



JAEA-Data/Code

2019-004

DOI:10.11484/jaea-data-code-2019-004

JRR-2 及び JRR-3 から発生した 放射性廃棄物に対する放射化学分析

Analysis of the Radioactivity Concentrations in Low-level Radioactive Waste
Generated from JRR-2 and JRR-3 Facilities

原賀 智子 下村 祐介 水飼 秋菜 石森 健一郎
亀尾 裕

Tomoko HARAGA, Yusuke SHIMOMURA, Akina MITSUKAI, Ken-ichiro ISHIMORI
and Yutaka KAMEO

原子力科学研究部門
原子力科学研究所
バックエンド技術部

Department of Decommissioning and Waste Management
Nuclear Science Research Institute
Sector of Nuclear Science Research

October 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

JRR-2 及び JRR-3 から発生した放射性廃棄物に対する放射化学分析

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 バックエンド技術部

原賀 智子、下村 祐介⁺¹、水飼 秋菜、石森 健一郎、亀尾 裕

(2019 年 4 月 3 日受理)

日本原子力研究開発機構の研究施設等から発生する研究施設等廃棄物は、放射能レベルに応じて将来的に浅地中埋設処分される予定であり、埋設処分を開始するまでに、廃棄体の放射能濃度を評価する方法を構築する必要がある。そこで、原子力科学研究所バックエンド技術部では、研究施設等廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討に資するため、原子力科学研究所内で保管されている JRR-2 及び JRR-3 から発生した放射性廃棄物から分析試料を採取し、放射化学分析を実施した。本報告書は、平成 28 年度から 29 年度に取得した 19 核種 (^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{94}Nb 、 ^{99}Tc 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{129}I 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 ^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm) の放射能濃度データについて整理し、放射能濃度評価方法の検討のための基礎資料としてまとめたものである。

本報告書は、ニュークリアデベロップメント株式会社が国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との契約により実施した業務成果に基づくものである。

原子力科学研究所: 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4

+1 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 環境技術開発センター 環境保全部

Analysis of the Radioactivity Concentrations in Low-level Radioactive Waste
Generated from JRR-2 and JRR-3 Facilities

Tomoko HARAGA, Yusuke SHIMOMURA⁺¹, Akina MITSUKAI, Ken-ichiro ISHIMORI
and Yutaka KAMEO

Department of Decommissioning and Waste Management
Nuclear Science Research Institute
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 3, 2019)

In the future, radioactive wastes which generated from nuclear research facilities in Japan Atomic Energy Agency are planning to be buried for the near surface disposal. Therefore, it is required to establish the method to evaluate the radioactivity concentrations of radioactive wastes by the time it starts disposal. In order to contribute to this work, we collected and analyzed the samples generated from JRR-2 and JRR-3. In this report, we summarized the radioactivity concentrations of 19 radionuclides (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{94}Nb , ^{99}Tc , $^{108\text{m}}\text{Ag}$, ^{129}I , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{234}U , ^{238}U , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm) which were obtained from radiochemical analysis of those samples.

Keywords: Low-level Radioactive Waste, Radioactivity Concentration, Radiochemical Separation, Metal Samples, JRR-2, JRR-3

This work performed by Nuclear Development Corporation under contract with Japan Atomic Energy Agency.

+1 Waste Management Department, Waste Management and Decommissioning Technology Development Center, Oarai Research and Development Institute, Sector of Fast Reactor and Advanced Research and Development

目 次

1. はじめに.....	1
2. 放射能分析方法.....	1
2.1 試料の概要.....	1
2.2 試料前処理(研磨、揮散回収).....	2
2.3 ^3H 及び ^{14}C 分析.....	2
2.4 ^{36}Cl 分析.....	3
2.5 ^{60}Co 分析.....	3
2.6 ^{63}Ni 分析.....	3
2.7 ^{90}Sr 分析.....	4
2.8 ^{94}Nb 、 ^{152}Eu 及び ^{154}Eu 分析.....	4
2.9 ^{99}Tc 分析.....	4
2.10 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 分析.....	5
2.11 ^{129}I 分析.....	5
2.12 ^{137}Cs 分析.....	5
2.13 ^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 及び ^{244}Cm 分析.....	5
3. 放射化学分析結果.....	6
4. まとめ.....	6
謝辞.....	7
参考文献.....	7

Contents

1. Introduction	1
2. Methods for radioactivity analysis.....	1
2.1 Overview of analysis sample	1
2.2 Preprocessing for analysis sample	2
2.3 Analysis of ^3H and ^{14}C	2
2.4 Analysis of ^{36}Cl	3
2.5 Analysis of ^{60}Co	3
2.6 Analysis of ^{63}Ni	3
2.7 Analysis of ^{90}Sr	4
2.8 Analysis of ^{94}Nb , ^{152}Eu and ^{154}Eu	4
2.9 Analysis of ^{99}Tc	4
2.10 Analysis of $^{108\text{m}}\text{Ag}$	5
2.11 Analysis of ^{129}I	5
2.12 Analysis of ^{137}Cs	5
2.13 Analysis of ^{234}U , ^{238}U , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am and ^{244}Cm	5
3. Results	6
4. Conclusions	6
Acknowledgement.....	7
References	7

表リスト

表 1	分析試料リスト	8
表 2	放射化学分析で使用した測定機器一覧	22
表 3	分析試料情報	23
表 4	^3H の分析結果	25
表 5	^{14}C の分析結果	25
表 6	^{36}Cl の分析結果	26
表 7	^{60}Co の分析結果	26
表 8	^{63}Ni の分析結果	27
表 9	^{90}Sr の分析結果	27
表 10	^{94}Nb の分析結果	27
表 11	^{99}Tc の分析結果	28
表 12	$^{108\text{m}}\text{Ag}$ の分析結果	28
表 13	^{129}I の分析結果	28
表 14	^{137}Cs の分析結果	29
表 15	^{152}Eu の分析結果	29
表 16	^{154}Eu の分析結果	29
表 17	^{234}U の分析結果	30
表 18	^{238}U の分析結果	30
表 19	^{238}Pu の分析結果	30
表 20	$^{239+240}\text{Pu}$ の分析結果	31
表 21	^{241}Am の分析結果	31
表 22	^{244}Cm の分析結果	31

図リスト

図 1	分析概要フロー	32
図 2	分析試料の削り取り処理フロー	33
図 3	揮散回収処理フロー	34
図 4	^3H 及び ^{14}C 分析フロー	36
図 5	^{36}Cl 分析フロー	37
図 6	^{63}Ni 分析フロー	38
図 7	^{90}Sr 分析フロー	39
図 8	^{94}Nb 、 ^{152}Eu 及び ^{154}Eu 分析フロー	41
図 9	^{99}Tc 分析フロー	42
図 10	$^{108\text{m}}\text{Ag}$ 分析フロー	43
図 11	^{129}I 分析フロー	44
図 12	^{137}Cs 分析フロー	45
図 13	^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 及び ^{244}Cm 分析フロー	46

1. はじめに

廃棄物埋設事業者は、埋設しようとする放射性廃棄物が法令で定められている技術上の基準に適合していることについて、規制当局による確認を受けなければならないことが「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」で規定されている。埋設しようとする放射性廃棄物に係る技術上の基準は、「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」において定められており、このうち、放射能濃度に係る項目は、放射性物質の種類ごとに埋設事業許可申請書等に記載された最大放射能濃度を超えないこととされている。

埋設処分を先行して実施している原子力発電所では、操業に伴って発生する均質・均一固化体または充填固化体の放射能濃度について、廃棄体一体ごとに、スケーリングファクタ法または平均放射能濃度法のような簡便な評価方法により評価している¹⁾。日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という。)の研究施設から発生する放射性廃棄物(以下「研究施設等廃棄物」という。)についても、将来的に浅地中埋設処分の実施が予定されており、合理的な埋設処分を実施するためには、原子力発電所と同様に簡便に廃棄体の放射能濃度を評価する方法を構築する必要がある。

この取り組みの一環として、これまでに、原子力機構原子力科学研究所(以下「原科研」という。)で発生したアスファルト固化対象の濃縮廃液の放射化学分析を実施し²⁾、放射能濃度評価方法について検討した³⁾。また、原子炉施設から発生する放射性廃棄物を対象とした放射能濃度評価方法の検討として、原科研内で保管管理されている動力試験炉(JPDR)施設の解体廃棄物から採取した分析試料の放射化学分析を実施し⁴⁻⁸⁾、放射能濃度評価方法について検討した^{9),10)}。

本報告では、研究用原子炉の JRR-2 及び JRR-3 から発生した放射性廃棄物の放射能濃度評価方法を検討するため、保管廃棄物から採取した分析試料(金属試料)に対して実施した放射化学分析の方法及び分析結果について記述する。放射化学分析を実施した核種は、JRR-2 及び JRR-3 において安全評価上重要核種として予備選定された 21 核種¹¹⁾のうち、本報告の対象外である放射化コンクリートに対して選定された重要核種やスケーリングファクタ法以外の放射能濃度評価方法(理論計算法)の適用を検討している核種を除いた 19 核種(³H、¹⁴C、³⁶Cl、⁶⁰Co、⁶³Ni、⁹⁰Sr、⁹⁴Nb、⁹⁹Tc、^{108m}Ag、¹²⁹I、¹⁵²Eu、¹⁵⁴Eu、¹³⁷Cs、²³⁴U、²³⁸U、²³⁸Pu、²³⁹⁺²⁴⁰Pu、²⁴¹Am、²⁴⁴Cm)である。

2. 放射能分析方法

2.1 試料の概要

JRR-2 及び JRR-3 の保管廃棄物から採取した分析試料(12 試料)を本試験の対象とした。図 1 に分析の概要を示す。表 1 に分析試料の形状、材質、外観等を、表 2 に使用した測定機器等の情報を示す。

2.2 試料前処理（研磨、揮散回収）

表 3 に分析試料情報として、発生施設や材質、試料区分について示す。図 2 に分析試料の削り取りフローを示す。

分析試料は最大 2 回繰り返して表面を削り取り、金属粉として回収し、各核種の分析に用いた。分析試料は、研究用原子炉施設の配管や機器等を解体して発生したものである。したがって、分析試料に含まれる放射性物質は、施設の配管内を循環していた冷却材等に含まれる放射性物質が接触したことによる表面汚染に加えて、金属材料自体やその中に含まれる不純物元素が中性子照射によって放射化された影響（放射化汚染）も考慮する必要がある。そこで、表面汚染に加えて、放射化汚染の有無について区分するため、分析試料の表面を削り取る処理の前後で Ge 半導体検出器（以下「Ge 検出器」という。）による放射能測定（全計数率（cps））を実施した。分析試料の初期放射能（ A_0 ）と比較して、削り取り後の放射能（ A_n ）がバックグラウンド相当（4-5 cps）まで低減できたものは、「表面汚染（放射化汚染なし）」として区分した。一方、初期の放射能（ A_0 ）と削り取り後の放射能（ A_n ）に大きな変動がなかったものは、「表面汚染（放射化汚染あり）」として区分した。また、初期の放射能（ A_0 ）が既にバックグラウンド相当であり、汚染部の回収程度が明確に評価できない試料は、「表面汚染（計数率が十分に低い）」として区分した。

^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 ^{94}Nb 、 ^{99}Tc 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{129}I 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu に対する分析の前処理として、揮散回収処理を実施した。図 3 に揮散回収処理フローを示す。はじめに、分析試料を反応槽に入れ、担体としてコバルト、ストロンチウム、ニオブ、レニウム（テクネチウム担体の代替）、ヨウ素、セシウム及びユーロピウムの安定元素を添加した。ヨウ素回収容器を揮散回収装置にセットし、硫酸酸性下で過酸化水素を添加し、ヨウ素を I_2 の形態で揮散させて、キシレン中にトラップした。これを ^{129}I 分析用試料とした。次に、ヨウ素を揮散させた後の反応槽に、銀担体を添加し、テクネチウム回収容器をセットして、硫酸と過酸化水素の沸騰溶液中で ^{99}Tc とレニウムを過テクネチウム（レニウム）酸として蒸留した。この操作を 5 度繰り返し、上澄みの透明な液体を ^{99}Tc 分析用試料とした。ヨウ素及びテクネチウムを揮散させた後の反応槽の残渣には、硫酸塩となった金属イオンが含まれているため、硝酸中で 4 度加熱溶解し、金属イオンを回収した。硝酸溶解液をろ過後、ろ液に塩酸を加え塩化銀沈殿を回収し、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 分析用試料とした。塩化銀沈殿を除いたろ液には、アンモニア水を添加し、 $\text{pH} = 10$ に調整した後、再度ろ過した。この沈殿を ^{94}Nb 、 ^{152}Eu 及び ^{154}Eu 分析用試料とした。さらに、ろ液に水酸化ナトリウムを加え、 $\text{pH} = 14$ に調整して加熱沸騰後、硝酸を加えて $\text{pH} = 10$ に調整した。炭酸ナトリウムを加えて加熱熟成した沈殿をろ別し、ろ液は ^{137}Cs 分析用試料とした。硝酸溶解液の残渣は、純水で溶解し、水酸化ナトリウムを加えて $\text{pH} = 10$ に調整した後、炭酸ナトリウムを加えて沈殿を加熱熟成した。この溶液をろ別した沈殿に加えて、 ^{137}Cs 分析用試料のろ別の際に得られた沈殿を合わせて ^{90}Sr 分析用試料とした。

2.3 ^3H 及び ^{14}C 分析

図 4 に ^3H 及び ^{14}C 分析フローを示す。分析試料を燃焼装置内にセットし、空気中で 950°C まで昇温して燃焼処理を行った。 ^3H はコールドトラップで HTO として回収し、 ^{14}C は酸化触媒存在下で CO_2 の化

学形で吸収液に回収し、メスアップして各測定用試料とした。測定用試料は NaI シンチレーションカウンタ(以下「NaI 検出器」という。)で測定し、妨害となる γ 線放出核種が混在していないことを確認した。液体シンチレータを混合し、一昼夜静置した後、 ^3H は 18.6 keV、 ^{14}C は 156 keV の β 線を液体シンチレーションカウンタ(以下「LSC」という。)で測定した。なお、950°C の燃焼処理で分析試料中の ^3H 及び ^{14}C はそれぞれ全てコールドトラップまたは吸収液へ移行しているものと考えられる。これまでにコールドトラップまたは吸収液で全量を回収できていることを確認しているため、 ^3H の放射能濃度及び ^{14}C の放射能濃度はいずれも回収率を 100%として算出した。

2.4 ^{36}Cl 分析

図 5 に ^{36}Cl 分析フローを示す。分析試料を反応槽に入れ、揮散回収装置にセットした。硫酸を加えて硫酸酸性にした後、酸化剤として過酸化水素、塩素担体、沸石を添加した。加熱し、HCl として揮発した塩素成分を水酸化ナトリウムが充填されたバブラーに通気させて回収した。塩素回収液は加熱後に放冷し、炭酸ナトリウムと硝酸を加え酸性(pH = 1)として炭酸脱気した後、鉄共沈させて上澄みに NaI 検出器で妨害となる γ 線放出核種が存在しないことを確認した。さらに、硝酸銀を加えて塩素を AgCl 沈殿として回収し、アンモニア水を加えて沈殿を再度溶解した。溶解液には硝酸銀と硫化アンモニウムを加えろ別し、硝酸酸性にした後、AgCl の沈殿を回収した。この塩素回収液に対する一連の操作は、2 度繰り返して行った。回収した沈殿中の ^{36}Cl の β 崩壊に伴い放出された 709 keV の β 線を β 線スペクトロメーター(以下「ピコ β 」という。)で測定した。 ^{36}Cl の放射能濃度は AgCl 沈殿の重量を測定して、求めた回収率で補正した。

2.5 ^{60}Co 分析

図 3 に示した揮散回収処理フローにおいて、硝酸溶解液のろ液及び沈殿に対して、1332 keV の γ 線を Ge 検出器で測定し、 ^{60}Co の放射能濃度を算出した。ろ液及び沈殿の放射能濃度を合計しているため、 ^{60}Co の放射能濃度は回収率を 100%として算出した。

2.6 ^{63}Ni 分析

図 6 に ^{63}Ni 分析フローを示す。分析試料を酸溶解した液に、ニッケル担体と 30%クエン酸アンモニウム溶液を加え、5 分攪拌した。pH = 9.3 に調整した後、1% ジメチルグリオキシム-エタノール溶液を添加し、生成したニッケル-ジメチルグリオキシム錯体(以下「Ni-DMG 錯体」という。)をキシレンで抽出した。抽出した Ni-DMG 錯体を洗浄液で 5 度洗浄した後、NaI 検出器で測定して妨害となる γ 線放出核種が混在していないことを確認した。液体シンチレータを混合し、一昼夜静置した後、 β 崩壊に伴って ^{63}Ni が放出する 66.9 keV の β 線を LSC で測定した。 ^{63}Ni の放射能濃度は、有機相の一部(10 mL)を分取し、ニッケル濃度を分光光度計で測定して求めた回収率で補正した。

2.7 ^{90}Sr 分析

図 7 に ^{90}Sr 分析フローを示す。揮散回収処理で回収した ^{90}Sr 分析用試料中の β 線測定において妨害となる γ 線放出核種やその他の β 線放出核種を分離するため、発煙硝酸を加えて、氷冷して沈殿を熟成させた。得られた沈殿は純水で溶解し、再度発煙硝酸を加えて沈殿を遠心分離した。この操作は 3 度繰り返した。その後、沈殿を溶解させた液体に硝酸を加えて pH 調整した後、アンモニア水を加えて pH を調整し (pH = 10) 鉄共沈させ、 ^{90}Sr の娘核種である ^{90}Y を除去した。ろ別した除去後の溶液を NaI 検出器で測定して、妨害となる γ 線放出核種が混在していないことを確認した。 ^{90}Sr と ^{90}Y との放射平衡を成立させるため約 2 週間放置した。ろ別した沈殿を硝酸酸性下で溶解し、イットリウム担体を加えた後、アンモニア水 (pH = 10) を加えて沈殿を生成させた。この沈殿をさらに 3 M 塩酸で溶解し、シュウ酸アンモニウムで再度沈殿させた。ろ別した水酸化物の沈殿中で ^{90}Y が放出する 2.2 MeV の β 線をピコ β で測定した。 ^{90}Sr の放射能濃度は除去後の溶液を一部分取し、ストロンチウム濃度を誘導結合プラズマ発光分光分析装置 (以下「ICP-AES」という。) で測定した結果と、 ^{90}Y 沈殿を溶解した溶液のイットリウム濃度を ICP-AES で測定した結果から回収率を求めて補正した。

2.8 ^{94}Nb 、 ^{152}Eu 及び ^{154}Eu 分析

図 8 に ^{94}Nb 、 ^{152}Eu 及び ^{154}Eu 分析フローを示す。揮散回収処理フローで回収した ^{94}Nb 、 ^{152}Eu 及び ^{154}Eu 分析用試料にアンモニア水を加えて五酸化ニオブ水和物の沈殿を生成させて回収した後、再度フッ化水素酸で溶解させた。さらにテトラフェニルアルソニウムクロリド (以下「TPAC」という。) と担体のコバルトを添加して沈殿を生成させ、妨害となる高エネルギーの γ 線放出核種を除去した後、 β 崩壊に伴い放出される 871 keV の γ 線を Ge 検出器で測定した。 ^{94}Nb の放射能濃度は沈殿を 0.1 N の塩酸で溶解した溶液のニオブ濃度を ICP-AES で測定して求めた回収率で補正した。 ^{152}Eu 及び ^{154}Eu は、 ^{94}Nb の処理過程で得たフッ化水素酸中で妨害となる γ 線放出核種と分離された EuF_3 沈殿を回収し、 ^{152}Eu が放出する 1408 keV の γ 線及び ^{154}Eu が放出する 1274 keV の γ 線を Ge 検出器で測定した。 ^{152}Eu 及び ^{154}Eu の放射能濃度は 0.1 N 塩酸で沈殿の全量を溶解した溶液のユーロピウム濃度を ICP-AES で測定して求めた回収率で補正した。

2.9 ^{99}Tc 分析

図 9 に ^{99}Tc 分析フローを示す。揮散回収処理フローで回収した ^{99}Tc 分析用試料に純水と過酸化水素を加えた後、加熱沸騰させ放冷した。チオアセトアミドを加え、熟成させた沈殿をろ別し、硝酸と過酸化水素で溶解した。溶解した液をろ過したろ液に硝酸を加えて酸性にした後、鉄担体を加え、アンモニア水で pH を調整し (pH = 10)、共沈により不純物を分離した。ろ液は硝酸で pH を調整した後 (pH = 1)、過塩素酸と TPAC を加え、沈殿を生成させろ過した。沈殿を硝酸と過塩素酸で溶解した液を誘導結合プラズマ質量分析装置 (以下「ICP-MS」という。) で測定した。 ^{99}Tc は安定同位体が存在しないため、テクネチウム担体の代替として同族元素であるレニウム担体を添加している。よって、 ^{99}Tc の放射能濃度は沈殿を溶解

した液のレニウム濃度を ICP-AES で測定して求めた回収率で補正した。

2.10 ^{108m}Ag 分析

図 10 に ^{108m}Ag 分析フローを示す。揮散回収処理フローで回収した ^{108m}Ag 分析用試料をアンモニア水でアルカリ性にした後、塩化ナトリウムを加えて AgCl の沈殿を生成させた。 ^{108m}Ag が放出する 433.9 keV、614.3 keV、722.9 keV の γ 線を Ge 検出器で測定した。 ^{108m}Ag の放射能濃度は沈殿を溶解した溶液の銀濃度を ICP-AES で測定して求めた回収率で補正した。

2.11 ^{129}I 分析

図 11 に ^{129}I 分析フローを示す。揮散回収処理フローで回収した ^{129}I 分析用試料をキシレンで抽出した後、(1+9)硝酸で 5 度洗浄し、さらに 10%亜硫酸水素ナトリウムで水相に逆抽出した。 ^{129}I の抽出液を NaI 検出器で測定し、妨害となる γ 線放出核種が混在していないことを確認した。その後、硝酸銀溶液を加え AgI 沈殿として回収し、 ^{129}I が β 崩壊に伴い放出する最大エネルギー 194 keV の β 線を 2π ガスフローカウンタ(以下「 $2\pi\text{GFC}$ 」という。)で測定した。 ^{129}I の放射能濃度は、 AgI 沈殿の質量を測定して求めた回収率で補正した。また、分析対象の 12 試料のうち代表 2 試料(NY-995-172 及び NY-85X-840)については、水相に逆抽出した抽出液の一部を分取して生成させた AgI 沈殿を加速器質量分析(以下「AMS」いう。)による高感度 ^{129}I 分析を行った。

2.12 ^{137}Cs 分析

図 12 に ^{137}Cs 分析フローを示す。揮散回収処理フローで回収した ^{137}Cs 分析用試料に塩酸を加えて pH を調整した(pH = 7)。溶液量に対して 5%の塩酸を添加した後、揮散回収処理フローにおいて添加された炭酸成分を除去するため 1 時間程度攪拌し、リンモリブデン酸アンモニウムを添加、攪拌し沈殿を生成することによって妨害となる他の γ 線放出核種と分離した。 ^{137}Cs の娘核種である ^{137m}Ba が放出する 662 keV の γ 線を Ge 検出器で測定した。 ^{137}Cs の放射能濃度はアンモニア水と純水で沈殿を溶解した液のセシウム濃度を原子吸光分析装置で測定して求めた回収率で補正した。

2.13 ^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 及び ^{244}Cm 分析

図 13 に ^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 及び ^{244}Cm 分析フローを示す。分析試料の酸溶解液を UTEVA レジンと TRU レジンの 2 種類の抽出クロマト樹脂を使用して、U、Pu、Am 及び Cm の各フラクションに分離した。分析試料の酸溶解液を一度乾固し、3 M 硝酸-1 M 硝酸アルミニウム溶液で再溶解した後、0.6 M スルファミン酸鉄溶液とアスコルビン酸を加えて Pu を 3 価に調整して、完全に溶解させた。その後、硝酸でコンディショニングした UTEVA レジンに通液し、Pu、Am 及び Cm の溶出液を回収した。その後、5 M 塩酸と 0.05 M シュウ酸の混酸で不純物を除去し、1 M 塩酸を通液して U の溶出液を回収した。得られた Pu、Am 及び Cm の溶出液は硝酸でコンディショニングした TRU レジンに通液し、不純物を

取り除いた後に Am 及び Cm の溶出液として分離回収した。Pu は 4 価に調整した後、溶出液に分離回収した。 α 線測定は表面障壁型 Si 半導体検出器(以下「SSB」という。)で核種ごとに行った。ただし、 ^{238}U は半減期が長いため、SSB による α 線測定より高感度に測定可能な誘導結合プラズマ質量分析装置(以下「ICP-MS」という。)を用いた質量分析を適用した。 ^{238}U 分析では、分離精製操作を行わないため、回収率を 100%として ^{238}U の放射能濃度を算出した。 ^{234}U 分析では、UTEVA レジンで分離精製した U の溶出液をステンレス板に電着し、SSB で測定した。 ^{234}U の放射能濃度は、UTEVA レジンによる分離精製時に試料溶解液を 2 分し、一方に ^{238}U 標準溶液を添加して、試料と同一の分離精製操作を実施した。その後、SSB で測定した ^{238}U の放射能濃度から求めた U の回収率で補正した。 ^{238}Pu 及び $^{239+240}\text{Pu}$ 分析では、UTEVA レジン及び TRU レジンで分離精製した Pu の溶出液をステンレス板に電着し、SSB で測定した。通常、 ^{238}Pu 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度を補正する際は、分離精製操作前後の試料を ICP-MS で測定し、 $M/Z = 239$ の信号強度の変化から分離精製時の Pu の回収率を算出するが、今回の試料では ^{239}Pu の放射能濃度が極めて低いため、過去の Pu 分離精製操作における平均回収率(67%)で補正した。 ^{241}Am 及び ^{244}Cm 分析は、UTEVA レジン及び TRU レジンで分離精製した Am 及び Cm の溶出液をステンレス板に電着し、SSB で測定した。 ^{241}Am の放射能濃度は、試料溶解液を 2 分し、一方に ^{241}Am 標準溶液を添加した上で、試料と同一の分離精製操作を行い、SSB で測定した ^{241}Am の放射能濃度から求めた Am の回収率で補正した。また、 ^{244}Cm は今回の分離精製条件では ^{241}Am と同じフラクションに回収されるため、 ^{244}Cm の放射能濃度は Am の回収率を用いて補正した。

3. 放射化学分析結果

平成 28 年度から 29 年度は、19 核種(^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{94}Nb 、 ^{99}Tc 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{129}I 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 ^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm)の放射化学分析を行い、228 点の分析データを取得した。核種ごとの分析結果を表 4 から表 22 にまとめた。

4. まとめ

本報告では、研究施設等から発生する放射性廃棄物を対象とする放射能濃度評価方法検討のための基礎資料として、JRR-2 及び JRR-3 から発生した放射性廃棄物について放射化学分析を実施し、得られた放射能濃度データについて取りまとめた。今後は、照射後試験施設等から発生した放射性廃棄物の分析を行い、放射能濃度データの蓄積を進めていく。

謝辞

本報告を執筆するにあたり、JRR-2 及び JRR-3 の保管廃棄物から分析試料を採取していただいたバックエンド技術部高減容処理技術課の方々に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 原子力安全基盤機構規格基準部, 均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法について(一部改正), JNES-SS-0801, 2008, 48p.
- 2) 星亜紀子, 亀尾裕, 片山淳他, 研究施設等から発生する均質・均一固化体に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2009-023, 2010, 84p.
- 3) 辻智之, 亀尾裕, 坂井章浩他, 研究施設等から発生する均質・均一固化体に対する放射能濃度評価方法の検討, JAEA-Technology 2011-028, 2011, 66p.
- 4) 星亜紀子, 辻智之, 田中究他, JPDR 保管廃棄物試料に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2011-011, 2011, 31p.
- 5) 辻智之, 亀尾裕, 坂井章浩他, JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討(1), JAEA-Technology 2012-045, 2013, 37p.
- 6) 田中究, 安田麻里, 亀尾裕他, JPDR 保管廃棄物試料に対する放射化学分析(2), JAEA-Data/Code 2013-008, 2013, 16p.
- 7) 安田麻里, 田中究, 渡辺幸一他, JPDR 保管廃棄物試料に対する放射化学分析(3), JAEA-Data/Code 2014-011, 2014, 59p.
- 8) 大森弘幸, 根橋宏治, 島田亜佐子他, JPDR 保管廃棄物試料に対する放射化学分析(4), JAEA-Data/Code 2014-029, 2015, 31p.
- 9) 辻智之, 亀尾裕, 坂井章浩他, JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討(1), JAEA-Technology 2012-045, 2013, 37p.
- 10) 辻智之, 坂井章浩, 出雲沙理他, JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討(2), JAEA-Technology 2015-009, 2015, 46p.
- 11) 坂井章浩, 天澤弘也, 仲田久和他, 研究施設等廃棄物の埋設処分における安全評価上重要核種の選定(その 3)－RI・研究所等廃棄物に係る主要放射性廃棄物発生施設毎の重要核種の予備評価－, JAEA-Technology 2010-021, 2010, 152p.

表 1 分析試料リスト (1/14)


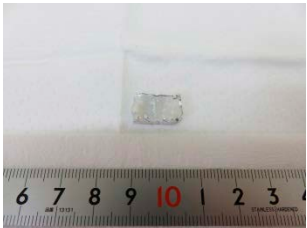
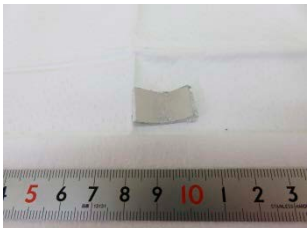

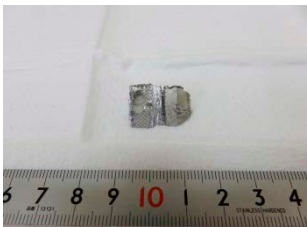

保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-928-1249	1	JRR-2	配管	Al	
	4	JRR-2	配管	Al	
	5	JRR-2	配管	Al	
NY-988-305	2	JRR-2	筒状	Al	
	3	JRR-2	筒状	Al	
	5	JRR-2	筒状	Al	

表 1 分析試料リスト (2/14)


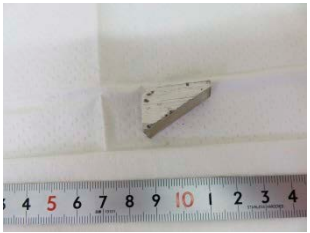

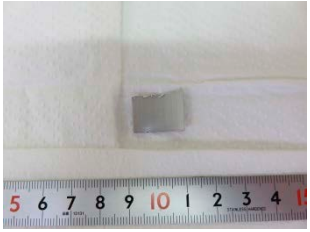
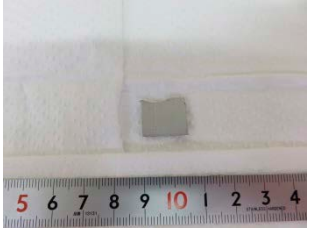
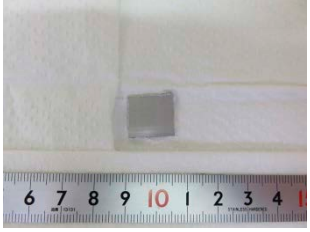
保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-995-172	5	JRR-2	板状	Al	
	11	JRR-2	板状	Al	
	12	JRR-2	板状	Al	
NY-995-178	2	JRR-2	筒状	Al	
	3	JRR-2	筒状	Al	
	5	JRR-2	筒状	Al	

表 1 分析試料リスト (3/14)


保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-99X-447	1	JRR-2	配管	Al	
	3	JRR-2	配管	Al	
	4	JRR-2	配管	Al	

表 1 分析試料リスト (4/14)

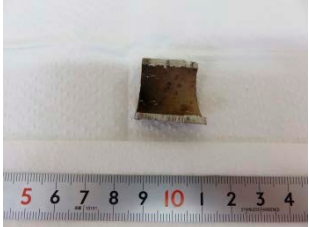
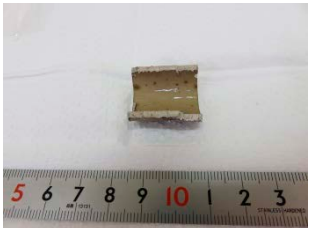
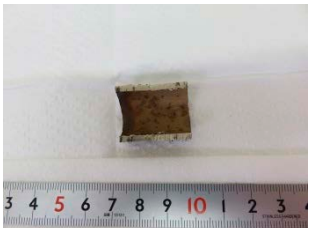
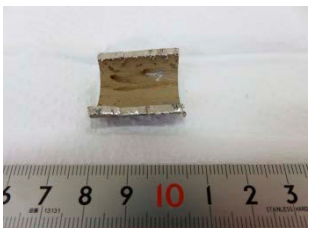
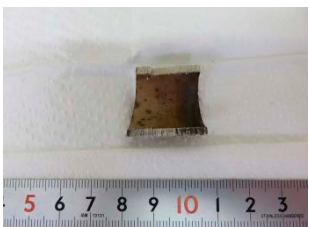
保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-155-BN-245	1	JRR-2	配管	SUS	
	2	JRR-2	配管	SUS	
	3	JRR-2	配管	SUS	
	4	JRR-2	配管	SUS	
	5	JRR-2	配管	SUS	

表 1 分析試料リスト (5/14)

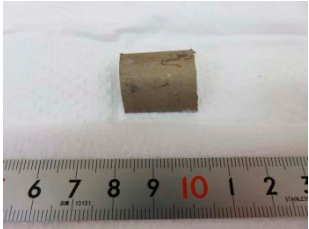
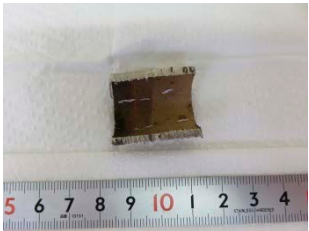
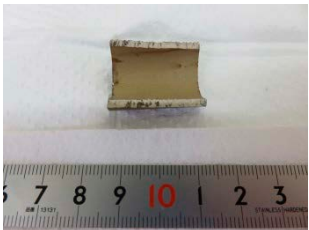
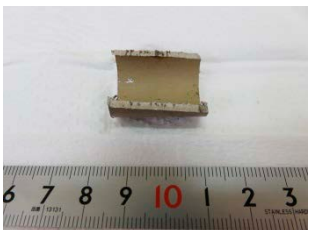

保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-155-BN-245	6	JRR-2	配管	SUS	
	7	JRR-2	配管	SUS	
	8	JRR-2	配管	SUS	
	9	JRR-2	配管	SUS	
	10	JRR-2	配管	SUS	

表 1 分析試料リスト (6/14)


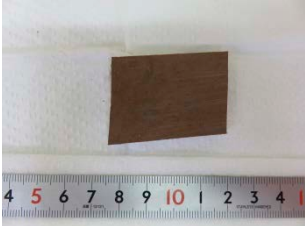

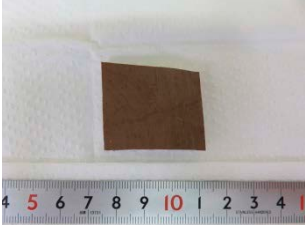
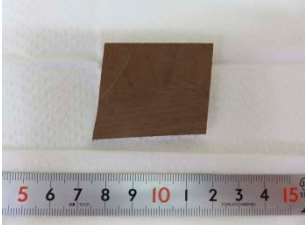
保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-155-BN-266	1	JRR-2	板状	Al	
	2	JRR-2	板状	Al	
	3	JRR-2	板状	Al	
	4	JRR-2	板状	Al	
	5	JRR-2	板状	Al	

表 1 分析試料リスト (7/14)


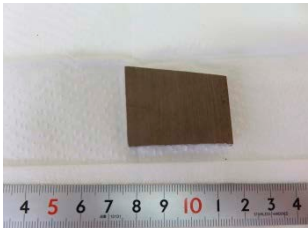


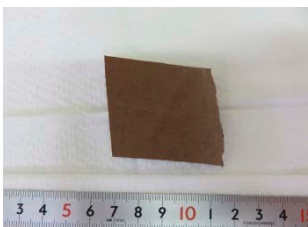
保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-155-BN-266	6	JRR-2	板状	Al	
	7	JRR-2	板状	Al	
	8	JRR-2	板状	Al	
	9	JRR-2	板状	Al	
	10	JRR-2	板状	Al	

表 1 分析試料リスト (8/14)




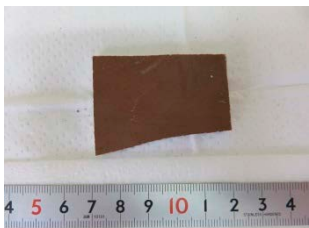
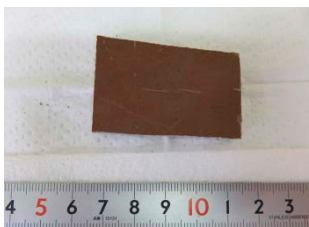
保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-155-BN-267	1	JRR-2	板状	Al	
	2	JRR-2	板状	Al	
	3	JRR-2	板状	Al	
	4	JRR-2	板状	Al	
	5	JRR-2	板状	Al	

表 1 分析試料リスト (9/14)


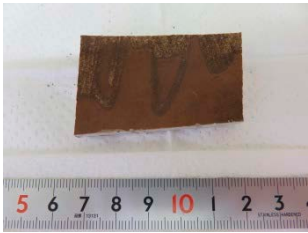

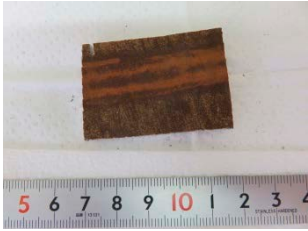
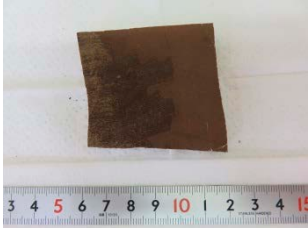
保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-155-BN-267	6	JRR-2	板状	Al	
	7	JRR-2	板状	Al	
	8	JRR-2	板状	Al	
	9	JRR-2	板状	Al	
	10	JRR-2	板状	Al	

表 1 分析試料リスト (10/14)


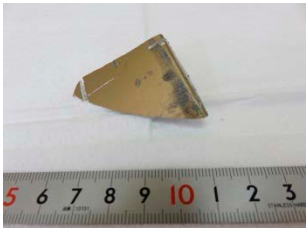
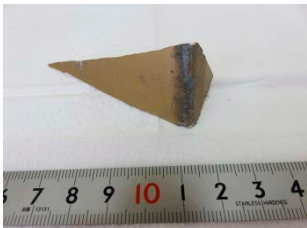


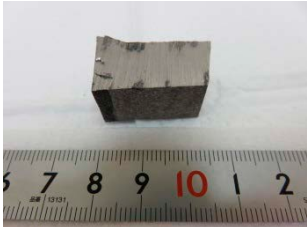
保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-85X-840	1	JRR-3	配管	Al	
	3	JRR-3	配管	Al	
	4	JRR-3	配管	Al	
NY-861-974	2	JRR-3	配管	SS (Zn メッキ)	
	11	JRR-3	配管	SS (Zn メッキ)	
	12	JRR-3	配管	SS (Zn メッキ)	

表 1 分析試料リスト (11/14)

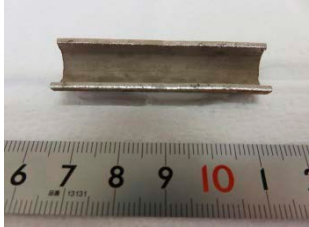
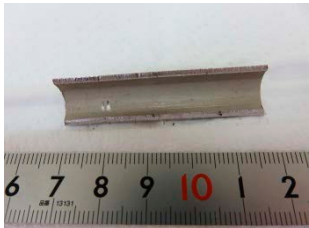
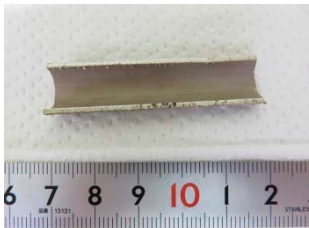
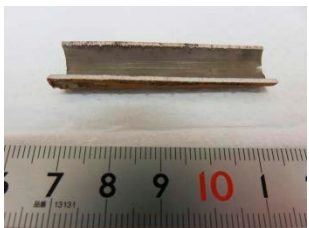

保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-863-1340	1	JRR-3	配管	SUS	
	2	JRR-3	配管	SUS	
	3	JRR-3	配管	SUS	
	4	JRR-3	配管	SUS	
	5	JRR-3	配管	SUS	

表 1 分析試料リスト (12/14)

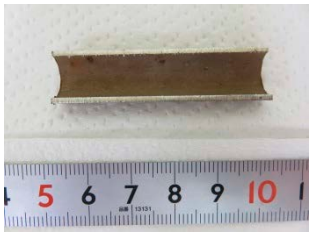
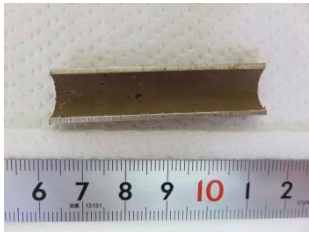
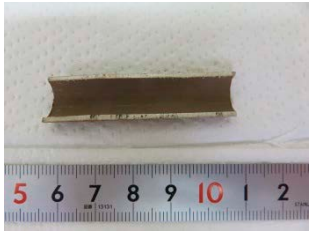
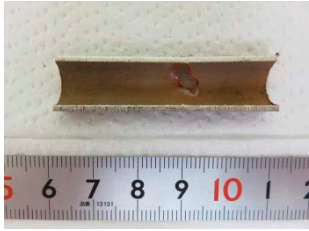

保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-863-1340	6	JRR-3	配管	SUS	
	7	JRR-3	配管	SUS	
	8	JRR-3	配管	SUS	
	9	JRR-3	配管	SUS	
	10	JRR-3	配管	SUS	

表 1 分析試料リスト (13/14)

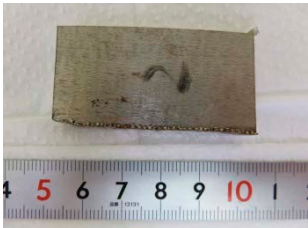

保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-86X-710	1	JRR-3	大型機器	SUS	
	2	JRR-3	大型機器	SUS	
	3	JRR-3	大型機器	SUS	
	4	JRR-3	大型機器	SUS	
	5	JRR-3	大型機器	SUS	

表 1 分析試料リスト (14/14)


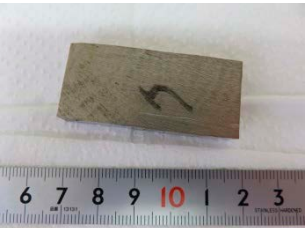
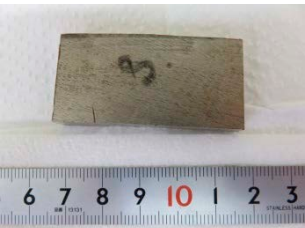


保管体番号	枝番	発生施設	形状	材質	外観写真
NY-86X-710	6	JRR-3	大型機器	SUS	
	7	JRR-3	大型機器	SUS	
	8	JRR-3	大型機器	SUS	
	9	JRR-3	大型機器	SUS	
	10	JRR-3	大型機器	SUS	

表 2 放射化学分析で使用了測定機器一覧

No.	測定器	略称	メーカー、型式	測定核種または用途
1	Ge半導体検出器	Ge検出器	ORTEC GEM-30P4	^{60}Co , ^{94}Nb , $^{108\text{m}}\text{Ag}$, ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu
	低エネルギーGe半導体検出器	LE-Ge	ORTEC LOAX-51370/20	
2	液体シンチレーションカウンタ	LSC	ALOKA LSC-5100	^3H , ^{14}C , ^{63}Ni
		LSC	PerkinElmer Tri-Carb 4910TR	
3	β 線スペクトロメータ	ピコ β	Fuji Electric NDD10001	^{36}Cl , ^{90}Sr
4	2π ガスフロカウンタ	2π GFC	ALOKA LBC-481-P	^{129}I
5	表面障壁型Si半導体検出器	SSB	AMETEK BU-020-450-AS	^{234}U , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm
6	誘導結合プラズマ質量分析装置	ICP-MS	PerkinElmer ELAN DRC II	^{99}Tc , ^{238}U
7	NaIシンチレーションカウンタ	NaI検出器	BICRON 3M3/3	γ 線妨害核種除去確認用
8	誘導結合プラズマ発光分光分析装置	ICP-AES	Agilent 5110	化学回収率確認用
9	吸光光度計	—	SHIMADZU UV-1850	化学回収率確認用
10	原子吸光分析装置	—	PerkinElmer AAAnalyst400	化学回収率確認用
11	加速器質量分析	—	東京大学 タンデム加速器研究施設	^{129}I (高感度分析用)

表 3 分析試料情報 (1/2)

保管体番号	発生施設	試料材質	採取年月日	形状	枝番	試料重量(g)	分析試料区分
NY-928-1249	JRR-2	アルミニウム	H24.2.14	配管	1	1.5339	表面汚染 (計数率が十分低い)
					4	0.7320	
					5	1.5295	
NY-988-305	JRR-2	アルミニウム	H24.2.6	筒状	2	4.2046	表面汚染 (放射化あり)
					3	2.6583	
					5	7.5013	
NY-995-172	JRR-2	アルミニウム	H24.2.7	板状	5	7.6322	表面汚染 (放射化あり)
					11	6.2402	
					12	7.2352	
NY-995-178	JRR-2	アルミニウム	H24.2.7	筒状	2	0.7068	表面汚染 (放射化あり)
					3	0.5390	
					5	0.5590	
NY-99X-447	JRR-2	アルミニウム	H24.2.8	配管	1	10.1783	表面汚染 (放射化なし)
					3	11.9101	
					4	7.5968	
NY-155-BN-245	JRR-2	ステンレス	H28.2.25	配管	1	11.3811	表面汚染 (計数率が十分低い)
					2	12.7111	
					3	12.3686	
					4	11.6243	
					5	10.7027	
					6	10.4802	
					7	14.2736	
					8	11.9319	
					9	14.3511	
					10	22.6675	
NY-155-BN-266	JRR-2	アルミニウム	H28.2.4	板状	1	14.8348	表面汚染 (放射化なし)
					2	21.5977	
					3	16.6154	
					4	17.4366	
					5	23.2126	
					6	17.4116	
					7	18.1579	
					8	17.7227	
					9	13.8159	
					10	31.7342	

表 3 分析試料情報 (2/2)

保管体番号	発生施設	試料材質	採取年月日	形状	枝番	試料重量(g)	分析試料区分
NY-155-BN-267	JRR-2	アルミニウム	H28.1.29	板状	1	21.6096	表面汚染 (放射化なし)
					2	24.2409	
					3	27.8012	
					4	23.8459	
					5	23.0016	
					6	20.6798	
					7	26.33	
					8	28.3566	
					9	24.2717	
					10	46.8379	
NY-85X-840	JRR-3	アルミニウム	H22.6.18	配管	1	17.1794	表面汚染 (放射化あり)
					3	16.4302	
					4	12.9861	
NY-861-974	JRR-3	鉄	H22.10.13	配管	2	83.0535	表面汚染 (計数率が十分低い)
					11	33.5159	
					12	38.5849	
NY-863-1340	JRR-3	ステンレス	H28.2.10	配管	1	9.686	表面汚染 (放射化なし)
					2	6.4536	
					3	7.6344	
					4	8.7036	
					5	8.6109	
					6	8.6165	
					7	8.0034	
					8	8.4805	
					9	7.9885	
					10	8.0429	
NY-86X-710	JRR-3	ステンレス	H28.3.1	大型機器	1	115.8831	表面汚染 (計数率が十分低い)
					2	59.5136	
					3	54.8941	
					4	56.7724	
					5	58.3424	
					6	52.1953	
					7	52.681	
					8	57.2988	
					9	54.1944	
					10	53.8399	

表 4 ³H の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日※1	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-928-1249	4	JRR-2	アルミニウム	0.7320	100	2017/6/6	ND	4 × 10 ⁻¹
NY-988-305	3	JRR-2	アルミニウム	2.6583	100	2017/6/6	(3.2±0.1) × 10 ¹	1 × 10 ⁻¹
NY-995-172	11	JRR-2	アルミニウム	6.2402	100	2017/6/6	(1.7±0.1) × 10 ¹	5 × 10 ⁻²
NY-995-178	2	JRR-2	アルミニウム	0.7068	100	2017/6/6	(2.8±0.1) × 10 ¹	4 × 10 ⁻¹
NY-99X-447	1	JRR-2	アルミニウム	10.1783	100	2017/6/6	(1.1±0.1) × 10 ⁻¹	3 × 10 ⁻²
NY-155-BN-245	4,7	JRR-2	ステンレス	25.8979	100	2017/6/7	(2.7±0.4) × 10 ⁻²	1 × 10 ⁻²
NY-155-BN-266	2,4	JRR-2	アルミニウム	39.0343	100	2017/6/29	(1.2±0.1) × 10 ⁰	7 × 10 ⁻³
NY-155-BN-267	1,4	JRR-2	アルミニウム	45.4555	100	2017/6/7	(2.1±0.1) × 10 ⁰	6 × 10 ⁻³
NY-85X-840	4	JRR-3	アルミニウム	12.9861	100	2017/7/5	(3.4±0.1) × 10 ¹	3 × 10 ⁻²
NY-861-974	11	JRR-3	鉄	33.5159	100	2017/7/5	(7.0±0.1) × 10 ⁰	9 × 10 ⁻³
NY-863-1340	5,9	JRR-3	ステンレス	16.5994	100	2017/6/10	(4.7±0.1) × 10 ⁻¹	2 × 10 ⁻²
NY-86X-710	8,10	JRR-3	ステンレス	111.1387	100	2017/6/10	(3.8±0.1) × 10 ⁻¹	3 × 10 ⁻³

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 5 ¹⁴C の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日※1	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-928-1249	4	JRR-2	アルミニウム	0.7320	100	2017/5/27	ND	3 × 10 ⁻¹
NY-988-305	3	JRR-2	アルミニウム	2.6583	100	2017/5/27	(1.0±0.1) × 10 ¹	7 × 10 ⁻²
NY-995-172	11	JRR-2	アルミニウム	6.2402	100	2017/5/27	(4.7±0.2) × 10 ⁻¹	3 × 10 ⁻²
NY-995-178	2	JRR-2	アルミニウム	0.7068	100	2017/5/27	(9.5±0.9) × 10 ⁻¹	3 × 10 ⁻¹
NY-99X-447	1	JRR-2	アルミニウム	10.1783	100	2017/5/27	(2.7±0.1) × 10 ¹	2 × 10 ⁻²
NY-155-BN-245	4,7	JRR-2	ステンレス	25.8979	100	2017/5/27	ND	7 × 10 ⁻³
NY-155-BN-266	2,4	JRR-2	アルミニウム	39.0343	100	2017/5/27	(9.5±0.1) × 10 ⁻¹	5 × 10 ⁻³
NY-155-BN-267	1,4	JRR-2	アルミニウム	45.4555	100	2017/5/27	(5.8±0.1) × 10 ⁻¹	4 × 10 ⁻³
NY-85X-840	4	JRR-3	アルミニウム	12.9861	100	2017/5/27	(8.0±0.1) × 10 ⁻¹	2 × 10 ⁻²
NY-861-974	11	JRR-3	鉄	33.5159	100	2017/5/27	(2.7±0.1) × 10 ⁻¹	6 × 10 ⁻³
NY-863-1340	5,9	JRR-3	ステンレス	16.5994	100	2017/5/31	(4.2±0.1) × 10 ⁰	1 × 10 ⁻²
NY-86X-710	8,10	JRR-3	ステンレス	111.1387	100	2017/5/31	(3.5±0.1) × 10 ⁻¹	2 × 10 ⁻³

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 6 ³⁶Cl の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-928-1249	1,5	JRR-2	アルミニウム	3.0634	83.4	2017/6/6	$(1.0 \pm 0.1) \times 10^1$	3×10^{-2}
NY-988-305	2,5	JRR-2	アルミニウム	11.7059	67.2	2017/6/6	$(3.2 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	3×10^{-3}
NY-995-172	5,12	JRR-2	アルミニウム	14.8674	30.1	2017/6/13	$(8.6 \pm 1.4) \times 10^{-3}$	3×10^{-3}
NY-995-178	3,5	JRR-2	アルミニウム	1.0980	97.1	2017/6/7	$(5.0 \pm 0.3) \times 10^{-1}$	3×10^{-2}
NY-99X-447	3,4	JRR-2	アルミニウム	19.5069	81.0	2017/6/7	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^0$	4×10^{-3}
NY-155-BN-245	3,9	JRR-2	ステンレス	26.7197	98.1	2017/5/10	$(1.6 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	6×10^{-4}
NY-155-BN-266	1,9	JRR-2	アルミニウム	28.6507	85.6	2017/5/29	$(1.5 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	6×10^{-4}
NY-155-BN-267	7,9	JRR-2	アルミニウム	50.6017	79.5	2017/5/31	$(1.6 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	7×10^{-4}
NY-85X-840	1,3	JRR-3	アルミニウム	33.6096	89.8	2017/6/7	$(3.8 \pm 0.1) \times 10^0$	5×10^{-3}
NY-861-974	2,12	JRR-3	鉄	121.6384	68.5	2017/6/7	$(3.4 \pm 0.1) \times 10^0$	2×10^{-3}
NY-863-1340	6,7	JRR-3	ステンレス	16.6199	87.1	2017/6/20	ND	2×10^{-3}
NY-86X-710	5,9	JRR-3	ステンレス	112.5368	67.8	2017/6/2	ND	4×10^{-4}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 7 ⁶⁰Co の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-928-1249	1,5	JRR-2	アルミニウム	3.0634	100	2017/6/7	ND	2×10^{-1}
NY-988-305	2,5	JRR-2	アルミニウム	11.7059	100	2017/6/28	$(4.9 \pm 0.1) \times 10^1$	2×10^{-1}
NY-995-172	5,12	JRR-2	アルミニウム	14.8674	100	2017/6/29	$(4.4 \pm 0.1) \times 10^0$	6×10^{-2}
NY-995-178	3,5	JRR-2	アルミニウム	1.0980	100	2017/6/29	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^2$	1×10^0
NY-99X-447	3,4	JRR-2	アルミニウム	19.5069	100	2017/7/1	$(4.3 \pm 0.1) \times 10^1$	2×10^{-1}
NY-155-BN-245	1,5,6	JRR-2	ステンレス	32.5640	100	2017/5/18	$(4.7 \pm 0.1) \times 10^0$	4×10^{-2}
NY-155-BN-266	5,7,8	JRR-2	アルミニウム	59.0932	100	2017/5/18	$(8.6 \pm 0.2) \times 10^{-1}$	2×10^{-2}
NY-155-BN-267	3,5,8	JRR-2	アルミニウム	79.1594	100	2017/5/19	$(3.1 \pm 0.1) \times 10^0$	2×10^{-2}
NY-85X-840	1,3	JRR-3	アルミニウム	33.6096	100	2017/7/2	$(3.7 \pm 0.1) \times 10^0$	2×10^{-1}
NY-861-974	2,12	JRR-3	鉄	121.6384	100	2017/7/2	$(3.2 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	6×10^{-3}
NY-863-1340	1,3,8	JRR-3	ステンレス	25.8009	100	2017/5/20	$(9.2 \pm 0.2) \times 10^{-1}$	3×10^{-2}
NY-86X-710	1,4,7	JRR-3	ステンレス	225.3365	100	2017/5/24	$(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	4×10^{-3}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 8 ^{63}Ni の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日※1	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	2,10	JRR-2	ステンレス	35.3786	96.2	2017/6/9	ND	5×10^0
NY-155-BN-266	3,10	JRR-2	アルミニウム	48.3496	90.8	2017/6/9	$(1.4 \pm 0.1) \times 10^0$	7×10^{-2}
NY-155-BN-267	2,10	JRR-2	アルミニウム	71.0788	91.4	2017/6/9	$(1.7 \pm 0.1) \times 10^0$	5×10^{-2}
NY-863-1340	4,10	JRR-3	ステンレス	16.7465	96.8	2017/6/9	ND	9×10^0
NY-86X-710	2,3	JRR-3	ステンレス	114.4077	99.5	2017/6/9	ND	3×10^0

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 9 ^{90}Sr の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日※1	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	1,5,6	JRR-2	ステンレス	32.5640	45.9	2017/7/3	ND	9×10^{-4}
NY-155-BN-266	5,7,8	JRR-2	アルミニウム	59.0932	59.0	2017/6/28	$(1.8 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	4×10^{-4}
NY-155-BN-267	3,5,8	JRR-2	アルミニウム	79.1594	58.3	2017/6/29	$(9.8 \pm 1.3) \times 10^{-4}$	3×10^{-4}
NY-863-1340	1,3,8	JRR-3	ステンレス	25.8009	72.9	2017/6/30	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	8×10^{-4}
NY-86X-710	1,4,7	JRR-3	ステンレス	225.3365	71.1	2017/7/4	$(5.8 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	9×10^{-5}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 10 ^{94}Nb の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日※1	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	1,5,6	JRR-2	ステンレス	32.5640	55.5	2017/6/22	ND	3×10^{-3}
NY-155-BN-266	5,7,8	JRR-2	アルミニウム	59.0932	54.5	2017/6/28	ND	2×10^{-3}
NY-155-BN-267	3,5,8	JRR-2	アルミニウム	79.1594	57.5	2017/7/2	$(8.9 \pm 1.6) \times 10^{-4}$	7×10^{-4}
NY-863-1340	1,3,8	JRR-3	ステンレス	25.8009	55.5	2017/6/24	ND	3×10^{-3}
NY-86X-710	1,4,7	JRR-3	ステンレス	225.3365	56.5	2017/6/25	ND	4×10^{-4}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 11 ⁹⁹Tc の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日※1	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	1,5,6	JRR-2	ステンレス	32.5640	84.0	2017/7/7	ND	2 × 10 ⁻³
NY-155-BN-266	5,7,8	JRR-2	アルミニウム	59.0932	74.7	2017/7/7	ND	3 × 10 ⁻³
NY-155-BN-267	3,5,8	JRR-2	アルミニウム	79.1594	61.5	2017/7/7	ND	3 × 10 ⁻³
NY-863-1340	1,3,8	JRR-3	ステンレス	25.8009	77.0	2017/7/7	ND	2 × 10 ⁻³
NY-86X-710	1,4,7	JRR-3	ステンレス	225.3365	68.0	2017/7/7	ND	2 × 10 ⁻⁴

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 12 ^{108m}Ag の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日※1	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	1,5,6	JRR-2	ステンレス	32.5640	64.2	2017/6/9	ND	3 × 10 ⁻³
NY-155-BN-266	5,7,8	JRR-2	アルミニウム	59.0932	71.0	2017/6/16	(4.0±0.4) × 10 ⁻³	1 × 10 ⁻³
NY-155-BN-267	3,5,8	JRR-2	アルミニウム	79.1594	82.3	2017/5/27	(2.6±0.2) × 10 ⁻³	8 × 10 ⁻⁴
NY-863-1340	1,3,8	JRR-3	ステンレス	25.8009	70.4	2017/5/29	ND	3 × 10 ⁻³
NY-86X-710	1,4,7	JRR-3	ステンレス	225.3365	56.1	2017/5/30	ND	4 × 10 ⁻⁴

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 13 ¹²⁹I の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日※1	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-928-1249	1,5	JRR-2	アルミニウム	3.0634	94.0	2017/5/17	ND	2 × 10 ⁻¹
NY-988-305	2,5	JRR-2	アルミニウム	11.7059	87.5	2017/5/17	ND	4 × 10 ⁻²
NY-995-172	5,12	JRR-2	アルミニウム	14.8674	72.9	2017/6/25	(2.6±0.1) × 10 ⁻⁶	2 × 10 ⁻⁸
NY-995-178	3,5	JRR-2	アルミニウム	1.0980	87.5	2017/5/17	ND	4 × 10 ⁻¹
NY-99X-447	3,4	JRR-2	アルミニウム	19.5069	80.2	2017/5/17	ND	2 × 10 ⁻²
NY-155-BN-245	1,5,6	JRR-2	ステンレス	32.5640	82.4	2017/6/8	ND	2 × 10 ⁻²
NY-155-BN-266	5,7,8	JRR-2	アルミニウム	59.0932	83.7	2017/6/8	ND	7 × 10 ⁻³
NY-155-BN-267	3,5,8	JRR-2	アルミニウム	79.1594	86.1	2017/6/8	ND	5 × 10 ⁻³
NY-85X-840	1,3	JRR-3	アルミニウム	33.6096	82.9	2017/6/25	(9.1±0.2) × 10 ⁻⁸	9 × 10 ⁻⁹
NY-861-974	2,12	JRR-3	鉄	121.6384	89.6	2017/5/17	ND	3 × 10 ⁻³
NY-863-1340	1,3,8	JRR-3	ステンレス	25.8009	84.5	2017/6/8	ND	2 × 10 ⁻²
NY-86X-710	1,4,7	JRR-3	ステンレス	225.3365	84.2	2017/6/8	ND	2 × 10 ⁻³

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 14 ^{137}Cs の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	1,5,6	JRR-2	ステンレス	32.5640	44.7	2017/7/5	ND	5×10^{-3}
NY-155-BN-266	5,7,8	JRR-2	アルミニウム	59.0932	47.2	2017/6/29	$(1.0 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	6×10^{-3}
NY-155-BN-267	3,5,8	JRR-2	アルミニウム	79.1594	74.6	2017/6/26	$(3.2 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	2×10^{-3}
NY-863-1340	1,3,8	JRR-3	ステンレス	25.8009	75.7	2017/6/29	$(6.8 \pm 0.4) \times 10^{-2}$	2×10^{-2}
NY-86X-710	1,4,7	JRR-3	ステンレス	225.3365	80.7	2017/7/1	$(8.5 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	10×10^{-4}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 15 ^{152}Eu の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	1,5,6	JRR-2	ステンレス	32.5640	70.0	2017/6/23	ND	1×10^{-2}
NY-155-BN-266	5,7,8	JRR-2	アルミニウム	59.0932	35.0	2017/6/29	ND	2×10^{-2}
NY-155-BN-267	3,5,8	JRR-2	アルミニウム	79.1594	66.0	2017/6/27	$(1.1 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	5×10^{-3}
NY-863-1340	1,3,8	JRR-3	ステンレス	25.8009	66.0	2017/6/30	ND	2×10^{-2}
NY-86X-710	1,4,7	JRR-3	ステンレス	225.3365	77.0	2017/7/1	ND	2×10^{-3}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 16 ^{154}Eu の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	1,5,6	JRR-2	ステンレス	32.5640	70.0	2017/6/23	ND	6×10^{-3}
NY-155-BN-266	5,7,8	JRR-2	アルミニウム	59.0932	35.0	2017/6/29	$(1.8 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	8×10^{-3}
NY-155-BN-267	3,5,8	JRR-2	アルミニウム	79.1594	66.0	2017/6/27	$(5.5 \pm 0.9) \times 10^{-3}$	3×10^{-3}
NY-863-1340	1,3,8	JRR-3	ステンレス	25.8009	66.0	2017/6/30	ND	9×10^{-3}
NY-86X-710	1,4,7	JRR-3	ステンレス	225.3365	77.0	2017/7/1	ND	8×10^{-4}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 17 ^{234}U の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	2,10	JRR-2	ステンレス	35.3786	72.2	2017/6/16	ND	2×10^{-4}
NY-155-BN-266	3,10	JRR-2	アルミニウム	48.3496	62.3	2017/6/15	$(1.8 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	8×10^{-5}
NY-155-BN-267	2,10	JRR-2	アルミニウム	71.0788	69.5	2017/6/7	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^{-3}$	8×10^{-5}
NY-863-1340	4,10	JRR-3	ステンレス	16.7465	69.5	2017/6/8	$(4.0 \pm 1.0) \times 10^{-4}$	4×10^{-4}
NY-86X-710	2,3	JRR-3	ステンレス	114.4077	65.5	2017/6/14	$(8.3 \pm 1.8) \times 10^{-5}$	5×10^{-5}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 18 ^{238}U の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	2,10	JRR-2	ステンレス	35.3786	100	2017/5/12	ND	7×10^{-6}
NY-155-BN-266	3,10	JRR-2	アルミニウム	48.3496	100	2017/5/12	$(6.9 \pm 0.1) \times 10^{-4}$	6×10^{-5}
NY-155-BN-267	2,10	JRR-2	アルミニウム	71.0788	100	2017/5/12	$(4.6 \pm 0.1) \times 10^{-4}$	4×10^{-5}
NY-863-1340	4,10	JRR-3	ステンレス	16.7465	100	2017/5/12	$(2.0 \pm 0.1) \times 10^{-4}$	2×10^{-5}
NY-86X-710	2,3	JRR-3	ステンレス	114.4077	100	2017/5/12	$(4.2 \pm 0.1) \times 10^{-5}$	3×10^{-6}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 19 ^{238}Pu の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	2,10	JRR-2	ステンレス	35.3786	66.6	2017/6/16	ND	3×10^{-4}
NY-155-BN-266	3,10	JRR-2	アルミニウム	48.3496	66.6	2017/6/15	$(2.3 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	2×10^{-4}
NY-155-BN-267	2,10	JRR-2	アルミニウム	71.0788	66.6	2017/6/7	ND	2×10^{-4}
NY-863-1340	4,10	JRR-3	ステンレス	16.7465	66.6	2017/6/8	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	7×10^{-4}
NY-86X-710	2,3	JRR-3	ステンレス	114.4077	66.6	2017/6/14	ND	10×10^{-5}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 20 $^{239+240}\text{Pu}$ の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	2,10	JRR-2	ステンレス	35.3786	66.6	2017/6/16	ND	1×10^{-4}
NY-155-BN-266	3,10	JRR-2	アルミニウム	48.3496	66.6	2017/6/15	$(2.2 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	2×10^{-4}
NY-155-BN-267	2,10	JRR-2	アルミニウム	71.0788	66.6	2017/6/7	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^{-3}$	2×10^{-4}
NY-863-1340	4,10	JRR-3	ステンレス	16.7465	66.6	2017/6/8	$(1.6 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	5×10^{-4}
NY-86X-710	2,3	JRR-3	ステンレス	114.4077	66.6	2017/6/14	$(8.0 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	8×10^{-5}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 21 ^{241}Am の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	2,10	JRR-2	ステンレス	35.3786	63.5	2017/6/16	ND	2×10^{-4}
NY-155-BN-266	3,10	JRR-2	アルミニウム	48.3496	73.0	2017/6/15	ND	3×10^{-4}
NY-155-BN-267	2,10	JRR-2	アルミニウム	71.0788	65.9	2017/6/7	$(2.8 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	1×10^{-4}
NY-863-1340	4,10	JRR-3	ステンレス	16.7465	87.4	2017/6/8	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	4×10^{-4}
NY-86X-710	2,3	JRR-3	ステンレス	114.4077	65.8	2017/6/14	$(5.5 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	7×10^{-5}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

表 22 ^{244}Cm の分析結果

試料番号		発生施設	材質	試料量 (g)	回収率 (%)	測定日 ^{※1}	放射能濃度±誤差 (Bq/g)	検出限界 (Bq/g)
保管体番号	枝番							
NY-155-BN-245	2,10	JRR-2	ステンレス	35.3786	63.5	2017/6/16	ND	2×10^{-4}
NY-155-BN-266	3,10	JRR-2	アルミニウム	48.3496	73.0	2017/6/15	$(1.0 \pm 0.3) \times 10^{-4}$	7×10^{-5}
NY-155-BN-267	2,10	JRR-2	アルミニウム	71.0788	65.9	2017/6/7	$(3.2 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	5×10^{-5}
NY-863-1340	4,10	JRR-3	ステンレス	16.7465	87.4	2017/6/8	ND	2×10^{-4}
NY-86X-710	2,3	JRR-3	ステンレス	114.4077	65.8	2017/6/14	$(3.5 \pm 1.2) \times 10^{-5}$	4×10^{-5}

※1 測定開始日を示す。ND:検出限界値以下であることを示す。

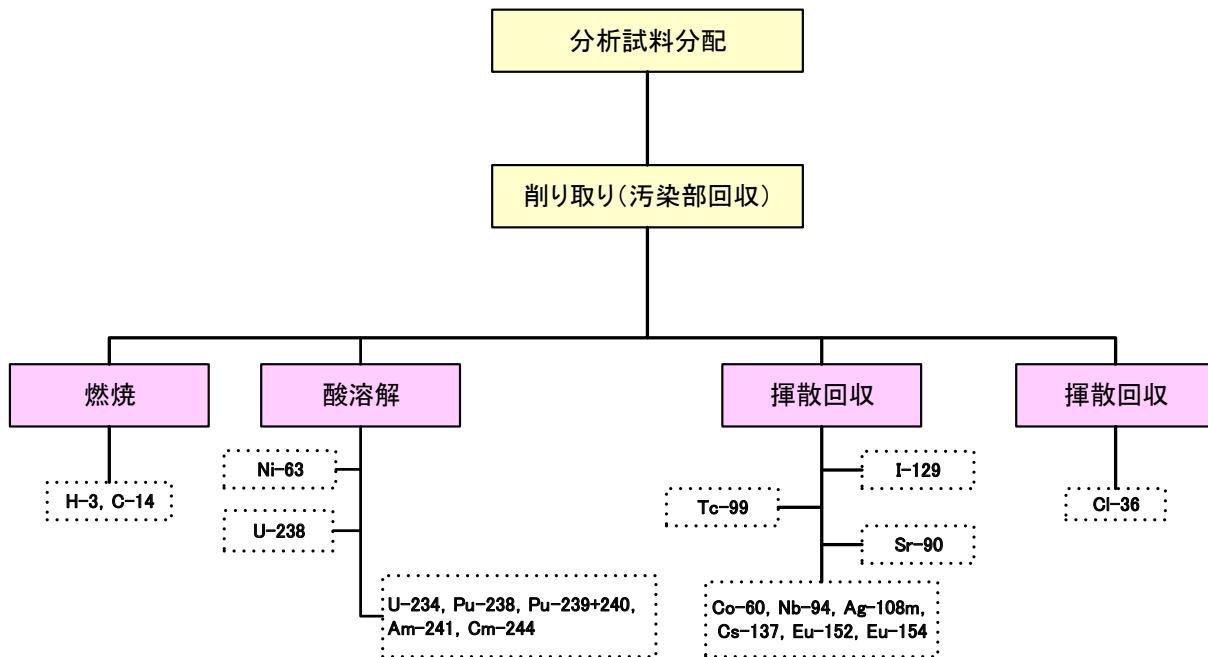


図 1 分析概要フロー

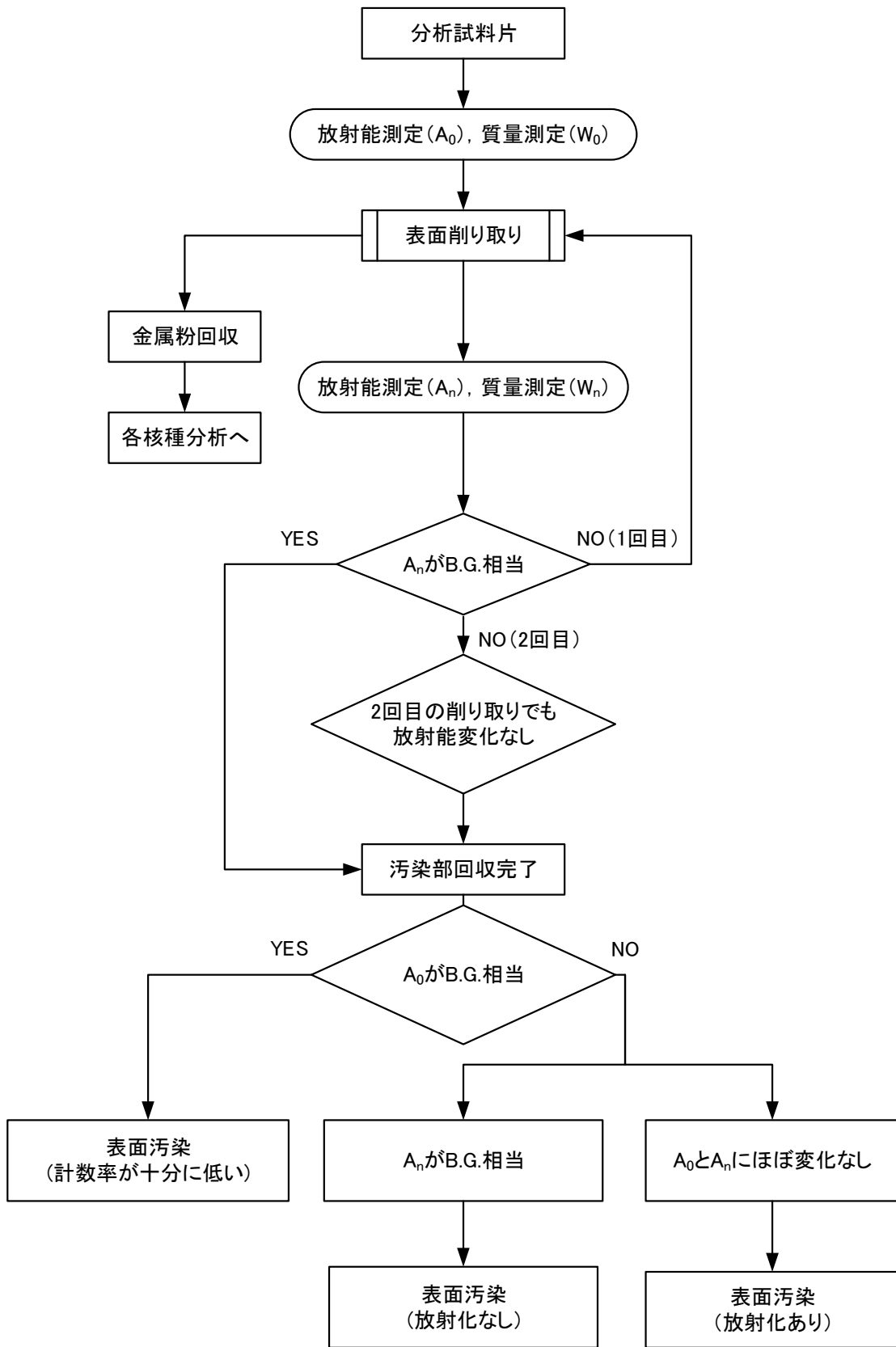


図2 分析試料の削り取り処理フロー

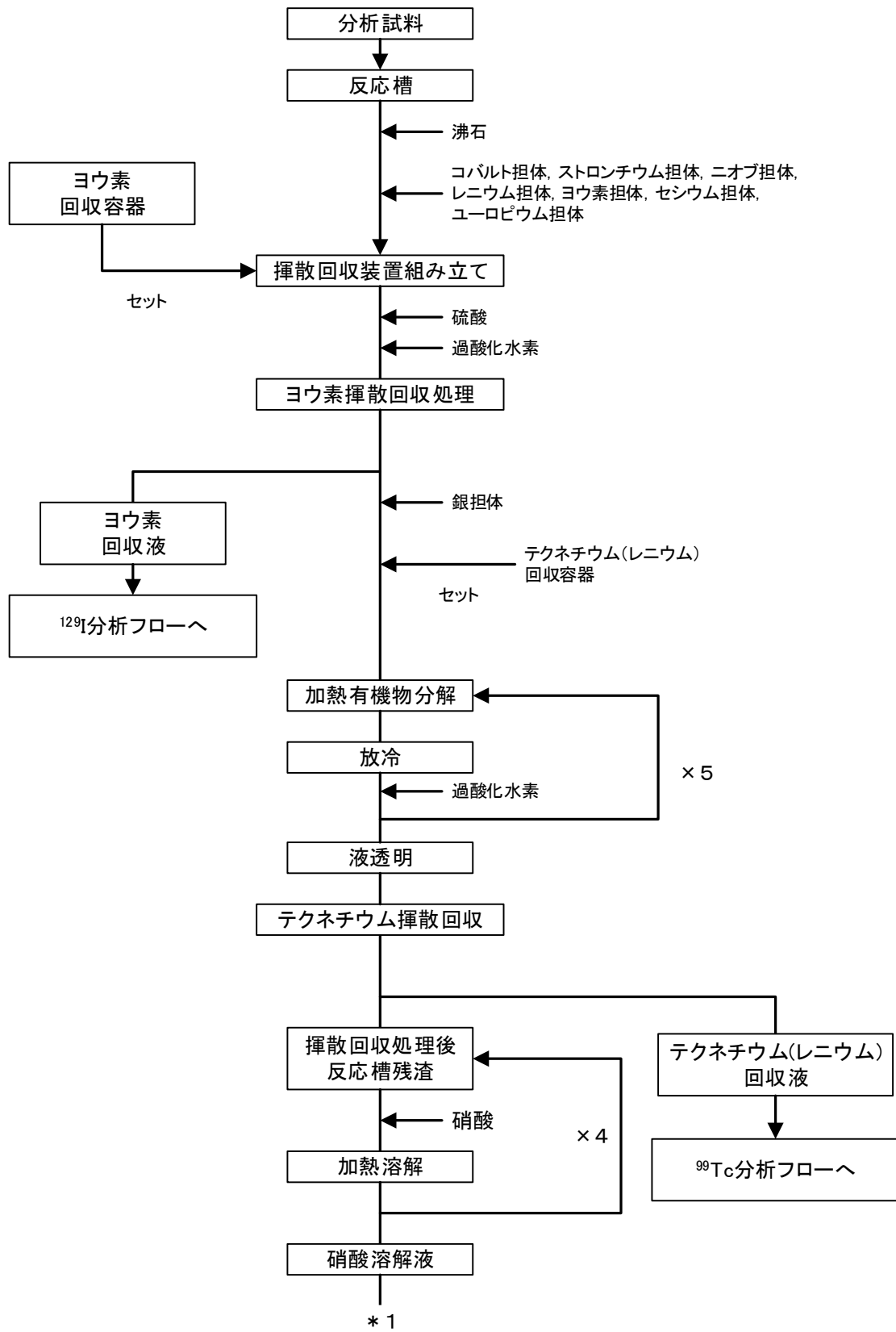


図3 揮散回収処理フロー(1/2)

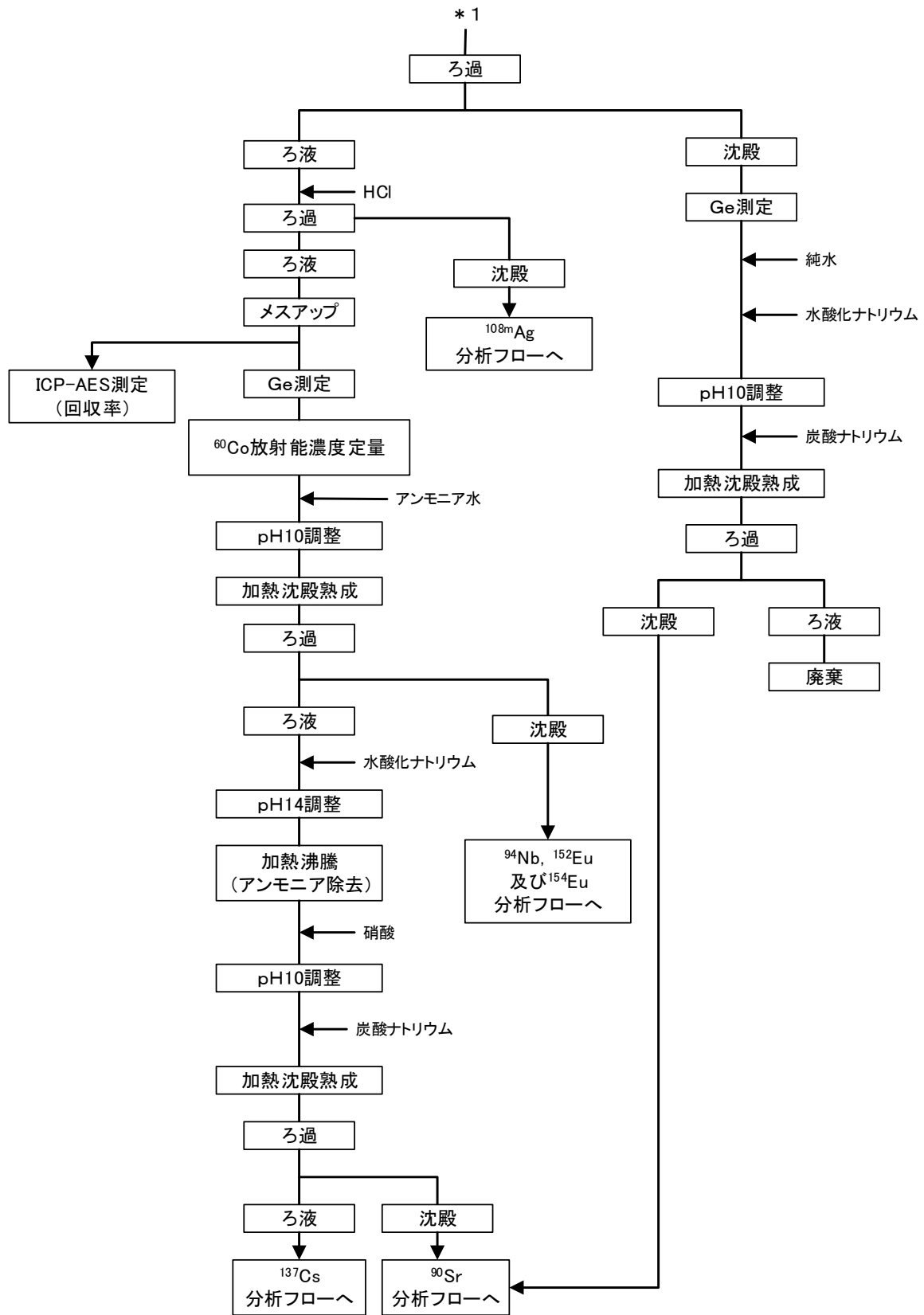


図3 揮散回収処理フロー(2/2)

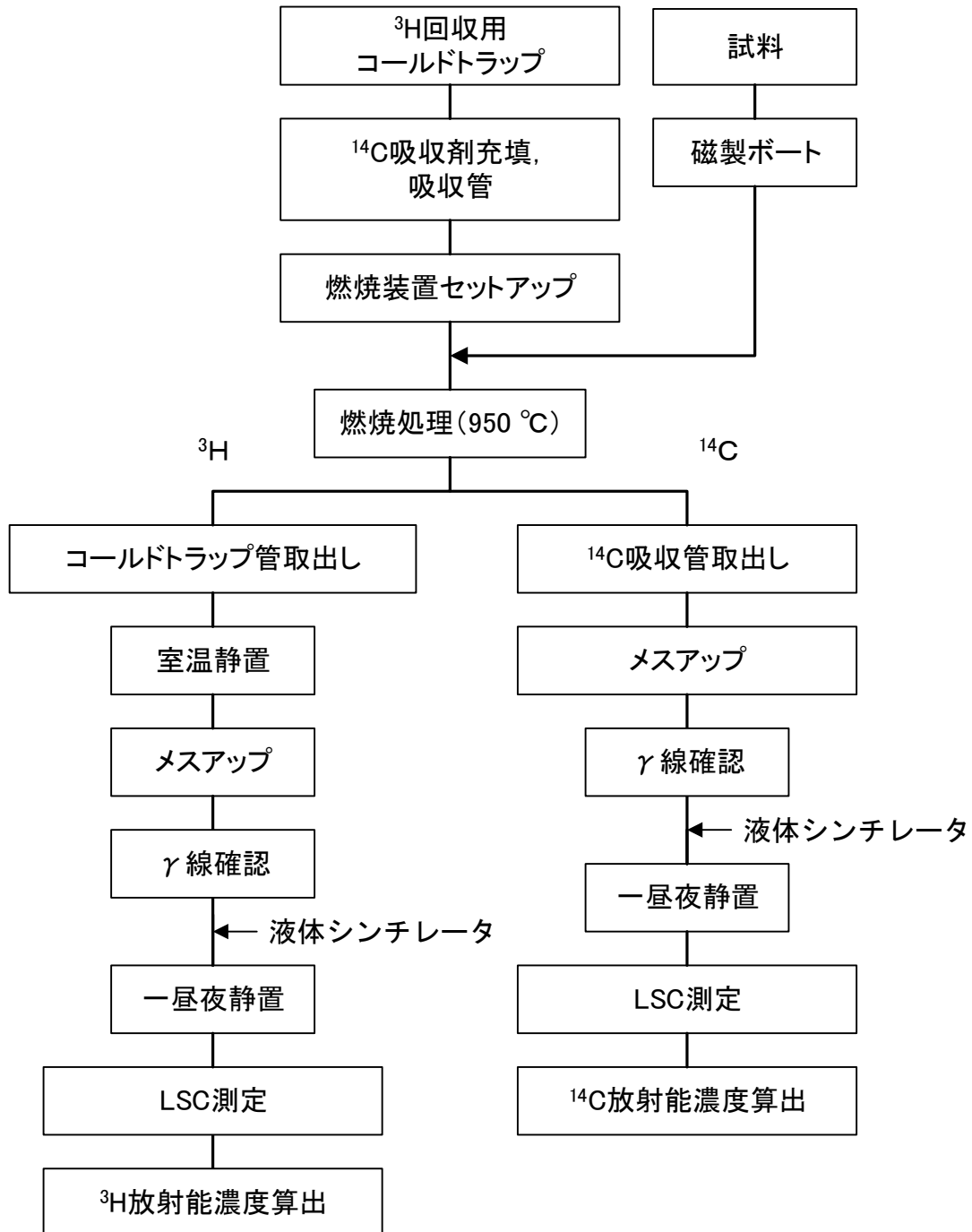


図4 ^3H 及び ^{14}C 分析フロー

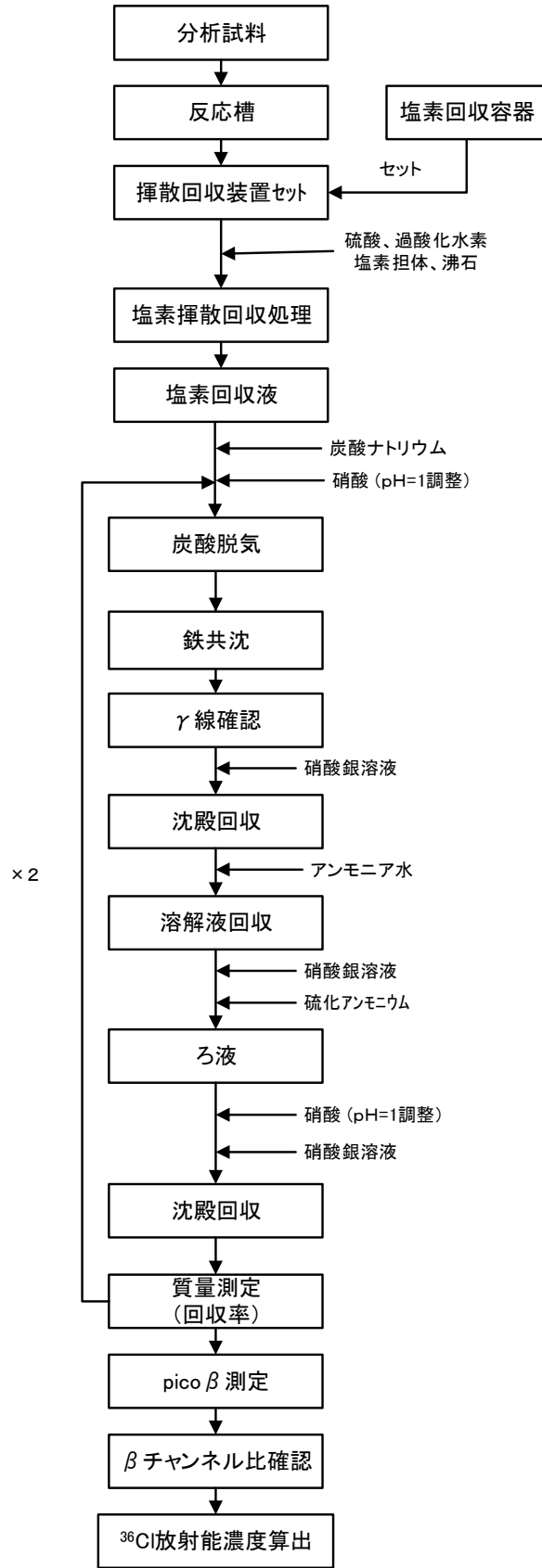


図 5 ^{36}Cl 分析フロー

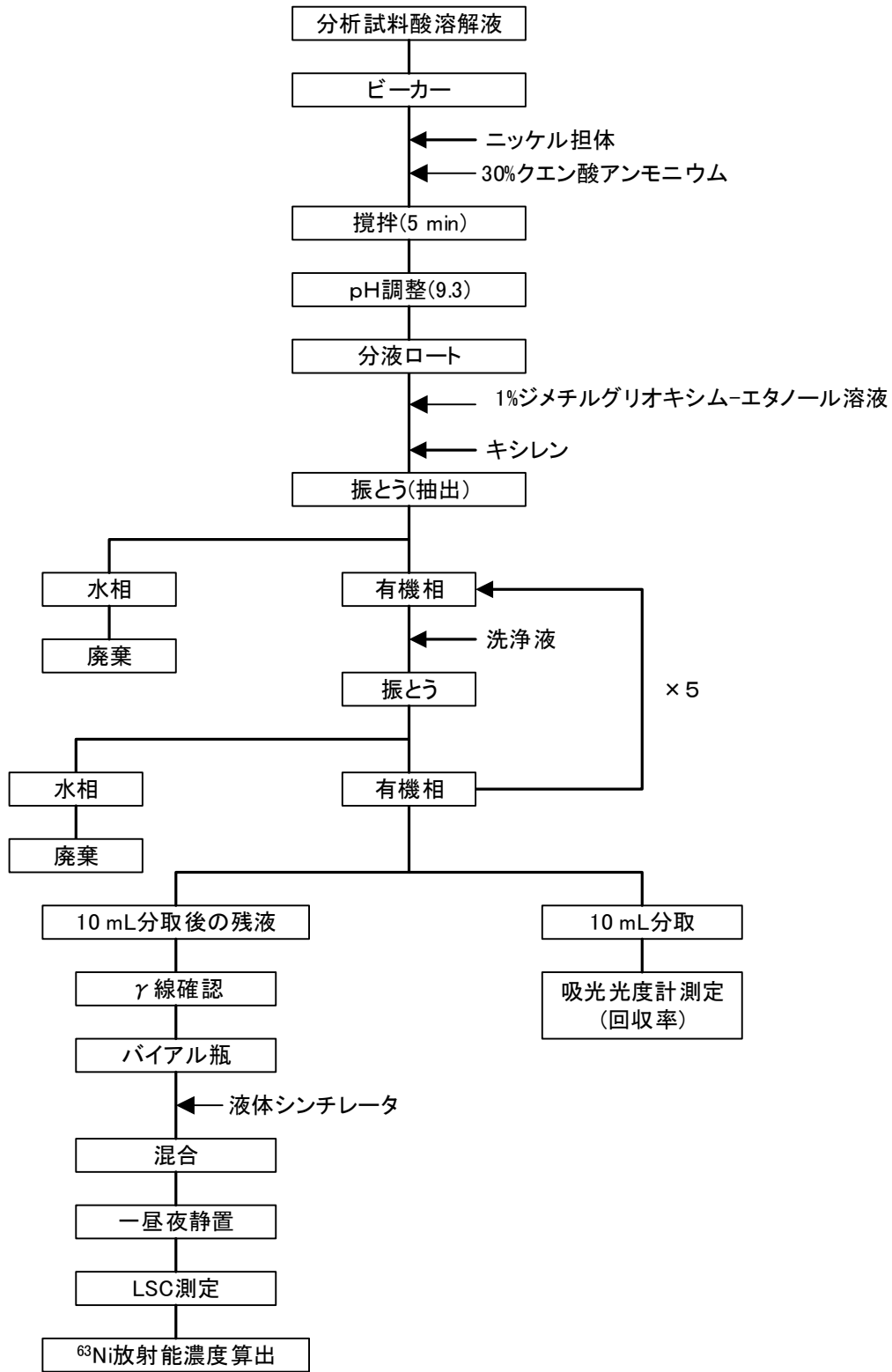


図 6 ^{63}Ni 分析フロー

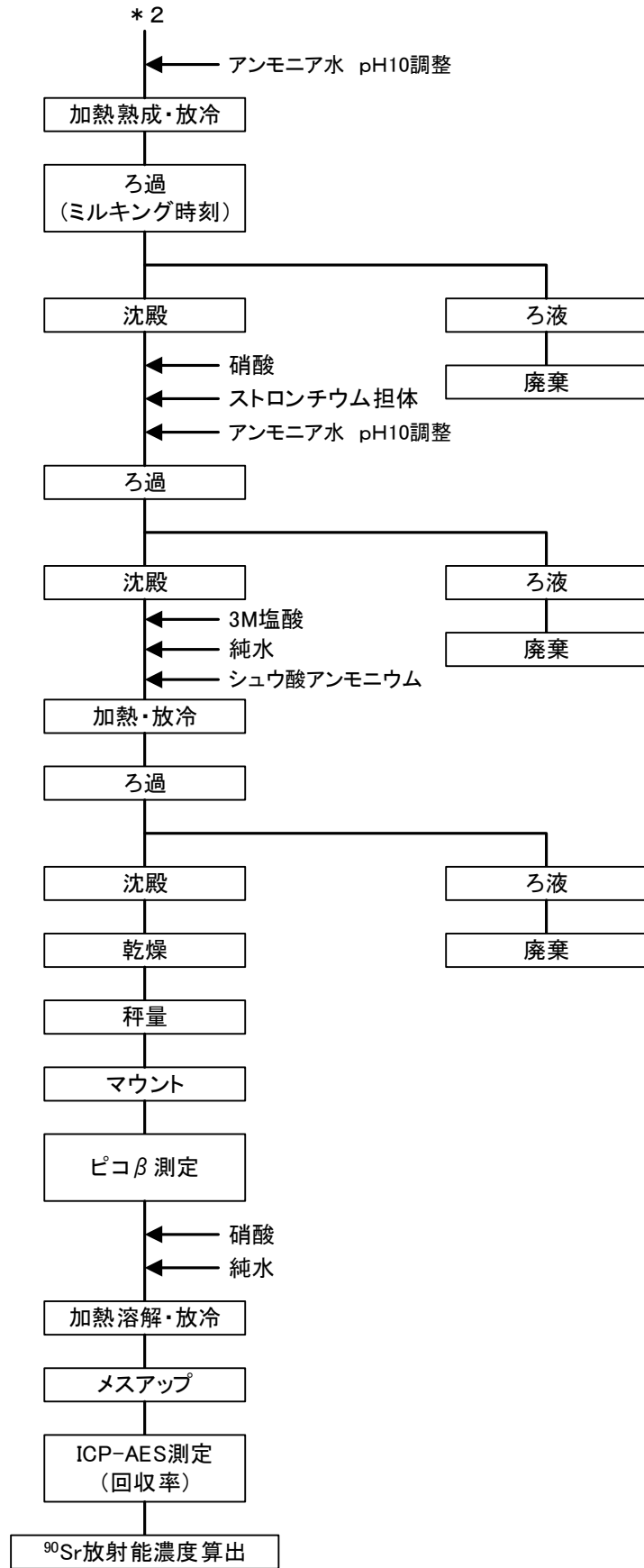


図 7 ⁹⁰Sr 分析フロー (2/2)

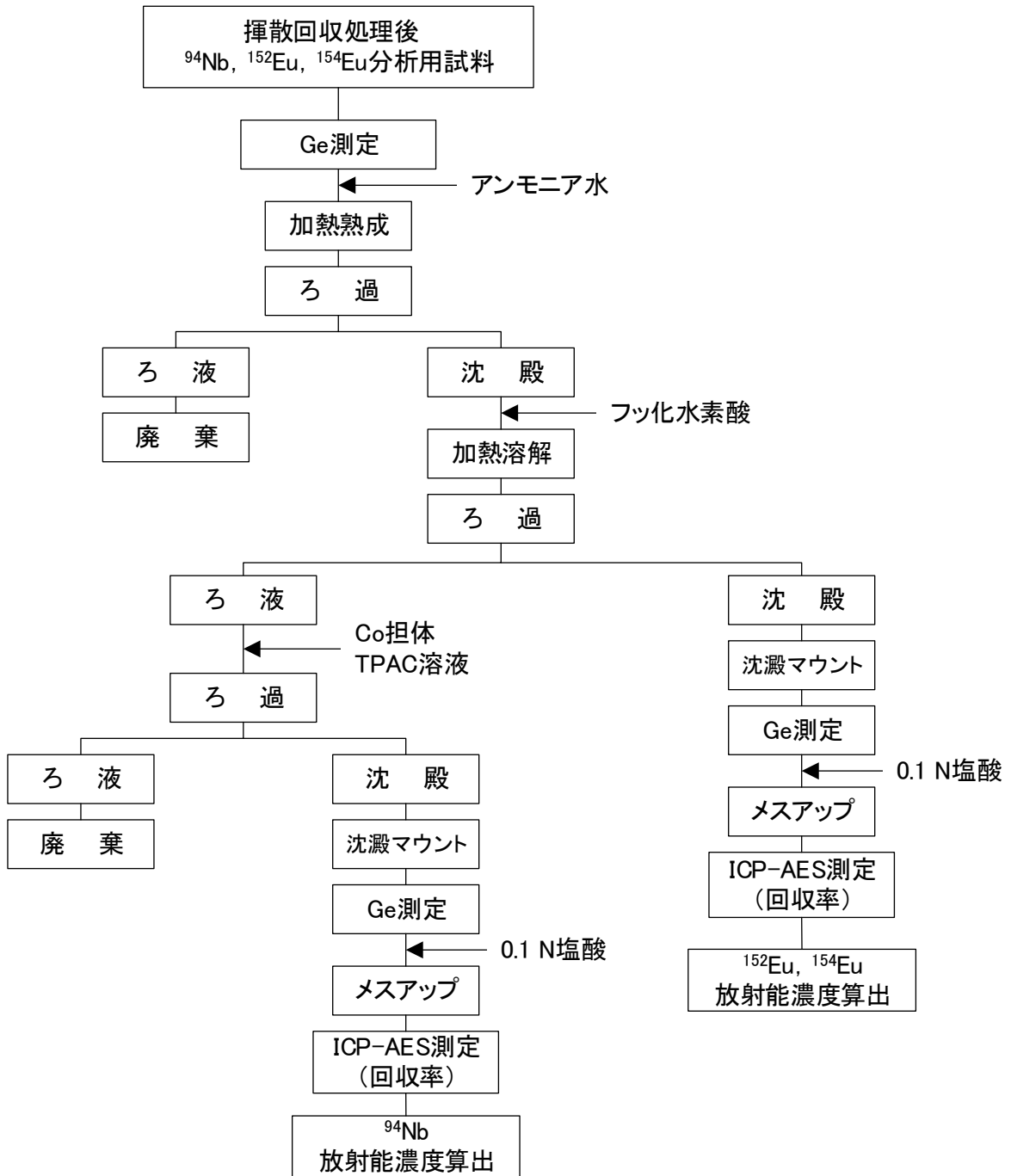


図 8 ^{94}Nb 、 ^{152}Eu 及び ^{154}Eu 分析フロー

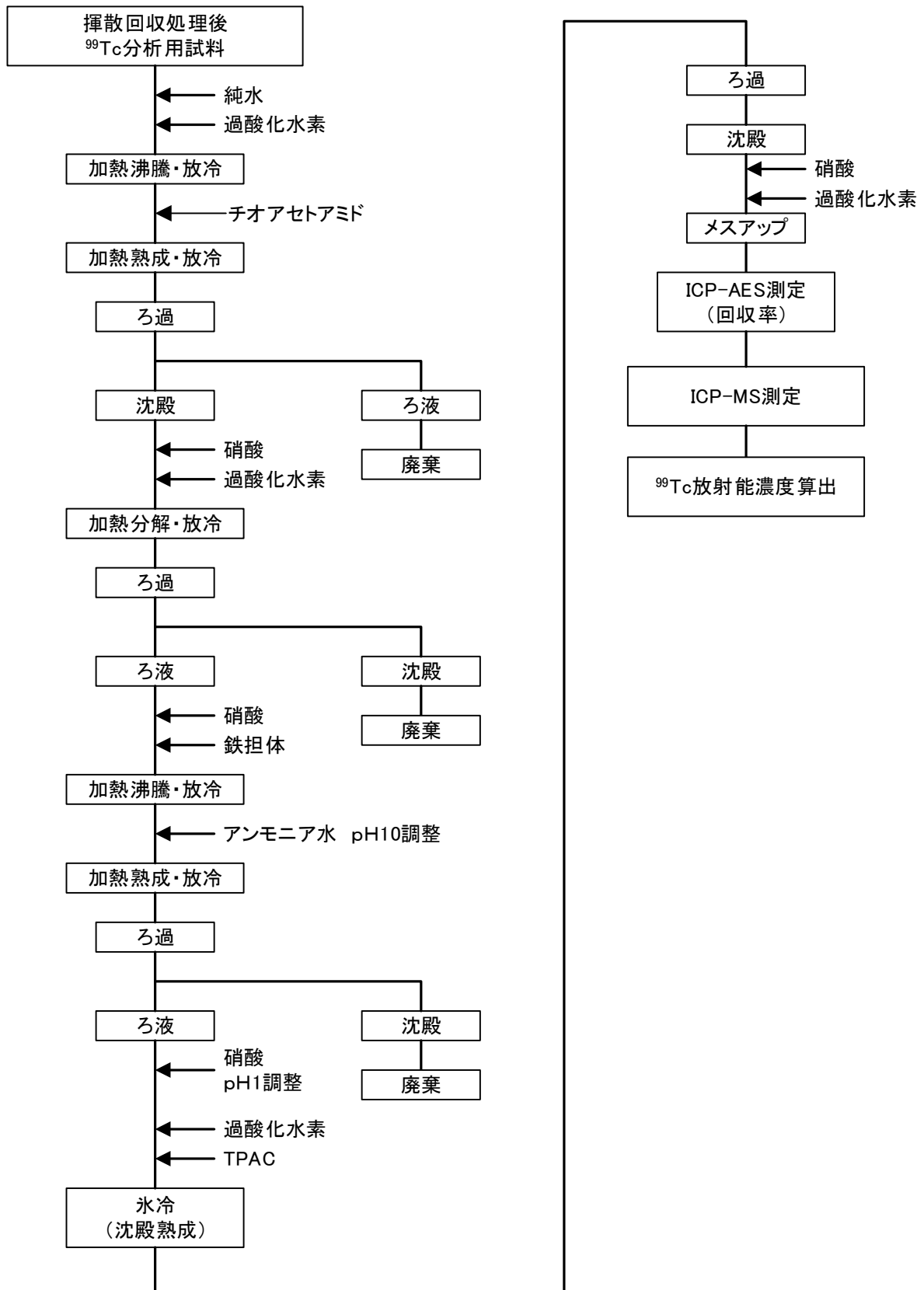


図9 ⁹⁹Tc 分析フロー

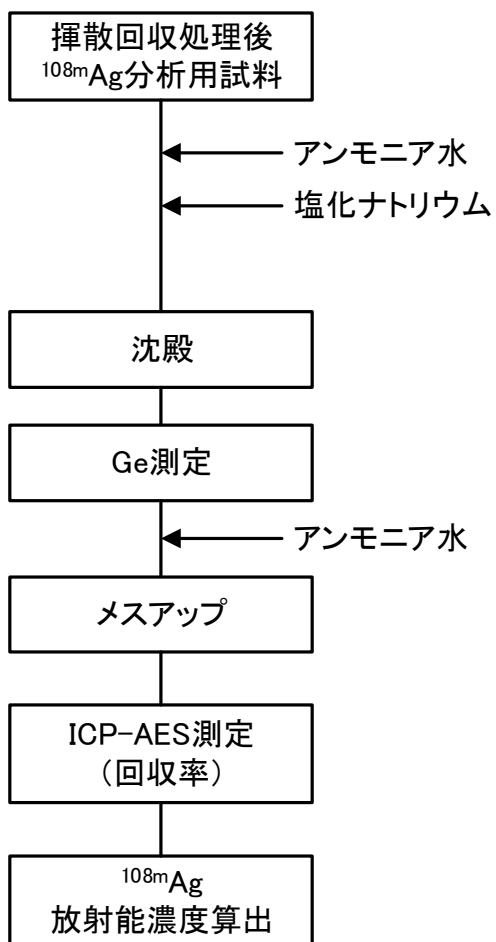


図 10 ^{108m}Ag 分析フロー

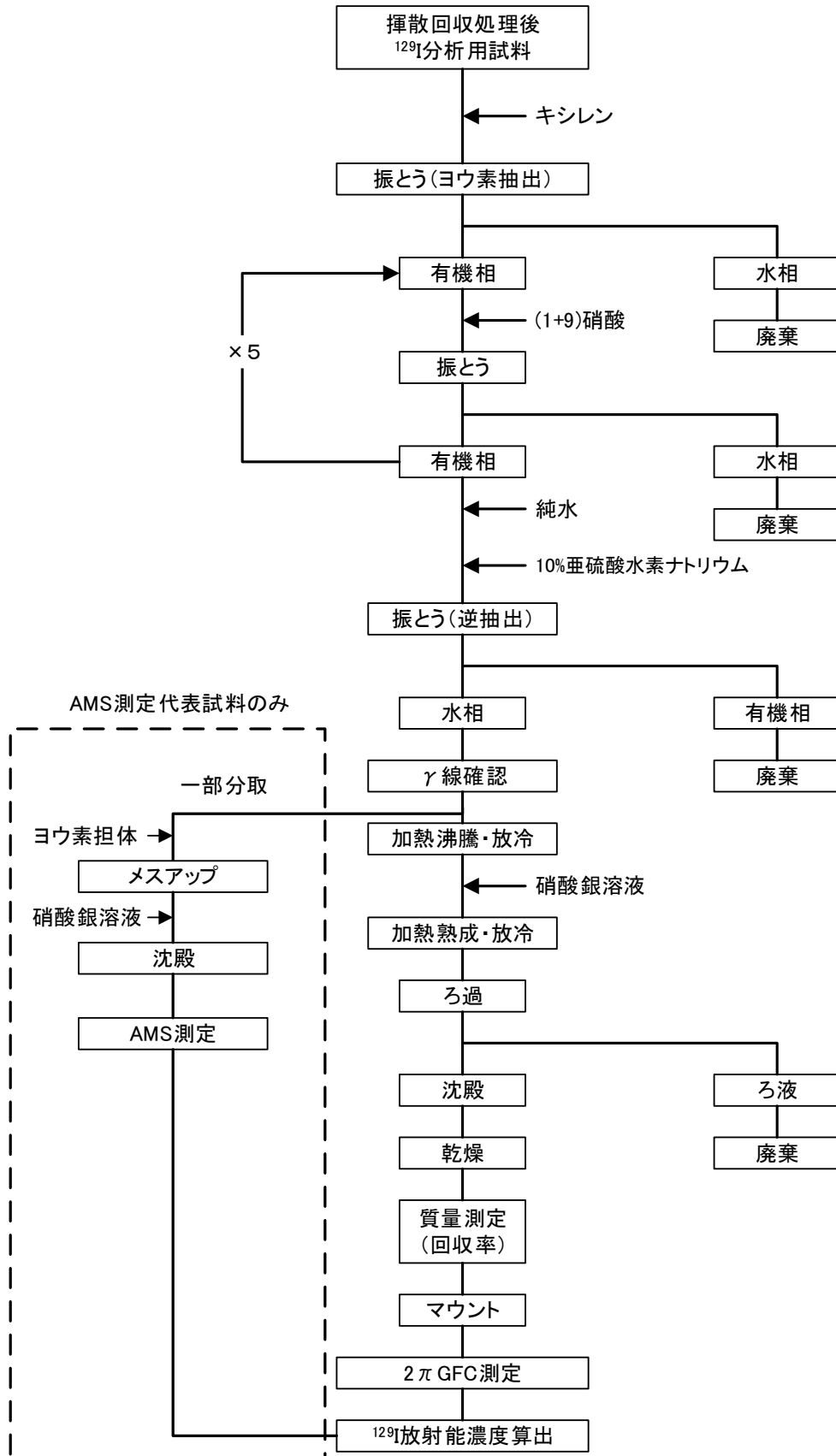


図 11 ^{129}I 分析フロー

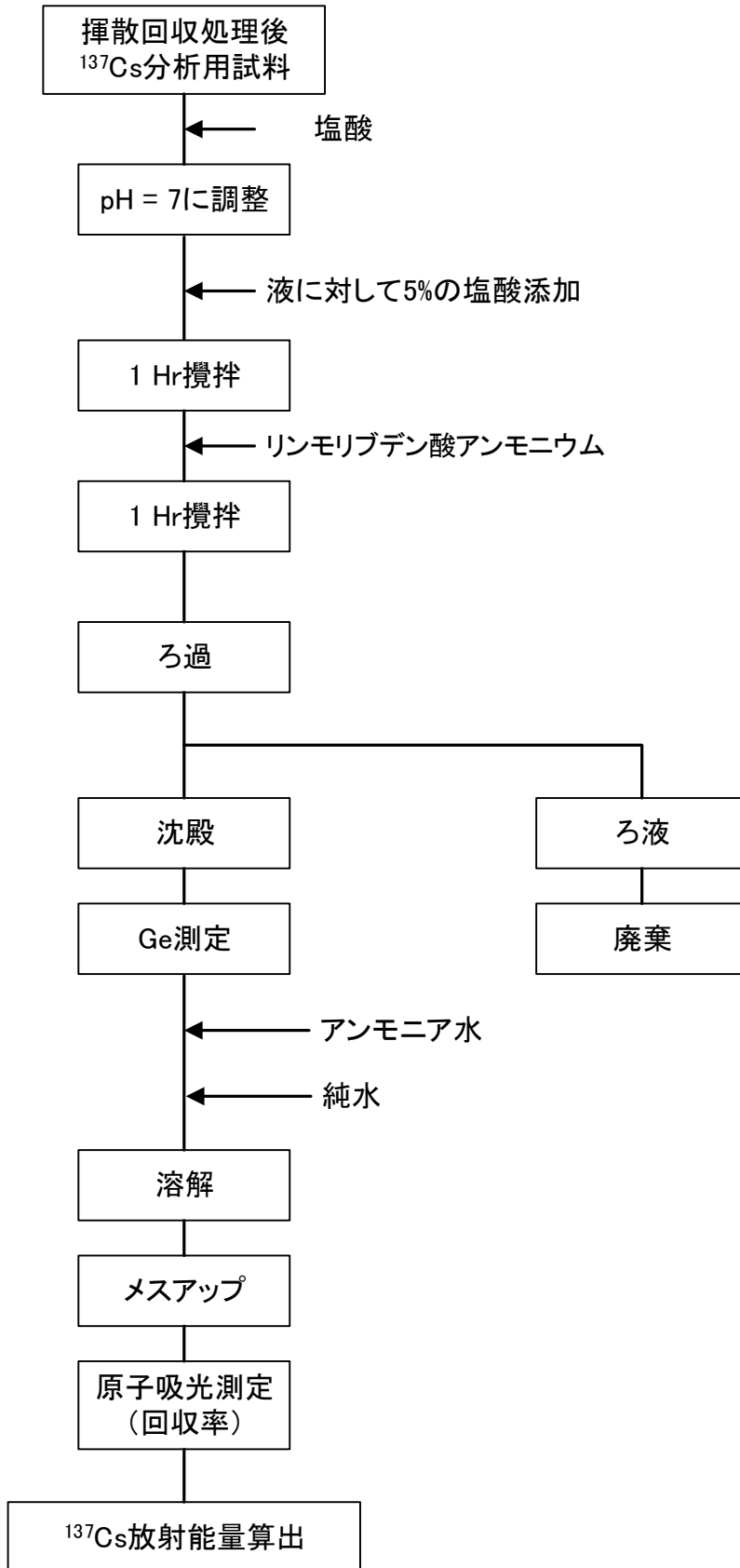


図 12 ^{137}Cs 分析フロー

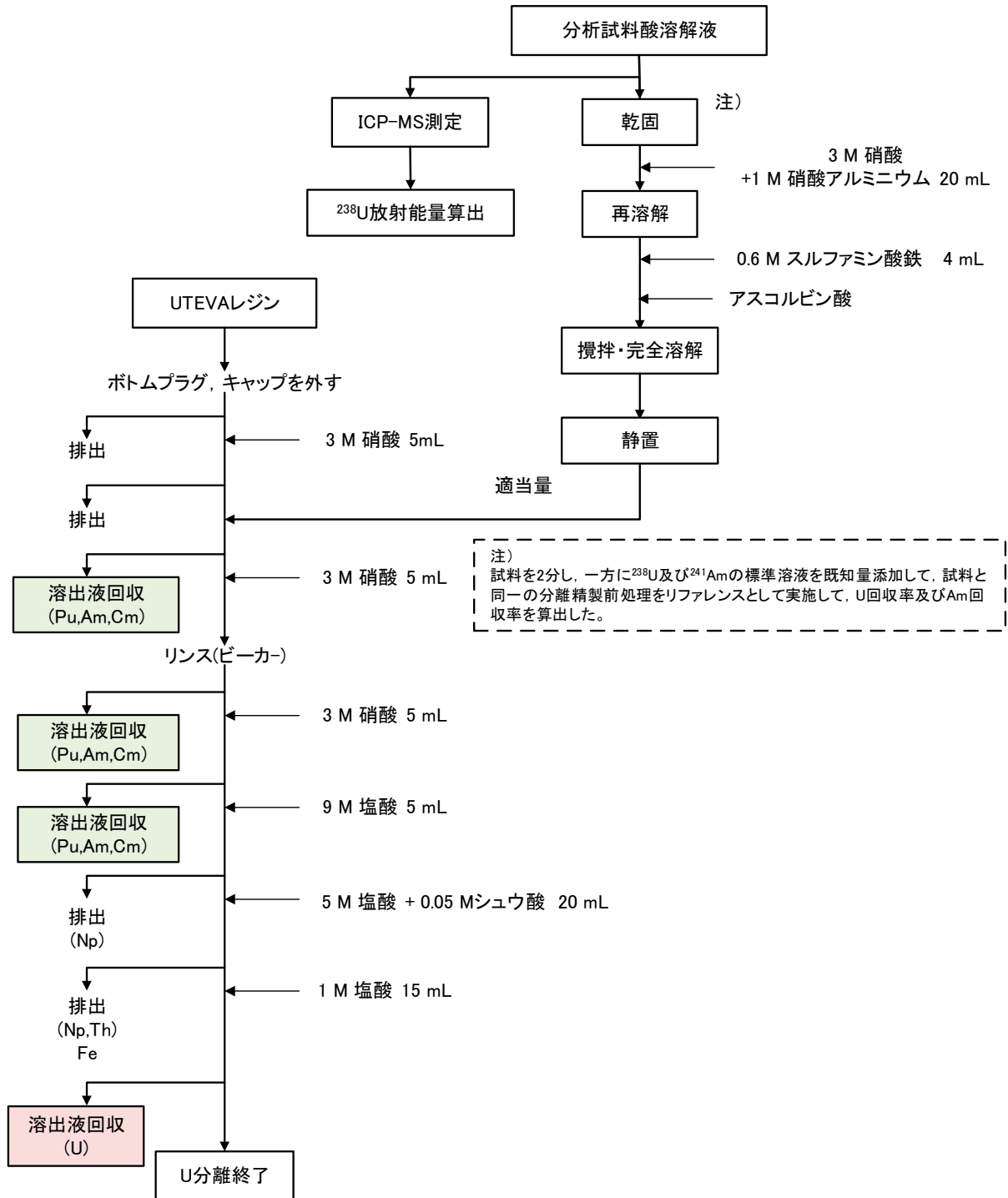


図 13 ²³⁴U、²³⁸U、²³⁸Pu、²³⁹⁺²⁴⁰Pu、²⁴¹Am 及び ²⁴⁴Cm 分析フロー(1/3)

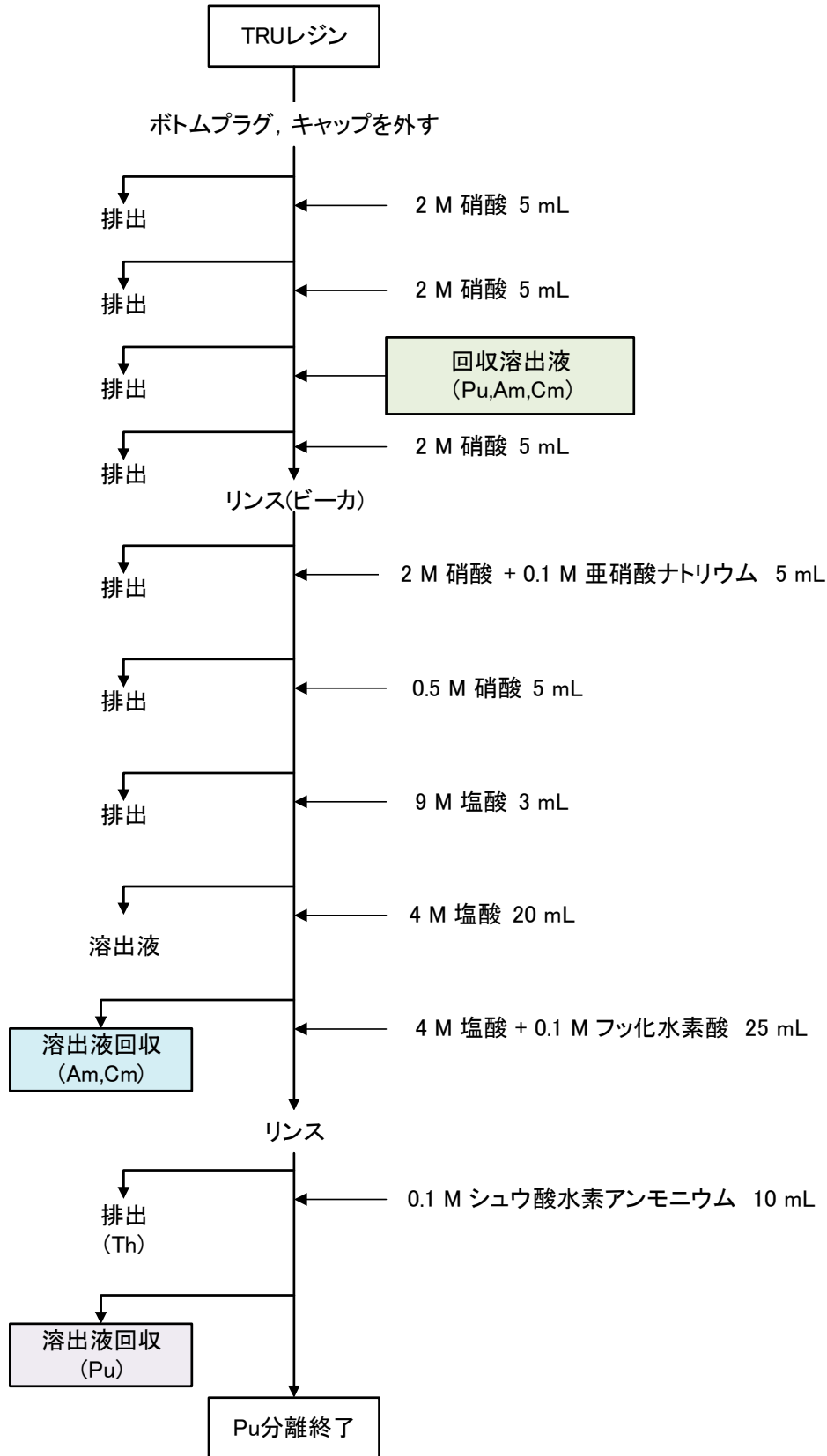


図 13 ^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 及び ^{244}Cm 分析フロー (2/3)

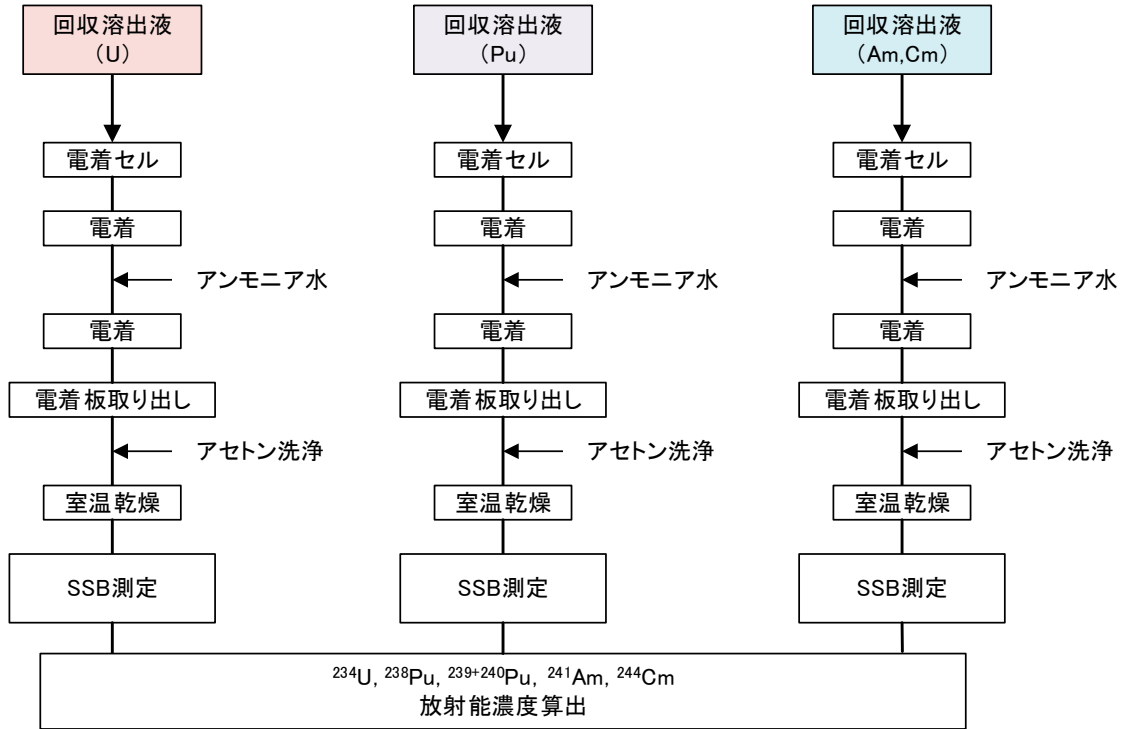


図 13 ^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 及び ^{244}Cm 分析フロー (3/3)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

