環境放射線モニタリング技術検討チーム第11回会合

資料2

ゲルマニウム半導体検出器による γ線スペクトロメトリー

(改訂原案)

第1章	序 論
第2章	用語の解説 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
第3章	γ線計測の基本原理 ······
第4章	測定機器
. 第5章	
. 第6章	核データ
. 第7章	測定・解析手順
. 第8章	検出下限値
. 第9章	分析結果の質の保証 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

解説

解説 A	γ線スペクトロメトリーにおける不確かさの評価・・・・・・・・・・・・・・・・
解説 B	IS011929 による下限値の計算例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
解説 C	測定試料の調製方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
解説 D	測定容器内不均一の影響(U-8 容器の例) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
解説 E	核データ表 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
解説 F	スペクトル例
解説 G	改良ピーク・トータル比
解説 H	ピーク効率変換(Efficiency Transfer)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

資料

資料1	環境試料に対するγ線の減弱係数の計算例 ·····
資料2	容積線源のピーク効率を求める例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
資料3	サム効果補正 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

参考文献

第1章 序 論

ゲルマニウム半導体検出器による y 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、化学分離などを必要とせずに多核種の同時定量が可能であるため、環境 試料中の y 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。

γ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、「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γ線スペクトロメトリーのための 試料前処理法」(No.24)及び「緊急時におけるγ線スペクトル解析法(No.29)が制定 されている。

本マニュアル「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 γ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 として平成4年に改訂されたものであるが、その後の測定機器及びコンピュータの性 能向上、解析手法の進歩等の状況に対応できるように、今回第3回となる改訂を行っ た。

本マニュアルは、原子力施設の周辺監視等において実施される環境放射能分析の実 務担当者を対象とし、基本的に平常時に分析所で行う環境試料のγ線スペクトロメト リーを対象に記述されている。なお、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 ては放射能測定法シリーズ No. 29「緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法」を合わ せて参照されたい。

今回の改訂における主な変更点は以下のとおりである。

- ・スペクトル解析は、メーカー等によって作製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。
- ・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¹が利用されるようになった現状を踏まえ、記述を追加。
- ・ソフトウェアが採用する解析手法の選択及び妥当性の確認はソフトウェア作製者の 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。
- モニタリングを目的とした環境試料のγ線スペクトロメトリーに必要な原理、原則

¹ γ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、γ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とは、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、それぞれ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、それを十分多くの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。

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 y線エネルギーの多くがこの範囲に含まれるため)。
- ・測定結果の不確かさ評価を導入。
- ・検出下限値の算出方法として、国際標準の IS011929 の手法を導入。
- ・分析・測定結果の品質保証についての記述を追加。

なお、γ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 体的な操作は機器毎に異なるため、実際の操作については機器及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。

第2章 用語の解説

用語および略語

「用語]

アイソトープ (isotope)

同位体または同位元素。原子番号が等しく(同一元素)、質量数が異なる核種をお互 いに同位体という。ギリシャ語の isos (同じ)と topos (場所)の意味で、イギリス の科学者ソディ(Frederick Soddy)によって与えられた。放射性のアイソトープを ラジオアイソトープ (radioisotope) という。例えば、セシウムにおいて、¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs、など。

運動エネルギー (kinetic energy)

速度vで運動している質量mの粒子の全エネルギー(mc²)から粒子の静止質量エネ ルギー $(m_0 c^2)$ を差し引いた値が、次式で表される運動エネルギー (E_k) である。こ こで、cは真空中の光速度である。

$$E_{k} = mc^{2} - m_{0}c^{2} = m_{0}c^{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{c}\right)^{2}}} - 1\right)$$

`

なお、 α 線などの重粒子では、 $v \ll c$ の時、 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ となる。

運動量 (momentum)

速度vで運動している質量mの粒子の運動量は、p = mvで表わされる。振動数vの電磁 波放射線の運動量は、p = hv/cで表される($h: \mathcal{T} = \mathcal{T} > \mathcal{T}$)。 運動量は方向を持つベクトルであり、上記の式は運動方向の成分である。

永続平衡 (secular equilibrium)

親核種の半減期が子孫核種の半減期に比べ非常に長く、ある時間(子孫核種の半減 期の8倍程度以上)経過した後、両核種の放射能がほとんど等しくなった状態。「放 射平衡」参照。

SN比 (SN ratio)

信号対雑音比。信号成分と雑音成分の大きさの比をいう。

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、共有結合で電子が1個余分とな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などで、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)

ー般的に、 α 線や β 線などの粒子線のエネルギーは運動エネルギーで表わされ、 γ 線や X線などの光子のエネルギーは、振動数をv、波長を λ 、プランク定数をh、真空中の 光速度をcとすると、 $E = hv = hc/\lambda$ で表わされる。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(単位: eV)を用いて表されることが多い。1eV は1電荷素量(e)をもつ粒子が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、1eV=1.602×10⁻¹⁹ Jである。

- エネルギー吸収係数 (energy absorption coefficient)
 - 光電効果やコンプトン散乱などによって生じた高速二次電子の電離作用・励起作用 によるエネルギー吸収の寄与分に相当し、次のように表される。制動放射損失によ る分をg、エネルギー転移係数をμtrとすると、エネルギー吸収係数は

$\mu_{en} = \mu_{tr}(1-g)$

光子エネルギーがそれほど高くない場合や低原子番号の物質など、制動放射の確率 が低いときはエネルギー転移係数に等しい。これは、吸収線量の概念と結び付けら れる。

エネルギー校正 (energy calibration)

- a線スペクトロメトリーあるいは γ 線スペクトロメトリーなどにおいて、ピークの正確な中心P(ch)とエネルギーE(keV)との関係を求めることをエネルギー校正という。Ge 半導体検出器のパルス波高値はエネルギーに対して非常によい直線性をもつので、エネルギー校正の式としては実用的には一次式($E = a + b \times P$: aおよびbは定数)で十分であるが、測定システムによっては二次式で表すことによってさらに高い精度でエネルギーを決定することができる。bはチャネル幅といわれ、環境放射能分析の分野では、 $0\sim 2$ MeVの範囲を 4000ch として、すなわちb = 0.500keV/ch なる値がよく使われる。
- エネルギー分解能 (energy resolution)

- 般的には、ピークの半値幅(FWHM)で表される。Ge 半導体検出器のエネルギー分 解能をいうときは、⁶⁰Co からの 1332.5keV y線ピークの FWHM で代表する。一般的に 使われる Ge 半導体検出器では、FWHM はおよそ 1.7keV~2.2keV の範囲である。

エンドキャップ (end cap)

Ge 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 製のキャップ部分をいう。通常のy線の測定には薄いアルミニウムの入射窓が、低エ ネルギー光子の測定にはベリリウム(Be)など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、励起エネルギーを X 線として外部に放出する代わりに、軌 道電子を放出してより低いエネルギー状態となる現象。

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α壊変やβ壊変などがある。(放射性) 崩壊ともいう。

壞変図 (decay scheme)

核種ごとに放射性壊変の性質やデータを図示したものである。半減期(あるいは寿命)、スピンとパリティ、壊変形式とその割合、エネルギー準位と遷移の比率、放出 される放射線のエネルギーと放出比、放射線の相互の関係などが示されている。

ガウス分布 (Gaussian distribution)

確率密度関数が次の式にしたがう確率分布。正規分布ともいわれる。 平均値*m*、標準偏差σのとき、*n*の値を示す確率*W*(*n*)は

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

Ge 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)

原子核の種類の意味。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(μs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、¹³⁷Csのβ壊変によって生成する¹³⁷Ba(半減期=2.55分)は¹³⁷Ba の核異性体である。

カスケードy線(cascade gamma ray)

ある γ線とほぼ同時に放出される他のγ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γ線を連 続的に放出するためである。例えば、⁶⁰Coの1173.2keV γ線と1332.5keV γ線はカス ケードの関係にある。カスケードγ線が放出される時間間隔は Ge 半導体検出器の分 解時間(μs程度)より短いため、複数のカスケードにあるγ線が検出器内で相互作用 を行っても、それぞれのγを分別することができない。「サム効果」参照。

γ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で、光子ともいわれる。γ線のエネルギーは両準位間のエネルギ ーの差に等しい(原子核の反跳エネルギーは大変小さいため)。

y線スペクトロメトリー (gamma ray spectrometry)

Ge 半導体検出器などを用いてγ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。γ線スペクトロスコピー(spectroscopy)ともいわれ る。

γ遷移 (gamma transition)

原子核がγ線を放出して、より低いエネルギーの励起準位または基底準位になること。 原子核のエネルギー状態が変化するだけなので、α壊変やβ壊変などの放射性壊変と は区別される。

γ線放出比 (gamma ray emission ratio)

1 壊変 (Bq) あたり放出される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、壊変の基準に注意されたい。例えば、¹³⁷Cs の 662keV γ線の 場合、¹³⁷Cs の壊変を基準にすると、γ線放出比は 0.851 であるが、¹³⁷ 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)と検出器の間の幾何学的条件(線源と検出器の間の距離など)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Ωとすると、幾 何学的効率はΩ/4π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 や広がりをもつので、計算などで定量的に幾何学的効率を決定することは困難であ る。

基底準位 (ground state)

原子核、原子あるいは分子などで、基底状態のエネルギー準位をいう。

基底状態 (ground state)

原子核、原子あるいは分子などで、最も低いエネルギーをもつ安定状態をいう。ただ

し、放射性核種の場合は、基底状態にあっても安定核とは言わないことに注意。

逆二乗則 (inverse square law)

放出率 n_0 (s⁻¹)の点線源からr (m)の距離における線束密度 Φ (s⁻¹m⁻²)は距離の2乗 に逆比例して、次のように表される。 $\Phi = n_0/4\pi r^2$ なお、ここでは物質(空気など) による吸収は考慮されていない。

禁止帯 (forbidden band)

伝導帯と価電子帯の間には電子の存在できない禁止帯(バンドギャップ)がある。こ れによって物質の電気伝導度が決まる。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。 半導体では、Siの禁止帯幅は300Kの温度で1.115eV、また、Geの禁止帯幅は0.665eV である。そのため、Si検出器は常温で使用可能であるが、Ge検出器は液体窒素温度 に冷却して使用される。

空乏層(depletion layer)

半導体検出器の p⁺電極と n⁺電極の間の結晶領域で、電荷キャリヤ(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、Ge半導体検出器ではGe結晶を液体窒素温度に冷却して使うが、そのため、Ge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比をa、計数率をn (s⁻¹)とすると計数効率(ϵ)は次 のように表わされる。 $\epsilon = n/(a \cdot A)$ 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。

計数誤差 (counting error)

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(σ)で、 $\sigma = \sqrt{n}$ と表される。通常、測定値は、 $n \pm \sigma$ と記される。

計数率 (counting rate)

計数値を測定時間で除した値。 γ 線スペクトルなどでは、ピーク面積(ピークの正味計数値)を測定時間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)などの単位が使われる。

原子 (atom)

原子は直径が 10⁻⁸ cm 程度で、その中心に直径が 10⁻¹³~10⁻¹² cm 程度の正の電荷をもつ 原子核があり、そのまわりを負の電荷をもつ電子(軌道電子)がまわっている。原子 核の正電荷とまわりの電子の負電荷の総和は等しく、原子は電気的に中性である。 軌道電子の状態は、主量子数 (n = 1, 2, 3, ...)、方位量子数 (l = 0, 1, ..., n - 1)、磁気量 子数 ($m = 0, ..., \pm (l - 1), \pm l$)およびスピン量子数 ($s = \pm 1/2$)によって量子化されて いる。基底状態においては低いエネルギー準位から順次電子の配置が定まる。中性 原子に比べて、軌道電子が少ない陽イオン (positive ion, cation)の半径は小さ く、軌道電子が多い陰イオン (negative ion, anion)の半径は大きい。なお、電子 の質量は非常に小さいので、原子の質量は原子核の質量にほぼ等しい。

原子核 (nucleus)

原子核は Z 個の陽子と N 個の中性子からなりたっている。原子核の種類は、原子番 号(Z) と質量数 (A=Z+N) の組み合わせのみで一義的に決まり、安定原子核と放射性 原子核を含めて、現在では 2500 以上もの核種が見出されている。Z によって元素名 は一義的に決まるので元素記号を X で表すと、原子核は ^AX という記号で表される(例 えば、Z=6 の場合、¹²C や ¹⁴C)。Z が等しく A の異なる原子核を同位元素(体)とい う。原子核の半径 R(cm) は、R=1.4×10⁻¹³A^{1/3}という関係にあり、その密度はほぼ一 定である。正電荷のみをもつ原子核の構成核子(陽子と中性子)を結びつける結合力 は核力といわれ、その本質は中間子理論によって説明される。

原子質量 (atomic mass)

原子質量単位で表した中性原子の質量

原子番号 (atomic number)

原子核に含まれる陽子の数に等しく、原子番号(記号:Z)で一義的に元素の種類が 決まる。例えば、Z=1 は水素(H)、Z=6 は炭素(C)など。中性の原子では、軌道電子 の数は原子番号に等しい。

原子量 (atomic weight)

炭素の同位体である¹²Cを12.0000として、原子の質量を相対的に表す。同位体を含む場合は、同位体の存在比を乗じて加算した値である。

減弱(衰)係数(attenuation coefficient)

光子相互作用の確率は、微視的(ミクロ)断面積(microscopic cross section)で 表されるが、実験的に求める相互作用の確率は巨視的(マクロ)断面積(macroscopic cross section)で表され、次の関係にある。物質の原子量をA、密度を ρ (g/cm³)、 アボガドロ数を N_A とすると、単位容積(1cm³)に含まれる原子数(N)は、 $N = \rho \cdot N_A/A$ である。光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の微視的断面積をそれぞれ τ 、 σ 、 κ とすると、巨視的断面積(Σ)は、 $\Sigma_{\tau} = \tau \cdot N$ 、 $\Sigma_{\sigma} = \sigma \cdot N$ 、 $\Sigma_{\kappa} = \kappa \cdot N$

物質中での γ 線の減弱(衰)は、全減弱(衰)係数(μ)を用いて表されることが多い。 この場合、 μ は線減弱(衰)係数といわれ、次のような関係がある。 μ [cm⁻¹]= $\Sigma_{\tau} + \Sigma_{\sigma} + \Sigma_{\kappa} = (\tau + \sigma + \kappa) \cdot N$

なお、単位質量(1g)当りの減弱(衰)係数(μ_m)は、 μ_m [cm²/g]= μ/ρ で表される。 これは質量減弱(衰)係数といわれる。

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。

光電効果 (photo-electric effect)

一般的には金属などの表面に光をあてると電子が放出される現象であるが、ここで は、γ線と物質の相互作用の一つをいう。光子は内殻軌道電子と相互作用をして全て のエネルギーを失う。その軌道電子は軌道を離れて高速の二次電子(光電子ともい う)になる。光子のエネルギーをhv、軌道電子の結合エネルギーをBとすると、生成 する二次電子の運動エネルギーは、E_e = hv – Bである。物質の原子番号を Z とする と、光電効果の確率(K 殻軌道電子の場合)はほぼ、Z⁵(hv)^{-3.5}に比例する。したがっ て、γ線検出器としては原子番号の大きな物質ほど、検出効率が高い結果となる。な お、hvが K 殻軌道電子の結合エネルギーより大きい場合、約 80%が K 軌道電子との光 電効果、約 20%が他の軌道(L 殻、M 殻など)電子との光電効果である。

光電子(photoelectron)

光電効果によって発生する高速二次電子、あるいは光電子増倍管の光電陰極から放 出される電子。

コベル法 (Covell's method)

計数値積算法ともいわれ、γ線スペクトル解析など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。 コールドフィンガー (cold finger)

Ge 半導体検出器のクライオスタットの中に付いている銅あるいはアルミニウム製の 棒(~2cm φ)で、Ge 結晶を冷却するため一方の端は液体窒素に接している。

コンプトンエッジ (Compton edge)

コンプトン散乱によって生成する二次電子(コンプトン電子)の連続エネルギー分 布のうち、最大のエネルギー(散乱角*θ* = *π*)に相当する部分。

- コンプトン散乱 (Compton scattering)
 - 光子と物質の相互作用の一つで、コンプトン効果ともいう。hvなるエネルギーの光 子は電子と衝突して散乱し、電子は反跳されて*E*eなる運動エネルギーをもつ二次電 子となる。散乱y線のエネルギーをhv'とすると、二次電子のエネルギーは、*E*e = hv – hv'となる。コンプトン散乱の断面積はクライン・仁科の式で正確に計算することが できる(ただし、自由電子)。y線スペクトルでは、連続スペクトル部分が二次電子の エネルギー分布に相当するが、さらに散乱y線の相互作用(光電効果など)によって エネルギー分布は異ったものとなる。大きな検出器ほど、このような多重相互作用 の確率が高くなるので、全エネルギー吸収の確率が高い。
- コンプトン電子 (Compton electron) コンプトン散乱によって生成する二次電子。
- サム効果 (coincidence summing effect, sum effect)
 - 2 個以上のカスケードにあるγ線が検出器内で同時に相互作用を行い、合計のエネル ギーに等しい波高値の信号が出力される現象。カスケードにある1 個以上のγ線がコ ンプトン散乱を起こすと出力パルス波高は連続分布に、両方が全エネルギー吸収を 起こすとエネルギーの和に等しいピーク(サムピークといわれる)になる。その結果 としてそのγ線ピークの計数率が減少する。他に、高エネルギーβ線とγ線のサム効果、 EC 壊変などでは特性 X 線とγ線のサム効果などがある。
- サムピーク (sum peak)
 - 2個のカスケードにあるγ線が検出器内で同時に全エネルギー吸収を起こすとエネル ギーの和に等しい波高値の信号になり、スペクトルにサムピークをつくる。
- 散乱 (scattering)

γ線のコンプトン散乱や核反応において、放射線が入射方向と異なる方向へ散乱する 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(核の励起などがない場合)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。 散乱γ線 (scattered gamma ray)

コンプトン散乱によって散乱されたγ線で、そのエネルギー分布は連続分布である。

時定数 (time constant)

CR 微分回路や積分回路において、コンデンサー容量(C)と抵抗(R)の積 $R[\Omega] \times C[Farad]$ は時間の次元をもつので、時定数といわれる。例えば、 $R = 10^5\Omega$ 、C = 10pFとすると、時定数 $\tau = 10\mu s$ となる。

- 質量数 (mass number) 原子核に含まれる陽子の数 (Z) と中性子の数 (N) の和 (A=Z+N)。
- 質量減弱(衰)係数(mass attenuation coefficient) 単位質量当りの相互作用断面積。「減弱係数」参照。

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ともいう。検出器内で電子対生成が起こり、生成した 陽電子が消滅して発生する2個の陽電子消滅放射線 ($m_0c^2 = 511$ keV) のうち1個が 光電効果、他の1個が相互作用をせず検出器外へ出る現象。 γ 線のエネルギーをhvと すると、観測されるエネルギーは、 $hv - m_0c^2$ である。ドップラー効果の影響を受け て、エネルギー分布は1keV 程度の広がりをもつ。「ダブルエスケープ」参照。

スケーラ (scaler)

ディスクリミネータを通過したロジックパルス信号を計数する計数装置で、測定時 間(プリセットタイム)の設定ができる。

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、一般的には後者を言うこ とが多い。α線やβ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。 γ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 ネルギー分布に他ならない。しかし、実際に観測されるγ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、統計的変動や雑音など 種々の「ゆらぎ」のために広がったパルス波高分布となる。

スペクトロメトリー (spectrometry)

スペクトルを測定する技術およびスペクトル解析の総称。α線が対象の場合はα線ス ペクトロメトリー、γ線が対象の場合はγ線スペクトロメトリーという。α線とγ線は 線スペクトルであるから正確なエネルギー情報をもつが、β線のエネルギー分布はも ともと連続であるので、特別な場合を除いてβ線スペクトロメトリーは行われない。

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ある電子が励起された残りの孔の状態をさし、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などによって生成する。結晶内部の電場 中では、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、見かけ上、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もつ電荷キャリヤ(坦体)として出力信号に寄与す る。

線形増幅器(linear amplifier)

入力信号に比例した出力信号を生成する増幅器で、リニアアンプあるいは比例増幅 器ともいわれる。高分解能スペクトル測定などに使われる線形増幅器には、直線性、 信号・雑音比(S/N)、計数率特性および安定性などに高い性能が要求される。

線減弱(衰)係数(linear attenuation coefficient) 単位容積当りの相互作用断面積。「減弱(衰)係数」参照。

全効率 (total efficiency)

γ線スペクトルのスペクトル全体(ピーク部分および連続部分)に対する計数効率。 ピーク・トータル比をPとすると、全効率=ピーク効率/Pで表される。散乱線の寄与 を含める場合と含めない場合がある。

前置增幅器 (preamplifier)

ー般に検出器の出力インピーダンスは高いので、信号をケーブルで伝送すると損失 など障害が生じる。それを避けるため、検出器に直結ないしは極く近くに置いて接 続し、入出力インピーダンス整合や増幅および波形整形をする増幅器である。

相対効率 (relative efficiency)

Ge 半導体検出器自体の計数効率を表す相対値で、⁶⁰Co の 1332.5keV γ線に対して次 のように定義される。ただし、⁶⁰Co 線源を検出器から 25cm の距離に置いて測定する。 相対効率(%) = 100・(Ge 検出器のピーク効率)/(3" φ×3" Nal 検出器のピーク効率) 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。 増幅器 (amplifier)

放射線測定に使われる増幅器には、大別して直流増幅器とパルス増幅器がある。目 的に応じていろいろな種類(機能と性能)のものが使われるが、信号・雑音比(S/N) を改善して入力信号を増幅することが目的である。パルス増幅器ではパルス波形整 形(シェーピング)や計数率特性の改善などが行われる。一般的に、線形増幅器が使 われるが、場合によっては対数増幅器やバイアス増幅器なども使われる。

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ともいう。検出器内で電子対生成が起こり、生成した陽 電子が消滅して発生する2個の陽電子消滅放射線($m_0c^2 = 511$ keV)が検出器内で相 互作用をせず検出器外へ出る現象。 γ 線のエネルギーをhvとすると、観測されるエネ ルギーは、 $hv - 2m_0c^2$ である。「シングルエスケープ」参照。

チャネル幅 (channel width)

マルチチャネル波高分析器を用いてα線やγ線のスペクトルを測定するさいに設定する1チャネル当りのエネルギー。例えば、波高値(ch)とエネルギー(keV)が比例 関係にある場合、4000ch で 2000keV とすると、チャネル幅は 0.5000keV/ch である。

ディスクリミネータ (discriminator)

波高弁別器ともいわれ、設定した基準電圧レベルより高いパルス波高値をもつ入力 パルスに対してのみ出力パルスを出す。出力パルスは計数装置(スケーラなど)ある いはタイミング系の入力信号に適したロジックパルスである。また、同時測定など のタイミング信号をつくるために使われる。シングルチャネル分析器は異なるレベ ル(可変)を持つ2つのディスクリミネータを内蔵している。

電子対生成 (pair electron production)

光子と物質の相互作用の一つ。hvなるエネルギーの光子は原子核がつくるクーロン 場で、電子対生成の相互作用によって電子と陽電子に変換される。電子の静止質量 エネルギーをm₀c²(511keV)とすると、生成した電子と陽電子の合計の運動エネルギ ーは、hv - 2m₀c²である。したがって、電子対生成を起こす光子の最低のエネルギー は 1022keV であり、光子エネルギーが高いほど断面積は大きい。軌道電子のクーロ ン場においても電子対生成が生ずるが、その割合は原子核による値の 1/Z となる (Z は原子番号)。「陽電子」、「陽電子消滅」および「陽電子消滅放射線」参照。

伝導帯 (conduction band)

半導体など固体結晶中で電子が自由に動くことのできるエネルギー準位帯。

内部転換 (internal conversion)

励起状態のエネルギー準位にある原子核がさらに低いエネルギー準位に遷移すると き、準位の差のエネルギーが軌道電子(K軌道電子など)に与えられ、その電子が軌 道から解放されて高速電子になる現象。その電子は内部転換電子といわれる。内部 転換とγ線の放出は競合過程にある。内部転換の起こる確率は準位間の遷移のモード によるが、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)

内部転換によって生成される高速電子。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。

パイルアップ (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 τ (s)とすると、パイルアップの数(s⁻¹)は $n\tau^2$ 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 あるい はピーク形状の劣化をきたす。

パルス波高 (pulse height)

パルス信号の最大の高さ(波高)をいう。ロジックパルスではパルス波高はほぼ一定 であるが、アナログ信号パルスは立ち上がる部分と減衰する部分からなり、最大の 値(volt)をパルス波高という。半導体検出器などの場合には、出力パルス波高は検 出器有感部内で吸収された放射線のエネルギーに正確に比例している。

パルス幅 (pulse width)

ロジックパルスではパルス幅はほぼ一定であるが、アナログ信号パルスではパルス 波高の 1/2 または 1/10 に相当する幅をいう。

バックグラウンド (background)

一般的には、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 たときの計数値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。

波形整形 (pulse shaping)

放射線測定の目的に応じて、微分回路と積分回路のいろいろな組み合わせ(フィル ター回路)がパルス波形整形に使われる。例えば、高いエネルギー分解能のスペクト ル測定では、パルスの周波数成分を狭くして高周波雑音および低周波雑音を低減す ることによって信号・雑音比 (S/N)が向上する。微分時定数を小さくして狭いパルス 幅の波形にすることによって、高計数率測定では計数率特性が改善され、同時・反同 時測定では時間分解能が向上する。

波高選別器(discriminator)

「ディスクリミネータ」と同じ。

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 10 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A₀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。

 $A = A_0 \cdot \exp(-0.693t/T)$ 、または、 $A = A_0/2^{(t/T)}$ なお、 $\ln(2) = 0.693$ …であり、半減期と壊変定数(λ)の関係は、 $T = \ln(2)/\lambda$

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(σ)との関係は、 FWHM=2.355 σ 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、電子が 1 個少ない正孔がつくられて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 などで、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に対する 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ε = n/Iと表される。γ 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 試料の幾何学的条件に依存する他に、自己吸収やサム効果など複雑な補正因子を含 むこともある。

ピーク効率変換(efficiency transfer) あるジオメトリにおけるピーク効率を元として、同一検出器の異なるジオメトリに おけるピーク効率を求める手法。

- ピーク・コンプトン比 (peak to Compton ratio)
 - Ge 半導体検出器の性能指標の一つ。⁶⁰Co の 1332.5keV y線のピークの高さ(計数値) と連続スペクトル部分における 1040~1096keV 間の平均計数値の比で定義される。 したがって、Ge 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 30~60:1 である。
- ピーク・トータル比 (peak to total ratio)

あるエネルギーのγ線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)に対する計数効率である。一般的に、Ge 結晶が大きいほど多重相互 作用の確率が高いので、ピーク・トータル比は大きくなる。

ピーク面積 (peak area)

α線スペクトルやγ線スペクトルにおいて、ピーク領域におけるピークの正味積算計 数値をいう。γ線スペクトルではピークの下にある平坦部の計数値は含まない。

- ピーク領域 (peak region)
 - α線スペクトルやγ線スペクトルにおいて、ピーク面積を求めるために設定するチャ ネル領域。解析方法(コベル法、フィッティング法など)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×FWHM とすることが多い。

比放射能 (specific activity)

放射性同位体を含む物質の単位質量あたりの放射能。単位は、Bq/g等である。

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)。絶対測定法などで決定される 一次標準、それとの比較測定で決定される二次標準などがある。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)

標準偏差(σ)は正規分布関数(ガウス分布関数)において、分布の広がりを表す値である。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 68.3%になる。また、 $\pm 2\sigma$ で約 95%、 $\pm 3\sigma$ で 99.7%である。計数値がポアソン分布に従うとすると、計数値(N)の統計誤差(σ_N)は、 $\sigma_N = \sqrt{N}$ なる関係で表される。なお、 σ^2 は分散といわれる。

フィッティング法 (fitting method)

測定データなどに対してある数学的関数を仮定し、最小二乗法を用いて関数に含ま れる未知パラメータを決定する計算法。全てのパラメータが関数の中に線形で含ま れている場合には、線形最小二乗法が適用でき、パラメータの幾つかが非線形で含 まれている場合には、非線形最小二乗法が適用される。例えばγ線スペクトロメトリ ーにおけるピーク解析の場合、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が決 定される。

不感層 (dead layer)

Ge 検出器の結晶の外側表面が n⁺type のものでは、その厚さは 0.5~0.7mm 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。

複合ピーク (complex peak)

α線スペクトルやγ線スペクトルにおいて、着目するピークの解析領域内に他のピー クが存在する場合、あるいは、領域外であっても解析に影響するピークがある場合、 それらを含めて複合ピークという。

平滑化 (smoothing)

スペクトルや時系列データなどの統計的変動を減らすための数値計算の手法。着目 する領域のデータ(計数値など)に対して前後数個のデータの平均をとる移動平均、 各データに「重み」を乗じて和をとる荷重移動平均などがある。

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)

- 1) パルス波形においては、電圧(流)がゼロレベルのライン。
- 2) γ線スペクトルなどにおいては、ピークの下に存在する平坦な部分。

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、次のように表される。

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

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

ここで、n = mであるから、nは計数誤差(1σ)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。

- (放射性) 壊変 ((radioactive) decay, (radioactive) disintegration) 「壊変」と同じ。
- 妨害ピーク (interruption peak)

γ線スペクトルなどにおいて解析対象ピークをコベル法(計数値積算法)などで解析 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、両核種の放射能は等しくなる。子孫核種の半減期が親核種の半減期より長い場 合は、子孫核種の放射能は親核種の放射能より大きくなる。

- マルチチャネル波高分析器 (multichannel pulse height analyzer; MCA)
- スペクトルを測定する装置で、MCA ともいわれる。アナログ量であるパルス波高(単 位:ボルト)をディジタル量(単位:チャネル)に変換するアナログ・ディジタル変 換器(ADC)、波高値ごとに計数値を記録するメモリー部、入出力インターフェース、 演算や制御のための電子回路などからなる。Ge 半導体検出器を用いるγ線スペクト ル測定には、4k、8k、16k チャネルの MCA が使われる。現在では、全ての機能が一体 構造となったタイプが主流である。

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

乱数を用いた数値計算を繰り返すことによって、求める解の確率的近似を求める手 法。原子力・放射線計測の分野では、

ライブタイム (live time)

マルチチャネル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)に対し てパルスの分析時間(不感時間)を補正した測定時間。測定時間(プリセットタイ ム)をライブタイムで設定すると、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、リアルタイムより少し長い時間測定される。 [略語]

ADC (Analog to Digital Converter)

マルチチャネル波高分析器(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)をチャネル数(ディジタル量)に変換する機器。

BNC

信号伝送のために使う同軸型ケーブルコネクターの一つ。

- FWHM (Full Width at Half Maximum) 半値幅ともいわれ、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。ガウ ス分布の標準偏差をσとすると、FWHM=2.355σ なる関係にある。
- 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。

- 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)。
- LLD (Lower Level Discriminator) あるレベル (電圧) 以下の信号をカットする機能。
- MCA (Multi-Channel Analyzer) PHA ともいわれる。マルチチャネル波高分析器。
- MCS (Multi-Channel Scaler) マルチチャネルスケーラ。マルチチャネル波高分析器のメモリーを時間軸のスケー ラとして使う方式。
- PA (PreAmplifier)

プリアンプ、前置増幅器。

PHA (Pulse Height Analyzer) 波高分析器。「マルチチャネル波高分析器 (MCA)」参照。

RI (radioisotope)

ラジオアイソトープの慣用的略語。

ROI (Region Of Interest)

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

ULD (Upper Level Discriminator) あるレベル (電圧) 以上の信号をカットする機能。

第3章 γ線測定の基本原理

ゲルマニウム半導体検出器による γ 線測定は、入射した γ 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 γ 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γ線スペクトロメ トリーの基礎であり、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γ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、その他に遮蔽体内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γ線やX線)によるものが含まれる。

γ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)がγ線の エネルギー情報と放出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。

3.1 γ線と物質との相互作用の種類及び性質

3.1.1 光電効果

γ線は Ge 検出器の有感部内に入射して全エネルギー(Eγ)をゲルマニウム原子の 軌道電子(KまたはL軌道電子、結合エネルギーI)に与えて、Eγ-Iの運動エネルギ ーをもつ高速電子(光電子ともいう)を生成する。この現象は光電効果といわれる。

EγがK 軌道電子の結合エネルギー(IK)より大きいときは、約80%がK 軌道電子 との相互作用で、20%が他の軌道電子との相互作用である。

光電効果の確率(全ての軌道電子を含む)はγ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γ線において顕著な相互作用である。

— スペクトルとの関係 —

- (1) 光電効果に続いて発生する全てのゲルマニウム特性 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 y 線のエネルギー(E y)に等しい。ほとんどの場合、光電効果では y 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 y 線の正確なエネ ルギー情報をもつ。これは単一エネルギー分布を作り、スペクトル中の光電ピ ーク(図 2-1 のピーク PP)として観測される。
- (2) γ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、γ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(Ex)を差し引いた値(Eγ-Ex)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) 鉛しゃへい体など原子番号の高い周辺物質においてγ線による光電効果が生 ずると、その物質表面近傍で発生した特性 X 線(鉛の場合、KX:72、85keV. LX:約10keV)が検出器に入射して検出される(図2-1のピークKX)。それを 除くには鉛しゃへい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γ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良い)に付与 され、γ線は消滅せずに、残りのエネルギーを持って散乱されることがある。このと き、γ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γ線(Eγ')となる。

生成する高速電子のエネルギー(Ee=Eγ-Eγ')は散乱γ線の散乱角に依存して相 互作用の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もち、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γ線エネルギーが数 10keV 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 コンプトン散乱の確率が高くなるので、数 100keV 以上のエネルギーのγ線において顕 著な相互作用である。

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

— スペクトルとの関係 —

連続スペクトル(図 2-1の連続部分)はγ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。

(1)しかし、散乱 y 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 y 線のエネルギーに等しく、結果として入射 y 線エネルギーに相当する出力信号 を生ずる。実際の Ge 検出器では、数 100keV 以上の y 線に対しては、この多重の 相互作用が光電ピーク(図 2-1 のピーク PP)をつくる主たる過程である。検出器 の有感部容積が大きいほど上記の多重相互作用の確率が高くなるため、スペクト ル中の光電ピークはコンプトン連続部にくらべて相対的に増大する結果となる。

- (2) 鉛しゃへい体など周辺物質においてγ線によるコンプトン散乱が生ずると、発生した散乱γ線が検出器に入射して検出される。散乱γ線の最小エネルギーは散乱角180度の場合に相当し(図2-1のピークBS)、入射γ線のエネルギーまで続く連続分布となる。その形状はγ線源・検出器・しゃへい体の間の幾何学的条件に依存するが、散乱角が90度以上の後方散乱が多い。検出器しゃへい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

γ線エネルギーが 2m₀c²(2個の電子の静止質量エネルギー=1.022MeV)以上の場合 には次のような相互作用が生ずる確率がある。1.022MeV 以上のエネルギーを持つγ線 が原子核近傍のクーロン場を通過する際、γ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、 γ 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 y 線エネルギーが 2m₀c² 以上の場合に起こる相互作用であり、その確率は y 線エネルギーが高いほど大きくなる。しかし、1.5MeV における確率は全相互作用の確率の 100 分の 1 程度であり、さらに高いエネルギーにおいて顕著な相互作用である。

発生した高速陽電子は検出器内で運動エネルギーを失い、熱エネルギー程度(0.1eV) となった陽電子は近傍に存在する電子と結合して消滅し(陽電子消滅)、2個の陽電子 消滅光子(E=m₀c²)に変換される。

- スペクトルとの関係 -

陽電子消滅の結果、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個の消滅光子が相互作用をせずに検出器外に出る。この現象はダブルエスケープ といわれ、出力信号は次の値に相当する。

 $E = E \gamma - 2m_0 c^2 \qquad (図 2-1 \mathcal{O} E)$

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

 $E = E \gamma - m_0 c^2 \qquad (図 2-1 \mathcal{O} \lor - \mathcal{O} SE)$

(3)1個の消滅光子が光電効果を起こし、他の1個は検出器外に出る。この現象はシン

グルエスケープといわれ、出力信号は次の値に相当する。

 $E = E \gamma - m_0 c^2 \qquad (図 2-1 \mathcal{O} t^\circ - \mathcal{O} SE)$

- (4)1 個または2 個の消滅光子が検出器内でコンプトン散乱を起こす。出力信号は連続 分布となる。 (図 2-1 の連続スペクトル部分)
- (5)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 2-1 のピーク PP)は大きくなり、エスケープピーク(図 2-1 のピー ク DE と SE)および連続部分は相対的に減少する結果となる。

鉛しゃへい体など周辺物質においてγ線による電子対生成が生ずると、そこで発生 した消滅光子が検出器に人射して 511keV のピークになる(図 2-1 のピーク 511)。電 子-陽電子対が検出器内で消滅する時の運動量は0ではないので、生成する陽電子消滅 放射線はドップラー効果の影響を受けてエネルギーは511±1keV 程度以下の範囲で増 減する。この結果、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γ線の作るピークにくらべて多少広い半値幅をもつので、スペクトル 解析の際に注意する必要がある。



図 2-1 y線との相互作用によって Ge 検出器内に生ずるエネルギー分布

3.2 ピーク解析

単一のエネルギーを持つγ線が検出器に入射して相互作用を起こした結果、図 2-1 に示すようなエネルギー分布が得られる。実際の試料のγ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γ線が混在するため、スペクトルはそれらのγ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γ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。ピーク中心チャネルは検出されたγ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γ線の数に比例するため、 これらを用いることにより、γ線放出核種の同定(定性)および定量が可能となる。

ピーク中心チャネルをγ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γ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γ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」に示した。



図 2-2 Ge 検出器で得られる y 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γ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確率がある。これはサム・ コインシデンス効果あるいやサム効果(coincidence summing)と呼ばれる。2個の光 子が同時に放出される場合を仮定すると、

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

このようなサム効果の現象が生じると、測定対象とする全エネルギー吸収ピークの 計数率は減少(サム・アウト)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 γ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・コインシデンス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サム効果は顕著に現れる。Ge 検出器結晶が大きくなる 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(光子の物質中での減弱(attenuation)及び減弱係数)

γ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出来ない補正項の1つである。試料容器などの線源支持体による吸収や試料自体に よる吸収(自己吸収という)がその例であり、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γ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。γ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γ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γ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、 検出器と試料との幾何学的な位置関係(ジオメトリ)など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 10%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減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γ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γ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と なるが、当該機能を実装したγ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 γ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)、遮蔽体及び解析装置(PC及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 y 線スペクトロメータの基本構成

(図は差し替え予定)

4.1.1 Ge 半導体検出器

Ge 結晶に γ線が入射すると Ge 原子の電子が弾き飛ばされ、この電子が回りの Ge 原 子の電子をつぎつぎに剥ぎ取っていく。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。全ての電子と空席の対(これを電子・正孔対という)の数 は γ線エネルギーに比例する。電子・正孔対をすべて収集することができれば γ線のエ ネルギー解析(スペクトロメトリ)が可能となる。

これを実現するために高純度の Ge¹に Ga などの第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。Ge 結晶の y 線が入射する外側に Li を熱拡散した電極 (n+電極、厚さ 0.5~0.8mm 程度、y 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+電極を作る。外側の n+電極にプラス、内側の p+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し y 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 Ge 検出器では 40keV~10MeV の y 線を測定することができる。さらに低エネルギーの y 線を測定するような場合は n 型 Ge 検出器²を用いる必要がある。図 4-2 に一般的な同軸型Ge 検出器の構造を示す。

①エンドキャップ
②カップ
③Ge 半導体結晶
④固定ナット
⑤固定郡
⑥クーリングロッド留金
⑦熱絶縁体 (プラスチック FET)
⑧シールド
⑨クライオスタットフランジ
⑪前置増幅器
⑪高圧フィルタ
⑫樹脂リング
⑬デュワーフランジ
⑭デュワーびん

図 4-2 Ge 半導体検出器構造図

1

2

3

-@

6

7

9

D

12

ദ്ര

10

6

(8)

0

¹高純度の Ge 半導体には、含まれる不純物によって n 型(As、P 等の第 5 族元素の不 純物)と p 型(Ga、In 等の第 3 族元素の不純物)があり、ともに半導体検出器として 利用される。

² n型は結晶にホウ素イオンを注入して p+電極を作るので、不感層を薄くすることが でき(~0.3µm厚)、ベリリウムなど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。

4.1.2 冷却装置

Ge 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℃)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

(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。液体窒素の消費量は1 日あたり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

ヘリウムなど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。装置の長期間の安定動作と電気的雑音の点でやや問題があるが、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耗はほとんどなく、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

ガスコンプレッサ



(2) 電気冷却



(3) ハイブリッド冷却

図 4-3 Ge 半導体検出器の冷却装置

4.1.3 前置增幅器

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。高いインピーダンス(交流成分に対する抵抗)の検出器に整合するために入力インピーダンスは高く、同時に低いインピーダンスの増幅器に整合するように出力インピーダンスは低く設計されている。電気的にはパルスの減衰や反射や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、y線とGe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(チャネル)に変換 し、変換されたチャネルに相当するスペクトルメモリー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、チャネル (y線エネルギーに相当)あ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y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ネル数として、γ線スペクトル測定では 4000~8000 チャ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 るスループット、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 Ge 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4π方向にわたって 10~15cm 厚の鉛で遮蔽する必要がある。 (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)アクリル枚で内張りすると良い。

鉛:5cm 厚でコバルト 60 の γ 線透過率は 6~7% になる。

鉄:5cm 厚でコバルト 60 の γ 線透過率は 30%前後になる。戦後製造された鉄の

中には、コバルト 60 が含まれている場合があるので、予め検査するか又は戦前 に製造された物を用いる。

- 銅:鉛の KX 線や、ウラン系列及びトリウム系列の核種からの低エネルギーγ線 を低減させるために銅やカドミウムを内張りする事がある。
- 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。
- しゃへい体の内張りを鉛、銅、鉄およびアクリルに変え、コバルト 60 線源の直接線 をしゃへいし後方散乱線のみを測定した例を図 4-4 に示す。



図 4-4 鉛しゃへい体の内張材と散乱線

(2) 内容積

後方散乱γ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。普通は 20×20×20~30×25×50cm であるが、分解能測定には 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。

2L マリネリ容器を使用し試料を測定するのであれば、30×25×50cm 以上の内容積 が必要である。

(3) 重量

しゃへい体の重量は 1.5~3 トンになるので、測定室の許容床荷重をそれ以上にしておく必要がある。

(4) しゃへい体に含まれる放射性物質

バックグラウンドを48時間測定して、人工放射性核種のピークが検出されない事。 15cm厚さの鉛で4π方向をしゃへいするしゃへい体の場合、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。

衣4-1 しやべい体に召まれる放射性物質								
核種など	⁴⁰ K	²²⁸ Ac	²¹⁴ Bi	²⁰⁸ T1	連続領域			
エネルギー	1460	911	609	584	at 120			
計数率	$30 \sim 90$	$50 \sim 120$	$200 \sim 500$	$180 \sim 400$	$150 \sim 500$			

表 4-1 しゃへい体に含まれる放射性物質

(注:連続領域の計数率は、(counts/day)/keV、

他は(counts/day)/peak である)

(5) 重量計(液体窒素容器の下に設置する)

(6) 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。この時は、十分な換気を行うこと。



図 4-5 縦型検出器しゃへい体の一例



図 4-6 L 字型検出器しゃへい体の一例

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

4.1.7 測定室

Ge 半導体検出器を設置する測定室の理想的な条件は次の通りである。

- (1) 空調が適切である。
 - ・温度変化の範囲と変化速度が小さいこと。23±2℃の範囲で安定しているのが望ましい。
 - ・湿度が 50~60%の範囲で安定しているのが望ましい。 空調機の風や、日光が直接機器に当たらない。
- (2) 放射能汚染に関して配慮されている。
 - ・汚染の恐れがない。
 - トレーサー分析室等から空調、排気の回り込みがない。
 - ・原子力施設等の事故時など、外気の取り込みを防止できるようにする。
 - ・清掃が容易である(床材の種類、機器の配置などに気を配る)。
- (3) 管理に関して
 - ・入退室に際してスリッパを履き換える。
 - ・測定試料調製は別室で行う。
 - ・紙パック式掃除機を使用し、毎月ゴミを灰化して測定し、汚染を確認する。
- (4) バックグラウンドが低い。
 - ・ラドンガス濃度が低い。数 Bq/m3 程度以下が通常の環境レベルである。 地下室は換気を十分にする。
 - ・強い標準線源などを近くに保管しない。
 - γ線照射装置などの近くでない。
- (5) 構造が適切である。
 - ・大きな床荷重に耐えられる。不足であれば、補強する。
 しゃへい体は造り方によっては~3トンに達する物もある。
- (6) 雑音等が低い。
 - 商用電源に雑音がない。
 - ・良い接地を用意する。
 - ・施設が工場地帯にあるとき等は周波数成分などの特徴を調べて、適合した ノイズフィルターを利用する。
 - ・掃除機等の動力電源は別に用意することが望ましい。

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 γ 線放出核種の種類及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、検出器及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、γ線スペクトルを正常に測定するために必要な測定機器のハードウェ アの校正(調整)とは別個のものである。

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あたっては、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(チャネル)とそれに 対応する y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 y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 象エネルギー領域全般をカバーできる y線源を測定したスペクトルを用いて行う必要 がある。ピーク中心と y線エネルギーの関係を最小二乗法で求めるが、使用する式は 一次式または二次式で十分であり、高次の多項式を用いる必要はない。

$$E(keV) = a \cdot ch^2 + b \cdot ch + c \ (\exists \land \exists)$$

5.2 半值幅校正

エネルギーとチャ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。これは、解析プログラムがピーク面積の計算等を行う際用いられる。 ピークの半値幅(w)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。

$$w(keV) = a \cdot E(keV)^{1/2} + b \cdot E(keV) + c$$

得られたピークの半値幅とγ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

γ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γ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 ε である。

$$\varepsilon = \frac{R}{S \cdot P}$$

ここで R はピーク計数率 (cps)、S は線源強度 (Bq)、P は着目している γ 線の放出 比である。 (使用する記号は全体で整合するように修正中)

ピーク効率は次の要因によって影響を受ける。

- γ線エネルギー
- ・検出器の形状
- ・検出器に対しての測定試料の幾何学的配置(ジオメトリ)
- 測定試料容器の形状、材質、測定試料の材質
- ・測定試料の化学的組成

測定試料のγ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、γ線エネルギー、測定試料の形状、材質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(単一核種線源)

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。対 象が単一核種の場合に用いられる。

測定のトレーサビリティーを確保するには、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、核種の添加値及び不確かさ 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)

なお、トレーサビリティーが確保できるのは、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γ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。

(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γ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リングを用いて計 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γ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 モデルを修正する必要がある。

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y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、想定される全ての試料 形状、材質に対応するジオメトリを持つ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(ジオメトリ、 y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、標準試料と異なる形状、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γ線 放出核種を含む標準線源を用い、得られたピーク効率をγ線エネルギーの関数に対し て関数化する(この時に得られるピーク効率とγ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、標準線源に含まれる以 外の任意のγ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法

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γ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γ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。(方法の詳細は資料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、同一検出器の別のジオメトリ(異なる形状、材質の測定試料)のピーク効率に換算する手法である。(なお、前項(1),(2)の手法も基本的な原理は同じであり、広義では本手法に含まれる。)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及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 Ge 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測定ジオメトリを用いて比を計算することで、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、例えば円柱形の標準試料のピーク効率から、直径、高さが 異なる円柱形試料の任意の材質、任意のγ線エネルギーに対するピーク効率を得るこ とが可能となる。更に、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:円柱→円柱)には有効であるが、大きく異なるジオメトリ間の変換(例:円柱 →マリネリ容器)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、円柱型容器の試料に対して適用した例を解説H「ピーク効 率変換(Efficiency Transfer)」に示した。

上記の手法のうちの何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 計算するにあたっては、換算係数の妥当性を確認しておく必要がある。(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γ線スペクトロメトリーで使用する核データ(半 減期、γ線エネルギー及び放出率)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。近年では、インターネットで公開されているものもある。

-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/endf.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)及び平成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 験において環境試料中に検出される可能性のある人工放射性核種及び自然放射性核種 を解説E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。

y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γ線強度 [γ/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γ線強度 [γ/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γ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、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、放射能測定法シリーズ No.13「ゲルマニウム 半導体検出器等を用いる機器分析のための試料の前処理法」を、緊急時における測定・ 解析については、放射能測定法シリーズ NO.29「緊急時におけるγ線スペクトル解析法」 を合わせて参照のこと。

7.1 測定試料の調製

γ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。

7.1.1 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(V-1、V-2、V-3、 V-5、ラストロウェア、U-4、U-8 などの名称)、マリネリ容器(2L,1L,700mL)などがあ 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を考慮して決め る。円筒容器は、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 リ容器は円筒容器よりも大量の試料を収容できるがピーク効率は円筒容器よりも低く なる。牛乳、海水、陸水等の液体や細断した野菜など、供試量が多く、前処理を施さな いでそのまま測定する場合に良く用いられ、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有用である。

供試量を同量にして測定を実施した場合、容器の底面積や底厚で計数率が変わるの で、底厚が薄く、底面積が約 40 cm²(検出器結晶の大きさで多少異なる)程度の容器の ピーク効率が大きくなる。但し大きさの違う容器を使用すると、それぞれの容器毎に ピーク効率を求めておく必要が生じるため、必要以上に容器の種類を増やさない方が よい。

7.1.2 試料の充填

Ge 半導体検出器を用いると非破壊・非侵食で試料中の放射能濃度の分析が可能であ るので、環境試料でも、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、沈澱)で測定に供する事が多い。ただし放射化学分析実施時よりも測定試料 の嵩が大きくなり、

・他の試料との相互汚染を起こさない事。

・容器内で粗密がなく均一になっている事。

・容器内で崩れないように固定する事。

などに注意する必要がある。

測定試料調製の具体的な手順の例を解説Cに示した。

7.2 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替 えることで、検出器への汚染のリスクを下げることができる¹。

7.2.1 試料の測定手順

試料の測定手順を以下に示す。

- ① 測定試料を検出器のエンドキャップ上に置く2。
 - ・測定試料と検出器の位置関係(ジオメトリ³)は効率校正用の標準線源と同じとなるようにする⁴。
 - ・マリネリ容器の場合は、液体窒素重量モニタの重量の変化を確認する5。

 ・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。

- 前回測定した y 線スペクトルを消去する。
- MCAのメモリに前回測定した γ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。
- ③ 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測定を開始する。
 - ・測定の開始時刻を記録する。
 - ・MCA(もしくは PC)の測定開始時刻と実際の時刻が一致していることを確認 する。
 - ・測定時間(リアルタイムもしくはライブタイムの)が増えていることを確認す

- ³ジオメトリには測定容器及び測定容器内の試料の充填高も含まれる。マリネリ容器の場合、 校正用線源と同様に標線まで試料を充填する必要がある。
- ⁴ ジオメトリが再現できる専用の冶具を使うのが良い。冶具がない場合は、印をつけるなど、 ジオメトリを担保できるような工夫をする。
- ⁵ 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)、マリネリ容器 に被せた袋内の空気が十分に抜け切れていないことがあげられ、閉じ込められた空気の圧 でクライオスタットに負荷がかかり、故障の原因となる。
- ⁶ 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。

¹ 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。

² 活性炭カートリッジを測定する場合は、過小評価を避けるために、吸引面を検出器のエンド キャップ側になるように置く。

る。

・デッドタイムを確認し、10%以上の場合は必要に応じて試料量を減らす。

・着目ピーク(40K や ¹³⁷Cs など)に±1keV 以上のドリフト(ずれ)が無いことを確認する。

時間間隔を空けて確認⁷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+ 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⁸。

・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 測定の記録をする。

・測定に関して記録すべき測定情報の例を表 7.1 に示す。このため、測定情報 を記録できるノートをあらかじめ準備しておく必要がある。

① 測定を終了する。

・所定の測定時間に達したら、測定停止ボタンを押す。

・プリセットタイムを設定した場合は、測定が終了したことを確認する。

・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 y 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、y 線スペクトルを読み込むなどすると、正しく保存され たことを確認できる。

⑦ 測定試料の取り出し

・遮へい体の扉を開けて、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。 ⑧ 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、汚染確認用のバックグラウンドを 測定し、汚染のチェックをした方が良い。

⁷ 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。

⁸ 電気的な雑音(ノイズ)による影響が考えられ、配線の見直しや LLD(Lower Limit Discriminator)の変更により改善する場合もある。改善しない場合は、検出器メーカに連絡 する必要がある。

項目	記録する内容
①測定番号	測定器に依存する番号(連番など)
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
	プリセットタイムもしく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	測定をした試料名及び試料番号
	必要に応じて、測定容器、試料重量、充填高、密度、材質も記録
⑦備考	測定するに当たって気づいた点を記録

表 7.1 記録すべき測定情報の例

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間違いないことを確認 する。

←③測定試料を検出器のエンドキャップ上に置く。

- ・校正用線源と同一のジオメトリである。
- ・マリネリ容器の場合、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。

←④前回測定した γ 線スペクトルの消去(保存済みであることを確認後に)

←⑤測定時間(プリセットタイム)の設定(3時間~24時間が目安)

←⑥測定開始

- ・測定開始時刻を記録する。
- ・MCA(もしくは PC)の測定開始時刻と実際の時刻の確認
- ・測定時間(ライブタイム)が増えていることを確認する。
- ・デッドタイムを確認する。

10%以上の場合、必要に応じて試料量を減らす。

・着目ピーク(40Kや137Csなど)のドリフトが起きていないことを
 確認する。

時間間隔(30分~数時間に1回程度)を空けて確認する。

- ・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。
- ・短時間のうちに人工放射性核種のピークが確認された場合は、試料調製 担当者に相互汚染の警告をする。

←⑦測定情報を記録する(表 7.1参照)。

←⑧測定終了

- ・ 測定の停止ボタンを押す(プリセットタイムをセットしなかった場合)
- ・ 測定終了していることを確認する (プリセットタイムをセットした場合)
- ・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 γ 線スペクトルを保存する。

←⑨測定試料の取り出し

- ・ジオメトリ(測定試料と検出器の位置関係)を確認する。
- ・取り出した測定試料と記録の照合をする。

←⑪測定試料の保管

- ・所定の場所に保管する。
- 可能であれば、放射能濃度の高い試料は別に保管する。
- ・必要に応じて、検出器の汚染チェックを行う。
 放射能濃度が高い試料の測定後は、汚染確認用のバックグラウンドを測定して、汚染のチェックを行う。

解析

図 7.1 試料の測定手順フロー図

No.	確認事項	チェック欄
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間違いないことを確認する。	
③測定	試料を検出器のエンドキャップ上に置く。	
1	校正用線源と同一のジオメトリである。	
2	マリネリ容器の場合、液体窒素重量モニタの重量の変化を確認する。	
3	検出器が汚染しないように注意する。	
④前回	測定したγ線スペクトルの消去	
4	前回測定したγ線スペクトルを消去する。	
	(保存済みであることを確認後に)	
⑤測定	時間の設定	
5	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)	
⑥測定	開始	
6	測定開始時刻を記録する。	
7	測定時間(ライブタイム)がカウントアップしている。	
8	デッドタイムを確認し、10%以上の場合は必要に応じて試料量を減らす。	
9	着目ピーク(⁴⁰ K や ¹³⁷ Cs など)のドリフトが起きていない。	
10	低エネルギー領域に幅広いピークがない。	
11	短時間のうちに人工放射性核種のピークが確認されない。	
	(確認された場合、試料調製時の相互汚染を警告するために前処理担当者	
	へ連絡する。)	
⑦測定	情報を記録する。	
12	測定情報(測定番号、測定開始日時他)を記録する。	
⑧測定	終了	
13	測定停止ボタンを押す (プリセットタイム設定しない場合)。	
14	測定時間が終了している (プリセットタイム設定した場合)。	
15	ライブタイムと測定終了時刻を記録する(必要に応じて)。	
16	測定したγ線スペクトルを保存する。	
⑨測定	試料の取り出し	
17	測定開始時のジオメトリ(測定試料と検出器の位置関係)と同一である。	
18	取り出した測定試料と記録の照合が一致する。	
⑪測定	試料の保管	
19	所定の場所に保管する。	
20	可能であれば、放射能濃度が高い試料は別に保管する。	
21	必要に応じて、検出器の汚染チェックを行う。	

7.2.2 デッドタイムが増加した場合の対応

鉱石試料のように高い放射能量を有する試料を測定する場合、検出器へ入射する γ線の数が膨大となり、電子機器の信号処理は過負荷状態となり、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。

- ・異なる核種などからのγ線によるランダムサムの発生
- ・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

ランダムサムやパルスパイルアップでは、γ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(目安として 10%程度) は、試料量を減らして、測定試料から放出されるγ線の数を減らす必要がある⁹。

7.3 スペクトル解析

スペクトル解析では、γ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、 ピークの位置からγ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。

ピークサーチ、ピーク面積の計算(コベル法、関数適合)については解説に記述しま す(作成中)

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、照合できなければ不明ピーク扱いとなり正しく照合できず、核種の誤認 が起こり得る。また、放出率の小さい y 線ピークも観測されることが考えられ、定量 用の放出率の大きい y 線ピークだけではなく、放出率の小さい y 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。さらに、検出と判定された y 線ピークに ついても、ベースラインの統計変動に起因して、ピーク形状を成しておらず、解析上検 出と判定される可能性が高くなる。

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、y線スペクトルを目視で確認するなど、測定担当者による確認が y線スペク トル解析では重要となる。

7.2.1 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。

⁹ 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γ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ピーク効率校正をしておく必要がある。

・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、測定試料重量(単位含む)、充填高、密度、測定試料材質、測定担当者名など。

- ② ソフトウェアが解析で使用する各種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、相対効率もしくは P/T 比校 正ファイル、サム効果補正用のデータファイル及び効率校正ファイル等
- 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)
 - ・減衰補正の条件を選択する。

採取開始もしくは終了日時、採取期間の中間¹⁰、減衰補正しない、などから いずれかを選択する。

- ・ピーク領域の計算方法(コベル法もしくは関数適合)を選択する。
- ・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 解析結果の帳票出力
 - ・ピークサーチ結果、ピーク定量結果、γ線スペクトル図などを出力する。
- ⑥ 解析結果の確認

・解析結果の帳票に記載されている測定試料情報、各種校正ファイル及び解析 条件を2人で読み合わせなどして、間違いがないことを確認する。

- ・ γ線スペクトル上の着目ピーク(40Kや137Csなど)の±1keV以上のドリフトの有無
- ・検出された核種を確認する。
 - γ線スペクトルを拡大してγ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検出でないかを確認)
- ・放出率の小さいy線ピークについても確認を行い、同定の精度を高める。
- ・逐次的に壊変する核種の場合は、親核種もしくは子孫核種のγ線ピークも確認する。

・他の放射性同位体によるγ線ピーク(例:放射性ヨウ素の同位体)を確認する¹¹。

・不明ピークについては、エネルギー順の核データ(解説 E)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。

¹⁰ 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、採取開始日時までの減衰補正を選べば良い。

¹¹ 放射性セシウムである ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs は、それぞれ中性子放射化生成核種と核分裂生成核種 であり、生成過程が異なることに留意する。

測定した γ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。

γ線スペクトル

←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、 測定試料重量(単位含む)、充填高、密度、測定試料材質、測定担当者名など 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)ファイルを登録する。

- ・相対効率もしくは PT 比校正ファイルとカスケードファイルを登録する。
- ・効率校正ファイルを登録する。

←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。

採取開始もしくは終了日時、採取期間の中間、減衰補正しない、などから いずれかを選択する。

・ピーク領域の計算方法を選択する。

コベル法もしく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ンウ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、γ線スペクトル図などを出力する。

←⑥解析結果の確認

・解析結果の帳票の記載事項を2人で読み合わせなどをして、確認する。

γ線スペクトル上の着目ピーク(40Kや137Csなど)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。

γ線スペクトルを拡大してγ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検出でないかを確認)
- ・放出率の小さいy線ピークについても確認を行い、同定の精度を高める。
- ・逐次的に壊変する核種の場合は、親核種もしくは子孫核種のγ線ピークも確認する。
- ・他の放射性同位体による y 線ピーク(例:放射性ヨウ素)を確認する。
- ・不明ピークについては、エネルギー順の核データ(解説 E)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γ線スペクトルの解析手順フロー図

No.	確認事項	チェック欄
①測定	試料情報の登録	
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、	
	測定試料重量(単位含む)、充填高、密度、測定試料材質、測定担当者名	
	などを正しく登録している。	
②各種	校正ファイルの登録	
2	エネルギー校正(半値幅校正含む)ファイルを正しく登録している。	
3	相対効率もしくは PT 比校正ファイルとカスケードファイルを正しく登録	
	している。	
4	効率校正ファイルを正しく登録している。	
③解析		·
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	適切なピーク領域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。	
④解析	。 の実行	
⑤解析	結果の出力	
10	ピークサーチ、ピーク定量結果、γ線スペクトル図を出力している。	
⑥解析		
11	解析結果帳票の記載事項に間違いがない(2人で読み合わせなど)。	
12	検出された人工放射性核種のγ線ピークについて	
	 γ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か 	
	確認している。	
	 ・シングルエスケープ、ダブルエスケープ、サムピーク、ランダムサムピー 	
	クの可能性を検討している。	
	 ・複数のγ線を放出する核種の場合は、放出率の小さいγ線ピークも確認 	
	している。	
	 ・逐次的に壊変する核種の親核種、子孫核種のγ線ピークを確認している。 	
	 ・他の放射性同位体によるγ線ピーク(例:放射性ヨウ素)を確認してい 	
	る。	

表 7.3 解析時における測定担当者の確認事項の例

表 7.3 解析時における測定担当者の確認事項の例(続き)

No.	確認事項	チェック欄
13	不明の γ 線ピークについて	
	 γ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か 	
	確認している。	
	・シングルエスケープ、ダブルエスケープ、サムピーク、ランダムサムピー	
	クの可能性を検討している。	
	・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。	

7.2.2 不明ピークの取扱い

γ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γ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(解説 E 参照)を用いて、同定作業を行うことができる¹²。

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

緊急時においてはサムピーク、ランダムサムピークが検出される場合がある。詳細については放射能測定法シリーズ No. 29 を参照のこと

7.2.3 放射性核種の誤判定について

放射性核種の誤判定は、同定されるべき核種の核データが核データライブラリに 登録されておらず、登録されている他の核種の γ 線エネルギーが同定幅の範囲で一 致することにより起こり得る。また、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、サムピークについても同様に誤認される可能 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する中性子 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易くなる。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と中性子と の相互作用により生成する ^{75m}Ge から放出される γ 線 (139.7keV) を ^{99m}Tc からの γ 線 (140.5keV) と誤認することが起こり得るので注意が必要である。

7.2.4 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γ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γ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

¹² 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。

ために用いるγ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。

定量結果の妥当性を確認する上で、他のエネルギーのγ線ピークによる定量結 果を無視するのではなく、確認する必要はある。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(^{110m}Ag(657.8keV)に対する¹³⁷Cs(661.7 keV)など)。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γ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γ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良い。

(2) 荷重平均を用いる方法

複数のγ線ピークの定量結果については、相対的に誤差が小さい定量結果に重 みをつけて、荷重平均を算出する。実際の測定においては、放出率の小さい、相対 的に誤差が大きな定量結果が得られることが想定され、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γ線エネルギーを決めておいた方が良い。また、荷重平均に使 用するγ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誤差は小さくなり、各々のγ線ピークが不検 出であっても、荷重平均の結果は3σ(σ:計数誤差)以上になる場合があるので 注意する。

7-14

7.4 解析結果の評価

解析結果を評価する際には、測定及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、サム効 果補正、減衰補正)の設定が不適切¹³など、解析結果は大きく変わることがあるので、 十分に確認された解析結果を取扱う必要がある。

測定及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)などを考慮して、検出が妥当であるか評価する必要があ る¹⁴¹⁵。

また、同一もしくは同様な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。同一もしくは同様な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。

¹³ 自己吸収補正では、材質、充填高及び密度の設定、サム効果補正では補正の有無などがある。減衰補正については、特に過渡平衡を成す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。

¹⁴ 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など)の可能性についても考慮する必要がある。

¹⁵ 短半減期核種が減衰した後では、γ線スペクトル上のベースライン計数が減少することに なり、これにより隠れていた他の人工放射性核種によるγ線ピークが確認できる場合があ る。

7.5 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報告することが望ましい。 報告様式の例を表 7.4.1 及び表 7.4.2 に示す。報告様式には、検出された放射性核種の 放射能濃度だけではなく、試料情報、測定情報、解析条件などを記載する。なお、記載 事項を転記する場合には、読合せなどを行って間違いがないことを確認する。

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ッ線スペクトル図も併せて報 告する。

γ 線スペクトル上の検出ピークに対して、7.2.1 項⑥の解析結果の確認から 7.5 項の 解析結果の報告までのフローチャート例を図 7.4.1 に示す。

表 7.4.1 報告様式の例 1

ゲルマニウム半導体件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								
採取日	1	1	:	~	1	1	:	
測定容器			測定試	料重量 [※]	1			

※1:単位(g, kg, mL, L, m², m³など)を併記する。

3. 測定器	
検出器型式	
遮へい体厚	
相対効率	
分解能(1.33MeV)	

5. M Æ 16	4. 測正及い解析							
検出器型式		①測定						
遮へい体厚		測定番号			測定	開始日時	/ / :	
相対効率		測定時間						
分解能(1.33MeV)		②解析						
		自己吸収補正	あり、	、なし				
		減衰補正	あり、	、なし	減衰	補正日	/ / :	
		サム効果補正	あり、	、なし	サム	効果補正核種		
				5. 1000000000000000000000000000000000000				
5. 測定結果								
5. 測定結果 核種	放射能濃度()*2		核種	Ē.		放射能濃度() [;]	*2
5. 測定結果 核種	放射能濃度(土)**2		核利	1		放射能濃度() [;] 土	※ 2
5. 測定結果 核種	<u>放射能濃度(</u> 土 土)**2		核和	±		放射能濃度() ⁾ 土 土	*2
5. 測定結果 核種	<u>放射能濃度(</u> 土 土 土)**2		核和	1 1		放射能濃度() ³ 土 土 土	*2
5. 測定結果 核種	<u>放射能濃度(</u> 生 生 生 生 土)**2		核和	重 一		<u>放射能濃度(</u>) ³ 土 土 土 土 土	*2
5. 測定結果 核種	<u>放射能濃度(</u> 土 土 土 土 土 土)**2		核和	<u></u>		<u>放射能濃度(</u>) [;] 土 土 土 土 土 土 土	¥2

(備考)

表 7.4.2 報告様式の例 2

<u>ゲルマニウム半導体検出器による核種測定結果</u>

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	$I I : \sim I I :$
測定容器	U-8 容器 , マリネリ容器(2L、1L、0.7L) , その他
測定試料重量	$({ m g}$, ${ m kg}$, ${ m mL}$, ${ m L}$, ${ m m}^2$, ${ m m}^3)$
充填高	(mm , cm)
密度	(g/cm ³)
(備考)	

3. 測定及び解析

①測定					
測定番号				測定時間	(秒)
測定開始日時	1	1			
②解析					
自己吸収補正	あり	,	なし		
減衰補正	あり	,	なし	減衰補正日	1 1 :
サム効果補正	あり	,	なし		
サム効果					
補正核種					
(備考)					

表 7.4.2 報告様式の例 2 (続き)

4. 測定器情報

検出器型式	
遮へい体厚	(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 () ※1	備考
	±	
	Ŧ	
	±	
	±	
	±	
	±	
	Ŧ	
	±	
	1±	

※1:放射能濃度の単位も併せて記載する。





図 7.4.1 解析結果の報告までのフローチャート例



図 7.4.1 解析結果の報告までのフローチャート例 (続き)

¹⁶ 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。

第8章 検出下限值

測定毎に着目核種のピーク領域について検出下限値を求めておくことは重要である。 検出された、されない、の判定はピーク面積が計数誤差の3倍を越えているか否か、 で行われるのが一般的である。環境放射能は微弱で検出されないことが多く、検出下 限値を計算しておかないと、ピーク探査によるスペクトル解析のみを行う場合、測定 しても何の結果も得られないことになる。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。なお、検出下限値 以上の放射能が在ればほとんどの場合検出されるが、それ以下であっても必ず不検出 になるわけではなく、検出される可能性がある。

検出下限値の算出には、平成4年度改訂の前マニュアルに記載された Cooper の方法 や、国際規格である ISO11929 による評価方法などがある。評価方法の詳細は解説 B 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。なお、検出下限値を報告する際には、採用した 評価方法を明記しておく必要がある。

第9章 分析結果の質の保証

Ge 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

適切な分析結果を得るためには、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、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。

1) エネルギー分解能

Co-60標準線源を測定し、1333keV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)。

2) ピーク効率

ピーク効率が変化した場合、解析結果に重大な影響を及ぼすため、変化が無いこと 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
- ・長半減期のγ線源(Eu-152, Cs-137等)を毎回同一のジオメトリで測定し、測定 結果(ピークの計数率など)の変動が予め設定した範囲を超えていないかを確認 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。
- ・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。
- 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。

・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。
 γ線スペクトル上の着目ピーク(⁴⁰K や¹³⁷Cs など)のピーク中心のずれが
 ±1keV以内であることを確認しても良い。
 エネルギー校正式が妥当でない場合は、ゲインの再調整及びエネルギー校正式を
 再度作成して使用する。

- ・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、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(温度:23±2℃、湿度:50~60%で安定しているのが望ましい)が されていることを確認する。
- ・液体窒素の消費量を確認する。

9.2 測定のトレーサビリティー

(トレーサビリティーに関する説明を追加予定)

トレーサビリティーを確保するため、利用者は、通常の運用で測定対象としている ジオメトリ、γ線エネルギーの範囲内の少なくとも1点において、国際標準または国 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には、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が付属している。校正証明 書には核種の添加値及び不確かさが記載されている。)

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。

9.3 測定・解析方法の妥当性確認

前項 9.2 において得られたトレーサビリティーの確保された条件以外で測定を行う 場合、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。

1) 妥当性確認の方法

換算係数を適用する先のジオメトリ、γ線エネルギーに対応する標準線源が入手で きる場合は、それを測定して確認。

外部精度管理として、定期的に外部機関が提供する技能試験に参加し、標準物質の 測定結果をもって妥当性確認を行うことが望ましい。

(記述を追加予定)

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』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。

γ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 の放射能濃度である。この放射能濃度という量に影響を及ぼす条件をすべて拾い上げ て完全に定義することは非常に困難である。その意味において測定試料中の放射能濃 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、あくまで測定対象 量の値の近似か推定値でしかない。この不完全さにより最終的に得られる測定結果は ある変動幅を持って得られることになる。

γ線スペクトロメトリーで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γ線のうち、検出器と相互作用を起こした数を計数し ている。得られた計数値に対して多くの係数を乗じて放射能濃度を得ることになる。 このため、測定の結果である放射能濃度は、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、γ線放出比、検 出器の計数効率、測定時間といった入力量の関数であるといえる。

 $A = f(x_1, x_2, x_3, \dots) = f(N, m, t, \varepsilon, \gamma, \dots)$ (1) ここで、A:放射能濃度

f(x1,x2,x3,…):放射能濃度を導出する計算を表現する関数

N,*m*,*t*,*ε*,*γ*,…: 放射能濃度を求めるために必要な入力量

したがって、求めるべき放射能濃度の不確かさは、放射能濃度の導出に関わる全て の入力量の不確かさを合成した値で評価される。なお、それぞれの入力量についても、 多くの入力量の関数である。

A.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。

- 測定手順を明確にする。
- ② 手順をもとに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。

測定手順を明確にする。

測定の手順を書き出し、最終的な結果である放射能濃度の値に影響を及ぼすよう な手順は、可能な限りピックアップする。

② 手順をもとに不確かさの要因を整理する。

γ線スペクトロメトリーに伴う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 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 A.1 に不確かさの要因を特定するために作成した特性要因図の例を示す。図 A.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には、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。

- 以前の測定データ

— 当該材料及び測定器の挙動及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

一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当てた不確かさ

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 が大きい訳ではない。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今後の測定で 評価しないようにする。

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。

③によって得られた個々の不確かさをすべて合成して合成標準不確かさを求める。 拡張不確かさが必要な場合には、包含係数kを選択し、k×合成標準不確かさから拡 張不確かさを算出する。一般にkは 2~3 の間で選ばれる。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(k=1)で あるのか拡張不確かさ(k = 2~3)であるのか)を必ず明記する。

- A.2 不確かさの計算手順
- A.2.1 測定試料に係る不確かさ
- A.2.1.1 秤量

天びんの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。

 u_1

天びんの校正証明書に記載がない場合は、以下を参考として算出する。

天びんの不確かさには、(1)繰り返し性の不確かさ、(2)丸め誤差の不確かさ、(3) 偏置加重の不確かさ、(4)正確さ、(5)温度特性、(6)校正分銅の不確かさがある。天 びんの不確かさは、1目量の1.3倍~2倍であることから、天びんの不確かさを1目量 の2倍とし、測定試料重量との比を相対標準不確かさとする。

$$u_{1a}' = \frac{2l}{w}$$

ここで、w:測定試料重量 *l*:1目量

繰り返し測定による評価は、10回程度繰り返し測定を行い、その平均値および標準 偏差を算出し、相対標準不確かさを求める。

$$u_{1b}' = \frac{w_{STD}/\sqrt{n}}{\overline{w}}$$

ここで、w:繰り返し測定の平均値 w_{STD}:繰り返し測定の標準偏差 n:繰り返し
 数

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

$$u_1' = \sqrt{(u_{1a}')^2 + (u_{1b}')^2}$$

A.2.2 試料の厚さ

計測器の不確かさは目幅の許容差を上下限とする矩形分布を仮定し、相対標準不確 かさを求める。

$$u_{2a} = \frac{l}{\sqrt{3}h}$$

ここで、h: 測定試料の厚さ l:1目量

繰り返し測定による評価は、10回程度繰り返し測定を行い,その平均値および標準 偏差を算出し、相対標準不確かさを求める。

$$u_{2b} = \frac{h_{STD}/\sqrt{n}}{\bar{h}}$$

ここで、 \bar{h} :繰り返し測定の平均値 h_{STD} :繰り返し測定の標準偏差 n:繰り返し数 u_{2a} と u_{2b} を合成し、厚さ測定の相対標準不確かさとする。

$$u_{2c} = \sqrt{u_{2a}^2 + u_{2b}^2}$$

厚さの測定における不確かさの評価は、厚さ測定に含まれる不確かさの値自体を用 いるのではなく、厚さの変動量に対する効率の変動量で評価する。次式に厚さ測定値*h* 及び厚さ測定値+不確かさ*h*+*h*·*u*_{2c}をそれぞれ代入し、効率を算出し、試料の厚さの 変動に対する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)。

$$\frac{1}{Eff} = a + bh + ch^2$$
$$u_2 = \frac{|E_2 - E_1|}{E_1}$$

ここで、Eff: ピーク効率 a, b, c: 定数 h: 測定試料の厚さ $E_1: 厚さhにおけるEff E_2: 厚さh+h·u_{2c}におけるEff$

A.2.3 試料の均質性

以下の文献等を参考に算出する。

- Alessia Ceccatelli, Ashild Dybdal, Ales Fajgelj, Aurelien Pitois, Calculation spreadsheet for uncertainty estimation of measurement results in gamma-ray spectrometry and its validation for quality assurance purpose, Applied Radiation and Isotopes, 124, 7-15 (2017)
- Octavian Sima, Marie-Christine Lépy, Application of GUM Supplement 1 to uncertainty of Monte Carlo computed efficiency in gamma-ray spectrometry, Applied Radiation and Isotopes, 109, 493-499 (2016)

また、モンテカルロシミュレーションを用いて、ジオメトリや試料の密度などのパラ メータを変化させることによって推定することも可能である(解説 D 参照)。

 u_3

- A.3 効率校正に係る不確かさ
- A.3.1 線源の厚さ

A.2.2 試料の厚さと同様

$$u_4 = \frac{|E_2 - E_1|}{E_1}$$

A.3.2 校正用線源の放射能

校正用線源に含まれる各核種について、300keV 未満及び 300keV 以上で分割し、成績 書に記載されている相対標準不確かさ(k=1)の最大値を使用する。

 u_5

A.3.3 幾何条件

検出器と測定試料に関する幾何学的条件についての不確かさは、10回程度繰り返し 測定を行い、その平均値および標準偏差を算出し、相対標準不確かさを求める。

$$u_6 = \frac{a_{STD}/\sqrt{n}}{a}$$

ここで、ā:繰り返し測定の平均値 *a_{sTD}*:繰り返し測定の標準偏差 *n*:繰り返し数 ただし、ホルダー等を用いて所定の位置に試料を設置できるようにしてある場合、 再現性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。

A.3.4 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。

A.3.5 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。

A.3.6 計数に係る不確かさ

正味ピーク面積に対する相対計数誤差を算出し、その値を標準不確かさとする。ただし、各々の核種について算出した相対計数誤差のうち、300keV で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。

$$u_7 = \frac{\sigma_N}{N}$$

ここで、N:正味ピーク面積 $\sigma_N:$ 計数誤差

A.3.7 放出比

解析に使用している核データを参照して相対誤差を算出し、相対標準不確かさとし て使用する。ただし、算出した相対誤差のうち、300keV で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。

 u_8

A.3.8 校正式のフィッティング

各核種(γ線)の校正データより、[フィッティング値/実測値]を算出し、300keVで 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。

$$u_9 = \frac{f_{STD}}{\bar{f}}$$

ここで、*f*: 300keV で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}*: 300keV で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 A.3.9 サム効果補正

以下の文献等を参考に算出する。

- Alessia Ceccatelli, Ashild Dybdal, Ales Fajgelj, Aurelien Pitois, Calculation spreadsheet for uncertainty estimation of measurement results in gamma-ray spectrometry and its validation for quality assurance purpose, Applied Radiation and Isotopes, 124, 7-15 (2017)
- Octavian Sima, Marie-Christine Lépy, Application of GUM Supplement 1 to uncertainty of Monte Carlo computed efficiency in gamma-ray spectrometry, Applied Radiation and Isotopes, 109, 493-499 (2016)

また、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 出比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も可能である。

 u_{10}

A.3.10 自己吸収補正

以下の文献等を参考に算出する。

- Alessia Ceccatelli, Ashild Dybdal, Ales Fajgelj, Aurelien Pitois, Calculation spreadsheet for uncertainty estimation of measurement results in gamma-ray spectrometry and its validation for quality assurance purpose, Applied Radiation and Isotopes, 124, 7-15 (2017)
- Octavian Sima, Marie-Christine Lépy, Application of GUM Supplement 1 to uncertainty of Monte Carlo computed efficiency in gamma-ray spectrometry, Applied Radiation and Isotopes, 109, 493-499 (2016)

また、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、γ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も可能である。

 u_{11}

A.3.11 減衰補正

解析に使用している核データを参照して、半減期、半減期+σのそれぞれで校正日から測定日までの経過日数での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。ただし、算出した相対標準不確かさのうち、300keV で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。

$$DF_1 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$
$$DF_2 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T+\sigma}}$$
$$u_{12} = \frac{|DF_2 - DF_1|}{DF_1}$$

A-6

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

- A.4 試料の測定に係る不確かさ
- A.4.1 幾何条件
 - A.3.3 幾何条件と同様

$$u_{13} = \frac{a_{STD}/\sqrt{n}}{a}$$

ここで、ā:繰り返し測定の平均値 *a_{STD}*:繰り返し測定の標準偏差 *n*:繰り返し数 ただし、ホルダー等を用いて所定の位置に試料を設置できるようにしてある場合、 再現性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。

A.4.2 不感時間

A.3.4 不感時間と同様

A.4.3 測定系の変動

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。

$$u_{14} = \frac{Ac}{\sqrt{3}}$$

ここで、Ac:変動幅の許容基準の上限

A.4.4 計数に係る不確かさ

A.3.6 計数に係る不確かさ

$$u_{15} = \frac{\sigma_N}{N}$$

A.4.5 放出比

A.3.7 放出比と同様

 u_{16}

A.4.6 サム効果補正

A.3.9 サム効果補正と同様

 u_{17}

A.4.7 自己吸収補正

A.3.10 自己吸収補正と同様

 u_{18}

A-7

A.4.8 減衰補正

A.3.11 減衰補正と同様

だたし、経過時間は試料採取に係る基準日から測定日までとする。

$$u_{19} = \frac{|DF_2 - DF_1|}{DF_1}$$
不確かさの要因		300keV 未満 300keV 以上		
測定試	秤量	u_1		
	試料の厚さ	<i>u</i> ₂		
料	試料の均質性	u	3	
	線源の厚さ	u_4		
	校正用線源の放射能	u_5	u_5	
	幾何条件	u	6	
	不感時間	評価	せず	
劾	測定系の変動	評価	せず	
率 校	計数に係る不確かさ	u_7	u_7	
ĨĔ	放出比	u ₈	u ₈	
	校正式のフィッティング	<i>u</i> 9	<i>u</i> 9	
	サム効果補正	u_{10}		
	自己吸収補正	u ₁₁		
	減衰補正	<i>u</i> ₁₂	<i>u</i> ₁₂	
	幾何条件	u ₁₃		
	不感時間	評価せず		
¥	測定系の変動	u ₁₄		
料の	計数に係る不確かさ	<i>u</i> ₁₅	u_{15}	
別	放出比	<i>u</i> ₁₆ <i>u</i> ₁₆		
	サム効果補正	u ₁₇		
	自己吸収補正		18	
	減衰補正	<i>u</i> ₁₉	<i>u</i> ₁₉	

表 A.1 不確かさバジェットシート



作成中

検出下限値の算出は Cooper の方法と IS011929 による評価方法がある。それぞれの 検出下限値と概念と計算方法を紹介する。

B.1 Cooper の方法による検出下限値

得られたスペクトル中の、ピーク面積とその計数誤差(σ)を比較して、ピーク面積 を別の数値に置き換えてみて「 $k\sigma$ 以下で検出されず」が「 $k\sigma$ 以上で検出された」に変 わる値を調べ、放射能に換算して検出下限値とする方法(k = 3とすることが多い)。計 数誤差(σ)をブランク(バックグラウンド)測定の標準偏差とすると、無いものを在 るとする確率は 0.15%(=(100-99.7)/2)であり、測定量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(在るものを無いとする確率が 50%)。



図 B.1 Cooper の方法による検出下限値の概念図

検出下限値の算出は、ピークの最低検出計数値Nmを次のように定義する。

$$N_m = k \cdot \sigma$$

ここで、

σ	計数誤差		
k	定数(3とすることが多い)		

最低検出計数値は

$$N_m = \frac{k^2 + k\sqrt{k^2 + 4\{l(1+l)B_l + h(1+h)B_h\}}}{2}$$
(B.2)

ここで、

(B.1)

- B.2 IS011929 による検出下限値
- B.2.1 概念
- ・決定しきい値: y* = k_{1-α}×ũ(0) ※ũ(0): 真値が0の場合の測定量の不確かさ 測定値が有意の物理的効果が生じたと、一定の過誤αで判定するための値。
 (α = 0.05のとき、放射能が存在しないのに、存在すると誤判定する確率が 5%)

・検出限界: $y^{#} = y^{*} + k_{1-\beta} \times \tilde{u}(y^{#})$ ※ $\tilde{u}(y^{#})$:真値が $y^{#}$ の場合の測定量の不確かさ 測定値がバックグラウンドによるものだけではなく試料に由来するものである と、一定の過誤 β で検出可能な最小値。 検出限界は、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)

 $\alpha = \beta = 0.05 (5\%)$ のとき、 $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1.65$



図 B.2 IS011929 による検出下限値の概念図

<定義>ISO 11929:2010 より抜粋

ISO 11929:2010 における detection threshold と detection limit の定義を和訳と共 に下記に示す。

3.6 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, one decides 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 that the true value of the measurand is zero is less or equal to a chosen probability, α .

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

3.6 決定しきい値

測定量の推定値であり、物理的影響を定量化する測定量の与えられた測定手順を使った実際の測定結果がこの値を超えるときには、人は物理的影響が存在すると決定する。

注記 1 決定しきい値は、測定結果 y が決定しきい値 y*を超える場合に、測定量の真値がゼロである確率は選択された確率 α 以下であると定義される。

注記 2 もし結果 y が決定しきい値 y*よりも下ならば、その結果は物理的影響に帰す ることはできない。しかしながら、物理的影響が存在しないことを結論付けることは できない。

3.7 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 3.6, 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, β , when, in fact, the true value of the measurand is not zero.

3.7 検出限界

測定手順により検出可能な特定の確率を保証する、測定量の最小の真値。 注記 3.6の決定しきい値を用いて、検出限界は、現実に測定量の真値がゼロでない時 に、測定量の真値がゼロであるという誤った決定をする確率が特定値βに等しくなる ような、測定量の真値の最小値である。

B.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 クが存在しないまたは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。

B.2.2.1 計数値から放射能を求める一般式

$$A = n_n \cdot w \tag{1}$$

ここで、

Α	放射能(Bq)/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への換算係数
	1

- ε_{F} エネルギーEでの検出効率
- *a* γ 線 放 出 率
- *m* 供試料量(kg,L等)
- f1 減衰補正係数
- f₂ 自己吸収補正係数
- f3 サム効果補正係数

B.2.2.2 決定しきい値

$$A^* = k_{1-\alpha} \cdot w \cdot \sqrt{n_0 \cdot \frac{x_g}{x_0} \cdot \left(1 + \frac{x_g}{x_0}\right)}$$
(2)

ここで、

*k*_{1-α} 第1種の過誤(無いものを在るとする過誤)を起こさない信頼
 区間の包含係数

 x_g ピーク領域のチャネル数

x₀ ベースライン領域のチャネル数の合計

注 (2) 式の $n_0 \cdot \frac{x_g}{x_0}$ はピーク領域内のベースライン部分の面積を表しており、ここで は解析プログラムの値を用いることとする。

B.2.2.3 検出下限値

k

$$A^{\#} = \frac{2 \cdot A^{*} + k^{2} \cdot w}{1 - k^{2} \cdot u_{rel}^{2}(w)}$$
(3)

ここで、

A[#] 検出下限値(Bq または Bq/kg, Bq/L 等)

包含係数

$$k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta}$$

 $k_{1-\beta}$ 第2種の過誤(在るものを無いとする過誤)を起こさな
い信頼区間の包含係数

urel(w) 換算係数wの相対標準不確かさ 試料測定のピーク面積に係る不確かさを除き、測定に係るすべ ての不確かさの合成標準不確かさ

B.3 IS011929 による検出下限値の計算例

B.3.1 解析領域にピークが存在しない場合

⁵⁹Fe (1291.6keV)



図 B.1 ⁵⁹Fe の解析領域

領域B ₁		領域A		領域B ₂	
チャネル	カウント	チャネル	カウント	チャネル	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		

表 B.1 各領域のチャネルとカウントデータ

表 B.2 各パラメータと決定しきい値及び検出下限値

パラメータ	値
x_g (ピーク領域チャネル数)	13
x ₀ (ベースライン領域 1,2 チャネル数合計)	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
$u_{rel}(w)$	0.04975
k	1.645
決定しきい値 A* (Bq/kg)	0.8065
検出下限値 A [#] (Bq/kg)	1.728

B.3.2 解析領域にピークが存在する場合



²²⁸Ac (911.2keV)

図 B.2 ²²⁸Ac の解析領域

領域 <i>B</i> 1		領域A		領域B ₂	
チャネル	カウント	チャネル	カウント	チャネル	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		

表 B.3 各領域のチャネルとカウントデータ

パラメータ	値
x_g (ピーク領域チャネル数)	11
x_0 (ベースライン領域 1,2 チャネル数合計)	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
$u_{rel}(w)$	0.04975
k	1.645
決定しきい値 A* (Bq/kg)	1.251
検出下限值 A [#] (Bq/kg)	2.651

表 B.4 各パラメータと決定しきい値及び検出下限値

解説 C 測定試料の調製方法

C.1 試料容器

現在、γ線の測定に利用されている試料容器は多種多様であり、同一機関内でも試料 の種類で使い分けていることがある。実際、測定容器の容量、底面積の大きさ、底厚の 違いにより検出下限値は変わる。

C.1.1 測定容器の種類

一般に使用されている測定容器には、V-1、V-2、V-3、V-5、ラストロウェア、U-9(U-4)、U-8、マリネリ容器(2L,1L,700mL)などがある。マリネリ容器は牛乳、海水、 陸水等の液体や細断した野菜など、前処理を施さずにそのまま測定する場合に良く用 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。



図 C.1 ガンマ線スペクトロメトリーに使用される測定容器

C.1.2 測定容器の選択

供試量を同量にして測定を実施した場合、容器の底面積や底厚で計数率が変わり、 底厚が薄く、底面積が約 50 cm² (供試料:約 100 cm³程度、検出器結晶の大きさで多少異 なる)程度の容器のピーク効率が最も高い。大きさの異なる容器を使用すると、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、なるべく容器の種類を増 やさない方がよい。

多量の試料を測定に供する事が出来るときは(特に短時間で多数の試料を測定する とき)、マリネリ容器の方が検出下限値が低いため有利である。

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など有用になる。

C.2 試料の充填

Ge 半導体検出器を用いると非破壊・非侵食で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)で測定に供する事が多い。ただし放射化学分析実施時よりも 測定試料の容積が大きくなり、

- ・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。

などに注意する必要がある。ここでは、試料詰めの具体的な例を述べる。

また概ねの目安として、U-8 容器(底面積 20cm²、高さ 5cm、内容積 100cm³)一杯に詰 めた場合、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。マリネリ容器は容器に標線があるのでその高さまで入れる事になり(測 定効率を一定に保つため)、一般的には 700mL か 2L になる。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。

C.2.1 試料詰めの準備

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を測定容器に記入する。

図または写真

図 C.2 測定試料容器の準備例

- C.2.2 試料詰めに必要な器具
 - ・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。) 詰め終わった試料の厚さを測る定規 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

·土壤、海底土、灰、乾燥物

測定容器(50~200mL 程度の小型容器) 試料詰め具(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)、薬さじ等

・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、マリネリ容器など)

包丁、メスシリンダ(1~2L)等

図または写真

図 C.3 試料詰め用簡易ドラフトボックスの例

C.2.3 小型容器への土壌、海底土、灰、乾燥物試料の詰め方

相互汚染の起こらない場所で試料を詰める。大型のドラフト内でもよいが、洗浄が 容易なように換気口を取り付けた試料詰め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。

<試料詰め手順>

(1)土壤、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またはエタノール等で湿らせた

ペーパータオルで拭く。

②試料詰めの終了後、清掃が容易であるよう紙を敷く。③試料詰め具の押圧面に 0.01mm 程度のポリエチレンシートをかぶせる。

図または写真

図 C.4.1 試料詰め手順(1)

④ふた付きの測定容器の重さを上皿天秤で計る。

⑤試料量が少ない場合、直接測定容器に入れる。試料量が多い場合は薬さじを用 いる。

⑥測定容器に 1/5 程度の量を数回に分けて入れる。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(解説 D 参照)。

図または写真

図 C.4.2 試料詰め手順(2)

⑦1/5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などしてある程度試料を詰め、さらに試料詰め具を利用し詰める。力を入れ過ぎると容器の底が壊れるので注意する(座ったまま軽く体重を預ける)

程度にとどめる)。

- 土壌 : 比較的詰め易い試料であるが、粉砕したものは舞い上がりがあるので 相互汚染に注意する。
- 海底土:砂状のものは圧迫しても詰まらないので、薬さじなどでつつき空洞部 分を少なくする程度でよい。粉砕したヘドロ質のものは、詰め具で圧 迫しても容器の端から漏れ、容易に詰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、十分試料が締まってから圧迫する。相互 汚染にも注意する。
- 灰試料:圧迫すると容易に詰まるが、力を入れ過ぎると固まった試料に「ひび」 が入るので、適度な力で詰める。「ひび」が入った場合は薬さじで砕き 再度圧迫する。



図 C.4.3 試料詰め手順(3)

⑧上記操作を試料の全量または容器がいっぱいになるまで繰り返す。詰め過ぎると、試料の高さが正確に測れなくなる事があるので注意する。

⑨測定容器内の試料上面を平にならし、容器底の内側より試料の高さを測り容器 に書き込む。凸凹は平均する。0.5mm位まで読む。

⑩測定容器のネジ部や溝部に付着した試料を、刷毛などで取り除く。



図 C.4.4 試料詰め手順(4)

①ふたをして重量を計り、容器に風袋引き試料重量を書き込む。0.01g位まで読む。②残試料は保存場所に移動して保管する。



図 C.4.5 試料詰め手順(5)

③作業場所に敷いた紙で詰め具にかぶせたポリエチレンシートを包んで捨て、簡易ドラフト内部を純水またはエタノール等で湿らせたペーパータオルで拭く。

④薬さじ、試料詰め具、定規、刷毛、手を洗った後、水分を拭きとる。

⑤ ①~⑭ を試料分だけ繰り返す。

⑩試料を詰め終わったら、測定容器を純水またはエタノール等で湿らせたペーパータオルで拭き、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込んだままで試料をつかみ、袋を裏返しにする。返したままで空気を抜き測定容器の底にシワがよらないよう注意しながら口を結ぶ。



図 C.4.6 試料詰め手順(6)

⑪ポリエチレン袋に封入した後、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またはエタノール等で湿らせた ペーパータオルで拭く。
- ②試料詰めの終了後、清掃が容易であるように紙を敷く。
- ③試料詰め具の押圧面に 0.01mm 程度のポリエチレンシートをかぶせる。
- ④ふた付きの測定容器の重さを上皿天秤で計る。
- ⑤使い捨て手袋(ポリエチレン製またはゴム製等)を着用し、試料を細かくする。 試料が硬い時は、はさみなどを利用する。
- ⑥試料の全量または測定容器がいっぱいになるまで入れる。試料量が多い場合は 薬さじを用いる。
- ⑦ふた付きで容器の重さを計り、試料重量を容器に記入する。0.01g 位まで読む。
- 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るようにし、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試料の高さを測り容器に記入する。凸凹は平均する。0.5mm 位まで読む。⑩残試料は保存場所に移動し保管する。

①作業場所に敷いた紙で詰め具にかぶせたポリエチレンシートを包んで捨て、簡易ドラフト内部を純水またはエタノール等で湿らせたペーパータオルで拭く。

②薬さじ、試料詰め具、定規、刷毛、手を洗った後、水分を拭きとる。
③試料を詰め終わったら、測定容器を純水またはエタノール等で湿らせたペーパ

ータオルで拭き、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込んだままで試料をつ かみ、袋を裏返しにする。返したままで空気を抜き測定容器の底にシワがよら ないよう注意しながら口を結ぶ。 ④ポリエチレン袋に封入した後、測定室に運ぶ。

- C.2.4 浮遊じん試料
- ・ろ紙のままで測定の場合(灰化した時は C.2.3 参照のこと)

<試料詰め手順>

- ①蓋付きの容器の重さを計る。0.01g 位まで読む。
- ②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。同一の試料から出来る限り多く取る。
- ③浮遊じんの付着している面を底に向け測定容器がいっぱいになるまで、または 全て入れる。
- ④ふた付きで容器の重さを計り、試料重量を容器に記入する。0.01g 位まで読む。
- ⑤一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るようにし、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。
- ⑥試料の高さを測り容器に記入する。凸凹は平均する。0.5mm 位まで読む。
- ⑦残試料は保存場所に移動し保管する。
- ⑧作業場所に敷いた紙で詰め具にかぶせたポリエチレンシートを包んで捨て、簡易ドラフト内部を純水またはエタノール等で湿らせたペーパータオルで拭く。
- ⑨薬さじ、試料詰め具、定規、刷毛、手を洗った後、水分を拭きとる。
- ⑩試料を詰め終わったら、測定容器を純水またはエタノール等で湿らせたペーパータオルで拭き、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込んだままで試料をつかみ、袋を裏返しにする。返したままで空気を抜き測定容器の底にシワがよらないよう注意しながら口を結ぶ。
- ⑪ポリエチレン袋に封入した後、測定室に運ぶ。

C.2.5 マリネリ容器への溶液、生、乾燥物試料の詰め方

陸水、降雨水、河川水、海水、牛乳等溶液試料はそのまま測定容器に入れる。野菜、 果物等水分の多い生試料は包丁等で細かく刻む。繊維質でないものはミキサーの使用 も考えられるが、試料が複数あるとミキサーの洗浄が大変なので、なるべく使用しな い方がよい。乾燥物は C.2.3 と同様の方法で細かくする。

<試料詰め手順>

①容器の重さを計る。乾燥物は落し蓋(アクリル円盤)込みの重量を計る。

②溶液、生試料:マリネリ容器についている目盛りまで一定量の試料で満たす。

乾燥物 : マリネリ容器についている目盛りの上まで入れ、落し蓋で押さ える。円盤を手で押して試料厚が容器の目盛りと一致するのを 確認する。 図または写真

図 C.5.1 試料詰め手順(マリネリ容器 その1)

③蓋をして重量を計り容器に風袋引き試料重量を記入する。0.01g位まで読む。
 ④ビニルテープなどで蓋を固定し溶液が漏れないようにする。乾燥物はアクリル
 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、容器の目盛りまで上から押し付けるとよい。

図または写真

- 図 C.5.2 試料詰め手順(マリネリ容器 その2)
- ⑤ポリエチレン袋に入れ、空気を抜き底にシワのないことを確認した後、ビニル テープなどを用いて口を閉じる。マリネリ容器の底の凹部分に検出器が入るこ 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 さえつけた状態のままテープで口を閉じる。
- ⑥試料を詰め終わったら、測定容器を純水またはエタノール等で湿らせたペーパータオルで拭き、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込んだままで試料をつかみ、袋を裏返しにする。返したままで空気を抜き測定容器の底にシワがよら

ないよう注意しながら口を結ぶ。

⑦ポリエチレン袋に封入した後、測定室に運ぶ。

図または写真

図 C.5.3 試料詰め手順(マリネリ容器 その3)

C.2.6 その他の試料の詰め方

特殊な前処理をした試料、例えば機械により圧迫し試料を固化する、化学処理による沈殿試料等の測定試料を容器に詰めるなどのように、前処理の方法で詰め方が異なるものは、測定法シリーズ No. 13「ゲルマニウム半導体検出器等を用いる機器分析のため試料前処理法」を参照する。その場合でもできるだけ多くの試料を空洞のないように詰める、試料の同定に必要な情報を容器に記入するなどの操作を行うこと。

解説 D 測定容器内不均一の影響(U-8 容器の例)

ゲルマニウム半導体検出器によるγ線スペクトロメトリーは、γ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γ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、また土壤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などを考慮すると、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、EGS5 を用いてモンテ カルロシミュレーションにより検討した。表 D.1 は検討に用いた検出器についての情 報である。

結晶タイプ	同軸型 p タイプ
相対効率(%)	31
Ge 結晶の高さ (mm)	50.47
Ge 結晶の直径 (mm)	52.2
不感層の厚さ(上面)(mm)	0.4
不感層の厚さ(側面)(mm)	0.6
コアホールの直径 (mm)	7.5
コアホールの深さ (mm)	35.07
結晶ホルダーの厚さ(mm)	1.9
エンドキャップの厚さ (mm)	1.5
エンドキャップと結晶との距離(mm)	7.53

表 D.1 モンテカルロシミュレーションに用いた検出器

D.1 放射性核種の偏在

D.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 充填高 : 5cm

- エネルギー: 661.66keV (¹³⁷Cs)
- 光子発生数:10,000,000 個

偏在の条件:表 E. 2~表 E. 4 参照

D.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。

表 D.2 放射性核種の偏在の条件(縦方向)





図 D.1 偏在(縦方向)が測定値に与える影響



表 D.3 放射性核種の偏在の条件(横方向)



図 D.2 偏在(横方向)が測定値に与える影響

18	19	20	21	
中心軸上に偏在	中心軸から半径 0.5cmの範囲に偏 在	中心軸から半径 1cmの範囲に偏在	中心軸から半径 1.5cmの範囲に偏 在	
22				
中心軸から半径				
2.0cmの範囲に偏				
在				

表 D.4 放射性核種の偏在の条件(軸と同心円の円柱状)



図 D.3 偏在(軸と同心円の円柱状)が測定値に与える影響

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 0.31~2.81 倍の変化が生じた。また、横方向及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 0.92~1.02 倍及び 1.08~1.16 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 1.22 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 そのまま測定する際に生じ得るため、注意が必要である。なお、放射性核種の容器壁へ の吸着防止に添加する試薬に関しては測定法シリーズ No.24 「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」を参照のこと。

D.2 放射性核種の分布の均質性

D.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 : 内寸縦 4.25cm、横 4.25cm、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 : 0.5cm, 1.0cm, 2.0cm, 3.0cm, 4.0cm, 5.0cm

- エネルギー : 88.03keV(¹⁰⁹Cd), 661.66keV(¹³⁷Cs), 1836.06keV(⁸⁸Y)
- 光子発生条件:容器に充填した試料内部を1辺0.25cm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、17×17×4=1156 個の立方体に 区切り、その立方体の中からランダムに約120 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 パターンに付き 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。



図 D.2 充填高 0.5cm、88.08keV の場合での計数効率の頻度分布

		エネルギー(keV)			
		88.03	661.66	1836.06	
	0.5	3.47%	2.78%	2.73%	
充填高(cm)	1.0	2.45%	2.09%	2.12%	
	2.0	2.70%	2.33%	2.42%	
	3.0	2.94%	2.48%	2.56%	
	4.0	3.06%	2.47%	2.66%	
	5.0	2.81%	2.79%	2.72%	

表 D.4 それぞれの条件での相対標準偏差

検討の結果、図 D.2 のように 18 通りある全ての条件で計数効率の頻度分布は正規分 布とよく一致した。表 D.4 はこの正規分布より求めた相対標準偏差である。表 D.4 か ら相対標準偏差は 88.03keV は大きく、661.66keV と 1836.06keV では有意な差は見ら れない。これは、88.03keV では自己吸収が大きいためと考えられる。また、それぞれ のエネルギーで、相対標準偏差と充填高との間に強い相関は見られなかった。したが って、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 88.03keV では約 3.5%、 661.66keV 及び 1836.06keV では約 2.8%であった。

88.03keVと661.66keVに関しては配置パターンを増やした結果を追加で記載予定です

解説 E 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、人工放射性核種ならびに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)され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測定法シリーズNo.29「緊急時にお けるゲルマニウム半導体検出器によるγ線スペクトル解析法」を参照のこと。

E.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。

E.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、ここで言う質量数とは、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ページでは核種毎に検索し、その核デー タを取得することもできる。

E.1.2 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。

E.2 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、⁶⁰Co、¹³¹I、¹³⁷Cs などのモニタリング対象核種なら びに⁷Be、⁴⁰K、ウラン系列核種及びトリウム系列核種など自然放射性核種を登録する。 環境試料を対象とした Ge 半導体検出器を用いたγ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¹³⁷Cs 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。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及びバック グラ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。 E.3 核データ

E.1 によって抽出した核データを表 E.1 及び表 E.2 に示す。なお、表 E.1 及び表 E.2 は以下にしたがって掲載している。

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は分及びSは秒を示す。

- ③ 10の累乗について、1.248E+9は1.248×10⁹を示す。
- ④ 表中の不確かさの表示について

エネルギー	エネルギー不確かさ
37.2	22

は、37.2±2.2を示し、

エネルギー	エネルギー不確かさ
701.7	3

は、701.7±0.3を示し、

半減期	半減期不確かさ
1.248E+9	3

は、(1.248±0.003)×10⁹を示し、

放出率	放出率不確かさ
0.270	12

- は、0.270±0.012を示す。
- ⑤ 表 E.1 は、²⁰⁶Tl 及び²¹⁰Po を除き放出率 0.01%以上のγ線を掲載した。
- ⑥ 表 E.2 は、²⁰⁶Tl 及び ²¹⁰Po を除き放出率 0.1%以上の γ 線のエネルギーを小数 点以下 1 桁で示した。
- ⑦ 表 E.2 において、表中にある [Pb(K α 1)] 等の(K)は X 線を、[¹³²I 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 表 E.1 及び表 E.2 において、表中にある [※⁷⁵Ge] 等の※は検出器及び遮へい 材に起因する放射性核種を示す。
- また、以下の点に注意が必要である。

注 1¹⁰⁶Ru(半減期 371.8 D)は純 β 核種(β ⁻,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¹⁰⁶Rhの γ 線を登録する。

注2 同一核種中にある同じエネルギーのγ線は異なるエネルギー遷移により発 生したものである。 表 E.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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
⁷ Be	53.22	6	D	477.6035	20	10.44	4
⁴⁰ K	1.248E+9	3	Y	1460.820	5	10.66	17
⁵¹ Cr	27.704	3	D	320.0824	4	9.910	10
⁵⁴ Mn	312.20	20	D	834.848	3	99.9760	10
				846.7639	19	98.85	3
₩ ⁵⁶ Mp	2 5789	1	Н	1037.8334	24	0.040	5
X MIII	2.0100	1	11	1238.2738	22	0.040	4
				1810.726	4	26.9	4
				14. 4129	6	9.16	15
				122.06067	12	85.60	17
⁵⁷ Co	271.74	6	D	136.4736	3	10.68	8
				570.09	20	0.0158	10
				692.41	7	0.149	10
50				810.7594	20	99.450	10
⁵⁸ Co	70.86	6	D	863.951	6	0.686	10
				1674.725	7	0.517	10
				142.6510	20	1.02	5
				192.343	5	3.08	12
50				334.80	20	0.270	12
ъ ^{э9} Fe	44. 490	9	D	382.0	4	0.018	3
				1099.245	3	56.5	19
				1291.590	6	43.2	14
				1481.70	20	0.059	7
⁶⁰ Co	1925-28	14	D	1173.228	3	99.85	3
00		11	D	1332.492	4	99.9826	6
				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
₩ ⁶³ 7n	38, 47	5	М	1123.72	7	0.111	13
/•		Ū		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
65	0.40 0.00			1866.1	3	0.020	3
^{oo} Zn	243.93	9	D	1115.5391	20	50.04	10
				233.2	5 -	0.16	3
				258.8	5	0.11	3
				302.0	7	0.11	4
				365.0	7	0.09	3
്ു ⁷⁴ Ga	8.12	12	М	444.2	5 -	0.06	3
				471.1	b	0.39	b
				484.9	3	1.06	6
				492.99	6	5.0	3
				497.56	15	0.96	10
				504.7	5	0.10	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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
				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	0.14	3
				1024.3	5	0.07	10
		12		1101. 32	0	0.87	19
	8. 12			1131. 52	14	0.10	20
				1134.5	3	0.19	20
i ∰ ⁷⁴ Ga			М	1160.33	10	0.63	5
				1177 42	18	0.24	3
				1184.40	20	0.21	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
				1744 00	14	0.73	10
				1806 5	20	4.02 0.28	5
				1820 75	16	1 90	5
				1940 63	7	5.4	<u> </u>
				1971 0	4	0.20	5
				1999.30	20	0.40	4
				595.83	8	59	4
ו · 74	10 00		5	608.43	8	0.552	21
'*As	17.77	2	IJ	634.78	8	15.4	11
				635.0	20	0.0357	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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				887.00	10	0.0255	15
്₩ ⁷⁴ As	17.77	2	D	993.46	8	0.0184	19
				1204.35	8	0.285	20
				66.00	20	0.114	13
				198.60	10	1.19	12
				264.60	10	11.4	11
ir ⁷⁵ Ge	82.78	4	М	353.0	5	0.021	3
				419.10	20	0.185	19
				468.80	20	0.223	24
				617.70	20	0.114	13
				61.92	10	0.0119	24
^{75m} Ge	47.7	5	S	136.01	8	0.020	6
				139.68	3	39.5	4
⁸⁵ Kr	10.739	14	Y	513.997	5	0.434	10
85 _C	64 840	7	D	514.0049	22	96	4
Sr	04.049	1	D	868.06	5	0.0120	7
⁸⁶ Rb	18.642	18	D	1077.0	4	8.64	4
				850.6	8	0.065	13
88	100 007	01	D	898.042	3	93.7	3
⁸⁸ Y	106.627	21	D	1382.2	10	0.021	6
				1836.063	12	99.2	3
				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
⁹¹ Sr	9.65	6	Н	749 80	10	23.7	8
51	5.00	0	11	761.40	10	0.576	22
				701.40	10	0.064	1
				820.80	20	0.161	7
				823.70	10	0.067	1
				879.70	10	0.188	7
				802.00	10	0.070	1
				901 30	20	0.010	5
				901.30	20	3 85	13
				923.80	10	0.040	13
				992 20	10	0.044	т Л
				1024 30	10	23 5	11
				1024.00	10	0.994	2 I I Q
				11/0 80	10	0.127	8
				1280.0	5	0.127	<u>о</u> Л
				1200.9	10	0.93	4
				1327 /0	10	0.017	- <u>+</u>
				1327.40	10	0.040	4 /1
				1/12 /0	10	0.020	4
				1413.40	10	0.30	4 7
	1			1410.00	10	0.100	1

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	y 線エネルギー (keV)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				1486.40	10	0.013	4
				1545.90	10	0.067	4
91~	0.65			1553.6	3	0.017	4
Sr	9.65	6	Н	1626.8	3	0.013	4
				1651.4	5	0.291	11
				1724.0	5	0.161	7
⁹¹ Y	58.51	6	D	1204.80	13	0.26	4
				266.90	10	7.4	12
				273.0	10	0.072	19
				287.0	10	0.076	16
				341.5	5	0.045	7
				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
^{93}v	10 18	8	н	1168.61	20	0.011	5
1	10.10	0	11	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
05				235.690	20	0.270	20
⁹⁵ Zr	64.032	6	D	724.192	4	44.27	22
				756.725	12	54.38	22
05			_	204.1161	17	0.028	9
⁹⁵ Nb	34.991	6	D	561.9		0.015	3
				765.803	6	99.808	7
				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
97~	16 740	0	TT	400.42	16	0.245	16
Zr	10.749	0	П	410.0	10	0.07	b d
				4/3.5	6	0.07	4
				507.04	ð 10	0.03	19
				513.41	18	0.000	5
				000 C	10	0.028	19
				602.27	0	0.09	10
				600 50	14	1.38	δ
				690. 52	10	0.103	18
				099.2 702.76	3	0.101	20
				103.16	5	1.01	5
				742.20	6	0.032	10
				779	<u>ర</u>	93.09	10
				112	3	0.24	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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
97-7	16 740	0	ц	1021.2	3	1.01	17
2r	10.749	0	11	1026.7	8	0.2793	5
				1110.44	19	0.093	19
				1147.97	8	2.62	11
				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
				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
07				857.46	21	0.045	7
⁹ 'Nb	72.1	7	М	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
				1629.09	22	0.025	7
				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	15	0.0105	9
⁹⁹ Mo	65.924	6	Н	411.491	15	0.0150	8
				528. 188 620, 02	15	0.0002	20
				621.771	24	0.0279	14
				739 500	17	12 20	16
				777 921	20	12.20	9
				822 972	15	0 134	3
				960 754	20	0.095	3
00		_		140.5110	10	89	4
^{ээш} Тс	6.0072	9	Н	142.63	3	0.0222	20
				39.760	10	0.0692	12
				53.286	10	0. 443	11
				241.875	10	0.0143	3
				294.964	10	0.288	4
¹⁰³ Ru	39.247	3	D	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
				428.40	20	0.071	3
				434.25	21	0.0202	21
106 _{D1-}	30.07	35	ç	439.2	3	0.0126	21
KII	50.01	00	5	511.861	4	20.4	4
				616.22	9	0.75	9
				621.93	6	9.93	23

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
106 _{D1}	20.07	25	S	1128.07	5	0.404	10
Kfi	50.07		5	1180.73	8	0.0145	4
				1194.54	5	0.0573	12
				1496.33	13	0.0222	8
				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
				79.131	3	6.6	5
108m A cr	138	9	V	433.937	4	90.5	6
Ag	400	5	1	614.276	4	89.8	19
				722.907	10	90.8	19
¹⁰⁹ Cd	461.9	4	D	88.0336	10	3.644	16
				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
110m			-	647.9	4	0.0177	5
Ag	249.83	4	D	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
				700.0701	15	16.69	1
				708.133	20	0.23	0
				762 0425	18	4. (1	3 7
				218 0245	17	22.00	1
				884 6799	10	75.0	19
				937 485	2	35.0	12 2
				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
核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	y 線エネルギー (keV)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
-------------------	----------	---------	-------	-------------------	------------------	------------	---------
				1300.07	7	0.0191	7
				1334.348	16	0.143	5
				1384.2932	20	25.1	5
				1420.29	10	0.027	4
110m.	0.40, 00		D	1475.7794	23	4.08	5
Ag	249.83	4	D	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
				255 134	10	2 11	8
¹¹³ Sn	115.09	3	D	200.104	3	64.97	17
				254 40	3	0.0161	10
				204.49	4	0.0101	10
				330.21	4	0.074	3 F
				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
				735.0	7	0.030	7
				766.22	1	0.071	1
				766.32	4	0.01213	20
				790.706	1	0.739	6
194			-	816.8	3	0.0729	18
¹²⁴ Sb	60.20	3	D	856.68	4	0.0238	10
				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
				1570.99	5	0.014	5
				1079.02	3	0.0400	10
				1622.4	4	0.0409	10
				1690.971	4	47.57	19
				1720.72	3	0.0951	17
				1918.74	6	0.0545	16
195			_	19.80	6	0.0204	10
¹²⁵ Sb	2.75856	25	Y	35.489	5	4.37	5
ł				58.43	5	0.012	6

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
¹²⁵ Sb	2.75856	25	Y	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
				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	0.25	10
			391.8	5	0.20	9	
				<i>4</i> 19 1	5	3.8	5
				412.1	0	0.7	3
				441.0	9	0.7	4
				440.1	5	4. 3	ు ం
				451.0	1	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
				584.2	11	0.33	19
¹²⁷ Sb	3.85	5	D	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
				57.63	8	0.030	5
				202.90	10	0.058	7
¹²⁷ Te	9.35	7	Н	202.90 215.10	10 10	0.058	7 5
¹²⁷ Te	9.35	7	Н	202.90 215.10 360.30	10 10 10	0.058 0.039 0.135	7 5 14

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
129m -	60 6	2	м	531.83	5	0.088	7
re	09.0	5	IVI	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
				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
^{129m} To	33 6	1	D	701.7	3	0.025	5
16	00.0	1	D	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
¹²⁹ I	1.57E+7	4	Y	39.578	4	7.51	23
				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
				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	4
				539.053	8	1.40	4
130-	19.96	1	н	553.910	10	0.66	3
1	12.30	1	П	586.049	8	1.69	0
				603.548	14	0.61	ئ 11
				623.0 669.526	3	0.017	11
				686 060	9	90 1 07	Л
				720 54	14 99	0.011	4 0
				739.519	10	82	<u></u> २
				749 09	10	0.012	5
				800.23	11	0.101	5
				808.20	т 2	0.226	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

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
				1094.23	4	0.552	20
				1199.15	4	0.253	11
				1122.13	2	11.2	11
130 T	19.26	1	н	1107.40	2	0.170	
1	12.30	1	11	1222. 30	ວ ງ	0. 179	0
				1272.12	ა ე	0.748	20
				1403.90	3 10	0. 345	10
				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
				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
				127.4	4	0.022	8
				130.50	10	0.067	8
				134.860	20	0.68	3
^{131m} Te	33.25	25	Н	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	0.992	20
				182.250	20	0.71	19
				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

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
191				357.4	3	0.019	8
^{131m} Te	33.25	25	Н	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
				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

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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	1.10	8
				923.40	20	0.112	19
				930.0	5	0.019	12
				987 80	10	0.13	12
				995 1	3	0.086	15
101				999 20	10	0.164	19
^{131m} Te	33.25	25	Н	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
				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
				1105.50	10	0.134	12
				1181.4	4	0.011	0 22
				1200.00	20	9.41	12
				1211.00	5	0.63	12
				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

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	y 線エネルギー (keV)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				1547.75	9	0.067	8
				1646.01	5	1.20	5
				1696.8	5	0.015	4
^{131m} Te	33.25	25	Н	1880.1	3	0.060	8
				1887.70	7	1.31	5
				1936.15	9	0.071	8
				1980.3	3	0.030	8
				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
131 I	8.0252	6	D	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} Xe	11.86	4	D	163.930	8	1.95	6
				49.720	10	15.0	6
132_	0.004	10	D	111.76	8	1.74	8
Te	3.204	13	D	116.30	8	1.96	9
				228.16	6	88	4
				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
				255.10	20	0.237	20
				255.1	3	0.010	10
				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	
^{132}I	2.295	13	Н	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	

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
132 T	2 295	13	н	687.8	5	0.039	20
1	2.250	15	11	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
				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
	1			1000 5	C	0.010	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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				1005.4	6	0.016	5
			1	1009.0	4	0.046	7
			1	1035.00	20	0.51	5
			1	1049.6	4	0.046	12
			1	1081.8	4	0.021	22
			1	1081.8	4	0.021	22
			1	1086.2	4	0.079	20
			1	1096.9	4	0.044	8
			1	1112.4	4	0.065	15
			1	1126.5	4	0.03	4
			1	1126.5	4	0.03	4
			1	1136.000	20	3. 01	14
			1	1143 30	20	1 35	6
			1	1147.8	5	0.27	5
			1	1172 90	20	1 09	7
			1	1206.7	6	0.017	•
			1	1200.7	4	0.017	3
			1	1212. 5	7	0.012	5
			1	1242.0	1	0.012	7
			1	1263 6	5	0.035	6
			1	1203.0	3	0. 027	20
			1	1272.0	4	0.100	20
			1	1290. 80	20	1.13	3
			1	1295.10	20	1.00	7
			1	1297.910	20	0.89	1
			1	1314.0	5 C	0.059	9
			Н	1317.918	6	0.118	15
^{132}I	2.295	13		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
			1	1476.70	20	0.130	9
			1	1519.60	20	0.079	5
				1542.3	6	0.0158	20
			1	1592.9	3	0.047	4
			1	1617.90	20	0.010	5
			1	1644.0	6	0.013	4
			1	1661.4	5	0.016	3
			1	1671.3	4	0.022	4
			1	1715.4	4	0.055	4
			1	1720.6	5	0.054	4
			1	1727.2	4	0.067	6
			1	1752.3	7	0.025	8
			1	1757.40	20	0.30	3
			1	1760.4	6	0.059	20
			1	1768.5	8	0.025	8
			1	1778.5	4	0.079	8
			1	1814.0	5	0.016	4
			1	1830.1	5	0.028	5
			1	1879.2	5	0.014	3
			l	1913. 7	5	0.030	10
			1	1921.08	12	1.23	6
			1	1985.625	6	0.0118	20
				150.4		0.030	7
			l	176.97	7	0.078	18
133 -	20 02	0	ш	233. 221	15	0.294	9
1001	20.83	δ	Н	245.95	8	0.035	9
			l	262.702	6	0.359	12
			l	267.173	19	0.117	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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
100				670.10	8	0.043	6
¹³³ I	20.83	8	Н	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
				1052.230	6	0.138	7
				1087.71	10	0.0122	18
				1236 441	6	1 51	5
				1230. 441	5	2 35	7
				1350.38	3	0.150	5
				79 6142	12	0.44	19
¹³³ Yo	5 2475	5	D	80 9979	11	36.9	3
AC	0.2110	Ŭ	Ď	160,6120	16	0 1066	13
133mVo	2 198	13	D	233 221	15	10.12	15
ле	2.100	10	D	53 1622	6	2 14	4
				79 6142	12	2.11	5
				80 9979	11	32.9	4
				160 6120	16	0.638	6
¹³³ Ba	10 551	11	v	223 2368	13	0.453	4
Da	10.001	11	1	226. 2000	10	7 16	5
				302 8508	5	18 34	13
				356 0129	7	62 05	19
				383 8485	12	8 94	7
				242 738	8	0.027	3
				326. 589	13	0.0162	10
				475 3650	20	1 477	7
				563 246	5	8 338	14
				569. 331	3	15, 373	17
^{134}Cs	2.0652	4	Y	604 7210	20	97 62	11
05		-	-	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
				158 197	18	0.289	14
105				200 19	10	0.012	5
¹³⁵ Xe	9.14	2	Н	249 794	15	90	2
				358 39	3	0.221	11
	1			000.00	J	V. 441	1 11

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	y 線エネルギー (keV)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				373.13	10	0.015	3
				407.990	20	0.358	17
125		0		608.185	15	2.90	14
ззХе	9.14	2	Н	654, 432	16	0.0450	24
				731, 520	20	0.055	4
				812.63	3	0.070	3
				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
¹³⁶ Cs	13.01	5	D	315.5	5	0.020	18
05		_	-	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	Ŭ
				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
¹³⁷ Cs	30, 08	9	Y	661,657	3	85.10	20
¹³⁹ Ce	137.641	20	D	165.8575	11	79.90	
00	10011		2	13.846	15	1. 22	18
				29,9660	10	14.1	5
				113.51	3	0,0161	13
				118, 837	3	0, 061	8
140			_	132,6870	10	0.202	6
¹⁴⁰ Ba	12.751	4	D	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
				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
				241.93	3	0.414	8
				266. 543	12	0.466	8
				306.90	20	0.025	7
				328.762	8	20.3	3
¹⁴⁰ La	1.67858	21	D	397.52	5	0.073	5
				432.493	12	2.90	3
	1			438 5	5	0 039	10
				100.0	0	0.000	
				487.021	12	45.5	6
				487.021 618.12	12 5	45.5 0.037	6 4
				487. 021 618. 12 751. 637	12 5 18	45.5 0.037 4.33	6 4 4
				487.021 618.12 751.637 815.772	12 5 18 19	45. 5 0. 037 4. 33 23. 28	6 4 4 20
				487.021 618.12 751.637 815.772 867.846	12 5 18 19 20	$ \begin{array}{r} 45.5 \\ 0.037 \\ 4.33 \\ 23.28 \\ 5.50 \\ \end{array} $	6 4 20 7
				487.021 618.12 751.637 815.772 867.846 919.550	12 5 18 19 20 23	45.5 0.037 4.33 23.28 5.50 2.66	6 4 20 7 3

核種名	半減期	半減期不確かさ	半減期単位	y 線エネルギー (keV)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				950.99	3	0.519	7
				992.9	5	0.013	5
				1045.05	24	0.025	15
				1097.20	23	0.023	5
¹⁴⁰ La	1.67858	21	D	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
¹⁴¹ Ce	32.511	13	D	145.4433	14	48.4	3
00				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
¹⁴³ Ce	33.039	6	Н	587.200	20	0.267	4
00		-		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
				33, 568	10	0, 200	23
				40.98	10	0.257	16
144		_	_	53, 395	5	0.100	8
¹⁴⁴ Ce	284.91	5	D	80.120	5	1. 36	6
				99.961	15	0.040	5
				133. 5150	20	11.09	20
144-	17.00	_	V	696.510	3	1.342	14
'"Pr	17.28	5	М	1489.160	5	0.278	5
				91.1050	20	28.1	8
				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
¹⁴⁷ Nd	10.98	1	D	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

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				589.35	4	0.039	3
147 _{NT} 1	10.09	1	D	594.80	3	0.283	6
Na	10.98	1	D	680.52	15	0.0294	15
				685.90	4	0.886	18
				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
152	10 517	14	37	534.25	5	0.0410	11
Eu	13.517	14	Ŷ	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
				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
	1	1			<u>^</u>		1

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
152 _E .	12 517	1.4	V	1089.737	5	1.734	12
Eu	15.517	14	1	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
000				1528.10	4	0.279	4
²⁰³ Hg	46.594	12	D	279.1952	10	81.56	5
²⁰⁶ T1	4.202	11	М	803.06	3	0.0050	5
				569.6980	20	97.75	3
				897.77	12	0. 128	5
²⁰⁷ Bi	31.55	4	Y	1063.656	3	74.5	3
				1442.20	20	0. 1310	20
				1460.0	15	1.61	6
				1770. 228	9	6.87	3
				211.40	15	0. 180	10
				233.36	15	0.310	10
				252.01	10	0.780	20
				211.311 495 05	15	0.040	3
				403.93 510.77	10	0.049	4
				583 1870	20	85.0	20
				587 7	20	0.060	20
				650 1	3	0.050	20
				705.2	3	0.022	20
				722_04	12	0.24	4
				748 70	20	0.046	3
²⁰⁸ T1	3.053	4	М	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

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
²¹⁰ Pb	22.20	22	Y	46.5390	10	4.25	4
²¹⁰ Po	138.376	2	D	803.06	3	0.00103	6
				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
				404 852	10	0.043	6
				404.000	10	1.76	5
211	26 1	0	м	427.000	10	1.70	0
Pb	30.1	Δ	M	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
²¹¹ Bi	2.14	2	М	351.07	5	13.02	12
				115. 183	5	0.596	10
				176.68	5	0.052	7
²¹² Pb	10.64	1	Н	238, 6320	20	43.6	6
15		_		300.087	10	3 30	5
				415.2	10	0.0131	22
				39.857	4	1 06	9
				288.20	4	0.337	3
				328.03	1	0.125	7
				433 7	5	0.017	1
				452.08	5	0.363	4
				452.98	5	0.050	4
				473.0	1	6.67	4
				721.330	9	1 109	10
²¹² Bi	60.55	6	М	185.31	8	1.102	13
				093.408	5 11	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
				53.2284	18	1.075	7
				118.2		0.094	21
				137.5	3	0.053	14
				141.3	6	0.058	18
²¹⁴ Pb	26.8	9	М	170.07	6	0.015	3
				196.19	5	0.067	8
				205.68	9	0.0114	13
				216 47	7	0.0100	23
				410. 11		0.0100	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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
214 _{D1}	96.9	0	м	470.6	8	0.011	3
Pb	20.8	9	M	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
				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
214	10.0	4	м	461.08	11	0.051	6
511B1	19.9	4	М	469.77	4	0.132	5
				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
1				649.22	5	0.057	5
1				658.70	20	0.0140	20
				660.94	13	0.053	4
	1	1					-

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
214	10.0	4	м	915.75	13	0.0230	20
Bi	19.9	4	М	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
				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	10	0.015	5
				1118 9	5	0.040	10
				1120 294	6	14 92	
				1120.201	16	0.026	2
				11.30 42		11 11 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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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	0.0110	3
				1303 75	7	0.107	5
				1316 00	9	0.081	6
				1310.99	9	0.081	6
				1329.94	10	0.001	0
				1341.49	15	0.021	3
				1371	0	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
²¹⁴ Bi	19.9	4	М	1479.17	9	0.055	4
DI	1000	-		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
				1935.62	16	0.032	3
				130.60	3	0.13	9
				221.5	3	0.030	5
				271.230	10	10.8	7
210	0.07		~	293.56	4	0.073	6
²¹⁹ Rn	3.96	1	S	401.810	10	6.6	5
				438.2	6	0.015	16
				517.60	6	0.044	4
				676 66	7	0 0173	2.4
				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	0.000	10
²²³ Ra	11.43	5	D	104.23	2 2	0.019	15
				110.70	10	0.0230	10
				114 70	20	0.000	5
				114. (U 199. 910	20 10	1 200	0
				122.019	20	0.020	20
				190.10	20	0.028	ა

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
				170.54	10	0.152	14
				210.0	0	0.133	6
				219.0	0	0.014	0
				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
000				346.8	3	0 181	3
²²³ Ra	11.43	5	D	362 052	17	0.046	2
				362.002	20	0.015	7
				260 5	20	0.010	2
				271 676	15	0. 0209	16
				371.070	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	<u>4</u> 1	0.057	2
				632 0	10	0.007	10
224 D	2 66	1	D	240 006	10	1 10	5
226p	3.00	4 7	U V	240. 980	10	4.10	D A
~Ka	1000	1	Ŷ	180.211	13	3.64	4
				0.5	3	0.09	3
				20.25	5 -	0.24	4
				24.13	<u>b</u>	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
227 TI-	18 68	Q	D	41.93	5	0.028	14
IN	10.00	J	ν	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
				50.130	10	0.4	7
				90.09	Ð	0.019	1

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
²²⁷ Th	18.68	9	D	141.42	5	0.07	8
				150.14	20	0.011	4
				164.52	10	0.015	3
				108.30	10	0.015	3
				175.40	ა ე	0.017	3 6
				175.8	<u>्</u>	0.021	5
				104.05	10	0.013	3
				200 50	10	0.013	4
				200.50	10	0.013	9
				201.04	10	0.224	4
				204.14	10	0.16	3
				206.08	5	0.25	4
				210.62	5	1 25	14
				212.70	4	0.079	12
				212.70	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
	1			967 OF	20	0.010	2
				207.05	20	0.010	5
				270.56	20	0.028	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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
				200.00	3	2 91	20
				200 50	16	0.014	20
				300.50	10	1.15	17
				304.500	20	1.15	17
				306.1	3	0.010	4
227	10.00	0	D	308.40	3	0.017	3
Th	18.68	9	D	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
				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
				120.0650	10	2 42	0
				125.50	5	0.018	3
				135.54	5	0.018	4
				137.91	ວ ວ	0.024	0
				141.02	ა 10	0.159	0
				145.849	10	0. 158	01
				153.977	10	0.722	21
				168.65	10	0.010	3
228	0.15	0		173.964	13	0.035	b
²²⁰ Ac	6.15	2	Н	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	5	0.76	11
				214.85	10	0.029	4
				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

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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	
				410.00	10	0.0102	3
				410.44	5	0.121	0
				440.44	5	0. 121	5
				449.15	10	0.048	5
				457 17	10	0.0150	0
				407.17	61 6	4 40	23
				403.004	10	4.40	1
				400.40	10	0.029	<u> </u>
				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
²²⁸ Ac	6.15	2	Н	508.959	17	0.45	5
ne				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
				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	R 20
				674 2	10	0.020	6
				674.8		9 1	7
	1			017.0		4.1	-
				677 11	10	0 069	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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
228	6 15	2	ц	904.20	4	0.77	3
AC	0.15	2	11	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
				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
	1						
				1153.52	4	0.139	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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
²²⁸ Ac	6.15	2	Н	1548.05	4	0. 038	12
				1550.85	20	0.178	13
				1573 26	5	0.020	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
				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
				1007.19	20 20	0.090	10
				1907.10	20	0.0119	21
				1929.78	15	0.0199	5
				1965 24	20	0.009	18
				84. 373	3	1. 19	4
				131.613	4	0. 127	4
²²⁸ Th	1.9125	9	Y	166. 410	4	0. 101	4
				205.93	5	0.0191	8
				215.983	5	0.247	8
²³¹ Th	25.52	1	Н	9.200		0.0330	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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				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
231 m	95 F9	1	ц	89.950	20	1.00	6
In	20.02	1	п	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
				16.50	10	0. 221	9
				19.60	C	0.35	10
				25.48	0 20	0.119	14
				27.360	20	10. 5	6
				25.910	20	0.037	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
				77.34	3	0.0572	19
231n	2 976F±4	11	V	96.84	3	0.084	3
Ра	3.270E+4	11	1	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	2.3	4
				302.00/	9	0.0000	5
				312.92 227.14	5 7	0.0980	20
				321.14	15	0.0399	3
				340 71	10 6	0 177	о 4
	1	1		010.11	U	V. 111	1

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				354.48	5	0.0961	21
2315	0.0765+4	11	37	357.11	8	0.168	4
201Pa	3.276E+4	11	Ŷ	379.35	7	0.0496	12
				407.81	3	0.0355	8
				62.860	20	0.016	3
				63.290	20	3.7	4
	推合 下減期不施シ之 下減期不施シ之 「減期不施シ之 「減二、10 「 」 「 「 </td <td>0.0130</td> <td>15</td>	0.0130	15				
kaa $+ixim$ $+ixim$ $+ixim$ $radin x + n x + (x + (x + (x + n))) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n) x + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n) x + (x + n) x + (x + n)) + (x + n) x + (x + n)$	0.060	6					
²³⁴ Th	24.10	3	D	87.02	6	0.015	3
111		Ū	2	92, 380	10	2 13	21
				92.800	20	2.10	20
				112 81	5	0.210	20
				112.01	5	0.210	23
		10		184.8	00	0.010	5
		16		73.920	20	0.013	4
				258. 227	3	0.0764	22
				740.10	8	0.0109	17
				742.813	5	0. 1066	23
				766.42	10	0.317	5
0.9.4				786.28	10	0.0544	9
^{234m} Pa	1.159	11	М	921.72	10	0.01278	16
		11		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
				19.55	5	63	3
				31.60	5	0.017	6
				34.70	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	10
				72 70	20	0.1200	12
				73.72	5	0.01000	12
				74.04	2	0.01000	6
				14.94	ა იი	0.001	10
				100, 10	20	1.66	14
				109.19	1	1.00	14
				115.45	5	0.030	10
				120.35	5	0.0260	3
				136.55	5	0.01200	12
²³⁵ U	703.8E+6	5	Y	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

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)	y 線エネルギー 不確かさ	放出率 (%)	放出率不確かさ
				279.50	5	0.270	3
235 _{1 1}	702 8E+6	5	V	291.65	3	0.040	6
U	103. OE+0	0	1	345.92	3	0.040	6
				387.84	3	0.040	6
				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	
²³⁹ Np 2.				166.39	0.016	7	
	2.356	3	D	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	
				26.34460	20	2.27	13
				32.18		0.0174	5
				33.1960	10	0.126	4
241 A m	132 6	6	v	43.420	3	0.073	8
Am	402.0	U	1	55.560	20	0.0181	18
				59.54091	10	35.9	4
				98.970	20	0.0203	5
				102.980	20	0.0195	5

表 E.2 エネルギー順核データ

y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 (%)
4.2	²³⁹ Np	2.356	D	2.600	81.0	¹³³ Xe	5.2475	D	36.9
13.8	¹⁴⁰ Ba	12.751	D	1.22	81.0	¹³³ Ba	10.551	Y	32.9
14.4	⁵⁷ Co	271.74	D	9.16	81.1	^{131m} Te	33.25	Н	3.92
16.5	²³¹ Pa	3.276E+4	Y	0.221	81.2	²³¹ Th	25.52	Н	0.90
17.2	²³¹ Th	25.52	Н	0.23	82.1	²³¹ Th	25.52	Н	0.42
19.1	²³¹ Th	25.52	Н	0.244	84.2	²³¹ Th	25.52	H	6.6
19.6	235U 221-	703.8E+6	Y	63	84.4	²²⁰ Th	1.9125	Y	1.19
19.6	²³¹ Pa ²²⁷ m	3.276E+4	Y D	0.35	84.9	$Pb(K\beta I)$	10.01	D	5.0
20.3	²³¹ D	18.08	D V	0.24	86.4	131mm	13.01	U U	5.9 0.149
25.5	231 _{TL}	25 52	I Ц	14 1	00.4 87.3	le Bi(K B 1)	33.20	П	0.142
25.0	241 Am	432 6	V N	2 97	88.0	¹⁰⁹ Cd	461 9	D	3 644
20.0	²³¹ Pa	3 276E+4	Y	10.5	90.0	²³¹ Th	25.52	H	1 00
27.8	129 To	69.6	M	16.3	91.1	147Nd	10.98	D	28.1
30.0	¹⁴⁰ Ba	12.751	D	14.1	92.4	²³⁴ Th	24.10	D	2.13
33.2	²⁴¹ Am	432.6	Y	0.126	92.8	²³⁴ Th	24.10	D	2.10
33.6	¹⁴⁴ Ce	284.91	D	0.200	93.9	²²⁷ Th	18.68	D	1.51
33.6	²²³ Ra	11.43	D	0.10	99.3	²³¹ Th	25.52	Н	0.131
35.5	¹²⁵ Sb	2.75856	Y	4.37	99.5	²²⁸ Ac	6.15	Н	1.26
38.2	²³¹ Pa	3.276E+4	Y	0.145	101.6	^{131m} Te	33.25	Н	0.164
39.6	¹²⁹ I	1.57E+7	Y	7.51	102.1	^{131m} Te	33.25	Н	7.66
39.9	²¹² Bi	60.55	М	1.06	102.3	²³¹ Th	25.52	Н	0.436
40.6	⁹⁹ Mo	65.924	Н	1.04	105.5	^{129m} Te	33.6	D	0.14
41.0	¹⁴⁴ Ce	284.91	D	0.257	106.1	²³⁹ Np	2.356	D	25.34
43.8	²²⁷ Th	18.68	D	0.213	109.2	²³⁵ U	703.8E+6	Y	1.66
44.7	²³⁹ Np	2.356	D	0.130	109.4	140La	1.67858	D	0.219
46.3	²³¹ Pa 210-1	3. 276E+4	Y	0.186	109.7	¹³⁰ Cs	13.01	D	0.409
46.5	239 Pb	22.20	Y D	4.25	111.8	¹³² Te	3.204	D	1.74
49.4	132m	2.350	D	0.120	112.8	227m	24.10	D	0.210
49.7	227 Th	3.204	D	15.0	113.1	227 Th	18.68	D	0.54
49.0 50.1	227 _{Th}	18.68	D	8.4	115.1	212 _{Dh}	10.64	Н	0.135
53 2	¹³³ Ba	10.551	Y	2 14	116.2	¹³² To	3 204	D	1.96
53.2	²¹⁴ Ph	26.8	M	1.075	117.0	¹²⁵ Sh	2, 75856	Y	0.263
53.3	¹⁰³ Ru	39.247	D	0. 443	117.2	²²⁷ Th	18.68	D	0.199
53.4	¹⁴⁴ Ce	284.91	D	0.100	120.5	¹⁴⁷ Nd	10.98	D	0.376
57.4	¹⁴³ Ce	33.039	Н	11.7	121.8	¹⁵² Eu	13.517	Y	28.53
57.8	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.47	122.1	⁵⁷ Co	271.74	D	85.60
58.6	²³¹ Th	25.52	Н	0.462	122.3	²²³ Ra	11.43	D	1.209
59.5	241 Am	432.6	Y	35.9	129.1	²²⁸ Ac	6.15	Н	2.42
61.1	¹²⁷ Sb	3.85	D	1.44	130.6	²¹⁹ Rn	3.96	S	0.13
61.5	²³⁹ Np	2.356	D	1.300	131.1	¹⁴⁰ La	1.67858	D	0.467
62.5	²²⁷ Th	18.68	D	0.11	131.6	²²⁸ Th	1.9125	Y	0.127
62.5	²²⁷ Th	18.68	D	0.11	132.7	¹⁴⁰ Ba	12.751	D	0.202
63.3	²³⁴ Th	24.10	D	3.7	133.5	¹⁴⁴ Ce	284.91	D	11.09
66.0	136 -	82.78	M	0.114	134.9	57 -	33.25	H	0.68
66.9	239 x	13.01	D	4.79	136.5	* Co	271.74	D	10.68
67.9 79.7	235 Np	2.356	D	0.10	139.7	-≫ ^{rom} Ge	41.1	5	39.5
72.0	231 _{T1}	25 52	I U	0.1200	140.0	235 ₁₁	0.0072	H V	0.200
72.0	$\frac{1h}{Ph(K\alpha 2)}$	20.02	11	0.202	140.0	59 _E	44 490	I D	1 02
75.0	$Ph(K\alpha 1)$				143.8	ге ²³⁵ П	703 8F+6	V	10.96
77 1	$Bi(K\alpha 1)$				144.2	223Ra	11, 43	D	3, 27
79.1	^{108m} A σ	438	Y	6.6	145.4	¹⁴¹ Ce	32.511	D	48.4
79.2	^{131m} Te	33.25	Н	0.123	145.8	²²⁸ Ac	6.15	H	0.158
79.6	¹³³ Xe	5.2475	D	0.44	147.4	¹³² I	2.295	Н	0.237
79.6	¹³³ Ba	10.551	Y	2.65	149.7	^{131m} Te	33.25	Н	4.9
79.7	²²⁷ Th	18.68	D	1.95	153.2	¹³⁶ Cs	13.01	D	7.7
80.1	¹⁴⁴ Ce	284.91	D	1.36	154.0	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.722
80.2	^{131}I	8.0252	D	2.62	154.2	²²³ Ra	11.43	D	5.70

y線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	y 線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
154 3	¹²⁷ Sb	3 85	D	0.15	227 9	¹²⁵ Sb	2 75856	V	0 1311
158.2	135Yo	9.14	Н	0.289	228 2	¹³² To	3 204	D	88
158.6	223Ra	11.43	D	0, 695	228.2	239Np	2, 356	D	10.73
159.7	^{131m} Te	33.25	Н	0.123	230. 7	^{131m} Te	33.25	H	0. 187
160.6	¹³³ Xe	5.2475	D	0.1066	231.6	¹⁴³ Ce	33.039	Н	2.05
160.6	¹³³ Ba	10.551	Y	0.638	233.2	₩ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.16
162.7	¹⁴⁰ Ba	12.751	D	6.22	233. 2	¹³³ T	20.83	Н	0.294
163.1	²³¹ Th	25.52	Н	0.154	233.2	^{133m} Xe	2.198	D	10.12
163.4	²³⁵ U	703.8E+6	Y	5.08	233.4	²⁰⁸ T1	3.053	М	0.310
163.9	¹³⁶ Cs	13.01	D	4.69	234.8	²²⁷ Th	18.68	D	0.45
163.9	^{131m} Xe	11.86	D	1.95	235.7	⁹⁵ Zr	64.032	D	0.270
165.9	¹³⁹ Ce	137.641	D	79.90	236.0	²²⁷ Th	18.68	D	12.9
166.4	²²⁸ Th	1.9125	Y	0.101	238.6	²¹² Pb	10.64	Н	43.6
166.6	¹³⁶ Cs	13.01	D	0.63	240.9	^{131m} Te	33.25	Н	7.32
172.7	¹²⁵ Sb	2.75856	Y	0.191	241.0	²²⁴ Ra	3.66	D	4.10
173.5	¹⁴⁰ La	1.67858	D	0.127	241.9	¹⁴⁰ La	1.67858	D	0.414
176.3	¹²⁵ Sb	2.75856	Y	6.84	242.0	²¹⁴ Pb	26.8	М	7.251
176.6	¹³⁶ Cs	13.01	D	13.7	244.7	¹⁵² Eu	13.517	Y	7.55
177.2	¹³¹ I	8.0252	D	0.269	249.8	¹³⁵ Xe	9.14	H	90
179.5	223Ra	11.43	D	0.153	250.3	²² 'Th	18.68	D	0.45
181.1	131mm	65.924	H	6.05	250.6	127 Te	69.6	M	0.38
182.3	131mT	33.20 33.25	п	0. 992	252.4	227ml	0.00 19.69	D	8. 0 0. 111
182.6	235 ₁₁	703 8F+6	V	0.39	252.5	208 _{T1}	3 053	M	0.780
183.1	131mTo	33.25	Н	0.149	253.2	131mTo	33. 25	Н	0.627
183.6	¹³² I	2.295	Н	0.138	254.2	⁹⁷ Zr	16.749	Н	1.15
185.7	²³⁵ U	703.8E+6	Y	57.0	254.4	²³⁹ Np	2.356	D	0.1092
186.2	²²⁶ Ra	1600	Y	3.64	254.6	²²⁷ Th	18.68	D	0.71
187.3	¹³⁶ Cs	13.01	D	0.54	255.1	^{132}I	2.295	Н	0.237
188.1	^{131m} Te	33.25	Н	0.205	255.1	¹¹³ Sn	115.09	D	2.11
189.8	^{131m} Te	33.25	Н	0.49	255.4	^{131m} Te	33.25	Н	0.299
190.5	^{131m} Te	33.25	H	0.112	255.8	²³¹ Pa	3.276E+4	Y	0.1059
191.4	59-	6.15	H	0. 123	256.2	²² 'Th	18.68	D	7.0
192.3	235m	44. 490	D V	3.08	258.8	214pu	8.12	M	0.11
194.9	147 _{NL}	10.3.8E+0	I D	0.030	258.9	²³¹ D-	20.8	M V	0. 531
190.0	¹ Na ** ⁷⁵ Co	82 78	M	1 19	261.2	91 _{Sn}	9.65	Н	0. 102
199.4	228 A c	6 15	Н	0.315	262.7	¹³³ T	20.83	Н	0.359
200.6	131mTo	33. 25	Н	7.28	262.9	²²⁷ Th	18.68	D	0.107
202.1	235U	703.8E+6	Y	1.080	262.9	¹³² T	2.295	Н	1.28
204.0	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.112	264.6	₩ ⁷⁵ Ge	82.78	М	11.4
204.1	¹²⁵ Sb	2.75856	Y	0.317	266.5	¹⁴⁰ La	1.67858	D	0.466
204.1	²²⁷ Th	18.68	D	0.23	266.9	⁹³ Y	10.18	Н	7.4
205.0	²²⁷ Th	18.68	D	0.16	267.2	¹³³ I	20.83	Н	0.117
205.3	²³⁵ U	703.8E+6	Y	5.02	269.5	²²³ Ra	11.43	D	13.9
206.1	²²⁷ Th	18.68	D	0.25	270.2	228Ac	6.15	H	3.46
208.1	¹²⁵ Sb	2.75856	Y	0.248	271.2	²¹⁹ Rn	3.96	S	10.8
209.0	228	69.6	M	0.180	272.4	⁹¹ 2r	16.749	H	0.23
209.3	239 _N	0.15	H D	3.89	272.0	227m	9.65	H	0.26
209.8	227 _{Tb}	2.000 18.68	D D	0.000 1.25	212.9	136 _{C a}	13.00	ת	12.66
210.0	²⁰⁸ T1	3, 053	M	0, 180	273.8	²¹⁴ R;	19.9	M	0. 128
214.0	^{131m} Te	33.25	H	0.411	274.7	⁹¹ Sr	9.65	H	1.04
214.9	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.76	274.8	²¹⁴ Pb	26.8	М	0.355
216.0	²²⁸ Th	1.9125	Y	0.247	275.4	¹⁴⁷ Nd	10.98	D	0.910
218.9	⁹⁷ Zr	16.749	Н	0.168	276.4	¹³³ Ba	10.551	Y	7.16
221.4	²³⁵ U	703.8E+6	Y	0.118	277.4	²⁰⁸ T1	3.053	М	6.6
223.2	¹³³ Ba	10.551	Y	0.453	277.6	²³⁹ Np	2.356	D	14.51
226.4	²³⁹ Np	2.356	D	0.259	278.4	¹²⁹ Te	69.6	М	0.57
227.8	²³⁹ Np	2.356	D	0.5100	278.6	^{131m} Te	33.25	Н	1.72

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 (%)
279.0	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.160	338.3	²²³ Ra	11.43	D	2.84
279.2	²⁰³ Hg	46.594	D	81.56	338.3	²²⁸ Ac	6.15	Н	11.27
279.5	²³⁵ U	703.8E+6	Y	0.270	338.5	²¹⁴ Bi	19.9	М	0.11
280.4	¹²⁷ Sb	3.85	D	0.66	340.5	¹³⁶ Cs	13.01	D	46.8
281.3	¹²⁹ Te	69.6	М	0.165	340.7	²³¹ Pa	3.276E+4	Y	0.177
283.2	^{131m} Te	33.25	Н	0.37	341.0	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.369
283.7	²³¹ Pa	3.276E+4	Y	1.65	342.6	²²⁷ Th	18.68	D	0.35
284.3	^{131}I	8.0252	D	6.12	342.9	²²³ Ra	11.43	D	0.222
284.9	¹³² I	2.295	Н	0.71	342.9	^{131m} Te	33.25	Н	0.37
285.5	²³⁹ Np	2.356	D	0.794	344.3	¹⁵² Eu	13.517	Y	26.59
286.1	²²⁷ Th	18.68	D	1.74	345.4	^{133}I	20.83	Н	0.104
288.2	²²³ Ra	11.43	D	0.160	346.8	²²³ Ra	11.43	D	0.181
288.2	²¹² Bi	60.55	М	0.337	348.9	²¹⁴ Bi	19.9	М	0.104
289.6	²²⁷ Th	18.68	D	1.9	350.5	²²⁷ Th	18.68	D	0.110
290.8	¹²⁷ Sb	3.85	D	2.02	350.6	¹⁴³ Ce	33.039	Н	3.23
293.3	¹⁴³ Ce	33.039	Н	42.8	351.1	²¹¹ Bi	2.14	М	13.02
293.3	¹²⁷ Sb	3.85	D	0.29	351.3	^{131m} Te	33.25	Н	0.202
295.0	¹⁰³ Ru	39.247	D	0.288	351.9	²¹⁴ Pb	26.8	М	35.60
295.2	²¹⁴ Pb	26.8	М	18.42	354.7	^{131m} Te	33.25	Н	0.220
295.9	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.440	355.4	⁹⁷ Zr	16.749	Н	2.09
296.5	²²⁷ Th	18.68	D	0.44	356.0	¹³³ Ba	10.551	Y	62.05
300.0	²²⁷ Th	18.68	D	2.21	357.1	²³¹ Pa	3.276E+4	Y	0.168
300.1	²³¹ Pa	3.276E+4	Y	2.41	358.4	¹³⁵ Xe	9.14	Н	0.221
300.1	²¹² Pb	10.64	Н	3.30	360.3	¹²⁷ Te	9.35	Н	0.135
302.0	<u>₩</u> ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.11	361.1	¹³³ I	20.83	Н	0.11
302.7	²³¹ Pa	3.276E+4	Y	2.3	363.3	^{132}I	2.295	Н	0.49
302.7	²³¹ Pa	3.276E+4	Y	0.17	364.5	^{131}I	8.0252	D	81.5
302.9	¹³³ Ba	10.551	Y	18.34	365.0	^{131m} Te	33.25	Н	1.16
304.5	²²⁷ Th	18.68	D	1.15	366.4	⁹⁹ Mo	65.924	Н	1.200
304.8	¹⁴⁰ Ba	12.751	D	4.29	367.8	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.859
309.5	^{131m} Te	33.25	Н	0.36	371.7	²²³ Ra	11.43	D	0.487
310.0	¹² 'Sb	3.85	D	0.26	379.9	⁹¹ Sr	9.65	Н	0.147
312.7	²² Th	18.68	D	0.52	380.5	¹²⁵ Sb	2.75856	Y	1.517
314.9	²² 'Th	18.68	D	0.3	383.8	¹³³ Ba	10.551	Y	8.94
314.9	²² 'Th	18.68	D	0.3	383.9	131mTe	33.25	H	0.19
315.9	²³⁹ Np	2.356	D	1.600	386.8	²¹⁴ Bi	19.9	M	0.295
316.7	132 I	2.295	H	0.128	387.9	132 199	2.295	H	0.17
319.4	14'Nd	10.98	D	2.13	387.9	132 199	2.295	Н	0.17
319.9	51	13.01	D	0.50	387.9	¹³² I	2.295	H	0.17
320.1	125	27.704	D	9.910	388.9	²¹⁴ Bi	19.9	M	0.402
321.0	228 .	2.75856	Y	0.416	391.7	¹¹³ Sn	115.09	D	64.97
321.6	223Ac	6.15	H	0.226	391.8	147.1.1	3.85	D	0.96
323. 9 205 0	Ka 131-	11.43 9.00F0	ע	ა. 99 0. 979	398. Z	124cr	10.98	ש	0.912
329. 8 207 4	228	8. UZ9Z	U U	0.12	400.3	977	00.20 16.740	U 	0.139
321.4	228 A	0.10	П U	2.05	400.4	219p	2 06	с	0.240
328. U	212p ·	0.10	п	2.90 0.195	401.0	211pr	3. 90 26 1	М	0.0
328. U 220 4	223p		M	0.120	404.9	214p ·	30. I	M	J. 10
320.4	140r	11.43	D	0.209	403.7	135v	19.9	M	0.109
328. 8 220 4	152 _E	1.0/000	U V	20.3 0 1919	408.0	125 _{C1}	9.14 9.75956	П V	0.308
323.4	227 _{T1}	18.69	1 D	2 0	400.1	228 A	6 15	і Ц	1 09
329.9 330 1	231 _D	2 976E14	V V	4.9 1.36	409.0	AC 147 _{N1}	10.08	п	0 150
220.1	977-	16 740	і Ц	0 1/2	410.0 /11_1	152 _E	13 517	v v	9 997
222 1	228 A -	6 15	н Ц	0.140	411.1 119 1	127 _{C1-}	3.85	I D	2.201
224 0	223p	11 /2	n D	0.40	/16 0	50 152	13 517	V	0.1000
334.3	<u>ка</u> ^{131m} т.	33 25	Н	9.99	416.9	<u>Е</u> Ц 132 _т	2 295	Н	0.47
22/ 2	239 _N -	2 356	D	2 056	<u>417</u> 4	131mT ~	33.25	Н	0.260
224.0	227 _{T1-}	18 68	D D	1 1/	417.4 417.6	1е 133т	20.83	Н	0.209
334.8	59 _E c	44 490	D	0.970	<u>417</u> Q	127 _T	9.35	Н	0.00
335 /	131m _T	33 25	Н	0 121	417 0	130 T	12 36	Н	34 2
000.4	re	00.40	11	0.101	111.3	L	12.00	11	01.4

y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 (%)
419.1	※ ⁷⁵ Ge	82.78	М	0.185	503.5	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.1524
422.9	¹³³ I	20.83	Н	0.311	503.8	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.182
423.7	¹⁴⁰ Ba	12.751	D	3.10	504.7	₩ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.10
427.1	²¹¹ Pb	36.1	М	1.76	505.8	¹³² I	2.295	Н	4.94
427.9	¹²⁵ Sb	2.75856	Y	29.6	507.2	¹³⁶ Cs	13.01	D	1.00
431.8	¹³² I	2.295	Н	0.47	507.6	⁹⁷ Zr	16.749	Н	5.03
432.4	^{131m} Te	33.25	Н	0.64	509.0	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.45
432.5	¹⁴⁰ La	1,67858	D	2,90	510.5	¹³⁰ T	12.36	Н	0.85
433.0	¹⁴³ Ce	33.039	Н	0.159	510.5	¹³³ T	20.83	Н	1.83
433.9	^{108m} Ag	438	Y	90.5	510.8	²⁰⁸ T1	3.053	М	22.60
437.6	¹⁴⁰ Ba	12, 751	D	1,929	511.9	¹⁰⁶ Rh	30.07	S	20.4
439.9	147Nd	10.98	D	1.28	513.4	977r	16.749	H	0.55
440.4	228Ac	6.15	Н	0.121	514.0	⁸⁵ Kr	10.739	Y	0.434
441 0	127Sb	3 85	D	0.7	514 0	85Sr	64 849	D	96
443 6	¹²⁵ Sb	2 75856	Y	0.306	521.0	** ⁷⁴ Ga	8 12	M	0.12
443.8	103R11	39 247	D	0.339	522.7	¹³² T	2 295	Н	16.0
444_0	152F11	13 517	V	2.827	523 1	228	6 15	Н	0 103
444 0	¹⁵² F11	13.517	V	0.298	524.8	131mTo	33 25	Н	0.131
444 1	124 _{Sh}	60.20	D	0.1889	525.5	¹²⁴ Sb	60.20	D	0.138
445.0	223po	11 43	D	1 29	529.9	133 T	20.83	Н	87.0
445 1	127 _{Sb}	3 85	D	4 3	530.7	131mTo	33.25	Н	0.101
446.2	132 T	2 295	И	1.0	531.0	147 _{N-J}	10.98	D	13 /
446.8	110m A cr	2.235	D	3.70	533 7	214 _{Db}	26.8	M	0 181
440.0	Ag ×637n	249.03	M	0.236	535.4	132 T	20.0	М	0.51
445.5	127 _{CL}	3 85	D	0.230	536 1	130 T	12.255	Ц	0.01
451.0	131mr -	33.05	Р	1.5	537.3	140 _D	12.30	n D	24 30
452.5	212p:	60 55	M	1.0	520 1	130 T	12.751	U U	1 40
453.0	214p;	10.0	M	0.000	540.9	1 × 74 C -	8 12	M	0.16
454.0	127 _{CL}	3.85	M D	0.232	540.9	131mm -	33.25	M	0.10
450.0	130 T	12.26	U U	0.11	542.2	127 _{C1}	2 85	n D	2.0
457.8	129m	60.6	M	0.237	545.5	228	6 15	и И	0.201
459.0	214pL	26.8	M	0.212	540.5	AC 132 T	2 205	Ц	1 14
402.0	131mm	20.0	M	1.76	547.2	1	2.290	11 M	0.11
402.9	228 A	55.25 6.15	п	1.70	552.0	130 T	0.12	M	0.11
403.0	AC 125c1	0.15	11 V	4.40	555.9	129mm	12.30	II D	0.00
403.4	5D 131mm	22.75000	I U	10.49	557 1	103 _D	33.0	D	0.110
408.2	1e × ⁷⁵ c	00 70	M	0.00	562 5	228 A	6 15	U U	0.841
400.0	214p ·	10.0	M	0.223	562.0	AC 1340	0.15	11 V	0.01
409.0	B1	19.9	M	0.152	564 0	152p	2.0032	I V	0.330
471.1	127 cu	0.12	M	0.39	566 4	152p	13. 317	I V	0.494
473.0	50 132 -	2.00	U U	20.0	560.2	134o	2.0652	1 V	15 979
475.0	1340	2.295	П V	0.17	560.7	207p:	2.0032	I V	10.070
475.4	7n	52.0002	1 D	1.477	570.0	228 A	6 15	1 1	91.10
411.0	ве 132 т	9 90E	ע u	0 17	570.9	AC 228 A	6 15	п	0.150
470.2	228 4	6 15	и П	0.17	580 1	214 _{D1}	26.8	M	0.100
410.0	214pt	26.9	11 M	0.209	500.1	208m1	20.0	M	85.0
400.4	<u>Pb</u> ₩ ⁷⁴ c	20.0 8 19	IVI M	1 06	503.2	228	5.005 6.15	M LI	00.0
404.9	<u>- 140</u> 140	0.12	M	1.00	594 9	AC	0.10	П	0.111
407.0	214pi	1.07050	D M	40.0	586.0	130 T	19.26	и И	1.60
401.1	129m	20.0 60.6	IVI M	0.432	500. U	152 _C	12.00	П V	0.455
401.4	1е 132т	2 205	м Ц	1.44	586 2	131mm	33.01/	і Ц	1 00
400.0	1 132 т	2.290	11 U	0.20	500.0	143 _C	22.20	11 U	0.967
400.0	152 ₁	2.290 13.517	11 V	0.20	501.2	147 _{NT 1}	10.00	п	0.207
400.1	147 _{NT 1}	10.01/	I D	0.414	505 0	Nd ≫.74 ∧	17.77	ע ח	50
409. Z	143 c	10.20	U U	0.100	505.0	* As	21.11 Q 10	M	01 00
490.4	Ce	00.009 0 10	П	2.10 5.0	090.9 600.6	125 cu	0.12	M V	91.0U
493.0	103~	0.12	M	01.0	000.0 600.1	131mm	2. 10000	I	60.11
497.1	100 Ku	39.247	D M	91.0	602.1	le	33.25	H	0.30
497.0	127~: Ga	0.12 2.05	M	0.90	002.4	2r	10. (49	H	1.38
502.8	131-	3.85	D D	0.8	602.7	127Sb	60.20	D D	91.8
503.0	101 I	8.0252	D	0.359	603.5	-"'Sb	3.85	D	4.5

γ線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)	y線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)
603. 5	¹³⁰ T	12.36	Н	0. 61	685.7	¹²⁷ Sb	3, 85	D	36.8
604.2	** ⁷⁴ Ga	8.12	M	2.85	685.9	^{131m} Te	33.25	H	0.149
604.7	¹³⁴ Cs	2.0652	Y	97.62	685.9	¹⁴⁷ Nd	10.98	D	0.886
606.7	¹²⁵ Sb	2.75856	Y	4.98	686.1	^{130}I	12.36	Н	1.07
608.2	¹³⁵ Xe	9.14	Н	2.90	687.0	^{110m} Ag	249.83	D	6.53
608.4	്₩ ⁷⁴ Ga	8.12	М	14.4	688.7	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.856
608.4	ir ⁷⁴ As	17.77	D	0.552	690.5	⁹⁷ Zr	16.749	Н	0.183
609.3	²¹⁴ Bi	19.9	М	45.49	692.4	⁵⁷ Co	271.74	D	0.149
609.4	^{131m} Te	33.25	Н	0.134	695.6	^{131m} Te	33.25	Н	0.38
610.3	¹⁰³ Ru	39.247	D	5.76	695.9	^{129m} Te	33.6	D	3.0
612.1	¹⁰³ Ru	39.247	D	0.105	696.5	¹⁴⁴ Pr	17.28	М	1.342
614.3	^{108m} Ag	438	Y	89.8	698.5	¹² 'Sb	3.85	D	3.64
616.2	¹⁰⁶ Rh	30.07	S	0.75	699.2	⁹⁷ Zr	16.749	Н	0.101
617.7	133-	82.78	M	0.114	701.5	228	8.12	M	0.77
618.0	91c	20.83	H	0.544	701.7	131mm	6.15	H	0.173
620.1	110m	9.65	H	1.78	702.5	214p:	33.25	H	0.377
620.4	132 T	249.83	U U	2.73	703.1	977.	19.9	M	0.472
621.2	132 T	2.295	Ц	1.58	703.8	211 _{DL}	36 1	M	0.462
621.2	106 _{Db}	2.295	II S	0.03	704.0	133 T	20.83	М	1 51
626.3	110mAg	249 83	D	0.217	706.7	110mAg	249 83	D	16 69
630.2	132 T	2 295	H	13 3	707 4	228 A c	6 15	H	0 155
631.3	⁹¹ Sr	9.65	Н	0, 556	708.1	110mAg	249.83	D	0.23
632.5	¹²⁴ Sb	60.20	D	0.1046	709.3	¹²⁴ Sb	60.20	D	1.353
634.8	¥ ⁷⁴ As	17.77	D	15.4	713.1	^{131m} Te	33.25	Н	1.38
636.0	¹²⁵ Sb	2.75856	Y	11.22	713.8	¹²⁴ Sb	60.20	D	2.276
637.0	^{131}I	8.0252	D	7.16	715.0	₩ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.22
637.8	¹²⁷ Sb	3.85	D	0.44	719.3	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.250
639.0	്‰ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.83	719.9	²¹⁴ Bi	19.9	М	0.392
642.7	^{131}I	8.0252	D	0.217	721.9	¹⁴³ Ce	33.039	Н	5.39
645.9	¹²⁴ Sb	60.20	D	7.42	722.0	²⁰⁸ T1	3.053	М	0.24
650.5	¹³² I	2.295	Н	2.57	722.2	¹²⁷ Sb	3.85	D	1.88
652.3	⁹¹ Sr	9.65	Н	2.98	722.8	¹²⁴ Sb	60.20	D	10.76
652.3	¹²⁷ Sb	3.85	D	0.37	722.9	108mAg	438	Y	90.8
652.9	⁹¹ Sr	9.65	H	8.0	722.9	¹³¹ I	8.0252	D	1.77
653.0	⁵¹ Sr	9.65	H	0.37	724.2	³³ Zr	64.032	D	44.27
650.5	110m	13.517	ľ D	0. 1441	726.9	132 T	6.15 2.205	H	0.62
657.0	97 _{NI}	249.83	D M	95.01	727.2	132 T	2.295	П	2.2
659 0	132 T	2 295	М	0.10	727.3	212p;	60.55	M	5.2 6.67
660.9	⁹¹ Sr	9.65	Н	0.101	728.4	¹³² T	2 295	Н	1.6
661.7	¹³⁷ Cs	30.08	Y	85.10	729.6	129mTo	33.6	D	0.70
664.6	¹⁴³ Ce	33.039	Н	5.69	733.9	₩ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.110
665.1	^{131m} Te	33.25	Н	4.18	739.5	99Mo	65.924	Н	12.20
665.4	²¹⁴ Bi	19.9	М	1.531	739.5	¹³⁰ I	12.36	Н	82
667.5	¹²⁷ Sb	3.85	D	0.74	742.8	^{234m} Pa	1.159	М	0.1066
667.7	^{132}I	2.295	Н	98.70	743.4	⁹⁷ Zr	16.749	Н	93.09
668.5	^{130}I	12.36	Н	96	744.2	^{131m} Te	33.25	Н	1.53
669.6	i X ⁶³ Zn	38.47	М	8.2	744.3	^{110m} Ag	249.83	D	4.77
669.8	^{132}I	2.295	Н	4.6	745.9	¹²⁷ Sb	3.85	D	0.15
671.4	¹³² I	2.295	Н	3.5	749.8	⁹¹ Sr	9.65	Н	23.7
671.4	¹²⁵ Sb	2.75856	Y	1.791	751.6	140La	1.67858	D	4.33
674.6	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.169	752.9	²¹⁴ Bi	19.9	М	0.128
674.8	²²⁸ Ac	6.15	H	2.1	755.3	²²⁸ Ac	6.15	H	1.00
676.6	110m Ag	249.83	D	0.143	756.7	⁹⁰ Zr	64.032	D	54.38
677.6	152	249.83	D	10.70	761.4	²⁰⁸	9.65	H	0.576
678.6	93	13.517	Y	0.473	763.1	110m.	3.053	M	1.79
680.2	133 T	10.18	Н	0.650	764.0	1525	249.83	D V	22.60
680.2	127 ~	20.83	H	0.650	765.9	95	13.517	Г Р	0.189
082.3	Sb	<u> </u>	D	U. 6	165.8	⁵⁰ Nb	34.991	D	99.808

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 (%)
766.4	^{234m} Pa	1.159	М	0.317	852.2	^{131m} Te	33.25	Н	19.9
766.5	²¹¹ Pb	36.1	М	0.617	852.2	^{131m} Te	33.25	Н	0.37
768.4	²¹⁴ Bi	19.9	М	4.894	854.9	⁹⁷ Zr	16.749	Н	0.357
768.4	^{133}I	20.83	Н	0.460	856.1	^{131m} Te	33.25	Н	0.60
772.0	⁹⁷ Zr	16.749	Н	0.24	856.3	¹³³ I	20.83	Н	1.24
772.3	²²⁸ Ac	6.15	Н	1.49	860.6	²⁰⁸ T1	3.053	М	12.50
772.6	¹³² I	2.295	Н	75.6	863.0	¹³² I	2.295	Н	0.56
773.7	^{131m} Te	33.25	H	36.8	864.0	²⁸ Co	70.86	D	0.686
774.1	¹³¹ Te	33.25	H	0.52	865.1	¹⁵¹ Te	33.25	H	0.19
777.0	99v	16.749	H	0. 1862	807.4	105 Eu	13.517	Y M	4.23
778.0	¹⁵² Eu	13 517	П V	4.31	867.8	140 ₁	0.12 1.67858	M D	8.7 5.50
780.0	<u>Еи</u> ¹³² т	2 295	I H	12.93	873 5	La ¹⁰⁶ Ph	30.07	S	0.439
782_1	228	6 15	Н	0.485	875.3	¹³³ T	20.83	Н	4 51
782.5	131mTo	33.25	Н	7.51	876.6	¹³² T	2, 295	Н	1.04
783.7	¹²⁷ Sh	3, 85	D	15.1	877.4	¹³⁰ T	12.36	Н	0. 191
784.3	³ € ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.67	879.7	⁹¹ Sr	9.65	Н	0.188
784.4	¹³² I	2.295	Н	0.38	880.5	¹⁴³ Ce	33.039	Н	1.031
785.4	²¹² Bi	60.55	М	1.102	884.7	^{110m} Ag	249.83	D	75.0
786.0	²¹⁴ Pb	26.8	М	1.06	886.7	്‰ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.34
786.4	²¹⁴ Bi	19.9	М	0.32	893.4	²¹² Bi	60.55	М	0.378
790.7	¹²⁴ Sb	60.20	D	0.739	897.8	²⁰⁷ Bi	31.55	Y	0.128
793.8	^{131m} Te	33.25	Н	13.4	898.0	⁸⁸ Y	106.627	D	93.7
794.9	²²⁸ Ac	6.15	Н	4.25	904.2	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.77
795.9	¹³⁴ Cs	2.0652	Y	85.46	909.7	¹³³ I	20.83	Н	0.214
800.2	¹³⁰ I	12.36	H	0.101	910.0	131 ^m Te	33.25	H	3.17
802.0	¹³⁴ Cs	2.0652	Y	8.688	910.1	¹³² I	2.295	H	0.93
802.1	206m1	69.6	M	0. 192	911.2	152p	0.15 12.517	H	25.8
803.1	210 _D	4.202	M D	0.0030	919.5	140 _{1 –}	167858	D I	2 66
804 5	977r	16 749	Н	0.61	920 6	^{131m} To	33 25	Н	1 16
805.6	$\frac{21}{977r}$	16, 749	Н	0.2793	923.4	^{131m} Te	33, 25	Н	0.112
806.2	²¹⁴ Bi	19.9	M	1.264	924.4	¹²⁷ Sh	3.85	D	0.52
808.3	¹³⁰ I	12.36	Н	0.236	925.2	¹⁴⁰ La	1.67858	D	6.90
809.3	¥ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.29	925.8	⁹¹ Sr	9.65	Н	3.85
809.5	^{132}I	2.295	Н	2.6	926.3	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.272
810.5	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.317	927.4	^{132}I	2.295	Н	0.41
810.8	⁵⁸ Co	70.86	D	99.450	927.6	²⁰⁸ T1	3.053	М	0.125
812.0	¹³² I	2.295	Н	5.5	934.1	²¹⁴ Bi	19.9	М	3.107
815.8	140La	1.67858	D	23.28	937.5	^{110m} Ag	249.83	D	35.0
817.0	12'Sb	3.85	D	0.40	941.3	^{131m} Te	33.25	Н	0.75
818.0	136g	249.83	D	7.43	942.5	%'⁺Ga	8.12	M	1.27
818.5	133 T	13.01	D	99.70 0.1EE	947.1	228 •	10.18	H	2.1
020.0 820.6	127 _{C1-}	20.00	п	0.100	948.U 951 0	Ac 140 ₁ _	U. 10 1 67858	п	0.100
820.8	91 _{Cr}	9.65	Н	0.161	952.0	La 212 _D ;	60.55	M	0.17
821.2	214 _{Ri}	19.9	M	0. 161	954 6	<u>132</u> т	2, 295	Н	17.6
822.8	131mTe	33.25	H	5.90	958.6	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.28
823.0	99Mo	65.924	H	0.134	961.0	₩ ⁷⁴ Ga	8.12	M	1.62
826.5	²¹⁴ Bi	19.9	M	0.117	962.1	⁶³ Zn	38.47	М	6.5
829.8	⁹⁷ Zr	16.749	Н	0.239	963.4	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.140
830.5	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.540	964.1	¹⁵² Eu	13.517	Y	14.51
832.0	²¹¹ Pb	36.1	М	3.52	964.1	²¹⁴ Bi	19.9	М	0.365
834.8	⁵⁴ Mn	312.20	D	99.9760	964.8	²²⁸ Ac	6.15	Н	4.99
835.7	²²⁸ Ac	6.15	Н	1.61	967.0	¹³⁰ I	12.36	Н	0.88
839.1	²¹⁴ Pb	26.8	M	0.583	968.2	¹²⁴ Sb	60.20	D	1.882
840.4	²²⁸ Ac	6.15	H	0.91	969.0	²²⁸ Ac	6.15	H	15.8
841.6	131mm	13.517	Y	0.168	971.3	³ 'Zr	16.749	Н	0.278
044.9	le	33. ∠3 2 5790	H U	U. 10	915.1	208 m 1	0.12 2.052	M	0.20
040. O	i X ₁ Mn	2. 9789	П	90.00	982.1	T1	J. UDJ	M	0.205

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 (%)
984.2	132 T	2.295	Н	0.59	1141.6	¹²⁷ Sb	3.85	D	0.37
987.8	^{131m} Te	33.25	Н	0.149	1143.3	¹³² I	2.295	Н	1.35
993.6	i ∰ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.64	1147.8	^{132}I	2.295	Н	0.27
997.2	^{110m} Ag	249.83	D	0.130	1148.0	⁹⁷ Zr	16.749	Н	2.62
999.2	^{131m} Te	33.25	Н	0.164	1148.9	^{131m} Te	33.25	Н	1.5
999.9	്‰ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.13	1148.9	^{131m} Te	33.25	Н	0.24
999.9	്‰ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.13	1150.9	^{131m} Te	33.25	Н	0.63
1001.0	^{234m} Pa	1.159	М	0.842	1153.5	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.139
1005.3	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.659	1155.2	²¹⁴ Bi	19.9	М	1.633
1018.1	⁹⁷ Zr	16.749	Н	0.3724	1157.4	130 I	12.36	Н	11.3
1021.2	⁹⁷ Zr	16.749	Н	1.01	1159.1	¹³⁶ Cs s			
1024.3	<u>₩</u> ′⁴Ga	8.12	M	0.14	1160.3	121m	8.12	M	0.63
1024.3	⁹¹ Sr	9.65	H	33.5	1165.5	131mTe	33.25	H	0.134
1024.4	97_	72.1	M	1.09	1168.0	134Cs	2.0652	Y	1.790
1026.7	228	16.749	H	0.2793	1172.9	¹³² I	2.295	H	1.09
1033.2	132 m	6.15	H	0.201	1173.2	134 c	1925. 28	D	99.85
1035.0	131mm	2. 295	H	0.51	1174.1	* Cs s	0.10	м	0.04
1035.4	134 g	33.25	H	0.101	1177.4	•X• Ga	8.12	M	0.24
1038.6	101Cs	2.0652	ľ D	0.990	1184.4	132 -	8.12	М	0.28
1045.1	136 136	12 01	D	1. 833	1190.4	93 _W	10.19	U	0 100
1040.1	106 _{D1}	20.07	D S	1 56	1203.3	¥74c	10.10 9.12	11 M	0.109
1050.4	214p;	10.07	M	0.313	1204.2	- % Ga ≫ ⁷⁴ ∧ -	17 77	M D	0.285
1052.0	133 T	20.83	М	0.515	1204.4	91 _V	58 51	D	0.200
1052.5	91 _{Cm}	9.65	Н	0.224	1204.8	131mT o	33.25	Н	0.20 9.41
1054.0	131mTo	33.25	Н	1 49	1200.0	214p;	19.9	M	0.451
1060.1	¹³³ T	20.83	Н	0.138	1212 9	¹⁵² E11	13.517	V	1 415
1063.7	207 _P ;	31 55	V	74 5	1212.5	130 T	12.36	Н	0 179
1065.2	228	6 15	Н	0 132	1235 4	136 136	13.01	D	20.0
1070 0	214 _{Ri}	19.9	M	0.272	1236.4	¹³³ T	20.83	H	1 51
1077.0	⁸⁶ Rh	18.642	D	8.64	1237.3	131mTe	33.25	Н	0.63
1078.6	²¹² Bi	60.55	M	0.564	1238.1	²¹⁴ Bi	19.9	М	5.834
1083.9	¹²⁹ Te	69.6	М	0.49	1247.1	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.50
1084.0	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.245	1249.9	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.187
1085.8	¹⁵² Eu	13.517	Y	10.11	1268.6	⁹⁷ Nb	72.1	М	0.147
1089.7	¹⁵² Eu	13.517	Y	1.734	1272.1	¹³⁰ T	12.36	Н	0.748
1093.9	²⁰⁸ T1	3.053	М	0.430	1272.8	¹³² I	2.295	Н	0.168
1095.7	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.129	1276.1	⁹⁷ Zr	16.749	Н	0.94
1096.5	^{130}I	12.36	Н	0.552	1280.9	⁹¹ Sr	9.65	Н	0.93
1099.2	⁵⁹ Fe	44.490	D	56.5	1281.0	²¹⁴ Bi	19.9	М	1.434
1101.3	്‰ ⁷⁴ Ga	8.12	М	5.42	1290.3	¹²⁷ Sb	3.85	D	0.37
1103.3	¹⁴³ Ce	33.039	Н	0.415	1290.8	^{132}I	2.295	Н	1.13
1109.2	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.189	1291.6	⁵⁹ Fe	44. 490	D	43.2
1109.5	²¹¹ Pb	36.1	М	0.115	1292.8	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.101
1110.6	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.285	1293.9	്‰ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.25
1111.6	¹²⁹ Te	69.6	М	0.191	1295.1	¹³² I	2.295	Н	1.88
1112.1	¹⁵² Eu	13.517	Y	13.67	1297.9	¹³² I	2.295	Н	0.89
1115.5	⁶⁵ Zn	243.93	D	50.04	1298.2	¹³³ I	20.83	Н	2.35
1120.3	²¹⁴ Bi	19.9	М	14.92	1299.1	¹⁵² Eu	13.517	Y	1.633
1122.2	¹³⁰ I	12.36	Н	0.253	1303.8	²¹⁴ Bi	19.9	M	0.107
1123.7	121-	38.47	M	0.111	1312.8	₩ ⁷⁴ Ga	8.12	M	0.62
1125.5	^{131m} Te	33.25	H	11.0	1315.2	131mTe	33.25	H	0.67
1128.0	106~r	33.25	H	0.93	1317.9	132 I	2.295	Н	0.118
1128.1	100Rh	30.07	S	0.404	1318.2	¹³⁴ I s	60.00	D	1 500
1131.5	214-	8.12	M	0.87	1325.5	***Sb	60.20	D	1.580
1133.7	***Bi	19.9	M	0.2512	1332.1	%''Ga 60~	8.12	M	1.74
1134.5	<u>%</u> '⁼Ga	8.12	M	0.19	1332.5	110m -	1925.28	D	99.9826
1134.5	132-	8.12 2.205	M	0.19	1334.3	* 74c	249.83	D M	0.143
1136.0	91~	2.295	H	3.01	1337.2	☆ Ga	8.12	M	0.8
1140.8	ĩSr	9.65	Н	0.127	1337.2	% '⁼Ga	8.12	М	0.8

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 (%)
1337.5	¹³² I s			()	1538.1	¹³⁶ Cs	13.01	D	0.100
1339.1	¹³² I s				1538.5	²¹⁴ Bi	19.9	М	0.398
1350.4	^{133}I	20.83	Н	0.150	1542.4	^{110m} Ag s			
1355.2	¹²⁴ Sb	60.20	D	1.038	1543.3	²¹⁴ Bi	19.9	М	0.303
1357.9	്₩ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.16	1547.0	i X ⁶³ Zn	38.47	М	0.122
1361.0	⁹⁷ Zr	16.749	Н	0.6516	1557.1	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.178
1362.7	⁹⁷ Zr	16.749	Н	1.02	1562.3	¹⁰⁶ Rh	30.07	S	0.163
1365.2	¹³⁴ Cs	2.0652	Y	3.017	1562.3	^{110m} Ag	249.83	D	1.22
1368.2	¹²⁴ Sb	60.20	D	2.624	1570.3	₩ ⁷⁴ Ga	8.12	M	0.97
1372.1	¹³² I	2.295	H	2.47	1579.8	¹²⁴ Sb	60.20	D	0.38
1376.1	¹²⁴ Sb	60.20	D	0.483	1580.5	²²⁰ Ac	6.15	Н	0.60
1377.7	110m	19.9	M	3.988	1583.2	228 A	19.9 6.15	M	0.705
1384.3	214p ·	249.83	D M	20.1	1501.4	Ac	0.15	П	3.22
1388 6	B1 136	19.9	M	0.795	1591.4	Ag s 214p;	10.0	М	0.267
1300.0	^{131m} To	33 25	Н	0 105	1595.2	110mAg c	15.5	IVI	0.201
1394.9	¹³² L s	00.20	11	0.100	1596.2	140 La	1 67858	D	95 4
1398.6	¹³² T	2,295	Н	7.01	1599.4	²¹⁴ Bi	19.9	M	0.324
1400.6	¹³⁴ Cs s				1602.0	№ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.29
1401.5	²¹⁴ Bi	19.9	М	1.330	1617.2	[™] ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.129
1403.9	¹³⁰ I	12.36	Н	0.345	1620.5	²¹² Bi	60.55	М	1.47
1406.7	¹³⁴ Cs s				1622.3	¹³² I s			
1408.0	²¹⁴ Bi	19.9	М	2.394	1625.1	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.255
1408.0	¹⁵² Eu	13.517	Y	20.87	1630.6	²²⁸ Ac	6.15	Н	1.51
1412.1	്‰ ⁶³ Zn	38.47	М	0.75	1638.3	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.47
1413.4	⁹¹ Sr	9.65	Н	0.98	1643.3	¹³⁴ Cs s			
1417.6	₩ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.110	1646.0	^{131m} Te	33.25	Н	1.20
1421.7	Ag s	10.10		0.05	1651.4	⁹¹ Sr	9.65	H	0.291
1425.4	³⁵ Y	10.18	H	0.25	1661.3	214Bi	19.9	M	1.047
1430.0	132 T	60.20	D	1.217	1674 7	580	0.15 70.96	H	0.178
1440.3 1442.2	1 S 207p;	31 55	V	0 1310	1676.8	00 ₩ ⁷⁴ Co	8 12	M	0.517
1442 6	132 T	2 295	Н	1 40	1684_0	²¹⁴ p;	19.9	M	0.214
1443 4	1 ** ⁷⁴ Ga	8.12	M	1.40	1691.0	¹²⁴ Sh	60 20	D	47.57
1443.4	³ √ ⁷⁴ Ga	8.12	M	1.8	1724.0	⁹¹ Sr	9.65	Н	0. 161
1445.1	¹²⁴ Sb	60.20	D	0.330	1727.2	¹³² L s			
1450.5	⁹³ Y	10.18	Н	0.33	1729.6	²¹⁴ Bi	19.9	М	2.878
1457.6	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.497	1744.9	്⊀ ⁷⁴ Ga	8.12	М	4.82
1459.1	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.83	1750.2	⁹⁷ Zr	16.749	Н	1.09
1460.0	²⁰⁷ Bi	31.55	Y	1.61	1757.4	^{132}I	2.295	Н	0.30
1460.8	⁴⁰ K	1.248E+9	Y	10.66	1764.5	²¹⁴ Bi	19.9	М	15.30
1471.7	in ³¹ √ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.193	1770.2	²⁰⁷ Bi	31.55	Y	6.87
1473.8	⁹¹ Sr	9.65	H	0.168	1803.7	¹³² I s			
1475.8	132-	249.83	D	4.08	1806.5	* (°⁺Ga	8.12	M	0.28
1470.0	×74c	2.295	H	0.130	1810.7	132- ₩ ⁰⁰⁰ Mn	2.5789	Н	∠o. 9
1470.7	•≫ Ga 132 т	ð. 1 <i>2</i>	М	0.30	1011.0	110m			
1479.7	1 S 124 _{Cb}	60.20	D	0.672	1820 8	Ag s	8 12	М	1 90
1489 2	30 144 _{Dn}	17 28	M	0.278	1836 1	88 _V	106.627	D	99.2
1489 4	⁷⁴ Ga	8 12	M	2.88	1838 4	²¹⁴ Ri	19.9	M	0.350
1495.9	²²⁸ Ac	6.15	H	0.86	1840.6	¹³² I s	1000	112	
1499.8	¹³² I s				1847.4	²¹⁴ Bi	19.9	М	2.025
1501.6	²²⁸ Ac	6.15	Н	0.46	1851.6	⁹⁷ Zr	16.749	Н	0.31
1505.0	^{110m} Ag	249.83	D	13.33	1866.6	¹³⁶ Cs s			
1509.2	²¹⁴ Bi	19.9	М	2.130	1873.2	²¹⁴ Bi	19.9	М	0.214
1510.2	്‰ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.23	1887.7	^{131m} Te	33.25	Н	1.31
1512.7	²¹² Bi	60.55	М	0.29	1896.1	²¹⁴ Bi	19.9	М	0.149
1515.7	⁹⁷ Nb	72.1	М	0.122	1917.8	⁹³ Y	10.18	Н	1.57
1526.3	¹²⁴ Sb	60.20	D	0.409	1921.1	¹³² I	2.295	Н	1.23
1528.1	¹⁵² Eu	13.517	Y	0.279	1940.6	i∛ ⁷⁴ Ga	8.12	М	5.4
γ線エネルギー (keV)	核種名	半減期	半減期単位	放出率 (%)					
------------------	----------------------	------	-------	------------					
1945.5	¹³² I s								
1962.8	¹³² I s								
1969.9	¹³⁴ Cs s								
1971.0	്‰ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.20					
1999.3	i ∰ ⁷⁴ Ga	8.12	М	0.40					

Ge 半導体検出器は分解能が優れており、一度の測定で γ 線スペクトルから多くのピークを検出できるので、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、y線スペクトル中の核種数が多い場合などは、核種を誤認する可能性がある。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。

このような場合、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、陽電子消滅放射線、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。

本解説では、核種同定作業の一助等のために、公益財団法人日本分析センターにお いて測定したバックグラウンドスペクトル2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7例及び原子力発電所事故時のスペクトル2例を示した。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 遊じん及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行ってい ない。なお、半減期、γ線のエネルギー、放出比については 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。

F.1 バックグラウンド

25cm 相対効率 31%の検出器で 2019 年 9 月 13 日に 14 万秒測定した。 遮蔽体: 4 π 方向が厚さ 15cm の鉛、内寸 30×30×60cm

・トリウム系列及びウラン系列の自然放射性核種が検出されている。

- ・遮へい体からの特性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、⁷⁵Ge, ⁵⁶Fe(n, n'), ⁷⁴Ge(n, n')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。

- F.2 バックグラウンド(純水 2L マリネリ)
 - F.1と同一の検出器で2016年7月30日に14万秒測定した。
 - ・F.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る ^{71m}Ge, ^{75m}Ge, ⁷⁰Ge(n, γ), ⁷²Ge(n, γ), ⁷³Ge(n, γ), ⁷⁴Ge(n, n')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。

F.3 大気浮遊じん-1

ダストモニター用ろ紙(HE - 40T 及び CP - 20)を用いて、大気中の浮遊粒子状物質 を 3400m³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 ⁷Be, ⁴⁰K, ²¹⁰Pb が検出されている。

F.4 大気浮遊じん-2

ダストモニター用ろ紙(HE - 40T 及び CP - 20)を用いて、大気中の浮遊粒子状物質 を 3400m³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。なお、試料採取日は 2018 年 10 月(東京電力福島第一原 子力発電所事故後)である。

・バックグラウンドから検出される核種の他に⁷Be,⁴⁰K,²¹⁰Pb 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¹³⁷Cs 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、²⁰⁶Pb(n, n'), ⁵⁶Fe(n, n')が検出されている。(検出されないこともある。)

F.5 降下物-1

受水面積 5000cm²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、大気浮遊じんと同様に⁷Be 及び塵 埃中の⁴⁰K,²¹⁰Pb 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、²⁰⁶Pb(n, n')が検出されている。(検出 されないこともある。)

F.6 降下物-2

受水面積 5000cm²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、大気浮遊じんと同様に⁷Be及び塵

埃中の⁴⁰K,²¹⁰Pb 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¹³⁴Cs,¹³⁷Cs が検出されている。

F.7 土壤-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²²⁸Ac,²¹²Pb,²¹²Bi,²⁰⁸T1 が検出されている。

・ウラン系列核種の^{234m}Pa,²²⁶Ra,²¹⁴Pb,²¹⁴Bi,²¹⁰Pb 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¹³⁷Cs が検出されている。

F.8 土壤-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²²⁸Ac,²¹²Pb,²¹²Bi,²⁰⁸T1 が検出されている。
- ・ウラン系列核種の^{234m}Pa,²²⁶Ra,²¹⁴Pb,²¹⁴Bi 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¹³⁴Cs,¹³⁷Cs が検出されている。

F.9 海産生物

海産生物(アジ)を可食部とし、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 ⁴⁰K 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¹³⁷Cs が検出されている。

F.10 鉱石

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、ウラン及びトリウム含量が多いため、それら同位体の放射能濃度が高く、放出されたγ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。
- ・ウラン及びトリウム同位体の放射能濃度が高いことから、それらの放出比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。²²⁸Acの1459.1keVピーク(放出比:0.83%)が検出されており、⁴⁰Kの1460.82keVピーク(放出比:10.66%)との誤認に注意が必要である。

- ・試料中のトリウムとγ線の相互作用により、89.957keV(Kα2)と105.604keV(Kβ1)のThXray ピークが検出されている。なお、93.350keV(Kα1)のThXray ピークは、92.38keV(放出比:2.13%)及び92.80keV(放出比:2.1%)の²³⁴Th 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}Pa 主ピーク(放出比:0.84%)
 に、²²⁸Ac (911.2keV、放出比:25.8%)とThXray (89.957keV:Kα2)とのサムピーク (1001.157keV)が重なるため、^{234m}Pa の定量には十分注意する。特に 1004keV {²²⁸Ac の 911.2keV のγ線と 93.350keV(Kα1)のThXray とのサムピーク} にピークが見られる時は、ThXray(Kα2)も検出されていると考えられ、^{234m}Pa 主ピークに ²²⁸Ac と ThXray(Kα2)のサムピークが重なっている可能性が高い。

F.11 東京電力福島第一原子力発電所事故時の大気浮遊じん

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⁹⁹Mo, ^{99m}Tc, ^{129m}Te, ¹³¹I, ¹³²Te, ¹³²I, ¹³³I, ¹³⁴Cs, ¹³⁶Cs, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La 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¹³² 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。

・高濃度のヨウ素及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。

・¹³² I は半減期が 2.28h で短いが、親の¹³²Te(半減期:78.2h)が検出されており、 これから生長した¹³² I が 3 月 15 日の測定時点に高濃度で検出された。

親娘関係がある⁹⁹Mo-^{99m}Tc、¹³²Te-¹³²I、¹⁴⁰Ba-¹⁴⁰La が検出されている。

F.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福井県衛生研究所(現福井県原子力環 境監視センター)にて 35401 秒測定したスペクトル。

・人工放射性核種の⁵⁸Co, ⁹¹Sr, ⁹³Y, ⁹⁹Mo, ^{99m}Tc, ⁹⁷Zr, ¹⁰³Ru, ¹³¹I, ¹³²Te, ¹³⁶Cs, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴¹Ce, ¹⁴¹Ce, ¹⁴⁴Ce, ¹⁴⁴Ce, ¹⁴⁷Nd, ²³⁹Np が検出されている。

F.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⁹⁵Nb, ⁹⁹Mo, ^{99m}Tc, ¹⁰³Ru, ^{110m}Ag, ¹²⁵Sb, ^{129m}Te, ¹³¹I, ¹³²Te, ¹³²I, ¹³⁴Cs, ¹³⁶Cs, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La が検出されている。

F.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⁹⁵Zr,⁹⁵Nb,¹⁰³Ru,¹⁰⁶Ru,^{110m}Ag,¹²⁵Sb,^{129m}Te,¹³¹I,¹³²Te, ¹³²I,¹³⁴Cs,¹³⁶Cs,¹³⁷Cs,¹⁴⁰Ba,¹⁴⁰La,¹⁴¹Ce,¹⁴⁴Ce,¹⁴⁷Nd,が検出されている。

スペクトル図には核種名とエネルギー(小数第一位まで)を記載する予定

F.1 バックグラウンド



F.2 バックグラウンド(純水 2L マリネリ)



F.3 大気浮遊じん-1



F.4 大気浮遊じん-2



F.5 降下物-1



F.6 降下物-2



F.7 土壤-1



F.8 土壌-2



F.9 海産生物(アジ)



F.10 鉱石



F.10.1 鉱石(拡大図 1/4)



F.10.2 鉱石(拡大図 2/4)



F.10.3 鉱石(拡大図 3/4)



F.10.4 鉱石(拡大図 4/4)



F.11 東京電力福島第一原子力発電所事故時の大気浮遊じん





F.11.1 東京電力福島第一原子力発電所事故時の大気浮遊じん(拡大図 1/4)



F.11.2 東京電力福島第一原子力発電所事故時の大気浮遊じん(拡大図 2/4)



F.11.3 東京電力福島第一原子力発電所事故時の大気浮遊じん(拡大図 3/4)



F.11.4 東京電力福島第一原子力発電所事故時の大気浮遊じん(拡大図 4/4)

F.12 核実験に係る試料



F.12.1 核実験に係る試料(拡大図 1/4)



F.12.2 核実験に係る試料(拡大図 2/4)



F.12.3 核実験に係る試料(拡大図 3/4)



F.12.4 核実験に係る試料(拡大図 4/4)



F.13 原発事故に係る浮遊じん



F.13.1 原発事故に係る浮遊じん(拡大図 1/4)



F.13.2 原発事故に係る浮遊じん(拡大図 2/4)



F.13.3 原発事故に係る浮遊じん(拡大図 3/4)



F-33

F.13.4 原発事故に係る浮遊じん(拡大図 4/4)



F.14 原発事故に係るスミヤ試料


F.14.1 原発事故に係るスミヤ試料(拡大図 1/4)



F.14.2 原発事故に係るスミヤ試料(拡大図 2/4)



F.14.3 原発事故に係るスミヤ試料(拡大図 3/4)



F.14.4 原発事故に係るスミヤ試料(拡大図 4/4)



F-39

解説 G 改良ピーク・トータル比

ゲルマニウム半導体検出器を用いたγ線スペクトロメトリーにおいて、カスケードγ 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 10% 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 うことになるため、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3「サム効果の補正」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γ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。

 $(P/T) = \alpha \times \ln(\text{相対効率}) + \beta \tag{G.1}$

ここで、

(*P*/*T*) α

β

) ピーク・トータル比

 $\ln(\alpha) = -0.3 \times \ln(E) - 1.11$

 $\ln(\beta) = -7.92 + 3.31 \times \ln(E) - 3.83 \times \{\ln(E)\}^2$

式(G.1)は点線源の測定結果から得られたものである¹。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。

本解説では、ピーク・トータル比を¹³⁷Cs 体積線源の実測値と EGS5 によるモンテカ ルロシミュレーションを用いて半実験的に求め、得られたピーク・トータル比を用い て¹³⁴Cs 体積線源のサム効果補正を実施した例を紹介する。

G.1¹³⁷Cs 体積線源のピーク・トータル比

次の同軸型 p タイプ Ge 半導体検出器 2 台を用いて、ポリプロピレン製円筒型容器 (U-8 容器)の¹³⁷Cs 体積線源(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(G.1)から求めた値と比較した。結果を図 G.1、G.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%

¹ 水本 良彦, 日下部 俊男, 岩田 志郎 ゲルマニウム検出器のピーク対トータル効率 比 RADIOISOTOPES 36 1987 20-23



注:式(G.1)は式(G.1)より求めた値である

図 G.1 検出器 Aの¹³⁷Cs 体積線源のピーク・トータル比



注:式(G.1)は式(G.1)より求めた値である

比較の結果、¹³⁷Cs 体積線源から求めたピーク・トータル比は、検出器 A では充填高 0.5cm のときに式(G.1)から求めた値とほぼ一致したが、充填高に依存して低下する 傾向が見られた(図 G.1)。また、検出器 B では充填高 2.0cm のときに式(G.1)から求 めた値とほぼ一致したが、充填高に依存して低下する傾向が見られた(図 G.2)

図 G.2 検出器 Bの¹³⁷Cs 体積線源のピーク・トータル比

G.2 ピーク・トータル比の他のエネルギーでの値への換算

G.1 で得られた¹³⁷Cs 体積線源のピーク・トータル比を、EGS5 によるモンテカルロシ ミュレーションを用いて式 (G.2) により他のエネルギーでの値に換算し、式 (G.1) か ら求めた値と比較した。結果を図 G.3、G.4 に示す。

ここで、

PT(661.7) ¹³⁷Cs 体積線源の実測によるピーク・トータル比
PT_{MC}(661.7) 661.7keV でのモンテカルロシミュレーションによるピーク・トータル比

 $PT_{MC}(E)$ エネルギーEでのモンテカルロシミュレーションによるピー ク・トータル比



図 G.3 検出器 A の式 (G.2) により換算したピーク・トータル比



図 G.4 検出器 B の式 (G.2) により換算したピーク・トータル比

G.3¹³⁴Cs 体積線源の解析

G.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型容器(U-8 容器)の¹³⁴Cs 体積線源(アルミナ製、充填高 0.5~4.7cm の 6 個)の 604.7keV と 795.9keV のピークを解析し、校正値と比較した。結果を図 G.5~G.8 及び表 G.1 に示 す。図中の不確かさは計数誤差のみを考慮し、拡張不確かさ(k = 2)とした。なお、 以降、式(G.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、本解説 G.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 I



図 G.5 検出器 A の ¹³⁴Cs 体積線源の解析結果 604.7keV



図 G.6 検出器 Aの¹³⁴Cs 体積線源の解析結果 795.9keV



図 G.7 検出器 Bの¹³⁴Cs 体積線源の解析結果 604.7keV



図 G.8 検出器 Bの¹³⁴Cs 体積線源の解析結果 795.9keV

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	-13.11~-7.35%	-2.28~0.13%	$-1.57 \sim 0.26\%$
	795.9 keV	-10.62~-6.02%	-1.80~0.53%	-0.96~0.82%
В	604.7 keV	$-18.92 \sim -10.77\%$	-2.71~1.22%	$-2.47 \sim -0.43\%$
	795.9 keV	-14.98~-8.19%	$-2.26 \sim 0.82\%$	$-1.60 \sim 0.37\%$

表 G.1 解析結果と校正値の差の範囲

サム効果補正を実施しなかった場合は、¹³⁴Cs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検出器に近 いジオメトリのためサム効果の寄与が大きくなっているためと考えられる。

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てた。 ただし、両検出器とも充填高 0.5 cm 及び 1 cm 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、体積線源のピーク・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、実試料に即した体積線源 のピーク・トータル比を用いることにより、サム効果補正が適正に実施されたためと 考えられる。

解説H 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、同一検出器の別のジオメト リ(異なる形状、材質の測定試料)での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、自己吸収の補正を含めた評価が可能となり、多くの検討、改良が行われ実用的 に用いられるようになった¹。

H.1 Efficiency Transfer の原理

本法は Moens²らにより提唱された次の原理に基づく。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 ップや不感層などを除いた有感部分のみで構成された検出器を配置した時の仮想的な ピーク・トータル比である。線源と検出器の間に不感層を含めた y 線の遮蔽や散乱を 起こす物質が存在しない条件下では、ピーク効率及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、ジオメトリに依存しない値となる。

この場合、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。



¹ Lepy M. C. et al., 2000, EUROMET action 428: transfer of Ge detectors efficiency calibration from point source geometry to other geometries Rapport CEA-R-5894 ² Moens, L.,DeDonder,J.,Xi-lei,L.,DeCorte,F.,DeWispelaere,A.,Simonits,A.,Hoste, J.,1981. Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 187,451-472.

上式の P₁は標準線源の実測値から得たピーク効率を用いる。T₁, T₂は試料と検出器 のジオメトリ(線源の材質による吸収及び検出器内で相互作用の経路を考慮した実 効立体角)から算出することができるため、線源のピーク効率 P₁から試料のピーク効 率 P₂を求めることが可能となる。なお、P₂を算出する際に T₁/T₂の項で検出器内部の ジオメトリ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コード (GEANT3, PENELOPE, MCNP, EGS4) 及び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。³

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。

H.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 EFFTRAN⁴を使用し、U-8 容器の標準線源(材質:アルミナ、充填高 30mm)の実測で求 めたピーク効率を基準として用い、別のジオメトリ(U-8 容器、材質:寒天、充填高 9mm, 28.4mm, 47.6mm)の3種類の試料のピーク効率に変換する検討を行った。

なお、計算に必要となる検出器の内部構造(Ge 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 Ge 検出器を使用)

解析に使用したピーク効率

A:基準となるピーク効率を EFFTRAN で変換して得られたピーク効率

B:標準線源の実測で得られたピーク効率

(充填高さの異なる U-8 容器の混合容積線源セットの測定で得られたピーク

³ T. Vidmar, N. Celik, N. Cornejo Diaz et al., "Testing Efficiency transfer codes for equivalence," Applied Radiation and Isotopes, vol. 68, no. 2, pp. 355-359, 2010.
⁴ Vidmar, T. EFFTRAN – a Monte Carlo Efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry. Nuclear Instruments and Methods A 550, 603-608.

効率で、任意の充填高さに対してピーク効率を計算可能なもの)

H.3 結果



図 H-2 EFFTRAN によるピーク効率を用いた解析結果と、線源の実測 によるピーク効率を用いた解析結果の比較

EFFTRAN によるピーク効率を用いた解析結果は、標準線源の実測によるピーク効率 を用いた解析結果と 2%以内で一致した。

H.4 結論

- ・一つの標準線源(U-8 容器、アルミナ、充填高 30mm)の実測で得られたピーク効率 に Efficiency transfer を適用することにより、材質・形状が異なる3種類の試料 (U-8 容器、寒天、充填高: 9mm, 28.4mm, 46.6mm)のピーク効率を求めることが出 来ることを確認した。
- ・Efficiencfy Transfer で求めた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%以内で一致した。

資料1 環境試料に対するy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、γ線が物質 中で前記3種類の相互作用のどれかを行うと一度に大きくエネルギーを失う。

Ge 半導体検出器を用いて光電ピークを定量する限りにおいて、γ線の減弱は上記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出来る。

なお、減弱係数の一要素であるコヒレント散乱は数 100keV 以下の低エネルギーに おいて自己吸収の補正に関係するが、この場合試料媒体中のコヒレント散乱による影響はかなり小さいので考慮しない。

 γ 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 γ 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 γ 線 の割合は次のように表される。

$$I \nearrow I_0 = e x p (-\mu x)$$

上式において、変数 x の単位が cm の場合には、μは cm⁻¹の次元をもち線減弱係 数といわれる。

厚さとして x の代りにその物質の密度を乗じた ρ x を用いることがあるが、この場合には μ の代りに質量減弱係数 μ / β (cm²/g)を使う。

相互作用の原子断面積をσ (cm²)、物質 1g に含まれる原子の数を N (g⁻¹) とすると、

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

となる。

μ/ρは物質の種類(元素組成)とγ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(文献 2, 3)から求める方法がある。例 として、γ線エネルギーEが80keVから2MeV程度まで、原子番号Zが30程度以下 の環境試料に適用できる相互作用断面積の近似式(文献 2)を使って求める方法を次に 示す。この近似式は数%程度の誤差を生じることがあるが、環境試料における自己吸 収の補正という目的に対しては十分に適用できる。その具体的な手順を次に示す。

なお実際の試料の測定では、測定試料は体積試料である場合が多く、試料から検出 器へのγ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γ線の減衰を 評価するには、検出器と試料の位置関係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用いられる。

 物質を構成する元素について、El なるエネルギーの光子に対する断面積をバーン (barn: 10⁻²⁴cm²)単位で数表などから求め、σ(El)とする。

なお、質量減弱係数 μ / ρ (cm²/g)を用いるときは、 σ (El) $\epsilon \mu / \rho$ (El) と 置き換えてもよい (以下、同様)。

資 1-1

② 同様に、E2なるエネルギーの断面積σ(E2)を数表から求める。なお、E1とE2は 適用エネルギー範囲内で誤差が最小になるように決める。

(例) $E_1 = 100$ keV $E_2 = 500$ keV

 ③ 次式の左辺にσ(Ei)またはσ(E2)を、右辺の E に Ei または E2 を代入し、連 立方程式を解いて A(Z)と B(Z)を求める。

σ (Z, E) =A (Z) · E^{-3.15}+B (Z) · exp [0.408 (log E) -0.066 (log E)²]
 log は自然対数

- ④ このようにしてその元素について、エネルギーE を変数とする断面積の近似式が 得られる。さらに他の元素についても①から③を行う。
- ⑤ 原子量が M、元素組成(単一元素でもよい)が AaBbCc……なる化合物の質量減 弱係数 μ / ρ (cm²/g) は次式により計算される。

 $\mu \neq \rho = 0.6023 (\mathbf{a} \cdot \sigma \mathbf{A} + \mathbf{b} \cdot \sigma \mathbf{B} + \mathbf{c} \cdot \sigma \mathbf{c} + \cdot \cdot \cdot) \neq \mathbf{M}$

なお、断面積 σ の代わりに質量減弱係数 μ (cm²/g)を用いたときは、物質の重量組成比を a, b. c,,,, として次式で計算される。

 $\mu \neq \rho = \mathbf{a} \cdot \mu \mathbf{A} + \mathbf{b} \cdot \mu \mathbf{B} + \mathbf{C} \cdot \mu \mathbf{C} + \cdot \cdot \cdot \cdot$

質量減弱係数の計算例

Al203 (アルミナ)の134keV (¹⁴⁴Ce ll.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(σ (Al100))をバーン (barn: 10⁻²⁴cm²)単位で13頁の引用文献1の数表から、または引用文献3から計算で求める。

	アルミニウム	Z = 13			
	エネルギー (keV)	光電効果	コンプトン散乱	電子対生成	 合計
	100	0.827	6.22	0	7.047
	500	0.0061	3.75	0	3.756
	σ (Al ₁₀₀) = 7.04	7である。			
2	同様に、500keVの)アルミニウム	の断面積(σ(A1	500)) 求める。	
	$\sigma (A1500) =$	3.756			
3	次式の左辺σ(Z,	E) に σ (Al1	(00) , σ (A1500),	右辺の E に 100)または 500 を
1	代入し、連立方程式	を解いてA(Z	C) と B (Z) を求め	つる。	
	σ (Z, E) = A	(Z) • E ^{-3.15} +	B (Z) • exp [0.40	8 $(\log E) - 0.0$	066 $(\log E)^{2}$]
-	アルミニウム		log は自然対	寸数	
7	7.047				
	=A (Z) • (100) -3	$^{.15}$ + B (Z) • e	xp [0.408 {log (10	$(00) \} -0.066 \{$	$\log (100) 2$]
ġ	8.756				
	=A (Z) • (500) -3	$^{.15}$ + B (Z) • e	xp [0.408 {log (50	$(00) \} -0.066 \{$	$\log (500) ^2$
	連立方程式を	を解く。			
	A (Z) =	$1.814 \cdot 10^{6}$			
	B (Z) =	3.801			

下記の近似式となる。

σ (Z, E) =1.814・10⁶・E^{-3.15}+3.801・exp [0.408 (log E) -0.066 (log E) ²]
④ 酸素についても①、②、③、を行い近似式を求める。

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

 σ (O₅₀₀) = 2.31

3.960

 $= A (Z) \cdot (100) {}^{-3.15} + B (Z) \cdot \exp [0.408 \{ \log (100) \} - 0.066 \{ \log (100) \} {}^{2}]$ 2.31 $= A (Z) \cdot (500) {}^{-3.15} + B (Z) \cdot \exp [0.408 \{ \log (500) \} - 0.066 \{ \log (500) \} {}^{2}]$

> 連立方程式を解きA(Z)とB(Z)を求める。 A(Z)=3.615・10⁵ B(Z)=2.340

 σ (Z, E) =3.615・10⁵・E^{-3.15}+2.340・exp [0.408 (log E) -0.066 (log E)²] ⑤ 原子量 (M) が 102 のアルミナ (Al₂O₃) の 134keV (¹⁴⁴ Ce ll.1%) での質量減弱 係数 $\mu \neq \rho$ (cm²/g) は次のように計算される。

134keVのアルミニウムの断面積

$$\sigma$$
 (13.134) =1.814・10⁶・(134) ^{-3.15}
+ 3.801・exp [0.408 {log (134)} -0.066 {log (134)} ²]
=6.118

134keVの酸素の断面積

$$\sigma \quad (8.134) = 3.615 \cdot 10^5 \cdot (134)^{-3.15} + 2.340 \cdot \exp \left[0.408 \left\{ \log (134) \right\} - 0.066 \left\{ \log (134) \right\}^2 \right] = 3.616$$

質量減弱係数を求める。

$$\mu \swarrow \rho = 0.6023 (a \cdot \sigma A + b \cdot \sigma B) \diagup M$$

 $= 0.6023 (2 \cdot 6.118 + 3 \cdot 3.616) \diagup 102$
 $= 0.136 (cm^2 \swarrow g)$

資料2 容積線源のピーク効率を求める例

環境試料のγ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、任意の試料充填高さ、γ線エネルギーに対してピーク効率を求め ることが出来るようにしておくと運用上便利である。

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

2.1 標準線源¹·

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

表 2-1 測定日における標準容積線源1個当りの放射能の目安(Bq)

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

この表の数倍までの強さで十分である。dead time が 5%以下になるようにする。 60keV 付近の低エネルギーも測定対象とする場合は、²⁴¹Am 300Bq を加える。 また、²⁰³Hg、¹¹³Sn を使用できない場合(母材が寒天の時など)は⁵¹Cr 600Bq で代え る。1500keV 以上の様子を知るためには、⁶⁰Co、⁸⁸Y 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。

2.2 測定

1. 測定時間は対象となる全てのピーク面積の計数誤差が 2%(3σ)以下になるまで とする。(~70000 秒)

2. また標準線源は試料と同じ位置、同じ包装で測定するようによく注意する。線源 を包むポリ袋も試料と同じにする。

3. 半減期の短い核種が含まれているので、購入したら減衰しないうちに測定する。 標準線源から放出されるγ線が、しゃへい体の鉛に当って KX線(Kβ1=84.936keV) を発生し、¹⁰⁹Cd(88.0keV)のピークを妨害する。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しゃへい

¹水溶液標準容積線源を測定する場合は、Ge半導体検出器やしゃへい体の汚染に十分気 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。

する。γ-X型検出器を用いるにもかかわらず、X線領域を測定の対象としない場合 は、線源から放出されるX線とのサム効果の影響を少なくするため、試料も標準線源 も検出器のエンドキャップの上に厚さ0.5mmの銅板を被せて測定する。また¹³⁹Ce等 電子捕獲によるX線の放出に注意する。

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 y 線放出率 (y /s)の値を測定日に減衰補正しておく。Bq 表 示の場合は放出比から y /s を求めておく。 測定値から求めた計数率 (cps)を y 線 放出率 (y /s)で除して対象とするエネルギーのピーク効率を求める。 両対数グラ フの縦軸にピーク効率、横軸にエネルギーをとり、計算したピーク効率をプロットす る。面積計算に用いるピーク領域は、スペクトルを拡大表示するかプロットして観察 し、決める。

図 2-1 にピークとベースライン領域の取り方、表 2-2 に分解能 1.9keV 程度の検 出器について、2000keV/4000 チャ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(チャネル)の取り方の例を示す。



図 2-1 ピーク

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。

y線のエネルギーによって計算領域(チャネル数)を下記の様に変える。

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

表 2-2 γ線のエネルギーと計算領域

⁸⁸Y、⁶⁰Co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²。サム効果の補正を行わないならば、⁸⁸Y、⁶⁰Coの測定値はピーク効率 曲線の傾きを知る参考にする。なお、⁶⁰Co 1332.5keV の低エネルギー側に ⁸⁸Y のエス ケープピークが出るのでそのピークを避ける。

² 資料3「サム効果補正法」参照

(1) 縦軸をピーク効率、横軸をエネルギーにし、効率計算プログラムによってピーク 効率を両対数グラフにプロットする。

300keV~600keV以上では約40~45度で右に下がる直線に近い形となる。 エネルギーが小さいほど光電効果及び、コンプトン散乱に続く光電効果が起こり易 いためピーク効率は大きくなる。200keV以下では120keV辺りを頂点とする上に 凸の曲線となる場合が多い。例を図2-2³に示す。



エネルギー [keV] 図 2-2 厚さごとのピーク効率曲線の例

³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。⁶⁰Coおよび⁸⁸Yのデータは、サム効果の補正を加えていない。

標準線源の各厚さ(5、10、20、30、40、50mm)毎に、ピーク効率曲線を関数 化する。関数形は Eff を効率、En を γ 線のエネルギー(keV)とし、 X=log(En/Eno) とおいて(C₁~C₆ は定数)、

log は自然対数

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

 C_6 の項は不要である場合もあるが、80keV以下まで校正する場合や、有感体積の 小さな検出器等に対しては必要である。計算は log (Eff) と X を変数にして最小 2 乗法で行う。(エネルギー領域を分けて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、線源の各厚さごとに、任意のエネルギー(80~2000keV)に於けるピー ク効率を求めることができる。グラフを見て、曲線が交差していないか、間隔が不 自然に変わっていないか等をチェックする。現在入手できる線源のセットでは検定 の誤差や線源の不均一性のため、通常は整って揃った曲線群が得られないが、厚さ が違っても本来は曲線の形はあまり変わらない。 C1~C6を、厚さを変数としてプロット(図 6-3)し、関数化する。関数形は

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

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



以上の結果を用いることで、任意の試料充填高さ(厚さ)に対してパラメータ C1~C4 を求めることができ、ピーク効率曲線が得られる。

資 2-6

多くの放射性核種は1崩壊につき2個以上のγ線をほぼ同時に放出する。それは崩 壊を起こした原子核のエネルギー準位が順次低くなって行くのにしたがい、その準位 間のエネルギー差に相当する線が非常に短時間の間に次々に放出されるためであ る。1崩壊で放出される複数のγ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γ線をカスケードγ線という)ため、複数のγ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γ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とは異なって低い計数率に おいても顕著にあらわれることがある。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10%にもなることがある。

サム効果は、崩壊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、崩壊図 を書き直して考えると理解しやすい。



通常崩壊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 のように書き直すと理解しやすい。ある核種から複数のγ線が放出される場合でも全 てのγ線がサム効果を起こす確率があるのではなく、カスケード(検出器の分解時間 以内に連なって放出)の関係にあるγ線のみがサム効果の対象となる。カスケードの 関係を系列として示したのが右図である。γ3 がサム効果を起こすのは系列5のみで ある。すなわちγ4としかサム効果を起こさない。正確には系列2及び4のサム効果 (γ1, γ2) によってγ3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¹することとする。

¹ クロスオーバーを起こす γ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あ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。 内部転換によって減少する割合を γ_i 毎に f_i として、 $f_ia_{ok} = a_{ik}$ とする。
- ・ γ_i の全放出比 a_i は、各系列における γ_i の放出確率の合計である。

$$a_i = \sum_k a_{ik}$$

・角相関²は無視する。

1. 次に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 とカスケードにある y を y, とあらわす。

2) ある系列において、全ての γ_j が計数されない確率は、 $\prod_i (1 - f_j T_j)$ となる。

T_j : γ_j に対する全効率

Ⅱ : 乗算記号

3) ある系列(k)の γ_i が γ_i のエネルギー情報を持ったまま1崩壊当たりに計数される確率は次のようにあらわされる。

$$\varepsilon_i f_i a_{ok} \prod_{j \neq i} (1 - f_j T_j) \qquad \varepsilon_i : \gamma_i$$
に対するピーク効率

4)全ての系列を合計すると

$$\sum_{k} \varepsilon_{i} f_{i} a_{ok} \prod_{j \neq 1} (1 - f_{j} T_{j})$$
となり、実際に 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の計数(1崩壊あたり)となる。 従って

$$\sum_{k} \varepsilon_{i} f_{i} a_{ok} \prod_{j \neq i} (1 - f_{j} T_{j}) = \varepsilon_{i}^{*} a_{i} \qquad \varepsilon_{i}^{*} : 観測されるピーク効率$$
$$\sum_{k} \varepsilon_{i} a_{ik} \prod_{j \neq i} (1 - f_{j} T_{j}) = \varepsilon_{i}^{*} a_{i} \quad \cdots \quad \cdots \quad (1)$$

² γ1とγ2がカスケードにあるとき、γ1の放出方向に対してγ2がどの方向に放出さ れやすいかをあらわす量

$$\varepsilon_i^* = \varepsilon_i \sum_{k} \left[\frac{a_{ik}}{a_i} \prod_{j \neq i} (1 - f_j T_j) \right]$$

サム効果を補正した は次の式で求められる。

$$\varepsilon_{i} = \frac{\varepsilon_{i}^{*}}{\sum_{k} \left[\frac{a_{ik}}{a_{i}} \prod_{j \neq i} \left(1 - f_{j} T_{j} \right) \right]}$$

2. 次に⁶⁰Co や⁸⁸Y のように主に 2本の y 線のみがサム効果を起こす場合について説明 する。崩壊図は次のようにあらわせる。



1) ①式は γ_i については次のようになる。

$$\varepsilon_{1}^{*}a_{1} = \varepsilon_{1}a_{11} + \varepsilon_{1}a_{12}(1 - f_{2}T_{2})$$

$$\therefore \quad \varepsilon_{1}^{*} = \varepsilon_{1}\left[\frac{a_{11}}{a_{1}} + \frac{a_{12}}{a_{1}}(1 - f_{2}T_{2})\right]$$
$$= \varepsilon_{1}\left(\frac{a_{11} + a_{12}}{a_{1}} - \frac{a_{12}}{a_{1}}f_{2}T_{2}\right)$$
$$= \varepsilon_{1}\left(1 - \frac{a_{12}}{a_{1}}f_{2}T_{2}\right)$$

 $a_{11} + a_{12} = a_1$ であるから

また γ_2 については次のようになる。 $\varepsilon_2^* a_2 = \varepsilon_2 a_{22} (1 - f_1 T_1)$ $\therefore \quad \varepsilon_2^* = \varepsilon_2 \frac{a_{22}}{a_2} (1 - f_1 T_1)$ 2) さらに ⁶⁰Co, ⁸⁸Y では内部転換が無視できるので、 $f_1 = 1$, $f_2 = 1$ となり、 $a_{12} = a_{22} = a_2$ と見なすことができる。また、 γ_1 の全放出比は 100%と見なすことが できるので $a_1 = 1$ となる。(⁶⁰Co の場合は a_2 も1となる。) 従って 1)の 2 つの式は、

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon_1 (1 - a_2 T_2)$$
$$\varepsilon_2^* = \varepsilon_2 (1 - T_1)$$

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。

$$\varepsilon_{1} = \frac{\varepsilon_{1}^{*}}{1 - a_{2}T_{2}} = \frac{\varepsilon_{1}^{*}}{1 - \frac{a_{2}\varepsilon_{2}}{PTk_{2}}} \cdots (2)$$

$$\varepsilon_{2} = \frac{\varepsilon_{2}^{*}}{1 - T_{1}} = \frac{\varepsilon_{2}^{*}}{1 - \frac{\varepsilon_{1}}{PTk_{1}}} \cdots (3)$$

$$\varepsilon_{1} = \frac{\varepsilon_{2}^{*}}{1 - \frac{\varepsilon_{1}}{PTk_{1}}} \cdots (3)$$

$$\varepsilon_{1} = \frac{\varepsilon_{2}^{*}}{1 - \frac{\varepsilon_{1}}{PTk_{1}}}$$

$$\varepsilon_{1} = \frac{\varepsilon_{2}^{*} - \rho \, \delta \, \delta \, \varepsilon_{1}}{\delta \, \delta \, \varepsilon_{2}}$$

$$\varepsilon_{1}^{*} = \frac{\varepsilon_{2}^{*}}{1 - \frac{\varepsilon_{1}}{PTk_{1}}}$$

$$\varepsilon_{2} = \frac{\varepsilon_{2}^{*}}{1 - \frac{\varepsilon_{2}}{PTk_{2}}} \cdots (3)$$

$$\varepsilon_{2} = \frac{\varepsilon_{2}^{*}}{1 - \frac{\varepsilon_{2}}{PTk_{2}}}$$

 4)サム効果の補正を行うには崩壊形式およびカスケードにある他のγ線の全効率を 知らなければならない。全効率Tは標準γ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むずかしい。なぜならば、用いるγ線源は、単色(一種類の γ線のみ)γ線核種でなければならないこと、また散乱γ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(PT比)を用いて次のようにあらわされる。

 $T = \frac{\varepsilon}{PT \natural t}$

ピーク・トータル比は、単色 γ 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、 *PT*比= n_p/n_T であらわされる。

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³を用いて計算することもできる。

 PT比 = $a \times \ln(相対効率) + β$
 $a = e^{(-0.30 \times \ln(E) - 1.11)}$
 $\beta = e^{(-1.82 \times \ln(E) + 9.15)}$

 相対効率: %

 E : (keV)

³水本良彦、日下部俊男、岩田志郎: "ゲルマニウム検出器のピーク対 トータル効率比"、RADIOISOTOPES, 36, 20(1987)

5)②、③式からも明らかなように、サム効果補正した正しい ϵ_1 を求めるには ϵ_2 が必要となる。しかし真の ϵ_2 は始めは分からない。従って先ず ϵ_2 の代わりに ϵ_2^* を②式に代入し ϵ_1 を求める。次に③式に ϵ_1 を代入して ϵ_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。