

放射能測定法シリーズ (No. 37)

AN-Sr-E

緊急時における放射性ストロンチウム分析法

令和8年6月制定

原子力規制庁監視情報課

目次

序論.....	1
第1章 降下物.....	3
1.1 装置・器具・試薬.....	3
1.2 分析操作.....	6
1.2.1 試料の前処理.....	6
1.2.2 Sr の分離・精製.....	6
1.2.3 回収された Sr の定量.....	7
第2章 大気浮遊じん.....	8
2.1 装置・器具・試薬.....	8
2.2 分析操作.....	11
2.2.1 試料の前処理.....	11
2.2.2 Sr の分離・精製.....	11
2.2.3 回収された Sr の定量.....	12
第3章 陸水及び飲料水.....	13
3.1 装置・器具・試薬.....	13
3.2 分析操作.....	16
3.2.1 試料の前処理.....	16
3.2.2 Sr の分離・精製.....	16
3.2.3 回収された Sr の定量.....	17
第4章 牛乳.....	18
4.1 装置・器具・試薬.....	18
4.2 分析操作.....	21
4.2.1 イオン交換樹脂のコンディショニング.....	21
4.2.2 試料の前処理.....	21
4.2.3 Sr の分離・精製.....	22
4.2.4 回収された Sr の定量.....	22
第5章 海水.....	24
5.1 装置・器具・試薬.....	24
5.2 分析操作.....	27
5.2.1 試料の前処理.....	27
5.2.2 Sr の分離・精製.....	27
5.2.3 回収された Sr の定量.....	28
第6章 土壌.....	29
6.1 装置・器具・試薬.....	29
6.2 分析操作.....	32
6.2.1 試料の前処理.....	32
6.2.2 Sr の分離・精製.....	32
6.2.3 回収された Sr の定量.....	33
第7章 食品.....	34
7.1 装置・器具・試薬.....	34
7.2 分析操作.....	37

7.2.1 試料の前処理.....	37
7.2.2 Sr の分離・精製.....	37
7.2.3 回収された Sr の定量.....	38
第 8 章 放射性 Sr の測定.....	39
8.1 装置・器具・試薬.....	39
8.2 計数効率の決定.....	42
8.2.1 ⁸⁹ Sr 計数効率の決定.....	42
8.2.2 ⁹⁰ Sr 及び ⁹⁰ Y 計数効率の決定.....	42
8.3 試料の測定.....	43
8.4 放射能濃度の計算.....	44
解 説.....	45
解説 A LSC による放射性 Sr 測定における計数効率の確認.....	47
解説 B 溶融法及び全分解法を用いた土壌試料の前処理方法.....	49
解説 C 本分析法を土壌及び海水に適用することの妥当性確認.....	53
解説 D 土壌試料分析法のその他環境試料への適用.....	61
解説 E 除染係数の確認.....	65
解説 F 各機関間でのクロスチェック結果.....	66
解説 G ⁸⁹ Sr 及び ⁹⁰ Sr 放射能濃度の算出方法.....	71
付 録.....	75
付録 A ⁹⁰ Sr 等の核データと壊変図.....	77
付録 B 用語の解説.....	78
付録 C 緊急時における放射性 Sr 分析フロー.....	81
参考文献.....	89

序 論

放射性ストロンチウム（以下「Sr」という。）分析法として、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」がある。当該測定法は⁸⁹Sr 及び⁹⁰Sr の定量法を定めたもので、一般環境中の環境放射線モニタリングのみならず、原子力発電所等の施設周辺の環境放射線モニタリングにおける放射性 Sr の測定法としても用いられている。当該測定法による分析は化学分離から測定に至る工程に長時間を要するため、緊急時における運用には不向きであり、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故における緊急時モニタリングにおいても、迅速に放射性 Sr を定量することができる分析法の開発が望まれていた。現在、放射能測定法シリーズ No. 23「液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法」が放射性 Sr の迅速分析法として有用とされているが*1、本書に記載した測定法はより簡便、かつ、迅速に結果が得られ、緊急時において多数の試料を分析しなくてはならない状況や結果報告の迅速性が求められる状況において、より有用である。

本書では、迅速かつ簡便な分離・精製方法として普及しているクラウンエーテル固定化メタクリル樹脂*2（以下「クラウンエーテル樹脂」という。）を採用することにより分析開始から測定までの分析所要時間を 24 時間程度とした。なお、分析操作はなるべく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」と共通化し、別途用意すべき装置、器具及び試薬が最小限となるよう配慮している。

測定には液体シンチレーションカウンタ（以下「LSC」という。）を採用し、試料ごとにチェレンコフ光測定及びシンチレーション測定を行うことで、イットリウム 90（⁹⁰Y）の生成を待たずに⁸⁹Sr 及び⁹⁰Sr の放射能濃度を求めることができる。LSC を用いた測定については、放射能測定法シリーズ No. 23「液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法」に測定方法とともに詳細な解説が記載されているので参考にされたい。

なお、本書はクラウンエーテル樹脂及び LSC を用いた⁸⁹Sr 及び⁹⁰Sr の定量法について記載しているが、日々進歩する分析技術も含めた新技術を否定するものではなく、分析の目的や精度に応じて方法を選択すればよい。例えば、半減期が約 30 年の⁹⁰Sr において、質量分析装置を用いた定量法は放射化学分析に対して不利とされていたが、適用可能な分析方法が開発されてきている。また、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」に誘導結合プラズマ質量分析装置や表面電離型質量分析装置を用いた分析法の概要が記載されているので参考にされたい。

試料種類は、平常時における環境放射線モニタリング結果を最大限に活用できるよう、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」に記載されている全ての試料を対象とした。また、目標とする検出可能レベルを満たしていれば、平常時における迅速分析法

*1 原子力規制庁監視情報課：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）（令和 6 年 3 月 21 日改訂）

*2 クラウンエーテル樹脂による分離・精製は単独での利用もさることながら、シュウ酸塩沈殿等の分離精製と組み合わせることにより、十分な除染がなされる。また、夾雑核種が存在している場合においても、十分な除染が期待され、夾雑核種の影響について特段の配慮は必要ない。

としても適用可能である。検出可能レベルは IAEA-TECDOC-1092^{*3}を参考にした。牛乳については GSG-2^{*4}に記載の「分析室での分析による食品、牛乳及び飲料水の濃度に関する初期設定の放射性核種固有の OIL^{*5}」より十分に低くなるようにした。本書における検出可能レベルを序表 1 に示す。

序表 1 試料種類ごとの分析供試量、検出可能レベル及び分析所要時間

試料名	分析供試量	検出可能レベル		単位	分析所要時間
		⁸⁹ Sr	⁹⁰ Sr		
降下物	0.05 m ² 、1 日	18	12	(Bq/m ²) / 日	12 時間
大気浮遊じん	1 m ³	0.9	0.6	Bq/m ³	12 時間
陸水及び飲料水	1 L	0.9	0.6	Bq/L	12 時間
牛乳	0.25 L	4	3	Bq/L	10 時間
海水	0.1 L	9	6	Bq/L	9 時間
土壌	1 g	900	600	Bq/kg 乾土	18 時間
	5 g	180	120		
	10 g	90	60		
食品	0.25 kg	4	3	Bq/kg 生	16 時間～24 時間

※分析所要時間とは、作業を継続的に行った場合に要する時間をいう。

※測定時における ⁸⁹Sr/⁹⁰Sr 放射能濃度比は 3、Sr 回収率は 80 %、LSC の測定時間は 100 分、チェレンコフ光測定におけるバックグラウンド計数率は 7 min⁻¹、計数効率はいずれも ⁸⁹Sr 35 %、⁹⁰Sr 2 %、⁹⁰Y 60 %、シンチレーション測定におけるバックグラウンド計数率は 8 min⁻¹、計数効率はいずれも ⁸⁹Sr 95 %、⁹⁰Sr 90 %、⁹⁰Y 100 %とする^{*6}。

^{*3} IAEA: Generic Procedures for Monitoring in a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA TECDOC, No. 1092 (1999)

^{*4} IAEA: Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards Series, No. GSG-2 (2011)

^{*5} Operational Intervention Level の略称で、空間放射線量率や環境試料中の放射性物質濃度等の計測可能な値で表される運用上の介入レベル。

^{*6} IAEA: 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)

第 1 章 降下物

降下物中の放射性 Sr は、試料を酸で分解・抽出し、シュウ酸塩沈殿やクラウンエーテル樹脂カラムなどにより Sr を分離・精製し、LSC で定量する^{*7}。

1.1 装置・器具・試薬

(1) 装置

- 1) アスピレーター：実効排気速度 12 L/分～15 L/分、到達圧力 6.6×10^3 Pa 程度のもの。
- 2) 遠心分離機：相対遠心加速度 $2000 \times g$ 以上で 10 分間使用可能なもの。
- 3) 純水製造装置
- 4) 電気乾燥器：室温～120 °C に温度設定可能なもの。
- 5) 電気炉：300 °C～600 °C、昇温時間 3 時間、保持時間 3 時間～48 時間に設定可能なもの。
- 6) 電子天秤：読取限界 0.01 mg 程度のもの。
- 7) ホットプレート：80 °C～250 °C に温度設定可能なもの。サンドバスタイプでもよい。
- 8) 原子吸光分析装置（以下「AAS」という。）：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。
- 9) 誘導結合プラズマ発光分光分析装置（以下「ICP-AES」という。）：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。

(2) 器具

- 1) カラム：内径 10 mm、カラム長 120 mm 程度のもの（ファネル付）。
- 2) 吸引瓶：硬質ガラス製
- 3) 吸引マニホールド：50 mL 程度の受け容器を設置可能なもの。
- 4) ビーカー：100 mL、200 mL、500 mL、1 L、2 L
- 5) フィルターホルダー：24 mm φ ろ紙用
- 6) ブフナー漏斗：90 mm φ
- 7) ホールピペット（又はマイクロピペット）：1 mL、5 mL、10 mL
- 8) メスシリンダー：1000 mL
- 9) メスフラスコ：100 mL
- 10) メンブレンフィルター：セルロース混合エステル製、孔径 0.45 μm、90 mm φ
- 11) ろ紙：セルロース製、No. 5C、24 mm φ

^{*7} Corcho-Alvarado, J.A., et al.: Determination of strontium radioisotopes in routine and emergency samples, Applied Radiation and Isotopes, 186, 6-8 (2022)

(3) 試薬

日本産業規格 (JIS) の試薬を用い、規格に規定されていないものについては、できるだけ純度の高いものを用いる。

- 1) 純水：イオン交換等により精製された水^{*8}
- 2) エタノール (C₂H₅OH)^{*9, *10}：試薬特級、質量分率 99.5 %以上
- 3) 塩酸 (HCl)^{*9, *11, *12}：試薬特級、質量分率 35.0 %～37.0 %
 - ・ 6 mol/L 塩酸：純水 1 容に塩酸 1 容を加えて混合する。
- 4) 硝酸 (HNO₃)^{*9, *11, *12}：試薬特級、質量分率 60 %～61 %
 - ・ 8 mol/L 硝酸：純水 2 容に硝酸 3 容を加えて混合する。
- 5) アンモニア水 (NH₃)^{*9, *11, *12}：試薬特級、質量分率 28.0 %～30.0 %
- 6) 硝酸ストロンチウム (Sr(NO₃)₂)^{*13}：試薬特級
 - ・ Sr 担体溶液 (Sr²⁺：10 mg/mL)：硝酸ストロンチウムを 300 °C の電気炉内で 2 時間～3 時間加熱し、乾燥する。デシケーター中で放冷した後、2.415 g を 100 mL ビーカーに取り、水を加えてかくはんし、完全に溶解させる。溶液を 100 mL メスフラスコに移し、純水を標線まで加え、よくかき混ぜる。
- 7) 炭酸アンモニウム ((NH₄)₂CO₃)：試薬特級
 - ・ 炭酸アンモニウム溶液 (飽和)：炭酸アンモニウム 200 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解の炭酸アンモニウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体の炭酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。
- 8) 炭酸カルシウム (CaCO₃)：試薬特級
 - ・ カルシウム (Ca) 担体溶液 (50 mg Ca²⁺/mL)：炭酸カルシウム 12.5 g を 100 mL ビーカーに取り、水 50 mL を加える。その後、塩酸を少しずつ加えて完全に溶解し、水を加えて 100 mL とする。

^{*8} 分析に使用する水は全て純水とする。ICP-AES や AAS による元素の定量分析には JIS K 0116：2014「発光分光分析通則」及び JIS K 0121：2006「原子吸光分析通則」に記載されているとおり、JIS K 0557：1998「用水・排水の試験に用いる水」に規定する A3 又は A4 の純水 (比抵抗率 1 MΩ・cm 以上等) を用いる。また、より高純度の水 (超純水：比抵抗率 18.2 MΩ・cm 以上) を用いるとなおよい。

^{*9} 労働安全衛生法の有害物表示対象物質 (作業者に危険や健康障害を生ずるおそれのあるもの)：ラベル表示や安全データシート交付、リスクアセスメント (リスクの低減対策等) が義務付けられており、これらについて作業者に周知及び教育を行う必要がある。

^{*10} 消防法で危険物第四類 (引火性液体) に分類される。火気厳禁、引火点より低い温度で保管及び使用する、第一類及び第五類危険物を近づけない、静電気の発生に気を付ける、小分けする場合は容器の容量いっぱいまで入れない (熱膨張による容器破損のおそれあり) 等の注意が必要である。

^{*11} 特定化学物質障害予防規則の第三類物質 (大量漏えいにより急性中毒を引き起こす物質)：局所排気装置を設置する等、ばく露される濃度の低減措置をとる必要がある。

^{*12} 毒物及び劇物取締法の対象物質 (急性毒性による健康被害が発生するおそれが高いもの)：貯蔵及び陳列場所には「医薬用外毒物」「医薬用外劇物」の表示をし、盗難・紛失・漏えい等を防ぐための措置を講じる必要がある。

^{*13} 消防法で危険物第一類 (酸化性固体) に分類される。強酸とは接触させない、可燃物との貯蔵を避ける、加熱・衝撃・摩擦を避ける等の注意が必要である。

- 9) シュウ酸アンモニウム一水和物 ($(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)^{*12} : 試薬特級
- ・シュウ酸アンモニウム溶液 (飽和) : シュウ酸アンモニウム一水和物 30 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解のシュウ酸アンモニウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体のシュウ酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。
- 10) シュウ酸二水和物 ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)^{*9, *12} : 試薬特級
- 11) ブロモクレゾールグリーン (BCG) 溶液 : pH 試験用
- 12) クラウンエーテル樹脂^{*14} : 粒径 100 μm ~ 150 μm 、カラムに充填して使用する。カートリッジ型 (粒径 50 μm ~ 100 μm) を用いてもよい^{*15}。

^{*14} クラウンエーテル樹脂は高温 (30 $^{\circ}\text{C}$ 以上)、低温 (4 $^{\circ}\text{C}$ 以下) を避け、密栓して保管することが望ましい。通常は長期保管が可能とされているが、過去のロットにおいて、保管期間が2年を超えたクラウンエーテル樹脂のSr回収率に低下が認められたため、注意が必要である。

^{*15} 使用するカートリッジの樹脂量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。例えば、層密度 0.35 g/mL のカートリッジ型カラム 1 mL には 0.35 g のクラウンエーテル樹脂が充填されている。

1.2 分析操作

1.2.1 試料の前処理

- 1) 採取した試料を適当なサイズのビーカーに移す。採取量が 1 L を超える場合はメスシリンダーを用いて 1 L を分取する。
- 2) Sr 担体溶液 (Sr^{2+} : 10 mg/mL) 2 mL を正確に加え、よくかき混ぜる。
- 3) ブフナー漏斗とメンブレンフィルターとを用いて吸引ろ過する。
- 4) ろ液を 2 L ビーカーに移す。
- 5) 残さをメンブレンフィルターごと 1 L ビーカーに移し、硝酸を 10 mL 加え、200 °C に設定したホットプレート上で乾固するまで加熱し、分解する。
- 6) 分解した残さに 6 mol/L 塩酸 100 mL を加え、時計皿でビーカーをおおい、150 °C に設定したホットプレート上で 2 時間加熱し、抽出する。
- 7) ブフナー漏斗とメンブレンフィルターとを用いて吸引ろ過し、ろ液を 4) のろ液と合わせる。

1.2.2 Sr の分離・精製

- 1) 1.2.1 で前処理した溶液に Ca 担体溶液 (Ca^{2+} : 50 mg/mL) 6 mL を加え、ホットプレート上で加熱し、シュウ酸二水和物 5 g^{*16} 及び BCG 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 に調整し、シュウ酸塩沈殿を生成させる^{*17}。
- 3) シュウ酸塩沈殿が沈降するまで静置した後、上澄み液にシュウ酸アンモニウム溶液 (飽和) を滴下し、シュウ酸塩沈殿の白い濁りが生じないことを確認する。濁りが生じる場合はシュウ酸二水和物が不足しているため、シュウ酸二水和物を追加して沈殿生成の操作を繰り返す。
- 4) 遠心分離によりシュウ酸塩沈殿を集める^{*18}。シュウ酸塩沈殿を硝酸 25 mL~30 mL で溶解し、200 mL ビーカーに移す。200 °C に設定したホットプレート上で乾固直前まで加熱し、濃縮する。この操作を褐色のガスが発生しなくなるまで繰り返す^{*19}。
- 5) 残さを 8 mol/L 硝酸 20 mL で溶解する^{*20}。
- 6) クラウンエーテル樹脂 3 g^{*21} をカラムに充填し^{*22}、8 mol/L 硝酸 50 mL^{*23} でコンディシ

*16 シュウ酸二水和物が過剰又は不足とならないように適宜、増減する。

*17 BCG 溶液は青緑を示す。

*18 沈殿を洗浄する場合、純水又は 1 % のシュウ酸溶液 25 mL を用いて 3 回程度行う。

*19 硝酸の必要量はシュウ酸塩沈殿の量 (試料中の Ca 量) による。なお、分解を繰り返す際の硝酸は 10 mL 程度としてもよい。

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

*21 クラウンエーテル樹脂の量を調整してもよい。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。

*22 クラウンエーテル樹脂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。

*23 メーカーの技術資料によると、クラウンエーテル樹脂に対する Sr の分配係数は 8 mol/L 硝酸において約 90 とあり、高い親和性を持つ (樹脂に吸着しやすい)。一方、0.05 mol/L 硝酸においては 1 以下となり、硝酸濃度が低いほど溶離する。

ヨニングする^{*24}。

- 7) 試料溶液を 1 mL/分程度の流速でカラムに通液する。これ以降の通液についても速度は 1 mL/分程度とする。
- 8) 8 mol/L 硝酸 100 mL をカラムに通液し、Y を溶離する。通液終了時刻を Sr と Y の分離日時として記録する。
- 9) 純水 30 mL をカラムに通液して Sr を溶離し、Sr 溶離液とする。

1.2.3 回収された Sr の定量

- 1) Sr 溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*25}とし、炭酸アンモニウム溶液（飽和）5 mL を加える。
- 2) 200 °C に設定したホットプレート上で数分間加熱し、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成する。
- 3) 放冷後、フィルターホルダーと既知質量のろ紙とを用いて、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 の乾燥器内で 30 分間加熱し、乾燥する。
- 5) デシケーター中で放冷後、沈殿の質量をはかり、Sr の回収率を求める^{*26}。ICP-AES 等を用いて Sr 回収率を求めてもよい。

^{*24} アスピレーター等を接続した吸引マニホールドを用いるとよい。カラム上部にファネルを取り付け、カラム出口に通過液の受け容器（ビーカーや遠心管を用いる）を設置する。流速はアスピレーター等の吸引の強さで調整するとよい。

^{*25} フェノールフタレインや pH 試験紙などで確認する。

^{*26} Sr 回収率は、(回収した炭酸ストロンチウムの量(mg)) × (87.62/147.63) / (添加した Sr 担体の量(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式量は 147.63 である)。

第 2 章 大気浮遊じん

大気浮遊じん中の放射性 Sr は、試料を灰化した後、酸で抽出し、シュウ酸塩沈殿やクラウンエーテル樹脂カラムなどにより Sr を分離・精製し、LSC で定量する^{*27}。

2.1 装置・器具・試薬

(1) 装置

- 1) アスピレーター：実効排気速度 12 L/分～15 L/分、到達圧力 6.6×10^3 Pa 程度のもの。
- 2) 遠心分離機：相対遠心加速度 $2000 \times g$ 以上で 10 分間使用可能なもの。
- 3) 純水製造装置
- 4) 電気乾燥器：室温～120 °C に温度設定可能なもの。
- 5) 電気炉：300 °C～600 °C、昇温時間 3 時間、保持時間 3 時間に設定可能なもの。
- 6) 電子天秤：読取限界 0.01 mg 程度のもの。
- 7) ホットプレート：80 °C～250 °C に温度設定可能なもの。サンドバスタイプでもよい。
- 8) AAS：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。
- 9) ICP-AES：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。

(2) 器具

- 1) カラム：内径 10 mm、カラム長 120 mm 程度のもの（ファネル付）。
- 2) 吸引瓶：硬質ガラス製
- 3) 吸引マニホールド：50 mL 程度の受け容器を設置可能なもの。
- 4) 磁製皿：120 mm φ、150 mm φ、平底
- 5) ビーカー：100 mL、200 mL、500 mL
- 6) フィルターホルダー：24 mm φ ろ紙用
- 7) ブフナー漏斗：90 mm φ
- 8) ホールピペット（又はマイクロピペット）：1 mL、5 mL、10 mL
- 9) メスフラスコ：100 mL
- 10) メンブレンフィルター：セルロース混合エステル製、孔径 0.45 μm、90 mm φ
- 11) ろ紙：セルロース製、No. 5C、24 mm φ

^{*27} Corcho-Alvarado, J.A., et al.: Determination of strontium radioisotopes in routine and emergency samples, Applied Radiation and Isotopes, 186, 6-8 (2022)

(3) 試薬

日本産業規格 (JIS) の試薬を用い、規格に規定されていないものについては、できるだけ純度の高いものを用いる。

- 1) 純水：イオン交換等により精製された水^{*28}
- 2) エタノール (C₂H₅OH)^{*29, *30}：試薬特級、質量分率 99.5 %以上
- 3) 塩酸 (HCl)^{*29, *31, *32}：試薬特級、質量分率 35.0 %～37.0 %
 - ・ 1 mol/L 塩酸：純水 11 容に塩酸 1 容を加えて混合する。
- 4) 硝酸 (HNO₃)^{*29, *31, *32}：試薬特級、質量分率 60 %～61 %
 - ・ 8 mol/L 硝酸：純水 2 容に硝酸 3 容を加えて混合する。
- 5) アンモニア水 (NH₃)^{*29, *31, *32}：試薬特級、質量分率 28.0 %～30.0 %
- 6) 硝酸ストロンチウム (Sr(NO₃)₂)^{*33}：試薬特級
 - ・ Sr 担体溶液 (Sr²⁺：10 mg/mL)：硝酸ストロンチウムを 300 °C の電気炉内で 2 時間～3 時間加熱し、乾燥する。デシケーター中で放冷した後、2.415 g を 100 mL ビーカーに取り、水を加えてかくはんし、完全に溶解させる。溶液を 100 mL メスフラスコに移し、純水を標線まで加え、よくかき混ぜる。
- 7) 炭酸アンモニウム ((NH₄)₂CO₃)：試薬特級
 - ・ 炭酸アンモニウム溶液 (飽和)：炭酸アンモニウム 200 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解の炭酸アンモニウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体の炭酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。
- 8) 炭酸カルシウム (CaCO₃)：試薬特級
 - ・ Ca 担体溶液 (50 mg Ca²⁺/mL)：炭酸カルシウム 12.5 g を 100 mL ビーカーに取り、水 50 mL を加える。その後、塩酸を少しずつ加えて完全に溶解し、水を加えて 100 mL とする。
- 9) シュウ酸アンモニウム一水和物 ((NH₄)₂C₂O₄·H₂O)^{*32}：試薬特級
 - ・ シュウ酸アンモニウム溶液 (飽和)：シュウ酸アンモニウム一水和物 30 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解のシュウ酸アンモニウ

^{*28} 分析に使用する水は全て純水とする。ICP-AES や AAS による元素の定量分析には JIS K 0116：2014「発光分光分析通則」及び JIS K 0121：2006「原子吸光分析通則」に記載されているとおり、JIS K 0557：1998「用水・排水の試験に用いる水」に規定する A3 又は A4 の純水 (比抵抗率 1 MΩ·cm 以上等) を用いる。また、より高純度の水 (超純水：比抵抗率 18.2 MΩ·cm 以上) を用いるとなおよい。

^{*29} 労働安全衛生法の有害物表示対象物質 (作業者に危険や健康障害を生ずるおそれのあるもの)：ラベル表示や安全データシート交付、リスクアセスメント (リスクの低減対策等) が義務付けられており、これらについて作業者に周知及び教育を行う必要がある。

^{*30} 消防法で危険物第四類 (引火性液体) に分類される。火気厳禁、引火点より低い温度で保管及び使用する、第一類及び第五類危険物を近づけない、静電気の発生に気を付ける、小分けする場合は容器の容量いっぱいまで入れない (熱膨張による容器破損のおそれあり) 等の注意が必要である。

^{*31} 特定化学物質障害予防規則の第三類物質 (大量漏えいにより急性中毒を引き起こす物質)：局所排気装置を設置する等、ばく露される濃度の低減措置をとる必要がある。

^{*32} 毒物及び劇物取締法の対象物質 (急性毒性による健康被害が発生するおそれが高いもの)：貯蔵及び陳列場所には「医薬用外毒物」「医薬用外劇物」の表示をし、盗難・紛失・漏えい等を防ぐための措置を講じる必要がある。

^{*33} 消防法で危険物第一類 (酸化性固体) に分類される。強酸とは接触させない、可燃物との貯蔵を避ける、加熱・衝撃・摩擦を避ける等の注意が必要である。

ムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体のシュウ酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。

- 10) シュウ酸二水和物 ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)^{*29, *32} : 試薬特級
- 11) ブロモクレゾールグリーン (BCG) 溶液 : pH 試験用
- 12) クラウンエーテル樹脂^{*34} : 粒径 100 μm ~150 μm 、カラムに充填して使用する。カートリッジ型 (粒径 50 μm ~100 μm) を用いてもよい^{*35}。

^{*34} クラウンエーテル樹脂は高温 (30 $^{\circ}\text{C}$ 以上)、低温 (4 $^{\circ}\text{C}$ 以下) を避け、密栓して保管することが望ましい。通常は長期保管が可能とされているが、過去のロットにおいて、保管期間が2年を超えたクラウンエーテル樹脂のSr回収率に低下が認められたため、注意が必要である。

^{*35} 使用するカートリッジの樹脂量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。例えば、層密度 0.35 g/mL のカートリッジ型カラム 1 mL には 0.35 g のクラウンエーテル樹脂が充填されている。

2.2 分析操作

2.2.1 試料の前処理

- 1) ろ紙を細かく刻んだもの^{*36}を磁製皿に取り、500 °Cの電気炉内で3時間程度^{*37}加熱し、灰化する。
- 2) 灰化した試料を500 mL ビーカーに移す。
- 3) Sr 担体溶液 (Sr²⁺ : 10 mg/mL) 2 mL を正確に加え、よくかき混ぜる。
- 4) 1 mol/L 塩酸 100 mL を加えて時計皿でおおい、150 °Cに設定したホットプレート上で2時間加熱し、抽出する。
- 5) ブフナー漏斗とメンブレンフィルターとを用いて吸引ろ過し、ろ液を200 mL ビーカーに受ける。

2.2.2 Sr の分離・精製

- 1) 2.2.1 で前処理した溶液に Ca 担体溶液 (50 mg Ca²⁺/mL) 6 mL を加え、ホットプレート上で加熱し、シュウ酸二水和物 5 g^{*38}及び BCG 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 に調整し、シュウ酸塩沈殿を生成させる^{*39}。
- 3) シュウ酸塩沈殿が沈降するまで静置した後、上澄み液にシュウ酸アンモニウム溶液 (飽和) を滴下し、シュウ酸塩沈殿の白い濁りが生じないことを確認する。濁りを生じる場合はシュウ酸二水和物が不足しているので、シュウ酸二水和物を追加して沈殿生成の操作を繰り返す。
- 4) 遠心分離によりシュウ酸塩沈殿を集める^{*40}。シュウ酸塩沈殿を硝酸 25 mL~30 mL で溶解し、200 mL ビーカーに移す。200 °Cに設定したホットプレート上で乾固直前まで加熱し、濃縮する。この操作を褐色のガスが発生しなくなるまで繰り返す^{*41}。
- 5) 残さを 8 mol/L 硝酸 20 mL で溶解する^{*42}。
- 6) クラウンエーテル樹脂 3 g^{*43}をカラムに充填し^{*44}、8 mol/L 硝酸 50 mL^{*45}でコンディショニングする。

^{*36} 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。

^{*37} 灰化時間を長くしてもよい。

^{*38} シュウ酸二水和物が過剰又は不足とならないように適宜、増減する。

^{*39} BCG 溶液は青緑を示す。

^{*40} 沈殿を洗浄する場合は純水又は 1 %のシュウ酸溶液 25 mL を用いて 3 回程度行う。

^{*41} 硝酸の必要量はシュウ酸塩沈殿の量 (試料中の Ca 量) による。なお、分解を繰り返す際の硝酸は 10 mL 程度としてもよい。

^{*42} 乾固物が溶解しない場合はホットプレート上で加熱するか、8 mol/L 硝酸 数 mL を追加する。

^{*43} クラウンエーテル樹脂の量を調整してもよい。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。

^{*44} クラウンエーテル樹脂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。

^{*45} メーカーの技術資料によると、クラウンエーテル樹脂に対する Sr の分配係数は 8 mol/L 硝酸において約 90 とあり、高い親和性を持つ (樹脂に吸着しやすい)。一方、0.05 mol/L 硝酸においては 1 以下となり、硝酸濃度が低いほど分離する。

ニングする^{*46}。

- 7) 試料溶液を 1 mL/分程度の流速でカラムに通液する。これ以降の通液についても速度は 1 mL/分程度とする。
- 8) 8 mol/L 硝酸 100 mL をカラムに通液し、Y を溶離する。通液終了時刻を Sr と Y の分離日時として記録する。
- 9) 純水 30 mL をカラムに通液して Sr を溶離し、Sr 溶離液とする。

2.2.3 回収された Sr の定量

- 1) Sr 溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*47}とし、炭酸アンモニウム溶液（飽和）5 mL を加える。
- 2) 200 °C に設定したホットプレート上で数分間加熱し、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成する。
- 3) 放冷後、フィルターホルダーと既知質量のろ紙とを用いて、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 の乾燥器内で 30 分間加熱し、乾燥する。
- 5) デンケーター中で放冷後、沈殿の質量をはかり、Sr の回収率を求める^{*48}。ICP-AES 等を用いて Sr 回収率を求めてもよい。

^{*46} アスピレーター等を接続した吸引マニホールドを用いるとよい。カラム上部にファネルを取り付け、カラム出口に通過液の受け容器（ビーカーや遠心管を用いる）を設置する。流速はアスピレーター等の吸引の強さで調整するとよい。

^{*47} フェノールフタレインや pH 試験紙などで確認する。

^{*48} Sr 回収率は、(回収した炭酸ストロンチウムの量(mg)) × (87.62/147.63) / (添加した Sr 担体の量(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式量は 147.63 である)。

第 3 章 陸水及び飲料水

陸水及び飲料水中の放射性 Sr は、試料をろ過した後（飲料水については省略可）、酸で分解・抽出し、シュウ酸塩沈殿やクラウンエーテル樹脂カラムなどにより Sr を分離・精製し、LSC で定量する^{*49}。

3.1 装置・器具・試薬

(1) 装置

- 1) アスピレーター：実効排気速度 12 L/分～15 L/分、到達圧力 6.6×10^3 Pa 程度のもの。
- 2) 遠心分離機：相対遠心加速度 $2000 \times g$ 以上で 10 分間使用可能なもの。
- 3) 純水製造装置
- 4) 電気乾燥器：室温～120 °C に温度設定可能なもの。
- 5) 電子天秤：読取限界 0.01 mg 程度のもの。
- 6) ホットプレート：80 °C～250 °C に温度設定可能なもの。サンドバスタイプでもよい。
- 7) AAS：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。
- 8) ICP-AES：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。

(2) 器具

- 1) カラム：内径 10 mm、カラム長 120 mm 程度のもの（ファネル付）。
- 2) 吸引瓶：硬質ガラス製
- 3) 吸引マニホールド：50 mL 程度の受け容器を設置可能なもの。
- 4) ビーカー：100 mL、200 mL、1 L、2 L
- 5) フィルターホルダー：24 mm ϕ ろ紙用
- 6) ブフナー漏斗：90 mm ϕ
- 7) ホールピペット（又はマイクロピペット）：1 mL、5 mL、10 mL
- 8) メスシリンダー：1000 mL
- 9) メスフラスコ：100 mL
- 10) メンブレンフィルター：セルロース混合エステル製、孔径 0.45 μm 、90 mm ϕ
- 11) ろ紙：セルロース製、No. 5C、24 mm ϕ

^{*49} Corcho-Alvarado, J.A., et al.: Determination of strontium radioisotopes in routine and emergency samples, Applied Radiation and Isotopes, 186, 6-8 (2022)

(3) 試薬

日本産業規格 (JIS) の試薬を用い、規格に規定されていないものについては、できるだけ純度の高いものを用いる。

- 1) 純水：イオン交換等により精製された水^{*50}
- 2) エタノール (C₂H₅OH) ^{*51, *52}：試薬特級、質量分率 99.5 %以上
- 3) 塩酸 (HCl) ^{*51, *53, *54}：試薬特級、質量分率 35.0 %～37.0 %
 - ・ 6 mol/L 塩酸：純水 1 容に塩酸 1 容を加えて混合する。
- 4) 硝酸 (HNO₃) ^{*51, *53, *54}：試薬特級、質量分率 60 %～61 %
 - ・ 8 mol/L 硝酸：純水 2 容に硝酸 3 容を加えて混合する。
- 5) アンモニア水 (NH₃) ^{*51, *53, *54}：試薬特級、質量分率 28.0 %～30.0 %
- 6) 硝酸ストロンチウム (Sr(NO₃)₂) ^{*55}：試薬特級
 - ・ Sr 担体溶液 (Sr²⁺：10 mg/mL)：硝酸ストロンチウムを 300 °C の電気炉内で 2 時間～3 時間加熱し、乾燥する。デシケーター中で放冷した後、2.415 g を 100 mL ビーカーに取り、水を加えてかくはんし、完全に溶解させる。溶液を 100 mL メスフラスコに移し、純水を標線まで加え、よくかき混ぜる。
- 7) 炭酸アンモニウム ((NH₄)₂CO₃)：試薬特級
 - ・ 炭酸アンモニウム溶液 (飽和)：炭酸アンモニウム 200 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解の炭酸アンモニウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体の炭酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。
- 8) 炭酸カルシウム (CaCO₃)：試薬特級
 - ・ Ca 担体溶液 (50 mg Ca²⁺/mL)：炭酸カルシウム 12.5 g を 100 mL ビーカーに取り、水 50 mL を加える。その後、塩酸を少しずつ加えて完全に溶解し、水を加えて 100 mL とする。
- 9) シュウ酸アンモニウム一水和物 ((NH₄)₂C₂O₄·H₂O) ^{*54}：試薬特級
 - ・ シュウ酸アンモニウム溶液 (飽和)：シュウ酸アンモニウム一水和物 30 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解のシュウ酸アンモニウ

^{*50} 分析に使用する水は全て純水とする。ICP-AES や AAS による元素の定量分析には JIS K 0116：2014「発光分光分析通則」及び JIS K 0121：2006「原子吸光分析通則」に記載されているとおり、JIS K 0557：1998「用水・排水の試験に用いる水」に規定する A3 又は A4 の純水 (比抵抗率 1 MΩ·cm 以上等) を用いる。また、より高純度の水 (超純水：比抵抗率 18.2 MΩ·cm 以上) を用いるとなおよい。

^{*51} 労働安全衛生法の有害物表示対象物質 (作業者に危険や健康障害を生ずるおそれのあるもの)：ラベル表示や安全データシート交付、リスクアセスメント (リスクの低減対策等) が義務付けられており、これらについて作業者に周知及び教育を行う必要がある。

^{*52} 消防法で危険物第四類 (引火性液体) に分類される。火気厳禁、引火点より低い温度で保管及び使用する、第一類及び第五類危険物を近づけない、静電気の発生に気を付ける、小分けする場合は容器の容量いっぱいまで入れない (熱膨張による容器破損のおそれあり) 等の注意が必要である。

^{*53} 特定化学物質障害予防規則の第三類物質 (大量漏えいにより急性中毒を引き起こす物質)：局所排気装置を設置する等、ばく露される濃度の低減措置をとる必要がある。

^{*54} 毒物及び劇物取締法の対象物質 (急性毒性による健康被害が発生するおそれが高いもの)：貯蔵及び陳列場所には「医薬用外毒物」「医薬用外劇物」の表示をし、盗難・紛失・漏えい等を防ぐための措置を講じる必要がある。

^{*55} 消防法で危険物第一類 (酸化性固体) に分類される。強酸とは接触させない、可燃物との貯蔵を避ける、加熱・衝撃・摩擦を避ける等の注意が必要である。

ムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体のシュウ酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。

- 10) シュウ酸二水和物 ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)^{*51, *54} : 試薬特級
- 11) ブロモクレゾールグリーン (BCG) 溶液 : pH 試験用
- 12) クラウンエーテル樹脂^{*56} : 粒径 100 μm ~150 μm 、カラムに充填して使用する。カートリッジ型 (粒径 50 μm ~100 μm) を用いてもよい^{*57}。

^{*56} クラウンエーテル樹脂は高温 (30 $^{\circ}\text{C}$ 以上)、低温 (4 $^{\circ}\text{C}$ 以下) を避け、密栓して保管することが望ましい。通常は長期保管が可能とされているが、過去のロットにおいて、保管期間が2年を超えたクラウンエーテル樹脂のSr回収率に低下が認められたため、注意が必要である。

^{*57} 使用するカートリッジの樹脂量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。例えば、層密度 0.35 g/mL のカートリッジ型カラム 1 mL には 0.35 g のクラウンエーテル樹脂が充填されている。

3.2 分析操作

3.2.1 試料の前処理^{*58}

- 1) 試料をメスシリンダーを用いて 1 L 分取する。
- 2) Sr 担体溶液 (Sr²⁺ : 10 mg/mL) 2 mL を正確に加え、よくかき混ぜる。
- 3) ブフナー漏斗とメンブレンフィルターとを用いて吸引ろ過する。
- 4) ろ液を 2 L ビーカーに移す。
- 5) 残さをメンブレンフィルターごと 1 L ビーカーに移し、硝酸を 10 mL 加え、200 °C に設定したホットプレート上で乾固するまで加熱し、分解する。
- 6) 分解した残さに 6 mol/L 塩酸 100 mL を加え、時計皿でビーカーを覆い、150 °C に設定したホットプレート上で 2 時間加熱し、抽出する。
- 7) ブフナー漏斗とメンブレンフィルターとを用いて吸引ろ過し、ろ液を 4) のろ液と合わせる。

3.2.2 Sr の分離・精製

- 1) 3.2.1 で前処理した溶液に Ca 担体溶液 (Ca²⁺ : 50 mg/mL) 6 mL を加え、ホットプレート上で加熱し、シュウ酸二水和物 5 g^{*59} 及び BCG 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 に調整し、シュウ酸塩沈殿を生成させる^{*60}。
- 3) シュウ酸塩沈殿が沈降するまで静置した後、上澄み液にシュウ酸アンモニウム溶液 (飽和) を滴下し、シュウ酸塩沈殿の白い濁りが生じないことを確認する。濁りを生じる場合はシュウ酸二水和物が不足しているため、シュウ酸二水和物を追加して沈殿生成の操作を繰り返す。
- 4) 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 で溶解し、200 mL ビーカーに移す。200 °C に設定したホットプレート上で乾固直前まで加熱し、濃縮する。この操作を褐色のガスが発生しなくなるまで繰り返す^{*62}。
- 5) 残さを 8 mol/L 硝酸 20 mL で溶解する^{*63}。
- 6) クラウンエーテル樹脂 3 g^{*64} をカラムに充填し^{*65}、8 mol/L 硝酸 50 mL^{*66} でコンディショ

*58 飲料水の場合、3)~7) の操作については不要である。

*59 シュウ酸二水和物が過剰又は不足とならないように適宜、増減する。

*60 BCG 溶液は青緑を示す。

*61 沈殿を洗浄する場合、純水又は 1 % のシュウ酸溶液 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 Ca 量) による。なお、分解を繰り返す際の硝酸は 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熱するか、8 mol/L 硝酸 数 mL を追加する。

*64 クラウンエーテル樹脂の量を調整してもよい。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 クラウンエーテル樹脂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 メーカーの技術資料によると、クラウンエーテル樹脂に対する Sr の分配係数は 8 mol/L 硝酸において約 90 とあり、高い親和性を持つ (樹脂に吸着しやすい)。一方、0.05 mol/L 硝酸においては 1 以下となり、硝酸濃度が低いほど溶離する。

ニングする^{*67}。

- 7) 試料溶液を 1 mL/分程度の流速でカラムに通液する。これ以降の通液についても速度は 1 mL/分程度とする。
- 8) 8 mol/L 硝酸 100 mL をカラムに通液し、Y を溶離する。通液終了時刻を Sr と Y の分離日時として記録する。
- 9) 純水 30 mL をカラムに通液して Sr を溶離し、Sr 溶離液とする。

3.2.3 回収された Sr の定量

- 1) Sr 溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*68}とし、炭酸アンモニウム溶液（飽和）5 mL を加える。
- 2) 200 °C に設定したホットプレート上で数分間加熱し、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成する。
- 3) 放冷後、フィルターホルダーと既知質量のろ紙とを用いて、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 の乾燥器内で 30 分間加熱し、乾燥する。
- 5) デンケーター中で放冷後、沈殿の質量をはかり、Sr の回収率を求める^{*69}。ICP-AES 等を用いて Sr 回収率を求めてもよい。

^{*67} アスピレーター等を接続した吸引マニホールドを用いるとよい。カラム上部にファネルを取り付け、カラム出口に通過液の受け容器（ビーカーや遠心管を用いる）を設置する。流速はアスピレーター等の吸引の強さで調整するとよい。

^{*68} フェノールフタレインや pH 試験紙などで確認する。

^{*69} Sr 回収率は、(回収した炭酸ストロンチウムの量(mg)) × (87.62/147.63) / (添加した Sr 担体の量(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式量は 147.63 である)。

第 4 章 牛乳

牛乳中の放射性 Sr は、強酸性陽イオン交換樹脂カラム、炭酸塩沈殿及びクラウンエーテル樹脂カラムなどにより Sr を分離・精製し、LSC で定量する^{*70}。

4.1 装置・器具・試薬

(1) 装置

- 1) アスピレーター：実効排気速度 12 L/分～15 L/分、到達圧力 6.6×10^3 Pa 程度のもの。
- 2) 遠心分離機：相対遠心加速度 $2000 \times g$ 以上で 10 分間使用可能なもの。
- 3) 純水製造装置
- 4) スターラー：500 mL ビーカーが使用可能なもの。
- 5) 電気乾燥器：室温～120 °C に温度設定可能なもの。
- 6) 電子天秤：読取限界 0.01 mg 程度のもの。
- 7) ホットプレート：80 °C～250 °C に温度設定可能なもの。サンドバスタイプでもよい。
- 8) AAS：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。
- 9) ICP-AES：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。

(2) 器具

- 1) かくはん子：500 mL ビーカーに適したもの。
- 2) カラム：内径 10 mm、カラム長 120 mm 程度のもの（ファネル付）。
- 3) 吸引瓶：硬質ガラス製
- 4) 吸引マニホールド：50 mL 程度の受け容器を設置可能なもの。
- 5) クロマトグラフ管：ガラス製、内径 20 mm、カラム長 350 mm（ガラス製ジョイント付）程度のもの。
- 6) 駒込ピペット：5 mL、10 mL
- 7) ビーカー：100 mL、200 mL、500 mL
- 8) フィルターホルダー：24 mm φ ろ紙用
- 9) ホールピペット（又はマイクロピペット）：1 mL、5 mL、10 mL
- 10) メスシリンダー：250 mL
- 11) メスフラスコ：100 mL
- 12) ろ紙：セルロース製、No. 5C、24 mm φ

^{*70} IAEA: 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)

(3) 試薬

日本産業規格 (JIS) の試薬を用い、規格に規定されていないものについては、できるだけ純度の高いものを用いる。

- 1) 純水：イオン交換等により精製された水^{*71}
- 2) エタノール (C₂H₅OH)^{*72, *73}：試薬特級、質量分率 99.5 % 以上
- 3) 塩酸 (HCl)^{*72, *74, *75}：試薬特級、質量分率 35.0 %～37.0 %
 - ・ 6 mol/L 塩酸：純水 1 容に塩酸 1 容を加えて混合する。
- 4) 硝酸 (HNO₃)^{*72, *74, *75}：試薬特級、質量分率 60 %～61 %
 - ・ 8 mol/L 硝酸：純水 2 容に硝酸 3 容を加えて混合する。
- 5) アンモニア水 (NH₃)^{*72, *74, *75}：試薬特級、質量分率 28.0 %～30.0 %
- 6) 水酸化ナトリウム (NaOH)^{*72, *75}：試薬特級
 - ・ 水酸化ナトリウム溶液 (24 w/v%)：水酸化ナトリウム 240 g を純水に溶解して 1 L とする。
- 7) 硝酸ストロンチウム (Sr(NO₃)₂)^{*76}：試薬特級
 - ・ Sr 担体溶液 (Sr²⁺：10 mg/mL)：硝酸ストロンチウムを 300 °C の電気炉内で 2 時間～3 時間加熱し、乾燥する。デシケーター中で放冷した後、2.415 g を 100 mL ビーカーに取り、水を加えてかくはんし、完全に溶解させる。溶液を 100 mL メスフラスコに移し、純水を標線まで加え、よくかき混ぜる。
- 8) 炭酸アンモニウム ((NH₄)₂CO₃)：試薬特級
 - ・ 炭酸アンモニウム溶液 (飽和)：炭酸アンモニウム 200 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解の炭酸アンモニウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体の炭酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。
- 9) 炭酸ナトリウム (Na₂CO₃)：試薬特級
 - ・ 炭酸ナトリウム溶液 (飽和)：炭酸ナトリウム 110 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解の炭酸ナトリウムが沈降した後の上澄み液

^{*71} 分析に使用する水は全て純水とする。ICP-AES や AAS による元素の定量分析には JIS K 0116：2014「発光分光分析通則」及び JIS K 0121：2006「原子吸光分析通則」に記載されているとおり、JIS K 0557：1998「用水・排水の試験に用いる水」に規定する A3 又は A4 の純水 (比抵抗率 1 MΩ・cm 以上等) を用いる。また、より高純度の水 (超純水：比抵抗率 18.2 MΩ・cm 以上) を用いるとなおよい。

^{*72} 労働安全衛生法の有害物表示対象物質 (作業者に危険や健康障害を生ずるおそれのあるもの)：ラベル表示や安全データシート交付、リスクアセスメント (リスクの低減対策等) が義務付けられており、これらについて作業者に周知及び教育を行う必要がある。

^{*73} 消防法で危険物第四類 (引火性液体) に分類される。火気厳禁、引火点より低い温度で保管及び使用する、第一類及び第五類危険物を近づけない、静電気の発生に気を付ける、小分けする場合は容器の容量いっぱいまで入れない (熱膨張による容器破損のおそれあり) 等の注意が必要である。

^{*74} 特定化学物質障害予防規則の第三類物質 (大量漏えいにより急性中毒を引き起こす物質)：局所排気装置を設置する等、ばく露される濃度の低減措置をとる必要がある。

^{*75} 毒物及び劇物取締法の対象物質 (急性毒性による健康被害が発生するおそれが高いもの)：貯蔵及び陳列場所には「医薬用外毒物」「医薬用外劇物」の表示をし、盗難・紛失・漏えい等を防ぐための措置を講じる必要がある。

^{*76} 消防法で危険物第一類 (酸化性固体) に分類される。強酸とは接触させない、可燃物との貯蔵を避ける、加熱・衝撃・摩擦を避ける等の注意が必要である。

を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体の炭酸ナトリウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。

10) 塩化ナトリウム (NaCl) : 試薬特級

- 4 mol/L 塩化ナトリウム溶液 : 塩化ナトリウム 23 g を純水に溶解して 100 mL とする。

11) 強酸性陽イオン交換樹脂 : 100 メッシュ～200 メッシュ、架橋度 8 %

12) クラウンエーテル樹脂^{*77} : 粒径 100 μm～150 μm、カラムに充填して使用する。カートリッジ型 (粒径 50 μm～100 μm) を用いてもよい^{*78}。

^{*77} クラウンエーテル樹脂は高温 (30 °C以上)、低温 (4 °C以下) を避け、密栓して保管することが望ましい。通常は長期保管が可能とされているが、過去のロットにおいて、保管期間が2年を超えたクラウンエーテル樹脂のSr回収率に低下が認められたため、注意が必要である。

^{*78} 使用するカートリッジの樹脂量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。例えば、層密度 0.35 g/mL のカートリッジ型カラム 1 mL には 0.35 g のクラウンエーテル樹脂が充填されている。

4.2 分析操作

4.2.1 イオン交換樹脂のコンディショニング

- 1) 強酸性陽イオン交換樹脂をビーカーに取る^{*79}。
- 2) 純水を加えてよくかき混ぜた後、静置する。
- 3) 傾斜法により、細かい樹脂、可溶性不純物等を除く。
- 4) 上澄み液が透明になるまで2)～3)の操作を繰り返す。
- 5) 6 mol/L 塩酸を樹脂容量とほぼ同量加え、よくかき混ぜた後、静置する。
- 6) 傾斜法により、上澄み液を除く。
- 7) 6 mol/L 塩酸の代わりに純水で5)～6)の操作を上澄み液が pH 7 になるまで繰り返す。
- 8) 6 mol/L 塩酸の代わりに水酸化ナトリウム溶液 (24 w/v%) で5)～6)の操作を行う。
- 9) 6 mol/L 塩酸の代わりに純水で5)～6)の操作を上澄み液が pH 7 になるまで繰り返す。
- 10) 6 mol/L 塩酸の代わりに水酸化ナトリウム溶液 (24 w/v%) で5)～6)の操作を行う。
- 11) 6 mol/L 塩酸の代わりに純水で5)～6)の操作を上澄み液が pH 7 になるまで繰り返す。

4.2.2 試料の前処理

- 1) 試料をメスシリンダーを用いて 0.25 L 分取し、500 mL ビーカーに移す。
- 2) かくはん子を加えた後、Sr 担体溶液 (Sr^{2+} : 10 mg/mL) 1 mL^{*80}を正確に加え、よくかき混ぜる。
- 3) 試料をスターラーでかくはんしながらコンディショニングした強酸性イオン交換樹脂 30 mL をゆっくりと加える^{*81}。
- 4) 試料を 30 分間スターラーでかくはん^{*82}する。
- 5) かくはん子を取り出した後、静置する。
- 6) 傾斜法により、上澄み液 (牛乳) を除く。
- 7) 40 °C～60 °C の温水 50 mL を加え、緩やかにかくはんした後、静置する。
- 8) 傾斜法により、上澄み液 (温水) を除く。
- 9) 7)～8) の操作を合計 3 回行う^{*83}。
- 10) コンディショニングした強酸性陽イオン交換樹脂 5 mL をクロマトグラフ管に充填する。
- 11) 9) の強酸性陽イオン交換樹脂を 40 °C～60 °C の温水 50 mL を用いて移す。
- 12) 40 °C～60 °C の温水 100 mL をクロマトグラフ管に通液する。
- 13) 4 mol/L 塩化ナトリウム溶液 200 mL を 3 mL/分～4 mL/分程度の速度でクロマトグラフ管に通液し、Sr を溶離する。

^{*79} 強酸性陽イオン交換樹脂 30 mL にサンプル数を乗じた量とさらに損失分を見込んで分取する。分取量の 2 倍以上のサイズのビーカーを使用する。

^{*80} クラウンエーテル樹脂に吸着する安定 Sr の量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。クラウンエーテル樹脂 2 mL 当たり、実用量として 8 mg の Sr 担体を使用可能なものが市販されている。

^{*81} コンディショニングした樹脂をメスシリンダーにて 30 mL はかり取ったもの。この時、純水で懸濁させた樹脂を、駒込ピペットを用いてメスシリンダーに沈降させながら分取する。

^{*82} 樹脂がビーカーの底部に沈降せず、牛乳中に分散していることを確認する。

^{*83} 試料 (牛乳) が残っている場合は、温水による洗浄を繰り返す。

- 14) 溶離液に少量の水酸化ナトリウム溶液(24 w/v%)を加えて pH を 10 以上^{*84}とした後、炭酸ナトリウム 3 g を加えて 200 °C に設定したホットプレート上で数分間加熱し、炭酸塩沈殿を生成させる。
- 15) 炭酸塩沈殿が沈降するまで静置した後、上澄み液に炭酸ナトリウム溶液(飽和)を滴下し、炭酸塩沈殿の白い濁りが生じないことを確認する。濁りを生じる場合は炭酸ナトリウム溶液が不足しているので、炭酸ナトリウム溶液を追加して沈殿生成の操作を繰り返す。
- 16) 遠心分離により炭酸塩沈殿を分離する。
- 17) 炭酸塩沈殿を硝酸 数 mL で溶解し、100 mL ビーカーに移して 150 °C に設定したホットプレート上で乾固するまで加熱する。
- 18) 乾固物を 8 mol/L 硝酸 20 mL で溶解する^{*85}。

4.2.3 Sr の分離・精製

- 1) クラウンエーテル樹脂 3 g^{*86}をカラムに充填し^{*87}、8 mol/L 硝酸 50 mL^{*88}でコンディショニングする^{*89}。
- 2) 4.2.2 で前処理した溶液を 1 mL/分程度の速度でカラムに通液する。これ以降の通液についても速度は 1 mL/分程度とする。
- 3) 8 mol/L 硝酸 100 mL をカラムに通液し、Y を溶離する。通液終了時刻を Sr と Y の分離日時として記録する。
- 4) 純水 30 mL をカラムに通液して Sr を溶離し、Sr 溶離液とする。

4.2.4 回収された Sr の定量

- 1) Sr 溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*90}とし、炭酸アンモニウム溶液(飽和) 5 mL を加える。
- 2) 200 °C に設定したホットプレート上で数分間加熱し、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成する。
- 3) 放冷後、フィルターホルダーと既知質量のろ紙とを用いて、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 の乾燥器内で 30 分間加熱し、乾燥する。

^{*84} pH 試験紙などで確認する。

^{*85} 乾固物が溶解しない場合はホットプレート上で加熱するか、8 mol/L 硝酸 数 mL を追加する。

^{*86} クラウンエーテル樹脂の量を調整してもよい。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。

^{*87} クラウンエーテル樹脂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。

^{*88} メーカーの技術資料によると、クラウンエーテル樹脂に対する Sr の分配係数は 8 mol/L 硝酸において約 90 とあり、高い親和性を持つ(樹脂に吸着しやすい)。一方、0.05 mol/L 硝酸においては 1 以下となり、硝酸濃度が低いほど溶離する。

^{*89} アスピレーター等を接続した吸引マニホールドを用いるとよい。カラム上部にファネルを取り付け、カラム出口に通過液の受け容器(ビーカーや遠心管を用いる)を設置する。流速はアスピレーター等の吸引の強さで調整するとよい。

^{*90} フェノールフタレインや pH 試験紙などで確認する。

- 5) 放冷後、沈殿の質量をはかり、Sr の回収率を求める^{*91}。ICP-AES 等を用いて Sr 回収率を求めてもよい。

^{*91} Sr 回収率は、(回収された炭酸ストロンチウムの量(mg)) × (87.62/147.63) / (添加した Sr 担体の量(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式量は 147.63 である)。

第 5 章 海水

海水中の放射性 Sr は、炭酸塩沈殿及びクラウンエーテル樹脂カラムなどにより Sr を分離・精製し、LSC で定量する^{*92}。

5.1 装置・器具・試薬

(1) 装置

- 1) アスピレーター：実効排気速度 12 L/分～15 L/分、到達圧力 6.6×10^3 Pa 程度のもの。
- 2) 遠心分離機：相対遠心加速度 $2000 \times g$ 以上で 10 分間使用可能なもの。
- 3) 純水製造装置
- 4) 電気乾燥器：室温～120 °C に温度設定可能なもの。
- 5) 電子天秤：読取限界 0.01 mg 程度のもの。
- 6) ホットプレート：80 °C～250 °C に温度設定可能なもの。サンドバスタイプでもよい。
- 7) AAS：ICP-AES もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。
- 8) ICP-AES：AAS もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。

(2) 器具

- 1) カラム：内径 10 mm、カラム長 120 mm 程度のもの（ファネル付）。
- 2) 吸引瓶：硬質ガラス製
- 3) 吸引マニホールド：50 mL 程度の受け容器を設置可能なもの。
- 4) 駒込ピペット：5 mL、10 mL
- 5) ビーカー：100 mL、200 mL
- 6) フィルターホルダー：24 mm ϕ ろ紙用
- 7) ホールピペット（又はマイクロピペット）：1 mL、5 mL、10 mL
- 8) メスシリンダー：100 mL
- 9) メスフラスコ：100 mL
- 10) ろ紙：セルロース製、No. 5C、24 mm ϕ

^{*92} IAEA: A Procedure for Rapid Determination of ⁸⁹Sr and ⁹⁰Sr in Seawater in Emergency Situations (2026) (注) 本レポートは IAEA HP に 2026 年 8 月頃に公開予定のため、本測定法シリーズの完成時には公開されていない。

(3) 試薬

日本産業規格 (JIS) の試薬を用い、規格に規定されていないものについては、できるだけ純度の高いものを用いる。

- 1) 純水：イオン交換等により精製された水^{*93}
- 2) エタノール (C₂H₅OH)^{*94, *95}：試薬特級、質量分率 99.5 %以上
- 3) 硝酸 (HNO₃)^{*94, *96, *97}：試薬特級、質量分率 60 %～61 %
 - ・ 8 mol/L 硝酸：純水 2 容に硝酸 3 容を加えて混合する。
 - ・ 1 mol/L 硝酸：純水 12 容に硝酸 1 容を加えて混合する。
- 4) アンモニア水 (NH₃)^{*94, *96, *97}：試薬特級、質量分率 28.0 %～30.0 %
- 5) 硝酸ストロンチウム (Sr (NO₃)₂)^{*98}：試薬特級
 - ・ Sr 担体溶液 (Sr²⁺：10 mg/mL)：硝酸ストロンチウムを 300 °C の電気炉内で 2 時間～3 時間加熱し、乾燥する。デシケーター中で放冷した後、2.415 g を 100 mL ビーカーに取り、水を加えてかくはんし、完全に溶解させる。溶液を 100 mL メスフラスコに移し、純水を標線まで加え、よくかき混ぜる。
- 6) 炭酸アンモニウム ((NH₄)₂CO₃)：試薬特級
 - ・ 炭酸アンモニウム溶液 (飽和)：炭酸アンモニウム 200 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解の炭酸アンモニウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体の炭酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。
- 7) 炭酸ナトリウム (Na₂CO₃)：試薬特級
 - ・ 炭酸ナトリウム溶液 (飽和)：炭酸ナトリウム 110 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解の炭酸ナトリウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体の炭酸ナトリウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。
 - ・ 0.25 g/mL 炭酸ナトリウム溶液：炭酸ナトリウム 25 g を純水に溶解して 100 mL とする。

^{*93} 分析に使用する水は全て純水とする。ICP-AES や AAS による元素の定量分析には JIS K 0116：2014 「発光分光分析通則」及び JIS K 0121：2006 「原子吸光分析通則」に記載されているとおり、JIS K 0557：1998 「用水・排水の試験に用いる水」に規定する A3 又は A4 の純水 (比抵抗率 1 MΩ・cm 以上等) を用いる。また、より高純度の水 (超純水：比抵抗率 18.2 MΩ・cm 以上) を用いるとなおよい。

^{*94} 労働安全衛生法の有害物表示対象物質 (作業者に危険や健康障害を生ずるおそれのあるもの)：ラベル表示や安全データシート交付、リスクアセスメント (リスクの低減対策等) が義務付けられており、これらについて作業者に周知及び教育を行う必要がある。

^{*95} 消防法で危険物第四類 (引火性液体) に分類される。火気厳禁、引火点より低い温度で保管及び使用する、第一類及び第五類危険物を近づけない、静電気の発生に気を付ける、小分けする場合は容器の容量いっぱいまで入れない (熱膨張による容器破損のおそれあり) 等の注意が必要である。

^{*96} 特定化学物質障害予防規則の第三類物質 (大量漏えいにより急性中毒を引き起こす物質)：局所排気装置を設置する等、ばく露される濃度の低減措置をとる必要がある。

^{*97} 毒物及び劇物取締法の対象物質 (急性毒性による健康被害が発生するおそれが高いもの)：貯蔵及び陳列場所には「医薬用外毒物」「医薬用外劇物」の表示をし、盗難・紛失・漏えい等を防ぐための措置を講じる必要がある。

^{*98} 消防法で危険物第一類 (酸化性固体) に分類される。強酸とは接触させない、可燃物との貯蔵を避ける、加熱・衝撃・摩擦を避ける等の注意が必要である。

- 8) クラウンエーテル樹脂^{*99}：粒径 100 μm～150 μm、カラムに充填して使用する。カートリッジ型（粒径 50 μm～100 μm）を用いてもよい^{*100}。

^{*99} クラウンエーテル樹脂は高温（30℃以上）、低温（4℃以下）を避け、密栓して保管することが望ましい。通常は長期保管が可能とされているが、過去のロットにおいて、保管期間が2年を超えたクラウンエーテル樹脂のSr回収率に低下が認められたため、注意が必要である。

^{*100} 使用するカートリッジの樹脂量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。例えば、層密度 0.35 g/mL のカートリッジ型カラム 1 mL には 0.35 g のクラウンエーテル樹脂が充填されている。

5.2 分析操作

5.2.1 試料の前処理

- 1) 試料をメスシリンダーを用いて 0.1 L 分取し、200 mL ビーカーに移す。また、試料に含まれる安定 Sr 分析^{*101}のため、別途、少量の試料を分取する。
- 2) Sr 担体溶液 (Sr²⁺ : 10 mg/mL) 1 mL^{*102}を正確に加え、よくかき混ぜる。
- 3) アンモニア水を加えて pH を 10 程度^{*103}に調整し、0.25 g/mL 炭酸ナトリウム溶液 8 mL を加えて、10 分間程度かくはんし、炭酸塩沈殿を生成させる。
- 4) 炭酸塩沈殿が沈降するまで静置した後、上澄み液に炭酸ナトリウム溶液 (飽和) を滴下し、炭酸塩沈殿の白い濁りが生じないことを確認する。濁りを生じる場合は炭酸ナトリウム溶液が不足しているので、炭酸ナトリウム溶液を追加して沈殿生成の操作を繰り返す。
- 5) 遠心分離により炭酸塩沈殿を分離する。
- 6) 炭酸塩沈殿を硝酸 数 mL で溶解し、100 mL ビーカーに移して 150 °C に設定したホットプレート上で乾固するまで加熱する。
- 7) 乾固物を 8 mol/L 硝酸 10 mL で溶解する^{*104, *105}。

5.2.2 Sr の分離・精製

(a) クラウンエーテル樹脂が充填されたカートリッジ型カラムを使用する場合

- 1) カートリッジ型カラム (樹脂量 2 mL) を 2 つ連結し、純水 10 mL 及び 8 mol/L 硝酸 10 mL^{*106}でコンディショニングする^{*107}。
- 2) 5.2.1 で前処理した溶液を 1 mL/分程度の速度でカートリッジ型カラムに通液する。これ以降の通液についても速度は 1 mL/分程度とする。
- 3) 8 mol/L 硝酸 50 mL をカラムに通液し、Y を溶離する。通液終了時刻を Sr と Y の分離日時として記録する。
- 4) 1 mol/L 硝酸 5 mL でカートリッジ型カラムを洗浄する。
- 5) カートリッジ型カラム内の残液を完全に排出する。

^{*101} 海水に含まれる安定 Sr は AAS、ICP-AES 等により定量する。

^{*102} クラウンエーテル樹脂に吸着する安定 Sr の量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。クラウンエーテル樹脂 2 mL 当たり、実用量として 8 mg の Sr 担体を使用可能なものが市販されている。

^{*103} pH 試験紙などで確認する。

^{*104} 乾固物が溶解しない場合はホットプレート上で加熱するか、8 mol/L 硝酸 数 mL を追加する。

^{*105} 沈殿体積と同等程度の硝酸を加え、沈殿を溶解してもよい (このとき、溶液の硝酸濃度は 8 mol/L になる)。

^{*106} メーカーの技術資料によると、クラウンエーテル樹脂に対する Sr の分配係数は 8 mol/L 硝酸において約 90 とあり、高い親和性を持つ (樹脂に吸着しやすい)。一方、0.05 mol/L 硝酸においては 1 以下となり、硝酸濃度が低いほど溶離する。

^{*107} カートリッジ型カラムを使用する場合、アスピレーター等を接続した吸引マニホールドなどを用いて吸引しながら通液する。カラム上部にファネルを取り付け、カラム出口に通過液の受け容器 (ビーカーや遠心管を用いる) を設置する。流速はアスピレーター等の吸引の強さで調整するとよい。

- 6) 純水 4 mL をカートリッジ型カラムに通液し、Sr を溶離する。この溶離操作を繰り返す。3 回の溶離液を合わせ、これを Sr 溶離液とする^{*108}。
- (b) クラウンエーテル樹脂をカラムに充填して使用する場合
 - 1) クラウンエーテル樹脂 3 g^{*109}をカラムに充填し^{*110}、8 mol/L 硝酸 50 mL^{*111}でコンディショニングする^{*112}。
 - 2) 5.2.1 で前処理した溶液を 1 mL/分の速度でカラムに通液する。これ以降の通液についても速度は 1 mL/分程度とする。
 - 3) 8 mol/L 硝酸 100 mL をカラムに通液し、Y を溶離する。通液終了時刻を Sr と Y の分離日時として記録する。
 - 4) 純水 30 mL をカラムに通液して Sr を溶離し、Sr 溶離液とする。

5.2.3 回収された Sr の定量

- 1) Sr 溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*113}とし、炭酸アンモニウム溶液（飽和）5 mL を加える。
- 2) 200 °C に設定したホットプレート上で数分間加熱し、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成する。
- 3) 放冷後、フィルターホルダーと既知質量のろ紙とを用いて、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 の乾燥器内で 30 分間加熱し、乾燥する。
- 5) 放冷後、沈殿の質量をはかり、Sr の回収率を求める^{*114}。ICP-AES 等を用いて Sr 回収率を求めてもよい。

^{*108} 純水 4 mL による溶離を 2 回行い、合計 8 mL の溶離液を既知質量の 20 mL ガラスバイアルにとり、放射性 Sr の測定に進んでもよい。この場合、Sr 回収率の低下を防ぐため、5) の操作を確実にを行うこと。回収率は溶離液の一部を重量法により分取し、ICP-AES 等により求める。

^{*109} クラウンエーテル樹脂の量を調整してもよい。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。

^{*110} クラウンエーテル樹脂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。

^{*111} メーカーの技術資料によると、クラウンエーテル樹脂に対する Sr の分配係数は 8 mol/L 硝酸において約 90 とあり、高い親和性を持つ（樹脂に吸着しやすい）。一方、0.05 mol/L 硝酸においては 1 以下となり、硝酸濃度が低いほど溶離する。

^{*112} アスピレーター等を接続した吸引マニホールドを用いるとよい。カラム上部にファネルを取り付け、カラム出口に通過液の受け容器（ビーカーや遠心管を用いる）を設置する。流速はアスピレーター等の吸引の強さで調整するとよい。

^{*113} pH 試験紙などで確認する。

^{*114} Sr 回収率は、(回収した炭酸ストロンチウムの量(mg)) × (87.62/147.63) / (添加した Sr 担体の量(mg) + 分析に供した海水に含まれる安定 Sr 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式量は 147.63 である)。

第 6 章 土壌

土壌中の放射性 Sr は、試料を灰化した後、酸で分解・抽出し、シュウ酸塩沈殿やクラウンエーテル樹脂カラムなどにより Sr を分離・精製し、LSC で定量する^{*115}。

6.1 装置・器具・試薬

(1) 装置

- 1) アスピレーター：実効排気速度 12 L/分～15 L/分、到達圧力 6.6×10^3 Pa 程度のもの。
- 2) 遠心分離機：相対遠心加速度 $2000 \times g$ 以上で 10 分間使用可能なもの。
- 3) 純水製造装置
- 4) 電気乾燥器：室温～120 °C に温度設定可能なもの。
- 5) 電気炉：300 °C～600 °C、昇温時間 3 時間、保持時間 3 時間に設定可能なもの。
- 6) 電子天秤：読取限界 0.01 mg 程度のもの。
- 7) ホットプレート：80 °C～250 °C に温度設定可能なもの。サンドバスタイプでもよい。
- 8) AAS：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。
- 9) ICP-AES：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。

(2) 器具

- 1) カラム：内径 10 mm、カラム長 120 mm 程度のもの（ファネル付）。
- 2) 吸引瓶：硬質ガラス製
- 3) 吸引マニホールド：50 mL 程度の受け容器を設置可能なもの。
- 4) 駒込ピペット：5 mL、10 mL
- 5) 磁製皿：90 mm φ、平底
- 6) ビーカー：100 mL、200 mL、300 mL
- 7) フィルターホルダー：24 mm φ ろ紙用
- 8) ブフナー漏斗：90 mm φ
- 9) ホールピペット（又はマイクロピペット）：1 mL、5 mL、10 mL
- 10) メスフラスコ：100 mL
- 11) ろ紙：セルロース製、No. 5C、24 mm φ
- 12) ろ紙：セルロース製、No. 5C、90 mm φ

^{*115} Corcho-Alvarado, J.A., et al.: Determination of strontium radioisotopes in routine and emergency samples, Applied Radiation and Isotopes, 186, 6-8 (2022)

(3) 試薬

日本産業規格 (JIS) の試薬を用い、規格に規定されていないものについては、できるだけ純度の高いものを用いる。

- 1) 純水：イオン交換等により精製された水^{*116}
- 2) エタノール (C₂H₅OH)^{*117, *118}：試薬特級、質量分率 99.5 %以上
- 3) 塩酸 (HCl)^{*117, *119, *120}：試薬特級、質量分率 35.0 %～37.0 %
- 4) 硝酸 (HNO₃)^{*117, *119, *120}：試薬特級、質量分率 60 %～61 %
 - ・王水：硝酸 1 容と塩酸 3 容を混合する。
 - ・8 mol/L 硝酸：純水 2 容に硝酸 3 容を加えて混合する。
 - ・1 mol/L 硝酸：純水 12 容に硝酸 1 容を加えて混合する。
- 5) アンモニア水 (NH₃)^{*117, *119, *120}：試薬特級、質量分率 28.0 %～30.0 %
- 6) 硝酸ストロンチウム (Sr(NO₃)₂)^{*121}：試薬特級
 - ・Sr 担体溶液 (Sr²⁺：10 mg/mL)：硝酸ストロンチウムを 300 °C の電気炉内で 2 時間～3 時間加熱し、乾燥する。デシケーター中で放冷した後、2.415 g を 100 mL ビーカーに取り、水を加えてかくはんし、完全に溶解させる。溶液を 100 mL メスフラスコに移し、純水を標線まで加え、よくかき混ぜる。
- 7) 炭酸アンモニウム ((NH₄)₂CO₃)：試薬特級
 - ・炭酸アンモニウム溶液 (飽和)：炭酸アンモニウム 200 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解の炭酸アンモニウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体の炭酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。
- 8) 炭酸カルシウム (CaCO₃)：試薬特級
 - ・Ca 担体溶液 (50 mg Ca²⁺/mL)：炭酸カルシウム 12.5 g を 100 mL ビーカーに取り、水 50 mL を加える。その後、塩酸を少しずつ加えて完全に溶解し、水を加えて 100 mL とする。
- 9) シュウ酸アンモニウム一水和物 ((NH₄)₂C₂O₄·H₂O)^{*120}：試薬特級
 - ・シュウ酸アンモニウム溶液 (飽和)：シュウ酸アンモニウム一水和物 30 g と純水 250 mL

^{*116} 分析に使用する水は全て純水とする。ICP-AES や AAS による元素の定量分析には JIS K 0116：2014「発光分光分析通則」及び JIS K 0121：2006「原子吸光分析通則」に記載されているとおり、JIS K 0557：1998「用水・排水の試験に用いる水」に規定する A3 又は A4 の純水 (比抵抗率 1 MΩ·cm 以上等) を用いる。また、より高純度の水 (超純水：比抵抗率 18.2 MΩ·cm 以上) を用いるとなおよい。

^{*117} 労働安全衛生法の有害物表示対象物質 (作業者に危険や健康障害を生ずるおそれのあるもの)：ラベル表示や安全データシート交付、リスクアセスメント (リスクの低減対策等) が義務付けられており、これらについて作業者に周知及び教育を行う必要がある。

^{*118} 消防法で危険物第四類 (引火性液体) に分類される。火気厳禁、引火点より低い温度で保管及び使用する、第一類及び第五類危険物を近づけない、静電気の発生に気を付ける、小分けする場合は容器の容量いっぱいまで入れない (熱膨張による容器破損のおそれあり) 等の注意が必要である。

^{*119} 特定化学物質障害予防規則の第三類物質 (大量漏えいにより急性中毒を引き起こす物質)：局所排気装置を設置する等、ばく露される濃度の低減措置をとる必要がある。

^{*120} 毒物及び劇物取締法の対象物質 (急性毒性による健康被害が発生するおそれが高いもの)：貯蔵及び陳列場所には「医薬用外毒物」「医薬用外劇物」の表示をし、盗難・紛失・漏えい等を防ぐための措置を講じる必要がある。

^{*121} 消防法で危険物第一類 (酸化性固体) に分類される。強酸とは接触させない、可燃物との貯蔵を避ける、加熱・衝撃・摩擦を避ける等の注意が必要である。

とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解のシュウ酸アンモニウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体のシュウ酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。

- 10) シュウ酸二水和物 ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)^{*117, *120} : 試薬特級
- 11) ブロモクレゾールグリーン (BCG) 溶液 : pH 試験用
- 12) クラウンエーテル樹脂^{*122} : 粒径 100 μm ~150 μm 、カラムに充填して使用する。カートリッジ型 (粒径 50 μm ~100 μm) を用いてもよい^{*123}。

^{*122} クラウンエーテル樹脂は高温 (30 $^{\circ}\text{C}$ 以上)、低温 (4 $^{\circ}\text{C}$ 以下) を避け、密栓して保管することが望ましい。通常は長期保管が可能とされているが、過去のロットにおいて、保管期間が2年を超えたクラウンエーテル樹脂の Sr 回収率に低下が認められたため、注意が必要である。

^{*123} 使用するカートリッジの樹脂量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。例えば、層密度 0.35 g/mL のカートリッジ型カラム 1 mL には 0.35 g のクラウンエーテル樹脂が充填されている。

6.2 分析操作

6.2.1 試料の前処理^{*124}

- 1) 乾土 5 g を磁製皿に取る^{*125, *126}。
- 2) 600 °C の電気炉内で 3 時間程度^{*127}加熱し、灰化する。
- 3) 灰化した土壌を 300 mL のビーカーに移す。
- 4) Sr 担体溶液 (Sr²⁺ : 10 mg/mL) 2 mL^{*128}を正確に加え、よくかき混ぜる。
- 5) 王水 50 mL を加え、200 °C に設定したホットプレート上で加熱し、乾固直前まで濃縮する。
- 6) 硝酸 5 mL を加え、200 °C に設定したホットプレート上で加熱し、乾固直前まで濃縮する。
- 7) 1 mol/L 硝酸 70 mL を加えて時計皿で覆い、150 °C に設定したホットプレート上で 1 時間加熱し、抽出する。
- 8) ブフナー漏斗とろ紙 (90 mm φ) とを用いて吸引ろ過し、ろ液を 200 mL ビーカーに受ける^{*129}。

6.2.2 Sr の分離・精製

- 1) 6.2.1 で前処理した溶液に Ca 担体溶液 (Ca²⁺ : 50 mg/mL) 6 mL を加え、ホットプレート上で加熱し、シュウ酸二水和物 5 g^{*130}及び BCG 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 に調整し、シュウ酸塩沈殿を生成させる^{*131}。
- 3) シュウ酸塩沈殿が沈降するまで静置した後、上澄み液にシュウ酸アンモニウム溶液 (飽和) を滴下し、シュウ酸塩沈殿の白い濁りが生じないことを確認する。濁りを生じる場合はシュウ酸二水和物が不足しているので、シュウ酸二水和物を追加して沈殿生成の操作を繰り返す。
- 4) 遠心分離によりシュウ酸塩沈殿を集める^{*132}。シュウ酸塩沈殿を硝酸 25 mL~30 mL で溶解し、200 mL ビーカーに移す。200 °C に設定したホットプレート上で乾固直前まで加熱し、濃縮する。この操作を褐色のガスが発生しなくなるまで繰り返す^{*133}。

^{*124} 酸抽出法を記載した。その他の前処理法は解説 B を参照のこと。

^{*125} 試料の秤量を行う際には十分に混合し、均一な状態にしてから秤量する必要がある。

^{*126} 乾土 5 g 相当の湿土を取ってもよい。乾土当たりの放射能濃度を求める場合には乾土率を求めておく必要がある。

^{*127} 可能な場合には灰化時間を長くしてもよい。

^{*128} 添加量は適宜、調整してもよい。

^{*129} 残さがある場合、残さは 1 mol/L 硝酸 3 mL とエタノール 1 mL で洗浄し、乾燥器を用いて約 80 °C で 5 分間乾燥し、さらに真空乾燥を 1 時間した後、必要に応じて全 α 放射能及び全 β 放射能測定を行う。全 α 放射能及び全 β 放射能測定を行う場合、ろ過に使用するろ紙は測定可能なサイズのものを使用する。この全 α 放射能及び全 β 放射能測定は難溶性の物質が放出された場合に実施し、放出が見込まれない場合には分析を迅速に実施するため行わない。

^{*130} シュウ酸二水和物が過剰又は不足とならないように適宜、増減する。

^{*131} BCG 溶液は青緑を示す。

^{*132} 沈殿を洗浄する場合、純水又は 1 % のシュウ酸溶液 25 mL を用いて 3 回程度行う。

^{*133} 硝酸の必要量はシュウ酸塩沈殿の量 (試料中の Ca 量) による。なお、分解を繰り返す際の硝酸は 10 mL 程度としてもよい。

- 5) 残さを 8 mol/L 硝酸 20 mL で溶解する^{*134}。
- 6) クラウンエーテル樹脂 3 g^{*135}をカラムに充填し^{*136}、8 mol/L 硝酸 50 mL^{*137}でコンディショニングする^{*138}。
- 7) 試料溶液を 1 mL/分の速度でカラムに通液する。これ以降の通液についても速度は 1 mL/分程度とする。
- 8) 8 mol/L 硝酸 100 mL をカラムに通液し、Y を溶離する。通液終了時刻を Sr と Y の分離日時として記録する。
- 9) 純水 30 mL をカラムに通液して Sr を溶離し、Sr 溶離液とする。

6.2.3 回収された Sr の定量

- 1) Sr 溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*139}とし、炭酸アンモニウム溶液（飽和）5 mL を加える。
- 2) 200 °C に設定したホットプレート上で数分間加熱し、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成する。
- 3) 放冷後、フィルターホルダーと既知質量のろ紙（24 mm φ）とを用いて、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 の乾燥器内で 30 分間加熱し、乾燥する。
- 5) 放冷後、沈殿の質量をはかり、Sr の回収率を求める^{*140}。ICP-AES 等を用いて Sr 回収率を求めてもよい。

^{*134} 乾固物が溶解しない場合はホットプレート上で加熱するか、8 mol/L 硝酸 数 mL を追加する。

^{*135} クラウンエーテル樹脂の量を調整してもよい。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。

^{*136} クラウンエーテル樹脂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。

^{*137} メーカーの技術資料によると、クラウンエーテル樹脂に対する Sr の分配係数は 8 mol/L 硝酸において約 90 とあり、高い親和性を持つ（樹脂に吸着しやすい）。一方、0.05 mol/L 硝酸においては 1 以下となり、硝酸濃度が低いほど溶離する。

^{*138} アスピレーター等を接続した吸引マニホールドを用いるとよい。カラム上部にファネルを取り付け、カラム出口に通過液の受け容器（ビーカーや遠心管を用いる）を設置する。流速はアスピレーター等の吸引の強さで調整するとよい。

^{*139} pH 試験紙などで確認する。

^{*140} Sr 回収率は、(回収した炭酸ストロンチウムの量(mg)) × (87.62/147.63) / (添加した Sr 担体の量(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式量は 147.63 である)。

第 7 章 食品

食品中の放射性 Sr は、試料を灰化した後、酸で分解・抽出し、シュウ酸塩沈殿やクラウンエーテル樹脂カラムなどにより Sr を分離・精製し、LSC で定量する^{*141}。

7.1 装置・器具・試薬

(1) 装置

- 1) アスピレーター：実効排気速度 12 L/分～15 L/分、到達圧力 6.6×10^3 Pa 程度のもの。
- 2) 遠心分離機：相対遠心加速度 $2000 \times g$ 以上で 10 分間使用可能なもの。
- 3) 純水製造装置
- 4) 電気乾燥器：室温～120 °C に温度設定可能なもの。
- 5) 電気炉：300 °C～600 °C、昇温時間 3 時間、保持時間 6 時間に設定可能なもの。
- 6) 電子天秤：読取限界 0.01 mg 程度のもの。
- 7) ホットプレート：80 °C～250 °C に温度設定可能なもの。サンドバスタイプでもよい。
- 8) AAS：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。
- 9) ICP-AES：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。

(2) 器具

- 1) カラム：内径 10 mm、カラム長 120 mm 程度のもの（ファネル付）。
- 2) 吸引瓶：硬質ガラス製
- 3) 吸引マニホールド：50 mL 程度の受け容器を設置可能なもの。
- 4) 磁製皿：120 mm φ、150 mm φ、平底
- 5) ビーカー：100 mL、200 mL、1 L
- 6) フィルターホルダー：24 mm φ ろ紙用
- 7) ブフナー漏斗：90 mm φ
- 8) ホールピペット（又はマイクロピペット）：1 mL、5 mL、10 mL
- 9) メスフラスコ：100 mL
- 10) メンブレンフィルター：セルロース混合エステル製、孔径 0.45 μm、90 mm φ
- 11) ろ紙：セルロース製、No. 5C、24 mm φ

^{*141} Corcho-Alvarado, J.A., et al.: Determination of strontium radioisotopes in routine and emergency samples, Applied Radiation and Isotopes, 186, 6-8 (2022)

(3) 試薬

日本産業規格 (JIS) の試薬を用い、規格に規定されていないものについては、できるだけ純度の高いものを用いる。

- 1) 純水：イオン交換等により精製された水^{*142}
- 2) エタノール (C₂H₅OH)^{*143, *144}：試薬特級、質量分率 99.5 %以上
- 3) 塩酸 (HCl)^{*143, *145, *146}：試薬特級、質量分率 35.0 %～37.0 %
 - ・ 6 mol/L 塩酸：純水 1 容に塩酸 1 容を加えて混合する。
- 4) 硝酸 (HNO₃)^{*143, *145, *146}：試薬特級、質量分率 60 %～61 %
 - ・ 王水：硝酸 1 容と塩酸 3 容を混合する。
 - ・ 8 mol/L 硝酸：純水 2 容に硝酸 3 容を加えて混合する。
- 5) アンモニア水 (NH₃)^{*143, *145, *146}：試薬特級、質量分率 28.0 %～30.0 %
- 6) 硝酸ストロンチウム (Sr(NO₃)₂)^{*147}：試薬特級
 - ・ Sr 担体溶液 (Sr²⁺：10 mg/mL)：硝酸ストロンチウムを 300 °C の電気炉内で 2 時間～3 時間加熱し、乾燥する。デシケーター中で放冷した後、2.415 g を 100 mL ビーカーに取り、水を加えてかくはんし、完全に溶解させる。溶液を 100 mL メスフラスコに移し、純水を標線まで加え、よくかき混ぜる。
- 7) 炭酸アンモニウム ((NH₄)₂CO₃)：試薬特級
 - ・ 炭酸アンモニウム溶液 (飽和)：炭酸アンモニウム 200 g と純水 250 mL とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解の炭酸アンモニウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体の炭酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。
- 8) 炭酸カルシウム (CaCO₃)：試薬特級
 - ・ Ca 担体溶液 (50 mg Ca²⁺/mL)：炭酸カルシウム 12.5 g を 100 mL ビーカーに取り、水 50 mL を加える。その後、塩酸を少しずつ加えて完全に溶解し、水を加えて 100 mL とする。
- 9) シュウ酸アンモニウム一水和物 ((NH₄)₂C₂O₄·H₂O)^{*146}：試薬特級
 - ・ シュウ酸アンモニウム溶液 (飽和)：シュウ酸アンモニウム一水和物 30 g と純水 250 mL

^{*142} 分析に使用する水は全て純水とする。ICP-AES や AAS による元素の定量分析には JIS K 0116：2014「発光分光分析通則」及び JIS K 0121：2006「原子吸光分析通則」に記載されているとおり、JIS K 0557：1998「用水・排水の試験に用いる水」に規定する A3 又は A4 の純水 (比抵抗率 1 MΩ·cm 以上等) を用いる。また、より高純度の水 (超純水：比抵抗率 18.2 MΩ·cm 以上) を用いるとなおよい。

^{*143} 労働安全衛生法の有害物表示対象物質 (作業者に危険や健康障害を生ずるおそれのあるもの)：ラベル表示や安全データシート交付、リスクアセスメント (リスクの低減対策等) が義務付けられており、これらについて作業者に周知及び教育を行う必要がある。

^{*144} 消防法で危険物第四類 (引火性液体) に分類される。火気厳禁、引火点より低い温度で保管及び使用する、第一類及び第五類危険物を近づけない、静電気の発生に気を付ける、小分けする場合は容器の容量いっぱいまで入れない (熱膨張による容器破損のおそれあり) 等の注意が必要である。

^{*145} 特定化学物質障害予防規則の第三類物質 (大量漏えいにより急性中毒を引き起こす物質)：局所排気装置を設置する等、ばく露される濃度の低減措置をとる必要がある。

^{*146} 毒物及び劇物取締法の対象物質 (急性毒性による健康被害が発生するおそれが高いもの)：貯蔵及び陳列場所には「医薬用外毒物」「医薬用外劇物」の表示をし、盗難・紛失・漏えい等を防ぐための措置を講じる必要がある。

^{*147} 消防法で危険物第一類 (酸化性固体) に分類される。強酸とは接触させない、可燃物との貯蔵を避ける、加熱・衝撃・摩擦を避ける等の注意が必要である。

とを密閉度の高い容器に入れ、十分振り混ぜて静置する。未溶解のシュウ酸アンモニウムが沈降した後の上澄み液を使用する。使用后、純水を補充して振り混ぜておけば、容器の底に固体のシュウ酸アンモニウムが残っている限り飽和溶液として使用できる。

- 10) シュウ酸二水和物 ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)^{*143, *146} : 試薬特級
- 11) ブロモクレゾールグリーン (BCG) 溶液 : pH 試験用
- 12) クラウンエーテル樹脂^{*148} : 粒径 100 μm ~150 μm 、カラムに充填して使用する。カートリッジ型 (粒径 50 μm ~100 μm) を用いてもよい^{*149}。

^{*148} クラウンエーテル樹脂は高温 (30 $^{\circ}\text{C}$ 以上)、低温 (4 $^{\circ}\text{C}$ 以下) を避け、密栓して保管することが望ましい。通常は長期保管が可能とされているが、過去のロットにおいて、保管期間が2年を超えたクラウンエーテル樹脂の Sr 回収率に低下が認められたため、注意が必要である。

^{*149} 使用するカートリッジの樹脂量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。例えば、層密度 0.35 g/mL のカートリッジ型カラム 1 mL には 0.35 g のクラウンエーテル樹脂が充填されている。

7.2 分析操作

7.2.1 試料の前処理

- 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。500 °C の電気炉内で 6 時間程度^{*150}加熱し、灰化する。
- 2) 灰化した試料を 1 L ビーカーに移す。
- 3) 王水 100 mL を加え、200 °C に設定したホットプレート上で乾固するまで加熱し、分解する。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繰り返す。
- 5) 分解した試料に 6 mol/L 塩酸 100 mL を加え、時計皿でビーカーを覆い、150 °C に設定したホットプレート上で 2 時間加熱し、抽出する。
- 6) プフナー漏斗とメンブレンフィルターとを用いて吸引ろ過し、ろ液を既知質量の 200 mL ビーカーに受ける。溶液の一部を分取し、安定 Sr を ICP-AES などにより定量する。残りの溶液に Sr 担体溶液 (Sr²⁺ : 10 mg/mL) 2 mL を正確に加える。

7.2.2 Sr の分離・精製

- 1) 7.2.1 で前処理した溶液に Ca 担体溶液 (Ca²⁺ : 50 mg/mL) 6 mL を加え、ホットプレート上で加熱し、シュウ酸二水和物 5 g^{*151}及び BCG 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 に調整し、シュウ酸塩沈殿を生成させる^{*152}。
- 3) シュウ酸塩沈殿が沈降するまで静置した後、上澄み液にシュウ酸アンモニウム溶液 (飽和) を滴下し、シュウ酸塩沈殿の白い濁りが生じないことを確認する。濁りを生じる場合はシュウ酸二水和物が不足しているので、シュウ酸二水和物を追加して沈殿生成の操作を繰り返す。
- 4) 遠心分離によりシュウ酸塩沈殿を集める^{*153}。シュウ酸塩沈殿を硝酸 25 mL～30 mL で溶解し、200 mL ビーカーに移す。200 °C に設定したホットプレート上で乾固直前まで加熱し、濃縮する。この操作を褐色のガスが発生しなくなるまで繰り返す^{*154}。
- 5) 残さを 8 mol/L 硝酸 20 mL で溶解する^{*155}。

*150 灰化時間を長くしてもよい。

*151 シュウ酸二水和物が過剰又は不足とならないように適宜、増減する。

*152 BCG 溶液は青緑を示す。

*153 沈殿を洗浄する場合、純水又は 1 % のシュウ酸溶液 25 mL を用いて 3 回程度行う。

*154 硝酸の必要量はシュウ酸塩沈殿の量 (試料中の Ca 量) による。なお、分解を繰り返す際の硝酸は 10 mL 程度としてもよい。

*155 乾固物が溶解しない場合は、150 °C に設定したホットプレート上で加熱するか、8 mol/L 硝酸 数 mL を追加する。

- 6) クラウンエーテル樹脂 3 g^{*156}をカラムに充填し^{*157}、8 mol/L 硝酸 50 mL^{*158}でコンディショニングする^{*159}。
- 7) 試料溶液を 1 mL/分程度の流速でカラムに通液する。これ以降の通液についても速度は 1 mL/分程度とする。
- 8) 8 mol/L 硝酸 100 mL をカラムに通液し、Y を溶離する。通液終了時刻を Sr と Y の分離日時として記録する。
- 9) 純水 30 mL をカラムに通液して Sr を溶離し、Sr 溶離液とする。

7.2.3 回収された Sr の定量

- 1) Sr 溶離液にアンモニア水を加えて pH を 9 程度^{*160}とし、炭酸アンモニウム溶液（飽和）5 mL を加える。
- 2) 200 °C に設定したホットプレート上で数分間加熱し、炭酸ストロンチウム沈殿を熟成する。
- 3) 放冷後、フィルターホルダーと既知質量のろ紙とを用いて、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 の乾燥器内で 30 分間加熱し、乾燥する。
- 5) デシケーター中で放冷後、沈殿の質量をはかり、Sr の回収率を求める^{*161}。ICP-AES 等を用いて Sr 回収率を求めてもよい。

^{*156} クラウンエーテル樹脂の量を調整してもよい。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。

^{*157} クラウンエーテル樹脂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。

^{*158} メーカーの技術資料によると、クラウンエーテル樹脂に対する Sr の分配係数は 8 mol/L 硝酸において約 90 とあり、高い親和性を持つ（樹脂に吸着しやすい）。一方、0.05 mol/L 硝酸においては 1 以下となり、硝酸濃度が低いほど溶離する。

^{*159} アスピレーター等を接続した吸引マニホールドを用いるとよい。カラム上部にファネルを取り付け、カラム出口に通過液の受け容器（ビーカーや遠心管を用いる）を設置する。流速はアスピレーター等の吸引の強さで調整するとよい。

^{*160} フェノールフタレインや pH 試験紙などで確認する。

^{*161} Sr 回収率は、(回収した炭酸ストロンチウムの量(mg)) × (87.62/147.63) / (添加した Sr 担体の量(mg) + 分析に供した食品に含まれる安定 Sr 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式量は 147.63 である)。

第 8 章 放射性 Sr の測定

各章で得た測定試料を LSC により測定し、以下の手順により ^{89}Sr 及び ^{90}Sr を定量する。本方法は 2 回の試料測定を必要とする。最初にチェレンコフ光測定を行い、続いてシンチレータを加えてシンチレーション測定を行う。

8.1 装置・器具・試薬

(1) 装置

- 1) アスピレーター：実効排気速度 12 L/分～15 L/分、到達圧力 6.6×10^3 Pa 程度のもの。
- 2) 純水製造装置
- 3) 電気乾燥器：室温～120 °C に温度設定可能なもの。
- 4) 電子天秤：読取限界 0.01 mg 程度のもの。
- 5) ホットプレート：80 °C～250 °C に温度設定可能なもの。サンドバスタイプでもよい。
- 6) AAS：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。
- 7) ICP-AES：重量法もしくは他の方法で安定 Sr 等を定量する場合は不要。
- 8) LSC

(2) 器具

- 1) カラム：内径 10 mm、カラム長 120 mm 程度のもの（ファネル付）。
- 2) ガラスバイアル：低カリウムガラス製、容量 20 mL
- 3) 吸引マニホールド：50 mL 程度の受け容器を設置可能なもの。
- 4) 駒込ピペット：5 mL、10 mL
- 5) ビーカー：100 mL
- 6) ホールピペット（又はマイクロピペット）：1 mL、5 mL、10 mL
- 7) メスフラスコ：100 mL

(3) 試薬

日本産業規格 (JIS) の試薬を用い、規格に規定されていないものについては、できるだけ純度の高いものを用いる。

- 1) 純水：イオン交換等により精製された水^{*162}
- 2) エタノール (C₂H₅OH) ^{*163, *164}：試薬特級、質量分率 99.5 %以上
- 3) 硝酸 (HNO₃) ^{*163, *165, *166}：試薬特級、質量分率 60 %～61 %
 - ・ 8 mol/L 硝酸：純水 2 容に硝酸 3 容を加えて混合する。
 - ・ 6.8 mol/L 硝酸：純水 1 容に硝酸 1 容を加えて混合する。
 - ・ 0.05 mol/L 硝酸：純水 260 容に硝酸 1 容を加えて混合する。
- 4) 過酸化水素 (H₂O₂) ^{*163, *166}：試薬特級
- 5) 硝酸ストロンチウム (Sr(NO₃)₂) ^{*167}：試薬特級
 - ・ Sr 担体溶液 (Sr²⁺：10 mg/mL)：硝酸ストロンチウムを 300 °C の電気炉内で 2 時間～3 時間加熱し、乾燥する。デシケーター中で放冷した後、2.415 g を 100 mL ビーカーに取り、水を加えてかくはんし、完全に溶解させる。溶液を 100 mL メスフラスコに移し、純水を標線まで加え、よくかき混ぜる。
- 6) 酸化イットリウム (Y₂O₃) ^{*163}：質量分率 99.99 %以上
 - ・ Y 担体溶液 (Y³⁺：10 mg/mL)：酸化イットリウム 1.270 g を 6.8 mol/L 硝酸 50 mL に加熱しながら溶解し、放冷後 100 mL メスフラスコに移し、純水を標線まで加え、よくかき混ぜる。
- 7) ⁸⁹Sr 標準液^{*168}
- 8) ⁹⁰Sr 標準液^{*168}

^{*162} 分析に使用する水は全て純水とする。ICP-AES や AAS による元素の定量分析には JIS K 0116：2014「発光分光分析通則」及び JIS K 0121：2006「原子吸光分析通則」に記載されているとおり、JIS K 0557：1998「用水・排水の試験に用いる水」に規定する A3 又は A4 の純水（比抵抗率 1 MΩ・cm 以上等）を用いる。また、より高純度の水（超純水：比抵抗率 18.2 MΩ・cm 以上）を用いるとなおよい。

^{*163} 労働安全衛生法の有害物表示対象物質（作業者に危険や健康障害を生ずるおそれのあるもの）：ラベル表示や安全データシート交付、リスクアセスメント（リスクの低減対策等）が義務付けられており、これらについて作業者に周知及び教育を行う必要がある。

^{*164} 消防法で危険物第四類（引火性液体）に分類される。火気厳禁、引火点より低い温度で保管及び使用する、第一類及び第五類危険物を近づけない、静電気の発生に気を付ける、小分けする場合は容器の容量いっぱいまで入れない（熱膨張による容器破損のおそれあり）等の注意が必要である。

^{*165} 特定化学物質障害予防規則の第三類物質（大量漏えいにより急性中毒を引き起こす物質）：局所排気装置を設置する等、ばく露される濃度の低減措置をとる必要がある。

^{*166} 毒物及び劇物取締法の対象物質（急性毒性による健康被害が発生するおそれが高いもの）：貯蔵及び陳列場所には「医薬用外毒物」「医薬用外劇物」の表示をし、盗難・紛失・漏えい等を防ぐために必要な措置を講じる必要がある。

^{*167} 消防法で危険物第一類（酸化性固体）に分類される。強酸とは接触させない、可燃物との貯蔵を避ける、加熱・衝撃・摩擦を避ける等の注意が必要である。

^{*168} 放射性同位元素等の規制に関する法律が適用される。使用の許可及び届出、販売及び賃貸の業の届出並びに廃棄の業の許可対象物質となる。令和 2 年 3 月 18 日に原子力規制委員会告示第六号により、【放射線を放出する同位元素の数量等を定める件】に、核種ごとの下限数量（告示数量）が記載されている。使用施設が核種ごとの割合（保有 Bq/告示 Bq）を、保有している全ての核種で計算し、足し合わせた総和が「1」を超えないようにする必要がある。また、平成 17 年 6 月に「放射性同位元素等の規制に関する法律施行令」で核種ごとに下限数量の考え方が導入、下限数量以下であれば、管理区域外での使用が認められる。実際に応用する際、公益社団法人日本アイソトープ協会より公表した「下限数量以下での非密封 RI の使用に関する安全取扱マニュアル」を参照すること。（<https://www.jriias.or.jp/report/cat1/308.html>）

- 9) 乳化シンチレータ
- 10) クラウンエーテル樹脂^{*169}：粒径 100 μm～150 μm、カラムに充填して使用する。カートリッジ型（粒径 50 μm～100 μm）を用いてもよい^{*170}。

^{*169} クラウンエーテル樹脂は高温（30℃以上）、低温（4℃以下）を避け、密栓して保管することが望ましい。通常は長期保管が可能とされているが、過去のロットにおいて、保管期間が2年を超えたクラウンエーテル樹脂のSr回収率に低下が認められたため、注意が必要である。

^{*170} 使用するカートリッジの樹脂量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。例えば、層密度 0.35 g/mL のカートリッジ型カラム 1 mL には 0.35 g のクラウンエーテル樹脂が充填されている。

8.2 計数効率の決定

8.2.1 ⁸⁹Sr 計数効率の決定

- 1) ⁸⁹Sr 標準液 約 50 Bq を 20 mL ガラスバイアルに正確に分取する。
- 2) Sr 担体溶液 (Sr²⁺ : 10 mg/mL) 1 mL^{*171}を正確に加え、150 °Cに設定したホットプレート上で^{*172}乾固するまで加熱する^{*173}。
- 3) 数滴の硝酸を添加後、蒸発乾固^{*173}し、硝酸塩を生成する。
- 4) 0.05 mol/L 硝酸 8 mL を 20 mL ガラスバイアルに添加し、緩やかに振り混ぜて沈殿を溶解する。
- 5) 各章の分析操作において炭酸ストロンチウム沈殿のろ過に用いたろ紙と同種のろ紙を、ガラスバイアルに入れる。
- 6) LSCによりチェレンコフ光測定を100分間(10分×10回)行い、⁸⁹Srの計数率(s⁻¹)を分取した⁸⁹Srの量(Bq)で除して計数効率を決定する。
- 7) チェレンコフ光測定終了後、シンチレータ12 mLを加えて振り混ぜる。
- 8) LSCによりシンチレーション測定を100分間(10分×10回)行い、⁸⁹Srの計数率(s⁻¹)を分取した⁸⁹Srの量(Bq)で除して計数効率を決定する。

8.2.2 ⁹⁰Sr 及び ⁹⁰Y 計数効率の決定

- 1) ⁹⁰Sr 標準液 約 20 Bq をビーカーに正確に分取する。
- 2) Sr 担体溶液 (Sr²⁺ : 10 mg/mL) 1 mL^{*171}及び Y 担体溶液 (Y³⁺ : 10 mg/mL) 1 mL を正確に加え、150 °Cに設定したホットプレート上で^{*172}乾固するまで加熱する^{*173}。
- 3) 数滴の硝酸を添加後、蒸発乾固^{*173}し、硝酸塩を生成させる。
- 4) 8 mol/L 硝酸 10 mL を添加する。
- 5) クラウンエーテル樹脂^{*174}3 g をカラムに充填し^{*175}、8 mol/L 硝酸 50 mL^{*176}でコンディショニングする^{*177}。
- 6) 4)の溶液を1 mL/分程度の流速でカラムに通液する。これ以降の通液についても速度は1 mL/分程度とする。
- 7) 8 mol/L 硝酸 100 mL でカラムを洗浄し、6)の通過液と合わせて⁹⁰Yの計数効率測定用溶液とする。
- 8) 純水 30 mL をカラムに通液し、Sr を溶離する。この溶離液を⁹⁰Srの計数効率測定用溶

^{*171} クラウンエーテル樹脂に吸着する安定 Sr の量は、メーカーの技術資料を参考にするとよい。クラウンエーテル樹脂 2 mL 当たり、実用量として 8 mg の Sr 担体を使用可能なものが市販されている。

^{*172} 赤外線ランプを使用してもよい。

^{*173} 乾固の際、沈殿が飛散しやすいので注意する。

^{*174} カートリッジ型カラムを使用してもよい。その際は 5.2.2 (a) の操作に準じて行う。

^{*175} クラウンエーテル樹脂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。

^{*176} メーカーの技術資料によると、クラウンエーテル樹脂に対する Sr の分配係数は 8 mol/L 硝酸において約 90 とあり、高い親和性を持つ(樹脂に吸着しやすい)。一方、0.05 mol/L 硝酸においては 1 以下となり、硝酸濃度が低いほど溶離する。

^{*177} アスピレーター等を接続した吸引マニホールドを用いるとよい。カラム上部にファネルを取り付け、カラム出口に通過液の受け容器(ビーカーや遠心管を用いる)を設置する。流速はアスピレーター等の吸引の強さで調整するとよい。

液とする。

- 9) ^{90}Y の計数効率測定用溶液を乾固し、着色がある場合は白くなるまで硝酸及び過酸化水素水で分解する。
- 10) ^{90}Y を含む乾固物を硝酸で溶解し、既知質量の 20 mL ガラスバイアルに移し、乾固する。
- 11) 乾固物を 0.05 mol/L 硝酸 8 mL で溶解し、その一部を分取して Y の回収率を AAS、ICP-AES 等により求める。
- 12) 各章の分析操作において炭酸ストロンチウム沈殿のろ過に用いたろ紙と同種のろ紙を、ガラスバイアルに入れる。
- 13) LSC によりチェレンコフ光測定を 100 分間 (10 分×10 回) 行い、 ^{90}Y の計数率 (s^{-1}) を分取した ^{90}Sr の量 (Bq) で除して計数効率を決定する。
- 14) チェレンコフ光測定終了後、シンチレータ 12 mL を加えて振り混ぜる。
- 15) LSC によりシンチレーション測定を 100 分間 (10 分×10 回) 行い、 ^{90}Y の計数率 (s^{-1}) を分取した ^{90}Sr の量 (Bq) で除して計数効率を決定する。
- 16) ^{90}Sr の計数効率測定用溶液について、1. 2. 3 の分析操作を実施する。硝酸ストロンチウムの沈殿を数滴の純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。
- 17) 0.05 mol/L 硝酸 8 mL で沈殿を緩やかに振り混ぜて溶解する。
- 18) LSC によりチェレンコフ光測定を 100 分間 (10 分×10 回) 行い、 ^{90}Sr の計数率 (s^{-1}) を分取した ^{90}Sr の量 (Bq) で除して計数効率を決定する。
- 19) チェレンコフ光測定終了後、シンチレータ 12 mL を加えて振り混ぜる。
- 20) LSC によりシンチレーション測定を 100 分間 (10 分×10 回) 行い、 ^{90}Sr の計数率 (s^{-1}) を分取した ^{90}Sr の量 (Bq) で除して計数効率を決定する。

8.3 試料の測定

- 1) 各章の分析操作にしたがって回収率を求めた炭酸ストロンチウムの沈殿を数滴の純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) 測定試料を LSC^{*178} にセットし、100 分間 (10 分×10 回) チェレンコフ光測定を行う。
- 4) 測定試料を取り出し、シンチレータ 12 mL を加え、振り混ぜる。
- 5) LSC にセットし、シンチレーション測定を行う。計 11 回 (各 10 分間) の繰り返し測定を行うが、化学ルミネセンスが起こると計数の増加を引き起こすため、1 回目のデータを棄却する。

*178 チェレンコフ光測定及びシンチレーション測定については解説 A を参照のこと。

8.4 放射能濃度の計算

以下の計算式により、 ^{89}Sr 及び ^{90}Sr の放射能濃度を計算する。算出方法については解説 G を参照のこと。

$$A_t^{\text{Sr}89} = \frac{B_{t_1}^{\text{Sr}89}}{Y_{\text{Sr}} \cdot W_s} \cdot e^{\lambda_{\text{Sr}89} \cdot (t_1 - t)} \quad (8.1)$$

$$A_t^{\text{Sr}90} = \frac{B_{t_1}^{\text{Sr}90}}{Y_{\text{Sr}} \cdot W_s} \cdot e^{\lambda_{\text{Sr}90} \cdot (t_1 - t)} \quad (8.2)$$

$A_t^{\text{Sr}89}$ 基準日時における ^{89}Sr 放射能濃度 (Bq/L 又は Bq/kg)

$A_t^{\text{Sr}90}$ 基準日時における ^{90}Sr 放射能濃度 (Bq/L 又は Bq/kg)

$B_{t_1}^{\text{Sr}89}$ チェレンコフ光測定時の ^{89}Sr 放射能 (Bq)

$B_{t_1}^{\text{Sr}90}$ チェレンコフ光測定時の ^{90}Sr 放射能 (Bq)

t_1 チェレンコフ光測定日時

t 減衰補正の基準日時

$\lambda_{\text{Sr}89}$ ^{89}Sr の壊変定数

$\lambda_{\text{Sr}90}$ ^{90}Sr の壊変定数

Y_{Sr} Sr 回収率

W_s 分析供試量 (L 又は kg)

解 説

解説 A LSC による放射性 Sr 測定における計数効率の確認

(1) 測定方法の概要

LSC による放射性 Sr の測定は 2 回の測定が 1 組を成している。スカベンジングにより ^{90}Y が除去された後、最初の測定はチェレンコフ光測定により、主に ^{89}Sr を測定する。チェレンコフ光測定に引き続き、シンチレータと試料溶液を混合して、シンチレーション測定を行う。この測定は ^{89}Sr 、 ^{90}Sr 及び ^{90}Y を測定対象としているが、 ^{90}Y はスカベンジング後であることから、生成量は少ない。この 2 回の測定結果から、 ^{89}Sr 及び ^{90}Sr の放射能を算出する。LSC による測定イメージを図 A.1 に示す。

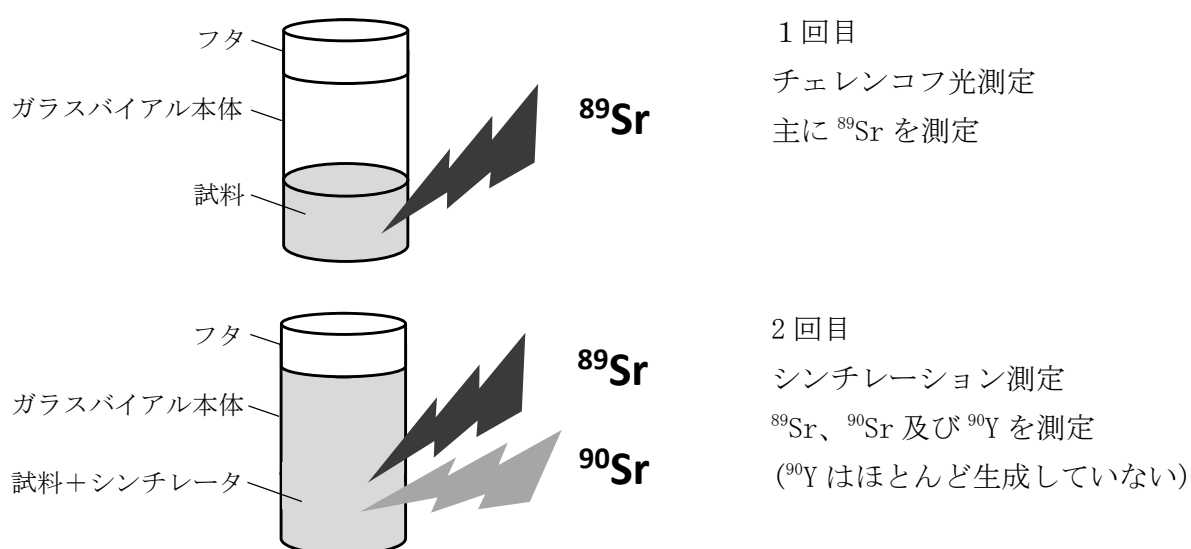


図 A.1 LSC による測定イメージ

LSC による測定は長時間の 1 回測定よりも繰り返し多数回測定の方が望ましい。

多数回測定の各計数値を用いて平均値及び標準偏差を求め、平均値 \pm (3 \times 標準偏差)の範囲から外れる測定結果は異常値として棄却する。異常値を棄却した場合には改めて平均値及び標準偏差を求め、残ったデータに異常値が含まれていないかどうかを確認する。

(2) LSC による計数効率

LSC により ^{89}Sr 及び ^{90}Sr を測定した際の計数効率の一例を表 A.1 に示す。

表 A. 1 LSC における計数効率

核種	計数効率	
	チェレンコフ光測定	シンチレーション測定
^{89}Sr	0.385	0.998
^{90}Sr	0.033	1.000
^{90}Y	0.582	1.000

チェレンコフ光測定では、 ^{89}Sr 及び ^{90}Y の計数効率が高く、他の 2 核種と比較して β 線の最大エネルギーが低い ^{90}Sr の計数効率は低い。このため、チェレンコフ光測定前にスカベンジングにより ^{90}Y が除去されていることを踏まえると、チェレンコフ光測定では ^{89}Sr が主な測定対象となる。

シンチレーション測定では、 ^{89}Sr 、 ^{90}Sr 及び ^{90}Y の計数効率はいずれも高く、おおむね 100 % である。ただし、スカベンジングにより ^{90}Y が除去されており、スカベンジング後から時間はそれほど経過していないことを踏まえると、 ^{89}Sr 及び ^{90}Sr が主な測定対象である。

チェレンコフ光による ^{89}Sr 、シンチレーション測定における ^{89}Sr 及び ^{90}Sr の計数効率は高く、LSC による測定は計数効率の高い測定方法であると考えられる。

解説 B 溶融法及び全分解法を用いた土壌試料の前処理方法

土壌試料の前処理方法として酸抽出、溶融による全分解及びフッ化水素酸による全分解がある（以下各々「酸抽出法」、「溶融法」、「全分解法」という。）^{*179}。それぞれの内容及び処理時間を表 B.1 に示す。

表 B.1 土壌試料の前処理方法及び処理時間

方法	内容	処理時間
酸抽出法	600 °Cで灰化した土壌 5 g ⇒ 王水 ⇒ 硝酸 ⇒ 1 mol/L 硝酸	約 6 時間
溶融法	乾土 0.5 g ⇒ 硝酸ナトリウム 0.2 g、炭酸ナトリウム 0.2 g、ホウ酸リチウム 2.0 g、ヨウ化カリウム 0.1 g を添加 ⇒ 自動溶融装置、マッフル炉、ガスバーナーで溶融	約 1 時間
全分解法	600 °Cで灰化した土壌 1 g ⇒ フッ化水素酸(2 回繰り返す) ⇒ 硝酸(3 回繰り返す) ⇒ 塩酸+ホウ酸 ⇒ 硝酸 ⇒ 1 mol/L 硝酸	約 12 時間

溶融は自動溶融装置、マッフル炉及びガスバーナーのいずれかを使用する。処理時間が最も短い方法はガスバーナーによる溶融であるが、自動溶融装置を使用した溶融でも 1 時間程度で処理可能とされている。

^{*179} マイクロウェーブ分解装置による全分解法もあるが、供試量や機器の使用方法によっては分解容器の変形又は破損が見られるため注意が必要である。

本書では酸抽出法を記載しているが、熔融法、全分解法の詳細を以下に示す。また、それぞれの分析フローを図 B. 1、図 B. 2 に示す。

(a) 熔融法

- 1) 試料（乾土）0.5 g を白金るつぼにはかり取り^{*180}、平らにする。
- 2) 白金るつぼに Sr 担体溶液（Sr²⁺ : 10 mg/mL）2 mL を正確に加え、150 °C に設定したホットプレート上で穏やかに蒸発乾固する。
- 3) 0.2 g 硝酸ナトリウム、0.2 g 炭酸ナトリウム、2.0 g ホウ酸リチウム、0.1 g ヨウ化カリウムを試料表面に加える。
- 4) 電気炉、ガスバーナーなどを用いて熔融する。
- 5) 300 mL ビーカーに 1 mol/L 塩酸 100 mL を入れる。
- 6) 塩酸を激しくかくはんしつつ、熔融した試料を入れる。
- 7) 融成物が溶解するまでかくはんし、水浴で約 10 分冷ます。
- 8) ろ紙を用いてろ過し、ろ液に 1 mol/L 硝酸 70 mL を加えて 1 時間加熱する^{*181}。

(b) 全分解法

- 1) 磁製皿に土壌を取り^{*182}、600 °C の電気炉内で 3 時間程度加熱し、灰化する。
- 2) 灰化した土壌 1 g を約 250 mL のフッ素樹脂製ビーカーに移し、フッ素樹脂製かくはん棒も入れる。
- 3) Sr 担体溶液（Sr²⁺ : 10 mg/mL）2 mL を正確に加え、よくかき混ぜる。
- 4) 40 %フッ化水素酸 40 mL を加え、フッ素樹脂製時計皿でフッ素樹脂製ビーカーを覆い、乾固直前まで濃縮する。この操作をもう 1 回行う。
- 5) 硝酸 50 mL を加えて分解し、乾固直前まで濃縮する。この操作を 3 回行う。
- 6) 塩酸 50 mL、ホウ酸 2 g~3 g を加え、2 時間加熱する。
- 7) 硝酸 数 mL で溶液をビーカーに移し、乾固直前まで濃縮する。
- 8) 湿った残さに硝酸 50 mL を加え、乾固直前まで濃縮する。
- 9) 分解が不完全な場合、再度硝酸 10 mL を加え、乾固直前まで濃縮する。
- 10) 1 mol/L 硝酸 70 mL を加えて 1 時間加熱し、溶解する。
- 11) ろ紙を用いてろ過し、ろ液をビーカーに受ける^{*181}。

^{*180} 乾土 0.5 g 相当の土壌（湿土）を白金るつぼに取って乾燥し、2)以降の操作をしてもよい。

^{*181} 残さがある場合、残さは 1 mol/L 硝酸 3 mL と エタノール 1 mL で洗浄し、乾燥器を用いて約 80 °C で 5 分間乾燥し、さらに真空乾燥を 1 時間した後、必要に応じて全 α 放射能及び全 β 放射能測定を行う。この全 α 放射能及び全 β 放射能測定は難溶性の物質が放出された場合に実施し、放出が見込まれない場合には分析を迅速に実施するため行わない。

^{*182} 湿質量当たりの放射能を求める場合、灰化前後の土壌の質量を記録し、灰化率を求めておく。また、1 g 程度の土壌を取り、600 °C の電気炉内で灰化した後、2)以降の操作を行ってもよい。

(a) 溶融法の分析フロー

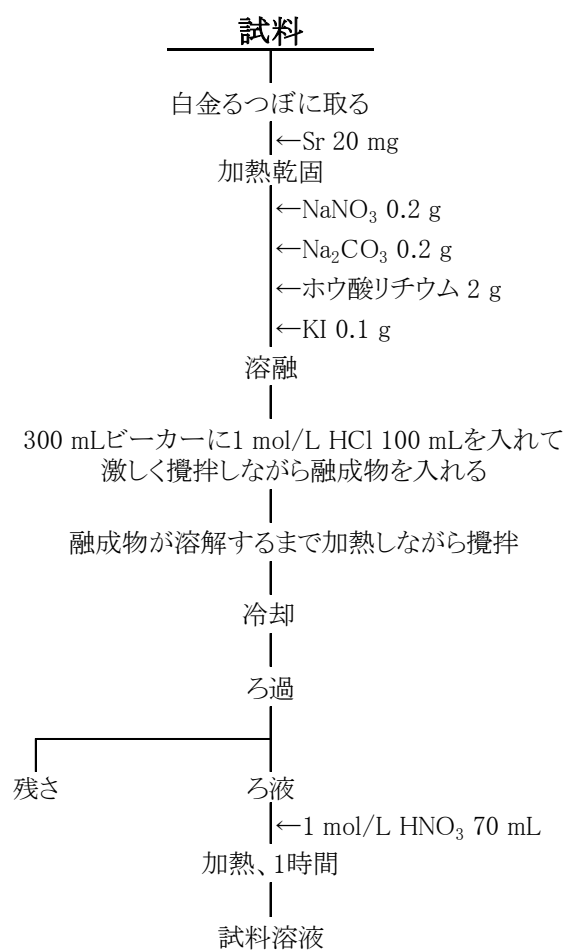


図 B. 1 (a) 溶融法の分析フロー

(b) 全分解法の分析フロー

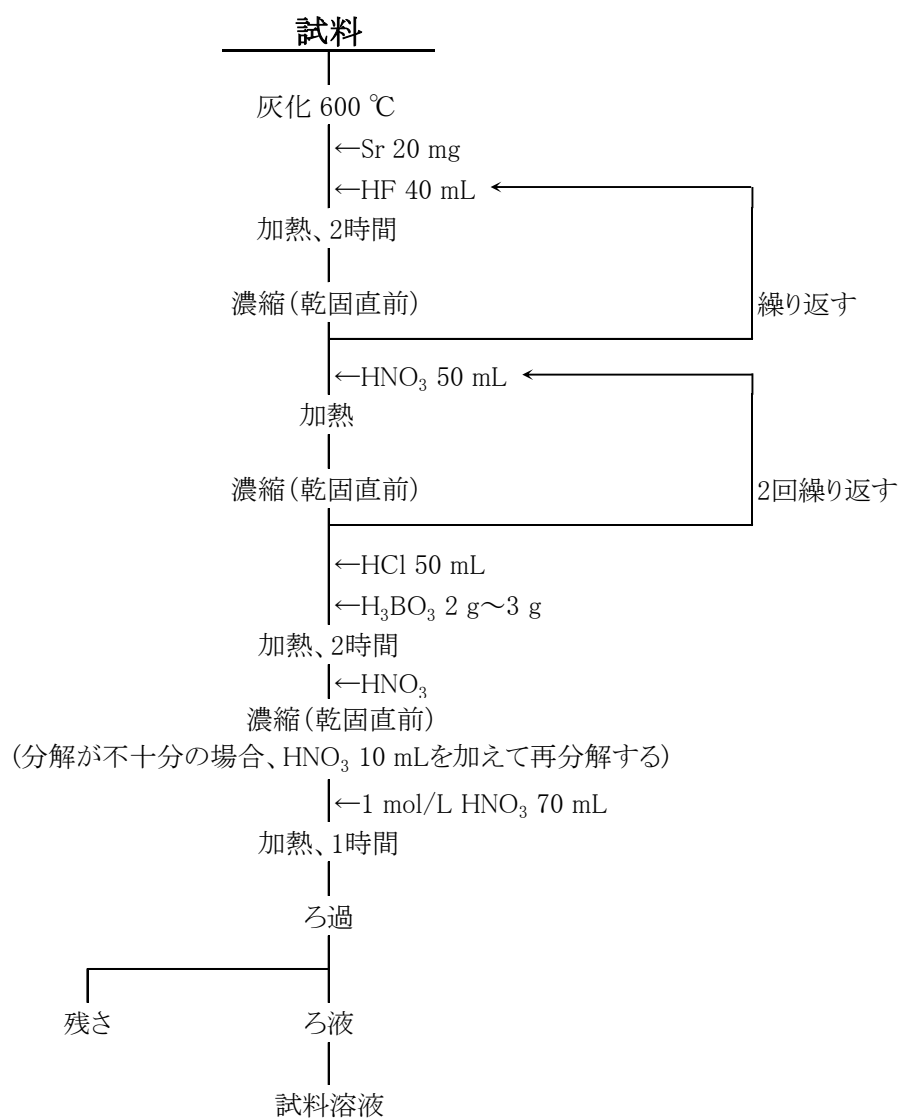


図 B.2 (b) 全分解法の分析フロー

解説 C 本分析法を土壌及び海水に適用することの妥当性確認

土壌^{*183}及び海水^{*184}を本書に示す分析方法で分析・測定した結果と、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」にしたがってイオン交換法で分析し、低バックグラウンド 2π ガスフロー計数装置（以下「LBC」という。）で測定した結果を比較した。なお、土壌の分析においては、解説 B の方法を用いたそれぞれの結果を記載している。

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」の ^{89}Sr 及び ^{90}Sr 分析法の概略を図 C. 1 に示す。

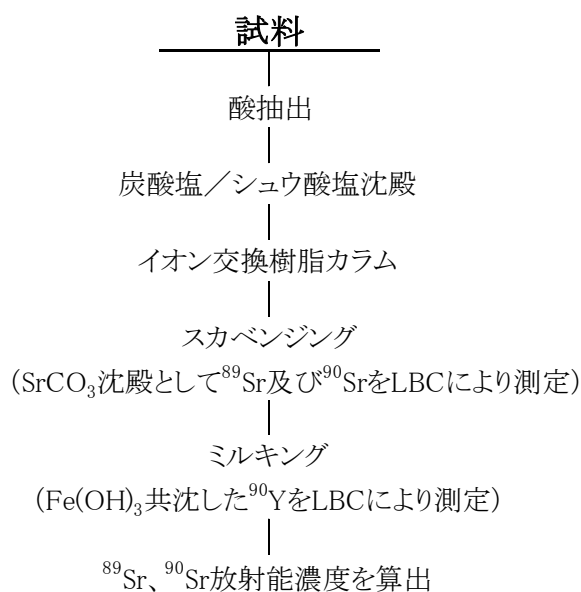


図 C. 1 放射能測定法シリーズ No. 2「放射性ストロンチウム分析法」の ^{89}Sr 及び ^{90}Sr 分析法

^{*183} IAEA より提供されたもので、土壌に ^{89}Sr 及び ^{90}Sr が添加された試料である。

^{*184} IAEA より提供されたもので、海水に ^{89}Sr 及び ^{90}Sr が添加された試料である。

土壌試料の分析結果を表 C. 1、表 C. 2 及び図 C. 2 に、海水の分析結果を表 C. 3、表 C. 4 及び図 C. 3 に示す。回収率はいずれの試料も良好であり、 ^{89}Sr 及び ^{90}Sr の分析結果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」による分析結果とおおむね一致しており、本書に示した分析方法は放射性 Sr を分析する方法として妥当であると考えられた。

表 C. 1 本分析法における土壌試料の Sr 回収率

試料番号	抽出法	回収率(%)
土壌 1	酸抽出法	87
	熔融法	76
	全分解法	86
土壌 2	酸抽出法	91
	熔融法	81
	全分解法	83
土壌 3	酸抽出法	85
	熔融法	73
	全分解法	85
土壌 4	酸抽出法	81
	熔融法	77
	全分解法	85
土壌 5	酸抽出法	82
	熔融法	78
	全分解法	87

表 C.2 土壌試料の分析結果

試料番号	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
土壌 1	本分析法	酸抽出法	9080 ± 220	0.91 ± 0.02	1820 ± 88	1.02 ± 0.05
		溶融法	9670 ± 490	0.97 ± 0.05	1620 ± 150	0.91 ± 0.08
		全分解法	9960 ± 260	1.00 ± 0.03	1920 ± 88	1.07 ± 0.05
	従来法	酸抽出法	9770 ± 180	—	1820 ± 34	—
			10100 ± 180	—	1760 ± 34	—
土壌 2	本分析法	酸抽出法	10800 ± 230	0.97 ± 0.02	1010 ± 90	1.04 ± 0.09
		溶融法	10800 ± 470	0.97 ± 0.04	1070 ± 140	1.11 ± 0.15
		全分解法	11700 ± 280	1.05 ± 0.03	831 ± 91	0.86 ± 0.09
	従来法	酸抽出法	11500 ± 150	—	964 ± 25	—
			10700 ± 160	—	970 ± 26	—
土壌 3	本分析法	酸抽出法	19200 ± 300	0.98 ± 0.02	981 ± 120	1.07 ± 0.13
		溶融法	20200 ± 610	1.04 ± 0.03	806 ± 180	0.88 ± 0.20
		全分解法	20900 ± 340	1.07 ± 0.02	839 ± 110	0.91 ± 0.12
	従来法	酸抽出法	19700 ± 180	—	917 ± 25	—
			19300 ± 170	—	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。

※±以降の数値は計数誤差を示した。

※分析供試量は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 乾土である。

※従来法との比は従来法の平均値との比を示した。

表 C.2 土壌試料の分析結果 (つづき)

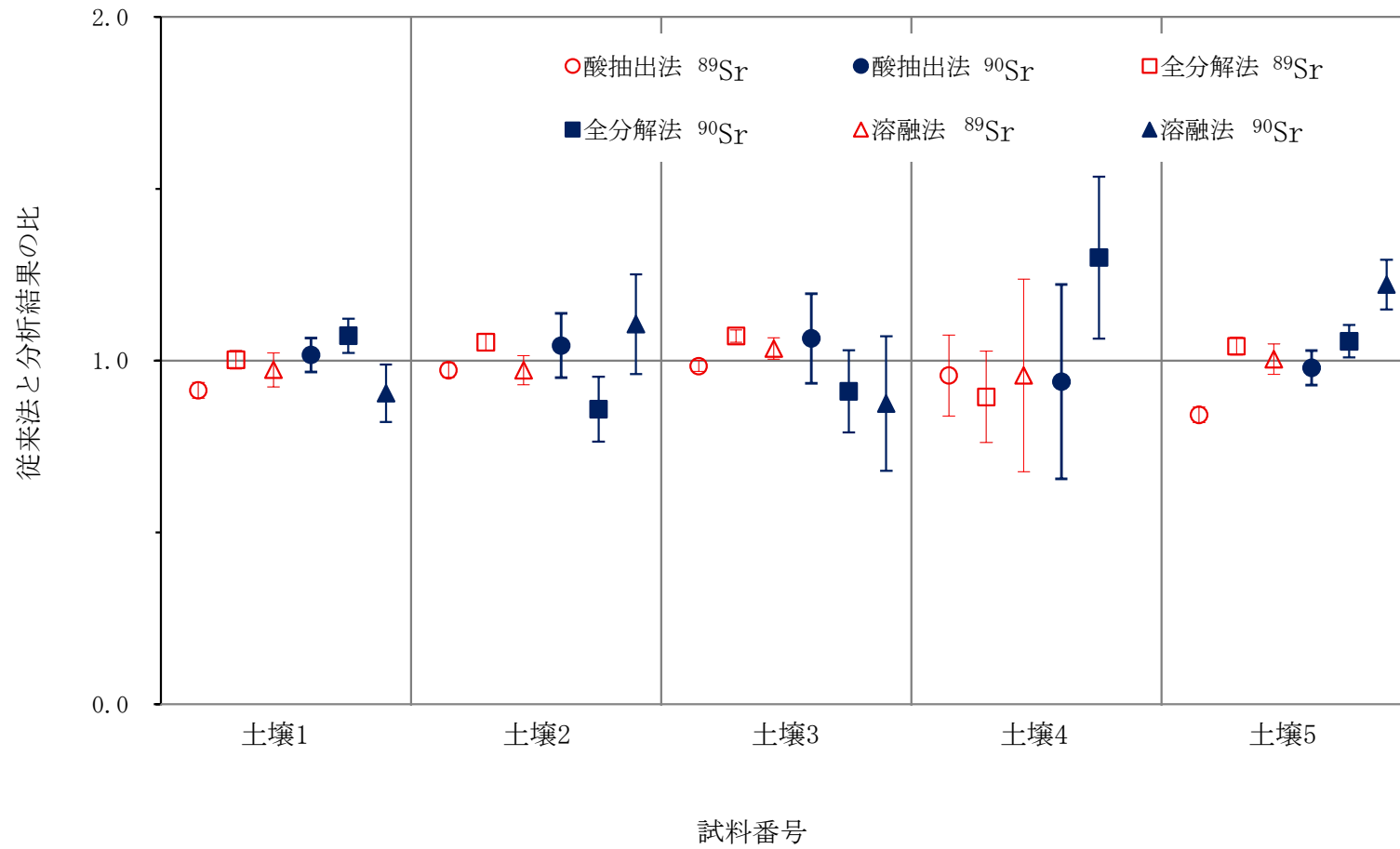
試料番号	分析法	試料分解法	⁸⁹ Sr (Bq/kg 乾土)	従来法との比	⁹⁰ Sr (Bq/kg 乾土)	従来法との比
土壌 4	本分析法	酸抽出法	1230 ± 150	0.96 ± 0.12	200 ± 55	0.94 ± 0.28
		熔融法	1230 ± 360	0.96 ± 0.28	不検出	—
		全分解法	1150 ± 170	0.89 ± 0.13	277 ± 51	1.30 ± 0.24
	従来法	酸抽出法	1190 ± 63	—	208 ± 12	—
			1380 ± 64	—	218 ± 12	—
土壌 5	本分析法	酸抽出法	8970 ± 230	0.84 ± 0.02	1900 ± 91	0.98 ± 0.05
		熔融法	10700 ± 470	1.00 ± 0.04	2370 ± 140	1.22 ± 0.07
		全分解法	11100 ± 270	1.04 ± 0.03	2050 ± 89	1.06 ± 0.05
	従来法	酸抽出法	10400 ± 190	—	1920 ± 34	—
			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。

※±以降の数値は計数誤差を示した。

※分析供試量は抽出法及び全分解法は1 g 乾土、熔融法は0.5 g 乾土、従来法は2 g 乾土である。

※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。

図 C. 2 土壌試料の分析結果

表 C.3 本分析法における海水試料の Sr 回収率

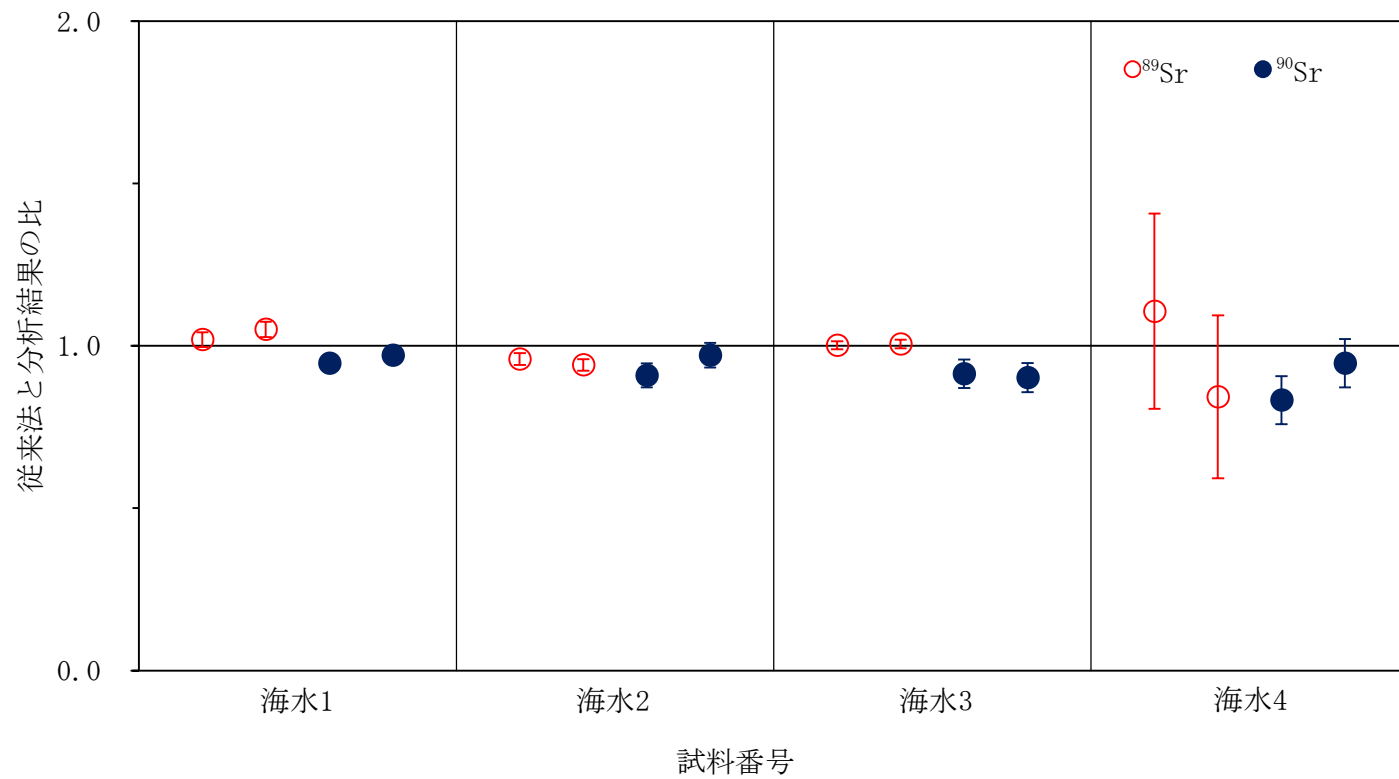
試料番号	回収率(%)
海水 1	88
	83
海水 2	89
	88
海水 3	90
	83
海水 4	85
	88
海水 5	82
	81

表 C.4 海水試料の分析結果

試料番号	分析法	⁸⁹ Sr (Bq/kg)			従来法との比			⁹⁰ Sr (Bq/kg)			従来法との比		
		値	±	値	値	±	値	±	値	±	値	±	
海水 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	—			
海水 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	—			
海水 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	—			
海水 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	—			
海水 5	本分析法	不検出			—		不検出			—			
		不検出			—		不検出			—			
	従来法	不検出			—		不検出			—			

※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。

※±以降の数値は計数誤差を示した。



※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。

図 C. 3 海水試料の分析結果

解説 D 土壌試料分析法のその他環境試料への適用

解説 B 及び解説 C の検討では緊急時における放射性 Sr 分析法の対象試料として、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 Sr 抽出液から Sr 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 Sr 抽出液を土壌の分析法にしたがって分析した場合の Sr 回収率及び Cs 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降下物、大気浮遊じん、陸水、飲料水及び食品である。

D.1 迅速な前処理方法の検討

D.1.1 前処理方法

各種環境試料ごとに検討した前処理方法を以下に示す。

(1) 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、先のろ液と合わせる。

(2) 大気浮遊じん

ろ紙を細かく刻み、500 °C の電気炉内で 3 時間程度灰化し、1 mol/L 塩酸で抽出する。

(3) 食品

試料を数 mm の大きさに細かく刻み、500 °C の電気炉内で 3 時間及び 6 時間程度灰化し、灰化物を硝酸で分解して 6 mol/L 塩酸で抽出する。

D.1.2 検討結果

各種環境試料ごとに検討した結果を以下に示す。

(1) 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。Sr 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。

(2) 大気浮遊じん

ろ紙は 500 °C の電気炉内で 3 時間程度灰化し、その後の抽出にも問題はなかった。Sr 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。

(3) 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。Sr 抽出液を得るまでの前処理所要時間は 10 時間～18 時間

程度であった。

前処理操作における Sr の損失を確認するため、各種環境試料に Sr 担体を添加して上記の前処理方法に従って Sr 抽出液を調製し、添加した Sr 担体と Sr 抽出液中の Sr 量を比較することで、前処理における Sr 損失の有無を確認した。

さらに、得られた各種環境試料の Sr 抽出液を土壌の分析法にしたがって分離・精製し、分離・精製後の Sr フラクシオン（クラウンエーテル樹脂による分離・精製後の溶液）中に含まれる Sr 量を求め、前処理から分離・精製までの Sr 損失を確認した。結果を表 D.1 に示す。

表 D.1 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 Sr 回収率

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

表 D.1 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 Sr 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 250 g	105	96
ホウレンソウ	生 250 g	105	96
しいたけ	生 250 g	102	95
豚肉	生 250 g	103	94
鮭	生 250 g	100	93
アジ	生 250 g	102	92
アサリ	生 250 g	97	80
ワカメ	生 250 g	99	92
米	生 250 g	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、Sr 抽出液中の Sr には損失が見られないことから、検討した前処理法は Sr 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 Sr 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。これらの結果より、飲料水については供試量 1 L、食品については供試量 250 g 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 Sr 分析法にしたがって分析した際の放射性 Cs 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 Cs 担体(10 mg) を添加して分析し、精製後の Sr フラクシオン(クラウンエーテル樹脂による分離・精製を行った溶液)中に含まれる Cs を定量し、Cs 添加値との比から除染係数を確認した。結果を表 D.2 に示す。各種環境試料を分析した際の Cs の除染係数は $10^3 \sim 10^4$ 程度であった。

表 D.2 各種環境試料分析時の Cs の除染係数

試料	除染係数
降下物	4×10^3
大気浮遊じん	1×10^3
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

各種環境試料の分析所要時間及び検出可能レベルを表 D.3 にまとめた。

表 D.3 分析所要時間及び検出可能レベル

試料	分析供試量	検出可能レベル		単位	分析所要時間
		^{89}Sr	^{90}Sr		
降下物	0.05 m ² 、1 日	18	12	Bq/m ² /日	12 時間
大気浮遊じん	1 m ³	0.9	0.6	Bq/m ³	12 時間
陸水及び飲料水	1 L	0.9	0.6	Bq/L	12 時間
食品	0.25 kg	4	3	Bq/kg 生	16 時間～24 時間

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。

解説 E 除染係数の確認

緊急時における放射性 Sr 分析法の前処理から測定までの放射性セシウム (Cs) 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 Cs 担体 (10 mg) を添加して分析し、精製後の Sr フラクシオン中に含まれる Cs を定量し、Cs 添加値との比から除染係数を確認した。結果を表 E. 1 に示す。

表 E. 1 除染係数の確認結果

試料	除染係数
牛乳	6×10^3
海水	3×10^4
土壌	6×10^4

解説 F 各機関間でのクロスチェック結果

(1) クロスチェック実施機関

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、海水及び土壌各 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 ^{89}Sr 及び ^{90}Sr 添加量

^{89}Sr : 80 Bq/試料程度

^{90}Sr : 20 Bq/試料程度

(4) 実施方法

1) コールド試験

Sr 回収率の確認のため、 ^{89}Sr 及び ^{90}Sr 未添加の牛乳、海水及び土壌をクロスチェック実施機関に送付し、クロスチェック実施機関において本書にしたがって分析し、Sr の回収率を求めた。

なお、日本分析センターでは ^{89}Sr 及び ^{90}Sr の放射能測定を行い、牛乳、海水及び土壌中に含まれる ^{89}Sr 及び ^{90}Sr の放射エネルギーを確認した。

2) ホット試験

本書における分析方法全体の妥当性確認のため、牛乳、海水及び土壌に ^{89}Sr 及び ^{90}Sr を添加し、クロスチェック実施機関担当者は本書にしたがって分析した。なお、回収率は重量法及び ICP-AES による方法で求め、測定には既に校正された日本分析センターの LSC 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

(6) 試験結果

クロスチェック実施結果を表 F.1 及び表 F.2 に示す。

表 F.1 コールド試験結果

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

一部の実施機関において、牛乳の Sr 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 Sr 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、Sr 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踏まえて、ホット試験を行った。

表 F.2 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 ± 0.98	1.04	65.6 ± 1.1	0.90	62.4	297 ± 0.97	1.02	64.6 ± 1.0	0.89		
	B	51.1	316 ± 1.2	1.09	68.0 ± 1.2	0.94	53.5	301 ± 1.1	1.04	64.9 ± 1.1	0.89		
	C	60.4	290 ± 1.0	1.00	62.7 ± 1.1	0.86	58.6	300 ± 1.0	1.03	64.6 ± 1.1	0.89		
	D	69.8	275 ± 0.88	0.95	57.8 ± 0.96	0.80	60.6	317 ± 1.0	1.09	66.6 ± 1.1	0.92		
	E	78.9	292 ± 0.85	1.01	68.3 ± 0.94	0.94	75.7	304 ± 0.88	1.05	71.1 ± 0.98	0.98		
	添加値	—	290 ± 4.1	—	72.6 ± 0.94	—	—	290 ± 4.1	—	72.6 ± 0.94	—		
海水	A	88.0	781 ± 2.1	0.98	184 ± 2.2	0.93	83.2	826 ± 2.3	1.03	194 ± 2.4	0.98		
	B	78.6	708 ± 2.2	1.01	158 ± 2.3	0.91	75.5	737 ± 2.2	1.05	164 ± 2.4	0.95		
	C	82.3	695 ± 2.0	0.99	150 ± 2.2	0.87	77.5	738 ± 2.1	1.05	160 ± 2.4	0.92		
	D	83.1	707 ± 2.1	1.01	153 ± 2.3	0.88	80.0	734 ± 2.2	1.05	159 ± 2.4	0.92		
	E	84.0	700 ± 2.0	1.00	151 ± 2.2	0.87	81.5	721 ± 2.1	1.03	155 ± 2.2	0.89		
	添加値	—	700 ± 10	—	173 ± 2.3	—	—	700 ± 10	—	173 ± 2.3	—		

※分析供試量は牛乳 0.25 L、海水 0.1 L である。

※牛乳、海水は重量法にて ⁸⁹Sr 及び ⁹⁰Sr 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。

※±以降の数値は計数誤差を示した。

表 F.2 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
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 ± 42 (16400 ± 230)	0.97	3510 ± 45 (4090 ± 53)	0.86	90.3	16700 ± 44 (16400 ± 230)	1.02	3650 ± 47 (4090 ± 53)	0.89

※土壌の分析供試量は 5 g 乾土である。

※±以降の数値は計数誤差を示した。

参加機関による牛乳、海水及び土壌の分析において Sr 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 Sr 回収率が低くなった理由については、クラウンエーテル樹脂に通液する前の試料乾固物を 8 mol/L 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、過誤により本書の分析操作に準拠していなかったため、表 F. 2 の土壌の結果には記載していない。

^{89}Sr 及び ^{90}Sr 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 ^{89}Sr で 0.94~1.09、 ^{90}Sr 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 ^{89}Sr で 1.01~1.09、 ^{90}Sr で 0.89~0.98 であり、今回参加した各機関の分析結果の偏差は、IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No.27^{*185}において実施した試験所間比較における各分析機関の偏差と同程度であった。重量法及び ICP-AES により求めた Sr 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。

^{*185} IAEA: 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)

解説 G ⁸⁹Sr 及び ⁹⁰Sr 放射能濃度の算出方法

⁸⁹Sr 及び ⁹⁰Sr 放射能濃度の算出方法は、IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 27^{*186}に記載の方法を採用した。8.4に記載したとおり、基準日時 t における ⁸⁹Sr 及び ⁹⁰Sr の放射能濃度 A_t^{Sr89} 及び A_t^{Sr90} は次の式(8.1)及び式(8.2)より求める。本章では各工程で得られた各推定値（入力値）を用いた放射能濃度の算出方法について解説する。

$$A_t^{Sr89} = \frac{B_{t_1}^{Sr89}}{Y_{Sr} \cdot W_s} \cdot e^{\lambda_{Sr89} \cdot (t_1 - t)} \quad (8.1)$$

A_t^{Sr89} 基準日時における ⁸⁹Sr 放射能濃度 (Bq/L 又は Bq/kg)

$B_{t_1}^{Sr89}$ チェレンコフ光測定時の ⁸⁹Sr 放射能 (Bq)

λ_{Sr89} ⁸⁹Sr の壊変定数

t_1 チェレンコフ光測定日時

t 減衰補正の基準日時

Y_{Sr} Sr 回収率

W_s 分析供試量 (L 又は kg)

$$A_t^{Sr90} = \frac{B_{t_1}^{Sr90}}{Y_{Sr} \cdot W_s} \cdot e^{\lambda_{Sr90} \cdot (t_1 - t)} \quad (8.2)$$

A_t^{Sr90} 基準日時における ⁹⁰Sr 放射能濃度 (Bq/L 又は Bq/kg)

$B_{t_1}^{Sr90}$ チェレンコフ光測定時の ⁹⁰Sr 放射能 (Bq)

λ_{Sr90} ⁹⁰Sr の壊変定数

t_1 チェレンコフ光測定日時

t 減衰補正の基準日時

Y_{Sr} Sr 回収率

W_s 分析供試量 (L 又は kg)

(1) ⁹⁰Sr 放射能 (Bq) 及び ⁸⁹Sr 放射能 (Bq)

チェレンコフ光測定時の正味計数率 r_c 及びシンチレーション測定時の正味計数率 r_s は式(G.1)及び式(G.2)で表される。

$$r_c = \varepsilon_c^{Sr89} \cdot B_{t_1}^{Sr89} + \varepsilon_c^{Sr90} \cdot B_{t_1}^{Sr90} + \varepsilon_c^{Y90} \cdot B_{t_0}^{Sr90} \cdot f_1 \quad (G.1)$$

r_c チェレンコフ光測定時の正味計数率

ε_c^{Sr89} チェレンコフ光測定における ⁸⁹Sr の計数効率

ε_c^{Sr90} チェレンコフ光測定における ⁹⁰Sr の計数効率

ε_c^{Y90} チェレンコフ光測定における ⁹⁰Y の計数効率

^{*186} IAEA: 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)

- $B_{t_0}^{Sr90}$ Sr と Y の分離時点での ^{90}Sr 放射能 (Bq)
 $B_{t_1}^{Sr89}$ チェレンコフ光測定時の ^{89}Sr 放射能 (Bq)
 $B_{t_1}^{Sr90}$ チェレンコフ光測定時の ^{90}Sr 放射能 (Bq)
 f_1 Sr と Y の分離からチェレンコフ光測定までの ^{90}Y 生成に係る補正係数、
 $f_1 = 1 - \exp(-\lambda_{Y90} \cdot (t_1 - t_0))$
 λ_{Y90} ^{90}Y の壊変定数
 t_0 ^{90}Sr と ^{90}Y の分離日時
 t_1 チェレンコフ光測定日時

$$r_s = \varepsilon_s^{Sr89} \cdot B_{t_2}^{Sr89} + \varepsilon_s^{Sr90} \cdot B_{t_2}^{Sr90} + \varepsilon_s^{Y90} \cdot B_{t_0}^{Sr90} \cdot f_2 \quad (G. 2)$$

- r_s シンチレーション測定時の正味計数率
 ε_s^{Sr89} シンチレーション測定における ^{89}Sr の計数効率
 ε_s^{Sr90} シンチレーション測定における ^{90}Sr の計数効率
 ε_s^{Y90} シンチレーション測定における ^{90}Y の計数効率
 $B_{t_0}^{Sr90}$ Sr と Y の分離時点での ^{90}Sr 放射能 (Bq)
 $B_{t_2}^{Sr89}$ シンチレーション測定時の ^{89}Sr 放射能 (Bq)
 $B_{t_2}^{Sr90}$ シンチレーション測定時の ^{90}Sr 放射能 (Bq)
 f_2 Sr と Y の分離からシンチレーション測定までの ^{90}Y 生成に係る補正係数、
 $f_2 = 1 - \exp(-\lambda_{Y90} \cdot (t_2 - t_0))$
 λ_{Y90} ^{90}Y の壊変定数
 t_0 ^{90}Sr と ^{90}Y の分離日時
 t_2 シンチレーション測定日時

ここで、 ^{90}Sr と ^{90}Y の分離からチェレンコフ光測定までの経過時間及び ^{90}Sr と ^{90}Y の分離からシンチレーション測定までの経過時間が ^{90}Sr の半減期よりも十分に短ければ、 $B_{t_0}^{Sr90} \cong B_{t_1}^{Sr90} \cong B_{t_2}^{Sr90}$ であるため、式 (G. 1) は次のように表される。

$$r_c = \varepsilon_c^{Sr89} \cdot B_{t_1}^{Sr89} + \varepsilon_c^{Sr90} \cdot B_{t_1}^{Sr90} + \varepsilon_c^{Y90} \cdot B_{t_1}^{Sr90} \cdot f_1 \quad (G. 3)$$

式 (G. 3) を $B_{t_1}^{Sr89}$ について解くと、式 (G. 3) は次のように表される。

$$B_{t_1}^{Sr89} = \frac{r_c - B_{t_1}^{Sr90} \cdot (\varepsilon_c^{Sr90} + \varepsilon_c^{Y90} \cdot f_1)}{\varepsilon_c^{Sr89}} \quad (G. 4)$$

同様に、 ^{90}Sr と ^{90}Y の分離からチェレンコフ光測定までの経過時間及び ^{90}Sr と ^{90}Y の分離からシンチレーション測定までの経過時間が ^{90}Sr の半減期よりも十分に短ければ、 $B_{t_0}^{Sr90} \cong B_{t_1}^{Sr90} \cong B_{t_2}^{Sr90}$ であるため、式 (G. 2) は次のように表される。

$$r_s = \varepsilon_s^{\text{Sr}89} \cdot B_{t1}^{\text{Sr}89} \cdot f_3 + \varepsilon_s^{\text{Sr}90} \cdot B_{t1}^{\text{Sr}90} + \varepsilon_s^{\text{Y}90} \cdot B_{t1}^{\text{Sr}90} \cdot f_2 \quad (\text{G. 5})$$

f_3 チェレンコフ光測定からシンチレーション測定までの ^{89}Sr 減衰に係る補正係数、
 $f_3 = \exp(-\lambda_{\text{Sr}89} \cdot (t_2 - t_1))$

式 (G. 4) を式 (G. 5) に代入し、 $B_{t1}^{\text{Sr}90}$ について解くと、式 (G. 5) は次のように表される。

$$B_{t1}^{\text{Sr}90} = \frac{r_s \cdot \varepsilon_c^{\text{Sr}89} - r_c \cdot \varepsilon_s^{\text{Sr}89} \cdot f_3}{\varepsilon_c^{\text{Sr}89} \cdot \varepsilon_s^{\text{Sr}90} + \varepsilon_c^{\text{Sr}89} \cdot \varepsilon_s^{\text{Y}90} \cdot f_2 - \varepsilon_s^{\text{Sr}89} \cdot \varepsilon_c^{\text{Sr}90} \cdot f_3 - \varepsilon_s^{\text{Sr}89} \cdot \varepsilon_c^{\text{Y}90} \cdot f_1 \cdot f_3} \quad (\text{G. 6})$$

ここで、 $\varepsilon_c^{\text{Sr}89} \cdot \varepsilon_s^{\text{Sr}90} + \varepsilon_c^{\text{Sr}89} \cdot \varepsilon_s^{\text{Y}90} \cdot f_2 - \varepsilon_s^{\text{Sr}89} \cdot \varepsilon_c^{\text{Sr}90} \cdot f_3 - \varepsilon_s^{\text{Sr}89} \cdot \varepsilon_c^{\text{Y}90} \cdot f_1 \cdot f_3 = Z$ とおくと、式 (G. 6) は次のように表される。

$$B_{t1}^{\text{Sr}90} = \frac{r_s \cdot \varepsilon_c^{\text{Sr}89} - r_c \cdot \varepsilon_s^{\text{Sr}89} \cdot f_3}{Z} \quad (\text{G. 7})$$

式 (G. 7) を式 (G. 4) に代入すると、式 (G. 4) は次のように表される。

$$B_{t1}^{\text{Sr}89} = \frac{r_c(Z + \varepsilon_c^{\text{Y}90} \cdot \varepsilon_s^{\text{Sr}89} \cdot f_1 \cdot f_3 + \varepsilon_c^{\text{Sr}90} \cdot \varepsilon_s^{\text{Sr}89} \cdot f_3) - r_s(\varepsilon_c^{\text{Sr}90} \cdot \varepsilon_c^{\text{Sr}89} + \varepsilon_c^{\text{Y}90} \cdot \varepsilon_c^{\text{Sr}89} \cdot f_1)}{\varepsilon_c^{\text{Sr}89} \cdot Z} \quad (\text{G. 8})$$

(2) ^{90}Sr 放射能濃度 (Bq/L 又は Bq/kg) 及び ^{89}Sr 放射能濃度 (Bq/L 又は Bq/kg)

式 (8. 1) 及び式 (8. 2) に式 (G. 6) より求めた ^{90}Sr 放射能、式 (G. 8) より求めた ^{89}Sr 放射能、分析供試量、Sr 回収率、計数効率、日時等を入力して放射能濃度を求める。

付 録

付録 A ^{90}Sr 等の核データと壊変図

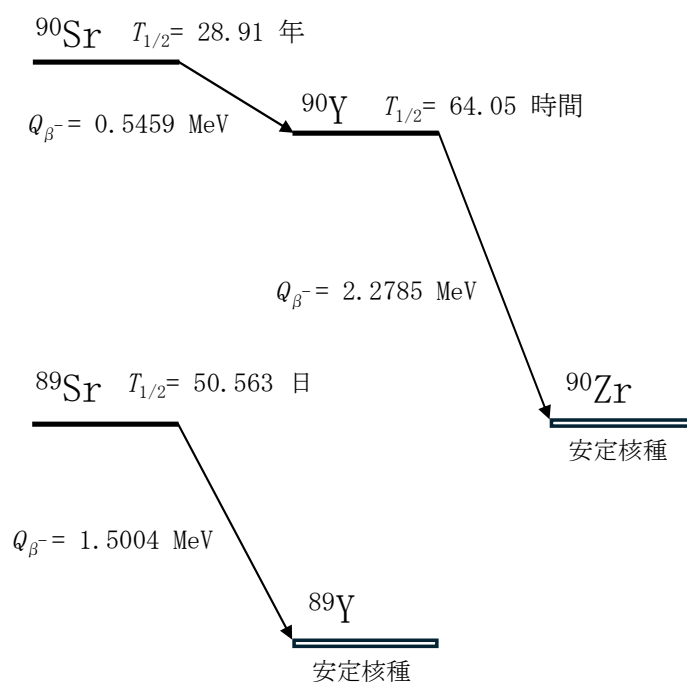
放射能計算に使用する核データは信頼ある核データ集から核データを抽出し、分析結果とともに使用した核データを付記することが望ましい。

本書では、米国 NNDC^{*187}が管理している ENSDF^{*188}より取得した ^{89}Sr 、 ^{90}Sr 及び ^{90}Y の核データを付表 A. 1 に示す。併せて、 ^{89}Sr 及び ^{90}Sr の壊変図を付図 A. 1 に示す。

付表 A. 1 核データ

核種	半減期	β 線最大エネルギー (MeV)	壊変様式 (放出割合(%))
^{89}Sr	50.563 \pm 0.025 日	1.5004 \pm 0.0024	β^- (100)
^{90}Sr	28.91 \pm 0.03 年	0.5459 \pm 0.0014	β^- (100)
^{90}Y	64.05 \pm 0.05 時間	2.2785 \pm 0.0016	β^- (100)

※核データの出典は、ENSDF (最終アクセス日：2026年3月12日) である。半減期及び β 線最大エネルギーは不確かさとともに記載した。



付図 A. 1 ^{89}Sr 及び ^{90}Sr の壊変図

^{*187} National Nuclear Data Center

^{*188} Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF) では、全世界の原子核構造や放射壊変データを集めて評価・整理したデータベースが収録されており、誰でも検索することができる。
(<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>)

付録 B 用語の解説

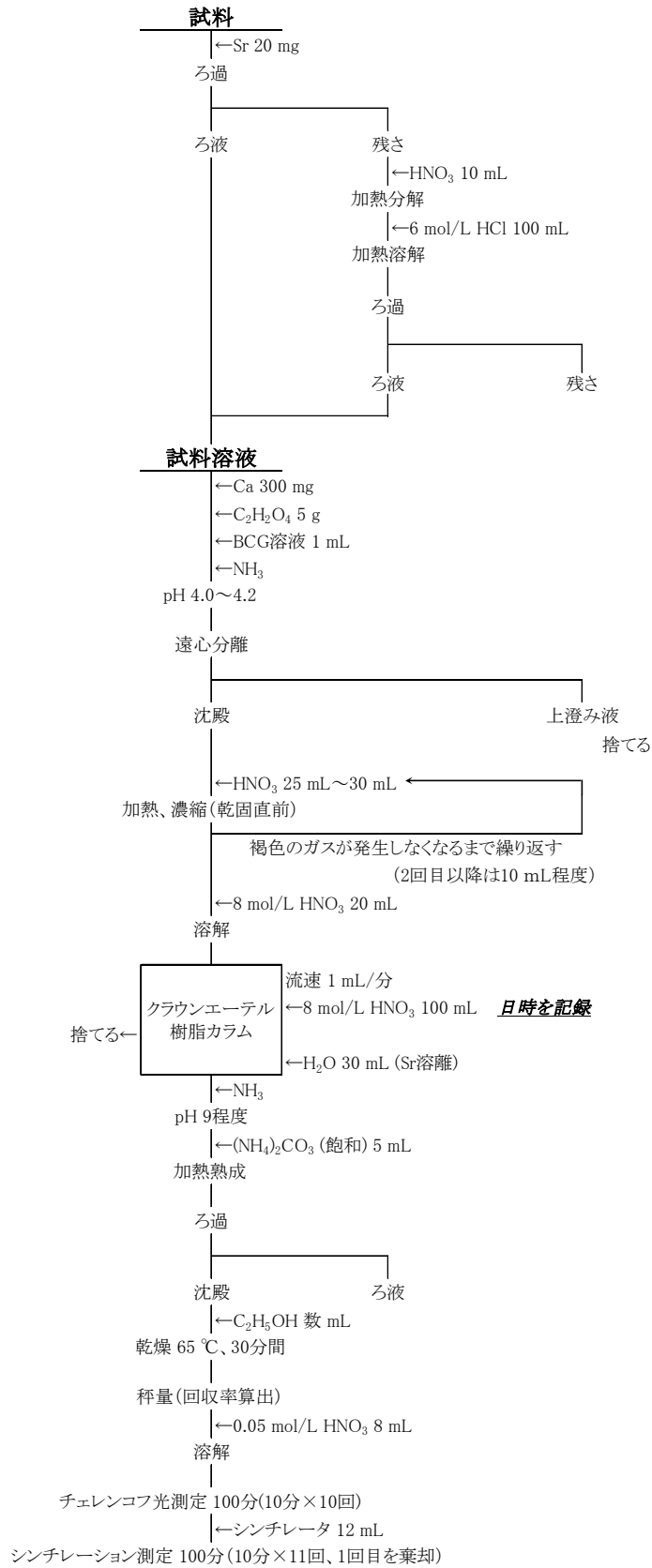
用語	説明
^{90}Y (イットリウム 90)	^{90}Sr の β^- 壊変により生成する放射性核種で、 β 線のみを放出する。 β^- 壊変により ^{90}Zr になり、その半減期は 64.05 時間、 β 線の最大エネルギーは 2.2785 MeV である。
液体シンチレーションカウンタ (液体シンチレーション計数器)	LSC (Liquid Scintillation Counter) と略され、測定試料の発光 (チェレンコフ光、シンチレーション光等) を光電子増倍管で計数する装置。 試料から放出された α 線や β 線を全立体角 (4π) 方向で検出でき、試料による自己吸収がないことから、低エネルギー β 線放出核種の測定に広く用いられている。検出器の周囲に鉛の遮へい体があり、同時計数回路を用いてバックグラウンド計数率を低くしたものや外部放射線の影響を除去するためのガードカウンタを備えたものがある。
共沈	微量であるために、沈殿剤によってそれ自身は沈殿しない濃度の物質を沈殿させる場合、共通の沈殿剤によって沈殿する他の物質 (担体) を加えることにより、担体とともに沈殿させる現象。放射性同位元素のような超微量の物質の化学分離に使われる。
計数率	単位時間当たりの計数値。通常は min^{-1} (1 分当たりの計数値) 又は s^{-1} (1 秒当たりの計数値) で示す。
原子吸光分析法	AAS (Atomic Absorption Spectrometry) とも略される。測定試料をフレーム中に噴霧するか、黒鉛炉内で加熱して測定対象元素を原子化し、これに測定元素特有の波長の光を透過させると基底状態の原子が光を吸収して励起状態に遷移する。この光の吸収度合 (吸光度) から元素濃度を測定する方法。
コンディショニング	測定又は分析操作等に際して装置、試薬、条件等をあらかじめ最適の状態に整えること。ここでは、イオン交換樹脂中やクラウンエーテル樹脂中の不純物除去などの目的で、その使用前に行う一種の前処理のことをいう。
除染係数	対象の放射性物質が前処理等によって除去される程度を示す指標で汚染除去係数ともいわれる。 前処理前の放射能濃度を前処理後の放射能濃度で除した値で表される。除染係数が大きいほど対象の放射性物質がより多く除去されたことを意味する。
シンチレーション光	放射線による原子や分子中の電子励起に基づく発光であり、本書では励起されたシンチレータ中の電子が基底状態に遷移する際に発生する蛍光のことをいう。
スカベンジング	化学分析においては不要な元素を分離・除去する操作を指す。分離・除去するために加えられる担体をスカベンジャーという。 本書においては、試料中で ^{90}Sr から生成した ^{90}Y を除去する操作をスカベンジングという。スカベンジングからミルキング時点までに生成した ^{90}Y の割合を正確に算出するために実施する。

用語	説明
Sr (ストロンチウム)	Sr には 4 つの安定同位体 (質量数 84、86、87 及び 88) 及び 20 以上の放射性同位体が存在する。 環境放射線モニタリング上で最も重要な放射性同位体は ^{89}Sr 及び ^{90}Sr である。
^{89}Sr (ストロンチウム 89) ^{90}Sr (ストロンチウム 90)	原子炉の運転や核実験等によるウランやプルトニウムの核分裂によって生成する。両核種とも β^- 壊変により β 線を放出する。 ^{89}Sr は半減期 50.563 日、 β 線の最大エネルギーは 1.5004 MeV であり、 β 線を放出して ^{89}Y に壊変する。 ^{90}Sr は半減期 28.91 年、 β 線の最大エネルギーは 0.5459 MeV であり、 β 線を放出して ^{90}Y に壊変する。 ^{90}Sr と ^{90}Y との放射平衡の関係を利用して、 ^{90}Sr の定量には ^{90}Y の β 線計測が用いられる。
担体	原子数としてごく微量の放射性核種を沈殿法等で取り扱う場合に、それを付加させるための多量の物質。ここでは、放射性核種を分離したり抽出したりする際に加える安定同位体のこと。 なお、本書において添加する Sr 担体は、分析工程において損失した放射性 Sr の量を補正するための回収率を算出する目的も有する。
チェレンコフ光	荷電粒子が媒体中の光の速度を超える速度で通過するとき生じる光のことをいう。
低バックグラウンド 2π ガスフロー計数装置	LBC (Low Background 2π gas flow Counter) と略され、 α 線や β 線を効率よく測定できる測定装置。検出器の周囲に鉛の遮へい体があり、センターカウンタ及びガードカウンタの 2 つの検出器で逆同時計数を行い、バックグラウンドを低減化している。 検出器は主として GM 計数管が用いられ、その場合にはカウンタガスとして Q ガスが用いられる。カウンタガスに PR ガスが用いられた比例計数管や、近年では様々な検出器を組み合わせたもの、ガスフローではないタイプの検出器も開発されている。 実際の運用においては、使用する検出器に用いられるガスの種類の選択や印加電圧等の仕様を確認すること。
放射平衡	放射性核種 (親) とその核種が壊変してできた核種 (子孫) との放射能の関係が、時間とともにある割合で一定となった状態をいい、両者の半減期の比によって永続平衡又は過渡平衡に分類される。 ^{90}Sr と ^{90}Y とは永続平衡の関係であり、子孫核種の ^{90}Y の半減期に対して十分な時間が経過すると両者の放射能は等しくなる。
ミルクィング	放射平衡が成立している場合、長い半減期を持つ親核種から短寿命の子孫核種を繰り返し分離・抽出する操作。 親核種から子孫核種を分離しても、親核種から再び子孫核種が生成するので、ある時間を経過させることによって何回でも繰り返し子孫核種を分離・抽出することができる。乳牛からの搾乳になぞらえてミルクィングと呼ばれている。

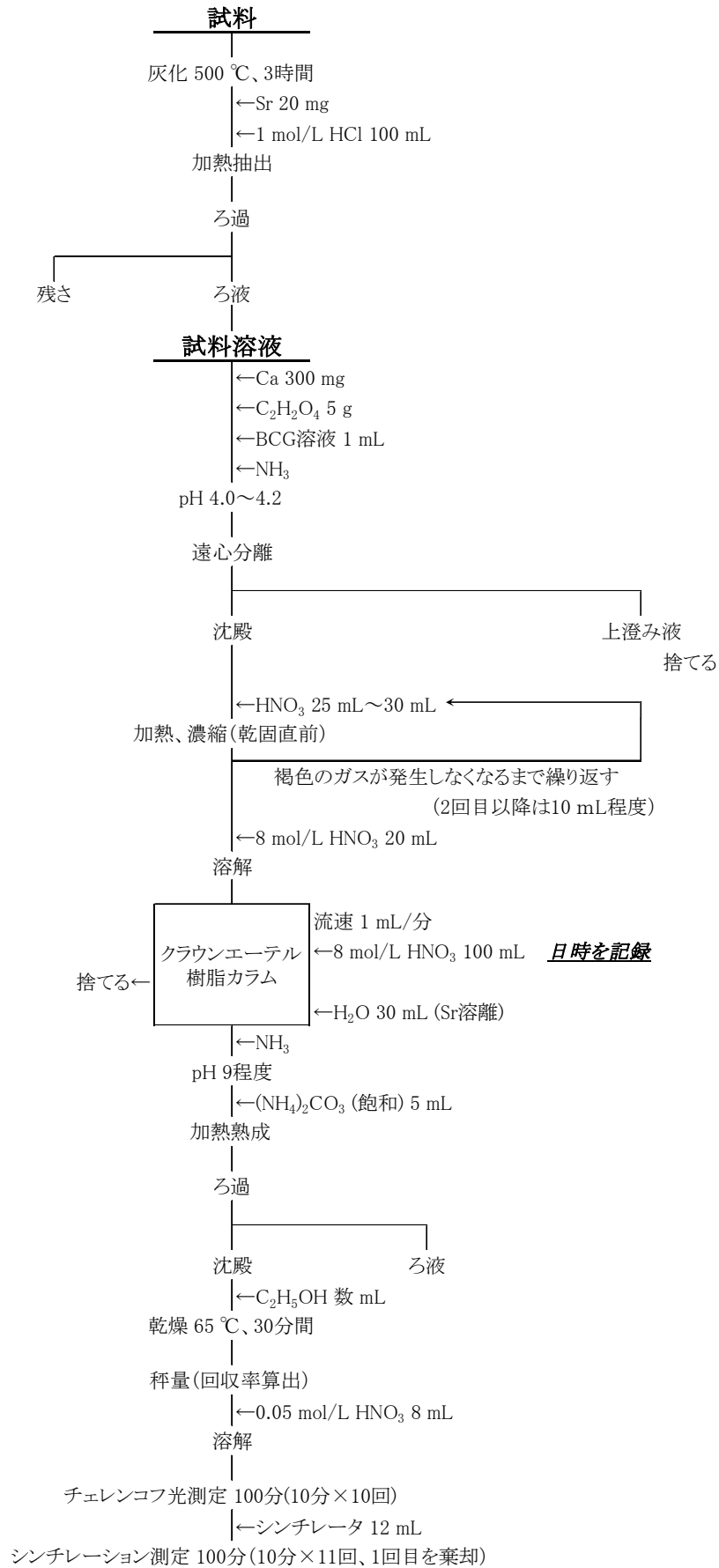
用語	説明
誘導結合プラズマ発光分光分析法	<p>ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) 又は ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy) と略され、高周波誘導結合プラズマ (ICP) を光源とする発光分光分析法である。</p> <p>試料溶液を霧状にしてアルゴンプラズマに導入し、励起された元素が基底状態に戻る際に放出する光を分光して、波長から元素の定性を、発光強度から定量を行う。</p>

付録C 緊急時における放射性 Sr 分析フロー

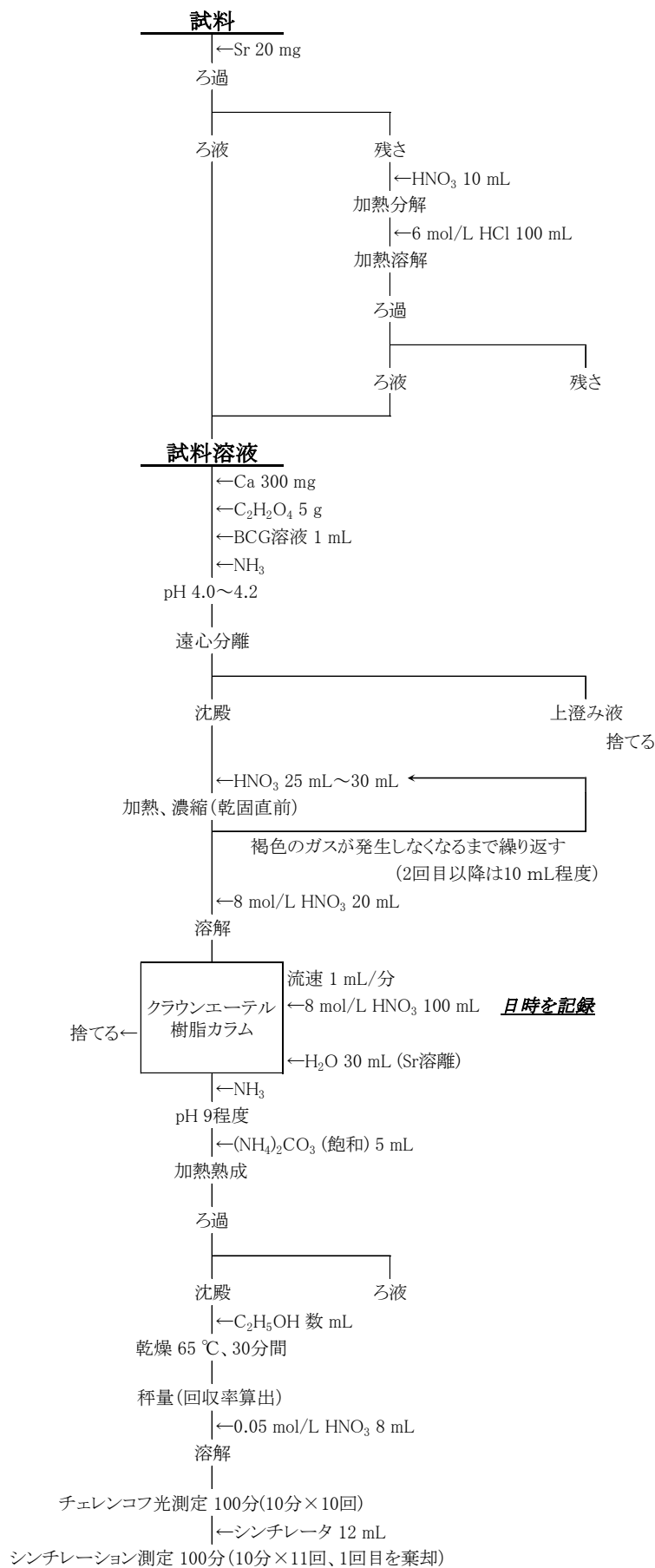
降下物



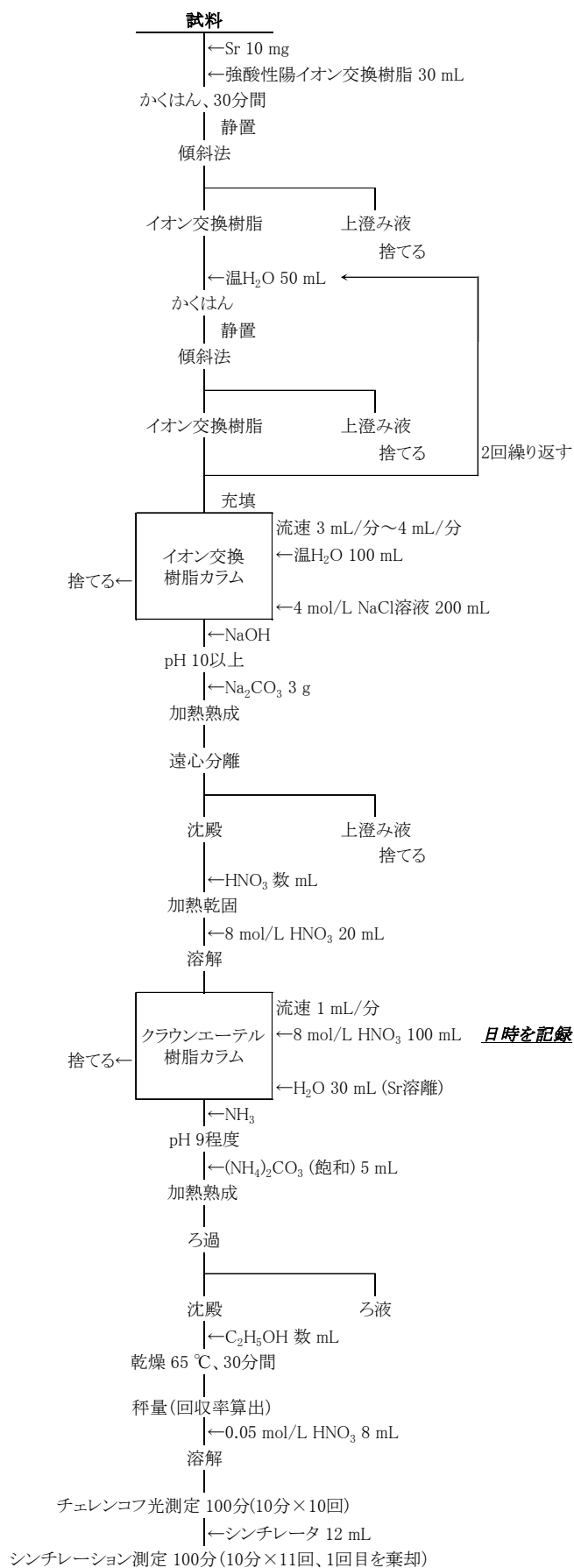
大気浮遊じん



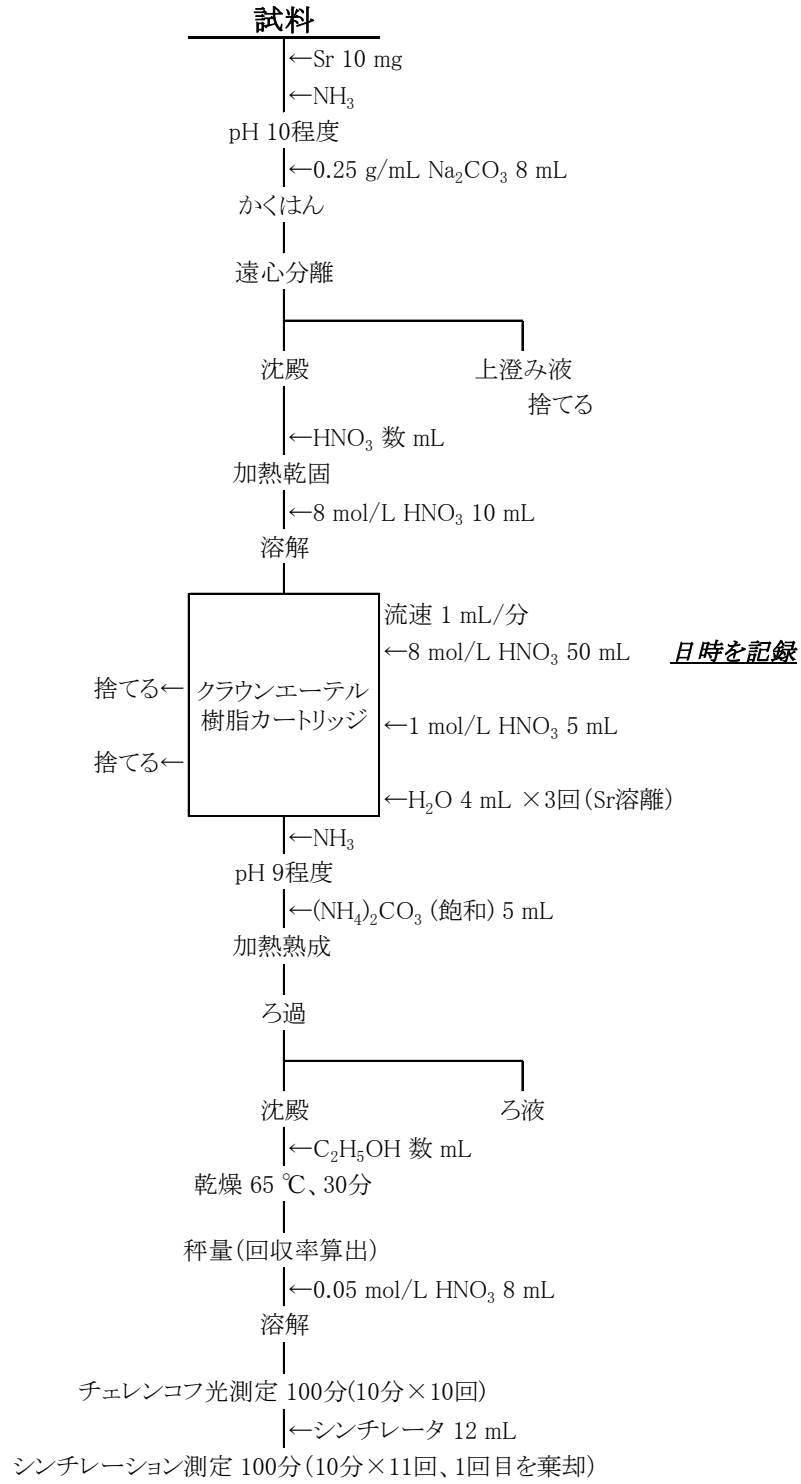
陸水及び飲料水



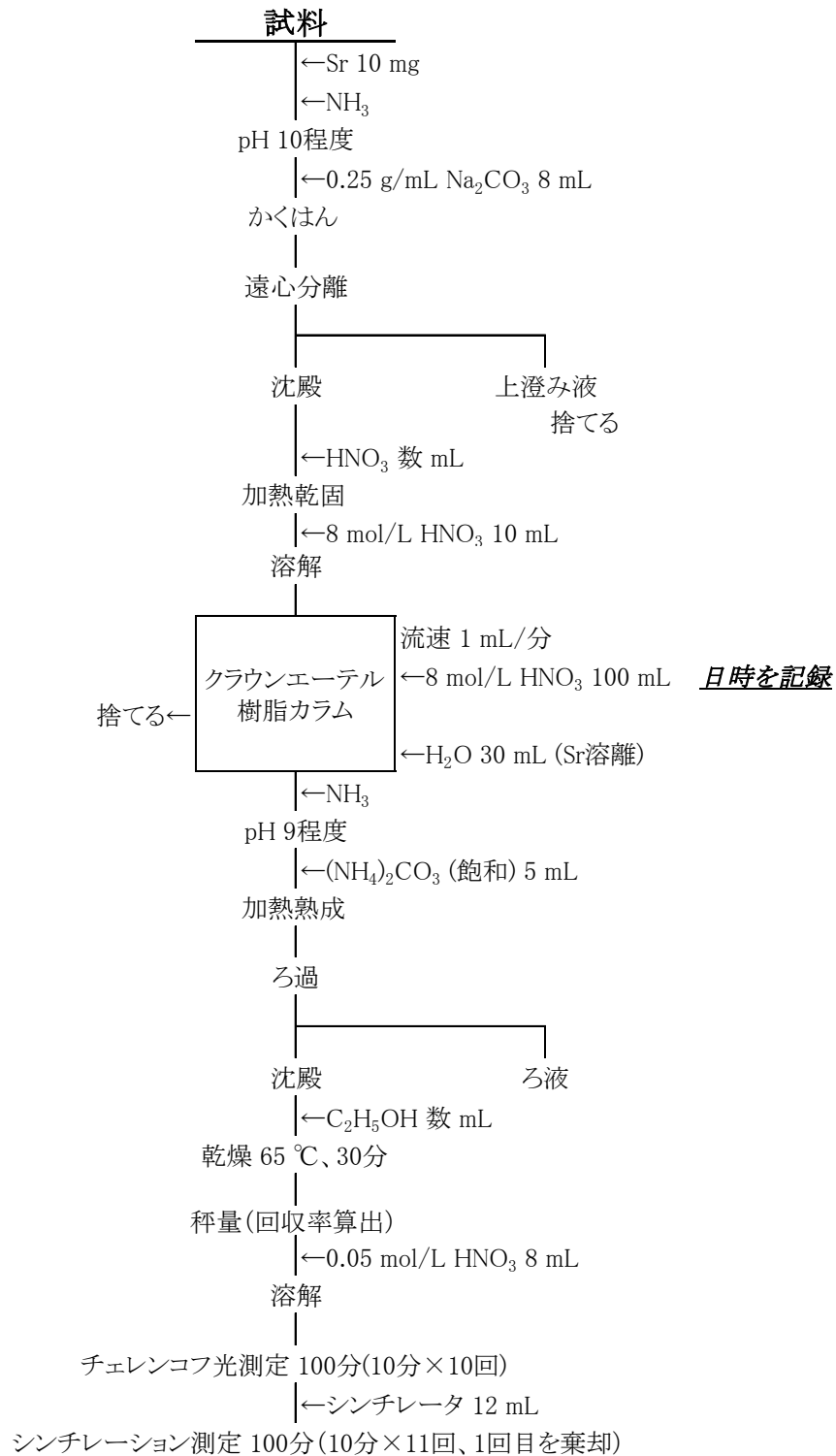
牛乳



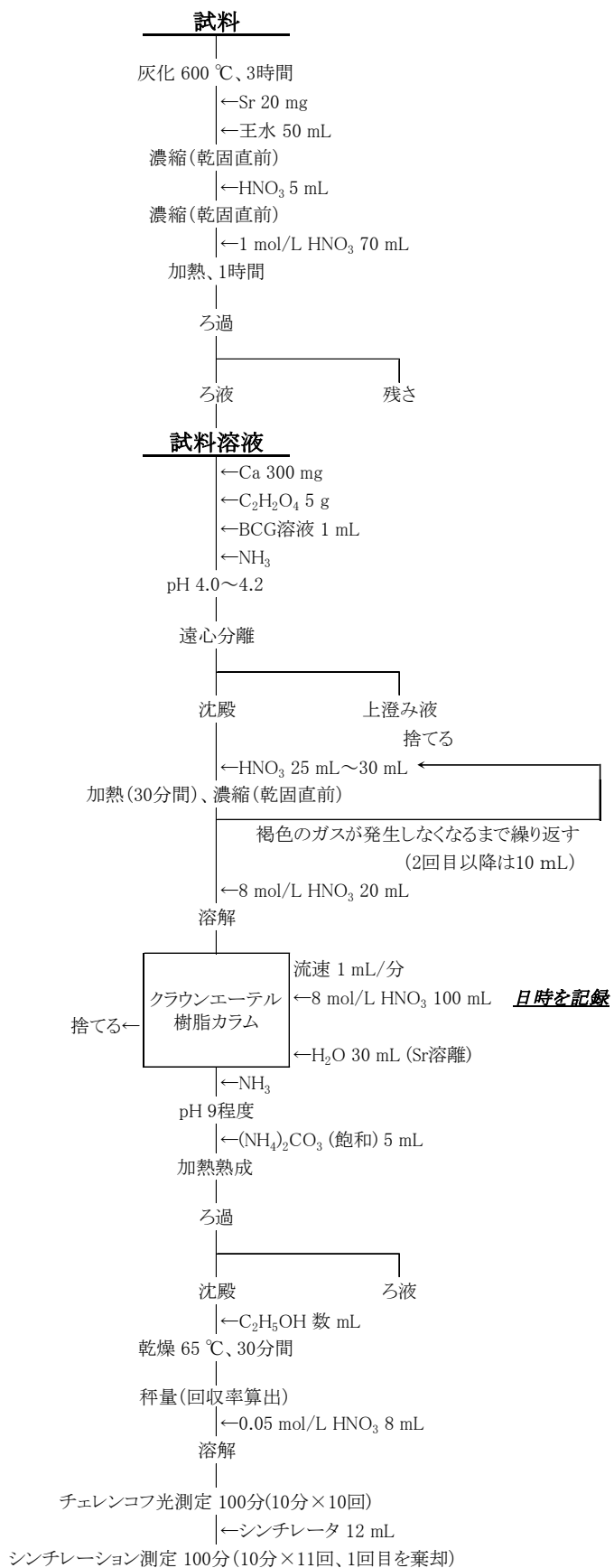
海水 (カートリッジ)



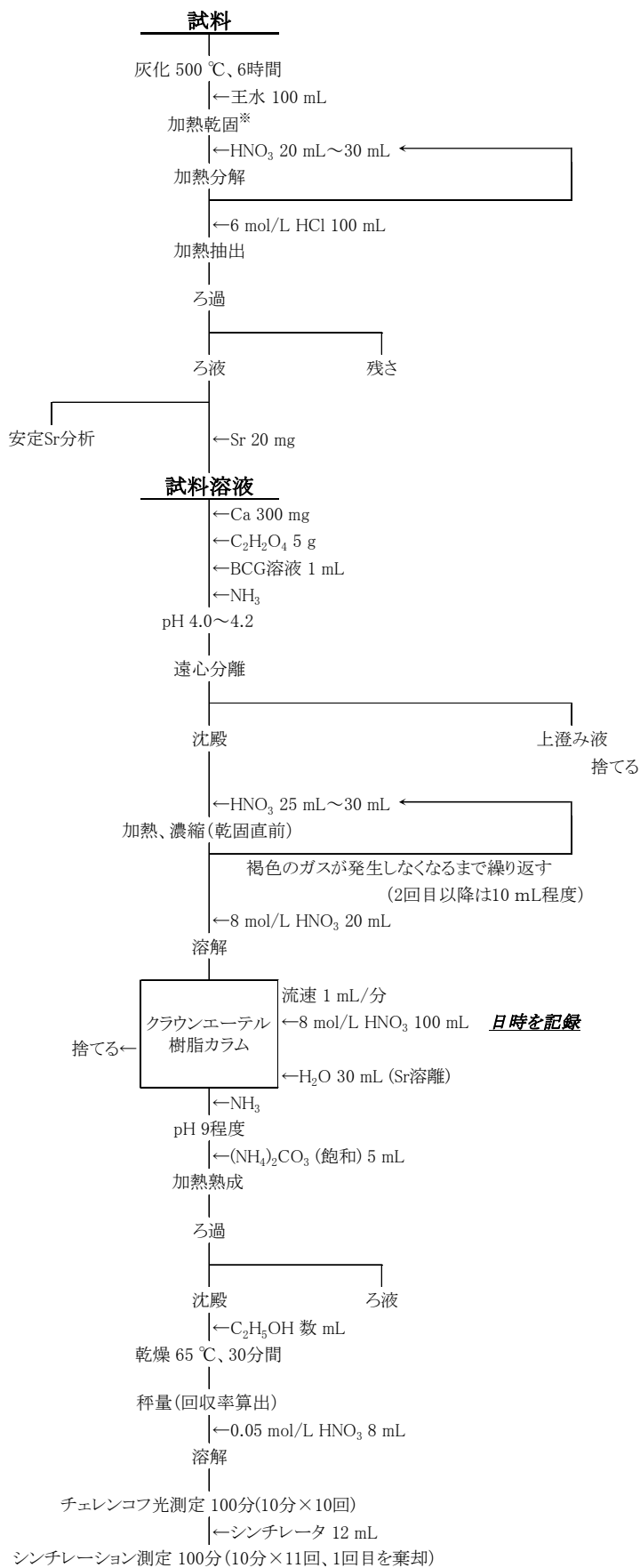
海水 (カラム)



土壌 抽出法



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。

参考文献

- 1) 原子力規制庁監視情報課：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）（令和6年3月21日改訂）
- 2) IAEA: Generic Procedures for Monitoring in a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA TECDOC, No.1092 (1999)
- 3) IAEA: Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards Series, No.GSG-2 (2011)
- 4) IAEA: 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)
- 5) Corcho-Alvarado, J.A., et al.: Determination of strontium radioisotopes in routine and emergency samples, Applied Radiation and Isotopes, 186, 6-8 (2022)
- 6) JIS K 0116 : 2014 「発光分光分析通則」
- 7) JIS K 0121 : 2006 「原子吸光分析通則」
- 8) JIS K 0557 : 1998 「用水・排水の試験に用いる水」
- 9) IAEA: A Procedure for Rapid Determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Seawater in Emergency Situations (2026) (注) 本レポートは IAEA HP に 2026 年 8 月頃に公開予定のため、本測定法シリーズの完成時には公開されていない。
- 10) Evaluated Nuclear Structure Data File, National Nuclear Data Center
(<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>)
- 11) Green, N., Wilkins, B.T.: An assessment of rapid methods of radionuclide analysis for use in the immediate aftermath of an accident.: Monitoring and Surveillance in Accident Situations (Chadwick, K.; Menzel, H., eds.), Rep. EUR 12557 EN, Commission of the European Communities, 103-135 (1993)
- 12) Vajda, N., Kim, C.K.: Determination of radiostrontium isotopes: a review of analytical methodology, Applied Radiation and Isotopes, 68, 2306-2326 (2010)
- 13) Tayeb, M., et al.: Rapid and simultaneous determination of Strontium-89 and Strontium-90 in seawater, Journal of Environmental Radioactivity, 153, 214-221 (2016)
- 14) Maxwell, S.L., et al.: Rapid determination of radiostrontium in large soil samples, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 295, 965-971 (2013)
- 15) Maxwell, S.L., et al.: Rapid separation of actinides and radiostrontium in vegetation samples, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 286, 273-282 (2010)
- 16) Lopes, I., et al.: Advances in Liquid Scintillation Spectrometry, LSC 2008: Proceedings of the 2008 International Liquid Scintillation Conference, 331-337 (2009)

- 17) Chmielewska, I., et al.: Advances in Liquid Scintillation Spectrometry, LSC 2008: Proceedings of the 2008 International Liquid Scintillation Conference, 53-57, ISBN: 9780963831460 (2009)
- 18) Pichestapong, P., et al.: Separation of Yttrium-90 from Strontium-90 by Extraction Chromatography Using Combined Sr Resin and RE Resin, Energy Procedia, 89, 366-372 (2016)
- 19) Horwitz, E.P., et al.: The application of novel extraction chromatographic materials to the characterization of radioactive waste solutions, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 161, 575-583 (1992)
- 20) Brun, S., et al.: Methodology for determination of radiostrontium in milk: a review, Lait, 83, 1-15 (2003)
- 21) Olfert, J.M., et al.: Rapid determination of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ in water samples by liquid scintillation and Cherenkov counting, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 300, 263-267 (2014)

本書の作成経過、委員会名簿及び会議開催経過

1. 本書の作成経過

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

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

令和6年度

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

(敬称略・五十音順)

事務局 公益財団法人日本分析センター

第1回 令和6年8月9日

第2回 令和6年10月31日

第3回 令和6年12月9日

第4回 令和7年2月27日

令和7年度

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

松原昌平 公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問

(敬称略・五十音順)

事務局 公益財団法人日本分析センター

第1回 令和7年8月7日

第2回 令和7年11月10日

第3回 令和8年1月8日

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

令和6年度

原子力規制委員会

伴 信彦 委員

外部専門家

工藤俊明 青森県原子力センター 所長

黒澤忠弘 国立研究開発法人産業技術総合研究所

計量標準総合センター 分析計測標準研究部門 副研究部門長

佐藤玖莉 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課

高田兵衛 福島大学 環境放射能研究所 准教授

武石 稔 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力安全・防災研

究所 原子力緊急時支援・研修センター 専門研修グループ

テクニカルアドバイザー

西沢博志 福井工業大学 工学部原子力技術応用工学科 教授

蜂須賀暁子 国立医薬品食品衛生研究所 有機化学部 主任研究官

濱松潮香 公益財団法人東京都農林水産振興財団

東京都農林総合研究センター 所長

山田崇裕 近畿大学 原子力研究所 教授

(敬称略・五十音順)

原子力規制庁

児嶋洋平 核物質・放射線総括審議官

監視情報課

川口悦生 課長

佐々木潤 企画官

監視情報課放射線環境対策室

久保善哉 室長

放射線防護企画課

黒川陽一郎 課長

放射線・廃棄物研究部門

高橋知之 統括技術研究調査官

酒井宏隆 上席技術研究調査官

柚木 彰 主任技術研究調査官

第 21 回会合 令和 6 年 9 月 9 日開催

第 22 回会合 令和 7 年 1 月 28 日開催

令和 7 年度

原子力規制委員会

神田玲子 委員

外部専門家

工藤俊明 青森県原子力センター 所長

黒澤忠弘 国立研究開発法人産業技術総合研究所

計量標準総合センター 分析計測標準研究部門 副研究部門長

佐藤玖莉 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課

高田兵衛 福島大学 環境放射能研究所 教授

武石 稔 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力安全・防災研

究所 原子力緊急時支援・研修センター 専門研修グループ

テクニカルアドバイザー

西沢博志 福井工業大学 工学部原子力技術応用工学科 教授

蜂須賀暁子 国立医薬品食品衛生研究所 有機化学部 主任研究官

濱松潮香 公益財団法人東京都農林水産振興財団

東京都農林総合研究センター 所長

山田崇裕 近畿大学 原子力研究所 教授

(敬称略・五十音順)

原子力規制庁

古金谷敏之 核物質・放射線総括審議官

監視情報課

川口悦生 課長

環境放射線モニタリング総合推進室

佐々木潤 室長

斎藤美紀子 室長補佐

河野恭彦 モニタリング企画専門官

放射線防護企画課

黒川陽一郎 課長

技術基盤グループ

酒井宏隆 安全技術管理官（放射線・廃棄物担当）

高橋知之 統括技術研究調査官（放射線防護担当）

森泉 純 放射線・廃棄物研究部門 主任技術研究調査官

柚木 彰 放射線・廃棄物研究部門 主任技術研究調査官

公益財団法人 日本分析センター

中村尚司 放射能測定法シリーズ改訂検討委員会 委員長

一般社団法人 日本電気計測器工業会（JEMIMA）

亀田周二 製品別部会 放射線計測委員会（第23回のみ）

第23回会合 令和7年10月9日開催

第24回会合 令和8年2月10日開催

制定履歴

令和8年6月 制定