

放射能測定法シリーズ (No. 6)

AI-NaI

NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータ 機器分析法

令和 8 年 6 月改訂

原子力規制庁監視情報課

目 次

序 論.....	1
第 1 章 測定原理.....	3
1.1 γ 線スペクトロメトリーの基本原理	3
1.2 γ 線と物質の相互作用	4
1.2.1 光電効果.....	4
1.2.2 コンプトン散乱.....	5
1.2.3 電子対生成.....	6
1.3 NaI 検出器の特徴	8
1.4 NaI 検出器による γ 線スペクトル	11
第 2 章 NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによる測定.....	14
2.1 機器と管理.....	14
2.1.1 エネルギー校正.....	14
2.1.2 検出効率校正.....	14
2.2 測定試料の調製.....	17
2.2.1 測定容器.....	17
2.2.2 試料の前処理.....	17
2.2.3 試料の充填.....	17
2.3 バックグラウンド測定.....	18
2.4 試料の測定.....	18
第 3 章 データ解析と評価.....	19
3.1 NaI 検出器を γ 線スペクトロメータとして用いる場合の注意事項	19
3.2 測定結果の解析.....	20
3.3 放射能濃度の計算.....	22
3.3.1 光電ピークを用いる方法.....	22
3.3.2 積算計数値を用いる方法.....	23
3.4 測定の不確かさ.....	24
第 4 章 スクリーニング法.....	25
4.1 スクリーニング法の原理.....	25
4.2 スクリーニング検査の実施手順.....	27
4.3 原子力発電所事故後の利用状況.....	28
第 5 章 品質保証.....	29
5.1 内部精度管理.....	29
5.1.1 トレーサビリティの確保.....	29
5.1.2 日常点検.....	29
5.2 外部精度管理.....	30
5.2.1 技能試験.....	30

解 説.....	31
解説 A 利用例の紹介	33
解説 B その他の解析手法	36
解説 C NaI(Tl)以外のシンチレーション検出器（参考）	42
参考文献.....	43

序 論

放射能測定法シリーズは、原子力災害対策指針に基づいて行われる平常時及び緊急時における環境放射線モニタリングにおいて用いられる、放射性物質及び放射線を測定するための標準的な方法を取りまとめたものであり、本マニュアルは、1972年に制定された同シリーズNo. 6「NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ機器分析法」の改訂版である。

NaI(Tl)シンチレーション検出器（以下「NaI 検出器」という。）は、以前より γ 線測定に広く用いられてきた機器であるが、エネルギー分解能が優れたゲルマニウム半導体検出器（以下「Ge 検出器」という。）の普及後は、その主要な用途は、分析対象試料中の放射性核種の測定ではなく、空間放射線量率の測定となっている。NaI 検出器を用いた空間線量率測定については、放射能測定法シリーズNo. 17「連続モニタによる環境 γ 線測定法」及び同シリーズNo. 20「空間 γ 線スペクトル測定法」を参照されたい。

NaI 検出器は、 γ 線に対する計数効率が高く、検出器部分の冷却が不要で維持管理が容易であるなどの特徴を持ち、比較的放射能濃度の高い試料の簡易的な測定や迅速なスクリーニング測定に適している。一方、Ge 検出器に比べてエネルギー分解能が低いため、エネルギーの近接した複数の γ 線を分離して測定することは原理的に難しく、複数の γ 線放出核種が混在した場合にそれらを区別して定量することは困難である。平常時の環境放射線モニタリングにおいて環境試料中に含まれる微量の人工放射性核種を定量するには、自然放射性核種のスペクトルの中に埋もれた微小なピークを検出する必要があるが、NaI 検出器で測定したスペクトル（複数の自然放射性核種の寄与を含む）の中から微量の人工放射性核種によるピークを判別することは事実上不可能であるため、高分解能の Ge 検出器の性能が必要不可欠である。このような状況を受けて、平常時の環境放射線モニタリングにおいては、人工放射性核種を定量するスペクトロメータとして用いられるのは Ge 検出器が主流となっていた。

しかしながら、2011年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故を契機として、NaI 検出器を取り巻く状況は一変した。原子炉から大量の放射性物質が広範囲に拡散し環境が汚染された状況に対応し、農産物や食品の安全を確保するために、多数の試料の放射能濃度を迅速に測定する必要性が生じた。農産物や食品試料中の放射性核種を同定し、その放射能を正確に定量するためには高分解能の Ge 検出器が適しているが、事故後には測定の需要が爆発的に増加したため Ge 検出器の台数が不足して対応可能な範囲を超えたこと、事故後の放射能レベルが通常的环境レベルよりはるかに高く NaI 検出器でも十分に検出可能であったことから、多くの現場で NaI 検出器を用いた測定が行われるようになった。食品衛生法に基づいて食品の安全を確保するための放射能調査では、放射性セシウムの濃度を核種別に求める必要はなく、総量が規制レベルを超えているかどうかを迅速に判定することが必要とされ、NaI 検出器はこの目的に適していたため多くの現場で利用されるようになった。

なお、原子力発電所事故の発生直後には、放射性ヨウ素（ ^{131}I 、 ^{132}I ）等の多くの短半減期核種が環境に放出され、NaI 検出器の分解能では核種の識別が不可能な状況であったため、測定には高分解能の Ge 検出器が使用された。NaI 検出器が多く現場で活用される状況となったのは、事故から数か月以上が経過して短半減期核種が減衰し、環境中に残留する事故由来の

人工放射性核種として放射性セシウム (^{137}Cs 及び ^{134}Cs) が支配的となった時期以降である。

本マニュアルは、環境試料（農産物、食品含む）に含まれる放射性物質の測定のために NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータを使用する地方自治体、農業、水産業及び食品関係の団体、原子力事業者等の実務担当者向けに、基本的な測定原理、運用方法等の内容を整理したものである。本マニュアルが対象とする分析法は、NaI 検出器をスペクトロメータとして用いて γ 線スペクトルを測定し、試料中に含まれている放射性核種を同定し、その放射能を定量する手法である。この中には、対象核種を放射性セシウム等に限定し、試料中の放射能が基準となるレベルを超える可能性があるかどうかを判別することを目的としたスクリーニング法も含まれる。

測定対象は以下の試料とした。

- ・ 環境試料： 土壌、生物試料など
- ・ 食品： 農産物、畜産物、水産物、加工食品など

NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータは、原理的に高エネルギー分解能の Ge 検出器と同等の測定結果を期待できるものではないが、原子力発電所の事故後のような原子力緊急事態においては、検出器の特性を理解した上で測定対象核種を限定して使用すれば、Ge 検出器を補完する測定手法として有効に活用できる。

なお、原子力発電所事故後に NaI 検出器が最も多く活用されたのは、食品中の放射性セシウムを対象としたスクリーニングである。検査方法の詳細については、厚生労働省が食品衛生法の規格基準に対応できるように定めた「食品中の放射性セシウムスクリーニング法」^{*1}を参照されたい。同文書では分析機器は規定されていないが、分析法の例として NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータを用いた方法が示されている。スクリーニング法は、試料中の放射能濃度がある基準値を上回る可能性があるかどうかを確実に判定することに特化した方法であり、放射能濃度そのものを正確に求めるための方法ではないことに留意する必要がある。スクリーニングの結果、ある基準レベルを超えている可能性があるとして判定された試料については、高分解能の Ge 検出器等を用いた γ 線スペクトロメトリー等に基づく試験により検査結果を確定することとされている。Ge 検出器による測定の詳細については、放射能測定法シリーズ No. 7「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」^{*2}を参照されたい。

^{*1} 厚生労働省医薬食品局食品安全部監視安全課：食品中の放射性セシウムスクリーニング法（平成 24 年 3 月改正）

^{*2} 原子力規制庁監視情報課：放射能測定法シリーズ No. 7「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」（令和 2 年改訂）

第 1 章 測定原理

1.1 γ 線スペクトロメトリーの基本原理

試料中の γ 線放出核種 (^{137}Cs など) の放射能を求める手法として、 γ 線測定が用いられることが多い。 γ 線を測定し放射能濃度を求めるまでの過程は次のとおりである。

γ 線が検出器に入射すると種々の相互作用が発生し、 γ 線のエネルギーの一部または全部が検出器を構成する物質に対して付与される。NaI 検出器は、微量のタリウム (Tl) を添加して作製したヨウ化ナトリウム結晶^{*3} (以下「NaI (Tl) シンチレータ」という。) と、シンチレーション光を電気信号に変換し増幅する光電子増倍管から構成される。NaI 検出器に γ 線が入射すると、光電効果やコンプトン散乱などの相互作用により二次電子が生成される。それらの二次電子が NaI (Tl) シンチレータを励起し、脱励起して基底状態に戻る際に蛍光 (シンチレーション光) を放出する。この微弱な光を光電子増倍管で光電子に変換して増幅することで、シンチレーション光の強さ (発光量) に比例した大きさの電圧パルスが得られる。シンチレーション光の光量と γ 線により検出器に付与されたエネルギーの間には比例関係が成り立つため、パルス波高 (電圧) を大きさ別に分類することで、検出器が吸収したエネルギーの頻度分布 (γ 線スペクトル) が得られる。これを解析することで試料中に存在する γ 線放出核種を同定し、その放射エネルギーを定量する。

一般的に、 γ 線スペクトロメトリーには次の利点がある。

- ・ γ 線は透過力が強いので、薄い形状の測定試料を調製する必要がなく、比較的大容量 (～2L 程度) の試料をそのまま測定できる。

(測定試料の調製のために複雑な化学分離処理等を必要とせず、試料を一定の形状の容器に充填するだけで測定可能)

- ・ γ 線のエネルギーは放射性核種に固有の値を持つため、 γ 線のスペクトルから比較的容易に核種を特定できる。

^{*3} タリウムは、ヨウ化ナトリウム結晶の発光効率の向上と、発光波長を光電子増倍管に適した波長にシフトさせることを目的として結晶の作製時にドーピングされる。

1.2 γ 線と物質の相互作用

γ 線（光子）と物質（検出器及び周辺物質）との相互作用は γ 線スペクトロメトリーの基礎であり、後述の3種類の相互作用（光電効果、コンプトン散乱、電子対生成）が特に重要である。 γ 線との相互作用によって検出器が付与されたエネルギーのスペクトルは、主として外部から検出器に直接入射したガンマ線がシンチレータ結晶内で単一あるいは多重の相互作用によってつくられる。それ以外にも、遮蔽体等の周辺物質における相互作用によって生じる他の放射線（特性X線、コンプトン散乱で生じる散乱 γ 線、 β 線の制動放射によって生じる連続エネルギー分布のX線など）による成分が含まれているため、複雑な形状になる。図1に、単一の γ 線（662 keV）を放出する核種である ^{137}Cs をNaI検出器で測定したスペクトルの例を示す。

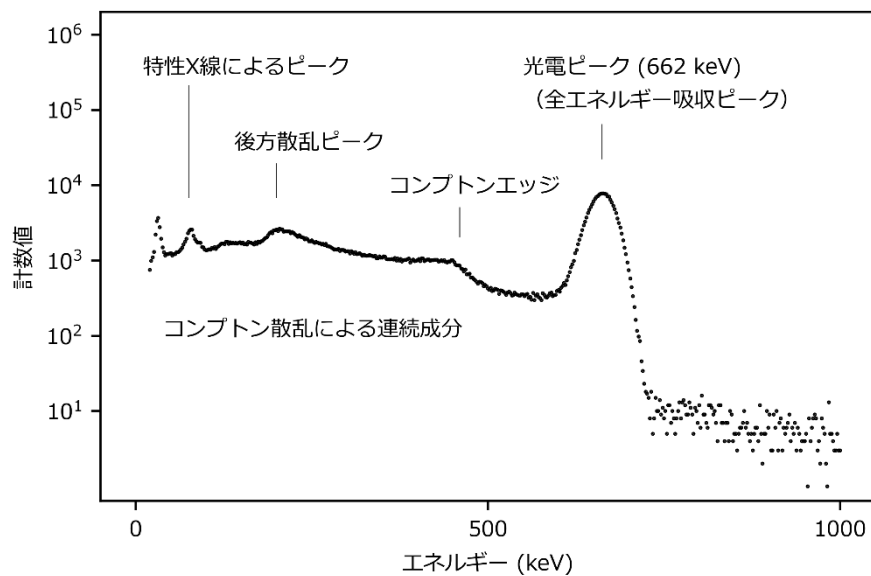


図1 NaI(Tl)検出器による ^{137}Cs のスペクトル例

以下、 γ 線と物質の主要な相互作用とスペクトルの関係について説明する。なお、スペクトルの詳細構造の解説は1.4章に記した。

1.2.1 光電効果

γ 線が物質に入射した際に全エネルギー(E_γ)を軌道電子(KまたはL殻の軌道電子、結合エネルギー I)に付与し、 $E_\gamma - I$ の運動エネルギーを持つ高速の二次電子(光電子ともいう)を生成する現象を光電効果という。 E_γ がK殻の軌道電子の結合エネルギー(I_K)より大きいときは、約80%がK殻の軌道電子との相互作用で、約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。

検出器に入射した γ 線が光電効果を起こした場合、 γ 線の全エネルギーが検出器に吸収され、スペクトル上にはピーク(光電ピークまたは全エネルギー吸収ピークと呼ばれる)として観測される(図1)。 γ 線スペクトルのうち、光電ピークのみが γ 線のエネルギーと入射頻度に関する情報を有するため、スペクトル解析は光電ピークを対象として行われる。スペク

トル上に明瞭なピークが観測され、ピークの位置を特定できる場合は、その位置から入射した γ 線のエネルギーを判別でき、 γ 線エネルギーは核種に固有であるため、放出した放射性核種を同定できる。さらに、ピークの強度は測定試料中に含まれる放射性核種の放射能に比例するため、定量が可能となる。なお、NaI 検出器はエネルギー分解能が低いため、測定されたスペクトル上でピーク位置を特定できないことが多く、その場合は核種を同定することは困難である。

1.2.2 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よい）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することがある。このとき、 γ 線はエネルギーの一部をシンチレータ結晶内の電子に与えて高速の二次電子（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（ $E_{\gamma'}$ ）となる。この現象をコンプトン散乱という。生成するコンプトン電子のエネルギー（ $E_e = E_{\gamma} - E_{\gamma'}$ ）は γ 線の散乱角に依存するので、コンプトン電子全体のエネルギー分布は連続したものになる。得られるスペクトル中では、光電ピークよりも低エネルギー側に連続成分として観測される。 γ 線の散乱角が180度 のときコンプトン電子のエネルギーは最大となり、これが連続分布の端（コンプトンエッジという）に相当する^{*4}。なお、NaI 検出器はエネルギー分解能が低いため、Ge 検出器で得られるスペクトルとは異なり、スペクトルには明確なエッジ状の形状が現れない場合が多い。

NaI 結晶におけるコンプトン散乱の確率は γ 線エネルギーが数十 keV から 100 keV 程度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。150 keV より低いエネルギーでは光電効果の確率が高いが、それ以上では光電効果の確率がエネルギーの増加とともに大きく減少しコンプトン散乱の確率の方が高くなるので、数百 keV 以上のエネルギーの γ 線において顕著な相互作用である。

検出器に入射した γ 線がコンプトン散乱を起こした場合に光電ピークよりも低エネルギー側に現れる連続部分は、 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。しかし、散乱した γ 線が引き続き検出器内で光電効果を起こした場合、結果として入射した γ 線の全エネルギーが検出器に付与されたことになり、スペクトル上では光電ピーク（全エネルギー吸収ピーク）として観測される。実際の NaI 検出器では、数 100 keV 以上の γ 線に対しては、この多重散乱（2 回以上の散乱）が光電ピークを生じる支配的な過程である。NaI 結晶の容積が大きいほど上記の多重散乱の確率が高くなり、スペクトル中の光電ピークの面積（ピーク計数）はコンプトン散乱によって生じる連続部分の面積と比べて大きくなる。

また、検出器の外側で発生したコンプトン散乱の影響もスペクトルに観測される。測定試料からの γ 線（図 1 の例では ^{137}Cs (662 keV)）が鉛遮蔽体などの周辺物質に入射しコンプトン散乱を起こすと、発生した散乱 γ 線が検出器に入射してエネルギーを付与することがあり、

^{*4} コンプトン電子のエネルギーは $E_e = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{m_0 c^2}{E_{\gamma}(1 - \cos\theta)}}$ （ E_{γ} : 入射 γ 線エネルギー、 θ : 散乱角）で与えられ $\theta = 180^\circ$ のとき最大となる。 Cs-137 の γ 線(662 keV)の場合、コンプトンエッジのエネルギーは 477 keV となる。

その場合にもスペクトル上に連続成分が観測される。このとき、検出器に入射した散乱 γ 線の最小エネルギーは散乱角 180 度の場合に相当し、入射 γ 線のエネルギーまで続く連続分布となる。スペクトル上では散乱 γ 線の最小エネルギーに相当する位置にピーク状の形状が現れる。その形状は γ 線源・検出器・遮蔽体の間の幾何学的な位置関係（ジオメトリ）に依存するが、散乱角が 90 度以上の後方散乱の寄与が多いため、後方散乱ピークと呼ばれる（図 1 参照）。検出器遮蔽体の内容積を大きくするほど、多重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。

1.2.3 電子対生成

エネルギーが 1022 keV^{*5}以上である 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。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（ ~ 0.1 eV）程度となると近傍に存在する電子と結合して消滅し（電子対消滅（annihilation））、2 個の電子対消滅光子 ($E = m_0c^2$) に変換される。電子対生成は γ 線エネルギーが $2m_0c^2$ 以上の場合に起こる相互作用であり、その確率は γ 線エネルギーが高いほど大きくなる^{*6}。電子対消滅の結果、検出器内部で発生した光子が引き続いて光電効果やコンプトン散乱を起こすか否かによって、検出器に付与されるエネルギーは次のようになる。

- (1) 2 個の電子対消滅光子が相互作用をせずに検出器外に出る。この現象はダブルエスケープといわれ、検出器に付与されるエネルギーは次の値に相当する。

$$E = E_\gamma - 2m_0c^2 \quad (1-1)$$

- (2) 1 個の電子対消滅光子が光電効果を起こし、他の 1 個は検出器外に出る。この現象はシングルエスケープといわれ、検出器に付与されるエネルギーは次の値に相当する。

$$E = E_\gamma - m_0c^2 \quad (1-2)$$

- (3) 2 個の電子対消滅光子が両方とも検出器内で光電効果を起こす。この現象は全エネルギー吸収に等しく、検出器に付与されるエネルギーは次の値に相当する。

$$E = E_\gamma \quad (1-3)$$

- (4) 1 個または 2 個の電子対消滅光子が検出器内でコンプトン散乱を起こす。検出器に付与されるエネルギーは連続分布となる。

^{*5} 2 個の静止状態にある電子（運動エネルギーが 0）の質量 m_0 を、質量とエネルギーの等価性を表す特殊相対性理論の式 ($E = mc^2$ 、 c : 光速) によりエネルギーに換算した値。

^{*6} 原子力施設に起因する人工放射性核種 (^{235}U の核分裂及び原子炉内での中性子放射化により生成されるもの) が放出する γ 線のエネルギーは 1500 keV よりも低いものが大部分である。1500 keV の γ 線が電子対生成を起こす確率は全相互作用の 100 分の 1 程度と低く、より高いエネルギーで顕著な相互作用となる。

また、鉛遮蔽体などの周辺物質において γ 線による電子対生成が生じると、そこで発生した電子対消滅光子が検出器に入射し検出されることがある。その場合、検出器に付与されるエネルギーは 511 keV となる。

NaI 検出器の場合、シンチレータ結晶の容積が大きいほど上記 (3) の確率が高くなるため、スペクトル中の光電ピークは大きくなり、連続部分は相対的に減少する。

NaI 検出器による測定で、検出器に入射した γ 線が電子対生成を起こした場合、実際に有効な出力信号が得られるのは上記 (3) の場合のみである。上記 (1), (2) の場合は、入射した γ 線エネルギーから 511 keV、1022 keV をそれぞれ差し引いたエネルギーに相当する出力信号が生じるが、スペクトル上では他の信号の中に埋没してしまい、独立したピークとしては識別できない。なお、高分解能の Ge 検出器の場合は、上記 (1), (2) の事象をスペクトル上でシングルエスケープピーク、ダブルエスケープピークとして観測することができる場合が多い。

1.3 NaI 検出器の特徴

NaI 検出器は γ 線測定に広く用いられており、以下の特徴を持つ。

【長所】

- ・ γ 線に対する検出効率が高い

ヨウ化ナトリウム結晶は密度が高く ($\rho = 3.67 \text{ g/cm}^3$)、構成元素にヨウ素 (原子番号 $Z=53$) を含むため有効原子番号が高いことから、 γ 線との相互作用を起こしやすいため (光電効果を起こす確率は Z^5 に比例)、 γ 線に対して高い検出効率を持つ。

- ・シンチレータの光出力が比較的高い

シンチレータとしての発光効率がよく、かつ光電子増倍管の動作に適した発光波長スペクトルを持つため、シンチレータが γ 線から付与されたエネルギーを光電子増倍管との組み合わせで効率的に電気信号に変換できる。

- ・低コスト

単純な物質で構成され、構造も単純なため、比較的低コストで入手可能。

- ・常温で使用可能

使用時に冷却を必要としないため、取り扱いが容易で運用コストが低い。

- ・大容量の結晶を作製可能

均一な大型の結晶を作製可能で、検出効率を高くすることが可能。

- ・検出器の規格化

同じ形状で同じ特性を持つ検出器を再現性良く量産できるため、検出器が規格化されている^{*7}。

- ・応答が高速

シンチレーション光の減衰時間が比較的に短いため、高計数率の測定にも対応可能。

【短所】

- ・エネルギー分解能が低い

Ge 検出器に比べてエネルギー分解能が低いため (^{137}Cs の 662 keV の γ 線に対し、ピークの半値幅で 7~9 %程度)、近接するエネルギーの γ 線を分離して測定することが困難な場合が多く、スペクトル解析を行う際のピーク分離や、スペクトルの連続部分のベースライン^{*8}の評価が難しい。

- ・シンチレータ結晶に潮解性がある

ヨウ化ナトリウム結晶は潮解性があるため密閉容器に入れて使用する必要がある。

- ・機械的、熱的な衝撃に対して脆弱

機械的な衝撃や急激な温度変化を与えた場合に結晶が破損することがある。

- ・検出器の動作に温度依存性がある

シンチレータの発光効率と光電子増倍管の特性が温度によって変化するため、精密な

^{*7} JIS Z 4321:1995 放射線測定用タリウム活性化ヨウ化ナトリウムシンチレータ

^{*8} 入射した γ 線の全エネルギーが検出器に付与された場合にスペクトルには光電ピークが生じるが、ピークは、コンプトン散乱などによって生じた連続成分の上に重なった (底上げされた) 形で観測される。ピークの下部に隠れている連続成分をベースラインという。

測定には、検出器を設置する環境の温度管理、検出器の動作の温度補償が必要となる。

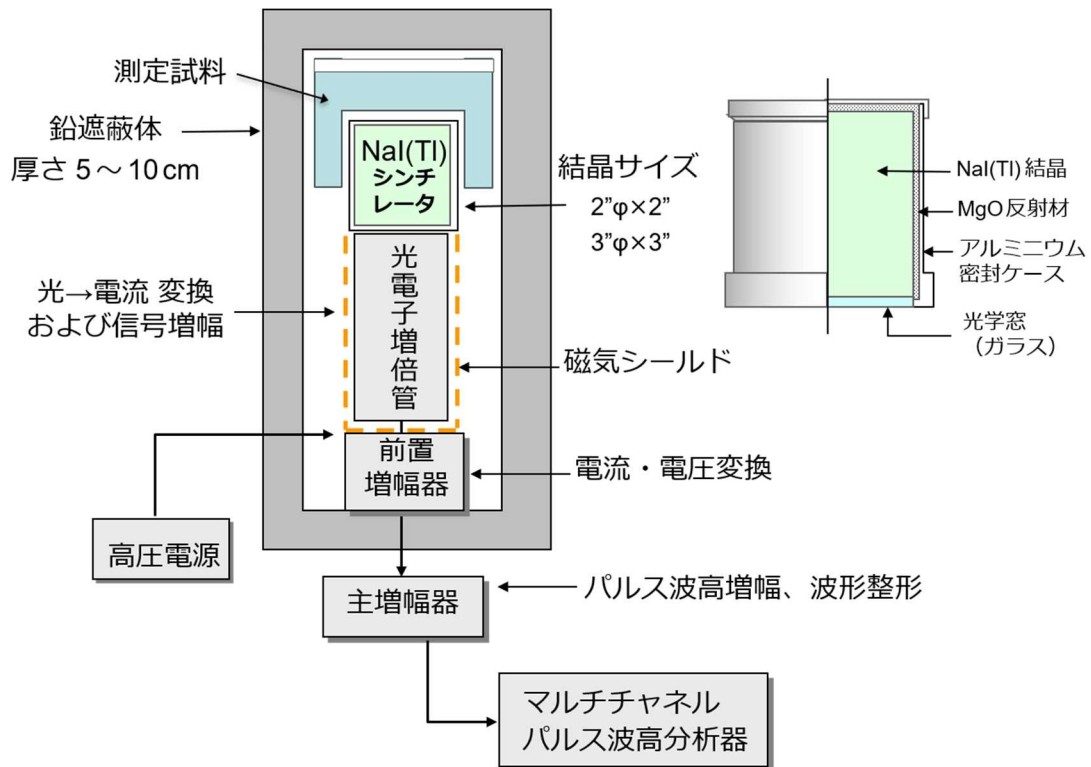


図 2 に NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータの構成例を示す。

図 2 NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータの構成例

NaI (Tl) シンチレータは潮解性があるため、密閉容器に封入した状態で使用される。シンチレータの発光を光電子増倍管に効率良く導くためにシンチレータの周囲には反射材が配置され、光電子増倍管に接する面はガラスとなっており光学的に結合されている。光電子増倍管の動作は磁場による影響を受けやすいため、外部磁場の影響を軽減するための磁気シールドを光電子増倍管の内部または周囲に装備する場合がある。

検出器は、周辺環境からの γ 線の影響（バックグラウンド）を低減するために鉛などの材質の遮蔽体に収容した状態で使用される。遮蔽体には 5～10 cm 程度の厚さの鉛が用いられることが多い(5 cm 厚の鉛に対する ^{60}Co の γ 線(1333 keV)の透過率は 6～7 %である)。バックグラウンド計数率が低いほど検出下限値は低くなる。

光電子増倍管を動作させるために高圧電源装置から数 100 V～1000 V 程度の電圧が印加される。NaI (Tl) シンチレータからの発光は光電子増倍管内の光電面で電子に変換され、電子は内部の電極に印加された電場により多段階（10 段程度）にわたって加速、増幅される。光電子増倍管からの出力は前置増幅器で電圧に変換された後に主増幅器で増幅され、シンチレータの発光量に比例する大きさ（波高）を持った電圧パルスとして出力される。出力されたアナログパルスは波高分析器でデジタル変換され、マルチチャネルアナライザにおいて横軸をパルス波高、縦軸をパルスの数とした頻度分布（ γ 線スペクトル）が得られる。

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により前置増幅器の出力を直接デジタル変換しマルチチャネルアナライザで波高分

布を得る装置が一般的となっている。それに伴い、光電子増倍管の後段の電子機器が全て一体化されてパッケージに収容され、PC と USB ケーブルで接続するだけで機能する製品も存在する。

1.4 NaI 検出器による γ 線スペクトル

検出器に入射した γ 線の全エネルギーが検出器に付与された場合、広がりを持ったピーク状のスペクトルが得られる。ピークの最大計数値の 1/2 の計数値になる γ 線エネルギーの範囲（半値幅（Full Width at Half Maximum））がエネルギー分解能を評価する指標として用いられる。NaI 検出器のエネルギー分解能は通常、特定エネルギーのピークの半値幅をピーク中心エネルギーで除した相対値（%）で表され、検出器の形状及び電子回路の特性等に依存するが、2～3 インチの円筒形 NaI (Tl) の場合、 ^{137}Cs (662 keV) に対して 7～9 %程度が一般的である。エネルギー分解能の概念図を図 3 に示した。

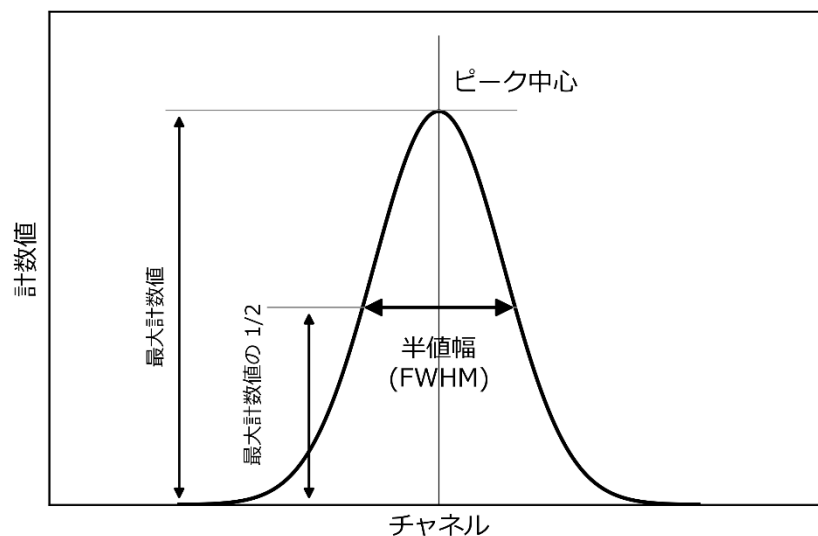


図 3 エネルギー分解能の概念図

実際のスペクトルは、検出器に γ 線が入射した際に γ 線エネルギーの一部のみが検出器に付与される場合が多く、また、周辺環境からの散乱 γ 線の影響も受けるため、ピーク以外にも様々な成分を持つ複雑な形状となる。 ^{137}Cs (662 keV の γ 線のみを放出) を測定したスペクトル例を図 4 に示す。

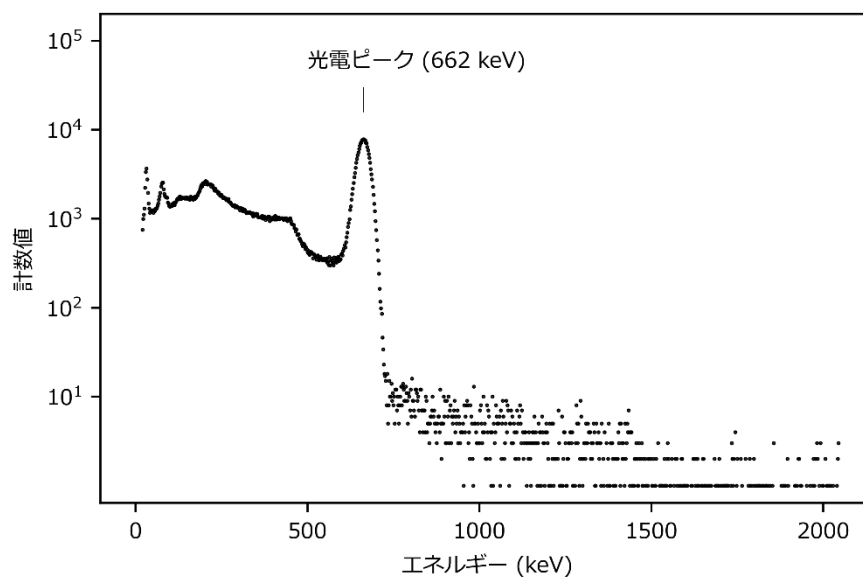


図 4 単一エネルギー γ 線放出核種 (^{137}Cs) のスペクトル例

より複雑な例として、複数の γ 線を放出する核種のスペクトル例を図5に示す。

図5は ^{134}Cs 標準線源を測定して得られたスペクトルである。

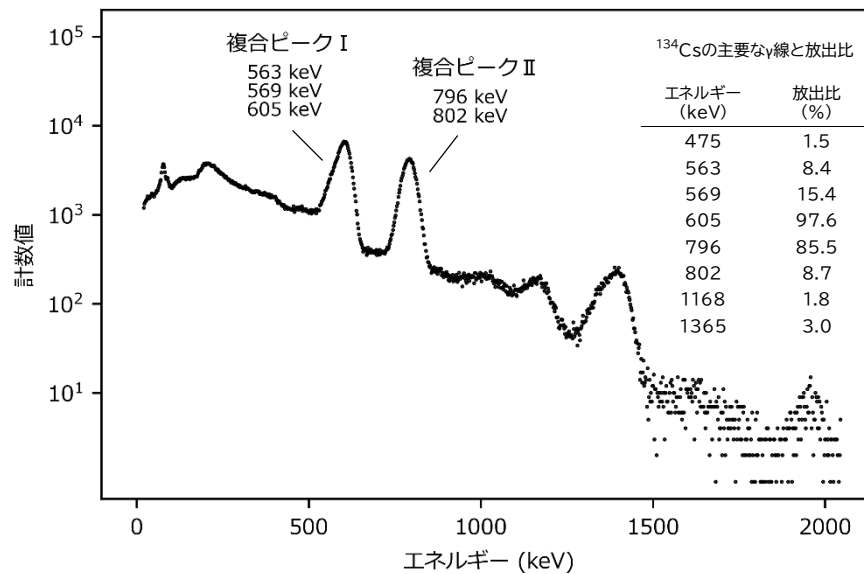


図5 複数の γ 線を放出する核種 (^{134}Cs) のスペクトル例

^{134}Cs は異なるエネルギーの γ 線を多数（放出比が1%を超えるものだけでも8本）放出するが、実際のスペクトルで主要なピークとして観測されるのは2本の複合ピークであり、これらは主に放出率の高い主要な γ 線（605 keV及び796 keV）によって生じる。なお、図5の複合ピークI及び複合ピークII内に含まれる複数の γ 線は、エネルギーが近接しているため分離することができず、それぞれが見かけ上単独のピークとして観測される。複合ピークIには563 keV（8.4%）、569 keV（15.4%）、605 keV（97.6%）が、複合ピークIIには796 keV（85.5%）及び802 keV（8.7%）が構成成分として含まれている。

このように、エネルギーの近接した γ 線によるピークが重畳した場合、個々の γ 線を弁別して分析することは困難となる。複数の核種が存在し γ 線の数が増えた場合にはさらに複雑になり、例えば ^{137}Cs と ^{134}Cs の両方が存在した場合は、 ^{137}Cs （662 keV）のピークは ^{134}Cs の低エネルギー側ピーク（図5の605 keVを含む複合ピークI）と重なり複合ピークを形成する。図6は ^{137}Cs と ^{134}Cs の両方を含む試料（原子力発電所事故から約1年半経過後に採取された土壌）から得られたスペクトルの例である。図6の複合ピークIIIには ^{134}Cs （563 keV, 569 keV, 605 keV）及び ^{137}Cs （662 keV）が、複合ピークIVには ^{134}Cs （796 keV, 802 keV）が構成成分として含まれている。

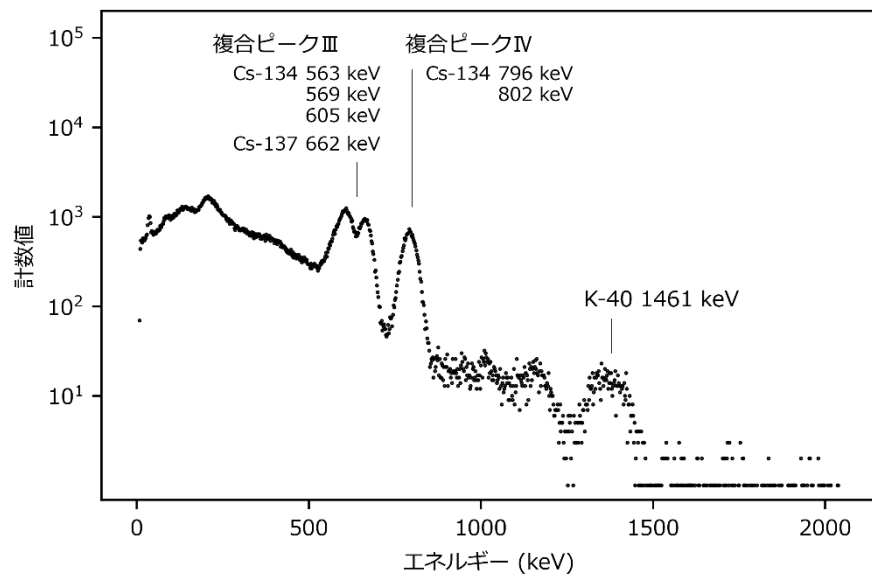


図6 ^{137}Cs と ^{134}Cs を含む試料（土壌）から得られたスペクトル例

第 2 章 NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによる測定

2.1 機器と管理

NaI(Tl)シンチレータと光電子増倍管の特性は温度によって変化するため、装置の利用環境の温度によってスペクトルのピーク位置が高エネルギー側または低エネルギー側にシフトし解析結果に影響を及ぼす場合がある。そのため、安定した測定結果を得るためには、測定装置を空調により温度管理された場所に設置して使用することが望ましい。検出器内部の温度が周辺温度と平衡に達するには数時間を要するため、24 時間の温度管理を行うことが望ましい。

実際の調整手順は測定機器の機種に依存する部分が多いため、各測定機器の取扱説明書の手順に従って行うこと。測定及びデータ解析は機器に付属する解析ソフトウェアを用いて行うことが一般的であるため、適切な解析を行うためにソフトウェアの取扱説明書が指定する方法に従って校正を実施しておくこと。以下には標準的と考えられる手順を示した。

2.1.1 エネルギー校正

スペクトルはチャンネルごとの計数として得られ、チャンネルと γ 線エネルギーとの対応関係を適切に調整するのがエネルギー校正である。チャンネルとエネルギーの対応関係はスペクトル解析時に必要な情報であり、対応関係のずれは解析結果に影響を及ぼすので注意する必要がある。

測定機器のエネルギー校正を行う際は、測定対象のエネルギー範囲に入る γ 線を放出する核種の線源 (^{137}Cs , ^{60}Co など) を測定し、対象核種のピーク中心が対応するチャンネルと一致するようにゲイン (増幅率) 等の調整を行う。適当な γ 線源を用意できない場合は、代替として塩化カリウム試薬 (カリウムの放射性同位体である ^{40}K (1461 keV の γ 線を放出する) が約 0.0117 %含まれている) を利用できる。少なくとも 1 日に 1 回、試料の測定前にピーク位置がずれていないことを確認し、ずれていた場合にはエネルギー校正を行うことが望ましい^{*9}。

2.1.2 検出効率校正

γ 線スペクトルから測定試料中の放射性核種を定量するためには、検出効率の校正が必要である。 γ 線スペクトロメトリーにおける検出効率としては、 γ 線が検出器に入射した際に光電ピーク (全エネルギー吸収ピーク) を生じる確率 (ピーク効率) を用いるのが原則である。ピーク効率は、測定試料中に存在する特定の核種の γ 線の単位時間当たりの放出数に対する、スペクトル上に観測される光電ピークの計数率との比である。

ピーク効率は γ 線が検出器内で相互作用を起こし全エネルギーが吸収される確率で決まり、その確率は γ 線のエネルギーに依存する (γ 線エネルギーが低いほど相互作用を起こす確率が高くなるため、ピーク効率が高くなる)。さらに、ピーク効率は NaI 検出器の結晶形状と大

^{*9} 装置は温度管理された屋内に置くことが望ましいが、農産物など大量の試料の測定を行う大型装置では、空調管理が十分でない場所へ設置されることがある。そのように温度変化が激しい場合は、測定前だけでなく気温の変化に合わせて 1 日に数回ピーク位置のずれを確認すること。

きさ、測定試料の形状、測定試料と検出器の位置関係（ジオメトリ）、測定試料内部での γ 線の自己吸収などの多くの要因によって変化する。そのため、検出効率校正は装置ごと、測定条件（使用する容器の種類と配置）ごとに実施する必要がある。検出効率校正は、原則として、放射能または放射能濃度について、国家標準へのトレーサビリティが確保された標準線源を使用して実施する必要がある。検出効率校正は、実際の測定試料と同じ形状、材質で、測定対象の放射性核種と同じ核種を含む標準線源を用いて行うことが望ましい。標準線源を用いた校正手順の例を以下に示す。

【単一の γ 線を放出する核種による検出効率校正（例： ^{137}Cs ）】

- ・標準線源を測定してスペクトルを得る。着目するピークの正味計数率の相対標準不確かさが1%未満となるまで測定することが望ましい。
- ・スペクトル上の光電ピーク位置を中心とした一定の範囲内にある計数値を積算する。
- ・ピークのベースライン部分の計数を差し引き、正味のピーク計数値を求める。
- ・正味計数値を測定時間と標準線源の添加核種の放射能値で除し、ピーク効率を求める。

$$\varepsilon = \frac{n}{N} \quad (2-1)$$

ここで、

ε : ピーク効率

n : スペクトルの光電ピークの正味計数率 (s^{-1})

N : 測定試料中の特定の核種から単位時間(秒)あたりに放出される γ 線の数 (s^{-1})

得られたピーク効率は、標準線源に含まれる核種の特定の γ 線エネルギー(^{137}Cs , 662 keV)のピークに対する値である。なお、同じジオメトリであっても γ 線エネルギーが異なればピーク効率の値は違ったものとなるため、異なる γ 線エネルギーの核種に対しては、別途ピーク効率を求める必要がある。また、 ^{134}Cs のように複数の異なるエネルギーの γ 線を放出する核種は、それぞれの γ 線に対するピーク効率の値が異なることに留意すること。

任意の γ 線エネルギーに対してピーク効率を得られるようにするためには、測定対象のエネルギー範囲をカバーするような複数の標準線源を用いて複数のエネルギーにおけるピーク効率を求め、エネルギーに対して関数化する方法がある。ただし、この方法は高分解能のGe検出器では一般的に用いられるが、NaI検出器では、複数の γ 線による光電ピークが重なり個々のピーク面積を求めてピーク効率を計算することが困難であるため、一般的には使用されない。NaI検出器でピーク効率を求める場合は、測定対象とする核種の標準線源を用いる方が適切である。

測定機器の検出効率を求める方法として、モンテカルロシミュレーション等を用いた数値モデルで計算することも可能であるが、このような数値モデルは、検出器のサイズなどの入力パラメータに敏感であるため、測定対象となる γ 線エネルギー範囲内の少なくとも一点の

エネルギーについて、標準線源を用いて数値モデルの応答の妥当性を確認しておくことが必要である。数値モデルの計算結果と標準線源の結果に不一致が見られた場合には数値モデルの修正が必要である。

【測定対象の核種と γ 線を限定した場合の効率校正（例： $^{137}\text{Cs} + ^{134}\text{Cs}$ ）】

低エネルギー分解能の NaI 検出器に対する検出効率校正では、特定の核種の特定の γ 線に対するピーク効率を個別に求めるのではなく、複数の核種をまとめて取り扱う方法があり、特に放射性核種濃度の低い試料に対して実用的に用いられる。

放射性核種濃度の低い試料を測定した場合は、十分な計数が得られないためスペクトル上には必ずしも明瞭な形状のピークが観測されず、ピークの判別及び正味ピーク面積を求めること自体が困難な場合が多い（特に、複数の核種が混在している場合に顕著である）。そのような場合には、スペクトル上でエネルギー範囲を設定し、そのエネルギー範囲内に入る複数の核種の γ 線に対する検出効率をまとめて評価する方法が有効である。放射性セシウム ($^{137}\text{Cs} + ^{134}\text{Cs}$) を対象とした校正手順の例を次に示す。

- 1) バックグラウンドスペクトルを測定する。
- 2) ^{137}Cs と ^{134}Cs の既知量が添加された標準線源を測定してスペクトルを得る（スペクトルは、関心領域（次項参照）の積算値の計数に係る相対標準不確かさが 1 %未満となるまで測定することが望ましい）。
- 3) ^{137}Cs と ^{134}Cs が放出する複数の γ 線のエネルギー範囲を包含するようにスペクトルに関心領域（ROI: Region of Interest, 540 keV～830 keV 程度）を設定し、領域内の計数値を積算し、測定時間で除して領域内の計数率を求める。
- 4) バックグラウンドスペクトルに標準線源のスペクトルと同様に関心領域を設定し、領域内の計数値を積算し、測定時間で除してバックグラウンド計数率を求める。
- 5) スペクトルの計数率からバックグラウンド計数率を差し引いて正味計数率を得る。
- 6) 正味計数率を標準線源の放射能で除し、逆数をとって換算係数（Bq/cps）を求める。

ここで得られる換算係数は、低レベルの試料を測定したスペクトルのように、十分な計数が得られず光電ピークを認識できないようなスペクトルを用いて放射性核種の定量を行う際に、検出効率の実用的な代替として用いることができる。この換算係数は測定機器及び測定条件によって決まり、機器換算係数と呼ばれる。測定されたスペクトルの特定のエネルギー領域（この例では 540 keV～830 keV 程度）の計数率に機器換算係数を乗ずることにより、 ^{137}Cs と ^{134}Cs の合計の濃度に換算することができる。機器換算係数は、当該機器を用いて定量結果を得るためのパラメータとして測定機器メーカーから提供される場合が多い。

なお、この方法を用いた場合には ^{137}Cs と ^{134}Cs を個別に定量することはできず、求められるのは合計値のみである。ただし、放射性セシウムがある基準レベル以下であるかどうかを判定する目的であれば、必ずしも核種を個別に定量する必要はないため、後述のスクリーニング法（第 4 章）において有効な手段となる。機器換算係数を算出する場合、標準線源とし

て¹³⁷Cs だけを用いてもよい。¹³⁷Cs が 662 keV の γ 線のみを放出するのに対し、¹³⁴Cs は複数の γ 線を放出し測定エネルギー領域での 1 Bq 当たりの計数率が大きくなるため、機器換算係数 (Bq/s⁻¹) としては ¹³⁴Cs の方が小さくなる。そのため、¹³⁷Cs の機器換算係数を用いて放射性セシウムの放射能値を求めると過大評価となるが、スクリーニングを目的とするのであれば、安全側の評価となるため許容される。

2.2 測定試料の調製

2.2.1 測定容器

測定容器の形状ごとに測定時のジオメトリ（検出器と測定容器に充填した試料の位置関係）が異なることで検出効率が変わるため、使用する測定容器の種類ごとに検出効率を求めておく必要がある。測定容器としては、プラスチック製の円筒型容器やマリネリ容器（容量 0.5～1L 程度）が用いられる。測定容器には次に示す性質を持つものが推奨される。

- ・ γ 線の吸収を起こしにくい材質であること（原子番号の小さい元素で構成されていること）。
- ・ 液体が漏れにくい構造であり、簡単に壊れない強度を持つこと。
- ・ 試料の充填を容易に行えること。
- ・ 試料の充填状態を確認しやすくするために、材質が透明または半透明であること。

2.2.2 試料の前処理

γ 線スペクトロメトリーでは、測定試料内に測定対象の放射性核種が均一に分布していることが前提である。液体試料は前処理を行わずによく攪拌してから測定容器に充填すればよい。固形物は必ずしも乾燥、灰化の必要はないが、一般的には容器に充填しやすい形状に切る等の前処理が必要となる。なお、対象試料が食品であり、食品摂取による被ばく線量評価を目的とする場合には、可食部のみを取り分けて測定試料とする等、調査の目的に応じて必要な処理を行ってから容器に充填すること。

試料の前処理方法については、放射能測定法シリーズ 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。

2.2.3 試料の充填

試料を測定容器に充填する際には、試料を識別できる情報（試料番号など）を確認し、取り違えが起こらないように十分に注意すること。充填前には容器の風袋重量を測定しておき、充填後に重量を測定し、容器に充填した重量を算出して記録すること。充填作業は、試料が測定容器内で可能な限り均一な状態となるようにし、容器内の充填高さも含めて、検出効率を求めた際に用いた標準線源と同じ幾何学的形状となるようにすること^{*10}。

^{*10} 試料が冷却されていた場合（試料充填後、腐敗防止などのために冷却して保管した場合も含む）、あるいは熱水抽出などの前処理で高い場合は、測定時までには試料が室温と同じ程度にしておく。

試料の充填後は、検出器の汚染を避けるために、容器の蓋を密閉した状態で全体をポリエチレン袋で覆ってテープで止める等、試料が漏れ出さないような措置を行うこと。

2.3 バックグラウンド測定

試料の測定に先立ち、検出器に汚染がないことを確認するため、検出器に試料をセットしない状態でバックグラウンド測定を行っておくこと。バックグラウンド測定は、日常点検(5.1.2)の一部として、少なくとも1日に1回行うことが望ましい。

2.4 試料の測定

試料の測定の標準的な手順を以下に示す。

- 1) 試料情報をシステムに入力する。
- 2) 検出器及び遮蔽体内部の汚染防止のため、測定試料をポリエチレン袋で包む。
- 3) 測定試料の試料番号等を確認し、試料の取り違えがないことを確認した後に検出器の所定の場所にセットする(検出器と測定試料の位置関係がずれると測定結果に影響を及ぼすため、所定の位置に正確に置くこと)。
- 4) 測定時間を事前に設定する。測定時間は、測定対象核種ごとに定める検出下限値(目標レベル)を達成するために十分な時間にする必要がある。
- 5) 測定を開始する。開始後、スペクトル表示画面等で実際に計数されていることを確認する。
- 6) 測定終了後、測定対象の放射性核種濃度が不検出であった場合、想定していた検出下限値が達成されていることを確認する。
- 7) 測定試料を取り出し、試料の取り違えがないことを試料番号等で確認する。
- 8) 測定データを保存する。保存する際のファイル名は、試料を確実に識別可能な名称とし、必要な場合には付帯情報を付けて保存することが望ましい。
- 9) 保存したデータファイルを開き、データが確実に保存されていることを確認する。
- 10) スペクトルを確認する。ピークが存在するか、存在する場合は形状に異常がないか、位置がシフトしていないことを確認する。
- 11) 解析結果のレポートを採取・分析記録等と照合し、試料量、使用した容器の種類等、解析に用いたパラメータ及び対象試料情報に入力誤りがないことを確認する。

第 3 章 データ解析と評価

3.1 NaI 検出器を γ 線スペクトロメータとして用いる場合の注意事項

γ 線スペクトロメトリによって測定試料中の γ 線放出核種を同定し、その放射能を定量する際には、スペクトル上に観測される光電ピーク（全エネルギー吸収ピーク）を用いるのが原則である。スペクトル上の光電ピークの位置は入射した γ 線のエネルギー情報を持ち、 γ 線エネルギーは核種に固有な値であるため、放射性核種を同定することが可能となる。さらに、光電ピークの正味面積から、別途標準線源で求めておいた検出効率を用いて、試料中に存在する放射性核種を定量することができる（検出効率校正については 2.1.2 章を参照）。

しかしながら、NaI 検出器で得られるのは低エネルギー分解能の γ 線スペクトルであるため、基本的な解析手法は共通するものの、高分解能の Ge 検出器で用いられる手法をそのまま適用することはできない。検出器のエネルギー分解能が低いことに起因する測定、解析上の問題点は以下のとおりである。

- ・ γ 線エネルギーによる核種の同定が困難

前述のとおり NaI 検出器はピーク分解能が低く、スペクトルの形状から試料中にどのような γ 線放出核種が存在するかを特定することは困難である。特に、複数の核種が試料中に存在しエネルギーの近接した複数の γ 線による複合ピークが形成される場合、核種を同定することは事実上不可能となる。

- ・ 正味ピーク面積の評価が困難

複数のピークが近接して一部が重なった場合、コンプトン散乱による連続部分（ベースライン）を見積もることは困難であり、正味ピーク面積を適切に評価することができない。標準線源のスペクトルのように十分な計数があり明瞭なピーク形状を持つスペクトルであれば、複合ピーク解析等の手法を用いて複数核種の弁別等の解析が可能な場合もあるが、実際の試料では十分な計数が得られない場合が多いため、適用できる状況は極めて限られる。

そのため、実際の試料の測定、解析に際しては、スペクトル上にエネルギー範囲を限定したチャンネル領域を設定し、その領域内の計数が特定の核種の γ 線に起因するものと仮定して解析を行う方法が用いられることが多い。この方法は特にスクリーニング法（第 4 章）において有効である。

3.2 測定結果の解析

測定結果の解析は、測定機器に付属する専用ソフトウェアを用いて行う。ソフトウェアは、作成者により十分に動作検証されたものであることを前提とする。NaI 検出器で測定されたスペクトルの解析には、スペクトル上に特定のエネルギー範囲に対応する領域を設定して領域内の計数を積算し、検出効率または機器換算係数を用いて放射能値に換算する方法が一般的に用いられる。解析方法の詳細を 3.3.1 章及び 3.3.2 章に示す。

市販の測定機器を使用すると、多くの場合、測定から解析までの一連の処理を自動的に行うことができるが、機器が正しく校正されていた場合でも、解析結果が妥当でない場合があり得るため注意が必要である。測定機器に付属するソフトウェアは、スペクトルのピーク位置を特定して放射性核種を判定するのではなく、あらかじめ想定した核種のピークエネルギー領域の計数がその核種由来であると仮定して放射能濃度を算出する方法をとっているものが多い（対象核種の想定例： ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{40}K ）。この場合、エネルギーが近接している想定外の核種を想定核種と誤認する可能性があるが、ソフトウェアで自動判定することは不可能であり、分析者自身が解析結果の妥当性を判断する必要がある。想定核種の γ 線であるかどうかの判定が困難なケースとしては以下のものがある。

・自然放射性核種 (^{214}Pb 、 ^{214}Bi) の影響

^{214}Pb 及び ^{214}Bi は、ウラン系列に属するラドン (^{222}Rn) の子孫核種であり、環境試料に含まれて検出されることがある（バックグラウンドスペクトルにも検出される）。 ^{214}Pb 及び ^{214}Bi の放出する γ 線のうち、測定対象の人工放射性核種である ^{131}I 、 ^{134}Cs の γ 線に近接するエネルギーのものがある。

^{214}Pb : 352 keV $\Leftrightarrow$ ^{131}I : 365 keV に近接

^{214}Bi : 609 keV $\Leftrightarrow$ ^{134}Cs : 605 keV に近接

これらの自然放射性核種が存在した場合、NaI 検出器のエネルギー分解能では弁別することができないため、人工放射性核種 ^{131}I 、 ^{134}Cs の γ 線による計数と判定される。例えば、井戸水などの天然水試料を測定した場合 ^{222}Rn が含まれることがあり、その子孫核種である ^{214}Pb 、 ^{214}Bi の γ 線が計数される場合が起こり得る。この場合、測定されたスペクトルから判別することは不可能であるが、 ^{222}Rn は半減期が 3.8 日と短く、その子孫核種である ^{214}Pb 、 ^{214}Bi も親核種である ^{222}Rn の半減期で減衰するため、数日程度経過した後に再測定することで、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi による寄与であったことを確認できる場合がある。

・自然放射性核種 (^{40}K) の影響

食品などの試料には、カリウムの放射性同位体である ^{40}K が必ず含まれている。 ^{40}K は比較的高エネルギーの γ 線 (1461 keV) を放出し、そのコンプトン散乱によりスペクトルの連続成分の計数が増加する。連続成分の一部は放射性セシウムのエネルギー領域に重なるため、放射性セシウムを対象としてスペクトルを解析した場合、測定機器のソフトウェアによっては、放射性セシウムが検出されたと誤認する場合が起こり得る。

このように、NaI 検出器を用いて人工放射性核種を定量する場合、試料内の自然放射性核種

の寄与を排除することができないため、定量結果が過大評価となることに留意しなければならない。ただし、スクリーニングに用いる場合は、過大評価は安全側の評価となるため許容される。

3.3 放射能濃度の計算

3.3.1 光電ピークを用いる方法

試料を測定して得られたスペクトル上に、ある γ 線放出核種からの単独の γ 線によって生じる光電ピークが観測され、核種及び γ 線エネルギーを同定可能でピークの正味計数値を求めることができる場合、試料中の核種の単位質量当たりの放射能 C_A は次式により求められる。正味計数値 n_E はピークの領域の計数値を積算したグロス計数値 $n_{g,E}$ からベースライン計数値 $n_{b,E}$ を差し引いて求める。図7にピーク面積計算の概念図を示した。

$$C_A = \frac{n_E/t_s}{P_E \cdot \varepsilon_E \cdot M \cdot f_E} \quad (3-1)$$
$$n_E = n_{g,E} - n_{b,E}$$

ここで、

- n_E : 対象ピーク（エネルギー E ）の正味計数値
- $n_{g,E}$: 対象ピークのグロス計数値
- $n_{b,E}$: 対象ピークのベースライン計数値
- t_s : 測定時間（秒）
- P_E : γ 線の放出比（エネルギー E keVの γ 線を一壊変あたりに放出する割合）
- M : 試料の質量
- ε_E : エネルギー E keVの γ 線に対するピーク効率
- f_E : 各種補正係数（内訳：減衰補正^{*11}係数、自己吸収補正^{*12}係数など）

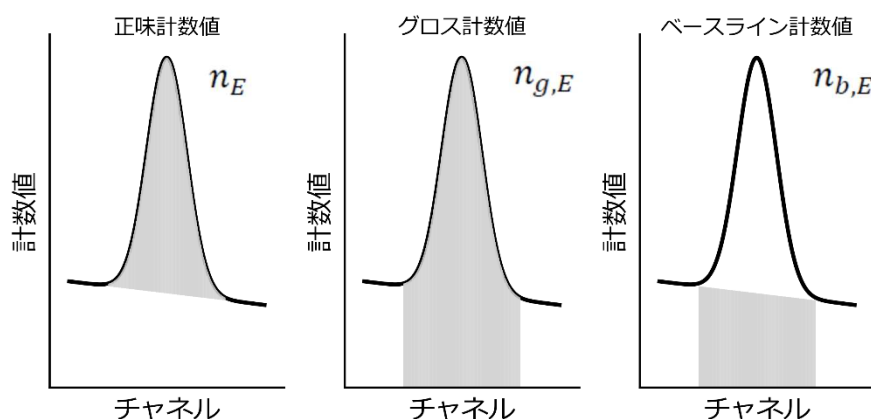


図7 ピーク面積計算の概念図

^{*11} 放射性核種が存在したとき、その放射能は時間とともに減衰する。測定して得られるデータは測定時の放射能であり、測定時点以前の値（例えば採取時点での値）を計算によって求めるのが減衰補正である。なお、スクリーニングでは検査時点での放射能値を評価できればよいため必要ない。

^{*12} 容積試料から放出される γ 線の一部は、試料に厚みがあるため試料自身と相互作用を起こし、エネルギーを失う。これを自己吸収と呼び、結果として検出される γ 線の数が増加する。この減少分を補正して放射能を求めるのが自己吸収補正である。厳密な計算には γ 線のエネルギーと、試料の材質（試料を構成する元素組成）の情報が必要となるが、実用上は代表的な材質のデータを用いればよい。

3-1 式は γ 線スペクトルから放射能を求める際の基本式であるが、実用的には、Ge 検出器で測定したスペクトルのような、単一の γ 線による独立した光電ピークが観測されるという理想的な条件でしか適用できない。NaI 検出器による実際の試料の測定スペクトルでは、複数の γ 線を放出する核種 (^{134}Cs など) または複数の核種が存在した場合、近接したエネルギーの γ 線は複合ピークを形成する。この場合、上式の P_E, ϵ_E は特定の核種の特定のエネルギーの γ 線に対する値であるため、複合ピークに対してそのまま使用することはできない。

また、複合ピーク全体の正味計数値 n_E を求めるためには、ピークを関数適合等の手法（解説 B 参照）を用いて構成成分に分解し、そのピークに含まれる複数の γ 線による寄与を個別に評価するか、または複数の γ 線による寄与の合計としてまとめて評価するか、いずれかの手法が必要となる。しかしながら、複合ピークを構成成分に分解する手法を用いるためには、十分な計数があり、統計変動が少なくピーク形状が明瞭なスペクトルが必要となるため、通常は困難である。

測定機器に付属のソフトウェアを用いて放射性核種の定量結果を得るためには、 γ 線のピーク効率 ϵ_E が必要とされる。ピーク効率については、検出効率校正 (2.1.2) を参照のこと。

測定機器のソフトウェアで妥当な分析結果を得るためには、検出効率がどのような条件に対して求められ、実際の試料の測定、解析条件に適合しているのかを確認した上で使用することが必要である。解析ソフトウェアが採用している検出効率と解析方法は各ソフトウェアに依存するので、それぞれの技術資料を参照すること。

3.3.2 積算計数値を用いる方法

スペクトル上で明確な光電ピークを判別できない場合にも対応できる簡易的な手法として、スペクトル上の特定のエネルギー領域の積算計数値（グロス計数値）を用いる方法がある。放射性セシウム ($^{137}\text{Cs} + ^{134}\text{Cs}$) を対象とした例を次に示す。この場合、試料のグロス計数値から、別途測定したバックグラウンドスペクトルのグロス積算値を差し引き、あらかじめ求めておいた機器換算係数を乗じることで放射性セシウムの濃度が得られる。機器換算係数については、検出効率校正 (2.1.2) 【測定対象の核種と γ 線を限定した場合の効率校正（例： $^{137}\text{Cs} + ^{134}\text{Cs}$ ）】を参照のこと。放射性セシウム濃度 C_A は(3-2)式により求められる。

$$C_A = \frac{n_g/t_s - n_b/t_b}{M} \cdot f_{conv} \quad (3-2)$$

ここで、

- n_g : スペクトルの放射性セシウムのエネルギー領域のグロス計数値
(エネルギー領域は、540 ～ 830 keV 付近が用いられる場合が多い)
- n_b : バックグラウンドスペクトルの、放射性セシウムのエネルギー領域のグロス計数値
- t_s : 試料の測定時間 (秒)
- t_b : バックグラウンドの測定時間 (秒)
- M : 試料の質量
- f_{conv} : 機器換算係数 (Bq/s^{-1})

3.4 測定の不確かさ

測定の不確かさ評価は GUM^{*13}による。3-1 式に示す測定のモデル式により求める単位質量当たりの放射能 C_A の不確かさ $u(C_A)$ は 3-3 式により求められる。

$$u(C_A) = \sqrt{\left(\frac{w}{t_s}\right)^2 \cdot u_{\text{count}}^2 + C_A^2 \cdot u_{\text{rel}}(w)} \quad (3-3)$$

$$u_{\text{count}}^2 = u^2(n_{g,E}) + u^2(n_{b,E})$$

$$w = \frac{1}{P_E \cdot \varepsilon_E \cdot V \cdot f_E}$$

w の相対標準不確かさ $u_{\text{rel}}(w)$ は次式で表すことができる。

$$u_{\text{rel}}(w) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(P_E) + u_{\text{rel}}^2(M) + u_{\text{rel}}^2(\varepsilon_E) + u_{\text{rel}}^2(f_E)}$$

ここで、

- u_{count} : 対象ピークの計数に係る標準不確かさ
- $n_{g,E}$: 対象ピークのグロス計数値
- $n_{b,E}$: 対象ピークのベースライン計数値
- $u_{\text{rel}}(P_E)$: γ 線放出比の相対標準不確かさ
- $u_{\text{rel}}(M)$: 試料の質量の相対標準不確かさ
- $u_{\text{rel}}(\varepsilon_E)$: エネルギー E keV の γ 線に対するピーク効率の相対標準不確かさ
- $u_{\text{rel}}(f_E)$: 補正係数（減衰補正係数、自己吸収補正係数など）の相対標準不確かさ

これらの不確かさは、Ge 検出器を用いた測定の不確かさと同様の手法により求めることができる^{*14}。ただし、NaI 検出器の場合は、試料の計数に係る不確かさ（(3-1) 式の $n_{g,E}$ 及び $n_{b,E}$ の不確かさ）が支配的であり、その他の不確かさの寄与は相対的に小さいため実用上は考慮しなくとも差し支えない。

また、後述のスクリーニング法においては、不確かさの寄与による測定値のばらつきを考慮してスクリーニングレベルを設定することで、放射能濃度が確実に基準値を下回るかどうかを判定しており、個別の核種の放射能濃度を求めることが目的ではないため、測定値の不確かさを評価することは必要とされない。

^{*13} 今井秀孝 他：測定における不確かさの表現のガイド[GUM]ハンドブック（2018）

^{*14} 原子力規制庁監視情報課：放射能測定法シリーズ No. 7 「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」（令和 2 年改訂）

第 4 章 スクリーニング法

4.1 スクリーニング法の原理

スクリーニング法とは、多数の検査対象の中から、特定の基準や条件に合致する可能性があるものを簡易的かつ効率的にふるい分け、選別するための検査方法をいう。検査の主な目的は、精密検査が必要な対象を効率よく絞り込むことにある。

放射性物質を対象としたスクリーニング法は、放射性核種濃度が、基準値を「確実に下回っている試料」と「上回っている可能性のある試料」を識別することに特化した測定法である。食品試料に対して適用する場合は、基準値を超える放射性物質を含む食品の流通を防ぎ、食の安全を確保することを目的として、基準値を上回っている可能性のある試料を選別するために行われる。多数の試料を迅速に検査する必要がある場合、二段階で検査を行うことが効率的である。検査の第一段階では、比較的成本が低く短時間で実行できる方法による測定を行い、基準値を上回る可能性がある試料を選別する。次の第二段階では、コストが高く時間を要する精密測定を、第一段階で選別された試料のみに適用することにより、検査に要するコストとリソースを削減することができる。NaI 検出器は、第一段階の測定で有効に利用できる。なお、第二段階の精密測定には Ge 検出器が用いられるのが一般的である。

スクリーニング検査の目的は、対象試料が特定の条件に適合するかどうかを判定することであり、検査の性能は、条件に適合する試料を合格とする確率と、条件に適合していない試料を不合格とする確率により評価される。両者の確率が高いほど検査の性能は高いと言える。

図 8 にスクリーニング検査の OC 曲線（特性曲線：Operating Characteristic Curve）の一例を示す。横軸は検査対象試料の放射性セシウム濃度、縦軸はその試料を測定したときの検査の合格率を示している。なお、この検査では、試料の放射能濃度が基準値を確実に下回っていると判定された場合を「合格」とする。

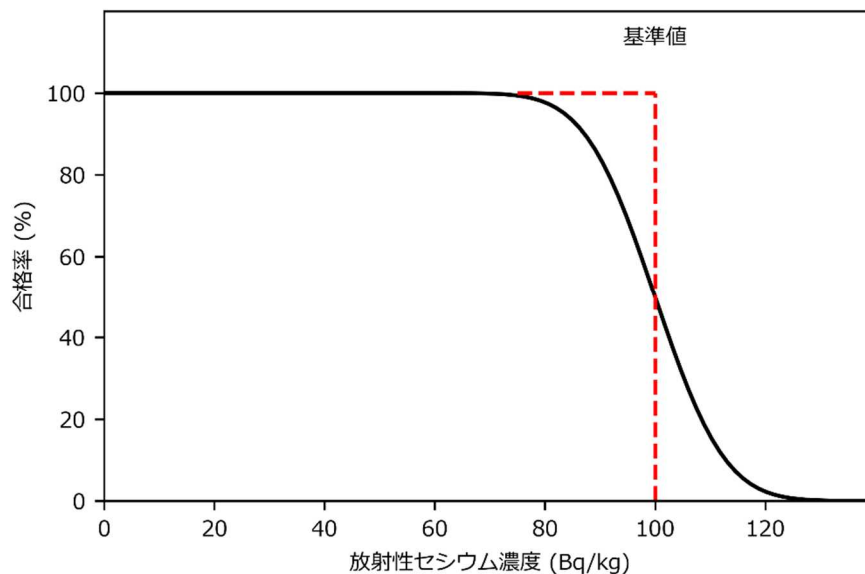


図 8 スクリーニング検査の OC 曲線の例

検査では、放射性セシウム濃度の測定値に基づいて合否が判定される。図 8 の点線で示した理想的な検査では、放射性セシウム濃度が基準値（この場合 100 Bq/kg）を少しでも下回っていれば合格となり、基準値を少しでも超過した場合は不合格となるが、実際の測定には不確かさによるばらつきが伴うため、同一試料であっても測定結果は変動し、測定値に対する合格率は図 8 の実線で示したような曲線となる。基準値付近での曲線の傾きは測定機器の性能によって変化し、測定精度が良いほど傾きは大きくなり、点線の理想的な検査に近くなる。しかしながら、図 8 の検査では、放射性セシウム濃度が 100 Bq/kg の場合でも 50 %が合格となるため、測定値が基準値を下回れば単純に合格であると判定することはできず、測定値のばらつきを考慮し、安全側に余裕を持たせて合否を判定しなければならない。

スクリーニング検査の目的は、放射性セシウム濃度が「基準値を確実に下回っている試料」と「上回っている可能性のある試料」を識別することである。この要求を満たすために、判定基準として、99 %の確率で合否判定の誤りを防ぐことのできる放射能濃度のレベルが、スクリーニングレベルとして設定される。これは、試料を測定して得られた値がそのレベル以下であった場合に、試料中の放射性セシウム濃度が基準値を上回る確率が 1 %以下となるようなレベルである。図 9 はスクリーニングレベルとして 80 Bq/kg が設定された測定器の例である。この機器で 80 Bq/kg の放射性セシウム濃度を持つ試料を測定した場合、得られる測定値は 80 Bq/kg を中心としてほぼ 60～100 Bq/kg の範囲でばらつき、測定値が基準値を下回る確率は 99 %となる。すなわち、測定値がスクリーニングレベルを下回っていれば、試料の放射能濃度が 100 Bq/kg を超える確率は 1 %よりも小さくなるため、合格と判定することができる。なお、スクリーニングレベルは機器及び測定条件によって異なり、基本的には測定器メーカーによって測定条件とともに情報提供される。

スクリーニングレベルを上回る測定結果が得られた試料に対しては、放射能濃度が基準値を超過しているかを判定するために、Ge 検出器を用いた精密測定を行うことが必要である。詳細については「食品中の放射性セシウムスクリーニング法(厚生労働省)」を参照されたい。

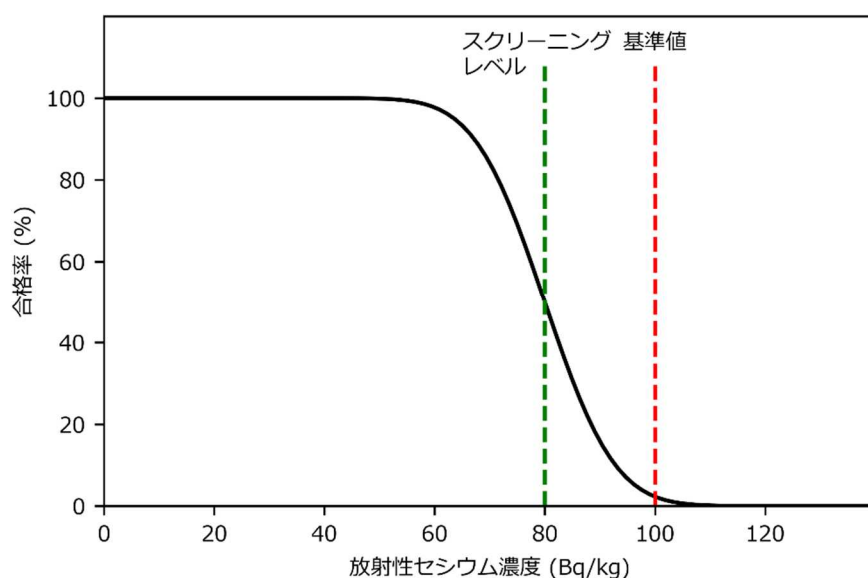


図 9 スクリーニング法に基づく検査の OC 曲線の例

4.2 スクリーニング検査の実施手順

「食品中の放射性セシウムスクリーニング法」に基づいた検査では、基準値（100 Bq/kg）の 1/4 の放射性セシウム濃度を検出できる測定装置が必要とされる。そのために、放射性セシウム濃度が 25 Bq/kg である試料を測定した場合に次式が成立する必要がある。

$$n_{s25} - n_b > 3 \sqrt{\frac{N_{s25}}{t_s^2} + \frac{N_b}{t_b^2}} \quad (4-1)$$

ここで、

- N_{s25} : 25 Bq/kg の試料の計数値
- N_b : バックグラウンドの計数値
- n_{s25} : 25 Bq/kg の試料の計数率 s^{-1}
- n_b : バックグラウンドの計数率 s^{-1}
- t_s, t_b : 試料及びバックグラウンドの計数時間 s (秒)

上記の条件を満たす測定装置を用い、次の手順で実施する。

- 1) 測定機器のエネルギー校正（2.1.1 章）を行う。
- 2) 検出効率校正（2.1.2 章）を行う。またはメーカーの提供する機器換算係数を用いる。
- 3) 2.2 章～2.4 章の手順に従って試料を測定する。
- 4) 測定機器付属のソフトウェアを用いて放射性セシウムの放射能値を算出する（3.2 章）。
- 5) 放射能値がスクリーニングレベルを下回った場合、試料の放射性セシウム濃度が確実に基準値を下回ると判定し、合格とする。
- 6) 放射能値がスクリーニングレベルを上回った場合、Ge 検出器を用いた精密測定を行い、放射性セシウム濃度を求める。

4.3 原子力発電所事故後の利用状況

2011年に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故の際は、環境中に大量の放射性物質（放射性セシウムを含む）が放出され、多くの食品が汚染された。この状況に対応して暫定規制値が設定され、それを上回る食品の流通を禁止する必要が生じた。多数の試料を迅速に測定する必要があったため、放射性セシウムを対象として NaI 検出器を用いたスクリーニング検査が多く現場で行われるようになった。その後、2012年4月に食品衛生法に基づいてより厳しい基準値^{*15}が設定された。

なお、事故直後には放射性ヨウ素等の短半減期核種が多く存在していたため、NaI 検出器を放射性セシウム（¹³⁷Cs 及び ¹³⁴Cs）のスクリーニング検査のために広く活用できる状況となったのは、事故から数か月以上が経過して短半減期核種が減衰し、環境中に残留する事故由来の放射性核種として放射性セシウムが支配的となった時期以降である。

その後、事故後の2012年10月に制定された原子力災害対策指針^{*16}において、運用上の介入レベル（OIL、Operational Intervention Level）の考え方が取り入れられた。OILは、原子力緊急事態において国民に対する特定の防護措置を発動するためのしきい値として位置づけられており、原則として空間放射線量率や環境試料中の放射性物質濃度など、測定可能な値で表される基準として定義されている。OILのレベルの一つであるOIL6は、汚染された飲食物の摂取による内部被ばくを防止することを目的に設定されており、飲食物摂取制限措置を発動するかどうかの意思決定に用いられる。その際に多くの飲食物を測定して放射性セシウムが基準値を下回っていることを迅速に確認するために、スクリーニング法を有効な手段として活用することが想定されている。

また、スクリーニング法は、事故後の放射性物質除染作業に伴って発生した土壌（除染除去土壌）や焼却処理した灰（焼却灰）の放射能レベルの判定にも利用された（8000 Bq/kgを超えた場合には指定廃棄物として取り扱われる^{*17}）。大量の試料を迅速に測定、判定する必要が生じたため、大容量の容器に入った試料を直接測定できる装置や、土壌をベルトコンベアで移送しながら放射能を測定し弁別する装置などが開発され、除染作業の現場で活用された。実際に用いられた測定装置の例を解説A（利用例の紹介）に示した。

^{*15} 厚生労働省：食品中の放射性物質に係る基準値の設定に関する Q&A について
https://www.mhlw.go.jp/shinsai_jouhou/dl/120412_2.pdf（参照 2025-09-30）

^{*16} 原子力規制委員会：原子力災害対策指針（令和6年9月改訂）

^{*17} 環境省：汚染状況調査方法ガイドライン（平成25年3月）

第 5 章 品質保証

NaI 検出器を用いた放射能分析は、原子力発電所事故の後などの原子力緊急事態において行われることが想定される。緊急時における放射能分析結果は、農作物や飲料水の摂取制限などの防護対策実施の判断に使われるものであり、データの信頼性は重要である。

客観的に信頼できるデータを得るためには、分析・測定の実施者が適切な品質保証を行うことが必要とされる。放射能分析・測定には様々な手法が含まれるが、それらの品質保証に共通する基本的な事項及び考え方については、放射能測定法シリーズ No. 38「放射能測定における品質保証」を参照されたい。本章では、NaI 検出器をスペクトロメータとして用いて試料中の放射性核種濃度を求める手法について、分析結果の品質を保証するために必要な事項について記述する。

分析結果の品質の保証を担保するために必要となる精度管理は、分析・測定者自身が実施する内部精度管理と、外部機関が実施する技能試験等に参加する外部精度管理に大別される。

5.1 内部精度管理

5.1.1 トレーサビリティの確保

検出効率校正 (2.1.2) を行う際には、国家標準へのトレーサビリティが確保された標準線源を使用すること。校正は適切な頻度 (1 年に 1 回以上) 実施すべきであり、校正の有効期限を設けて管理する必要がある。有効期限内において、分析結果に影響を及ぼす変化が機器に生じていないことを日常点検 (5.1.2) で確認する。

5.1.2 日常点検

測定装置が健全であることを確認するための点検項目を定め、各点検項目における許容基準を設けておく必要がある。以下の項目は 1 日 1 回以上行うことが望ましい。

- ・ 設置環境

適切な空調管理 (温度、湿度) ができる場所に測定機器を設置し、その環境が維持されていることを確認する。

- ・ エネルギー校正

適当な γ 線放出核種 (^{137}Cs 等) を含む線源を測定し、スペクトル上のピーク位置を確認する。

- ・ 検出効率の確認

試験用標準線源または装置に付属の点検用試料を測定し、計数値があらかじめ決められた範囲にあることを確認する (これにより、機器の異常を早期発見することができる)。

- ・ バックグラウンドの確認

測定装置に試料をセットしない状態でバックグラウンドスペクトルを測定し、計数値が通常より著しく高い、あるいは低いなどの異常がないこと、スペクトルに通常は見られないピークがないことを確認する。計数値が極端に低い場合には測定装置自体が正常に動作していない可能性がある。

バックグラウンドの計数率が著しく高い、あるいはこれまでに観測されなかったピークが認められるなどの場合は、装置の検出器部分が汚染されている可能性があるため、検出部の除染を行う。除染作業後にはバックグラウンドを再度測定し、日常と変化がないことを確認する。

なお、機器を長期間使用しない場合は、機器が劣化しないような措置（梱包等）を講じた上で適切な環境に保管すること。また、使用可能な状態を維持するために、あらかじめ定めた期間内（例：年 1 回）に機器を稼働させて点検を行うことが望ましい。

5.2 外部精度管理

5.2.1 技能試験

外部機関（ISO/IEC 17043 認定を取得している機関が望ましい）が提供する技能試験に参加し、試験品の分析結果を添加値（付与値）と比較することにより、試験所としての技能レベルを客観的に示すことができる。ISO/IEC 17043 に基づいた技能試験の場合には、参加試験所のパフォーマンス評価方法として、 z スコアや En 値等がある。

解 説

解説 A 利用例の紹介

原子力発電所事故後には、NaI (Tl) 検出器を装備した様々な測定装置が多く現場で食品や農水産物試料の測定に用いられた。実際に使用された測定装置の例を以下に示す（なお、特定の測定装置の使用を推奨するものではない）。

表 A.1 主として食品試料、農水産物試料を対象とした測定装置

			
検出器	2×2 インチ NaI (Tl) 検出器	3×3 インチ NaI (Tl) 検出器	3×3 インチ NaI (Tl) 検出器
遮蔽厚	鉛 38 mm	鉛 50 mm	鉛 50 mm
測定容器	V-11 容器（容量 900 mL）	1 L マリネリ容器	V-5 容器（容量 630 mL） または 1L マリネリ容器
Cs-137+134 検出下限値	30 Bq/kg（10 分測定）	10 Bq/kg 以下（17 分測定）	10 Bq/kg 以下 （1L マリネリ容器、10 分測定）

- ・測定容器に試料を充填し、鉛遮蔽体内に設置した NaI (Tl) 検出器で測定する。
- ・「食品中の放射性セシウムスクリーニング法」に対応。

表 A.2 複数試料に対応した連続自動測定装置

	
検出器	5×5 インチ 井戸型 NaI (Tl) 検出器
遮蔽厚	鉛 50 mm
測定容器	CA-20 容器（容量 200 mL）
Cs-137+134 検出下限値	25 Bq/kg（900 秒測定）
特徴	サンプルチェンジャーにより、最大 50 試料の連続測定が可能

- ・「食品中の放射性セシウムスクリーニング法」に対応。

表 A.3 特定の用途に特化した測定装置（対象：食品、農産物、水産物）

	食品放射能検査システム	農産物放射能測定システム (米の全袋検査用)	あんぽ柿用 放射能測定装置
			
検出器	2×2 インチ NaI (Tl) 検出器×2	3×3 インチ NaI (Tl) 検出器	2×2 インチ NaI (Tl) 検出器 ×32
遮蔽厚	－	－	鉄 100 mm
Cs-137+134 検出下限値	50 Bq/kg (30kg 米袋、15 秒測定)	25 Bq/kg (30kg 米袋、10 秒測定)	25 Bq/kg (80 秒測定)
特徴	米袋、段ボールに入った試料を 非破壊でそのまま測定可能	試料をパッケージのまま迅速 に測定可能	あんぽ柿に特化した装置。出 荷前の製品パッケージをその まま測定可能

- ・「食品中の放射性セシウムスクリーニング法」に対応。
- ・食品等を出荷前の製品の状態のままで測定し、基準値を超えているかを迅速に判定する目的で用いられる。

表 A.4 特定の用途に特化した測定装置（対象：土壌、廃棄物）

	大容量容器対応スクリーニングシステム	土壌測定・分別システム
		
検出器	NaI (Tl) 検出器×2	CsI シンチレータ+MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)
遮蔽厚	—	—
Cs-137+134 検出下限値	2000 Bq/kg 以下	
特徴	・ 大容量の容器に入った試料をそのままの状態で測定でき、放射性セシウム濃度が 8000 Bq/kg を上回るかどうかを 60 秒以内に判定可能	・ 大量の除去土壌等を所定の濃度 (8000 Bq/kg など) で分別する装置であり、中間貯蔵施設で用いられた。 ・ 土壌濃度分別システムの中に放射能測定装置が組み込まれており、ベルトコンベアで土壌を連続的に移送しながら測定を行い、所定の濃度を基準として低濃度、高濃度に分別できる。

- ・ 大量の土壌等を測定し、基準値を超えているかを迅速に判定するために用いられる。
- ・ 汚染状況調査方法ガイドライン（環境省）（平成 25 年 3 月）に対応。

解説 B その他の解析手法

NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータでは、エネルギー分解能の制約から、一般的に核種の弁別を行うことは困難である。しかしながら、原子力発電所事故から数か月程度以上経過して短半減期核種が減衰し、残留する核種として放射性セシウムが支配的になったような状況下では、十分な計数がありピーク形状が明瞭なスペクトルが得られる等の条件を満たせば核種弁別が可能な場合がある。本解説では、核種の弁別定量に利用できる手法を紹介する。なお、これらの手法の適用にあたっては十分な経験が必要であり、妥当性を検証した上で採用することが必要である。

・ 寄与係数法

複数の核種のピークが重なって生じた複合ピークの面積から、特定の核種の寄与分のピーク面積を差し引く手法であり、複合ピーク内の核種に、他の核種のピークと重ならない別のピークが存在する場合に適用できる。

図 B. 1 は ^{134}Cs と ^{137}Cs を含む試料から得られたスペクトルである。600～660 keV 付近に見られるピーク I は ^{134}Cs (605 keV) と ^{137}Cs (662 keV) の複合ピークであり、ピーク II は ^{134}Cs (796 keV) によるピークである（説明を簡略化するため、 ^{134}Cs の放出比の小さい γ 線は省略した）。ピーク II は ^{134}Cs の単独ピークなので、これを用いてピーク I の中に含まれる ^{134}Cs のピーク面積の寄与分を計算しピーク I の面積から差し引くことにより、 ^{137}Cs のピーク面積を求め、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能を個別に求めることができる。計算方法を以下に示す。

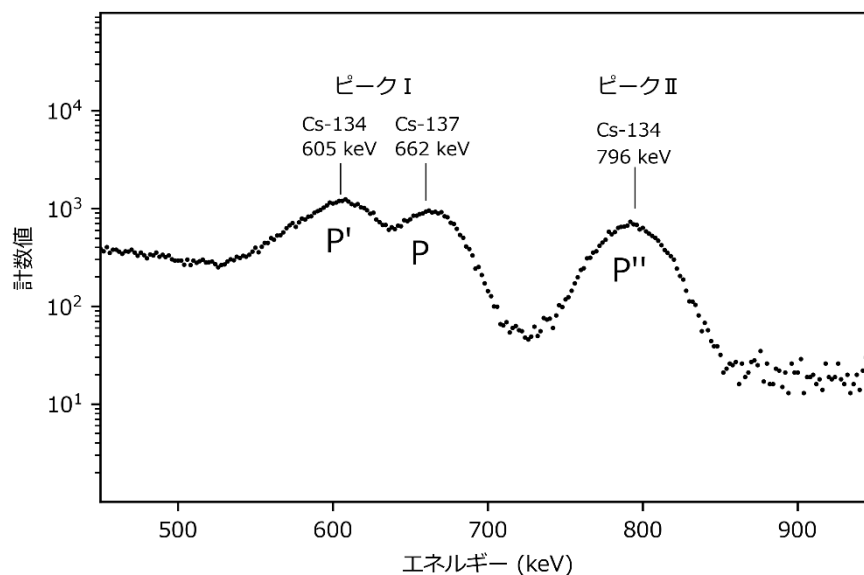


図 B. 1 寄与係数法の適用例

複合ピーク I の中に含まれる ^{137}Cs のピークを P、 ^{134}Cs のピークを P' とし、ピーク II (^{134}Cs , 796 keV) を P'' とすると、複合ピーク I の中に占める ^{137}Cs のピーク面積 $N_{\text{net}}(P)$ 及び標準偏差 σ_N (計数に係る不確かさ) は次式で表される。

$$N_{net}(P) = N_{net}(P + P') - v N_{net}(P'') \quad (B-1)$$

$$\sigma_N = \sqrt{\{\sigma_N(P + P')\}^2 + v^2 \cdot \{\sigma_N(P'')\}^2}$$

v は、 ^{134}Cs の 796 keV のピーク面積から同核種の 605 keV のピーク面積を求める寄与係数であり、 γ 線放出率とピーク効率から次式で求められる。

$$v = \frac{I'}{I''} \cdot \frac{\epsilon'}{\epsilon''}$$

ここで、

$N_{net}(P)$: 複合ピーク I の中に含まれている ^{137}Cs (662 keV) の正味ピーク面積

$N_{net}(P + P')$: 複合ピーク I の正味ピーク面積

$N_{net}(P'')$: ピーク II (^{134}Cs 796 keV) の正味ピーク面積

v : 寄与係数

I' : ^{134}Cs (605 keV) の γ 線放出率

I'' : ^{134}Cs (796 keV) の γ 線放出率

ϵ' : ^{134}Cs (605 keV) のピーク効率

ϵ'' : ^{134}Cs (796 keV) のピーク効率

$N_{net}(P)$ 、 $N_{net}(P'')$ をそれぞれ放射能値に換算することで、 ^{137}Cs と ^{134}Cs の放射能値を個別に求めることができる。

・複合ピーク解析（関数適合）

複数の核種が存在した場合、NaI 検出器で得られるスペクトルには、異なる核種による近接したエネルギーの γ 線ピークが重なり合った複合ピークが観測される。複合ピークを構成する各ピークの面積を別個に求めることができれば、複数核種を弁別して定量することが可能となる。図 B.2 に、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の複合ピークに関数適合を適用し個々の面積を求めた例を示す。

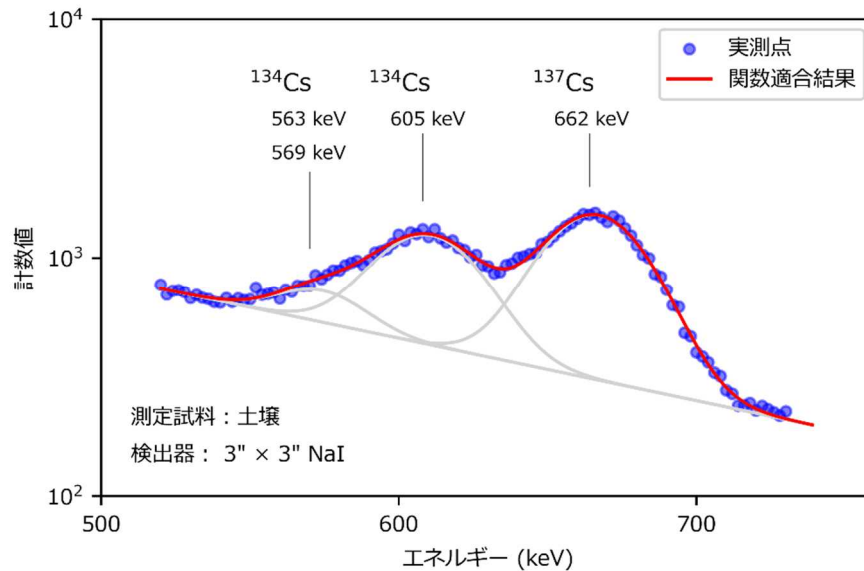


図 B.2 関数適合による複合ピーク解析の例

複合ピークにおける各チャンネルの計数値 $F(x)$ は複数のガウス関数の和として表すことができる。なお、 ^{134}Cs の γ 線のうち、563 keV と 569 keV のピークはエネルギーが近接しているため 1 本のピークとして扱い、ピーク数 $n=3$ とした(図 B.2 のスペクトルの横軸はチャンネルであるが、便宜上エネルギーとして表示した)。

$$F(x) = \sum_{i=1}^n [A_i \exp\{-B_i^2(x - x_i)^2\}] + g(x) \quad (\text{B-2})$$

$$B_i^2 = \frac{2.7726}{W_i^2}$$

ここで、

$F(x)$: チャンネル x における計数値

x : チャンネル

x_i : i 番目のピークの中心チャンネル

A_i : i 番目のピークの高さ

W_i : i 番目のピークの半値幅

$g(x)$: ベースライン関数（本例では指数関数を使用）

非線形最小二乗法により適合計算を行ってパラメータを求め、得られたパラメータから、個々のピーク面積 S_i ($i=1, 2, 3$) は次式で与えられる。

$$S_i = \frac{A_i}{B_i} \sqrt{\pi} \quad (\text{B-3})$$

図 B. 2 の例では、スペクトルのベースラインを表す関数の上に 3 つのガウス関数が載った関数を用いて適合を行った。これにより、複合ピークを 3 つの成分 ^{134}Cs (563 keV, 569 keV)、 ^{134}Cs (605 keV)、 ^{137}Cs (662 keV) に分離してそれぞれのピーク面積を個別に求め、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能値を別個に求めることが可能となる (図 B. 2 のデータ点は実測の計数値を、赤線は関数適合の結果を、灰色の実線は複合ピークを構成する個々の成分の関数適合結果を示す)。この手法は複合ピークを含む複雑なスペクトルの解析に有効であるが、NaI 検出器で得られたスペクトルに適用する際には以下のことに留意する必要がある。

本例では、特定の核種の存在を仮定して解析を行っている。測定試料の中に ^{134}Cs と ^{137}Cs のみが存在するという前提条件のもとで評価しているため、解析対象としているエネルギー範囲 (550 keV~750 keV 程度) のエネルギーの γ 線を放出する他核種が存在する可能性がある場合には、本手法を適用することはできない。

関数適合の結果が適切な値に収束するためには、ピークの統計変動が小さく、形状が明瞭である必要があり、そのためにスペクトルには十分な計数値が必要とされる。ピークとピークの間に凹がない場合は、ピーク中心を固定パラメータとして扱って適合計算を行うことが有効である (本例では、 ^{134}Cs の 563 keV, 569 keV のピーク中心位置を固定パラメータとした)。また、計数値が小さく統計変動が大きいスペクトルに適用するには、ピーク中心と半値幅を固定パラメータとして適合計算を行うことが有効な場合がある。

なお、核種別の放射能値を確実に求める必要がある場合には、高分解能の Ge 検出器を使用することが推奨される。

・アンフォールディング法^{*18,*19}

NaI(Tl)シンチレーション検出器に単一エネルギーの光子が入射した場合であっても、光電効果、コンプトン散乱等の相互作用及び検出器固有のエネルギー分解能の影響により、測定によって出力される波高分布（測定スペクトル）は光電ピーク、コンプトン連続成分、後方散乱などを含む複雑な形状を示す。このため、測定スペクトルには入射光子のエネルギー分布が直接的に反映されているわけではない。このような測定スペクトル $P(h)$ は、線源のスペクトル $N(E)$ と検出器の応答関数 $K(E, h)$ との畳込みとして次式で表される。

$$P(h) = \int K(E, h)N(E)dE \quad (B-4)$$

ここで、応答関数 $K(E, h)$ とは、入射エネルギー E の光子が検出器内でエネルギー付与し、電気信号化され、どの出力チャンネル h に記録されるかを示す確率分布であり、エネルギー分解能の影響を含み、検出器及び周辺の構造、材質さらに線源の配置に固有である。応答関数は、既知の単色 γ 線源を用いて実験的に求める方法のほか、モンテカルロシミュレーションにより計算的に求める方法が用いられる。

アンフォールディング (unfolding) 法は、上式に基づき、既知の応答関数と測定スペクトルから、未知である線源スペクトル $N(E)$ を推定・再構成する手法であり、空間放射線量率の評価を目的として以前から利用されてきた。測定データには電気信号のゆらぎによるぼけ（広がり）の効果が重畳していることを考慮し、応答関数を用いて逆に解くことで、線源本来のエネルギー分布を復元するものである（図 B.3 参照）。

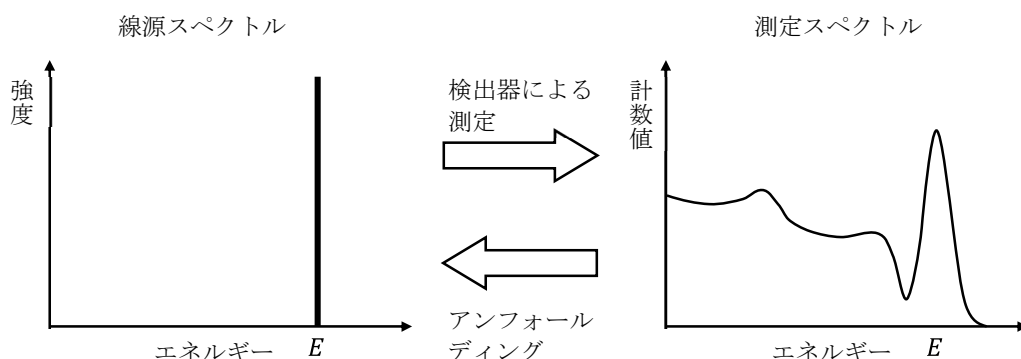


図 B.3 アンフォールディングの原理

これによりエネルギー分解能の改善と、光電ピークだけでなくコンプトン連続成分などを含む全ての信号が線源スペクトルに復元されるため、検出効率の向上が期待できる。アンフォールディング法によって復元されたスペクトルのエネルギー分解能は応答関数の bin 幅に依存するが、放射性セシウムのスクリーニングを目的とした場合、従来の応答関数では bin 幅が広く ^{134}Cs (605 keV) 及び ^{137}Cs (662 keV) のピークを十分に表現できなかった。しかし、モンテカルロシミュレーションを用いて高精度化した応答関数を求め、bin 幅をより細かく

^{*18} 原子力規制庁監視情報課：放射能測定法シリーズ No. 13「連続モニタによる環境 γ 線測定法」（平成 29 年改訂）

^{*19} 原子力規制庁監視情報課：放射能測定法シリーズ No. 12「空間 γ 線スペクトル測定法」（平成 2 年改訂）

設定して解析を実施することで、ピーク識別性の改善を図り、 ^{134}Cs と ^{137}Cs のピークを分離し、それぞれを定量した例も報告されている^{*20}。高精度化された応答関数の例を図 B. 4 に示す。実際のアンフォールディングでは、逆問題の性質上、直接的な行列逆演算はノイズ増幅や数値不安定性を生じやすいため、逐次近似法やストリッピング法により安定的な推定結果を求めることが多い。

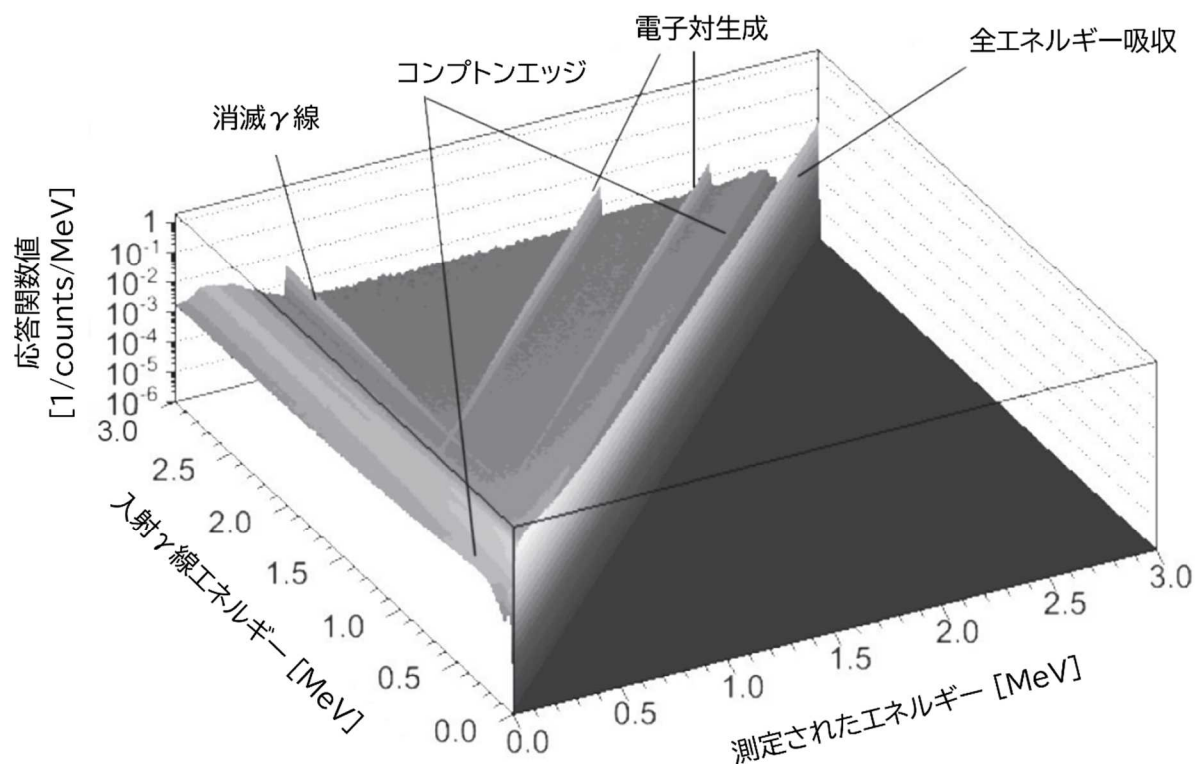


図 B. 4 高精度化された応答関数の例

^{*20} H. Nishizawa, M. Hayashi, T. Azuma, Y. Watanabe and T. Kin: Radioactivity Measurement System Using a Sodium Iodide Scintillator Applying an Unfolding Processing Method, Jpn. J. of Health Phys. 49(1) 45-47 (2014)

解説 C NaI(Tl)以外のシンチレーション検出器（参考）

NaI(Tl)以外にも、 γ 線測定用に使用できるシンチレータが複数存在する。市販で入手可能なシンチレータと特徴の例を表 C.1 に示す。

シンチレータはその特性により、高エネルギー物理、放射線医療機器、環境放射線モニタリングなどの様々な分野で利用されている。近年、比較的長い発光波長を持つシンチレータ（CsI など）と Si フォトダイオード検出器を組み合わせた、低電圧で動作し温度依存性の小さい測定装置が普及してきており、本書の対象である試料中放射能濃度を測定するためのスペクトロメータの検出器として採用されている例もある。

表 C.1 各種シンチレータの比較*²¹

シンチレータ	発光波長 (nm)	発光減衰時間 (μ s)	密度 (g / cm ³)	発光量 (NaI(Tl)を 1.0 とした相対値)	潮解性	エネルギー分解能 ※半値幅 (%) (Cs-137, 662keV)
NaI(Tl)	415	0.23	3.67	1.0	有り	～ 9
CsI(Tl)	550	0.6 / 3.4	4.51	0.45	僅かに有り	～ 8
LaBr ₃ (Ce)	380	0.035	4.90	1.4	有り	～ 3
CeBr ₃	370	0.018	5.23	1.3	有り	～ 4
SrI ₂ (Eu)	450	1 ～ 5	4.6	1.2 ～ 1.4	有り	～ 4
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	480	0.3	7.13	0.15 ～ 0.2	無し	～ 10
Gd ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ (Ce) (GAGG)	520	0.1	6.7	0.35 ～ 0.4	無し	～ 5

NaI(Tl) : 発光量 (Light yield) は 43000 photon/MeV

CsI(Tl) : 発光波長が長いため、受光素子として光電子増倍管ではなく Si フォトダイオードが使われることが多い。

LaBr₃(Ce) : エネルギー分解能が優れており、発光の減衰時間が短いため高計数率測定に適している。¹³⁸La を含むため自己放射能が比較的高い。

CeBr₃ : LaBr₃ とほぼ同じ性能であるが、自己放射能の影響はない。

SrI₂(Eu) : エネルギー分解能が優れているが、発光の減衰時間が長いため高計数率測定には適していない。

BGO : 高密度の物質であり、有効原子番号が大きいため γ 線に対して高い検出効率を持つ。潮解性がないため特別な密封が不要。

GAGG(Ce) : エネルギー分解能が優れており、発光の減衰時間が短いため高計数率測定に適している。高密度の物質であり、有効原子番号が大きいため γ 線に対して高い検出効率を持つ。

*²¹ <https://scionix.nl/wp-content/uploads/2022/09/Physical-prop-scints.pdf> (参照 2026-01-23)

参考文献

- 1) 厚生労働省医薬食品局食品安全部監視安全課：食品中の放射性セシウムスクリーニング法（平成 24 年 3 月改正）
- 2) 原子力規制庁監視情報課：放射能測定法シリーズ No. 7「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」（令和 2 年改訂）
- 3) 今井秀孝 他：測定における不確かさの表現のガイド[GUM]ハンドブック(2018)
- 4) ISO 19581:2017, Measurement of radioactivity - Gamma emitting radionuclides
Rapid screening method using scintillation detector gamma-ray spectrometry.
ISO 19581:2017 (2017)
- 5) JIS Z 4321:1995 「放射線測定用タリウム活性化よう化ナトリウムシンチレータ」
- 6) 公益社団法人日本アイソトープ協会：NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによる γ 線スペクトロメトリーガイダンス（2015 年 3 月）
- 7) 原子力規制庁監視情報課：放射能測定法シリーズ 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」（平成 31 年改訂）
- 8) 原子力規制庁監視情報課：放射能測定法シリーズ No. 38「放射能測定における品質保証」（令和 8 年制定）
- 9) 環境省：汚染状況調査方法ガイドライン（平成 25 年 3 月）
- 10) 原子力規制庁監視情報課：放射能測定法シリーズ No. 13「連続モニタによる環境 γ 線測定法」（平成 29 年改訂）
- 11) 原子力規制庁監視情報課：放射能測定法シリーズ No. 12「空間 γ 線スペクトル測定法」（平成 2 年改訂）
- 12) H. Nishizawa, M. Hayashi, T. Azuma, Y. Watanabe and T. Kin: Radioactivity Measurement System Using a Sodium Iodide Scintillator Applying an Unfolding Processing Method, Jpn. J. of Health Phys. 49(1) 45-47 (2014)

本書の作成経過、委員会名簿及び会議開催経過

1. 本書の作成経過

本書は、令和6年度原子力施設等防災対策等委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業及び令和7年度原子力施設等防災対策等委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業において、公益財団法人日本分析センターに委託した成果を基に、原子力規制委員会が設置した環境放射線モニタリング技術検討チームにおける議論を経て作成したものである。

2. 令和6年度原子力施設等防災対策等委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業及び令和7年度原子力施設等防災対策等委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業内に設置した「放射能測定法シリーズ改訂検討委員会」の委員名簿と委員会開催日

令和6年度

委員長	中村尚司	国立大学法人東北大学 名誉教授
委員	大野 剛	学習院大学 理学部化学科 教授
	桑原雄宇	茨城県環境放射線監視センター 主任研究員
	城野克広	国立研究開発法人産業技術総合研究所 工学計測標準研究部門 データサイエンス研究グループ 研究グループ長
	神 俊雄	青森県原子力センター 分析課長
	永岡美佳	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 福島廃炉安全工学研究所 安全管理部 安全管理課 課長
	松原昌平	公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問
(敬称略・五十音順)		
事務局	公益財団法人日本分析センター	

第1回 令和6年8月9日

第2回 令和6年10月31日

第3回 令和6年12月9日

第4回 令和7年2月27日

令和7年度

委員長	中村尚司	国立大学法人東北大学 名誉教授
委員	桑原雄宇	茨城県環境放射線監視センター 主任研究員
	城野克広	国立研究開発法人産業技術総合研究所 工学計測標準研究部門 データサイエンス研究グループ 研究グループ長
	神 俊雄	青森県原子力センター 統括研究管理員
	田副博文	国立大学法人弘前大学 被ばく医療総合研究所 教授
	永岡美佳	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 福島廃炉安全工学研究所 安全管理部 安全管理課 課長

松原昌平 公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問

(敬称略・五十音順)

事務局 公益財団法人日本分析センター

第1回 令和7年8月7日

第2回 令和7年11月10日

第3回 令和8年1月8日

3. 原子力規制委員会 環境放射線モニタリング技術検討チーム構成メンバーと会合開催日

令和6年度

原子力規制委員会

伴 信彦 委員

外部専門家

工藤俊明 青森県原子力センター 所長

黒澤忠弘 国立研究開発法人産業技術総合研究所

計量標準総合センター 分析計測標準研究部門 副研究部門長

佐藤玖莉 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課

高田兵衛 福島大学 環境放射能研究所 准教授

武石 稔 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力安全・防災研究所 原子力緊急時支援・研修センター 専門研修グループ
テクニカルアドバイザー

西沢博志 福井工業大学 工学部原子力技術応用工学科 教授

蜂須賀暁子 国立医薬品食品衛生研究所 有機化学部 主任研究官

濱松潮香 公益財団法人東京都農林水産振興財団
東京都農林総合研究センター 所長

山田崇裕 近畿大学 原子力研究所 教授

(敬称略・五十音順)

原子力規制庁

児嶋洋平 核物質・放射線総括審議官

監視情報課

川口悦生 課長

佐々木潤 企画官

監視情報課放射線環境対策室

久保善哉 室長

放射線防護企画課

黒川陽一郎 課長

放射線・廃棄物研究部門

高橋知之 統括技術研究調査官

酒井宏隆 上席技術研究調査官

柚木 彰 主任技術研究調査官

第 21 回会合 令和 6 年 9 月 9 日開催

第 22 回会合 令和 7 年 1 月 28 日開催

令和 7 年度

原子力規制委員会

神田玲子 委員

外部専門家

工藤俊明 青森県原子力センター 所長

黒澤忠弘 国立研究開発法人産業技術総合研究所

計量標準総合センター 分析計測標準研究部門 副研究部門長

佐藤玖莉 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課

高田兵衛 福島大学 環境放射能研究所 教授

武石 稔 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力安全・防災研
究所 原子力緊急時支援・研修センター 専門研修グループ
テクニカルアドバイザー

西沢博志 福井工業大学 工学部原子力技術応用工学科 教授

蜂須賀暁子 国立医薬品食品衛生研究所 有機化学部 主任研究官

濱松潮香 公益財団法人東京都農林水産振興財団
東京都農林総合研究センター 所長

山田崇裕 近畿大学 原子力研究所 教授

(敬称略・五十音順)

原子力規制庁

古金谷敏之 核物質・放射線総括審議官

監視情報課

川口悦生 課長

環境放射線モニタリング総合推進室

佐々木潤 室長

斎藤美紀子 室長補佐

河野恭彦 モニタリング企画専門官

放射線防護企画課

黒川陽一郎 課長

技術基盤グループ

酒井宏隆 安全技術管理官（放射線・廃棄物担当）

高橋知之 統括技術研究調査官（放射線防護担当）

森泉 純 放射線・廃棄物研究部門 主任技術研究調査官

柚木 彰 放射線・廃棄物研究部門 主任技術研究調査官

公益財団法人 日本分析センター

中村尚司 放射能測定法シリーズ改訂検討委員会 委員長

一般社団法人 日本電気計測器工業会（JEMIMA）

亀田周二 製品別部会 放射線計測委員会（第23回のみ）

第23回会合 令和7年10月9日開催

第24回会合 令和8年2月10日開催

改訂履歴

昭和49年1月 制定

令和8年6月 改訂