

JRR-3、JRR-4及び再処理特別研究棟から発生した 放射性廃棄物に対する放射化学分析 (2)

Analysis of the Radioactivity Concentrations in Radioactive Waste Generated
from JRR-3, JRR-4 and JRTF Facilities (2)

飛田 実 後藤 勝則 大森 剛 大曾根 理
原賀 智子 青野 竜士 今田 未来 土田 大貴
水飼 秋菜 石森 健一郎

Minoru TOBITA, Katsunori GOTO, Takeshi OMORI, Osamu OSONE
Tomoko HARAGA, Ryuji AONO, Miki KONDA, Daiki TSUCHIDA
Akina MITSUKAI and Ken-ichiro ISHIMORI

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

November 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

JRR-3、JRR-4 及び再処理特別研究棟から発生した放射性廃棄物に対する放射化学分析 (2)

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

飛田 実*¹、後藤 勝則*²、大森 剛*²、大曾根 理*²、原賀 智子、
青野 竜士、今田 未来、土田 大貴、水飼 秋菜⁺、石森 健一郎

(2023 年 7 月 26 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放射性廃棄物は、放射能レベルに応じて将来的にトレンチとピットに分けて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、JRR-3、JRR-4 及び再処理特別研究棟から発生した放射性廃棄物よりコンクリートを試料として採取し、放射化学分析を実施した。本報告書は、令和 3 年度から令和 4 年度に取得した 23 核種 (^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 $^{166\text{m}}\text{Ho}$ 、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am 、 ^{244}Cm) の放射能濃度データについて整理し、放射能濃度評価法検討のための基礎資料としてまとめたものである。

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

+ 原子力科学研究所 保安全管理部

*¹ 検査開発株式会社

*² 株式会社ジック

Analysis of the Radioactivity Concentrations in Radioactive Waste
Generated from JRR-3, JRR-4 and JRTF Facilities (2)

Minoru TOBITA*¹, Katsunori GOTO*², Takeshi OMORI*², Osamu OSONE*², Tomoko HARAGA,
Ryuji AONO, Miki KONDA, Daiki TSUCHIDA, Akina MITSUKAI⁺ and Ken-ichiro ISHIMORI

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 July 26, 2023)

Radioactive wastes generated from nuclear research facilities in Japan Atomic Energy Agency are planning to be buried in the near surface disposal field as trench and pit. Therefore, it is required to establish the method to evaluate the radioactivity concentrations of radioactive wastes until the beginning of disposal. In order to contribute to the study of radioactivity concentration evaluation methods for radioactive wastes generated from nuclear research facilities, we collected and analyzed concrete samples generated from JRR-3, JRR-4 and JAERI Reprocessing Test Facility. In this report, we summarized the radioactivity concentrations of 23 radionuclides (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{94}Nb , $^{108\text{m}}\text{Ag}$, ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{154}Eu , $^{166\text{m}}\text{Ho}$, ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm) which were obtained from radiochemical analysis of the samples in fiscal years 2021-2022.

Keywords: Low-level Radioactive Waste, Radioactivity Concentration, Radiochemical Separation, Concrete Samples, JRR-3, JRR-4, JRTF

⁺ Department of Operational Safety Administration, Nuclear Science Research Institute

*¹ Inspection Development Company Ltd.

*² Growth Industry Create Corporation

目 次

1. はじめに.....	1
2. 放射能分析.....	1
2.1 試料の概要.....	1
2.2 試料の前処理.....	2
2.3 ^3H の分析.....	3
2.4 ^{14}C の分析.....	4
2.5 ^{36}Cl の分析.....	4
2.6 ^{41}Ca の分析.....	5
2.7 ^{60}Co 、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 及び $^{166\text{m}}\text{Ho}$ の分析.....	6
2.8 ^{63}Ni 及び ^{90}Sr の分析.....	7
2.9 ^{234}U 、 ^{235}U 及び ^{238}U の分析.....	8
2.10 ^{238}Pu 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の分析.....	9
2.11 ^{241}Am 、 ^{243}Am 及び ^{244}Cm の分析.....	9
3. 分析結果.....	10
4. まとめ.....	10
謝辞.....	11
参考文献.....	11

Contents

1. Introduction	1
2. Radioactivity analysis.....	1
2.1 Overview of analytical samples.....	1
2.2 Preprocessing for analytical samples.....	2
2.3 Analysis of ^3H	3
2.4 Analysis of ^{14}C	4
2.5 Analysis of ^{36}Cl	4
2.6 Analysis of ^{41}Ca	5
2.7 Analysis of ^{60}Co , ^{94}Nb , $^{108\text{m}}\text{Ag}$, ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{154}Eu and $^{166\text{m}}\text{Ho}$	6
2.8 Analysis of ^{63}Ni and ^{90}Sr	7
2.9 Analysis of ^{234}U , ^{235}U and ^{238}U	8
2.10 Analysis of ^{238}Pu and $^{239+240}\text{Pu}$	9
2.11 Analysis of ^{241}Am , ^{243}Am and ^{244}Cm	9
3. Results	10
4. Conclusions	10
Acknowledgement.....	11
References	11

表リスト

表 1	施設ごとの分析対象核種	13
表 2	分析法の概要及び測定機器等の情報	14
表 3	^3H の分析結果	15
表 4	^{14}C の分析結果	15
表 5	^{36}Cl の分析結果	15
表 6	^{41}Ca の分析結果	16
表 7	^{60}Co の分析結果	16
表 8	^{63}Ni の分析結果	16
表 9	^{90}Sr の分析結果	17
表 10	^{94}Nb の分析結果	17
表 11	$^{108\text{m}}\text{Ag}$ の分析結果	17
表 12	^{137}Cs の分析結果	18
表 13	^{133}Ba の分析結果	18
表 14	^{152}Eu の分析結果	18
表 15	^{154}Eu の分析結果	19
表 16	$^{166\text{m}}\text{Ho}$ の分析結果	19
表 17	^{234}U の分析結果	19
表 18	^{235}U の分析結果	20
表 19	^{238}U の分析結果	20
表 20	^{238}Pu の分析結果	20
表 21	$^{239+240}\text{Pu}$ の分析結果	21
表 22	^{241}Am の分析結果	21
表 23	^{243}Am の分析結果	21
表 24	^{244}Cm の分析結果	22

図リスト

図 1	分析概要フロー.....	23
図 2	試料溶解フロー.....	24
図 3	^3H の分析フロー.....	25
図 4	^3H の分離装置.....	25
図 5	^{14}C の分析フロー.....	26
図 6	^{14}C の分離装置.....	26
図 7	^{36}Cl の分析フロー.....	27
図 8	^{41}Ca の分析フロー.....	29
図 9	^{63}Ni 及び ^{90}Sr の分析フロー.....	30
図 10	^{234}U 、 ^{235}U 及び ^{238}U の分析フロー.....	31
図 11	^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am 及び ^{244}Cm の分析フロー.....	32

1. はじめに

「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年法律第166号）」においては、廃棄物埋設事業者は埋設対象となる放射性廃棄物が法令に定める基準を満たしていることについて、原子力規制委員会による確認を受けなければならないと定められている。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つ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（昭和63年総理府令第1号）」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、運転保守に伴って発生する均質・均一固化体及び充填固化体の放射能濃度について、廃棄体一体ごとに、スク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。

廃棄体の放射能濃度を評価する方法を構築する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て、原科研内で保管廃棄されている動力試験炉（JPDR）、研究用試験炉（JRR-2、JRR-3及びJRR-4）及び照射後試験施設（ホットラボ及び再処理特別研究棟（JRTR: JAERI Reprocessing Test Facility））から発生した放射性廃棄物より採取した試料の放射化学分析を実施し⁴⁾⁻¹⁶⁾、実施した放射化学分析の結果をもとに放射能濃度評価方法について検討した¹⁷⁾⁻²⁰⁾。

本報告では、JRR-3、JRR-4 及び再処理特別研究棟から発生した放射性廃棄物のうち、コンクリートの廃棄物に対する放射能濃度評価方法を検討するため、保管廃棄した放射性廃棄物より採取した試料に対して分析を実施し、その放射化学分析の手法及び分析結果について記述した。放射化学分析を実施した核種は、JRR-3、JRR-4 及び再処理特別研究棟において安全評価上重要な核種として予備評価された 19 核種 (^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 $^{166\text{m}}\text{Ho}$ 、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Am) ²¹⁾に、 ^{133}Ba 、 ^{238}Pu 、 ^{243}Am 、 ^{244}Cm を加えた 23 核種である。ただし、エネルギー弁別のできない核種 (^{239}Pu 及び ^{240}Pu) は、合算値 ($^{239+240}\text{Pu}$) で表した。

2. 放射能分析

2.1 試料の概要

JRR-3、JRR-4 及び再処理特別研究棟から発生したコンクリート試料（5 試料）を本分析の対象とした。施設ごとの分析対象核種を表 1 に示す。なお、JRTR2K については、供試料量が少なく、対象核種すべての分析は不可能と判断し、限られた試料量で検出する可能性の高い核種に限定し

て分析を行った。分析概要フローを図 1 に示す。また、適用した分析法の概要及び使用した測定機器等の情報を表 2 に示す。

2.2 試料の前処理

2.2.1 ^3H 分析用試料の分取

採取した試料から ^3H 分析のために、試料を 1~10 g 取り分けた。また、2.2.2 項及び 2.3.1 項において試料サイズに制限があるため、試料の大きさが、1 cm 角以上の場合には、ステンレス棒を用いて、試料の大きさが 1 cm 角未満となるように粗粉碎した。粉碎作業にともない発生する熱や粉末状となり表面積が増加することにより、 ^3H が水分とともに蒸発してしまう可能性があるため、操作は必要最小限とした。

2.2.2 粉碎

コンクリート試料（必要に応じて粗粉碎したもの）をふるい（ナイロンスクリーン、102 メッシュ）にかけ、ふるいを通過せずに残存したものを、遊星ボールミルを用いて粉碎した。粉碎後に再度ふるいにかけて、残存物がなくなるまで繰り返し粉碎を行った。

2.2.3 均一化・分取

ふるいを通過した試料をポリビンに集め、卓上ポットミルで 4 時間攪拌した。攪拌した試料を台紙（円に扇形に 10 等分の目盛りをつけたもの）の上に取り出し、円錐状にした後、プラスチック製板を用いて上から押し広げて平らにし、台紙の目盛りを用いて扇形に 10 等分に区分けした。 γ 線放出核種（ ^{60}Co 、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 $^{166\text{m}}\text{Ho}$ ）の分析用試料として、台紙上に 10 等分に区分けした箇所からそれぞれ少量ずつ U8 容器に取り分け、 50.0 ± 1 g を分取した。それ以外の分析対象核種に対しては、酸溶解用及びアルカリ融解用試料として、10 等分に区分けした箇所からそれぞれ少量ずつ 8 ml ポリビンに取り分け、 1.0 ± 0.1 g ずつ 15 本分取した。分取における均一性確認は、主要核種（ ^{60}Co 、 ^{137}Cs 及び ^{152}Eu ）のうち、試料ごとに最も濃度の高い核種を用いて評価した。試料名 JRTFR2K については、粉碎に用いた試料の重量が 1 g 未満であることから、攪拌した試料を 8 ml ポリビンに全量移し替え、 γ 線放出核種の分析用試料とした。それ以外の分析対象核種に対しては、 γ 線放出核種分析後の試料を 8 ml ポリビンに取り分け、 1.0 ± 0.1 g ずつ最大 15 本分取した。

2.2.4 試料溶解

均一化後のコンクリート試料の溶解フローを図 2 に示す。同一試料名に対し、1 g に分取した試料 5 個をそれぞれ 10 ml ビーカーに移し入れ、試料の入った 10 ml ビーカーを 100 ml ビーカー内に入れ、100 ml ビーカーに時計皿を被せ、電気炉に入れ、 150 °C で 1 時間、その後 500 °C で 2 時間保持し、灰化を行った。灰化後の試料をテフロン製の反応容器に移し入れ、濃塩酸 12 ml、濃硝酸 4 ml を加えて、マイクロ波加熱分解を行った²²⁾。十分に放冷した後、メンブレンフィルタ（孔径 0.45 μm ）（本項において、以降同一仕様のものを使用した場合は仕様の記載を省略する。）でろ過し、ろ液 (1) を回収した。残さ (1) を Ge 半導体検出器（以下「Ge 検出器」という。）で

測定し、主要核種 (^{60}Co 、 ^{137}Cs 及び ^{152}Eu) の残存率を確認した。主要核種の残存率が 10 %以上となった場合は、残さ (1) に対し、蛍光 X 線分析計を用いて元素分析を行い、残さ (1) に含まれる主要元素 (Ca、Si、Ti、Cr 等) に応じて酸を使い分け、残さ (1) を溶解させるが、今回の試料は、主要核種の残存率が 10 %未満となったことから、フローに従って、残さ (1) の溶解は実施しなかった。回収したろ液 (1) を加熱濃縮しながら、同一試料名の 5 個分を混ぜ合わせ、濃硝酸 5 ml を加えて加熱濃縮する操作を繰り返し行い、濃縮液 (1) とし、1 M 硝酸 100 ml に定容し、これを試料溶解液とした。試料名 NY-83Z-1486、NY-943-1600、NY-943-1601、NY-988-375 は、1 M 硝酸溶解時に沈殿が生じたため、ろ過を行い、残さを Ge 検出器で測定し、主要核種 (^{60}Co 、 ^{137}Cs 及び ^{152}Eu) が残存していないことを確認した。ろ過の際には、溶液が冷えて Pu 等の α 線放出核種等が不溶性の塩に取り込まれて回収率が低下しないように²²⁾、注意して操作を行った。

試料名 JRTFR2K は、試料量が 1 g 未満であることから、1 M 硝酸 20 ml に定容し、これを試料溶解液とした。

2.3 ^3H の分析

2.3.1 分離操作

^3H の分析フローを図 3 に、分析に使用した分離装置を図 4 に示す。2.2.1 項において取り分けた試料 1~10 g を石英ボートに載せて Ni 箔で覆い、管状電気炉 I 側の石英管内に設置した。下流側の管状電気炉 II の石英管内には、酸化触媒 (ホプカライト I) 4.1 g を詰めて、ホプカライトが飛散ないように両端を石英ウールでゆるく固定した。ガス捕集ラインには、ドライアイスで約 $-70\text{ }^\circ\text{C}$ に冷却した U 字管を 2 段設置し、試料の加熱により生成する ^3H を含む水を捕集した。また、ガス捕集ラインの下流側に ^{14}C を含む二酸化炭素を捕集するためにインピンジャーに二酸化炭素吸収剤 (PerkinElmer 製 Carbo-Sorb[®] E) を入れて設置した。

水バブラーにより加湿した空気を分離装置内に 50 ml/min で流しながら、管状電気炉 II を $110\text{ }^\circ\text{C}$ に昇温した。石英管出口に水滴が生じなくなることを確認した後、管状電気炉 II を $500\text{ }^\circ\text{C}$ に昇温し、 $500\text{ }^\circ\text{C}$ に到達後、管状電気炉 I を $110\text{ }^\circ\text{C}$ に昇温して、試料を乾燥させた。試料が十分乾燥したことを確認した後、管状電気炉 I を $500\text{ }^\circ\text{C}$ まで昇温し 1 時間保持した後、 $900\text{ }^\circ\text{C}$ まで昇温し、試料を $900\text{ }^\circ\text{C}$ で 1 時間加熱した。加熱後、 ^3H トラップの U 字管を取り外し、純水 6 ml で U 字管内を洗い、管内の水を回収した。回収した水はナス形フラスコに入れ、沸騰石 6 粒と過酸化ナトリウム約 5 mg を加えて蒸留しバイアルに回収した。蒸留後の水に純水を添加して総量 6~7 ml になるように調整し、シンチレータ (PerkinElmer 製 Ultima Gold[™] LLT) を最終的な体積が 20 ml となるように加えて ^3H の測定用試料とした。試料名 JRTFR2K については、試料量が少ないため、 ^3H の分析と ^{14}C の分析を同時に行った。 ^{14}C 含む二酸化炭素を捕集するために二酸化炭素吸収剤 (PerkinElmer 製 Carbo-Sorb[®] E) を 5 ml ずつ加えたインピンジャー 2 段に捕集した。二酸化炭素吸収剤をバイアルに回収し、各インピンジャーをシンチレータ (PerkinElmer 製 Permafluor[®] E⁺) 10 ml で共洗いし、丁寧に混合したものを ^{14}C の測定用試料とした。

2.3.2 回収率測定

^3H の分離回収操作における回収率は、これまでの実績から 100 % として評価した²³⁾。また、蒸留操作における ^3H の回収率は、蒸留前のナス形フラスコ内の水の重量と蒸留後に回収したバイアル内の水の重量から算出した。

2.3.3 放射能測定

^3H の測定は、液体シンチレーションカウンター（以下「LSC」という。）により 36,000 秒間行った。また、計数効率はクエンチング補正用の ^3H 放射能標準溶液を用いて求めた。

2.4 ^{14}C の分析

2.4.1 分離操作

^{14}C の分析フローを図 5 に示す。2.2.3 項でポリビンに分取した均一化後の試料 1 g と炭酸ナトリウム 0.1 g (C 担体) をニッケルるつぼに入れ、試料を覆うように水酸化ナトリウム粉末 10 g を添加し、水分を蒸発しやすくするため、るつぼの蓋を少し隙間ができるように被せた。試料を入れたニッケルるつぼごとビーカーに入れ、時計皿で蓋をして電気炉に入れ 110 °C に昇温し、30 分間加熱した。その後、550 °C に昇温し、30 分間加熱した。放冷後、90 °C に温めた純水を用いて、融解物をビーカーに回収して、加熱・溶解した。 ^{14}C の分離回収に使用した装置を図 6 に示す。放冷後の溶解液を三口フラスコに移し、回転子を入れ、分液ロート、ガス導入管、排気管を取り付けた。分液ロートには、8 M 硝酸 42 ml を加えた。回転子により溶液を攪拌し、分液ロート内の硝酸を少しずつ添加した後、窒素ガスを分離装置内に 50 ml/min で流した。 ^{14}C が含まれる二酸化炭素ガスは、二酸化炭素吸収剤 (PerkinElmer 製 Carbo-Sorb[®] E) を 5 ml ずつ加えたインピンジャー 2 段に捕集した。窒素ガスを 3 時間継続して流した後、二酸化炭素吸収剤をバイアルに回収し、各インピンジャーをシンチレータ (PerkinElmer 製 Permafluor[®] E⁺) 10 ml で共洗いし、丁寧に混合したものを ^{14}C の測定用試料とした。

2.4.2 回収率測定

^{14}C の分離回収操作における回収率は、これまでの実績から 100 % として評価した²³⁾。

2.4.3 放射能測定

^{14}C の測定は、LSC により 36,000 秒間行った。また、計数効率はクエンチング補正用の ^{14}C 放射能標準溶液を用いて求めた。

2.5 ^{36}Cl の分析

2.5.1 分離操作

^{36}Cl の分析フローを図 7 に示す。塩化ナトリウム溶液 (Cl 担体) 最大 5 mg をニッケルるつぼに入れ、ニッケルるつぼごとビーカーに入れ、ホットプレートで加熱濃縮し、放冷後、ニッケルるつぼをビーカーから取り出し、ニッケルるつぼに 2.2.3 項でポリビンに分取した均一化後の試料 1 g と試料を覆うように水酸化ナトリウム粉末 10 g を添加し、水分を蒸発しやすくするため、るつ

ぼの蓋を少し隙間ができるように被せた。試料を入れたニッケルるつぼごとビーカーに戻し、時計皿で蓋をして電気炉に入れ 110 °C に昇温し、60 分間加熱した。その後、550 °C に昇温し、30 分間加熱した。放冷後、温めた純水を用いて、融解物をビーカーに回収し、加熱・溶解した。溶解後放冷し、メンブレンフィルタ（孔径 0.45 μm）（本項において、以降同一のものを使用した場合は仕様の記載を省略する。）でろ過した。ろ液に硝酸を加え、中和した後、再びろ過し、回収したろ液に硝酸を加え、1 M 以上の硝酸溶液にした。その溶液をろ過し、ろ液に 2 wt%硝酸銀-1 M 硝酸溶液 5 ml を加え、ハロゲン化銀沈殿を作製した。メンブレンフィルタを用いて沈殿をろ過し、回収した沈殿をフィルタごと 50 ml 遠沈管に入れ、アンモニア水 30 ml を加えて攪拌した。遠沈管内容物をろ過し、ろ液に硝酸を加えて中和させた後、再びろ過した。回収したろ液に硝酸を加え 1 M 以上の硝酸溶液にした。ろ液に 2 wt%硝酸銀-1 M 硝酸溶液 5 ml を加え、ハロゲン化銀沈殿を作製し、メンブレンフィルタを用いてろ過した。ハロゲン化銀沈殿に亜鉛粉末 1 g を加え硫酸（1+8）2 ml でハロゲン化銀を溶解し、溶解液をろ過した。ろ液に 1 M 硝酸 40 ml と 2 wt%硝酸銀-1 M 硝酸溶液 5 ml を加えた。あらかじめ 80 °C の恒温槽で 1 時間乾燥させて、30 分間放冷後に風袋を測定したガラス繊維ろ紙（孔径 0.7 μm、直径 21 mm）を用いてろ過した。沈殿をガラス繊維ろ紙ごと、80 °C の恒温槽で 1 時間乾燥させて、30 分間放冷後、重量を測定した。重量測定後、アクリルディスクの上に置き、マイラーで覆い、テフロンリングで固定したものを ³⁶Cl の測定用試料とした。試料名 JRTFR2K については、試料量が少ないため、本分析は行わなかった。

2.5.2 回収率測定

分離における ³⁶Cl の回収率は、試料に含まれる Cl 量を求め、担体として添加した安定元素の Cl 量を考慮し、分離操作によって生成した塩化銀沈殿の乾燥重量を秤量することによって求めた Cl 量から算出した。なお、試料に含まれる Cl 量は、³⁶Cl 分析用とは別の 2.2.3 項でポリビンに分取した均一化後の試料 1 g を使用し、Cl 担体を加えずに同様の操作を行い、塩化銀沈殿の乾燥重量を秤量することによって求めた。

2.5.3 放射能測定

³⁶Cl はガスフロー型低バックグラウンド β 線測定装置（以下「LBC」という。）で 43,200 秒間測定した。LBC による効率は、塩化銀重量と計数効率の関係をあらかじめ求めておき、近似式から算出した。

2.6 ⁴¹Ca の分析

2.6.1 分離操作

⁴¹Ca の分析フローを図 8 に示す。2.2.4 項で 100 ml に定容した溶液（以下「試料溶解液」という。）から 0.5 ml 分取し、希釈して誘導結合プラズマ発光分光分析装置（以下「ICP-AES」という。）を用いて Ca 及び ⁴¹Ca 測定の際に妨害となると考えられる元素（Fe、Co、Ba、Eu）を定量した。その結果をもとに、イオン交換条件を考慮し、試料溶解液のうち Ca が 70 mg 程度となる液量を化学分離に使用した（最大 19 ml）。妨害となる元素の分離のために、試料溶解液に含まれる安定元素の量を考慮し、保持担体として安定元素の Co、Ba、Eu を各 1 mg 添加した。また、測

定用試料を形成するためにシュウ酸カルシウム一水和物沈殿が 100 mg 必要であることから、この後の操作で生じる沈殿の量が 100 mg を下回らないように、Ca の量が 70 mg より少ない場合は Ca の量が 70 mg 程度となるように Ca を添加し、Fe の量が 19 mg より少ない場合は Fe の量が 19 mg 程度となるように Fe を添加した。安定元素を添加した試料溶液は、乾固直前まで加熱濃縮し、濃塩酸 5 ml を加えた。濃塩酸でコンディショニングした陰イオン交換樹脂（富士フィルム和光純薬製 DOWEX™ 1X8、7 ml）を上段に、同じく濃塩酸でコンディショニングした陽イオン交換樹脂（富士フィルム和光純薬製 DOWEX™ 50WX8、10 ml）を下段に連結させたカラムに、溶解した試料溶液を通液し、次に濃塩酸 20 ml を通液して試料溶液に含まれる Fe や Co 等を除去した。ただし、試料名 NY-83Z-1486 については、Fe 量が多かったため、試料を 3 分割して、それぞれに対して連結させたカラムに通液し、濃塩酸の通液量を 30 ml に増量した。その後、下段の陽イオン交換樹脂に濃塩酸 25 ml 通液した後、4 M 硝酸 50 ml を通液し、その流出液を乾固直前まで加熱濃縮し、1 M 塩酸 6 ml を加えた。1 M 塩酸でコンディショニングした陽イオン交換樹脂（富士フィルム和光純薬製 DOWEX™ 50WX8、13 ml）に通液し、0.8 M 酢酸アンモニウム+1 M 酢酸 (1+1) を 230 ml 通液した。次に、2 M 酢酸アンモニウム+メタノール (1+1) を 75 ml 通液し、その流出液を加熱濃縮させてから 1 M 塩酸 10 ml で溶解した。溶解液に純水 30 ml を加え 0.2 M シュウ酸アンモニウム 50 ml を加え、アンモニア水を徐々に加えて pH 試験紙で pH5~7 になっていることを確認し、加温して沈殿を熟成させた。放冷後、メンブレンフィルタ（セルロース混合エステル製、孔径 1.0 µm、直径 25 mm）でろ過し、沈殿を 110 °C の恒温槽で 2 時間乾燥させた。直径 16 mm × t 0.5 mm の凹みのあるアクリルディスクに試料を入れ成型し、マイラー膜で覆い、テフロンリングで固定したものを ⁴¹Ca の測定用試料とした。試料名 JRTFR2K については、試料量が少ないため、⁴¹Ca の分析は行わなかった。

2.6.2 回収率測定

分離における Ca の回収率は、分析前の試料溶解液に含まれていた初期量と添加した安定元素の量を考慮し、分離操作によって生成したシュウ酸カルシウム一水和物沈殿の乾燥重量を秤量することによって求めた Ca 量から算出した。⁴¹Ca の分析は、試料中の Ca に含まれる ⁴¹Ca の濃度に相当するものを放射線計測しているため、回収率を必要としない。

2.6.3 放射能測定

X 線測定には、低エネルギー光子検出器 (Si-LEPS) を使用し、検出器の効率校正は、濃度が既知の ⁵⁵Fe 放射能標準を用い、測定用試料と同一形状で ⁴¹Ca のエネルギー 3.3 keV、⁵⁵Fe のエネルギー 5.9 keV のシュウ酸カルシウム一水和物における質量減弱係数を考慮した²⁴⁾。測定時間は 500,000 秒間とした。

2.7 ⁶⁰Co、⁹⁴Nb、^{108m}Ag、¹³⁷Cs、¹³³Ba、¹⁵²Eu、¹⁵⁴Eu 及び ^{166m}Ho の分析

2.7.1 分離操作

2.2.3 項で U8 容器に分取した均一化後の試料を化学分離せずに定量を行った。試料名 JRTFR2K のみ 8 ml ポリビンに分取した均一化後の試料を化学分離せずに定量を行った。

2.7.2 回収率測定

^{60}Co 、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 及び $^{166\text{m}}\text{Ho}$ については、化学分離をせずに定量しているため回収率を 100 % とした。

2.7.3 放射能測定

γ 線測定には Ge 検出器を使用し、検出器の効率校正は、測定用試料と同一形状 (U8 容器、8 ml ポリビン) で濃度が既知の混合放射能標準溶液 (^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu) を用いて効率曲線を作成し、エネルギーごとの効率を算出し、放射能を定量した。Ge 検出器による γ 線放出核種 (^{60}Co 、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 及び $^{166\text{m}}\text{Ho}$) の測定時間は 300,000 秒間とし、試料名 JRTR2K のみ 500,000 秒間とした。

2.8 ^{63}Ni 及び ^{90}Sr の分析

2.8.1 分離操作

^{63}Ni 及び ^{90}Sr の分析フローを図 9 に示す。分析前の試料に含まれる安定元素の量を求めるため、試料溶解液のうち 0.5 ml 分取し、適宜希釈して ICP-AES を用いて Ca、Fe、Ni、Sr を定量した。試料溶解液の 19 ml を化学分離に使用した。化学分離における回収率測定を行うために、試料溶解液に、担体として安定元素の Co、Ni、Sr、Cs 及び Eu を 2 mg 添加した。ただし、試料中に Sr 及び Ni が含まれていた試料については、合計 2 mg 程度となるように安定元素を添加した。安定元素を添加した試料溶液は、8 M 硝酸 1.5 ml を加え硝酸酸性とした後、りんモリブデン酸アンモニウム (以下「AMP」という。) 1 g を加え、十分に攪拌後一晩静置し、メンブレンフィルタ (孔径 0.45 μm) でろ過した。なお、 γ 線測定結果から試料中の ^{137}Cs の放射能濃度が 2 Bq/g 以下の場合、AMP を加えて、ろ過する手順を省略した。今回の試料では、ろ過を省略している。AMP 添加後のろ液または安定元素を添加した試料溶液を乾固直前まで加熱濃縮した後、8 M 塩酸 10 ml に溶解し、8 M 塩酸でコンディショニングした陰イオン交換樹脂 (富士フィルム和光純薬製 DOWEX™ 1X8、直径 10×100 mm) に通液後 8 M 塩酸 10 ml を通液し、試料溶液に含まれる Fe や Co を除去した。イオン交換分離により得られた Sr 及び Ni を含む溶液を乾固直前まで加熱濃縮し、8 M 硝酸 20 ml に溶解して、8 M 硝酸でコンディショニングした Sr 用固相抽出樹脂 (Eichrom Technologies 製、Sr レジン、5 ml) に通液した。Eu などを 8 M 硝酸 20 ml で除去した後、3 M 硝酸-0.05 M シュウ酸 15 ml を通液し、シュウ酸を 8 M 硝酸 15 ml で洗い流した。Sr レジンに吸着させた Sr は 0.05 M 硝酸 20 ml によって溶離させ、乾固直前まで加熱濃縮した後、0.05 M 硝酸で 10 ml に定容し、Sr 回収率測定用に 0.2 ml を分取した。残りの溶液は、 ^{90}Sr と ^{90}Y が放射平衡になるまで 2 週間静置してから、8 ml 分取し、シンチレータ (PerkinElmer 製 Ultima Gold™ LLT) を 12 ml 入れて ^{90}Sr の測定用試料とした。本試料の発生履歴を考慮すると、短半減期の ^{89}Sr は検出限界以下まで減衰していると考えられたため、 ^{90}Sr と ^{90}Y の β 線の合計を測定し、 ^{90}Sr の放射能を求めた。試料名 JRTR2K については、試料量が少ないため、 ^{90}Sr の分析は行わなかった。

^{63}Ni の分析は、Sr レジンからの流出液を用いて行った。Sr レジンからの流出液を乾固直前まで加熱濃縮した後、塩酸 (1+23) 20 ml で溶解し、1 M クエン酸アンモニウムを 4 ml 加え、アンモニア水を用いて pH を 9~10 付近にし、残さの有無を確認した。残さが生じた試料は、残さをメ

ンブレンフィルタ（孔径 0.45 μm ）でろ過し、ろ液をアンモニア水（1+100）でコンディショニングした Ni 用固相抽出樹脂（Eichrom Technologies 製、Ni レジン、5 ml）に通液した。0.2 M クエン酸アンモニウム-アンモニア溶液 20 ml で Eu など除去した後、アンモニア水（1+100）5 ml でクエン酸を洗い流した。Ni レジンに吸着させた Ni は 3 M 硝酸 20 ml により溶離させ、乾固直前まで加熱濃縮した後、0.5 M 塩酸で 10 ml に定容し、Ni 回収率測定用に 0.2 ml を分取し、残りの溶液から 8 ml 分取し、シンチレータ（PerkinElmer 製 Ultima Gold™ LLT）を 12 ml 入れて ^{63}Ni の測定用試料とした。試料名 JRTRFR2K については、試料量が少ないため、 ^{63}Ni の分析は行わなかった。

2.8.2 回収率測定

Sr 及び Ni の回収率は、分析前の試料溶解液に含まれていた初期量と添加した安定元素の量を考慮し、化学分離を行った後の量を測定して算出した。Sr 及び Ni の測定には、ICP-AES を使用した。

2.8.3 放射能測定

^{63}Ni 及び ^{90}Sr の測定には、LSC を使用し、クエンチング補正用の放射能標準溶液を用いて効率校正を行った。LSC による ^{63}Ni 及び ^{90}Sr の測定時間は 36,000 秒間とした。

2.9 ^{234}U 、 ^{235}U 及び ^{238}U の分析

2.9.1 分離操作

^{234}U 、 ^{235}U 及び ^{238}U の分析フローを図 10 に示す。試料溶解液を 5 ml 分取し、濃硝酸を 0.99 ml 加えて 3 M 硝酸溶液とし、3 M 硝酸でコンディショニングした固相抽出樹脂（Eichrom Technologies 製、UTEVA®レジン、5 ml）に通液した後、試料に含まれる Fe などを 3 M 硝酸 40 ml で除去した。UTEVA®レジンに吸着した Pu を 3 価に還元して溶離させるため、0.1 M ヒドロキシルアミン - 0.01 M アスコルビン酸 - 1 M 硝酸溶液 40 ml を通液した。カラムに残っているアスコルビン酸を 1 M 硝酸 15 ml で洗浄してから、5 M 塩酸 40 ml で Th を除去し、0.5 M 塩酸 40 ml を通液し、U を溶離させた。この溶液に塩化チタン（Ⅲ）溶液（22 %）1 ml を加えて十分に攪拌し、1000 ppm のネオジウム標準溶液 0.1 ml とフッ化水素酸 2 ml を加え、30 分以上静置した後、メンブレンフィルタ（ポリプロピレン製、孔径 0.1 μm 、直径 25 mm）で吸引ろ過し、フッ化ネオジウムとともに U のフッ化物をメンブレンフィルタ上に捕集した。両面テープを貼ったタンタル板に U を捕集したメンブレンフィルタを張り付け、U の測定用試料とした。

2.9.2 回収率測定

U の回収率を確認するため、試料溶解液 5 ml に試料中の ^{234}U の放射能に応じ ^{233}U を 0.02~0.2 Bq 添加し、2.9.1 項の化学分離を行った後、Si 半導体検出器（以下「SSB 検出器」という。）で α 線を測定した。

2.9.3 放射能測定

^{234}U 、 ^{235}U 及び ^{238}U は、2.9.1 項で作製した測定用試料を SSB 検出器により測定した。測定時間は 500,000 秒間とした。また、効率校正は、放射能既知の α 線源 (^{241}Am をフッ化ネオジムとともに沈殿させた校正線源) を用いて行った。

2.10 ^{238}Pu 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の分析

2.10.1 分離操作

^{238}Pu 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の分析フローを図 11 に示す。試料溶解液を 5 ml 分取し (JRTFR2K は試料溶解液を 100 倍希釈し、その溶液を 0.25 ml 分取し、1 M 硝酸を 4.75 ml 加え 5 ml とした)、濃硝酸 0.45 ml を加え 2 M 硝酸溶液とし、アスコルビン酸 0.3 g を加え丁寧に攪拌した。2 M 硝酸 - 0.3 M アスコルビン酸溶液でコンディショニングした固相抽出樹脂 (Eichrom Technologies 製、TRU レジン、5 ml) に調製した試料溶解液を通液し、Fe などを 2 M 硝酸 - 0.3 M アスコルビン酸溶液 20 ml で除去した後、TRU レジンに吸着させた Pu を 4 価に調整するために 1 M 硝酸 - 0.1 M 亜硝酸ナトリウム溶液を 5 ml 通液した。その後、2 M 硝酸 20 ml を通液してカラムの洗浄を行い、Am と Cm を溶離させるため 4 M 塩酸 30 ml を通液した。次に、4 M 塩酸 - 0.02 M 三塩化チタン溶液 30 ml を通液して 4 価の Pu を 3 価に還元し溶離させた。Pu を溶離した液に 1000 ppm のネオジム標準溶液 0.3 ml とフッ化水素酸 2 ml を加え、30 分以上静置した後、メンブレンフィルタ (ポリプロピレン製、孔径 0.1 μm 、直径 25 mm) で吸引ろ過し、フッ化ネオジムとともに Pu のフッ化物をメンブレンフィルタ上に捕集した。両面テープを貼ったタンタル板に Pu を捕集したメンブレンフィルタを張り付け、Pu の測定用試料とした。

2.10.2 回収率測定

Pu の回収率を確認するため、試料溶解液 5 ml (JRTFR2K は試料溶解液を 100 倍希釈し、その溶液を 0.25 ml 分取し、1 M 硝酸を 4.75 ml 加え 5 ml とした) に試料中の ^{238}Pu または $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能の高い方の放射能に応じ ^{242}Pu を 0.01~0.2 Bq 添加し、2.10.1 項の化学分離を行った後、SSB 検出器で α 線を測定した。

2.10.3 放射能測定

^{238}Pu 及び $^{239+240}\text{Pu}$ は、2.10.1 項で作製した測定用試料を SSB 検出器により測定した。測定時間は 500,000 秒間とした。なお、 ^{239}Pu 及び ^{240}Pu は α 線測定では弁別できないため、 ^{239}Pu と ^{240}Pu の合算値を $^{239+240}\text{Pu}$ として記載した。また、効率校正は、放射能既知の α 線源 (^{241}Am をフッ化ネオジムとともに沈殿させた校正線源) を用いて行った。

2.11 ^{241}Am 、 ^{243}Am 及び ^{244}Cm の分析

2.11.1 分離操作

^{241}Am 、 ^{243}Am 及び ^{244}Cm の分析フローを図 11 に示す。試料溶解液を 5 ml 分取し (NY-943-1600 及び NY-943-1601 は試料溶解液を 0.25 ml 分取し、1 M 硝酸を 4.75 ml 加え 5 ml とし、JRTFR2K は試料溶解液を 100 倍希釈し、その溶液を 5 ml 分取した)、濃硝酸 0.45 ml を加え 2 M 硝酸溶液と

し、アスコルビン酸 0.3 g を加え丁寧に攪拌した。2 M 硝酸 - 0.3 M アスコルビン酸溶液でコンディショニングした固相抽出樹脂（Eichrom Technologies 製、TRU レジン、5 ml）に調製した試料溶解液を通液し、Fe などを 2 M 硝酸 - 0.3 M アスコルビン酸溶液 20 ml で除去した後、TRU レジンに吸着させた Pu を 4 価に調整するために 1 M 硝酸 - 0.1 M 亜硝酸ナトリウム溶液を 5 ml 通液した。その後、2 M 硝酸 20 ml を通液してカラムの洗浄を行い、Am と Cm を溶離させるため 4 M 塩酸 30 ml を通液し Am 及び Cm を溶離させた。Am 及び Cm を溶離した液に 1000 ppm のネオジウム標準溶液 0.3 ml とフッ化水素酸 2 ml を加え、30 分以上静置した後、メンブレンフィルタ（ポリプロピレン製、孔径 0.1 μm 、直径 25 mm）で吸引ろ過し、フッ化ネオジウムとともに Am 及び Cm のフッ化物をメンブレンフィルタ上に捕集した。両面テープを貼ったタンタル板に Am 及び Cm を捕集したメンブレンフィルタを張り付け、Am 及び Cm の測定用試料とした。

2.11.2 回収率測定

Am 及び Cm の回収率を確認するため、試料溶解液 5 ml（NY-943-1600 及び NY-943-1601 は試料溶解液を 0.25 ml 分取し、1 M 硝酸を 4.75 ml 加え 5 ml とし、JRTFR2K は試料溶解液を 100 倍希釈し、その溶液を 5 ml 分取した）に試料中の ^{241}Am 、 ^{243}Am または ^{244}Cm の放射能のうち最も高い放射能に応じ ^{243}Am を 0.01~0.1 Bq 添加し、2.11.1 項の化学分離を行った後、SSB 検出器で α 線を測定した。本分離条件において、Cm は Am と同じフラクションに回収されるため、Cm の回収率は Am の回収率を用いることとした。

2.11.3 放射能測定

2.11.1 項で作製した測定用試料を SSB 検出器により測定した。測定時間は 500,000 秒間とした。また、効率校正は、放射能既知の α 線源（ ^{241}Am をフッ化ネオジウムとともに沈殿させた校正線源）を用いて行った。

3. 分析結果

令和 3 年度から令和 4 年度において、23 核種 (^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 $^{166\text{m}}\text{Ho}$ 、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am 、 ^{244}Cm) の放射化学分析を行い、102 点の分析データを取得した。核種ごとの分析結果を表 3 から表 24 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-3、JRR-4 及び再処理特別研究棟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、放射能濃度評価方法検討のためのデータを取得できた。

謝辞

本報告を執筆するあたり、JRR-3、JRR-4 及び再処理特別研究棟の保管廃棄物等から分析用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及び廃止措置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.
- 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) 田中究, 安田麻里, 渡辺幸一他, 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 原賀智子, 下村祐介, 水飼秋菜他, 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, JAEA-Data/Code 2019-004, 2019, 48p.
- 9) 水飼秋菜, 原賀智子, 石森健一郎他, 照射後試験施設から発生した放射性廃棄物に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2019-012, 2020, 70p.
- 10) 飛田実, 原賀智子, 佐々木誉幸他, JRR-2、JRR-3 及びホットラボから発生した放射性廃棄物に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2019-016, 2020, 72p.
- 11) 青野竜士, 水飼秋菜, 原賀智子他, JPDR 及び JRR-4 から発生した放射性廃棄物に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2020-006, 2020, 70p.
- 12) 土田大貴, 原賀智子, 飛田実他, JRR-3 及び JPDR から発生した放射性廃棄物に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2020-022, 2021, 34p.
- 13) 飛田実, 原賀智子, 遠藤翼他, JPDR から発生した放射性廃棄物に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2021-013, 2021, 30p.
- 14) 土田大貴, 水飼秋菜, 青野竜士他, JPDR、JRR-3 及び JRR-4 から発生した放射性廃棄物に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2022-004, 2022, 87p.
- 15) 飛田実, 今田未来, 大森剛他, JRR-3、JRR-4 及び再処理特別研究棟から発生した放射性廃棄物に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2022-007, 2022, 40p.

- 16) 青野竜士, 水飼秋菜, 土田大貴他, JRR-2、JRR-3 及びホットラボから発生した放射性廃棄物に対する放射化学分析, JAEA-Data/Code 2023-002, 2023, 81p.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 林宏一, 出雲沙理, 仲田久和他, JRR-2 及び JRR-3 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討, JAEA-Technology 2018-001, 2018, 66p.
- 20) 水飼秋菜, 原賀智子, 石森健一郎他, 照射後試験施設から発生した廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討, JAEA-Technology 2019-015, 2019, 52p.
- 21) 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.
- 22) 原賀智子, 石森健一郎, 加藤健一他, 焼却灰及びセメント固化体の放射化学分析のためのマイクロ波加熱装置を用いる試料溶解法, 分析化学, 60(1), 2011, pp.87-90.
- 23) 亀尾裕, 島田亜佐子, 石森健一郎他, 研究施設等廃棄物に含まれる放射性核種の簡易・迅速分析法 (分析指針), JAEA-Technology 2009-051, 2009, 81p.
- 24) M. Itoh, K. Watanabe, M. Hatakeyama, M. Tachibana, Determination of ^{41}Ca in biological-shield concrete by low-energy X-ray spectrometry, Analytical and Bioanalytical Chemistry, 372, 2002, pp. 532-536.

表 1 施設ごとの分析対象核種

施設 核種	JRR-3	JRR-4	再処理特別研究棟
^3H	○	○	○
^{14}C	○	○	○
^{36}Cl	○	○	○
^{41}Ca	○	○	○
^{60}Co	○	○	○
^{63}Ni	○	○	○
^{90}Sr	○	○	○
^{94}Nb	○	○	○
^{99}Tc	○	○	○
$^{108\text{m}}\text{Ag}$	○	○	○
^{129}I	—	—	○
^{137}Cs	○	○	○
^{133}Ba	○	○	○
^{152}Eu	○	○	○
^{154}Eu	○	○	○
$^{166\text{m}}\text{Ho}$	○	○	○
^{234}U	○	○	○
^{235}U	—	—	○
^{238}U	○	○	○
^{238}Pu	○	○	○
^{239}Pu	○※1	○※1	○※1
^{240}Pu	○※1	○※1	○※1
^{241}Am	○	○	○
^{243}Am	○	○	○
^{244}Cm	○	○	○

○：分析対象核種

—：分析対象外

※1 エネルギー弁別できないので合算した。

表 2 分析法の概要及び測定機器等の情報

核種	分析法 (概要)	測定器 (型番)	校正日	測定日
³ H	燃焼法による分離の後、H ₂ Oの形で回収し、LSCを用いてβ線測定	LSC (PerkinElmer製 Tri-Carb 2910TR/LL)	2021/9/16	2021/9/18 ~ 2021/10/1
¹⁴ C	アルカリ融解後の液に酸を添加し、CO ₂ の形で回収し、LSCを用いてβ線測定	LSC (PerkinElmer製 Tri-Carb 2910TR/LL)	2021/10/26	2021/11/27 ~ 2021/12/1
³ H, ¹⁴ C (IRTR2Kのみ)	燃焼法による分離の後、HはH ₂ Oの形で回収し、LSCを用いてβ線測定 燃焼法による分離の後、 ¹⁴ CはCO ₂ の形で回収し、LSCを用いてβ線測定	LSC (PerkinElmer製 Tri-Carb 2910TR/LL)	2021/10/22, 26	2021/10/20 ~ 2021/10/21
³⁶ Cl	アルカリ融解後、ケイ酸塩を除去し、硝酸銀溶液を添加してAgClの形で回収し、LBCを用いてβ線測定	LBC (ALOKA製 LBC-4312)	2022/1/21	2022/1/19
⁴¹ Ca	溶解後、イオン交換樹脂でマトリックス元素などと分離した後、低エネルギー光子検出器を用いてX線測定	Si-LEPS (CANBERRA製 SL80165)	2022/6/28	2022/5/30 ~ 2022/6/20
⁶⁰ Co	粉碎後、Ge検出器を用いてγ線測定	Ge検出器 (ORTEC製 GEM-40P4-76)	2021/7/20, 21,26,27	2021/6/25 ~ 2021/7/16
⁶³ Ni	溶解後、Csを沈殿分離した後、陰イオン交換樹脂で ⁶⁰ Coを除去し、SrレジンでSrを除去後、NiレジンによりNiを精製し、LSCを用いてβ線測定	LSC (PerkinElmer製 Tri-Carb 2910TR)	2022/2/9	2022/2/23
⁹⁰ Sr	溶解後、Csを沈殿分離した後、陰イオン交換樹脂で ⁹⁰ Coを除去し、SrレジンでSrを精製し、放射平衡が成立した後、 ⁹⁰ Sr- ⁹⁰ YをLSCを用いてβ線測定	LSC (PerkinElmer製 Tri-Carb 2910TR)	2022/2/9	2022/2/23
⁹⁴ Nb	粉碎後、Ge検出器を用いてγ線測定	Ge検出器 (ORTEC製 GEM-40P4-76)	2021/7/20, 21,26,27	2021/6/25 ~ 2021/7/16
^{108m} Ag	粉碎後、Ge検出器を用いてγ線測定	Ge検出器 (ORTEC製 GEM-40P4-76)	2021/7/20, 21,26,27	2021/6/25 ~ 2021/7/16
¹³⁷ Cs	粉碎後、Ge検出器を用いてγ線測定	Ge検出器 (ORTEC製 GEM-40P4-76)	2021/7/20, 21,26,27	2021/6/25 ~ 2021/7/16
¹³³ Ba	粉碎後、Ge検出器を用いてγ線測定	Ge検出器 (ORTEC製 GEM-40P4-76)	2021/7/20, 21,26,27	2021/6/25 ~ 2021/7/16
¹⁵² Eu	粉碎後、Ge検出器を用いてγ線測定	Ge検出器 (ORTEC製 GEM-40P4-76)	2021/7/20, 21,26,27	2021/6/25 ~ 2021/7/16
¹⁵⁴ Eu	粉碎後、Ge検出器を用いてγ線測定	Ge検出器 (ORTEC製 GEM-40P4-76)	2021/7/20, 21,26,27	2021/6/25 ~ 2021/7/16
^{166m} Ho	粉碎後、Ge検出器を用いてγ線測定	Ge検出器 (ORTEC製 GEM-40P4-76)	2021/7/20, 21,26,27	2021/6/25 ~ 2021/7/16
²³⁴ U	溶解後、UTEVA®レジンでマトリックス元素を除去した後、SSB検出器によりα線測定	SSB検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble)	2021/10/20, 2022/10/19	2021/11/4 ~ 2022/11/16
²³⁵ U (IRTR2Kのみ)	溶解後、UTEVA®レジンでマトリックス元素を除去した後、SSB検出器によりα線測定	SSB検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble)	2022/10/19	2022/11/16
²³⁸ U	溶解後、UTEVA®レジンでマトリックス元素を除去した後、SSB検出器によりα線測定	SSB検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble)	2021/10/20, 2022/10/19	2021/11/4 ~ 2022/11/16
²³⁸ Pu	溶解後、TRUレジンでマトリックス元素やAmなどと分離した後、SSB検出器によりα線測定	SSB検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble)	2021/10/20	2021/12/22 ~ 2022/1/17
²³⁹⁻²⁴⁰ Pu	溶解後、TRUレジンでマトリックス元素やAmなどと分離した後、SSB検出器によりα線測定	SSB検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble)	2021/10/20	2021/12/22 ~ 2022/1/11
²⁴¹ Am	溶解後、TRUレジンでマトリックス元素やPuなどと分離した後、SSB検出器によりα線測定	SSB検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble)	2021/10/20	2022/1/4 ~ 2022/3/16
²⁴³ Am	溶解後、TRUレジンでマトリックス元素やPuなどと分離した後、SSB検出器によりα線測定	SSB検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble)	2021/10/20	2022/1/4 ~ 2022/3/16
²⁴⁴ Cm	溶解後、TRUレジンでマトリックス元素やPuなどと分離した後、SSB検出器によりα線測定	SSB検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble)	2021/10/20	2022/1/4 ~ 2022/3/16

表3 ^3H の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.0912	98.0	2021/10/1	$(1.9 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	6×10^{-3}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	3.5838	97.5	2021/9/27	ND	9×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	6.1612	99.2	2021/9/27	$(4.9 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	5×10^{-3}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	4.3468	98.3	2021/9/18	$(1.4 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	7×10^{-3}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.9498	96.4	2021/10/21	ND	4×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表4 ^{14}C の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	1.0258	100	2021/12/1	$(5.3 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	2×10^{-2}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	1.0416	100	2021/11/27	$(1.9 \pm 0.1) \times 10^0$	2×10^{-2}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	1.0439	100	2021/11/27	$(2.7 \pm 0.1) \times 10^0$	2×10^{-2}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	1.0492	100	2021/11/27	$(2.8 \pm 0.5) \times 10^{-2}$	2×10^{-2}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.9498	100	2021/10/20	ND	2×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表5 ^{36}Cl の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	1.0271	88.2	2022/1/19	ND	9×10^{-3}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	1.0371	91.1	2022/1/19	ND	8×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	1.0282	88.2	2022/1/19	ND	9×10^{-3}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	1.0413	67.5	2022/1/19	ND	1×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 6 ^{41}Ca の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.1478	87.9	2022/5/30	ND	2×10^0
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	5.1618	89.4	2022/6/6	ND	2×10^0
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	4.9176	88.3	2022/6/13	ND	2×10^0
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	5.1770	76.9	2022/6/20	ND	2×10^0

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 7 ^{60}Co の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	50.4674	100	2021/7/16	ND	8×10^{-4}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	50.1791	100	2021/7/1	ND	2×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	49.5261	100	2021/7/5	ND	1×10^{-3}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	50.3659	100	2021/7/9	ND	1×10^{-3}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7872	100	2021/6/25	ND	3×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 8 ^{63}Ni の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.1478	83.7	2022/2/23	ND	3×10^{-2}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	5.1618	88.7	2022/2/23	ND	3×10^{-2}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	4.9176	87.1	2022/2/23	ND	3×10^{-2}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	5.1770	97.4	2022/2/23	ND	3×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 9 ^{90}Sr の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.1478	92.6	2022/2/23	ND	2×10^{-2}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	5.1618	91.8	2022/2/23	ND	2×10^{-2}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	4.9176	90.8	2022/2/23	ND	2×10^{-2}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	5.1770	93.1	2022/2/23	ND	2×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 10 ^{94}Nb の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	50.4674	100	2021/7/16	ND	1×10^{-3}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	50.1791	100	2021/7/1	ND	2×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	49.5261	100	2021/7/5	ND	2×10^{-3}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	50.3659	100	2021/7/9	ND	2×10^{-3}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7872	100	2021/6/25	ND	3×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 11 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	50.4674	100	2021/7/16	ND	1×10^{-3}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	50.1791	100	2021/7/1	ND	2×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	49.5261	100	2021/7/5	ND	2×10^{-3}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	50.3659	100	2021/7/9	ND	2×10^{-3}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7872	100	2021/6/25	ND	4×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 12 ^{137}Cs の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	50.4674	100	2021/7/16	$(9.6 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	2×10^{-3}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	50.1791	100	2021/7/1	ND	2×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	49.5261	100	2021/7/5	ND	2×10^{-3}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	50.3659	100	2021/7/9	ND	2×10^{-3}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7872	100	2021/6/25	ND	4×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 13 ^{133}Ba の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	50.4674	100	2021/7/16	ND	2×10^{-3}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	50.1791	100	2021/7/1	ND	2×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	49.5261	100	2021/7/5	ND	2×10^{-3}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	50.3659	100	2021/7/9	ND	2×10^{-3}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7872	100	2021/6/25	ND	5×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 14 ^{152}Eu の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	50.4674	100	2021/7/16	ND	3×10^{-3}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	50.1791	100	2021/7/1	ND	7×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	49.5261	100	2021/7/5	ND	4×10^{-3}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	50.3659	100	2021/7/9	ND	4×10^{-3}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7872	100	2021/6/25	ND	1×10^{-1}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 15 ^{154}Eu の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	50.4674	100	2021/7/16	ND	4×10^{-3}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	50.1791	100	2021/7/1	ND	4×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	49.5261	100	2021/7/5	ND	4×10^{-3}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	50.3659	100	2021/7/9	ND	4×10^{-3}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7872	100	2021/6/25	ND	9×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 16 $^{166\text{m}}\text{Ho}$ の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	50.4674	100	2021/7/16	ND	2×10^{-3}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	50.1791	100	2021/7/1	ND	2×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	49.5261	100	2021/7/5	ND	2×10^{-3}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	50.3659	100	2021/7/9	ND	2×10^{-3}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7872	100	2021/6/25	ND	5×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 17 ^{234}U の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.1478	100	2021/11/4	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	5×10^{-4}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	5.1618	94.6	2021/11/4	$(4.2 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	4×10^{-4}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	4.9176	89.1	2021/11/4	$(4.2 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	6×10^{-4}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	5.1770	81.6	2021/11/4	$(7.6 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	4×10^{-4}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7842	89.6	2022/11/16	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	8×10^{-4}

※1 測定開始日を示す。

表 18 ^{235}U の分析結果

試料番号	枝番	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)
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7842	89.6	2022/11/16	$(2.1 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	6×10^{-4}

※1 測定開始日を示す。

表 19 ^{238}U の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.1478	100	2021/11/4	$(9.8 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	4×10^{-4}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	5.1618	94.6	2021/11/4	$(4.3 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	5×10^{-4}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	4.9176	89.1	2021/11/4	$(4.4 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	4×10^{-4}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	5.1770	81.6	2021/11/4	$(5.4 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	6×10^{-4}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7842	89.6	2022/11/16	$(1.0 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	8×10^{-4}

※1 測定開始日を示す。

表 20 ^{238}Pu の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.1478	87.5	2021/12/22	ND	8×10^{-4}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	5.1618	96.4	2021/12/22	ND	5×10^{-4}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	4.9176	98.6	2021/12/22	ND	6×10^{-4}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	5.1770	88.0	2021/12/22	ND	7×10^{-4}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7842	100	2022/1/17	$(3.1 \pm 0.6) \times 10^0$	2×10^0

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 21 $^{239+240}\text{Pu}$ の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.1478	87.5	2022/1/11	$(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	6×10^{-4}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	5.1618	96.4	2021/12/22	ND	6×10^{-4}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	4.9176	98.6	2022/1/11	$(4.9 \pm 2.3) \times 10^{-4}$	5×10^{-4}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	5.1770	88.0	2021/12/22	ND	4×10^{-4}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7842	100	2022/1/11	$(2.6 \pm 0.1) \times 10^2$	1×10^0

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 22 ^{241}Am の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.1478	100	2022/1/4	ND	6×10^{-4}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	5.1618	100	2022/3/3	ND	8×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	4.9176	100	2022/3/16	ND	1×10^{-2}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	5.1770	100	2022/1/4	ND	5×10^{-4}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7842	100	2022/1/24	$(1.8 \pm 0.1) \times 10^1$	6×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 23 ^{243}Am の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.1478	100	2022/1/4	ND	6×10^{-4}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	5.1618	100	2022/3/3	ND	2×10^{-2}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	4.9176	100	2022/3/16	ND	2×10^{-2}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	5.1770	100	2022/1/4	ND	5×10^{-4}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7842	100	2022/1/31	ND	8×10^{-1}

※1 測定開始日を示す。
ND：検出下限値未満であることを示す。

表 24 ^{244}Cm の分析結果

試料番号	枝番	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)
NY-83Z-1486	-	JRR-3	コンクリート	5.1478	100	2022/1/4	ND	5×10^{-4}
NY-943-1600	-	JRR-4	コンクリート片	5.1618	100	2022/3/3	ND	7×10^{-3}
NY-943-1601	-	JRR-4	コンクリート	4.9176	100	2022/3/16	ND	1×10^{-2}
NY-988-375	-	JRR-4	コンクリート	5.1770	100	2022/1/4	ND	4×10^{-4}
JRTFR2K	-	JRTF	コンクリート	0.7842	100	2022/1/31	ND	6×10^{-2}

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値未満であることを示す。

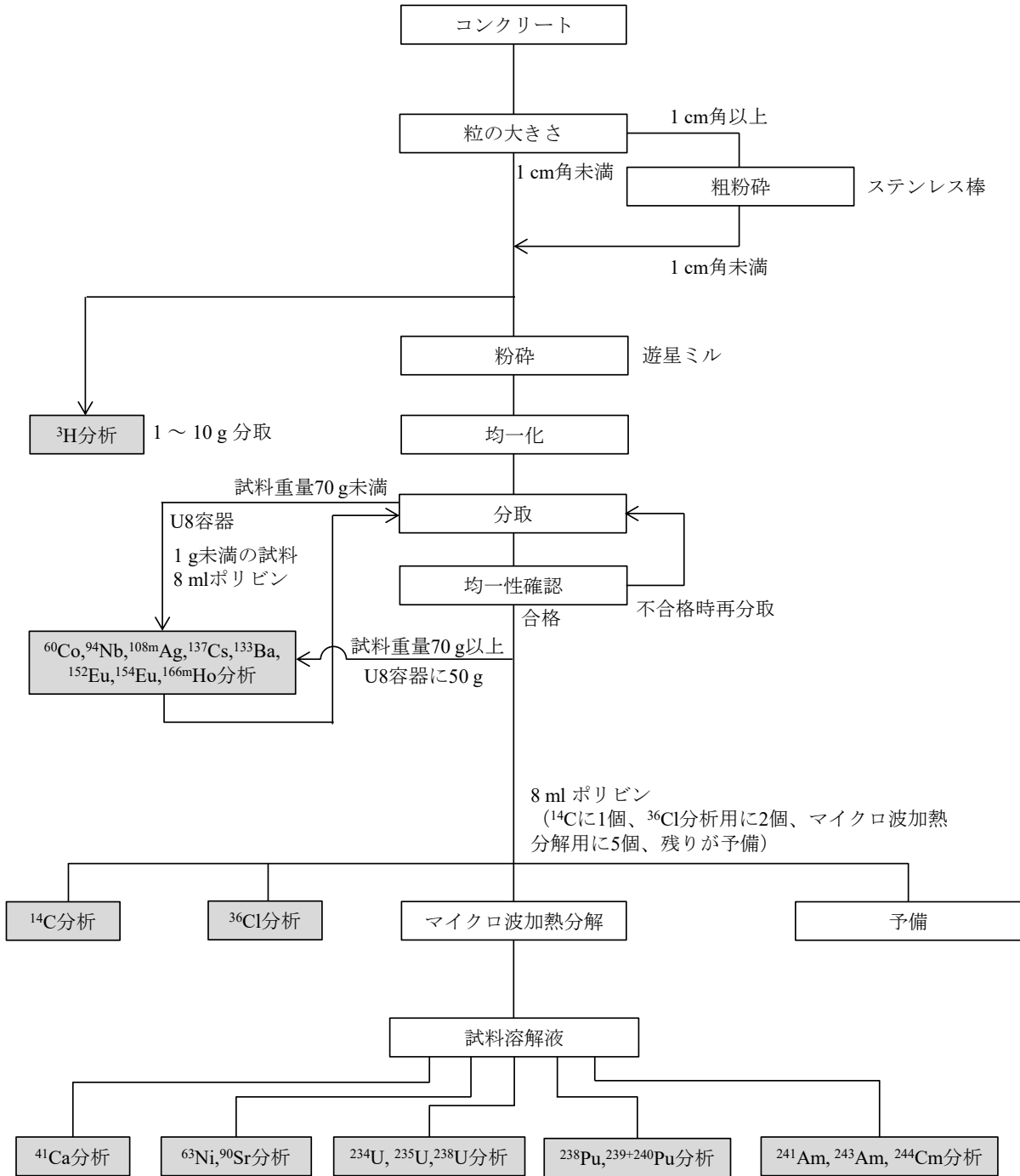


図1 分析概要フロー

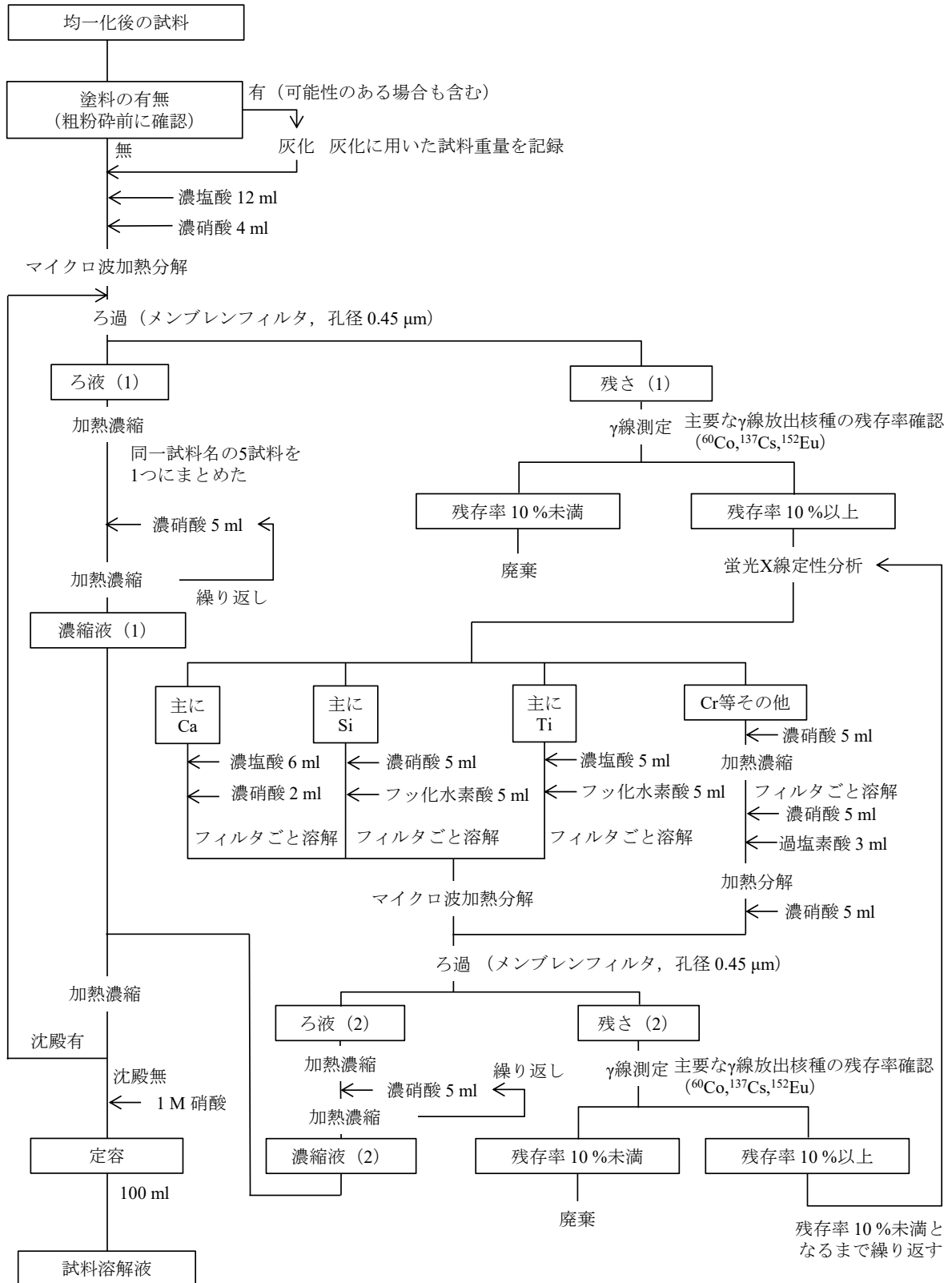


図2 試料溶解フロー

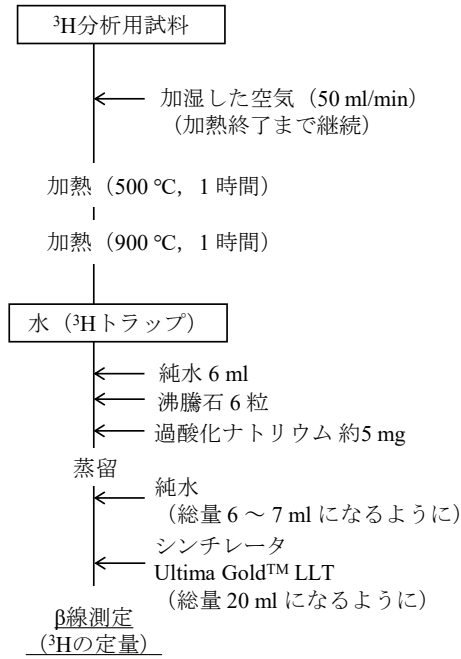


図 3 3Hの分析フロー

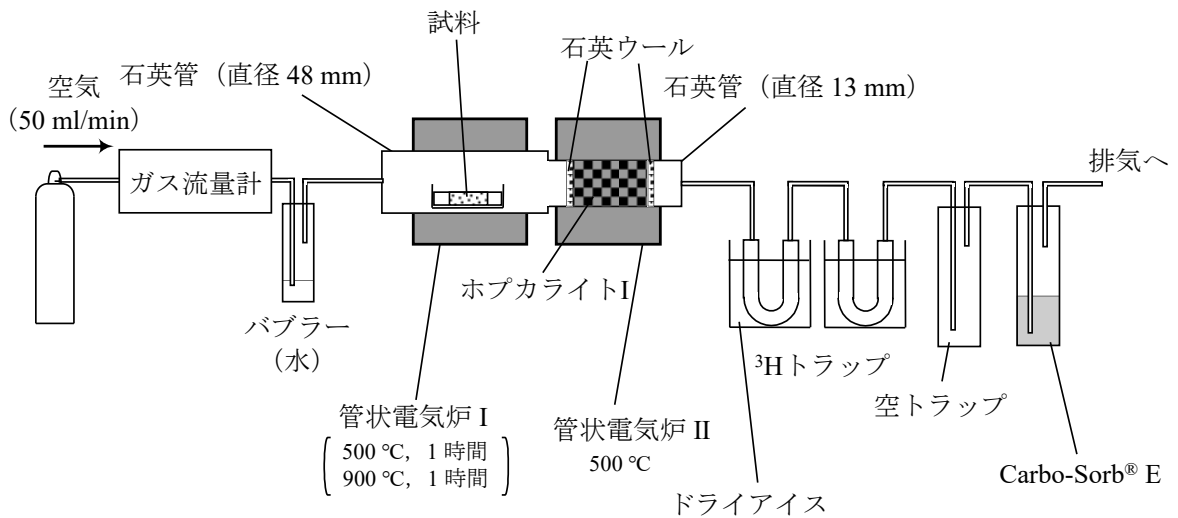


図 4 3Hの分離装置

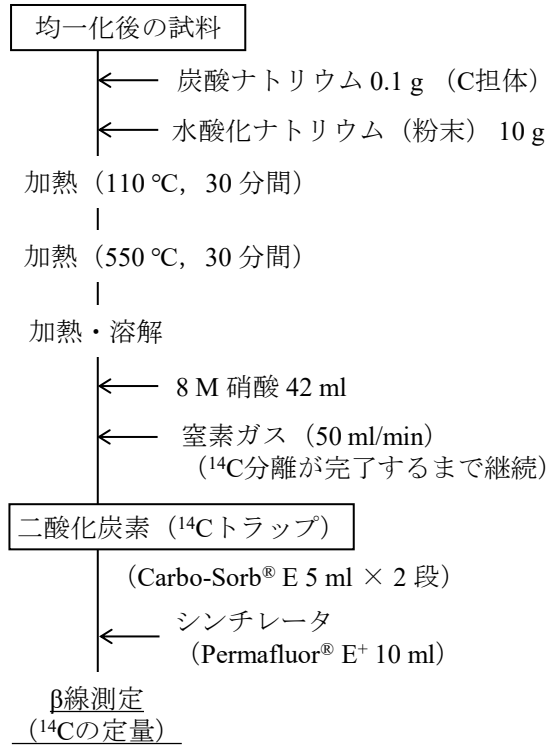


図 5 ¹⁴Cの分析フロー

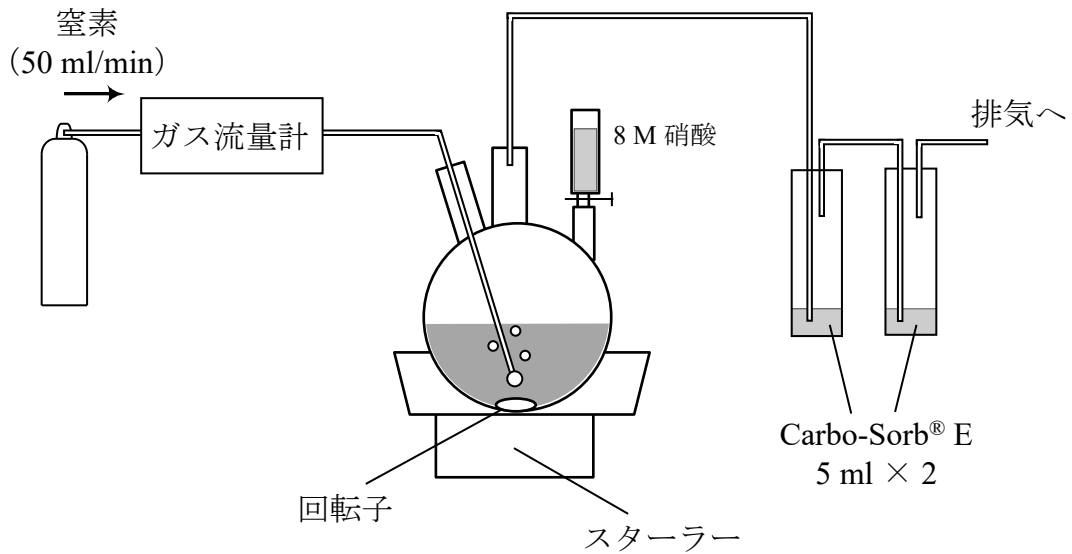


図 6 ¹⁴Cの分離装置

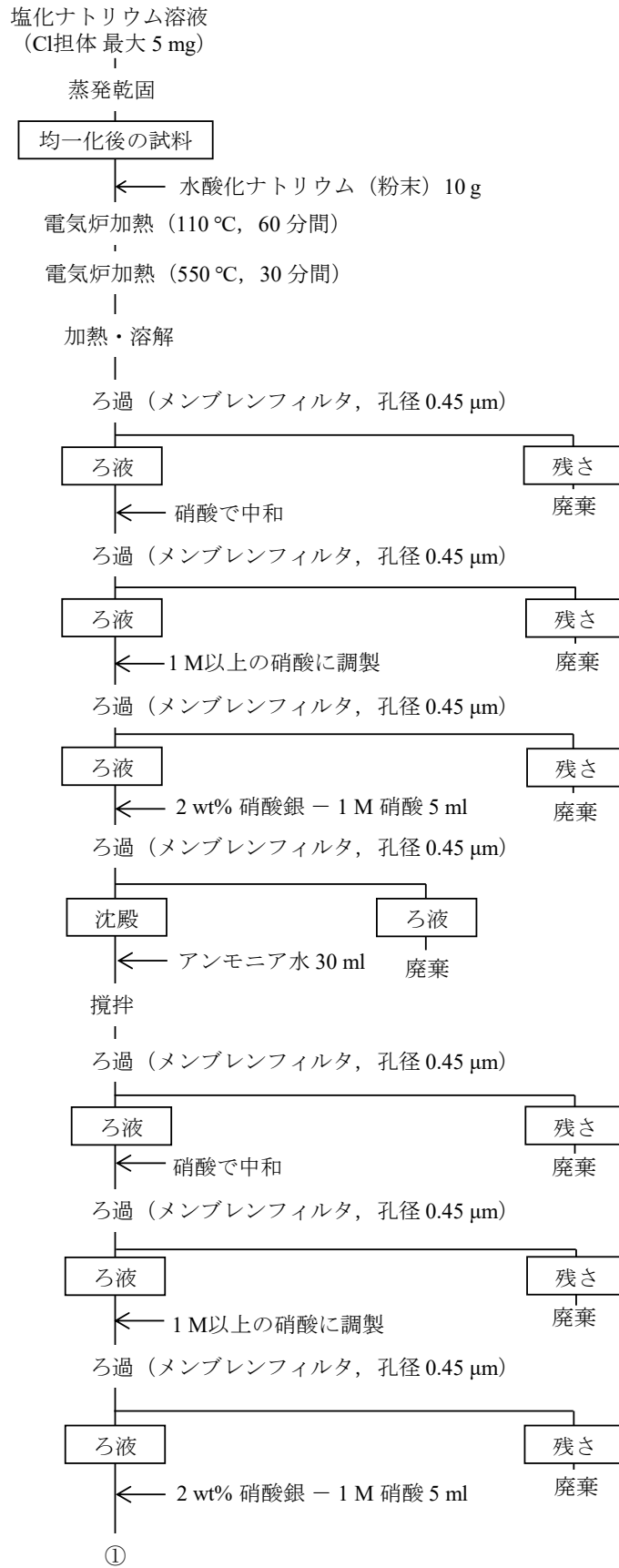


図 7 ³⁶Clの分析フロー (1/2)

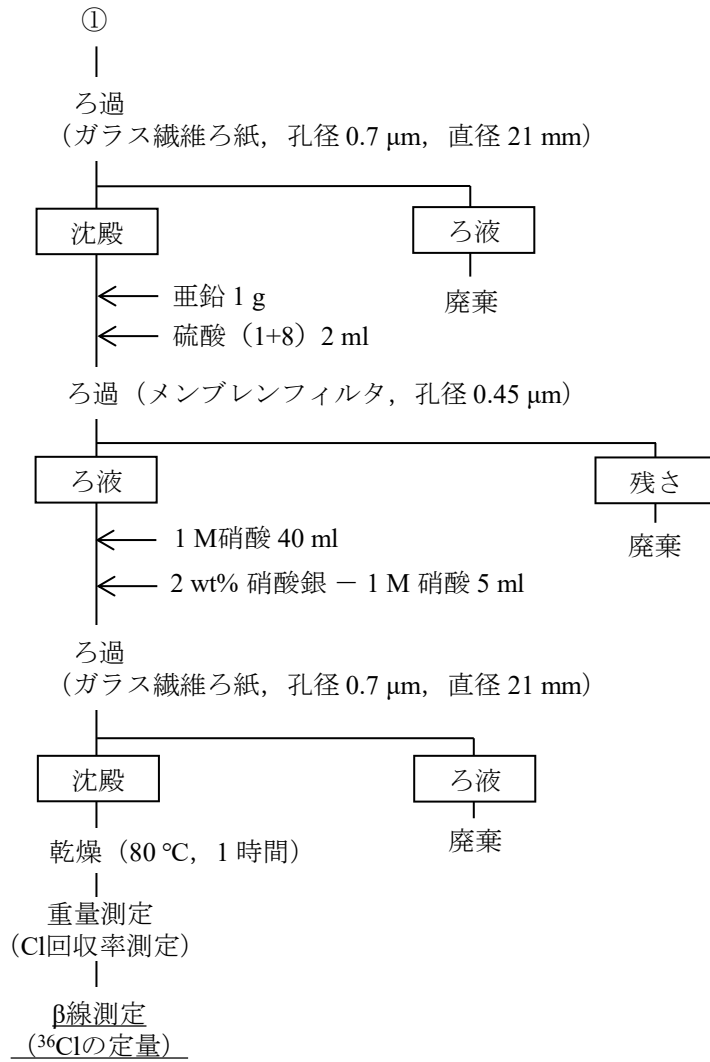


図 7 ³⁶Clの分析フロー (2/2)

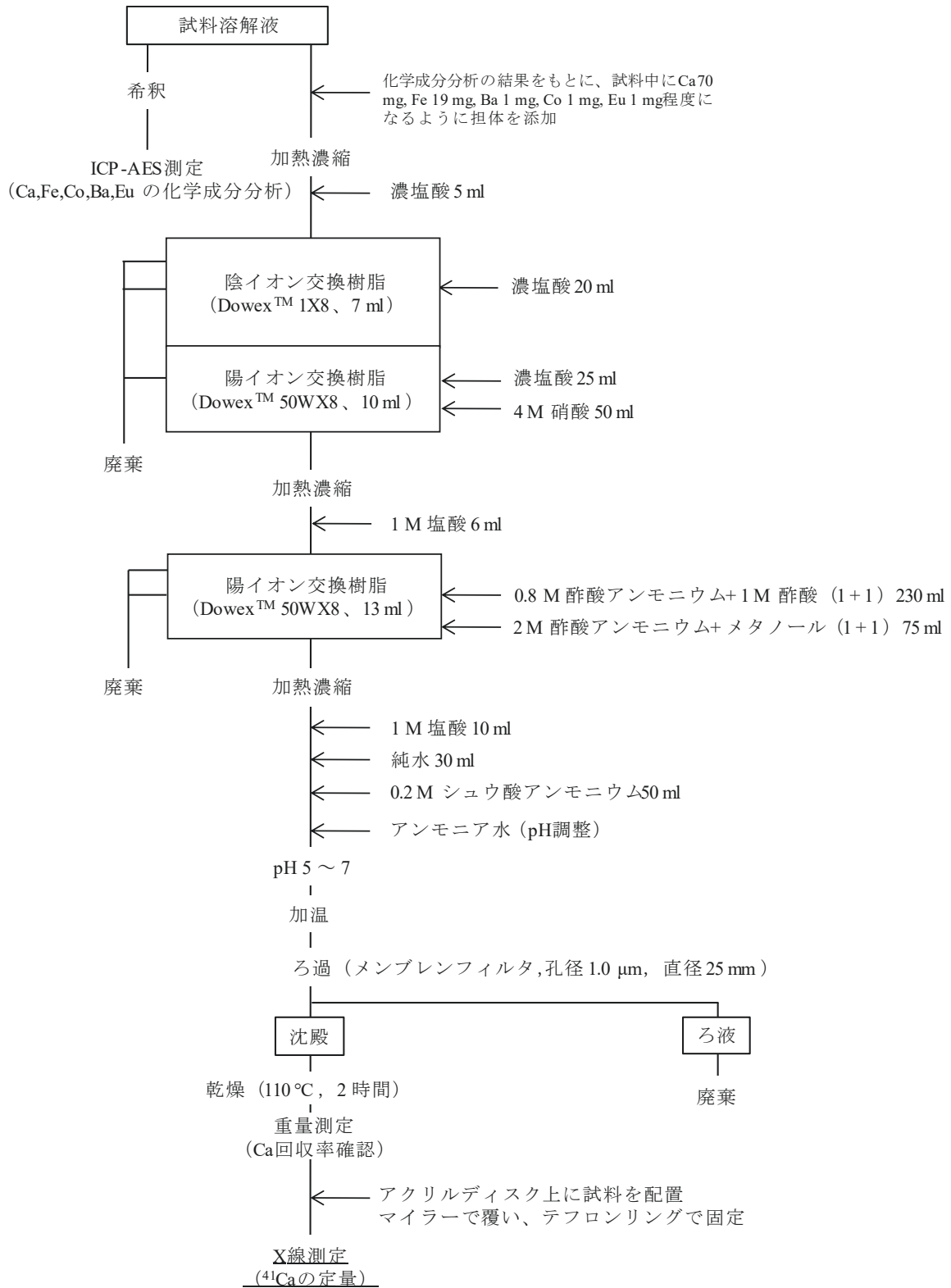


図 8 ⁴¹Caの分析フロー

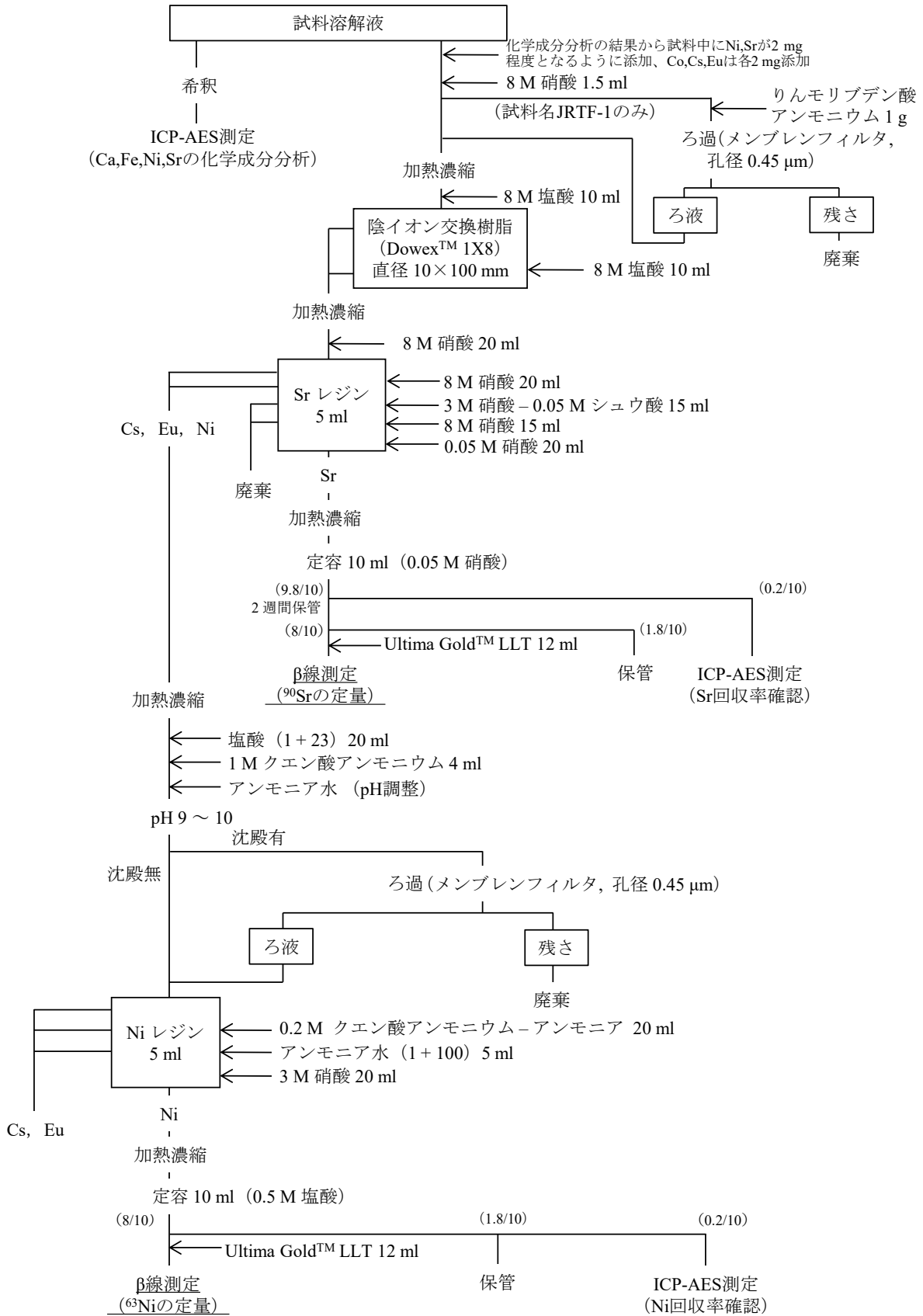


図 9 ⁶³Ni及び⁹⁰Srの分析フロー

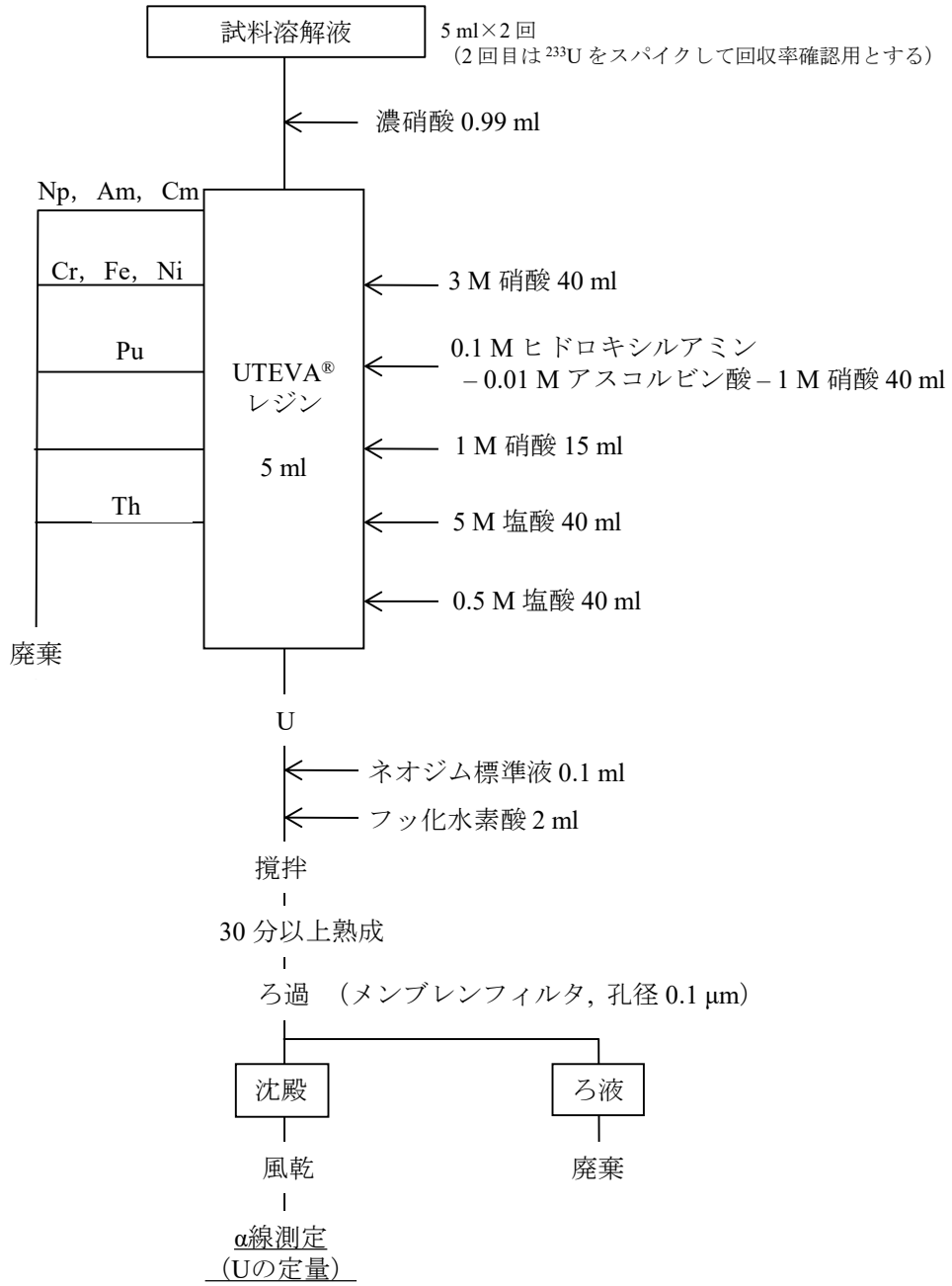


図 10 ²³⁴U、²³⁵U及び²³⁸Uの分析フロー

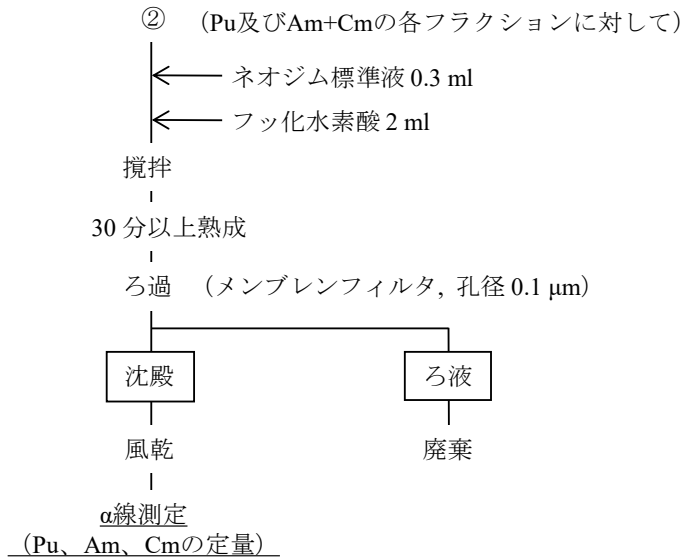
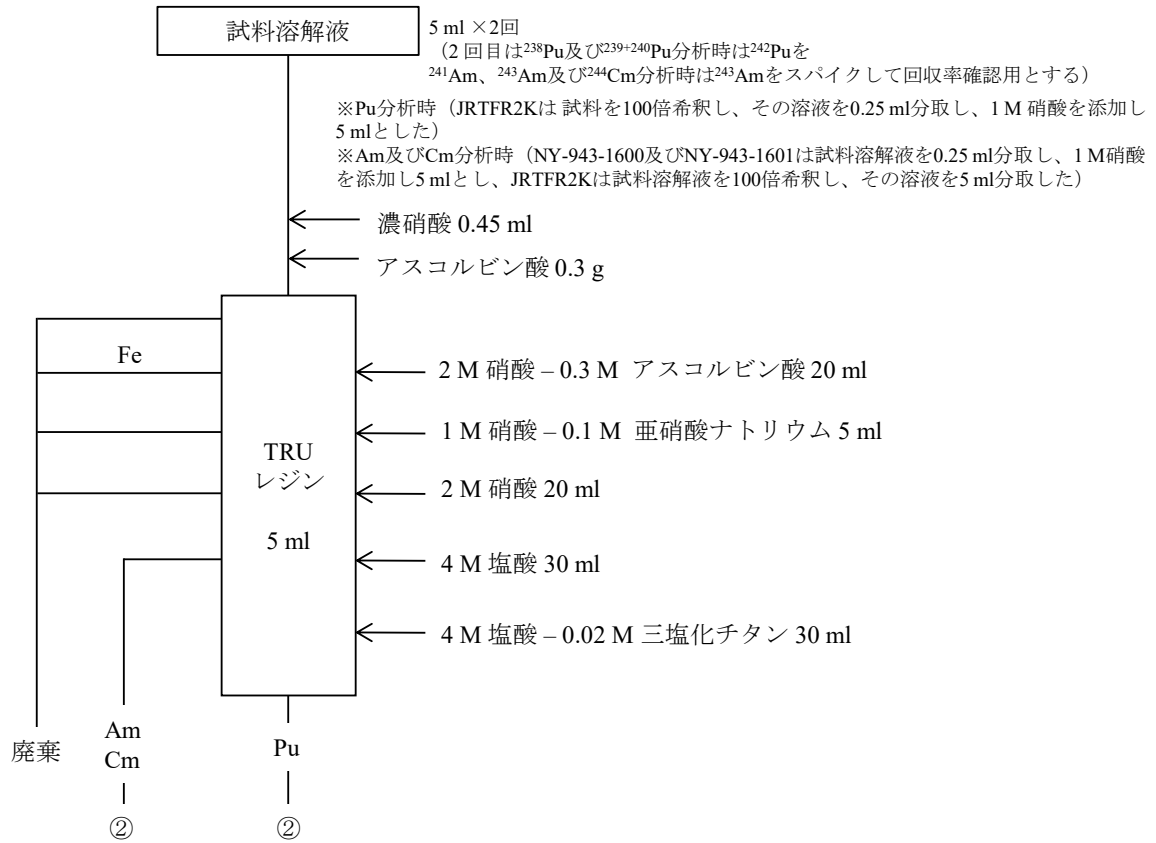


図 11 ²³⁸Pu、²³⁹⁺²⁴⁰Pu、²⁴¹Am、²⁴³Am及び²⁴⁴Cmの分析フロー

