

平成 28 年度放射線対策委託費
(放射能測定法シリーズ改訂) 事業
業務報告書

平成 29 年 3 月

公益財団法人 日本分析センター

本報告書は、原子力規制委員会 原子力規制庁の平成 28 年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業における委託業務として、公益財団法人日本分析センターが実施した成果を取りまとめたものです。

目 次

1. 業務目的	1
2. 実施期間	1
3. 業務内容	1
3.1 概要	1
3.2 委員会開催	3
3.2.1 委員構成	3
3.2.2 委員会開催日と議題	5
4. 放射能測定法シリーズ改訂に係る検討事項及び結果	6
4.1 連続モニタによる環境 γ 線測定法	6
4.1.1 測定地上高約 3m（局舎上）の許容について	6
4.1.2 周辺線量当量に対応するための機器改修の可否について	11
4.2 緊急時における放射性ストロンチウム分析法	14
4.2.1 文献調査	14
4.2.2 分析目標レベルについて	17
4.2.3 IAEA の分析法について	18
4.2.4 分析法の妥当性について	32
4.2.5 セシウムの除染係数について	41
4.2.6 分析所要時間及び検出下限値の確認	41
4.2.7 クロスチェック	42
4.2.8 環境試料への適用	47
4.2.9 迅速な前処理方法の適用	47
4.3 緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法	68
4.3.1 核データライブラリ	68
4.3.2 減衰補正	74
4.3.3 自己吸収補正	78
4.3.4 サム効果補正	84
4.3.5 デッドタイム増加に伴う測定上の問題点	92
4.3.6 その他	96
4.3.7 国内調査	108
4.4 原子力施設等放射能調査機関連絡協議会からの意見について	109
5. まとめ	110

参考資料 1 平成 28 年度 放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨

参考資料 2 調査文献リスト

参考資料 3 原子力施設等放射能調査機関連絡協議会からの意見

別冊 1「連続モニタによる環境 γ 線測定法」

別冊 2「緊急時における放射性ストロンチウム分析法」

1. 業務目的

原子力規制委員会では、環境放射能の水準を把握するための調査や、陸域、海域及び空域の各種放射線モニタリングを実施している。また、都道府県、市町村、原子力事業者及び研究機関等、様々な主体が放射線モニタリングを実施している。これらの結果の精度を保つため、また、原子力災害が発生した際に適切な放射線モニタリングを実施できるようにするため、標準的な分析・測定手法を定義する必要がある。

環境放射能分野における標準的な分析・測定法マニュアルとしては、「文部科学省放射能測定法シリーズ」（以下「測定法」という。）が34種作成されているが、中には刊行から40年程度経過しているものも存在し、技術の進展等が反映されていない場合があると考えられることから、これらの測定法の内容を精査し、改訂等を行うこととする。

2. 実施期間

平成28年10月7日～平成29年3月31日

3. 業務内容

3.1 概要

本業務の内容は(1)～(4)のとおりとする。業務に当たっては、専門的知見を持つ者から意見を聴取する等、技術的妥当性に留意するとともに、適宜、原子力規制庁担当官と調整を行った。(1)及び(2)の改訂案を作成するに当たっては、JIS原案作成のための手引（第17版）を参考にした。また、(1)～(3)に共通し、以下の項目に留意した。

- ・ 平成26年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業報告書及び平成27年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業報告書を参照すること。
- ・ 改訂の前後において、過去の測定結果との連続性を満たすこと。
- ・ 単位系等が現在国際的に使用されているものであること。
- ・ 記載された方法を実施するにあたり、現時点において機器の校正等に必要な線源等が入手できること。
- ・ 測定法の記述が曖昧で測定者の裁量に委ねられている手法がないこと。
- ・ 技術の進展が適切に反映されていること。
- ・ 新たに実験・検証が必要な項目がある場合、その事項を一覧にするとともに、契約期間内に報告書案の作成も含めて可能と見込まれるものに関し限り実験・検証を実施すること。

(1) 平成27年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業の改訂案に対する追加的事項の検討

平成27年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業において作成した測定法No.17「連続モニタによる環境 γ 線測定法」及び測定法No.20「空間 γ 線スペクトル測定法」の改訂案について、原子力災害対策指針におけるOIL

(Operational Intervention Level)に基づく追加的防護措置の判断に資することを目的として、線量(Gy $\leftrightarrow$ Sv)の換算、測定器の高さの違いによる評価等について、

更なる文献調査、技術的な詳細検討や解析等を行うとともに、過去の測定による知見等を取り入れて、改訂案を完成させた。

(2) 緊急時における放射性ストロンチウム分析法の作成

平成 27 年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業において検討を行った緊急時における放射性ストロンチウムの分析手法について、その検討結果を反映してマニュアル案を作成した。また、昨年度の検討に不足がある場合は、本事業の中で追加的に検討を行い、マニュアル案に反映させた。

(3) 測定法 No. 29「緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法」の検討

測定法 No. 29「緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法」を見直し、改訂案を検討した。改訂案の検討に当たっては、以下の点に留意した。

- ① 東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故（以下「福島第一原発事故」という。）を踏まえ、核データの設定の考え方、各種補正等の解析法について検討した。
- ② 緊急時における検出器の保護や除染等の考え方の記載を検討した。

(4) 報告書の作成

(1) ～ (3) の結果を取りまとめるとともに、業務報告書を作成した。

3.2 委員会開催

放射能測定法シリーズ改訂検討委員会を3回開催し、実施計画、内容及び改訂案等について審議を行った。また、緊急時における放射性ストロンチウム分析法を作成するに当たっては、クロスチェックを実施した。

委員及び委員会の開催状況を、3.2.1及び3.2.2に示す。

3.2.1 委員構成

放射能測定法シリーズ改訂検討委員会

(五十音順、敬称略、平成29年3月現在)

氏名	所属	役職名
(委員長) 中村尚司	東北大学	名誉教授
阿部琢也	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門原子力科学研究所 放射線管理部放射線計測技術課放射能測定チーム	チームリーダー
阿部幸雄	福島県環境創造センター環境放射線センター	主幹兼次長兼 分析・監視課長
大野剛	学習院大学理学部化学科	准教授
木村芳伸	青森県原子力センター分析課	研究管理員
黒澤忠弘	国立研究開発法人産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門放射線標準研究グループ	上級主任研究員
斎藤公明	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門福島環境安全センター東京事務所	上級嘱託
玉柿励治	福井県原子力環境監視センター福井分析管理室	主任研究員
津田修一	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門原子力基礎工学研究センター 環境・放射線科学ディビジョン放射線挙動解析研究グループ	研究副主幹
長岡鋭	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	研究嘱託
藤田博喜	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部環境監視課	課長代理

クロスチェック協力者

(五十音順、敬称略、平成 29 年 3 月現在)

氏名	所属	役職名
岩井 直樹	福井県原子力環境監視センター福井分析管理室	主任研究員
木村 芳伸	青森県原子力センター分析課	研究管理員
松原 菜摘	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部環境監視課	
森口 朋浩	福島県環境創造センター福島支所	副主査

3.2.2 委員会開催日と議題

第1回、第2回及び第3回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会の日時、場所、出席者及び議題を以下に示す。また、それぞれの委員会要旨については、参考資料1に示す。

第1回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会

日時 平成28年12月5日（月）10時00分～12時00分

場所 航空会館 501+502 会議室

出席者 中村委員長、阿部（琢）委員、阿部（幸）委員、木村委員、黒澤委員、齋藤委員、玉柿委員、津田委員、長岡委員、藤田委員

議題 （1）放射能測定法シリーズ改訂の実施計画及び現状調査について
（2）その他

第2回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会

日時 平成29年1月20日（金）14時00分～16時30分

場所 東京国際フォーラム G610 会議室

出席者 中村委員長、阿部（幸）委員、大野委員、木村委員、黒澤委員、齋藤委員、玉柿委員、津田委員、長岡委員

議題 （1）第1回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について
（2）原子力施設等放射能調査機関連絡協議会からのご意見について
（3）放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について
（4）その他

第3回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会

日時 平成29年3月2日（木）13時30分～16時30分

場所 東京国際フォーラム G610 会議室

出席者 中村委員長、阿部（琢）委員、大野委員、木村委員、黒澤委員、齋藤委員、玉柿委員、津田委員、長岡委員、藤田委員

議題 （1）第2回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について
（2）放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について
（3）その他

4. 放射能測定法シリーズ改訂に係る検討事項及び結果

4.1 連続モニタによる環境 γ 線測定法

4.1.1 測定地上高約3m（局舎上）の許容について

(1) 目的

原子力災害対策指針における OIL (Operational Intervention Level) に基づく追加的防護措置の判断に資することを目的として、測定器の高さの違いによる評価等について、更なる文献調査、技術的な詳細検討や解析等を行うと共に、過去の測定による知見等を取り入れて改訂案を充実させるため、検討を行った。

なお、本検討事項の結果については、測定法原案である別冊1「連続モニタによる環境 γ 線測定法」に収録した。

(2) 方法

設置地上高の異なる検出器の設置条件を仮定し、人工放射性核種の沈着状況を原子力災害時から経時的に変化させ、設置条件及び沈着状況が測定値に与える影響をシミュレーション計算によって解析した。なお、シミュレーション計算の実施に際しては、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 松田規宏氏に御協力頂いた。

なお、シミュレーション計算による解析は、各種条件が1パターンのみであるため、その他の設置条件及び沈着状況を踏まえた考え方については、文献調査によって考察を行った。

(3) 結果

シミュレーション計算の各種条件は、表4.1.1のとおりである。

無限平面上に局舎が存在し、その局舎上に検出器が設置されている状況での測定値と、無限平面上に局舎は存在せず、地上高1mに検出器が設置されている状況での測定値を、それぞれシミュレーション計算によって算出したモデルとその結果を図4.1.1及び表4.1.2に示す。シミュレーション計算による解析結果から、原子力災害直後の局舎上及び周辺土壌表面に同一の密度で放射性物質が沈着した状況下であれば、局舎上での測定値と地上高1mでの測定値との間には、空気カーマ、周辺線量当量共に、約15%程度低く評価された。

このシミュレーションモデルと同等の設置・沈着条件であり、原子力災害直後の放射性物質が地表面に沈着したばかりの限られた期間であれば、地上高1mと同等とみなすことができると考えられる。ただし、これは言い換えると、設置・沈着条件が異なると同様の考え方が成立しない場合があることを意味している。沈着条件の違いにおける沈着量を表したものを図4.1.2に示す。

一方、原子力災害の発生から一定期間の時間が経過した後の状況を想定した一例として、周辺土壌には放射性物質の沈着は残るものの、コンクリート製の局舎上表面に沈着した放射性物質が、ウェザリングによって洗い流された状況下(局舎上の沈着はなし)を

模擬してシミュレーションを行った。その結果、局舎上における測定値は地上高 1 m の測定値に比べ、空気カーマ、周辺線量当量共に 40～50 %程度低く評価された。

なお、原子力災害時は、地表面や建造物等に沈着した人工放射性核種だけが測定対象ではなく、放射性プルームの発生時には大気中を浮遊している人工放射性核種も測定対象となる。参考として、測定時における線源の分布状況の違いによる検出器の入射方向分布を表したものを図 4.1.3 に示す。

表 4.1.1 シミュレーション計算条件

条件種別		条件内容
連続モニタ 設置条件	局舎	材質：コンクリート製 外寸：3300×2500×2350mm 壁厚：100mm 屋根厚：100mm
	検出器	検出器種別：NaI(Tl)シンチレーション検出器 2in ϕ ×2in 設置高：検出器結晶部の幾何学的中心が屋根表面から 615mm 設置位置：屋根中央部に設置
周辺環境の 条件	環境	無限平面の土壌
	沈着条件	^{137}Cs の重量緩衝深度 $\beta = 0.1\text{g/cm}^2$ 、 1.0g/cm^2 、 5.0g/cm^2
	土壌	密度： 1.6g/cm^3 組成 ¹⁾ : O 57.7%, Si 27.1%, Al 5.0%, Ca 4.1%, H 2.1%, C 1.6% K 1.3%, Fe 1.1%
解析に使用した 計算コード		粒子・重イオン輸送計算コード PHITS JENDL-4.0(光子の核データライブラリ)
線量換算係数		空気カーマ率:ICRP pub.74 周辺線量当量率:ICRP pub.74
解析手法		境界反射法 ²⁾

(シミュレーション計算協力：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

核工学・炉工学ディビジョン 炉物理標準コード研究グループ 松田規宏氏)

1) Eckerman K. F. and Ryman J. G., External exposure to radionuclides in air, water, and soil, Federal Guidance Report No. 12, EPA-402-R-93-081, Oak Ridge National Laboratory (1993)

2) Furuta T. and Takahashi F., A computational approach using reflection boundaries for dose calculation in infinitely expanded radiation field, Radiation Protection Dosimetry, 167, 392-398 (2015)

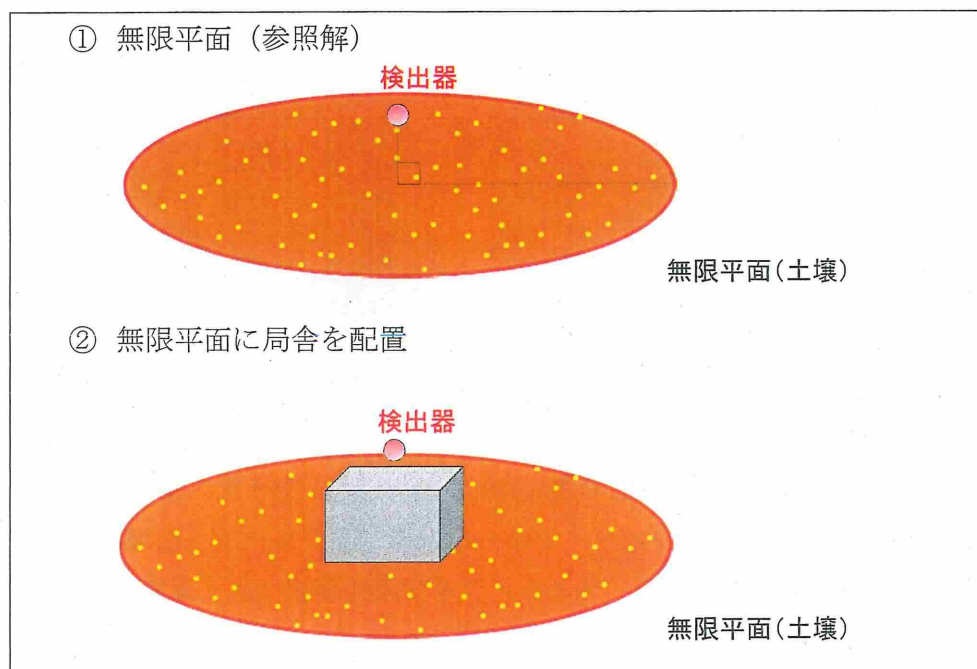


図 4.1.1 シミュレーション計算モデル

(シミュレーション計算協力：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核工学・炉工学ディビジョン 炉物理標準コード研究グループ 松田規宏氏)

表 4.1.2 シミュレーション計算によって算出した結果

原子力災害直後		
局舎上と地上高1mの比較		
緩衝深度 β g cm^{-2}	空気カーマ率 局舎上／地上高1m	1cm線量当量率 局舎上／地上高1m
0.1	0.85	0.86

局舎上の沈着物がウェザリング等で減衰		
局舎上と地上高1mの比較		
緩衝深度 β g cm^{-2}	空気カーマ率 局舎上／地上高1m	1cm線量当量率 局舎上／地上高1m
0.1	0.59	0.60
1.0	0.58	0.59
5.0	0.54	0.54

(シミュレーション計算協力：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核工学・炉工学ディビジョン 炉物理標準コード研究グループ 松田規宏氏)

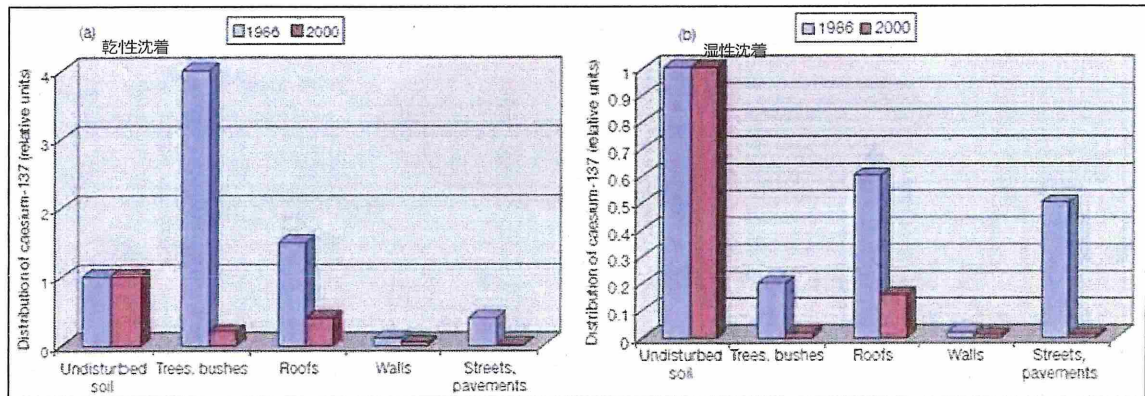


図 4.1.2 地面の種類別における ^{137}Cs 沈着量の違い

(日本学術会議 チェルノブイリ・フォーラム専門家グループ「環境」の報告
放射線学的評価報告書シリーズ “チェルノブイリ原発事故による環境への影響とその修復：20 年の経験”)

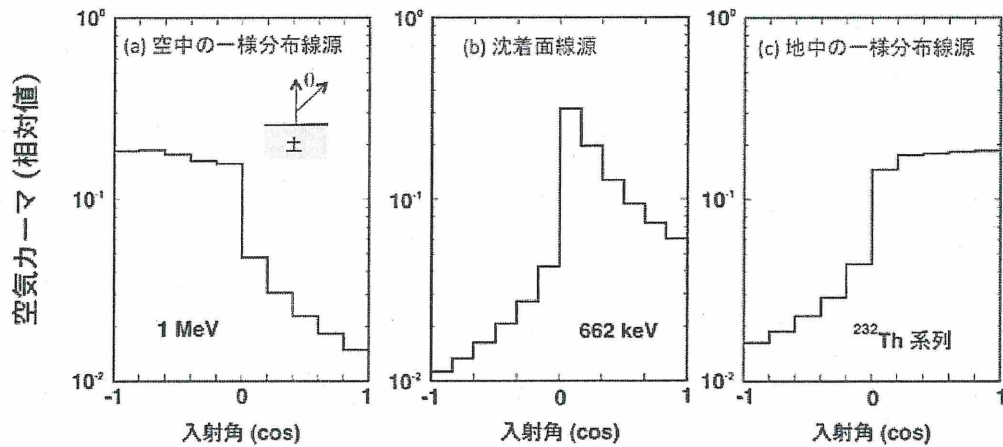


図 4.1.3 環境中に分布した線源から放出された γ 線による地上 1m における空気カーマの入射方向分布

斎藤公明 ほか “Ⅲ 環境 γ 線の特徴と被ばく線量との関係” RADIOISOTOPES, 63, 585-602 (2014))

4.1.2 周辺線量当量に対応するための機器改修の可否について

(1) 目的

原子力災害対策指針における OIL (Operational Intervention Level) に基づく追加的防護措置の判断に資することを目的として、線量 (Gy $\leftrightarrow$ Sv) の換算について、更なる文献調査、技術的な詳細検討や解析等を行うと共に、過去の測定による知見等を取り入れて改訂案を充実させるため、検討を行った。

なお、本検討事項の結果については、測定法原案である別冊 1「連続モニタによる環境 γ 線測定法」に収録した。

(2) 方法

平成 27 年度に実施した「放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業」での検討結果において、 γ 線エネルギー分布が刻一刻と変わる原子力災害の状況下では、空気吸収線量 (Gy) と周辺線量当量 (Sv) の両線量の間に、一般化した適切な換算係数をあらかじめ示すことは困難であることが解説されている。

この結果を踏まえ、測定者が換算を実施するのではなく、測定機器の仕様を改修することによって、元々出力される測定値を両線量とすることの可否について検討した。

検討方法は、空気吸収線量 (Gy) 及び周辺線量当量 (Sv) の両線量にて測定値を得る手段の可否について、連続モニタの製造業者に対して聞き取り調査を実施した。

また、機器の改修の可否と併せ、他国においてモニタリングに用いている線量についても、国内のみならず国外のユーザに販売を実施している連続モニタの製造業者に対して聞き取り調査を実施した。

製造業者への聞き取り調査

調査日 平成 28 年 11 月 18 日 (金)

調査者 公益財団法人 日本分析センター 放射能分析事業部 γ 線解析グループ
松田上級技術員、田中上級技術員

調査先 株式会社日立製作所 ヘルスケアビジネスユニット

(3) 結果

① NaI モニタ

株式会社日立製作所 ヘルスケアビジネスユニット社製の NaI モニタの場合、NaI モニタによって出力される波高分布から線量率を導き出す手法に、線量演算子として $G(E)$ 関数を採用している。この仕様のうち、波高分布の情報をソフト上にてデジタル処理を実施している場合については、検出器のサイズ・形状に応じた $G(E)$ 関数を組み込む仕様となっている。この複数の演算子 ($G(E)$ 関数) を組み込む仕様を活用し、検出器のサイズ・形状に応じた $G(E)$ 関数ではなく、定義の異なる線量に対応した演算

子 ($G(E)$ 関数)を組み込み、かつ、常時両線量にて演算するように改修することによって、同時に空気吸収線量 (Gy) 及び周辺線量当量 (Sv) の両線量での測定値を得ることができる。ただし、表示画面の線量、テレメータシステムの対応等、その他の大規模な改修も合わせて必要となる。

また、同じ線量演算子として $G(E)$ 関数を利用している方式を採用していても、モジュールを回路に組み込み、アナログ処理を実施している「DBM 回路方式」の場合には、上記内容を適用することはできない。

なお、今回調査したメーカー以外においても、同様のシステム仕様となっていれば同一の改修が必要となることが考えられるが、福島第一原発事故後には、これまでに納入実績のないメーカーも参入しているため、いずれのメーカーにおいても対応可能であるか否かについては、注視する必要があると考えられる。

② 電離箱モニタ

電離箱線量計については、測定原理上エネルギー情報が得られないため、周辺線量当量を測定する場合には、低エネルギーにおける応答特性を測定値に反映させるために、電離箱壁材に原子番号の大きい材料を用いることもある。以下に市販されている電離箱モニタにおける線量率算出の一例を示す。

メーカーによる電離箱線量計の線量算出方法の一例

⇒ 電離箱検出器からの出力電圧を線量率 (Gy/h) へ換算している。

1. 照射施設にて値付けされた線源照射 (^{137}Cs) を実施する。この際の線量率は Gy/h である。
2. 低レンジ、中レンジ、高レンジの 3 ポイントの線量率にて照射し各照射線量率に応じた出力電圧を確認する。
3. レンジ (低レンジ、中レンジ、高レンジ) 毎に照射値と出力電圧値から換算定数を算出する。(換算定数: 照射値に対する出力電圧の比率)
4. 出荷時に組み合わせる測定装置側に接続する電離箱検出器の換算定数を設定する。

また、周辺線量当量 (Sv) を算出するためには、照射施設にて値付けされた線源照射 (^{137}Cs) を実施し、照射値 (Sv/h) を電離箱検出器の指示値から、測定器毎に換算定数を算出する必要がある。

なお、今回調査したメーカー以外においても、同様の算出方法となっていれば同一の対応が必要となることが考えられるが、いずれのメーカーにおいても対応可能であるか否かについては、注視する必要があると考えられる。

③ 国外における線量測定

国外における線量測定の現状は様々である。線量として周辺線量当量及び空気吸収線量を採用している国（又は地域）を次に示す。

- ・ 周辺線量当量：欧州、豪州、韓国、香港、台湾
- ・ 空気吸収線量：中国

なお、モニタリングに用いている測定器機種は、主に電離箱及び GM 計数管である。

4.2 緊急時における放射性ストロンチウム分析法

4.2.1 文献調査

緊急時における放射性ストロンチウム分析法の検討にあたり、分離・精製方法及び測定方法について調査し、緊急時における放射性ストロンチウム分析法として採用すべき方法を検討した。個別の文献調査結果については、参考資料2に記載した。

(1) 分離・精製法について

分離・精製法は沈殿分離、抽出クロマトグラフィー(Eichrom 社製 Sr resin、DGA resin、3M 社製 Empore Sr Rad Disk) などの方法があった。以下に、各分離・精製方法について述べる。

(2) 沈殿分離について

Tazoe ら^{*1}は海水中のストロンチウム 90 分析にあたり、ストロンチウム 90 と放射平衡にあるイットリウム 90 を分析対象として、イットリウム 90 を水酸化鉄沈殿により濃縮し、DGA resin を用いてイットリウム 90 を分離・精製している。

Amano ら^{*2}は食品中のストロンチウム 90 分析にあたり、ストロンチウム 90 と放射平衡にあるイットリウム 90 を分析対象として、食品からイットリウム 90 を抽出した後、水酸化鉄共沈及びシュウ酸塩沈殿によってイットリウム 90 を粗分離し、DGA resin を用いてイットリウム 90 を分離・精製している。

Tayeb ら^{*3}は海水中のストロンチウム 90 分析にあたり、ストロンチウム 90 と放射平衡にあるイットリウム 90 を分析対象として、イットリウム 90 を炭酸塩沈殿により濃縮し、DGA resin を用いてイットリウム 90 を分離・精製している。

沈殿分離法は炭酸塩、シュウ酸塩、リン酸塩などがある。いずれも簡便な操作で溶液からストロンチウムを分離することができるが、周期表においてストロンチウムと同族元素であるカルシウムなどのアルカリ土類金属を分離することができないため、試料からストロンチウムを粗分離する手段として活用されている。緊急時における放射性ストロンチウム分析法においても、沈殿分離法はストロンチウムの粗分離方法として利用できると考えられた。

ストロンチウムとカルシウムを沈殿分離により分離する方法として、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」にも記載のある発煙硝酸を利用した方法がある。発煙硝酸法は共存する大量のカルシウムからストロンチウムを分離することができる利点はあるものの、発煙硝酸は取扱いに注意と習熟を要する試薬であり、緊急時における放射性ストロンチウム分析法には適していないと考えられた。

*1 H. Tazoe et al., Talanta 152 (2016) 219-227

*2 H. Amano et al., Appl. Radiat. Isot. 112 (2016) 131-135

*3 M. Tayeb et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. (2015) 304 1043-1052

(3) 抽出クロマトグラフィーについて

抽出クロマトグラフィーの代表的なものとして Eichrom 社製の Sr resin がある。当該製品は樹脂、樹脂を充填したカラム及びカートリッジとして販売されており、それらをストロンチウムの簡便、かつ、迅速な分離・精製法として利用した分析が広く行われている。

Maxwell ら^{*4}は海水中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 分析に Sr resin 及び DGA resin を分離・精製法として利用している。当該分析法では沈殿分離により海水から粗分離したストロンチウムを Sr resin によって分離・精製してガスフロー型比例計数管でストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を測定し、イットリウム 90 の放射平衡を待って DGA resin でイットリウム 90 を精製し、測定している。

Maxwell ら^{*5}は土壌中のストロンチウム 90 分析に Sr resin を利用している。当該分析法では沈殿分離により土壌から粗分離したストロンチウムを Sr resin によって分離・精製してガスフロー型比例計数管でストロンチウム 90 を測定している。

Maxwell ら^{*6}は野菜中のストロンチウム 90 を TEVA、TRU 及び DGA resin を用いて他の核種を分離した後、Sr resin を用いてストロンチウムを分離・精製してガスフロー型比例計数管でストロンチウム 90 を測定している。

Ometa'kova ら^{*7}は陸水中のストロンチウム 90 分析に Empore Sr Rad Disk を利用している。当該分析法では、試料をディスクに通液してストロンチウム 90 を捕集し、0.05 mol/L エチレンジアミン四酢酸四ナトリウム溶液によりストロンチウムを溶離し、液体シンチレーションカウンタによりチェレンコフ光を測定している。Empore Sr Rad Disk は、ろ過と同様の操作でストロンチウムを捕集できるディスクであるが、鉛やビスマスなどを取り除くことが難しく、一部の環境試料への適用に限られている^{*8}。

Sr resin と DGA resin は多様な環境試料への適用が既に検討されており、緊急時における放射性ストロンチウム分析法に適していると考えられた。Sr resin はストロンチウム、DGA resin はイットリウムを分離・精製の対象とし、このために Sr resin を利用した場合はストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を分析対象とすることができるが、DGA resin を使用した場合はストロンチウム 90 (イットリウム 90) のみが分析対象となる。緊急時における放射性ストロンチウム分析法ではストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を分析対象とするため Sr resin は適しているが、イットリウム 90 を対象とする DGA resin は適していないと考えられた。

^{*4} S. L. Maxwell et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 298 (2013), 867-875

^{*5} S. L. Maxwell et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 295 (2013), 965-971

^{*6} S. L. Maxwell et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 286 (2010), 273-282

^{*7} Jarmila Ometa'kova et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 290 (2011), 319-323

^{*8} N. Vajda et al, Appl. Radiat. Isot. 68 (2010), 2306-2326

緊急時における放射性ストロンチウム分析法ではストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を分析対象とすることから、分離・精製方法としては Sr resin を用いた迅速、かつ、簡便な方法を主とし、沈殿分離法による粗分離と組み合わせる方法が良いと考えられた。

放射性ストロンチウム分析法をレビューした Vajda ら^{*9}も発煙硝酸法などの従来法は分析に長時間を要し、イットリウムを溶媒抽出して間接的にストロンチウム 90 を定量する方法は比較的早く簡便であるが、近年はより選択性が高く、簡便、かつ、迅速な Sr resin を用いた抽出クロマトグラフィーに替わっているとしている。

(4) 測定法について

測定法としては、低バックグラウンド β 線測定装置、液体シンチレーションカウンタ、ICP-MS などがある。ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を測定の対象とする場合、低バックグラウンド β 線測定装置及び液体シンチレーションカウンタが緊急時における放射性ストロンチウム分析法に用いる測定法の候補となる。

低バックグラウンド β 線測定装置によるストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の測定は、1) ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を含む試料を測定し、2) イットリウム 90 の放射平衡を待ってイットリウム 90 を分離した後に測定する方法がある。このように低バックグラウンド β 線測定装置によるストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の定量にはイットリウム 90 の成長を待つことが必要であり、緊急時における放射性ストロンチウム分析法の測定法としては適していない。

液体シンチレーションカウンタによるストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の測定は、いくつかの方法があるが、イットリウム 90 を除いてから直ちにチェレンコフ光を測定し、引き続いてシンチレータを加えてシンチレーション測定する方法がある。この方法は IAEA による牛乳中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 分析法^{*10}に採用されている測定法で、最初のチェレンコフ光測定ではストロンチウム 89、シンチレーション測定ではストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の測定が行われる。

分離・精製及び測定方法をまとめると表 4.2.1 のようになる。

^{*9} N. Vajda et al, Appl. Radiat. Isot. 68(2010), 2306-2326

^{*10} Rapid Simultaneous Determination of ⁸⁹Sr and ⁹⁰Sr in Milk: A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 27 (2013)

表 4.2.1 分離・精製及び測定方法

工程	手法	
分離・精製	Sr resin 分離・精製対象：Sr 迅速性：○ 分析対象核種：○(Sr-89、Sr-90)	DGA resin 分離・精製対象：Y 迅速性：○ 分析対象核種：×(Sr-90のみ)
測定	液体シンチレーションカウンタ 迅速性：○ 測定対象核種：○(Sr-89、Sr-90) (放射平衡を待つ必要なし)	β線測定装置 迅速性：× 測定対象核種：○(Sr-89、Sr-90) (放射平衡を待つ必要あり)

ICP-MSによる測定はストロンチウム90を対象とすることが一般的であるが、近年、ストロンチウム89を対象とする検討が進んでいる。ストロンチウム89は半減期が短いため、ストロンチウム90と比較すると検出下限値が高くなる。今後、ICP-MSの性能の向上により検出下限値がより低くなることも考えられ、測定方法の選択肢の一つとして考慮していくことが必要である。

4.2.2 分析目標レベルについて

緊急時における放射性ストロンチウム分析法を記載した文献として、IAEA-TECDOC-1092^{*11}がある。IAEA-TECDOC-1092に記載されたストロンチウム分析法に係る典型的なMDA^{*12}を表4.2.2に示す。

表 4.2.2 IAEA-TECDOC-1092に記載されたSr分析法に係る典型的なMDA

試料	供試量	典型的なMDA		単位
		Sr-89	Sr-90	
牛乳	50mL	5	10	Bq/L
土壌	5g	350	600	Bq/kg
水	1L	5	10	Bq/L

^{*11} Generic Procedures for Monitoring in a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA-TECDOC-1092, IAEA 1999

^{*12} MDA : Minimum Detectable Activity

緊急時における放射性ストロンチウム分析法に係る分析目標レベルとして、上記の値を想定する。

4.2.3 IAEA の分析法について

IAEA は緊急時を想定して、牛乳中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法を作成し、公開している^{*13}。また、土壌及び海水中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法についても検討を進め、公開の準備をしている。分析法の概要及び詳細を図 4.2.1 から図 4.2.6 に示す。

^{*13} Rapid Simultaneous Determination of ⁸⁹Sr and ⁹⁰Sr in Milk : A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 27 (2013)

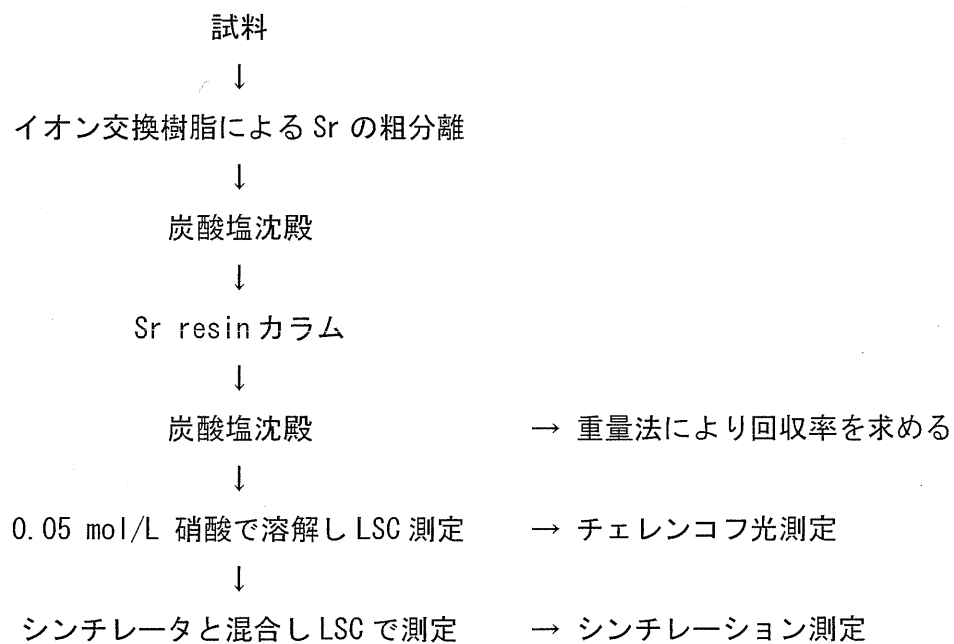


図 4.2.1 牛乳中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の概要

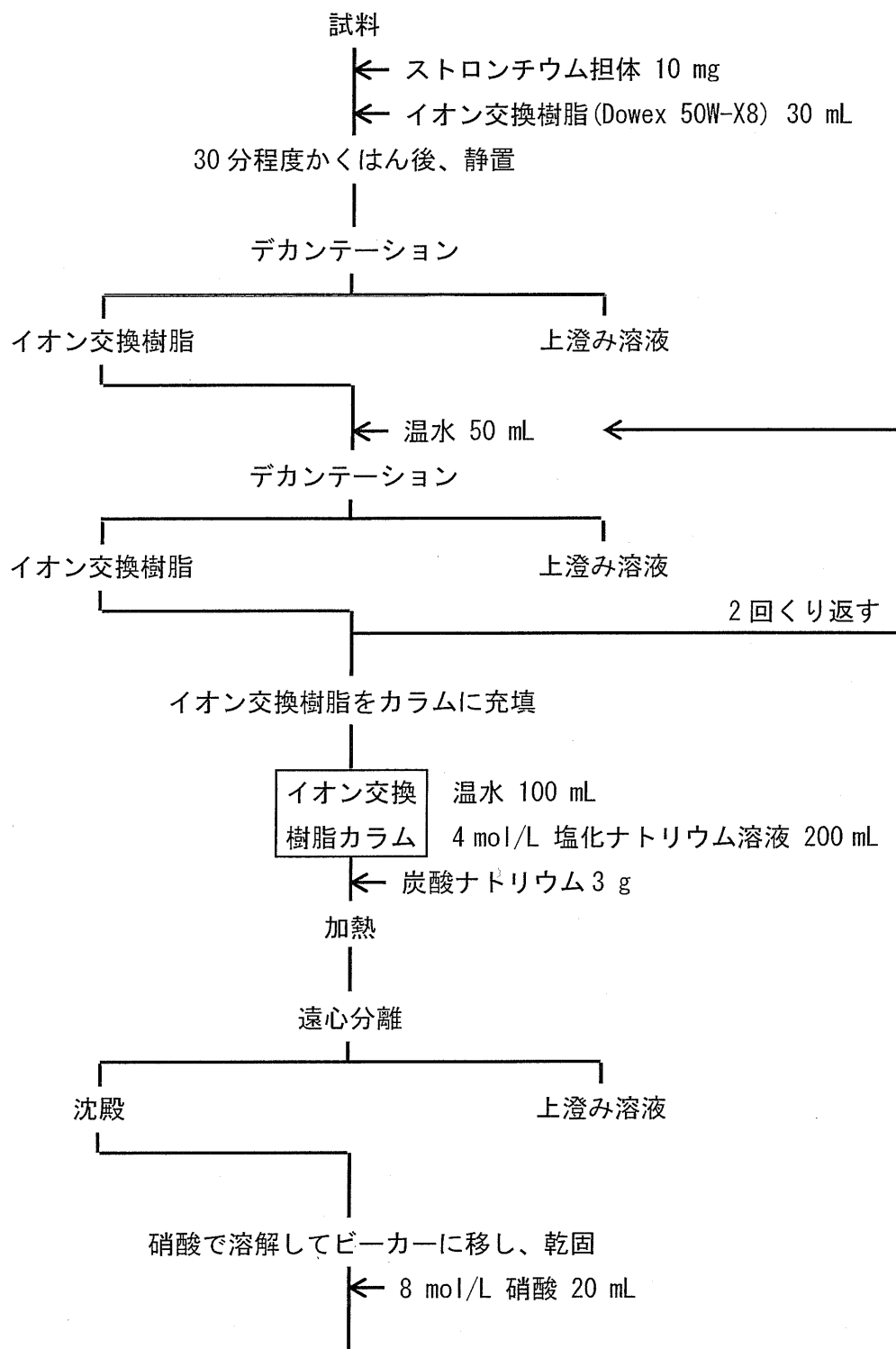


図 4. 2. 2 牛乳中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の詳細

^{*14} 牛乳の分析法は、Rapid Simultaneous Determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Milk : A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No.27に基づいているが、実験上の注意点、操作に対する確認方法及び実験条件について追加等を行った。

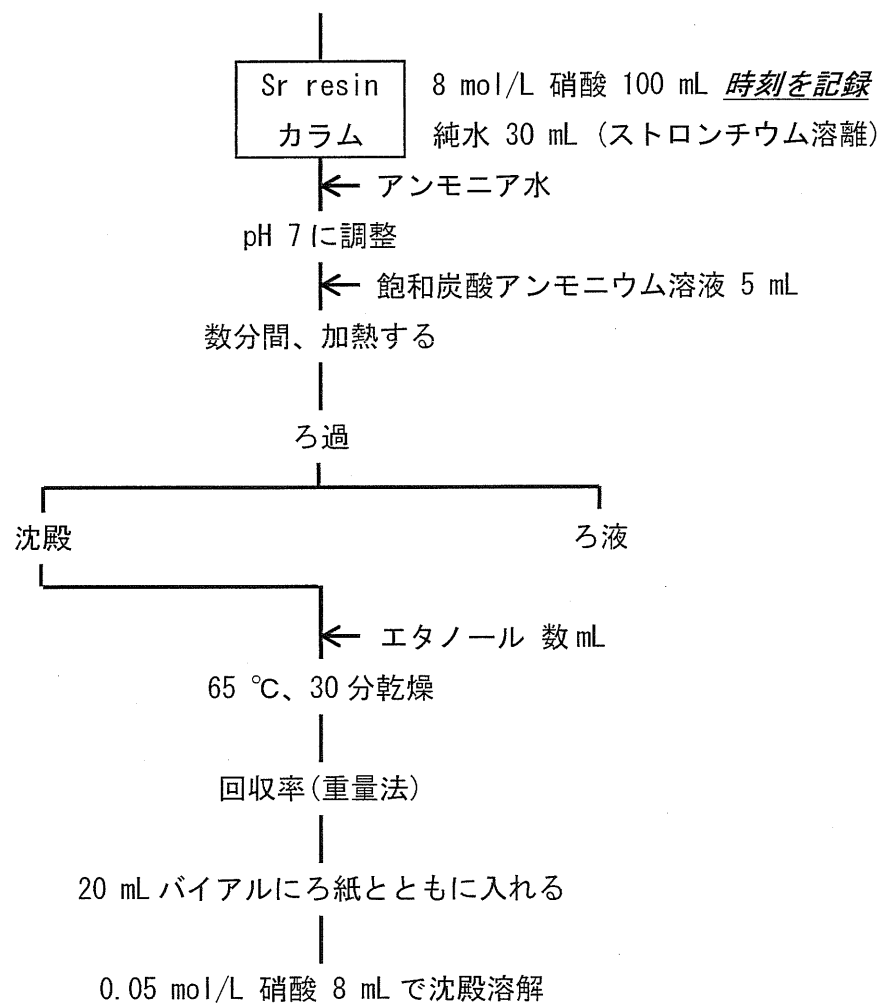


図 4.2.2 牛乳中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の詳細(つづき)

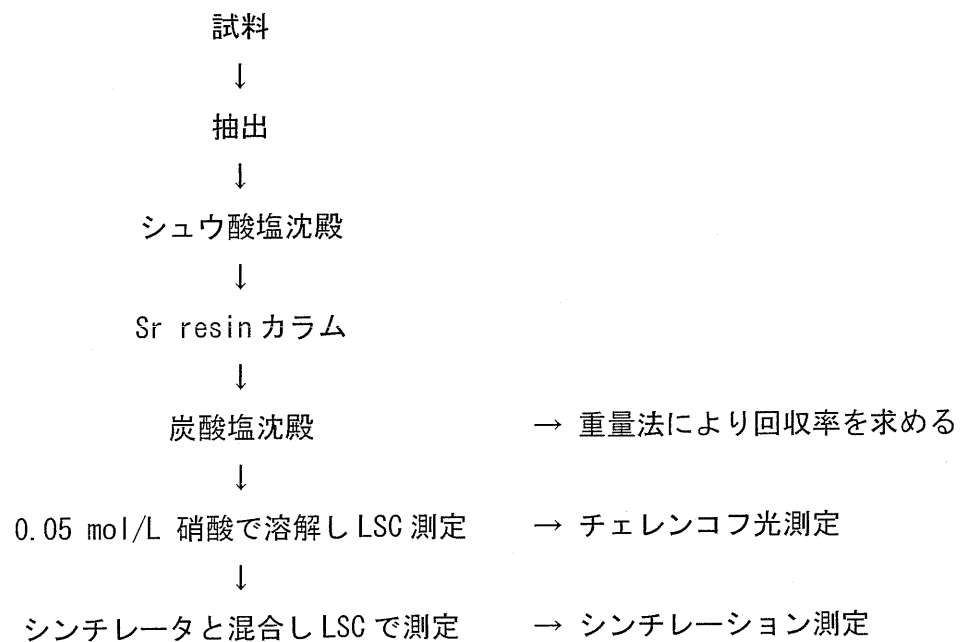


図 4.2.3 土壌中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の概要

土壌^{*15}

酸抽出法

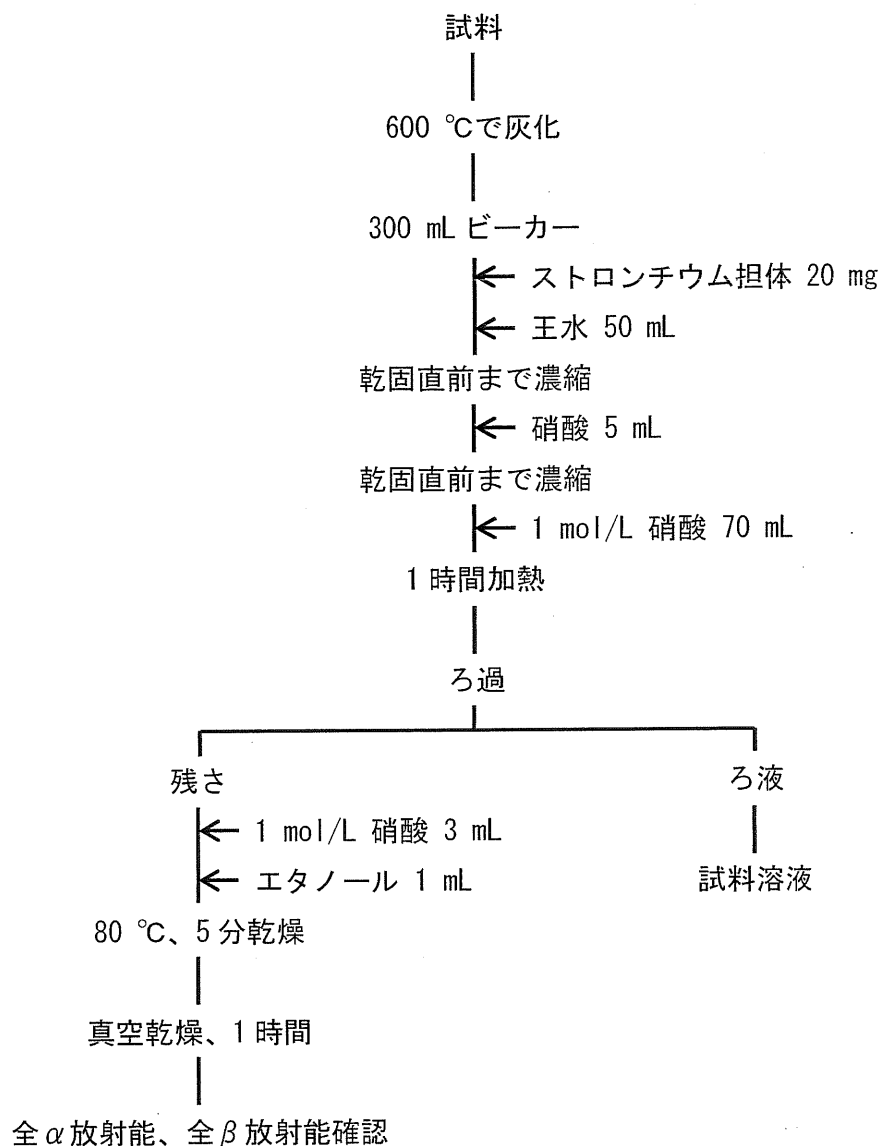


図 4.2.4 土壌中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の詳細

^{*15} 土壌の分析法は、IAEA の ALMERA ネットワークが活動の一環として開発している方法^{*}を用いた。本分析法は、ALMERA ネットワークの中でクロスチェックを行っている段階にあり、今後 IAEA より報告書が公表される予定である。

※プロジェクト名：Method Development Activity of the IAEA's network of Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity (ALMERA) for the Rapid Simultaneous Determination of ⁸⁹Sr and ⁹⁰Sr in Soil Samples Using Cerenkov and Liquid Scintillation Counting.)

溶融法

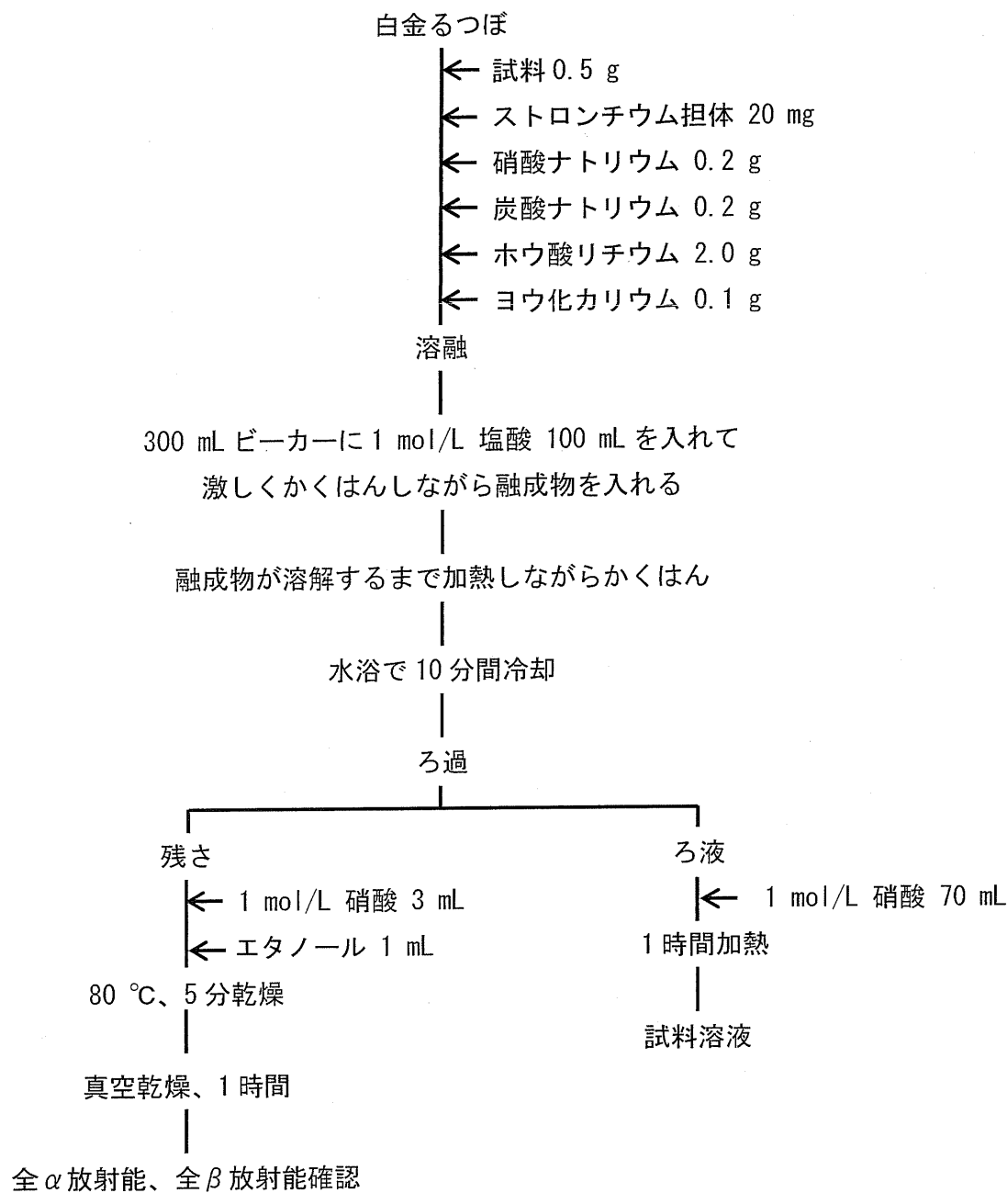


図 4.2.4 土壌中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の詳細(つづき)

全分解法

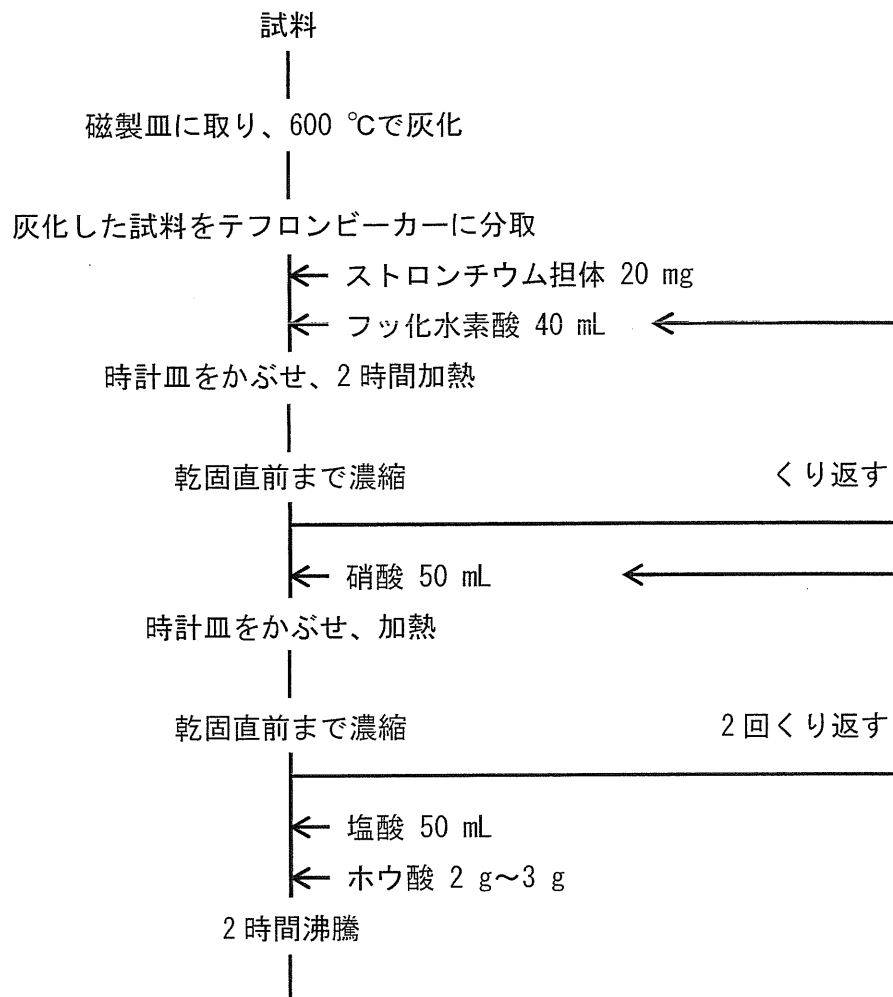


図 4.2.4 土壌中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の詳細(つづき)

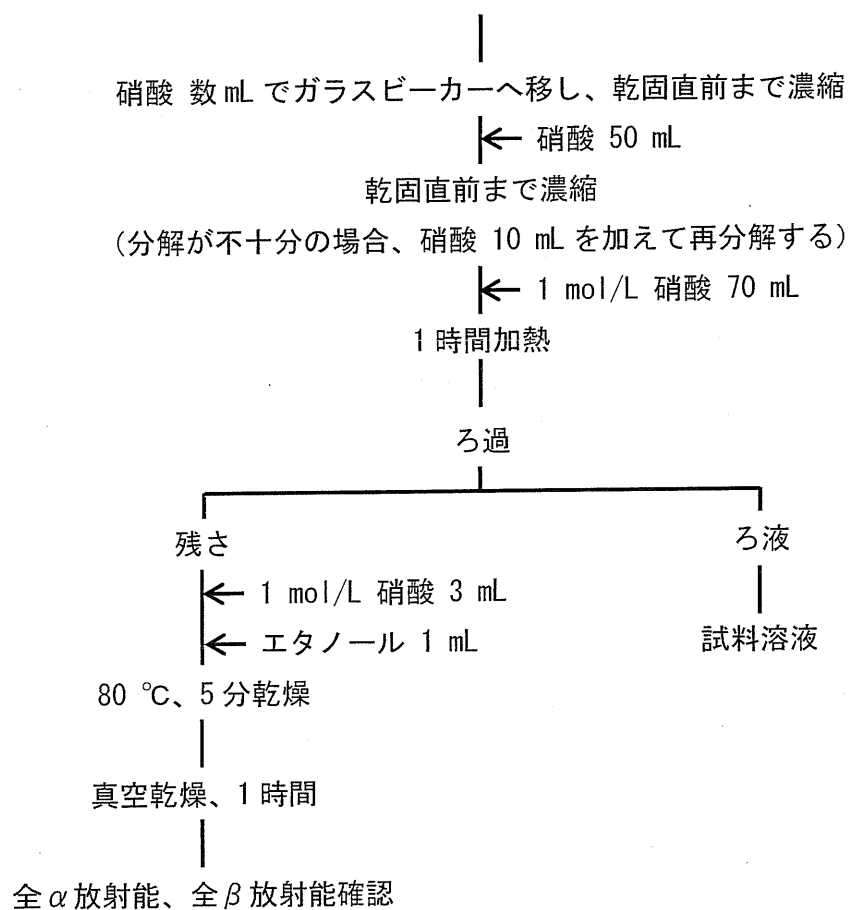


図 4.2.4 土壌中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の詳細(つづき)

マイクロウェーブ分解法

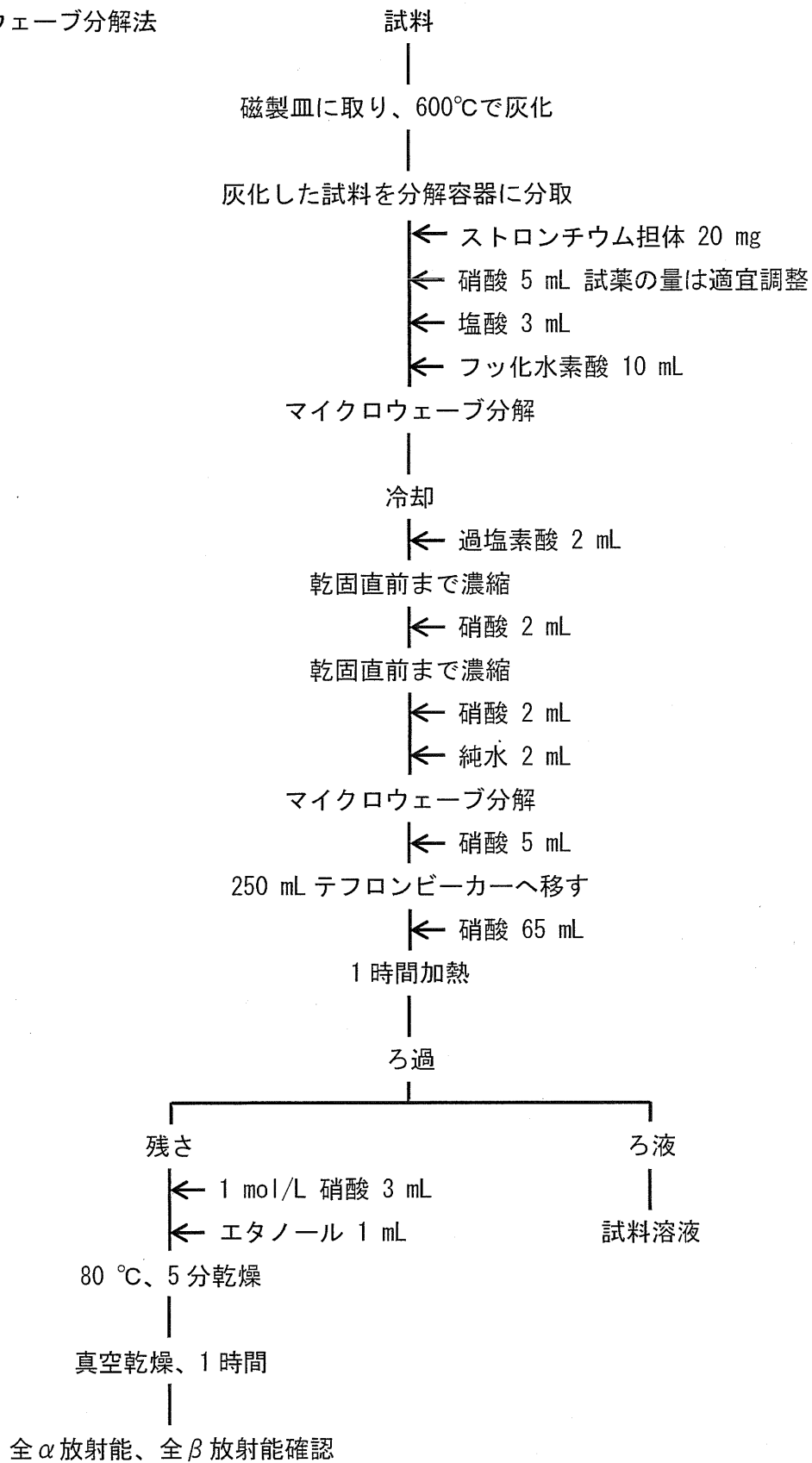


図 4.2.4 土壌中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の詳細 (つづき)

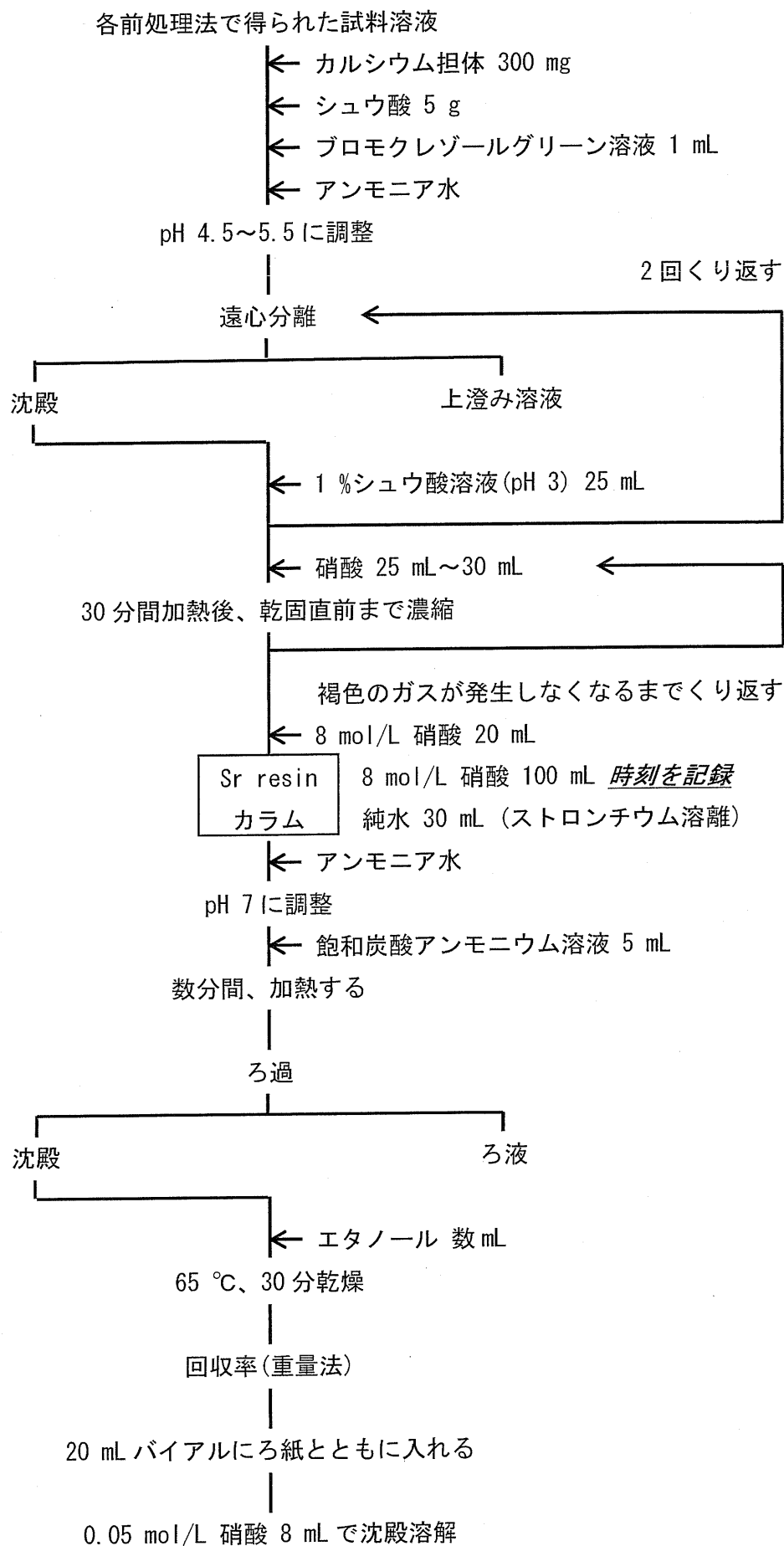


図 4.2.4 土壌中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の詳細(つづき)

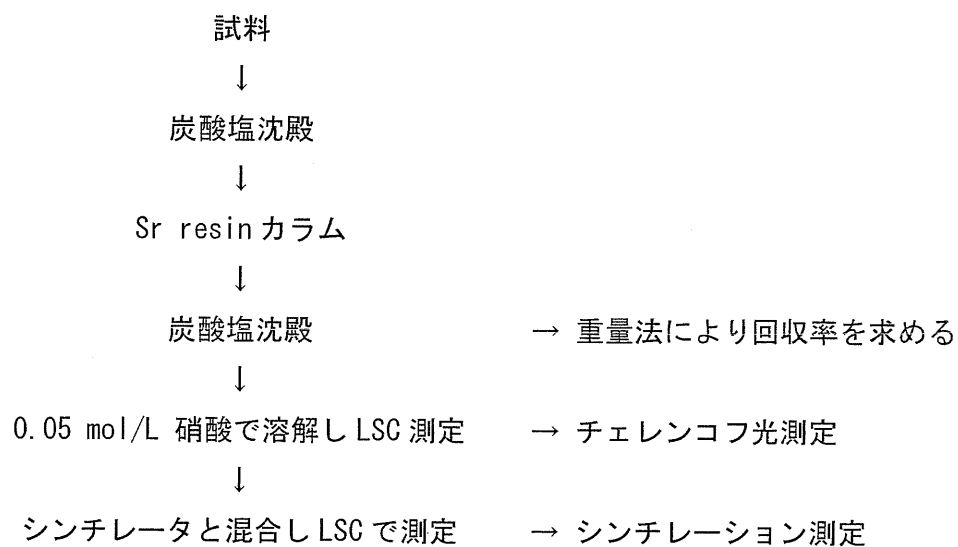


図 4.2.5 海水中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の概要

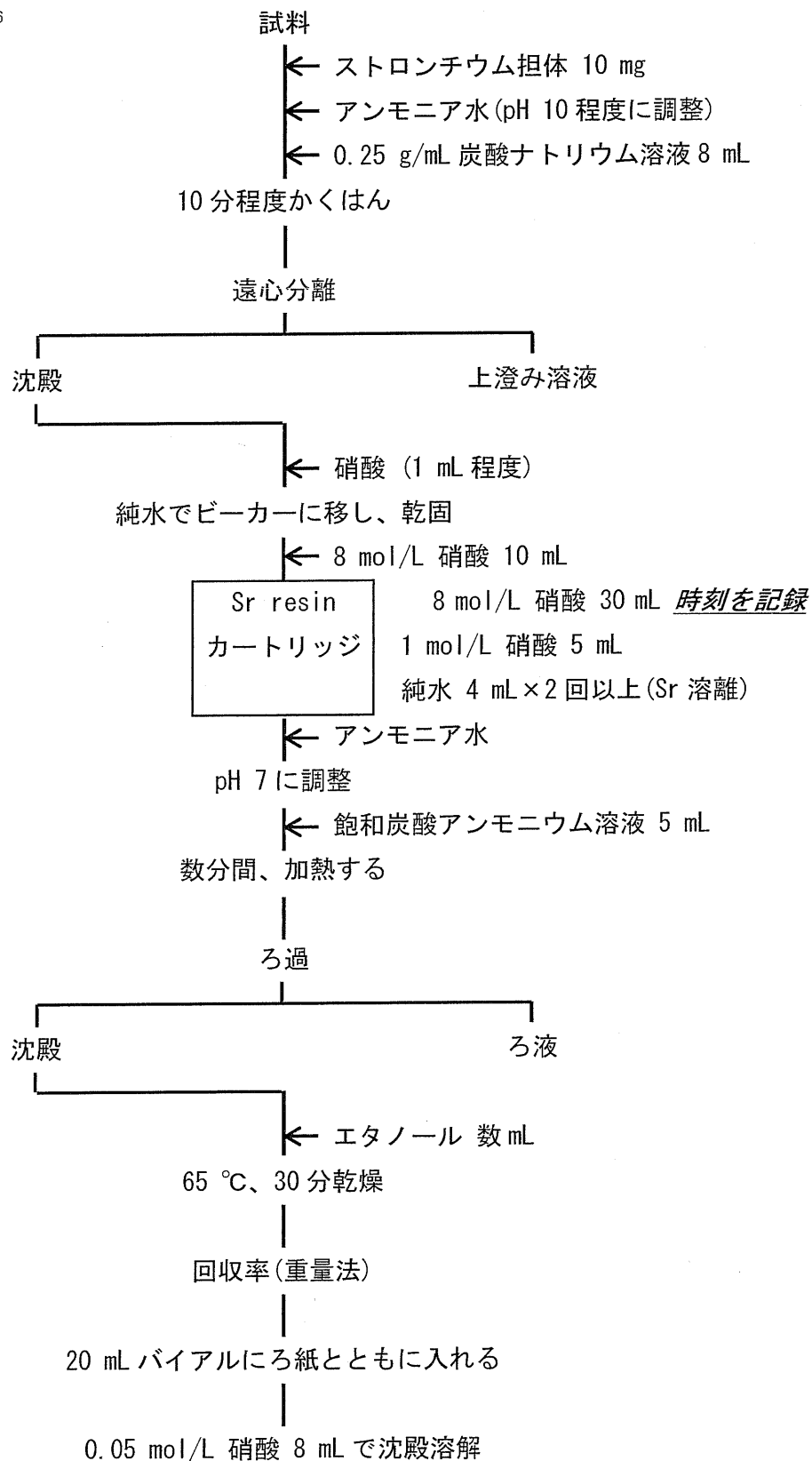


図 4.2.6 海水中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の詳細

*16 海水の分析法は、IAEA の ALMERA ネットワークが活動の一環として開発している方法を用いた。本分析法は、ALMERA ネットワークの中でクロスチェックを行っている段階にあり、今後 IAEA より報告書が公表される予定である。

海水(カラム)

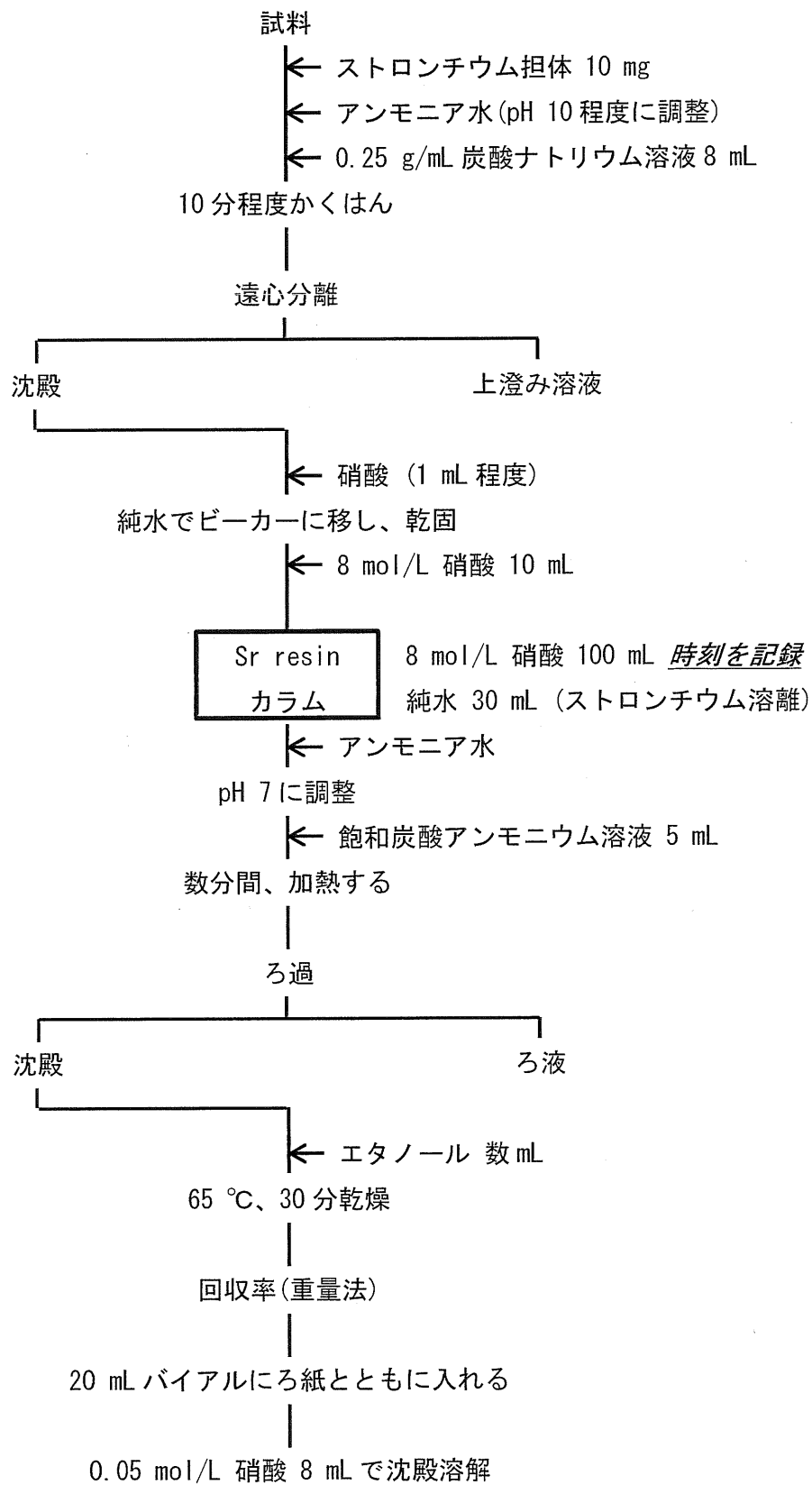


図 4.2.6 海水中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の詳細 (つづき)

IAEA による分析法の特徴として、以下の点が挙げられる。

- ・ 分析操作は沈殿分離、ろ過、遠心分離、カラムによる精製などを含み、いずれの操作も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」に含まれるものである。
- ・ 用いる試薬類は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」と共通のものが多く、試料による分析操作の違いが小さいため、本分析法のために準備すべき消耗品類の種類が少ない。
- ・ 試料毎に分析操作が若干異なるものの、類似の分析操作であり、複数種類の試料の並行分析も容易に行なえる。

さらに、緊急時における放射性ストロンチウム分析法のユーザとして想定される原子力施設が立地している自治体における運用についても可能であると考えられるが、以下の点について注意が必要である。

- ・ ストロンチウム 89 は半減期が短く、通常は標準液を保有していない自治体が多いが、本分析法によりストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を分析する際には、あらかじめストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の計数効率を定期的に確認しておく必要がある。
- ・ 使用する機材や消耗品類は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」によるストロンチウム 90 分析で使用するものが多いが、Sr resin やカラムなどの消耗品類はあらかじめ準備しておく必要がある。
- ・ 分析手順の確認や習熟のため、定期的に分析を実施することが望ましい(外部の研修等を活用するなど)。

上記のような注意点はあるものの、当該分析法は沈殿分離と Sr resin を組み合わせた簡便、かつ、迅速な方法であり、文献の調査結果を踏まえると緊急時における放射性ストロンチウム分析法として適している。なお、土壌の前処理法として酸抽出法、溶融法、全分解法、マイクロウェーブ分解法の 4 つの方法が示されているが、操作の簡便性や放射能測定法シリーズにおける前処理法を考慮すると、酸抽出法を優先すべきと考えられた。

4.2.4 分析法の妥当性について

牛乳、土壌及び海水の分析法の妥当性は以下のように確認した。

- ・ 牛乳については既知量のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 が添加された牛乳を分析した結果を添加値と比較した。
- ・ 土壌及び海水は分析法に従って分析した結果と、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」に従って分析した結果を比較した。

Rapid Simultaneous Determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Milk: A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting, IAEA Analytical Quality in Nuclear

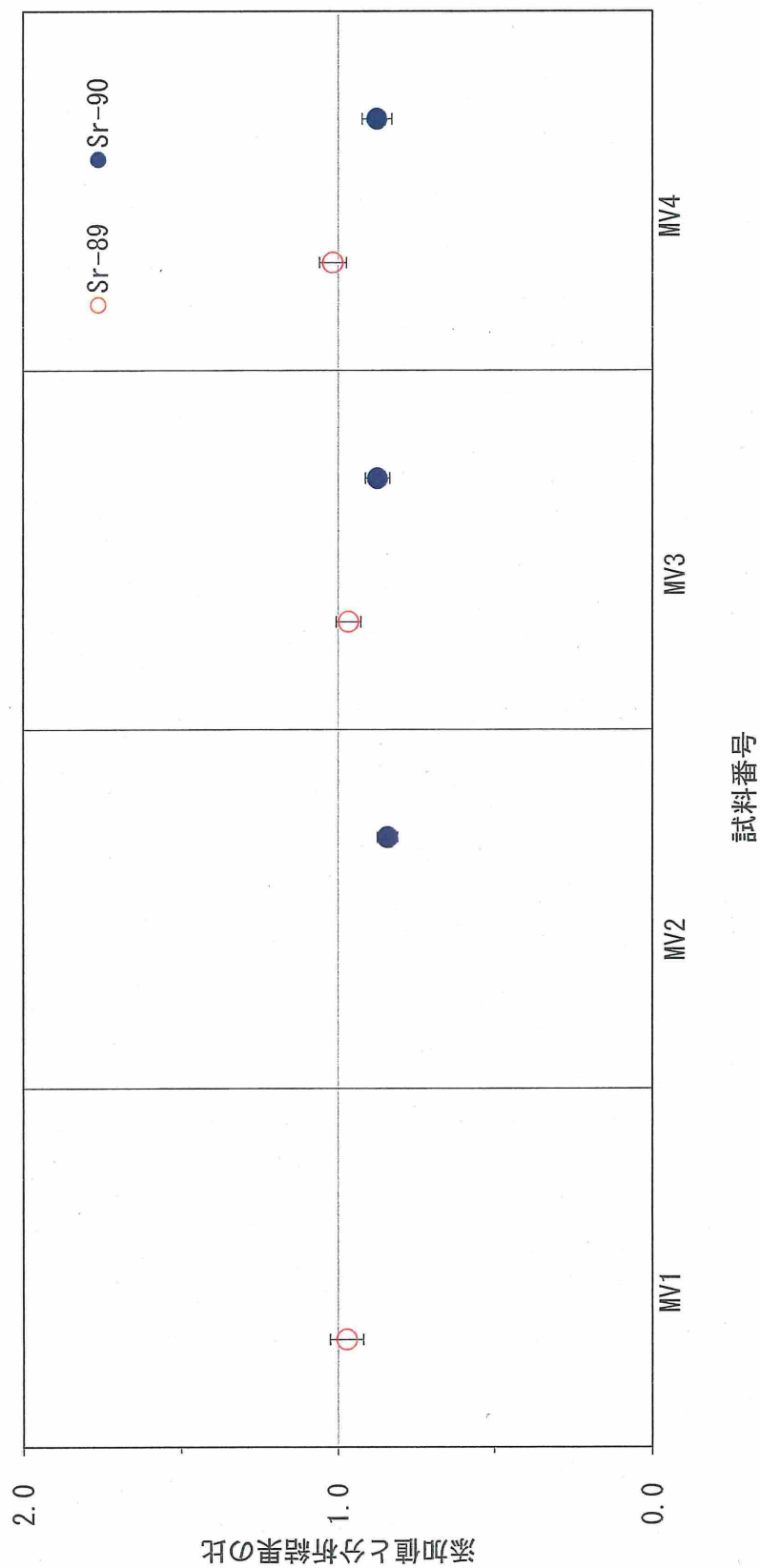
Applications Series No. 27 (2013)では、ストロンチウム 90 に係る測定の正確さの許容範囲として、30 %の差(relative bias)が示されており、分析結果はそれを満たしている。牛乳、土壌及び海水の分析結果を表 4.2.3～表 4.2.5 及び図 4.2.7～図 4.2.9 に示す。

表 4. 2. 3 牛乳の妥当性確認結果

試料名	^{89}Sr (Bq/kg)		^{90}Sr (Bq/kg)	
	分析結果	添加値	分析結果	添加値
MV1	410 $\pm$ 14	422 $\pm$ 18	*(-2.6 $\pm$ 3)	-
MV2	*(17 $\pm$ 9)	-	100 $\pm$ 2	119 $\pm$ 4
MV3	430 $\pm$ 12	445 $\pm$ 13	68 $\pm$ 2.4	77.9 $\pm$ 2.3
MV4	840 $\pm$ 15	826 $\pm$ 32	68 $\pm$ 2.7	77.7 $\pm$ 3.0

分析結果の誤差は計数誤差を示した。分析結果が誤差の3倍以下のものについては*で示し、その数値を()内に示した。

Rapid Simultaneous Determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Milk: A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 27 (2013) では、ストロンチウム 90 に係る測定の正確さの許容範囲として、30 %の差 (relative bias) が示されている。



分析結果の誤差は計数誤差を示した。

Rapid Simultaneous Determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Milk: A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 27 (2013) では、ストロンチウム 90 に係る測定の正確さの許容範囲として、30 % の差 (relative bias) が示されている。

図 4.2.7 牛乳の妥当性確認結果

表 4.2.4 土壌試料の妥当性確認結果

試料名	分析法	試料分解法	⁸⁹ Sr (Bq/kg 乾土)	従来法との比	⁹⁰ Sr (Bq/kg 乾土)	従来法との比
Soil (bottle 1)	本分析法	酸抽出	9080 ± 220	0.91 ± 0.02	1820 ± 88	1.02 ± 0.05
		全分解	9960 ± 260	1.00 ± 0.03	1920 ± 88	1.07 ± 0.05
		溶融	9670 ± 490	0.97 ± 0.05	1620 ± 150	0.91 ± 0.08
	従来法	酸抽出	9770 ± 180 10100 ± 180	— —	1820 ± 34 1760 ± 34	— —
Soil (bottle 2)	本分析法	酸抽出	10800 ± 230	0.97 ± 0.02	1010 ± 90	1.04 ± 0.09
		全分解	11700 ± 280	1.05 ± 0.03	831 ± 91	0.86 ± 0.09
		溶融	10800 ± 470	0.97 ± 0.04	1070 ± 140	1.11 ± 0.15
	従来法	酸抽出	11500 ± 150 10700 ± 160	— —	964 ± 25 970 ± 26	— —
Soil (bottle 3)	本分析法	酸抽出	19200 ± 300	0.98 ± 0.02	981 ± 120	1.07 ± 0.13
		全分解	20900 ± 340	1.07 ± 0.02	839 ± 110	0.91 ± 0.12
		溶融	20200 ± 610	1.04 ± 0.03	806 ± 180	0.88 ± 0.20
	従来法	酸抽出	19700 ± 180 19300 ± 170	— —	917 ± 25 925 ± 24	— —

従来法とは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」を示す。

分析結果の誤差は計数誤差を示した。分析結果が誤差の3倍以下のものについては*で示し、その数値を()内に示した。

分析供試量は酸抽出法及び全分解法は1 g 乾土、溶融法は0.5 g 乾土、従来法は2 g である。

従来法との比は従来法の平均値との比を示した。

表 4.2.4 土壌試料の妥当性確認結果(つづき)

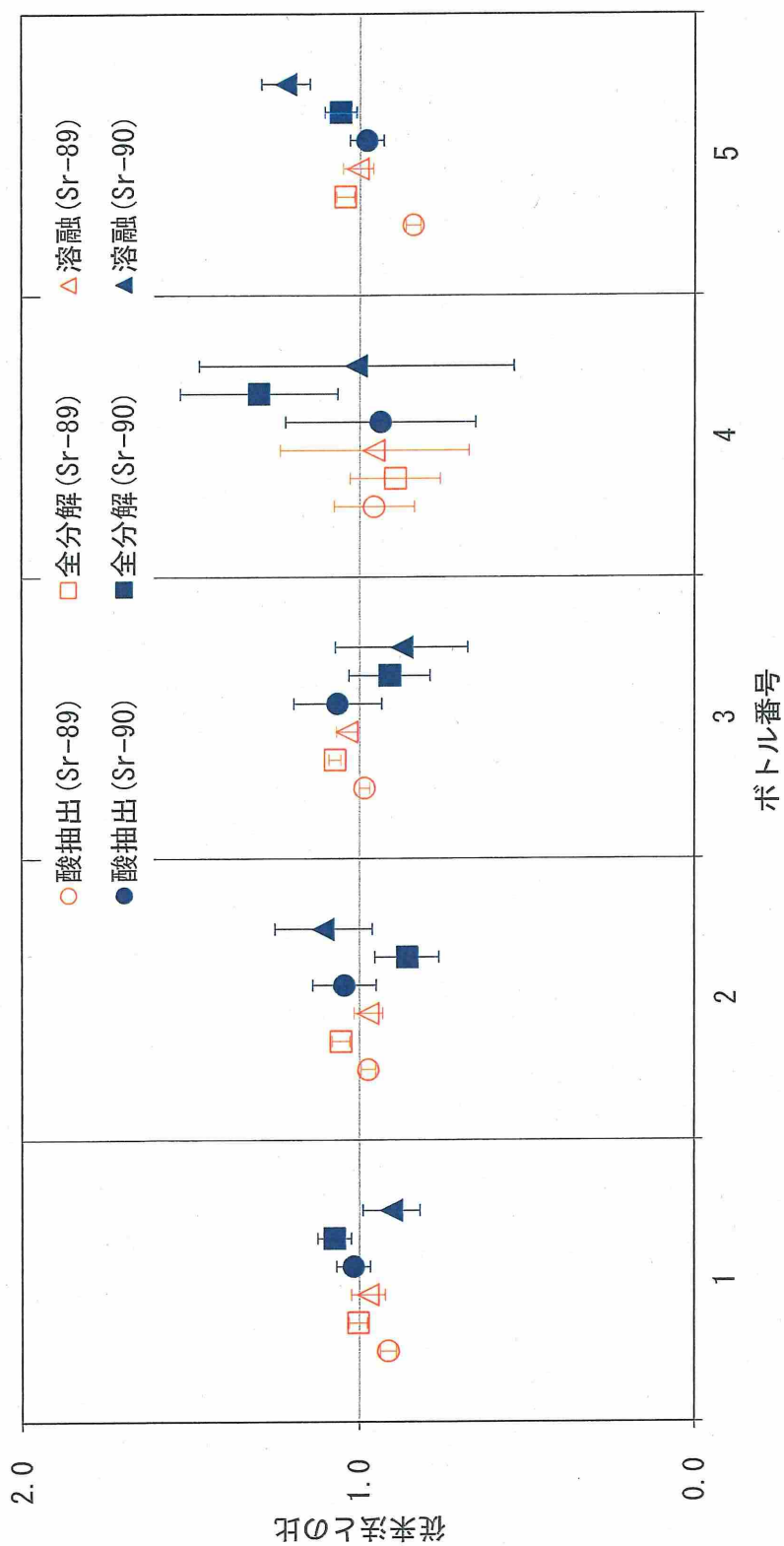
試料名	分析法	試料分解法	⁸⁹ Sr (Bq/kg 乾土)	従来法との比	⁹⁰ Sr (Bq/kg 乾土)	従来法との比
Soil (bottle 4)	本分析法	酸抽出	1230 ± 150	0.96 ± 0.12	200 ± 55	0.94 ± 0.28
		全分解	1150 ± 170	0.89 ± 0.13	277 ± 51	1.30 ± 0.24
		溶融	1230 ± 360	0.96 ± 0.28	* (215 ± 100)	1.01 ± 0.47
	従来法	酸抽出	1190 ± 63	—	208 ± 12	—
		酸抽出	1380 ± 64	—	218 ± 12	—
Soil (bottle 5)	本分析法	酸抽出	8970 ± 230	0.84 ± 0.02	1900 ± 91	0.98 ± 0.05
		全分解	11100 ± 270	1.04 ± 0.03	2050 ± 89	1.06 ± 0.05
		溶融	10700 ± 470	1.00 ± 0.04	2370 ± 140	1.22 ± 0.07
	従来法	酸抽出	10400 ± 190	—	1920 ± 34	—
		酸抽出	10900 ± 190	—	1960 ± 35	—

従来法とは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」を示す。

分析結果の誤差は計数誤差を示した。分析結果が誤差の 3 倍以下のものについては*で示し、その数値を()内に示した。

分析供試量は酸抽出法及び全分解法は 1 g 乾土、溶融法は 0.5 g 乾土、従来法は 2 g である。

従来法との比は従来法の平均値との比を示した。



従来法とは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」を示す。
分析結果の誤差は計数誤差を示した。

図 4.2.8 土壌の妥当性確認結果

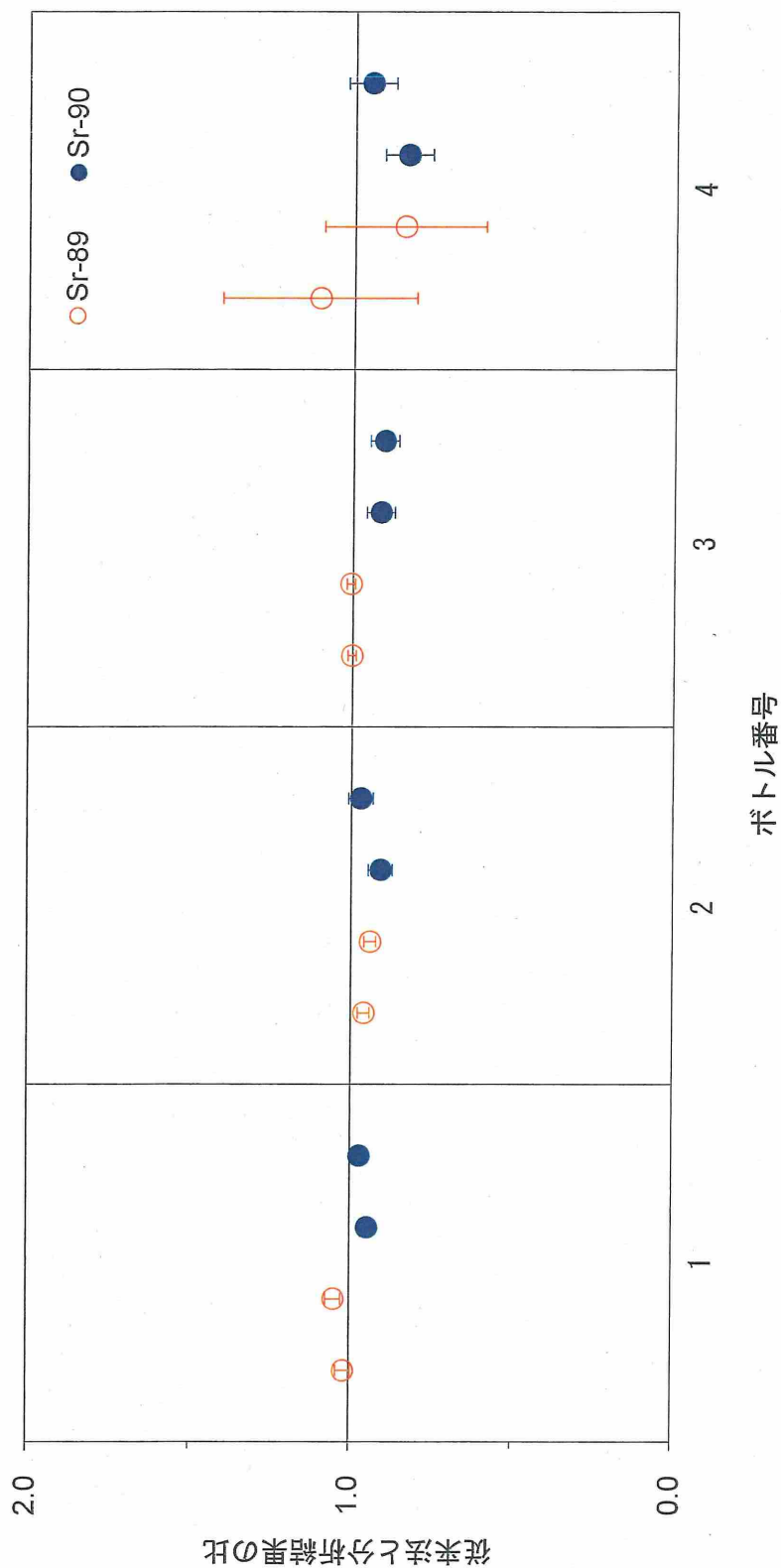
表 4.2.5 海水の妥当性確認結果

試料名	分析法	⁸⁹ Sr (Bq/kg)		従来法 との比	⁹⁰ Sr (Bq/kg)		従来法 との比
Sea water (bottle 1)	本分析法	261	± 2.5	1.02 ± 0.02	46.4	± 0.79	0.95 ± 0.02
		269	± 2.7	1.05 ± 0.02	47.6	± 0.83	0.97 ± 0.02
	従来法	256	± 5.1	-	49.0	± 0.76	-
Sea water (bottle 2)	本分析法	262	± 2.5	0.96 ± 0.02	22.0	± 0.76	0.91 ± 0.04
		257	± 2.5	0.94 ± 0.02	23.5	± 0.76	0.97 ± 0.04
	従来法	273	± 4.5	-	24.2	± 0.53	-
Sea water (bottle 3)	本分析法	513	± 3.3	1.00 ± 0.01	23.4	± 1.0	0.91 ± 0.04
		515	± 3.5	1.01 ± 0.01	23.1	± 1.0	0.90 ± 0.04
	従来法	512	± 5.6	-	25.6	± 0.54	-
Sea water (bottle 4)	本分析法	6.85	± 1.1	1.11 ± 0.30	4.24	± 0.32	0.83 ± 0.07
		5.22	± 1.0	0.84 ± 0.25	4.82	± 0.30	0.95 ± 0.07
	従来法	6.19	± 1.4	-	5.09	± 0.25	-
Sea water (bottle 5)	本分析法	* (0.3	± 1.1)	-	* (-0.17	± 0.30)	-
		* (1.4	± 1.1)	-	* (-0.38	± 0.29)	-
	従来法	* (0.17	± 0.27)	-	* (0.056	± 0.047)	-

従来法とは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」を示す。

分析結果の誤差は計数誤差を示した。

分析結果が誤差の3倍以下のものについては*で示し、その数値を()内に示した。



従来法とは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」を示す。
分析結果の誤差は計数誤差を示した。

図 4. 2. 9 海水の妥当性確認結果

牛乳、土壌及び海水のいずれも、添加値又は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」に準じて分析した結果と、緊急時における放射性ストロンチウム分析法によって得られた結果は一致しており、検討を行った分析法は妥当なものと考えられた。

4.2.5 セシウムの除染係数について

緊急時における放射性ストロンチウム分析法に係る前処理から測定までの放射性セシウムの除染係数を確認するため、環境試料を前処理した溶液にセシウム担体(10 mg)を添加して分析し、精製後のストロンチウムフラクション(Sr resinによる分離・精製を行った溶液)中に含まれるセシウムを定量し、セシウム添加値との比(除染係数、セシウム添加値/ストロンチウムフラクション中に含まれるセシウム)を確認した。結果を表 4.2.6 に示す。

表 4.2.6 セシウムの除染係数

試料	除染係数
牛乳	6×10^3
土壌	6×10^4
海水	3×10^4

4.2.6 分析所要時間及び検出下限値の確認

牛乳、土壌及び海水の分析所要時間及び検出下限値を表 4.2.7 にまとめた。各試料とも IAEA-TECDOC-1092 と同程度又はそれ以下の検出下限値となっている。

表 4.2.7 分析所要時間及び検出下限値

試料	供試量	分析所要時間 (時間)	検出下限値		単位
			Sr-89	Sr-90	
牛乳	0.25L	10	4	3	Bq/L
土壌	5g	18	180	120	Bq/kg 乾土
海水	0.1L	9	9	6	Bq/L

これまでの検討結果を踏まえ、緊急時における放射性ストロンチウム分析法のマニュアル原案を作成した。作成したマニュアル原案を別冊 2 に示した。

4.2.7 クロスチェック

平成 28 年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業における「緊急時における放射性ストロンチウム分析法」のマニュアル原案の妥当性を確認するためにクロスチェックを実施した。実施方法等は以下のとおり。

(1) 参加機関

青森県原子力センター
福島県環境創造センター
福井県原子力環境監視センター
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
公益財団法人日本分析センター

(2) 対象試料

牛乳、土壌及び海水 各 1 試料

（牛乳及び海水は市販のものを購入、土壌は日本分析センター構内で採取、前処理したものを使用）

(3) ホット試験用試料へのストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 添加量

ストロンチウム 89 80 Bq/試料程度

ストロンチウム 90 20 Bq/試料程度

(4) 実施方法

① コールド試験

分析操作への習熟及びストロンチウム回収率の確認のため、日本分析センターが送付したストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 未添加のクロスチェック用試料を、クロスチェック実施機関担当者がマニュアル原案に従って分析を実施した。

② ホット試験

マニュアル原案の妥当性確認のため、ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を添加したクロスチェック用試料をクロスチェック実施機関担当者がマニュアル原案に従って分析を実施した。なお、試料の測定は、既に校正された日本分析センターの液体シンチレーションカウンタを用いた。

(5) 実施場所

コールド試験：クロスチェック実施機関

ホット試験：日本分析センター

（ホット試験においては、クロスチェック実施機関担当者が日本分析センターに来所）

(6) 結果

クロスチェック実施結果を表 4.2.8 及び表 4.2.9 に示す。

表 4.2.8 コールド試験結果

試料	クロスチェック実施機関	ストロンチウム回収率 (%)
牛乳	A	10.6
		31.1
	B	66.6
		78.2
	C	69.5
		83.0
	D	79.4
		86.4
土壌	A	89.0
		98.0
	B	88.4
		89.8
	C	95.3
		93.6
	D	90.2
		90.3
海水	A	98.5
		82.0
	B	88.0
		90.8
	C	82.2
		85.0
	D	85.3
		94.0
	A	85.1
		86.4
	B	83.5

一部の実施機関において、牛乳のストロンチウム回収率の低下が見られた。この原因として、イオン交換樹脂によるストロンチウムの捕集操作におけるかくはんが弱く、イオン交換樹脂が牛乳中に十分に分散しないため、ストロンチウムが定量的に捕集されないことが考えられた。このため、当該操作における注意事項をマニュアルに追加し、ホット試験を行った。

表 4.2.9 ホット試験結果

試料	クロスチェック 実施機関	重量法				ICP-AES					
		Sr 回収率(%)	⁸⁹ Sr*** (Bq/kg)	添加値 との比	⁹⁰ Sr*** (Bq/kg)	添加値 との比	Sr*** 回収率(%)	⁸⁹ Sr (Bq/kg)	添加値 との比	⁹⁰ Sr*** (Bq/kg)	添加値 との比
牛乳*	A	61.5	301±1	1.04	65.6±1.1	0.90	62.4	297±1	1.02	64.6±0.9	0.89
	B	51.1	316±1	1.09	68.0±1.2	0.94	53.5	301±1	1.04	64.9±1.0	0.89
	C	60.4	290±1	1.00	62.7±1.1	0.86	58.6	300±1	1.03	64.6±0.9	0.89
	D	69.8	275±1	0.95	57.8±1.0	0.80	60.6	317±1	1.09	66.6±0.9	0.92
	E	78.9	292±1	1.01	68.3±0.9	0.94	75.7	304±1	1.05	71.1±0.9	0.98
	添加値**	—	290±4	—	72.6±0.9	—	—	290±4	—	72.6±0.9	—
土壌*	A (添加値)	88.8	15800±44 (16500±230)	0.96	3590±44 (4080±53)	0.88	82.8	17000±47 (16500±230)	1.03	3850±48 (4080±53)	0.94
	B (添加値)	74.1	15700±48 (16600±230)	0.95	3650±48 (4090±53)	0.89	67.8	17200±53 (16600±230)	1.04	3990±52 (4090±53)	0.98
	D (添加値)	94.2	15500±41 (16500±230)	0.94	3620±41 (4100±53)	0.88	86.7	16900±45 (16500±230)	1.02	3940±45 (4100±53)	0.96
	E (添加値)	94.0	16000±43 (16400±230)	0.97	3510±45 (4090±53)	0.86	90.3	16700±44 (16400±230)	1.02	3650±47 (4090±53)	0.89

* 分析供試量は牛乳 0.25L、土壌 5g 乾土である。

** 牛乳は重量法にてストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を添加したため、通常の分析結果と異なり Bq/kg 単位となっている。

*** 誤差は計数誤差を示した。

表 4.2.9 ホット試験結果 (つづき)

試料	クロスチェック 実施機関	重量法				ICP-AES					
		Sr 回収率(%)	⁸⁹ Sr ^{*****} (Bq/kg)	添加値 との比	⁹⁰ Sr ^{*****} (Bq/kg)	添加値 との比	Sr 回収率(%)	⁸⁹ Sr ^{*****} (Bq/kg)	添加値 との比	⁹⁰ Sr ^{*****} (Bq/kg)	添加値 との比
海水 [*]	A ^{***}	88.0	781±2	0.98	184±2	0.93	83.2	826±2	1.03	194±2	0.98
	B	78.6	708±2	1.01	158±2	0.91	75.5	737±2	1.05	164±2	0.95
	C	82.3	695±2	0.99	150±2	0.87	77.5	738±2	1.05	160±2	0.92
	D	83.1	707±2	1.01	153±2	0.88	80.0	734±2	1.05	159±2	0.92
	E	84.0	700±2	1.00	151±2	0.87	81.5	721±2	1.03	155±2	0.89
	添加値 ^{**}	—	700±10	—	173±2	—	—	700±10	—	173±2	—

* 海水の分析供試量は 0.1L である。

** 海水は重量法にてストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を添加したため、通常の分析結果と異なり Bq/kg 単位となっている。

*** 添加値は ⁸⁹Sr 801±11 Bq/kg、⁹⁰Sr 199±3 Bq/kg である。

**** 誤差は計数誤差を示した。

参加機関による牛乳、土壌及び海水の分析においてストロンチウム回収率は一部の試料を除き、おおむね 60%以上であった。

参加機関 B による牛乳の分析においてストロンチウム回収率が低くなった理由については、Sr resinに通液する前に試料の乾固物を 8 mol/L の硝酸に溶解した際、乾固物が完全に溶解しなかったためと考えられた。

また、参加機関 C による土壌の分析については、過誤により本マニュアルと分析操作に相違が見られたため、本結果には記載していない。

ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の結果は、回収率を重量法で求めた場合の添加値と分析結果の比はストロンチウム 89 で 0.94~1.09、ストロンチウム 90 で 0.80~0.94、回収率を ICP-AES で求めた場合の添加値と分析結果の比はストロンチウム 89 で 1.01~1.09、ストロンチウム 90 で 0.89~0.98 であり、各機関の分析結果は、Simultaneous Determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Milk : A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 27 (2013)と同程度の分析精度であった。重量法及び ICP-AES により求めたストロンチウム回収率は一部に差異があるものの、分析結果に大きく影響を及ぼすものではなかった。

4.2.8 環境試料への適用

これまでの検討では緊急時における放射性ストロンチウム分析法の対象試料として、牛乳、土壌及び海水としてきた。特に、土壌を対象とした分析法は各種環境試料のストロンチウム抽出液からストロンチウムを分離・精製する方法に適用できると考えられることから、各種環境試料の迅速な前処理方法を検討するとともに、各種環境試料のストロンチウム抽出液を土壌の分析法に従って分析した場合のストロンチウム回収率及びセシウムの除染係数を検討した。

なお、検討対象とした各種環境試料は大気浮遊じん、降下物、陸水、飲料水及び食品である。

4.2.9 迅速な前処理方法の適用

各種環境試料ごとに以下の前処理方法を検討した。

- ・大気浮遊じん

ろ紙を細かく刻み、電気炉で 500 °C、3 時間灰化し、1 mol/L 塩酸で抽出する。

- ・降下物、陸水及び飲料水

ろ過し、残さを硝酸で分解する。その後、6 mol/L 塩酸で抽出し、先のろ液とあわせる。

- ・食品

試料を数ミリ角程度に細かく刻んで電気炉により 500°C で灰化し、灰化物を硝酸で分解して 6 mol/L 塩酸で抽出する。

検討した結果を以下に示す。

- ・大気浮遊じん

ろ紙は電気炉で 500 °C、3 時間で十分に灰化され、その後の抽出にも問題はなかった。ストロンチウム抽出液を得るまでの前処理所要時間は 6 時間程度であった。

- ・降下物、陸水及び飲料水

残さの分解及び抽出に問題はなかった。ストロンチウム抽出液を得るまでの前処理所要時間は 6 時間程度であった。

- ・食品

電気炉による 3 時間の灰化では灰化不十分な試料も見られたが、6 時間の灰化では有機物が十分に分解されていた。灰化物の硝酸による分解は試料の種類により所要時間が異なるものの、10 時間程度で分解された。ストロンチウム抽出液を得るまでの前処理所要時間は 10～18 時間程度であった。

前処理操作におけるストロンチウムの損失を確認するため、各種環境試料にストロンチウム担体を添加して上記の前処理方法に従ってストロンチウム抽出液を調製し、添加したストロンチウム担体とストロンチウム抽出液中のストロンチウム量を比較することで、前処理におけるストロンチウム損失の有無を確認した。

さらに、得られた各種環境試料のストロンチウム抽出液を土壌の分析法に従って分離・精製し、分離・精製後のストロンチウムフラクション (Sr resin による分離・精製後の溶液) 中に含まれるス

ストロンチウム量を求め、前処理から分離・精製までのストロンチウム損失を確認した。結果を表 4. 2. 10 に示す。

表 4. 2. 10 各種環境試料分析時の前処理終了後及び分離・精製後におけるストロンチウム回収率

試料	供試量	回収率(%)	
		前処理終了後	分離・精製終了後
大気浮遊じん	ろ紙 1 枚	103	97
		103	94
		102	99
降下物	1L	97	103
		96	100
		100	100
陸水及び飲料水	1L	101	100
		98	101
		97	103
大根	生 100g	105	94
		102	94
		100	97
ホウレンソウ	生 100g	105	90
		101	93
		101	93
しいたけ	生 100g	103	92
豚肉	生 100g	102	93
鮭	生 100g	101	94
		105	94
		105	92
アジ	生 100g	99	94
アサリ	生 100g	102	96
ワカメ	生 100g	104	91
米	生 100g	100	91

表 4.2.10 各種環境試料分析時の前処理終了後及び分離・精製後におけるストロンチウム回収率
(つづき)

試料	供試量	回収率(%)	
		前処理終了後	分離・精製終了後
大根	生 250g	105	96
ホウレンソウ	生 250g	105	96
しいたけ	生 250g	102	95
豚肉	生 250g	103	94
鮭	生 250g	100	93
アジ	生 250g	102	92
アサリ	生 250g	97	80
ワカメ	生 250g	99	92
米	生 250g	104	87

食品については供試量 100 g 及び供試量 250 g の 2 つのケースを検討した。

いずれの試料においても、ストロンチウム抽出液中のストロンチウムには損失が見られないことから、検討した前処理法はストロンチウムを失うことなく、適切な前処理方法であると考えられた。また、分離・精製後のストロンチウム回収率は 80 % 以上であり、前処理から分離・精製までの分析法は適切であると考えられた。これから、食品については供試量 250 g、飲料水については供試量 1 L までの適用が可能であることが確認できた。

各種環境試料を土壌の分析法に準じた緊急時における放射性ストロンチウム分析法に従って分析した際の放射性セシウムの除染係数を確認するため、環境試料を前処理した溶液にセシウム担体 (10 mg) を添加して分析し、精製後のストロンチウムフラクション (Sr resin による分離・精製を行った溶液) 中に含まれるセシウムを定量し、セシウム添加値との比から除染係数を確認した。結果を表 4.2.11 に示す。

表 4. 2. 11 各種環境試料分析時のセシウムの除染係数

試料	除染係数
大気浮遊じん	1×10^3
降下物	4×10^3
陸水及び飲料水	6×10^3
大根	4×10^3
ホウレンソウ	5×10^3
しいたけ	2×10^3
豚肉	1×10^3
鮭	3×10^3
アジ	6×10^4
アサリ	5×10^3
ワカメ	4×10^3
米	2×10^4

各種環境試料を分析した際のセシウムの除染係数は $10^3 \sim 10^4$ 程度であった。

各種環境試料の分析所要時間及び検出下限値を表 4. 2. 12 にまとめた。

表 4. 2. 12 分析所要時間及び検出下限値

試料	供試量	分析所要時間 (時間)	検出下限値		単位
			Sr-89	Sr-90	
大気浮遊じん	1m ³	12	0.9	0.6	Bq/m ³
降下物	0.05m ² 、1日	12	18	12	Bq/m ² /日
陸水及び 飲料水	1L	12	0.9	0.6	Bq/L
食品	0.25kg	16~24	4	3	Bq/kg

各種環境試料についても、適切な前処理操作を実施した後、土壌と同様の分離・精製法を採用することで、24 時間程度で測定まで実施できることが確認できた。

各種環境試料の分析法案を次に示す。

1. 大気浮遊じん

大気浮遊じんを対象とする。

試料を灰化し、ストロンチウム担体を一定量加え、1 mol/L 塩酸でストロンチウムを抽出する。抽出液からシュウ酸塩沈殿を調製する。シュウ酸塩沈殿を遠心分離し、硝酸を加えてシュウ酸塩沈殿を分解し、8 mol/L 硝酸に溶解する。その溶液を抽出クロマトグラフィーレジンに通液し、ストロンチウムを精製する。精製したストロンチウムの回収率は重量法等により求め、液体シンチレーションカウンタにより測定し、ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の放射能濃度を求める^{*17}。

1.1 試薬・器具・装置

試 薬

担 体 溶 液	ストロンチウム担体溶液 (10 mg Sr^{2+} /mL) カルシウム担体溶液 (50 mg Ca^{2+} /mL)
酸 類	硝酸、8 mol/L 硝酸、1 mol/L 硝酸、0.05 mol/L 硝酸 塩酸 シュウ酸
アルカリ類	アンモニア水
塩 類	飽和炭酸アンモニウム溶液
そ の 他	エタノール、シンチレータ、ブロモクレゾールグリーン溶液
樹 脂 類	Eichrom 社製 Sr resin
器 具	磁製皿、ホットプレート、分離型フィルターホルダー (25 mm ろ紙用)、ブフナー漏斗 (90 mm ろ紙用)、ろ紙 (No. 5C、直径 24 mm)、メンブランフィルター (0.45 μ m、直径 90 mm)、カラム (内径 10 mm、長さ 120 mm)、ガラスバイアル (20 mL)
装 置	電気炉、アスピレータ、遠心分離機、乾燥機

1.2 分析操作

1.2.1 試料の前処理

^{*17} 大気浮遊じんの分析法は、IAEA の ALMERA ネットワークが活動の一環として開発している方法※を用いた。本分析法は、ALMERA ネットワークの中でクロスチェックを行っている段階にあり、今後 IAEA より報告書が公表される予定である。

※プロジェクト名：Method Development Activity of the IAEA's network of Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity (ALMERA) for the Rapid Simultaneous Determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Soil Samples Using Cerenkov and Liquid Scintillation Counting.)

- (1) ろ紙を細かく刻んだもの^{*18}を磁製皿に取り、電気炉を用いて 500 °C で 3 時間程度^{*19}灰化する。
- (2) 灰化した試料を 500 mL のビーカーに移す。
- (3) ストロンチウム担体 20 mg を加える。
- (4) 1 mol/L 塩酸を 100 mL 加え、2 時間加熱する。
- (5) メンブランフィルター(0.45 μm、直径 90 mm)を用いてろ過し、ろ液をビーカーに受け、ストロンチウム分離・精製溶液とする。

1.2.2 ストロンチウムの分離・精製

- (1) ストロンチウム分離・精製溶液にカルシウム担体 300 mg、シュウ酸 5 g^{*20}及びブロモクレゾールグリーン溶液 1 mL を加える。
- (2) 溶液をかくはんしながらアンモニア水を加え、pH を 4.0~4.2 に調整する^{*21*22}。
- (3) 遠心分離によりシュウ酸塩沈殿を集める^{*23}。シュウ酸塩沈殿を硝酸 25 mL~30 mL で溶解する。30 分間加熱した後、乾固直前まで濃縮する。この操作を褐色のガスが発生しなくなるまでくり返す^{*24}。
- (4) 残さを 8 mol/L 硝酸 20 mL で溶解する^{*25}。
- (5) Sr resin 3 g^{*26}を内径 10 mm、長さ 120 mm のカラムに詰め^{*27}、8 mol/L 硝酸 50 mL でコンデューティングする。
- (6) 試料溶液を 1 mL/分程度の流速でカラムに通液する^{*28}。
- (7) カラムを 8 mol/L 硝酸 100 mL で洗浄する。ストロンチウムとイットリウムの分離時刻(スカベンジング時刻)を記録する。
- (8) カラムに純水 30 mL を通液してストロンチウムを溶離し、ストロンチウム溶離液とする。

^{*18} 汚染防止の観点から、ろ紙をそのまま磁製皿に取り、灰化してもよい。その場合は細かく刻んだ場合よりも灰化しにくくなるため、灰化後の状態に注意する。

^{*19} 灰化時間を長くしてもよい。

^{*20} シュウ酸が過剰又は不足とならないように適宜、増減する。

^{*21} ブロモクレゾールグリーンは青緑を示す。

^{*22} 上澄み液に飽和シュウ酸アンモニウム溶液を滴下し、シュウ酸塩沈殿の白色の濁りが生じないことを確認するとよい。濁りが生じる場合はシュウ酸が不足しているので、シュウ酸を追加して沈殿生成の操作をくり返す。

^{*23} 沈殿を洗浄する場合、純水又は pH が 3 程度の希釈したシュウ酸溶液(例えば 1 %) 25 mL を用いて 3 回程度行う。

^{*24} 硝酸の必要量はシュウ酸塩沈殿の量(試料中のカルシウム量)による。なお、分解をくり返す際の硝酸は 10 mL 程度としてもよい。

^{*25} 乾固物が溶解しない場合はホットプレート上で加温するか、8 mol/L 硝酸 数 mL を追加する。

^{*26} 適宜、Sr resin の量を調整してもよい。また Sr resin カートリッジを使用してもよい。使用量等を変更する場合は事前に妥当性を確認しておくこと。

^{*27} Sr resin を純水に懸濁させたものをカラムに流し入れる。この際、気泡が入らないよう注意する。

^{*28} バキュームボックスを利用してもよい。

1.2.3 ストロンチウム回収率

- (1) ストロンチウム溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*29}とし、飽和炭酸アンモニウム溶液 5 mL を加える。
- (2) ホットプレート上で数分間沸騰させ、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成させる。
- (3) 放冷後、分離型フィルターホルダーと重量既知のろ紙 (No. 5C、直径 24 mm) を用いて、沈殿を吸引ろ過する。沈殿を少量のエタノールで洗浄する。
- (4) ろ紙上の沈殿を 65 °C で 30 分間乾燥する。
- (5) デシケータ中で放冷後、沈殿の重量をはかり、ストロンチウムの回収率を求める^{*30}。

ICP-AES 等の利用が可能な場合、適切な方法で ICP-AES 等によりストロンチウム回収率を求めてもよい。

1.2.4 測定試料の調製

- (1) 回収率を求めた先の炭酸塩沈殿を数滴の水もしくはエタノールで湿らせ、20 mL ガラスバイアルにろ紙ごと入れる。
- (2) 0.05 mol/L 硝酸 8 mL を加えて沈殿を溶解し、測定試料とする。

1.2.5 放射性ストロンチウムの測定

- (1) 土壌と同様の方法で、放射性ストロンチウムの測定を行う。

^{*29} フェノールフタレインや pH 試験紙などで確認する。

^{*30} ストロンチウム回収率は、(回収した炭酸ストロンチウム重量 (mg)) × (87.62/147.63) / (添加したストロンチウム担体重量 (mg)) で計算できる。(Sr の原子量は 87.62、炭酸ストロンチウムの分子量は 147.63 である。)

2. 降下物

降下物を対象とする。

試料にストロンチウム担体を一定量加え、ろ過する。残さを硝酸で分解した後、6 mol/L 塩酸でストロンチウムを抽出し、先のろ液とあわせた溶液からシュウ酸塩沈殿を調製する。シュウ酸塩沈殿を遠心分離し、硝酸を加えてシュウ酸塩沈殿を分解し、8 mol/L 硝酸に溶解する。その溶液を抽出クロマトグラフィーレジンに通液し、ストロンチウムを精製する。精製したストロンチウムの回収率は重量法等により求め、液体シンチレーションカウンタにより測定し、ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の放射能濃度を求める^{*31}。

2.1 試薬・器具・装置

試 薬

担 体 溶 液	ストロンチウム担体溶液(10 mg Sr^{2+} /mL) カルシウム担体溶液(50 mg Ca^{2+} /mL)
酸 類	硝酸、8 mol/L 硝酸、1 mol/L 硝酸、0.05 mol/L 硝酸 塩酸 シュウ酸
アルカリ類	アンモニア水
塩 類	飽和炭酸アンモニウム溶液
そ の 他	エタノール、シンチレータ、プロモクレゾールグリーン溶液
樹 脂 類	Eichrom 社製 Sr resin
器 具	ホットプレート、分離型フィルターホルダー(25 mm ろ紙用)、ブフナー漏斗(90 mm ろ紙用)、ろ紙(No. 5C、直径 24 mm)、メンブランフィルター(0.45 μm 、直径 90 mm)、カラム(内径 10 mm、長さ 120 mm)、ガラスバイアル(20 mL)
装 置	アスピレータ、遠心分離機、乾燥機

2.2 分析操作

2.2.1 試料の前処理

^{*31} 降下物の分析法は、IAEA の ALMERA ネットワークが活動の一環として開発している方法^{*}を用いた。本分析法は、ALMERA ネットワークの中でクロスチェックを行っている段階にあり、今後 IAEA より報告書が公表される予定である。

※プロジェクト名：Method Development Activity of the IAEA's network of Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity (ALMERA) for the Rapid Simultaneous Determination of ⁸⁹Sr and ⁹⁰Sr in Soil Samples Using Cerenkov and Liquid Scintillation Counting.)

- (1) 採取した試料(最大で 1 L^{*32})にストロンチウム担体 20 mg を加え、メンブランフィルター (0.45 μ m、直径 90 mm) でろ過する。
- (2) 残さをメンブランフィルターごと 1 L のビーカーに移し、硝酸を加えて分解する。
- (3) 分解した残さに 6 mol/L 塩酸を 100 mL 加え、2 時間加熱する。
- (4) メンブランフィルター (0.45 μ m、直径 90 mm) を用いてろ過し、ろ液をビーカーに受け、(1) のろ液とあわせたものをストロンチウム分離・精製溶液とする。

2.2.2 ストロンチウムの分離・精製

- (1) ストロンチウム分離・精製溶液にカルシウム担体 300 mg、シュウ酸 5 g^{*33} 及びブロモクレゾールグリーン溶液 1 mL を加える。
- (2) 溶液をかくはんしながらアンモニア水を加え、pH を 4.0~4.2 に調整する^{*34*35}。
- (3) 遠心分離によりシュウ酸塩沈殿を集める^{*36}。シュウ酸塩沈殿を硝酸 25 mL~30 mL で溶解する。30 分間加熱した後、乾固直前まで濃縮する。この操作を褐色のガスが発生しなくなるまでくり返す^{*37}。
- (4) 残さを 8 mol/L 硝酸 20 mL で溶解する^{*38}。
- (5) Sr resin 3 g^{*39} を内径 10 mm、長さ 120 mm のカラムに詰め^{*40}、8 mol/L 硝酸 50 mL でコンデューティングする。
- (6) 試料溶液を 1 mL/分程度の流速でカラムに通液する^{*41}。
- (7) カラムを 8 mol/L 硝酸 100 mL で洗浄する。ストロンチウムとイットリウムの分離時刻(スカベンジング時刻)を記録する。
- (8) カラムに純水 30 mL を通液してストロンチウムを溶離し、ストロンチウム溶離液とする。

2.2.3 ストロンチウム回収率

- (1) ストロンチウム溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*42} とし、飽和炭酸アンモニウム

*32 採取量が 1 L を超える場合は分取する。

*33 シュウ酸が過剰又は不足とならないように適宜、増減する。

*34 ブロモクレゾールグリーンは青緑を示す。

*35 上澄み液に飽和シュウ酸アンモニウム溶液を滴下し、シュウ酸塩沈殿の白色の濁りが生じないことを確認するとよい。濁りが生じる場合はシュウ酸が不足しているので、シュウ酸を追加して沈殿生成の操作をくり返す。

*36 沈殿を洗浄する場合、純水又は pH が 3 程度の希釈したシュウ酸溶液(例えば 1 %) 25 mL を用いて 3 回程度行う。

*37 硝酸の必要量はシュウ酸塩沈殿の量(試料中のカルシウム量)による。なお、分解をくり返す際の硝酸は 10 mL 程度としてもよい。

*38 乾固物が溶解しない場合はホットプレート上で加温するか、8 mol/L 硝酸 数 mL を追加する。

*39 適宜、Sr resin の量を調整してもよい。また Sr resin カートリッジを使用してもよい。使用量等を変更する場合は事前に妥当性を確認しておくこと。

*40 Sr resin を純水に懸濁させたものをカラムに流し入れる。この際、気泡が入らないよう注意する。

*41 バキュームボックスを利用してもよい。

溶液 5 mL を加える。

- (2) ホットプレート上で数分間沸騰させ、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成させる。
- (3) 放冷後、分離型フィルターホルダーと重量既知のろ紙 (No. 5C、直径 24 mm) を用いて、沈殿を吸引ろ過する。沈殿を少量のエタノールで洗浄する。
- (4) ろ紙上の沈殿を 65 °C で 30 分間乾燥する。
- (5) デシケーター中で放冷後、沈殿の重量をはかり、ストロンチウムの回収率を求める^{*43}。

ICP-AES 等の利用が可能な場合、適切な方法で ICP-AES 等によりストロンチウム回収率を求めてもよい。

2.2.4 測定試料の調製

- (1) 回収率を求めた先の炭酸塩沈殿を数滴の水もしくはエタノールで湿らせ、20 mL ガラスバイアルにろ紙ごと入れる。
- (2) 0.05 mol/L 硝酸 8 mL を加えて沈殿を溶解し、測定試料とする。

2.2.5 放射性ストロンチウムの測定

- (1) 土壌と同様の方法で、放射性ストロンチウムの測定を行う。

^{*42} フェノールフタレインや pH 試験紙などで確認する。

^{*43} ストロンチウム回収率は、 $(\text{回収した炭酸ストロンチウム重量 (mg)}) \times (87.62/147.63) / (\text{添加したストロンチウム担体重量 (mg)})$ で計算できる。(Sr の原子量は 87.62、炭酸ストロンチウムの分子量は 147.63 である。)

3. 陸水及び飲料水

陸水及び飲料水を対象とする。

試料にストロンチウム担体を一定量加え、ろ過する。残さを硝酸で分解した後、6 mol/L 塩酸でストロンチウムを抽出し、先のろ液とあわせた溶液からシュウ酸塩沈殿を調製する。シュウ酸塩沈殿を遠心分離し、硝酸を加えてシュウ酸塩沈殿を分解し、8 mol/L 硝酸に溶解する。その溶液を抽出クロマトグラフィーレジンに通液し、ストロンチウムを精製する。精製したストロンチウムの回収率は重量法等により求め、液体シンチレーションカウンタにより測定し、ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の放射能濃度を求める^{*44}。

3.1 試薬・器具・装置

試 薬

担 体 溶 液	ストロンチウム担体溶液 (10 mg Sr ²⁺ /mL) カルシウム担体溶液 (50 mg Ca ²⁺ /mL)
酸 類	硝酸、8 mol/L 硝酸、1 mol/L 硝酸、0.05 mol/L 硝酸 塩酸 シュウ酸
アルカリ類	アンモニア水
塩 類	飽和炭酸アンモニウム溶液
そ の 他	エタノール、シンチレータ、ブロモクレゾールグリーン溶液
樹 脂 類	Eichrom 社製 Sr resin

器 具	ホットプレート、分離型フィルターホルダー (25 mm ろ紙用)、ブフナー漏斗 (90 mm ろ紙用)、ろ紙 (No. 50、直径 24 mm)、メンブランフィルター (0.45 μm、直径 90 mm)、カラム (内径 10 mm、長さ 120 mm)、ガラスバイアル (20 mL)
-----	---

装 置	アスピレータ、遠心分離機、乾燥機
-----	------------------

3.2 分析操作

3.2.1 試料の前処理

- (1) 試料 1 L にストロンチウム担体 20 mg を加え、メンブランフィルター (0.45 μm、直径 90 mm) でろ過する。

^{*44} 陸水及び飲料水の分析法は、IAEA の ALMERA ネットワークが活動の一環として開発している方法^{*}を用いた。本分析法は、ALMERA ネットワークの中でクロスチェックを行っている段階にあり、今後 IAEA より報告書が公表される予定である。

※プロジェクト名: Method Development Activity of the IAEA's network of Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity (ALMERA) for the Rapid Simultaneous Determination of ⁸⁹Sr and ⁹⁰Sr in Soil Samples Using Cerenkov and Liquid Scintillation Counting.)

- (2) 残さをメンブランフィルターごと 1 L のビーカーに移し、硝酸を加えて分解する。
- (3) 分解した残さに 6 mol/L 塩酸を 100 mL 加え、2 時間加熱する。
- (4) メンブランフィルター (0.45 μ m、直径 90 mm) を用いてろ過し、ろ液をビーカーに受け、(1) のろ液とあわせたものをストロンチウム分離・精製溶液とする。

3.2.2 ストロンチウムの分離・精製

- (1) ストロンチウム分離・精製溶液にカルシウム担体 300 mg、シュウ酸 5 g^{*45} 及びプロモクレゾールグリーン溶液 1 mL を加える。
- (2) 溶液をかくはんしながらアンモニア水を加え、pH を 4.0~4.2 に調整する^{*46*47}。
- (3) 遠心分離によりシュウ酸塩沈殿を集める^{*48}。シュウ酸塩沈殿を硝酸 25 mL~30 mL で溶解する。30 分間加熱した後、乾固直前まで濃縮する。この操作を褐色のガスが発生しなくなるまでくり返す^{*49}。
- (4) 残さを 8 mol/L 硝酸 20 mL で溶解する^{*50}。
- (5) Sr resin 3 g^{*51} を内径 10 mm、長さ 120 mm のカラムに詰め^{*52}、8 mol/L 硝酸 50 mL でコンデューティングする。
- (6) 試料溶液を 1 mL/分程度の流速でカラムに通液する^{*53}。
- (7) カラムを 8 mol/L 硝酸 100 mL で洗浄する。ストロンチウムとイットリウムの分離時刻(スカベンジング時刻)を記録する。
- (8) カラムに純水 30 mL を通液してストロンチウムを溶離し、ストロンチウム溶離液とする。

3.2.3 ストロンチウム回収率

- (1) ストロンチウム溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*54} とし、飽和炭酸アンモニウム溶液 5 mL を加える。
- (2) ホットプレート上で数分間沸騰させ、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成させる。

*45 シュウ酸が過剰又は不足とならないように適宜、増減する。

*46 プロモクレゾールグリーンは青緑を示す。

*47 上澄み液に飽和シュウ酸アンモニウム溶液を滴下し、シュウ酸塩沈殿の白色の濁りが生じないことを確認するとよい。濁りが生じる場合はシュウ酸が不足しているので、シュウ酸を追加して沈殿生成の操作をくり返す。

*48 沈殿を洗浄する場合、純水又は pH が 3 程度の希釈したシュウ酸溶液 (例えば 1 %) 25 mL を用いて 3 回程度行う。

*49 硝酸の必要量はシュウ酸塩沈殿の量 (試料中のカルシウム量) による。なお、分解をくり返す際の硝酸は 10 mL 程度としてもよい。

*50 乾固物が溶解しない場合はホットプレート上で加温するか、8 mol/L 硝酸 数 mL を追加する。

*51 適宜、Sr resin の量を調整してもよい。また Sr resin カートリッジを使用してもよい。使用量等を変更する場合は事前に妥当性を確認しておくこと。

*52 Sr resin を純水に懸濁させたものをカラムに流し入れる。この際、気泡が入らないよう注意する。

*53 バキュームボックスを利用してもよい。

*54 フェノールフタレインや pH 試験紙などで確認する。

- (3) 放冷後、分離型フィルターホルダーと重量既知のろ紙 (No. 5C、直径 24 mm) を用いて、沈殿を吸引ろ過する。沈殿を少量のエタノールで洗浄する。
- (4) ろ紙上の沈殿を 65 °C で 30 分間乾燥する。
- (5) デシケータ中で放冷後、沈殿の重量をはかり、ストロンチウムの回収率を求める^{*55}。

ICP-AES 等の利用が可能な場合、適切な方法で ICP-AES 等によりストロンチウム回収率を求めてもよい。

3.2.4 測定試料の調製

- (1) 回収率を求めた先の炭酸塩沈殿を数滴の水もしくはエタノールで湿らせ、20 mL ガラスバイアルにろ紙ごと入れる。
- (2) 0.05 mol/L 硝酸 8 mL を加えて沈殿を溶解し、測定試料とする。

3.2.5 放射性ストロンチウムの測定

- (1) 土壌と同様の方法で、放射性ストロンチウムの測定を行う。

^{*55} ストロンチウム回収率は、(回収した炭酸ストロンチウム重量(mg)) × (87.62/147.63) / (添加したストロンチウム担体重量(mg)) で計算できる。(Sr の原子量は 87.62、炭酸ストロンチウムの分子量は 147.63 である。)

4. 食品

食品を対象とする。

試料を電気炉で灰化する。灰化物にストロンチウム担体を一定量加え、硝酸で分解した後、6 mol/L 塩酸でストロンチウムを抽出する。抽出液からシュウ酸塩沈殿を調製する。シュウ酸塩沈殿を遠心分離し、硝酸を加えてシュウ酸塩沈殿を分解し、8 mol/L 硝酸に溶解する。その溶液を抽出クロマトグラフィーレジンに通液し、ストロンチウムを精製する。精製したストロンチウムの回収率は重量法等により求め、液体シンチレーションカウンタにより測定し、ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の放射能濃度を求める^{*56}。

4.1 試薬・器具・装置

試 薬

担 体 溶 液	ストロンチウム担体溶液 (10 mg Sr^{2+} /mL) カルシウム担体溶液 (50 mg Ca^{2+} /mL)
酸 類	硝酸、8 mol/L 硝酸、1 mol/L 硝酸、0.05 mol/L 硝酸 塩酸 王水 シュウ酸
アルカリ類	アンモニア水
塩 類	飽和炭酸アンモニウム溶液
そ の 他	エタノール、シンチレータ、ブロモクレゾールグリーン溶液
樹 脂 類	Eichrom 社製 Sr resin

器 具 磁製皿、ホットプレート、分離型フィルターホルダー (25 mm ろ紙用)、ブフナー漏斗 (90 mm ろ紙用)、ろ紙 (No. 5C、直径 24 mm)、メンブランフィルター (0.45 μ m、直径 90 mm)、カラム (内径 10 mm、長さ 120 mm)、ガラスバイアル (20 mL)

装 置 電気炉、アスピレータ、遠心分離機、乾燥機

4.2 分析操作

4.2.1 試料の前処理

^{*56} 食品の分析法は、IAEA の ALMERA ネットワークが活動の一環として開発している方法^{*}を用いた。本分析法は、ALMERA ネットワークの中でクロスチェックを行っている段階にあり、今後 IAEA より報告書が公表される予定である。

^{*}プロジェクト名 : Method Development Activity of the IAEA's network of Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity (ALMERA) for the Rapid Simultaneous Determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Soil Samples Using Cerenkov and Liquid Scintillation Counting.)

- (1) 試料を数 mm の大きさに細かく刻み、250 g を磁製皿にひろげる。電気炉を用いて 500 °C で 6 時間程度^{*57}灰化する。
- (2) 灰化した試料をビーカーに移す。
- (3) 王水 100 mL を加えて加熱し、乾固する。乾固後の試料が十分に分解されている場合は(5)へ進む。
- (4) 乾固した後、硝酸 20 mL～30 mL を加え、試料を分解する。この操作を試料が分解するまでくり返す。
- (5) 分解した試料に 6 mol/L 塩酸を 100 mL 加え、加熱する。
- (6) メンブランフィルター(0.45 μm、直径 90 mm)を用いてろ過し、ろ液をビーカーに受ける。溶液の一部を分取し、安定ストロンチウムを ICP-AES などにより定量する。残りの溶液にストロンチウム担体 20 mg を加え、ストロンチウム分離・精製溶液とする。

4.2.2 ストロンチウムの分離・精製

- (1) ストロンチウム分離・精製溶液にカルシウム担体 300 mg、シュウ酸 5 g^{*58}及びブロモクレゾールグリーン溶液 1 mL を加える。
- (2) 溶液をかくはんしながらアンモニア水を加え、pH を 4.0～4.2 に調整する^{*59*60}。
- (3) 遠心分離によりシュウ酸塩沈殿を集める^{*61}。シュウ酸塩沈殿を硝酸 25 mL～30 mL で溶解する。30 分間加熱した後、乾固直前まで濃縮する。この操作を褐色のガスが発生しなくなるまでくり返す^{*62}。
- (4) 残さを 8 mol/L 硝酸 20 mL で溶解する^{*63}。
- (5) Sr resin 3 g^{*64}を内径 10 mm、長さ 120 mm のカラムに詰め^{*65}、8 mol/L 硝酸 50 mL でコンデューティングする。
- (6) 試料溶液を 1 mL/分程度の流速でカラムに通液する^{*66}。
- (7) カラムを 8 mol/L 硝酸 100 mL で洗浄する。ストロンチウムとイットリウムの分離時刻(ス

^{*57} 灰化時間を長くしてもよい。

^{*58} シュウ酸が過剰又は不足とならないように適宜、増減する。

^{*59} ブロモクレゾールグリーンは青緑を示す。

^{*60} 上澄み液に飽和シュウ酸アンモニウム溶液を滴下し、シュウ酸塩沈殿の白色の濁りが生じないことを確認するとよい。濁りが生じる場合はシュウ酸が不足しているので、シュウ酸を追加して沈殿生成の操作をくり返す。

^{*61} 沈殿を洗浄する場合、純水又は pH が 3 程度の希釈したシュウ酸溶液(例えば 1 %) 25 mL を用いて 3 回程度行う。

^{*62} 硝酸の必要量はシュウ酸塩沈殿の量(試料中のカルシウム量)による。なお、分解をくり返す際の硝酸は 10 mL 程度としてもよい。

^{*63} 乾固物が溶解しない場合はホットプレート上で加温するか、8 mol/L 硝酸 数 mL を追加する。

^{*64} 適宜、Sr resin の量を調整してもよい。また Sr resin カートリッジを使用してもよい。使用量等を変更する場合は事前に妥当性を確認しておくこと。

^{*65} Sr resin を純水に懸濁させたものをカラムに流し入れる。この際、気泡が入らないよう注意する。

^{*66} バキュームボックスを利用してもよい。

カベンジング時刻)を記録する。

(8) カラムに純水 30 mL を通液してストロンチウムを溶離し、ストロンチウム溶離液とする。

4.2.3 ストロンチウム回収率

- (1) ストロンチウム溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*67}とし、飽和炭酸アンモニウム溶液 5 mL を加える。
- (2) ホットプレート上で数分間沸騰させ、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成させる。
- (3) 放冷後、分離型フィルターホルダーと重量既知のろ紙 (No. 5C、直径 24 mm) を用いて、沈殿を吸引ろ過する。沈殿を少量のエタノールで洗浄する。
- (4) ろ紙上の沈殿を 65 °C で 30 分間乾燥する。
- (5) デシケータ中で放冷後、沈殿の重量をはかり、ストロンチウムの回収率を求める^{*68}。

ICP-AES 等の利用が可能な場合、適切な方法で ICP-AES 等によりストロンチウム回収率を求めてもよい。

4.2.4 測定試料の調製

- (1) 回収率を求めた先の炭酸塩沈殿を数滴の水もしくはエタノールで湿らせ、20 mL ガラスバイアルにろ紙ごとに入れる。
- (2) 0.05 mol/L 硝酸 8 mL を加えて沈殿を溶解し、測定試料とする。

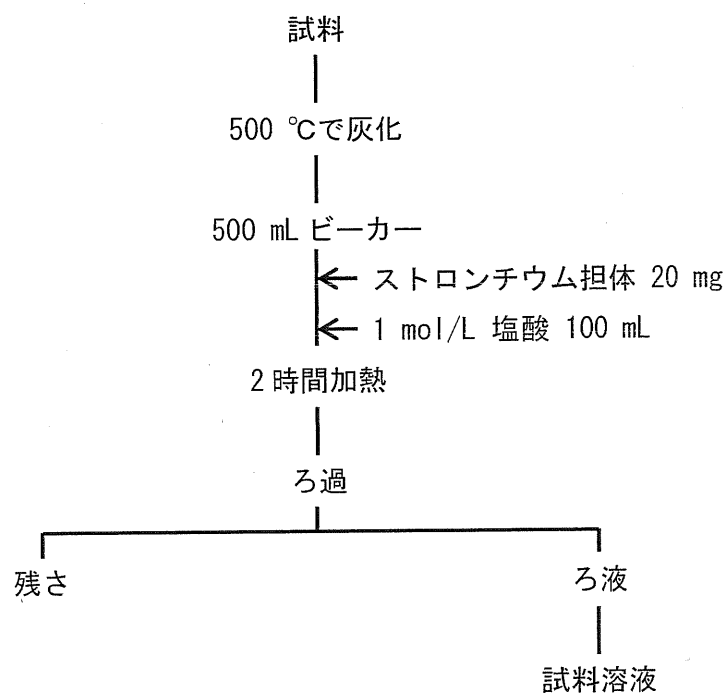
4.2.5 放射性ストロンチウムの測定

- (1) 土壌と同様の方法で、放射性ストロンチウムの測定を行う。

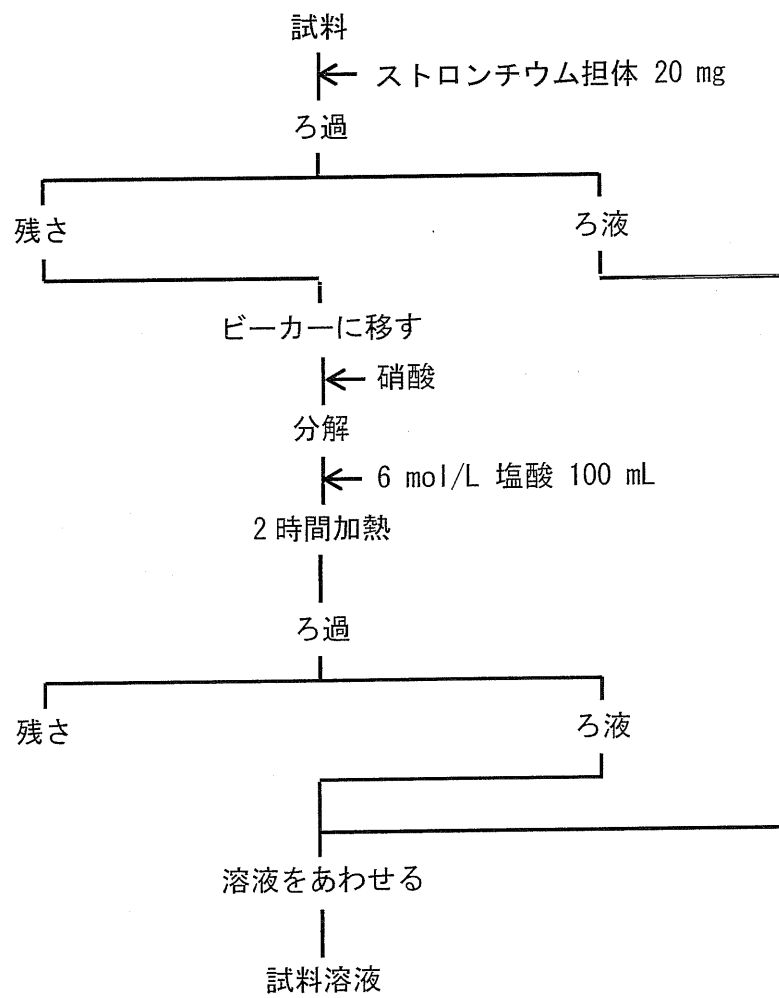
^{*67} フェノールフタレインや pH 試験紙などで確認する。

^{*68} ストロンチウム回収率は、 $(\text{回収した炭酸ストロンチウム重量 (mg)}) \times (87.62/147.63) / (\text{添加したストロンチウム担体重量 (mg)} + \text{分析に供した食品に含まれる安定ストロンチウム量 (mg)})$ で計算できる。(Sr の原子量は 87.62、炭酸ストロンチウムの分子量は 147.63 である。)

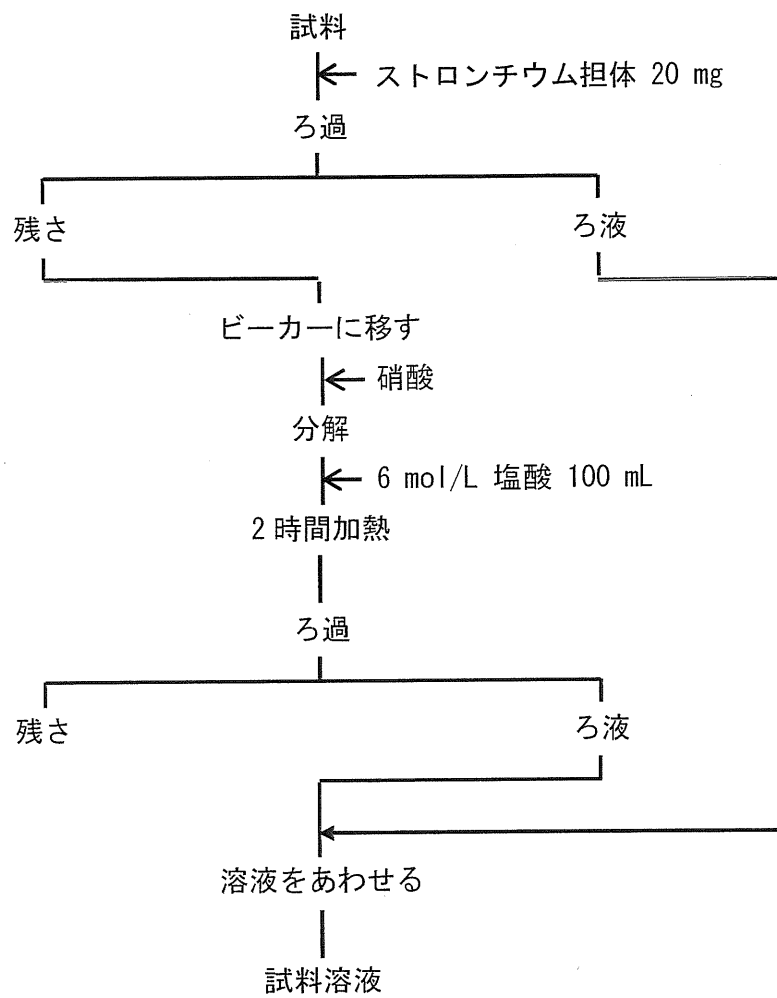
大気浮遊じん



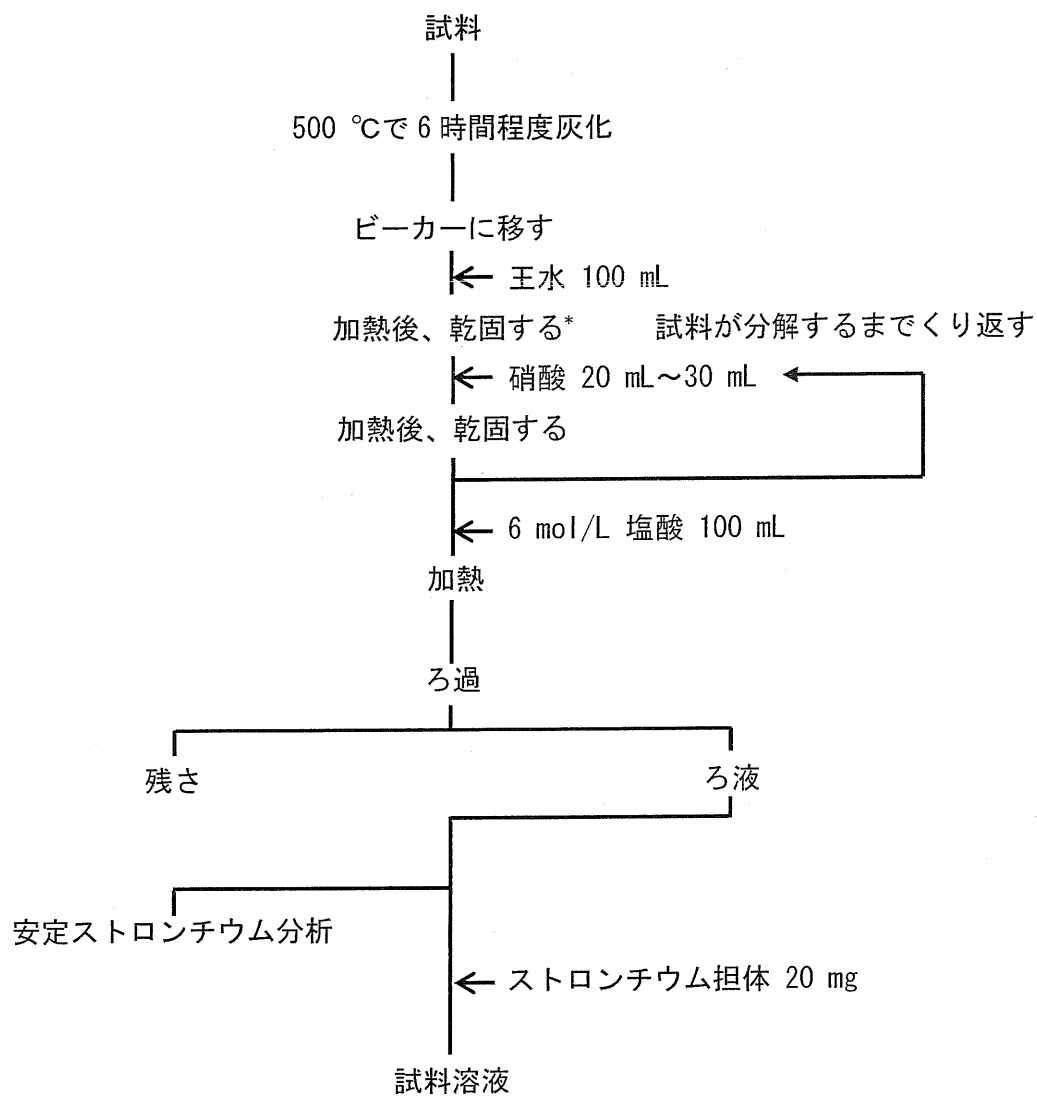
降下物



陸水及び飲料水



食品



*乾固後の試料が十分に分解されている場合、硝酸による分解を省略して6 mol/L 塩酸による抽出に進む

大気浮遊じん、降下物、陸水、飲料水及び食品の分離・精製

各前処理法で得られた試料溶液

- ← カルシウム担体 300 mg
- ← シュウ酸 5 g
- ← ブロモクレゾールグリーン溶液 1 mL
- ← アンモニア水

pH 4.0~4.2 に調整

- ← 硝酸 25 mL~30 mL

30 分間加熱後、乾固直前まで濃縮

褐色のガスが発生しなくなるまでくり返す

- ← 8 mol/L 硝酸 20 mL

Sr resin カラム 8 mol/L 硝酸 100 mL 時刻を記録
純水 30 mL (Sr 溶離)

- ← アンモニア水

pH 9 程度に調整

- ← 飽和炭酸アンモニウム溶液 5 mL

数分間、沸騰する

ろ過

沈殿

ろ液

- ← エタノール 数 mL

65 °C、30 分間乾燥

回収率(重量法)

20 mL バイアルにろ紙とともに入れる

0.05 mol/L 硝酸 8 mL で沈殿溶解

4.3 緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法

4.3.1 核データライブラリ

(1) 目的

現行測定法では、ブルックヘブン米国立研究所 (Brookhaven National Laboratory) にある核データセンター (National Nuclear Data Center) が維持管理している評価済核構造データファイル (Evaluated Nuclear Structure Data File (以下「ENSDF」という。)) を出典としている。

核データライブラリの記載には、緊急時用マスター核データライブラリの作成方法が記載されているが、プログラムやデータベースの専門的な知識が必要であり、エンドユーザが記載に沿って解析用核データを作成するのは難しいと考えられる。また、放出・検出の可能性がある核種が網羅されているので、データ数が膨大であり、ガンマ線ピークを誤認することが起こり得る。

このことから、測定法改訂に伴い、核データライブラリの設定の考え方について検討を行い、現行測定法の記載内容を改善することを目的とした。

(2) 方法

国内外で発生した原子力施設事故 (チェルノブイリ原子力発電所事故 (以下「チェルノブイリ事故」という。))、JCO 臨界事故 (以下「JCO 事故」という。))、福島第一原発事故) において、論文等で報告されている核種を調査し、検出された核種の整理を行う。核種を絞ることになるので、測定スペクトル上のガンマ線ピークが不明扱いとなることが想定されることから、現行測定法にある詳細な核データは付録として掲載する。なお、核データは、現行測定法と同じ ENSDF とし、最新情報に核データをアップデートする方向で検討を行う。

また、整理の考え方については、国内調査を実施して、その考え方が適切であるか、また実用的であるかを国内の環境放射線モニタリング機関と意見交換を行った。

(3) 結果

国内外で発生した原子力施設事故において報告されている核種を調査した結果を以下に示した。

①福島第一原発事故

福島第一原発事故において、検出が報告されている人工放射性核種を表 4.3.1 に示した。また、福島第一原発事故時に採取された環境試料 (大気浮遊じん及び土壌) のガンマ線スペクトルの例を図 4.3.1 及び図 4.3.2 に示した。

表 4.3.1 福島第一原発事故において検出が報告されている人工放射性核種

⁵⁸ Co	⁵⁹ Fe	⁶⁰ Co	⁶⁵ Zn	⁸⁶ Rb	⁹¹ Sr	⁹¹ Y	⁹⁵ Zr
⁹⁵ Nb	⁹⁹ Mo	^{99m} Tc	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru	^{110m} Ag	¹¹³ Sn	¹²⁵ Sb
¹²⁷ Te	¹²⁹ Te	^{129m} Te	¹³⁰ I	^{131m} Te	¹³¹ I	¹³¹ Xe	¹³² Te
¹³² I	¹³³ I	^{133m} Xe	¹³³ Xe	¹³⁴ Cs	¹³⁵ Xe	¹³⁶ Cs	¹³⁷ Cs
¹⁴⁰ Ba	¹⁴⁰ La	²⁰³ Pb	²³⁹ Np				

※ 放射性キセノンは in-situ Ge によるガンマ線スペクトル上で検出

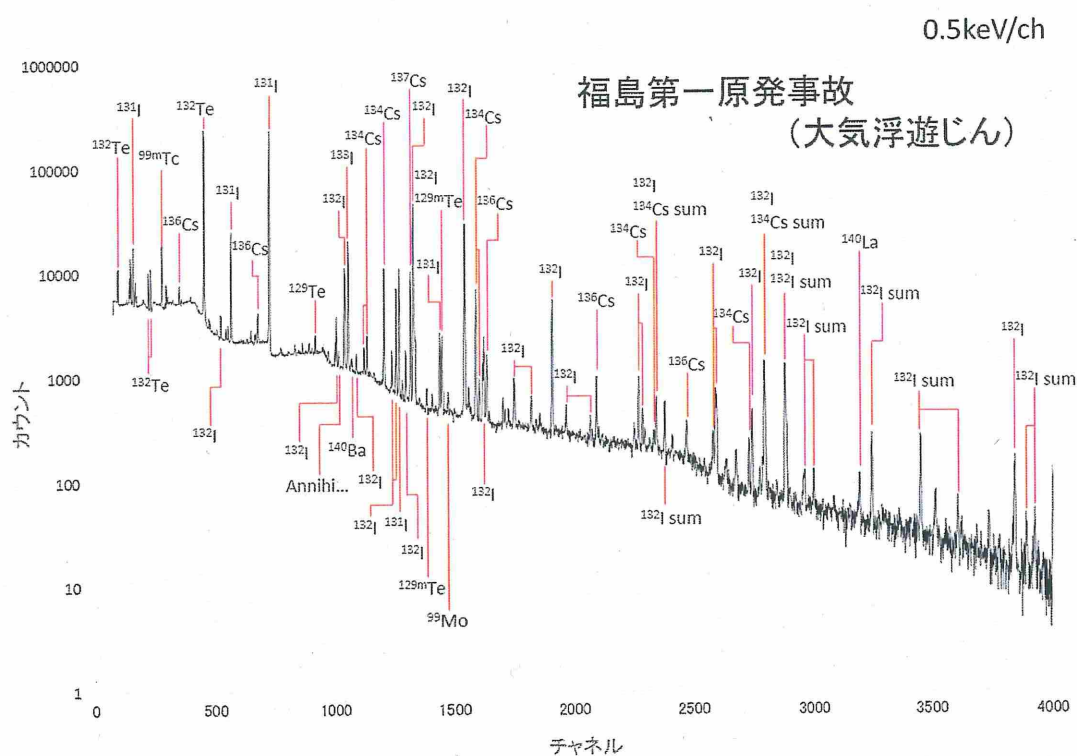


図 4.3.1 福島第一原発事故時に採取された環境試料（大気浮遊じん）のガンマ線スペクトル

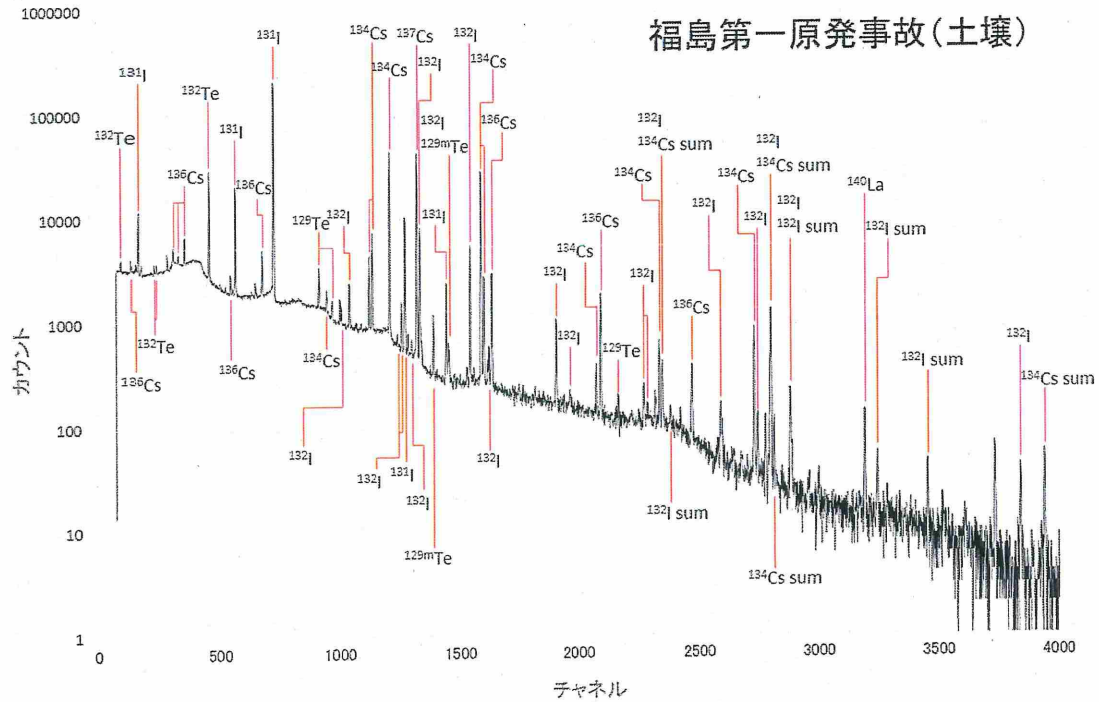


図 4.3.2 福島第一原発事故時に採取された環境試料（土壌）のガンマ線スペクトル

②JCO 事故

JCO 事故において、検出が報告されている人工放射性核種を表 4.3.2 に示した。

また、JCO 事故時に採取された環境試料(野菜類)のガンマ線スペクトルの例を図 4.3.3 に示した。

表 4.3.2 JCO 事故において検出が報告されている人工放射性核種

^{24}Na	^{46}Sc	^{51}Cr	^{54}Mn	^{56}Mn	^{59}Fe	^{60}Co	^{65}Zn
^{82}Br	^{91}Sr	^{95}Zr	^{95}Nb	^{103}Ru	^{122}Sb	^{124}Sb	^{131}I
^{133}I	^{134}Cs	^{135}I	^{137}Cs	^{138}Cs	^{140}Ba	^{140}La	^{153}Sm
^{198}Au							

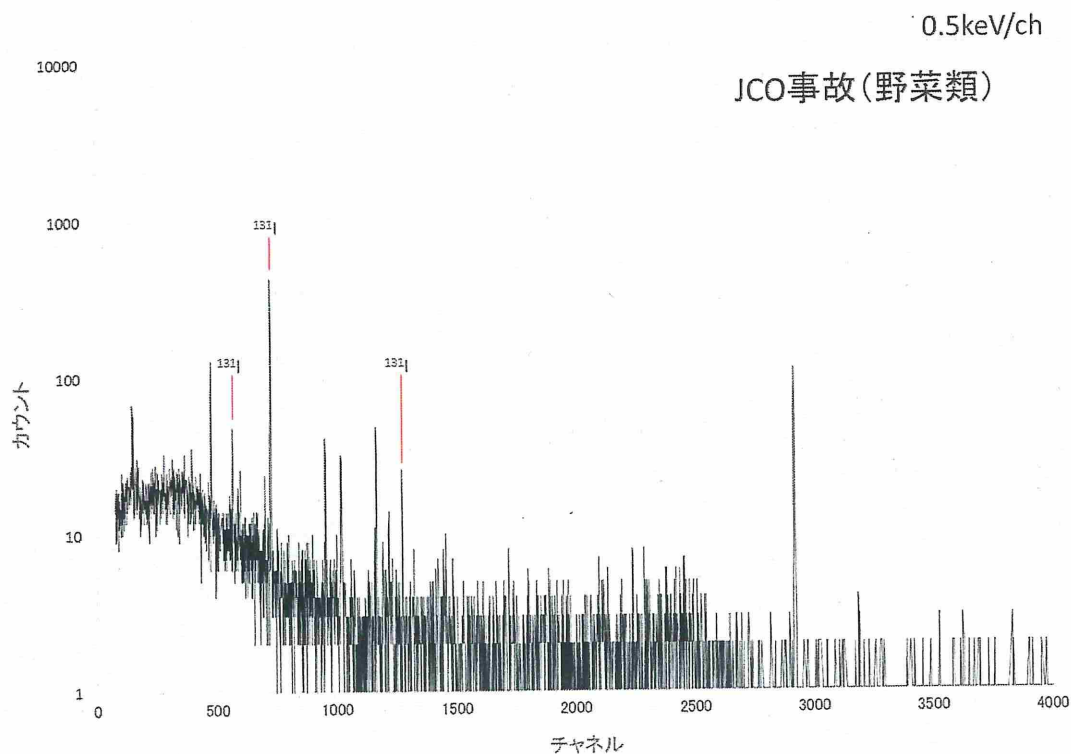


図 4.3.3 JCO 事故時に採取された環境試料（野菜類）のガンマ線スペクトル

③チェルノブイリ事故

チェルノブイリ事故において、検出された人工放射性核種を表 4.3.3 に示した。また、チェルノブイリ事故時に採取された環境試料（大気浮遊じん）のガンマ線スペクトルの例を図 4.3.4 に示した。

表 4.3.3 チェルノブイリ事故において検出された人工放射性核種

^{60}Co	^{95}Zr	^{95}Nb	^{99}Mo	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	^{103}Ru	^{106}Ru	$^{110\text{m}}\text{Ag}$
^{125}Sb	$^{129\text{m}}\text{Te}$	^{131}I	^{132}Te	^{134}Cs	^{136}Cs	^{137}Cs	^{140}Ba
^{140}La	^{141}Ce	^{144}Ce	^{147}Nd	^{152}Eu			

表 4.3.4 平常時の汎用核データライブラリの例

⁷ Be	⁴⁰ K	⁵¹ Cr	⁵⁴ Mn	⁵⁸ Co	⁵⁹ Fe	⁶⁰ Co	⁶⁵ Zn
⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
¹⁴⁰ Ba	¹⁴⁰ La	¹⁴⁴ Ce	²⁰⁸ Tl	²¹⁴ Bi	²²⁸ Ac	^{234m} Pa	

※ その他の登録核種として、^{108m}Ag, ^{110m}Ag, ¹⁴¹Ce, ¹⁵²Eu, ¹⁵⁴Eu, ²¹²Pb, ²¹²Bi, ²¹⁴Pb, (²²⁶Ra) がある。また、²²⁶Ra のガンマ線 (186. 2keV) は ²³⁵U のガンマ線 (185. 7keV) と重なるので参考とする。

平常時汎用核データライブラリ(A)			福島第一原発事故、チェルノブイリ事故(B)						
⁷ Be	⁴⁰ K	⁵¹ Cr	⁵⁸ Co	⁵⁹ Fe	⁶⁰ Co	⁶⁵ Zn	⁸⁶ Rb	⁹¹ Sr	⁹¹ Y
⁵⁴ Mn	⁵⁸ Co	⁵⁹ Fe	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb	⁹⁹ Mo	^{99m} Tc	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru	^{110m} Ag
⁶⁰ Co	⁶⁵ Zn	⁹⁵ Zr	¹¹³ Sn	¹²⁵ Sb	¹²⁷ Te	¹²⁹ Te	^{129m} Te	¹³⁰ I	^{131m} Te
⁹⁵ Nb	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru	¹³¹ I	¹³¹ Xe	¹³² Te	¹³² I	¹³³ I	^{133m} Xe	¹³³ Xe
¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁵ Xe	¹³⁶ Cs	¹³⁷ Cs	¹⁴⁰ Ba	¹⁴⁰ La	¹⁴¹ Ce
¹³⁷ Cs	¹⁴⁰ Ba	¹⁴⁰ La	¹⁴⁴ Ce	¹⁴⁷ Nd	¹⁵² Eu	²⁰³ Pb	²³⁹ Np		
¹⁴⁴ Ce	²⁰⁸ Tl	²¹⁴ Bi							
²²⁸ Ac	^{234m} Pa								
			JCO事故(含中性子線による放射化核種)(C)						
^{108m} Ag	^{110m} Ag	¹⁴¹ Ce	²⁴ Na	⁴⁶ Sc	⁵¹ Cr	⁵⁴ Mn	⁵⁶ Mn	⁵⁹ Fe	⁶⁰ Co
¹⁵² Eu	¹⁵⁴ Eu	²¹² Pb	⁶⁵ Zn	⁸² Br	⁹¹ Sr	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb	¹⁰³ Ru	¹²² Sb
²¹² Bi	²¹⁴ Pb	²²⁶ Ra	¹²⁴ Sb	¹³¹ I	¹³³ I	¹³⁴ Cs	¹³⁵ I	¹³⁷ Cs	¹³⁸ Cs
			¹⁴⁰ Ba	¹⁴⁰ La	¹⁵³ Sm	¹⁹⁸ Au			

注：放射性キセノンは in-situ Ge で検出された核種である。

【福島第一原発事故及びチェルノブイリ事故にみられる原子力施設事故】



【JCO 事故にみられる原子力施設事故】



図 4.3.5 緊急時用核データライブラリ例の作成概略図

4.3.2 減衰補正

(1) 目的

現行測定法では、逐次壊変核種を含めて、放射能が検出された時のみ減衰補正を適用すると記載されている。また、過渡平衡核種の減衰補正については、子孫核種が過渡平衡になっているとみなして行って十分である場合もあると記載されている。一方で、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」には、逐次壊変核種の測定結果に減衰補正を適用すると不具合が起きることが記載されている。

福島第一原発事故時においては、逐次壊変核種や短半減期核種の減衰補正の適用に関して混乱を生じ、環境放射線モニタリング機関における対応も異なり、場合によっては再計算を余儀なくされる事態となった。

このことから、減衰補正の適用で問題となり得る逐次壊変核種（特に過渡平衡核種）に焦点を合わせて検討を行い、その適用に関する考え方を整理することを目的とする。

(2) 方法

過渡平衡核種について、減衰補正を適用することにより、不具合となる事例を数例検討し、現行測定法に追記する内容として提案する。

また、不具合となる事例を踏まえて、減衰補正の適用に関する整理の考え方について国内調査を実施して、その考え方が適切であるか、また実用的であるかを国内の環境放射線モニタリング機関と意見交換を行った。

(3) 結果

① 放出源情報の不足による不具合

原子力施設事故時において、放出源情報が必ずしも入手できるとは限らず、また、その放出も1回のみとは限らない。ここでは、その状況を仮定して、減衰補正を適用することにより、不具合となる事例を紹介する。

【仮定】

1回目の放出後の10時間後に同量の放出があった場合

^{132}Te （半減期：3.204日）が10000Bq放出（ $t=0\text{h}$ 及び $t=10\text{h}$ ）され、子孫核種の ^{132}I （半減期：2.295時間）の放射能は放出時点でゼロとする。 ^{132}Te 及び ^{132}I の経時変化は、黄色と青色の実線で示した。

40時間後の放射能を基に過渡平衡核種の減衰補正を適用すると、事象と異なる結果となり得る。 ^{132}Te 及び ^{132}I の減衰補正結果は、黒と橙色の点線で示した。

^{132}Te と ^{132}I の放射能の経時推移と減衰補正の適用結果を図4.3.6に示した。

図4.3.6より、2回の放出が起きた仮定に対して、測定時における放射能で減衰補正を適用すると時間 $t=0$ における初期状態に戻らないこととなる。

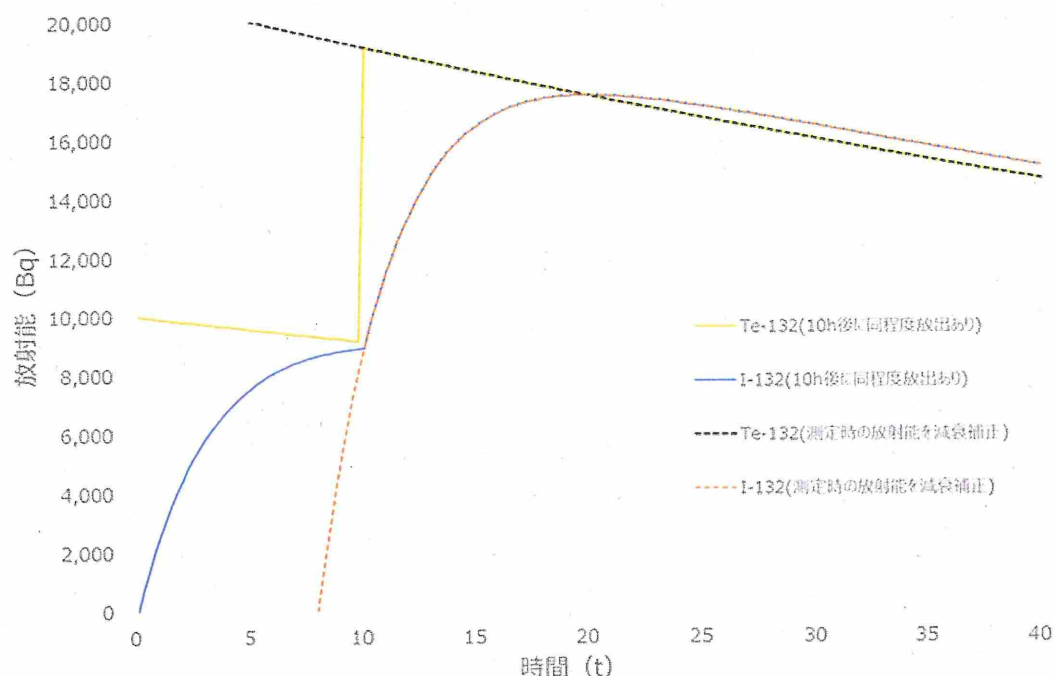


図 4.3.6 ^{132}Te と ^{132}I の放射能の経時推移と減衰補正の適用結果

注：測定中の減衰補正を考慮していない。

②減衰補正適用による不整合

測定時において検出されていた核種が減衰補正を適用することにより、ある時点において不検出となることが起こり得る。

【仮定】

測定時に親核種である ^{140}Ba （半減期：12.7527 日）の放射能が $10000 \pm 100\text{Bq}$ 、 ^{140}La （半減期：1.67855 日）の放射能が $11500 \pm 100\text{Bq}$ 、簡易的に計数誤差の 3 倍を超えると検出判定とする。図 4.3.7 に、測定時における ^{140}Ba 及び ^{140}La の放射能を基に減衰補正を適用した結果をそれぞれ黒色と赤色の実線で示し、 ^{140}Ba 及び ^{140}La の計数誤差の 3 倍値に減衰補正を適用した結果をそれぞれ黒色と赤色の点線で示した。

図 4.3.7 より、過去のある時点 t において、子孫核種の ^{140}La の放射能は計数誤差の 3 倍以下となり、不検出となることが起こり得る。

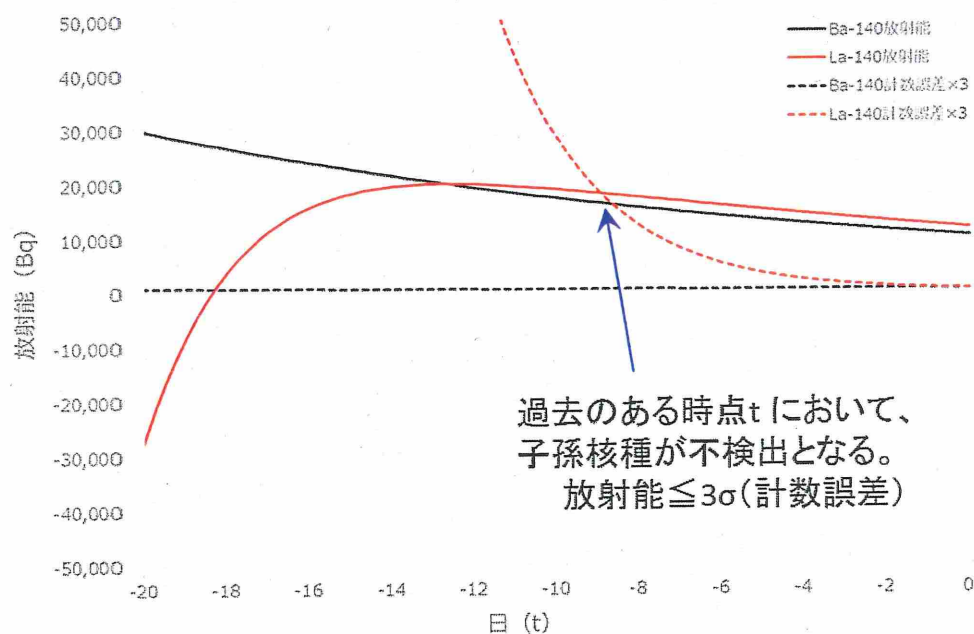


図 4.3.7 ^{140}Ba と ^{140}La の放射能の減衰補正の適用結果

注：測定中の減衰補正を考慮していない。

③測定値のばらつきに伴う不整合

過渡平衡状態に達した親核種と子孫核種の放射能比は一定となる。一方で、測定値は統計的な変動を含むものであり、必ずしも測定結果が適切な放射能比とは限らない。放射能比が適切な比からずれていると全く異なる結果を招くことがある。

【仮定】

^{132}Te と ^{132}I は過渡平衡状態に達するとその放射能比は 1.03 となる。得られた測定結果がその比から $\pm 1\%$ ずれた状況を仮定し、減衰補正を適用した結果を図 4.3.8 に示した。適正な放射能比における ^{132}Te と ^{132}I の減衰補正適用結果をそれぞれ黒色と橙色で示し、放射能比が $+1\%$ ずれた減衰補正結果を赤色、放射能比が -1% ずれた減衰補正結果を青色で示した。なお、測定時間は 1800 秒とし、測定中の減衰補正を考慮した。

図 4.3.8 より、適切な放射能比から $+1\%$ ずれると減衰補正結果は発散し、適切な放射能比から -1% ずれると放射能がゼロとなる時間が異なってしまう。

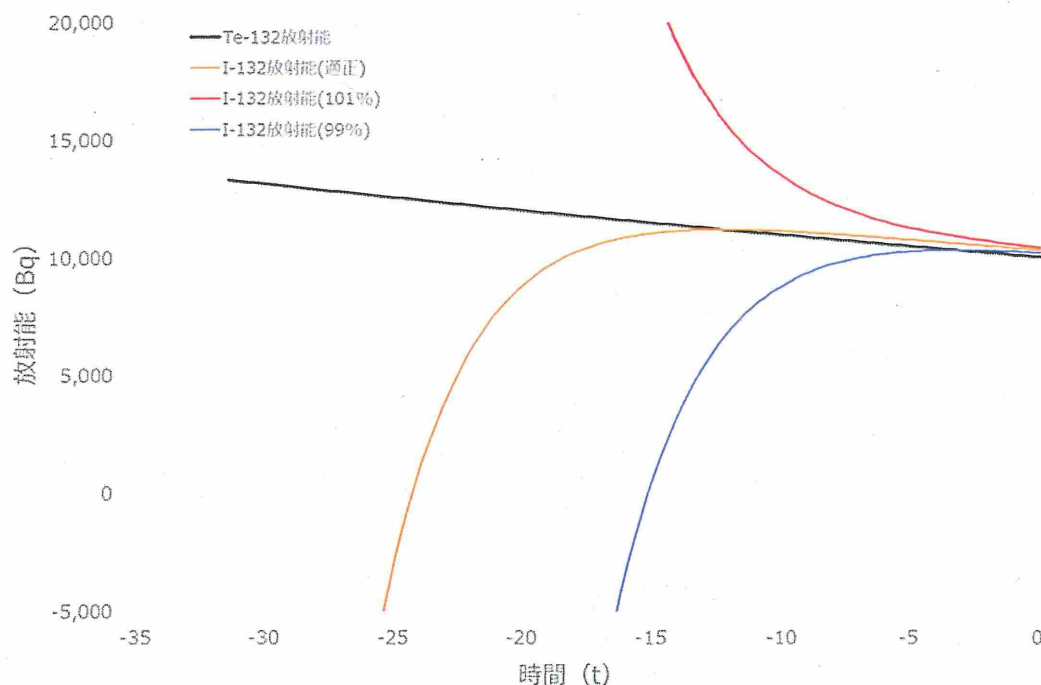


図 4.3.8 放射能比が異なる場合の ^{132}Te と ^{132}I の減衰補正適用結果
注：測定中の減衰補正を考慮している。

④過渡平衡核種の一部が検出される事例

緊急時の試料は放射エネルギーが大きいことが想定され、高エネルギーガンマ線のコンプトン散乱により、ベースライン計数の増大を引き起こすことになる。そのため、低エネルギーガンマ線ピークが検出されにくくなり、過渡平衡核種の一部が検出されることが起こり得る。

実例として、親核種の ^{140}Ba は不検出、子孫核種の ^{140}La が検出された事例を図 4.3.9 に示す。

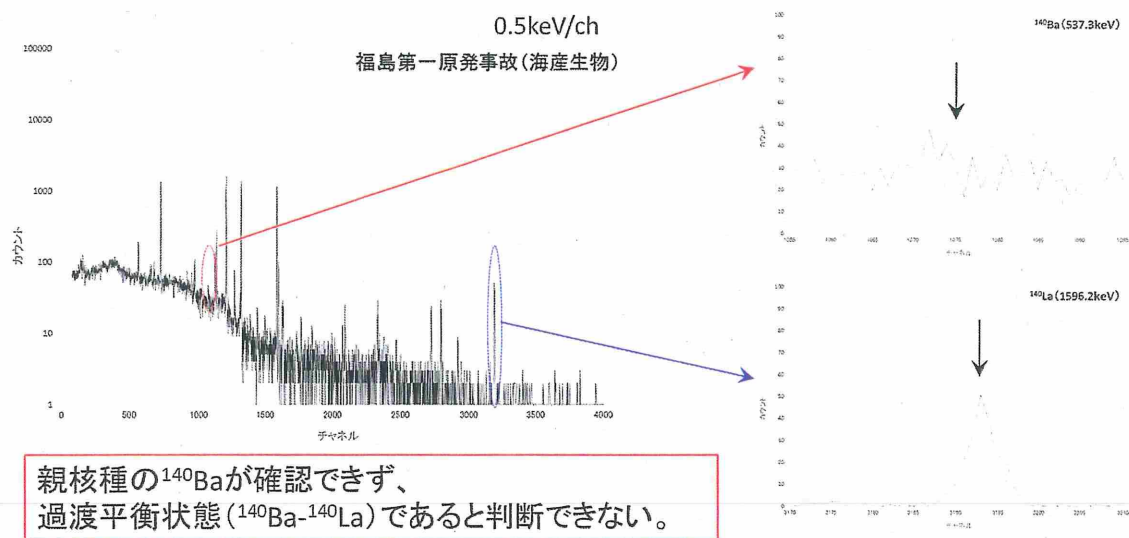


図 4.3.9 過渡平衡核種の一部が検出された事例

過渡平衡核種の一部が検出された場合、測定結果とともにその理由を明記することが必要であるといえる。また、過渡平衡核種の一部が検出された場合の減衰補正については、次項の(4)改訂案に記載する。

(4)改訂案

放射能測定法シリーズ改訂検討委員会にて、減衰補正の適用に関する考え方を審議したが、いずれの考え方も一長一短があること、かつ、国内で実施されているモニタリング結果との整合性を勘案した上で、さらなる議論の必要がある。

減衰補正に関わる記載内容については、以下の項目について引き続き審議していく必要がある。

①国内のモニタリング結果との整合を踏まえた上での減衰補正の考え方

②過渡平衡核種、特に子孫核種の取扱い

(減衰補正適用により不具合を生じる可能性がある子孫核種の取扱い)

4.3.3 自己吸収補正

(1)目的

現行測定法では、自己吸収補正に関する記載として、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」に準じ、マリネリ容器における自己吸収補正を例として記載している。福島第一原発事故において、使用された測定容器はマリネリ容器だけではなく、円柱型容器（U-8 容器など）も使用されていたことを踏まえる必要がある。自己吸収補正係数に影響を及ぼす因子としては、測定試料の材質、密度、測定試料の高さがあげられる。密度と測定試料の高さの設定はさほど難しくはないが、測定試料の材質を選ぶ際に、判断に迷うことが考えられる。

また、緊急時の前処理では、試料を均質にする工程が省略されることから、上記の測定試料の材質の設定と併せて自己吸収補正に関連した問題点として、追記内容を検討することを目的とする。

(2)方法

現行測定法に記載されている試料ごとに適切な材質を提案して、改訂案に追加することを検討する。

また、前処理を簡略化した海産生物（アジ生試料）及び野菜（キャベツ生試料）と試料を均質にする工程を施した試料（灰試料）の測定結果を比較し、解説への追加記載を検討する。なお、生試料については、5つの試料を調製し測定した結果であり、灰試料は5試料を混合して灰化した試料の測定結果である。

(3)結果

①試料の材質設定

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」において、自己吸収補正に用いる線減弱係数を求める式として、試料の材質の原子番号がカルシウム（Z=20）以下で使用するものとは別に、土壌、海底土、灰化物で使用するものが定義されている。一方、緊急時において測定される環境試料として、水試料（飲料水、牛乳、海水など）、葉菜などの生試料、土壌、海底土、汚泥等であることを勘案すると、測定試料の材質として、水もしくは土壌・海底土・灰化物の2つに絞って良いと考えられる。

材質を水もしくは土壌・海底土・灰化物のどちらかを選択するにあたり、試料に含まれる水（油）分率で決定するのが簡易的である。水分量が50%以上の試料については、材質として水を選択することが適切であると考えられ、50%未満の試料については、土壌・海底土・灰化物を選択することが適切と考えられる。

現行測定法に試料調製の記載がある試料について、選択すべき材質を表4.3.5に示した。

表 4.3.5 環境試料ごとの選択すべき材質

環境試料	材質
大気浮遊じん	土壌・海底土・灰化物
土壌	土壌・海底土・灰化物
降下物、降水	水
飲料水	水
牛乳、原乳	水
葉菜	水
その他（豆類、キノコ類、肉類、卵類、チーズ、バター等固形状乳製品、コンデンスミルク、海藻類、魚類、海水）	水
その他（穀類、粉乳）	土壌・海底土・灰化物

注1：活性炭カートリッジの場合、校正用線源と測定試料の形状が同一であるため、自己吸収補正は相殺されるので、補正する必要はない。

注2：降下物、降水、飲料水等の水試料は濃縮等の前処理をしていない試料とする。

注3：生試料は乾燥処理をしていない試料とする。

②海産生物（アジ）

海産生物（アジ）の測定結果を表4.3.6及び図4.3.10に示した。

生試料の測定結果を灰試料の測定結果と比較すると、-1%～+13%の差が見られた。生試料の測定結果が高い傾向が見られるが、測定容器（U-8 容器）に充填する際の部位の違いに伴う測定試料内の偏在が原因と考えられた。しかしながら、生試料の測定結果は灰試料と3.3σ（σ：計数誤差）程度の差でしかなく、著しく大きなものではなかった。

また、試料調製を実施したが、熟練者立会の下で実施したこともあり、生試料間の変動係数は5.6%であった。測定の計数誤差3.9%と比較しても著しく大きなものではないと

いえる。

実際の試料調製では、熟練者立会や助言を得られるとも限らないので、試料調製時には可能な限り細かく裁断し、部位間の差による測定試料内の偏在を起こさないようにすることが重要である。

表 4.3.6 海産生物（アジ）の測定結果

単位：Bq/kg 生

試料名		採取日	測定日	^{40}K	^{137}Cs (参考)
灰試料	アジ (灰)	2016/11/15	2017/2/1	120 ± 0.9	0.14 ± 0.013
生試料	アジ 1 (生)		2016/11/16	130 ± 5	ND (0.25 ± 0.20)
	アジ 2 (生)		2016/11/15	130 ± 5	ND (0.16 ± 0.20)
	アジ 3 (生)		2016/11/17	130 ± 5	ND (-0.19 ± 0.20)
	アジ 4 (生)		2016/11/21	120 ± 5	ND (0.28 ± 0.20)
	アジ 5 (生)		2016/11/22	120 ± 5	ND (0.39 ± 0.20)

測定値は計数値がその計数誤差の 3 倍を超えるものについて有効数字 2 桁で示し、それ以下のものについて ND で示した。また、誤差は計数誤差のみを示した。

測定値は採取日に減衰補正した。

すべての試料の測定は同じ検出器で実施した。

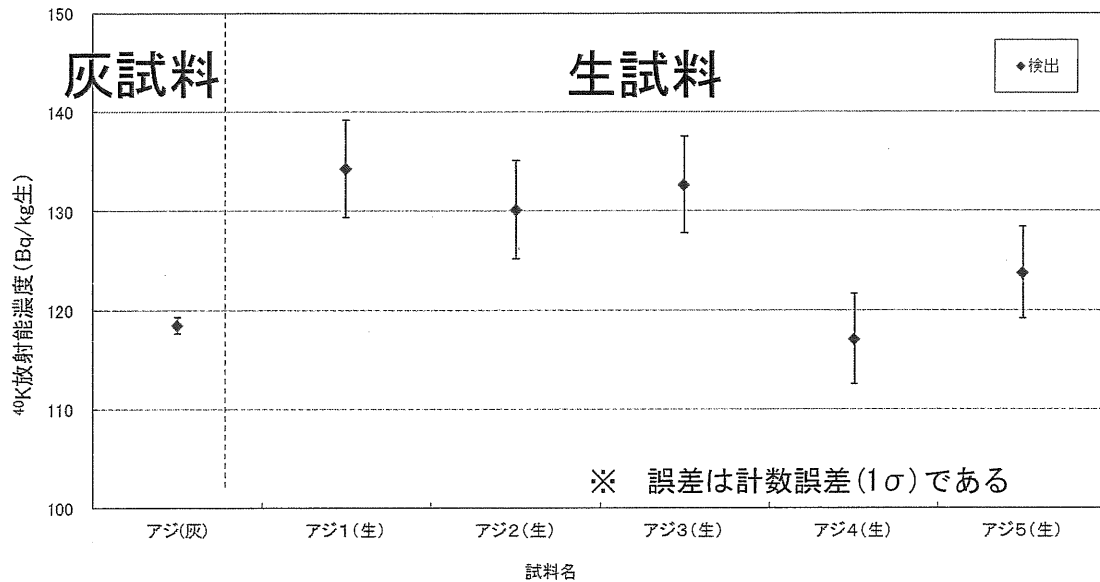


図 4.3.10 海産生物（アジ）の測定結果

③野菜（キャベツ）

野菜（キャベツ）の測定結果を表 4.3.7 及び図 4.3.11 に示した。

生試料の測定結果を灰試料の測定結果と比較すると、 $-8\% \sim +7\%$ の差が見られたが、灰試料を基準とすると、ほぼ正負同程度に分布する結果となった。測定の計数誤差を基準としてみても、 $-4.3\sigma \sim +3.1\sigma$ 程度の範囲内であった。生試料間の変動係数は 4.2% であり、測定の計数誤差 2.5% と比較しても著しく大きなものではないといえる。

実際の試料調製では、熟練者立会や助言を得られるとも限らないので、試料調製時には空隙を生じないように試料調製することが重要である。

表 4.3.7 野菜（キャベツ）の測定結果

単位：Bq/kg 生

試料名		採取日	測定日	^{40}K	^{137}Cs (参考)
灰試料	キャベツ(灰)	2016/11/15	2017/1/31	69 ± 0.3	0.027 ± 0.0041
生試料	キャベツ1(生)		2016/11/15	69 ± 1.7	ND (0.031 ± 0.049)
	キャベツ2(生)		2016/11/16	63 ± 1.4	ND (0.071 ± 0.033)
	キャベツ3(生)		2016/11/17	69 ± 1.5	ND (0.054 ± 0.038)
	キャベツ4(生)		2016/11/21	71 ± 1.5	ND (0.082 ± 0.035)
	キャベツ5(生)		2016/11/22	74 ± 1.6	ND (-0.022 ± 0.037)
	キャベツ6(生)		2016/12/13	68 ± 1.6	ND (0.011 ± 0.044)
	キャベツ7(生)		2016/12/14	66 ± 1.5	ND (0.030 ± 0.038)
	キャベツ8(生)		2016/12/15	70 ± 1.6	ND (0.054 ± 0.045)
	キャベツ9(生)		2016/12/16	68 ± 1.4	ND (0.014 ± 0.035)
	キャベツ10(生)		2016/12/19	68 ± 1.6	ND (0.032 ± 0.044)

測定値は計数値がその計数誤差の3倍を超えるものについて有効数字2桁で示し、それ以下のものについてNDで示した。また、誤差は計数誤差のみを示した。

測定値は採取日に減衰補正した。

すべての試料の測定は同じ検出器で実施した。

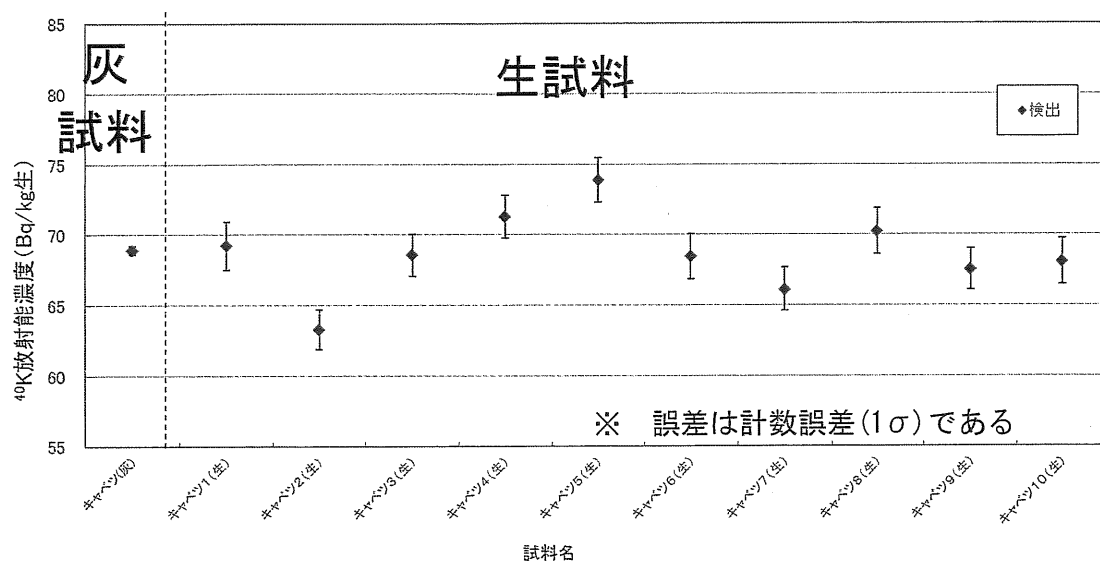


図 4.3.11 野菜（キャベツ）の測定結果

④その他

国内の環境放射線モニタリング機関担当者に対して、自己吸収補正に関連する事項を調査し、追記が必要な事項としては以下のものがあげられる。

- ・校正用線源と測定試料の形状が同一の場合

活性炭カートリッジなど、測定試料と同形状の線源でピーク効率校正している場合は、自己吸収補正係数は相殺される。

(4) 改訂案

検討事項を本文及び解説として追加する。

また、線源と測定試料が同一形状の場合は自己吸収補正が相殺されることについても追加する。

4.3.4 サム効果補正

(1) 目的

サム効果補正は、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ガンマ線スペクトロメトリー」に準拠したソフトウェアで行い、緊急時においても平常時と同じ変数（相対効率、カスケードファイル）によりサム効果補正係数を算出している。

ここでは、サム効果に関わる緊急時に特有な問題点に焦点を合わせて、注意すべき事項として追加が必要な内容を検討することを目的とする。

(2) 方法

サムピークが出現しているガンマ線スペクトルを用いて、その検出事例を追加記載内容として検討を行う。また、壊変図を用いて、サム効果を起こすエネルギー遷移について検討を行い、ガンマ線スペクトル上に出現するサムピークのエネルギーを改訂案に追記することを目的とする。

(3) 結果

①¹³⁴Cs によるサムピーク

¹³⁴Cs の β^- 壊変に伴い、過剰なエネルギーをガンマ線として放出して、より低エネルギー準位に遷移する。¹³⁴Cs の壊変に伴う主なガンマ線を表 4.3.8 に示した。

表 4.3.8 ¹³⁴Cs の壊変に伴う主なガンマ線

ガンマ線エネルギー (keV)	放出比 (%)
475.4 (①)	1.48
563.2 (②)	8.34
569.3 (③)	15.37
604.7 (④)	97.62
795.9 (⑤)	85.46
802.0 (⑥)	8.69
1038.6 (⑦)	0.99
1168.0 (⑧)	1.79
1365.2 (⑨)	3.02

注 1：放出比 0.5%以上のガンマ線を掲載し、エネルギー順に①～⑨の番号を付与した。

注 2：ガンマ線エネルギーは小数点以下 1 桁、放出比は小数点以下 2 桁で示した。

出典：ENSDF (URL : <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/index.jsp>)

サンプイクは、カスケード状にある複数のガンマ線がほぼ検出器に同時に入射し、各々の全エネルギー付与信号が和信号としてスペクトル上に出力されることであることから、図 4.3.12 に示した ^{134}Cs の壊変図とともに理解する必要があり、カスケード状にあるエネルギー遷移のパターンを考慮する必要がある。

表 4.3.8 に示したガンマ線について、エネルギーの低い順に①から⑨の番号を付与し、ガンマ線スペクトル上にサンプイクとして出現する可能性があるものを表 4.3.9 に示した。

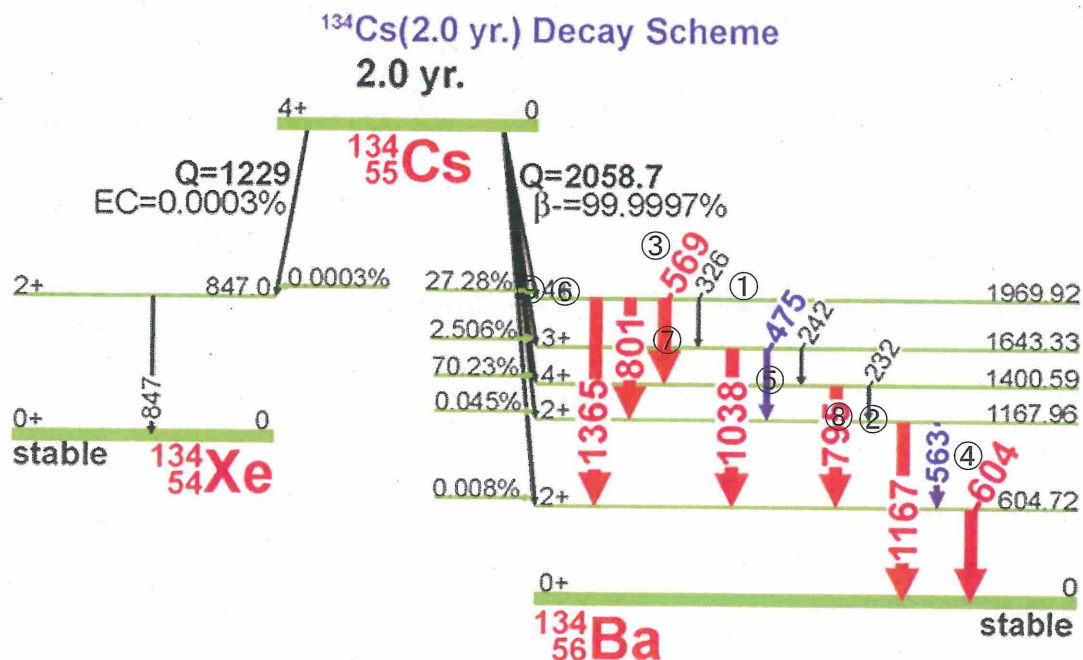


図 4.3.12 ^{134}Cs の壊変図

出典 : Online Spectrum Catalogs for Ge and Si(Li), Idaho National Laboratory
(URL : http://www4vip.inl.gov/gammaray/catalogs/ge/catalog_ge.shtml)

表 4. 3. 9 ^{134}Cs の壊変に伴うガンマ線のサムピーク出現判定表

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
①		※1		※4				※4	
②			※4	※2		※3			
③				○	※3			※4	
④					○	○	※4		○
⑤									
⑥								○	
⑦									
⑧									
⑨									

※1：⑦のガンマ線と同じエネルギー遷移

※2：⑧のガンマ線と同じエネルギー遷移

※3：⑨のガンマ線と同じエネルギー遷移

※4：放出比の小さいガンマ線によるエネルギー遷移を経由するためサムピークの出現は低い

表 4. 3. 9 より、ガンマ線スペクトル上に出現するサムピークのエネルギーとしては次のとおりとなる。

- ・ 1174. 0keV (③+④)
- ・ 1400. 6keV (④+⑤)
- ・ 1406. 7keV (④+⑥)
- ・ 1969. 9 (1970. 0) keV (④+⑨、⑥+⑧)

上記に示したサムピークが出現したガンマ線スペクトルを図 4. 3. 13 に示した。

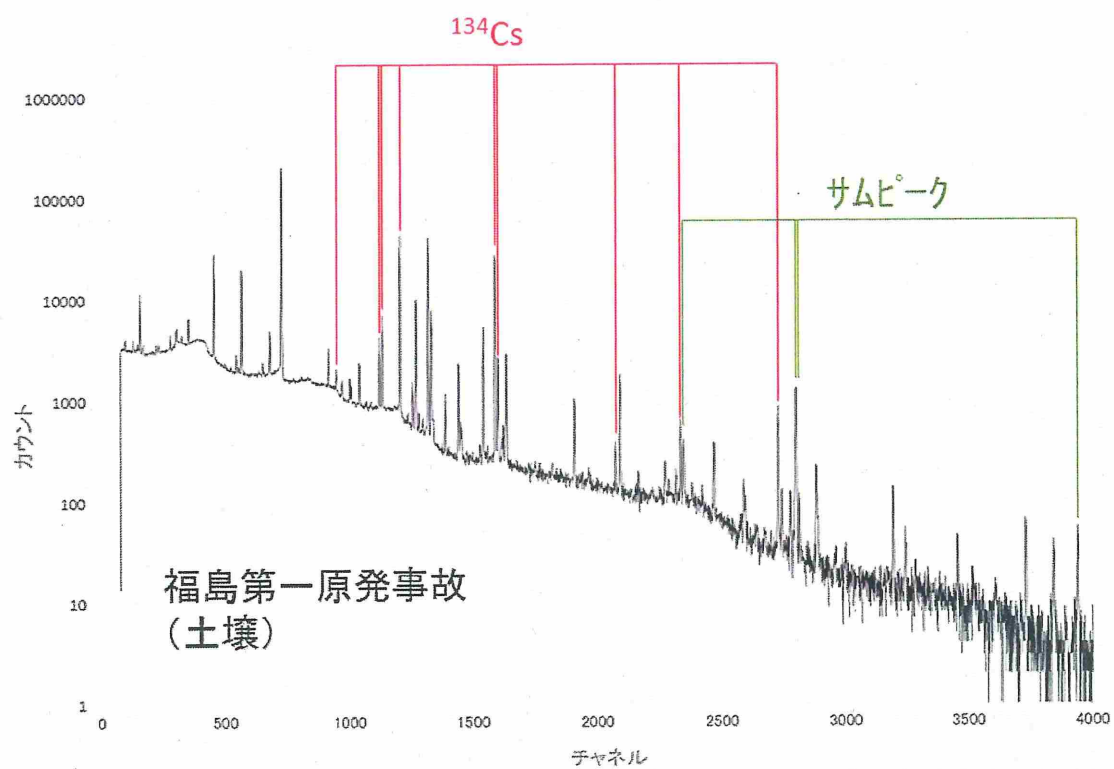


図 4.3.13 ^{134}Cs のサムピークが出現したガンマ線スペクトル

②¹³²I によるサムピーク

¹³²I も ¹³⁴Cs と同様複数のガンマ線を放出し、サムピークが観測される代表的な人工放射性核種である。¹³²I の壊変に伴う主なガンマ線を表 4.3.10 に示した。

表 4.3.10 ¹³²I の壊変に伴う主なガンマ線

ガンマ線エネルギー (keV)	放出比 (%)	ガンマ線エネルギー (keV)	放出比 (%)
262.9	1.30	780.0	1.20
505.8 (①)	5.0	809.5	2.6
522.7 (②)	16.2	812.0 (⑨)	5.6
547.2	1.15	876.6	1.05
621.2	1.6	954.6 (⑩)	17.8
630.2 (③)	13.5	1136.0 (⑪)	3.05
650.5	2.6	1143.3	1.37
667.7 (④)	100	1172.9	1.10
669.8 (⑤)	4.7	1290.8	1.14
671.4 (⑥)	3.5	1295.1	1.90
727.0	2.2	1372.1	2.5
727.2 (⑦)	3.2	1398.6 (⑫)	7.1
728.4	1.6	1442.6	1.42
772.6 (⑧)	76.6	1921.1	1.25

注1：放出比1%以上で2000keV以下のガンマ線を掲載した。

注2：放出比が3%以上のガンマ線をエネルギー順に①～⑫の番号を付与した。

注3：ガンマ線エネルギーは小数点以下1桁、放出比は小数点以下2桁で示した。

なお、ガンマ線のエネルギーによって、放出比の小数点以下2桁目もしくは1桁目がない場合は、それぞれ小数点以下1桁もしくは整数で示した。

出典：ENSDF (URL：<http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/index.jsp>)

¹³²I の壊変図を図 4.3.14 に示したが、¹³²I は多数のガンマ線を放出することから、カスケード状にあるエネルギー遷移のパターンを考慮するのが複雑となる。放出比が小さいガンマ線はサム効果を起こす確率が低くなることから、簡略化するために、表 4.3.10 に示したガンマ線について、放出比が3%以上のガンマ線について、エネルギーの低い順に①から⑫の番号を付与し、ガンマ線スペクトル上にサムピークとして出現する可能性があるものを表 4.3.11 に示した。

2.2 hr.

4+

132I

53I

Q=3577

0.0035%

0.11%

0.05%

0.25%

0.15%

0.15%

0.24%

0.038%

0.5%

0.7%

0.40%

0.75%

1.45%

13.0%

0.42%

3.6%

4+

5+

6+

4+

3+

4+

2+

2+

0+

2+

2+

0+

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

12

3386.20

3383.35

3237.20

3226.72

3214.00

3182.79

3155.81

3121.70

3076.42

3058.14

2958.77

2958.89

2950.70

2940.10

2838.88

2754.44

2670.01

2598.70

2583.76

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

2394.93

2350.65

2303.43

2187.27

2111.85

2110.28

1993.01

1803.72

1440.33

1297.92

667.72

0

stable

132Xe

54Xe

stable

Table of Contents

10

2813.46

2588.70

2583.76

2424.78

239

表 4.3.11 ^{132}I の壊変に伴うガンマ線のサムピーク出現判定表

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
①			※1	※4								
②				○				※2				
③				※2					※2			
④					○	○	○	○	○	○	○	※3
⑤								※2				
⑥								※4				
⑦								○				
⑧												※3
⑨												
⑩												
⑪												
⑫												

※1：⑪のガンマ線と同じエネルギー遷移

※2：他のガンマ線と同じエネルギー遷移

※3：2000keV 以上

※4：他のガンマ線によるエネルギー遷移と区別が難しい。

表 4.3.11 より、ガンマ線スペクトル上に出現するサムピークのエネルギーとしては次のとおりとなる。

- ・ 1190.4keV (②+④)
- ・ 1337.5keV (④+⑤)
- ・ 1339.1keV (④+⑥)
- ・ 1394.9keV (④+⑦)
- ・ 1440.3keV (④+⑧)
- ・ 1479.7keV (④+⑨)
- ・ 1499.8keV (⑦+⑧)
- ・ 1622.3keV (④+⑩)
- ・ 1803.7keV (④+⑪)

上記に示したサムピークが一部出現したガンマ線スペクトルを図 4.3.15 に示した。

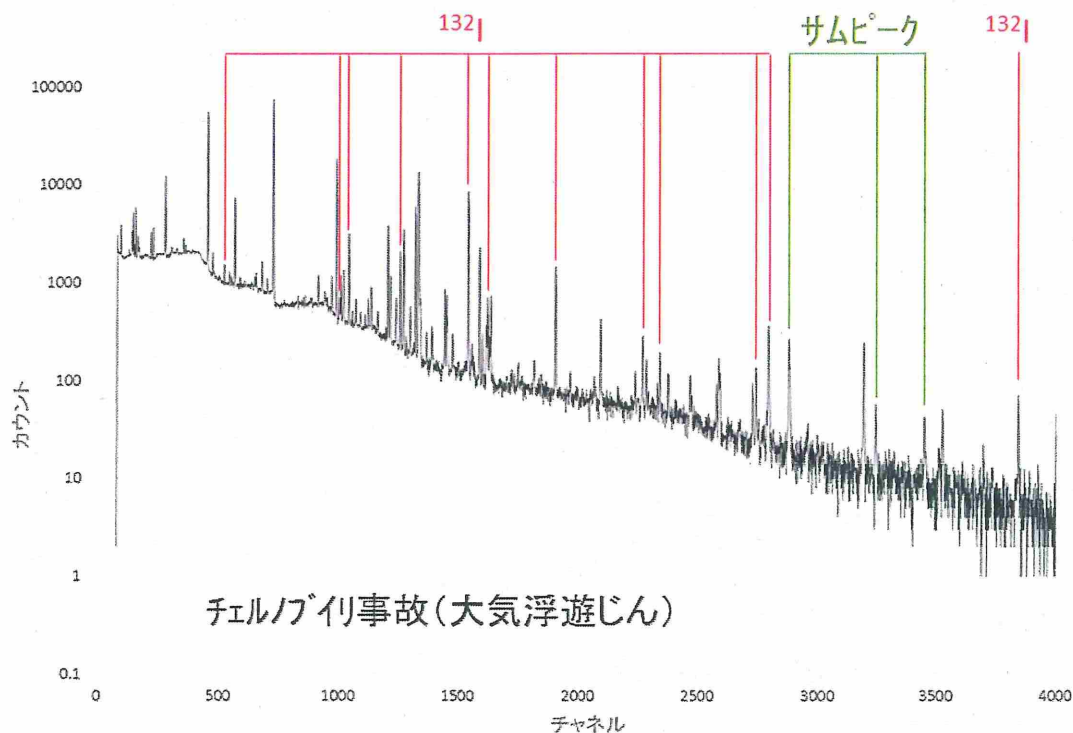


図 4.3.15 ^{132}I のサンプピークが出現したガンマ線スペクトル

ただし、注意が必要なのは、図 4.3.14 に示した ^{132}I の β^- 壊変後のエネルギー遷移は、ほぼ全て 667.7keV (放出比 100%) のエネルギー遷移を経由することである。このため、上記以外にもサンプピークが出現することは考えられる。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」の「資料」内にあるエネルギー順の核データにはサンプピークの記載もあり、サンプピークの同定に非常に有効なものであることから、改訂案に参照先として追記すべき内容といえる。

③カスケードファイル

サンプ効果補正は、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ガンマ線スペクトロメトリー」に準じた市販ソフトを用いて行われるのが一般的である。その際に必要な情報としては、検出器の相対効率とカスケードファイルである。カスケードファイルに登録されている代表的な核種を表 4.3.12 に示した。

表 4.3.12 カスケードファイルに登録されている核種の例

^{22}Na	^{46}Sc	^{58}Co
^{59}Fe	^{60}Co	^{88}Y
^{133}Ba	^{134}Cs	^{152}Eu

カスケードファイルに登録されている核種は、市販ソフトウェアメーカーやソフトウェアのバージョンによって異なる場合があるので注意が必要である。

なお、ピーク効率校正時にサム効果を起こす核種、例えば ^{134}Cs のみで効率校正をしている場合は、サム効果補正項が相殺されるので補正をする必要がない。

(4) 改訂案

検討結果をサム効果補正に関わる内容として本文と解説に追加する。内容としては以下のとおりである。

- ・ ^{134}Cs や ^{132}I は、カスケード状のガンマ線を多数放出する核種であり、ガンマ線スペクトル上には多数のガンマ線が出現すること、及びそのサムピークのエネルギーを実例とともに本文に追記し、かつ、解説として追加する。

4.3.5 デッドタイム増加に伴う測定上の問題点

(1) 目的

緊急時の高い放射エネルギーの試料の測定では、検出器へ入射するガンマ線の量が膨大となり、電子機器の信号処理は過負荷状態となる。結果として、デッドタイムが増加し、幾つかの問題が起こり得る。

このことから、デッドタイム増加に伴う測定上の問題点として、新たに項目立てをして、改訂案に追加することを目的とする。

(2) 方法

デッドタイム増加に伴う測定上の問題点として、以下に示す事象が起こり得る。

- ・ ランダムサム
 - ・ 測定に時間を要する（ライブタイムが進まない）
 - ・ パルスパイルアップ
- 結果としてピーク分解能が悪くなる（高エネルギー側にテーリングする）
結果としてピーク計数率の低下を招く（過小評価となる）

上記事象が起きた場合の測定上の問題点を追加内容として検討する。

また、国内の環境放射線モニタリング機関において調査を行い、有用なスペクトル事例の入手や実際の問題点を改訂案に反映させる。

(3) 結果

① ランダムサム

緊急時のガンマ線スペクトルでは、カスケード状のガンマ線によるサムピークだけでなく、異なる核種からのガンマ線によるランダムサム（例： $^{137}\text{Cs} + ^{134}\text{Cs}$ ）にも注意を払う必要がある。さらに、同じ核種の異なる壊変事象に伴うサムピーク（例： $^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ ）もランダムサムとしてスペクトル上に出現することが考えられる。ランダムサムピークは、解析時に不明ピーク扱いとなるので、スペクトル上の大きなピークから核種を選定、組合せることにより同定をする必要がある。また、後述のパルスパイルアップと同様、

本来、ピークの位置に出力されるべき信号が他のガンマ線による信号に加算されるので、ピーク計数率の減少を引き起こし、放射能濃度の過小評価となる可能性があることに注意が必要である。

②測定に時間を要する

デッドタイムが大きい測定では、信号処理が膨大となり、測定終了までに時間を要することとなる。実際の測定例として、福島第一原発事故直後に採取した葉菜のガンマ線スペクトル例を図 4.3.16 に示した。また、比較対象として、試料量を減容してデッドタイムを減少させた同一試料のガンマ線スペクトルも図 4.3.16 に併せて示した。

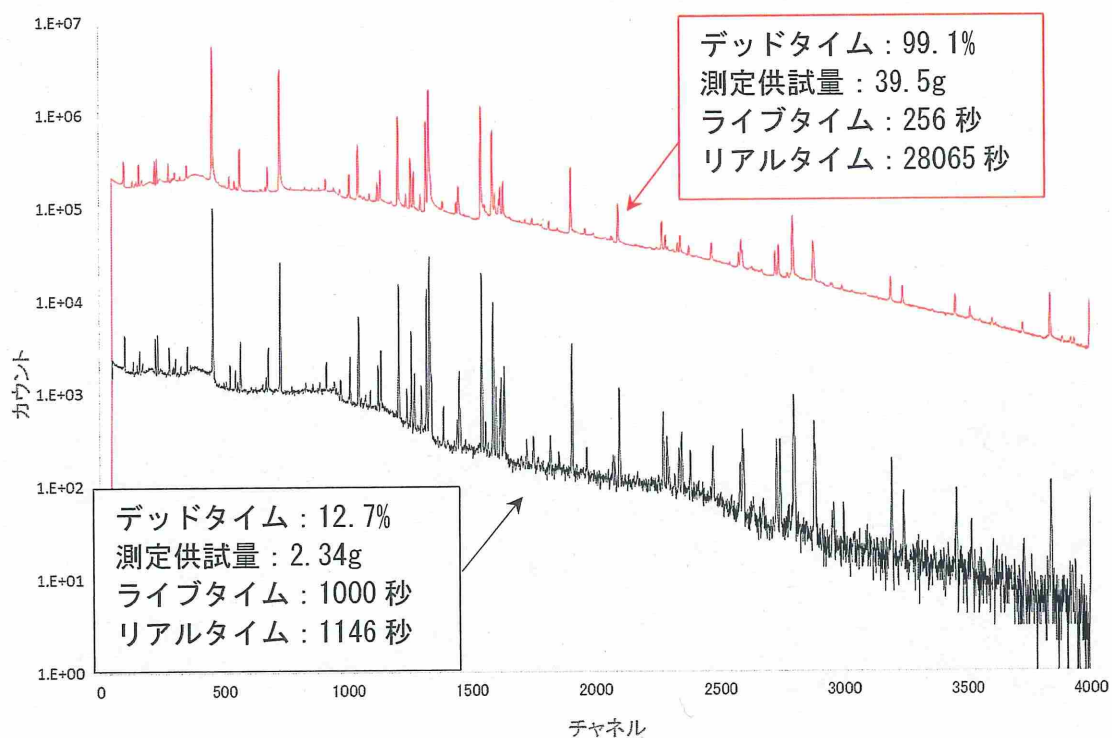


図 4.3.16 同一試料のデッドタイムが大きいガンマ線スペクトル（赤）と
デッドタイムが小さいガンマ線スペクトル（黒）の比較図
（データ提供：福島県環境創造センター 環境放射線センター）

③パルスパイルアップ

パルスパイルアップにより、分解能の劣化、正味計数率の低下を引き起こす。パルスパイルアップとは、偶発同時計数または偶発加算計数とも呼ばれ、2本またはそれ以上のガンマ線がほぼ同時に検出された場合に起こる現象である※。

独立した壊変事象によりほぼ同時に入射した複数のガンマ線が、加算された信号として出力される。パルスパイルアップにより、ガンマ線の全エネルギー付与信号に他の信号が加算されるため、ガンマ線ピークの高エネルギー側にテーリングを生じたり、さらに高エネルギー側に計数を生じたりする。本来、ガンマ線ピーク位置に出力されるべき信号が、より高エネルギー側に出力されることから、正味計数率の低下を生じ、結果として放射能濃度の過小評価を招くこととなる。

※ 実用ガンマ線測定ハンドブック（日刊工業新聞社発行）より引用

参考として、デッドタイムが5%以下と10%以上におけるオシロスコープの波形観察画面を図4.3.17に、それぞれのデッドタイムにおけるガンマ線スペクトルを図4.3.18に示した。また、デッドタイムが大きい環境試料の測定時におけるテーリングした ^{134}Cs (604.7keV) のガンマ線ピークを図4.3.19に示した。

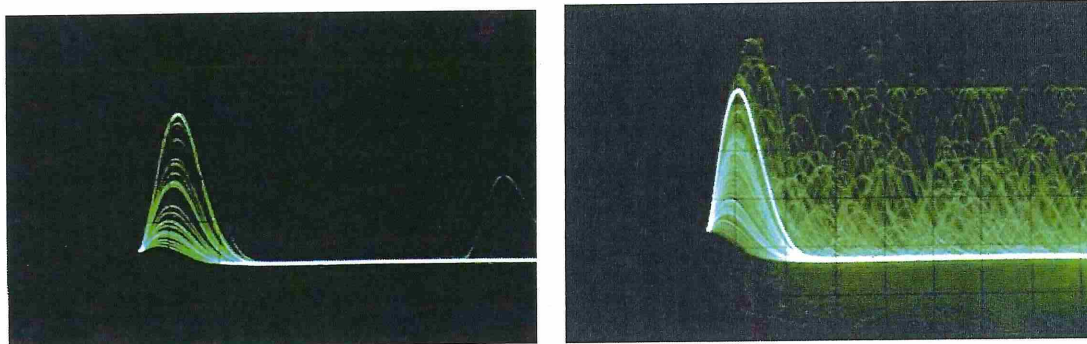


図 4.3.17 オシロスコープによる波形観察画面
(左図：デッドタイム5%以下、右図：デッドタイム10%以上)

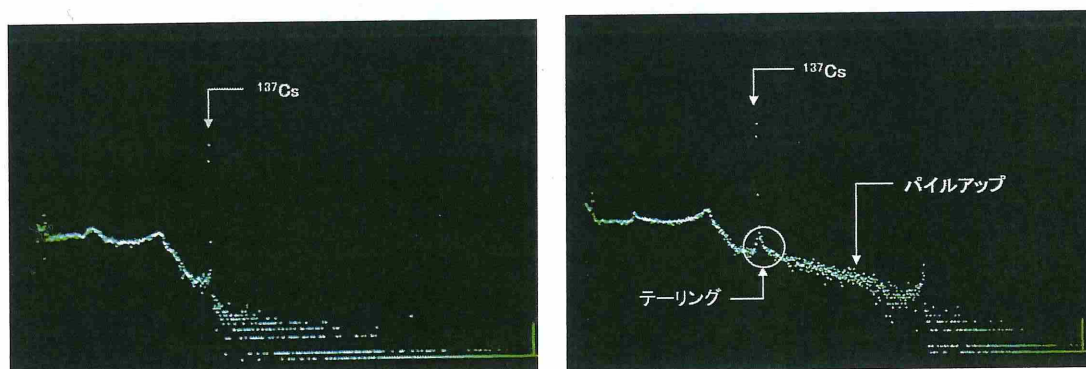


図 4.3.18 デッドタイムの異なるガンマ線スペクトル
(左図：デッドタイム5%以下、右図：デッドタイム10%以上)

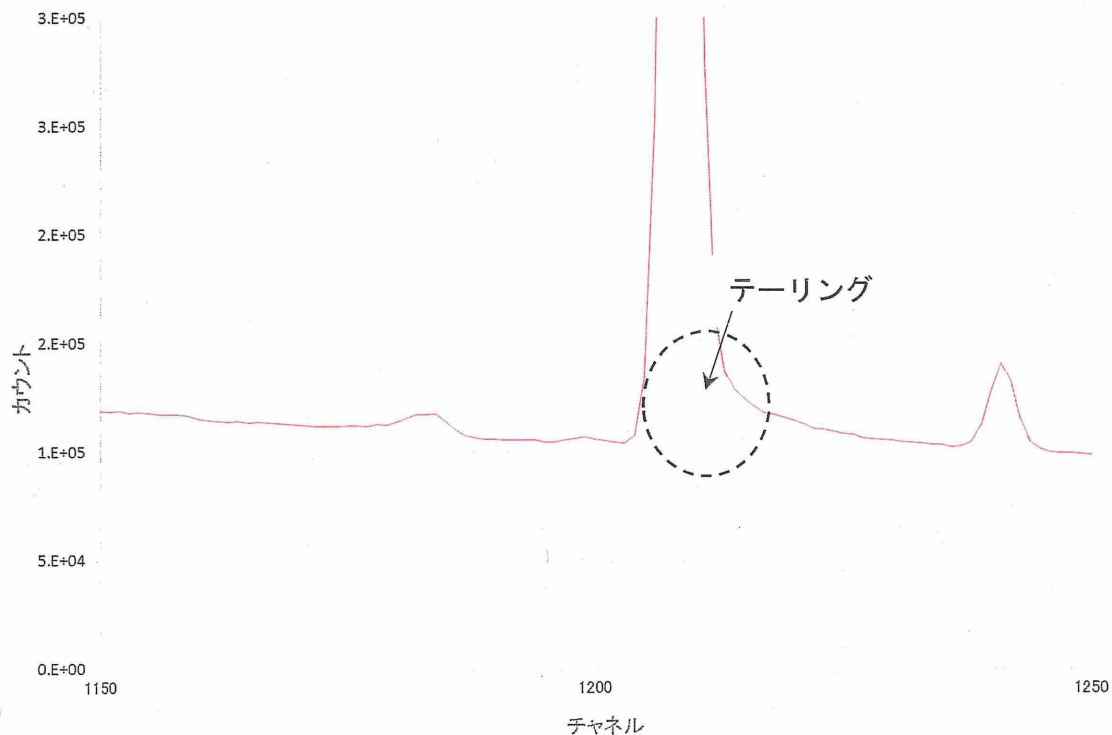


図 4.3.19 デッドタイムが大きい環境試料の ^{134}Cs ガンマ線ピーク (604.7keV)

(データ提供：福島県環境創造センター 環境放射線センター)

緊急時の環境試料の測定では、デッドタイムが大きくなることが想定され、上述した問題が起こり得る。この解決策としては、試料量を減容することにより、測定試料の放射エネルギーを減らすこと、もしくは検出器から離れたジオメトリー（幾何学的条件）で測定することがあげられる。実用的なのは前者であり、後者はそのジオメトリーでピーク効率校正をしておくことが必要となる。

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」には、デッドタイムの目安として 5%との記載があり、試料量を減容する際の参考とすることが望ましい。

(4) 改訂案

検討結果をデッドタイム増加に伴う測定上の問題点として本文と解説に追加する。

内容としては以下のとおりである。

- ・デッドタイム増加に伴い、ランダムサム、測定に時間を要する、パルスパイルアップといった測定上の問題が起こり、分解能の劣化や正味計数率の低下を引き起こす。デッドタイムを少なくするために、試料量の減容などを行う必要があることを本文と解説に追加する。

4.3.6 その他

(1) 目的

前述の核データや各種補正以外にも、緊急時における特有の問題点や注意事項は数多くある。検出器等の汚染や除染対策、汚染が除去できない状況での取扱いなどあげられる。このことから、国内の環境放射線モニタリング機関における経験や対応等について聞き取り調査を行い、その他の事項として改訂案に追記すべき内容を取りまとめることを目的とする。

(2) 方法

以下に示す内容について、国内の環境放射線モニタリング機関に聞き取り調査を行い、その経験や対応策を取りまとめる。

- ・ 検出器の汚染対策、除染方法
- ・ スクリーニングによる環境試料の放射エネルギーの識別
- ・ 前処理・試料調製、測定における汚染防止策
- ・ エネルギー校正の頻度
- ・ バックグラウンド測定と汚染が除去できないバックグラウンドの取扱い

また、一部の記載にマリネリ容器を想定した記載があるので、U-8 容器を含めた記載とすることや福島第一原発事故の経験を踏まえて、実際の前処理や測定試料調製作業時の写真等を用いてユーザがイメージしやすい記載についても検討を行う。

(3) 結果

その他の改訂事項として検討した結果を図 4.3.20 に示した緊急時における作業フローの例に沿って以下に示した。

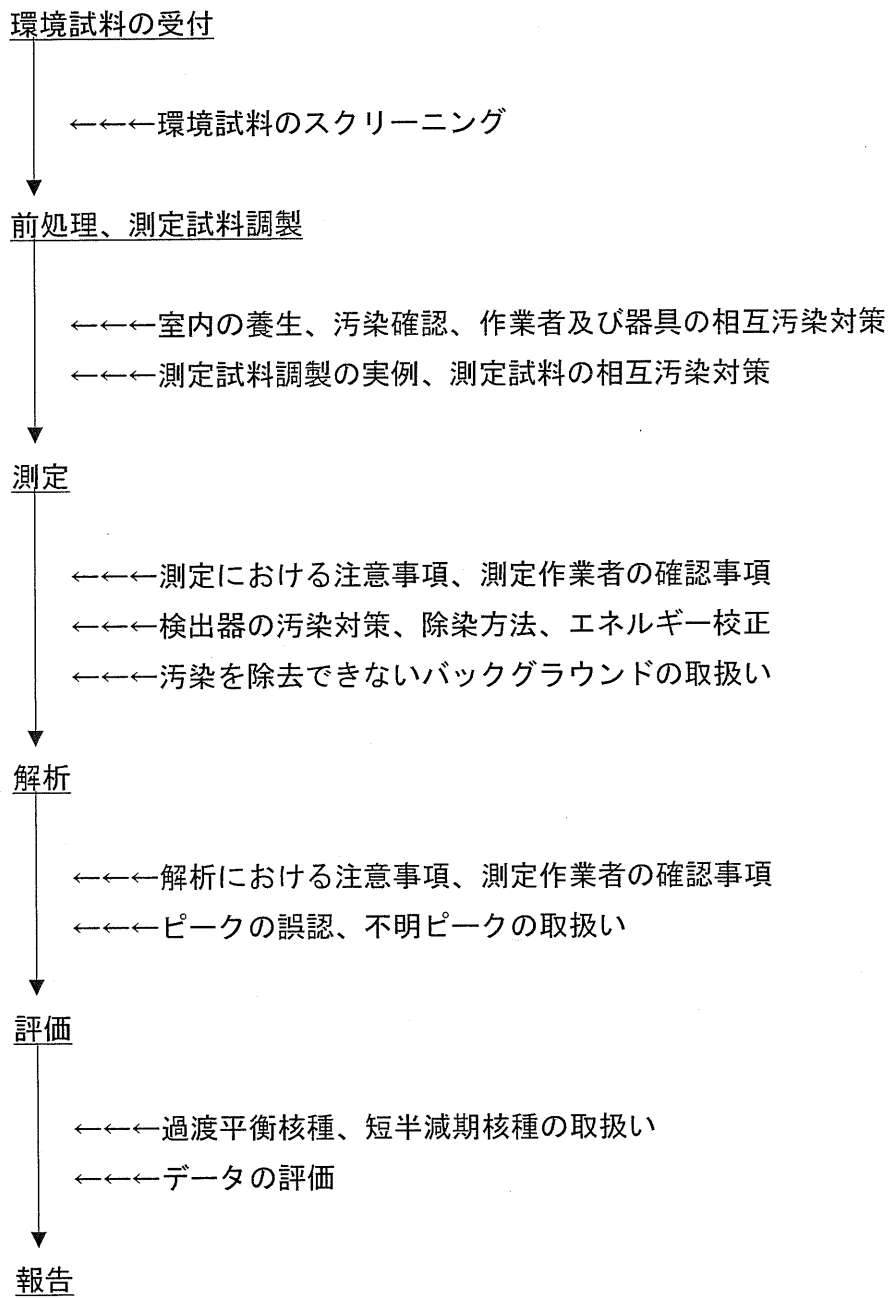


図 4.3.20 緊急時における作業フローの例

①環境試料の受付

・環境試料のスクリーニング

緊急時の環境試料は放射エネルギーが高いものや低いものが混在していると考えられる。放射エネルギーを把握せずに、前処理や試料調製を行うことは相互汚染の危険性を高めるだけでなく、作業者に無用な被ばくを与えることに繋がる。

NaI (TI) シンチレーション式サーベイメータや GM サーベイメータによるスクリーニングを実施して、放射エネルギーの高い試料は、作業員から距離を離して遮へいし、必要最小限の時間で前処理、試料調製を行うことが必要である。また、可能な限り、放射エネルギーの低い試料から前処理、試料調製を行い、試料間の相互汚染の危険性を低減することができる。

②前処理、測定試料調製

・室内の養生

緊急時の環境試料を前処理、測定試料を調製する部屋は、平常時に作業する部屋とは別の方が望ましい。また、室内は十分に養生しておき、汚染が室内に残らないようにすることが必要である。緊急時においては、養生に使用する資材の調達が難しいこともあり、福島第一原発事故直後の事例では、ブルーシートで代用した事例もある。図 4. 3. 21 に作業室内の養生例を示した。



図 4. 3. 21 作業室内の養生例

(左図：ポリエチレンろ紙による養生、右図：ブルーシートによる養生)

・汚染確認 (スミヤ試験)

作業終了後にはスミヤ試験を実施し、サーベイメータによる測定が作業前と同程度であることを確認する。作業前のレベルと比較して、高い計数が得られた場合は、養生が汚染したと判断し、養生を張り替える。

・作業員及び器具の相互汚染対策

前処理、測定試料調製時において、環境試料を直接触るホット作業と直接触らないクール作業を区別して、可能な限り、作業員と作業台を別々にすることが望ましく、汚染を

拡大させないことが重要である。また、作業者は室内専用の作業着（白衣）を着用し、汚染を人体に付着させない着用具や前処理に使用する資材は、試料ごとに交換する必要がある。

図 4. 3. 22 に使い捨ての着用具や資材の例を示した。



図 4. 3. 22 使い捨ての着用具や資材の例

・ 測定試料調製の実例、測定試料の相互汚染対策

試料を細かく裁断する際には、養生した作業台の上に、さらに使い捨て可能な資材による簡易養生をしておく有効である。作業台や室内に施した養生を張り替えるのにはかなりの労力を費やす。試料ごとに使い捨てる簡易養生を施すことにより、省力化に資することができる。試料の裁断には、使い捨てのカッター刃を使って紙皿の上で行い、汚染が拡大することを避ける必要がある。また、キノコ等の柔らかい食材は手で切り分け、牛乳などの水試料は二人一組で行うなどの工夫をすると、汚染拡大の危険性を低減することができる。また、U-8 容器等の円柱型の測定容器に生試料を充填するには、本体ねじ部分にテフロンシールを巻き、容器の密閉性を良くすることで、測定容器外に汚染を拡大させないために有効である。参考として、図 4. 3. 23 に福島第一原発事故直後に実施した前処理の様子を示した。



図 4. 3. 23 福島第一原発事故直後に実施した前処理（野菜）の様子

試料調製した測定試料は、コールド専用の作業台に置き、コールド作業担当者が純水で濡らしたティッシュ等で容器外側を拭き、汚染が拡大しないようにすることが必要である。また、測定容器は、ポリ袋で二重に覆い、移動する際の環境からの汚染を測定試料に移さない工夫も必要なことである。

前処理、測定試料調製作業者と測定作業者は別々に決めておくことが望ましく、試料を受け渡す際にも直接触れないようにし、汚染を移動させないことも重要である。予め測定試料を受け渡す場所に簡易テーブルを設置し、受け渡しをすれば汚染を拡大させない効果を十分に期待できる。試料の受け渡しの工夫例として図 4.3.24 に示したパスボックスの設置があげられる。これは前処理、測定試料調製室と別の室内を隔てた壁に受け渡し専用のボックスを設置したものである。壁を隔てた両室内から扉の開閉が可能であり、直接触ることなく試料の受け渡しができる設備である。



図 4.3.24 測定試料受け渡し用パスボックス

(写真は福島県環境創造センター 環境放射線センターに設置されたものである。)

前処理、測定試料調製時に発生する記録は原紙を測定作業者に引き渡すことは避けるべきである。コピーやメールを活用することにより、測定室内への汚染持ち込みの危険性を低減化することができる。

③測定

・測定における注意事項

測定における注意事項としては、まず、測定室内に汚染を持ち込まないことが重要である。そのために、測定室内専用の作業着（白衣）やビニール手袋を着用することが必要である。また、測定室内に汚染を持ち込まない工夫として、測定室内専用の靴を用意すること、作業動線に粘着シートを設置することがあげられ、毎日掃除を徹底することも有効である。

測定試料はポリ袋で二重に覆っているが、測定室に入室する直前で、外側のポリ袋は汚染したという前提で取り去り、新しいポリ袋で覆い、検出器が汚染しないようにする必要がある。

・測定作業者の確認事項

現行の測定法においても記載のある注意事項を含めて、測定作業者が測定時にチェックすべき項目の例を表 4.3.13 に示し、改訂案に追加する。

表 4.3.13 測定作業者のチェック項目の例

測定	
No.	チェック項目
1	測定試料のジオメトリーは校正用線源と同一である
2	マリネリ容器の場合、重量計の変化が+0.3kg 以内である
3	前回測定データが消去されている（保存済みであることを確認）
4	測定時間（プリセット時間）が適切である
5	測定時間がカウントアップしている
6	測定の記録をしている （試料名、測定番号、測定試料の高さ、測定開始時刻、プリセットタイム、測定作業者名など）
7	デッドタイムが著しく大きくない
8	着目ピーク（ ^{40}K や ^{137}Cs など）のドリフトが起きていない （時間間隔を空けて複数回確認する）
9	数十 keV 以下の領域にノイズによる幅広いピークが観察されない
10	所定の測定時間が終了している
11	測定済みデータを保存している
12	測定試料を検出器から取り出している
13	取り出した試料の情報と測定の記録が一致している

・検出器の汚染対策、除染方法

前述の「測定における注意事項」に記載した内容を含めて、まず、測定室内に汚染を持ち込まない対応が必要である。記載内容以外の対策としては、クリーンブースの使用、HEPA フィルターを通して外気からの汚染を取り込まないなどがあげられる。

検出器自体の汚染対策としては、検出器本体を薄いポリ袋で覆っておくことが有効である。汚染が確認されれば、ポリ袋を取り去り、新しいポリ袋で覆うことにより除染することができる。

遮へい体の汚染対策として、遮へい体の内側にアクリル等のプラスチックを内貼りすることが一般的に行われている。遮へい体が汚染された場合の除染対策として、乾拭きや水、アルコールを湿らせた布等による洗浄があげられる。また、必要に応じて、内貼りを取り外して、プラスチックや鉛等の分解清掃を行う必要がある。分解洗浄で除染できないことも想定され、容易に交換できるものについては、新しいものに更新することにより、除染

を行うことが望ましい。遮へい体に鉛ブロックを使用している場合は、汚染された側を検出器から遠ざけることにより、汚染の影響を低減化することができる。なお、必ずしも除染できるとは限らず、汚染された状態での使用を余儀なくされることは十分に考えられる。この場合における対応について、後述の「汚染を除去できないバックグラウンドの取扱い」に記載する。

検出器以外のケーブル、電子機器についても、乾拭き、水拭き、分解洗浄、機器更新による除染を検討する。ただし、取扱説明書や製造業者に確認して、作業の安全面について十分配慮して行う必要がある。

・エネルギー校正

緊急時の環境試料のガンマ線スペクトル上では、多数のガンマ線ピークが検出され、複数のガンマ線ピークが近接していることが起こり得る。ゲインが変化して、適切なエネルギー校正式が適用できない場合、ガンマ線ピークを誤認、もしくは認識しないこととなる。一般に、空調が管理されている室内環境（温度 22℃～26℃程度、湿度 35%～65%程度）であれば、ゲルマニウム半導体検出器は安定性に優れた装置である。しかしながら、誤認の危険性が高い緊急時には、エネルギー校正式がずれていないことを線源等により定期的に確認することが望ましく、測定状況を勘案して頻度を検討する必要がある。定期的に確認することができない場合、もしくは次の校正までエネルギー校正式がずれていないことを担保するには、ガンマ線スペクトル上に出現する ^{40}K などの天然放射性核種のガンマ線ピークで確認すれば良い。測定時間が短く、天然放射性核種のガンマ線ピークが確認できない場合は、原子力施設事故時に放出が予想される ^{137}Cs などの人工放射性核種のガンマ線ピークで代用ができる。表 4.3.14 に、確認に用いることができる ^{40}K 、 ^{137}Cs 及び ^{134}Cs のガンマ線エネルギーの例を示した。なお、エネルギー校正は 1 次式で良く近似できるので、対象エネルギー範囲の 1 点で確認できれば十分である。

表 4.3.14 エネルギー校正確認用ガンマ線エネルギーの例

	核種	ガンマ線エネルギー (keV)
天然放射性核種	^{40}K	1460.9
人工放射性核種	^{137}Cs	661.7
	^{134}Cs	604.7
		795.9

注： ^{134}Cs の 604.7keV のガンマ線は、近接する ^{214}Bi の 609.3keV のガンマ線と誤認しないように注意する。

・汚染を除去できないバックグラウンドの取扱い

バックグラウンドスペクトルは、単に測定試料のガンマ線スペクトルからバックグラウンド寄与分を差引きするだけでなく、検出器や遮へい体が汚染されていないことを確認す

る上で重要である。ひとたび検出器が汚染され、除染対策を施しても除去できないことは十分に考えられ、汚染された状態での使用を余儀なくされる。

このため、バックグラウンドを前述にある2つの目的に応じて、測定を行う必要がある。一つは「汚染確認用のバックグラウンド」であり、もう一つは「差引用のバックグラウンド」である。

「汚染確認用のバックグラウンド」は、測定試料と同程度の測定時間で、適当な頻度で実施するものである。緊急時では、環境試料を途切れなく測定する必要がある、検出器や遮へい体が汚染された時期を特定するのは困難である。「汚染確認用のバックグラウンド」の頻度が少ないと、対象期間が長くなり、再測定すべき試料数も増加してしまう。頻度が短いと、再測定すべき試料数は減少するものの、環境試料を測定すべきマシンタイムが減ってしまう。その時々での測定状況に応じて、「汚染確認用のバックグラウンド」の頻度を勘案する必要がある。

「差引用のバックグラウンド」は、測定試料の2倍以上の測定時間で実施し、汚染寄与分を可能な限り精度良く差引くためのものである。短半減期核種による汚染が確認された場合は、毎日、「差引用のバックグラウンド」を測定し、汚染による影響を把握することが望ましい。 ^{134}Cs の汚染が確認された場合は、1週間程度の間隔で測定を実施すれば、減衰による影響は1%未満に抑えることができる。より半減期の長い ^{137}Cs のみの汚染という場合は、1ヶ月程度の間隔でも減衰による影響はほとんど無視できる。

④解析

・解析における注意事項

緊急時の環境試料のガンマ線スペクトル上には多数のガンマ線ピークが観測され、核データライブラリと照合ができなければ不明ピーク扱いとなり、正しい照合でなければ核種の誤認が起こり得る。また、放出比の小さいガンマ線ピークも観測されることが考えられる。そのため、定量用の放出比の大きいガンマ線ピークだけではなく、放出比の小さいガンマ線ピークも確認しておくと同定の精度を高めることができる。さらに、検出と判定されたガンマ線ピークについても、ベースラインの統計変動に起因して、ピーク形状を成しておらず、解析上検出と判定されることもある。

総じて、市販ソフトウェアで自動解析された出力帳票をそのまま報告するのではなく、ガンマ線スペクトルを目視で確認するなど、測定作業による確認が緊急時のガンマ線スペクトル解析では重要となる。

・測定作業の確認事項

測定作業のチェック項目の例を表4.3.15に示し、改訂案に追加する。

表 4.3.15 測定作業者のチェック項目の例

解析	
No.	チェック項目
1	ソフトウェアへの入力項目（試料名、採取開始・終了日時、試料の高さ、試料重量、密度、材質、測定作業者名等）が正しく入力されている
2	測定容器の種類が正しく選択されている
3	解析用核データライブラリの選択が適切である
4	エネルギー校正ファイルが正しく選択されている
5	ピークサーチ条件（関数フィルター、感度（通常は 3）、ピーク中心計算方法）が適切である
6	効率校正ファイルが正しく選択されている
7	サム効果補正として、相対効率が正しく入力されている もしくは、PT（Peak to Total 比）校正ファイルが正しく選択されている
8	カスケードファイルが正しく選択されている
9	バックグラウンドスペクトルが正しく選択されている （直近の差引用バックグラウンドスペクトルである）
10	減衰補正の適用条件が適切である
11	ピーク領域の計算方法（コベル法、関数適合）が正しく選択されている
12	出力帳票について、上記項目が正しく入力され解析されている
13	スペクトル上で観測される着目ピーク（ ^{40}K や ^{137}Cs など）のドリフトが起きていない
14	同定済みピークについて ・ ベースラインの統計変動に伴って、解析上検出されたピークであるか ・ 複数のガンマ線を放出する核種については、他のガンマ線ピークを確認する ・ 定量用のガンマ線ピークしか確認できない場合 - 逐次壊変系列を成す核種については、親と子孫核種のガンマ線ピークを確認する - 質量数の異なる同一元素の放射性核種によるガンマ線ピークを確認する - さらに原子力事故の種類、経過時間、半減期を考慮して、同定結果が妥当であるか判断する
15	不明ピークについて ・ ベースラインの統計変動に伴って、解析上検出されたピークであるか ・ シングルエスケープ、ダブルエスケープ、サムピーク、ランダムサムピークの可能性を検討する ・ エネルギー順の核データライブラリを用いて、放射性核種の候補を絞る - 複数のガンマ線を放出する核種については、核データライブラリに登録

	されていない放出比の小さいガンマ線ピークを確認する 逐次壊変系列を成す核種については、親と子孫核種のガンマ線ピークを確認する 質量数の異なる同一元素の放射性核種によるガンマ線ピークを確認する さらに原子力事故の種類、経過時間、半減期を考慮して、同定結果が妥当であるか判断する
--	---

注1：サム効果補正に関する入力、設定は市販ソフトウェアメーカーにより異なる。

注2：バックグラウンドスペクトルは、バックグラウンドスペクトル上の 2σ （計数誤差）以上のピーク寄与分を差引くため、定量分析する際に必要である。

・ピークの誤認

スペクトル上に検出されたガンマ線ピークは、核データライブラリと照合を行い、核種の同定が行われる。核種の誤認は、同定されるべき核種の核データが核データライブラリに登録されておらず、登録されている他の核種のガンマ線エネルギーが同定幅の範囲で一致することにより起こり得る。また、核データライブラリに登録されていないシングルエスケープ、ダブルエスケープ、サムピークについても同様に誤認される可能性がある。代表的な例としては、 ^{134}Cs のサムピーク（569.3keV+604.7keV）を ^{60}Co （1173.2keV）と同定するものがあげられる。この場合、高エネルギー側に位置する ^{60}Co （1332.5keV）のガンマ線ピークがないことを確認することにより誤認を回避することができる。また、核データライブラリに ^{132}I の核データが登録されておらず、 ^{58}Co や ^{59}Fe が登録されていると、809.5keV及び1290.8keVの ^{132}I からのガンマ線をそれぞれ ^{58}Co （810.8keV）及び ^{59}Fe （1291.6keV）と誤認する恐れがある。

緊急時の測定試料は水分を多く含んだ試料であることが想定される。宇宙線により二次的に生成する中性子が原子番号の小さい元素で構成される水により減速されて、検出器材と相互作用し易くなる。Ge結晶と中性子との相互作用により生成する ^{75}mGe から放出されるガンマ線（139.68keV）を $^{99\text{m}}\text{Tc}$ からのガンマ線（140.511keV）と誤認することが起こり得るので注意が必要である。

核種の誤認を避けるためには、同定結果が正しいものであるか確認するステップを設けることが必要となる。

・不明ピークの取扱い

ガンマ線スペクトル上で検出されたガンマ線ピークは、核データライブラリと照合を行い、同定幅の範囲で一致するガンマ線エネルギーがない場合は、不明ピーク扱いとなる。不明ピークの照合は多大な作業量となることが考えられるが、エネルギー順に記載のある核データライブラリを用いて、同定作業を行うことができる。

同定作業を進める前に、以下に示す可能性を検討する必要がある。

- ・ベースラインの統計変動に伴う、解析上検出されたピーク
- ・シングルエスケープ、ダブルエスケープ、サムピーク、ランダムサムピーク

エネルギー順に記載のある核データライブラリとして、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」の「資料」は、不明ピークの同定作業に良い手助けとなる。シングルエスケープ、ダブルエスケープ、サムピークについても記載があるので、非常に有効なものといえる。ただし、ランダムサムピークについては記載がないので、スペクトル上の大きなピークから核種を選定、組合せることにより同定をする必要がある。

⑤評価

・ 過渡平衡核種、短半減期核種の取扱い

過渡平衡核種、短半減期核種の取扱いについては、「4.3.2 減衰補正」の改訂案に関して、さらに議論が必要であることから、その結論を踏まえた上での記載となる。

なお、減衰補正を適用した結果、膨大な数値となるおそれがあり、そのまま報告することにより生じる混乱を勘案する必要がある。十分に検討した上で、減衰補正を適用しない測定時の放射能として評価することも必要である。

・ データの評価

測定で得られた人工放射性核種の放射能濃度のみでデータの妥当性を確認することは難しいといえる。しかしながら、人工放射性核種の放射能比を確認することは、データの妥当性を判断する材料となり得る。人工放射性核種の環境への放出量の情報を把握し、かつ、人工放射性核種の放射能比のデータを蓄積して、データを評価する必要がある。なお、短半減期核種を含む放射能比の場合は、減衰補正を考慮した評価をする必要がある。

また、同一もしくは同様な試料の測定結果のデータベースを利用して評価することも有効である。この場合、人工放射性核種ではなく、天然放射性核種の放射能濃度に着目することとなる。同一もしくは同様な試料中の天然放射性核種濃度はほぼ同程度であることが期待できる。それぞれの結果を比較して、著しく差がないことを確認することにより、データの妥当性を判断することも可能となる。

⑥その他

・ ブランク試料

大気浮遊じん用の活性炭カートリッジやろ紙には、製造過程において、原子力施設事故等により環境中に放出された人工放射性核種が混入し、製品として出荷されるものがある。このため、試料の測定結果には製造過程における混入寄与分を含んでいることとなる。そのため、ブランク試料を予め測定しておき、その寄与分を測定結果から差引く必要がある。

また、製造ロット番号が変わった場合には、改めてブランク試料を測定し、その寄与分を評価し直す必要がある。

(4) 改訂案

検討事項を本文及び解説として追加する。内容としては以下のとおりである。

- ・ 環境試料のスクリーニング
- ・ 室内の養生、汚染確認、作業者及び器具の相互汚染対策
- ・ 測定試料調製の実例、測定試料の相互汚染対策
- ・ 測定における注意事項、測定作業者の確認事項（チェック項目の追記）
- ・ 検出器の汚染対策、除染方法、エネルギー校正
- ・ 汚染を除去できないバックグラウンドの取扱い
- ・ 解析における注意事項、測定作業者の確認事項（チェック項目の追記）
- ・ ピークの誤認、不明ピークの取扱い
- ・ 過渡平衡核種、短半減期核種の取扱い
- ・ データの評価
- ・ その他としてブランク試料の取扱い

4.3.7 国内調査

緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法を改訂するにあたり、以下の項目について、検討内容が適切であるか、実用的であるかの意見交換を行った。また、福島第一原発事故における経験や対応等をマニュアル改訂案に反映させるためにヒアリングを行った。

- ①核データライブラリに登録すべき核種とその整理方法について
- ②減衰補正の実際の適用例とその適用の考え方について
- ③自己吸収補正の実際の適用例について
- ④カスケードファイルに登録されている核種とサムピークの実例について
- ⑤その他（検出器の汚染対策や除染対策など）

以下に示す機関について国内調査を実施し、意見交換やヒアリングの結果をもとに、検討結果として本業務報告書内に取りまとめた。

- ①日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所

調査日：平成 29 年 2 月 2 日（木）13 時 30 分から 16 時 30 分

調査者：（公財）日本分析センター 放射能分析事業部

γ線解析グループ 新田グループリーダー

- ②福島県環境創造センター 環境放射線センター

調査日：平成 29 年 2 月 6 日（月）13 時 00 分から 16 時 00 分

調査者：（公財）日本分析センター 放射能分析事業部

γ線解析グループ 新田グループリーダー

- ③福島県環境創造センター

調査日：平成 29 年 2 月 7 日（火）9 時 00 分から 11 時 00 分

調査者：（公財）日本分析センター 放射能分析事業部

γ線解析グループ 新田グループリーダー

- ④日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所

調査日：平成 29 年 2 月 7 日（火）14 時 00 分から 16 時 30 分

調査者：（公財）日本分析センター 放射能分析事業部

γ線解析グループ 新田グループリーダー

4.4 原子力施設等放射能調査機関連絡協議会からの意見について

本事業を実施するに当たって、マニュアル案等の主なユーザとなる地方公共団体の分析機関に対して、原子力施設等放射能調査機関連絡協議会を通じて、2回意見聴取した。詳細については参考資料3に示す。

5. まとめ

原子力規制委員会では、環境放射能の水準を把握するための調査や、陸域、海域、空域の各種放射線モニタリングを実施している。また、都道府県、市町村、原子力事業者及び研究機関等、さまざまな主体が放射線モニタリングを実施している。これらの結果の精度を保つため、及び今後万が一原子力災害が発生した際に適切な放射線モニタリングを実施できるようにするためには、標準的な分析・測定手法を定義する必要がある。

本年度については、以下の項目について、業務を実施した。業務に当たっては、専門的知見を持つ者から意見を聴取する等、技術的妥当性に留意するとともに、適宜、原子力規制庁担当官と調整を行った。

- ・ 平成 27 年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業の改訂案に対する追加的事項の検討
- ・ 緊急時における放射性ストロンチウム分析法の作成
- ・ 測定法 No. 29「緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法」の検討
- ・ 報告書の作成

(1) 平成 27 年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業の改訂案に対する追加的事項の検討

測定法 No. 17「連続モニタによる環境 γ 線測定法」を見直し、改訂案を作成した。

検討事項として、異なる測定地上高間の測定値をシミュレーションにより表現し、その結果から考察を行った。また、周辺線量当量に対応するための機器改修に関する調査を実施した。

(2) 緊急時における放射性ストロンチウム分析法の作成

放射性ストロンチウム分析法については、測定法 No. 2「放射性ストロンチウム分析法」が存在するが、化学分析・測定に時間を要するため緊急時の運用には不向きであり、緊急時における放射性ストロンチウム分析法を作成した。

マニュアル案を作成するに当たっては、文献調査、分析目標レベルの確認、分析法の妥当性の確認、分析所要時間や検出下限値の確認、クロスチェック、様々な環境試料への適用性の確認、迅速な前処理方法の検討等を実施した。

(3) 測定法 No. 29「緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法」の検討

現行の測定法 No. 29「緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法」は、福島第一原発事故の教訓を取り込み、更なる実効性の向上を図るために、核データライブラリ、減衰補正、自己吸収補正、サム効果補正等について検討した。

(4) 報告書の作成

(1) 平成 27 年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業の改訂案に対する追加的事項の検討、(2) 緊急時における放射性ストロンチウム分析法の作成について

は、検討結果を取りまとめるとともに、マニュアル案を作成した。(1) の改訂案及び(2) のマニュアル案を作成するに当たっては、JIS 原案作成のための手引（第 17 版）を参考にした。また、(3) 測定法 No. 29「緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法」の検討については、マニュアル改訂に必要な検討項目を取りまとめた。本事業を実施するに当たって、マニュアル案の主なユーザとなる地方公共団体の分析機関に対して、原子力施設等放射能調査機関連絡協議会を通じて、意見聴取した。その他に、マニュアル改訂及び検討に必要な事項を調査するために、国内の分析機関を訪問するとともに、文献を入手して調査を実施した。

本業務を実施するに当たっては、学識経験者等からなる委員会「放射能測定法シリーズ改訂検討委員会」を設置し、検討内容及び検討結果、マニュアル改訂案等について、総合的な評価・検討を行った。

参考資料1 平成28年度 放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨

平成 28 年度 第 1 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨

1. 日時 平成 28 年 12 月 5 日(月) 10 時 00 分～12 時 00 分

2. 場所 航空会館 501+502 会議室

3. 出席者(敬称略)

委員長 中村尚司 東北大学 名誉教授

委員 阿部琢也 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

阿部幸雄 福島県環境創造センター

木村芳伸 青森県原子力センター

黒澤忠弘 国立研究開発法人産業技術総合研究所

斎藤公明 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

玉柿励治 福井県原子力環境監視センター

津田修一 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

長岡鋭 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

藤田博喜 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(大野剛 学習院大学 欠席)

原子力規制庁 久野聡企画官、山田純也課長補佐、佐々木潤地方調整専門官、及川真
司環境放射能対策官、土田幹隆解析評価専門官、西内幹智係員

オブザーバー 応用光研工業(株)(鎌田貴志)、セイコー・イージーアンドジー(株)(水井雅之、
板津英輔)、ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ(株)(鈴木敦雄、酒井国
博)、(株)日立製作所(中嶋貴士)

事務局 公益財団法人 日本分析センター

森本、磯貝、太田(裕)、伴場、新田、前山、平出、松田、伊藤

4. 議題

(1) 放射能測定法シリーズ改訂の実施計画及び現状調査について

(2) その他

5. 配付資料

資料 1-1 平成 28 年度放射能測定法シリーズ改訂検討委員会 委員名簿

資料 1-2 平成 28 年度放射能測定法シリーズ改訂事業について

資料 1-3 連続モニタによる環境 γ 線量率測定法について

資料 1-4 緊急時の放射性ストロンチウム分析法について

資料 1-5 緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法について

6. 議事概要

- (1) 議事に先立ち、日本分析センター森本理事より、本委員会の委員長を中村委員に依頼した。
- (2) 事務局から資料 1-2 に基づき、平成 28 年度放射能測定法シリーズ改訂事業について説明があった。
- (3) 事務局から資料 1-3 に基づき、連続モニタによる環境 γ 線量率測定法について説明があり、以下の意見等があった。
 - ①シミュレーション計算結果について、局舎上と地上高 1m の値の比が 15%程度なら許容できるが、40%は大きすぎるという感じを受けると委員より意見があった。
 - ②原子力災害直後の状況を考えたとき、必ずしも均一に汚染されるのか、沈着が少ないかもしれない等、事故直後の状況について情報収集をしたほうがよいと委員より意見があった。
 - ③空気吸収線量と周辺線量当量の 2 つの値を測定できるのはいいことだが、ICRP において周辺線量当量の考え方を変える可能性がある。その場合でも、整合性の取れるように対処してほしいと委員より意見があった。
 - ④測定機器の改修とはどのようなことをするのかと委員より質問があった。自治体の測定機器には様々な検出器形状に対応した G(E) 関数が組み込める構成となっている。この構成を活かし複数の単位に応じた演算子を機器メーカーが作成して組み込むことを考えていると事務局より回答があった。
 - ⑤個々の測定機器の改修は可能であろうが、既に使用されている機器は何千台もあり、実際には難しいのではないかと委員より意見があった。
 - ⑥ソフト上において G(E) 関数で演算するのではなく DBM 回路の場合はどう対応するのかと委員より質問があった。現在使われている機器は G(E) 関数を用いてソフト上で演算している機種が多くを占めていると事務局より回答があった。
 - ⑦電離箱の対応はどうするのかと委員より質問があった。電離箱については新たに方法を考える必要があると事務局より回答があった。
 - ⑧測定機器の改修を行うことにより、テレメータ、ホームページへの公開システム等付随して行わなければいけないことがあることを認識してほしい。また、モニタリングポストによっては、OIL の判断に必要なものについては改修を行わなくていいのではないかと。どのようにまとめるか難しいと委員より意見があった。
 - ⑨空気吸収線量と周辺線量当量の 2 つの測定値が表示されることで、かえって混乱が起これるのではないかと委員より意見があった。平常時と緊急時の測定値の単位が異なることになるため、混乱しないように丁寧な対応をしなければいけないと事務局より回答があった。
 - ⑩事故直後はプルームが流れているので沈着とは別のシミュレーションが必要である。事故時の状況を考える必要があると委員より意見があった。福島県や日本分析センターのデータを活用して対応を検討したいと事務局より回答があった。
 - ⑪木が多いところなど様々な環境でのシミュレーション結果がほしいと委員より意見が

あった。

⑫マニュアルに、「原則として空気吸収線量と周辺線量当量の双方を計測可能な機器仕様が必要」という内容が書かれてしまうと、モニタリングの実施者として困る。また、「原則」はどの程度の強さの意味で書かれるのか、対応できる形にしてほしいと委員より意見があった。1つの理想的な状況を示したものであり、表現方法は原子力規制庁担当官とも相談したいと事務局より回答があった。

⑬マニュアルではシミュレーションを行って換算するという表記になるのかと委員より質問があった。原子力災害時に換算は行いたくない。どの程度まで許容できるかどうか議論していただきたいと事務局より回答があった。

⑭電離箱の単位換算については、事故時の高線量率を想定した対応のみ考慮すればよいのではないかと委員より意見があった。

(4) 事務局から資料 1-4 に基づき、緊急時の放射性ストロンチウム分析法について説明があり、以下の意見等があった。

①検出下限値はどの程度を想定しているのか。必要な検出下限値によって、用いる供試量やレジンの量等も決まるはずである。今のマニュアル化の方法だと、検出下限値ありきで作成が進んでおり、緊急時等に必要とされる検出下限値を担保出来るのかどうか不明である。また、測定器の校正についてはどのようにするのか。さらに、対象試料毎にマニュアル化するため、そのマニュアル化する優先順位はあるのかと委員より質問があった。検出下限値については、IAEA の分析法に準拠して設定することになる。また、測定器の校正については、Sr-89 及び Sr-90 の標準溶液で校正を行うことになるが、Sr-89 は半減期が短く、購入にかかる期間も長いことから、予め校正を行うような記載にしたい。さらに、マニュアル化の優先順位は特になく、全ての対象試料の種類に対して、マニュアル化を同時に行うと事務局より回答があった。

②標準溶液を扱うことから、管理区域を設定していないところでは校正を行わなくていいということか。Sr を加えたシンチレータを日本分析センターが販売すればいいのではないかと委員より質問があった。標準溶液でも下限数量以下なら管理区域の設定は行わなくていい。シンチレータの販売は難しいと事務局より回答があった。

③原子力規制庁は仕様書で検出下限値を決めていないのかと委員より質問があった。仕様書では検出下限値を明記していないと事務局より回答があった。試料としては土壌や水が初めではないかと考えている。海外の情報等を次回以降に示してもらいたいと原子力規制庁より回答があった。

④これまでのマニュアルでは、分析目標レベルがまず初めに記載されていると委員より意見があった。今年度完成した分析方法に基づいて、分析目標レベルが決定されることになるかと事務局より回答があった。

⑤IAEA の分析法に準拠するのであれば、本事業において何を検討するのかと原子力規制庁より質問があった。IAEA の方法は牛乳、土壌、海水試料のみである。それを参考に他の試料への適用を検討すると事務局より回答があった。

(5) 事務局から資料 1-5 に基づき、緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法について説明があり、以下の意見等があった。

①サム効果補正のライブラリーは作成するのか。分析工程における確認事項等を示した手順を作ってほしいと委員より意見があった。ライブラリーはメーカーのカスケードファイルに入っている。追加すべき核種があれば本委員会にて審議をお願いしたい。定性的な方法として、試料を検出器から離し、サムピークが減少することで確認できると事務局より回答があった。

②サム効果に限らず、緊急時におけるガンマ線スペクトル解析における確認項目が挙げられているとよいと委員より意見があった。メーカーによって操作方法が異なるため詳細情報は挙げられないが、BG ファイルや効率ファイルの確認項目を挙げることは可能であると事務局より回答があった。

③福島事故での経験を活かした内容にしてほしい。ICRP から核データに関する報告書が出ている。被ばく評価や核データにおいて整合性を確認してほしいと委員より意見があった。

④補正についてはメーカーのソフトに従うのか、方法をマニュアルに明記するのかと委員より質問があった。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」に準拠してメーカーのソフトは作られている。また、本マニュアルでも放射能測定法シリーズ No. 7 を引用していると事務局より回答があった。

⑤放射能測定法シリーズ全体を今後どのように改訂・統合していくのか。異なるマニュアルに重複した内容が見受けられる。また、核データは日本分析センターで作成し、公開した方がよいのではないかと委員より質問があった。核データはメーカーが販売しているので、今後どのようにするかは原子力規制庁担当官と相談したいと事務局より回答があった。放射能測定法シリーズについては、改訂も統合も実施したいが、福島事故での教訓も盛り込みたいと考えている。追加しながら統合するのは難しいため、まずは中身を充実させ、その後統合を行う予定であると原子力規制庁より回答があった。

7. その他

事務局より、第 2、3 回委員会は審議時間を長く取るため午後に開催予定と連絡があった。委員より、日程調整は早めに行ってほしいと意見があった。

以上

平成 28 年度 第 2 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨

1. 日時 平成 29 年 1 月 20 日(金) 14 時 00 分～16 時 35 分

2. 場所 東京国際フォーラム G610 会議室

3. 出席者(敬称略)

委員長 中村尚司 東北大学 名誉教授

委員 阿部幸雄 福島県環境創造センター

大野剛 学習院大学

木村芳伸 青森県原子力センター

黒澤忠弘 国立研究開発法人産業技術総合研究所

斎藤公明 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

玉柿励治 福井県原子力環境監視センター

津田修一 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

長岡鋭 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(阿部琢也 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 欠席)

(藤田博喜 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 欠席)

原子力規制庁 久野聡企画官、山田純也課長補佐、大平智章解析評価専門官、
及川真司環境放射能対策官、上杉正樹技術参与、西内幹智係員

オブザーバー 応用光研工業(株)(鎌田貴志)、セイコー・イージーアンドジー(株)(板津英輔)、
ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ(株)(鈴木敦雄、酒井国博)、(株)日立
製作所(杉山勇人、中嶋貴士)

事務局 公益財団法人 日本分析センター

森本、磯貝、伴場、新田、前山、平出、松田、太田(智)

4. 議題

(1) 第 1 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について

(2) 原子力施設等放射能調査機関連絡協議会からのご意見について

(3) 放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について

(4) その他

5. 配付資料

資料 2-1 平成 28 年度放射能測定法シリーズ改訂検討委員会 委員名簿

資料 2-2 平成 28 年度第 1 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨(案)

資料 2-3 測定法シリーズ改訂に関する放調協意見

資料 2-4 連続モニタによる環境 γ 線量率測定法について

資料 2-5-1 緊急時の放射性ストロンチウム分析法について

資料 2-5-2 緊急時の放射性ストロンチウム分析法

資料 2-6 緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法について

6. 議事概要

(1) 第 1 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について

事務局から資料 2-2 に基づき、第 1 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について説明があり、以下の意見等があった。一部語句を修正することとなり、了承された。

- ①委員より、「複数の単位に応じた回路」を「複数の単位に応じた演算子」に変更すべきとの意見があった。
- ②委員より、DBM 回路も G(E) 関数を用いているので、表記を変更する必要があるとの意見があった。

(2) 原子力施設等放射能調査機関連絡協議会からのご意見について

玉柿委員から資料 2-3 に基づき、測定法シリーズ改訂に関する放調協意見について説明があり、以下の意見等があった。

- ①委員より、放調協意見に対して事務局からの回答はないのかとの質問があった。事務局より、各項目（連続モニタ、緊急時ストロンチウム、緊急時ガンマ線スペクトル解析）の審議の中で説明すると回答があった。

(3) 放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について

・連続モニタによる環境 γ 線量率測定法について

議事に先立ち、原子力規制庁・山田課長補佐から、連続モニタにおける OIL の判断に用いる測定値の取り扱いについて説明があった。現在検討している単位の換算及び測定地上高 1m の測定値への補正方法については、放射能測定法シリーズが技術的な内容を定める文書であり行政的な判断を伴う内容を記載すべきではないこと、また、周辺線量当量の定義が今後見直される動きがあり国際動向を注視しつつ慎重に対応していく必要があるという理由からこれらについては、測定法シリーズとは切り離して本委託事業の事業報告書の付録として記載することとする。

以上の方針に基づき、事業を進めることとなった。

事務局から資料 2-4 に基づき、連続モニタによる環境 γ 線量率測定法について説明があり、以下の意見等があった。

- ①委員より、マニュアル原案の修正案における測定単位において、空気吸収線量 (Gy) だけでなく周辺線量当量 (Sv) も記載すべきであるとの意見があった。事務局より、空気吸収線量と周辺線量当量を併記することで修正すると回答があった。
- ②委員より、放射性物質の形状について質問があり、放射性物質の地表面への沈着は必ずしも粒子状だけではないので、“粒子状”という表記を削除すべきであるとの意見があった。事務局より、“粒子状”という表記を削除することで修正すると回答があった。

- ③委員より、測定地上高についてはマニュアルの参考資料として記載されているとユーザにとって便利だが、マニュアルには記載されないのかとの質問があった。原子力規制庁より、本委託事業の事業報告書の付録として記載すると回答があった。
- ④委員より、委託事業の事業報告書は一般公開されるのかとの質問があった。原子力規制庁より、委託事業の事業報告書は国会図書館に収録されるため閲覧可能であると回答があった。
- ⑤委員より、測定地上高について、マニュアルの一部として記載されている方がユーザにとって利便性が高いのでマニュアルの付録として記載してはどうかとの意見があった。原子力規制庁より、本件は委託事業の事業報告書の付録として記載し、今後、測定法シリーズ化するにあたって検討したいと回答があった。
- ⑥委員より、ユーザが困らないようなマニュアルを作成してほしいとの意見があった。

・緊急時の放射性ストロンチウム分析法について

事務局から資料 2-5-1 及び資料 2-5-2 に基づき、緊急時の放射性ストロンチウム分析法について説明があり、以下の意見等があった。

- ①原子力規制庁より、本年度中にマニュアル原案を作成する必要があるが、マニュアルとして成立する分析対象試料と検討が必要な分析対象試料とを明示してほしいと要望があった。
- ②原子力規制庁より、放射性ストロンチウムの分析法は国際的にも未だ検討段階であるが、国内外の迅速法の現状はどうなっているのかと質問があった。事務局より、文献調査により国内外の状況を調査中であると回答があった。
- ③原子力規制庁より、学会や大学関係者にも分析方法の妥当性について確認してほしいと要望があった。
- ④原子力規制庁より、分析目標レベルの範囲を示すことが重要であるとの意見があった。
- ⑤原子力規制庁より、緊急時の初期、中期、復旧期における対象核種と分析目標レベルの範囲を示したほうがよいとの意見があった。事務局より、指針等がない状況において対象核種や目標レベルを設定することは難しいと回答があった。
- ⑥原子力規制庁より、土壌の分解法として酸抽出、全分解、熔融を記載しているがすべて必要なのかと質問があった。事務局より、IAEA が採用しているため、マニュアルに記載したほうがよいと回答があった。
- ⑦原子力規制庁より、分析供試量が土壌は 0.5g から 1g、海水は 100mL と少なめであるが、試料の代表性は担保できるのかと質問があった。事務局より、IAEA の方法に準拠しており、迅速に分析ができるという利点があると回答があった。
- ⑧原子力規制庁より、海水 1L を原案の方法で実施するのは可能かと質問があった。事務局より、供試量を 1L にする場合は従来法を選択したほうがよいと回答があった。
- ⑨原子力規制庁より、クロスチェックは実施しないのかと質問があった。事務局より、委託実施期間が短いのでクロスチェックを実施するのは難しいと回答があった。
- ⑩原子力規制庁より、クロスチェックは必ず実施するよう指示があった。またクロスチェ

ックを実施しないのであれば、クロスチェックが不必要であることをこの検討委員会の場でオーソライズし、クロスチェックを実施しなくてもよいという技術的妥当性を示した原案を作成するよう指示があった。

- ⑪原子力規制庁より、固相抽出法については交換容量が少ないので試料量の限界を示したほうがよいとの意見があった。
- ⑫原子力規制庁より、抽出クロマトグラフィー用レジンについては1社のみではなく他社にも同様の製品があるので記載方法を工夫してほしいとの要望があった。
- ⑬委員より、緊急時においては土壌の報告単位は「Bq/kg」のみではなく、降下量としての考え方「Bq/m²」も示すほうがよいとの意見があった。
- ⑭委員より、抽出クロマトグラフィー用レジンは保管期間が長くなると性能が劣化するため、注意事項として追記する必要があるとの意見があった。
- ⑮委員より、ICP-MSを用いた放射性ストロンチウムの測定は、ストロンチウム 89 の計測ができないという欠点があるが、分析所要時間が短く下限値が検討中の分析法の下限値よりも 100 倍程度低いという利点がある上、汎用性も高いため解説として記載するのがよいとの意見があった。
- ⑯委員より、ストロンチウム 89 とストロンチウム 90 の比が異なる場合においても問題なく計測できるのかとの質問があった。事務局より、問題なく計測可能であると回答があった。
- ⑰委員より、マニュアルには供試量などの分析条件を示すほうがよいとの意見があった。事務局より、分析条件についてマニュアルに示す予定であると回答があった。
- ⑱委員より、本委員会は示された結果について議論すべき場であるので、委託事業の仕様に関わる事項については原子力規制庁と分析センターで別途協議してほしいとの意見があった。

・緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法について

事務局から資料 2-6 に基づき、緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法について説明があり、以下の意見等があった。

- ①原子力規制庁より、ガンマ線スペクトル解析における懸念事項について、マニュアル原案にどのような方向性をもって記載するかとの質問があった。事務局より、マニュアル原案の作成は来年度に予定されているので、詳細は未定であると回答があった。
- ②原子力規制庁より、ガンマ線スペクトル解析における懸念事項に対する対応について今後の委員会で議論してほしいとの要望があった。
- ③委員より、減衰補正の事例について示すことは意義があるとの意見があった。
- ④委員より、チェルノブイリ事故ではコバルト 60 やユウロピウム 152 の検出事例もあることを認識しておいてほしいとの意見があった。
- ⑤委員より、福島事故の経験について聞き取り調査を行い、事故対応の経験を活かした内容のマニュアルにしてほしいとの要望があった。福島のマップ事業では放射能分析の実績のない機関を含む 22 機関が分析を実施し、成果がでている。東大の下村先生が調査

結果をまとめられ、筑波大の恩田先生がプロトコルを出しているので参考になる。

⑥委員より、試料採取についてマニュアル記載するのかとの質問があった。原子力規制庁より、緊急時の採取法については新規マニュアルとして作成する予定なので、本マニュアル原案には含めないと回答があった。

⑦委員より、本マニュアルにおいて ENSDF の核データを採用しているのはなぜかとの質問があった。事務局より、現行のマニュアルで ENSDF を採用しているためであると回答があった。

(4) その他

事務局より、第3回委員会を3月2日に東京国際フォーラムで開催する旨連絡があった。

以上

平成 28 年度 第 3 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨

1. 日時 平成 29 年 3 月 2 日(木) 13 時 30 分～16 時 35 分

2. 場所 東京国際フォーラム G610 会議室

3. 出席者(敬称略)

委員長 中村尚司 東北大学 名誉教授

委員 阿部琢也 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

大野剛 学習院大学

木村芳伸 青森県原子力センター

黒澤忠弘 国立研究開発法人産業技術総合研究所

斎藤公明 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

玉柿励治 福井県原子力環境監視センター

津田修一 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

長岡鋭 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

藤田博喜 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(阿部幸雄 福島県環境創造センター 欠席)

原子力規制庁 久野聡企画官、山田純也課長補佐、大平智章解析評価専門官、
及川真司環境放射能対策官、西内幹智係員

オブザーバー 応用光研工業(株)(鎌田貴志)、セイコー・イージーアンドジー(株)(板津英輔、
阿部敬朗)、ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ(株)(鈴木敦雄)、(株)日立
製作所(中嶋貴士)

事務局 公益財団法人 日本分析センター

森本、磯貝、伴場、新田、前山、平出、松田、伊藤

4. 議題

(1) 第 2 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について

(2) 放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について

(3) その他

5. 配付資料

資料 3-1 平成 28 年度第 2 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会 要旨案

資料 3-2-1 放射能測定法シリーズ改訂事業 業務報告書案

(連続モニタによる環境 γ 線測定法の該当部分)

資料 3-2-2 連続モニタによる環境 γ 線測定法 マニュアル原案

資料 3-3-1 緊急時における放射性ストロンチウム分析法について

資料 3-3-2 緊急時における放射性ストロンチウム分析法 マニュアル原案

資料 3-4-1 放射能測定法シリーズ改訂事業 業務報告書案
(緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法の該当部分)

資料 3-4-2 減衰補正の考え方について

資料 3-5 放射能測定法シリーズ改訂事業 業務報告書の概要

参考資料 1 平成 28 年度第 1 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会 要旨

参考資料 2 測定シリーズ改訂案に関する意見

6. 議事概要

(1) 第 2 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について

事務局から資料 3-1 に基づき、第 2 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について説明があり、了承された。

(2) 放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について

・連続モニタによる環境 γ 線測定法について

事務局から資料 3-2-1 に基づき、連続モニタによる環境 γ 線測定法について説明があり、以下の意見等があった。

- ①委員より、4.1.1(3)「人工放射性核種だけが測定対象にはならず」の表現を再考するよう意見があった。
- ②委員より、資料 3-2-1 の 4 章と付録の関係について質問があった。事務局より、どちらも本委託事業の業務報告書の内容であり、マニュアル原案には記載しないとの回答があった。委員より、ユーザにとってわかりやすいマニュアルにしてほしいとの意見があった。原子力規制庁より、今後、測定法シリーズ化するにあたって検討したいとの回答があった。
- ③委員より、図 4.2 の(a)及び(b)の説明がないため、追加したほうがよいとの意見があった。事務局より、説明を追加するとの回答があった。
- ④委員より、付録 2 のタイトルについて、「単位」と表現することに違和感があり、「測定量」といったほうが適当なのではないかとの意見があった。事務局より、文言については検討するとの回答があった。
- ⑤委員より、マニュアル原案において「 $\mu\text{Sv/h}$ 」が使われており、マニュアル原案単独では説明がなくわかりにくいため、単位に関する解説は換算や補正を含めなくても、その意味については記載してほしいとの意見があった。事務局より、測定法原案本文の 7.4 項に記載がある旨の回答があった。
- ⑥委員より、付録 2.1 において、空気カーマと空気吸収線量は等しいと記載しているが、空気吸収線量はベータ線を含んでいるため、「ガンマ線に限った場合」を加え、厳密に表現したほうがよいとの意見があった。事務局より、追記するとの回答があった。
- ⑦委員より、福島事故の際、Cs が沈着した場合の比が 1.25 になるという事例があるので追記してほしいとの意見があった。事務局より、事例を確認し追記するとの回答があっ

た。

・緊急時における放射性ストロンチウム分析法について

原子力規制庁から、緊急時における放射性ストロンチウム分析法に関し、以下の説明があった。分析法の妥当性確認のためのクロスチェックについて、青森県、福島県、福井県、原子力機構の関係者に協力いただいたこと、放射能測定法シリーズに記載する対象試料については牛乳、土壌、海水としたこと、土壌試料の分析法については平成 29 年 5 月 31 日に、海水試料の分析法については平成 30 年に IAEA から公表される予定であること、検討段階にある土壌と海水の分析法の記載についてはクロスチェック中の分析法である旨を記載すれば利用、Web 公開可能と IAEA から了解を得ているとのことであった。

事務局から参考資料 2 に基づき、測定シリーズ改訂案に関する意見について説明があった。

事務局から資料 3-3-1 及び資料 3-3-2 に基づき、緊急時における放射性ストロンチウム分析法について説明があり、以下の意見等があった。

- ①委員より、これまでの測定法シリーズのように、他のマニュアル（液体シンチレーション）を引用しないのかとの質問があった。原子力規制庁より、最新の知識や技術を取り入れ、他のマニュアルも参照しつつ作成してもらうとの回答があった。
- ②委員より、前回の委員会要旨だけでは、試料の代表性が 1g では担保できないという質問に対する回答が的確ではないとの意見があった。事務局より、試料が少量の場合に行う処理について大野委員から意見をもらっているのでマニュアル原案等に追記したいとの回答があった。委員より、福島事故の際、放射性物質が不均質であった結果等を加えてほしいとの意見があった。原子力規制庁より、試料の代表性が担保できないことを考慮して、供試量を 1g から 5g に変更したとの回答があった。
- ③委員より、資料 3-3-1 のスライド番号 30 の図では、全ての結果に低めの傾向があるのではないかと意見があった。事務局より、結果について、En 数が 1 以下であることを確認しており、表現方法を考えるとの回答があった。
- ④事務局より、資料 3-3-1 及び資料 3-3-2 の土壌の検出下限値に訂正があり、供試量 5g における検出下限値は Sr-89、90 でそれぞれ 180、120 Bq/kg 乾土であるとの説明があった。
- ⑤委員より、Sr と Cs の比が大きく異なる場合、Sr の測定に Cs が影響するのではないかと質問があった。事務局より、Sr と Cs の比が大きく異なる場合には影響する可能性があるとの回答があった。
- ⑥委員より、クロスチェックのホット試験で添加する放射エネルギーが MDA に比べてかなり大きいため、クロスチェックの目的は測定結果が一致することを確認したいのかとの質問があった。事務局より、測定結果が一致することを確認したいとの回答があった。
- ⑦委員より、大気浮遊じんの前処理方法でろ紙を細かく刻んでいるが、周囲を汚染するおそれがあるため、そのまま灰化できないのかとの意見があった。事務局より、検討したいとの回答があった。

- ⑧原子力規制庁より、緊急時における放射性ストロンチウム分析法については業務報告書案がなく、いつ委員に見てもらうのかとの質問があった。事務局より、クロスチェックは3月下旬に行うので、その部分は除いてどこかのタイミングで確認してもらいたいとの回答があった。
- ⑨委員より、Sr-90 に比べて検出下限値は200倍程低下するが、ICP-MSでもSr-89が分析できるとの意見があった。
- ⑩委員より、マニュアルの序論において、分析目標レベル等をどのように決めたか詳しく記述してほしいとの意見があった。
- ⑪委員より、土壌のみ担体溶液の量が多いのはなぜかとの質問があった。事務局より、IAEAに準拠したとの回答があった。
- ⑫委員より、前処理方法は、マイクロウェーブ分解装置による全分解のほうが迅速なのではないか。マニュアル原案に記載してほしいとの意見があった。事務局より、日本分析センターでの検討段階において、分解容器が変形したためマニュアル原案に記載していないが、記載について検討したいと回答があった。
- ⑬委員より、回収率は算出するだけで補正はしないのか。補正しないのであれば、判断基準を設けるべきだとの意見があった。事務局より、マニュアル原案の計算式で回収率を用いて計算しているとの回答があった。
- ⑭委員より、Sr resin カートリッジはカラムより短時間で分離・精製ができるが、海水試料のみに採用されているのはなぜかとの質問があった。事務局より、IAEAの分析方法に準拠しており、土壌試料などに用いる場合は共存元素が多いため、より多くのカートリッジを必要とするためであるとの回答があった。
- ⑮委員より、「Sr と Y の分離時間を記録する」では、分離を開始した時間なのか、分離にかかった時間なのかわかりにくいため、「時刻」という表現にしたほうがよいとの意見があった。
- ⑯委員より、放射能濃度の計算に用いる計算式を解説に記載して、計算式の導出についても詳しく記載してほしいとの意見があった。事務局より、詳しく記載できるようであれば記載したいとの回答があった。

・緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法について

事務局から資料3-4-1及び資料3-4-2に基づき、緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法について説明があり、以下の意見等があった。

- ①委員より、デッドタイムが増加した際、補正式の使用を勧めるかとの質問があった。事務局より、アンプの波形整形が最も大きな要素になると思うが、アナログ/デジタルの違いなどあり難しいと回答した。
- ②委員より、資料3-4-1の図4.3.12に表4.3.8の①～⑨の番号を加えるとわかりやすいとの意見があった。事務局より、了解したとの回答があった。
- ③委員より、資料3-4-1の図4.3.22において、ポケット線量計は除外したほうがよいとの意見があった。事務局より、了解したとの回答があった。

- ④委員より、減衰補正は採取日に補正するののかとの質問があった。事務局より、試料採取日か試料購入日が妥当だろうとの回答があった。委員より、それらの記述はあるのかとの質問があった。事務局より、現在のところないが、試料採取日や試料購入日であれば、厚労省等の他省庁との考え方とも合うとの回答があった。
- ⑤委員より、資料 3-4-2 の案 1~3 について、核種やケースによってどのくらいのばらつきを持つのか算出すれば判断基準になるのではないかと意見があった。事務局より、様々な機関の担当者に意見を聞いてきたが、緊急時にはばらつき等を考えて判断する余裕はないとのことだった。一律に決めていたほうがよいと考えるとの回答があった。委員より、すでにあるデータを使って、案 1~3 を評価してみてもどうかとの意見があった。事務局より、事例として計算をしてみるととの回答があった。
- ⑥委員より、資料 3-4-2 について、案 3 がいいと思うが、減衰補正について苦労した経験もあるので、メーカーに対応してもらいたいとの意見があった。オブザーバーより、減衰補正の過程で λt が 64 を超えると係数が大きくなり計算処理ができなくなるとの意見があった。委員より、核種によって減衰補正をするかどうかを指定できると使いやすいとの意見があった。
- ⑦委員より、資料 3-4-2 の案 3 において、減衰補正は子孫核種は行わず親核種のみを補正するということかとの質問があった。事務局より、実際は両方とも行わないと考えていたが、そのほうがよければそうするとの回答があった。
- ⑧原子力規制庁より、資料 3-4-2 の案 1~3 については、他省庁との整合が重要であり、この場で決めることに懸念があるとの意見があった。委員より、マニュアル原案には決めずに併記するというかとの質問があった。原子力規制庁より、最も良い案があればいいが、一長一短なため決められないだろうとの回答があった。委員より、案 1~3 についてすでにあるデータで評価を行い、他省庁についても調査を行い、来年度に決めたほうがよいとの意見があった。

・放射能測定法シリーズ改訂事業業務報告書の概要について

事務局から資料 3-5 に基づき、放射能測定法シリーズ改訂事業業務報告書の概要について説明があり、以下の意見等があった。

- ①委員より、今回示されなかったストロンチウム部分も含め、いつ資料として送付されるのかとの質問があった。事務局より、調整中だがあまり遅くならないところで送付したいとの回答があった。

(4) その他

原子力規制庁より、来年度のマニュアル原案の取り扱いについて説明があった。

以上

参考資料 2 調査文献リスト

連続モニタによる環境γ線測定法

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
1	放射性Csによる土壌汚染環境での各種建物による線量低減	古田 琢哉, 高橋 史明	Isotope News 2014年11月号	727	2014	27-29
2	環境に沈着した事故由来の放射性セシウムからのガンマ線に対する建物内の遮蔽効果及び線量低減効果の解析	古田 琢哉, 高橋 史明	JAEA-Research 2014-003		2014	
3	A computational approach using reflection boundaries for dose calculation in infinitely expanded radiation field	Takuya Furuta, Fumiaki Takahashi	Radiation Protection Dosimetry	167	2015	392-398
4	External exposure to Radionuclides in air, water, and soil	Keith F. Eckerman, Jeffrey C. Ryman	Federal Guidance Report	12	1993	
5	Study of radiation dose reduction of buildings of different sizes and materials	Takuya Furuta, Fumiaki Takahashi	Journal of Nuclear Science and Technology	52	2015	897-904
6	Wash-off effects in urban areas	K. Mueck, F. Steger	Radiation Protection Dosimetry	37	1991	189-194
7	Weathering of radiocaesium contamination on urban streets, walls and roofs	K. G. Andersson, J. Roed, C. L. Fogh	Journal of Environmental Radioactivity	62	2002	49-60
8	チェルノブイリ原発事故による環境への影響とその修復：20年の経緯		国際原子力機関 (IAEA)		2006	
9	福島周辺における空間線量率の測定と評価 Ⅲ 環境γ線の特徴と被ばく線量との関係	斎藤 公明, 遠藤 章	RADIOISOTOPES	63	2014	585-602
10	原子力又は放射線の緊急事態に対する準備と対応		IAEA 安全基準シリーズ No. GS-R-2		2009	
11	緊急時被ばく状況における人々の防護のための委員会勧告の適用		ICRP Publication 109		2008	
12	原子力事故または放射線緊急事態後の長期汚染地域に居住する人々の防護に対する委員会勧告の適用		ICRP Publication 111		2008	
13	環境放射線線量率の高精度測定用14L球形電離箱	長岡 鋭, 斎藤 公明, 森内 茂	JAERI-M 91-067		1991	
14	講座 核融合施設における放射線計測の基礎 2. 放射線計測の基礎	飯本 武志, 上養 義朋, 河野 孝央	The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research	89	2013	629-634
15	福島周辺における空間線量率の測定と評価 Ⅱ 放射線防護で用いられる線量の意味と特徴	斎藤 公明, 山本 英明	RADIOISOTOPES	63	2014	519-530
16	福島周辺における空間線量率の測定と評価 Ⅳ 環境中における空間線量率測定の実際	津田 修一, 吉田 忠義, 安藤 真樹, 松田 規宏, 三上 智, 谷垣 実, 奥村 良, 高宮 幸一, 佐藤 信浩, 関 暁之, 武宮 博, 斎藤 公明	RADIOISOTOPES	64	2015	275-289
17	「福島第一原子力発電所事故に伴う放射能物質の第二次分布状況等に関する調査研究」成果報告書		文部科学省, 平成 23年度放射能測定 調査委託事業		2012	
18	「福島第一原子力発電所事故に伴う放射能物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書		文部科学省, 平成 24年度放射能測定 調査委託事業		2013	

緊急時における放射能ストロンチウム分析法

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
1	Time optimization of ^{90}Sr determinations: sequential measurement of multiple samples during decay of ^{90}Y	Stina Holmgren Rondahl, Annika Tovedal, Oscar Björnham, Henrik Ramebäck	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	311	2017	1143-1148
2	Method for rapid screening analysis of Sr-90 in edible plant samples collected near Fukushima, Japan	Hikaru Amano, Hideaki Sakamoto, Norikatsu Shiga, Kaori Suzuki	Applied Radiation and Isotopes	112	2016	131-135
3	Separation of Yttrium-90 from Strontium-90 by Extraction Chromatography Using Combined Sr Resin and RE Resin	Pipat Pichetapong, Wiranee Sriwiang, Uthaiwan Injarean	Energy Procedia	89	2016	366-372
4	Rapid and simultaneous determination of Strontium-89 and Strontium-90 in seawater	Michelle Tayeb, Xiongxin Dai, Sandra Sdraulig	Journal of Environmental Radioactivity	153	2016	214-221
5	Rapid isolation method for radioactive strontium using Empore™ Strontium Rad Disk	Zijian Zhang, Kazuhiko Ninomiya, Naruto Takahashi, Takashi Saito, Kazuyuki Kita, Yoshiaki Yamaguchi, Atsushi Shinohara	Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences	16	2016	15-21
6	Determination of strontium-90 from direct separation of yttrium-90 by solid phase extraction using DGA Resin for seawater monitoring	Hirofumi Tazoe, Hajime Obata, Takeyasu Yamagata, Zinichi Karube, Hisao Nagai, Masatoshi Yamada	Talanta	152	2016	219-227
7	Strontium-90 activity concentration in soil samples from the exclusion zone of the Fukushima daiichi nuclear power plant	Sarata Kumar Sahoo, Norbert Kavasi, Atsuyuki Sorimachi, Hideki Arae, Shinji Tokonami, Jerzy Wojciech Mietelski, Edyta Łokas, Satoshi Yoshida	Scientific Reports	6	2016	doi:10.1038/srep23925
8	Application of Sr Specific Resin on Enrichment, Separation and Determination of ^{90}Sr in Environmental Water	WU Lian-sheng, ZENG Fan, WANG Ying, CHEN Chao-feng, YANG Li-tao, SHANGGUAN Zhi-hong	Journal of Nuclear and Radiochemistry	37	2015	476-483
9	Rapid determination of ^{90}Sr from ^{90}Y in seawater	M. Tayeb, X. Dai, E.C. Corcoran, D.G. Kelly	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	304	2015	1043-1052
10	Rapid determination of ^{90}Sr in seawater samples	Sherrod L. Maxwell, Brian K. Culligan, Jay B. Hutchison, Robin C. Utsey, Daniel R. McAlister	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	303	2015	709-717
11	A comparison of ^{90}Sr determination methods using separation on on AnaLig® Sr-Oigel and non-destructive direct beta spectrometry	Alojz Slaninka, Silvia Dulanská, Ondrej Slávik, Lubomír Mátel	Radiation Physics and Chemistry	112	2015	56-60
12	Direct strontium determination in aqueous samples - Version 1.0-14/09/15 - TKI		TRISKEM		2015	
13	水中 ^{90}Sr 放射能濃度の ^{90}Y β線測定による迅速簡便測定法 Rapid and Simple Measurement Method of ^{90}Sr Concentration in Water by Measuring β-rays from ^{90}Y	平山 英夫・近藤 健次郎・海野 泰裕・松村 宏・岩瀬 広・柚木 彰・佐々木 慎一	日本原子力学会論文誌	14	2015	141-150
14	DEPOSITION OF STRONTIUM-90 IN SOIL AND VEGETATION AT VARIOUS LOCATIONS SURROUNDING THE FUKUSHIMA DAIICHI NUCLEAR POWER PLANT	Joseph E. Ball	Thesis for the Degree of Master of Science, Colorado State University		2015	
15	Separation and Analysis of Sr-90 and Zr-90 for Nuclear Forensic Applications	Ana Paula Zattoni	www.theses.ulaval.ca/2015/31654/31654.pdf		2015	
16	2014 Atomic spectrometry update- A review of advances in environmental analysis	Owen T. Butler, Warren R. L. Cairns, Jennifer M. Cook and Christine M. Davidson	Journal of Analytical Atomic Spectrometry		2014	doi:10.1039/C4JA90062F

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
17	誘導結合プラズマ質量分析法における同位体分析技術の進歩と環境地球化学への応用 Advances in Isotope Ratio Analysis by ICP-MS and Its Application to Environmental Geochemistry	大野 剛	Journal of Mass Spectrometry Society of Japan	62	2014	103-113
18	Rapid determination of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ in water samples by liquid scintillation and Cherenkov counting	Jennifer M. Olfert, Xiongxin Dai, Sheila Kramer-Tremblay	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	300	2014	263-267
19	ISO Standards on Test Methods for Radioactivity Monitoring of Food and the Environment	Dominique Calmet	Radiation Emergency Medicine	3	2014	7-20
20	Eichrom Resin Shelf-life	Daniel McAlister, Jill Bryant, Sarah Tejchma, Ed Rush	Radiobioassay & Radiochemical Measurements Conference http://www.eichrom.com/PDF/04-mcalister-sr-resin-shelf-life-rmc2014-final.pdf		2014	
21	Development and characterisation of a new Sr selective resin for the rapid determination of ^{90}Sr in environmental water samples	J. J. Surman, J. M. Pates, H. Zhang, S. Happel	Talanta	129	2014	623-628
22	ICP質量分析法による放射性 ^{90}Sr の迅速分析とその適用事例	高貝 慶隆・古川 真・亀尾 裕・鈴木 勝彦	展望	721	2014	2-7
23	液体シンチレーションカウンタを用いたチェレンコフ光測定による放射性Sr (^{89}Sr 及び ^{90}Sr) 測定法の検討	大野 峻史	新潟県放射線監視センター年報	12	2014	29-34
24	^{90}Sr and ^{89}Sr in seawater off Japan as a consequence of the Fukushima Dai-ichi nuclear accident	N. Casacuberta, P. Masqué, J. Garcia-Orellana, R. Garcia-Tenorio, K.O. Buesseler	Biogeosciences	10	2013	3649-3659
25	Rapid Simultaneous Determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Milk: A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting		IAEA		2013	
26	Determination of ^{90}Sr in food using extraction chromatography and LSC	Eliane S. C. Temba, Ângela M. Amaral, Aluísio S. Reis Júnior, Roberto P. G. Monteiro	International Nuclear Atlantic Conference 2013		2013	24-29
27	A rapid method for determining strontium-90 in urine samples	Xiongxin Dai, Yuhang cui, Sheila Kramer-Tremblay	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	296	2013	363-368
28	Rapid determination of radiostrontium in large soil samples	Sherrod L. Maxwell, Brian K. Culligan, Patrick J. Shaw	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	295	2013	965-971
29	Rapid determination of radiostrontium in seawater samples	Sherrod L. Maxwell, Brian K. Culligan, Robin C. Utsey	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	298	2013	867-875
30	Rapid determination of ^{90}Sr in urine samples using AnaLig® Sr-01	Silvia Dulanská, Boris Remenec, Ján Bilohuštín, Miroslav Labaš ka, Dušan Galanda	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	295	2013	2189-2192
31	Concentration of strontium-90 at selected hot spots in Japan	Georg Steinhäuser, Viktoria Schauer, Katsumi Shozugawa	PLOS one http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0057760		2013	
32	Rapid radiochemical analyses in support of Fukushima Nuclear Accident - 13196	Sherrod L. Maxwell, Brian K. Culligan, Jay B. Hutchison	WM2013 Conference, February 24-28, 2013, Phoenix, Arizona, USA		2013	

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
33	Water quality — Strontium 90 and strontium 89 — Test methods using liquid scintillation counting or proportional counting		ISO 13160:2012		2012	
34	環境試料中放射性ストロンチウム分析法の改善	川崎 将垂・渡部 陽子	Japanese Journal of Health Physics	47	2012	124-129
35	2011 Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: summary of regional radioactive deposition monitoring results	Katsumi Hirose	Journal of Environmental Radioactivity	111	2012	13-17
36	Statistical suitability testing of 3M Empore™ Sr disc and AnaLig® Sr-01 use for ⁹⁰ Sr determination	Silvia Dulanská, Boris Remenec, Dušan Galanda, Mojmir Némec, Livia Dvorská	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	293	2012	965-971
37	ICP発光分光分析装置を用いた安定ストロンチウム分析におけるマトリックスの影響	土田 智宏・本間 漢太郎・熊倉 健吾	新潟県放射線監視センター年報	10	2012	49-54
38	A comparison of classical ⁹⁰ Sr separation methods with selective separation using molecular recognition technology products AnaLig® SR-01 gel, 3M Empore™ Strontium Rad Disk and extraction chromatography Sr® Resin	Jarmila Ometáková, Silvia Dulanská, L'ubomir Matel, Boris Remenec	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	290	2011	319-323
39	Separation of Sr in combination of ion exchange and Sr resin with alcohol-nitric acid solution and rapid determination of ⁹⁰ Sr in wine and soil samples	Željko Grahek, Astrid Gojmerac Ivšić, Nikolina Krljan, Marijana Nodilo	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	289	2011	437-449
40	Rapid radiochemical method for total radiostrontium (Sr-90) in water for environmental remediation following homeland security events		U. S. Environmental Protection Agency		2011	
41	Activity standardization by means of a new TDCR-Čerenkov counting technique	K. Kossert	Applied Radiation and Isotopes	68	2010	1116-1120
42	Determination of radiostrontium isotopes: A review of analytical methodology	Nóra Vajda, Chang-Kyu Kim	Applied Radiation and Isotopes	68	2010	2306-2326
43	Rapid separation of actinides and radiostrontium in vegetation samples	Sherrod L. Maxwell III, Brian K. Culligan, Gray W. Noyes	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	286	2010	273-282
44	Determination of ⁹⁰ Sr in environment of district Swat, Pakistan	T. Jabbar, K. Khan, M. S. Subhani, P. Akhter	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	279	2009	377-384
45	APPLICATION OF CALCIUM CARRIER TO AVOID LOSSES OF ⁹⁰ Sr DURING THE CHEMICAL PREPARATION OF LIQUID SAMPLE FOR LIQUID SCINTILLATION SPECTROMETRY	Izabela Chmielewska, Stanisław Chafupnik, Edit Bokori	Proceedings of the International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry		2009	53-57
46	APPLICATION OF LIQUID SCINTILLATION COUNTING TECHNIQUE TO THE DETERMINATION OF ⁹⁰ Sr IN MILK SAMPLES	Irene Lopes, Maria José Madruga	Proceedings of the International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry		2009	331-337
47	Determination of ⁹⁰ Sr in preparedness: Optimization of total analysis time for multiple samples	A. Tovedal, U. Nygren, H. Ramebäck	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	276	2008	357-362
48	Rapid screening of ⁹⁰ Sr activity in water and milk samples using Cherenkov radiation	K.C. Stamoulis, K.G. Ioannides, D.T. Karamanis, D.C. Patiris	Journal of Environmental Radioactivity	93	2007	144-156

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
49	Rapid determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in radioactive waste using Sr extraction disk and beta-ray spectrometer	Y. Kameo, A. Katayama, A. Fujiwara, T. Haraga, M. Nakashima	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	274	2007	71-78
50	Ecological half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems	G. Pröhl, S. Ehken, I. Fiedler, G. Kirchener, E. Klemt, G. Zibold	Journal of Environmental Radioactivity	91	2006	41-72
51	Determination of radioactive strontium in seawater	Željko Grahek, Martina Rožmarić Mačefat	Analytica Chimica Acta	534	2005	271-279
52	Methodology for determination of radiostrontium in milk: a review	Stéphane BRUN, Yann KERDALLAN, Bernadette BOURSIER, Jean-Marc FREMY, Françoise JANIN	Lait	83	2003	1-15
53	Separation of Sr from Ca, Ba and Ra by means of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and $\text{Ba}(\text{Ra})\text{Cl}_2$ or $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ for the determination of radiostrontium	Qingjiang Chen, Ziaolin Hou, Yixuan Yu, Henning Dahlgaard, Sven P. Nielsen	Analytica Chimica Acta	466	2002	109-116
54	Cherenkov counting of yttrium-90 in the dry state: correlations with phosphorus-32 Cherenkov counting data	Michael F. L'Annunziata, Charles J. Passo Jr.	Applied Radiation and Isotopes	56	2002	907-916
55	Measurement of ^{90}Sr in aqueous samples using liquid scintillation counting with full spectrum DPM method	M. H. Lee, K. H. Chung, G. K. Choi, C. W. Lee	Applied Radiation and Isotopes	57	2002	257-263
56	Factor of merit and minimum detectable activity for ^{90}Sr determinations by gas-flow proportional counting or Cherenkov counting	F. Vaca, G. Manjón, S. Cuéllar, M. García-León	Applied Radiation and Isotopes	55	2001	849-851
57	Simultaneous measurement of ^{89}Sr and ^{90}Sr in aqueous samples by liquid scintillation counting using the spectrum unfolding method	K. H. Hong, Y. H. Cho, M. H. Lee, G. S. Choi, C. W. Lee	Applied Radiation and Isotopes	54	2001	299-305
58	Application of a low-background gamma-ray spectrometer to the determination of ^{90}Sr	J. W. Mietelski, W. Męczyński	Applied Radiation and Isotopes	53	2000	121-126
59	Rapid $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ determination in water samples using a sequential injection method	J. J. Mateos, E. Gómez, F. Garcías, M. Casas, V. Cerdá	Applied Radiation and Isotopes	53	2000	139-144
60	Isolation of yttrium and strontium from soil samples and rapid determination of ^{90}Sr	Željko Grahek, Ivan Eskinja, Katarina Košutić, Štefica Cerjan-Stefanović	CROATICA CHEMICA ACTA	73	2000	795-807
61	Detection limits for ^{90}Sr , Pu, Am and Cm in soil and pasture vegetation shortly after a nuclear accident	Ingvar Friberg, Raine Vesanen	Applied Radiation and Isotopes	51	1999	229-237
62	Measurement of ^{90}Sr in Bone Ash	T. Altitzoglou, J. J. Larosa, C. Nicholl	Applied Radiation and Isotopes	49	1998	1313-1317
63	A fast method for the determination of strontium-89 and strontium-90 in environmental samples and its application to the analysis of strontium-90 in Ukrainian soils	M. Filss, W. Botsch, J. Handl, R. Michel	Radiochimica Acta	83	1998	81-92
64	Rapid procedures for the determination of radioactive strontium isotopes in food and environmental samples	S. Abbadi, H. Diercks, A. Knöchel, R. Sen Gupta, K. Tödter	Kerntechnik	62	1997	91-95
65	A rapid method for determining strontium-90 in contaminated samples of soil and plant	J. Tormos, A. Jouve, D. Revy, R. Millan-Gomez, R. Zanon, M. J. Erario	Journal of Environmental Radioactivity	27	1995	193-206
66	Determination of barium and strontium in calcium-containing matrices using high-performance chelation ion chromatography	P. Jones, M. Foulkes, B. Paull	Journal of Chromatography A	673	1994	173-179
67	Rapid determination of ^{90}Sr in foodstuffs and environmental material	A. Ghods, M. Hussain, A. Mirna	Radiochimica Acta	65	1994	271-274

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
68	Monitoring and surveillance in accident situations Post-Chernobyl action	K. Chadwick, H. Menzel	Commision of the European Communities		1993	
69	THE APPLICATION OF NOVEL EXTRACTION CHROMATOGRAPHIC MATERIALS TO THE CHARACTERIZATION OF RADIOACTIVE WASTE SOLUTIONS	E. Ph. HORWITZ, M. L. DIETZ, R. CHIARIZIA	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	161	1992	575-583
70	A novel strontium-selective extraction chromatographic Resin. Solvent Extr Ion Exch 10:313	Mark L Dietz	Solvent Extraction and Ion Exchange		1992	
71	チェレンコフ光測定と液体シンチレーション測定による89Srと90Srの迅速測定法の検討 Rapid Measurement of 89Sr and 90Sr by Čerenkov and Liquid Scintillation Counting	清水 武彦・林 直美・坪 憲・野村 保・大和 愛司・岩井 誠	保健物理	20	1985	139-143
72	A rapid method for the determination of radiostrontium in river water	J. Lapid, M. Miinster, S. Farhi, M. Eini, L. Lalouche	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	86	1984	321-326
73	The Radiochemistry of Barium, Calcium, and Strontium	D. N. SUNDERMAN and C. W. TOWNLEY	Subcommittee on Radiochemistry National Academy of Sciences - National Research Council		1960	
74	USE OF ION EXCHANGE RESINS TO CONCENTRATE RADIONUCLIDES FOR SUBSEQUENT ANALYSIS	Bernd Kahn, Edwin R. Eastwood and William J. Lacy	Chemistry- Radiation and Radiochemistry		1957	
75	Determination of strontium-90 and strontium-89 in environmental samples by liquid scintillation counting	L. Salonen	http://www.lsc-international.org/conf/pfiles/lsc1977_017.pdf			
76	Rapid Methods for Actinides and Sr-89/90 in Environmental Samples	Sherrod L. Maxwell	http://www.trisken-international.com/iso_album/rapid_determination_of_actinides_and_sr-89_90_in_the_environmental_samples.pdf			
77	Determination of radiostrontium released from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant through extraction chromatography and liquid scintillation counting	Akihiro MAEKAWA, Noriyuki MOMOSHIMA, Shinji SUGIHARA and Toshiya TAMARI	Proceedings of the International Symposium on Environmental monitoring and dose estimation of residents after accident of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/anzen_kiban/outcome/Proceedings_for_Web/Topics_2-09.pdf		2012	
78	Measurement of Strontium-90 in Environmental Samples by Using Rapid Sr Sampler	Shing-Fa Fang, Tzu-Wen Wang and Jih-Hung Chiu	Proceeding of the 10th IRPA international		2000	
79	The Radiochemistry of Barium, Calcium, and Strontium	By D. N. SUNDERMAN and C. W. TOWNLEY	Subcommittee on Radiochemistry National Academy of Sciences- National Research Council		1960	95-118
80	TOXICOLOGICAL PROFILE FOR STRONTIUM	U. S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Regist			2004	249-255

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
81	Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency		IAEA-TECDOC-1092		1999	
82	Criteria for use in preparedness and response for a nuclear or radiological emergency		IAEA-Safety Standards for protecting people and the environment	GSG-2	2011	

緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法－１

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
1	2011 Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: summary of regional radioactive deposition monitoring results	Katsumi Hirose	Journal of Environmental Radioactivity	111	2012	13-17
2	An air-mass trajectory study of the transport of radioactivity from Fukushima to Thessaloniki, Greece and Milan, Italy	A. Ioannidou, E. Giannakaki, M. Manolopoulou, S. Stous, E. Vagena, C. Papastefanou, L. Gini, S. Manenti, F. Groppi	Atmospheric Environment	75	2013	163-170
3	An overview of Fukushima radionuclides measured in the northern hemisphere	P. Thakur, S. Ballard, R. Nelson	Science of the Total Environment	458-460	2013	577-613
4	Anthropogenic radionuclides in the atmosphere observed at Tsukuba: characteristics of the radionuclides derived from Fukushima	Taeko Doi, Kazuyoshi Masumoto, Akihiro Toyoda, Atsushi Tanaka, Yasuyuki Shibata, Katsumi Hirose	Journal of Environmental Radioactivity	122	2013	55-62
5	Arrival time and magnitude of airborne fission products from the Fukushima, Japan, reactor incident as measured in Seattle, WA, USA	J. Diaz Leon, D.A. Jaffe, J. Kaspar, A. Knecht, M.L. Miller, R.G.H. Robertson, A.G. Schubert	Journal of Environmental Radioactivity	102	2011	1032-1038
6	Artificial radionuclides in surface air in Finland following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident	Ari-Pekka Leppänen, Aleksi Mattila, Markku Kettunen, Riitta Kontro	Journal of Environmental Radioactivity	126	2013	273-283
7	Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident	Genki Katata, Masakazu Ota, Hiroaki Terada, Masamichi Chino, Haruyasu Nagai	Journal of Environmental Radioactivity	109	2012	103-113
8	Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part II: verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion	Hiroaki Terada, Genki Katata, Masamichi Chino, Haruyasu Nagai	Journal of Environmental Radioactivity	112	2012	141-154
9	Atmospheric radionuclides transported to Fukuoka, Japan remote from the Fukushima Dai-ichi nuclear power complex following the nuclear accident	N. Momoshima, S. Sugihara, R. Ichikawa, H. Yokoyama	Journal of Environmental Radioactivity	111	2012	28-32
10	Characterization of brown rice as a certified reference material for Fukushima accident-related radioactivity measurements	Yasuhiro Unno, Mayumi Hachinohe, Shioka Hamamatsu, Setsuko Todoriki, Akira Yunoki, Tsutomu Miura	Applied Radiation and Isotopes	87	2014	485-488
11	Comparison of radioactivity data measured in PM ₁₀ aerosol samples at two elevated stations in northern Italy during the Fukushima event	Laura Tositti, Erika Brattich, Giorgia Cinelli, Alberto Previti, Domiziano Mostacci	Journal of Environmental Radioactivity	114	2012	105-112
12	Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts	Georg Steinhäuser, Alexander Brandl, Thomas E. Johnson	Science of the Total Environment	470-471	2014	800-817
13	Deposition of fission and activation products after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident	Katsumi Shozugawa, Norio Nogawa, Motoyuki Matsuo	Environmental Pollution	163	2012	243-247
14	Depth distribution of ¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, and ¹³¹ I in soil profile after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident	Hiroaki Kato, Yuichi Onda, Mengistu Teramaga	Journal of Environmental Radioactivity	111	2012	59-64

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
15	Detailed deposition density maps constructed by large-scale soil sampling for gamma-ray emitting radioactive nuclides from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident	Kimiaki Saito, Isao Tanihata, Mamoru Fujiwara, Takashi Saito, Susumu Shimoura, Takaharu Otsuka, Yuichi Onda, Masaharu Hoshi, Yoshihiro Ikeuchi, Fumiaki Takahashi, Nobuyuki Kinouchi, Jun Saegusa, Akiyuki Seki, Hiroshi Takemiya, Tokushi Shibata	Journal of Environmental Radioactivity	139	2015	308-319
16	Dispersion of Fukushima radionuclides in the global atmosphere and the ocean	P. P. Povinec, M. Gera, K. Holy, K. Hirose, G. Lujanienė, M. Nakano, W. Plastino, I. Sykora, J. Bartok, M. Gazák	Applied Radiation and Isotopes	81	2013	383-392
17	Distribution of oceanic ¹³⁷ Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model	Daisuke Tsumune, Takaki Tsubono, Michio Aoyama, Katsumi Hirose	Journal of Environmental Radioactivity	111	2012	100-108
18	Emergency Monitoring of Environmental Radiation and Atmospheric Radionuclides at Nuclear Science Research Institute, JAEA Following the Accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant	Takehisa OHKURA, Tetsuya OISHI, Mitumasa TAKI, Yukio SHIBANUMA, Masamitsu KIKUCHI, Hitoshi AKINO, Yasuaki KIKUTA, Masatsugu KAWASAKI, Jun SAEGUSA, Masahiro TSUTSUMI, Hitoshi OGOSE, Shunsuke TAMURA and Tadahirow SAWAHATA	JAEA-Data/Code	2012-010	2012	37
19	Environmental mobility of ^{110m} Ag: lessons learnt from Fukushima accident(Japan) and potential use for tracking the dispersion of contamination within coastal catchments	Hugo Lepage, Olivier Evrard, Yuichi Onda, Jeremy Patin, Caroline Chartin, Irène Lefèvre, Philippe Bonté, Sophie Ayrault	Journal of Environmental Radioactivity	130	2014	44-55
20	Estimation of immediate fallout after the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant by using HPGe detector and EGS5 code	Yasuhiro Unno, Akira Yunoki, Yasushi Sato, Yoshio Hino	Applied Radiation and Isotopes	81	2013	348-352
21	Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident	P. Bailly du Bois, P. Laguionie, D. Boust, I. Korsakissok, D. Didier, B. Fiévet	Journal of Environmental Radioactivity	114	2012	2-9
22	Evidence of the radioactive fallout in the center of Asia(Russia) following the Fukushima Nuclear Accident	A. Bolsunovsky, D. Dementyev	Journal of Environmental Radioactivity	102	2011	1062-1064
23	Food safety regulations: what we learned from the Fukushima nuclear accident	Nobuyuki Hamada, Haruyuki Ogino	Journal of Environmental Radioactivity	111	2012	83-99
24	Measurement of soil contamination by radionuclides due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident and associated estimated cumulative external dose estimation	S. Endo, S. Kimura, T. Takatsuji, K. Nanasawa, T. Imanaka, K. Shizuma	Journal of Environmental Radioactivity	111	2012	18-27
25	Monitoring of aerosols in Tsukuba after Fukushima Nuclear Power Plant incident in 2011	Yutaka Kanai	Journal of Environmental Radioactivity	111	2012	33-37
26	Numerical simulation on the long-term variation of radioactive cesium concentration in the North Pacific due to the Fukushima disaster	Hideyuki Kawamura, Takuya Kobayashi, Akiko Furuno, Norihisa Usui, Masafumi Kamachi	Journal of Environmental Radioactivity	136	2014	64-75
27	Outline of the national mapping projects implemented after the Fukushima accident	Kimiaki Saito, Yuichi Onda	Journal of Environmental Radioactivity	139	2015	240-249
28	Particle size distribution of radioactive aerosols after the Fukushima and the Chernobyl accidents	Helena Malá, Petr Rulík, Vera Bečková, Jan Mihalík, Miriam Slezáková	Journal of Environmental Radioactivity	126	2013	92-98

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
29	Radiation measurements in the Chiba Metropolitan Area and Radiological aspects of fallout from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants accident	Hikaru Amano, Masakazu Akiyama, Bi Chunlei, Takao Kawamura, Takeshi Kishimoto, Tomotaka Kuroda, Takahiko Muroi, Tomoaki Odaira, Yuji Ohta, Kenji Takeda, Yushu Watanabe, Takao Morimoto	Journal of Environmental Radioactivity	111	2012	42-52
30	Radioactivity release from the Fukushima accident and its consequences: A review	Yang-Hyun Koo, Yong-Sik Yang, Kun-Woo Song	Progress in Nuclear Energy	74	2014	61-70
31	Radiocesium and radioiodine in soil particles agitated by agricultural practices: Field observation after the Fukushima nuclear accident	N. Yamaguchi, S. Eguchi, H. Fujiwara, K. Hayashi, H. Tsukada	Science of the Total Environment	425	2012	128-134
32	Remobilization of radiocesium on riverine particles in seawater: The contribution of desorption to the export flux to the marine environment	Hyoe Takata, Kazuyuki Hasegawa, Shinji Oikawa, Natsumi Kudo, Takahito Ikenoue, Ryosuke S. Isono, Masashi Kusakabe	Marine Chemistry	176	2015	51-63
33	Size distribution studies of ¹³⁷ Cs in river water in the Abukuma Riverine system following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident	Aya Sakaguchi, Kazuya Tanaka, Hokuto Iwatani, Haruka Chiga, Qiaohui Fan, Yuichi Onda, Yoshio Takahashi	Journal of Environmental Radioactivity	139	2015	379-389
34	Soil sampling and analytical strategies for mapping fallout in nuclear emergencies based on the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident	Yuichi Onda, Hiroaki Kato, Masaharu Hoshi, Yoshio Takahashi, Minh-Long Nguyen	Journal of Environmental Radioactivity	139	2015	300-307
35	Spatial variations of low levels of ¹³⁴ Cs and ¹³⁷ Cs in seawaters within the Sea of Japan after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident	Mutsuo Inoue, Hisaki Kofuji, Shinji Oikawa, Takuma Murakami, Masayoshi Yamamoto, Seiya Nagao, Yasunori Hamajima, Jun Misonoo	Applied Radiation and Isotopes	81	2013	340-343
36	Specific activity and activity ratios of radionuclides in soil collected about 20 km from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: Radionuclide release to the south and southwest	Keiko Tagami, Shigeo Uchida, Yukio Uchihori, Nobuyoshi Ishii, Hisashi Kitamura, Yoshiyuki Shirakawa	Science of the Total Environment	409	2011	4885-4888
37	The transfer of radiocesium from the bark to the stemflow of chestnut trees (<i>Castanea crenata</i>) contaminated by radionuclides from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident	Yoshito Sasaki, Hironobu Abe, Katsuaki Mitachi, Takayoshi Watanabe, Yasuo Ishii, Tadafumi Niizato	Journal of Environmental Radioactivity	161	2016	58-65
38	核実験監視用放射性核種観測網による大気中の人工放射性核種の測定	米沢 仲四郎, 山本 洋一	ぶんせき	8	2011	451-458
39	福島原発事故に伴う飯館村の放射能汚染調査	遠藤 暁, 今中 哲二, 林 剛平, 菅井 益郎, 小澤 祥司, 梶本 剛	放射化学	29	2014	15-25
40	福島第一原子力発電所事故に係る特別環境放射線モニタリング結果 —中間報告（空間線量率、空気中放射性物質濃度、降下じん中放射性物質濃度）—	古田 定昭, 住谷 秀一, 渡辺 均, 中野 政尚, 今泉 謙二, 竹安 正則, 中田 陽, 藤田 博喜, 水谷 朋子, 森澤 正人, 國分 祐司, 河野 恭彦, 永岡 美佳, 横山 裕也, 外間 智規, 磯崎 徳重, 根本 正史, 檜山 佳典, 小沼 利光, 加藤 千明, 倉知 保	IAEA-Review	2011-035	2011	89
41	Ge検出器-γ線スペクトロメトリーによる玄米認証標準物質中 ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs及び ⁴⁰ Kの分析 —第1部 放射能濃度の定量—	米沢 仲四郎	分析化学	65	2016	645-655
42	Ge検出器-γ線スペクトロメトリーによる玄米認証標準物質中 ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs及び ⁴⁰ Kの分析 —第2部 不確かさ評価—	米沢 仲四郎, 城野 克広, 原賀 智子	分析化学	66	2017	27-37

緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法-2

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
1	Activation of gold by the neutrons from the JCO accident	Kazuhisa Komura, Ahmed M Yousef, Yoshimasa Murata, Toshiaki Mitsugashira, Riki Seki, Tetsuji Imanaka	Journal of Environmental Radioactivity	50	2000	77-82
2	Levels of radionuclides in plant samples collected around the uranium conversion facility following the criticality accident in Tokai-mura	Tadaaki Ban-nai, Yasuyuki Muramatsu, Keiko Tagami, Shigeo Uchida, Satoshi Yoshida, Shinzo Kimura, Yoshito Watanabe	Journal of Environmental Radioactivity	50	2000	131-143
3	Measurements of ⁶⁰ Co in spoons activated by neutrons during the JCO criticality accident at Tokai-mura in 1999	J. Gasparro, M. Hult, K. Komura, D. Arnold, L. Holmes, P.N. Johnston, M. Laubenstein, S. Neumaier, J.-L. Reyss, P. Schillebeeckx, H. Tagziria, G. Van Britsom, R. Vasselli	Journal of Environmental Radioactivity	73	2004	307-321
4	Neutron-induced radionuclides in soil from the JCO campus by non-destructive γ -ray spectrometry	Y. Murata, T. Muroyama, H. Kofuji, M. Yamamoto, K. Komura	Journal of Environmental Radioactivity	50	2000	69-76
5	Passive gamma-ray spectrometry for the determination of total fission events in the JCO criticality accident '99 in Tokai	Toshiaki Mitsugashira, Mitsuo Hara, Takashi Nakanishi, Tsutomu Sekine, Riki Seki, Sadao Kojima	Journal of Environmental Radioactivity	50	2000	21-26
6	Radioactive contamination from the JCO criticality accident	H Koide, T Imanaka, K Kobayashi, K. Ogino	Journal of Environmental Radioactivity	50	2000	123-130
7	Radioactivity of ⁵¹ Cr in stainless steel collected from residences in the JCO neighborhood	S Endo, N Tosaki, K Shizuma, M. Ishikawa, J. Takada, S. Suga, K. Kitagawa, M. Hoshi	Journal of Environmental Radioactivity	50	2000	83-88
8	Radionuclides in aerosol samples collected after the criticality accident in the JCO uranium conversion facility	Taeko Doi, Takashi Uehiro	Journal of Environmental Radioactivity	50	2000	119-122
9	Report on the preliminary fact finding mission following the accident at the nuclear fuel processing facility in Tokaimura, Japan	INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA	IAEA-TOAC	—	1999	35
10	Residual neutron-induced radionuclides in a soil sample collected in the vicinity of the criticality accident site in Tokai-mura, Japan: A Progress Report	Takashi Nakanishi, Risa Hosotani, Kazuhisa Komura, Toshiharu Muroyama, Hisaki Kofuji, Yoshimasa Murata, Shinzo Kimura, Sarata Kumar Sahoo, Hidenori Yonehara, Yoshito Watanabe, Tada-aki Ban-nai	Journal of Environmental Radioactivity	50	2000	61-68
11	Thermal neutron fluence from ultra low-level γ -ray spectrometry of spoons activated during the JCO criticality accident at Tokai-mura in 1999	Mikael Hult, María José Martínez Canet, Peter N. Johnston, Kazuhisa Komura	Journal of Environmental Radioactivity	60	2002	307-318
12	JCO臨界事故における原研の活動	JCO臨界事故調査支援原研タスクグループ	JAERI-Tech	2000-074	2000	216
13	JCO臨界事故に係る環境モニタリング結果（1999年9月30日～11月2日）（業務報告）	核燃料サイクル開発機構 東海事業所	JNC TN8440	2001-004	2001	62

緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法-3

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
1	PROCEEDING OF THE SECOND STEERING CONFERENCE RELATING TO THE "AGREEMENT ON THE IMPLEMENTATION OF RESEARCH AT THE CHERNOBYL CENTER FOR INTERNATIONAL RESEARCH" BETWEEN CHESIR AND JAERI	Toshi NAGAOKA, Orihiko TOGAWA, Shigeru MORIUCHI, S.I. RYBALKO, A.K. SUKHORUCHKIN and S.V. KAZAKOV	JAERI-Conf	94-005	1994	99
2	PROCEEDING OF THE WORKSHOP ON THE RESULTS OF THE COOPERATIVE RESEARCH BETWEEN JAERI AND CHESIR CONCERNING THE STUDY ON ASSESSMENT AND ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL RADIOLOGICAL CONSEQUENCES AND VERIFICATION OF AN ASSESSMENT SYSTEM NOVEMBER 16-17, 1999, TOKYO	Hikaru AMANO and Kimiaki SAITO	JAERI-Conf	2000-016	2001	205
3	ソ連チェルノブイル原子力発電所事故に伴う特別環境放射能調査	動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所	PNCT N8420	86-10	1986	166
4	再処理施設周辺環境放射線監視年報 1986年（1月～12月）	動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所	PNC SN8440	87-08	1987	153

緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法-4

文献 番号	タイトル	著者	出典	号数	発行年	ページ
1	Cosmic ray-induced background in Ge-spectrometry	G. Heusser	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B	83	1993	223-228
2	2012年原子力学会春の年会 企画セッション 「評価済核構造データファイルENSDFとその応用」	遠藤 章	核データニュース	102	2012	33-39
3	緊急時における食品の放射能測定マニュアル	厚生労働省医薬局食品保健部監視安全課	—	—	2002	39
4	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）	原子力規制庁監視情報課	—	—	2016	30
5	原子力災害対策指針（平成28年3月1日部分改正）	原子力規制委員会	—	—	2016	68
6	実用 ガンマ線測定ハンドブック	Gordon Gilmore, John D. Hemingway 米澤 仲四朗, 松江 秀明, 宮本 ユタカ, 鈴木 大輔, 安田 健一郎, 伊奈川 潤, 齋藤 陽子 共訳	日刊工業新聞社 発行	—	2002	366
7	放射能濃度等測定方法ガイドライン	環境省	廃棄物関係ガイドライン	第五部	2013	68

緊急時における放射性ストロンチウム分析法
文献調査結果

文献番号	対象核種	対象試料	供試量	分離精製方法	測定法	測定時間	回収率 (%)	所要時間	下限值	特記事項
2	Sr-90	大気エアロゾル	—	試料 →酸抽出 →固相抽出 →陽イオン交換 ・Sr回収率をICP-MSで測定	LSC(チェレンコフ測定)	14日間	80%以上	約14日間 (前処理:4時間、 分離精製2.5時間、 測定14日間)	0.004Bq/試料	・Quantulus使用 ・Pb-210を除去
5	Sr-90	食用植物	0.0365kg~ 0.45kg 乾物	試料 →灰化 →塩酸抽出 →鉄共沈 →シュウ酸塩 →DGALレジン →Y-90を分離精製	LSC(チェレンコフ測定)	—	82.0~107%(Y)	3日間	14mBq/kg-wet (1kg-wet 供試量)	—
6	Sr-90 (Y-90)	海水	0.5~3L	鉄共沈 →DGALレジン →鉄共沈 →LBC ・Y回収率をICP-OESで測定	LBC	20時間	Y-90の回収率 95.5±2.3%	3試料/日	1.5mBq/L	Sr-90とY-90の放射平衡を仮定
7	Sr-90	土壌	10~15g	土壌 →乾燥 105℃ 24時間 →均質化 (>2mm) →酸抽出 (8mol/L HNO ₃) →Srレジン →LSC (安定Srの回収率測定はICP-MS利用)	LSC	記載なし(他の文献に基づく)*1	25~70%	記載なし(他の文献に基づく)*1	記載なし(他の文献に基づく)*1	*1 Kavasi, M. et al. Measurement of ⁹⁰ Sr in contaminated Fukushima soils using liquid scintillation counter. Radiat. Prot. Dosim. Doi : 10.1093/rpd/ncv282(2015)
9	Sr-90 (Y-90)	海水	1L	海水 →炭酸カルシウム共沈 →HClO共沈 →DGA-Nレジン(Yを分離・精製) →LSC(チェレンコフ) →(-部分取してシンチレータと混合) →LSC (回収率は重量法により求める)	LSC(チェレンコフ測定+液体シンチレーション測定)	1時間	88±7%	<4時間/10試料	0.11Bq/L(チェレンコフ測定) 0.18Bq/L(液体シンチレーション測定)	
10	Sr-90 (Y-90)	海水	40L	鉄共沈 →フッ化ランタン共沈 →DGALレジン(Y-90を分離・精製) →LBC (ICP-MSによるYの回収率測定)	LBC	1000分	84.2±6.8%(Y)	8時間	150 μBq/L	

文献番号	対象核種	対象試料	供試量	分離精製方法	測定法	測定時間	回収率 (%)	所要時間	下限値	特記事項
11	Sr-89, Sr-90	スミヤ試料 (5cmφ)	サンプル当り	スミヤ試料 →灰化 550℃ 18時間 →酸抽出 8時間 2回繰り返す ←Sr-85 (回収率補正用) →上澄み →蒸発乾固 →3mol/L HNO ₃ →→部分取 →AnaLig@Sr-01 →Sr-90を分離・精製 →2週間放置 (Y-90成長) →LSC測定 (チェレンコフ) (回収率はSr-85のγ線で測定)	LSC (チェレンコフ測定) 計数効率 50~60%	60分×4~5回/2週間	Sr-85使用	—	~0.05Bq/試料	非破壊測定法 (β線スペクトロメータ) との性能比較を実施
12	Sr-89, Sr-90	水	500mL	TK100L-ジン	LSCor比例計数管 or LSC (チェレンコフ)	—	—	—	—	—
13	Sr-90	水	25cm ³	なし (試料水を容器に入れるのみ)	GM計数管 (検出領域を制限して測定)	10分	—	—	1.1Bq/cm ³ (BCLレベル) 1.3cpsの場合)	—
14	Sr-90	野菜、土壌 (凍結したもの)	5~15g	HNO ₃ 還流、H ₂ O ₂ 分解 →ろ過 →Srレジン →溶離液を濃縮	LSC	6000秒	85% (野菜) 88% (土壌)	36時間	4.16cpm (土壌) 1.65cpm (野菜)	—
15	Sr-90	SrTiO ₃	—	マイクログウェーブ →レジン (AG 50W-X8 or Dowex 1-X8 or Srレジン or DGAレジン)	ICP-MS	—	91~107% (50W-X8) 81~93% (1-X8) 78% (Srレジン) 79~85% (DGAレジン)	—	—	—
18	Sr-90	水	125mL	DGA-Nレジン + Srレジン	LSC (TDORチェレンコフ)、LSC	—	92±5%	1日	—	—
21	Sr-90	水	—	TK100L-ジン	LSC	—	—	—	—	—
22	Sr-90	土壌、水	土壌 6g	土壌の分解はマイクログウェーブを使用。元素の分離はICP-MSに接続したフローインジェクションカラムと超音波ネブライザーによる	ICP-MS (四重極型)	数分	—	20分/試料	土壌 5Bq/kg 水 3Bq/L	—
23	Sr-89, Sr-90	土壌、灰	土壌 100g 灰 10g	試料 →酸抽出 or 酸分解 →炭酸塩 →シュウ酸塩 →陽イオン交換カラム →スカベンジング	LSC (チェレンコフ測定) × 2回	—	—	10日	Sr-89/Sr-90 ≧ 10 Sr-89:0.07 Bq/試料 Sr-90:0.08 Bq/試料 Sr-89/Sr-90 ≧ 0.5 Sr-89:0.06 Bq/試料 Sr-90:0.08 Bq/試料	—
25	Sr-89, Sr-90	牛乳	250mL	試料 →陽イオン交換樹脂 →炭酸塩 →Srレジン →炭酸塩	LSC (チェレンコフ測定 + ジンチェレーション測定)	100分	—	—	—	マニユアル原案中の牛乳の分析法について、参考にしたIAEAの資料。
26	Sr-90	食品	—	試料 →凍結乾燥 →灰化 →酸分解・硝酸抽出 →シュウ酸塩 →Srレジン	LSC (Quantulus)	60分	90%以上	—	0.0048Bq/g	—

文献番号	対象核種	対象試料	供試量	分離精製方法	測定法	測定時間	回収率 (%)	所要時間	下限値	特記事項
27	Sr-90	尿	20mL	試料 →TRUレジン+Srレジン	LSC(シンチレーション 測定)×2回	10分	75~93%	前処理:4時間/12 試料 測定:2回目の測 定は8日後	10Bq/L	
28	Sr-90	土壌	50g	試料 →110°C乾燥・混合・550°C燃焼 →炭抽出・乾固・塩酸溶解 →水酸化鉄沈殿・フッ化カルシウム沈殿 →Srレジンカラム	ガスフロー-比例計数 管	90分	81.0~98.6%	—	—	
29	Sr-89, Sr-90	海水	1~2L (4L、10Lも適 用可能)	試料 →Y+Feキャリア添加 →リン酸カルシウム+水酸化鉄沈殿 →硝酸で溶解後、硝酸アルミニウムを添加 し濃縮 →遠心分離 →Srレジン+DGAレジン	ガスフロー-比例計数 管	2時間	76.7~96.5%	—	9.1mBq/L(Sr-89 and/or Sr-90: 供試量2L、120 分測定) 1mBq/L(Sr-89 and/or Sr-90: 供試量6L、1000 分測定) 0.61mBq/L(Sr-90: 供試 量10L、1000分測定)	
30	Sr-90	尿	数10~500mL	試料 →リン酸カルシウム+水酸化鉄 →プレフィルタ(100~150μm, Eichrom)+ AnaLig® Sr01 gel(60~100mesh, IBC)	分離の検討実験では Sr-85をGeで測定 Sr-90の定量は LSC(チェレンコフ測 定)	—	60~100%	Y-90の成長を見る ため、2週間以上 にわたって繰り返し 測定する	0.12Bq/L	
31	Sr-90	土壌、植物(葉、草、 針葉樹葉)	—	試料 →Srキャリア、濃硝酸、過酸化水素を添加 して混合・加熱(環流) →ろ過・残さは酸分解して完全に溶液化 →Srレジン(100~150μm) →0.05mol/L硝酸で溶離 →蒸発乾固して0.01mol/L硝酸で溶解	LSC(シンチレーション 測定)	1000分×2回	92.4~98.2% (回収率 はSr-85のGe測定に よる)	測定は化学分離 直後2週間以上 たった後の2回測 定する	—	事故後(2011.12~2012.7)に東日 本沿岸地域で採取した土壌、植 物の調査論文。
32	Sr-89, Sr-90	土	①1.5g ②50g	① アルカリ溶融 →水酸化物沈殿 →フッ化カルシウム沈殿 →イオン交換樹脂 ② 炭抽出 →水酸化鉄沈殿 →フッ化カルシウム沈殿 →イオン交換樹脂	ガスフロー-比例計数 管	—	①ave. 77.2 % ②ave. 89.3 % 89.6 %	(10日後に測定)	① <1pCi ②	
33	Sr-89, Sr-90	水	—	—	LSC 比例計数管(PC)	—	—	—	—	測定法の紹介のみ
36	Sr-90	Liquid test sample from NPL 2003 9.631 Bq/g 2005 10.189 Bq/g	0.5mL	Sr Rad Disk or AnaLig® Sr-01	TRICARB 2900 TR(PerkinElmer)	90分(4~5回)	—	—	—	
37	Sr(安定)	灰(杉葉)	灰1g	試料 →硝酸・塩酸分解 →炭抽出・乾固・塩酸溶解 →過酸化水素分解 →塩酸分解 →硝酸溶解	ICP-OES	—	—	—	—	

文献番号	対象核種	対象試料	供試量	分離精製方法	測定法	測定時間	回収率 (%)	所要時間	下限値	特記事項
38	Sr-90	陸水	30mL	試料 →2mol/L硝酸 →Sr Rad Disk吸着 →0.05mol/L Na ₄ EDTA溶離	LSC(チェレンコフ測定)	—	96%	—	—	回収率Sr-85
38	Sr-90	陸水	30mL	試料 →>1mol/L硝酸 →Sr Analig® Sr-01吸着 →0.05mol/L Na ₄ EDTA溶離	LSC(チェレンコフ測定)	—	97~99%	—	—	回収率Sr-85
38	Sr-90	陸水	30mL	試料 →8mol/L硝酸 →Srレジン吸着 →0.05mol/L硝酸溶離	LSC(チェレンコフ測定)	—	89%	—	—	回収率Sr-85
38	Sr-90	陸水	50mL	試料 →炭酸塩 →8mol/L硝酸溶離 →Srレジン吸着 →0.05mol/L硝酸溶離	LSC(チェレンコフ測定)	—	54%	—	—	回収率Sr-85
38	Sr-90	陸水	50mL	試料 →乾固 →硝酸溶解 →Y TBP抽出 →Y 2M硝酸逆抽出 →Y シュウ酸塩	$\alpha \cdot \beta$ 測定器	—	86%	—	—	回収率シュウ酸イットリウム
39	Sr-90	ワイン	20L	試料 →Srレジン吸着 →0.01mol/L硝酸溶離 →乾固 →5mol/L硝酸溶離	LSC(チェレンコフ測定)	—	60%	—	—	
39	Sr-90	土壌	10g	試料 →水または硝酸溶解 →Srレジン吸着 →0.01mol/L硝酸溶離 →乾固 →5mol/L硝酸溶離	LSC(チェレンコフ測定)	—	60%	—	—	
40	Sr-90	水	0.5L	試料 →炭酸塩 →8mol/L硝酸溶離 →Srレジン吸着 →0.05mol/L硝酸溶離 →乾固	ガスフロー- β 線測定	100分	50%	27~90時間	1.0pCi/l	回収率:硝酸ストロンチウム重量法
41	Sr-89, Y-90, (32P, 204Tl, 106Rh)	—	—	—	LSC(チェレンコフ測定)	—	—	—	—	TDGR-チェレンコフ光の測定技術
43	Sr-90, アクチノイド (Pu, Am, Cm)	野菜類	5~10g	試料 →アルカリ溶融(NaOH) →TEVALレジン、TRULレジン、DGALレジンの 複層カラムによる分離 →Srレジンによる精製	ガスフロー比例計数 管(Sr-90)、 α スベクトロメトリ (Pu, Am, Cm)	1~2	101%(Pu) 93%(Am) 97%(U) 64%(Sr) (4~6試料の平均値)	8時間	—	

文献番号	対象核種	対象試料	供試量	分離精製方法	測定法	測定時間	回収率 (%)	所要時間	下限値	特記事項
44	Sr-90	土壌 野菜類 水	灰10g 水100mL	灰試料 →酸抽出 →YをTBPIにより溶媒抽出 →ジユウ酸塩 →HClで溶解	LSCでチェレンコフ測定	200分	75~90% (Yの回収率)	—	0.03Bq/kg (dry)	採取と前処理法はIAEA Technical Report 295に基づく
45	Sr-90	水		水試料 →蒸発濃縮 →Srレジンカラムで分離	LSC (Quantulus)で 測定	—	—	—	—	試料の蒸発濃縮時にSrがガラス 器具の壁に吸着する現象を防止 するために行った検討 →Caキヤリアの添加が有効
46	Sr-90	牛乳	1L	牛乳 →灰化 →ジユウ酸塩→炭酸塩 →Srレジンカラムで分離	LSC	80分	92.6% (5試料の平均)	—	0.012Bq/L (バックグラウンド測定 1220分の場合)	
47	Sr-90	牛乳	5mL	牛乳(5mL) →マイクローウェーブ処理装置で分解(50分) →Srレジンカラムで分離 →Yの成長を13時間待った後に測定	LSC (チェレンコフ測定)	30分	—	24時間以内に10 試料の分析可能	50Bq/L	緊急時を想定し、複数試料を同 時並行で分析する場合の最悪条 件を数字モデルにより検討
48	Sr-90	牛乳	20mL	前処理なしでそのまま20mLバイアルに入 れ、チェレンコフ測定	LSC (チェレンコフ測定)	100分 30分	—	100分 (75Bq/L) 30分 (125Bq/L)	75Bq/L 125Bq/L	迅速なスクリーニングを目的と し、チェレンコフ測定について、検 出効率、検出下限値を検討 (K-40及び他核種が共存した場 合の影響など)
49	Sr-89, Sr-90	放射性廃液	1mL	試料 →乾固 (固形物はフッ硝酸・硝酸・過塩素酸 で分解) →希硝酸溶解 →Sr-85トレーサー添加 →Sr Red Diskに捕集	低バックグラウンドβ 線スペクトロメトリー (ヒコベータ)	5000秒	93~102%	1~2日間 (作業工 程から推定)	Sr-89: 130Bq/mL, Sr- 90: 44Bq/mL	既存法 (Srレジン分離→スカベン ジング→ミルキング→LBC測定、 回収率: 82~96%、下限値: 1.1Bq/mL)と比較
51	Sr-89, Sr-90	海水	①1L ②30L	①試料 →Srレジン分離 ②試料 →炭酸塩 →Srレジン分離 or 陰イオン交換分離	LSC (チェレンコフ測定)	100分	①50% ②Srレジン: 60% (Sr)、 陰イオン交換: 65% (Sr)、70% (Y)	①1~2日間 (作業 工程から推定) ②3~4日間 (作業 工程から推定)	①不明 (高濃度試料の み適用可能) ②50mBq/L	①のSrレジンによる直接精製法 は、緊急時の高濃度試料などに 適用可能
52	Sr-89, Sr-90	牛乳	①500mL ②1L	①試料 →陽イオン交換分離 →炭酸塩 →DC18C6 (ク라운エーテル) カラム分離 →炭酸塩 →鉄共沈 →BaCrO ₄ 沈殿 →炭酸塩 ②試料 →陽イオン交換分離 →Srレジンカラム分離	①LBC測定 (ただし Sr-89とSr-90の合 算値) ②LSC測定	①1~2時間 1~2時間	①50%以上 ②80%以上	①24時間 ②24時間	①5~100mBq/L ②10~100mBq/L	レビューのため、分離精製法に ついては主だったものだけを例 挙げた。

文献番号	対象核種	対象試料	供試量	分離精製方法	測定法	測定時間	回収率 (%)	所要時間	下限値	特記事項
53	Sr-89, Sr-90	①海水 ②飲料水	①45L ②200L	試料 →Ca除去 (Srを炭酸塩、Caを水酸化物にする) →水酸化物 →炭酸塩 →鉄共沈 →シュウ酸塩	LBC測定	不明	Sr: 65.8~85.5% Y: 82.8~92.9%	約4週間 (作業工程から推定)	0.02~0.05mBq/L	各種沈殿の溶解度の差を利用して精製。発煙硝酸法と分析結果がよく一致。
55	Sr-90	スタンダード、原発施設の排水	排水300mL	試料 →Sr-85添加 (回収率測定用トレーサー) →陽イオン交換樹脂 (AG 50X-8) →Srレジン →Sr-90を分離精製 →シュウ酸塩沈殿 →回収率測定 (重量法) →LSC測定 (シンチレーション)	LSC測定 (シンチレーション測定, Tricarb-2770)	100分	76~91% (重量法)	1日以内 ※クエンチング補正測定を含まない	25.63mBq/sample, 27.37mBq/sample	LSCの解析法の比較について (full spectrum DPM vs dual label DPM)
57	Sr-89, Sr-90	スタンダード、原発施設の排水	排水1L	試料 →Sr-85添加 (回収率測定用トレーサー) →陽イオン交換樹脂 (Dowex 50WX8-200) →Sr-spec →Sr-90を分離精製 →回収率測定 (γ線スペクトロメトリー) →LSC測定 (シンチレーション)	LSC (シンチレーション測定, Tricarb-2700TR)	80分	92~95% (Sr-85, γ線スペクトロメトリー)	1日以内 (4時間 (分離)+測定) ※クエンチング補正測定を含まない	LSC: 37.4mBq/L (Sr-90), 32.2mBq/L (Sr-89)	LSCの解析法の比較について (full spectrum DPM vs dual label DPM)
58	Sr-90	スタンダード	薄い点線源状であるもの	なし	γ線スペクトロメトリー	4日	—	4日以上 (測定のみ)	0.38Bq/sample (Sr-90とY-90の合計)	LSCを用いたSr-89及びSr-90の同時測定について
59	Sr-90	水 (Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ 添加) または (塩濃度約3500mg/L程度まで添加)	40mL	試料 →自動分離システム (MnO ₂ ^{aq} /吸着を利用) →低バックグラウンド比例計数管 (Y-90を測定)	低バックグラウンド比例計数管 (Tennelec LB-1000 low background proportional counter)	—	90±10% (Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ 添加の場合), 80~% (3500mg/Lまでの塩濃度添加の場合) (Y-90放射化学的回収率)	前処理30分+測定 (記載なし)	—	自動分離システムの検討について
60	Sr-90	土壌	10g乾土	試料 →キヤリア添加 (Sr/Y) →真空乾燥 (2か月) →105°C乾燥 →陽イオン交換樹脂 (AMBERLITE IR-120) →陽イオンを吸着分離後、溶離 →陰イオン交換樹脂 (AMBERLITE CG-400 または DOWEX AG1 × 8) →Y, Srを除く陽イオンを除去 →陽イオン交換樹脂 (DOWEX 50 × 8) →洗浄液 (Y側) →回収率 (AAS) →シュウ酸塩 →LBC →溶離液 (Sr側) →回収率 (AAS)	低バックグラウンドβ線計測装置 (CANBERRA 2400) LSC (チエレンコフ光測定, PACKARD TRI CARB 2770 TR/SL)	100分	80%	LBC: 2日間, LSC: 3日間, (前処理1日+測定 (1~2日))	LSC: 4mBq/g	土壌試料からのY及びSrの分離とSr-90迅速分析について

文献番号	対象核種	対象試料	供試量	分離精製方法	測定法	測定時間	回収率 (%)	所要時間	下限値	特記事項
62	Sr-90	骨灰 (bone ash)	5g	試料 →硝酸分解 →TRUレジン →発煙硝酸 →Srレジン →回収率測定 (ICP-MS)	LSC	180-300分	10.5%	—	10Bq/kg	
63	Sr-90	土壌	100g	試料 →灰化 →硝酸分解 →硫酸塩 →炭酸塩 →(クロム酸塩) →Srレジン	LSC	6時間	50%	2週間	0.20Bq/kg	
64	Sr-90	土壌、植物、食物、牛乳、大気浮遊じん	草: 20g 土壌: 100g 牛乳: 200mL 肉: 100g	試料 →灰化 →Cs除去 (AMP) →EDTA →HPLC分離	β -HPLOC検出器	4時間	—	1.5~2日	1~3Bq (絶対量)	
65	Sr-90	土壌、植物	25g	試料 →乾燥 →塩酸、フッ化水素酸分解 (土壌) または 灰化後硝酸分解 (植物等) →クラウンエーテル	LSC	600~3600秒	70~85%	48時間	14~27Bq/kg	
67	Sr-90	ホエイ、粉乳、骨板 き肉、香辛料、骨 灰、	0.5-1kg生	試料 →灰化 (500°C) →キャリア添加 (Cs, Ba, La, Sr, Fe, Y) →硝酸分解 →硝酸・フッ化水素酸分解 →pH調整 (pH=0.3, アンモニア水) →溶媒抽出 (HDEHP or DBP or TBP) により Y-90を分離精製 →LSC測定	LSC (チェレンコフ測定、Y-90、ウィンドウモード)	100分	約90%	記載なし	約1Bq/kg	
71	Sr-89, Sr-90, Y-90	—	200ml	試料 (Sr-89, Sr-90, Y-90) →TTA-ベンゼン溶媒抽出 →Y-90を抽出 →抽出液を蒸発乾固 →塩酸溶液に溶解 →LSC測定	①チェレンコフ光測定 +液体シンチレーション測定 ②液体シンチレーション測定 (スピルオーバー法によりSr-89, Sr-90, Y-90同時測定)	30分	—	2日~3日	Sr-89/Sr-90 比: 1の場合 ①Sr-89: 4.7×10^{-8} 、Sr-90: 1.6×10^{-8} ②Sr-89: 2.9×10^{-8} 、Sr-90: 1.6×10^{-8} 単位: $\mu\text{Ci/mL}$ (他の比についても記載可能)	測定法①Sr-89<Sr-90の場合、Y-90の影響でSr-89を過大評価 測定法②Sr-89>Sr-90の場合、Sr-90を約10%過小評価
72	Sr-90, Sr-89	河川水	1L	水試料 →TTA/TOPOで抽出 (pH10.5) →逆抽出	Na(Tl)ウエル型シンチレーションカウンタ	—	—	—	—	Srの分配係数は400以上 分離係数は5000以上 Sr-89, Y-88等を測定
73	Sr	—	—	試料 →Sr担体添加 →硝酸塩 (2回) →シュウ酸塩	counting chamber	—	61% (シュウ酸ストロンチウム)	—	—	発煙硝酸を使用。 60%硝酸を用いることでCa濃度を最小にできる。
74	放射性 Cs, Sr, Co, Co	河川水	1L	試料 →陽イオン交換 (Dowex-50またはIR-120) →放射化学分析	GM計数管	—	—	—	$10^{-3} \mu\text{Ci/mL}$	樹脂の量は試料に含まれるCa量に依存

文献番号	対象核種	対象試料	供試量	分離精製方法	測定法	測定時間	回収率 (%)	所要時間	下限値	特記事項
75	Sr-90, Sr-89	①エアフィルター(ガラス繊維ろ紙) ②人骨(human bone)	—	①→化学分離(発煙硝酸) →炭酸塩 ②→化学分離(発煙硝酸、イオン交換) →炭酸塩	チェレンコフ光測定 +液体シンチレーション測定	—	①約30%	分離精製 →2時間放置 →チェレンコフ光測定 →Y-90成長を待つ →カクテル添加 →12時間放置 →LSC測定	②400分測定、Sr-90はY-90から計算の場合(pCi/sample) チェレンコフ光測定 Sr-90:0.26、Sr-89:0.37 LS測定 Sr-90:0.12、Sr-89:0.21	チェレンコフ光測定の数値効率 Sr-89:40%、Sr-90:1% BQ(ミニバイアル) チェレンコフ光測定:5cpm、LSC:8cpm、 (20mLバイアル) 7cpm、14cpm
77	Sr-89, Sr-90	土壌	2g(10gを灰化後分取)	試料 →灰化(400°C 4h) →担体添加(Sr:5mg Cs:10mg) →酸分解(20mL 硝酸 3h) →炭酸塩沈殿 →陽イオン交換 →Srレジン(5mL 8mol/L硝酸:Yを洗浄) →Srレジン(10mL 0.05mol/L硝酸:Sr分離) →2週間(Y-90の成長) →Srレジン(5mL 8mol/L硝酸 通過液→ LSC測定:90Y) →Srレジン(10mL 0.05mol/L硝酸 溶離液 →LSC測定:Sr-89, Sr-90)	LSC	1200分	70~74%	12時間(Sr分離・精製)	2.7Bq/kg	・汚染された土壌に対応可能
78	Sr-90 (Y-90)	土壌、植物、水	—	試料(土壌・植物) →灰化(400°C 8h) →塩酸・硝酸で溶解 →担体添加(Sr) →シュウ酸塩沈殿 →硝酸塩沈殿 →液性を2mol/L硝酸に調整 →Srサンプラー(クワウンエーテルを含む)にSrを吸着 →Y-90を溶出 →LSC測定(Y-90) * 水については担体添加後蒸発減容し、Srサンプラーにかける。Srサンプラー以降の操作については土壌・植物と同様	LSC(チェレンコフ測定)	—	土壌(51.2%、51.7%)、 植物(71.2%、75.5%)、 水(100%)	—	—	・Srサンプラーによる分析は迅速・簡便

参考資料 3 原子力施設等放射能調査機関連絡協議会からの意見

測定法シリーズ改訂に関する放調協意見（第1回検討会時点）

改訂全般について

- ユーザーの視点に立った分かりやすいマニュアル作成を目標に掲げているが、よりよいマニュアルとなるよう、マニュアルの構成、用語の説明、例示など十分に検討すること。
- 特に分析方法については、作業者がこのマニュアルを直接見ながら作業することはなく、これを活用して手順書を作成し、分析作業を行うものと考えられることから、解説や分析上の注意点などの記載の充実を期待する。

『連続モニタによる環境γ線測定法』について

1) 測定高さについて

- 換算ををするとした場合には、平常時に確認しておくべき事項（例えば、他の検出器を使用した測定結果の比較、シミュレーションのためのパラメータの確認など）を明確にすること。
- 換算ををするとした場合、緊急時に容易に取り扱えるよう、複雑なものとならないように配慮すること。
- シミュレーションにおいて、積雪影響を想定したパターンを示してほしい（さまざまな深さ、融雪・除雪時の周囲が覆われた状況など）。
なお、近年の気象状況を勘案すれば、積雪については、報告書様式に積雪量などの情報を追加する、積雪影響の解説を充実させるなど対応が必要である。
- 地上高と周辺線量当量の関係図（7. 2）について、地上高の範囲を拡張できないか（5m程度まで）。

2) 参考値として示された各O I Lの空気吸収線量換算値について

- O I L 2および6は沈着した放射性核種を対象としており趣旨に沿わないと考えられる。なお、O I L 2を安全側とする場合には切り捨てるべきである。
- 換算値が示されることで、ダブルスタンダードになり、現場が混乱する懸念がある。

3) 両方の線量情報の同時測定について

- 自治体からは以下のような意見がある。
 - ①監視業務の基本方針であるので、測定法シリーズにおける議論の前に、指針の改訂として議論すべき。
 - ②異なる2つの測定結果が得られることとなり混乱が生じるおそれがある。
 - ③それぞれの結果の運用方法（どのような目的で用い、公表は周辺線量当量に統一するなど）を示しておく必要がある。
 - ④平常時と緊急時は同じ単位とし、いずれか一方を基本とすることが望ましい。
 - ⑤低線量を吸収線量で、高線量を周辺線量当量とする方法もある。
 - ⑥計測の都度、換算するより、両方の単位に対応できる仕様とすることは現実的な

対応である。

- ⑦測定機器の改修のみならず、収集系についても改修が必要であり、また、簡易型モニタリングポスト等では、検出部と測定部が一体となっており入れ替えが必要となると考えられる。このため相当の費用を要する可能性がある。
 - ⑧改修には相当の期間と費用を要するおそれがあり、『原則として、……明記する』については、「望ましい」、「推奨する」、「今後の機器更新に際しては～」とするなど、記載方法に配慮してほしい。
 - ⑨電離箱による測定結果を公表しており、周辺線量当量に限定されると支障が生じる。
 - ⑩電離箱についても、両方の単位に対応できる方法を検討していただきたい（例えば、NaIによる同時計測の結果の比率を乗じて換算する方法など）。
 - ⑪自治体のみならず事業者の観測局にも影響があり、配慮が必要である（防護措置の判断に事業者の観測局も使用するように計画に位置付けている例がある）。
- 測定器のエネルギー特性の許容幅や、OILの性質（十分に安全側の数値であり、迅速な防護措置判断のための数値で厳密な数値でない）を考えた場合、換算係数をそこまで厳格に定義しておく必要があるのか疑問である（昨年度示された各状況下での換算係数1.3～1.7は不適當なのか）。
- 単位の関係、概念、単位に関連する各検出器の特徴について、詳細かつ丁寧な解説をお願いします。

『緊急時の放射性ストロンチウム分析法』について
1) チェレンコフ光による測定について ○新潟県でのチェレンコフ光を用いた放射性 Sr 分析法の検討では、^{90}Sr が ^{89}Sr よりもかなり多い場合（放出が少し落ち着いて日数経過した場合を想定）、^{90}Sr の影響で ^{89}Sr が誤計数するケースが見受けられた。この分析法がスカベンジング直後にチェレンコフ光を測定するという手法であったからであると考えるが、Sr-resin を使用する場合でも ^{90}Sr と ^{89}Sr の放射能比が異なる場合について、正しく計数・計算されるか検討することが必要と考える。 例) $^{90}\text{Sr} \gg ^{89}\text{Sr}$、$^{89}\text{Sr} \gg ^{90}\text{Sr}$、$^{89}\text{Sr} = 0$ かつ ^{90}Sr が多い場合 ○チェレンコフ光測定では最短 10 日（作業時間 8 時間／日）で従来のベータ線測定法と同程度の下限值が得られる。
2) 検討の前提条件について ○所要時間を 24 時間としているのは夜間もずっと職員が張り付くことを想定していると思われるが、現実的ではない。どのような想定で所要時間を定義しているのかを明確にすべきである。また、24 時間の理由はマニュアル上にも記載が必要である。 ○検出下限値の検討は分析法の検討の最後としているが、試料量などにより処理時間が変わることから、分析時間とともに、前提条件として最低限検出が必要な水準が示されるべきであり、マニュアル化するかどうかはそこからの議論であると考え
3) 記述内容について ○以下の事項の丁寧な記載を要望する。 ①様々な測定法の中でチェレンコフ光+シンチレーションの採用理由 ②語句の説明 ③従来法との比較（検出下限値、所要日数等） ④前処理の有無（生物試料は生 or 灰化、土壌試料は湿土 or 乾燥土） ⑤分析、測定条件の記載（分析供試料量、測定時間、検出器効率、目標となる回収率等） ⑥LSC によるチェレンコフ測定、シンチレーション測定の検出器効率の目安 ⑦分析・測定上の注意点の記載

『緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法』について

1) 記述内容について

- 日本分析センターの研修での核種ライブラリの作成や事故時のスペクトル解析などが参考になったため、実際に分析センターや福島で測定されたデータを参考に取り入れられたい。
- Te-129 と Te-129m などの短半減期核種の取り扱い（どのような場合に検出とするか等）について、明記してほしい。
- 核爆発（核実験）による核種と原子力災害とでは放出核種に違いがあるので（核爆発では短半減期核種が多い）、そのことにも対応可能な核ライブラリも合わせて整理しておくことが望ましい。
- 以下の事項の丁寧な記載を要望する。
 - ①緊急時に対応できる核データの記載、紹介
 - ②サムピークの具体例、サム効果補正が必要となる核種、 γ 線エネルギーの記載
 - ③逐次壊変核種（子孫核種）の関係について（一例として、Mo-99 と Tc-99m の子孫核種の検出の判断。両核種が検出されたことをもって検出と判断するか等の紹介）。
 - ④不明ピークの処理方法
 - ⑤U8 容器の追記
 - ⑥BGの補正

2) 高計測率への対応について

- 空間線量率の値から、「 $00\mu\text{Sv/h}$ を超えた地域の土壌採取は U8 半分程度で良い。」など、供試料量を調整するような考えを取り入れられてはどうか。
（少量の試料ならば U8 容器を転倒混和である程度均質化可能であり、デッドタイムの増加やランダムサムの発生も低減できる）

測定シリーズ改訂案に関する意見
【緊急時の放射性ストロンチウム分析法関係】

1 技術解説について

(1) Sr レジン

- ① Sr レジンは本マニュアルに初めて記載されることから、その特徴や性質、使用条件、取扱上の注意事項、保管方法などについて解説を添付すべきである。
- ② 使用する Sr レジンは『Eichrom 社製 Sr resin』に限定しているが、この製品が選定された理由と根拠を明記しておくべきである。
- ③ 土壌および牛乳と海水とでは使用するレジンの種類が異なっている。製品を限定していることからその理由と本マニュアルで求めている仕様を明記すべきである。

(2) 東京電力福島第一原子力発電所事故の経験の反映

- ① 緊急時のマニュアルとして、東京電力福島第一原子力発電所事故の検出事例・実績について、解説を加えるべきである。
- ② 事故後に様々な簡易測定法(質量分析計を使用した方法など)が検討されており、IAEA に加えてそれらの成果も反映したものとすることが望ましい。

(3) チェレンコフ光測定

現行の他のマニュアルにおいてチェレンコフ光測定に関する解説は見られないことから、本マニュアルにおいて原理等の解説を加えるべきである。また、液体シンチレーションカウンタに関する全般の解説が付されることが望ましい。

(4) データ解析

データの解析方法や誤計数などの解析状の注意点、バックグラウンドの影響等についての解説を加えるべきである。

2 各試料の分析方法等について

(1) 試料の取り扱い

- ① 緊急時の試料を取り扱うことから、試料の交叉汚染を防止するための措置(機器や器具、作業場所の汚染防止など)や注意事項を記載すべきである。
- ② 試料の汚染や測定系安定性などの確認のためには、ブランク試料の測定を行うことも有効である。

(2) 土壌の分析

前処理法が3種類規定されているが、現行案ではどの方法を採用すべきかユーザーが判断できない。解説 B には『迅速性』および『難分解性 Sr の存在』を理由に IAEA が熔融法を推奨しているとあるが、それ以降に記載されている分析結果からはその効果が読み取れない。処理時間の比較や難分解性 Sr 存在下での分析結果、それぞれの前処理法の利点・欠点を整理して表記すべきである。

(3) 測定方法

- ① 測定装置に関する記載が認められないが、他の測定法リリースと同様に、装置の性能や条件、機器の調整方法についても例を挙げて記載すべきである。

- ② チェレンコフ光を用いた Sr の測定では、Sr90 ピークが Sr89 ピークと重なる部分があるため、Sr90>>Sr89 の条件下では、Sr89 の濃度が過大に（あるいは下限値未満であるものが検出されたと）見積もられる可能性が高くなる。

1 F 事故の事例をもとに、89/90=4 程度の状況下での分析を想定しているようだが、それであれば、注意事項等にその旨を記載すべきである。

（例えば、「本分析法は、90>>89 の状況下では 89 が過大に見積もられる可能性が高いため、事故直後の 89>90 の状況下での使用に限られる。」等）

（4）表記方法

- ① 案文の各処に『処理条件の記載がない』、『判断基準がない』などの不明瞭な記載がある。操作内容は出来る限り具体的に記載するとともに、脚注に理由や条件などの詳細を記載し、分かりやすい表記になるよう努めること。
- ② 使用する用語や表記方法については、現行の「放射性ストロンチウム分析法」や JIS 規格を参考にして斉一化された表記になるよう努めること。

【参考】 その他改訂素案の記載事項に係るもの

※改訂案はあくまで作成途中であるため、修正等の参考として送付する。

試薬の調整	意 見
2.1	・ Sr-89 標準溶液は、半減期が短いことから、取扱いに係る注意事項について脚注に解説があるとよい。 ・ 脚注に入手先の記載があるとよい。 ・ バイアル容量の制限を受けるため、目安となる濃度の記載が欲しい。なお希釈に使用する硝酸濃度もあるとよい。
2.2	・ Ca 担体溶液調製時の塩酸添加の目安を示すべき ※本文への記載が難しい場合は脚注に記載する
2.3	・ 8mol/L 硝酸 「水●容」 脱字 (『2 容』ではないか?) ・ 0.05、1 及び 3mol/L 硝酸、1mol/L 塩酸、王水、40%フッ化水素酸の記載も必要 ・ 酸濃度については、「mol/L」ではなく、(A+B) の混合比で記載した方がよい ・ 現行法と異なるが調整については「水○○に、▲▲を□□m l 加えたもの」や「○○に水を加えて、□Lとする」などの表現のほうが J I S わかりやすく、J I S などに合わせていってもよいのでは。
2.4	・ 0.1mol/L アンモニア水の記載も必要 ・ アルカリ濃度についても、(A+B) の記載が適当
2.5	・ 調整方法が必要
2.7	・ ミニカラムの使用についても記載
その他	・ 使用する水の純度について記載すべき ※JIS K0557 などの引用など ・ 各章に記載される試薬を確実に追加 (ホウ酸リチウム、ヨウ化カリウム。炭酸ナトリウム、硝酸ナトリウム。下線部はカタカナ)

!! 以下の見出しの項目番号 (カッコ付きの番号) は、素案に示された番号に欠落やズレがあるため小見出しごとの記載順としている

土壌	意 見
-	・ まえがきが必要
4.1 試薬	・ 必要なものを確実に追加
4.1 器具	・ 必要なものを確実に追加 (白金るつば、テフロンビーカー) ・ φ47mm は操作上出てこないため適宜修正
4.1 装置	・ 超純水製造装置はここでは不要 ・ 乾燥機が必要
4.2	・ 熔融法は迅速で IAEA が推奨しているとのことであるが、試料量が少なく検出目標値が上がらないか? ・ 方法によって試料量が異なることで検出目標値が変わることは適当でないのではないか? (試料量が変わっても検出目標値は同程度ということか?)

4.2.1 溶融(2)	・担体の添加量を記載する ・「穏やかに」とのあいまいな表記でなく、具体的な条件を記載する ・「蒸発乾燥」具体的な処理条件が示されれば「乾燥」でよい ・0.2g 硝酸ナトリウム→硝酸ナトリウム 0.2g とすべき。他も同様
4.2.1 溶融(3)	・電気炉の具体的な設定条件を記載する
4.2.1 溶融(6)	・ろ紙が器具に記載されていない ・0.45 ミクロンでのろ過は必要か？ ・ろ紙→ メンブラン 47mm φ の誤り？ ・記載条件では吸引濾過が必要では？ ・テフロン製を使用する必要があるか？ ・残さの処理について、必要に応じてとはどのような場合か？ ・残さ測定の目的を明確にし、本来の試料とは分けて記載すべき
4.2.1 溶融(7)	・ろ液に対して更に 1 時間加熱が必要か？
4.2.1 分解(1)	・タイトル「全分解」→「酸抽出」ではないか ・灰化時間は具体的に記載する
4.2.1 分解(2)	・テフロンビーカーの容量 約 250ml？ ・「土」という表記と「試料」という表記が混在する ・テフロン製を使用する必要があるか？ ・「テフロン製かくはん棒も入れる」は必要か？
4.2.1 分解(3)	・担体の添加量を記載する
4.2.1 分解(4)	・王水を加えた場合、時計皿を載せて分解しないのか？（蒸発乾固のみでよいのか） ・「加熱蒸発」のような表記は、現行のストロンチウム分析法や JIS の記載を考慮し表記を統一する ・ホットプレートを使用するとの記載が必要
4.2.1 分解(5)	・溶解法と記載が逆転している ※ろ過→1M 硝酸加熱 ・1mol/L 硝酸添加時には時計皿の使用が必要では？ ・1mol/L 硝酸添加時の加熱は沸騰か？
4.2.1 分解(6)	・残さ測定の目的を明確にし、本来の試料とは分けて記載すべき
4.2.1 分解(6)	・「必要に応じ」を具体的に記載する
4.2.1 抽出(1)	・タイトル「酸抽出」→「全分解」ではないか ・灰化時間は具体的に記載する
4.2.1 抽出(2)	同 4.2.1 分解(2)
4.2.1 抽出(3)	同 4.2.1 分解(3)
4.2.1 抽出(4)	・ホットプレートを使用するとの記載が必要 ・フッ化水素酸の試薬の記載がない 「蒸発」とは蒸発乾固でよいのか？
4.2.1 抽出(6)	・ホウ酸の試薬の記載がない ・時計皿の使用の記載
4.2.1 抽出(7)	・残さの洗浄は不要か？

	・蒸発は乾固でなく直前止めか？ ※(8)に「湿った」とある
4.2.1 抽出(9)	・「分解が不完全な場合」をどうやって判断するのか明確にすべき ・硝酸 10ml はどこに加えるのか具体的に記載する (6)の残差か？(8)の 50ml に対して追加するのか？ ・「加熱蒸発」は単に蒸発乾固すればよいのか？一定時間加熱分解するのか？
4.2.1 抽出(10)	・何に対して 1 M 硝酸を加えるのか？硝酸 50ml を加えた(8)か？ ・溶解法と記載が逆 ※ろ過→1 M 硝酸加熱 ・加熱は沸騰か？時計皿は？ ※1 時間と具体的な時間を規定している
4.2.1 抽出(11)	・ろ過の方法を具体的に記載する。(5 C でよいのか？メンブランか？) 同 4.2.1 分解(6)
4.2.2(1)	・カラムの記載が器具にない ・コンディショニング時の流速の記載は不要か？
4.2.2(2)	・通液する試料を冷却する必要はないか？ ・通液速度の記載は不要か？ ・試料の酸濃度とコンディショニング液の酸濃度が違うが問題ないか？ ※海水、牛乳の場合は同じ濃度である
4.2.2(3)	・Sr と Y の分離時間とはなにか注釈が必要である ・どの時点で記録するのか明記する ・洗浄液の取扱いについて記載すべきである
4.2.2(4)	・通液速度の記載は不要か？ ・純水 30ml で十分量だとすれば注意書き、解説があったほうがよい
4.2.3(1)	・調整する pH の範囲について注意書き、解説すべき ・中和の終了判定の方法はなんでもよいのか（指示薬は不要か） ・もしくは pH 6～8 になど具体的に記載すべき
4.2.3(2)	・どの程度の加熱温度、処理時間が必要か具体的に記載すべき
4.2.3(3)	・水浴での冷却は可能か？ ・φ 24mm、5 C ろ紙は器具に記載がない
4.2.3(5)	・回収率の求め方を具体的に記載すべきである ・炭酸ストロンチウムとしての添加量、分子量などの情報を記載しておくべき ・ICP を利用する場合、試料の一部を分取することになると思うが、それで問題ないか？ ・回収率の目安（結果の妥当が担保されるレベル）を示すべきである
4.2.4	・バイアル容量を記載する（測定で 20ml バイアルを使用することを前提に記載されており、その旨を記載して置く必要がある） ・なぜ 8ml か（シンチレータの添加を考慮しており、そのことを記載しておく必要がある）

海水	意見
まえがき	・沈殿は「調製する」より「生成する」のほうが適当では ・硝酸 8mol/L の理由はどこかに記載されるべきだが、まえがきでは濃度まで詳細に記載する必要はないのではないか ・「その溶液を」ではなく「その溶液から」が適当 ・抽出クロマトグラフィー「用」レジンと2章に記載されている ・ここで回収率測定について ICP の適用を規定するのであれば、本文中にも「求めてもよい」ではなく正式に記載すべきである
7.1 試薬	・必要なものを確実に追加
7.1 器具	・必要なものを確実に追加 ・φ47mm はマニュアル上に出てこない
7.1 装置	・超純水製造装置は不要
7.2.1(1)	・ビーカーの容量を記載する
7.2.1(2)	・担体の添加量を記載する ・「正確に」が必要であればすべての章に適用する。
7.2.1(3)	・pH 調整の終了判定の方法はなんでもよいのか（指示薬は不要か） ・調整する pH の範囲について注意書き、解説すべき ・もしくは pH9～10 など具体的に記載すべき
7.2.1(4)	・遠心分離の条件を記載する ・海水のろ過はしないことになっているが、浮遊物質もこの操作で回収するとすればそれなりの遠心力が必要である ・海水中では浮遊物質は考慮しなくてよいのか？
7.2.1(5)	・ろ液の処理によって濃度が変わると考えられるが、硝酸の濃度は大雑把でよいということか？
7.2.2(1)	・土壌の処理方法との違いを解説すべきである ・器具に記載されていない ・コンディショニング時の流量調整は不要か？ ※不要だと思うが、そもそもコンディショニングについては、「〇〇を通液し、カラムをコンディショニングする」など丁寧に記載すべきである
7.2.2(2)	・カートリッジでの通液速度の調整方法は？ ※解説に記載されれば明確になる ※自然流下であればその旨を記載する
7.2.2(3)	同 4.2.2(3)
7.2.2(4)	・1mol/L 硝酸 5ml による洗浄は、土壌には記載がないが必要な理由は？ ※土壌では不要か？特記すべきことがあれば注釈に記載する
7.2.2(5)	・残液の排出はどのような方法で行うのか記載する ※エアを送ってよいのか？
7.2.2(6)	・通液速度の記載は不要か？ ・4ml で十分量だとすれば注意書き、解説があったほうがよい

	※海水と比べて明らかに少ない ・「この操作を繰り返す」とは？
7.2.3(1)	同 4.2.3(1)
7.2.3(2)	同 4.2.3(2)
7.2.3(3)	同 4.2.3(3)
7.2.3(5)	同 4.2.3(5)
7.2.7.	同 4.2.4

牛乳	意見
まえがき	・海水を対象→牛乳を対象 ・同海水まえがき
8.1 試薬	・必要なものを確実に追加
8.1 器具	・必要なものを確実に追加 ・φ47mm はマニュアル上に出てこない
8.1 装置	・超純水製造装置は不要
8.2.1(1)	・250ml と記載する
8.2.1(2)	・イオン交換樹脂の添加量を記載する ・イオン交換樹脂のコンディショニングは不要か？ ・担体はどの時点で添加するのか不明である ・担体の添加量を記載する
8.2.1(3)	・白濁液中で沈降が確認できるのか。具体的な沈降時間を記載した方がよい
8.2.1(4)	・「温水」の具体的な温度範囲を記載すべき
8.2.1(5)	・カラムの記載が器具にない ・「5ml のイオン交換樹脂」の調整方法の記載がない
8.2.1(8)	・溶離液の pH 調整は不要か？ ・炭酸塩の調整方法が海水と比較して記載が不十分である
8.2.1(9)	・遠心分離の条件を記載する ・デカンテーションの記載など海水に合わせる
8.2.1(10)	・ここで乾固、再溶解する必要があるのか？ ※海水では沈殿を溶解し次の工程へ移行している ・ビーカーに移す際、遠沈管の洗浄を行う方がよい
8.2.2(1)	同 4.2.2(1)
8.2.2(2)	同 4.2.2(2)
8.2.2(3)	同 4.2.2(3)
8.2.2(4)	同 4.2.2(4)
8.2.3(1)	同 4.2.3(1)
8.2.3(2)	同 4.2.3(2)
8.2.3(3)	同 4.2.3(3)

8.2.3(5)	同 4.2.3(5)
8.2.4	同 4.2.4

測定	意見
10.1	・操作ごとに「10.1.1」など番号を付ける
10.1 Sr89(1)	・調整方法は各試料の操作と同様に丁寧に記載する必要がある ・バイアル容量を記載する
10.1 Sr89(2)	・担体の添加量を記載する ・赤外線ランプは前章までに出てきていないので、統一して記載する ・「穏やかに」とのあいまいな表記でなく、具体的な条件を記載する ・液体の処理であり、蒸発・乾燥ではなく、蒸発乾固のほうが適当であるが、「放射性ストロンチウム分析法」も参考にして記載を統一すべき
10.1 Sr89(3)	・濃硝酸→ 硝酸 ・蒸発・乾燥について同上
10.1 Sr89(4)	・ろ紙の記載があるが、前操作でろ過操作が記載されていない ・「回収率を求める場合は、」ではなく、回収率の取り扱いを明記する ※効率校正に回収率は必要か？ ・バイアルでの溶解（やさしく振って）は、各試料の同操作にも同様に記載する ・LSC 測定用バイアルとガラスバイアルの違いは何か
10.1 Sr90(1)	・「キャリア」→ 「担体」 ・担体の添加量を記載する（試料と同量？） ・イットリウム担体調整方法の記載がない ・酸の蒸発方法を具体的に記載する
10.1 Sr90(2)	・3mol/L および 8mol/L の使い分けの判断がわからない ※あいまいな記載はすべきでない ・ある程度の範囲が許され、標準液を調製する酸に硝酸を使用し、硝酸溶液としておけば必ずしも蒸発は不要では？
10.1 Sr90(3)	・Section2 が不明
10.1 Sr90(4)	・Section2 がないので意味が通じない ・イットリウム回収率の算出方法を具体的に記載する ・試料の調製の項で「計数」について触れる必要はない ・最終的に全容 8ml にすべきでないのか？
10.1 効率(1)	・「適したウィンドウの設定」とは何か不明 ・使用する装置に関する詳細な記載がない ・測定条件についても不明である
10.1 効率(2)	・「適切な測定時間」の目安は分析条件とともに示しておくべきである ・測定回数についても目安を示しておくべきである
10.1 効率(3)	・全量が 20ml になるようにすることは、もっと前の時点で明らかにしておく必

	要がある ・UltimaGold やそれ以外のシンチレータを使用した場合の例、注意点、解説を記載してほしい ・測定はどのように行うのか具体例がない
10.2	・式中の表記に誤りがないか（正味計数率の記号が誤りでは？） ・回収率による補正は行わないのか？ ・計数効率はどうに求めるのか具体的に記載しないのか？ ・ε^{Y90}_c の記載がない ・壊変定数などの固有値は記載しておくべきである ・「t」および「λ」に関する説明を追加する ・時間について、通液開始時か、測定開始時点か？何分何秒の単位で算出すべきか？明確にしておく

解説	意見
A	・具体的な測定例を挙げた記載が望ましい ・P20 最後の文 1)それぞれの測定での計数効率が高いことが重要ではなく、その差を利用した方法であることが重要である 2)Sr-89 にくらべて Sr-90 が多い場合には影響があることを、例を挙げて記載すべきである
B	・分析センターの受注業務としての調査報告事項として記載されているが、マニュアルでの解説とした立場で整理し、記載すべきである ・IAEA のドラフト案の評価については、「解説」ではなく、例として付録に記載すべきものと考えられる ・P21 1)このマニュアルの中で IAEA のマニュアルがどのような位置づけなのかよくわからない。改訂案ではフローチャートから IEAE の方法を完全に踏襲していないと判断されるので、IAEA の方法との違いを明確にし、その検討結果が記載されるべきである 2)従来法に加えて、IAEA の標準メソッドと比較した場合の結果を記載すべきである 3)IAEA が実施しているようなバリデーション（複数機関による確認）は実施しないのか 4)平成 16 年度の調査結果は、広く公開されているのか 5)最終文のうち、「今後の分析法検討の……と思われる」は不要 ・P24～ 1)適用した 3 つの抽出法に対する解説、適用結果としてだけでまとめ、その利点、欠点を含めてユーザーが選択できるようにまとめるべきである

	2)従来法は2 g で実施されているが、マニュアルでは 100g としており、この結果との一致をもって妥当なのかどうか評価できるのか疑問である 3) マイクロウエーブは、プルトニウム分析法にも採用されており、外した理由が不明確である。更に、環境測定ではPM2. 5の分析にも採用されている機器であり、自治体レベルでは所有している機関も多く、密封で安全に多数の試料を処理できるので有効である。変形により試料が飛散等するおそれがあり、汚染が懸念されるなどの説明であれば納得できるが、熔融法を採用した場合に同様の懸念がないのか疑問である。 なお、分解容器の変形は、正常な使用方法であれば発生しないと考えられる。
--	---

フロー	意見
	・本文の操作と一致ない箇所が多々あるので修正が必要

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。