

## Ⅱ. 分 担 研 究 報 告

食品中の放射性物質の検査に係る信頼性評価手法の検討

曾我 慶介

## 平成 28 年度厚生労働科学研究補助金 食品の安全確保推進研究事業

### 震災に起因する食品中の放射性物質ならびに有害化学物質の実態に関する研究 分担研究報告書

#### 食品中の放射性物質の検査に係る信頼性評価手法の検討

研究代表者 蜂須賀 暁子 国立医薬品食品衛生研究所生化学部第一室長  
研究分担者 曾我 慶介 国立医薬品食品衛生研究所生化学部研究員

#### 研究要旨

法に基づいて行われる検査は、基本的にその結果によって何らかの行政措置が伴うものであるため、検査の分析値には一定の品質が要求される。分析値の品質保証において一般にパラメータとして用いられる不確かさについて、平成 25 年度は計数の統計による不確かさを中心に、平成 26 年度は測定操作全体の不確かさについて、平成 27 年度は測定値の偏りを生じさせる因子としてジオメトリーについて、測定結果に及ぼす影響を理論と実測から検討した。平成 28 年度は、検査に影響する要因として、測定ピークの判定、校正、試料及び測定環境の維持管理について総合的に検討した。食品中放射性物質の試験法においては測定前の分離操作は行っていないことから、放射性セシウムの測定ピークエネルギー範囲の計数が放射性セシウムによるものかどうかの判定が確定法では必要であり、妨害となりうる核種について検討し、一次情報であるスペクトルの重要性を指摘した。放射性物質検査は定量法であることから校正についても考察した。また、放射性物質の検査が必要となる場合は事故時と予想されることから、試料及び測定環境の汚染防止について検討した。

放射能検査においても他の検査と同様に、検査の全操作を把握し、各操作における不確かさや偏りを生じさせる要因を推定し、それらの最終結果に与える影響の大きさを評価していることが分析値の品質を保証する上で重要と考えられる。

#### A. 研究目的

法に基づく検査は常に同じ分析結果が得られることが重要である。食品衛生法に基づく放射能検査では、図 1 に示すようなスキームによって対応がなされており、検査結果によっては、自治体単位の出荷制限、さらには摂取制限の措置が取られる。従って、検査の判定に用いられる放射能の分析値の品質は、一定水準以上にあることが要求される。そのためには、まず検査の信頼性が評価されている

必要がある。

当研究課題においては、平成 24 年度は検査において重要な役割を担っているスクリーニング測定機器について、検査対応状況を販売者に面接調査した。平成 25 年度は、一般に分析値の品質評価で用いられる測定の不確かさについて、放射能測定特有の因子である計数の統計による不確かさ（いわゆる計数誤差）を取り上げて検討した。測定の不確かさは、GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in

Measurement、計測における不確かさの表現のガイド) の定義によれば、「測定の結果に附随した、合理的に測定量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ」とされる。実質上、「『測定値』からどの程度のばらつきの範囲内に『真の値』があるかを示す、測定の結果に附随するパラメータ」と解釈されている。平成 26 年は前年に引き続き測定の不確かさについて、測定法全体での検討及び評価を行った。特に放射能測定特有の因子について、一般の化学分析との相違を含めて比較検討した。平成 27 年度は、測定値の偏りを生じさせる放射能測定に特有の因子として、試料と検出器の幾何学的位置関係であるジオメトリーを取り上げた。放射性セシウムの汚染試料を用いて測定試料の不均質性の測定結果へ及ぼす影響を検討し、ジオメトリーを無視して試料量を規定量以上に充填した場合は、放射能濃度が過小評価されることを示した。

最終年度である平成 28 年度は測定全体を俯瞰し、また、放射能測定が必要とされる状況を考慮し、測定ピークの判定、校正、試料及び測定環境の維持管理について検討した。

放射線測定では、試料に含まれている放射性核種から核壊変により放出される放射線を検出器で測定する。現行の食品放射能検査法では、測定対象核種である放射性セシウム(セシウム 137 (Cs-137) とセシウム 134 (Cs-134)) から放出されるガンマ線を測定しており、その検査法はガンマ線、すなわち光子の優れた透過

性を利用し、放射性核種の抽出など分離抽出操作は行わずに、食品を測定容器に充填するのみの前処理となっている。従って、確定法において正しい判定をするためには、放射性セシウムのピークエネルギー位置における計数値が放射性セシウムによるものかどうかの評価が必須であることから、妨害となりうる核種など測定ピークの判定について検討した。

また、食品中の放射能検査は測定機器を用いた定量測定であり、信頼性の高い計測を行うためには測定機器が校正されている必要があることから、校正についても検討を行った。最後に、食品中放射能検査が必要とされる場合は、原子力施設等の事故により高濃度汚染試料の存在が疑われることから、試料の汚染防止及び測定環境の維持管理についても考察を行った。

## B. 方法

### 1. 測定ピークの判定

核データは、アイソトープ手帳 11 版 公益社団法人日本アイソトープ協会、日本原子力研究開発機構/核データ研究グループ / Nuclear Data Center [http://www.ndc.jaea.go.jp/nuclldata/index\\_J.html](http://www.ndc.jaea.go.jp/nuclldata/index_J.html)、国際原子力機関 IAEA /Live Chart of Nuclides <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> を参照した。

### 2. 校正

日本の計量標準の整備・維持・供給を担っている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の情報を

参照した。

### 3. 試料及び測定環境の維持管理

「放射能測定法シリーズ 文部科学省」及び「水道水等の放射能測定マニュアル 平成 23 年 10 月厚生労働省健康局水道課」、「ISO/IEC 17025(試験及び校正を行う試験所の能力に関する一般要求事項)」を参考にした。

## C. 結果及び考察

### 1. 測定ピークの判定

測定核種である Cs-137 及び Cs-134 の壊変図を図 2 にそれらの主な放射線エネルギーを表 1 に示す。

Cs-137 は、ベータ線を放出して Ba-137 になるベータ壊変核種であり、その過程で数種のガンマ線(光子)を放出するが、測定に利用されるのは実質上、放出割合 85.1% の 662 keV の光子 1 種類になる。複数ピークでの確認ができないため、核種同定にあたっては測定ピークの形状等を注意深く確認する必要がある。

Cs-134 は、そのほとんど (99.9997%) は Cs-137 と同様にベータ線を放出して Ba-134 に変わり、一部 (0.0003%) は軌道電子を捕獲して Xe-134 に変わる。ベータ壊変時に複雑なエネルギー準位を経るため複数の光子が放出されるが、一般に 605 keV (放出割合 97.6%) と 796 keV (放出割合 85.5%) の 2 本が測定に用いられる。高濃度の試料の場合は、569 keV (放出割合 15.4%) 等のピークの検出も可能になる。Cs-134 のように複数ピークが検出される核種では、核種同定においてピーク比も重要な情報となる。なお、Cs-134

のように複数のガンマ線がカスケード状に放出される場合は、情報が多くなる反面、サム効果の適切な補正が必要になる。

測定妨害ピークを考えるにあたっては、測定機器のエネルギー分解能、妨害核種の放出光子エネルギー、半減期、放出確率、存在確率などが影響要因として挙げられる。エネルギー分解能は機器の性能に依存する。食品検査の試験法通知(食品中の放射性物質の試験について 食安発 0315 第 4 号 平成 24 年 3 月 15 日)では、使用機器として、「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ータ:検出器の相対効率は 15%以上とし、検出器周辺を暑さ 10~15 cm の鉛遮蔽体等で囲む。」と記載されており、エネルギー分解能については触れられていない。一方で、我が国の放射線測定法の基本となっている放射線測定法シリーズには関連するものが 2 件あり、「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ガンマ線スペクトロメトリー 平成 4 年 科学技術庁」では、機器仕様例として、相対効率は 10%程度、エネルギー分解能はコバルト 60 の 1333 keV において半値幅 (FWHM) 1.9-2.0 keV 以下となっており、「放射能測定法シリーズ No.33 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法 平成 29 年 原子力規制庁」では、機器仕様例として、相対効率 25%程度、コバルト 60 の 1333 keV に対して半値幅 2.3 keV 以下が例示されている。これらのことから、食品検査でも同等クラスの機器、すなわちコバルト 60 の 1333 keV における半値幅が 2.0 keV 前後

の機器が一般に使用されていると推定される。よって、定量に用いるピークエネルギーの前後 5 keV を妨害ピーク候補と考え、それらの光子を放出する核種を核データから検索したところ、Cs-137 の 662 keV で 43 核種 (表 2-1)、Cs-134 の 605 keV で 46 核種 (表 2-2)、Cs-134 の 796 keV で 31 核種 (表 2-3) が抽出された。抽出された核種の半減期について、想定される食品検査の所要時間と比較し、短過ぎるものを除き、当該エネルギー光子の放出割合及び存在確率を考慮し、妨害となる可能性が高い核種を推定した。

その結果、Cs-137 の 662 keV 近傍の光子リスト (表 2-1) では、中性子捕獲反応  $^{109}\text{Ag}(n, \gamma)^{110\text{m}}\text{Ag}$  など生成する人工核種 Ag-110m の 657.76 keV (半減期 249.76d、放出割合 94.32%)、中性子誘起核分裂反応  $\text{U}(n, f)^{97}\text{Zr}$  の後、ベータ壊変で生成する人工核種 Nb-97 の 657.94 keV (半減期 72.1h、放出割合 98.23%) などが事故時における妨害核種の候補と考えられたが、現時点ではいずれもその可能性は低いと考えられた。なお、エネルギー差 6 keV のため、表 2-1 の欄外に記載したが、原子力施設事故直後において環境汚染を引き起こしやすい人工核種 I-132 は、中性子誘起核分裂反応  $\text{U}(n, f)^{132}\text{Te}$  の後、ベータ壊変で生成するため、その 667.7 keV (半減期 2.295h、放出割合 98.7%) は量によっては妨害となる可能性がある。ただし、I-132 が検出される状況においては、I-132 以外にも検出される核種が数多く、ベースラインの設定が困

難な状況と予想される。このような状況においては、エネルギーピークの同定は機器のエネルギー分解能に頼るだけでなく、時間をおいて複数回測定することにより半減期など情報の種類を増やして多角的に検討することが有用である。

Cs-134 の 605 keV 近傍の光子リスト (表 2-2) では、中性子捕獲反応で生じる Sb-124 や Ir-194 などの人工核種がいくつかあるが、半減期、放出割合、及び存在確率から、いずれも妨害の可能性は低いと考えられた。一方、自然核種については、ウラン壊変系列 (図 3) に属する Bi-214 が抽出されている。ウラン壊変系列は、希ガスの Rn-222 を経るため、それ以降の壊変核種は自然界に広範囲に分布する。よって、Bi-214 の 609.32keV (半減期 19.9m、放出確率 145.49%、表 1-2 参照) は、測定光子エネルギー 604.72 keV と 4.6keV の差はあるものの留意する必要がある。特にエネルギー分解能があまり高くない機器を用いている場合は常に注意が必要である。

Cs-134 の 795.86 keV 近傍の光子リスト (表 2-3) では、半減期、放出確率、存在確率から、表中の核種はいずれも妨害の可能性は通常は低いと考えられた。

一般には、Cs-134 の 605 keV と 796 keV の 2 本のピークは、放出割合が各々 97.6% と 85.5% であることから、前者の方が計数値が大きく信頼性が高いとされるが、妨害を考慮すると、後者の方が信頼性が高くなる場合もある。測定状況ごとに総合的に判断することが重要である。

妨害ピークの有無を評価するには、目

的ピークの位置、形状を精査すること、妨害が疑われる核種の当該ピーク以外のピークを調べること、逆に測定核種が複数ピークを検出できる場合はそれらの比率を確認することが一般的な手法となる。加えて現在の放射性セシウム（Cs-134+Cs-137）の測定においては測定2核種の比率を確認することも併せて有用である。

Cs-134 の 604.72 keV に Bi-214 の 609.32keV の妨害が疑われる場合を例に挙げれば、まず、Cs-134 の 604.72 keV のピーク位置、形状を確認する。この作業は、機器の性能管理としてエネルギー校正が適切になされていることが前提条件になる。その結果、Bi-214 の妨害が疑われた場合は、Bi-214 の主ピークである 609 keV (46.1%) の他、1120 keV (15.1%)、1764 keV (15.4%) のピークを調べる。また、Cs-134 側においても、604.72 keV (97.6%) と 795.86 keV (85.8%) の検出比に矛盾がないか確認する(表1参照)。さらに、現状においてはCs-134 と Cs-137 の比率も有力な情報となる。福島第一原子力発電所事故においては、汚染源が1か所ではなく、その汚染源ごとに2核種の比率が異なるため、環境中に放出された2核種の比率は場所により完全には同一ではないものの、今までの検査データからほぼ一定の範囲内と考えられる。

計算例として、原子力安全・保安院が公表している「大気中への放射性物質の放出量の試算値 (Bq)」を表3に、その情報に基づくCs-137 と Cs-134 の放射能量及びそれらの比率の物理的減衰による経時変化を図4に示す。この推定値によ

れば、平成23年3月においてはCs-137及びCs-134の放射能量は各々15 PBq、18 PBqであり、Cs-137のCs合計(Cs-134とCs-137の総和)に対する比は45.5%である。半減期2.1年であるCs-134は、半減期30年のCs-137に比べて早く減衰し、事故後6年を経過した平成29年3月においてはCs-137及びCs-134の放射能量は各々13.1 PBq、2.4 PBqであり合計値は15.5 PBqとなり、平成23年3月に比べ半分以下となっている。同じ推定値を用いて、Cs-137のCs合計量に対する比率変化を右軸で示したが、事故直後から1年毎の数値は、45、53、61、68、74、80%と増加し、平成29年3月は84%となっている。現在において検出されるCs-134は、その半減期から福島第一原子力発電所由来と考えられるが、Cs-137はこの事故の他に、過去の原爆実験等のフォールアウトの影響を受けている可能性がある。これらのことから測定2核種の比率は、放出推定量から求められた比率と同じか、あるいはそれよりもCs-137過多側になることが予想され、その比率から大きくずれている場合は、データを精査する必要がある。このように測定で得られる情報を多面的に活用し、測定核種に由来すると推定されるピーク面積を求め、濃度を算出することが信頼性の高い検査に繋がる。

多くの測定機器では、予めピークエネルギー領域を指定しておけば自動的にピーク認識を行い、ピーク面積を計算し、放射能濃度が帳票に記載される。しかしながら、ピークの形状の評価は機器に装

備されていないか、あるいは不十分なものもあると思われる、検査者がスペクトルごとに直接評価することが重要となる。ここでは測定妨害核種による正側の誤りについて記載したが、放射能測定はその基となる核壊変が確率現象であり、バックグラウンドとなる自然放射能も同様の不確かさを含むため、この場合の誤りは正負両側に変動する。例えば、ピーク領域のバックグラウンドの正負の変動はそのままピーク面積の正負の変動となり、ピーク前後のベースライン領域の正負の変動は逆にピーク面積の負正の変動となる。つまり、ピーク前後のベースライン領域において負側に変動した場合は、ピーク面積を多く見積もることとなり、逆にベースライン領域において正側に変動した場合は、ピーク面積を小さく見積もることになる。これらの確率による変動の評価を誤った場合は、当然、放射能濃度を正しく算出することができない。バックグラウンドの確率による大きな変動を排除するためにも、検査者がスペクトルの確認をすることは重要であり、疑義が生じた場合は問題を解決するための措置が必要となる。バックグラウンドも含めた確率的な変動によるもの場合は、再測定が有効な手段となる。妨害核種が疑われる場合は、妨害核種の性質や量により、測定時間を長くする、あるいは時間をおいて再度測定することなどを試みる。放射能測定においては確率的影響が常にあるため、合計の測定時間は同じでも、長時間の1回測定よりも分割して測定の方が情報量は多くなることも考慮

し、測定妨害の種類を予測して対応することが重要と考えられる。

## 2. 校正

食品中の放射能検査は測定機器を用いた定量測定であり、信頼性のある計測を行うためには測定機器が校正されていなくてはならない。校正は、JIS Z 8103:2000 計測用語においては「計器又は測定系の示す値、若しくは実量器又は標準物質の表す値と、標準によって実現される値との間の関係を確定する一連の作業。備考：校正には、計器を調整して誤差を修正することは含まない。」と定義されている。

食品中の放射能検査の通知法においては、機器校正法として「校正及びスペクトル解析方法は『文部科学省編放射能測定シリーズ No.7 ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー』に記載の方法、あるいは国際的に認められた方法に従う。」とあり、国家標準にトレーサブルな標準線源を用いて校正する。

放射線測定機器の校正に用いられる標準線源には、放射線のエネルギー、放射能、線量率等があるが、ガンマ線スペクトロメトリーで必要となるのは、スペクトルの横軸であるエネルギーと縦軸となる放射能について数値が定められている放射能標準ガンマ体積線源になる。標準線源は、これらの量について、国家標準につながる経路が確立されていること、すなわちトレーサビリティが確保されていることが求められる。トレーサビリティとは、測定の信頼性が測定現場で使用

する末端の測定機器にまで一定のレベルで保証されることを目的とする考え方であり、国際相互承認と併せて計測値の社会的認知を得る国際的な基本的条件である。食品中放射能測定に用いられる放射線計測器の校正は、このように放射線エネルギーと放射能が既知の標準体積線源を用いて行うことになる。

図5に放射能計測のトレーサビリティ体系を示す。日本では産業技術総合研究所 NMIJ の国家標準に対して、公益社団法人日本アイソトープ協会や公益財団法人日本分析センターの標準器がトレーサブルになっている。そのため、検査現場の機器校正においては、日本アイソトープ協会より標準線源を入手するのが一般的である。その際、検査に使用する測定容器と同じ容器・体積の標準線源を用意することが重要である。なぜならガンマ線スペクトロメトリーでは、測定試料と検出器の位置関係であるジオメトリー、及び試料から検出器までの透過率が計数効率に影響するからであり、測定試料と標準線源との間をできる限り同じ条件にすることが信頼性の高い検査結果を得るためには重要となる。測定容器と異なる形状・材質の標準線源では校正することはできない。そのため、検査で複数の異なる測定容器・体積を用いる場合は、容器・体積ごとの校正が必要である。逆に、標準線源を共有して複数の測定機器を校正するような場合では、検査における測定容器・体積を標準線源のそれと同じにする必要がある。

### 3. 試料及び測定環境の維持管理

平成 25 年度より測定に関する問題点について論じてきたが、実際の検査においては、測定に至る以前の試料の取扱いや測定環境の整備も、正しい検査結果を得るためには重要である。

検査試料の汚染として、試料間の汚染、クロス・コンタミネーションを考えてみると、そのときの測定核種（物理・化学的性状）と汚染状況（量・均質性）によって留意すべき点は異なってくる。試料が不揮発性の放射性物質で均質に汚染されている場合は、通常の商品検査と同程度の注意で対応できると考えられる。例えば、基準値の 10 倍の汚染試料が 0.1% 混入した場合は、計算上は基準値の 1% の増加と算定される。現在、このようなレベルを超えることはまずないと考えられ、検査の判定に影響する可能性は低いと思われる。しかし、事故直後のように極端に高濃度の試料が存在する場合は、試料受付時からサーベイメータなどで試料をランク付けして低濃度試料と動線を分けるなどの物理的な対策が必要になることもありえる。現在の測定核種は放射性セシウムであり、常温常圧における揮発性はないが、事故直後の放射性ヨウ素のように揮発性がある場合は、高濃度汚染試料に対しては、揮発を抑えて試料間あるいは検査環境の汚染を引き起こさないための物理・化学的な取扱い条件を設定する必要がある。

また、放射能測定においては著しい不均質汚染の可能性についても留意する。福島原子力発電所事故から 6 年が経過し

た現在では、食品中の放射能物質は、直接の粒子の付着等ではなく、間接的な汚染によるものがほとんどであり比較的均質化されているものが多いと考えられるが、特に事故直後には、粒子1つで基準値超過にする高濃度粒子も存在しうる。そのような場合には、試料間の汚染は厳密に制御しなくてはならない。

放射能はその性質が放射性核種、すなわち元素に由来するため、物理的半減期に則って減衰し、生物系の有害物などと異なり増加することはないものの、逆に一般的な有害物質のように化学形の変化により測定反応性が変わることも本質的にはない。放射エネルギーは時間にのみ依存し、人為的に減少させることができないことが特徴であり、このことは測定環境汚染においても留意すべき点である。測定環境が何らかの放射性物質で汚染された場合、その物質を除かない限りその核種の半減期に則って放射能を出し続ける。前年度までの報告書に記載しているように、放射能測定の精度はバックグラウンドに依存するため、バックグラウンドは低いほうが望ましい。これらのことから、測定環境を放射能で極力汚染しないように常に留意することが重要である。試料及び測定機器の両方に対して汚染防止対策を取り、汚染状況を定期的に確認し、汚染が認められた場合は、直ちに的確に除染及び汚染拡大防止等の措置を取る。

上述した内容の多くは、「食品中の放射性物質の試験法について．厚生労働省食安発0315第4号 平成24年3月15日」の「3 検査結果の信頼性管理」

にも記載されている。信頼性の高い検査を行うためには下記通知内容の遵守が重要である。

### 「3 検査結果の信頼性管理

- 1) 測定日毎にバックグラウンドを測定し、通常範囲を超えて上昇していないことを確認する。
- 2) 測定日毎に空の測定容器を用いてブランクを測定し、分析系に放射性表面汚染がないことを確認する。
- 3) 定期的に標準線源を用いて校正を行う。
- 4) 測定日毎にエネルギーのスケールがずれていないことを確認する。
- 5) 試料を測定容器に詰める際には、特に検出器付近に空隙ができないように留意する。
- 6) 試料による分析系の放射性表面汚染、あるいは試料間の汚染が起らないように留意する。特に検出部位の汚染を防ぐため、検出器をポリエチレン袋で覆う、測定容器の外側に試料を付着させない等の措置を講じる。
- 7) 測定容器をくりかえし使用する場合は、測定容器の内側にポリエチレン袋を入れて試料を充填するなど、測定容器の汚染を防ぐ措置を講じる。
- 8) 試料の取り違えを防止するための措置を講じる。」

### D. 結論

放射能測定における信頼性に関わる要因及びその影響を明らかにし、分析結果の信頼性評価法の確立に資するため、本年度は、測定ピークの判定、校正、試料

及び測定環境の維持管理について検討した。

食品中の放射性物質検査は、放射線の測定値を基に判定される。放射線測定機器に限らず、現在の測定機器は、測定開始ボタンを押せば定量結果を帳票で取り出せるものが増えてきている。しかしながら、定量結果までにはいくつかの情報加工段階があり、その一つ一つに間違いがないかを確認することが信頼性の高い検査を行うためには必要である。そのためには、最も信頼性が高くかつ情報量の多い根源的なデータの活用が課題となる。食品中放射性セシウムの検査であれば、測定原理及び定量までのアルゴリズムを理解した上で一次データであるスペクトルそのものを検査者が確認し、さらに測定だけでなく測定環境や試料の汚染状況についても留意し、総合的に判断することが重要と考えられる。

2. 実用新案登録  
なし
3. その他  
なし

## E. 研究発表

1. 論文発表
  - 1) 蜂須賀暁子：放射能分析における計数の統計的不確かさについて，食品衛生学雑誌，67(2)，J25-29 (2016)
2. 学会発表
  - 1) 曾我慶介、近藤一成、蜂須賀暁子．放射能測定におけるジオメトリー影響の検証．日本薬学会 第 137 年会 (2017.03)

## F. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得  
なし.

表1 壊変データ (Cs-137、Cs-134、Bi-214)

核種	半減期	壊変形式	主なβ線のエネルギー(MeV)と放出割合	主な光子のエネルギー(MeV)と放出割合	内部転換電子の放出割合(%)
Cs-137	30.1671 y	β-	0.514 94.4% 1.176 5.6%	<b>0.662 85.1%</b> 0.0321 5.8% Ba-Kα 0.0365 1.3% Ba-Kβ	9.7
Cs-134	2.0648 y	β-	0.0886 27.3% 0.415 2.5% 0.658 70.2% 他	0.475 1.5% 0.563 8.4% 0.569 15.4% <b>0.605 97.6%</b> <b>0.796 85.5%</b> 0.802 8.7% 1.168 1.8% 1.365 3.0% 他 0.0321 0.69% Ba-Kα 0.0365 0.16% Ba-Kβ	0.061 0.15 0.58 0.26 0.026
Bi-214	19.9 m	α β-	5.455 0.011% 他 1.068 5.7% 1.153 4.3% 1.425 8.2% 1.508 17.0% 1.542 17.8% 1.894 7.4% 3.272 18.2% 他	<b>0.609 46.1%</b> 0.768 4.9% 1.120 15.1% 1.238 5.8% 1.378 4.0% 1.764 15.4% 2.204 5.4% 他 0.0787 1.6% Po-Kα	0.95 0.080 0.25 0.075 0.016 0.080 0.015

アイソトープ手帳 11 版 (編集・発行: 日本アイソトープ協会) 及び  
Nuclear Data Center (<http://www.ndc.jaea.go.jp/NuC/sbygame.html>) より抜粋

表2 測定核種光子エネルギー近傍の光子リスト

「Nuclear Data Center (<http://wwwndc.jaea.go.jp/NuC/sbygame.html>)」及び「放射能測定法シリーズ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 平成4年 科学技術庁」よりデータを抽出

表2-1 Cs-137の661.66 keVのピーク前後5 keVの光子放出核種

	核種	エネルギー (keV)	放出割合 (%)	壊変形式	半減期	実効光度* (dps)
-21	35-Br-76	657.02	15.91	EC	16.2 H	1.89E-06
20	33-As-76	657.05	6.17	B-	26.24 H	4.53E-07
19	54-Xe-142	657.05	*791.	B-	1.22 S	* 4.49E+00
18	49-In-121	657.32	7.1	B-	23.1 S	2.13E-03
17	83-Bi-202	657.49	60.56	EC	1.71 H	6.82E-05
16	47-Ag-110	657.5	4.5	B-	24.6 S	1.27E-03
	49-In-110	657.75	98.1	EC	69.1 M	1.64E-04
15	49-In-110	657.75	98.29	EC	4.9 H	3.86E-05
14	47-Ag-110m	657.76	94.32	B-	249.76 D	3.03E-08
13	41-Nb-97	657.94	98.23	B-	72.1 M	1.57E-04
12	49-In-104	658	100	EC	1.8 M	6.42E-03
11	42-Mo-89	658.6	5.84	EC	2.11 M	3.20E-04
10	52-Te-127	658.9	0.01	B-	109 D	7.36E-12
9	31-Ga-81	659.1	6.04	B-,N	1.217 S	3.44E-02
8	47-Ag-94	659.1	* 50.7	EC	0.55 S	* 6.39E-01
7	31-Ga-80	659.14	78	B-	1.676 S	3.23E-01
6	10-Ne-18	659.25	0.14	B+	1.672 S	5.80E-04
5	91-Pa-235	659.3	--	B-	24.1 M	N/A
4	85-At-208	660.04	88.82	EC	1.63 H	1.05E-04
3	68-Er-149	661	0.02	EC,P	8.9 S	1.56E-05
2	67-Ho-148	661.3	58.94	EC	9.59 S	4.26E-02
1	53-I-117	661.5	5.1	B+	2.22 M	2.65E-04
	<b>55-Cs-137</b>	<b>661.66</b>	<b>85.1</b>	<b>B-</b>	<b>30.08 Y</b>	<b>6.21E-10</b>
	<b>56-Ba-137</b>	<b>661.66</b>	<b>89.9</b>	<b>IT</b>	<b>2.552 M</b>	<b>4.07E-03</b>
1	88-Ra-208	661.9	* 84.	IT	--	* N/A
2	46-Pd-98	662.2	19.72	EC	17.7 M	1.29E-04
3	72-Hf-171	662.2	*266.	EC	12.1 H	* 4.23E-05
4	92-U-239	662.24	0.18	B-	23.45 M	8.87E-07
5	57-La-132	663.07	11.23	EC	24.3 M	5.34E-05
6	51-Sb-109	664	9.75	EC	17 S	3.98E-03
7	37-Rb-78	664.42	38.74	EC	5.74 M	7.80E-04
8	58-Ce-143	664.57	5.69	B-	33.039 H	3.32E-07
9	88-Ra-211	665	5.00E-04	Alpha	13 S	N/A

0	89-Ac-232	665	15.3	B-	119	S	8.91E-04
11	86-Rn-207	665.1	98	IT	184.5	US	3.68E+03
12	18-Ar- 34	665.54	2.5	EC	844.5	MS	2.05E-02
13	47-Ag-100	665.7	86	EC	2.24	M	4.44E-03
14	47-Ag-100	665.7	98.8	EC	2.01	M	5.68E-03
	35-Br- 80	665.8	1.08	EC	17.68	M	7.06E-06
15	39-Y -100	665.8	10.4	B-	0.94	S	7.67E-02
16	85-At-200	665.9	*100.	EC	--		* N/A
17	39-Y -100	665.98	7.74	B-	735	MS	7.30E-02
18	51-Sb-126	666.1	85.67	B-	19.15	M	5.17E-04
19	33-As- 80	666.2	42	B-	15.2	S	1.92E-02
20	53-I -126	666.33	32.88	EC	12.93	D	2.04E-07
21	51-Sb-126	666.5	99.6	B-	12.35	D	6.47E-07
22	51-Sb-107	666.6	13.86	EC	4	S	2.40E-02
欄外	53-I -132	667.7	98.7%	B-	2.295	H	8.28E-05

\* ) 実効光度 Effective Intensities (dps) は光子の放出割合 intensity と半減期 half-life から算出される。

Effective Intensity (dps) = { Intensity (%) ÷ 100 } × { log<sub>e</sub>2 ÷ Half-life (s) }

\*: relative 相対値, ~: approximate 概算値, ?: calculated or estimated 計算または推定値

表 2 - 2 Cs-134 の 604.72 keV のピーク前後 5 keV の光子放出核種

核種	エネルギー (keV)	放出割合 (%)	壊変形式	半減期	実効光度* (dps)	
23	53-I -132	599.8	14	B-	1.387 H	1.94E-05
22	70-Yb-161	599.88	27.72	EC	4.2 M	7.62E-04
21	70-Yb-151	599.9	69	IT	20 US	2.39E+04
20	41-Nb-100	600.3	69.35	B-	2.99 S	1.61E-01
19	37-Rb- 97	600.5	10.76	B-	169.1 MS	4.41E-01
18	77-Ir-194	600.5	62	B-	171 D	2.91E-08
17	93-Np-240	600.57	20	B-	61.9 M	3.73E-05
16	51-Sb-125	600.6	17.65	B-	2.75856 Y	1.41E-09
	53-I -118	600.6	8.04	B+	13.7 M	6.78E-05
15	53-I -118	600.6	93.28	B+	8.5 M	1.27E-03
14	88-Ra-226	600.66	5.00E-04	Alpha	1600 Y	N/A
3	53-I -138	601	1.14	B-,N	6.41 S	1.23E-03
12	53-I -137	601.05	4.8	B-	24.5 S	1.36E-03
11	53-I -120	601.1	87	EC	53 M	1.90E-04
10	69-Tm-154	601.4	39.5	EC	3.3 S	8.30E-02
9	84-Po-208	601.52	1.00E-03	EC	2.898 Y	N/A
8	88-Ra-211	601.6	--	Alpha	13 S	N/A
7	39-Y - 82	601.9	1.1	B+	8.3 S	9.19E-04

6	55-Cs-140	602.25	53.3	B-	63.7	S	5.80E-03
	61-Pm-136	602.7	49.74	EC	107	S	3.22E-03
5	61-Pm-136	602.7	*384.	EC	--		* N/A
	51-Sb-124	602.72	25	B-	93	S	1.86E-03
4	51-Sb-124	602.73	97.79	B-	60.2	D	1.30E-07
3	53-I -124	602.73	62.9	EC	4.176	D	1.21E-06
2	52-Te-135	603.7	27.9	B-	19	S	1.02E-02
1	49-In-105	604.12	9.21	EC	5.07	M	2.10E-04
	<b>55-Cs-134</b>	<b>604.72</b>	<b>97.62</b>	<b>B-</b>	<b>2.0652</b>	<b>Y</b>	<b>1.04E-08</b>
1	57-La-134	604.72	5.04	EC	6.45	M	9.03E-05
2	75-Re-190	605.14	14.89	B-	3.2	H	8.96E-06
3	77-Ir-190	605.14	39.9	EC	11.78	D	2.72E-07
4	73-Ta-164	605.2	14.1	EC	14.2	S	6.88E-03
5	79-Au-188	605.3	* 16.3	EC	8.84	M	* 2.13E-04
6	53-I -118	605.6	77.61	B+	13.7	M	6.54E-04
	53-I -118	605.6	100.17	B+	8.5	M	1.36E-03
7	29-Cu- 74	605.9	86	B-	1.63	S	3.66E-01
8	52-Te-110	605.9	--	EC	18.6	S	N/A
9	36-Kr- 79	606.09	8.12	EC	35.04	H	4.46E-07
10	49-In-112	606.4	1.11	EC	14.97	M	8.57E-06
11	51-Sb-136	606.62	18	B-	0.923	S	1.35E-01
12	47-Ag-112	606.7	3.1	B-	3.13	H	1.91E-06
13	58-Ce-135	606.76	18.81	EC	17.7	H	2.05E-06
14	48-Cd-105	607.22	3.74	EC	55.5	M	7.78E-06
15	27-Co- 70	607.6	*100.	B-	0.5	S	*1.39E+00
16	83-Bi-204	608.1	93.5	IT	1.07	MS	6.06E+02
17	54-Xe-135	608.18	2.9	B-	9.14	H	6.11E-07
18	82-Pb-192	608.2	18.62	EC	3.5	M	6.15E-04
19	31-Ga- 74	608.4	14.41	B-	8.12	M	2.05E-04
20	33-As- 74	608.43	0.55	EC	17.77	D	2.48E-09
21	22-Ti- 51	608.55	1.18	B-	5.76	M	2.37E-05
22	86-Rn-218	609.31	0.12	Alpha	35	MS	2.38E-02
23	<b>83-Bi-214</b>	<b>609.32</b>	<b>45.49</b>	<b>B-</b>	<b>19.9</b>	<b>M</b>	<b>2.64E-04</b>

表 2 - 3 Cs-134 の 795.86 keV のピーク前後 5keV の光子放出核種

	核種	エネルギー (keV)	放出割合 (%)	壊変形式	半減期		実効光度* (dps)
13	50-Sn-125	791.6	* 55.	IT	0.23	US	* 1.66E+06
12	39-Y - 97	791.7	69.37	IT	142	MS	3.39E+00
11	75-Re-184	792.07	37.68	EC	35.4	D	8.54E-08
10	46-Pd- 97	792.7	13.84	EC	3.1	M	5.16E-04
9	50-Sn-125	792.8	* 40.	IT	6.2	US	* 4.47E+04
8	32-Ge- 81	792.94	34.08	B-	7.6	S	3.11E-02
	39-Y - 84	793	30	EC	4.6	S	4.52E-02
7	39-Y - 84	793.1	98.3	EC	39.5	M	2.87E-04
6	53-I -122	793.28	1.33	EC	3.63	M	4.23E-05
	51-Sb-130	793.4	86	B-	6.3	M	1.58E-03
5	51-Sb-130	793.4	100	B-	39.5	M	2.92E-04
4	52-Te-131	793.75	13.37	B-	33.25	H	7.74E-07
3	61-Pm-134	794.7	22.75	EC	5	S	3.15E-02
2	49-In-100	794.9	86.59	EC	5.9	S	1.02E-01
1	56-Ba-134	795.7	--	IT	2.63	US	N/A
	<b>55-Cs-134</b>	<b>795.86</b>	<b>85.46</b>	<b>B-</b>	<b>2.0652</b>	<b>Y</b>	<b>9.09E-09</b>
1	65-Tb-149	796	96.98	EC	4.16	M	2.69E-03
2	25-Mn- 46	796.1	1.6	EC	36.2	MS	3.06E-01
3	69-Tm-149	796.2	~*250.	EC	0.9	S	* 1.93E+00
4	48-Cd-107	796.46	0.06	EC	6.5	H	1.78E-08
5	45-Rh-110	796.7	5.35	B-	3.2	S	1.16E-02
6	26-Fe- 49	797.1	23.7	B+	64.7	MS	2.54E+00
7	27-Co- 50	797.3	26.99	B+P	38.81	MS	4.82E+00
8	50-Sn-131	798.5	* 86.	B-	--		* N/A
9	69-Tm-162	798.68	5.18	EC	24.3	S	1.48E-03
	69-Tm-162	798.68	8.38	EC	21.7	M	4.46E-05
10	97-Bk-246	798.7	61	EC	1.8	D	2.72E-06
11	56-Ba-143	798.79	15.56	B-	14.5	S	7.44E-03
12	95-Am-246	798.8	24.8	B-	25	M	1.15E-04
13	64-Gd-143	798.89	10.71	EC	110	S	6.75E-04
14	31-Ga- 84	798.9	--	B-,N	85	MS	N/A
15	60-Nd-154	799.55	10.66	B-	25.9	S	2.85E-03
16	72-Hf-182	799.6	9.4	B-	61.5	M	1.77E-05
17	81-Tl-210	799.6	98.96	B-	1.3	M	8.79E-03
18	84-Po-214	799.7	0.01	Alpha	164.3	US	4.22E-01

表3 大気中への放射性セシウムの放出量及びその比率

核種	1号機	2号機	3号機
	放出量 PBq		
Cs-134	0.71	16	0.82
Cs-137	0.59	14	0.71
合計	1.3	30	1.53
	比率 %		
Cs-134	54.6	53.3	53.6
Cs-137	45.4	46.7	46.4

放出量は下記資料の数値を引用し、それを基に比率を算出した。

- ・東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機、2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について：平成23年6月6日 原子力安全・保安院、  
[http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo\\_6017222\\_po\\_20110606-1nisa.pdf?contentNo=1&alternativeNo=](http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_6017222_po_20110606-1nisa.pdf?contentNo=1&alternativeNo=)  
「表5 解析で対象とした期間での大気中への放射性物質の放出量の試算値(Bq)」

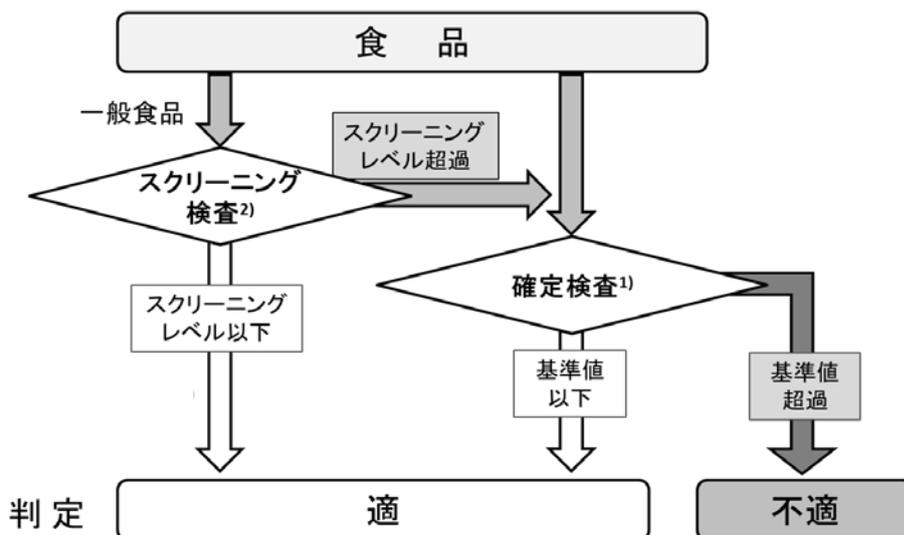


図1 食品中の放射性セシウムの検査の流れ

- 1) 食安発0315第4号 平成24年3月15日
- 2) 事務連絡 厚生労働省医薬食品局食品安全部監視安全課 平成24年3月1日  
食品中の放射性セシウムスクリーニング法の一部改正について

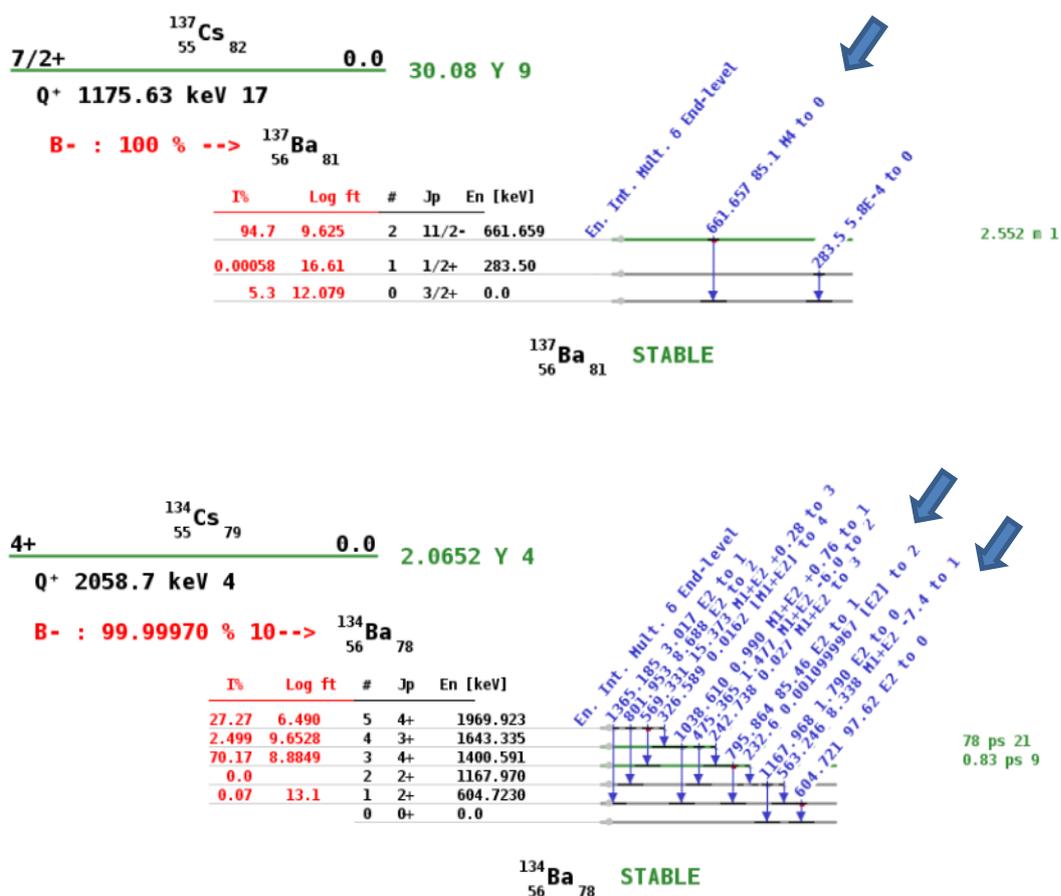
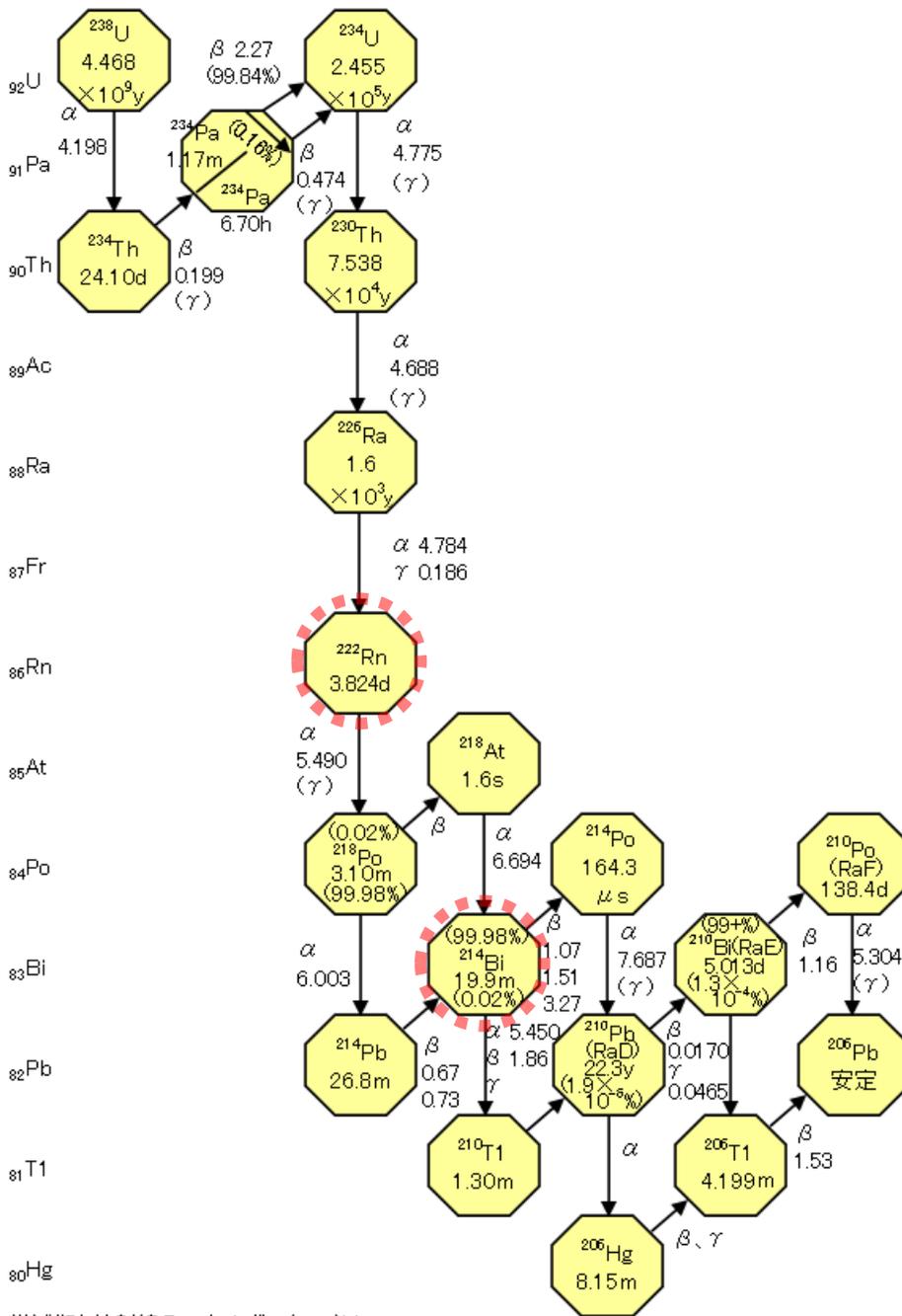


図2 Cs-137 及び Cs-134 の壊変図 (IAEA/Live Chart of Nuclides の図に太矢印を加筆)

<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>



半減期と放射線のエネルギー(MeV)は  
 Evaluated Nuclear Structure Data File(1995年2月)

### ウラン( $^{238}\text{U}$ )壊変系列

【出典】日本アイソトープ協会(編):アイソトープ手帳、丸善(2002年7月)、p.13

図3 ウラン壊変系列

原子力百科事典 ATOMICA : 一般財団法人 高度情報科学技術研究機構  
<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/08/08010312/07.gif> の図に赤破線加筆

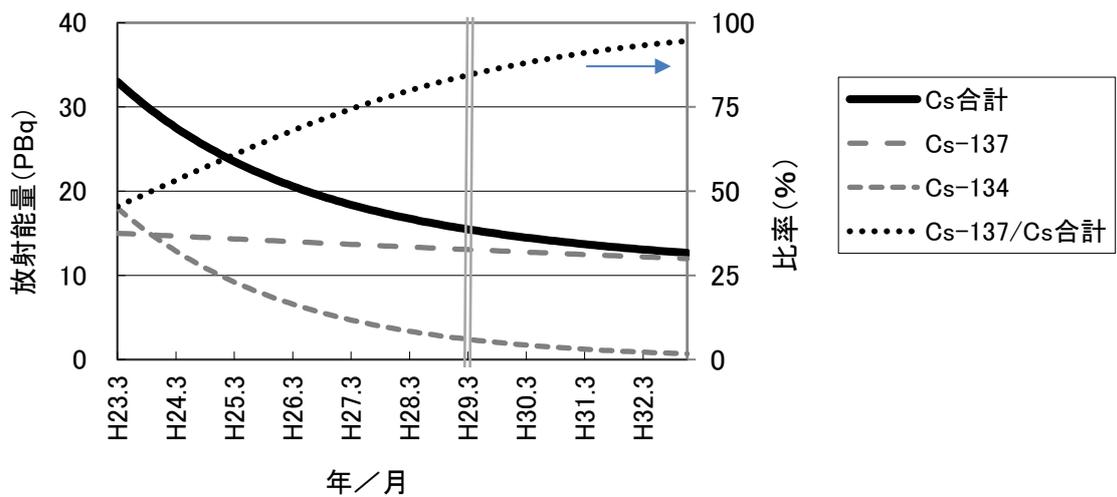


図4 放射性セシウムの減衰による経時変化 (表3参照)

平成23年3月の放出量をCs-137:15 PBq、Cs-134:18 PBq(平成23年6月6日原子力安全・保安院推定値)とし、それぞれの半減期を30年、2.1年としたときの核種ごとの放射エネルギーの減衰による経時変化、およびそれらの合計量の変化を左軸で示す。また、Cs-137の放射性セシウム(Cs-134+Cs-137)に対する比率変化を右軸で示す。

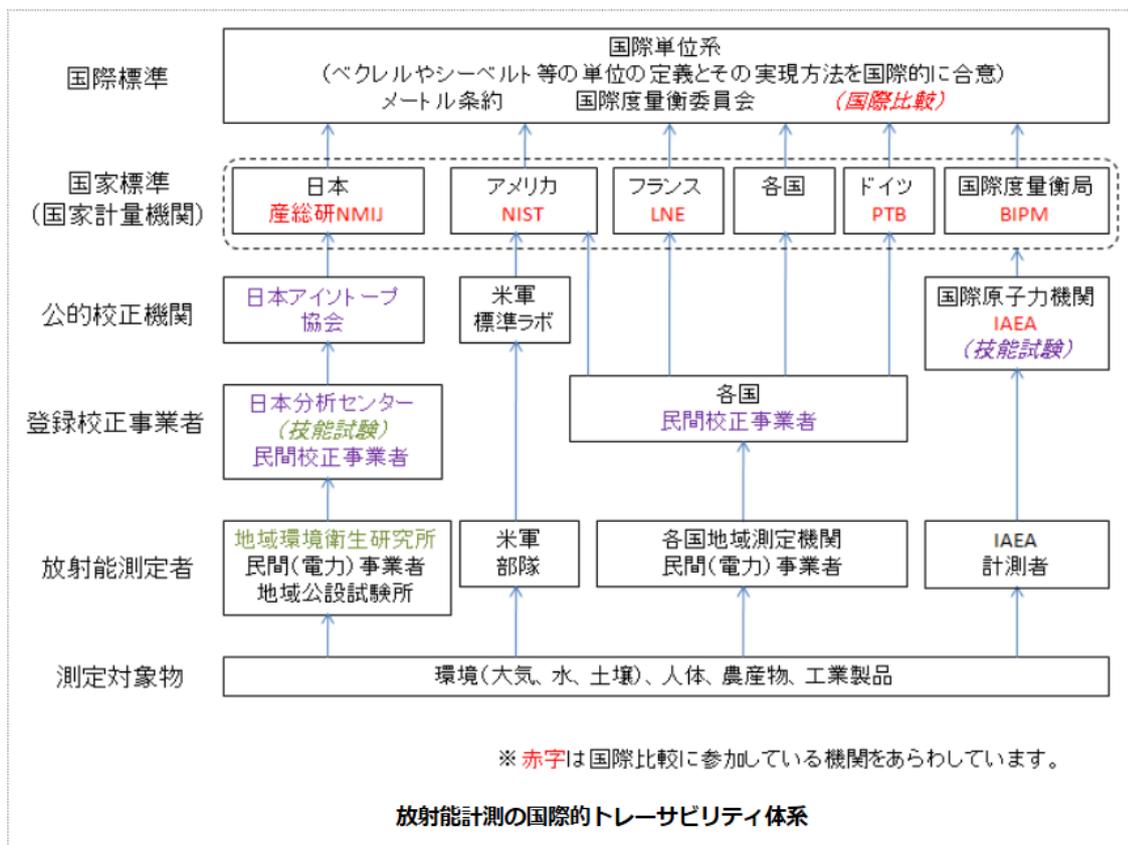


図5 放射能計測の国際的トレーサビリティ体系

[https://www.nmij.jp/library/IR\(J\)/confidence/index.html](https://www.nmij.jp/library/IR(J)/confidence/index.html) より