

JAB NOTE 9

^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放射能濃度測定に係る 不確かさの評価ガイドライン

第 1 版：2014 年 5 月 1 日

公益財団法人 日本適合性認定協会

目次

序文	3
1. 適用範囲.....	3
2. 不確かさの評価プロセス.....	3
3. 測定モデル式.....	4
4. 個別の要因の標準不確かさの評価	6
4.1 ピーク計数効率校正の不確かさ(u_p).....	6
4.2 試料放射能測定の不確かさ	7
5. 不確かさの合成と報告	9
表1 ガンマ線スペクトロメトリーにおける測定の不確かさ評価結果例（マリネリ容器）	10
表2 ガンマ線スペクトロメトリーにおける測定の不確かさ評価結果例（U8 容器）	12

^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放射能濃度測定に係る不確かさの評価ガイドライン

序文

種々の量の測定における測定の不確かさは、その測定結果のばらつきの程度を示す重要な指標として理解されている。測定の不確かさは、試験結果とともに報告することにより、試験所の顧客に対して試験結果の信頼性を示すことだけでなく、不確かさのそれぞれの要因を評価することにより、測定のばらつきを低減するためのインプット信号を与えることに繋がる。

2011年3月11日の東日本大震災に起因する福島第一原発事故によって放出された放射性物質による放射能汚染においても、食品、環境を中心として多くの放射能分析が行われており、その分析の信頼性は社会生活において重要な問題となっている。

本文書は、放射能分析における測定の信頼性向上を目的として、ゲルマニウム半導体検出器を用いるガンマ線スペクトロメトリーによって ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放射能濃度測定を実施する場合の測定の不確かさを評価し報告するためのガイドラインを定めるものである。

1. 適用範囲

本文書は、ゲルマニウム半導体検出器を用いるガンマ線スペクトロメトリーによる ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放射能濃度測定の不確かさ評価に適用する。

2. 不確かさの評価プロセス

測定の不確かさを評価・報告するための一般的は方法及び手順は、“**Guide to the Expression of Uncertainty in Metrology (GUM)**”として計量におけるガイドのための合同委員会(JCGM)及び国際標準化機構(ISO)から発行されている。その中で、測定の不確かさを求める際に測定のモデル化を行うことが推奨されている。測定のモデル化を行うことにより、測定の不確かさの要因がどのように測定結果に影響を与えるかを知ることができる。不確かさ評価プロセスの第1番目のステップは、測定のモデル化を行いモデル式を立てることである。

第二番目のステップはそのような測定のモデル式から影響する不確かさ要因について洗い出し、不確かさのモデル式にまとめることである。ただし、補正因子とはならない測定(環境)条件などが測定結果に影響する場合には、それらについても不確かさ要因に加えなければならないので、特性要因図を用いてそれらを体系的に整理することが推奨される。

第三番目のステップは、洗い出されたそれぞれの不確かさ要因を評価するための方法を模索し、実行することである。そのためには実験等により求めるもの(タイプ A)

と文献等を元に求めるもの(タイプ B)に不確かさのタイプを分け、実験で求めるものについて合理的に求めるための実験計画を立て評価を進めることになる。一般にタイプ A 不確かさの評価を行うためには分散分析法の利用が有効であり、求めたい不確かさ要因を評価するのに適切な実験計画を立て、繰り返し性やその他のばらつきの要因を評価することが行われるが、放射能測定の場合、検出限界を下げるためには測定時間が長くなるなどの理由で、繰り返しが十分に行えない場合がある。このような場合、繰り返し成分に相当する評価については計数から求める方法がある。これについては、4 項で解説する。

第四番目のステップは、評価したそれぞれの不確かさを合成し、最後に拡張不確かさで報告することである。これについては 5 項で紹介する。

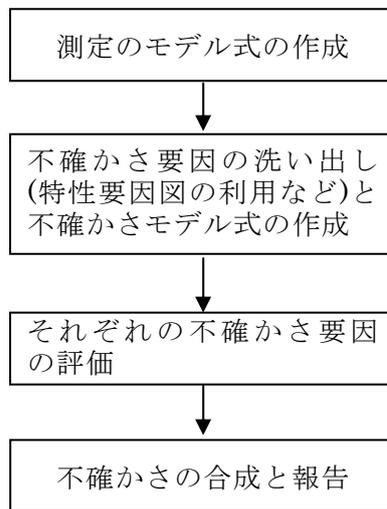


図 1 不確かさ評価のステップ

3. 測定のモデル式

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による放射能濃度 (C) は次の測定のモデル式で表せる。

$$C(Bq/kg) = \frac{R}{W \times \epsilon \times p} \dots\dots\dots (1)式$$

- R: 線正味ピーク計数率(cps) 注 1
- W: 試料質量(kg)
- ε: 線ピーク計数効率
- p: 線光子放出割合

注 1 : SI 単位では (s⁻¹) と表記する。

ここで、

$$\epsilon = \frac{R}{A \times p}$$

: 線ピーク 計数効率

A: 校正用標準体積線源の放射能[Bq]

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の不確かさの要因は、図 2 に示すとおり多様である。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による放射能測定においては比較法と効率曲線法があるが、実際の測定には後者が多く用いられており、図 2 は効率曲線法を想定した不確かさ要因例となっている(効率校正の不確かさにフィッティングの不確かさを含めている)。

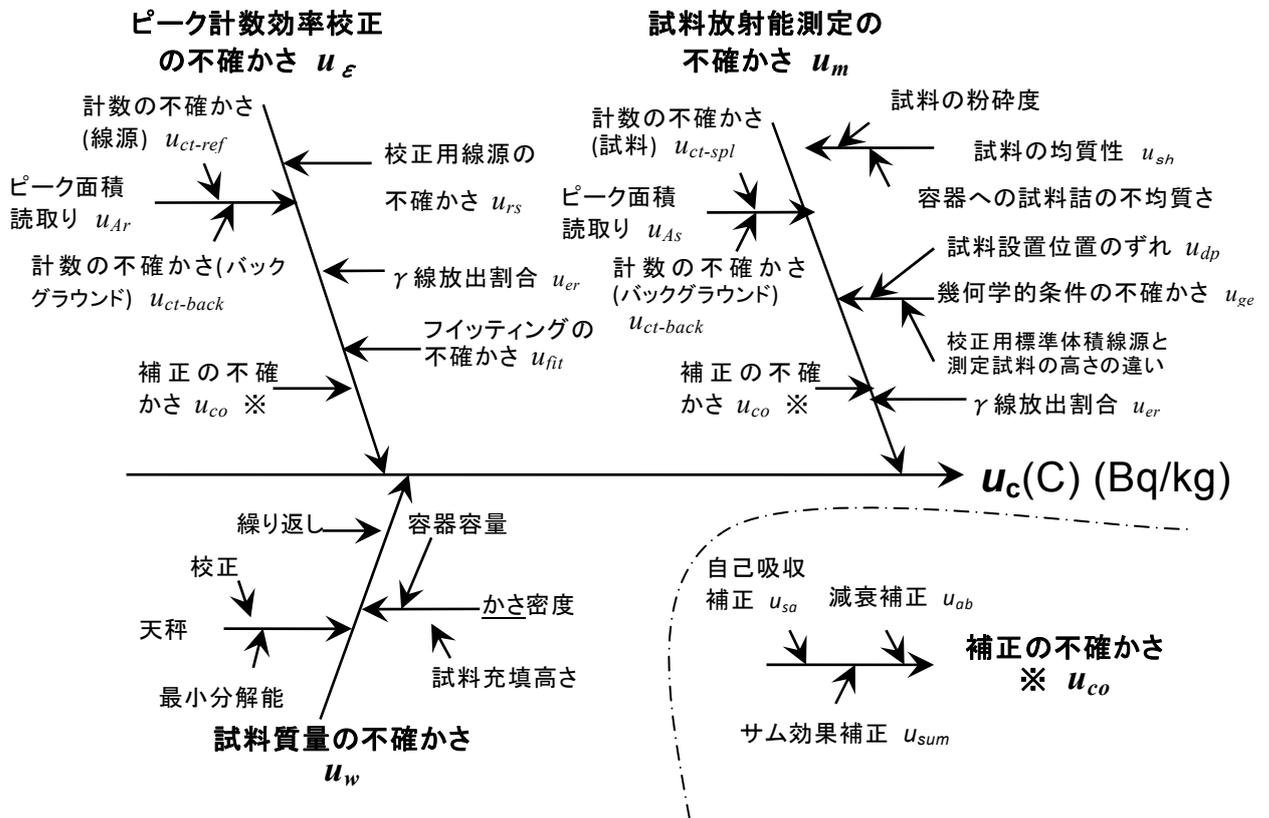


図 2 ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリーの不確かさ要因図

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の不確かさ要因には、大別してピーク計数効率校正の不確かさ (u_ϵ)、試料放射能測定の不確かさ (u_m) 及び試料質量測定の不確かさ (u_w)がある。

ピーク計数効率校正の不確かさ(u)には、校正用線源放射能の不確かさ(u_{RS})、ピーク面積の読み取り不確かさ(u_{Ar})、線光子放出比の不確かさ(u_p)及びフィッティングの不確かさ(u_{fit})が含まれる。

試料放射能測定の不確かさには、ピーク面積の読み取りの不確かさ(u_{As})に加え、試料の均質性不確かさ(u_{sh})、校正時と試料を詰める高さの違いなどのジオメトリー(幾何学的条件)の不確かさ(u_{ge})及び試料質量測定の不確かさ(u_w)が含まれる。

この他にも線自己吸収補正の不確かさ(u_{Ca})、基準日に換算するための減衰補正の不確かさ(u_{CD})、測定中の減衰補正の不確かさ(u_{Dm})及び線のサム効果(加算同時計数)補正の不確かさ(u_{CCs})は、ピーク計数効率校正及び試料放射能測定の双方に影響する。

上記より、放射能濃度(C)の合成不確かさ(u_c)は次式で表される。

$$u_c^2(C) = u_{RS}^2(C) + u_{Ar}^2(C) + u_p^2(C) + u_{fit}^2(C) + u_{As}^2(C) + u_{ge}^2(C) + u_w^2(C) + u_{sh}^2(C) + u_{Ca}^2(C) + u_{CDc}^2(C) + u_{Dm}^2(C) + u_{CCs}^2(C)$$

...(2)式

4. 個別の要因の標準不確かさの評価

4.1 ピーク計数効率校正の不確かさ(u)

ピーク計数効率校正の不確かさ(u)は、校正用標準体積線源放射能の不確かさ(u_{RS})、校正時のピーク面積読み取りの不確かさ(u_{Ar})及びフィッティングの不確かさで構成される。

4.1.1 校正用標準体積線源放射能の不確かさ(u_{RS}): 校正用標準体積線源放射能の不確かさは、標準体積線源に対して発行された校正証明書に記載された不確かさを採用する。

4.1.2 ピーク面積読み取りの不確かさ(u_A):

ピーク面積の読み取りの不確かさは次式で表される。

$$\sigma_A = \sqrt{A + B \left(1 + \frac{n}{2m}\right)}$$

n : ピーク領域チャンネル幅

m : バックグラウンド計数領域チャンネル幅

$G(=A+B)$: ピーク総計数

A : ピーク正味計数

A : ピーク正味計数の標準不確かさ

ここで、

$$B = (S_L + S_H) \times \frac{n}{2m}$$

B : ピークでのバックグラウンド計数

S_L : バックグラウンド計数領域(低 ch 側)

S_H : バックグラウンド計数領域(高 ch 側)

4.1.3 フィッティングで得られたピーク効率曲線の不確かさ

ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーによる放射能分析機器のピーク効率曲線は、通常、多核種標準体積線源により校正され、残差が最少になるように最適化されたフィッティング式が与えられる。このフィッティング式で得られたピーク効率曲線の不確かさを実験などにより求めることは難しい。そのため、簡易的に多核種ごとの残差（測定値とフィッティング値の差）により評価することができる。

なお、標準体積線源に含まれていない核種（例えば ^{134}Cs ）のフィッティングによる不確かさは、全ての核種の残差の最大値又は近傍の核種（この場合は ^{137}Cs ）の残差を便宜的に用いて評価してもよい。

4.2 試料放射能測定の不確かさ

4.2.1 ピーク面積の読み取り不確かさ(u_A): ピーク面積の読み取り不確かさは、4.1.2 項で示した式に試料測定のピーク総計数を代入して算出する。

備考) 放射能測定における測定の繰り返し性は、ピーク面積の読み取り不確かさ(計数の不確かさ)に包含されるので、不確かさ評価のために繰り返し測定を行う必要はない。ただし、繰り返し測定は試験所の内部品質管理手法としては有効である。

4.2.2 ジオメトリー(幾何学的条件)の不確かさ(u_{ge}): ジオメトリー(幾何学的条件)の不確かさには、校正時の標準体積線源の高さと測定試料を詰める高さの違いに起因する不確かさ(u_{sh})及び校正時と試料を置く場所の違いに起因する不確かさが含まれる(u_{sp})。校正時と試料を詰める高さの違いに起因する不確かさは、想定できる高さの最大差(管理幅で規定されることが多い)で繰り返し測定を行い、その評価結果を不確かさとする。校正時と試料を置く場所の違いに起因する不確かさは、校正時の標準体積線源と測定容器の設置位置に違いがある場合に発生する。その場合には、最大の差を発生すると思われる位置で測定を繰り返して実施し、その評価結果を不確かさ(u_{sp})とする。いずれの場合も測定装置(ノギスなど)の校正の不確かさと測定の繰り返しについてあらかじめ評価しておくことが望ましい。

4.2.3 試料質量測定の不確かさ(u_w): 試料質量測定の不確かさの要因には、天秤の不確かさと繰り返し性がある。このうち、繰り返し性については天秤の校正の不確かさに含まれているので、試験所が自ら試料測定により不確かさ評価を行う必要はない。

ただし、天秤の不確かさには、校正証明書に記載された測定の不確かさに加え、読み取り誤差（デジタル式天秤の場合は最小表示読み取り値の半分）がある。

また、上記の不確かさに代えて天秤メーカーが発行する仕様書に記載されている質量測定の最大許容差(精度等級に相当するもの)を質量測定の不確かさとしても良い。

4.2.4 線自己吸収補正の不確かさ(u_{SA}):

ピーク効率校正をした際の標準体積線源のかさ密度と測定試料のかさ密度との差により自己吸収補正を行うが、市販の分析ソフトを使用する場合には補正の大きさは把握できるものの、補正の不確かさは試験所自身が評価することは難しい。市販の分析ソフトの場合、試料材質の選択を行えるが、この材質の違いが大きな不確かさ要因となり得るので適切な材質を選択することが重要である。

なお、選択した材質の違いは不確かさの評価ではないが、測定データの違いを確認しておくことが望ましい。

備考) かさ密度 : JIS Z 9211

固体粒子の堆積の単位体積あたりの質量

4.2.5 基準日に換算するための減衰補正の不確かさ(u_{CDc}):

半減期データに不確かさ情報が付記されているものもあり、これを利用することが可能であるが、この補正の不確かさは無視できるほど十分に小さい。

4.2.6 測定中の減衰補正の不確かさ(u_{Dm}):

半減期の短い核種を測定する場合には、測定時間との関係で測定結果に影響が出るため測定中の減衰について補正し、その補正の不確かさについて核データからの出典により評価が必要であるが、このガイドの測定対象である放射性セシウムの測定の場合には、測定中に減衰する量は極めて少ないため補正は不要であり、このため不確かさは無視できるほど十分に小さい。

4.2.7 サム効果補正の不確かさ

^{137}Cs の場合は、サム効果補正をしない。 ^{134}Cs の場合には、エネルギー効率毎に ^{134}Cs の標準物質を用いてサム効果補正を行わなければならないが、通常、このような作業は試験所が行うには負荷が多すぎるため、市販されている分析装置に補正プログラムが組み込まれている。試験所は、この分析装置の補正プログラムによる補正の大きさは把握できるものの、補正の不確かさを試験所自身が評価することは難しい。

4.2.8 試料の均質性に起因する不確かさ(u_{sh})

試料の均質性に起因する不確かさには、試料粉碎時の粉碎度に起因する不確かさと粉碎後の試料を容器に詰める際の不均質さに起因する不確かさがある。試料粉碎時の粉碎度に起因する不確かさは大きな要因となり得る。しかし、測定試料の組成などにより試料の粉碎度による不確かさを実験で正確に評価することは非常に難しいが、予め評価しておくことが望ましい。また、測定試料の容器内の不均質さに起因する不確かさについても大きな不確かさの要因になり得る。この場合、試料を詰め直すなどにより自ら評価することが望ましい。

したがって、試料を粉碎や充填する際に測定の不確かさ全体への影響を最小化するよう、できるだけ均質に試料を粉碎・混合することに留意する。

備考) 表 1 及び表 2 の不確かさ評価例では、この要因を考慮していない。

5. 不確かさの合成と報告

4 項で求めた個別の要因の標準不確かさの合成は、(2)式に従って行う。その際、それぞれの不確かさ要因の確率分布の形状(正規分布、矩形分布、三角分布など)に注意してその除数を決定する必要がある。個別の要因の標準不確かさを合成する際には、測定量の単位を揃えて合成する。

試験報告書に拡張不確かさを標記する場合は、通常、約 95% 包含確率に相当する包含係数 $k=2$ を用いてよい。

^{137}Cs の 100 Bq/kg 近傍での測定の不確かさ評価事例を、表 1 (マリネリ容器を用いた場合)、表 2 (U8 容器を用いた場合) に示す。

表 1 ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーにおける測定の不確かさ評価結果 例 1

一般食品の基準値レベル(放射性セシウム 100 Bq/kg)での ¹³⁷Cs の不確かさの推定

<校正条件> 2L マリネリ容器入り標準体積線源使用 測定時間:20000 秒

<測定条件> 試験品:密度 0.75 容器:2L マリネリ容器使用 測定時間:2000 秒

不確かさの要因		引用値又は測定値	出典/ 標準偏差	タイプ 確率分布	除数	標準不確かさ	相対標準 不確かさ	相対合成 標準不確かさ	備考		
(1) ピーク計 数効率校正 の不確かさ	標準体積線源の 放射能の不確かさ	3800 Bq	校正証明書 4.7 % (k=2)	B 正規分布	2	89.3 Bq	2.35 %	3.11 %	2000 秒 測 定		
	標準体積線源の質 量測定の不確かさ	試料質量測定の不確かさと相関があるため、 試料質量測定の不確かさで評価			—						
	ピーク面積読み取 りの不確かさ	70000 counts	効率校正時データ 264 counts	A 正規分布	1	264 counts	0.38 %				
	フィッティングの不 確かさ	—	多核種標準体積 線源による フィッティング残差	B 矩形分布	1	—	2.0 %				
	減衰補正 (測定中、基準日 補正)の不確かさ	無視できるほど小さい									
	サム効果補正の 不確かさ	—									
	自己吸収補正の 不確かさ	—									

(2) 試料放射能測定の不確かさ	ピーク面積読み取りの不確かさ	1000 counts	解析プログラムで自動計算	A 正規分布	1	31.6 counts	3.16 %	4.28 %	※1標線の±10 mmに試料を充填した時の測定値の差で評価した。		
	試料の不均質性に起因する不確かさ	試料をできるだけ均質に混ぜることで無視できるほど小さいとみなす。			—						
	校正時と試料を詰める高さの違いによる不確かさ	1000 counts	検証データ ※1 50 counts	A 矩形分布	$\sqrt{3}$	28.9 counts	2.89 %				
	試料を置く位置のずれによる不確かさ	—	無視できるほど小さい	—	—	—	—				
	サム効果補正の不確かさ	—									
	自己吸収補正の不確かさ	—									
(3) 試料の質量測定の不確かさ	天秤の不確かさ	1500 g	校正証明書 0.24 g (k=2)	B 正規分布	2	0.12 g	0.008 %	0.010 %			
	質量測定の再現性	1500 g	検証データ 0.10 g	A 正規分布	1	0.10 g	0.007 %				
								相対合成標準不確かさ	5.29 %		
								相対拡張不確かさ (k=2)	10.6 %		

1：試料高さ（充填高さとマリネリ容器の標線の差）が試験結果に与える影響を検証しておく。

表 2 ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーにおける測定の不確かさ評価結果 例 2

一般食品の基準値レベル(放射性セシウム 100 Bq/kg)での ¹³⁷Cs の不確かさの推定

<校正条件> U8 容器入り標準体積線源使用 測定時間:20000 秒

<測定条件> 試験品:密度 0.75 容器:U8 容器使用 測定時間:2000 秒

不確かさの要因		引用値又は測定値	出典/ 標準偏差	タイプ 確率分布	除数	標準不確かさ	相対標準 不確かさ	相対合成標準 不確かさ	備考		
(1) ピーク計 数効率校正 の不確かさ	標準体積線源の放射能の不確かさ	3800 Bq	校正証明書 4.7 % (k=2)	B 正規分布	2	89.3 Bq	2.35 %	3.24 %	20000 秒測定		
	標準体積線源の質量測定の不確かさ	試料質量測定の不確かさと相関があるため、試料質量測定の不確かさで評価			—						
	ピーク面積読み取りの不確かさ	10000 counts	効率校正時データ 100 counts	A 正規分布	1	100 counts	1.0 %				
	フィッティングの不確かさ	—	多核種標準体積線源によるフィッティング残差	B 矩形分布	1	—	2.0 %				
	減衰補正(測定中、基準日補正)の不確かさ	無視できるほど小さい									
	サム効果補正の不確かさ	—									
	自己吸収補正の不確かさ	—									

(2) 試料放射能測定の不確かさ	ピーク面積読み取りの不確かさ	300 counts	解析プログラムで自動計算	A 正規分布	1	17.3 counts	5.77 %	5.03 %	※1 ノギスの不確かさ及び高さ計測部位による測定差を含む ※2 検出器の中央部に設置した場合と10 mm ずらした場合の差 10000 秒測定
	試料の不均質性に起因する不確かさ	試料をできるだけ均質に混ぜることで無視できるほど小さいとみなす。			—				
	試料高さの計測の不確かさ	— 50 mm	検証データ ※1 ± 2 mm	A 矩形分布	√3	1.15 mm	2.31 %		
	試料を置く位置のずれによる不確かさ	1000 counts	検証データ ※2 5 counts	A 矩形分布	√3	2.88 counts	0.288 %		
	自己吸収補正の不確かさ	—							
(3) 試料の質量測定の不確かさ	天秤の不確かさ	75 g	校正証明書 0.24 g (k=2)	B 正規分布	2	0.12 g	0.16 %	0.21 %	
	質量測定の再現性	75 g	検証データ 0.10 g	A 正規分布	1	0.10 g	0.133 %		
								相対合成標準不確かさ	7.02 %
								相対拡張不確かさ (k=2)	14.0 %

- 1 : 試料高さ（充填高さともリネリ容器の標線の差）が試験結果に与える影響を検証しておく。
- 2 : 容器の設置場所の違いによる試験結果への影響を評価しておく

改 定 履 歴 (公開文書用)

版 番号	改 定 内 容 概 略	発行日	文書責任者	承認者
1	新規発行	2014-05-01	PM (放射能・放射線)	試験所技 術委員会

公益財団法人 日本適合性認定協会
〒141-0022 東京都品川区東五反田 1 丁目 22-1
五反田 AN ビル 3F
Tel.03-3442-1217 Fax.03-5475-2780

本協会に無断で記載内容を引用、転載及び複製することを固くお断り致します。