

ゲルマニウム半導体検出器による ガンマ線スペクトロメトリー

平成4年改訂

文 部 科 学 省

科学技術・学術政策局

原子力安全課防災環境対策室

目 次

| | |
|-------------------------------------|----|
| 第1章 序 論 | 1 |
| 第2章 光子と検出器の相互作用および波高スペクトルとの関係 | 9 |
| 2.1 相互作用の種類および性質 | 9 |
| 2.2 光子の物質中での減衰および減衰係数 | 13 |
| 第3章 測定機器 | 17 |
| 3.1 Ge半導体検出器 | 18 |
| 3.2 高圧電源 | 22 |
| 3.3 線形増幅器（主増幅器） | 23 |
| 3.4 波高分析器（多重波高分析器） | 26 |
| 3.5 bin電源 | 28 |
| 3.6 ケーブルおよびコネクタ | 28 |
| 3.7 遮蔽体 | 29 |
| 3.8 測定室 | 33 |
| 第4章 データ解析用計算機 | 36 |
| 4.1 本 体 | 36 |
| 4.2 データの転送 | 38 |
| 4.3 周辺機器 | 39 |
| 第5章 機器の設置と点検・調整 | 41 |
| 5.1 必要な標準線源、器具、計測器 | 41 |
| 5.2 設置と信号の観察 | 42 |
| 検出器 | |
| 高圧電源 | |
| 線形増幅器（主増幅器） | |
| 波高分析器 | |
| 5.3 標準線源スペクトルの解析 | 56 |
| 標準線源の測定 | |
| 関数適合 | |
| 1333keVピークの中心 | |
| エネルギー分解能等 | |
| ピークの非対称 | |
| ピーク・コンプトン比 | |
| ピーク面積 | |
| 25cm相対効率の計算 | |

| | | |
|--------|------------------|-----|
| 5. 4 | 直線性 | 58 |
| | 積分直線性のチェック | |
| | 微分直線性のチェック方法 | |
| 5. 5 | 液体窒素補給に関する注意と消費率 | 60 |
| 第 6 章 | 標準線源とピーク効率 | 63 |
| 6. 1 | 標準線源 | 64 |
| 6. 2 | 測定 | 64 |
| 6. 3 | ピーク効率曲線の作成 | 65 |
| 6. 4 | 自己吸収の補正 | 72 |
| 6. 5 | サム効果の補正 | 77 |
| 6. 6 | その他のピーク効率を求める方法 | 88 |
| 6. 7 | マリネリ容器のピーク効率 | 97 |
| 第 7 章 | 測定試料調製法 | 102 |
| 7. 1 | 試料容器 | 102 |
| 7. 2 | 試料の充填 | 105 |
| 第 8 章 | 測定と記録 | 110 |
| 8. 1 | 試料ホルダ | 110 |
| 8. 2 | 測定開始手順 | 111 |
| 8. 3 | 測定中のチェック | 112 |
| 8. 4 | 測定終了手順 | 112 |
| 8. 5 | 測定ノート | 114 |
| 第 9 章 | スペクトル解析 | 117 |
| 9. 1 | ピーク探査と FWHM | 117 |
| 9. 2 | チャンネルとエネルギーの関係式 | 126 |
| 9. 3 | ピーク解析 | 127 |
| 9. 4 | 妨害ピークの処理 | 140 |
| 9. 5 | バックグラウンドとその差し引き方 | 149 |
| 9. 6 | 核種の同定 | 150 |
| 第 10 章 | 放射能濃度の計算 | 152 |
| 10. 1 | 減衰補正法 | 152 |
| 10. 2 | 放射能濃度の計算 | 155 |

| | | |
|-------|------------------------------------|-----|
| 10. 3 | 同一核種の複数ピークの取扱 | 155 |
| 10. 4 | 報告書の作成 | 157 |
| 第11章 | データ解析用プログラム | 163 |
| 11. 1 | スペクトル解析プログラムの概要 | 163 |
| 11. 2 | 一般に使用されている γ 線スペクトル解析プログラム | 164 |
| 11. 3 | スペクトル解析プログラムの作製（外注、自作）について | 173 |
| 解 説 | | 175 |
| I | : 計数値の統計性（ポアソン分布） | 177 |
| II | : 検出下限値について | 179 |
| III | : 最小2乗法について | 183 |
| 資 料 | | 187 |
| A | : 標準容積線源の作製方法 | 189 |
| B | : 核データ（環境試料中の放射性核種について） | 193 |
| C | : 環境放射能モニタリングと線量当量の推定・評価 | 276 |
| D | : 効率図例 | 278 |
| E | : 障害とその対応 | 280 |
| F | : 用語集 | 293 |
| 付 録 | | 301 |
| I. | 操作の簡易化を目指した γ 線スペクトル解析プログラム | 303 |
| 1. | まえがき | 303 |
| 2. | ファイル | 306 |
| 2. 1 | スペクトルデータファイル | 306 |
| 2. 2 | 試料及び測定条件ファイル | 306 |
| 2. 3 | ピーク効率曲線データファイル | 307 |
| 2. 4 | 核データファイル | 307 |
| 2. 5 | その他 | 309 |
| 3. | プログラム | 311 |
| 3. 1 | 測定プログラム | 313 |
| 3. 2 | 標準線源スペクトル解析プログラム | 315 |

| | | |
|-----------------------|--------------------------------|-----|
| 3.3 | 試料スペクトル解析プログラム | 319 |
| 1) | 試料スペクトル解析プログラムの操作 | 320 |
| 2) | プログラムの解析法の内容 | 322 |
| ① | 解析手法 | 322 |
| ② | モジュール機能 | 325 |
| 3.4 | ファイル訂正プログラム | 328 |
| 4. | その他 | 329 |
| 資 料 | | 331 |
| 1. | エネルギー校正に用いる核種 | 333 |
| 2. | 寒天標準試料で自己吸収補正をした定量結果と補正なしの定量結果 | 337 |
| 3. | チェック及び出力フォーマット例 | 341 |
| II. | 同定用ゲージ | 345 |
| III. | スペクトル図例 | 349 |
| 本書の作成経過、委員会名簿及び会議開催経過 | | 359 |

第1章 序論

Ge半導体検出器を用いる γ 線スペクトロメトリーは、その分解能が優れており、化学分離などを必要とせずに多核種の同時定量ができるため、環境試料中の γ 線放出核種を対象とした放射能分析の主要な手法として急速に発展普及してきた。

「放射能測定法シリーズ ゲルマニウム半導体検出器を用いた機器分析法」は最初、昭和51年に制定されたが、Ge半導体検出器や周辺機器の性能向上、電子計算機の普及に伴って、スペクトル解析法など測定技術が著しく進歩したため、昭和54年に第1回の改訂(文献1)が行われた。その後も測定技術の進歩は極めて著しいものがあり、高純度Ge半導体検出器の一般化による取扱方法の変更や、スペクトル解析プログラムの開発とパーソナルコンピュータの普及等に対応できるように、今回第2回の改訂を行った。

本マニュアルは環境放射能分析の実務担当者を対象とし、また理工系の大学卒業程度程度の知識を前提として記述されている。

Ge半導体検出器を用いた γ 線スペクトロメトリーは元来高度な分析技術であるので、単に機器等の操作手引書に従って操作するだけでなく、十分な理解と経験を基に正しく操作することによって、初めて正確な結果を得ることができる。従って本マニュアルの内容は、ある程度原理的な解説から測定現場における操作手順の記述まで、さらに解析プログラムを作成する人を対象にした記述など、広範囲にわたっている。

また失敗等も含め様々な経験を踏まえて、経験的な測定技術など文献等にあまり記載されていない内容は省かない様に心掛けたが、その他の詳細については成書(文献2,3,4)に譲っており、不足する所はそれらを参照して載きたい。

昭和54年改訂のマニュアルはデータ解析処理のいろいろな手法を紹介する形式をとったが、本マニュアルは今までの経験をもとに推奨する手法を記述した。例えば①ピーク効率を求めるために多核種混合容積線源を使用することとした；

―― 引用文献 ―――

文献1) 科学技術庁放射能測定法シリーズ“ゲルマニウム半導体検出器を用いた機器分析法”，科学技術庁，(1979年改訂)

文献2) 野口正安：“ γ 線スペクトロメトリー”，日刊工業新聞社(1980)

文献3) Nicholas Tsoulfanidis：“MEASUREMENT AND DETECTION OF RADIATION”，
阪井英次訳「放射線計測の理論と演習」上下巻，現代工学社(1986)

文献4) 岡村廸夫：“放射線測定回路とシステム”，日刊工業新聞社(1975)

②ピーク効率曲線の関数式を定めた；③自己吸収とサム効果の補正を行うこととした；④ピーク探査を行うこととした；⑤独立したピークはコベル法を用い、複合ピークは関数適合を使用してピーク面積を求めることとした；⑥データの解析処理には計算機を、また計算処理には最小2乗法を前提にした；などである。なお、理由が妥当であればここに述べた以外の方法も使用できるように、昭和54年改訂マニュアルで採用された手法、及びその他の重要と思われる手法も合わせて掲載した。

各章の概要は次の通りである。

- 2章 光子と検出器の相互作用およびスペクトルとの関係：光子（ γ 線）と検出器の相互作用について述べ、その作用が γ 線スペクトル上にどのように現われるか、例をあげて解説した。
- 3章 測定機器：使用する機器の構造、機能及び満たすべき性能などを説明した。
- 4章 データ解析用計算機：Ge半導体検出器によるスペクトル解析にはどのような計算機が使用されるかを記述した。また必要な周辺装置とその機能、性能を説明した。
- 5章 機器の設置と点検・調整：測定機器購入後、試料を実際に測定する前に実施する機器の設置、調整などの方法を述べた。
- 6章 標準線源とピーク効率：効率決定の方法を記述した。またピーク効率を求めるプログラムを作成する人のために、ピーク効率曲線、自己吸収とサム効果補正について説明した。
- 7、8章 測定試料調製法、測定と記録：細かく操作手順まで記述した。多くの経験に基づいて記述してあるので、他の方法を用いる場合はここに記述された操作の趣旨を十分に検討してから実施するのが望ましい。
- 9章 スペクトル解析：ピーク探査を行い、ピーク面積を求めるまでを記述した。ピークが重なっていないときはコベル法を、複数のピークが重なっている場合は最小2乗法を用いる。スペクトル解析プログラムを作成する人のための記述であるが、測定担当者も内容を知っておくのが望ましい。
- 10章 放射能濃度の計算：親娘関係を含む減衰補正法、放射能濃度の計算、同一核種の複数ピークの取扱などについて記述した。減衰補正に関しては一部前マニュアルの記述内容を補足した。解析プログラムを作成する人のための記述であるが、測定担当者も内容を理解しておくことが必要である。

1 1 章 データ解析用プログラム：プログラムについて注意事項などを中心に記述した。現状の市販プログラムの紹介、プログラムの作成方法、自作または外注するときの注意を記述した。

解説（計数値の統計性、検出下限値について、最小2乗法について）：データの解析に関する計算について記述した。解析プログラムを作成する場合に必要なある。

検出下限値に関しては、昭和54年改訂のマニュアルは難解であったので、より簡明な方法を記載した。

資料

A)標準容積線源の作製方法：通常標準容積線源は購入するが、自作する場合の注意と添加核種のおおよその濃度について記述した。

B)核データ：Table of Isotopes(7th Edition)から必要と思われるものを抜粋した。

C)環境放射能モニタリングと線量当量の推定・評価：環境放射能分析における代表的な核種の検出可能レベルおよびそのレベルの食品の一年間摂取による預託線量当量の計算例を示した。

D)効率図例：1 Bq(γ)の放射能を70000秒(約1昼夜)測定して得られるカウント数等について掲載した。

E)障害とその対応：障害が見つかったときに迅速に修復できるように、異常のある部分やその原因を突き止める手助けとなることを、経験をもとに記載した。通常、修理はメーカー業者に依頼するが、簡単な障害は本章を参考にすれば自分で対応することもできる。

F)用語集：本マニュアルで使用されている用語をまとめた。

引用文献：本文中で引用したものは“(文献番号)”をつけ、脚注に掲載した。

参考文献：重要と思われるものを、各章末に掲載した。

付録

同定用ゲージ：ゲージと同じ大きさのスペクトル図を上に乗せ透かしてみれば、ピークの同定が容易にできる。

スペクトル図例：チェルノブイル事故関係試料の測定データなど、多くの核種が検出されたものについて掲載した。環境試料の測定で、通常検出されない核種が見つかったときなど参考にすることができる。

本マニュアルは現時点における最新の技術内容に対応して記述したものであるが、初めに述べた通り、Ge半導体検出器や周辺機器類の進歩は目ざましいものがあり、本マニュアルが現状に沿わなくなる恐れもあるので、常にできる限り最新の情報を調査することが望まれる。特に測定器、電子計算機、解析プログラム等の購入に当たっては、いずれも高価であるので、環境試料測定の目的、内容に応じて適切なものを選択することが必要である。

以下に測定システムの購入から測定結果を得るまでの一般的な手順を示す。

- | | |
|---|-----------|
| (1) 購入 | 11章、4章、3章 |
| 目的などをよく考えて全体のシステムを選択する。 | |
| スペクトル解析プログラム、計算機、波高分析器、電子回路、検出器、遮蔽体の仕様を決める。解析プログラムと機器類の仕様は互いに関係があるので注意する。 | |
| (2) 搬入から作動まで | 5章1、2 |
| ① 機器を設置、接続、調整する。 | |
| ② 測定器の動作を確認する。 | |
| ③ データ解析に専用の計算機を使用する場合はデータ解析用計算機を設置し、接続する。 | |
| (3) 測定と解析 | |
| 結果を出すまでには | |
| ① 核データファイルの作成 | 資料B |
| ② 標準線源の測定とデータの解析 | 5章3、6章 |
| ③ ピーク効率の測定 | 6章 |
| ④ ピークトータル比の測定 | 6章 |
| ⑤ バックグラウンドスペクトルの解析 | 9章 |
| の準備を経て | |
| ⑥ 試料の測定・スペクトルの解析 | 7、8、9、 |
| が行われる。 | 10、11章 |

このマニュアル中に記載された項目の内、担当者が手作業で行う項目と計算機プログラムで処理される項目を分類し、上記の順に整理すると以下のようになる。

~~~~~の項目は計算機プログラムで処理され、そうでない項目は担当者の手作業による。

① 核データファイルの作成

核種の検討、拾い出し、準位構造の調査 資料 B

核データファイル作成プログラムの起動

核データのインプット

核データファイル作成

② 標準線源の測定とデータの解析

標準線源をセットする。 5章3

測定プログラムの起動。 8章、11章

測定開始、終了、スペクトルファイル作成

標準線源データ解析プログラムの起動

パラメータのインプット（核種、値付日、放射能）

ピーク探査（平滑化2次微分、探査、3点計数值法） 9章

関数適合 9章

F W H M、F W T M、非対称、ピークコンプトン比、  
ピーク面積、25cm相対効率の計算 5章、9章

履歴ファイルへの登録

結果のチェック（手計算）

比例配分によるF W H M計算。 9章

比例配分によるF W T M計算。 9章

比例配分による非対称計算。 9章

ピークコンプトン比の計算。 9章

ピーク面積計算（コベル法）。 9章

結果の比較。

計算機による結果と手計算による結果が一致しているか

|   |                                 |       |
|---|---------------------------------|-------|
| ③ | ピーク効率の測定                        | 6 章   |
|   | 効率測定用標準容積線源をセットする。              |       |
|   | 測定プログラムの起動                      |       |
|   | <u>測定開始、終了、スペクトルファイル作成</u>      |       |
|   | ピーク効率計算プログラムの起動                 |       |
|   | パラメータのインプット（核種、値付日、放射能）         |       |
|   | <u>ピーク探査（平滑化2次微分、探査、3点計数值法）</u> | 9 章   |
|   | <u>関数適合</u>                     | 9 章   |
|   | <u>ピーク面積計算</u>                  | 9 章   |
|   | <u>パラメータを使用してピーク効率を計算</u>       | 6 章   |
|   | <u>関数適合によるピーク効率の関数化</u>         | 6 章   |
|   | <u>効率関数のファイルへの登録</u>            |       |
|   | 結果のチェック（手計算）                    |       |
|   | ピーク探査（グラフを目視して）                 |       |
|   | ピーク面積計算（コベル法）                   |       |
|   | パラメータを利用してピーク効率の計算              |       |
|   | 結果の比較                           |       |
|   | 計算機による効率関数と手計算によるピーク効率が一致しているか  |       |
| ④ | ピークトータル比の測定                     | 6 章   |
|   | ピークトータル比測定用標準線源をセットする。          |       |
|   | 測定プログラムの起動                      |       |
|   | <u>測定開始、終了、スペクトルファイル作成</u>      |       |
|   | 結果の計算                           |       |
|   | ピーク探査（グラフを目視して）                 | 9 章   |
|   | ピーク面積計算（コベル法）                   | 9 章   |
|   | トータル面積の計算                       | 6 章 5 |
|   | <u>関数適合によるピークトータル比の関数化</u>      | 6 章   |
|   | <u>ピークトータル比関数のファイルへの登録</u>      |       |
|   | 結果の比較                           |       |
|   | 計算機による関数と手計算による値が一致しているか        |       |

⑤ バックグラウンドスペクトルの解析

検出器から試料などを取り除いてバックグラウンド測定状態にする 9章5

測定プログラムの起動

測定開始、終了、スペクトルファイル作成

スペクトル解析プログラムの起動

パラメータのインプット（測定日）

ピーク探査（平滑化2次微分、探査、3点計数值法） 9章

関数適合 9章

核種の同定およびピーク面積計算 10章

解析結果のファイルへの登録

結果のチェック（手計算：プログラム使用開始時、疑義発生時のみ）

ピーク探査（グラフを目視して）

ピーク面積計算（コベル法）

結果の比較

計算機による解析結果と手計算が一致しているか

⑥ 試料の測定・スペクトルの解析

ここまでにピーク効率の測定（標準線源の測定）、効率ファイル、核データファイルの作成、バックグラウンドの測定が完了していなければならない。

試料の測定

7章、8章を参考にして、測定試料を調製する。解析プログラムを初めて使用する場合は、放射能濃度既知の試料を測定し、よい結果が得られるかどうか確認するべきである。

測定試料調製 7章

測定と記録 8章

測定プログラムの起動

測定開始、終了、スペクトルファイル作成

スペクトル解析プログラムの起動

パラメータのインプット

（採取年月日、測定年月日、供試量、規格化定数、  
スペクトルファイル名、効率ファイル名、  
使用する核データファイル名）

ピーク探査（平滑化2次微分、探査、3点計数值法） 9章

関数適合 9章

|                                                       |      |
|-------------------------------------------------------|------|
| <u>ピーク面積計算</u>                                        | 9 章  |
| <u>ピーク効率を計算（高さ、エネルギー、自己吸収・サム効果補正）</u>                 | 6 章  |
| <u>核種の同定と放射能の計算</u>                                   | 10 章 |
| <u>（<math>\gamma</math>線放出比、減衰補正、濃度計算、バックグラウンド引算）</u> |      |
| <u>解析結果のファイルへの登録</u>                                  |      |
| <u>報告書の印刷</u>                                         |      |

結果のチェック（手計算：プログラム使用開始時、疑義発生時のみ）

ピーク探査（グラフを目視して）

ピーク面積計算（コベル法）

結果の比較

計算機による解析結果と手計算が一致しているか

なお、測定の原理、スペクトル解析や放射能濃度を求めるプログラムの内容を理解するために 2 章、9 章、10 章を読む必要がある。

過去の例によれば試料の取り違い、計算機への入力ミスなどを除くと、誤った解析結果を出してしまう原因としては、次の 3 つの場合が多いので十分に留意されたい。

ピーク効率に問題がある。

核データを取り違えている。（核種同定の誤りと核データの誤り）

ピーク領域を正しく取っていない。

なお測定業務を開始した後、核データファイル等を修正したり複製を作成する必要が生じる。またピーク効率は定期的に測定し直す必要があり、これらの際にファイル保守（修正）プログラムが使用される。

以上の様な観点でシステム全体を把握し、Ge 半導体検出器を用いる  $\gamma$  線スペクトロメトリーを十分理解することによって環境放射能分析結果の正確さを確保することが出来る。

## 第2章 光子と検出器の相互作用および波高スペクトルとの関係

光子（ $\gamma$ 線）は、検出器に入射して相互作用をした結果生ずる高速電子を検出することによって、間接的に測定される。そのため、光子と物質（検出器およびその周辺物質）との相互作用は $\gamma$ 線スペクトロメトリーの基礎であり、とくに後に述べる3種類の相互作用が重要である。実際に観測される $\gamma$ 線波高スペクトル（以下、単にスペクトルと言う）は、主として検出器の有感部内における単一あるいは多重の相互作用によってつくられるが、その他に遮蔽体などの周辺物質における相互作用によって生ずる他の放射線（散乱線やX線）によるものが含まれる。

$\gamma$ 線スペクトルのうち、光電ピーク（全エネルギーピークともいわれる）は $\gamma$ 線の正確なエネルギー情報と線源の放射能に関する情報をもっているので、スペクトル解析は主として光電ピークを用いて行われる。

### 2. 1 相互作用の種類および性質

#### 2. 1. 1 光電効果

$\gamma$ 線はGe検出器の有感部内に入射して全エネルギー（ $E_\gamma$ ）をGe原子の軌道電子（KまたはL軌道電子、結合エネルギー  $I$ ）に与えて、 $E_\gamma - I$ なる運動エネルギーをもつ高速電子（光電子ともいう）を生成する。この現象は光電効果といわれる。 $E_\gamma$ がK軌道電子の結合エネルギー（ $I_K$ ）より大きいときは、約80%がK軌道電子との相互作用で、20%が他の軌道電子との相互作用である。

光電効果の確率（全ての軌道電子を含む）は $\gamma$ 線エネルギーのほぼ $-3.2$ 乗に比例するので、比較的低エネルギーの $\gamma$ 線において顕著な相互作用である。

#### — スペクトルとの関係 —

- (1) 光電効果に続いて発生する全てのGe特性X線または競合的に発生するオージェ電子のエネルギーの合計は $I$ に等しく、それらが全て検出器有感部内に吸収されるなら、その合計のエネルギーと光電子のエネルギーとの和は入射 $\gamma$ 線のエネルギー（ $E_\gamma$ ）に等しい。ほとんどの場合、光電効果では $\gamma$ 線の全エネルギーが検出器に吸収されるので、発生する出力信号は $\gamma$ 線の正確なエネルギー情報をもつ。これは単一エネルギー分布を作り、スペクトル中の光電ピーク（図2-1のピークPP）として観測される。
- (2)  $\gamma$ 線エネルギーが低い（およそ100 keV以下）場合は、検出器有感部の入射面近傍での光電効果の確率が高いため、発生したX線が検出器に吸収されずに外に出る確率が高まる。その場合には、 $\gamma$ 線のエネルギーからGe-X線（主として、KX線；9.9 keV）のエネルギー（ $E_x$ ）を差し引いた値（ $E_\gamma - E_x$ ）に相当する出力信号が発生する。この現象はスペクトル中にX線エスケープ・ピークとして観測される。

(3) 鉛遮蔽体など原子番号の高い周辺物質において $\gamma$ 線による光電効果が生ずると、その物質表面近傍で発生した特性X線(鉛の場合、KX:72,85keV,LX:約10keV)が検出器に入射して検出される(図2-1のピークKX)。それを除くには鉛遮蔽体の内側表面を厚さ1mm程度のカドミウム板で覆い、さらに厚さ数mmの銅板で覆う。

## 2. 1. 2 コンプトン散乱

$\gamma$ 線はエネルギーの一部を検出器有感部内の電子に与えて高速電子(コンプトン電子ともいう)を生成し、より低いエネルギーの散乱 $\gamma$ 線( $E_{\gamma'}$ )となる。生成する高速電子のエネルギー( $E_e = E_{\gamma} - E_{\gamma'}$ )は散乱 $\gamma$ 線の散乱角に依存して相互作用のたびごとに異なるので、結果としてエネルギー分布は連続分布となる。散乱角が180度の場合、コンプトン電子は最大のエネルギーをもち、連続分布の端(コンプトン・エッジという)に相当する。

Geにおけるコンプトン散乱の確率は $\gamma$ 線エネルギーが数10keVから100keVぐらいいまではほぼ一定であり、それ以上ではエネルギーに対して緩やかな減少関数となる。150keVより低いエネルギーでは光電効果の確率が高いが、それ以上ではコンプトン散乱の確率が高くなるので、数100keV以上のエネルギーの $\gamma$ 線において顕著な相互作用である。

なお、エネルギーが変わらない散乱であるコヒレント散乱は検出器内で信号をつくらないので、ここでは取り上げないこととする。

### - スペクトルとの関係 -

連続スペクトル(図2-1の連続部分)は $\gamma$ 線エネルギーの情報をほとんどもたないので、スペクトル解析には使われない。

(1) しかし、散乱 $\gamma$ 線が続いて検出器有感部内で光電効果を起こした場合、はじめに生じたコンプトン電子のエネルギーと次に生じた光電子のエネルギーの和は入射 $\gamma$ 線のエネルギーに等しく、結果として入射 $\gamma$ 線エネルギーに相当する出力信号を生ずる。実際のGe検出器では、数100keV以上の $\gamma$ 線に対しては、この多重の相互作用が光電ピーク(図2-1のピークPP)をつくる主たる過程である。検出器の有感部容積が大きいほど上記の多重相互作用の確率が高くなるため、スペクトル中の光電ピークはコンプトン連続部に比べて相対的に増大する結果となる。

(2) 鉛遮蔽体など周辺物質において $\gamma$ 線によるコンプトン散乱が生ずると、発生した散乱 $\gamma$ 線が検出器に入射して検出される。散乱 $\gamma$ 線の最小エネルギーは散乱角180度の場合に相当し(図2-1のピークBS)、入射 $\gamma$ 線のエネルギーまで続く連続分布となる。その形状は $\gamma$ 線源・検出器・遮蔽体間の幾何学的条件に依存するが、散乱角が90度以上の後方散乱が多い。検出器遮蔽体の内容積を大きくするほど、多重散乱(2回以上の散乱)も含めて後方散乱による連続スペクトル部分を減少させることができる。

## 2. 1. 3 電子対生成

$\gamma$ 線エネルギーが  $2m_0c^2$  (2個の電子の静止質量エネルギー = 1.022MeV) 以上の場合には次のような相互作用が生ずる確率がある。主として原子核の近傍のクーロン場において、 $\gamma$ 線は1対の陰陽電子を生成して全エネルギーを失う。発生した両方の電子の運動エネルギーの和は、 $\gamma$ 線のエネルギーから2個の電子の静止質量エネルギーを差し引いた値 ( $E_\gamma - 2m_0c^2$ ) となる。

電子対生成は $\gamma$ 線エネルギーが $2m_0c^2$ 以上の場合に起こる相互作用であり、その確率は $\gamma$ 線エネルギーが高いほど大きくなる。しかし、1.5MeVにおける確率は全相互作用の確率の100分の1程度であり、さらに高いエネルギーにおいて顕著な相互作用である。

発生した高速陽電子は検出器内で運動エネルギーを失うと近傍の電子と結合して消滅し(陽電子消滅)、2個の陽電子消滅光子 ( $E = m_0c^2$ ) に変換される。

### — スペクトルとの関係 —

陽電子消滅光子が続いて光電効果やコンプトン散乱を起こすか否かによって、次のようなエネルギーに相当する出力信号を生ずる。

- (1) 2個の消滅光子が相互作用をせずに検出器外にでる。この現象はダブルエスケープといわれ、出力信号は次の値に相当する。

$$E = E_\gamma - 2m_0c^2 \quad (\text{図2-1のピークDE})$$

- (2) 1個の消滅光子が光電効果を起こし、他の1個は検出器外にでる。この現象はシングルエスケープといわれ、出力信号は次の値に相当する。

$$E = E_\gamma - m_0c^2 \quad (\text{図2-1のピークSE})$$

- (3) 2個の消滅光子が両方とも検出器内で光電効果を起こす。この現象は全エネルギー吸収に等しく、出力信号は次の値に相当する。

$$E = E_\gamma \quad (\text{図2-1のピークPP})$$

- (4) 1個または2個の消滅光子が検出器内でコンプトン散乱を起こす。出力信号は連続分布となる。(図2-1の連続スペクトル部分)

検出器の有感部容積が大きいほど上記(3)の確率は高くなるため、スペクトル中のピークPPは大きくなり、ピークDEとSEおよび連続部分は相対的に減少する結果となる。

鉛遮蔽体など周辺物質において $\gamma$ 線による電子対生成が生ずると、そこで発生した消滅光子が検出器に入射して511keVのピークになる(図2-1のピーク511)。陰陽電子対が検出器内で消滅する時の運動量は0ではないので、生成する陽電子消滅放射線はドップラー効果をうけてエネルギーは $511 \pm 1\text{keV}$ 程度以下の範囲で増減する。したがって、消滅光子の光電ピークあるいはシングルエスケープピークは、同じエネルギーの $\gamma$ 線の作るピークにくらべて多少広い半値幅をもつので、スペクトル解析の際に注意する必要がある。

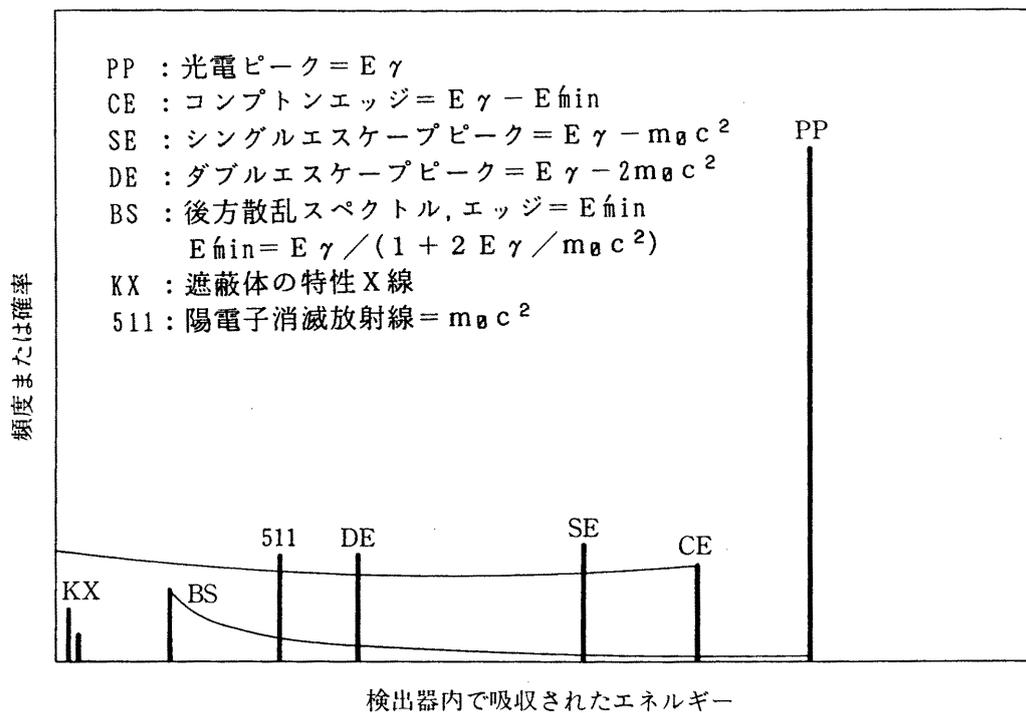


図 2 - 1  $\gamma$  線の相互作用によってつくられるエネルギー分布

#### 2. 1. 4 サム・コインシデンス効果

もし、線源から複数個の光子が同時に放出されるならば、それらの光子が同時に検出されてそれらの和の出力信号を生ずる確率がある。これはサム・コインシデンス効果あるいはサム効果と呼ばれる。2 個の光子が同時に放出される場合を仮定すると、

- (1) 両方の光子が全エネルギーを検出器有感部内で失うと、両方の光子のエネルギーの和に相当する出力信号（サム・ピークと呼ばれる）を生ずる。
- (2) 一方あるいは両方の光子がコンプトン散乱をするとスペクトルの連続部分に相当する出力信号を生ずる。
- (3) 検出器の入射窓が薄いときには、高エネルギーの  $\beta$  線あるいは EC 壊変や内部転換に伴う特性 X 線とのサム効果が生じることがある。

このようなサム効果の現象が生じると、測定対象とするエネルギーのピークの計数率は減少するので、スペクトルの定量解析においてはその補正が必要となる。サム・コインシデンスの確率は両方の放射線の効率の積に比例するから、効率の高い測定ほどサム効果は顕著に現れる。また、 $\gamma$ - $\gamma$  サム効果の場合、測定対象のピーク計数率は他方の  $\gamma$  線の全効率（ピークと連続部を含む全計数効率）に比例して減少する。

サム効果に関する補正法の詳細は 6. 5 を参照されたい。

## 2. 2 光子の物質中での減衰および減衰係数

$\gamma$ 線が検出器の有感部に入射する前に生ずる減衰は、放射能定量において欠くことの出来ない補正項の1つである。試料容器などの線源支持体による吸収や試料自体による吸収（自己吸収という）がその例であり、とくに環境試料測定の場合のように容積試料を用いる場合は後者の補正が不可欠である（詳細は 6. 4 参照）。

コンプトン散乱における極めて微小な角度の前方散乱の場合を除いて、 $\gamma$ 線が物質中で前記3種類の相互作用のどれかを行うと1度に大きくエネルギーを失う。

Ge半導体検出器を用いて光電ピークを定量する限りにおいて、 $\gamma$ 線の減衰は上記3種類の相互作用の断面積（あるいは減衰係数）の合計を用いて計算することが出来る。なお、減衰係数の一要素であるコヒレント散乱は数100keV以下の低エネルギーにおいて自己吸収の補正に関係するが、この場合試料媒体中のコヒレント散乱による影響はかなり小さいので考慮しない。

$I_0$ なる強度の平行線束の $\gamma$ 線が厚さ $x$ の物質に垂直に入射すると、透過する $\gamma$ 線の割合は次のように表される。

$$I / I_0 = \exp(-\mu x)$$

上式において、変数 $x$ の単位がcmの場合には、 $\mu$ は $\text{cm}^{-1}$ の次元をもち線減衰係数といわれる。

厚さとして $x$ の代わりにその物質の密度を乗じた $\rho x$ を用いることがあるが、この場合には $\mu$ の代わりに質量減衰係数 $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )を使う。

相互作用の原子断面積を $\sigma$  ( $\text{cm}^2$ )、物質1gに含まれる原子の数を $N$  ( $\text{g}^{-1}$ )とすると、

$$\mu/\rho = \sigma \cdot N$$

となる。

$\mu/\rho$ は物質の種類（元素組成）と $\gamma$ 線エネルギーによって決まる値であり、数表として与えられている相互作用の原子断面積（文献1）を用いて補間法で計算するか、あるいは、物質の原子番号とエネルギーを変数とする近似関数（文献2, 3）から求

### --- 引用文献 ---

(文献1) E. Storm and H. I. Israel: "Photon Cross Section from 1keV to 100MeV for Elements Z=1 to 100", Nuclear Data Tables, 7(6), 1970

(文献2) K. Sato, et al., : "Determination of Attenuation Coefficient for Self-absorption Correction in Routine Gamma Ray Spectrometry of Environmental Bulk Sample", J. Radioanalytical and Nucl. Chemistry, 84, 431(1984)

(文献3) 野口正安: "光子相互作用断面積の近似式と質量減衰係数", RADIOISOTOPES, 36, 49(1987)

める方法がある。前者の方法は膨大な数値ファイルを必要とし、当マニュアルの目的には必ずしも適しているとはいえない。後者の例として、 $\gamma$ 線エネルギー  $E$  が 80keV から 2MeV 程度まで、原子番号  $Z$  が 30 程度以下の環境試料に適用できる相互作用断面積の近似式(文献2)を使って求める方法を次に示す。この近似式は数%程度の誤差を生じることがあるが、環境試料における自己吸収の補正という目的に対しては十分に適用できる。その具体的な手順を次に示す。

- ① 物質を構成する元素について、 $E_1$ なるエネルギーの光子に対する断面積をバーン(barn:  $10^{-24}\text{cm}^2$ )単位で数表などから求め、 $\sigma(E_1)$ とする。

なお、質量減衰係数  $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) を用いるときは、 $\sigma(E_1)$ を  $\mu/\rho(E_1)$  と置き換えてもよい(以下、同様)。

- ② 同様に、 $E_2$ なるエネルギーの断面積  $\sigma(E_2)$ を数表から求める。なお、 $E_1$ と  $E_2$ は適用エネルギー範囲内で誤差が最小になるように決める。

(例)  $E_1 = 100 \text{ keV}$        $E_2 = 500 \text{ keV}$

- ③ 次式の左辺に  $\sigma(E_1)$ または  $\sigma(E_2)$ を、右辺の  $E$ に  $E_1$ または  $E_2$ を代入し、連立方程式を解いて  $A(Z)$ と  $B(Z)$ を求める。

$$\sigma(Z, E) = A(Z) \cdot E^{-3.15} + B(Z) \cdot \exp[0.408(\log E) - 0.066(\log E)^2]$$

$\log$  は自然対数

- ④ このようにしてその元素について、エネルギー  $E$ を変数とする断面積の近似式が得られる。さらに他の元素についても ① から ③ を行う。

- ⑤ 原子量が  $M$ 、元素組成(単一元素でもよい)が  $A_a B_b C_c \dots$ なる化合物の質量減衰係数  $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) は次式により計算される。

$$\mu/\rho = 0.6023(a \cdot \sigma_A + b \cdot \sigma_B + c \cdot \sigma_C + \dots) / M$$

なお、断面積  $\sigma$ の代わりに質量減衰係数  $\mu$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) を用いたときは、物質の重量組成比を  $a, b, c, \dots$  として次式で計算される。

$$\mu/\rho = a \cdot \mu_A + b \cdot \mu_B + c \cdot \mu_C + \dots$$

質量減衰係数の計算例

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (アルミナ) の 134keV (<sup>144</sup>Ce 11.1%) における質量減衰係数を求める。

- ① 物質を構成する元素について、100keVの光子に対する断面積 (σ (Al<sub>100</sub>)) をバールン (barn: 10<sup>-24</sup>cm<sup>2</sup>) 単位で 13頁 の引用文献 1 の数表から、または引用文献 3 から計算で求める。

| アルミニウム      |        | Z=13    |       |       |
|-------------|--------|---------|-------|-------|
| エネルギー (keV) | 光電効果   | コンプトン散乱 | 電子対生成 | 合計    |
| 100         | 0.827  | 6.22    | 0     | 7.047 |
| 500         | 0.0061 | 3.75    | 0     | 3.756 |

σ (Al<sub>100</sub>) = 7.047 である。

- ② 同様に、500keV のアルミニウムの断面積 (σ (Al<sub>500</sub>)) 求める。  
σ (Al<sub>500</sub>) = 3.756

- ③ 次式の左辺 σ (Z, E) に σ (Al<sub>100</sub>)、σ (Al<sub>500</sub>)、右辺の E に 100 または 500 を代入し、連立方程式を解いて A (Z) と B (Z) を求める。

$$\sigma (Z, E) = A(Z) \cdot E^{-3.15} + B(Z) \cdot \exp[0.408(\log E) - 0.066(\log E)^2]$$

アルミニウム log は自然対数

$$7.047 = A(Z) \cdot (100)^{-3.15} + B(Z) \cdot \exp[0.408 \{ \log(100) \} - 0.066 \{ \log(100) \}^2]$$

$$3.756 = A(Z) \cdot (500)^{-3.15} + B(Z) \cdot \exp[0.408 \{ \log(500) \} - 0.066 \{ \log(500) \}^2]$$

連立方程式を解く。

$$A(Z) = 1.814 \cdot 10^6$$

$$B(Z) = 3.801$$

下記の近似式となる。

$$\sigma (Z, E) = 1.814 \cdot 10^6 \cdot E^{-3.15} + 3.801 \cdot \exp[0.408(\log E) - 0.066(\log E)^2]$$

- ④ 酸素についても ①、②、③、を行い近似式を求める。

| 酸素          |        | Z=8     |       |       |
|-------------|--------|---------|-------|-------|
| エネルギー (keV) | 光電効果   | コンプトン散乱 | 電子対生成 | 合計    |
| 100         | 0.0804 | 3.88    | 0     | 3.960 |
| 500         | 0      | 2.31    | 0     | 2.31  |

$$\sigma (O_{100}) = 3.960$$

$$\sigma (O_{500}) = 2.31$$

$$3.960 = A(Z) \cdot (100)^{-3.15} + B(Z) \cdot \exp[0.408 \{ \log(100) \} - 0.066 \{ \log(100) \}^2]$$

$$2.31 = A(Z) \cdot (500)^{-3.15} + B(Z) \cdot \exp[0.408 \{ \log(500) \} - 0.066 \{ \log(500) \}^2]$$

連立方程式を解きA(Z)とB(Z)を求める。

$$A(Z) = 3.615 \cdot 10^5$$

$$B(Z) = 2.340$$

$$\sigma(Z, E) = 3.615 \cdot 10^5 \cdot E^{-3.15} + 2.340 \cdot \exp[0.408(\log E) - 0.066(\log E)^2]$$

- ⑤ 原子量(M)が 102 のアルミナ ( $Al_2O_3$ ) の 134keV ( $^{144}Ce$  11.1%) での質量減衰係数  $\mu/\rho$  ( $cm^2/g$ ) は次のように計算される。

134keV のアルミニウムの断面積

$$\begin{aligned} \sigma(13, 134) &= 1.814 \cdot 10^6 \cdot (134)^{-3.15} \\ &\quad + 3.801 \cdot \exp[0.408 \{\log(134)\} - 0.066 \{\log(134)\}^2] \\ &= 6.118 \end{aligned}$$

134keV の酸素の断面積

$$\begin{aligned} \sigma(8, 134) &= 3.615 \cdot 10^5 \cdot (134)^{-3.15} \\ &\quad + 2.340 \cdot \exp[0.408 \{\log(134)\} - 0.066 \{\log(134)\}^2] \\ &= 3.616 \end{aligned}$$

質量減衰係数を求める。

$$\begin{aligned} \mu/\rho &= 0.6023(a \cdot \sigma_A + b \cdot \sigma_B) / M \\ &= 0.6023(2 \cdot 6.118 + 3 \cdot 3.616) / 102 \\ &= 0.136 \quad (cm^2/g) \end{aligned}$$

### 第3章 測定機器

Ge 半導体検出器を用いたγ線スペクトロメータは一般的に、検出器、電子回路、波高分析器、データ解析用計算機、遮蔽体から構成される。この章では使用する機器とその機能及び充たすべき性能を述べる。

機器の説明の後に、現在環境試料測定に用いられている機器の性能の一例を掲載した。<sup>1)</sup>

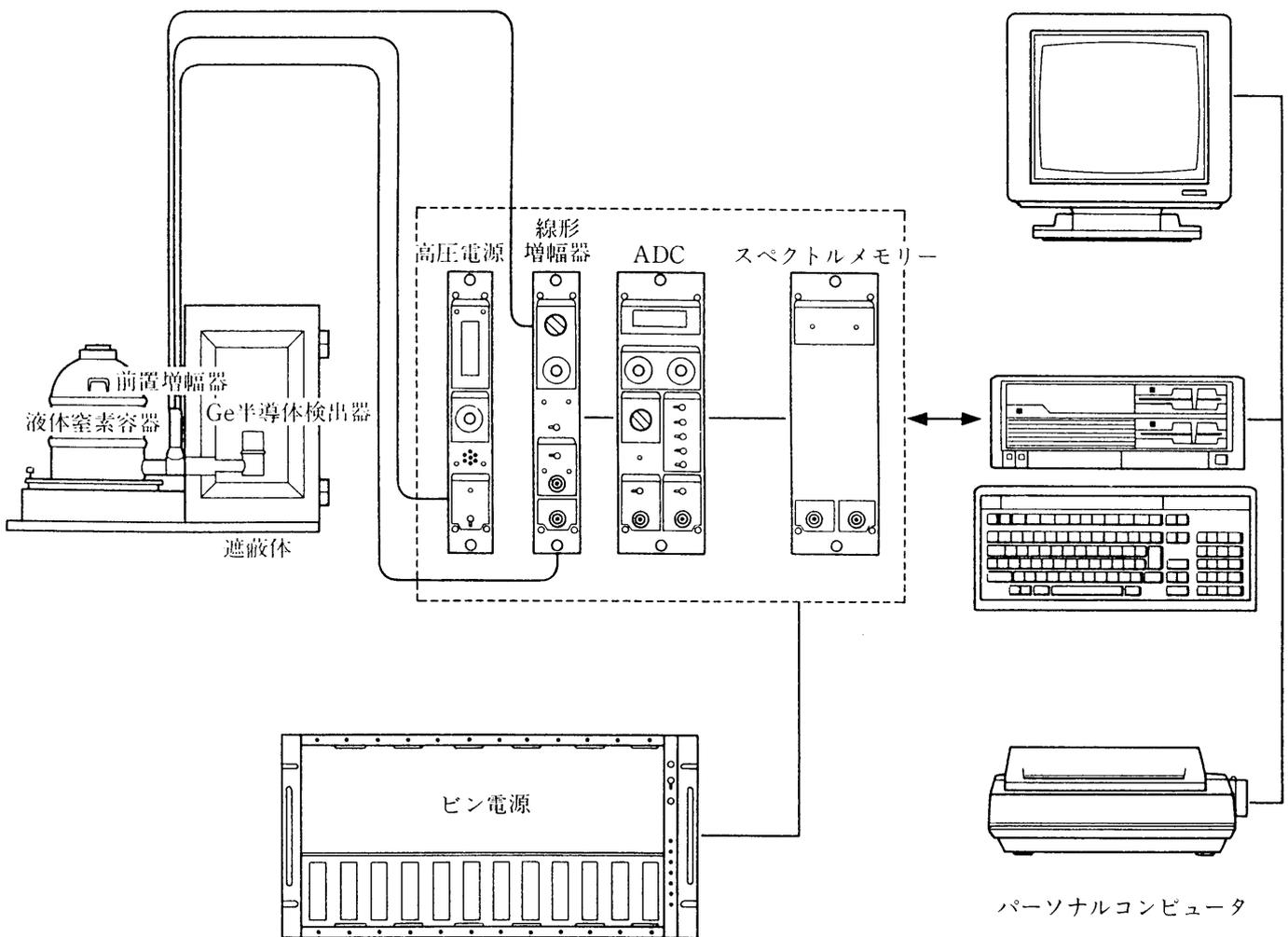


図3-1 Ge半導体スペクトロメータの構成の一例

1) 環境放射能測定には、目的や考え方により、様々の性能の測定装置が用いられているが、ここに掲載した性能であれば、大部分の目的に対応できると考えられる。

### 3. 1 Ge 半導体検出器

Ge 半導体検出器は Ge 半導体結晶、前置増幅器、クライオスタット<sup>1)</sup>、及び液体窒素容器より構成されている。

#### 3. 1. 1 機能

##### (1) Ge半導体結晶<sup>2)</sup>

入射した $\gamma$ 線と検出器との相互作用の結果生じた高速電子によって、そのエネルギーに比例した電荷が発生する。

- ① エンドキャップ
- ② カップ
- ③ Ge 半導体結晶
- ④ 固定ナット
- ⑤ 固定部
- ⑥ クーリングロッド留金
- ⑦ 熱絶縁体 (プラスチック F E T)
- ⑧ シールド
- ⑨ クライオスタットフランジ
- ⑩ 前置増幅器
- ⑪ 高圧フィルター
- ⑫ 樹脂リング
- ⑬ デュワーフランジ
- ⑭ デュワーびん
- ⑮ コールドフィンガー
- ⑯ モレキュラーシープ

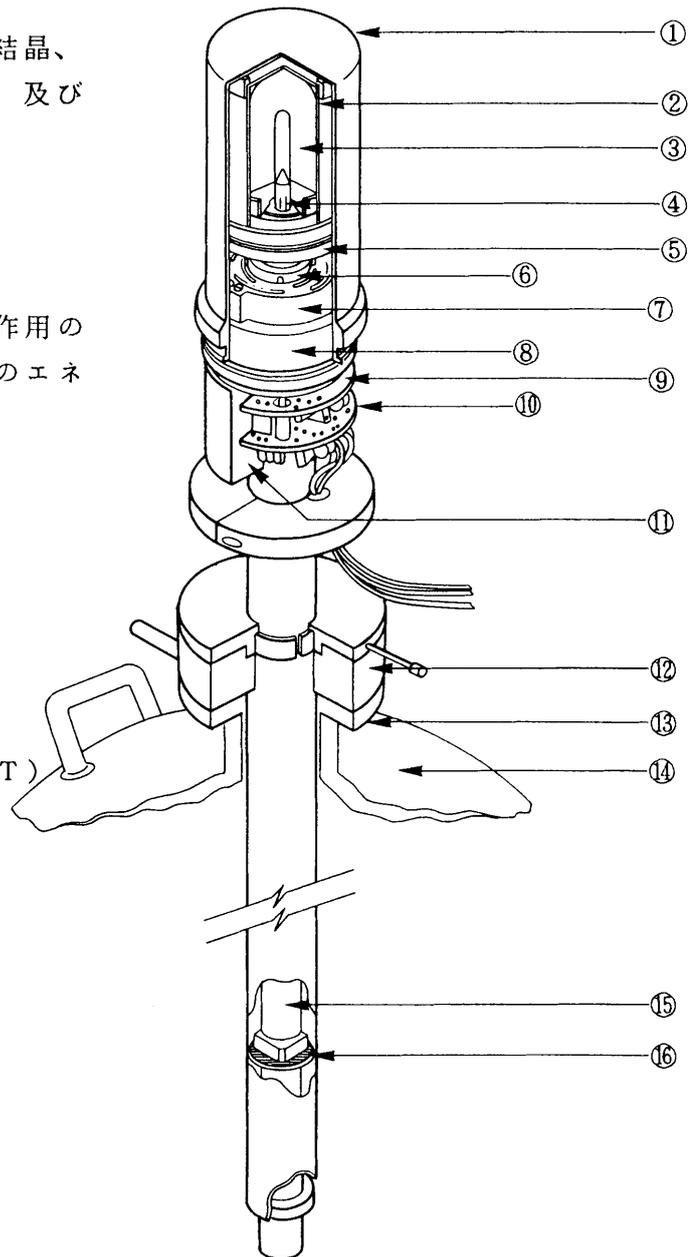


図3-2 Ge 半導体検出器構造図

1) 資料 F：用語集 2 測定器 参照のこと。

2) 高純度の Ge 半導体には、含まれる不純物によって n 型 (As、P 等の第 5 族元素の不純物) と p 型 (Ga、In 等の第 3 族元素の不純物) があり、ともに半導体検出器として利用される。p 型は結晶に Li を熱拡散して n 電極を作る。p 型では入射窓が厚くなるので、50keV 以上の光子が測定の対象と考えられる。

n 型は結晶に硼素イオンを注入 ( $\sim 0.3\mu\text{m}$  厚) して p 電極を作るので、入射窓を薄くすることが出来、低エネルギー ( $\approx 10\text{keV}$ ) 領域から MeV 領域まで測定出来る。対象となる低エネルギー $\gamma$ 線や X 線を放出する核種には  $^{125}\text{I}$ 、 $^{234}\text{Th}$  等がある。低エネルギー $\gamma$ 線と X 線とがサムコインシデンスを起こすので、検出器から離して測定しサム効果の程度を確認するなど、測定には注意を要する。

## (2) 前置増幅器<sup>1)</sup>

検出器結晶中で発生した電荷量に比例した高さの信号を出力する、電荷有感型増幅器である。

線形増幅器へ損失なく信号を伝達するため、また接続する信号ケーブルが雑音を拾わないように、出力インピーダンスを下げてある。

高電圧は、高抵抗とコンデンサーを用いた時定数が数～数十秒のフィルタ回路を通して検出器に印加し、変動が起こりにくくしてある。

取り付け位置はエンドキャップに近い場所、エンドキャップ内、液体窒素容器側（リモートプリアンプ）等があり、前置増幅器の取り付け位置によってはマリネリ容器が使用できないことがあるので注意する。

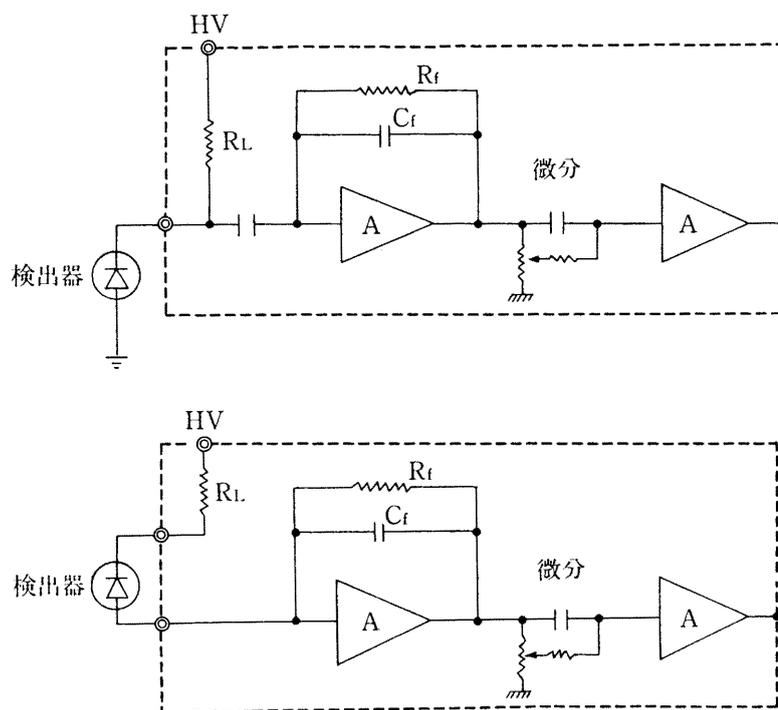


図 3 - 3 電荷有感型前置増幅器回路図(文献1)の例

## (3) 液体窒素容器（デュワーびん）

Ge 半導体結晶は液体窒素温度で動作するので液体窒素で冷却する。

1) 信号パルスのテイル部分を早く 0 に復帰させ、信号の重畳（パイルアップ：信号が連続して来たために積み重なってしまうこと）による波高値への影響を減らすため、ポールゼロ消去回路が組み込まれている。

--- 引用文献 ---

(文献1) 河田 燕：“放射線計測技術” 東京大学出版会(1978)

### 3. 1. 2 性能

#### 1) 測定エネルギー範囲

環境放射能測定では一般的に 50~2000keV を考慮すればよい。

#### 2) 計数効率

25cm 相対効率<sup>1)</sup> 10~40% 程度。

結晶の有感体積 数十~百数十 cm<sup>3</sup>。

#### 3) エネルギー分解能

1333keV の  $\gamma$  線に対する FWHM<sup>2)</sup> 1.6~2.2keV 程度、122keV においては 0.8~1.2keV 前後。

1333keV の  $\gamma$  線に対する FWTM<sup>3)</sup> 3.5~4.2keV 前後。

#### 4) ピーク・コンプトン比 (P/C 比)<sup>4)</sup>

30~60:1

#### 5) バックグラウンド

環境放射能分析に用いる測定器はバックグラウンドが低い必要があるが、多くの場合、市販されている検出器で十分である。<sup>5)</sup>

### 3. 1. 3 形状

1) 縦型、横向き、下向き、L字型等の形がある。環境試料測定には縦型もしくはL字型がよく、両者のうちではL字型の方が使いやすい。<sup>6)</sup>

---

1) 資料 F:用語集 3 効率 参照。

2) 資料 F:用語集 5 スペクトル解析 参照。

3) 資料 F:用語集 5 スペクトル解析 参照。

4) 5章 3. 6 参照。

5) 大部分のメーカーについて、念のために低バックグラウンド仕様を指定して購入することもできる。これは検出器自身から <sup>60</sup>C<sub>0</sub> が検出されないことを保証し、また低バックグラウンドの素材を使用している。

6) バックグラウンド、保守等の点からは前置増幅器が検出器結晶のそばでなくて、液体窒素容器側に設置されている型 (リモート・プリアンプ) の方がよい。

一方マイクロ・フォニック雑音やパーソナル・コンピュータのCRTからの磁気雑音に対しては、検出器結晶の側にあり、遮蔽体の中にはいる方がよい。

またエンドキャップの中に設置されているものもある。形によってはマリネリ容器が使えないので事前に確認する必要がある。

1. L字型：遮蔽が容易であり、遮蔽体の内容積を広く取れる。リモート・プリアンプ式の場合、前置増幅器を遮蔽体の外に出せるため、これによるバックグラウンドが除かれる。
2. 縦型：構造が単純で強度的に強い。多少、液体窒素の補給がしにくい。
3. 横向き：低エネルギー $\gamma$ 線を測定の対象に含める場合、エンドキャップの入射窓がベリリウム製になるので、物を落下させて破ることの無いよう、横向きの検出器を使用する場合がある。環境試料の測定に不向きなことが多い。
4. 下向き：野外（in-situ）測定に適している。
5. 携帯型検出器：持ち運びながら測定できる。測定試料を検出器にセットできない場合に用いられる。
6. その他の検出器：頻繁に検出器の所まで行けない場合（被曝、汚染の恐れがある等）には液体窒素の代わりに冷凍器で冷却する検出器を用いることができる。<sup>1)</sup>

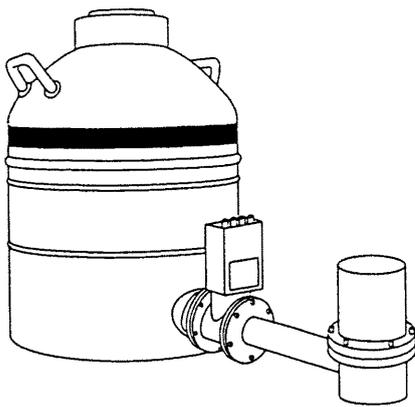


図 3 - 4 NPR、J、L字型

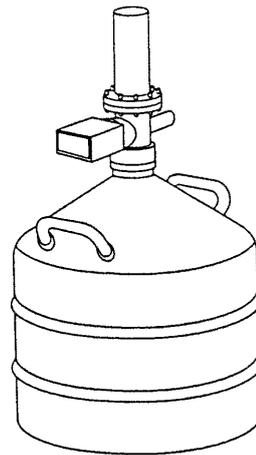


図 3 - 5 縦型

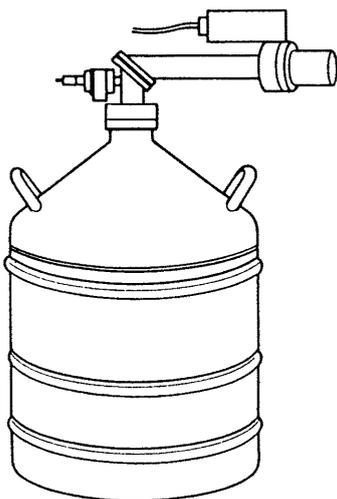


図 3 - 6 横向き

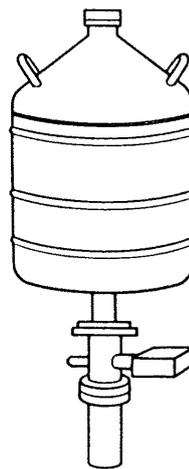


図 3 - 7 下向き

1) 液体窒素冷却に比べ、冷媒（ヘリウムガス）の膨張機の振動のため、分解能が10%程度悪く、また運転に電力を要する（ $\sim 2\text{kW}$ ）。

### 3. 1. 4 仕様例

1. L字型高純度Ge半導体検出器であり、前置増幅器が液体窒素容器側に設置されていること。
2. 25cm 相対効率 10%
3. エネルギー分解能  
1333keV において FWHM : 1.9~2.0keV。  
FWTM : 3.8~4.0keV。  
120keV において FWHM : 0.8~1.2keV。
4. ピーク・コンプトン比 30:1 以上。
5. ピークの非対称性 1333keVの FWTM において 10% 以下。
6. 検出器に含まれる人工放射性核種のピークが 48 時間測定したバックグラウンドスペクトルから検出されないこと。
7. 液体窒素消費量が 1~2.5kg/日以下。
8. 検出器結晶の温度上昇に対する保護機能があること。

### 3. 2 高圧電源

検出器結晶中で発生した電荷を収集するため、直流の高電圧を発生させる装置。

#### 3. 2. 1 機能

##### 1) 出力電圧

0~±5000V<sup>1)</sup>

##### 2) 電圧設定

昇圧、降圧は数分かけて連続的にゆっくり行う。

##### 3) 高圧出力端子

高圧出力は背面から SHV コネクタで供給される。

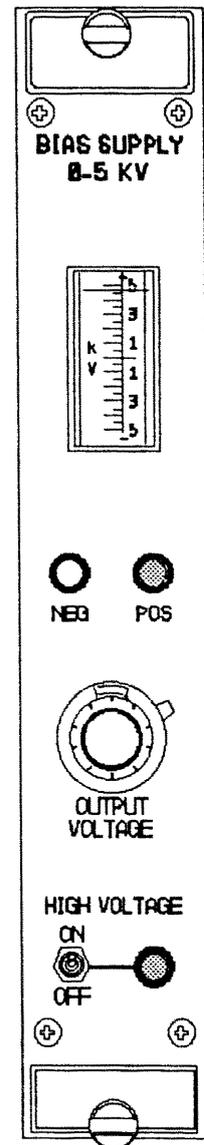


図3-8 高圧電源の一例

1) 正負の切り替えは、背面のネジ様スイッチをドライバーを用いて切り替えるものと、高圧電源の中を開けて切り換えパネル（内部プラグボードとも言う）を差し替えるものとの2種類がある。

#### 4) 検出器保護

液体窒素の枯渇などにより検出器の温度が上昇した時、検出器からの信号を受けて自動的に電源を切る機能を備えたものが望ましい。

#### 5) 高圧バッファ

不意の停電等により、前置増幅器初段の FET が損傷するのを避けるため、高圧電源と検出器の間に高圧バッファを使用することがある。

### 3. 2. 2 仕様例

1. 出力： 0～±5000V、1～100 $\mu$ A。
2. 雑音： peak to peak : 10mV 以下。
3. 温度による変動： ±0.05%/°C 以下。
4. 時間による変動： 0.1%/時間以下。
5. 検出器の温度上昇に対する保護機構があること。

### 3. 3 線形増幅器（主増幅器）

前置増幅器からの信号の信号対雑音比（S/N）を改善し、波高分析器のADC（アナログ・デジタル変換器）に適した波形と大きさ（波高値）に変える装置である。単極性（unipolar）パルスと双極性（bipolar）パルスを出力する<sup>1)</sup>。

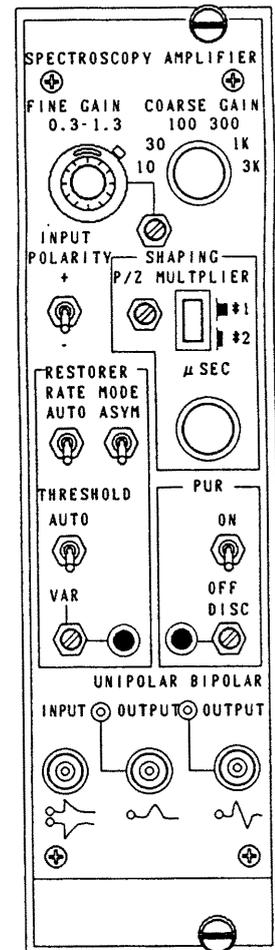


図 3 - 9 線形増幅器  
の一例

1) 通常、疑似ガウスとよばれる波形を出力するが、カスプと呼ばれる形のパルスを出力するものもある。環境試料測定の場合には、低計数率の時に信号雑音比がよいので単極性パルスが主に使われる。双極性パルスは高い計数率のパルスに対してパイルアップなどの影響を受けにくい。

### 3. 3. 1 機能

#### (1) 波形整形

前置増幅器からの信号の  $S/N$  を改善し、波高分析器の ADC に適した波形に変換する。図 3-10 に示されるように波形整形に係る時定数 (shaping time) を切り替えて分解能が最も良くなるように設定する<sup>1)</sup>。

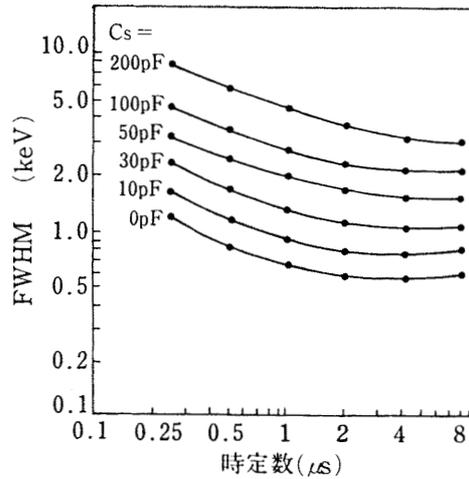


図 3-10 shaping time と半値幅

$C_s$ : 検出器のストレーキャパシティ

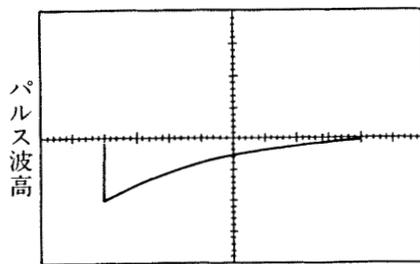


図 3-11 前置増幅器出力パルス波形  
(時間軸:  $15 \mu s/div$ )  
(電圧軸:  $50mV/div$ )

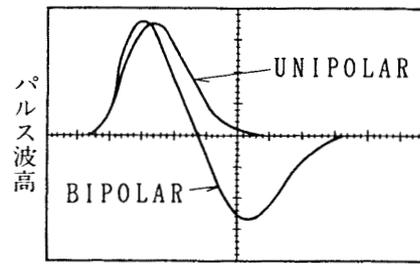


図 3-12 線形増幅器出力パルス波形  
(時間軸:  $3 \mu s/div$ )  
(電圧軸:  $2V/div$ )

1) 一般的には、検出器静電容量がそれほど大きくないときには  $2 \sim 6 \mu s$  で最もエネルギー分解能が良くなる。

## (2) 増幅率

増幅率は、数十～百倍程度である。

### 3. 3. 2 仕様例

1. 温度による利得変動： 100ppm/°C以下、0 レベル変動 50 $\mu$ V 以下。
2. 積分非直線性： 0.05% 以下。
3. 波形整形の時定数： 0.5 から 6 $\mu$ s の範囲をカバーしていること。
4. 増幅利得： 20～1000 の範囲をカバーしていること。
5. DCレベル調整(dc level adjust)、ポールゼロ調整(pole zero cancel)、ベースライン修復(base line restore) 機能を備えていること。
6. 入力：極性の切り替えが出来ること  
インピーダンスは1k $\Omega$ 以上。
7. 出力：0～10V で波形は正の単極と双極があり、インピーダンスは1 $\Omega$ 以下および93 $\Omega$

### 3. 4 波高分析器（多重波高分析器）

線形増幅器から入力されるパルス信号を波高値別に収集記憶し、必要に応じて出力するための装置。収集中のスペクトルをCRTディスプレイに表示出来る。

波高分析器（MCA：multichannel analyzer、PHA：pulse height analyzer）は、ADC（アナログ・デジタル変換器）、スペクトルメモリ、表示装置から構成され、蓄えられたデータを外部のコンピュータに転送したりプリンタに出力する。

一体型MCAと、市販のパーソナル・コンピュータにADC、スペクトルメモリ等を組み合わせたパソコン・MCAとがある。

パソコン・MCA：通常ADCとスペクトルメモリーを bin 電源に納め、これらと表示用のパソコンの3つで構成される。

一体型MCA：一つの筐体に組み込まれているものと、いくつかのモジュールを組合わせ、bin 電源に納めて構成されているものがある。

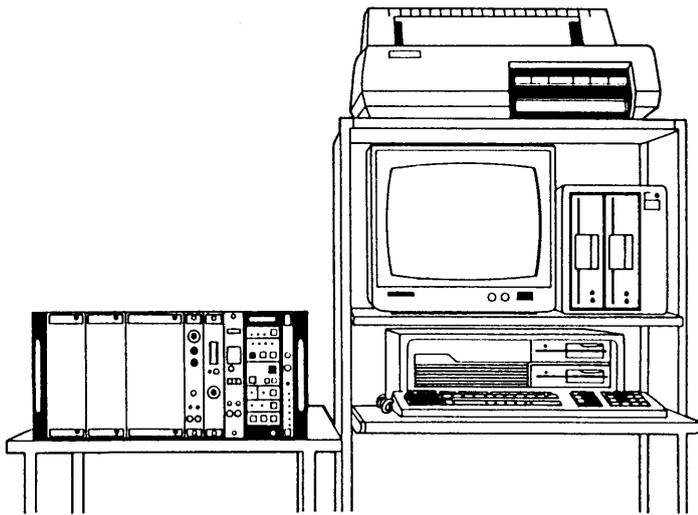


図 3 - 1 3 パソコン・MCA の一例

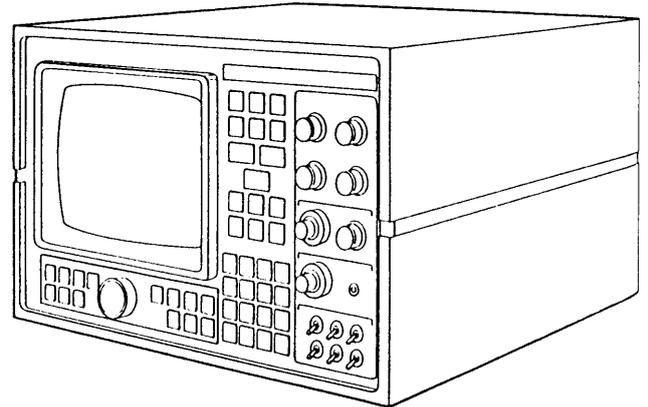


図 3 - 1 4 一体型 MCA の一例

#### 3. 4. 1 機能

##### 1) ADC（アナログ・デジタル変換器）

線形増幅器から入力されたパルス信号を、その波高値に比例したデジタル量（チャンネル）に変換する。

不感時間 (dead time)：入力した信号をMCAが処理（変換）していて、次のデータを受け付けることの出来ない時間の和。

ライブタイム (live time)：ADCに信号が入力されるのを待っている時間の和。

トルータイム (true time)：不感時間とライブタイムの和。

## 2) スペクトルメモリ

1. 波高値 (チャンネル) 別に信号の個数 (カウント数) を記憶する。
2. チャンネル数としては最小で 4 K チャンネル、チャンネル当りのカウント数としては最小で  $10^6$  カウントできる必要がある。

## 3) 表示装置<sup>1)</sup>

1. スペクトルメモリーの内容を表示する装置。
2. ディスプレイ上では、スペクトルの他に時間、プリセット値、カーソル位置及びカーソル位置の計数值等の情報が表示される。
3. 画面がなるべく大きく、4096 (または8192) チャンネルを1チャンネルごとすべて表示できることが望ましい。(画面が 10 インチ以上で、厳密に全チャンネル表示できる機種は現在まだない)

## 4) 分析モード: パルス波高分析 (P H A) モードとマルチチャンネルスケーラ (M C S) モードとがある。

P H A モード: 横軸に波高値、縦軸に計数值を表示する、通常の分析モード。

M C S モード: 環境放射能測定には使用されない。横軸に時間 ( $\Delta t$ ) を、縦軸に時間  $\Delta t$  の間に入力された信号の数をとる。時間  $\Delta t$  を経過すると自動的にメモリは次のチャンネルに切り替わり  $\Delta t$  の間だけ計数記録していく。最終的には放射線の計数值の時間的变化が記録される。

## 3. 4. 2 仕様例

1. 4096 チャンネル、 $10^6$  カウント/チャンネル以上。
2. 積分非直線性 0.05% 以下。微分非直線性 1% 以下 (5. 4 参照のこと)。
3. 温度による変動 0.01% (0.5チャンネル)/ $^{\circ}\text{C}$  以下。時間による変動 1 チャンネル/日以下。
4. 入力は 0~10 V、時定数 0.5~10  $\mu$  秒のパルスとし、入力インピーダンス 1k $\Omega$  以上。
5. U L D<sup>2)</sup>、L L D<sup>3)</sup> (upper & lower level discriminator)、A D C ゼロレベル調整 (zero level adjustment) を備えていること。
6. クロック周波数 50MHz 以上。
7. データ処理時間 4096 チャンネルに対して 100  $\mu$  s/pulse 以下。
8. 指定された方式で指定された電子計算機と、相互にデータの転送が出来ること。
9. 線形増幅器を内蔵している場合、性能等は前節の線形増幅器に準ずる。

---

1) ディスプレイに備わっている機能については、章末の備考 (A) 参照のこと。

2) 波高値が大きすぎて測定の対象にならない信号を A D C へ通さず、不感時間を増加させないようにするための上限ディスクリミネータ。

3) 雑音等を A D 変換して不感時間を増加させないように遮断するための下限ディスクリミネータ。

### 3. 5 bin 電源

線形増幅器と高圧電源を収納し、電源を供給する。通常、 $\pm 24V(1A)$  及び  $\pm 12V(2A)$  が供給できる。 $\pm 6V(10A)$  が供給できるものと出来ないものがある。ADC、スペクトルメモリ等のデジタル機器を収納して使用する場合は  $\pm 6V$  が必要である。

枠の右側にチェック用の端子がある。

机上で使用の場合は底面からの通風の確保に注意する。まれに同一筐体内に置いた機器どうしが干渉することがある。

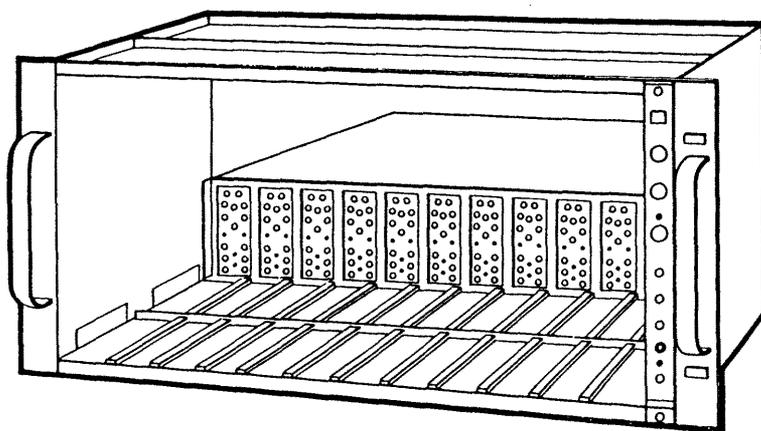


図 3 - 1 5 bin 電源の一例

#### 3. 5. 1 仕様例

1. 入力:  $100V \pm 10\%$  (または  $110V \pm 10\%$ )
2. 出力:  $\pm 12V$ 、 $\pm 24V$  とし、安定化されていること。
3. Ge半導体スペクトロメータを構成する回路を収容し、動作に必要な電力を供給できること。

#### 3. 6 ケーブルおよびコネクタ

信号や電源の供給には専用のケーブルが用いられる。信号用には特性インピーダンスが  $50\Omega$  と  $93\Omega$  のものがあり、通常は  $93\Omega$  が使用される。高圧の供給には耐電圧の関係で特別なものが使用される。

高圧電源用のコネクタは、耐電圧の関係で信号用とは別のものが用いられる。

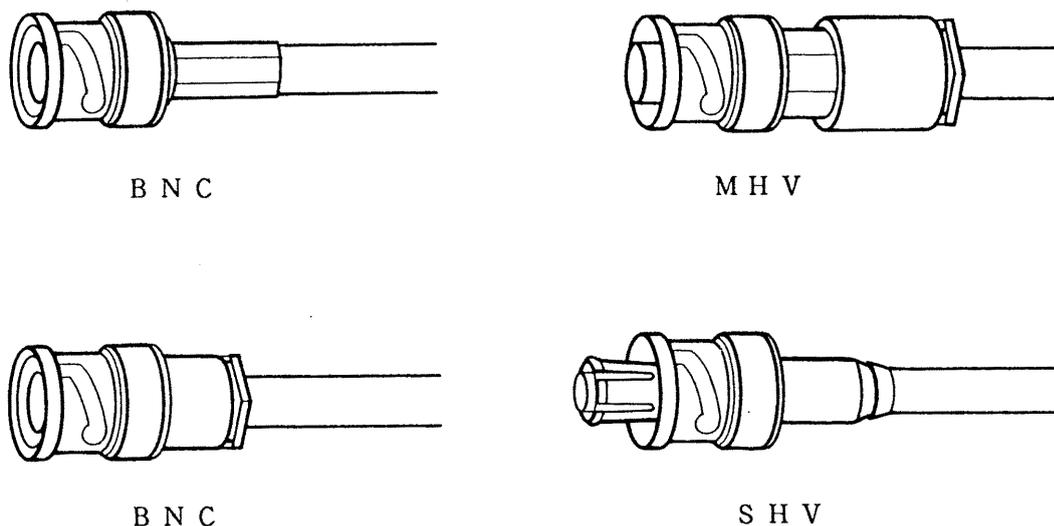


図 3 - 1 6 コネクタの例

信号用には B N C と呼ばれるコネクタと RG62/U、RG58/U ケーブルの組合せが使用され、高電圧の供給には S H V と呼ばれるコネクタと RG59/U ケーブルの組合せが使用される。

現在あまり使用されなくなったが、M H V と呼ばれるコネクタがある (NaI シンチレーションプローブ等に使用される)。B N C と M H V のコネクタは形状が似ていて絶縁物のカラーの深さのみが異なり、間違えて無理にねじ込むと壊れる。M H V と B N C を両方使用している場合は注意が必要である。

### 3. 6. 1 仕様例

1. 一式を以て G e 半導体スペクトロメータを正常に構成できること。

### 3. 7 遮蔽体

環境試料測定に用いる G e 半導体検出器は、外部からの放射線を減少させるため、通常  $4\pi$  方向にわたって 10~15cm 厚の鉛<sup>1)</sup>で遮蔽される。縦型検出器等の場合、必ずしも液体窒素容器まで囲わなくてもよいが、エンドキャップのすぐ際まで遮蔽材を回り込ませ、液体窒素容器の下に鉛ブロック等を 5~10cm 厚さに敷く

1)  $^{208}\text{Tl}$ 、 $^{214}\text{Bi}$ 、 $^{228}\text{Ac}$  のウラン系列及びトリウム系列の天然放射性核種が含まれていることがある。鉛が内側表面に露出していると KX 線 (約 75keV) が検出されるが、後方散乱によるバックグラウンドの増加が最も少ない。

と効果がある。また試料の出し入れ、保守の容易な構造が必要である。外観、構造はGe半導体検出器の形状に依り異なる。(図 3-18, 19)

### 1) 材質

遮蔽体として用いられる物質には主に鉛が使われるが、鉄材が使われる場合もある。また内張りとして銅、カドミウムが追加されることがある。

除染を容易にするため薄い(～2mm程度)アクリル板で内張りすると良い。

1. 鉛: 5 cm厚で  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線透過率は 6～7% になる。
2. 鉄: 5 cm厚で  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線透過率は 30% 前後になる。戦後製造された鉄の中には、 $^{60}\text{Co}$  が含まれている場合があるので、予め検査するか又は戦前に製造された物を用いる。<sup>1)</sup>
3. 銅: 鉛の KX 線や、ウラン系列及びトリウム系列の核種からの低エネルギー  $\gamma$  線を低減させるために銅やカドミウムを内張りする事がある。<sup>2)</sup>
4. カドミウム: 内張りに用いると鉛の KX 線除去には効果的であるが、カドミウムの KX 線(約23keV)が発生する。

遮蔽体の内張りを鉛、銅、鉄およびアクリルに変え、 $^{60}\text{Co}$  線源の直接線を遮蔽し後方散乱線のみを測定した例を図 3-17 に示す。

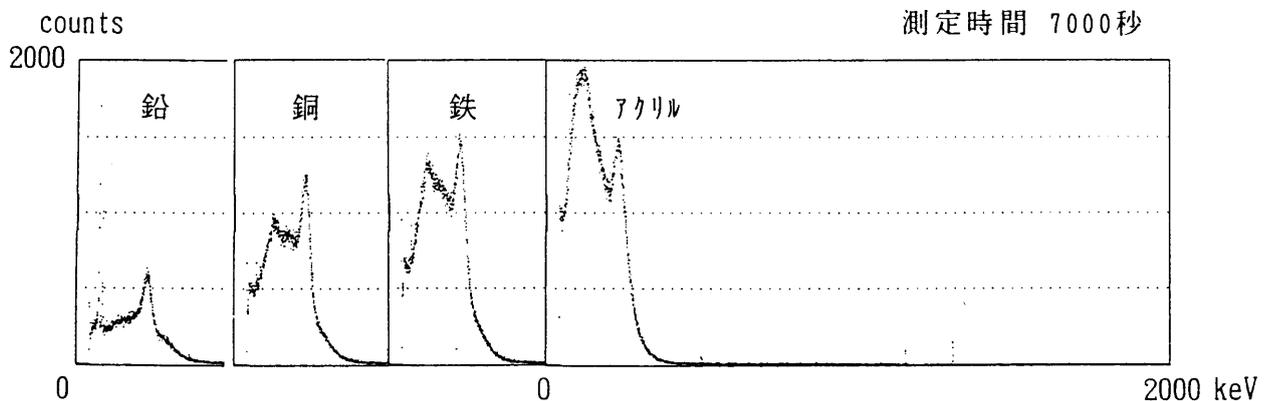


図 3-17 鉛遮蔽体の内張材と散乱線

- 1) 鉄を用いた場合、宇宙線との相互作用により  $^{56}\text{Fe}$  の励起状態からの  $\gamma$  線(約847keV)が検出される。また、後方散乱  $\gamma$  線が増加する。
- 2) 銅を内張りに用いると宇宙線との相互作用により  $^{63}\text{Cu}$  の励起状態からの  $\gamma$  線(約670, 960keV)が検出される。

## 2) 内容積

1. 後方散乱 $\gamma$ 線の影響を少なくし、試料の出し入れを容易にする等からなるべく広い方がよい。普通は  $20 \times 20 \times 20 \sim 30 \times 25 \times 50 \text{cm}$  であるが、分解能測定には検出器エンドキャップ上に  $27 \text{cm}$  程度以上の空間があると便利である。
2.  $2 \text{ g}$  マリネリ容器を使用し試料を測定するのであれば、 $30 \times 25 \times 50 \text{cm}$  以上の内容積が必要である。

## 3) 重量

遮蔽体の重量は  $1.5 \sim 3$  トンになるので、測定室の許容床荷重をそれ以上にしておく必要がある。

## 4) 遮蔽体に含まれる放射性物質

バックグラウンドを  $48$  時間測定して、人工放射性核種のピークが検出されない事。<sup>1)</sup>  $15 \text{cm}$  厚さの鉛で  $4\pi$  方向を遮蔽する遮蔽体の場合、ウラン、トリウム系列等の天然放射性核種に起因する計数率は、相対効率  $25 \sim 30\%$  の検出器で測定すると表 3-1 のようになる。

表 3-1 遮蔽体に含まれる放射性物質

| 核種など        | $^{40}\text{K}$ | $^{228}\text{Ac}$ | $^{214}\text{Bi}$ | $^{208}\text{Tl}$ | 連続領域     |
|-------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| エネルギー (keV) | 1 4 6 0         | 9 1 1             | 6 0 9             | 5 8 4             | at 1 2 0 |
| 計数率         | 30~90           | 50~120            | 200~500           | 180~400           | 150~500  |

(注：連続領域の計数率は、(counts/day)/keV、他は (counts/day)/peak である)

## 5) 重量計 (液体窒素容器の下に設置する<sup>2)</sup>)

液体窒素の消費量を常時監視でき、補給を怠らないためのチェックや、クライオスタットの真空漏れのチェックが出来るので設置することが望ましい<sup>3)</sup>。

- 1) 遮蔽体とで同一の材質で、升の形に加工した試料を作って測定し、材質のバックグラウンドの検査をすることが出来る。章末の備考 (B) 参照のこと
- 2) L字型検出器用遮蔽体の場合検出器の台を回転式にするのが一般的である。
- 3) 縦型遮蔽体の場合重量計も遮蔽体内に入るのでこれによりバックグラウンドが増加する可能性があるので確認すること。半導体センサーを用いた“ロードセル”型の物は、重量の変化による変位が少ないのでよい。

6) 測定室が地下にある等で、Rn 濃度が高くバックグラウンド・スペクトルに影響を及ぼす場合がある。この時は、十分な換気を行う。<sup>1)</sup>

### 3. 7. 1 仕様例

1. 指定する Ge 半導体検出器を収容できること。
2.  $4\pi$  方向を厚さ 10~15cm 以上の鉛で囲うこと。
3. 厚さ 2mm 以下のアクリル板で内貼りすること。
4. 遮蔽体に含まれる人工放射性核種のピークが 48 時間測定したバックグラウンドスペクトルから検出されないこと。
5. 内寸が 30×30×60cm 以上で、検出器エンドキャップ上に少なくとも 27cm 程度以上の空間があること。

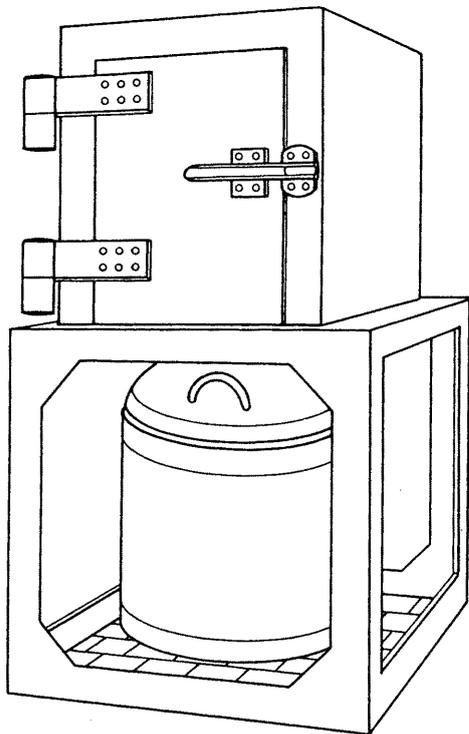


図 3 - 1 8 縦型検出器遮蔽体の一例

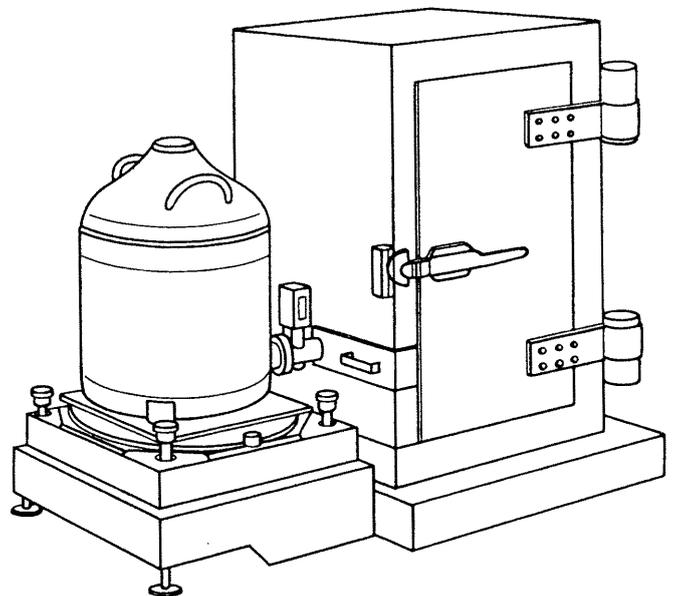


図 3 - 1 9 L 字型検出器遮蔽体の一例

1) 遮蔽体内に窒素ガスを送り込んで Rn ガスを追い出し、低減させる方法がある。  
(文献1)

----- 引用文献 -----  
(文献1) 左合 勉, 五十棲泰人: “ゲルマニウム半導体スペクトロメータの $\gamma$ 線バックグラウンドスペクトルに対する空气中ラドンの影響とその低減方法”,  
RADIOISOTOPES, 36, 70 (1987)

### 3. 8 測定室

Ge半導体検出器を設置する測定室の理想的な条件は次の通りである。<sup>1)</sup>

- 1) 空調が適切である。
  1. 温度変化の範囲と変化速度が小さいこと。23 ± 2 °Cの範囲で安定しているのが望ましい。
  2. 湿度が50 ~ 60 %の範囲で安定しているのが望ましい。
  3. 空調機の風や、日光が直接機器に当たらない。
- 2) 放射能汚染に関して配慮されている。
  1. 汚染の恐れがない。

トレーサー分析室等から空調、排気の回り込みがない。  
核実験時など、外気の取り込みを防止できるようにする。
  2. 清掃が容易である（床材の種類、機器の配置などに気を配る）。
- 3) 管理に関して
  1. 入退室に際してスリッパを履き換える。
  2. 試料詰めは別室で行う。
  3. 紙パック式掃除機を使用し、毎月ゴミを灰化して測定し、汚染を確認する。
- 4) バックグラウンドが低い。
  1. ラドンガス濃度が低い。数Bq/m<sup>3</sup>程度以下が通常的环境レベルである。

地下室は換気を十分にする。
  2. 強い標準線源などを近くに保管しない。
  3. γ線照射装置などの近くでない。
- 5) 構造が適切である。

大きな床荷重に耐えられる。不足であれば、補強する。  
遮蔽体は造り方によっては～3トンに達する物もある。
- 6) 雑音等が低い。

商用電源に雑音がない。  
良い接地を用意する。  
施設が工場地帯にあるとき等は周波数成分などの特徴を調べて、適合したノイズフィルターを利用する。  
掃除機等の動力電源は別に用意することが望ましい。

---

1) 既設の部屋を用いる場合にも、これらの事項を参考とする。

---

## 備考

### (A) ディスプレイに備わっている機能

ディスプレイ上でスペクトルの様子を観察したり、ピークチャンネル、計数値等のチェックなどのため、一般に次のような機能が備わっている。

#### a) ROI (着目領域: region of interest) :

1. 注目しているピーク等について、任意の領域にわたって目印をつける機能で、これを「ROI (ロイ) をかける (または設定する)」という。
2. ROI をかけた領域は、データ表示の輝度が明るくなる、あるいはX軸からデータ点まで直線で結ぶ等、一目で分かるように表示される。
3. ROI は複数箇所について設定することが出来る。
4. ROI を設定すると、その領域にカーソルをジャンプさせたり、領域のピーク面積の計算 (integral、net) 等ができる。

#### b) 拡大 (水平軸の拡大) :

スペクトルを拡大表示する。拡大率も変えられる。

#### c) スクロール :

拡大した状態で、拡大率を変えずに表示領域を左右に移動できる。

#### d) カーソル、カーソルジャンプ :

カーソルは、指定したチャンネル上に輝線で表示され、そのチャンネルのチャンネル数や、計数値を表示する。カーソルは左右に移動させることができる。また、ROI を設定してあるところにジャンプさせる事もできる。ROI を設定する際、始点と終点の指定をカーソルで行う。

#### e) インテグラル (積算) :

ROI 内の計数値の和。

#### f) ネットエリア :

ROI の計数値の、両端の値を結んだ直線の上に出ている部分の積算値を表示する。

#### g) 垂直軸目盛り :

リニア ( $10^2$  程度から  $10^6$  程度まで)、または対数 (log) を選べる。

(B) 升型試料とその測定結果（遮蔽体素材のバックグラウンドの検査）

$^{60}\text{Co}$  を含む鉄板で 図 3 - 2 0 のような升型試料を作り、検出器にかぶせて測定した時と、同じ材料で遮蔽体を内張り（内寸  $30 \times 30 \times 60\text{cm}$ 、厚さ  $10\text{mm}$ ）して測定した時と比べると、計数率は後者が 4 倍高かった。

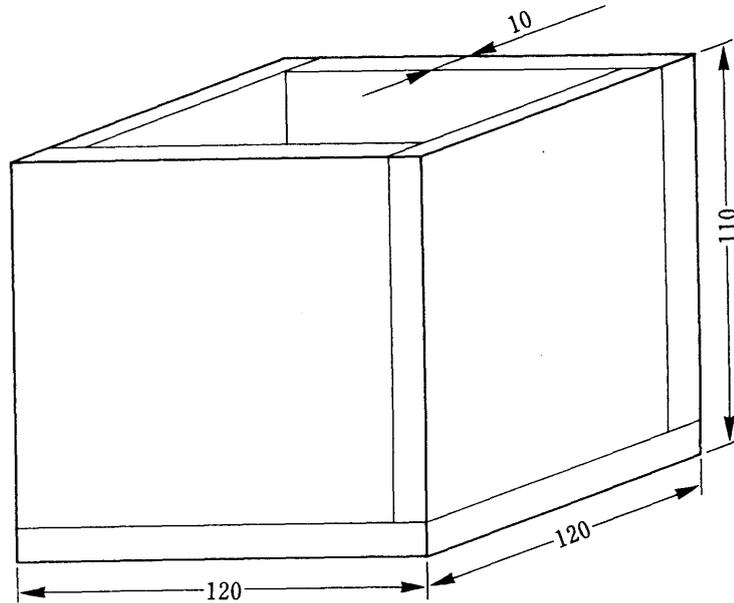


図 3 - 2 0 升型試料

— — — 参考文献 — — —

- 1) 小林哲二, 杉田徹, 佐々木哲夫, 松尾昇: “超高純度 Ge  $\gamma$  線検出器”, RADIOISOTOPES, **23**, 427 (1974)
- 2) 島 邦博, 見原 猛, 梅谷啓二, 三雲 昂: “鉛遮蔽材を使用した  $\gamma$  線バックグラウンドスペクトルにおける鉛 K X 線の発生要因”, RADIOISOTOPES, **29**, 363 (1980)
- 3) 広瀬妙子, 佐藤 純, 佐藤和郎: “新しい鉄材を遮蔽に用いたガンマ線スペクトロメータ”, RADIOISOTOPES, **28**, 163 (1979)
- 4) 静間 清, 岩谷和夫, 葉佐井博巳: “ゲルマニウム検出器用低バックグラウンド遮蔽体における散乱ガンマ線”, RADIOISOTOPES, **36**, 465 (1987)
- 5) 櫻井次郎, 小村和久: “Ge (Li) 検出器のバックグラウンドの経年変化”, RADIOISOTOPES, **30**, 471 (1981)
- 6) G. Heusser: “The Background Components of Germanium Low-Level Spectrometers.”, Nucl. Instr. Methods, Phys. Res. **B17**, 418 (1986)

## 第4章 データ解析用計算機

現在、電子計算機を使わずに $\gamma$ 線スペクトロメトリーを行うことは考えられない。Ge 半導体検出器を用いると一回の測定で 4096 または 8192個の多量の計数データが得られ、このデータを計算機を使用せずに日常業務として計算処理する事は事実上不可能であるので、本マニュアルでは、計算処理には電子計算機を用いることを前提とする。計算機や周辺機器等は現時点で $\gamma$ 線スペクトル解析に最適と思われるものを取り上げて説明したが、現状の計算機の進歩は著しいので、購入にあたっては最新の情報を調査し機種等を選定する必要がある。

新しく $\gamma$ 線スペクトル解析装置を導入する場合は、まず解析プログラム、あるいはプログラム言語などソフトウェアの選定を優先し、それを実行できるハードウェアを用意する。ソフトウェアについては第11章に記載されている。

ソフトウェアを決めた後、計算機の機種、メモリーの大きさ、ディスク容量、プリンタ、プロッタ等の周辺機器を決定する。

選定された計算機に対し、波高分析器(MCA)のどの機種からでもデータ転送できるとは限らないので注意する。MCAと解析システムを別々に購入して接続する場合、データ転送が可能なMCAを選択する。<sup>1)</sup>

### 4. 1 本体

主にパーソナルコンピュータまたはミニコンピュータがスペクトロメトリー専用コンピュータとして使われている。

#### 4. 1. 1 パーソナルコンピュータ

スペクトロメトリーに使用される代表的なパーソナルコンピュータはプロセッサが 16 bit または 32 bit で、メモリーは 640Kbyte、補助記憶装置として 1 Mbyte のフロッピーディスクを 2 台、20~40Mbyte のハードディスクを備えている。

またOS(基本ソフト)には MS-DOS が多く採用されている。

一日に数個の定型的なスペクトル処理を行うだけであればパーソナルコンピュータでも処理することが出来る。

640Kbyte のメモリーでは不十分なので、RAM ボードなどを増設するとよい。最近のパーソナルコンピュータは日本語変換プロセッサが使用できるようになったがメモリーを占有するので、日本語変換プロセッサと日本語辞書を増設した RAM ボードに置く。

---

1) シリアル転送方式の場合は速度は遅いが、測定器から距離をおいてデータ解析用計算機のディスプレイを設置できるので、発生する磁気雑音が前置増幅器に影響するのを避けられる。

資料 F: 用語集 6 データ解析用計算機 参照。

#### 4. 1. 2 ミニコンピュータ

代表的なミニコンピュータはプロセッサが 32 bit であり、大規模な OS が使用されるようになってきたため、メモリは～数 Mbyte 程度実装されている。

また少なくとも 100 Mbyte 程度のハードディスクを備えている。グラフィックスの機能を利用するためには「ワークステーション」型を選ぶ必要がある。OS は放射線計測の分野で実績の高いものを使用する。

1. 処理する測定データの数が多い。
2. データベースを構築する。
3. 何種類かの計算方式でデータを処理し比較する。
4. より良いデータ処理プログラムを開発する。
5. 検討実験のデータ解析のためのプログラムを作る。

等の使い方をするのであれば、ミニコンピュータまたはワークステーションを導入する。

#### 4. 1. 3 汎用計算機

汎用計算機は通常は研究所、事業所などの中央の計算センター等に設置されるような大型で多目的の計算機である。スペクトル解析だけのために汎用計算機を導入することは避けた方がよい。汎用機を使う場合はプログラムの開発、改訂等が容易ではない、と考えた方がよく、プログラムを用意する際に処理内容等の詳細な検討を行い、手直しの必要が起こらないようにする。

「処理内容に今後更新が考えられる」、「検討実験を行った時は、データを処理するためにその都度プログラムを作りたい」のであれば別に小さなデータ解析用計算機を用意する方がよい。

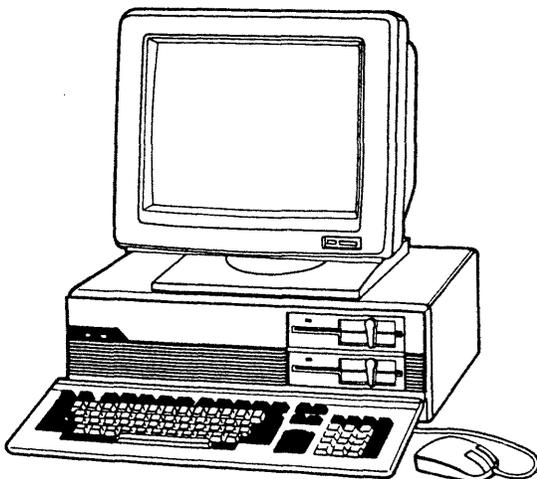


図 4 - 1 パーソナル・コンピュータ

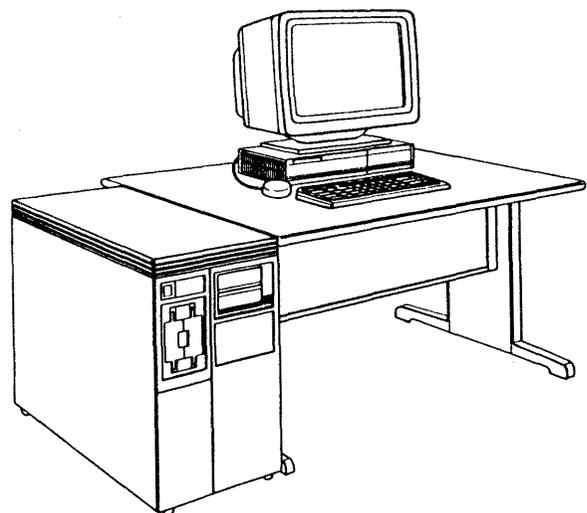


図 4 - 2 ミニ・コンピュータ

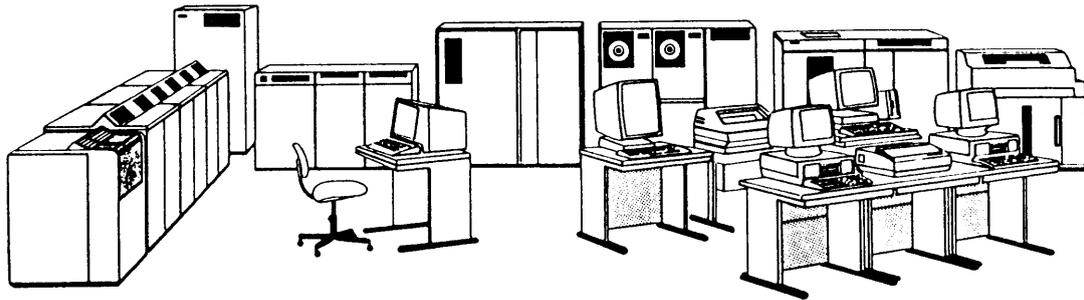


図4-3 汎用計算機

#### 4. 2 データの転送

$\gamma$ 線スペクトロメトリーに計算機を使用するための特有なものとして、MCAのスペクトルデータを計算機に転送する機能が必要である。現在 GPIB、RS-232C、等が使われ、今後は Ethernet 等の利用が考えられる。また、この様な標準規格によらないパラレル転送を利用し、高速化を図っているメーカーもある。

1. GPIBは8ビットのパラレル（1バイトのシリアル）転送を行う。いわゆる“芋蔓”式に様々な機器を接続できる優れた標準規格である。  
データの転送のみならず、機器の制御も行うことができ、測定器、データ解析用計算機周辺機器等、メーカーが異なっても接続できる。接続する機器間の距離は3mまでで、機器15台までの制限がある。
2. RS-232Cは1ビットずつシリアル転送を行う。転送速度は遅いが、距離を伸ばすことができる（～20m）。
3. 標準規格によらない方式に付いてはメーカーに長所短所をよく確認しておく。

通常第11章に述べる解析プログラムによって転送方式が決まり、それに応じてMCAの機種が決まり、自由な選択は出来ない。

## 4. 3 周辺機器

### 4. 3. 1 固定ディスク装置

磁性体の円盤を用いた記憶装置。容量はパーソナルコンピュータで 40 Mbyte 以上ある方がよい。ミニコンピュータの場合 100 Mbyte 以上必要で、データ蓄積の方法によっては数百 Mbyte 以上必要になる。このような外部記憶装置のデータのバックアップには「ストリーマテープ」（連続的に高密度に記録するカセット磁気テープ）がある。

### 4. 2. 2 フロッピーディスク装置

取扱いが便利なので、別の計算機とのデータ交換、プログラム移動等に利用され、また小容量のデータバックアップ等に使用される。

他の機関とのデータ交換、及び計算を行う機会が増えると考えられ、そのためには、8 インチ 2 D D、5 インチ 2 H D、3.5 インチ 2 H D 等、良く普及しているフォーマットのフロッピーディスクを使用できるようにしておくのがよい。

### 4. 2. 3 光ディスク装置

追記型光ディスク（消去不可）、光磁気ディスク（消去可）等のレーザー光線を用いた記憶装置で、飛躍的に記憶容量が大きく（500～1000Mbyte）、今後普及して来ると思われる。スペクトルの保存などに、各々の特徴を考慮して利用できる。

### 4. 2. 4 プリンタ

漢字が印字できるものがよい。連続用紙を使用する場合は 15 インチ幅の用紙が使用できるのがよい。カット紙を使用する場合は、少なくとも B 4 サイズに印刷できなければ不便である。

レーザープリンタ : 高速で印字は美しいが、比較的高価格である。

ドットマトリクスプリンタ : 価格が安いので普及しているが、インパクト型は騒音が高い。

インクジェットプリンタ : 低騒音であり、カラー印刷に用いられる。  
などがある。

### 4. 2. 5 X Yプロッタ

スペクトル等を視覚的に理解するために必要である。A 3 用紙が使用でき、画質が良く、プロットプログラムが容易に作成できる機種が望ましい。解析するデータが多い場合は、連続して高速にプロットできるものが必要になる。

### 4. 2. 6 ディスプレイ装置

理想的なデータ処理システムでは、良いグラフィックプログラムが適切に組み込まれていて、実行されているデータ処理の概念を視覚的に理解できなくてはならない。このような場合には、高速で、分解能の高いグラフィックシステムが役に立つ。

パーソナルコンピュータではグラフィック用メモリとプロセッサの間で高速のデータ転送が行われるのが一般的であるが、ミニコンピュータではRS-232Cなどの低速のシリアルラインで結ばれ、描画速度が遅い機種が少なくない。いわゆる「ワークステーション」であれば描画は高速で行われる。

画面の解像度はパーソナルコンピュータで普通640×400ドットであり、これより粗いと実用的ではない。カラーディスプレイであれば色分けしてプロットできるので表示内容が理解しやすくなる。

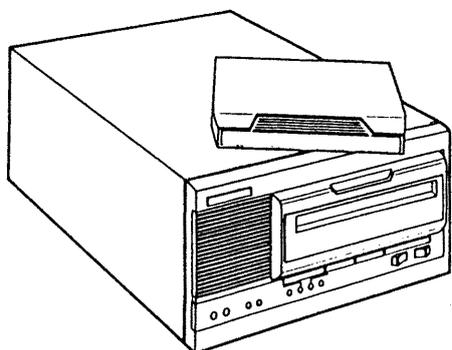


図4-4 固定ディスク装置

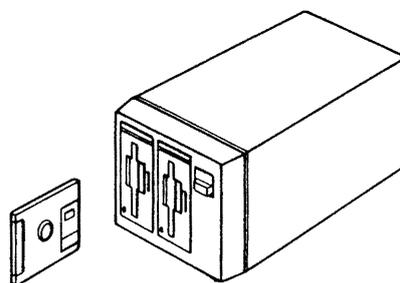


図4-5 フロッピーディスク装置

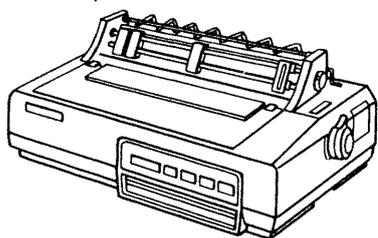


図4-6 ドットマトリクス  
プリンタ

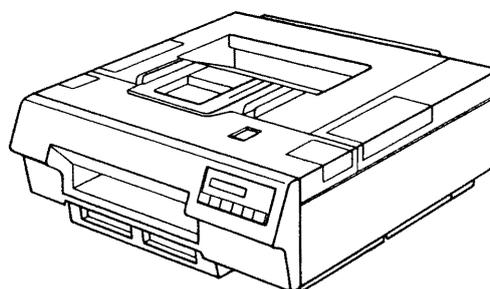


図4-7 レーザープリンタ

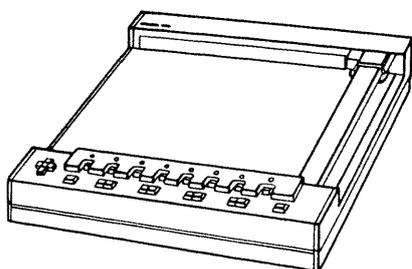


図4-8 XYプロッタ

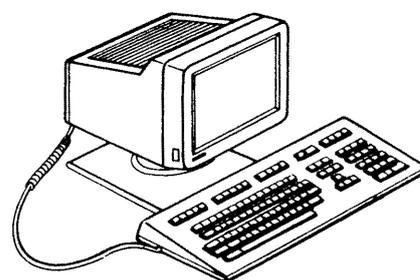


図4-9 ディスプレイ装置

## 第5章 機器の設置と点検・調整

Ge 半導体スペクトロメータを設置する際の注意事項等について述べる。また使用中は適切な点検・調整を行い常に正常な状態で使用する。

### 5. 1 必要な標準線源、器具、計測器

設置および調整・点検には下記の線源、器具、計測器等を使用する。

#### (1) 密封線源

点検や調整を行うには信号を観測し、その波形が正しく調整されているか、あるいは発振していないかどうか等を見る必要がある。信号を発生させるには適当な線源を用い、パルス発生器は原則として使用しない。使用する線源は37kBq程度で十分である。下記に使用する線源を示す。

| 項目                          | 使用する線源(例)                                                 | 放射能      |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|----------|
| dc level 調整<br>pole zero 調整 | $^{57}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 等 | 37kBq 程度 |
| エネルギー校正                     | $^{57}\text{Co}$ 及び $^{60}\text{Co}$                      |          |

#### (2) 器具

点検調整に当たり必要な器具の一例を下記に示す。

1. マイナスドライバー (トリマの操作: 幅 2~3 mm、プラスチック製がよい)
2. 標準線源用ホルダ

密封標準点線源をエンドキャップ上 25cm 離して測定するためのホルダ。

線源の強さによっては近づけて使用する。プラスチック等の軽い材質がよい。

#### (3) 点検調整するのに用いる計測器を下記に示す。

1. テスター                      測定器等の配線の断線、絶縁、電源電圧等のチェックに使用する。
2. オシロスコープ              信号の観察に使用する(文献1)。

----- 引用文献 -----

(文献1) 波形観測 (オシロスコープ・テクニック・ガイド), ソニー・テクトロニクス編, ラジオ技術社(1975)

5. 2 設置と信号の観察

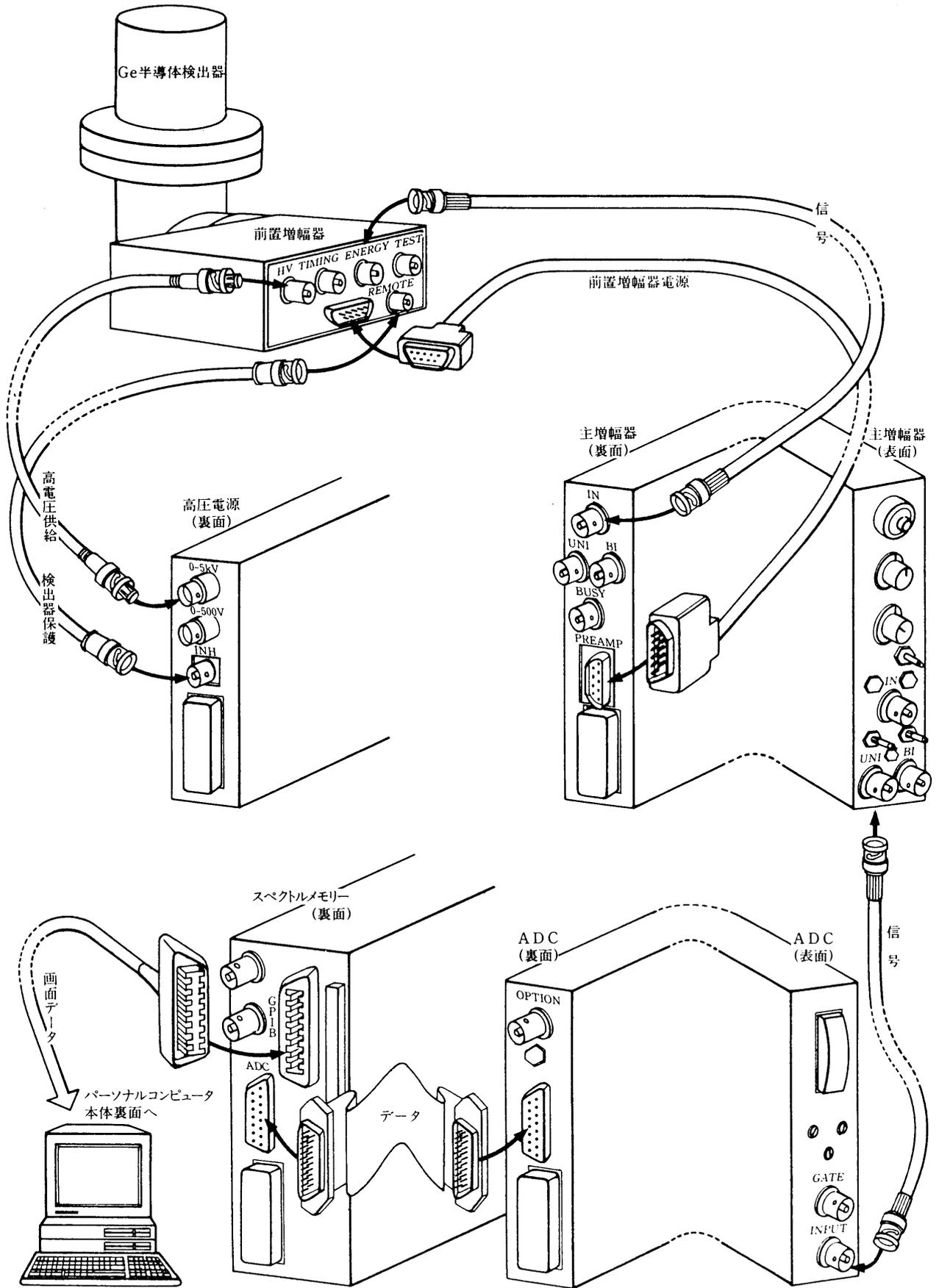


図 5 - 1 パソコン MCA を用いた  $\gamma$  線測定装置の接続

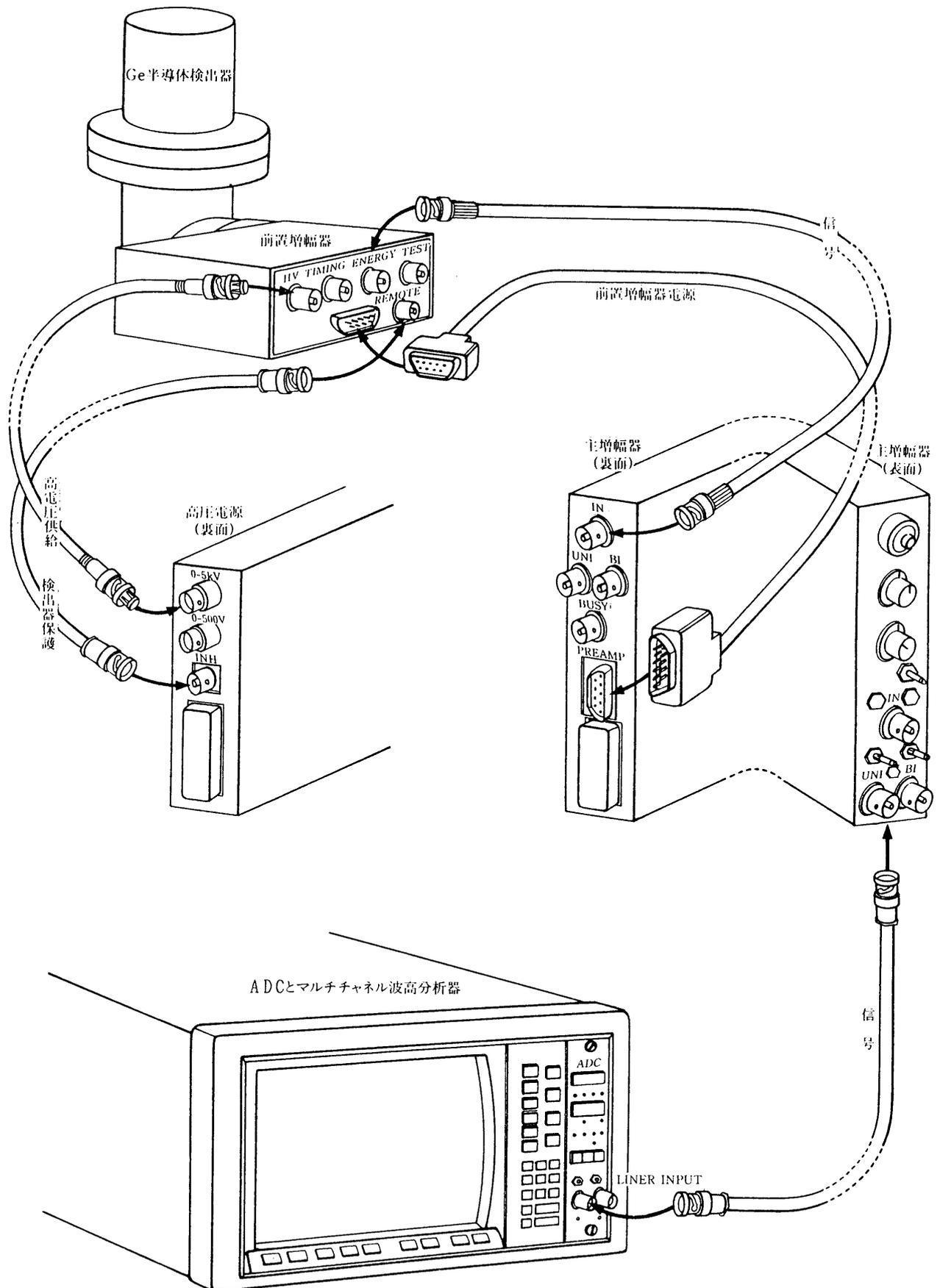


図 5 - 2 一体型 MCA を用いた  $\gamma$  線測定装置の接続

## 5. 2. 1 検出器

通常のGe半導体検出器は、衝撃に弱く、また液体窒素で冷却しながら高い電圧を印加して使用するので、設定方法や取り扱い上の注意について述べる。

### (1) 検出器の冷却について

1. 検出器が冷却されていない状態で高電圧をかけると、結晶に大きな漏れ電流が流れ、前置増幅器を損傷するので行ってはならない。
2. リチウムドリフト型の検出器は液体窒素による冷却が中断されると、高電圧が印加されていない状態でも、検出器結晶中のリチウムが析出する等、劣化し使用できなくなる。高純度ゲルマニウム検出器は高電圧が印加されていなければ冷却が中断しても性能に変化はない。再冷却は完全に室温に上昇した後行い、検出器結晶が十分冷却されるまで一昼夜（24時間程度）放置してから高電圧を印加する。

### (2) エンドキャップのカバー

1. エンドキャップがアルミニウムまたはステンレス製のものは、汚染防止のため薄いポリエチレン袋でつつむ。
2. 低エネルギー光子測定用（n型半導体）の検出器等、エンドキャップにベリリウム製の入射窓があるものは、 $\gamma$ 線とX線とがサムコインシデンスを起こす。X線を測定しない場合、入射窓上に用途に応じてアルミニウム板、銅板等のカバー（エンドキャップと同径で0.5mm程度の厚さ）を取り付けてから薄いポリエチレン袋でつつむ。

### (3) ケーブルのつなぎ方

1. 原則として検出器と遮蔽体の間は絶縁し、遮蔽体は接地しない。
2. 前置増幅器の電源ピンコネクタと線形増幅器背面の前置増幅器電源用ピンコネクタを集合ケーブルで接続する。
3. 前置増幅器のH.V.入力端子と高圧電源の出力端子を高圧用ケーブル（3.6参照）で接続する。  
背面にあるもう一つの500V用のコネクタと混同しないように注意する。
4. 検出器の温度が上昇した時に高電圧を切断するための前置増幅器の端子を、信号用ケーブルで高圧電源の所定の端子に接続する。  
検出器と高圧電源のメーカーが異なるなどで、温度変化と切断動作が逆になる場合があるので注意する。
5. 前置増幅器のenergy output端子と線形増幅器背面の入力端子を信号用ケーブルで接続する。
6. 線形増幅器のUNIOUT端子とMCAのADCINを信号用ケーブルで接続する。
7. 折れ曲がらない範囲で、ケーブルはできるだけ短くする。

8. ケーブルは4本まとめて束にし、20cm位ごとに縛る（絶縁物の紐、結束バンドなどを用いる）。
9. test input 端子は通常使用せず、パルサーによる試験の際にパルサーと信号用ケーブルで接続する。
10. timing output 端子（付いていない機器もある）は、通常使用しない。

#### （4）前置増幅器（プリアンプ）

DC レベル（dc level）、ポールゼロ（pole zero）調整及び時定数の選定などの機器設定はメーカーが行っており、使用者が調整する必要はない。しかしオシロスコープで出力信号に異常を見つけた場合は、再調整を依頼する。

縦型検出器エンドキャップに外付けされているものは液体窒素注入の際に水滴がつき、湿気を吸収しやすいので、前置増幅器の全体（コネクタ部分を含む）をポリエチレン袋などで包み、その中にシリカゲルを入れるなどして内部をよく乾燥した状態に保つ。

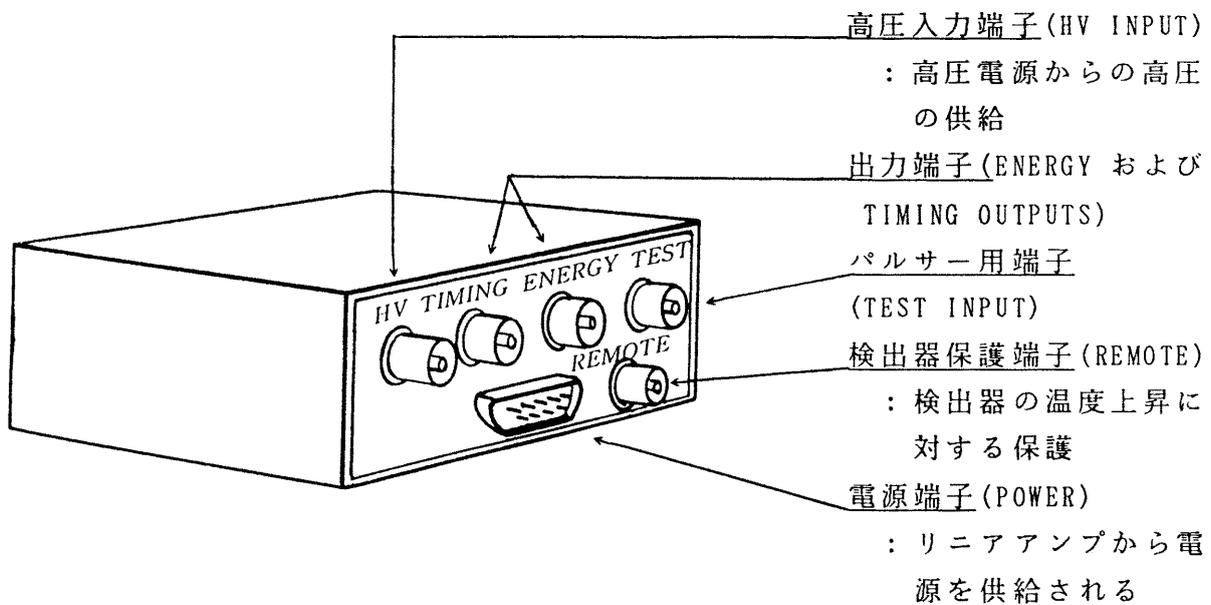


図 5 - 3 前置増幅器の一例

点検調査は、設置時の他、年2回以上分解能の測定と平行して行う。以下に出力の調査方法を述べる。

1) DC レベルの確認

- ① 前置増幅器の出力端子（図5-3）をオシロスコープの入力端子に接続し、input coupling を GND にする。
- ② input coupling を dc にし、入力を表示する。
- ③ volts/div 及び time/div を適当に調節する。（縦軸は 0.1V/div 程度、横軸は 2 ms/div 程度で観察できる。図5-4）
- ④ そのときの輝線の中心が dc level（中央の水平線）より  $\pm 0.5V$  以上ずれている場合はメーカーに再調整または修理を依頼する。  
（ほとんどの場合 0.1V 以内である。0.5V 程度のずれまでは測定に影響しない。）

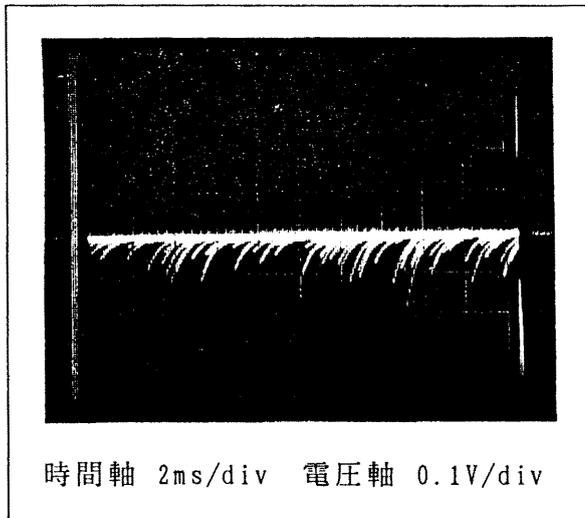


図5-4<sup>1)</sup> 前置増幅器の DCレベル

---

1) 図は線源を測定している状態の波形であるが、線源のない方が観察しやすい。

2) pole zero 及び出力波形の確認

- ①  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$  または  $^{137}\text{Cs}$  線源を、エンドキャップ上 25cm 程度離して測定する。(検出器と線源の距離は、dead time が 5% 程度以下になるように調節する。)
- ② オシロスコープの input coupling を dc にする。
- ③ volts/div 及び time/div を調節し、図 5-5 に示すような信号を表示する。(volts/div は 10mV/div 程度、また time/div については 1ms/div 程度で観察できる。)

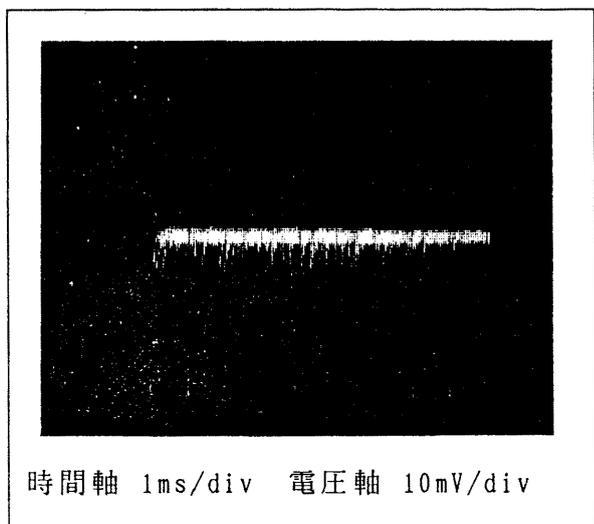


図 5-5 pole zero 調整<適正な波形>

- ④ この時の出力が数十 mV 程度であることを確認する。
- ⑤ 出力波形が補償されていない場合(図 5-6、図 5-7)、及び波形に異常のある場合はメーカーに再調整を依頼する(数十MHz 以上の発振が重畳していることがあり、見落としがちである)。

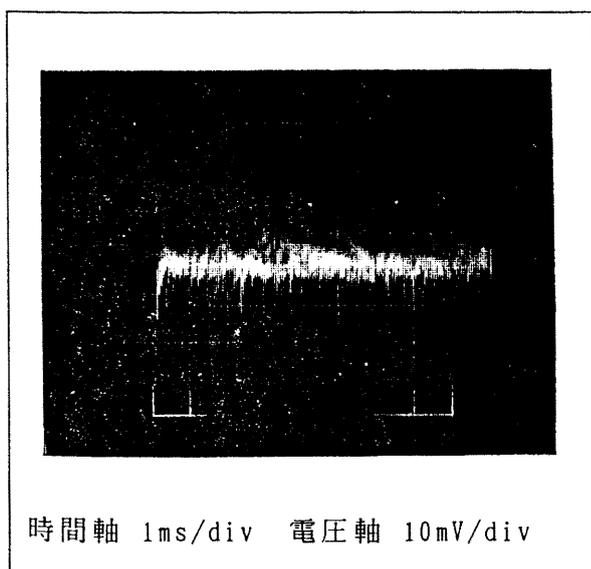


図 5-6 pole zero 未調整  
<補償不足>

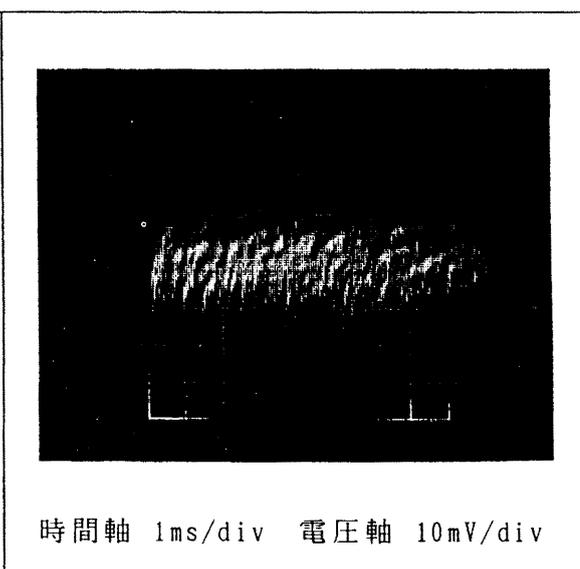


図 5-7 pole zero 未調整  
<過補償>

### 3) バイアス電流の確認

- ① 設置時に、高圧を印加した時と印加して無い時、それぞれについてテスターで検査用の端子<sup>1)</sup>の電圧を測っておく。
- ② この電圧の差を、メーカーによる抵抗値で除した値が、検出器結晶の漏れ電流である。
- ③ 点検時には漏れ電流を測って設置時の値と比較し、変動を記録する。
- ④ 異常があった時は高圧印加を中止し、メーカーに連絡する。

## 5. 2. 2 高圧電源

出力電圧の極性を、表示灯によって確認する。又、印加電圧は徐々に上げる。高圧電源には時定数 数～数十秒の高圧フィルタが入っているが、ゆっくり操作するのが望ましい。印加電圧は所定の値を越えないようにする。

高圧設定後は常に高圧を入れておくのが一般的であるが、なんらかの理由により電源を切らねばならない時は印加手順を逆に行えば良い。停電や移動などの後にはできるだけ早く電源を復帰することが望ましい。

ここではオシロスコープを使用した高電圧の印加方法について述べる。

### (1) 高電圧の印加

- ① bin 電源、波高分析器、高圧電源、それぞれのスイッチが off、さらに高圧電源に関しては目盛がゼロボルトになっている事を確認してから主電源を入れ、各々のスイッチを on にする。
- ②  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$  または  $^{137}\text{Cs}$  線源を測定し、信号をオシロスコープで観察する（但し電圧をかけないと信号は観測されない事が多い）。
- ③ 前置増幅器の出力端子（図5-3）（線形増幅器へ接続されている場合、その入力端子でもよい）をオシロスコープの入力端子に接続し、input coupling を dc、trigger mode を auto、time/div を  $5\mu\text{s}/\text{div}$ 、Volt/div を  $2\text{V}/\text{div}$  にして、観察する。
- ④ H.V. ヘリポットのロックを外し、始めはゆっくりと回転させ電圧を上げる（粗調整の切り替えスイッチと微調整が別々になっている型は、先に微調整を上げる。）。検出器と線源の距離は、dead time が 5% 程度以下になるよう調節する。
- ⑤ この時、オシロスコープの CRT を見ながら操作し、信号が観察できる状態を保つ。電圧の上げ方が早過ぎて、見えなくなった場合は上げる操作を一時中止し、数秒間待って再び信号が観察出来る様になってからこの操作を続ける。

---

1)用意されていない製品もある。

- ⑥ 急激に電圧を上げすぎて測定が一時停止する状態を可能な限り避ける。ある程度電圧が上がるにつれ（～300V）、起こりにくくなる。
- ⑦ 電圧が 1000V 程度になったら、今度はヘリポットを見るようにし、所定の電圧まで上げて目盛りを合わせ、ロックする。所定の電圧を越えないこと。
- ⑧ 電源の立ち上げが済んだら、そのままの状態ですら、2～3時間放置し装置が安定するのを待つ。通電してすぐに線形増幅器等の設定をしても再調整する必要がある。

5. 2. 3 線形増幅器（主増幅器）

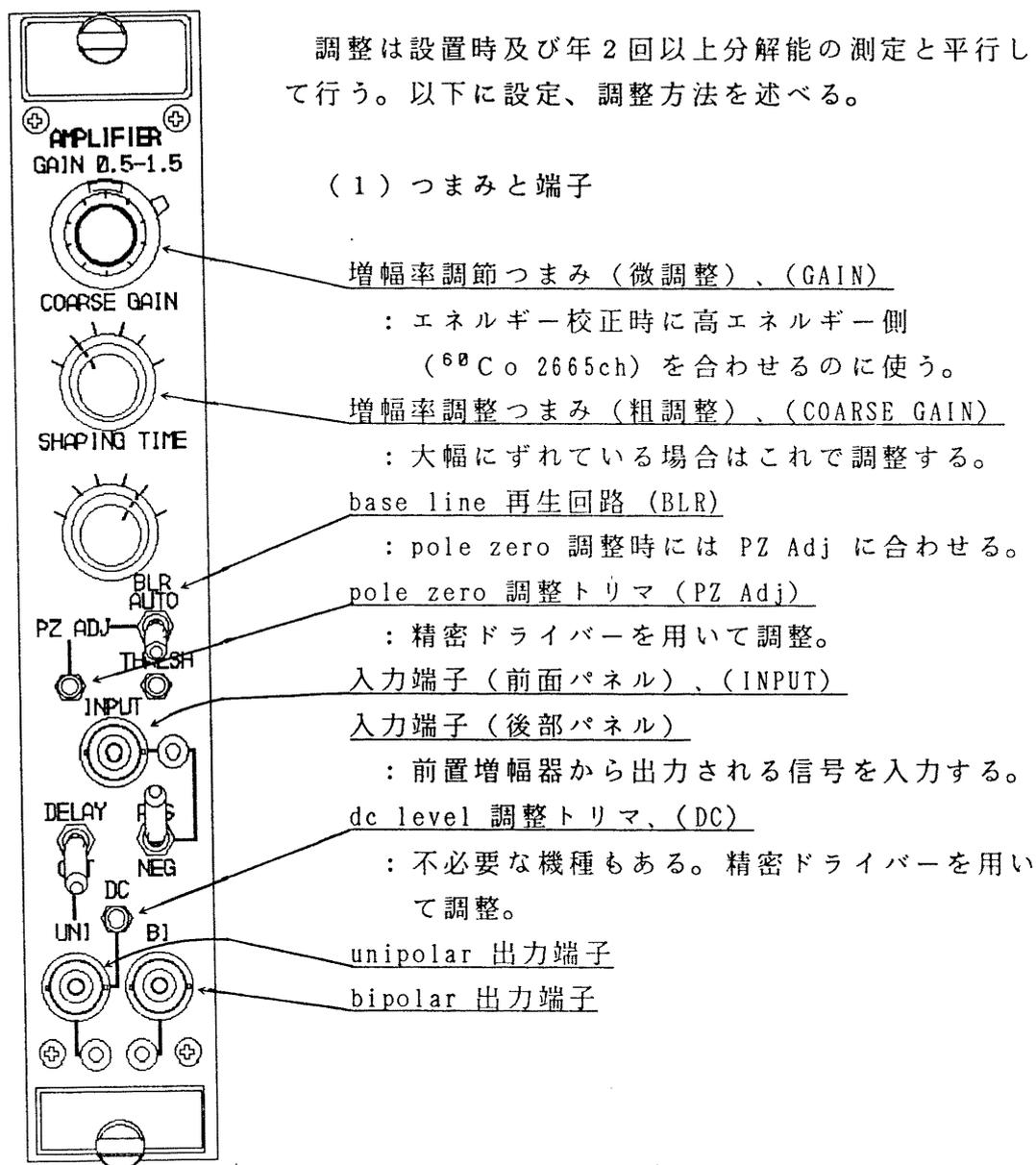
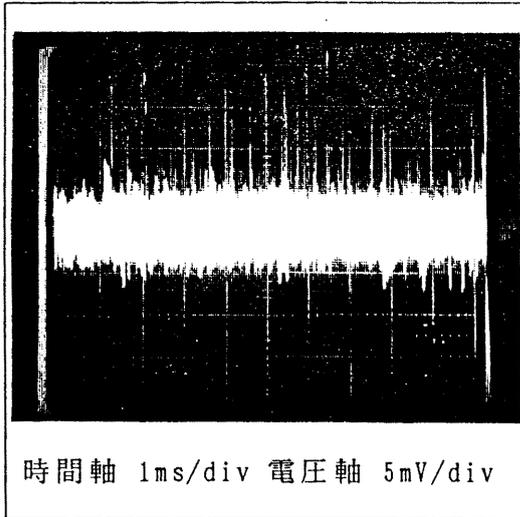


図 5 - 8 線形増幅器  
の一例

## (2) dc level の調整

- ① オシロスコープの input impedance を  $1M\Omega$  にする。
- ② 線形増幅器においては unipolar と bipolar の2つの出力端子があるが (図5-8 参照)、一般的には unipolar からの出力が測定に用いられるので、これをオシロスコープに接続する。



- ③ trigger mode を auto にする。
- ④ input coupling を GND にする。
- ⑤ CRT 上に水平の輝線が現れるので、vert position つまみで CRT 中央水平線 (0V) に中心を合わせる。
- ⑥ input coupling を dc にし、入力信号を表示する。
- ⑦ Volts/div 及び time/div を適当に調節する。(縦軸は 5mV/div 程度 また横軸は 1ms/div 程度で観測でる。図5-9)

図5-9 dc level の調整

- ⑧ この時、信号の中心が ⑤ で合わせた中央の水平線よりずれていたら、線形増幅器側の dc level 調整トリマ (図5-8) を精密ドライバーを用いて調整し、中心を合わせる。

## (3) 出力の観察

- ①  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$  または  $^{137}\text{Cs}$  線源を、エンドキャップ上 25cm 程度離して測定し、検出器と線源の距離を ADC の dead time が 5% 程度以下になるよう、線源の強度に応じて調節する。
- ② 線形増幅器においては unipolar と bipolar の2つの出力端子があるので、オシロスコープの入力端子にそれぞれの出力端子を接続し、信号が図5-10 の unipolar 及び 図5-11 の bipolar の波形になっていることを確認する (縦軸は 2V/div、横軸は  $5\mu\text{s}/\text{div}$  程度で観察する)。
- ③ 図のような信号が観測できない時は、線形増幅器またはオシロスコープの故障、設定ミスが考えられる。dc level、pole zero、時定数を再調整しても信号に異常が見られるようであればメーカーに修理を依頼する。

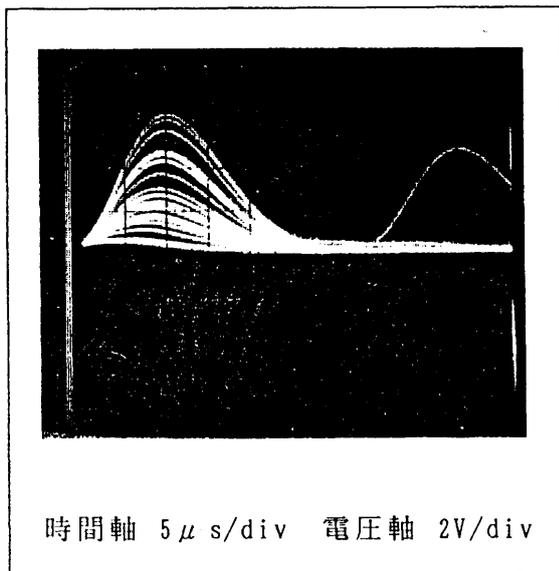


図5-10 unipolarの波形

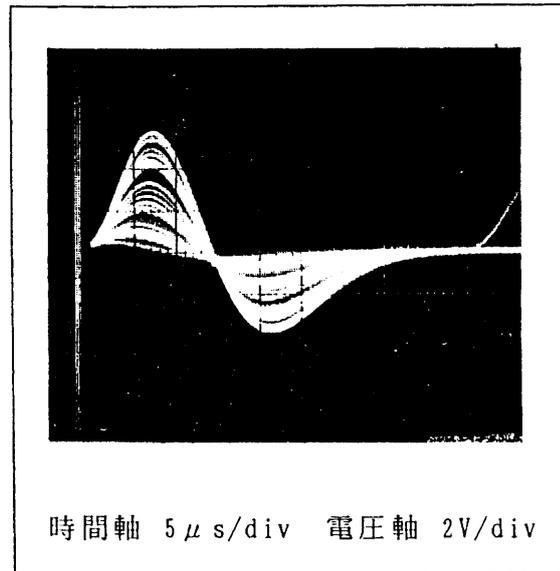


図5-11 bipolarの波形

#### (4) pole zero 調整

- ①  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$  または  $^{137}\text{Cs}$  線源を、エンドキャップ上 25cm 程度離して測定し、検出器と線源の距離は ADC の dead time が 5% 程度以下になるよう調節する。
- ② 線形増幅器からの出力 (unipolar) をオシロスコープに入力し、input coupling を dc に合わせる。
- ③ 線形増幅器のベースライン再生回路 (BLR) のスイッチ (図5-8) を pz adj の位置にする。但し、この操作が不要な機種もある。
- ④ 図5-13 に示すような信号を得る。(縦軸は 50mV/div 程度、横軸は 10  $\mu$ s/div 程度で観測する。)
- ⑤ 波形が補償不足 (図5-14、図5-15) または補償過多 (図5-16、図5-17) の状態であれば、pole zero 調整トリマ (pz adj 図5-8) を精密ドライバーを用いて調整し、正常な状態 (図5-12、図5-13) にする。
- ⑥ 調整後、ベースライン再生回路のスイッチを pz adj から auto の状態へ忘れずに戻して置く。

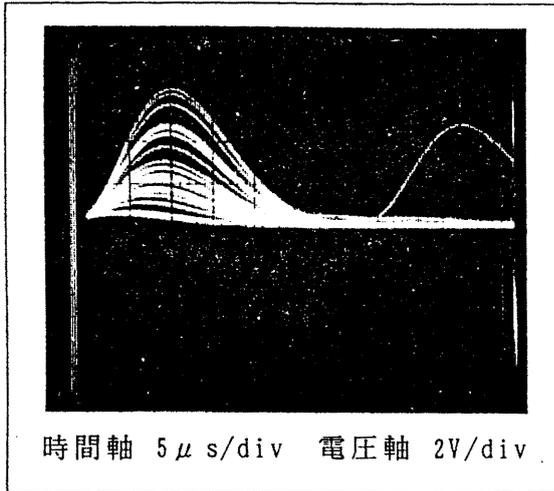


図 5 - 1 2 適正な波形 - 全景

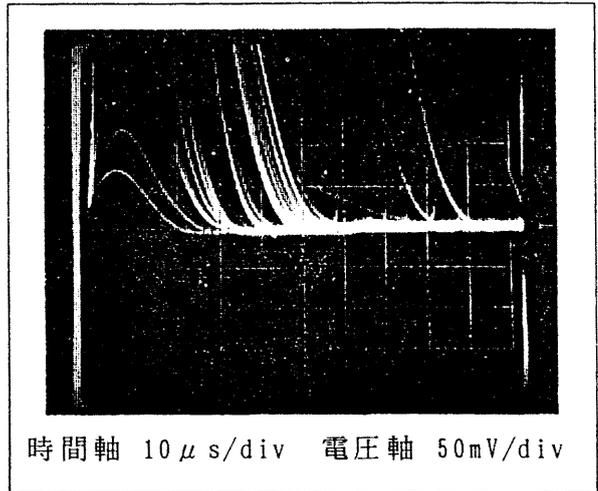


図 5 - 1 3 適正な波形 - 拡大

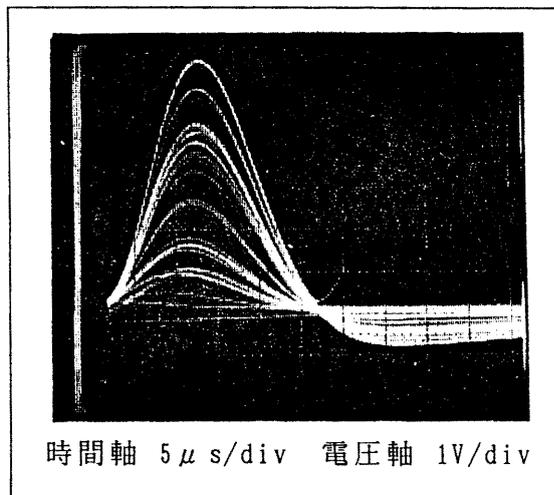


図 5 - 1 4 補償不足 - 全景

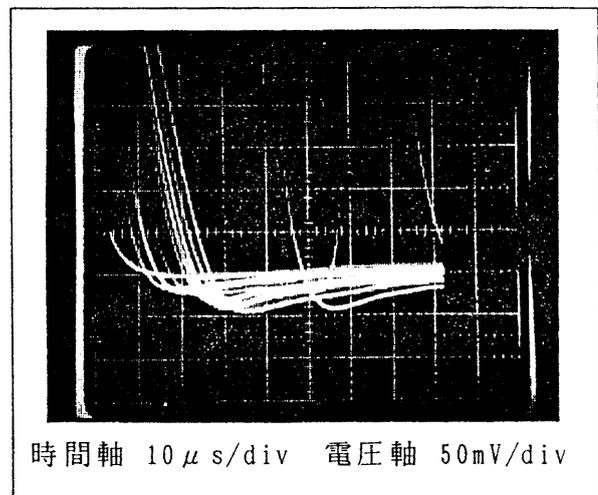


図 5 - 1 5 補償不足 - 拡大

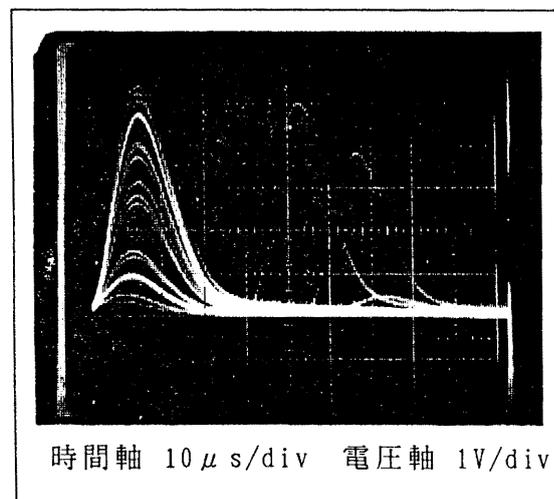


図 5 - 1 6 補償過多 - 全景

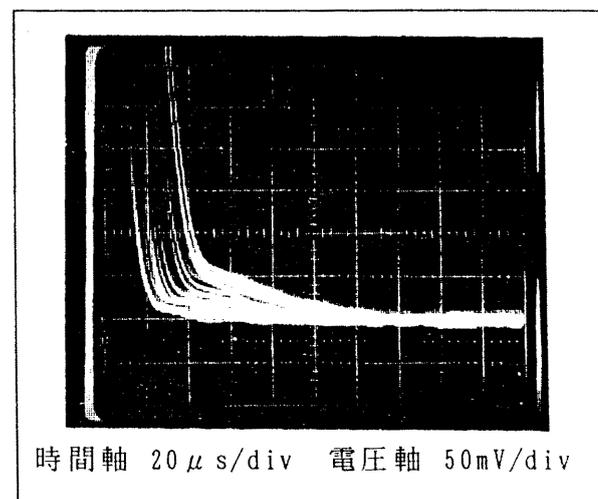


図 5 - 1 7 補償過多 - 拡大

#### (5) 増幅率の調整 (エネルギー校正)

A D C の base line (または zero) を調節してエネルギー校正式を上下へ平行移動し、線形増幅器の増幅率を変える事によってその傾きを調節する。

- ①  $^{57}\text{Co}$  及び  $^{60}\text{Co}$  の密封線源を、エンドキャップ上 25cm 程度離して測定し、検出器と線源の距離は ADC の dead time が 5% 程度以下になるように調節する。
- ② 線形増幅器の unipolar 端子と波高分析器 A D C の入力端子とを接続する。
- ③ 線形増幅器の増幅率粗調整 (図 5-8) と増幅率微調整 (図 5-8) を操作し、チャンネル幅がおおよそ 0.5keV/ch となるようにする。(4000 チャンネルでフルスケール 2000keV とした場合)
- ④ 波高分析器に信号を取り込みながら、線形増幅器の増幅率微調整つまみを操作して  $^{60}\text{Co}$  1332.5keV のピーク位置を 2665ch に合わせる。
- ⑤ 次に A D C の base line (0 adjust) のつまみを用いて、 $^{57}\text{Co}$  122keV のピーク位置を 244ch に合わせる。
- ⑥ ③の設定が狂うので、上記の2本のピークを交互に、徐々に所定のチャンネルに合わせて行く。
- ⑦ 線形増幅器の増幅率調節つまみは、A D C の base line つまみに比べてピーク位置の移動量が大きいため注意する。
- ⑧ 尚、精密なエネルギー校正式はデータ解析の際に求める。(9.2 参照)

#### (6) 時定数の選定

特に理由がなければ検出器メーカーの指定値を用いる。通常、最適値は 2~6 $\mu$ s 程度である。

## 5. 2. 4 波高分析器

波高分析器には、線形増幅器のようにスペクトルの解析計算に敏感に反映する調整箇所はない。下記の通り正しく設定して使用する。パソコンを組み合わせる使用するパソコンMCAと、一体型MCAでは、ADC以降の接続形態が異なる。

### (1) ケーブルの接続

パソコンMCA：線形増幅器の出力をケーブルでADCの入力に接続し、ADCの出力をスペクトルメモリーの入力端子に接続し、スペクトルメモリーの出力をパソコンのインターフェイスへ接続する。

ADC以降は普通パラレル信号用ケーブルが使われる。

一体型MCA：線形増幅器の出力を信号用ケーブルでADC入力に接続し、計算機へのデータ転送用ケーブルを接続する。パラレル信号用のケーブルを用いるものとシリアル信号用ケーブルを用いるものがある。

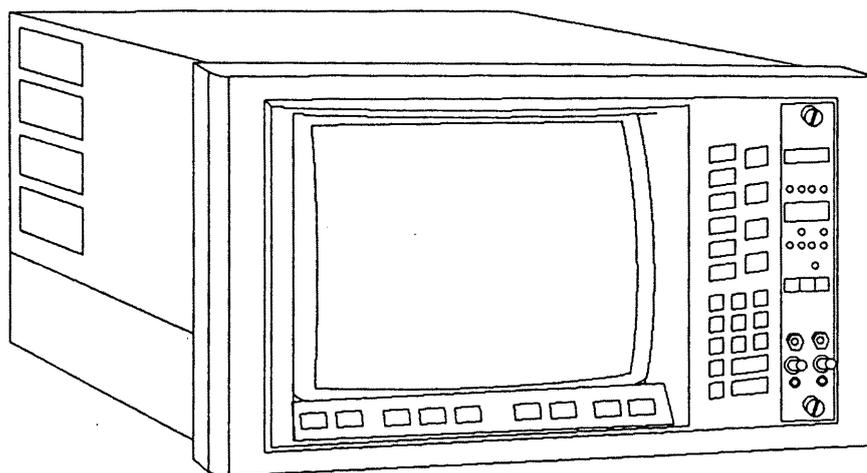


図5-18 一体型MCAの一例

### (2) ADC IN

線形増幅器からの出力を信号用ケーブルでADCの入力に接続する。

### (3) ULD の設定

- ①  $^{60}\text{Co}$  の密封線源をエンドキャップ上 25cm 程度離して測定し、検出器と線源の距離を ADC の dead time が 5% 程度以下になるよう調節する。
- ② 正しくエネルギー校正し、測定中のスペクトルの高エネルギー端を観察する。
- ③ ULD 調節用のヘリポットを調節し、スペクトルの右側が切り落とされて0になるようにし、その位置を移動させて画面のすぐ外 (4096チャンネルより少し高エネルギー側) へ出す。

(4) L L D の設定

- ①  $^{60}\text{Co}$  の密封線源を、エンドキャップ上 25cm 程度離して測定し、検出器と線源の距離を A D C の dead time が 5% 程度以下になるよう調節する。
- ② 正しくエネルギー校正し、測定中のスペクトルの低エネルギー端を観察する。
- ③ L L D 調節用のヘリポットを調節し、スペクトルの左側が切り落とされて 0 になる位置を移動させ、35~40keV 付近に設定する。
- ④ 必要とするスペクトルを切り落とさないように、L L D は 40keV 以上にしない。

(5) BASE LINE の設定

設定方法は線形増幅器の節の増幅率調整の所に記載されている。

(6) CONVERSION GAIN の設定

4096 または 8192 で使用する。

(7) GATE について (A D C への入力を制御する GATE)

off で使用する。または GATE 入力端子に何も接続せず、anti モードで使用する。

(8) B L R の設定

計数率が特別高くなければ (1000cps 以上) OFF にする。

(9) DIGITAL OFFSET の設定

全て OFF で使用する。

(10) A M P I N について

内蔵の増幅器を用いない場合 OFF にする。

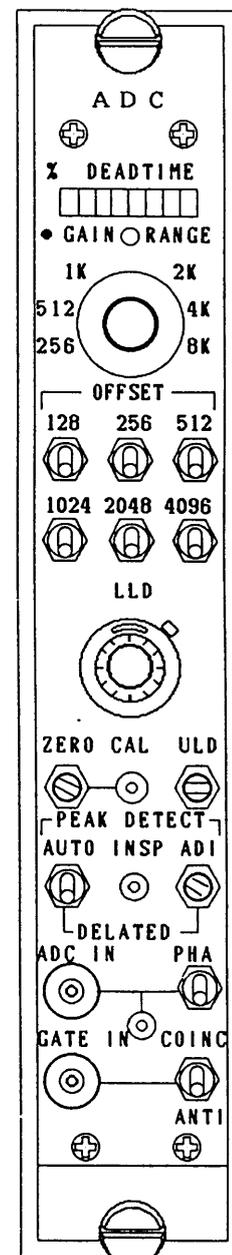


図 5 - 1 9 A D C の一例

### 5. 3 標準線源スペクトルの解析

標準線源を測定したスペクトルから、機器の基本的な性能を表わすエネルギー分解能等の幾つかの量を求める方法を述べる。以下の試験を年2回以上、及び適宜（停電を復帰した時等）行う。

#### 5. 3. 1 標準線源の測定

エンドキャップの中心軸上 25cm に 37kBq 程度の  $^{60}\text{Co}$  標準線源をセットし、1332.5keV ピークの面積が 20000 カウント程度になるまで (2000keV/4000 channel の条件下で) 測定する。ピークの高さは 4096ch の場合、およそ 6000 カウントになる。

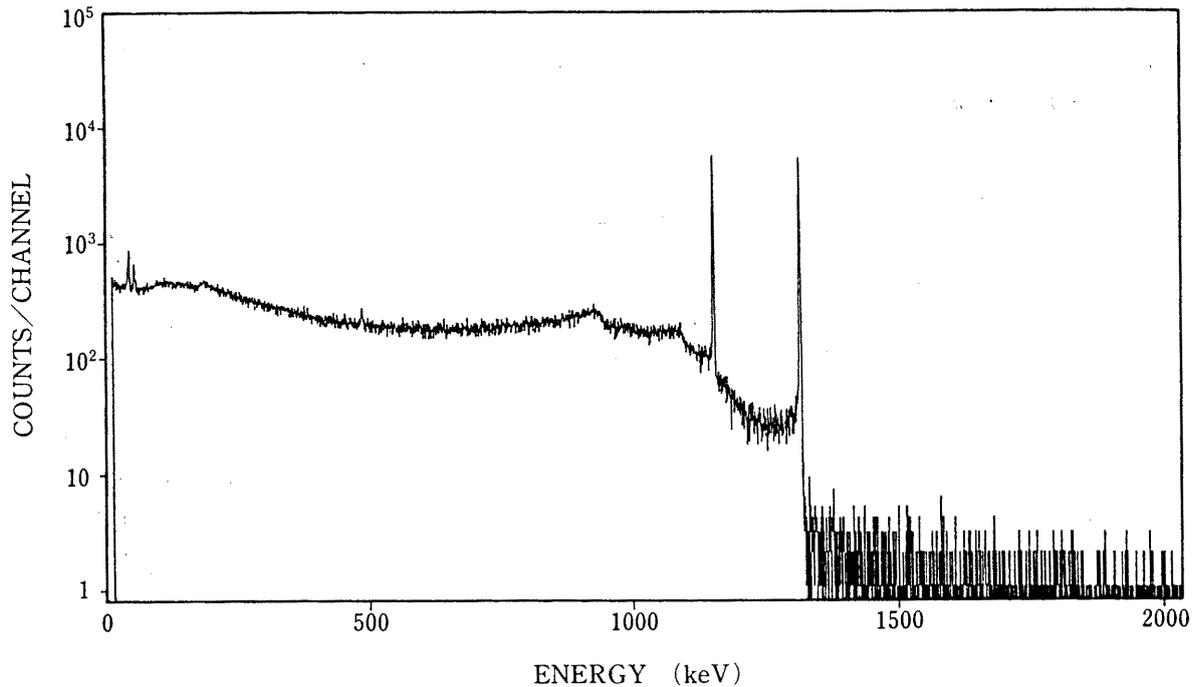


図 5 - 2 0  $^{60}\text{Co}$  のスペクトル

### 5. 3. 2 関数適合〔計算機を用いる〕

1333keV ピークを関数適合する。詳細は 9. 3. 1 参照のこと。

### 5. 3. 3 1333keV ピークの中心

上記の関数適合計算の結果として得られる。

### 5. 3. 4 エネルギー分解能等〔計算機を用いる〕

1.  $^{60}\text{Co}$  の 1333keV ピークを関数適合する。詳細は 9. 3. 1 参照のこと。

2.  $^{60}\text{Co}$  の 1172keV ピークの中心を求め（関数適合でも一次微分ゼロクロス法（9章）でもよい）1333keV ピークの中心と併せてエネルギー校正式（一次式）を作り、1333keV ピークの FWHM の単位をチャンネルからエネルギーへ換算する。

3. 同様に FWTM（ピーク中心の 1/10 の高さでの、ピークの幅）を計算する。

4. 良い検出器は FW.01M（ピーク中心の 1/100 の高さでの、ピークの幅）を計算することができ、FWHM の 3 倍以下である。

5. 遮蔽体の中へ検出器を入れて測定すると分解能が低くなることもある（対地容量のためと思われる）。

6. 検収の時は ADC の変換利得を最高にし、フルスケール付近で測定するので通常の使用状態よりも条件が良くなる。

### 5. 3. 5 ピークの非対称

一般的にピークは中心の左右で幅が異なり、FWTM における差で表現される。詳細は 9. 3. 3 または 9. 3. 4 参照のこと。

### 5. 3. 6 ピーク・コンプトン比

関数適合で得られたピーク値（最大計数値でもよい）を、1040~1096keV の区間の計数の平均値で除して得る。

### 5. 3. 7 ピーク面積

ガウス関数で表現されている部分の面積とし、テーリングの部分と段差はピーク面積に含めない。コベル法（9. 3. 6 参照）で計算してもよい。

### 5. 3. 8 25cm 相対効率の計算

検出器から 25cm 離れた位置に  $^{60}\text{Co}$  の点線源を置いて 1333 keV の  $\gamma$  線を測定した時、3 インチ  $\phi$   $\times$  3 インチ長の NaI 検出器のそれとの比（25cm 相対効率はピーク効率  $\varepsilon_{1333}$  (count/ $\gamma$ )<sup>1)</sup> に 83333<sup>2)</sup> を乗じて得られる。

$$25\text{cm 相対効率}(\%) = 83333 \times \varepsilon_{1333}$$

FWHM、ピーク・コンプトン比、FWTM における非対称、FWTM

FW.01M、段差、テイリング等は定期的に測定し（年 2 回以上）記録する。

1)資料 F：用語集 3 効率 参照。

2) $^{60}\text{Co}$  の密封点線源から 25cm の距離における 3 インチ  $\phi$   $\times$  3 インチ長の NaI 検出器の 1333keV  $\gamma$  線に対するピーク効率は  $1.20 \times 10^{-3}$  である。

## 5. 4 直線性

一般的にスペクトロメータには、エネルギーとチャンネルの間に正確な比例関係が望まれる。特にGe半導体スペクトロメータは分解能が優れているために、比例関係の良否によって使い易さが変わる。チャンネルとエネルギーの比例（正確には1次式）関係を直線性と言う。

直線性には積分直線性と、微分直線性の2種類があり、積分直線性が悪いとエネルギーとチャンネルのズレ、即ちピークチャンネルのズレが起こる。微分直線性が悪いと平坦であるべきスペクトルに凸凹が現われる。

### 波高分析器の動作

波高分析器の動作について下図を用いて述べる。左上からボールが打ち出され、その強さに応じて遠くへ飛んだり近くで落ちたりして、下の部分にたまっていく。

γ線スペクトロメトリーにおいては、ボールを打ち出す力がγ線のエネルギーに相当し、下の溝（Channel!）がスペクトルメモリーに対応する。

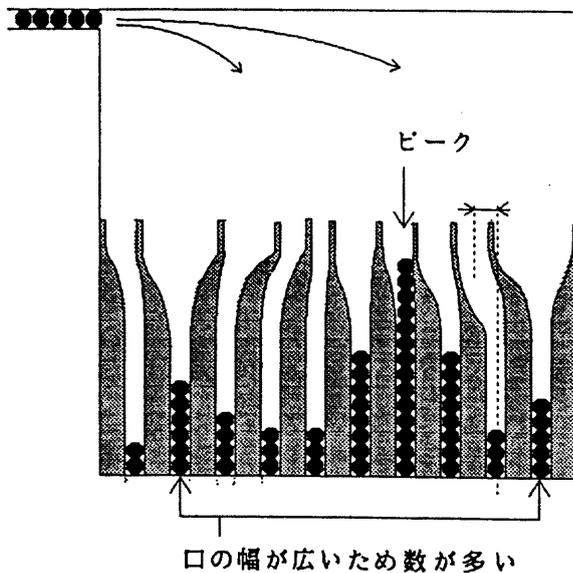


図5-26 ADCの機能

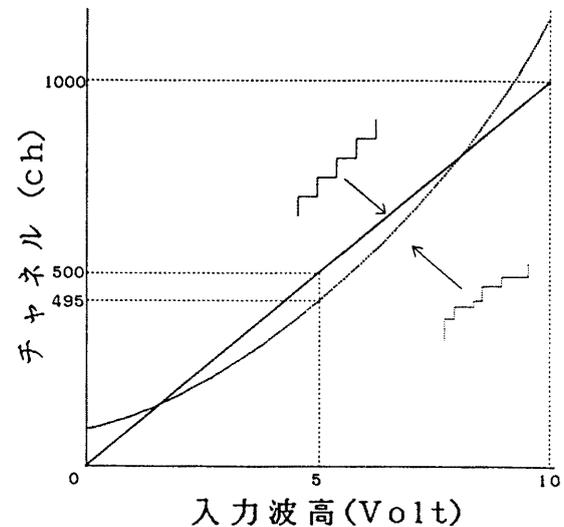


図5-27 入力波高とチャンネルの関係

いま、多数のボールを、届く位置を変えながら（厳密に同じ幅で、少しずつ）、打ちだしたとする。その場合、ボールの受け口の幅が全て同じであれば、溝にたまるボールの数は同じになる。しかし、受け口の幅が他より広いものがあれば、その溝にはボールが多くたまる。

この、各溝の受け口の幅の均一性が微分直線性に相当し、また、溝の中心と、受け口の中心とのズレが（積分）直線性に対応する。

なお図を見ても分かるように受け口の幅のばらつきと中心のズレとは関係があり、線形増幅器の増幅率に歪みがあれば、微分直線性も悪くなる。

#### 5. 4. 1 積分直線性のチェック

Ge半導体検出器を新たに設置した時や、日常業務に於てエネルギー校正曲線の係数に異常が生じた時などには積分直線性を調査する。

積分直線性は測定の対象になるエネルギー範囲に適当に散らばったエネルギーの $\gamma$ 線を放出する標準線源を測定し、エネルギーとピーク中心チャンネル（同時にFWHMも調査するとよい）の直線関係をグラフ化してチェックができる。

エネルギーとピーク中心チャンネルの関係がずれた実際の例を 図5-28 に示す。これは、測定系の設定ミスにより生じた例であり、測定したピーク中心チャンネルと計算値との間に大きな差がある。

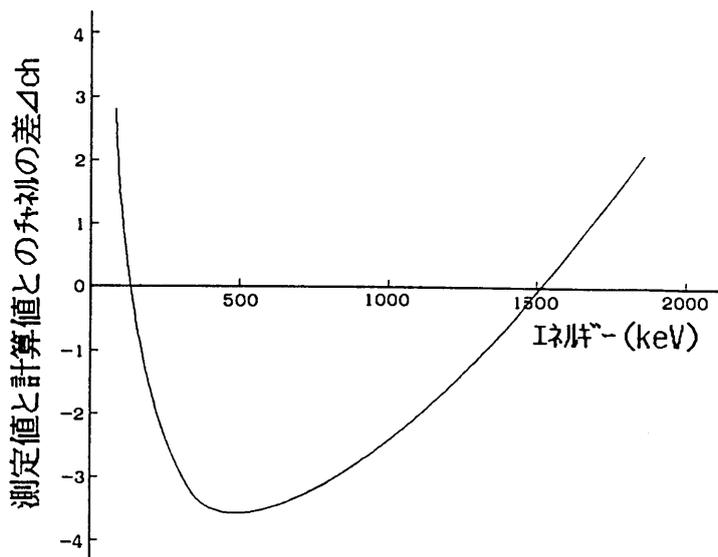


図5-28 エネルギーとチャンネル値の偏差

#### 5. 4. 2 微分直線性のチェック方法

測定スペクトル上に普段は見られなくて、かつ放射能に起因するとは考えられない段差や凸凹が発生した時には微分直線性を調査する。<sup>1)</sup>

以下のチェックで、明らかに修理しなければならないか否かを調べることができる。また、詳しく調べるには、計数が  $10^5$  カウント/ch 以上必要である。

1. 時間とともに波高値が増加する特殊なパルサ（スライディングパルサあるいはランプジェネレータ）の出力を測定して、まったく平らなスペクトルが得られるかどうか調べる。
2.  $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等、コンプトン連続分布が広く、そこに他のピークが無い核種のスペクトルの平坦な部分のみを拡大して測定し、調べることが出来る。操作手順を以下に述べる。
  - ①  $^{60}\text{Co}$  の線源を測定する。
  - ② 線形増幅器と A D C の間に biased amplifier を入れ、その LLD、線形増幅器の gain を調整して、コンプトン連続分布で計数値が平坦になっているエネルギーの範囲（約 550～700keV）を、0～4095 ch に広げる。
  - ③ A D C の ULD で 4095 ch を越える大きさの信号を除去して dead time を減らしてから、不感時間が 10% 程度以下の状態になるように線源位置を調節する。計数値が  $10^5$  カウント/ch になるまで測定を行う。
  - ④ 全チャンネルの計数値が統計変動の範囲内で均一であることを確かめる。

#### 5. 5 液体窒素補給に関する注意と消費率

##### (1) 液体窒素補給の注意

1. 液体窒素は液体窒素容器の容量の 1/3 以下にならないように補給する。この場合消費量を見て決めるのではなく、あらかじめ補給日（1週間に1度）を決めておくと、入れ忘れがない。
2. 液体窒素容器がいっぱいになるまで補給する。縦型検出器については、使用していない補給口から溢れ出すのを確認する。
3. 毎回消費量を記録する。これにより液体窒素容器の真空度がチェック出来る。

---

1) 現在使われている A D C のほとんどはウィルキンソン式と呼ばれるものであり、微分直線性が非常に優れているので、故障していない限り実用上問題となることはほとんどない。但し A D 変換を高速化するために単純なウィルキンソン型でない製品が発売されてきており、この場合は正しく調整されていないと微分直線性に問題が出て来る可能性がある。

4. 補給直後は液体窒素が沸騰しマイクロフォニック雑音が発生しやすいので、30分程経過後測定を始める。
5. 高純度Ge半導体検出器の場合、一ヶ月以上使用しないのであればその間、液体窒素を補給しなくても良いが、使用を再開するときは空の状態の液体窒素容器に液体窒素を入れる事になり、液体窒素容器自身の冷却のためにかなり消費するので、液体窒素容器の容量より余分な量(数ℓ)を用意しておく。
6. 液体窒素容器を空にしたら、室温になるまで冷却を再開しない。
7. 補給容器にセットしたクライオジェットと縦型検出器の間をシリコンゴムのパイプでつないで補給すると、ゴムが冷やされ固くなり割れ易いので、注意して使用すること。
8. 縦型検出器の場合、空気中の水分がパイプ等の中に凍り付き、スムーズに入らなくなる場合があり、重量を測る等液体窒素が十分入ったかどうかよく確認する必要がある。

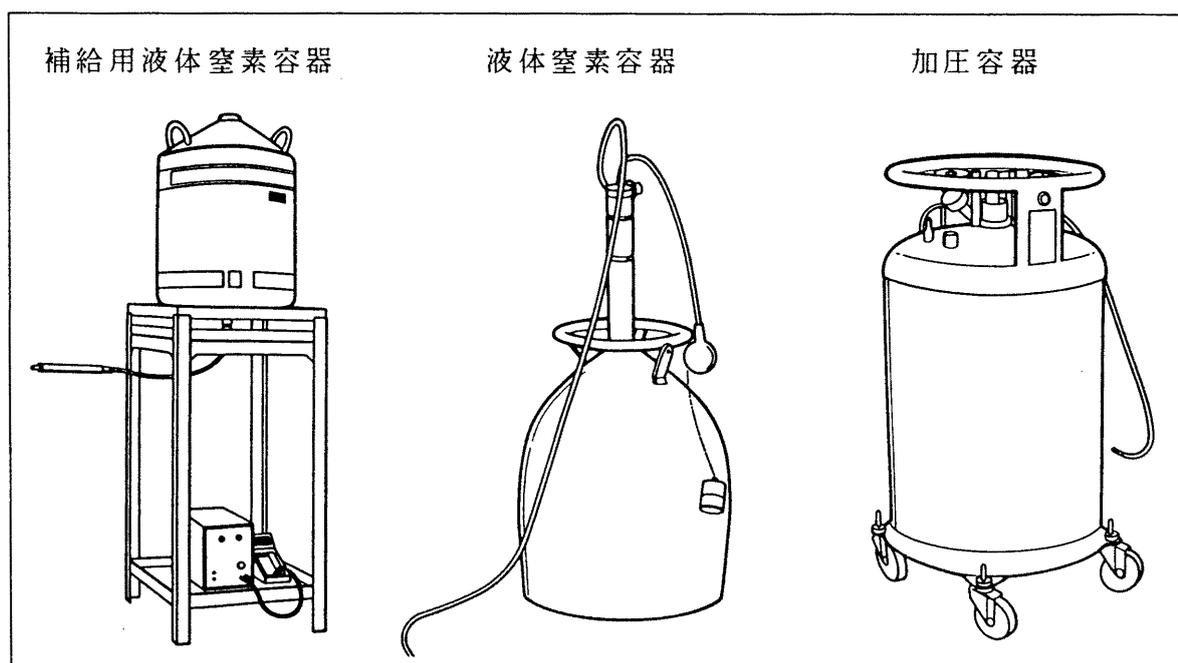


図5-29 液体窒素補給容器

## (2) 液体窒素取扱の注意

1. 液体窒素容器の注入口や補給用液体窒素容器のガス抜き口を開けておく。密封すると気化した窒素で圧力が上昇し破裂することがある。
2. 液体窒素にはなるべく触れない様にし、補給中は危険防止のため皮手袋等を着用するのが望ましい。軍手など吸水性の素材のものを使用すると凍傷をおこすことがある。
3. 足に掛かるとくつ下の中に入り込み危険であるので注意する。
4. 冷却中の金属(液体窒素容器の注入口等)には絶対にさわらない。凍傷になったり、皮膚が凍り付き怪我をする。

5. 補給に使用したビニールパイプなどは硬く凍っているので、無理に注入口から取り外そうとすると割れたり折れるので、柔らかくなるまで待つ。ビニールパイプを注入口から急いで取り外したい時はヘヤードライヤー等を利用して暖める。

### (3) 液体窒素の消費率について

デュワービン中の液体窒素（比重 0.8）は普通、1日当り 1～2.5kg 減少する。2.5kg を越えた時はクライオスタットの真空を引き直す等の処置をした方がよい。購入してから 1～2 年の内に段々と消費量が増えて来る物が多い。急に 3kg を越えたような場合（エンドキャップが冷たくなったり、水滴や霜が付く等のことある）は直ちにメーカーに連絡して処置する。

## 第6章 標準線源とピーク効率

試料を測定した結果ピーク面積が得られる。これを $\gamma$ 線の数に換算する比例定数がピーク効率である。

Ge半導体検出器による環境放射能分析において、データが合わない等のトラブルの多くはピーク効率が正しく求められていない事によるものである。通常ピーク効率は使用者自身が標準線源を正しく測定し、測定結果を効率計算プログラムに入力して求める。一般には $\gamma$ 線のエネルギーとピーク効率の関係を関数式で表わし、ピーク効率曲線とする。

エネルギーとピーク効率の関係式を求めるのは年一回以上行うのが望ましいが、別の方法で効率に変化が無い事を（低エネルギー領域に注意する）確認しても良い。

今までに容積試料のピーク効率を測定する方法がいくつか行われており、本マニュアル改訂に当たって以下の方法について比較検討した。

1. 容積線源セット（高さが数種類、母材1種）を用いる方法
2. 基準容積線源セット（KCl等、高さが数種類）と混合点線源を用いる方法
3. 点線源効率積分法
4. 容積線源セット（高さが数種類、比重の異なる数種の母材）を用いる方法

下記に述べた各方法の特徴を比較すると 1 の方法が本マニュアルに適していると考えられる。

- 1：入手できるのは精度数%程度の線源セットである。使用する線源のエネルギー範囲に付いて、いわゆる幾何学的効率がチェックできる。自己吸収の補正は理論的な計算で行われる。この補正は精度が高く、信頼できる。
- 2：安価で正確な標準線源で実施できる。使用する線源のエネルギー範囲において同一の幾何学的効率を適用している。そのため誤差は多くの場合数%以下であると考えられるが、 $^{40}\text{K}$ の $\gamma$ 線エネルギー以外で幾何学的効率がどのようになっているか、確認出来ない。
- 3：多数の注意深い測定が必要であり、データ処理が容易ではない。
- 4：多数の標準容積線源が必要で高価である。限られた素材以外では均一な容積線源を作成するのは容易ではない。信頼出来る比重の異なった容積線源セットは入手困難なので、自己吸収は比重の異なった線源の実測値から補間するよりも理論的な計算で補正する方がむしろ信頼できる。

## 6. 1 標準線源<sup>1)</sup>

厚さの異なった（5～50mm 約 10mm 毎）多核種混合容積線源を1セット用意する。線源容器には測定容器とおなじものを用いる。標準容積線源の厚さの誤差は0.5mm 以下、核種と放射能は下記の通りとする。

表6-1 測定日における標準容積線源1個当りの放射能の目安（Bq）

| $^{109}\text{Cd}$ | $^{57}\text{Co}$ | $^{139}\text{Ce}$ | $^{203}\text{Hg}$ | $^{113}\text{Sn}$ | $^{85}\text{Sr}$ | $^{137}\text{Cs}$ | $^{54}\text{Mn}$ | $^{59}\text{Fe}$ |
|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 3000              | 200              | 100               | 300               | 300               | 400              | 300               | 600              | 1000             |

この表の数倍までの強さで十分である。dead time が 5% 以下になるようにする。

60keV 付近の低エネルギーも測定対象とする場合は、 $^{241}\text{Am}$  300Bq を加える。また、 $^{203}\text{Hg}$ 、 $^{113}\text{Sn}$  を使用できない場合（母材が寒天の時など）は  $^{51}\text{Cr}$  600Bq で代える。1500keV 以上の様子を知るためには、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{88}\text{Y}$  を加えるが、サム効果があるので、参考データとするか補正<sup>2)</sup>を行ってからデータを使用する。

標準容積線源の母材の種類として、寒天、アルミナ、プラスチック等がある。標準容積線源は日本アイソトープ協会から購入するが、特別な場合には自作することもできる。

## 6. 2 測定

1. 測定時間は対象となる全てのピーク面積の計数誤差が 2% ( $3\sigma$ ) 以下になるまでとする。（～70000 秒）
2. また標準線源は試料と同じ位置、同じ包装で測定するようによく注意する。線源を包むポリ袋も試料と同じにする。
3. 半減期の短い核種が含まれているので、購入したら減衰しないうちに測定する。標準線源から放出される  $\gamma$  線が、遮蔽体の鉛に当たって K X 線 ( $K\beta 1=84.936\text{keV}$ ) を発生し、 $^{109}\text{Cd}$  (88.0keV) のピークを妨害する。鉛の K X 線の影響を取り除くため、標準線源測定時には厚さ 5mm 程度の銅板で検出器と線源の外側を囲って補助遮蔽する。 $\gamma$ -X 型検出器を用いるにもかかわらず、X 線領域を測定の対象としない場合は、線源から放出される X 線とのサム効果の影響を少なくするため、試料も標準線源も検出器のエンドキャップの上に厚さ 0.5mm の銅板を被せて測定する。また  $^{139}\text{Ce}$  等電子捕獲による X 線の放出に注意する。

1) 水溶液標準容積線源を測定する場合は、Ge半導体検出器や遮蔽体の汚染に十分気を付ける必要がある。測定容器が密栓されているか、壊れていないか、ポリ袋が破れていないか等に特に注意する。

2) 6. 5 サム効果の補正 参照。

### 6. 3 ピーク効率曲線の作成〔計算機を用いる〕

対象核種の正味ピーク面積から 1秒当りのカウント数 CPS を求める。この場合標準線源の検定値  $Bq$  または  $\gamma$  線放出率 ( $\gamma/S$ ) の値を測定日に減衰補正しておく。  $Bq$  表示の場合は放出比から  $\gamma/S$  を求めておく。測定値から求めた計数率 (cps) を  $\gamma$  線放出率 ( $\gamma/S$ ) で除して対象とするエネルギーのピーク効率を求める。両対数グラフの縦軸にピーク効率、横軸にエネルギーをとり、計算したピーク効率をプロットする。

面積計算に用いるピーク領域は、スペクトルを拡大表示するかプロットして観察し、決める。

図 6-1 にピークとベースライン領域の取り方、表 6-2 に分解能 1.9keV 程度の検出器について、2000keV/4000チャンネルにエネルギー校正されているときの、正味ピーク面積をコベル法 (9.3.6 参照のこと) で計算する場合の領域 (チャンネル) の取り方の例を示す。

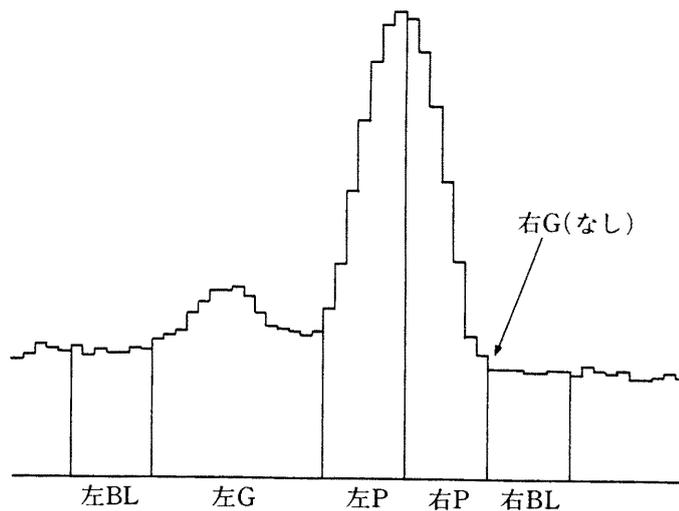


図 6-1 ピーク、ベースライン領域の取り方

- 左BL、右BL : ピークのベースライン部分を計算するための、  
低または高エネルギー側のベースライン領域。
- 左G、右G : 妨害ピークがあり、計算に用いない低または高  
エネルギー側のベースライン領域。
- 左P、右P : 低または高エネルギー側のピーク領域。

$\gamma$ 線のエネルギーによって計算領域（チャンネル数）を下記の様に変える。

表 6 - 2  $\gamma$ 線のエネルギーと計算領域

| 核種                | エネルギー<br>(keV) | 左 B L<br>(チャンネル) | 左 G<br>(チャンネル) | 左 P<br>(チャンネル) | 右 P<br>(チャンネル) | 右 G<br>(チャンネル) | 右 B L<br>(チャンネル) |
|-------------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| $^{109}\text{Cd}$ | 88             | 4                | 14             | 4              | 4              | 0              | 4                |
| $^{57}\text{Co}$  | 122            | 4                | 0              | 4              | 4              | 0              | 4                |
| $^{139}\text{Ce}$ | 165            | 4                | 0              | 4              | 4              | 0              | 4                |
| $^{203}\text{Hg}$ | 279            | 4                | 0              | 4              | 4              | 0              | 4                |
| $^{113}\text{Sn}$ | 392            | 4                | 0              | 4              | 4              | 0              | 4                |
| $^{85}\text{Sr}$  | 514            | 5                | 0              | 5              | 5              | 0              | 5                |
| $^{137}\text{Cs}$ | 662            | 5                | 0              | 5              | 5              | 0              | 5                |
| $^{54}\text{Mn}$  | 835            | 5                | 0              | 5              | 5              | 0              | 5                |
| $^{88}\text{Y}$   | 898            | 5                | 0              | 5              | 5              | 0              | 5                |
| $^{65}\text{Zn}$  | 1116           | 5                | 0              | 5              | 5              | 0              | 5                |
| $^{59}\text{Fe}$  | 1099           | 6                | 0              | 6              | 6              | 0              | 6                |
| $^{60}\text{Co}$  | 1173           | 7                | 0              | 7              | 7              | 0              | 7                |
| $^{59}\text{Fe}$  | 1292           | 7                | 0              | 7              | 7              | 0              | 7                |
| $^{60}\text{Co}$  | 1333           | 8                | 14             | 8              | 8              | 0              | 8                |
| $^{88}\text{Y}$   | 1836           | 8                | 0              | 8              | 8              | 0              | 8                |

$^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 等の測定値はサム効果のために低くなるので、利用するのであれば補正をする必要がある<sup>1)</sup>。サム効果の補正を行わないならば、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$ の測定値はピーク効率曲線の傾きを知る参考にする。なお、 $^{60}\text{Co}$  1332.5 keV の低エネルギー側に  $^{88}\text{Y}$  のエスケープピークが出るのでそのピークを避ける。

1) 6. 5 サム効果の補正 参照。

(1) 縦軸をピーク効率、横軸をエネルギーにし、効率計算プログラムによってピーク効率を両対数グラフ用紙（サイズは有効数字2桁が読み取れる A3 サイズ程度とする）にプロットする。

300keV ~ 600keV 以上では約 40~45度で右に下がる直線に近い形となる。エネルギーが小さいほど光電効果及び、コンプトン散乱に続く光電効果が起こり易いためピーク効率は大きくなる。200keV 以下では 120keV 辺りを頂点とする上に凸の曲線となる場合が多い。例を 図6-2<sup>1)</sup> に示す。

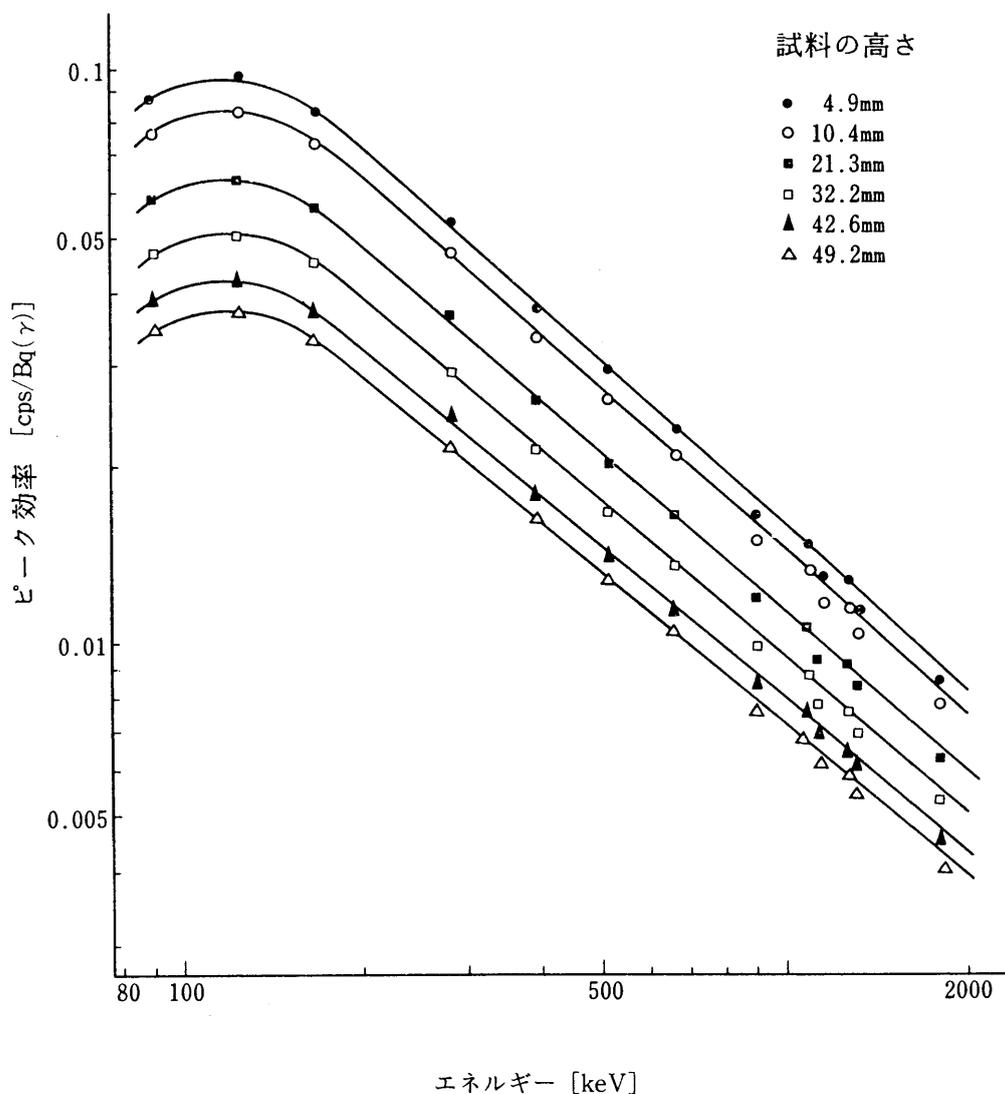


図6-2 厚さごとのピーク効率曲線の例

1) 水溶液標準線源の例である。放射能濃度が均一であり、放射能を変化させないよう測定と希釈を交互に繰り返し測定したことから、測定値はきれいなピーク効率曲線を描いた。<sup>60</sup>Co および <sup>88</sup>Y のデータは、サム効果の補正を加えていない。

標準線源の各厚さ (5, 10, 20, 30, 40, 50mm) 毎に、ピーク効率曲線を開数化する。開数形は Eff を効率、 $E_n$  を  $\gamma$  線のエネルギー (keV) とし、  
 $X = \log (E_n/E_{n0})$  とおいて ( $C_1 \sim C_6$  は定数)、

$$\log (\text{Eff}) = C_1 + C_2 X \quad : E_{n0} < E_n$$

$$\log (\text{Eff}) = C_1 + C_2 X + C_3 X^2 + C_4 X^3 + C_5 X^4 (+ C_6 X^5) \quad : E_n < E_{n0}$$

$\log$  は自然対数

$E_{n0}$  はプロットしたグラフをみて 300keV~600keV から高エネルギー側に続く直線の始点に設定する。よく分からない場合は 400keV にする。

$C_6$  の項は不要である場合もあるが、80keV 以下まで校正する場合や、有感体積の小さな検出器等に対しては必要である。計算は  $\log (\text{Eff})$  と  $X$  を変数にして最小 2 乗法で行う。(エネルギー領域を分けて開数適合するならば、高エネルギー側で  $C_1$  と  $C_2$  を決めた後、低エネルギー側で  $C_3 \sim C_6$  を計算する)

上式を開数サブプログラムの形で書いた例を以下に示す。プログラム言語は HP-BASIC である。

```

3447 St:DEF FNction(REAL A(*),X)
3449! A(*) :Coefficients, fitting parameter
3450!
3456 R=A(1)+A(2)*X
3457 IF X<0 THEN R=R+X*X*(A(3)+X*(A(4)+X*(A(5)+X*A(6))))
3460!
3463 RETURN R
3464 En:FNEND

```

これで、線源の各厚さごとに、任意のエネルギー (80~2000keV) に於けるピーク効率を求めることができる。グラフを見て、曲線が交差していないか、間隔が不自然に変わっていないか等をチェックする。現在入手できる線源のセットでは検定の誤差や線源の不均一性のため、通常は整って揃った曲線群が得られないが、厚さが違ってても本来は曲線の形はあまり変わらない。

$C_1 \sim C_6$  を、厚さを変数としてプロット（図 6 - 3）し、関数化する。関数形は

$$\exp(-C_n) = \alpha_n h^2 + \beta_n h + \gamma_n$$

とする。余程良い線源が入手できない限り、 $C_1$  を除いて滑らかな曲線にはならない。その時は  $C_2 \sim C_6$  は各ピークの値の平均値を用いる。

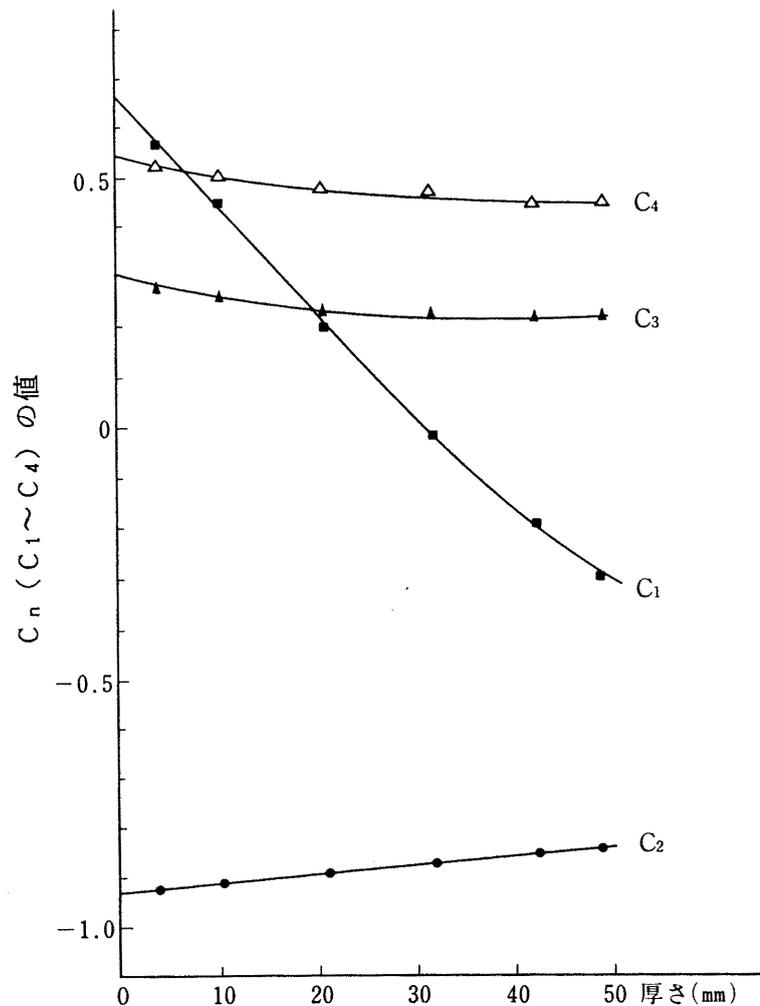


図 6 - 3 定数  $C_1 \sim C_4$  と容積線源の厚さの関係

注 1) 上図の例では  $C_5$ 、 $C_6$  は不要であった。

注 2)  $C_1 \sim C_4$  の縦軸の値は 図 6 - 2 で示したピーク効率曲線を、関数適合した値である。

( 単位 cps / nCi )

(2) ピーク効率測定の確認

測定が正しく行われたか確認のため、各ピークの効率の逆数を厚さ（0 mm～測定容器の高さ）に対してプロットする。

線形のグラフ用紙の、縦軸を各ピークの効率の逆数、横軸を容積線源の厚さにしてプロットすると、ほぼ直線に近い下に凸の曲線となる（上に凸の曲線になったならば測定をやり直すか、または直線を当てはめる）。

図6-4 に例を示す。このピーク効率の逆数と容積線源の厚さとの関係を表わす曲線を関数化する。関数形は効率を  $Eff$  とおいて

$$(Eff)^{-1} = ah^2 + bh + c \quad (h \text{ は容積線源の厚さ、} a, b, c \text{ は定数})$$

を用いる。効率の逆数に対して最小二乗法を適用し、定数  $a, b, c$  を求める。 $a$  はほぼ直線に近い下に凸の曲線であるから小さな正の値となる。

全てのプロットは効率校正プログラムにより自動的に行われるべきであり、また効率データファイルも分析者の検査を経て自動的に更新されるべきである。

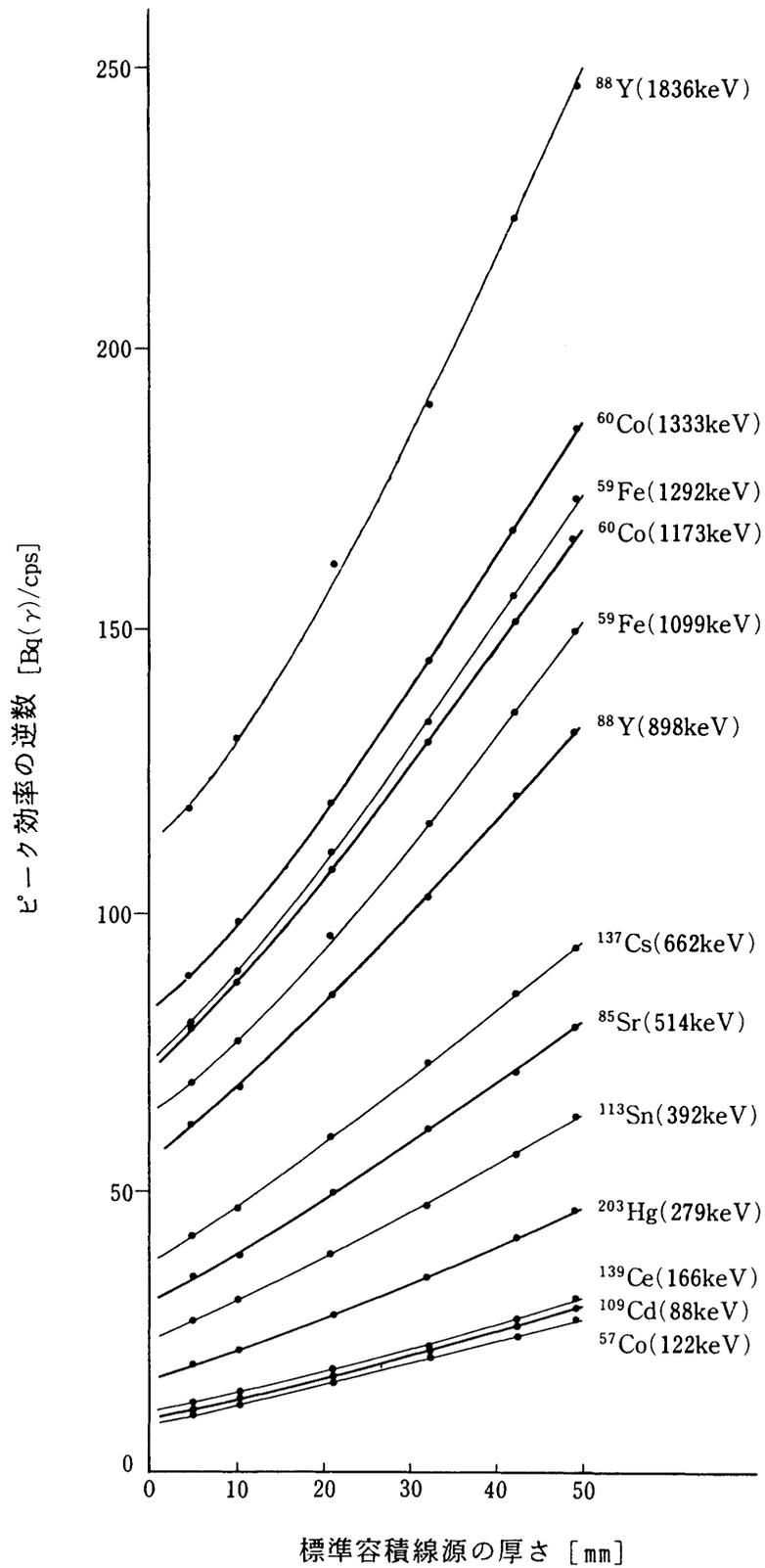


図 6 - 4 ピーク効率の逆数と容積線源の厚さの関係

## 6. 4 自己吸収の補正〔計算機を用いるが手計算でもチェック出来る〕

容積試料から放出される $\gamma$ 線の一部は、試料に厚みがあるため、試料自身と相互作用を起こし、そのエネルギーの $\gamma$ 線は消滅する。これを自己吸収と呼ぶ。

自己吸収は試料の厚さが厚いほど、試料の線減衰係数が大きいほど、起こりやすい。容積線源で求めたピーク効率は容積線源自身の自己吸収の影響を受けており、そのまま用いて試料の放射能濃度を計算すると、材質や密度やエネルギーが異なる場合、自己吸収の程度が異なり、誤差を生じる。

以下に自己吸収だけを補正する方法を述べるが、サム効果を含めて補正する場合の計算は 6. 5 を参照のこと。

### 6. 4. 1 計算方法(文献1)

前節に従ってピーク効率の逆数がほぼ直線になるのを確認したら、次の近似式を作る。

$$(\text{効率}) \approx (\text{高さの1次式})^{-1} = (b \cdot h + c)^{-1}$$

$$D = c/b, \quad \varepsilon_0 = 1/c, \quad \text{とおくと} \quad (\text{効率}) \approx D \cdot \varepsilon_0 / (h + D) \quad \text{となる。}^{1)}$$

誤差を小さくするため、この近似式は自己吸収の違いによって生じるピーク効率の差の計算だけに用いる。放出される $\gamma$ 線を平行線束とみなし、自己吸収の違い $\Delta \varepsilon$ を計算する。試料と標準容積線源の線減衰係数を各々 $\mu$ 、 $\mu_s$ として

$$\Delta \varepsilon = \frac{D^2 \cdot \varepsilon_0}{H} \int_0^H \frac{1 - \exp\{(\mu_s - \mu) \cdot h\}}{(h + D)^2} dh$$

となる。

---

1) 試料容器底面から D 下がった所に検出器の実効的な中心がある

----- 引用文献 -----

(文献1) 佐藤兼章, 高野直人, 今沢良章, 樋口英雄, 野口正安:

“容積試料に対する自己吸収の補正を含む $\gamma$ 線ピーク効率の決定”

RADIOISOTOPES, 32, 25(1983)

D はエネルギーによって変化させなくてもよい<sup>1)</sup>。ε<sub>0</sub>は関数化された効率で計算する。シンプソンの公式を用い、 $a = (\mu_s - \mu) \cdot D$ 、 $X = H/D$  と置くと次のように表される。

$$\Delta \varepsilon (H) = \frac{\varepsilon_0}{12} \left\{ 4 \cdot \frac{1 - e^{-ax/4}}{\left(1 + \frac{X}{4}\right)^2} + 2 \cdot \frac{1 - e^{-ax/2}}{\left(1 + \frac{X}{2}\right)^2} + 4 \cdot \frac{1 - e^{-3ax/4}}{\left(1 + \frac{3 \cdot X}{4}\right)^2} + \frac{1 - e^{-ax}}{(1+X)^2} \right\}$$

- 
- 1) γ線のエネルギーによりDは多少変わるが、標準容積試料と測定対象試料の線減衰係数の差が小さいときは、正確な値でなくても補正結果にあまり差は生じない。  
 2 酸化マンガン試料中の<sup>144</sup>Ce (134keV) を定量するとき (標準試料が水の場合 : 線減衰係数の差 Δμ ≒ 0.4)、しかも試料の高さが5 cmもあるような特殊な場合を除いては、問題にならない。

## 6. 4. 2 線減衰係数

- 1) 自己吸収の補正に用いる線減衰係数は、 $\gamma$ 線のエネルギー及び試料の材質によって異なる(減衰係数は 2. 2 を参照)。 $\gamma$ 線が試料中で消滅したりエネルギーを失ったりする原因には、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成等がある。実際は、試料の材質の原子番号がカルシウム( $Z = 20$ )以下であれば一つの式で表現でき、見かけの密度と $\gamma$ 線エネルギーが分かれば計算することができる。見かけの密度は測定試料の重量、測定容器の底面積、試料の厚さから計算できる。海底土、土壌、灰化物等の質量減衰係数と $\gamma$ 線のエネルギーの関係は次式で示される。

$$\mu / \rho \text{ (cm}^2/\text{g)} = \exp \left\{ -2.361 - 0.3949 \times \log \frac{E_n}{400} - 0.06914 \times \left( \log \frac{E_n}{400} \right)^2 \right\}$$

logは自然対数

$\mu / \rho$  : 海底土、土壌、灰化物等の質量減衰係数  
( $\mu$  : 海底土、土壌、灰化物等の線減衰係数)  
 $E_n$  :  $\gamma$ 線のエネルギー (keV)

- 2) 海水等の処理に用いるリンモリブデン酸アンモニウム及び二酸化マンガンは原子番号が大きく、土壌等の質量減衰係数を当てはめる事は出来ない。リンモリブデン酸アンモニウムの質量減衰係数は次式で示される。

$$\mu / \rho \text{ (cm}^2/\text{g)} = 1.794 \times (E_n^{-0.4921}) + 673500 \times (E_n^{-3.040})$$

$\mu / \rho$  : リンモリブデン酸アンモニウムの質量減衰係数  
( $\mu$  : リンモリブデン酸アンモニウムの線減衰係数)  
 $E_n$  :  $\gamma$ 線のエネルギー (keV)

二酸化マンガンの質量減衰係数はリンモリブデン酸アンモニウムの質量減衰係数に 0.13 を乗じたものと、土壌等の質量減衰係数に 0.87 を乗じたものの和になる。

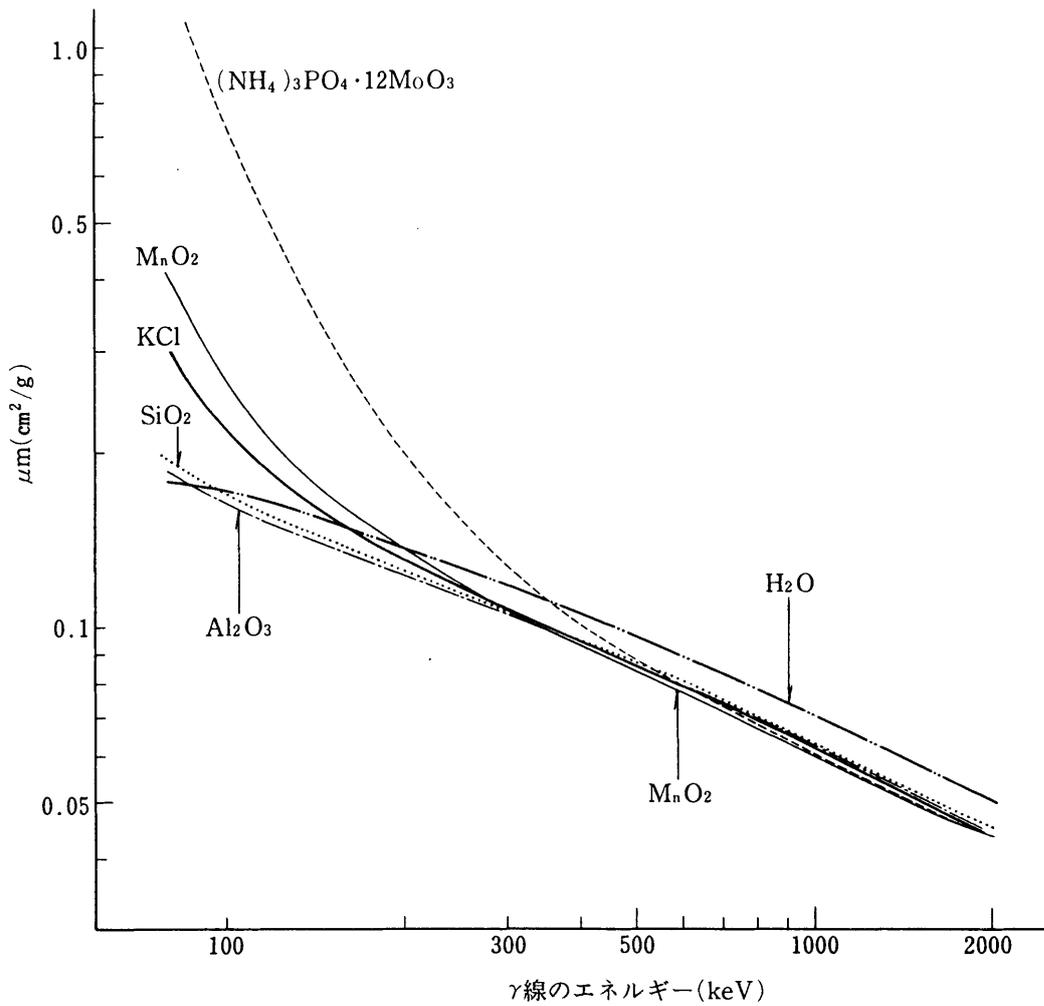


図 6 - 5 質量減衰係数

3) リンモリブデン酸アンモニウムに、水酸化物や硫化物が均一に混合された試料については、次式を用いる。

$$\mu_{total} = \left( \mu_1 \times \frac{w_1}{w_{total}} + \mu_2 \times \frac{w_2}{w_{total}} \right)$$

$\mu_{total}$  : 混合試料全体の線減衰係数

$\mu_1$  : リンモリブデン酸アンモニウムの線減衰係数

$\mu_2$  : 水酸化物や硫化物の線減衰係数

(土壌等の線減衰係数と同じである)

$w_{total}$  : 混合試料全体の重量

$w_1$  : リンモリブデン酸アンモニウムの重量

$w_2$  : 水酸化物や硫化物の重量

6. 4. 3 自己吸収と補正の原理

試料中のある場所の単位距離を通過する平行な $\gamma$ 線束を考える。この $\gamma$ 線はその場所で試料物質と相互作用して数が減る。その場所で消滅する数はその場所に入ってきた $\gamma$ 線の数に比例し、その比例定数が線減衰係数である。減少する数は「その場所の位置が何処であるか」に無関係であり、関係するのは $\gamma$ 線の数だけだから座標については線形微分方程式になり指数減衰になる。

$$\frac{dN}{dx} = -\text{線減衰係数} \times N \quad N = A \cdot \exp(-\text{線減衰係数} \cdot x)$$

試料中から放出された $\gamma$ 線は、放出された位置と試料容器の底までの距離の指数関数に逆比例して減少する。

試料を容器の底面に平行に面スライスし、その面に対するピーク効率に自己吸収による減少率を掛ける。この補正された面効率を容器の底面から上面まで足し合わせてピーク効率を計算する。

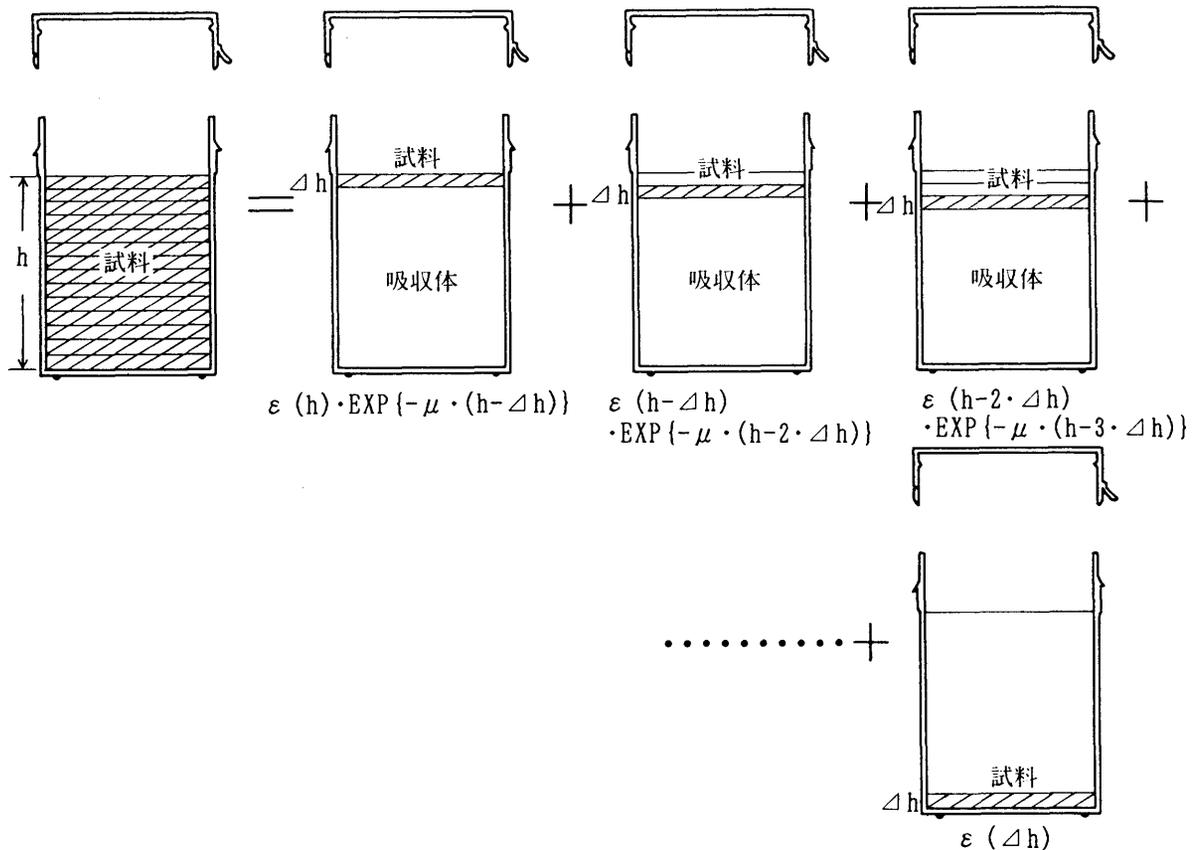


図6-6 面効率を容器の底面から上面まで自己吸収を考慮して積算する

## 6. 5 サム効果の補正

一般的に、放射性核種の崩壊は複数個の $\gamma$ 線の放出を伴う。崩壊を起こした原子核のエネルギー準位が順次低くなって行くのにしたがって、その準位間のエネルギー差に相当する $\gamma$ 線が次々に放出される。普通、全部の $\gamma$ 線が放出され終わるまでにかかる時間は $10^{-20}$ s以下であり、1崩壊に係る2つ以上の $\gamma$ 線が検出器と反応しても時間的に区別できず、和の信号が1つ出力されるだけである。この現象をサム効果という。検出器が目的の $\gamma$ 線の全エネルギーを吸収した場合、他にも検出器と反応を起こす $\gamma$ 線があったならば、その出力は目的の $\gamma$ 線の出力よりも大きくなる。

従って $\gamma$ 線を1個だけ放出する崩壊と違い、複数個の $\gamma$ 線が放出される時は同時に放出される $\gamma$ 線に邪魔されてしまい、目的の $\gamma$ 線だけを単独に検出できない場合が出て来る。

### 6. 5. 1

遷移に関する準位図（図6-7、図6-8）を見ても分かるように、サム効果を考慮すると、目的の $\gamma$ 線の全エネルギー吸収を検出できるのは

1. 原子核が目的の $\gamma$ 遷移の始状態に遷移して来るまでに放出された放射線が、（特性X線、散乱線を含めて）一切検出されない。
2. 目的の $\gamma$ 線が全エネルギー吸収を起こす（ピークの位置に検出される）。
3. 原子核が目的の $\gamma$ 遷移の終状態から基底状態に遷移するまでに放出された放射線が、（散乱線を含めて）一切検出されない。

の3つが同時に成り立つ必要がある。

同時に複数の $\gamma$ 線が放出される時、ある1個の $\gamma$ 線だけがピーク位置に検出される確率は、その1個のピーク効率と、残りの $\gamma$ 線が検出器と何の反応も起こさない確率との積になる。残りの $\gamma$ 線全てが反応を起

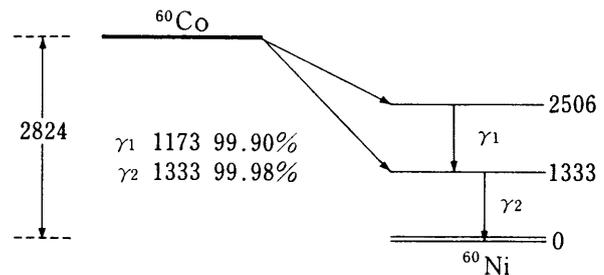


図6-7  $^{60}\text{Co}$  崩壊図

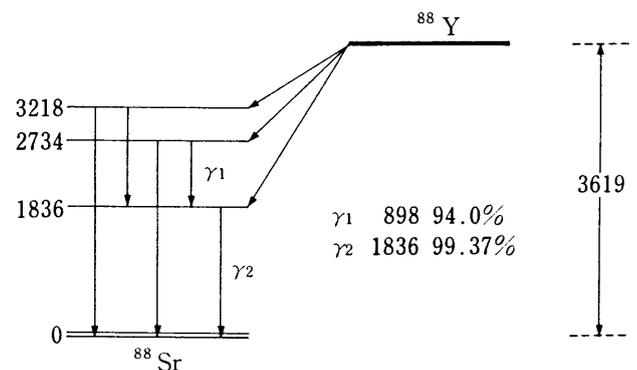


図6-8  $^{88}\text{Y}$  崩壊図

こさない確率は、「残りの $\gamma$ 線」の内の1つに付いて反応しない確率、即ちその $\gamma$ 線放出の発生確率 $\times$ その $\gamma$ 線が反応を起こさない確率(=1-全効率)

を「残りの $\gamma$ 線」全てについて掛算する事になる。

目的のエネルギーを持った $\gamma$ 線と同時に放出される $\gamma$ 線の組合わせは、1通りではなくて複数組あるので、これらの組合せ全てに付いて補正計算をし、加算しなくてはならない。

目的の $\gamma$ 線の放出の始状態へ来ることの出来る遷移パターンは準位図から拾い出すことが出来る。同様に目的の $\gamma$ 線の放出の終状態から基底状態へ落ちて行くパターンも拾い出すことが出来る。

目的の遷移の準位の間には他の準位がはさまっている場合、その準位を経由する遷移の一部はサム効果のため、目的の遷移と同じエネルギーを検出器に与え、これらを考慮するとサム効果と自己吸収を補正した面線源効率は

$$\varepsilon_{rk}^*(E_{rk}, h, \mu) = (b_{rk})^{-1} \times \left( \sum_{C_{fk}} D_{fg} D_{gh} D_{h \dots} D_{ij} D_{jk} \right) \times \left( \sum_{C_{af}} A_{ab} A_{bc} A_{c \dots} A_{ef} \right) \times \left( \sum_{C_{kq}} A_{kl} A_{lm} A_{m \dots} A_{pq} \right)$$

a: 親核の崩壊の出発となるエネルギー状態

f: 着目する測定対象の $\gamma$ 線を放出する励起状態

k: 着目する測定対象の $\gamma$ 線放出によって到達する状態

q: 娘核の基底状態

$b_{rk}$ : 着目する測定対象の $\gamma$ 線(f $\rightarrow$ k)の放出確率

$\varepsilon_{rk}(E_{rk}, h, \mu)$ : 高さ h、エネルギー E、線減衰係数  $\mu$  のときの面線源効率  
 $= \varepsilon(E_{rk}) \cdot \exp(-\Delta \mu h)$

$\varepsilon_{rk}^*(E_{rk}, h, \mu)$ :  $\varepsilon_{rk}(E_{rk}, h, \mu)$  にサム効果の補正を行った面線源効率

$\Delta \mu$ :  $\mu_s - \mu_0$  試料の線減衰係数と標準容積線源のそれとの差

$R_{mn}$ :  $\gamma$  遷移(m $\rightarrow$ n)の確率 / (遷移の始めの状態 m からの全ての遷移確率の和)

$D_{mn}$ :  $D_{mn} = R_{mn} \times \varepsilon(E_{mn}, h, \mu)$

$A_{mn}$ :  $A_{mn} = R_{mn} \times \{ 1 - \varepsilon(E_{mn}, h, \mu) / R^{P/T}(E_{mn}) \}$

$R^{P/T}(E)$ : ピークトータル比

$\sum_{C_{im}}$ : i から始まって m で終わり、 $i < j < k \dots l < m$  である全ての遷移パターンについての和

なお内部転換、X線サム等について別に考慮する必要がある場合がある。

### 6. 5. 2 全ての遷移パターンを拾い出す方法

m個のエネルギー準位が関係する遷移のパターンは、各準位に1ビットを割当て、「経由するか、素通りするか」に1または0を当てはめれば、m桁の2進数で表現できる。言い替えると、ある数(1~ $2^m$ )を2進数に書き直せばそれが1つの遷移パターンを特定する。

即ち1から $2^m$ までの全ての整数を2進法で書き直して準位に対応させれば、全ての遷移パターンを拾ったことに相当する。

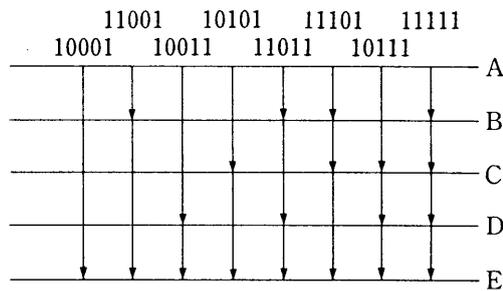


図 6 - 9 カスケード・パターン

B、C、Dで示す3つのエネルギー準位を、経由するか、素通りするかを考えると、全てのカスケード・パターンを拾うことができ、その数は $2^3$ 個あることがわかる。

### 6. 5. 3 容積試料のピーク効率

容積線源効率の式に試料の厚さを掛け、厚さについて微分すると面線源効率を得られる。試料を薄い面にスライスし、その面の効率について自己吸収の差及びサム効果の補正を行ってから積算する。

微積分の計算は解析的に行うよりも、数値的に差分を計算したりシンプソンの方法などで積算する。その方が、関数形が自由にでき、また式の計算違いの恐れが少ない。

標準容積線源の効率を  $\varepsilon^U(E, H, \mu_0)$  とすれば面線源効率  $\varepsilon(E, h, \mu_0)$  は

$$\varepsilon(E, h, \mu_0) \equiv \frac{\partial}{\partial H} [H \times \varepsilon^U(E, H, \mu_0)]$$

$$= \{ (h + \Delta h) \times \varepsilon^U(E, h + \Delta h, \mu_0) - (h - \Delta h) \times \varepsilon^U(E, h - \Delta h, \mu_0) \} / 2 \Delta h$$

この  $\varepsilon(E, h, \mu_0)$  を本章 5. 1 のサム効果と自己吸収を補正した面線源効率を  
求める式に代入し、下記の様に容積試料のピーク効率を計算する。

$$\varepsilon^{\dot{v}}(E, h, \mu) = \frac{1}{H} \sum_{h=0}^H \varepsilon^*(E, h, \mu)$$

#### 容積試料ピーク効率プログラム

以下に自己吸収、サム効果の両方を補正できる容積試料のピーク効率プログラムの例を示す。

プログラム言語は BASIC/98 である。Pass パラメータのうち、メインがサブプログラムから受け取る計算結果を \_\_\_\_\_ で示す。

1000 から 1250 までは自己吸収、サム効果ともに補正された面線源効率を、  
シンプソンの公式に従って数値積分している。

面線源効率は 1390 から 1850 までであり、3 個のサブプログラム：核データ、  
自己吸収補正済みピーク効率（吸補済面 P 効率）、ピークトータル比（PT 比）  
：を呼び出し、サム効果の補正を行っている。

1970 から 1990 までは核データサブプログラムのパラメータ受渡しの形式を  
示している。指定された 2 つのレベル間のエネルギー差、遷移確率を返す。

1350 から 1370 までは吸補済面 P 効率サブプログラムのパラメータ受渡しの  
形式を示している。エネルギーと高さを与えられると自己吸収を補正したピーク  
効率を返す。

1992 から 1994 までは PT 比サブプログラムのパラメータ受渡しの形式を示  
している。エネルギーを指定されるとピークトータル比を返す。

プログラム例

1000 '面線源効率(サム効果および自己吸収の補正済)を、シンプソンの公式で  
体積積分する。

1001 N=2(例えば)

1005 体積=1

1010 巾=(頂端-底端)/N

1020 S0=0:S=0

1040 高さ=底端+巾/2

1050 FOR I=1 TO N

1060 CALL \*面線源効率(核種,始,終,容器,半径,高さ,GRAM,AMP,効率)

1070 S=S+効率:高さ=高さ+巾

1090 NEXT I

1100 S0=S\*4

1120 S=0

1130 高さ=底端+巾

1140 FOR I=1 TO N-1

1150 CALL \*面線源効率(核種,始,終,容器,半径,高さ,GRAM,AMP,効率)

1160 S=S+効率:高さ=高さ+巾

1180 NEXT I

1190 S0=S0+S\*2

1210 CALL \*面線源効率(核種,始,終,容器,半径,底端,GRAM,AMP,効率)

1220 S0=S0+効率

1230 CALL \*面線源効率(核種,始,終,容器,半径,頂端,GRAM,AMP,効率)

1235 S0=S0+効率

1240 S0=S0\*(頂端-底端)/6/N/高さ

1250 END

1350 SUB \*吸補済面P効率(ENERGY,容器,半径,高さ,GRAM,AMP,P効率)

1351 '

1352 ' 自己吸収補正済みの面線源効率

1352 '

1360 P効率=1 'β遷移の場合は、0と答えるようにする。

1370 END SUB

```

1380 '.....
1390 SUB *面線源効率(核種,始,終,容器,半径,高さ,GRAM,AMP,DET#,効率)
1391 '
1392 '          サム効果と自己吸収を補正した面線源効率
1393 '
1395 ' 崩壊前の核の準位を0とし、崩壊後の核の励起状態の内、崩壊前より
1396 ' エネルギーの低い準位に上から1→基底と番号を付ける
1397 '
1400 始=4          ' 問題にしているγ遷移の始準位(例えば4)
1410 終=8          ' 問題にしているγ遷移の終準位(例えば8)
1420 基底=12      ' 崩壊後の核の基底状態          どうやって入手するか
1430 PC=0         ' いくつかのパターンについて生き残り確率を足して行く
1440 '
1460 FOR I=1 TO 2
1470   IF I=1 THEN          ' 崩壊開始から始準位までの遷移
1480     上=0:下=始
1490   ELSE                ' 終準位から基底までの遷移
1500     上=終:下=基底
1510   END IF
1520 '
1530   FOR K=2^(下-上-1) TO 2^(下-上)-1          ' ----- Kは10進参照数
1540     J=1:L=0:P=1
1541 '          P:遷移毎に、感応しない確率を、一つのパターンに沿って連
1542 '          続して掛算して入れて置く
1550     DO UNTIL J>下+1          ' 一つのパターンについて辿る。
1560       IF K MOD (2^J)>=2^(J-1) THEN          ' ----- そのBITは立っていた
1570         着=J+上:発=L+上
1580 '
1590   PRINT USING "##";発;
1600   PRINT " → ";
1610   PRINT USING "##";着;
1620   PRINT " : ";
1630 '
1640   CALL *核データ(核種,発,着,ENERGY,相対分岐比)

```

```

1650      CALL *吸補濟面P効率(ENERGY, 容器, 半径, 高さ, GRAM, AMP, P効率)
1660      CALL *PT比(ENERGY, PT比)
1670      P=P*相对分岐比*(1-P効率/PT比)      '括弧の中は感応しない確率
1680      L=J      '今立っていた BIT を発として憶えておく。
1690      END IF
1700      J=J+1
1710      LOOP      '一つのパターンが終了
1720      PRINT
1721 '
1730      PC=PC+P      '次のパターンについて足し合わせる。
1740      NEXT K
1741 '
1750      IF I=1 THEN      '始レベルまで見つからずに来る確率
1760      効率=PC:PC=0
1770      ELSE      '終レベルから先、見つからずに逃げおおせる確率
1780      効率=効率*PC
1790      END IF
1800      NEXT I
1810 '      下線はサブプログラムの出力変数
1820      CALL *核データ(核種, 始, 終, ENERGY, 相对分岐比)
1830      CALL *吸補濟面P効率(ENERGY, 容器, 半径, 高さ, GRAM, AMP, P効率)
1831 '      問題にしている  $\gamma$  遷移の自己吸収補正済み面線源効率
1840      効率=効率*P効率
1850      END SUB
1860 '.....
1870      SUB *核データ(核種, 発, 着, ENERGY, 相对分岐比)
1880      ENERGY=1:相对分岐比=1
1890 '       $\beta$  遷移については例えばエネルギーを負で答え、
1900 '      相对分岐比については正しく答える
1910      END SUB
1920 '.....
1930      SUB *PT比(ENERGY, PT比)
1940      PT比=1      '  $\beta$  遷移の場合は、1 と答えるようにする。
1950      END SUB

```

#### 6. 5. 4 ピーク・トータル比

サム効果の補正を行うためには、カスケードにある他の $\gamma$ 線の全効率が必要となる。全効率を知るには、ピーク効率と全効率の比であるピーク・トータル比を、 $\gamma$ 線のエネルギーの関数として求めておく。ピーク・トータル比は、検出器の相対効率、遮蔽体の材質や内容積によって影響される。

##### (1) 線源と測定

単一核種 $\gamma$ 点線源 ( $^{241}\text{Am}$ 、 $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{139}\text{Ce}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{113}\text{Sn}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{65}\text{Zn}$ ) を用いて、対象となるピーク面積の計数誤差が2%以下になるまで測定する。強さは各核種とも 37kBq( $\gamma$ ) とする。

測定位置はエンドキャップの中心軸上 5cm とする。検出器が $\gamma$ -X型の場合は、線源からのX線を防ぐため 0.5mm 厚の銅板をエンドキャップの上に置く。

ピーク・トータル比は遮蔽体内容積の広さによってかなり変わる。しかし、

測定試料がセットされる付近では、線源位置が変わっても3%程度しか変化しないので試料をセットする位置の一箇所で測定すればよい。

但し、 $\gamma$ 線の散乱をできるだけ小さくするため、線源及び支える治具(図6-10参照)は出来るだけ少量の軽い材質(紙、発泡スチロール、密度の小さい木等)で作るのが望ましい。

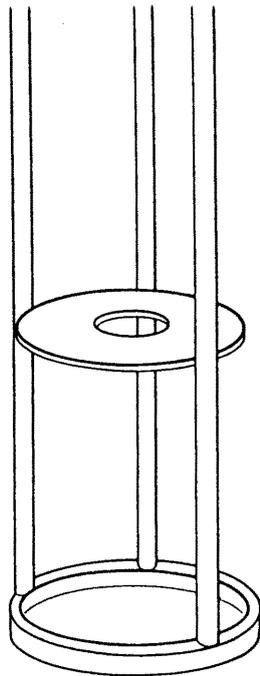


図6-10 ピーク・トータル比測定に用いる線源ホルダ

##### (2) ピーク・トータル比の求め方

ピーク・トータル比はピーク面積を全スペクトル面積で除して得る。

1. ピーク領域(図6-11aの縦線で表した部分)の全計数を、ピーク面積とする。

2. Lower discri level 以上 4096 チャンネルまでの計数值を積算する。Lower discri level 以下のカウント数は、図 6-11b の縦線領域で示したように、lower discri level の数十チャンネル上から外挿して、長方形もしくは台形で近似して求め、その部分も加えて全スペクトル面積とする。

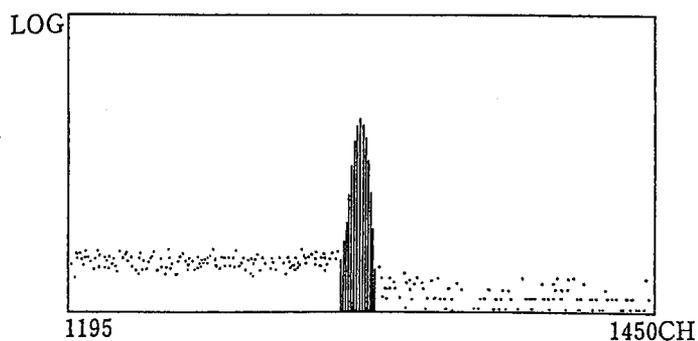


図 6-11a  $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線スペクトル  
(全エネルギーピーク付近)

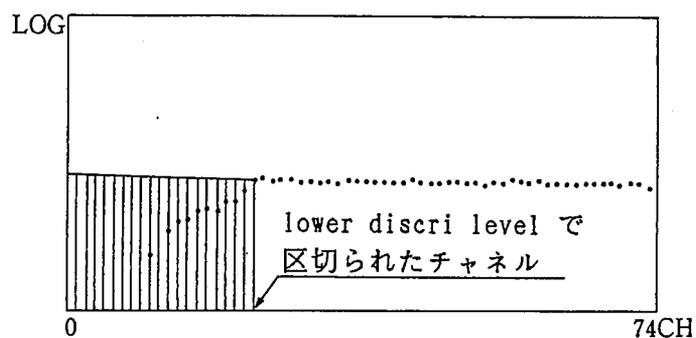


図 6-11b  $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線スペクトル  
(lower discri level 付近)

3. ピークを1本だけ出す  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{139}\text{Ce}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$  のピーク・トータル比とエネルギーの関係を両対数グラフにプロットする。

4.  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{113}\text{Sn}$ 、 $^{65}\text{Zn}$  のように 2 本ピークを出す核種については、大きい方のピークのエネルギーにおける値を求めることとする。

小さい方のピークのエネルギーに対応するピーク・トータル比をグラフから求める。小さい方のピーク面積を掛けて、そのピークに起因する全スペクトル面積を推定する。

5. 4. の結果を、全スペクトル面積（2 本のピークを含む）から差し引き、大きい方のピーク面積で除して、そのエネルギーにおけるピーク・トータル比とする。

6. この値もグラフにプロットしてピーク・トータル比とエネルギーの関係を関数化する。

### (3) ピークトータル比の関数化

1. 内容積が 20cm 立方程度の鉛の遮蔽体に納められた検出器に対して下記の報告(文献1) <sup>1)</sup>がある。

$$\log(\alpha) = -0.30 \times \log(\text{En}) - 1.11$$

$$\log(\beta) = -1.82 \times \log(\text{En}) + 9.15$$

$$\text{PT比} = \alpha \times \log(25\text{cm 相対効率}) + \beta$$

En :  $\gamma$  線のエネルギー (keV)

logは自然対数

2. 遮蔽体内側の空間の大きさが上と大きく異なる場合は、ピークトータル比を実測し、上式にならって関数化する。

---

1)なお  $\log(\beta)$ の式は下式に置き換える方がより精度が高い。(野口正安、未発表)

$$\log(\beta) = -7.97 + 3.31 \times \log(\text{En}) - 0.383 \times \log(\text{En}) \times \log(\text{En})$$

En :  $\gamma$  線のエネルギー (keV)

logは自然対数

----- 引用文献 -----

(文献1) 水本良彦, 日下部俊男, 岩田志郎: “ゲルマニウム検出器のピーク対トータル効率比”, RADIOISOTOPES, 36, 20(1987)

6. 5. 5 サム効果を起こす核種を含む標準線源〔計算機を用いる〕

$^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$  などサム効果によってピーク効率が減少する核種を標準線源として用いた場合、得られたピーク効率のサム効果を補正<sup>1)</sup>して正しい値を求めた後、ピーク効率の計算に用いなければならない。

逐次近似を用いた計算は下記の手順で行う。

- |                                                                                                      |                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| ① 仮に効率の測定値を用いてサム効果による減少率 $S(\epsilon_M)$ を計算する。                                                      | $S(\epsilon_M)$                                                    |
| ② 測定効率を $(1 - \text{減少率})$ で除した値 $\epsilon^M / \{1 - S(\epsilon_M)\}$ を、仮の補正済み効率 $\epsilon_U$ とする。   | $\epsilon_U \leftarrow \epsilon^M / \{1 - S(\epsilon_M)\}$         |
| ③ 仮の補正済み効率を用いてサム効果による減少率 $S(\epsilon_U)$ を計算する。                                                      | $S(\epsilon_U)$                                                    |
| ④ 測定効率を $(1 - \text{減少率})$ で除した値 $\epsilon^M / \{1 - S(\epsilon_U)\}$ を、仮の補正済み効率 $\epsilon_U$ と比較する。 | $\epsilon_U \rightleftharpoons \epsilon^M / \{1 - S(\epsilon_U)\}$ |
| ⑤ 差があれば、④ の $\epsilon^M / \{1 - S(\epsilon_U)\}$ を、新たな仮の補正済み効率 $\epsilon_U$ とし、③ へ戻る。                | $\epsilon_U \leftarrow \epsilon^M / \{1 - S(\epsilon_U)\}$         |
| ⑥ 合っていたら、仮の補正済み効率をサム効果の影響が補正されたピーク効率 $\epsilon^C$ とする。                                               | $\epsilon^C = \epsilon^M / \{1 - S(\epsilon_U)\}$                  |

---

1) 2. 1. 4 で述べたように、高効率の検出器を用いるとサム効果が顕著に現れ、その補正が必要になるので本マニュアルが想定している測定には15%程度の検出器が適当である。

## 6. 6 その他のピーク効率を求める方法

### 6. 6. 1 相対ピーク効率曲線と基準ピーク効率曲線を用いる方法

ここまでに述べた方法でピーク効率を求めるには、厚さの異なる数個の多核種混合標準容積線源を測定して効率曲線群を作成しなければならない。これに対して、 $\gamma$ 線のエネルギーに対する相対ピーク効率曲線を1つと、ピーク効率の逆数と標準容積線源の厚さの関係を示す曲線1つを作成してその積で代用する方法がある。ただしピーク効率曲線を求めるのに点線源を用いるので、点線源から求めたピーク効率曲線と、容積線源から求めたピーク効率曲線の形に大きな差が無いと仮定する。

水溶液標準容積線源から求めたピーク効率とこの方法から求めた自己吸収補正済みのピーク効率曲線は、図6-15に示すように低エネルギーを除いて一致しているので、この例については先ほどの仮定に大きな問題は無いことが分かるが、 $\pm 15\%$ 以上の誤差が生じた例もある。

(1) 標準線源及びその測定については次の通りである。

1.  $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{139}\text{Ce}$ 、 $^{203}\text{Hg}$ 、 $^{113}\text{Sn}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$ を含む混合点線源 (Amersham、QCD-1等) を検出器のエンドキャップの中心軸上の距離4cmの位置に置いて測定する。距離を4cmにするのは $^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$ のサム効果の影響を小さくするためである。
2. 測定時間は、対象となる全てのピーク面積の計数誤差が2%以下になるまでとする。
3. 厚さが5、10、20、30、40、50mmのKC1標準容積線源またはCs標準溶液線源 (測定試料と同形の測定容器) を測定してピーク効率の逆数と厚さの関係を表わす基準ピーク効率曲線を求める。  
なおKC1 1g当りの放射能は1.746Bq( $\gamma$ )である。

## 6. 6. 2 点線源のピーク効率を積分する方法〔計算機を用いる〕

混合点線源を、容積試料の置かれる空間を埋めるように、位置を変えて繰り返し測定し、容積試料のピーク効率を求める。固体の容積標準線源にみられる放射能の不均一の影響がなく、試料の形状が変わってもピーク効率を求められる。しかし、測定箇所を多くする必要があり、データ処理量が多くなる。

(1) 標準線源及びその測定については次の通りである。

1.  $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{139}\text{Ce}$ 、 $^{203}\text{Hg}$ 、 $^{113}\text{Sn}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{59}\text{Fe}$  を含む 4kBq 程度の棒状混合点線源を作製して用いる。
2. 測定箇所は例えば、検出器のエンドキャップからの高さが 0.5、1、2、3、4、5cm で、エンドキャップの中心軸から 0、0.5、1、1.5、2、3、4cm 離れた点の合計 42 点程度の測定を行う。

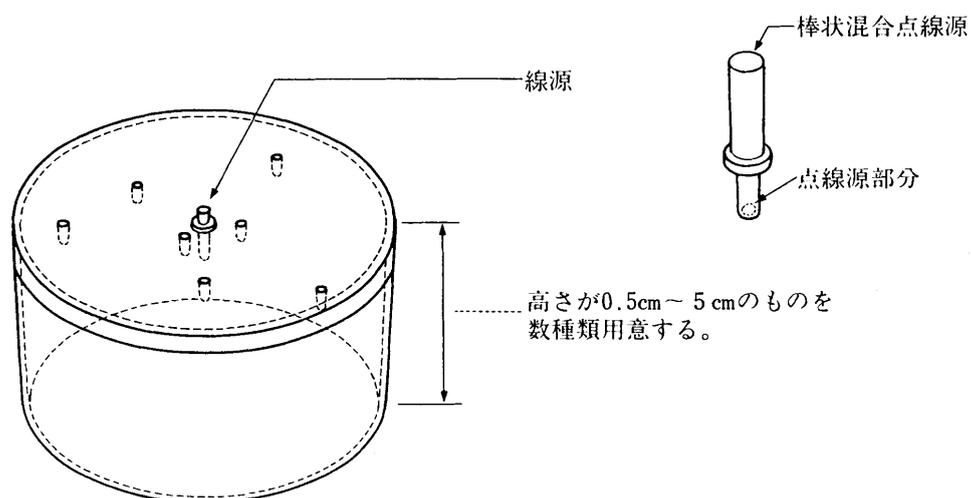


図 6 - 1 2 点線源効率積分法に使用する線源ホルダ

(2) 計算法〔計算機を用いる〕

エンドキャプの中心軸からの距離 ( $r$ ) とピーク効率 (エンドキャプ中心でのピーク効率で規格化しておく) との関係を、エンドキャプからの高さごとに片対数グラフにプロットする (図6-13、図6-14 参照)。エンドキャプからの高さ ( $h$ ) が大きくなると、広がりが大きくなる正規分布となる。

$$\varepsilon_r = \exp \{ -c_1 \exp(-c_2 h) r^2 \}$$

に関数化して各高さに於ける  $c_1$ 、 $c_2$  を求める。水平方向の積分を行い面線源ピーク効率を求める。片対数グラフに高さと、エンドキャプの中心軸上に置いた点線源のピーク効率の関係をプロットして

$$1 / \varepsilon_h = a + b h + c h^2$$

に関数化する。高さ  $h$ 、エンドキャプの中心から  $r$  だけ離れたある位置におけるピーク効率は

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_h = \exp \{ -c_1 \exp(-c_2 h) r^2 \} / (a + b h + c h^2)$$

となる。これに自己吸収の補正を乗じて積算しピーク効率を得る。

なおこの式のパラメータ  $c_n$  をエネルギーの関数  $c_n(E)$  にしてエネルギー依存性を持たせ、全エネルギー領域を表わそうとすると、関数の自由度が多すぎ、最小2乗法の逐次近似計算を収束させるのが困難である。

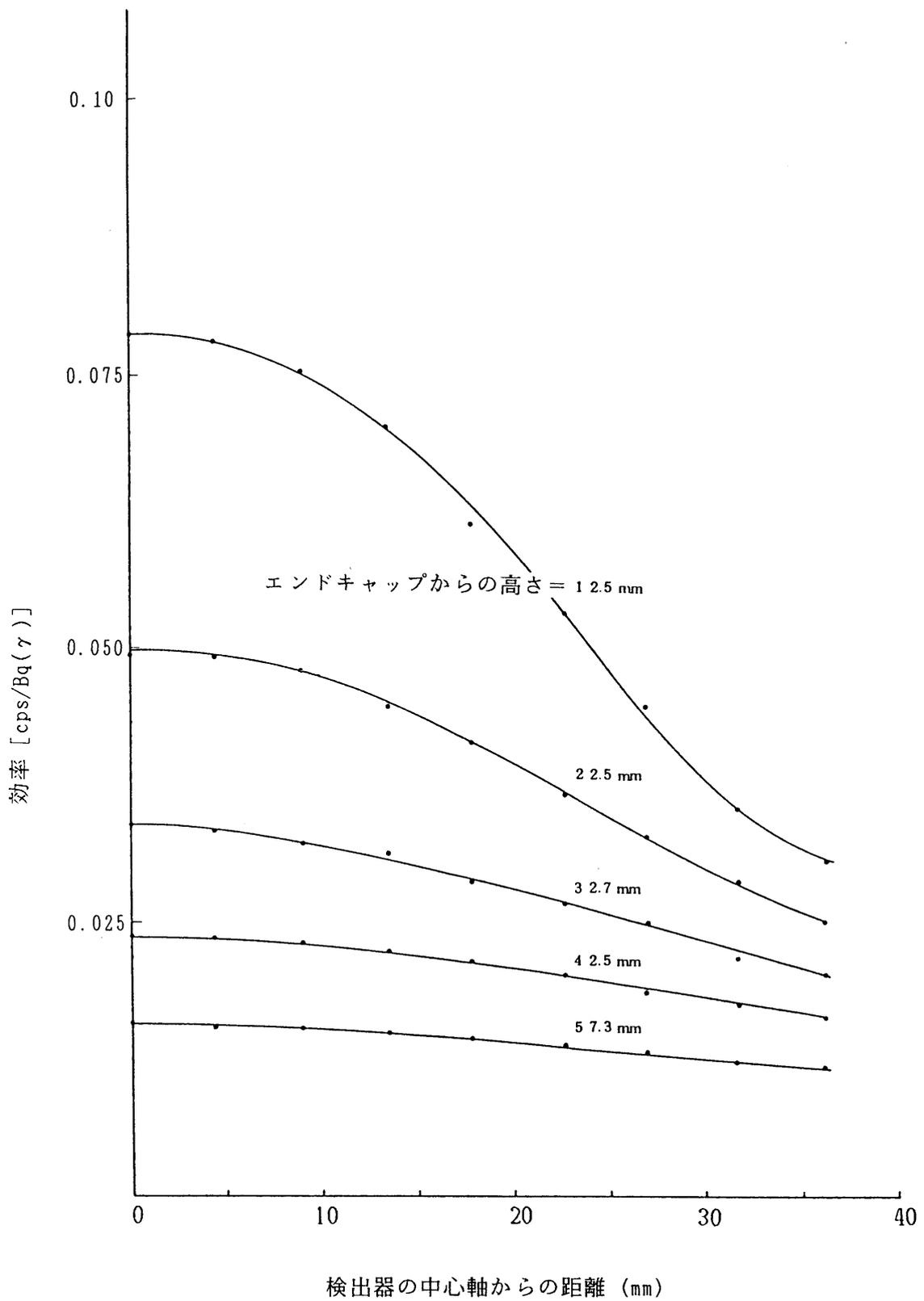


図6-13 点線源測定結果例 ( $^{57}\text{Co}$  122keV)

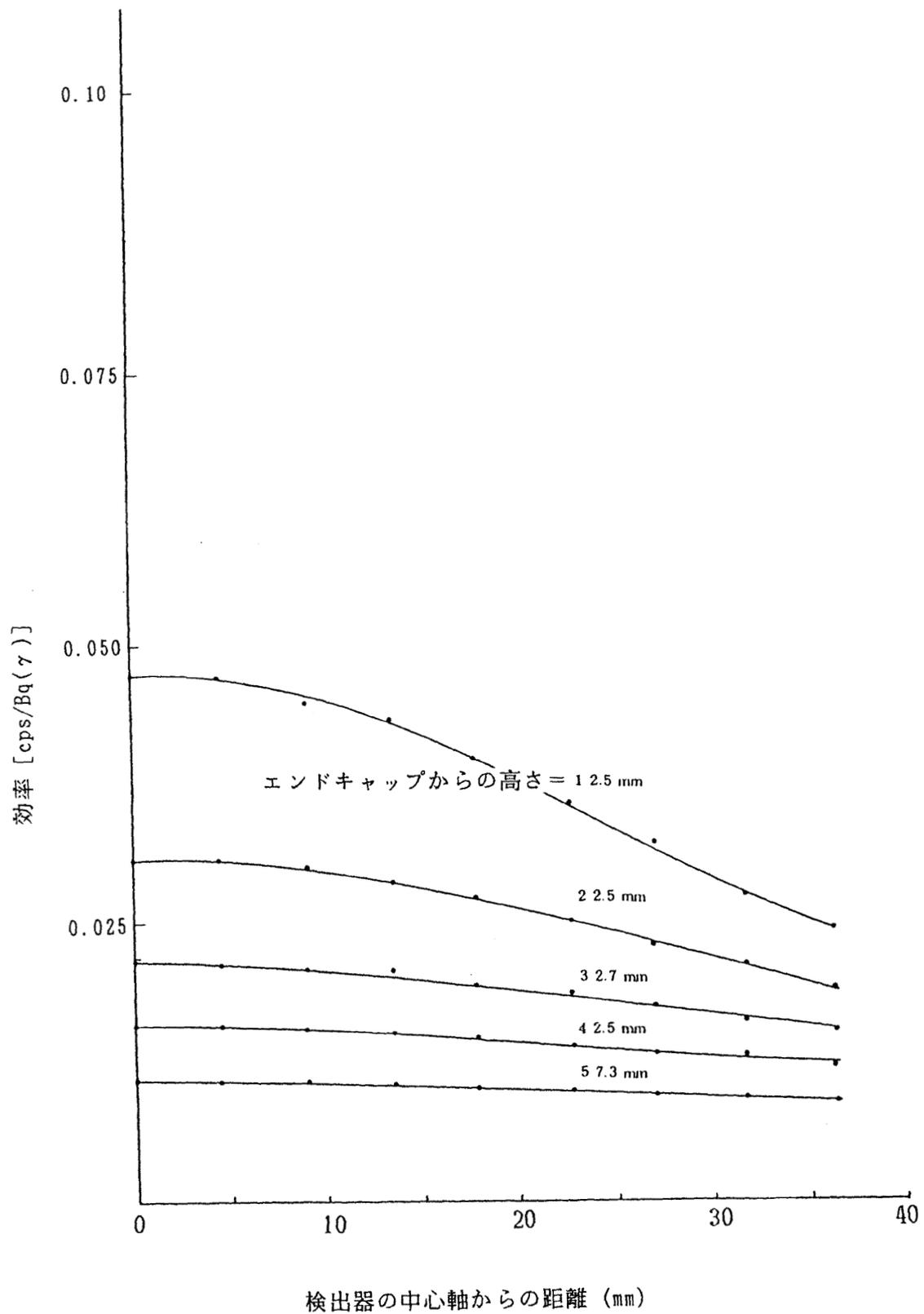


図6-14 点線源測定結果例 ( $^{59}\text{Fe}$  1292keV)

6. 6. 3 比重と厚さの異なった何組かの標準容積線源の測定データを利用して  
線形補間により補正を行う方法

幾つかの厚さと比重の組合せについて作製された標準線源セットを測定し、ピーク効率を求める。H、 $\mu$ 、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$  を次のように定める。

H、 $\mu$  は、補正すべき試料の厚さと線減衰係数

$h_1$  は、標準線源のうち  $h_1 < H$  でかつ最も H に近いものの厚さ

$h_2$  は、標準線源のうち  $h_2 > H$  でかつ最も H に近いものの厚さ

$\mu_1$  は、標準線源のうち  $\mu_1 < \mu$  でかつ最も  $\mu$  に近いものの線減衰係数

$\mu_2$  は、標準線源のうち  $\mu_2 > \mu$  でかつ最も  $\mu$  に近いものの線減衰係数

標準線源の効率  $\varepsilon(h_1, \mu_1)$ 、 $\varepsilon(h_1, \mu_2)$ 、 $\varepsilon(h_2, \mu_1)$ 、 $\varepsilon(h_2, \mu_2)$  を用いて

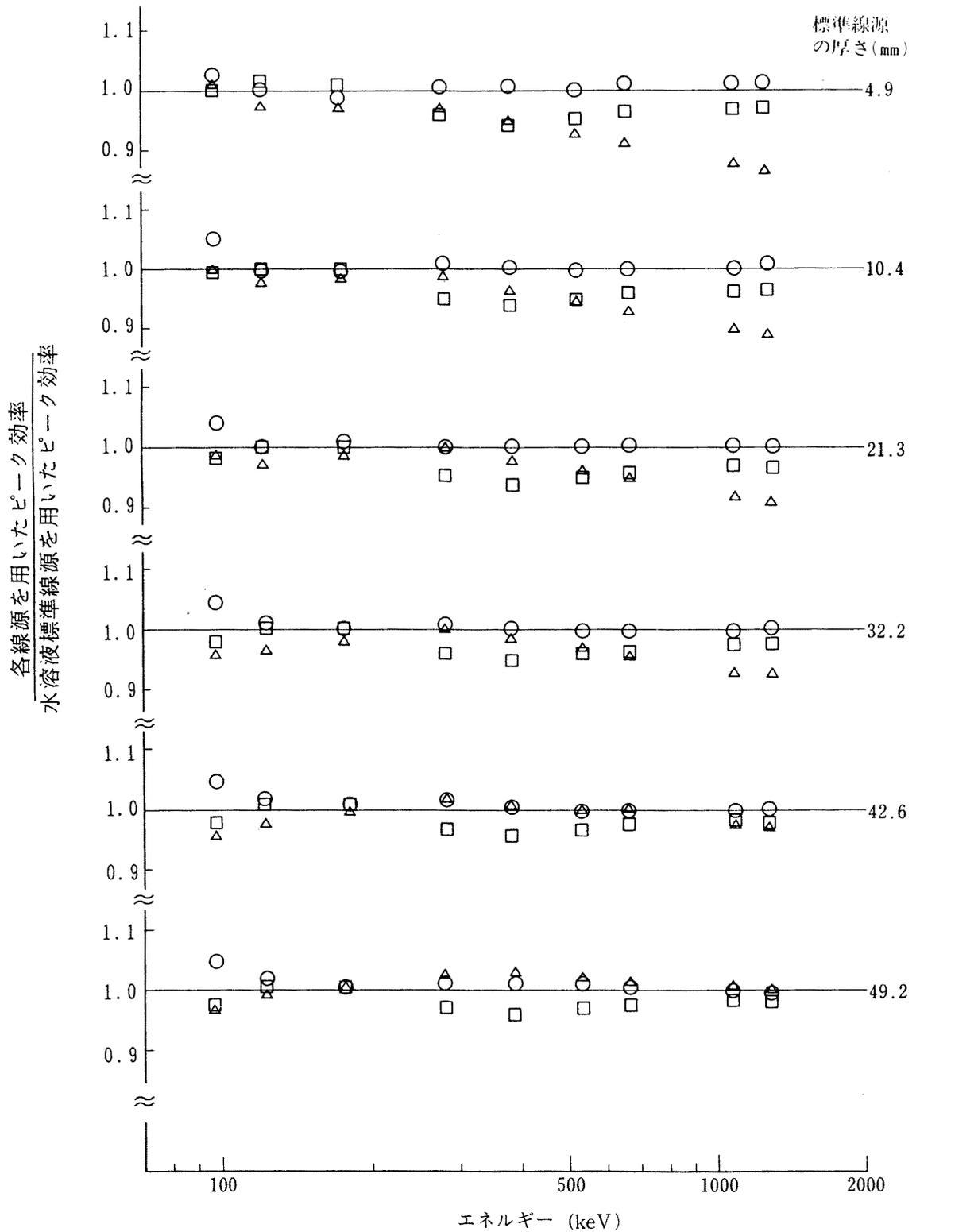
① 厚さの補正計算をまず行う

$$\frac{1}{\varepsilon(H, \mu_1)} = \frac{\varepsilon(h_1, \mu_1) - \varepsilon(h_2, \mu_1)}{\varepsilon(h_1, \mu_1) \cdot \varepsilon(h_2, \mu_1)} \cdot \frac{H - h_1}{h_2 - h_1} + \frac{1}{\varepsilon(h_1, \mu_1)}$$

$$\frac{1}{\varepsilon(H, \mu_2)} = \frac{\varepsilon(h_1, \mu_2) - \varepsilon(h_2, \mu_2)}{\varepsilon(h_1, \mu_2) \cdot \varepsilon(h_2, \mu_2)} \cdot \frac{H - h_1}{h_2 - h_1} + \frac{1}{\varepsilon(h_1, \mu_2)}$$

② 自己吸収の補正計算は下式のようになる。

$$\varepsilon(H, \mu) = \frac{\mu - \mu_1}{\mu_1 - \mu_2} \times \{ \varepsilon(H, \mu_1) - \varepsilon(H, \mu_2) \} + \varepsilon(H, \mu_1)$$



△：比重の異なる容積線源を用いたピーク効率

□：点線源効率積分法を用いたピーク効率

○：相対ピーク効率曲線と基準ピーク効率曲線を用いたピーク効率

図 6 - 1 5 水溶液標準線源と、比重の異なる容積線源・点線源効率積分法・相対ピーク効率曲線と基準ピーク効率を用いたピーク効率の比較

#### 6. 6. 4 ピーク効率の関数形〔計算機を用いる〕

ピーク効率は数式化する。ピーク効率を表現する関数として様々な式が用いられてきた。これらの式のパラメータの値は通常、最小2乗法によって計算される。このため、関数の形がピーク効率を表現するのに適していること、および最小2乗法で計算し易い形をしていること、の両方が重要である。用いる式の特徴を理解して適用する。

エネルギー依存性の表現に関しては次の方法がある。

##### 1) エネルギー領域を高低に分け、ピーク効率の対数をエネルギーの対数の2～3次式で表現してつなぐ方法

データのばらつきが小さくない場合、領域の境目で食い違いが出来る。グラフにプロットし、雲形定規等を用いて曲線を描き、その曲線の数値を読みとって関数適合する。最小2乗法の計算は容易である。

##### 2) 2つのエネルギーの指数関数とエネルギーのべき乗の和を用いる方法

$$\varepsilon(E, h) = a(h) \times E^{-b} + c(h) \times \exp(-d \times E) - e(h) \times \exp(-f \times E)$$

相対効率の形を表現するのに適しているが関数適合の計算は難しい。一旦グラフ上に滑らかな曲線を作成してその数値を読みとってでも必ずしも適合計算が収束しない。計算しようとする適合パラメータ毎に、使用する測定データを取捨選択する等の操作が必要になる。

また 6. 6. 1 の方法の厚さ依存性に関しては次の方法がある。

##### 1) 試料の厚さの指数関数の和を用いる方法

$$\varepsilon(E, h) = \left[ A(E) \{1 - e^{-(a+m)h}\} / (a+m) + B(E) \{1 - e^{-(b+m)h}\} / (b+m) \right] / h \quad m: \text{線減衰係数}$$

一旦  $\varepsilon(E, h)$  の逆数を  $h$  の2次式に適合し、式から改めて数値をサンプリングして計算する。

自己吸収の補正が容易に計算できる。

##### 2) ピーク効率の逆数を厚さの2次式で表現する。

$$\varepsilon(E, h)^{-1} = a(E) + b(E) \times h + c(E) \times h^2$$

試料の厚さとピーク効率の逆数を適切に表現出来る。自己吸収の補正は数値積分を用いないと計算できない。

#### 6. 6. 5 2層になった試料の自己吸収補正を含むピーク効率

試料によっては、2層で測定することがある。その一例として、海水試料があり、硫化物とリンモリブデン酸アンモニウムの2層にすることがある。下層の硫化物の自己吸収補正を含むピーク効率は、1層の場合と同様にして求める。上層のリンモリブデン酸アンモニウムの自己吸収補正を含むピーク効率は、下層における $\gamma$ 線の吸収を考慮して、次式によって求める。

$$\varepsilon_A = \frac{\exp\{(\mu_A - \mu_S) \times H_1\}}{H_2 - H_1} \times (H_2 \times \varepsilon_2 - H_1 \times \varepsilon_1)$$

$\varepsilon_A$  : 上層の自己吸収補正を含むピーク効率

$\mu_A$  : 上層の線減衰係数

$\mu_S$  : 下層の線減衰係数

$H_2$  : 試料全体の厚さ

$H_1$  : 下層の厚さ

$\varepsilon_2$  : 厚さが  $H_2$  で、試料全体が上層部分の材質であると仮定した時の自己吸収補正を含むピーク効率

$\varepsilon_1$  : 厚さが  $H_1$  で、試料全体が上層部分の材質であると仮定した時の自己吸収補正を含むピーク効率

## 6. 7 マリネリ容器のピーク効率

マリネリ容器<sup>1)</sup>は、牛乳、海水、陸水等の水溶液や細断した野菜など、前処理を施さないうで、そのまま測定する場合によく用いられる。検出感度が高く、前処理抜きで、あるいは短い測定時間でもある程度の定量結果が得られるため、放射能が高いかどうかを早く知りたい緊急時に用いられる。マリネリ容器は検出器の周りを囲む逆井戸形となっており形が複雑であるので、測定に供する試料の量を可変に出来ず、ピーク効率を測定するときの線源の形状と試料の形状を同一にするのが前提である。液体試料で量が少し足りない程度であれば水等で容積を増やし基準の容積にする。

### 6. 7. 1 $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{40}\text{K}$ を対象とする場合<sup>2)</sup>のピーク効率の求め方。

緊急時に問題となり、しかも重要な核種  $^{131}\text{I}$  と  $^{137}\text{Cs}$ 、さらに天然放射性核種として含まれていることが多い  $^{40}\text{K}$  のピーク効率を求める。

1.  $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{40}\text{K}$ を含むマリネリ標準線源を、ピーク面積が 20,000 カウントを越えるまで測定する。ピーク面積を計算してピーク効率を求める。
2. 相対効率 25% の Ge 半導体検出器を用いた場合、マリネリ容器の形状や容積にもよるがピーク効率は  $^{131}\text{I}$  が 0.012count/ $\gamma$ 、 $^{137}\text{Cs}$  が 0.008count/ $\gamma$ 、 $^{40}\text{K}$  が 0.004count/ $\gamma$  程度となる。

---

1) マリネリ容器については、7章 1 (2) を参照のこと。

2) 試料を測定した結果、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{40}\text{K}$  以外で  $\gamma$  線のエネルギーが 200keV 以上の核種が検出された場合、次の様にしてピーク効率を計算することができる。ピーク効率曲線は両対数グラフにプロットすると  $\gamma$  線のエネルギーが 200keV 以上ではほぼ直線になる。これを式で表わすと  $\varepsilon = a \cdot E_n^{-b}$  となる。ここで  $\varepsilon$  はピーク効率 (c/ $\gamma$ )、 $E_n$  は  $\gamma$  線のエネルギー (keV)、 $a$ 、 $b$  は定数である。

$^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{40}\text{K}$  のうち 2 核種のピーク効率 (c/ $\gamma$ ) とエネルギー (keV) を代入して定数  $a$ 、 $b$  を求め、求めたい核種の  $\gamma$  線のエネルギーを

$$\varepsilon = a \cdot \text{keV}^{-b}$$

に代入してピーク効率を計算する。

6. 7. 2 核種を3つに限定しない場合のピーク効率の求め方。

1. 80keV から 2MeV の範囲にエネルギーが適当に分散した  $\gamma$  線を放出する核種  $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{139}\text{Ce}$ 、 $^{203}\text{Hg}$ 、 $^{113}\text{Sn}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{60}\text{Co}$  を含む標準線源を測定する。
2.  $^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$  はサム効果のため測定値は低めの値を示すが、通常の円筒型試料容器をエンドキャップ直上においた場合ほどではないので、無視してもそれほど大きな誤差は生じない。
3. 両対数グラフにピーク効率とエネルギーの関係をプロットする。関数化は 6. 3 と同様に行うが  $C_6$  の項は不要である。

6. 7. 3 自己吸収補正

マリネリ容器はつねに一定の高さまで試料を充填して使わなければならないので、一種類の形状の標準容積線源で、試料の線減衰係数の異なる母材に対して自己吸収の補正を行うことになる。

(1) 自己吸収補正式

1. 標準試料を測定し、そのピーク効率  $\epsilon_s(E, \mu_s)$  を求める。  
 $E$  はエネルギー、 $\mu$  は線減衰係数、添字  $S$  は標準試料を表す。
2. 次式の  $\mu$  に標準試料の母材に対する線減衰係数  $\mu_s$  および試料の線減衰係数  $\mu_x$  をそれぞれ代入して  $f(\mu_s)$  および  $f(\mu_x)$  を求める。

$$0.7\text{ℓ用} \quad f(\mu) = (1 + a_{0.7}\mu + b_{0.7}\mu^2)^{-1}$$

$$2.0\text{ℓ用} \quad f(\mu) = (1 + a_{2.0}\mu + b_{2.0}\mu^2)^{-1}$$

$a$ 、 $b$ ：定数<sup>1)</sup>

7. 1 (2) で示したマリネリ容器の場合、下記の値が利用できる。

$$a_{0.0} = 1.71115 \quad a_{0.7} = -0.558435$$

$$b_{2.0} = 1.02209 \quad b_{0.7} = 5.58197$$

---

1) 定数  $a$ 、 $b$  の求め方は 6. 7. 3 (2) 参照。

3. 次式から、試料のピーク効率  $\varepsilon_x(E, \mu_x)$  を求める。

添字  $x$  は測定試料を表す。

$$\varepsilon_x(E, \mu_x) = \frac{f(\mu_x)}{f(\mu_s)} \varepsilon_s(E, \mu_s)$$

(2) 定数  $a$ 、 $b$  の求め方。

マリネリ容器は検出器を囲う形状なので、自己吸収の成分は検出器の形状や効率にそれほど依存しない。そこで、検出器のピーク効率をエネルギー  $E$ 、幾何学的条件  $G$ 、試料の線減衰係数  $\mu$  によって、 $\varepsilon(E, G, \mu)$  で表すと、次式のように近似することができる。

$$\varepsilon(E, G, \mu) \approx \varepsilon(E, G) \cdot f(\mu)$$

これは、 $f(\mu)^{-1}$  を 2 次式で近似できると仮定すると、

$$\frac{\varepsilon(E, G, \mu_{s1})}{\varepsilon(E, G, \mu_{s2})} = \frac{f(\mu_{s1})}{f(\mu_{s2})} = \frac{1 + a\mu_{s2} + b\mu_{s2}^2}{1 + a\mu_{s1} + b\mu_{s1}^2}$$

となり、右辺はエネルギーおよび検出器によらず容器<sup>1)</sup>だけできまる。

$\mu$  がそれぞれ  $\mu_{s1}$  および  $\mu_{s2}$  の二つの標準線源のピーク効率のデータから、定数  $a$  および  $b$  を求める。

---

1) 使用するマリネリ容器については、7章 1 (2) 測定容器の選択 参照。

— — — — 参考文献 — — — — —

- 1) 本多哲多郎, 武田健治, 野口正安: “標準点線源校正法による容積試料に対する $\gamma$ 線ピーク効率の決定”, RADIOISOTOPES, **27**, 3(1978)
- 2) 武田健治, 本多哲多郎, 野口正安: “自己吸収の補正を含む $\gamma$ 線ピーク効率の決定”, RADIOISOTOPES, **28**, 25(1979)
- 3) 高野直人: “ゲルマニウム半導体検出器の半実験的な効率計算”  
RADIOISOTOPES, **36**, 3(1987)
- 4) M. Noguchi, K. Takeda, H. Higuchi, : “Semi-empirical  $\gamma$ -Ray Peak Efficiency Determination including Self-absorption Correction Based on Numerical Integration.” : Intern. J. Appl. Radiat. Isot., **32**, 17(1981)
- 5) 水本良彦, 日下部俊男, 岩田志郎: “Ge(Li) 検出器の円盤状面線源に対する全エネルギーピーク効率の形状補正”, RADIOISOTOPES, **35**, 411(1986)
- 6) 中村尚司, 大久保徹, 林 剛: “容積試料に対する高純度ゲルマニウム検出器のピーク効率の評価”, RADIOISOTOPES, **32**, 595(1983)
- 7) T. Nakamura: “Monte Carlo Calculation of Peak Efficiencies and Response Functions of Coaxial-type Ge(Li) Detectors for Disk Gamma-ray Sources.” , Nucl. Inst. Methods **131**, 521, (1975)
- 8) T. Nakamura, T. Suzuki: “Monte Carlo Calculation of Peak Efficiencies of Ge(Li) and Pure Ge Detectors To Voluminal Source and Comparison with Environmental Radioactivity Measurement.”  
Nucl. Inst. Methods **205**, 211, (1975)
- 9) M. K. Miller : “Self-absorption Corrections for Gamma Ray Spectral Measurements of  $^{210}\text{Pb}$  in Environmental Samples.” , Nucl. Inst. Methods, Phys Res Sect A, **258**, 281(1987)

- 10) L. Zikovsky: "Correction Factors for the Selfabsorption of Gamma-rays in a Cylindrical Sample" ,Nucl Inst. Methods, Phys Res Sect B, **232**, 421 (1984)
  
- 11) R. J. Gehrke, R. G. Helmer and R. C. Greenwood: "Precise Relative  $\gamma$ -Ray Intensities for Calibration of Ge Semiconductor Detectors" ,Nucl Inst. Methods, **147**, 405(1977)
  
- 12) A. P. Kushelevski and Z. B. Alfassi: "Off Center Gamma Ray Detection Efficiencies of Cylindrical Single Open Ended(SOE) Ge(Li) Detectors" , Nucl. Inst. Methods, **131**, 93(1975)
  
- 13) K. Debertin, U. Sch Ö tzing: "Coincidence Summing Corrections in Ge(Li)-Spectrometry at Low Source-to-Detector Distances." , Nucl. Inst. Methods, **158**, 471(1979)

## 第7章 測定試料調製法

### 7. 1 試料容器

現在、 $\gamma$ 線の測定に利用されている試料容器は多種多様であり、容量、底面積、底厚の違い等で定量下限値は変わる。

#### (1) 測定容器の種類

一般に使用されている測定容器には、V-1、V-2、V-3、U-4、U-8、ラストロウェア、マリネリ容器などがある。マリネリ容器は液体、生及び乾燥物のような試料に、その他の容器は、土壌、海底土、灰試料に多く使用されている。

マリネリ容器は、牛乳、海水、陸水等の液体や細断した野菜など、前処理を施さないうで、そのまま測定する場合によく用いられる。検出感度が高く、前処理抜きで、また短い測定時間でもある程度の定量結果が得られるため、放射能が高いかどうかを早く知りたい緊急時に用いられる。

いろいろな容器の例

| 容器          | 容器の<br>高さmm | 底面積<br>( $\text{cm}^2$ ) | 底厚<br>(mm) | 材 質<br>(本 体) | 特 徴 |
|-------------|-------------|--------------------------|------------|--------------|-----|
| V-1         | 35          | 28                       | 2.5        | スチロール        | 気 密 |
| V-2         | 46          | 49                       | 2.5        | スチロール        | 気 密 |
| V-3         | 57          | 69                       | 3          | スチロール        | 気 密 |
| ラスト<br>ウェア  | 64          | 35                       | 3          | ポリプロピレン      | 気 密 |
| U-4         | 32          | 20                       | 2.5        | スチロール        | 安 価 |
| U-8         | 62          | 21                       | 2.5        | スチロール        | 安 価 |
| マリネリ        | 190         | —                        | —          | 塩ビ、アクリル      | 高 価 |
| セキュリ<br>テナー | 75          | 20                       | 1.5        | ポリプロピレン      | 気 密 |
| テナー         | 91          | 31                       | 2.5        | ポリプロピレン      | 気 密 |

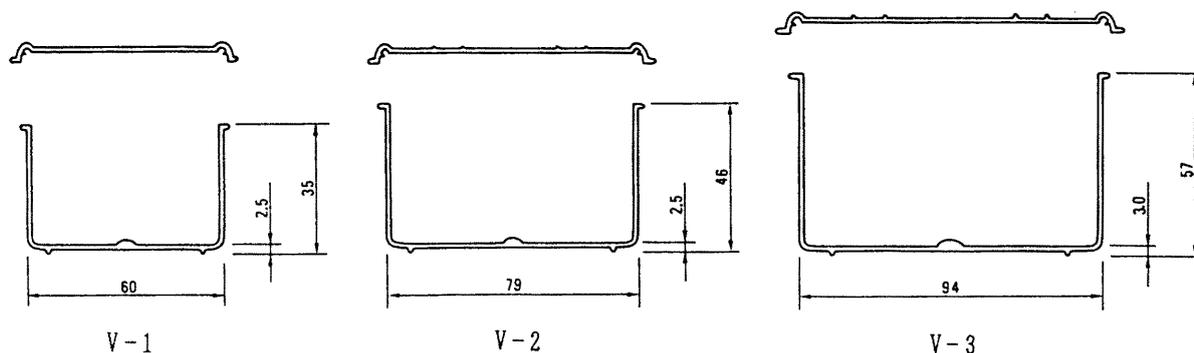


図7-1 a 各種容器の断面

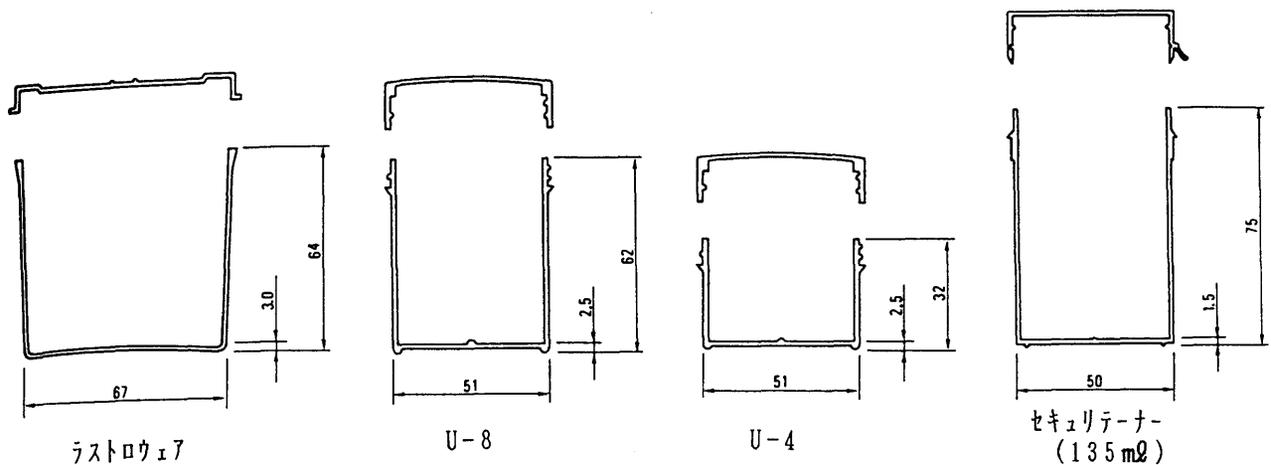


図7-1b 各種容器の断面

(2) 測定容器の選択

1. 同じ量の測定試料を測定しても、容器の底面積や底厚で計数率が変わり、底厚が薄く、底面積が約  $30\text{cm}^2$  (検出器結晶の大きさで多少異なる) 程度の容器のピーク効率が最も高い。
2. 大きさの違う容器を使用すると、それぞれの容器に対するピーク効率を求める必要があり、なるべく容器の種類を増やさない方がよい。
3. 多量の試料を測定に供する事が出来るときは(特に短時間で多数の試料を測定するとき)、マリネリ容器の方が試料当りの定量下限値が低いので有利である。
4. マリネリ容器は、高価なので使い捨てにできない。容器を洗浄して再使用するが、酸または洗剤で洗浄しても汚染を完全に除去するのは容易ではない。

前もってマリネリ容器専用のビニールバッグを用意し、容器内側に装着しておき、その中に試料を入れ測定すると、ビニールバッグの交換だけで繰り返し使用できる。

ビニールバッグはマリネリ容器と違い、安価で、前もって用意しておいても保存に場所を取らないので、核実験時等多くの試料を測定するときにも対応できる。

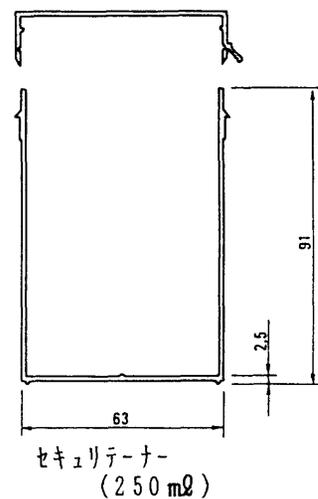


図7-2 底面積  $30\text{cm}^2$  程度の  $250\text{ml}$  容器図

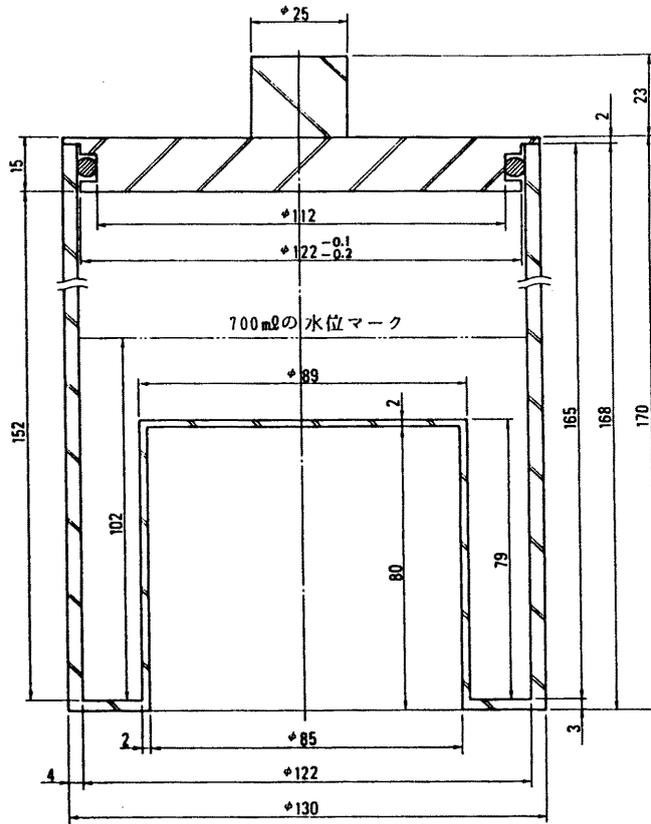


図 7 - 3 700m<sup>3</sup> マリネリ容器図

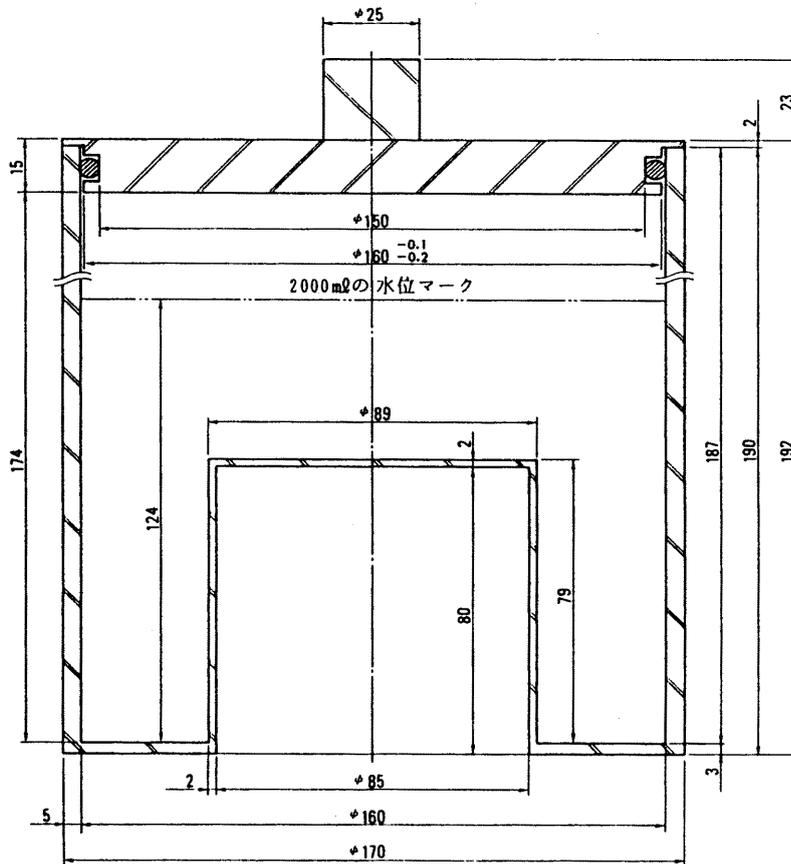


図 7 - 4 2000m<sup>3</sup> マリネリ容器図

## 7. 2 試料の充填

Ge半導体検出器を用いたγ線スペクトロメトリーであれば非破壊で分析できるので、環境試料測定においても試料を採取したまま（溶液、生）、または簡単な前処理だけ（乾燥、灰化、沈殿）で測定に供する事が多い。ただし高度な濃縮操作を行った時よりも測定試料の容積が大きくなり、従って、

1. 他の試料との相互汚染を起こさない。
2. 容器内で粗密がなく均一になっている。
3. あまり崩れ易くないように固定する。

などに注意する必要がある。ここでは、試料詰めの方法の具体的な例を述べる。

### 7. 2. 1 試料詰め準備

(1) 測定しようとする試料を、採取状況の記録等と照合して確認する。

採取記録例

試料番号、試料採取日、試料の種類（ほうれん草、土壌・・・）  
採取場所、灰化率、乾燥率

(2) どのような試料かわかるように必要な情報を測定容器に記入する。

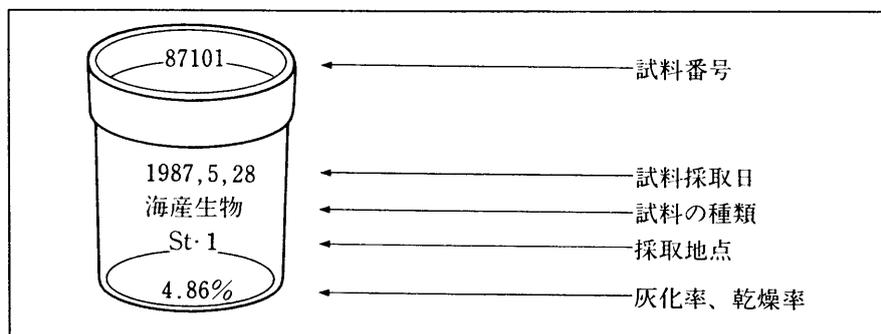


図7-5 測定容器への情報記入例

(3) この際、試料と容器の組合せを間違えると取り返しがつかない。

### 7. 2. 2 試料詰めに必要な器具

(1) 各試料共通なもの

- 上皿天秤（風袋を除去出来るものがよい）
- 詰め終わった試料の厚さを測る定規
- 落し蓋（容器底の内径と同じ径のもの、アクリル製円盤）
- 薄いポリエチレンシート（厚さ 0.01~0.05mm程度のもの）
- 測定容器を入れるポリエチレン袋（小~大の各種）
- 使い捨て手袋（ポリエチレン製の手袋等）
- ペーパータオル、キムワイプ、はさみ、カッター

(2) 土壌、海底土、灰、乾燥物

測定容器 (50~200m $\phi$ 程度の小型容器)

試料詰め具 (容器底の内径よりやや小さめの径の亚克力製円盤を直径20mm程度の棒に接着したもの)、薬さじ等

(3) 浮遊塵

測定容器 (50~100m $\phi$ 程度の小型容器)

(4) 水、生、乾燥物

0.5~2 $\phi$ 程度のマリネリ容器

包丁、メスシリンダ (1~2 $\phi$ ) 等

7. 2. 3 土壌、海底土、灰化物、乾燥物試料の詰め方

(1) なるべく相互汚染の起こらない場所で試料を詰める。

大型のドラフト内でもよいが、試料詰め用に、換気口の付いている透明塩化ビニル製簡易ドラフト等を用意すると便利である。

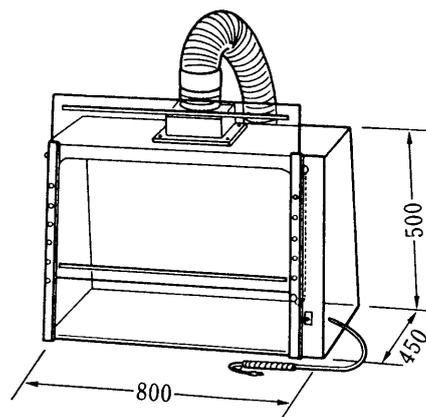


図7-6 試料詰め用簡易ドラフトボックスの例

(2) 手順

1) 土壌、海底土、灰試料

- ① 使用前に簡易ドラフト内側等の作業場所を清掃し、紙を敷く。
- ② 試料詰め具の押圧面にポリエチレンシートをかぶせる。
- ③ 上皿天秤で測定容器 (蓋込み) の重さを計る。
- ④ 測定容器にいっぱい入れず、容器の 1/5 程度の量を数回に分けて入れる。
- ⑤ 1/5 程度の試料を入れたら、詰め具を利用するなどして詰める。容器を軽く机に打ちつけるなどしてもよい。

土壌 : 比較的詰め易い試料であるが、粉碎したものは舞い上がりがあるので相互汚染に注意する。

海底土 : 砂状のものは圧迫しても詰まらないので、薬さじなどでつつき空洞部分を少なくする程度でよい。

粉碎したヘドロ質のものは、詰め具で圧迫しても容器内壁との隙間から漏れ、容易に詰めることができないので、十分試料が締まってから圧迫する。相互汚染にも注意する。

灰化物：圧迫すると容易に詰まるが、力を入れ過ぎると固まった試料に「ひび」がはいるので、適度な力で詰める。「ひび」が入った場合は薬さじで砕き再圧迫する。

- ⑥ 上記操作を試料の全量または容器がいっぱいになるまで繰り返す。
- ⑦ 測定容器内の試料上面を平にならし、容器底の上面から試料の厚さを測り油性ペンで容器に書き込む。凸凹があれば平均し 0.5mm 程度の精度を出す。
- ⑧ 測定容器のネジ部や溝部に付着した試料を、刷毛などで取り除く。
- ⑨ 蓋をして 0.1g の精度で重量を計り、油性ペンで容器に風袋引き試料重量を書き込む。
- ⑩ 作業場所に敷いた紙で詰め具にかぶせたポリエチレンシートを包んで捨て、内部を清掃する。
- ⑪ 薬さじ、詰め具、定規、刷毛、手を洗った後、水分を拭きとる。
  - ①～⑪ を試料分だけ繰り返す。
- ⑫ 試料を詰め終わったら、容器を水を含ませたペーパータオルまたはキムワイプで拭き、ポリエチレン袋に入れる。

キムワイプで拭いた後は直接手で触れない。

ポリエチレン袋に手を差込んだままで試料をつかみ、袋を裏返しにする。返したままで空気を抜き測定容器の底にシワがよらないよう注意しながら口を結ぶ。
- ⑬ ポリエチレン袋に入れ終わったら測定室に運ぶ。

## 2) 乾燥物

- ① 土壌、海底土、灰試料の ④までを行う。
- ② 使い捨て手袋（ポリエチレン製手袋等）を着用し、試料を細かくする。試料が硬い時は、はさみなどを利用する。
- ③ 試料は測定容器がいっぱいになるまで、または全試料を入れる。
- ④ 蓋をして 0.1g の精度で重量を計り、油性ペンで容器に風袋引き試料重量を書き込む。
- ⑤ 一旦蓋を取り試料の上にアクリル製の落とし蓋を乗せ押え付けた後、再び蓋をする。この時、柔らかいポリエチレンシートを丸めて、落とし蓋と測定容器の蓋の間にいれて隙間を埋めるとよい。
- ⑥ 落とし蓋を用いなかったときは測定容器内の試料上面を平にならし、容器底の上面から試料の厚さを測り油性ペンで容器に書き込む。凸凹があれば平均し 0.5mm 程度の精度で測る。
- ⑦ 土壌、海底土、灰試料の ⑧、⑩～⑬を行う。

### 3) 浮遊塵

ろ紙のままで測定する場合（灰化した時は 1) 参照のこと）

- ① 測定容器に蓋をして重量を計る。
- ② 測定容器の底の内径に合わせ、鉋かカッターで試料の付着したろ紙を切りとる。同一試料からとれるだけ取る。
- ③ 試料のついている面を底に向け測定容器がいっぱいになるまで、または全試料を入れる。
- ④ 2) 乾燥物の ④ 以下を行う。

### 7. 2. 4 マリネリ容器への溶液、生、乾燥物試料の詰め方

1. 陸水、降（雨）水、河川水、海水、牛乳等液体試料はそのまま測定容器に入れる。
2. 野菜、果物等水分の多い生試料は包丁等で細かく刻む。繊維質でないものはミキサーの使用も考えられるが、試料が複数あるとミキサーの洗浄が大変なので、なるべく使用しない方がよい。
3. 乾燥物は 7. 2. 3 (2) 2) 乾燥物 と同様な方法で細かくする。

#### (1) 手順

- ① 容器の重さを計る。乾燥物は落とし蓋（アクリル円盤）込みの重量を計る。
- ② 溶液、生試料：マリネリ容器についている目盛りまで一定量の試料で満たす。  
乾燥物：マリネリ容器についている目盛りの上まで入れ、落とし蓋で押さえる。円盤を手で押して試料厚が容器の目盛りと一致するのを確認する。
- ③ 蓋をして 0.1g の精度で重量を計り、油性ペンで容器に風袋引き試料重量を書き込む。
- ④ ビニールテープなどで蓋を固定し溶液が漏れないようにする。乾燥物は落とし蓋の上に丸めた柔らかいポリエチレンシートなどを入れ、容器の目盛りまで上から押し付けるとよい。
- ⑤ ポリエチレン袋に入れ、空気を抜き、ビニールテープなどを用いて口を閉じる。  
マリネリ容器の底の凹部分に検出器がはいることを考慮し、ポリエチレン袋の上から凹部分に余裕ができるように、凹型に押さえつけた状態のままテープで口を閉じる。
- ⑥ 7. 2. 3 (2) 1) 土壌、海底土、灰試料の ⑫～⑬ を行う。

#### 7. 2. 5 その他の試料の詰め方

特殊な前処理をした試料、例えば機械により圧迫・固化した試料、化学処理による沈殿試料等の測定試料を容器に詰めるなどのように、前処理の方法で詰め方が異なるものは、文献1を参照する。その場合にも、ここまでに述べた注意事項などに関する考え方に従って行う。

--- 引用文献 -----  
(文献1) 科学技術庁放射能測定法シリーズ“ゲルマニウム半導体検出器等を用いる機器分析のための試料の前処理法”, 科学技術庁, (1982)

## 第 8 章 測定と記録

Ge半導体検出器を用いる環境試料測定の手順及び注意事項について具体的に述べる。

測定時間、供試量については分析機関によって各々の理由に基づき決定されるが、時間は3～24時間、供試量については灰で数～数十g、水で数十ℓ（前処理前）、土等で百g程度であることが多い。

### 8. 1 試料ホルダ

業務としての環境放射能の分析では、定常的に多数の試料を扱う事が前提になる。そのため、高度な化学処理などを行わない場合が多いので測定試料の体積が比較的大きくなる。しかし測定試料の放射能は低いので検出器エンドキャップに密着させて測定する必要がある。このため試料の測定位置が狂うと（特に上下方向に）大きな誤差を生じるので、測定位置の正確な再現性が要求される。

試料を検出器のエンドキャップ上に正確に固定するためにはホルダを使用する。検出器の汚染防止のために被せてあるポリエチレン袋のため、ホルダの取付け位置がずれてこないように注意して作製する。試料をホルダにセットする時は100g程度のおもりを乗せて浮き上がるのを防ぐ。

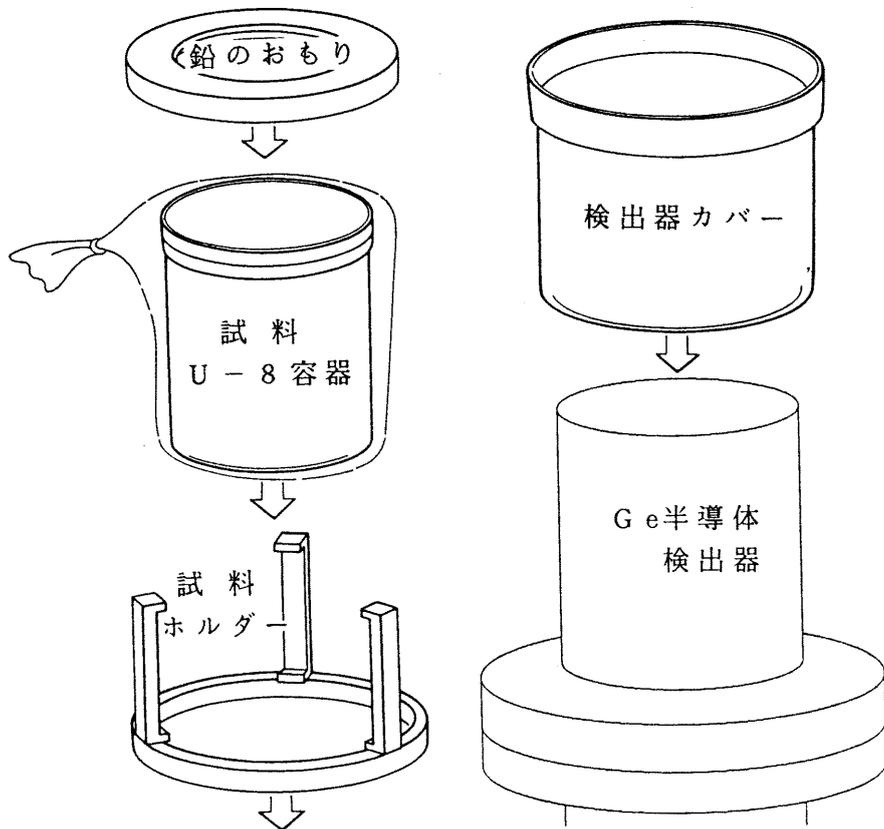


図 8 - 1 試料ホルダの 1 例

## 8. 2 測定開始手順

(1) 検出器汚染防止のため、測定試料をポリエチレン袋で包む。

1. 測定室でさらに1枚ポリエチレン袋で包む。(試料詰めが完了していれば、ポリエチレン袋が掛けられて測定室に持ち込まれているはずである<sup>1)</sup>。)
2. ポリエチレン袋で包む際、空気が入らないように、また測定容器の底にシワができないようにする<sup>2)</sup>。

(2) 測定試料を検出器エンドキャップ上にセットする。

測定ノートに測定番号、試料名、試料内容等を記入する。このノートはそのまま測定記録簿として保存する。

(3) 直前に測定したスペクトルを波高分析器上でチェックする。

スペクトルに雑音やチャンネルシフト等がないか見る。

(4) 直前に測定したデータの消去

メモリーの live time 及びスペクトルが完全に消去されているのを確認する。

(5) 測定の開始

1. 測定開始後、live time が0秒から数え始めるのを確認する。
2. CRTやディスプレイ上で信号がスペクトルメモリーに入ってくるのを確かめる。

---

1) 7章 参照。1枚目の袋は容器中の試料が外へ洩れて周りを汚染しないためであり、2枚目は測定試料調製室の汚染を測定室に持ち込まないためである。

2) 空気が入ったり、シワがよると、測定容器が検出器エンドキャップ上で浮き上がり密着できないことがある。

### 8. 3 測定中のチェック

環境試料は20時間以上にわたって測定される場合が多く、測定中にもチェックを行うことが望ましい。

#### (1) データ収集

1. スペクトルデータ、live timer、true timer が正常にカウントアップされているか確認する。測定開始時刻からおおよその測定時間を算出し、これらの数値がほぼ妥当かどうかを確かめれば理想的である。
2. dead time meter が大きくふれていないか見る。

#### (2) スペクトル状態の観察

1. ピーク形状は正常か確かめる。  
40K のような観察しやすいピークでチャンネルシフト、コブ状のテーリングなどの異常がないか見る。
2. ピークの出方や連続領域のパターンは試料の種類等からみて妥当かどうかを確認する。
3. メモリー落ちはないか調べる。

(3) 長時間 CRT を明るくしていると画面が劣化するので、測定中は CRT を暗くしておく（自動的に消える機種もある）。

### 8. 4 測定終了手順

測定を終了するに当たって以下の様なチェックを行う（自動測定、自動試料交換機を用いた場合、出来ない項目がある）。

#### (1) 測定の停止

1. 目標とする測定時間に達しているか確認する。
2. データ収集が正常に動作しているか確認してから、測定を停止する。

#### (2) live time と測定終了時刻の記録

live time は測定開始時刻からみて妥当かどうかを確認し、測定終了時刻とともにノートに記録する。

#### (3) 試料の取りだし

1. 試料が正しい位置に置かれていたかを見る。
2. エンドキャップに触ってみる。（冷たいとクライオスタットの真空劣化が考えられる。）
3. 検出器をカバーしているポリエチレンシートにシワがよったり、切れていないか見る。

#### (4) 測定試料の確認

測定ノートと照合するなどして、取り違えが無かったかを確認後、直ちに試料を片づける。

#### (5) スペクトルデータファイルの作成

1. 計算機へデータを転送し、ファイルを作成する。
2. 波高分析器が複数ある時は、スペクトルの取り違えに注意する。

#### (6) スペクトル・データファイルの検査

1. 計算機に取り込んだスペクトルデータをプリントアウトする。
2. 波高分析器内のデータと計算機に作成されたデータファイルが同一であるかどうか、ディスプレイまたはプリントアウトしたデータと照合・確認（live time を見る）した後、波高分析器のデータを消去する。
3. 測定ノート等に記載されている測定番号、測定開始時間、live time とスペクトルデータの内容が一致することを確認する。

既に試料名、採取日、容器の種類、試料の厚さ、重量、乾燥・灰分%等がスペクトルデータと一緒に書き込まれているならば、これらについても測定ノート等と一致するか確認する。

#### (7) スペクトルの検査

1. プロッタでスペクトルデータをプロットアウトする。
2. ピーク形状が正常かどうかを見る。  
ピークシフト、ピークの裾にコブ状のテーリングはないか調べる。  
機器調整時のスペクトルとピークの広がり具合を比較し、分解能の劣化の有無を確認する。
3. メモリー落ちはないか調べる。
4. スペクトルの様子を確認する。  
バックグラウンド・スペクトルには、X線、陽電子消滅放射線、天然核種のピークの出方や連続領域の形等、その検出器特有のパターンがあり、測定スペクトル（特に計数率が低いとき）と照らし合わせると正常に作動しているかどうかの目安になることがある。
5. 試料の種類等から見てピークの出方、コンプトン領域の形は妥当かどうかを確認する。検出される核種、スペクトルの形は、試料の種類ごとに大体似ているので、取り違え等が分かることがある。
6. ピークを同定し、通常検出されない核種の有無を確認する。検出される可能性のある核種を記入したゲージ<sup>1)</sup>を使うと便利である。

核種は資料 B：核データを参照する。

---

1) 付録：同定用ゲージを参照。

## 8. 5 測定ノート

測定ノートに記録を取る事は重要であり、解析時の入力情報のチェックはもとより測定機器の管理にも役立ち、また後でデータ等に異常が見つかった時の調査の手がかりにもなる。

通常の試料測定以外の事を行った場合は「その測定が何のために行われたか」必ず記録するべきである。

測定条件の変更があった時も後で分かるように詳しく記載するべきである。例えば、頻繁に測定条件を変更しなければならなかった事と、液体窒素の補給との間の相関が分かれば、真空系に何かあると考えられる。

複数の検出器があるならば測定ノートは検出器ごとに1冊ずつ用意する。

測定ノートに記載する項目（解析上必要な項目を全て記載する方式の場合）を以下に例示する。

### (1) 測定試料について

試料番号 : 測定試料1つ1つに固有の名前か番号

試料名、部位 : 浮遊塵、海産生物、日常食、土壌、海水、陸水、降下物等  
(部位: 内臓、筋肉、下層、上層、…～…cm 等)

試料採取場所 : 住所等。

試料採取日時 : 採取年月日、採取期間

供試量 : 単位 (ℓ、g、kg 等)、測定に供した量。

灰分比等 : 灰分比、乾燥比 (生試料を乾燥または灰化して測定した時、放射能濃度の生換算に使用。g/g、kg/ℓ 等单位にも注意する)

回収率等 : 化学回収率等

前処理形態 : 灰化、濃縮、蒸発乾固、風乾、粉碎、化学沈澱、集塵等。

容器の種類 : U-8、U-4、V-1、2ℓマリネリピーカ等。容器によってピーク効率の求め方 (関数式等) が異なる。

試料充填高さ : 単位 (mm または、cm) 0.5mm 単位程度の表示。

試料重量 : 単位 (g) 0.1g まで表示。

沈殿の種類、量 : 二酸化マンガン・・・ 単位 (g) 0.1g まで表示。

報告値の単位 : Bq/試料、Bq/ℓ、Bq/kg乾土、Bq/kg生等

(2) 測定について

- 測定番号 : 測定器毎に1回1回の測定に付けられた固有の番号
- 測定開始時 : 年月日時分
- 測定終了時 : 年月日時分
- 検出器番号 :
- 測定時間 : live time (秒)
- 測定者 : 試料を検出器にセットした者 (自署)
- 測定終了者 : 測定後それを取り出した者 (自署)

(3) 測定条件、測定目的について

- 測定目的 : その測定が何のために行われたか記録しておく。検討用試料測定、分解能測定、効率測定、汚染確認・・・・
- 試料の特徴 : 放射能の強い試料、密封しにくかった試料の測定。
- 測定条件 : 時定数、変換利得、試料位置、空調、補助遮蔽・・・・等の変更があった時。

(4) 測定データについて

- $^{40}\text{K}$  のピークチャンネル : 毎日記録するとチャンネルがシフトする傾向がつかめ、エネルギー校正を再調整する目安になる。
- スペクトル上の特徴 : 例えば  $^7\text{Be}$  が強い。 $^{234}\text{Th}$  が目立つ・・・・

(5) その他

- 特記事項を記載する。

| 測定番号   | 測定開始             |       | 測定時間<br>(Sec) | 測定終了             |      | K <sub>0</sub> ch | F <sub>077</sub> | 試料採取日付    | 測定容器 | 試料番号<br>試料花径高 <sub>1</sub> | 前処理形態<br>試料重量          | 灰分率比                  | 測定目的<br>試料名 | 試料採取場所    | F <sub>077</sub><br>番号 |
|--------|------------------|-------|---------------|------------------|------|-------------------|------------------|-----------|------|----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------|-----------|------------------------|
|        | 月日               | 時間    |               | 月日               | 時間   |                   |                  |           |      |                            |                        |                       |             |           |                        |
| 204611 | // <sub>11</sub> | 11:49 | 76658         | // <sub>12</sub> | 9:06 | 21.7              | OK               | 62. 9/2   | U-8  | NGO 4701<br>49.5 mm        | 乾土<br>122.4g           |                       | 2/40<br>海底土 | K港 1      | 池                      |
| 204612 | // <sub>12</sub> | 12:04 | 75029         | // <sub>13</sub> | 8:55 | 21.8              | OK               | 62. 9/2   | U-8  | NGO 4708<br>49.5 mm        | 乾土<br>126.7g           |                       | 2/40<br>海底土 | K港 8      | 池                      |
| 204613 | // <sub>13</sub> | 11:15 | 77971         | // <sub>14</sub> | 8:56 | 21.9              | OK               | 62. 9/2   | U-8  | NGO 4710<br>49.5 mm        | 乾土<br>127.0g           |                       | 2/40<br>海底土 | K港 10     | 池                      |
| 204614 | // <sub>14</sub> | 12:00 | 162117        | // <sub>16</sub> | 9:03 | 22.0              | OK               | 62. 10/1  | U-8  | MBF 0818<br>49.0 mm        | 灰<br>81.9g             | 5.25%                 | M電11<br>77イ | 第2回       | 石                      |
| 204615 | // <sub>16</sub> | 15:24 | 150026        | // <sub>18</sub> | 9:05 | 22.0              | OK               | —         | —    | ⊙ B. G                     |                        | 54 M <sub>0</sub> *** |             |           |                        |
| 204616 | // <sub>18</sub> | 14:36 | 152478        | // <sub>20</sub> | 8:57 | 21.6              | OK               | —         | —    | B. G                       |                        |                       |             |           |                        |
| 204617 | // <sub>20</sub> | 11:31 | 76168         | // <sub>21</sub> | 9:15 | 21.7              | OK               | 62. 6/3   | U-8  | CBS 2611<br>23 mm          | 灰<br>26.66g            | 2.00%                 | 確認分析<br>Tサ工 | A県<br>Y島沖 | 津                      |
| 204618 | // <sub>21</sub> | 12:52 | 70014         | // <sub>22</sub> | —    | 21.9              | OK               | 62. 9/2   | U-8  | EW0 0259<br>11.5 mm        | 水酸化物<br>502 32.31g 20g | 硫酸化物沈殿                | E研究所<br>海水  | E調査       | 岡                      |
| 204619 | // <sub>24</sub> | 12:05 | 72301         | // <sub>25</sub> | 9:00 | 21.8              | OK               | 62. 11/10 | U-4  | PVK 0207<br>36 mm          | 灰<br>26.2g             | 0.716%                | B県<br>キャベツ  | S浜        | 岡                      |
| 204620 | // <sub>25</sub> | 11:29 | 77074         | // <sub>26</sub> | 8:59 | 21.7              | OK               | 62. 4/12  | U-4  | CB0 2217<br>27 mm          | 灰<br>29.0g             | 1.82%                 | 確認分析<br>シラス | C県<br>D漁場 | 高                      |

//<sub>18</sub> ドリフト発生 (約1時間測定終了後、取りかわる程)  
AMP交換した。OK → 使用していたAMP修理  
(No.13のAMP)

//<sub>20</sub> エネルギー校正

//<sub>25</sub> ヒストメモリー DS-1030 故障!  
他のメモリーに故障した。MCA 8100に交換した。

\* // 電気系工事のため停電予定 (9:20~12:50)

液体窒素を供給した。  
停電により電源を一旦落とした。  
空調の設定を変更した。  
メモリー落ちがあった。  
線形増幅器を交換した。

## 第9章 スペクトル解析

試料を測定して得られたスペクトルのピークを探索後、核種を同定し、全エネルギーピークの面積から放射能を計算する。この章の計算には、電子計算機を使用する。環境試料を測定して得られる $\gamma$ 線スペクトルは、計数値が低くてピークの形状が悪く、また妨害ピークがある等、その解析は簡単ではないことが多い。

定量には次の2つの方法がある。

1. 探索の結果検出されたピークについて同定し、ピーク面積を計算し、放射能を定量する。
2. ピークが検出されたか否かに係わらず、着目する核種のピーク位置において面積を計算し、放射能を定量する。

前者の方法では関心のある核種について、データが得られないことがあり、後者では予想外の核種について対応できない。両者を適切に併用する。

解析には電子計算機を使用するが、関数式、使用するパラメータ、ピーク領域、核データ等が妥当であるか否か、解析過程のグラフや表を出力して確認出来るようにプログラムするのが良い。

### 9. 1 ピーク探索とFWHM〔計算機を使用〕

ピーク領域の設定等のため、スペクトル中のピークを探索し、FWHM (full width at half maximum, ピークの半分の高さにおける幅) とチャンネルの、エネルギーによる式を作成する。

(1) 計算処理手順の一例を示す。

- ① 過去の測定データ等から仮のFWHMを得て、ガウス型平滑化2次微分フィルタを作る(可能であればピークのFWHM、計数値、近接ピーク等に応じてフィルタの幅等を変化させるとよい)。
- ② 平滑化2次微分を実施し、その計数誤差と比較してピークを探索する。  
検出されたピークの中心を、平滑化2次微分されたスペクトルについて3点計数値法または1次微係数ゼロクロス法で計算し、④のためにピーク中心の初期値を得る。
- ③ 検出されたピークの中から、その近傍(FWHMの3幅以内)に他のピークが無い物を、FWHM及びチャンネルとエネルギーの関係式を作成するためにピックアップする。

Pb-K $\alpha$ X線(すぐ隣に別のX線ピークがあるが利用できる)、 $^{214}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Tl}$ 、 $^{214}\text{Bi}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、等の $\gamma$ 線ピークが考えられる。

- ④ ピックアップされたピークを「1次式+ガウス関数」<sup>1)</sup>で関数適合する。結果のピーク中心と幅と（面積とそれらの）誤差をリストアップする。
- ⑤ FWHM を  $a + b \times \sqrt{\text{チャンネル}}$  に関数適合させ、 $\chi^2$ 検定する。
1. 陽電子消滅放射線（511.0keV）およびシングルエスケープピークは上式に従わないのでチャンネル-エネルギーの式の作成にのみ使用する。
  2.  $\chi^2$ を調べ、設定した信頼区間内に入っていなかったなら、下式の値が大きい順に、ピークを一つずつ除外して関数適合と $\chi^2$ 検定をやり直す。

$$\left| \{FWHM_i - FWHM(E_i)\} \right| / \sqrt{\{\Delta_i^2 + \Delta(E_i)^2\}}$$

FWHM<sub>i</sub> : 各ピークの半値幅

FWHM(E<sub>i</sub>): 半値幅-エネルギーの式から求めた半値幅

$\Delta_i$  : 各ピークの半値幅の誤差

$\Delta(E_i)$  : 半値幅-エネルギー式の誤差

- ⑥ 丁寧に計算しようとするならば、⑤の結果が①で使用したFWHMと統計変動以上の違いがあった時は修正し、①へ戻り、フィルタの作成からやり直す。

---

1) 9. 1 (6) 参照。

(2) ピーク探査用のガウス型平滑化2次微分フィルタ

1. スペクトルの FWHM の 1~2 倍の幅 “W” を持つガウス関数を、2 回微分し、数値フィルタを作る。

$$F(x) = \exp\left\{-\frac{2.773}{W^2}(x-p)^2\right\}$$

p : ピーク中心

x - p = j と置き換えた後、j について2回微分すると、

$$F''(j) = -\left\{\frac{5.546}{W^2}\left(1 - \frac{5.546j^2}{W^2}\right)\exp\left(-\frac{5.546j^2}{2 \cdot W^2}\right)\right\}$$

となる。

2. j を  $-3 \times W$  から  $3 \times W$  まで1ずつ変え、 $F''(j)$  を求めガウス型平滑化2次微分フィルタとする。j の範囲はこの程度で十分であり、これ以上は、 $F''(j)$  が小さくなるので不要である。

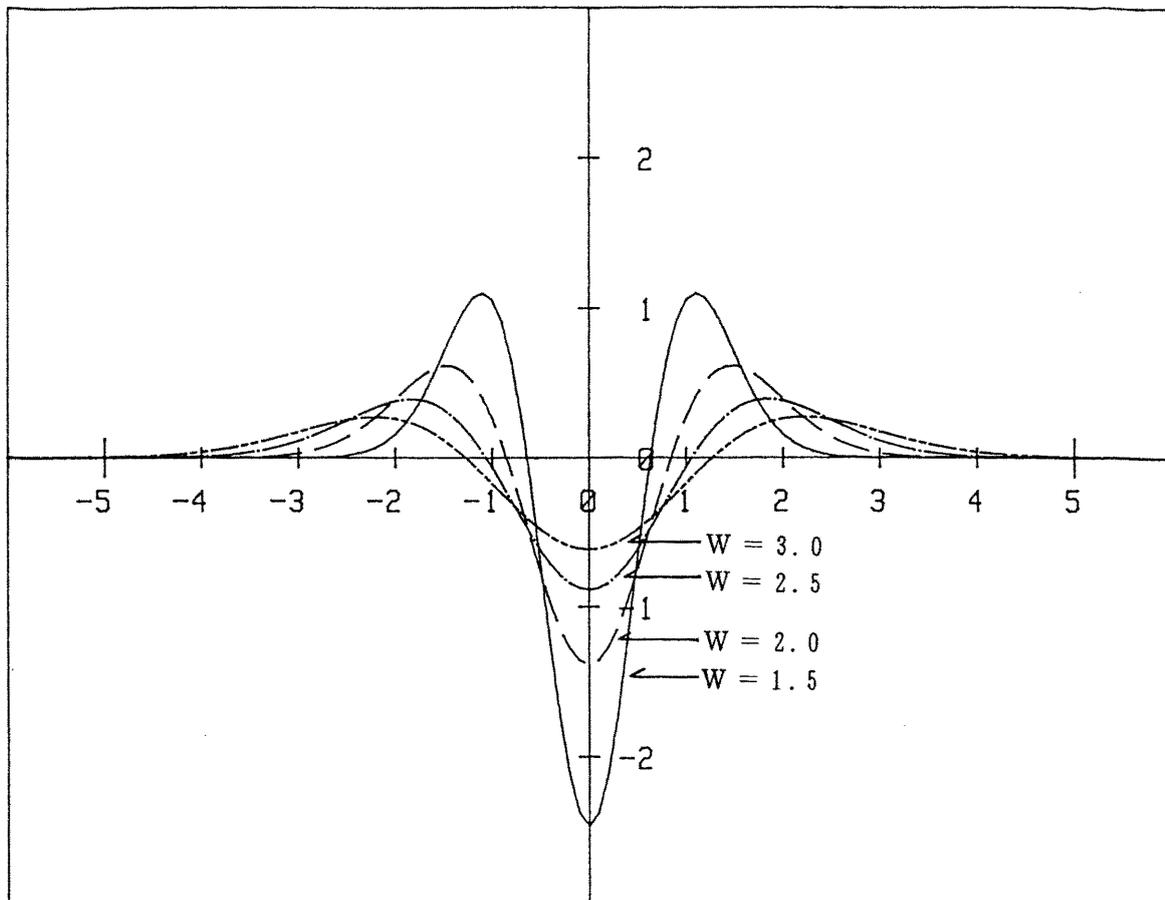


図 9 - 1 ガウス型平滑化2次微分フィルタ

(3) 平滑化2次微分とその計数誤差の計算

1. (2) で求めたフィルタを用い、平滑化2次微分値とその計数誤差を求める。平滑化2次微分値は次式で求める。

$$N''(i) = \sum_{j=-k}^k F''(j) \cdot N(i+j)$$

$N(i+j)$ :  $(i+j)$  チャンネルの計数值

$F''(j)$ : ガウス型平滑化2次微分フィルタ

$k$ :  $3 \times W$

2.  $N''(i)$  の計数誤差は次式で求める。

$$\sigma''(i) = \sqrt{\left(\sum_{j=-k}^k F''(j)^2 \cdot N(i+j)\right)}$$

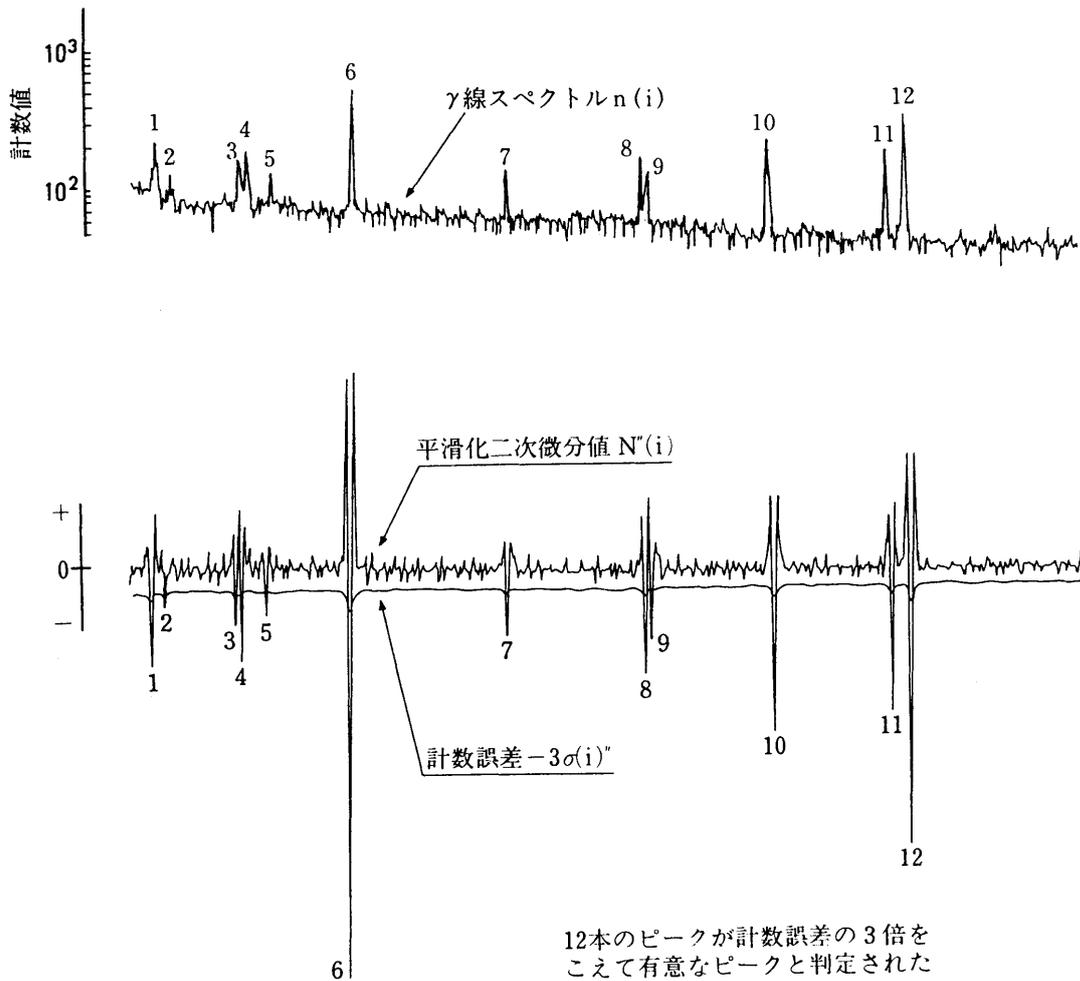


図 9 - 2 平滑化2次微分とその誤差の図

### 3. 平滑化 2 次微分プログラムの例

以下のプログラムでは、スペクトル  $Y(*)$  と平滑化のフィルタ幅  $W$  を受け取り、微分したスペクトル  $Dy(*)$  とその計数誤差  $Sdy(*)$  を返す。プログラム言語は HP-BASIC である。

```
1550 SUB Bibun(Y(*), Dy(*), Sdy(*), W)
1560 !=====
1570 ! 平滑化 2 次微分
1580 !=====
1590     DIM M(-21:21)
1600     INTEGER Fw, K, J
1610     Fw=MIN(3*W, 20)           ! j (x - p = j) の数
1620     FOR J=-Fw TO Fw         ! ガウス型平滑化 2 次微分フィルタ
1630         Ffww=5.546/W/W
1640         M(J)=-Ffww*(1-Ffww*J*J)*EXP(-Ffww*J*J/2)
1650     NEXT J
1660 !
1670     FOR K=50 TO 4080         ! 50チャンネルから4080チャンネルまで
1680         Dw=0                 ! 平滑化 2 次微分を行う。
1690         Sdw=0
1700         FOR J=-Fw TO Fw     ! 平滑化 2 次微分値を求める。
1710             Mw=M(J)
1720             Yw=Y(K+J)*Mw
1740             IF Yw<>0 THEN
1750                 Dw=Dw+Yw
1760                 Sdw=Sdw+Yw*Mw
1770             END IF
1780         NEXT J
1790         Dy(K)=Dw             ! 平滑化 2 次微分値
1800         Sdy(K)=SQR(Sdw)     ! その統計変動 (1σ)
1810     NEXT K
1820 SUBEND
```

#### 4. ピーク探査プログラム例

以下のプログラムではスペクトル  $Spc(*)$ 、平滑化2次微分フィルタの幅  $W$  を受取って平滑化2次微分を行い、その計数誤差と比較してピークを探し出して  $Prepeaksp(*)$  に書き込んで返す。プログラム言語は HP-BASIC である。

```
1000 SUB Peaksearch(Spc(*), INTEGER Peakcnt, REAL Prepeaksp(*), REAL Cn(*),
      Scn(*), W)
1010 ! *****
1020 OPTION BASE 1
1030 !
1040 CALL Bibun(Spc(*), Cn(*), Scn(*), W)
      ! 平滑化2次微分を行う。
1050 !
1060 J=1
1070 FOR I=30 TO 4070 ! 平滑化2次微分値を用いて 30 から 4070チャンネル
      ! までピーク探査を行う。
      !
1080 IF (Cn(I-1)>Cn(I)) AND (Cn(I)<Cn(I+1)) AND (Cn(I)<-2.5*Scn(I))
      AND (J<4097) THEN
      ! Iチャンネルの値が I-1チャンネル、I+1チャンネルより小さく
      ! かつ統計変動値の -2.5倍より小さい場合ピークと認める。
1090 Prepeaksp(J)=I+1/2*((Cn(I+1)-Cn(I-1))/(2*Cn(I)-Cn(I-1)
      -Cn(I+1)))
      ! ピーク中心チャンネルの算出
1100 Peakcnt=J ! 検出されたピークの数。
1110 J=J+1
1120 END IF
      !
1130 NEXT I
1140 SUBEND
```

(4) ピークの判定

全てのチャンネルの計数値について、平滑化2次微分とその誤差を計算し、組にしてチャンネル順に並べる。同じチャンネルの平滑化2次微分とその誤差を比較し、2次微分値×(-1)がその誤差の2~3倍より大きい所を探し、ピークとする。

1. ピークであるとの判定基準は、あまり敏感過ぎるとピークでないものを拾うので、平滑化2次微分が変動係数の2~3倍以上となった部分をピークの候補とするのが妥当である。

$$N''(i) \leq -2.5 \times \sigma''(i)$$

2. 小さなピークも出来るだけ見落とさないように探査するためには、上式の-2.5を大きくすれば(正にならない範囲で)よいが、放射能ではなくて単に計数値の統計変動に起因するピークの数が増えて来る。探査されたピークが放射能の存在を表わしているか否か、そのピークの面積計算、核種同定を行って判断する。

(5) ピーク中心チャンネルの計算

以下の2つの計算法は関数適合の初期値の計算、あるいは手計算する時に用いる。

1. 三点計数値法でピーク中心チャンネルを求める。

ピークのうち、もっとも計数値の高いチャンネルをh、その計数を $N_h$ 、 $h-1$ チャンネルおよび $h+1$ チャンネルの計数値をそれぞれ $N_{h-1}$ 、 $N_{h+1}$ とする。

- a) ピーク中心付近を放物線で近似すると、

$$P = h + \frac{1}{2} \left\{ \frac{N_{h+1} - N_{h-1}}{2N_h - N_{h-1} - N_{h+1}} \right\}$$

- b) ピーク中心付近を正規分布関数で近似するならば、

$$P = h + \frac{1}{2} \cdot \frac{\log(N_{h+1}/N_{h-1})}{\log\{N_h^2 / (N_{h-1} \cdot N_{h+1})\}}$$

logは自然対数

2. 1次微係数ゼロクロス法でピーク中心チャンネルを求めることもできる。

- a) ピークの最もカウント数の高いチャンネルと二番目のチャンネルの間にピーク中心があるとする。
- b) ピークをはさんで隣合うチャンネルを  $m$ 、 $m+1$  とし、その計数值に対する一次微係数をそれぞれ  $\Delta N_m$ 、 $\Delta N_{m+1}$  とする。
- c)  $\Delta N_m$ 、 $\Delta N_{m+1}$  は次式の  $i$  を  $m$ 、 $m+1$  とおいて求める。

$$\Delta N_i = \sum_{-k}^k k \cdot N_{i+k} \quad N_i: i \text{チャンネルのカウント数}$$

$k$  はピークの広がりや対称性に応じて決め、 $1 \sim 1.5 \text{keV}$  相当で十分である。

$$k = 2: \Delta N_i = 2(N_{i+2} - N_{i-2}) + N_{i+1} - N_{i-1}$$

$$k = 3: \Delta N_i = 3(N_{i+3} - N_{i-3}) + 2(N_{i+2} - N_{i-2}) + N_{i+1} - N_{i-1}$$

となる。

- d) ピーク中心チャンネルは  $P = m + \Delta N_m / (\Delta N_m - \Delta N_{m+1})$  となる。  
ただし  $\Delta N_m > 0$ 、 $\Delta N_{m+1} \leq 0$  この条件が満たされない場合は、前、後に1チャンネルずらして同じ計算を行う。

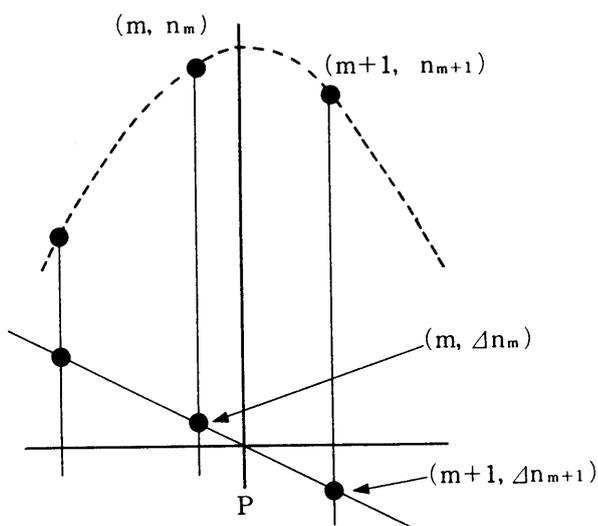


図 9-3 一次微係数ゼロクロス法

(6) ピークの FWHM の計算方法〔具体的な計算方法は次節を参照〕

- a) ピックアップされたピークを「1次式+ガウス関数」で関数適合する。  
「ガウス関数+1次式」を下記に示す。

$$F(i, C_k) = C_1 + C_2(i-P) + C_3 \exp\{C_4(i-P)^2\}$$

$C_1, C_2, C_3, C_4$ : 定数

$P$ : ピーク中心チャンネル

手計算するなら (FWHM のエネルギーによる式は一次回帰で計算する)

- b) ガウス関数へ疑似的に適合する<sup>1)</sup>。(誤差は計算できない)  
c) 計数値を比例配分して求める (ピーク中心は②で得た値を用いる)。

ここで求める FWHM は、ピーク探査、ピーク領域の決定などに使用するためであり、測定器の性能に関するエネルギー分解能については 9章3 および 5章に記載した。

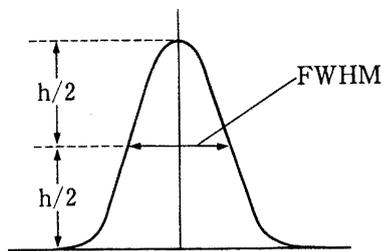


図 9 - 4 半値幅の定義

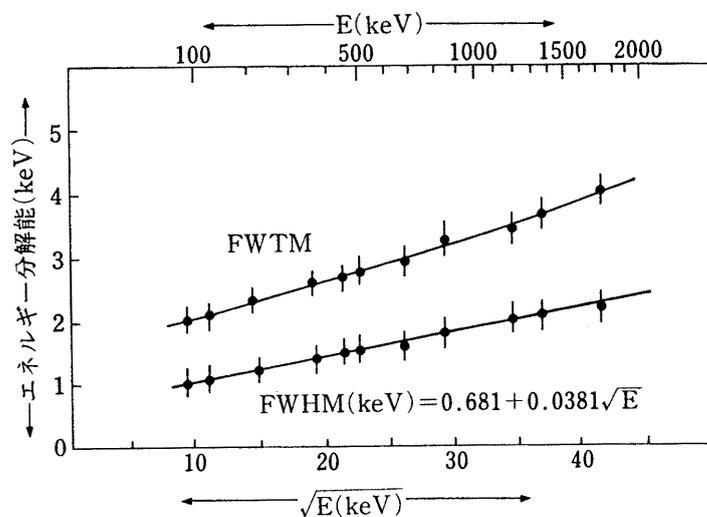


図 9 - 5 エネルギー分解能の例

1) 9. 3. 2 3) 参照。

9. 2 チャンネルとエネルギーの関係式〔計算機で求める〕

チャンネルとエネルギーの関係式は、試料やバックグラウンド等、解析の対象となるスペクトル自身のピークを用いて作成する。原則として、標準線源等を測定して得た式を、試料のスペクトルに適用しない。下記に計算手順の一例を示す。

① ピーク探査の結果 (9. 1 (1) ③) の中から、チャンネルとエネルギーの式を計算するためのピークを決める。

1. 前回の計算結果、核データ表等を参照し、ピックアップされたピークの核種を同定し、そのエネルギーを調べる。
2. 最小 2 乗法でチャンネル-エネルギーの式を求める。
3.  $\chi^2$  を調べ、設定した信頼区間内に入っていなかったなら、下式の値が大きい順に、ピークを一つずつ除外して関数適合と  $\chi^2$  検定をやり直す。

$$| \{ P_i - P(E_i) \} | / \sqrt { \Delta_i^2 + \Delta(E_i)^2 }$$

$P_i$  : 各ピークのピーク中心

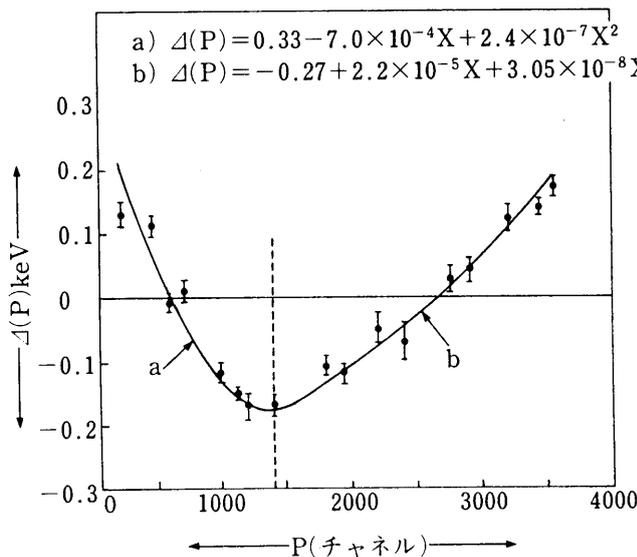
$P(E_i)$  : チャンネル-エネルギーの式から求めたピーク中心

$\Delta_i$  : 各ピークのピーク中心の誤差

$\Delta(E_i)$  : チャンネル-エネルギーの式の誤差

② チャンネル-エネルギー式とその誤差を計算する。

1. 適度な間隔で、はっきりしたピークが 3 本あれば最低の用は足りる。
2. 使用するピークが 3 本なら 2 次式を使う。
3. ピークの数が多くても 4 次以上の式を用いない。
4. 2 つの放物線を頂点で接続して用いてもよい。



$\Delta(P)$  : 直線回帰<sup>1)</sup>によって得られたチャンネルの式  
( $E = a + bP$  :  $a, b$  は定数) から  
求められるエネルギーと、  
真の  $\gamma$  線エネルギーの差

図 9-6 チャンネル-エネルギー式の直線関係からの偏差  $\Delta(P)$  の例

1) 9. 3. 4 3) 参照。

### 9. 3 ピーク解析

ピークに対して関数適合を用いて計算するので、解説Ⅲ（最小2乗法）に述べられているように、誤差を正しく取り扱わなければならない。FWHMの計算の時と異なり、面積計算のための関数適合を行う場合は正確を期するため、適合関数は単純なガウス関数と一次式の組合せでない方が望ましい。

#### 9. 3. 1 関数適合〔計算機で計算する〕

適合領域はピーク中心の左右に各々FWHMの8倍程度とする。ピークの形は検出器によって微妙に異なるので、ピーク関数を一つに決めることは困難であり、各々の検出器に合わせてピーク関数を作る事が望ましい。以下に計数誤差の小さいスペクトルに適用できる関数の一例を掲載する。

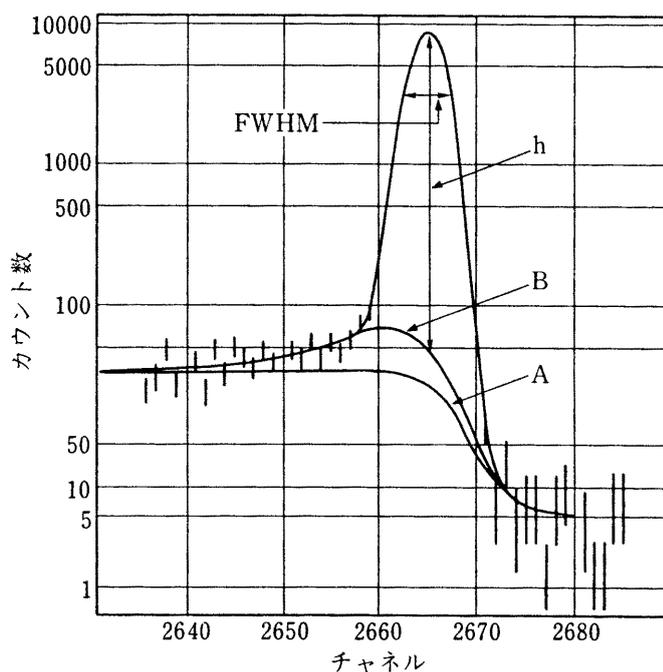


図9-7 関数曲線の分解図

左右で FWHM ( $w_l, w_r$ ) の異なる正規分布曲線を頂点で接続する。 $x_0$  をピーク中心と置き、低エネルギー側の階段状の形 A を

$$\frac{a}{1 + \exp \left\{ (x - x_0) / (1.5 w_l) \right\}}$$

- 1) ピーク低エネルギー側のテーリング B の形は検出器によって異なり、
1. ピーク低エネルギー側の立ち上がりの傾斜が高エネルギー側よりも緩やか。
  2. ピークの低エネルギー側のベースラインが、高エネルギー側のベースラインよりも高く、段差が大きい。
- の2種類ある。

$$\frac{b}{1+c(x-x_0)^2} \times \frac{1}{1+\exp\{(x-x_0)/(1.5W_1)\}} \quad \text{で表わす。}$$

以上を合わせると以下の式になる。

$$P(x) = h \times \exp\{-2.7726(x-x_0)^2 / (W_1 \text{ or } W_r)^2\} + \\ + \frac{1}{1+\exp\{(x-x_0)/(1.5W_1)\}} \times \left\{ a + \frac{b}{1+c(x-x_0)^2} \right\} + g$$

h : ピークの高さ

a : 段差の高さ

W<sub>1</sub> : ピークの左側に適用する幅

b : テーリングの高さ

W<sub>r</sub> : ピークの右側に適用する幅

c : テーリングの広がり

g : ベースラインの高さ

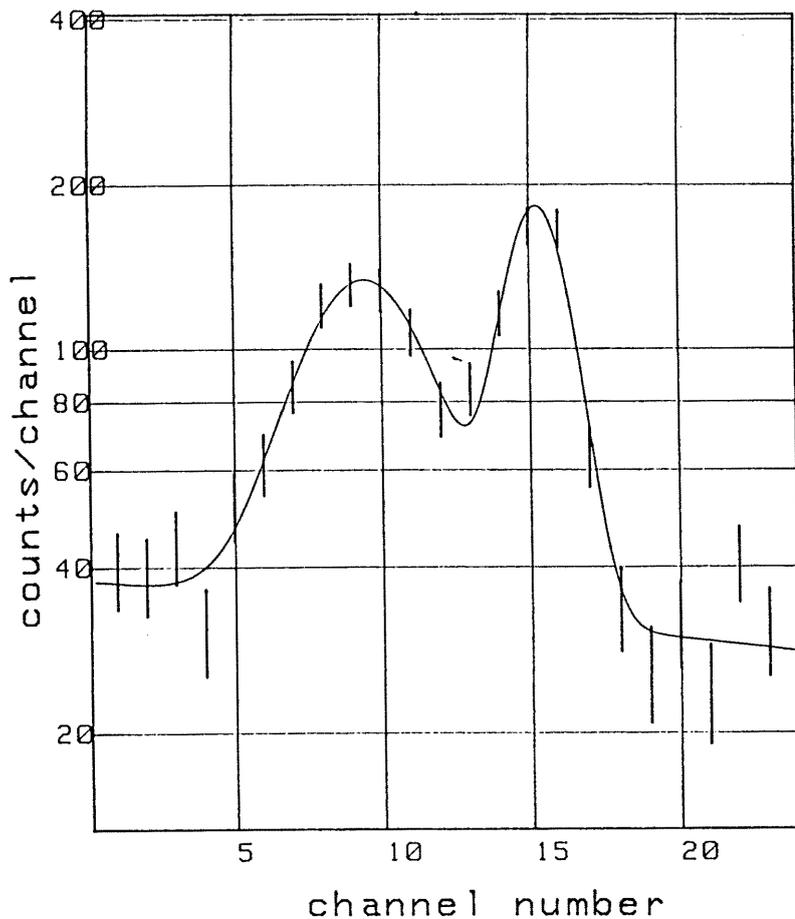
適合パラメータは、h, a, b, c, W<sub>1</sub>, W<sub>r</sub>, g およびピーク中心 X<sub>0</sub> である。

#### (1) 適合パラメータの設定

1. 核種を想定しない場合、ピーク中心は平滑化2次微分されたスペクトルに3点計数値法または一次微分ゼロクロス法等を適用して計算する。
2. 核種を想定する場合、ピーク中心はチャンネル-エネルギーの式に当てはめて計算し、計数が高いとき以外は適合パラメータにしない。
3. ピークの高さとベースラインのみを適合パラメータとし、関数適合によって求める。関数適合の際は、段差や非対称、テーリング、FWHM等のパラメータはエネルギー依存性を測定して予め関数化しておき、固定パラメータとする方がよい。
4. 適合計算の後、適合パラメータなどの誤差を計算する。
5. 適合度をチェックするため、 $\chi^2$ を計算すると良い。

#### (2) 複合したピークについて

1. 重なっていても、ピークとピークの間には凹みがあれば適合計算できる。  
次頁の 図9-8 に複合したピークについて、実際に関数適合した結果を示す。
2. 凹みが見えない程重なっている場合でも、ズレが見えるようであれば、少なくともピーク中心の距離を固定して置けば(核種を仮定することになる)計算できる。出来れば 9. 6、10. 3 の結果をフィードバックする。
3. 事実上全く重なっている場合、同じ核種の別ピークのデータを利用して計算する。寄与係数法もその一つである。



C1:  $3.785E+1 \pm 3.84E+0$   
 C2:  $-4.036E-1 \pm 2.23E-1$   
 C3:  $1.001E+2 \pm 7.16E+0$   
 C4:  $-1.097E-1 \pm 1.86E-2$   
 C5:  $9.421E+0 \pm 1.63E-1$   
 C6:  $1.491E+2 \pm 1.11E+1$   
 C7:  $-4.343E-1 \pm 6.34E-2$   
 C8:  $1.525E+1 \pm 8.66E-2$

Chi Sq. by Weighted LSF:  
 $1.58E+01$

Fitting Accuracy : 1.00

図9-8 複合したピークの関数適合

適合関数 Y はチャンネル番号を X と置くと

$$Y = C_1 + C_2 X + C_3 \exp\{C_4 (X - C_5)(X - C_5)\} + C_6 \exp\{C_7 (X - C_8)(X - C_8)\}$$

である。

- ・  $C_1 + C_2 X$  はベースラインの一次式である。
- ・  $C_3 \exp\{C_4 (X - C_5)(X - C_5)\}$  は高さ  $C_3$ 、中心  $C_5$ 、半値幅が  $(4 \log 2 / C_4)$  のピーク関数（ガウス関数）である。
- ・  $C_6 \exp\{C_7 (X - C_8)(X - C_8)\}$  は高さ  $C_6$ 、中心  $C_8$ 、半値幅が  $(4 \log 2 / C_7)$  のピーク関数（ガウス関数）である。 log は自然対数

この例での計算結果は下記の通りとなった。

ベースライン :  $37.8 - 0.404 X$

左のピーク関数 :  $100.1 \exp\{-0.1097 (X - 9.42)(X - 9.42)\}$

高さ : 100.1

中心 : 9.42 チャンネル

半値幅 : 5.03 チャンネル

右のピーク関数 :  $149.1 \exp\{-0.4343 (X - 15.25)(X - 15.25)\}$

高さ : 149.1

中心 : 15.25 チャンネル

半値幅 : 2.53 チャンネル

9. 3. 2 関数適合結果を用いた FWHM 等の計算 [計算機で求める]

FWHMを求めるためには、ピーク関数の値がピーク値の半分になるチャンネルを計算する。即ち、関数値が与えられた時、それを実現する変数を求める「逆関数プログラム」が必要になる(次頁に例を示す)。

ピーク関数を  $Y = P(X)$  とおくと  $X = P^{-1}(Y)$  であり  $Y$  がピークの高さの  $1/2$  になるピークの両側 2 つの  $X$  の値  $P^{-1}(Y_{1/2})$ 、 $P^{-1}(Y_{1/2})$  を  $X_l$ 、 $X_r$  とすれば

$$FWHM = X_r - X_l \quad \text{である。}$$

また解説Ⅲ(最小2乗法について)の(2)に従って  $X_r$ 、 $X_l$  各々の誤差を計算する。

$$\sigma_{X_i}^2 = \sum_{ij} \frac{\partial P^{-1}}{\partial C_i} \sigma(C_i, C_j) \frac{\partial P^{-1}}{\partial C_j} = \sum_{ij} \frac{\partial P^{-1}}{\partial C_i} C_{ij}^2 \frac{\partial P^{-1}}{\partial C_j}$$

$C_{i,j}$  : ピーク関数の適合パラメータ

$\sigma(C_i, C_j)$ 、 $C_{ij}^2$  : 最小2乗法で得られた  $C_{i,j}$  の計算結果の標準偏差

$$\frac{\partial P^{-1}}{\partial C_i} = \frac{1}{\frac{\partial P(X_{l,r})}{\partial C_i}} \quad \text{を代入して計算する。}$$

FWHM はピーク関数の逆関数で表現されるため、誤差を計算する際に「逆関数の偏微分」が必要になる。これは「逆関数の偏微分は偏微分の逆数に等しい。」ことを用いて計算する。

$$\frac{\partial P^{-1}}{\partial C_i} = \frac{\partial P^{-1}(X)}{\partial W_{l,r}} \Bigg|_{X=X_{l,r}} = \frac{1}{\frac{\partial P(X)}{\partial W_{l,r}} \Bigg|_{X=X_{l,r}}}$$

$$= 0.5 \times \frac{P(W_{l,r} + \delta, X_{l,r}) - P(W_{l,r} - \delta, X_{l,r})}{\delta} \quad (\delta = 0.1 \text{ チャンネル程度を代入して計算する})$$

$X_r$ 、 $X_l$  各々の誤差の2乗和の平方根を計算して FWHM の誤差とする。

## 2分法による逆関数プログラム例

以下のプログラムは Y を与えられた時、関数サブプログラム FNCTion( ) について  $Y = FNCTion(Answer)$  になるような Answer を、Xleft\_ と Xright に挟まれた区間で探す。プログラム言語は HP-BASIC である。

```
61 SUB INV_FNC(Y, Answer, Xleft_, Xright)
62!
63 Yleft_=FNCTion(Xleft_)
64 Yright=FNCTion(Xright)
65 IF (Yleft_<Y)*(Y<Yright) OR (Yright<Y)*(Y<Yleft_) THEN
66     LOOP
67     Xm=(Xleft_+Xright)*.5
68     Ym=FNCTion(Xm)+(Y=0)
69     EXIT IF (.999999<Ym/(Y+(Y=0)))*(Ym/(Y+(Y=0))<1.000001)
70     IF (Ym<Y)*(Y<Yright) OR (Yright<Y)*(Y<Ym) THEN
71         Yleft_=Ym
72         Xleft_=Xm
73     ELSE
74         Yright=Ym
75         Xright=Xm
76     END IF
77 END LOOP
78 Answer=Xm
79 END IF
80 SUBEND
```

### 9. 3. 3 ピークの非対称〔計算機で計算する〕

一般的にピークは中心の左右で幅が異なり、最大カウント数の10分の1の高さにおける値で表現される。

$$\text{ピークの非対称} = \{FWTM(\text{左}) - FWTM(\text{右})\} / FWTM(\text{右})$$

9. 3. 4 FWHM等の手計算の方法

1) FWHM、FWTM、FW.01M の計算

- ① 平滑化1次微係数ゼロクロス法等で中心を求める(9. 1 (5) 2. 参照)。
- ② 高エネルギー側 30 チャンネル位の計数値を平均して、ベースラインを求める。
- ③ FWHM、FWTM、FW.01M を計算する。直線で計数値をつなぎ、比例配分して計算する。
- ④ FWTM における非対称性を計算する。

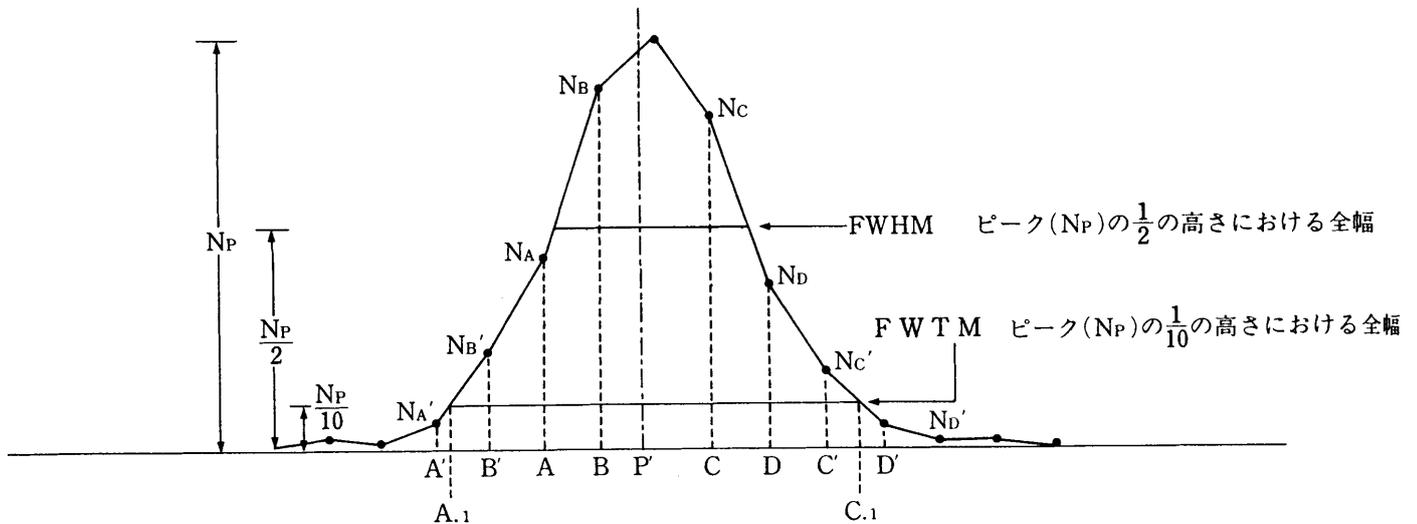


図9-9 半値幅とピークの非対称性

$$FWHM (ch) = \left[ C + \frac{N_C - N_P/2}{N_C - N_D} \right] - \left[ A + \frac{N_P/2 - N_A}{N_B - N_A} \right]$$

$$FWTM (ch) = \left[ C' + \frac{N_{C'} - N_P/10}{N_{C'} - N_{D'}} \right] - \left[ A' + \frac{N_P/10 - N_{A'}}{N_{B'} - N_{A'}} \right]$$

$\downarrow$   $\downarrow$   
 $C.1$   $A.1$

$$\text{非対称性} = \frac{(P' - A.1) - (C.1 - P')}{(C.1 - P')} \times 100 (\%)$$

A、B、C、D、P、A'、B'、C'、D' : チャンネル数

$N_A$ 、 $N_B$ 、 $N_C$ 、 $N_D$ 、 $N_P$  . . . : 計数値

P' : 1次微係数ゼロクロス法等で求めたピーク中心チャンネル

一次微分のゼロクロス点、FWTM等について計数誤差を計算しておけば非対称の誤差を計算できる。

3) ガウス関数への疑似適合 (指数関数変換の方法)

1. FWHM は以下のように、疑似的にガウス関数を当てはめて計算する事も出来る。計数值からベースラインを差し引いてから対数を取り、差分を求めて一次式に当てはめる。

- ① ピークの各計数值から高エネルギー側ベースライン 30 チャンネルの平均計数值を差し引き、その値を  $f(x)$  とする。
- ②  $Z(n) = f(n-1) / f(n+1)$  と置き、ピーク領域全体で  $Z(n)$  を計算する。
- ③ 片対数用紙の横軸に  $n$  を、縦軸に  $Z(n)$  をとってプロットする。
- ④  $Z(n)$  がおよそ 0.1 から 10 の範囲に直線を当てはめる。
- ⑤  $Z(n) = 1$  になる所がピーク中心チャンネル  $p$  である。
- ⑥  $Z(n) = 10$  になる  $n$  を  $a$ 、 $Z(n) = 0.1$  なる  $n$  を  $b$  とすると、  
 $FWHM = 1.552\sqrt{(a-b)}$   
 となる。

2. ③④の過程を直線回帰する事によって計算機を利用することが出来る。

$$Y = a + bX \quad Y: \log \{ Z(n) \}, X: n \text{ とすると}$$

$$b = \frac{N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}, \quad a = \frac{1}{N} (\sum Y_i - b \sum X_i) \text{ で与えられる。}$$

ここで  $N$ : データの個数、 $X_i$ :  $i$  番目の  $X$  の値、 $Y_i$ :  $i$  番目の  $Y$  の値

$\log$  は自然対数

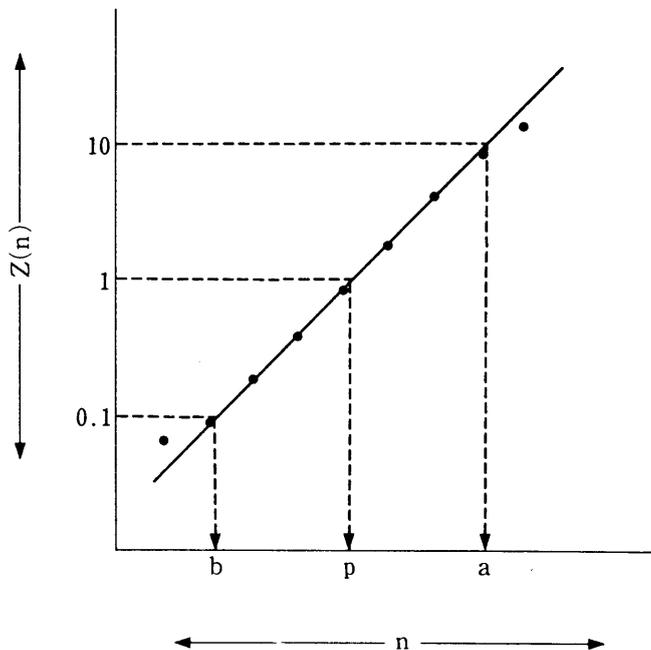


図 9 - 1 0 ガウス関数への疑似適合 (指数関数変換の方法)

### 9. 3. 5 ピーク面積の求め方

ピーク面積は原則として関数適合によって計算し、ガウス関数で表現されている部分の面積とする。テーリングの部分と段差はピーク面積に含めない。

コベル法（後述）と、関数適合で多少差が生じることがあるが、実用上差し支えはない。

ピークの非対称、テーリング、段差等がエネルギーによってどう変わるか予め調べておき、それらをピーク関数に反映させて用いるとよい。

テーリングに乗った小さなピークや複合ピークなど条件が悪い場合を除き、単純なピークに限れば、面積計算に 1 次式 + 単純ガウス関数 を使用出来る。

### 9. 3. 6 コベル法によるピーク面積〔手計算によって結果をチェック出来る〕

コベル法の概念図と説明

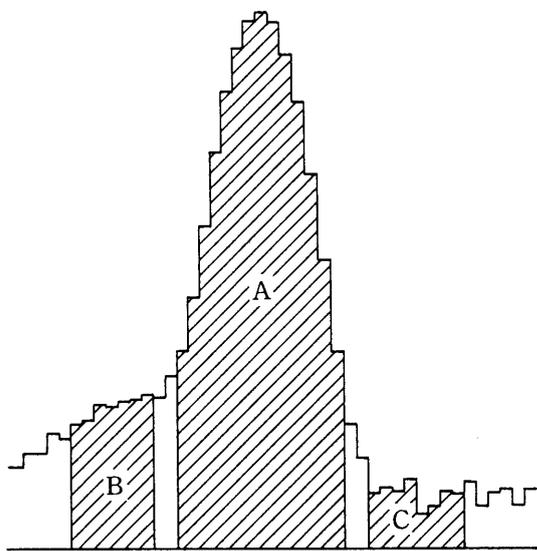


図9-11 コベル法によるピーク面積

計算例：ピーク中心から低エネルギー側と高エネルギー側に分け、それぞれのピーク領域とベースライン領域の計算に使用するチャンネル数を同じ数とした場合（詳細は 9. 3. 6 (3) 参照のこと）。

$$\begin{aligned} \text{ピーク面積} & N_{\text{net}} = A - B - C \\ \text{ピーク面積の標準偏差} & \sigma_N = \sqrt{(A + B + C)} \end{aligned}$$

計数誤差が小さくてテーリングが分かるピークに対しては、低エネルギー側のベースライン領域とピーク領域の境界は、曲線の曲がり角にする。

(1) ピーク領域およびその近傍のベースラインの設定

これらの領域は個々のスペクトルに無関係に決めることはできないが、ピークの形状は単純なガウス関数であり、ベースラインは限られた範囲内で直線であると仮定<sup>1)</sup>して次の条件を満足するように決める。

- 1) 想定されるピークの中心チャンネルPをチャンネル-エネルギーの式(9.2 参照)から求め、そのPに対して左右同チャンネル  $u'$  をとる。その幅は次のように決める。

$$1.5 \times \text{FWHM} \geq u' \geq 1.1 \times \text{FWHM}$$

低エネルギー側の境界は、 $L_0 = P - u'$  とし、小数点以下を切り捨てて整数とする。

高エネルギー側の境界は、 $R_0 = P + u'$  とし、小数点以下を切り上げて整数とする。

- 2) 二つのピークが重なった複合ピークについては、低エネルギー( $E_L$ )  $\gamma$  線および高エネルギー( $E_H$ )  $\gamma$  線についてそれぞれチャンネル-エネルギーの式(9.2 参照)を用いてピーク中心チャンネル  $P(E_L)$  および  $P(E_H)$  を決める。

低エネルギー側の境界は、 $L_0 = P(E_L) - u'$  とし、小数点以下を切り捨てて整数とする。

高エネルギー側の境界は、 $R_0 = P(E_H) + u'$  とし、小数点以下を切り上げて整数とする。

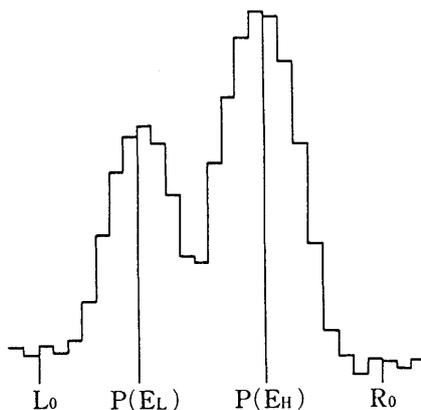


図9-12 複合ピークに対するピーク領域

- 1) 最小2乗法等を採用する場合には、ベースラインに2次以上の式を用いることが出来る。

3) ベースライン領域については原則として次のように決める。

低エネルギー側の境界 ( $L_2$  より  $L_1$  チャンネルまで)

$$P - L_1 \geq 2 \times \text{FWHM}、L_1 - L_2 \geq P - L_0$$

高エネルギー側の境界 ( $R_1$  より  $R_2$  チャンネルまで)

$$R_1 - P \geq 1.5 \times \text{FWHM}、R_2 - R_1 \geq R_0 - P$$

ただし、 $L_2$ 、 $L_1$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  は整数とする。

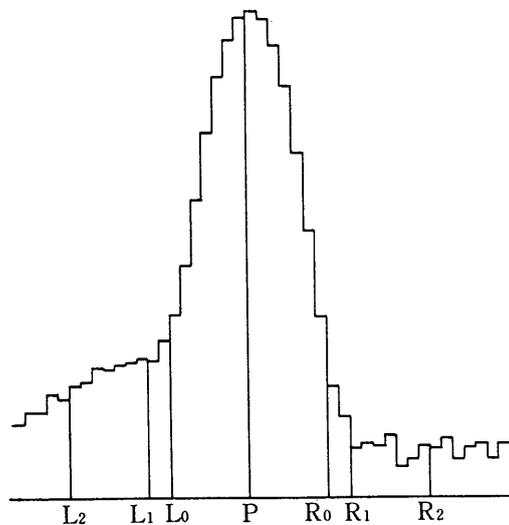


図 9 - 1 3 ベースライン領域 ( $L_2 \sim L_1$ ) および ( $R_1 \sim R_2$ )

(2) 単一の独立したピークの面積の求め方

1. ここでは、 $\gamma$ 線スペクトルのベースラインが勾配をもっているとして、ピーク面積を求める。勾配をもたないものについては、(3)を参照のこと
2. ピーク領域について(1)の方法に準じて、 $L_0$  および  $R_0$ を決め  $N_P$ を求めめる。

$$N_P = \sum_{i=L_0}^{R_0} n_i \quad \text{ただし } n_i \text{ はチャンネルの計数}$$

3. ベースライン領域について、(1)の方法に準じて、 $L_2$ 、 $L_1$  および  $R_1$ 、 $R_2$ を決め、 $N_L$  および  $N_R$ を求めめる。

$$N_L = \sum_{i=L_2}^{L_1} n_i \quad , \quad N_R = \sum_{i=R_1}^{R_2} n_i$$

4. ピーク面積  $N_{net}$  は次のように計算される。

$$N_{net} = N_P - \beta_L N_L - \beta_R N_R$$

その標準偏差  $\sigma_N$ は

$$\sigma_N = \sqrt{N_P + \beta_L^2 N_L + \beta_R^2 N_R}$$

上式において

$$\beta_L = \frac{(R_1 + R_2 - L_0 - R_0)(R_0 - L_0 + 1)}{(L_1 - L_2 + 1)(R_1 + R_2 - L_2 - L_1)}$$

$$\beta_R = \frac{(L_0 + R_0 - L_1 - L_2)(R_0 - L_0 + 1)}{(R_2 - R_1 + 1)(R_1 + R_2 - L_2 - L_1)}$$

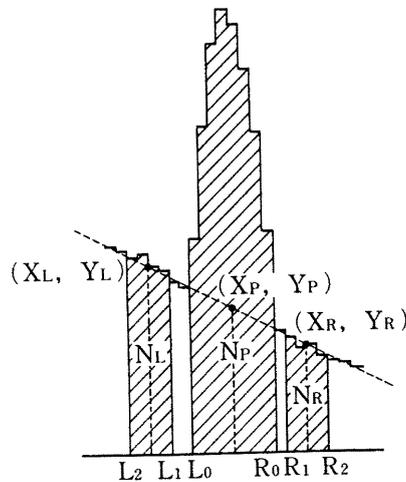


図9-14 勾配をもったベースラインを含むピークのピーク面積の求め方

5.  $\beta_L$ 、 $\beta_R$ の求め方

ベースラインは1次式

$$Y = aX + b$$

a、b：定数

であるので、低エネルギー側ベースライン領域の中間点を  $(X_L, Y_L)$ 、高エネルギー側を  $(X_R, Y_R)$ 、ピーク領域のベースラインの中間点を  $(X_P, Y_P)$  とすると

$$Y_P = \frac{Y_R - Y_L}{X_R - X_L} (X_P - X_L) + Y_L$$

$$\therefore Y_P = \frac{(X_R - X_P)Y_L + (X_P - X_L)Y_R}{X_R - X_L} \quad \text{となる。}$$

それぞれのベースライン領域の中間点は次式であらわすことができる。

$$X_L = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad Y_L = \frac{N_L}{(L_1 - L_2 + 1)}$$

$$X_R = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad Y_R = \frac{N_R}{(R_2 - R_1 + 1)}$$

$$X_P = \frac{L_0 + R_0}{2}$$

ピーク領域から差し引くベースライン領域の面積  $S_{LR}$ は

$$\begin{aligned} S_{LR} &= Y_P (R_0 - L_0 + 1) \\ &= \frac{(R_1 + R_2 - L_0 - R_0)(R_0 - L_0 + 1)}{(L_1 - L_2 + 1)(R_1 + R_2 - L_2 - L_1)} \cdot N_L \\ &\quad + \frac{(L_0 + R_0 - L_1 - L_2)(R_0 - L_0 + 1)}{(R_2 - R_1 + 1)(R_1 + R_2 - L_2 - L_1)} \cdot N_R \\ &= \beta_L N_L + \beta_R N_R \end{aligned}$$

となる。

(3) その他のピーク面積の求め方

単一の独立したピークで、ベースラインが勾配をもたない場合。

1. ピーク領域について(1)の方法に準じて、 $L_0$  および  $R_0$  を決め  $N_P$  を求める。

$$N_P = \sum_{i=L_0}^{R_0} n_i \quad \text{ただし } n_i \text{ はチャンネルの計数}$$

2. ベースライン領域について、(1)の方法に準じて、 $L_2$ 、 $L_1$  および  $R_1$ 、 $R_2$  を決め、 $N_L$  および  $N_R$  を求める。

$$N_L = \sum_{i=L_2}^{L_1} n_i \quad , \quad N_R = \sum_{i=R_1}^{R_2} n_i$$

3. ピーク面積  $N_{net}$  は次のように計算される。

$$N_{net} = N_P - \beta_L N_L - \beta_R N_R$$

その標準偏差  $\sigma_N$  は

$$\sigma_N = \sqrt{(N_P + \beta_L^2 N_L + \beta_R^2 N_R)}$$

上式において  $\beta_L$ 、 $\beta_R$  は次のように求める。

$$\beta_L = \frac{R_0 - L_0 + 1}{2(L_1 - L_2 + 1)}$$

$$\beta_R = \frac{R_0 - L_0 + 1}{2(R_2 - R_1 + 1)}$$

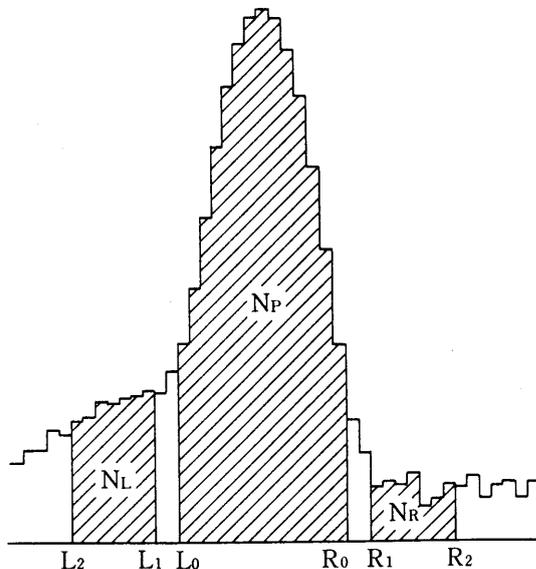


図9-15 勾配のないベースラインをもったピークのピーク面積の求め方

4. ピーク領域の計算に使用するチャンネル数の半分を、低エネルギーおよび高エネルギー側ベースライン領域のそれぞれの計算チャンネル数とすると、 $\beta_L$ 、 $\beta_R$  は1となり計算が簡単になる。

$$L_1 - L_2 + 1 = \frac{1}{2} (R_0 - L_0 + 1) \quad \therefore \beta_L = 1$$

$$R_2 - R_1 + 1 = \frac{1}{2} (R_0 - L_0 + 1) \quad \therefore \beta_R = 1$$

5. ピーク面積  $N_{net}$  は次のように計算される。

$$N_{net} = N_P - N_L - N_R$$

その標準偏差  $\sigma_N$  は

$$\sigma_N = \sqrt{(N_P + N_L + N_R)}$$

となる。

#### 9. 4 妨害ピークの処理

ピーク探査で妨害ピークが検出されている場合は次のようにする。

1. 解析対象ピークと妨害ピークの間がベースラインまで落ちて、それぞれ独立したピークになっているときは、妨害ピークを避けてベースライン領域をとる下記(9. 4. 1)の方法で、ピーク面積を求める。
2. ピークとピークの間がベースラインレベルまで落ちていない(複合ピーク)の場合は、関数適合(9. 3. 1 参照)を用いる。
3. ほとんど重なっている場合、下記(9. 4. 2)の寄与係数法を用いる。  
なお遮蔽体等からの妨害の寄与係数と試料からの妨害の寄与係数は本来異なるので、バックグラウンドの引算を行ってから、寄与係数による補正を行うべきである。バックグラウンド差引の方法によっては、計算が煩雑になる。  
また寄与係数を測定した線源と同じ形状、同じ自己吸収の試料でなければ正確な補正は出来ない。これらの事情により、ある程度の誤差は避けられない。
4. 解析対象核種の主ピークが複合ピークの時、副ピークに独立したものがあり、そのピーク面積の計数誤差が主ピークより小さいならば、放出比が小さくても独立したものを対象にする。

9. 4. 1 単一の独立したピークで、近傍のベースラインに妨害ピークが存在する場合に、妨害ピークを避けてベースライン領域を決める方法。

次の基準に合致するとき行う<sup>1)</sup>。

- ① ピーク探査によりベースライン領域に妨害ピークがあると判定されたとき。
- ② 妨害基準ピークのピーク面積  $N_{net}(P')$  がその計数誤差  $\sigma_N(P')$  の2倍を越えるとき、すなわち、 $N_{net}(P') \geq 2 \sigma_N(P')$  かつ、 $N_{net}(P')$  に寄与係数  $\nu$  を乗じた値が2カウント以上のとき、すなわち、 $\nu N_{net}(P') \geq 2$

対象ピークに対するピーク領域の選び方は 9. 3. 6 (1) の方法によって決め、ベースライン領域は妨害ピークを避けて決める。すなわち、 $L_1$  または  $R_1$  は妨害ピークの中心  $P'$  より  $1.5 \times FWHM$  以上離れたチャンネルとする。

ピーク面積  $N_{net}$  およびその標準偏差  $\sigma_N$  は 9. 3. 6 (2) の方法に準ずる。

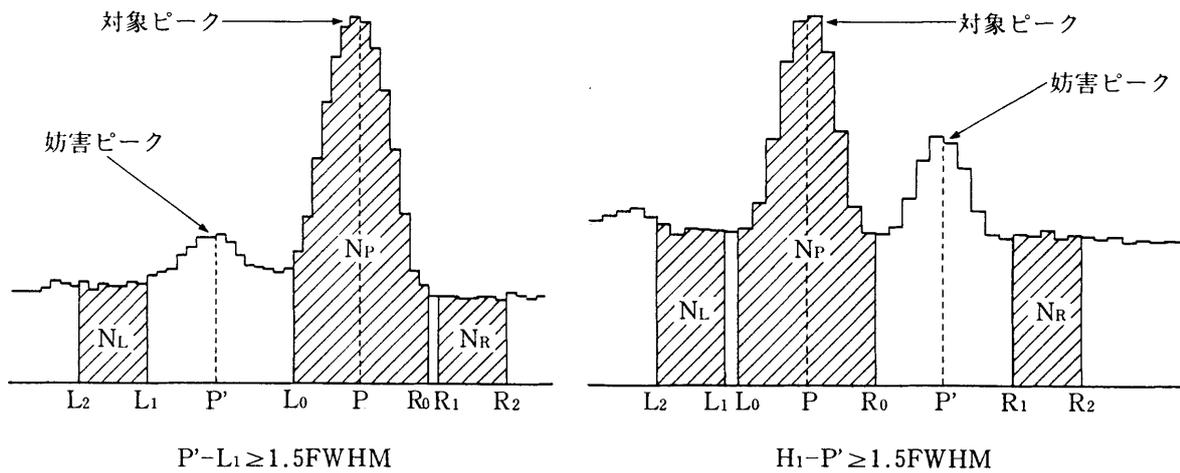


図 9 - 1 6 妨害ピークをさけてベースライン領域を決める方法

1) ① の条件が成り立っているなら ② が成り立っていなくてもこの方法を採用した方が無難である。

## 9. 4. 2 その他の妨害ピークの処理方法

### (1) 寄与係数を用いてピーク面積を補正する方法<sup>1)</sup>

単一の独立したピークで、近傍のベースラインに妨害ピークが存在し、寄与係数を用いて補正する方法。

1) 妨害ピークの補正は次の基準に合致するとき適用する。

① 妨害基準ピークのピーク面積  $N_{\text{net}}(P'')$  がその計数誤差  $\sigma_N(P'')$  の2倍を越えるとき、すなわち、 $N_{\text{net}}(P'') \geq 2 \sigma_N(P'')$

② かつ、 $N_{\text{net}}(P'')$  に寄与係数  $\nu$  を乗じた値が2カウント以上のとき、すなわち、 $\nu N_{\text{net}}(P'') \geq 2$

1. 対象ピークにたいするピーク領域は 9. 3. 6 (1) の方法によって決める。

$$N_p = \sum_{i=L_0}^{R_0} n_i$$

2. ベースライン領域は、妨害ピークを全て含むように決める。すなわち、妨害ピークの中心チャンネルを  $P'$  とすると、次の条件を満たすように  $L_2$ 、 $L_1$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  を決める。

妨害ピークが対象ピークの低エネルギー側にあるとき (図 9 - 17)

$$L_1 - P' \geq 1.5 \times \text{FWHM} \quad \text{および} \quad P' - L_2 \geq 1.5 \times \text{FWHM}$$

妨害ピークが対象ピークの高エネルギー側にあるとき

$$P' - R_1 \geq 1.5 \times \text{FWHM} \quad \text{および} \quad R_2 - P' \geq 1.5 \times \text{FWHM}$$

3. 妨害ピークを生ずる同じ核種から放出される他の顕著な単一ピーク

$P''$  (以下妨害基準ピークという) に対して 9. 3. 6 (2) の方法に準じてピーク面積  $N_{\text{net}}(P'')$  およびその誤差  $\sigma_N(P'')$  を決める。

4. 妨害ピークのピーク面積  $N_{\text{net}}(P')$  は、 $N_{\text{net}}(P'')$  をもちいて次のように見積ることができる。

$$N_{\text{net}}(P') = \nu N_{\text{net}}(P'') \quad \text{ここで} \quad \nu = \frac{a'}{a''} \cdot \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''}$$

上式において、 $a'$ 、 $a''$  はピーク  $P'$  および  $P''$  の  $\gamma$  線放出比、また  $\varepsilon'$  および  $\varepsilon''$  はピーク  $P'$  および  $P''$  の  $\gamma$  線に対するピーク効率 (自己吸収の補正を含む) である。 $a'/a''$  は核データから、 $\varepsilon'/\varepsilon''$  は相対ピーク効率から求めることができる。あるいは、 $\nu$  の値として実験値を用いることもできる。

---

1) 寄与補正を行う事によって増加する計数誤差と、補正を行わない事によって放射能値に生じる誤差とを比較検討して、補正の妥当性を判断する事が望ましい。

5. 上記で決められたベースライン領域の  $N_L$  および  $N_R$  を求める。

$$N_L = \sum_{i=L_2}^{L_1} n_i \quad , \quad N_R = \sum_{i=R_1}^{R_2} n_i$$

6. 対象ピークのピーク面積  $N_{net}$  およびその標準偏差  $\sigma_N$  は次のように計算できる。

対象ピークの低エネルギー側に妨害ピークがあるとき。

$$N_{net} = N_P - \beta_L \{N_L - \nu N_{net}(P'')\} - \beta_R N_R$$

その標準偏差  $\sigma_N$  は

$$\sigma_N = \sqrt{[N_P + \beta_L^2 N_L + \beta_R^2 N_R + \{\nu \beta_L \sigma_N(P'')\}^2]}$$

上式において

$$\beta_L = \frac{(R_1 + R_2 - L_0 - R_0)(R_0 - L_0 + 1)}{(L_1 - L_2 + 1)(R_1 + R_2 - L_2 - L_1)}$$

$$\beta_R = \frac{(L_0 + R_0 - L_1 - L_2)(R_0 - L_0 + 1)}{(R_2 - R_1 + 1)(R_1 + R_2 - L_2 - L_1)}$$

(対象ピークの高エネルギー側に妨害ピークがあるときは、上式のすべてについて  $L$  と  $R$  を置き換えれば良い。)

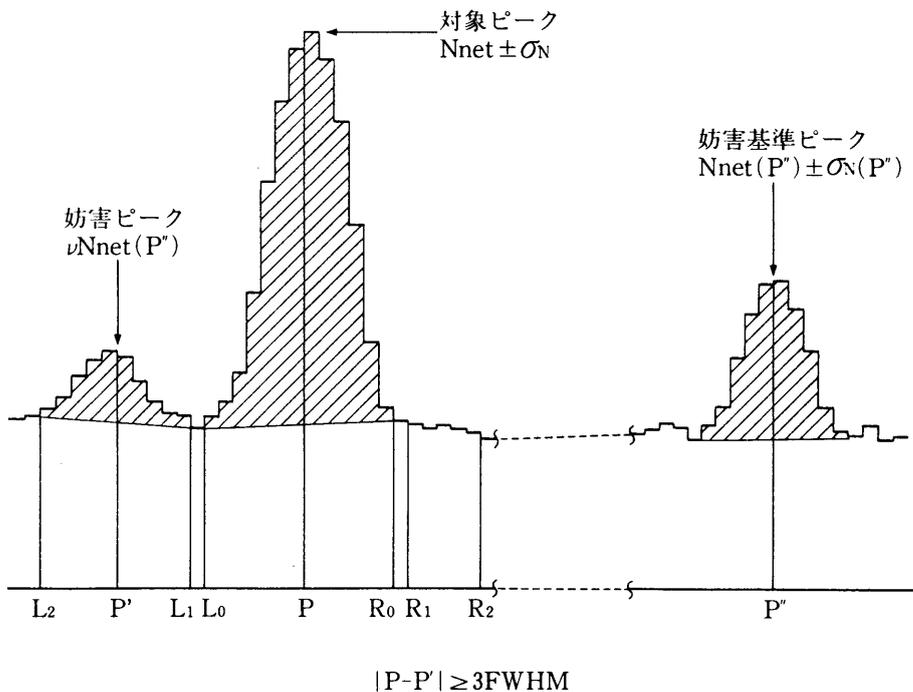


図9-17 ベースラインから妨害ピークの寄与を差し引く方法

(2) 複合ピーク (FWHM の3倍以内に他のピークが存在する) の解析

1) 二本のピークが同一の核種による場合

1. ピーク領域を 9. 3. 6 (1) 2) によって、 $L_0 = P(E_L) - u'$ 、 $R_0 = P(E_H) + u'$  とする。

ここで  $P(E_L)$  および  $P(E_H)$  は低エネルギー ( $E_L$ ) ピーク中心チャンネルおよび高エネルギー ( $E_H$ ) ピーク中心チャンネルとする。

2. ベースライン領域を 9. 3. 6 (2) で計算し、両ピークを含めたピーク面積  $N_{net}(E_L + E_H)$  およびその標準偏差  $\sigma_N$  を求める。  
 3.  $E_L$  および  $E_H$  のエネルギーに対するピーク効率をそれぞれ  $\varepsilon_L$  および  $\varepsilon_H$ 、また  $\gamma$  線放出比をそれぞれ  $a_L$  および  $a_H$  とすると

$$N_{net}(E_L) \pm \sigma_L = \frac{\varepsilon_L a_L}{\varepsilon_L a_L + \varepsilon_H a_H} \{N_{net}(E_L + E_H) \pm \sigma_N\}$$

$$N_{net}(E_H) \pm \sigma_H = \frac{\varepsilon_H a_H}{\varepsilon_L a_L + \varepsilon_H a_H} \{N_{net}(E_L + E_H) \pm \sigma_N\}$$

上式において  $\varepsilon_L \approx \varepsilon_H$  としても良い。

2) 二本のピークが異なった核種によるものであり、かつ妨害基準ピークがある場合

1. 妨害ピークの補正は (1) と同じ基準に合致するとき適用する。  
 2. ピーク領域を 9. 3. 6 (1) 2) によって、 $L_0 = P(E_L) - u'$ 、 $R_0 = P(E_H) + u'$  とする。

ここで  $P(E_L)$  および  $P(E_H)$  は低エネルギー ( $E_L$ ) ピーク中心チャンネルおよび高エネルギー ( $E_H$ ) ピーク中心チャンネルとする。

3. ベースライン領域を 9. 3. 6 (2) で計算し、両ピークを含めたピーク面積  $N_{net}(P_L + P_H)$  を求める。

今、 $P_L$  を対象ピークとし、 $P$  で表わし、 $P_H$  を妨害ピークとし  $P'$  で表わすことにする。すなわち妨害ピークを含めたピーク面積を

$N_{net}(P + P')$  およびその標準偏差を  $\sigma_N(P + P')$  で表わす。

4. 妨害基準ピーク ( $P''$ ) に対して、9. 3. 6 (2) の方法でピーク面積  $N_{net}(P'')$  およびその標準偏差  $\sigma_N(P'')$  を求める。  
 5. 妨害ピークのピーク計数に対する  $N_{net}(P'')$  の割合 (寄与係数) を  $\nu$  とする。 $\nu$  は、 $P'$  および  $P''$  の  $\gamma$  線放出比をそれぞれ  $a'$  および  $a''$ 、ピーク効率を  $\varepsilon'$  および  $\varepsilon''$  とすると、

$$\nu = \frac{a'}{a''} \cdot \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''} \text{ ただし } \varepsilon', \varepsilon'' \text{ は自己吸収が補正されているものとする。}$$

6. 対象ピークのピーク面積  $N_{net}(P)$  およびその標準偏差  $\sigma_N$  は次のように表わされる。

$$N_{net}(P) = N_{net}(P + P') - \nu N_{net}(P'')$$

その標準偏差  $\sigma_N$  は

$$\sigma_N = \sqrt{[\{\sigma_N(P + P')\}]^2 + \nu^2 \{\sigma_N(P'')\}^2}$$

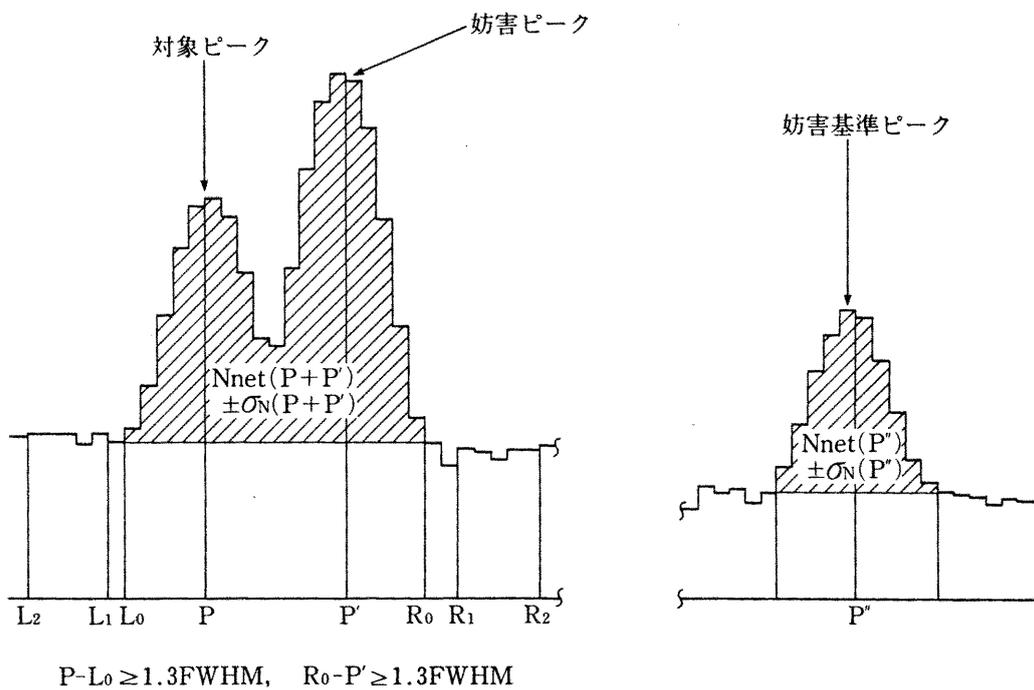


図 9 - 1 8 複合ピークから妨害ピークを差し引く方法

(3) 複合ピークを連立方程式を用いて解析する

この方法は、ピークの形がガウス関数であり、両ピークを中心チャンネル  $P_1$  と  $P_2$  およびその FWHM が正確に求められるときにのみ適用できる。

1. 両ピークを中心チャンネルをエネルギーの式 (9. 2 参照) から正確に求める。
2. ピークの FWHM を式 (9. 1 参照) から求める (両ピークの FWHM は等しいとして良い)。
3. 解析のためのチャンネル領域は次の条件を満たすように決める。ただし、 $L_0$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  および  $U_0$  は整数、 $U_1$  と  $U_2$  は小数点以下 2 桁の精度で求める。

$$L_0 \approx P_1 - 1.5 \times \text{FWHM}$$

$$R_0 \approx P_2 + 1.5 \times \text{FWHM}$$

$$U_0 \approx \frac{1}{2} (P_1 + P_2)$$

$$U_1 = U_0 - P_1$$

$$U_2 = P_2 - U_0$$

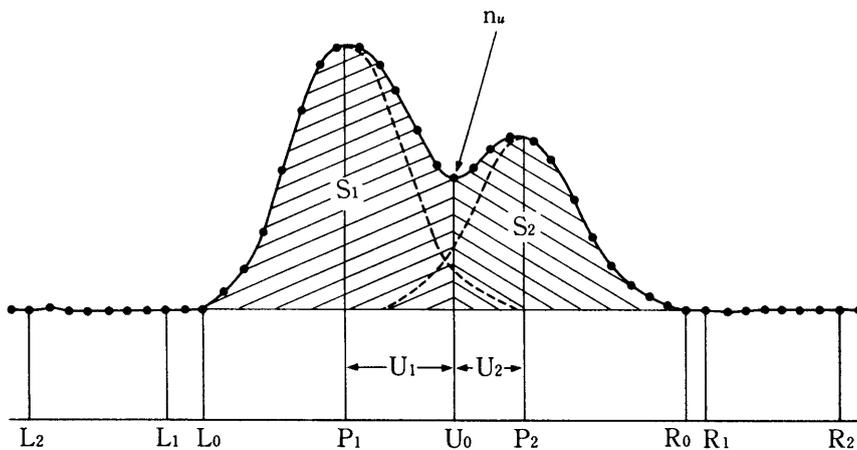


図 9 - 1 9 連立方程式法における領域の決定法

4. 領域  $L_0$  から  $U_0$  まで、および  $U_0$  から  $R_0$  までのそれぞれのピーク面積  $S_1$  および  $S_2$ 、それぞれの標準偏差  $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  を次のように求める。

$$N_P(1) = \sum_{i=L_0}^{u-1} n_i \quad , \quad N_P(2) = \sum_{i=u+1}^{R_0} n_i$$

$$N_L = \sum_{i=L_2}^{L_1} n_i \quad , \quad N_R = \sum_{i=R_1}^{R_2} n_i$$

$$S_1 = N_P(1) + \frac{1}{2} n_u - \beta_1 N_L, \quad \sigma_1 = \sqrt{\{N_P(1) + \frac{1}{4} n_u + \beta_1^2 N_L\}}$$

$$S_2 = N_P(2) + \frac{1}{2} n_u - \beta_2 N_R, \quad \sigma_2 = \sqrt{\{N_P(2) + \frac{1}{4} n_u + \beta_2^2 N_R\}}$$

上式において

$$\beta_1 = \frac{U_0 - L_0 + 0.5}{L_1 - L_2 + 1} \quad , \quad \beta_2 = \frac{R_0 - U_0 + 0.5}{R_2 - R_1 + 1}$$

5. ピーク  $P_1$  および  $P_2$  に対応するピーク面積をそれぞれ  $N_1$  および  $N_2$ 、またそれぞれの誤差を  $\sigma_{N1}$  および  $\sigma_{N2}$  とすると、それぞれ次式で表わされる。

$$N_1 = \alpha_{11} S_1 + \alpha_{12} S_2 \quad , \quad \sigma_{N1} = \sqrt{\{(\alpha_{11} \sigma_1)^2 + (\alpha_{12} \sigma_2)^2\}}$$

$$N_2 = \alpha_{21} S_1 + \alpha_{22} S_2 \quad , \quad \sigma_{N2} = \sqrt{\{(\alpha_{21} \sigma_1)^2 + (\alpha_{22} \sigma_2)^2\}}$$

上式の  $\alpha_{11}$ 、 $\alpha_{12}$ 、 $\alpha_{21}$ 、 $\alpha_{22}$  は次のように求める。

$$U_1' = 2.355 \times U_1 / \text{FWHM} \quad , \quad U_2' = 2.355 \times U_2 / \text{FWHM} \quad \text{とし、次のよう}$$

に確率  $P(U_1')$  および  $P(U_2')$  を算出する。

$$\text{分布 } F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2)$$

において  $x = u'$  より右側の確率は、その不定積分

$$P(u') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{u'}^{\infty} \exp(-x^2/2) dx$$

で表わすことができる。

$$\text{ここで } t = \frac{1}{1 + r x} \quad \text{とすると、上式は}$$

$$P(u') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{u'}^{\infty} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt \quad \text{となる。}$$

この式の積分値は次式で近似することができる（文献1）。

$$P(u') = F(x) (b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5) + e(x)$$

$$\text{ここで } r=0.2316419 \quad , \quad t = \frac{1}{1+r x}$$

$$b_1 = 0.31938153, \quad b_2 = -0.356563782$$

$$b_3 = 1.781477937, \quad b_4 = -1.821255978$$

$$b_5 = 1.330274429$$

近似による誤差は  $|e(x)| < 7.5 \times 10^{-8}$

$x = U_1'$  および  $x = U_2'$  として  $P(U_1')$  および  $P(U_2')$  を算出する。

$\alpha_{11}$ 、 $\alpha_{12}$ 、 $\alpha_{21}$ 、 $\alpha_{22}$  は次式で求めることができる。

$$\alpha_{11} = \frac{1 - P(U_2')}{1 - P(U_1') - P(U_2')} \quad , \quad \alpha_{12} = \frac{-P(U_2')}{1 - P(U_1') - P(U_2')}$$

$$\alpha_{21} = \frac{-P(U_1')}{1 - P(U_1') - P(U_2')} \quad , \quad \alpha_{22} = \frac{1 - P(U_1')}{1 - P(U_1') - P(U_2')}$$

----- 引用文献 -----

(文献1) HEWLETT-PACKARD HP-65 STAT PAC1 解説書

## 9. 5 バックグラウンドとその差し引き方〔手計算でチェック出来る〕

試料に起因しない計数を放射能の計算に含めないため、バックグラウンド即ち試料の無い状態での測定を行い、その計数を差し引く必要がある。

1. 最低一ヶ月に一度はバックグラウンドを測定する。
2. 測定時間は試料の場合の2倍程度以上とする。
3. 汚染の可能性があった時には適宜測定する。
4. バックグラウンドスペクトル中のピーク面積が $2\sigma$ 以下のとき、試料の対応するピーク面積から差し引く必要はない。

$$N \pm \sigma_N = S/T_S - B/T_B \pm \sqrt{\{(\sigma_S/T_S)^2 + (\sigma_B/T_B)^2\}}$$

$N$  : 正味ピーク計数率

$\sigma_N$  : 正味ピーク計数率の計数誤差

$S$  : 試料ピーク面積

$\sigma_S$  : 試料ピーク面積の計数誤差

$B$  : バックグラウンドピーク面積

$\sigma_B$  : バックグラウンドピーク面積の計数誤差

$T_S$  : 試料測定時間

$T_B$  : バックグラウンド測定時間

5. 試料自身による遮蔽効果を考えると、厳密には同一の大きさ、材質のブランク試料を測って引算すべきである。全ての測定試料にブランク試料を用意することは不可能であるが、マリネリ容器試料には遮蔽効果もあるのでバックグラウンドが0でない天然核種などについては無視できない場合がある。
6. 差引に使用されるバックグラウンドは、試料に先立った測定、試料の後の測定、何回かの測定の平均、等が考えられる。なお天然系列核種（3. 7 4) 参照）は日によって計数率が大きく変化することがあるので注意する必要がある。

## 9. 6 核種の同定

検出されたピークがどの核種によるのか、同定しなくてはならない。同定はピーク位置即ち、エネルギーを調べて行う。核種について幾つかの候補があり、特定できないときは、それらの核種の放出する別の $\gamma$ 線の存在とその放出比を調べて同定の参考にする。

1. チャンネル-エネルギーの式とピーク中心、双方の誤差を考慮して核種の同定を行う。単に、何チャンネル以内に入ったか否かで判断すべきではないが、測定スペクトル中のピークを用いてエネルギー校正すれば 0.3keV 程度以上のズレは起こりにくい。
2. 機械的に核データ表と比較するだけで核種を同定するのは好ましくなく、その核種がその試料に通常どの程度あるか、他にピークは無いかな等を併せて判断する。
3. 凝った方法を使わなくても平常時用、標準線源用、緊急時用、施設監視用等の核データ表を複数用意して使い分けると余計なトラブルを避けることが出来る。
4. 複数ピークを利用する方法は 10. 3 に述べてある。
5. 核データ（資料 B：核データ）から得られる情報、複数ピークのデータを用いた定量結果（10. 3. 2）に基づいて見直しをする。

— — — — — 参考文献 — — — — —

- 1) 富永 洋: “総説 ガンマ線スペクトルの電子計算機による解析”,  
RADIOISOTOPES, **20**, 93(1971)
- 2) 富永 昌治, 永田昭次郎, 納谷嘉信, 上田 勇, 佐々木崇: “高速フーリエ変換を用いた $\gamma$ 線スペクトルの解析”, RADIOISOTOPES, **26**, 841(1977)
- 3) D. F. Covell: “Determination of Gamma-Ray Abundance Directly from the Total Absorption Peak”, Anal. Chem., **31**, 1785(1959)
- 4) K. Liebscher, H. Smith: “Quantitative Interpretation of Gamma-Ray Spectra”, Anal. Chem., **40**, 1999(1968)
- 5) A. Savitzky, M. J. E. Golay: “Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures”, Anal. Chem., **36**, 1627(1964)
- 6) J. T. Routti and S. G. Prussin: “Photopeak Method for the Computer Analysis of Gamma-Ray Spectra from Semiconductor Detectors”, Nucl. Inst. Methods, **72**, 125(1969)
- 7) J. Kern: “Computer Analysis of Nuclear Spectra and  $\gamma$ -Energy Photopeak”, Nucl. Inst. Methods, **79**, 233(1970)
- 8) D. C. Robinson: “A Computer Program for the Determination of Accurate Gamma Ray Line Intensities from Germanium Spectra”, Nucl. Inst. Methods, **78**, 120(1970)
- 9) L. Varnell and J. Trischuk: “A Peak-Fitting and Calibration Program for Ge(Li) Detectors”, Nucl. Inst. Methods, **76**

## 第10章 放射能濃度の計算

### 10.1 減衰補正法

放射性核種の放射能の強さは時間とともに弱くなる。測定して得られるデータは測定時の放射能であり、知りたい時点での値は計算によって求める必要がある。

#### (1) 崩壊による減衰を補正計算する方法

〔計算機を用いるが手計算でチェック出来る〕

放射性原子核の時間当りの減少  $-dN/dt$  と崩壊定数  $\lambda$  およびその時点での放射性原子核の数  $N$

との関係は 
$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$
 である。したがってこれを積分し次の関係を得る。

測定時点での放射能が  $A \pm \sigma$  であれば時間  $t$  前（例えば採取時）の放射能  $A_0 \pm \sigma_0$  は

$$A_0 = A \exp(\lambda t), \quad \sigma_0 = \sigma \exp(\lambda t)$$

となる。半減期  $T$  で書けば次のようになる。

$$A_0 = A (1/2)^{-(t/T)}, \quad \sigma_0 = \sigma (1/2)^{-(t/T)}$$

(2) 放射性の原子核が崩壊して安定元素に変わらず、再び別種の放射性原子核に変わる場合、始めの核種を「親」、新たに作られた核種を「娘」と呼ぶ。親の減衰は上の式で表されるが、娘の放射性原子核の時間当りの減少の項には親からの流れ込みが付け加わる。この場合の計算式は次のようになる。

$$-\frac{dN_p}{dt} = \lambda_p N_p \quad \begin{array}{l} N_p: \text{親核種の原子数} \\ \lambda_p: \text{親核種の崩壊定数} \end{array}$$

$$-\frac{dN_d}{dt} = \lambda_d N_d - \lambda_p N_p \quad \begin{array}{l} N_d: \text{娘核種の原子数} \\ \lambda_d: \text{娘核種の崩壊定数} \end{array}$$

上の式を解いて、過去へ時間  $t$  の減衰補正を行った結果が次の式である。

$$A_{p0} = A_p \exp(\lambda_p t)$$

$$\sigma_{p0} = \sigma_p \exp(\lambda_p t)$$

$$A_{d0} = A_d \exp(\lambda_d t) - \frac{\lambda_d}{\lambda_d - \lambda_p} \{ \exp(\lambda_d t) - \exp(\lambda_p t) \} A_p$$

$$\sigma_{d0} = \sqrt{ \{ \sigma_d \exp(\lambda_d t) \}^2 + \frac{\lambda_d^2}{(\lambda_d - \lambda_p)^2} \{ \exp(\lambda_d t) - \exp(\lambda_p t) \}^2 \sigma_p^2 }$$

親娘の型で連続的に崩壊する場合について

1. 親が長寿命でなく（娘よりは長い）、放射能の時間的变化は見えるが、親娘の放射能比が一定である状態を過渡平衡と呼ぶ。
2. 親が長寿命（かつ娘より長い）で親娘の放射能比が一定で、時間的变化も見られない状態を永続平衡と呼ぶ。
3. 親娘の型で崩壊する場合、娘が測定時に「 $3\sigma$ 以下」であっても、減衰補正を行うと「 $3\sigma$ 以上」に変わることがある。
  - a) 例えば測定時点の放射能について、娘は弱くて誤差が小さく、親は強くて誤差が大きかったとする<sup>1)</sup>。時間が経てば娘が生長して来るのは明かで、将来の娘の放射能を計算すれば時間とともに「 $3\sigma$ 以下」が「 $3\sigma$ 以上」に変わる。この場合について、逆に娘の過去の放射能を考える。上の式に従って現在の放射能と連続的に継がる曲線を描き、遡って計算すると、負でかつ「 $3\sigma$ 以上」になる。
  - b) 親娘の測定値が両方とも $3\sigma$ 以下で不検出であっても、異符号だと減衰補正によって娘が $3\sigma$ 以上になる場合がでてくる。上の式に従い、計算した例を図10-1に示す。

左の例は親娘の測定値が同符号であり、時期に拘らず常に $3\sigma$ 以下である。右の例は親娘の測定値が異符号で、過去に遡るとある期間娘のみが $3\sigma$ を越えて+になる。

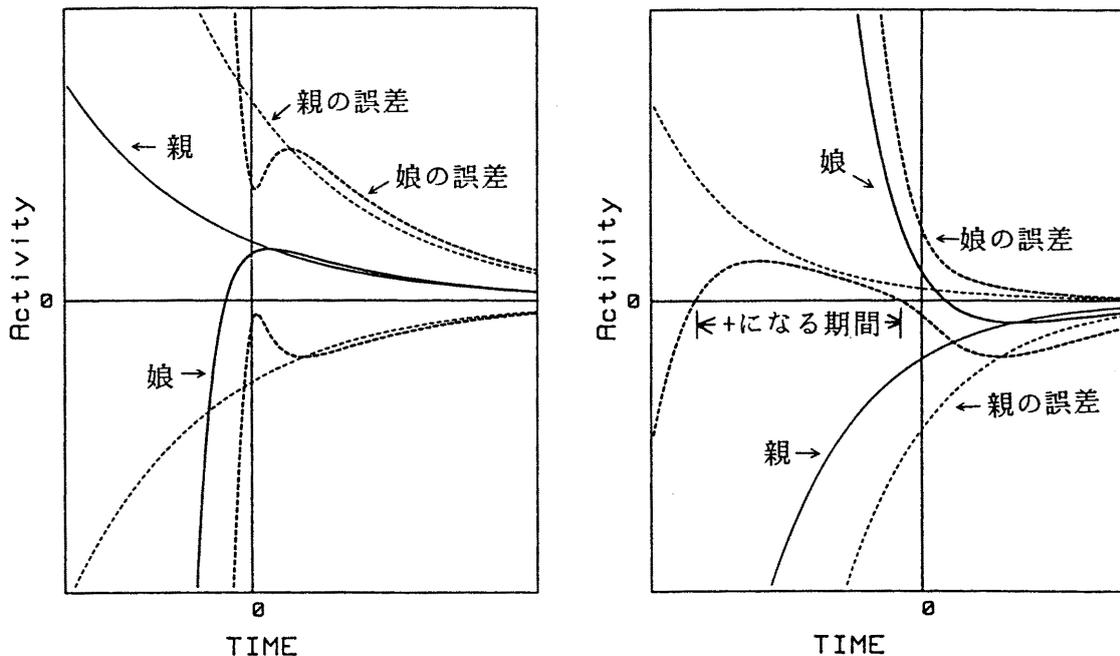


図10-1 親娘の型で崩壊する場合の減衰補正曲線

実線は放射能、破線は $3\sigma$ の範囲を示している。

1) いわゆるスカベンジの時に起こる。

(3) 測定した時間に比べて長くない寿命を持つ核種の場合には減衰補正の計算が複雑である。放射性核種が測定中に減衰するのを考慮した計算は

$$\frac{\lambda t_m}{1 - \exp(-\lambda t_m)} \times \exp(\lambda t) \times (A \pm \sigma) \quad \text{で表される。}$$

$t_m$  : 測定時間 (トルータイム: true time)

$t$  : 減衰補正時間 (減衰補正基準時刻と測定開始時刻の差)

(4) 親娘両方とも true time よりもずっと長いとは言えない寿命を持っている場合は、「測定中の親から娘への流れ込み」を考慮した計算を行う必要がある。

例えば  $^{99}\text{Mo}$  (親:半減期 66.02h) と  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (娘:半減期 6.007h) 等がある。

$t_m$  : 測定時間 (true time)

$t$  : 減衰補正時間 (時刻 0 と測定開始時刻の差)

$A_p \pm \sigma_p$  : 測定時点での親の放射能

$A_d \pm \sigma_d$  : 測定時点での娘の放射能

$A_{p0} \pm \sigma_{p0}$  : 時刻 0 での親の放射能

$A_{d0} \pm \sigma_{d0}$  : 時刻 0 での娘の放射能、と置けば

$$A_{p0} \pm \sigma_{p0} = \frac{\lambda_p t_m}{1 - \exp(-\lambda_p t_m)} \times \exp(\lambda_p t) \times (A_p \pm \sigma_p)$$

$$A_{d0} = \frac{A_p \lambda_d t_m}{\lambda_d - \lambda_p} \left\{ \frac{\lambda_p \times \exp(\lambda_p t)}{1 - \exp(-\lambda_p t_m)} + \frac{\lambda_d \times \exp(\lambda_d t)}{1 - \exp(-\lambda_d t_m)} \right\} + \frac{A_d \lambda_d t_m \times \exp(\lambda_d t)}{1 - \exp(-\lambda_d t_m)}$$

$$\sigma_{d0} = \left[ \sigma_p^2 \frac{(\lambda_d t_m)^2}{(\lambda_d - \lambda_p)^2} \left\{ \frac{\lambda_p \times \exp(\lambda_p t)}{1 - \exp(-\lambda_p t_m)} + \frac{\lambda_d \times \exp(\lambda_d t)}{1 - \exp(-\lambda_d t_m)} \right\}^2 + \sigma_d^2 \left\{ \frac{\lambda_d t_m \times \exp(\lambda_d t)}{1 - \exp(-\lambda_d t_m)} \right\}^2 \right] \quad \text{となる。}$$

## (5) 減衰補正計算法の適用

誤解を避けるため、放射能が検出された時のみ減衰補正を行う。これは親娘の型で逐次崩壊するしないに拘らず、正しい選択である。

1. 天然崩壊系列核種の減衰補正は計算が困難であり、またそれ程意味はないので測定時の値を出せば良く、減衰補正の必要はない。
2. 崩壊が系列をなして連続的である時、厳密には線形連立一次微分方程式を解かなくてはならない。
3. 娘核種の減衰補正は過渡平衡になっているとみなして行って十分である場合もある。

### 10. 2 放射能濃度の計算〔計算機を用いるが手計算も出来る〕

放射能濃度は次の式にしたがって計算する。

$$\frac{\text{試料ピーク面積}}{\text{試料測定時間}} - \frac{\text{BGピーク面積}}{\text{BG測定時間}} = \text{正味計数率}$$
$$\text{放射能濃度} = \frac{\text{正味計数率} \times \text{減衰補正係数} \times \text{灰分率} \times \text{希釈倍率}}{\text{ピーク効率} \times \gamma \text{線放出比} \times \text{回収率} \times \text{測定供試量}}$$

バックグラウンドスペクトル中のピーク面積が $2\sigma$ 以下であれば、差引を行わなくてよい。

### 10. 3 同一核種の複数ピークの取扱

一般的に、放射能は一崩壊についてエネルギーの異なった複数の $\gamma$ 線を放出する。これを利用すれば核種の同定や定量が正確になる。<sup>1)</sup>

実際に環境試料中にある核種では $^{60}\text{Co}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 等であるが緊急時などには $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{140}\text{Ba}$ 、 $^{140}\text{La}$ など多数のピークを生ずる核種が幾つか検出される。

---

1) ただし妨害等により数値や同定に自信が持てないのであれば、信頼できるピークの値のみを利用する。

### 10. 3. 1 取扱い手順

何らかのピークが検出された時、可能であるならば以下のように処理するのが望ましい。

- ① そのピークに対し、候補となる核種を拾い出す。
- ② 候補となった核種の「主要」なピークを核データ表で調べ、妨害ピークが検出されている等で信頼できない領域と、サムピーク、エスケープピークのデータを除外する（同定には利用する）。
- ③ 除外されなかった全てのピーク領域について放射能を計算する。
- ④ それらの値が計数誤差の範囲で一致しているかどうか調べ、想定した核種が妥当であるか否か調べる。想定した核種が間違っていたら別の核種を想定して②へ戻り、正しかったなら次のようにする。
- ⑤ あまり多数のピークのデータを使っても効果がないと思われるならば次のようにする。全てのピーク毎に放射能を計算し、誤差の小さい順に並べ、大きな差があるところを選んで足切りを行い、選別する。
- ⑥ 誤差の重みをつけた荷重平均をする。

荷重平均の計算について

- a. 異なった測定器（互いにバイアスがあるかも知れない）を用いた。
- b. 分割した試料である。
- c. ピークのエネルギーがかけ離れており、効率曲線に問題が考えられる。

等、互いに異なった誤差が重なっているデータであるのに、計数誤差だけを表示してある場合、荷重平均の計算は適用できない。同スペクトル中の同一核種のピークであれば、計数誤差のみと考えるも妥当と考えられる。

荷重平均すれば必ず誤差は小さくなり、例えば $3\sigma$ 以下のピークを複数用いて計算すると $3\sigma$ 以上になることもある。

### 10. 3. 2 荷重平均の計算

複数の放射能値  $A_i \pm \sigma_i$  が得られた時は下の式を用いて荷重平均する。

$$t = t_0 \pm \sigma_t \quad \text{ただし} \quad t_0 = \frac{\sum_i \frac{A_i}{\sigma_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}, \quad \frac{1}{\sigma_t^2} = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}$$

#### 10.4 報告書の作成

試料を測定して放射能濃度を求めた後、これらの結果を報告書にしなければならぬ。報告書には書式が定められている場合が多いが、ここではそれらの補助資料として、スペクトル解析した結果を計算機のプリンタが書き出すものを取り扱う。

計算機からの出力のため、紙の大きさや文字種などを選べないので、報告書の形式や、書き込むことの出来る情報量は制限を受ける。また、計算機の種類によっては、日本語（漢字）が使えないといった制限もある。出力形式の設計にあたっては、個々にいろいろな問題があるが、本章では、報告書として取り込まれることが望ましい項目を挙げる。

報告書には数値の他にグラフ（スペクトル）を添付する。

報告書に載せる情報は、大きく分けて「試料の情報」、「測定の情報」、そして「測定結果（データ）」の3つが必要である。

##### (1) 試料の情報：試料自身及び採取から測定にかかるまでの情報（前処理等）

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| 試料番号   | : 測定試料1つ1つに固有の名前もしくは番号。                                 |
| 試料名、部位 | : 浮遊塵、海産生物、日常食、土壌、海水、陸水、降下物等<br>(部位：内臓、筋肉、下層、上層、…～…cm等) |
| 試料採取場所 | : 住所等（場合によっては緯度経度）                                      |
| 試料採取日  | : 採取年月日、採取期間                                            |
| 供試量    | : 単位（ $\mu$ 、g、kg等）、測定に供した量。化学処理した試料について。               |
| 灰分比等   | : 灰分比、乾燥比（乾燥または灰化处理した時）                                 |
| 回収率等   | : 化学回収率等                                                |
| 前処理形態  | : 灰化、濃縮、蒸発乾固、風乾、化学沈澱、集塵等前処理法                            |
| 容器の種類  | : U-8、U-4、V-1、2 $\mu$ マリネリビーカー等。                        |
| 試料充填高さ | : 単位（mmまたは、cm） 0.5mm単位程度まで表示。                           |
| 化学沈澱量  | : 単位（g） 0.1gまで表示。                                       |
| 試料重量   | : 単位（g） 0.1gまで表示。                                       |

(2) 測定の情報：測定することによって発生した情報。

測定番号 : 1回1回の測定に付けられる固有の番号。

検出器 : 検出器番号、仕様（高純度または、Liドリフト型、メーカー、型番、相対効率、分解能）

測定日時 : 年月日時分、from（～to）

live time : 単位（秒） live time

バックグラウンド：測定試料の解析に使われたバックグラウンドの情報で、測定番号、測定日時、live time

測定条件 : 通常とは異なる条件で測定をした場合にその内容を表示する。（例：エンドキャップ上 $\cdot\cdot$ cm浮かせた、時定数を $\cdot\cdot$ にした、補助遮蔽を使用した等。）

(3) 測定結果（データ）：測定、解析に使用したデータ及び結果。放射能計算結果の表示桁数は、データ、誤差ともに有効数字3桁とする。桁が多すぎる場合は、E表示にするか、単位を変えて桁をずらす。例を 図10-2 に示す。

核種名 : 測定対象核種、検出された核種

エネルギー(及び、放出比) : 核データまたは、測定値

ピーク中心チャンネル : ピーク面積を計算するときに用いられたピーク中心チャンネル。小数点以下2桁。

ピーク面積 : カウント（誤差は $1\sigma$ ）。有効数字4～5桁。

正味ピーク計数率 : ピーク面積を測定時間（live time）で除して計数率を出し、バックグラウンド計数率を差し引いた値。（誤差は $1\sigma$ ）。有効数字4～5桁。単位（counts/秒 または /1000秒）

バックグラウンド計数率 : （誤差は $1\sigma$ ）。有効数字4～5桁。  
単位（counts/秒 または /1000秒）

測定時放射能 : Bq/試料。有効数字3桁

採取時放射能濃度 : Bq/kg生など。有効数字3桁

荷重平均値 : 同一核種で複数のピークについて定量した時には荷重平均した値も表示する。

ピーク効率 : 絶対値、%、cps/Bq 等に表示する。

試料番号

M641110GOD00249U00

測定試料：海底土

試料採取年月日 89/11/10

測定供試量 0.15550 測定試料重量 155.500 g  
 測定試料高さ 50.000 mm  
 規格化乗数 1.00000

BG1 # 1002018 測定日 90/02/17 測定時刻 15:12 Live Time 156175 秒  
 RUN # 1002021 測定日 90/02/21 測定時刻 14:37 Live Time 83147 秒  
 BG2 # 1002025 測定日 90/02/26 測定時刻 17:08 Live Time 162538 秒

| 核種      | 放射能濃度<br>Bq/kg乾土 | 放射能/試料           | ピーク中心   | ピーク計数率            | Back Ground cpks | 正味計数率           | 計数効率   |
|---------|------------------|------------------|---------|-------------------|------------------|-----------------|--------|
| Ce-144  | -0.5814 ± 1.69   | -0.0704 ± 0.205  | 265.54  | -0.1097 ± 0.788   | 0.191 ± 0.381    | -0.300 ± 0.875  | 38.436 |
| Cr- 51  | -20.97 ± 26.0    | -0.248 ± 0.307   | 638.74  | -0.4690 ± 0.559   | 0.0808 ± 0.390   | -0.550 ± 0.681  | 22.579 |
| I -131  | -1040. ± 1600.   | -0.0220 ± 0.0339 | 727.54  | -0.3608 ± 0.498   | -0.282 ± 0.245   | -0.361 ± 0.555  | 20.189 |
| Sb-125  | -0.6260 ± 0.609  | -0.0906 ± 0.0881 | 854.34  | -0.3608 ± 0.406   | 0.107 ± 0.203    | -0.467 ± 0.454  | 17.546 |
| Be- 7   | 12.73 ± 8.75     | 0.519 ± 0.356    | 953.74  | 1.176 ± 0.533     | 0.316 ± 0.254    | 0.859 ± 0.590   | 15.930 |
| Ru-103  | -0.5709 ± 1.07   | -0.0144 ± 0.0270 | 992.74  | -6.013E-2 ± 0.333 | 0.138 ± 0.166    | -0.198 ± 0.372  | 15.379 |
| Ba-140  | -127.9 ± 263.    | -0.0736 ± 0.151  | 1073.13 | -0.2191 ± 0.477   | 0.0389 ± 0.232   | -0.258 ± 0.531  | 14.365 |
| *Tl-208 | 0.9500 ± 0.204   | 0.148 ± 0.0317   | 1164.73 | 2.911 ± 0.335     | 1.21 ± 0.144     | 1.70 ± 0.364    | 13.376 |
| Sb-125  | -0.8932 ± 0.862  | -0.129 ± 0.125   | 1199.53 | 8.793E-2 ± 0.263  | 0.388 ± 0.122    | -0.300 ± 0.290  | 13.039 |
| Cs-134  | 3.390E-2 ± 0.167 | 0.00479 ± 0.0236 | 1207.85 | 6.065E-2 ± 0.261  | -0.199 ± 0.146   | 0.0606 ± 0.299  | 12.961 |
| *Bi-214 | 1.954 ± 0.461    | 0.304 ± 0.0718   | 1216.91 | 4.750 ± 0.393     | 2.95 ± 0.165     | 1.80 ± 0.426    | 12.877 |
| Ru-106  | -0.1027 ± 1.78   | -0.0132 ± 0.229  | 1242.33 | -1.635E-2 ± 0.258 | -0.0196 ± 0.119  | -0.0164 ± 0.284 | 12.649 |
| Cs-137  | -0.2264 ± 0.232  | -0.0350 ± 0.0359 | 1321.73 | -0.2776 ± 0.332   | 0.0793 ± 0.153   | -0.357 ± 0.366  | 11.993 |
| Zr- 95  | -0.4657 ± 0.980  | -0.0237 ± 0.0500 | 1511.93 | -0.1408 ± 0.271   | -0.0249 ± 0.119  | -0.141 ± 0.296  | 10.700 |
| Nb- 95  | 2.316 ± 2.57     | 0.0152 ± 0.0520  | 1530.13 | 0.4476 ± 0.500    | 0.287 ± 0.229    | 0.161 ± 0.550   | 10.592 |
| Cs-134  | -0.1961 ± 0.187  | -0.0277 ± 0.0264 | 1590.12 | -0.1974 ± 0.209   | 0.0455 ± 0.0999  | -0.243 ± 0.232  | 10.257 |
| Co- 58  | 0.5331 ± 0.329   | 0.0303 ± 0.0187  | 1620.12 | 0.3041 ± 0.172    | -0.0687 ± 0.0737 | 0.304 ± 0.187   | 10.098 |
| Mn- 54  | 0.2251 ± 0.421   | 0.0279 ± 0.0521  | 1668.12 | 0.2745 ± 0.468    | -0.344 ± 0.211   | 0.275 ± 0.513   | 9.856  |
| Ac-228  | 1.093 ± 0.584    | 0.170 ± 0.0908   | 1820.72 | 1.245 ± 0.230     | 0.779 ± 0.0955   | 0.465 ± 0.249   | 9.170  |
| Pa-234m | 8.857 ± 23.4     | 1.38 ± 3.63      | 2000.51 | 0.3608 ± 0.166    | 0.292 ± 0.0751   | 0.0690 ± 0.182  | 8.492  |
| Fe- 59  | 0.5271 ± 1.07    | 0.0165 ± 0.0334  | 2197.10 | 0.1363 ± 0.136    | 0.0630 ± 0.0606  | 0.0733 ± 0.149  | 7.874  |
| Zn- 65  | -0.3831 ± 0.352  | -0.0445 ± 0.0409 | 2229.50 | -0.1245 ± 0.148   | 0.0510 ± 0.0646  | -0.175 ± 0.161  | 7.782  |
| Co- 60  | 5.887E-2 ± 0.157 | 0.00882 ± 0.0236 | 2344.90 | 0.1121 ± 0.164    | 0.0462 ± 0.0641  | 0.0659 ± 0.176  | 7.474  |
| Fe- 59  | -1.723 ± 1.50    | -0.0539 ± 0.0469 | 2581.69 | -0.1203 ± 0.127   | 0.0408 ± 0.0586  | -0.161 ± 0.140  | 6.923  |
| Co- 60  | -0.1318 ± 0.146  | -0.0197 ± 0.0219 | 2663.48 | -3.608E-2 ± 0.137 | 0.0973 ± 0.0567  | -0.133 ± 0.148  | 6.753  |
| *K - 40 | 99.71 ± 3.73     | 15.5 ± 0.580     | 2920.07 | 10.99 ± 0.383     | 0.577 ± 0.0729   | 10.4 ± 0.390    | 6.278  |
| La-140  | 39.69 ± 104.     | 0.0228 ± 0.0601  | 3191.46 | 0.1759 ± 0.301    | 0.0471 ± 0.156   | 0.129 ± 0.339   | 5.851  |
| Sb-125  | -0.715 ± 0.497   |                  |         |                   |                  |                 |        |
| Cs-134  | -0.0683 ± 0.125  |                  |         |                   |                  |                 |        |
| Fe- 59  | -0.231 ± 0.870   |                  |         |                   |                  |                 |        |
| Co- 60  | -0.0435 ± 0.107  |                  |         |                   |                  |                 |        |

図 10-2 測定結果の例

以下、可能であるならば

自己吸収、サム効果補正量： $(\text{補正済効率} - \text{補正無し効率}) \div \text{補正済効率} (\%)$   
自己吸収、サム効果補正をした場合。

妨害核種、ピーク                   ：核種名及びエネルギー

検出下限値                           ：

線量                                   ：

その他対象外核種

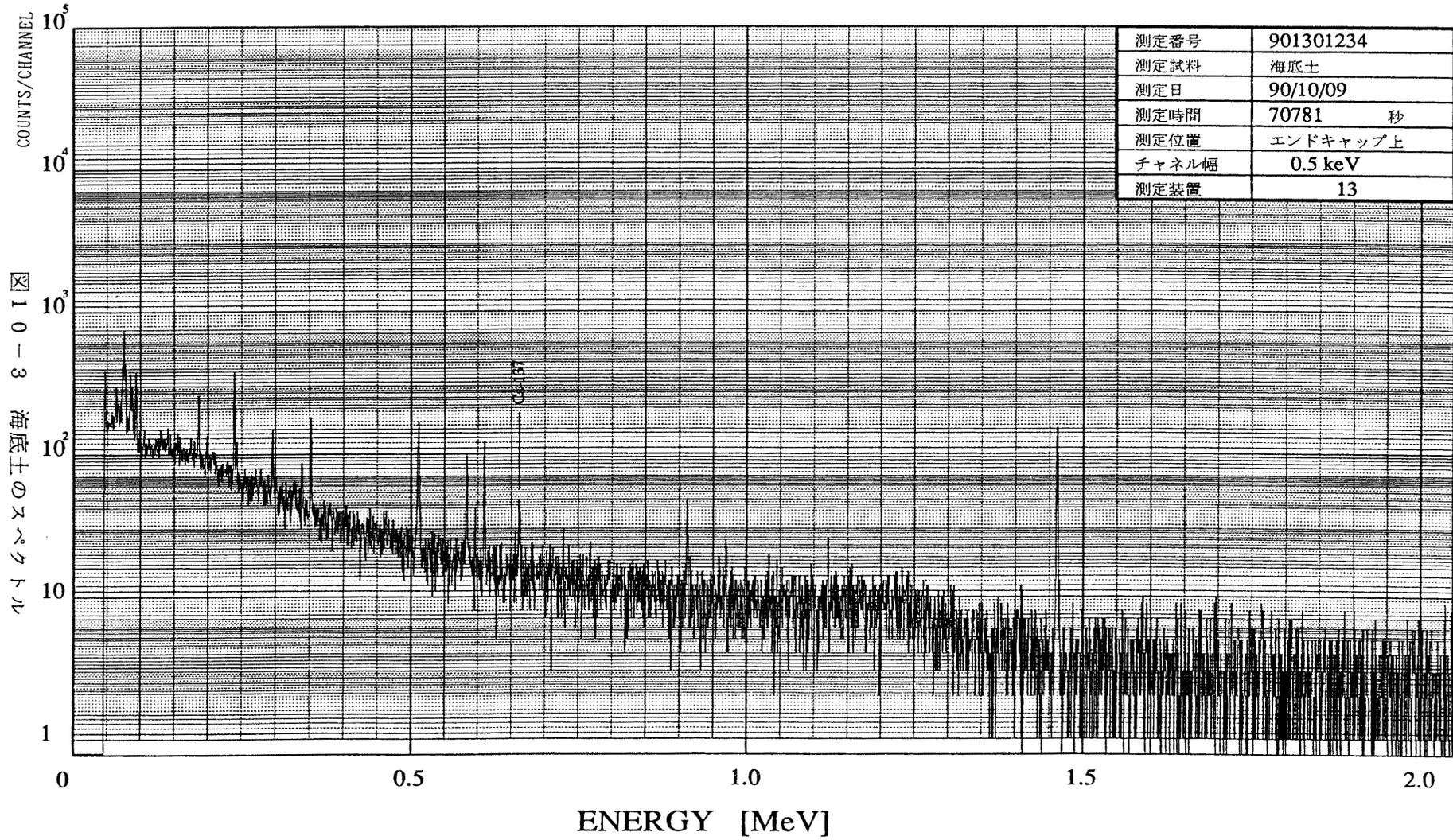
#### (4) スペクトルのグラフ

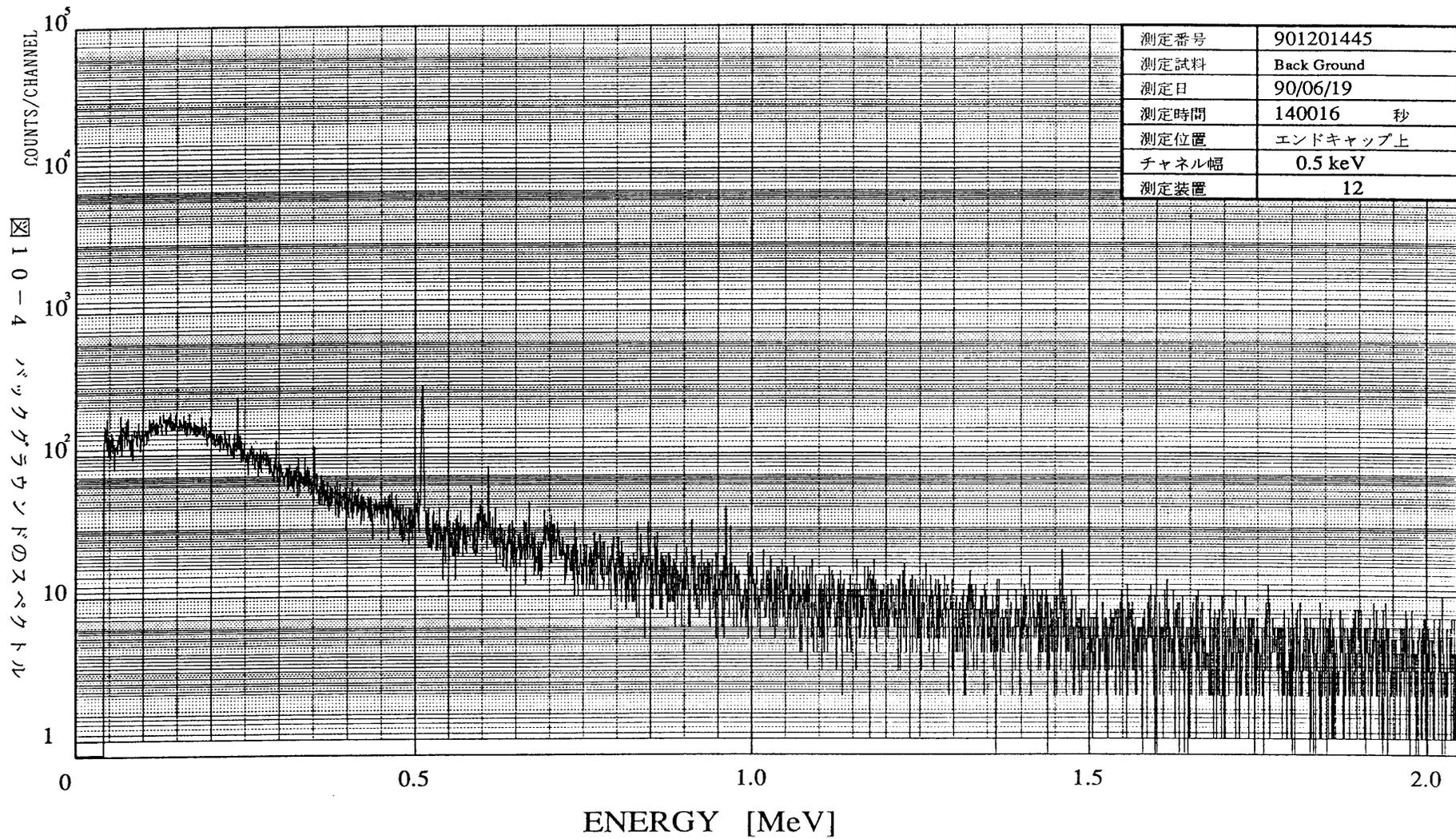
試料及び、解析に用いたバックグラウンドのスペクトルを添付する。

図10-3 に平常時の海底土、図10-4 にバックグラウンドのスペクトルの例を示す。

必要な項目：測定番号、試料名、live time、測定日時

その他       ：検出されたピーク及び注目したピーク（検出されてもされなくても）に矢印を付ける。





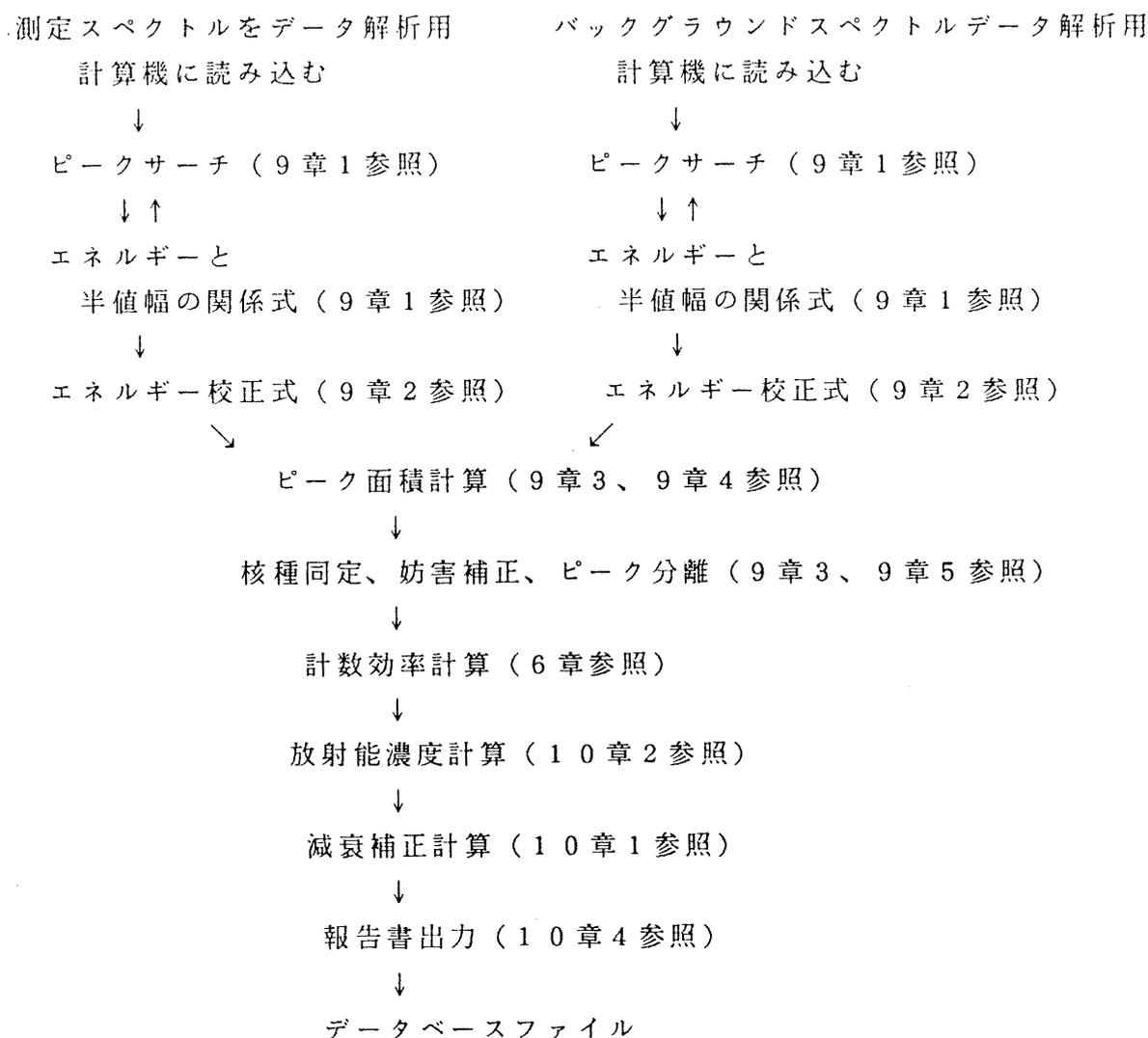
☒ 10-4 バックグラウンドスペクトル

## 第 1 1 章 データ解析用プログラム

環境試料を Ge 半導体検出器で測定して得られたスペクトルの解析には、多量のデータを処理するので電子計算機を用いる。プログラムの良否で便利さやデータの正確さなどが変わるので、解析システムの導入に際しては検討が必要である。

### 1 1. 1 スペクトル解析プログラムの概要

以下に $\gamma$ 線スペクトロメトリーのデータ処理の例を示す。各段階ごとの具体的な計算方法については、それぞれの章に記載してある。



スペクトル解析に用いるプログラムは既製品を購入する、自作する、外注する、等が考えられる。それぞれ得失があるが、どの方法にしても処理内容を把握し、どのような計算処理が行われるのか、十分に検討する必要がある。

## 1 1. 2 一般に使用されている $\gamma$ 線スペクトル解析プログラム

今後Ge半導体検出器による環境試料の $\gamma$ 線スペクトル解析は市販解析プログラムを購入して行われるのが一般化すると考えられる。現在パーソナルコンピュータ用に市販されている $\gamma$ 線スペクトル解析プログラムを参考に、使用上の要点を述べる。さらに、現在多く使用されているプログラムによって、放射能既知の模擬土壌試料、およびチェルノブイル原発事故の影響を受けた試料のスペクトルを解析した結果を掲載した。

現在市販されている解析プログラムの機能、性能はおおよそ十分であるといえる。しかし購入に当たっては、多数の使用実績があり、使用法が簡明で初心者にも誤操作がないような製品を選ぶようにする他、次のような点に特に留意する必要がある。

1. 操作に当たって、どうすればやりたいことができるのか、分かりやすく作られている。
2. 処理方式に柔軟性があり、例えばピーク領域の取り方を自由に変更できる。
3. 核データファイルが自由に作れる。
4. 自己吸収とサム効果の補正ができ、補正をするしないの選択もできる。
5. 印刷された結果を見れば何をどう処理したかよく分かる。
6. そのメーカーはプログラムの改訂等に際して、核種、放射能、ピークチャンネル、ピーク面積等のデータの表現方法やフロッピーファイルへの蓄積形式などについて、一貫性を保ってきた。

購入の際に特注して改造を依頼する場合があるが、現在販売されている解析プログラムは必要な性能を持っており、特に改造をする意味は薄い。改造を行った場合は保守が出来なくなる恐れがあり、また改訂版が出されても特注品には対応しないと考えられる。改良の希望をメーカーに伝え、改訂の際に反映されるのを待つのが賢明である。なおソースプログラムは公開されないのが一般的である。

### 1 1. 2. 1 パーソナルコンピュータ用プログラムの概要

昭和54年改訂科学技術庁マニュアル（放射能測定法シリーズ7「ゲルマニウム半導体を用いた機器分析法」）に基づき作成されている。OSはMS-DOSである。なおハードディスクを使用すると使いやすくなる。

一般に市販のデータ解析プログラムシステムは次のようなプログラムの集合から出来ている。

#### (1) 測定開始・終了プログラム

スペクトルメモリー等の制御、測定の開始および測定中に収集中のスペクトルの観察ができる。測定終了後、データをファイルする。

## (2) スペクトル解析プログラム

ピーク面積を計算し、バックグラウンドを差し引き、 $\gamma$ 線放出比とピーク効率と測定供試量と計測時間で除し、減衰補正して放射能濃度を求め、報告書を作成する。

核種をあらかじめ決めておき、ピークが検出されなくても放射能を計算する方法と、ピーク探査をしてから、核種を同定して放射能を計算する方法とがある。市販プログラムにおいてもこの両者に対応している製品があるが、妨害補正などの扱いが異なっている事があるので注意する。

## (3) ピーク効率計算プログラム

標準線源の測定データから、ピーク効率を計算し、その結果をスペクトル解析プログラムで利用できるようにファイルに登録する。

測定データと求められた効率曲線のグラフを出力する必要がある。

製品によって採用している校正方法が異なるので、適した標準線源を入手して校正する。具体的には K C I 容積線源+エネルギー相対効率(混合線源)用の効率計算プログラムと、混合容積線源セット用の効率計算プログラムがある。

## (4) ファイル登録修正プログラム

システムに付随して下記のようなデータファイルがあり、それらにデータを記入したり、更新したり、内容を印刷したりするプログラムがある。

核データ(妨害補正を含む)、ピーク効率  
エネルギー校正結果、エネルギー分解能測定結果  
解析条件、試料等測定結果

なおファイルが ASCII 形式で作成されていれば、スクリーンエディターで保守ができて便利である。

## 1 1. 2. 2 解析手法と問題点

### (1) エネルギー校正式

エネルギー校正式  $E(\text{keV}) = C_0 + C_1 * (f_{\gamma} \text{rel}) + C_2 * (f_{\gamma} \text{rel})^2$  を作成する製品が多い。<sup>1)</sup>

1. 増幅率が正しく調整されていても、変化する可能性があるため、測定の都度そのスペクトル自身のピークを用いてエネルギー校正式を求めるのが望ましい。

前回の校正式と大きく変わったときは、ドリフト許容範囲内にエネルギー校正式を求めるために登録したピークより大きなピークがあることなどが考えられ、正しい結果が得られないこともある。

---

1) 機器が正常に作動しており、2000keV が 4000チャンネル に対応している場合、 $C_1$  は 0.5 に近い値に、 $C_2$  は  $10^{-3}$  程度であることを確認する。

2. エネルギー校正曲線の非直線性を調べるためには、一次式からのずれについて表示するとよい。

## (2) ピーク効率

ピーク効率曲線から大きく離れた測定値はないか、ピーク効率曲線が、低エネルギー（300keV 程度以下）で上に凸の曲線に、高エネルギー（300 keV程度以上）で、ほぼ直線（微かにS字状）になっているか、グラフにプロットして確認する。そうならなかった時は、核データ（ $\gamma$ 線のエネルギー、 $\gamma$ 線放出比、半減期等）、ピーク領域、線源の値付け、減衰補正の確認を行い、それでも原因がわからないときは、線源の再測定、別の線源の測定を行う。<sup>1)</sup>

$^{60}\text{Co}$ 、 $^{88}\text{Y}$ 等サム効果の影響を受けている核種の効率データは、サム効果の補正を行ってから使用する。相対効率 30% 程度以上の検出器について、この補正ができないときは、ピーク効率の計算に使用しないことが望ましい。

1. 高低エネルギー 2 領域でそれぞれ別の式を作成する方法については、その境界において、製品によっては効率曲線が滑らかなにつながらないことがある。一旦データをグラフにプロットして、滑らかな曲線でなぞり、適切な境界エネルギーを設定した上で線上の値を入力する等の工夫が必要になる。

6 章に記載した計算方法を採用すれば、つなぎ目は自動的に滑らかになる。

2. 現在(1989年5月)市販されている製品では、標準容積線源と試料のマトリックスが違っている場合、自己吸収の補正計算はできない。また  $^{60}\text{Co}$ 、 $^{88}\text{Y}$ のように、 $\gamma$ 線をカスケードに放出する核種のサム効果補正計算もできない。

## (3) 核データ表

新しく作成する場合は、ピーク効率の測定等によく用いる核種、環境試料に検出される可能性のある核種以外は登録しない。核データ表は複数作成し、適宜選んで利用できる。目的や試料別に核種を絞って作成して使い分けると無用の混乱が防げる。対象とするデータは Table of Isotopes (7th Edition) 等を参照して入力する。

1. 購入したプログラムの核データに誤入力のあることがある。例えば天然放射性系列に属する核種の半減期が、親ではなくてその核種自身の半減期となっている、 $\gamma$ 線放出比が間違っている等。
2. 妨害補正の寄与計算に必要なピークが、放出比が 1% 以下であるために記載されていない事がある。(例： $^{54}\text{Mn}$  への  $^{228}\text{Ac}$  の妨害、 $^{51}\text{Cr}$  への  $^{228}\text{Ac}$  の妨害等。詳しくは資料 B：核データを参照)

---

1) ピーク効率(cps/ $\gamma$ ps)は、試料容器、検出器の相対効率によって異なるが、半径 24mm の円筒容器に、厚さ 50mm に試料を詰め、20% の相対効率を持つ検出器を用いて測定すると、 $^{137}\text{Cs}$  の 662keV  $\gamma$ 線に対して 1% 程度となる。

#### (4) ピーク探査

平滑化2次微分値の絶対値がその誤差の-2~-3倍より小さいチャンネルをピークとするが、その倍数を変えると検出の感度を変えられる。倍数はピーク検出感度などとも呼ばれる。ピーク検出の感度を上げすぎると、ピークでないのにピークと認識してしまう。下げすぎると、ピークがあるのに見落とし、間違った結果を得ることになる。また平滑化<sup>1)</sup>の回数等を変えると、検出感度が変わる。

あらかじめ、MCAのディスプレイ上などでスペクトル中の $\gamma$ 線ピークのチャンネル位置を調べておき、ピーク探査の結果をチェックするとよい。

平滑化の回数を変えられる製品は、検出感度との組合せによっては、ピーク検出がうまく行かなくなることがあり、注意して使用する。

#### (5) ピーク中心チャンネル

5章に記載されているように3点計数値法、ガウス関数に疑似フィッティングする方法、平滑化1(3)次微分ゼロクロス法、など様々な方法があるがそれほど結果に大きな差はない。

#### (6) $\gamma$ 線エネルギーと半値幅の関係式

半値幅をエネルギーの $\sqrt{\quad}$ と1次式の和( $FWHM = a + b \times E + c\sqrt{\text{Energy}}$ )で表わすプログラムがあるが、環境試料測定においては、 $\sqrt{\quad}$ と定数の和

( $FWHM = d + e\sqrt{\text{Energy}}$ )で妥当な表現ができる。

a、b、c、d、e: 定数

#### (7) ピーク領域

ピーク領域を正しく取っているかどうか確認することが重要である。なんらかのトラブルが発生したときは必ずここをチェックする。領域が狭くてピーク全体が入りきらない場合、反対に広すぎてベースライン領域まで取っているときは、ピーク領域の広さを決める定数(半値幅の何倍かを示す数値)を変更する。

#### (8) バックグラウンドの差し引き

現在市販されているプログラムでは、試料のない状態で測定を行い、求めたバックグラウンドデータを試料の測定データから差し引くことはできるが、計算に使用できるのは試料の前または後に測定した一個のバックグラウンドだけである。試料測定の前後に測定されたバックグラウンドで挟んだり、何回かの測定の平均等を用いて計算することはできない。

---

1) 平滑化2次微分とはガウス関数を2回微分した数値フィルタ関数による荷重移動平均の数値処理をいう(9章参照)。微分せずにガウス関数をそのまま使用したフィルタ関数を用いて同様の計算することを平滑化と言う。

## (9) 定量結果

定量結果における確認事項を記載する。

1. 通常的环境試料には含まれない核種が検出されていないかを確認する。もし、検出されているときは、関連する他のピークがあるか調べる。
2. Pb の X 線 (84.9keV) を<sup>109</sup>Cd (88keV) と、陽電子消滅線 (511keV) を<sup>85</sup>Sr (514keV) と取り違えることがある。

## 1 1. 2. 3 プログラムの使用に関して

プログラムを使うには単にキーボードを操作できれば良いわけではない。正しい結果を得るには、放射能測定や機器についてある程度の知識や経験が必要である。調査したプログラムに関して使用上の注意点を以下に掲載する。

### (1) キー入力について

誤入力が無いように、できれば二人で読み合わせして確認しながら入力する。

キー入力操作はスクリーンエディターのようにデータの入力や訂正のできるものが、使いやすく良い。

### (2) プログラム操作マニュアルについて

個々のプログラムについては、詳細に分かり易く書かれている。しかし測定、校正、解析、ファイル保守等全体がどの様に構成されているか、全体の流れと実際の手順を事前に把握しておく必要がある。

かなり重要な事柄がマニュアルに記載されていない例があるので、注意する。

### (3) 計測開始、終了、転送プログラム

各製品ともそれぞれ特徴があり、比較的使いやすく作られている。

### (4) ピーク効率の作成

作成された効率曲線の図が表示されない製品があり、この場合は A 3 程度の両対数グラフ用紙に、測定値を手でプロットして、ピーク効率曲線を描いて確認する。

### (5) チャンネルのエネルギー依存性

エネルギーとチャンネルの関係の 2 次式を作成する。

### (6) ピーク領域

ピーク領域がピークを中心にして正しく当てはめられているか、また領域幅がピークを完全に含んでいるかを確認する。

計算処理後、用いたピーク領域をディスプレイ上に表示する製品があり、設定領域の確認に便利である。

#### (7) ピーク中心

算出されたピーク中心チャンネルが、 $\gamma$ 線のエネルギーに対応していることを確認する。

#### (8) ピーク探査

直接 MCA やグラフ等で調べた全てのピークが、計算処理されていることを確認する。

#### (9) 核種の同定

探査されたピークのエネルギーを計算し、核データ表と照合して核種を同定する。エネルギーの決められた誤差範囲内にピークを持つ核種を列挙する。核種の同定において、一つで複数のピークを持つ核種であっても相互の関係は配慮されない。

#### (10) 核データの作成

核種データが ASCII ファイルになっている場合は、エディタで処理できる。あらかじめ、作成済みの製品もあるがデータを確認する必要がある。

1. 製品によっては寄与補正のため、妨害関係を考慮しながら入力する必要がある。
2. 放出比が 1% 程度以下のピークは、入力されていない製品がある。

#### (11) XYプロット

ピークの核種名が記載されない製品や、XYプロットへの出力がオプションになっている製品がある。

#### (12) 使いやすさ

1. 一度計算処理するとキー入力したデータが消失し、再度計算のやり直しをする時はキー入力を始めからやり直さなければならない製品がある。
2. 解析計算終了後にパラメータの変更、誤入力の訂正等の必要が生じた場合、その変更部分だけを変えて再解析しても結果のファイルが訂正されないため、正しい再解析結果を得るには煩雑な操作を必要とする製品がある。
3. 平滑化の回数とピーク検出感度、妨害補正の有無、ピーク効率、エネルギー校正式、バックグラウンドのファイル名等が解析結果に出力されない製品があり、確認がにくい。
4. エネルギー校正式、ピーク効率曲線のグラフが出力されない製品がある。
5. 場合によっては妨害補正のできない製品がある。
6. 解析可能なピークの数に制限がある製品がある。

#### 1 1. 2. 4 手計算による確認

新しいプログラムの使用を開始したときは、手計算による確認が必要である。ピーク領域の面積計算、ベースライン領域の面積計算、寄与補正の計算、バックグラウンドの差し引き計算、ピーク効率、半減期補正、放出比、測定試料重量、灰化率等を用いて放射能を手計算して、計算機による結果と比較する。

#### 1 1. 2. 5 解析チェック用スペクトル

放射能濃度既知試料の測定スペクトルを、現在よく使用されている数種類の市販解析プログラム仕様のデータファイルとしてフロッピーディスクに納めたものがある。このフロッピーディスクには効率測定用標準線源の測定データも入っているので、効率を計算し、試料のスペクトルを解析することによって、解析プログラムの作動が正常か確認できる。

1 1. 2. 6 スペクトルデータを用いる確認

市販プログラムを用いて標準容積線源、妨害補正が必要な放射能既知の試料、原発事故等に係る試料、バックグラウンド、等のスペクトルについて定量した結果を比較して以下に示す。

(1) 放射能濃度既知の模擬土壌試料 (単位: pCi<sup>1)</sup>/g)

| 核種                 | エネルギー<br>(keV) | A社            | B社            | C社            | 日本分析センター     |
|--------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| <sup>144</sup> Ce  | 133.54         | 9.98 ± 0.333  | 9.85 ± 0.391  | 9.33 ± 0.359  | 9.98 ± 0.323 |
| <sup>51</sup> Cr   | 320.08         | 49.8 ± 1.27   | 52.1 ± 1.60   | 50.7 ± 1.47   | 55.1 ± 1.82  |
| <sup>137</sup> Cs  | 661.64         | 3.00 ± 0.0506 | 2.88 ± 0.0953 | 2.94 ± 0.0549 | 3.08 ± 0.080 |
| <sup>58</sup> Co   | 810.76         | 4.94 ± 0.0850 | 4.73 ± 0.124  | 4.89 ± 0.0819 | 5.07 ± 0.082 |
| <sup>54</sup> Mn   | 834.83         | 5.19 ± 0.0691 | 5.33 ± 0.124  | 5.19 ± 0.0693 | 5.64 ± 0.123 |
| <sup>59</sup> Fe   | 1099.22        | 16.0 ± 0.236  | 15.6 ± 0.278  | 15.9 ± 0.224  | 16.0 ± 0.225 |
| <sup>60</sup> Co   | 1173.21        | 1.90 ± 0.0528 | 1.96 ± 0.0574 | 1.92 ± 0.0484 | 1.98 ± 0.050 |
| <sup>59</sup> Fe   | 1291.56        | 16.5 ± 0.307  | 17.3 ± 0.491  | 15.5 ± 0.281  | 15.8 ± 0.286 |
| <sup>60</sup> Co   | 1332.47        | 1.94 ± 0.0548 | 1.98 ± 0.0582 | 1.88 ± 0.0482 | 1.95 ± 0.049 |
| <sup>208</sup> Tl  | 583.14         | 22.3 ± 0.101  | 22.7 ± 0.234  | 22.3 ± 0.108  | 22.8 ± 0.104 |
| <sup>214</sup> Bi  | 609.31         | 54.0 ± 0.220  | 54.5 ± 0.545  | 51.2 ± 0.215  | 53.4 ± 0.213 |
| <sup>228</sup> Ac  | 911.2          | 63.0 ± 0.352  | 59.2 ± 0.651  | 60.2 ± 0.344  | 63.3 ± 0.354 |
| <sup>234m</sup> Pa | 1001.0         | 110. ± 7.72   | 96.3 ± 7.60   | 97.8 ± 5.84   | 85.3 ± 6.94  |
| <sup>40</sup> K    | 1460.8         | 35.4 ± 0.615  | 36.9 ± 0.756  | 34.5 ± 0.582  | 35.2 ± 0.609 |

| 核種                | エネルギー<br>(keV) | 添加値          |
|-------------------|----------------|--------------|
| <sup>144</sup> Ce | 133.54         | 9.75 ± 3.9 % |
| <sup>51</sup> Cr  | 320.08         | 49.4 ± 3.6 % |
| <sup>137</sup> Cs | 661.64         | 2.99 ± 4.1 % |
| <sup>58</sup> Co  | 810.76         | 5.09 ± 3.8 % |
| <sup>54</sup> Mn  | 834.83         | 5.07 ± 3.8 % |
| <sup>59</sup> Fe  | 1099.22        | 15.8 ± 3.7 % |
| <sup>60</sup> Co  | 1173.21        | 1.89 ± 4.4 % |
| <sup>59</sup> Fe  | 1291.56        | 15.8 ± 3.7 % |
| <sup>60</sup> Co  | 1332.47        | 1.89 ± 4.4 % |

注) サム効果の補正は行っていない。

1) Bq/g に換算するときには放射能濃度に 0.037 を乗ずる。

(2) チェルノブイル原発事故に係わる試料(単位: pCi<sup>1)</sup>/kg)

| 核種                 | エネルギー<br>(keV) | A社           | B社           | C社           | 日本分析センター     |
|--------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <sup>144</sup> Ce  | 133.54         | 843 ± 159.   | 822 ± 143.   | 748 ± 132.   | 820 ± 150.   |
| <sup>103</sup> Ru  | 497.08         | 2580 ± 467.  | 3290 ± 706.  | 2420 ± 390.  | 2150 ± 438.  |
| <sup>134</sup> Cs  | 604.66         | 2850 ± 48.7  | 2760 ± 80.2  | 2750 ± 49.6  | 2740 ± 51.8  |
| <sup>106</sup> Ru  | 622.2          | 10200 ± 388. | 9760 ± 454.  | 11600 ± 277. | 10200 ± 390. |
| <sup>110m</sup> Ag | 657.75         | 250 ± 30.9   | 193 ± 29.4   | 216 ± 25.4   | 207 ± 27.7   |
| <sup>137</sup> Cs  | 661.64         | 12900 ± 100. | 11800 ± 155. | 11400 ± 89.8 | 11500 ± 89.9 |
| <sup>134</sup> Cs  | 795.76         | 2940 ± 58.0  | 2600 ± 60.5  | 2850 ± 54.7  | 2860 ± 56.1  |
| <sup>58</sup> Co   | 810.76         | 512 ± 94.4   | 440 ± 89.7   | 413 ± 67.6   | 393 ± 75.2   |
| <sup>54</sup> Mn   | 834.83         | 1540 ± 44.9  | 1500 ± 62.7  | 1500 ± 43.9  | 1490 ± 67.0  |
| <sup>60</sup> Co   | 1173.21        | 343 ± 27.5   | 287 ± 29.8   | 263 ± 25.1   | 308 ± 26.7   |
| <sup>60</sup> Co   | 1332.47        | 325 ± 25.8   | 350 ± 27.5   | 327 ± 24.6   | 297 ± 24.6   |
| <sup>208</sup> Tl  | 583.14         | 85 ± 24.5    | 90 ± 26.7    | 74 ± 18.1    | 93 ± 23.6    |
| <sup>214</sup> Bi  | 609.31         | 286 ± 53.3   | 238 ± 52.1   | 187 ± 45.3   | 290 ± 94.2   |
| <sup>228</sup> Ac  | 911.2          | 346 ± 66.4   | 344 ± 69.5   | 278 ± 48.0   | 328 ± 65.5   |
| <sup>40</sup> K    | 1460.75        | 24500 ± 525. | 26100 ± 626. | 24000 ± 509. | 24300 ± 519. |

注) サム効果の補正は行っていない。

#### 解析結果

3社のプログラムとも、ほぼ同一の解析結果になり、模擬土壌試料については添加値とも一致し、環境試料を分析することに問題はない。

1) Bq/g に換算するときは放射能濃度に 0.037 を乗ずる。

### 1 1. 3 スペクトル解析プログラムの作製（外注、自作）について

解析プログラムを外注する場合および自作する場合の最大の利点は、プログラムがいわゆるブラックボックスにならないことである。ソースリストは当然明らかであり、設計段階から作業すれば内容についての理解が格段に違う。欠点は費用が掛かることであり、またよいプログラムを作成するには、それなりの能力、経験、知識がなければ市販のプログラムより良いものを作成する事はむずかしい。

なお具体的な計算式や手順は、各章に記載されているのでここでは扱わない。

#### 1 1. 3. 1 解析プログラムの流れ（9章を参照する。）

- ① 解析するデータ（ファイル名）、試料に関する情報、解析対象核種などを入力する。
- ② FWHM の概略値（前回解析結果など）を入力し、その値を幅とする平滑化2次微分フィルターを作成する。このフィルターを使ってスペクトルの平滑化2次微分とその誤差を計算し、 $-2\sim-3\sigma$ を越えたか否かでピークを探查する。
- ③ ピーク中心から FWHM の3倍以内に他の妨害となるピークが無く、独立したピークを選んでリストアップする。
- ④ リストアップされたピークに対して、1次式+ガウス関数<sup>1)</sup>で関数適合を行う。
- ⑤ ④ の適合計算の結果の中から、半値幅の誤差が小さいピークを選んでリストアップし、半値幅とエネルギーの関係式を求める。その式と ② の概略値に有意な差があったなら概略値を置き換え、②へ戻ってピーク探查をやり直す。
- ⑥ ④ の適合計算の結果の中から、ピーク中心の誤差が小さいピークをリストアップし、エネルギー校正式を計算する。
- ⑦ ピーク領域幅、対象ピーク等の解析条件を参照し、③でリストアップされたピークについて、コベル法、または関数適合でピーク面積等を計算する。
- ⑧ ピーク探查の結果に基づいて複合ピークの関数適合を行う。
- ⑨ バックグラウンドスペクトルについても同様に ⑧ まで処理する。試料のスペクトルと同じ核種についてピーク面積がその誤差の2倍以上のピークがあれば、試料のピークから差引いて正味ピーク計数率を求める。
- ⑩ 正味ピーク面積を、サム効果、自己吸収等を補正したピーク効率<sup>2)</sup>で除する。
- ⑪ 複数のピークがある核種についてはそれらを考慮し、核種を同定、定量、減衰補正し、報告書を出力する。<sup>3)</sup>

---

1) 9章 1 参照。

2) 6章 3、6章 4、6章 5 に計算方法が記述してある。

3) 10章 4 を参照。

### 1 1. 3. 2 支援プログラム

試料を測定して得られたデータを解析するだけでなく、その他に以下のようなプログラムが必要である。

#### 標準線源データ処理プログラム

標準線源を測定して得られたデータからピーク効率関数などを作成してファイルに登録し、グラフを作成する。

#### 各種ファイル保守プログラム

効率ファイル、核データファイル、データ解析の途中で一時的に作られる作業ファイル等の保守を行う。新規にシステムを作成するのなら、まず市販の表計算ソフトのような動作をする、汎用の便利で使いやすいファイル保守プログラムを一つ作り、そのデータファイル形式に合わせて、各ファイルを設計するとよい。各ファイルごとに専用の保守プログラムを作成しない。

測定一覧表、試料一覧表、分析結果一覧表などを作れるようにしておくデータ整理などに便利である。なお試料の情報や測定結果、半値幅とエネルギーの関係式、エネルギー校正曲線等をデータベースに整理すれば理想的である。

### 1 1. 3. 3 プログラム作製に当たっての注意事項

解析プログラムを作成したり、外注したりする際には次の点に留意しなければならない。

1. 正確に必要な機能を果たすこと。
2. 処理の内容が良く分かること。
3. 使いやすく、便利に出来ていること。

2.の「分かりやすさ」は極めて重要である。プログラムを作り、使用して何年か経って改訂する時に、内容がよく分からなくなっていることが希ではない。まして製作者がいなくなっているとプログラムの意味すら不明確となることがある。こうした事態を回避するため、モジュール化、構造化、ドキュメント化等が有効である。

# 解 說

## I : 計数値の統計性 (ポアソン分布)

放射性原子核の崩壊を放射線計測によって測定すると、特有のばらつきが伴う。放射性原子核が崩壊する確率は個別の原子核によって変わらず、一定である。そのため、崩壊数のばらつき方を計算によって求めることが出来、2項分布することは良く知られている。ところで放射線が計測される確率も個別の崩壊によらずに一定であり、原子核の崩壊と同種かつ独立な事象なので合わせて考えることが出来る。

放射性原子核  $N$  個がある決まった時間内に崩壊する真の平均値が  $L$  であり、 $L$  個の崩壊のうち計測される真の平均値が  $m$  であるとき、2つの事象は独立であるから、放射性原子核が計測される確率は

$$(L/N) \times (m/L) = m/N$$

で一定となる。だから、放射性原子核が崩壊し、かつ計測される確率も一定でランダム現象であり、2項分布として取り扱うことが出来る。

### 分布関数 $P(n)$ の計算

放射性原子核が全部で  $N$  個あり、ある時間内に起こるその崩壊事象の計測結果の真の平均値が  $m$  である時に、計数値  $n$  を得る確率  $P(n)$  を求める。

ある1個が計測される確率 :  $m/N$

特定の  $n$  個が計測される確率 :  $(m/N)^n$

ある1個が計測されない確率 :  $1 - m/N$

特定の  $(N-n)$  個が計測されない確率 :  $(1 - m/N)^{N-n}$

$N$  個から特定の  $n$  個を選ぶ選び方 :  ${}_N C_n = \frac{N!}{n!(N-n)!}$

であるから、まず特定の  $n$  個が計測され、残り ( $=N-n$ ) が計測されない確率は、

$$(m/N)^n \cdot (1 - m/N)^{N-n}$$

$N$  個の中から  $n$  個を選ぶ選び方を掛け算すると  $n$  個が計測される確率は

$${}_N C_n \cdot (m/N)^n \cdot (1 - m/N)^{N-n} \quad (\text{二項分布})$$

故に求める分布関数  $P(n)$  は、 $m$  に比べて  $N$  が非常に大きいならば

$$P(n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \{ {}_N C_n \cdot (m/N)^n \cdot (1 - m/N)^{N-n} \}$$

ここで、 $N$ が $m$ よりも非常に大きい場合とは、 $(m/N) \rightarrow 0$ であり、全部の原子核の個数に比べて、計測される回数が遙かに少ないという事である。これは検出効率が極めて低いか、あるいは測定する核種の平均寿命よりもずっと短時間の測定の時に成立し、一般には後者である。

$$P(n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \binom{N}{n} \left(\frac{m}{N}\right)^n \cdot (1 - m/N)^{N-n} = \frac{m^n}{n!} e^{-m}$$

のポアソン分布となる。ポアソン分布の分散  $\sigma^2$  及び標準偏差  $\sigma$  を計算すると

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \sum_{n=0}^{\infty} \{(m-n)^2 \cdot P(n)\} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \{(m^2 - 2mn + n^2) \left(\frac{m^n}{n!} \cdot e^{-m}\right)\} = m \end{aligned}$$

故に標準偏差  $\sigma = \sqrt{m}$  となる。

## II : 検出下限値について

測定毎に着目核種のピーク領域について検出下限値を求めておくことは重要である。検出された、されない、の判定はピーク面積が計数誤差の3倍を越えているか否か、で行われるのが一般的である。環境放射能は微弱で検出されないことが多く、検出下限値を計算しておかないと、ピーク探査によるスペクトル解析のみを行う場合、測定しても何の結果も得られない事になる。スペクトル解析プログラムに組み込んで、特に検出されなかった場合は検出下限値を得ておくのが望ましい。

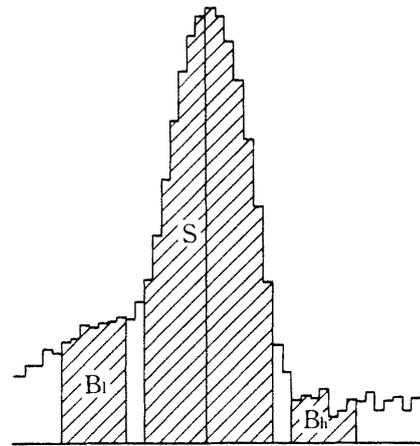
なお検出下限値以上の放射能が在ればほとんどの場合検出されるが、それ以下であっても必ず不検出になるわけではなく、検出される可能性がある。

### II. 1 検出下限値の計算

: Cooper の方法(文献1)

得られたスペクトル中の、ピーク領域の計数値を別の数値に置き換えてみて「 $3\sigma$ 以下<sup>1)</sup>で検出されず」が「 $3\sigma$ 以上で検出された」に変わる値を調べ、放射能に換算して検出下限値とする。

図II-1のように面積を取ると検出されるための正味ピーク面積についての条件は次式で表わされる。



図II-1 面積の取り方

$$a) \quad \frac{S - (\varrho B_l + h B_h)}{\sqrt{9 + 3\sqrt{\{9 + 4\varrho(1 + \varrho)B_l + 4h(1 + h)B_h\}}}} = 3$$

↓

正味ピーク面積

$\varrho$  = 低エネルギー側ピーク領域幅 / 低エネルギー側ベースライン領域幅

$h$  = 高エネルギー側ピーク領域幅 / 高エネルギー側ベースライン領域幅

$S$  = ピーク領域の面積

$B_l$  = 低エネルギー側ベースラインの面積

$B_h$  = 高エネルギー側ベースラインの面積

1) 検出を判定する方法として「 $3\sigma$ 以上」がよく用いられるが、いわば便宜的な方法であり、計数値が大きくなければ(大数の法則が成り立たなければ)妥当とは言えない。これは、測定時間が短くて解析対象領域の計数値が全て0だった時、誤差が0になるので理解出来る。

-----引用文献-----

文献1) J.A.Cooper: "Factors Determining the Ultimate Detection Sensitivity of Ge(Li) Gamma-Ray Spectrometers", Nucl. Instr. Methods, **82**, 273(1970)

より一般的には下式になり、妨害やバックグラウンド中のピーク等の引算を要する場合に対応することが出来る。ピーク領域の面積を  $S$  とし、差し引くべき面積とその誤差を  $B_n, \sigma_n$  と置くと、正味ピーク面積について

$$S - B_1 - B_2 - \dots = n \sigma (S, B_1, \sigma_1^2, B_2, \sigma_2^2, \dots) \text{ を解いて}$$

b)  $S - (B_1 + B_2 + \dots) =$

$$n^2 / 2 + n \sqrt{ \{ n^2 + 4 \{ (B_1 + \sigma_1^2) + (B_2 + \sigma_2^2) + \dots \} \} } / 2$$

前頁 a) 或は b) の右辺を、測定時間と計数効率と  $\gamma$  線放出比で除し、放射能に換算して検出下限値とする。仮に試料中に、この方法で計算された強さの放射能がある時、50% の確率で  $n \sigma$  以上として検出できる。

## II. 2 検出下限値に関する一般的な考え方

検出下限値については II. 1 の Cooper の方法以外にも様々な考え方がある。測定試料と測定条件（測定器、測定時間等）が決められたとき、分析対象となる核種について「最低これだけの放射能があれば検出し損なうことは殆ど無い」という値が本来の検出下限値である。

すなわち、同一試料を同一条件で繰り返し測定しても、スペクトルには統計変動があって測定毎に異なることを考慮し、「スペクトルに統計変動があっても、検出を保証できる最小の放射能値」を調べるべきである。そのためには、

- ① 「その試料から対象核種のみを取り除いて同一条件で測定した」と仮定し、スペクトルとその統計変動（ピーク領域の各チャンネルの計数値の確率分布）を推定する。
- ② 次に対象核種の適当な強さの放射能を仮定し、それからの計数を、推定したスペクトル（対象核種を含まない）に加算して、統計変動を含めてスペクトルを作成する。
- ③ 作成されたスペクトルの統計変動の範囲について、対象核種の放射能を計算し、その内の例えば 95% が「検出された」と判定されるとき、その放射能が検出下限値である。（検出下限値に等しい放射能があるのに「検出」にならない可能性が 5% ある。）

すなわち検出下限値の算出方法は、検出を判定する方法（計数値に付随する誤差の計算方法）にも依存する。

Cooper の方法では計数誤差の  $n$  倍で「検出」を判定するが、判定法の例をもう一つ挙げる。まず測定結果から遡って「試料に含まれる放射能の真の値が“ある値”であった確率は幾らか」を推定し、“ある値”を変化させる事によって放射能の値の確率分布を求める。そして、正である確率が 99.5% 以上であれば、検出されたと判定する（この場合、対象核種が存在しないのに検出されたと間違える可能性が 0.5% ある）。

$\gamma$ 線スペクトロメトリーにおいて、1～2日程度の測定では各チャンネルの計数値の誤差を0に近くする事ができないので真の平均値は分からず、その確率分布を推定しなければならない。一般的に、測定結果を基に、遡って「真の平均値が“ある値”であった確率は幾らか」を推定する統計手法は、実行するのが容易ではない。

II. 2の一般論を式で表現すると、以下のようになる。

$$\sum_c P_s(A) \times P_B = PDI$$

- A : 測定試料中の放射能。この値を調節して検出下限値を調べる。
- S : 放射能Aによる正味ピーク面積
- $P_s(A)$  : 放射能がAだった時、測定の結果正味ピーク面積の計数値がSになる確率。通常  $P_s$  はポアソン分布である。
- B : 対象核種の寄与を除いた試料のスペクトル（ベースライン計数値）
- $P_B$  : Bが出現する確率。 $P_B$  を統計学的に正しく推定するのは容易ではない。
- c : ピーク面積とその誤差を計算し、「検出された」と判定されるSとBの組み合わせ。「検出を判定する方法の危険率」＝「無いものを有ると誤る危険率」をどう取るか、で組合せ c が決まる。
- 「検出された」と判定するには幾つかの方法があり、方法によって組合せ c は変わる。3 $\sigma$ 方式もその一つであり、ピーク領域の計数値が「ベースラインの統計変動の上限を越えた時」とする方法もあり、後者による検出下限値の方が低い。
- PDI : 検出下限値の放射能があったにも拘らず、検出されたという結果が得られない危険率をどのくらい許すか、逆に言えば何%の確率で検出を保証するか<sup>1)</sup>。

PDIを決め、cについて同時確率の和が、PDIになる様にAを調節し、得られたAを検出下限値とする。

「検出された、されない」の判定法、PDIの決め方、 $P_B$ の見積り方、などの点について様々な考え方ができるので、検出下限値の計算には幾通りかの方法が考えられる。昭和54年度改訂の前マニュアルには Pasternack の方法(文献1)が掲載され、本マニュアルはCooper の方法を推奨した。他に、より定義に忠実な計算法も有り得るが実行するのは困難と考えられる。

1) Cooper の方法は「n $\sigma$ 以上」になる測定結果を50%の確率で実現する放射能を検出下限値としている。すなわちPDI=0.5である。Bについては「測定して得られた計数値＝真の平均値」であると近似しているので、 $P_B$  はポアソン分布となる。

--- 引用文献 ---  
 文献1) B.S.Pasternack and N.H.Harley: "Detection Limits for Radionuclides in the Analysis of Multi-Component Gamma Ray Spectrometer Data", Nucl. Instr. Methods, **91**, 533(1971)

## II. 3 Cooper の方法と Pasternack の方法の比較

昭和54年度改訂のマニュアルに掲載された Pasternack の検出下限値の計算について、下記のような指摘があった。

1. 「無いものを有ると誤認する危険率」及び「臨界値の放射能が有るのに無いと誤認する危険率」の概念が明確になっていないと、計算された検出下限値の意味が良く理解できない。
2. バックグラウンドの引算や妨害補正が検出下限値に及ぼす影響を盛り込むのが容易ではない。
3. 検出下限値の計算をする際に用いる「検出・不検出」の判定基準と、計数誤差を $3\sigma$ に取る事との関係が明解に述べられていない。

一方、検出下限値の厳密な計算は困難なので近似などが行われる<sup>1)</sup>。また計算法も色々あり、どのように計算するか約束事にせざるを得ない。

本改訂版で Cooper の方法を推奨するに当たっては、これらの事情と次のような理由を併せて考慮した。

1. 概念が簡明なので、確率統計の知識が十分でなくても何を計算しているのか比較的容易に理解できる。
2. バックグラウンドの引算や妨害補正が検出下限値に及ぼす影響を計算に容易に取り込める。

なお独自の方法で検出下限値を計算する場合には、どのような考え方にもとづいて計算したのかを明記する事が望まれる。

---

1) Pasternack の方法を採用としても「統計的に不十分なデータしか無いとき（測定時間が短い、または繰り返しの測定回数が少ない）、バックグラウンド或はベースラインの統計変動を正しく求めるには、どう計算するのか」と言う問題は残されている。

### Ⅲ：最小 2 乗法について

ある変数  $X$  に対応して量  $Y$  がある時、 $X$  を変えて測定すると、 $X_i$  について測定値  $Y_i \pm \sigma_i$  が得られる。これらのデータに適当な関数曲線を当てはめる。計算のため、次の 2 つを仮定する。

- 1) 関数は  $M$  個の可変パラメータ  $C_1 \sim C_M$  を持った  $f(X, C_n)$  で書き表す事ができる。またパラメータ  $C_n$  の値を変えることで曲線の形が変わり、測定値への当てはめが出来る。
- 2)  $C_n$  の真の値  $C_n^t$  を用いると  $Y$  の真の値  $\hat{Y}_i$  は  $\hat{Y}_i = f(X_i, C_n^t)$  となる事が、仮定できる。

#### 1 最小 2 乗法の計算

正規方程式を作り、繰り返し解いて逐次近似を行う。

真の値  $C_m^t$  を知る事はできないので最尤解  $C_m^s$  を求める。 $C_m^s$  に近い  $C_m^o$  を知っているとし、この  $C_m^s$  と  $C_m^o$  の距離を  $C_m^{so}$  と置くと

$$C_m^s = C_m^o + C_m^{so}, \quad {}^o f_i^s \simeq f_i^o + \sum_m C_m^{so} \cdot \frac{\partial f_i^o}{\partial C_m} \quad \text{-----} \quad \text{①}$$

ここで、これからのテイラー展開等の計算に関連して用いる記法の例を示す。

$$C_n \simeq C_n^t + C_n', \quad f(X, C_n) = f^t, \quad \frac{\partial f^t}{\partial C_n} = \frac{\partial}{\partial C_n} f(X, C_n) \Big|_{C_n = C_n^t}$$

等と記す。またテイラー展開を用いて近似値を計算した場合は、展開の原点を左上の添え字で示す。

$${}^o R(s) \simeq R(o) + \frac{\partial R}{\partial C} \Big|_{C=C^o} \times C^{os} + \dots$$

$$\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \frac{\partial f_i^o}{\partial C_m} \frac{\partial f_i^o}{\partial C_n} = C_{mn}^o, \quad \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} (Y_i - f_i^o) \frac{\partial f_i^o}{\partial C_m} = N_m^o$$

と置けば、正規方程式は

$$\begin{array}{ccc}
 \left[ \begin{array}{cccc} C_{11}^{\circ} & C_{12}^{\circ} & \cdots & C_{1M}^{\circ} \\ C_{21}^{\circ} & C_{22}^{\circ} & \cdots & C_{2M}^{\circ} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{M1}^{\circ} & C_{M2}^{\circ} & \cdots & C_{MM}^{\circ} \end{array} \right] & \begin{bmatrix} C_1^{s^{\circ}} \\ C_2^{s^{\circ}} \\ \vdots \\ C_M^{s^{\circ}} \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} N_1^{\circ} \\ N_2^{\circ} \\ \vdots \\ N_M^{\circ} \end{bmatrix} \\
 \parallel & \parallel & & \parallel \\
 C^{\circ} & \delta C & & N^{\circ}
 \end{array}$$

となり、 $\delta C = C^{\circ -1} \times N^{\circ}$

の連立1次方程式を解いて（逆行列を求めて） $C_m^{s^{\circ}}$ を得ることが出来る。

式④の  $C_m^s = C_m^{\circ} + C_m^{s^{\circ}}$  に代入し、得られた  $C_m^s$  を  $C_m^{\circ}$  と読み換えて、再び同様の計算を行う。繰り返しても  $C_m^s$  の値に変化が起こらなくなったならば答とする。

## 2 標準偏差の計算

最小2乗法で計算して得られた結果の標準偏差は

$$\sigma(C_i, C_j) = C_{ij}^{s^{\circ -1}}$$

で与えられる。計算で得られた結果  $C_k$  で表される関数  $F(\dots, C_k, \dots)$  の分散は次のようにして求められる。

正規分布する量の一次式の分散は計算できるので、 $F$  を正規分布する量  $C_k^{t^s}$  の一次式にテイラー展開すれば

$$\sigma_F^2 = \sum_{ij} \frac{\partial F^s}{\partial C_i} \sigma(C_i, C_j) \frac{\partial F^s}{\partial C_j} = \sum_{ij} \frac{\partial F^s}{\partial C_i} C_{ij}^{s^{\circ -1}} \frac{\partial F^s}{\partial C_j}$$

となる。

例えば、ガウス分布 + 1 次式 で適合させたピーク面積の誤差は、適合関数を

$A \exp \{-B^2 (x - x_0)^2\}$  と置けば、面積  $S$  は  $\frac{A}{B} \sqrt{\pi}$  であり

$$\sigma_s^2 = \frac{\partial S^s}{\partial A} C_{AA}^{s-1} \frac{\partial S^s}{\partial A} + \frac{\partial S^s}{\partial B} C_{BB}^{s-1} \frac{\partial S^s}{\partial B} + 2 \frac{\partial S^s}{\partial A} C_{AB}^{s-1} \frac{\partial S^s}{\partial B}$$

$$\sigma_s^2 = \frac{\sqrt{\pi}}{B} C_{AA}^{s-1} \frac{\sqrt{\pi}}{B} + \frac{A\sqrt{\pi}}{B^2} C_{BB}^{s-1} \frac{A\sqrt{\pi}}{B^2} - 2 \frac{\sqrt{\pi}}{B} C_{AB}^{s-1} \frac{A\sqrt{\pi}}{B^2}$$

$$\sigma_s^2 = \frac{\pi}{B^2} C_{AA}^{s-1} + \frac{A^2 \pi}{B^4} C_{BB}^{s-1} - 2 \frac{A \pi}{B^3} C_{AB}^{s-1} \quad \text{となる。}$$

### 3 $\chi^2$ 検定

下式は自由度  $N - M$  の  $\chi^2$  分布するので、最小 2 乗法による関数適合の結果が妥当であるかどうかチェックできる。

$$\alpha \leq \sum_i \frac{(Y_i - f(X_i, C_h^t))^2}{\sigma_i^2} \leq \beta$$

$\alpha, \beta$  は自由度と危険率で定まる値で、 $\chi^2$  の表<sup>1)</sup>から求める。自由度とは測定データの数からパラメータの個数を引いた値である。

---

1) 鈴木 武：“近代品質管理総論”，日刊工業新聞社（1971） P. 263  
付表 12 等参照。

# 資 料

## 資料 A：標準容積線源の作製方法

標準容積線源を作製する時、母材として寒天、アルミナ、プラスチック等の固体を用いれば容易に密封できるが、放射能濃度が均一になりにくい。水は放射能濃度を均一にでき、作製も容易であるが、完全に密封することは困難であるため、周囲への汚染に十分注意しなければならない。

### 1 KCl 容積線源の作製方法

KCl は手軽に購入することができ、また<sup>40</sup>K は半減期が長いので一度作製しておけばよい。さらに、<sup>40</sup>K の放射能値は KCl の重量から計算できるので正確な値を知ることができる。以下に作製方法の概略を述べる。

- ① KCl の必要量を乳鉢に移して細かくし、ふるいを用いて 42mesh から 60mesh の間に粒度を揃える。
- ② 測定容器に厚さが 5、10、20、30、40、50mm となるように移す。振動器を用いて、KCl の上面を水平にする。
- ③ KCl の重量を計る。
- ④ 中蓋をして発泡性の充填剤等で中蓋の上の空間を埋め、接着剤を用いて蓋を固定し、ビニールテープでとめる。測定容器の外側を湿ったキムワイプで拭き取り、ポリエチレン袋に包む。
- ⑤ KCl の重量から、各容器について<sup>40</sup>K の $\gamma$ 線放出率を計算する。  
KCl 1g 当りの放射能は 1.746Bq( $\gamma$ ) である。

### 2 寒天容積線源の作製方法

80keV から 2MeV の範囲にエネルギーが適当に分散した $\gamma$ 線を放出する核種<sup>109</sup>Cd、<sup>57</sup>Co、<sup>139</sup>Ce、<sup>51</sup>Cr、<sup>85</sup>Sr、<sup>137</sup>Cs、<sup>54</sup>Mn、<sup>88</sup>Y、<sup>59</sup>Fe、<sup>60</sup>Co を含む混合標準溶液を、寒天に混合し固化して線源を作製する。

表-1 測定日における標準容積線源 1 個当りの放射能の概略値 (Bq/g)

| <sup>109</sup> Cd | <sup>57</sup> Co | <sup>139</sup> Ce | <sup>51</sup> Cr | <sup>85</sup> Sr | <sup>137</sup> Cs | <sup>54</sup> Mn | <sup>88</sup> Y | <sup>59</sup> Fe | <sup>60</sup> Co |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| 120               | 8                | 4                 | 40               | 20               | 15                | 30               | 8               | 50               | 3                |

(寒天が常温で固まるためには酸濃度が 0.0005N 以下でなければならない等の理由で<sup>203</sup>Hg、<sup>113</sup>Sn は使用できない。)

- ①あらかじめ重量と、口から底面までの深さを求めておいた測定容器を6個用意する。これらに厚さが5、10、20、30、40、50mmの寒天標準試料を作製する。
- ②重量既知のピーカに必要量（作製したい寒天容積線源の量に相当する量）の水を入れる。
- ③混合標準溶液に用いる放射性核種の担体溶液（それぞれ1mg/mL程度）を1mLずつ加える。
- ④放射能濃度が300Bq/g程度となるよう混合標準溶液の一定量を加える。
- ⑤水の重量の1.5%の寒天と、寒天の0.005%のHgCl<sub>2</sub>を防腐剤として加える。
- ⑥焦げつかせないように攪拌しながら90℃以上に加熱して寒天を溶解する。完全に溶解後、寒天溶液の重量を計る。
- ⑦ただちに、用意した6個の測定容器に気泡が入らないように注意しながら厚さが5、10、20、30、40、50mm程度となるように移し重量を計る。
- ⑧測定容器の内径に合うポリエチレンフィルムで表面を覆い、水平にして氷水中で冷却固化する。
- ⑨常温で一晩放置後、容器の口から寒天の上面までを測り、予め測定しておいた容器の内寸の高さから差し引いて寒天の厚さを求める。寒天の上面は水平になりにくいので、数箇所を測り<sup>1)</sup>平均値をとる。
- ⑩接着剤を用いて蓋を固定し、ビニールテープでとめる。
- ⑪測定容器外側の拭取試験を行い、ポリエチレン袋で包む。
- ⑫汚染がないことを確認し、各測定容器の放射能を計算する。

### 3 アルミナ容積線源の作製方法

80keV から 2MeV の範囲にエネルギーが適当に分散した $\gamma$ 線を放出する核種<sup>109</sup>Cd、<sup>57</sup>Co、<sup>139</sup>Ce、<sup>51</sup>Cr、<sup>85</sup>Sr、<sup>137</sup>Cs、<sup>54</sup>Mn、<sup>88</sup>Y、<sup>59</sup>Fe、<sup>60</sup>Coを含む混合標準溶液をアルミナに混合して作製する（濃度は寒天と同じ）。

- ①あらかじめ重量と、口から底面までの深さを求めておいた測定容器を6個用意する。
- ②200 mesh 程度のアルミナ（クロマトグラフ用アルミナ等）を必要量用意する。
- ③重量既知のピーカに水をアルミナと同量入れる。
- ④放射性核種の担体溶液（それぞれ1mg/mL程度）を1mLずつ加える。
- ⑤アルミナの放射能濃度が300Bq/g程度となるよう、混合標準溶液の一定量を加える。

---

1) 平な蓋の数箇所に穴をあけ、上下に垂直に動く細い物差しを付け、蓋の上にはみ出した部分を計測できる器具を用意すると便利である。

- ⑥均一になるように攪拌した後、アルミナを加える。
- ⑦ホットプレートの上に置き、赤外線ランプを用いて、ステンレススプーンで攪拌しながら乾燥する。乾燥したアルミナの重量を計る。
- ⑧ポリエチレン瓶に移し硬質のガラス玉を加え、ロールミルを用いて1時間混合する。
- ⑨測定容器に、厚さが5、10、20、30、40、50mm程度となるように移し、重量を測定する。厚さは測定容器の底からアルミナの上面までを測定して求める。
- ⑩接着剤を用いて蓋を固定し、ビニールテープでとめる。測定容器外側の拭取試験を行いポリエチレン袋で包む。
- ⑪汚染がないことを確認し、各測定容器の放射能を計算する。

#### 4 灰試料を用いた標準容積線源

自己吸収の補正を行わない場合、対象試料に合わせて密度の小さい標準容積線源を作製することが考えられる。

一般に生物試料の灰化物は密度が小さいのでこれを用いる。

- ①生物試料（魚のすり身、ドライミルク等）をポリエチレン袋に入る。
- ②混合標準溶液に含まれる放射性核種の担体溶液（それぞれ1mg/ml程度）を1mlずつ加える。
- ③灰の放射能濃度が300Bq/g程度となるよう混合標準溶液の一定量を加える。添加核種および濃度は寒天と同様とする。
- ④ポリエチレン袋に入れたまま混合して、袋ごと磁器製蒸発皿に移し450℃で灰化する。
- ⑤ポリエチレン瓶に移しよく混合する。
- ⑥測定容器に、厚さが5、10、20、30、40、50mm程度となるように移し、重量を測定する。厚さは測定容器の底から灰試料の上面までを測定して求める。
- ⑦接着剤を用いて蓋を固定し、ビニールテープでとめる。測定容器外側の拭取試験を行いポリエチレン袋で包む。
- ⑧汚染がないことを確認し、各測定容器の放射能を計算する。

#### 5 水溶液容積線源の作製方法

80keVから2MeVの範囲にエネルギーが適当に分散したγ線を放出する核種<sup>109</sup>Cd、<sup>57</sup>Co、<sup>139</sup>Ce、<sup>203</sup>Hg（12Bq/g）、<sup>113</sup>Sn（15Bq/g）、<sup>85</sup>Sr、<sup>137</sup>Cs、<sup>54</sup>Mn、<sup>88</sup>Y、<sup>59</sup>Fe、<sup>60</sup>Coを含む混合標準溶液を用いて作製する（<sup>203</sup>Hg、<sup>113</sup>Sn以外の濃度は寒天と同じとする）。

- ①重量既知の測定容器に混合標準溶液を移し、厚さが5mm程度になるように、混合標準溶液と同じ濃度の酸溶液を用いて希釈する。
- ②ガラス棒でよく攪拌したのち、少量の水でガラス棒を洗浄し、洗液は測定容器に加える。測定容器の蓋を閉める。
- ③重量および水溶液の厚さを求める。

- ④蓋のまわりをビニールテープでとめ、測定容器外側の拭取試験を行い、ポリエチレン袋で2重に包む。汚染がないことを確認する。
- ⑤測定と希釈を交互に繰り返し、厚さ 5、10、20、30、40、50mm の容積線源について測定結果を得る。

## 6 マリネリ標準線源

### 1) $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{40}\text{K}$ を対象とする場合

- ①KCl 30g を正確に量り取りビーカーに移し水で溶解する。200mℓ程度のメスシリンダに入れ水を加えて正確に一定量とする。
- ②2000mℓ程度のメスシリンダに、規定のマリネリ容器容量からKCl溶液と使用するRI標準溶液容量の合計量を差し引いた量の水を正確に入れる。
- ③マリネリ容器の半分程度までメスシリンダ内の水を入れたのち、1ℓ当り10Bq および 100Bq 程度になるように  $^{131}\text{I}$  標準溶液と  $^{137}\text{Cs}$  標準溶液を正確に一定量、さらにKCl溶液を全量加える。KCl溶液の入っていたメスシリンダは、②のメスシリンダ内に残っている水で洗浄し洗液はマリネリ容器に入れる。
- ④メスシリンダに残っている水の全量をマリネリ容器に移し、ガラス棒でよく攪拌したのち少量の水でガラス棒を洗浄し、洗液はマリネリ容器に加える。マリネリ容器の規定の高さまで溶液が入っているか確認する。
- ⑤蓋をしてビニールテープでとめ、マリネリ容器外側の拭取試験を行う。汚染がないことを確認する。
- ⑥ポリエチレンの袋で二重に包む。  
この程度の強さの線源の場合、計数値の誤差を 2% にするのに 7万秒程度測定する必要がある。

### 2) 上記1) の3核種に限定しない場合

- ①80keV から 2MeV の範囲にエネルギーが適当に分散した $\gamma$ 線を放出する核種  $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{139}\text{Ce}$ 、 $^{203}\text{Hg}$ 、 $^{113}\text{Sn}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{60}\text{Co}$  を含む 5kBq/5mℓ程度の混合標準溶液を用意する。
- ②2000mℓ程度のメスシリンダに、規定のマリネリ容器容量から使用する混合標準溶液量を差し引いた量の酸性溶液を、正確に入れる。  
溶液は標準溶液と同じ酸濃度とする。
- ③マリネリ容器にメスシリンダ内の酸性溶液を全量入れたのち、混合標準溶液を正確に一定量加える。ガラス棒でよく攪はんしたのち少量の水でガラス棒を洗浄し、洗液はマリネリ容器に加える。  
マリネリ容器の規定の高さまで溶液が入っているか確認する。
- ④マリネリ容器に蓋をしてビニールテープでとめ、マリネリ容器外側の拭取試験を行う。汚染がないことを確認する。
- ⑤ポリエチレンの袋で二重に包む。

## 資料 B：核データ（環境試料中の放射性核種について）

Ge半導体検出器を用いた環境放射能分析は、今日広い範囲に普及している。γ線スペクトロメトリー担当者の数も増え、ごく特殊な専門家と考えることは出来なくなっており、その便を考え、ピーク同定、核種同定、解析対象核種及びピークの選定に資するために、環境試料中に検出される可能性のある人工放射性核種及び天然放射性核種について、これまでに行われてきた分析結果をもとに調査し、整理した。

表－1：環境試料を測定した際に検出される放射性核種のピーク

チェルノブイル原子力発電所事故時などに、実際に検出されたことのあるピーク、および福井県衛生研究所の厚意で提供された中国核実験に係る試料のデータにみられるピークについて調べ、エネルギー順にまとめたものである。

表－2：核種別核データ

核データを核種別に質量数順に並べ替えたものである。対象核種の解析上問題となるものも同じ表中に掲載し、対象核種には \_\_\_\_\_ を付け分かりやすいようにした。

表中、人工放射性核種に「人工」、検出器及び遮蔽材に起因する放射性核種に「機器」を付け、天然放射性核種と区別した。また、解析上重要と判断されるγ線のエネルギーに「主要」を付けた。さらに±5keV以下で隣合うピークに印を付け、解析上妨害となる可能性を示した。サムピーク、エスケープピーク（シングル、ダブル）を核種名の欄に各々 s、e、d で表示した他、娘核種からのγ線についてもエネルギーの欄に D と表示し、核種同定の参考とした。

数値は Table of Isotopes (7th Edition) から引用した。  
尚、表中の小さな数字で表示してある部分は誤差を表す。

例  $147.2_1$  は  $147.2 \pm 0.1$  を意味する。

表中、解析対象核種の中で最も低エネルギーのγ線にのみ半減期と備考を記載し、その他は空欄とした。

表-1 環境試料を測定した際に検出される放射性核種 (エネルギー順)

|    | 核種名                       | 半減期                          | エネルギー (keV) | 放出比 (%) | 備考                                                    |
|----|---------------------------|------------------------------|-------------|---------|-------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{144}\text{Ce}$         | 284.510d                     | 33.62210    | 0.29134 | $\beta^-$ 娘: $^{144}\text{Pr}$                        |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          | 66.021h                      | 40.5510     | 0.8716  | $\beta^-$ 娘: $^{99\text{m}}\text{Tc}, ^{99}\text{Tc}$ |
|    | Unknown                   |                              | 41.5        |         |                                                       |
|    | $^{210}\text{Pb}$         | 22.2622y                     | 46.50315    | 4.058   | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$             |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$         | 78.28h                       | 49.721      | 14.2    | $\beta^-$ 娘: $^{132}\text{I}$                         |
|    | $^{227}\text{Th}$         | 18.717652d                   | 50.22       | 7.222   | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$                         |
|    | $^{214}\text{Pb}$         | 26.8m                        | 53.22614    | 2.24    | $\beta^-$ 親: $^{226}\text{Ra}$                        |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         | 33.02h                       | 57.3651     | ~12.1   | $\beta^-$                                             |
|    | $^{234}\text{Th}$         | 24.10125d                    | 63.292      | 3.82    | $\beta^-$ 娘: $^{234\text{m}}\text{Pa}$                |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$         | 13.002d                      | 66.915      | 12.510  | $\beta^-$ 娘: $^{136\text{m}}\text{Ba}$                |
|    | Pb(K $\alpha$ 2)          |                              | 72.804      |         |                                                       |
|    | Pb(K $\alpha$ 1)          |                              | 74.969      |         |                                                       |
|    | Bi(K $\alpha$ 1)          |                              | 77.108      |         |                                                       |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ | 127.7y                       | 79.45       | 6.68    | EC, $\beta^+$ , IT                                    |
|    | $^{227}\text{Th}$         |                              | 79.82       | 1.76    |                                                       |
| 人工 | $^{144}\text{Ce}$         |                              | 80.1065     | 1.1318  |                                                       |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          | 8.0401d                      | 80.1832     | 2.61    | $\beta^-$                                             |
|    | $^{231}\text{Th}$         | 25.521h                      | 84.212      | 6.55    | $\beta^-$ 親: $^{235}\text{U}$                         |
|    | $^{228}\text{Th}$         | 1.9131344y                   | 84.3713     | 1.216   | $\alpha$ 親: $^{232}\text{Th}$                         |
|    | Pb(K $\beta$ 1)           |                              | 84.936      |         |                                                       |
|    | Bi(K $\beta$ 1)           |                              | 87.343      |         |                                                       |
|    | $^{231}\text{Th}$         |                              | 89.952      | 0.9419  |                                                       |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         | 10.981d                      | 91.105016   | 27.247  | $\beta^-$                                             |
|    | $^{234}\text{Th}$         |                              | 92.802      | 5.43    |                                                       |
|    | $^{227}\text{Th}$         |                              | 94.02       | 1.24    |                                                       |
|    | $^{228}\text{Ac}$         | 6.13h                        | 99.51       | 1.32    | $\beta^-$ 親: $^{232}\text{Th}$                        |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         | 2.3464d                      | 99.55       | 14.56   | $\beta^-$ -Pu(K $\alpha$ 2)                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                              | 100.4015    | 0.122   |                                                       |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         |                              | 103.76      | 22.28   | Pu(K $\alpha$ 1)                                      |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         |                              | 106.14      | 27.89   |                                                       |
|    | $^{235}\text{U}$          | 7.0385<br>*10 <sup>8</sup> y | 109.142     | 1.52    | $\alpha$                                              |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$         |                              | 111.768     | 1.83    |                                                       |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$         |                              | 116.308     | 1.94    |                                                       |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         |                              | 117.26      | 8.14    | Pu(K $\beta$ 1)                                       |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |                              | 120.4909    | 0.407   |                                                       |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         |                              | 120.6       | 2.7710  | Pu(K $\beta$ 2)                                       |
|    | $^{223}\text{Ra}$         | 11.434611d                   | 122.4       | 1.237   | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$                         |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                              | 129.11      | 2.63    |                                                       |
| 人工 | $^{144}\text{Ce}$         |                              | 133.5445    | 11.12   |                                                       |
| 機器 | $^{75\text{m}}\text{Ge}$  | 47.75s                       | 139.683     | 39.2    | IT, $\beta^-$                                         |
| 人工 | $^{99\text{m}}\text{Tc}$  | 6.0072h                      | 140.5116    | 89.02   | IT, $\beta^-$ 親: $^{99}\text{Mo}$                     |
| 人工 | $^{99\text{m}}\text{Tc}$  |                              | 142.633     | 6.43    |                                                       |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$          | 44.563d                      | 142.6484    | 1.024   | $\beta^-$                                             |
|    | $^{235}\text{U}$          |                              | 143.762     | 11.1    |                                                       |

|    | 核種名               | 半減期                                       | エネルギー (keV) |                         | 放出比 (%)            | 備考                                                |
|----|-------------------|-------------------------------------------|-------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                                           |             | 144.3 )                 | 3.34 <sub>22</sub> |                                                   |
| 人工 | $^{141}\text{Ce}$ | 32.55 <sub>1d</sub>                       | 主要          | 145.444 )               | 48.44              | $\beta^-$                                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  | 2.2846 <sub>4h</sub>                      |             | 147.2 <sub>1</sub> )    | 0.24 <sub>2</sub>  | $\beta^-$ 親: $^{132}\text{Te}$                    |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                                           |             | 153.22 <sub>5</sub> )   | 7.47 <sub>16</sub> |                                                   |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                                           |             | 154.0 <sub>2</sub> )    | 0.80 <sub>11</sub> |                                                   |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                                           |             | 154.3 )                 | 5.74 <sub>36</sub> |                                                   |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$ | 12.789 <sub>6d</sub>                      |             | 162.61 <sub>2</sub> )   | 6.11 <sub>34</sub> | $\beta^-$ 娘: $^{140}\text{La}$                    |
|    | $^{235}\text{U}$  |                                           |             | 163.35 <sub>2</sub> )   | 4.7 <sub>4</sub>   |                                                   |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                                           |             | 163.89 <sub>5</sub> )   | 4.62 <sub>10</sub> |                                                   |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$ | 2.71 <sub>2y</sub>                        |             | 176.29 <sub>2</sub> )   | 6.8 <sub>5</sub>   | $\beta^-$ 娘: $^{125m}\text{Te}$                   |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                                           |             | 176.55 <sub>5</sub> )   | 13.6 <sub>2</sub>  |                                                   |
| 人工 | $^{131}\text{I}$  |                                           |             | 177.210 <sub>2</sub> )  | 0.26 <sub>0</sub>  |                                                   |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$  |                                           | 主要          | 181.07 <sub>5</sub> )   | 6.29 <sub>83</sub> |                                                   |
|    | $^{235}\text{U}$  |                                           | 主要          | 185.715 <sub>5</sub> )  | 54.                |                                                   |
|    | $^{226}\text{Ra}$ | 1599.7 <sub>y</sub>                       | 主要          | 186.180 <sub>4</sub> )  | 3.3 <sub>1</sub>   | $\alpha$ 娘: $^{214}\text{Pb}$                     |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$  |                                           |             | 192.344 <sub>6</sub> )  | 3.08 <sub>10</sub> |                                                   |
| 機器 | $^{75}\text{Ge}?$ | 82.78 <sub>4m</sub>                       |             | 198.56 )                | 1.14 <sub>11</sub> | $\beta^-$                                         |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                                           |             | 209.5 <sub>2</sub> )    | 4.3 <sub>7</sub>   |                                                   |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                           |             | 209.76 )                | 3.42 <sub>10</sub> |                                                   |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$  | 16.90 <sub>5h</sub>                       |             | 218.87 <sub>20</sub> )  | 0.18 <sub>2</sub>  | $\beta^-$ 娘: $^{97m}\text{Nb}$ , $^{97}\text{Nb}$ |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ |                                           | 主要          | 228.16 <sub>6</sub> )   | 88.3               |                                                   |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                           |             | 228.2 )                 | 11.4 <sub>3</sub>  |                                                   |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$ |                                           |             | 231.559 <sub>33</sub> ) | ~ 2.0 <sub>2</sub> |                                                   |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                                           | 主要          | 236.0 <sub>2</sub> )    | 11.2               |                                                   |
|    | $^{212}\text{Pb}$ | 10.643 <sub>12h</sub>                     | 主要          | 238.626 <sub>5</sub> )  | 43.1               | $\beta^-$ 娘: $^{212}\text{Bi}$                    |
|    | $^{224}\text{Ra}$ | 3.665 <sub>19d</sub>                      | 主要          | 240.981 <sub>5</sub> )  | 3.9 <sub>1</sub>   | $\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$                     |
|    | $^{214}\text{Pb}$ |                                           |             | 241.924 <sub>30</sub> ) | 7.6 <sub>8</sub>   |                                                   |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$  |                                           |             | 254.152 <sub>0</sub> )  | 1.25 <sub>14</sub> |                                                   |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                           |             | 254.4 )                 | 0.11 <sub>1</sub>  |                                                   |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                                           |             | 254.8 <sub>2</sub> )    | 0.19 <sub>3</sub>  |                                                   |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                                           |             | 256.3 <sub>2</sub> )    | 6.32 <sub>0</sub>  |                                                   |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                                           |             | 262.7 <sub>1</sub> )    | 1.44 <sub>9</sub>  |                                                   |
| 機器 | $^{75}\text{Ge}$  |                                           | 主要          | 264.61 )                | 11.11 <sub>1</sub> |                                                   |
| 人工 | $^{93}\text{Y}$   | 10.25 <sub>1h</sub>                       | 主要          | 266.9 <sub>1</sub> )    | 6.81 <sub>5</sub>  | $\beta^-$                                         |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                                           | 主要          | 269.6 )                 | 14.0 <sub>3</sub>  |                                                   |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                                           |             | 270.2 <sub>3</sub> )    | 3.6 <sub>6</sub>   |                                                   |
|    | $^{219}\text{Rn}$ | 3.96 <sub>1s</sub>                        | 主要          | 271.20 <sub>5</sub> )   | 10.1               | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$                     |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$  |                                           |             | 272.27 <sub>20</sub> )  | 0.25 <sub>4</sub>  |                                                   |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                                           |             | 273.65 <sub>4</sub> )   | 12.7 <sub>2</sub>  |                                                   |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                                           |             | 275.42 <sub>2</sub> )   | 0.82 <sub>18</sub> |                                                   |
|    | $^{208}\text{Tl}$ | 3.0527 <sub>33m</sub>                     |             | 277.4 <sub>3</sub> )    | 6.8 <sub>3</sub>   | $\beta^-$ 親: $^{228}\text{Th}$                    |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                           | 主要          | 277.60 )                | 14.5 <sub>4</sub>  |                                                   |
|    | $^{231}\text{Pa}$ | 3.276 <sub>11</sub><br>*10 <sup>4</sup> y | 主要          | 283.56 <sub>6</sub> )   | 1.7 <sub>3</sub>   | $\alpha$ 娘: $^{227}\text{Ac}$                     |
| 人工 | $^{131}\text{I}$  |                                           |             | 284.298 <sub>5</sub> )  | 6.0 <sub>1</sub>   |                                                   |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                           |             | 285.5 )                 | 0.76 <sub>2</sub>  |                                                   |

|    | 核種名               | 半減期                    | エネルギー (keV)           | 放出比 (%)             | 備考                                        |
|----|-------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------------------|
|    | $^{227}\text{Th}$ |                        | 286.22                | 1.44                |                                           |
|    | $^{212}\text{Bi}$ | 60.600 <sub>43</sub> m | 288.077               | 0.323               | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$ |                        | 293.262 <sub>21</sub> | ~42.                |                                           |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$ | 39.35 <sub>5</sub> d   | 294.98 <sub>2</sub>   | 0.242 <sub>25</sub> | $\beta^-$ 娘: $^{103}\text{mRh}$           |
|    | $^{214}\text{Pb}$ |                        | 295.217 <sub>39</sub> | 18.9 <sub>20</sub>  |                                           |
|    | $^{231}\text{Pa}$ |                        | 299.94 <sub>6</sub>   | 2.57                |                                           |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                        | 300.0 <sub>2</sub>    | 1.97                |                                           |
|    | $^{212}\text{Pb}$ |                        | 300.11 <sub>5</sub>   | 3.33                |                                           |
|    | $^{231}\text{Pa}$ |                        | 302.52 <sub>6</sub>   | 2.57                |                                           |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$ |                        | 304.85 <sub>1</sub>   | 4.37 <sub>28</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                        | 315.9                 | 1.52 <sub>5</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                        | 316.5 <sub>4</sub>    | 0.16 <sub>4</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                        | 319.41 <sub>3</sub>   | 2.0 <sub>3</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{51}\text{Cr}$  | 27.701 <sub>6</sub> d  | 320.076 <sub>1</sub>  | 10.2 <sub>6</sub>   | EC                                        |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                        | 321.9 <sub>4</sub>    | 0.22 <sub>3</sub>   |                                           |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                        | 324.1                 | 4.12 <sub>26</sub>  |                                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                        | 328.3 <sub>4</sub>    | 3.1 <sub>4</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{140}\text{La}$ | 40.27 <sub>5</sub> h   | 328.768 <sub>12</sub> | 18.5 <sub>6</sub>   | $\beta^-$ 親: $^{140}\text{Ba}$            |
|    | $^{231}\text{Pa}$ |                        | 329.89 <sub>6</sub>   | 1.4 <sub>4</sub>    |                                           |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                        | 329.9 <sub>2</sub>    | 2.4 <sub>8</sub>    |                                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                        | 332.9 <sub>4</sub>    | 0.35 <sub>5</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                        | 334.3                 | 1.95 <sub>7</sub>   |                                           |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                        | 338.6                 | 2.96 <sub>20</sub>  |                                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                        | 338.7 <sub>4</sub>    | 12.2                |                                           |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                        | 340.57 <sub>5</sub>   | 46.8 <sub>5</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$ |                        | 350.587 <sub>50</sub> | ~3.4 <sub>3</sub>   |                                           |
|    | $^{211}\text{Bi}$ | 2.15m                  | 351.0 <sub>1</sub>    | 12.7 <sub>2</sub>   | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$             |
|    | $^{214}\text{Pb}$ |                        | 351.992 <sub>62</sub> | 36.7 <sub>40</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$  |                        | 355.391 <sub>0</sub>  | 2.27 <sub>24</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                        | 363.5 <sub>4</sub>    | 0.491 <sub>0</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{131}\text{I}$  |                        | 364.480 <sub>5</sub>  | 81.1                |                                           |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$  |                        | 366.451 <sub>0</sub>  | 1.351 <sub>6</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$ |                        | 380.51 <sub>4</sub>   | 1.51                |                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                        | 387.8 <sub>4</sub>    | 0.17 <sub>3</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$  |                        | 400.39 <sub>20</sub>  | 0.32 <sub>5</sub>   |                                           |
|    | $^{219}\text{Rn}$ |                        | 401.8 <sub>2</sub>    | 6.51 <sub>3</sub>   |                                           |
|    | $^{211}\text{Pb}$ | 36.1 <sub>2</sub> m    | 404.8 <sub>1</sub>    | 3.5 <sub>2</sub>    | $\beta^-$ 娘: $^{211}\text{Bi}$            |
|    | $^{214}\text{Bi}$ |                        | 405.74 <sub>3</sub>   | 0.17 <sub>1</sub>   |                                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                        | 409.8 <sub>3</sub>    | 2.1 <sub>3</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                        | 416.8 <sub>4</sub>    | 0.46 <sub>9</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$ |                        | 423.72 <sub>1</sub>   | 3.07 <sub>21</sub>  |                                           |
|    | $^{211}\text{Pb}$ |                        | 426.9 <sub>1</sub>    | 1.6 <sub>3</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$ |                        | 427.95 <sub>2</sub>   | 30.1                |                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                        | 431.9 <sub>4</sub>    | 0.45 <sub>9</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{140}\text{La}$ |                        | 432.530 <sub>29</sub> | 2.721 <sub>5</sub>  |                                           |

|    | 核種名                 | 半減期                  | エネルギー (keV)                           | 放出比 (%)              | 備考                                              |
|----|---------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|
| 人工 | $^{108m}\text{Ag}$  |                      | 主要 434.00 <sub>10</sub> )             | 90.59                |                                                 |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$   |                      | 437.58 <sub>2</sub> )                 | 2.02                 |                                                 |
|    | $^{40}\text{K}$ d   |                      | 438.75)                               | 0.0                  |                                                 |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$   |                      | 439.85 <sub>8</sub> )                 | 1.12                 |                                                 |
|    | $^{223}\text{Ra}$   |                      | 445.5)                                | 1.54 <sub>18</sub>   |                                                 |
| 人工 | $^{132}\text{I}$    |                      | 446.04)                               | 0.67 <sub>8</sub>    |                                                 |
|    | $^{212}\text{Bi}$   |                      | 452.83 <sub>10</sub> )                | 0.35 <sub>3</sub>    |                                                 |
| 人工 | $^{129}\text{Te}$   | 69.55m               | 主要 459.60 <sub>5</sub> )              | 7.17                 | $\beta^-$ 親: $^{129m}\text{Te}$                 |
|    | $^{228}\text{Ac}$   |                      | 463.3 <sub>3</sub> )                  | 4.65                 |                                                 |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$   |                      | 463.51 <sub>4</sub> )                 | 11.1                 |                                                 |
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$   |                      | 473.0 <sub>4</sub> )                  | 25.1                 |                                                 |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$   | 2.0625y              | 475.35 <sub>5</sub> )                 | 1.465 <sub>40</sub>  | $\beta^-$ , EC                                  |
|    | $^7\text{Be}$       | 53.29 <sub>2</sub> d | 主要 477.593 <sub>12}</sub> )           | 10.35 <sub>8</sub>   | EC                                              |
| 人工 | $^{140}\text{La}$   |                      | 主要 487.029 <sub>19}</sub> )           | 43.0 <sub>16</sub>   |                                                 |
| 人工 | $^{129}\text{Te}$   |                      | 487.39 <sub>5</sub> )                 | 1.31                 |                                                 |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$   |                      | 490.36 <sub>7</sub> )                 | ~2.0 <sub>2</sub>    |                                                 |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$   |                      | 主要 497.08 <sub>2</sub> )              | 86.4 <sub>35</sub>   |                                                 |
| 人工 | $^{132}\text{I}$    |                      | 505.90 <sub>13}</sub> )               | 5.0 <sub>2</sub>     |                                                 |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$    |                      | 主要 507.63 <sub>10</sub> )             | 5.06 <sub>53}</sub>  |                                                 |
|    | $^{208}\text{Tl}$   |                      | 510.723 <sub>20}</sub> )              | 21.6 <sub>9</sub>    |                                                 |
|    | Annih               |                      | 511.)                                 | 0.0                  |                                                 |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$   | 366.58d              | 511.80 <sub>15</sub> ) <sup>D</sup>   | 19.1                 | $\beta^-$ 娘: $^{106}\text{Rh}$                  |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$    |                      | 513.38 <sub>20}</sub> )               | 0.6 <sub>1</sub>     |                                                 |
| 人工 | $^{132}\text{I}$    |                      | 522.65 <sub>9</sub> )                 | 16.1 <sub>6</sub>    |                                                 |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$   |                      | 主要 531.01 <sub>7</sub> )              | 12.0 <sub>2</sub>    |                                                 |
| 人工 | $^{132}\text{I}$    |                      | 535.5 <sub>4</sub> )                  | 0.52 <sub>8</sub>    |                                                 |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$   |                      | 主要 537.27 <sub>2</sub> )              | 23.6 <sub>5</sub>    |                                                 |
| 人工 | $^{132}\text{I}$    |                      | 547.1 <sub>2</sub> )                  | 1.25 <sub>9</sub>    |                                                 |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$    | 9.481h               | 主要 555.57 <sub>5</sub> ) <sup>D</sup> | 61.7                 | $\beta^-$ 娘: $^{91m}\text{Y}$ , $^{91}\text{Y}$ |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$   |                      | 557.04 <sub>2</sub> )                 | 0.80 <sub>8</sub>    |                                                 |
|    | $^{228}\text{Ac}$   |                      | 562.6 <sub>5</sub> )                  | 0.86 <sub>15</sub>   |                                                 |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$   |                      | 563.26 <sub>5</sub> )                 | 8.38 <sub>5</sub>    |                                                 |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$   |                      | 569.29 <sub>3</sub> )                 | 15.43 <sub>11</sub>  |                                                 |
|    | $^{207}\text{Bi}$   | 38.3y                | 主要 569.653 <sub>20}</sub> )           | 97.74 <sub>4</sub>   | EC, $\beta^+$                                   |
| 人工 | $^{140}\text{La}$ d |                      | 574.49)                               | 0.0                  |                                                 |
|    | $^{208}\text{Tl}$   |                      | 主要 583.139 <sub>23}</sub> )           | 86.3                 |                                                 |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$   |                      | 587.28 <sub>15}</sub> )               | ~0.24 <sub>4</sub>   |                                                 |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$    | 8.255m               | 主要 595.88 <sub>4</sub> )              | 91.2 <sub>10</sub>   | $\beta^-$                                       |
| 機器 | $^{74}\text{As}$    | 17.795d              | 主要 595.90 <sub>8</sub> )              | 60.2                 | EC, $\beta^+$ , $\beta^-$                       |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$   |                      | 主要 600.77 <sub>6</sub> )              | 18.1                 |                                                 |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$    |                      | 602.41 <sub>20}</sub> )               | 1.39 <sub>14</sub>   |                                                 |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$    |                      | 604.22 <sub>10}</sub> )               | 2.87 <sub>21</sub>   |                                                 |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$   |                      | 主要 604.66 <sub>2</sub> )              | 97.56 <sub>32}</sub> |                                                 |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$   |                      | 606.82 <sub>4</sub> )                 | 4.9 <sub>4</sub>     |                                                 |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$    |                      | 608.40 <sub>5</sub> )                 | 14.6 <sub>5</sub>    |                                                 |

|    | 核種名                       | 半減期                   | エネルギー (keV)               | 放出比 (%)             | 備考                                                       |                |
|----|---------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|----------------|
|    | $^{214}\text{Bi}$         | 19.7m                 | 主要 609.312 <sub>10</sub>  | 46.1 <sub>12</sub>  | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$                |                |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$         |                       | 主要 610.33 <sub>2</sub>    | 5.44 <sub>56</sub>  |                                                          |                |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                       | 主要 614.37 <sub>10</sub>   | 89.7 <sub>31</sub>  |                                                          |                |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |                       | 616.33 <sub>17</sub>      | 0.82 <sub>19</sub>  |                                                          |                |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | 252.2 <sub>3d</sub>   | 620.346 <sub>1</sub>      | 2.78 <sub>5</sub>   |                                                          | $\beta^-$ , IT |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 621.0 <sub>2</sub>        | 2.0 <sub>1</sub>    |                                                          |                |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |                       | 主要 622.2 <sub>3</sub>     | 9.8 <sub>14</sub>   |                                                          |                |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 630.22 <sub>9</sub>       | 13.7 <sub>6</sub>   |                                                          |                |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                       | 636.15 <sub>4</sub>       | 12.1                |                                                          |                |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |                       | 636.973 <sub>2</sub>      | 7.2 <sub>1</sub>    |                                                          | $\beta^-$      |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         | 60.20 <sub>3d</sub>   | 645.82 <sub>4</sub>       | 7.23 <sub>22</sub>  |                                                          |                |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 650.6 <sub>2</sub>        | 2.7 <sub>2</sub>    |                                                          |                |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                       | 652.3 <sub>3</sub>        | 2.9 <sub>8</sub>    |                                                          |                |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                       | 652.9 <sub>2</sub>        | 7.6 <sub>11</sub>   |                                                          |                |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                       | 653.2                     | 0.46 <sub>9</sub>   |                                                          |                |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                       | 主要 657.749 <sub>10</sub>  | 94.4 <sub>1</sub>   |                                                          |                |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$          | 72.17m                | 主要 657.92 <sub>10</sub>   | 98.2 <sub>1</sub>   | $\beta^-$ 親: $^{97}\text{Zr}$                            |                |
| 人工 | $^{137}\text{Cs}$         | 30.174 <sub>34Y</sub> | 主要 661.638 <sub>19D</sub> | 85.0 <sub>5</sub>   | $\beta^-$ 娘: $^{137\text{m}}\text{Ba}$                   |                |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                       | 664.55 <sub>10</sub>      | 5.3 <sub>5</sub>    |                                                          |                |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                       | 665.453 <sub>22</sub>     | 1.56 <sub>9</sub>   | $\beta^+$ , EC                                           |                |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 主要 667.69 <sub>8</sub>    | 98.7 <sub>1</sub>   |                                                          |                |
| 機器 | $^{63}\text{Zn}$          | 38.0 <sub>1m</sub>    | 主要 669.62 <sub>5</sub>    | 8.4 <sub>4</sub>    |                                                          |                |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 669.8 <sub>3</sub>        | 4.9 <sub>8</sub>    |                                                          |                |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 671.6 <sub>3</sub>        | 5.2 <sub>4</sub>    |                                                          |                |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                       | 671.66 <sub>4</sub>       | 1.7 <sub>1</sub>    |                                                          |                |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                       | 677.602 <sub>11</sub>     | 10.6 <sub>1</sub>   |                                                          |                |
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$         | 3.91 <sub>7d</sub>    | 主要 685.7 <sub>5</sub>     | 36.1                |                                                          | $\beta^-$      |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |                       | 685.80 <sub>35</sub>      | 0.71 <sub>13</sub>  |                                                          |                |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                       | 686.988 <sub>11</sub>     | 6.45 <sub>4</sub>   |                                                          |                |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                       | 690.632 <sub>0</sub>      | 0.25 <sub>4</sub>   | IT, $\beta^-$ 娘: $^{129}\text{Te}$                       |                |
|    | Unknown                   |                       | 693.                      |                     |                                                          |                |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ | 33.52 <sub>12d</sub>  | 主要 695.98 <sub>5</sub>    | 2.9 <sub>4</sub>    |                                                          |                |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                       | 699.2 <sub>3</sub>        | 0.12 <sub>2</sub>   |                                                          |                |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                       | 703.11 <sub>4</sub>       | 0.47 <sub>3</sub>   |                                                          |                |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                       | 706.670 <sub>13</sub>     | 16.3 <sub>0</sub>   |                                                          |                |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                       | 719.86 <sub>3</sub>       | 0.40 <sub>3</sub>   |                                                          |                |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                       | 721.96 <sub>11</sub>      | ~5.1 <sub>5</sub>   |                                                          |                |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         |                       | 主要 722.78 <sub>4</sub>    | 11.30 <sub>16</sub> |                                                          |                |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |                       | 722.893 <sub>2</sub>      | 1.8 <sub>0</sub>    |                                                          |                |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                       | 主要 722.95 <sub>8</sub>    | 89.7 <sub>31</sub>  | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ |                |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          | 63.98 <sub>6d</sub>   | 主要 724.184 <sub>12</sub>  | 43.12 <sub>0</sub>  |                                                          |                |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                       | 726.7 <sub>5</sub>        | 0.78 <sub>27</sub>  |                                                          |                |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 727.1 <sub>2</sub>        | 6.5 <sub>3</sub>    |                                                          |                |
|    | $^{212}\text{Bi}$         |                       | 主要 727.27 <sub>7</sub>    | 6.3 <sub>2</sub>    |                                                          |                |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ |                       | 729.62 <sub>5</sub>       | 0.69 <sub>13</sub>  |                                                          |                |

|    | 核種名                 | 半減期         | エネルギー (keV) |           | 放出比 (%)  | 備考                            |                   |
|----|---------------------|-------------|-------------|-----------|----------|-------------------------------|-------------------|
| 人工 | <sup>99</sup> Mo    |             | 主要          | 739.41    | 12.68    |                               |                   |
|    | <sup>214</sup> Bi d |             |             | 742.50    | 0.0      |                               |                   |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr    |             | 主要          | 743.3610  | 92.83    |                               | <sup>97m</sup> Nb |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag  |             |             | 744.26013 | 4.654    |                               |                   |
| 人工 | <sup>91</sup> Sr    |             | 主要          | 749.81    | 23.2     |                               |                   |
| 人工 | <sup>140</sup> La   |             |             | 751.82780 | 4.2020   |                               |                   |
|    | <sup>228</sup> Ac   |             |             | 755.31    | 1.02     |                               |                   |
| 人工 | <sup>95</sup> Zr    |             | 主要          | 756.722   | 54.65    |                               |                   |
|    | <sup>208</sup> Tl   |             |             | 763.138   | 1.649    |                               |                   |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag  |             |             | 763.92813 | 22.31    |                               |                   |
| 人工 | <sup>95</sup> Nb    | 34.973d     | 主要          | 765.78619 | 99.821   | $\beta^-$ 親: <sup>95</sup> Zr |                   |
|    | <sup>234m</sup> Pa  | 1.1753m     |             | 766.62    | 0.211    | $\beta^-$ , IT                |                   |
|    | <sup>214</sup> Bi   |             |             | 768.35612 | 4.9120   |                               |                   |
|    | <sup>228</sup> Ac   |             |             | 771.83    | 1.62     |                               |                   |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |             | 主要          | 772.618   | 76.219   |                               |                   |
| 人工 | <sup>99</sup> Mo    |             |             | 777.81    | 4.4053   |                               |                   |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |             |             | 780.23    | 1.236    |                               |                   |
|    | <sup>228</sup> Ac   |             |             | 782.01    | 0.5111   |                               |                   |
| 人工 | <sup>127</sup> Sb   |             |             | 783.75    | 15.1     |                               |                   |
|    | <sup>212</sup> Bi   |             |             | 785.467   | 1.01     |                               |                   |
|    | <sup>214</sup> Pb   |             |             | 785.9520  | 0.869    |                               |                   |
|    | <sup>214</sup> Bi   |             |             | 786.14    | 0.3111   |                               |                   |
|    | <sup>228</sup> Ac   |             |             | 795.02    | 4.47     |                               |                   |
| 人工 | <sup>134</sup> Cs   |             | 主要          | 795.762   | 85.4438  |                               |                   |
|    | <sup>228</sup> Ac   |             |             | 796.1     | 0.127    |                               |                   |
| 人工 | <sup>134</sup> Cs   |             |             | 801.843   | 8.734    |                               |                   |
|    | <sup>210</sup> Po   | 138.376317d | 主要          | 803.      | 0.001229 | $\alpha$ 親: <sup>210</sup> Bi |                   |
|    | <sup>206</sup> Tl   | 4.18317m    | 主要          | 803.3     | 0.00555  | $\beta^-$                     |                   |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr    |             |             | 804.5310  | 0.657    |                               |                   |
|    | <sup>214</sup> Bi   |             |             | 806.17418 | 1.236    |                               |                   |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |             |             | 809.82    | 2.93     |                               |                   |
| 人工 | <sup>58</sup> Co    | 70.787d     | 主要          | 810.75533 | 99.442   |                               |                   |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |             |             | 812.22    | 5.65     |                               |                   |
| 人工 | <sup>140</sup> La   |             | 主要          | 815.857   | 22.47    |                               |                   |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag  |             |             | 818.01612 | 7.285    |                               |                   |
| 人工 | <sup>136</sup> Cs   |             | 主要          | 818.504   | 99.706   |                               |                   |
| 人工 | <sup>99</sup> Mo    |             |             | 822.81    | 0.14019  |                               |                   |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr    |             |             | 829.8010  | 0.222    |                               |                   |
|    | <sup>228</sup> Ac   |             |             | 830.42    | 0.6512   |                               |                   |
|    | <sup>211</sup> Pb   |             |             | 831.81    | 2.86     |                               |                   |
| 人工 | <sup>54</sup> Mn    | 312.207d    | 主要          | 834.82721 | 100.     | EC                            |                   |
|    | <sup>228</sup> Ac   |             |             | 835.62    | 1.72     |                               |                   |
|    | <sup>214</sup> Pb   |             |             | 839.2020  | 0.596    |                               |                   |
|    | <sup>228</sup> Ac   |             |             | 840.42    | 0.9716   |                               |                   |
| 機器 | <sup>56</sup> Mn    | 2.57856h    | 主要          | 846.75420 | 98.874   | $\beta^-$                     |                   |

|    | 核種名                 | 半減期                  | エネルギー (keV)               | 放出比 (%)             | 備考                 |
|----|---------------------|----------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|
| 人工 | <sup>97</sup> Zr    |                      | 854.90 <sub>10</sub>      | 0.33 <sub>4</sub>   |                    |
|    | <sup>208</sup> Tl   |                      | 主要 860.37 <sub>8</sub>    | 12.0 <sub>4</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |                      | 863.3 <sub>2</sub>        | 0.59 <sub>5</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>140</sup> La   |                      | 867.82 <sub>14</sub>      | 5.3 <sub>3</sub>    |                    |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |                      | 876.8 <sub>2</sub>        | 1.08 <sub>5</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>143</sup> Ce   |                      | 880.39 <sub>13</sub>      | ~0.92 <sub>8</sub>  |                    |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag  |                      | 主要 884.667 <sub>13</sub>  | 72.8 <sub>3</sub>   |                    |
|    | <sup>228</sup> Ac   |                      | 904.1 <sub>3</sub>        | 0.82 <sub>12</sub>  |                    |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |                      | 910.3 <sub>2</sub>        | 0.92 <sub>5</sub>   |                    |
|    | <sup>228</sup> Ac   |                      | 主要 911.2 <sub>2</sub>     | 27.2                |                    |
| 人工 | <sup>140</sup> La   |                      | 919.63 <sub>15</sub>      | 2.52 <sub>16</sub>  |                    |
| 人工 | <sup>140</sup> La   |                      | 925.24 <sub>9</sub>       | 6.8 <sub>3</sub>    |                    |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |                      | 927.6 <sub>3</sub>        | 0.44 <sub>8</sub>   |                    |
|    | <sup>214</sup> Bi   |                      | 934.061 <sub>14</sub>     | 3.19 <sub>14</sub>  |                    |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag  |                      | 主要 937.478 <sub>13</sub>  | 34.3 <sub>2</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>93</sup> Y     |                      | 947.1 <sub>1</sub>        | 1.9 <sub>6</sub>    |                    |
|    | <sup>40</sup> K e   |                      | 949.750                   | 0.0                 |                    |
| 人工 | <sup>140</sup> La   |                      | 951.4 <sub>4</sub>        | 0.53 <sub>3</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |                      | 主要 954.55 <sub>9</sub>    | 18.1 <sub>6</sub>   |                    |
| 機器 | <sup>63</sup> Zn    |                      | 962.06 <sub>4</sub>       | 6.6 <sub>7</sub>    |                    |
|    | <sup>228</sup> Ac   |                      | 964.4 <sub>4</sub>        | 4.7 <sub>10</sub>   |                    |
|    | <sup>228</sup> Ac   |                      | 主要 968.8 <sub>3</sub>     | 16.2                |                    |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr    |                      | 971.39 <sub>10</sub>      | 0.29 <sub>3</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |                      | 984.5 <sub>2</sub>        | 0.56 <sub>6</sub>   |                    |
|    | <sup>234m</sup> Pa  |                      | 主要 1001.025 <sub>22</sub> | 0.59                |                    |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr    |                      | 1021.3 <sub>3</sub>       | 1.35 <sub>14</sub>  |                    |
| 人工 | <sup>91</sup> Sr    |                      | 主要 1024.3 <sub>1</sub>    | 33.2                |                    |
| 人工 | <sup>97</sup> Nb    |                      | 1024.53 <sub>30</sub>     | 1.1 <sub>1</sub>    |                    |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |                      | 1034.7 <sub>2</sub>       | 0.57 <sub>5</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>134</sup> Cs   |                      | 1038.50 <sub>5</sub>      | 1.00 <sub>1</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>136</sup> Cs   |                      | 主要 1048.07 <sub>7</sub>   | 79.8 <sub>8</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>106</sup> Ru   |                      | 1050.47 <sub>7</sub> D    | 1.6 <sub>2</sub>    |                    |
|    | <sup>207</sup> Bi   |                      | 主要 1063.630 <sub>30</sub> | 73.8 <sub>23</sub>  |                    |
|    | <sup>212</sup> Bi   |                      | 1078.80 <sub>10</sub>     | 0.51 <sub>4</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>129</sup> Te   |                      | 1083.99 <sub>5</sub>      | 0.56 <sub>8</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>140</sup> La e |                      | 1085.49                   | 0.0                 |                    |
|    | <sup>208</sup> Tl   |                      | 1093.9 <sub>2</sub>       | 0.37 <sub>4</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>59</sup> Fe    |                      | 主要 1099.224 <sub>25</sub> | 56.5 <sub>15</sub>  |                    |
| 人工 | <sup>143</sup> Ce   |                      | 1102.98 <sub>18</sub>     | ~0.37 <sub>5</sub>  |                    |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr    |                      | 1110.45 <sub>20</sub>     | 0.11 <sub>2</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>65</sup> Zn    | 244.0 <sub>2</sub> d | 主要 1115.518 <sub>25</sub> | 50.75 <sub>10</sub> | EC, β <sup>+</sup> |
|    | <sup>214</sup> Bi   |                      | 主要 1120.287 <sub>2</sub>  | 15.0 <sub>6</sub>   |                    |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |                      | 1136.03 <sub>12</sub>     | 3.0 <sub>2</sub>    |                    |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |                      | 1143.4 <sub>2</sub>       | 1.4 <sub>1</sub>    |                    |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr    |                      | 1147.95 <sub>10</sub>     | 2.64 <sub>29</sub>  |                    |

|    | 核種名                         | 半減期                    | エネルギー (keV)                  | 放出比 (%)             | 備考                            |
|----|-----------------------------|------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |                        | 1152.88 <sub>8</sub> )       | 0.0                 |                               |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |                        | 1155.19 <sub>2</sub> )       | 1.69 <sub>9</sub>   |                               |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$           |                        | 1167.86 <sub>6</sub>         | 1.805 <sub>26</sub> |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                        | 1173.2 <sub>2</sub> )        | 1.1 <sub>1</sub>    |                               |
| 人工 | $^{60}\text{Co}$            | 5.2719 <sub>11</sub> y | 主要 1173.210 <sub>21</sub> )  | 100.                | $\beta^-$                     |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$ s         |                        | 1173.95 <sub>5</sub> )       | 0.0                 |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |                        | 1190.35 <sub>7</sub> )       | 0.0                 |                               |
| 人工 | $^{91}\text{Y}$             | 58.51 <sub>6</sub> d   | 主要 1208.                     | 0.30 <sub>3</sub>   | $\beta^-$                     |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$           |                        | 1235.34 <sub>5</sub> )       | 19.7 <sub>2</sub>   |                               |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |                        | 1238.11 <sub>1</sub> )       | 5.95 <sub>21</sub>  |                               |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |                        | 1245.0 <sub>8</sub> )        | 0.16 <sub>9</sub>   |                               |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |                        | 1246.9 <sub>2</sub> )        | 0.38 <sub>15</sub>  |                               |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |                        | 1249.3 <sub>8</sub> )        | 0.11 <sub>7</sub>   |                               |
|    | $^{214}\text{Bi}$ e         |                        | 1253.50)                     | 0.0                 |                               |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$            |                        | 1268.63 <sub>10}</sub> )     | 0.16 <sub>2</sub>   |                               |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$            |                        | 1276.09 <sub>10}</sub> )     | 0.974 <sub>96</sub> |                               |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |                        | 1280.96 <sub>2</sub> )       | 1.47 <sub>9</sub>   |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                        | 1290.7 <sub>3</sub> )        | 1.14 <sub>6</sub>   |                               |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$            |                        | 主要 1291.564 <sub>28}</sub> ) | 43.2 <sub>11</sub>  |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                        | 1295.3 <sub>3</sub> )        | 2.0 <sub>1</sub>    |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                        | 1298.2 <sub>5</sub> )        | 0.9 <sub>1</sub>    |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                        | 1317.1 <sub>7</sub> )        | 0.12 <sub>2</sub>   |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |                        | 1318.3 <sub>2</sub> )        | 0.0                 |                               |
| 人工 | $^{58}\text{Co}$ s          |                        | 1321.75 <sub>5</sub> )       | 0.0                 |                               |
| 人工 | $^{60}\text{Co}$            |                        | 主要 1332.470 <sub>24}</sub> ) | 100.                |                               |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$   |                        | 1334.242 <sub>19}</sub> )    | 0.141 <sub>5</sub>  |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |                        | 1339.3 <sub>3</sub> )        | 0.0                 |                               |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$            |                        | 1362.66 <sub>10}</sub> )     | 1.35 <sub>14</sub>  |                               |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$           |                        | 1365.13 <sub>10}</sub> )     | 3.04 <sub>4</sub>   |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                        | 1372.07 <sub>13}</sub> )     | 2.5 <sub>1</sub>    |                               |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |                        | 1377.669 <sub>14}</sub> )    | 4.05 <sub>18}</sub> |                               |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$   |                        | 1384.270 <sub>13}</sub> )    | 24.6 <sub>1</sub>   |                               |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |                        | 1385.31 <sub>3</sub> )       | 0.78 <sub>5</sub>   |                               |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ s         |                        | 1388.65 <sub>2</sub> )       | 0.0                 |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                        | 1398.57 <sub>10}</sub> )     | 7.1 <sub>3</sub>    |                               |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$ s         |                        | 1400.42 <sub>4</sub> )       | 0.0                 |                               |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |                        | 1401.50 <sub>4</sub> )       | 1.39 <sub>8</sub>   |                               |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$ s         |                        | 1406.50 <sub>5</sub> )       | 0.0                 |                               |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |                        | 1407.98 <sub>4</sub> )       | 2.48 <sub>10}</sub> |                               |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ s |                        | 1421.677 <sub>23}</sub> )    | 0.0                 |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |                        | 1440.31 <sub>6</sub> )       | 0.0                 |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                        | 1442.56 <sub>10}</sub> )     | 1.42 <sub>6</sub>   |                               |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |                        | 1459.2 <sub>2</sub> )        | 0.93 <sub>13</sub>  |                               |
|    | $^{40}\text{K}$             | 1.277 <sub>8</sub>     | 主要 1460.75 <sub>6</sub> )    | 10.67 <sub>13</sub> | $\beta^-, \text{EC}, \beta^+$ |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$   | $\times 10^9$ y        | 1475.760 <sub>22}</sub> )    | 4.04 <sub>2</sub>   |                               |

|    | 核種名                         | 半減期 | エネルギー (keV)              | 放出比 (%)             | 備考 |
|----|-----------------------------|-----|--------------------------|---------------------|----|
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |     | 1479.9 <sub>2</sub> )    | 0.0                 |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |     | 1496.2 <sub>2</sub> )    | 0.98 <sub>13</sub>  |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |     | 1499.7 <sub>4</sub> )    | 0.0                 |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |     | 1501.7 <sub>2</sub> )    | 0.54 <sub>7</sub>   |    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$   |     | 1505.001 <sub>21</sub> ) | 13.2 <sub>1</sub>   |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |     | 1509.228 <sub>17</sub> ) | 2.19 <sub>11</sub>  |    |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$            |     | 1515.64 <sub>20</sub> )  | 0.12 <sub>2</sub>   |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |     | 1539.0 <sub>5</sub> )    | 0.054 <sub>30</sub> |    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ s |     | 1542.416 <sub>23</sub> ) | 0.0                 |    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$   |     | 1562.266 <sub>22</sub> ) | 1.19 <sub>2</sub>   |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |     | 1583.22 <sub>4</sub> )   | 0.72 <sub>5</sub>   |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |     | 1588.3 <sub>2</sub> )    | 3.5 <sub>5</sub>    |    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ s |     | 1591.337 <sub>26</sub> ) | 0.0                 |    |
|    | $^{208}\text{Tl}$ d         |     | 1592.5)                  | 0.0                 |    |
| 人工 | $^{140}\text{La}$           |     | 1596.49 <sub>24</sub> )  | 95.5 <sub>3</sub>   |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           | 主要  | 1599.31 <sub>6</sub> )   | 0.33 <sub>3</sub>   |    |
|    | $^{212}\text{Bi}$           | 主要  | 1620.62 <sub>10</sub> )  | 1.4 <sub>1</sub>    |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |     | 1622.25 <sub>7</sub> )   | 0.0                 |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |     | 1625.3 <sub>3</sub> )    | 0.32 <sub>14</sub>  |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |     | 1630.7 <sub>3</sub> )    | 1.5 <sub>3</sub>    |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |     | 1638.3 <sub>3</sub> )    | 0.46 <sub>10</sub>  |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           | 主要  | 1661.28 <sub>6</sub> )   | 1.15 <sub>7</sub>   |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$           |     | 1685.8 <sub>3</sub> )    | 0.092 <sub>21</sub> |    |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$           |     | 1691.02 <sub>4</sub> )   | 49.0 <sub>5</sub>   |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |     | 1727.17 <sub>7</sub> )   | 0.0                 |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |     | 1729.60 <sub>2</sub> )   | 2.98 <sub>13</sub>  |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$            |     | 1750.46 <sub>10</sub> )  | 1.35 <sub>14</sub>  |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |     | 1757.5 <sub>2</sub> )    | 0.38 <sub>3</sub>   |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           | 主要  | 1764.50 <sub>2</sub> )   | 15.8 <sub>6</sub>   |    |
|    | $^{207}\text{Bi}$           |     | 1770.220 <sub>40</sub> ) | 6.79 <sub>20</sub>  |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |     | 1803.72 <sub>9</sub> )   | 0.0                 |    |
| 機器 | $^{56}\text{Mn}$            |     | 1810.72 <sub>4</sub> )   | 27.2 <sub>9</sub>   |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |     | 1811.1 <sub>2</sub> )    | 0.0                 |    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ s |     | 1822.145 <sub>26</sub> ) | 0.0                 |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |     | 1840.9 <sub>2</sub> )    | 0.0                 |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |     | 1847.42 <sub>3</sub> )   | 2.10 <sub>9</sub>   |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$            |     | 1851.55 <sub>10</sub> )  | 0.35 <sub>4</sub>   |    |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ s         |     | 1866.58 <sub>1</sub> )   | 0.0                 |    |
| 人工 | $^{93}\text{Y}$             |     | 1917.8 <sub>1</sub> )    | 1.4 <sub>4</sub>    |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |     | 1921.08 <sub>12</sub> )  | 1.18 <sub>9</sub>   |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |     | 1945.8 <sub>4</sub> )    | 0.0                 |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |     | 1963.0 <sub>3</sub> )    | 0.0                 |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |     | 2002.30 <sub>12</sub> )  | 1.1 <sub>1</sub>    |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s          |     | 2039.76 <sub>9</sub> )   | 0.0                 |    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ s |     | 2042.019 <sub>23</sub> ) | 0.0                 |    |

表-2 核種別核データ

${}^7\text{Be}$

|       | 核種名                 | 半減期     | エネルギー (keV) |           | 放出比 (%) | 備考             |
|-------|---------------------|---------|-------------|-----------|---------|----------------|
| 人工    | ${}^{127}\text{Sb}$ |         |             | 473.04    | 25.1    |                |
| 人工    | ${}^{134}\text{Cs}$ | 2.0625y |             | 475.355   | 1.46540 | $\beta^-$ , EC |
| ----- | ${}^7\text{Be}$     | 53.292d | 主要          | 477.59312 | 10.358  | EC             |

${}^{40}\text{K}$

|       | 核種名                  | 半減期                        | エネルギー (keV) |           | 放出比 (%) | 備考                        |
|-------|----------------------|----------------------------|-------------|-----------|---------|---------------------------|
| 人工    | ${}^{140}\text{Ba}$  |                            |             | 423.721   | 3.0721  |                           |
|       | ${}^{211}\text{Pb}$  |                            |             | 426.91    | 1.63    |                           |
| 人工    | ${}^{125}\text{Sb}$  |                            | 主要          | 427.952   | 30.1    |                           |
| 人工    | ${}^{132}\text{I}$   |                            |             | 431.94    | 0.459   |                           |
| 人工    | ${}^{140}\text{La}$  |                            |             | 432.53029 | 2.7215  |                           |
| 人工    | ${}^{108m}\text{Ag}$ |                            | 主要          | 434.0010  | 90.59   |                           |
| 人工    | ${}^{140}\text{Ba}$  |                            |             | 437.582   | 2.02    |                           |
| ----- | ${}^{40}\text{K}_d$  | -----                      | -----       | 438.75    | 0.0     | -----                     |
| 人工    | ${}^{147}\text{Nd}$  |                            |             | 439.858   | 1.12    |                           |
| 人工    | ${}^{93}\text{Y}$    |                            |             | 947.11    | 1.96    |                           |
| ----- | ${}^{40}\text{K}_e$  | -----                      | -----       | 949.750   | 0.0     | -----                     |
| 人工    | ${}^{140}\text{La}$  |                            |             | 951.44    | 0.533   |                           |
| 人工    | ${}^{132}\text{I}$   |                            | 主要          | 954.559   | 18.16   |                           |
|       | ${}^{228}\text{Ac}$  |                            |             | 1459.22   | 0.9313  |                           |
| ----- | ${}^{40}\text{K}$    | 1.2778<br>* $10^9\text{y}$ | 主要          | 1460.756  | 10.6713 | $\beta^-$ , EC, $\beta^+$ |

<sup>51</sup>Cr

|    | 核種名               | 半減期      | エネルギー (keV) |           | 放出比 (%) | 備考 |                                     |
|----|-------------------|----------|-------------|-----------|---------|----|-------------------------------------|
| 人工 | <sup>239</sup> Np | 27.7016d | 主要          | 315.9     | 1.525   | EC |                                     |
| 人工 | <sup>132</sup> I  |          |             | 316.54    | 0.164   |    |                                     |
| 人工 | <sup>147</sup> Nd |          |             | 319.413   | 2.03    |    |                                     |
| 人工 | <sup>51</sup> Cr  |          |             | 320.0761  | 10.26   |    |                                     |
|    | <sup>228</sup> Ac |          |             | 321.94    | 0.223   |    |                                     |
|    | <sup>223</sup> Ra |          |             | 324.1     | 4.1226  |    |                                     |
|    | <sup>228</sup> Ac |          |             | 328.34    | 3.14    |    |                                     |
| 人工 | <sup>140</sup> La |          |             | 328.76812 | 18.56   |    | β <sup>-</sup> 親: <sup>140</sup> Ba |
|    | <sup>231</sup> Pa |          |             | 329.896   | 1.44    |    |                                     |
|    | <sup>227</sup> Th |          |             | 329.92    | 2.48    |    |                                     |
|    | <sup>228</sup> Ac | 332.94   | 0.355       |           |         |    |                                     |
| 人工 | <sup>239</sup> Np | 334.3    | 1.957       |           |         |    |                                     |
|    | <sup>223</sup> Ra | 338.6    | 2.9620      |           |         |    |                                     |
|    | <sup>228</sup> Ac | 338.74   | 12.2        |           |         |    |                                     |
| 人工 | <sup>136</sup> Cs | 340.575  | 46.85       |           |         |    |                                     |

<sup>54</sup>Mn

|    | 核種名               | 半減期      | エネルギー (keV) |           | 放出比 (%) | 備考 |
|----|-------------------|----------|-------------|-----------|---------|----|
| 人工 | <sup>97</sup> Zr  | 312.207d | 主要          | 829.8010  | 0.222   | EC |
|    | <sup>228</sup> Ac |          |             | 830.42    | 0.6512  |    |
|    | <sup>211</sup> Pb |          |             | 831.81    | 2.86    |    |
| 人工 | <sup>54</sup> Mn  |          |             | 834.82721 | 100.    |    |
|    | <sup>228</sup> Ac |          |             | 835.62    | 1.72    |    |
|    | <sup>214</sup> Pb |          |             | 839.2020  | 0.596   |    |
|    | <sup>228</sup> Ac |          |             | 840.42    | 0.9716  |    |

<sup>56</sup>Mn

|    | 核種名                | 半減期      | エネルギー (keV) |           | 放出比 (%) | 備考             |
|----|--------------------|----------|-------------|-----------|---------|----------------|
| 機器 | <sup>56</sup> Mn   | 2.57856h | 主要          | 846.75420 | 98.874  | β <sup>-</sup> |
| 機器 | <sup>56</sup> Mn   |          |             | 1810.724  | 27.29   |                |
| 人工 | <sup>132</sup> I s |          |             | 1811.12   | 0.0     |                |

|    | 核種名                       | 半減期                                                                     | エネルギー (keV)              |                                 | 放出比 (%)                    | 備考                                         |                    |  |
|----|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|--------------------|--|
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         | 138.3763 <sub>17</sub> <sup>d</sup><br>4.183 <sub>17</sub> <sup>m</sup> | 主要<br>主要                 | 801.84 <sub>3</sub> )           | 8.73 <sub>4</sub>          | $\alpha$ 親: $^{210}\text{Bi}$<br>$\beta^-$ |                    |  |
|    | $^{210}\text{Po}$         |                                                                         |                          | 803. )                          | 0.00122 <sub>9</sub>       |                                            |                    |  |
|    | $^{206}\text{Tl}$         |                                                                         |                          | 803.3 )                         | 0.0055 <sub>5</sub>        |                                            |                    |  |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                                                                         |                          | 804.53 <sub>10</sub> )          | 0.65 <sub>7</sub>          |                                            |                    |  |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                                                                         |                          | 806.174 <sub>18</sub> )         | 1.23 <sub>6</sub>          |                                            |                    |  |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                                                         |                          | 809.8 <sub>2</sub> )            | 2.9 <sub>3</sub>           |                                            |                    |  |
| 人工 | $^{58}\text{Co}$          |                                                                         |                          | 70.78 <sub>7</sub> <sup>d</sup> | 主要 810.755 <sub>33</sub> ) |                                            | 99.44 <sub>2</sub> |  |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                                                         |                          |                                 | 812.2 <sub>2</sub> )       |                                            | 5.6 <sub>5</sub>   |  |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |                                                                         |                          |                                 | 主要 815.85 <sub>7</sub> )   |                                            | 22.4 <sub>7</sub>  |  |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                                                                         |                          |                                 | 818.016 <sub>12</sub> )    |                                            | 7.28 <sub>5</sub>  |  |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$         |                                                                         | 主要 818.50 <sub>4</sub> ) | 99.70 <sub>6</sub>              |                            |                                            |                    |  |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          |                                                                         | 822.8 <sub>1</sub> )     | 0.140 <sub>19</sub>             |                            |                                            |                    |  |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                                                         |                          | 1317.1 <sub>7</sub> )           | 0.12 <sub>2</sub>          |                                            |                    |  |
| 人工 | $^{132}\text{I}$ s        |                                                                         |                          | 1318.3 <sub>2</sub> )           | 0.0                        |                                            |                    |  |
| 人工 | $^{58}\text{Co}$ s        |                                                                         |                          | 1321.75 <sub>5</sub>            | 0.0                        |                                            |                    |  |

|    | 核種名                      | 半減期                              | エネルギー (keV) |                          | 放出比 (%)            | 備考                                       |
|----|--------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------|------------------------------------------|
| 機器 | $^{75\text{m}}\text{Ge}$ | 47.7 <sub>5</sub> <sup>s</sup>   | 主要          | 139.68 <sub>3</sub> )    | 39.2               | $\text{IT}, \beta^-$                     |
| 人工 | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | 6.007 <sub>2</sub> <sup>h</sup>  | 主要          | 140.511 <sub>6</sub> )   | 89.0 <sub>2</sub>  | $\text{IT}, \beta^-$ 親: $^{99}\text{Mo}$ |
| 人工 | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ |                                  |             | 142.63 <sub>3</sub> )    | 6.4 <sub>3</sub>   |                                          |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$         | 44.56 <sub>3</sub> <sup>d</sup>  |             | 142.648 <sub>4</sub> )   | 1.02 <sub>4</sub>  | $\beta^-$                                |
|    | $^{235}\text{U}$         |                                  | 主要          | 143.76 <sub>2</sub> )    | 11.1               |                                          |
|    | $^{223}\text{Ra}$        |                                  |             | 144.3 )                  | 3.34 <sub>22</sub> |                                          |
| 人工 | $^{141}\text{Ce}$        | 32.55 <sub>1</sub> <sup>d</sup>  | 主要          | 145.44 <sub>4</sub> )    | 48.4 <sub>4</sub>  | $\beta^-$                                |
| 人工 | $^{132}\text{I}$         | 2.2846 <sub>4</sub> <sup>h</sup> |             | 147.2 <sub>1</sub> )     | 0.24 <sub>2</sub>  | $\beta^-$ 親: $^{132}\text{Te}$           |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$         |                                  |             | 192.344 <sub>6</sub>     | 3.08 <sub>10</sub> |                                          |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$         |                                  | 主要          | 1099.224 <sub>25</sub> ) | 56.5 <sub>15</sub> |                                          |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$        |                                  |             | 1102.98 <sub>18</sub>    | ~0.37 <sub>5</sub> |                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$         |                                  |             | 1290.7 <sub>3</sub> )    | 1.14 <sub>6</sub>  |                                          |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$         |                                  | 主要          | 1291.564 <sub>28</sub> ) | 43.2 <sub>11</sub> |                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$         |                                  |             | 1295.3 <sub>3</sub> )    | 2.0 <sub>1</sub>   |                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$         |                                  |             | 1298.2 <sub>5</sub>      | 0.9 <sub>1</sub>   |                                          |

<sup>60</sup>Co

|    | 核種名                 | 半減期       | エネルギー (keV) |            | 放出比 (%) | 備考             |
|----|---------------------|-----------|-------------|------------|---------|----------------|
| 人工 | <sup>132</sup> I    | 5.271911y | 主要          | 1173.22    | 1.11    | β <sup>-</sup> |
| 人工 | <sup>60</sup> Co    |           |             | 1173.21021 | 100.    |                |
| 人工 | <sup>134</sup> Cs s |           |             | 1173.955   | 0.0     |                |
| 人工 | <sup>60</sup> Co    |           | 主要          | 1332.47024 | 100.    |                |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag  |           |             | 1334.24219 | 0.1415  |                |

<sup>63</sup>Zn

|    | 核種名                | 半減期       | エネルギー (keV) |            | 放出比 (%) | 備考                                                                         |         |      |                     |
|----|--------------------|-----------|-------------|------------|---------|----------------------------------------------------------------------------|---------|------|---------------------|
| 人工 | <sup>124</sup> Sb  | 60.203d   | 主要          | 645.824    | 7.2322  | β <sup>-</sup>                                                             |         |      |                     |
| 人工 | <sup>132</sup> I   |           |             | 650.62     | 2.72    |                                                                            |         |      |                     |
| 人工 | <sup>91</sup> Sr   |           |             | 652.33     | 2.98    |                                                                            |         |      |                     |
| 人工 | <sup>91</sup> Sr   |           |             | 652.92     | 7.611   |                                                                            |         |      |                     |
| 人工 | <sup>91</sup> Sr   |           |             | 653.2      | 0.469   |                                                                            |         |      |                     |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag |           |             | 657.74910  | 94.41   |                                                                            |         |      |                     |
| 人工 | <sup>97</sup> Nb   | 30.17434y | 主要          | 657.9210   | 98.21   | β <sup>-</sup> 親: <sup>97</sup> Zr<br>β <sup>-</sup> 娘: <sup>137m</sup> Ba |         |      |                     |
| 人工 | <sup>137</sup> Cs  |           |             | 661.63819D | 85.05   |                                                                            |         |      |                     |
| 人工 | <sup>143</sup> Ce  |           |             | 664.5510   | 5.35    |                                                                            |         |      |                     |
| 人工 | <sup>214</sup> Bi  |           |             | 665.45323  | 1.569   |                                                                            |         |      |                     |
| 人工 | <sup>132</sup> I   |           |             | 667.698    | 98.71   |                                                                            |         |      |                     |
| 機器 | <sup>63</sup> Zn   |           |             | 38.01m     | 主要      |                                                                            | 669.625 | 8.44 | β <sup>+</sup> , EC |
| 人工 | <sup>132</sup> I   |           |             |            |         |                                                                            | 669.83  | 4.98 |                     |
| 人工 | <sup>132</sup> I   |           |             |            |         |                                                                            | 671.63  | 5.24 |                     |
| 人工 | <sup>125</sup> Sb  |           |             |            |         |                                                                            | 671.664 | 1.71 |                     |
| 機器 | <sup>63</sup> Zn   |           |             |            |         |                                                                            |         | 主要   |                     |
|    | <sup>228</sup> Ac  | 964.44    | 4.710       |            |         |                                                                            |         |      |                     |
|    | <sup>228</sup> Ac  | 968.83    | 16.2        |            |         |                                                                            |         |      |                     |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr   |           |             | 971.3910   | 0.293   |                                                                            |         |      |                     |

<sup>65</sup>Zn

|    | 核種名               | 半減期     | エネルギー (keV) |            | 放出比 (%) | 備考                 |
|----|-------------------|---------|-------------|------------|---------|--------------------|
| 人工 | <sup>65</sup> Zn  | 244.02d | 主要          | 1115.51825 | 50.7510 | EC, β <sup>+</sup> |
|    | <sup>214</sup> Bi |         |             | 1120.2872  | 15.06   |                    |

## 74Ga

|    | 核種名                       | 半減期                  | エネルギー (keV)              | 放出比 (%)             | 備考                                        |
|----|---------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          | 8.25 <sub>5</sub> m  | 主要 595.88 <sub>4</sub>   | 91.2 <sub>10</sub>  | $\beta^-$                                 |
| 機器 | $^{74}\text{As}$          | 17.79 <sub>5</sub> d | 主要 595.90 <sub>8</sub>   | 60.2                | EC, $\beta^+$ , $\beta^-$                 |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 主要 600.77 <sub>6</sub>   | 18.1                |                                           |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                      | 602.41 <sub>20</sub>     | 1.39 <sub>14</sub>  |                                           |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          |                      | 604.22 <sub>10</sub>     | 2.87 <sub>21</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         |                      | 主要 604.66 <sub>2</sub>   | 97.56 <sub>32</sub> |                                           |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 606.82 <sub>4</sub>      | 4.9 <sub>4</sub>    |                                           |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          |                      | 608.40 <sub>5</sub>      | 14.6 <sub>5</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         | 19.7m                | 主要 609.31 <sub>210</sub> | 46.1 <sub>12</sub>  | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$ |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$         |                      | 主要 610.33 <sub>2</sub>   | 5.44 <sub>56</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                      | 主要 614.37 <sub>10</sub>  | 89.7 <sub>31</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |                      | 616.33 <sub>17</sub> D   | 0.82 <sub>19</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | 252.2 <sub>3</sub> d | 620.34 <sub>611</sub>    | 2.78 <sub>5</sub>   | $\beta^-$ , IT                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      | 621.0 <sub>2</sub>       | 2.0 <sub>1</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |                      | 主要 622.2 <sub>3</sub> D  | 9.8 <sub>14</sub>   |                                           |

## 74As

|    | 核種名                       | 半減期                  | エネルギー (keV)              | 放出比 (%)             | 備考                                        |
|----|---------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          | 8.25 <sub>5</sub> m  | 主要 595.88 <sub>4</sub>   | 91.2 <sub>10</sub>  | $\beta^-$                                 |
| 機器 | $^{74}\text{As}$          | 17.79 <sub>5</sub> d | 主要 595.90 <sub>8</sub>   | 60.2                | EC, $\beta^+$ , $\beta^-$                 |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 主要 600.77 <sub>6</sub>   | 18.1                |                                           |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                      | 602.41 <sub>20</sub>     | 1.39 <sub>14</sub>  |                                           |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          |                      | 604.22 <sub>10</sub>     | 2.87 <sub>21</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         |                      | 主要 604.66 <sub>2</sub>   | 97.56 <sub>32</sub> |                                           |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 606.82 <sub>4</sub>      | 4.9 <sub>4</sub>    |                                           |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          |                      | 608.40 <sub>5</sub>      | 14.6 <sub>5</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         | 19.7m                | 主要 609.31 <sub>210</sub> | 46.1 <sub>12</sub>  | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$ |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$         |                      | 主要 610.33 <sub>2</sub>   | 5.44 <sub>56</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                      | 主要 614.37 <sub>10</sub>  | 89.7 <sub>31</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |                      | 616.33 <sub>17</sub> D   | 0.82 <sub>19</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | 252.2 <sub>3</sub> d | 620.34 <sub>611</sub>    | 2.78 <sub>5</sub>   | $\beta^-$ , IT                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      | 621.0 <sub>2</sub>       | 2.0 <sub>1</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |                      | 主要 622.2 <sub>3</sub> D  | 9.8 <sub>14</sub>   |                                           |

$^{75}\text{mGe}$

|    | 核種名                      | 半減期                   | エネルギー (keV) |                      | 放出比 (%)            | 備考                                |
|----|--------------------------|-----------------------|-------------|----------------------|--------------------|-----------------------------------|
| 機器 | $^{75\text{m}}\text{Ge}$ | 47.75s                | 主要          | 139.68 <sub>3</sub>  | 39.2               | IT, $\beta^-$                     |
| 人工 | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | 6.007 <sub>2</sub> h  | 主要          | 140.511 <sub>6</sub> | 89.0 <sub>2</sub>  | IT, $\beta^-$ 親: $^{99}\text{Mo}$ |
| 人工 | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ |                       |             | 142.63 <sub>3</sub>  | 6.4 <sub>3</sub>   |                                   |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$         | 44.56 <sub>3</sub> d  |             | 142.648 <sub>4</sub> | 1.02 <sub>4</sub>  | $\beta^-$                         |
|    | $^{235}\text{U}$         |                       | 主要          | 143.76 <sub>2</sub>  | 11.1               |                                   |
|    | $^{223}\text{Ra}$        |                       |             | 144.3                | 3.34 <sub>22</sub> |                                   |
| 人工 | $^{141}\text{Ce}$        | 32.55 <sub>1</sub> d  | 主要          | 145.44 <sub>4</sub>  | 48.4 <sub>4</sub>  | $\beta^-$                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$         | 2.2846 <sub>4</sub> h |             | 147.2 <sub>1</sub>   | 0.24 <sub>2</sub>  | $\beta^-$ 親: $^{132}\text{Te}$    |

$^{75}\text{Ge}$

|    | 核種名               | 半減期                    | エネルギー (keV) |                      | 放出比 (%)            | 備考                             |
|----|-------------------|------------------------|-------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|
| 機器 | $^{75}\text{Ge}?$ | 82.78 <sub>4</sub> m   |             | 198.56               | 1.14 <sub>11</sub> | $\beta^-$                      |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                        |             | 262.7 <sub>1</sub>   | 1.44 <sub>9</sub>  |                                |
| 機器 | $^{75}\text{Ge}$  |                        | 主要          | 264.61               | 11.1 <sub>11</sub> |                                |
| 人工 | $^{93}\text{Y}$   | 10.25 <sub>1</sub> h   | 主要          | 266.9 <sub>1</sub>   | 6.8 <sub>15</sub>  | $\beta^-$                      |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                        | 主要          | 269.6                | 14.0 <sub>3</sub>  |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                        |             | 270.2 <sub>3</sub>   | 3.6 <sub>6</sub>   |                                |
|    | $^{219}\text{Rn}$ | 3.96 <sub>1</sub> s    | 主要          | 271.20 <sub>5</sub>  | 10.1               | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$  |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$  |                        |             | 272.27 <sub>20</sub> | 0.25 <sub>4</sub>  |                                |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                        |             | 273.65 <sub>4</sub>  | 12.7 <sub>2</sub>  |                                |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                        |             | 275.42 <sub>2</sub>  | 0.82 <sub>18</sub> |                                |
|    | $^{208}\text{Tl}$ | 3.0527 <sub>33</sub> m |             | 277.4 <sub>3</sub>   | 6.8 <sub>3</sub>   | $\beta^-$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                        | 主要          | 277.60               | 14.5 <sub>4</sub>  |                                |

91Sr

|                                                                                                    | 核種名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 半減期                                                                                                           | エネルギー (keV)                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 放出比 (%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 備考                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 人工<br>人工                                                                                           | <sup>91</sup> Sr<br><sup>103</sup> Ru                                                                                                                                                                                                                                                                              | 9.48 <sub>1</sub> h                                                                                           | 主要                                                           | 555.57 <sub>5</sub> )<br>557.04 <sub>2</sub> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 61.7<br>0.80 <sub>8</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                         | β <sup>-</sup> 娘: <sup>91m</sup> Y, <sup>91</sup> Y                                                                                             |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工 | <sup>124</sup> Sb<br><sup>132</sup> I<br><sup>91</sup> Sr<br><sup>91</sup> Sr<br><sup>91</sup> Sr<br><sup>110m</sup> Ag<br><sup>97</sup> Nb<br><sup>137</sup> Cs<br><sup>143</sup> Ce<br><sup>214</sup> Bi<br><sup>132</sup> I<br>機器 <sup>63</sup> Zn<br><sup>132</sup> I<br><sup>132</sup> I<br><sup>125</sup> Sb | 60.20 <sub>3</sub> d<br><br><br><br><br><br><br>30.174 <sub>34</sub> y<br><br><br><br><br>38.0 <sub>1</sub> m | 主要<br><br><br><br><br><br><br>主要<br><br><br><br><br>主要<br>主要 | 645.82 <sub>4</sub> )<br>650.6 <sub>2</sub> )<br>652.3 <sub>3</sub> )<br>652.9 <sub>2</sub> )<br>653.2 )<br>657.749 <sub>10</sub> )<br>657.92 <sub>10</sub> )<br>661.638 <sub>19</sub> )<br>664.55 <sub>10</sub> )<br>665.453 <sub>22</sub> )<br>667.69 <sub>8</sub> )<br>669.62 <sub>5</sub> )<br>669.8 <sub>3</sub> )<br>671.6 <sub>3</sub> )<br>671.66 <sub>4</sub> ) | 7.23 <sub>22</sub><br>2.7 <sub>2</sub><br>2.9 <sub>8</sub><br>7.6 <sub>11</sub><br>0.46 <sub>9</sub><br>94.4 <sub>1</sub><br>98.2 <sub>1</sub><br>85.0 <sub>5</sub><br>5.3 <sub>5</sub><br>1.56 <sub>9</sub><br>98.7 <sub>1</sub><br>8.4 <sub>4</sub><br>4.9 <sub>8</sub><br>5.2 <sub>4</sub><br>1.7 <sub>1</sub> | β <sup>-</sup><br><br><br><br><br><br>β <sup>-</sup> 親: <sup>97</sup> Zr<br>β <sup>-</sup> 娘: <sup>137m</sup> Ba<br><br><br>β <sup>+</sup> , EC |
| 人工<br>人工<br>人工                                                                                     | <sup>91</sup> Sr<br><sup>140</sup> La<br><sup>228</sup> Ac<br><sup>95</sup> Zr                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                               | 主要<br><br><br>主要                                             | 749.8 <sub>1</sub> )<br>751.827 <sub>80</sub> )<br>755.3 <sub>1</sub> )<br>756.72 <sub>2</sub> )                                                                                                                                                                                                                                                                         | 23.2<br>4.20 <sub>20</sub><br>1.0 <sub>2</sub><br>54.6 <sub>5</sub>                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                 |
| 人工<br>人工<br>人工                                                                                     | <sup>97</sup> Zr<br><sup>91</sup> Sr<br><sup>97</sup> Nb                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                               | 主要                                                           | 1021.3 <sub>3</sub> )<br>1024.3 <sub>1</sub> )<br>1024.53 <sub>30</sub> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1.35 <sub>14</sub><br>33.2<br>1.1 <sub>1</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                 |

91Y

|    | 核種名             | 半減期                  | エネルギー (keV) |       | 放出比 (%)           | 備考             |
|----|-----------------|----------------------|-------------|-------|-------------------|----------------|
| 人工 | <sup>91</sup> Y | 58.51 <sub>6</sub> d | 主要          | 1208. | 0.30 <sub>3</sub> | β <sup>-</sup> |

|                      | 核種名                                                                                                                                                                 | 半減期                                                               | エネルギー (keV)                    |                                                                                                                                                          | 放出比 (%)                                                                                                                                                | 備考                                                                                  |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 人工<br>機器<br>人工       | $^{132}\text{I}$<br>$^{75}\text{Ge}$<br>$^{93}\text{Y}$                                                                                                             | 10.25 <sub>1</sub> h                                              | 主要<br>主要                       | 262.7 <sub>1</sub><br>264.6 <sub>1</sub><br>266.9 <sub>1</sub>                                                                                           | 1.44 <sub>9</sub><br>11.1 <sub>11</sub><br>6.81 <sub>5</sub>                                                                                           | $\beta^-$                                                                           |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工 | $^{223}\text{Ra}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{219}\text{Rn}$<br>$^{97}\text{Zr}$<br>$^{136}\text{Cs}$<br>$^{147}\text{Nd}$<br>$^{208}\text{Tl}$<br>$^{239}\text{Np}$ | 3.96 <sub>1</sub> s<br><br><br><br><br><br>3.0527 <sub>33</sub> m | 主要<br><br><br>主要<br><br><br>主要 | 269.6<br>270.2 <sub>3</sub><br>271.20 <sub>5</sub><br>272.27 <sub>20</sub><br>273.65 <sub>4</sub><br>275.42 <sub>2</sub><br>277.4 <sub>3</sub><br>277.60 | 14.0 <sub>3</sub><br>3.6 <sub>6</sub><br>10.1<br>0.25 <sub>4</sub><br>12.7 <sub>2</sub><br>0.82 <sub>18</sub><br>6.8 <sub>3</sub><br>14.5 <sub>4</sub> | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$<br><br><br><br><br><br>$\beta^-$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
| 人工<br>人工<br>人工       | $^{93}\text{Y}$<br>$^{40}\text{K}$ e<br>$^{140}\text{La}$<br>$^{132}\text{I}$                                                                                       |                                                                   |                                | 947.1 <sub>1</sub><br>949.750<br>951.44<br>954.55 <sub>9</sub>                                                                                           | 1.9 <sub>6</sub><br>0.0<br>0.53 <sub>3</sub><br>18.1 <sub>6</sub>                                                                                      |                                                                                     |
| 人工<br>人工             | $^{93}\text{Y}$<br>$^{132}\text{I}$                                                                                                                                 |                                                                   |                                | 1917.8 <sub>1</sub><br>1921.08 <sub>12</sub>                                                                                                             | 1.44<br>1.18 <sub>9</sub>                                                                                                                              |                                                                                     |

$^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$

- ・特別な場合で無ければ2核種が同時に検出される。もし無いのであればはっきりした根拠が無ければならない。
- ・ $^{234\text{m}}\text{Pa}$  をこの核種と誤認した例がある。
- ・親娘関係を仮定して減衰補正を行なうと値が負になることがある。

|    | 核種名                       | 半減期                | エネルギー (keV) |             | 放出比 (%) | 備考                                                       |
|----|---------------------------|--------------------|-------------|-------------|---------|----------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         | 63.986d            | 主要          | 719.863 )   | 0.403   | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                    |             | 721.9611 )  | ~5.15   |                                                          |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         |                    |             | 722.784 )   | 11.3016 |                                                          |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |                    |             | 722.8932 )  | 1.80    |                                                          |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                    |             | 722.958 )   | 89.731  |                                                          |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          |                    |             | 724.18412 ) | 43.120  |                                                          |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$         |                    |             | 726.75 )    | 0.7827  |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                    |             | 727.12 )    | 6.53    |                                                          |
| 人工 | $^{212}\text{Bi}$         |                    |             | 727.277 )   | 6.32    |                                                          |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ |                    |             | 729.625 )   | 0.6913  |                                                          |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                    | 主要          | 749.81 )    | 23.2    |                                                          |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |                    |             | 751.82780 ) | 4.2020  |                                                          |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$         |                    |             | 755.31 )    | 1.02    |                                                          |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          |                    |             | 756.722 )   | 54.65   |                                                          |
| 人工 | $^{208}\text{Tl}$         | 34.973d<br>1.1753m | 主要          | 763.138 )   | 1.649   | $\beta^-$ 親: $^{95}\text{Zr}$<br>$\beta^-$ , IT          |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                    |             | 763.92813 ) | 22.31   |                                                          |
| 人工 | $^{95}\text{Nb}$          |                    |             | 765.78619 ) | 99.821  |                                                          |
|    | $^{234\text{m}}\text{Pa}$ |                    |             | 766.62 )    | 0.211   |                                                          |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                    |             | 768.35612 ) | 4.9120  |                                                          |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$         |                    |             | 771.83 )    | 1.62    |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          | 772.618 )          | 76.219      |             |         |                                                          |

|                      | 核種名                                                                                                                    | 半減期                                               | エネルギー (keV)                                                               | 放出比 (%)                                                                                                                                         | 備考                                                                                                                                |                                                                  |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 人工                   | <sup>97</sup> Zr                                                                                                       | 16.90 <sub>5</sub> h                              | 218.87 <sub>20</sub>                                                      | 0.18 <sub>2</sub>                                                                                                                               | β <sup>-</sup> 娘: <sup>97m</sup> Nb, <sup>97</sup> Nb                                                                             |                                                                  |
| 人工<br>人工<br>人工       | <sup>97</sup> Zr<br><sup>239</sup> Np<br><sup>132</sup> I<br><sup>227</sup> Th                                         |                                                   | 254.15 <sub>20</sub><br>254.4<br>254.8 <sub>2</sub><br>256.3 <sub>2</sub> | 1.25 <sub>14</sub><br>0.11 <sub>1</sub><br>0.19 <sub>3</sub><br>6.3 <sub>20</sub>                                                               |                                                                                                                                   |                                                                  |
| 人工<br>機器<br>人工       | <sup>132</sup> I<br><sup>75</sup> Ge<br><sup>93</sup> Y<br><sup>223</sup> Ra<br><sup>228</sup> Ac<br><sup>219</sup> Rn | 10.25 <sub>1</sub> h                              | 主要<br>主要<br>主要                                                            | 262.7 <sub>1</sub><br>264.6 <sub>1</sub><br>266.9 <sub>1</sub><br>269.6                                                                         | 1.44 <sub>9</sub><br>11.1 <sub>11</sub><br>6.8 <sub>15</sub><br>14.0 <sub>3</sub>                                                 | β <sup>-</sup>                                                   |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工 | <sup>97</sup> Zr<br><sup>136</sup> Cs<br><sup>147</sup> Nd<br><sup>208</sup> Tl<br><sup>239</sup> Np                   | 3.96 <sub>1</sub> s<br><br>3.0527 <sub>33</sub> m | 主要<br><br>主要                                                              | 270.2 <sub>3</sub><br>271.20 <sub>5</sub><br>272.27 <sub>20</sub><br>273.65 <sub>4</sub><br>275.42 <sub>2</sub><br>277.4 <sub>3</sub><br>277.60 | 3.6 <sub>6</sub><br>10.1<br>0.25 <sub>4</sub><br>12.7 <sub>2</sub><br>0.82 <sub>18</sub><br>6.8 <sub>3</sub><br>14.5 <sub>4</sub> | α親: <sup>227</sup> Ac<br><br>β <sup>-</sup> 親: <sup>228</sup> Th |
| 人工<br>人工<br>人工       | <sup>143</sup> Ce<br><sup>211</sup> Bi<br><sup>214</sup> Pb<br><sup>97</sup> Zr                                        | 2.15m                                             | 主要<br>主要                                                                  | 350.587 <sub>50</sub><br>351.0 <sub>1</sub><br>351.992 <sub>62</sub><br>355.39 <sub>10</sub>                                                    | ~3.4 <sub>3</sub><br>12.7 <sub>2</sub><br>36.7 <sub>40</sub><br>2.27 <sub>24</sub>                                                | α親: <sup>227</sup> Ac                                            |
| 人工                   | <sup>97</sup> Zr<br><sup>219</sup> Rn<br><sup>211</sup> Pb<br><sup>214</sup> Bi<br><sup>228</sup> Ac                   | 36.1 <sub>2</sub> m                               | 主要                                                                        | 400.39 <sub>20</sub><br>401.8 <sub>2</sub><br>404.8 <sub>1</sub><br>405.74 <sub>3</sub><br>409.8 <sub>3</sub>                                   | 0.32 <sub>5</sub><br>6.5 <sub>13</sub><br>3.5 <sub>2</sub><br>0.17 <sub>1</sub><br>2.1 <sub>3</sub>                               | β <sup>-</sup> 娘: <sup>211</sup> Bi                              |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工 | <sup>132</sup> I<br><sup>97</sup> Zr<br><sup>208</sup> Tl<br>Annihi<br><sup>106</sup> Ru<br><sup>97</sup> Zr           | 366.5 <sub>8</sub> d                              | 主要                                                                        | 505.90 <sub>13</sub><br>507.63 <sub>10</sub><br>510.723 <sub>20</sub><br>511.<br>511.80 <sub>15</sub><br>513.38 <sub>20</sub>                   | 5.0 <sub>2</sub><br>5.06 <sub>53</sub><br>21.6 <sub>9</sub><br>0.0<br>19.1<br>0.6 <sub>1</sub>                                    | β <sup>-</sup> 娘: <sup>106</sup> Rh                              |

|    | 核種名                       | 半減期         | エネルギー (keV)   | 放出比 (%)  | 備考                                        |
|----|---------------------------|-------------|---------------|----------|-------------------------------------------|
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          | 8.255m      | 主要 595.884    | 91.210   | $\beta^-$                                 |
| 機器 | $^{74}\text{As}$          | 17.795d     | 主要 595.908    | 60.2     | EC, $\beta^+$ , $\beta^-$                 |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |             | 主要 600.776    | 18.1     |                                           |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |             | 602.4120      | 1.3914   |                                           |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          |             | 604.2210      | 2.8721   |                                           |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         |             | 主要 604.662    | 97.5632  |                                           |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |             | 606.824       | 4.94     |                                           |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          |             | 608.405       | 14.65    |                                           |
|    | $^{214}\text{Bi}$         | 19.7m       | 主要 609.31210  | 46.112   | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$ |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$         |             | 主要 610.332    | 5.4456   |                                           |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |             | 主要 614.3710   | 89.731   |                                           |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |             | 616.3317 D    | 0.8219   |                                           |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | 252.23d     | 620.34611     | 2.785    | $\beta^-$ , IT                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |             | 621.02        | 2.01     |                                           |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |             | 主要 622.23 D   | 9.814    |                                           |
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$         | 3.917d      | 主要 685.75     | 36.1     | $\beta^-$                                 |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |             | 685.8035      | 0.7113   |                                           |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |             | 686.98811     | 6.454    |                                           |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |             | 690.6320      | 0.254    |                                           |
|    | Unknown                   |             | 693.          |          |                                           |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ | 33.5212d    | 主要 695.985    | 2.94     | IT, $\beta^-$ 娘: $^{129}\text{Te}$        |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |             | 699.23        | 0.122    |                                           |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |             | 703.114       | 0.473    |                                           |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |             | 706.67013     | 16.30    |                                           |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          |             | 主要 739.41     | 12.68    |                                           |
|    | $^{214}\text{Bi}$ d       |             | 742.50        | 0.0      |                                           |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |             | 主要 743.3610 D | 92.83    | $^{97\text{m}}\text{Nb}$                  |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |             | 744.26013     | 4.654    |                                           |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         | 138.376317d | 801.843       | 8.734    | $\alpha$ 親: $^{210}\text{Bi}$             |
|    | $^{210}\text{Po}$         | 4.18317m    | 主要 803.       | 0.001229 | $\beta^-$                                 |
|    | $^{206}\text{Tl}$         |             | 主要 803.3      | 0.00555  |                                           |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |             | 804.5310      | 0.657    |                                           |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |             | 806.17418     | 1.236    |                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |             | 809.82        | 2.93     |                                           |
| 人工 | $^{58}\text{Co}$          |             | 主要 810.75533  | 99.442   |                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |             | 812.22        | 5.65     |                                           |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |             | 主要 815.857    | 22.47    |                                           |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |             | 818.01612     | 7.285    |                                           |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$         |             | 主要 818.504    | 99.706   |                                           |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          |             | 822.81        | 0.14019  |                                           |

|    | 核種名                | 半減期                  | エネルギー (keV)           | 放出比 (%)             | 備考 |
|----|--------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|----|
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      | 829.80 <sub>10</sub>  | 0.22 <sub>2</sub>   |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$  |                      | 830.4 <sub>2</sub>    | 0.65 <sub>12</sub>  |    |
|    | $^{211}\text{Pb}$  |                      | 831.8 <sub>1</sub>    | 2.8 <sub>6</sub>    |    |
| 人工 | $^{54}\text{Mn}$   | 312.20 <sub>7d</sub> | 834.82 <sub>72</sub>  | 100.                | EC |
|    | $^{228}\text{Ac}$  |                      | 835.6 <sub>2</sub>    | 1.7 <sub>2</sub>    |    |
|    | $^{214}\text{Pb}$  |                      | 839.20 <sub>20</sub>  | 0.59 <sub>6</sub>   |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$  |                      | 840.4 <sub>2</sub>    | 0.97 <sub>16</sub>  |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      | 854.90 <sub>10</sub>  | 0.33 <sub>4</sub>   |    |
| 機器 | $^{63}\text{Zn}$   |                      | 962.06 <sub>4</sub>   | 6.6 <sub>7</sub>    |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$  |                      | 964.4 <sub>4</sub>    | 4.7 <sub>10</sub>   |    |
|    | $^{228}\text{Ac}$  |                      | 968.8 <sub>3</sub>    | 16.2                |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      | 971.39 <sub>10</sub>  | 0.29 <sub>3</sub>   |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      | 1021.3 <sub>3</sub>   | 1.35 <sub>14</sub>  |    |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$   |                      | 1024.3 <sub>1</sub>   | 33.2                |    |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$   |                      | 1024.53 <sub>30</sub> | 1.1 <sub>1</sub>    |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      | 1110.45 <sub>20</sub> | 0.11 <sub>2</sub>   |    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$   |                      | 1143.4 <sub>2</sub>   | 1.4 <sub>1</sub>    |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      | 1147.95 <sub>10</sub> | 2.64 <sub>29</sub>  |    |
| 人工 | $^{132}\text{I s}$ |                      | 1152.88 <sub>8</sub>  | 0.0                 |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$  |                      | 1155.19 <sub>2</sub>  | 1.69 <sub>9</sub>   |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      | 1276.09 <sub>10</sub> | 0.974 <sub>96</sub> |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$  |                      | 1280.96 <sub>2</sub>  | 1.47 <sub>9</sub>   |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      | 1362.66 <sub>10</sub> | 1.35 <sub>14</sub>  |    |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$  |                      | 1365.13 <sub>10</sub> | 3.04 <sub>4</sub>   |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      | 1750.46 <sub>10</sub> | 1.35 <sub>14</sub>  |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$  |                      | 1847.42 <sub>3</sub>  | 2.10 <sub>9</sub>   |    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      | 1851.55 <sub>10</sub> | 0.35 <sub>4</sub>   |    |

|    | 核種名                       | 半減期                  | エネルギー (keV)             | 放出比 (%)                 | 備考                    |                          |                    |
|----|---------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------|
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         | 60.20 <sub>3</sub> d | 645.82 <sub>4</sub> )   | 7.23 <sub>22</sub>      | $\beta^-$             |                          |                    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      | 650.6 <sub>2</sub> )    | 2.7 <sub>2</sub>        |                       |                          |                    |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                      | 652.3 <sub>3</sub> )    | 2.9 <sub>8</sub>        |                       |                          |                    |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                      | 652.9 <sub>2</sub> )    | 7.6 <sub>11</sub>       |                       |                          |                    |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                      | 653.2 )                 | 0.46 <sub>9</sub>       |                       |                          |                    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                      | 主要                      | 657.749 <sub>10</sub> ) |                       | 94.4 <sub>1</sub>        |                    |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$          |                      | 72.17m                  | 主要                      |                       | 657.92 <sub>10</sub> )   | 98.2 <sub>1</sub>  |
| 人工 | $^{137}\text{Cs}$         |                      | 30.174 <sub>34</sub> y  | 主要                      |                       | 661.638 <sub>19D</sub> ) | 85.0 <sub>5</sub>  |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                      |                         | 664.55 <sub>10</sub> )  |                       | 5.3 <sub>5</sub>         |                    |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                      |                         | 665.453 <sub>22</sub> ) |                       | 1.56 <sub>9</sub>        |                    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          | 主要                   |                         | 667.69 <sub>8</sub> )   | 98.7 <sub>1</sub>     |                          |                    |
| 機器 | $^{63}\text{Zn}$          | 38.0 <sub>1</sub> m  |                         | 主要                      | 669.62 <sub>5</sub> ) | $\beta^+, \text{EC}$     |                    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      | 669.8 <sub>3</sub> )    | 4.9 <sub>8</sub>        |                       |                          |                    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      | 671.6 <sub>3</sub> )    | 5.2 <sub>4</sub>        |                       |                          |                    |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 671.66 <sub>4</sub> )   | 1.7 <sub>1</sub>        |                       |                          |                    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                      |                         | 主要                      | 1021.3 <sub>3</sub> ) |                          | 1.35 <sub>14</sub> |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                      | 1024.3 <sub>1</sub> )   | 33.2                    |                       |                          |                    |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$          |                      | 1024.53 <sub>30</sub> ) | 1.1 <sub>1</sub>        |                       |                          |                    |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$          |                      | 1268.63 <sub>10</sub> ) | 0.16 <sub>2</sub>       |                       |                          |                    |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$          |                      | 1515.64 <sub>20</sub> ) | 0.12 <sub>2</sub>       |                       |                          |                    |

|                                                                | 核種名                                                                                                                                                                                                                                                  | 半減期                                                                                             | エネルギー (keV)                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 放出比 (%)                                                                                                                                                                                                                                                                     | 備考                                                    |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 人工                                                             | <sup>99</sup> Mo<br>Unknown                                                                                                                                                                                                                          | 66.02 <sub>1</sub> h                                                                            |                                              | 40.55 <sub>1</sub> <sub>0</sub><br>41.5                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0.87 <sub>1</sub> <sub>6</sub>                                                                                                                                                                                                                                              | β <sup>-</sup> 娘: <sup>99m</sup> Tc, <sup>99</sup> Tc |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工                                           | <sup>125</sup> Sb<br><sup>136</sup> Cs<br><sup>131</sup> I<br><sup>99</sup> Mo                                                                                                                                                                       | 2.71 <sub>2</sub> y                                                                             |                                              | 176.29 <sub>2</sub><br>176.55 <sub>5</sub><br>177.210 <sub>2</sub><br>181.07 <sub>5</sub>                                                                                                                                                                                                               | 6.8 <sub>5</sub><br>13.6 <sub>2</sub><br>0.26 <sub>0</sub><br>6.29 <sub>8</sub> <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                | β <sup>-</sup> 娘: <sup>125m</sup> Te                  |
|                                                                | <sup>235</sup> U<br><sup>226</sup> Ra                                                                                                                                                                                                                | 1599.7 <sub>7</sub> y                                                                           | 主要<br>主要<br>主要                               | 185.715 <sub>5</sub><br>186.180 <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                                                                            | 54.<br>3.3 <sub>1</sub>                                                                                                                                                                                                                                                     | α娘: <sup>214</sup> Pb                                 |
| 人工<br>人工<br>人工                                                 | <sup>132</sup> I<br><sup>131</sup> I<br><sup>99</sup> Mo                                                                                                                                                                                             |                                                                                                 | 主要                                           | 363.5 <sub>4</sub><br>364.480 <sub>5</sub><br>366.45 <sub>1</sub> <sub>0</sub>                                                                                                                                                                                                                          | 0.49 <sub>1</sub> <sub>0</sub><br>81.1<br>1.35 <sub>1</sub> <sub>6</sub>                                                                                                                                                                                                    |                                                       |
| 人工<br>人工<br>人工                                                 | <sup>99</sup> Mo<br><sup>214</sup> Bi d<br><sup>97</sup> Zr<br><sup>110m</sup> Ag                                                                                                                                                                    |                                                                                                 | 主要<br>主要                                     | 739.4 <sub>1</sub><br>742.50<br>743.36 <sub>1</sub> <sub>0</sub><br>744.260 <sub>1</sub> <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                   | 12.6 <sub>8</sub><br>0.0<br>92.8 <sub>3</sub><br>4.65 <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                          | <sup>97m</sup> Nb                                     |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工                         | <sup>99</sup> Mo<br><sup>132</sup> I<br><sup>228</sup> Ac<br><sup>127</sup> Sb<br><sup>212</sup> Bi<br><sup>214</sup> Pb<br><sup>214</sup> Bi                                                                                                        |                                                                                                 |                                              | 777.8 <sub>1</sub><br>780.2 <sub>3</sub><br>782.0 <sub>1</sub><br>783.7 <sub>5</sub><br>785.46 <sub>7</sub><br>785.95 <sub>2</sub> <sub>0</sub><br>786.1 <sub>4</sub>                                                                                                                                   | 4.40 <sub>5</sub> <sub>3</sub><br>1.23 <sub>6</sub><br>0.51 <sub>1</sub> <sub>1</sub><br>15.1<br>1.0 <sub>1</sub><br>0.86 <sub>9</sub><br>0.31 <sub>1</sub> <sub>1</sub>                                                                                                    |                                                       |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工 | <sup>134</sup> Cs<br><sup>210</sup> Po<br><sup>206</sup> Tl<br><sup>97</sup> Zr<br><sup>214</sup> Bi<br><sup>132</sup> I<br><sup>58</sup> Co<br><sup>132</sup> I<br><sup>140</sup> La<br><sup>110m</sup> Ag<br><sup>136</sup> Cs<br><sup>99</sup> Mo | 138.3763 <sub>1</sub> <sub>7</sub> <sub>d</sub><br>4.183 <sub>1</sub> <sub>7</sub> <sub>m</sub> | 主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要 | 801.84 <sub>3</sub><br>803.<br>803.3<br>804.53 <sub>1</sub> <sub>0</sub><br>806.174 <sub>1</sub> <sub>8</sub><br>809.8 <sub>2</sub><br>810.755 <sub>3</sub> <sub>3</sub><br>812.2 <sub>2</sub><br>815.85 <sub>7</sub><br>818.016 <sub>1</sub> <sub>2</sub><br>818.50 <sub>4</sub><br>822.8 <sub>1</sub> | 8.73 <sub>4</sub><br>0.00122 <sub>9</sub><br>0.0055 <sub>5</sub><br>0.65 <sub>7</sub><br>1.23 <sub>6</sub><br>2.9 <sub>3</sub><br>99.44 <sub>2</sub><br>5.6 <sub>5</sub><br>22.4 <sub>7</sub><br>7.28 <sub>5</sub><br>99.70 <sub>6</sub><br>0.140 <sub>1</sub> <sub>9</sub> | α親: <sup>210</sup> Bi<br>β <sup>-</sup>               |

$^{99m}\text{Tc}$

|    | 核種名               | 半減期                   | エネルギー (keV)          |                      | 放出比 (%)              | 備考                                |
|----|-------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 機器 | $^{75}\text{Ge}$  | 47.75s                | 主要                   | 139.68 <sub>3</sub>  | 39.2                 | IT, $\beta^-$                     |
| 人工 | $^{99m}\text{Tc}$ | 6.007 <sub>2</sub> h  | 主要                   | 140.511 <sub>6</sub> | 89.0 <sub>2</sub>    | IT, $\beta^-$ 親: $^{99}\text{Mo}$ |
| 人工 | $^{99m}\text{Tc}$ |                       |                      | 142.63 <sub>3</sub>  | 6.4 <sub>3</sub>     |                                   |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$  |                       | 44.56 <sub>3</sub> d |                      | 142.648 <sub>4</sub> |                                   |
|    | $^{235}\text{U}$  |                       | 主要                   | 143.76 <sub>2</sub>  | 11.1                 |                                   |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                       |                      | 144.3                | 3.34 <sub>22</sub>   |                                   |
| 人工 | $^{141}\text{Ce}$ | 32.55 <sub>1</sub> d  | 主要                   | 145.44 <sub>4</sub>  | 48.4 <sub>4</sub>    | $\beta^-$                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  | 2.2846 <sub>4</sub> h |                      | 147.2 <sub>1</sub>   | 0.24 <sub>2</sub>    | $\beta^-$ 親: $^{132}\text{Te}$    |

$^{103}\text{Ru}$

|    | 核種名                | 半減期                  | エネルギー (keV) |                       | 放出比 (%)             | 備考                                              |
|----|--------------------|----------------------|-------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------------------------|
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$  | 39.35 <sub>5</sub> d | 主要          | 293.262 <sub>21</sub> | ~42.                | $\beta^-$ 娘: $^{103m}\text{Rh}$                 |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$  |                      |             | 294.98 <sub>2</sub>   | 0.242 <sub>25</sub> |                                                 |
|    | $^{214}\text{Pb}$  |                      | 主要          | 295.217 <sub>39</sub> | 18.9 <sub>20</sub>  |                                                 |
|    | $^{231}\text{Pa}$  |                      |             | 299.94 <sub>6</sub>   | 2.5 <sub>7</sub>    |                                                 |
|    | $^{227}\text{Th}$  |                      |             | 300.0 <sub>2</sub>    | 1.9 <sub>7</sub>    |                                                 |
|    | $^{212}\text{Pb}$  |                      |             | 300.11 <sub>5</sub>   | 3.3 <sub>3</sub>    |                                                 |
|    | $^{231}\text{Pa}$  |                      |             | 302.52 <sub>6</sub>   | 2.5 <sub>7</sub>    |                                                 |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$  |                      |             | 304.85 <sub>1</sub>   | 4.37 <sub>28</sub>  |                                                 |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$  |                      | 主要          | 497.08 <sub>2</sub>   | 86.4 <sub>35</sub>  |                                                 |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$   | 9.48 <sub>1</sub> h  | 主要          | 555.57 <sub>5</sub>   | 61.7                | $\beta^-$ 娘: $^{91m}\text{Y}$ , $^{91}\text{Y}$ |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$  |                      |             | 557.04 <sub>2</sub>   | 0.80 <sub>8</sub>   |                                                 |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$   | 8.25 <sub>5</sub> m  | 主要          | 595.88 <sub>4</sub>   | 91.2 <sub>10</sub>  | $\beta^-$                                       |
| 機器 | $^{74}\text{As}$   | 17.79 <sub>5</sub> d | 主要          | 595.90 <sub>8</sub>   | 60.2                | EC, $\beta^+$ , $\beta^-$                       |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$  |                      | 主要          | 600.77 <sub>6</sub>   | 18.1                |                                                 |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                      |             | 602.41 <sub>20</sub>  | 1.39 <sub>14</sub>  |                                                 |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$   |                      |             | 604.22 <sub>10</sub>  | 2.87 <sub>21</sub>  |                                                 |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$  |                      | 主要          | 604.66 <sub>2</sub>   | 97.56 <sub>32</sub> |                                                 |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$  |                      |             | 606.82 <sub>4</sub>   | 4.9 <sub>4</sub>    |                                                 |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$   |                      |             | 608.40 <sub>5</sub>   | 14.6 <sub>5</sub>   |                                                 |
|    | $^{214}\text{Bi}$  | 19.7 <sub>m</sub>    | 主要          | 609.31 <sub>210</sub> | 46.1 <sub>2</sub>   | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$       |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$  |                      | 主要          | 610.33 <sub>2</sub>   | 5.44 <sub>56</sub>  |                                                 |
| 人工 | $^{108m}\text{Ag}$ |                      | 主要          | 614.37 <sub>10</sub>  | 89.7 <sub>31</sub>  |                                                 |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$  |                      |             | 616.33 <sub>17</sub>  | 0.82 <sub>19</sub>  |                                                 |
| 人工 | $^{110m}\text{Ag}$ | 252.2 <sub>3</sub> d |             | 620.34 <sub>611</sub> | 2.78 <sub>5</sub>   | $\beta^-$ , IT                                  |
| 人工 | $^{132}\text{I}$   |                      |             | 621.0 <sub>2</sub>    | 2.0 <sub>1</sub>    |                                                 |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$  |                      | 主要          | 622.2 <sub>3</sub>    | 9.8 <sub>14</sub>   |                                                 |

|                                                                            | 核種名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 半減期                                                                                                          | エネルギー (keV)                                                                         | 放出比 (%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 備考                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 人工<br>人工                                                                   | $^{132}\text{I}$<br>$^{97}\text{Zr}$<br>$^{208}\text{Tl}$<br>Annihi                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                              | 主要<br>505.90 <sub>13</sub><br>507.63 <sub>10</sub><br>510.72 <sub>320</sub><br>511. | 5.0 <sub>2</sub><br>5.06 <sub>53</sub><br>21.6 <sub>9</sub><br>0.0                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                               |
| 人工<br>人工                                                                   | $^{106}\text{Ru}$<br>$^{97}\text{Zr}$                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 366.5 <sub>8</sub> d                                                                                         | 511.80 <sub>15</sub> D<br>513.38 <sub>20</sub>                                      | 19.1<br>0.6 <sub>1</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $\beta^-$ 娘: $^{106}\text{Rh}$                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                               |
| 機器<br>機器<br>人工<br>人工<br>機器<br>人工<br>人工<br>機器<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工 | $^{74}\text{Ga}$<br>$^{74}\text{As}$<br>$^{125}\text{Sb}$<br>$^{97}\text{Zr}$<br>$^{74}\text{Ga}$<br>$^{134}\text{Cs}$<br>$^{125}\text{Sb}$<br>$^{74}\text{Ga}$<br>$^{214}\text{Bi}$<br>$^{103}\text{Ru}$<br>$^{108\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{106}\text{Ru}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{106}\text{Ru}$ | 8.25 <sub>5</sub> m<br>17.79 <sub>5</sub> d<br><br><br><br><br><br><br>19.7m<br><br><br>252.2 <sub>3</sub> d | 主要<br>主要<br>主要<br><br><br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要        | 595.88 <sub>4</sub><br>595.90 <sub>8</sub><br>600.77 <sub>6</sub><br>602.41 <sub>20</sub><br>604.22 <sub>10</sub><br>604.66 <sub>2</sub><br>606.82 <sub>4</sub><br>608.40 <sub>5</sub><br>609.31 <sub>210</sub><br>610.33 <sub>2</sub><br>614.37 <sub>10</sub><br>616.33 <sub>17</sub> D<br>620.34 <sub>611</sub><br>621.0 <sub>2</sub><br>622.2 <sub>3</sub> D | 91.2 <sub>10</sub><br>60.2<br>18.1<br>1.39 <sub>14</sub><br>2.87 <sub>21</sub><br>97.56 <sub>32</sub><br>4.9 <sub>4</sub><br>14.6 <sub>5</sub><br>46.1 <sub>12</sub><br>5.44 <sub>56</sub><br>89.7 <sub>31</sub><br>0.82 <sub>19</sub><br>2.78 <sub>5</sub><br>2.0 <sub>1</sub><br>9.8 <sub>14</sub> | $\beta^-$<br>EC, $\beta^+$ , $\beta^-$<br><br><br><br><br>$\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$<br><br><br>$\beta^-$ , IT |
| 人工<br>人工                                                                   | $^{136}\text{Cs}$<br>$^{106}\text{Ru}$                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                              | 主要<br>1048.07 <sub>7</sub><br>1050.47 <sub>7</sub> D                                | 79.8 <sub>8</sub><br>1.6 <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                               |

$^{108m}\text{Ag}$

1 放射能源 (生成反応)

$^{107}\text{Ag} (n, \gamma)$

2 半減期 127年

3 壊変形式

EC (91.5%)

IT (8.5%)

4 核種の同定

主要ピーク : 434.00 keV (90.5%)

主要ピーク : 614.37 keV (89.7%)

主要ピーク : 722.95 keV (89.7%)

5 環境試料中の放射能レベル

イカの内臓や貝類から検出され、1~2 pCi/kg生程度の濃度である。まれに7pCi/kg生程度のものもある。

6 その他

主および主要ピークの妨害核種で通常試料から検出されるのは  $^{212}\text{Bi}$  のみであり、他は検出されないと思ってよい。

$^{212}\text{Bi}$  以外の妨害核種が検出された場合は寄与係数法で補正するか、そのピークを避けて解析する必要がある。

|    | 核種名                | 半減期                       | エネルギー (keV) |            | 放出比 (%) | 備考                 |        |                               |
|----|--------------------|---------------------------|-------------|------------|---------|--------------------|--------|-------------------------------|
| 人工 | Pb(K $\alpha$ 2)   | $^{108m}\text{Ag}$ 127.7y | }           | 72.804     | 6.68    | EC, $\beta^+$ , IT |        |                               |
|    | Pb(K $\alpha$ 1)   |                           |             | 74.969     |         |                    |        |                               |
|    | Bi(K $\alpha$ 1)   |                           |             | 77.108     |         |                    |        |                               |
|    | $^{108m}\text{Ag}$ |                           |             | 79.45      |         |                    |        |                               |
| 人工 | $^{227}\text{Th}$  | }                         | }           | 79.82      | 1.76    |                    |        |                               |
| 人工 | $^{144}\text{Ce}$  |                           |             | 80.1065    | 1.1318  |                    |        |                               |
| 人工 | $^{131}\text{I}$   |                           |             | 8.0401d    | 80.1832 |                    | 2.61   | $\beta^-$                     |
|    | $^{231}\text{Th}$  |                           |             | 25.521h    | 84.212  |                    | 6.55   | $\beta^-$ 親: $^{235}\text{U}$ |
|    | $^{228}\text{Th}$  |                           |             | 1.9131344y | 84.3713 |                    | 1.216  | $\alpha$ 親: $^{232}\text{Th}$ |
|    | Pb(K $\beta$ 1)    |                           |             |            | 84.936  |                    |        |                               |
|    | Bi(K $\beta$ 1)    |                           |             |            | 87.343  |                    |        |                               |
|    | $^{231}\text{Th}$  |                           |             |            | 89.952  |                    | 0.9419 |                               |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$  |                           |             | 10.981d    | 91.1050 |                    | 27.247 | $\beta^-$                     |
|    | $^{234}\text{Th}$  |                           |             |            | 92.802  |                    | 5.43   |                               |
|    | $^{227}\text{Th}$  |                           | 94.02       | 1.24       |         |                    |        |                               |

|    | 核種名                       | 半減期                  | エネルギー (keV)              | 放出比 (%)             | 備考                                                       |
|----|---------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |                      | 423.72 <sub>1</sub>      | 3.07 <sub>21</sub>  |                                                          |
|    | $^{211}\text{Pb}$         |                      | 426.9 <sub>1</sub>       | 1.6 <sub>3</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 427.95 <sub>2</sub>      | 30.1                |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      | 431.9 <sub>4</sub>       | 0.45 <sub>9</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |                      | 432.530 <sub>29</sub>    | 2.72 <sub>15</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                      | 434.00 <sub>10</sub>     | 90.5 <sub>9</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |                      | 437.58 <sub>2</sub>      | 2.0 <sub>2</sub>    |                                                          |
|    | $^{40}\text{K}$ d         |                      | 438.75                   | 0.0                 |                                                          |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |                      | 439.85 <sub>8</sub>      | 1.1 <sub>2</sub>    |                                                          |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          | 8.25 <sub>5</sub> m  | 主要 595.88 <sub>4</sub>   | 91.2 <sub>10</sub>  | $\beta^-$                                                |
| 機器 | $^{74}\text{As}$          | 17.79 <sub>5</sub> d | 主要 595.90 <sub>8</sub>   | 60.2                | EC, $\beta^+$ , $\beta^-$                                |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 主要 600.77 <sub>6</sub>   | 18.1                |                                                          |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                      | 602.41 <sub>20</sub>     | 1.39 <sub>14</sub>  |                                                          |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          |                      | 604.22 <sub>10</sub>     | 2.87 <sub>21</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         |                      | 主要 604.66 <sub>2</sub>   | 97.56 <sub>32</sub> |                                                          |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 606.82 <sub>4</sub>      | 4.9 <sub>4</sub>    |                                                          |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          |                      | 608.40 <sub>5</sub>      | 14.6 <sub>5</sub>   |                                                          |
|    | $^{214}\text{Bi}$         | 19.7m                | 主要 609.31 <sub>10</sub>  | 46.1 <sub>12</sub>  | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$                |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$         |                      | 主要 610.33 <sub>2</sub>   | 5.44 <sub>56</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                      | 主要 614.37 <sub>10</sub>  | 89.7 <sub>31</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |                      | 616.33 <sub>17</sub> D   | 0.82 <sub>19</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | 252.2 <sub>3</sub> d | 620.346 <sub>11</sub>    | 2.78 <sub>5</sub>   | $\beta^-$ , IT                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      | 621.0 <sub>2</sub>       | 2.0 <sub>1</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |                      | 主要 622.2 <sub>3</sub> D  | 9.8 <sub>14</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         |                      | 719.86 <sub>3</sub>      | 0.40 <sub>3</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                      | 721.96 <sub>11</sub>     | ~5.1 <sub>5</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         |                      | 主要 722.78 <sub>4</sub>   | 11.30 <sub>16</sub> |                                                          |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |                      | 722.893 <sub>2</sub>     | 1.8 <sub>0</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                      | 主要 722.95 <sub>8</sub>   | 89.7 <sub>31</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          | 63.98 <sub>6</sub> d | 主要 724.184 <sub>12</sub> | 43.1 <sub>20</sub>  | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                      | 726.7 <sub>5</sub>       | 0.78 <sub>27</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      | 727.1 <sub>2</sub>       | 6.5 <sub>3</sub>    |                                                          |
|    | $^{212}\text{Bi}$         |                      | 主要 727.27 <sub>7</sub>   | 6.3 <sub>2</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ |                      | 729.62 <sub>5</sub>      | 0.69 <sub>13</sub>  |                                                          |

イカの内臓に検出される

|    | 核種名                | 半減期       | エネルギー (keV) |               | 放出比 (%) | 備考                                        |
|----|--------------------|-----------|-------------|---------------|---------|-------------------------------------------|
| 機器 | <sup>74</sup> Ga   | 8.255m    | 主要          | 595.884 )     | 91.210  | $\beta^-$                                 |
| 機器 | <sup>74</sup> As   | 17.795d   | 主要          | 595.908 )     | 60.2    | EC, $\beta^+$ , $\beta^-$                 |
| 人工 | <sup>125</sup> Sb  |           | 主要          | 600.776 )     | 18.1    |                                           |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr   |           |             | 602.4120 )    | 1.3914  |                                           |
| 機器 | <sup>74</sup> Ga   |           |             | 604.2210 )    | 2.8721  |                                           |
| 人工 | <sup>134</sup> Cs  |           | 主要          | 604.662 )     | 97.5632 |                                           |
| 人工 | <sup>125</sup> Sb  |           |             | 606.824 )     | 4.94    |                                           |
| 機器 | <sup>74</sup> Ga   |           |             | 608.405 )     | 14.65   |                                           |
|    | <sup>214</sup> Bi  | 19.7m     | 主要          | 609.31210 )   | 46.112  | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: <sup>226</sup> Ra |
| 人工 | <sup>103</sup> Ru  |           | 主要          | 610.332 )     | 5.4456  |                                           |
| 人工 | <sup>108m</sup> Ag |           | 主要          | 614.3710 )    | 89.731  |                                           |
| 人工 | <sup>106</sup> Ru  |           |             | 616.3317 ) D  | 0.8219  |                                           |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag | 252.23d   |             | 620.34611 )   | 2.785   | $\beta^-$ , IT                            |
| 人工 | <sup>132</sup> I   |           |             | 621.02 )      | 2.01    |                                           |
| 人工 | <sup>106</sup> Ru  |           | 主要          | 622.23 ) D    | 9.814   |                                           |
| 人工 | <sup>124</sup> Sb  | 60.203d   |             | 645.824 )     | 7.2322  | $\beta^-$                                 |
| 人工 | <sup>132</sup> I   |           |             | 650.62 )      | 2.72    |                                           |
| 人工 | <sup>91</sup> Sr   |           |             | 652.33 )      | 2.98    |                                           |
| 人工 | <sup>91</sup> Sr   |           |             | 652.92 )      | 7.611   |                                           |
| 人工 | <sup>91</sup> Sr   |           |             | 653.2 )       | 0.469   |                                           |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag |           | 主要          | 657.74910 )   | 94.41   |                                           |
| 人工 | <sup>97</sup> Nb   |           |             | 657.9210 )    | 98.21   | $\beta^-$ 親: <sup>97</sup> Zr             |
| 人工 | <sup>137</sup> Cs  | 30.17434y | 主要          | 661.63819 ) D | 85.05   | $\beta^-$ 娘: <sup>137m</sup> Ba           |
| 人工 | <sup>143</sup> Ce  |           |             | 664.5510 )    | 5.35    |                                           |
|    | <sup>214</sup> Bi  |           |             | 665.45322 )   | 1.569   |                                           |
| 人工 | <sup>132</sup> I   |           | 主要          | 667.698 )     | 98.71   |                                           |
| 機器 | <sup>63</sup> Zn   | 38.01m    | 主要          | 669.625 )     | 8.44    | $\beta^+$ , EC                            |
| 人工 | <sup>132</sup> I   |           |             | 669.83 )      | 4.98    |                                           |
| 人工 | <sup>132</sup> I   |           |             | 671.63 )      | 5.24    |                                           |
| 人工 | <sup>125</sup> Sb  |           |             | 671.664 )     | 1.71    |                                           |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag |           |             | 677.60211 )   | 10.61   |                                           |

|    | 核種名                       | 半減期                      | エネルギー (keV) |                                      | 放出比 (%)               | 備考                                 |
|----|---------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$         | 3.917d                   | 主要          | 685.75 )                             | 36.1                  | $\beta^-$                          |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |                          |             | 685.80 <sub>35}</sub> )              | 0.71 <sub>13</sub>    |                                    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                          |             | 686.988 <sub>11}</sub> )             | 6.45 <sub>4</sub>     |                                    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                          |             | 690.63 <sub>20}</sub> )              | 0.25 <sub>4</sub>     |                                    |
|    | Unknown                   |                          |             | 693. )                               |                       |                                    |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ | 33.52 <sub>12</sub> d    | 主要          | 695.98 <sub>5}</sub> )               | 2.9 <sub>4</sub>      | IT, $\beta^-$ 娘: $^{129}\text{Te}$ |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                          |             | 699.2 <sub>3}</sub> )                | 0.12 <sub>2</sub>     |                                    |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                          |             | 703.11 <sub>4}</sub> )               | 0.47 <sub>3}</sub>    |                                    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                          |             | 706.670 <sub>13}</sub> )             | 16.3 <sub>0</sub>     |                                    |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          |                          | 主要          | 739.4 <sub>1}</sub> )                | 12.6 <sub>8}</sub>    |                                    |
|    | $^{214}\text{Bi}$ d       |                          |             | 742.50 )                             | 0.0                   |                                    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                          | 主要          | 743.36 <sub>10}</sub> ) <sup>D</sup> | 92.8 <sub>3}</sub>    | $^{97\text{m}}\text{Nb}$           |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                          |             | 744.260 <sub>13}</sub> )             | 4.65 <sub>4</sub>     |                                    |
| 人工 | $^{208}\text{Tl}$         |                          |             | 763.13 <sub>8}</sub> )               | 1.64 <sub>9}</sub>    |                                    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                          |             | 763.928 <sub>13}</sub> )             | 22.3 <sub>1</sub>     |                                    |
| 人工 | $^{95}\text{Nb}$          | 34.97 <sub>3</sub> d     | 主要          | 765.786 <sub>19}</sub> )             | 99.82 <sub>1</sub>    | $\beta^-$ 親: $^{95}\text{Zr}$      |
|    | $^{234\text{m}}\text{Pa}$ | 1.175 <sub>3</sub> m     |             | 766.6 <sub>2}</sub> )                | 0.21 <sub>1</sub>     | $\beta^-$ , IT                     |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                          |             | 768.356 <sub>12}</sub> )             | 4.91 <sub>20}</sub>   |                                    |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                          |             | 771.8 <sub>3}</sub> )                | 1.6 <sub>2}</sub>     |                                    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                          | 主要          | 772.61 <sub>8}</sub> )               | 76.21 <sub>9}</sub>   |                                    |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         | 138.3763 <sub>17</sub> d | 主要          | 801.84 <sub>3}</sub> )               | 8.73 <sub>4</sub>     | $\alpha$ 親: $^{210}\text{Bi}$      |
|    | $^{210}\text{Po}$         | 4.183 <sub>17</sub> m    | 主要          | 803. )                               | 0.00122 <sub>9}</sub> | $\beta^-$                          |
|    | $^{206}\text{Tl}$         |                          |             | 803.3 )                              | 0.0055 <sub>5}</sub>  |                                    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                          |             | 804.53 <sub>10}</sub> )              | 0.65 <sub>7</sub>     |                                    |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                          |             | 806.174 <sub>18}</sub> )             | 1.23 <sub>6}</sub>    |                                    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                          |             | 809.8 <sub>2}</sub> )                | 2.9 <sub>3}</sub>     |                                    |
| 人工 | $^{58}\text{Co}$          |                          | 主要          | 810.755 <sub>33}</sub> )             | 99.44 <sub>2}</sub>   |                                    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                          |             | 812.2 <sub>2}</sub> )                | 5.6 <sub>5}</sub>     |                                    |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |                          | 主要          | 815.85 <sub>7}</sub> )               | 22.4 <sub>7}</sub>    |                                    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                          |             | 818.016 <sub>12}</sub> )             | 7.28 <sub>5}</sub>    |                                    |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$         |                          | 主要          | 818.50 <sub>4}</sub> )               | 99.70 <sub>6}</sub>   |                                    |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          |                          |             | 822.8 <sub>1}</sub> )                | 0.140 <sub>19}</sub>  |                                    |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                          |             | 876.8 <sub>2}</sub> )                | 1.08 <sub>5}</sub>    |                                    |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                          |             | 880.39 <sub>13}</sub> )              | ~0.92 <sub>8}</sub>   |                                    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                          | 主要          | 884.667 <sub>13}</sub> )             | 72.8 <sub>3}</sub>    |                                    |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         |                          |             | 934.061 <sub>14}</sub> )             | 3.19 <sub>14}</sub>   |                                    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                          | 主要          | 937.478 <sub>13}</sub> )             | 34.3 <sub>2}</sub>    |                                    |

|          | 核種名                                                                                                               | 半減期 | エネルギー (keV) |                                                                                                                       | 放出比 (%)                                                                       | 備考 |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 人工<br>人工 | $^{60}\text{Co}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$                                                                     |     | 主要          | 1332.470 <sub>24</sub><br>1334.242 <sub>19</sub>                                                                      | 100.<br>0.1415                                                                |    |
| 人工<br>人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{214}\text{Bi}$<br>$^{136}\text{Cs}$ s                                             |     |             | 1384.270 <sub>13</sub><br>1385.31 <sub>3</sub><br>1388.65 <sub>2</sub>                                                | 24.61<br>0.785<br>0.0                                                         |    |
| 人工       | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ s                                                                                       |     |             | 1421.677 <sub>23</sub>                                                                                                | 0.0                                                                           |    |
| 人工<br>人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{132}\text{I}$ s                                                                   |     |             | 1475.760 <sub>22</sub><br>1479.9 <sub>2</sub>                                                                         | 4.04 <sub>2</sub><br>0.0                                                      |    |
| 人工<br>人工 | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{132}\text{I}$ s<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{214}\text{Bi}$    |     |             | 1496.2 <sub>2</sub><br>1499.7 <sub>4</sub><br>1501.7 <sub>2</sub><br>1505.001 <sub>21</sub><br>1509.228 <sub>17</sub> | 0.98 <sub>13</sub><br>0.0<br>0.547<br>13.2 <sub>1</sub><br>2.19 <sub>11</sub> |    |
| 人工       | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$ s                                                                  |     |             | 1539.0 <sub>5</sub><br>1542.416 <sub>23</sub>                                                                         | 0.054 <sub>30</sub><br>0.0                                                    |    |
| 人工       | $^{110\text{m}}\text{Ag}$                                                                                         |     |             | 1562.266 <sub>22</sub>                                                                                                | 1.19 <sub>2</sub>                                                             |    |
| 人工<br>人工 | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$ s<br>$^{208}\text{Tl}$ d<br>$^{140}\text{La}$<br>$^{214}\text{Bi}$ |     | 主要          | 1588.3 <sub>2</sub><br>1591.337 <sub>26</sub><br>1592.5<br>1596.49 <sub>24</sub><br>1599.31 <sub>6</sub>              | 3.5 <sub>5</sub><br>0.0<br>0.0<br>95.5 <sub>3</sub><br>0.33 <sub>3</sub>      |    |
| 人工       | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ s                                                                                       |     |             | 1822.145 <sub>26</sub>                                                                                                | 0.0                                                                           |    |
| 人工<br>人工 | $^{132}\text{I}$ s<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$ s                                                                 |     |             | 2039.76 <sub>9</sub><br>2042.019 <sub>23</sub>                                                                        | 0.0<br>0.0                                                                    |    |

|    | 核種名                       | 半減期       | エネルギー (keV) |            | 放出比 (%) | 備考                                                       |
|----|---------------------------|-----------|-------------|------------|---------|----------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         | 60.203d   |             | 645.824    | 7.2322  | $\beta^-$                                                |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |           |             | 650.62     | 2.72    |                                                          |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |           |             | 652.33     | 2.98    |                                                          |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |           |             | 652.92     | 7.611   |                                                          |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |           |             | 653.2      | 0.469   |                                                          |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |           | 主要          | 657.74910  | 94.41   |                                                          |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$          |           |             | 657.9210   | 98.21   | $\beta^-$ 親: $^{97}\text{Zr}$                            |
| 人工 | $^{137}\text{Cs}$         | 30.17434y | 主要          | 661.63819D | 85.05   | $\beta^-$ 娘: $^{137\text{m}}\text{Ba}$                   |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |           |             | 664.5510   | 5.35    |                                                          |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |           |             | 665.45322  | 1.569   |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |           | 主要          | 667.698    | 98.71   |                                                          |
| 機器 | $^{63}\text{Zn}$          | 38.01m    | 主要          | 669.625    | 8.44    | $\beta^+$ , EC                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |           |             | 669.83     | 4.98    |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |           |             | 671.63     | 5.24    |                                                          |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |           |             | 671.664    | 1.71    |                                                          |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         |           |             | 719.863    | 0.403   |                                                          |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |           |             | 721.9611   | ~5.15   |                                                          |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         |           | 主要          | 722.784    | 11.3016 |                                                          |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |           |             | 722.8932   | 1.80    |                                                          |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |           | 主要          | 722.958    | 89.731  |                                                          |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          | 63.986d   | 主要          | 724.18412  | 43.120  | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |           |             | 726.75     | 0.7827  |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |           |             | 727.12     | 6.53    |                                                          |
|    | $^{212}\text{Bi}$         |           | 主要          | 727.277    | 6.32    |                                                          |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ |           |             | 729.625    | 0.6913  |                                                          |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         |           |             | 1691.024   | 49.05   |                                                          |

|    | 核種名                       | 半減期                  | エネルギー (keV)            | 放出比 (%)             | 備考                                        |
|----|---------------------------|----------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         | 2.71 <sub>2</sub> y  | 176.29 <sub>2</sub>    | 6.8 <sub>5</sub>    | $\beta^-$ 娘: $^{125\text{m}}\text{Te}$    |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$         |                      | 176.55 <sub>5</sub>    | 13.6 <sub>2</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |                      | 177.210 <sub>2</sub>   | 0.26 <sub>0</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          |                      | 181.07 <sub>5</sub>    | 6.29 <sub>83</sub>  |                                           |
|    | $^{235}\text{U}$          |                      | 185.715 <sub>5</sub>   | 54.                 |                                           |
|    | $^{226}\text{Ra}$         | 1599.7y              | 186.180 <sub>4</sub>   | 3.3 <sub>1</sub>    | $\alpha$ 娘: $^{214}\text{Pb}$             |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 380.51 <sub>4</sub>    | 1.5 <sub>1</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |                      | 423.72 <sub>1</sub>    | 3.07 <sub>21</sub>  |                                           |
|    | $^{211}\text{Pb}$         |                      | 426.9 <sub>1</sub>     | 1.6 <sub>3</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 427.95 <sub>2</sub>    | 30.1                |                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      | 431.9 <sub>4</sub>     | 0.45 <sub>9</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |                      | 432.530 <sub>29</sub>  | 2.72 <sub>15</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                      | 434.00 <sub>10</sub>   | 90.5 <sub>9</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |                      | 437.58 <sub>2</sub>    | 2.0 <sub>2</sub>    |                                           |
|    | $^{40}\text{K}$ d         |                      | 438.75                 | 0.0                 |                                           |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |                      | 439.85 <sub>8</sub>    | 1.1 <sub>2</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{129}\text{Te}$         | 69.5 <sub>5</sub> m  | 459.60 <sub>5</sub>    | 7.1 <sub>7</sub>    | $\beta^-$ 親: $^{129\text{m}}\text{Te}$    |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                      | 463.3 <sub>3</sub>     | 4.6 <sub>5</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 463.51 <sub>4</sub>    | 11.1                |                                           |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          | 8.25 <sub>5</sub> m  | 595.88 <sub>4</sub>    | 91.2 <sub>10</sub>  | $\beta^-$                                 |
| 機器 | $^{74}\text{As}$          | 17.79 <sub>5</sub> d | 595.90 <sub>8</sub>    | 60.2                | EC, $\beta^+$ , $\beta^-$                 |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 600.77 <sub>6</sub>    | 18.1                |                                           |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                      | 602.412 <sub>0</sub>   | 1.39 <sub>14</sub>  |                                           |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          |                      | 604.22 <sub>10</sub>   | 2.87 <sub>21</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         |                      | 604.66 <sub>2</sub>    | 97.56 <sub>32</sub> |                                           |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 606.82 <sub>4</sub>    | 4.9 <sub>4</sub>    |                                           |
| 機器 | $^{74}\text{Ga}$          |                      | 608.40 <sub>5</sub>    | 14.6 <sub>5</sub>   |                                           |
|    | $^{214}\text{Bi}$         | 19.7m                | 609.312 <sub>10</sub>  | 46.1 <sub>12</sub>  | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$ |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$         |                      | 610.33 <sub>2</sub>    | 5.44 <sub>56</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                      | 614.37 <sub>10</sub>   | 89.7 <sub>31</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |                      | 616.33 <sub>17</sub> D | 0.82 <sub>19</sub>  |                                           |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | 252.2 <sub>3</sub> d | 620.346 <sub>11</sub>  | 2.78 <sub>5</sub>   | $\beta^-$ , IT                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      | 621.0 <sub>2</sub>     | 2.0 <sub>1</sub>    |                                           |
| 人工 | $^{106}\text{Ru}$         |                      | 622.2 <sub>3</sub> D   | 9.8 <sub>14</sub>   |                                           |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      | 636.15 <sub>4</sub>    | 12.1                |                                           |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |                      | 636.973 <sub>2</sub>   | 7.2 <sub>1</sub>    |                                           |

|    | 核種名                       | 半減期                  | エネルギー (keV)            |                       | 放出比 (%)                 | 備考             |                               |                                        |
|----|---------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------|----------------------------------------|
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         | 60.20 <sub>3</sub> d |                        | 645.82 <sub>4</sub>   | 7.23 <sub>22</sub>      | $\beta^-$      |                               |                                        |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      |                        | 650.6 <sub>2</sub>    | 2.7 <sub>2</sub>        |                |                               |                                        |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                      |                        | 652.3 <sub>3</sub>    | 2.9 <sub>8</sub>        |                |                               |                                        |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                      |                        | 652.9 <sub>2</sub>    | 7.6 <sub>11</sub>       |                |                               |                                        |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                      |                        | 653.2                 | 0.46 <sub>9</sub>       |                |                               |                                        |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                      | 主要                     | 657.749 <sub>10</sub> | 94.4 <sub>1</sub>       |                |                               |                                        |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$          |                      |                        | 657.92 <sub>10</sub>  | 98.2 <sub>1</sub>       |                | $\beta^-$ 親: $^{97}\text{Zr}$ |                                        |
| 人工 | $^{137}\text{Cs}$         |                      | 30.174 <sub>34</sub> y | 主要                    | 661.638 <sub>19D}</sub> |                | 85.0 <sub>5</sub>             | $\beta^-$ 娘: $^{137\text{m}}\text{Ba}$ |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                      |                        |                       | 664.55 <sub>10</sub>    |                | 5.3 <sub>5</sub>              |                                        |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                      |                        |                       | 665.453 <sub>22</sub>   |                | 1.56 <sub>9</sub>             |                                        |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          | 主要                   |                        | 667.69 <sub>8</sub>   | 98.7 <sub>1</sub>       |                |                               |                                        |
| 機器 | $^{63}\text{Zn}$          | 38.0 <sub>1</sub> m  | 主要                     | 669.62 <sub>5</sub>   | 8.4 <sub>4</sub>        | $\beta^+$ , EC |                               |                                        |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      |                        | 669.8 <sub>3</sub>    | 4.9 <sub>8</sub>        |                |                               |                                        |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                      |                        | 671.6 <sub>3</sub>    | 5.2 <sub>4</sub>        |                |                               |                                        |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                      |                        | 671.66 <sub>4</sub>   | 1.7 <sub>1</sub>        |                |                               |                                        |
|    |                           |                      |                        |                       |                         |                |                               |                                        |

|    | 核種名                       | 半減期      | エネルギー (keV) | 放出比 (%) | 備考                                                    |
|----|---------------------------|----------|-------------|---------|-------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$         |          | 473.04      | 25.1    |                                                       |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         | 2.0625y  | 475.355     | 1.46548 | $\beta^-$ , EC                                        |
|    | $^7\text{Be}$             | 53.292d  | 477.59312   | 10.358  | EC                                                    |
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$         | 3.917d   | 685.75      | 36.1    | $\beta^-$                                             |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |          | 685.8035    | 0.7113  |                                                       |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |          | 686.9881    | 6.454   |                                                       |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |          | 690.6328    | 0.254   |                                                       |
|    | Unknown                   |          | 693.        |         |                                                       |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ | 33.5212d | 695.985     | 2.94    | IT, $\beta^-$ 娘: $^{129}\text{I}$ , $^{129}\text{Te}$ |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |          | 699.23      | 0.122   |                                                       |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |          | 703.114     | 0.473   |                                                       |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |          | 706.67013   | 16.38   |                                                       |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          |          | 777.81      | 4.4053  |                                                       |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |          | 780.23      | 1.236   |                                                       |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |          | 782.01      | 0.5111  |                                                       |
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$         |          | 783.75      | 15.1    |                                                       |
|    | $^{212}\text{Bi}$         |          | 785.467     | 1.01    |                                                       |
|    | $^{214}\text{Pb}$         |          | 785.9528    | 0.869   |                                                       |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |          | 786.14      | 0.3111  |                                                       |

$^{129m}\text{T e}$

|    | 核種名                | 半減期                   | エネルギー (keV) |                         | 放出比 (%)             | 備考                                                |
|----|--------------------|-----------------------|-------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------------------------|
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$  | 3.917d                | 主要          | 685.75 )                | 36.1                | $\beta^-$                                         |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$  |                       |             | 685.80 <sub>35</sub> )  | 0.71 <sub>13</sub>  |                                                   |
| 人工 | $^{110m}\text{Ag}$ |                       |             | 686.988 <sub>11</sub> ) | 6.45 <sub>4</sub>   |                                                   |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                       |             | 690.63 <sub>20</sub> )  | 0.25 <sub>4</sub>   |                                                   |
|    | Unknown            |                       |             | 693. )                  |                     |                                                   |
| 人工 | $^{129m}\text{Te}$ | 33.52 <sub>12</sub> d | 主要          | 695.98 <sub>5</sub> )   | 2.9 <sub>4</sub>    | IT, $\beta^-$ 娘: $^{129}\text{Te}$                |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$   |                       |             | 699.2 <sub>3</sub> )    | 0.12 <sub>2</sub>   |                                                   |
|    | $^{214}\text{Bi}$  |                       |             | 703.11 <sub>4</sub> )   | 0.47 <sub>3</sub>   |                                                   |
| 人工 | $^{110m}\text{Ag}$ |                       |             | 706.670 <sub>13</sub> ) | 16.3 <sub>0</sub>   |                                                   |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$  | 63.986d               | 主要          | 719.86 <sub>3</sub> )   | 0.40 <sub>3</sub>   | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95m}\text{Nb}$ |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$  |                       |             | 721.96 <sub>11</sub> )  | ~5.1 <sub>5</sub>   |                                                   |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$  |                       |             | 722.78 <sub>4</sub> )   | 11.30 <sub>16</sub> |                                                   |
| 人工 | $^{131}\text{I}$   |                       |             | 722.893 <sub>2</sub> )  | 1.8 <sub>0</sub>    |                                                   |
| 人工 | $^{108m}\text{Ag}$ |                       |             | 722.95 <sub>8</sub> )   | 89.7 <sub>31</sub>  |                                                   |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$   |                       |             | 724.184 <sub>12</sub> ) | 43.12 <sub>0</sub>  |                                                   |
|    | $^{228}\text{Ac}$  |                       |             | 726.7 <sub>5</sub> )    | 0.78 <sub>27</sub>  |                                                   |
| 人工 | $^{132}\text{I}$   |                       |             | 727.1 <sub>2</sub> )    | 6.5 <sub>3</sub>    |                                                   |
|    | $^{212}\text{Bi}$  |                       |             | 727.27 <sub>7</sub> )   | 6.3 <sub>2</sub>    |                                                   |
| 人工 | $^{129m}\text{Te}$ |                       |             | 729.62 <sub>5</sub> )   | 0.69 <sub>13</sub>  |                                                   |

$^{129}\text{T e}$

|    | 核種名                 | 半減期    | エネルギー (keV) |                         | 放出比 (%)            | 備考                              |
|----|---------------------|--------|-------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------|
| 人工 | $^{129}\text{Te}$   | 69.55m | 主要          | 459.60 <sub>5</sub> )   | 7.1 <sub>7</sub>   | $\beta^-$ 親: $^{129m}\text{Te}$ |
|    | $^{228}\text{Ac}$   |        |             | 463.3 <sub>3</sub> )    | 4.6 <sub>5</sub>   |                                 |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$   |        |             | 463.51 <sub>4</sub> )   | 11.1               |                                 |
| 人工 | $^{140}\text{La}$   |        | 主要          | 487.029 <sub>19</sub> ) | 43.0 <sub>16</sub> |                                 |
| 人工 | $^{129}\text{Te}$   |        |             | 487.39 <sub>5</sub> )   | 1.3 <sub>1</sub>   |                                 |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$   |        |             | 490.36 <sub>7</sub> )   | ~2.0 <sub>2</sub>  |                                 |
| 人工 | $^{129}\text{Te}$   |        |             | 1083.99 <sub>5</sub> )  | 0.56 <sub>8</sub>  |                                 |
| 人工 | $^{140}\text{La e}$ |        |             | 1085.4 <sub>9</sub> )   | 0.0                |                                 |

強く出たときは2次以降のピークにも注意する

|    | 核種名                | 半減期        | エネルギー (keV)    | 放出比 (%) | 備考                                        |        |
|----|--------------------|------------|----------------|---------|-------------------------------------------|--------|
| 人工 | Pb(K $\alpha$ 2)   | 127.7y     | 72.804 )       | 6.68    | EC, $\beta^+$ , IT                        |        |
|    | Pb(K $\alpha$ 1)   |            | 74.969 )       |         |                                           |        |
|    | Bi(K $\alpha$ 1)   |            | 77.108 )       |         |                                           |        |
|    | $^{108m}\text{Ag}$ |            | 79.45 )        |         |                                           |        |
|    | $^{227}\text{Th}$  |            | 79.82 )        |         |                                           |        |
| 人工 | $^{144}\text{Ce}$  | 8.0401d    | 80.1065 )      | 1.1318  | $\beta^-$                                 |        |
| 人工 | $^{131}\text{I}$   |            | 80.1832 )      | 2.61    |                                           |        |
|    | $^{231}\text{Th}$  | 25.521h    | 主要 84.212 )    | 6.55    | $\beta^-$ 親: $^{235}\text{U}$             |        |
|    | $^{228}\text{Th}$  | 1.9131344y | 主要 84.3713 )   | 1.216   | $\alpha$ 親: $^{232}\text{Th}$             |        |
|    | Pb(K $\beta$ 1)    | 10.981d    | 84.936 )       | 0.9419  | $\beta^-$                                 |        |
|    | Bi(K $\beta$ 1)    |            | 87.343 )       |         |                                           |        |
|    | $^{231}\text{Th}$  |            | 89.952 )       |         |                                           |        |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$  |            | 主要 91.105016 ) |         |                                           | 27.247 |
|    | $^{234}\text{Th}$  |            | 主要 92.802 )    |         |                                           | 5.43   |
|    | $^{227}\text{Th}$  |            | 94.02 )        |         |                                           | 1.24   |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$  | 2.712y     | 176.292 )      | 6.85    | $\beta^-$ 娘: $^{125m}\text{Te}$           |        |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$  | -----      | 176.555 )      | 13.62   | -----                                     |        |
| 人工 | $^{131}\text{I}$   |            | 177.2102 )     | 0.268   |                                           |        |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$   |            | 主要 181.075 )   | 6.2983  |                                           |        |
|    | $^{235}\text{U}$   | 1599.7y    | 主要 185.7155 )  | 54.     | $\alpha$ 娘: $^{214}\text{Pb}$             |        |
|    | $^{226}\text{Ra}$  |            | 主要 186.1804 )  | 3.31    |                                           |        |
| 人工 | $^{231}\text{Pa}$  | 3.2761104y | 主要 283.566 )   | 1.73    | $\alpha$ 娘: $^{227}\text{Ac}$             |        |
| 人工 | $^{131}\text{I}$   | 60.60043m  | 284.2985 )     | 6.01    | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$ |        |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$  |            | 285.5 )        | 0.762   |                                           |        |
|    | $^{227}\text{Th}$  |            | 286.22 )       | 1.44    |                                           |        |
|    | $^{212}\text{Bi}$  |            | 288.077 )      | 0.323   |                                           |        |
| 人工 | $^{132}\text{I}$   | -----      | 363.54 )       | 0.4918  | -----                                     |        |
| 人工 | $^{131}\text{I}$   |            | 主要 364.4805 )  | 81.1    |                                           |        |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$   |            | 366.4518 )     | 1.3516  |                                           |        |

|    | 核種名                       | 半減期     | エネルギー (keV) |             | 放出比 (%) | 備考                                                       |
|----|---------------------------|---------|-------------|-------------|---------|----------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |         |             | 636.154 )   | 12.1    |                                                          |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |         |             | 636.9732 )  | 7.21    |                                                          |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         |         |             | 719.863 )   | 0.403   |                                                          |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |         |             | 721.9611 )  | ~5.15   |                                                          |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         |         | 主要          | 722.784 )   | 11.3016 |                                                          |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |         |             | 722.8932 )  | 1.80    |                                                          |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |         | 主要          | 722.958 )   | 89.731  |                                                          |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          | 63.986d | 主要          | 724.18412 ) | 43.120  | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |         |             | 726.75 )    | 0.7827  |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |         |             | 727.12 )    | 6.53    |                                                          |
|    | $^{212}\text{Bi}$         |         | 主要          | 727.277 )   | 6.32    |                                                          |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ |         |             | 729.625 )   | 0.6913  |                                                          |

- 1 : 半減期は 2時間 17分で、核分裂生成物であるが、普通は親核種  $^{132}\text{Te}$  と平衡になっている。
- 2 : 同定について
- ・  $^{132}\text{Te}$  が親であり、同時にでる。
  - ・ 668keV のピークは 3 段の階段のようになる。
  - ・ 522.65keV のピークは干渉が無く、比較的強い。
  - ・ 核実験等の直後に検出される。この核種はそのようなことがなければ検出される可能性はなく、また同時に検出される核種も決まっているとって差し支え無いので同定を誤らないこと。
  - ・ 同定に疑問があるのなら、何時間か間を空けて再測定し、半減期を確認する事が出来る。
- 3 : 妨害について
- この核種が検出されるような場合に共存する可能性のある核種について述べる。
- ・  $^{141}\text{Ce}$  を妨害する。 $^{141}\text{Ce}$  はピークが一本しかないので注意する。
  - ・  $^{58}\text{Co}$  を妨害する。 $^{58}\text{Co}$  はピークが一本しかないので注意する(但し  $^{58}\text{Co}$  は核分裂生成物ではなくて誘導放射能である)。
  - ・  $^{131}\text{I}$  の主ピークを妨害する。
  - ・  $^{125}\text{Sb}$  の主ピーク (427.95) を妨害する。
  - ・  $^{140}\text{Ba}$  の主ピーク (537.27) を妨害する。
  - ・  $^{106}\text{Ru}$  の主ピーク (622.2) を妨害する。
  - ・  $^{97}\text{Zr}$  の主要なピーク (507.63) を妨害する。
  - ・  $^{147}\text{Nd}$  の主要なピーク (531.01) を妨害する。
  - ・  $^{95}\text{Zr}$  の主要なピーク (724.184) を妨害する。
  - ・  $^{60}\text{Co}$  の主要なピーク (1173.210) を妨害する。
  - ・  $^{59}\text{Fe}$  の主要なピーク (1291.564) を妨害する。
- ・ 主要なピーク (954.55) が  $^{140}\text{La}$  から妨害される可能性がある。

|    | 核種名                      | 半減期      | エネルギー (keV) | 放出比 (%) | 備考                                |
|----|--------------------------|----------|-------------|---------|-----------------------------------|
| 機器 | $^{75}\text{mGe}$        | 47.75s   | 主要 139.683  | 39.2    | IT, $\beta^-$                     |
| 人工 | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | 6.0072h  | 主要 140.5116 | 89.02   | IT, $\beta^-$ 親: $^{99}\text{Mo}$ |
| 人工 | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ |          | 142.633     | 6.43    |                                   |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$         | 44.563d  | 142.6484    | 1.024   | $\beta^-$                         |
|    | $^{235}\text{U}$         |          | 主要 143.762  | 11.1    |                                   |
|    | $^{223}\text{Ra}$        |          | 144.3       | 3.3422  |                                   |
| 人工 | $^{141}\text{Ce}$        | 32.551d  | 主要 145.444  | 48.44   | $\beta^-$                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$         | 2.28464h | 147.21      | 0.242   | $\beta^-$ 親: $^{132}\text{Te}$    |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$         |          | 254.1520    | 1.2514  |                                   |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$        |          | 254.4       | 0.111   |                                   |
| 人工 | $^{132}\text{I}$         |          | 254.82      | 0.193   |                                   |
|    | $^{227}\text{Th}$        |          | 256.32      | 6.320   |                                   |

|                                                                      | 核種名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 半減期                                                                                                   | エネルギー (keV)                                                                      | 放出比 (%)                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 備考                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 人工<br>機器<br>人工                                                       | $^{132}\text{I}$<br>$^{75}\text{Ge}$<br>$^{93}\text{Y}$<br>$^{223}\text{Ra}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{219}\text{Rn}$<br>$^{97}\text{Zr}$<br>$^{136}\text{Cs}$<br>$^{147}\text{Nd}$<br>$^{208}\text{Tl}$<br>$^{239}\text{Np}$                                                                                        | 10.25 <sub>1</sub> h<br><br><br><br><br>3.96 <sub>1</sub> s<br><br><br><br><br>3.0527 <sub>33</sub> m | 主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要                                     | 262.7 <sub>1</sub><br>264.6 <sub>1</sub><br>266.9 <sub>1</sub><br>269.6<br>270.2 <sub>3</sub><br>271.20 <sub>5</sub><br>272.27 <sub>20</sub><br>273.65 <sub>4</sub><br>275.42 <sub>2</sub><br>277.4 <sub>3</sub><br>277.60                                                                 | 1.44 <sub>9</sub><br>11.1 <sub>11</sub><br>6.8 <sub>15</sub><br>14.0 <sub>3</sub><br>3.6 <sub>6</sub><br>10.1<br>0.25 <sub>4</sub><br>12.7 <sub>2</sub><br>0.82 <sub>18</sub><br>6.8 <sub>3</sub><br>14.5 <sub>4</sub>                                                                                   | $\beta^-$<br><br><br><br><br>$\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$<br><br><br><br>$\beta^-$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工 | $^{239}\text{Np}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{147}\text{Nd}$<br>$^{51}\text{Cr}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{223}\text{Ra}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{140}\text{La}$<br>$^{231}\text{Pa}$<br>$^{227}\text{Th}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{239}\text{Np}$<br>$^{223}\text{Ra}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{136}\text{Cs}$ | 27.70 <sub>16</sub> d<br><br>40.27 <sub>5</sub> h                                                     | 主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要 | 315.9<br>316.5 <sub>4</sub><br>319.4 <sub>13</sub><br>320.07 <sub>61</sub><br>321.9 <sub>4</sub><br>324.1<br>328.3 <sub>4</sub><br>328.76 <sub>812</sub><br>329.89 <sub>6</sub><br>329.9 <sub>2</sub><br>332.9 <sub>4</sub><br>334.3<br>338.6<br>338.7 <sub>4</sub><br>340.57 <sub>5</sub> | 1.52 <sub>5</sub><br>0.16 <sub>4</sub><br>2.0 <sub>3</sub><br>10.2 <sub>6</sub><br>0.22 <sub>3</sub><br>4.12 <sub>26</sub><br>3.1 <sub>4</sub><br>18.5 <sub>6</sub><br>1.4 <sub>4</sub><br>2.4 <sub>8</sub><br>0.35 <sub>5</sub><br>1.95 <sub>7</sub><br>2.96 <sub>20</sub><br>12.2<br>46.8 <sub>5</sub> | EC<br><br><br><br>$\beta^-$ 親: $^{140}\text{Ba}$                                                         |
| 人工<br>人工<br>人工                                                       | $^{132}\text{I}$<br>$^{131}\text{I}$<br>$^{99}\text{Mo}$                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                       | 主要<br>主要<br>主要                                                                   | 363.5 <sub>4</sub><br>364.48 <sub>05</sub><br>366.45 <sub>10</sub>                                                                                                                                                                                                                         | 0.49 <sub>10</sub><br>81.1<br>1.35 <sub>16</sub>                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                          |
| 人工                                                                   | $^{132}\text{I}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                       |                                                                                  | 387.8 <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.17 <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                          |
| 人工                                                                   | $^{132}\text{I}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                       |                                                                                  | 416.8 <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.46 <sub>9</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                          |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工                         | $^{140}\text{Ba}$<br>$^{211}\text{Pb}$<br>$^{125}\text{Sb}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{140}\text{La}$<br>$^{108\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{140}\text{Ba}$<br>$^{40}\text{K}$<br>$^{147}\text{Nd}$                                                                                                                        |                                                                                                       | 主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要                                     | 423.72 <sub>1</sub><br>426.9 <sub>1</sub><br>427.95 <sub>2</sub><br>431.9 <sub>4</sub><br>432.53 <sub>029</sub><br>434.00 <sub>10</sub><br>437.58 <sub>2</sub><br>438.75<br>439.85 <sub>8</sub>                                                                                            | 3.07 <sub>21</sub><br>1.6 <sub>3</sub><br>30.1<br>0.45 <sub>9</sub><br>2.72 <sub>15</sub><br>90.5 <sub>9</sub><br>2.0 <sub>2</sub><br>0.0<br>1.1 <sub>2</sub>                                                                                                                                            |                                                                                                          |

|                                                                                  | 核種名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 半減期                                                   | エネルギー (keV)                                                                | 放出比 (%)                                                                                                                                                                     | 備考                                                                                                                                       |                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 人工                                                                               | $^{223}\text{Ra}$<br>$^{132}\text{I}$                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                       | 445.5<br>446.04                                                            | 1.5418<br>0.678                                                                                                                                                             |                                                                                                                                          |                                                                                                                                           |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工                                                             | $^{132}\text{I}$<br>$^{97}\text{Zr}$<br>$^{208}\text{Tl}$<br>Annih<br>$^{106}\text{Ru}$<br>$^{97}\text{Zr}$                                                                                                                                                                                                                       | 366.58d                                               | 主要<br>505.9013<br>507.6310<br>510.72320<br>511.<br>511.8015 D<br>513.3820  | 5.02<br>5.0653<br>21.69<br>0.0<br>19.1<br>0.61                                                                                                                              | $\beta^-$ 娘: $^{106}\text{Rh}$                                                                                                           |                                                                                                                                           |
| 人工                                                                               | $^{132}\text{I}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                       | 522.659                                                                    | 16.16                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                          |                                                                                                                                           |
| 人工<br>人工<br>人工                                                                   | $^{147}\text{Nd}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{140}\text{Ba}$                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                       | 主要<br>531.017<br>535.54<br>主要<br>537.272                                   | 12.02<br>0.528<br>23.65                                                                                                                                                     |                                                                                                                                          |                                                                                                                                           |
| 人工                                                                               | $^{132}\text{I}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                       | 547.12                                                                     | 1.259                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                          |                                                                                                                                           |
| 機器<br>機器<br>人工<br>人工<br>機器<br>人工<br>人工<br>機器<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工 | $^{74}\text{Ga}$<br>$^{74}\text{As}$<br>$^{125}\text{Sb}$<br>$^{97}\text{Zr}$<br>$^{74}\text{Ga}$<br>$^{134}\text{Cs}$<br>$^{125}\text{Sb}$<br>$^{74}\text{Ga}$<br>$^{214}\text{Bi}$<br>$^{103}\text{Ru}$<br>$^{108\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{106}\text{Ru}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{106}\text{Ru}$ | 8.255m<br>17.795d<br><br><br><br>19.7m<br><br>252.23d | 主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要 | 595.884<br>595.908<br>600.776<br>602.4120<br>604.2210<br>604.662<br>606.824<br>608.405<br>609.31210<br>610.332<br>614.3710<br>616.3317 D<br>620.34611<br>621.02<br>622.23 D | 91.210<br>60.2<br>18.1<br>1.3914<br>2.8721<br>97.5632<br>4.94<br>14.65<br>46.112<br>5.4456<br>89.731<br>0.8219<br>2.785<br>2.01<br>9.814 | $\beta^-$<br>EC, $\beta^+$ , $\beta^-$<br><br><br><br><br><br>$\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$<br><br><br><br><br>$\beta^-$ , IT |
| 人工                                                                               | $^{132}\text{I}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                       | 630.229                                                                    | 13.76                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                          |                                                                                                                                           |

|    | 核種名                       | 半減期                                          | エネルギー (keV)            |                        | 放出比 (%)                 | 備考                                                       |                   |                                                                         |
|----|---------------------------|----------------------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         | 60.20 <sub>3</sub> d                         |                        | 645.82 <sub>4</sub>    | 7.23 <sub>22</sub>      | $\beta^-$                                                |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                              |                        | 650.6 <sub>2</sub>     | 2.7 <sub>2</sub>        |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                                              |                        | 652.3 <sub>3</sub>     | 2.9 <sub>8</sub>        |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                                              |                        | 652.9 <sub>2</sub>     | 7.6 <sub>11</sub>       |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                                              |                        | 653.2                  | 0.46 <sub>9</sub>       |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                                              | 主要                     | 657.749 <sub>10</sub>  | 94.4 <sub>1</sub>       |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$          |                                              |                        | 657.92 <sub>10</sub>   | 98.2 <sub>1</sub>       |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{137}\text{Cs}$         |                                              | 30.174 <sub>34</sub> y | 主要                     | 661.638 <sub>19D}</sub> |                                                          | 85.0 <sub>5</sub> | $\beta^-$ 親: $^{97}\text{Zr}$<br>$\beta^-$ 娘: $^{137\text{m}}\text{Ba}$ |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                                              |                        |                        | 664.55 <sub>10</sub>    |                                                          | 5.3 <sub>5</sub>  |                                                                         |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                                              |                        |                        | 665.453 <sub>22}</sub>  |                                                          | 1.56 <sub>9</sub> |                                                                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          | 主要                                           |                        | 667.69 <sub>8</sub>    | 98.7 <sub>1</sub>       |                                                          |                   |                                                                         |
| 機器 | $^{63}\text{Zn}$          | 38.0 <sub>1</sub> m                          | 主要                     | 669.62 <sub>5</sub>    | 8.4 <sub>4</sub>        | $\beta^+$ , EC                                           |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                              |                        | 669.8 <sub>3</sub>     | 4.9 <sub>8</sub>        |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                              |                        | 671.6 <sub>3</sub>     | 5.2 <sub>4</sub>        |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                                              |                        | 671.66 <sub>4</sub>    | 1.7 <sub>1</sub>        |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         | 63.98 <sub>6</sub> d                         |                        | 719.86 <sub>3</sub>    | 0.40 <sub>3</sub>       | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                                              |                        | 721.96 <sub>11</sub>   | ~5.1 <sub>5</sub>       |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         |                                              | 主要                     | 722.78 <sub>4</sub>    | 11.30 <sub>16}</sub>    |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |                                              |                        | 722.893 <sub>2}</sub>  | 1.8 <sub>0</sub>        |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                                              | 主要                     | 722.95 <sub>8</sub>    | 89.7 <sub>31}</sub>     |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          |                                              | 主要                     | 724.184 <sub>12}</sub> | 43.1 <sub>20</sub>      |                                                          |                   |                                                                         |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                                              |                        | 726.7 <sub>5</sub>     | 0.78 <sub>27}</sub>     |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                              |                        | 727.1 <sub>2</sub>     | 6.5 <sub>3</sub>        |                                                          |                   |                                                                         |
|    | $^{212}\text{Bi}$         |                                              | 主要                     | 727.27 <sub>7</sub>    | 6.3 <sub>2</sub>        |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ |                                              |                        | 729.62 <sub>5</sub>    | 0.69 <sub>13}</sub>     |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{208}\text{Tl}$         | 34.97 <sub>3</sub> d<br>1.175 <sub>3</sub> m |                        | 763.13 <sub>8</sub>    | 1.64 <sub>9</sub>       | $\beta^-$ 親: $^{95}\text{Zr}$<br>$\beta^-$ , IT          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                                              |                        | 763.928 <sub>13}</sub> | 22.3 <sub>1</sub>       |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{95}\text{Nb}$          |                                              | 主要                     | 765.786 <sub>19}</sub> | 99.8 <sub>21</sub>      |                                                          |                   |                                                                         |
|    | $^{234\text{m}}\text{Pa}$ |                                              |                        | 766.6 <sub>2</sub>     | 0.21 <sub>1</sub>       |                                                          |                   |                                                                         |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                                              |                        | 768.356 <sub>12}</sub> | 4.91 <sub>20}</sub>     |                                                          |                   |                                                                         |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                                              |                        | 771.8 <sub>3</sub>     | 1.6 <sub>2</sub>        |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                              | 主要                     | 772.61 <sub>8</sub>    | 76.2 <sub>19}</sub>     |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          |                                              |                        | 777.8 <sub>1</sub>     | 4.40 <sub>53}</sub>     |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                              |                        | 780.2 <sub>3</sub>     | 1.23 <sub>6</sub>       |                                                          |                   |                                                                         |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                                              |                        | 782.0 <sub>1</sub>     | 0.51 <sub>11}</sub>     |                                                          |                   |                                                                         |
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$         |                                              |                        | 783.7 <sub>5</sub>     | 15.1                    |                                                          |                   |                                                                         |
|    | $^{212}\text{Bi}$         |                                              |                        | 785.46 <sub>7</sub>    | 1.0 <sub>1</sub>        |                                                          |                   |                                                                         |
|    | $^{214}\text{Pb}$         |                                              |                        | 785.95 <sub>20}</sub>  | 0.86 <sub>9</sub>       |                                                          |                   |                                                                         |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                                              |                        | 786.1 <sub>4</sub>     | 0.31 <sub>11}</sub>     |                                                          |                   |                                                                         |

|    | 核種名                        | 半減期                                                                     | エネルギー (keV)         |                        | 放出比 (%)              | 備考                                         |
|----|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------------------|
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$          | 138.3763 <sub>17</sub> <sup>d</sup><br>4.183 <sub>17</sub> <sup>m</sup> | 主要                  | 801.84 <sub>3</sub>    | 8.73 <sub>4</sub>    | $\alpha$ 親: $^{210}\text{Bi}$<br>$\beta^-$ |
|    | $^{210}\text{Po}$          |                                                                         |                     | 803.                   | 0.00122 <sub>9</sub> |                                            |
|    | $^{206}\text{Tl}$          |                                                                         |                     | 803.3                  | 0.0055 <sub>5</sub>  |                                            |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$           |                                                                         |                     | 804.53 <sub>10}</sub>  | 0.65 <sub>7</sub>    |                                            |
|    | $^{214}\text{Bi}$          |                                                                         |                     | 806.174 <sub>18}</sub> | 1.23 <sub>6</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         |                     | 809.8 <sub>2</sub>     | 2.9 <sub>3</sub>     |                                            |
| 人工 | $^{58}\text{Co}$           |                                                                         |                     | 810.755 <sub>33}</sub> | 99.44 <sub>2</sub>   |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         |                     | 812.2 <sub>2</sub>     | 5.6 <sub>5</sub>     |                                            |
| 人工 | $^{140}\text{La}$          |                                                                         |                     | 815.85 <sub>7</sub>    | 22.4 <sub>7</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$  |                                                                         |                     | 818.016 <sub>13}</sub> | 7.28 <sub>5</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$          | 818.50 <sub>4</sub>                                                     | 99.70 <sub>6</sub>  |                        |                      |                                            |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$           | 822.8 <sub>1</sub>                                                      | 0.140 <sub>19</sub> |                        |                      |                                            |
| 人工 | $^{208}\text{Tl}$          |                                                                         | 主要                  | 860.37 <sub>8</sub>    | 12.0 <sub>4</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         |                     | 863.3 <sub>2</sub>     | 0.59 <sub>5</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{140}\text{La}$          |                                                                         |                     | 867.82 <sub>14</sub>   | 5.3 <sub>3</sub>     |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         |                     | 876.8 <sub>2</sub>     | 1.08 <sub>5</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$          |                                                                         | 主要                  | 880.39 <sub>13}</sub>  | ~0.92 <sub>8</sub>   |                                            |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$  |                                                                         |                     | 884.667 <sub>13}</sub> | 72.8 <sub>3</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         |                     | 910.3 <sub>2</sub>     | 0.92 <sub>5</sub>    |                                            |
|    | $^{228}\text{Ac}$          |                                                                         | 主要                  | 911.2 <sub>2</sub>     | 27.2                 |                                            |
| 人工 | $^{140}\text{La}$          |                                                                         |                     | 925.24 <sub>9</sub>    | 6.8 <sub>3</sub>     |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         |                     | 927.6 <sub>3</sub>     | 0.44 <sub>8</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{93}\text{Y}$            |                                                                         |                     | 947.1 <sub>1</sub>     | 1.9 <sub>6</sub>     |                                            |
|    | $^{40}\text{K} \text{ e}$  |                                                                         |                     | 949.750                | 0.0                  |                                            |
| 人工 | $^{140}\text{La}$          |                                                                         |                     | 951.4 <sub>4</sub>     | 0.53 <sub>3</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         | 主要                  | 954.55 <sub>9</sub>    | 18.1 <sub>6</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         |                     | 984.5 <sub>2</sub>     | 0.56 <sub>6</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         |                     | 1034.7 <sub>2</sub>    | 0.57 <sub>5</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$          |                                                                         |                     | 1038.50 <sub>5</sub>   | 1.00 <sub>1</sub>    |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         |                     | 1136.03 <sub>12}</sub> | 3.0 <sub>2</sub>     |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I}$           |                                                                         |                     | 1143.4 <sub>2</sub>    | 1.4 <sub>1</sub>     |                                            |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$           |                                                                         |                     | 1147.95 <sub>10}</sub> | 2.64 <sub>29</sub>   |                                            |
| 人工 | $^{132}\text{I} \text{ s}$ |                                                                         |                     | 1152.88 <sub>8</sub>   | 0.0                  |                                            |
|    | $^{214}\text{Bi}$          |                                                                         |                     | 1155.19 <sub>2</sub>   | 1.69 <sub>9</sub>    |                                            |

|                      | 核種名                                                                                                            | 半減期                    | エネルギー (keV)                                                                                                           | 放出比 (%)                                                                                   | 備考        |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 人工<br>人工<br>人工       | $^{132}\text{I}$<br>$^{60}\text{Co}$<br>$^{134}\text{Cs}$ s                                                    | 5.2719 <sub>11</sub> y | 主要<br>1173.2 <sub>2</sub><br>1173.210 <sub>2</sub><br>1173.95 <sub>5</sub>                                            | 1.1 <sub>1</sub><br>100.<br>0.0                                                           | $\beta^-$ |
| 人工                   | $^{132}\text{I}$ s                                                                                             |                        | 1190.35 <sub>7</sub>                                                                                                  | 0.0                                                                                       |           |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工 | $^{132}\text{I}$<br>$^{59}\text{Fe}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{132}\text{I}$                                   |                        | 主要<br>1290.7 <sub>3</sub><br>1291.564 <sub>28</sub><br>1295.3 <sub>3</sub><br>1298.2 <sub>5</sub>                     | 1.14 <sub>6</sub><br>43.2 <sub>11</sub><br>2.0 <sub>1</sub><br>0.9 <sub>1</sub>           |           |
| 人工<br>人工<br>人工       | $^{132}\text{I}$<br>$^{132}\text{I}$ s<br>$^{58}\text{Co}$ s                                                   |                        | 1317.1 <sub>7</sub><br>1318.3 <sub>2</sub><br>1321.75 <sub>5</sub>                                                    | 0.12 <sub>2</sub><br>0.0<br>0.0                                                           |           |
| 人工                   | $^{132}\text{I}$ s                                                                                             |                        | 1339.3 <sub>3</sub>                                                                                                   | 0.0                                                                                       |           |
| 人工                   | $^{132}\text{I}$                                                                                               |                        | 1372.07 <sub>13</sub>                                                                                                 | 2.5 <sub>1</sub>                                                                          |           |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工 | $^{132}\text{I}$<br>$^{134}\text{Cs}$ s<br>$^{214}\text{Bi}$<br>$^{134}\text{Cs}$ s<br>$^{214}\text{Bi}$       |                        | 1398.57 <sub>10</sub><br>1400.42 <sub>4</sub><br>1401.50 <sub>4</sub><br>1406.50 <sub>5</sub><br>1407.98 <sub>4</sub> | 7.1 <sub>3</sub><br>0.0<br>1.39 <sub>8</sub><br>0.0<br>2.48 <sub>10</sub>                 |           |
| 人工<br>人工             | $^{132}\text{I}$ s<br>$^{132}\text{I}$                                                                         |                        | 1440.31 <sub>6</sub><br>1442.56 <sub>10</sub>                                                                         | 0.0<br>1.42 <sub>6</sub>                                                                  |           |
| 人工<br>人工             | $^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{132}\text{I}$ s                                                                |                        | 1475.760 <sub>22</sub><br>1479.9 <sub>2</sub>                                                                         | 4.04 <sub>2</sub><br>0.0                                                                  |           |
| 人工<br>人工             | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{132}\text{I}$ s<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{214}\text{Bi}$ |                        | 1496.2 <sub>2</sub><br>1499.7 <sub>4</sub><br>1501.7 <sub>2</sub><br>1505.001 <sub>2</sub><br>1509.228 <sub>17</sub>  | 0.98 <sub>13</sub><br>0.0<br>0.54 <sub>7</sub><br>13.2 <sub>1</sub><br>2.19 <sub>11</sub> |           |
| 人工                   | $^{212}\text{Bi}$<br>$^{132}\text{I}$ s<br>$^{228}\text{Ac}$                                                   |                        | 主要<br>1620.62 <sub>10</sub><br>1622.25 <sub>7</sub><br>1625.3 <sub>3</sub>                                            | 1.4 <sub>1</sub><br>0.0<br>0.32 <sub>14</sub>                                             |           |
| 人工                   | $^{132}\text{I}$ s<br>$^{214}\text{Bi}$                                                                        |                        | 1727.17 <sub>7</sub><br>1729.60 <sub>2</sub>                                                                          | 0.0<br>2.98 <sub>13</sub>                                                                 |           |
| 人工                   | $^{132}\text{I}$                                                                                               |                        | 1757.5 <sub>2</sub>                                                                                                   | 0.38 <sub>3</sub>                                                                         |           |

|          | 核種名                                               | 半減期   | エネルギー (keV)                                                 | 放出比 (%)                                        | 備考    |
|----------|---------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------|
| 人工       | $^{132}\text{I}$ s                                | ----- | -----<br>1803.72 <sub>g</sub>                               | -----<br>0.0                                   | ----- |
| 機器<br>人工 | $^{56}\text{Mn}$<br>$^{132}\text{I}$ s            | ----- | -----<br>1810.72 <sub>4</sub> )<br>1811.1 <sub>2</sub>      | -----<br>27.2 <sub>g</sub><br>0.0              | ----- |
| 人工       | $^{132}\text{I}$ s                                | ----- | -----<br>1840.9 <sub>2</sub>                                | -----<br>0.0                                   | ----- |
| 人工<br>人工 | $^{93}\text{Y}$<br>$^{132}\text{I}$               | ----- | -----<br>1917.8 <sub>1</sub> )<br>1921.08 <sub>12</sub>     | -----<br>1.4 <sub>4</sub><br>1.18 <sub>g</sub> | ----- |
| 人工       | $^{132}\text{I}$ s                                | ----- | -----<br>1945.8 <sub>4</sub>                                | -----<br>0.0                                   | ----- |
| 人工       | $^{132}\text{I}$ s                                | ----- | -----<br>1963.0 <sub>3</sub>                                | -----<br>0.0                                   | ----- |
| 人工       | $^{132}\text{I}$                                  | ----- | -----<br>2002.30 <sub>12</sub>                              | -----<br>1.1 <sub>1</sub>                      | ----- |
| 人工<br>人工 | $^{132}\text{I}$ s<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$ s | ----- | -----<br>2039.76 <sub>g</sub> )<br>2042.019 <sub>23</sub> } | -----<br>0.0<br>0.0                            | ----- |

|    | 核種名               | 半減期                                      | エネルギー (keV) |                       | 放出比 (%)            | 備考                                        |
|----|-------------------|------------------------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|-------------------------------------------|
| 人工 | $^{210}\text{Pb}$ | 22.2622y                                 | 主要          | 46.503 <sub>15</sub>  | 4.058              | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$ |
|    | $^{132}\text{Te}$ | 78.28h                                   |             | 49.72 <sub>1</sub>    | 14.2               | $\beta^-$ 娘: $^{132}\text{I}$             |
|    | $^{227}\text{Th}$ | 18.7176 <sub>52</sub> d                  |             | 50.22                 | 7.222              | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$             |
|    | $^{214}\text{Pb}$ | 26.8m                                    |             | 53.226 <sub>14</sub>  | 2.24               | $\beta^-$ 親: $^{226}\text{Ra}$            |
|    | $^{143}\text{Ce}$ | 33.02h                                   | 主要          | 57.365 <sub>1</sub>   | ~12.1              | $\beta^-$                                 |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ | 6.13h                                    |             | 99.5 <sub>1</sub>     | 1.32               | $\beta^-$ 親: $^{232}\text{Th}$            |
|    | $^{239}\text{Np}$ | 2.346 <sub>4</sub> d                     |             | 99.55                 | 14.56              | $\beta^-$ Pu(K $\alpha$ 2)                |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ |                                          |             | 100.40 <sub>15</sub>  | 0.122              |                                           |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                          | 主要          | 103.76                | 22.28              | Pu(K $\alpha$ 1)                          |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                          |             | 106.14                | 27.89              |                                           |
|    | $^{235}\text{U}$  | 7.038 <sub>5</sub><br>*10 <sup>8</sup> y |             | 109.14 <sub>2</sub>   | 1.52               | $\alpha$                                  |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ |                                          |             | 111.76 <sub>8</sub>   | 1.83               |                                           |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ |                                          |             | 116.30 <sub>8</sub>   | 1.94               |                                           |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                          |             | 117.26                | 8.14               | Pu(K $\beta$ 1)                           |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                                          |             | 120.490 <sub>9</sub>  | 0.407              |                                           |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                          |             | 120.6                 | 2.771 <sub>0</sub> | Pu(K $\beta$ 2)                           |
|    | $^{223}\text{Ra}$ | 11.4346 <sub>11</sub> d                  |             | 122.4                 | 1.237              | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$             |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ |                                          | 主要          | 228.16 <sub>6</sub>   | 88.3               |                                           |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                          |             | 228.2                 | 11.43              |                                           |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$ |                                          |             | 231.559 <sub>33</sub> | ~2.02              |                                           |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                                          | 主要          | 236.0 <sub>2</sub>    | 11.2               |                                           |
|    | $^{212}\text{Pb}$ | 10.643 <sub>12</sub> h                   | 主要          | 238.626 <sub>5</sub>  | 43.1               | $\beta^-$ 娘: $^{212}\text{Bi}$            |
|    | $^{224}\text{Ra}$ | 3.665 <sub>19</sub> d                    | 主要          | 240.981 <sub>5</sub>  | 3.91               | $\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$             |
|    | $^{214}\text{Pb}$ |                                          |             | 241.924 <sub>30</sub> | 7.68               |                                           |

|    | 核種名                 | 半減期         | エネルギー (keV)    | 放出比 (%)  | 備考                                        |
|----|---------------------|-------------|----------------|----------|-------------------------------------------|
| 人工 | <sup>127</sup> Sb   |             | 473.04 )       | 25.1     |                                           |
| 人工 | <sup>134</sup> Cs   | 2.0625y     | 475.355 )      | 1.46540  | $\beta^-$ , EC                            |
|    | <sup>7</sup> Be     | 53.292d     | 主要 477.59312   | 10.358   | EC                                        |
| 人工 | <sup>228</sup> Ac   |             | 562.65 )       | 0.8615   |                                           |
|    | <sup>134</sup> Cs   |             | 563.265 )      | 8.385    |                                           |
| 人工 | <sup>134</sup> Cs   |             | 569.293 )      | 15.4311  |                                           |
| 人工 | <sup>207</sup> Pb   | 38.3y       | 主要 569.65320   | 97.744   | EC, $\beta^+$                             |
|    | <sup>140</sup> La d |             | 574.49 )       | 0.0      |                                           |
| 機器 | <sup>74</sup> Ga    | 8.255m      | 主要 595.884 )   | 91.210   | $\beta^-$                                 |
| 機器 | <sup>74</sup> As    | 17.795d     | 主要 595.908 )   | 60.2     | EC, $\beta^+$ , $\beta^-$                 |
| 人工 | <sup>125</sup> Sb   |             | 主要 600.776 )   | 18.1     |                                           |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr    |             | 602.4120 )     | 1.3914   |                                           |
| 機器 | <sup>74</sup> Ga    |             | 604.2210 )     | 2.8721   |                                           |
| 人工 | <sup>134</sup> Cs   |             | 主要 604.662 )   | 97.5632  |                                           |
| 人工 | <sup>125</sup> Sb   |             | 606.824 )      | 4.94     |                                           |
| 機器 | <sup>74</sup> Ga    |             | 608.405 )      | 14.65    |                                           |
|    | <sup>214</sup> Pb   | 19.7m       | 主要 609.31210   | 46.112   | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: <sup>226</sup> Ra |
| 人工 | <sup>103</sup> Ru   |             | 主要 610.332 )   | 5.4456   |                                           |
| 人工 | <sup>108m</sup> Ag  |             | 主要 614.3710 )  | 89.731   |                                           |
| 人工 | <sup>106</sup> Ru   |             | 616.3317 ) D   | 0.8219   |                                           |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag  | 252.23d     | 620.3461 )     | 2.785    | $\beta^-$ , IT                            |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |             | 621.02 )       | 2.01     |                                           |
| 人工 | <sup>106</sup> Ru   |             | 主要 622.23 ) D  | 9.814    |                                           |
| 人工 | <sup>228</sup> Ac   |             | 795.02 )       | 4.47     |                                           |
| 人工 | <sup>134</sup> Cs   |             | 主要 795.762 )   | 85.4438  |                                           |
|    | <sup>228</sup> Ac   |             | 796.1 )        | 0.127    |                                           |
| 人工 | <sup>134</sup> Cs   |             | 801.843 )      | 8.734    |                                           |
|    | <sup>210</sup> Po   | 138.376317d | 主要 803. )      | 0.001229 | $\alpha$ 親: <sup>210</sup> Pb             |
|    | <sup>206</sup> Tl   | 4.18317m    | 主要 803.3 )     | 0.00555  | $\beta^-$                                 |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr    |             | 804.5310 )     | 0.657    |                                           |
|    | <sup>214</sup> Pb   |             | 806.17418 )    | 1.236    |                                           |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |             | 809.82 )       | 2.93     |                                           |
| 人工 | <sup>58</sup> Co    |             | 主要 810.75533 ) | 99.442   |                                           |
| 人工 | <sup>132</sup> I    |             | 812.22 )       | 5.65     |                                           |
| 人工 | <sup>140</sup> La   |             | 主要 815.857 )   | 22.47    |                                           |
| 人工 | <sup>110m</sup> Ag  |             | 818.01612 )    | 7.285    |                                           |
| 人工 | <sup>136</sup> Cs   |             | 主要 818.504 )   | 99.706   |                                           |
| 人工 | <sup>99</sup> Mo    |             | 822.81 )       | 0.14019  |                                           |

|                | 核種名                                                                                                      | 半減期       | エネルギー (keV)                                                         | 放出比 (%)                               | 備考        |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------|
| 人工<br>人工       | $^{132}\text{I}$<br>$^{134}\text{Cs}$                                                                    |           | 1034.72 )<br>1038.505 )                                             | 0.575<br>1.001                        |           |
| 人工             | $^{134}\text{Cs}$                                                                                        |           | 1167.866                                                            | 1.80526                               |           |
| 人工<br>人工<br>人工 | $^{132}\text{I}$<br>$^{60}\text{Co}$<br>$^{134}\text{Cs s}$                                              | 5.271911y | 主要<br>1173.22 )<br>1173.2102 )<br>1173.955 )                        | 1.11<br>100.<br>0.0                   | $\beta^-$ |
| 人工<br>人工       | $^{97}\text{Zr}$<br>$^{134}\text{Cs}$                                                                    |           | 1362.6610 )<br>1365.1310 )                                          | 1.3514<br>3.044                       |           |
| 人工<br>人工<br>人工 | $^{132}\text{I}$<br>$^{134}\text{Cs s}$<br>$^{214}\text{Bi}$<br>$^{134}\text{Cs s}$<br>$^{214}\text{Bi}$ |           | 1398.5710 )<br>1400.424 )<br>1401.504 )<br>1406.505 )<br>1407.984 ) | 7.13<br>0.0<br>1.398<br>0.0<br>2.4810 |           |

$^{136}\text{Cs}$

|                      | 核種名                                                                                                                     | 半減期                  | エネルギー (keV)                                                                                     | 放出比 (%)                                         | 備考                                                                 |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 人工<br>人工             | $^{234}\text{Th}$<br>$^{136}\text{Cs}$                                                                                  | 24.10125d<br>13.002d | 63.292 )<br>66.915 )                                                                            | 3.82<br>12.510                                  | $\beta^-$ 娘: $^{234m}\text{Pa}$<br>$\beta^-$ 娘: $^{136m}\text{Ba}$ |
| 人工                   | $^{136}\text{Cs}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{223}\text{Ra}$                                                             |                      | 153.225 )<br>154.02 )<br>154.3 )                                                                | 7.4716<br>0.8011<br>5.7436                      |                                                                    |
| 人工<br>人工             | $^{140}\text{Ba}$<br>$^{235}\text{U}$<br>$^{136}\text{Cs}$                                                              | 12.7896d             | 162.612 )<br>163.352 )<br>163.895 )                                                             | 6.1134<br>4.74<br>4.6210                        | $\beta^-$ 娘: $^{140}\text{La}$                                     |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工 | $^{125}\text{Sb}$<br>$^{136}\text{Cs}$<br>$^{131}\text{I}$<br>$^{99}\text{Mo}$<br>$^{235}\text{U}$<br>$^{226}\text{Ra}$ | 2.712y<br>1599.7y    | 主要<br>176.292 )<br>176.555 )<br>177.2102 )<br>181.075 )<br>主要<br>185.7155 )<br>主要<br>186.1804 ) | 6.85<br>13.62<br>0.260<br>6.2983<br>54.<br>3.31 | $\beta^-$ 娘: $^{125m}\text{Te}$<br>$\alpha$ 娘: $^{214}\text{Pb}$   |



|    | 核種名                                            | 半減期 | エネルギー (keV)                        | 放出比 (%)         | 備考 |
|----|------------------------------------------------|-----|------------------------------------|-----------------|----|
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$<br>$^{214}\text{Bi}$         |     | 1235.345<br>1238.111               | 19.72<br>5.9521 |    |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{214}\text{Bi}$ |     | 1384.270 <sub>13</sub><br>1385.313 | 24.61<br>0.785  |    |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}_s$                            |     | 1388.652                           | 0.0             |    |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}_s$                            |     | 1866.581                           | 0.0             |    |

$^{137}\text{Cs}$

|    | 核種名                       | 半減期                   | エネルギー (keV)            | 放出比 (%) | 備考                                     |
|----|---------------------------|-----------------------|------------------------|---------|----------------------------------------|
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         | 60.20 <sub>3d</sub>   | 645.824                | 7.2322  | $\beta^-$                              |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 650.62                 | 2.72    |                                        |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                       | 652.33                 | 2.98    |                                        |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                       | 652.92                 | 7.611   |                                        |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                       | 653.2                  | 0.469   |                                        |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                       | 657.749 <sub>10</sub>  | 94.41   |                                        |
| 人工 | $^{97}\text{Nb}$          |                       | 657.92 <sub>10</sub>   | 98.21   | $\beta^-$ 親: $^{97}\text{Zr}$          |
| 人工 | $^{137}\text{Cs}$         | 30.174 <sub>34y</sub> | 661.638 <sub>19D</sub> | 85.05   | $\beta^-$ 娘: $^{137\text{m}}\text{Ba}$ |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                       | 664.55 <sub>10</sub>   | 5.35    |                                        |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         |                       | 665.453 <sub>22</sub>  | 1.569   |                                        |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 667.69 <sub>8</sub>    | 98.71   |                                        |
| 機器 | $^{63}\text{Zn}$          | 38.0 <sub>1m</sub>    | 669.62 <sub>5</sub>    | 8.44    | $\beta^+$ , EC                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 669.83                 | 4.98    |                                        |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       | 671.63                 | 5.24    |                                        |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                       | 671.664                | 1.71    |                                        |

140 B a

|    | 核種名                       | 半減期      | エネルギー (keV)  | 放出比 (%) | 備考                                     |
|----|---------------------------|----------|--------------|---------|----------------------------------------|
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         | 12.7896d | 162.612      | 6.1134  | $\beta^-$ 娘: $^{140}\text{La}$         |
| 人工 | $^{235}\text{U}$          |          | 163.352      | 4.74    |                                        |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$         |          | 163.895      | 4.6210  |                                        |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         | 39.355d  | 主要 293.26221 | ~42.    | $\beta^-$ 娘: $^{143}\text{m}\text{Rh}$ |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$         |          | 294.982      | 0.24225 |                                        |
|    | $^{214}\text{Pb}$         |          | 主要 295.21739 | 18.920  |                                        |
|    | $^{231}\text{Pa}$         |          | 299.946      | 2.57    |                                        |
|    | $^{227}\text{Th}$         |          | 300.02       | 1.97    |                                        |
|    | $^{212}\text{Pb}$         |          | 300.115      | 3.33    |                                        |
|    | $^{231}\text{Pa}$         |          | 302.526      | 2.57    |                                        |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |          |              | 304.851 |                                        |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |          | 423.721      | 3.0721  |                                        |
|    | $^{211}\text{Pb}$         |          | 426.91       | 1.63    |                                        |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         | 主要       | 427.952      | 30.1    |                                        |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |          | 431.94       | 0.459   |                                        |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |          | 432.53029    | 2.7215  |                                        |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ | 主要       | 434.0010     | 90.59   |                                        |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |          | 437.582      | 2.02    |                                        |
|    | $^{40}\text{K}$ d         |          | 438.75       | 0.0     |                                        |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |          | 439.858      | 1.12    |                                        |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         | 主要       | 531.017      | 12.02   |                                        |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |          | 535.54       | 0.528   |                                        |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         | 主要       | 537.272      | 23.65   |                                        |

|    | 核種名                       | 半減期      | エネルギー (keV) | 放出比 (%)     | 備考      |                                |
|----|---------------------------|----------|-------------|-------------|---------|--------------------------------|
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         | 27.7016d | 主要          | 315.9 )     | 1.525   | EC                             |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |          |             | 316.54 )    | 0.164   |                                |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |          |             | 319.413 )   | 2.03    |                                |
| 人工 | $^{51}\text{Cr}$          |          |             | 320.0761 )  | 10.26   |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |          |             | 321.94 )    | 0.223   |                                |
|    | $^{223}\text{Ra}$         |          |             | 324.1 )     | 4.1226  |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |          |             | 328.34 )    | 3.14    |                                |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         | 40.275h  |             | 328.76812 ) | 18.56   | $\beta^-$ 親: $^{140}\text{Ba}$ |
|    | $^{231}\text{Pa}$         |          |             | 329.896 )   | 1.44    |                                |
|    | $^{227}\text{Th}$         |          |             | 329.92 )    | 2.48    |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |          |             | 332.94 )    | 0.355   |                                |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         |          |             | 334.3 )     | 1.957   |                                |
|    | $^{223}\text{Ra}$         |          |             | 338.6 )     | 2.9620  |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |          | 主要          | 338.74 )    | 12.2    |                                |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$         |          | 主要          | 340.575 )   | 46.85   |                                |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |          | 主要          | 423.721 )   | 3.0721  |                                |
|    | $^{211}\text{Pb}$         |          |             | 426.91 )    | 1.63    |                                |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |          |             | 427.952 )   | 30.1    |                                |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |          |             | 431.94 )    | 0.459   |                                |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |          |             | 432.53029 ) | 2.7215  |                                |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |          |             | 434.0010 )  | 90.59   |                                |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |          |             | 437.582 )   | 2.02    |                                |
|    | $^{40}\text{K}$ d         |          | 438.75 )    | 0.0         |         |                                |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |          |             | 439.858 )   | 1.12    |                                |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |          | 主要          | 487.02919 ) | 43.016  |                                |
| 人工 | $^{129}\text{Te}$         |          |             | 487.395 )   | 1.31    |                                |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |          |             | 490.367 )   | ~2.02   |                                |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         | 38.3y    | 主要          | 569.293 )   | 15.4311 | EC, $\beta^+$                  |
|    | $^{207}\text{Bi}$         |          |             | 569.65320 ) | 97.744  |                                |
| 人工 | $^{140}\text{La}$ d       |          |             | 574.49 )    | 0.0     |                                |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |          | 主要          | 749.81 )    | 23.2    |                                |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |          |             | 751.82780 ) | 4.2020  |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |          |             | 755.31 )    | 1.02    |                                |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          |          | 主要          | 756.722 )   | 54.65   |                                |

|    | 核種名                         | 半減期                                                     | エネルギー (keV)      | 放出比 (%)         | 備考                                           |              |
|----|-----------------------------|---------------------------------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------------------------|--------------|
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$           | 138.3763 $_{17}^{\text{d}}$<br>4.183 $_{17}^{\text{m}}$ | 801.84 $_{3}$    | 8.73 $_{4}$     | $\alpha$ 親: $^{210}\text{Bi}$<br>$\beta^{-}$ |              |
|    | $^{210}\text{Po}$           |                                                         | 主要 803.          | 0.00122 $_{9}$  |                                              |              |
|    | $^{206}\text{Tl}$           |                                                         | 主要 803.3         | 0.0055 $_{5}$   |                                              |              |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$            |                                                         |                  | 804.53 $_{10}$  |                                              | 0.65 $_{7}$  |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |                                                         |                  | 806.174 $_{18}$ |                                              | 1.23 $_{6}$  |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                                                         |                  | 809.8 $_{2}$    |                                              | 2.9 $_{3}$   |
| 人工 | $^{58}\text{Co}$            |                                                         | 主要               | 810.755 $_{33}$ |                                              | 99.44 $_{2}$ |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                                                         |                  | 812.2 $_{2}$    |                                              | 5.6 $_{5}$   |
| 人工 | $^{140}\text{La}$           |                                                         | 主要               | 815.85 $_{7}$   |                                              | 22.4 $_{7}$  |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$   |                                                         |                  | 818.016 $_{12}$ |                                              | 7.28 $_{5}$  |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$           | 主要                                                      | 818.50 $_{4}$    | 99.70 $_{6}$    |                                              |              |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$            |                                                         | 822.8 $_{1}$     | 0.140 $_{19}$   |                                              |              |
| 人工 | $^{208}\text{Tl}$           |                                                         | 主要 860.37 $_{8}$ | 12.0 $_{4}$     |                                              |              |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                                                         | 863.3 $_{2}$     | 0.59 $_{5}$     |                                              |              |
| 人工 | $^{140}\text{La}$           |                                                         | 867.82 $_{14}$   | 5.3 $_{3}$      |                                              |              |
| 人工 | $^{140}\text{La}$           |                                                         |                  | 919.63 $_{15}$  | 2.52 $_{16}$                                 |              |
| 人工 | $^{140}\text{La}$           |                                                         |                  | 925.24 $_{9}$   | 6.8 $_{3}$                                   |              |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            |                                                         | 927.6 $_{3}$     | 0.44 $_{8}$     |                                              |              |
| 人工 | $^{93}\text{Y}$             |                                                         | 947.1 $_{1}$     | 1.9 $_{6}$      |                                              |              |
|    | $^{40}\text{K e}$           |                                                         | 949.750          | 0.0             |                                              |              |
| 人工 | $^{140}\text{La}$           |                                                         | 951.4 $_{4}$     | 0.53 $_{3}$     |                                              |              |
| 人工 | $^{132}\text{I}$            | 主要                                                      | 954.55 $_{9}$    | 18.1 $_{6}$     |                                              |              |
| 人工 | $^{129}\text{Te}$           |                                                         | 1083.99 $_{5}$   | 0.56 $_{8}$     |                                              |              |
| 人工 | $^{140}\text{La e}$         |                                                         | 1085.4 $_{9}$    | 0.0             |                                              |              |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$           |                                                         | 1588.3 $_{2}$    | 3.5 $_{5}$      |                                              |              |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag s}$ |                                                         | 1591.337 $_{26}$ | 0.0             |                                              |              |
|    | $^{208}\text{Tl d}$         |                                                         | 1592.5           | 0.0             |                                              |              |
| 人工 | $^{140}\text{La}$           | 主要                                                      | 1596.49 $_{24}$  | 95.5 $_{3}$     |                                              |              |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |                                                         | 1599.31 $_{6}$   | 0.33 $_{3}$     |                                              |              |

<sup>141</sup>Ce

|    | 核種名               | 半減期                   | エネルギー (keV) |                      | 放出比 (%)            | 備考                                     |
|----|-------------------|-----------------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------------------------|
| 機器 | <sup>75m</sup> Ge | 47.75s                | 主要          | 139.68 <sub>3</sub>  | 39.2               | IT, β <sup>-</sup>                     |
| 人工 | <sup>99m</sup> Tc | 6.007 <sub>2</sub> h  | 主要          | 140.511 <sub>6</sub> | 89.0 <sub>2</sub>  | IT, β <sup>-</sup> 親: <sup>99</sup> Mo |
| 人工 | <sup>99m</sup> Tc |                       |             | 142.63 <sub>3</sub>  | 6.4 <sub>3</sub>   |                                        |
| 人工 | <sup>59</sup> Fe  | 44.56 <sub>3</sub> d  |             | 142.648 <sub>4</sub> | 1.02 <sub>4</sub>  | β <sup>-</sup>                         |
|    | <sup>235</sup> U  |                       | 主要          | 143.76 <sub>2</sub>  | 11.1               |                                        |
|    | <sup>223</sup> Ra |                       |             | 144.3                | 3.34 <sub>22</sub> |                                        |
| 人工 | <sup>141</sup> Ce | 32.55 <sub>1</sub> d  | 主要          | 145.44 <sub>4</sub>  | 48.4 <sub>4</sub>  | β <sup>-</sup>                         |
| 人工 | <sup>132</sup> I  | 2.2846 <sub>4</sub> h |             | 147.2 <sub>1</sub>   | 0.24 <sub>2</sub>  | β <sup>-</sup> 親: <sup>132</sup> Te    |

<sup>143</sup>Ce

|    | 核種名               | 半減期                     | エネルギー (keV) |                       | 放出比 (%)             | 備考                                     |
|----|-------------------|-------------------------|-------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------------|
| 人工 | <sup>210</sup> Pb | 22.26 <sub>22</sub> y   | 主要          | 46.503 <sub>15</sub>  | 4.05 <sub>8</sub>   | β <sup>-</sup> , α親: <sup>226</sup> Ra |
|    | <sup>132</sup> Te | 78.2 <sub>8</sub> h     |             | 49.72 <sub>1</sub>    | 14.2                | β <sup>-</sup> 娘: <sup>132</sup> I     |
|    | <sup>227</sup> Th | 18.7176 <sub>52</sub> d |             | 50.2 <sub>2</sub>     | 7.2 <sub>22</sub>   | α親: <sup>227</sup> Ac                  |
|    | <sup>214</sup> Pb | 26.8 <sub>m</sub>       |             | 53.226 <sub>14</sub>  | 2.2 <sub>4</sub>    | β <sup>-</sup> 親: <sup>226</sup> Ra    |
| 人工 | <sup>143</sup> Ce | 33.0 <sub>2</sub> h     | 主要          | 57.365 <sub>1</sub>   | ~12.1               | β <sup>-</sup>                         |
| 人工 | <sup>132</sup> Te |                         | 主要          | 228.16 <sub>6</sub>   | 88.3                |                                        |
| 人工 | <sup>239</sup> Np |                         |             | 228.2                 | 11.4 <sub>3</sub>   |                                        |
| 人工 | <sup>143</sup> Ce |                         |             | 231.559 <sub>33</sub> | ~2.0 <sub>2</sub>   |                                        |
|    | <sup>227</sup> Th |                         | 主要          | 236.0 <sub>2</sub>    | 11.2                |                                        |
|    | <sup>212</sup> Pb | 10.643 <sub>12</sub> h  | 主要          | 238.626 <sub>5</sub>  | 43.1                | β <sup>-</sup> 娘: <sup>212</sup> Bi    |
|    | <sup>224</sup> Ra | 3.665 <sub>19</sub> d   | 主要          | 240.981 <sub>5</sub>  | 3.9 <sub>1</sub>    | α親: <sup>228</sup> Th                  |
|    | <sup>214</sup> Pb |                         |             | 241.924 <sub>30</sub> | 7.6 <sub>8</sub>    |                                        |
| 人工 | <sup>143</sup> Ce |                         | 主要          | 293.262 <sub>21</sub> | ~42.                |                                        |
| 人工 | <sup>103</sup> Ru | 39.35 <sub>5</sub> d    |             | 294.98 <sub>2</sub>   | 0.242 <sub>25</sub> | β <sup>-</sup> 娘: <sup>103m</sup> Rh   |
|    | <sup>214</sup> Pb |                         | 主要          | 295.217 <sub>39</sub> | 18.9 <sub>20</sub>  |                                        |
|    | <sup>231</sup> Pa |                         |             | 299.94 <sub>6</sub>   | 2.5 <sub>7</sub>    |                                        |
|    | <sup>227</sup> Th |                         |             | 300.0 <sub>2</sub>    | 1.9 <sub>7</sub>    |                                        |
|    | <sup>212</sup> Pb |                         |             | 300.11 <sub>5</sub>   | 3.3 <sub>3</sub>    |                                        |
|    | <sup>231</sup> Pa |                         |             | 302.52 <sub>6</sub>   | 2.5 <sub>7</sub>    |                                        |
| 人工 | <sup>140</sup> Ba |                         |             | 304.85 <sub>1</sub>   | 4.37 <sub>28</sub>  |                                        |
| 人工 | <sup>143</sup> Ce |                         |             | 350.587 <sub>50</sub> | ~3.4 <sub>3</sub>   |                                        |
|    | <sup>211</sup> Bi | 2.15 <sub>m</sub>       | 主要          | 351.0 <sub>1</sub>    | 12.7 <sub>2</sub>   | α親: <sup>227</sup> Ac                  |
|    | <sup>214</sup> Pb |                         | 主要          | 351.992 <sub>62</sub> | 36.7 <sub>40</sub>  |                                        |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr  |                         |             | 355.39 <sub>10</sub>  | 2.27 <sub>24</sub>  |                                        |

|                                                    | 核種名                                                                                                                                                                                                                         | 半減期                                                                | エネルギー (keV)    |                                                                                                                                                              | 放出比 (%)                                                                                   | 備考                                                                                                       |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 人工<br>人工<br>人工                                     | $^{140}\text{La}$<br>$^{129}\text{Te}$<br>$^{143}\text{Ce}$                                                                                                                                                                 |                                                                    | 主要             | 487.029 <sub>19</sub><br>487.395<br>490.367                                                                                                                  | 43.016<br>1.31<br>~2.02                                                                   |                                                                                                          |
| 人工                                                 | $^{208}\text{Tl}$<br>$^{143}\text{Ce}$                                                                                                                                                                                      |                                                                    | 主要             | 583.139 <sub>23</sub><br>587.281 <sub>5</sub>                                                                                                                | 86.3<br>~0.244                                                                            |                                                                                                          |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工 | $^{124}\text{Sb}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{91}\text{Sr}$<br>$^{91}\text{Sr}$<br>$^{91}\text{Sr}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{97}\text{Nb}$<br>$^{137}\text{Cs}$<br>$^{143}\text{Ce}$                                | 60.20 <sub>3</sub> d<br><br><br><br><br><br>30.174 <sub>34</sub> y | 主要             | 645.82 <sub>4</sub><br>650.62<br>652.33<br>652.92<br>653.2<br>657.749 <sub>19</sub><br>657.921 <sub>9</sub><br>661.638 <sub>19</sub><br>664.551 <sub>9</sub> | 7.23 <sub>22</sub><br>2.72<br>2.98<br>7.611<br>0.469<br>94.41<br>98.21<br>85.05<br>5.35   | $\beta^-$<br><br><br><br><br><br>$\beta^-$ 親: $^{97}\text{Zr}$<br>$\beta^-$ 娘: $^{137\text{m}}\text{Ba}$ |
| 人工<br>機器<br>人工<br>人工<br>人工                         | $^{214}\text{Bi}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{63}\text{Zn}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{125}\text{Sb}$                                                                                                      | 38.01m                                                             | 主要<br>主要       | 665.453 <sub>23</sub><br>667.698<br>669.625<br>669.83<br>671.63<br>671.664                                                                                   | 1.569<br>98.71<br>8.44<br>4.98<br>5.24<br>1.71                                            | $\beta^+$ , EC                                                                                           |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工       | $^{214}\text{Bi}$<br>$^{143}\text{Ce}$<br>$^{124}\text{Sb}$<br>$^{131}\text{I}$<br>$^{108\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{95}\text{Zr}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{212}\text{Bi}$<br>$^{129\text{m}}\text{Te}$ | 63.986d                                                            | 主要<br>主要<br>主要 | 719.863<br>721.961 <sub>11</sub><br>722.784<br>722.893 <sub>2</sub><br>722.958<br>724.184 <sub>12</sub><br>726.75<br>727.12<br>727.277<br>729.625            | 0.403<br>~5.15<br>11.3016<br>1.80<br>89.731<br>43.120<br>0.7827<br>6.53<br>6.32<br>0.6913 | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95\text{m}}\text{Nb}$                                                 |
| 人工<br>人工<br>人工                                     | $^{132}\text{I}$<br>$^{143}\text{Ce}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$                                                                                                                                                          |                                                                    | 主要             | 876.82<br>880.391 <sub>3</sub><br>884.667 <sub>13</sub>                                                                                                      | 1.085<br>~0.928<br>72.83                                                                  |                                                                                                          |
| 人工<br>人工                                           | $^{59}\text{Fe}$<br>$^{143}\text{Ce}$                                                                                                                                                                                       |                                                                    | 主要             | 1099.224 <sub>25</sub><br>1102.981 <sub>8</sub>                                                                                                              | 56.515<br>~0.375                                                                          |                                                                                                          |

|    | 核種名                                                                                                                    | 半減期                              | エネルギー (keV) |                                                                      | 放出比 (%)                          | 備考                                                                          |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{144}\text{Ce}$                                                                                                      | 284.510d                         |             | 33.62210                                                             | 0.29134                          | $\beta^-$ 娘: $^{144}\text{Pr}$                                              |
| 人工 | Pb(K $\alpha$ 2)<br>Pb(K $\alpha$ 1)<br>Bi(K $\alpha$ 1)<br>$^{108\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{227}\text{Th}$             | 127.7y                           |             | 72.804 )<br>74.969 )<br>77.108 )<br>79.45 )<br>79.82 )               | 6.68<br>1.76                     | EC, $\beta^+$ , IT                                                          |
| 人工 | $^{144}\text{Ce}$                                                                                                      |                                  |             | 80.1065                                                              | 1.1318                           |                                                                             |
| 人工 | $^{131}\text{I}$<br>$^{231}\text{Th}$<br>$^{228}\text{Th}$                                                             | 8.0401d<br>25.521h<br>1.9131344y | 主要<br>主要    | 80.1832 )<br>84.212 )<br>84.3713 )                                   | 2.61<br>6.55<br>1.216            | $\beta^-$<br>$\beta^-$ 親: $^{235}\text{U}$<br>$\alpha$ 親: $^{232}\text{Th}$ |
| 人工 | Pb(K $\beta$ 1)<br>Bi(K $\beta$ 1)<br>$^{231}\text{Th}$<br>$^{147}\text{Nd}$<br>$^{234}\text{Th}$<br>$^{227}\text{Th}$ | 10.981d                          | 主要<br>主要    | 84.936 )<br>87.343 )<br>89.952 )<br>91.1050 )<br>92.802 )<br>94.02 ) | 0.9419<br>27.247<br>5.43<br>1.24 | $\beta^-$                                                                   |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{144}\text{Ce}$                                                                                 |                                  | 主要          | 129.11 )<br>133.5445                                                 | 2.63<br>11.12                    |                                                                             |

|    | 核種名                | 半減期                      | エネルギー (keV) |             | 放出比 (%) | 備考                             |
|----|--------------------|--------------------------|-------------|-------------|---------|--------------------------------|
| 人工 | Pb(K $\alpha$ 2)   | 127.7y                   | 主要          | 72.804 )    | 6.68    | EC, $\beta^+$ , IT             |
|    | Pb(K $\alpha$ 1)   |                          |             | 74.969 )    |         |                                |
|    | Bi(K $\alpha$ 1)   |                          |             | 77.108 )    |         |                                |
|    | <sup>108m</sup> Ag |                          |             | 79.45 )     |         |                                |
|    | <sup>227</sup> Th  |                          |             | 79.82 )     |         |                                |
|    | <sup>144</sup> Ce  |                          |             | 80.1065 )   |         |                                |
|    | <sup>131</sup> I   |                          |             | 80.1832 )   |         |                                |
|    | <sup>231</sup> Th  |                          |             | 84.212 )    |         |                                |
|    | <sup>228</sup> Th  |                          |             | 84.3713 )   |         |                                |
|    | Pb(K $\beta$ 1)    |                          |             | 84.936 )    |         |                                |
| 人工 | Bi(K $\beta$ 1)    | 1.9131344y               | 主要          | 87.343 )    | 1.1318  | $\beta^-$                      |
|    | <sup>231</sup> Th  |                          |             | 89.952 )    |         |                                |
|    | <sup>147</sup> Nd  |                          |             | 91.105016 ) |         |                                |
|    | <sup>234</sup> Th  |                          |             | 92.802 )    |         |                                |
| 人工 | <sup>228</sup> Ac  | 7.0385*10 <sup>8</sup> y | 主要          | 94.02 )     | 27.247  | $\beta^-$                      |
|    | <sup>239</sup> Np  |                          |             | 99.51 )     |         |                                |
|    | <sup>239</sup> Np  |                          |             | 99.55 )     |         |                                |
|    | <sup>239</sup> Np  |                          |             | 100.4015 )  |         |                                |
|    | <sup>239</sup> Np  |                          |             | 103.76 )    |         |                                |
|    | <sup>235</sup> U   |                          |             | 106.14 )    |         |                                |
|    | <sup>132</sup> Te  |                          |             | 109.142 )   |         |                                |
|    | <sup>132</sup> Te  |                          |             | 111.768 )   |         |                                |
|    | <sup>239</sup> Np  |                          |             | 116.308 )   |         |                                |
|    | <sup>147</sup> Nd  |                          |             | 117.26 )    |         |                                |
| 人工 | <sup>239</sup> Np  | 11.434611d               | 主要          | 120.4909 )  | 0.407   | Pu(K $\beta$ 1)                |
|    | <sup>239</sup> Np  |                          |             | 120.6 )     |         |                                |
|    | <sup>223</sup> Ra  |                          |             | 122.4 )     |         |                                |
|    |                    |                          |             |             |         |                                |
| 人工 | <sup>132</sup> I   | 10.251h                  | 主要          | 262.71 )    | 1.449   | $\beta^-$                      |
|    | <sup>75</sup> Ge   |                          |             | 264.61 )    |         |                                |
|    | <sup>93</sup> Y    |                          |             | 266.91 )    |         |                                |
|    | <sup>223</sup> Ra  |                          |             | 269.6 )     |         |                                |
|    | <sup>228</sup> Ac  |                          |             | 270.23 )    |         |                                |
|    | <sup>219</sup> Rn  |                          |             | 271.205 )   |         |                                |
|    | <sup>97</sup> Zr   |                          |             | 272.2728 )  |         |                                |
|    | <sup>136</sup> Cs  |                          |             | 273.654 )   |         |                                |
|    | <sup>147</sup> Nd  |                          |             | 275.422 )   |         |                                |
|    | <sup>208</sup> Tl  |                          |             | 277.43 )    |         |                                |
| 人工 | <sup>239</sup> Np  | 3.052733m                | 主要          | 277.60 )    | 6.83    | $\beta^-$ 親: <sup>228</sup> Th |
|    |                    |                          |             |             |         |                                |

|    | 核種名                       | 半減期      | エネルギー (keV) |             | 放出比 (%) | 備考                                       |
|----|---------------------------|----------|-------------|-------------|---------|------------------------------------------|
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         | 27.7016d | 主要          | 315.9 )     | 1.525   | EC<br><br>$\beta^-$ 親: $^{140}\text{Ba}$ |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |          |             | 316.54 )    | 0.164   |                                          |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |          |             | 319.413 )   | 2.03    |                                          |
| 人工 | $^{51}\text{Cr}$          |          |             | 320.0761 )  | 10.26   |                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |          | 321.94 )    | 0.223       |         |                                          |
|    | $^{223}\text{Ra}$         |          | 324.1 )     | 4.1226      |         |                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |          | 328.34 )    | 3.14        |         |                                          |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         | 40.275h  |             | 328.76813 ) | 18.56   |                                          |
|    | $^{231}\text{Pa}$         |          |             | 329.896 )   | 1.44    |                                          |
|    | $^{227}\text{Th}$         |          |             | 329.92 )    | 2.48    |                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |          |             | 332.94 )    | 0.355   |                                          |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         |          |             | 334.3 )     | 1.957   |                                          |
|    | $^{223}\text{Ra}$         |          |             | 338.6 )     | 2.9620  |                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |          | 主要          | 338.74 )    | 12.2    |                                          |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$         |          | 主要          | 340.575 )   | 46.85   |                                          |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |          | 主要          | 423.721 )   | 3.0721  |                                          |
|    | $^{211}\text{Pb}$         |          |             | 426.91 )    | 1.63    |                                          |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |          |             | 427.952 )   | 30.1    |                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |          |             | 431.94 )    | 0.459   |                                          |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |          |             | 432.53029 ) | 2.7215  |                                          |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |          |             | 434.0010 )  | 90.59   |                                          |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |          |             | 437.582 )   | 2.02    |                                          |
|    | $^{40}\text{K d}$         |          |             | 438.75 )    | 0.0     |                                          |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |          |             | 439.858 )   | 1.12    |                                          |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |          |             |             | 主要      |                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |          |             | 535.54 )    | 0.528   |                                          |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$         |          | 主要          | 537.272 )   | 23.65   |                                          |
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$         | 3.917d   | 主要          | 685.75 )    | 36.1    | $\beta^-$                                |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |          |             | 685.8035 )  | 0.7113  |                                          |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |          |             | 686.9881 )  | 6.454   |                                          |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |          |             | 690.6320 )  | 0.254   |                                          |
|    | Unknown                   |          |             | 693. )      |         |                                          |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ | 33.5212d | 主要          | 695.985 )   | 2.94    | IT, $\beta^-$ 娘: $^{129}\text{Te}$       |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |          |             | 699.23 )    | 0.122   |                                          |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |          |             | 703.114 )   | 0.473   |                                          |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |          |             | 706.67013 ) | 16.30   |                                          |

206 T 1

|    | 核種名    | 半減期                                                         | エネルギー (keV) |                         | 放出比 (%)              | 備考                           |
|----|--------|-------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------|----------------------|------------------------------|
| 人工 | 134Cs  | 138.3763 <sub>17</sub> <sup>d</sup><br>4.18317 <sup>m</sup> | 主要          | 801.84 <sub>3</sub> )   | 8.73 <sub>4</sub>    | α 親: 210Bi<br>β <sup>-</sup> |
|    | 210Po  |                                                             |             | 803. )                  | 0.00122 <sub>9</sub> |                              |
|    | 206Tl  |                                                             |             | 803.3 )                 | 0.0055 <sub>5</sub>  |                              |
| 人工 | 97Zr   |                                                             |             | 804.53 <sub>10</sub> )  | 0.65 <sub>7</sub>    |                              |
|    | 214Bi  |                                                             |             | 806.174 <sub>18</sub> ) | 1.23 <sub>6</sub>    |                              |
| 人工 | 132I   |                                                             |             | 809.8 <sub>2</sub> )    | 2.9 <sub>3</sub>     |                              |
| 人工 | 58Co   |                                                             | 主要          | 810.755 <sub>33</sub> ) | 99.44 <sub>2</sub>   |                              |
| 人工 | 132I   |                                                             |             | 812.2 <sub>2</sub> )    | 5.6 <sub>5</sub>     |                              |
| 人工 | 140La  |                                                             | 主要          | 815.85 <sub>7</sub> )   | 22.4 <sub>7</sub>    |                              |
| 人工 | 110mAg |                                                             |             | 818.016 <sub>12</sub> ) | 7.28 <sub>5</sub>    |                              |
| 人工 | 136Cs  |                                                             | 主要          | 818.50 <sub>4</sub> )   | 99.70 <sub>6</sub>   |                              |
| 人工 | 99Mo   |                                                             |             | 822.8 <sub>1</sub> )    | 0.140 <sub>19</sub>  |                              |

207 B i

|    | 核種名     | 半減期   | エネルギー (keV) |                          | 放出比 (%)             | 備考                 |
|----|---------|-------|-------------|--------------------------|---------------------|--------------------|
| 人工 | 134Cs   | 38.3y | 主要          | 569.29 <sub>3</sub> )    | 15.43 <sub>11</sub> | EC, β <sup>+</sup> |
|    | 207Bi   |       |             | 569.653 <sub>20</sub> )  | 97.74 <sub>4</sub>  |                    |
| 人工 | 140La d |       |             | 574.49 )                 | 0.0                 |                    |
|    | 207Bi   |       | 主要          | 1063.630 <sub>30</sub> ) | 73.82 <sub>3</sub>  |                    |
|    | 207Bi   |       |             | 1770.220 <sub>40</sub> ) | 6.79 <sub>20</sub>  |                    |

208 T 1

|    | 核種名   | 半減期                    | エネルギー (keV) |                        | 放出比 (%)            | 備考                      |
|----|-------|------------------------|-------------|------------------------|--------------------|-------------------------|
| 人工 | 132I  | 10.25 <sub>1</sub> h   | 主要          | 262.7 <sub>1</sub> )   | 1.44 <sub>9</sub>  | β <sup>-</sup>          |
| 機器 | 75Ge  |                        |             | 264.6 <sub>1</sub> )   | 11.11 <sub>1</sub> |                         |
| 人工 | 93Y   |                        |             | 266.9 <sub>1</sub> )   | 6.81 <sub>5</sub>  |                         |
|    | 223Ra |                        |             | 269.6 )                | 14.0 <sub>3</sub>  |                         |
|    | 228Ac |                        |             | 270.2 <sub>3</sub> )   | 3.6 <sub>6</sub>   |                         |
|    | 219Rn | 3.96 <sub>1</sub> s    | 主要          | 271.20 <sub>5</sub> )  | 10.1               | α 親: 227Ac              |
| 人工 | 97Zr  |                        |             | 272.27 <sub>20</sub> ) | 0.25 <sub>4</sub>  |                         |
| 人工 | 136Cs |                        |             | 273.65 <sub>4</sub> )  | 12.7 <sub>2</sub>  |                         |
| 人工 | 147Nd |                        |             | 275.42 <sub>2</sub> )  | 0.82 <sub>18</sub> |                         |
|    | 208Tl | 3.0527 <sub>33</sub> m |             | 277.4 <sub>3</sub> )   | 6.8 <sub>3</sub>   | β <sup>-</sup> 親: 228Th |
| 人工 | 239Np |                        | 主要          | 277.60 )               | 14.5 <sub>4</sub>  |                         |

|                            | 核種名                                                                                                                                                           | 半減期                                        | エネルギー (keV) |                                                                                                                                                                                 | 放出比 (%)                                                                                                                                           | 備考                                              |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 人工<br>人工                   | $^{132}\text{I}$<br>$^{97}\text{Zr}$                                                                                                                          |                                            | 主要          | 505.90 <sub>13</sub> )                                                                                                                                                          | 5.0 <sub>2</sub>                                                                                                                                  |                                                 |
|                            | $^{208}\text{Tl}$                                                                                                                                             |                                            |             | 507.63 <sub>10</sub> )                                                                                                                                                          | 5.06 <sub>53</sub>                                                                                                                                |                                                 |
|                            | Annihil                                                                                                                                                       |                                            |             | 510.723 <sub>20</sub> )                                                                                                                                                         | 21.6 <sub>9</sub>                                                                                                                                 |                                                 |
| 人工<br>人工                   | $^{106}\text{Ru}$<br>$^{97}\text{Zr}$                                                                                                                         | 366.5 <sub>8d</sub>                        |             | 511.)<br>511.80 <sub>15</sub> )<br>513.38 <sub>20</sub> )                                                                                                                       | 0.0<br>19.1<br>0.6 <sub>1</sub>                                                                                                                   | $\beta^-$ 娘: $^{106}\text{Rh}$                  |
| 人工                         | $^{208}\text{Tl}$<br>$^{143}\text{Ce}$                                                                                                                        |                                            | 主要          | 583.139 <sub>23</sub> )<br>587.28 <sub>15</sub> )                                                                                                                               | 86.3<br>~0.24 <sub>4</sub>                                                                                                                        |                                                 |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工<br>人工 | $^{208}\text{Tl}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{95}\text{Nb}$<br>$^{234\text{m}}\text{Pa}$<br>$^{214}\text{Bi}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{132}\text{I}$ | 34.97 <sub>3d</sub><br>1.175 <sub>3m</sub> | 主要          | 763.13 <sub>8</sub> )<br>763.928 <sub>13</sub> )<br>765.786 <sub>19</sub> )<br>766.6 <sub>2</sub> )<br>768.356 <sub>12</sub> )<br>771.8 <sub>3</sub> )<br>772.61 <sub>8</sub> ) | 1.64 <sub>9</sub><br>22.3 <sub>1</sub><br>99.82 <sub>1</sub><br>0.21 <sub>1</sub><br>4.91 <sub>20</sub><br>1.6 <sub>2</sub><br>76.21 <sub>9</sub> | $\beta^-$ 親: $^{95}\text{Zr}$<br>$\beta^-$ , IT |
| 人工<br>人工                   | $^{208}\text{Tl}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{140}\text{La}$                                                                                                    |                                            | 主要          | 860.37 <sub>8</sub> )<br>863.3 <sub>2</sub> )<br>867.82 <sub>14</sub> )                                                                                                         | 12.0 <sub>4</sub><br>0.59 <sub>5</sub><br>5.3 <sub>3</sub>                                                                                        |                                                 |
|                            | $^{208}\text{Tl}$                                                                                                                                             |                                            |             | 1093.9 <sub>2</sub>                                                                                                                                                             | 0.37 <sub>4</sub>                                                                                                                                 |                                                 |
| 人工<br>人工                   | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag s}$<br>$^{208}\text{Tl d}$<br>$^{140}\text{La}$<br>$^{214}\text{Bi}$                                             |                                            | 主要          | 1588.3 <sub>2</sub> )<br>1591.337 <sub>26</sub> )<br>1592.5)<br>1596.49 <sub>24</sub> )<br>1599.31 <sub>6</sub> )                                                               | 3.5 <sub>5</sub><br>0.0<br>0.0<br>95.5 <sub>3</sub><br>0.33 <sub>3</sub>                                                                          |                                                 |

$^{210}\text{Pb}$

|    | 核種名               | 半減期                    | エネルギー (keV) |                        | 放出比 (%)           | 備考                                        |
|----|-------------------|------------------------|-------------|------------------------|-------------------|-------------------------------------------|
| 人工 | $^{210}\text{Pb}$ | 22.26 <sub>22y</sub>   | 主要          | 46.503 <sub>15</sub> ) | 4.05 <sub>8</sub> | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$ |
|    | $^{132}\text{Te}$ | 78.2 <sub>8h</sub>     |             | 49.72 <sub>1</sub> )   | 14.2              | $\beta^-$ 娘: $^{132}\text{I}$             |
|    | $^{227}\text{Th}$ | 18.7176 <sub>52d</sub> |             | 50.2 <sub>2</sub> )    | 7.2 <sub>22</sub> | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$             |
|    | $^{214}\text{Pb}$ | 26.8 <sub>m</sub>      |             | 53.226 <sub>14</sub> ) | 2.2 <sub>4</sub>  | $\beta^-$ 親: $^{226}\text{Ra}$            |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$ | 33.0 <sub>2h</sub>     | 主要          | 57.365 <sub>1</sub> )  | ~12.1             | $\beta^-$                                 |

210Po

|       | 核種名    | 半減期                                             | エネルギー (keV)                                                          |                         | 放出比 (%)              | 備考                             |
|-------|--------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|
| 人工    | 134Cs  | 138.376317 <sub>d</sub><br>4.18317 <sub>m</sub> | 主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要 | 801.84 <sub>3</sub> )   | 8.73 <sub>4</sub>    | $\alpha$ 親: 210Bi<br>$\beta^-$ |
| ----- | 210Po  |                                                 |                                                                      | 803.----- )             | 0.00122 <sub>9</sub> |                                |
|       | 206Tl  |                                                 |                                                                      | 803.3 )                 | 0.0055 <sub>5</sub>  |                                |
| 人工    | 97Zr   |                                                 |                                                                      | 804.531 <sub>0</sub> )  | 0.65 <sub>7</sub>    |                                |
|       | 214Bi  |                                                 |                                                                      | 806.1741 <sub>8</sub> ) | 1.23 <sub>6</sub>    |                                |
| 人工    | 132I   |                                                 |                                                                      | 809.8 <sub>2</sub> )    | 2.9 <sub>3</sub>     |                                |
| 人工    | 58Co   |                                                 |                                                                      | 810.755 <sub>33</sub> ) | 99.44 <sub>2</sub>   |                                |
| 人工    | 132I   |                                                 |                                                                      | 812.2 <sub>2</sub> )    | 5.6 <sub>5</sub>     |                                |
| 人工    | 140La  |                                                 |                                                                      | 815.85 <sub>7</sub> )   | 22.4 <sub>7</sub>    |                                |
| 人工    | 110mAg |                                                 |                                                                      | 818.0161 <sub>2</sub> ) | 7.28 <sub>5</sub>    |                                |
| 人工    | 136Cs  |                                                 |                                                                      | 818.50 <sub>4</sub> )   | 99.70 <sub>6</sub>   |                                |
| 人工    | 99Mo   |                                                 |                                                                      | 822.8 <sub>1</sub> )    | 0.1401 <sub>9</sub>  |                                |

211Pb

|       | 核種名    | 半減期                     | エネルギー (keV)                            |                         | 放出比 (%)                    | 備考                 |
|-------|--------|-------------------------|----------------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|
| 人工    | 97Zr   | 36.12 <sub>m</sub>      | 主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要             | 400.392 <sub>0</sub> )  | 0.32 <sub>5</sub>          | $\beta^-$ 娘: 211Bi |
|       | 219Rn  |                         |                                        | 401.8 <sub>2</sub> )    | 6.51 <sub>3</sub>          |                    |
| ----- | 211Pb  |                         |                                        | 404.81----- )           | 3.52-----                  |                    |
|       | 214Bi  |                         |                                        | 405.74 <sub>3</sub> )   | 0.17 <sub>1</sub>          |                    |
|       | 228Ac  |                         |                                        | 409.8 <sub>3</sub> )    | 2.1 <sub>3</sub>           |                    |
| 人工    | 140Ba  | -----                   | 主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要 | 423.72 <sub>1</sub> )   | 3.07 <sub>21</sub>         | -----              |
| ----- | 211Pb  |                         |                                        | 426.91----- )           | 1.63-----                  |                    |
| 人工    | 125Sb  |                         |                                        | 427.95 <sub>2</sub> )   | 30.1                       |                    |
| 人工    | 132I   |                         |                                        | 431.9 <sub>4</sub> )    | 0.45 <sub>9</sub>          |                    |
| 人工    | 140La  |                         |                                        | 432.530 <sub>29</sub> ) | 2.721 <sub>5</sub>         |                    |
| 人工    | 108mAg |                         |                                        | 434.001 <sub>0</sub> )  | 90.5 <sub>9</sub>          |                    |
| 人工    | 140Ba  |                         |                                        | 437.58 <sub>2</sub> )   | 2.0 <sub>2</sub>           |                    |
|       | 40K d  |                         |                                        | 438.75 )                | 0.0                        |                    |
| 人工    | 147Nd  |                         |                                        | 439.85 <sub>8</sub> )   | 1.1 <sub>2</sub>           |                    |
| 人工    | 97Zr   |                         |                                        | 312.20 <sub>7d</sub>    | 主要<br>主要<br>主要<br>主要<br>主要 |                    |
|       | 228Ac  | 830.4 <sub>2</sub> )    | 0.651 <sub>2</sub>                     |                         |                            |                    |
| ----- | 211Pb  | 831.81----- )           | 2.86-----                              |                         |                            |                    |
| 人工    | 54Mn   | 834.827 <sub>21</sub> ) | 100.                                   |                         |                            |                    |
|       | 228Ac  | 835.6 <sub>2</sub> )    | 1.7 <sub>2</sub>                       |                         |                            |                    |
|       | 214Pb  | 839.202 <sub>0</sub> )  | 0.59 <sub>6</sub>                      |                         |                            |                    |
|       | 228Ac  | 840.4 <sub>2</sub> )    | 0.971 <sub>6</sub>                     |                         |                            |                    |

211Bi

|    | 核種名               | 半減期   | エネルギー (keV) | 放出比 (%)               | 備考                 |                               |
|----|-------------------|-------|-------------|-----------------------|--------------------|-------------------------------|
| 人工 | <sup>143</sup> Ce | 2.15m | 主要<br>主要    | 350.587 <sub>58</sub> | ~3.4 <sub>3</sub>  | $\alpha$ 親: <sup>227</sup> Ac |
|    | <sup>211</sup> Bi |       |             | 351.0 <sub>1</sub>    | 12.7 <sub>2</sub>  |                               |
|    | <sup>214</sup> Pb |       |             | 351.992 <sub>63</sub> | 36.7 <sub>40</sub> |                               |
| 人工 | <sup>97</sup> Zr  |       |             | 355.391 <sub>0</sub>  | 2.27 <sub>24</sub> |                               |

212Pb

|    | 核種名               | 半減期                                             | エネルギー (keV)          | 放出比 (%)               | 備考                  |                                                                 |
|----|-------------------|-------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 人工 | <sup>132</sup> Te | 10.643 <sub>12</sub> h<br>3.665 <sub>19</sub> d | 主要<br>主要<br>主要<br>主要 | 228.16 <sub>6</sub>   | 88.3                | $\beta^-$ 娘: <sup>212</sup> Bi<br>$\alpha$ 親: <sup>228</sup> Th |
| 人工 | <sup>239</sup> Np |                                                 |                      | 228.2                 | 11.4 <sub>3</sub>   |                                                                 |
| 人工 | <sup>143</sup> Ce |                                                 |                      | 231.559 <sub>33</sub> | ~2.0 <sub>2</sub>   |                                                                 |
|    | <sup>227</sup> Th |                                                 |                      | 236.0 <sub>2</sub>    | 11.2                |                                                                 |
|    | <sup>212</sup> Pb |                                                 |                      | 238.626 <sub>5</sub>  | 43.1                |                                                                 |
|    | <sup>224</sup> Ra |                                                 |                      | 240.981 <sub>5</sub>  | 3.9 <sub>1</sub>    |                                                                 |
|    | <sup>214</sup> Pb |                                                 |                      | 241.924 <sub>30</sub> | 7.6 <sub>8</sub>    |                                                                 |
| 人工 | <sup>143</sup> Ce | 39.35 <sub>5</sub> d                            | 主要<br>主要             | 293.262 <sub>21</sub> | ~42.                | $\beta^-$ 娘: <sup>103m</sup> Rh                                 |
| 人工 | <sup>103</sup> Ru |                                                 |                      | 294.98 <sub>2</sub>   | 0.242 <sub>25</sub> |                                                                 |
|    | <sup>214</sup> Pb |                                                 |                      | 295.217 <sub>39</sub> | 18.9 <sub>20</sub>  |                                                                 |
|    | <sup>231</sup> Pa |                                                 |                      | 299.94 <sub>6</sub>   | 2.5 <sub>7</sub>    |                                                                 |
|    | <sup>227</sup> Th |                                                 |                      | 300.0 <sub>2</sub>    | 1.9 <sub>7</sub>    |                                                                 |
|    | <sup>212</sup> Pb |                                                 |                      | 300.11 <sub>5</sub>   | 3.3 <sub>3</sub>    |                                                                 |
|    | <sup>231</sup> Pa |                                                 |                      | 302.52 <sub>6</sub>   | 2.5 <sub>7</sub>    |                                                                 |
| 人工 | <sup>140</sup> Ba |                                                 |                      | 304.85 <sub>1</sub>   | 4.37 <sub>28</sub>  |                                                                 |

|       | 核種名                | 半減期                               | エネルギー (keV) |                       | 放出比 (%)             | 備考                                                |                     |                    |                                           |
|-------|--------------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------------------------|
| 人工    | $^{231}\text{Pa}$  | $3.276_{11} \times 10^4 \text{y}$ | 主要          | 283.56 <sub>6</sub>   | 1.7 <sub>3</sub>    | $\alpha$ 娘: $^{227}\text{Ac}$                     |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{131}\text{I}$   |                                   |             | 284.298 <sub>5</sub>  | 6.0 <sub>1</sub>    |                                                   |                     |                    |                                           |
|       | $^{239}\text{Np}$  |                                   |             | 285.5                 | 0.76 <sub>2</sub>   |                                                   |                     |                    |                                           |
|       | $^{227}\text{Th}$  |                                   |             | 286.2 <sub>2</sub>    | 1.4 <sub>4</sub>    |                                                   |                     |                    |                                           |
| ----- | $^{212}\text{Bi}$  |                                   |             | -----                 | -----               |                                                   | 288.07 <sub>7</sub> | 0.32 <sub>3</sub>  | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
| ----- | $^{212}\text{Bi}$  | -----                             | -----       | 452.83 <sub>10</sub>  | 0.35 <sub>3</sub>   | -----                                             |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{214}\text{Bi}$  | 63.98 <sub>6</sub> d              | 主要          | 719.86 <sub>3</sub>   | 0.40 <sub>3</sub>   | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95m}\text{Nb}$ |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{143}\text{Ce}$  |                                   |             | 721.96 <sub>11</sub>  | ~5.1 <sub>5</sub>   |                                                   |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{124}\text{Sb}$  |                                   |             | 722.78 <sub>4</sub>   | 11.30 <sub>16</sub> |                                                   |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{131}\text{I}$   |                                   |             | 722.893 <sub>2</sub>  | 1.8 <sub>0</sub>    |                                                   |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{108m}\text{Ag}$ |                                   |             | 722.95 <sub>8</sub>   | 89.7 <sub>31</sub>  |                                                   |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{95}\text{Zr}$   |                                   |             | 724.184 <sub>13</sub> | 43.1 <sub>20</sub>  |                                                   |                     |                    |                                           |
|       | $^{228}\text{Ac}$  |                                   |             | 726.7 <sub>5</sub>    | 0.78 <sub>27</sub>  |                                                   |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{132}\text{I}$   |                                   |             | 727.1 <sub>2</sub>    | 6.5 <sub>3</sub>    |                                                   |                     |                    |                                           |
| ----- | $^{212}\text{Bi}$  |                                   |             | -----                 | -----               |                                                   | 727.27 <sub>7</sub> | 6.3 <sub>2</sub>   | -----                                     |
| 人工    | $^{129m}\text{Te}$ |                                   |             | -----                 | -----               |                                                   | 729.62 <sub>5</sub> | 0.69 <sub>13</sub> | -----                                     |
| 人工    | $^{99}\text{Mo}$   |                                   |             | 777.8 <sub>1</sub>    | 4.40 <sub>53</sub>  |                                                   |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{132}\text{I}$   |                                   |             | 780.2 <sub>3</sub>    | 1.23 <sub>6</sub>   |                                                   |                     |                    |                                           |
|       | $^{228}\text{Ac}$  |                                   |             | 782.0 <sub>1</sub>    | 0.51 <sub>11</sub>  |                                                   |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{127}\text{Sb}$  |                                   |             | 783.7 <sub>5</sub>    | 15.1                |                                                   |                     |                    |                                           |
| ----- | $^{212}\text{Bi}$  |                                   |             | -----                 | -----               |                                                   | 785.46 <sub>7</sub> | 1.0 <sub>1</sub>   | -----                                     |
|       | $^{214}\text{Pb}$  |                                   |             | 785.95 <sub>20</sub>  | 0.86 <sub>9</sub>   |                                                   |                     |                    |                                           |
|       | $^{214}\text{Bi}$  |                                   |             | 786.1 <sub>4</sub>    | 0.31 <sub>11</sub>  |                                                   |                     |                    |                                           |
| ----- | $^{212}\text{Bi}$  | -----                             | -----       | 1078.80 <sub>10</sub> | 0.51 <sub>4</sub>   | -----                                             |                     |                    |                                           |
| ----- | $^{212}\text{Bi}$  | -----                             | 主要          | 1620.62 <sub>10</sub> | 1.4 <sub>1</sub>    | -----                                             |                     |                    |                                           |
| 人工    | $^{132}\text{I}$ s |                                   |             | 1622.25 <sub>7</sub>  | 0.0                 |                                                   |                     |                    |                                           |
|       | $^{228}\text{Ac}$  |                                   |             | 1625.3 <sub>3</sub>   | 0.32 <sub>14</sub>  |                                                   |                     |                    |                                           |

|                | 核種名                                                                                                                                                                        | 半減期                                                                              | エネルギー (keV)                                                                                                                                                                                         | 放出比 (%)                                                                                                                                                 | 備考                                                                                                                                            |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 人工             | $^{210}\text{Pb}$<br>$^{132}\text{Te}$<br>$^{227}\text{Th}$<br>$^{214}\text{Pb}$                                                                                           | 22.26 <sub>22</sub> y<br>78.2 <sub>8</sub> h<br>18.7176 <sub>52</sub> d<br>26.8m | 主要<br>46.503 <sub>15</sub><br>49.72 <sub>1</sub><br>50.22<br>53.226 <sub>14</sub>                                                                                                                   | 4.05 <sub>8</sub><br>14.2<br>7.2 <sub>22</sub><br>2.2 <sub>4</sub>                                                                                      | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$<br>$\beta^-$ 娘: $^{132}\text{I}$<br>$\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$<br>$\beta^-$ 親: $^{226}\text{Ra}$ |
| 人工             | $^{143}\text{Ce}$                                                                                                                                                          | 33.0 <sub>2</sub> h                                                              | 主要<br>57.365 <sub>1</sub>                                                                                                                                                                           | ~12.1                                                                                                                                                   | $\beta^-$                                                                                                                                     |
| 人工<br>人工<br>人工 | $^{132}\text{Te}$<br>$^{239}\text{Np}$<br>$^{143}\text{Ce}$<br>$^{227}\text{Th}$<br>$^{212}\text{Pb}$<br>$^{224}\text{Ra}$<br>$^{214}\text{Pb}$                            | 10.643 <sub>12</sub> h<br>3.665 <sub>19</sub> d                                  | 主要<br>228.16 <sub>6</sub><br>228.2<br>231.559 <sub>33</sub><br>主要<br>236.0 <sub>2</sub><br>主要<br>238.626 <sub>5</sub><br>主要<br>240.981 <sub>5</sub><br>241.924 <sub>30</sub>                        | 88.3<br>11.4 <sub>3</sub><br>~2.0 <sub>2</sub><br>11.2<br>43.1<br>3.9 <sub>1</sub><br>7.6 <sub>8</sub>                                                  | $\beta^-$ 娘: $^{212}\text{Bi}$<br>$\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$                                                                               |
| 人工<br>人工       | $^{143}\text{Ce}$<br>$^{103}\text{Ru}$<br>$^{214}\text{Pb}$<br>$^{231}\text{Pa}$<br>$^{227}\text{Th}$<br>$^{212}\text{Pb}$<br>$^{231}\text{Pa}$<br>人工<br>$^{140}\text{Ba}$ | 39.35 <sub>5</sub> d                                                             | 主要<br>293.262 <sub>21</sub><br>294.98 <sub>2</sub><br>主要<br>295.217 <sub>39</sub><br>299.94 <sub>6</sub><br>300.0 <sub>2</sub><br>300.11 <sub>5</sub><br>302.52 <sub>6</sub><br>304.85 <sub>1</sub> | ~42.<br>0.242 <sub>25</sub><br>18.9 <sub>20</sub><br>2.5 <sub>7</sub><br>1.9 <sub>7</sub><br>3.3 <sub>3</sub><br>2.5 <sub>7</sub><br>4.37 <sub>28</sub> | $\beta^-$ 娘: $^{103m}\text{Rh}$                                                                                                               |
| 人工<br>人工<br>人工 | $^{143}\text{Ce}$<br>$^{211}\text{Bi}$<br>$^{214}\text{Pb}$<br>$^{97}\text{Zr}$                                                                                            | 2.15m                                                                            | 主要<br>350.587 <sub>50</sub><br>351.0 <sub>1</sub><br>主要<br>351.992 <sub>62</sub><br>355.391 <sub>0</sub>                                                                                            | ~3.4 <sub>3</sub><br>12.7 <sub>2</sub><br>36.7 <sub>40</sub><br>2.27 <sub>24</sub>                                                                      | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$                                                                                                                 |
| 人工<br>人工<br>人工 | $^{99}\text{Mo}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{127}\text{Sb}$<br>$^{212}\text{Bi}$<br>$^{214}\text{Pb}$<br>$^{214}\text{Bi}$                              |                                                                                  | 777.8 <sub>1</sub><br>780.2 <sub>3</sub><br>782.0 <sub>1</sub><br>783.7 <sub>5</sub><br>785.46 <sub>7</sub><br>785.95 <sub>20</sub><br>786.1 <sub>4</sub>                                           | 4.40 <sub>53</sub><br>1.23 <sub>6</sub><br>0.51 <sub>11</sub><br>15.1<br>1.0 <sub>1</sub><br>0.86 <sub>9</sub><br>0.31 <sub>11</sub>                    |                                                                                                                                               |
| 人工<br>人工       | $^{97}\text{Zr}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{211}\text{Pb}$<br>人工<br>$^{54}\text{Mn}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{214}\text{Pb}$<br>$^{228}\text{Ac}$                        | 312.20 <sub>7</sub> d                                                            | 主要<br>829.801 <sub>0</sub><br>830.4 <sub>2</sub><br>831.8 <sub>1</sub><br>834.827 <sub>21</sub><br>835.6 <sub>2</sub><br>839.20 <sub>20</sub><br>840.4 <sub>2</sub>                                 | 0.22 <sub>2</sub><br>0.65 <sub>12</sub><br>2.8 <sub>6</sub><br>100.<br>1.7 <sub>2</sub><br>0.59 <sub>6</sub><br>0.97 <sub>16</sub>                      | EC                                                                                                                                            |

1 放射能源（生成反応）

- ・ U 系列の天然放射性核種であり、<sup>226</sup>R a の娘の R a C として知られる。

2 半減期 19.7分

3 壊変形式

$\beta -$  100%

4 同定について

- ・ 主要ピーク : 609.3 (46.1%)
- ・ 主要ピーク : 1120.287 (15.0%)
- ・ 主要ピーク : 1764.50 (15.8%) keV
- ・ 609.3 (46.1%) には、<sup>134</sup>C s 604.66 (97.66%)、<sup>125</sup>S b 606.82 (4.92%)、<sup>103</sup>R u 610.33 (5.44%) が、妨害するので注意が必要である。
- ・ 1120.287 (15.0%) には、<sup>65</sup>Z n 1115.518 (50.75) が妨害する。
- ・ 1764.50 (15.8%) を妨害する核種はない。

5 定量について

- ・ 通常 1764.5 (15.8%) のピークを使用するが、妨害核種のないときは 609.3 (46.1%) のピークで計算してもよい。

6 環境試料中の放射能レベル

- ・ 海底土、陸土 : 100 ~ 800 pCi/kg 乾土
- ・ 海産生物 : ~ 20 pCi/kg 生
- ・ 降下物 : ~ 40 pCi/m<sup>3</sup>

7 その他

- ・ U 系列の中で、定量に利用できる  $\gamma$  線放出核種として重要である。
- ・ <sup>226</sup>R a の定量に利用されることもある。
- ・ この核種は、遮蔽体を使用している材質中に含まれるため、バックグラウンドスペクトルから検出される。
- ・ 材質により放射能濃度が異なるので、バックグラウンドレベルを把握しておくことが必要である。

|    | 核種名               | 半減期    | エネルギー (keV) | 放出比 (%)              | 備考                |                               |
|----|-------------------|--------|-------------|----------------------|-------------------|-------------------------------|
| 人工 | <sup>97</sup> Zr  | 36.12m | 主要          | 400.392 <sub>0</sub> | 0.32 <sub>5</sub> | $\beta$ -娘: <sup>211</sup> Bi |
|    | <sup>219</sup> Rn |        |             | 401.8 <sub>2</sub>   | 6.51 <sub>3</sub> |                               |
|    | <sup>211</sup> Pb |        |             | 404.8 <sub>1</sub>   | 3.5 <sub>2</sub>  |                               |
|    | <sup>214</sup> Bi |        |             | 405.74 <sub>3</sub>  | 0.17 <sub>1</sub> |                               |
|    | <sup>228</sup> Ac |        |             | 409.8 <sub>3</sub>   | 2.1 <sub>3</sub>  |                               |

|       | 核種名                       | 半減期       | エネルギー (keV)  | 放出比 (%) | 備考                                                    |
|-------|---------------------------|-----------|--------------|---------|-------------------------------------------------------|
| 機器    | $^{74}\text{Ga}$          | 8.255m    | 主要 595.884   | 91.210  | $\beta^-$                                             |
| 機器    | $^{74}\text{As}$          | 17.795d   | 主要 595.908   | 60.2    | EC, $\beta^+$ , $\beta^-$                             |
| 人工    | $^{125}\text{Sb}$         |           | 主要 600.776   | 18.1    |                                                       |
| 人工    | $^{97}\text{Zr}$          |           | 602.4120     | 1.3914  |                                                       |
| 機器    | $^{74}\text{Ga}$          |           | 604.2210     | 2.8721  |                                                       |
| 人工    | $^{134}\text{Cs}$         |           | 主要 604.662   | 97.5632 |                                                       |
| 人工    | $^{125}\text{Sb}$         |           | 606.824      | 4.94    |                                                       |
| 機器    | $^{74}\text{Ga}$          |           | 608.405      | 14.65   |                                                       |
| ----- | $^{214}\text{Bi}$         | 19.7m     | 主要 609.31210 | 46.112  | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$             |
| 人工    | $^{103}\text{Ru}$         |           | 主要 610.332   | 5.4456  |                                                       |
| 人工    | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |           | 主要 614.3710  | 89.731  |                                                       |
| 人工    | $^{106}\text{Ru}$         |           | 616.3317     | 0.8219  |                                                       |
| 人工    | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | 252.23d   | 620.3461     | 2.785   | $\beta^-$ , IT                                        |
| 人工    | $^{132}\text{I}$          |           | 621.02       | 2.01    |                                                       |
| 人工    | $^{106}\text{Ru}$         |           | 主要 622.23    | 9.814   |                                                       |
| 人工    | $^{124}\text{Sb}$         | 60.203d   | 645.824      | 7.2322  | $\beta^-$                                             |
| 人工    | $^{132}\text{I}$          |           | 650.62       | 2.72    |                                                       |
| 人工    | $^{91}\text{Sr}$          |           | 652.33       | 2.98    |                                                       |
| 人工    | $^{91}\text{Sr}$          |           | 652.92       | 7.611   |                                                       |
| 人工    | $^{91}\text{Sr}$          |           | 653.2        | 0.469   |                                                       |
| 人工    | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |           | 主要 657.74910 | 94.41   | $\beta^-$ 親: $^{97}\text{Zr}$                         |
| 人工    | $^{97}\text{Nb}$          |           | 657.9210     | 98.21   | $\beta^-$ 娘: $^{137\text{m}}\text{Ba}$                |
| 人工    | $^{137}\text{Cs}$         | 30.17434Y | 主要 661.63819 | 85.05   |                                                       |
| 人工    | $^{143}\text{Ce}$         |           | 664.5510     | 5.35    |                                                       |
| ----- | $^{214}\text{Bi}$         |           | 665.45322    | 1.569   |                                                       |
| 人工    | $^{132}\text{I}$          |           | 主要 667.698   | 98.71   |                                                       |
| 機器    | $^{63}\text{Zn}$          | 38.01m    | 主要 669.625   | 8.44    | $\beta^+$ , EC                                        |
| 人工    | $^{132}\text{I}$          |           | 669.83       | 4.98    |                                                       |
| 人工    | $^{132}\text{I}$          |           | 671.63       | 5.24    |                                                       |
| 人工    | $^{125}\text{Sb}$         |           | 671.664      | 1.71    |                                                       |
| 人工    | $^{127}\text{Sb}$         | 3.917d    | 主要 685.75    | 36.1    | $\beta^-$                                             |
| 人工    | $^{147}\text{Nd}$         |           | 685.8035     | 0.7113  |                                                       |
| 人工    | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |           | 686.9881     | 6.454   |                                                       |
| 人工    | $^{97}\text{Zr}$          |           | 690.6320     | 0.254   |                                                       |
|       | Unknown                   |           | 693.         |         |                                                       |
| 人工    | $^{129\text{m}}\text{Te}$ | 33.5212d  | 主要 695.985   | 2.94    | IT, $\beta^-$ 娘: $^{129}\text{Te}$ , $^{129}\text{I}$ |
| 人工    | $^{97}\text{Zr}$          |           | 699.23       | 0.122   |                                                       |
| ----- | $^{214}\text{Bi}$         |           | 703.114      | 0.473   |                                                       |
| 人工    | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |           | 706.67013    | 16.30   |                                                       |

|    | 核種名                       | 半減期                                          | エネルギー (keV)          |                                                   | 放出比 (%)             | 備考                                                       |
|----|---------------------------|----------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         | 63.986d                                      | 主要                   | 719.86 <sub>3</sub>                               | 0.40 <sub>3</sub>   | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                                              |                      | 721.96 <sub>11</sub>                              | ~5.1 <sub>5</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         |                                              |                      | 722.78 <sub>4</sub>                               | 11.30 <sub>16</sub> |                                                          |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |                                              |                      | 722.89 <sub>32</sub>                              | 1.8 <sub>0</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                                              |                      | 722.95 <sub>8</sub>                               | 89.7 <sub>31</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          |                                              |                      | 724.18 <sub>412</sub>                             | 43.1 <sub>20</sub>  |                                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                                              |                      | 726.7 <sub>5</sub>                                | 0.78 <sub>27</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                              |                      | 727.1 <sub>2</sub>                                | 6.5 <sub>3</sub>    |                                                          |
|    | $^{212}\text{Bi}$         |                                              |                      | 727.27 <sub>7</sub>                               | 6.3 <sub>2</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ |                                              |                      | 729.62 <sub>5</sub>                               | 0.69 <sub>13</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          |                                              | 主要                   | 739.4 <sub>1</sub>                                | 12.6 <sub>8</sub>   | $^{97\text{m}}\text{Nb}$                                 |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}_d$       |                                              |                      | 742.5 <sub>0</sub>                                | 0.0                 |                                                          |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          |                                              |                      | 743.36 <sub>10D</sub>                             | 92.8 <sub>3</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                                              |                      | 744.26 <sub>013</sub>                             | 4.65 <sub>4</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{208}\text{Tl}$         | 34.97 <sub>3d}</sub><br>1.175 <sub>3m}</sub> | 主要                   | 763.13 <sub>8</sub>                               | 1.64 <sub>9</sub>   | $\beta^-$ 親: $^{95}\text{Zr}$<br>$\beta^-$ , IT          |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ |                                              |                      | 763.92 <sub>813</sub>                             | 22.3 <sub>1</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{95}\text{Nb}$          |                                              |                      | 765.78 <sub>619</sub>                             | 99.8 <sub>21</sub>  |                                                          |
|    | $^{234\text{m}}\text{Pa}$ |                                              |                      | 766.6 <sub>2</sub>                                | 0.21 <sub>1</sub>   |                                                          |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                                              |                      | 768.35 <sub>612</sub>                             | 4.91 <sub>20</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$         |                                              | 主要                   | 771.8 <sub>3</sub>                                | 1.6 <sub>2</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                              |                      | 772.61 <sub>8</sub>                               | 76.21 <sub>9</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          |                                              |                      | 777.8 <sub>1</sub>                                | 4.40 <sub>53</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                                              |                      | 780.2 <sub>3</sub>                                | 1.23 <sub>6</sub>   |                                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                                              |                      | 782.0 <sub>1</sub>                                | 0.51 <sub>11</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{127}\text{Sb}$         |                                              |                      | 783.7 <sub>5</sub>                                | 15.1                |                                                          |
|    | $^{212}\text{Bi}$         |                                              |                      | 785.46 <sub>7</sub>                               | 1.0 <sub>1</sub>    |                                                          |
|    | $^{214}\text{Pb}$         |                                              |                      | 785.95 <sub>20</sub>                              | 0.86 <sub>9</sub>   |                                                          |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                                              |                      | 786.1 <sub>4</sub>                                | 0.31 <sub>11</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{134}\text{Cs}$         |                                              |                      | 138.3763 <sub>17d}</sub><br>4.183 <sub>17m}</sub> | 主要                  |                                                          |
|    | $^{210}\text{Po}$         | 803.                                         | 0.00122 <sub>9</sub> |                                                   |                     |                                                          |
|    | $^{206}\text{Tl}$         | 803.3                                        | 0.0055 <sub>5</sub>  |                                                   |                     |                                                          |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          | 804.53 <sub>10</sub>                         | 0.65 <sub>7</sub>    |                                                   |                     |                                                          |
|    | $^{214}\text{Bi}$         | 806.17 <sub>418</sub>                        | 1.23 <sub>6</sub>    |                                                   |                     |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          | 809.8 <sub>2</sub>                           | 2.9 <sub>3</sub>     |                                                   |                     |                                                          |
| 人工 | $^{58}\text{Co}$          | 810.75 <sub>533</sub>                        | 99.44 <sub>2</sub>   |                                                   |                     |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          | 812.2 <sub>2</sub>                           | 5.6 <sub>5</sub>     |                                                   |                     |                                                          |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         | 815.85 <sub>7</sub>                          | 22.4 <sub>7</sub>    |                                                   |                     |                                                          |
| 人工 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | 818.01 <sub>612</sub>                        | 7.28 <sub>5</sub>    |                                                   |                     |                                                          |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$         | 818.50 <sub>4</sub>                          | 99.70 <sub>6</sub>   |                                                   |                     |                                                          |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$          | 822.8 <sub>1</sub>                           | 0.140 <sub>19</sub>  |                                                   |                     |                                                          |

|                | 核種名                                                                                                            | 半減期                  | エネルギー (keV)                                                                                                           | 放出比 (%)                                                                                   | 備考            |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 人工             | $^{214}\text{Bi}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$                                                                 |                      | 934.061 <sub>14</sub><br>937.478 <sub>13</sub>                                                                        | 3.19 <sub>14</sub><br>34.3 <sub>2</sub>                                                   |               |
| 人工             | $^{65}\text{Zn}$<br>$^{214}\text{Bi}$                                                                          | 244.0 <sub>2</sub> d | 1115.518 <sub>25</sub><br>1120.287 <sub>2</sub>                                                                       | 50.75 <sub>10</sub><br>15.0 <sub>6</sub>                                                  | EC, $\beta^+$ |
| 人工<br>人工<br>人工 | $^{132}\text{I}$<br>$^{97}\text{Zr}$<br>$^{132}\text{I s}$<br>$^{214}\text{Bi}$                                |                      | 1143.4 <sub>2</sub><br>1147.95 <sub>10</sub><br>1152.88 <sub>8</sub><br>1155.19 <sub>2</sub>                          | 1.4 <sub>1</sub><br>2.64 <sub>29</sub><br>0.0<br>1.69 <sub>9</sub>                        |               |
| 人工             | $^{136}\text{Cs}$<br>$^{214}\text{Bi}$                                                                         |                      | 1235.34 <sub>5</sub><br>1238.11 <sub>1</sub>                                                                          | 19.7 <sub>2</sub><br>5.95 <sub>21</sub>                                                   |               |
|                | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{214}\text{Bi e}$                             |                      | 1245.0 <sub>8</sub><br>1246.9 <sub>2</sub><br>1249.3 <sub>8</sub><br>1253.50                                          | 0.16 <sub>9</sub><br>0.38 <sub>15</sub><br>0.11 <sub>7</sub><br>0.0                       |               |
| 人工             | $^{97}\text{Zr}$<br>$^{214}\text{Bi}$                                                                          |                      | 1276.09 <sub>10</sub><br>1280.96 <sub>2</sub>                                                                         | 0.974 <sub>96</sub><br>1.47 <sub>9</sub>                                                  |               |
|                | $^{214}\text{Bi}$                                                                                              |                      | 1377.669 <sub>14</sub>                                                                                                | 4.05 <sub>18</sub>                                                                        |               |
| 人工<br>人工       | $^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{214}\text{Bi}$<br>$^{136}\text{Cs s}$                                          |                      | 1384.270 <sub>13</sub><br>1385.31 <sub>3</sub><br>1388.65 <sub>2</sub>                                                | 24.6 <sub>1</sub><br>0.78 <sub>5</sub><br>0.0                                             |               |
| 人工<br>人工<br>人工 | $^{132}\text{I}$<br>$^{134}\text{Cs s}$<br>$^{214}\text{Bi}$<br>$^{134}\text{Cs s}$<br>$^{214}\text{Bi}$       |                      | 1398.57 <sub>10</sub><br>1400.42 <sub>4</sub><br>1401.50 <sub>4</sub><br>1406.50 <sub>5</sub><br>1407.98 <sub>4</sub> | 7.1 <sub>3</sub><br>0.0<br>1.39 <sub>8</sub><br>0.0<br>2.48 <sub>10</sub>                 |               |
| 人工<br>人工       | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{132}\text{I s}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{214}\text{Bi}$ |                      | 1496.2 <sub>2</sub><br>1499.7 <sub>4</sub><br>1501.7 <sub>2</sub><br>1505.001 <sub>2</sub><br>1509.228 <sub>17</sub>  | 0.98 <sub>13</sub><br>0.0<br>0.54 <sub>7</sub><br>13.2 <sub>1</sub><br>2.19 <sub>11</sub> |               |
|                | $^{214}\text{Bi}$                                                                                              |                      | 1583.22 <sub>4</sub>                                                                                                  | 0.72 <sub>5</sub>                                                                         |               |

|    | 核種名                         | 半減期 | エネルギー (keV) |                        | 放出比 (%)            | 備考 |
|----|-----------------------------|-----|-------------|------------------------|--------------------|----|
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$           |     |             | 1588.3 <sub>2</sub>    | 3.5 <sub>5</sub>   |    |
|    | $^{110\text{m}}\text{Ag s}$ |     |             | 1591.337 <sub>26</sub> | 0.0                |    |
| 人工 | $^{208}\text{Tl d}$         |     |             | 1592.5                 | 0.0                |    |
|    | $^{140}\text{La}$           |     | 主要          | 1596.49 <sub>24</sub>  | 95.5 <sub>3</sub>  |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |     |             | 1599.31 <sub>6</sub>   | 0.33 <sub>3</sub>  |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |     | 主要          | 1661.28 <sub>6</sub>   | 1.15 <sub>7</sub>  |    |
| 人工 | $^{132}\text{I s}$          |     |             | 1727.17 <sub>7</sub>   | 0.0                |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |     |             | 1729.60 <sub>2</sub>   | 2.98 <sub>13</sub> |    |
|    | $^{214}\text{Bi}$           |     | 主要          | 1764.50 <sub>2</sub>   | 15.8 <sub>6</sub>  |    |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$           |     |             | 1847.42 <sub>3</sub>   | 2.10 <sub>9</sub>  |    |
|    | $^{97}\text{Zr}$            |     |             | 1851.55 <sub>10</sub>  | 0.35 <sub>4</sub>  |    |

$^{219}\text{Rn}$

|    | 核種名               | 半減期                    | エネルギー (keV) |                      | 放出比 (%)            | 備考                             |
|----|-------------------|------------------------|-------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                        |             | 262.7 <sub>1</sub>   | 1.44 <sub>9</sub>  |                                |
| 機器 | $^{75}\text{Ge}$  |                        | 主要          | 264.6 <sub>1</sub>   | 11.1 <sub>11</sub> |                                |
| 人工 | $^{93}\text{Y}$   | 10.25 <sub>1</sub> h   | 主要          | 266.9 <sub>1</sub>   | 6.8 <sub>15</sub>  | $\beta^-$                      |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                        | 主要          | 269.6                | 14.0 <sub>3</sub>  |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                        |             | 270.2 <sub>3</sub>   | 3.6 <sub>6</sub>   |                                |
|    | $^{219}\text{Rn}$ | 3.96 <sub>1</sub> s    | 主要          | 271.20 <sub>5</sub>  | 10.1               | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$  |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$  |                        |             | 272.27 <sub>20</sub> | 0.25 <sub>4</sub>  |                                |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                        |             | 273.65 <sub>4</sub>  | 12.7 <sub>2</sub>  |                                |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                        |             | 275.42 <sub>2</sub>  | 0.82 <sub>18</sub> |                                |
|    | $^{208}\text{Tl}$ | 3.0527 <sub>33</sub> m |             | 277.4 <sub>3</sub>   | 6.8 <sub>3</sub>   | $\beta^-$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                        | 主要          | 277.60               | 14.5 <sub>4</sub>  |                                |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$  |                        |             | 400.39 <sub>20</sub> | 0.32 <sub>5</sub>  |                                |
|    | $^{219}\text{Rn}$ |                        |             | 401.8 <sub>2</sub>   | 6.51 <sub>3</sub>  |                                |
|    | $^{211}\text{Pb}$ | 36.1 <sub>2</sub> m    | 主要          | 404.8 <sub>1</sub>   | 3.5 <sub>2</sub>   | $\beta^-$ 娘: $^{211}\text{Bi}$ |
|    | $^{214}\text{Bi}$ |                        |             | 405.74 <sub>3</sub>  | 0.17 <sub>1</sub>  |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                        |             | 409.8 <sub>3</sub>   | 2.1 <sub>3</sub>   |                                |

|       | 核種名               | 半減期                          | エネルギー (keV) |            | 放出比 (%)   | 備考                                |                               |
|-------|-------------------|------------------------------|-------------|------------|-----------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 人工    | <sup>228</sup> Ac | 6.13h                        | 主要          | 99.51 )    | 1.32      | $\beta^-$ 親: <sup>232</sup> Th    |                               |
|       | <sup>239</sup> Np | 2.3464d                      |             | 99.55 )    | 14.56     | $\beta^-$ Pu(K $\alpha$ 2)        |                               |
| 人工    | <sup>228</sup> Ac |                              |             | 100.4015 ) | 0.122     |                                   |                               |
| 人工    | <sup>239</sup> Np |                              |             | 103.76 )   | 22.28     | Pu(K $\alpha$ 1)                  |                               |
| 人工    | <sup>239</sup> Np |                              |             | 106.14 )   | 27.89     |                                   |                               |
|       | <sup>235</sup> U  | 7.0385<br>*10 <sup>8</sup> y |             | 109.142 )  | 1.52      | $\alpha$                          |                               |
| 人工    | <sup>132</sup> Te |                              |             | 111.768 )  | 1.83      |                                   |                               |
| 人工    | <sup>132</sup> Te |                              |             | 116.308 )  | 1.94      |                                   |                               |
| 人工    | <sup>239</sup> Np |                              |             | 117.26 )   | 8.14      | Pu(K $\beta$ 1)                   |                               |
| 人工    | <sup>147</sup> Nd |                              |             | 120.4909 ) | 0.407     |                                   |                               |
| 人工    | <sup>239</sup> Np |                              |             | 120.6 )    | 2.7710    | Pu(K $\beta$ 2)                   |                               |
| ----- | <sup>223</sup> Ra | 11.434611d                   |             | -----      | 122.4     | -----                             | $\alpha$ 親: <sup>227</sup> Ac |
| 機器    | <sup>75m</sup> Ge | 47.75s                       |             | 主要         | 139.683 ) | 39.2                              | IT, $\beta^-$                 |
| 人工    | <sup>99m</sup> Tc | 6.0072h                      | 主要          | 140.5116 ) | 89.02     | IT, $\beta^-$ 親: <sup>99</sup> Mo |                               |
| 人工    | <sup>99m</sup> Tc |                              |             | 142.633 )  | 6.43      |                                   |                               |
| 人工    | <sup>59</sup> Fe  | 44.563d                      |             | 142.6484 ) | 1.024     | $\beta^-$                         |                               |
|       | <sup>235</sup> U  |                              | 主要          | 143.762 )  | 11.1      |                                   |                               |
| ----- | <sup>223</sup> Ra | -----                        | -----       | 144.3      | -----     | -----                             |                               |
| 人工    | <sup>141</sup> Ce | 32.551d                      | 主要          | 145.444 )  | 48.44     | $\beta^-$                         |                               |
| 人工    | <sup>132</sup> I  | 2.28464h                     |             | 147.21 )   | 0.242     | $\beta^-$ 親: <sup>132</sup> Te    |                               |
| 人工    | <sup>136</sup> Cs |                              |             | 153.225 )  | 7.4716    |                                   |                               |
|       | <sup>228</sup> Ac |                              |             | 154.02 )   | 0.8011    |                                   |                               |
| ----- | <sup>223</sup> Ra | -----                        | -----       | 154.3      | -----     | -----                             |                               |
| 人工    | <sup>132</sup> I  |                              | 主要          | 262.71 )   | 1.449     |                                   |                               |
| 機器    | <sup>75</sup> Ge  |                              | 主要          | 264.61 )   | 11.111    |                                   |                               |
| 人工    | <sup>93</sup> Y   | 10.251h                      | 主要          | 266.91 )   | 6.815     | $\beta^-$                         |                               |
| ----- | <sup>223</sup> Ra | -----                        | 主要          | 269.6      | -----     | -----                             |                               |
|       | <sup>228</sup> Ac |                              | 主要          | 270.23 )   | 3.66      |                                   |                               |
|       | <sup>219</sup> Rn | 3.961s                       | 主要          | 271.205 )  | 10.1      | $\alpha$ 親: <sup>227</sup> Ac     |                               |
| 人工    | <sup>97</sup> Zr  |                              |             | 272.2720 ) | 0.254     |                                   |                               |
| 人工    | <sup>136</sup> Cs |                              |             | 273.654 )  | 12.72     |                                   |                               |
| 人工    | <sup>147</sup> Nd |                              |             | 275.422 )  | 0.8218    |                                   |                               |
|       | <sup>208</sup> Tl | 3.052733m                    |             | 277.43 )   | 6.83      | $\beta^-$ 親: <sup>228</sup> Th    |                               |
| 人工    | <sup>239</sup> Np |                              | 主要          | 277.60 )   | 14.54     |                                   |                               |

|    | 核種名               | 半減期      | エネルギー (keV) |           | 放出比 (%) | 備考                             |
|----|-------------------|----------|-------------|-----------|---------|--------------------------------|
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ | 27.7016d | 主要          | 315.9     | 1.525   | EC                             |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |          |             | 316.54    | 0.164   |                                |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |          |             | 319.413   | 2.03    |                                |
| 人工 | $^{51}\text{Cr}$  |          |             | 320.0761  | 10.26   |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |          |             | 321.94    | 0.223   |                                |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |          |             | 324.1     | 4.1226  |                                |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ | 40.275h  | 主要          | 328.34    | 3.14    | $\beta^-$ 親: $^{140}\text{Ba}$ |
|    | $^{140}\text{La}$ |          |             | 328.76812 | 18.56   |                                |
|    | $^{231}\text{Pa}$ |          |             | 329.896   | 1.44    |                                |
|    | $^{227}\text{Th}$ |          |             | 329.92    | 2.48    |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |          |             | 332.94    | 0.355   |                                |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |          |             | 334.3     | 1.957   |                                |
|    | $^{223}\text{Ra}$ | 338.6    | 2.9620      |           |         |                                |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ | 主要       | 主要          | 338.74    | 12.2    |                                |
|    | $^{136}\text{Cs}$ |          |             | 340.575   | 46.85   |                                |
| 人工 | $^{223}\text{Ra}$ |          |             | 445.5     | 1.5418  |                                |
|    | $^{132}\text{I}$  |          |             | 446.04    | 0.678   |                                |

$^{224}\text{Ra}$

|    | 核種名               | 半減期       | エネルギー (keV) |           | 放出比 (%)  | 備考                                                              |
|----|-------------------|-----------|-------------|-----------|----------|-----------------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ | 10.64312h | 主要          | 228.166   | 88.3     | $\beta^-$ 娘: $^{212}\text{Bi}$<br>$\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |           |             | 228.2     | 11.43    |                                                                 |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$ |           |             | 231.55933 | ~ 2.02   |                                                                 |
|    | $^{227}\text{Th}$ |           |             | 236.02    | 11.2     |                                                                 |
|    | $^{212}\text{Pb}$ |           |             | 238.6265  | 43.1     |                                                                 |
|    | $^{224}\text{Ra}$ |           |             | 3.66519d  | 240.9815 |                                                                 |
|    | $^{214}\text{Pb}$ |           |             | 241.92430 | 7.68     |                                                                 |

$^{226}\text{Ra}$

|    | 核種名               | 半減期    | エネルギー (keV) |          | 放出比 (%)  | 備考                              |
|----|-------------------|--------|-------------|----------|----------|---------------------------------|
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$ | 2.712y | 主要          | 176.292  | 6.85     | $\beta^-$ 娘: $^{125m}\text{Te}$ |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |        |             | 176.555  | 13.62    |                                 |
| 人工 | $^{131}\text{I}$  |        |             | 177.2102 | 0.260    |                                 |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$  |        |             | 181.075  | 6.2983   |                                 |
|    | $^{235}\text{U}$  |        |             | 185.7155 | 54.      |                                 |
|    | $^{226}\text{Ra}$ |        |             | 1599.7y  | 186.1804 |                                 |

|                   | 核種名                   | 半減期                                 | エネルギー (keV)             | 放出比 (%)             | 備考                                        |                               |                                           |
|-------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|
| 人工                | $^{210}\text{Pb}$     | 22.2622y                            | 主要 46.503 <sub>15</sub> | 4.058               | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{226}\text{Ra}$ |                               |                                           |
|                   | $^{132}\text{Te}$     | 78.28h                              | 49.72 <sub>1</sub>      | 14.2                | $\beta^-$ 娘: $^{132}\text{I}$             |                               |                                           |
|                   | $^{227}\text{Th}$     | 18.717652d                          | 50.22                   | 7.222               | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$             |                               |                                           |
|                   | $^{214}\text{Pb}$     | 26.8m                               | 53.226 <sub>14</sub>    | 2.24                | $\beta^-$ 親: $^{226}\text{Ra}$            |                               |                                           |
| 人工                | $^{143}\text{Ce}$     | 33.02h                              | 主要 57.365 <sub>1</sub>  | ~12.1               | $\beta^-$                                 |                               |                                           |
| 人工                | Pb(K $\alpha$ 2)      | 127.7y                              | 72.804                  | 6.68                | EC, $\beta^+$ , IT                        |                               |                                           |
|                   | Pb(K $\alpha$ 1)      |                                     | 74.969                  |                     |                                           |                               |                                           |
|                   | Bi(K $\alpha$ 1)      |                                     | 77.108                  |                     |                                           |                               |                                           |
|                   | $^{108m}\text{Ag}$    |                                     | 79.45                   |                     |                                           |                               |                                           |
|                   | $^{227}\text{Th}$     |                                     | 79.82                   |                     |                                           |                               |                                           |
| 人工                | $^{144}\text{Ce}$     | 8.040 <sub>1</sub> d                | 80.106 <sub>5</sub>     | 1.13 <sub>18</sub>  | $\beta^-$                                 |                               |                                           |
| 人工                | $^{131}\text{I}$      |                                     | 80.183 <sub>2</sub>     | 2.6 <sub>1</sub>    |                                           |                               |                                           |
|                   | $^{231}\text{Th}$     |                                     | 84.21 <sub>2</sub>      | 6.55                |                                           | $\beta^-$ 親: $^{235}\text{U}$ |                                           |
|                   | $^{228}\text{Th}$     |                                     | 1.9131344y              | 84.371 <sub>3</sub> |                                           | 1.216                         | $\alpha$ 親: $^{232}\text{Th}$             |
|                   | Pb(K $\beta$ 1)       |                                     | 84.936                  |                     |                                           |                               |                                           |
| 人工                | Bi(K $\beta$ 1)       | 10.98 <sub>1</sub> d                | 87.343                  | 0.94 <sub>19</sub>  | $\beta^-$                                 |                               |                                           |
|                   | $^{231}\text{Th}$     |                                     | 89.95 <sub>2</sub>      |                     |                                           |                               |                                           |
|                   | $^{147}\text{Nd}$     |                                     | 91.1050 <sub>16</sub>   |                     |                                           | 27.24 <sub>7</sub>            |                                           |
|                   | $^{234}\text{Th}$     |                                     | 92.80 <sub>2</sub>      |                     |                                           | 5.4 <sub>3</sub>              |                                           |
|                   | $^{227}\text{Th}$     |                                     | 94.0 <sub>2</sub>       |                     |                                           | 1.24                          |                                           |
| 人工                | $^{132}\text{Te}$     |                                     | 主要 228.16 <sub>6</sub>  | 88.3                |                                           |                               |                                           |
| 人工                | $^{239}\text{Np}$     |                                     | 228.2                   | 11.4 <sub>3</sub>   |                                           |                               |                                           |
| 人工                | $^{143}\text{Ce}$     |                                     | 231.559 <sub>33</sub>   | ~2.0 <sub>2</sub>   |                                           |                               |                                           |
| $^{227}\text{Th}$ | 主要 236.0 <sub>2</sub> |                                     | 11.2                    |                     |                                           |                               |                                           |
|                   | $^{212}\text{Pb}$     | 10.643 <sub>12</sub> h              | 主要 238.626 <sub>5</sub> | 43.1                | $\beta^-$ 娘: $^{212}\text{Bi}$            |                               |                                           |
|                   | $^{224}\text{Ra}$     | 3.665 <sub>19</sub> d               | 主要 240.981 <sub>5</sub> | 3.9 <sub>1</sub>    | $\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$             |                               |                                           |
|                   | $^{214}\text{Pb}$     |                                     | 241.924 <sub>30</sub>   | 7.6 <sub>8</sub>    |                                           |                               |                                           |
| 人工                | $^{97}\text{Zr}$      |                                     | 254.152 <sub>0</sub>    | 1.25 <sub>14</sub>  |                                           |                               |                                           |
| 人工                | $^{239}\text{Np}$     |                                     | 254.4                   | 0.11 <sub>1</sub>   |                                           |                               |                                           |
| 人工                | $^{132}\text{I}$      |                                     | 254.8 <sub>2</sub>      | 0.19 <sub>3</sub>   |                                           |                               |                                           |
| $^{227}\text{Th}$ | 256.3 <sub>2</sub>    |                                     | 6.32 <sub>0</sub>       |                     |                                           |                               |                                           |
| 人工                | $^{231}\text{Pa}$     | 3.276 <sub>11</sub> $\times 10^4$ y | 主要 283.56 <sub>6</sub>  | 1.7 <sub>3</sub>    | $\alpha$ 娘: $^{227}\text{Ac}$             |                               |                                           |
|                   | $^{131}\text{I}$      |                                     | 284.298 <sub>5</sub>    | 6.0 <sub>1</sub>    |                                           |                               |                                           |
|                   | $^{239}\text{Np}$     |                                     | 285.5                   | 0.76 <sub>2</sub>   |                                           |                               |                                           |
|                   | $^{227}\text{Th}$     |                                     | 286.2 <sub>2</sub>      | 1.44                |                                           |                               |                                           |
|                   | $^{212}\text{Bi}$     |                                     | 60.600 <sub>43</sub> m  | 288.07 <sub>7</sub> |                                           | 0.32 <sub>3</sub>             | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$ |

|    | 核種名               | 半減期                   | エネルギー (keV)         |                       | 放出比 (%)                                                                                                                                                 | 備考                              |
|----|-------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$ | 39.355d               | 主要                  | 293.262 <sub>21</sub> | ~42.<br>0.242 <sub>25</sub><br>18.9 <sub>20</sub><br>2.5 <sub>7</sub><br>1.9 <sub>7</sub><br>3.3 <sub>3</sub><br>2.5 <sub>7</sub><br>4.37 <sub>28</sub> | $\beta^-$ 娘: $^{103m}\text{Rh}$ |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$ |                       |                     | 294.98 <sub>2</sub>   |                                                                                                                                                         |                                 |
|    | $^{214}\text{Pb}$ |                       | 主要                  | 295.217 <sub>39</sub> |                                                                                                                                                         |                                 |
|    | $^{231}\text{Pa}$ |                       |                     | 299.94 <sub>6</sub>   |                                                                                                                                                         |                                 |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                       |                     | 300.0 <sub>2</sub>    |                                                                                                                                                         |                                 |
|    | $^{212}\text{Pb}$ |                       |                     | 300.11 <sub>5</sub>   |                                                                                                                                                         |                                 |
|    | $^{231}\text{Pa}$ |                       |                     | 302.52 <sub>6</sub>   |                                                                                                                                                         |                                 |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$ |                       | 304.85 <sub>1</sub> |                       |                                                                                                                                                         |                                 |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ | 27.701 <sub>6</sub> d | 主要                  | 315.9                 | 1.52 <sub>5</sub>                                                                                                                                       | EC                              |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                       |                     | 316.5 <sub>4</sub>    | 0.16 <sub>4</sub>                                                                                                                                       |                                 |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                       |                     | 319.41 <sub>3</sub>   | 2.0 <sub>3</sub>                                                                                                                                        |                                 |
| 人工 | $^{51}\text{Cr}$  |                       |                     | 320.076 <sub>1</sub>  | 10.2 <sub>6</sub>                                                                                                                                       |                                 |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                       |                     | 321.9 <sub>4</sub>    | 0.22 <sub>3</sub>                                                                                                                                       |                                 |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                       | 324.1               | 4.12 <sub>26</sub>    |                                                                                                                                                         |                                 |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                       | 328.3 <sub>4</sub>  | 3.1 <sub>4</sub>      |                                                                                                                                                         |                                 |
| 人工 | $^{140}\text{La}$ | 40.27 <sub>5</sub> h  |                     | 328.768 <sub>12</sub> | 18.5 <sub>6</sub>                                                                                                                                       | $\beta^-$ 親: $^{140}\text{Ba}$  |
|    | $^{231}\text{Pa}$ |                       |                     | 329.89 <sub>6</sub>   | 1.4 <sub>4</sub>                                                                                                                                        |                                 |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                       |                     | 329.9 <sub>2</sub>    | 2.4 <sub>8</sub>                                                                                                                                        |                                 |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                       |                     | 332.9 <sub>4</sub>    | 0.35 <sub>5</sub>                                                                                                                                       |                                 |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                       |                     | 334.3                 | 1.95 <sub>7</sub>                                                                                                                                       |                                 |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                       |                     | 338.6                 | 2.96 <sub>20</sub>                                                                                                                                      |                                 |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                       | 主要                  | 338.7 <sub>4</sub>    | 12.2                                                                                                                                                    |                                 |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                       | 主要                  | 340.57 <sub>5</sub>   | 46.8 <sub>5</sub>                                                                                                                                       |                                 |

|    | 核種名               | 半減期                              | エネルギー (keV) |                         | 放出比 (%)             | 備考                             |
|----|-------------------|----------------------------------|-------------|-------------------------|---------------------|--------------------------------|
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ | 6.13h                            |             | 99.5 <sub>1</sub> )     | 1.3 <sub>2</sub>    | $\beta^-$ 親: $^{232}\text{Th}$ |
|    | $^{239}\text{Np}$ | 2.346 <sub>4</sub> d             |             | 99.55 )                 | 14.5 <sub>6</sub>   | $\beta^-$ Pu(K $\alpha$ 2)     |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ |                                  |             | 100.40 <sub>15</sub> )  | 0.12 <sub>2</sub>   |                                |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                  | 主要          | 103.76 )                | 22.2 <sub>8</sub>   | Pu(K $\alpha$ 1)               |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                  |             | 106.14 )                | 27.8 <sub>9</sub>   |                                |
| 人工 | $^{235}\text{U}$  | 7.038 <sub>5</sub><br>* $10^8$ y |             | 109.14 <sub>2</sub> )   | 1.5 <sub>2</sub>    | $\alpha$                       |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ |                                  |             | 111.76 <sub>8</sub> )   | 1.8 <sub>3</sub>    |                                |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ |                                  |             | 116.30 <sub>8</sub> )   | 1.9 <sub>4</sub>    |                                |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                  |             | 117.26 )                | 8.1 <sub>4</sub>    | Pu(K $\beta$ 1)                |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                                  |             | 120.49 <sub>9</sub> )   | 0.40 <sub>7</sub>   |                                |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                  |             | 120.6 )                 | 2.77 <sub>10}</sub> | Pu(K $\beta$ 2)                |
|    | $^{223}\text{Ra}$ | 11.4346 <sub>11</sub> d          |             | 122.4 )                 | 1.23 <sub>7</sub>   | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$  |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ |                                  | 主要          | 129.1 <sub>1</sub> )    | 2.6 <sub>3</sub>    |                                |
|    | $^{144}\text{Ce}$ |                                  |             | 133.54 <sub>45</sub> )  | 11.1 <sub>2</sub>   |                                |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                                  |             | 153.22 <sub>5</sub> )   | 7.47 <sub>16}</sub> |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                                  |             | 154.0 <sub>2</sub> )    | 0.80 <sub>11}</sub> |                                |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                                  |             | 154.3 )                 | 5.74 <sub>36}</sub> |                                |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ |                                  |             | 209.5 <sub>2</sub> )    | 4.3 <sub>7</sub>    |                                |
|    | $^{239}\text{Np}$ |                                  |             | 209.76 )                | 3.42 <sub>10}</sub> |                                |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                                  | 主要          | 262.7 <sub>1</sub> )    | 1.44 <sub>9</sub>   |                                |
| 機器 | $^{75}\text{Ge}$  |                                  | 主要          | 264.6 <sub>1</sub> )    | 11.1 <sub>11}</sub> | $\beta^-$                      |
| 人工 | $^{93}\text{Y}$   | 10.25 <sub>1</sub> h             | 主要          | 266.9 <sub>1</sub> )    | 6.8 <sub>15}</sub>  |                                |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                                  | 主要          | 269.6 )                 | 14.0 <sub>3</sub>   |                                |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                                  |             | 270.2 <sub>3</sub> )    | 3.6 <sub>6</sub>    |                                |
| 人工 | $^{219}\text{Rn}$ | 3.96 <sub>1</sub> s              | 主要          | 271.20 <sub>5</sub> )   | 10.1                | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$  |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$  |                                  |             | 272.27 <sub>20}</sub> ) | 0.25 <sub>4</sub>   |                                |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                                  |             | 273.65 <sub>4</sub> )   | 12.7 <sub>2</sub>   |                                |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                                  |             | 275.42 <sub>2</sub> )   | 0.82 <sub>18}</sub> |                                |
|    | $^{208}\text{Tl}$ | 3.0527 <sub>33</sub> m           |             | 277.4 <sub>3</sub> )    | 6.8 <sub>3</sub>    | $\beta^-$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                                  | 主要          | 277.60 )                | 14.5 <sub>4</sub>   |                                |

|    | 核種名                       | 半減期                   | エネルギー (keV) | 放出比 (%)               | 備考                  |                                                          |
|----|---------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         | 27.701 <sub>6</sub> d | 主要          | 315.9                 | 1.52 <sub>5</sub>   | EC                                                       |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       |             | 316.5 <sub>4</sub>    | 0.16 <sub>4</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$         |                       |             | 319.41 <sub>3</sub>   | 2.0 <sub>3</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{51}\text{Cr}$          |                       |             | 320.0761              | 10.2 <sub>6</sub>   |                                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                       |             | 321.9 <sub>4</sub>    | 0.22 <sub>3</sub>   |                                                          |
|    | $^{223}\text{Ra}$         | 40.27 <sub>5</sub> h  |             | 324.1                 | 4.12 <sub>26</sub>  | $\beta^-$ 親: $^{140}\text{Ba}$                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                       |             | 328.3 <sub>4</sub>    | 3.1 <sub>4</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |                       |             | 328.7681 <sub>2</sub> | 18.5 <sub>6</sub>   |                                                          |
|    | $^{231}\text{Pa}$         |                       |             | 329.89 <sub>6</sub>   | 1.4 <sub>4</sub>    |                                                          |
|    | $^{227}\text{Th}$         |                       |             | 329.9 <sub>2</sub>    | 2.4 <sub>8</sub>    |                                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                       | 主要          | 332.9 <sub>4</sub>    | 0.35 <sub>5</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$         |                       |             | 334.3                 | 1.95 <sub>7</sub>   |                                                          |
|    | $^{223}\text{Ra}$         |                       |             | 338.6                 | 2.96 <sub>20</sub>  |                                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                       |             | 338.7 <sub>4</sub>    | 12.2                |                                                          |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$         |                       |             | 340.57 <sub>5</sub>   | 46.8 <sub>5</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$          | 36.12 <sub>m</sub>    | 主要          | 400.39 <sub>20</sub>  | 0.32 <sub>5</sub>   | $\beta^-$ 娘: $^{211}\text{Bi}$                           |
|    | $^{219}\text{Rn}$         |                       |             | 401.8 <sub>2</sub>    | 6.51 <sub>3</sub>   |                                                          |
|    | $^{211}\text{Pb}$         |                       |             | 404.8 <sub>1</sub>    | 3.5 <sub>2</sub>    |                                                          |
|    | $^{214}\text{Bi}$         |                       |             | 405.74 <sub>3</sub>   | 0.17 <sub>1</sub>   |                                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                       |             | 409.8 <sub>3</sub>    | 2.1 <sub>3</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{129}\text{Te}$         | 69.5 <sub>5</sub> m   | 主要          | 459.60 <sub>5</sub>   | 7.1 <sub>7</sub>    | $\beta^-$ 親: $^{129\text{m}}\text{Te}$                   |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                       |             | 463.3 <sub>3</sub>    | 4.6 <sub>5</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$         |                       |             | 463.51 <sub>4</sub>   | 11.1                |                                                          |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$         |                       |             | 562.6 <sub>5</sub>    | 0.86 <sub>15</sub>  |                                                          |
|    | $^{134}\text{Cs}$         |                       |             | 563.26 <sub>5</sub>   | 8.38 <sub>5</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{214}\text{Bi}$         | 63.98 <sub>6</sub> d  | 主要          | 719.86 <sub>3</sub>   | 0.40 <sub>3</sub>   | $\beta^-$ 娘: $^{95}\text{Nb}$ , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$         |                       |             | 721.9611 <sub>1</sub> | ~5.1 <sub>5</sub>   |                                                          |
| 人工 | $^{124}\text{Sb}$         |                       |             | 722.78 <sub>4</sub>   | 11.301 <sub>6</sub> |                                                          |
| 人工 | $^{131}\text{I}$          |                       |             | 722.893 <sub>2</sub>  | 1.8 <sub>0</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ |                       |             | 722.95 <sub>8</sub>   | 89.73 <sub>1</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          |                       |             | 724.1841 <sub>2</sub> | 43.12 <sub>0</sub>  |                                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                       |             | 726.7 <sub>5</sub>    | 0.782 <sub>7</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{132}\text{I}$          |                       |             | 727.1 <sub>2</sub>    | 6.5 <sub>3</sub>    |                                                          |
|    | $^{212}\text{Bi}$         |                       |             | 727.27 <sub>7</sub>   | 6.3 <sub>2</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ |                       |             | 729.62 <sub>5</sub>   | 0.691 <sub>3</sub>  |                                                          |
| 人工 | $^{91}\text{Sr}$          |                       | 主要          | 749.8 <sub>1</sub>    | 23.2                |                                                          |
| 人工 | $^{140}\text{La}$         |                       |             | 751.827 <sub>00</sub> | 4.20 <sub>20</sub>  |                                                          |
|    | $^{228}\text{Ac}$         |                       |             | 755.3 <sub>1</sub>    | 1.0 <sub>2</sub>    |                                                          |
| 人工 | $^{95}\text{Zr}$          |                       |             | 756.72 <sub>2</sub>   | 54.6 <sub>5</sub>   |                                                          |

|                | 核種名                                                                                                                                           | 半減期                                          | エネルギー (keV)                                                                                                                                                   | 放出比 (%)                                                                                                                              | 備考                                              |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 人工<br>人工       | $^{208}\text{Tl}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{95}\text{Nb}$<br>$^{234\text{m}}\text{Pa}$<br>$^{214}\text{Bi}$<br>$^{228}\text{Ac}$     | 34.97 <sub>3</sub> d<br>1.175 <sub>3</sub> m | 763.13 <sub>8</sub><br>763.928 <sub>13</sub><br>765.786 <sub>19</sub><br>766.62<br>768.356 <sub>12</sub><br>771.8 <sub>2</sub>                                | 1.64 <sub>9</sub><br>22.3 <sub>1</sub><br>99.82 <sub>1</sub><br>0.21 <sub>1</sub><br>4.912 <sub>0</sub><br>1.62                      | $\beta^-$ 親: $^{95}\text{Zr}$<br>$\beta^-$ , IT |
| 人工             | $^{132}\text{I}$                                                                                                                              |                                              | 772.61 <sub>8</sub>                                                                                                                                           | 76.21 <sub>9</sub>                                                                                                                   |                                                 |
| 人工<br>人工<br>人工 | $^{99}\text{Mo}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{127}\text{Sb}$<br>$^{212}\text{Bi}$<br>$^{214}\text{Pb}$<br>$^{214}\text{Bi}$ |                                              | 777.8 <sub>1</sub><br>780.2 <sub>3</sub><br>782.0 <sub>1</sub><br>783.7 <sub>5</sub><br>785.46 <sub>7</sub><br>785.95 <sub>20</sub><br>786.1 <sub>4</sub>     | 4.40 <sub>53</sub><br>1.23 <sub>6</sub><br>0.51 <sub>11</sub><br>15.1<br>1.0 <sub>1</sub><br>0.86 <sub>9</sub><br>0.31 <sub>11</sub> |                                                 |
| 人工             | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{134}\text{Cs}$<br>$^{228}\text{Ac}$                                                                                   |                                              | 795.0 <sub>2</sub><br>795.76 <sub>2</sub><br>796.1                                                                                                            | 4.47<br>85.44 <sub>38</sub><br>0.127                                                                                                 |                                                 |
| 人工<br>人工       | $^{97}\text{Zr}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{211}\text{Pb}$<br>$^{54}\text{Mn}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{214}\text{Pb}$<br>$^{228}\text{Ac}$ | 312.20 <sub>7</sub> d                        | 829.80 <sub>10</sub><br>830.4 <sub>2</sub><br>831.8 <sub>1</sub><br>834.827 <sub>21</sub><br>835.6 <sub>2</sub><br>839.20 <sub>20</sub><br>840.4 <sub>2</sub> | 0.22 <sub>2</sub><br>0.65 <sub>12</sub><br>2.86<br>100.<br>1.7 <sub>2</sub><br>0.59 <sub>6</sub><br>0.97 <sub>16</sub>               | EC                                              |
|                | $^{228}\text{Ac}$                                                                                                                             |                                              | 904.1 <sub>3</sub>                                                                                                                                            | 0.82 <sub>12</sub>                                                                                                                   |                                                 |
| 人工             | $^{132}\text{I}$<br>$^{228}\text{Ac}$                                                                                                         |                                              | 910.3 <sub>2</sub><br>911.2 <sub>2</sub>                                                                                                                      | 0.92 <sub>5</sub><br>27.2                                                                                                            |                                                 |
| 機器<br>人工       | $^{63}\text{Zn}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{97}\text{Zr}$                                                                |                                              | 962.06 <sub>4</sub><br>964.4 <sub>4</sub><br>968.8 <sub>3</sub><br>971.39 <sub>10</sub>                                                                       | 6.67<br>4.71 <sub>0</sub><br>16.2<br>0.29 <sub>3</sub>                                                                               |                                                 |
|                | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{228}\text{Ac}$<br>$^{214}\text{Bi e}$                                                            |                                              | 1245.0 <sub>8</sub><br>1246.9 <sub>2</sub><br>1249.3 <sub>8</sub><br>1253.50                                                                                  | 0.16 <sub>9</sub><br>0.38 <sub>15</sub><br>0.117<br>0.0                                                                              |                                                 |

|    | 核種名                                                                 | 半減期                          | エネルギー (keV)                            | 放出比 (%)                  | 備考                        |
|----|---------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
|    | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{40}\text{K}$                                | $1.277 \times 10^9 \text{y}$ | 主要<br>1459.22<br>1460.756              | 0.9313<br>10.6713        | $\beta^-$ , EC, $\beta^+$ |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{132}\text{I}$ s                             |                              | 1496.22<br>1499.74                     | 0.9813<br>0.0            |                           |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$<br>$^{214}\text{Bi}$ |                              | 1501.72<br>1505.00121<br>1509.22817    | 0.547<br>13.21<br>2.1911 |                           |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$ s                    |                              | 1539.05<br>1542.41623                  | 0.05430<br>0.0           |                           |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$<br>$^{110\text{m}}\text{Ag}$ s                    |                              | 1588.32<br>1591.33726                  | 3.55<br>0.0              |                           |
| 人工 | $^{208}\text{Tl}$ d<br>$^{140}\text{La}$<br>$^{214}\text{Bi}$       |                              | 主要<br>1592.5<br>1596.4924<br>1599.316  | 0.0<br>95.53<br>0.333    |                           |
| 人工 | $^{212}\text{Bi}$<br>$^{132}\text{I}$ s<br>$^{228}\text{Ac}$        |                              | 主要<br>1620.6210<br>1622.257<br>1625.33 | 1.41<br>0.0<br>0.3214    |                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$                                                   |                              | 1630.73                                | 1.53                     |                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$                                                   |                              | 1638.33                                | 0.4610                   |                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$                                                   |                              | 1685.83                                | 0.09221                  |                           |

228 Th

|    | 核種名                | 半減期        | エネルギー (keV) |                        | 放出比 (%) | 備考                            |        |
|----|--------------------|------------|-------------|------------------------|---------|-------------------------------|--------|
| 人工 | Pb(K $\alpha$ 2)   | 127.7y     | }           | 72.804                 | 6.68    | EC, $\beta^+$ , IT            |        |
|    | Pb(K $\alpha$ 1)   |            |             | 74.969                 |         |                               |        |
|    | Bi(K $\alpha$ 1)   |            |             | 77.108                 |         |                               |        |
| 人工 | <sup>108m</sup> Ag | 127.7y     | }           | 79.45                  | 1.76    |                               |        |
| 人工 | <sup>227</sup> Th  |            |             | 79.82                  |         |                               |        |
| 人工 | <sup>144</sup> Ce  | 8.0401d    | }           | 80.1065                | 1.1318  | $\beta^-$                     |        |
| 人工 | <sup>131</sup> I   |            |             | 80.1832                |         |                               |        |
|    | <sup>231</sup> Th  |            |             | 25.521h                |         |                               | 84.212 |
|    | <sup>228</sup> Th  | 1.9131344y | 主要          | 84.3713                | 1.216   | $\alpha$ 親: <sup>232</sup> Th |        |
| 人工 | Pb(K $\beta$ 1)    | 10.981d    | }           | 84.936                 | 0.9419  | $\beta^-$                     |        |
|    | Bi(K $\beta$ 1)    |            |             | 87.343                 |         |                               |        |
|    | <sup>231</sup> Th  |            |             | 89.952                 |         |                               |        |
|    | <sup>147</sup> Nd  |            |             | 91.1050 <sub>16}</sub> |         |                               | 27.247 |
|    | <sup>234</sup> Th  |            |             | 92.802                 |         |                               | 5.43   |
|    | <sup>227</sup> Th  |            |             | 94.02                  |         |                               | 1.24   |

231 Th

|    | 核種名                | 半減期        | エネルギー (keV) |                        | 放出比 (%) | 備考                            |        |
|----|--------------------|------------|-------------|------------------------|---------|-------------------------------|--------|
| 人工 | Pb(K $\alpha$ 2)   | 127.7y     | }           | 72.804                 | 6.68    | EC, $\beta^+$ , IT            |        |
|    | Pb(K $\alpha$ 1)   |            |             | 74.969                 |         |                               |        |
|    | Bi(K $\alpha$ 1)   |            |             | 77.108                 |         |                               |        |
| 人工 | <sup>108m</sup> Ag | 127.7y     | }           | 79.45                  | 1.76    |                               |        |
| 人工 | <sup>227</sup> Th  |            |             | 79.82                  |         |                               |        |
| 人工 | <sup>144</sup> Ce  | 8.0401d    | }           | 80.1065                | 1.1318  | $\beta^-$                     |        |
| 人工 | <sup>131</sup> I   |            |             | 80.1832                |         |                               |        |
|    | <sup>231</sup> Th  |            |             | 25.521h                |         |                               | 84.212 |
|    | <sup>228</sup> Th  | 1.9131344y | 主要          | 84.3713                | 1.216   | $\alpha$ 親: <sup>232</sup> Th |        |
| 人工 | Pb(K $\beta$ 1)    | 10.981d    | }           | 84.936                 | 0.9419  | $\beta^-$                     |        |
|    | Bi(K $\beta$ 1)    |            |             | 87.343                 |         |                               |        |
|    | <sup>231</sup> Th  |            |             | 89.952                 |         |                               |        |
|    | <sup>147</sup> Nd  |            |             | 91.1050 <sub>16}</sub> |         |                               | 27.247 |
|    | <sup>234</sup> Th  |            |             | 92.802                 |         |                               | 5.43   |
|    | <sup>227</sup> Th  |            |             | 94.02                  |         |                               | 1.24   |

$^{231}\text{Pa}$

|    | 核種名               | 半減期                   | エネルギー (keV)            |                         | 放出比 (%)               | 備考                              |                                           |
|----|-------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
|    | $^{231}\text{Pa}$ | 3.276 <sub>11</sub>   | 主要                     | 283.56 <sub>6</sub>     | 1.7 <sub>3</sub>      | $\alpha$ 娘: $^{227}\text{Ac}$   |                                           |
| 人工 | $^{131}\text{I}$  | *10 <sup>4</sup> y    |                        | 284.298 <sub>5</sub> )  | 6.0 <sub>1</sub>      |                                 |                                           |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                       |                        | 285.5 )                 | 0.76 <sub>2</sub>     |                                 |                                           |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                       |                        | 286.2 <sub>2</sub> )    | 1.4 <sub>4</sub>      |                                 |                                           |
|    | $^{212}\text{Bi}$ |                       | 60.600 <sub>43m}</sub> |                         | 288.07 <sub>7</sub> ) | 0.32 <sub>3</sub>               | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
|    |                   |                       |                        |                         |                       |                                 |                                           |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$ | 39.35 <sub>5d}</sub>  | 主要                     | 293.262 <sub>21</sub> ) | ~42.                  | $\beta^-$ 娘: $^{103m}\text{Rh}$ |                                           |
| 人工 | $^{103}\text{Ru}$ |                       |                        | 294.98 <sub>2</sub> )   | 0.242 <sub>25</sub>   |                                 |                                           |
|    | $^{214}\text{Pb}$ |                       | 主要                     | 295.217 <sub>39</sub> ) | 18.9 <sub>20</sub>    |                                 |                                           |
|    | $^{231}\text{Pa}$ |                       |                        | 299.94 <sub>6</sub> )   | 2.5 <sub>7</sub>      |                                 |                                           |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                       |                        | 300.0 <sub>2</sub> )    | 1.9 <sub>7</sub>      |                                 |                                           |
|    | $^{212}\text{Pb}$ |                       |                        | 300.11 <sub>5</sub> )   | 3.3 <sub>3</sub>      |                                 |                                           |
|    | $^{231}\text{Pa}$ |                       |                        | 302.52 <sub>6</sub> )   | 2.5 <sub>7</sub>      |                                 |                                           |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$ |                       |                        | 304.85 <sub>1</sub> )   | 4.37 <sub>28</sub>    |                                 |                                           |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ | 27.701 <sub>6d}</sub> | 主要                     | 315.9 )                 | 1.52 <sub>5</sub>     | EC                              |                                           |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                       |                        | 316.5 <sub>4</sub> )    | 0.16 <sub>4</sub>     |                                 |                                           |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                       |                        | 319.41 <sub>3</sub> )   | 2.0 <sub>3</sub>      |                                 |                                           |
| 人工 | $^{51}\text{Cr}$  |                       |                        | 320.076 <sub>1</sub> )  | 10.2 <sub>6</sub>     |                                 |                                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                       |                        | 321.9 <sub>4</sub> )    | 0.22 <sub>3</sub>     |                                 |                                           |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                       |                        | 324.1 )                 | 4.12 <sub>26</sub>    |                                 |                                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                       |                        | 328.3 <sub>4</sub> )    | 3.1 <sub>4</sub>      |                                 |                                           |
| 人工 | $^{140}\text{La}$ | 40.27 <sub>5h}</sub>  |                        | 328.768 <sub>12</sub> ) | 18.5 <sub>6</sub>     | $\beta^-$ 親: $^{140}\text{Ba}$  |                                           |
|    | $^{231}\text{Pa}$ |                       |                        | 329.89 <sub>6</sub> )   | 1.4 <sub>4</sub>      |                                 |                                           |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                       |                        | 329.9 <sub>2</sub> )    | 2.4 <sub>8</sub>      |                                 |                                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                       |                        | 332.9 <sub>4</sub> )    | 0.35 <sub>5</sub>     |                                 |                                           |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                       |                        | 334.3 )                 | 1.95 <sub>7</sub>     |                                 |                                           |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                       |                        | 338.6 )                 | 2.96 <sub>20</sub>    |                                 |                                           |
|    | $^{228}\text{Ac}$ |                       | 主要                     | 338.7 <sub>4</sub> )    | 12.2                  |                                 |                                           |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                       | 主要                     | 340.57 <sub>5</sub> )   | 46.8 <sub>5</sub>     |                                 |                                           |

$^{234}\text{Th}$

貝類に濃縮される

|    | 核種名               | 半減期                    | エネルギー (keV) |                      | 放出比 (%)            | 備考                              |
|----|-------------------|------------------------|-------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
|    | $^{234}\text{Th}$ | 24.101 <sub>25d}</sub> |             | 63.29 <sub>2</sub> ) | 3.8 <sub>2</sub>   | $\beta^-$ 娘: $^{234m}\text{Pa}$ |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ | 13.00 <sub>2d}</sub>   |             | 66.91 <sub>5</sub> ) | 12.51 <sub>0</sub> | $\beta^-$ 娘: $^{136m}\text{Ba}$ |

|    | 核種名                | 半減期                  | エネルギー (keV) |                       | 放出比 (%) | 備考                                                                          |
|----|--------------------|----------------------|-------------|-----------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------|
|    | Pb(K $\alpha$ 2)   |                      |             | 72.804                | }       | EC, $\beta^+$ , IT                                                          |
|    | Pb(K $\alpha$ 1)   |                      |             | 74.969                |         |                                                                             |
|    | Bi(K $\alpha$ 1)   |                      |             | 77.108                |         |                                                                             |
| 人工 | $^{108m}\text{Ag}$ | 127.7y               |             | 79.45                 |         |                                                                             |
|    | $^{227}\text{Th}$  |                      |             | 79.82                 |         |                                                                             |
| 人工 | $^{144}\text{Ce}$  |                      |             | 80.1065               |         |                                                                             |
| 人工 | $^{131}\text{I}$   | 8.040 <sub>1</sub> d |             | 80.1832               |         |                                                                             |
|    | $^{231}\text{Th}$  | 25.52 <sub>1</sub> h | 主要          | 84.212                |         |                                                                             |
|    | $^{228}\text{Th}$  | 1.9131344y           | 主要          | 84.3713               |         |                                                                             |
|    | Pb(K $\beta$ 1)    |                      |             | 84.936                |         |                                                                             |
|    | Bi(K $\beta$ 1)    |                      |             | 87.343                | }       | $\beta^-$<br>$\beta^-$ 親: $^{235}\text{U}$<br>$\alpha$ 親: $^{232}\text{Th}$ |
|    | $^{231}\text{Th}$  |                      |             | 89.952                |         |                                                                             |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$  | 10.98 <sub>1</sub> d | 主要          | 91.1050 <sub>16</sub> |         |                                                                             |
|    | $^{234}\text{Th}$  |                      | 主要          | 92.802                |         |                                                                             |
|    | $^{227}\text{Th}$  |                      |             | 94.02                 | 5.43    |                                                                             |
|    |                    |                      |             |                       | 1.24    |                                                                             |

$^{234m}\text{Pa}$

貝類に検出されたときは親核種の $^{234}\text{Th}$ を確認すること

|    | 核種名                | 半減期                  | エネルギー (keV)            | 放出比 (%)            | 備考                            |
|----|--------------------|----------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 人工 | $^{208}\text{Tl}$  |                      | 763.138                | 1.649              |                               |
| 人工 | $^{110m}\text{Ag}$ |                      | 763.928 <sub>13</sub>  | 22.3 <sub>1</sub>  |                               |
|    | $^{95}\text{Nb}$   | 34.97 <sub>3d</sub>  | 765.786 <sub>19</sub>  | 99.82 <sub>1</sub> | $\beta^-$ 親: $^{95}\text{Zr}$ |
|    | $^{234m}\text{Pa}$ | 1.175 <sub>3m}</sub> | 766.6 <sub>2</sub>     | 0.21 <sub>1</sub>  | $\beta^-$ , IT                |
|    | $^{214}\text{Bi}$  |                      | 768.356 <sub>12</sub>  | 4.91 <sub>20</sub> |                               |
|    | $^{228}\text{Ac}$  |                      | 771.8 <sub>3</sub>     | 1.6 <sub>2</sub>   |                               |
| 人工 | $^{132}\text{I}$   |                      | 772.61 <sub>8</sub>    | 76.21 <sub>9</sub> |                               |
|    | $^{234m}\text{Pa}$ |                      | 1001.025 <sub>22</sub> | 0.5 <sub>9</sub>   |                               |

$^{235}\text{U}$

|    | 核種名               | 半減期                     | エネルギー (keV)          | 放出比 (%)            | 備考                                |
|----|-------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------------|
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ | 6.13h                   | 99.5 <sub>1</sub>    | 1.3 <sub>2</sub>   | $\beta^-$ 親: $^{232}\text{Th}$    |
|    | $^{239}\text{Np}$ | 2.346 <sub>4d</sub>     | 99.55                | 14.5 <sub>6</sub>  | $\beta^-$ Pu(K $\alpha$ 2)        |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ |                         | 100.40 <sub>15</sub> | 0.12 <sub>2</sub>  |                                   |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                         | 103.76               | 22.2 <sub>8</sub>  | Pu(K $\alpha$ 1)                  |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                         | 106.14               | 27.8 <sub>9</sub>  |                                   |
|    | $^{235}\text{U}$  | 7.038 <sub>5</sub>      | 109.14 <sub>2</sub>  | 1.5 <sub>2</sub>   | $\alpha$                          |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ | *10 <sup>8</sup> y.     | 111.76 <sub>8</sub>  | 1.8 <sub>3</sub>   |                                   |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ |                         | 116.30 <sub>8</sub>  | 1.9 <sub>4</sub>   |                                   |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                         | 117.26               | 8.1 <sub>4</sub>   | Pu(K $\beta$ 1)                   |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                         | 120.490 <sub>9</sub> | 0.40 <sub>7</sub>  |                                   |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                         | 120.6                | 2.77 <sub>10</sub> | Pu(K $\beta$ 2)                   |
|    | $^{223}\text{Ra}$ | 11.4346 <sub>11d}</sub> | 122.4                | 1.23 <sub>7</sub>  | $\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$     |
| 機器 | $^{75m}\text{Ge}$ | 47.7 <sub>5s}</sub>     | 139.68 <sub>3</sub>  | 39.2               | IT, $\beta^-$                     |
| 人工 | $^{99m}\text{Tc}$ | 6.007 <sub>2h}</sub>    | 140.511 <sub>6</sub> | 89.0 <sub>2</sub>  | IT, $\beta^-$ 親: $^{99}\text{Mo}$ |
| 人工 | $^{99m}\text{Tc}$ |                         | 142.63 <sub>3</sub>  | 6.4 <sub>3</sub>   |                                   |
| 人工 | $^{59}\text{Fe}$  | 44.56 <sub>3d}</sub>    | 142.648 <sub>4</sub> | 1.02 <sub>4</sub>  | $\beta^-$                         |
|    | $^{235}\text{U}$  |                         | 143.76 <sub>2</sub>  | 11.1               |                                   |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                         | 144.3                | 3.34 <sub>22</sub> |                                   |
| 人工 | $^{141}\text{Ce}$ | 32.55 <sub>1d}</sub>    | 145.444              | 48.4 <sub>4</sub>  | $\beta^-$                         |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  | 2.2846 <sub>4h}</sub>   | 147.2 <sub>1</sub>   | 0.24 <sub>2</sub>  | $\beta^-$ 親: $^{132}\text{Te}$    |
| 人工 | $^{140}\text{Ba}$ | 12.789 <sub>6d}</sub>   | 162.61 <sub>2</sub>  | 6.11 <sub>34</sub> | $\beta^-$ 娘: $^{140}\text{La}$    |
|    | $^{235}\text{U}$  |                         | 163.35 <sub>2</sub>  | 4.7 <sub>4</sub>   |                                   |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |                         | 163.89 <sub>5</sub>  | 4.62 <sub>10</sub> |                                   |

|    | 核種名               | 半減期     | エネルギー (keV) |          | 放出比 (%) | 備考                                     |
|----|-------------------|---------|-------------|----------|---------|----------------------------------------|
| 人工 | $^{125}\text{Sb}$ | 2.712y  | 主要          | 176.292  | 6.85    | $\beta^-$ 娘: $^{125\text{m}}\text{Te}$ |
| 人工 | $^{136}\text{Cs}$ |         |             | 176.555  | 13.62   |                                        |
| 人工 | $^{131}\text{I}$  |         |             | 177.2102 | 0.260   |                                        |
| 人工 | $^{99}\text{Mo}$  |         |             | 181.075  | 6.2983  |                                        |
|    | $^{235}\text{U}$  |         |             | 185.7155 | 54.     |                                        |
|    | $^{226}\text{Ra}$ | 1599.7y | 主要          | 186.1804 | 3.31    | $\alpha$ 娘: $^{214}\text{Pb}$          |

$^{239}\text{Np}$

|    | 核種名               | 半減期                   | エネルギー (keV) |           | 放出比 (%)         | 備考                                                              |
|----|-------------------|-----------------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------------------------------------------------------|
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ | 6.13h                 |             | 99.51     | 1.32            | $\beta^-$ 親: $^{232}\text{Th}$                                  |
|    | $^{239}\text{Np}$ | 2.3464d               |             | 99.55     | 14.56           | $\beta^-$ Pu(K $\alpha$ 2)                                      |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ | 7.0385<br>* $10^8$ y  | 主要          | 100.4015  | 0.122           | Pu(K $\alpha$ 1)                                                |
|    | $^{239}\text{Np}$ |                       |             | 103.76    | 22.28           |                                                                 |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                       | 106.14      | 27.89     |                 |                                                                 |
| 人工 | $^{235}\text{U}$  |                       | 109.142     | 1.52      | $\alpha$        |                                                                 |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ |                       | 111.768     | 1.83      |                 |                                                                 |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ |                       | 116.308     | 1.94      |                 |                                                                 |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                       | 117.26      | 8.14      | Pu(K $\beta$ 1) |                                                                 |
| 人工 | $^{147}\text{Nd}$ |                       | 120.4909    | 0.407     |                 |                                                                 |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                       | 120.6       | 2.7710    | Pu(K $\beta$ 2) |                                                                 |
|    | $^{223}\text{Ra}$ |                       | 11.434611d  |           | 122.4           | 1.237                                                           |
| 人工 | $^{228}\text{Ac}$ |                       |             | 209.52    | 4.37            |                                                                 |
|    | $^{239}\text{Np}$ |                       |             | 209.76    | 3.4210          |                                                                 |
| 人工 | $^{132}\text{Te}$ | 10.64312h<br>3.66519d | 主要          | 228.166   | 88.3            | $\beta^-$ 娘: $^{212}\text{Bi}$<br>$\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                       |             | 228.2     | 11.43           |                                                                 |
| 人工 | $^{143}\text{Ce}$ |                       |             | 231.55933 | ~ 2.02          |                                                                 |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                       |             | 236.02    | 11.2            |                                                                 |
|    | $^{212}\text{Pb}$ |                       |             | 238.6265  | 43.1            |                                                                 |
|    | $^{224}\text{Ra}$ |                       |             | 240.9815  | 3.91            |                                                                 |
|    | $^{214}\text{Pb}$ |                       |             | 241.92430 | 7.68            |                                                                 |
| 人工 | $^{97}\text{Zr}$  |                       |             | 254.1520  | 1.2514          |                                                                 |
| 人工 | $^{239}\text{Np}$ |                       |             | 254.4     | 0.111           |                                                                 |
| 人工 | $^{132}\text{I}$  |                       |             | 254.82    | 0.193           |                                                                 |
|    | $^{227}\text{Th}$ |                       |             | 256.32    | 6.320           |                                                                 |

|                      | 核種名                                                                            | 半減期                                   | エネルギー (keV)            |                         | 放出比 (%)            | 備考                                                                                   |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 人工<br>機器<br>人工       | $^{132}\text{I}$<br>$^{75}\text{Ge}$<br>$^{93}\text{Y}$                        | 10.25 <sub>1</sub> h                  | 主要                     | 262.7 <sub>1</sub> )    | 1.44 <sub>9</sub>  | $\beta^-$<br><br>$\alpha$ 親: $^{227}\text{Ac}$<br><br>$\beta^-$ 親: $^{228}\text{Th}$ |
|                      |                                                                                |                                       |                        | 264.6 <sub>1</sub> )    | 11.1 <sub>11</sub> |                                                                                      |
|                      | $^{223}\text{Ra}$                                                              | 主要                                    | 266.9 <sub>1</sub> )   | 6.8 <sub>15</sub>       |                    |                                                                                      |
|                      | $^{228}\text{Ac}$                                                              | 主要                                    | 269.6)                 | 14.0 <sub>3</sub>       |                    |                                                                                      |
|                      | $^{219}\text{Rn}$                                                              | 3.96 <sub>1</sub> s                   | 主要                     | 270.2 <sub>3</sub> )    | 3.6 <sub>6</sub>   |                                                                                      |
| 人工                   | $^{97}\text{Zr}$                                                               |                                       |                        | 271.20 <sub>5</sub> )   | 10.1               |                                                                                      |
| 人工                   | $^{136}\text{Cs}$                                                              |                                       |                        | 272.27 <sub>20</sub> )  | 0.25 <sub>4</sub>  |                                                                                      |
| 人工                   | $^{147}\text{Nd}$                                                              |                                       |                        | 273.65 <sub>4</sub> )   | 12.7 <sub>2</sub>  |                                                                                      |
|                      | $^{208}\text{Tl}$                                                              | 3.0527 <sub>33</sub> m                | 主要                     | 275.42 <sub>2</sub> )   | 0.82 <sub>18</sub> |                                                                                      |
| 人工                   | $^{239}\text{Np}$                                                              |                                       |                        | 277.4 <sub>3</sub> )    | 6.8 <sub>3</sub>   |                                                                                      |
|                      |                                                                                |                                       |                        | 277.60)                 | 14.5 <sub>4</sub>  |                                                                                      |
| 人工<br>人工             | $^{231}\text{Pa}$<br>$^{131}\text{I}$<br>$^{239}\text{Np}$                     | 3.276 <sub>11</sub> 10 <sup>4</sup> y | 主要                     | 283.56 <sub>6</sub> )   | 1.7 <sub>3</sub>   | $\alpha$ 娘: $^{227}\text{Ac}$                                                        |
|                      |                                                                                |                                       |                        | 284.298 <sub>5</sub> )  | 6.0 <sub>1</sub>   |                                                                                      |
|                      |                                                                                |                                       |                        | 285.5)                  | 0.76 <sub>2</sub>  |                                                                                      |
|                      | $^{227}\text{Th}$                                                              | 60.600 <sub>43</sub> m                |                        | 286.2 <sub>2</sub> )    | 1.4 <sub>4</sub>   | $\beta^-$ , $\alpha$ 親: $^{228}\text{Th}$                                            |
|                      | $^{212}\text{Bi}$                                                              |                                       |                        | 288.07 <sub>7</sub> )   | 0.32 <sub>3</sub>  |                                                                                      |
| 人工<br>人工<br>人工<br>人工 | $^{239}\text{Np}$<br>$^{132}\text{I}$<br>$^{147}\text{Nd}$<br>$^{51}\text{Cr}$ | 27.701 <sub>6</sub> d                 | 主要                     | 315.9)                  | 1.52 <sub>5</sub>  | EC<br><br>$\beta^-$ 親: $^{140}\text{Ba}$                                             |
|                      |                                                                                |                                       |                        | 316.5 <sub>4</sub> )    | 0.16 <sub>4</sub>  |                                                                                      |
|                      | $^{228}\text{Ac}$                                                              | 主要                                    | 319.41 <sub>3</sub> )  | 2.0 <sub>3</sub>        |                    |                                                                                      |
|                      | $^{223}\text{Ra}$                                                              | 主要                                    | 320.076 <sub>1</sub> ) | 10.2 <sub>6</sub>       |                    |                                                                                      |
|                      | $^{228}\text{Ac}$                                                              | 主要                                    | 321.9 <sub>4</sub> )   | 0.22 <sub>3</sub>       |                    |                                                                                      |
|                      | $^{228}\text{Ac}$                                                              | 主要                                    | 324.1)                 | 4.12 <sub>26</sub>      |                    |                                                                                      |
| 人工                   | $^{140}\text{La}$                                                              | 40.27 <sub>5</sub> h                  | 主要                     | 328.3 <sub>4</sub> )    | 3.1 <sub>4</sub>   |                                                                                      |
|                      | $^{231}\text{Pa}$                                                              |                                       |                        | 328.768 <sub>12</sub> ) | 18.5 <sub>6</sub>  |                                                                                      |
|                      | $^{227}\text{Th}$                                                              |                                       |                        | 329.89 <sub>6</sub> )   | 1.4 <sub>4</sub>   |                                                                                      |
|                      | $^{228}\text{Ac}$                                                              |                                       |                        | 329.9 <sub>2</sub> )    | 2.4 <sub>8</sub>   |                                                                                      |
| 人工                   | $^{239}\text{Np}$                                                              |                                       |                        | 332.9 <sub>4</sub> )    | 0.35 <sub>5</sub>  |                                                                                      |
|                      | $^{223}\text{Ra}$                                                              |                                       |                        | 334.3)                  | 1.95 <sub>7</sub>  |                                                                                      |
|                      | $^{228}\text{Ac}$                                                              |                                       |                        | 338.6)                  | 2.96 <sub>20</sub> |                                                                                      |
| 人工                   | $^{136}\text{Cs}$                                                              |                                       | 主要                     | 338.7 <sub>4</sub> )    | 12.2               |                                                                                      |
|                      |                                                                                |                                       | 主要                     | 340.57 <sub>5</sub> )   | 46.8 <sub>5</sub>  |                                                                                      |

## 資料 C：環境放射能モニタリングと線量当量の推定・評価

「環境放射線モニタリングに関する指針」（平成元年3月）によれば、環境試料中の放射線の測定にあたり測定条件を決めるための前提となる測定目標値は、モニタリングの目的が公衆の線量当量の評価にあるか、または環境への蓄積状況の把握にあるかによって異なる。ここでは、試料の種類が飲料水・食品等であって、これらの摂取による公衆の線量当量の評価が目的である場合につき、測定目標値設定のさい参考となるように、測定条件とそれに対応する主要核種の検出可能レベルおよびそのレベルの食品等の一年間摂取による預託実効線量当量の計算例を示す。

条件は以下の通りである：

1. 測定試料：表に示す各試料を灰化または蒸発乾固して、U-8容器に詰めたもの。ただし、 $^{131}\text{I}$ については生試料をそのまま2リットルのマリネリ容器に入れたもの。
2. Ge半導体検出器：相対効率20%；測定時間：一日。
3. 線量換算係数：モニタリング指針、表L-1の値。
4. 成人一日あたりの食品摂取量：

葉菜、牛乳、魚、無脊椎動物、海藻：発電用軽水型原子炉周辺の線量目標値に対する評価指針（平成元年3月）

精米：佐伯誠道編、環境放射能（ソフトサイエンス社、昭59）

水道水：ICRP Publication 23(1975)

浮遊塵：ICRP Publication 2 (1959) の呼吸量

茶：一日あたりの摂取量を2g生と仮定し、抽出率30%として計算

5. 計算式：

預託実効線量当量( $\mu\text{Sv}$ ) =

線量換算係数( $\mu\text{Sv}$ ) × 摂取量(g生・日) × 放射性核種濃度(Bq/g生) × 365(日)

なお、発電用軽水型原子炉に対する線量目標値(50 $\mu\text{Sv}$ /年)に対応する各試料の放射性核種濃度も併せて示した。

表-1 Ge半導体検出器の検出可能レベルに対応する成人の預託実効線量当量

上段：検出可能レベル (Bq/kg生、Bq/ℓ、Bq/m<sup>3</sup>)

中段：検出可能レベルの食品を一年間摂取した場合の預託実効線量当量 (μSv/年)

下段：線量目標値 50 μSv/年に対応する放射性核種濃度 (Bq/kg生、Bq/ℓ、Bq/m<sup>3</sup>)

I-131：2ℓマリッ容器測定

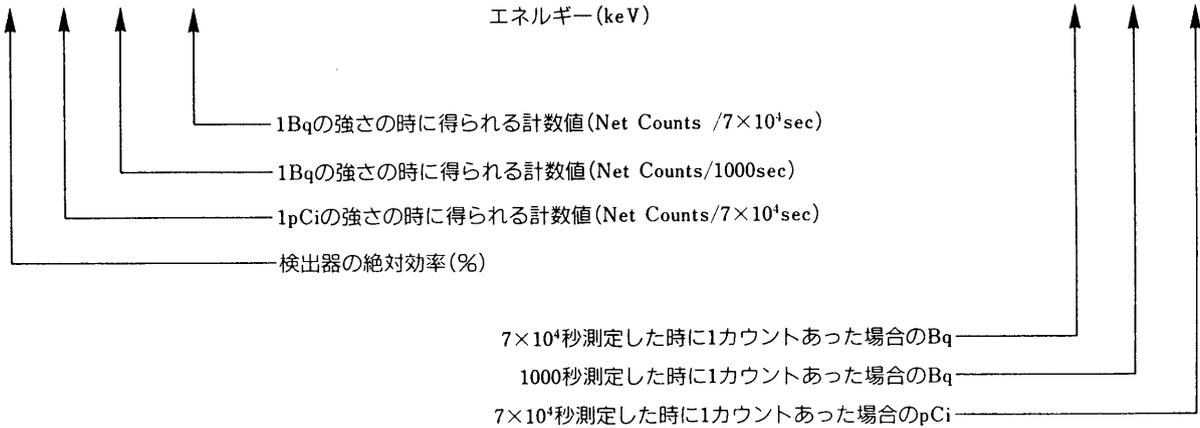
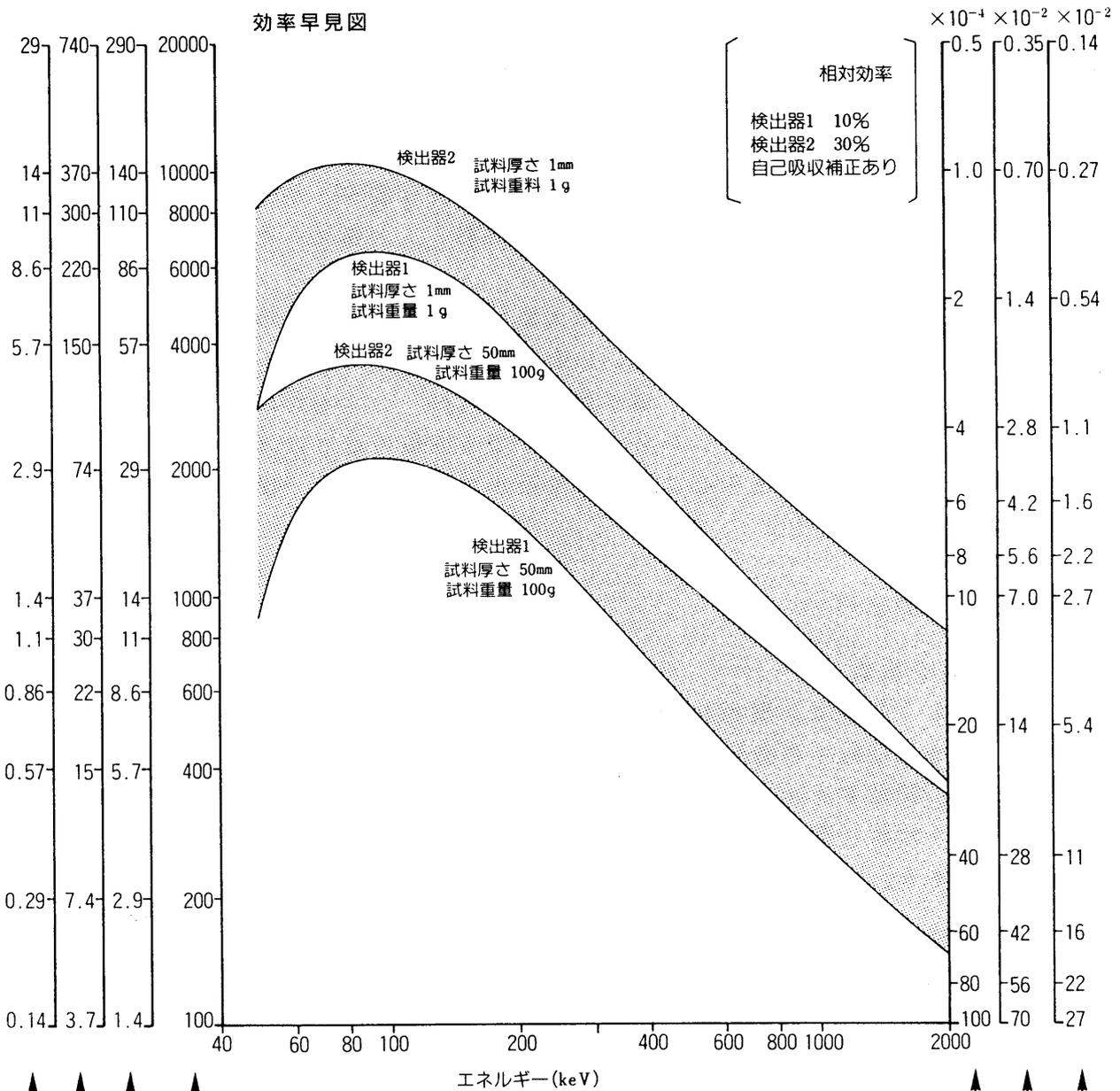
| 試料名                                   | 核種名               | Ce-144                                                               | I-131                                                 | Ba-140                                                              | Cs-134                                                               | Ru-106                                                               | Cs-137                                                               | Zr-95                                                               | Nb-95                                                               | Mn-54                                                               | Co-60                                                                | La-140                                                              | 備考                |
|---------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|
|                                       |                   | 線量換算係数 (μSv/Bq)                                                      |                                                       |                                                                     |                                                                      |                                                                      |                                                                      |                                                                     |                                                                     |                                                                     |                                                                      |                                                                     |                   |
| 供試料                                   | 摂取量/日             |                                                                      |                                                       |                                                                     |                                                                      |                                                                      |                                                                      |                                                                     |                                                                     |                                                                     |                                                                      |                                                                     |                   |
| 大根, 白菜<br>2 kg生                       | 0.1 kg            | 0.44<br>8.5*10 <sup>-2</sup><br>2.6*10 <sup>2</sup>                  | (0.19)<br>6.0*10 <sup>-2</sup><br>1.6*10 <sup>2</sup> | 0.37<br>3.1*10 <sup>-2</sup><br>6.0*10 <sup>2</sup>                 | 0.093<br>6.8*10 <sup>-2</sup><br>6.8*10 <sup>1</sup>                 | 0.74<br>1.6*10 <sup>-1</sup><br>2.4*10 <sup>2</sup>                  | 0.19<br>9.7*10 <sup>-2</sup><br>9.8*10 <sup>1</sup>                  | 0.19<br>6.4*10 <sup>-3</sup><br>1.5*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>4.2*10 <sup>-3</sup><br>2.3*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>5.1*10 <sup>-3</sup><br>1.9*10 <sup>3</sup>                 | 0.093<br>2.4*10 <sup>-2</sup><br>2.0*10 <sup>2</sup>                 | 0.28<br>2.1*10 <sup>-2</sup><br>6.5*10 <sup>2</sup>                 | Bq/kg生            |
| ハウレンソウ<br>2 kg生                       | 0.1 kg            | 0.48<br>9.3*10 <sup>-2</sup><br>2.6*10 <sup>2</sup>                  | (0.19)<br>6.0*10 <sup>-2</sup><br>1.6*10 <sup>2</sup> | 0.37<br>3.1*10 <sup>-2</sup><br>6.0*10 <sup>2</sup>                 | 0.093<br>6.8*10 <sup>-2</sup><br>6.8*10 <sup>1</sup>                 | 0.74<br>1.6*10 <sup>-1</sup><br>2.4*10 <sup>2</sup>                  | 0.19<br>9.7*10 <sup>-2</sup><br>9.8*10 <sup>1</sup>                  | 0.19<br>6.4*10 <sup>-3</sup><br>1.5*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>4.2*10 <sup>-3</sup><br>2.3*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>5.1*10 <sup>-3</sup><br>1.9*10 <sup>3</sup>                 | 0.093<br>2.4*10 <sup>-2</sup><br>2.0*10 <sup>2</sup>                 | 0.28<br>2.1*10 <sup>-2</sup><br>6.5*10 <sup>2</sup>                 | Bq/kg生            |
| 精米<br>2 kg生                           | 0.2 kg            | 0.48<br>1.9*10 <sup>-1</sup><br>1.3*10 <sup>2</sup>                  | (0.19)<br>1.2*10 <sup>-1</sup><br>7.9*10 <sup>1</sup> | 0.37<br>6.2*10 <sup>-2</sup><br>3.0*10 <sup>2</sup>                 | 0.093<br>1.4*10 <sup>-1</sup><br>3.4*10 <sup>1</sup>                 | 0.74<br>3.1*10 <sup>-1</sup><br>1.2*10 <sup>2</sup>                  | 0.19<br>1.9*10 <sup>-1</sup><br>4.9*10 <sup>1</sup>                  | 0.19<br>1.3*10 <sup>-2</sup><br>7.4*10 <sup>2</sup>                 | 0.19<br>8.3*10 <sup>-3</sup><br>1.1*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>1.0*10 <sup>-2</sup><br>9.4*10 <sup>2</sup>                 | 0.093<br>4.8*10 <sup>-2</sup><br>9.8*10 <sup>1</sup>                 | 0.28<br>4.3*10 <sup>-2</sup><br>3.3*10 <sup>2</sup>                 | Bq/kg生            |
| 茶<br>1 kg生                            | 0.6 g             | 0.93<br>1.1*10 <sup>-3</sup><br>4.3*10 <sup>4</sup>                  | (0.37)<br>7.0*10 <sup>-4</sup><br>2.6*10 <sup>4</sup> | 0.74<br>3.7*10 <sup>-4</sup><br>9.9*10 <sup>4</sup>                 | 0.19<br>8.3*10 <sup>-4</sup><br>1.1*10 <sup>4</sup>                  | 1.5<br>1.9*10 <sup>-3</sup><br>3.9*10 <sup>4</sup>                   | 0.37<br>1.1*10 <sup>-3</sup><br>1.6*10 <sup>4</sup>                  | 0.37<br>7.5*10 <sup>-5</sup><br>2.5*10 <sup>5</sup>                 | 0.37<br>4.9*10 <sup>-5</sup><br>3.8*10 <sup>5</sup>                 | 0.37<br>5.9*10 <sup>-5</sup><br>3.1*10 <sup>5</sup>                 | 0.19<br>2.9*10 <sup>-4</sup><br>3.3*10 <sup>4</sup>                  | 0.56<br>2.6*10 <sup>-4</sup><br>1.1*10 <sup>5</sup>                 | Bq/kg生            |
| 水道水<br>20 ℓ                           | 0.15 ℓ            | 1.9*10 <sup>-2</sup><br>5.5*10 <sup>-3</sup><br>1.7*10 <sup>2</sup>  | (0.19)<br>9.1*10 <sup>-2</sup><br>1.0*10 <sup>2</sup> | 1.5*10 <sup>-2</sup><br>1.9*10 <sup>-3</sup><br>4.0*10 <sup>2</sup> | 7.4*10 <sup>-3</sup><br>8.1*10 <sup>-3</sup><br>4.6*10 <sup>1</sup>  | 3.7*10 <sup>-2</sup><br>1.2*10 <sup>-2</sup><br>1.6*10 <sup>2</sup>  | 7.4*10 <sup>-3</sup><br>5.7*10 <sup>-3</sup><br>6.5*10 <sup>1</sup>  | 7.4*10 <sup>-3</sup><br>3.7*10 <sup>-4</sup><br>9.9*10 <sup>2</sup> | 1.1*10 <sup>-2</sup><br>3.6*10 <sup>-4</sup><br>1.5*10 <sup>3</sup> | 1.1*10 <sup>-2</sup><br>4.4*10 <sup>-4</sup><br>1.3*10 <sup>3</sup> | 7.4*10 <sup>-3</sup><br>2.8*10 <sup>-3</sup><br>1.3*10 <sup>2</sup>  | 1.5*10 <sup>-2</sup><br>1.7*10 <sup>-3</sup><br>4.3*10 <sup>2</sup> | Bq/ℓ              |
| 牛乳<br>2 ℓ                             | 0.2 ℓ             | 0.44<br>1.7*10 <sup>-1</sup><br>1.3*10 <sup>2</sup>                  | (0.19)<br>1.2*10 <sup>-1</sup><br>7.9*10 <sup>1</sup> | 0.37<br>6.2*10 <sup>-2</sup><br>3.0*10 <sup>2</sup>                 | 0.093<br>1.4*10 <sup>-1</sup><br>3.4*10 <sup>1</sup>                 | 0.74<br>3.1*10 <sup>-1</sup><br>1.2*10 <sup>2</sup>                  | 0.19<br>1.9*10 <sup>-1</sup><br>4.9*10 <sup>1</sup>                  | 0.19<br>1.3*10 <sup>-2</sup><br>7.4*10 <sup>2</sup>                 | 0.19<br>8.3*10 <sup>-3</sup><br>1.1*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>1.0*10 <sup>-2</sup><br>9.4*10 <sup>2</sup>                 | 0.093<br>4.8*10 <sup>-2</sup><br>9.8*10 <sup>1</sup>                 | 0.28<br>4.3*10 <sup>-2</sup><br>3.3*10 <sup>2</sup>                 | Bq/ℓ              |
| アジ, カレイ<br>1 kg生                      | 0.2 kg            | 0.96<br>3.7*10 <sup>-1</sup><br>1.3*10 <sup>2</sup>                  | —<br>—<br>7.9*10 <sup>1</sup>                         | 0.74<br>1.2*10 <sup>-1</sup><br>3.0*10 <sup>2</sup>                 | 0.19<br>2.8*10 <sup>-1</sup><br>3.4*10 <sup>1</sup>                  | 1.5<br>6.4*10 <sup>-1</sup><br>1.2*10 <sup>2</sup>                   | 0.37<br>3.8*10 <sup>-1</sup><br>4.9*10 <sup>1</sup>                  | 0.37<br>2.5*10 <sup>-2</sup><br>7.4*10 <sup>2</sup>                 | 0.37<br>1.6*10 <sup>-2</sup><br>1.1*10 <sup>3</sup>                 | 0.37<br>2.0*10 <sup>-2</sup><br>9.4*10 <sup>2</sup>                 | 0.19<br>9.7*10 <sup>-2</sup><br>9.8*10 <sup>1</sup>                  | 0.56<br>8.6*10 <sup>-2</sup><br>3.3*10 <sup>2</sup>                 | Bq/kg生            |
| イカ<br>1 kg生                           | 0.02kg            | 0.93<br>3.6*10 <sup>-2</sup><br>1.3*10 <sup>3</sup>                  | —<br>—<br>7.9*10 <sup>2</sup>                         | 0.74<br>1.2*10 <sup>-2</sup><br>3.0*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>2.8*10 <sup>-2</sup><br>3.4*10 <sup>2</sup>                  | 1.5<br>6.4*10 <sup>-2</sup><br>1.2*10 <sup>3</sup>                   | 0.37<br>3.8*10 <sup>-2</sup><br>4.9*10 <sup>2</sup>                  | 0.37<br>2.5*10 <sup>-3</sup><br>7.4*10 <sup>3</sup>                 | 0.37<br>1.6*10 <sup>-3</sup><br>1.1*10 <sup>4</sup>                 | 0.37<br>2.0*10 <sup>-3</sup><br>9.4*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>9.7*10 <sup>-3</sup><br>9.8*10 <sup>2</sup>                  | 0.56<br>8.6*10 <sup>-3</sup><br>3.3*10 <sup>3</sup>                 | Bq/kg生            |
| サザエ<br>1 kg生                          | 0.02kg            | 0.93<br>3.6*10 <sup>-2</sup><br>1.3*10 <sup>3</sup>                  | —<br>—<br>7.9*10 <sup>2</sup>                         | 0.74<br>1.2*10 <sup>-2</sup><br>3.0*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>2.8*10 <sup>-2</sup><br>3.4*10 <sup>2</sup>                  | 1.5<br>6.4*10 <sup>-2</sup><br>1.2*10 <sup>3</sup>                   | 0.37<br>3.8*10 <sup>-2</sup><br>4.9*10 <sup>2</sup>                  | 0.37<br>2.5*10 <sup>-3</sup><br>7.4*10 <sup>3</sup>                 | 0.37<br>1.6*10 <sup>-3</sup><br>1.1*10 <sup>4</sup>                 | 0.37<br>2.0*10 <sup>-3</sup><br>9.4*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>9.7*10 <sup>-3</sup><br>9.8*10 <sup>2</sup>                  | 0.56<br>8.6*10 <sup>-3</sup><br>3.3*10 <sup>3</sup>                 | Bq/kg生            |
| コンブ<br>1 kg生                          | 0.04kg            | 0.96<br>7.4*10 <sup>-2</sup><br>6.5*10 <sup>2</sup>                  | —<br>—<br>3.9*10 <sup>2</sup>                         | 0.74<br>2.5*10 <sup>-2</sup><br>1.5*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>5.5*10 <sup>-2</sup><br>1.7*10 <sup>2</sup>                  | 1.5<br>1.3*10 <sup>-1</sup><br>5.9*10 <sup>2</sup>                   | 0.37<br>7.6*10 <sup>-2</sup><br>2.4*10 <sup>2</sup>                  | 0.37<br>5.0*10 <sup>-3</sup><br>3.7*10 <sup>3</sup>                 | 0.37<br>3.2*10 <sup>-3</sup><br>5.7*10 <sup>3</sup>                 | 0.37<br>3.9*10 <sup>-3</sup><br>4.7*10 <sup>3</sup>                 | 0.19<br>1.9*10 <sup>-2</sup><br>4.9*10 <sup>2</sup>                  | 0.56<br>1.7*10 <sup>-2</sup><br>1.6*10 <sup>3</sup>                 | Bq/kg生            |
|                                       |                   | 線量換算係数 (μSv/Bq)                                                      |                                                       |                                                                     |                                                                      |                                                                      |                                                                      |                                                                     |                                                                     |                                                                     |                                                                      |                                                                     |                   |
|                                       |                   | 9.5*10 <sup>-2</sup>                                                 | 5.3*10 <sup>-3</sup>                                  | 9.6*10 <sup>-4</sup>                                                | 1.3*10 <sup>-2</sup>                                                 | 1.2*10 <sup>-1</sup>                                                 | 8.7*10 <sup>-3</sup>                                                 | 5.2*10 <sup>-3</sup>                                                | 1.2*10 <sup>-3</sup>                                                | 1.7*10 <sup>-3</sup>                                                | 4.1*10 <sup>-2</sup>                                                 | 1.2*10 <sup>-3</sup>                                                | 呼吸摂取              |
| 浮遊塵<br>10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | 20 m <sup>3</sup> | 2.6*10 <sup>-5</sup><br>1.8*10 <sup>-2</sup><br>7.2*10 <sup>-2</sup> | 3.7*10 <sup>-6</sup><br>1.4*10 <sup>-4</sup><br>1.3   | 1.9*10 <sup>-5</sup><br>1.3*10 <sup>-4</sup><br>7.1                 | 7.4*10 <sup>-6</sup><br>7.0*10 <sup>-4</sup><br>5.3*10 <sup>-1</sup> | 3.7*10 <sup>-5</sup><br>3.2*10 <sup>-2</sup><br>5.7*10 <sup>-2</sup> | 7.4*10 <sup>-6</sup><br>4.7*10 <sup>-4</sup><br>7.9*10 <sup>-1</sup> | 1.1*10 <sup>-5</sup><br>4.2*10 <sup>-4</sup><br>1.3                 | 1.1*10 <sup>-5</sup><br>9.6*10 <sup>-5</sup><br>5.7                 | 1.1*10 <sup>-5</sup><br>1.4*10 <sup>-4</sup><br>4.0                 | 7.4*10 <sup>-6</sup><br>2.2*10 <sup>-3</sup><br>1.7*10 <sup>-1</sup> | 1.9*10 <sup>-5</sup><br>1.7*10 <sup>-4</sup><br>5.7                 | Bq/m <sup>3</sup> |

資料 D : 効率図例

相対効率 10% と 30% の検出器で、U-8 容器に入った重量 1 g (試料高 1mm) と重量 100 g (試料高 50mm) の試料を測定したときに、下記の条件で得られる結果と絶対効率を図に示した。

1. 1 Bq( $\gamma$ ) の放射能を 70000秒 (約 1 昼夜) 測定して得られるカウント数。
2. 1 Bq( $\gamma$ ) の放射能を 1000秒 測定して得られるカウント数。
3. 1 pCi( $\gamma$ ) の放射能を 70000秒 (約 1 昼夜) 測定して得られるカウント数。
4. 70000秒 (約 1 昼夜) 測定して、1 カウントあったときの放射能 [Bq( $\gamma$ )]
5. 1000秒 測定して、1 カウントあったときの放射能 [Bq( $\gamma$ )]
6. 70000秒 (約 1 昼夜) 測定して、1 カウントあったときの放射能 [pCi( $\gamma$ )]

効率早見図



## 資料 E：障害とその対応

Ge半導体検出器を用いた $\gamma$ 線測定装置は、重くて大きな構造体（遮蔽体）、デジタル及びアナログの電子機器（増幅器、MCA）、低温機器（クライオスタット）、大型単結晶（検出部）等、性質の異なった様々の要素の組合せであることが大きな特徴である。精密でデリケートであり、運用に当たっては温度、湿度を調整し、振動や電源等にも十分気をつけなければならない。見学者が不用意に触れた、測定室内を模様替えした、修理や検査のため機器を移動・入れ替えした、等によって条件が変えられる事もある。

分解能が劣化した、チャンネルシフトが大きい、等の障害が見つかった時、迅速に回復するためには、機器のどれが悪いのか原因を突き止めること、簡単な障害は自分で解決をすることが望ましい。電子機器に限れば、いくつかのモジュールの組合せで出来ており、どれが悪いのか分かるだけでも回復の速さは大幅に変わる。ここではアナログの電子機器を中心に簡単な診断ができるように、単純な現象についての例を集めた。

### 1 障害への対応<sup>1)</sup>

#### 1. 1 異常の発見

下記のような症状が現われた場合は障害が考えられるので対処しなければならない。故障や使用中の変化をいち早く見つけるには、測定毎に9章で述べた測定開始手順、測定中チェック、測定終了手順を確実に行う。特に異常のある場合はスペクトル形状に変化が現れ易いので、常にスペクトルを観察することを心がけるべきである。

|             |                                                               |
|-------------|---------------------------------------------------------------|
| 分解能の劣化      | : ピークの幅が広がる。<br>ピークが広くなり面積の計算が合わない。                           |
| 雑音          | : スペクトル上に広い山が出来る。<br>低エネルギー領域の計数が異常に多い。<br>dead time が異常に大きい。 |
| メモリーの異常     | : 加算しないチャンネルがある、計数が1カウント<br>づつ増えない、計数が頭打ちになる。                 |
| クロックの異常     | : 時計と比べて動作がおかしい。                                              |
| チャンネルシフト    | : 前日の測定と比較して、例えば $^{40}\text{K}$ のピークチャ<br>ンネルが1keV以上ずれている。   |
| エネルギー直線性の劣化 | : チャンセル・エネルギーの式が大きく変化した。                                      |
| ピーク効率の低下    | : 定期的な検査によって発見される。                                            |

---

1) 接続、設定の確認は必ず行い、障害ではないのに修理のためメーカーの技術者に出張してもらうようなことは避けるべきである。

## 1. 2 原因等の調査方法

以下に述べる項目を、順番に調査する。表の後に内容が詳しく記してある。

| 順番 | 調査内容（放射線による信号を発生させないで行う）                    |
|----|---------------------------------------------|
| 1  | 高圧が印加されているかどうか高圧電源のメーターでチェックする。             |
| 2  | 波高分析器「画面」を観察して、メモリーと表示部の障害を調べる。             |
| 3  | 波高分析器の ADC を調べる。                            |
| 4  | bin 電源の右枠のチェック端子の電圧をテスターで調べ、更にオシロスコープで観察する。 |
| 5  | 線形増幅器出力等を観察する                               |
| 6  | 前置増幅器出力を観察する。                               |
| 7  | 検出器クライオスタットの断熱が悪化していないか、調べる。                |

| 順番 | 調査内容（37kBq 程度の $^{60}\text{Co}$ 標準線源等をエンドキャップ上 25 cm で測定し、信号を観察しながら行う。） |
|----|-------------------------------------------------------------------------|
| 1  | MCA の dead time meter や計数が積算されていく様子を観察する                                |
| 2  | 線形増幅器出力波形を観察する。                                                         |
| 3  | 前置増幅器出力波形を観察する。                                                         |

### （1）標準線源などで放射線の信号を発生させないで行う調査

#### 1) 高圧が印加されているかどうか高圧電源のメーターでチェックする。

- ・メーターの振れが正常でない場合は、高圧を切って数分待ち、出力ケーブルを外した状態で再び印加し、変化を調べる。

：変わらない場合

→ 高圧電源が故障しているので修理する。

：正常になる場合、更にケーブルや前置増幅器を調べる。

→ ケーブルが原因なら交換する。

→ 前置増幅器が原因なら修理する。

#### 2) 波高分析器「画面」を観察して、メモリーと表示部の障害を調べる。

パソコンMCAの場合はメモリーモジュールの障害を調べる。

- ・スペクトルに周期的なパターンが現われていないか、パソコンMCA等で全チャンネルの計数を表示しない機種については見落としが無いように注意する。
- ・スペクトル全体がずれていないか（デジタルオフセットの設定がずれていた場合は直す）
- ・スペクトルの一部が消えていないか（メモリー落ちしていないか）
- スイッチ類（MEMORY TRANSFER 等）の設定が正しいにもかかわらず、異常がみられる場合は、メモリー等の故障が考えられるので修理する。
- ・Timer の進み方に異常はないか、調べる。念のため時計と比較する。

→ 異常がある場合は修理する。

上記の場合はM C Aの表示部かメモリーの障害である。一方、下記に示すものは表示部で観察されるが、表示部・メモリー以外の障害によって発生する症状である。

- ・ピークの脇に瘤がある
- ・低エネルギー領域に広いノイズの山がある
- ・ピークの幅が広い

### 3) 波高分析器の A D C を調べる。

- ・信号を観察して動作をチェックするのは困難であるから、スイッチ等が正しく設定されているかどうかを調べる。

DIGITAL OFF SET : 正しくないとスペクトルが何チャンネル分か低エネルギー側へずれ、その分データが収集されない。

B L R (ある場合) : ON だと計数率が低いとき、直線性が悪い。  
OFF だと高計数率のとき、直線性が悪い。

CONV. GAIN : 正しくないと1チャンネル当りのエネルギーが何倍も変わる。

GATE (ANTI、COIN) : 間違えると信号を受け付けない。

AMP IN : M C Aの内蔵増幅器を使用する、しないの設定がまちがっている

→ 間違いがあったら正しく設定し直す。

### 4) bin 電源の右枠のチェック端子の電圧をテスターで調べ、更にオシロスコープで観察する。

- ・電圧が正しく出ていない場合

: 電圧が0であればヒューズを確認する。

: 挿入されているモジュールのどれかが異常に電流を消費していないか。抜いたり挿入したりしてチェック端子の電圧を観察する。

→ 異常なモジュールがあれば修理する。

: モジュールの消費電力が合わせて過負荷になっている。

→ 別の bin 電源にモジュールを分散する。

: モジュールが原因ではない場合

→ bin 電源を修理する

- ・発振が観察された場合 (数十～数 MHz の範囲を調べる)

: アナログモジュールを抜いてみる。(前置増幅器の電源に注意)

→ 消えればアース等を通して正帰還が起きているので、ケーブルの取り回しを変えたり、線形増幅器出力にターミネータを付ける。

: デジタルモジュールを抜いたり、位置を変えてみる。

A D C のクロックは 100～200 MHz である。

高圧電源の DC-DC 変換器は 1 kHz 位の発振器を内蔵している。

: パソコンを OFF にしてみる。

CPU のクロックは数 MHz、ディスプレイの水平掃引周波数は  
24 kHz である。

→ どれも当てはまらず、全てのモジュールを外しても消えなければ  
bin 電源自身の障害であり、修理する。

#### 5) 線形増幅器出力等を観察する

・スイッチ等の設定をチェックする。

input polarity (逆であると出力信号が極端に小さく、分解能がひどく悪くなる)

delay (性能にほとんど関係無いが、off で使用する)

B L R (AUTO または OFF で使用する)

COARSE GAIN (チャンネル当りのエネルギーが大きく狂う)

SHAPING TIME (検出器メーカー指定の値にする)

→ 間違っていれば直す。

・ケーブルの接続を調べる。

→ 間違っていれば直す。

・コネクタ部分の接触等不良を調べる (軽くケーブルを揺らして観察する)

→ 問題があれば修理、または交換する。

・出力の DC レベルを調べる。

→ ±20mV 以内に設定する。

・発振が観察された場合 (数十MHz ~数 MHz)

: 50~100Ω のターミネータで出力を終端してみる。

→ 消えるなら、そのまま使用するか、ケーブルの取り回しを変えてみる。

: ケーブルの取り回しと閉ループをチェックする (軽く揺らしてみる)

→ 変化があれば、ケーブルの取り回しを変えて改善する。CRT ディスプレイが原因しているのなら (24 kHz) その配置を変える。

#### 6) 前置増幅器出力を観察する。

・チェック端子の電圧を測定する。

→ 異常の場合、高圧電源に原因がなければ修理する。

・出力の DC レベルを調べる。

→ ±500mV 以上であれば修理する。

・発振が観察された場合 (数十~数 MHz)

: ケーブルの取り回しと閉ループをチェックする (軽く揺らしてみる)

→ 変化があれば、ケーブルの取り回しを変えて改善する。CRT ディスプレイが原因しているのなら (24 kHz) その配置を変える。

: bin 電源中のデジタルモジュールを抜いてみる。

A D C のクロックは 100~200 MHz である。

高圧電源の DC-DC 変換器は 1 kHz 位の発振器を内蔵している。

: パソコンを OFF にしてみる。

CPU のクロックは数 MHz、ディスプレイの水平掃引周波数は 24 kHz である。

→ どれも当てはまらず、全てのモジュールを外しても消えなければ前置増幅器自身の障害であり、修理する。

7) 検出器クライオスタットの断熱が劣化していないか、調べる。

→ エンドキャップに水滴が付いていたり、触ると普段と違ってかなり冷たかったりしたら、修理する。液体窒素供給記録を見て消費量が急増していないか調べる。

(2) 標準線源等を測定し、信号を観察しながら行う調査 (例えば 370kBq 程度の  $^{60}\text{Co}$  をエンドキャップ上 25 cm で測定する。)

1) MCA の dead time meter やスペクトルが積算されていく様子を観察する。

・スイッチ類の設定を点検する (MEMORY TRANSFER 等)。

→ 設定が正しく、動作に異常があるなら修理する。

・異常がある時、別の MCA と入れ替えてみる。

→ 異常が直るのなら、修理する。

A D C 部

・ケーブルの取り回しと閉ループをチェックする (軽く揺らしてみる)

→ 変化があれば、ケーブルの取り回しを変えて改善する。CRT ディスプレイが原因しているのなら (24 kHz) その配置を変える。

・軽くケーブルを揺らしながら観察し、コネクタ部分の接触等不良を調査する。

→ 異常があれば修理、交換する。

・Dead Time Meter が大きく振れている

A D C の L L D の設定が低すぎる。

A D C の ZERO-LEVEL の調整が狂っている。

→ 正しく調整する。

線形増幅器出力の DC レベルがずれている。

→ 線形増幅器を調整する。

→ どれも当てはまらなければ A D C 自身の障害であり、修理する。

・チャンネルシフトがある、発振等が無いのに分解能が悪いなど。

: 別の A D C (M C A) と交換して調べる。

→ 改善されるなら修理する。改善されなければ、線形増幅器または前置増幅器に原因があると考えられるが、これだけでは判断できない。

## 2) 線形増幅器出力波形を観察する。

- ・ 信号波形に異常がある。
  - ： 入力信号波形の異常が出力に反映されていないか、時定数、入力波形の選択は正しいか調べる。
  - 他に原因がなければ修理する。
- ・ チャネルシフトがひどい。
  - ： 増幅率のつまみ（粗および微調整）を軽く指で弾き、接触を確認する。
  - 変化があれば修理する。無ければ、線形増幅器、A D C、前置増幅器のどれかに原因があると考えられるが、どれに原因があるのか判断できない。
- ・ 発振等が無いのに分解能が悪い。
  - ： ポールゼロ調整を調べる。
  - 正しく調整する。正しく調整されている場合、線形増幅器、前置増幅器、A D Cのどれかに原因があると考えられるが、どれに原因があるのか、判断できない。

別の線形増幅器と交換して調べる。

- 改善される場合は修理する。改善されなければ、A D C、前置増幅器、のどちらかに原因があると考えられるが、これだけでは判断できない。交換して調査する場合、前置増幅器の電源を同時に交換しない場合は閉ループも同時に変わるので留意する。

## 3) 前置増幅器出力波形を観察する。

- ・ 波形を調べる。
  - 正しくない場合は修理する。
- ・ ポールゼロを調べる。
  - 正しくない場合は修理する。
- ・ チャネルシフトがひどい。
  - 発振等が無いのに分解能が悪い。
  - ： 線形増幅器、A D C 共、交換して調べる。
  - 改善されなければ前置増幅器が原因である可能性が高いので修理する。改善されれば、線形増幅器、A D Cのどちらかに原因があると考えられるが、これだけでは判断できない。

### (3) 調査する場合の注意

- ・ 前置増幅器の電源は線形増幅器を通して供給されているので、高電圧がかかっている状態で線形増幅器を取り外さないこと。
  - 別の線形増幅器と交換して調査するときは高電圧を下げてからにする。
  - 或は前置増幅器への電源供給はそのまま変えずに、信号のみを別のものに通して調査する。

- ・ 高圧電源を OFF にしてもバッファ回路が働いているので、数分は高圧ケーブル、前置増幅器電源ケーブルを外さないこと。
- ・ 高電圧を印加した状態で調査するときは、高圧電源の蓋を開けたり、高圧部分にさわらないこと。短絡させると検出器が壊れ、感電する危険もある。
- ・ 波高分析器は取り外してもよいので、同じ物があれば交換して、異常の有無を確認できる。

## 2 障害の例<sup>1)</sup>

ここでは異常が発見された時にどの様に対応すれば良いか、参考になるとと思われる事例を掲載した。ここに記載されていない現象が発生した時にも、本章 1 に従って調査する。

### 2. 1 電子回路に関して

#### (1) 現象別の例

- ・ チャンネルシフトに関して

| 故障の原因・内容                                     | 原因の判定法                                                                           |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 線形増幅器の増幅度粗調整用ロータリー・スイッチの汚れ                   | スイッチを指で軽く弾くと大きくずれる。                                                              |
| 高圧電源で粗調整ロータリー・スイッチの汚れによる接触不良<br>(モデルによって異なる) | 前置増幅器出力の DC レベルを観察しながらスイッチを軽く弾くと大きく変動する。<br>-----<br>H.V プロブを用い、オシロスコープで出力を観察する。 |

1) ここにある例は、発生頻度、診断の容易さ、回復時間の短縮に対する効果等の客観的基準に基づいて選択・掲載した訳ではなく、入手できた例の中から選んだに過ぎない。実際に考慮すべき症状の極く一部である。

・分解能劣化に関して

| 故障の原因・内容                                              | 原因の判定法                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 検出器クライオスタットの真空劣化                                      | エンドキャップが冷たくなる。                                                                                           |
| 前置増幅器の発振                                              | オシロスコープにより出力を観察する                                                                                        |
| 高圧電源の粗調整ロータリー・スイッチの汚れによる接触不良<br>(機種によってロータリー・スイッチはない) | 前置増幅器出力の DC レベルを観察しながらスイッチを軽くはじくと大きく変動する。<br>-----<br>H.V プロブを用い、オシロスコープで出力を観察する。                        |
| 線形増幅器の発振                                              | 線形増幅器の出力の BNC ケーブルの末端にターミネータを付けると正常になる。上記ケーブルの末端をオシロスコープで観察する。                                           |
| 線形増幅器のポールゼロ調整が不適當                                     | 出力をオシロスコープで観察すると補償の過不足が見られる。                                                                             |
| bin 電源が放熱不十分で発振                                       | チェック端子をオシロスコープで観察する。                                                                                     |
| 検出器と回路系を接続しているケーブルがコイル状になっていた為、近くのパソコンの CRT の磁気等を拾った。 | 線形増幅器の出力に 24kHz の雑音が観測され、ケーブルを動かすと大きく変わる。<br>-----<br>CRT を移動すると無くなる。                                    |
| 前置増幅器や波高分析器の接地不良、検出器の絶縁不良                             | 高圧電源や波高分析器を外すと発振がなくなる。                                                                                   |
| マイクロフォニック雑音<br>低エネルギー領域で分解能劣化                         | ピーク形状に注意する。雑音の発生源が近くにないか調べる。<br>-----<br>100Hz～3kHzの雑音が観測される。<br>-----<br>波形整形時間を長くしバイポーラ出力にすると影響が少なくなる。 |

・高圧が印加出来ない事に関して。

| 故障の原因・内容                 | 原因の判定法                                                    |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 初段の電界効果トランジスタ (FET) が故障。 | 前置増幅器の電源電圧がそのまま出力に出てパルスが出ない。リモート・シャットダウンが作動した時に発生することがある。 |

(2) 機器別の例

・前置増幅器について

| 発生した現象                 | 故障の原因・内容                   |
|------------------------|----------------------------|
| 全ピークが低エネルギー側にテールリングする。 | 湿気により前置増幅器内部の高抵抗にリークが発生した。 |

・波高分析器 ADC に関して

| 発生した現象                | 故障の原因・内容                                   |
|-----------------------|--------------------------------------------|
| live time 等のクロックが遅れる。 | クロックの故障。<br>メモリーサイクル等の不調による dead time の増加。 |

・波高分析器スペクトル・メモリーに関して

| 発生した現象                  | 故障の原因・内容          |
|-------------------------|-------------------|
| あるチャンネル数毎に周期的にメモリー落ちする。 | メモリのドライバ電圧の低下     |
| 全体的にメモリー落ちする。           | 基板エッジの汚れ<br>部品の汚れ |
| 振動を与えるとメモリー落ちする。        | メモリーボード内のはんだ付け不良  |

・波高分析器ディスプレイに関して

| 発生した現象      | 故障の原因・内容  |
|-------------|-----------|
| CRT 表示画面のゆれ | 電源ユニットの異常 |
| ヒューズが切れる。   |           |

・bin 電源に関して

| 現象                               | 故障の原因・内容                               |
|----------------------------------|----------------------------------------|
| 出力（電圧など）が正しくない。リップルが載っている。臭いがする。 | 過負荷、温度上昇などの為、中のコンデンサの容量が抜けたり、焦げたりしている。 |

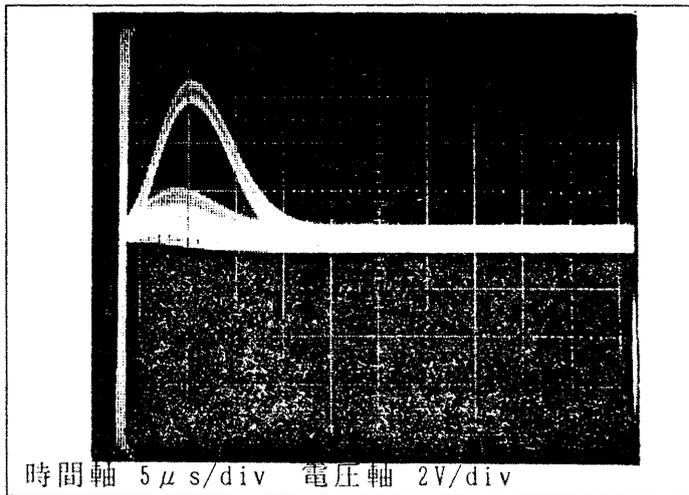
2. 2 検出器、遮蔽体等の汚染の除去

- ・汚染であることを確認する。
- ・汚染を拡大しない（汚い試料の取扱）
- ・汚染箇所を突き止める。
- ・プラスチック製の内張りを取り外す。
- ・検出された元素の、化学的、物理的特徴に合わせて、薄い中性洗剤液、エタノール等で拭き取る。使い捨てのキムタオルを用いる。惜しまずにどんどん新しい物に替える。

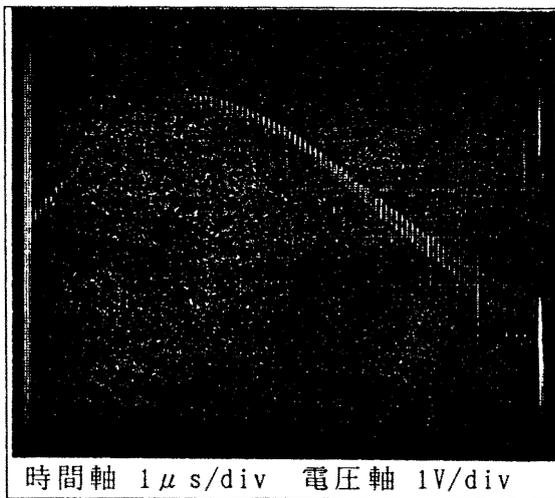
3 オシロスコープによる観察例  
 ここでは調査の参考になるように、発振や雑音の、オシロスコープによる観察例をいくつか記載する。

3. 1 線形増幅器の発振

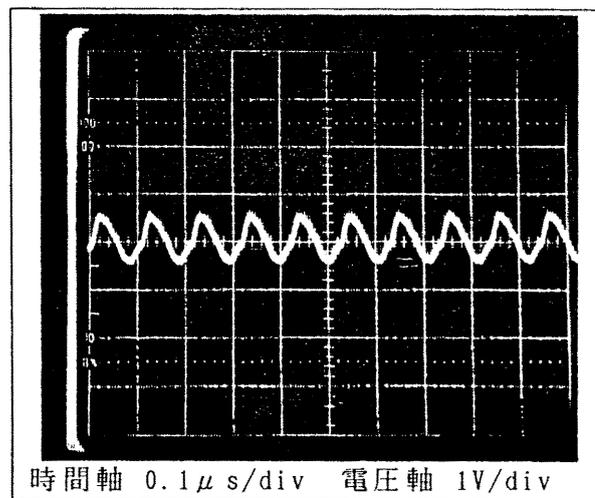
- ・ADCの入力インピーダンスが高いために線形増幅器からの出力が反射されて発振が起ることがある。



図A-1 信号全景

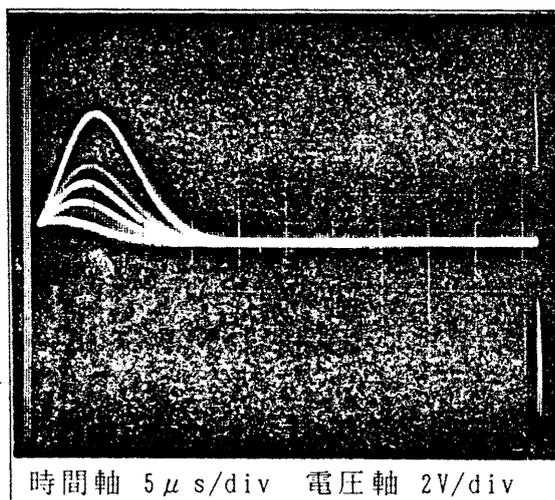


図A-2 拡大1

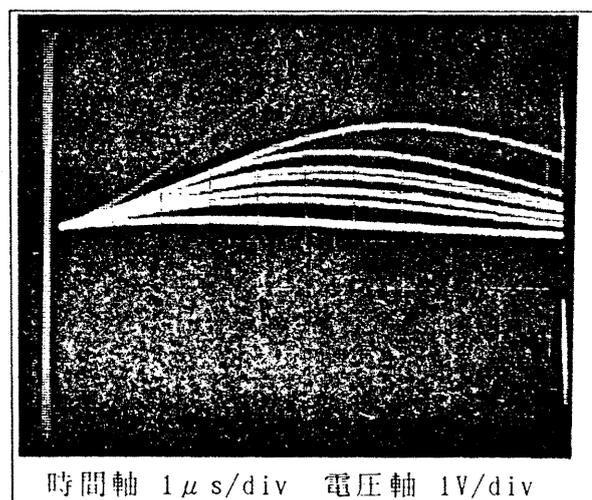


図A-3 拡大2

- ・この場合ADCの入力端子に、線形増幅器の出力インピーダンスに合った100Ωのターミネーターを挿入することで発振が止まった。(ただし線形増幅器のゲインを調整し直す必要が生じる)



図A-4 信号全景



図A-5 拡大

### 3. 2 パーソナルコンピュータからの磁気雑音

- ・前置増幅器の近くにコンピュータ等磁気を発生する物体があると、雑音を拾うことがある。

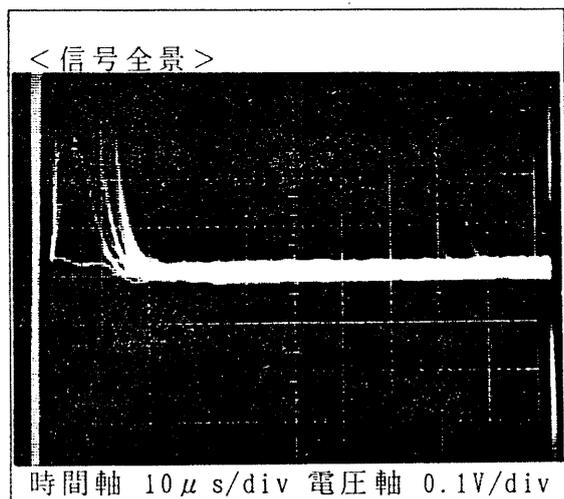


図 A - 6 信号全景

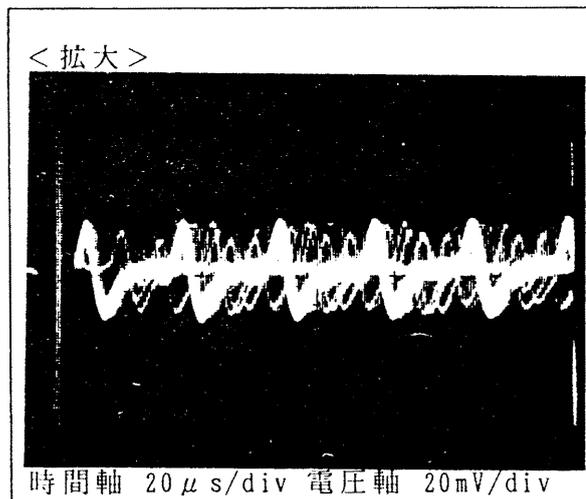


図 A - 7 拡大

- ・前置増幅器と線形増幅器、高圧電源の間には、4本のケーブルがあり、輪になるとアンテナになって雑音を拾い易くなるので、まとめて束にし、20cm毎に縛っておく。
- ・雑音の発生源を遠ざけたりあるいは角度を変えると、減少する。パソコンからの磁気雑音はディスプレイ装置を遠ざけたり、磁氣的に遮蔽すると減少する。

### 3. 3 bin 電源

- ・bin にデジタルモジュール（スペクトルメモリー、ADC・・・）が挿入されていると、クロックの信号が電源側へ伝わることもある（高圧電源のDC-DCインバーターも雑音源となりうる）。それらを取り除いても尚発振するようであればピン電源の故障である。モジュールの挿入位置を変えると良くなる事がある。

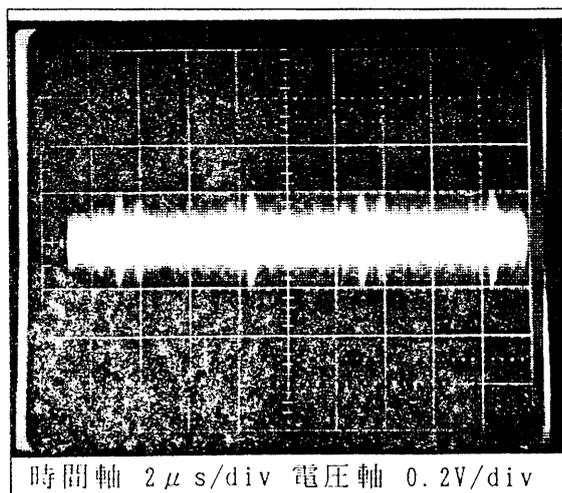


図 A - 8 デジタルモジュールの雑音

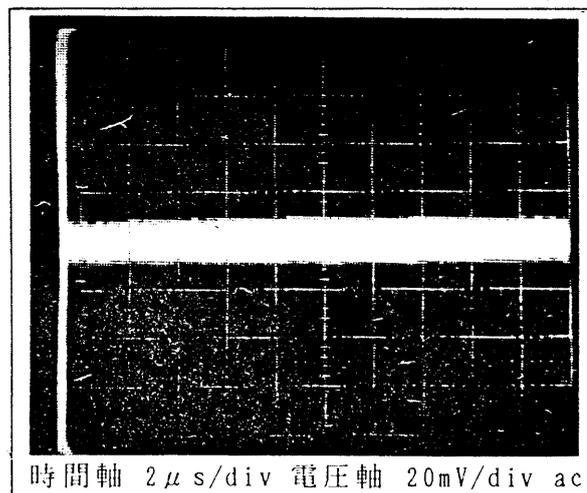
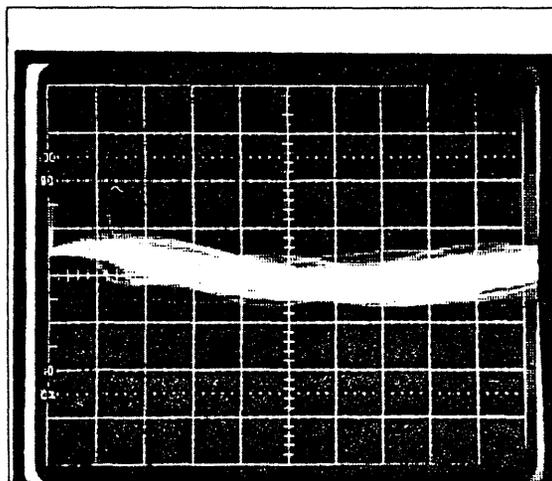


図 A - 9 デジタルモジュールを外した場合

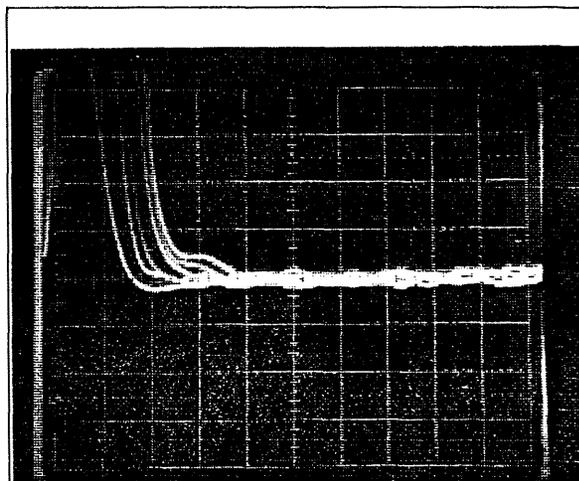
### 3. 4 液体窒素供給の際のマイクロフォニック雑音

- 液体窒素を供給している最中は、容器内の微震動や、窒素が気化して発生する泡の破裂の音が検出器結晶に伝わり、分解能が悪くなる。このため液体窒素供給中と直後は測定を行わず、それらの振動がおさまるのを待って30分後に測定を再開する。



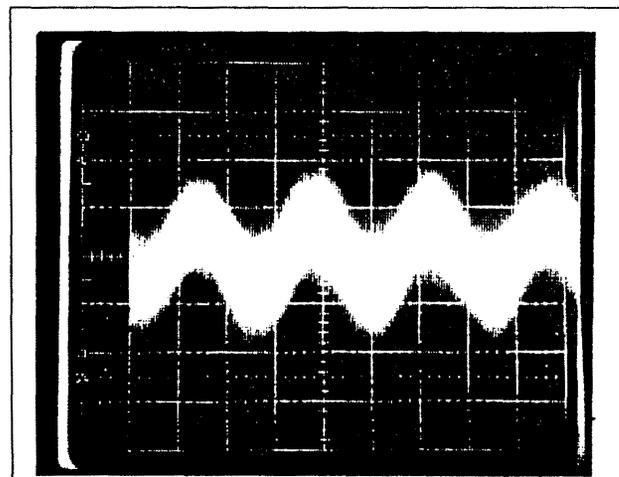
時間軸  $10\mu\text{s}/\text{div}$  電圧軸  $0.1\text{V}/\text{div}$

図 A - 1 0 雑音例 1



時間軸  $10\mu\text{s}/\text{div}$  電圧軸  $20\text{mV}/\text{div}$

図 A - 1 1 雑音例 2



時間軸  $0.5\text{m}\mu\text{s}/\text{div}$  電圧軸  $20\text{mV}/\text{div}$

図 A - 1 2 雑音例 3 - ヘアー・ドライヤーを使用して作ったマイクロフォニック雑音

## 資料 F：用語集

### 1 放射能（3章 測定機器の機能と動作原理1）

天然放射性核種：自然界に存在する放射性核種のこと、アクチニウム、ウラン、トリウムのような系列をもつものと $^{40}\text{K}$ のように単独で存在するものがある。

人工放射性核種：人工的（核実験、原子力発電等）に作り出される放射性核種。

アクチニウム系列： $^{235}\text{U}$ から、安定な $^{207}\text{Pb}$ までの、質量数  $4n+3$  の放射性元素の崩壊系列。

ウラン系列： $^{238}\text{U}$ から、安定な $^{206}\text{Pb}$ までの、質量数  $4n+2$  の放射性元素の崩壊系列で、 $^{234}\text{Th}$ 、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{214}\text{Pb}$ 、 $^{214}\text{Bi}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ などがある。

トリウム系列： $^{232}\text{Th}$ から、安定な $^{208}\text{Pb}$ までの、質量数  $4n$  の放射性元素の崩壊系列で、 $^{228}\text{Ac}$ 、 $^{228}\text{Th}$ 、 $^{212}\text{Pb}$ 、 $^{212}\text{Bi}$ 、 $^{208}\text{Tl}$ などがある。

存在比：同位体存在率ともいい、複数の同位体をもつ天然核種で、ある同位体の原子数が全体の原子数の何%存在するかの値。

X線：原子の核外で生じ、真空紫外線より短い波長をもつ電磁波を一般にX線とよぶ。電子のような荷電粒子が物質中を通過したり、殻電子が脱励起するときに放出される。前者は連続エネルギーの制動X線で、後者は単一エネルギーの特性X線（ $\text{Pb}(K\alpha 2) 72.88\text{keV}$ 、 $\text{Bi}(K\alpha 1) 77.15\text{keV}$ など）である。厳密な分類ではないが $500 \sim 5 \times 10^{-10}\text{m}$ 程度を軟X線領域、 $1 \times 10^{-10}\text{m}$ 程度以下を硬X線領域ということもある。

$\alpha$ 線：自然放射性元素から放出される3種類の放射線を $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 線とよんだのが名前の由来である。 $\alpha$ 粒子はHe原子核（質量数4、原子番号2）であり、 $\alpha$ 粒子の線束を $\alpha$ 線と称する。 $\alpha$ 粒子は物質中を通過するときの電離作用がおおきく、透過力は弱い。放射性元素が $\alpha$ 粒子を放出して崩壊する現象を $\alpha$ 崩壊という。自然に存在する $\alpha$ 放出核種はSm（原子番号62）より重い元素に限られ、放出される $\alpha$ 粒子のエネルギーは最大9MeV程度、大気中での飛程は約10cm以下である。

$\beta$ 線： $\alpha$ 線とともに発見され、電離作用などの物質との相互作用は $\alpha$ 線より弱く、透過力は強いことから、 $\alpha$ 線と区別され $\beta$ 線と名づけられた。高速の電子および陽電子の線束を $\beta$ 線と呼ぶこともあるが、一般的には、放射性核の $\beta$ 崩壊による電子または陽電子に限定して、 $\beta$ 線と呼ぶのが普通である。最高エネルギーが数MeV程度で、連続的なスペクトルを示す。

$\gamma$ 線：励起状態にある原子核が、より低い励起状態あるいは安定状態に移るとき（ $\gamma$ 崩壊）、または物質が消滅（電子-陽電子消滅）するときに発生する電磁放射線のこと。 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線にくらべてはるかに強い透過力をもつ。原子核から放射される電磁波を $\gamma$ 線と称し、核外現象のX線と区別しているが、両者とも波長が同じであれば、物理的性質は変わらない。

宇宙線：宇宙から地上にふりそそいでいる高エネルギー（数十MeV以上）粒子の放射線。地球に入射する宇宙線を一次宇宙線、それが大気圏内の原子核と相互作用して生み出した宇宙線を二次宇宙線と呼んで区別している。一次宇宙線が空気の原子核と相互作用すると多数の中間子を発生する。このうち中性の $\pi^0$ 中間子は2個の $\gamma$ 線に崩壊し、電荷をもつ $\pi$ 中間子は $\mu$ 粒子に崩壊するか、空気の原子核と衝突し再び核作用をおこす。 $\mu$ 粒子は、電子と2個のニュートリノに崩壊する。これらの宇宙線を起因とする粒子が遮蔽体や検出器と作用し、バックグラウンドになる。

p C i（ピコキュリー）：放射能を表わす単位で、1 C i（キュリー）は毎秒 $3.7 \times 10^{10}$ の崩壊（ $3.7 \times 10^{10}$  d p s）をする放射性核種の放射能である。1 p C iは $0.037$  d p sである。

B q（ベクレル）：放射能のS I単位で、1 B qは1 d p sである。環境試料の放射能値に応じてm B qなども使用される。

k e V、M e V：1 e V（電子ボルト）は、真空中で電子を1 Vの電位差で加速したときに電子が得るエネルギー（ $1.602 \times 10^{-19}$  J）である。

1 0 0 0倍をk e V、1 0 0万倍をM e Vという。

$\gamma$ 線放出比：1崩壊当り放出される $\gamma$ 線の割合。百分率で示されることが多い。

$\gamma$ 線放出率：単位時間当り放出される $\gamma$ 線の数（ $\gamma$  p s など）として使用されるが、 $\gamma$ 線放出比と同意語として使用されることもある。

エスケープピーク：検出器中で起こった陽電子消滅によって発生した2個の $\gamma$ 線（ $=0.511$ MeV）が検出器の中で相互作用せずに外に逃げた時に検出されるピーク。2個とも相互作用せず外に逃げたときダブルエスケープ、1個が相互作用しない時をシングルエスケープという。

エネルギー分解能：放射線検出器でエネルギースペクトルを測定するとき、相接近した2本の線スペクトルを分離できる能力の目安。通常あるエネルギーにおける線スペクトルの半値幅（F W H M）、または下記のようにエネルギーと半値幅の比で表わす。

たとえば $^{60}\text{Co}$  1332.5 k e Vのピークのエネルギー分解能は次のようになる。

$$\text{エネルギー分解能} = \frac{1332.5 \text{ keV ピークの F W H M (keV)}}{1332.5} \times 100 (\%)$$

コンプトン散乱： $\gamma$ 線と電子の衝突の結果起きる $\gamma$ 線の散乱で、波高スペクトル上では連続スペクトルとして観察される。

減衰係数：減弱係数ともいう。粒子（光子）と原子との衝突過程において、入射粒子がある特定の過程により失われる確率（断面積（ $\text{cm}^2$ ））を、物質の単位体積（ $\text{cm}^3$ ）あるいは単位重量（g）当りに換算したものである。放射線が物質を通過する際に起こる吸収の大きさを表す。放射線や物質の種類、エネルギーによって異なり、単位体積当りを線減衰係数、単位重量当りで表したものを質量減衰係数という。

カスケード $\gamma$ 線：原子核がある状態から次から次へとカスケード（cascade：検出器の分解時間以内につづいて放出すること）に $\gamma$ 線を放出し、連鎖的によりエネルギーの低い状態に転移したときの $\gamma$ 線。

サム効果（＝サム・コインシデンス効果）：1崩壊で2つ以上の $\gamma$ 線が検出器と反応したときに、それらのエネルギー和の信号になり、計数される信号の数が本来の数より減少すること。カスケード $\gamma$ 線を測定したときなどに起こる。

正規分布：ガウス分布ともいう。

2つの実数 $\mu$ （ $-\infty < \mu < \infty$ ）および $\sigma^2$ （ $0 < \sigma^2 < \infty$ ）によって、確率分布を表す関数。

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi) \cdot \sigma}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} (x - \mu)^2\right\}$$

平均が $\mu$ 、分散が $\sigma^2$ であり、① $x = \mu$ に関して左右対象であり、② $x = \mu$ で最大値 $1 / \{\sqrt{(2\pi) \cdot \sigma}\}$ をとり、その両側へ単調に減少し、③ $x = \mu \pm \sigma$ を変極点としてもつ。

最大値の半分の高さを示す $x$ の2倍を半値幅（FWHM）といい、 $FWHM = 2\sigma\sqrt{(2\ln 2)} = 2.355\sigma$ となる。

また1/10幅（FWTM）は

$2\sigma\sqrt{(2\ln 10)} = 4.292\sigma$ となる。

$\gamma$ 転移：原子核が $\gamma$ 崩壊し、ある状態からエネルギーの違う他の状態へ変化すること。

準位図：原子核のエネルギー状態を、縦軸にエネルギーの大きさをとり水平に線を引いて表し、この線の片側に基底状態からのエネルギー値を、他方にスピン、パリティの値を書き込んだもの。

崩壊図：放射性核種が崩壊する様子を、放射線の種類、強度およびエネルギーの関係について原子核の励起準位とともに図示したもの。崩壊図式ともいう。

## 2 測定器（3章 測定機器の機能と動作原理2、5章 機器の設置と点検・調整）

スペクトル：あるものを成分に分解し、それぞれの成分の強度を、成分を特徴づける量の大小の順に従って並べたものをいう。 $\gamma$ 線スペクトルは $\gamma$ 線をエネルギー別に分けたスペクトルである。環境試料の測定ではエネルギー領域として20keVから2MeV程度を必要とする。

コールドフィンガー：Ge半導体結晶を冷却するためにアルミニウムや銅で作られた棒で、一方は液体窒素の中に入れ、他方は結晶につなぐ。

クライオスタット：液体窒素などを使用する、低温の実験装置のことである。

Ge半導体検出器では、一般に液体窒素を用いて結晶を冷却してる部分（結晶、コールドフィンガー、エンドキャップ、真空箱等）を指す。

クライオジェット：液体窒素補給容器に取り付け、中から液体を取り出す器具。30 $\mu$ m程度以下の容器に使用し、ゴム球を押すことにより容器内部を加圧し取り出す。

デュワーびん：液体窒素を溜めておく容器で、2重の金属容器で作られている。  
2重容器の隙間は真空排気され、液体窒素の消費が少なくなるように断熱してある。補給用および測定器と一体になっているものがあるが、測定器と一体になっているデュワーびんの正常な窒素消費量は1～2.5kg/日以下である。

結晶有感領域：空乏層ともいい、半導体中のキャリアのない部分で、絶縁体として働く。放射線が入ると電子と正孔の対ができ、印加電界によってこれらの電荷を集めることができる。

電界効果トランジスタ（FET）：トランジスタの一種。ゲート、ソース、ドレインの3電極があり、ゲートに信号を与えると、ドレインへの出力電流が変調される。信号電力はゲートの接合容量を充電するのみで、微小ですむのが特徴である。前置増幅器では初段にソース接地FETを置き、検出器結晶内で生じた微小の電圧をゲートに入力し、ソースドレイン間の電流を変化させ、増幅を行う。

パイルアップ：2つ以上のパルスが、パルス持続時間の間に重なりあう現象で、この状態でAD変換されると、波高分布に誤差（真の波高値と違った値にAD変換される）を生じる。パイルアップの防止には、パルス幅を短くする必要があるが、同じ計数率でパルス幅を狭くすると分解能が悪くなり、パルス幅が広いままで、パイルアップをさけるため計数率を下げたのでは測定に時間がかかる。

フィルタ回路：特定の周波数範囲にある周波数の信号のみを通過し、他の周波数範囲を通さないようにする回路。

ポールゼロ消去回路：パイルアップを減少し、アンダーシュートを補償できるように設計された回路。

時定数：電子回路を流れる電流が流れはじめの値の $1/e$ になる時間。その回路の過渡応答の早さを表す。

エンドキャップ：検出器結晶を包んでいるアルミニウム、ステンレス、銅製のキャップ。

ベリリウム窓：Ge半導体検出器結晶は真空箱（クライオスタット）内に入っているが、試料からの $\gamma$ 線が通過するための窓をベリリウムで作ったもの。ベリリウムは大気中で安定な金属元素のなかで最も質量数が小さく放射線の吸収を最小限にできるので、低エネルギー光子（ $\gamma$ 線）の測定に適している。

in-situ測定：野外に検出器を持ち出して測定すること。

ディスプレイ（表示）：画面に数字、文字、図形を表示するもの。波高分析器はCRTディスプレイが多く使用されているが、この他に液晶やプラズマ・ディスプレイがある。

後方散乱 $\gamma$ 線：後方散乱とは散乱の角度が $90^\circ$ 以上のことをいう。測定した試料の放射能が強いとき、試料中の $\gamma$ 線が遮蔽体などからの散乱線として検出されることがある。ピークは、 $\sim 200$ keV程度の低エネルギー領域にあらわれ、その大きさは遮蔽体の材質と内容積で異なる。

4  $\pi$  方向：ある点のまわりの全方向のことである。上部または下部のみのときは  $2\pi$  方向という。

マイクロ・フォニック雑音：機器の振動が測定中に電気信号として取り込まれたときの雑音。

### 3 効率（6章 標準線源とピーク効率）

シンプソンの公式：関数  $f(x)$  の定積分を近似的な数値計算で行うための公式。

自己吸収を補正する際に、標準体積試料と測定対象試料の自己吸収の相違によって生ずる効率の差を求める計算などに用いる。

逆二乗則：放射線強度が線源と検出器間の距離の2乗に反比例すること。

リンモリブデン酸アンモニウム ( $3(\text{NH}_4)_2\text{O} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 24\text{MoO}_3$ ) 分子量 1876.5)：セシウム濃縮用試薬。酸性溶液中でアンモニウムイオンとセシウム、ルビジウム、カリウムイオンが置換する。

コリメータ：光、放射線などを必要な細さに絞る装置のこと。鉛ブロックに必要な径の穴をあけ、この穴を通過した  $\gamma$  線のみを測定に使用し、機器調整を行うことがある。

ピーク・トータル比：単色  $\gamma$  線のスペクトルにおいて、ピーク面積を全スペクトル面積で割ったもの。サム効果の補正に使用する。

25 cm 相対効率：Ge 検出器を、 $^{60}\text{Co}$  点線源から 25 cm の距離において測定したときの、1332.5 keV  $\gamma$  線に対する Ge 検出器のピーク面積と、3 インチ  $\times$  3 インチ NaI シンチレーション検出器のピーク面積との比（% で表わす）。

相対ピーク効率：基準  $\gamma$  線エネルギーのピーク効率の値を1としたときの、他のエネルギーのピーク効率の値。

基準ピーク効率：基準  $\gamma$  線について試料の幾何学的条件（試料厚など）を考慮したピーク効率。

ピーク効率：相対ピーク効率、基準ピーク効率、および自己吸収などその他の補正項を含めた絶対ピーク効率の総称。

c p s / B q ( $\gamma$ )：検出器が単位時間当りに数えることができた光子 ( $\gamma$  線) 数を、単位時間当りに試料から放出された数で割ったもの。ピーク効率を表す。

c o u n t /  $\gamma$ ：検出器が数えることのできた光子 ( $\gamma$  線) 数を、試料から放出された数で割ったもの。ピーク効率を表す。c p s / B q ( $\gamma$ ) と同じ。

### 4 測定（7章 試料調製法、8章 測定法、10章 放射能濃度）

c p m：1 分間あたりのカウント数

c p s：1 秒間あたりのカウント数

c p k s：1 0 0 0 秒間あたりのカウント数。

$\gamma$  p s：1 秒間あたりの  $\gamma$  線の放出数。

バックグラウンド：測定にとって不必要な効果をさす言葉で、正しい測定結果を出すためにはバックグラウンドの寄与を知ってこれを除く必要がある。

Ge 検出器では、一般に試料のない状態、あるいはブランク試料を測定したときに得られる計数をバックグラウンドとする。

環境試料：環境放射能の測定に用いる試料。大気浮遊じん、降下物、陸水、土壌、精米、野菜、茶、牛乳、日常食、海水、海底土、海産魚、淡水魚、貝類、海藻類などが選択される。

コインシデンス法（同時計数法）：複数個の検出器をコインシデンス回路（2個のパルスが時間的に重なって入力された場合のみ出力パルスを生じる）に接続して用いる放射線測定方法。真に測定しようとする事象のみを取り出すのに有効で、雑音によるバックグラウンド値を低くすることができる。

アンチコインシデンス（反同時計数）：複数個の検出器からの同時の出力信号は対象外の事象として排除することで、アンチコンプトン測定法などに使用される。この測定方法はゲルマニウム検出器内でコンプトン散乱をして生じた散乱 $\gamma$ 線をNaI(Tl)などで検出し、アンチコインシデンス回路で除去する方法である。

スカベンジ：各種の元素を含むものから特定の元素を取り除くこと。

## 5 スペクトル解析（9章 スペクトル解析）

チャンネル幅： $\gamma$ 線スペクトルにおいて1チャンネルに相当するエネルギー幅（keV/chなど）。

解析対象ピーク：エネルギーや放射能を求めるために着目するピーク。

妨害ピーク：解析対象ピークに対して解析上妨害を与えるピーク。

妨害基準ピーク：妨害ピークの算出に用いたための、妨害ピークと同じ核種から放出される他の $\gamma$ 線の内、とくに顕著で解析が容易なピーク。

寄与係数：着目するチャンネル領域に寄与する妨害ピークの計数を推定するために、妨害基準ピーク面積に乗ずる係数。

ピーク中心チャンネル：ピークの中心に相当する計算上のチャンネル値で、ピーク中心位置ともいわれる。

ピーク領域：ピークを形成しているチャンネルの領域で半値幅のおよそ2.3～5倍である。

解析対象領域：解析対象ピークを含むエネルギーまたはチャンネル領域で解析の際に利用する領域。

ベースライン：解析対象ピークに対してピーク領域およびその付近におけるスペクトルの単調な連続分布の部分。

ピーク面積：着目するピークの正味の積算計数値で、ピーク領域の積算計数値からベースラインの積算計数値を引いたもの。

検出限界：検出可能な最低の放射能

ピーク探査（ピークサーチ）：スペクトルの中から、ピークを見つけ出すこと。

核種同定：ピーク探査などで検出されたピークのエネルギーから核種名を探し出すこと。

平滑化： $\gamma$ 線スペクトルのピークはベースラインの上であり、それらには統計変動が重なっている。このようなスペクトルの解析が容易にできるように、統計変動の除去を目的に数値フィルターを用いて移動平均（たたみ込み積分）を行うこと。

ガウス関数二次微分フィルタ：ガウス関数を2回微分して求めた数値フィルタ。

FWHM (Full Width at Half Maximum、半値幅)：ピーク中心の高さの半分を示す位置での、ピークの全幅。ピークの広がりをあらわす量であり、検出器の性能を示す。また、検出器の劣化や機器調整の良否の確認に利用される。

FWTM (Full Width at Tenth Maximum、 $1/10$ 幅)：ピーク中心の高さの $1/10$ を示す位置での、ピークの全幅。検出器の劣化や機器調整の良否の確認に利用できる。

直線回帰分析：線形最小2乗法で直線をあてはめること。

テイリング：ピークの裾が、主に低エネルギー側に尾をひいていること。

## 6 計算機 (4章 電子計算機、11章 スペクトル解析プログラム)

CRT (Cathode Ray Tube、陰極線管)：ブラウン管

入力装置：フロッピーディスク、キーボード等、コンピュータシステムへ命令やデータを読み込む装置。

中央処理装置 (CPU: Central Processing Unit)：他の装置の制御と監視、論理演算を含めた計算、プログラムの実行を行う装置。

主記憶装置：実行中のプログラムの命令等を貯える記憶装置。

補助記憶装置：主記憶装置より低速だが、大容量の記憶が可能であり、大量のデータやプログラムを保存できる記憶装置。フロッピーディスク、固定ディスク、磁気テープ装置などがある。

ビット (Bit: binary digit)：コンピュータで情報を表現する時の最小の単位で、0か1である。

バイト：意味のある情報を表す最小単位である。8ビットの集まりを1バイトと呼び、1バイトは2の8乗、256通りの組み合わせを表現できる。

ワード (語)：コンピュータで処理されるデータの基本単位で、何桁かのビットからなり、単一の情報単位としてコンピュータで処理され、文字や数字等を表現する。コンピュータによって語の長さが限定されているもの (固定語長) と変えられるもの (可変語長) がある。固定語長は機種によって、8、16、24、32ビットなどの大きさがある。

コンパイラ言語：人間の作ったプログラムを1プログラムごとに機種に適した機械語に翻訳 (コンパイラ) して使用する フォートラン、C、パスカル等のプログラム作成用言語。

インタプリタ言語：プログラム用言語の命令を機械語に翻訳が終わったら、すぐその機械語を実行する。実行がすんだら、次の1命令の翻訳に入り実行をくりかえす。この様に同時通訳の形式をとる BASIC等のプログラム作成用言語。この特徴から会話型言語と言われる。くりかえし翻訳するので実行に時間がかかる。

ラムディスク：コンピュータのメモリ（RAM）を仮想的なディスクとして使用すること。フロッピーディスクのような、機械的動作部分がないので高速なファイルアクセスが可能となる。

RAM（Random Access Memory）：アドレス（記憶番地）の指定で、その内容を取り出したり書き換えることのできる記憶素子。メモリに書き込み、読み取りができることから RWM（Read/Write Memory）ということもある。

ROM（Read Only Memory）：記憶すべき内容を一度書き込むと、電源を切っても内容は消えず、内容を変えず読みだし専用として使用する記憶素子。

フロントプロセッサ：日本語入力等を受け持つ部分。キーボードから受け取った信号を漢字に変換し、プログラムへ変換したデータを引き渡す。

周辺機器：CPU以外の記憶、入力、出力装置のこと。フロッピーディスク、プリンタ、プロッタなどのほか、ディスプレイやキーボードも周辺機器の一種である。

固定ディスク：取り外しできない磁気ディスクからなる外部記憶装置。記憶容量は、数十メガバイトから1ギガバイト以上のものまでである。

グラフィックディスプレイ：ブラウン管に文字だけでなく図形も出力する機能をもつ出力装置。

パラレル・ライン：複数の分離したラインで、同時にデータの転送ができる。高速なデータ転送が可能であり、転送の制御は簡単に済むが、複数のラインが必要なので遠距離の転送には高価格になる。

シリアル・ライン：データを直列に並べ換えて1ビットずつ送る方式を取るもの。1本の線でデータが送れるので低価格でできるが、転送速度が遅い欠点がある。代表的なものに RS-232Cがある。

RS-232C：アメリカ電子工業会（EIA）によって規定された、データ通信装置とのインターフェースの1つ。シリアルである。

インターフェース：2つ以上の機器で、動作のタイミング、データの取扱が違うとき、これを調整してデータのやりとりがうまくいくようにする部分。

ワークステーション：ネットワークの中で端末機としての機能をもち、そのみでも種々の処理ができるもの。16、32ビットのCPUをもっており、グラフィック機能がすぐれている。

パーソナル・コンピュータ：パソコンともいう。個人利用を主目的に作られた、マイクロコンピュータをベースにしたコンピュータ。

# 付 録

## I 操作の簡易化を目指した $\gamma$ 線スペクトル解析プログラム

### 1 まえがき

環境放射線モニタリングの分野におけるゲルマニウム半導体検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトル分析法の一層の普及にともない、操作が容易でかつ確実な結果を与えるスペクトル解析プログラムの開発への要望が高まってきている。操作の簡易化は、たとえば緊急時のように、多くの人員がモニタリングの実施のために動員される場合に対しても役立つと考えられる。

このような状況に対処するため作られた、対話形式によるユーザーインターフェイスを持つ解析プログラムの基本仕様を本付録に示す。この仕様は最小要件を例示したものである。最善とは言いきれないが、この仕様に盛られた考え方をゆがめない限りにおいては、他の機能を付加することを妨げるものではない。なお、本解析プログラムの特徴は次のとおりである。

#### 1) man-machine interface について

man-machine interface に重点をおいて（操作等の表示を分かり易く）迅速に間違いなく操作できるプログラムである。

#### 2) ファイルに関して

スペクトルデータ以外の一般的なファイル（プログラム実行時に作成される作業用ファイルも含めて）は、市販のプログラム用ファイル、あるいはテキスト形式等互換性の高いフォーマットが望ましく、一つの保守プログラムで扱え、多数のファイル保守プログラムを使い分けなくて済むようにした。

#### 3) 核データに関して

環境試料中に検出される可能性のある人工放射性核種及び天然放射性核種を取り扱う必要がある。しかし、緊急時には、平常時と異なった核種が検出され、互いに近接したエネルギーに複数の核種のピークが存在することが多いため、核種の同定において、誤認する可能性がある。これを防ぐために、緊急時の段階や試料の種類に応じた核データファイルを複数用意しておくようにした。

#### 4) 測定試料容器に関して

小型容器：大気浮遊塵、降水、飲料水、生物、牛乳、土壌等を測定する。

容器に充填された試料の高さの補正を行なう。

マリネリ容器：海水、降水、飲料水、生物試料、牛乳等を測定する。

#### 5) その他

万一、ピーク効率曲線が測定・作成されていない場合でも、オーダーだけは測定できるようにプログラム仕様に適切なピーク効率曲線を用意しておき、おおよその計算結果が得られるようにしておく。

この付録は $\gamma$ 線スペクトル解析プログラム作成者のための基本仕様として書かれており、スペクトル解析の流れにそっては記述されていない。また、分析担当者がこの付録の仕様を読んで理解しておくことは必ずしも必要ではないと考えられる。

なお、本マニュアルに詳細仕様を示すことは困難であるため、ここでは仕様の考え方のみを示してある。

プログラムを作る際、正しく、理解しやすいプログラムにする事の重要性については本文に述べてあるが、本付録ではman-machine interface について記載した。プログラム作成者の意図どおりに間違いなく動作するようにパソコン操作者を誘導するのは重要なことである。

以下に各セクションの概要を示す。

1： スペクトル解析プログラムで取り扱うファイルはどんなものがあるか。その中には何が記載されているか。

フォーマットはどんな形が考えられるか。

をまとめて示してある。

2： プログラムの構成と流れ。

入力画面の記載のところでは誤りを起こしにくく、理解しやすい対話形式が強く望まれていることを例をあげて示した。

測定プログラム

解析用のパソコンが、MCAを兼ねている場合についての留意事項などを示した。

#### 標準線源スペクトル解析プログラム

相対ピーク効率の関数型は示してあるが計算式等の正確な全体像は本文を参考にする。

#### 試料スペクトル解析プログラム

計算式等についての正確な全体像は本文を参考にする。

プログラムの機能のモジュールへの分け方とそれを用いた全体の流れについても記載されている。

またこのセクションの記載事項は大部分は標準線源スペクトル解析プログラムの計算に共通して利用される。

## 2 ファイル

### 2.1 スペクトルデータファイル

スペクトルデータファイルは、下記のフォーマットとする。

|        |   |              |      |
|--------|---|--------------|------|
| 4096 個 | } | Live time(秒) | (CR) |
|        |   | Real time(秒) | (CR) |
|        |   | 計数値の文字表現     | (CR) |
|        |   | ”            | (CR) |
|        |   | ”            | (CR) |

### 2.2 試料及び測定条件ファイル

試料及び測定条件ファイルに必要な記載項目例は次のとおり。

- ・ 測定番号（検出器番号を含める）または該当スペクトルデータファイル名
- ・ 測定開始年月日及び時刻
- ・ 採取年月日
- ・ 試料名
- ・ 採取地点
- ・ 試料コメント
- ・ 測定容器名
- ・ 測定試料重量及び試料供試量
- ・ 試料高さ（マリネリ容器で測定するときは2000と入力する。）
- ・ エネルギー校正式の作成に用いるピークを中心チャンネルとこれに対応するエネルギーの対を3組、または2次式の校正式
- ・ ピーク効率曲線式の係数等の計算結果
- ・ 試料測定前後BGスペクトル番号

### 2.3 ピーク効率曲線データファイル

解析に用いたピーク効率曲線のデータは、試料及び測定条件ファイルにもファイルすること。

### 2.4 核データファイル

基となる核データファイルには、次の核種を登録する。

Be-7, K-40, Cr-51, Mn-54, Mn-56, Co-58, Fe-59, Co-60, Zn-63, Zn-65,  
Ga-74, As-74, Ge-75, Ge-75m, Sr-91, Y-91, Y-93, Zr-95, Nb-95, Nb-97,  
Zr-97, Mo-99, Tc-99m, Ru-103, Ru-106, Ag-108m, Ag-110m, Sb-124, Sb-125, Sb-127,  
Te-129, Te-129m, I-131, I-132, Te-132, Cs-134, Cs-136, Cs-137, Ba-140, La-140,  
Ce-141, Ce-143, Ce-144, Nd-147, Tl-206, Bi-207, Tl-208, Pb-210, Pb-212, Bi-212,  
Pb-214, Bi-214, Ra-224, Ra-226, Th-227, Ac-228, Th-228, Th-231, Th-234,  
Pa-234m, U-235, Np-239, Am-241

- ・ 核種名
- ・ 分析対象核種であるか否か。
- ・ 光子エネルギー (keV)
- ・ 放出率 (%)
- ・ 半減期 (day)
- ・ ピークの設定 (チャンネル) (default 値を記載する)

- Left base : 低エネルギー側のベースライン計算用のチャンネル領域 (LB)
- Left gap : 低エネルギー側の妨害ピークのチャンネル領域 (LG)
- Left peak : 低エネルギー側のピーク領域 (LP)
- Right base : 高エネルギー側のベースライン計算用のチャンネル領域 (RB)
- Right gap : 高エネルギー側の妨害ピークのチャンネル領域 (RG)
- Right peak : 高エネルギー側のピーク領域 (RP)

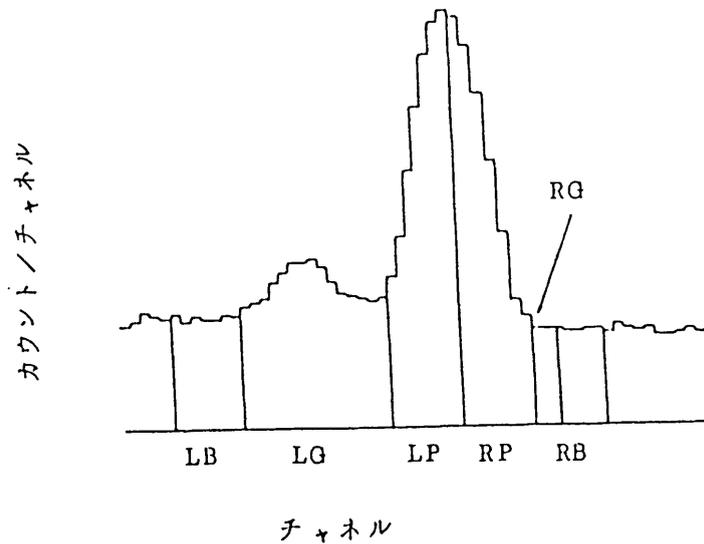


図 ピークの設定

表 核データファイルの記載項目の一例

| 核種     | 分析<br>対象 | エネルギー  | 放出率  | 半減期   | ピークの設定       |             |                    | 備考             |
|--------|----------|--------|------|-------|--------------|-------------|--------------------|----------------|
|        |          | keV    | %    | day   | Left<br>base | Left<br>gap | Left . . .<br>peak |                |
| Ce-144 | ○        | 133.54 | 11.1 | 284.9 | 3            | 0           | 3                  | F.P.           |
| Ce-141 | ×        | 145.44 | 48.4 | 32.50 | 3            | 5           | 3                  | F.P.           |
| U-235  | ×        | 185.72 | 57.5 | 0*    | 5            | 0           | 5                  | Ac-series      |
| Cr-51  | ○        | 320.08 | 9.83 | 27.70 | 4            | 4           | 4                  | (n, $\gamma$ ) |
| .      | .        | .      | .    | .     | .            | .           | .                  | .              |
| .      | .        | .      | .    | .     | .            | .           | .                  | .              |

\* 減衰補正を行わないこと意味する

## 2.5 その他

- ・ 緊急時には多数の核種を検出する可能性があり近接したエネルギーに複数の核種の存在が予想されるため、全核種を記載した一種類の核データファイルでは近接したピークの核種を誤認し混乱する恐れがある。よって複数の核データファイルの使い分けができること。
- ・ ピーク領域の変更が可能であること。
- ・ 標準線源用の核データファイルを用意する。
- ・ その他の一般的なスペクトルデータ以外のフォーマット（プログラム実行時に作成される作業用ファイル等も含む）もスプレッドシート型の市販プログラムで利用できるファイルあるいはテキスト形式を用いるなどして、一つのユーティリティープログラムで扱えること。

市販のファイル形式を利用しない場合は以下のようなフォーマットが考えられる。

- ・ テーブルの各要素には、実数値、文字列のいずれも収めることができ、各項目毎に幅も可変でき、次の4種類の情報が1つのシーケンシャルファイルに収められていること。

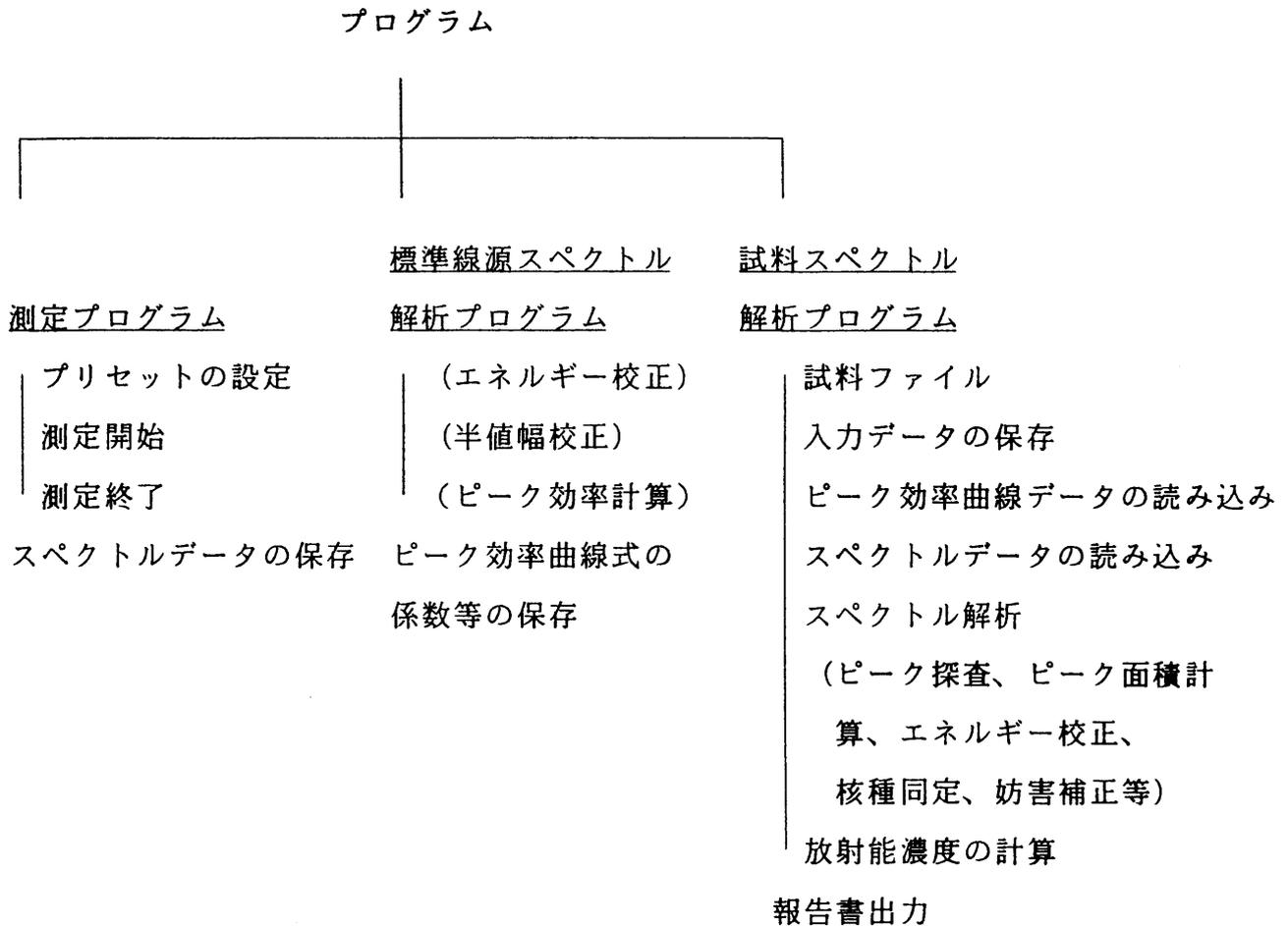
- ① テーブルの大きさ (行×列) 等の情報
- ② 実数値のテーブル (単精度実数の2次元配列)
- ③ 制御用のテーブル (単精度整数の2次元配列)

テーブルの各要素が文字であるか数値であるか、また何桁の幅を持つか等の情報を持つ。

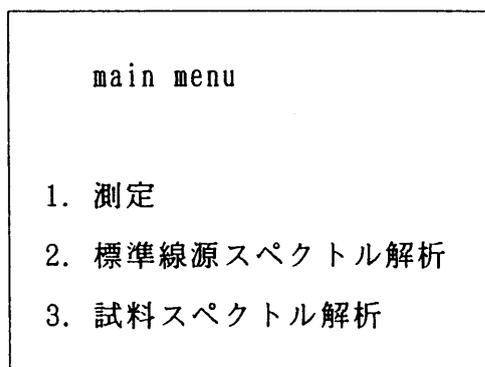
- ④ 文字列データ

### 3 プログラム

プログラムは、次の3種類から成りそれぞれ次のような機能を持つ。



☒ プログラムの概要



☒ プログラムメニュー例

- ・ パーソナルコンピュータをMCA と共用するタイプのシステム (パソコンMCA) は、スペクトルと menu画面を分割して表示すること。その場合表示は、測定時にはスペクトルメモリーの内容を、標準線源解析または試料解析時にはフロッピーから読み込んだスペクトルデータを表示する。

main menu

1. 測定: 試料の測定
2. 標準線源解析: 標準線源を測定しピーク効率曲線を作成
3. 試料解析: 試料測定データの解析

番号を選択し入力してください。 \_\_\_\_\_

スペクトルの表示エリア

- ・ man-machine interface に重点を置き、あまり熟練していない者でもスムーズに対応できるようにする。
- ・ 入力をスムーズに行うため、前回に入力した内容が画面上に残っていること。

### 3.1 測定プログラム

main menu で1を選択すると下記の画面（例）が表示される。

1.測定

次の1-6 を実行します。

- 1. erase (スペクトルメモリを消去)
- 2. preset time(何秒間測定しますか?)
- 3. start (測定開始)
- 4. stop (測定終了)
- 5. save (今表示されているスペクトルをフ  
ロッピーに保存)
- 6. return to main menu

番号を選択し入力してください。 \_\_\_\_\_

#### ○1を選択したとき

(表示されたスペクトルがスペクトルメモリー及び画面から消去される。ただし  
フロッピーからは消去されない)

#### ○2を選択したとき

何秒間測定しますか? \_\_\_\_\_ (秒)

(測定中の時は「既に測定中です」とコメントが現れる)

→入力後、測定画面に戻る。

#### ○3を選択したとき

(画面はそのまま、測定を開始する)

(測定中の時は「既に測定中です」とコメントが現れ、動作しない)

○4 を選択したとき

(画面はそのまま、測定を終了する)

(停止中の時は「停止中です」と表示し、動作しない)

(プリセットを指定して測定中の時には、

「測定時間がセットされていますが、止めますか?」

「止めるならY、止めないならN を入力してください。」と表示する)

○5 を選択したとき

測定番号(測定器番号込み)を入力してください。

(スペクトルは画面に保存された状態) →入力後、測定画面に戻る。

(測定中の時は「測定中ですので保存できません」と表示する)

○6 を選択したとき

(main menu に戻る)

注意事項:

- ・ フロッピーへ書き込んだデータは本プログラムを用いて消去できないこと。
- ・ CRT には現在のスペクトルメモリーの内容のみを表示する。
- ・ 測定中のスペクトル表示を中断してフロッピーの内容を表示できないこと。

### 3.2 標準線源スペクトル解析プログラム

main menu で 2 を選択すると下記の画面（例）が表示される。

|                                                                                        |                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <p>2. ピーク効率曲線作成</p> <p>標準線源の測定データがフロッピーに保存してあればピーク効率曲線を計算できます。</p>                     |                                                                  |
| <p>小型容器</p> <p>1. 測定番号、条件等の入力<br/>〔高さの異なる 2 個<sup>1)</sup><br/>(以上) の線源測定データを入力する〕</p> | <p>マリネリ容器</p> <p>2. 測定番号、条件等の入力<br/>( 1 個の線源測定データ<br/>を入力する)</p> |
| <p>番号を選択し入力してください。</p>                                                                 |                                                                  |

注 1) 簡単のため 1 cm と 5 cm の混合核種容積線源 2 つの測定データから計算するのを原則とする。

#### ○ 1 を選択したとき

- ・ 高さの異なる何個の線源のデータを使用して計算するか入力してください。

① 標準線源の検定日を入力してください。

19    /    /   

② 測定した標準線源の高さを入力してください。

       (mm)

③ 重量を入力してください。

\_\_\_\_\_ (g)

④ 測定番号を入力してください。

\_\_\_\_\_

(測定番号を入力するとピーク効率曲線作成用のスペクトルデータが、測定時とは異なった形式で表示される) 例：白黒反転

⑤ 測定開始年月日を入力してください。

19\_\_/\_\_/\_\_

⑥ 測定開始時刻を入力してください。

\_\_\_\_\_:

⑦ 添加核種についてのデータを入力してください。

| 核種         | $^{109}\text{Cd}$ | $^{57}\text{Co}$ | $^{139}\text{Ce}$ | $^{203}\text{Hg}$ | ... |
|------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----|
| 添加値 (Bq/g) | _____             | _____            | _____             | _____             |     |

(初めに示された線源個数分、1～7の入力項目を繰り返す)

○2 を選択したとき

① 測定番号を入力してください。

\_\_\_\_\_

② 検定日を入力してください。

19\_\_/\_\_/\_\_

③ 重量を入力してください。

\_\_\_\_\_ (g)

(測定番号を入力するとピーク効率曲線作成用のスペクトルデータが、測定時とは異なった形式で表示される) 例：白黒反転

④ 測定開始年月日を入力してください。

19\_\_/\_\_/\_\_

⑤ 測定開始時刻を入力してください。

\_\_\_\_\_:

⑥ 添加核種についてのデータを入力してください。

| 核種         | $^{109}\text{Cd}$ | $^{57}\text{Co}$ | $^{139}\text{Ce}$ | $^{203}\text{Hg}$ | ... |
|------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----|
| 添加値 (Bq/g) | _____             | _____            | _____             | _____             |     |

- 標準線源解析プログラムで用いる測定データスペクトルのグラフは、フロッピーから読み込むため、測定プログラムメニューで表示されるスペクトルメモリーのグラフとは異なった表示方法とするのが望ましい（例えば白黒反転させる等）。
- 小型容器：原則として高さが1 cm及び5 cm（その他の高さがあってもよい）の多核種混合標準容積線源を測定し、各高さについてピーク効率曲線を作成する。  
この2本（+α）の曲線を用いて試料の高さに関する補正を行い、ピーク効率を求める。
- 2ℓ マリネリ容器：原則として、1種類の標準容積線源（2ℓ マリネリ容器）を用いてピーク効率曲線を作成する。
- ピーク効率曲線の関数形は、本文（6.3 65頁）に従う。

標準線源を用いて求めるピーク効率曲線の式は下記のとおりで、 $C_1 \sim C_5$ の定数を求める。

$X = \ln(E_n / E_{n0})$  としたとき

$E_{n0} < E_n$  ;  $\ln(\text{ピーク効率}) = C_1 + C_2 X$

$E_{n0} > E_n$  ;  $\ln(\text{ピーク効率}) = C_1 + C_2 X + C_3 X^2 + C_4 X^3 + C_5 X^4$

$E_n$  はエネルギー (keV)

$E_{n0}$  はピーク効率曲線の接合エネルギー (keV)

小型容器で、任意の高さのピーク効率は、上式から当該エネルギーのピーク効率を計算し、その逆数を試料高さの1次式の関数とし、 $a, b, c$ の定数を求める。

$(\text{ピーク効率})^{-1} = ah + b$  ( $h$ :標準容積線源の高さ)

〔ただし、3種類以上の高さ線源を用いたときは  
 $(\text{ピーク効率})^{-1} = ah^2 + bh + c$  ( $h$ :標準容積線源の高さ)〕

- $E_{n0}$  は400 keV を defaultとする。

但し、 $E_{n0} = 200$  keV 程度以下に設定した際は、高エネルギー側及び低エネルギー側両方を2次式とする。

### 3.3 試料スペクトル解析プログラム

測定スペクトルデータをフロッピーから計算機へ転送

(測定番号を入力するとスペクトルのグラフが測定時とは異なった形式で表示される。)

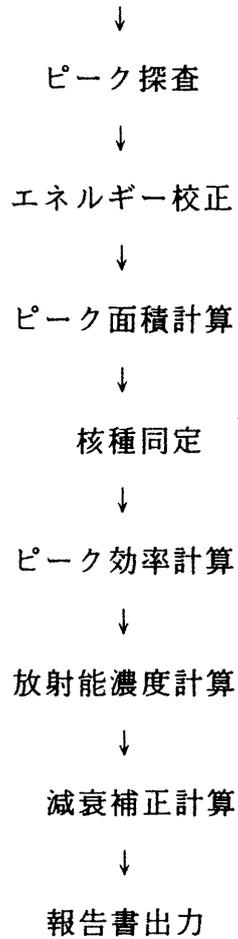


図 試料スペクトルの解析

1) 試料スペクトル解析プログラムの操作

main menu で3を選択すると下記の画面（例）が表示される。

|                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------|
| <p>3. 解析</p> <p>試料測定データを解析する。</p> <p>・解析する測定番号（検出器番号を含む）<br/>を入力してください。</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------|

スペクトルが表示される。



測定条件が表示される。

- ・測定開始年月日 19\_\_/\_\_/\_\_
- ・測定開始時刻 \_\_\_\_:
- ・採取年月日を西暦で入力してください。 19\_\_/\_\_/\_\_
- ・試料名 \_\_\_\_\_
- ・採取地点 \_\_\_\_\_
- ・試料についてのコメント \_\_\_\_\_
- ・測定容器名 \_\_\_\_\_
- ・試料重量 \_\_\_\_\_ (g)
- ・測定に供する量と単位 \_\_\_\_\_ ( )
- ・測定試料の高さ \_\_\_\_\_ (mm)  
(マリネリ容器で測定するときは2000)
- ・エネルギー校正のために使用する3本のピークのエネルギー (keV)と目安となるチャンネル

|    | エネルギー (keV) | チャンネル (目安) |
|----|-------------|------------|
| 1: | _____ ,     | _____      |
| 2: | _____ ,     | _____      |
| 3: | _____ ,     | _____      |

上記の測定条件に誤りがないときはY、誤りがあるときはNを入力してください。

2) プログラムの解析法の内容

① 解析手法

a) ピーク効率について (本文 6.3 65頁)

- ・ 高さの異なった2個 (他にあれば数個) の混合容積線源を測定する。
- ・ 各高さの測定結果についてピーク効率のエネルギー依存性を関数化する。
- ・ 各関数の係数の高さ依存性を関数化する (効率の逆数を1次式にする。3点の場合は2次式となる)。
- ・ 面線源ピーク効率 (本文 6.4.3 76頁) を求め、指定された高さまで積分し、容積試料のピーク効率を計算する。

b) ピークの検出法 (本文 9.4 122頁)

- ・ 測定スペクトルについて各チャンネル毎に平滑化2次微分し、その誤差を比較し、ピークを探索する。
- ・ ピーク探索は、ガウス関数2次微分フィルタを用い200本程度のピークが検出されても問題を生じないように設定<sup>1)</sup>する。

---

1) ウラン系列、トリウム系列及びK-40を添加した混合核種容積線源のスペクトル (70,000s測定) を、フィルタ幅をFWHM×2.0とし、ピーク探索感度を変化させた時の検出可能ピーク数を次に示す。

ピーク探索感度、フィルタ幅には注意を要することが分かる。

---

|          |     |     |     |     |     |     |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ピーク探索感度  | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 |
| 検出可能ピーク数 | 139 | 92  | 74  | 52  | 44  | 38  |

---

c) エネルギー校正式（本文 9.2 126頁）

- ・ エネルギー校正式は、3本以上のピークを用いて2次式または3次式を作成する。その際、測定した試料のスペクトルから検出されたピークを用いて校正式を作成するのが原則とし、測定試料の前または後に測定した線源のスペクトルから求めた校正式も適用できるようにする。エネルギー校正式を求めるために用いる主な核種を資料1に示した。

ピーク解析するエネルギー範囲をカバーするように適当な間隔で3本以上のピーク選択する。

エネルギー校正式を作成する方法は下記の順位で選択する。

1. 試料のスペクトルを用いる。
2. 最近、測定したスペクトルを用いる。
3. 標準線源のスペクトルを用いる。

d) ピーク面積の計算法

- ・ 指定された領域をコベル法（本文 9.3.6 134頁）を用いて計算する。
- ・ 原則として妨害補正は実施せず、妨害ピークが近接しない独立したピークを対象に定量する（ただし、どうしても妨害ピークが避けられないときは、寄与係数を用いる方法はできるだけ避けて、関数適合によるピークフィッティングでピークを分離する）。
- ・ 原則としてバックグラウンドは差し引かない（バックグラウンドの差引きも可能なプログラムとする。但し、バックグラウンドスペクトル中のピークが、計数誤差の2倍以上の時に試料の対応するピーク面積から差引くこととする）。

e) ピーク効率の計算法

a)で作成された関数を用いる。

- ・ 自己吸収の補正\*については、本文（6.4 72頁）に従い原則として実施する。

---

\* 自己吸収補正は、計算に要する時間も短く、低エネルギーでの影響が大きいので実施する（寒天試料で自己吸収補正をした結果としない結果を資料2に示した。低エネルギーのCd-109, Co-57, Ce-139 及びCr-51 で自己吸収の補正をしない結果は、添加値に対して10 %以上低い値である）。

- ・ 自己吸収の補正方法については本文（6.4 72頁）を参照。

f) 核種同定

- ・ エネルギー校正式及びピーク中心の誤差を考慮して核種を同定する（エネルギー校正式が正しければ、0.3 keV 以上のずれは起こりにくい）。一つのピークで複数の核種が候補となった場合、それらの核種を列挙する（試料中の放射能レベル、他ピークの存在等を基に判断するため）。
- ・ 緊急時初期の段階ではどのような核種が検出されているか見当がつかないことを考慮し、ピーク探査の結果検出されたピークについて核種同定し、ピーク面積を計算し、放射能を算出する。
- ・ 検出される核種の知見が明確になった際は、ピークが検出されたか否かにかかわらず着目する核種のピーク位置でピーク面積を計算し、放射能を算出する。
- ・ 核種を同定する際、いくつかの候補核種がありどうしても特定できないときは、それら核種の放出する別の $\gamma$ 線の存在とその放出比を調べ共に列挙する。

g) 減衰補正法（本文 10.1 152頁）

- ・ 検出された核種について補正し、不検出となった核種については計算しない。過渡平衡（親核種からの流れ込みについて）の補正は、人工放射性核種についてのみ行う。

② モジュール機能

試料を測定して得られたスペクトルに対する解析プログラム全体のデータ処理は、モジュールを用いて下記のような流れと階層で実施する（副プログラムを下線で示す）。

スペクトルデータファイル等（試料の種類、測定供試量等）の読み込み

↓

ピーク探査

↓

スペクトル2回微分

↓

エネルギー校正式作成

↓

単独ピークの処理

↓

複合ピーク面積計算

↓

関数適合

↓

核種同定・ピーク効率計算

↓

面線源ピーク効率計算・容積試料ピーク効率計算

↓

複数ピークによる放射能の計算

↓

ピークがない核種の計算

↓

減衰補正

↓

プリントアウト

a) ピーク探査

指定された領域を指定された幅の平滑化2次微分フィルタで微分する。微分後のスペクトルをその係数の誤差と比較し、検出感度 ( $-2\sim 3\sigma$ ) 以下となっている部分にピークがあるとみなす。

ピーク領域について、3点法（放物線型：本文 9.1 129頁）でピーク中心チャンネルを計算する。

放物線型3点法は、誤差計算が可能であるから、ピーク中心チャンネルの誤差も計算する。

スペクトル2回微分

渡された生スペクトルの指定された範囲を2回微分し、出力する。微分は、ガウス関数を2回微分して作成したフィルタによる畳み込み積分で実施する。

微分値に付随する計算誤差は、畳み込みにおける線形結合の計数と生スペクトルの計数の誤差から計算する。（本文 9.1 120頁）

b) エネルギー校正式作成

ピークチャンネルとエネルギーの対を何組か得て2～3次式を作成する。または、予め標準線源を測定して得られている校正式を参照する。（本文 9.2 126頁）

c) 単独ピークの処理 （本文 9.3.6 134頁）

複合していない単独で孤立しているピークについて、コベル法でピーク面積とその誤差を計算する。

d) 複合ピーク面積計算 （本文 9.3 (2) 128頁）

検出されたピークと候補に挙がったピークに対応が付けられる場合は、間隔を固定して複数のピーク関数を合成し、関数適合してピーク面積等を計算する。

関数適合

渡されたデータを指定された関数で関数適合する。

e) 核種同定・ピーク効率計算

スペクトル上に存在するピークに放射性核種を同定する。

定量の対象にするピークについてはピーク効率を計算する。

面線源ピーク効率計算

指定された高さ、エネルギー、核種、母材における面線源ピーク効率を計算する。  
線減衰係数を基に自己吸収を補正する。

容積試料ピーク効率計算

面線源ピーク効率を積分し、容積試料のピーク効率を計算する。

f) 複数ピークによる放射能の計算

同一核種について複数のピークから放射能値が計算された時、荷重平均を行う。

g) ピークが検出されなかった核種の計算

関心のある核種でピークが検出されていない場合、エネルギー校正式からピーク位置を推定して面積を計算する。

h) 減衰補正

検出された核種について減衰補正を行う。

i) プリントアウト

測定解析結果を印刷する。

グラフ描き (棒描き、データプロット、関数プロット)

パラメータとして渡されたデータのグラフをディスプレイに表示する。印刷も可能とする。

### 3.4 ファイル訂正プログラム

1) スペクトルデータファイルについて

スペクトル計数データは、書き込み訂正ができないこと。

2) 試料及び測定条件ファイルについて

パスワードが無い限り、手入力項目のみ訂正できるようにする。

3) 効率曲線データファイルについて

全項目にわたって訂正できるようにする。

4) 核データファイルについて

全項目にわたって訂正できるようにする。

#### 4 その他

- 後日改めて再計算をすることがあるため、測定条件等は測定番号で呼び出せるようにする。また測定条件の変更がスムーズに行われるようにする。
- ピーク効率曲線を作成していないときにもオーダーだけは測れるように、おおよそのピーク効率曲線を準備する。ゲルマニウム検出器のピーク効率の目安を本文 資料 D に示した。
- 標準線源スペクトル解析プログラムを用いる場合、小型容器以外の容器を用いる場合の注意事項を下記に示す。

小型容器以外の円筒容器を使用しているいろいろな高さの試料を測定する場合は、測定に使用する容器を用いて2種類以上の高さの標準線源を用いてピーク効率曲線を作成する。

高さ一定（容積一定）の試料を測定する場合は、一種類の標準線源（マリネリ容器と同様）を用いてピーク効率曲線を作成する。

- ピーク領域設定とエネルギー半値幅の関係について下記に示す。（本文 9.3.6 134 頁）

ピーク領域は、ピーク中心チャンネル  $p$  に対し左右同チャンネル  $u$  を次の式から求め、

$$1.5 \times \text{FWHM} \geq u \geq 1.1 \times \text{FWHM}$$

低エネルギー側の境界 ( $L_0$ ) は、 $L_0 = p - u$ とし小数点以下を切り捨てた整数、高エネルギー側の境界 ( $H_0$ ) は、 $H_0 = p + u$ とし小数点以下を切り捨てた整数とする。

- チェック及び報告出力フォーマット例を資料 3 に示す。

# 資 料

資料 1 ;

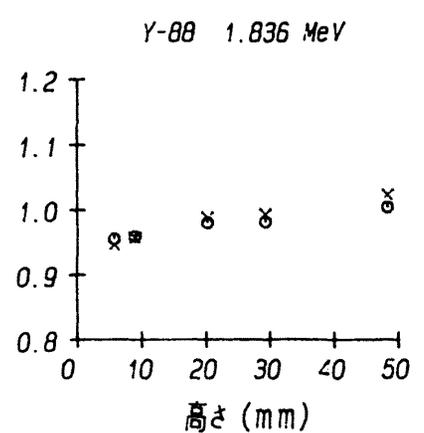
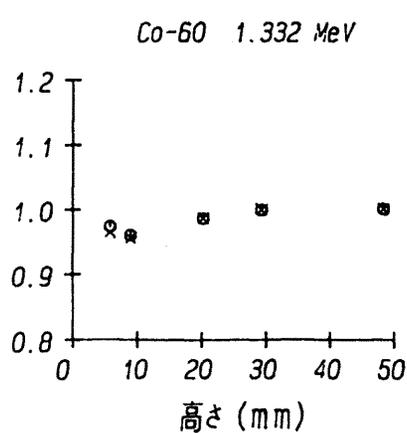
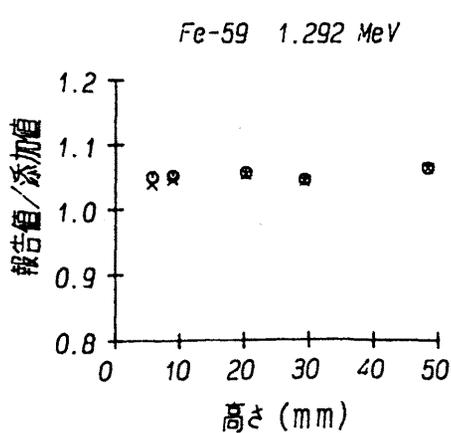
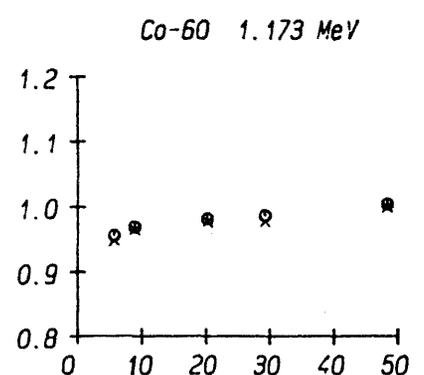
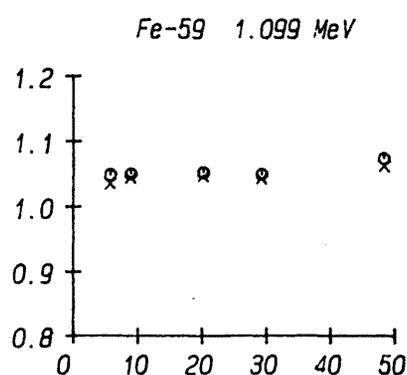
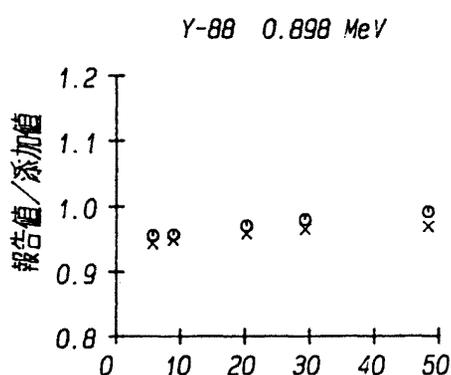
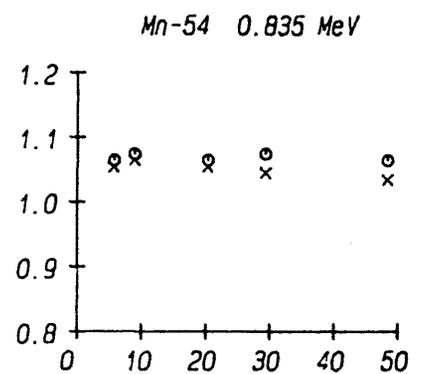
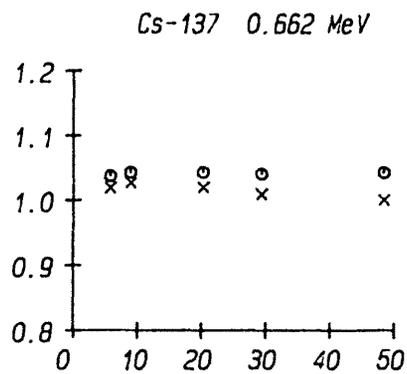
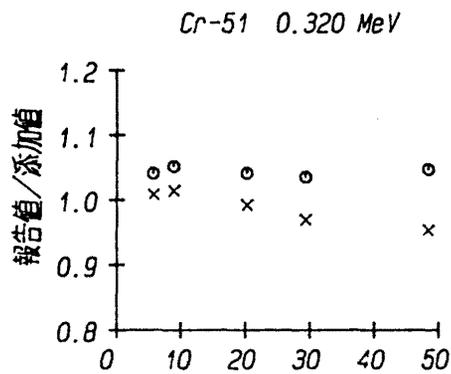
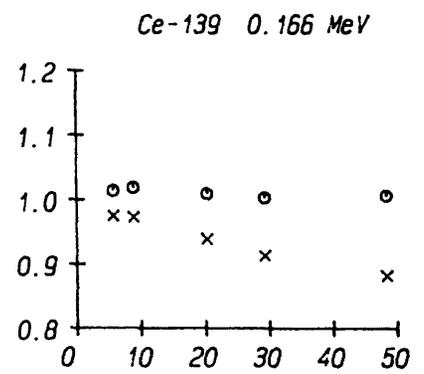
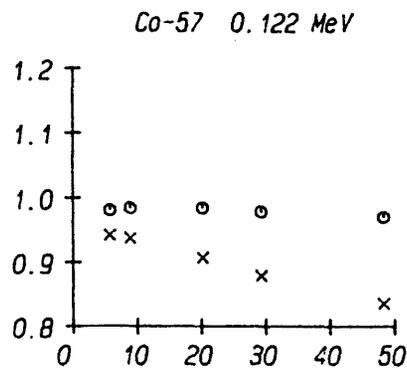
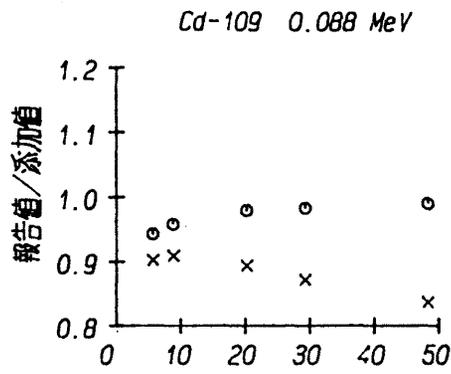
エネルギー校正に用いる核種

表 エネルギー校正に用いる主な核種及び光子エネルギー  
 (試料及び線源で用いる核種のピークエネルギー)

| 核種       | エネルギー (keV) |
|----------|-------------|
| Pb-210   | 46.503      |
| Pb-X ray | 74.969      |
| Bi-X ray | 77.108      |
| Cd-109   | 88.032      |
| Th-234   | 92.80       |
| Co-57    | 122.058     |
| Ce-144   | 133.544     |
| Ce-139   | 165.85      |
| Ra-226   | 186.180     |
| Hg-203   | 279.19      |
| I-131    | 364.480     |
| Sn-113   | 391.69      |
| Be-7     | 477.593     |
| Sr-85    | 514.00      |
| Tl-208   | 583.1       |
| Bi-214   | 609.312     |
| I-131    | 636.973     |
| Cs-137   | 661.65      |
| Mn-54    | 834.827     |
| Y-88     | 898.03      |
| Co-60    | 1173.21     |
| Fe-59    | 1291.564    |
| Co-60    | 1332.47     |
| K-40     | 1460.75     |
| La-140   | 1596.49     |
| Bi-214   | 1764.50     |
| Y-88     | 1836.00     |

資料 2 ;

寒天標準試料で自己吸収補正をした定量  
結果と補正なしの定量結果



寒天試料の分析結果比較図

U-8容器 ○：自己吸収修正あり (サム効果未修正)  
 ×：自己吸収修正なし (サム効果未修正)

資料 3 ;

チェック及び出力フォーマット例

チェック用出力フォーマットの例

測定番号; ABC001ZX , (1990/09/01-10/2 採取, 衛生研究所屋上), Live time; 71018 s, Real time; 72579 s  
 試料名 ; 大気浮遊塵 , 採取日; 1990/10/02 試料重量; 10.5 g, 試料供試料量; 1050 m3  
 測定日; 1990/11/05 , 時刻; 10:15 試料高さ; 43 mm, 測定容器; U-8

エネルギー校正

|              |                   |                  |                |
|--------------|-------------------|------------------|----------------|
|              | 1)                | 2)               | 3)             |
| エネルギー (keV): | <u>74.97</u> ,    | <u>609.30</u> ,  | <u>1460.80</u> |
| チャンネル        | : <u>149.34</u> , | <u>1219.25</u> , | <u>2921.01</u> |

バックグラウンド  
 測定番号; B9010200001 , 測定日; 1990/10/20 , 時刻; 10:00 , Live time; 142753 s  
 測定番号; B9011250025 , 測定日; 1990/11/25 , 時刻; 09:45 , Live time; 145326 s

| 核種     | 放射能濃度<br>(Bq/m3) | 放射能/ 試料<br>(Bq)   | ピーク中心<br>(チャンネル) | ピーク面積<br>(カウント) | 計数効率   | BG計数率<br>(cpks) | 正味計数率<br>(cpks) | 他に可能性のある核種                                              |
|--------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------------|
| Ce-144 | -0.0009 ± 0.0471 | -0.00291 ± 0.0471 | 266.61           | 27.2 ± 58.6     | 55.641 | 0.397 ± 0.242   | -0.0180 ± 0.853 |                                                         |
| Ce-141 | 0.0167 ± 0.0202  | 0.0249 ± 0.0301   | 290.45           | 78.0 ± 53.9     | 54.192 | 0.438 ± 0.235   | 0.652 ± 0.790   | <sup>235</sup> U, <sup>132</sup> I                      |
| Cr-51  | 0.0322 ± 0.0163  | 0.0419 ± 0.212    | 640.37           | 33.0 ± 41.7     | 29.450 | 0.340 ± 0.193   | 0.121 ± 1.59    | <sup>147</sup> Nd,                                      |
| I-131  | -0.161 ± 0.188   | -0.0230 ± 0.0269  | 729.27           | -8.00 ± 38.6    | 25.943 | 0.373 ± 0.170   | -0.484 ± 0.566  | <sup>228</sup> Ac<br><sup>132</sup> I, <sup>99</sup> Mo |
| .      | .                | .                 | .                | .               | .      | .               | .               | .                                                       |
| .      | .                | .                 | .                | .               | .      | .               | .               | .                                                       |
| .      | .                | .                 | .                | .               | .      | .               | .               | .                                                       |
| .      | .                | .                 | .                | .               | .      | .               | .               | .                                                       |

↑  
エネルギー順

報告書用出力フォーマットの例

測定番号; ABC001ZX , (1990/09/01-10/2 採取, 衛生研究所屋上), Live time; 71018 s, Real time; 72579 s  
 試料名 ; 大気浮遊塵 , 採取日; 1990/10/02 試料重量; 10.5 g, 試料供試量; 1050 m3  
 測定日; 1990/11/05 , 時刻; 10:15 試料高さ; 43 mm, 測定容器; U-8

バックグラウンド  
 測定番号; BG902YX , 測定日; 1990/10/20 , 時刻; 10:00 , Live time; 142753 s  
 測定番号; BG901YX , 測定日; 1990/11/25 , 時刻; 09:45 , Live time; 145326 s

| 核種     | 放射能濃度<br>(Bq/m3) | 放射能/ 試料<br>(Bq)   | ピーク中心<br>(チャンネル) |
|--------|------------------|-------------------|------------------|
| Ce-144 | -0.0009 ± 0.0471 | -0.00291 ± 0.0471 | 266.61           |
| Ce-141 | 0.0167 ± 0.0202  | 0.0249 ± 0.0301   | 290.45           |
| Cr-57  | 0.0322 ± 0.0163  | 0.0419 ± 0.212    | 640.37           |
| I-131  | -0.161 ± 0.188   | -0.0230 ± 0.0269  | 729.27           |
| .      | .                | .                 | .                |
| .      | .                | .                 | .                |
| .      | .                | .                 | .                |
| .      | .                | .                 | .                |

## II. 同定用ゲージ

環境試料中の放射性核種の同定は、数本の、時には十数本のピークについて、そのエネルギー、放出率、親娘関係、試料中にその核種が存在するのが妥当かなどを考慮して行わねばならない。核種同定用ゲージは、上記の煩雑な手法を軽減し、必ずしも環境放射能測定の実験がなくても同定ができるように作製したものである。

ゲージの上段と下段に、環境試料中に検出される可能性のある人工放射性核種と天然放射性核種をエネルギー順に記載し、その核種の検出されるべき場所には実線（天然放射性核種を表す）と破線（人工放射性核種を表す）を引いた。ゲージと同じ大きさのスペクトル図をこの上に乗せ透かして見れば、スペクトル中のピークの同定が容易にできる。



### Ⅲ. スペクトル図例

ここに示したスペクトル図の試料は

1. 核実験に係る試料 : 中国核実験直後に日本で採取された試料
2. 原発事故に係る浮遊塵 : ソ連国内で採取されたチェルノブイル事故時の試料
3. 原発事故に係るスミヤ試料 : ソ連国内で採取されたチェルノブイル事故時の試料
4. 鉱物試料 : 輸入セラミックス原料

の4種類である。0~2020keVを、500keVまたは520keVごとに区切り、合計4枚に全エネルギーのスペクトルが示してある。横軸はエネルギー (keV)、縦軸はカウント数の対数であるが、目盛りはカウント数とは無関係である。

測定時間は次のとおりである。

- |                 |             |
|-----------------|-------------|
| 1. 核実験に係る試料     | 3 5 4 0 1 秒 |
| 2. 原発事故に係る浮遊塵   | 5 0 0 0 0 秒 |
| 3. 原発事故に係るスミヤ試料 | 1 0 1 1 秒   |
| 4. 鉱物試料         | 7 7 0 7 1 秒 |

ピーク上には、同定した核種名及びエネルギー (keV) を示した。

なお、サムピーク、シングルエスケープピーク及びダブルエスケープピークは、各々核種名の後にs、e及びdを付して示した。

各試料にみられた核種は以下の通りである。

#### 1. 核実験に係る試料

$^{144}\text{Ce}$ 、 $^{99}\text{Mo}$ 、 $^{143}\text{Ce}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{147}\text{Nd}$ 、 $^{239}\text{Np}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{141}\text{Ce}$ 、 $^{140}\text{Ba}$ 、 $^{97}\text{Zr}$ 、 $^{132}\text{Te}$ 、 $^{93}\text{Y}$ 、 $^{140}\text{La}$ 、 $^{136}\text{Cs}$ 、 $^{103}\text{Ru}$ 、 $^{91}\text{Sr}$ 、 $^{58}\text{Co}$

#### 2. 原発事故に係る浮遊塵

$^{129\text{m}}\text{Te}$ 、 $^{132}\text{Te}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{136}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{132}\text{I}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{99}\text{Mo}$ 、 $^{103}\text{Ru}$ 、 $^{140}\text{La}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{125}\text{Sb}$ 、 $^{140}\text{Ba}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{95}\text{Nb}$

#### 3. 原発事故に係るスミヤ試料

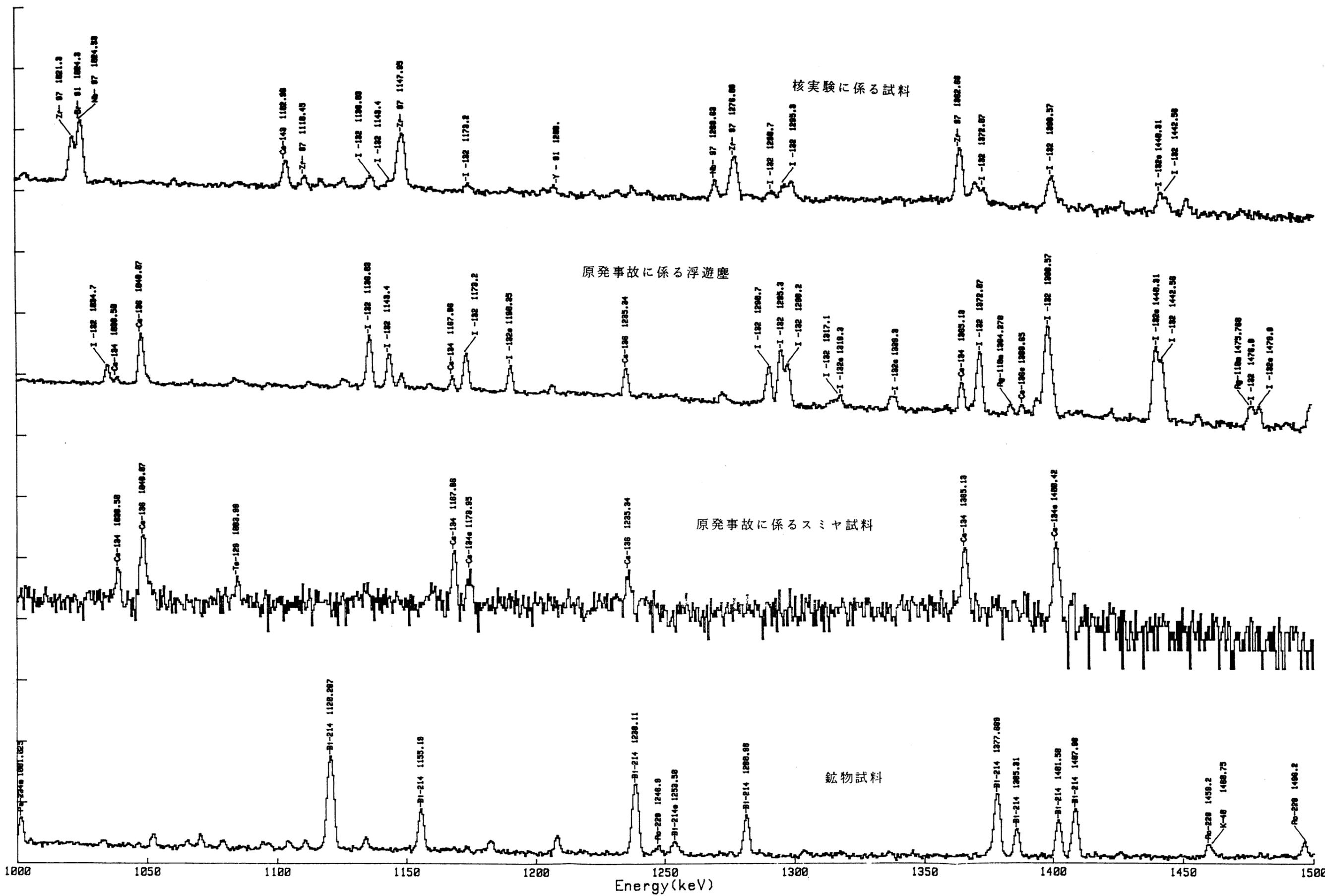
$^{141}\text{Ce}$ 、 $^{144}\text{Ce}$ 、 $^{147}\text{Nd}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{136}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{140}\text{Ba}$ 、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ 、 $^{132}\text{Te}$ 、 $^{140}\text{La}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{132}\text{I}$ 、 $^{125}\text{Sb}$ 、 $^{103}\text{Ru}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{95}\text{Zr}$ 、 $^{95}\text{Nb}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$

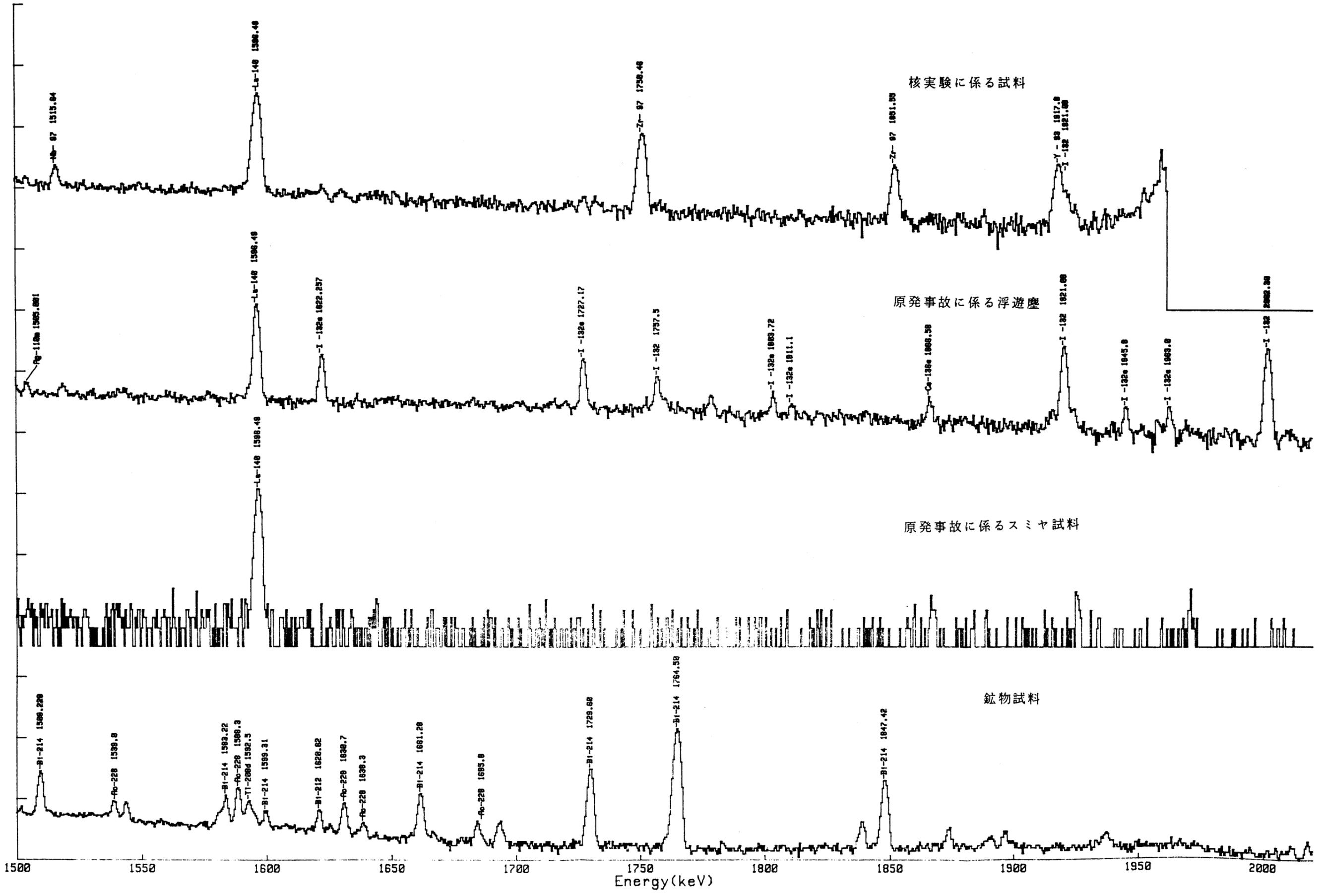
#### 4. 鉱物試料

$^{236}\text{U}$ 、 $^{227}\text{Th}$ 、 $^{212}\text{Pb}$ 、 $^{214}\text{Pb}$ 、 $^{228}\text{Ac}$ 、 $^{208}\text{Tl}$ 、 $^{212}\text{Bi}$ 、 $^{214}\text{Bi}$ 、 $^{40}\text{K}$









# 本書の作成経過、委員会名簿 及び会議開催経過

### 1. 本書の作成経過

本書は放射能測定調査委託費（放射能調査対策研究委託に係るもの）で、財団法人日本分析センターに委託した成果を、放射線審議会測定部会に諮問して作成したものである。

### 2. 放射能調査対策研究委託時の「ゲルマニウム半導体検出器を用いた機器分析法検討委員会」の委員会名簿

|       |                               |
|-------|-------------------------------|
| 河田 燕  | 城蹊大学工学部 教授                    |
| 野口 正安 | 日本原子力研究所ラジオアイソトープ原子炉研修所 主任研究員 |
| 浜田 達二 | 社団法人 日本アイソトープ協会 常務理事          |
| 鈴木 隆司 | 東京都立アイソトープ総合研究所 主事            |
| 中村 尚司 | 東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター教授  |
| 中村 吉秀 | 社団法人 日本アイソトープ協会 技術課長          |
| 望月 勉  | ビームオペレーション株式会社 取締役社長          |

事務局 財団法人日本分析センター

高野 直人、虻川 成司、池内 嘉宏、大石 卓

### 3. 放射線審議会測定部会

#### イ) 放射線審議会測定部会の委員会名簿

##### 委員

|              |                      |
|--------------|----------------------|
| (部会長) ○浜田 達二 | 社団法人 日本アイソトープ協会 常務理事 |
| 池田 長生        | 社団法人 日本アイソトープ協会 常務理事 |
| ○柏木 寛        | 電子技術総合研究所 所長         |
| 滝沢 行雄        | 秋田大学医学部 教授           |
| 谷村 顕雄        | 国立衛生試験所 所長           |

##### 専門委員

|        |                             |
|--------|-----------------------------|
| ○阿部 史朗 | 放射線医学総合研究所 特別研究官            |
| ○岡野 真治 | 理化学研究所宇宙研究室 嘱託              |
| ○押野 昌夫 | 日本原子力研究所東海研究所保健物理部 部長       |
| ○小山 雄生 | 農業環境技術研究所環境管理部計測情報課分析研究室 室長 |
| 阪上 正信  | 金沢大学名誉教授                    |
| ○戸田 誠  | 海上保安庁水路部海洋調査課海洋汚染調査室 室長     |
| 広瀬 勝己  | 気象庁気象研究所地球化学研究部第二室 室長       |
| ○深津 弘子 | 財団法人日本分析センター 分析部調査役         |
| 大和 愛司  | 動力炉・核燃料開発事業団環境技術開発推進本部 次長   |
| ○吉田 勝彦 | 水産庁中央水産研究所海洋生産部海洋放射能研究室 室長  |

○印はワーキンググループ I の方

事務局 原子力安全局原子力安全課防災環境対策室

(敬称略・五十音順)

ロ) 放射線審議会測定部会の開催日

測定部会及び測定部会の委員、専門委員の一部の方から構成したワーキンググループ I で審議を行った。

測定部会開催日

第 15 回 平成 2 年 3 月 26 日

第 16 回 平成 2 年 11 月 19 日

ワーキンググループ I

第 1 回 平成 2 年 4 月 23 日

第 2 回 平成 2 年 6 月 5 日

第 3 回 平成 2 年 7 月 5 日

第 4 回 平成 2 年 9 月 3 日

## 文部科学省放射能測定法シリーズ

- |                                      |                   |
|--------------------------------------|-------------------|
| 1. 全ベータ放射能測定法                        | 昭和 51 年 9 月 (2 訂) |
| 2. 放射性ストロンチウム分析法                     | 平成 15 年 7 月 (4 訂) |
| 3. 放射性セシウム分析法                        | 昭和 51 年 9 月 (改訂)  |
| 4. 放射性ヨウ素分析法                         | 平成 8 年 3 月 (2 訂)  |
| 5. 放射性コバルト分析法                        | 平成 2 年 2 月 (改訂)   |
| 6. NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ機器分析法      | 昭和 49 年 1 月       |
| 7. ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー      | 平成 4 年 8 月 (3 訂)  |
| 8. 放射性ジルコニウム分析法                      | 昭和 51 年 9 月       |
| 9. トリチウム分析法                          | 平成 14 年 7 月 (2 訂) |
| 10. 放射性ルテニウム分析法                      | 平成 8 年 3 月 (改訂)   |
| 11. 放射性セリウム分析法                       | 昭和 52 年 10 月      |
| 12. プルトニウム分析法                        | 平成 2 年 11 月 (改訂)  |
| 13. ゲルマニウム半導体検出器等を用いる機器分析のための試料の前処理法 | 昭和 57 年 7 月       |
| 14. ウラン分析法                           | 平成 14 年 7 月 (2 訂) |
| 15. 緊急時における放射性ヨウ素測定法                 | 平成 14 年 7 月 (改訂)  |
| 16. 環境試料採取法                          | 昭和 58 年 12 月      |
| 17. 連続モニタによる環境 $\gamma$ 線測定法         | 平成 8 年 3 月 (改訂)   |
| 18. 熱ルミネセンス線量計を用いた環境 $\gamma$ 線量測定法  | 平成 2 年 2 月 (改訂)   |
| 19. ラジウム分析法                          | 平成 2 年 2 月        |
| 20. 空間 $\gamma$ 線スペクトル測定法            | 平成 2 年 2 月        |
| 21. アメリシウム分析法                        | 平成 2 年 11 月       |
| 22. プルトニウム・アメリシウム逐次分析法               | 平成 2 年 11 月       |
| 23. 液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法        | 平成 8 年 3 月 (改訂)   |
| 24. 緊急時におけるガンマ線スペクトロメトリーのための試料前処理法   | 平成 4 年 8 月        |
| 25. 放射性炭素分析法                         | 平成 5 年 9 月        |
| 26. ヨウ素-129 分析法                      | 平成 8 年 3 月        |
| 27. 蛍光ガラス線量計を用いた環境 $\gamma$ 線量測定法    | 平成 14 年 7 月       |
| 28. 環境試料中プルトニウム迅速分析法                 | 平成 14 年 7 月       |

ゲルマニウム半導体検出器による  
ガンマ線スペクトロメトリー

|                  |          |
|------------------|----------|
| 昭和 51 年 9 月      | 制定       |
| 昭和 54 年 3 月      | 改訂       |
| 平成 2 年 11 月      | 2 訂      |
| 平成 4 年 8 月       | 3 訂      |
| 平成 5 年 1 月 11 日  | 第 1 刷 発行 |
| 平成 16 年 7 月 30 日 | 第 7 刷 発行 |

発 行 所

財 団 法 人 日 本 分 析 セ ン タ ー

〒263-0002 千葉県千葉市稲毛区山王町 295-3

電 話 (043) 423-5325 (代表)

(043) 424-8663 (直通)

FAX (043) 423-4071