

Ⅱ. 分 担 研 究 報 告

緊急時の放射能測定法の検討

蜂須賀 暁子

食品中の放射性物質等検査システムの評価手法の開発に資する研究(23KA1006)

令和7年度分担研究報告書

緊急時の放射能測定法の検討

研究分担者 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

平成 23 年の東日本大震災を起因とする福島第一原子力発電所事故による飲食物の放射性物質汚染では、原子力安全委員会により示された指標値を暫定規制値とし、これを上回る食品については食品衛生法第 6 条第 2 号に当たるものとされ、検査に当たっては「緊急時における食品の放射能測定マニュアル(以下、「測定マニュアル」)」が参照された。測定マニュアルが制定された平成 14 年以降に、関連する法令等や放射能測定法シリーズの改訂等がなされていることから、本課題では測定マニュアルについて、改訂等が必要と思われる箇所を検討する。令和 5 年度は、背景と主に放射性セシウムを想定した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測定法について、令和 6 年度は主に放射性ヨウ素測定法について、本年度は主に α 線放出核種の測定法について検討した。

ウラン及びプルトニウムについては、測定マニュアルに記載されている ICP-MS 法がその迅速性において現在でも緊急時に有利であることから、基本的な分析方針を継続することに問題はないと考えられた。超ウラン元素のアメリシウム及びキュリウムについては測定マニュアルに記載がないが、対応する放射能測定法シリーズに準じた ICP-MS 法を測定核種に応じて採用するのが妥当と考えられた。また、超ウラン元素の基準値は 8 核種の合計放射能で与えられていることから、各種放射能測定装置により合計放射能を測定する方法も状況によっては選択肢になると考えられた。放射性ストロンチウムは、OIL6 においては測定核種に設定されていないものの、内部被ばく線量に影響を与え得る重要核種であることから、検討対象とした。現在、新たな放射能測定法シリーズとして緊急時に対応する放射性ストロンチウムの測定法が検討されており、その方法は、クラウンエーテル樹脂を用いて分離精製を行った後に、液体シンチレーションカウンタを用いてチェレンコフ光測定とシンチレーション測定を続けて行うことにより、イットリウム 90 の生成を待たずにストロンチウム(Sr)89 及び Sr-90 の放射能濃度を求めるものである。この方法は、迅速性に優れ、Sr-89 にも対応できることから、緊急時測定法の第一選択肢と考えられた。放射性ストロンチウムについては、測定状況の多様性が予想されることから、状況に応じて適切な方法を選択できるような複数の測定法の提示が妥当と考えられた。

緊急時の状況は事故等により大きく変動すると思われ、影響の大きさは異なるものの、いずれの測定法も混在核種の影響を受けることから、緊急時対応の測定については幅広く柔軟性を持たせて想定し、準備をしておくことが重要と思われた。

A. 研究目的

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災とその後の津波は甚大な被害をもたらし、福島第一原子力発電所(福島原発)では放射性物質を漏出する重大事故が発生した。環境中へ放出された放射性物質によって汚染された飲食物に起因する衛生上の危害の発生を防止し、もって国民の健康の保護を図ることを目的とする食品衛生法の観点から、同月 17 日に厚生労働省より「放射能汚染された食品の取り扱いについて」¹⁾が各自治体に発出された。通知内容は、原子力安全委員会により示された指標値²⁾を暫定規制値とし、これを上回る食品については、食品衛生法第 6 条第 2 号に当たるものとして食用に供されることがないよう販売その他についての処置を求めたものであり、検査に当たっては、「緊急時における食品の放射能測定マニュアル(以下、「測定マニュアル」)」³⁾を参照して実施することとした。

東日本大震災時には、緊急時の法令に基づいた各種の対策が取られたが、震災後 15 年が経過し、事故の教訓も踏まえて改正された関連法令も少なくない。また、放射能測定法シリーズは我が国の放射線測定の公定法であり、測定マニュアルもこれらを参照しているが、近年、このシリーズも改訂や新規制定がなされている。

測定マニュアルは平成 14 年の作成から 20 年以上が経過しており、背景となる関連法令や文書が変化してきていることから、本課題では、

=====

- 1) 放射能汚染された食品の取り扱いについて、食安発 0317 第 3 号、平成 23 年 3 月 17 日、厚生労働省医薬食品局食品安全部長

- 2) 飲食物摂取制限に関する指標について、平成 10 年 3 月 6 日、原子力安全委員会 原子力発電所等周辺防災対策専門部会環境ワーキンググループ

- 3) 緊急時における食品の放射能測定マニュアル、平成 14 年 3 月、厚生労働省医薬局 食品保健部監視安全課

測定マニュアルについて、現在に即して改訂が必要と思われる箇所等、緊急時の放射能測定法について検討する。令和 5 年度は、背景と主に放射性セシウムを想定した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測定法について、令和 6 年度は主に放射性ヨウ素測定法について、本年度は主に α 線放出核種の測定法について検討した。

B. 研究方法

主に以下の文書等を参考に検討した。
なお、斜体は旧文書である。

法令

- ・原子力災害対策特別措置法、平成 11 年法律第 156 号

緊急時対応等

- ・原子力施設等の防災対策について、昭和 55 年 6 月、平成 22 年 8 月一部改訂まで 14 回改訂、原子力安全委員会(防災指針)
- ・緊急時環境放射線モニタリング指針、昭和 59 年 6 月、平成 13 年 3 月一部改訂、原子力安全委員会(緊急時モニタリング指針)
- ・環境放射線モニタリング指針、平成 20 年 3 月、原子力安全委員会
- ・原子力災害対策指針、平成 24 年 10 月 31 日制定、最新令和 7 年 10 月 3 日一部改正、原子力規制委員会
- ・緊急時モニタリングについて(原子力災害対策指針補足参考資料)、平成 26 年 1 月

29 日制定、最新令和 6 年 3 月 21 日一部改正、原子力規制庁監視情報課

- ・平常時モニタリングについて(原子力災害対策指針補足参考資料)、平成 30 年 4 月 4 日制定、最新令和 3 年 12 月 21 日改訂、原子力規制庁監視情報課

放射能測定法シリーズ

- ・ <https://www.jcac.or.jp/site/library/series.html>、文部科学省及び原子力規制庁、主に No.12、No.21、No.22、No.28、No.30、No.31 他(表 6 参照)

公益財団法人日本アイソトープ協会

- ・アイソトープ手帳 12 版、日本アイソトープ協会編集発行、2020 年 3 月 31 日

C. 研究結果・考察

1. 測定対象核種及び濃度

平成 24 年の改正原子力災害対策特別措置法に基づく原子力災害対策指針には、災害対策として実施すべきことが示されており、全体像として防護措置等の実施フローの例を図 1 に、運用上の介入レベル(OIL: Operational Intervention Level)と防護措置の内容を表 1 に示す。介入レベル OIL とは、緊急時に防護措置を講じるための事前に定められた運用上の判断基準であり、IAEA の安全基準体系の一般安全要件 GSR part7 及び一般安全指針 GSG-2 等で用いられているもので、食品分野では飲食物の摂取制限措置の判断基準としての OIL6 の設定が求められている。図 1 及び表 1 には、原子力災害時の防護措置対策の全体の概略が示されているが、食品については、飲食物中の放射性核種濃度の測定を行い、一定以上の濃度、すなわち OIL6 を超えるものが確認された場合には、該当する飲食物の摂取を回避することで経口摂取による内部被ばくの低減を図る防護措置がとられる。この OIL6 の内容は、緊急時の核種測定に関係するため、測定マニュアル及び緊急時モニタリングにお

いて重要である。測定マニュアル作成時の防災指針に記載されている飲食物の摂取制限に関する指標を表 2 に示す。この値は、福島原発事故後に緊急時の防護措置を講じる基準として適切に機能したと評価され、原子力災害対策指針の OIL6 に日本独自の基準としてそのまま採用されている。したがって、測定核種、数量、測定対象飲食物等については震災前からの変更は生じておらず、測定マニュアルと摂取制限を判別するための緊急時モニタリングの飲食物の測定内容は同等レベルと考えられる。なお、これらは放射能濃度で与えられているため、ウランに関して、天然ウラン(後述)、ウラン(U)238 及び U-235 の放射能・質量濃度換算表を表 3 に示す。

OIL6 で扱われる α 線放出核種は、表 1 及び表 2 に示すように「ウラン」と「超ウラン元素のアルファ核種」のグループになる。これらに関連する核種の壊変データを表 4A に示す。

「ウラン」については核種の指定はないが、天然のウランにはウラン系列の U-238(半減期 4.468×10^9 年)、U-234(半減期 2.455×10^5 年)、アクチニウム系列の U-235(半減期 7.04×10^8 年)が存在し、その存在比率はそれぞれ 99.27%、0.005%、0.72% である。U-238 に対する U-235 の比率が 2~4% の低濃縮ウランは電力生成のための核燃料として、同比率が 90% 以上の高濃縮ウランは原子力潜水艦の核燃料や核兵器に、同比率が 0.2% 程度の劣化ウランは航空機のカウンターウェイトや放射線遮蔽容器などに工業利用されている。天然ウラン 1 g は 25 kBq の比放射能を持ち(表 3)、このうち U-238、U-235、U-234 の寄与率はそれぞれ 48.9%、2.2%、48.9% である。天然には存在せず、核変換により生じる同位体としては U-232、U-233、U-236、U-237 があり、これらの半減期はそれぞれ 68.9 年、 1.59×10^5

年、 2.34×10^7 年、6.75 日である。この中で U-237 は、 α 壊変ではなく β -壊変をすることから、預託実効線量への寄与率は低い。これらのことから、環境汚染時の核種の存在比率を一律に事前に想定することは困難である。「ウラン」としての飲食物摂取制限の際の基準の濃度は、「飲料水、乳・乳製品」は 20 Bq/kg、「野菜類、穀類、肉・卵・魚・その他」は 100 Bq/kg(表 1)である。

「超ウラン元素のアルファ核種」には、プルトニウム(Pu)238、Pu-239、Pu-240、Pu-242、アメリシウム(Am)241、キュリウム(Cm)242、Cm-243、Cm-244 の 8 核種が含まれている。原子炉中の存在割合の高いネプツニウム(Np)239、Pu-241 についても検討されたが、Np-239 は β -壊変核種であり、Pu-241 も α 壊変の割合はごく僅かで、ほとんどが β -壊変をするため、預託実効線量への寄与率が低く、この 2 核種は最終的に測定対象から外された。これら「超ウラン元素のアルファ核種」の飲食物摂取制限に関する指標においては放射能濃度の合計として、「飲料水、乳・乳製品」は 1 Bq/kg、「野菜類、穀類、肉・卵・魚・その他」は 10 Bq/kg(表 1)である。

なお、放射能と質量は、半減期(あるいは壊変定数)を用いて換算可能である。飲食物摂取制限に関連する核種について、放射能と質量の関係を表 5 に示す。長半減期核種である U-238 の 1 Bq は 80 μ g であり、20 Bq/kg(= 1600 μ g/kg)程度の測定は、一般的な機器分析で扱う濃度範囲内であることが分かる。しかし、短半減期核種、例えばヨウ素(I)-131 の 1 Bq は 0.2 fg(フェムトグラム: 10^{-15} g)であり、300 Bq/kg(= 60 fg/kg)程度の測定は、一般的な機器分析では困難なレベルであり、高感度な放射線測定が有利であることが読み取れる。

一般に放射線測定は高感度であるが、放射線は線種ごとに性質が異なるため、測定手法も線種に依存する。昨年度までに検討

した放射性セシウムや放射性ヨウ素は、透過性の高い γ 線を測定に利用できるため、測定核種の分離精製を行わずに、前処理としては標準線源と形状を揃える操作(試料の均質化、同等測定容器の使用)のみで測定することができる。迅速性を要求される緊急時測定においては煩雑な測定核種の分離精製を行わないことは有利である。しかし、 γ 線とは異なり、 α 線は透過力が極めて乏しく自己吸収が大きいいため、 α 線測定を行う場合は、測定核種を分離精製して測定に適した測定試料を作製する必要がある。また、 γ 線や α 線は線スペクトルであるのに対し、 β 線は連続スペクトルであることから、検出信号において他核種と区別することが困難なため、 β 線測定においては、測定核種を他核種から分離精製した測定試料を作成するのが基本である。測定に利用する事象の特性、測定濃度範囲等、測定における基本的事項を踏まえた上で、緊急時における測定法について検討した。

2. 放射能測定法シリーズ

放射能測定法シリーズは、環境中に存在する放射性核種を効率的かつ正確に分離・定量するための方法を規定したマニュアルで、震災前は「環境放射線モニタリング指針」、現在では原子力災害対策指針補足参考資料の「緊急時モニタリングについて」及び「平常時モニタリングについて」での使用を目的としたもので、国(文部科学省及び原子力規制庁)によって制定され、我が国の放射線・放射能測定の基本となるものである。

測定マニュアルもこれらに基づき作成されていることから、平成 14 年の作成当時と現在の放射能測定法シリーズの制定・改訂情報を表 6 に示す。測定マニュアルで引用されている文書の番号を太字としたが、平成 14 年以降に改訂されたもの(No. 15、No. 7 など)や、関連分野で新たに作成された文

書(No. 29 など)もある。本年度は主に α 線放出核種の測定について、まず、平常時の一般的な測定法を整理し、緊急時の測定法について検討した。

3. ウラン測定

3. 1 ウラン測定法

放射能測定法シリーズ「No. 14 ウラン分析法、平成 14 年 7 月(2 訂)」では、水試料(海水、陸水)、土試料(海底土、土壌)、生物試料(海産生物、農作物)及び大気浮遊じんを対象としている。天然核種であるウランは環境中に広く存在し、陸水、海産生物、農作物試料の平均的ウラン含有量は、それぞれ 0.01~0.1 $\mu\text{g/L}$ 、1 $\mu\text{g/kg}$ 生、10 $\mu\text{g/kg}$ 生とされる。

飲食物関連試料のウランの各種分析法と分析目標レベルを表 7 に示す。分析法としては、水試料は酸溶液とし、生物試料は 105°C で乾燥後、500°C の電気炉で灰試料とし、酸で前処理する。各測定対象試料に応じた前処理により得られた酸溶液について、キレート樹脂法、TBP(リン酸三ブチル)抽出法、水酸化鉄(III)共沈法等によりウランを分離した後、吸光光度法、蛍光光度法又は α 線スペクトロメトリーにより測定する。吸光光度法は、ウラン(VI)あるいはウラン(IV)のアルセナゾIII錯体を、それぞれ 655nm、665nm における吸光度で測定する。蛍光光度法は、ウラニルイオン(UO_2^{2+})の蛍光を利用したもので、吸光光度法より高感度であるものの、測定試料の熔融体作成技術において再現性に問題が生じやすい。 α 線スペクトロメトリーは、分離精製したウランをステンレス鋼板上に電着し、シリコン半導体検出器を用いて測定するもので、同位体別の定量が可能である。内部標準物質としては U-232 を用い、平常時の測定は通常、24 時間程度行う。また、誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)法は、前処理により得られた

酸溶液を希釈後、ICP-MS(ここでは四重極型)により測定し、質量電荷数比(m/z)238 等のイオン強度からウランの量を求めるもので、ウランの同位体別の定量が可能である。内標準元素としてビスマス又はタリウムを用いる。なお、ICP-MS 法は検出感度が高く、他の定量法による場合より分析供試量を少なくすることができるが、生物試料の場合には供試量と硝酸の量がウランの溶出量に影響するため、表 7 では他の分析法と同じ供試量として記載されている。

ウランについては、緊急時に特化した放射能測定法シリーズは制定されていない。

3. 2 測定マニュアルにおけるウラン測定

一般的なウラン分析法の中で緊急時に有利と考えられるのは、感度において飲食物の摂取制限の基準を満たし、かつ、前処理や分離精製が簡便で測定も迅速に行える ICP-MS 法であり、測定マニュアルにも放射能測定法シリーズの ICP-MS 法が記載されている。この「No. 14 ウラン分析法」は、測定マニュアル制定時の平成 14 年から改訂されていないことから、基本的な分析方針を継続することに問題はないと考えられる。ただし、上述したように、ウランの測定対象核種比率は環境汚染時の状況によって異なることから、測定対象核種及び共存核種の存在比率等、測定条件によっては、 α 線スペクトロメトリーなど他の方法が選択される場合もあり得ると考えられる。

4. 超ウラン元素のアルファ核種測定法

4. 1 プルトニウムの測定法

放射能測定法シリーズ「No. 12 プルトニウム分析法、平成 2 年 11 月(1 訂)」は、超ウラン元素であるプルトニウムのうち、Pu-239+Pu-240 の分析法を定めたものであるが、Pu-238 の測定も可能である。Pu-239 と Pu-240 はそれぞれの放出する α 線のエネルギー

ーが近似しているため(表 4A 参照)、通常の α 線スペクトロメトリーだけでは区別ができず、両核種の合計量として算出される。測定対象試料は水試料、灰試料、土試料、降下物、大気浮遊じん及び焼結プルトリウムを含む環境試料としている。分析方法としては、各対象試料に応じた前処理・濃縮を行ったのち、イオン交換法(強塩基性陰イオン交換樹脂)又は溶媒抽出法(TOA: トリ-n-オクチルアミン-キシレン)によりプルトリウムを分離精製し、ステンレス鋼板上に電着して計測用試料とする。計測用試料について、シリコン半導体検出器による α 線スペクトル測定によりプルトリウムを定量する。なお、放射エネルギーと化学収率を求めるため、あらかじめ試料に Pu-242(又は Pu-236)標準溶液を一定量加える。この分析法の飲食物関連試料についての分析目標レベルを表 8 に示す。試料の化学分離から電着終了までに要する時間は、イオン交換法で約 30 時間、溶媒抽出法で約 20 時間である。

4. 2 アメリシウムの測定法

放射能測定法シリーズ「No. 21 アメリシウム分析法、平成 2 年 11 月」は、Am-241 の分析法を定めたものであるが、キュリウムも挙動が類似しているため、Am-241 と同時に Cm-242 も測定できる。測定対象試料は、水試料、灰試料、土試料、降下物、大気浮遊じんとしている。分析方法としては、各対象試料に応じて前処理・濃縮を行ったのち、イオン交換法(強塩基性陰イオン交換樹脂)又は溶媒抽出法(TOA-キシレン)によりアメリシウムを分離、精製し、ステンレス鋼板上に電着し計測用試料とする。計測用試料について、シリコン半導体検出器による α 線スペクトル測定によりアメリシウムを定量する。なお、放射エネルギーと化学収率を求めるため、あらかじめ試料に Am-243(又は Cm-244)標準溶液を一定量加えておく。この分析法

の飲食物関連試料についての分析目標レベルを表 8 に示す。試料の化学分離から電着終了までに要する時間は、イオン交換法で約 70 時間、溶媒抽出ーイオン交換法で約 50 時間である。

4. 3 プルトリウム・アメリシウムの分析法

放射能測定法シリーズ「No. 22 プルトリウム・アメリシウム逐次分析法、平成 2 年 11 月」は、同一試料から Pu-239+Pu-240 と Am-241 の逐次分析法を定めたもので、前述の「No. 12 プルトリウム分析法」と「No. 21 アメリシウム分析法」を併せた内容となっている。対象試料は、水試料、灰試料、土試料、降下物、大気浮遊じん、焼結プルトリウムを含む環境試料としている。各対象試料に応じた前処理・濃縮を行ったのち、イオン交換法又は溶媒抽出法によりプルトリウムとアメリシウムを化学分離し、各々を分離、精製し、ステンレス鋼板上に電着して計測用試料とする。計測用試料について、シリコン半導体検出器による α 線スペクトロメトリーを行うことによりプルトリウムとアメリシウムを定量する。なお、化学収率を求めるため、あらかじめ試料に Pu-242(又は Pu-236)及び Am-243(又は Cm-244)標準溶液を一定量加える。この分析の、水試料及び灰試料の分析目標レベルを表 8 に示す。試料の化学分離から電着終了までに要する時間は、イオン交換法の場合、プルトリウムで約 30 時間、アメリシウムで約 70 時間であり、溶媒抽出ーイオン交換法の場合、プルトリウムで約 20 時間、アメリシウムで約 50 時間であり、各々測定法シリーズの No. 12 と No. 21 と同じである。

4. 4 プルトリウムの迅速分析法

放射能測定法シリーズ「No. 28 環境試料中プルトリウム迅速分析法、平成 14 年 7 月」は、緊急時の迅速な分析法として ICP-MS を

用いた分析法を採用している。従来の環境試料中の「No. 12 プルトニウム分析法」は、プルトニウムを分離・精製後、シリコン半導体検出器を用いてその α 線を測定する方法であり、試料の前処理、分解・抽出、分離・精製及び α 線測定に 1 週間程度を要するため、緊急時の分析法への対応として新たに迅速分析法が制定された。質量分析法の一つである ICP-MS は、放射線を測定する方法とは異なり、安定元素や長半減期のプルトニウム同位体等に対しても優れた検出感度を持ち、多元素同時分析や迅速測定が可能であるという特徴を有する。また、測定法だけでなく、前処理から分離精製に至る各工程の迅速化の検討も加わり、24 時間程度で結果を得ることができる分析法となっている。測定対象試料は、大気浮遊じん、土壌、降下物、飲料水、牛乳及び葉菜とされ、難溶性(焼結)プルトニウムを含む試料にも対応している。この分析法の水試料及び灰試料の分析目標レベルを表 8 に示す。

飲料水は、陸水(井戸水、水道水等)を対象とし、可溶性と難溶性のプルトニウムを合わせて分析する。試料に Pu-242 標準溶液を一定量加えた後、ろ過する。残渣は、マイクロウエーブ分解装置と硝酸-フッ化水素酸混合溶液を用いて 30 分間加熱して、含まれている難溶性のプルトニウムを浸出する。浸出液をろ液に合わせた後、溶液中のプルトニウムを、水酸化鉄(III)共沈法により濃縮し、沈殿を硝酸で溶解する。牛乳試料は、原乳及び市販乳を対象とし、可溶性プルトニウムを分析する。牛乳試料をガスコンロで乾燥・炭化し、マイクロウエーブ高温灰化装置等で加熱灰化し、Pu-242 標準溶液を一定量加えた後、マイクロウエーブ分解装置を用いて硝酸に溶解する。葉菜試料は、白菜、ほうれん草、レタス等を対象とし、難溶性プルトニウムも分析対象とする。葉菜試料を、105℃で乾燥後、マイクロウエーブ高温灰化

装置等を使用して 3 時間加熱することにより灰化し、Pu-242 標準溶液を一定量加えた後、マイクロウエーブ分解装置を用いて硝酸-フッ化水素酸混合溶液で 30 分間プルトニウムを浸出する。各測定対象試料に応じた前処理により得られた酸溶液中のプルトニウムを Pu⁴⁺に調整した後、硝酸系の陰イオン交換法によりプルトニウムを分離・精製する。精製した試料を硝酸溶液とし、ICP-MS を用いた Pu-242 トレーサー法で Pu-239 と Pu-240 を定量する。

また、Pu-238 を定量する必要がある場合は、ICP-MS 測定後の残試料溶液を用いてプルトニウムをステンレス鋼板上に電着して α 線計測用線源とし、シリコン半導体検出器を用いた α 線スペクトロメトリーによる Pu-242 トレーサー法で定量する。試料の前処理、化学分離から ICP-MS 測定までに要する時間は、飲料水、牛乳試料、葉菜試料において、それぞれ約 13、12、16 時間である。

4. 5 アメリシウム、キュリウムの迅速分析法

放射能測定法シリーズ「No. 30 環境試料中アメリシウム 241、キュリウム迅速分析法、平成 16 年 2 月」は、環境試料中のアメリシウム及びキュリウムを迅速に定量することを目的としたもので、対象試料は、大気浮遊じん、土壌、降下物、飲料水、牛乳及び葉菜としている。分析は、前述の「No. 28 環境試料中のプルトニウム迅速分析法」の分離・精製工程のイオン交換樹脂カラムの通過液から、アメリシウム及びキュリウムを分離・精製し、 α 線の測定にはシリコン半導体検出器を用いている。

従来の環境試料中のアメリシウム、キュリウムの分析法(No. 21 アメリシウム分析法)は、アメリシウム及びキュリウムを陰イオン交換法等により分離・精製後電着し、シリコン半導体検出器を用いてその α 線を測

定する方法であり、試料の分解・抽出の前処理、分離・精製及び α 線測定 of 各工程に長時間を要し、「緊急時の分析法」には適していない。そこで、分離法に抽出クロマトグラフィーを、測定試料の調製にフッ化ネオジム共沈法を採用することにより、分析開始後 24 時間以内(α 線計測時間 4 時間を含む)で結果を得ることができる、緊急時に対応可能な迅速分析法が定められている。また、高濃度の試料への対応とスクリーニングを目的として、低エネルギー光子スペクトロメータ(LEPS)を用いた γ 線スペクトロメリーにより Am-241 を定量する方法も併せて記載されている。これら分析法による水試料及び灰試料の分析目標レベルを分析供試量等とともに表 8 に示す。

飲料水、牛乳及び葉菜試料の前処理は、Pu-242 標準溶液を Am-243 標準溶液に置き換える他は、「No. 28 環境試料中プルトニウム迅速分析法」と同様に行う。各測定対象試料に応じた前処理により得られた酸溶液中のプルトニウムを Pu4+に調整した後、硝酸系の陰イオン交換法によりプルトニウムを分離除去する。アメリシウム、キュリウムは、水酸化鉄(III)共沈法で捕集後、抽出クロマトグラフィー(TRU レジンカラム)により分離・精製する。精製した測定対象核種溶液を、フッ化ネオジム共沈法によりろ紙上にてろ別して α 線計測用試料とし、シリコン半導体検出器を用いた α 線スペクトロメリーにより、Am-243 トレーサー法で定量する。試料の前処理、化学分離から測定までに要する時間は、飲料水、牛乳試料、葉菜試料において、それぞれ約 17、19、22 時間である。

4. 6 全アルファ放射能迅速分析法

放射能測定法シリーズ「No. 31 環境試料中全アルファ放射能迅速分析法、平成 16 年 2 月」は、前述(No. 30 環境試料中アメリシウム 241、キュリウム迅速分析法参照)の抽

出クロマトグラフィーを用いて分離・精製し、試料中の全 α 放射能(プルトニウム、アメリシウム、キュリウムの同位体)を、種々の α 線測定装置により行い、分析開始後 24 時間以内に結果を得ることができる緊急時に対応した全 α 放射能迅速分析法である。対象試料は、大気浮遊じん、土壌、降下物、飲料水、牛乳及び葉菜としている。この分析法による水試料及び灰試料の分析目標レベルを分析供試量等とともに表 8 に示す。

飲料水、牛乳及び葉菜試料の前処理は、標準溶液を添加しない以外は、「No. 28 環境試料中プルトニウム迅速分析法」(又は「No. 31 環境試料中全アルファ放射能迅速分析法」)と同様に行う。各測定対象試料に応じた前処理により得られた酸溶液中のプルトニウム、アメリシウム及びキュリウムを水酸化鉄(III)共沈法で捕集し、プルトニウムを Pu3+に調整した後、抽出クロマトグラフィー(TRU レジンカラム)によりプルトニウム、アメリシウム及びキュリウムを分離・精製する。精製した測定対象核種溶液を、フッ化ネオジム共沈法によりメンブランフィルター上にろ別し α 線計測用試料とし、ZnS(Ag)シンチレーション計数装置等を用いて全 α 放射能を定量する。定量には、あらかじめ標準線源を用いて決定した計数効率を用いる。また、シリコン半導体検出器を用いた場合は、その α 線スペクトルから、核種ごとの定量も可能である。なお、本法では、化学分離工程において損失があるが、標準物質を添加していないため、回収率の補正ができないことに留意する。

試料の前処理、化学分離から測定までに要する時間は、飲料水、牛乳試料、葉菜試料において、それぞれ約 14、18、20 時間である。

4. 7 測定マニュアルにおける超ウラン元素のアルファ核種測定法

測定マニュアル作成の平成 14 年には、「No. 28 環境試料中プルトニウム迅速法」の原案までが作成されており、プルトニウムについてはこの方法が記載されている。アメリカシウム、キュリウムについては、該当する迅速分析法(No. 30、No. 31)は制定されておらず、測定マニュアルにこれらの核種についての記載はない。

緊急時における測定としては、基本的には、簡便性、迅速性から ICP-MS 法が有用である。具体的には、「No. 28 環境試料中プルトニウム迅速分析法」、「No. 30 環境試料中アメリカシウム 241、キュリウム迅速分析法」に記載の ICP-MS 法を測定核種に応じて採用するのが妥当と考えられる。いずれも測定核種の分離精製操作を経ているため、不純物はおおむね除かれていると考えられるが、ICP-MS は同重体(U-238 と Pu-238 など)や近傍に存在比の大きいピークがあるなど測定条件によっては、期待される精度、感度を得られないことに留意する必要がある。

超ウラン元素の基準値は 8 核種の合計放射能で与えられていることから、「No. 31 環境試料中全アルファ放射能迅速分析法」に記載の ZnS(Ag)シンチレーション計数装置、 2π ガスフロー計数装置等により合計放射能を測定する方法も、状況によっては選択肢になると考えられる。

5. 放射性ストロンチウム測定

上述のように、「飲食物摂取制限に関する指標」及び「OIL6：飲食物の摂取を制限する際の基準」において、放射性ストロンチウム(Sr-90 及び Sr-89)が属するグループの代表核種は、測定に γ 線を利用できる放射性セシウム(Cs-134 及び Cs-137)であり、純 β 核種である Sr-90、Sr-89 は測定対象とはされていない。しかし、半減期が 28.8 年と長く(表 5B)、内部被ばく線量に影響を与える核種として測定マニュアルに記載されており、

状況によっては測定する必要性が生じ得ることから、本研究でも関連する放射能測定法シリーズ(表 6)を中心に検討対象とした。

5. 1 放射性ストロンチウム分析法

放射能測定法シリーズ「No. 2 放射性ストロンチウム分析法、令和 7 年 6 月(5 訂)」では、放射性ストロンチウムのうち、環境中に放出された場合、被ばく線量評価上重要な Sr-89 及び Sr-90 が測定対象となっている。測定マニュアル作成の平成 14 年以降は、平成 15 年(4 訂)及び令和 7 年(5 訂)に改訂されている。平成 15 年の改訂では、試薬の取り扱いの問題から、3 種類の主たる分析法(分離精製法：発煙硝酸法、イオン交換法、シュウ酸塩法)の筆頭を発煙硝酸法からイオン交換法にした。令和 7 年の改訂では、主たる分析方法に大きな変更はなかったものの、牛乳関連試料に適用としていた溶媒抽出法が、利用頻度が低いことから本文から削除され、逆に、固相抽出を用いた化学分離法及び質量分析計を用いた放射性ストロンチウムの定量法(質量分析法、ICP-MS と表面電離型質量分析装置)がより迅速な方法として参考に記載された。主たる分析法であるイオン交換法、発煙硝酸法及びシュウ酸塩法の概要は以下のとおりである。

イオン交換法：強酸性陽イオン交換樹脂を充填したカラムを用い、陽イオン交換樹脂に対する陽イオン金属の分配係数の差を利用して、ストロンチウムとカルシウム等の他のアルカリ土類金属元素とを分離する方法。樹脂カラムの交換容量を超えるほどカルシウムを多量に含む試料の場合、複数の樹脂カラムを用いて対処する。

発煙硝酸法：硝酸の比重 1.45(質量分率約 77 %)における硝酸ストロンチウムと硝酸カルシウムとの溶解度の差を利用してストロンチウムとカルシウムとを分離す

る方法。硝酸塩沈殿の生成を繰り返す必要があるため、発煙硝酸の取扱いに注意が必要である。また、カルシウム以外の同族元素の分離除去操作も別途必要になる。

シュウ酸塩法：シュウ酸塩の溶解度の差を利用してストロンチウムを分離する方法であり、カルシウムを分離除去しないので簡便ではある反面、使用器具の容量が大きく、分析操作が煩雑である等のデメリットがある。また、炭酸ストロンチウム沈殿を測定試料とする場合、分析対象核種は **Sr-90** のみに限定される。

測定対象試料は、降下物、大気浮遊じん、陸水、海水、土壌・海底土、灰試料である。この分析法の陸水試料及び灰試料の分析目標レベル(検出可能レベル)を表 9 に示す。

陸水(飲料水、河川水等)は、蒸発法又は強酸性陽イオン交換樹脂を用いたイオン交換法による前処理により酸溶液とする。灰試料(穀類、野菜類、茶葉、松葉、牛乳、海産物、日常食等)は酸に溶解する。これら各試料の前処理により得られた酸溶液中のストロンチウムをイオン交換法、発煙硝酸法又はシュウ酸塩法により分離・精製する。別途、ストロンチウムの回収率を炭酸ストロンチウム沈殿の重量法、あるいは液体シンチレーションカウンタ(LSC)測定溶液を ICP 発光分析法又は原子吸光法により求め、放射能濃度の算出時に用いる。

分離・精製した放射性ストロンチウムの測定は、低バックグラウンド 2π ガスフロー計数装置(LBC)を用いる場合、**Sr-90** はこれと放射平衡にある娘核種のイットリウム(**Y**)-90 を分離して **Y-90** の放射能を測定することによって定量する。**Sr-89** は炭酸ストロンチウムの放射能(**Sr-90** + **Y-90** + **Sr-89**)を測定した後、その炭酸ストロンチウムから **Y-90** を分離して **Y-90** の放射能を測定し、得られた計数値から **Sr-90** 及び(**Sr-90** + **Y-90**)の計数値を算出し、炭酸ストロンチウムの計

数値から(**Sr-90** + **Y-90**)の計数値を差し引くことにより定量する。

LSC を用いてチェレンコフ光を利用する場合、**Sr-89** はスカベンジ後速やかに測定することによって定量する。**Sr-90** は **Y-90** 成長後(2 週間以上が望ましい)に測定し、得られた計数値から **Sr-89** の計数値を差し引くことにより定量する。

5. 2 LSC による放射性ストロンチウム分析法

放射能測定法シリーズ「No. 23 液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法、平成 8 年 3 月(1 訂)」は、対象核種が文書表題にはないものの、放射性ストロンチウムの分析法が掲載されており、前述の「No. 2 放射性ストロンチウム分析法」とも密接な関係にあることから、概要を記載する。LSC は、溶液状態での測定が可能なことから試料の調製が簡便であり、 α 線及び β 線に対して高い計数効率を有する。この LSC を用いた測定について 3 分類し、①チェレンコフ光による放射性ストロンチウム及び放射性セリウム分析法、②液体シンチレーション測定(β 線)による放射性コバルト及び放射性ヨウ素分析法、③液体シンチレーション測定(α 線)によるプルトニウム分析法、の構成で書かれている。放射性ストロンチウムについては、チェレンコフ光と液体シンチレーション測定の組み合わせにより複数の方法が可能であるが、①のチェレンコフ光による測定の項目に記載されている。

測定対象は、海水、灰試料(海産生物、穀類・野菜、牛乳等)及び土壌であり、そのうち、飲食物に関連する試料の分析目標値等を表 9 に示す。分析目標値は、測定時間を 100 分とし、バックグラウンド計数の計数誤差の 3 倍以上を有意とした場合、**Sr-89** でおよそ 70 mBq/試料である。また、**Sr-90** の分

析目標値は、含まれる Sr-89 の放射能により変化するが、Sr-89 が含まれていない場合、およそ 40 mBq/試料である。本法は測定試料調製が簡単であるため、分析所要時間を短縮でき、測定試料調製までに要する時間は、イオン交換法で約 25 時間、シュウ酸塩法で約 30 時間、溶媒抽出法で約 15 時間である。

海産生物、穀類、野菜類、牛乳、ドライミルクなどの灰試料は塩酸に溶解した後、イオン交換法及びシュウ酸塩法により放射性ストロンチウムを分離・精製し、チェレンコフ光測定により定量する。回収率を算出するための安定ストロンチウムの測定は原子吸光法が記載されている。測定は、Sr-89、Sr-90(Y-90)が混在する試料について、Y-90 をスカベンジした直後にチェレンコフ光を測定(主として Sr-89 が測定される)し、さらに数日後(2 週間以上が望ましい)に再びチェレンコフ光を測定(Sr-89 と Y-90 が測定される)する。両者の計数率から Sr-89 及び Sr-90 の放射能を求める。定量には、あらかじめ標準線源を用いて決定した計数効率を用いる。

Y-90 と平衡状態にある Sr-90 を含む牛乳等の灰試料については、溶媒抽出法(ビス-(2-エチルヘキシル)リン酸(HDEHP)-トルエン)により Y-90 をミルキングし、チェレンコフ光を測定し、得られた計数率から放射能を求める方法も記載されている。なお、前述のように、溶媒抽出法は「No.2 放射性ストロンチウム分析法(5 訂)」においては普及性から削除されている。

5. 3 緊急時放射性ストロンチウム分析法

放射能測定法シリーズ「(番号未定)緊急時における放射性ストロンチウム分析法(令和 8 年 6 月制定予定)」は、前述の「No.2 放射性ストロンチウム分析法」が化学分離から測定に至る工程に長時間を要するため、緊急時における運用には不向きであることが

ら、緊急時に有用な分析法として作成されており、令和 8 年 6 月制定予定の資料が web 上で公開されている(表 6)。それによれば、分離・精製にクラウンエーテル固定化メタクリル樹脂(クラウンエーテル樹脂)を採用することにより分析開始から測定までの分析所要時間が 24 時間程度となっている。測定には LSC を採用し、試料ごとにチェレンコフ光測定及びシンチレーション測定を行うことで、Y-90 の生成を待たずに Sr-89 及び Sr-90 の放射能濃度を求めることができる。

対象試料は、「No. 2 放射性ストロンチウム分析法」に記載されている全ての試料(降下物、大気浮遊じん、陸水及び飲料水、牛乳、海水、土壌、食品)としている。この分析法による水試料、牛乳及び食品試料の分析目標レベルを分析供試量等とともに表 9 に示す。試料の前処理、化学分離から測定までに要する時間は、飲料水、牛乳試料、食品試料において、それぞれ約 12、10、16-24 時間である。

飲料水試料は、シュウ酸塩沈殿によりストロンチウムを前処理し、沈殿を硝酸で溶解する。牛乳試料は強酸性陽イオン交換樹脂カラム、炭酸塩沈殿によりストロンチウムを前処理し、沈殿を硝酸で溶解する。食品試料は灰化した後、酸で分解・抽出し、シュウ酸塩沈殿によりストロンチウムを分離し、沈殿を硝酸で溶解する。これら各測定対象試料に応じた前処理により得られた酸溶液中のストロンチウムをクラウンエーテル樹脂カラム及び炭酸塩沈殿により分離・精製する。炭酸ストロンチウムの沈殿は質量等により定量し、ストロンチウムの回収率を求める。炭酸ストロンチウムの沈殿について LSC を用い、最初にチェレンコフ光測定を行い、続いてシンチレータを加えてシンチレーション測定を行う。これら 2 回の測定値及びストロンチウムの回収率から、Sr-

89 及び Sr-90 の放射能濃度を求める。

なお、この方法は、IAEA の方法を参考としている (Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 27 “Rapid Simultaneous Determination of 89Sr and 90Sr in Milk: a Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting”, 2013)。

5. 4 米国の放射性ストロンチウム測定法

米国では、米国食品医薬品局(FDA)が食品安全・監視プログラム「Compliance Program Guidance Manual (CPGM) Program 7034.019 : Toxic Elements in Food and Foodware, and Radionuclides in Food - Import and Domestic(食品及び食品用器中の有害元素並びに食品中の放射性物質 - 輸入及び国内品)」に則り、平常時の放射性物質の監視を行っている。放射性ストロンチウムの分析法は、「EAC SOP for the determination of Strontium-90 in Foods by Internal Gas- Flow Proportional Counting, Method 2.0. (内部ガスフロー比例計数法による食品中の Sr-90 の測定に関する標準作業手順書)」及び「WEAC SOP for Analysis of Strontium-90 in Food by Liquid Scintillation Counting, SOP-000450(LSC による食品中 Sr-90 の分析に関する標準作業手順書)」が定められており、共に、食品の Sr-90 が Y-90 と平衡状態にあり、新たな汚染がなく、また、事故等の直後に懸念される Y-91(半減期 58.5 日)の影響がない場合を想定している。前者は、2004 年制定、2021 年に 11 訂が出されており、灰試料中のイットリウムを硝酸で抽出し、発煙硝酸及び TBP で Y-90 を抽出し、水酸化物沈殿、次いでシュウ酸塩沈殿により精製し、沈殿を LBC により計測する方法である。試料中の Sr-90 濃度は、計測された Y-90 の計数率、計数効率、化学収率、減衰補正係数、及び試料重量から算出する。後者は 2020 年制定、2023 年に 6 訂が出されており、灰試料中のイットリウ

ムを硝酸で抽出し、DGA 樹脂及び TRU 樹脂により精製した Y-90 を、LSC を用いたチェレンコフ光測定により定量する方法である。

FDA が平常時の食品監視に対応しているのに対し、緊急時は米国環境保護庁(EPA)が対応しており、分析法は「Selected Analytical Methods for Environmental Remediation and Recovery (SAM) 2017(環境汚染事故後の調査や復旧作業で使用される分析方法のガイドライン)」に、化学物質、放射性物質、病原体などによる汚染事故が発生した際に迅速かつ統一された基準で分析を行うための指針としてまとめられており、現行の文書は 2004 年に制定されたものの 8 訂に当たる 2017 年版である。飲食物に関連する放射性ストロンチウムの分析法としては、飲料水と(食用を目的としない)植物試料中の Sr-89 及び Sr-90 の定量と定性が記載されている。飲料水における定量では、古くは 1980 年制定の「Method 905.0: Radioactive Strontium in Drinking Water」があり、これは、各種沈殿法で精製後、LBC で測定する方法で、大筋で「No.2 放射性ストロンチウム分析法」と同様である。2011 年制定の「Rapid Radiochemical Method for Radiostrontium」では、ストロンチウムを選択的に吸着するカラムを用いて精製し、LBC で測定する方法が記載されている。植物試料中における定量では、同じく 2011 年制定の「Actinides and Sr-89/90 in Vegetation」にアクチニドとの一斉分析の一部として、ストロンチウムを選択的に吸着するカラムを用いて精製し、 β 線測定を行う方法が記載されている。カラムを用いる方法は、どちらも「(番号未定)緊急時における放射性ストロンチウム分析法」と類似した方法である。

5. 5 測定マニュアルにおける放射性ストロンチウム測定

上述のように、「飲食物摂取制限に関する指標」において、放射性ストロンチウムは直接の測定対象核種とはなっていないが評価対象核種であることから測定マニュアルに取り上げられている。その内容は、緊急時の Sr-90 測定法としては溶媒抽出法が、食品中に存在する放射性核種の濃度を正確に求めるための分析法としては平常時モニタリングの発煙硝酸法が採用されている。

溶媒抽出法は、「No. 2 放射性ストロンチウム分析法(4訂)」及び「No. 23 液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法」においては牛乳、ドライミルクなどの灰のみを対象としているのに対し、測定マニュアルでは、「牛乳、海産生物、穀類、野菜など」と対象が広がっている。分析操作内容は、ほぼ「No. 23 液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法」の溶媒抽出法を踏襲している。平衡状態にある Sr-90(Y-90)を、HDEHP による溶媒抽出法により分離精製した後、ミルキングした Y-90 をチェレンコフ光で測定し、得られた計数率から Sr-90 の放射能を求めるものである。娘核種 Y-90 の生成を待つ過程がないため、迅速に結果が得られる特徴を持つ。測定対象核種が Sr-90 だけであり、試料中において既に放射平衡になっている Sr-90 を対象とする場合には優れた方法であるものの、事故等の初期に問題となる可能性が高い Sr-89 には対応していない。

発煙硝酸法は、「No. 2 放射性ストロンチウム分析法」に掲載の、発煙硝酸法により分離精製した Sr-90 から生じた Y-90 を LBC で測定する方法である。Sr-90 だけでなく、Sr-89 の放射能濃度も高感度に得られるものの、取扱いに注意を要する発煙硝酸を使用すること、娘核種 Y-90 の生成を待つため、測定結果を得るまでに 3 週間程度を要することが短所である。分離精製方法として、発煙硝酸法ではなく、イオン交換法あるいはシュウ

酸塩法への変更が考えられるが、シュウ酸塩法は LBC での測定においては Sr-89 の測定に不適なことや処理時間から、イオン交換法の選択が有利と考えられる。しかし、結果を得るまでに長時間を要することに変わりはないことから、緊急時対応の測定法としては課題が残る。

緊急時に対応する測定法としては、現在制定作業中の「緊急時における放射性ストロンチウム分析法」に、より迅速性を重視した方法として、クラウンエーテル樹脂による分離精製後に LSC を用いて、最初にチェレンコフ光測定、次いでシンチレーション測定を行うことで、Y-90 の生成を待たずに Sr-89 及び Sr-90 の放射能濃度を求める方法が掲載予定である。この方法は、分析所要時間が 10～24 時間程度(作業を継続的に行った場合)であり、かつ、緊急時に問題となりやすい Sr-89 にも対応できることから、緊急時測定法の第一選択肢と考えられる。本法で使用するクラウンエーテル樹脂カラムは、操作性に優れ、迅速簡便に分離精製を行うことができるものの、他の方法に比べて費用がかさむことが難点である(令和 7 年度末現在、A 社製カートリッジ 1 本 1.2 万円程度)。

放射性ストロンチウムについては、OIL6 において第一義の測定対象核種ではないことから、測定対象核種、濃度、要求される迅速性とその重要度など測定状況がより多様であると予想され、測定マニュアルにも 2 法が掲載されているように、状況に応じて適切な方法を選択できるような複数の測定法の提示が妥当と考えられる。

6. 測定関連事項

OIL6 の測定対象とされる核種の測定に関連する事項についても考察した。

測定マニュアルにおいて引用されている、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 3 月(1 訂)」が震災後に改訂されている。この文書は γ 線スペクトロメトリーのための試料前処理法であることから、直接関係するのは放射性ヨウ素及び放射性セシウムの測定であるが、それ以外の核種の測定の際にも、汚染防止策など緊急時における試料の取扱いにおいて参考になる。他の有害物質と異なり、放射性物質の取扱いにおいては被ばくなど特有の留意事項もあり、特に緊急時においては重要な問題となる場合もあることから、旧版より詳細に書かれている改訂後の試料前処理法は参考資料として有用と考えられる。

試料採取についての文書は、測定マニュアルでは直接は引用されていないが、「採取」の文言は頻出している。採取に関する文書としては、震災後に制定された放射能測定法シリーズ「No. 35 緊急時における環境試料採取法、令和 3 年 6 月」がある。前述の試料前処理法と同様に、放射性物質の取扱いにおいて有益な参考資料と考えられる。なお、緊急時の基盤となる平常時についての「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、昭和 57 年 7 月」及び「No. 16 環境試料採取法、昭和 58 年 12 月」は、来年度改訂作業開始の予定となっている。

また、新たに放射能測定法シリーズ「(番号未定)環境放射能分析における品質保証」が令和 8 年に制定される予定である。試験・検査における分析値の品質保証は重要であり、「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)」においても、『平常時モニタリングにおける品質保証の目的は、得られたデータの品質が客観的にみて、適切なレベルに維持されていることを保証することである。これによって始めて各機関の間のデータあるいは一機関の異なった時期におけるデータの統一的な解

釈が可能になる。』、『放射性物質の濃度の測定データについては、ISO/IEC 17025(試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項)の考え方に沿って品質を保証することが望ましい。』と記載されており、これを受けて新設されるもので、原案は web 上に公開されている。核種ごとの細かい内容は各測定法の文書に委ね、ここでは分析値の品質保証の考え方が書かれており、上位文書にあるように、各項目は基本的に推奨事項であり、要求事項とはなっていない。

環境放射能モニタリングは原子力規制の一環で行われ、食品検査は食品衛生法の元に行われる。この測定マニュアルは、平成 23 年には、食品衛生法の検査において参照されたことから、食品検査との連携が重視されると考えられる。現時点ではどちらにおいても ISO/IEC 17025 の内容は推奨されてはいるものの、要求事項にまではなっていないが、食品検査においては、試験法ごとに妥当性評価が求められ、真度、併行精度等の目標値も定められている。現在、我が国における食品中放射性物質の検査は、震災後の放射性セシウムで行われている。平成 23 年は測定マニュアルが参照され、翌平成 24 年には、震災以前は食品中放射性物質の検査は輸入食品のみであり、放射性物質を取り扱える機関はほとんどないと予想されること、放射性セシウムは γ 線測定を利用するため、前処理が簡便であることなどから、試験の妥当性確認に係る要件としては、機器校正、計数の統計誤差に基づく測定条件の設定、測定結果の確認、ブランク試験等であり、一般的な食品検査で求められる添加回収、併行精度等は課されていない。今後、放射線モニタリング及び食品検査の動向、放射性核種ごとの測定法、緊急度、放射性物質の取扱いの法規制等を考慮し、食品中放射性物質の測定において求められる品質保証について、更なる検討が必要である。

D. 結論

本課題では、制定されてから 20 年以上が経過している測定マニュアルについて、改訂が必要と思われる箇所について検討する。令和 5 年度は、背景と主に放射性セシウムの測定法について、令和 6 年度は放射性ヨウ素の測定法について、本年度は主に α 線放出核種の「ウラン」並びに「プルトニウム及び超ウラン元素のアルファ核種(8 核種の合計)」の測定法について検討した。

ウランについては、測定マニュアルに記載されている ICP-MS 法がその迅速性において現在でも緊急時に有利であることから、基本的な分析方針を継続することに問題はないと考えられた。

プルトニウム及び超ウラン元素のアルファ核種については、測定マニュアルにはプルトニウムについてのみ ICP-MS 法が記載されているが、それ以外の核種についてもプルトニウムと同様に、対応する放射能測定法シリーズに準じた ICP-MS 法を測定核種に応じて採用するのが妥当と考えられた。また、超ウラン元素の基準値は 8 核種の合計放射能で与えられていることから、「No. 31 環境試料中全アルファ放射能迅速分析法」に記載されているように、各種放射能測定装置により合計放射能を測定する方法も状況によっては選択肢になると考えられた。

放射性ストロンチウムは、飲食物摂取制限に関する指標及び OIL6 においては測定核種に設定されていないものの、環境汚染時に内部被ばく線量に影響を与える核種として重要であることから、測定マニュアルに倣い検討対象とした。測定マニュアルには、Sr-90 迅速分析法として溶媒抽出法が、精度の高い方法として平常時モニタリングの発煙硝酸法が記載されている。溶媒抽出法は、平衡状態(Sr-90/Y-90)にある試料について、溶媒抽出法により分離精製した後、ミ

ルキングした Y-90 をチェレンコフ光で測定するもので、娘核種の生成を待つ過程がないため、迅速性に優れている。しかし、測定対象核種が Sr-90 のみで Sr-89 に対応できていないことや、既に放射平衡にある試料を前提としており、事故等の初期の段階には適応が難しい。発煙硝酸法は、発煙硝酸法により分離精製した Sr-90 から生じた Y-90 を LBC で測定する方法であり、Sr-90 だけでなく、Sr-89 も高感度に測定できるものの、取扱いに注意を要する発煙硝酸を使用すること、娘核種 Y-90 の生成を待つため、迅速性に欠ける。分離精製法を発煙硝酸法ではなく、イオン交換法に変えることで利便性は上がるが、分析所要時間の改善は見込めない。緊急に対応する測定法として、クラウンエーテル樹脂を用いた分離精製後に LSC を用いてチェレンコフ光測定とシンチレーション測定を続けて行うことで、Y-90 の生成を待たずに Sr-89 及び Sr-90 の放射能濃度を求める方法が現在、検討されている。この方法は、迅速で Sr-89 にも対応できることから、緊急時測定法の第一選択肢と考えられる。放射性ストロンチウムについては、OIL6 においても第一義の測定対象核種ではないことから、測定対象核種、濃度、要求される迅速性とその重要度など測定状況がより多様であると予想され、測定マニュアルにも 2 法が掲載されているように、状況に応じて適切な方法を選択できるような複数の測定法の提示が妥当と考えられた。

緊急時の状況は事故等により大きく変動すると思われ、影響の大きさは異なるものの、いずれの測定法も混在核種の影響を受けることから、緊急時対応の測定については幅広く柔軟性を持たせて想定し、準備をしておくことが重要と思われた。

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

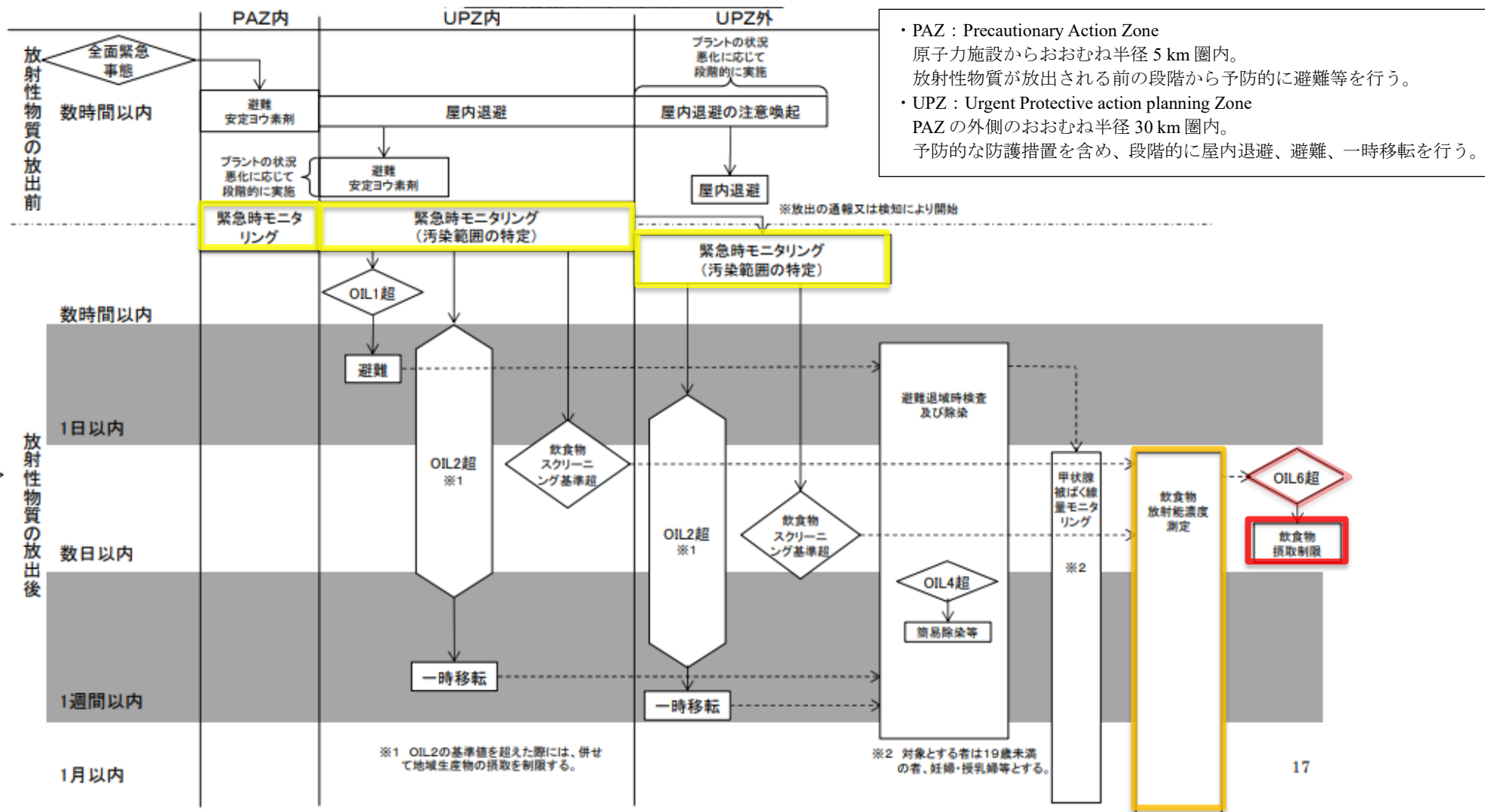


図1 防護措置等の実施フローの例

・原子力災害対策指針、令和7年10月3日、原子力規制委員会、p.43 図1より、一部改変(色付け、注追記)

表 1 運用上の介入レベル(OIL)と防護措置について *0

	基準の種類	基準の概要	初期設定値 *1			防護措置の概要
緊急防護措置	OIL 1	地表面からの放射線、再浮遊した放射性物質の吸入、不注意な経口摂取による被ばく影響を防止するため、住民等を数時間内に避難や屋内退避等させるための基準	500 μ Sv/h (地上 1 m で計測した場合の空間放射線量率)			数時間内を目途に区域を特定し、避難等を実施。(移動が困難な者の一時屋内退避を含む)
	OIL 4	不注意な経口摂取、皮膚汚染からの外部被ばくを防止するため、除染を講ずるための基準	β 線 : 40,000 cpm (皮膚から数 cm での検出器の計数率) β 線 : 13,000 cpm 【1 か月後の値】 (皮膚から数 cm での検出器の計数率)			避難又は一時移転の基準に基づいて避難等した避難者等に避難退域時検査を実施して、基準を超える際は迅速に簡易除染等を実施。
早期防護措置	OIL 2	地表面からの放射線、再浮遊した放射性物質の吸入、不注意な経口摂取による被ばく影響を防止するため、地域生産物*5の摂取を制限するとともに、住民等を1週間程度内に一時移転させるための基準	20 μ Sv/h (地上 1 m で計測した場合の空間放射線量率)			1 日内を目途に区域を特定し、地域生産物の摂取を制限するとともに、1 週間程度内に一時移転を実施。
飲食物摂取制限 *9	飲食物に係るスクリーニング基準	OIL 6 による飲食物の摂取制限を判断する準備として、飲食物中の放射性核種濃度測定を実施すべき地域を特定する際の基準	0.5 μ Sv/h *6 (地上 1 m で計測した場合の空間放射線量率)			数日内を目途に飲食物中の放射性核種濃度を測定すべき区域を特定。
	OIL 6	経口摂取による被ばく影響を防止するため、飲食物の摂取を制限する際の基準	核種 *7	飲料水 牛乳・乳製品	野菜類、穀類、肉、卵、魚、その他	1 週間内を目途に飲食物中の放射性核種濃度の測定と分析を行い、基準を超えるものにつき摂取制限を迅速に実施。
			放射性ヨウ素	300 Bq/kg	2,000 Bq/kg *8	
			放射性セシウム	200 Bq/kg	500 Bq/kg	
			プルトニウム及び超ウラン元素のアルファ核種	1 Bq/kg	10 Bq/kg	
			ウラン	20 Bq/kg	100 Bq/kg	

*0 原子力災害対策指針、令和 7 年 10 月 3 日、原子力規制委員会、p.71 表 3 OIL と防護措置について より一部改変(省略、色付け)

*1 「初期設定値」とは緊急事態当初に用いる OIL の値であり、地上沈着した放射性核種組成が明確になった時点で必要な場合には OIL の初期設定値は改定される。

*5 「地域生産物」とは、放出された放射性物質により直接汚染される野外で生産された食品であって、数週間以内に消費されるもの(例えば野菜、該当地域の牧草を食べた牛の乳)をいう。

*6 実効性を考慮して、計測場所の自然放射線によるバックグラウンドによる寄与も含めた値とする。

*7 その他の核種の設定の必要性も含めて今後検討する。その際、IAEA の GSG-2 における OIL 6 を参考として数値を設定する。

*8 根菜、芋類を除く野菜類が対象。

*9 IAEA では、飲食物摂取制限が効果的かつ効率的に行われるよう、飲食物中の放射性核種濃度の測定が開始されるまでの間の暫定的な飲食物摂取制限の実施及び当該測定の対象の決定に係る基準である OIL3 等を設定しているが、我が国では、放射性核種濃度を測定すべき区域を特定するための基準である「飲食物に係るスクリーニング基準」を定める。

表 2 平成 14 年当時の飲食物摂取制限に関する指標 *1*2

核種	対象	飲食物摂取制限に関する指標
放射性ヨウ素 *3 (混合核種の代表核種 I-131)	飲料水 牛乳・乳製品	300 Bq/kg 以上
	野菜類 (根菜、芋類を除く。)	2000 Bq/kg 以上
放射性セシウム *4	飲料水 牛乳・乳製品	200 Bq/kg 以上
	野菜類 穀類 肉・卵・魚・その他	500 Bq/kg 以上
ウラン	飲料水 牛乳・乳製品	20 Bq/kg 以上
	野菜類 穀類 肉・卵・魚・その他	100 Bq/kg 以上
プルトニウム及び超ウラン元素 のアルファ核種 (²³⁸ Pu、 ²³⁹ Pu、 ²⁴⁰ Pu、 ²⁴² Pu、 ²⁴¹ Am、 ²⁴² Cm、 ²⁴³ Cm、 ²⁴⁴ Cm の 放射能濃度の合計)	飲料水 牛乳・乳製品	1 Bq/kg 以上
	野菜類 穀類 肉・卵・魚・その他	10 Bq/kg 以上

(注) 乳児用として市販される食品の摂取制限の指標としては、ウランについては 20 Bq/kg を、プルトニウム及び超ウラン元素のアルファ核種については 1 Bq/kg を適用するものとする。ただしこの基準は、調理され食事に供される形のものに適用されるものとする。

*1 原子力施設等の防災対策について、昭和 55 年 6 月(平成 15 年 7 月一部改訂)原子力安全委員会

P.27 表 3 飲食物摂取制限に関する指標 より一部改変(配置等)

*2 算出根拠は、ウラン以外は「飲食物摂取制限に関する指標について、平成 10 年 3 月 6 日、原子力安全委員会 原子力発電所等周辺防災対策専門部会環境ワーキンググループ」を参照。

*3 放射性ヨウ素には 6 核種(Te-132, I-131～135)が含まれ、混合核種の代表核種は I-131 である。

*4 放射性セシウムには 4 核種(Sr-89, Sr-90, Cs-134, Cs-137)が含まれ、混合核種の代表核種は Cs-134+Cs-137 である。

表 3 ウランの放射能濃度と質量濃度の関係

放射能濃度(Bq/kg)	質量濃度(μg/kg)		
	天然ウラン*3	U-238	U-235
20 *1	796	1610	250
100 *2	3980	8040	1250
1	39.8	80.4	12.5
25.1	1000	-	-
12.4	-	1000	-
80.0	-	-	1000

*1 飲食物の摂取を制限する際の基準における飲料水、牛乳・乳製品の濃度(表 1 参照)

*2 飲食物の摂取を制限する際の基準における野菜類、穀類、肉・卵・魚・その他の濃度(表 1 参照)

*3 組成は U-238 : 99.2742%、U-235 : 0.7204%、U-234 : 0.0054%

表 4 核種の壊変データ

A：ウラン及び超ウラン元素関連

核種	半減期 *1	壊変形式 *1*2	主な α/β 線のエネルギー (MeV) と放出割合 *1		主な光子のエネルギー (MeV) と放出割合 *1		備考
U-232	68.9 y	α	5.263 5.320 他	31.5% 68.1%	0.0578 0.129 0.0152	0.20% 0.068% 11.5% Th-L 他	娘核種 †Th-228
U-233	1.592 x E+05 y	α	4.729 4.783 4.825 他	1.6% 13.2% 84.5%	0.0424 0.0547 0.0971 0.0150	0.086% 0.018% 0.020% 5.8% Th-L 他	ネプツニウム系列 娘核種 †Th-229
U-234 天然存在度 0.0054%	2.455 x E+05 y	α	4.723 4.775 他	28.4% 71.4%	0.0532 0.1209 0.0152	0.12% 0.040% 他 10.5%Th-L	ウラン系列 娘核種 †Th-230
U-235 天然存在度 0.7204%	7.04 x E+08 y	α	4.218 4.326 4.366 4.397 4.558 4.599 他	5.8% 4.4% 17.2% 55.6% 4.2% 5.1%	0.109 0.144 0.163 0.186 0.0925 0.107 0.0150	1.5% 11.0% 5.1% 57.2% 9.3% Th-K α 2.6% Th-K β 29.4% Th-L 他	アクチニウム系列 娘核種 †Th-231
U-236	2.342 x E+07 y	α	4.446 4.495 他	25.9% 73.8%	0.0494 0.113 0.0152	0.078% 0.019% 9.6%Th-L	娘核種 Th-232
U-237	6.752 d	β^-	0.237 0.251 他	50.9% 41.9%	0.0595 0.0648 0.165 0.208 0.332 0.100 0.115 0.0160	34.5% 1.3% 1.9% 21.2% 1.2% 他 41.7% Np-K α 12.0% Np -K β 63.7% Np -L	娘核種 Np-237
U-238 天然存在度 99.2742%	4.468 x E+09 y	α SF	4.153 4.202 他 5.45 x E-05%	20.9% 79.0%	0.0496 0.114 0.0152 0.939 0.958	0.064% 0.010% 7.7%Th-L 3.5 x E-04% 5.2 x E-04%	ウラン系列 娘核種 †Th-234
Np-239	2.356 d	β^-	0.330 0.392 0.437 他	39.3% 10.7% 43.6%	0.106 0.210 0.228 0.278 0.334 0.103 0.118 0.0166	27.2% 3.4% 10.8% 14.4% 2.1% 他 39.9% Pu-K α 11.5% Pu-K β 57.5% Pu-L	娘核種 Pu-239
Pu-238	87.7 y	α SF	5.456 5.499 他 1.9 x E-07%	29.0% 70.9%	0.0435 0.0999 0.0159 0.955 0.958	0.040% 0.0074% 他 11.0% Pu-K α 1.2 x E-06% 8.8 x E-07%	娘核種 U-234
Pu-239	2.411 x E+04 y	α	5.106 5.144 5.157 他	11.9% 17.1% 70.7%	0.0387 0.0516 0.0988 0.129 0.375 0.414 0.0159	0.010% 0.027% 0.0015% 0.0063% 0.0016% 0.0015% 他 4.6% U-L	娘核種 U-235m、 U-235
Pu-240	6561 y	α SF	5.124 5.168 他 5.63 x E-06%	27.1% 72.8%	0.0452 0.104 0.159 0.936 0.958	0.045% 0.0071% 他 10.3% U-L 3.7 x E-05% 3.7 x E-05%	娘核種 U-236
Pu-241	14.329 y	α β^-	4.854 4.897 0.0208 100%	0.0003% 0.0020%	0.149 0.0974 0.112 0.0156	0.00019% 他 0.00085% U-K α 0.00024% U -K β 0.0013% U-L	娘核種 †U-237 Am-241

(表 4 A 続き)

核種	半減期 *1	壊変 形式 *1*2	主な α/β 線のエネルギー(MeV)と放出割合 *1	主な光子のエネルギー(MeV)と放出割合 *1	備考
Pu-242	3.75 x E+05 y	α SF	4.858 23.5% 4.902 76.5% 他 5.56 x E-04%	0.0449 0.037% 0.104 0.0026% 0.0159 8.8% U-L 0.917 0.0037% 0.958 0.0046% 他	娘核種 U-238
Am-241	432.6 y	α	5.388 1.6% 5.443 13.0% 5.486 84.7% 他	0.0263 2.4% 0.0595 35.9% 0.0161 37.9% Np-L 他	娘核種 Np-237
Am-243	7.364 x E+03 y	α	5.179 1.1% 5.223 11.0% 5.276 87.6% 他	0.0311 0.072% 0.0435 5.9% 0.0747 68.2% 0.0867 0.34% 0.118 0.57% 0.0161 19.9% Np-L 他	娘核種 †Np-239
Cm-242	162.8 d	α SF	6.069 25.9% 6.113 74.1% 他 6.2 x E-06%	0.0441 0.032% 0.102 0.0025% 0.157 0.0014% 0.0169 10.2% Pu-L 0.993 4.3 x E-05% 0.958 2.5 x E-05%	娘核種 Pu-238
Cm-243	28.9 y	α EC	5.742 11.5% 5.786 73.0% 5.992 5.7% 6.058 4.7% 他 0.29%	0.0441 0.032% 0.102 0.0025% 0.157 0.0014% 他 0.0169 49% Pu-L	娘核種 Pu-239 Am-243
Cm-244	18.10 y	α SF	5.763 23.6% 5.805 76.4% 1.37 x E-04%	0.0428 0.024% 0.0989 0.0016% 0.0169 8.7% Pu-L 0.914 9.6 x E-04% 0.958 7.5 x E-04% 他	娘核種 Pu-240

(表 4)

B ストロントリウム及びセシウム関連核種の壊変データ

核種	半減期 *1	壊変 形式 *1*2	主な α/β 線のエネルギー(MeV)と放出割合 *1	主な光子のエネルギー(MeV)と放出割合 *1	備考
Sr-89	50.563 d	β^-	1.495 100%	0.909 0.0096% Y-89m	娘核種 †Y-89m
Sr-90	28.79 y	β^-	0.546 100%		娘核種 Y-90
Y-89m	15.66 s	IT		0.909 99.2%	
Y-90	64.00 h	β^-	2.280 100%		
Cs-134	2.0652 y	β^-	0.0886 27.3% 0.415 2.5% 0.658 70.2% 他	0.563 8.4% 0.569 15.4% 0.605 97.6% 0.796 85.5% 0.802 8.7% 1.365 3.0% 0.0321 0.69% Ba-K α 0.0365 0.16% Ba-K β 他	
Cs-137	30.08 y	β^-	0.514 94.4% 1.176 5.6%	0.662 85.1% 0.0321 5.8% Ba-K α 0.0365 1.3% Ba-K β	娘核種 †Ba-137m

*1 アイソトープ手帳 12 版、2020 年 3 月 31 日、日本アイソトープ協会編集発行 より

不記載の核種は <https://nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> より*2 α : α 壊変、 β^- : β^- 壊変、SF : 自発核分裂、EC : 軌道電子捕獲、IT : 核異性体転移

† 親核種の放射線データに娘核種からの寄与が含まれる。

表 5 飲食物摂取制限に関する核種の放射能と質量の関係

グループ	核種	半減期	1 Bq あたりの 原子数	1 Bq あたりの g 数		1 g あたりの Bq 数
放射性 ヨウ素	I-131	8.0252 d	1.00E+06	2.18E-16	(0.2 fg)	4.59E+15
放射性 セシウム	Cs-137	30.08 y	1.37E+09	3.12E-13	(0.3 pg)	3.21E+12
	Cs-134	2.0648 y	9.40E+07	2.09E-14	(0.02 pg)	4.78E+13
	Sr-90	28.79 y	1.31E+09	1.96E-13	(0.2 pg)	5.11E+12
	Sr-89	50.563 d	6.30E+06	9.42E-16	(0.9 fg)	1.07E+15
ウラン	U-238	4.468 x E+09 y	2.03E+17	8.04E-05	(80 µg)	1.24E+04
	U-235	7.04 x E+08 y	3.21E+16	1.25E-05	(12 µg)	7.97E+04
プルトニウム 及び超ウラン 元素のアル ファ核種	Pu-238	87.7 y	3.99E+09	1.58E-12	(1 pg)	6.33E+11
	Pu-239	24110 y	1.10E+12	4.37E-10	(0.4 ng)	2.29E+09
	Pu-240	6564 y	2.99E+11	1.19E-10	(0.1 ng)	8.40E+09
	Pu-242	375000 y	1.71E+13	6.86E-09	(7 ng)	1.46E+08
	Am-241	432.2 y	1.97E+10	7.88E-12	(8 pg)	1.27E+11
	Cm-242	162.8 d	2.03E+07	8.16E-15	(8 fg)	1.23E+14
	Cm-243	29.1 y	1.32E+09	5.35E-13	(0.5 pg)	1.87E+12
	Cm-244	18.1 y	8.24E+08	3.34E-13	(0.3 pg)	2.99E+12

表 6 関連する測定法シリーズ一覧 <https://www.jcac.or.jp/site/library/series.html>

No.	書名	H14 年 3 月当時	令和 8 年 3 月現在	略 *
ヨウ素、セシウム関係(主に γ 線測定)				
4	放射性ヨウ素分析法	平成 8 年 3 月(2 訂)	同左	I
15	緊急時における放射性ヨウ素測定法	平成 14 年 7 月	令和 5 年 10 月(2 訂)	I 緊急
3	放射性セシウム分析法	昭和 51 年 9 月(1 訂)	同左	Cs
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 8 月(3 訂)	令和 2 年 9 月(4 訂)	Ge
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	-	平成 16 年 2 月 平成 30 年 3 月(1 訂)	Ge 緊急
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	昭和 57 年 7 月	同左 〔令和 10 年改訂予定〕	Ge 前処理
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 4 年 8 月	平成 31 年 3 月(1 訂)	γ 前処理 緊急
6	NaI(Tl) シンチレーションスペクトロメータ機器分析法	昭和 49 年 1 月	同左 〔令和 8 年 6 月改訂予定〕	NaI
ストロンチウム関係(主に β 線測定)				
2	放射性ストロンチウム分析法	昭和 58 年 12 月(3 訂)	平成 15 年 7 月(4 訂) 令和 7 年 6 月(5 訂)	Sr
#	緊急時における放射性ストロンチウム分析法	-	〔令和 8 年 6 月制定予定〕	Sr 緊急
23	液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法	平成 8 年 3 月(1 訂)	同左	LSC
ウラン、プルトニウム及び超ウラン元素関係(主に α 線測定)				
14	ウラン分析法	平成 14 年 7 月(2 訂)	同左	U
12	プルトニウム分析法	平成 2 年 11 月(1 訂)	同左	Pu
21	アメリシウム分析法	平成 2 年 11 月	同左	Am
22	プルトニウム・アメリシウム逐次分析法	平成 2 年 11 月	同左	Pu・Am
28	環境試料中プルトニウム迅速分析法	(平成 14 年 7 月)	同左	Pu 迅速
30	環境試料中アメリシウム 241、キュリウム迅速分析法	-	平成 16 年 2 月	Am・Cm 迅速
31	環境試料中全アルファ放射能迅速分析法	-	平成 16 年 2 月	全 α
全体に関すること				
16	環境試料採取法	昭和 58 年 12 月	同左 〔令和 10 年改訂予定〕	採取
35	緊急時における環境試料採取法	-	令和 3 年 6 月	採取 緊急
##	環境放射能分析における品質保証	-	〔令和 8 年 6 月制定予定〕	品質 保証

文書番号の太字：測定マニュアルで引用

*表 7、表 8 で使用

表7 ウランの分析法と分析目標レベル

A 水試料(海水、陸水)

1 水試料(海水、陸水)							
前処理	分離	測定 (標準物質*1)	測定核種	供試量	分析目標レ ベル μg/g *2	出典／測定 法シリーズ *3	
塩酸添加	キレート樹脂法	吸光光度法 (海水)	U	2 L	1	No. 14 U	
		蛍光光度法 (陸水)		2 L	0.1		
	キレート樹脂・TBP *4 抽出法あるいは 水酸化鉄(III)共沈・ TBP 抽出法	α線スペクト ロメトリー (U-232)		2 L	0.04		
	－	ICP-MS (Bi 又は Tl)		2 mL	0.04		
				50 mL	0.002		

B 生物試料(海産生物、農産物)

前処理	分離	測定 (標準物質*1)	測定核種	供試量	分析目標レ ベル µg/g *2	出典／測定 法シリーズ *3
硝酸浸出	TBP*4 抽出法	蛍光光度法	U	500 g 生 (5 g 灰 *5)	0.4	No. 14 U
		α線スペクト ロメトリー (U-232)			0.2	
	—	ICP-MS (Bi 又は Tl)			0.008	

*1 化学的回収率や検出効率を求めるために添加される物質。内部標準物質、トレーサー。

*2 分析目標レベルは以下の条件で計算した。

- ①吸光光度法：直接法によるブランク試料の吸光度の標準偏差の3倍
- ②蛍光光度法：空試験のブランク試料の標準偏差の3倍
- ③α線スペクトロメトリー：回収率80%、測定時間20時間、計数効率20%、バックグラウンド計数率を1カウント/20時間とした場合の正味計数率に伴う計数誤差の3倍
- ④ICP質量分析法：測定時間10秒、バックグラウンド計数率5cpsとした場合のバックグラウンド計数の標準偏差の3倍

*3 文書名は表6参照

*4 TBP：リン酸三ブチル

*5 灰化率を1%とした場合。

表 8 超ウラン元素分析法と分析目標レベル

A. 水試料

前処理	分離 ／測定試料作成	測定 (標準物質*1)	測定核種 (測定可能)	供試 量	分析目標レ ベル (mBq/L)	出典/測定 法シリーズ *2	所要時間
硝酸添加、 水酸化鉄(III) 共沈、硝酸 溶液 (可溶性のみ)	イオン交換法*3 又は溶媒*4抽出 法 ／ステンレス鋼 板上に電着	α 線スペクト ロメトリー *5 (Pu-242 又は Pu-236)	Pu-239+240 (Pu-238)	100 L	0.02 *6	No. 12 Pu	全工程 1 週間 程度(No. 28) 化学分離から 電着終了ま で、イオン交 換法 約 30 時 間、溶媒抽出- イオン交換法 約 20 時間
同上	イオン交換法 *3、又は溶媒抽 出*4*7-イオン交 換法*3 ／ステンレス鋼 板上に電着	α 線スペクト ロメトリー *5 (Am-243、又 は Cm-244)	Am-241 (Cm-242)	100 L	0.02 *6	No. 21 Am	化学分離から 電着終了ま で、イオン交 換法 約 70 時 間、溶媒抽出- イオン交換法 約 50 時間
同上	Pu: イオン交換 法*3 又は溶媒抽 出法*4 Am: Pu 分離後、 陰イオン交換法 又は溶媒抽出*7- 陰イオン交換法 *3	α 線スペクト ロメトリー *5 (Pu-242 又は Pu-236、及 び Am-243 又 は Cm-244)	Pu-239+240、 (Pu-238) Am-241 (Cm-242)	100 L	0.02 *6 0.02 *6	No. 22 Pu Am	(所要時間は No. 12 又は No. 21 と同じ)
硝酸-フッ化 水素酸混合 溶液浸出、 マイクロウ ェーブ分 解、水酸化 鉄(III)共沈、 硝酸溶液	陰イオン交換法 *3	ICP-MS (Pu-242)	Pu-239 Pu-240	2 L	2 10 *8	No. 28 Pu 迅 速	結果取得：24 時間程度 前処理から測 定まで約 13 時間
		α 線スペクト ロメトリー *5 (Pu-242)	Pu-238 Pu-239+240	2 L	6 6 *9		測定：4 時間
同上	陰イオン交換(Pu 除去)-水酸化鉄 共沈-抽出クロマ トグラフィー*10 ／フッ化ネオジ ム共沈法	α 線スペクト ロメトリー *5 (Am-243)	Am-241 Cm	2 L	2 *11 2 *11	No. 30 Am Cm 迅速	前処理から測 定まで約 17 時間
-	-	LEPS *12,*13	Am-241	2 L	4 *14 0.1 *15		
蒸発乾固	-						
硝酸-フッ化 水素酸混合 溶液浸出、 マイクロウ ェーブ分 解、水酸化 鉄(III)共沈、 硝酸溶液	水酸化鉄共沈-抽 出クロマトグラ フィー*10 ／フッ化ネオジ ム共沈法 (標準物質なし)	ZnS(Ag)シンチレ ーション計数装 置	Pu、Am、 Cm α 線放出 核種 *16	2 L	2 *17	No. 31 全 α	前処理から測 定まで約 14 時間
		2 π ガスフロー計 数装置			5 *17		
		シリコン半 導体検出器	核種ごとの 定量		2 *17		

(表 8 続き)

B. 生物試料(海産生物、農産物)

前処理	分離 ／測定試料作成	測定 (標準物質*1)	測定核種 (測定可能)	供試 量	分析目標レ ベル (mBq/L)	出典/測 定法シ ーズ *2	所要時間
灰化、酸分 解、硝酸溶 液	イオン交換法*3 又は溶媒*4 抽出 法 ／ステンレス鋼 板上に電着	α線スペクト ロメトリー *5 (Pu-242 又は Pu-236)	Pu-239+240 (Pu-238)	0.5～ 1kg 生 相当 *18	4～2 mBq/kg 生 *6	No. 12 Pu	
同上	イオン交換法 *3、又は溶媒抽 出*4*7-イオン交 換法*3 ／ステンレス鋼 板上に電着	α線スペクト ロメトリー *5 (Am-243、又 は Cm-244)	Am-241 (Cm-242)	0.5～ 1kg 生 相当	4～2 mBq/kg 生 *6	No. 21 Am	
同上	Pu: イオン交換 法*3 又は溶媒抽 出法*4 Am: Pu 分離後、 陰イオン交換法 又は溶媒抽出*7- 陰イオン交換法 *3	α線スペクト ロメトリー *5 (Pu-242 又は Pu-236、及 び Am-243 又 は Cm-244)	Pu-239+240、 (Pu-238) Am-241 (Cm-242)	0.5～ 1kg 生 相当	4～2 mBq/kg 生 *6 4～2 mBq/kg 生 *6	No. 22 Pu Am	
硝酸-フッ化 水素酸混合 溶液浸出、 マイクロウ ェーブ分 解、硝酸溶 液		ICP-MS (Pu-242)	Pu-239 Pu-240	0.1kg 生相 当葉 菜	50 mBq/kg 生 200 mBq/kg 生*8	No. 28 Pu 迅 速	前処理か ら測定ま で約 16 時間
		α線スペクト ロメトリー *5 (Pu-242)	Pu-238 Pu-239+240		100 mBq/kg 生 100 mBq/kg 生*9		
灰化、マイ クロウエー ブ分解、硝 酸溶液	陰イオン交換法 *3	ICP-MS (Pu-242)	Pu-239 Pu-240	0.1 L 牛乳	50 mBq/L 200 mBq/L *8		前処理か ら測定ま で約 12 時間
		α線スペクト ロメトリー *5 (Pu-242)	Pu-238 Pu-239+240		100 mBq/L 100 mBq/L *9		
硝酸-フッ化 水素酸混合 溶液浸出、 マイクロウ ェーブ分 解、硝酸溶 液	陰イオン交換(Pu 除去)-水酸化鉄 共沈-抽出クロマ トグラフィー*10 ／フッ化ネオジ ム共沈法	α線スペクト ロメトリー *5 (Am-243)	Am-241	0.1kg 生葉 菜	50 mBq/kg 生*11	No. 30 Am,Cm	前処理か ら測定ま で約 22 時間
			Cm		50 mBq/kg 生*11		
-	-	LEPS *12,*13	Am-241	0.1kg 葉菜 生	4 Bq/kg 生 *14		
灰化	-			1kg 葉 菜灰	0.3 Bq/L *19		
灰化、マイ クロウエー ブ分解、硝 酸溶液	陰イオン交換(Pu 除去)-水酸化鉄 共沈-抽出クロマ トグラフィー*10 ／フッ化ネオジ ム共沈法	α線スペクト ロメトリー *5 (Am-243)	Am-241	0.1 L 牛乳	50 mBq/L*11		前処理か ら測定ま で約 19 時間
			Cm		50 mBq/L*11		
-	-	LEPS *12,*13	Am-241	0.1 L 牛乳	4 Bq/L*14		
灰化	-			1 L 牛 乳	0.2 Bq/L *20		

硝酸-フッ化水素酸混合溶液浸出、マイクロウェーブ分解、硝酸溶液	水酸化鉄共沈-抽出クロマトグラフィー*10 ／フッ化ネオジム共沈法 (標準物質なし)	ZnS(Ag)シンチレーション計数装置	Pu、Am、Cm α 線放出核種 *16	0.1 kg 葉菜生	50 mBq/ kg 生*17	No. 31 全 α	前処理から測定まで約 20 時間
		2 π ガスフロー計数装置			100 mBq/kg 生*17		
		シリコン半導体検出器			50 mBq/ kg 生*17		
灰化、硝酸溶液、マイクロウェーブ分解、硝酸溶液	水酸化鉄共沈-抽出クロマトグラフィー*10 ／フッ化ネオジム共沈法 (標準物質なし)	ZnS(Ag)シンチレーション計数装置	Pu、Am、Cm α 線放出核種 *16	0.1 L 牛乳	50 mBq/L*17		前処理から測定まで約 18 時間
		2 π ガスフロー計数装置			100 mBq/L*17		
		シリコン半導体検出器			50 mBq/L*17		

*1 化学的回収率や検出効率を求めるために添加される物質。内部標準物質、トレーサー。

*2 文書名は表 6 参照

*3 イオン交換樹脂：強塩基性陰イオン交換樹脂

*4 溶媒：TOA(トリ-n-オクチルアミン)-キシレン

*5 シリコン半導体検出器

*6 計数効率：20%、測定時間：24 時間、核種からの α 線の全計数値が計数誤差の 3 倍とした場合

*7 溶媒：TTA(テノイルトリフルオロアセトン)-キシレン

*8 四重極 ICP-MS と超音波ネブライザーを併用し、回収率を 70%、1 分間 3 回繰り返し測定した時のバックグラウンド計数値の変動(標準偏差)の 3 倍とした場合

*9 プルトニウム分離・精製後の試料の 1/3(残りの 2/3 は ICP-MS 用)を用いて、回収率を 23%(70% $\times$ 1/3)、測定時間を 4 時間、計数効率 20%、バックグラウンド計数率を 1 カウント/4 時間とした時の正味計数率に伴う誤差の 3 倍とした場合

*10 TRU レジンカラム

*11 計数効率 20%の検出器で 4 時間計測した場合

*12 LEPS：Low Energy Photon Spectrometer、低エネルギー光子スペクトロメータ

*13 直径 20mm、面積 200mm²、厚さ 10mm の検出器で Am-241 の 59.5 keV を 4 時間計測した場合

*14 試料をそのまま前処理なしに測定した場合

*15 2L の試料を蒸発した乾固物を測定した場合

*16 Pu、Am、Cm α 線放出核種：プルトニウム同位体(Pu-238、Pu-239、Pu-240)、アメリシウム 241 及びキュリウム同位体(Cm-242、Cm-243、Cm-244)の合計

*17 4 時間計測した場合

*18 灰分率が 4%未満の試料は生 0.5～1kg 相当の灰を、4%以上の試料は灰 20g

*19 1kg 相当の灰を測定した場合

*20 1L 相当の灰を測定した場合

表9 放射性ストロンチウム分析法と分析目標レベル

試料名	前処理	分析方法 分離	測定	核種	分析供 試量	検出可 能レベ ル	単位	分析所要時 間	出典／ 測定法 シリー ズ*1
陸水	蒸発法 又はイ オン交 換法	イオン交換法 発煙硝酸法	LBC*2*3	Sr-90	100 L	0.4 *4 0.2 *5	mBq/L	(3週間程度)	No. 2 Sr
		シュウ酸塩法		(Sr-89) Sr-90					
陸水飲料水		シュウ酸塩沈殿-炭酸塩沈殿-抽出クロマトグラフィー*6-炭酸塩沈殿法	LSC*7*8	Sr-89	1 L	0.9 *9	Bq/L	測定まで約 12時間	No.未 定 Sr 緊 急
				Sr-90		0.6 *9	Bq/L		
灰試料	酸抽出	イオン交換法 発煙硝酸法 シュウ酸塩法	LBC*2*3	Sr-90	1 kg 生 相当	0.04 *4 (0.20)*5	Bq/kg 生		
		イオン交換法 シュウ酸塩法	LSC*7	Sr-90 *10 Sr-89 *11	10 g 灰	0.004*12 0.005*13 0.007*14	Bq/kg 灰	測定試料調 製までイオ ン交換法約 25時間、シュ ウ酸塩法約 30時間	No. 2 Sr、 No. 23 LSC
食品	灰化、 酸抽出	シュウ酸塩-抽出クロマトグラフィー*6-炭酸塩沈殿法	LSC*7*8 (チェレンコフ+液体シンチレーション)	Sr-89	0.25 kg	4 *9	Bq/L	測定まで約 16-24時間	No.未 定 Sr 緊 急
				Sr-90		3 *9	Bq/L		
牛乳	灰化、 酸抽出	溶媒抽出法*15	LSC	Sr-90	10 g 灰	0.004 *13	Bq/g 灰	測定試料調 製まで約 15 時間	No. 23 LSC No. 2 Sr
牛乳	イオン 交換	イオン交換樹脂カラム-炭酸塩沈殿-抽出クロマトグラフィー*6-炭酸塩沈殿法	LSC*7*8	Sr-89	0.25 L	4 *9	Bq/L	測定まで約 10時間	No.未 定 Sr 緊 急
				Sr-90		3 *9	Bq/L		

*1 文書名は表 6 参照。

*2 LBC:低バックグラウンド 2 π ガスフロー計数装置

*3 Y-90 をスカベンジし、約 2 週間後、生成した Y-90 を測定し、Sr-90 を算出

*4 LBC の 90Y に対する計数効率 25 %、測定時間 60 分、バックグラウンド計数率 0.4 cpm、Sr 回収率 80%の場合 (No. 2, 5 訂)

*5 LBC の 90Y に対する計数効率 27%、測定時間 60 分、バックグラウンド計数率 0.3 cpm、Sr 回収率 90%の場合 (No. 2, 4 訂)

*6 クラウンエーテル固定化メタクリル樹脂

*7 LSC : 液体シンチレーションカウンタ

*8 スカベンジ後、1 回目はチェレンコフ(主に Sr-89)、2 回目はシンチレーション測定(主に Sr-89、Sr-90)

*9 チェレンコフ測定 100 分間(10 分×10 回)、シンチレーション測定 110 分間(10 分×11 回、1 回目は棄却)した場合

*10 Y-90 成長後(2 週間以上が望ましい)に測定し、得られた計数値から Sr-89 の計数値を差し引き算出

*11 スカベンジ後速やかにチェレンコフ測定

*12 測定時間を 100 分とし、バックグラウンド計数の計数誤差の 3 倍以上を有意とし、Sr-89 が含まれていない場合(含まれる Sr-89 の放射能により変化する)。Sr-90 : およそ 40 mBq/試料(No. 23)

*13 LSC の 90Y に対する計数効率 45 %、測定時間 100 分、バックグラウンド計数率 5 cpm、Sr 回収率 80%、89Sr は含まれないものとした場合。(No. 2, 5 訂、No. 23 参考)

*14 測定時間を 100 分とし、バックグラウンド計数の計数誤差の 3 倍以上を有意とした場合。Sr-89 : およそ 70 mBq/試料

*15 HDEHP : ビス-(2-エチルヘキシル)リン酸