

ゲルマニウム半導体検出器による  
 $\gamma$ 線スペクトロメトリー  
(改訂案)



## 目 次

第 1 章	序 論	1
第 2 章	用語および略語の解説	3
第 3 章	$\gamma$ 線測定の基本原理	15
3.1	$\gamma$ 線と物質との相互作用の種類および性質	15
3.2	ピーク解析	20
第 4 章	測定機器	23
4.1	機器構成	23
第 5 章	検出器の校正	31
5.1	エネルギー校正	31
5.2	半値幅校正	31
5.3	ピーク効率校正	32
第 6 章	核データ	35
第 7 章	測定・解析手順	36
7.1	検出器の冷却	36
7.2	測定試料の調製	37
7.3	バックグラウンドの測定	37
7.4	試料の測定	38
7.5	スペクトル解析	43
7.6	解析結果の妥当性の確認	49
7.7	解析結果の報告	49
第 8 章	検出下限値	56
第 9 章	分析結果の質の保証	57
9.1	機器の健全性確認	57
9.2	不確かさの評価	58
9.3	測定のトレーサビリティ	59
9.4	測定・解析方法の妥当性確認	59

## 解 説

解説 A	ピーク効率変換 (Efficiency Transfer) .....	63
解説 B	測定試料の調製方法 .....	67
解説 C	$\gamma$ 線スペクトロメトリーにおける不確かさの評価 .....	80
解説 D	検出下限値の計算例 .....	101

## 資 料

資料 1	$\gamma$ 線スペクトル解析で用いられる計算手法 .....	117
1.1	ピーク解析 .....	118
1.2	容積線源のピーク効率を求める例 .....	148
1.3	マリネリ容器のピーク効率 .....	157
1.4	サム効果補正法 .....	160
1.5	環境試料に対する $\gamma$ 線の減弱係数の計算例 .....	164
1.6	自己吸収の補正 .....	168
1.7	減衰補正の計算例 .....	173
1.8	バックグラウンドの補正方法 .....	177
1.9	ピーク・トータル比 .....	178
1.10	ゲルマニウム半導体検出器の検出可能レベル .....	181
資料 2	測定容器内における試料の不均一分布の影響 (U-8 容器の例) .....	184
資料 3	サム効果補正に用いるピーク・トータル比の改良の検討 .....	191
資料 4	スペクトル例 .....	198
資料 5	核データ表 .....	238

参考文献	.....	304
------	-------	-----

## 第1章 序 論

ゲルマニウム半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトロメトリーは、エネルギー分解能が優れており、化学分離等を必要とせず多核種の同時定量が可能であるため、環境試料中の $\gamma$ 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広く用いられてきた。

$\gamma$ 線スペクトロメトリーに関係した放射能測定法シリーズとしては、「放射性ヨウ素分析法」(No. 4)、「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」(No. 13)、「緊急時における放射性ヨウ素測定法」(No. 15)、「緊急時における $\gamma$ 線スペクトロメトリーのための試料前処理法」(No. 24)、「緊急時におけるゲルマニウム半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトル解析法」(No. 29) および「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」(No. 33) が制定されている。

平成4年改訂のマニュアル「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」は、主に平常時を対象とした $\gamma$ 線スペクトル解析法を記載した放射能測定法シリーズ No.7 として改訂されたものであるが、その後の測定機器および解析装置の性能向上、解析手法の進歩等の状況に対応できるように、令和2年に第4回となる改訂を行った。

平成4年改訂のマニュアルは解析ソフトウェア開発者向けの内容を多く含む構成であったが、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、原子力施設等の周辺監視等において平常時に実施される環境試料の $\gamma$ 線スペクトロメトリーの基本的事項について記述する構成とした。本文には $\gamma$ 線スペクトロメトリーの基本となる原理・原則を記載し、解説には本文を補足する詳細な内容を記載した。なお、核データ、スペクトル例を含むその他の技術情報および、平成4年改訂のマニュアルに記載され現在でも利用されている解析手法の詳細は資料として掲載した。

今回の改訂における主な変更点は以下のとおりである。

- ・環境放射線モニタリングを目的とした環境試料の $\gamma$ 線スペクトロメトリーに必要な原理・原則を記載するものとし、解析の詳細な手法（プログラムコード等）までは細かく規定しない。
- ・測定対象のエネルギー範囲は 50keV～2000keV 程度とする（原子炉に由来する核種から放出される $\gamma$ 線エネルギーの多くがこの範囲に含まれるため）。
- ・スペクトル解析は、メーカー等によって作成されたソフトウェアパッケージを使用することを前提とする。
- ・ソフトウェアが採用する解析手法の選択および妥当性の確認はソフトウェア作成者の責任とし、ソフトウェアの運用を含む一連の分析行為により得られる結果の妥当性確認はユーザーの責任とする。
- ・ピーク効率をモンテカルロシミュレーション等の数値計算モデルによって求める手

法<sup>1</sup>が利用されるようになった現状を踏まえ、記述を追加。

- ・従来、 $\gamma$ 線スペクトロメトリーで得られた結果の誤差の評価には計数誤差のみが使用されてきたが、近年各分野において測定の不確かさ<sup>2</sup>の導入が広まってきている状況を踏まえ、測定の不確かさ評価を導入。
- ・検出下限値の算出方法として、近年放射線計測の分野で国際的に利用が広がっている ISO11929 の手法を導入 [1] [2]。
- ・分析・測定結果の品質保証についての記述を追加。

なお、 $\gamma$ 線スペクトルの測定、解析手順の大部分は測定機器メーカーが提供するソフトウェア上で行われるのが現状であるが、機器調整や解析ソフトウェアに関する具体的な操作は機器ごとに異なるため、実際の操作については機器およびソフトウェアの説明書等を参照し、機器に実装されている機能を理解した上で使用する必要がある。

本マニュアルの測定対象核種は、平常時に検出されるものであるが、原子力施設事故等の緊急時においては様々な核種が検出され、測定されるスペクトルも複雑なものとなるため、緊急時の対応については「緊急時におけるゲルマニウム半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトル解析法」(No. 29) を合わせて参照されたい。

---

<sup>1</sup>  $\gamma$ 線がゲルマニウム半導体検出器に入射してエネルギーを検出器に付与する事象を、 $\gamma$ 線と原子の相互作用の理論式等を用いて数値計算で再現することでピーク効率を算出する方法。モンテカルロシミュレーションについては第2章を参照のこと。

<sup>2</sup> 測定の結果に付随した、合理的に測定対象量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ。

## 第2章 用語および略語の解説

[用語]

n型半導体 (n-type semiconductor)

4 価の元素である Si や Ge に 5 価の元素を不純物として微量 (1ppm 程度) ドーピングすると、余分の電子が価電子帯に入り電導性が高い半導体となる。5 価の元素としては、P や As 等が用いられ、これらはドナー (donor: 電子を提供するもの) といわれる。「p 型半導体」参照。

エネルギー (energy)

一般的に、 $\alpha$  線や  $\beta$  線等の粒子線のエネルギーは運動エネルギーで表され、 $\gamma$  線や X 線等の光子のエネルギー  $E$  は、振動数を  $\nu$ 、波長を  $\lambda$ 、プランク定数を  $h$ 、真空中の光速を  $c$  とすると次式で表される。

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

基本単位系におけるエネルギーの単位は J(ジュール) であるが、放射線のエネルギーの単位は、電子ボルト (eV) を用いて表されることが多い。1eV は 1 電荷素量  $e$  を持つ粒子が 1 ボルトの電位差によって加速されて得る運動エネルギーとして定義される。なお、 $1\text{eV}=1.602\times 10^{-19}$  J である。

エネルギー準位 (energy level)

原子、分子もしくは原子核がとり得る定常状態、またはそのエネルギー値。

エネルギー分解能 (energy resolution)

放射線検出器でエネルギースペクトルを測定するとき、近接した 2 本の線スペクトルを分離できる能力の目安であり、一般的には、ピークの半値幅 (Full Width at Half Maximum; FWHM) で表される。ゲルマニウム半導体検出器のエネルギー分解能は、検出器の性能を表す指標となり、性能仕様書やメーカーの検査成績書に記載されている。値としては、 $^{60}\text{Co}$  からの 1332.5keV  $\gamma$  線ピークの FWHM で代表する。一般的に使われるゲルマニウム半導体検出器では、FWHM はおよそ 1.7keV~2.2keV の範囲である。また、次のようにエネルギーと半値幅の比で表されることもある。

$$\text{エネルギー分解能(\%)} = \frac{1332.5\text{keV ピークの FWHM(keV)}}{1332.5} \times 100 \quad (2.2)$$

エンドキャップ (end cap)

ゲルマニウム半導体検出器のクライオスタットの一部で、結晶部分を覆っているアルミニウム等の材質のキャップ部分をいう。通常の  $\gamma$  線の測定には薄いアルミニウムの入射窓が、また、低エネルギー光子の測定にはベリリウム (Be) 等の薄い入射窓

が使われる。

#### オージェ効果 (Auger effect)

励起状態にある原子が、軌道電子にエネルギーを与え、低いエネルギー状態となる現象。結果として軌道電子が放出される。

#### オージェ電子 (Auger electron)

オージェ効果によって放出される電子。放出される電子のエネルギーは、励起エネルギー(エネルギー準位間の差)から放出電子の結合エネルギーを引いた値である。エネルギーは元素に固有の値であるが、化合物では化学状態の影響を受ける。オージェ電子の放出と特性 X 線の放出は競合過程である。

#### (放射性)壊変 ((radioactive) decay, (radioactive) disintegration)

ある核種が、自発的に放射線を出したり核分裂を起こしたりして、他の核種に変わる現象。放射線の種類によって $\alpha$ 壊変や $\beta$ 壊変等がある。(放射性)崩壊ともいう。

#### 壊変図 (decay scheme)

放射性核種の壊変の特徴を図で示したもので、放射線の種類、強度、エネルギー等を子孫核種のエネルギー準位に対応して示したものの。

#### ガウス分布 (Gaussian distribution)

確率密度関数が次の式に従う確率分布。正規分布ともいわれる。

平均値 $m$ 、標準偏差 $\sigma$ のとき、確率密度関数 $W(n)$ は

$$W(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(m-n)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2.3)$$

ゲルマニウム半導体検出器で得られるスペクトルのピーク形状はガウス分布によく一致する。「ポアソン分布」参照。

#### 核種 (nuclide)

構成する陽子・中性子の組成が異なる個別の原子核の種類を指す。一般に、核種は原子番号と質量数によって一義的に決まるが、励起状態にある寿命が比較的長い( $\mu$ s以上)準安定核(核異性体)も核種に含めることがある。例えば、 $^{137}\text{Cs}$ が $\beta$ 壊変して生成する $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (半減期=2.55分)は $^{137}\text{Ba}$ の核異性体である。

#### カスケード $\gamma$ 線 (cascade gamma ray)

1つの原子核において、ある $\gamma$ 線とほぼ同時に放出される他の $\gamma$ 線。励起状態にある原子核が次から次に連続的に低いエネルギー準位に遷移し、その準位間の差に相当するエネルギーの $\gamma$ 線を連続的に放出するために発生する。例えば、 $^{60}\text{Co}$ の



1173.2keV  $\gamma$ 線と 1332.5keV  $\gamma$ 線はカスケードの関係にある。カスケード $\gamma$ 線が放出される時間間隔はゲルマニウム半導体検出器の分解時間( $\mu s$ 程度)より短いため、カスケードの関係にある $\gamma$ 線が検出器内で相互作用を行っても、それぞれの $\gamma$ 線を分別することができない。

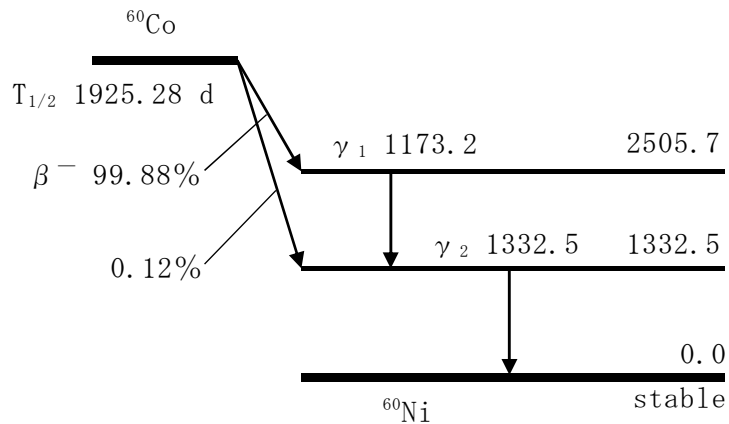


図 2.1  $^{60}\text{Co}$  の壊変図

### 価電子帯 (valence band)

固体内では格子イオンによる周期場のために、電子に許されるエネルギー準位はいくつかの限られたエネルギー範囲に帯状に集まっている (エネルギーバンド)。半導体や絶縁体において構成原子の持つ電子で満たされているエネルギーバンドを充満帯といい、その中で最もエネルギー準位の高いものを価電子帯という。価電子帯より高い準位に禁止帯を隔てて伝導帯がある。

### 関数適合法 (function fitting method)

$\gamma$ 線スペクトル解析等においてピーク面積 (ピークの正味計数値) を求める方法の一つ。関数としてガウス関数 (ピーク) + 直線ベースラインを仮定し、ピークの高さ、ピーク中心、FWHM、直線ベースラインの各パラメータを決定し、その関数を積分することによりピーク面積を求める。フィッティング法ともいう。

### $\gamma$ 線 (gamma ray)

励起状態にある原子核が、より低いエネルギーの励起準位または基底準位になる際に放出される電磁波 (光子) である。 $\gamma$ 線のエネルギーは両準位間のエネルギーの差にほぼ等しい (厳密には原子核の反跳エネルギー分が差し引かれるが、これは大変小さいため無視できる)。

### $\gamma$ 線スペクトロメトリー (gamma ray spectrometry)

ゲルマニウム半導体検出器等を用いて $\gamma$ 線スペクトルを測定する技術およびスペクトルを解析して放射能を決定する方法。 $\gamma$ 線スペクトロスコピー (spectroscopy) ともいわれる。

### γ線放出率 (gamma ray emission ratio)

1 壊変 (Bq) 当たり放出される γ 線の割合で、その γ 線に固有な値である。その核種が逐次壊変となる場合は、壊変の基準に注意する必要がある。例えば、<sup>137</sup>Cs の 662keV γ 線の場合、<sup>137</sup>Cs の壊変を基準にすると、γ 線放出率は 0.851 であるが、<sup>137m</sup>Ba を基準にすると 0.899 である。

### 幾何学的効率 (geometrical efficiency)

線源 (または試料) と検出器の間のジオメトリ (線源と検出器の間の距離等) に依存する計数効率。点線源の場合は、線源から検出器をみる立体角を  $\Omega$  とすると、幾何学的効率は  $\Omega/4\pi$  である。しかし、一般に線源 (試料) と検出器はそれぞれの容積や広がりを持つので、単純な計算で定量的に幾何学的効率を決定することは困難である。

### 禁止帯 (forbidden band)

伝導帯と価電子帯の間にある電子の存在できないエネルギーバンド。これによって物質の電気伝導度が決定する。絶縁体や純粋な無機結晶では禁止帯の幅が大きく (5eV 程度)、常温 (0.05eV 以下) 程度の熱では電子は伝導帯に励起されない。一方、ゲルマニウム半導体の禁止帯幅は 0.665eV であり、常温では電子が伝導帯に励起されてしまうため、液体窒素温度に冷却して使用される。

### 空乏層 (depletion layer)

半導体検出器の p<sup>+</sup>電極と n<sup>+</sup>電極の間の結晶領域で、電荷キャリア (電子と正孔) が非常に少ない高純度の部分 (放射線に有感な部分) をいう。ここに放射線が入射してエネルギーが吸収されると、そのエネルギーに比例した数の電子・正孔対がつくられて信号が発生する。真性半導体領域ともいわれる。

### クライオスタット (cryostat)

真空低温容器。例えば、ゲルマニウム半導体検出器ではゲルマニウム結晶を液体窒素温度に冷却して使うため、ゲルマニウム結晶はクライオスタット内に保持されている。

### 計数効率 (counting efficiency)

測定値 (計数率) から放射能または放射線強度を決定するため用いる定数。放射能を  $A$  (Bq)、測定する放射線の放出率を  $I_\gamma$ 、正味計数率を  $N$  (s<sup>-1</sup>) とすると計数効率  $\varepsilon$  は

$$\varepsilon = \frac{N}{A \cdot I_\gamma} \quad (2.4)$$

この関係には、幾何学的効率が含まれているが、検出器のみの効率 (検出効率ともいう) をいうときは幾何学的効率を含まない場合がある。

計数に係る不確かさ (uncertainty due to counting statistics)

線源からの放射線の放出および放射線の検出は完全に統計的なランダム事象であるため、計数値（または計数率）も統計的な変動を受ける。計数値の統計的「ゆらぎ」はポアソン分布（またはガウス分布）に従うので、計数値 $n$ に対して予測される誤差は標準偏差 $\sigma$ で、 $\sigma = \sqrt{n}$ と表される。通常、測定値は、 $n \pm \sigma$ と記される。慣例的に計数誤差 (counting error) という用語が用いられてきた。

計数率 (counting rate)

計数値を測定時間で除した値。単位は  $s^{-1}$  を用いる。 $\gamma$  線スペクトル等では、ピーク面積（ピークの正味計数値）を測定時間（ライブタイム）で除した値はピーク計数率といわれる。慣用的に、cps(count per second)、cpm(count per minute) 等の単位が使われる。

検出下限値 (detection limit)

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検出できる最小量（値）。

検出効率 (detection efficiency)

計数効率とほぼ同じ意味であるが、幾何学的効率を含まず、検出器固有の効率を意味することもある。

コヒーレント散乱 (coherent scattering)

光子と物質の相互作用の一つで、入射光子がエネルギー（あるいは波長）を変えずに、その方向のみを変えて散乱する現象。検出器内においては信号をつくらない。光子の波長が標的より長い場合をレイリー散乱 (Rayleigh scattering)、光子の波長が標的より短い場合をミー散乱 (Mie scattering) という。

コベル法 (Covell's method)

計数値積算法ともいわれ、 $\gamma$  線スペクトル解析等においてピーク面積（ピークの正味計数値）を求める方法の一つ。ピーク領域内の計数値を積算し、その中に含まれる平坦部の計数値を差し引く方法。ピーク領域内に他のエネルギーのピークがあるときは、この方法を直接的に適用することはできない。

散乱 (scattering)

物質との相互作用の結果、放射線が進行方向を変える現象。散乱の前後において、関与する全ての放射線の運動量および運動エネルギーに変化がない場合（核の励起等がない場合）を弾性 (elastic) 散乱、変化がある場合を非弾性 (inelastic, non-elastic) 散乱という。

質量減弱（衰）係数（mass attenuation coefficient）

単位質量当たりの相互作用断面積。

シングルエスケープピーク（single photon escape peak）

シングルフォトンエスケープピークともいう。着目する  $\gamma$  線が検出器内で電子対生成を起こし、生成した陽電子が消滅して発生する 2 個の電子対消滅光子（ $m_0c^2 = 511\text{keV}$ ）のうち 1 個が検出器内で光電効果を起こし、他の 1 個が相互作用をせず検出器外へ出る現象に伴うピーク。 $\gamma$  線のエネルギーを  $h\nu$  とすると、観測されるエネルギーは、 $h\nu - m_0c^2$  である。また、そのピーク形状はドップラー効果の影響を受けて、エネルギー分布は 1keV 程度の広がりを持つ。「ダブルエスケープピーク」参照。

スペクトル（spectrum）

放射線のエネルギー分布またはパルス波高分布をいうが、一般的には後者をいうことが多い。 $\alpha$  線や  $\beta$  線の場合は、そのエネルギー分布にほぼ相似なスペクトルを示す。 $\gamma$  線スペクトルの場合は、本来は検出器の有感体積内で吸収された高速二次電子のエネルギー分布となる。しかし、実際に観測される  $\gamma$  線スペクトルは、二次電子のエネルギーから出力パルスの波高への変換過程において、統計的変動や雑音等種々の「ゆらぎ」のために広がったパルス波高分布となる。

正規分布関数（normal distribution function）

ガウス分布関数ともいわれる統計関数である。「ガウス分布」参照。

正孔（positive hole）

半導体の価電子帯に電子が存在しない状態（孔）を指し、ホールとも呼ばれる。不純物の存在、また、放射線の電離作用等によって生成される。電場を印加した結晶内部では、隣の原子から電子が正孔に移動することによって中性原子となり、電子を放出した原子には正孔が生じる。このプロセスが電場と逆の方向に沿って連続して起きるので、みかけ上、正孔が結晶内で移動することになる。Ge や Si 結晶では、自由電子とほぼ同程度の移動度を持つ電荷キャリア（担体）として出力信号に寄与する。

全効率（total efficiency）

あるエネルギーの  $\gamma$  線の計測スペクトルにおいて、ピークを含むスペクトル全体の計数値（波高値ゼロから最大波高値までの積分計数値）に対する計数効率。ピーク効率を  $\varepsilon$ 、ピーク・トータル比を  $P/T$  とすると、全効率  $T$  は

$$T = \frac{\varepsilon}{P/T} \quad (2.5)$$

散乱線の寄与を含める場合と含めない場合がある。「ピーク・トータル比」参照。

相対効率 (relative efficiency)

ゲルマニウム半導体検出器の性能指標の一つ。1332.5keV ( $^{60}\text{Co}$ ) の  $\gamma$  線における Ge 検出器のピーク効率と 3"  $\phi \times 3$ " NaI(Tl) シンチレーション検出器のピーク効率の比で定義される。Ge 検出器のピーク効率  $\varepsilon_{\text{Ge}}$ 、NaI(Tl) 検出器のピーク効率  $\varepsilon_{\text{NaI}}$  とすると相対効率  $\varepsilon_{\text{rel}}$  (%) は

$$\varepsilon_{\text{rel}} = \frac{\varepsilon_{\text{Ge}}}{\varepsilon_{\text{NaI}}} \times 100 \quad (2.6)$$

ただし、 $^{60}\text{Co}$  点線源とそれぞれの検出器の表面までの距離を 25cm として測定する。また、このとき  $\varepsilon_{\text{NaI}} = 1.20 \times 10^{-3}$  であるため、相対効率  $\varepsilon_{\text{rel}}$  (%) は次の式からも求めることができる。

$$\varepsilon_{\text{rel}} = 8.33 \times 10^4 \times \varepsilon_{\text{Ge}} \quad (2.7)$$

現在では、相対効率が 20~40% 程度の Ge 検出器が多く使われているが、なかには 100% を超える検出器もある。

ダブルエスケープピーク (double photon escape peak)

ダブルフォトンエスケープピークともいう。着目する  $\gamma$  線が検出器内で電子対生成を起こし、生成した陽電子が消滅して発生する 2 個の電子対消滅光子 ( $m_0c^2 = 511\text{keV}$ ) が検出器内で相互作用をせず検出器外へ出る現象に伴うピーク。 $\gamma$  線のエネルギーを  $h\nu$  とすると、観測されるエネルギーは、 $h\nu - 2m_0c^2$  である。「シングルエスケープピーク」参照。

デッドタイム (dead time)

不感時間とも呼ばれ、入射した  $\gamma$  線の信号処理に費やす時間。その時間内は次の  $\gamma$  線が入射しても処理することができない (不感である)。リアルタイム (トゥルータイムともいう) を  $t_R$ 、ライブタイムを  $t_L$  とするとデッドタイム  $t_D$  は

$$t_D = t_R - t_L \quad (2.8)$$

内部転換 (internal conversion)

励起状態にある原子核が、軌道電子 (K 殻の軌道電子等) にエネルギーを与え、より低いエネルギー準位に遷移する現象。結果として軌道電子が放出される。内部転換と  $\gamma$  線の放出は競合過程にあり、内部転換は一般的に重い原子核、小さいエネルギー準位差の場合に起こりやすい。また、内部転換が起こると特性 X 線 (またはオージェ電子) が放出される。

内部転換電子 (internal conversion electron)

内部転換によって放出される電子。その運動エネルギーは、関与するエネルギー準位の差から軌道電子の結合エネルギーを引いた値である。したがって、核種に固有な線スペクトルを形成する。

パルスパイルアップ (pulse pile-up)

2 個以上のパルス信号が重なりあうこと。パイルアップした信号のパルス波高と波形はそれぞれのパルスの波高と時間差によって異なる。計数率を  $n$  ( $s^{-1}$ )、パルスの最大幅 (波高が 0 になる時間) を  $\tau$  (s) とすると、パイルアップの数 ( $s^{-1}$ ) は  $n^2\tau$  である。高計数率のスペクトル測定で問題となり、ピーク計数率の減少や FWHM の増大あるいはピーク形状の劣化をきたす。

バックグラウンド (background)

試料 (線源) のないときあるいは放射能を含まないブランク試料を置いたときの計数值またはスペクトルをいう。γ線スペクトルでピーク面積を求める場合には、ピーク領域に含まれる平坦部分をバックグラウンドということもある。

半減期 (half-life)

ある基準とする時刻における放射能に対して、放射能が 1/2 になる時間をいう。半減期は核種に固有の値であり、短いもので 1 秒よりはるかに短く、長いもので数十億年以上である。半減期を  $T$ 、経過時間を  $t$ 、基準時 ( $t = 0$ ) の放射能を  $A_0$  とすると、時間  $t$  における放射能  $A$  は次のように表される。

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{または、} \quad A = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} \quad (2.9)$$

なお、 $\ln(2) \cong 0.693$  であり、半減期と壊変定数  $\lambda$  の関係は、 $T = \ln(2)/\lambda$  である。

半値幅 (full width at half maximum ; FWHM)

α線スペクトルやγ線スペクトルにおいて、ピークの最大値の半分の高さにおける全幅で定義される。ピークの形状をガウス分布とすると、標準偏差  $\sigma$  との関係は、式 (2.3) から求められ、 $FWHM = 2\sqrt{2\ln(2)}\sigma \cong 2.355\sigma$  である。

p 型半導体 (p-type semiconductor)

4 価の元素である Si や Ge に 3 価の元素を不純物として微量 (1ppm 程度) ドーピングすると、正孔が生じ電導性の高い半導体となる。3 価の元素としては、B、Al、Ga、In 等が用いられ、これらはアクセプタ (acceptor : 電子を受け入れるもの) といわれる。「n 型半導体」参照。

ピーク効率 (peak efficiency)

α線スペクトルあるいはγ線スペクトル測定において、ピークの正味計数率から算出した計数効率をいう。最も基本的な定義としては、ピークの正味計数率を  $n$ 、線源から放出される測定対象の放射線の強度を  $I$  とすると、ピーク効率は

$$\varepsilon = \frac{n}{I} \quad (2.10)$$

と表される。 $\gamma$ 線スペクトル解析では、最も重要な定量因子である。放射線エネルギーおよび測定試料のジオメトリに依存する他に、自己吸収やサム効果等複雑な補正因子を含むこともある。

#### ピーク効率変換 (efficiency transfer)

半実験的なピーク効率計算方法の一種であり、ある特定のジオメトリで得られたピーク効率を、同一検出器の異なる材質、異なるジオメトリの試料測定におけるピーク効率に換算する手法。

#### ピーク・コンプトン比 (peak to Compton ratio)

ゲルマニウム半導体検出器の性能指標の一つ。一般的には $^{60}\text{Co}$ の1332.5keV  $\gamma$ 線のピークの高さ(計数值)の連続スペクトル部分における1040~1096keV間の平均計数值に対する比で定義される。ゲルマニウム半導体検出器の相対効率が大きいほど、また、エネルギー分解能が高いほど、ピーク・コンプトン比は大きな値を示す。通常の検出器では、その値は30~60である。

#### ピーク・トータル比 (peak to total ratio)

あるエネルギーの $\gamma$ 線の計測スペクトルにおいて、ピーク効率/全効率と定義される。なお、全効率は、ピークを含むスペクトル全体の計数值(波高値ゼロから最大波高値までの積分計数值)から算出した計数効率である。一般的に、ゲルマニウム結晶が大きいほど多重相互作用の確率が大きくなるため、ピーク・トータル比は大きくなる。「全効率」参照。

#### ピーク面積 (peak area)

ピーク領域におけるピークの正味積算計数值をいう。 $\gamma$ 線スペクトルではベースライン部分の計数值は含まない。

#### ピーク領域 (peak region)

ピーク面積を求めるために設定するチャンネル領域。解析方法(コベル法、関数適合法等)によって異なるが、半値幅(FWHM)を基準にして、領域の幅をおよそ $3 \times \text{FWHM}$ とすることが多い。

#### 標準線源または標準試料 (standard source or standard sample)

放射能が正確に決められている線源(または、試料)。絶対測定法等で決定される一次標準、それとの比較測定で決定される二次標準等がある。放射能測定で使われる標準線源は基準線源(reference source)ともいわれ、比較測定による放射能の決定、または計数効率の決定に使われる。

### 標準偏差 (standard deviation)

1 組の観測データまたは統計データのばらつきの度合いを表す量で、分散の正の平方根で定義される。正規分布関数 (ガウス分布関数) においては分布の広がりを表す。標準偏差を $\sigma$ とすると、中心から $\pm\sigma$ の範囲内の積分値は全体の積分値に対して約 68.3%になる。また、 $\pm 2\sigma$ で約 95%、 $\pm 3\sigma$ で約 99.7%である。計数値の統計処理においては、計数値がポアソン分布に従うとすると、計数値 $N$ の標準偏差 $\sigma_N$ は、 $\sigma_N = \sqrt{N}$ なる関係で表される。

### 不感層 (dead layer)

粒子によって失われたエネルギーの大部分が出力信号に寄与できないような、半導体検出器内の層。ゲルマニウム半導体検出器の結晶の外側表面が n<sup>+</sup>type のものでは、その厚さは 0.5~0.8mm 程度であり、この部分はピーク計数値の信号に寄与しない不感層である。100keV 程度以下の低エネルギー光子はこの不感層によって減弱されるので、光子エネルギーが低いほど計数効率が低下する。

### 分解能 (resolution)

エネルギー分解能のこと。「エネルギー分解能」参照。

### ベクレル (Bq)

国際単位系 (SI) の放射能の単位で、1Bq=1 壊変/秒と定義される。ウランの放射能の発見によって 1903 年にノーベル物理学賞を受けたフランスの物理学者ベクレル (Becquerel) の名前に由来する。

### ベースライン (base line)

$\gamma$  線スペクトル等において、ピークの前後の平坦な部分から連続している裾の部分。

### ポアソン分布 (Poisson's distribution)

離散的確率分布の一種。放射性核種の壊変のようなランダムな現象はポアソン分布に従う<sup>1</sup>ため、計数値の統計処理に使われる。平均の計数値 $m$ に対して、 $n$ なる計数値を示す確率 $p(n)$ は

$$p(n) = m^n \cdot e^{-m} / n! \quad (2.11)$$

$$\sigma^2 = \sum (m - n)^2 p(n) = m \quad \text{より標準偏差は } \sigma = \sqrt{m}$$

$n$ は標準偏差 $\sigma$ を含めて、 $n \pm \sqrt{n}$ と表される。ポアソン分布は、整数値のみの非連続変数に適用されるが、 $m$ がおよそ 20 以上のときはガウス分布関数とほぼ一致する。

### 妨害ピーク (interruption peak)

---

<sup>1</sup> 壊変の確率が 1 に近い場合等の特殊な場合は除く。



γ線スペクトル等において解析対象ピークをコベル法（計数值積算法）等で解析する場合、その解析領域内に存在する他のピークを妨害ピークという。

#### 放射平衡（radioactive equilibrium）

ある放射性核種（親核種）が壊変して生成する核種（子孫核種）が放射性核種であり、子孫核種の半減期が親核種の半減期より短い場合、子孫核種の放射能は時間とともに増加し、半減期の8倍程度経過した以降は親核種の放射能と一定の比率の関係になる。親核種の半減期に比べて子孫核種の半減期が極めて短い場合は、永続平衡となり、両核種の放射能はほぼ等しくなる。そうでない場合は、子孫核種の放射能は親核種の放射能より大きくなり、比率が一定の過渡平衡となる。

#### モンテカルロシミュレーション（Monte Carlo simulation）

乱数を用いて数値計算やシミュレーションを行う方法の総称。γ線と物質との相互作用は光電効果や散乱等の様々な確率的な事象の組み合わせであるが、それらの構成事象の個々の振る舞いを乱数を用いてシミュレートし、それを十分な回数繰り返すことにより、着目している事象の発生確率を計算する。測定試料から発生したγ線が検出器に入射し全エネルギーを検出器に付与する事象の発生確率を計算することでピーク効率を算出できる。

#### ライブタイム（live time）

多重波高分析器を用いる測定において、真の時間（リアルタイムまたはトゥルータイムともいう）に対して入力パルスの分析時間（デッドタイム）を補正した測定時間。個々の入力パルスの分析時間によって測定時間が補正されるため、ライブタイムはリアルタイムより短くなる。

#### ランダムサム（random summing）

異なる核種からのγ線（例： $^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$ ）や同じ核種の異なる壊変事象に伴い放出されたγ線（例： $^{137}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ ）が偶発的にほぼ同時に検出される現象。この現象が発生した場合、パルスパイルアップが生ずる。γ線の入射が増加するとその発生が顕著となり、各々のγ線ピークの計数減を生じることとなる。なお、この現象によって発生するピークは、計数率に強く依存し、計数率が低下すると顕著に減少するが、カスケード遷移によるサムピークは計数率にそれほど依存しないため、計数率による変化で両者を区別することができる。「パルスパイルアップ」参照。

[略語]

ADC (Analog to Digital Converter)

マルチチャンネル波高分析器 (MCA) の一部で、入力パルスの波高値 (ボルト単位のアナログ量) をチャンネル数 (デジタル量) に変換する機器。

FWHM (Full Width at Half Maximum)

半値幅。「半値幅」参照。

FWTM (Full Width at Tenth Maximum)

ピークの最大値の 1/10 の高さにおける全幅で定義される。一般に、FWHM のほぼ 2 倍の値を示す。ピークの対称性は、主として低エネルギー側におけるテイルの大きさによって決まる。FWTM をピーク中心で分割したときの低エネルギー側の幅を  $a$ 、高エネルギー側の幅を  $b$  とすると、ピークの非対称性は次式で表される。

$$\text{ピークの非対称性} = \frac{a - b}{b} \quad (2.12)$$

HV (High Voltage)

検出器に印加する高電圧、または高電圧電源 (high voltage power supply)。

MCA (Multichannel Pulse height Analyzer)

マルチチャンネル波高分析器。

PA (Pre Amplifier)

プリアンプ、前置増幅器。

ROI (Region of Interest)

着目 (関心) 領域。マルチチャンネル波高分析器では、あるチャンネルから他のチャンネルにわたって指定されるチャンネル領域をいう。

### 第3章 $\gamma$ 線測定の基本原理

ゲルマニウム半導体検出器による $\gamma$ 線測定は、入射した $\gamma$ 線（光子）が検出器と相互作用をした結果生ずる高速電子（二次電子）を検出することにより間接的に行われる。検出器に $\gamma$ 線が入射すると種々の相互作用が起こり、二次電子が生じるが、この電子の電離作用によりゲルマニウム結晶中に電子正孔対ができ、それらの電荷を収集し電気信号に変えることで検出器として動作する。

そのため、光子と物質（検出器および周辺物質）との相互作用は $\gamma$ 線スペクトロメトリの基礎であり、特に後に述べる3種類の相互作用が重要である。実際に観測される $\gamma$ 線によって検出器が得たエネルギーのスペクトル（以下、「スペクトル」という。）は、主として検出器の有感部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、その他に遮蔽体等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 $\gamma$ 線やX線）によるものが含まれる。

#### 3.1 $\gamma$ 線と物質との相互作用の種類および性質

##### 3.1.1 光電効果

$\gamma$ 線はゲルマニウム半導体検出器の有感部内に入射して全エネルギー（ $E_\gamma$ ）をゲルマニウム原子の軌道電子（KまたはL殻の軌道電子、結合エネルギー $I$ ）に与えて、 $E_\gamma - I$ の運動エネルギーを持つ高速電子（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殻の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殻の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。

検出器に入射した $\gamma$ 線が光電効果を起こした場合、 $\gamma$ 線の全エネルギーが検出器に吸収され、スペクトル上にはピークとして観測される（光電ピークと呼ばれる）。 $\gamma$ 線スペクトルのうち、光電ピーク（全エネルギー吸収ピークともいう）のみが $\gamma$ 線のエネルギー情報と放射源の放射能強度に関する情報を持っているため、スペクトル解析は光電ピークを対象として行われる。

#### — 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ゲルマニウム特性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持つ。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3.1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 100keV 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; 9.9keV) 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) 鉛遮蔽体等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 3.1 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。

### 3.1.2 コンプトン散乱

入射した  $\gamma$  線のエネルギーの一部が電子 (軌道電子でも自由電子でもよい) に付与され、 $\gamma$  線は消滅せずに、残りのエネルギーを持って散乱することがある。このとき、 $\gamma$  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角度ごとに異なるので一定にならず、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持ち、連続分布の端 (コンプトン・エッジという) に相当する。

ゲルマニウムにおけるコンプトン散乱の確率は  $\gamma$  線エネルギーが数十 keV から 100keV ぐら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、それ以上では光電効果の確率がエネルギーの増加とともに大きく減少しコンプトン散乱の確率の方が高くなるので、数百 keV 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ー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 —

- (1) 連続スペクトル (コンプトンエッジ (図 3.1 の CE) より低エネルギー側の連続部分) は  $\gamma$  線エネルギーの情報をほとんど持たないので、スペクトル解析には使われない。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。実際のゲルマニウム半導体検出器では、数百 keV 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 3.1 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) 鉛遮蔽体等周辺物質において  $\gamma$  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 3.1 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・遮蔽体の間のジオメトリに依存するが、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

### 3.1.3 電子対生成

エネルギーが  $2m_0c^2$ （2 個の電子の静止質量エネルギー<sup>1</sup> = 1.022MeV）以上である  $\gamma$  線が原子核近傍のクーロン場を通過する際、 $\gamma$  線が消滅して電子、陽電子の対を生成することがある。このとき、原子核や軌道電子のエネルギーに変化は起こらない。

発生した電子と陽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 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<sup>2</sup>。

発生した高速陽電子は検出器内で運動エネルギーを失い、熱エネルギー（ $\sim 0.1\text{eV}$ ）程度となると陽電子は近傍に存在する電子と結合して消滅し（電子対消滅（annihilation））、2 個の電子対消滅光子（ $E = m_0c^2$ ）に変換される。

## — スペクトルとの関係 —

電子対消滅の結果、検出器内部で発生した光子が、引き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、スペクトルには次のようなエネルギーに相当する出力信号が生ずる。

- (1) 2 個の電子対消滅光子が相互作用をせずに検出器外に出る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。

<sup>1</sup> 静止状態にある電子（運動エネルギーが 0）の質量  $m_0$  を相対論の式（ $E = m_0c^2$ 、 $c$  は光速）によりエネルギーに換算した値。

<sup>2</sup> 原子力施設起因の人工放射性核種はほとんどが 1.5MeV より低い  $\gamma$  線を放出する。

$$E = E_{\gamma} - 2m_0c^2 \quad (\text{図 3.1 のピーク DE})$$

- (2) 1 個の電子対消滅光子が光電効果を起こし、他の 1 個は検出器外に出る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。

$$E = E_{\gamma} - m_0c^2 \quad (\text{図 3.1 のピーク SE})$$

- (3) 2 個の電子対消滅光子が両方とも検出機内で光電効果を起こす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。

$$E = E_{\gamma} \quad (\text{図 3.1 のピーク PP})$$

- (4) 1 個または 2 個の電子対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 3.1 の CE より低エネルギー側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 (図 3.1 のピーク PP) は大きくなり、エスケープピーク (図 3.1 のピーク DE と SE) および連続部分は相対的に減少する。

また、鉛遮蔽体等周辺物質において  $\gamma$  線による電子対生成が生ずると、そこで発生した電子対消滅光子が検出器に入射して 511keV のピークになる (図 3.1 のピーク 511)。電子-陽電子対が検出器内で消滅するときの運動量は 0 ではないので、生成する電子対消滅光子はドップラー効果の影響を受けてエネルギーは 511keV から  $\pm 1\text{keV}$  程度の範囲内で増減する。この結果、電子対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  $\gamma$  線の作るピークに比べて多少広い半値幅を持つので、スペクトル解析の際に注意する必要がある。

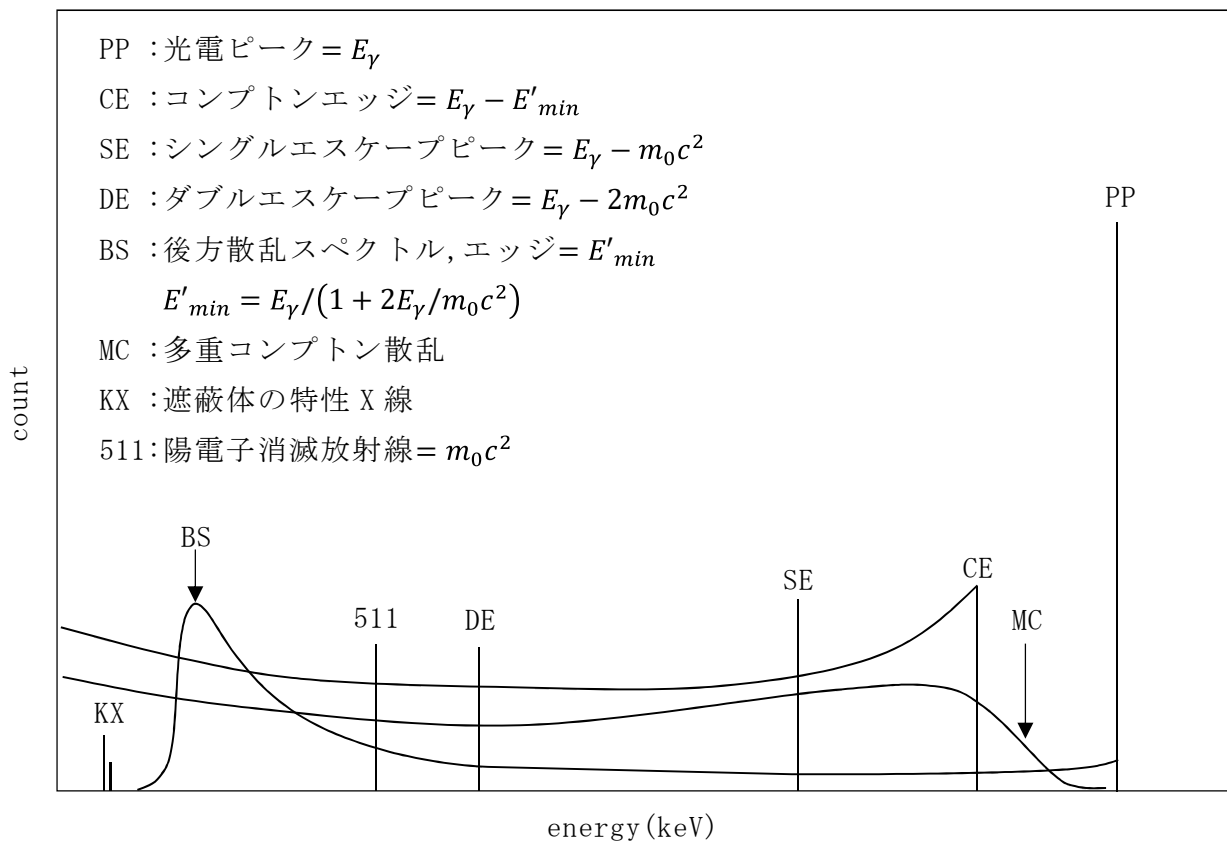


図 3.1  $\gamma$  線との相互作用によってゲルマニウム半導体検出器内に生ずるエネルギー分布 [3]

### 3.2 ピーク解析

単一のエネルギーを持つ $\gamma$ 線が検出器に入射して相互作用を起こした結果、図 3.1 に示すようなエネルギー分布が得られる。実際の試料の $\gamma$ 線スペクトルを測定した場合は複数の異なるエネルギーの $\gamma$ 線が混在するため、スペクトルはそれらの $\gamma$ 線と検出器との相互作用で生じたエネルギー分布が重なり合った複雑な形状となるが、解析対象となるのは光電ピーク（全エネルギー吸収ピーク）のみである。

光電ピークは、散乱線や他のエネルギーの $\gamma$ 線によるコンプトン散乱によって生ずる連続成分の上に重なった形で観測される。ピークの形状はガウス分布にほぼ一致する。ピーク中心チャンネルは検出された $\gamma$ 線のエネルギーに依存し、ピーク面積（連続成分を差し引いた正味面積）は検出器と相互作用を起こした $\gamma$ 線の数に比例するため、これらを用いることにより、 $\gamma$ 線放出核種の同定（定性）および定量が可能となる。

ピーク中心チャンネルを $\gamma$ 線エネルギーに換算するためにはエネルギー校正、ピーク面積から $\gamma$ 線の数を求めるにはピーク効率（測定試料から放出される $\gamma$ 線が検出器に入射し、観測されたスペクトル上で光電ピークの正味計数を生ずる確率）の校正を行っておく必要がある。校正方法については第 5 章「検出器の校正」を参照のこと。

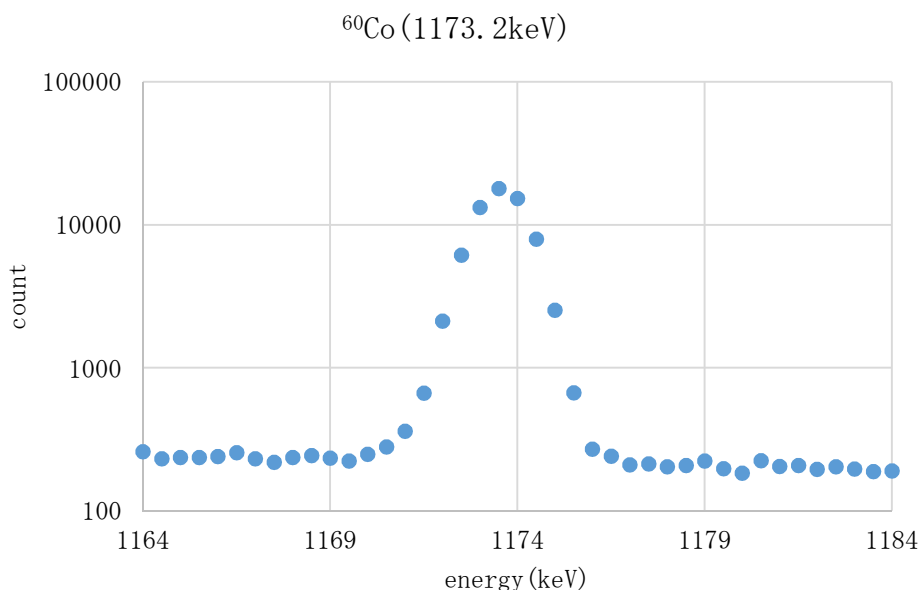


図 3.2 ゲルマニウム半導体検出器で得られる $\gamma$ 線スペクトルの光電ピークの形状

### 3.3 各種補正（スペクトル解析に影響を与えるもの）

#### 3.3.1 サム・コインシデンス効果

壊変時に複数の $\gamma$ 線を同時に放出する核種を測定した場合、複数個の光子が検出器に同時に入射して検出され、それらの和の出力信号を生ずることがある。これはサム・コインシデンス効果あるいはサム効果（coincidence summing）と呼ばれる。2個の光子が同時に検出器に入射す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が生じると、測定対象とする全エネルギー吸収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。サム効果は同時に放出される $\gamma$ 線の相互関係によって決まるので核種の壊変形式に依存する。

サム効果の確率は両方の放射線の検出効率の積に比例するため、検出効率の高い条件下での測定ほど顕著に現れる。ゲルマニウム半導体検出器の結晶が大きくなるほど影響が増大するため、補正は必須である。

### 3.3.2 自己吸収

$\gamma$ 線が検出器の有感部に入射する前に生ずる減弱は、放射能定量において欠くことのできない補正項の1つである。試料容器等の線源支持体による吸収や自己吸収（試料自体による吸収）がその例であり、特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。

原子核の壊変に伴って放出された $\gamma$ 線は原子核に固有のエネルギーを持つ。そのエネルギーを持った状態で検出器に入射し、相互作用の結果全エネルギーが検出器に吸収された場合にのみ全エネルギー吸収ピークとして現れる。 $\gamma$ 線スペクトル解析ではこれを解析対象とする。自己吸収により一部でもエネルギーを失った $\gamma$ 線は、その後検出器に入射した場合でも全エネルギー吸収ピークを生ずることはなく、結果としてピーク面積が減少する。

自己吸収は $\gamma$ 線エネルギー、試料媒体の材質、試料の形状、検出器の形状と大きさ、検出器と試料とのジオメトリ等に依存する複雑な現象であり、容積試料内での自己吸収は数十%以上にもなることがあることから補正は不可欠である。補正には様々な媒体の標準線源を測定して試料形状、材質への依存性を求める方法があるが、精度の高い多くの標準線源を必要とすることから必ずしも現実的な方法ではない。容積試料内部での $\gamma$ 線の自己吸収を厳密に補正するには、試料内のある位置から放出された $\gamma$ 線が試料内部を通過する際に試料の構成物質と起こす相互作用を評価しなければならない。そのためにはモンテカルロシミュレーションが必須であり、当該機能を実装した $\gamma$ 線スペクトル解析ソフトウェアが必要となる。しかしながら、自己吸収が発生する状況を単純化したモデルを仮定することで、シミュレーションを用いない場合でも、対象は限定されるものの実用的に自己吸収補正を行うことは可能である。環境試料に

対する自己吸収の補正方法の一例を資料 1.6 に示した。

## 第4章 測定機器

### 4.1 機器構成

ゲルマニウム半導体検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメータは、一般的に検出器（本体、前置増幅器、検出器を冷却する装置を含む）、測定装置（電源類、線形増幅器、多重波高分析器）、遮蔽体および解析装置（PCおよびスペクトル解析ソフトウェア）から構成される。また、機器全体を設置する測定室も重要な構成要素である。

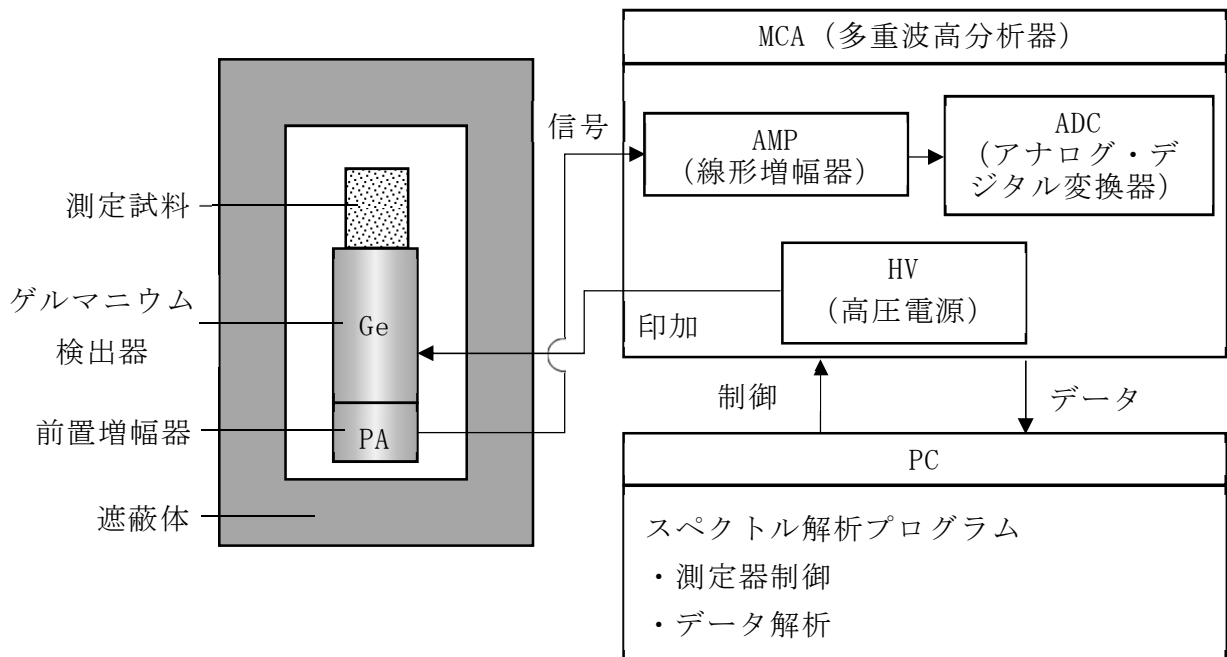


図 4.1 ゲルマニウム半導体検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメータの基本構成

#### 4.1.1 ゲルマニウム半導体検出器

ゲルマニウム結晶に $\gamma$ 線が入射し相互作用すると $\gamma$ 線のエネルギーが結晶中の電子に与えられ、この電子が結晶中の他の電子と次々に相互作用して電離してゆく。最初の電子は全ての運動エネルギーをこれらの電離に消費して停止する。こうして生成した電子・正孔対の数は $\gamma$ 線エネルギーに比例する。電子・正孔対を全て収集することができれば $\gamma$ 線のエネルギー解析（スペクトロメトリー）が可能となる。

これを実現するために高純度のGe<sup>1</sup>にGa等の第Ⅲ族の元素を不純物として添加した円柱の形をしたp型結晶を用いる。ゲルマニウム結晶の $\gamma$ 線が入射する外側にLiを熱拡散した電極（n<sup>+</sup>電極、厚さ0.5~0.8mm程度、 $\gamma$ 線に対して不感層となる）を作り、中心に空けた空洞部分にp<sup>+</sup>電極を作る。外側のn<sup>+</sup>電極にプラス、内側のp<sup>+</sup>電極にマイナスの逆バイアスを3000V程度印加することによって結晶内部に空乏層が生成され $\gamma$ 線に有感な領域ができる。この大きさは一般的には30~150mL程度である。このp型ゲルマニウム半導体検出器では40keV~10MeVの $\gamma$ 線を測定することができる。

<sup>1</sup> 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。

さらに低エネルギーの $\gamma$ 線を測定するような場合はn型ゲルマニウム半導体検出器<sup>2</sup>を用いる必要がある。ただし、50keV以下の低エネルギーの測定には効率曲線の使用が困難であるため、測定試料と同じ形状・材質であり、測定対象核種を含む標準線源との比較測定により、定量することが望ましい。また、50keV以上の $\gamma$ 線の測定においてn型ゲルマニウム半導体検出器を使用する場合でも、図4.2のように $\gamma$ 線とX線でサム効果が発生することがある。そのため、低エネルギーの $\gamma$ 線を測定しない場合は、エンドキャップの上に入射窓を覆うように0.5mmほどの銅板を置いて低エネルギーのX線を遮蔽するとよい。

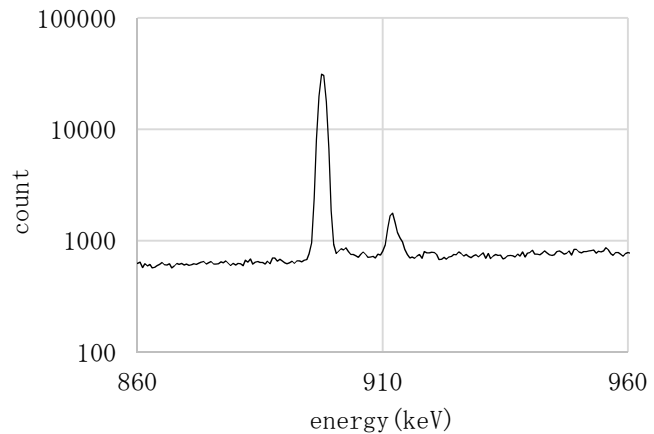


図 4.2 n型ゲルマニウム半導体検出器における<sup>88</sup>YとX線とのサムピーク

図 4.3 に一般的な同軸型ゲルマニウム半導体検出器の構造を示す。

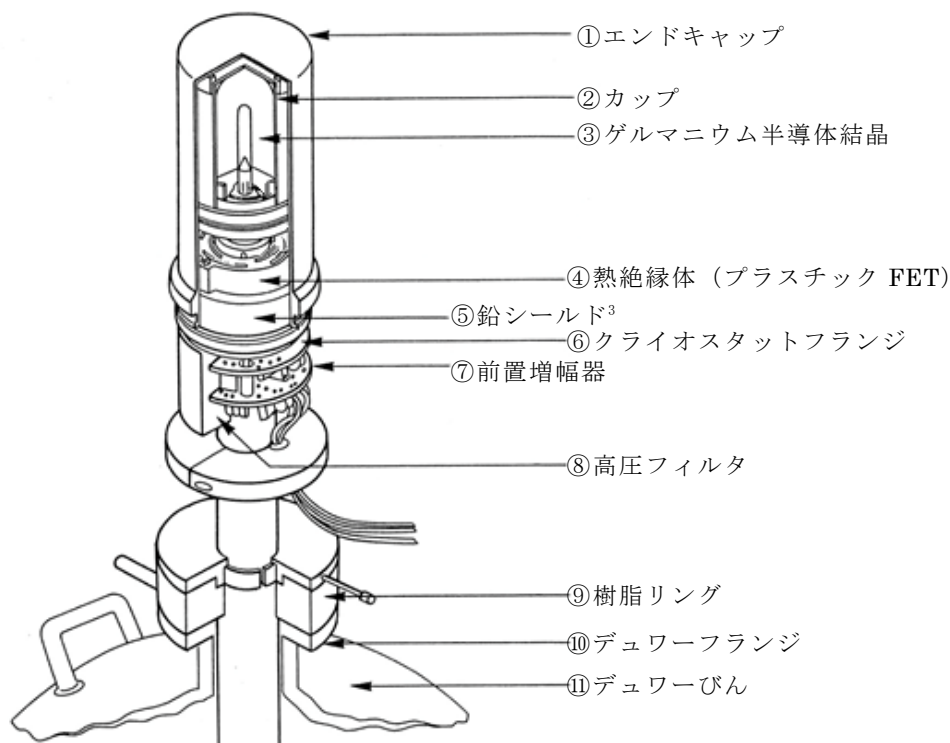


図 4.3 ゲルマニウム半導体検出器構造図

<sup>2</sup> n型は結晶にホウ素イオンを注入してp<sup>+</sup>電極を作るので、不感層を薄くすることができ(～0.3 $\mu$ m厚)、ベリリウム等の低原子番号の物質を入射窓に用いることで低エネルギー(3keV程度)まで測定可能である。

<sup>3</sup> 低バックグラウンド仕様の検出器において、検出器の下部方向から入る $\gamma$ 線の遮蔽に用いられる。

#### 4.1.2 冷却装置

ゲルマニウム結晶は禁止帯幅 (0.665eV) が小さいため常温では使用できず、液体窒素温度 (77K、 $-196^{\circ}\text{C}$ ) に冷却した状態で使用する必要がある。検出器の冷却方法としては以下の方式が用いられる (図 4.4)。

##### (1) 液体窒素による冷却

30L 程度の液体窒素容器 (デュワー) を用いて冷却する方式であり、液体窒素の消費量は 1 日当たり 1~2L 程度以下である。定期的に液体窒素を補給する必要がある。

##### (2) 電気式冷却装置

ヘリウム等の冷媒ガスを用いて冷却する方式で、液体窒素を使用しないため補給の必要がない。装置の運転に伴う電氣的雑音等の影響により液体窒素による冷却に比べて分解能がやや劣るが、近年の装置では分解能への影響はかなり低減されている。

##### (3) ハイブリッド冷却

液体窒素冷却と、蒸発した窒素ガスを回収して液体窒素に戻す冷却装置を組み合わせた方式で、正常に動作しているときには液体窒素の消費はほとんどなく、長期間にわたって補給が不要である。また、冷却装置が故障した場合でも液体窒素による冷却を継続できるという利点がある。



(1) 液体窒素冷却



(2) 電気冷却



(3) ハイブリッド冷却

図 4.4 ゲルマニウム半導体検出器の冷却装置

#### 4.1.3 前置増幅器

前置増幅器は検出器内に生成された電荷を収集し適切な電気信号（電荷量に比例した高さの電圧パルス）に変えて後段の線形増幅器に送るものであり、検出器と増幅器のインターフェースとして機能する。電気的にはパルスの減衰や反射、ノイズの侵入を防ぐ働きをしている。

#### 4.1.4 線形増幅器（主増幅器）

前置増幅器から出力されるパルスを増幅し、後段の波高分析に適した形に整形する。出力パルスの高さ（波高）は、検出器内に生成された電荷量に比例する大きさを持つ。

#### 4.1.5 多重波高分析器（MCA）

線形増幅器からの出力パルスを波高別に分類して計数（パルス波高分析）することで、 $\gamma$ 線とゲルマニウム半導体検出器の相互作用によって検出器に付与されたエネルギーの分布を得ることができる。パルス波高分析は、ADC（アナログ・デジタル変換器）によって線形増幅器からの出力パルスの波高値（電圧、アナログ量）をデジタル値（チャンネル）に変換し、変換されたチャンネルに相当するスペクトルメモリに計数値を加算することで行われる。この過程を多くの出力パルスに対して行い結果を積算することで、チャンネル（ $\gamma$ 線エネルギーに相当）当たりの計数値のヒストグラム（波高分布）が得られる。これが $\gamma$ 線スペクトルと呼ばれる。

計数値を蓄積するメモリのチャンネル数として、 $\gamma$ 線スペクトル測定では4000～8000チャンネル程度が用いられるが、環境放射線モニタリングでは4000チャンネルが一般的に用いられる。

なお、近年はデジタル信号プロセッサ（digital signal processor : DSP）を用いたデジタル信号処理技術が一般化しており、前置増幅器の出力を直接デジタル変換してMCAで波高分布を得る装置も存在する。信号処理のデジタル化により、高計数率における処理能力、エネルギー分解能、温度変化に対しての安定性が向上している。

#### 4.1.6 遮蔽体

環境試料測定に用いるゲルマニウム半導体検出器は、外部からの放射線（バックグラウンド）を減少させるため、通常 $4\pi$ 方向にわたって10～15cm厚の鉛等で遮蔽する必要がある（図4.5）。

##### (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よい。

- 鉛 : 5cm 厚で  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線透過率は 6~7% になる。鉛素材の中には、 $^{208}\text{Tl}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{214}\text{Bi}$ 、 $^{228}\text{Ac}$  等の自然放射性核種が含まれていることがあるが、 $^{210}\text{Pb}$  が多く含まれている場合、子孫核種である  $^{210}\text{Bi}$  の  $\beta$  線による制動放射線によりバックグラウンドが高くなるので、 $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Bi}$ ) を含まない古い鉛素材を用いるか、製造ロットを検査してから使用することが望ましい [4] [5]。また、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鉄と比較して少ない。
- 鉄 : 5cm 厚で  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線透過率は 30% 前後になる。遮蔽体に用いた場合、宇宙線由来の中性子との相互作用により  $^{56}\text{Fe}$  の励起状態からの  $\gamma$  線 (約 847keV) が検出されることがある。また、戦後の一時期に製造された鉄の中には、製造工程で微量の  $^{60}\text{Co}$  が混入していた場合があるので、あらかじめ検査して確認しておくことが望ましい。
- 銅 : 鉛の KX 線や、ウラン系列およ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内張りに用いることがある。ただし、宇宙線由来の中性子との相互作用により  $^{63}\text{Cu}$  の励起状態からの  $\gamma$  線 (671keV) が検出されることがある。
- 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。また、宇宙線由来の中性子と反応し、 $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)$  による  $\gamma$  線 (約 558keV) のピークが検出されることがある。

## (2) 内容積

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の理由からなるべく広い方がよい。通常は  $20 \times 20 \times 20 \sim 30 \times 25 \times 50\text{cm}$  程度である<sup>4</sup>。

2L 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 1.5~3 トンになる。

## (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こと。

15cm 厚さの鉛で  $4\pi$  方向を遮蔽する遮蔽体の場合、ウラン、トリウム系列等の自然放射性核種に起因する計数率は、相対効率 25~30% の検出器で測定すると表 4.1 のようになる。

<sup>4</sup> 分解能測定時に点線源を 25cm の距離で測定できるように、検出器エンドキャップ上に 27cm 程度以上の空間があると便利である。

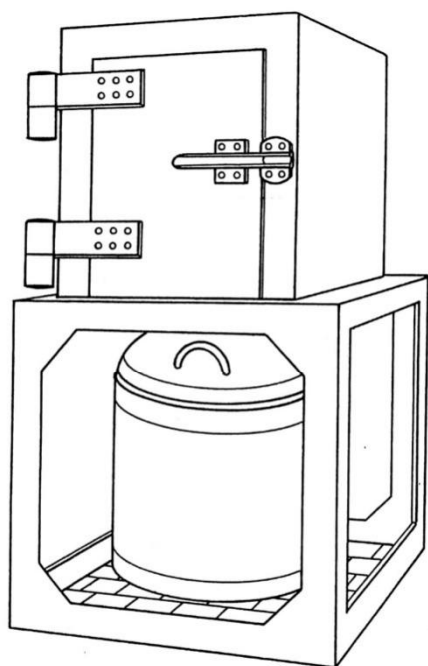
表 4.1 遮蔽体に含まれる放射性物質

核種等	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{214}\text{Bi}$	$^{208}\text{Tl}$	連続領域
エネルギー (keV)	1460.8	911.2	609.3	583.2	120
計数率	30~90	50~120	200~500	180~400	150~500

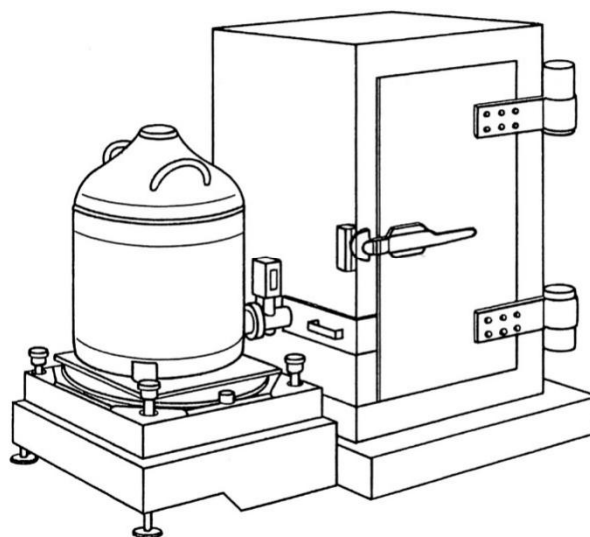
(注：連続領域の計数率は、(counts/day) / keV、他は (counts/day) / peak である。  
 連続領域の計数率が高い場合は、地金に  $^{210}\text{Pb}$  が含有している可能性がある。)

(5) 質量計

液体窒素を充填したクライオスタットの重量変化を常時監視する。液体窒素補給のタイミングやクライオスタットの真空度低下による断熱劣化の判断材料となるため、質量計を設置するとともにその数値を定期的に記録することが望ましい。



(1) 縦型検出器遮蔽体



(2) L字型検出器遮蔽体

図 4.5 遮蔽体の一例



#### 4.1.7 測定室

ゲルマニウム半導体検出器を設置する測定室の理想的な条件は次のとおりである。

##### (1) 測定環境

- ・測定機器を安定に動作させるために空調が適切であること。
- ・空調機の風や、直射日光が測定機器に当たらないこと。
- ・室温 23～25℃程度、室温の変動は±2℃程度以内、湿度は 50～60%の範囲内に保たれて

いることが望ましい<sup>5</sup>。

- ・強い標準線源等を近くに保管しないこと。
- ・γ線照射装置等の近くでないこと。

##### (2) 放射能汚染に対する対策

- ・空調系統が RI を使用する分析室等と分離されていること。
- ・原子力施設の事故時に施設への影響が想定される場合には、外気の取り込みを遮断

できることが望ましい。

- ・清掃が容易であること（床材の種類、機器の配置等に配慮）。

##### (3) 管理上の注意点

- ・測定試料調製は別室で行うこと。
- ・汚染の恐れがある場合は、汚染を測定室内に持ち込ませないため、入退室に際してスリッパ等を履き換える運用にすること。
- ・室内の清浄性確保に効果があるため、入り口に粘着マットを設置することが望ましい。
- ・紙パック式掃除機等を使用して定期的に測定室内のゴミを採取、測定し、室内の汚染状況を確認することが望ましい。

##### (4) バックグラウンド低減のための対策

- ・遮蔽体内の空気中のラドンガス濃度を低く保つこと<sup>6</sup>（通常的环境レベルは数 Bq/m<sup>3</sup>程度以下）。
- ・測定室が地下にある等で、ラドン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。このときは十分な換気を行い、空気中のラドン濃度を低減させること<sup>7</sup>。

##### (5) 設備、構造

- ・遮蔽体の重量（1.5～3 トン）を上回る許容床荷重を有すること。
- ・耐震対策を行うこと。

---

<sup>5</sup> 測定室環境が変化すると、ピークがドリフトする恐れがある。

<sup>6</sup> 液体窒素冷却の場合、窒素の逃し口を遮蔽体内へ導入することでラドンを追い出せる。また、窒素ガスを充填したポリ袋を遮蔽体内に置き、遮蔽体内の空気を物理的に排除する方法も有効である。

<sup>7</sup> 測定室の外部の環境からラドン・トロンが流入する場合には、配管の隙間をうめる等の方法で空気の流入を防止するとともに、測定室のみ独立した空調とすることも有効である。

機器を床等に固定し、地震が発生した場合に揺れで他の機器等にぶつかり損傷を起こさないような対策を講じること。

- ・電源に雑音がないこと。

施設が工場地帯にあるとき等は周波数成分等の特徴を調べて、適合したノイズフィルタを利用することで雑音を低減できる。

- ・停電対策のため、非常用電源または UPS（無停電電源装置）を設置することが望ましい。
- ・掃除機等の動力電源は別に用意することが望ましい。
- ・検出器の冷却に液体窒素を用いる場合、酸素濃度計を設置すること。

## 第 5 章 検出器の校正

ゲルマニウム半導体検出器で測定したスペクトルを解析することにより、測定試料中に存在する $\gamma$ 線放出核種の種類および存在量に関する情報を得ることができる。解析は光電ピーク（全エネルギー吸収ピーク）を対象として行われる。正しい解析結果を得るためには、検出器および測定条件に対応した校正を実施しておく必要がある。

なお、本章の内容は測定したスペクトルを解析する上で必要となるソフトウェア上の校正であり、事前にハードウェア側でゲインの調整等（7.1.3 参照）を行う必要がある。

以下に示す校正は、必要な機能を有する専用の解析ソフトウェアを用いて行われるのが一般的である。ソフトウェアの利用に当たっては、ソフトウェアを利用して得られた結果の妥当性を確認できることが必要である。（妥当性確認については第 9 章を参照のこと）

以下に、ソフトウェアを利用して解析を行うために必要となる校正の一般的な手順について述べる。

### 5.1 エネルギー校正

エネルギー校正の目的は、スペクトル中におけるピーク中心（チャンネル）とそれに対応する $\gamma$ 線エネルギーとの関係を得ることである。これによってピーク中心に対応する $\gamma$ 線エネルギーが得られ、核種の同定が可能となる。エネルギー校正は、測定対象のエネルギー領域全般をカバーできるように複数の $\gamma$ 線源を測定したスペクトルを用いて行う必要がある。ピーク中心 $P$ と $\gamma$ 線エネルギーの関係性を最小二乗法で求めるが、使用する式は 1 次式または 2 次式で十分であり、高次の多項式を用いる必要はない。

$$E(\text{keV}) = a \cdot P^2 + b \cdot P + c \quad (2 \text{ 次式}) \quad (5.1)$$

### 5.2 半値幅校正

エネルギーとチャンネルの関係式を求める際に、ピークの半値幅とエネルギーの校正式も求めておく。ピークの半値幅 $W$  (keV) とエネルギー $E$  (keV) は、経験的にエネルギーの平方根を含む関係で知られている。

$$W = a \cdot E^{1/2} + b \cdot E + c \quad (5.2)$$

得られたピークの半値幅と $\gamma$ 線エネルギーの関係は、ピーク面積を計算する際にピーク領域を設定するための情報として利用される。

### 5.3 ピーク効率校正

$\gamma$ 線スペクトロメトリーの目的は測定試料中に含まれる放射能(Bq)を求めることである。放射能を求めるには、スペクトル上の全エネルギー吸収ピークの面積から、試料から放出された $\gamma$ 線の数を求める必要があり、そのために用いられるのがピーク効率 $\varepsilon$ である。

$$\varepsilon = \frac{N}{A \cdot I_{\gamma}} \quad (5.3)$$

ここで $N$ はピーク計数率(cps)、 $A$ は放射能(Bq)、 $I_{\gamma}$ は着目している $\gamma$ 線の放出率である。

ピーク効率は次の要因によって影響を受ける。

- ・  $\gamma$ 線エネルギー
- ・ 検出器の形状、内部構造
- ・ 検出器に対しての測定試料のジオメトリ
- ・ 測定試料容器の形状、材質
- ・ 測定試料の形状、材質

測定試料の $\gamma$ 線スペクトルから放射能を求めるには、ある特定の測定条件におけるピーク効率の値が必要となる。ピーク効率を決定するには、一般的には標準線源が用いられるが、 $\gamma$ 線エネルギー、測定試料の形状、材質、密度等の条件に依存して変化するため、適用できる範囲は限定される。ピーク効率は以下の方法により求める。

#### 5.3.1 ピーク効率の測定

##### (1) 標準線源の実測

測定対象核種を含み、測定対象の試料と同じ形状の標準線源を測定して求めることが理想的である。測定対象核種が複数の場合は、それら全ての核種の放出 $\gamma$ 線のエネルギー範囲を含む線源が必要となる。測定時の注意点については資料1.2「容積線源のピーク効率を求める例」を参照のこと。

測定のトレーサビリティを確保するには、校正用の標準線源として、国家標準または国際標準にトレーサブルな標準線源（日本国内の国家標準については、計量法に基づく校正事業者登録制度による校正事業者が発行した、核種の添加値および不確かさが記載された校正証明書が添付されたもの）を用いる必要がある（第9章参照）。

##### (2) シミュレーションまたは他の数値モデルによるピーク効率の計算

測定試料から放出された $\gamma$ 線が検出器に入射して全エネルギー吸収ピークが出現する確率を、モンテカルロシミュレーションまたは他の数値計算モデルを用いて計算することが可能である。このような数値モデルを用いるには個々の検出器の内部構造（検出器の結晶の形状、大きさ、不感層の厚さ、その他の構造物の形状等）に関する詳細情

報が必要であるが、計算過程がこれらのパラメータに対して非常に敏感であるため、パラメータの僅かな差で計算結果に大きな差異が生ずる場合がある。そのため、数値モデルによる計算結果のみからピーク効率を求めることは実質的に不可能であり、少なくとも 1 種類の、測定対象のエネルギー領域内の  $\gamma$  線を放出する標準線源を測定して結果を検証する必要がある。標準線源の測定結果から求めたピーク効率と数値モデルで計算したピーク効率の間に差異が見られた場合は、原因を検証し、数値モデルで使用されるパラメータを必要に応じて修正する。

### 5.3.2 ピーク効率の換算

標準線源の実測で得られたピーク効率は、線源と同じ形状、材質の試料を、線源を測定したときと同じジオメトリで測定した場合にしか適用できない。環境試料の  $\gamma$  線スペクトロメトリーでは容積試料の測定を行う場合が多いが、想定される全ての形状、材質に対応する標準線源を用意することは現実的ではない。そのため、実用上は、標準線源を入手可能な特定の限られた測定条件（形状、材質、 $\gamma$  線エネルギー）で得られたピーク効率を他の測定条件でのピーク効率に換算する方法が用いられる。その場合、基準となるピーク効率からの換算係数を求めることにより、標準線源と異なる形状、材質、核種に対しても放射性核種の定量が可能となる。ピーク効率の換算には以下の方法が用いられる。

#### (1) ピーク効率のエネルギー補間

測定対象のエネルギー範囲(50keV~2000keV 程度)をカバーするような複数の  $\gamma$  線放出核種を含む標準線源を用い<sup>1</sup>、得られたピーク効率を  $\gamma$  線エネルギーに対して関数化する（このときに得られるピーク効率と  $\gamma$  線エネルギーの関係をピーク効率曲線という）。これを用いることで、同一のジオメトリであれば、標準線源から放出される  $\gamma$  線のエネルギー以外の任意の  $\gamma$  線エネルギーに対してピーク効率を得ることができる。

#### (2) 容積線源のピーク効率内挿

同一形状の円筒形容器を用いて充填高が異なるように調製された複数の  $\gamma$  線放出核種を含む標準線源を測定し、得られた複数のピーク効率曲線を充填高に対して関数化することで、任意の充填高、任意の  $\gamma$  線エネルギーに対して内挿によりピーク効率を得ることができる。詳細は資料 1.2「容積線源のピーク効率を求める例」を参照のこと。

#### (3) ピーク効率変換 (Efficiency Transfer)

ある特定のジオメトリで測定されたピーク効率を、同一検出器の異なる材質、ジオメトリの試料測定におけるピーク効率に換算する手法である。（なお、前項(1)、(2)の

---

<sup>1</sup> 現実的には範囲を厳密に含むのは難しく、範囲の両端は  $^{241}\text{Am}$  (59.5keV) や  $^{88}\text{Y}$  (1836.1keV) となり、それを超えるエネルギーについては外挿する場合がほとんどである。

手法も基本的な概念は同じであり、広義では本手法に含まれる。) 本法ではピーク効率の換算には線源と検出器の立体角を考慮した数値モデルおよびモンテカルロシミュレーションが用いられる。数値モデルでの計算は、計算過程で検出器のゲルマニウム結晶形状、不感層の厚さ等の内部構造パラメータの影響を強く受けるという欠点があるが、本法では、標準線源と試料で同一の検出器の内部構造パラメータを用いて計算し比をとることで、検出器に依存するパラメータの大部分が相殺されるため、5.3.1(2)の手法と比較して計算結果への影響が少なく、計算時間も短時間で済むという利点がある。

本法を適用することで、例えば円筒形容器の標準線源のピーク効率から、直径、高さが異なる任意の材質の円筒形試料に対するピーク効率を得ることが可能となる。さらに、試料の材質を考慮した自己吸収補正、サム効果の評価を同時に行うことが可能である。なお、本法は似通ったジオメトリ間のピーク効率の変換(例:円筒形容器→円筒形容器(検出器に対する測定試料の位置関係等が類似))には有効であるが、大きく異なるジオメトリ間の変換(例:円筒形容器→マリネリ容器(検出器に対する測定試料の位置関係等が異なる))に用いることは実用的ではなく、適用できる範囲は限定される。

本法の基本的な原理と、円筒形容器の試料に対して適用した例を解説A「ピーク効率変換(Efficiency Transfer)」に示した。

上記の手法のうちのいずれかで求められたピーク効率の換算係数を用いて放射能値を計算するに当たっては、換算係数の妥当性を確認しておく必要がある。詳細は第9章「分析結果の質の保証」を参照のこと。

## 第6章 核データ

ゲルマニウム半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトロメトリーで使用する核データ（半減期、 $\gamma$ 線エネルギーおよび放出率）はデータベースや文献等の核データ集から入手することができる。近年インターネットで公開されているものもあり、2020年に確認できたもののいくつかを列記する。

－Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF)

<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>

－Decay Data Evaluation Project (DDEP)

<http://www.lnhb.fr/nuclear-data/>

－Evaluated Nuclear Data File (ENDF)

<https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>

－Joint Evaluated Fission and Fusion (JEFF) Library

<http://www.oecd-nea.org/dbdata/>

本マニュアルでは、「平常時モニタリングについて」（原子力災害対策指針補足参考資料）および平成4年度改訂の前マニュアル等を参考として、原子力発電所事故や核実験の影響により環境試料中に検出される可能性のある人工放射性核種および自然放射性核種を資料5に掲載した。

核データはそれぞれの核データ集によって値が異なることや、同一の核データ集であってもデータの更新によって値に違いが生じることがある。これは核データの評価方法や核データ集が参照するデータが異なるためである。その結果、使用する核データによって算出した結果が変わってしまうため、使用した核データを明らかにしておくことが必要である。

$\gamma$ 線スペクトロメトリーでは、解析で以下のことを行っている。

①標準線源の検定値(Bq)から核データを用いて $\gamma$ 線強度( $\gamma/s$ )を求め、ピーク計数率(cps)からピーク効率を求める。

②試料の測定結果のピーク計数率(cps)からピーク効率を用いて $\gamma$ 線強度( $\gamma/s$ )を求め、核データを用いて放射能(Bq)を求める。

核データは放射能から $\gamma$ 線強度（またはその逆）の換算に用いられる。したがって、①、②で用いる核データは同一の核データ集から引用されたものであることが望ましく、同一の核データ集から引用されたものであるなら、換算に差異は生じないため、特に最新のデータにこだわる必要はない。また、これらの観点から解析用の核データを更新する際にはピーク効率を再計算する必要があり注意が必要である。

## 第7章 測定・解析手順

本章は、ゲルマニウム半導体検出器を用いた測定・解析を行う上で、正しい結果を得るために注意すべき事項を含む測定試料の調製から結果の報告までの一連の作業手順について記載する。

なお、測定試料の調製方法については、「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」(No. 13)を、緊急時における測定・解析については、「緊急時におけるゲルマニウム半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトル解析法」(No. 29)を合わせて参照のこと。

### 7.1 測定機器の準備

測定機器の操作手順は機種に依存するので、具体的な手順は各機器の説明書を参照のこと。ここでは一般的な $\gamma$ 線測定機器で必要な事項について述べる。

#### 7.1.1 検出器の冷却

- ・ゲルマニウム半導体検出器は、使用時には液体窒素温度に冷却された状態にする必要がある。
- ・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。
- ・検出器が冷却されていない状態から測定可能な状態にする場合は、液体窒素を充填（または電気冷却装置等を起動）してから24時間程度経過後、検出器が十分に冷却された状態となってから使用すること。

#### 7.1.2 高電圧の印加

検出器が十分に冷却された状態になってから、機器仕様に指定された値の高電圧を印加する。高電圧のON/OFFはMCA制御ソフトウェア上で行えるようになっている場合が多い。

#### 7.1.3 ゲイン調整

ハードウェア上で、測定される $\gamma$ 線スペクトルの横軸（チャンネル）と $\gamma$ 線エネルギーの対応関係を調整するために行う。環境モニタリングにおいては、2000keV/4000チャンネル（0.5keV/チャンネル）とする設定が一般的に用いられる。

- ・標準線源（ $^{57}\text{Co}$  122.1keV、 $^{60}\text{Co}$  1332.5keV）の密封線源を用意する。  
（法規制を受けない $10^4$ から $10^5\text{Bq}$ 程度のものを用いる。）
- ・標準線源を検出器のエンドキャップからある程度離れた場所に設置し、MCAを測定状態にしてスペクトルを収集しながら以下の調整を行う。検出器と線源の距離はデッドタイムが5%程度以下となるように調節する。
- ・増幅器のゲインを調整し、 $^{60}\text{Co}$ (1332.5keV)のピークの中心位置を2665チャンネルに



合わせる。

- ・ADCのゼロレベルを調整し、 $^{57}\text{Co}$  (122.1keV)のピーク中心位置を244チャンネルに合わせる。
- ・増幅器ゲインとADCゼロレベルの調整は相互に影響を与えるため、上記の2本のピークを交互に調整し、所定のチャンネルに合わせる。
- ・所定のチャンネルに合わせたら、分解能の確認を行う(9.1参照)。

## 7.2 測定試料の調製

$\gamma$ 線スペクトロメトリーにおけるピーク効率は試料測定のジオメトリに依存するため、測定試料を調製する際には、試料の形状、容器への充填状態によりピーク効率が変化して定量結果に影響を及ぼす可能性があることに留意しなければならない。

### 7.2.1 測定容器

一般に使用されている測定容器には、円筒形のプラスチック容器、マリネリ容器(2L、1L、700mL)等がある。使用する容器は、測定に供する試料の量と、要求される検出下限値を考慮して決める。円筒形容器は、少量の試料を検出器に近い位置で測定する際に用いられる。検出器に近い位置で(高いピーク効率で)測定できる反面、供試量は少なくなる。一方、マリネリ容器は円筒形容器よりも大量の試料を収容できるが試料量当たりのピーク効率は円筒形容器よりも低くなる。詳細は解説Bを参照のこと。

### 7.2.2 試料の充填

ゲルマニウム半導体検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメトリーでは、測定対象核種の分離精製を必要としないため、環境試料について、試料を採取したまま、あるいは簡単な前処理(乾燥、灰化、沈澱)を行った上で測定に供することができる。ただし、測定試料の体積が大きくなるため、以下の事項に注意する必要がある。

- ・容器内で粗密がなく均一になっていること。
- ・容器内で崩れたりすることがなく、一定の形状を保っていること。

測定試料調製の具体的な手順については解説Bを参照のこと。

## 7.3 バックグラウンドの測定

$\gamma$ 線スペクトロメトリーでは、試料測定時に周辺環境や測定器自体からの放射線も同時に計測される。そのため、試料の測定前もしくは測定後に、検出器のバックグラウンド、すなわち試料のない状態での測定を行い、試料の測定結果からバックグラウンドの影響を差し引く必要がある。なお、厳密には、試料容器及び試料媒体の材質による遮蔽効果や材質に含まれる放射性核種からの放射線の寄与があるので、同一の形状および材質(元素組成および密度)を持つブランク試料の測定結果を補正に使用すべきであるが、全ての測定試料にブランク試料を用意することは現実的ではない。ただし、マリネリ容器試料のように試料自体が多量となる場合はこの遮蔽効果や放射線の寄与

が大きくなるため、目的核種の定量結果への影響が無視できなくなる場合がある。そのため、その寄与の度合いを把握し、必要に応じてブランク試料を測定することが望ましい。

バックグラウンド測定での注意点は以下のとおりである。

- ・少なくとも月 1 回測定すること
- ・汚染の可能性があった場合、適宜測定すること
- ・少なくとも試料の 2 倍程度の測定時間で測定すること

バックグラウンド補正の方法は資料 1.8 を参照のこと。

#### 7.4 試料の測定

測定試料を検出器のエンドキャップ上に置くことから始まり、測定終了後に測定試料を取り出すまでの一連の手順を以下に示す。なお、測定試料はポリエチレン袋で二重に袋掛けしておき、測定室に持ち込む前に外側の袋を新しいポリエチレン袋に取り替えることで、検出器への汚染のリスクを下げるができる。また、検出器のエンドキャップについてもポリエチレン袋で覆うことで、汚染した場合でも容易に除去できる場合がある。

##### 7.4.1 試料の測定手順

試料の測定手順と注意点を以下に示す。また、測定に関して記録すべき測定情報の例を表 7.1 に、手順フローを図 7.1 にそれぞれ示す。

###### ① 測定試料の準備

- ・測定試料が測定対象であることの識別確認を行う。
- ・測定試料容器と採取記録票や台帳等の記載を照合して確認する。
- ・測定試料の情報（試料名称、試料番号等）を記録する。

###### ② 測定試料の設置

測定試料を検出器のエンドキャップ上に置く<sup>1</sup>。

- ・治具等を用いて<sup>2</sup>、測定試料が規定のジオメトリ<sup>3</sup>となるように置く。
- ・マリネリ容器を使用する場合は、液体窒素重量モニタの重量の変化を確認する<sup>4</sup>。
- ・オートサンプルチェンジャを用いた測定で、外袋を用いない場合は、検出器が汚染しないように注意する。

<sup>1</sup> 特に n 型検出器の場合、ピーク効率校正も含め、検出器保護キャップを常時付けた状態で運用することも多い。その場合は保護キャップの上に置く。

<sup>2</sup> ジオメトリが再現できる専用の治具を使うのがよい。治具がない場合は、印をつける等、ジオメトリを担保できるような工夫をする。

<sup>3</sup> あらかじめピーク効率を求めたジオメトリ（5 章参照）。

<sup>4</sup> マリネリ容器にかぶせた袋内の空気が十分抜けていないと、閉じ込められた空気の圧力でクライオスタットに試料の重量がかかり、故障の原因となる。液体窒素重量モニタの数値が大きく増加した場合（目安として 0.3kg 程度）は、試料を検出器から外して袋をかけなおす等の対応をとる。

### ③ 測定開始時

測定開始前に以下の作業を行う。

- ・ 前回測定した $\gamma$ 線スペクトルを消去する。  
MCAのメモリに前回測定した $\gamma$ 線スペクトルが残っている場合は、保存済みであることを確認して消去する。
- ・ 必要に応じて測定時間（プリセットタイム）を設定する。  
測定時間は目的により異なるが、3時間～24時間を目安とする。

### ④ 測定開始後

- ・ 測定開始時刻や測定番号等の測定情報を記録する（表 7.1 を参照のこと）。
- ・ 測定時間（リアルタイムまたはライブタイム<sup>5</sup>）が増えていることを確認する。
- ・ デッドタイムを確認し、大きい場合（目安として10%程度）は必要に応じて試料量を減らす。
- ・ 着目ピーク（<sup>40</sup>K（1460.8keV）や<sup>137</sup>Cs（661.6keV）等）に $\pm 1$ keVの範囲以上のドリフト（ずれ）がないことを確認する。時間間隔を空けて確認<sup>6</sup>し、ピークのドリフトがあった場合は、空調設備等の確認を行い、ゲインの再調整等の必要な措置を行う。
- ・ 低エネルギー（数十 keV 以下）領域に高計数率の幅広いピークができていないことを確認する<sup>7</sup>。
- ・ 短時間のうちに確認可能なピークが形成された場合、可能な限りこのピークについて核種の同定を行う。人工放射性核種であった場合、試料調製時の相互汚染の可能性を周知するために前処理担当者へ連絡する。

### ⑤ 測定終了時

- ・ プリセットタイムを設定していなかった場合、測定停止前に十分な測定時間やピーク計数が得られていることを確認する。
- ・ ライブタイムと測定終了時刻を記録する。
- ・ 測定した $\gamma$ 線スペクトルをPC等に保存する。保存する際、測定番号の付け間違いに注意する。再度、 $\gamma$ 線スペクトルを読み込む等すると、正しく保存されたことを確認できる。

### ⑥ 測定試料の取り出し

- ・ 測定が終了していることを確認する。
- ・ 遮蔽体の扉を開けて、測定試料について検出器に設置した測定直前の状態が維持されていることを確認する。
- ・ 取り出した測定試料を記録と照合し、試料の取り違いがないことを確認する。

---

<sup>5</sup> デッドタイムが大きい場合は、ライブタイムが増えるのに時間がかかる。

<sup>6</sup> プリセットタイムに応じて、30分～数時間に1回程度確認する。

<sup>7</sup> 電氣的な雑音（ノイズ）による影響が考えられ、配線の見直しやLLD（Lower Level Discriminator）の変更により改善する場合もある。改善しない場合は、検出器メーカーに対応を求める必要がある。

⑦ 測定試料の保管

- ・測定が終了した測定試料については、冷蔵庫等の測定済み試料の保管場所に速やかに移し、まだ測定していない測定試料と混同しないよう注意する。
- ・可能であれば、放射能濃度が高い測定済み試料は低い測定済み試料とは別々に保管する。
- ・放射能濃度の高い試料を測定した場合、バックグラウンドを測定し、汚染のチェックをするとよい。

表 7.1 記録すべき測定情報の例

項目	記録する内容
①測定番号	測定器に依存する番号（連番等）
②測定開始日時	測定を開始した日時（日時分までを記録）
③測定終了日時	測定が終了した日時（日時分までを記録） プリセットタイムをセットして、測定を自動終了した場合は不要
④測定時間	測定を行った時間 プリセットタイムまたは測定終了後のライブタイムを記録
⑤測定担当者	測定を行った担当者名
⑥測定試料	測定をした試料名および試料番号 必要に応じて、測定容器、供試量、充填高、密度、材質も記録
⑦データ保存場所	ファイル名
⑧備考	測定するに当たって気づいた点を記録

試料の測定手順のフロー図を図 7.1 に、測定時における測定担当者の確認事項の例を表 7.2 に示す。

## 測定

### ←①測定試料の準備

- ・測定試料が測定対象であることの識別確認を行う。
- ・測定試料容器と採取記録票や台帳等の記載を照合して確認する。
- ・測定試料の情報（試料名称、試料番号等）を記録する。

### ←②測定試料の設置

- ・測定試料が規定のジオメトリに置かれていることを確認する。
- ・マリネリ容器を使用する場合、液体窒素重量モニタの重量の変化を確認する。
- ・検出器が汚染しないように注意する。

### ←③測定開始時

- ・前回測定した $\gamma$ 線スペクトルが保存済みであることを確認する。
- ・前回測定した $\gamma$ 線スペクトルを消去する。
- ・測定時間（プリセットタイム）を設定する（3時間～24時間が目安）。

### ←④測定開始後

- ・測定情報を記録する（表 7.1 参照）。
- ・MCA（またはPC）の測定開始時刻と実際の時刻を確認する。
- ・測定時間（ライブタイム）が増えていることを確認する。
- ・デッドタイムが大きくない（目安：10%未満）ことを確認する。
- ・着目ピーク（ $^{40}\text{K}$ （1460.8keV）や $^{137}\text{Cs}$ （661.6keV）等）のドリフトが起きていないことを確認する。
- ・低エネルギー領域に幅広いピークがないことを確認する。
- ・短時間でピークが確認される場合は、そのピークが人工放射性核種のピークでないか確認する。

### ←⑤測定終了時

- ・測定停止前に、十分な測定時間やピーク計数等が得られていることを確認する（プリセットタイムをセットしなかった場合）。
- ・必要に応じて、ライブタイムと測定終了時刻を記録する。
- ・測定した $\gamma$ 線スペクトルを保存し、保存先のファイル名を記録する。

### ←⑥測定試料の取り出し

- ・測定終了していることを確認する。
- ・測定開始時のジオメトリと同一であることを確認する。
- ・取り出した測定試料と記録の照合をする。

### ←⑦測定試料の保管

- ・所定の場所に保管する。
- ・必要に応じて、バックグラウンド測定にて検出器の汚染チェックを行う。

## 解析

図 7.1 試料の測定手順フロー図

表 7.2 測定時における測定担当者の確認事項の例

No.	確認事項	チェック欄
<b>① 測定試料の準備</b>		
1	測定試料が測定対象であることの識別確認を行う。	
2	測定試料容器と採取記録票や台帳等の記載を照合して確認する。	
3	測定試料の情報（試料名称、試料番号等）を記録する。	
<b>② 測定試料の設置</b>		
4	規定のジオメトリであることを確認する。	
5	マリネリ容器を使用する場合、液体窒素重量モニタの重量が増えていないことを確認する。	
6	検出器が汚染しないように注意する。	
<b>③ 測定開始時</b>		
7	前回測定した $\gamma$ 線スペクトルが保存済みであることを確認する。	
8	前回測定した $\gamma$ 線スペクトルを消去する。	
9	必要に応じて測定時間（プリセットタイム）を設定する。 （目安 3 時間～24 時間）	
<b>④ 測定開始後</b>		
10	測定情報（測定番号、測定開始日時他）を記録する。	
11	測定時間（ライブタイム）が増加していることを確認する。	
12	デッドタイムが大きくない（目安：10%未満）ことを確認する。	
13	着目ピーク（ $^{40}\text{K}$ や $^{137}\text{Cs}$ 等）のドリフトが起きていないことを確認する。	
14	低エネルギー領域に幅広いピークがないことを確認する。	
15	短時間でピークが確認される場合は、そのピークが人工放射性核種のピークでないことを確認する。	
<b>⑤ 測定終了時</b>		
16	測定停止前に、十分な測定時間やピーク計数等が得られていることを確認する（プリセットタイムを設定しない場合）。	
17	ライブタイムと測定終了時刻を記録する（必要に応じて）。	
18	測定した $\gamma$ 線スペクトルを保存し、ファイル名を記録する。	
<b>⑥ 測定試料の取り出し</b>		
19	測定が止まっていることを確認する。	
20	測定開始時のジオメトリと同一であることを確認する。	
21	取り出した測定試料と記録が一致することを確認する。	
<b>⑦ 測定試料の保管</b>		
22	所定の場所に保管する。	
23	必要に応じて、検出器の汚染チェックを行う。	

#### 7.4.2 デッドタイムが増加した場合の対応

鉍石試料のように高い放射エネルギーを有する試料を測定する場合、検出器へ入射する $\gamma$ 線の数が膨大となるため、電子機器の信号処理は過負荷状態となる。結果としてデッドタイムが増加する。

デッドタイムが増加した試料の測定では、以下に示す問題点がある。

- ・異なる核種等からの $\gamma$ 線によるランダムサムによるピークの発生。
- ・測定に時間を要する（ライブタイムが進まない）。
- ・パルスパイルアップによるピーク形状の劣化。

ランダムサムやパルスパイルアップでは、 $\gamma$ 線ピークの正味計数率の低下を招き、結果として過小評価を引き起こすことがある。

試料の測定を開始して、測定のデッドタイムが大きい場合は、試料量を減らして、測定試料から放出される $\gamma$ 線の数を減らす必要がある<sup>8</sup>。

#### 7.5 スペクトル解析

スペクトル解析では、 $\gamma$ 線スペクトルの中の全エネルギー吸収ピークを対象とし、ピーク的位置から $\gamma$ 線のエネルギーを特定して核種の同定を行い、ピーク面積から核種の定量を行う。

核種の同定は、検出されたピークのエネルギーと解析用核データライブラリを照合して行うが、適切な核データが含まれていない場合、核種の誤同定が起こり得る。なお、緊急時のスペクトルにおいては、放出率の小さい $\gamma$ 線ピークも観測される可能性があることから、定量用の放出率の大きい $\gamma$ 線ピークだけではなく放出率の小さい $\gamma$ 線ピークも確認しておくと同定の精度を高めることができる。また、ベースラインの統計的変動に起因して、ピーク形状を成していないにもかかわらず、解析上検出と判定される場合もあるため、実際にスペクトルを確認することが必要である。

総じて、使用するソフトウェアで自動解析された出力帳票をそのまま報告するのではなく、 $\gamma$ 線スペクトルを目視で確認する等、測定担当者による確認が $\gamma$ 線スペクトル解析では重要となる。

##### 7.5.1 スペクトル解析の手順

スペクトル解析の手順を以下に示す。

- ① 測定試料の情報を登録する。
  - ・試料名、試料の種類、採取場所、試料採取開始・終了日時、測定容器、供試量（単位含む）、充填高、密度、測定試料材質、測定担当者名等。
- ② ソフトウェアが解析で使用するデータファイルを登録する。
  - ・エネルギー校正（半値幅校正を含む）ファイル、ピーク効率校正ファイルおよび

<sup>8</sup> 測定試料を検出器から遠ざけることにより、検出器へ入射する $\gamma$ 線の数を減らすこともできるが、事前にそのジオメトリでのピーク効率が得られるようにピーク効率校正を行っておく必要がある。

び各種補正（自己吸収、サム効果補正）に必要なファイル。

③ 解析条件を設定する。

- ・解析用核データライブラリを選択する。
- ・ピークサーチ感度を選択する（通常は3）。

資料 1.1 「ピーク解析」参照のこと。

- ・減衰補正の条件を選択する。

一般的には、採取終了日時を基準とするが、放射能の減衰を考慮すべきほど採取期間が長い場合には、採取期間の中間<sup>9</sup>を基準とすることもある。また、核種によっては減衰補正しない等の場合もあるため、いずれかを選択する。

- ・ピーク面積の計算方法（コベル法または関数適合）を選択する。

資料 1.1 「ピーク解析」参照のこと。

- ・バックグラウンド補正ファイルを登録する。

差引き用のバックグラウンドスペクトルを選択する。

④ 解析の実行

⑤ 解析結果の帳票出力

- ・ピークサーチ結果、ピーク定量結果、 $\gamma$ 線スペクトル図等を出力する。

⑥ 解析結果の確認

- ・ $\gamma$ 線スペクトル上の着目ピーク（ $^{40}\text{K}$ （1460.8keV）や $^{137}\text{Cs}$ （661.6keV）等）に $\pm 1\text{keV}$ の範囲以上のドリフトがないことを確認する。

- ・検出された核種を確認する。

$\gamma$ 線スペクトルを拡大して $\gamma$ 線ピークの形状を確認する。

（ピーク領域のベースライン計数の統計変動による誤検出でないかを確認）

（ピークがいびつな形状でないか確認）

- ・複数のエネルギーの $\gamma$ 線を放出する核種の場合は、他の $\gamma$ 線ピークも確認する。また、逐次的に壊変する核種の場合は、親核種および子孫核種の $\gamma$ 線ピークも確認する。

- ・不明ピークについては、エネルギー順の核データ（資料5）を参照して、同定を行う。必要に応じて、同定した核種の核データを解析用核データに登録して、再解析を行う。

測定した $\gamma$ 線スペクトルの解析手順のフロー図を図 7.2 に、解析時における測定担当者の確認事項の例を

表 7.3 に示す。

<sup>9</sup> 採取期間の中間を選べない場合は、中間となる日時を別途求めておき、採取開始日時にその日時を登録して、登録した採取開始日時までの減衰補正を選べばよい。



## 解 析

### ←①測定試料情報の登録

- ・試料名、試料の種類、採取場所、試料採取開始・終了日時、測定容器、供試量（単位含む）、充填高、密度、測定試料材質、測定担当者名等を登録する。

### ←②各種校正ファイルの登録

- ・エネルギー校正（半値幅校正を含む）ファイルを登録する。
- ・ピーク効率校正ファイルを登録する。
- ・サム効果補正、自己吸収補正に必要なファイルがある場合は登録する。

### ←③解析条件の設定

- ・解析用核データライブラリを選択する。
- ・ピークサーチ感度（通常は3）を選択する。
- ・減衰補正の条件を選択する。
- ・ピーク面積の計算方法を選択する。  
コベル法または関数適合から選択する。
- ・バックグラウンド補正ファイルを登録する。  
差引き用のバックグラウンドスペクトルを選択する。

### ←④解析の実行

### ←⑤解析結果の出力

- ・ピークサーチ結果、ピーク定量結果、 $\gamma$ 線スペクトル図等を出力する。

### ←⑥解析結果の確認

- ・ $\gamma$ 線スペクトル上の着目ピーク（ $^{40}\text{K}$ や $^{137}\text{Cs}$ 等）のドリフトがないことを確認する。
- ・検出された核種を確認する。  
 $\gamma$ 線スペクトルを拡大して $\gamma$ 線ピークの形状を確認する。  
（ベースライン計数の統計変動による誤検出でないかを確認）  
（いびつな形状でないか確認）
- ・複数のエネルギーの $\gamma$ 線を放出する核種の場合は、他の $\gamma$ 線ピークも確認する。
- ・逐次的に壊変する核種の場合は、親核種および子孫核種の $\gamma$ 線ピークも確認する。
- ・不明ピークについては、エネルギー順の核データ（資料5）を参照して、同定を行う。必要に応じて、同定した核種の核データを解析用核データライブラリに登録して、再解析を行う。

## 評 価

図 7.2 測定した $\gamma$ 線スペクトルの解析手順フロー図

表 7.3 解析時における測定担当者の確認事項の例

No.	確認事項	チェック欄
<b>① 測定試料情報の登録</b>		
1	試料名、試料の種類、採取場所、試料採取開始・終了日時、測定容器、供試量（単位含む）、充填高、密度、測定試料材質、測定担当者名等を正しく登録している。	
<b>② 各種校正ファイルの登録</b>		
2	エネルギー校正（半値幅校正を含む）ファイルを正しく登録している。	
3	ピーク効率校正ファイルを正しく登録している。	
4	サム効果補正、自己吸収補正に必要なファイルを正しく登録している。	
<b>③ 解析条件の設定</b>		
5	解析用核データライブラリを正しく選択している。	
6	ピークサーチ感度を正しく選択している。	
7	適切な減衰補正条件を選択している。	
8	適切なピーク面積の計算方法を選択している。	
9	バックグラウンド補正ファイルを正しく登録している。	
<b>④ 解析の実行</b>		
<b>⑤ 解析結果の出力</b>		
10	ピークサーチ、ピーク定量結果、 $\gamma$ 線スペクトル図を出力している。	
<b>⑥ 解析結果の確認</b>		
11	解析結果帳票の記載事項に間違いがないか確認している。	
12	<u>検出された人工放射性核種の<math>\gamma</math>線ピークについて</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>・<math>\gamma</math>線スペクトルを拡大して、ピーク形状に異常がないか確認している。</li> <li>・シングルエスケープ、ダブルエスケープ、サムピーク、後方散乱ピークの可能性を検討している。</li> <li>・複数の<math>\gamma</math>線を放出する核種の場合は、放出率の小さい<math>\gamma</math>線ピークも確認している。</li> <li>・逐次的に壊変する核種の親核種および子孫核種の<math>\gamma</math>線ピークを確認している。</li> </ul>	
13	<u>不明な<math>\gamma</math>線ピークについて</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>・<math>\gamma</math>線スペクトルを拡大して、ベースライン計数の統計変動に伴う検出でないか確認している。</li> <li>・シングルエスケープ、ダブルエスケープ、サムピーク、後方散乱ピークの可能性を検討している。</li> <li>・エネルギー順の核データを参照して、不明ピークを同定している。</li> </ul>	

### 7.5.2 不明ピークの取扱い

$\gamma$ 線スペクトル上で検出されたピークは、解析用核データライブラリと照合を行い、同定幅の範囲で一致する $\gamma$ 線エネルギーがない場合は、不明ピーク扱いとなる。不明ピークの照合は多大な作業量となることが考えられるが、エネルギー順に記載のある核データ（資料5参照）を用いて、同定作業を行うことができる<sup>10</sup>。

同定作業を進める前に、以下に示す可能性を検討する必要がある。

- ・ベースラインの統計変動に伴う、解析上検出されたピーク
- ・シングルエスケープ、ダブルエスケープ
- ・サムピーク
- ・後方散乱ピーク

緊急時に想定される高計数率のスペクトルではランダムサムによるピークが検出される場合がある。詳細については「緊急時におけるゲルマニウム半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトル解析法」（No.29）を参照のこと。

### 7.5.3 放射性核種の判定について

放射性核種の判定は、スペクトル上に検出されたピークの $\gamma$ 線エネルギーを解析用核データライブラリと照合することで行われる。そのため、同定されるべき核種の $\gamma$ 線エネルギーが解析用核データライブラリに登録されていない場合、または、登録されている他の核種の $\gamma$ 線エネルギーが同定幅の範囲で一致した場合には、核種を正しく判定できない場合が起り得る。また、解析用核データライブラリに登録されていないシングルエスケープ、ダブルエスケープ、サムピーク、後方散乱ピークについても同様に正しく判定されない可能性がある。

また、水分を多く含んだ試料の場合には、宇宙線により二次的に生成される中性子が水により減速されて、検出器を構成する材料と相互作用しやすくなる。例えば、ゲルマニウム半導体検出器の検出器部分に用いられるゲルマニウムの原子核が中性子と相互作用して生成する<sup>75m</sup>Geから放出される $\gamma$ 線(139.7keV)を<sup>99m</sup>Tcからの $\gamma$ 線(140.5keV)と誤同定することが起り得るので注意が必要である。

誤同定の有無の確認方法としては、以下の方法がある。

- ・複数の $\gamma$ 線を放出する核種における、複数ピークの有無および各ピーク面積の整合性確認
- ・逐次壊変時の親核種・子孫核種における、ピークの有無および解析結果の整合性確認
- ・他核種のシングルエスケープ、ダブルエスケープ、サムピーク、後方散乱ピークの確認
- ・採取日時から測定開始までの時間と比べ、核種の半減期が短すぎないかの確認

<sup>10</sup> 同定結果の妥当性を評価するために再測定をする場合、再測定結果が同定核種の半減期に従って減少しているか確認することは有効である。

- ・再測定結果が核種の半減期に従って減少しているかの確認

#### 7.5.4 同一核種の複数ピークの取扱い

放射性核種の中には複数の $\gamma$ 線を放出する核種があり、同定の精度を高める上で、複数の $\gamma$ 線の検出を確認することは有効であるが、放射能の定量や結果を報告するために用いる $\gamma$ 線ピークの取扱いについてはあらかじめ決めておく必要がある。

一般的には、主ピーク（放出率の最も大きい第1ピーク）に着目する方法と複数ピークから得られる結果の荷重平均を用いる方法がある。それぞれの方法に対する注意事項を以下に記載するが、本測定法では、主ピークに着目する方法を基本とする。

##### (1) 主ピークに着目する方法

放出率の最も大きい第1ピークに着目する簡易的な方法である<sup>11</sup>。

定量結果の妥当性を確認する上で、他のエネルギーの $\gamma$ 線ピークによる定量結果についても、無視するのではなく、確認する必要がある。これらの定量結果が大きく異なる場合、妨害ピークの寄与を考慮する必要がある（<sup>110m</sup>Ag（657.8keV）に対する<sup>137</sup>Cs（661.7keV）等）。妨害ピークの寄与が認められる場合は、次に放出率が大きい $\gamma$ 線ピークを定量結果として採用する判断が必要である。また、第1ピークに対し、他の核種の $\gamma$ 線ピークによる妨害が予想される場合には、あらかじめ解析用核データライブラリ上で第2ピークを定量ピークとする設定をした方がよい。

##### (2) 荷重平均を用いる方法

複数の $\gamma$ 線ピークの定量結果については、不確かさの2乗の逆数で重みをつけて荷重平均を算出する。平常時の測定においては、放出率の小さい $\gamma$ 線によるピークを用いた定量結果は相対的に不確かさが大きいため、荷重平均の計算に使用してもあまり意味がない。そのため、あらかじめ放出率やピーク効率を考慮して、荷重平均に使用する $\gamma$ 線エネルギーを決めておいた方がよい。また、荷重平均に使用する $\gamma$ 線ピークの定量結果それぞれについて、妨害ピークの寄与により、大きくかけ離れていないことを確認する。

なお、荷重平均を行うと必ずその不確かさは小さくなり、各々の $\gamma$ 線ピークが不検出であっても、荷重平均の結果は $3u$ （ $u$ ：不確かさ）以上になり、解析上検出と判定される場合があるので注意する。

複数の放射能値 $A_i \pm u_i$ の荷重平均 $A \pm u$ は以下の式にて求める。

$$A = \frac{\sum_i \frac{A_i}{u_i^2}}{\sum_i \frac{1}{u_i^2}} \quad (7.2)$$

$$\frac{1}{u^2} = \sum_i \frac{1}{u_i^2} \quad (7.3)$$

<sup>11</sup> ピーク効率の違いを考慮した場合、放出率が大きい光子による光電ピークよりも放出率が小さいピークの方がピーク面積が大きくなる可能性がある。

## 7.6 解析結果の妥当性の確認

解析結果を評価する際には、測定および解析が正しく行われていることが前提となる。校正用線源と異なるジオメトリでの測定や解析における各種補正（自己吸収補正、サム効果補正、減衰補正）の設定が不適切な場合等には、解析結果は大きく変わることがある。例として、自己吸収補正では、材質、充填高および密度の設定、サム効果補正では補正の有無等がある。減衰補正については、特に過渡平衡を形成する子孫核種の減衰補正結果に問題が起きていないことを確認する必要がある。

測定および解析が正しく行われたことが担保された解析結果であっても、得られた人工放射性核種の測定結果のみでデータが妥当であるか判断するのは難しいといえる。原子炉施設等の事故の種類、放出源の核種組成の情報、放出源からの距離、気象条件、経過時間、半減期、物理的・化学的挙動（揮発性、不揮発性）等を考慮して、測定結果が妥当であるか評価する必要がある。検出された人工放射性核種については、その他の放出源（例えば、過去の大気圏内核爆発実験や医療用放射性物質等）の可能性についても考慮する必要がある。

緊急時等で短半減期核種が検出された場合、短半減期核種の減衰後はベースライン計数が減少し、隠れていた他の人工放射性核種による $\gamma$ 線ピークが確認できる場合がある。

また、同種または同様の試料の測定結果のデータベースを利用して評価することも有効である。この場合、人工放射性核種ではなく、自然放射性核種の放射能濃度に着目することとなる。同種または同様の試料中の自然放射性核種濃度はほぼ同程度であることが期待できる。それぞれの結果を比較して、著しく差がないことを確認することにより、データの妥当性を判断することが可能な場合もある。

## 7.7 解析結果の報告

妥当性を確認した解析結果は、所定の報告様式を用いて不確かさとともに報告することが望ましい。報告様式の例を表 7.4.1 および表 7.4.2 に示す。報告様式には、検出された放射性核種の放射能濃度だけでなく、試料情報、測定情報、解析条件等を記載する。なお、記載事項を転記する場合には、転記元と照合して間違いがないことを確認する。また、不確かさの評価については解説 C「 $\gamma$ 線スペクトロメトリーにおける不確かさの評価」を参照のこと。

第三者が測定結果を評価する際に、報告値だけでは判断できないことも十分に考えられるので、必要に応じて、出力された解析帳票や $\gamma$ 線スペクトル図も併せて報告する。 $\gamma$ 線スペクトル上の検出ピークに対して、7.5.1 項⑥の解析結果の確認から 7.7 項の解析結果の報告までのフローチャート例を図 7.3.1 に示す。

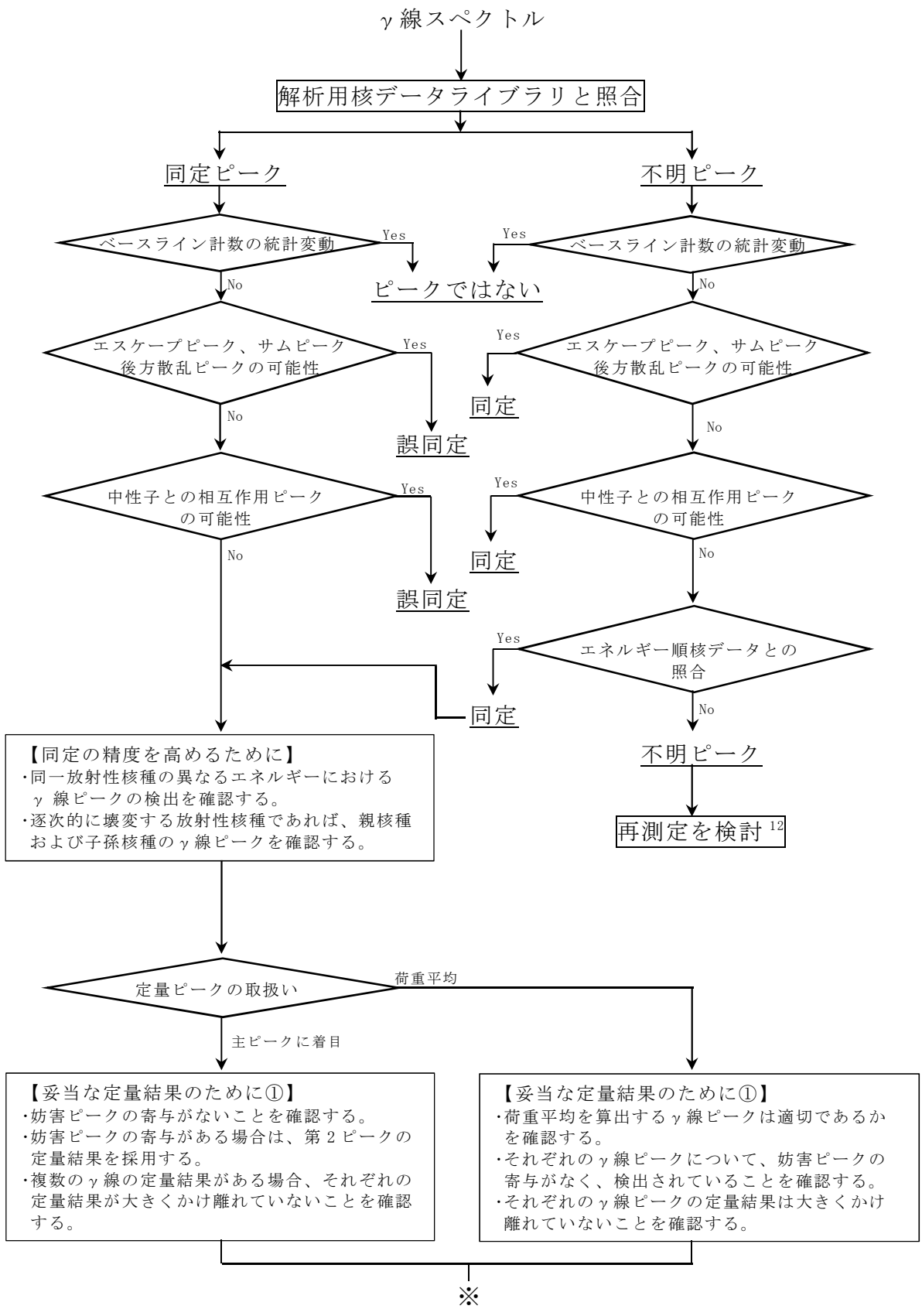


図 7.3.1 解析結果の報告までのフローチャート例

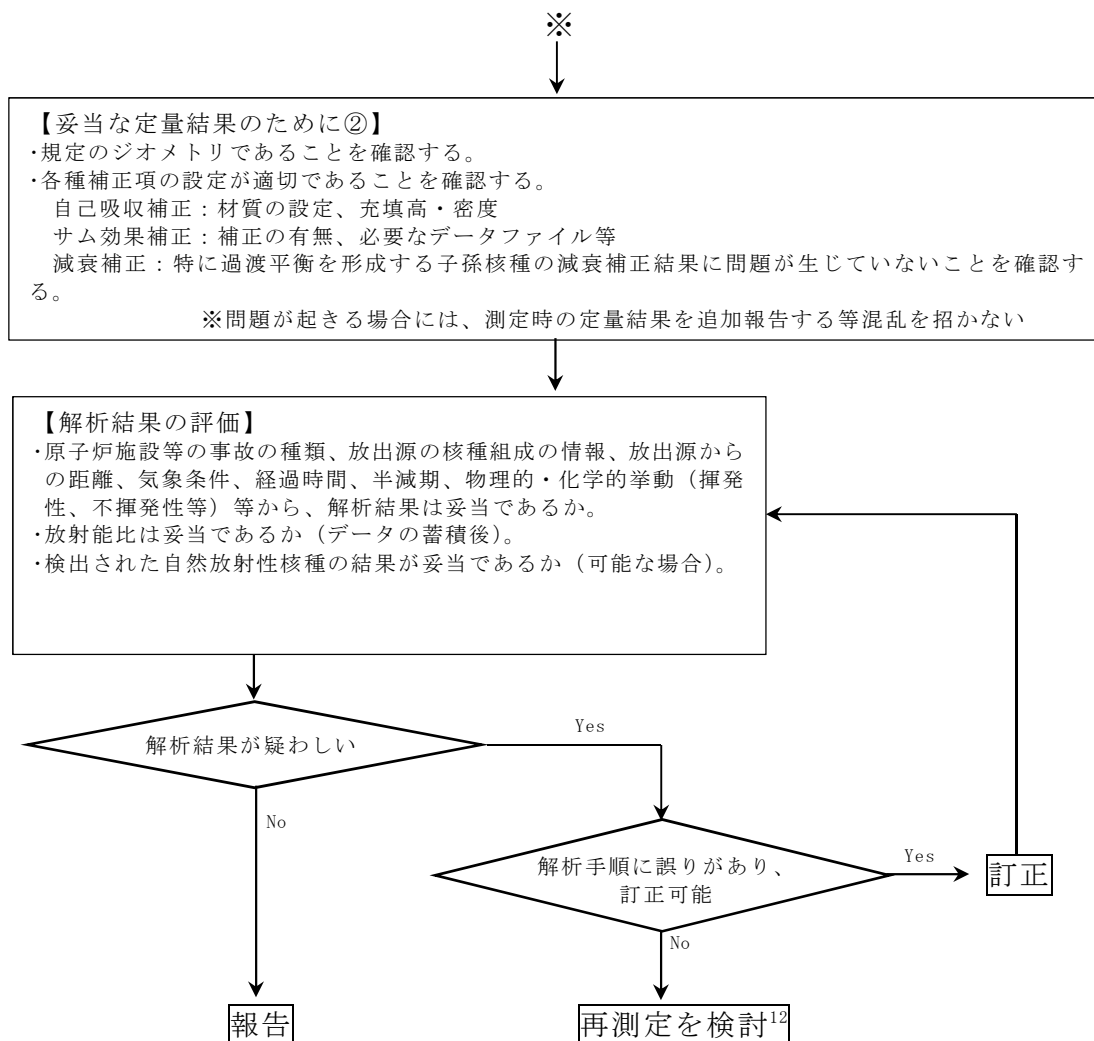


図 7.3.1 解析結果の報告までのフローチャート例（続き）

<sup>12</sup> 同定結果の妥当性を評価するために再測定をする場合、再測定結果が同定核種の半減期に従って減少しているか確認することは有効である。

表 7.4.1 報告様式の例 1 (横版)

ゲルマニウム半導体検出器による核種測定結果

1. 実施機関	
分析機関	
主任担当者	
測定担当者	

2. 測定試料		
試料名		
採取場所		
採取年月日	/ / : ~ / / :	
測定容器	供試量 <sup>※1</sup>	
充填高	密度	

※1: 単位 (g-FW (生重量), g-DW (乾燥重量), kg-FW, kg-DW, mL, L, m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup>等) を併記する。

3. 測定器	
検出器型式	
遮蔽体厚	
相対効率	
分解能 (1.33MeV)	

4. 測定および解析			
①測定			
測定番号		測定開始日時	/ / :
測定時間			
②解析			
自己吸収補正	あり, なし		
減衰補正	減衰補正日	/ / :	
	逐次的壊変を考慮しなくてもよい核種の減衰補正	あり, なし	
	逐次的に壊変する子孫核種の減衰補正 <sup>※2</sup>	なし, 流れ込み考慮, 親核種の半減期	
サム効果補正	あり, なし	サム効果補正核種	

※2: 逐次的に壊変する子孫核種の減衰補正方法を記録する (なし…減衰補正なし、流れ込み考慮…親核種からの流れ込みを考慮した減衰補正、親核種の半減期…放出時点から過渡平衡状態と仮定して、子孫核種の半減期として、親核種の半減期を用いた減衰補正)。

5. 測定結果			
核種	放射能濃度±不確かさ ( ) <sup>※3</sup>	核種	放射能濃度±不確かさ ( ) <sup>※3</sup>
	±		±
	±		±
	±		±
	±		±
	±		±
	±		±

※3: 放射能濃度の単位も併せて記載する。

(備考)
------



表 7.4.1 報告様式の例 1(縦版)

ゲルマニウム半導体検出器による核種測定結果

1. 実施機関	
分析機関	
主任担当者	
測定担当者	

2. 測定試料		
試料名		
採取場所		
採取年月日	/ / : ~ / / :	
測定容器	供試量 <sup>※1</sup>	
充填高	密度	

※1: 単位 (g-FW (生重量), g-DW (乾燥重量), kg-FW, kg-DW, mL, L, m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup> 等) を併記する。

3. 測定器	
検出器型式	
遮蔽体厚	
相対効率	
分解能 (1.33MeV)	

4. 測定および解析		
①測定		
測定番号		測定開始日時 / / :
測定時間		
②解析		
自己吸収補正	あり, なし	
減衰補正	減衰補正日	/ / :
	逐次的壊変を考慮しなくてもよい核種の減衰補正	あり, なし
	逐次的に壊変する子孫核種の減衰補正 <sup>※2</sup>	なし, 流れ込み考慮, 親核種の半減期
サム効果補正	あり, なし	サム効果補正核種

※2: 逐次的に壊変する子孫核種の減衰補正方法を記録する (なし…減衰補正なし、流れ込み考慮…親核種からの流れ込みを考慮した減衰補正、親核種の半減期…放出時点から過渡平衡状態と仮定して、子孫核種の半減期として、親核種の半減期を用いた減衰補正)。

5. 測定結果			
核種	放射能濃度±不確かさ( ) <sup>※3</sup>	核種	放射能濃度±不確かさ( ) <sup>※3</sup>
	±		±
	±		±
	±		±
	±		±
	±		±
	±		±

※3: 放射能濃度の単位も併せて記載する。

(備考)
------

表 7.4.2 報告様式の例 2

ゲルマニウム半導体検出器による核種測定結果

1. 実施機関

分析機関	
主任担当者	
測定担当者	

2. 測定試料

試料名	
試料の種類	
採取場所	
採取年月日	/ / : ~ / / :
測定容器	U-8 容器 , マリネリ容器(2L、1L、0.7L) , その他
供試量 <sup>*1</sup>	(g-FW , g-DW , kg-FW , kg-DW , mL , L , m <sup>2</sup> , m <sup>3</sup> )
充填高	(mm , cm)
密度	(g/cm <sup>3</sup> )
(備考)	

\*1 : FW (生重量)、DW (乾燥重量) の区別をする。

3. 測定および解析

①測定			
測定番号		測定時間	(秒)
測定開始日時	/ / :		
②解析			
自己吸収補正	あり , なし		
減衰補正	減衰補正日	/ / :	
	逐次的壊変を考慮しなくてもよい核種の減衰補正	あり , なし	
	逐次的に壊変する子孫核種の減衰補正 <sup>*2</sup>	なし , 流れ込み考慮 , 親核種の半減期	
サム効果補正	あり , なし		
サム効果補正核種			
(備考)			

\*2 : 逐次的に壊変する子孫核種の減衰補正方法を記録する (なし…減衰補正なし、流れ込み考慮…親核種からの流れ込みを考慮した減衰補正、親核種の半減期…放出時点から過渡平衡状態と仮定して、子孫核種の半減期として、親核種の半減期を用いた減衰補正)。

表 7.4.2 報告様式の例 2 (続き)

4. 測定器情報

検出器型式	
遮蔽体厚	(mm)
相対効率	(%)
分解能 (1.33MeV)	(keV)
(備考)	

5. 測定結果

核種	放射能濃度±不確かさ ( ) ※3	備考
	±	
	±	
	±	
	±	
	±	
	±	
	±	
	±	
	±	

※3：放射能濃度の単位も併せて記載する。

6. 備考

--

## 第 8 章 検出下限値

放射能測定における検出下限値は、検出器のバックグラウンド、供試量、測定時間等によって変化する。さらに、 $\gamma$ 線スペクトロメトリーにおける検出下限値は、スペクトル解析における種々の要因を考慮して計算され、検出器の性能を含んだものとなる。測定ごと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に係る不確かさの 3 倍を超えているか否か、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、測定しても結果が得られないことになる。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。また、検出下限値より多い放射能があ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、ピークとして検出される可能性がある。また、放射能と検出下限値が一致した場合は、50%の確率で検出することができる（あるものをないとする確率が 50%）。

検出下限値の算出には、前マニュアル（平成 4 年度改訂）に記載された Cooper の方法や、国際規格である ISO11929 による評価方法等がある。評価方法の詳細は解説 D を参照のこと。

なお、検出下限値の評価方法は複数あるが、どれを選択するかは測定を実施した調査の要求仕様等に則って選択すること。また、検出下限値を報告する際には、採用した評価方法（信頼度の記述を含む）を明記しておく必要がある。

## 第9章 分析結果の質の保証

ゲルマニウム半導体検出器を用いて適切な分析結果を得るために必要な要件について記述する。

### 9.1 機器の健全性確認

平常時モニタリングにおける品質保証の目的は、得られたデータの品質が客観的に見て、適切なレベルに維持されていることを保証することである。これによつてはじめて各機関の間のデータあるいは一機関の異なった時期におけるデータの統一的な解釈が可能になる。放射性物質の濃度の測定データについては、ISO/IEC17025 の考え方に沿つて品質を保証することが望ましい。放射性物質の濃度の定量に関しては、試料の採取からデータの評価に至る一連の行為の全ての段階において品質保証システムが確立されている必要がある。すなわち、分析結果の信頼性（質）を保証するには、品質保証システムのもとに、適切な精度管理が行われ、分析結果には不確かさが付与されることが要求されている。

適切な分析結果を得るためには、必要な性能を満たす測定機器<sup>1</sup>を用い、測定機器が正常に機能している状態を維持しなければならない。機器が正常に機能しており、分析結果の信頼性に影響を与える可能性がある変化がないことを確認するために、以下の事項を定期的に点検すること。

機器に異常が認められた場合には使用を中止して必要な修理等を行い、修理完了後に動作試験を行い、健全性を確認した後に使用を再開すること。また、必要な場合は、異常が見つかる前の測定結果を確認し、問題がなかったかを評価すること。

#### (1) エネルギー分解能

<sup>60</sup>Co 標準線源を測定し、1332.5keV のピーク形状を確認し、半値幅を求める。

実施頻度は、年 2 回程度以上（停電等により機器を停止した場合はその都度実施）。半値幅が初期の値の 10% 程度以上大きくなった場合は原因を調査し、必要な対応をとること。

#### (2) ピーク効率

ピーク効率が増減した場合、解析結果に重大な影響を及ぼすため、変化がないことを定期的に（年 1 回程度以上）確認することが必要である。

- ・確認方法としては、長半減期の  $\gamma$  線源（<sup>152</sup>Eu、<sup>137</sup>Cs 等）を同一のジオメトリで測定する方法がある。この場合、測定結果（ピークの計数率等）の変動があらかじめ設定した範囲を超えていないかを確認する。

---

<sup>1</sup> 測定機器の運用開始前に、解析ソフトウェアが学術文献の裏付けのある手法を採用していること、国家標準または国際標準にトレーサブルな標準線源の測定試験データが適切であることを確認しておく必要がある。

- ・ピーク効率に解析結果に重大な影響を及ぼすほどの変化が認められた場合は、改めてピーク効率校正を行うこと。また、異常が見つかる前の測定結果を確認し、問題がなかったかを評価すること。

### (3) 機器の日常点検

機器を健全な状態に維持し、異常を早期に発見して対応するために以下の日常点検を行うことが望ましい。また、これらの項目について、点検記録を作成し保管することが望ましい。

- ・使用しているエネルギー校正式が妥当であるか確認する。  
標準線源を測定し、ピーク中心のずれが $\pm 1\text{keV}$ の範囲内であることを確認する。標準線源の代わりに測定試料の $\gamma$ 線スペクトル上の着目ピーク ( $^{40}\text{K}$  や  $^{137}\text{Cs}$  等) のピーク中心のずれが $\pm 1\text{keV}$ の範囲内であることを確認してもよい。  
エネルギー校正式が妥当でない場合は、ゲインの再調整およびエネルギー校正式を再度作成して使用する。
- ・測定試料のない状態でバックグラウンドスペクトルを定期的に測定し、測定機器が汚染されていないことを確認する。測定機器が汚染されている場合は除染を実施した後、バックグラウンドスペクトルを再測定する。また、汚染が見つかる前の測定結果を確認し、問題がなかったかを評価すること。汚染が除去しきれない場合は、適切な頻度で差引き（補正）用のバックグラウンドの測定を実施する。
- ・適切な空調管理がされていることを確認する。  
(室温は  $23\sim 25^\circ\text{C}$  程度、室温の変動は $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度以内、湿度は  $50\sim 60\%$ の範囲内に保たれていることが望ましい。)
- ・液体窒素の消費量を確認する。
- ・点検の結果異常が認められた場合は試料の測定を中止し、原因を調査して修理等の必要な措置を講ずること。また、異常が見つかる前の測定結果を確認し、問題がなかったかを評価すること。

## 9.2 不確かさの評価

国際的な品質システムにおいては、試料採取の不確かさ、試料処理の不確かさおよび測定の不確かさを考慮しなければならないが、ここでは測定の不確かさについて記す。平常時のモニタリングにおいては、放射能の計数に係る不確かさが最も大きい不確かさを示すので、これまでは計数に係る不確かさのみを示すことが多かった。しかし、機器の校正および、試料の測定から解析までの一連の工程における不確かさの評価が求められているため、事前に不確かさの要因となる事項を整理しておく必要がある。また、不確かさの評価をすることで、一連の分析作業の各要素ごとの不確かさを把握でき、分析結果の質の管理や改善といったことが可能となる。 $\gamma$ 線スペクトロメトリにおける不確かさの評価の方法と具体例については解説Cを参照のこと。

### 9.3 測定トレーサビリティ

測定トレーサビリティとは、測定結果が何を根拠として値付けされたかを示す経路であり、分析が正しく行われていることを示す根拠の一つとして使われる。

トレーサビリティが確保できるのは、標準線源を測定したジオメトリにおける、線源に含まれる核種の $\gamma$ 線エネルギーに対してのみであり、他のエネルギー、ジオメトリには適用されない。そのため、ゲルマニウム半導体検出器を用いた測定結果のトレーサビリティを確保するには、利用者は、測定対象としているジオメトリ、 $\gamma$ 線エネルギーにおいて、国家標準にトレーサブルな標準線源を用いてピーク効率の校正を実施することが必要である。

日本国内で作製された国家標準にトレーサブルな標準線源は、計量法に基づく校正事業者登録制度による校正事業者が発行した校正証明書付きで入手することができる（証明書には核種の添加値および不確かさが記載されている。）。また、日本と相互承認協定（CIPM-MRA）を締結している諸外国製の線源を用いてもよい。

校正の結果得られたピーク効率は、有効期限を定めるとともに、前項 9.1 の方法に従って定期的に点検を行い、分析結果に影響を及ぼす変化が生じていないことを確認した上で使用すること。

### 9.4 測定・解析方法の妥当性確認

$\gamma$ 線スペクトルを解析して適切な分析結果を得るには、解析に用いる計算手法および、計算に用いるデータ（ピーク効率等）が妥当であることが必要とされる。さらに、前項 9.3 において得られたトレーサビリティの確保された条件以外で測定を行う場合は、ジオメトリ、エネルギーの異なる測定条件への換算係数が必要となる。

測定、解析方法の妥当性確認には以下の方法が用いられる。

#### (1) 標準物質の測定

測定対象と同じ核種、形状、材質の標準物質を入手できる場合は、標準物質の測定、解析結果から妥当性を確認することができる。

#### (2) 他の分析（解析）手法による結果との比較

標準物質を入手できない場合は、同一の試料を、妥当性を確認したい分析（解析）手法と、既に妥当性を確認済みの手法の双方で分析して結果を比較する方法がある。

#### (3) 試験所間の比較分析

同一の試料を用いて他の試験所（ISO/IEC17025 認定試験所が望ましい）との間で相互比較分析を実施し、両者の分析結果に有意な差が見られないことを確認することで、測定、解析のプロセスの妥当性を確認することができる。

#### (4) 技能試験への参加

外部品質管理として、外部機関が提供する技能試験に参加し、試験試料の分析結果を添加値（付与値）と比較することにより、試験所としての技能を客観的に示すことができる。ISO/IEC17043 に基づいた技能試験の場合には、参加試験所の Z スコアや

En 値が報告され、参加した試験所は提出した結果を他の試験所の結果と比較できる。



解 說



## 解説 A ピーク効率変換 (Efficiency Transfer)

ピーク効率変換 (Efficiency Transfer) は、半実験的なピーク効率計算方法の一種であり、ある特定のジオメトリで得られたピーク効率を、同一検出器の異なる材質、ジオメトリの試料測定におけるピーク効率に換算する手法である。

ピーク効率を数値計算で別のジオメトリに展開する手法自体は古くから行われてきたものであるが、近年、モンテカルロシミュレーション等の手法を用いることで、サム効果、自己吸収の影響を含めた評価が可能となり、多くの検討、改良を経て実用的に用いられるようになった [6]。

### A.1 Efficiency Transfer の原理

本法は Moens らにより提唱された次の原理に基づく [7]。本法では、仮想ピーク・トータル比 (Virtual peak-to-total) の概念が用いられる。これは、線源と、エンドキャップや不感層等を除いた有感部分のみで構成された検出器を配置したときの仮想的なピーク・トータル比であり、以下の式にて求められる。

$$(P/T)_V = \frac{4\pi}{\bar{\Omega}} \cdot \varepsilon \quad (\text{A.1})$$

ここで、 $(P/T)_V$ : 仮想ピーク・トータル比、 $\bar{\Omega}$ : 実効立体角、 $\varepsilon$ : ピーク効率

線源と検出器の間に不感層を含めた  $\gamma$  線の遮蔽や散乱を起こす物質が存在しない条件下では、ピーク効率および全効率はどちらも線源から検出器への実効立体角に比例する。そのため、仮想ピーク・トータル比は実測により求めたピーク・トータル比と異なり、ジオメトリに依存せず、検出器固有の値となる。このことから、式 (A.1) より、線源と測定試料のピーク効率の間に以下の関係が成立する。

$$\varepsilon_2 = \frac{\bar{\Omega}_2}{\bar{\Omega}_1} \varepsilon_1 \quad (\text{A.2})$$

ここで、 $\varepsilon_1$ : 線源測定時のピーク効率、 $\bar{\Omega}_1$ : 線源測定時の実効立体角、  
 $\varepsilon_2$ : 試料測定時のピーク効率、 $\bar{\Omega}_2$ : 試料測定時の実効立体角

上式の  $\varepsilon_1$  は標準線源の実測値から得たピーク効率を用いる。実効立体角は試料と検出器のジオメトリおよび試料の材質による吸収、検出器内で相互作用の経路をもとに算出することができるため、 $\bar{\Omega}_2/\bar{\Omega}_1$  を換算係数として用いることで線源のピーク効率  $\varepsilon_1$  から試料のピーク効率  $\varepsilon_2$  を求めることが可能となる。なお、 $\varepsilon_2$  を算出する際に  $\bar{\Omega}_2/\bar{\Omega}_1$  の項で検出器の内部構造に依存する影響の多くが相殺されるため、検出器の内部構造の情報は計算結果には大きく影響しない。実効立体角を求めるための計算方法 (モンテカルロシミュレーションを含む) の違いにより、本原理に基づくピーク効率変換を

実装したコードは複数存在し、半実験的なピーク効率計算方法として一般に利用されている。なお、本法は専用のソフトウェアのみならず汎用のモンテカルロシミュレーションコードを用いても実施可能である。

汎用のモンテカルロシミュレーションコード (GEANT3、PENELOPE、MCNP、EGS4) およびγ線スペクトロメトリーに特化したソフトウェア (ANGLE、DETEFF、GESPECOR、ETNA、EFFTRAN)を用いて本法 (Efficiency Transfer) の相互比較を行った結果が報告されている<sup>1</sup> [8]。複数のコードによる計算結果は数%以内 (多くの場合 2%以内) で一致しており、使用するコードの違いによる実用上の問題はなく、環境モニタリングを目的としたγ線スペクトロメトリーにおいても有効な手法であることが示されている。なお、汎用のモンテカルロシミュレーションコードによる計算と比較して、専用のソフトウェアによる計算時間は圧倒的に短く、多くの場合数秒以内に結果が得られる。

## A.2 検討 (実際の検出器への適用例)

ピーク効率変換 (Efficiency Transfer) を実装した専用ソフトウェアの一つである EFFTRAN [9] を使用し、U-8 容器の混合容積線源 (材質: アルミナ、充填高 30mm、密度:  $1.022\text{g/cm}^3$ 、核種:  $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{139}\text{Ce}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$ ) の実測で求めたピーク効率を基準として用い、別の材質 (寒天)、ジオメトリ (U-8 容器、充填高 9mm、28.4mm、47.6mm、密度:  $1.001\text{g/cm}^3$ 、添加核種:  $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{139}\text{Ce}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{60}\text{Co}$ ) の 3 種類の試料のピーク効率に換算する検討を行った。

なお、計算に必要な検出器の内部構造 (ゲルマニウム結晶のサイズ、不感層の厚さ、構造物の材質) については、検出器メーカーから提供された情報を使用した。次のピーク効率 A、B を用い、上記 3 種類の試料の測定で得られたスペクトルを解析して添加核種の放射能濃度を求め、結果を比較した (相対効率 31% の p タイプ同軸型ゲルマニウム半導体検出器を使用)。

### 解析に使用したピーク効率

- A: EFFTRAN によるピーク効率 (基準となるピーク効率 (混合容積線源、充填高 30mm) から EFFTRAN で換算した各充填高の寒天のピーク効率)
- B: 従来法 (容積線源のピーク効率の内挿) によるピーク効率 (充填高の異なる U-8 容器の混合容積線源セット (材質: アルミナ) の測定で得られた任意の充填高、材質 (元素組成および密度) に対して補正計算が可能なピーク効率)

---

<sup>1</sup> Testing efficiency transfer codes for equivalence. T.Vidmar, et al. 68, 2010, 355-359

### A.3 結果

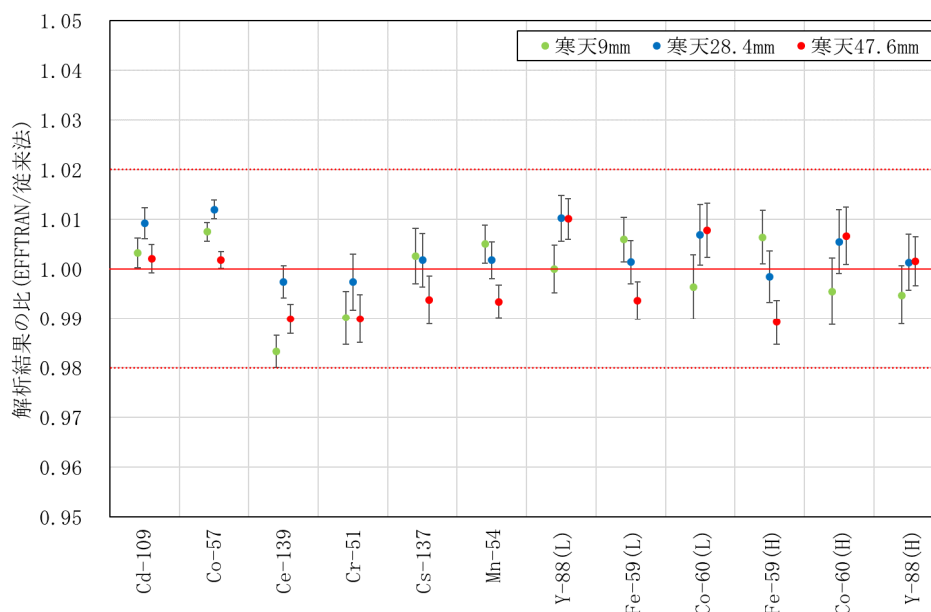


図 A.1 EFFTRAN によるピーク効率を用いた解析結果と、従来法によるピーク効率を用いた解析結果の比較

\*エラーバーは解析結果の比の不確かさ(k=1)を示す。

EFFTRAN によるピーク効率を用いた解析結果は、従来法（容積線源のピーク効率の内挿）によるピーク効率を用いた解析結果と 2%以内で一致すると評価できる。この結果は、同軸型検出器で U-8 容器の試料を測定する場合において、一つの混合容積線源の実測で得られたピーク効率を、材質、試料充填高の異なる試料のピーク効率に実用上問題ないレベルで換算できることを示している。また、<sup>60</sup>Co、<sup>88</sup>Y の解析結果からサム効果の補正に関しても問題ない。

### A.4 結論

ピーク効率変換 (Efficiency Transfer) は、特定のジオメトリで得られたピーク効率を、同一検出器における他のジオメトリのピーク効率に換算する半実験的な手法である。A.1 に示したとおり多くのソフトウェアで実装され、確立された手法として利用されている。

γ線スペクトロメトリーでは様々な形状の試料を測定することが可能であるが、測定対象となる全ての試料形状に対して標準線源を準備することは費用および運用面において現実的ではない。複数のジオメトリに対して換算係数を求めることが可能な本

法は、多種多様の形状の試料を測定する際に有用なものである。

本法は、混合容積線源の実測で求めたピーク効率を他のジオメトリでのピーク効率に換算する手法として、換算係数の妥当性確認は必要となるが、 $\gamma$ 線スペクトロメトリーにおいて容積試料のピーク効率を得る方法として有効である。

## 解説 B 測定試料の調製方法

### B.1 測定容器

#### B.1.1 測定容器の種類

現在、 $\gamma$ 線の測定に利用されている測定容器は多種多様であり、一般にはプラスチック製の円筒形容器やマリネリ容器（700mL、1L、2L）等が使用されている。マリネリ容器は牛乳、海水、陸水等の液体や細断した野菜等、前処理を施さずにそのまま測定する場合によく用いられる。測定効率が高く、前処理抜きで短時間にある程度の定量結果が得られるため、放射能濃度が高いかどうかを早く知りたい緊急時に用いられることが多い。



図 B.1 ガンマ線スペクトロメトリーに使用される測定容器

#### B.1.2 測定容器の選択

ピーク効率および検出下限値は測定容器の形状、容量、底面積、底厚等に依存する。供試量を同量にして測定を実施した場合、底厚が薄く、底面積が約  $50\text{cm}^2$ （供試料：約  $100\text{cm}^3$  程度、検出器結晶の大きさで多少異なる）程度の円筒形の容器のピーク効率が最も高い。そのため、試料の種類や供試量、要求される検出下限値に応じて容器を使い分けている分析機関もある。しかし、異なる種類の容器を使用すると、それぞれの容器ごとにピーク効率を求めておく必要が生じるため、むやみに使用する容器の種類を増やさない方がよい。

多量の試料を測定に供することができるときは（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検出下限値が低いいため有利である。しかし、マリネリ容器は、高価なので使い捨てにできない。容器を洗浄することで再使用できるが、酸または洗剤で洗浄しても汚染を除去するのは容易ではない。そこで前もってマリネリ容器専用のポリエチレン製の内袋を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、内袋の交換だけで繰り返し使用できる。内袋はマリネリ容器と違い、前もって用意しておいても段ボール箱一個程度に数百枚入り、保存に場所を取らないの

で、緊急時等多くの試料を測定するときにも対応できる。

表 B.1 いろいろな容器の例

容器	容器の高さ/mm	底面積/cm <sup>2</sup>	底厚/mm	材質(本体)
U-8	61.0	19.6	2.5	ポリプロピレン
U-9(U-4)	32.0	20.0	2.5	ポリプロピレン
その他の 円筒形容器	35.0	28.3	2.0	ポリスチレン
	46.0	50.3	2.5	ポリスチレン
	57.0	70.9	2.5	ポリスチレン
700mL マリネリ	168.0	-	-	アクリル
2L マリネリ	190.0	-	-	アクリル

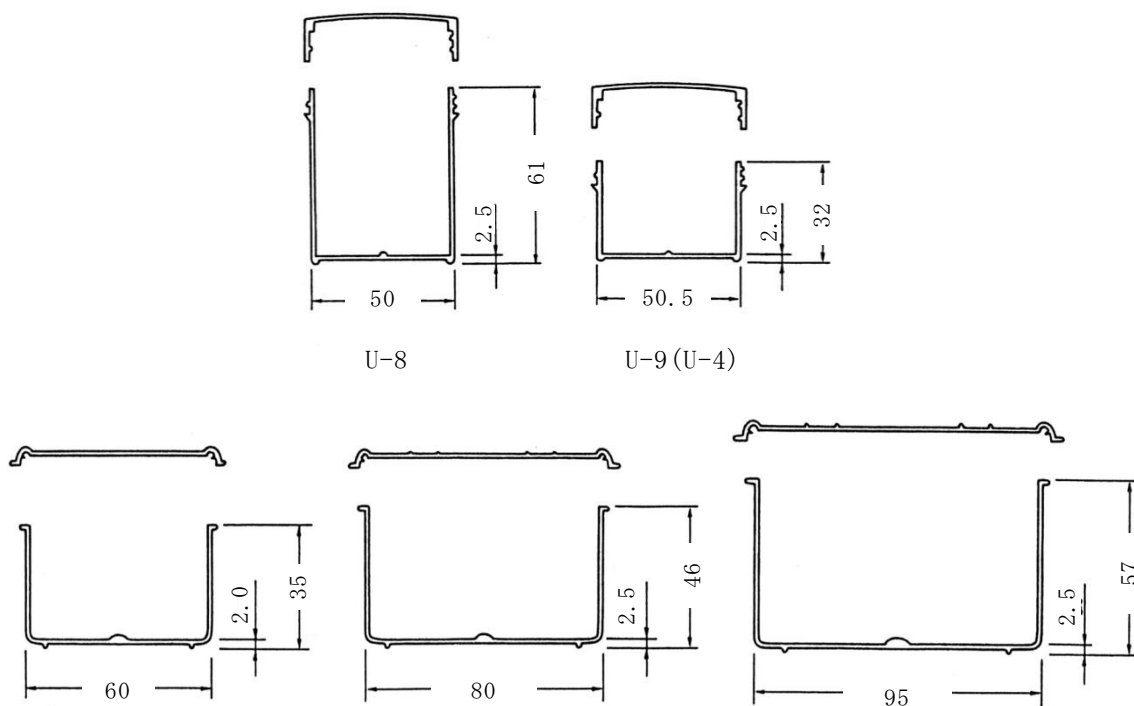
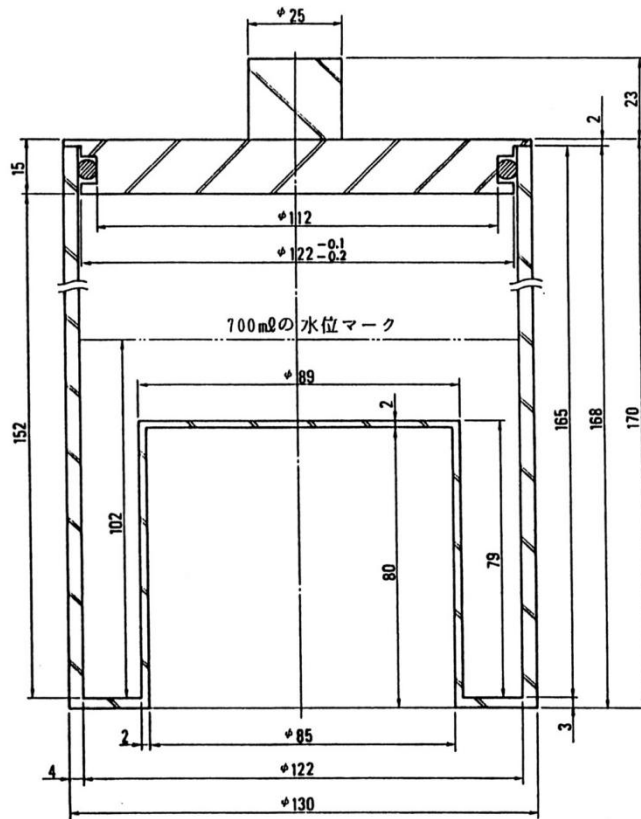
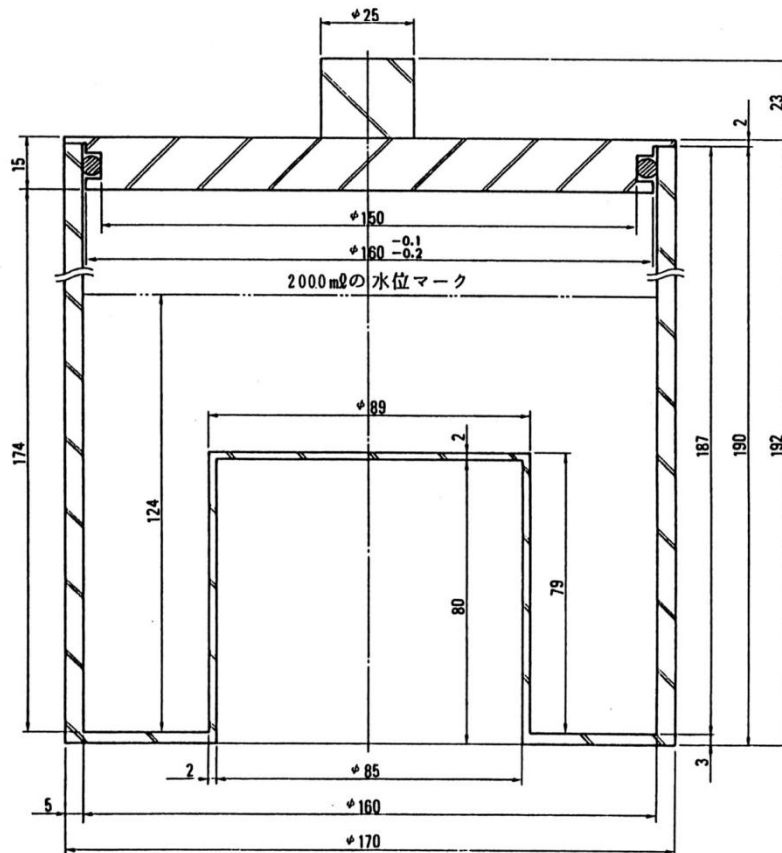


図 B.2.1 各種円筒形容器の断面





700mL マリネリ容器



2L マリネリ容器

図 B. 2. 2 マリネリ容器の断面

## B.2 試料の充填

ゲルマニウム半導体検出器を用いると測定対象核種の分離精製をせずに試料中の放射能濃度の定量が可能であるため、環境試料においても、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）で測定に供することが多い。ただし、高度な濃縮操作を行ったときよりも測定試料の容積が大きくなり、したがって、

- ・他の試料との相互汚染を起こさないこと。
- ・容器内で粗密がなく均一になっていること。
- ・容器内で崩れないように固定すること。

等に注意する必要がある。

ここでは、前処理後の試料の充填方法の例を述べる。なお、試料の前処理については「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」

(No. 13) や「環境試料採取法」(No. 16) を、緊急時の試料の取り扱いについては「緊急時における $\gamma$ 線スペクトロメトリーのための試料前処理法」(No. 24) をそれぞれ参照すること。試料重量の概ねの目安として、U-8 容器(底面積 約  $20\text{cm}^2$ 、内容積 約  $100\text{cm}^3$ )にネジ部の境界（以下、高さの上限<sup>1</sup>とする。U-8 容器の場合、充填高 5cm 程度)まで充填した場合、灰試料は約 20g~70g 程度、土試料は約 60g~120g 程度、乾燥物で~30g 程度の量が入る。マリネリ容器はジオメトリを一定とするため容器の標線まで試料を充填する必要がある。一般的に使用されるマリネリ容器は 700mL か 2L である。700mL では大気浮遊じんや乾燥物試料の約 20~50g 程度から土壌試料の約 1000g 程度、2L では海藻試料の約 1000g から液体や細断した生物試料の~2500g 程度が正味の試料重量の目安となる。

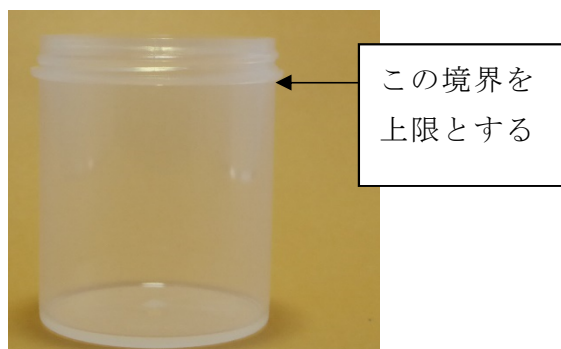


図 B.3 U-8 容器における高さの上限

<sup>1</sup> これ以上試料を入れた場合、容器の凹凸により試料の充填高が正確に測定できなくなる恐れがあるため、この高さを上限とする。

### B.2.1 試料充填の準備

測定する試料を、採取状況の記録等と照合して確認する。

試料の確認に必要な情報（試料番号、試料採取日、試料の種類、採取場所等）を測定容器に記入する。



図 B.4 測定試料容器の準備例

### B.2.2 試料充填に必要な器具

- ・各試料共通なもの

- 上皿天秤（風袋除去のできるものが便利である。）

- 充填し終わった試料の充填高を測る定規<sup>2</sup>

- アクリル製円盤（容器底の内径と同じ径のもの）

- 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（ポリエチレン製またはゴム製等）

- ペーパータオル、はさみ、カッター

- ・土壌、海底土、灰、乾燥物

- 測定容器（50～200mL 程度の小型容器）

- 試料充填具（容器底の内径と同じ径のアクリル製円盤を直径 20mm 程度の棒に接着したもの）、葉さじ等

- ・浮遊じん

- 測定容器（50～100mL 程度の小型容器）

- ・水、生、乾燥物

- 測定容器（0.5～2L 程度の大型容器、マリネリ容器等）

- 包丁、メスシリンダ（1～2L）等

<sup>2</sup> 不確かさを求める必要がある場合には、許容差がわかるものまたは推定できるもの（ノギスや等級の示された金属製直尺等）を用いること。

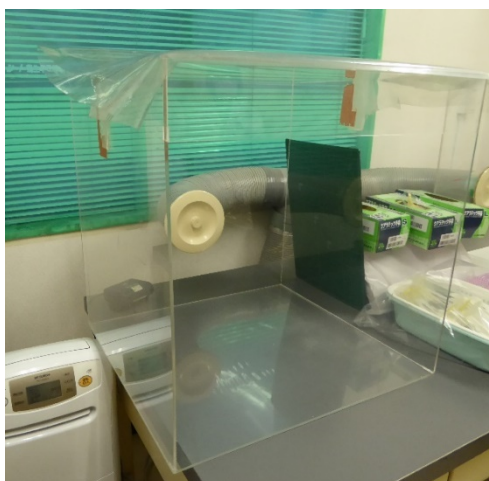


図 B. 5 試料充填用簡易ドラフトボックスの例

### B. 2. 3 小型容器への試料の充填方法

相互汚染の起こらない場所で試料を充填する。大型のドラフト内でもよいが、洗浄が容易なように、換気口を取り付けた試料充填用の簡易ドラフトを透明塩化ビニル等で作製すると便利である。

#### < 試料充填手順 >

##### (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純水等<sup>3</sup>で湿らせたペーパータオルで拭く。
- ②使い捨て手袋を着用し、作業終了後の清掃を容易にするため、簡易ドラフト内に紙を敷く。
- ③試料充填具の押圧面に 0.01mm 程度のポリエチレンシートをかぶせる。

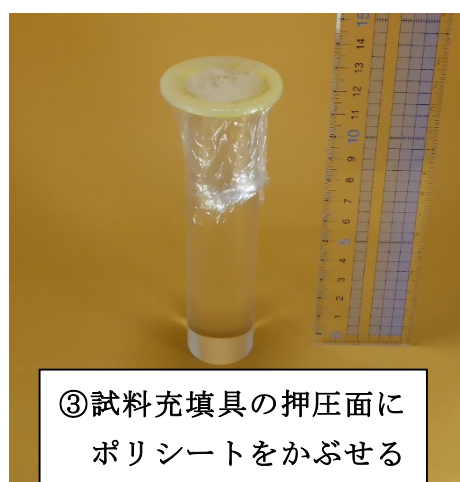
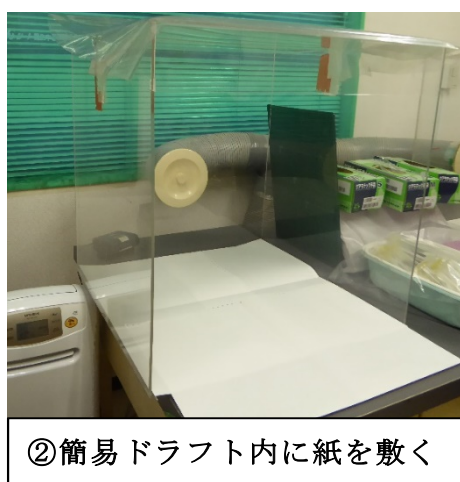


図 B. 6. 1 試料充填手順(1)

<sup>3</sup> エタノール等の有機溶剤を使う場合、簡易ドラフトや容器の材質によっては侵食される恐れがある。

- ④上皿天秤で測定容器（ふた込み）の重量を測定する。
- ⑤試料をよく攪拌、混合した後、測定容器に 1/5 程度の量を数回に分けて入れる。このとき、試料全体からまんべんなく取って入れるようにすること。一度に入れると均一性が悪くなり、偏在の影響が測定値に現れる恐れがある（資料 2 参照）。

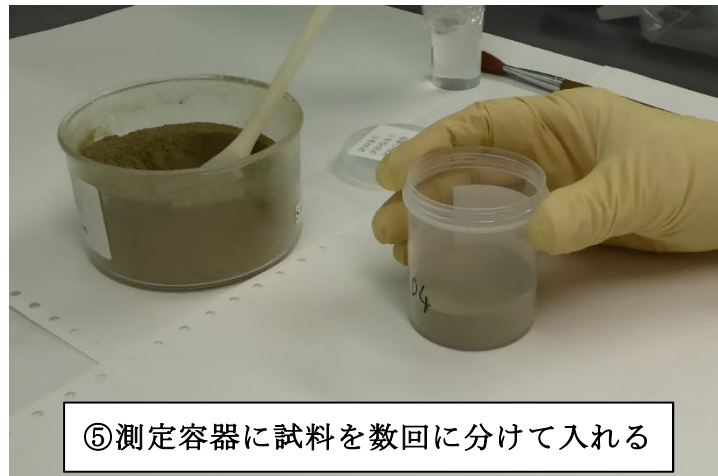


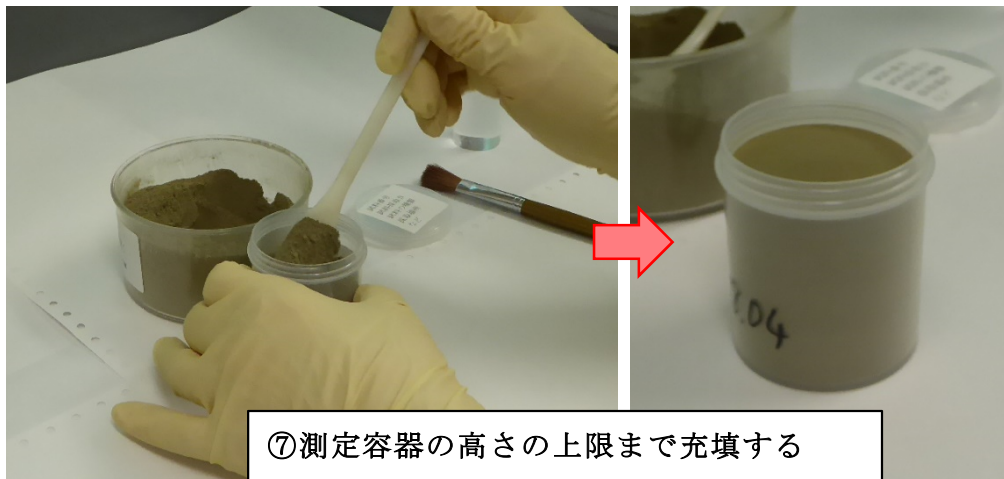
図 B. 6. 2 試料充填手順(2)

- ⑥1/5 程度の試料を入れたら、測定容器を水平に保ったまま、繰り返し軽く机に打ち付ける等してある程度試料を充填し、さらに、試料充填具を利用し圧縮する。充填具を使うときは力を入れ過ぎると容器の底が壊れるので、座ったまま軽く体重を預ける程度にとどめる。

土壌：比較的充填しやすい試料であるが、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：砂状のものは圧縮しても固まらないので、藁さじ等でつつき空隙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、充填具で圧縮しても容器の端から漏れ、容易に固めることができないので、机に打ち付ける時間を調節して、試料が十分に締まってから圧縮する。相互汚染にも注意する。

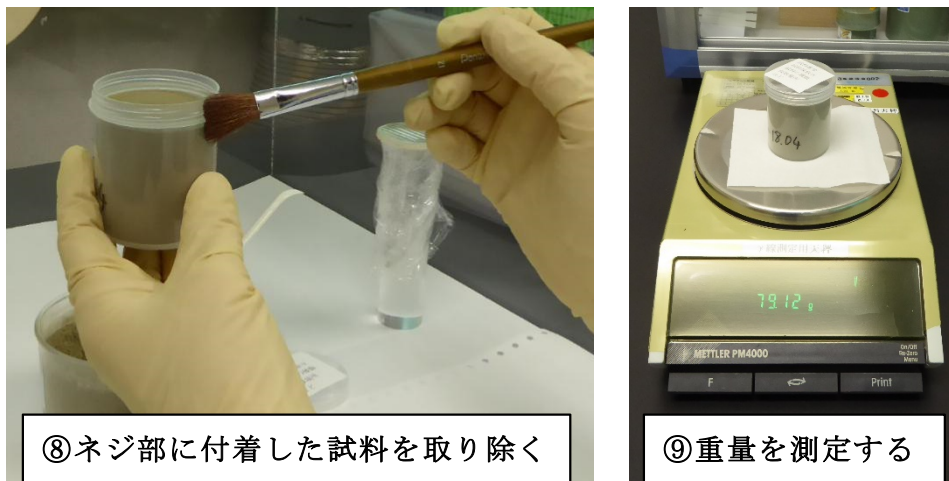
灰試料：圧縮すると容易に固まるが、力を入れ過ぎると固まった試料に「ひび」が入るので、適度な力で圧縮する。「ひび」が入った場合は藁さじで砕き再度圧縮する。



⑦測定容器の高さの上限まで充填する

図 B. 6. 3 試料充填手順(3)

- ⑦上記⑤～⑥の操作を繰り返し、試料を全量または高さの上限まで充填する。充填しすぎると、試料の充填高が正確に測定できなくなることがあるので注意する。
- ⑧測定容器内の試料上面を平らにならし、容器のネジ部や溝部に付着した試料を、刷毛等で取り除く。
- ⑨ふたをして重量を測定し、容器に風袋引き試料重量を書き込む。このとき、0.01g 程度まで読むこと。

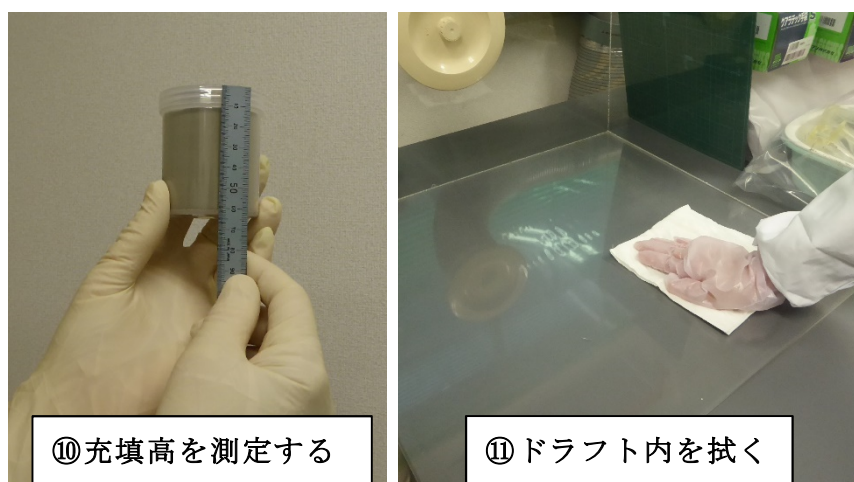


⑧ネジ部に付着した試料を取り除く

⑨重量を測定する

図 B. 6. 4 試料充填手順(4)

- ⑩容器底の内側より試料の充填高を測定し測定容器に書き込む。このとき、3～4点程度で測定して平均し、0.5mm 程度まで読むこと。

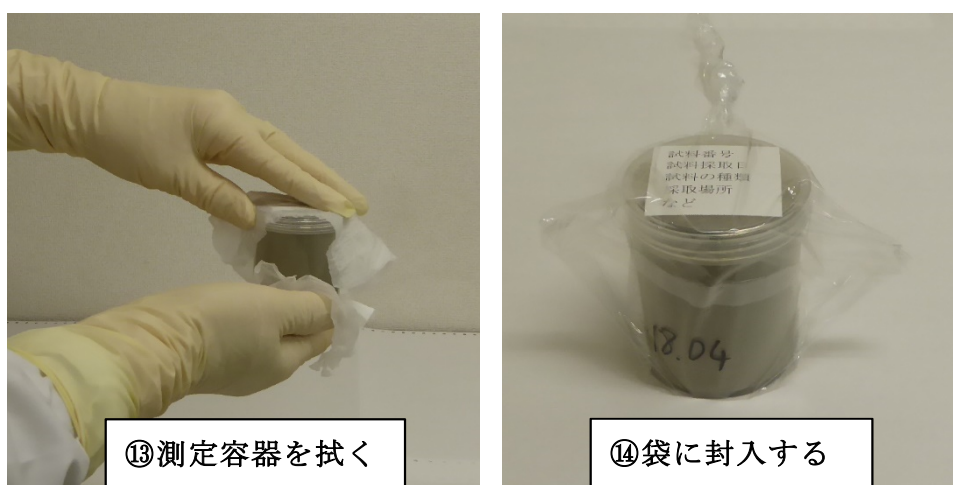


⑩ 充填高を測定する

⑪ ドラフト内を拭く

図 B. 6. 5 試料充填手順(5)

- ⑩作業場所に敷いた紙で充填具にかぶせたポリエチレンシートを包んで捨て、使い捨て手袋を脱いで捨てた後、新しい使い捨て手袋を着用し、簡易ドラフト内部を純水等で湿らせたペーパータオルで拭く。
- ⑪使い捨て手袋を脱いで捨て、薬さじ、試料充填具、定規、刷毛、手を洗い水分を拭きとる。  
(試料が複数ある場合には②～⑫ を試料分だけ繰り返す。)
- ⑫試料を充填し終わったら、使い捨て手袋を着用し、測定容器を純水等で湿らせたペーパータオルで汚染に注意して拭き、ポリエチレン袋に入れる。ペーパータオルで拭いた後の測定容器は直接手で触れないこと。ポリエチレン袋に手を差し込んだままで試料をつかみ、袋を裏返しにして測定容器を入れる。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 測定容器を拭く

⑭ 袋に封入する

図 B. 6. 6 試料充填手順(6)

- ⑭ポリエチレン袋に封入した後、使い捨て手袋を脱いで捨て、測定室に運ぶ。

## (2) 乾燥物

- ①使用前に簡易ドラフト内側等の作業場所を純水等で湿らせたペーパータオルで拭く。
- ②使い捨て手袋を着用し、作業終了後の清掃を容易にするため、簡易ドラフト内に紙を敷く。
- ③試料充填具の押圧面に0.01mm程度のポリエチレンシートをかぶせる。
- ④上皿天秤で測定容器（ふた込み）の重量を測定する。
- ⑤試料を細かくする。試料が硬いときは、はさみ等を利用する。その後、試料をよく攪拌、混合する。
- ⑥試料を全量または高さの上限まで入れる。空隙が残ると試料の偏在の影響により正しい測定値を得ることができなくなる（資料2参照）。
- ⑦測定容器内の試料上面を平らにならし、ふたをして重量を測定し、測定容器に風袋引き試料重量を書き込む。このとき、0.01g程度まで読むこと。
- ⑧一旦ふたを取り試料の上にアクリル製円盤を乗せ押え付けた後、再びふたをする。このとき、アクリル製円盤の上に柔らかいポリエチレンシートを丸めて入れ、隙間をうめるとよい。
- ⑨容器底の内側より試料の充填高を測定し測定容器に書き込む。このとき、3～4点程度で測定して平均し、0.5mm程度まで読むこと。
- ⑩作業場所に敷いた紙で充填具にかぶせたポリエチレンシートを包んで捨て、使い捨て手袋を脱いで捨てた後、新しい使い捨て手袋を着用し、簡易ドラフト内部を純水等で湿らせたペーパータオルで拭く。
- ⑪使い捨て手袋を脱いで捨て、薬さじ、試料充填具、定規、刷毛、手を洗い水分を拭きとる。  
(試料が複数ある場合には②～⑪を試料分だけ繰り返す。)
- ⑫試料を充填し終わったら、使い捨て手袋を着用し、測定容器を純水等で湿らせたペーパータオルで汚染に注意して拭き、ポリエチレン袋に入れる。ペーパータオルで拭いた後の測定容器は直接手で触れないこと。ポリエチレン袋に手を差し込んだままで試料をつかみ、袋を裏返しにして測定容器を入れる。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ポリエチレン袋に封入した後、使い捨て手袋を脱いで捨て、測定室に運ぶ。

## (3) 浮遊じん試料（ろ紙を測定する場合）

- ①使い捨て手袋を着用し、使用前に簡易ドラフト内側等の作業場所を純水等で湿らせたペーパータオルで拭く。
- ②作業終了後の清掃を容易にするため、簡易ドラフト内に紙を敷く。
- ③上皿天秤で測定容器（ふた込み）の重量を測定する。
- ④測定容器の底の内径に合わせ、はさみかカッターで浮遊じんのついたろ紙を切りとる。大型のろ紙の場合、同一の試料からできる限り多く、かつ全体からま



んべんなく切り抜くようにする。なお、大型ろ紙を折り畳む手法については、「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」(No. 13) や「環境試料採取法」(No. 16)、「緊急時におけるγ線スペクトロメトリーのための試料前処理法」(No. 24) を参照すること。

- ⑤浮遊じんの付着している面を底に向け、全量または高さの上限まで入れる。
- ⑥測定容器内の試料上面を平らにならし、ふたをして重量を測定し、測定容器に風袋引き試料重量を書き込む。このとき、0.01g 程度まで読むこと。
- ⑦一旦ふたを取り試料の上にアクリル製円盤を乗せ押え付けた後、再びふたをする。このとき、アクリル製円盤の上に柔らかいポリエチレンシートを丸めて入れ、隙間をうめるとよい。
- ⑧容器底の内側より試料の充填高を測定し測定容器に書き込む。このとき、3~4点程度で測定して平均し、0.5mm 程度まで読むこと。
- ⑨作業場所に敷いた紙を捨て、使い捨て手袋を脱いで捨てた後、新しい使い捨て手袋を着用し、簡易ドラフト内部を純水等で湿らせたペーパータオルで拭く。
- ⑩使い捨て手袋を脱いで捨て、はさみ、カッター、定規、手を洗い水分を拭きとる。  
(試料が複数ある場合は②~⑩ を試料分だけ繰り返す。)
- ⑪試料を充填し終わったら、使い捨て手袋を着用し、測定容器を純水等で湿らせたペーパータオルで汚染に注意して拭き、ポリエチレン袋に入れる。ペーパータオルで拭いた後の測定容器は直接手で触れないこと。ポリエチレン袋に手を差し込んだままで測定容器をつかみ、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。
- ⑫ポリエチレン袋に封入した後、使い捨て手袋を脱いで捨て、測定室に運ぶ。

#### B. 2. 4 マリネリ容器への試料の充填方法

陸水、降雨水、河川水、海水、牛乳等の溶液試料はそのまま測定容器に入れる。野菜、果物等の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。乾燥物は B. 2. 3 と同様の方法で細かくする。

##### < 試料充填手順 >

- ①使用前に簡易ドラフト内側等の作業場所を純水等で湿らせたペーパータオルで拭く。
- ②使い捨て手袋を着用し、作業終了後の清掃を容易にするため、簡易ドラフト内に紙を敷く。
- ③マリネリ容器の内側に内袋を装着し、重量を測定する。乾燥物はアクリル製円盤込みの重量を測定する。
- ④試料をよく攪拌、混合し、内袋に充填する。このとき、空隙が残ると試料の偏

在の影響により正しい測定値を得ることができない（資料2参照）ため、空隙ができないように充填すること。

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、亚克力製円盤で押さえる。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。

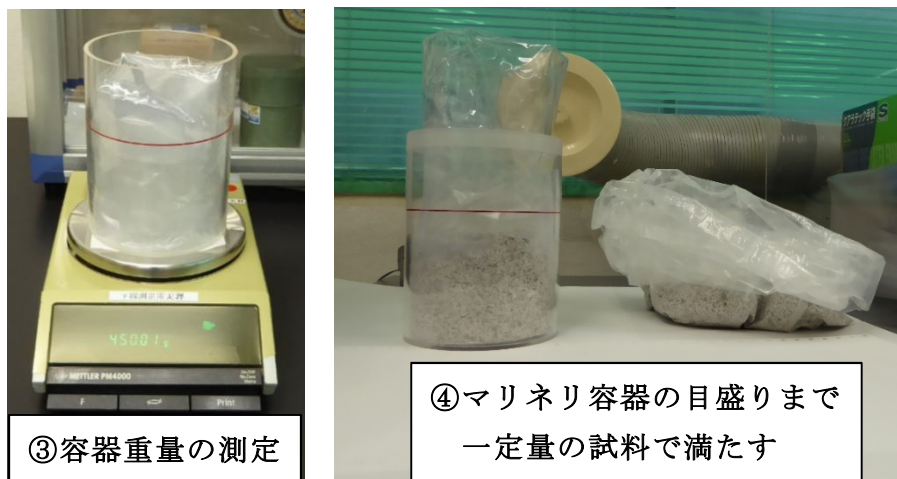


図 B. 7. 1 試料充填手順(マリネリ容器 その1)

⑤試料を充填した後、重量を測定し、容器にビニルテープ等を貼り、そこに風袋引き試料重量を記入する。このとき 0.01g 程度まで読むこと。

⑥内袋の口をビニルテープ等で閉じる。その後、ビニルテープ等でふたを固定し溶液が漏れないようにする。乾燥物は亚克力製円盤の上に柔らかいポリエチレンシートを丸めて入れ、容器の目盛りまで上から押し付けるとよい。

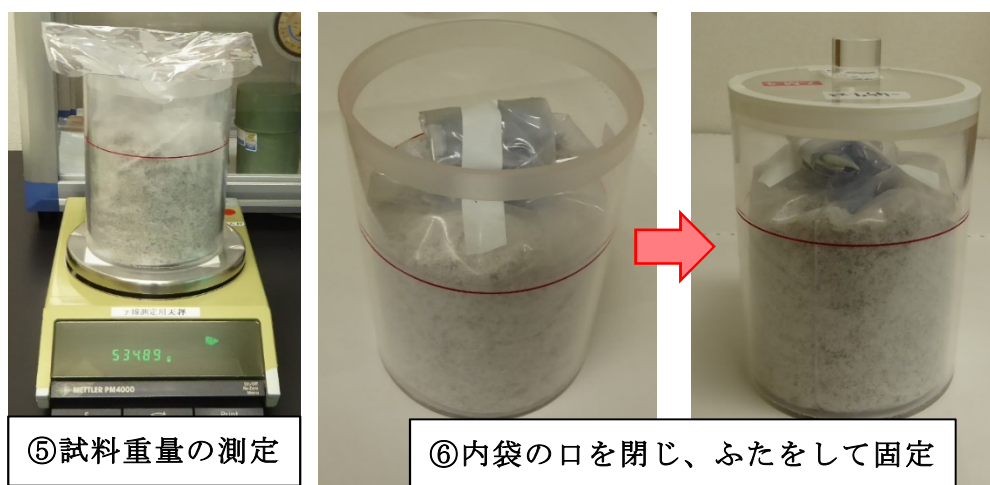


図 B. 7. 2 試料充填手順(マリネリ容器 その2)

⑦作業場所に敷いた紙を捨てた後、使い捨て手袋を脱いで捨てた後、新しい使い

- 捨て手袋を着用し、簡易ドラフト内部を純水等で湿らせたペーパータオルで拭く。
- ⑧使い捨て手袋を脱いで捨て、薬さじ、定規、刷毛、手を洗い水分を拭きとる。  
(試料が複数ある場合は②～⑧を試料分だけ繰り返す。)
- ⑨使い捨て手袋を着用し、マリネリ容器を純水等で湿らせたペーパータオルで汚染に注意して拭く。ペーパータオルで拭いた後のマリネリ容器は直接手で触れないこと。
- ⑩マリネリ容器をポリエチレン袋に入れ、空気を抜き、ビニルテープ等で口を閉じる。このとき、マリネリ容器の底の凹部分に検出器が入ることを考慮し、ポリエチレン袋の上から凹部分に余裕ができるように、凹型に押しえつけた状態のまま口を閉じること。
- ⑪ポリエチレン袋に封入した後、使い捨て手袋を脱いで捨て、測定室に運ぶ。

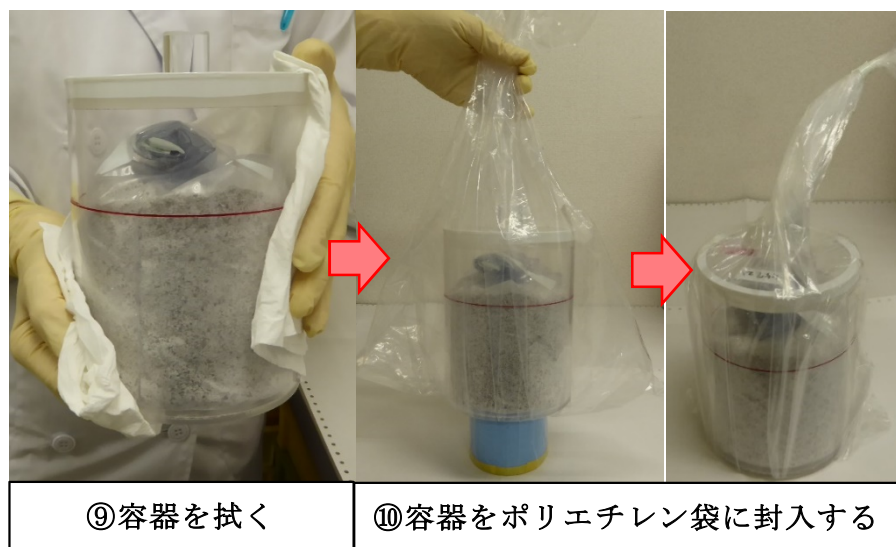


図 B. 7. 3 試料充填手順(マリネリ容器 その3)

#### B. 2. 5 その他の試料の充填方法

特殊な前処理をした試料、例えば機械により圧縮し試料を固化する、化学処理による沈殿試料等の測定試料を容器に充填する等のように、前処理の方法で充填方法が異なるものは、「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」(No. 13) や「環境試料採取法」(No. 16)、「緊急時におけるγ線スペクトロメトリのための試料前処理法」(No. 24) を参照する。その場合でもできるだけ多くの試料を空隙のないように充填する、試料の同定に必要な情報を容器に記入する等の操作を行うこと。

## 解説 C $\gamma$ 線スペクトロメトリーにおける不確かさの評価

測定結果がどの程度信頼のおける値であるのかを示す一つの指標として、測定に対する不確かさ (Uncertainty of Measurement) が用いられている。その定義は次のとおりである。測定の不確かさとは『測定の結果に付随した、合理的に測定対象量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴付けるパラメータ』 [10]である。注意すべき点は測定の不確かさは測定結果それぞれのばらつきではなく、一連の測定の持つ潜在的な変動を示す値であるということである。

$\gamma$ 線スペクトロメトリーによる環境試料の測定の場合は、測定対象量は測定試料中の単位供試量 (質量、体積など) 当たりの放射能 (以下、「放射能濃度」という。) である。この放射能濃度に影響を及ぼす条件を全て拾い上げて完全に定義することは非常に困難である。また、放射線の発生は統計事象であり、測定によって得られる計数には統計的な変動が必ずある。これらのことから放射能濃度の真の値を得ることはほぼ不可能であり、得られた測定結果は、一連の測定の過程でどのように厳密に測定や解析を実施したとしても、一般的には、あくまで放射能濃度の真の値の近似か推定値ではない。また、この不完全さにより最終的に得られる測定結果はある幅を持って得られることになる。

$\gamma$ 線スペクトロメトリーでは、検出器は放射能濃度を直接測定しているのではなく、測定の対象となる放射性核種の放出する  $\gamma$ 線のうち、検出器と相互作用を起こし全エネルギー吸収となった数を計数している。このため、放射能濃度は、検出器からの計数値だけではなく、多くの補正係数 (サム効果、自己吸収、放射能の減衰等)、測定試料の供試量、 $\gamma$ 線放出率、検出器の計数効率、測定時間といった情報を用いて求められている。言い換えれば、放射能濃度はこれら入力量の関数であるといえる。

$$A = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = f(N, m, t, \varepsilon, \gamma, \dots) \quad (\text{C. 1})$$

ここで、 $A$  : 放射能濃度

$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  : 放射能濃度を導出する計算を表現する関数

$N, m, t, \varepsilon, \gamma, \dots$  : 放射能濃度を求めるために必要な入力量

求めるべき放射能濃度の標準不確かさは、放射能濃度の導出に関わる全ての入力量の標準不確かさにそれぞれ感度係数を考慮して、合成することで得られる。それぞれの入力量が全て独立な (相関がない) 場合、それぞれの入力量の不確かさは次の式に従って合成される。

$$u(A) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right\}^2} \quad (\text{C. 2})$$

ここで、 $u(A)$  : 放射能濃度の合成標準不確かさ

$u(x_i)$  : 入力量  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  の標準不確かさ

式(C.2)において微分係数 $\partial f/\partial x_i$ は感度係数と呼ばれ、出力量 $A$ が入力量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ のそれぞれの値の変化に伴ってどのように変化するかを記述する。例えば、入力量 $x_i$ の微小変化 $\Delta x_i$ によって生じる出力量 $A$ の変化は $(\Delta A)_i = (\partial f/\partial x_i)(\Delta x_i)$ で与えられる。この変化が入力量 $x_i$ の標準不確かさによって生じるものであれば、対応する出力量 $A$ の変化は $(\partial f/\partial x_i)u(x_i)$ となる。なお、標準不確かさはばらつきのことであり標準偏差で表され、それぞれの入力量の標準不確かさの評価は後述のタイプ A またはタイプ B に分類して行う。

また、出力量 $A$ が入力量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ の乗除のみで表される場合、出力量の相対標準不確かさはそれぞれの入力量の相対標準不確かさの 2 乗和の平方根で求めることができる。したがって、式(C.2)は次の式となる。

$$\frac{u(A)}{A} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{u(x_i)}{x_i} \right\}^2} \quad (\text{C.3})$$

ここで、 $u(A)/A$ ：放射能濃度の相対合成標準不確かさ

$u(x_i)/x_i$ ：入力量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ の相対標準不確かさ

本解説では、式(C.3)を用いて不確かさの評価を行う。

### C.1 不確かさの評価手順

測定の不確かさの評価は一般に以下のような手順で行われる。

- ① 測定結果に影響を及ぼす要因をピックアップし測定モデル式として整理する。
- ② モデル式に基づき不確かさの要因を整理する。
- ③ 個々の不確かさの要因について不確かさを評価する。
- ④ 個々の不確かさを全て合成し、測定の結果の不確かさを求める。

上述した不確かさの評価の手順に従って以下に概略を示す。

- ① 測定結果に影響を及ぼす要因をピックアップし測定モデル式として整理する。

測定の手順および精度管理による許容基準などから最終的な測定結果に大きな影響を及ぼすような要因を漏れがないようにピックアップし、測定モデル式として整理する。

- ② モデル式に基づき不確かさの要因を整理する。

$\gamma$ 線スペクトロメトリーによる放射能濃度の定量に伴う不確かさの要因は大きく次の3種類に分けられる。

- i 測定試料に係る不確かさ
- ii ピーク効率校正に係る不確かさ
- iii 試料の測定に係る不確かさ

それぞれの項目にはさらに詳細な要因が考えられる。図 C.1 に不確かさの要因を特定するために作成した不確かさの要因図の例を示す。図 C.1 に示された要因以外にも、測定の結果に影響を及ぼす要因が存在する可能性があることに注意が必要である。

③ 個々の不確かさの要因について不確かさを評価する。

不確かさを評価する方法は、タイプ A 評価とタイプ B 評価の 2 つに分類される。

タイプ A 評価は、一連の観測値の統計的解析による不確かさの評価方法であり、それぞれの要因について、繰り返し測定から実験標準偏差を求めて標準不確かさとする。

タイプ B 評価は、一連の観測値の統計的解析以外の手段による不確かさの評価方法であり、それぞれの要因について、起こり得る変動について入手できる全ての情報に基づく科学的判断によって評価する。入手できる情報とは、次のようなものがある。

- 試料測定に先立って自ら測定した測定器の特性、ピーク効率の経時変化などの以前の測定データ
- 当該材料および測定器の挙動および特性についての一般的知識または経験
- 製造業者の仕様
- 校正その他の証明書に記載されたデータ
- ハンドブックから引用した参考データに割りあてられた不確かさ

それぞれの不確かさの要因全てが、評価すべき測定の結果の不確かさに対して寄与が大きいわけではない。それぞれの不確かさの評価を行い、不確かさを合成して全体の不確かさに対する寄与を求め、ほとんど寄与のない項目については必ずしも評価する必要はない。

④ 個々の不確かさを全て合成し、測定の結果の不確かさを求める。

③によって得られた個々の不確かさを全て合成して合成標準不確かさを求める。

④によって得られる合成標準不確かさは、測定結果に結び付けられた標準偏差を表している。真の値を含むと期待できる区間を表すことが必要な場合には、包含係数 $k$ を合成標準不確かさに乗じて拡張不確かさとする。 $k$ は信頼の水準と  $t$ -分布から決定され、一般に 2~3 の間で選ばれることが多い。 $\gamma$ 線スペクトロメトリーでは、測定結果の分布は正規分布とみなすことができるため、信頼の水準が約 95% のとき  $k = 2$  となる。測定結果の報告の際は、測定値に併記した不確かさがどのような値であるのか(合成標準不確かさであるのか拡張不確かさ( $k = 2 \sim 3$ )であるのか)を必ず明記する。

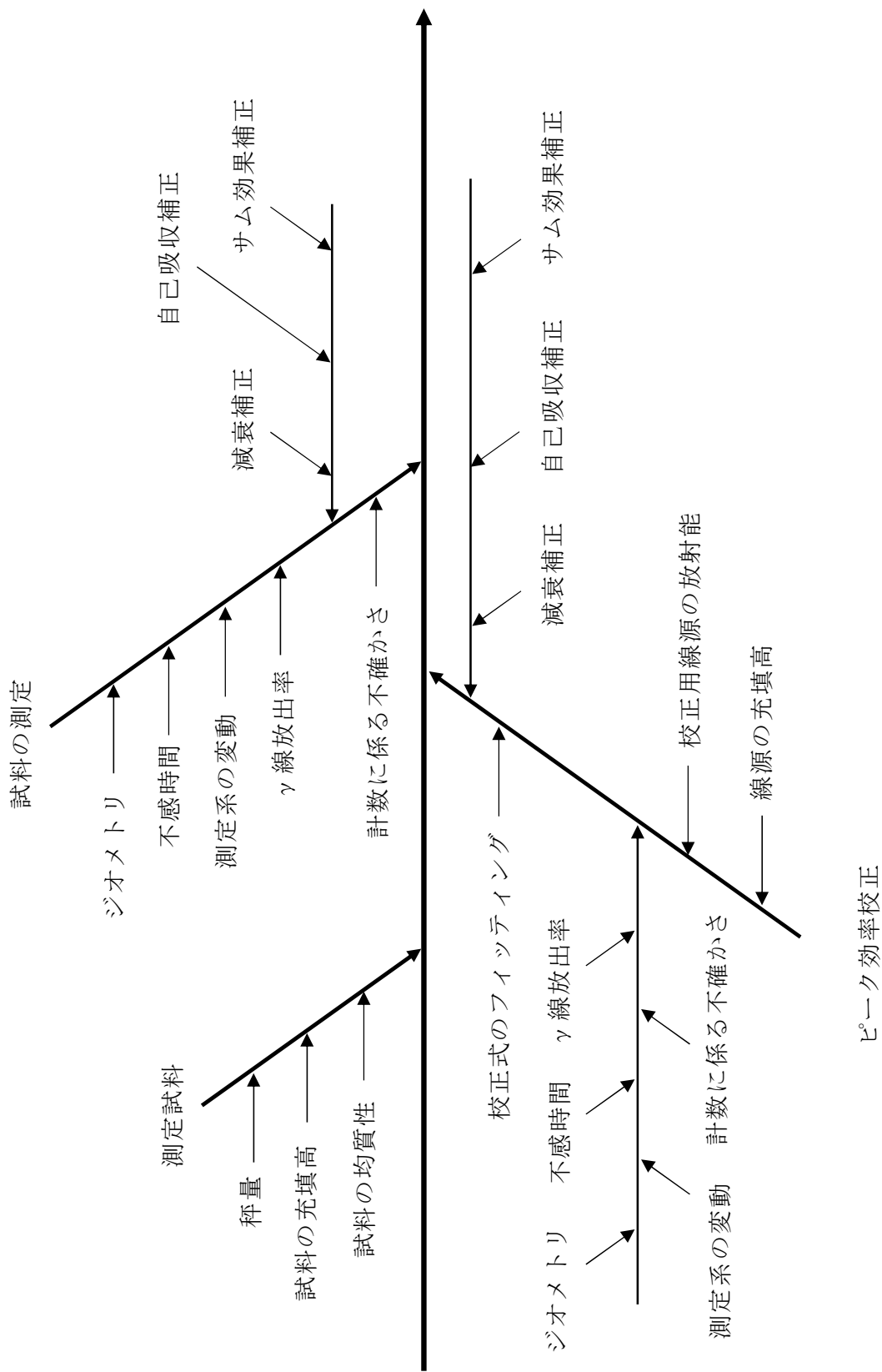


図 C.1  $\gamma$ 線スペクトロメトリにおける不確かさ要因図

## C.2 不確かさの計算手順

### C.2.1 測定試料に係る不確かさ

#### C.2.1.1 秤量 ( $u_1$ )

校正証明書に記載されている不確かさ（不確かさ方程式）を用いる。記載されている不確かさが相対値でない場合は、次の式により相対標準不確かさを算出する。

$$u_1 = \frac{u(w)}{w} \quad (\text{C. 4})$$

ここで、 $u(w)$ ：秤量値の不確かさ(g)  $w$ ：秤量値(g)

校正証明書に記載がない場合は、以下を参考に計測器の指示値の丸め誤差による不確かさと繰り返し測定の精度による不確かさをそれぞれ評価し、それらを合成して秤量の不確かさとする。

#### (1) 指示値の丸め誤差による不確かさ

電子天びんの読取限界（最小目盛）を $l$ とすると、零点および秤量値のそれぞれにおいて、 $\pm l/2$ を上下限とする矩形分布となる。これら2つの分布を合成することで得られる、 $\pm l$ を上下限とする三角分布から相対標準不確かさを求める。なお、三角分布の標準偏差は、その分布の幅の半分を $\sqrt{6}$ で除すことで求めることができる。

$$u_{1a} = \frac{l}{\sqrt{6}w} \quad (\text{C. 5})$$

ここで、 $l$ ：読取限界(g)  $w$ ：秤量値(g)

#### (2) 繰り返し測定の精度による不確かさ

1回の秤量に係る不確かさは、測定対象の試料と同程度の重量を複数回（10回程度）繰り返し測定し、標準偏差の平均値に対する相対値として求めることができる。

$$\frac{w_{STD}}{\bar{w}} \quad (\text{C. 6})$$

ここで、 $\bar{w}$ ：繰り返し測定の平均値(g)  $w_{STD}$ ：繰り返し測定の標準偏差(g)

実際の試料の秤量において、1回の測定しか行わない場合の不確かさは上式で与えられるが、複数回の測定を行ってその平均値を秤量値として採用する場合は、測定の回数を $n$ とすると、秤量値の相対標準不確かさは次式で与えられる。なお、1回のみの測定の場合には $n=1$ となり、式(C.6)と式(C.7)は一致する。

$$u_{1b} = \frac{w_{STD}}{\bar{w}} \times \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (\text{C. 7})$$

$n$ ：測定の回数



(3) 秤量の不確かさ

$u_{1a}$ と $u_{1b}$ を合成し、秤量の相対標準不確かさとする。

$$u_1 = \sqrt{(u_{1a})^2 + (u_{1b})^2} \quad (\text{C. 8})$$

【計算例】

校正証明書に記載がない場合、読取限界 0.01g の電子天びんで 20.06g の秤量値のとき、

$$u_{1a} = \frac{0.01}{\sqrt{6} \times 20.06} = 0.000204$$

繰り返し測定によって、表 C.1 の結果を得たとき、

表 C.1 重量の繰り返し測定の結果

回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
測定値 (g)	20.05	20.05	20.06	20.05	20.07	20.06	20.07	20.06	20.05	20.06

測定値の平均 : 20.058g

標準偏差 : 0.0079g

$$\frac{0.0079}{20.058} = 0.000394$$

試料の秤量では通常は 1 回の測定値を採用するため

$$u_{1b} = 0.000394 \times \frac{1}{\sqrt{1}} = 0.000394$$

したがって、秤量の不確かさは

$$u_1 = \sqrt{0.000204^2 + 0.000394^2} = 0.000444 \quad (0.0444\%)$$

C.2.1.2 試料の充填高 ( $u_2$ )

試料の充填高は式(C.1)における直接の入力量ではない。そのため、試料の充填高の不確かさの評価は、充填高の測定の不確かさの値自体を用いるのではなく、充填高の変動量に対するピーク効率の変動量で評価する。評価手順としては、まず、計測器の精度による不確かさと繰り返し測定の精度による不確かさをそれぞれ評価し、それらを合成して充填高の測定の不確かさを求める。次に、充填高の変動に対するピーク効率の変動を評価し、試料の充填高の不確かさ ( $u_2$ ) とする。なお、評価する基準のエネルギーは 661.7keV とする<sup>1</sup>。

<sup>1</sup> ピーク効率曲線は充填高の変化に対してほぼ平行に移動する (資料 1.2 参照) ため、どのエネルギーで評価を行っても差は生じない。

(1) 計測器の精度による不確かさ

計測器の許容差を上下限とする矩形分布を仮定し、不確かさを算出する。なお、矩形分布の標準偏差は、その分布の幅の半分を $\sqrt{3}$ で除すことで求めることができる。

$$u_{2a} = \frac{l}{\sqrt{3}h} \quad (C.9)$$

ここで、 $l$ ：計測器の許容差(mm)  $h$ ：測定試料の充填高(mm)  
ノギスおよび金属製直尺の許容差を表 C.2 および表 C.3 に示す。

表 C.2 ノギスの許容差 (JIS B7507:2016)

測定長 (mm)	目量、最小表示量または最小読取值 (mm)	
	0.1 または 0.05	0.02 または 0.01
50 以下	±0.05	±0.02
50-100	±0.06	±0.03

表 C.3 金属製直尺の許容差 (JIS B7516:2005)

等級	長さの許容差 (mm)
1 級	±[0.10 + 0.05(L/0.5)]
2 級	±[0.10 + 0.10(L/0.5)]

注 1  $L$  は測定長をメートルで表した数値であって、単位をもたない。

注 2  $L/0.5$  の計算値のうち、1 未満の端数は、切り上げて整数値とする。

(2) 繰り返し測定の精度による不確かさ

1 回の測定に係る不確かさは、測定対象の試料と同程度の充填高のものを複数回 (10 回程度) 繰り返し測定し、標準偏差の平均値に対する相対値として求めることができる。

$$\frac{h_{STD}}{\bar{h}} \quad (C.10)$$

ここで、 $\bar{h}$ ：繰り返し測定の平均値(mm)  $h_{STD}$ ：繰り返し測定の標準偏差(mm)

実際の試料の充填高の測定において、1 回の測定しか行わない場合の不確かさは上式で与えられるが、複数回の測定を行ってその平均値を充填高として採用する場合は、測定の回数を $n$ とすると、充填高の相対標準不確かさは次式で与えられる。なお、1 回のみ測定の場合には $n=1$ となり、式(C.10)と式(C.11)は一致する。

$$u_{2b} = \frac{h_{STD}}{\bar{h}} \times \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (C.11)$$

ここで、 $n$ ：測定の回数

(3) 試料の充填高の測定の不確かさ

$u_{2a}$ と $u_{2b}$ を合成し、充填高の測定の相対標準不確かさとする。

$$u_{2c} = \sqrt{u_{2a}^2 + u_{2b}^2} \quad (\text{C. 12})$$

(4) 充填高の変動に対する効率の変動

次式に充填高 $h$ および充填高+不確かさ $h + h \cdot u_{2c}$ をそれぞれ代入し、ピーク効率を算出し、試料の充填高の変動に対するピーク効率の変動を評価する（評価する基準のエネルギーは 661.7keV とする）。

$$\frac{1}{\varepsilon} = a + bh + ch^2 \quad (\text{C. 13})$$

$$u_2 = \frac{|\varepsilon_2 - \varepsilon_1|}{\varepsilon_1} \quad (\text{C. 14})$$

ここで、 $\varepsilon$ ：ピーク効率  $a, b, c$ ：定数  $h$ ：測定試料の充填高(mm)

$\varepsilon_1$ ：充填高 $h$ における $\varepsilon$   $\varepsilon_2$ ：充填高 $h + h \cdot u_{2c}$ における $\varepsilon$

【計算例】

金属製直尺（1級）を用いて充填高 10mm を測定したとき、表 C. 3 から許容差は $\pm 0.15$ となるため、

$$u_{2a} = \frac{0.15}{\sqrt{3} \times 10} = 0.00866$$

繰り返し測定によって、表 C. 4 の結果を得たとき、

表 C. 4 充填高の繰り返し測定の結果

回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
測定値 (mm)	10.0	10.0	10.0	10.5	10.0	10.5	10.5	10.0	10.0	10.0

測定値の平均：10.15mm

標準偏差：0.2415mm

$$\frac{0.2415}{10.15} = 0.0238$$

試料の充填高では通常は3回の繰り返しの平均値を採用するため

$$u_{2b} = 0.024 \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.0137$$

したがって、充填高の測定の不確かさは

$$u_{2c} = \sqrt{0.00866^2 + 0.0137^2} = 0.0162$$

次に、充填高の測定の不確かさがピーク効率へ与える影響を算出する。充填高 10mm のとき、661.7keV における高さ校正式（解析プログラムで確認することができる）

$$1/\varepsilon = 25.96624 + 0.7599944 \times h + 0.0005517124 \times h^2$$

に  $h_1 = 10$  および  $h_2 = 10 + 10 \times 0.016 = 10.16$  を代入し、

$$\varepsilon_1 = 0.029743$$

$$\varepsilon_2 = 0.029634$$

よって、試料の充填高の不確かさは

$$u_2 = \frac{|0.029634 - 0.029743|}{0.029743} = 0.00366 \quad (0.366\%)$$

### C. 2. 1. 3 試料の均質性

評価しなくても構わない。

測定容器内での放射性核種の偏在は測定値に大きな影響を与え、不確かさを見積もることは困難である（資 2.1 参照）。したがって、試料調製において測定試料を十分に混合し、均一に測定容器に充填する必要がある。ただし、モンテカルロシミュレーションを用いて、測定容器内の放射性核種の分布を変化させることによって推定することは可能である [11]（資 2.2 参照）。

### C. 2. 2 ピーク効率校正に係る不確かさ

ピーク効率は、校正用線源を測定して得られたピーク効率（実測値）をエネルギーの関数（ピーク効率曲線）とし、その関数から算出するのが一般的な手法である。したがって、ピーク効率校正に係る不確かさを求めるには、関数フィッティングを含めてピーク効率曲線の不確かさを算出しなければならないが、現状では厳密な評価は困難である<sup>2</sup>。そのため、本解説では下記の条件で不確かさを評価することとする<sup>3</sup>。

- ① ピーク効率曲線を大きく湾曲する低エネルギー領域と直線近似できる高エネルギー領域に分割し、2つの関数を用いてフィッティングする場合において、それぞれの領域について不確かさを評価する。なお、本解説で示す計算例では、それぞれの領域に分割するエネルギーが 166keV～320keV の間にあるものとしている。
- ② 校正用線源に含まれる核種の濃度の不確かさなど各要因について、分割したそれぞれのエネルギー領域内の最大値を、そのエネルギー領域の不確かさとして用いる。
- ③ 関数フィッティングの不確かさは、実測値とフィッティング値のずれの情報を基に評価する。なお、フィッティングには最低でもエネルギーの異なる 3 本以上の  $\gamma$  線を用いることとする。

<sup>2</sup> ピーク効率曲線の不確かさを厳密に評価した例もある [25] [26]。

<sup>3</sup> 文部科学省のエネルギー対策特別会計委託事業による委託業務「平成 19 年度放射能分析確認調査」において採用され、それ以降の都道府県を対象とした相互比較分析で継続して用いられてきた評価方法 [28] [29]。

### C. 2. 2. 1 線源の充填高 ( $u_3$ )

#### C. 2. 1. 2 試料の充填高と同様

$$u_3 = \frac{|\varepsilon_2 - \varepsilon_1|}{\varepsilon_1} \quad (\text{C. 15})$$

### C. 2. 2. 2 校正用線源の放射能 ( $u_{4L}$ 、 $u_{4H}$ )

校正用線源に含まれる各核種について、低エネルギー領域および高エネルギー領域に分割し、校正証明書に記載されている不確かさから、相対標準不確かさを求め、その最大値を使用する。

#### 【計算例】

校正用線源の校正証明書に記載されている各核種濃度の不確かさが表 C. 5 であるとき、

表 C. 5 校正用線源の校正証明書に記載された不確かさ

核種	$^{109}\text{Cd}$	$^{57}\text{Co}$	$^{139}\text{Ce}$	$^{51}\text{Cr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{54}\text{Mn}$	$^{88}\text{Y}$	$^{60}\text{Co}$
相対標準 不確かさ (%)	2.75	2.6	2.6	2.65	2.6	2.55	2.55	2.55

低エネルギー領域： $u_{4L} = 2.75\%$

高エネルギー領域： $u_{4H} = 2.65\%$

注 1 相対拡張不確かさ ( $k = 2$ ) が校正証明書に記載されている場合は、その値を 2 で除し、相対標準不確かさとする。

注 2 校正に複数の線源を用いた場合は、低エネルギー領域および高エネルギー領域のそれぞれで、全ての校正用線源に含まれる各核種の相対標準不確かさの最大値を用いる。

### C. 2. 2. 3 ジオメトリ (検出器と線源の位置関係)

評価しなくても構わない。

ホルダなどの治具を用いて、所定の位置に線源を設置できるようにしてある場合は、ジオメトリの不確かさは小さく、他の要因と比較して無視できると考えられるので省略する。一例であるが相対効率 31%、同軸型 p タイプ検出器において、多核種混合容積線源 (U-8 容器、アルミナ製、充填高 4.7cm) を検出器の中心および中心から水平方向に 1mm ずらして測定したときのピーク面積の変化を表 C. 6 に示す。表 C. 6 から線源の設置位置が 1mm ずれたとしてもピーク面積に有意な差は見られず、不確かさは十分に小さいと評価できる。

表 C.6 設置位置の違いによるピーク面積の比較

設置位置	γ線エネルギー		
	88.0keV	661.7keV	1332.5keV
中心	28628.7 ± 196.2	54974.4 ± 241.6	32707.8 ± 182.2
中心から 1mm の位置	28964.3 ± 197.1	54318.7 ± 240.5	32984.7 ± 182.7
中心に対する比	1.012 ± 0.010	0.988 ± 0.006	1.008 ± 0.008

#### C.2.2.4 不感時間

不感時間（検出器回路の動作不能時間）に起因する不確かさは小さく、他の要因と比較して無視できると考えられるので省略する。

#### C.2.2.5 測定系の変動

校正時の測定期間内における測定系の変動に起因する不確かさは小さく、他の要因と比較して無視できると考えられるので省略する。

#### C.2.2.6 計数に係る不確かさ ( $u_{5L}$ 、 $u_{5H}$ )

ピーク面積と計数に係る不確かさから相対標準不確かさを算出する。ただし、各々の核種について算出した相対標準不確かさのうち、低エネルギー領域および高エネルギー領域のそれぞれの最大値をその領域における相対標準不確かさとして使用する。

$$u_5 = \frac{\sigma_N}{N} \quad (C.16)$$

ここで、 $N$ ：ピーク面積  $\sigma_N$ ：計数に係る不確かさ

【計算例】

校正用線源の測定によって、表 C.7 の結果を得たとき、

表 C.7 校正用線源の測定結果

核種(エネルギー)	ピーク面積 (count)	計数に係る 不確かさ	相対標準不確かさ (%)
<sup>109</sup> Cd(88.0 keV)	159954.7	455.3	0.2846
<sup>57</sup> Co(122.1 keV)	240783.0	541.1	0.2247
<sup>139</sup> Ce(165.9 keV)	178768.4	475.8	0.2662
<sup>51</sup> Cr(320.1 keV)	280192.4	548.5	0.1958
<sup>137</sup> Cs(661.7 keV)	73158.2	294.3	0.4023
<sup>54</sup> Mn(834.8 keV)	76776.8	291.4	0.3795
<sup>88</sup> Y(898.0 keV)	62889.9	268.0	0.4261
<sup>60</sup> Co(1173.2 keV)	59521.3	253.3	0.4256
<sup>60</sup> Co(1332.5 keV)	52916.9	237.6	0.4490
<sup>88</sup> Y(1836.1 keV)	34687.4	189.0	0.5449

低エネルギー領域： $u_{5L} = 0.285\%$

高エネルギー領域： $u_{5H} = 0.545\%$

注 校正に複数の線源を用いた場合は、低エネルギー領域および高エネルギー領域のそれぞれで、全ての核種の相対標準不確かさの最大値を用いる。

C.2.2.7  $\gamma$ 線放出率 ( $u_{6L}$ 、 $u_{6H}$ )

解析に使用している核データを参照して相対不確かさを算出し、相対標準不確かさとして使用する。ただし、算出した相対不確かさのうち、低エネルギー領域および高エネルギー領域のそれぞれの最大値をその領域における相対標準不確かさとして使用する。

【計算例】

解析に使用している核種の $\gamma$ 線放出率およびその不確かさを表 C. 8 に示す。

表 C. 8 各核種の $\gamma$ 線放出率およびその不確かさ

核種(エネルギー)	$\gamma$ 線放出率(%)	$\gamma$ 線放出率の不確かさ	相対標準不確かさ(%)
$^{109}\text{Cd}$ (88.0 keV)	3.644	0.016	0.4391
$^{57}\text{Co}$ (122.1 keV)	85.60	0.17	0.1986
$^{139}\text{Ce}$ (165.9 keV)	79.90	—	—
$^{51}\text{Cr}$ (320.1 keV)	9.910	0.010	0.1009
$^{137}\text{Cs}$ (661.7 keV)	85.10	0.20	0.2350
$^{54}\text{Mn}$ (834.8 keV)	99.9760	0.0010	0.0010
$^{88}\text{Y}$ (898.0 keV)	93.7	0.3	0.3202
$^{60}\text{Co}$ (1173.2 keV)	99.85	0.03	0.0300
$^{60}\text{Co}$ (1332.5 keV)	99.9826	0.0006	0.0006
$^{88}\text{Y}$ (1836.1 keV)	99.2	0.3	0.3024

低エネルギー領域： $u_{6L} = 0.439\%$

高エネルギー領域： $u_{6H} = 0.320\%$

C. 2. 2. 8 校正式のフィッティング ( $u_{7L}$ 、 $u_{7H}$ )

各核種 ( $\gamma$ 線) の校正データより、[フィッティング値/実測値]を算出し、分割した各領域における[フィッティング値/実測値]の変動係数を、その領域における校正式のフィッティングの相対標準不確かさとする。

$$u_7 = \frac{f_{STD}}{\bar{f}} \quad (\text{C. 17})$$

ここで、 $\bar{f}$ ：分割した各領域における[フィッティング値/実測値]の平均

$f_{STD}$ ：分割した各領域における[フィッティング値/実測値]の標準偏差



【計算例】

校正用線源を用いてピーク効率校正を行い、表 C.9 の結果を得たとき

表 C.9 各核種の校正データ

核種 エネルギー	フィッティング値	実測値	フィッティング値/ 実測値
<sup>109</sup> Cd(88.0 keV)	0.141720	0.141242	1.003388
<sup>57</sup> Co(122.1 keV)	0.138644	0.140522	0.986636
<sup>139</sup> Ce(165.9 keV)	0.115227	0.113012	1.019600
<sup>51</sup> Cr(320.1 keV)	0.063601	0.064534	0.985549
<sup>137</sup> Cs(661.7 keV)	0.032975	0.032503	1.014506
<sup>54</sup> Mn(834.8 keV)	0.026721	0.026740	0.999283
<sup>88</sup> Y(898.0 keV)	0.025014	0.024792	1.008961
<sup>60</sup> Co(1173.2 keV)	0.019642	0.019650	0.999584
<sup>60</sup> Co(1332.5 keV)	0.017506	0.017529	0.998650
<sup>88</sup> Y(1836.1 keV)	0.013100	0.013151	0.996117

エネルギー領域	フィッティング値/実測値のそれぞれの値	
低エネルギー領域	平均	1.003208
	標準偏差	0.016483
	変動係数	1.643 %
高エネルギー領域	平均	1.000379
	標準偏差	0.009275
	変動係数	0.9271 %

低エネルギー領域： $u_{7L} = 1.64\%$

高エネルギー領域： $u_{7H} = 0.927\%$

注 校正に複数の線源を用いた場合は、各線源について個別に評価を行い、低エネルギー領域および高エネルギー領域のそれぞれで、各線源の中から最大値を用いる。

#### C.2.2.9 サム効果補正

サム効果補正に含まれる不確かさは、相対効率あまり大きくない検出器では、計数に係る不確かさや校正用線源の放射能の不確かさに比べて影響は小さく、また、見積もることが困難であるため必ずしも評価しなくても構わない<sup>4</sup>。ただし、モンテカルロシミュレーションを用いて、ジオメトリやγ線エネルギー、γ線放出率などのパラメータを変化させることによって推定することは可能である [11]。

<sup>4</sup> 核種によらず一律に評価した例もある [27]。

### C.2.2.10 自己吸収補正

評価しなくても構わない。

標準試料の測定時における自己吸収補正に係る不確かさは、校正用線源の組成および均質性が十分に担保できているものとして省略する。

### C.2.2.11 減衰補正 ( $u_{8L}$ 、 $u_{8H}$ )

解析に使用している核データを参照して、半減期、半減期+不確かさのそれぞれで校正日時から測定日時までの経過時間における減衰補正係数を算出し、その差の相対値を相対標準不確かさとする<sup>5</sup>。ただし、算出した相対標準不確かさのうち、分割した各領域に対して、最大値をその領域における相対標準不確かさとして使用する。

$$DF_1 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad (C.18)$$

$$DF_2 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T+\sigma}} \quad (C.19)$$

$$u_8 = \frac{|DF_2 - DF_1|}{DF_1} \quad (C.20)$$

ここで、 $T$ ：半減期  $T + \sigma$ ：半減期+不確かさ  $t$ ：経過時間

$DF_1$ ： $T$ における減衰補正係数  $DF_2$ ： $T + \sigma$ における減衰補正係数

#### 【計算例】

解析に使用している核種の半減期およびその不確かさ、検定日から60日後に測定したと仮定したときの $DF_1$ および $DF_2$ を表C.10に示す。

表 C.10 各核種の半減期およびその不確かさ

核種	半減期	半減期の 不確かさ	$DF_1$	$DF_2$	相対標準 不確かさ(%)
<sup>109</sup> Cd	461.9 (日)	0.4 (日)	0.9139	0.9140	0.007791
<sup>57</sup> Co	271.74 (日)	0.06 (日)	0.8581	0.8581	0.003379
<sup>139</sup> Ce	137.641 (日)	0.02 (日)	0.7392	0.7393	0.004390
<sup>51</sup> Cr	27.704 (日)	0.003 (日)	0.2229	0.2229	0.016256
<sup>137</sup> Cs	30.08 (年)	0.09 (年)	0.9962	0.9962	0.001130
<sup>54</sup> Mn	312.2 (日)	0.2 (日)	0.8753	0.8754	0.008529
<sup>88</sup> Y	106.627 (日)	0.021 (日)	0.6770	0.6771	0.007681
<sup>60</sup> Co	1925.28 (日)	0.14 (日)	0.9786	0.9786	0.0001571

低エネルギー領域： $u_{8L} = 0.00779\%$

高エネルギー領域： $u_{8H} = 0.0163\%$

<sup>5</sup> 校正日時から測定日時までの期間が短い場合は、減衰補正に係る不確かさは小さいため評価を省略してもよい。

### C. 2. 3 試料の測定に係る不確かさ

#### C. 2. 3. 1 ジオメトリ（検出器と試料の位置関係）

C. 2. 2. 3 ジオメトリ（検出器と試料の位置関係）と同様

#### C. 2. 3. 2 不感時間

C. 2. 2. 4 不感時間と同様

#### C. 2. 3. 3 測定系の変動 ( $u_9$ )

精度管理により設定されている変動幅の許容基準（相対値）を上下限とする矩形分布とする。

$$u_9 = \frac{Ac}{\sqrt{3}} \quad (C. 21)$$

ここで、 $Ac$ ：変動幅の許容基準の上限

また、精度管理（トレンドチャート）によって測定系の変動が得られている場合は、その値を不確かさとする。ただし、その場合は C. 2. 3. 1 検出器と試料とのジオメトリの不確かさも含まれるため、重複しないように注意が必要である。

#### 【計算例】

基準線源の測定によって精度管理をし、許容基準を±5%としているとき、

$$u_9 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.0289 \quad (2.89\%)$$

#### C. 2. 3. 4 サム効果補正

C. 2. 2. 9 サム効果補正と同様

#### C. 2. 3. 5 自己吸収補正

評価しなくても構わない<sup>6</sup>。

試料の測定時における自己吸収補正に係る不確かさは、測定試料の組成および均質性に起因し、見積もることが困難であるため省略する。ただし、モンテカルロシミュレーションを用いて、ジオメトリや線源の密度、 $\gamma$ 線エネルギーなどのパラメータを変化させることによって推定することは可能である [11]。

#### C. 2. 3. 6 $\gamma$ 線放出率 ( $u_{10}$ )

C. 2. 2. 7  $\gamma$ 線放出率と同様

なお、測定ごとに測定対象核種について評価する。

---

<sup>6</sup> 一律に評価した例もある [27]

C. 2. 3. 7 減衰補正 ( $u_{11}$ )

C. 2. 2. 11 減衰補正と同様

ただし、経過時間は試料採取に係る基準日時から測定日時までとする。

$$u_{11} = \frac{|DF_2 - DF_1|}{DF_1} \quad (\text{C. 22})$$

なお、測定ごとに測定対象核種について評価する。

C. 2. 3. 8 計数に係る不確かさ ( $u_{12}$ )

C. 2. 2. 6 計数に係る不確かさと同様

$$u_{12} = \frac{\sigma_N}{N} \quad (\text{C. 23})$$

なお、測定ごとに測定対象核種について評価する。

表 C.11 不確かさバジェットシート

不確かさの要因	低エネルギー領域	高エネルギー領域
C.2.1 測定試料		
C.2.1.1 秤量	$u_1$	
C.2.1.2 試料の充填高	$u_2$	
C.2.1.3 試料の均質性	評価しなくても構わない	
C.2.2 ピーク効率校正		
C.2.2.1 線源の充填高	$u_3$	
C.2.2.2 校正用線源の放射能	$u_{4L}$	$u_{4H}$
C.2.2.3 ジオメトリ	評価しなくても構わない	
C.2.2.4 不感時間	評価しなくても構わない	
C.2.2.5 測定系の変動	評価しなくても構わない	
C.2.2.6 計数に係る不確かさ	$u_{5L}$	$u_{5H}$
C.2.2.7 $\gamma$ 線放出率	$u_{6L}$	$u_{6H}$
C.2.2.8 校正式のフィッティング	$u_{7L}$	$u_{7H}$
C.2.2.9 サム効果補正	評価しなくても構わない	
C.2.2.10 自己吸収補正	評価しなくても構わない	
C.2.2.11 減衰補正	$u_{8L}$	$u_{8H}$
C.2.3 試料の測定		
C.2.3.1 ジオメトリ	評価しなくても構わない	
C.2.3.2 不感時間	評価しなくても構わない	
C.2.3.3 測定系の変動	$u_9$	
C.2.3.4 サム効果補正	評価しなくても構わない	
C.2.3.5 自己吸収補正	評価しなくても構わない	
C.2.3.6 $\gamma$ 線放出率	$u_{10}$	
C.2.3.7 減衰補正	$u_{11}$	
C.2.3.8 計数に係る不確かさ	$u_{12}$	
相対合成標準不確かさ	$u_{relL}$	$u_{relH}$

表 C.12 不確かさバジェットシート (計算例)

不確かさの要因	低エネルギー領域	高エネルギー領域
C.2.1 測定試料		
C.2.1.1 秤量	0.0444%	
C.2.1.2 試料の充填高	0.366%	
C.2.1.3 試料の均質性	評価しなくても構わない	
C.2.2 ピーク効率校正		
C.2.2.1 線源の充填高	0.366%	
C.2.2.2 校正用線源の放射能	2.75%	2.65%
C.2.2.3 ジオメトリ	評価しなくても構わない	
C.2.2.4 不感時間	評価しなくても構わない	
C.2.2.5 測定系の変動	評価しなくても構わない	
C.2.2.6 計数に係る不確かさ	0.285%	0.545%
C.2.2.7 $\gamma$ 線放出率	0.439%	0.320%
C.2.2.8 校正式のフィッティング	1.64%	0.927%
C.2.2.9 サム効果補正	評価しなくても構わない	
C.2.2.10 自己吸収補正	評価しなくても構わない	
C.2.2.11 減衰補正	0.00779%	0.0163%
C.2.3 試料の測定		
C.2.3.1 ジオメトリ	評価しなくても構わない	
C.2.3.2 不感時間	評価しなくても構わない	
C.2.3.3 測定系の変動	2.89%	
C.2.3.4 サム効果補正	評価しなくても構わない	
C.2.3.5 自己吸収補正	評価しなくても構わない	
試料の測定における $\gamma$ 線放出率、減衰補正および計数に係る不確かさを除く相対合成標準不確かさ	4.38%	4.11%
C.2.3.6 $\gamma$ 線放出率	測定ごとに評価	
C.2.3.7 減衰補正	測定ごとに評価	
C.2.3.8 計数に係る不確かさ	測定ごとに評価	
相対合成標準不確かさ	測定ごとに評価	

#### C.2.4 実際の環境試料を測定した際の不確かさの計算例

ここでは環境試料の測定結果を例に、それぞれの不確かさ要因が最終的な測定値の不確かさに与える影響の大きさを比較する。

ある土壌試料を測定し、 $^{137}\text{Cs}$  の測定値が  $1.87 \text{ Bq/kg}$   
(ピーク面積  $426.4 \pm 38.6$ ) であった場合、

計数に係る不確かさ (相対標準不確かさ) はピーク面積から

$$\frac{38.6}{426.4} = 0.0905$$

また、 $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線放出率の不確かさ (相対標準不確かさ) は表 C.8 から

$$0.235\%$$

なお、試料の測定における減衰補正に係る不確かさは、試料採取に係る基準日時から測定日時までの期間が、対象核種 ( $^{137}\text{Cs}$ ) の半減期に比べて十分短いため省略する。表 C.12 から試料の測定における  $\gamma$  線放出率、減衰補正および計数に係る不確かさを除く相対合成標準不確かさが  $4.11\%$  であるため、測定値の相対合成標準不確かさは

$$\sqrt{0.0411^2 + 0.0905^2 + 0.00235^2} = 0.0994 \quad (9.94\%)$$

したがって、測定値の標準不確かさは

$$1.87 \times 0.0994 = 0.1859 \approx 0.19 \text{ (Bq/kg)}$$

このとき、測定値の不確かさに対する各不確かさ要因の寄与の大きさを次式によって評価した。

$$S_j = \frac{\{u(x_j)/x_j\}^2}{\sum_{i=1}^n \{u(x_i)/x_i\}^2} \times 100 \quad (\text{C.24})$$

ここで、 $S_j$  : 各不確かさ要因の寄与 (%)

$u(x_i)/x_i$  : 入力量  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  の相対標準不確かさ

評価の結果、各不確かさ要因の寄与の大きさは図 C.2 のようになった。

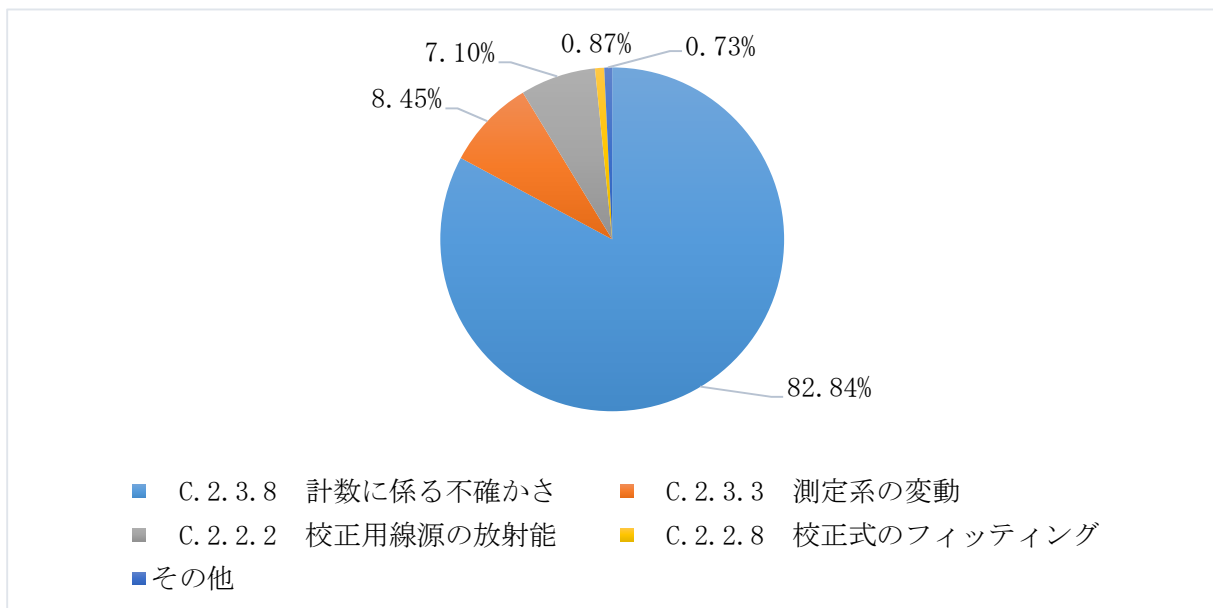


図 C.2 各不確かさ要因の寄与の大きさ

図 C.2 から、不確かさ要因で寄与が大きいものは計数に係る不確かさ、測定系の変動、校正用線源の放射能であったことが分かった。必ずしも全てではないが、環境試料の測定において、検出される核種は低濃度であることが多く、計数に係る不確かさの寄与が最も大きくなる場合が多い。

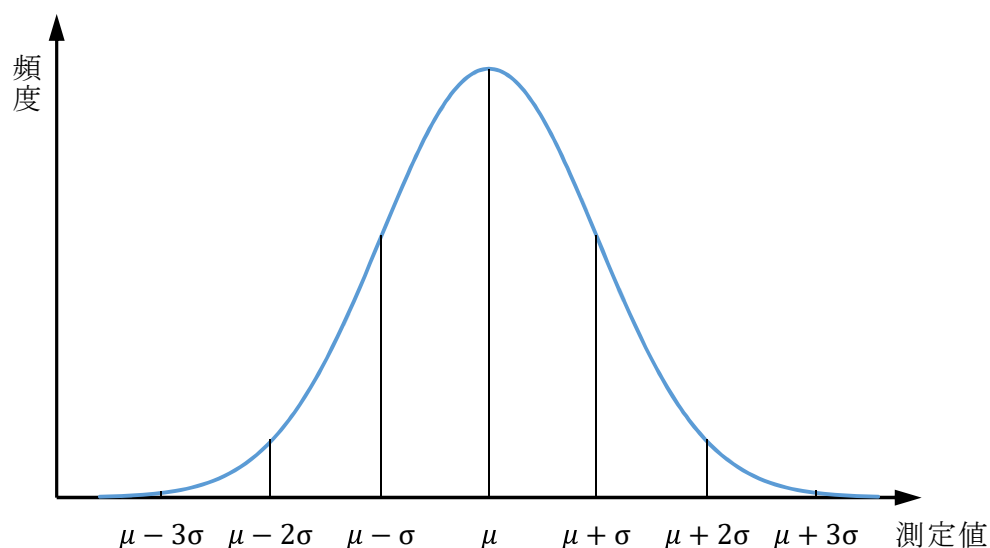
各不確かさ要因の寄与の大きさを比較し、寄与の大きい要因については、測定手順や評価方法を見直すことによって不確かさを小さくすることができるか検討することが望ましい。この例の場合では、計数に係る不確かさの寄与が最も大きいため、測定時間を長くすることによって不確かさを小さくすることができる。



## 解説 D 検出下限値の計算例

検出下限値の算出は Cooper の方法 [12]、Kaiser の方法 [13]、Currie の方法 [14] および ISO11929 [15] による評価方法等がある。本解説では、Cooper の方法および ISO11929 による評価方法それぞれの検出下限値の概念と算出の例を示す。

それぞれの検出下限値の概念において、測定値の分布を考慮されたい。ある測定対象を十分な回数だけ測定を繰り返すと、測定値は図 D.1 のように平均を頂点とした正規分布あるいはガウス分布といわれる数学モデルで表現される。



$\mu$  : 測定値の平均

$\sigma$  : 測定値の分布の標準偏差

図 D.1 測定値の分布

測定値は図 D.1 の分布において、約 68% が  $\mu \pm \sigma$  の範囲、約 95% が  $\mu \pm 2\sigma$  の範囲、約 99.7% が  $\mu \pm 3\sigma$  の範囲に含まれる。

### D.1 Cooper の方法による検出下限値

#### D.1.1 概念

サンプルの測定において、測定の対象となる放射性核種が全く含まれていないとき、測定対象核種のピーク領域の正味の計数値すなわちピーク面積は図 D.2 のような分布となる。このとき、ピーク面積を  $N_m$ 、計数に係る不確かさ（標準不確かさ）を  $\sigma$  として、 $N_m = k\sigma$  となるピーク面積を最低検出計数値として、検出下限値を定義する。

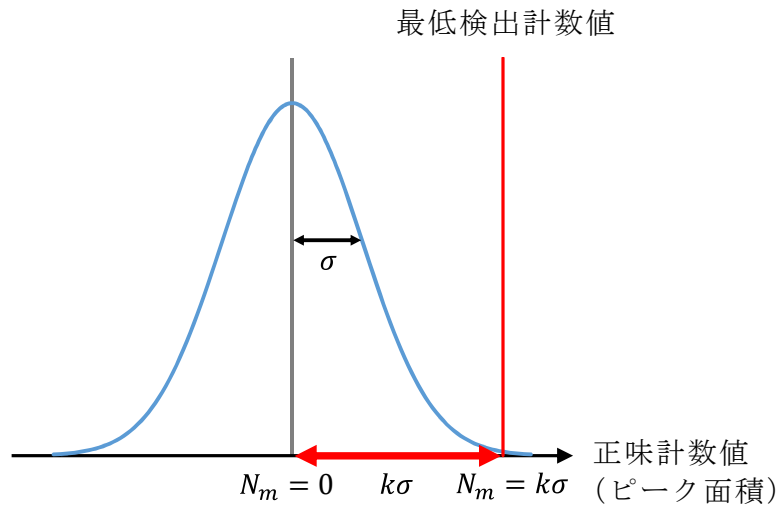


図 D. 2 Cooper の方法による検出下限値の概念図

#### D. 1. 2 検出下限値の算出

ピークの最低検出計数値  $N_m$  を次のように定義する。

$$N_m = k\sigma \tag{D. 1}$$

ここで、

- $\sigma$  計数に係る不確かさ
- $k$  包含係数 (3 とすることが多い)

図 D. 3 のように勾配のないベースラインをもったピークでは、チャンネル  $i$  の計数値を  $n_i$  とすると (資料 1.1 参照)

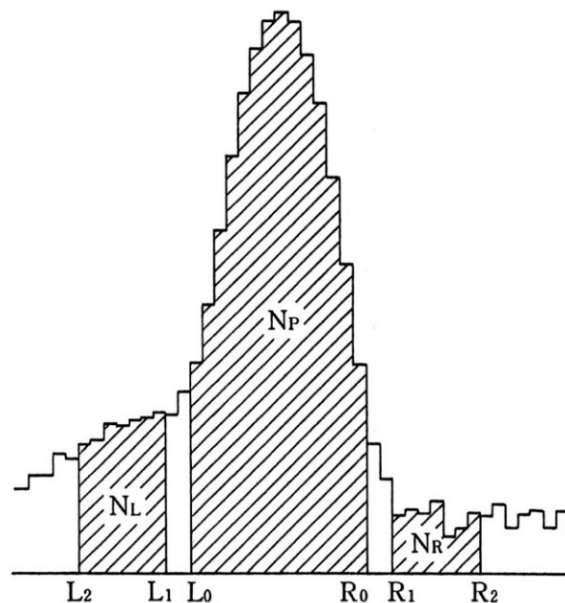


図 D. 3 勾配のないベースラインをもったピーク

$$N_P = \sum_{i=L_0}^{R_0} n_i, \quad N_L = \sum_{i=L_2}^{L_1} n_i, \quad N_R = \sum_{i=R_1}^{R_2} n_i$$

$$\beta_L = \frac{R_0 - L_0 + 1}{2(L_1 - L_2 + 1)}, \quad \beta_R = \frac{R_0 - L_0 + 1}{2(R_2 - R_1 + 1)}$$

ピーク領域内のベースライン部分の面積は $\beta_L N_L + \beta_R N_R$ であるから、ピーク面積は  
 $N_m = N_P - \beta_L N_L - \beta_R N_R$

このとき、ピーク面積の計数に係る不確かさ $\sigma$ は

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= (\sqrt{N_P})^2 + (\beta_L \sqrt{N_L})^2 + (\beta_R \sqrt{N_R})^2 \\ &= N_m + \beta_L N_L + \beta_R N_R + \beta_L^2 N_L + \beta_R^2 N_R \\ &= N_m + \beta_L(1 + \beta_L)N_L + \beta_R(1 + \beta_R)N_R \end{aligned}$$

となる。これを式(D.1)に代入して

$$N_m = k\sqrt{N_m + \beta_L(1 + \beta_L)N_L + \beta_R(1 + \beta_R)N_R}$$

これを解いて、最低検出計数値は

$$N_m = \frac{k^2 + k\sqrt{k^2 + 4\{\beta_L(1 + \beta_L)N_L + \beta_R(1 + \beta_R)N_R\}}}{2} \quad (\text{D. 2})$$

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できる。

$$\begin{aligned} N_m &= N_P - (N_1 + N_2 + \dots + N_n) \\ &= \frac{k^2 + k\sqrt{k^2 + 4\{(N_1 + \sigma_1^2) + (N_2 + \sigma_2^2) + \dots + (N_n + \sigma_n^2)\}}}{2} \end{aligned} \quad (\text{D. 3})$$

ここで、 $N_P$  ピーク領域の面積  
 $N_i$  差し引くべき面積  
 $\sigma_i$  差し引くべき面積の計数に係る不確かさ

得られた最低検出計数値を放射能または放射能濃度に換算し、検出下限値とする。

## D.2 IS011929 による検出下限値

### D.2.1 概念

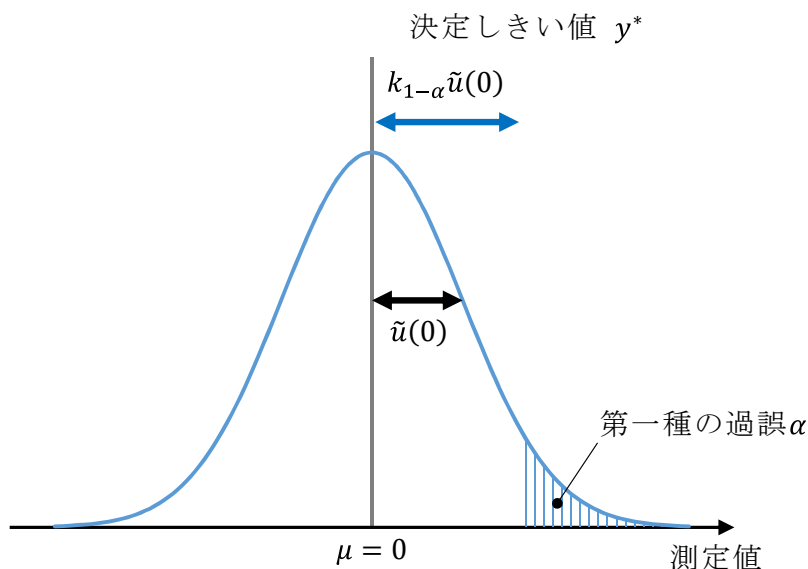
IS011929 による検出下限値は従来法である Currie の方法の概念を拡張し、計数以外に係る不確かさを取り扱えるようにしたものである。

また、IS011929 による検出下限値において、計数以外に係る不確かさを考慮しない

場合は、Cooper の方法 (k=3.29) で求めた計算結果にほぼ一致する<sup>1</sup>。

- ・ 決定しきい値 :  $y^* = k_{1-\alpha} \times \tilde{u}(0)$  ※  $\tilde{u}(0)$  : 真値が0の場合の測定値の標準不確かさ  
物理的影響が存在すると決定する値で、次のようにブランク測定の分布により定義される。

測定の対象となる放射性核種を全く含まないブランク測定において、測定値は図 D.4 のような分布 ( $\mu = 0$ ) となる。この分布において、第一種の過誤となる確率 (危険率) を  $\alpha$  としたとき、上側  $100\alpha$  パーセント点を超える測定値を、ブランクとは有意に異なり、物理的影響が存在する値として、決定しきい値とする。



$\tilde{u}(0)$  : 真値が0の場合の測定値の標準不確かさ

$k_{1-\alpha}$  : 第一種の過誤となる確率が  $\alpha$  となる包含係数

図 D.4 ISO11929 による決定しきい値

- ・ 検出下限値 :  $y^\# = y^* + k_{1-\beta} \times \tilde{u}(y^\#)$   
※  $\tilde{u}(y^\#)$  : 真値が  $y^\#$  の場合の測定値の標準不確かさ  
測定値がブランクによるものだけではなく試料に由来するものであるとする値で、次のように定義される。

サンプルの測定において、測定量の真値が決定しきい値より大きい値ではあるが決定しきい値に近い値であるとき、測定値は図 D.5 のような分布となり、ブランク測定の分布と重なる。

<sup>1</sup> 計数に係る不確かさとして、何を考慮したかが厳密に同じでないと計算結果は一致しない (ピーク面積、ベースライン面積、妨害ピーク面積、ピークバックグラウンド面積等)。

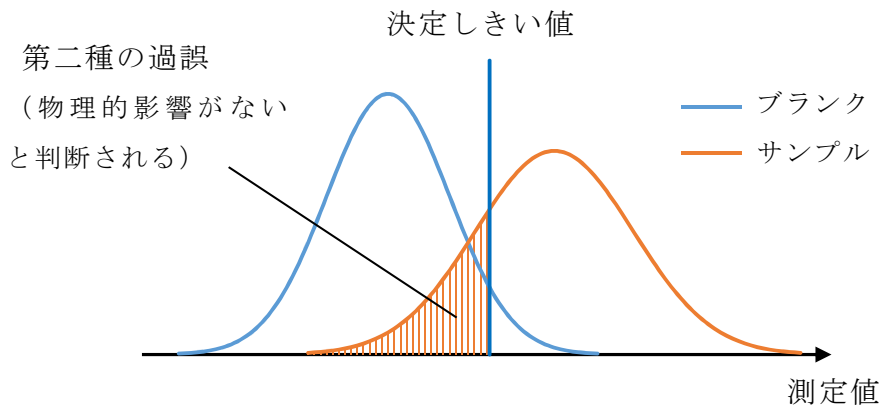
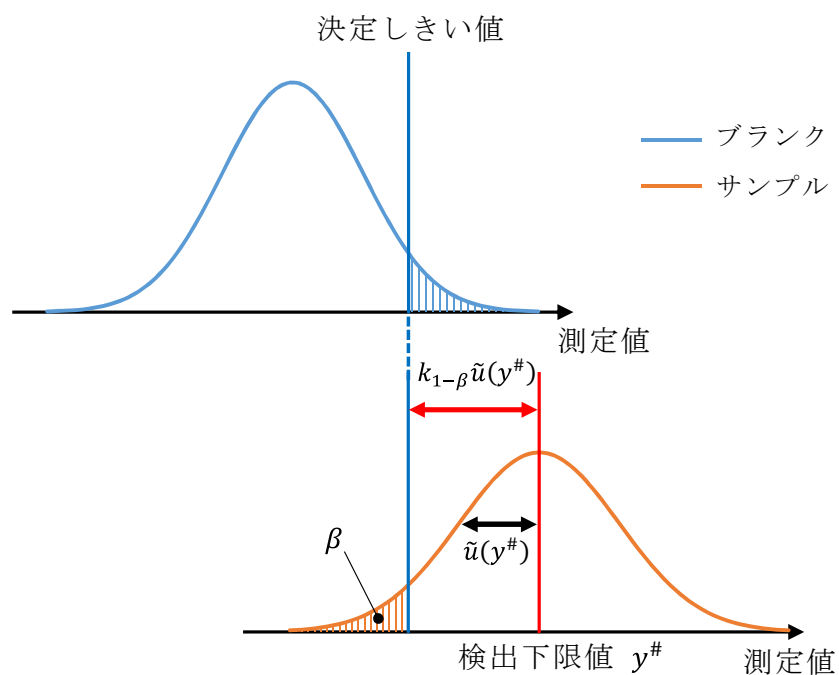


図 D.5 測定量の真値が決定しきい値に近い値のときの測定値の分布

このとき、図 D.5 の斜線で示された領域の測定値は決定しきい値を下回り物理的影響は存在しないと判断される。そこで、第二種の過誤となる確率を $\beta$ としたとき、図 D.6 のように、サンプル測定の分布において、下側 $100\beta$ パーセント点が決まりしきい値と一致するときの測定対象量の真値を検出下限値とする。



$\tilde{u}(y^\#)$  : 真値が $y^\#$ の場合の測定値の標準不確かさ

$k_{1-\beta}$  : 第二種の過誤の確率が $\beta$ となる包含係数

図 D.6 ISO11929 による検出下限値

検出下限値は、ガイドライン値 $y_r$ との比較により測定手順の評価に用いられる。

( $y^\# < y_r$ のとき、測定手順は適切と評価される)

ここで、ISO11929-1:2019 によるガイドライン値 $y_r$ とは以下のとおりである。

検出下限値に関する科学的、法的、その他の要件に対応した値であり、検出下限値との比較による測定手順の評価を目的とした値。

注記 1 ガイドライン値は例えば、放射能、比放射能、放射能濃度・放射能面密度や線量率等で与えられる。

注記 2 検出下限値とガイドライン値との比較によって、測定手順がガイドライン値から定められた要件を満たす、すなわち、測定目的に適合するかどうかを決定する。検出下限値がガイドライン値よりも小さい場合、測定手順は要件を満たしている。

注記 3 適合要求や規制限度によって規定されている値と混在してはならない。

また、 $\alpha = \beta = 0.05$  (5%) のとき包含係数  $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} \approx 1.645$  である。

図 D.7 は決定しきい値と検出下限値の概念を 1 つの図にまとめたものである。

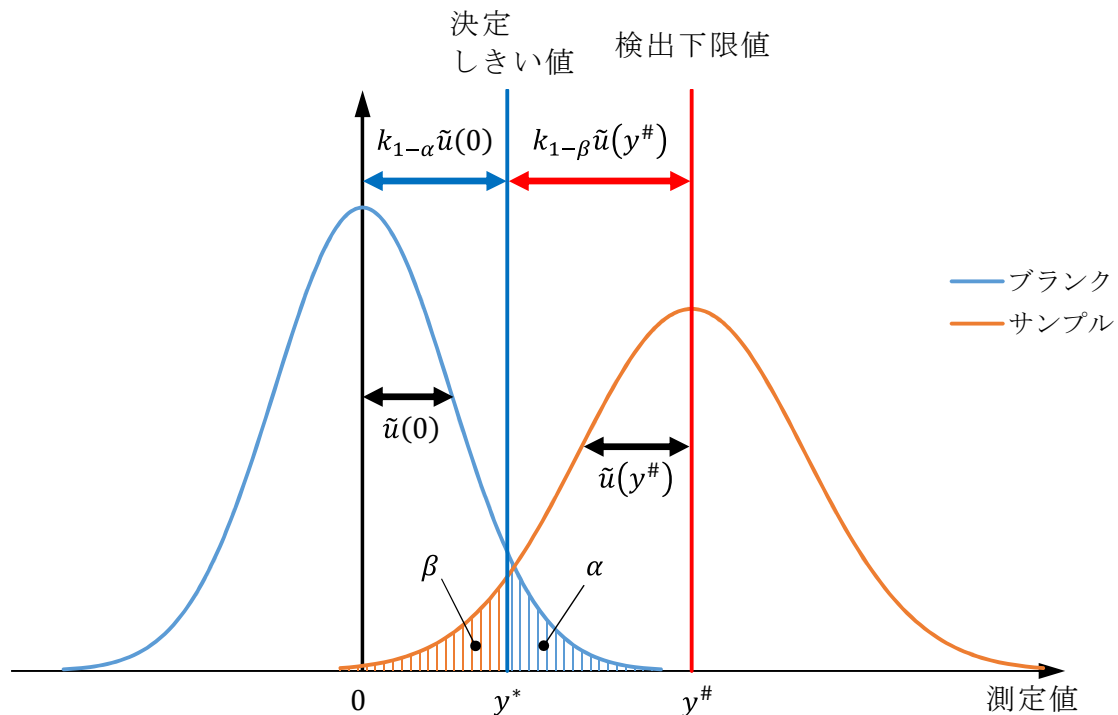


図 D.7 ISO11929 による検出下限値の概念

<定義> ISO 11929-1:2019 より抜粋

ISO 11929-1:2019 における decision threshold と detection limit の定義を和訳と共に下記に示す。

### 3.12 Decision threshold

Value of the estimator of the measurand, which when exceeded by the result of an actual measurement using a given measurement procedure of a measurand quantifying a physical effect, is used to decide that the physical effect is present

Note 1 to entry: The decision threshold is defined such that in cases where the measurement result,  $y$ , exceeds the decision threshold,  $y^*$ , the probability

of a wrong decision, namely that the true value of the measurand is not zero if in fact it is zero, is less or equal to a chosen probability  $\alpha$ .

Note 2 to entry: If the result,  $y$ , is below the decision threshold,  $y^*$ , it is decided to conclude that the result cannot be attributed to the physical effect; nevertheless, it cannot be concluded that it is absent.

### 3.12 決定しきい値

物理的影響を定量化するための既定の測定手順を用いた実際の測定結果がこれを上回ったときに物理的影響があると決定するために用いられる、測定量の推定値。

注記 1 測定結果 $y$ が決定しきい値 $y^*$ を超えたとき、間違った決定を行う確率、すなわち実際はゼロにもかかわらず測定量がゼロではないとする確率が、選択されている確率 $\alpha$ 以下となるように、決定しきい値は定義される。

注記 2 もし結果 $y$ が決定しきい値 $y^*$ を下回ったときは、この結果が物理的影響に起因するとはいえないと結論付けることができる。しかしながら、物理的影響がないと結論付けることはできない。

### 3.13 Detection limit

Smallest true value of the measurand which ensures a specified probability of being detectable by the measurement procedure

Note 1 to entry: With the decision threshold according to 4.13, the detection limit is the smallest true value of the measurand for which the probability of wrongly deciding that the true value of the measurand is zero is equal to a specified value,  $\beta$ , when, in fact, the true value of the measurand is not zero. The probability of being detectable is consequently  $(1 - \beta)$ .

Note 2 to entry: The terms detection limit and decision threshold are used in an ambiguous way in different standards (e.g. standards related to chemical analysis or quality assurance). If these terms are referred to one has to state according to which standard they are used.

### 3.13 検出下限値

その測定手順によって検出できる特定の確率を保証する測定量の最小の真値。

注記 1 検出下限値は 4.13 の決定しきい値において、実際に測定量の真値がゼロでないときに、測定量の真値がゼロであるという誤った決定がされる確率が特定値  $\beta$  に等しくなるときの測定量の最小の真値である。そのため、検出される確率は  $(1 - \beta)$  となる。

注記 2 検出下限値および決定しきい値の用語は様々な規格（化学分析に関する規格や品質保証に関する規格等）において、複数の意味で使われる。これらの用語を引用するのであれば、用語が使われている規格のうちのどれに従っているかを明示する必要がある。

## D. 2. 2 検出下限値の算出

IAEA より出版されている Analytical Quality in Nuclear Applications Series No.48 『Determination and Interpretation of Characteristic Limits for Radioactivity Measurements』に記載されているモデル式を用いて、解析領域にピークが存在しない、および存在する場合での検出下限値の計算例を示す。

計算には、土壌試料 0.1054 kg をポリプロピレン製円筒形容器 (U-8 容器) に 50mm の高さに充填し、約 70,000 秒測定したスペクトルデータを用いた。なお、計算に使用した核種はスペクトル形状の観点から選択されたものであり、それ以外の特段の理由はない。

### D. 2. 2. 1 計数值から放射能を求める一般式

$$A = n_n \cdot w \quad (\text{D. 4})$$

ここで、

$A$  放射能 (Bq) または放射能濃度 (Bq/kg、Bq/L 等)

$n_n$  ピーク領域の正味のカウント数

$w$  ピーク面積から放射能または放射能濃度への換算係数

$$w = \frac{1}{t \cdot \varepsilon_E \cdot a \cdot m \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3}$$

$t$  測定時間 (s)

$\varepsilon_E$  エネルギー  $E$  での検出効率

$a$   $\gamma$  線放出率

$m$  供試量 (kg、L 等)

ただし、 $A$  を放射能として求める場合は不要

$f_1$  減衰補正係数

$f_2$  自己吸収補正係数

$f_3$  サム効果補正係数

### D. 2. 2. 2 決定しきい値

$$A^* = k_{1-\alpha} \cdot w \cdot \sqrt{n_0 \cdot \frac{x_g}{x_0} \cdot \left(1 + \frac{x_g}{x_0}\right)} \quad (\text{D. 5})$$

ここで、

$A^*$  決定しきい値 (Bq または Bq/kg、Bq/L 等)

$k_{1-\alpha}$  第一種の過誤が  $\alpha$  となる包含係数

$n_0$  ベースライン領域のカウント数の合計

$x_g$  ピーク領域のチャンネル数

$x_0$  ベースライン領域のチャンネル数の合計



注 式(D.5)の  $n_0 \cdot \frac{x_g}{x_0}$  はピーク領域内のベースライン部分の面積を表す。

なお、妨害ピークが存在する場合など、より一般的な場合は参考文献 [16]を参照のこと (5.4.6.5 Continuous background, the specified activity of the value is not zero, there are overlapping peaks)。

### D.2.2.3 検出下限値

$$A^\# = \frac{2 \cdot A^* + k^2 \cdot w}{1 - k^2 \cdot u_{rel}(w)^2} \quad (D.6)$$

ここで、

- $A^\#$  検出下限値 (Bq または Bq/kg、Bq/L 等)
- $k$  包含係数
  - $k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta}$
  - $k_{1-\beta}$  第二種の過誤が $\beta$ となる包含係数
- $u_{rel}(w)$  換算係数 $w$ の相対標準不確かさ
  - 試料測定の数値に係る不確かさを除き、測定に係る全ての不確かさを合成した相対標準不確かさ

### D.3 検出下限値の計算例

#### D.3.1 解析領域にピークが存在しない場合

$^{59}\text{Fe}$  (1291.6keV)

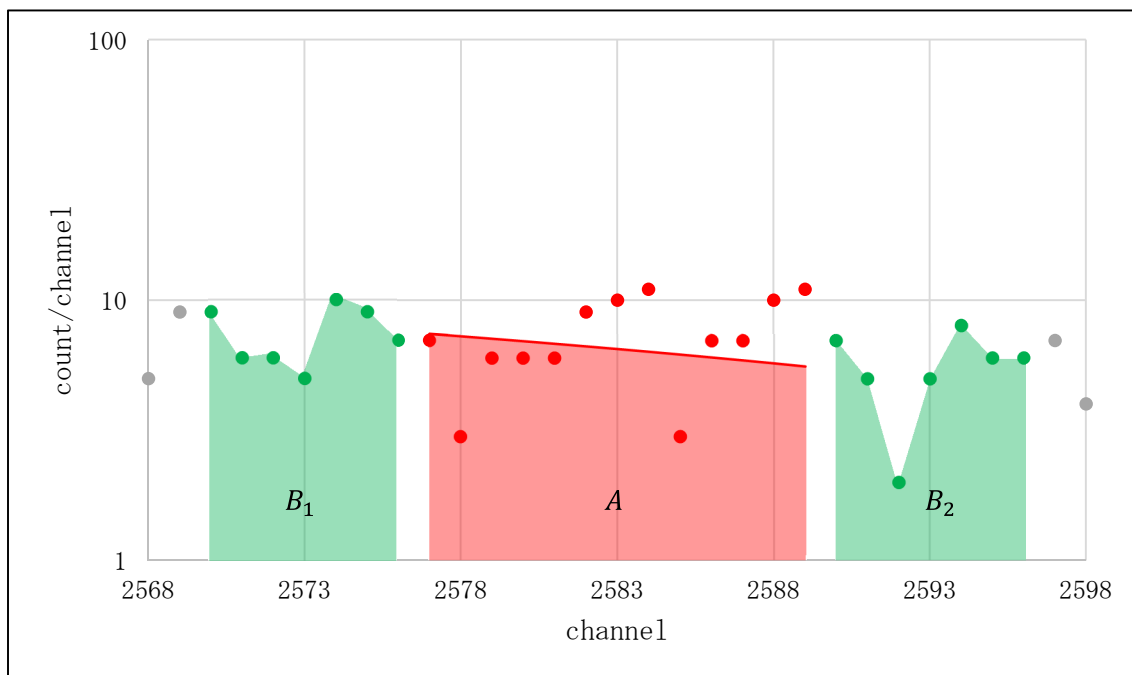


図 D.8  $^{59}\text{Fe}$  の解析領域

表 D.1 各領域のチャンネルとカウントデータ

領域 $B_1$		領域 $A$		領域 $B_2$	
チャンネル	カウント	チャンネル	カウント	チャンネル	カウント
2570	9	2577	7	2590	7
2571	6	2578	3	2591	5
2572	6	2579	6	2592	2
2573	5	2580	6	2593	5
2574	10	2581	6	2594	8
2575	9	2582	9	2595	6
2576	7	2583	10	2596	6
		2584	11		
		2585	3		
		2586	7		
		2587	7		
		2588	10		
		2589	11		

• Cooper の方法による検出下限値

表 D.2 各パラメータと決定しきい値および検出下限値

パラメータ	値
$\beta_L$	0.9286
$\beta_R$	0.9286
$N_L$ (低エネルギー側ベースラインの面積)	52
$N_R$ (高エネルギー側ベースラインの面積)	39
$k$	3
$N_m$ (最低検出計数值)	43.06
検出下限値 (Bq/kg)	1.654

・ IS011929 による検出下限値

表 D.3 各パラメータと決定しきい値および検出下限値

パラメータ	値
$x_g$ (ピーク領域チャンネル数)	13
$x_0$ (ベースライン領域 1、2 チャンネル数合計)	14
$n_0 \frac{x_g}{x_0}$	84.50
$\sqrt{n_0 \frac{x_g}{x_0} \left(1 + \frac{x_g}{x_0}\right)}$	12.77
$w$	0.03840
$u_{rel}(w)$ (解説 C 表 C.12 の下から 5 行目参照)	0.04110
$k$ ( $\alpha = \beta = 0.05(5\%)$ )	1.645
決定しきい値 $A^*$ (Bq/kg)	0.8065
検出下限値 $A^\#$ (Bq/kg)	1.725

D.3.2 解析領域にピークが存在する場合

$^{228}\text{Ac}$  (911.2keV)

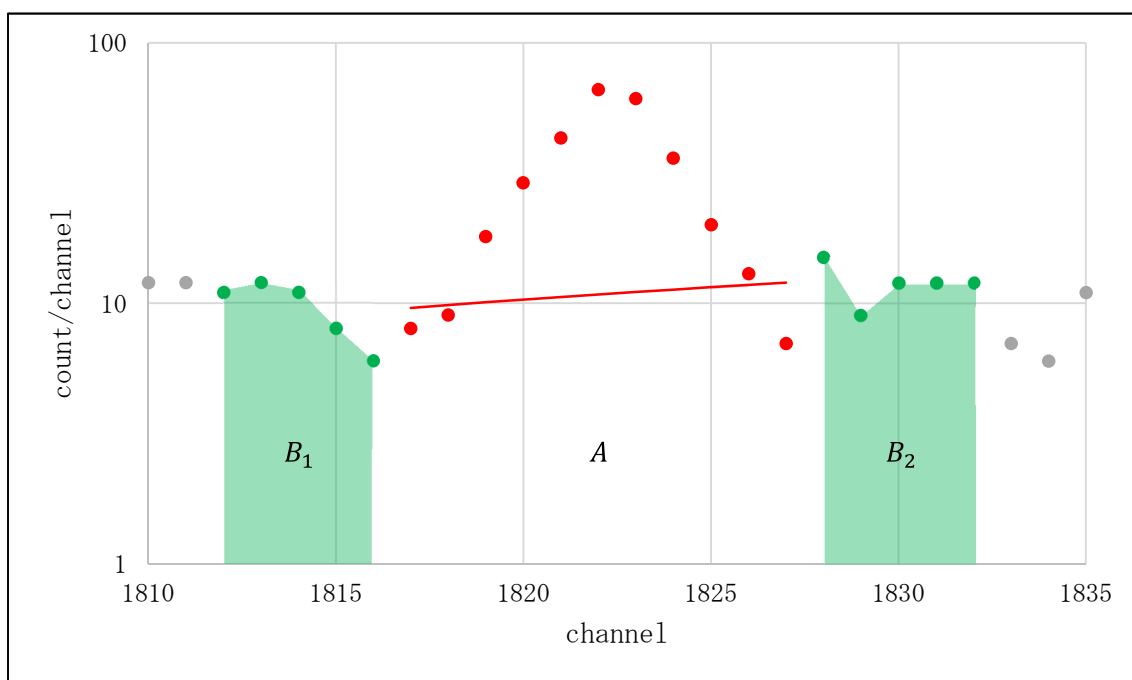


図 D.9  $^{228}\text{Ac}$  の解析領域

表 D. 4 各領域のチャンネルとカウントデータ

領域 $B_1$		領域 $A$		領域 $B_2$	
チャンネル	カウント	チャンネル	カウント	チャンネル	カウント
1812	11	1817	8	1828	15
1813	12	1818	9	1829	9
1814	11	1819	18	1830	12
1815	8	1820	29	1831	12
1816	6	1821	43	1832	12
		1822	66		
		1823	61		
		1824	36		
		1825	20		
		1826	13		
		1827	7		

・ Cooper の方法による検出下限値

表 D. 5 各パラメータと決定しきい値および検出下限値

パラメータ	値
$\beta_L$	1.100
$\beta_R$	1.100
$N_L$ (低エネルギー側ベースラインの面積)	48
$N_R$ (高エネルギー側ベースラインの面積)	60
$k$	3
$N_m$ (最低検出計数值)	52.10
検出下限値 (Bq/kg)	2.509

・ IS011929 による検出下限値

表 D.6 各パラメータと決定しきい値および検出下限値

パラメータ	値
$x_g$ (ピーク領域チャンネル数)	11
$x_0$ (ベースライン領域 1、2 チャンネル数合計)	10
$n_0 \frac{x_g}{x_0}$	118.8
$\sqrt{n_0 \frac{x_g}{x_0} \left(1 + \frac{x_g}{x_0}\right)}$	15.79
$w$	0.04816
$u_{rel}(w)$ (解説 C 表 C.12 の下から 5 行目参照)	0.04110
$k (\alpha = \beta = 0.05(5\%))$	1.645
決定しきい値 $A^*$ (Bq/kg)	1.251
検出下限値 $A^\#$ (Bq/kg)	2.645



資 料





## 資料1 $\gamma$ 線スペクトル解析で用いられる計算手法

平成4年改訂のマニュアルは解析ソフトウェア開発者向けの内容を多く含む構成であったが、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、原子力施設等の周辺監視等において平常時に実施される環境試料の $\gamma$ 線スペクトロメトリーの基本的事項について記述する構成とした。

そのため、平成4年改訂のマニュアルに記載された解析手法の詳細は本文には記述されていない。一方、これらの手法は現在も使われる手法であり、本マニュアルへの記載が求められている。また、参考文献として平成4年改訂のマニュアルを引用している文献等への対応も必要となる。このような背景を踏まえ、資料1では、解析に用いられる計算手法の詳細および技術情報を掲載した。

## 資料 1.1 ピーク解析

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、光電ピーク（全エネルギーピーク）の面積から放射能を計算する。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。放射能の定量には次の2つの方法がある。

- ・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。
- ・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解析結果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。そのため両者を適切に併用する必要がある。

### 資 1.1.1 ピークサーチと FWHM

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

- 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、その計数に係る不確かさ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三点計数値法または 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）に他のピークがないものを、FWHM およ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）、<sup>214</sup>Pb、<sup>208</sup>Tl、<sup>214</sup>Bi、<sup>40</sup>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」で関数適合する。結果のピーク中心と FWHM と（面積とそれらの）不確かさをリストアップする。
- ⑤FWHM を  $a + b \times \sqrt{(\text{エネルギー})}$  に関数適合させ、 $X^2$ 検定する。

- ・電子対消滅放射線（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<sup>1</sup>。
- ・ $X^2$ 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 $X^2$ 検定をやり直す。

$$|W_i - W(E_i)| / \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma(E_i)^2} \quad (\text{資 1.1.1})$$

- $W_i$  : 各ピークの半値幅  
 $W(E_i)$  : 半値幅－エネルギーの式から求めた半値幅  
 $\sigma_i$  : 各ピークの半値幅の不確かさ  
 $\sigma(E_i)$  : 半値幅－エネルギー式の不確かさ

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ときは修正し、①へ戻り、フィルタの作成からやり直す。

(2) ピークサーチ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  $kW$ （このとき、 $k = 1\sim 2$ ）を持つガウス関数を、2 回微分し、数値フィルタを作る。

$$F(x) = \exp\left\{-\frac{2.773}{(kW)^2}(x-P)^2\right\} \quad (\text{資 1.1.2})$$

$P$  : 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、

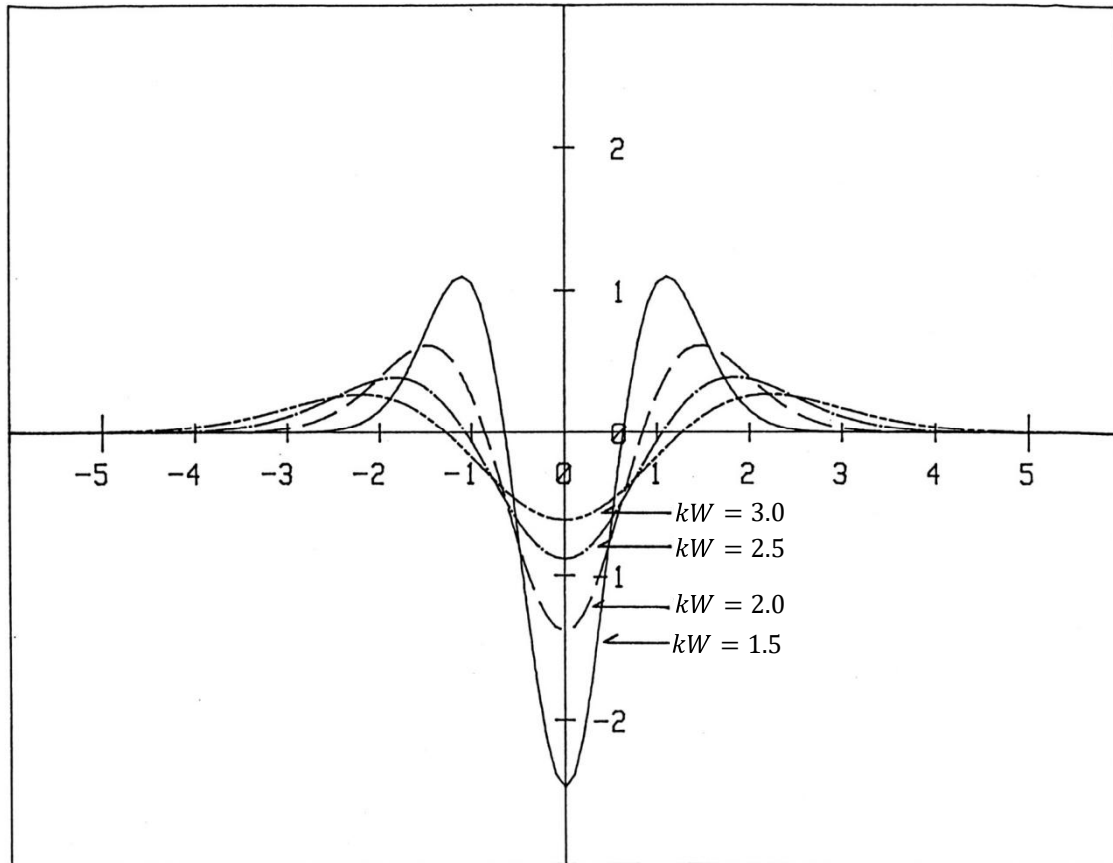
$$F''(j) = -\left\{\frac{5.546}{(kW)^2} \left(1 - \frac{5.546j^2}{(kW)^2}\right) \exp\left(-\frac{5.546j^2}{2 \cdot (kW)^2}\right)\right\} \quad (\text{資 1.1.3})$$

となる。

② $j$  を  $-3 \times (kW)$  から  $3 \times (kW)$  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。

---

<sup>1</sup> 分析ソフトウェアによっては、FWHM の式とチャンネルエネルギーの式の作成に共通のピークを使用し、片方の式の作成のみに使用することができない場合がある。



資図 1.1.1 ガウス型平滑化 2 次微分フィルタ

(3) 平滑化 2 次微分とその計数に係る不確かさの計算

(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に係る不確かさを求める。  
平滑化 2 次微分値は次式で求める。

$$N''(i) = \sum_{j=-K}^K F''(j) \cdot N(i+j) \quad (\text{資 1.1.4})$$

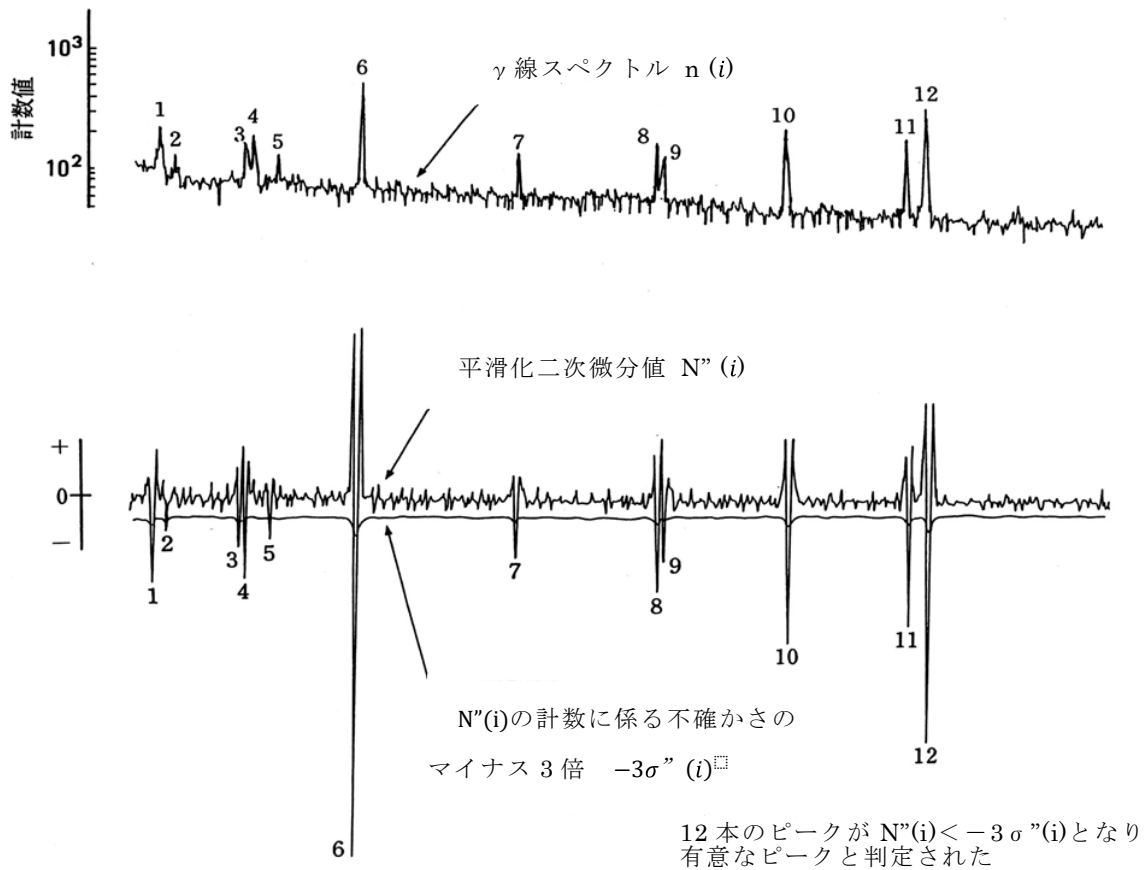
$N(i+j)$  :  $(i+j)$ チャンネルの計数值

$F''(j)$  : ガウス型平滑化 2 次微分フィルタ

$K$  :  $3 \times (kW)$

また、 $N''(i)$ の計数に係る不確かさは次式で求める。

$$\sigma''(i) = \sqrt{\sum_{j=-K}^K F''(j)^2 \cdot N(i+j)} \quad (\text{資 1.1.5})$$



資図 1.1.2 平滑化 2 次微分とその不確かさの図

#### (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 次微分とその不確かさを計算し、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 次微分とその不確かさを比較し、平滑化 2 次微分値がその不確かさのマイナス 2~3 倍より小さい所を探し、ピークとする。

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 次微分値がその不確かさのマイナス 2~3 倍未満となった部分をピークの候補とするのが妥当である。次式の  $s$  はピークサーチ感度であり、環境試料の γ 線スペクトルでは 3 程度の値が用いられる。

$$N''(i) < -s \times \sigma''(i) \quad (\text{資 1.1.6})$$

小さなピークもできるだけ見落とさないように探索するためには、上式の  $-s$  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くる。探査されたピークが放射能の存在を表しているか否か、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とき用いる。

① 三点計数値法でピーク中心チャンネル $P$ 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。このとき、以下のように近似できる。

a) ピーク中心付近を放物線で近似する場合

$$P = h + \frac{1}{2} \left\{ \frac{N_{h+1} - N_{h-1}}{2N_h - N_{h-1} - N_{h+1}} \right\} \quad (\text{資 1.1.7})$$

b) ピーク中心付近をガウス関数で近似する場合

$$P = h + \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln(N_{h+1}/N_{h-1})}{\ln\{N_h^2/(N_{h-1} \cdot N_{h+1})\}} \quad (\text{資 1.1.8})$$

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) ピーク中心をはさんで隣り合うチャンネルを $m$ 、 $m+1$ とし、その計数値に対する1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。

$$\Delta N_i = \sum_{j=-k}^k j \cdot N_{i+j} \quad (\text{資 1.1.9})$$

$N_q$  : チャンネル $q$ のカウント数

$k$ はピークの広がりや対称性に依じて決め、1~1.5keV相当で十分である。

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

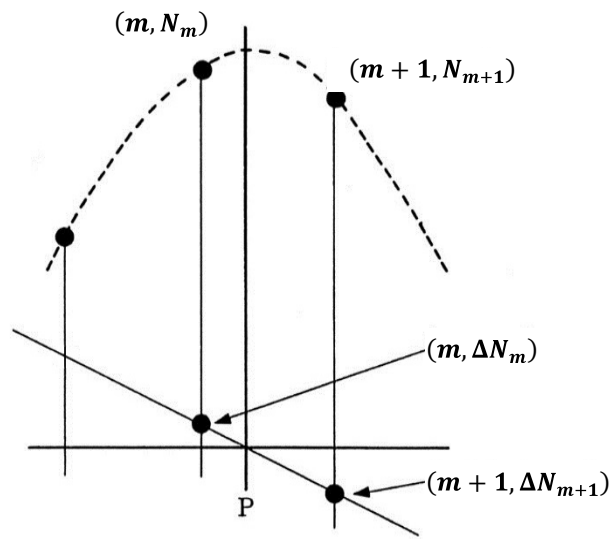
$$k = 3 : \Delta N_i = 3(N_{i+3} - N_{i-3}) + 2(N_{i+2} - N_{i-2}) + N_{i+1} - N_{i-1}$$

となる。

d) ピーク中心チャンネルを $P = m + \Delta N_m / (\Delta N_m - \Delta N_{m+1})$ により求める。

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、前に1チ

ヤネルずらして同じ計算を行う。



資図 1.1.3 1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資 1.1.3 を参照]

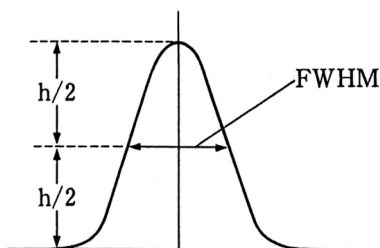
ピックアップされたピークを「1 次式+ガウス関数」で関数適合する。「1 次式+ガウス関数」を下記に示す。

$$F(i, C_k) = C_1 + C_2(i - P) + C_3 \exp\{C_4(i - P)^2\} \quad (\text{資 1.1.10})$$

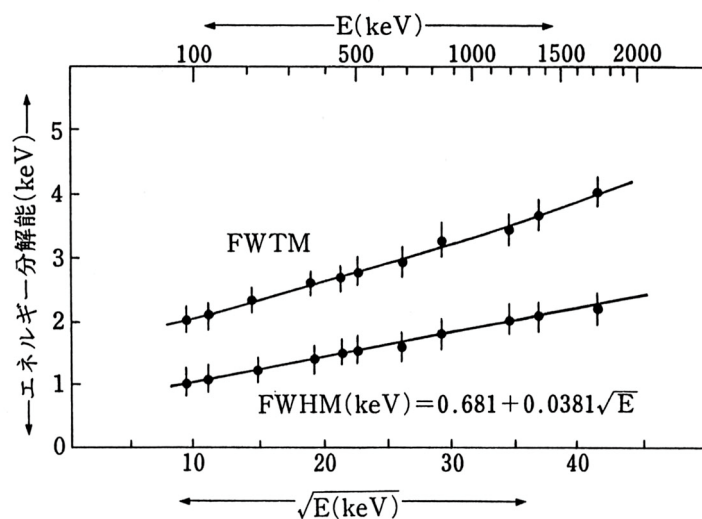
$C_1, C_2, C_3, C_4$  : 定数

$P$  : ピーク中心チャンネル

ここで求める FWHM は、ピーク探査、ピーク領域の決定等に使用する。



資図 1.1.4 半値幅の定義



資図 1.1.5 エネルギー分解能の例



### 資 1.1.2 チャネルとエネルギーの関係式

チャネルとエネルギーの関係式は、測定ごとに多少の変動があるため、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ことが望ましい。下記に計算手順の一例を示す。

(1) ピーク探査の結果（資 1.1.1 (1) ③）の中から、チャ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。

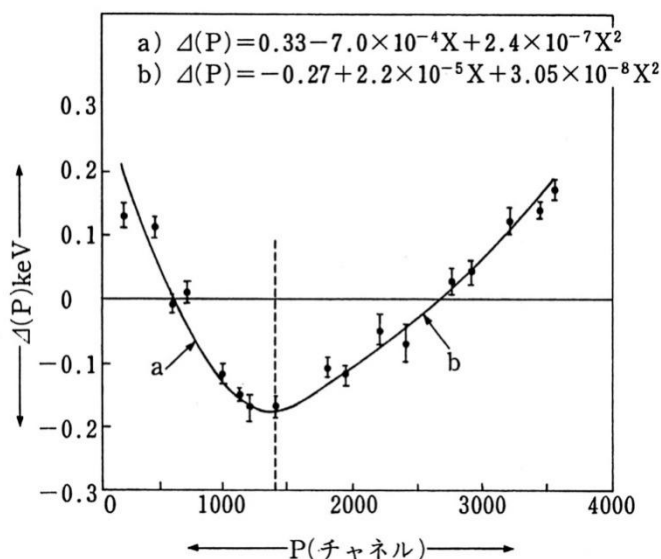
- ① 前回の計算結果、核データ表等を参照し、ピックアップされたピークの核種を同定し、そのエネルギーを調べる。
- ② 最小二乗法でチャネルエネルギーの式を求める。
- ③  $X^2$  を調べ、設定した信頼区間内に入っていなかったなら、下式の値が大きい順に、ピークを一つずつ除外して関数適合と  $X^2$  検定をやり直す。

$$\{|P_i - P(E_i)|\} / \sqrt{\{\sigma_i^2 + \sigma(E_i)^2\}} \quad (\text{資 1.1.11})$$

- $P_i$  : 各ピークのピーク中心
- $P(E_i)$  : チャネル-エネルギーの式から求めたピーク中心
- $\sigma_i$  : 各ピークのピーク中心の不確かさ
- $\sigma(E_i)$  : チャネル-エネルギーの式の不確かさ

(2) チャネル-エネルギー式とその不確かさを計算する。

- ・ 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。
- ・ 使用するピークが 3 本なら 2 次式を使う。
- ・ ピークの数が多くても 4 次以上の式を用いない。
- ・ 2 つの放物線を頂点で接続して用いてもよい。



$\Delta(P)$  : 直線回帰によって得られたチャネルの式  
 $(E = a + bP : a, b \text{ は定数})$  から求められるエネルギーと、真の  $\gamma$  線エネルギーの差

資図 1.1.6 チャネル-エネルギー式の直線関係からの偏差  $\Delta(P)$  の例

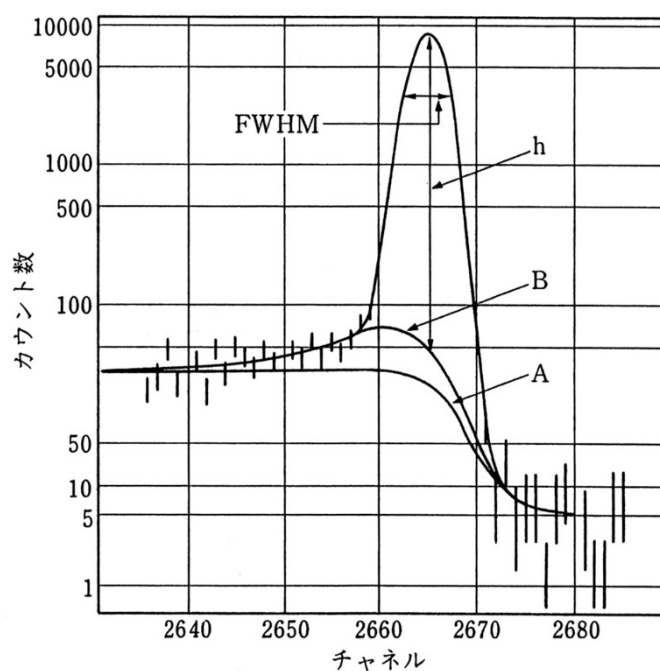
### 資 1.1.3 ピーク解析

$\gamma$ 線が検出器に入射し全エネルギーが検出器に吸収された場合、スペクトル上には光電ピーク（全エネルギー吸収ピーク）が観測される。ピーク中心チャンネルは検出された $\gamma$ 線のエネルギーに依存し、ピーク面積（連続成分を差し引いた正味面積）は検出器と相互作用を起こした $\gamma$ 線の数に比例するため、これらを用いることにより、 $\gamma$ 線放出核種の同定（定性）および定量が可能となる。

定量を行うためにはスペクトルのピーク面積を求める必要がある。面積の計算には関数適合またはコベル法（後述）が用いられる。

#### 資 1.1.3.1 関数適合

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ことが望ましい。以下に計数に係る不確かさ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。

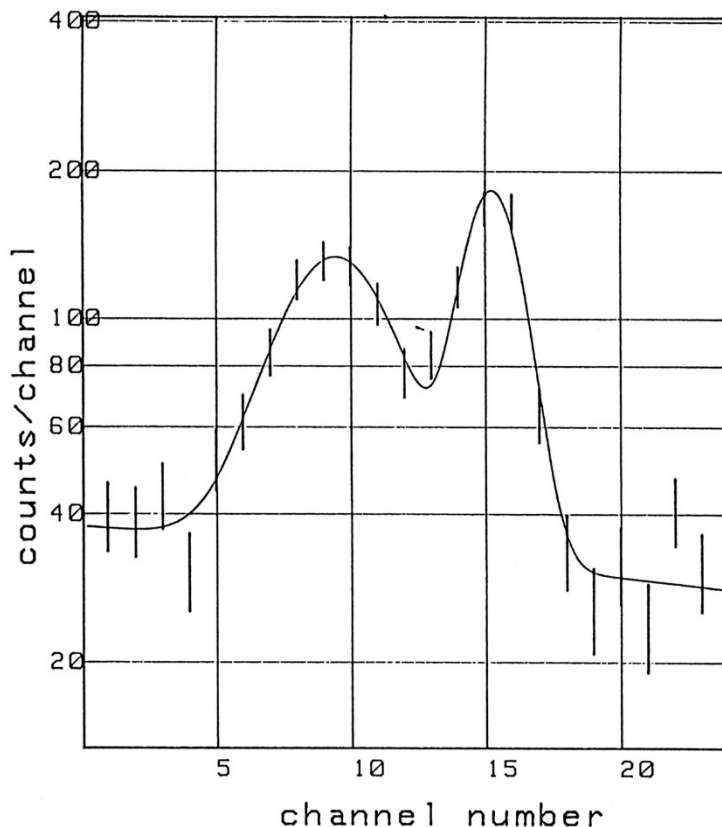


資図 1.1.7 関数曲線の分解図



- ・ 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おけば(核種を仮定することになる)計算できる。
- ・ 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。

資図 1.1.8 を例として、複合したピークにて実際に関数適合した結果を示す。



$C_1 : 3.785E+1 \pm 3.84E+0$   
 $C_2 : -4.036E-1 \pm 2.23E-1$   
 $C_3 : 1.001E+2 \pm 7.16E+0$   
 $C_4 : -1.097E-1 \pm 1.86E-2$   
 $C_5 : 9.421E+0 \pm 1.63E-1$   
 $C_6 : 1.491E+2 \pm 1.11E+1$   
 $C_7 : -4.343E-1 \pm 6.34E-2$   
 $C_8 : 1.525E+1 \pm 8.66E-2$

Chi Sq. by Weighted LSF :  
 1.58E+01  
 Fitting Accuracy: 1.00

資図 1.1.8 複合したピーク関数適合

適合関数 $Y$ はチャンネル番号を $X$ と置くと

$$Y = C_1 + C_2X + C_3 \exp\{C_4(X - C_5)(X - C_5)\} + C_6 \exp\{C_7(X - C_8)(X - C_8)\} \quad (\text{資 1.1.13})$$

である。

- ・  $C_1 + C_2X$  はベースラインの1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 $\sqrt{(4 \ln 2)/-C_4}$ 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 $\sqrt{(4 \ln 2)/-C_7}$ のピーク関数(ガウス関数)である。

この例での計算結果は下記のとおりとなった。

ベースライン :  $37.8 - 0.404X$   
 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

### 資 1.1.3.2 関数適合結果を用いた FWHM 等の計算

#### (1) FWHM の計算

FWHM を求めるためには、ピーク関数の値がピーク中心の値の半分になるチャンネルを計算する。すなわち、関数値が与えられたとき、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。

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

$X_r$ 、 $X_l$  各々の不確かさの 2 乗を計算する。

$$\sigma_X^2 = \sum_{i,j} \frac{\partial P^{-1}}{\partial C_i} \sigma(C_i, C_j) \frac{\partial P^{-1}}{\partial C_j} \quad \text{資 1.1.14}$$

$C_i$  : 最小二乗法で得られたピーク関数の適合パラメータ  
 $\sigma(C_i, C_j)$  :  $C_i$  と  $C_j$  の共分散 ( $i = j$  のときは分散)

FWHM はピーク関数の逆関数で表現されるため、不確かさを計算する際に「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。」ことを用いることができる (  $\frac{\partial P^{-1}}{\partial C_i} = \frac{1}{\frac{\partial P(X_{l \text{ or } r})}{\partial C_i}}$  ) 。

$X_r$ 、 $X_l$  各々の不確かさの 2 乗和の平方根を計算して FWHM の不確かさとする。

#### (2) ピークの非対称性

一般的にピークは中心の左右で幅が異なり、ピーク中心  $P$  と最大カウント数の 10 分

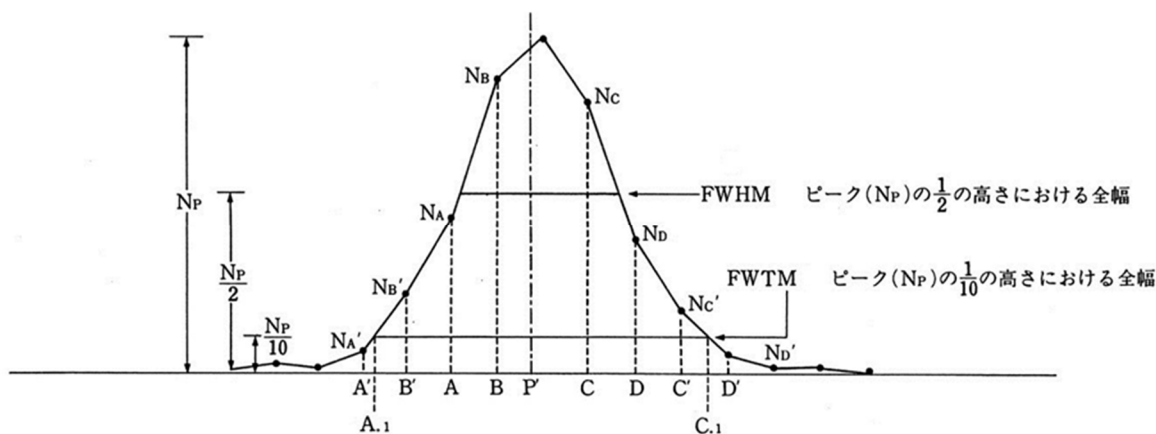
の1の高さにおけるピーク幅（FWTM）を用いて表現される。FWTMをピーク中心で分割したときの低エネルギー側の幅を $a$ 、高エネルギー側の幅を $b$ とすると、以下の式のようになる。

$$\text{ピークの非対称性} = \frac{a-b}{b} \quad (\text{資 1.1.15})$$

### (3) FWHM 等の手計算の方法

FWHMは以下の方法で手計算ができ、これを用いることで関数適合が正しくできているかの参考とすることができる。

- ① 平滑化1次微係数ゼロクロス法等で中心を求める（資 1.1.1 (5) ②参照）。
- ② 高エネルギー側30チャンネル程度の計数值を平均して、ベースラインを求める。
- ③ FWHM、FWTMを計算する。直線で計数值をつなぎ、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。



資図 1.1.9 半値幅とピークの非対称性

$$W(\text{ch}) = \left[ C + \frac{N_C - N_P/2}{N_C - N_D} \right] - \left[ A + \frac{N_P/2 - N_A}{N_B - N_A} \right] \quad (\text{資 1.1.16})$$

$$W(\text{ch}) = \left[ C' + \frac{N_{C'} - N_P/10}{N_{C'} - N_{D'}} \right] - \left[ A' + \frac{N_P/10 - N_{A'}}{N_{B'} - N_{A'}} \right] \quad (\text{資 1.1.17})$$

$$\begin{array}{ccc} \downarrow & & \downarrow \\ C_1 & & A_1 \end{array}$$

$$\text{非対称性} = \frac{(P' - A_1) - (C_1 - P')}{(C_1 - P')} \times 100 (\%) \quad (\text{資 1.1.18})$$

$W$  : FWHM

$A, B, C, D, P, A', B', C', D'$  : チャネル  
 $N_A, N_B, N_C, N_D, N_P \dots$  : 計数值  
 $P'$  : ピーク中心チャネル

1 次微係数のゼロクロス点、FWTM 等について計数に係る不確かさを計算しておけば非対称の不確かさを計算することができる。

#### 資 1.1.3.3 関数適合による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。

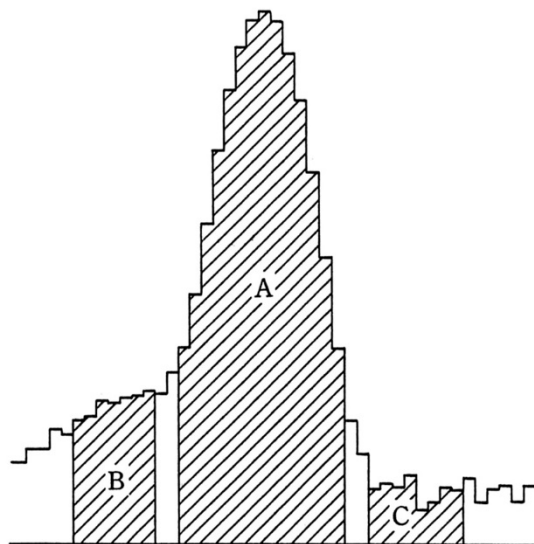
コベル法（後述）と、関数適合で多少差が生じることがあるが、実用上差し支えはない。

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あらかじめ調べておき、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等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することができる。

#### 資 1.1.4 コベル法によるピーク面積の計算

コベル法はピークの左右両側のピークのない領域（以下、ベースライン領域とする）を元にベースラインを設定し、ピーク領域のベースライン分を補正することでピーク面積を求める手法である。資図 1.1.10 にコベル法の概念図を示す。



資図 1.1.10 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全て同じ数とした場合

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

計数に係る不確かさ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。

##### 資 1.1.4.1 ピーク領域およびその近傍のベースラインの設定

ピーク領域および各ベースライン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>3</sup>して次の条件を満足するように決める。

- (1) 想定されるピークを中心チャンネル $P$ をチャンネル-エネルギーの式（資 1.1.2 参照）から求め、その $P$  に対して左右同チャンネル幅 $u$ をとる。その幅は FWHM を $W$ と置いたとき、次のように決める。

<sup>3</sup>最小二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できる。



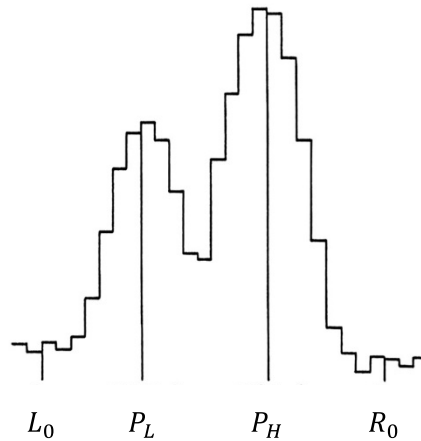
$$1.5 \times W \geq u' \geq 1.1 \times W$$

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、低エネルギーの $\gamma$ 線および高エネルギーの $\gamma$ 線についてそれぞれチャンネル-エネルギーの式（資 1.1.2 参照）を用いてピーク中心チャンネル $P_L$ および $P_H$ を決める。

低エネルギー側の境界は、 $L_0 = P_L - u'$ 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、 $R_0 = P_H + u'$ とし、小数点以下を切り上げて整数とする。



資図 1.1.11 複合ピークに対するピーク領域

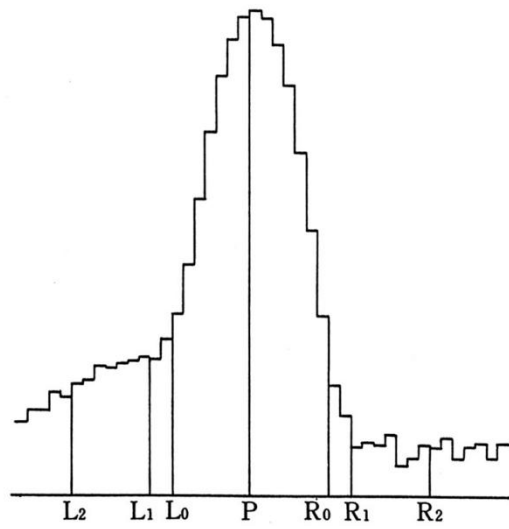
- (3) ベースライン領域については原則として次のように決める。  
低エネルギー側の境界（ $L_2$ より $L_1$ チャンネルまで）

$$P - L_1 \geq 1.5 \times W, L_1 - L_2 \geq P - L_0$$

高エネルギー側の境界（ $R_1$ より $R_2$ チャンネルまで）

$$R_1 - P \geq 1.5 \times W, R_2 - R_1 \geq R_0 - P$$

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



資図 1.1.12 ベースライン領域 ( $L_2 \sim L_1$ ) および ( $R_1 \sim R_2$ )

#### 資 1.1.4.2 単一の独立したピークの面積の求め方

##### (1) ベースラインに勾配のある場合

ここでは、 $\gamma$ 線スペクトルのベースラインが勾配を持っているとして、ピーク面積を求める。勾配を持たないものについては、(2)を参照のこと

まず、ピーク領域について資 1.1.4.1の方法に準じて、 $L_0$ および $R_0$ を決め $N_P$ を求める。

$$N_P = \sum_{i=L_0}^{R_0} n_i \quad (\text{資 1.1.19})$$

ただし、 $n_i$ はチャネル $i$ の計数

次にベースライン領域について、資 1.1.4.1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。

$$N_L = \sum_{i=L_2}^{L_1} n_i, \quad N_R = \sum_{i=R_1}^{R_2} n_i \quad (\text{資 1.1.20})$$

これにより、ピーク面積  $N_{net}$  およびその標準偏差 $\sigma_N$ は次のように計算される。

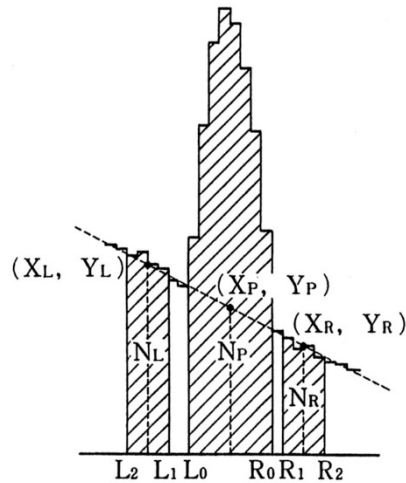
$$N_{net} = N_P - \beta_L N_L - \beta_R N_R \quad (\text{資 1.1.21})$$

$$\sigma_N = \sqrt{N_P + \beta_L^2 N_L + \beta_R^2 N_R} \quad (\text{資 1.1.22})$$

上式において

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

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



資図 1.1.13 勾配を持ったベースラインを含む  
ピークのピーク面積の求め方

式(資 1.1.21)および式(資 1.1.22)において、 $\beta_L$ 、 $\beta_R$ は以下のようにして求めることができる。ベースラインは1次式  $Y = aX + b$  ( $a$ 、 $b$ : 定数) であるので、低エネルギー側および高エネルギー側のベースライン領域の中間点をそれぞれ  $(X_L, Y_L)$  および  $(X_R, Y_R)$ 、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

$$\begin{aligned}
 Y_P &= \frac{Y_R - Y_L}{X_R - X_L} (X_P - X_L) + Y_L \\
 &= \frac{(X_R - X_P)Y_L + (X_P - X_L)Y_R}{X_R - X_L} \qquad \qquad \qquad (\text{資 1.1.23})
 \end{aligned}$$

となる。

また、それぞれのベースライン領域の中間点は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 X_L &= \frac{L_1 + L_2}{2} & Y_L &= \frac{N_L}{L_1 - L_2 + 1} \\
 X_R &= \frac{R_1 + R_2}{2} & Y_R &= \frac{N_R}{R_2 - R_1 + 1} \\
 X_P &= \frac{L_0 + R_0}{2}
 \end{aligned}$$

そのため、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

$$\begin{aligned}
 S_{LR} &= Y_P(R_0 - L_0 + 1) \\
 &= \frac{(R_1 + R_2 - L_0 - R_0)(R_0 - L_0 + 1)}{(L_1 - L_2 + 1)(R_1 + R_2 - L_2 - L_1)} \cdot N_L \\
 &\quad + \frac{(L_0 + R_0 - L_1 - L_2)(R_0 - L_0 + 1)}{(R_2 - R_1 + 1)(R_1 + R_2 - L_2 - L_1)} \cdot N_R \\
 &= \beta_L N_L + \beta_R N_R
 \end{aligned} \tag{資 1.1.24}$$

となる。

(2) ベースラインに勾配がない場合

まず、ピーク領域について資 1.1.4.1 の方法に準じて、 $L_0$ および $R_0$ を決め $N_P$ を求める。

$$N_P = \sum_{i=L_0}^{R_0} n_i \tag{資 1.1.25}$$

$n_i$  : チャネル $i$ の計数

次に、ベースライン領域について、資 1.1.4.1 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。

$$N_L = \sum_{i=L_2}^{L_1} n_i, \quad N_R = \sum_{i=R_1}^{R_2} n_i \tag{資 1.1.26}$$

これにより、ピーク面積 $N_{net}$ およびその標準偏差 $\sigma_N$ は次のように計算される。

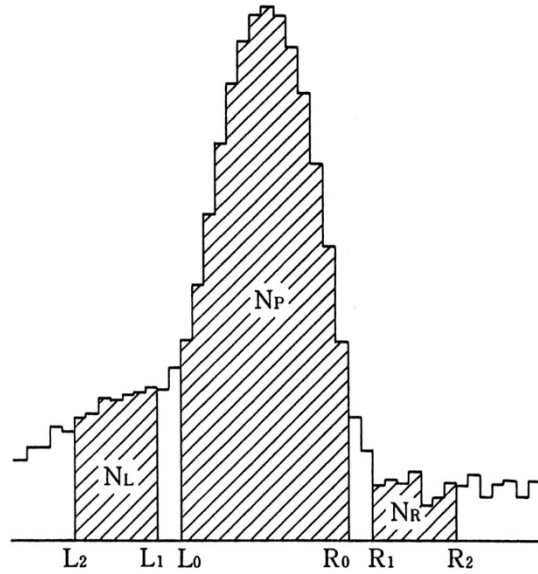
$$N_{net} = N_P - \beta_L N_L - \beta_R N_R \tag{資 1.1.27}$$

$$\sigma_N = \sqrt{N_P + \beta_L^2 N_L + \beta_R^2 N_R} \tag{資 1.1.28}$$

上式において

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

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



資図 1.1.14 勾配のないベースラインを持った  
ピークのピーク面積の求め方

このとき、ピーク領域の計算に使用するチャンネル数の半分を、低エネルギー側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に使用する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。

$$L_1 - L_2 + 1 = \frac{1}{2}(R_0 - L_0 + 1) \quad \therefore \beta_L = 1 \quad (\text{資 1.1.29})$$

$$R_2 - R_1 + 1 = \frac{1}{2}(R_0 - L_0 + 1) \quad \therefore \beta_R = 1 \quad (\text{資 1.1.30})$$

そのため、ピーク面積 $N_{net}$ およびその標準偏差 $\sigma_N$ は次のように計算される。

$$N_{net} = N_P - N_L - N_R \quad (\text{資 1.1.31})$$

$$\sigma_N = \sqrt{(N_P + N_L + N_R)} \quad (\text{資 1.1.32})$$

### 資 1.1.5 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。

- ・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(資 1.1.5.1(1))の方法で、ピーク面積を求める。
- ・ほとんど重なっている場合、下記(資 1.1.5.1(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き算を行ってから、寄与係数による補正を行うべきである。バックグラウンドを差し引く方法によっては、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できない。これらの事情により、ある程度の誤差は避けられない。
- ・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場合(複合ピーク)は、関数適合(資 1.1.3 参照)を用いる。
- ・解析対象核種の主ピークが複合ピークのとき、副ピークに独立したものがあり、そのピーク面積の計数に係る不確かさが主ピークより小さいならば、放出率が小さくても独立したものを対象にする。

#### 資 1.1.5.1 単一の独立したピークにおける近傍のベースラインの妨害ピークの処理

##### (1) 妨害ピークを避けてベースライン領域を決める方法

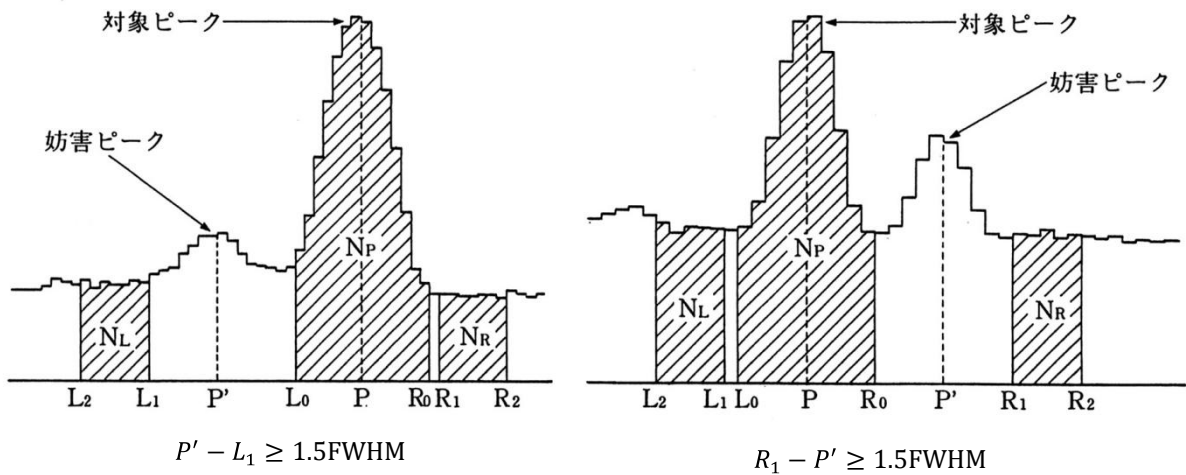
次の基準に合致するときに行う<sup>4</sup>。

- 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。)のピーク面積 $N_{net}(P'')$ がその計数に係る不確かさ $\sigma_N(P'')$ の2倍を超えるとき、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( $\nu N_{net}(P'') \geq 2$ )のとき

対象ピークに対するピーク領域の選び方は資 1.1.4.1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 $1.5 \times \text{FWHM}$ 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 $\sigma_N$ は資 1.1.4.2の方法に準ずる。

<sup>4</sup> ①の条件が成り立っている場合、②が成り立っていなくてもこの方法をとった方が無難である。



資図 1.1.15 妨害ピークをさけてベースライン領域を決める方法

(2) 寄与係数を用いてピーク面積を補正する方法<sup>5</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。妨害ピークの補正は次の基準に合致するときに適用する。

- ・ 妨害基準ピークのピーク面積  $N_{net}(P'')$  がその計数に係る不確かさ  $\sigma_N(P'')$  の 2 倍を超えるとき、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、 $\nu N_{net}(P'') \geq 2$

① 対象ピークに対するピーク領域は資 1.1.4.1 の方法によって決める。

$$N_p = \sum_{i=L_0}^{R_0} n_i \quad (\text{資 1.1.33})$$

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、妨害ピークを中心チャンネルを  $P'$  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 (資図 1.1.16)

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

妨害ピークが対象ピークの高エネルギー側にあるとき

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

<sup>5</sup> 寄与補正を行うことによって増加する計数に係る不確かさと、補正を行わないこと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ことが望ましい。



③妨害基準ピークに対して資 1.1.4.2 の方法に準じてピーク面積 $N_{net}(P'')$ およびその不確かさ $\sigma_N(P'')$ を決める。

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

$$N_{net}(P') = \nu N_{net}(P'') \quad \text{ここで} \quad \nu = \frac{a'}{a''} \cdot \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (\text{資 1.1.34})$$

上式において、 $a'$ 、 $a''$ はピーク $P'$ および $P''$ の $\gamma$ 線放出率、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、 $\varepsilon'/\varepsilon''$ はピーク効率校正式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。

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。

$$N_L = \sum_{i=L_2}^{L_1} n_i, \quad N_R = \sum_{i=R_1}^{R_2} n_i \quad (\text{資 1.1.35})$$

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。

$$N_{net} = N_P - \beta_L \{N_L - \nu N_{net}(P'')\} - \beta_R N_R \quad (\text{資 1.1.36})$$

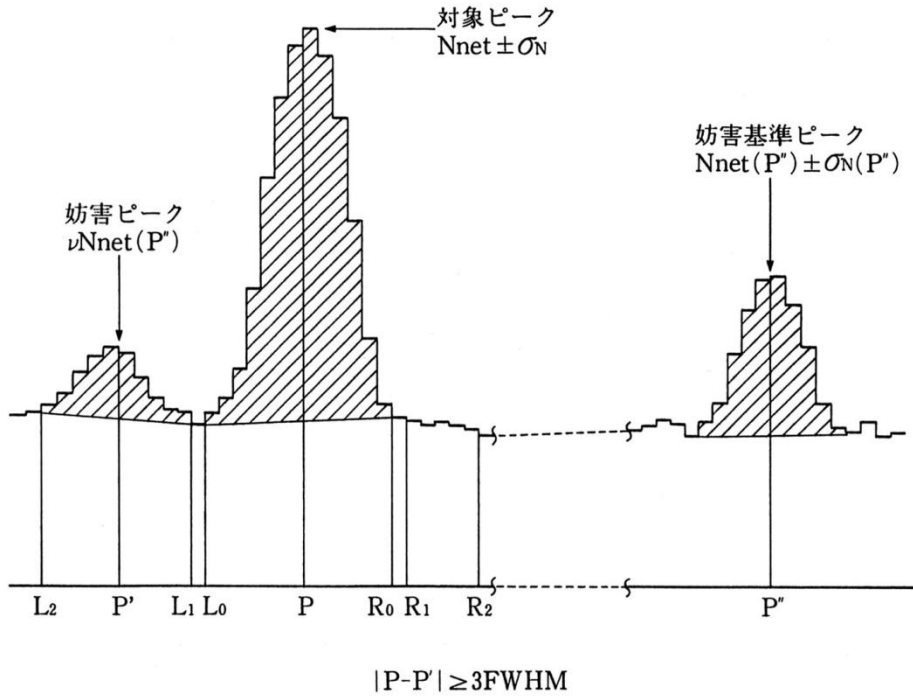
$$\sigma_N = \sqrt{N_P + \beta_L^2 N_L + \beta_R^2 N_R + \{\nu \beta_L \sigma_N(P'')\}^2} \quad (\text{資 1.1.37})$$

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、式(資 1.1.36)および(資 1.1.37)の全てについて $L$ と $R$ を置き換えればよい。)



資図 1.1.16 ベースラインから妨害ピークの寄与を差し引く方法

資 1.1.5.2 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 ピーク領域を資 1.1.4.1 (2) によって、 $L_0 = P_L - u'$ 、 $R_0 = P_H + u'$  とする。ここで  $P_L$  および  $P_H$  は低エネルギー側のピークを中心チャネルおよび高エネルギー側のピークを中心チャネルとする。
- ② ベースライン領域を資 1.1.4.2 で計算し、両ピークを含めたピーク面積  $N_{net}(P_L + P_H)$  およびその標準偏差  $\sigma_N$  を求める。
- ③  $P_L$  および  $P_H$  における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  $\gamma$  線放出率をそれぞれ  $a_L$  および  $a_H$  とすると

$$N_{net}(P_L) \pm \sigma_L = \frac{\varepsilon_L a_L}{\varepsilon_L a_L + \varepsilon_H a_H} \{N_{net}(P_L + P_H) \pm \sigma_N\} \quad (\text{資 1.1.38})$$

$$N_{net}(P_H) \pm \sigma_H = \frac{\varepsilon_H a_H}{\varepsilon_L a_L + \varepsilon_H a_H} \{N_{net}(P_L + P_H) \pm \sigma_N\} \quad (\text{資 1.1.39})$$

上式において  $\varepsilon_L \cong \varepsilon_H$  としてもよい。

(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資 1.1.5.1 (2) と同じ基準に合致するとき適用する。
- ② ピーク領域を資 1.1.4.1 (2) によって、 $L_0 = P_L - u'$ 、 $R_0 = P_H + u'$  とする。ここで  $P_L$  および  $P_H$  は低エネルギー側のピークを中心チャネルおよび高エネルギー側のピークを中心チャネルとする。
- ③ ベースライン領域を資 1.1.4.2 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、 $P$  で表し、 $P_H$  を妨害ピークとし  $P'$  で表すことにする。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  $\sigma_N(P + P')$  で表す。

- ④ 妨害基準ピーク ( $P''$ ) に対して、資 1.1.4.2 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  $N_{net}(P'')$  に対する妨害ピークのピーク面積の割合（寄与係数）を  $v$  とする。 $v$  は、 $P'$  および  $P''$  の  $\gamma$  線放出率をそれぞれ  $a'$  および  $a''$ 、ピーク効率を  $\varepsilon'$  および  $\varepsilon''$  とすると、以下のようなになる。

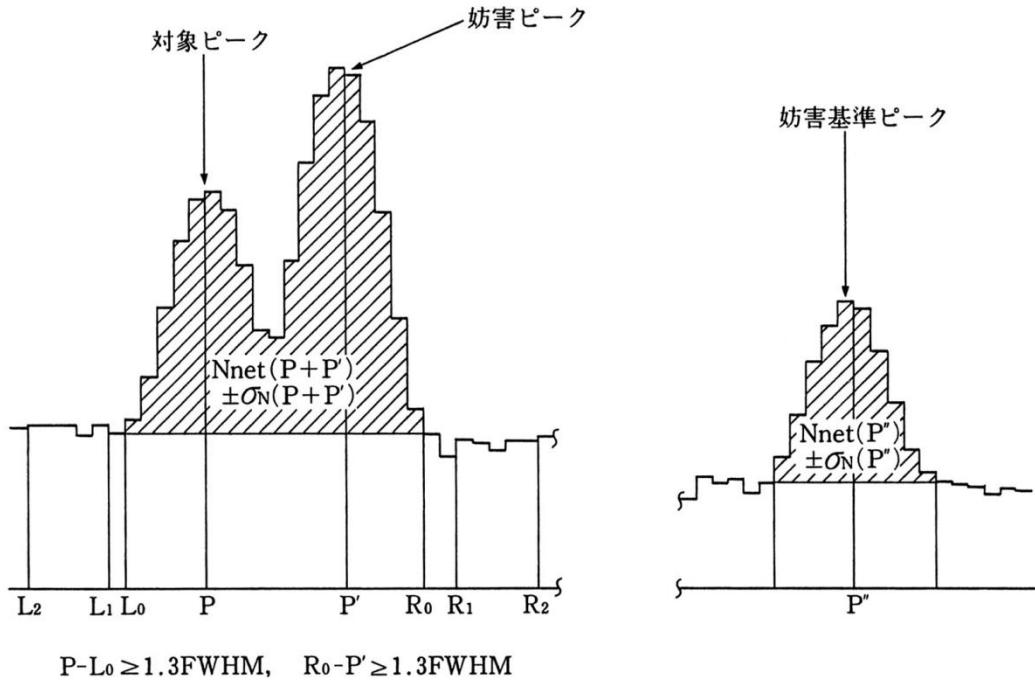
$$v = \frac{a'}{a''} \cdot \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''}$$

ただし  $\varepsilon'$ 、 $\varepsilon''$  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 $\sigma_N$ は次のように表される。

$$N_{net}(P) = N_{net}(P + P') - vN_{net}(P'') \quad (\text{資 1.1.40})$$

$$\sigma_N = \sqrt{\{\sigma_N(P + P')\}^2 + v^2\{\sigma_N(P'')\}^2} \quad (\text{資 1.1.41})$$



資図 1.1.17 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(資 1.1.2 参照)から正確に求める。
- ②ピークのFWHMを式(資 1.1.1 参照)から求める(両ピークのFWHMは等しいとしてよい)。
- 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。

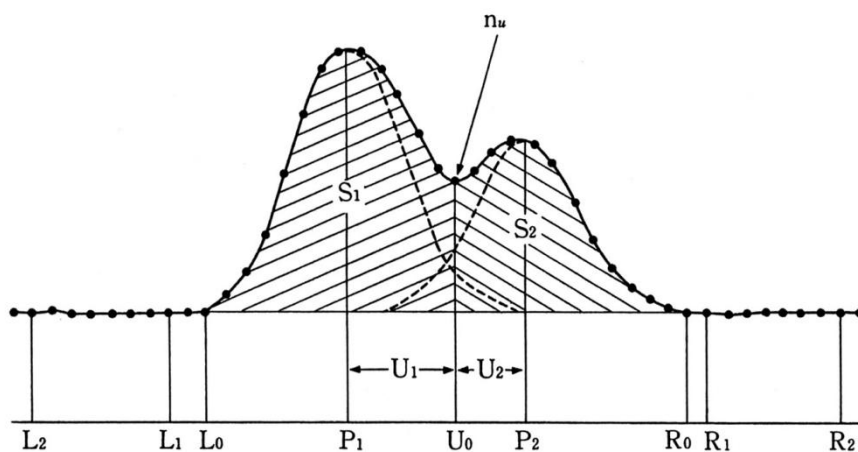
$$L_0 \approx P_1 - 1.5 \times \text{FWHM} \quad (\text{資 1.1.42})$$

$$R_0 \approx P_2 + 1.5 \times \text{FWHM} \quad (\text{資 1.1.43})$$

$$U_0 \approx \frac{1}{2}(P_1 + P_2) \quad (\text{資 1.1.44})$$

$$U_1 = U_0 - P_1 \quad (\text{資 1.1.45})$$

$$U_2 = P_2 - U_0 \quad (\text{資 1.1.46})$$



資図 1.1.18 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。

$$N_P(1) = \sum_{i=L_0}^{U_0-1} n_i, \quad N_P(2) = \sum_{i=U_0+1}^{R_0} n_i \quad (\text{資 1.1.47})$$

$$N_L = \sum_{i=L_2}^{L_1} n_i, \quad N_R = \sum_{i=R_1}^{R_2} n_i \quad (\text{資 1.1.48})$$

$$S_1 = N_P(1) + \frac{1}{2}n_u - \beta_1 N_L, \quad \sigma_1 = \sqrt{N_P(1) + \frac{1}{4}n_u + \beta_1^2 N_L} \quad (\text{資 1.1.49})$$

$$S_2 = N_P(2) + \frac{1}{2}n_u - \beta_2 N_R, \quad \sigma_2 = \sqrt{N_P(2) + \frac{1}{4}n_u + \beta_2^2 N_R} \quad (\text{資 1.1.50})$$

上式において

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

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、それぞれの不確かさを $\sigma_{N1}$ および $\sigma_{N2}$ とすると、それぞれ次式で表される。

$$N_1 = \alpha_{11}S_1 + \alpha_{12}S_2, \quad \sigma_{N1} = \sqrt{(\alpha_{11}\sigma_1)^2 + (\alpha_{12}\sigma_2)^2} \quad (\text{資 1.1.51})$$

$$N_2 = \alpha_{21}S_1 + \alpha_{22}S_2, \quad \sigma_{N2} = \sqrt{(\alpha_{21}\sigma_1)^2 + (\alpha_{22}\sigma_2)^2} \quad (\text{資 1.1.52})$$

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

$U_1' = 2.355 \times U_1/\text{FWHM}$ 、 $U_2' = 2.355 \times U_2/\text{FWHM}$ とし、次のように確率 $P(U_1')$ および $P(U_2')$ を算出する。

$$\text{分布} \quad F(x) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \exp(-x^2/2) \quad (\text{資 1.1.53})$$

において $x = u'$ より右側の確率は、その積分値

$$P(u') = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_{u'}^{\infty} \exp(-x^2/2) dx \quad (\text{資 1.1.54})$$

で表すことができる。

この式の積分値は次式で近似することができる。

$$P(u') = F(u')(b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5) + e(u') \quad (\text{資 1.1.55})$$

$$\text{ここで } r = 0.2316419, \quad t = \frac{1}{1 + ru'}$$

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

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

$$b_5 = 1.330274429$$

近似による不確かさは  $|e(u')| < 7.5 \times 10^{-8}$

$u' = U_1'$  および  $u' = U_2'$  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。

$$\alpha_{11} = \frac{1 - P(U_2')}{1 - P(U_1') - P(U_2')}, \quad \alpha_{12} = \frac{-P(U_2')}{1 - P(U_1') - P(U_2')} \quad (\text{資 1.1.56})$$

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

## 資料 1.2 容積線源のピーク効率を求める例

環境試料の $\gamma$ 線スペクトロメトリーでは円筒形の測定容器が用いられることが一般的である。その際、任意の試料の充填高、 $\gamma$ 線エネルギーに対してピーク効率を求めることができるようにしておくこと運用上便利である。

ここでは、容積試料の任意の充填高についてピーク効率を求めるために、充填高の異なる容積線源のセットを用いる例を示す。

### 資 1.2.1 標準線源<sup>1</sup>

充填高の異なる（5～50mm、約 10mm ごと）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同じものを用いる。標準容積線源の充填高の不確かさは 0.5mm 以下、核種と放射能は資表 1.2.1 に示す目安を踏まえ設定する。

資表 1.2.1 測定日における標準容積線源 1 個当たりの放射能の目安 (Bq)

<sup>109</sup> Cd	<sup>57</sup> Co	<sup>139</sup> Ce	<sup>203</sup> Hg	<sup>113</sup> Sn	<sup>85</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>54</sup> Mn	<sup>59</sup> Fe
3000	200	100	300	300	400	300	600	1000

注) 各核種の放出する $\gamma$ 線エネルギーについては資料 5 を参照のこと

この表の数倍までの強さでも問題ないが、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、<sup>241</sup>Am 300Bq を加える。また、<sup>203</sup>Hg、<sup>113</sup>Sn を使用できない場合（母材が寒天のとき等）は <sup>51</sup>Cr 600Bq で代える。1500keV 以上の様子を知るためには、<sup>60</sup>Co、<sup>88</sup>Y を加えるが、サム効果があるので、補正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できる。

### 資 1.2.2 測定

線源の測定の際には、以下の点に留意すること。

- ・測定時間は対象となる全てのピーク面積の計数に係る不確かさ ( $3\sigma$ ) が 2% 以下になるまでとする。
- ・標準線源は試料と同じ位置、同じ包装で測定するように注意する。線源を包むポリ袋も試料と同じにする。また、検出器に汚染防止用のポリ袋や保護キャップを付けた状態で試料の測定を行う場合は、線源測定時にも同じ状態にすること。
- ・半減期の短い核種が含まれているので、購入後は速やかに測定する。

<sup>1</sup> 溶液状態の標準容積線源を測定する場合は、ゲルマニウム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。

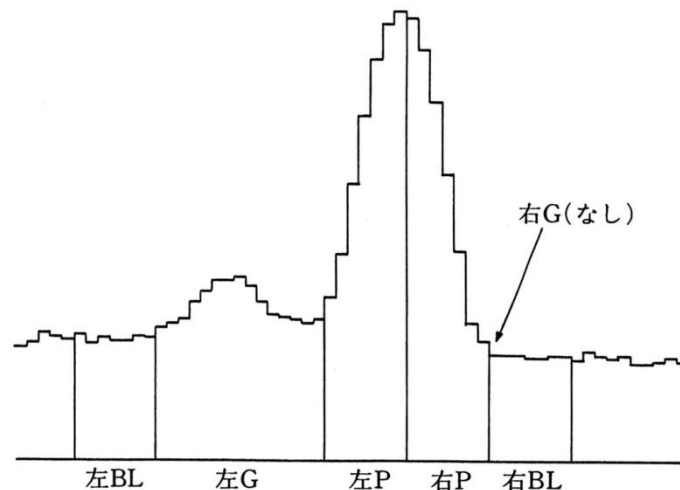


- ・標準線源から放出される  $\gamma$  線が遮蔽体の鉛に当たって KX 線 ( $K_{\beta 1}=84.936\text{keV}$ ) を発生し、 $^{109}\text{Cd}$  ( $88.0\text{keV}$ ) のピークを妨害することがある。その場合、鉛の KX 線の影響を取り除くため、標準線源測定時には厚さ 5mm 程度の銅板で検出器と線源の外側を囲って補助遮蔽する方法がある。しかし、このピーク効率を使って測定するときは、ピーク効率測定時と同様に銅板で検出器と試料の外側を囲って補助遮蔽する必要がある。
- ・n 型検出器を用いるにもかかわらず、X 線領域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 の銅板をかぶせて測定する。
- ・ $^{139}\text{Ce}$  等の電子捕獲による X 線の放出に注意する。

### 資 1.2.3 ピーク効率曲線の作成

対象核種の正味ピーク面積から 1 秒当たりのカウント数 cps を求める。この場合標準線源の検定値 Bq または単位時間当たりの  $\gamma$  線放出数 ( $\gamma/s$ ) の値を測定日に減衰補正しておく。Bq 表示の場合は放出率から  $\gamma/s$  を求めておく。測定値から求めた計数率 (cps) を単位時間当たりの  $\gamma$  線放出数 ( $\gamma/s$ ) 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。

資図 1.2.1 にピークとベースライン領域の取り方、資表 1.2.2 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で計算する場合の領域 (チャンネル) の取り方の例を示す。



資図 1.2.1 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）を資表 1.2.2 のように設定する。

資表 1.2.2  $\gamma$  線のエネルギーと計算領域

核種	エネルギー (keV)	左 BL (チャンネル)	左 G (チャンネル)	左 P (チャンネル)	右 P (チャンネル)	右 G (チャンネル)	右 BL (チャンネル)
$^{109}\text{Cd}$	88.0	4	14	4	4	0	4
$^{57}\text{Co}$	122.1	4	0	4	4	0	4
$^{139}\text{Ce}$	165.9	4	0	4	4	0	4
$^{203}\text{Hg}$	279.2	4	0	4	4	0	4
$^{113}\text{Sn}$	391.7	4	0	4	4	0	4
$^{85}\text{Sr}$	514.0	5	0	5	5	0	5
$^{137}\text{Cs}$	661.7	5	0	5	5	0	5
$^{54}\text{Mn}$	834.8	5	0	5	5	0	5
$^{88}\text{Y}$	898.0	5	0	5	5	0	5
$^{65}\text{Zn}$	1115.5	5	0	5	5	0	5
$^{59}\text{Fe}$	1099.2	6	0	6	6	0	6
$^{60}\text{Co}$	1173.2	7	0	7	7	0	7
$^{59}\text{Fe}$	1291.6	7	0	7	7	0	7
$^{60}\text{Co}$	1332.5	8	14	8	8	0	8
$^{88}\text{Y}$	1836.1	8	0	8	8	0	8

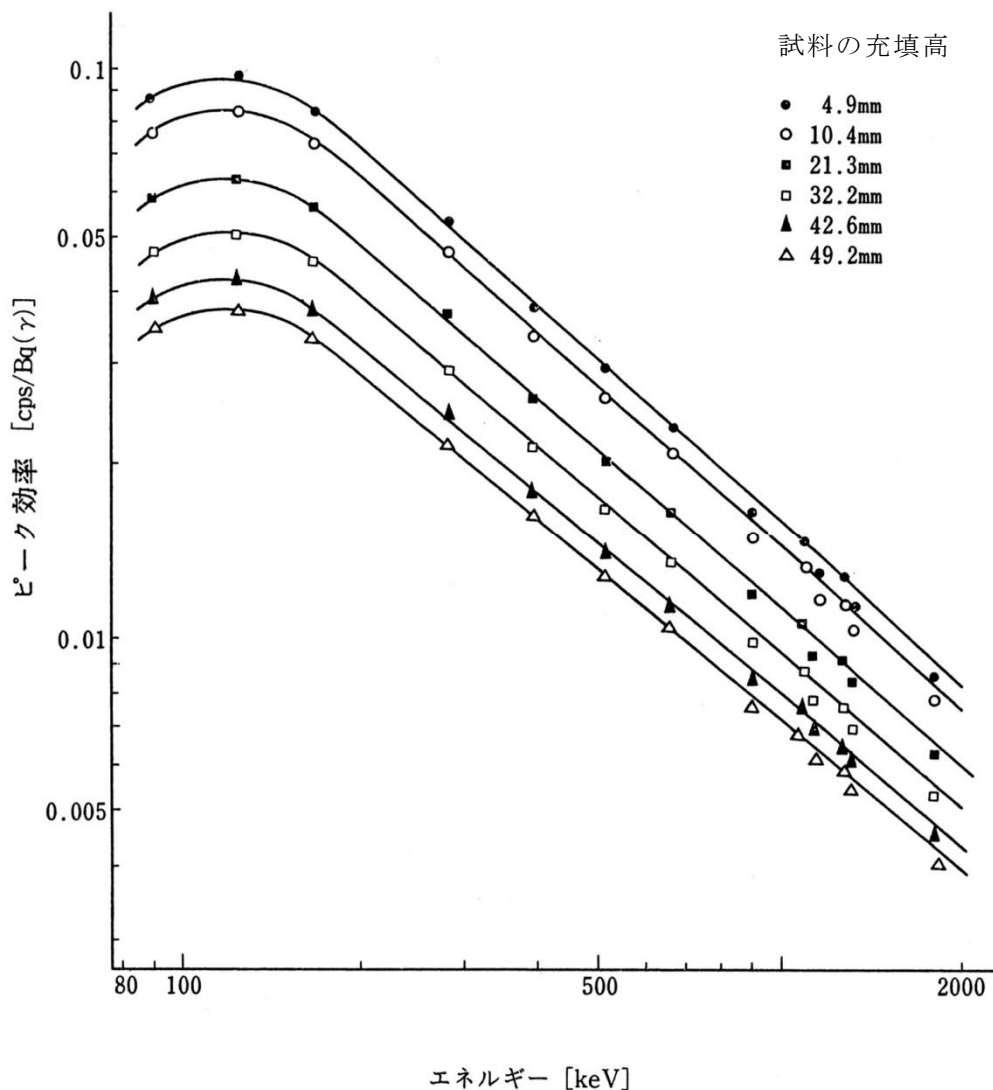
$^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$  等の測定値はサム効果のために低くなるので、利用するのであれば補正をする必要がある<sup>2</sup>。サム効果の補正を行わないならば、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$  の測定値はピーク効率曲線の傾きを知る参考とし、ピーク効率曲線の算出には用いない。なお、 $^{109}\text{Cd}$  (88.0keV) の低エネルギー側に鉛の特性 X 線によるピークが出るのでそのピークは除外する。また、 $^{60}\text{Co}$  (1332.5keV) の低エネルギー側に  $^{88}\text{Y}$  のエスケープピークが出るのでそのピークは除外する。

<sup>2</sup> 資料 1.4 「サム効果補正法」 参照。

各エネルギーに対するピーク効率を求めたら、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にプロットする。

300keV~600keV 以上では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および、コンプトン散乱に続く光電効果が起こりやすいためピーク効率は大きくなるが、 $\gamma$ 線の透過率は低くなるため、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。例を資図 1.2.2<sup>3</sup>に示す。



資図 1.2.2 試料の充填高ごとのピーク効率曲線の例

<sup>3</sup> 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に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。

標準線源の各充填高（5、10、20、30、40、50mm）ごとに、ピーク効率曲線関数化する。関数形は $\varepsilon$ をピーク効率、 $E$ を $\gamma$ 線のエネルギー（keV）とし、 $X = \ln(E/E_0)$ とおいて（ $C_1 \sim C_6$ は定数）、

$$\ln(\varepsilon) = C_1 + C_2X \quad : E_0 \leq E \quad (\text{資 1.2.1})$$

$$\ln(\varepsilon) = C_1 + C_2X + C_3X^2 + C_4X^3 + C_5X^4 + C_6X^5 \quad : E < E_0 \quad (\text{資 1.2.2})$$

直線部分と曲線部分の境界エネルギー $E_0$ は、300～600keVの範囲内でピーク効率曲線が滑らかになるような値を選定する。

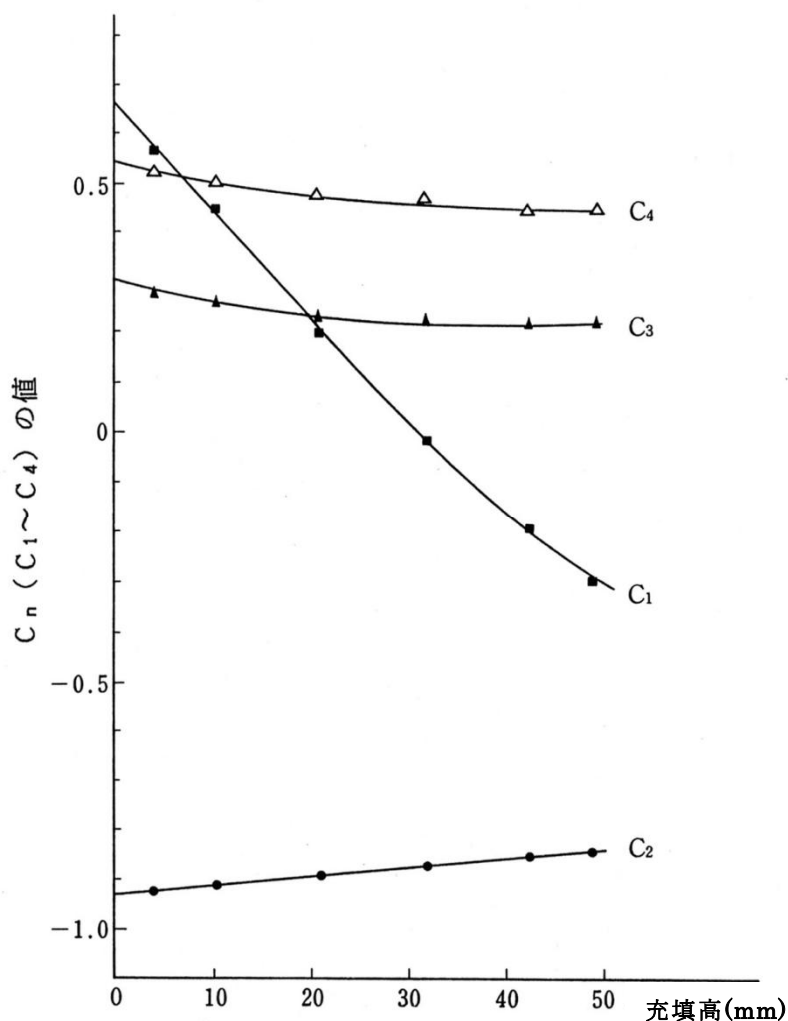
$C_6$ 項は一般的には不要であるが、80keV以下まで校正する場合は必要である。計算は $\ln(\varepsilon)$ と $X$ を変数にして最小二乗法で行う。（エネルギー領域を分けて関数適合するならば、高エネルギー側で $C_1$ と $C_2$ を決めた後、低エネルギー側で $C_3 \sim C_6$ を計算する）

これで、線源の充填高ごとに、任意のエネルギー（80～2000keV）にお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。現在入手可能な容積線源のセットでは検定の不確かさ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、充填高が違ってても本来は曲線の形はあまり変わらない。

充填高の異なる複数試料で求めた $C_1 \sim C_6$ を、試料の充填高 $h$ を変数としてプロット(資図 1.2.3)し、関数化する。関数形は

$$\exp(-C_n) = \alpha_n h^2 + \beta_n h + \gamma_n \quad (\text{資 1.2.3})$$

とする。余程よ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。そのときは $C_2 \sim C_6$ は各充填高の値の平均値を用いる。



資図 1.2.3 定数 $C_1 \sim C_4$ と容積線源の充填高の関係

注 1) 上図の例では  $C_5$ 、 $C_6$ は不要であった。

注 2)  $C_1 \sim C_4$ の縦軸の値は資図 1.2.2 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)

以上の結果を用いることで、任意の試料の充填高に対してパラメータ $C_1 \sim C_4$ を求めることができ、ピーク効率曲線が得られる。

#### 資 1.2.4 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

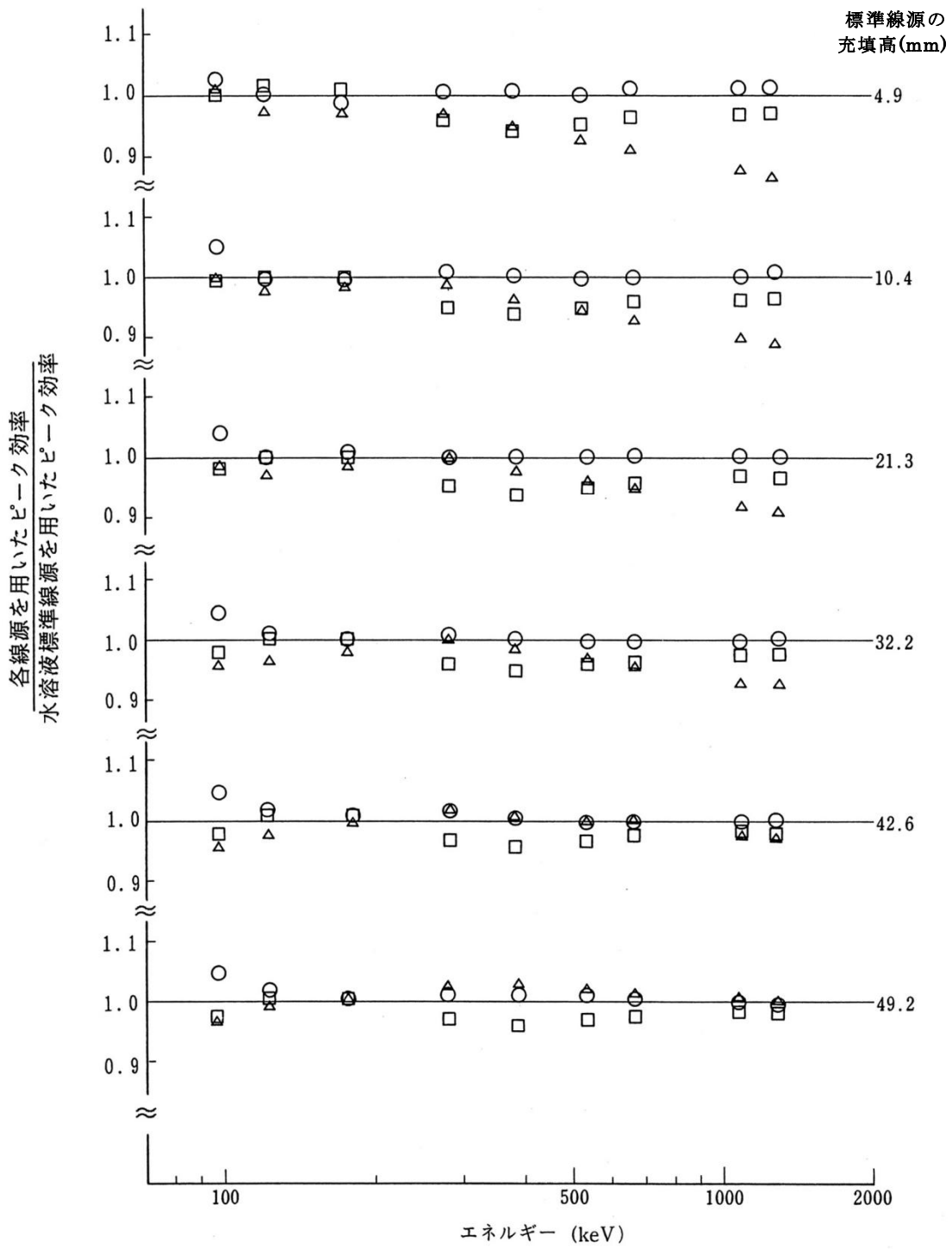
これまでに述べた方法でピーク効率を求めるには、充填高の異なる数個の多核種混合標準容積線源を測定してピーク効率曲線群を作成しなければならない。これに対し、ある $\gamma$ 線のエネルギー（基準エネルギー）のピーク効率の逆数と標準容積線源の充填高の関係を表す基準ピーク効率曲線を1つと、基準エネルギーに対する相対ピーク効率曲線（基準エネルギーのピーク効率を1に換算したピーク効率曲線）を1つ求めて、基準ピーク効率曲線の逆数と相対ピーク効率曲線を乗じることで代用する方法がある。ただし、ピーク効率曲線を求めるのに点線源を用いるので、点線源から求めたピーク効率曲線と、容積線源から求めたピーク効率曲線の形に大きな差がないと仮定する。

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、資図 1.2.4 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ないことが分かるが、 $\pm 15\%$ 以上の誤差が生じた例もある。

標準線源およびその測定については次のとおりである。

- $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{139}\text{Ce}$ 、 $^{203}\text{Hg}$ 、 $^{113}\text{Sn}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$  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して相対効率曲線を求める。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。
- 測定時間は、対象となる全てのピーク面積の計数に係る不確かさが 2% 以下になるまでとする。
- 高さが 5、10、20、30、40、50mm の KCl 標準容積線源またはセシウム標準溶液線源（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充填高の関係を表す基準ピーク効率曲線を求める。

なお、KCl 1g 当たりの放射能は約 1.7Bq である。



- △ : 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

資図 1.2.4 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曲線を用いたピーク効率の比較

### 資 1.2.5 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。

$$\varepsilon_A = \frac{\exp\{(\mu_A - \mu_S) \times H_1\}}{H_2 - H_1} \times (H_2 \times \varepsilon_2 - H_1 \times \varepsilon_1) \quad (\text{資 1.2.4})$$

- $\varepsilon_A$  : 上層の自己吸収補正を含むピーク効率
- $\mu_A$  : 上層の線減弱係数
- $\mu_S$  : 下層の線減弱係数
- $H_2$  : 試料全体の充填高
- $H_1$  : 下層の充填高
- $\varepsilon_2$  : 高さが $H_2$ で、試料全体が上層部分の材質であると仮定したときの自己吸収補正を含むピーク効率
- $\varepsilon_1$  : 高さが $H_1$ で、試料全体が上層部分の材質であると仮定したときの自己吸収補正を含むピーク効率



### 資料 1.3 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等、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よく用いられる。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ため、U-8 容器を用いる場合のようにピーク効率を試料の充填高により関数化することが困難であり、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。

#### 資 1.3.1 <sup>131</sup>I、<sup>137</sup>Cs、<sup>40</sup>K を対象とする場合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 <sup>131</sup>I と <sup>137</sup>Cs、さらに、自然放射性核種として含まれていることが多い <sup>40</sup>K の 3 核種に限定してピーク効率を求める。

<sup>131</sup>I、<sup>137</sup>Cs、<sup>40</sup>K を含むマリネリ標準線源をピーク面積が 20,000 カウントを超えるまで測定し、そこからピーク効率を求める。相対効率 25% のゲルマニウム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 <sup>131</sup>I が 0.012count/ $\gamma$ 、<sup>137</sup>Cs が 0.008count/ $\gamma$ 、<sup>40</sup>K が 0.004count/ $\gamma$  程度となる。

試料を測定した結果、<sup>131</sup>I、<sup>137</sup>Cs、<sup>40</sup>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、次のよう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。これを式で表すと  $\varepsilon = a \cdot E^{-b}$  となる。ここで  $\varepsilon$  はピーク効率 (count/ $\gamma$ )、 $E$  は  $\gamma$  線のエネルギー (keV)、 $a$ 、 $b$  は定数である。

<sup>131</sup>I、<sup>137</sup>Cs、<sup>40</sup>K のうち 2 核種のピーク効率とエネルギーを代入して定数  $a$ 、 $b$  を求め、求めたい核種の  $\gamma$  線のエネルギーを  $\varepsilon = a \cdot E^{-b}$  に代入してピーク効率を計算する。

#### 資 1.3.2 核種を 3 つに限定しない場合のピーク効率の求め方

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>203</sup>Hg、<sup>113</sup>Sn、<sup>85</sup>Sr、<sup>137</sup>Cs、<sup>88</sup>Y、<sup>59</sup>Fe、<sup>60</sup>Co を含む標準線源を測定することで、ピーク効率曲線を求める。このとき、<sup>88</sup>Y、<sup>60</sup>Co はサム効果のため測定値は低めの値を示すが、通常の間筒形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。

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。関数化は資 1.2.3 と同様に行うが  $C_6$  の項は不要である。

<sup>1</sup> マリネリ容器については、解説 B を参照のこと。

### 資 1.3.3 自己吸収補正

マリネリ容器は常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、試料の線減弱係数の異なる材質に対して自己吸収の補正を行うことになる。自己吸収補正式の求め方を以下に示す。

①標準線源を測定し、そのピーク効率 $\varepsilon_s(E, \mu_s)$ を求める。

$E$ はエネルギー、 $\mu$ は線減弱係数、添字 $s$ は標準線源を表す。

②ピーク効率のうちの線減弱係数に関わる成分の関数 $f(\mu)$ を $\mu$ の2次関数の逆数と仮定し、標準線源のピーク効率および線減弱係数を用いて次式のとおり求める。

$$f(\mu) = (1 + a\mu + b\mu^2)^{-1} \quad (\text{資 1.3.1})$$

$a, b$  : 定数

以下は解説 B.1.2 で示したマリネリ容器での  $a, b$  の算出の例<sup>2</sup>となる。

$$0.7\text{L 用} \quad f(\mu) = (1 + a_{0.7}\mu + b_{0.7}\mu^2)^{-1} \quad (\text{資 1.3.2})$$
$$a_{0.7} = -0.558435 \quad b_{0.7} = 5.58197$$

$$2.0\text{L 用} \quad f(\mu) = (1 + a_{2.0}\mu + b_{2.0}\mu^2)^{-1} \quad (\text{資 1.3.3})$$
$$a_{2.0} = 1.71115 \quad b_{2.0} = 1.02209$$

式(資 1.3.1)の $\mu$ に標準線源の材質に対する線減弱係数 $\mu_s$ および試料の線減弱係数 $\mu_x$ をそれぞれ代入して $f(\mu_s)$ および $f(\mu_x)$ を求める。

添字 $x$ は測定試料を表す。

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

---

<sup>2</sup> 容積の異なるマリネリ容器の  $a, b$  については以下のとおり算出する。

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ピーク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 $E$ 、ジオメトリ $G$ 、試料の線減弱係数 $\mu$ 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。

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

ここで、 $f(\mu)^{-1}$ 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の形状・材質のみに依存する。この式に2つの標準線源の材質（線減弱係数）とピーク効率を代入し、定数 $a$ および $b$ を計算する。

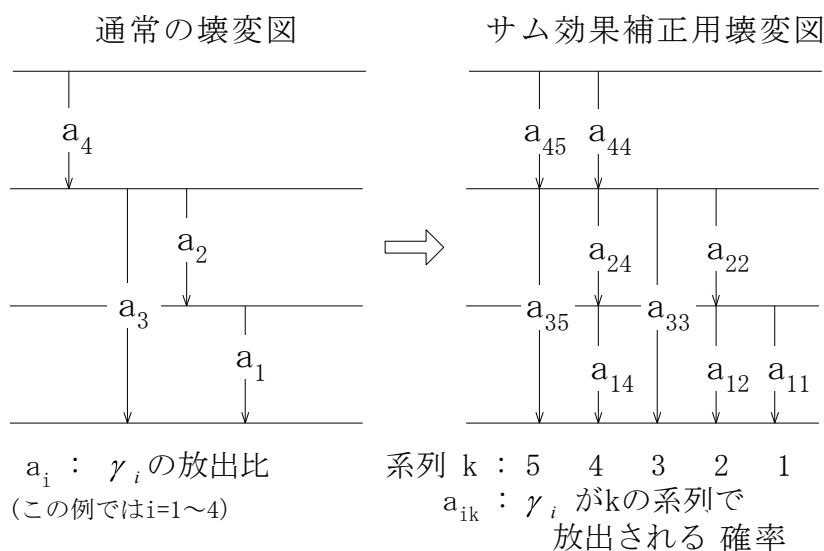
$$\varepsilon_x(E, \mu_x) = \frac{f(\mu_x)}{f(\mu_s)} \varepsilon_s(E, \mu_s)$$

(資 1.3.4)

## 資料 1.4 サム効果補正法

多くの放射性核種は1壊変につき2個以上の $\gamma$ 線をほぼ同時に放出する。これは壊変後の原子核の励起状態から順次低いエネルギー準位への遷移が、非常に短時間に発生し、準位間のエネルギー差に相当する $\gamma$ 線がほぼ同時に放出されるためである。1壊変で放出される複数の $\gamma$ 線は検出器の分解時間以内で生じる（このように連続的に放出される複数の $\gamma$ 線をカスケード $\gamma$ 線という）ため、複数の $\gamma$ 線が検出器に吸収された場合には分離することができず、和の信号が1つ出力され、目的の $\gamma$ 線の計数が減少してしまうことになる。この現象をサム・コインシデンス効果（サム効果）といい、ランダムにパルスが重なり合うパイルアップが高い計数率において発生するのは異なり、低い計数率においても顕著に現れることがある。サム効果は検出効率と核種の壊変形式に依存し場合によっては数十%<sup>1</sup>にもなることがある。

サム効果は、壊変形式が少し複雑になると大変混みいったものとなるので、壊変図を書き直して考えると理解しやすい。



資図 1.4.1 壊変図の書き直し例

通常壊変図は左図のように示されているが、サム効果に着目して考える際には右図のように書き直す。ある核種から複数の $\gamma$ 線が放出される場合でもカスケードの関係にある $\gamma$ 線のみがサム効果の対象となり、そうでない場合はサム効果は生じない。カスケードの関係を系列として示したのが右図である。 $\gamma_3$ がサム効果を起こすのは系列5のみである。すなわち $\gamma_4$ としかサム効果を起こさない。正確には系列2および4のサム効果（ $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ ）によって $\gamma_3$ に相当する信号が増える（クロスオーバー）ことになるがここでは無視<sup>2</sup>することとする。

<sup>1</sup> 相対効率が40%の検出器の場合でも、サム効果が20%以上になることがある。

<sup>2</sup> クロスオーバーを起こす $\gamma$ 線は通常ピーク効率校正には使用しない。

サム効果の補正式を導くに当たって以下のことを前提とする。

- ・遷移の確率は系列が同じならば全て同じである。その値を $a_{ok}$ とする。

内部転換によって $\gamma$ 線放出が減少した後の残存率を $\gamma_i$ ごとに $f_i$ として、 $f_i a_{ok} = a_{ik}$ とする。

- ・ $\gamma_i$ の全放出率 $a_i$ は、各系列における $\gamma_i$ の放出確率の合計である。

$$a_i = \sum_k a_{ik} \quad (\text{資 1.4.1})$$

- ・角相関<sup>3</sup>は無視する。

まずサム効果を補正するための手順を示す。

(1) ある系列において $\gamma_i$ とカスケードの関係にある $\gamma$ 線を $\gamma_j$ と表す ( $i \neq j$ )。

(2) ある系列において、全ての $\gamma_j$ が計数されない確率は、 $\prod_j (1 - f_j T_j)$ となる。

$T_j$  :  $\gamma_j$ に対する全効率

$\prod$  : 乗算記号

(3) ある系列( $k$ )の $\gamma_i$ が $\gamma_i$ のエネルギー情報を持ったまま1壊変当たりに計数される確率は次のように表される。

$$\varepsilon_i f_i a_{ok} \prod_{j \neq i} (1 - f_j T_j) \quad (\text{資 1.4.2})$$

$\varepsilon_i$  :  $\gamma_i$ に対するピーク効率

(4) 全ての系列を合計すると

$$\sum_k \varepsilon_i f_i a_{ok} \prod_{j \neq i} (1 - f_j T_j) \quad (\text{資 1.4.3})$$

となり、実際に $\gamma_i$ のエネルギーとして計測される計数、すなわち観測される $\gamma_i$ の計数 (1壊変当たり) の期待値となる。

したがって、

$$\sum_k \varepsilon_i f_i a_{ok} \prod_{j \neq i} (1 - f_j T_j) = \varepsilon_i^* a_i \quad (\text{資 1.4.4})$$

$\varepsilon_i^*$  : 観測されるピーク効率

$$\sum_k \varepsilon_i a_{ik} \prod_{j \neq i} (1 - f_j T_j) = \varepsilon_i^* a_i \quad (\text{資 1.4.5})$$

<sup>3</sup>  $\gamma_1$ と $\gamma_2$ がカスケードの関係にあるとき、 $\gamma_1$ の放出方向に対して $\gamma_2$ がどの方向に放出されやすいかを表す量。

$$\varepsilon_i^* = \varepsilon_i \sum_k \left[ \frac{a_{ik}}{a_i} \prod_{j \neq i} (1 - f_j T_j) \right] \quad (\text{資 1.4.6})$$

サム効果を補正した $\varepsilon_i$ は次の式で求められる。

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_i^*}{\sum_k \left[ \frac{a_{ik}}{a_i} \prod_{j \neq i} (1 - f_j T_j) \right]} \quad (\text{資 1.4.7})$$

- (5) サム効果の補正を行うには壊変形式およびカスケードの関係にある他の $\gamma$ 線の全効率を知らなければならない。全効率 $T$ は標準 $\gamma$ 線源を用いて求められるが、ピーク効率を求めるよりはるかに難しい。なぜならば、用いる $\gamma$ 線源は、単色（一種類の $\gamma$ 線のみ） $\gamma$ 線核種でなければならないこと、また散乱 $\gamma$ 線の取扱いが難しいからである。

一般的には、全効率 $T$ はピーク・トータル比( $P/T$ )を用いて次のように表される。

$$T = \frac{\varepsilon}{(P/T)} \quad (\text{資 1.4.8})$$

ピーク・トータル比は、単色 $\gamma$ 線源（放射能の正確な値は必要ない）を用いて求めることができ、スペクトルのピーク面積 $n_p$ と全スペクトル面積 $n_T$ より、 $(P/T) = n_p/n_T$ で表される。

ピーク・トータル比は実測で求めるのが理想であるが、遮蔽体内の空間が1辺20cmの立方体程度であるならば、以下の式 [17]を用いて計算することもできる。

$$(P/T) = a \times \ln(\varepsilon_{rel}) + \beta \quad (\text{資 1.4.9})$$

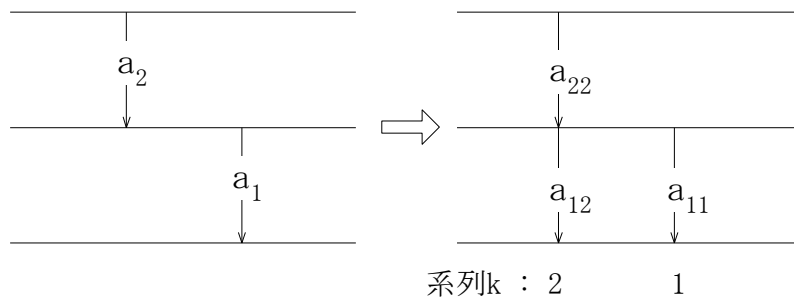
$$a = e^{(-0.30 \times \ln(E) - 1.11)}$$

$$\beta = e^{(-1.82 \times \ln(E) + 9.15)}$$

$E$  :  $\gamma$ 線エネルギー (keV)

$\varepsilon_{rel}$  : 相対効率 (%)

次に $^{60}\text{Co}$ や $^{88}\text{Y}$ のように主に2本の $\gamma$ 線のみがサム効果を起こす場合について説明する。壊変図は次のように表せる。



資図 1.4.2  $\gamma$ 線が2本のときの壊変図

(1) 式(資 1.4.5) は $\gamma_1$ については次のようになる。

$$\varepsilon_1^* a_1 = \varepsilon_1 a_{11} + \varepsilon_1 a_{12}(1 - f_2 T_2) \quad (\text{資 1.4.10})$$

$$\begin{aligned} \therefore \varepsilon_1^* &= \varepsilon_1 \left[ \frac{a_{11}}{a_1} + \frac{a_{12}}{a_1} (1 - f_2 T_2) \right] \\ &= \varepsilon_1 \left( \frac{a_{11} + a_{12}}{a_1} - \frac{a_{12}}{a_1} f_2 T_2 \right) \\ &\quad a_{11} + a_{12} = a_1 \text{であるから} \\ &= \varepsilon_1 \left( 1 - \frac{a_{12}}{a_1} f_2 T_2 \right) \end{aligned} \quad (\text{資 1.4.11})$$

また、 $\gamma_2$ については次のようになる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_2^* a_2 &= \varepsilon_2 a_{22}(1 - f_1 T_1) \\ \therefore \varepsilon_2^* &= \varepsilon_2 \frac{a_{22}}{a_2} (1 - f_1 T_1) \end{aligned} \quad (\text{資 1.4.12})$$

(2) さらに、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{88}\text{Y}$  では内部転換が無視できるので $f_1 = 1$ 、 $f_2 = 1$ となり、 $a_{12} = a_{22} = a_2$ とみなすことができる。また、 $\gamma_1$ の全放出率は100%とみなすことができるので $a_1 = 1$ となる。 $(^{60}\text{Co}$ の場合は $a_2$ も1となる。)したがって、(1)の式(資 1.4.11)および式(資 1.4.12)は、

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon_1 (1 - a_2 T_2) \quad (\text{資 1.4.13})$$

$$\varepsilon_2^* = \varepsilon_2 (1 - T_1) \quad (\text{資 1.4.14})$$

(3) サム効果を補正し、正しいピーク効率を求めるには次の式が用いられる。

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_1^*}{1 - a_2 T_2} = \frac{\varepsilon_1^*}{1 - \frac{a_2 \varepsilon_2}{(P/T)_2}} \quad (\text{資 1.4.15})$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_2^*}{1 - T_1} = \frac{\varepsilon_2^*}{1 - \frac{\varepsilon_1}{(P/T)_1}} \quad (\text{資 1.4.16})$$

$\varepsilon$  : ピーク効率  
 $\varepsilon^*$  : 観測されるピーク効率  
 $a$  : 放出率  
 $T$  : 全効率  
 $(P/T)$  : ピーク・トータル比

(4) 式(資 1.4.15)、(資 1.4.16)からも明らかなように、サム効果補正した正しい $\varepsilon_1$ を求めるには $\varepsilon_2$ が必要となる。しかし、真の $\varepsilon_2$ ははじめは分からない。したがって、まず $\varepsilon_2$ の代わりに $\varepsilon_2^*$ を式(資 1.4.15)に代入し $\varepsilon_1$ を求める。次に式(資 1.4.16)に $\varepsilon_1$ を代入して $\varepsilon_2$ を求める。この操作を収束するまで何回か繰り返し行う。通常は2回程度で十分である。

## 資料 1.5 環境試料に対する $\gamma$ 線の減弱係数の計算例

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、 $\gamma$  線が物質中で相互作用（光電効果、コンプトン散乱、電子対生成）のどれかを行うと一度に大きくエネルギーを失う。ゲルマニウム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、容積試料の自己吸収補正に使われる  $\gamma$  線の減弱係数は前記 3 種類の相互作用の断面積（あるいは減弱係数）の合計を用いて計算することができる。

なお、 $\gamma$  線エネルギーが変わらないコヒーレント散乱については、等方散乱と広い線束のため、容積試料の測定においては媒体からの散乱線の出入がほぼ等しいと仮定し、本計算例においては考慮しないこととする [18]。

$\gamma$  線が物質中を通過する際の減弱を評価するために単純化したモデルとして、強度  $I_0$  の平行線束の  $\gamma$  線が厚さ  $x$  の物質に垂直に入射する場合を考えると、透過する  $\gamma$  線の割合は次のように表される。

$$I/I_0 = \exp(-\mu x) \quad (\text{資 1.5.1})$$

上式において、 $\mu$  は線減弱係数といわれ、変数  $x$  の単位が cm の場合、単位は  $\text{cm}^{-1}$  となる。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  $\mu$  の代わりに質量減弱係数  $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) 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、

$$\mu/\rho = \sigma \cdot N \quad (\text{資 1.5.2})$$

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、物質の原子番号とエネルギーを変数とする近似関数 [19] [20] から求める方法がある。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 [19] 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。

なお、実際の試料の測定では、測定試料は容積試料である場合が多く、試料から検出器への  $\gamma$  線入射は平行線束とはならない。そのような場合に試料内での  $\gamma$  線の減衰を評価するには、検出器と試料のジオメトリから立体角を考慮した数値計算、モンテカルロシミュレーション等の手法が必要となる。

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 :  $10^{-24}\text{cm}^2$ ) 単位で数表等から求め、 $\sigma(E_1)$  とする。



なお、質量減弱係数 $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) 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。

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

③次式の $\sigma(Z, E)$ に $\sigma(E_1)$ 、右辺の $E$ に $E_1$ を代入した式と $\sigma(Z, E)$ に $\sigma(E_2)$ 、右辺の $E$ に $E_2$ を代入した式による連立方程式を解いて $A(Z)$ と $B(Z)$ を求める。

$$\sigma(Z, E) = A(Z) \cdot E^{-3.15} + B(Z) \cdot \exp[0.408(\ln E) - 0.066(\ln E)^2] \quad (\text{資 1.5.3})$$

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分子量が $M$ 、元素組成が  $A_aB_bC_c\cdots$ なる化合物の質量減弱係数 $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) は次式により計算される。

$$\mu/\rho = 0.6022(a \cdot \sigma_A + b \cdot \sigma_B + c \cdot \sigma_C + \cdots)/M \quad (\text{資 1.5.4})$$

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

$$\mu/\rho = a \cdot \mu/\rho_A + b \cdot \mu/\rho_B + c \cdot \mu/\rho_C + \cdots \quad (\text{資 1.5.5})$$

質量減弱係数の計算例

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

- 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 ( $\sigma(\text{Al}_{100})$ ) をバーン (barn : 10<sup>-24</sup>cm<sup>2</sup>) 単位で数表から計算で求める。

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

$\sigma(\text{Al}_{100}) = 7.047$ である。

- ②同様に、500keV のアルミニウムの断面積 ( $\sigma(\text{Al}_{500})$ ) を求める。

$$\sigma(\text{Al}_{500}) = 3.756$$

- ③次式の $\sigma(Z, E)$ に $\sigma(\text{Al}_{100})$ 、右辺の $E$ に100を代入した式と $\sigma(Z, E)$ に $\sigma(\text{Al}_{500})$ 、右辺の $E$ に500を代入した式による連立方程式を解いて $A(Z)$ と $B(Z)$ を求める。

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

アルミニウム

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

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

連立方程式を解く。

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

$$B(Z) = 3.801$$

下記の近似式となる。

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

- 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

$$\sigma(\text{O}_{100}) = 3.960$$

$$\sigma(\text{O}_{500}) = 2.31$$

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

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

連立方程式を解き  $A(Z)$  と  $B(Z)$  を求める。

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

$$B(Z) = 2.340$$

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

⑤分子量 (M) が 102 のアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) の 134keV ( $^{144}\text{Ce}$  11.1%) での質量減弱係数  $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) は次のように計算される。

134keV のアルミニウムの断面積

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

134keV の酸素の断面積

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

質量減弱係数を求める。

$$\begin{aligned} \mu/\rho &= 0.6022(a \cdot \sigma A + b \cdot \sigma B)/M \\ &= 0.6022(2 \cdot 6.118 + 3 \cdot 3.616)/102 \\ &= 0.136(\text{cm}^2/\text{g}) \end{aligned}$$

## 資料 1.6 自己吸収の補正

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、エネルギーを失う。これを自己吸収と呼ぶ。これによってエネルギーを失った  $\gamma$  線は光電ピークとして計数されなくなるため、補正が必要となる。

自己吸収は試料の厚さが厚いほど、試料の線減弱係数が大きいほど、起こりやすい。容積線源を用いて算出したピーク効率は容積線源自身の自己吸収の影響を含んでいるため、材質や密度が線源と異なる試料にそのままピーク効率を適用することはできない。

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資料 1.2 を参照のこと。

### 資 1.6.1 自己吸収と補正の原理

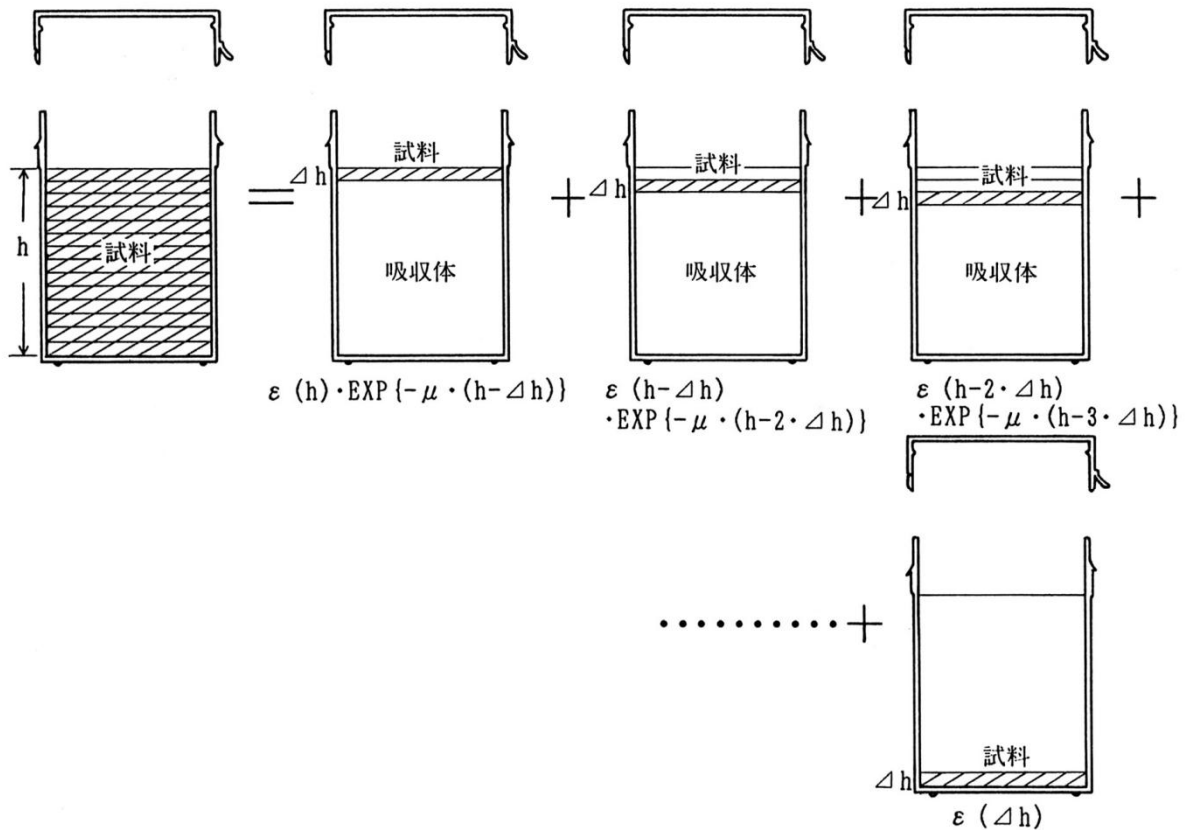
試料中のある場所の単位距離を通過する平行な  $\gamma$  線束を考える。この  $\gamma$  線はその場所で試料物質と相互作用して数が減る。その場所で消滅する数はその場所に入ってきた  $\gamma$  線の数に比例し、その比例定数が線減弱係数  $\mu$  である。減少する数は「その場所の位置が何処であるか」に無関係であり、 $\gamma$  線の数のみに依存するため、3 次元的な座標を考慮する必要はなく、減弱は線形微分方程式で表現される。

$$\frac{dN}{dx} = -\mu \times N \qquad N = A \cdot \exp(-\mu \cdot X) \qquad (\text{資 1.6.1})$$

ここで、  
 $N$  : 試料容器底面における  $\gamma$  線の数  
 $A$  : 試料から放出される  $\gamma$  線の数  
 $X$  : 放出された位置から試料容器底面までの距離

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に応じて減少する。

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。



資図 1.6.1 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

### 資 1.6.2 線減弱係数

(1) 自己吸収の補正に用いる線減弱係数（資料 1.5 を参照）は、 $\gamma$  線のエネルギーおよび試料の材質によって異なる。 $\gamma$  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、みかけの密度と  $\gamma$  線エネルギーが分かれば計算することができる。み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、灰化物等の質量減弱係数と  $\gamma$  線のエネルギーの関係は次式で示される。

$$\mu/\rho (\text{cm}^2/\text{g}) = \exp \left\{ -2.361 - 0.3949 \times \ln \frac{E}{400} - 0.06914 \times \left( \ln \frac{E}{400} \right)^2 \right\} \quad (\text{資 1.6.2})$$

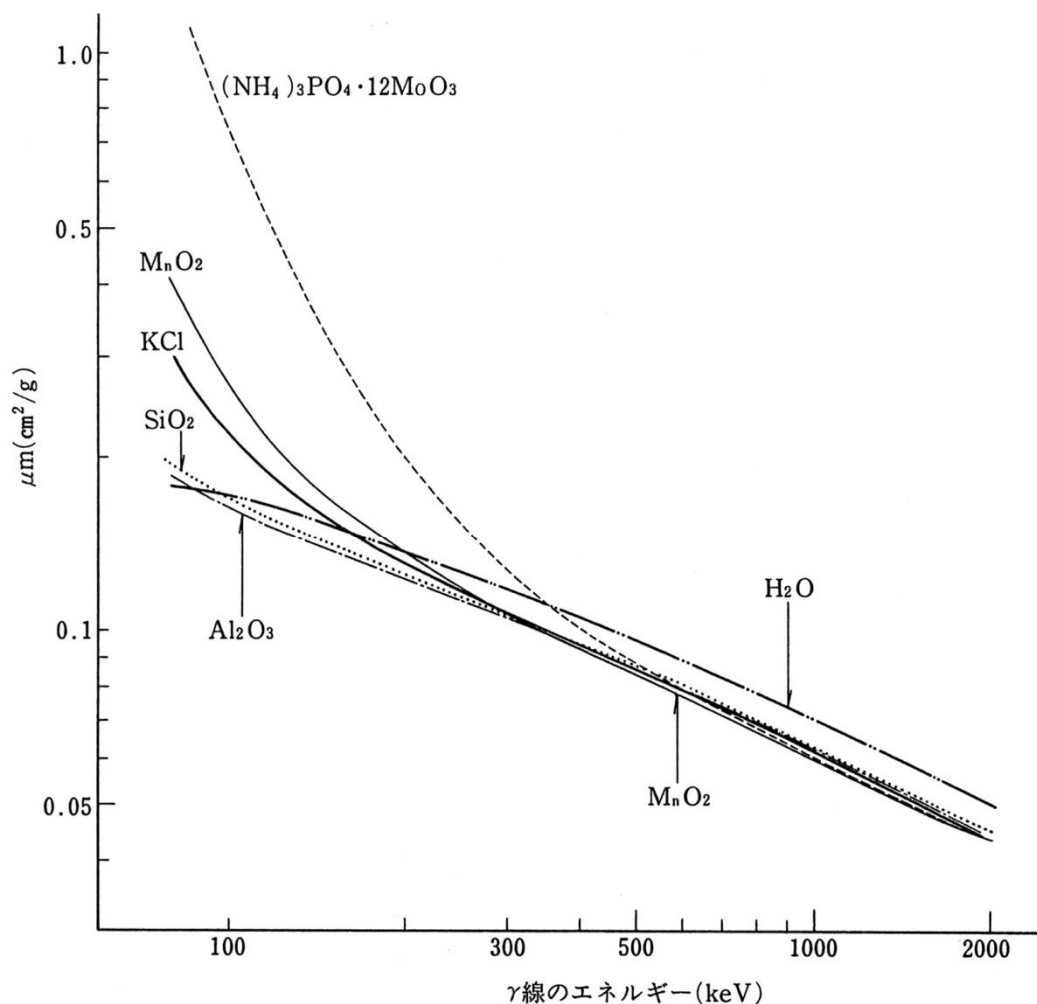
$\mu/\rho$  : 海底土、土壌、灰化物等の質量減弱係数  
 ( $\mu$  : 海底土、土壌、灰化物等の線減弱係数)  
 $E$  :  $\gamma$  線のエネルギー (keV)

(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および二酸化マンガンは原子番号の平均が大きく、土壌等の質量減弱係数をあてはめることはできない。リンモリブデン酸アンモニウムの質量減弱係数は次式で示される。

$$\mu/\rho(\text{cm}^2/\text{g}) = 1.794 \times (E^{-0.4921}) + 673500 \times (E^{-3.040}) \quad (\text{資 1.6.3})$$

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

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



資図 1.6.2 質量減弱係数

(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。

$$\mu_{total} = \left( \mu_1 \times \frac{w_1}{w_{total}} + \mu_2 \times \frac{w_2}{w_{total}} \right) \quad (\text{資 1.6.4})$$

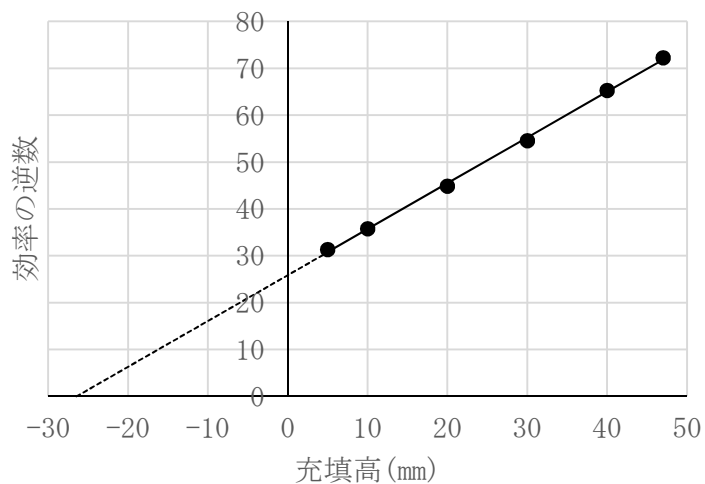
- $\mu_{total}$  : 混合試料全体の線減弱係数
- $\mu_1$  : リンモリブデン酸アンモニウムの線減弱係数
- $\mu_2$  : 水酸化物や硫化物の線減弱係数  
(土壌等の線減弱係数と同じである)
- $w_{total}$  : 混合試料全体の重量
- $w_1$  : リンモリブデン酸アンモニウムの重量
- $w_2$  : 水酸化物や硫化物の重量

### 資 1.6.3 計算方法 [21]

同一の材質で充填高の異なる複数の標準線源におけるピーク効率 $\varepsilon$ と充填高 $h$ の関係を1次式の逆数で近似すると以下の式となる。

$$\varepsilon \approx (b \cdot h + c)^{-1} \quad (\text{資 1.6.5})$$

$b, c$  : 定数



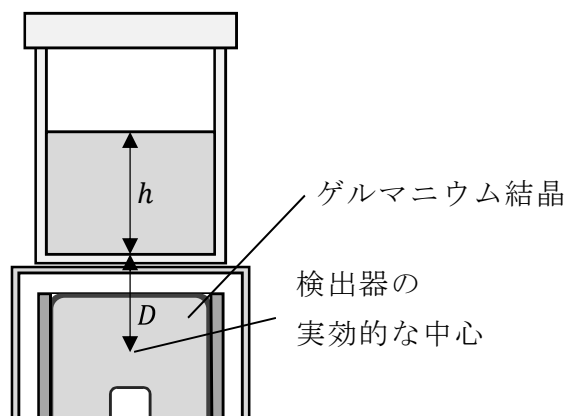
資図 1.6.3 ピーク効率と充填高の関係

ここで  $D = c/b$ 、 $\varepsilon_0 = 1/c$  とおくと、以下の式となる。

$$\varepsilon \approx D \cdot \varepsilon_0 / (h + D) \quad (\text{資 1.6.6})$$

この近似式は試料と線源の自己吸収の差分を求めるためにのみ用いるものであり、

ピーク効率の絶対値を求めるには誤差が大きくなり使用できない<sup>1</sup>。また、 $D$ は試料底面から検出器の実効的な中心までの距離を表す。



資図 1.6.4 検出器の実効的な中心

放出される  $\gamma$  線を平行線束とみなし、標準容積線源と測定対象試料の自己吸収の違い  $\Delta\varepsilon$  を計算する。試料と標準容積線源の線減弱係数をそれぞれ  $\mu$ 、 $\mu_s$  と、高さ方向の変数を  $x$  として

$$\Delta\varepsilon = \frac{D^2 \cdot \varepsilon_0}{h} \int_0^h \frac{1 - \exp\{(\mu_s - \mu) \cdot x\}}{(x + D)^2} dx \quad (\text{資 1.6.7})$$

となる。

$D$ は  $\gamma$  線のエネルギーにより多少変わるものの、標準容積線源と測定対象試料の線減弱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。二酸化マンガ試料中の  $^{144}\text{Ce}$  (133.5keV) を定量するとき (標準線源が水の場合：線減弱係数の差  $\Delta\mu \cong 0.4$ )、しかも試料の高さが 5cm もあるような特殊な場合を除いては、問題にならないため、エネルギーによって変化させなくてもよい。

$\varepsilon_0$ は関数化されたピーク効率で計算する。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。

$$\Delta\varepsilon(h) = \frac{\varepsilon_0}{12} \left\{ 4 \cdot \frac{1 - e^{aX/4}}{\left(1 + \frac{X}{4}\right)^2} + 2 \cdot \frac{1 - e^{aX/2}}{\left(1 + \frac{X}{2}\right)^2} + 4 \cdot \frac{1 - e^{3aX/4}}{\left(1 + \frac{3 \cdot X}{4}\right)^2} + \frac{1 - e^{aX}}{(1 + X)^2} \right\} \quad (\text{資 1.6.8})$$

<sup>1</sup> ピーク効率  $\varepsilon$  の逆数と充填高  $h$  の関係は本来 2 次式で表される。



## 資料 1.7 減衰補正の計算例

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) 壊変による減衰の補正計算

放射性核種の時間当たりの減少 $-dN/dt$ と壊変定数 $\lambda$ およびその時点での放射性核種の数 $N$ との関係は

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (\text{資 1.7.1})$$

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

$$A_0 = A \exp(\lambda t) \quad (\text{資 1.7.2})$$

$$\sigma_0 = \sigma \exp(\lambda t) \quad (\text{資 1.7.3})$$

となる。半減期 $T$ で書けば次のようになる。

$$A_0 = A (1/2)^{-(t/T)} \quad (\text{資 1.7.4})$$

$$\sigma_0 = \sigma (1/2)^{-(t/T)} \quad (\text{資 1.7.5})$$

### (2) 逐次壊変による減衰の補正計算

放射性核種が壊変して安定な核種に変わらず、再び別種の放射性核種に変わる場合、はじめの核種を「親核種」、新たに作られた核種を「子孫核種」と呼ぶ。親核種の減衰は上の式で表されるが、子孫核種の時間当たりの減少の項には親核種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。

$$-\frac{dN_p}{dt} = \lambda_p N_p \quad (\text{資 1.7.6})$$

$N_p$  : 親核種の原子数  $\lambda_p$  : 親核種の壊変定数

$$-\frac{dN_d}{dt} = \lambda_d N_d - \lambda_p N_p \quad (\text{資 1.7.7})$$

$N_d$  : 子孫核種の原子数  $\lambda_d$  : 子孫核種の壊変定数

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。

$$A_{p0} = A_p \exp(\lambda_p t) \quad (\text{資 1.7.8})$$

$$\sigma_{p0} = \sigma_p \exp(\lambda_p t) \quad (\text{資 1.7.9})$$

$$A_{d0} = A_d \exp(\lambda_d t) - \frac{\lambda_d}{\lambda_d - \lambda_p} \{ \exp(\lambda_d t) - \exp(\lambda_p t) \} A_p \quad (\text{資 1.7.10})$$

$$\sigma_{d0} = \sqrt{ \{ \sigma_d \exp(\lambda_d t) \}^2 + \frac{\lambda_p^2}{(\lambda_d - \lambda_p)^2} \{ \exp(\lambda_d t) - \exp(\lambda_p t) \}^2 \sigma_p^2 } \quad (\text{資 1.7.11})$$

## 親-子孫の関係で連続的に壊変する場合について

1. 親核種が長寿命でなく（子孫核種よりは長い）、放射能の時間的変化は見えるが、親核種と子孫核種の放射能比が一定である状態を過渡平衡と呼ぶ。
2. 親核種が長寿命（子孫核種より長い）、かつ、親核種と子孫核種の放射能比が一定で、時間的変化も見られない状態を永続平衡と呼ぶ。
3. 親-子孫の関係で壊変する場合、子孫核種が測定時に「 $3\sigma$ 未満」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、子孫核種は弱くて不確かさが小さく、親核種は強くて不確かさが小さかったとする<sup>1</sup>。時間が経てば子孫核種が生長してくるのは明らかで、将来の子孫核種の放射能を計算すれば時間とともに「 $3\sigma$ 未満」が「 $3\sigma$ 以上」に変わる。

この場合について、逆に子孫核種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つながる曲線を描き、遡って計算すると、負でかつ「 $3\sigma$ 未満」になる。

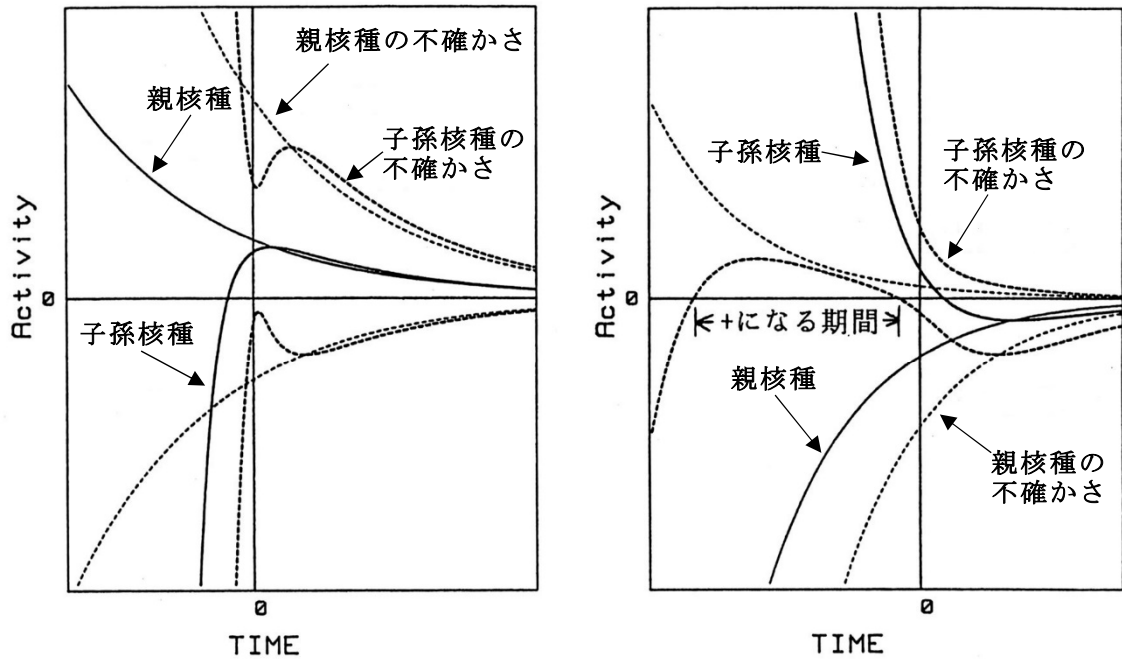
b) 親核種、子孫核種の測定値が両方とも「 $3\sigma$ 未満」で不検出であっても、異符号だと減衰補正によって子孫核種が「 $3\sigma$ 以上」になる場合がでてくる。上の式に従い、計算した例を資図 1.7.1 に示す。

左の例は親核種、子孫核種の測定値が同符号であり、時期にかかわらず常に「 $3\sigma$ 未満」である。

右の例は親核種、子孫核種の測定値が異符号で、過去に遡るとある期間子孫核種のみが $3\sigma$ を超えて子孫核種の下方 $3\sigma$ がプラスになる。

---

<sup>1</sup> いわゆるスカベンジのときに起こる。



資図 1.7.1 親-子孫の関係で壊変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。

### (3) 測定中の壊変による減衰補正計算

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以下の式で表される。

$$A_0 = \frac{\lambda t_m}{1 - \exp(-\lambda t_m)} \times \exp(\lambda t) \times (A \pm \sigma) \quad (\text{資 1.7.12})$$

$t_m$  : 測定時間 (リアルタイム: real time<sup>2</sup>)

$t$  : 減衰補正時間 (減衰補正基準時刻と測定開始時刻の差)

### (4) 測定中の逐次壊変による減衰補正計算

親核種、子孫核種の両方ともリアルタイム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、「測定中の親核種から子孫核種への流れ込み」を考慮した計算を行う必要がある。

例えば  $^{99}\text{Mo}$  (親核種: 半減期 66.02h) と  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (子孫核種: 半減期 6.007h) 等がある。

<sup>2</sup> トゥルータイム (true time) ともいう。ここではリアルタイムと表記する。

- $t_m$  : 測定時間 (リアルタイム)  
 $t$  : 減衰補正時間 (減衰補正基準時刻と測定開始時刻の差)  
 $A_p \pm \sigma_p$  : 測定時点での親核種の放射能  
 $A_d \pm \sigma_d$  : 測定時点での子孫核種の放射能  
 $A_{p0} \pm \sigma_{p0}$  : 減衰補正基準時刻での親核種の放射能  
 $A_{d0} \pm \sigma_{d0}$  : 減衰補正基準時刻での子孫核種の放射能

とおけば

$$A_{p0} \pm \sigma_{p0} = \frac{\lambda_p t_m}{1 - \exp(-\lambda_p t_m)} \times \exp(\lambda_p t) \times (A_p \pm \sigma_p) \quad (\text{資 1.7.13})$$

$$A_{d0} = \frac{A_p \lambda_d t_m}{\lambda_d - \lambda_p} \left\{ \frac{\lambda_p \times \exp(\lambda_p t)}{1 - \exp(-\lambda_p t_m)} - \frac{\lambda_d \times \exp(\lambda_d t)}{1 - \exp(-\lambda_d t_m)} \right\} + \frac{A_d \lambda_d t_m \times \exp(\lambda_d t)}{1 - \exp(-\lambda_d t_m)} \quad (\text{資 1.7.14})$$

$$\sigma_{d0} = \sqrt{\sigma_p^2 \frac{(\lambda_d t_m)^2}{(\lambda_d - \lambda_p)^2} \left\{ \frac{\lambda_p \times \exp(\lambda_p t)}{1 - \exp(-\lambda_p t_m)} - \frac{\lambda_d \times \exp(\lambda_d t)}{1 - \exp(-\lambda_d t_m)} \right\}^2 + \sigma_d^2 \left\{ \frac{\lambda_d t_m \times \exp(\lambda_d t)}{1 - \exp(-\lambda_d t_m)} \right\}^2} \quad (\text{資 1.7.15})$$

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ときのみ減衰補正を行う。これは親-子孫の関係で逐次壊変するしないにかかわらず、正しい選択である。

1. 自然壊変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よく、減衰補正の必要はない。
2. 壊変が系列をなして連続的であるとき、厳密には線形連立1次微分方程式を解かなくてはならない。
3. 子孫核種の減衰補正は過渡平衡になっているとみなしての補正で十分な場合もある。

## 資料 1.8 バックグラウンドの補正方法

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、すなわち試料のない状態での測定を行い、補正を行う必要がある。補正方法は以下の式のとおりである。

$$N \pm \sigma_N = S/T_S - B/T_B \pm \sqrt{(\sigma_S/T_S)^2 + (\sigma_B/T_B)^2} \quad (\text{資 1.8.1})$$

- $N$  : 正味ピーク計数率
- $\sigma_N$  : 正味ピーク計数率の計数に係る不確かさ
- $S$  : 試料ピーク面積
- $\sigma_S$  : 試料ピーク面積の計数に係る不確かさ
- $B$  : 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に係る不確かさ
- $T_S$  : 試料測定時間
- $T_B$  : バックグラウンド測定時間

このとき、以下の点に注意すること。

- 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の補正は必要ない。
- 補正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。なお自然系列核種(4.1.6 (4)および4.1.7 (4)を参照)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。

## 資料 1.9 ピーク・トータル比

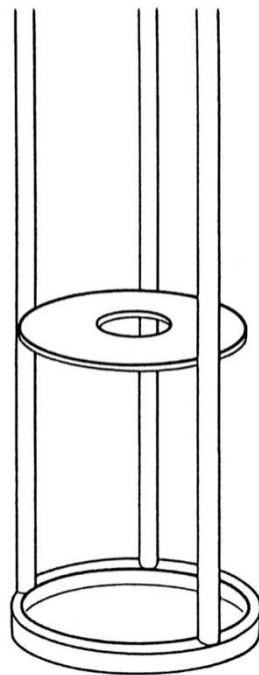
サム効果の補正を行うためには、カスケードの関係にある他の $\gamma$ 線の全効率が必要となる。全効率を知るには、ピーク効率と全効率の比であるピーク・トータル比を、 $\gamma$ 線のエネルギーの関数として求めておく方法が一般的である。ピーク・トータル比は、検出器の相対効率、遮蔽体の材質や内容積によって影響される。

### 資 1.9.1 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に係る不確かさが2%以下になるまで測定する。

ピーク・トータル比は、測定試料がセットされる付近では点線源の位置が変わっても3%程度しか変化しないため、測定試料がセットされる付近の一箇所で測定すればよい。そのため、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n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。

また、 $\gamma$ 線の散乱をできるだけ小さくするため、線源および支える治具(資図 1.9.1 参照)はでき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。

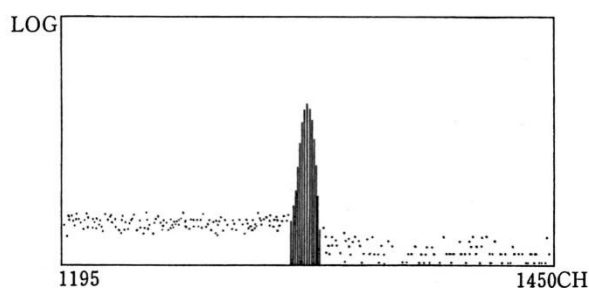


資図 1.9.1 ピーク・トータル比測定に用いる線源ホルダ

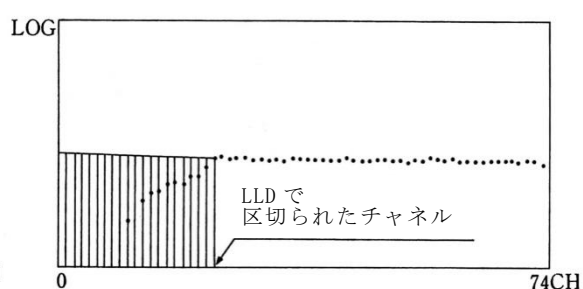
### 資 1.9.2 ピーク・トータル比の求め方

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（資図 1.9.2a の縦線で表した部分）の計数からベースラインを差し引いた正味計数をピーク面積とする。
- (2) スペクトルの低エネルギー側の下限（以下、LLD とする）から 4096 チャンネルまでの計数値を積算する。LLD 以下のカウント数は、資図 1.9.2b の縦線領域で示したように、LLD 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。



資図 1.9.2a  $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線スペクトル  
(全エネルギーピーク付近)



資図 1.9.2b  $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線スペクトル  
(LLD 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、そのピーク・トータル比の逆数に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）から差し引いた面積で大きい方のピーク面積を除して、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。

### 資 1.9.3 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<sup>1</sup>がある [17]。

$$\begin{aligned}\ln(\alpha) &= -0.30 \times \ln(E) - 1.11 \\ \ln(\beta) &= -1.82 \times \ln(E) + 9.15 \\ (P/T) &= \alpha \times \ln(\varepsilon_{rel}) + \beta\end{aligned}\tag{資 1.9.1}$$

$E$  :  $\gamma$  線のエネルギー (keV)  
 $(P/T)$  : ピーク・トータル比  
 $\varepsilon_{rel}$  : 相対効率 (%)

- (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・トータル比を实测し、上式にならって関数化する。

---

<sup>1</sup> なお $\ln(\beta)$ 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)  
 $\ln(\beta) = -7.97 + 3.31 \times \ln(E) - 0.383 \times \ln(E) \times \ln(E)$



## 資料 1.10 ゲルマニウム半導体検出器の検出可能レベル

「平常時モニタリングについて（原子力災害対策指針補足参考資料）」（平成 30 年 4 月）によれば、大気中および環境試料中の放射性物質の濃度の測定に当たっては、測定目標値を設定する必要がある。ここでは、「周辺住民等の被ばく線量の推定および評価」の目的で測定する食品や大気浮遊じん等について、測定目標値設定の際に参考になるように、測定条件とそれに対応する主要核種の検出可能レベルを示す。

条件は以下のとおりである。

### (1) 測定試料

- ・  $^{131}\text{I}$  以外の核種  
前処理：灰化または蒸発乾固  
容器：U-8 容器
- ・  $^{131}\text{I}$   
前処理：なし  
容器：2L マリネリ容器

### (2) 測定条件

- ・ 測定器  
同軸型ゲルマニウム半導体検出器  
p 型  
相対効率  
資表 1.10.1 約 20%  
資表 1.10.2 U-8 容器：約 40%  
マリネリ容器：約 30%
- ・ 測定時間  
資表 1.10.1 80000 秒程度  
資表 1.10.2 70000 秒程度

資表 1.10.1 ゲルマニウム半導体検出器の検出可能レベル

試料名	供試量	<sup>144</sup> Ce	<sup>131</sup> I	<sup>140</sup> Ba	<sup>134</sup> Cs	<sup>106</sup> Ru	<sup>137</sup> Cs	<sup>95</sup> Zr	<sup>95</sup> Nb	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>140</sup> La	備考
大根、白菜	約 2 kg 生	0.44	(0.19)	0.37	0.093	0.74	0.19	0.19	0.19	0.19	0.093	0.28	Bq/kg 生
ホウレンソウ	約 2 kg 生	0.48	(0.19)	0.37	0.093	0.74	0.19	0.19	0.19	0.19	0.093	0.28	Bq/kg 生
精米	約 2 kg 生	0.48	(0.19)	0.37	0.093	0.74	0.19	0.19	0.19	0.19	0.093	0.28	Bq/kg 生
茶	約 1 kg 生	0.93	(0.37)	0.74	0.19	1.5	0.37	0.37	0.37	0.37	0.19	0.56	Bq/kg 生
水道水	約 20 L	$1.9 \times 10^{-2}$	(0.19)	$1.5 \times 10^{-2}$	$7.4 \times 10^{-3}$	$3.7 \times 10^{-2}$	$7.4 \times 10^{-3}$	$7.4 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$7.4 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-2}$	Bq/L
牛乳	約 2 L	0.44	(0.19)	0.37	0.093	0.74	0.19	0.19	0.19	0.19	0.093	0.28	Bq/L
アジ、カレイ	約 1 kg 生	0.96	—	0.74	0.19	1.5	0.37	0.37	0.37	0.37	0.19	0.56	Bq/kg 生
イカ	約 1 kg 生	0.93	—	0.74	0.19	1.5	0.37	0.37	0.37	0.37	0.19	0.56	Bq/kg 生
サザエ	約 1 kg 生	0.93	—	0.74	0.19	1.5	0.37	0.37	0.37	0.37	0.19	0.56	Bq/kg 生
コンブ	約 1 kg 生	0.96	—	0.74	0.19	1.5	0.37	0.37	0.37	0.37	0.19	0.56	Bq/kg 生
浮遊塵	約 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	$2.6 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-5}$	$7.4 \times 10^{-6}$	$3.7 \times 10^{-5}$	$7.4 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$7.4 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-5}$	Bq/m <sup>3</sup>

相対効率 20%程度

測定時間 80000 秒程度

<sup>131</sup>I は 2L マリネリ容器での生試料の測定、他の核種は U-8 容器での前処理済み試料の測定

資表 1.10.2 ゲルマニウム半導体検出器の検出可能レベル

試料名	供試量	<sup>144</sup> Ce	<sup>131</sup> I	<sup>140</sup> Ba	<sup>134</sup> Cs	<sup>106</sup> Ru	<sup>137</sup> Cs	<sup>95</sup> Zr	<sup>95</sup> Nb	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>140</sup> La	備考
陸水	約 20 L	0.014	(0.17)	0.011	0.0043	0.030	0.0033	0.0053	0.0031	0.0032	0.0041	0.0041	Bq/L
土壌	約 0.1 kg 乾土	11	—	6.5	2.1	18	2.1	3.6	2.6	2.2	2.6	2.5	Bq/kg 乾土
灰化物 (農産物)	約 5 kg 生	0.13	(0.31)	0.11	0.035	0.28	0.033	0.058	0.032	0.034	0.060	0.043	Bq/kg 生
灰化物 (海産生物)	約 4 kg 生	0.28	(0.21)	0.21	0.070	0.56	0.069	0.12	0.068	0.072	0.14	0.043	Bq/kg 生
大気浮遊じん	約 3000m <sup>3</sup>	1.3×10 <sup>-4</sup>	2.7×10 <sup>-5</sup>	9.6×10 <sup>-5</sup>	3.5×10 <sup>-5</sup>	2.7×10 <sup>-4</sup>	3.0×10 <sup>-5</sup>	4.9×10 <sup>-5</sup>	2.9×10 <sup>-5</sup>	2.9×10 <sup>-5</sup>	3.7×10 <sup>-5</sup>	3.9×10 <sup>-5</sup>	Bq/m <sup>3</sup>
降下物	約 0.5 m <sup>2</sup>	0.69	—	0.46	0.19	1.3	0.14	0.23	0.14	0.14	0.18	0.18	MBq/km <sup>2</sup>

相対効率 40%程度

測定時間 70000 秒程度

<sup>131</sup>I を除く核種は U-8 容器での前処理済み試料の測定

<sup>131</sup>I は 2L マリネリ容器での生試料で、相対効率 30%程度の検出器を用いて測定

検出可能レベルの算出方法について

- ・代表的な試料について、相対効率 40%程度（2L マリネリは相対効率 30%程度）の検出器による過去の実測データから、検出下限値の平均値を求めた。
- ・実際の測定では、同じ検出器を用いた場合でもバックグラウンド等の条件は遮蔽体や設置環境により異なるため、バックグラウンドが高い状況下での測定を想定して上記の平均値を 3 倍し、「条件が悪くとも検出可能なレベル」という意味で、過大に見積もった値を算出して検出可能レベルとした。

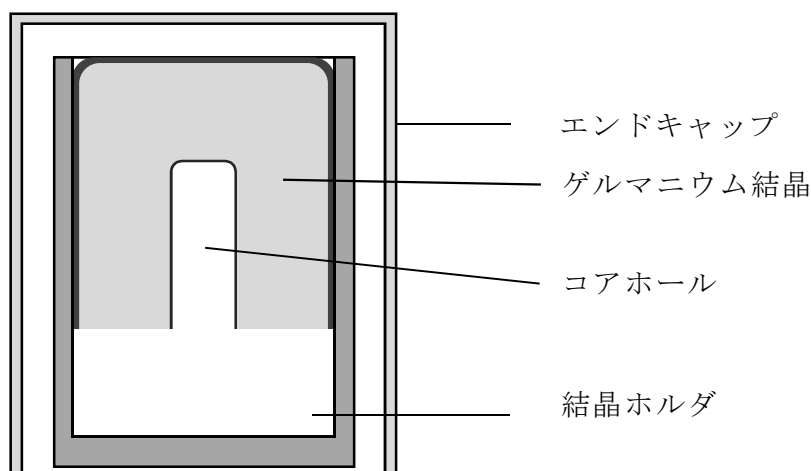
## 資料 2 測定容器内における試料の不均一分布の影響 (U-8 容器の例)

ゲルマニウム半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトロメトリーは、 $\gamma$ 線の特徴により、化学分離・精製を必要とせずに大量の試料を測定することができる。このことはゲルマニウム半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトロメトリーの利点の1つである。このとき、測定容器に充填された試料内部は、測定の対象となる放射性核種が一様に分布していることが理想である。しかし、液体試料では測定容器内壁への放射性核種の吸着や放射性核種を含む粒子状物質の沈降、また、土壌試料では試料の混合の度合いや高強度の放射性核種を含む粒子状物質の混入等を考慮すると、測定容器内の放射性核種が一様に分布していないことが懸念される。

そこで、放射性核種の容器内不均一が測定値に与える影響を、電磁カスケードモンテカルロシミュレーションコードである EGS5 (Electron Gamma Shower version5) を用いて検討した。資表 2.1 および資図 2.1 は検討に用いた検出器についての情報である。

資表 2.1 モンテカルロシミュレーションに用いた検出器

結晶タイプ	同軸型 p タイプ
相対効率 (%)	31
ゲルマニウム結晶の高さ (mm)	50.47
ゲルマニウム結晶の直径 (mm)	52.20
不感層の厚さ (上面) (mm)	0.40
不感層の厚さ (側面) (mm)	0.60
コアホールの直径 (mm)	7.50
コアホールの深さ (mm)	35.07
結晶ホルダの厚さ (mm)	1.90
エンドキャップの厚さ (mm)	1.50
エンドキャップと結晶との距離 (mm)	7.53



資図 2.1 モンテカルロシミュレーションに用いた検出器 (模式図)

資 2.1 放射性核種の偏在

資 2.1.1 検討の条件

測定容器内での放射性核種の偏在が測定値に与える影響を、以下の条件でモンテカルロシミュレーションを行い検討した。

測定容器：ポリプロピレン製円筒形容器（U-8 容器）

試料材質：水

土壌 組成 [22]：O(49.0%)、Si(36.5%)、Al(7.1%)、Fe(4.0%)、  
C(2.0%)、K(1.4%)

密度：1.55g/cm<sup>3</sup>

充填高：5cm

エネルギー：88.0keV (<sup>109</sup>Cd)、661.7keV (<sup>137</sup>Cs)、1836.1keV (<sup>88</sup>Y)


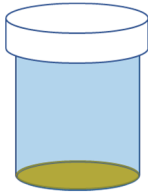
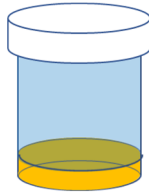
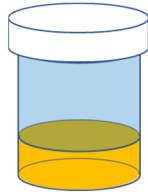
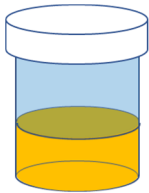
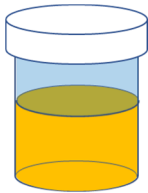


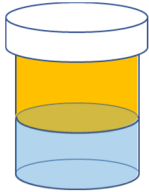
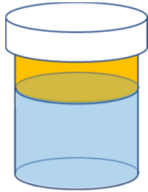
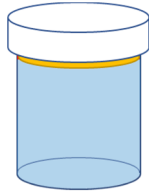
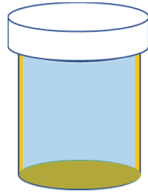
光子発生数：10,000,000

偏在の条件：資表 2.2～資表 2.4 参照

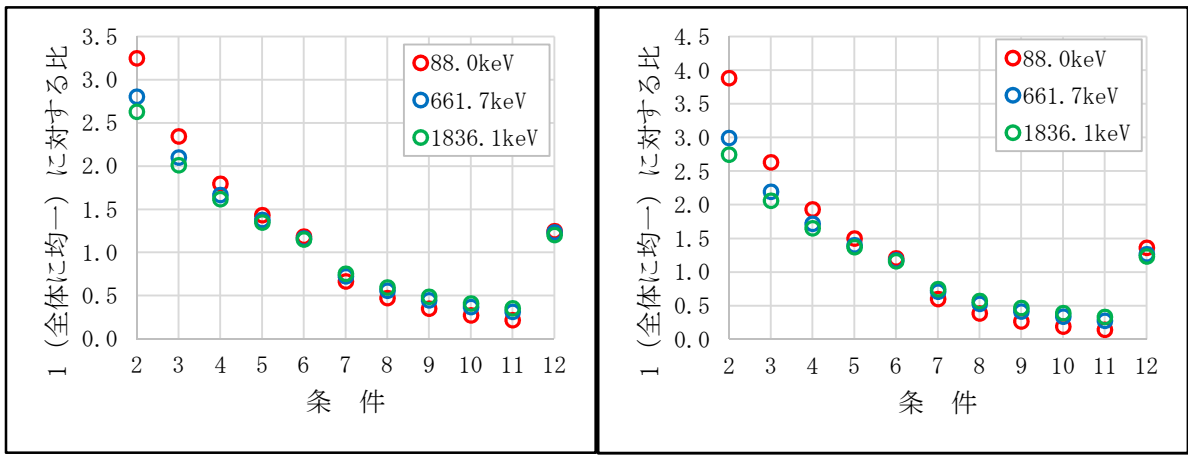
資 2.1.2 偏在が測定値に与える影響

偏在が測定値に与える影響を、偏在の条件とともに示す。

資表 2.2 放射性核種の偏在の条件（縦方向）

条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
			
1.0000	0.0000	0.2000	0.4000
条件 5	条件 6	条件 7	条件 8
			
0.6000	0.8000	0.8000	0.6000
条件 9	条件 10	条件 11	条件 12
			
0.4000	0.2000	0.0000	0.0000

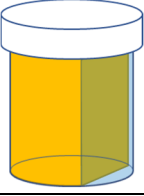
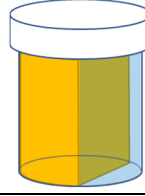


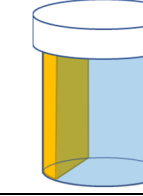
注 オレンジ色で示した部分に同一濃度の放射性核種が偏在しており、数値は条件 1 と比較した当該部分の体積比である。



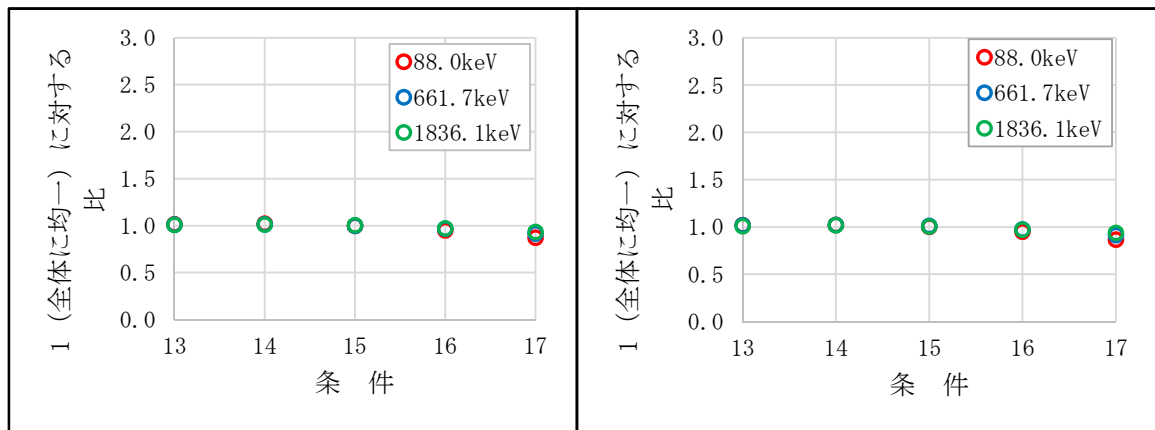
注 左図は材質が水、右図は材質が土壌の結果である。

資図 2.2 偏在（縦方向）が測定値に与える影響

資表 2.3 放射性核種の偏在の条件（横方向）

条件 13	条件 14	条件 15	条件 16	条件 17
				
0.8905	0.7082	0.5000	0.2928	0.1096

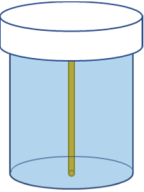
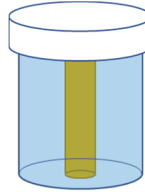
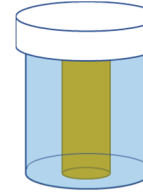
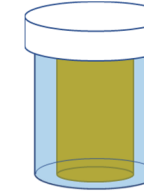
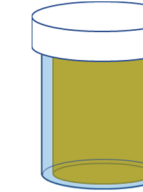
注 オレンジ色で示した部分に同一濃度の放射性核種が偏在しており、数値は条件 1 と比較した当該部分の体積比である。



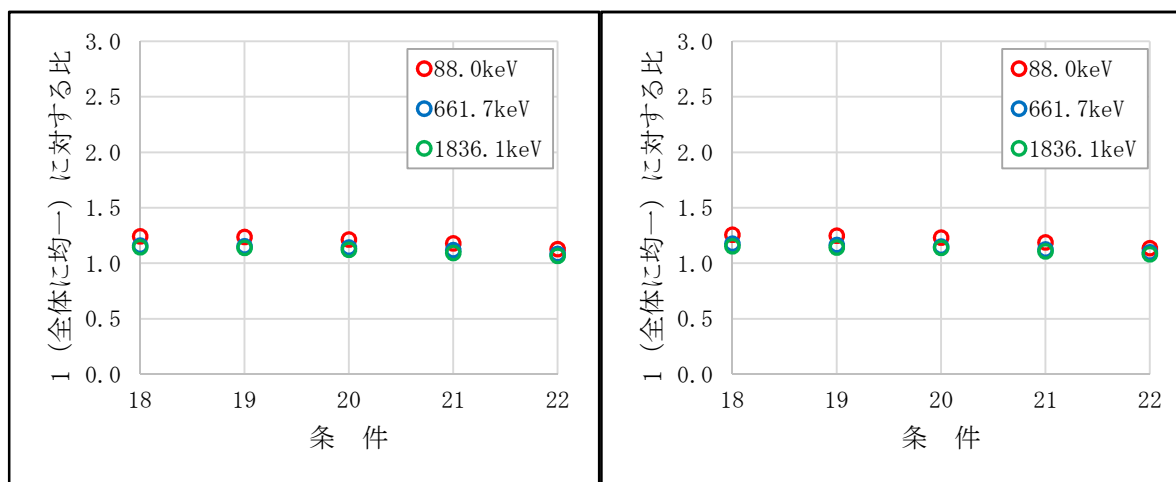
注 左図は材質が水、右図は材質が土壌の結果である。

資図 2.3 偏在（横方向）が測定値に与える影響

資表 2.4 放射性核種の偏在の条件（軸と同心円の円柱状）

条件 18	条件 19	条件 20	条件 21	条件 22
				
0.0000	0.0434	0.1736	0.3906	0.6944

注 黄土色で示した部分に同一濃度の放射性核種が偏在しており、数値は条件 1 と比較した当該部分の体積比である。



注 左図は材質が水、右図は材質が土壌の結果である。

資図 2.4 偏在（軸と同心円の円柱状）が測定値に与える影響

全ての条件において、 $\gamma$ 線エネルギーによる差異はあるものの、測定容器内の偏在が測定値に与える影響の傾向は一致した。偏在による影響が最も大きく現れる $\gamma$ 線エネルギーは 88.0keV で、これは自己吸収の影響が大きいためと考えられる。材質が水では、測定容器内での放射性核種が縦方向に偏在した場合、条件 1（全体に均一）と比較して 0.21~3.25 倍の変化が生じた。また、横方向および軸と同心円の円柱状に偏在した場合、条件 1 と比較して 0.87~1.02 倍および 1.07~1.24 倍の変化が生じた。材質が土壌では、測定容器内での放射性核種が縦方向に偏在した場合、条件 1（全体に均一）と比較して 0.14~3.88 倍の変化が生じた。また、横方向および軸と同心円の円柱状に偏在した場合、条件 1 と比較して 0.87~1.02 倍および 1.08~1.26 倍の変化が生じた。この結果から縦方向に偏在した場合は線源-検出器間の距離が変化するため、測定値に与える影響が大きい。また、放射性核種が容器壁に吸着した場合（条件 12）でも、条件 1 と比較して材質が水では最大 1.24 倍、土壌では最大 1.36 倍となり測定値は過大評価となる。これらの偏在は水試料を前処理なしで測定する場合や、土壌試料等で混合が不十分な場合に起こりえるため注意が必要である。なお、水試料における放射性核種の容器壁への吸着防止等に関しては「緊急時における $\gamma$ 線スペクトロメ

トリーのための試料前処理法」(No. 24) を参照のこと。

## 資 2.2 放射性核種の分布の均質性

### 資 2.2.1 検討の条件

測定容器内で放射性核種が不均一に分布しているとき、その分布が測定値に与える影響を以下の条件で EGS5 によるモンテカルロシミュレーションを行い検討した [11]。

測定容器 : 内寸縦 4.2cm、横 4.2cm、高さ 6.0cm、壁厚 0.1cm ポリプロピレン製容器 (底面積を U-8 容器と同程度とした)

試料材質 : アルミナ

充填高 : 1.0cm, 2.0cm, 3.0cm, 4.0cm, 5.0cm

エネルギー : 88.0keV ( $^{109}\text{Cd}$ )、661.7keV ( $^{137}\text{Cs}$ )、1836.1keV ( $^{88}\text{Y}$ )

光子発生条件 : 容器に充填した試料内部を 1 辺 0.2cm の立方体に区切り、10% の立方体から光子が発生するように乱数を用いてランダムに決定した。(例えば充填高 1.0cm の場合、 $21 \times 21 \times 5 = 2205$  個の立方体に区切り、その立方体の中からランダムに約 220 個の立方体を選択し、光子を発生させる。)

配置パターン : 3,000 パターン

光子発生数 : 1 パターンにつき 500,000 個

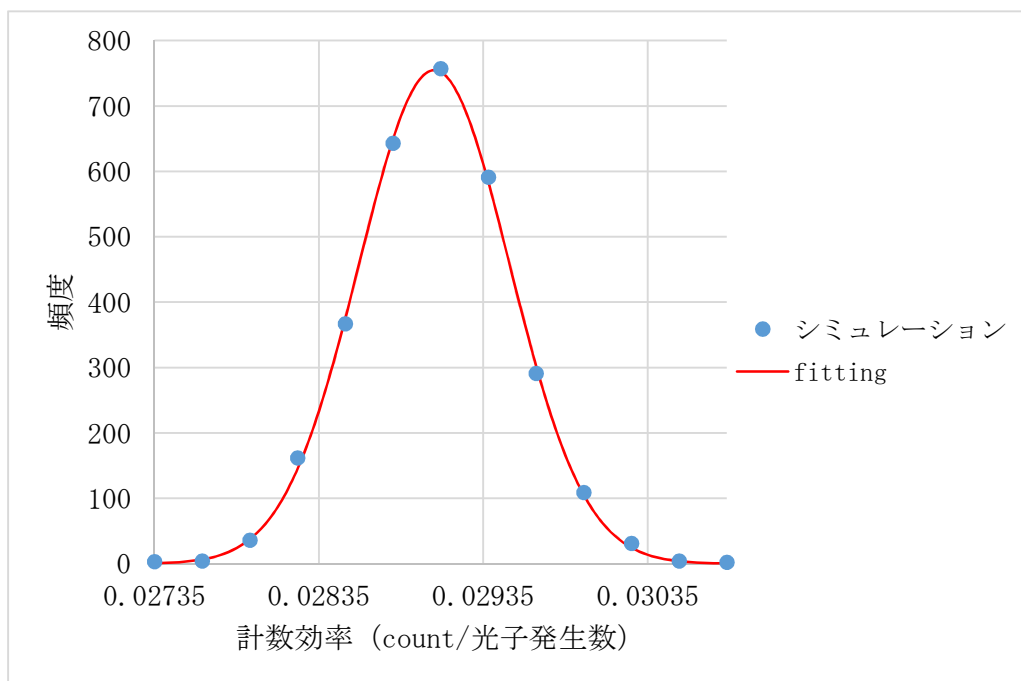
それぞれの配置パターンで計数効率 (count/光子発生数) を算出し、その頻度分布から相対標準偏差を求め、放射性核種の分布が測定値に与える影響を評価した。

なお、GUM Supplement 1 [10] [23] では反復回数 (上記条件では配置パターン) は最低でも 10,000 回以上、できれば 1,000,000 回以上行うことが推奨となっているが、全ての条件で 10,000 回以上行うことは一般的な PC では現実的ではないことから、この段階では、10,000 回以上行う候補を選定するために、まずは配置パターンを 3,000 パターンとして検討を行った。

### 資 2.2.2 測定値に与える影響

検討の結果、15 通りある全ての条件で計数効率の頻度分布は資図 2.5 のように正規分布とよく一致した。資表 2.5 はこの正規分布より求めた相対標準偏差である。資表 2.5 から相対標準偏差は各  $\gamma$  線エネルギーとも、充填高に依存して大きくなる傾向が見られた。また、 $\gamma$  線エネルギーによる相対標準偏差の差異は、同一充填高では最大で約 0.3% 程度であり、88.0keV が最大値となることが多いのは自己吸収による影響のためと考えられる。





資図 2.5 充填高 1.0cm、661.7keV の場合での計数効率の頻度分布

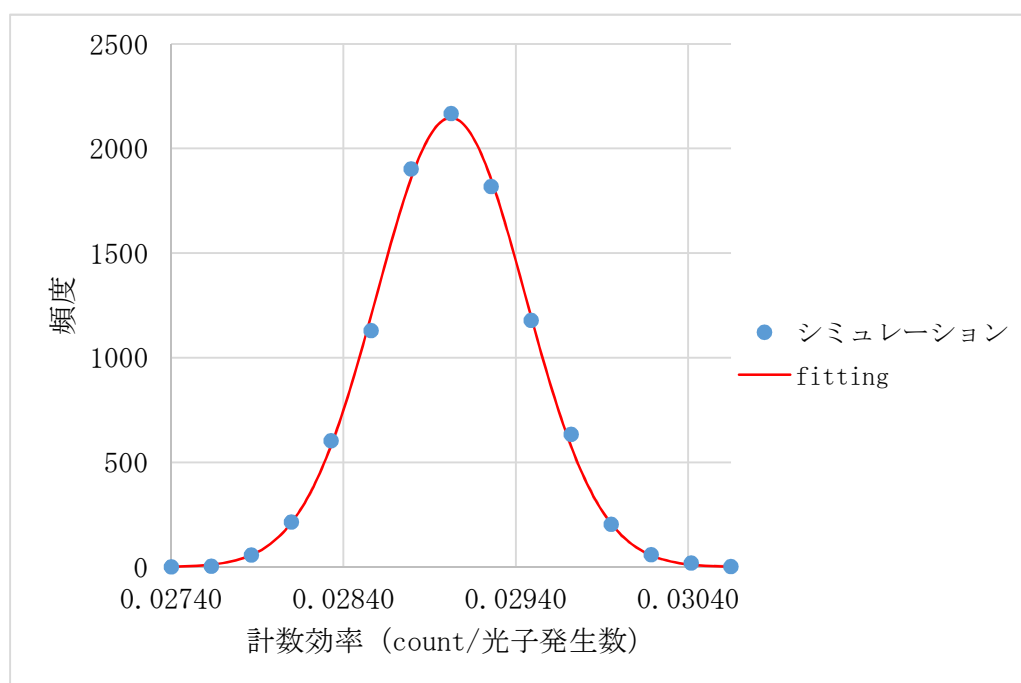
資表 2.5 それぞれの条件での相対標準偏差

		γ線エネルギー (keV)		
		88.0	661.7	1836.1
充填高 (cm)	1.0	1.75%	1.58%	1.78%
	2.0	1.98%	1.82%	2.01%
	3.0	2.14%	1.96%	2.15%
	4.0	2.25%	2.07%	2.16%
	5.0	2.44%	2.17%	2.29%

以上の結果から、相対標準偏差が大きい傾向を示す 88.0keV および小さい傾向を示す 661.7keV のそれぞれについて、相対標準偏差が最小値または最大値となる、充填高 1.0cm と 5.0cm の計 4 通りで配置パターンを 10,000 パターンに増やし、再びモンテカルロシミュレーションを行った。光子発生数は count 数についての統計的な不確かさを小さくし、また、充填高間での不確かさを同程度とするため、充填高 1.0cm では 1,000,000 個、充填高 5.0cm では 2,000,000 個とした。

検討の結果、上記の 4 通りの全ての条件で計数効率の頻度分布は資図 2.6 のように正規分布とよく一致した。資表 2.6 はこの正規分布より求めた相対標準偏差である。資表 2.6 のそれぞれの充填高および γ 線エネルギーでの相対標準偏差は資表 2.5 とほぼ一致しているため、充填高および γ 線エネルギーによる相対標準偏差への影響は資表 2.5 と同様と考えられる。また、測定容器内での放射性核種の分布が測定値に与える影響は 88.0keV では約 1.7~2.4%、661.7keV では約 1.5~2.0%であった。したがって、資表 2.5 の 1836.1keV の結果も考慮して、測定容器内での放射性核種の分布が測

定値に与える影響は、充填高および $\gamma$ 線エネルギーによらず一律で評価する場合は、約2.5%と評価することができる。なお、この結果は資2.2.1で示された幾何学的条件での結果であり、幾何学的条件を変更すると相対標準偏差は大きく変わる。このため、幾何学的条件の設定は十分に検討する必要がある。一例ではあるが、立方体の1辺を0.1cm、充填高1.0cm、 $\gamma$ 線エネルギー88.0keV、光子発生割合10%とした場合では相対標準偏差は0.74%、また、立方体の1辺を0.2cm、充填高1.0cm、 $\gamma$ 線エネルギー88.0keV、光子発生割合20%とした場合では相対標準偏差は1.23%であった。本資料では立方体の1辺を0.2cmとしたが、これは環境試料では土壌等の前処理において2mmのふるいを通すためであり、相対標準偏差が最大となる条件での評価をするためである。また、モンテカルロシミュレーションに要した時間は、Core i7-7700K(4.2GHz) Linux 4コアによる並列計算を用いて、資2.2.1の15通り合計で約5日間、資2.2.2の4通り合計で約7日間であった。



資図 2.6 配置パターン、光子発生数を増やした場合での充填高 1.0cm、661.7keV の場合での計数効率の頻度分布

資表 2.6 配置パターン、光子発生数を増やした場合でのそれぞれの条件での相対標準偏差

		エネルギー (keV)	
		88.0	661.7
充填高 (cm)	1.0	1.68%	1.48%
	5.0	2.41%	2.03%

### 資料 3 サム効果補正に用いるピーク・トータル比の改良の検討

ゲルマニウム半導体検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメトリーにおいて、カスケード $\gamma$ 線を放出する核種はサム効果によってピークの計数値が減少する。サム効果の程度は検出効率と核種の壊変形式に依存し、場合によってはピークの計数値に及ぼす影響が数十%にも達する。このため、サム効果によって測定値は放射能（濃度）を過小評価してしまうことになることから、サム効果によって減少したピークの計数値に対して補正を行う必要がある（資料 1.4 参照）。

サム効果の補正を行うために必要な全効率は、ピーク効率と全効率の比であるピーク・トータル比から求められる。ピーク・トータル比は、複数の単一核種の $\gamma$ 線源の測定から求めることができるが、次の経験式から求めることもできる。

$$(P/T) = \alpha \times \ln(\varepsilon_{rel}) + \beta \quad (\text{資 3.1})$$

ここで、

$(P/T)$	ピーク・トータル比
$\varepsilon_{rel}$	相対効率 (%)
$\alpha$	$\ln(\alpha) = -0.30 \times \ln(E) - 1.11$
$\beta$	$\ln(\beta) = -7.97 + 3.31 \times \ln(E) - 3.83 \times \{\ln(E)\}^2$
$E$	$\gamma$ 線エネルギー (keV)

式(資 3.1)は点線源の測定結果から得られたものである [17]。しかし、環境試料のほとんどは体積試料であり、ピーク・トータル比が実際の測定条件における値と異なる可能性がある。実際に、東京電力福島第一原子力発電所事故後の環境試料において $^{134}\text{Cs}$ が検出されたが、サム効果補正が不足しているのではないかとの指摘があり [24]、その一因が補正計算に使われているピーク・トータル比にある可能性が考えられた。

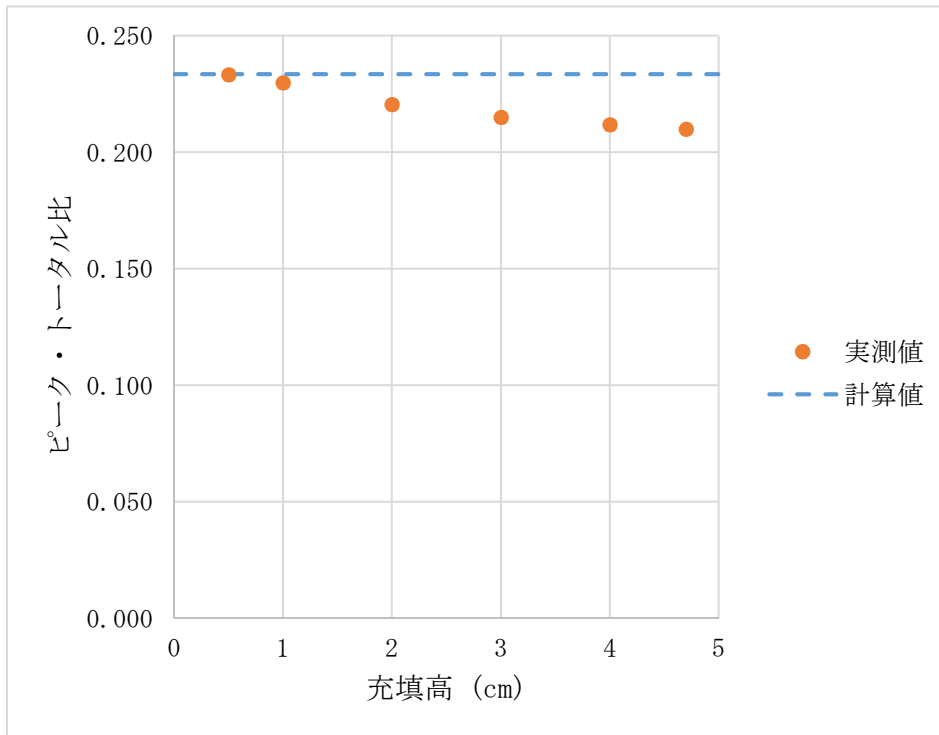
本資料では、ピーク・トータル比を $^{137}\text{Cs}$ 容積線源の実測値と EGS5 によるモンテカルロシミュレーションの結果から求めた換算式を用いて半実験的に求め、得られたピーク・トータル比を $^{134}\text{Cs}$ 容積線源のサム効果補正に適用した検討結果を紹介する。

#### 資 3.1 $^{137}\text{Cs}$ 容積線源による 661.7keV におけるピーク・トータル比

次の同軸型 p タイプゲルマニウム半導体検出器 2 台を用いて、ポリプロピレン製円筒形容器 (U-8 容器) の $^{137}\text{Cs}$ 容積線源 (アルミナ製、充填高 0.5~4.7cm の 6 個) を測定し、ピーク・トータル比を求め、式(資 3.1)から求めた値と比較した。結果を資図 3.1、資図 3.2 に示す。

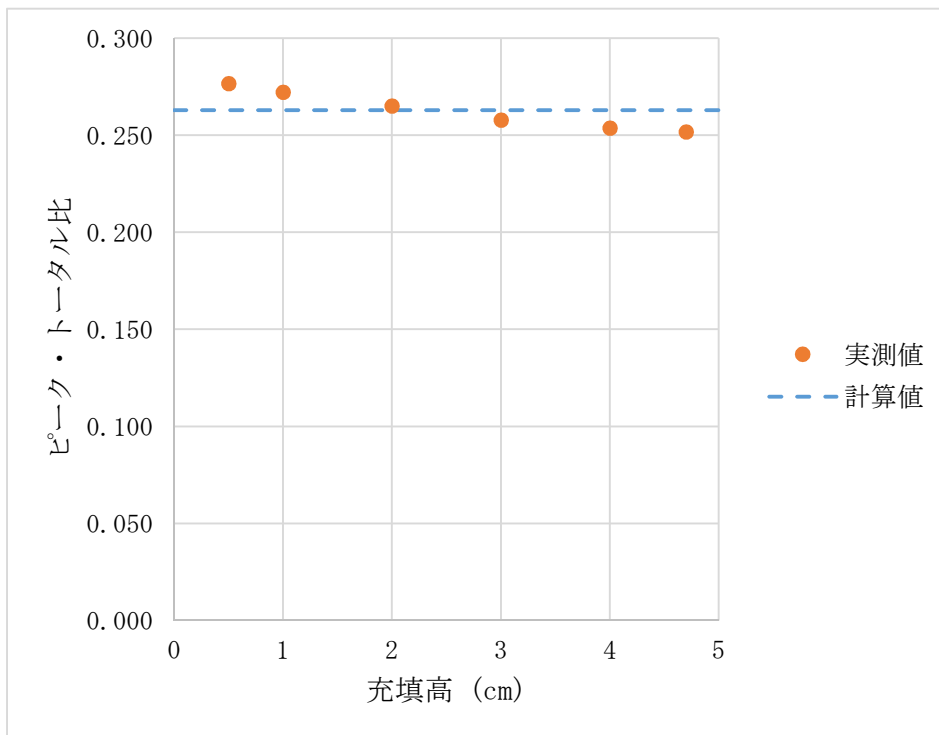
検出器 A : CANBERRA GC2519-7915-30、相対効率 31%

検出器 B : ORTEC GEM-50195S、相対効率 58%



注 計算値は式(資 3.1)を用いて相対効率より求めた値である。

資図 3.1 検出器 A の 661.7keV におけるピーク・トータル比



注 計算値は式(資 3.1)を用いて相対効率より求めた値である。

資図 3.2 検出器 B の 661.7keV におけるピーク・トータル比

比較の結果、 $^{137}\text{Cs}$  容積線源から求めた 661.7keV におけるピーク・トータル比は、検出器 A では充填高 0.5cm のときに式(資 3.1)から求めた値とほぼ一致したが、充填高

が大きくなるにつれて低下する傾向が見られた（資図 3.1）。また、検出器 B では充填高 2.0cm のときに式(資 3.1)から求めた値とほぼ一致したが、充填高が大きくなるにつれて低下する傾向が見られた（資図 3.2）。

### 資 3.2 ピーク・トータル比の他のエネルギーでの値への換算

資 3.1 で得られた 661.7keV におけるピーク・トータル比を、EGS5 によるモンテカルロシミュレーションから求めたピーク・トータル比を用いて式(資 3.2)により他のエネルギーでの値に換算し、式(資 3.1)から求めた値と比較した。結果を資図 3.3、資図 3.4 に示す。

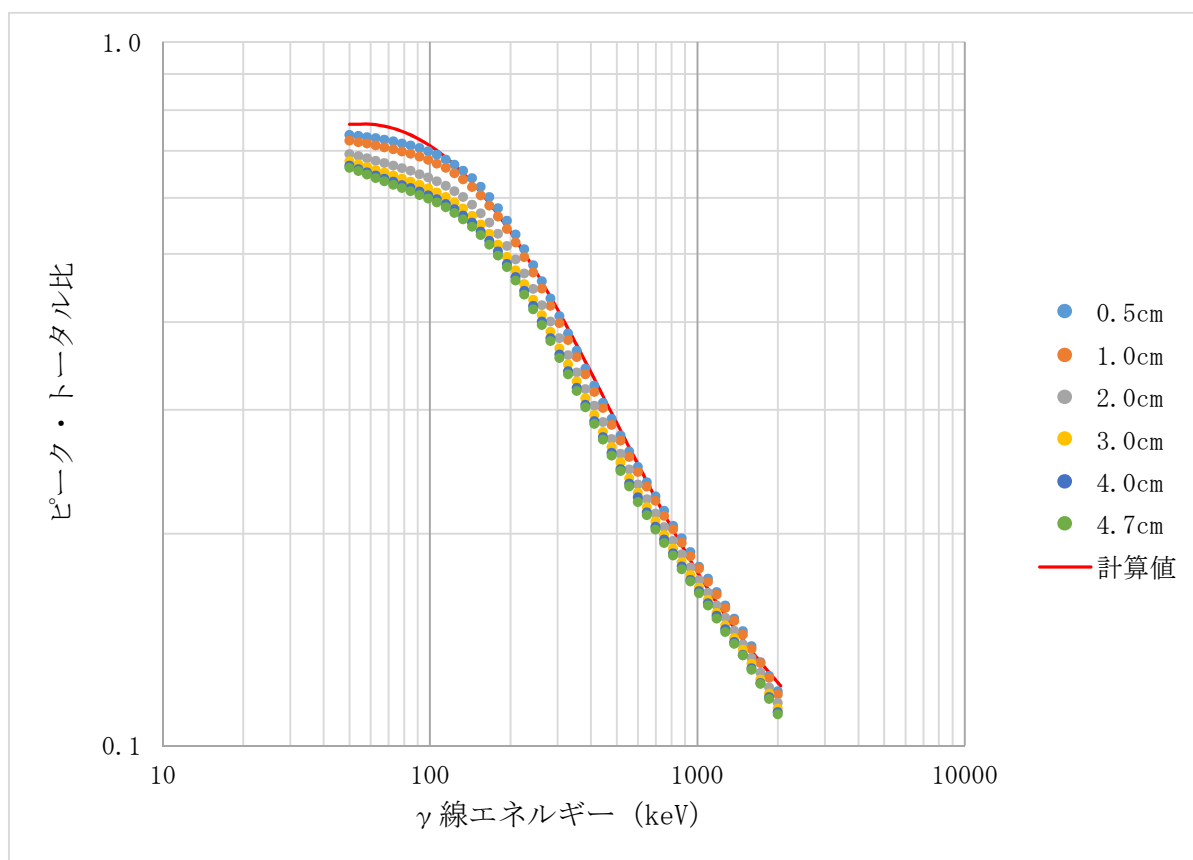
$$\left(\frac{P}{T}\right) = PT(661.7) \times \frac{PT_{MC}(E)}{PT_{MC}(661.7)} \quad (\text{資 3.2})$$

ここで、

$PT(661.7)$  実測から求めた 661.7keV におけるピーク・トータル比

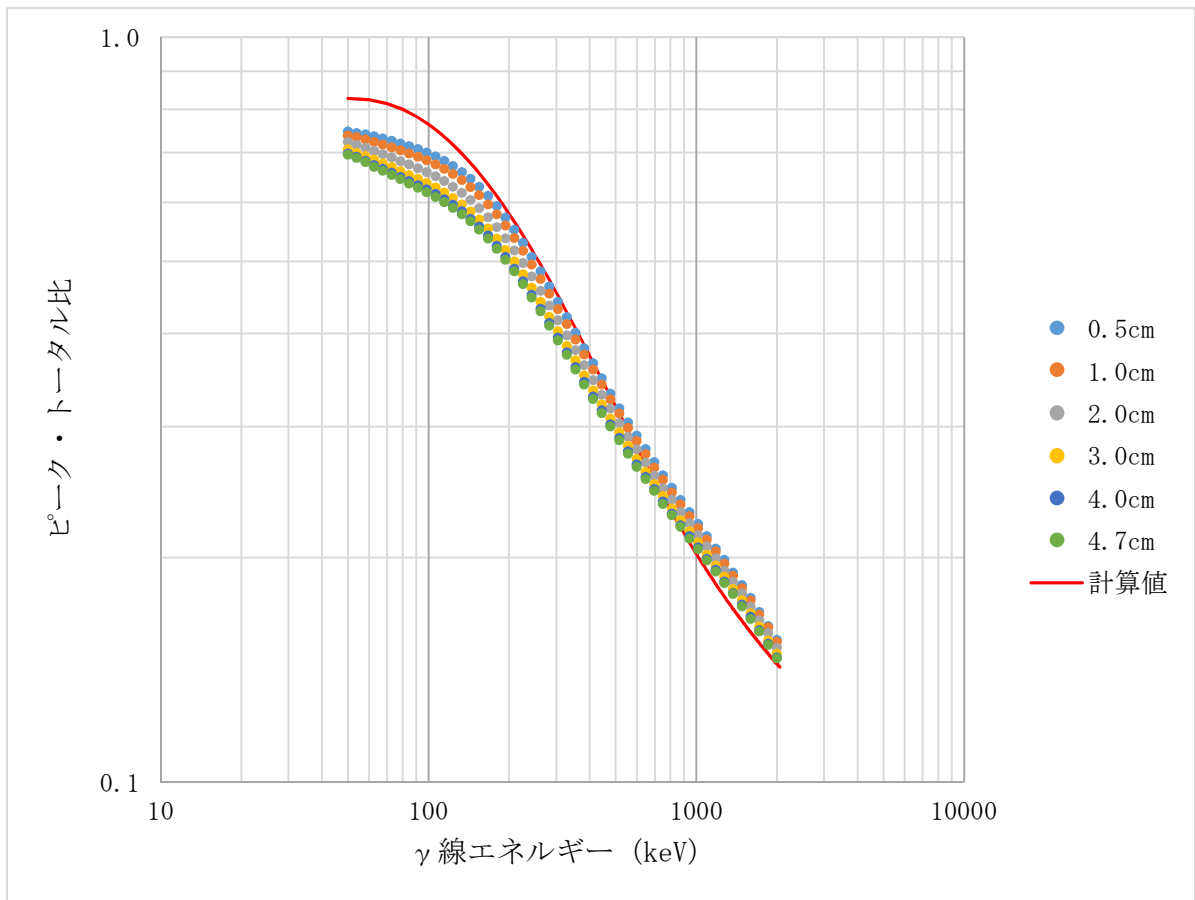
$PT_{MC}(661.7)$  モンテカルロシミュレーションから求めた 661.7keV におけるピーク・トータル比

$PT_{MC}(E)$  モンテカルロシミュレーションから求めたエネルギー  $E$  におけるピーク・トータル比



注 計算値は式(資 3.1)を用いて相対効率より求めた値である。

資図 3.3 検出器 A の式(資 3.2)により換算したピーク・トータル比



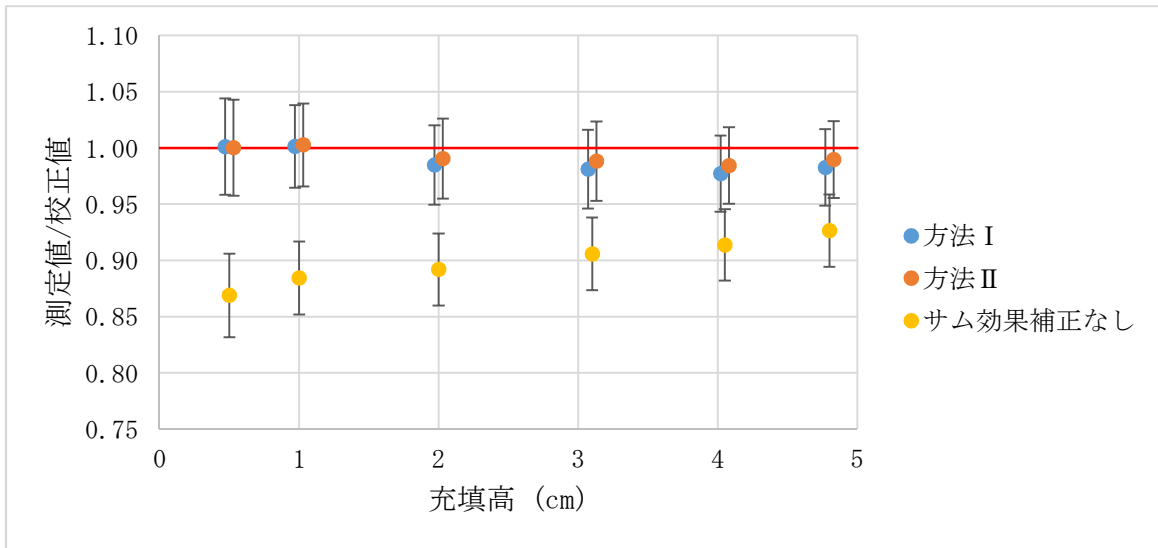
注 計算値は式(資 3.1)を用いて相対効率より求めた値である。

資図 3.4 検出器 B の式(資 3.2)により換算したピーク・トータル比

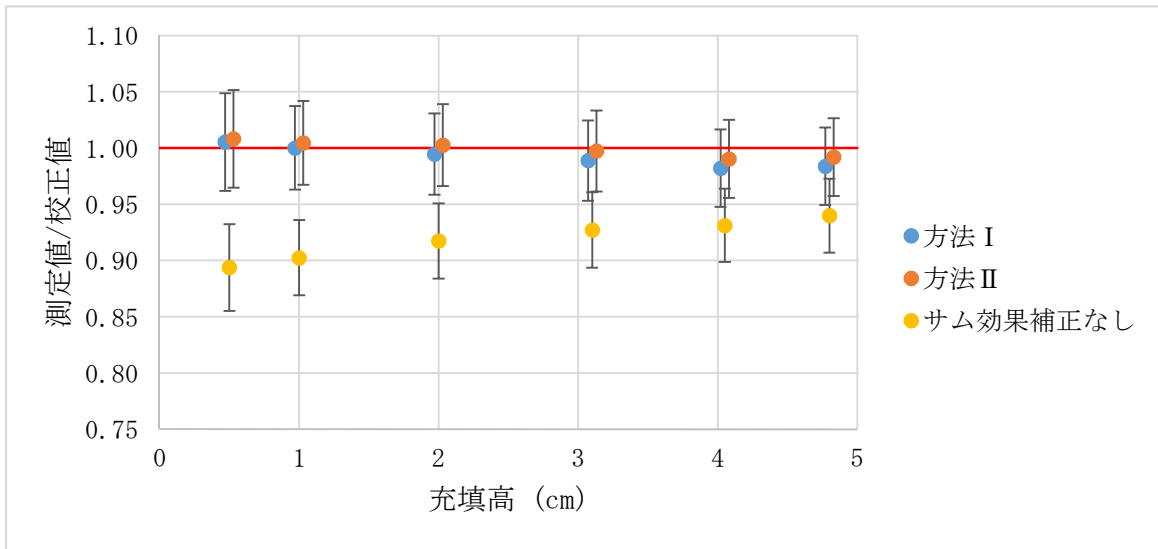
### 資 3.3 $^{134}\text{Cs}$ 容積線源の解析

資 3.2 によって得られたピーク・トータル比を用いてポリプロピレン製円筒形容器 (U-8 容器) の  $^{134}\text{Cs}$  容積線源 (アルミナ製、充填高 0.5~4.7cm の 6 個) の 604.7keV と 795.9keV のピークから放射能を求め<sup>1</sup>、校正値と比較した。結果を資図 3.5~資図 3.8 および資表 3.1 に示す。図中の不確かさは計数に係る不確かさのみを考慮し、拡張不確かさ ( $k=2$ ) とした。なお、以降、式(資 3.1)によるピーク・トータル比を用いたサム効果補正を方法 I、資 3.2 によるピーク・トータル比を用いたサム効果補正を方法 II と表記する。

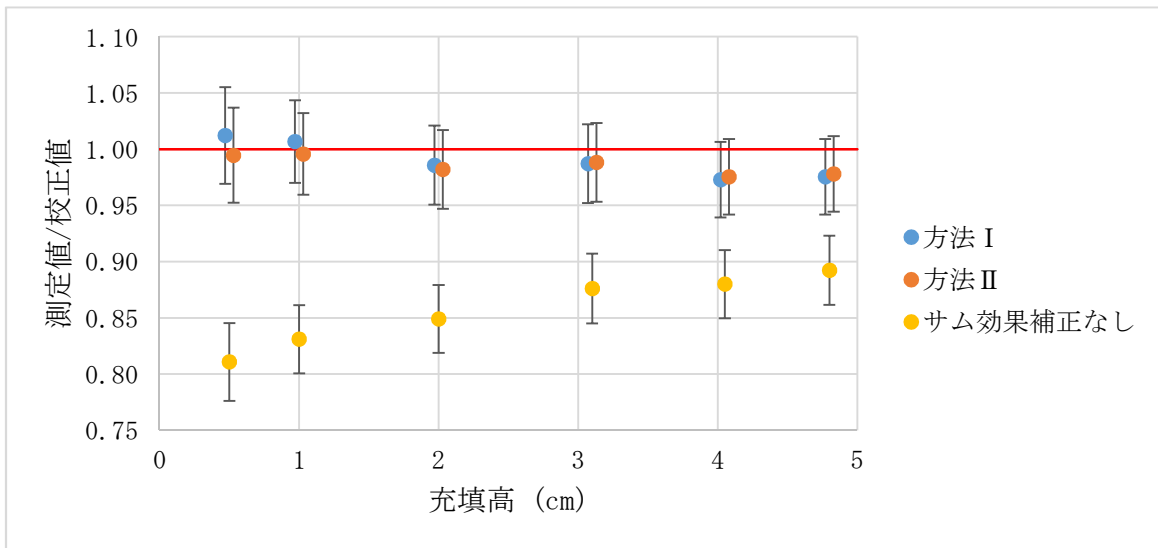
<sup>1</sup> 解析にはセイコー・イージーアンドジー社製ガンマスタジオを用いた。



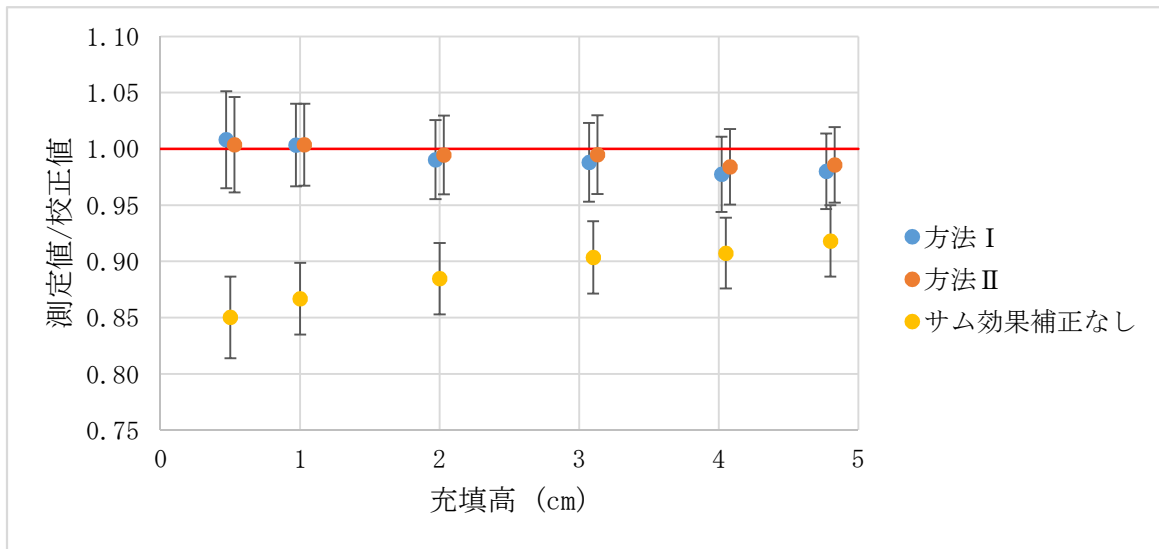
資図 3.5 検出器 A の  $^{134}\text{Cs}$  容積線源の解析結果 604.7keV



資図 3.6 検出器 A の  $^{134}\text{Cs}$  容積線源の解析結果 795.9keV



資図 3.7 検出器 B の  $^{134}\text{Cs}$  容積線源の解析結果 604.7keV



資図 3.8 検出器 B の  $^{134}\text{Cs}$  容積線源の解析結果 795.9keV

資表 3.1 解析結果と校正値の差の範囲

検出器	解析ピーク	サム効果補正なし	方法 I	方法 II
A	604.7 keV	-13.1~-7.4%	-2.3~0.1%	-1.6~0.3%
	795.9 keV	-10.6~-6.0%	-1.8~0.5%	-1.0~0.8%
B	604.7 keV	-18.9~-10.8%	-2.7~1.2%	-2.5~-0.4%
	795.9 keV	-15.0~-8.2%	-2.3~0.8%	-1.6~0.4%

サム効果補正を実施しなかった場合は、 $^{134}\text{Cs}$  の解析結果は校正値に対して検出器 A では約 6~13%程度低く、検出器 B では約 8~19%程度低くなっており、また、充填高が大きくなるほど校正値に近づく傾向が見られた。充填高が小さい試料では、相対的に検出器に近いジオメトリとなることから、サム効果の寄与が大きくなったものと考えられる。

方法 I の場合、両検出器ともに解析結果は不確かさの範囲で校正値と一致した。ただし、両検出器とも充填高 0.5cm および 1cm では解析結果は校正値とほぼ一致するが、充填高が大きくなるにつれて解析結果は低めとなる傾向が見られた。このことは、サム効果補正係数にジオメトリ依存性があることを示している。

方法 II の場合、方法 I の場合と比較して両検出器ともにほとんどの場合で解析結果は校正値に近づく結果となった。また、依然としてサム効果補正のジオメトリ依存性は見られるものの、その影響は小さくなっている。これは、容積線源のピーク・トータル比は一定ではなく、その充填高に依存して変化しており、実試料に即した容積線源のピーク・トータル比を用いることにより、サム効果の補正が適正に近づいたためと考えられる。

以上の結果から、サム効果補正に従来から用いられてきた経験式によるピーク・トータル比の代替として、 $^{137}\text{Cs}$  容積線源の実測値と EGS5 によるモンテカルロシミュレー



シヨンの結果から求めた換算式を用いて半実験的に求めたピーク・トータル比を用いることで、サム効果補正を若干改善させることが可能であることが示された。しかしながら、サム効果補正の改善は見られたが依然としてジオメトリ依存性が残っており、根本的な解決とはなっていない。

なお、近年利用されている、モンテカルロシミュレーション等の数値モデル (Efficiency Transfer を含む) では、ゲルマニウム検出器に入射した $\gamma$ 線と検出器との相互作用をサム効果も含めて再現可能であるため、ピーク・トータル比自体が不要となっている。

したがって、本検討で得られたピーク・トータル比を用いるサム効果補正は、短期的には現在市販されている解析プログラムを大きく修正することなく適用可能という利点があるものの、原理的にはモンテカルロシミュレーションの方が優れているため、中長期的にはシミュレーションを用いたサム効果補正法に移行することが現実的な解決策と考えられる。

## 資料 4 スペクトル例

ゲルマニウム半導体検出器は分解能が優れており、一度の測定で $\gamma$ 線スペクトルから多くのピークを検出できるので、適切に各種校正を行っていけばそれらについて正確に核種を同定することができる。

通常、解析プログラムを利用して、自動的に核種の同定を行うが、 $\gamma$ 線スペクトル中の核種数が多い場合等は、核種を誤同定する可能性がある。したがって、核種の同定には信頼性確保のために使用者による確認が必要である。

ルーチン的に取り扱う試料についてスペクトル例を知っておくことは、測定した試料の種類によってスペクトル形状が異なるので、核種の同定作業に役立つ。

また、バックグラウンドスペクトルには、特性 X 線、電子対消滅放射線、自然放射性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る。試料の測定スペクトルは、その種類によって、ピークの出方、検出される核種、コンプトン領域の形が大体似ている。したがって、種々のスペクトルの特徴を理解しておくことは、核種同定に役立つとともに、測定試料の取り違いや、測定器が正常に作動しているかの確認に有用である。

本資料では、核種同定作業の一助等のために、バックグラウンドスペクトル 1 例、純水を入れた 2L マリネリ容器を測定した場合に得られるスペクトル 1 例、種々の環境試料を測定した場合に得られるスペクトル 8 例および東京電力福島第一原子力発電所事故に係る大気浮遊じんのスペクトル 1 例を示す。また、平成 4 年度改訂の前マニュアルに記載されていた核実験に係る試料、原発事故に係る浮遊じんおよび原発事故に係るスミヤ試料の 3 例は貴重なデータであるため記載した。

スペクトル例には、検出された核種のピークに核種名および $\gamma$ 線エネルギー（単位 keV）を付した。

得られた計数（スペクトル）についてはバックグラウンドの差し引き等はない。なお、 $\gamma$ 線のエネルギーについては ENSDF（2019 年 8 月）の核データを用い、それぞれのスペクトルは 1channel=約 0.5keV である。

### 資 4.1 バックグラウンド（検出器に何も載せずに測定）

相対効率 31%の検出器で 2019 年 9 月 13 日に 14 万秒測定したスペクトル。

遮蔽体：4 $\pi$ 方向が厚さ 15cm の鉛、内寸 30×30×60cm

- ・トリウム系列およびウラン系列の自然放射性核種が検出されている。
- ・遮蔽体からの特性 X 線が検出されている。
- ・宇宙線由来の中性子が測定機器と反応し、放射化生成物である  $^{71m}\text{Ge}$  および  $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$ 、 $^{74}\text{Ge}(n, n')^{74}\text{Ge}$  に起因する  $\gamma$  線が検出されている（検出されないこともある）。

長時間測定し、測定機器のバックグラウンドスペクトルを把握しておくことが望

ましい。なお、資図 4.1 中の Fe-56(n, n'), Ge-74(n, n') は  $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$ 、 $^{74}\text{Ge}(n, n')^{74}\text{Ge}$  に起因する  $\gamma$  線を表している。

#### 資 4.2 純水 (2L マリネリ)

資 4.1 と同一の検出器で 2016 年 7 月 30 日に 14 万秒測定したスペクトル。

- ・資 4.1 と同様のピークが検出されている。
- ・純水を入れた 2L マリネリ容器で検出器を覆うことで、宇宙線由来の中性子と測定機器との反応が顕著になり、ゲルマニウム同位体と中性子の相互作用により、放射化生成物である  $^{71\text{m}}\text{Ge}$ 、 $^{75\text{m}}\text{Ge}$  および  $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$ 、 $^{70}\text{Ge}(n, \gamma)^{71}\text{Ge}$ 、 $^{72}\text{Ge}(n, \gamma)^{73}\text{Ge}$ 、 $^{73}\text{Ge}(n, \gamma)^{74}\text{Ge}$ 、 $^{74}\text{Ge}(n, n')^{74}\text{Ge}$  に起因する  $\gamma$  線が検出されている (検出されないこともある)。

ゲルマニウム同位体と中性子の相互作用によるピークは、液体または水分を多く含む試料をマリネリ容器で測定する場合にも検出されることがある。なお、資図 4.2 中の Fe-56(n, n'), Ge-70(n,  $\gamma$ )、Ge-72(n,  $\gamma$ )、Ge-73(n,  $\gamma$ )、Ge-74(n, n') は  $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$ 、 $^{70}\text{Ge}(n, \gamma)^{71}\text{Ge}$ 、 $^{72}\text{Ge}(n, \gamma)^{73}\text{Ge}$ 、 $^{73}\text{Ge}(n, \gamma)^{74}\text{Ge}$ 、 $^{74}\text{Ge}(n, n')^{74}\text{Ge}$  に起因する  $\gamma$  線を表している。

#### 資 4.3 大気浮遊じん-1

ダストモニタ用ろ紙 (HE - 40T および CP - 20) を用いて、大気中の浮遊粒子状物質を  $3400\text{m}^3$  吸引し、内容積 100mL (U-8 容器) の測定容器に詰め、2010 年 11 月 4 日に 7 万秒測定したスペクトル。

- ・バックグラウンドから検出される核種の他に  $^7\text{Be}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{210}\text{Pb}$  が検出されている。
- ・宇宙線由来の中性子が測定機器と反応し、放射化生成物である  $^{75\text{m}}\text{Ge}$  が検出されている (検出されないこともある)。

#### 資 4.4 大気浮遊じん-2

ダストモニタ用ろ紙 (HE - 40T および CP - 20) を用いて、大気中の浮遊粒子状物質を  $3400\text{m}^3$  吸引し、内容積 100mL (U-8 容器) の測定容器に詰め、2018 年 11 月 5 日に 7 万秒測定したスペクトル。

- ・バックグラウンドから検出される核種の他に  $^7\text{Be}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{210}\text{Pb}$  が検出されている。
- ・東京電力福島第一原子力発電所事故由来の  $^{137}\text{Cs}$  が検出されている。
- ・宇宙線由来の中性子が測定機器と反応し、放射化生成物である  $^{71\text{m}}\text{Ge}$ 、 $^{75\text{m}}\text{Ge}$  および  $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$ 、 $^{74}\text{Ge}(n, n')^{74}\text{Ge}$ 、 $^{206}\text{Pb}(n, n')^{206}\text{Pb}$  に起因する  $\gamma$  線が検出されている (検出されないこともある)。

なお、資図 4.4 中の Fe-56(n, n'), Ge-74(n, n'), Pb-206(n, n') は  $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$ 、 $^{74}\text{Ge}(n, n')^{74}\text{Ge}$ 、 $^{206}\text{Pb}(n, n')^{206}\text{Pb}$  に起因する  $\gamma$  線を表している。

#### 資 4.5 降下物-1

受水面積 5000cm<sup>2</sup>の大型水盤で1ヶ月間採取した降下物を蒸発乾固し、内容積 100mL(U-8 容器)の測定容器に詰め、2010年4月15日に7万秒測定したスペクトル。

- ・バックグラウンドから検出される核種の他に塵埃中の<sup>7</sup>Be および<sup>40</sup>K、<sup>210</sup>Pb が検出されている。
- ・宇宙線由来の中性子が測定機器と反応し、放射化生成物である<sup>71m</sup>Ge、<sup>75m</sup>Ge および<sup>74</sup>Ge(n, n')<sup>74</sup>Ge、<sup>206</sup>Pb(n, n')<sup>206</sup>Pb に起因する $\gamma$ 線が検出されている。(検出されないこともある。)
- ・<sup>7</sup>Be が多量に含まれている場合、<sup>7</sup>Be の $\gamma$ 線に起因する後方散乱ピーク(約166keV)が<sup>139</sup>Ce の $\gamma$ 線(165.8keV)と重なるため注意が必要である。

なお、資図 4.5 中の Ge-74(n, n')、Pb-206(n, n')は<sup>74</sup>Ge(n, n')<sup>74</sup>Ge、<sup>206</sup>Pb(n, n')<sup>206</sup>Pb に起因する $\gamma$ 線を表している。

#### 資 4.6 降下物-2

受水面積 5000cm<sup>2</sup>の大型水盤で1ヶ月間採取した降下物を蒸発乾固し、内容積 100mL(U-8 容器)の測定容器に詰め、2018年6月19日に7万秒測定したスペクトル。

- ・バックグラウンドから検出される核種の他に塵埃中の<sup>7</sup>Be および<sup>40</sup>K、<sup>210</sup>Pb が検出されている。
  - ・東京電力福島第一原子力発電所事故由来の<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs が検出されている。
  - ・宇宙線由来の中性子が測定機器と反応し、放射化生成物である<sup>71m</sup>Ge、<sup>75m</sup>Ge および<sup>74</sup>Ge(n, n')<sup>74</sup>Ge に起因する $\gamma$ 線が検出されている。(検出されないこともある。)
- なお、資図 4.6 中の Ge-74(n, n')は<sup>74</sup>Ge(n, n')<sup>74</sup>Ge に起因する $\gamma$ 線を表している。

#### 資 4.7 土壌-1

表土を、内容積 100mL (U-8 容器) の測定容器に詰め、2005年4月13日に7万秒測定したスペクトル。

- ・トリウム系列核種の<sup>228</sup>Ac、<sup>212</sup>Pb、<sup>212</sup>Bi、<sup>208</sup>Tl が検出されている。
- ・ウラン系列核種の<sup>234m</sup>Pa、<sup>226</sup>Ra、<sup>214</sup>Pb、<sup>214</sup>Bi、<sup>210</sup>Pb が検出されている。
- ・アクチニウム系列核種の<sup>235</sup>U が検出されている。
- ・大気圏内核実験の影響が残っており、フォールアウトからの<sup>137</sup>Cs が検出されている。
- ・宇宙線由来の中性子が測定機器と反応し、放射化生成物である<sup>71m</sup>Ge が検出されている。(検出されないこともある。)

#### 資 4.8 土壌-2

表土を、内容積 100mL (U-8 容器) の測定容器に詰め、2018年10月22日に7万秒測定したスペクトル。

- ・トリウム系列核種の<sup>228</sup>Ac、<sup>212</sup>Pb、<sup>212</sup>Bi、<sup>208</sup>Tl が検出されている。

- ・ウラン系列核種の  $^{234m}\text{Pa}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{214}\text{Pb}$ 、 $^{214}\text{Bi}$  が検出されている。
- ・アクチニウム系列核種の  $^{235}\text{U}$  が検出されている。
- ・東京電力福島第一原子力発電所事故由来の  $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  が検出されている。

#### 資 4.9 海産生物

海産生物（アジ）の可食部を乾燥後灰化し、内容積 100mL（U-8 容器）の測定容器に詰め、2005 年 12 月 13 日に 7 万秒測定したスペクトル。なお、図中の SE はシングルエスケープピーク、DE はダブルエスケープピークを示す。

- ・バックグラウンドと同様の自然放射性核種が検出されている。
  - ・明確な  $^{40}\text{K}$  のシングルエスケープピーク（SE）とダブルエスケープピーク（DE）が検出されている。
  - ・魚の筋肉に蓄積されたフォールアウト起源の  $^{137}\text{Cs}$  が検出されている。
  - ・宇宙線由来の中性子が測定機器と反応し、放射化生成物である  $^{71m}\text{Ge}$ 、および  $^{206}\text{Pb}(n, n')^{206}\text{Pb}$  に起因する  $\gamma$  線が検出されている。（検出されないこともある。）
- なお、資図 4.9 中の Pb-206(n, n')は  $^{206}\text{Pb}(n, n')^{206}\text{Pb}$  に起因する  $\gamma$  線を表している。

#### 資 4.10 鉱石（モナザイト粉末）

ウラン、トリウムの含有量が比較的高い鉱物を、内容積 100mL（U-8 容器）の測定容器に詰め、2010 年 10 月 12 日に 7 万秒測定したスペクトル。なお、図中 sum はサムピークを示す。

- ・検出される核種は土壌と同じだが、ウランおよびトリウム含量が多いため、それら同位体およびその壊変生成物の放射能濃度が高く、放出された  $\gamma$  線と検出器との相互作用によるコンプトン散乱のため、スペクトルのベースライン全体が高い。
- ・ウランおよびトリウム同位体およびその壊変生成物の放射能濃度が高いことから、それらの放出率の小さいピークが多数検出されている。核種同定には十分な注意が必要である。 $^{228}\text{Ac}$  の 1459.1keV ピーク（放出率：0.83%）が検出されており、 $^{40}\text{K}$  の 1460.82keV ピーク（放出率：10.66%）との誤同定に注意が必要である。
- ・試料中のトリウムと  $\gamma$  線の相互作用により、89.957keV ( $\text{K}\alpha 2$ ) と 105.604keV ( $\text{K}\beta 1$ ) の ThXray ピークが検出されている。なお、93.350keV ( $\text{K}\alpha 1$ ) の ThXray ピークは、92.38keV（放出率：2.13%）および 92.80keV（放出率：2.1%）の  $^{234}\text{Th}$  ピークと重なっていると考えられる。
- ・トリウム濃度が高い試料の場合、1001.03keV の  $^{234m}\text{Pa}$  主ピーク（放出率：0.84%）に、 $^{228}\text{Ac}$ （911.2keV、放出率：25.8%）と ThXray（89.957keV： $\text{K}\alpha 2$ ）とのサムピーク（1001.157keV）が重なるため、 $^{234m}\text{Pa}$  の定量には十分注意する。特に 1004.6keV { $^{228}\text{Ac}$  の 911.2keV の  $\gamma$  線と 93.350keV ( $\text{K}\alpha 1$ ) の ThXray とのサムピーク}

ク} にピークが見られるときは、ThXray(K $\alpha$  2)も検出されていると考えられ、<sup>234m</sup>Pa 主ピークに <sup>228</sup>Ac と ThXray(K $\alpha$  2)のサムピークが重なっている可能性が高い。

#### 資 4.11 東京電力福島第一原子力発電所事故に係る大気浮遊じん

東京電力福島第一原子力発電所事故の直後に千葉市で採取された大気浮遊じんを 2011 年 3 月 15 日に 3 万秒測定したスペクトル。なお、図中 sum はサムピークを示す。

- ・人工放射性核種の <sup>99</sup>Mo、<sup>99m</sup>Tc、<sup>129</sup>Te、<sup>129m</sup>Te、<sup>131</sup>I、<sup>132</sup>Te、<sup>132</sup>I、<sup>133</sup>I、<sup>134</sup>Cs、<sup>136</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs、<sup>140</sup>Ba、<sup>140</sup>La が検出されている。
- ・多くのピークが検出されたが、それらの中でも <sup>132</sup>I は最もピーク数が多くサムピークを合わせ約 60 本のピークが見られた。
- ・高濃度のヨウ素およびセシウム同位体等のために、スペクトルのベースライン全体が高い。
- ・<sup>132</sup>I は半減期が 2.28h で短い、親の <sup>132</sup>Te (半減期: 78.2h) が検出されており、これから生長した <sup>132</sup>I が 3 月 15 日の測定時点に高濃度で検出された。
- ・親-子孫の関係がある <sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc、<sup>132</sup>Te-<sup>132</sup>I、<sup>140</sup>Ba-<sup>140</sup>La が検出されている。

#### 資 4.12 核実験に係る試料

中国核実験直後に日本で採取された降水を 35401 秒測定したスペクトル。

- ・人工放射性核種の <sup>58</sup>Co、<sup>91</sup>Sr、<sup>91</sup>Y、<sup>93</sup>Y、<sup>95</sup>Zr、<sup>95</sup>Nb、<sup>97</sup>Zr、<sup>97</sup>Nb、<sup>99</sup>Mo、<sup>99m</sup>Tc、<sup>103</sup>Ru、<sup>131</sup>I、<sup>132</sup>Te、<sup>132</sup>I、<sup>136</sup>Cs、<sup>140</sup>Ba、<sup>140</sup>La、<sup>141</sup>Ce、<sup>143</sup>Ce、<sup>144</sup>Ce、<sup>147</sup>Nd、<sup>239</sup>Np が検出されている。
- ・多数の核分裂生成核種が高濃度に含まれているため、スペクトルのベースライン全体が高い。
- ・親-子孫の関係がある <sup>91</sup>Sr-<sup>91</sup>Y、<sup>95</sup>Zr-<sup>95</sup>Nb、<sup>97</sup>Zr-<sup>97</sup>Nb、<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc、<sup>132</sup>Te-<sup>132</sup>I、<sup>140</sup>Ba-<sup>140</sup>La が検出されている。

#### 資 4.13 原発事故に係る浮遊じん

旧ソ連国内で採取されたチェルノブイリ事故時の大気浮遊じんを 1986 年 5 月 2 日に 5 万秒測定したスペクトル。

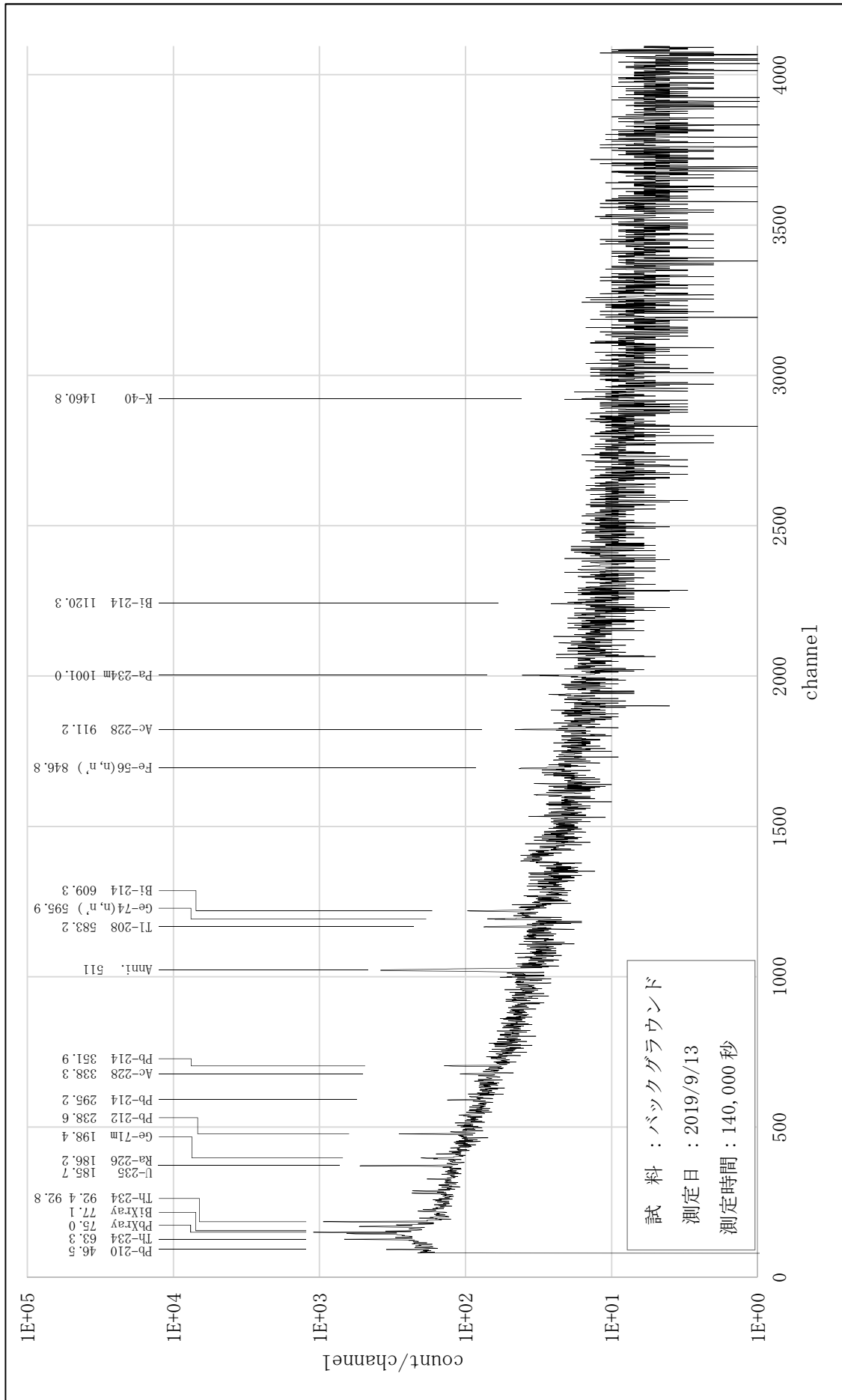
- ・人工放射性核種の <sup>95</sup>Nb、<sup>99</sup>Mo、<sup>99m</sup>Tc、<sup>103</sup>Ru、<sup>106</sup>Ru、<sup>110m</sup>Ag、<sup>125</sup>Sb、<sup>129</sup>Te、<sup>129m</sup>Te、<sup>131</sup>I、<sup>132</sup>Te、<sup>132</sup>I、<sup>134</sup>Cs、<sup>136</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs、<sup>140</sup>Ba、<sup>140</sup>La が検出されている。
- ・多くのピークが検出されたが、それらの中でも <sup>132</sup>I は最もピーク数が多くサムピークを合わせ約 60 本のピークが見られた。
- ・高濃度のヨウ素およびセシウム同位体等のために、スペクトルのベースライン全体が高い。
- ・<sup>132</sup>I は半減期が 2.28h で短い、親の <sup>132</sup>Te (半減期: 78.2h) が検出されており、これから生長した <sup>132</sup>I が 5 月 2 日の測定時点に高濃度で検出された。

- ・ 親-子孫の関係がある  $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{132}\text{Te}-^{132}\text{I}$ 、 $^{140}\text{Ba}-^{140}\text{La}$  が検出されている。

#### 資 4.14 原発事故に係るスミヤ試料

旧ソ連国内で採取されたチェルノブイリ事故時のスミヤ試料を 1986 年 5 月 31 日に 1011 秒測定したスペクトル。

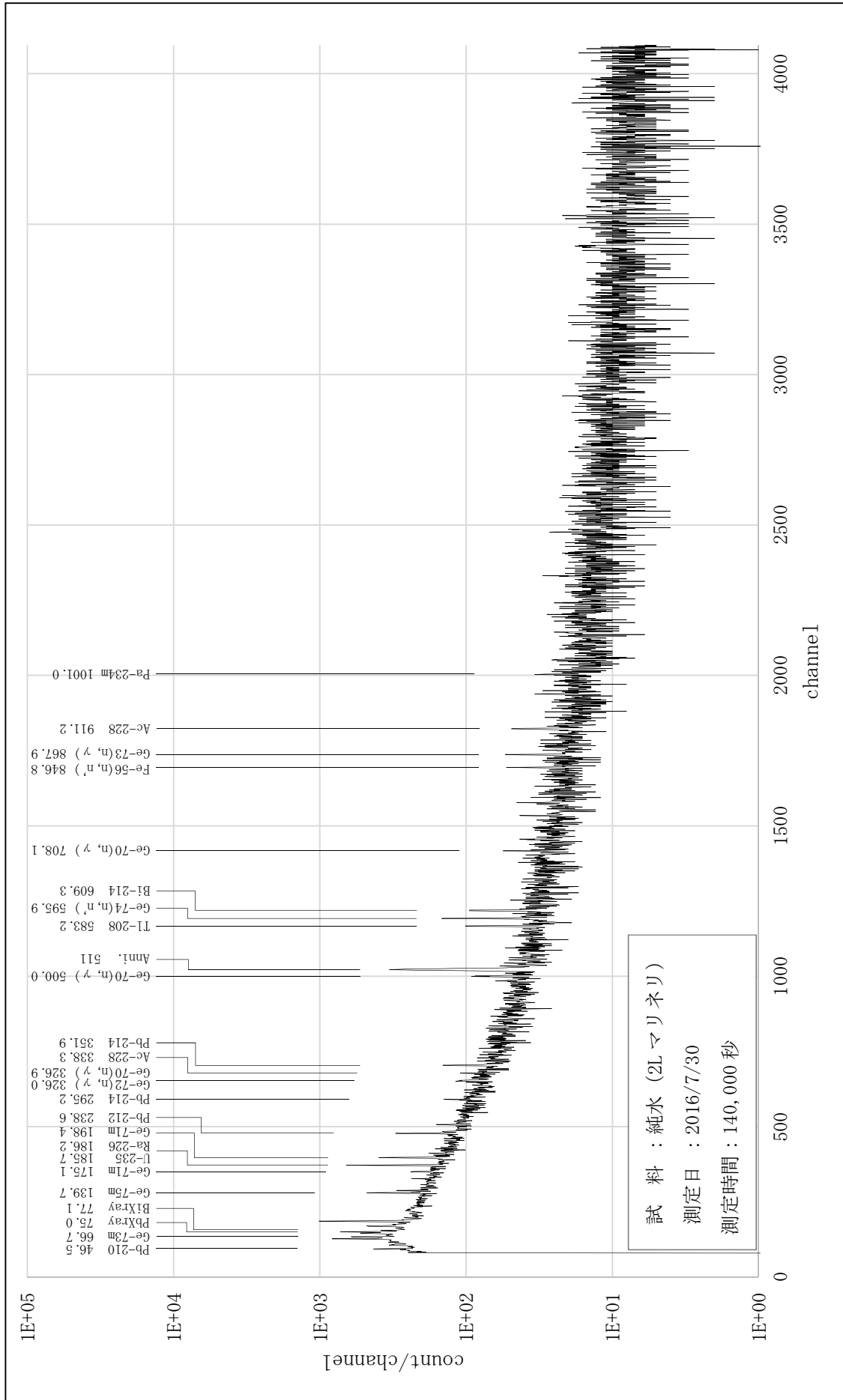
- ・ 人工放射性核種の  $^{95}\text{Zr}$ 、 $^{95}\text{Nb}$ 、 $^{103}\text{Ru}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{125}\text{Sb}$ 、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{132}\text{Te}$ 、 $^{132}\text{I}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{136}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{140}\text{Ba}$ 、 $^{140}\text{La}$ 、 $^{141}\text{Ce}$ 、 $^{144}\text{Ce}$ 、 $^{147}\text{Nd}$ 、が検出されている。
- ・ 事故からおよそ 35 日経過していることから、ヨウ素同位体等の短半減期核種は減衰しているが、セシウム同位体や  $^{95}\text{Zr}$ 、 $^{95}\text{Nb}$ 、 $^{140}\text{La}$  等のためにスペクトルのベースラインが高い。
- ・ 親-子孫の関係がある  $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ 、 $^{132}\text{Te}-^{132}\text{I}$ 、 $^{140}\text{Ba}-^{140}\text{La}$  が検出されている。



Anni. : 電子対消滅光子によるピーク

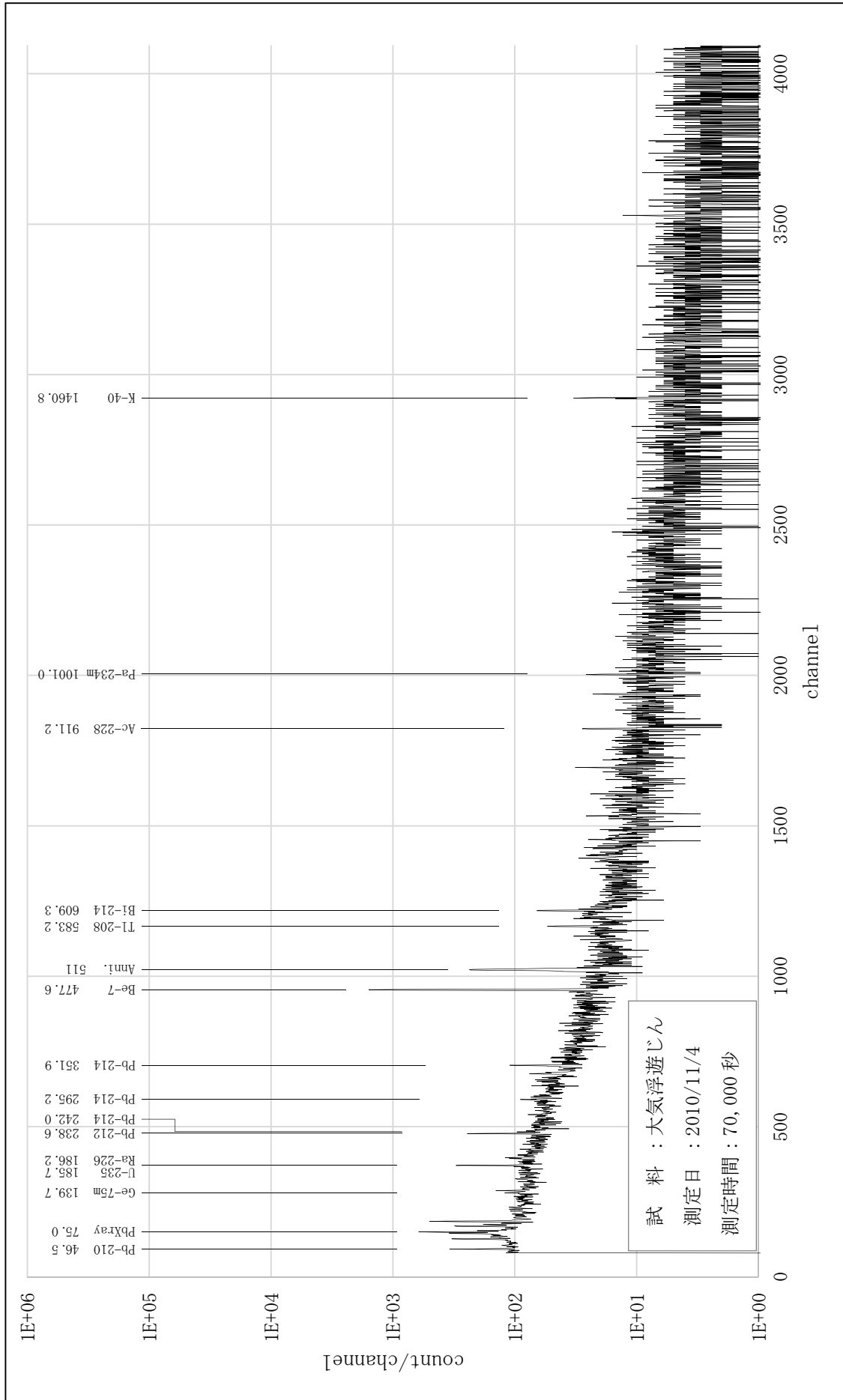
資図 4.1 バックグラウンド (検出器に何も載せずに測定)





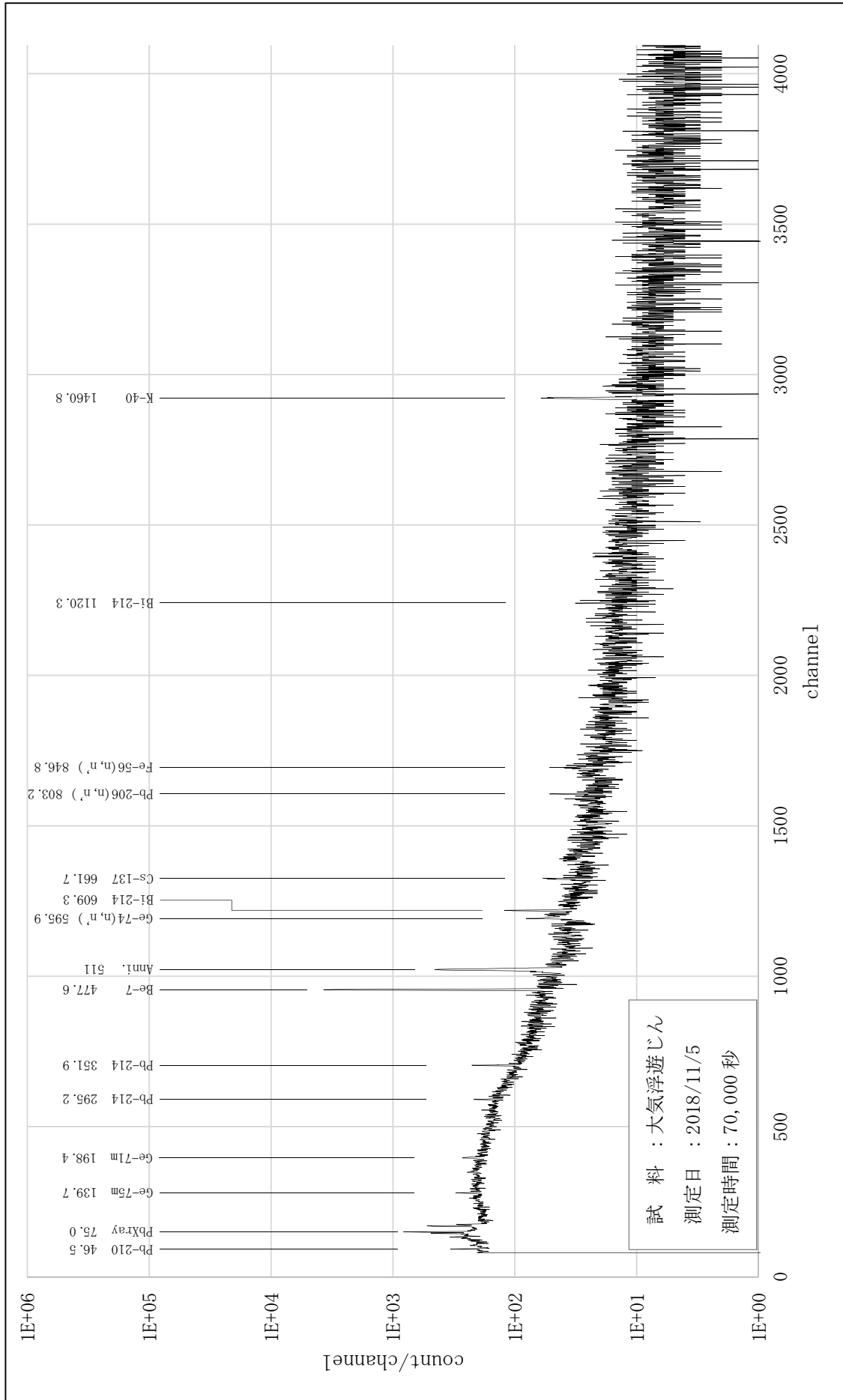
Ann. : 電子対消滅光子によるピーク

資図 4.2 純水 (2L マリネリ)



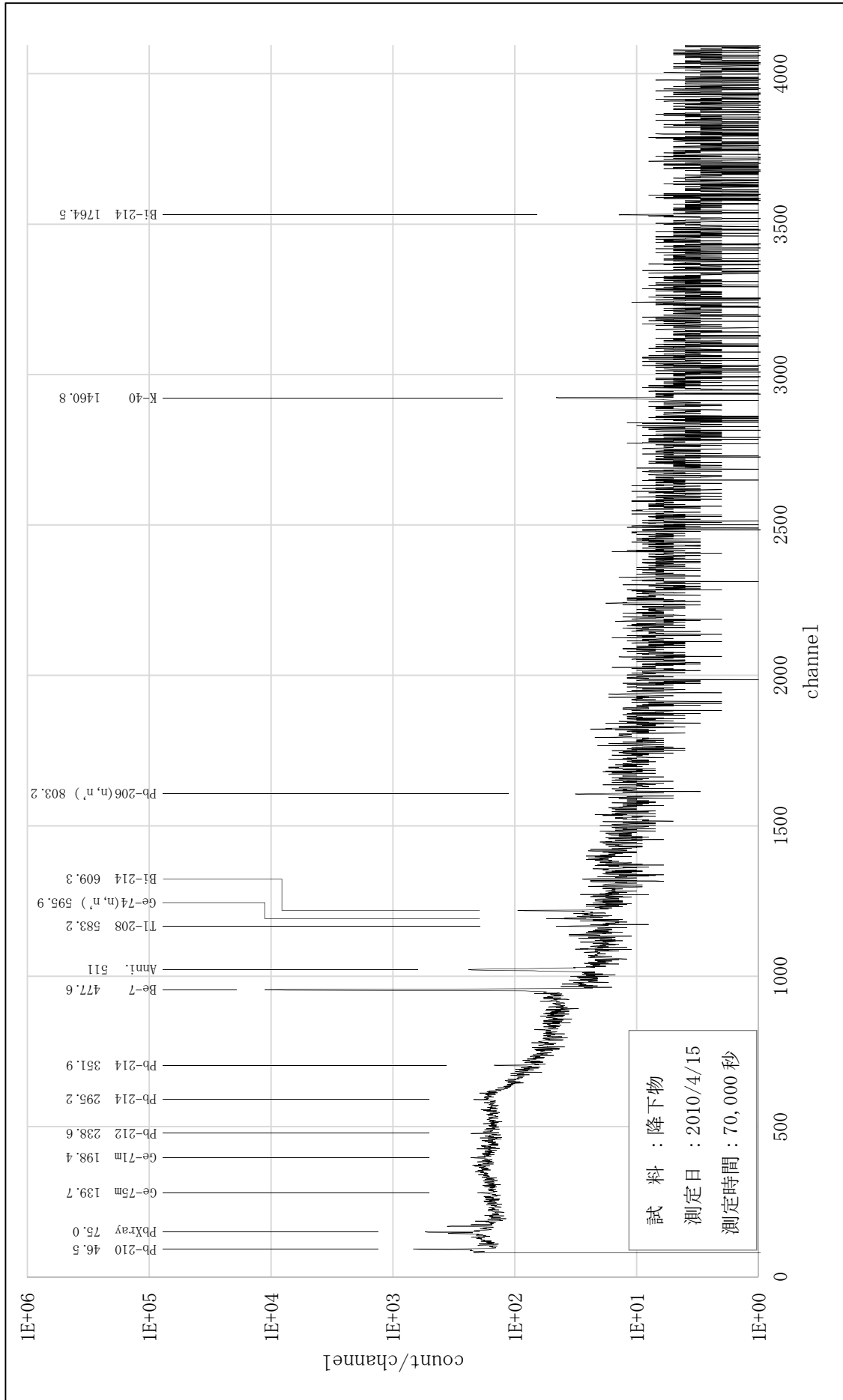
Anni. : 電子対消滅光子によるピーク

資図 4.3 大気浮遊じん-1



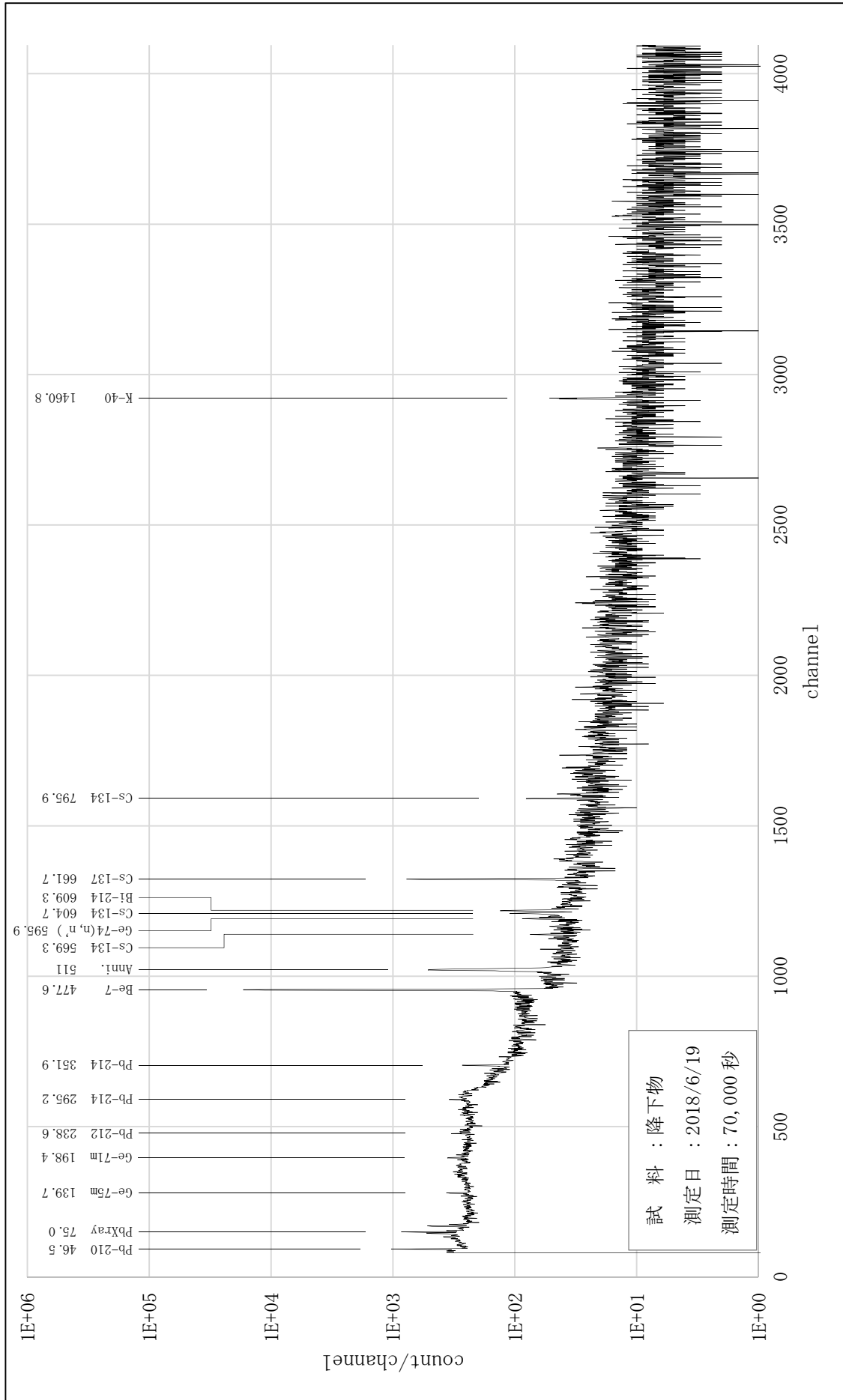
資図 4.4 大気浮遊じん-2

Anni. : 電子対消滅光子によるピーク



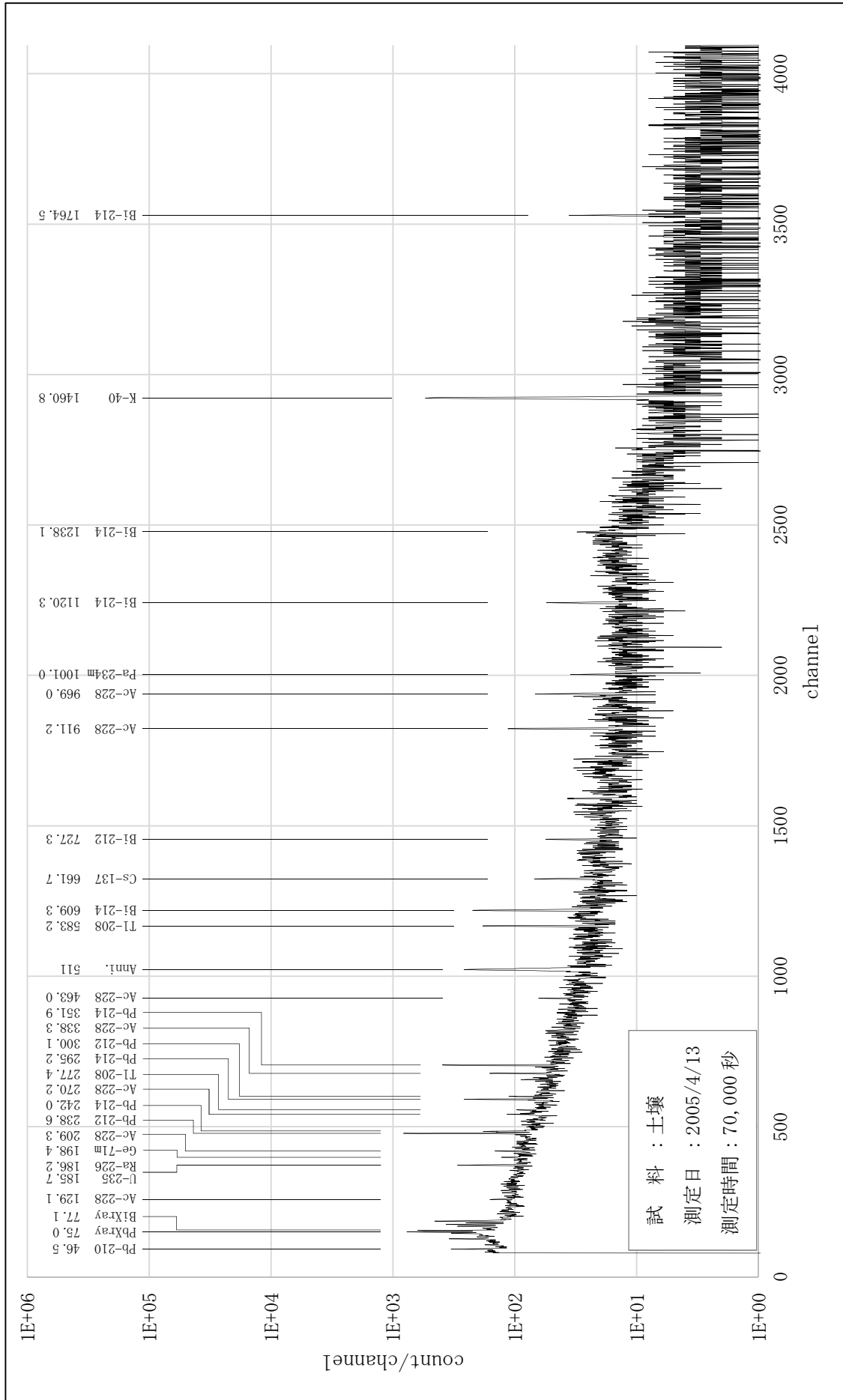
資図 4.5 降下物-1

Anni. : 電子対消滅光子によるピーク



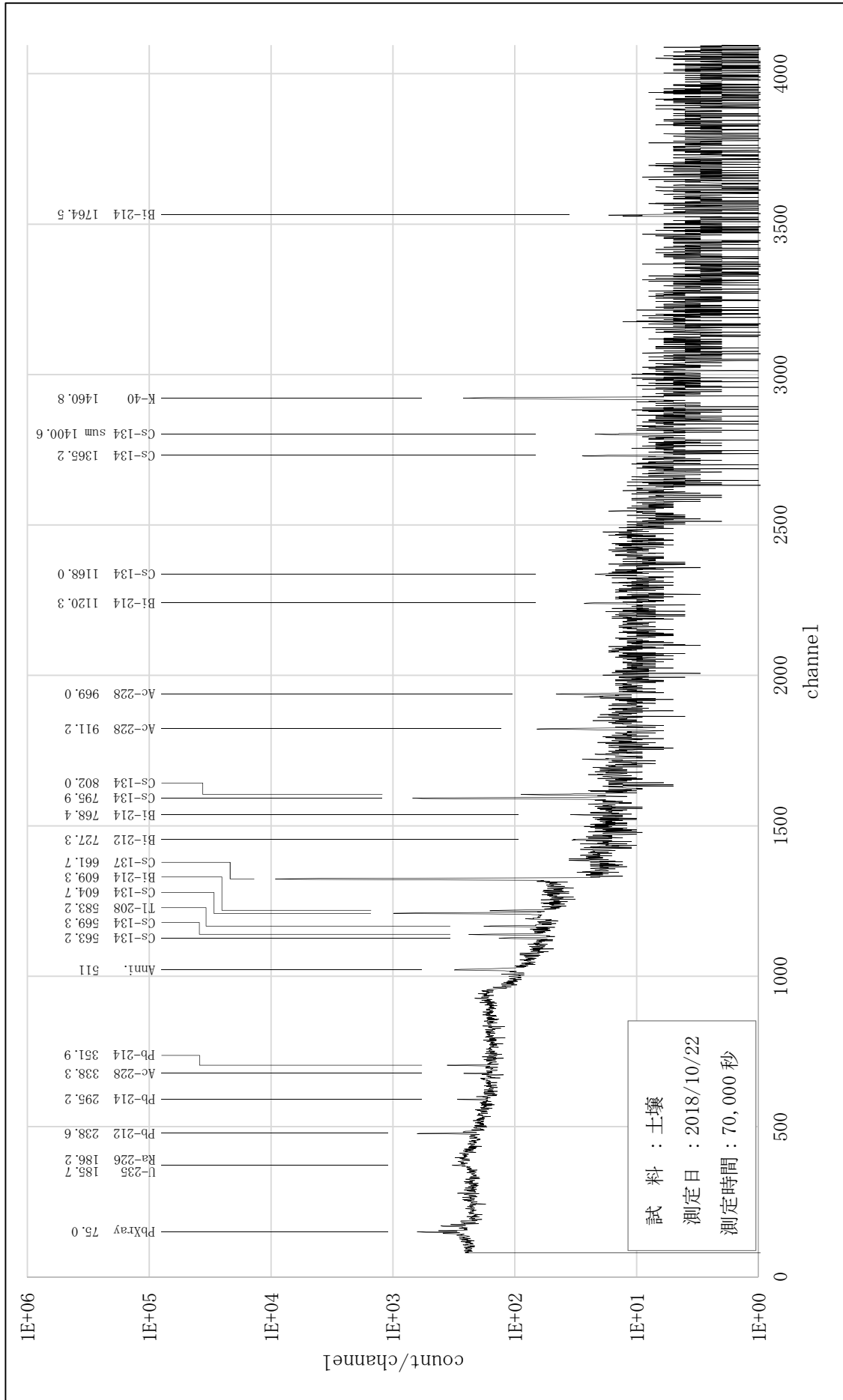
資図 4.6 降下物-2

Anni. : 電子対消滅光子によるピーク



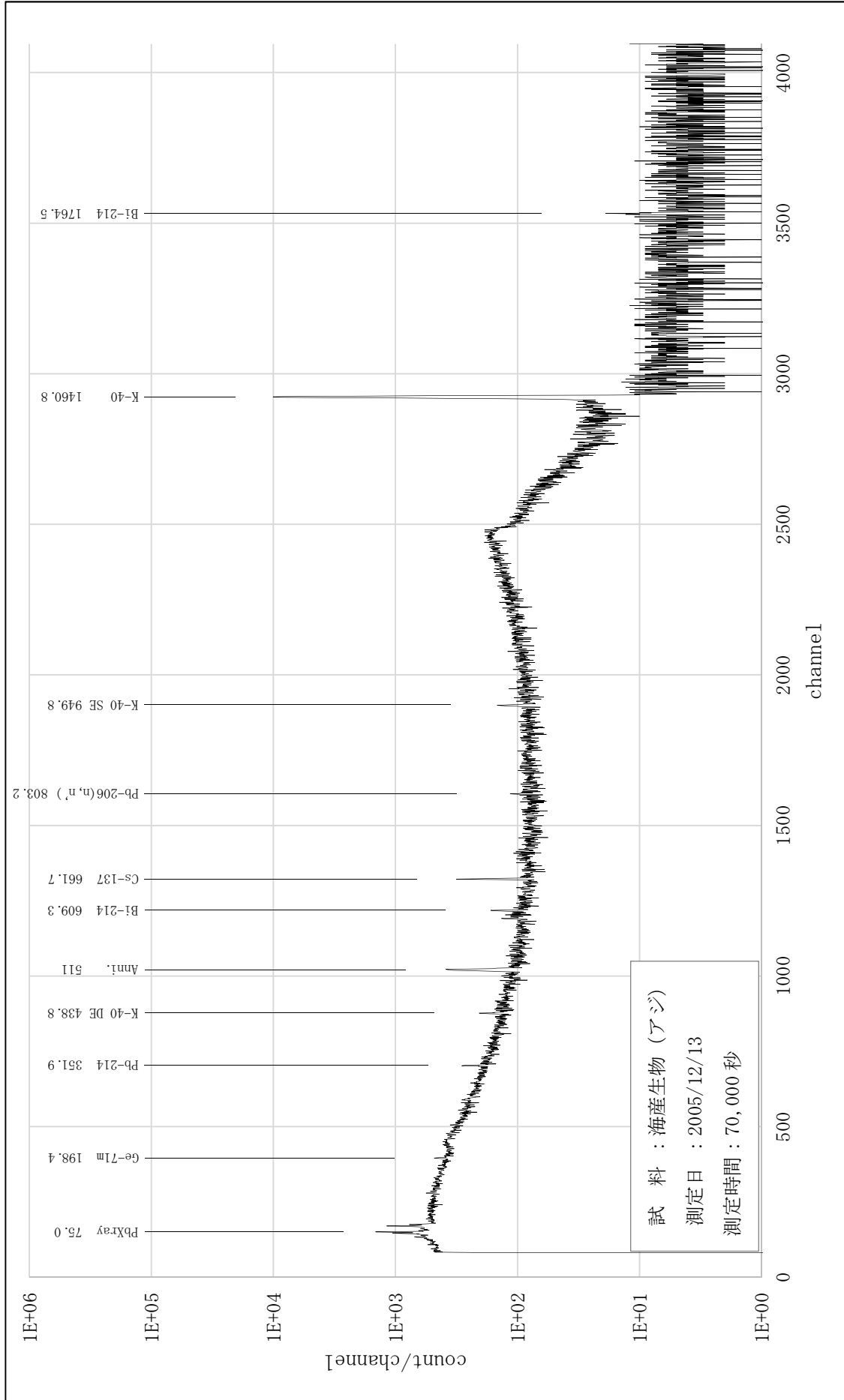
Ann. : 電子対消滅光子によるピーク

資図 4.7 土壌-1



Anni. : 電子対消滅光子によるピーク  
 sum : サムピーク

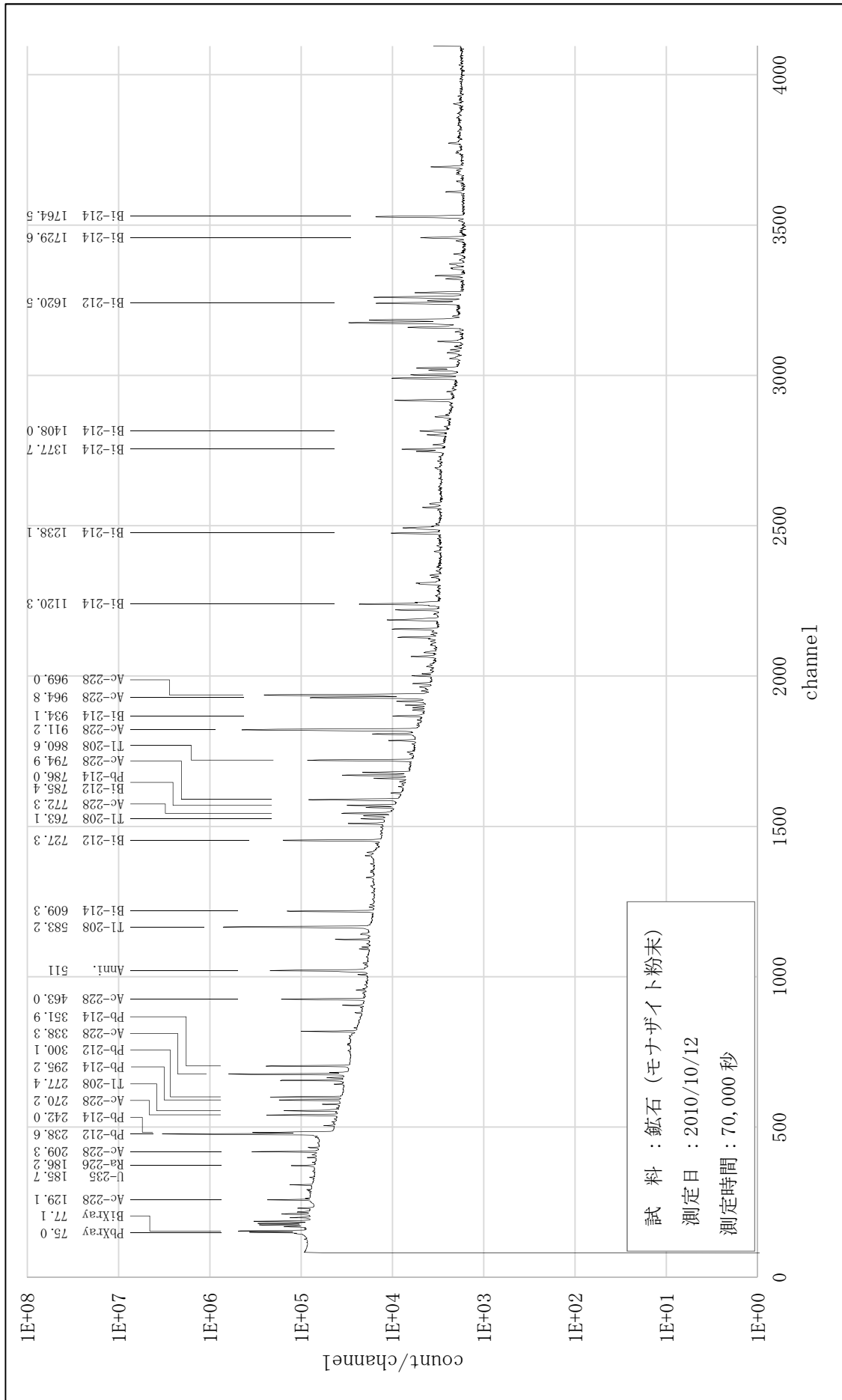
資図 4.8 土壌-2



Anni. : 電子対消滅光子によるピーク  
 SE : シングルスエスケープピーク  
 DE : ダブルスエスケープピーク

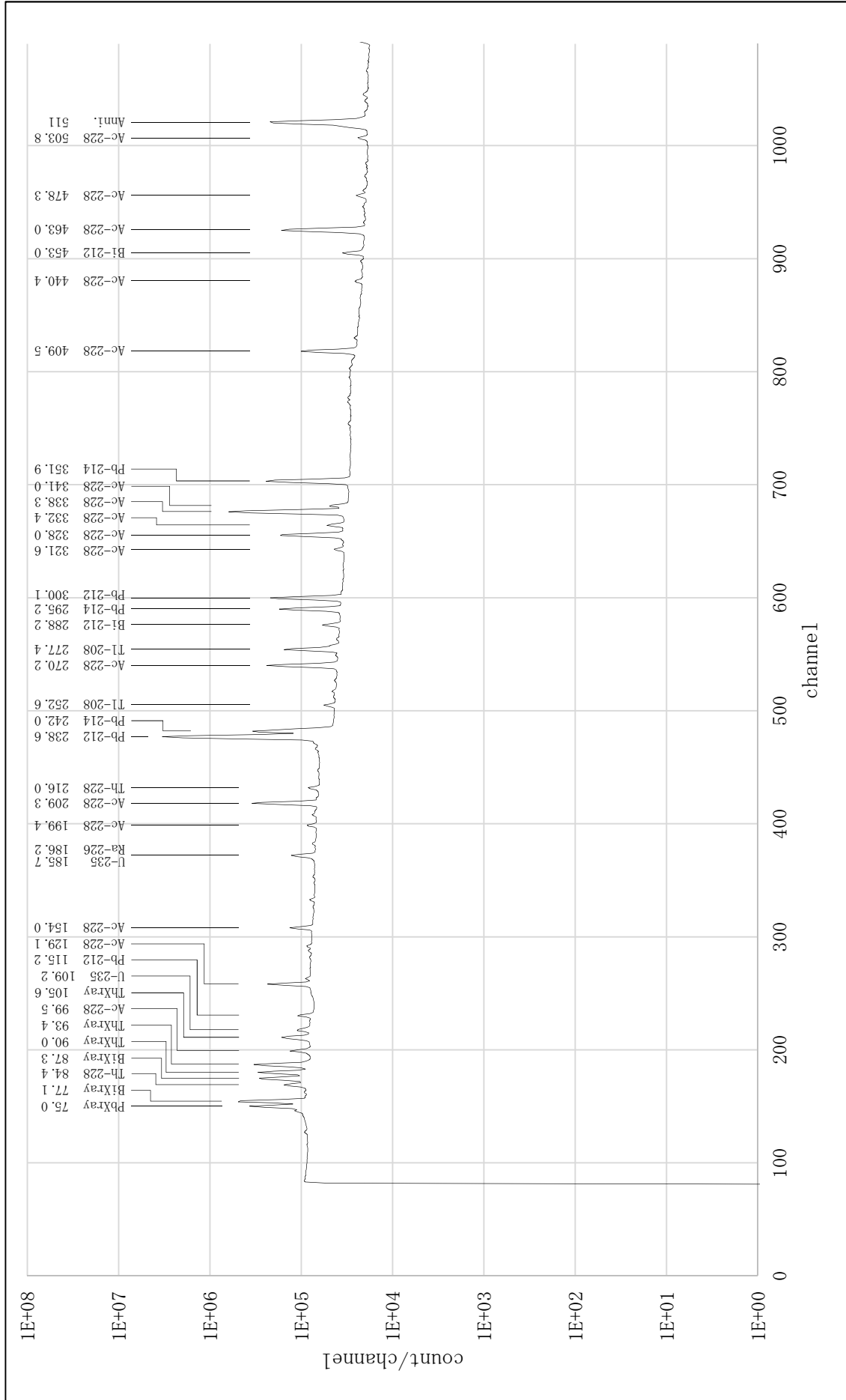
資図 4.9 海産生物 (アジ)





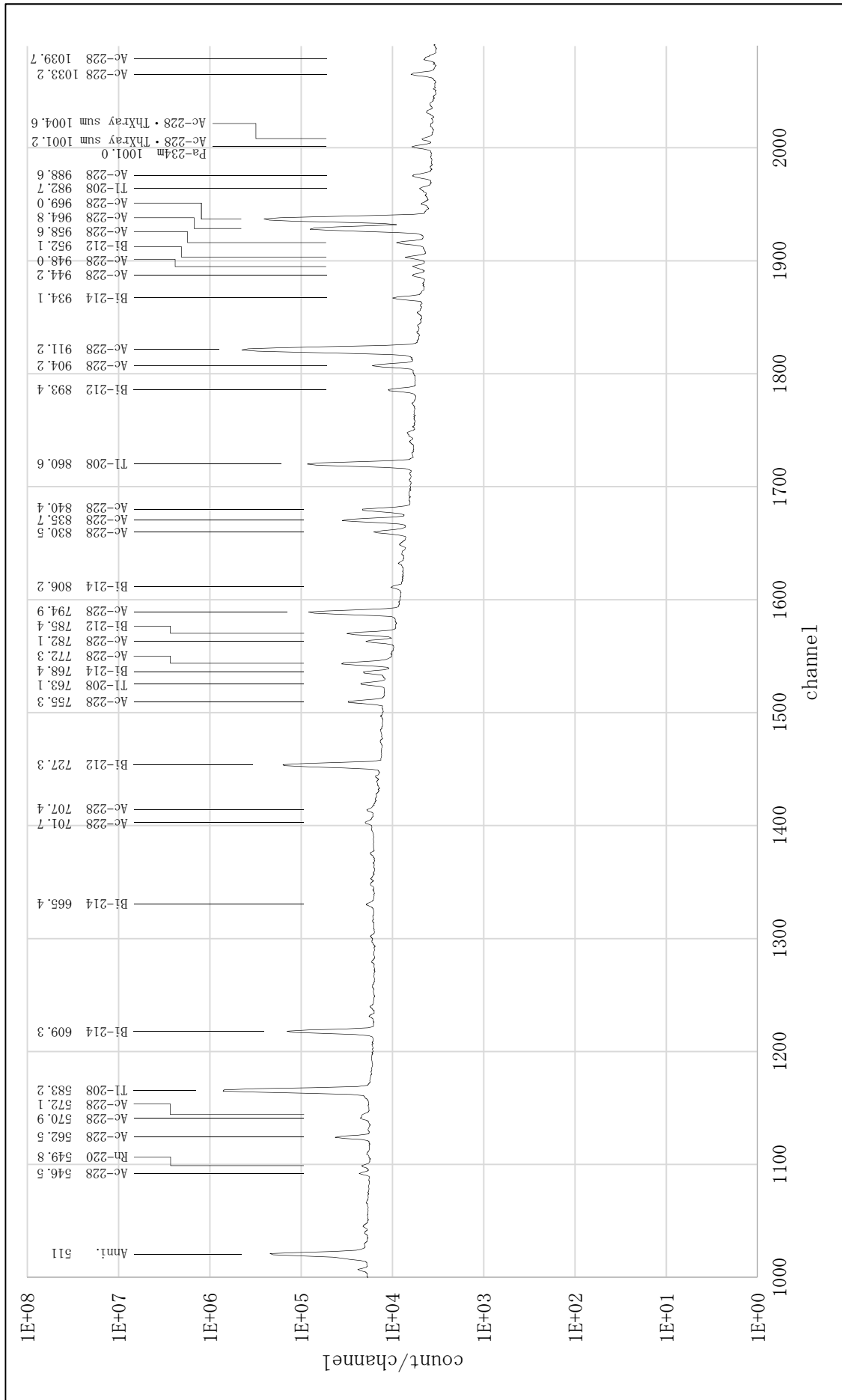
資図 4.10 鉍石 (モノザイト粉末)

Anni. : 電子対消滅光子によるピーク



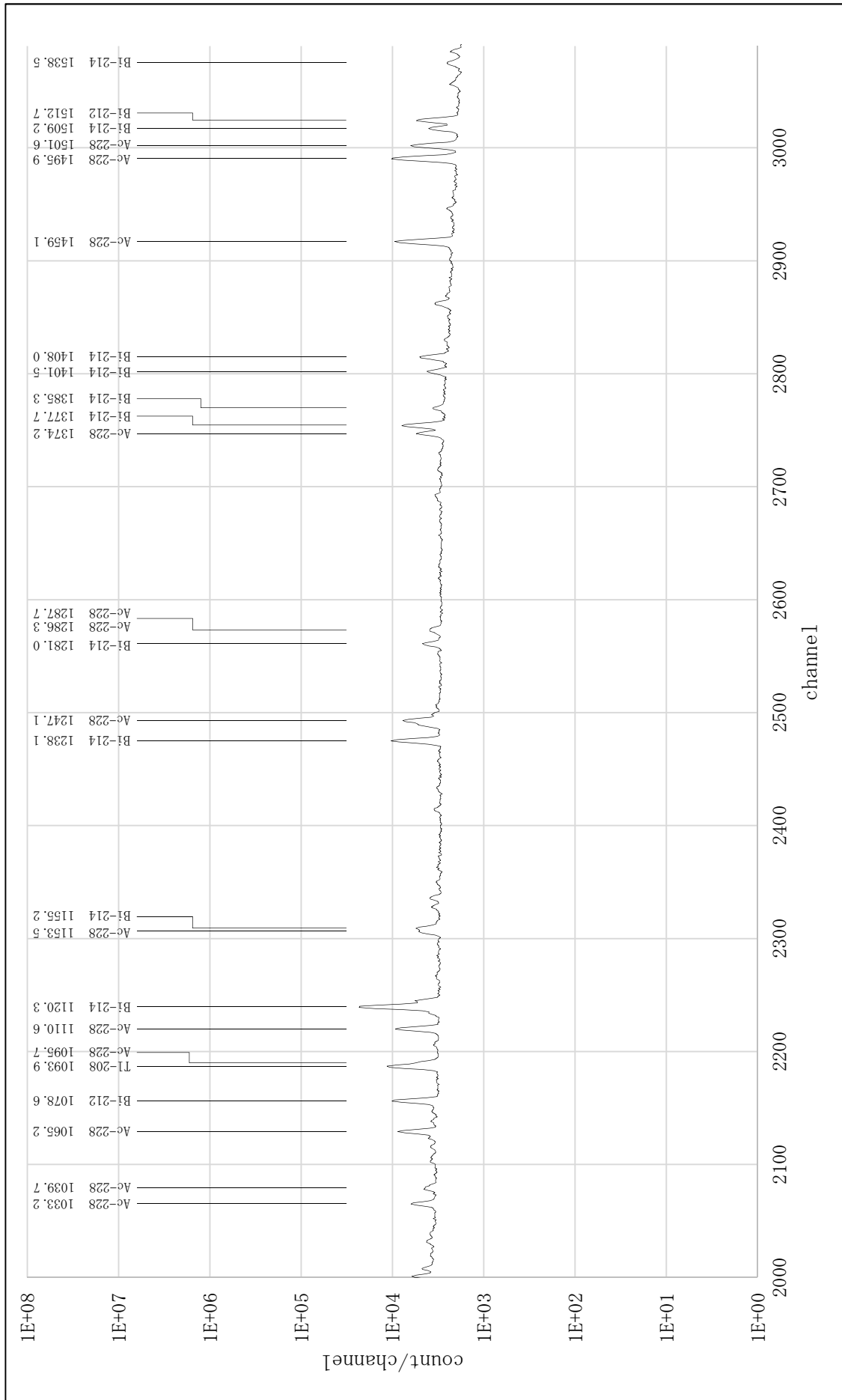
Anni. : 電子対消滅光子によるピーク

資図 4.10.1 鉍石 (モノザイト粉末) (拡大図 1/4)

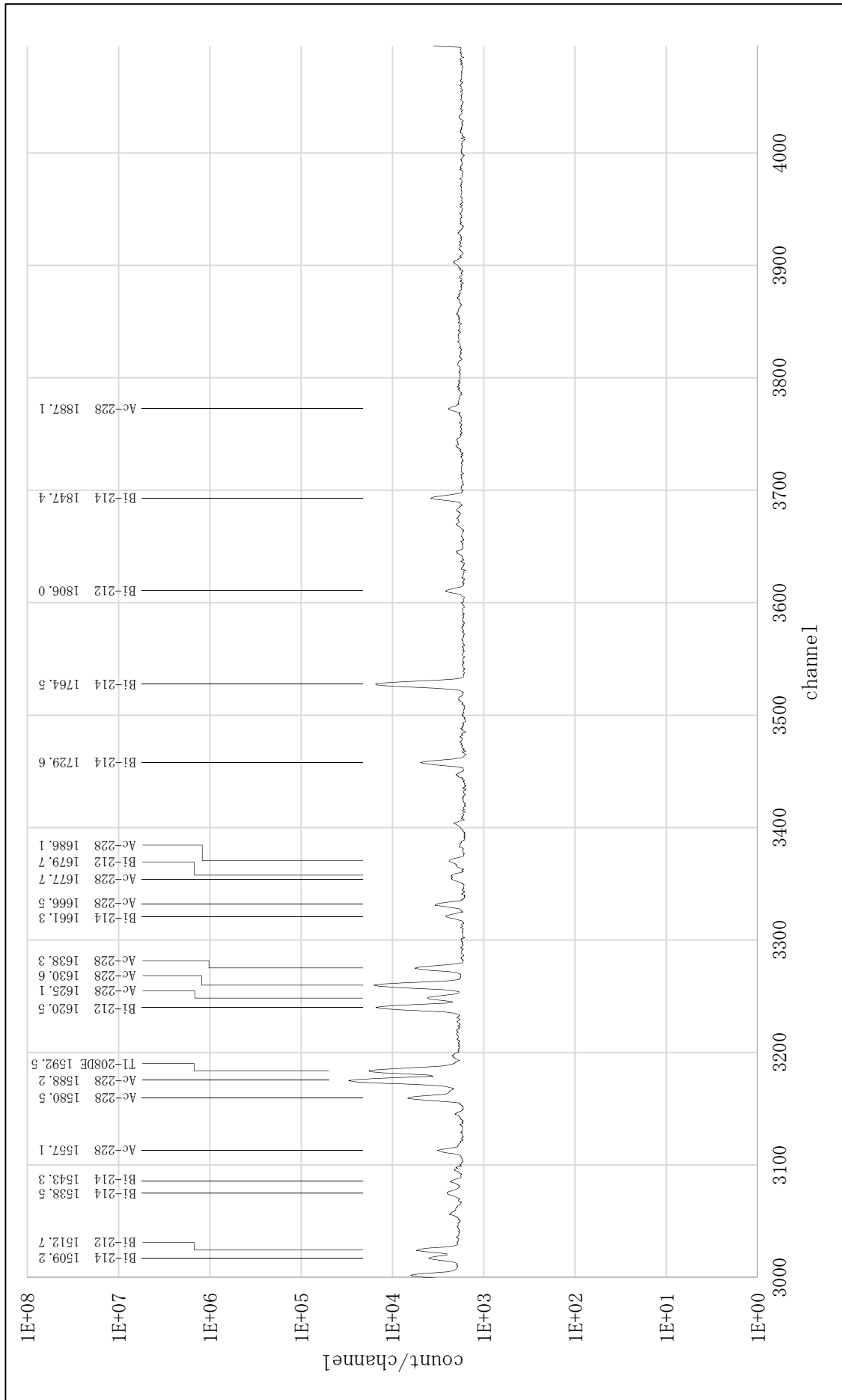


Anni. : 電子対消滅光子によるピーク  
 sum : サムピーク

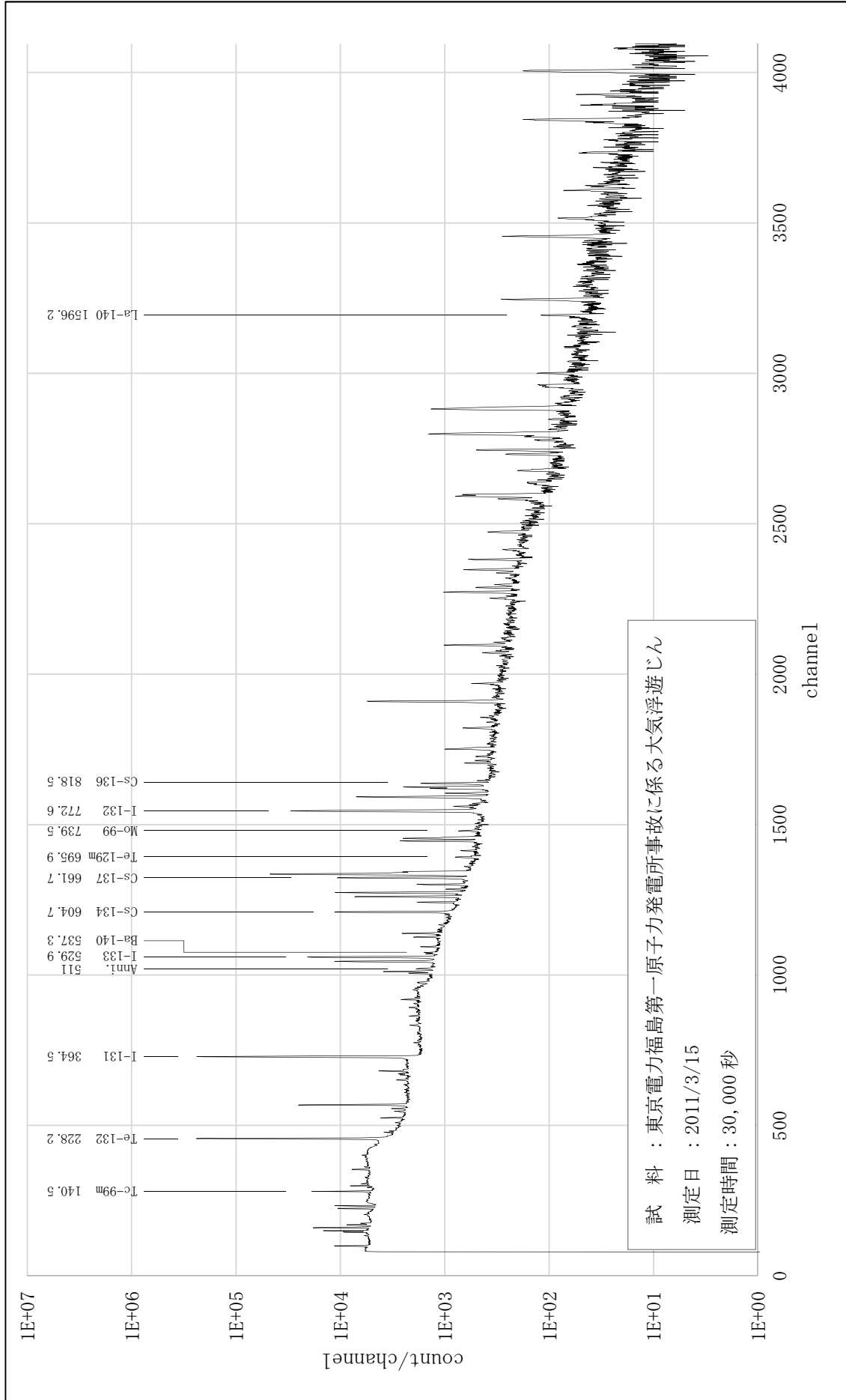
資図 4.10.2 鉍石 (モノザイト粉末) (拡大図 2/4)



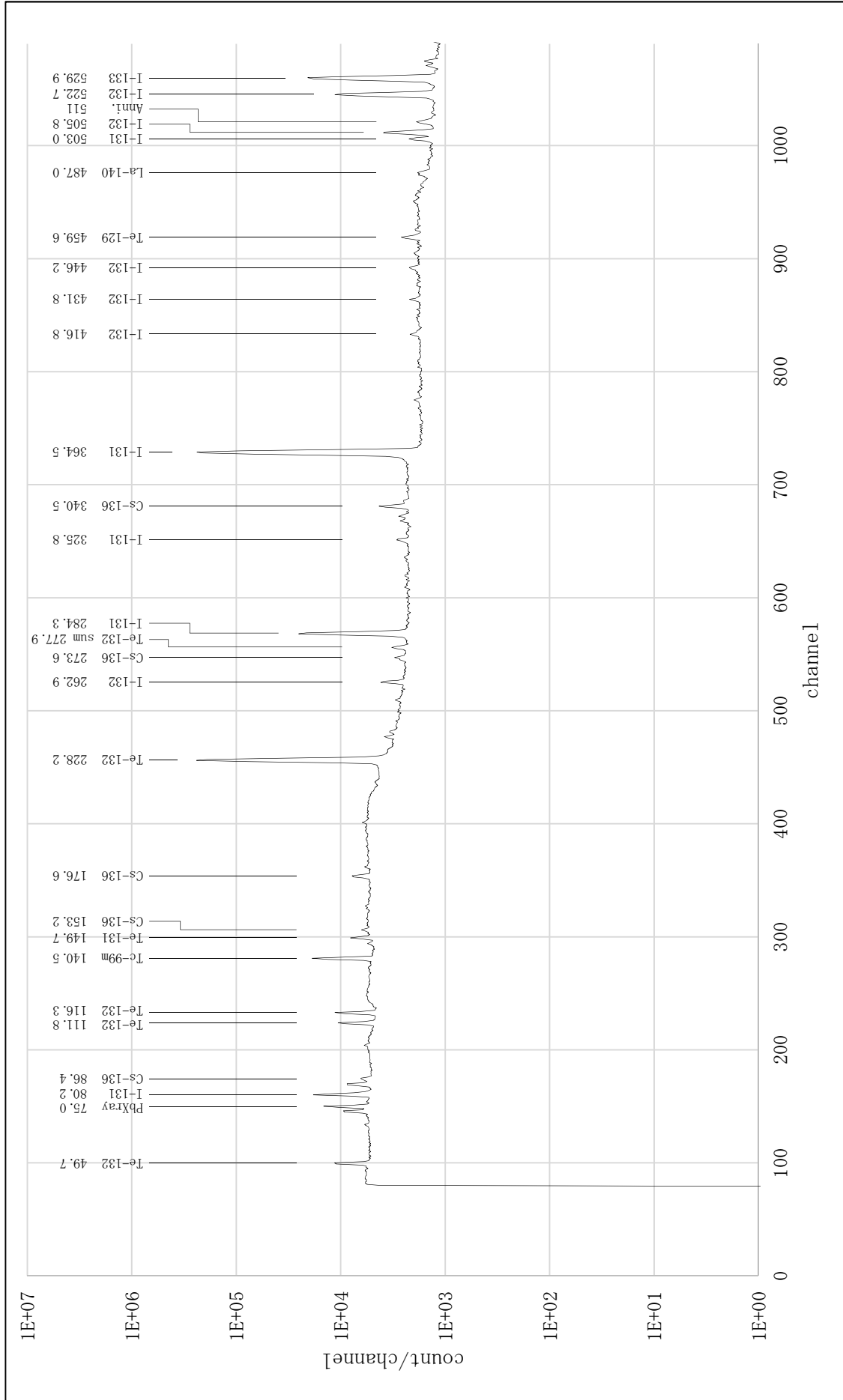
資図 4.10.3 鉍石 (モナザイト粉末) (拡大図 3/4)



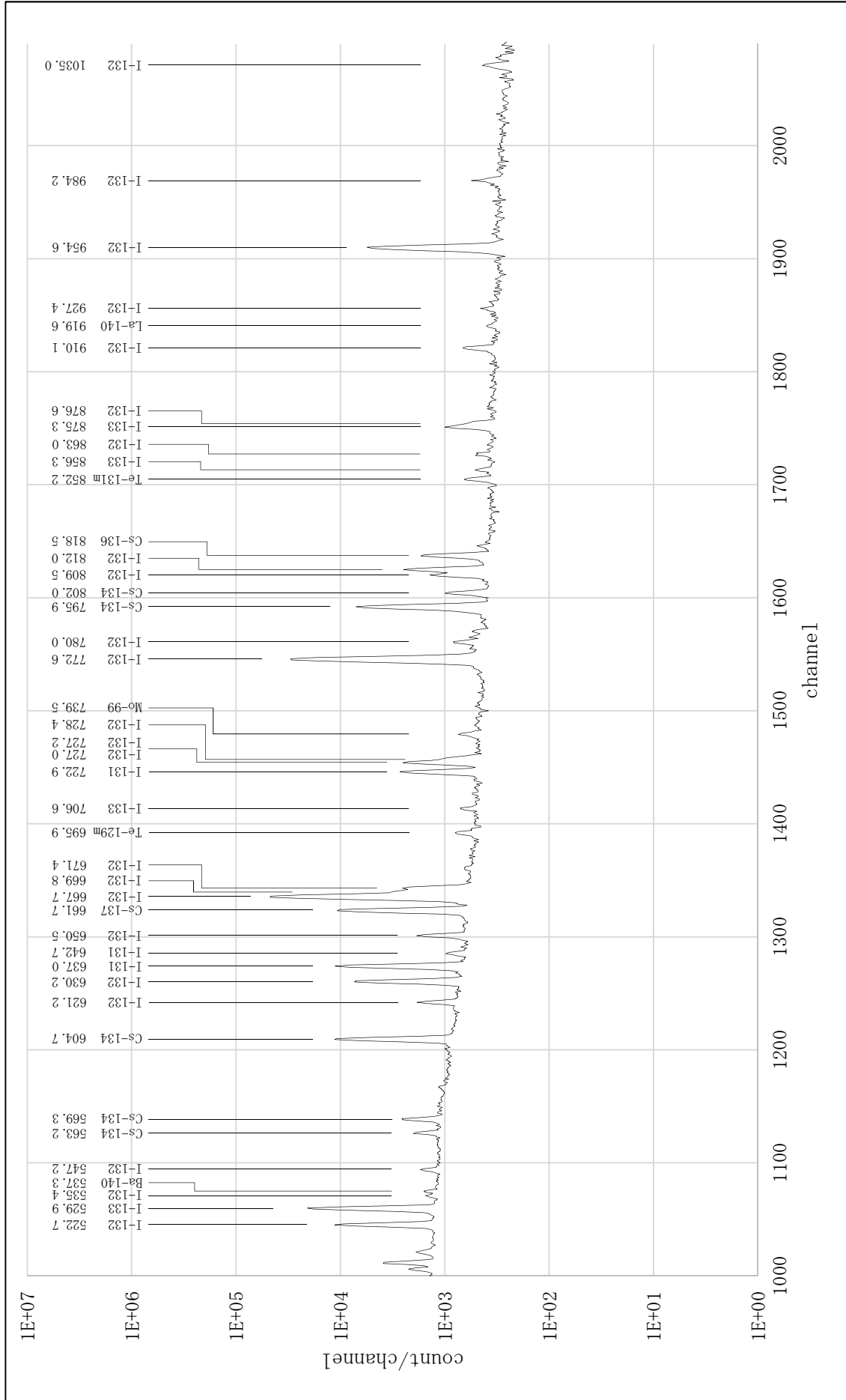
資図 4.10.4 鉍石 (モニザイト粉末) (拡大図 4/4)



資図 4. 11 東京電力福島第一原子力発電所事故に係る大気浮遊じん Ann.i. : 電子対消滅光子によるピーク

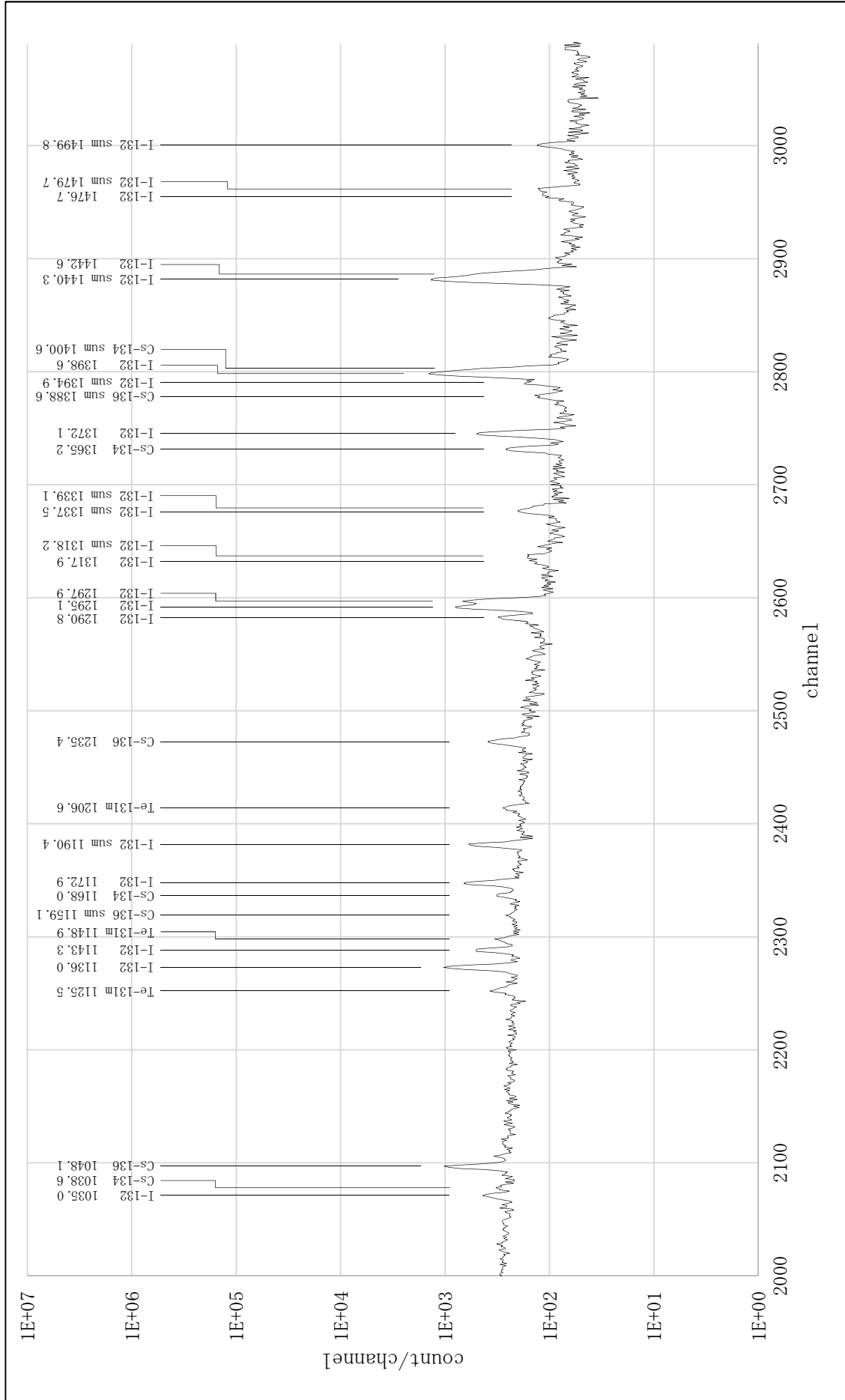


資図 4.11.1 東京電力福島第一原子力発電所事故に係る大気浮遊じん (拡大図 1/4) Anni. : 電子対消滅光子によるピーク  
sum : サムピーク

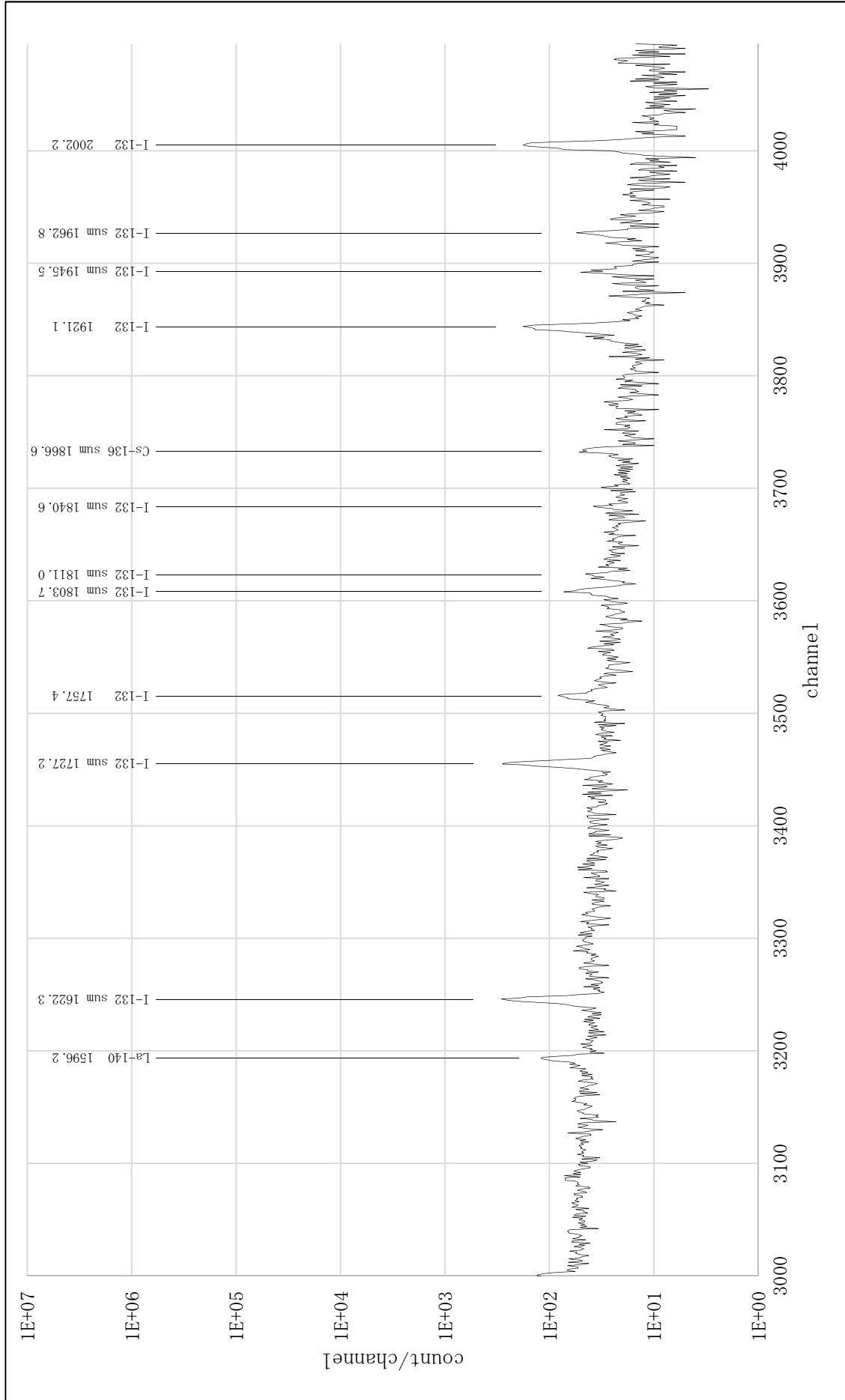


資図 4.11.2 東京電力福島第一原子力発電所事故に係る大気浮遊じん (拡大図 2/4)

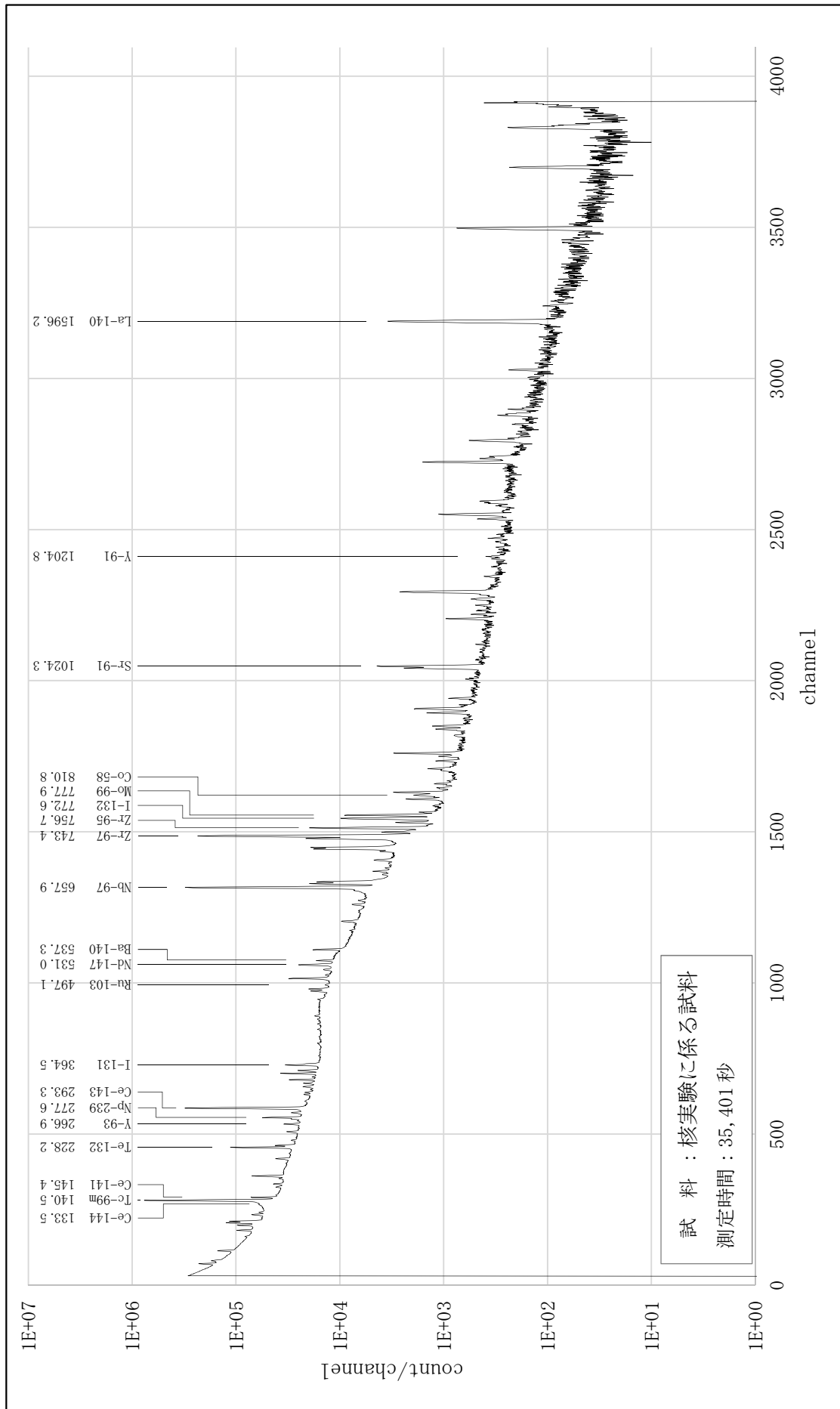




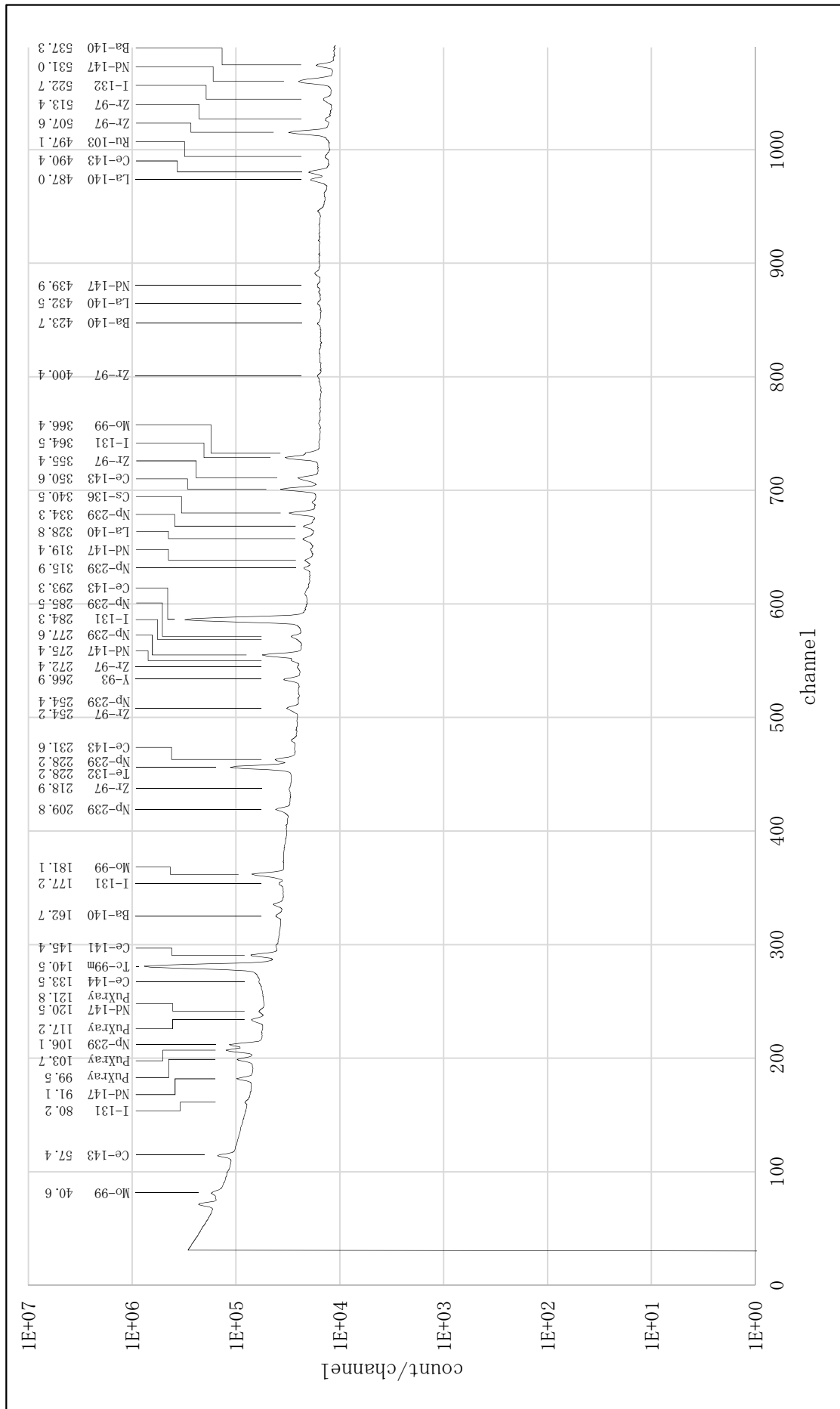
資図 4. 11.3 東京電力福島第一原子力発電所事故に係る大気浮遊じん (拡大図 3/4) sum : サムピーク



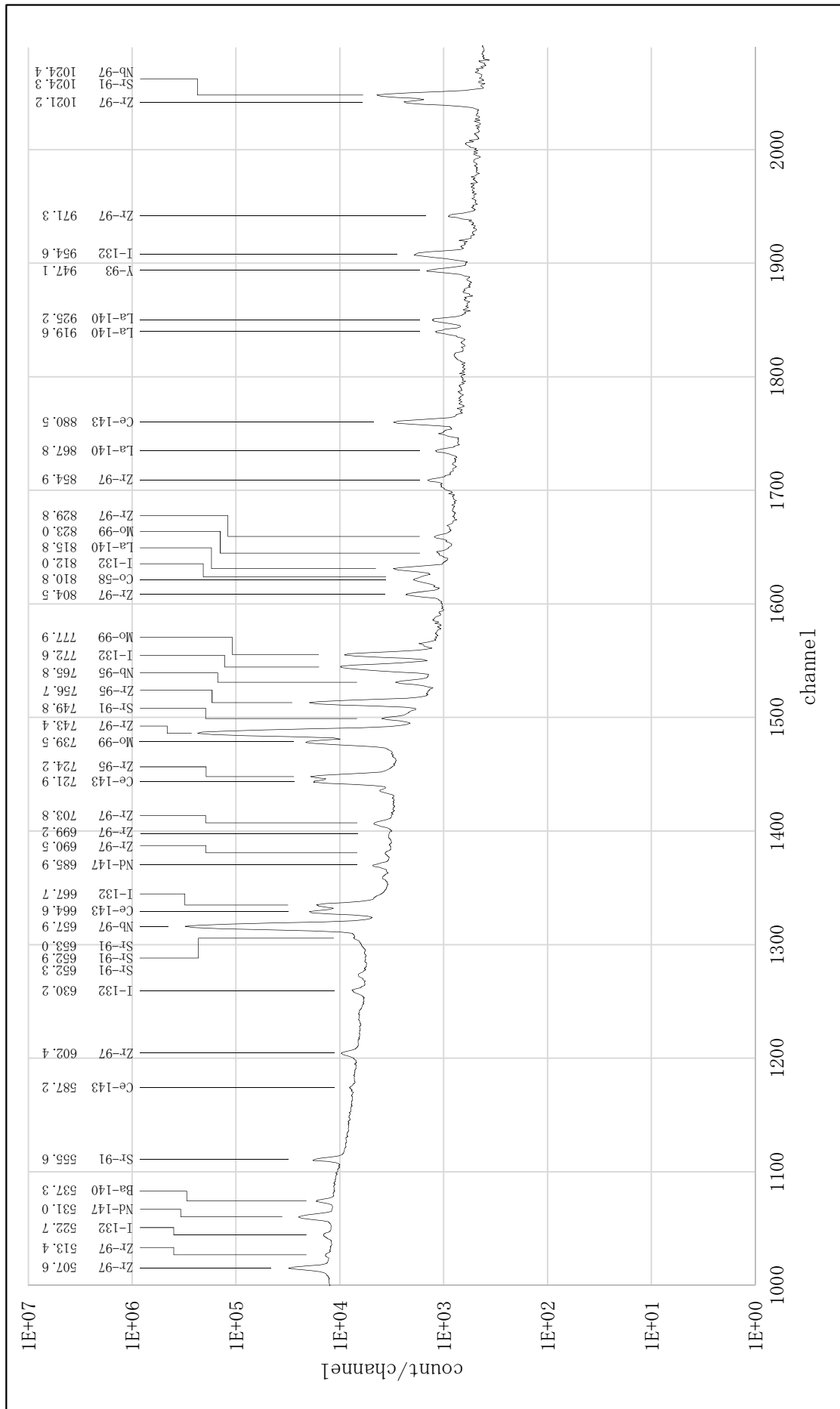
資図 4.11.4 東京電力福島第一原子力発電所事故に係る大気浮遊じん (拡大図 4/4) sum : サムピーク



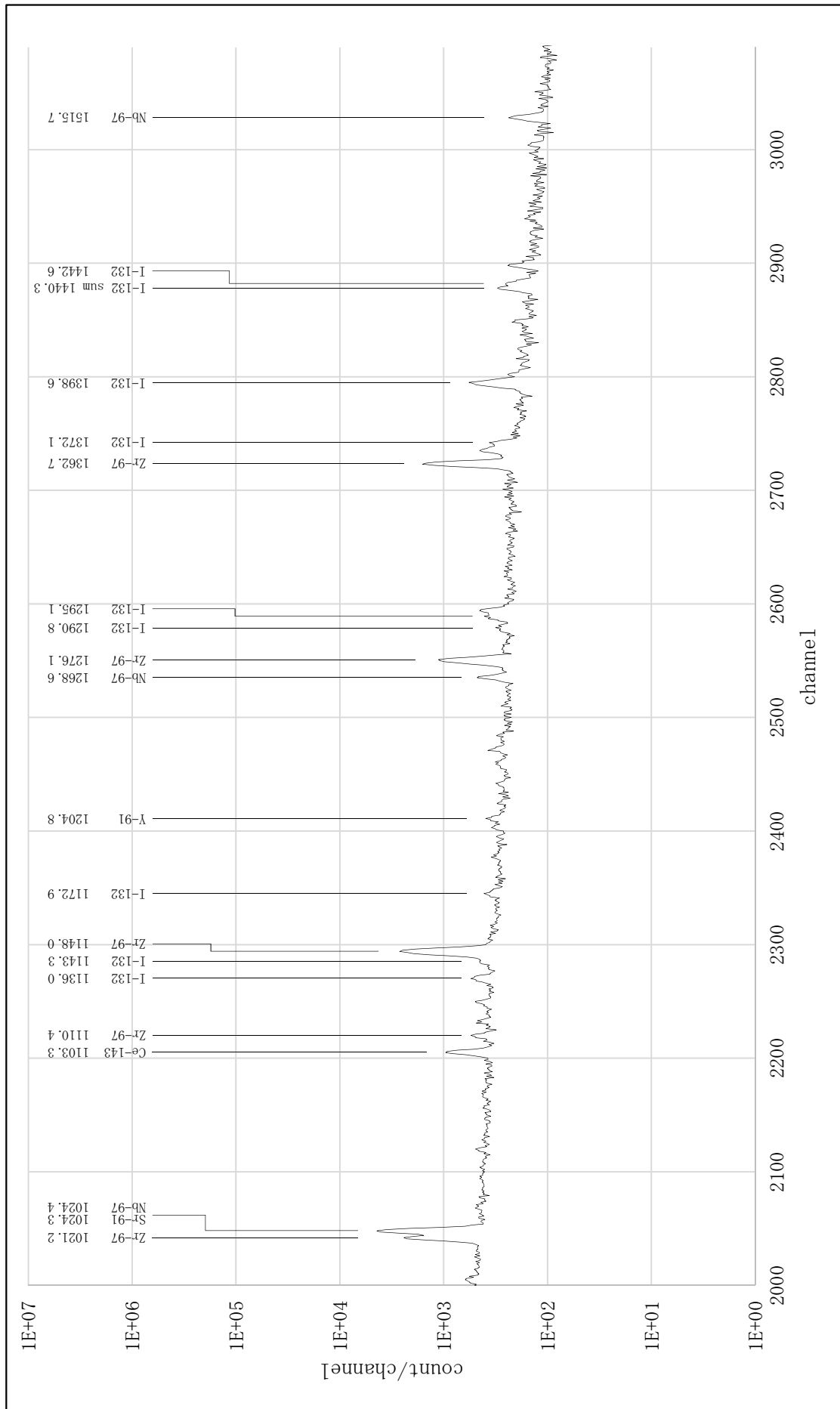
資図 4.12 核実験に係る試料



資図 4. 12. 1 核実験に係る試料 (拡大図 1/4)

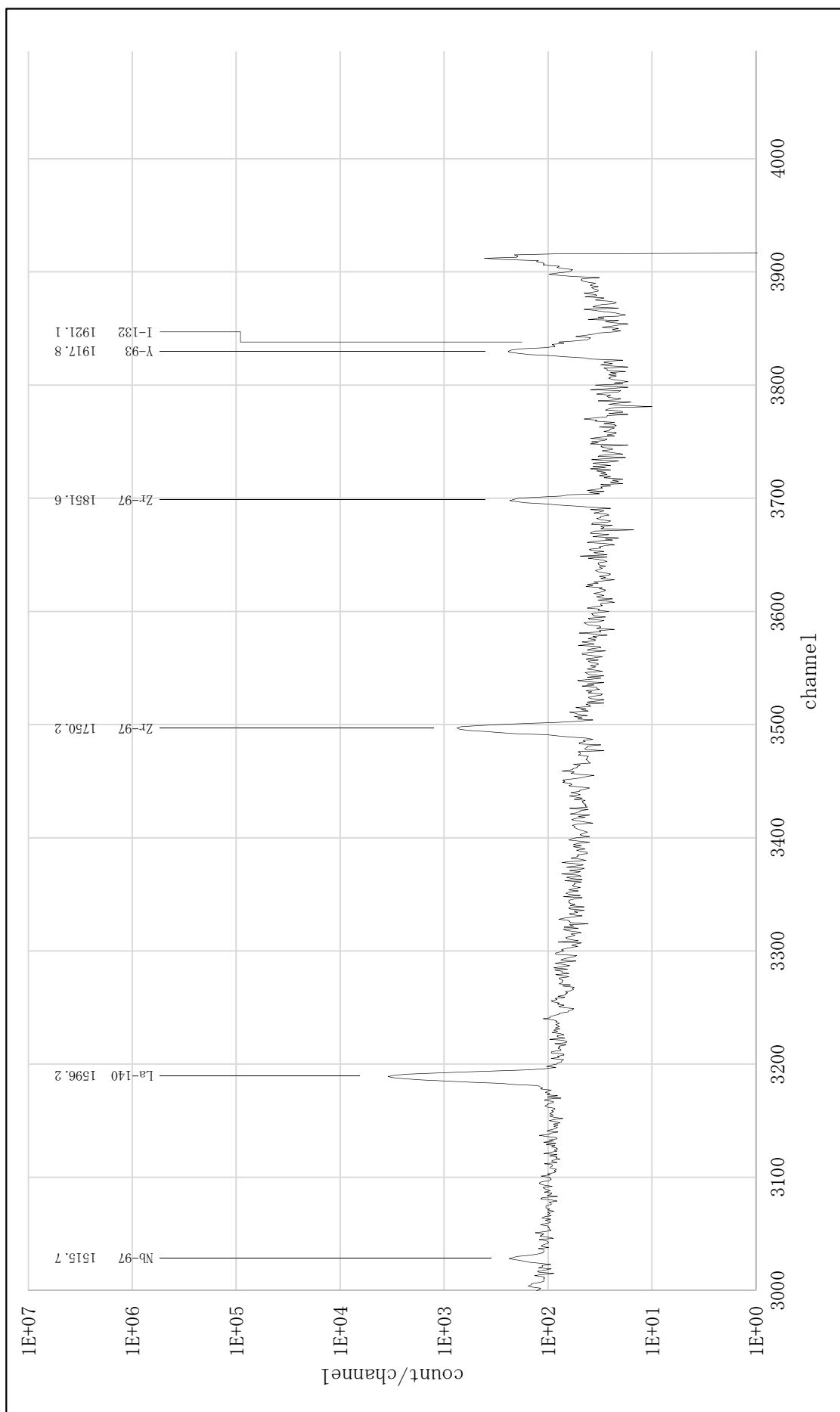


資図 4. 12. 2 核実験に係る試料 (拡大図 2/4)

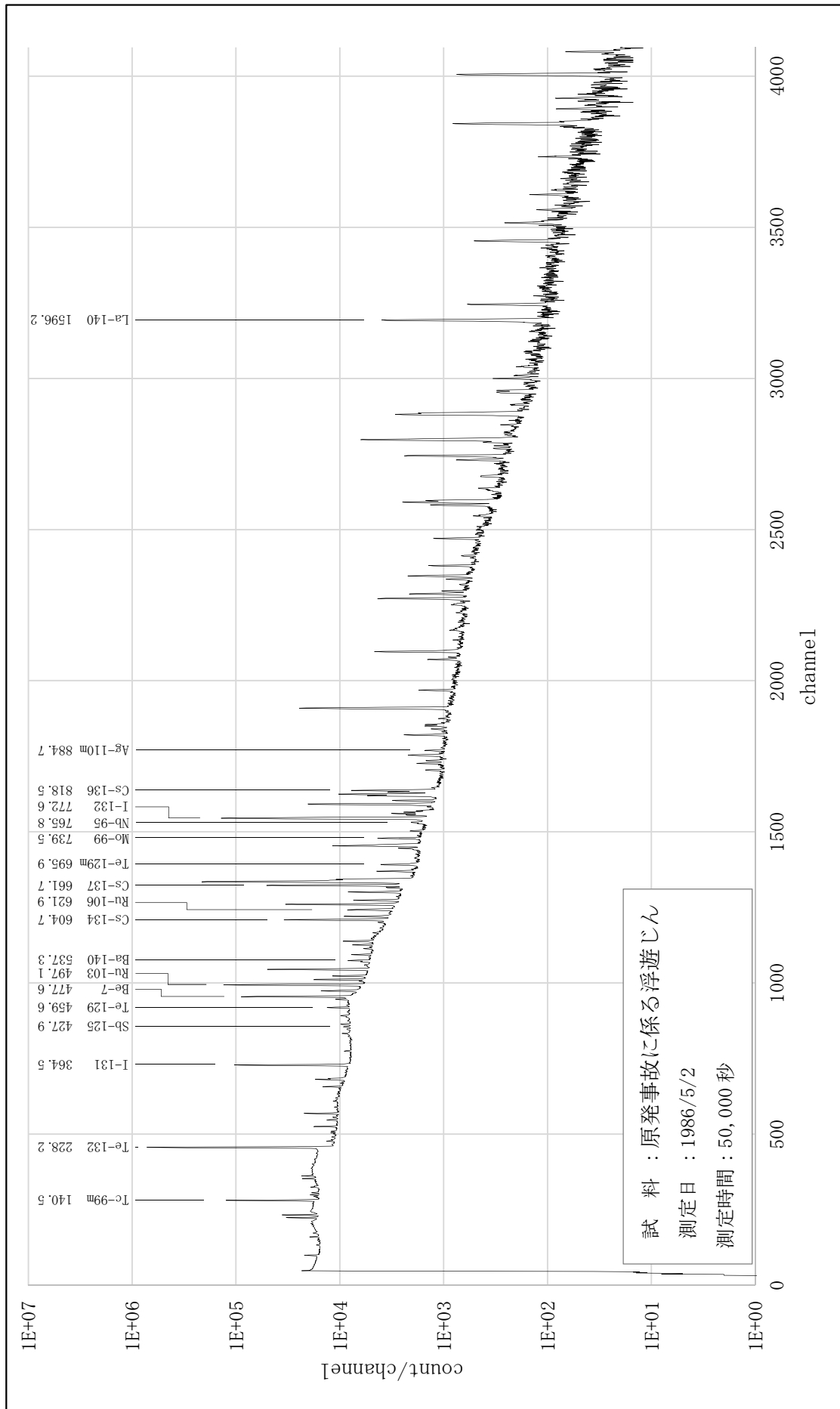


sum : サムピーク

資図 4. 12. 3 核実験に係る試料 (拡大図 3/4)

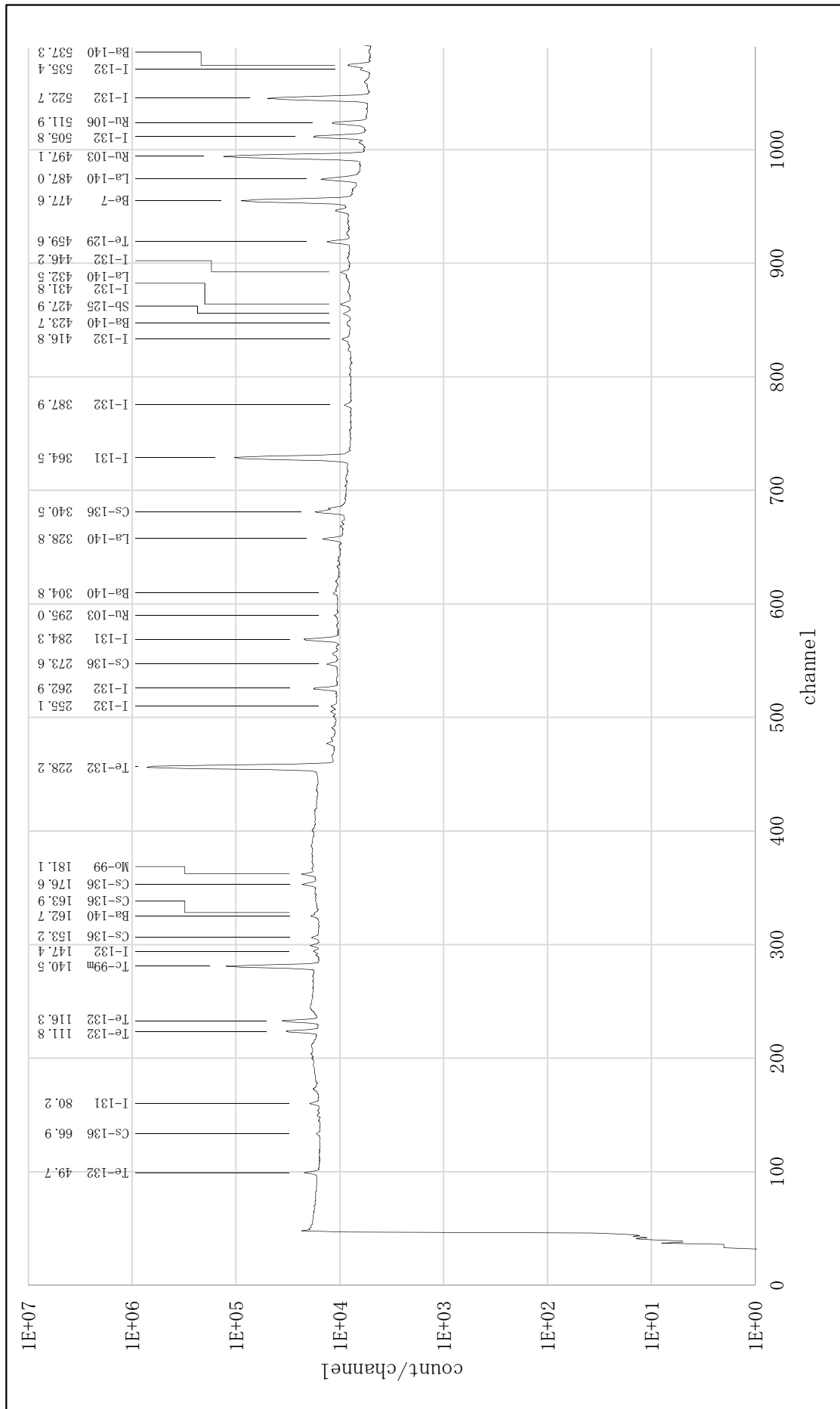


資図 4.12.4 核実験に係る試料 (拡大図 4/4)

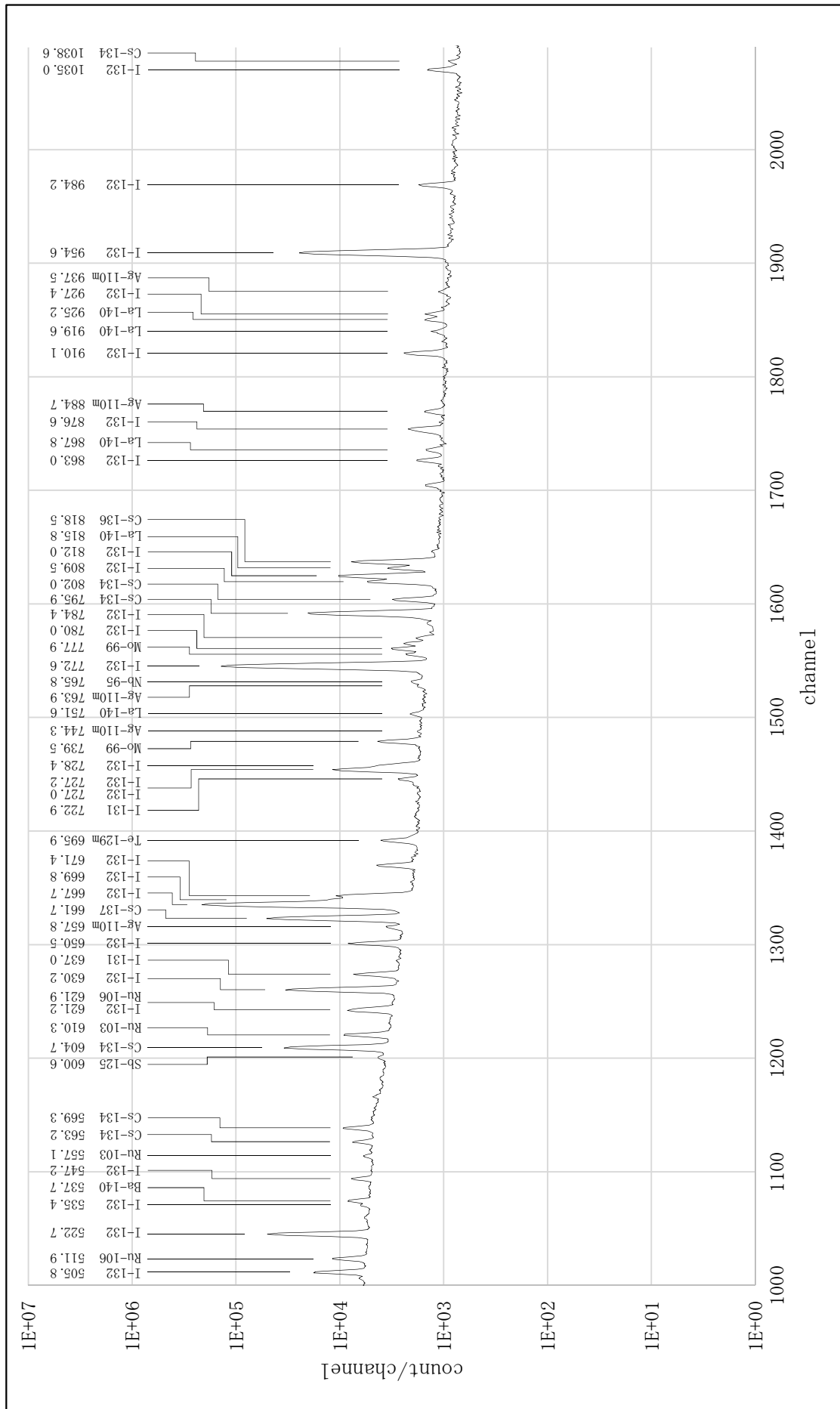


資図 4.13 原発事故に係る浮遊じん

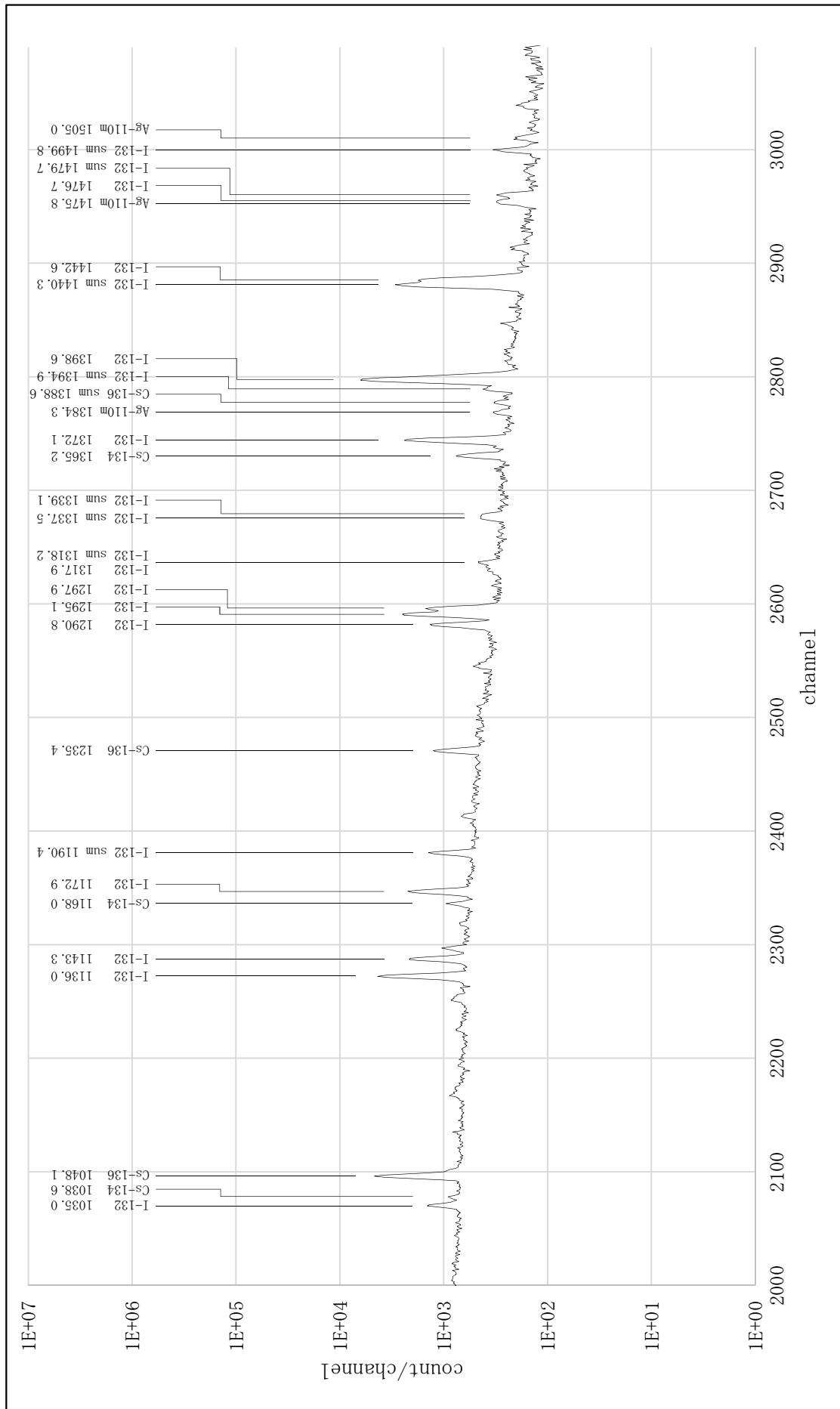




資図 4.13.1 原発事故に係る浮遊じん (拡大図 1/4)

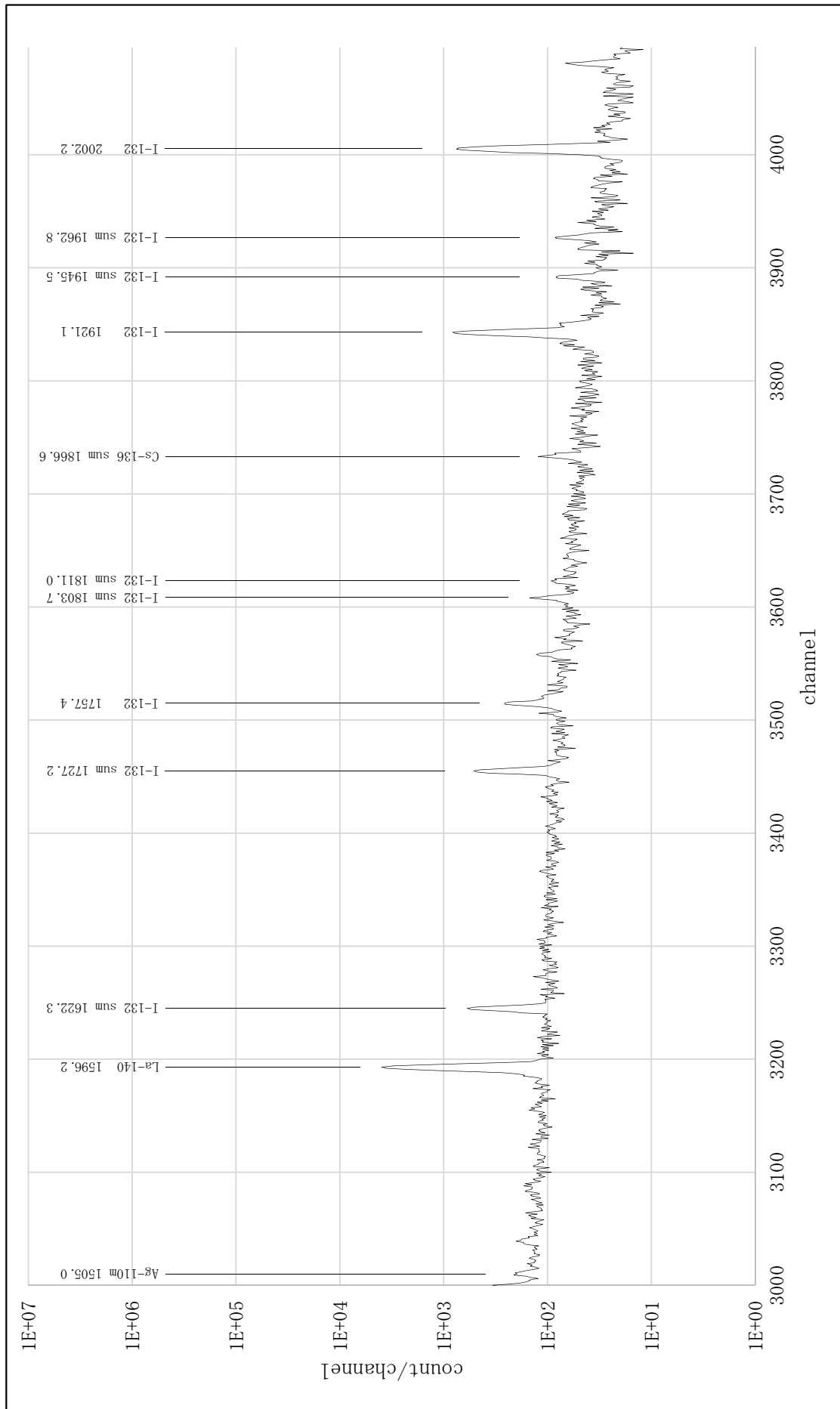


資図 4. 13. 2 原発事故に係る浮遊じん (拡大図 2/4)



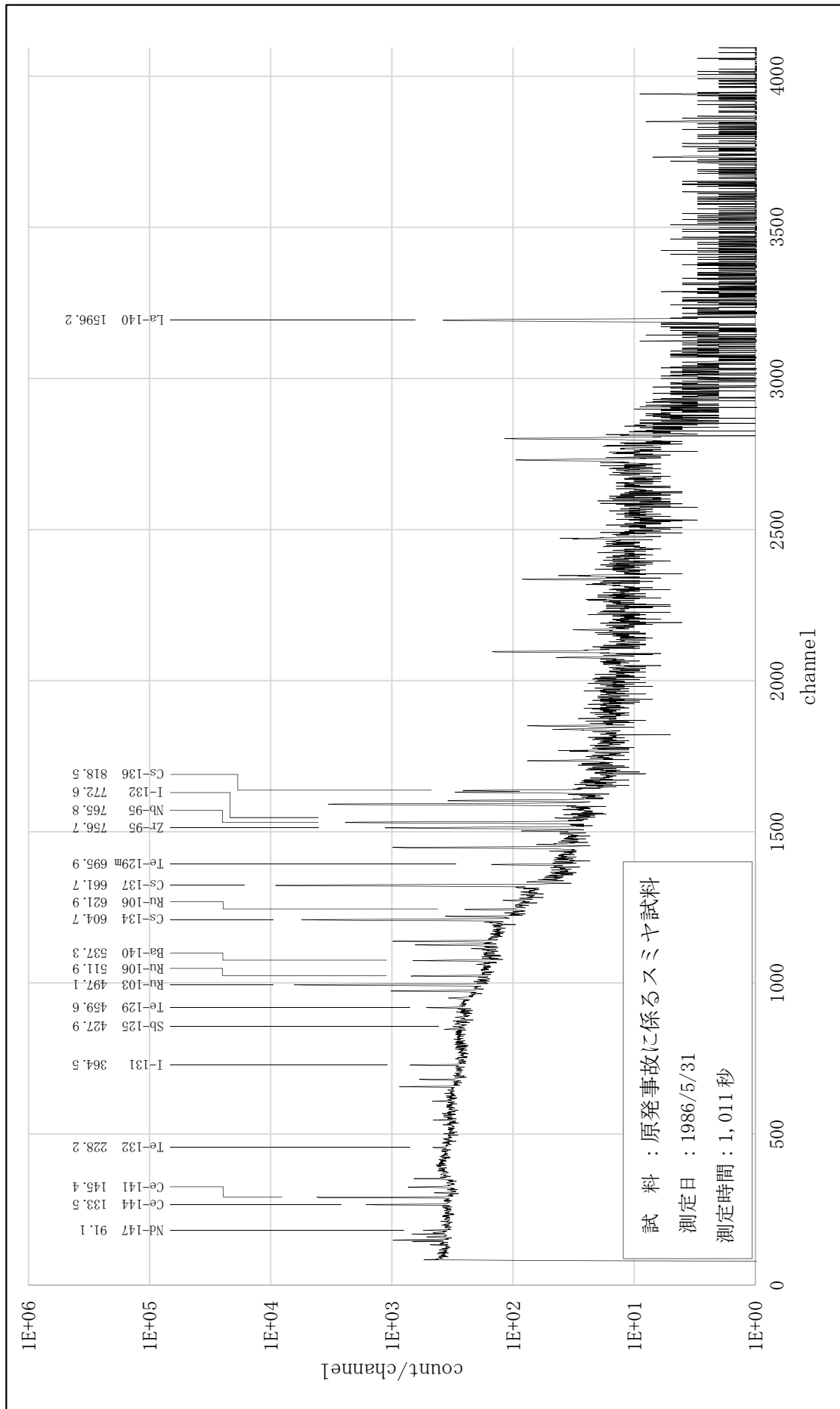
sum : サムピーク

資図 4.13.3 原発事故に係る浮遊じん (拡大図 3/4)

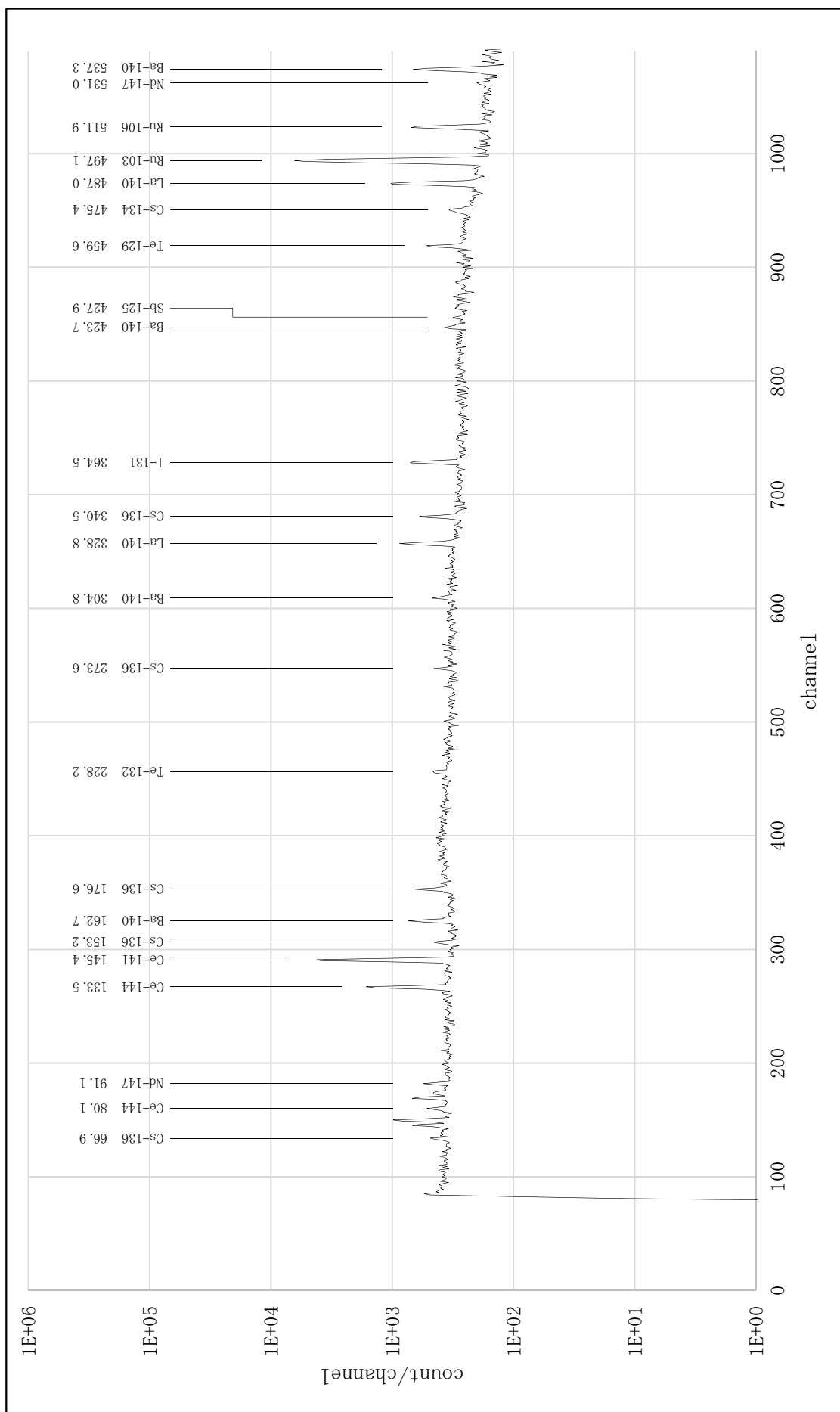


sum : サムピーク

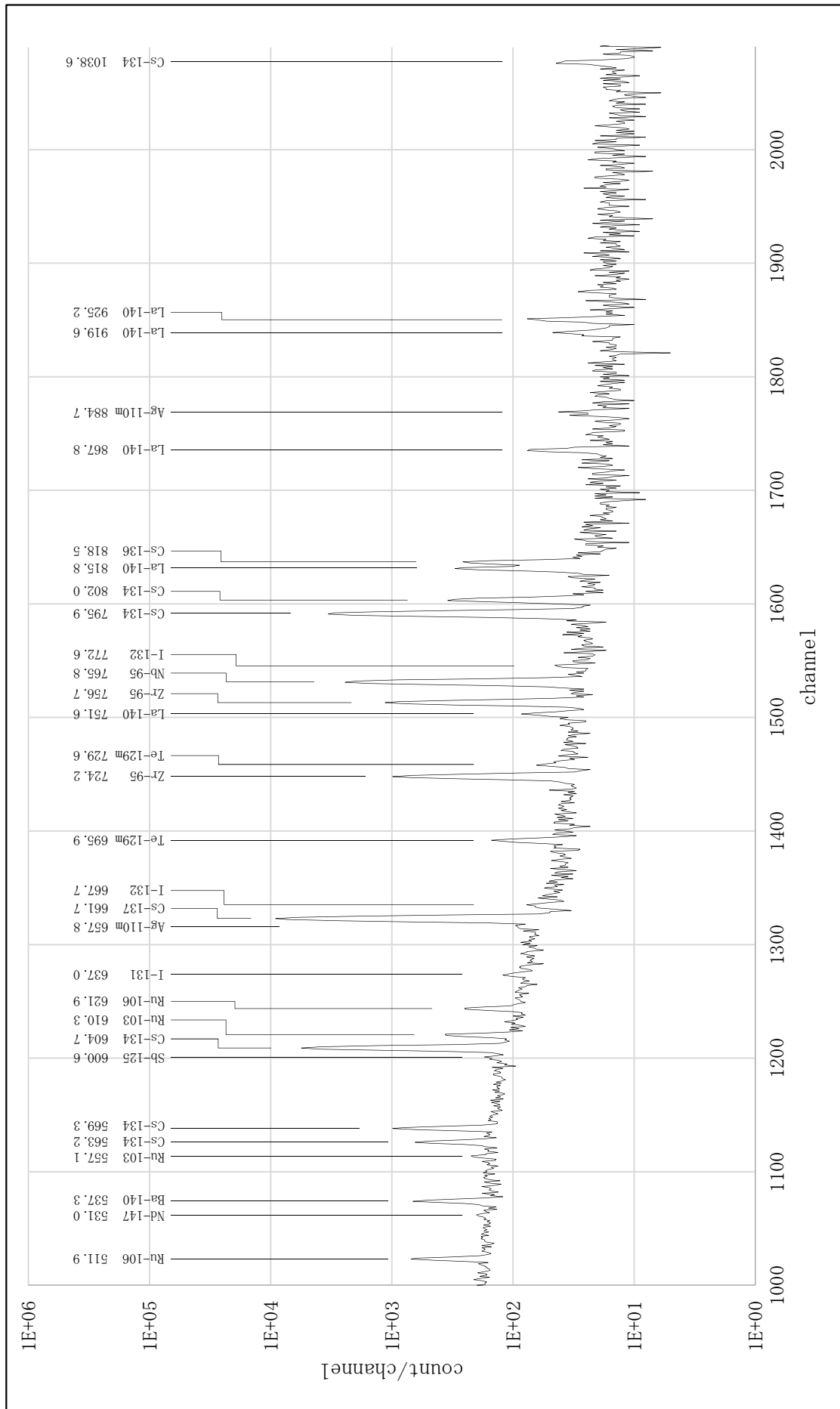
資図 4.13.4 原発事故に係る浮遊じん (拡大図 4/4)



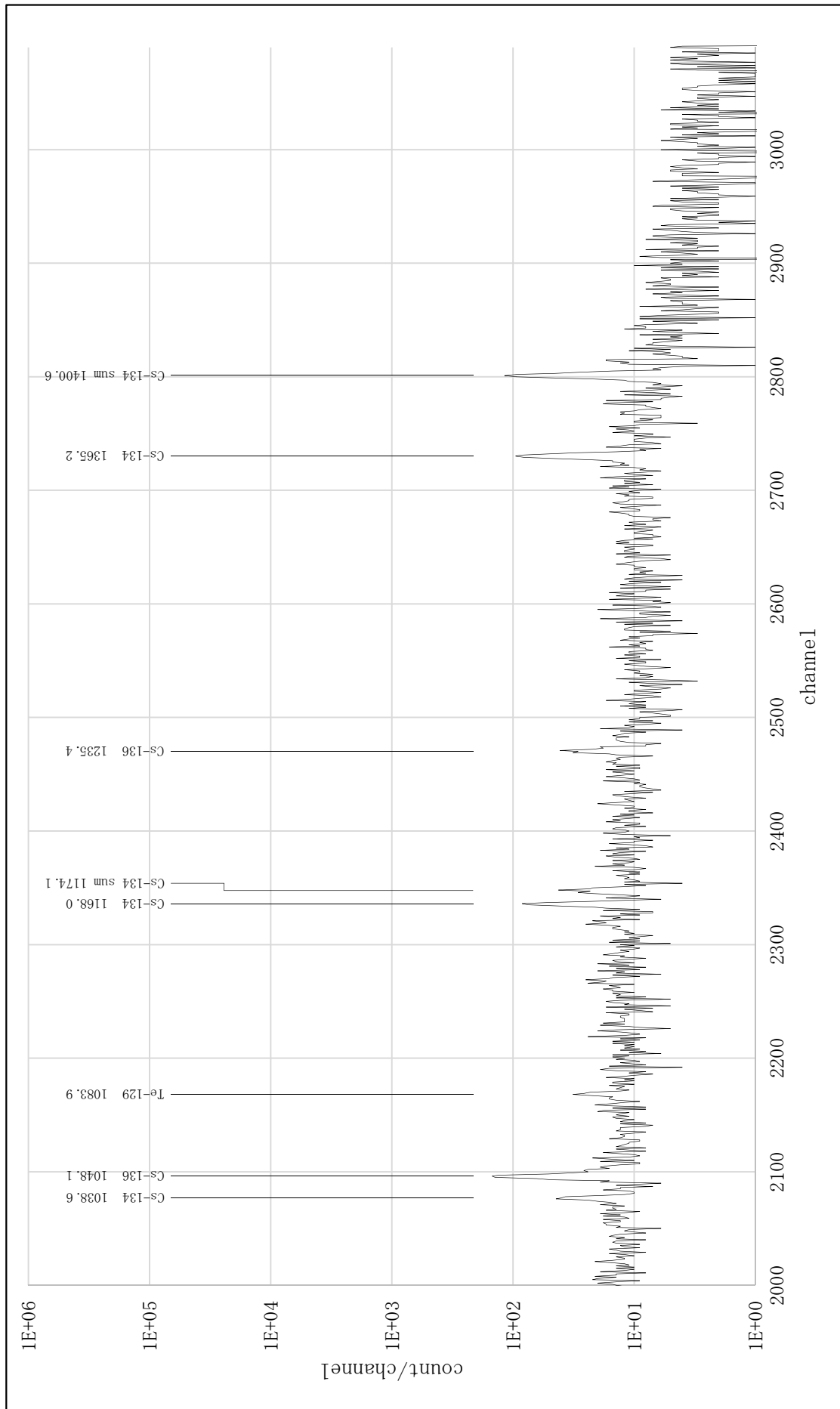
資図 4.14 原発事故に係るスミヤ試料



資図 4.14.1 原発事故に係るスミヤ試料 (拡大図 1/4)



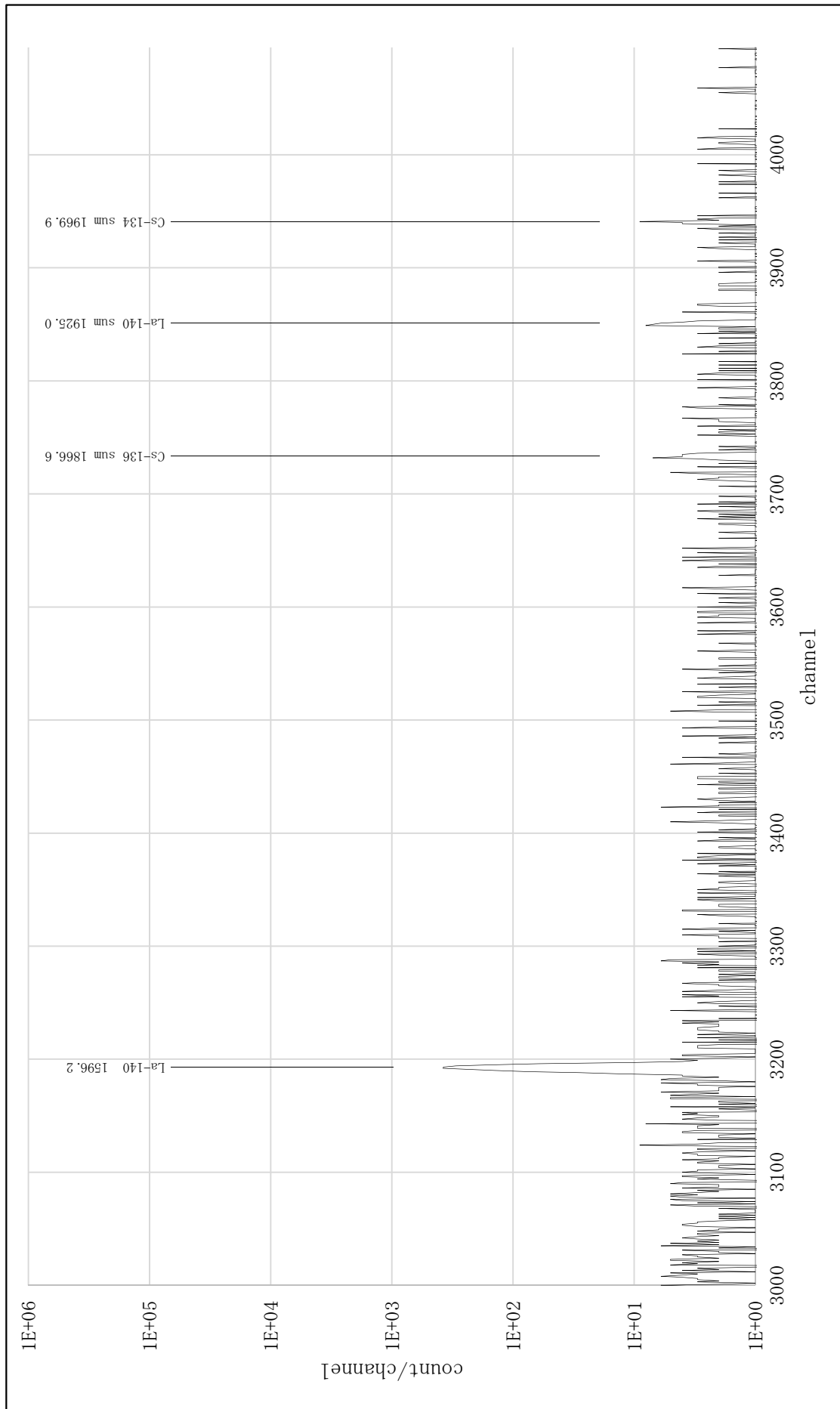
資図 4.14.2 原発事故に係るスミヤ試料 (拡大図 2/4)



sum : サムピーク

資図 4.14.3 原発事故に係るスミヤ試料 (拡大図 3/4)





sum : サムピーク

資図 4.14.4 原発事故に係るスミヤ試料 (拡大図 4/4)

## 資料5 核データ表

核データ集を信頼できる1つに特定し、その核データ集から選定した核種の核データを抽出する。抽出した核データはデータベースや電子ファイルで管理するとデータの抽出、再構成が容易となる。解析プログラムには、所属機関のモニタリング計画等に基づき、人工放射性核種および自然放射性核種を選定し、登録（またはライブラリファイル作成）する（以下、核データ集から抽出したデータを管理するデータベース等を「マスター核データライブラリ」、解析プログラムに登録（またはライブラリファイル作成）し解析に使用する核データを「解析用核データライブラリ」という）。なお、緊急時における解析用ライブラリの作成に関しては「緊急時におけるゲルマニウム半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトル解析法」（No.29）を参照のこと。

### 資5.1 核データの取得

ここでは、基本となる核データ集をENSDF（Evaluated Nuclear Structure Data File）（2019年8月）とし、核種の核データを取得する方法を示す。

#### 資5.1.1 基本とする核データ集の取得

ENSDFは、電子ファイルとして作成された核データ集で、このENSDFを管理しているNNDC（National Nuclear Data Center）から著作権なしでその使用についての自由を認められている。ENSDFの電子ファイルはNNDCからインターネット経由で取得することができる（<http://www.nndc.bnl.gov>）。ファイルは質量数ごとに複数のファイルにまとめられている。

ENSDF\_191004\_099.ZIP（質量数～99までの核データが納められている）

ENSDF\_191004\_199.ZIP（質量数100～199までの核データが納められている）

ENSDF\_191004\_300.ZIP（質量数200～300までの核データが納められている）

※令和元年（2019年）11月時点である。

上記ファイルは、複数の質量数ごとのファイルをZIPというファイル圧縮形式で1つのファイルとしてまとめたものである。このZIP形式に対応した展開（解凍）プログラムを用いることにより圧縮を解いて使用することができる。例えば

ENSDF\_191004\_199.ZIPを展開（解凍）するとensdf.100, …, ensdf.181, …というファイルができるので、質量数181の核種についてはensdf.181のファイルを参照することになる。なお、ここでいう質量数とは、目的とする放射性核種が壊変した後の子孫核種の質量数となるので注意する。また、webページでは核種ごとに検索し、その核データを取得することもできる。

### 資5.2 核データ集からの核種ごとの核データの抽出

ENSDFから個々の核種のデータを抽出するには、NNDCのホームページで配布されている、ENSDFのためのプログラムであるRADLSTを用いるのが簡便である。ENSDFは独自のフォーマットに従ってデータが記載されているが、RADLSTはENSDFの独自フォーマ

ットを表形式に変換したテキストファイルを作成する。RADLSTを用いて変換した質量数ごとのテキストファイルから目的核種の核データを抽出し、マスター核データライブラリに登録する。

### 資 5.3 解析用核データライブラリの作成

解析用核データライブラリには、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等のモニタリング対象核種<sup>1</sup> ならびに  $^7\text{Be}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、ウラン系列核種およびトリウム系列核種等自然放射性核種を登録する。環境試料を対象としたゲルマニウム半導体検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメトリーでは、モニタリングの対象となる人工放射性核種は  $^{137}\text{Cs}$  を除き、ほとんどの場合で不検出である。不検出という結果だけでは測定結果を評価することは困難であるため、自然放射性核種の測定結果を評価項目の一つとする。また、バックグラウンド測定で検出される自然放射性核種のピークは、試料の測定の際に補正する必要がある（資料 1.8 参照）。したがって、解析用核データライブラリには試料に含まれている可能性のある自然放射性核種およびバックグラウンド測定で検出される自然放射性核種を登録する必要がある。また、解析用核データライブラリに核種を追加する場合は、マスター核データライブラリからデータを抽出し、追加する。新たに核データを追加した解析用核データライブラリは、以前のものとは別に保存する。

---

<sup>1</sup>  $^{60}\text{Co}$ 、 $^{134}\text{Cs}$  等はサム効果補正が必要な核種である。解析においてサム効果補正を実施する核種は、解析プログラムのメーカーによって異なるため、使用している解析プログラムがサム効果補正を実施する核種をメーカーに問い合わせ、把握しておく必要がある。なお、国内で入手できる $\gamma$ 線スペクトル解析プログラムが対応している核種としては、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{46}\text{Sc}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{152}\text{Eu}$  がある。

#### 資 5.4 核データ表

資 5.2 によって抽出した核データを資表 5.1～資表 5.4 に示す。なお、資表 5.1～資表 5.4 は以下に従って掲載している。

- ① 核データの出典は ENSDF (2019 年 8 月時点) である。
- ② 半減期の単位は、Y は年、D は日、H は時間、M は分および S は秒を示す。
- ③ 10 の累乗について、1.248E+9 は  $1.248 \times 10^9$  を示す。
- ④ 表中のある値の不確かさはその値の最小桁と重なり、以下に示すとおりとなる。

エネルギー	エネルギー不確かさ	エネルギー±不確かさ
37.2	22	37.2±2.2

エネルギー	エネルギー不確かさ	エネルギー±不確かさ
661.657	3	661.657±0.003

半減期	半減期不確かさ	半減期±不確かさ
1.248E+9	3	$(1.248 \pm 0.003) \times 10^9$

放出率	放出率不確かさ	放出率±不確かさ
0.270	12	0.270±0.012

- ⑤ 資表 5.1 は、 $^{206}\text{Tl}$  および  $^{210}\text{Po}$  を除き放出率 0.01%以上の  $\gamma$  線を掲載した。
- ⑥ 資表 5.2 は、 $^{206}\text{Tl}$  および  $^{210}\text{Po}$  を除き放出率 0.1%以上の  $\gamma$  線のエネルギーを小数点以下 1 桁で示した。
- ⑦ 資表 5.2 において、表中にある [Pb(K $\alpha$ 1)] 等の (K) は X 線を、[ $^{132}\text{I}$  s] 等の s はサムピークを示し、エネルギーのみの記載とした。
- ⑧ 資表 5.1 および資表 5.2 において、表中にある [※ $^{75}\text{Ge}$ ] 等の※は検出器および遮蔽材に起因する放射性核種を示す。
- ⑨ 資表 5.1 および資表 5.2 において、表中にある [† $^{228}\text{Ac}$ ] 等の†は自然放射性核種を示す。
- ⑩ 資表 5.3 および資表 5.4 は校正に用いられる核種の核データである。

また、以下の点に注意が必要である。

注 1  $^{106}\text{Ru}$ (半減期 371.8 D)は純  $\beta$  核種 ( $\beta^-$ 、100%) のため、解析用核データライブラリには放射平衡が成立しているとして  $^{106}\text{Rh}$  の  $\gamma$  線を登録する。

注 2 同一核種中にある同じエネルギーの  $\gamma$  線は異なるエネルギー遷移により発生したものである。

資表 5.1 核種別核データ

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>7</sup> Be	53.22	6	D	477.6035	20	10.44	4
† <sup>40</sup> K	1.248E+9	3	Y	1460.820	5	10.66	17
<sup>51</sup> Cr	27.704	3	D	320.0824	4	9.910	10
<sup>54</sup> Mn	312.20	20	D	834.848	3	99.9760	10
※ <sup>56</sup> Mn	2.5789	1	H	846.7639	19	98.85	3
				1037.8334	24	0.040	5
				1238.2738	22	0.040	4
				1810.726	4	26.9	4
<sup>58</sup> Co	70.86	6	D	810.7594	20	99.450	10
				863.951	6	0.686	10
				1674.725	7	0.517	10
<sup>59</sup> Fe	44.490	9	D	142.6510	20	1.02	5
				192.343	5	3.08	12
				334.80	20	0.270	12
				382.0	4	0.018	3
				1099.245	3	56.5	19
				1291.590	6	43.2	14
<sup>60</sup> Co	1925.28	14	D	1173.228	3	99.85	3
				1332.492	4	99.9826	6
※ <sup>63</sup> Zn	38.47	5	M	365.2	4	0.0115	25
				443.13	20	0.016	5
				449.93	5	0.236	19
				515.0	10	0.021	9
				584.82	15	0.033	5
				624.3	3	0.014	4
				669.62	5	8.2	3
				675.0	6	0.015	4
				742.25	10	0.067	9
				899.0	4	0.012	3
				962.06	4	6.5	4
				1123.72	7	0.111	13
				1130.7	3	0.013	3
				1149.50	16	0.019	3
				1208.8	3	0.012	3
				1327.03	8	0.069	5
				1374.47	13	0.034	3
				1389.66	8	0.043	6
1392.55	8	0.097	16				
1412.08	5	0.75	5				
1547.04	6	0.122	7				
1573.71	20	0.0164	18				
1861.3	3	0.0139	21				
1866.1	3	0.020	3				
<sup>65</sup> Zn	243.93	9	D	1115.5391	20	50.04	10
※ <sup>74</sup> Ga	8.12	12	M	233.2	5	0.16	3
				258.8	5	0.11	3
				302.0	7	0.11	4
				365.0	7	0.09	3
				444.2	5	0.06	3
				471.1	5	0.39	5
				484.9	3	1.06	6
				492.99	6	5.0	3
				497.56	15	0.96	10
				504.7	5	0.10	3
				521.0	5	0.12	3
				540.9	5	0.16	3
				545.5	5	0.064	19
				551.8	5	0.11	3
595.87	4	91.80	20				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
※ $^{74}\text{Ga}$	8. 12	12	M	604. 21	10	2. 85	19
				608. 40	5	14. 4	8
				639. 00	10	0. 83	5
				652. 5	5	0. 06	3
				701. 52	10	0. 77	11
				715. 0	3	0. 22	4
				733. 9	4	0. 110	19
				784. 30	20	0. 67	7
				809. 3	3	0. 29	7
				867. 83	6	8. 7	6
				886. 71	15	0. 34	8
				942. 47	7	1. 27	6
				960. 99	7	1. 62	7
				975. 1	3	0. 27	3
				993. 55	10	0. 64	4
				999. 90	20	0. 13	13
				999. 90	20	0. 13	13
				1024. 3	5	0. 07	7
				1024. 3	5	0. 14	3
				1101. 32	6	5. 42	19
				1131. 52	14	0. 87	6
				1134. 5	3	0. 19	20
				1134. 5	3	0. 19	20
				1160. 33	10	0. 63	5
				1177. 42	18	0. 24	3
				1184. 40	20	0. 28	3
				1204. 22	4	7. 62	19
				1293. 9	5	0. 25	4
				1312. 84	11	0. 62	9
				1332. 1	3	1. 74	10
				1337. 18	10	0. 8	8
				1337. 18	10	0. 8	8
				1357. 90	20	0. 16	16
1417. 6	7	0. 110	10				
1443. 38	7	1. 8	19				
1443. 38	7	1. 8	19				
1471. 70	20	0. 193	19				
1478. 2	3	0. 30	3				
1489. 37	7	2. 88	6				
1510. 2	3	0. 23	3				
1570. 34	10	0. 97	4				
1601. 97	20	0. 29	3				
1617. 2	3	0. 129	19				
1630. 7	10	0. 09	8				
1676. 77	14	0. 73	4				
1744. 90	20	4. 82	10				
1806. 5	3	0. 28	5				
1829. 75	16	1. 90	5				
1940. 63	7	5. 4	3				
1971. 0	4	0. 20	5				
1999. 30	20	0. 40	4				
※ $^{74}\text{As}$	17. 77	2	D	595. 83	8	59	4
				608. 43	8	0. 552	21
				634. 78	8	15. 4	11
				635. 0	20	0. 0357	21
				887. 00	10	0. 0255	15
				993. 46	8	0. 0184	19
※ $^{75}\text{Ge}$	82. 78	4	M	66. 00	20	0. 114	13
				198. 60	10	1. 19	12

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
※ <sup>75</sup> Ge	82.78	4	M	264.60	10	11.4	11
				353.0	5	0.021	3
				419.10	20	0.185	19
				468.80	20	0.223	24
				617.70	20	0.114	13
※ <sup>75m</sup> Ge	47.7	5	S	61.92	10	0.0119	24
				136.01	8	0.020	6
				139.68	3	39.5	4
<sup>85</sup> Kr	10.739	14	Y	513.997	5	0.434	10
<sup>86</sup> Rb	18.642	18	D	1077.0	4	8.64	4
<sup>91</sup> Sr	9.65	6	H	118.50	20	0.074	5
				261.20	20	0.449	17
				272.6	6	0.26	4
				274.70	20	1.04	5
				359.10	10	0.050	4
				379.90	10	0.147	6
				393.00	10	0.050	4
				486.50	20	0.080	5
				506.70	10	0.044	4
				520.8	3	0.034	4
				533.90	10	0.077	5
				593.10	10	0.094	5
				620.10	10	1.78	7
				626.80	10	0.044	4
				631.30	10	0.556	21
				652.3	3	2.98	20
				652.90	20	8.0	5
				653.0	20	0.37	14
				660.90	10	0.101	5
				749.80	10	23.7	8
				761.40	10	0.576	22
				793.60	10	0.064	4
				820.80	20	0.161	7
				823.70	10	0.067	4
				879.70	10	0.188	7
				892.90	10	0.070	4
				901.30	20	0.094	5
				925.80	20	3.85	13
				973.90	10	0.040	4
				992.20	10	0.044	4
				1024.30	10	33.5	11
				1054.60	10	0.224	8
				1140.80	10	0.127	6
1280.9	5	0.93	4				
1305.30	10	0.017	4				
1327.40	10	0.040	4				
1353.50	20	0.023	4				
1413.40	10	0.98	4				
1473.80	10	0.168	7				
1486.40	10	0.013	4				
1545.90	10	0.067	4				
1553.6	3	0.017	4				
1626.8	3	0.013	4				
1651.4	5	0.291	11				
1724.0	5	0.161	7				
<sup>91</sup> Y	58.51	6	D	1204.80	13	0.26	4
<sup>93</sup> Y	10.18	8	H	266.90	10	7.4	12
				273.0	10	0.072	19
				287.0	10	0.076	16
				341.5	5	0.045	7



核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
<sup>93</sup> Y	10.18	8	H	680.20	10	0.67	10
				714.40	20	0.017	4
				947.10	10	2.1	4
				962.30	20	0.0122	24
				987.7	3	0.011	3
				1158.50	20	0.030	6
				1168.61	20	0.011	5
				1183.50	10	0.049	9
				1184.7	6	0.020	5
				1203.30	10	0.109	17
				1237.40	10	0.030	8
				1425.40	10	0.25	4
				1450.50	10	0.33	5
				1470.10	10	0.066	16
				1642.70	10	0.052	9
1651.70	20	0.024	5				
1827.80	20	0.024	5				
1917.80	10	1.57	23				
<sup>95</sup> Zr	64.032	6	D	235.690	20	0.270	20
				724.192	4	44.27	22
				756.725	12	54.38	22
<sup>95</sup> Nb	34.991	6	D	204.1161	17	0.028	9
				561.9		0.015	3
				765.803	6	99.808	7
<sup>97</sup> Zr	16.749	8	H	111.6	3	0.065	10
				182.9	5	0.032	7
				202.5	6	0.029	9
				218.90	20	0.168	19
				254.17	14	1.15	8
				272.40	16	0.23	3
				294.8	4	0.08	3
				297.2	3	0.066	12
				305.1	9	0.028	19
				330.43	19	0.143	15
				355.40	9	2.09	10
				400.42	16	0.245	16
				410.0	10	0.07	5
				473.5	6	0.07	4
				507.64	8	5.03	19
				513.41	18	0.55	5
				558.0	10	0.028	19
				600.6	6	0.09	10
				602.37	14	1.38	8
				690.52	16	0.183	18
				699.2	3	0.101	20
				703.76	5	1.01	5
				707.4	6	0.032	17
				743.36	3	93.09	16
				772	3	0.24	13
				775.0	8	0.1862	4
				804.52	9	0.61	8
				805.6	8	0.2793	5
				829.79	9	0.239	18
				854.89	8	0.357	23
971.34	15	0.278	17				
1018.1	8	0.3724	7				
1021.2	3	1.01	17				
1026.7	8	0.2793	5				
1110.44	19	0.093	19				
1147.97	8	2.62	11				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
<sup>97</sup> Zr	16.749	8	H	1276.07	9	0.94	6
				1361.0	8	0.6516	12
				1362.68	9	1.02	11
				1750.24	22	1.09	11
				1851.61	9	0.31	3
<sup>97</sup> Nb	72.1	7	M	178.0	3	0.049	10
				238.4	3	0.049	10
				549.25	20	0.049	10
				657.94	9	98.23	8
				719.53	19	0.090	9
				857.46	21	0.045	7
				909.55	14	0.040	7
				1024.4	3	1.09	7
				1117.02	18	0.085	8
				1148.6	3	0.049	10
				1268.62	10	0.147	20
				1515.66	19	0.122	13
<sup>99</sup> Mo	65.924	6	H	40.58324	17	1.04	4
				158.782	15	0.0176	8
				162.370	15	0.0120	7
				181.068	8	6.05	12
				366.421	15	1.200	25
				380.13	8	0.0105	9
				411.491	15	0.0150	8
				528.788	15	0.0532	20
				620.03	4	0.0279	14
				621.771	24	0.018	4
				739.500	17	12.20	16
				777.921	20	4.31	9
822.972	15	0.134	3				
960.754	20	0.095	3				
<sup>99m</sup> Tc	6.0072	9	H	140.5110	10	89	4
				142.63	3	0.0222	20
<sup>103</sup> Ru	39.247	3	D	39.760	10	0.0692	12
				53.286	10	0.443	11
				241.875	10	0.0143	3
				294.964	10	0.288	4
				443.810	10	0.339	5
				497.085	10	91.0	13
				557.057	10	0.841	11
				610.333	10	5.76	7
612.09	6	0.105	6				
<sup>106</sup> Rh	30.07	35	S	428.40	20	0.071	3
				434.25	21	0.0202	21
				439.2	3	0.0126	21
				511.861	4	20.4	4
				616.22	9	0.75	9
				621.93	6	9.93	23
				680.25	14	0.0110	7
				715.90	20	0.0100	5
				873.49	5	0.439	11
				1045.6	6	0.0133	17
				1050.41	6	1.56	5
				1062.14	5	0.0320	8
				1114.48	5	0.0118	19
				1128.07	5	0.404	10
				1180.73	8	0.0145	4
1194.54	5	0.0573	12				
1496.33	13	0.0222	8				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{106}\text{Rh}$	30.07	35	S	1562.25	6	0.163	4
				1766.25	5	0.0343	9
				1796.94	9	0.0277	7
				1927.22	9	0.0153	5
				1988.44	8	0.0261	7
$^{108\text{m}}\text{Ag}$	438	9	Y	79.131	3	6.6	5
				433.937	4	90.5	6
				614.276	4	89.8	19
				722.907	10	90.8	19
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249.83	4	D	120.23	3	0.0171	9
				133.333	7	0.0746	16
				219.348	8	0.073	5
				221.078	10	0.0685	10
				229.420	22	0.0120	14
				266.914	12	0.041	4
				365.448	11	0.094	5
				387.075	9	0.0525	9
				396.894	22	0.037	4
				446.812	3	3.70	5
				467.01	4	0.0252	19
				544.56	4	0.018	3
				572.70	10	0.0175	13
				573.0	4	0.0172	10
				603.08	20	0.011	8
				620.3553	17	2.73	8
				626.256	10	0.217	17
				630.62	5	0.033	5
				647.9	4	0.0177	5
				657.7601	11	95.61	10
				666.90	9	0.029	14
				676.59	7	0.143	10
				677.6218	12	10.70	5
				687.0092	18	6.53	3
				706.6761	15	16.69	7
				708.133	20	0.23	5
				744.2756	18	4.77	3
				763.9425	17	22.60	7
				818.0245	18	7.43	4
				884.6782	13	75.0	12
				937.485	3	35.0	3
				997.246	14	0.130	4
				1018.94	4	0.0142	7
				1085.447	14	0.073	4
				1117.48	3	0.0494	9
				1125.709	20	0.0308	14
1163.19	5	0.075	23				
1164.98	7	0.044	3				
1251.06	4	0.027	3				
1300.07	7	0.0191	7				
1334.348	16	0.143	5				
1384.2932	20	25.1	5				
1420.29	10	0.027	4				
1475.7794	23	4.08	5				
1505.0282	20	13.33	16				
1562.2942	18	1.22	3				
1592.77	6	0.0209	8				
1783.49	3	0.0102	5				
1903.53	3	0.0162	7				
$^{113}\text{Ag}$	5.37	5	H	17.70	20	0.042	5
				96.20	20	0.0370	20

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{113}\text{Ag}$	5.37	5	H	133.50	20	0.0660	20
				206.40	20	0.0200	20
				217.20	10	0.0280	20
				258.80	10	1.64	3
				298.60	10	10.00	
				316.30	10	1.343	20
				333.10	10	0.598	9
				339.40	10	0.638	10
				364.40	10	0.140	3
				369.0	10	0.010	5
				374.30	20	0.0250	20
				382.10	10	0.145	3
				392.40	10	0.0200	20
				410.80	10	0.0120	20
				584.00	10	0.21	3
				585.0	10	0.010	5
				611.0	5	0.045	10
				624.00	10	0.0190	10
				672.30	10	0.87	3
				672.30	10	0.030	10
				680.60	10	0.695	16
				734.0	10	0.010	5
				809.90	10	0.0150	20
				816.10	10	0.0110	20
				827.0	10	0.010	5
				878.50	10	0.0520	20
883.60	10	0.282	7				
896.10	10	0.058	10				
988.40	10	0.423	9				
1049.90	10	0.045	3				
1084.50	10	0.016	3				
1126.10	10	0.061	3				
1180.80	10	0.037	3				
1194.60	10	0.378	10				
1479.20	10	0.068	4				
$^{113}\text{Sn}$	115.09	3	D	255.134	10	2.11	8
				391.698	3	64.97	17
$^{124}\text{Sb}$	60.20	3	D	254.49	4	0.0161	10
				336.21	4	0.074	3
				371.00	11	0.038	5
				400.30	6	0.139	7
				444.09	3	0.1889	20
				469.06	7	0.050	3
				481.42	4	0.0237	19
				525.50	21	0.138	4
				530.45	3	0.0421	20
				572.06	6	0.0190	13
				602.7261	23	97.8	4
				632.489	19	0.1046	10
				645.8521	19	7.42	3
				662.42	3	0.029	4
				709.34	5	1.353	13
				713.776	4	2.276	18
				722.782	3	10.76	5
				735.7	7	0.056	6
				735.9	7	0.071	7
				766.32	4	0.01213	20
790.706	7	0.739	6				
816.8	3	0.0729	18				
856.68	4	0.0238	10				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
<sup>124</sup> Sb	60.20	3	D	899.23	3	0.0172	14
				968.195	4	1.882	10
				976.62	5	0.0832	16
				1045.125	4	1.833	12
				1086.70	8	0.0378	18
				1263.45	7	0.0413	18
				1301.14	9	0.0343	10
				1325.504	4	1.580	15
				1355.20	5	1.038	13
				1368.157	5	2.624	14
				1376.090	9	0.483	5
				1385.33	4	0.063	3
				1436.554	7	1.217	9
				1445.11	4	0.330	4
				1488.887	24	0.672	6
				1526.317	24	0.409	5
				1565.7	5	0.014	3
				1579.82	5	0.38	5
				1622.4	4	0.0409	10
1690.971	4	47.57	19				
1720.72	3	0.0951	17				
1918.74	6	0.0545	16				
<sup>125</sup> Sb	2.75856	25	Y	19.80	6	0.0204	10
				35.489	5	4.37	5
				58.43	5	0.012	6
				116.955	11	0.263	4
				172.719	8	0.191	8
				176.3140	20	6.84	7
				178.842	5	0.0337	24
				198.654	11	0.0128	6
				204.138	10	0.317	7
				208.077	5	0.248	5
				209.32	9	0.045	3
				227.891	10	0.1311	23
				321.04	4	0.416	5
				380.452	8	1.517	17
				408.065	10	0.184	3
				427.874	4	29.6	3
				443.555	9	0.306	4
				463.365	4	10.49	11
				600.5970	20	17.65	19
606.713	3	4.98	6				
635.950	3	11.22	15				
671.441	6	1.791	19				
<sup>127</sup> Sb	3.85	5	D	61.10	10	1.44	14
				154.3	5	0.15	8
				252.4	3	8.5	6
				280.4	5	0.66	16
				290.8	5	2.02	16
				293.3	9	0.29	15
				310.0	7	0.26	12
				391.8	5	0.96	9
				412.1	5	3.8	5
				441.0	9	0.7	4
				445.1	5	4.3	3
				451.0	7	0.18	8
				456.0	10	0.11	8
				473.0	4	25.8	16
				502.8	6	0.8	3
				543.3	5	2.9	5

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{127}\text{Sb}$	3.85	5	D	584.2	11	0.33	19
				603.5	5	4.5	3
				624.0	10	0.066	23
				637.8	5	0.44	15
				652.3	9	0.37	8
				667.5	9	0.74	9
				682.3	10	0.6	3
				685.7	5	36.8	20
				698.5	5	3.64	22
				722.2	5	1.88	15
				745.9	5	0.15	8
				763.7	8	0.07	4
				783.7	5	15.1	9
				817.0	6	0.40	19
				820.6	6	0.22	12
				924.4	9	0.52	8
				1141.6	8	0.37	8
1155.2	10	0.040	23				
1290.3	8	0.37	12				
1377.9	9	0.07	4				
$^{127}\text{Te}$	9.35	7	H	57.63	8	0.030	5
				202.90	10	0.058	7
				215.10	10	0.039	5
				360.30	10	0.135	14
				417.90	10	0.99	14
$^{129}\text{Te}$	69.6	3	M	27.81	5	16.3	20
				208.96	5	0.180	13
				250.62	5	0.38	3
				278.43	5	0.57	4
				281.26	5	0.165	12
				342.88	5	0.049	4
				459.60	5	7.7	6
				487.39	5	1.42	11
				531.83	5	0.088	7
				624.34	5	0.097	7
				740.96	5	0.037	3
				802.10	5	0.192	14
				804.60	13	0.022	3
				833.28	5	0.045	4
				982.27	5	0.0160	12
1083.85	5	0.49	4				
1111.64	5	0.191	15				
1260.63	5	0.0112	9				
$^{129m}\text{Te}$	33.6	1	D	27.81	5	0.027	6
				105.50	5	0.14	4
				556.65	5	0.118	24
				671.84	5	0.025	5
				695.88	6	3.0	6
				701.7	3	0.025	5
				729.57	5	0.70	14
				740.96	5	0.027	6
				817.04	5	0.091	18
				844.81	5	0.034	7
1022.43	5	0.017	4				
1050.21	5	0.018	4				
$^{130}\text{I}$	12.36	1	H	158.80	18	0.020	7
				227.55	16	0.012	5
				246.306	22	0.047	5
				280.09	11	0.024	7
				302.49	6	0.013	5

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{130}\text{I}$	12.36	1	H	363.467	15	0.089	20
				417.932	4	34.2	10
				427.94	4	0.083	11
				429.1		0.034	11
				457.758	21	0.237	15
				510.472	9	0.85	3
				536.066	6	99.00	
				539.053	8	1.40	4
				553.916	10	0.66	3
				586.049	8	1.69	6
				603.548	14	0.61	3
				623.0	3	0.017	11
				668.536	9	96	3
				686.060	14	1.07	4
				729.54	22	0.011	8
				739.512	10	82	3
				749.02	14	0.012	5
				800.23	4	0.101	5
				808.29	3	0.236	10
				814.15	11	0.025	5
				821.15	8	0.043	5
				854.99	10	0.035	5
				867.75	22	0.043	6
				877.35	4	0.191	10
				897.04	16	0.021	5
				944.21	8	0.062	14
				967.02	3	0.88	3
				996.80	16	0.028	5
				1060.07	17	0.017	5
				1094.29	20	0.028	8
				1096.48	4	0.552	20
				1122.15	4	0.253	11
				1157.43	3	11.3	4
1222.56	3	0.179	8				
1272.12	3	0.748	25				
1403.90	3	0.345	16				
1417.69	13	0.0119	20				
1424.73	15	0.0208	20				
1487.85	15	0.0119	20				
1500.20	9	0.0396	20				
1545.78	23	0.023	4				
1547.75	23	0.018	4				
1607.29	12	0.045	3				
$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	25	H	36.83	3	0.0116	15
				62.380	20	0.0351	24
				66.95	5	0.022	4
				73.32	5	0.026	3
				78.57	8	0.015	3
				79.19	3	0.123	5
				81.140	20	3.92	10
				86.430	20	0.142	5
				98.30	10	0.013	3
				100.00	10	0.071	4
				101.6	3	0.164	16
				102.060	10	7.66	20
				103.3	3	0.045	8
				105.00	20	0.026	4
				109.40	20	0.034	8
				111.90	20	0.030	8
113.50	10	0.011	4				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{131m}\text{Te}$	33.25	25	H	127.4	4	0.022	8
				130.50	10	0.067	8
				134.860	20	0.68	3
				137.60	20	0.07	4
				149.3	3	0.075	19
				149.710	10	4.9	7
				151.20	20	0.07	3
				155.90	20	0.037	23
				159.66	4	0.123	15
				169.70	20	0.030	8
				172.00	20	0.011	4
				177.20	20	0.063	12
				182.250	20	0.71	19
				182.250	20	0.992	20
				183.11	8	0.149	19
				188.13	5	0.205	12
				189.76	4	0.49	4
				190.52	6	0.112	15
				200.630	20	7.28	17
				203.4	4	0.019	8
				207.50	10	0.037	12
				210.3	3	0.015	4
				211.9	4	0.011	4
				213.98	3	0.411	20
				227.7	4	0.015	12
				230.65	5	0.187	12
				232.30	10	0.090	12
				235.00	20	0.015	12
				240.930	10	7.32	15
				253.170	20	0.627	16
				255.44	7	0.299	13
				261.40	20	0.015	4
				267.2	3	0.015	12
				269.2	3	0.05	6
				269.2	3	0.05	6
				278.560	20	1.72	5
				281.4	3	0.034	19
				283.20	20	0.37	4
				290.30	20	0.075	12
				296.8	3	0.049	8
				302.70	20	0.037	12
				303.90	20	0.037	8
				309.47	6	0.36	4
323.7	4	0.015	8				
331.2	6	0.030	12				
334.270	10	9.22	20				
335.44	7	0.131	23				
342.92	5	0.37	12				
342.92	5	0.04	4				
345.9	3	0.09	3				
351.30	10	0.202	19				
353.5	3	0.07	4				
354.70	10	0.220	12				
357.4	3	0.019	8				
362.3	4	0.07	4				
364.98	10	1.16	15				
375.8	3	0.011	4				
377.8	3	0.019	19				
377.8	3	0.019	19				
379.3	3	0.019	8				



核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{131m}\text{Te}$	33.25	25	H	383.90	7	0.19	3
				403.3	4	0.030	12
				408.2	3	0.06	3
				417.40	20	0.269	20
				432.40	7	0.64	3
				452.30	4	1.5	4
				462.92	5	1.76	5
				468.16	9	0.30	3
				492.65	5	0.07	15
				506.80	20	0.086	15
				524.80	10	0.131	16
				530.70	10	0.101	19
				541.40	10	0.108	23
				546.70	20	0.037	8
				558.10	20	0.022	8
				572.70	20	0.041	23
				579.8	3	0.075	23
				586.30	3	1.90	9
				597.00	20	0.049	19
				602.09	4	0.30	12
				609.40	10	0.134	16
				637.3		0.015	15
				657.20	20	0.030	15
				665.05	3	4.18	11
				681.9	3	0.030	8
				685.90	10	0.149	12
				695.62	8	0.38	3
				702.50	7	0.377	20
				713.10	4	1.38	16
				738.80	20	0.063	12
				744.20	4	1.53	5
				749.0	8	0.015	8
				773.67	3	36.8	8
				774.10	10	0.52	8
				782.49	4	7.51	18
				793.75	3	13.4	3
				801.60	20	0.019	8
				822.78	4	5.90	13
				844.90	20	0.15	4
				848.90	20	0.037	12
				852.21	3	19.9	6
				852.21	3	0.37	19
				856.05	6	0.60	4
865.10	20	0.19	4				
872.3	3	0.097	12				
881.6	3	0.034	12				
910.00	3	3.17	10				
920.62	5	1.16	8				
923.40	20	0.112	23				
930.0	4	0.019	12				
941.27	5	0.75	3				
987.80	10	0.149	12				
995.1	3	0.086	15				
999.20	10	0.164	19				
1003.60	20	0.026	15				
1005.70	20	0.071	15				
1023.60	20	0.060	8				
1035.40	20	0.101	8				
1059.69	4	1.49	5				
1072.30	20	0.022	4				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{131m}\text{Te}$	33.25	25	H	1108.3	3	0.022	8
				1114.1	3	0.011	4
				1125.46	4	11.0	3
				1127.96	6	0.93	8
				1148.89	7	1.5	3
				1148.89	7	0.24	25
				1150.90	9	0.63	8
				1162.70	20	0.026	8
				1165.50	10	0.134	12
				1181.4	4	0.011	8
				1206.60	4	9.41	22
				1211.00	20	0.060	12
				1237.32	5	0.63	4
				1254.2	4	0.026	4
				1315.16	8	0.67	8
				1316.20	20	0.09	4
				1318.30	20	0.037	8
				1333.8	3	0.052	8
				1340.60	10	0.097	12
				1376.8	4	0.041	8
				1389.6	3	0.015	4
				1394.83	9	0.105	8
				1403.6	6	0.011	8
				1496.5	4	0.056	8
1547.75	9	0.067	8				
1646.01	5	1.20	5				
1696.8	5	0.015	4				
1880.1	3	0.060	8				
1887.70	7	1.31	5				
1936.15	9	0.071	8				
1980.3	3	0.030	8				
$^{131}\text{I}$	8.0252	6	D	80.1850	20	2.62	4
				163.930	8	0.0211	5
				177.2140	20	0.269	4
				272.498	17	0.0576	12
				284.305	5	6.12	7
				318.088	16	0.0774	17
				324.65	3	0.0212	25
				325.789	4	0.273	22
				358.40	20	0.016	6
				364.489	5	81.5	8
				404.814	4	0.0546	17
				503.004	4	0.359	4
				636.989	4	7.16	10
				642.719	5	0.217	5
722.911	5	1.77	3				
$^{131m}\text{Xe}$	11.86	4	D	163.930	8	1.95	6
$^{132}\text{Te}$	3.204	13	D	49.720	10	15.0	6
				111.76	8	1.74	8
				116.30	8	1.96	9
				228.16	6	88	4
$^{132}\text{I}$	2.295	13	H	136.7	4	0.04	5
				136.7	4	0.04	5
				147.40	10	0.237	20
				183.6	3	0.138	20
				194.3	5	0.089	
				234.3	6	0.030	10
				241.2	5	0.049	
				250.8	6	0.011	12
250.8	6	0.011	12				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
<sup>132</sup> I	2.295	13	H	255.1	3	0.010	10
				255.10	20	0.237	20
				262.90	10	1.28	10
				278.4	4	0.025	25
				278.4	4	0.025	25
				284.90	10	0.71	7
				296.5	6	0.016	
				306.7	4	0.06	6
				306.7	4	0.06	6
				310.1	4	0.05	6
				310.1	4	0.05	6
				316.7	4	0.128	20
				343.7	4	0.089	20
				355.2	4	0.03	4
				355.2	4	0.03	4
				363.34	5	0.49	10
				376.6	4	0.010	5
				387.9	3	0.17	18
				387.9	3	0.17	18
				387.9	3	0.17	18
				402.6	6	0.023	
				416.8	3	0.47	5
				431.8	3	0.47	5
				445.0	6	0.099	
				446.2	3	0.60	5
				473.6	4	0.17	4
				478.2	4	0.17	4
				488.0	4	0.23	24
				488.0	4	0.23	24
				505.79	3	4.94	20
				522.65	9	16.0	5
				535.4	3	0.51	5
				539.7	4	0.06	7
				539.7	4	0.06	7
				547.20	20	1.14	8
				559.7	4	0.089	20
				572.5	4	0.04	4
				572.5	4	0.04	4
				591.1	6	0.05	5
				591.1	6	0.05	5
				600.0	6	0.08	8
				600.0	6	0.08	8
				609.8	5	0.039	10
620.90	20	0.39	20				
621.2	3	1.58	20				
630.190	20	13.3	4				
642.4	5	0.035					
650.50	20	2.57	20				
659.0	7	0.10	10				
667.7141	20	98.70					
669.80	20	4.6	6				
671.40	20	3.5	10				
684.40	20	0.039	10				
687.8	5	0.039	20				
706.4	7	0.020					
727.0	3	2.2	6				
727.2	3	3.2	6				
728.40	20	1.6	4				
771.7		0.020	20				
772.600	10	75.6	13				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{132}\text{I}$	2.295	13	H	780.00	20	1.18	4
				784.4	4	0.38	4
				791.2	4	0.099	20
				809.50	20	2.6	3
				812.00	20	5.5	4
				831.3	5	0.025	10
				847.9	5	0.017	5
				863.00	20	0.56	5
				866.0	6	0.025	25
				866.0	6	0.025	25
				876.60	20	1.04	4
				886.1	5	0.025	8
				888.7	5	0.021	22
				888.7	5	0.021	22
				904.4	5	0.013	4
				910.10	20	0.93	3
				927.4	3	0.41	4
				947.2	6	0.044	14
				954.55	9	17.6	5
				965.8	5	0.035	8
				984.20	20	0.59	4
				995.8	5	0.030	10
				1002.5	6	0.016	17
				1002.5	6	0.016	17
				1005.4	6	0.016	5
				1009.0	4	0.046	7
				1035.00	20	0.51	5
				1049.6	4	0.046	12
				1081.8	4	0.021	22
				1081.8	4	0.021	22
				1086.2	4	0.079	20
				1096.9	4	0.044	8
				1112.4	4	0.065	15
				1126.5	4	0.03	4
				1126.5	4	0.03	4
				1136.000	20	3.01	14
				1143.30	20	1.35	6
				1147.8	5	0.27	5
				1172.90	20	1.09	7
				1206.7	6	0.017	
				1212.3	4	0.012	3
				1242.6	7	0.012	
				1254.1	4	0.059	7
				1263.6	5	0.027	6
1272.8	4	0.168	20				
1290.80	20	1.13	5				
1295.10	20	1.88	7				
1297.910	20	0.89	7				
1314.0	5	0.059	9				
1317.918	6	0.118	15				
1372.07	13	2.47	10				
1390.7	7	0.015	10				
1398.57	10	7.01	20				
1410.6	3	0.043	7				
1442.56	10	1.40	5				
1456.50	20	0.049	7				
1476.70	20	0.130	9				
1519.60	20	0.079	5				
1542.3	6	0.0158	20				
1592.9	3	0.047	4				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{132}\text{I}$	2.295	13	H	1617.90	20	0.010	5
				1644.0	6	0.013	4
				1661.4	5	0.016	3
				1671.3	4	0.022	4
				1715.4	4	0.055	4
				1720.6	5	0.054	4
				1727.2	4	0.067	6
				1752.3	7	0.025	8
				1757.40	20	0.30	3
				1760.4	6	0.059	20
				1768.5	8	0.025	8
				1778.5	4	0.079	8
				1814.0	5	0.016	4
				1830.1	5	0.028	5
				1879.2	5	0.014	3
				1913.7	5	0.030	10
1921.08	12	1.23	6				
1985.625	6	0.0118	20				
$^{133}\text{I}$	20.83	8	H	150.4		0.030	7
				176.97	7	0.078	18
				233.221	15	0.294	9
				245.95	8	0.035	9
				262.702	6	0.359	12
				267.173	19	0.117	7
				345.43	5	0.104	18
				361.09	5	0.11	4
				372.05	15	0.010	6
				381.59	7	0.045	5
				386.85	5	0.059	5
				417.6		0.154	11
				422.910	12	0.311	11
				438.87	8	0.040	5
				510.530	4	1.83	6
				522.4		0.04	5
				529.872	3	87.0	23
				537.73	10	0.036	7
				556.17	8	0.020	3
				617.974	14	0.544	16
				648.76	6	0.057	13
				670.10	8	0.043	6
				678.7	3	0.022	7
				680.247	11	0.650	20
				706.578	8	1.51	5
				768.382	15	0.460	15
				789.59	6	0.050	4
				820.506	22	0.155	6
				856.278	7	1.24	4
				875.329	5	4.51	13
909.67	3	0.214	9				
911.49	5	0.046	7				
1052.296	18	0.556	17				
1060.07	6	0.138	7				
1087.71	10	0.0122	18				
1236.441	6	1.51	5				
1298.223	5	2.35	7				
1350.38	3	0.150	5				
$^{133}\text{Xe}$	5.2475	5	D	79.6142	12	0.44	19
				80.9979	11	36.9	3
				160.6120	16	0.1066	13
$^{133\text{m}}\text{Xe}$	2.198	13	D	233.221	15	10.12	15

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
<sup>134</sup> Cs	2.0652	4	Y	242.738	8	0.027	3
		4		326.589	13	0.0162	10
				475.3650	20	1.477	7
				563.246	5	8.338	14
				569.331	3	15.373	17
				604.7210	20	97.62	11
				795.864	4	85.46	6
				801.953	4	8.688	16
				1038.610	7	0.990	3
				1167.968	5	1.790	5
1365.185	7	3.017	8				
<sup>135</sup> Xe	9.14	2	H	158.197	18	0.289	14
				200.19	10	0.012	5
				249.794	15	90	3
				358.39	3	0.221	11
				373.13	10	0.015	3
				407.990	20	0.358	17
				608.185	15	2.90	14
				654.432	16	0.0450	24
				731.520	20	0.055	4
				812.63	3	0.070	3
<sup>136</sup> Cs	13.01	5	D	66.881	17	4.79	20
				86.36	3	5.9	7
				109.681	7	0.409	20
				153.246	4	7.7	5
				163.9200	20	4.69	20
				166.576	6	0.63	3
				176.602	4	13.7	3
				187.285	6	0.54	5
				233.5	4	0.080	10
				273.646	8	12.66	20
				302.4	4	0.030	10
				315.5	5	0.020	18
				319.911	8	0.50	7
				340.547	8	46.8	5
				490.00	20	0.080	20
				507.188	10	1.00	5
				733.0	5	0.01994	
				818.514	12	99.70	10
				1048.073	20	80	3
				1235.362	23	20.0	7
1321.6	4	0.050	20				
1538.09	20	0.100	20				
1551.30	20	0.015	5				
<sup>137</sup> Cs	30.08	9	Y	661.657	3	85.10	20
<sup>140</sup> Ba	12.751	4	D	13.846	15	1.22	18
				29.9660	10	14.1	5
				113.51	3	0.0161	13
				118.837	3	0.061	8
				132.6870	10	0.202	6
				162.6600	10	6.22	10
				304.849	3	4.29	7
				423.7220	10	3.10	4
				437.5750	20	1.929	20
				537.261	9	24.39	24
<sup>140</sup> La	1.67858	21	D	64.135	10	0.0143	19
				68.916	6	0.0754	19
				109.422	11	0.219	4
				131.117	8	0.467	10
				173.543	9	0.127	4

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
<sup>140</sup> La	1.67858	21	D	241.93	3	0.414	8
				266.543	12	0.466	8
				306.90	20	0.025	7
				328.762	8	20.3	3
				397.52	5	0.073	5
				432.493	12	2.90	3
				438.5	5	0.039	10
				487.021	12	45.5	6
				618.12	5	0.037	4
				751.637	18	4.33	4
				815.772	19	23.28	20
				867.846	20	5.50	7
				919.550	23	2.66	3
				925.189	21	6.90	7
				950.99	3	0.519	7
				992.9	5	0.013	5
				1045.05	24	0.025	15
				1097.20	23	0.023	5
				1303.5	4	0.042	7
1405.20	17	0.059	7				
1596.21	4	95.4	15				
1877.29	19	0.041	4				
1924.62	13	0.0134	19				
<sup>141</sup> Ce	32.511	13	D	145.4433	14	48.4	3
<sup>143</sup> Ce	33.039	6	H	57.356	7	11.7	4
				139.742	17	0.077	5
				231.5500	20	2.05	5
				293.2660	20	42.8	5
				350.619	3	3.23	4
				371.29	3	0.025	3
				389.640	20	0.0364	18
				432.999	6	0.159	4
				446.02	9	0.015	3
				447.450	20	0.060	3
				490.368	5	2.16	3
				497.810	20	0.045	3
				556.870	10	0.0317	18
				587.200	20	0.267	4
				614.22	3	0.0120	13
				664.571	15	5.69	7
				721.929	13	5.39	7
				791.070	20	0.0133	5
				806.340	20	0.0287	9
				809.980	20	0.0312	9
				880.460	10	1.031	13
937.820	10	0.0261	13				
1002.850	10	0.0753	19				
1031.22	3	0.0201	9				
1046.78	4	0.0120	9				
1060.220	20	0.0364	14				
1103.250	20	0.415	6				
<sup>144</sup> Ce	284.91	5	D	33.568	10	0.200	23
				40.98	10	0.257	16
				53.395	5	0.100	8
				80.120	5	1.36	6
				99.961	15	0.040	5
<sup>144</sup> Pr	17.28	5	M	133.5150	20	11.09	20
<sup>144</sup> Pr	17.28	5	M	696.510	3	1.342	14
				1489.160	5	0.278	5
<sup>147</sup> Nd	10.98	1	D	91.1050	20	28.1	8

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{147}\text{Nd}$	10.98	1	D	117.98	5	0.0160	14
				120.48	5	0.376	9
				196.64	4	0.190	4
				240.50	20	0.043	3
				271.87	6	0.0132	10
				275.374	15	0.910	19
				319.411	18	2.13	5
				398.155	20	0.912	19
				408.52	6	0.0187	14
				410.48	3	0.150	4
				439.895	22	1.28	3
				489.24	3	0.155	4
				531.016	22	13.4	3
				541.83	7	0.019	3
				589.35	4	0.039	3
				594.80	3	0.283	6
				680.52	15	0.0294	15
685.90	4	0.886	18				
$^{152}\text{Eu}$	13.517	14	Y	121.7817	3	28.53	16
				148.00	5	0.0205	11
				212.43	11	0.0207	6
				244.6974	8	7.55	5
				251.633	9	0.0670	19
				271.08	4	0.0715	19
				275.42	4	0.0346	9
				295.9387	17	0.440	5
				315.10	3	0.0399	11
				316.13	13	0.0101	5
				324.83	3	0.0681	19
				329.41	5	0.1213	25
				340.46	10	0.0266	8
				344.2785	12	26.59	21
				351.66	5	0.0106	8
				367.7892	20	0.859	6
				411.1165	12	2.237	13
				416.02	3	0.1088	20
				443.9607	16	2.827	15
				444.01	17	0.298	11
				482.33	5	0.0247	8
				488.6793	20	0.414	4
				493.54	4	0.0303	14
				503.467	9	0.1524	20
				520.24	4	0.0534	17
				523.13	5	0.0153	7
				526.88	5	0.0120	8
				534.25	5	0.0410	11
				556.48	10	0.0177	7
				562.98	14	0.0202	19
				563.986	5	0.494	5
				566.438	6	0.131	4
				586.265	3	0.455	4
				595.61	12	0.032	11
656.489	5	0.1441	23				
671.155	14	0.024	5				
674.64	14	0.169	4				
675.0		0.0213	8				
678.623	5	0.473	4				
686.60	5	0.0203	7				
688.670	5	0.856	7				
696.87	19	0.016	8				



核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{152}\text{Eu}$	13.517	14	Y	712.83	5	0.0955	25
				719.346	7	0.250	8
				719.36	14	0.095	4
				728.04	4	0.0111	4
				764.88	4	0.189	5
				768.96	4	0.082	5
				778.9046	24	12.93	9
				794.78	5	0.0263	16
				805.71	9	0.0152	6
				810.451	5	0.317	3
				839.36	4	0.0177	6
				841.574	5	0.168	3
				867.380	3	4.23	3
				896.59	9	0.0670	22
				901.19	5	0.0854	25
				919.337	4	0.419	5
				926.31	5	0.272	4
				930.59	5	0.0729	19
				958.63	5	0.0197	11
				963.367	7	0.140	7
				964.057	5	14.51	7
				974.09	5	0.0136	8
				990.18	5	0.0314	14
				1005.27	5	0.659	11
				1084.0	10	0.245	8
				1084.38	11	0.0106	8
				1085.837	10	10.11	5
				1089.737	5	1.734	12
				1109.18	5	0.189	7
				1112.076	3	13.67	9
				1170.97	9	0.0372	16
				1206.09	16	0.0130	14
1212.948	11	1.415	9				
1249.94	5	0.187	3				
1261.35	5	0.0335	14				
1292.78	5	0.101	3				
1299.142	8	1.633	11				
1348.10	7	0.0173	8				
1363.78	5	0.0258	6				
1408.013	3	20.87	10				
1457.643	11	0.497	5				
1528.10	4	0.279	4				
$^{154}\text{Eu}$	8.601	10	Y	123.0706	9	40.4	5
				131.56	7	0.0131	5
				188.22	7	0.2400	24
				232.12	7	0.0218	5
				247.9290	7	6.89	7
				269.65	8	0.0115	6
				301.38	7	0.0124	4
				305.2		0.0205	4
				312.32	7	0.0182	4
				322.07	7	0.0619	8
				346.70	7	0.0260	5
				397.07	7	0.0276	7
				401.26	7	0.188	3
				403.49	7	0.0223	18
				444.4925	19	0.547	6
				467.92	7	0.0626	9
				478.24	7	0.2250	23
517.98	7	0.0498	15				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{154}\text{Eu}$	8.601	10	Y	533.03	8	0.0185	11
				534.86	7	0.017	7
				557.53	7	0.269	3
				569.50	7	0.0139	21
				581.97	7	0.893	9
				591.755	3	4.95	5
				598.30	7	0.0105	14
				602.68	7	0.0293	11
				613.24	7	0.0931	12
				625.2557	24	0.316	4
				649.52	7	0.0874	19
				664.74	8	0.0261	11
				669.14	8	0.0160	8
				676.60	7	0.1672	18
				692.4206	18	1.777	19
				715.76	7	0.187	6
				723.3015	22	20.06	20
				756.8021	23	4.52	5
				800.61	8	0.0212	11
				815.51	7	0.511	6
				845.416	7	0.568	12
				850.67	7	0.243	3
				873.1835	23	12.08	12
				880.65	7	0.084	6
				892.775	6	0.521	6
				904.064	3	0.889	10
				924.57	7	0.0649	10
				996.29	7	10.48	10
				1004.76	7	18.01	19
				1047.18	18	0.0613	15
				1118.27	7	0.113	4
				1128.552	7	0.300	4
				1140.702	6	0.237	4
1160.31	7	0.0462	6				
1188.14	7	0.0876	9				
1241.34	7	0.1226	17				
1246.121	4	0.856	11				
1274.429	4	34.8	4				
1289.88	11	0.0210	8				
1291.36	8	0.022	8				
1294.99	8	0.0116	6				
1408.28	7	0.0247	11				
1494.048	4	0.698	8				
1537.81	7	0.0575	12				
1596.481	3	1.797	24				
$^{203}\text{Pb}$	51.92	3	H	279.1952	10	80.9	19
				401.320	3	3.35	11
				680.515	3	0.75	3
† $^{206}\text{Tl}$	4.202	11	M	803.06	3	0.0050	5
$^{207}\text{Bi}$	31.55	4	Y	569.6980	20	97.75	3
				897.77	12	0.128	5
				1063.656	3	74.5	3
				1442.20	20	0.1310	20
				1460.0	15	1.61	6
1770.228	9	6.87	3				
† $^{208}\text{Tl}$	3.053	4	M	211.40	15	0.180	10
				233.36	15	0.310	10
				252.61	10	0.780	20
				277.371	5	6.6	3
485.95	15	0.049	4				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>208</sup> Tl	3.053	4	M	510.77	10	22.60	20
				583.1870	20	85.0	3
				587.7		0.060	20
				650.1	3	0.050	20
				705.2	3	0.022	4
				722.04	12	0.24	4
				748.70	20	0.046	3
				763.13	8	1.79	3
				808.30	20	0.030	7
				821.20	20	0.041	4
				835.90	20	0.076	11
				860.557	4	12.50	10
				883.30	20	0.031	3
				927.60	20	0.125	11
				982.70	20	0.205	8
				1093.90	20	0.430	20
1160.8	3	0.011	3				
1185.2	3	0.017	5				
1282.8	3	0.052	5				
† <sup>210</sup> Pb	22.20	22	Y	46.5390	10	4.25	4
† <sup>210</sup> Po	138.376	2	D	803.06	3	0.00103	0
† <sup>211</sup> Pb	36.1	2	M	65.420	14	0.077	6
				81.00	20	0.045	12
				83.80	10	0.058	9
				88.20	20	0.017	4
				94.3	3	0.012	3
				95.00	20	0.018	3
				97.30	20	0.0116	13
				244.0		0.039	13
				313.59	9	0.031	4
				342.91	4	0.035	6
				362.072	17	0.043	3
				404.853	10	3.78	6
				427.088	10	1.76	5
				478.0	4	0.013	3
				481.1	4	0.026	6
				481.92	12	0.0103	13
				500.4	5	0.012	3
				609.38	4	0.043	7
				676.69	7	0.013	4
				704.64	3	0.462	11
				766.51	3	0.617	17
832.01	3	3.52	6				
951.0		0.022	13				
1014.64	5	0.0173	6				
1080.16	6	0.0123	7				
1109.48	5	0.115	4				
1196.33	5	0.0102	4				
† <sup>211</sup> Bi	2.14	2	M	351.07	5	13.02	12
† <sup>212</sup> Pb	10.64	1	H	115.183	5	0.596	10
				176.68	5	0.052	7
				238.6320	20	43.6	6
				300.087	10	3.30	5
				415.2		0.0131	22
† <sup>212</sup> Bi	60.55	6	M	39.857	4	1.06	9
				288.20	4	0.337	3
				328.03	4	0.125	7
				433.7	5	0.017	4
				452.98	5	0.363	4
473.0	7	0.050	4				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>212</sup> Bi	60.55	6	M	727.330	9	6.67	9
				785.37	8	1.102	13
				893.408	5	0.378	20
				952.120	11	0.17	4
				1073.60	20	0.0160	20
				1078.62	10	0.564	20
				1512.7	3	0.29	4
				1620.50	10	1.47	4
				1679.7	5	0.058	13
				1806.0	5	0.090	20
† <sup>214</sup> Pb	26.8	9	M	53.2284	18	1.075	7
				118.2		0.094	21
				137.5	3	0.053	14
				141.3	6	0.058	18
				170.07	6	0.015	3
				196.19	5	0.067	8
				205.68	9	0.0114	13
				216.47	7	0.0100	23
				241.9950	23	7.251	16
				258.86	3	0.531	4
				274.80	4	0.355	10
				295.2228	18	18.42	4
				298.8		0.026	5
				305.26	3	0.0312	21
				314.33	7	0.078	6
				323.84	4	0.029	3
				351.9321	18	35.60	7
				462.02	6	0.212	5
				470.6	8	0.011	3
				480.432	20	0.337	4
				487.14	6	0.432	5
				511.00	9	0.033	9
				533.660	20	0.181	6
538.42	8	0.020	3				
543.83	7	0.044	4				
580.14	3	0.370	4				
765.97	19	0.053	4				
785.96	8	1.06	3				
839.07	8	0.583	8				
† <sup>214</sup> Bi	19.9	4	M	268.80	20	0.0170	20
				273.80	5	0.128	7
				280.97	4	0.067	7
				304.20	20	0.019	19
				304.20	20	0.019	19
				333.37	5	0.065	4
				334.78	8	0.019	19
				334.78	8	0.019	19
				338.5	6	0.11	4
				348.92	6	0.104	12
				351.9	5	0.070	10
				386.78	5	0.295	5
				388.89	5	0.402	10
				394.05	8	0.0126	9
				396.02	6	0.026	4
				405.720	20	0.169	6
				426.5	5	0.012	4
				452.92	10	0.030	4
				454.790	20	0.292	4
461.08	11	0.051	6				
469.77	4	0.132	5				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>214</sup> Bi	19.9	4	M	474.44	4	0.099	6
				485.92	11	0.022	4
				487.95	13	0.028	9
				494.20	9	0.0104	10
				501.99	14	0.0180	20
				519.90	5	0.0165	17
				524.60	8	0.0168	17
				536.78	4	0.065	6
				542.83	7	0.077	6
				572.78	6	0.078	5
				595.24	7	0.0170	20
				609.320	5	45.49	16
				615.77	5	0.054	7
				617.10	20	0.034	4
				633.10	4	0.056	3
				639.62	8	0.033	3
				649.22	5	0.057	5
				658.70	20	0.0140	20
				660.94	13	0.053	4
				665.447	9	1.531	6
				683.23	5	0.082	5
				697.93	8	0.067	4
				699.82	13	0.016	5
				703.11	4	0.472	9
				704.96	22	0.047	7
				708.87	21	0.0121	12
				710.71	8	0.0740	20
				719.87	3	0.392	8
				723.08	10	0.037	3
				727.0	10	0.036	14
				733.81	7	0.041	3
				740.76	13	0.0430	20
				752.85	3	0.128	7
				768.360	5	4.894	11
				769.7	5	0.030	10
				786.35	14	0.32	4
				788.6	4	0.0130	20
				799.3	3	0.036	7
				806.180	9	1.264	5
				814.96	9	0.039	3
				821.18	3	0.161	8
				826.45	10	0.117	13
				832.36	9	0.0280	20
				840.4	5	0.0100	20
847.16	11	0.024	3				
873.06	18	0.018	3				
878.03	12	0.012	3				
904.31	8	0.076	7				
915.75	13	0.0230	20				
930.20	20	0.026	4				
934.056	6	3.107	10				
934.10	20	0.050	10				
934.5	5	0.010	3				
938.65	16	0.013	4				
939.6	5	0.017	6				
943.33	11	0.0170	20				
961.62	17	0.0101	13				
964.08	3	0.365	10				
965.00	10	0.011	3				
976.18	12	0.0154	21				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>214</sup> Bi	19.9	4	M	989.34	17	0.010	3
				991.49	19	0.0110	20
				1013.4	7	0.013	4
				1021.36	17	0.0150	23
				1032.38	7	0.063	4
				1033.30	20	0.020	3
				1045.70	20	0.0230	20
				1051.96	3	0.313	7
				1062		0.013	8
				1067.39	24	0.025	6
				1069.96	7	0.272	9
				1087		0.015	7
				1103.70	13	0.098	12
				1104.71	13	0.078	4
				1109		0.015	5
				1118.9	5	0.040	10
				1120.294	6	14.92	3
				1130.45	16	0.036	3
				1133.66	3	0.2512	10
				1155.210	8	1.633	6
				1155.6	5	0.016	4
				1167.30	20	0.0120	20
				1173.00	8	0.055	3
				1207.68	3	0.451	10
				1238.122	7	5.834	15
				1279.0	7	0.0130	20
				1280.976	10	1.434	6
				1284.0	10	0.0110	10
				1285.1	5	0.016	3
				1303.75	7	0.107	5
				1316.99	9	0.081	6
				1329.94	16	0.081	6
				1341.49	13	0.021	3
				1371		0.0100	20
				1377.669	8	3.988	11
				1385.310	13	0.793	5
				1401.515	12	1.330	5
				1407.988	11	2.394	7
				1449		0.018	9
				1479.17	9	0.055	4
				1484		0.013	5
				1509.210	10	2.130	10
				1538.53	5	0.398	11
1543.34	5	0.303	10				
1583.204	15	0.705	5				
1594.75	7	0.267	12				
1599.37	5	0.324	12				
1636.36	16	0.0115	13				
1657.07	17	0.048	4				
1661.274	16	1.047	6				
1684.012	20	0.214	5				
1729.595	11	2.878	8				
1764.491	10	15.30	3				
1813.72	13	0.0110	10				
1838.36	4	0.350	10				
1847.429	13	2.025	9				
1873.16	5	0.214	8				
1890.32	9	0.084	8				
1896.05	12	0.149	8				
1898.68	14	0.050	7				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>214</sup> Bi	19.9	4	M	1935.62	16	0.032	3
† <sup>219</sup> Rn	3.96	1	S	130.60	3	0.13	9
				221.5	3	0.030	5
				271.230	10	10.8	7
				293.56	4	0.073	6
				401.810	10	6.6	5
				438.2	6	0.015	16
				517.60	6	0.044	4
				676.66	7	0.0173	24
† <sup>223</sup> Ra	11.43	5	D	10.0	10	0.0139	14
				14.40	10	0.0167	15
				33.6	5	0.10	4
				63.2	5	0.056	16
				104.23	8	0.019	3
				106.78	3	0.0236	15
				110.856	10	0.058	5
				114.70	20	0.010	5
				122.319	10	1.209	23
				136.10	20	0.028	3
				144.235	10	3.27	9
				154.208	10	5.70	17
				158.635	10	0.695	18
				175.65	15	0.019	5
				177.30	10	0.047	5
				179.54	6	0.153	14
				219.0	8	0.014	6
				221.32	24	0.036	6
				247.2	5	0.010	3
				249.30	10	0.039	10
				251.6	3	0.042	14
				255.20	20	0.053	7
				269.463	10	13.9	4
				288.18	3	0.160	5
				293.80	20	0.0667	10
				323.871	10	3.99	9
				328.38	3	0.209	8
				334.01	6	0.101	6
				338.282	10	2.84	7
				342.87	4	0.222	15
				346.8	3	0.181	3
				362.052	17	0.046	3
				362.90	20	0.015	7
				369.5		0.0209	3
371.676	15	0.487	16				
372.90	10	0.0500	8				
373.3		0.0500	8				
376.0	3	0.012	4				
376.10	20	0.013	5				
382.8	3	0.014	5				
387.70	20	0.015	6				
393.5	5	0.011	4				
430.6	3	0.019	6				
432.12	10	0.035	3				
439.3		0.082	14				
445.033	12	1.29	5				
481.6	5	0.021	6				
487.50	20	0.0111	14				
527.611	13	0.071	5				
598.721	24	0.095	5				
609.31	4	0.057	3				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>223</sup> Ra	11.43	5	D	632.0	10	0.031	10
† <sup>224</sup> Ra	3.66	4	D	240.986	6	4.10	5
† <sup>226</sup> Ra	1600	7	Y	186.211	13	3.64	4
† <sup>227</sup> Th	18.68	9	D	6.5	3	0.09	3
				20.25	5	0.24	4
				24.13	5	0.088	10
				27.41	9	0.030	6
				29.860	10	0.076	13
				31.580	10	0.068	12
				40.20	3	0.015	4
				41.93	5	0.028	14
				43.77	5	0.213	23
				43.8	5	0.055	23
				44.22	12	0.053	14
				44.40	5	0.013	9
				48.30	3	0.014	6
				49.82	5	0.43	10
				50.130	10	8.4	9
				50.85	5	0.015	7
				59.6	5	0.010	4
				61.441	20	0.090	13
				62.45	5	0.11	12
				62.45	5	0.11	12
				64.35	10	0.026	5
				68.74	3	0.03	4
				68.74	3	0.03	4
				69.8	3	0.010	4
				72.85	5	0.025	20
				73.63	5	0.014	6
				75.01	5	0.027	11
				77.4	4	0.0103	9
				79.690	20	1.95	18
				93.88	5	1.51	14
				94.97	5	0.019	20
				94.97	5	0.019	20
				96.03	5	0.070	15
				99.58	10	0.026	7
				99.60	20	0.0129	11
				100.27	3	0.084	17
				113.11	5	0.54	5
				113.11	5	0.155	14
				117.20	5	0.199	22
				117.5	5	0.013	4
123.58	10	0.014	6				
134.60	10	0.034	7				
138.40	10	0.014	3				
140.6	3	0.022	16				
141.42	5	0.07	8				
141.42	5	0.07	8				
150.14	20	0.011	4				
164.52	10	0.015	3				
168.36	10	0.015	3				
173.45	3	0.017	3				
175.8	3	0.021	6				
184.65	5	0.036	5				
197.56	10	0.013	4				
200.50	10	0.013	9				
201.64	10	0.024	4				
204.14	10	0.23	4				
204.98	10	0.16	3				



核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>227</sup> Th	18.68	9	D	206.08	5	0.25	4
				210.62	5	1.25	14
				212.70	4	0.079	12
				212.7	3	0.019	6
				218.90	5	0.06	6
				218.90	5	0.06	6
				219.0	3	0.050	13
				234.76	10	0.45	7
				235.960	20	12.9	12
				246.12	10	0.0123	14
				248.10	10	0.025	6
				250.27	8	0.45	6
				252.50	5	0.111	19
				254.63	3	0.71	15
				256.230	20	7.0	7
				262.87	5	0.107	12
				267.05	20	0.010	3
				270.56	20	0.028	10
				272.91	5	0.51	5
				279.80	5	0.054	14
				281.42	5	0.09	10
				281.42	5	0.09	10
				284.24	10	0.040	14
				285.52	10	0.044	13
				286.09	20	1.74	22
				289.59	10	1.9	5
				289.77	10	0.019	5
				292.41	5	0.066	10
				296.50	5	0.44	6
				299.98	3	2.21	20
				300.50	16	0.014	3
				304.500	20	1.15	17
				306.1	3	0.010	4
				308.40	3	0.017	3
				312.69	3	0.52	6
				314.75	10	0.035	3
				314.85	4	0.3	3
				314.85	4	0.3	3
				319.24	5	0.032	7
				324.88	20	0.010	3
329.850	20	2.9	3				
334.370	20	1.14	13				
342.55	4	0.35	10				
346.450	10	0.0120	17				
350.54	7	0.110	21				
352.61	10	0.0101	24				
362.63	10	0.051	5				
379.40	10	0.010	3				
383.51	4	0.025	24				
392.4	5	0.010	3				
† <sup>228</sup> Ac	6.15	2	H	18.40		0.014	4
				56.96	5	0.019	4
				57.766	5	0.47	3
				77.34	3	0.026	5
				99.509	6	1.26	7
				100.41	3	0.093	13
				129.0650	10	2.42	9
				135.54	5	0.018	4
				137.91	5	0.024	5
				141.02	3	0.050	8

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>228</sup> Ac	6.15	2	H	145.849	10	0.158	8
				153.977	10	0.722	21
				168.65	10	0.010	3
				173.964	13	0.035	5
				184.540	20	0.070	8
				191.353	10	0.123	8
				199.407	10	0.315	5
				204.026	10	0.112	15
				209.253	6	3.89	7
				214.85	10	0.029	4
				214.85	5	0.76	11
				223.85	10	0.054	5
				231.42	10	0.025	4
				257.52	10	0.030	3
				263.58	10	0.040	4
				270.2450	20	3.46	6
				278.95	5	0.160	21
				278.95	5	0.031	5
				282.00	3	0.072	19
				321.646	8	0.226	11
				326.04	20	0.033	5
				327.4		0.12	4
				328.000	6	2.95	12
				332.370	4	0.40	4
				338.320	3	11.27	19
				340.96	5	0.369	21
				356.94	10	0.0170	18
				377.99	10	0.025	3
				389.12	15	0.0103	15
				397.94	10	0.027	3
				399.62	10	0.029	3
				409.462	6	1.92	4
				416.30	20	0.0132	21
				419.42	10	0.021	3
				440.44	5	0.121	8
				449.15	5	0.048	5
				452.47	10	0.015	5
				457.17	15	0.0150	23
				463.004	6	4.40	7
				466.40	10	0.029	3
				470.25	20	0.013	3
				471.76	15	0.033	3
474.75	10	0.022	3				
478.33	5	0.209	15				
480.94	20	0.023	5				
490.33	15	0.0111	23				
492.37	10	0.0235	23				
503.823	13	0.182	12				
508.959	17	0.45	5				
515.06	10	0.049	5				
520.151	16	0.067	5				
523.131	16	0.103	8				
540.76	10	0.026	3				
546.47	5	0.201	13				
548.73	15	0.023	3				
555.12	10	0.046	5				
562.500	4	0.87	3				
570.91	10	0.182	24				
572.14	8	0.150	16				
583.41	5	0.111	10				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>228</sup> Ac	6.15	2	H	590.4		0.017	3
				610.64	10	0.023	5
				616.22	3	0.080	5
				620.38	5	0.080	5
				623.27	20	0.011	3
				627.23	20	0.014	3
				629.40	5	0.045	5
				634.18	10	0.0106	21
				640.34	3	0.054	5
				648.84	10	0.022	22
				648.84	10	0.022	22
				651.51	3	0.090	8
				663.82	10	0.028	6
				666.45	10	0.057	6
				672.00	15	0.026	8
				674.2		0.05	6
				674.8		2.1	7
				677.11	10	0.062	5
				684.0		0.019	5
				688.10	5	0.067	5
				688.10	5	0.067	5
				699.08	15	0.037	5
				701.747	14	0.173	10
				707.41	5	0.155	15
				718.48	15	0.019	4
				726.863	15	0.62	8
				737.72	5	0.037	4
				755.315	4	1.00	3
				772.291	5	1.49	3
				774.10	20	0.06000	
				776.56	10	0.019	6
				778.2		0.022	6
				782.142	5	0.485	19
				791.5	3	0.013	3
				791.5	3	0.010	3
				792.8		0.08000	
				794.947	5	4.25	7
				816.71	10	0.030	3
				824.934	23	0.050	5
				830.486	8	0.540	21
				835.710	6	1.61	6
				840.377	7	0.91	4
				870.46	4	0.044	4
873.17	15	0.031	6				
874.44	7	0.047	10				
877.46	10	0.014	3				
887.33	10	0.027	3				
901.23	15	0.016	3				
904.20	4	0.77	3				
911.204	4	25.8	4				
918.97	10	0.027	3				
944.196	14	0.095	8				
947.982	11	0.106	8				
958.61	4	0.28	4				
964.766	10	4.99	9				
968.971	17	15.8	3				
975.96	5	0.050	5				
979.48	10	0.026	3				
987.71	20	0.077	13				
988.63	20	0.077	13				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>228</sup> Ac	6.15	2	H	1016.44	15	0.011	11
				1016.44	15	0.011	11
				1019.86	10	0.021	4
				1033.248	9	0.201	13
				1039.65	15	0.044	9
				1040.92	15	0.044	9
				1053.09	20	0.013	4
				1054.11	20	0.018	5
				1062.55	15	0.010	3
				1065.18	4	0.132	10
				1074.71	15	0.010	3
				1095.679	20	0.129	10
				1103.41	10	0.0150	23
				1110.610	10	0.285	23
				1110.610	10	0.019	10
				1117.63	10	0.054	8
				1142.85	15	0.0103	21
				1153.52	4	0.139	10
				1164.50	8	0.065	5
				1175.31	10	0.024	3
				1217.03	10	0.021	3
				1245.05	20	0.095	18
				1247.08	4	0.50	3
				1250.04	10	0.062	5
				1276.69	10	0.014	3
				1286.27	20	0.050	10
				1287.68	20	0.080	15
				1309.71	20	0.019	6
				1315.34	10	0.015	3
				1347.50	15	0.015	3
				1357.78	15	0.020	4
				1365.70	15	0.014	3
				1374.19	10	0.014	4
				1385.39	10	0.0106	21
				1401.49	10	0.012	3
				1415.66	10	0.021	4
				1430.95	10	0.035	7
				1451.40	15	0.0106	21
				1459.138	15	0.83	8
				1469.71	15	0.020	4
				1480.37	15	0.016	3
				1495.910	20	0.86	4
				1501.57	5	0.46	3
				1529.05	10	0.057	6
1537.89	10	0.047	5				
1548.65	4	0.038	4				
1557.11	4	0.178	13				
1559.85	20	0.020	4				
1573.26	5	0.033	3				
1580.53	3	0.60	4				
1588.20	3	3.22	8				
1625.06	5	0.255	18				
1630.627	10	1.51	4				
1638.281	10	0.47	3				
1666.523	13	0.178	13				
1677.67	3	0.054	5				
1684.01	20	0.015	5				
1686.09	7	0.095	8				
1700.59	20	0.0101	23				
1702.43	5	0.048	5				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>228</sup> Ac	6.15	2	H	1724.21	4	0.029	3
				1738.2	3	0.018	4
				1740.4	3	0.011	3
				1758.11	10	0.035	4
				1823.22	10	0.044	4
				1835.43	10	0.038	4
				1842.13	10	0.042	4
				1870.83	10	0.0243	23
				1887.10	5	0.090	8
				1907.18	20	0.0119	10
				1929.78	20	0.0199	21
				1952.33	15	0.059	5
				1965.24	20	0.0204	18
† <sup>228</sup> Th	1.9125	9	Y	84.373	3	1.19	4
				131.613	4	0.127	4
				166.410	4	0.101	4
				205.93	5	0.0191	8
				215.983	5	0.247	8
† <sup>231</sup> Th	25.52	1	H	9.200		0.0330	15
				10.25		0.0502	23
				17.20		0.23	8
				18.07		0.011	11
				19.10		0.244	12
				25.640	20	14.1	10
				42.86	7	0.059	3
				58.5700	24	0.462	25
				63.86	3	0.023	4
				72.751	3	0.252	14
				81.2280	14	0.90	6
				82.0870	14	0.42	3
				84.2140	13	6.6	4
				89.950	20	1.00	6
				93.02	4	0.047	6
				99.278	3	0.131	9
				102.2700	13	0.436	24
				106.61	3	0.0176	11
				116.820	20	0.0222	17
				124.914	17	0.058	3
				134.030	20	0.0250	14
135.664	11	0.079	5				
145.940	20	0.0317	20				
163.101	5	0.154	9				
174.150	20	0.0178	11				
183.500	20	0.0330	20				
217.94	3	0.0396	20				
† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	11	Y	16.50	10	0.221	9
				19.60		0.35	10
				25.48	6	0.119	14
				27.360	20	10.5	5
				29.970	20	0.097	6
				35.83	3	0.0162	11
				38.200	20	0.145	6
				39.980	20	0.016	4
				44.140	20	0.055	5
				46.340	20	0.186	11
				52.71	3	0.077	5
				54.600	20	0.070	5
				57.19	3	0.0328	23
				63.64	3	0.0445	17
74.15	4	0.0223	9				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	11	Y	77.34	3	0.0572	19
				96.84	3	0.084	3
				100.85	6	0.0228	9
				144.40	8	0.0115	10
				243.08	9	0.0336	24
				246.04	9	0.012	4
				255.78	7	0.1059	20
				260.19	8	0.182	4
				273.15	6	0.0577	13
				277.22	7	0.0679	15
				283.682	16	1.65	3
				286.58	10	0.0104	6
				300.066	10	2.41	5
				302.667	9	0.17	5
				302.667	9	2.3	4
				312.92	5	0.0986	20
				327.14	7	0.0359	9
				330.055	15	1.36	3
				340.71	6	0.177	4
				354.48	5	0.0961	21
357.11	8	0.168	4				
379.35	7	0.0496	12				
407.81	3	0.0355	8				
† <sup>234</sup> Th	24.10	3	D	62.860	20	0.016	3
				63.290	20	3.7	4
				73.920	20	0.0130	15
				83.30	5	0.060	6
				87.02	6	0.015	3
				92.380	10	2.13	21
				92.800	20	2.10	20
				112.81	5	0.210	23
† <sup>234m</sup> Pa	1.159	16	M	73.920	20	0.013	4
		11		258.227	3	0.0764	22
				740.10	8	0.0109	17
				742.813	5	0.1066	23
				766.42	10	0.317	5
				786.28	10	0.0544	9
				921.72	10	0.01278	16
				945.940	20	0.0101	9
				1001.03	10	0.842	9
				1193.73	12	0.01358	17
				1510.21	10	0.01305	21
				1737.75	10	0.0213	3
1831.36	10	0.01742	24				
† <sup>235</sup> U	703.8E+6	5	Y	19.55	5	63	3
				31.60	5	0.017	6
				34.70	10	0.0370	4
				41.4	3	0.030	10
				41.96	15	0.060	10
				51.21	5	0.034	7
				54.25	5	0.015	15
				64.45	5	0.013	12
				72.70	20	0.1200	12
				73.72	5	0.01000	10
				74.94	3	0.051	6
				96.090	20	0.091	12
				109.19	7	1.66	14
				115.45	5	0.030	10
120.35	5	0.0260	3				

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ(keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{235}\text{U}$	703.8E+6	5	Y	136.55	5	0.01200	12
				140.760	20	0.200	20
				143.760	20	10.96	14
				150.930	20	0.090	10
				163.356	3	5.08	7
				182.62	5	0.39	5
				185.715	5	57.0	7
				194.940	10	0.630	12
				198.900	20	0.036	6
				202.120	10	1.080	23
				205.316	10	5.02	6
				215.28	4	0.029	3
				221.386	14	0.118	7
				233.50	3	0.038	4
				240.88	4	0.074	6
				246.830	20	0.055	3
				251.50	10	0.020	20
				275.35	15	0.051	6
				275.49	6	0.0320	4
				279.50	5	0.270	3
291.65	3	0.040	6				
345.92	3	0.040	6				
387.84	3	0.040	6				
$^{239}\text{Np}$	2.356	3	D	4.200		2.600	
				44.660	20	0.130	10
				49.410	20	0.120	20
				57.28		0.036	
				57.30		0.090	
				61.4600	20	1.300	20
				67.860	20	0.10	3
				106.1230	20	25.34	17
				106.47	4	0.049	8
				124.4		0.010	
				166.39	6	0.016	7
				181.70	3	0.082	3
				209.7530	20	3.363	20
				226.380	20	0.259	16
				227.8		0.5100	
				228.1830	10	10.73	9
				254.40	3	0.1092	22
				272.84	3	0.0766	19
				277.5990	10	14.51	8
				285.4600	20	0.794	7
315.880	3	1.600	12				
334.3100	20	2.056	13				
434.7	5	0.013					
$^{241}\text{Am}$	432.6	6	Y	26.34460	20	2.27	13
				32.18		0.0174	5
				33.1960	10	0.126	4
				43.420	3	0.073	8
				55.560	20	0.0181	18
				59.54091	10	35.9	4
				98.970	20	0.0203	5
102.980	20	0.0195	5				

資表 5.2 エネルギー順核データ



$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
4.2	<sup>239</sup> Np	2.356	D	2.600	61.1	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	1.44
9.4	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	1.7	61.5	<sup>239</sup> Np	2.356	D	1.300
13.8	<sup>140</sup> Ba	12.751	D	1.22	62.5	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.11
16.5	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	0.221	62.5	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.11
17.2	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	0.23	62.9	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.207
19.1	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	0.244	63.3	† <sup>234</sup> Th	24.10	D	3.7
19.6	† <sup>235</sup> U	703.8E+6	Y	63	63.8	† <sup>232</sup> Th	14.0E+9	Y	0.263
19.6	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	0.35	63.9	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	23
20.3	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.24	64.4	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.13
20.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.32	64.8	<sup>237</sup> U	6.75	D	1.282
25.5	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	0.119	64.9	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	1.89
25.6	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	14.1	65.7	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	3.01
25.7	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.97	65.8	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	1.15
26.3	<sup>241</sup> Am	432.6	Y	2.27	66.0	※ <sup>75</sup> Ge	82.78	M	0.114
26.3	<sup>237</sup> U	6.75	D	2.43	66.1	<sup>75</sup> Se	119.78	D	1.111
26.5	<sup>155</sup> Eu	4.753	Y	0.316	66.9	<sup>136</sup> Cs	13.01	D	4.79
27.4	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	10.5	67.7	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	42.9
27.5	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	1.94	67.9	<sup>239</sup> Np	2.356	D	0.10
27.8	<sup>129</sup> Te	69.6	M	16.3	69.7	<sup>153</sup> Sm	46.50	H	4.73
30.0	<sup>140</sup> Ba	12.751	D	14.1	69.7	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.47
30.6	<sup>201</sup> Tl	3.0421	D	0.253	71.1	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.39
31.7	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.874	72.0	<sup>187</sup> W	24.000	H	13.55
32.2	<sup>201</sup> Tl	3.0421	D	0.258	72.5	<sup>145</sup> Pr	5.984	H	0.261
33.2	<sup>237</sup> U	6.75	D	0.130	72.7	† <sup>235</sup> U	703.8E+6	Y	0.1200
33.2	<sup>241</sup> Am	432.6	Y	0.126	72.8	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	0.252
33.6	<sup>144</sup> Ce	284.91	D	0.200	72.8	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.60
33.6	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	0.10	72.8	Pb(K $\alpha$ 2)			
35.5	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	4.37	74.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.30
35.5	<sup>125m</sup> Te	57.40	D	7.30	74.3	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	1.11
38.2	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	0.145	74.7	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.98
39.6	<sup>129</sup> I	1.57E+7	Y	7.51	75.0	Pb(K $\alpha$ 1)			
39.9	† <sup>212</sup> Bi	60.55	M	1.06	75.4	<sup>153</sup> Sm	46.50	H	0.19
39.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.146	75.7	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.228
40.6	<sup>99</sup> Mo	65.924	H	1.04	76.2	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.203
41.0	<sup>144</sup> Ce	284.91	D	0.257	76.8	<sup>134</sup> Te	41.8	M	0.274
42.7	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.268	76.9	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.20
43.8	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.213	77.1	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.61
44.7	<sup>239</sup> Np	2.356	D	0.130	77.1	Bi(K $\alpha$ 1)			
45.3	<sup>155</sup> Eu	4.753	Y	1.31	77.4	<sup>197</sup> Hg	64.14	H	18.7
46.3	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	0.186	79.1	<sup>108m</sup> Ag	438	Y	6.6
46.5	† <sup>210</sup> Pb	22.20	Y	4.25	79.2	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.123
47.5	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.177	79.4	<sup>134</sup> Te	41.8	M	20.9
49.4	<sup>239</sup> Np	2.356	D	0.120	79.6	<sup>133</sup> Xe	5.2475	D	0.44
49.7	<sup>132</sup> Te	3.204	D	15.0	79.7	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	1.95
49.8	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.43	80.1	<sup>144</sup> Ce	284.91	D	1.36
50.1	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	8.4	80.2	<sup>131</sup> I	8.0252	D	2.62
51.0	<sup>237</sup> U	6.75	D	0.340	80.3	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.451
51.8	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.76	81.0	<sup>133</sup> Xe	5.2475	D	36.9
53.2	† <sup>214</sup> Pb	26.8	M	1.075	81.1	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	3.92
53.3	<sup>103</sup> Ru	39.247	D	0.443	81.2	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	0.90
53.4	<sup>144</sup> Ce	284.91	D	0.100	81.6	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.26
54.5	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	3.8	82.1	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	0.42
57.4	<sup>143</sup> Ce	33.039	H	11.7	83.4	<sup>153</sup> Sm	46.50	H	0.192
57.8	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.47	84.2	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	6.6
58.5	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	1.42	84.4	† <sup>228</sup> Th	1.9125	Y	1.19
58.6	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	0.462	84.7	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	2.654
58.9	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	1.30	84.9	Pb(K $\beta$ 1)			
59.5	<sup>237</sup> U	6.75	D	34.5	86.1	<sup>155</sup> Eu	4.753	Y	0.154
59.5	<sup>241</sup> Am	432.6	Y	35.9	86.4	<sup>136</sup> Cs	13.01	D	5.9
60.0	<sup>155</sup> Eu	4.753	Y	1.22	86.4	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.142

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
86.5	<sup>155</sup> Eu	4.753	Y	30.7	120.5	<sup>147</sup> Nd	10.98	D	0.376
87.3	Bi (K $\beta$ 1)				121.1	<sup>75</sup> Se	119.78	D	17.20
88.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.06	121.8	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	28.53
89.0	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	8.4	122.3	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.197
89.5	<sup>153</sup> Sm	46.50	H	0.158	122.3	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	1.209
89.7	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	3.26	122.4	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.256
90.0	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	1.00	123.1	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	40.4
91.1	<sup>147</sup> Nd	10.98	D	28.1	126.6	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.111
91.3	<sup>67</sup> Ga	3.2617	D	3.11	129.1	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	2.42
92.2	<sup>82</sup> Br	35.282	H	0.719	129.6	<sup>105m</sup> Rh	40	S	20.00
92.3	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.16	129.8	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	5.68
92.4	† <sup>234</sup> Th	24.10	D	2.13	129.8	<sup>85m</sup> Kr	4.480	H	0.301
92.8	† <sup>234</sup> Th	24.10	D	2.10	130.6	† <sup>219</sup> Rn	3.96	S	0.13
93.3	<sup>67</sup> Ga	3.2617	D	38.81	131.1	<sup>134</sup> Te	41.8	M	0.18
93.9	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	1.51	131.1	<sup>140</sup> La	1.67858	D	0.467
95.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	2.30	131.6	† <sup>228</sup> Th	1.9125	Y	0.127
96.7	<sup>75</sup> Se	119.78	D	3.449	132.7	<sup>140</sup> Ba	12.751	D	0.202
97.0	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	1.45	133.0	<sup>181</sup> Hf	42.39	D	43.3
97.4	<sup>153</sup> Sm	46.50	H	0.772	133.5	<sup>144</sup> Ce	284.91	D	11.09
97.7	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	1.05	134.2	<sup>187</sup> W	24.000	H	10.36
97.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.106	134.6	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	2.5
98.1	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.36	134.9	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.68
99.3	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	0.131	135.3	<sup>201</sup> Tl	3.0421	D	2.565
99.4	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.10	135.4	<sup>134</sup> I	52.5	M	4.3
99.5	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	1.26	136.0	<sup>75</sup> Se	119.78	D	58.5
100.0	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	2.54	136.3	<sup>181</sup> Hf	42.39	D	5.85
100.1	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	14.20	136.4	<sup>192</sup> Ir	73.829	D	0.199
101.4	<sup>134</sup> Te	41.8	M	0.38	136.6	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.12
101.6	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.164	136.9	<sup>181</sup> Hf	42.39	D	0.86
101.9	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	1.28	138.1	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	1.49
102.1	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	7.66	139.0	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.76
102.3	† <sup>231</sup> Th	25.52	H	0.436	139.2	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.51
102.8	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	0.40	139.3	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.50
103.2	<sup>153</sup> Sm	46.50	H	29.25	139.7	※ <sup>75m</sup> Ge	47.7	S	39.5
104.8	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	3.5	140.5	<sup>99m</sup> Tc	6.0072	H	89
105.3	<sup>155</sup> Eu	4.753	Y	21.1	140.8	† <sup>235</sup> U	703.8E+6	Y	0.200
105.5	<sup>129m</sup> Te	33.6	D	0.14	141.1	<sup>201</sup> Tl	3.0421	D	0.28
105.9	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.1422	142.7	<sup>59</sup> Fe	44.490	D	1.02
106.1	<sup>239</sup> Np	2.356	D	25.34	143.2	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.214
109.2	† <sup>235</sup> U	703.8E+6	Y	1.66	143.8	† <sup>235</sup> U	703.8E+6	Y	10.96
109.3	<sup>125m</sup> Te	57.40	D	0.280	144.2	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	3.27
109.4	<sup>140</sup> La	1.67858	D	0.219	145.4	<sup>141</sup> Ce	32.511	D	48.4
109.7	<sup>136</sup> Cs	13.01	D	0.409	145.8	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.158
110.4	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.107	147.4	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.237
111.8	<sup>132</sup> Te	3.204	D	1.74	147.5	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.153
112.5	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.130	149.1	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	1.75
112.5	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.119	149.7	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	4.9
112.8	† <sup>234</sup> Th	24.10	D	0.210	150.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.27
113.1	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.155	150.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.53
113.1	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.54	151.2	<sup>85m</sup> Kr	4.480	H	75.2
113.7	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	1.871	152.0	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.106
114.3	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	19.2	152.4	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	7.02
115.2	† <sup>212</sup> Pb	10.64	H	0.596	152.6	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	0.50
116.3	<sup>132</sup> Te	3.204	D	1.96	153.2	<sup>136</sup> Cs	13.01	D	7.7
116.4	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.444	154.0	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.722
116.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22	154.2	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	5.70
116.9	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.11	154.3	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.15
117.0	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.263	155.9	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	5.9
117.2	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.199	156.2	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.149
118.4	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	0.60	156.4	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.69

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
156.4	$^{182}\text{Ta}$	114.74	D	2.671	185.7	$\dagger$ $^{235}\text{U}$	703.8E+6	Y	57.0
158.2	$^{135}\text{Xe}$	9.14	H	0.289	186.2	$\dagger$ $^{226}\text{Ra}$	1600	Y	3.64
158.6	$\dagger$ $^{223}\text{Ra}$	11.43	D	0.695	186.6	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.180
159.7	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.123	187.3	$^{136}\text{Cs}$	13.01	D	0.54
159.9	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	0.47	188.1	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.205
160.6	$^{133}\text{Xe}$	5.2475	D	0.1066	188.2	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	0.2400
160.8	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.25	188.5	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.77
162.5	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.29	188.6	$^{149}\text{Nd}$	1.728	H	1.79
162.7	$^{140}\text{Ba}$	12.751	D	6.22	189.8	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.49
162.9	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.88	190.3	$^{114\text{m}}\text{In}$	49.51	D	15.56
163.1	$\dagger$ $^{231}\text{Th}$	25.52	H	0.154	190.5	$^{81\text{m}}\text{Kr}$	13.10	S	67.6983
163.4	$\dagger$ $^{235}\text{U}$	703.8E+6	Y	5.08	190.5	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.112
163.5	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.156	191.4	$\dagger$ $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.123
163.6	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	1.55	191.4	$^{197}\text{Hg}$	64.14	H	0.632
163.9	$^{136}\text{Ba}$	0.3084	S	31.25	192.0	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.50
163.9	$^{136}\text{Cs}$	13.01	D	4.69	192.0	$^{149}\text{Nd}$	1.728	H	0.57
163.9	$^{131\text{m}}\text{Xe}$	11.86	D	1.95	192.3	$^{59}\text{Fe}$	44.490	D	3.08
164.4	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.77	193.4	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.47
164.6	$^{237}\text{U}$	6.75	D	1.86	193.9	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.328
165.9	$^{139}\text{Ba}$	82.93	M	23.7	194.7	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	1.67
165.9	$^{201}\text{Tl}$	3.0421	D	0.155	194.9	$\dagger$ $^{235}\text{U}$	703.8E+6	Y	0.630
166.0	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	3.10	196.3	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	26.0
166.4	$\dagger$ $^{228}\text{Th}$	1.9125	Y	0.101	196.6	$^{147}\text{Nd}$	10.98	D	0.190
166.6	$^{136}\text{Cs}$	13.01	D	0.63	198.2	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.13
167.4	$^{201}\text{Tl}$	3.0421	D	10.00	198.4	$^{182}\text{Ta}$	114.74	D	1.465
167.8	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	8.3	198.6	$\times$ $^{75}\text{Ge}$	82.78	M	1.19
168.4	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.92	198.6	$^{75}\text{Se}$	119.78	D	1.496
168.6	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.29	198.9	$^{149}\text{Nd}$	1.728	H	1.39
169.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	4.2	199.2	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.74
171.3	$^{111}\text{In}$	2.8047	D	90.7	199.4	$\dagger$ $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.315
172.7	$^{125}\text{Sb}$	2.75856	Y	0.191	200.6	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	7.28
173.5	$^{140}\text{La}$	1.67858	D	0.127	200.7	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.35
174.2	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.18	201.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.13
176.3	$^{125}\text{Sb}$	2.75856	Y	6.84	201.2	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	8.9
176.5	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.86	201.3	$^{192}\text{Ir}$	73.829	D	0.471
176.6	$^{136}\text{Cs}$	13.01	D	13.7	202.0	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.88
176.9	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.18	202.1	$\dagger$ $^{235}\text{U}$	703.8E+6	Y	1.080
177.2	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	3.8	202.5	$^{90\text{m}}\text{Y}$	3.19	H	97.3
177.2	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.18	204.0	$\dagger$ $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.112
177.2	$^{131}\text{I}$	8.0252	D	0.269	204.1	$^{95\text{m}}\text{Nb}$	3.61	D	2.30
177.3	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.13	204.1	$^{125}\text{Sb}$	2.75856	Y	0.317
177.8	$^{149}\text{Nd}$	1.728	H	0.155	204.1	$\dagger$ $^{227}\text{Th}$	18.68	D	0.23
178.1	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.27	204.2	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.131
178.3	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.19	204.4	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	1.00
179.4	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.10	205.0	$\dagger$ $^{227}\text{Th}$	18.68	D	0.16
179.4	$^{182}\text{Ta}$	114.74	D	3.119	205.3	$\dagger$ $^{235}\text{U}$	703.8E+6	Y	5.02
179.5	$\dagger$ $^{223}\text{Ra}$	11.43	D	0.153	205.8	$^{192}\text{Ir}$	73.829	D	3.31
180.4	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	2.84	206.1	$\dagger$ $^{227}\text{Th}$	18.68	D	0.25
180.9	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	18.3	206.2	$^{187}\text{W}$	24.000	H	0.153
181.1	$^{99}\text{Mo}$	65.924	H	6.05	208.0	$^{237}\text{U}$	6.75	D	21.2
182.3	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.71	208.1	$^{125}\text{Sb}$	2.75856	Y	0.248
182.3	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.992	208.1	$^{149}\text{Nd}$	1.728	H	2.55
182.3	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	65	208.6	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	0.150
182.6	$\dagger$ $^{235}\text{U}$	703.8E+6	Y	0.39	208.8	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	1.12
183.1	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	0.6	209.0	$^{67}\text{Ga}$	3.2617	D	2.460
183.1	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.149	209.0	$^{129}\text{Te}$	69.6	M	0.180
183.6	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.138	209.0	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	1.73
184.6	$^{67}\text{Ga}$	3.2617	D	21.410	209.3	$\dagger$ $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	3.89
184.6	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.13	209.8	$^{239}\text{Np}$	2.356	D	3.363
185.5	$^{149}\text{Nd}$	1.728	H	0.104	210.5	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	22.7

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
210.6	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	1.25	240.1	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	3.8
211.0	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	30.0	240.2	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	3.94
211.3	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	25.9	240.7	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.253
211.4	† <sup>208</sup> Tl	3.053	M	0.180	240.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.27
212.3	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.175	240.9	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	7.32
213.5	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.73	241.0	† <sup>224</sup> Ra	3.66	D	4.10
213.9	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.40	241.6	<sup>92</sup> Sr	2.611	H	2.93
214.0	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.411	241.9	<sup>140</sup> La	1.67858	D	0.414
214.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.18	242.0	† <sup>214</sup> Pb	26.8	M	7.251
214.8	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.00	244.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.27
214.9	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.76	244.5	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.403
215.5	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	27.9	244.7	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	7.55
216.0	† <sup>228</sup> Th	1.9125	Y	0.247	245.4	<sup>111</sup> In	2.8047	D	94.1
217.0	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.23	245.5	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.21
218.9	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	0.168	245.7	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.80
219.1	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.14	246.2	<sup>187</sup> W	24.000	H	0.136
220.5	<sup>135</sup> I	6.58	H	1.75	247.9	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	6.89
220.9	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	1.17	249.7	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	0.60
220.9	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.24	249.8	<sup>135</sup> Xe	9.14	H	90
221.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.19	250.3	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.45
221.4	† <sup>235</sup> U	703.8E+6	Y	0.118	250.6	<sup>129</sup> Te	69.6	M	0.38
221.5	<sup>82</sup> Br	35.282	H	2.28	251.5	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22
222.1	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	7.57	252.4	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	8.5
224.2	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.13	252.5	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.111
225.1	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	0.123	252.6	† <sup>208</sup> Tl	3.053	M	0.780
226.4	<sup>239</sup> Np	2.356	D	0.259	253.2	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.627
226.8	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.163	254.2	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	1.15
227.2	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.34	254.3	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.169
227.3	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.5	254.4	<sup>239</sup> Np	2.356	D	0.1092
227.8	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	1.51	254.6	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.71
227.8	<sup>239</sup> Np	2.356	D	0.5100	254.7	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.197
227.9	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.1311	255.1	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.237
228.2	<sup>132</sup> Te	3.204	D	88	255.1	<sup>113</sup> Sn	115.09	D	2.11
228.2	<sup>239</sup> Np	2.356	D	10.73	255.4	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.299
229.3	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	3.644	255.8	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	0.1059
229.6	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.482	256.2	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	7.0
229.7	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.241	257.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.35
230.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22	258.0	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	3.9
230.2	<sup>84</sup> Br	31.76	M	0.30	258.1	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.376
230.7	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.187	258.1	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.56
231.4	<sup>115</sup> Cd	53.46	H	0.740	258.8	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	1.64
231.6	<sup>143</sup> Ce	33.039	H	2.05	258.8	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.11
232.4	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	1.03	258.9	† <sup>214</sup> Pb	26.8	M	0.531
233.2	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.16	259.8	<sup>134</sup> Te	41.8	M	0.44
233.2	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.294	260.2	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	0.182
233.2	<sup>133m</sup> Xe	2.198	D	10.12	260.9	<sup>115</sup> Cd	53.46	H	1.94
233.4	† <sup>208</sup> Tl	3.053	M	0.310	261.2	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	0.449
234.8	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.45	261.6	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	6.3
235.0	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	0.30	262.7	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.359
235.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.13	262.8	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	6.57
235.5	<sup>134</sup> I	52.5	M	2.13	262.9	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.107
235.7	<sup>95</sup> Zr	64.032	D	0.270	262.9	<sup>132</sup> I	2.295	H	1.28
235.7	<sup>95m</sup> Nb	3.61	D	24.8	264.1	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	3.612
236.0	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	12.9	264.3	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.184
236.6	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.160	264.5	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	53.3
236.7	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.19	264.6	※ <sup>75</sup> Ge	82.78	M	11.4
237.1	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.52	264.7	<sup>75</sup> Se	119.78	D	58.9
238.6	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.89	266.5	<sup>140</sup> La	1.67858	D	0.466
238.6	† <sup>212</sup> Pb	10.64	H	43.6	266.9	<sup>93</sup> Y	10.18	H	7.4
239.1	<sup>187</sup> W	24.000	H	0.100	267.2	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.117

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
267.5	<sup>237</sup> U	6.75	D	0.712	290.8	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	2.02
267.7	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	6.0	292.1	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.64
268.1	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.3	292.1	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.10
268.5	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.214	293.3	<sup>143</sup> Ce	33.039	H	42.8
269.5	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	13.9	293.3	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.29
270.2	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	10.7	294.8	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.57
270.2	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	3.46	294.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.18
270.6	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	0.11	295.0	<sup>103</sup> Ru	39.247	D	0.288
271.2	† <sup>219</sup> Rn	3.96	S	10.8	295.2	† <sup>214</sup> Pb	26.8	M	18.42
272.4	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	0.23	295.3	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.828
272.6	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	0.26	295.7	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	1.6
272.9	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.51	295.9	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.440
273.2	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.18	296.0	<sup>192</sup> Ir	73.829	D	28.71
273.3	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	27.9	296.5	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.44
273.5	<sup>82</sup> Br	35.282	H	0.803	298.6	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	10.00
273.6	<sup>136</sup> Cs	13.01	D	12.66	299.5	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.45
273.8	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.128	300.0	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	2.21
274.3	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	1.2	300.1	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	2.41
274.7	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	1.04	300.1	† <sup>212</sup> Pb	10.64	H	3.30
274.8	† <sup>214</sup> Pb	26.8	M	0.355	300.2	<sup>67</sup> Ga	3.2617	D	16.64
275.2	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	6.8	301.1	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.376
275.4	<sup>147</sup> Nd	10.98	D	0.910	301.3	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	2.4
275.4	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.65	302.0	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.11
276.0	<sup>81</sup> Kr	2.29E5	Y	0.298	302.7	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	2.3
277.0	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.342	302.7	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	0.17
277.4	† <sup>208</sup> Tl	3.053	M	6.6	303.3	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	5.8
277.6	<sup>239</sup> Np	2.356	D	14.51	303.9	<sup>75</sup> Se	119.78	D	1.315
278.0	<sup>134</sup> Te	41.8	M	21.2	304.5	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	1.15
278.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.44	304.8	<sup>140</sup> Ba	12.751	D	4.29
278.3	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	0.60	304.9	<sup>85m</sup> Kr	4.480	H	14.0
278.4	<sup>129</sup> Te	69.6	M	0.57	306.1	<sup>105</sup> Rh	35.36	H	5.1
278.6	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	1.72	306.7	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.239
278.8	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.144	307.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22
279.0	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.160	308.5	<sup>192</sup> Ir	73.829	D	29.70
279.2	<sup>203</sup> Pb	51.92	H	80.9	309.5	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.36
279.5	† <sup>235</sup> U	703.8E+6	Y	0.270	310.0	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.26
279.5	<sup>75</sup> Se	119.78	D	25.02	310.3	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.50
279.8	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.11	311.0	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.510
280.1	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.232	311.7	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.107
280.1	<sup>105</sup> Rh	35.36	H	0.166	312.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.77
280.4	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.66	312.6	<sup>42</sup> K	12.355	H	0.336
281.3	<sup>129</sup> Te	69.6	M	0.165	312.7	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.52
282.5	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.62	314.1	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	61
283.2	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.37	314.2	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.31
283.3	<sup>192</sup> Ir	73.829	D	0.266	314.4	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.123
283.7	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	1.65	314.9	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.3
284.3	<sup>131</sup> I	8.0252	D	6.12	314.9	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.3
284.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.18	315.9	<sup>239</sup> Np	2.356	D	1.600
284.9	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.71	316.3	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	1.343
285.5	<sup>239</sup> Np	2.356	D	0.794	316.4	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	11.1
285.5	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	3.5	316.5	<sup>192</sup> Ir	73.829	D	82.86
286.0	<sup>149</sup> Pm	53.08	H	3.10	316.7	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.128
286.1	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	1.74	317.7	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	3.0
288.2	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	0.160	318.4	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.227
288.2	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.69	318.7	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	2.9
288.2	† <sup>212</sup> Bi	60.55	M	0.337	318.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.18
288.5	<sup>135</sup> I	6.58	H	3.10	318.9	<sup>105</sup> Rh	35.36	H	19.1
289.6	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	1.9	319.4	<sup>147</sup> Nd	10.98	D	2.13
290.3	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.304	319.8	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.46
290.8	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.83	319.9	<sup>136</sup> Cs	13.01	D	0.50

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
320.1	<sup>51</sup> Cr	27.704	D	9.910	344.5	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	17.9
321.0	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.416	344.9	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	2.12
321.6	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.226	345.4	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.104
322.3	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	3.0	345.6	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.18
323.8	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	1.2	345.9	<sup>181</sup> Hf	42.39	D	15.12
323.9	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	3.99	346.8	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	0.181
323.9	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	1.22	347.3	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.53
324.9	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.290	347.8	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.161
325.3	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.13	348.9	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.104
325.8	<sup>131</sup> I	8.0252	D	0.273	349.2	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	1.38
325.8	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.106	349.8	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.142
326.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22	350.0	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	0.289
326.1	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	1.06	350.2	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	1.02
326.2	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	1.2	350.5	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.110
326.6	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	4.56	350.6	<sup>143</sup> Ce	33.039	H	3.23
327.4	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.12	351.0	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	0.26
328.0	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	2.95	351.1	† <sup>211</sup> Bi	2.14	M	13.02
328.0	† <sup>212</sup> Bi	60.55	M	0.125	351.1	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.42
328.4	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	0.209	351.1	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.162
328.8	<sup>140</sup> La	1.67858	D	20.3	351.3	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.202
329.4	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.1213	351.6	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	1.17
329.8	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.221	351.9	† <sup>214</sup> Pb	26.8	M	35.60
329.9	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	2.9	353.3	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.106
330.1	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	1.36	354.3	<sup>78</sup> As	90.7	M	1.9
330.4	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	0.143	354.7	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.220
330.9	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	0.67	354.7	<sup>84</sup> Br	31.76	M	0.30
330.9	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	78	355.4	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	2.09
332.1	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	1.4	355.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.52
332.4	<sup>237</sup> U	6.75	D	1.200	357.0	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.5
332.4	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.40	357.1	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	0.168
333.1	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	0.598	358.4	<sup>135</sup> Xe	9.14	H	0.221
333.2	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.171	358.9	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.31
334.0	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	0.101	359.2	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	2.39
334.2	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	2.7	360.1	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.153
334.3	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	6.8	360.3	<sup>127</sup> Te	9.35	H	0.135
334.3	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	9.22	361.1	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.11
334.3	<sup>239</sup> Np	2.356	D	2.056	361.9	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.187
334.4	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	1.14	362.2	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	2.25
334.4	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.84	363.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.40
334.7	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.145	363.3	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.49
334.8	<sup>59</sup> Fe	44.490	D	0.270	363.9	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.244
335.4	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.131	364.2	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.305
336.2	<sup>115</sup> Cd	53.46	H	1.000	364.4	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	0.140
336.2	<sup>115m</sup> In	4.486	H	45.8	364.5	<sup>131</sup> I	8.0252	D	81.5
337.5	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.21	365.0	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	1.16
338.3	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	2.84	365.3	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.191
338.3	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	11.27	366.1	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.5
338.5	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.11	366.3	<sup>65</sup> Ni	2.51719	H	4.81
338.6	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.72	366.4	<sup>99</sup> Mo	65.924	H	1.200
339.4	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	0.638	366.6	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.54
340.1	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	22.5	366.9	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	3.33
340.5	<sup>136</sup> Cs	13.01	D	46.8	367.3	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.1422
340.7	† <sup>231</sup> Pa	3.276E+4	Y	0.177	367.5	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	14.5
341.0	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.369	367.8	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.859
342.6	† <sup>227</sup> Th	18.68	D	0.35	367.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.18
342.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.40	370.5	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	11.2
342.9	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	0.222	370.9	<sup>237</sup> U	6.75	D	0.1073
342.9	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.37	371.7	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	0.487
344.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	26.59	374.5	<sup>192</sup> Ir	73.829	D	0.727
344.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.58	376.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.18

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
379.9	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.95	416.4	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	22.7
379.9	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	0.147	416.5	<sup>192</sup> Ir	73.829	D	0.670
379.9	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.27	416.8	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.47
380.5	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	1.517	417.4	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.269
382.0	<sup>84</sup> Br	31.76	M	0.56	417.6	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.154
382.1	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	0.145	417.6	<sup>135</sup> I	6.58	H	3.53
383.9	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.19	417.9	<sup>127</sup> Te	9.35	H	0.99
384.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.13	417.9	<sup>130</sup> I	12.36	H	34.2
384.7	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.267	419.1	※ <sup>75</sup> Ge	82.78	M	0.185
386.8	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.295	419.7	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	1.22
387.9	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.17	419.8	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.18
387.9	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.17	420.1	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.94
387.9	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.17	420.2	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.237
388.0	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.31	421.6	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.427
388.9	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.402	422.9	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.311
390.5	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.64	423.6	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	7.4
391.0	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.124	423.7	<sup>140</sup> Ba	12.751	D	3.10
391.7	<sup>113</sup> Sn	115.09	D	64.97	425.2	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.272
391.8	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.96	427.1	† <sup>211</sup> Pb	36.1	M	1.76
392.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.142	427.4	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.162
393.4	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	3.77	427.9	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	29.6
393.4	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.124	429.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.77
393.5	<sup>67</sup> Ga	3.2617	D	4.56	429.9	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.304
393.6	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.1896	430.5	<sup>92</sup> Sr	2.611	H	3.28
397.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.58	431.8	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.47
397.2	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.20	432.4	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.64
398.2	<sup>147</sup> Nd	10.98	D	0.912	432.5	<sup>140</sup> La	1.67858	D	2.90
399.0	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	1.34	433.0	<sup>143</sup> Ce	33.039	H	0.159
399.0	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.105	433.3	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.379
400.3	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	0.139	433.4	<sup>134</sup> I	52.5	M	4.15
400.4	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	0.245	433.7	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.554
400.7	<sup>75</sup> Se	119.78	D	11.41	433.8	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	2.0
401.3	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.188	433.9	<sup>108m</sup> Ag	438	Y	90.5
401.3	<sup>203</sup> Pb	51.92	H	3.35	434.2	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	9.8
401.8	† <sup>219</sup> Rn	3.96	S	6.6	434.4	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.36
402.6	<sup>87</sup> Kr	76.3	M	50	434.4	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.209
403.0	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.232	434.7	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.1113
404.3	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.00	435.0	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.212
404.6	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	1.172	435.1	<sup>134</sup> Te	41.8	M	18.9
404.9	† <sup>211</sup> Pb	36.1	M	3.78	435.3	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.97
405.5	<sup>134</sup> I	52.5	M	7.37	437.6	<sup>140</sup> Ba	12.751	D	1.929
405.7	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.169	439.4	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.11
406.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.31	439.4	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.18
407.0	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.187	439.5	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.207
408.0	<sup>135</sup> Xe	9.14	H	0.358	439.9	<sup>147</sup> Nd	10.98	D	1.28
408.1	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.184	440.4	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.121
409.0	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	4.66	440.9	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	1.51
409.1	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	2.72	441.0	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.7
409.5	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	1.92	443.6	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	1.15
409.7	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.231	443.6	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.306
410.5	<sup>147</sup> Nd	10.98	D	0.150	443.8	<sup>103</sup> Ru	39.247	D	0.339
410.7	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	17.8	444.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	2.827
411.0	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.57	444.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.298
411.1	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	2.237	444.1	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	0.1889
411.8	<sup>198</sup> Au	2.6941	D	95.62	444.5	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.547
412.1	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	3.8	444.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.64
413.2	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.53	445.0	† <sup>223</sup> Ra	11.43	D	1.29
413.5	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	2.27	445.1	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	4.3
414.8	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.301	445.7	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	4.0
416.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.1088	445.7	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.5

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
446.2	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.60	479.5	$^{90\text{m}}\text{Y}$	3.19	H	90.74
446.8	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249.83	D	3.70	479.5	$^{187}\text{W}$	24.000	H	26.6
448.5	$^{92}\text{Y}$	3.54	H	2.3	480.4	† $^{214}\text{Pb}$	26.8	M	0.337
449.9	※ $^{63}\text{Zn}$	38.47	M	0.236	482.2	$^{181}\text{Hf}$	42.39	D	80.5
450.8	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	1.24	483.6	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	2.2
451.0	$^{127\text{Sb}}$	3.85	D	0.18	484.6	$^{192}\text{Ir}$	73.829	D	3.19
451.4	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.29	484.8	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	1.02
451.6	$^{135}\text{I}$	6.58	H	0.316	484.9	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	1.06
452.3	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	1.5	487.0	$^{140}\text{La}$	1.67858	D	45.5
453.0	† $^{212}\text{Bi}$	60.55	M	0.363	487.1	† $^{214}\text{Pb}$	26.8	M	0.432
453.4	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.538	487.4	$^{129}\text{Te}$	69.6	M	1.42
454.5	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	1.5	487.4	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.44
454.8	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.292	488.0	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.23
455.4	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	4.8	488.0	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.23
456.0	$^{127}\text{Sb}$	3.85	D	0.11	488.7	$^{152}\text{Eu}$	13.517	Y	0.414
456.7	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	0.7	488.9	$^{134}\text{I}$	52.5	M	1.45
457.8	$^{130}\text{I}$	12.36	H	0.237	489.1	$^{192}\text{Ir}$	73.829	D	0.438
458.9	$^{134}\text{I}$	52.5	M	1.31	489.2	$^{147}\text{Nd}$	10.98	D	0.155
459.5	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	1.5	489.5	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.55
459.6	$^{129}\text{Te}$	69.6	M	7.7	490.3	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.126
460.9	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	0.99	490.3	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.160
460.9	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	1.62	490.4	$^{143}\text{Ce}$	33.039	H	2.16
461.0	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	9.7	491.3	$^{92}\text{Sr}$	2.611	H	0.27
461.4	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	1.33	492.4	$^{115}\text{Cd}$	53.46	H	8.03
462.0	† $^{214}\text{Pb}$	26.8	M	0.212	492.6	$^{92}\text{Y}$	3.54	H	0.49
462.2	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.59	493.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.62
462.2	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	1.24	493.0	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	5.0
462.5	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	0.80	495.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.155
462.8	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	30.7	497.0	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.18
462.9	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	1.76	497.1	$^{103}\text{Ru}$	39.247	D	91.0
463.0	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	4.40	497.6	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.96
463.0	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.75	497.8	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.11
463.4	$^{125}\text{Sb}$	2.75856	Y	10.49	499.3	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	2.0
464.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.22	500.0	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.430
464.6	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	4.7	500.1	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.55
465.5	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.36	502.8	$^{127}\text{Sb}$	3.85	D	0.8
468.0	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	18.0	503.0	$^{131}\text{I}$	8.0252	D	0.359
468.1	$^{192}\text{Ir}$	73.829	D	47.84	503.5	$^{152}\text{Eu}$	13.517	Y	0.1524
468.2	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.30	503.7	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.42
468.8	※ $^{75}\text{Ge}$	82.78	M	0.223	503.8	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.182
469.4	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	17.5	504.7	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.10
469.8	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.132	505.3	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.518
469.9	$^{125}\text{Sn}$	9.64	D	1.5	505.8	$^{132}\text{I}$	2.295	H	4.94
470.1	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.184	506.7	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	2.0
470.4	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	0.202	507.2	$^{136}\text{Cs}$	13.01	D	1.00
471.1	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.39	507.2	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.35
471.8	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.73	507.6	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	5.03
471.9	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.66	507.9	$^{65}\text{Ni}$	2.51719	H	0.293
472.7	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.145	509.0	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.45
473.0	$^{127}\text{Sb}$	3.85	D	25.8	510.5	$^{130}\text{I}$	12.36	H	0.85
473.6	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.17	510.5	$^{133}\text{I}$	20.83	H	1.83
474.6	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	2.56	510.8	† $^{208}\text{Tl}$	3.053	M	22.60
475.4	$^{134}\text{Cs}$	2.0652	Y	1.477	511.8	$^{187}\text{W}$	24.000	H	0.807
475.5	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	1.07	511.9	$^{106}\text{Rh}$	30.07	S	20.4
476.0	$^{181}\text{Hf}$	42.39	D	0.703	513.4	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	0.55
477.6	† $^{7}\text{Be}$	53.22	D	10.44	513.7	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.20
478.2	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.17	514.0	$^{85}\text{Kr}$	10.739	Y	0.434
478.2	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	0.2250	514.4	$^{134}\text{I}$	52.5	M	2.24
478.3	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.209	514.4	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.147
478.6	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.75	514.7	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.14



$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
516.3	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.194	563.2	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	8.338
516.7	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.43	564.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.494
519.7	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22	564.2	<sup>122</sup> Sb	2.7238	D	70.67
520.6	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.28	564.4	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	14.7
521.0	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.12	565.0	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.353
522.7	<sup>132</sup> I	2.295	H	16.0	565.5	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.95
523.1	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	1.55	566.0	<sup>134</sup> Te	41.8	M	18.6
523.1	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.103	566.4	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.131
524.8	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.131	567.0	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.136
524.8	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.31	567.6	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.148
525.2	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.1644	569.3	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	15.373
525.5	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	0.138	569.4	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.15
525.6	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22	569.7	<sup>207</sup> Bi	31.55	Y	97.75
526.5	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	45	570.8	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.31
526.6	<sup>135m</sup> Xe	15.29	M	80.6	570.9	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.182
527.0	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.14	570.9	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	1.59
527.9	<sup>115</sup> Cd	53.46	H	27.5	571.5	<sup>76</sup> As	26.24	H	0.140
529.9	<sup>133</sup> I	20.83	H	87.0	572.1	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.150
530.7	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.101	574.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.58
531.0	<sup>147</sup> Nd	10.98	D	13.4	574.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.97
531.6	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.1422	575.0	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.117
532.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.71	575.1	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	0.85
533.7	† <sup>214</sup> Pb	26.8	M	0.181	576.0	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.129
534.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.84	578.1	<sup>142</sup> La	91.1	M	1.33
535.4	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.51	580.1	† <sup>214</sup> Pb	26.8	M	0.370
536.1	<sup>130</sup> I	12.36	H	99.00	581.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.40
537.3	<sup>140</sup> Ba	12.751	D	24.39	582.0	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.893
539.1	<sup>130</sup> I	12.36	H	1.40	582.0	<sup>187</sup> W	24.000	H	0.1308
539.3	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	0.114	582.6	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.80
540.3	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22	582.9	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.00
540.5	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	6.6	583.2	† <sup>208</sup> Tl	3.053	M	85.0
540.8	<sup>134</sup> I	52.5	M	7.66	583.4	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.111
540.9	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.16	584.0	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	0.21
541.4	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.108	584.2	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.33
543.3	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	2.9	586.0	<sup>130</sup> I	12.36	H	1.69
544.6	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	15.42	586.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.455
545.0	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.16	586.3	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	1.90
545.3	<sup>78</sup> As	90.7	M	3.0	586.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22
546.5	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.201	587.2	<sup>143</sup> Ce	33.039	H	0.267
546.6	<sup>135</sup> I	6.58	H	7.15	588.6	<sup>192</sup> Ir	73.829	D	4.522
547.0	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	10.8	589.1	<sup>187</sup> W	24.000	H	0.150
547.2	<sup>132</sup> I	2.295	H	1.14	591.1	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.160
551.6	<sup>187</sup> W	24.000	H	6.14	591.8	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	4.95
551.8	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.11	594.3	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.00
551.8	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.17	594.8	<sup>147</sup> Nd	10.98	D	0.283
553.9	<sup>130</sup> I	12.36	H	0.66	595.4	<sup>134</sup> I	52.5	M	11.1
554.4	<sup>82</sup> Br	35.282	H	71.7	595.5	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	1.00
555.6	<sup>91m</sup> Y	49.71	M	95.0	595.8	※ <sup>74</sup> As	17.77	D	59
555.9	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.59	595.9	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	91.80
556.7	<sup>129m</sup> Te	33.6	D	0.118	597.3	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.131
556.8	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.44	599.5	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	2.08
557.1	<sup>103</sup> Ru	39.247	D	0.841	600.6	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	17.65
557.5	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.269	601.5	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.102
557.9	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	16.8	602.1	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.30
558.4	<sup>114m</sup> In	49.51	D	4.4	602.4	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	1.38
559.1	<sup>76</sup> As	26.24	H	45.0	602.7	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	97.8
559.2	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	0.109	603.0	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.7
561.1	<sup>92</sup> Y	3.54	H	2.4	603.5	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	4.5
562.5	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.87	603.5	<sup>130</sup> I	12.36	H	0.61
563.2	<sup>76</sup> As	26.24	H	1.20	604.2	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	2.85

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
604.4	$^{192}\text{Ir}$	73.829	D	8.216	634.8	※ $^{74}\text{As}$	17.77	D	15.4
604.7	$^{134}\text{Cs}$	2.0652	Y	97.62	635.7	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	1.6
604.8	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	1.7	636.0	$^{125}\text{Sb}$	2.75856	Y	11.22
605.1	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	1.02	636.2	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	36
606.2	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.146	636.2	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	1.42
606.4	$^{82}\text{Br}$	35.282	H	1.229	636.3	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	1.68
606.7	$^{125}\text{Sb}$	2.75856	Y	4.98	636.5	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.18
607.3	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.13	637.0	$^{131}\text{I}$	8.0252	D	7.16
608.2	$^{135}\text{Xe}$	9.14	H	2.90	637.1	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.21
608.4	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	14.4	637.8	$^{127}\text{Sb}$	3.85	D	0.44
608.4	※ $^{74}\text{As}$	17.77	D	0.552	638.7	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.222
609.3	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	45.49	639.0	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.83
609.4	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.134	641.3	$^{142}\text{La}$	91.1	M	47.4
609.5	$^{65}\text{Ni}$	2.51719	H	0.155	642.3	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	24
610.3	$^{103}\text{Ru}$	39.247	D	5.76	642.3	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.71
612.1	$^{103}\text{Ru}$	39.247	D	0.105	642.7	$^{131}\text{I}$	8.0252	D	0.217
612.5	$^{192}\text{Ir}$	73.829	D	5.34	645.4	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	0.89
613.8	$^{78}\text{As}$	90.7	M	54	645.9	$^{124}\text{Sb}$	60.20	D	7.42
614.3	$^{108\text{m}}\text{Ag}$	438	Y	89.8	646.2	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.14
614.4	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.53	646.3	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	6.3
615.2	$^{181}\text{Hf}$	42.39	D	0.233	647.5	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	15.5
616.2	$^{106}\text{Rh}$	30.07	S	0.75	647.9	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.124
617.5	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.34	649.9	$^{135}\text{I}$	6.58	H	0.46
617.7	※ $^{75}\text{Ge}$	82.78	M	0.114	650.5	$^{132}\text{I}$	2.295	H	2.57
618.0	$^{133}\text{I}$	20.83	H	0.544	650.8	$^{92}\text{Sr}$	2.611	H	0.37
618.4	$^{187}\text{W}$	24.000	H	7.57	652.3	$^{127}\text{Sb}$	3.85	D	0.37
619.1	$^{82}\text{Br}$	35.282	H	43.7	652.3	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	2.98
619.3	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	3.6	652.7	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.31
619.8	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	1.6	652.9	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	8.0
620.1	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	1.78	653.0	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	0.37
620.4	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249.83	D	2.73	653.3	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.49
620.9	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.39	654.2	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	17.0
621.2	$^{132}\text{I}$	2.295	H	1.58	654.3	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.241
621.3	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.40	654.3	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	2.97
621.8	$^{134}\text{I}$	52.5	M	10.6	654.7	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	2.00
621.9	$^{106}\text{Rh}$	30.07	S	9.93	654.8	$^{149}\text{Nd}$	1.728	H	8.0
622.8	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	0.99	655.6	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	0.188
623.3	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.22	656.2	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	2.1
624.8	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.190	656.5	$^{152}\text{Eu}$	13.517	Y	0.1441
625.3	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	0.316	657.1	$^{76}\text{As}$	26.24	H	6.2
625.5	$^{187}\text{W}$	24.000	H	1.314	657.8	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249.83	D	95.61
625.7	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	2.4	657.9	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.27
626.3	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249.83	D	0.217	657.9	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	4
626.7	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	2.8	657.9	$^{97}\text{Nb}$	72.1	M	98.23
627.0	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.11	658.2	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	1.7
627.3	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.236	659.0	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.10
628.0	$^{134}\text{I}$	52.5	M	2.22	660.8	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.11
628.7	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	0.101	660.9	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	0.101
628.7	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	31	661.7	$^{137\text{m}}\text{Ba}$	2.552	M	89.90
629.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.27	661.7	$^{137}\text{Cs}$	30.08	Y	85.10
630.2	$^{132}\text{I}$	2.295	H	13.3	663.5	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.68
630.2	$^{149}\text{Nd}$	1.728	H	0.189	664.6	$^{143}\text{Ce}$	33.039	H	5.69
631.3	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	0.556	665.1	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	4.18
631.8	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	2.80	665.3	$^{76}\text{As}$	26.24	H	0.36
631.9	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	7.4	665.4	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	1.531
632.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.22	665.9	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	1.18
632.3	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.151	667.1	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	2.5
632.5	$^{124}\text{Sb}$	60.20	D	0.1046	667.5	$^{127}\text{Sb}$	3.85	D	0.74
633.7	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	2.53	667.7	$^{132}\text{I}$	2.295	H	98.70
634.4	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	2.14	668.5	$^{130}\text{I}$	12.36	H	96

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
668.7	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.36	697.8	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.254
669.0	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	1.9	698.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.75
669.2	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.29	698.4	<sup>82</sup> Br	35.282	H	28.4
669.2	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	1.10	698.5	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	3.64
669.6	※ <sup>63</sup> Zn	38.47	M	8.2	698.6	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.231
669.8	<sup>132</sup> I	2.295	H	4.6	699.2	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	0.101
670.3	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.96	699.6	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.24
671.3	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.90	700.9	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.30
671.4	<sup>132</sup> I	2.295	H	3.5	701.5	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.77
671.4	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	1.791	701.7	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.173
672.3	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	0.87	702.5	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.377
673.1	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.53	702.7	<sup>94</sup> Nb	2.03E+4	Y	100.0
673.1	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.132	702.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.95
673.8	<sup>87</sup> Kr	76.3	M	1.89	703.1	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.472
674.6	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.169	703.8	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	1.01
674.8	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	2.1	704.2	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.34
675.8	<sup>145</sup> Pr	5.984	H	0.514	704.6	† <sup>211</sup> Pb	36.1	M	0.462
675.9	<sup>198</sup> Au	2.6941	D	0.805	705.3	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.108
676.4	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	15.7	706.6	<sup>133</sup> I	20.83	H	1.51
676.6	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	0.143	706.7	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.83
676.6	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.1672	706.7	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	16.69
677.3	<sup>134</sup> I	52.5	M	7.9	707.1	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.138
677.3	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.235	707.4	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.155
677.6	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	10.70	707.9	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.66
678.6	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.473	708.1	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	0.23
680.2	<sup>93</sup> Y	10.18	H	0.67	709.3	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.137
680.2	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.650	709.3	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	1.353
680.5	<sup>203</sup> Pb	51.92	H	0.75	709.9	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.88
680.6	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	0.695	710.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.58
680.9	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	6.5	712.3	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.86
681.8	<sup>90m</sup> Y	3.19	H	0.32	712.7	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	1.00
682.3	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.6	712.7	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.56
682.8	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	5.76	713.0	<sup>134</sup> Te	41.8	M	4.7
683.2	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.24	713.1	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	1.38
683.6	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.108	713.8	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	2.276
683.9	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	3.0	714.4	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	7.5
684.2	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.622	715.0	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.22
685.7	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	36.8	715.8	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.187
685.8	<sup>187</sup> W	24.000	H	33.2	716.4	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.20
685.9	<sup>147</sup> Nd	10.98	D	0.886	717.7	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	4.1
685.9	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.149	718.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.66
686.1	<sup>130</sup> I	12.36	H	1.07	719.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.250
686.3	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.92	719.9	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.392
686.6	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	3.2	721.9	<sup>143</sup> Ce	33.039	H	5.39
687.0	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	6.53	722.0	† <sup>208</sup> Tl	3.053	M	0.24
687.5	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.65	722.2	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	1.88
687.5	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	1.20	722.4	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.146
688.6	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.164	722.8	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	10.76
688.7	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.856	722.9	<sup>108m</sup> Ag	438	Y	90.8
690.1	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.129	722.9	<sup>131</sup> I	8.0252	D	1.77
690.5	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	0.183	723.3	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	20.06
692.4	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	1.777	723.5	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	5.4
692.7	<sup>122</sup> Sb	2.7238	D	3.85	723.5	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22
692.9	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	2.0	724.2	<sup>95</sup> Zr	64.032	D	44.27
694.8	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.403	724.3	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	47.3
694.9	<sup>78</sup> As	90.7	M	16.7	725.2	<sup>114m</sup> In	49.51	D	4.4
695.6	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.38	726.3	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	4.1
695.9	<sup>129m</sup> Te	33.6	D	3.0	726.9	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.62
696.3	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.171	727.0	<sup>132</sup> I	2.295	H	2.2
696.5	<sup>144</sup> Pr	17.28	M	1.342	727.2	<sup>132</sup> I	2.295	H	3.2

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
727.3	$\dagger$ $^{212}\text{Bi}$	60.55	M	6.67	767.2	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	29.5
727.6	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	4.0	768.4	$\dagger$ $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	4.894
728.4	$^{132}\text{I}$	2.295	H	1.6	768.4	$^{133}\text{I}$	20.83	H	0.460
728.6	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.24	769.0	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.321
729.6	$^{129\text{m}}\text{Te}$	33.6	D	0.70	769.1	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.106
730.7	$^{134}\text{I}$	52.5	M	1.83	770.6	$^{65}\text{Ni}$	2.51719	H	0.104
730.8	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.1048	771.7	$^{76}\text{As}$	26.24	H	0.122
731.9	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.49	772.0	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	0.24
732.0	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	22.0	772.3	$\dagger$ $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	1.49
733.5	$^{56}\text{Co}$	77.236	D	0.191	772.6	$^{132}\text{I}$	2.295	H	75.6
733.9	$\times$ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.110	772.8	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.90
734.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	1.42	772.9	$^{187}\text{W}$	24.000	H	5.02
736.1	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.47	773.3	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.233
736.5	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	1.29	773.4	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	2.82
737.1	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.444	773.7	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	36.8
739.2	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.69	773.7	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	1.5
739.5	$^{99}\text{Mo}$	65.924	H	12.20	774.1	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.52
739.5	$^{130}\text{I}$	12.36	H	82	775.0	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	0.1862
739.8	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.49	776.5	$^{82}\text{Br}$	35.282	H	83.6
740.1	$^{76}\text{As}$	26.24	H	0.117	777.9	$^{99}\text{Mo}$	65.924	H	4.31
742.6	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	15.3	778.9	$^{152}\text{Eu}$	13.517	Y	12.93
742.8	$\dagger$ $^{234\text{m}}\text{Pa}$	1.159	M	0.1066	779.7	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	1.42
742.9	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.31	780.0	$^{132}\text{I}$	2.295	H	1.18
743.3	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	100	781.3	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	1.07
743.4	$^{97\text{m}}\text{Nb}$	58.7	S	97.90	782.1	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.33
743.4	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	93.09	782.1	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.27
743.6	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.190	782.1	$\dagger$ $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.485
744.2	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	1.53	782.5	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	7.51
744.3	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249.83	D	4.77	783.7	$^{127}\text{Sb}$	3.85	D	15.1
745.2	$^{187}\text{W}$	24.000	H	0.368	784.3	$\times$ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.67
745.8	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	1.03	784.4	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.38
745.9	$^{127}\text{Sb}$	3.85	D	0.15	784.8	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	1.38
748.1	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.56	785.1	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.221
748.1	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	4.5	785.4	$\dagger$ $^{212}\text{Bi}$	60.55	M	1.102
748.3	$^{145}\text{Pr}$	5.984	H	0.525	785.5	$^{135}\text{I}$	6.58	H	0.152
749.8	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	23.7	786.0	$\dagger$ $^{214}\text{Pb}$	26.8	M	1.06
749.9	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.93	786.4	$\dagger$ $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.32
751.6	$^{140}\text{La}$	1.67858	D	4.33	786.4	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	1.071
752.6	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	0.26	787.2	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	1.74
752.8	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	1.28	787.7	$^{56}\text{Co}$	77.236	D	0.311
752.9	$\dagger$ $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.128	788.2	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.50
753.3	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.27	788.3	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.53
754.0	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	100	789.0	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.101
755.3	$\dagger$ $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	1.00	789.7	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.35
756.7	$^{95}\text{Zr}$	64.032	D	54.38	790.3	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.125
756.8	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.27	790.7	$^{124}\text{Sb}$	60.20	D	0.739
756.8	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	4.52	793.4	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	100
761.1	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	4.32	793.8	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	13.4
761.4	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	0.576	794.4	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.30
762.7	$^{157}\text{Eu}$	15.18	H	0.37	794.7	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.84
762.7	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	1.73	794.9	$\dagger$ $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	4.25
763.1	$\dagger$ $^{208}\text{Tl}$	3.053	M	1.79	795.9	$^{134}\text{Cs}$	2.0652	Y	85.46
763.9	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249.83	D	22.60	797.7	$^{135}\text{I}$	6.58	H	0.17
764.9	$^{152}\text{Eu}$	13.517	Y	0.189	797.7	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.109
765.8	$^{95}\text{Nb}$	34.991	D	99.808	800.2	$^{130}\text{I}$	12.36	H	0.101
766.1	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.146	800.3	$^{125}\text{Sn}$	9.64	D	1.1
766.4	$\dagger$ $^{234\text{m}}\text{Pa}$	1.159	M	0.317	800.5	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.89
766.5	$\dagger$ $^{211}\text{Pb}$	36.1	M	0.617	802.0	$^{134}\text{Cs}$	2.0652	Y	8.688
766.7	$^{134}\text{I}$	52.5	M	4.15	802.1	$^{129}\text{Te}$	69.6	M	0.192
766.8	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.83	802.2	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	6.0

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
802.7	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	1.20	839.5	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	100
803.1	† $^{210}\text{Po}$	138.376	D	0.00103	840.2	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.81
803.1	† $^{206}\text{Tl}$	4.202	M	0.0050	840.4	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.91
804.5	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	0.61	841.2	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.208
805.1	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.13	841.5	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.16
805.6	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	0.2793	841.6	$^{152}\text{Eu}$	13.517	Y	0.168
806.2	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	1.264	842.6	$^{78}\text{As}$	90.7	M	1.08
807.9	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.56	843.2	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.216
808.3	$^{130}\text{I}$	12.36	H	0.236	844.1	$^{134}\text{Te}$	41.8	M	1.2
808.8	$^{149}\text{Nd}$	1.728	H	0.189	844.3	$^{92}\text{Y}$	3.54	H	1.25
809.3	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.29	844.9	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.15
809.5	$^{132}\text{I}$	2.295	H	2.6	845.4	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	0.568
810.4	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	2.38	845.4	$^{87}\text{Kr}$	76.3	M	7.3
810.5	$^{152}\text{Eu}$	13.517	Y	0.317	845.8	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	2.5
810.8	$^{58}\text{Co}$	70.86	D	99.450	845.9	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.63
811.8	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	9.7	846.8	※ $^{56}\text{Mn}$	2.5789	H	98.85
812.0	$^{132}\text{I}$	2.295	H	5.5	846.8	$^{56}\text{Co}$	77.236	D	99.9399
813.0	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	48.2	847.0	$^{134}\text{I}$	52.5	M	96
813.4	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.139	848.7	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.281
813.6	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	13.0	850.3	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.173
814.3	$^{87}\text{Kr}$	76.3	M	0.164	850.7	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	0.243
815.5	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	0.511	850.7	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.12
815.8	$^{140}\text{La}$	1.67858	D	23.28	852.0	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.156
816.3	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.62	852.2	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	19.9
816.4	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.62	852.2	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.37
817.0	$^{127}\text{Sb}$	3.85	D	0.40	854.6	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	3.3
817.7	$^{151}\text{Pm}$	28.40	H	0.17	854.9	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	0.357
818.0	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249.83	D	7.43	855.7	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	1.6
818.5	$^{136}\text{Cs}$	13.01	D	99.70	856.1	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.60
818.5	$^{136}\text{Ba}$	0.3084	S	99.706	856.3	$^{133}\text{I}$	20.83	H	1.24
819.3	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.13	857.3	$^{134}\text{I}$	52.5	M	6.70
819.5	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	1.39	858.4	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.205
820.4	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.169	859.5	$^{149}\text{Pm}$	53.08	H	0.109
820.5	$^{133}\text{I}$	20.83	H	0.155	860.4	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	7.9
820.6	$^{127}\text{Sb}$	3.85	D	0.22	860.6	† $^{208}\text{Tl}$	3.053	M	12.50
820.8	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	0.161	860.8	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	0.40
821.2	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.161	861.3	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.28
822.0	$^{105}\text{Ru}$	4.44	H	0.21	861.6	$^{142}\text{La}$	91.1	M	1.66
822.5	$^{125}\text{Sn}$	9.64	D	4.3	862.3	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.67
822.8	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	5.90	862.6	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.61
823.0	$^{99}\text{Mo}$	65.924	H	0.134	863.0	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.56
823.3	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.63	864.0	$^{58}\text{Co}$	70.86	D	0.686
824.9	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	2.6	864.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	12.5
826.5	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.117	864.0	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.19
827.1	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.44	864.6	$^{187}\text{W}$	24.000	H	0.409
827.6	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.26	865.1	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.19
827.8	$^{82}\text{Br}$	35.282	H	24.2	865.8	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.188
828.1	$^{78}\text{As}$	90.7	M	8.1	866.0	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	0.47
829.8	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	0.239	867.0	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	1.33
829.8	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	1.8	867.4	$^{152}\text{Eu}$	13.517	Y	4.23
830.5	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.540	867.6	$^{76}\text{As}$	26.24	H	0.131
831.8	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	2.26	867.8	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	8.7
832.0	† $^{211}\text{Pb}$	36.1	M	3.52	867.8	$^{140}\text{La}$	1.67858	D	5.50
834.8	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	13.0	871.1	$^{94}\text{Nb}$	2.03E+4	Y	100.0
834.8	$^{54}\text{Mn}$	312.20	D	99.9760	871.7	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	5.11
835.7	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	1.61	873.2	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	12.08
835.8	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	1.0	873.5	$^{106}\text{Rh}$	30.07	S	0.439
836.4	$^{87}\text{Kr}$	76.3	M	0.77	874.9	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.534
836.8	$^{135}\text{I}$	6.58	H	6.69	875.2	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.82
839.1	† $^{214}\text{Pb}$	26.8	M	0.583	875.3	$^{133}\text{I}$	20.83	H	4.51

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
875.9	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	2.50	919.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.419
876.6	<sup>132</sup> I	2.295	H	1.04	919.6	<sup>140</sup> La	1.67858	D	2.66
876.7	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	2.75	920.6	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	1.16
877.4	<sup>130</sup> I	12.36	H	0.191	920.7	<sup>145</sup> Pr	5.984	H	0.146
877.7	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.101	922.6	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.14
878.0	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	3.5	923.1	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.74
878.2	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	0.47	923.4	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.112
878.2	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.1896	923.9	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.101
879.4	<sup>187</sup> W	24.000	H	0.171	924.4	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.52
879.7	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	0.188	925.2	<sup>140</sup> La	1.67858	D	6.90
880.5	<sup>143</sup> Ce	33.039	H	1.031	925.5	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.71
880.7	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	3.96	925.6	<sup>134</sup> Te	41.8	M	1.48
880.7	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.7	925.8	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	3.85
880.8	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.11	926.0	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.40
881.6	<sup>84</sup> Br	31.76	M	42	926.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.272
882.0	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.19	927.4	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.41
882.7	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.77	927.6	† <sup>208</sup> Tl	3.053	M	0.125
883.3	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	1.2	928.0	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.614
883.6	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	0.282	928.9	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	1.09
884.1	<sup>134</sup> I	52.5	M	65.1	929.3	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.79
884.5	<sup>192</sup> Ir	73.829	D	0.292	931.4	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	3.64
884.7	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	75.0	933.1	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	26.4
884.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.80	934.1	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	3.107
884.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.80	934.5	<sup>92</sup> Y	3.54	H	13.9
884.9	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.46	934.6	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	0.21
886.0	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.39	934.9	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	19.0
886.7	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.34	935.0	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.181
887.7	<sup>67</sup> Ga	3.2617	D	0.148	937.5	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	35.0
888.5	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.66	939.4	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.304
888.7	<sup>78</sup> As	90.7	M	2.1	939.5	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.1918
889.3	<sup>46</sup> Sc	83.79	D	99.9840	940.5	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.77
889.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22	941.3	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.75
891.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.84	942.5	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	1.27
892.8	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.521	943.4	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	47.1
893.4	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	0.29	944.4	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	1.33
893.4	† <sup>212</sup> Bi	60.55	M	0.378	944.9	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.294
894.9	<sup>142</sup> La	91.1	M	8.34	945.2	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.49
896.0	<sup>134</sup> Te	41.8	M	0.44	945.7	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	1.53
896.5	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.126	946.7	<sup>87</sup> Kr	76.3	M	0.129
897.8	<sup>207</sup> Bi	31.55	Y	0.128	947.1	<sup>93</sup> Y	10.18	H	2.1
898.0	<sup>88</sup> Rb	17.773	M	14.40	947.5	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.292
900.7	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.107	947.5	<sup>84</sup> Br	31.76	M	0.35
903.2	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.140	947.9	<sup>134</sup> I	52.5	M	4.01
904.1	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.889	948.0	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.106
904.2	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.77	948.7	<sup>151</sup> Pm	28.40	H	0.35
907.0	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	1.00	949.2	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.53
907.6	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	0.53	949.6	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.22
908.8	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.0	951.0	<sup>140</sup> La	1.67858	D	0.519
909.7	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.214	952.0	<sup>82</sup> Br	35.282	H	0.378
910.0	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	3.17	952.1	† <sup>212</sup> Bi	60.55	M	0.17
910.1	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.93	952.3	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.14
911.0	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.71	953.3	<sup>92</sup> Sr	2.611	H	3.52
911.2	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	25.8	954.6	<sup>132</sup> I	2.295	H	17.6
912.7	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	44	957.2	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.39
912.8	<sup>92</sup> Y	3.54	H	0.63	958.6	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.61
913.9	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.39	958.6	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.28
914.8	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	8.8	959.0	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.46
914.9	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	1.8	959.7	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.350
915.0	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	23.3	960.5	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	1.45
915.6	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	4.1	961.0	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	1.62

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
961.0	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.15	1005.7	<sup>84</sup> Br	31.76	M	0.46
961.4	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.15	1006.7	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.237
962.1	※ <sup>63</sup> Zn	38.47	M	6.5	1007.5	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.53
962.2	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.38	1007.6	<sup>82</sup> Br	35.282	H	1.304
963.1	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.61	1009.8	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	29.8
963.4	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.140	1011.4	<sup>142</sup> La	91.1	M	3.93
964.1	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	14.51	1011.9	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.31
964.1	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.365	1015.9	<sup>84</sup> Br	31.76	M	6.2
964.8	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	4.99	1017.4	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	0.32
966.8	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	8.96	1017.5	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	0.32
966.9	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.39	1018.1	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	0.3724
967.0	<sup>130</sup> I	12.36	H	0.88	1018.7	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.14
968.2	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	1.882	1021.2	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	1.01
968.2	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.16	1022.8	<sup>149</sup> Nd	1.728	H	0.104
969.0	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	15.8	1024.3	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.14
969.3	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.45	1024.3	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	33.5
969.4	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	2.10	1024.4	<sup>97</sup> Nb	72.1	M	1.09
969.8	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.37	1026.7	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	0.2793
970.5	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.27	1027.0	<sup>134</sup> Te	41.8	M	0.44
971.3	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	0.278	1027.4	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.128
972.0	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.89	1029.1	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	11.7
972.3	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.0	1029.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.97
972.6	<sup>135</sup> I	6.58	H	1.21	1030.7	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	15.13
972.6	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.44	1030.7	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	1.5
974.7	<sup>134</sup> I	52.5	M	4.78	1033.2	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.201
975.1	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.27	1035.0	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.51
977.4	<sup>56</sup> Co	77.236	D	1.421	1035.4	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.101
978.3	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	3.9	1035.6	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.24
979.0	<sup>145</sup> Pr	5.984	H	0.256	1037.3	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.307
980.3	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.19	1037.8	<sup>56</sup> Co	77.236	D	14.05
982.7	† <sup>208</sup> Tl	3.053	M	0.205	1038.6	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	0.990
984.2	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.59	1038.8	<sup>135</sup> I	6.58	H	7.9
985.7	<sup>157</sup> Eu	15.18	H	0.146	1039.6	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.48
985.8	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.112	1040.3	<sup>134</sup> I	52.5	M	2.03
985.8	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	1.31	1040.4	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.50
987.3	<sup>84</sup> Br	31.76	M	0.79	1043.7	<sup>142</sup> La	91.1	M	2.70
987.8	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.149	1044.0	<sup>82</sup> Br	35.282	H	27.6
988.4	<sup>113</sup> Ag	5.37	H	0.423	1044.4	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.239
990.1	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.142	1045.1	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	1.833
991.5	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	1.4	1047.5	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	3.5
992.1	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	1.9	1048.1	<sup>136</sup> Cs	13.01	D	80
992.7	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.105	1048.1	<sup>136</sup> Ba	0.3084	S	99.820
993.6	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.64	1049.5	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.142
995.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.40	1050.4	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.7
995.1	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.15	1050.4	<sup>106</sup> Rh	30.07	S	1.56
996.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.31	1051.4	<sup>145</sup> Pr	5.984	H	0.175
996.3	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	10.48	1051.7	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	3.79
996.5	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.176	1052.0	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.313
996.6	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.109	1052.3	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.556
996.9	<sup>56</sup> Co	77.236	D	0.111	1052.7	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.73
997.2	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	0.130	1053.7	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.13
999.2	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.164	1054.3	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.159
999.9	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.13	1054.6	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	0.224
999.9	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.13	1058.8	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.10
1000.2	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	2.3	1059.7	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	1.49
1001.0	† <sup>234m</sup> Pa	1.159	M	0.842	1060.1	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.138
1001.7	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	2.086	1061.8	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.161
1004.8	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	18.01	1061.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.33
1005.1	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.32	1063.7	<sup>207</sup> Bi	31.55	Y	74.5
1005.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.659	1065.1	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	4.9

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
1065.2	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.132	1123.7	※ <sup>63</sup> Zn	38.47	M	0.111
1066.0	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	23.1	1124.0	<sup>135</sup> I	6.58	H	3.62
1067.1	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	10	1125.0	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.126
1070.0	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.272	1125.1	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.45
1072.6	<sup>134</sup> I	52.5	M	14.9	1125.5	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	11.0
1075.5	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.40	1126.6	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.120
1076.0	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.34	1128.0	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.93
1077.0	<sup>86</sup> Rb	18.642	D	8.64	1128.1	<sup>106</sup> Rh	30.07	S	0.404
1078.1	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.13	1128.6	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.300
1078.6	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	2.0	1129.5	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.135
1078.6	† <sup>212</sup> Bi	60.55	M	0.564	1129.6	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	0.80
1079.2	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	4.6	1129.9	<sup>76</sup> As	26.24	H	0.126
1079.6	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.44	1130.6	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.47
1079.8	<sup>78</sup> As	90.7	M	1.62	1131.5	<sup>135</sup> I	6.58	H	22.6
1080.8	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.27	1131.5	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.87
1081.3	<sup>82</sup> Br	35.282	H	0.644	1132.4	<sup>92</sup> Y	3.54	H	0.24
1082.6	<sup>84</sup> Br	31.76	M	0.14	1133.7	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.2512
1083.9	<sup>129</sup> Te	69.6	M	0.49	1134.2	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.40
1084.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.245	1134.5	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.19
1085.2	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	6.4	1134.5	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.19
1085.8	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	10.11	1134.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.27
1087.7	<sup>198</sup> Au	2.6941	D	0.1589	1136.0	<sup>132</sup> I	2.295	H	3.01
1087.7	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	1.2	1136.2	<sup>134</sup> I	52.5	M	9.1
1088.0	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.411	1137.3	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22
1089.2	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	4.6	1137.6	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.30
1089.5	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	3.7	1140.4	<sup>56</sup> Co	77.236	D	0.132
1089.7	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	1.734	1140.5	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.283
1089.9	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.1422	1140.7	<sup>122</sup> Sb	2.7238	D	0.76
1093.9	† <sup>208</sup> Tl	3.053	M	0.430	1140.7	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.237
1095.7	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.129	1140.8	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	0.127
1096.5	<sup>130</sup> I	12.36	H	0.552	1141.3	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	1.28
1096.5	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.80	1141.4	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	2.0
1098.4	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.71	1141.6	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.37
1099.2	<sup>59</sup> Fe	44.490	D	56.5	1142.4	<sup>92</sup> Sr	2.611	H	2.79
1100.1	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.69	1142.4	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	1.67
1101.3	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	5.42	1142.7	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.06
1101.6	<sup>135</sup> I	6.58	H	1.61	1143.3	<sup>132</sup> I	2.295	H	1.35
1103.2	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.80	1143.5	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.14
1103.3	<sup>143</sup> Ce	33.039	H	0.415	1145.1	<sup>78</sup> As	90.7	M	1.67
1104.5	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.341	1146.2	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.60
1109.2	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.189	1147.2	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	1.24
1109.5	† <sup>211</sup> Pb	36.1	M	0.115	1147.8	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.27
1110.6	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.285	1148.0	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	2.62
1111.6	<sup>129</sup> Te	69.6	M	0.191	1148.9	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	1.5
1112.1	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	13.67	1148.9	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.24
1112.7	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	2.0	1150.3	<sup>145</sup> Pr	5.984	H	0.194
1113.4	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.445	1150.9	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.63
1114.9	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.111	1151.2	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	0.11
1115.5	<sup>65</sup> Ni	2.51719	H	15.43	1151.9	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.201
1115.5	<sup>65</sup> Zn	243.93	D	50.04	1153.5	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.139
1116.6	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	1.03	1153.7	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	6.8
1118.3	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.113	1154.1	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	4.7
1119.1	<sup>84</sup> Br	31.76	M	0.14	1155.2	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	1.633
1120.0	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	0.13	1156.0	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	0.131
1120.1	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.24	1157.0	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.73
1120.3	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	14.92	1157.4	<sup>130</sup> I	12.36	H	11.3
1120.5	<sup>46</sup> Sc	83.79	D	99.9870	1158.1	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.29
1121.3	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	35.24	1158.2	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.5
1122.2	<sup>130</sup> I	12.36	H	0.253	1159.1	<sup>136</sup> Cs s			
1123.6	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	8.9	1159.1	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.34



$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
1159.9	$^{135}\text{I}$	6.58	H	0.103	1221.4	$^{182}\text{Ta}$	114.74	D	27.23
1160.2	$^{142}\text{La}$	91.1	M	1.71	1222.6	$^{130}\text{I}$	12.36	H	0.179
1160.3	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.63	1223.6	$^{182}\text{Ta}$	114.74	D	0.24
1164.0	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.13	1227.5	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.13
1165.5	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.134	1228.1	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.11
1168.0	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.253	1228.5	$^{76}\text{As}$	26.24	H	1.22
1168.0	$^{134}\text{Cs}$	2.0652	Y	1.790	1229.1	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.61
1169.0	$^{135}\text{I}$	6.58	H	0.88	1229.6	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.18
1169.1	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.266	1230.7	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	8.0
1169.5	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.12	1231.0	$^{182}\text{Ta}$	114.74	D	11.62
1170.7	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.66	1232.3	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.28
1172.9	$^{132}\text{I}$	2.295	H	1.09	1233.1	$^{142}\text{La}$	91.1	M	1.90
1173.2	$^{60}\text{Co}$	1925.28	D	99.85	1233.8	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	2.3
1173.3	$^{125}\text{Sn}$	9.64	D	0.18	1234.6	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	11.0
1174.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.31	1235.4	$^{136}\text{Cs}$	13.01	D	20.0
1174.1	$^{134}\text{Cs s}$				1236.4	$^{133}\text{I}$	20.83	H	1.51
1175.1	$^{56}\text{Co}$	77.236	D	2.252	1237.3	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	0.63
1175.4	$^{87}\text{Kr}$	76.3	M	1.11	1237.8	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.241
1176.4	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.1422	1238.1	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	5.834
1177.4	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.24	1238.3	$^{56}\text{Co}$	77.236	D	66.46
1179.5	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	1.00	1239.0	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	1.8
1181.6	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	4.5	1239.0	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.21
1183.4	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.13	1240.3	$^{78}\text{As}$	90.7	M	5.9
1184.4	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.28	1240.5	$^{135}\text{I}$	6.58	H	0.90
1185.0	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.69	1241.3	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	0.1226
1185.0	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	0.108	1242.0	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.237
1189.0	$^{182}\text{Ta}$	114.74	D	16.49	1242.2	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.42
1190.0	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.35	1242.4	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	6.6
1190.4	$^{132}\text{I s}$				1245.2	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.363
1191.1	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.379	1246.1	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	0.856
1191.9	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	0.6	1247.1	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.50
1191.9	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	0.6	1247.9	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	1.20
1193.3	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	2.68	1249.1	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	0.52
1194.6	$^{113}\text{Ag}$	5.37	H	0.378	1249.9	$^{152}\text{Eu}$	13.517	Y	0.187
1196.2	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.39	1250.5	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	1.0
1198.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.18	1250.7	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	1.12
1199.1	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.70	1252.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.27
1199.2	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.17	1256.9	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.18
1203.3	$^{93}\text{Y}$	10.18	H	0.109	1256.9	$^{122}\text{Sb}$	2.7238	D	0.81
1203.7	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.40	1257.4	$^{182}\text{Ta}$	114.74	D	1.509
1204.2	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.18	1258.4	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.402
1204.2	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	7.62	1258.5	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	1.00
1204.4	※ $^{74}\text{As}$	17.77	D	0.285	1259.5	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	1.0
1204.8	$^{91}\text{Y}$	58.51	D	0.26	1260.0	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	1.14
1205.5	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.13	1260.4	$^{135}\text{I}$	6.58	H	28.7
1206.6	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	9.41	1263.3	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.910
1207.4	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	4.1	1263.9	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.90
1207.7	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.451	1264.9	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.137
1209.0	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.18	1267.6	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	3.0
1209.0	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.13	1268.6	$^{97}\text{Nb}$	72.1	M	0.147
1209.0	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.940	1269.5	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.56
1209.8	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.14	1272.1	$^{130}\text{I}$	12.36	H	0.748
1211.9	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.38	1272.7	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.73
1212.7	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.14	1272.8	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.168
1212.9	$^{76}\text{As}$	26.24	H	1.44	1273.1	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.164
1212.9	$^{152}\text{Eu}$	13.517	Y	1.415	1273.7	$^{182}\text{Ta}$	114.74	D	0.660
1213.3	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	2.6	1274.4	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	34.8
1215.4	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.134	1274.5	$^{22}\text{Na}$	2.6018	Y	99.940
1216.1	$^{76}\text{As}$	26.24	H	3.42	1276.1	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	0.94
1220.9	$^{125}\text{Sn}$	9.64	D	0.27	1276.1	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.103

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
1277.4	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	2.89	1339.8	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.0
1280.0	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.183	1342.7	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.2565
1280.9	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	0.93	1343.6	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	1.14
1281.0	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	1.434	1348.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.19
1281.7	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.559	1350.4	<sup>133</sup> I	20.83	H	0.150
1284.7	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.3	1352.3	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.159
1284.7	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.3	1352.6	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.41
1287.5	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.100	1354.5	<sup>141</sup> La	3.92	H	1.64
1289.1	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	1.372	1355.2	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	1.038
1290.3	<sup>127</sup> Sb	3.85	D	0.37	1357.9	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.16
1290.6	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.10	1360.2	<sup>56</sup> Co	77.236	D	4.283
1290.8	<sup>132</sup> I	2.295	H	1.13	1360.3	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.9
1291.0	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.67	1361.0	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	0.6516
1291.6	<sup>59</sup> Fe	44.490	D	43.2	1362.4	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.24
1292.3	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	3.7	1362.7	<sup>97</sup> Zr	16.749	H	1.02
1292.8	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.101	1363.0	<sup>142</sup> La	91.1	M	2.13
1293.6	<sup>41</sup> Ar	109.61	M	99.160	1365.2	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	3.017
1293.9	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.25	1365.5	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	1.65
1295.1	<sup>132</sup> I	2.295	H	1.88	1366.3	<sup>88</sup> Rb	17.773	M	0.113
1297.9	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.89	1366.4	<sup>156</sup> Eu	15.19	D	1.57
1298.2	<sup>133</sup> I	20.83	H	2.35	1367.9	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.61
1298.7	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.12	1368.2	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	2.624
1299.1	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	1.633	1368.5	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	3.19
1299.2	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.13	1368.6	<sup>24</sup> Na	14.997	H	99.9936
1301.5	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.202	1368.7	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	1.10
1303.3	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	18.4	1369.5	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	1.48
1303.8	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.107	1372.1	<sup>132</sup> I	2.295	H	2.47
1307.2	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.31	1372.3	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22
1308.7	<sup>78</sup> As	90.7	M	13.0	1373.5	<sup>78</sup> As	90.7	M	4.8
1309.3	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.51	1373.8	<sup>182</sup> Ta	114.74	D	0.2224
1312.8	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.373	1376.1	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	0.483
1312.8	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.62	1377.7	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	3.988
1314.7	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.59	1378.0	<sup>128</sup> Sb	9.05	H	1.8
1315.2	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.67	1381.2	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.76
1317.5	<sup>82</sup> Br	35.282	H	26.9	1382.5	<sup>88</sup> Rb	17.773	M	0.784
1317.9	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.118	1382.6	<sup>87</sup> Kr	76.3	M	0.288
1318.2	<sup>132</sup> I s				1383.9	<sup>92</sup> Sr	2.611	H	90
1318.3	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.462	1384.3	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	25.1
1319.7	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.295	1385.0	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.100
1321.3	<sup>105</sup> Ru	4.44	H	0.203	1385.3	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.793
1322.4	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.11	1388.6	<sup>136</sup> Cs s			
1323.2	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.33	1389.3	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.43
1325.0	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.16	1389.9	<sup>87</sup> Kr	76.3	M	0.119
1325.5	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	1.580	1392.0	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.8
1327.0	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.695	1393.0	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.1422
1331.8	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.85	1394.8	<sup>131m</sup> Te	33.25	H	0.105
1332.1	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	1.74	1394.9	<sup>132</sup> I s			
1332.5	<sup>60</sup> Co	1925.28	D	99.9826	1398.6	<sup>132</sup> I	2.295	H	7.01
1334.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22	1398.9	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	1.37
1334.3	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	0.143	1400.6	<sup>134</sup> Cs s			
1335.4	<sup>56</sup> Co	77.236	D	0.1224	1401.5	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	1.330
1336.0	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.14	1402.2	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.1422
1337.2	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.8	1403.9	<sup>130</sup> I	12.36	H	0.345
1337.2	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.8	1404.4	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.12
1337.5	<sup>132</sup> I s				1405.4	<sup>92</sup> Y	3.54	H	4.8
1337.6	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	1.62	1406.7	<sup>134</sup> Cs s			
1338.0	<sup>87</sup> Kr	76.3	M	0.63	1406.9	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.218
1339.0	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.39	1408.0	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	2.394
1339.1	<sup>132</sup> I s				1408.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	20.87
1339.3	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	2.07	1408.7	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	1.28

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
1412.1	※ <sup>63</sup> Zn	38.47	M	0.75	1479.0	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.126
1413.4	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	0.98	1479.7	<sup>132</sup> I s			
1414.3	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.22	1480.9	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.373
1415.7	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.37	1481.8	<sup>65</sup> Ni	2.51719	H	23.59
1417.6	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.110	1488.4	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.60
1419.3	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	1.20	1488.9	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	0.672
1419.4	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.394	1489.2	<sup>144</sup> Pr	17.28	M	0.278
1419.7	<sup>125</sup> Sn	9.64	D	0.49	1489.4	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	2.88
1420.5	<sup>139</sup> Ba	82.93	M	0.261	1494.0	<sup>154</sup> Eu	8.601	Y	0.698
1421.7	<sup>110m</sup> Ag s				1494.1	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.1422
1422.3	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.33	1495.6	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.18
1425.4	<sup>93</sup> Y	10.18	H	0.25	1495.6	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.53
1428.2	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.17	1495.9	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.86
1431.0	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.558	1499.6	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.40
1431.4	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.17	1499.8	<sup>132</sup> I s			
1432.9	<sup>117m</sup> Cd	3.36	H	13.4	1501.6	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.46
1433.5	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.11	1502.8	<sup>135</sup> I	6.58	H	1.08
1435.8	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	76.3	1505.0	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	13.33
1436.6	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	1.217	1505.5	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.11
1437.5	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.316	1506.2	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.22
1439.1	<sup>76</sup> As	26.24	H	0.279	1509.2	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	2.130
1440.3	<sup>132</sup> I s				1510.2	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.23
1440.9	<sup>78</sup> As	90.7	M	0.32	1512.7	† <sup>212</sup> Bi	60.55	M	0.29
1442.2	<sup>207</sup> Bi	31.55	Y	0.1310	1515.7	<sup>97</sup> Nb	72.1	M	0.122
1442.6	<sup>132</sup> I	2.295	H	1.40	1516.3	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	1.02
1442.7	<sup>56</sup> Co	77.236	D	0.180	1516.3	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.43
1443.4	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	1.8	1517.2	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	1.22
1443.4	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	1.8	1518.4	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	2.15
1443.7	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	2.5	1521.1	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.80
1445.0	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.97	1524.6	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.47
1445.1	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	0.330	1524.6	<sup>42</sup> K	12.355	H	18.08
1445.5	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.1422	1526.3	<sup>124</sup> Sb	60.20	D	0.409
1448.4	<sup>135</sup> I	6.58	H	0.32	1526.8	<sup>129</sup> Sb	4.366	H	0.548
1450.2	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.61	1528.1	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.279
1450.5	<sup>93</sup> Y	10.18	H	0.33	1529.8	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	10.9
1452.7	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.127	1530.0	<sup>78</sup> As	90.7	M	2.5
1453.6	<sup>76</sup> As	26.24	H	0.108	1531.2	<sup>87</sup> Kr	76.3	M	0.36
1455.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.58	1533.7	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.90
1455.1	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.47	1534.7	<sup>84</sup> Br	31.76	M	0.100
1455.2	<sup>134</sup> I	52.5	M	2.30	1538.0	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.5
1457.6	<sup>135</sup> I	6.58	H	8.7	1538.1	<sup>136</sup> Cs	13.01	D	0.100
1457.6	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.497	1538.5	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.398
1458.9	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.13	1538.8	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.150
1459.1	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.83	1540.2	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.47
1460.0	<sup>207</sup> Bi	31.55	Y	1.61	1541.5	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.51
1460.8	† <sup>40</sup> K	1.248E+9	Y	10.66	1542.4	<sup>110m</sup> Ag s			
1461.2	<sup>142</sup> La	91.1	M	0.95	1543.3	† <sup>214</sup> Bi	19.9	M	0.303
1463.8	<sup>84</sup> Br	31.76	M	2.0	1544.2	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.9
1464.8	<sup>88</sup> Kr	2.825	H	0.114	1545.8	<sup>142</sup> La	91.1	M	2.99
1470.0	<sup>134</sup> I	52.5	M	0.76	1547.0	※ <sup>63</sup> Zn	38.47	M	0.122
1470.3	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	1.55	1552.0	<sup>133m</sup> Te	55.4	M	0.13
1471.7	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.193	1553.5	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.6
1473.1	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.60	1555.3	<sup>138</sup> Cs	32.5	M	0.366
1473.8	<sup>91</sup> Sr	9.65	H	0.168	1557.1	† <sup>228</sup> Ac	6.15	H	0.178
1474.9	<sup>82</sup> Br	35.282	H	16.39	1559.0	<sup>131</sup> Sb	23.03	M	0.42
1475.5	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	0.42	1561.6	<sup>130</sup> Sb	39.5	M	0.60
1475.8	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	4.08	1562.2	<sup>117</sup> Cd	2.49	H	1.42
1476.6	<sup>77</sup> Ge	11.211	H	0.253	1562.3	<sup>106</sup> Rh	30.07	S	0.163
1476.7	<sup>132</sup> I	2.295	H	0.130	1562.3	<sup>110m</sup> Ag	249.83	D	1.22
1478.2	※ <sup>74</sup> Ga	8.12	M	0.30	1566.4	<sup>135</sup> I	6.58	H	1.29

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
1570.1	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.872	1674.7	$^{58}\text{Co}$	70.86	D	0.517
1570.3	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.97	1676.8	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.73
1573.5	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.22	1678.0	$^{135}\text{I}$	6.58	H	9.6
1573.5	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	1.04	1682.1	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.70
1573.7	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.70	1682.1	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.272
1576.6	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	11.2	1683.2	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	3.3
1578.0	$^{87}\text{Kr}$	76.3	M	0.129	1684.0	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.214
1578.1	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	0.67	1685.6	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.66
1578.4	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.14	1685.7	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	0.50
1579.8	$^{124}\text{Sb}$	60.20	D	0.38	1688.6	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.237
1580.5	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.60	1691.0	$^{124}\text{Sb}$	60.20	D	47.57
1581.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.13	1704.4	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.58
1581.9	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	1.9	1706.5	$^{135}\text{I}$	6.58	H	4.10
1583.2	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.705	1706.9	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	1.00
1587.7	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	1.15	1707.9	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	0.30
1588.2	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	3.22	1709.9	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.325
1591.4	$^{110\text{m}}\text{Ag s}$				1713.4	$^{78}\text{As}$	90.7	M	1.78
1593.2	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	0.50	1717.1	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.107
1594.8	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.267	1719.7	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.410
1595.2	$^{110\text{m}}\text{Ag s}$				1721.0	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.32
1596.2	$^{140}\text{La}$	1.67858	D	95.4	1721.8	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	2.45
1596.5	$^{154}\text{Eu}$	8.601	Y	1.797	1722.7	$^{142}\text{La}$	91.1	M	1.52
1599.4	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.324	1723.1	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	2.01
1600.1	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.579	1724.0	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	0.161
1602.0	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.29	1724.3	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.133
1603.8	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.46	1724.9	$^{65}\text{Ni}$	2.51719	H	0.399
1607.6	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	0.40	1727.2	$^{132}\text{I s}$			
1608.8	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	1.4	1727.2	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.152
1611.2	$^{87}\text{Kr}$	76.3	M	0.114	1727.7	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.111
1613.8	$^{134}\text{I}$	52.5	M	4.31	1729.6	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	2.878
1614.1	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.137	1737.2	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.11
1617.0	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	0.90	1738.2	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	7.45
1617.2	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.129	1739.1	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.13
1618.2	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.284	1740.5	$^{87}\text{Kr}$	76.3	M	2.04
1620.5	† $^{212}\text{Bi}$	60.55	M	1.47	1741.2	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	1.6
1622.3	$^{132}\text{I s}$				1741.5	$^{134}\text{I}$	52.5	M	2.56
1622.5	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.208	1744.9	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	4.82
1623.4	$^{65}\text{Ni}$	2.51719	H	0.498	1749.8	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	0.30
1625.1	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.255	1750.2	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	1.09
1626.6	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	0.60	1756.1	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	1.13
1629.2	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.19	1756.4	$^{142}\text{La}$	91.1	M	2.70
1630.6	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	1.51	1757.4	$^{132}\text{I}$	2.295	H	0.30
1638.3	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.47	1762.6	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	2.5
1642.0	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.16	1764.5	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	15.30
1643.3	$^{134}\text{Cs s}$				1768.2	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.24
1643.6	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.27	1770.2	$^{207}\text{Bi}$	31.55	Y	6.87
1644.3	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.39	1770.8	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.19
1644.3	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.237	1771.4	$^{56}\text{Co}$	77.236	D	15.41
1646.0	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	1.20	1773.2	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.53
1646.2	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.22	1778.3	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.137
1650.3	$^{82}\text{Br}$	35.282	H	0.739	1779.6	$^{82}\text{Br}$	35.282	H	0.1112
1651.4	$^{91}\text{Sr}$	9.65	H	0.291	1779.9	$^{88}\text{Rb}$	17.773	M	0.238
1652.1	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.28	1785.5	$^{128}\text{Sb}$	9.05	H	0.40
1652.2	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.47	1787.7	$^{76}\text{As}$	26.24	H	0.293
1655.2	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.23	1791.2	$^{135}\text{I}$	6.58	H	7.72
1655.6	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	0.80	1791.9	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.97
1656.1	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	1.311	1797.5	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.14
1661.3	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	1.047	1803.7	$^{132}\text{I s}$			
1666.5	† $^{228}\text{Ac}$	6.15	H	0.178	1806.5	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.28
1669.5	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.63	1806.7	$^{125}\text{Sn}$	9.64	D	0.15

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
1806.8	$^{134}\text{I}$	52.5	M	5.55	1963.7	$^{56}\text{Co}$	77.236	D	0.707
1810.7	※ $^{56}\text{Mn}$	2.5789	H	26.9	1965.8	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	1.3
1810.8	$^{56}\text{Co}$	77.236	D	0.640	1966.0	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	3.9
1811.0	$^{132}\text{I}_s$				1967.8	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.13
1818.7	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	0.24	1969.9	$^{134}\text{Cs}_s$			
1821.2	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	1.22	1971.0	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.20
1822.2	$^{110\text{m}}\text{Ag}_s$				1981.3	$^{138}\text{Cs}$	32.5	M	0.14
1829.8	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	1.90	1984.6	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	0.42
1830.7	$^{135}\text{I}$	6.58	H	0.58	1995.6	$^{78}\text{As}$	90.7	M	1.35
1835.7	$^{78}\text{As}$	90.7	M	1.46	1997.3	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	26.2
1836.0	$^{88}\text{Rb}$	17.773	M	22.81	1997.4	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	2.10
1838.4	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.350	1999.3	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	0.40
1840.6	$^{132}\text{I}_s$								
1842.6	$^{87}\text{Kr}$	76.3	M	0.139					
1846.5	$^{77}\text{Ge}$	11.211	H	0.177					
1847.3	$^{92}\text{Y}$	3.54	H	0.36					
1847.4	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	2.025					
1851.6	$^{97}\text{Zr}$	16.749	H	0.31					
1854.3	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	4.2					
1854.4	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	4.2					
1856.4	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.25					
1857.4	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.240					
1866.6	$^{136}\text{Cs}_s$								
1867.3	$^{117}\text{Cd}$	2.49	H	0.11					
1870.8	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.44					
1871.6	$^{129}\text{Sb}$	4.366	H	0.356					
1873.2	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.214					
1877.0	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	1.51					
1877.5	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	1.12					
1881.2	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.18					
1884.4	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	0.70					
1885.6	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.80					
1887.3	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.14					
1887.7	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25	H	1.31					
1892.8	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.14					
1893.0	$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4	M	0.12					
1894.0	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.29					
1896.1	† $^{214}\text{Bi}$	19.9	M	0.149					
1897.6	$^{84}\text{Br}$	31.76	M	14.6					
1901.3	$^{142}\text{La}$	91.1	M	7.16					
1908.7	$^{88}\text{Kr}$	2.825	H	0.100					
1915.7	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	1.0					
1917.8	$^{93}\text{Y}$	10.18	H	1.57					
1921.0	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.81					
1921.1	$^{132}\text{I}$	2.295	H	1.23					
1923.3	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.19					
1923.5	$^{78}\text{As}$	90.7	M	0.76					
1925.9	$^{134}\text{I}$	52.5	M	0.18					
1927.3	$^{135}\text{I}$	6.58	H	0.296					
1933.6	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.1422					
1937.7	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	1.94					
1940.6	※ $^{74}\text{Ga}$	8.12	M	5.4					
1945.5	$^{132}\text{I}_s$								
1946.3	$^{156}\text{Eu}$	15.19	D	0.165					
1948.0	$^{130}\text{Sb}$	39.5	M	1.20					
1949.4	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.38					
1956.4	$^{131}\text{Sb}$	23.03	M	0.8					
1957.5	$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36	H	0.16					
1961.5	$^{142}\text{La}$	91.1	M	0.1422					
1962.8	$^{132}\text{I}_s$								

資表 5.3 核種別核データ（校正に用いられる核種）

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ (keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
<sup>51</sup> Cr	27.704	3	D	320.0824	4	9.910	10
<sup>54</sup> Mn	312.20	20	D	834.848	3	99.9760	10
<sup>57</sup> Co	271.74	6	D	14.4129	6	9.16	15
				122.06067	12	85.60	17
				136.4736	3	10.68	8
				570.09	20	0.0158	10
<sup>59</sup> Fe	44.490	9	D	692.41	7	0.149	10
				142.6510	20	1.02	5
				192.343	5	3.08	12
				334.80	20	0.270	12
				382.0	4	0.018	3
				1099.245	3	56.5	19
<sup>60</sup> Co	1925.28	14	D	1291.590	6	43.2	14
				1481.70	20	0.059	7
<sup>65</sup> Zn	243.93	9	D	1173.228	3	99.85	3
				1332.492	4	99.9826	6
<sup>85</sup> Sr	64.849	7	D	1115.5391	20	50.04	10
				514.0049	22	96	4
<sup>88</sup> Y	106.627	21	D	868.06	5	0.0120	7
				850.6	8	0.065	13
				898.042	3	93.7	3
				1382.2	10	0.021	6
<sup>109</sup> Cd	461.9	4	D	1836.063	12	99.2	3
				88.0336	10	3.644	16
<sup>113</sup> Sn	115.09	3	D	255.134	10	2.11	8
				391.698	3	64.97	17
<sup>125</sup> Sb	2.75856	25	Y	19.80	6	0.0204	10
				35.489	5	4.37	5
				58.43	5	0.012	6
				116.955	11	0.263	4
				172.719	8	0.191	8
				176.3140	20	6.84	7
				178.842	5	0.0337	24
				198.654	11	0.0128	6
				204.138	10	0.317	7
				208.077	5	0.248	5
				209.32	9	0.045	3
				227.891	10	0.1311	23
				321.04	4	0.416	5
				380.452	8	1.517	17
				408.065	10	0.184	3
				427.874	4	29.6	3
				443.555	9	0.306	4
463.365	4	10.49	11				
600.5970	20	17.65	19				
606.713	3	4.98	6				
635.950	3	11.22	15				
671.441	6	1.791	19				
<sup>133</sup> Ba	10.551	11	Y	53.1622	6	2.14	4
				79.6142	12	2.65	5
				80.9979	11	32.9	4
				160.6120	16	0.638	6
				223.2368	13	0.453	4
				276.3989	12	7.16	5
				302.8508	5	18.34	13
				356.0129	7	62.05	19
383.8485	12	8.94	7				
<sup>134</sup> Cs	2.0652	4	Y	242.738	8	0.027	3
				326.589	13	0.0162	10
				475.3650	20	1.477	7

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	γ線エネルギー (keV)	γ線エネルギー 不確かさ (keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{134}\text{Cs}$	2. 0652	4	Y	563. 246	5	8. 338	14
				569. 331	3	15. 373	17
				604. 7210	20	97. 62	11
				795. 864	4	85. 46	6
				801. 953	4	8. 688	16
				1038. 610	7	0. 990	3
				1167. 968	5	1. 790	5
				1365. 185	7	3. 017	8
$^{137}\text{Cs}$	30. 08	9	Y	661. 657	3	85. 10	20
$^{139}\text{Ce}$	137. 641	20	D	165. 8575	11	79. 90	
$^{152}\text{Eu}$	13. 517	14	Y	121. 7817	3	28. 53	16
				148. 00	5	0. 0205	11
				212. 43	11	0. 0207	6
				244. 6974	8	7. 55	5
				251. 633	9	0. 0670	19
				271. 08	4	0. 0715	19
				275. 42	4	0. 0346	9
				295. 9387	17	0. 440	5
				315. 10	3	0. 0399	11
				316. 13	13	0. 0101	5
				324. 83	3	0. 0681	19
				329. 41	5	0. 1213	25
				340. 46	10	0. 0266	8
				344. 2785	12	26. 59	21
				351. 66	5	0. 0106	8
				367. 7892	20	0. 859	6
				411. 1165	12	2. 237	13
				416. 02	3	0. 1088	20
				443. 9607	16	2. 827	15
				444. 01	17	0. 298	11
				482. 33	5	0. 0247	8
				488. 6793	20	0. 414	4
				493. 54	4	0. 0303	14
				503. 467	9	0. 1524	20
				520. 24	4	0. 0534	17
				523. 13	5	0. 0153	7
				526. 88	5	0. 0120	8
				534. 25	5	0. 0410	11
				556. 48	10	0. 0177	7
				562. 98	14	0. 0202	19
				563. 986	5	0. 494	5
				566. 438	6	0. 131	4
				586. 265	3	0. 455	4
				595. 61	12	0. 032	11
				656. 489	5	0. 1441	23
				671. 155	14	0. 024	5
				674. 64	14	0. 169	4
				675. 0		0. 0213	8
				678. 623	5	0. 473	4
				686. 60	5	0. 0203	7
688. 670	5	0. 856	7				
696. 87	19	0. 016	8				
712. 83	5	0. 0955	25				
719. 346	7	0. 250	8				
719. 36	14	0. 095	4				
728. 04	4	0. 0111	4				
764. 88	4	0. 189	5				
768. 96	4	0. 082	5				
778. 9046	24	12. 93	9				
794. 78	5	0. 0263	16				



核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	$\gamma$ 線エネルギー 不確かさ (keV)	放出率 (%)	放出率不確かさ (%)
$^{152}\text{Eu}$	13.517	14	Y	805.71	9	0.0152	6
				810.451	5	0.317	3
				839.36	4	0.0177	6
				841.574	5	0.168	3
				867.380	3	4.23	3
				896.59	9	0.0670	22
				901.19	5	0.0854	25
				919.337	4	0.419	5
				926.31	5	0.272	4
				930.59	5	0.0729	19
				958.63	5	0.0197	11
				963.367	7	0.140	7
				964.057	5	14.51	7
				974.09	5	0.0136	8
				990.18	5	0.0314	14
				1005.27	5	0.659	11
				1084.0	10	0.245	8
				1084.38	11	0.0106	8
				1085.837	10	10.11	5
				1089.737	5	1.734	12
				1109.18	5	0.189	7
				1112.076	3	13.67	9
				1170.97	9	0.0372	16
				1206.09	16	0.0130	14
1212.948	11	1.415	9				
1249.94	5	0.187	3				
1261.35	5	0.0335	14				
1292.78	5	0.101	3				
1299.142	8	1.633	11				
1348.10	7	0.0173	8				
1363.78	5	0.0258	6				
1408.013	3	20.87	10				
1457.643	11	0.497	5				
1528.10	4	0.279	4				
$^{203}\text{Hg}$	46.594	12	D	279.1952	10	81.56	5
$^{241}\text{Am}$	432.6	6	Y	26.34460	20	2.27	13
				32.18		0.0174	5
				33.1960	10	0.126	4
				43.420	3	0.073	8
				55.560	20	0.0181	18
				59.54091	10	35.9	4
				98.970	20	0.0203	5
102.980	20	0.0195	5				

資表 5.4 エネルギー順核データ (校正に用いられる核種)

γ線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	γ線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
14.4	<sup>57</sup> Co	271.74	D	9.16	656.5	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.1441
26.3	<sup>241</sup> Am	432.6	Y	2.27	661.7	<sup>137</sup> Cs	30.08	Y	85.10
33.2	<sup>241</sup> Am	432.6	Y	0.126	671.4	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	1.791
35.5	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	4.37	674.6	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.169
53.2	<sup>133</sup> Ba	10.551	Y	2.14	678.6	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.473
59.5	<sup>241</sup> Am	432.6	Y	35.9	688.7	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.856
79.6	<sup>133</sup> Ba	10.551	Y	2.65	692.4	<sup>57</sup> Co	271.74	D	0.149
81.0	<sup>133</sup> Ba	10.551	Y	32.9	719.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.250
88.0	<sup>109</sup> Cd	461.9	D	3.644	764.9	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.189
117.0	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.263	778.9	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	12.93
121.8	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	28.53	795.9	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	85.46
122.1	<sup>57</sup> Co	271.74	D	85.60	802.0	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	8.688
136.5	<sup>57</sup> Co	271.74	D	10.68	810.5	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.317
142.7	<sup>59</sup> Fe	44.490	D	1.02	834.8	<sup>54</sup> Mn	312.20	D	99.9760
160.6	<sup>133</sup> Ba	10.551	Y	0.638	841.6	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.168
165.9	<sup>139</sup> Ce	137.641	D	79.90	867.4	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	4.23
172.7	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.191	898.0	<sup>88</sup> Y	106.627	D	93.7
176.3	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	6.84	919.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.419
192.3	<sup>59</sup> Fe	44.490	D	3.08	926.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.272
204.1	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.317	963.4	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.140
208.1	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.248	964.1	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	14.51
223.2	<sup>133</sup> Ba	10.551	Y	0.453	1005.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.659
227.9	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.1311	1038.6	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	0.990
244.7	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	7.55	1084.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.245
255.1	<sup>113</sup> Sn	115.09	D	2.11	1085.8	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	10.11
276.4	<sup>133</sup> Ba	10.551	Y	7.16	1089.7	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	1.734
279.2	<sup>203</sup> Hg	46.594	D	81.56	1099.2	<sup>59</sup> Fe	44.490	D	56.5
295.9	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.440	1109.2	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.189
302.9	<sup>133</sup> Ba	10.551	Y	18.34	1112.1	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	13.67
320.1	<sup>51</sup> Cr	27.704	D	9.910	1115.5	<sup>65</sup> Zn	243.93	D	50.04
321.0	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.416	1168.0	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	1.790
329.4	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.1213	1173.2	<sup>60</sup> Co	1925.28	D	99.85
334.8	<sup>59</sup> Fe	44.490	D	0.270	1212.9	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	1.415
344.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	26.59	1249.9	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.187
356.0	<sup>133</sup> Ba	10.551	Y	62.05	1291.6	<sup>59</sup> Fe	44.490	D	43.2
367.8	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.859	1292.8	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.101
380.5	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	1.517	1299.1	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	1.633
383.8	<sup>133</sup> Ba	10.551	Y	8.94	1332.5	<sup>60</sup> Co	1925.28	D	99.9826
391.7	<sup>113</sup> Sn	115.09	D	64.97	1365.2	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	3.017
408.1	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.184	1408.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	20.87
411.1	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	2.237	1457.6	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.497
416.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.1088	1528.1	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.279
427.9	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	29.6	1836.1	<sup>88</sup> Y	106.627	D	99.2
443.6	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	0.306					
444.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	2.827					
444.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.298					
463.4	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	10.49					
475.4	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	1.477					
488.7	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.414					
503.5	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.1524					
514.0	<sup>85</sup> Sr	64.849	D	96					
563.2	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	8.338					
564.0	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.494					
566.4	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.131					
569.3	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	15.373					
586.3	<sup>152</sup> Eu	13.517	Y	0.455					
600.6	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	17.65					
604.7	<sup>134</sup> Cs	2.0652	Y	97.62					
606.7	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	4.98					
636.0	<sup>125</sup> Sb	2.75856	Y	11.22					

## 参考文献

1. ISO11929-1:2019, Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the coverage interval) for measurements of ionizing radiation — Fundamentals and application — Part1:Elementary applications. ISO. 2019, ISO11929-1.
2. ISO 20042:2019 Measurement of radioactivity - Gamma-ray emitting radionuclides - Generic test method using gamma-ray spectrometry. ISO. 2019.
3. 野口正安 , 富永洋. 放射線応用計画 基礎から応用まで. 2004. 日刊工業新聞社.
4. 鉛地金中の  $^{210}\text{Pb}$  の定量. 上杉正樹, ほか. Vol.31、No.3, 1982年, RADIOISOTOPES.
5. Improvements on the method for determining of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in lead. Masaki Uesugi, et al. 283, 2010, J Radioanal Nucl Chem, 577-584.
6. Transfer of Ge detectors efficiency calibration from point source geometry to other geometries. Lepy M.C., et al. 2000, EUROMET action 428.
7. CALCULATION OF THE ABSOLUTE PEAK EFFICIENCY OF GAMMA-RAY DETECTORS FOR DIFFERENT COUNTING GEOMETRIES. L.MOENS, et al. 187, 1981, 451-472.
8. Testing efficiency transfer codes for equivalence. T.Vidmar, et al. 68, 2010, 355-359.
9. EFFTRAN — A Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry. Tim Vidmar. 550, 2005, 603-608.
10. 今井秀孝, (編). 測定における不確かさの表現のガイド[GUM]ハンドブック. 2018. 日本規格協会.
11. Application of GUM Supplement 1 to uncertainty of Monte Carlo computed efficiency in gamma-ray spectrometry. Octavian Sima, Marie Christine Lépy. 109, 2016, 493-499.
12. Factors determining the ultimate detection sensitivity of Ge(Li) gamma-ray spectrometers. J.A.Cooper. 82, 1970, NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS, 273-277.
13. Zum Problem der Nachweisgrenze. H.Kaiser. 209, 1965, Analytische Chemie, 1-18.
14. Limits for qualitative detection and quantitative determination Application to Radiochemistry. Lloyd.A.Currie. 40, 1968, Analytical Chemistry, 586-593.
15. ISO 11929:2010, Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for

- measurements of ionizing radiation — Fundamentals and application. ISO. 2010, ISO 11929:2010.
16. Determination and Interpretation of Characteristic Limits for Radioactivity Measurements Decision Threshold, Detection Limit and Limits of the Confidence Interval. IAEA. 2017, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 48.
  17. ゲルマニウム検出器のピーク対トータル効率比. 水本良彦, 日下部俊男, 岩田志郎. 36, 1987年, RADIOISOTOPES, 20-23.
  18. 容積試料における $\gamma$ 線自己吸収の補正法. 野口正安. 49, 2000年, 189-198.
  19. Determination of Attenuation Coefficient for Self-absorption Correction in Routine Gamma Ray Spectrometry of Environmental Bulk Sample. K. Sato, et al. 1984, J. Radioanalytical and Nucl. Chemistry, 84, 431.
  20. 光子相互作用断面積の近似式と質量減弱係数. 野口正安. 36, RADIOISOTOPES, 49.
  21. 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. 佐藤兼章, 他. 32, 1983年, RADIOISOTOPES, 25.
  22. 日本土壌肥料学雑誌. 矢内純太, 岡田達朗, 山田秀和. 83(6), 2012年12月, 673-680.
  23. JCGM 101:2008, Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. JCGM. 2008, JCGM 2008.
  24.  $^{134}\text{Cs}$  のサム効果補正に関する共同実験結果. 米沢仲四郎, 他. 67(4), 2018年, BUNSEKI KAGAKU, 213-220.
  25. Ge 検出器 -  $\gamma$ 線スペクトロメトリーによる玄米認証標準物質中  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  及び  $^{40}\text{K}$  の分析 —第2部 不確かさ評価—. 米沢仲四郎, 城野克広, 原賀智子. 66(1), 2017年, BUNSEKI KAGAKU, 27-37.
  26. A practical evaluation of measurement uncertainty in gamma-ray efficiency curve determination through an analytical approach. Katsuhiko Shirono, et al. 121, 2017, 131-141.
  27. Calculation spreadsheet for uncertainty estimation of measurement results in gamma-ray spectrometry and its validation for quality assurance purpose. Alessia Ceccatelli, et al. 124, 2017, Applied Radiation and Isotopes, 7-15.
  28. 19 確認委報告 011 放射能分析確認調査 (立地県) 事業報告書. 文部科学省. 2007年.
  29. 環境放射能分析研修ゲルマニウム半導体検出器による測定法. 公益財団法人日本分析センター. 2019年.