



JAEA-Data/Code

2020-022

DOI:10.11484/jaea-data-code-2020-022

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

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

土田 大貴 原賀 智子 飛田 実 大森 弘幸
大森 剛 村上 秀昭 水飼 秋菜 青野 竜士
石森 健一郎 亀尾 裕

Daiki TSUCHIDA, Tomoko HARAGA, Minoru TOBITA, Hiroyuki OMORI
Takeshi OMORI, Hideaki MURAKAMI, Akina MITSUKAI, Ryuji AONO
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

March 2021

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, 2021

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

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

土田 大貴、原賀 智子、飛田 実*¹、大森 弘幸*²、大森 剛*³

村上 秀昭*⁴、水飼 秋菜、青野 竜士、石森 健一郎、亀尾 裕

(2020年12月23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-3 及び JPDR から発生した放射性廃棄物よりコンクリート試料を採取し、放射化学分析を実施した。本報告書は、令和元年度に取得した 22 核種 (^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 $^{166\text{m}}\text{Ho}$ 、 ^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{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

- *1 検査開発株式会社
- *2 原子力エンジニアリング株式会社
- *3 株式会社ジック
- *4 東京パワーテクノロジー株式会社

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

Daiki TSUCHIDA, Tomoko HARAGA, Minoru TOBITA*¹, Hiroyuki OMORI*², Takeshi OMORI*³
Hideaki MURAKAMI*⁴, Akina MITSUKAI, Ryuji AONO, 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 December 23, 2020)

Radioactive wastes generated from nuclear research facilities in Japan Atomic Energy Agency are planning to be buried in the near surface disposal field. 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 this work, we collected and analyzed concrete samples generated from JRR-3 and JPDR. In this report, we summarized the radioactivity concentrations of 22 radionuclides (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{94}Nb , $^{108\text{m}}\text{Ag}$, ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , $^{166\text{m}}\text{Ho}$, ^{234}U , ^{238}U , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm) which were obtained from radiochemical analysis of the samples.

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

*¹ Inspection Development Company Ltd.

*² Nuclear Engineering Company Ltd.

*³ GIC CORP.

*⁴ Tokyo Power Technology Ltd.

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 | 1 |
| 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 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{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 及び ^{238}U の分析..... | 7 |
| 2.10 ^{238}Pu 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の分析..... | 8 |
| 2.11 ^{241}Am 、 ^{243}Am 及び ^{244}Cm の分析 | 9 |
| 3. 分析結果..... | 9 |
| 4. まとめ | 9 |
| 謝辞..... | 9 |
| 参考文献..... | 10 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Radioactivity analysis..... | 1 |
| 2.1 Overview of analytical samples..... | 1 |
| 2.2 Preprocessing for analytical samples..... | 1 |
| 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 , $^{108\text{m}}\text{Ag}$, ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{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 and ^{238}U | 7 |
| 2.10 Analysis of ^{238}Pu and $^{239+240}\text{Pu}$ | 8 |
| 2.11 Analysis of ^{241}Am , ^{243}Am and ^{244}Cm | 9 |
| 3. Results | 9 |
| 4. Conclusions | 9 |
| Acknowledgement..... | 9 |
| References | 10 |

表リスト

| | | |
|------|--------------------------------------|----|
| 表 1 | 試料リスト..... | 11 |
| 表 2 | 分析法の概要及び測定機器等の情報..... | 12 |
| 表 3 | ^3H の分析結果..... | 13 |
| 表 4 | ^{14}C の分析結果..... | 13 |
| 表 5 | ^{36}Cl の分析結果..... | 14 |
| 表 6 | ^{41}Ca の分析結果..... | 14 |
| 表 7 | ^{60}Co の分析結果..... | 15 |
| 表 8 | ^{63}Ni の分析結果..... | 15 |
| 表 9 | ^{90}Sr の分析結果..... | 16 |
| 表 10 | ^{94}Nb の分析結果..... | 16 |
| 表 11 | $^{108\text{m}}\text{Ag}$ の分析結果..... | 17 |
| 表 12 | ^{133}Ba の分析結果..... | 17 |
| 表 13 | ^{137}Cs 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..... | 20 |
| 表 18 | ^{238}U の分析結果..... | 20 |
| 表 19 | ^{238}Pu の分析結果..... | 21 |
| 表 20 | $^{239+240}\text{Pu}$ の分析結果..... | 21 |
| 表 21 | ^{241}Am の分析結果..... | 22 |
| 表 22 | ^{243}Am の分析結果..... | 22 |
| 表 23 | ^{244}Cm の分析結果..... | 23 |

図リスト

| | | |
|------|---|----|
| 図 1 | 分析概要フロー | 24 |
| 図 2 | 試料溶解フロー | 25 |
| 図 3 | ^3H の分析フロー | 27 |
| 図 4 | ^3H の分離装置 | 27 |
| 図 5 | ^{14}C の分析フロー | 28 |
| 図 6 | ^{14}C の分離装置 | 28 |
| 図 7 | ^{36}Cl の分析フロー | 29 |
| 図 8 | ^{41}Ca の分析フロー | 31 |
| 図 9 | ^{63}Ni 及び ^{90}Sr の分析フロー | 32 |
| 図 10 | ^{234}U 及び ^{238}U の分析フロー | 33 |
| 図 11 | ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am 及び ^{244}Cm の分析フロー | 34 |

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、スケーリングファクタ法、又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ことが合理的である。

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及びJRR-3)及び照射後試験施設(ホットラボ)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⁾⁻¹⁰⁾、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¹¹⁾⁻¹⁴⁾。

本報告では、JRR-3、JPDRから発生した放射性廃棄物のうち、コンクリート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から採取した試料に対し、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及びJPDRにおいて安全評価上重要核種として予備評価された22核種(^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 $^{166\text{m}}\text{Ho}$ 、 ^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am 、 ^{244}Cm)である¹⁵⁾。ただし、エネルギー弁別のできない核種($^{239+240}\text{Pu}$)は、合算値で表した。

2. 放射能分析

2.1 試料の概要

JRR-3から発生した試料(3試料)及びJPDRから発生した試料(2試料)を本分析の対象とした。分析概要フローを図1に、分析試料の形状、外観等を表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1~10g程度を取り分けた。また、2.3.1項「分離操

作」に示す ^3H の分離操作及び2.2.2項「粉砕」に示す粉砕作業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角よりも大きい場合には、チスやハンマーを用いて、試料の大きさが1 cm角未満となるように粗粉砕した。粉砕作業時に発生する熱や粉末状となって表面積が増加し、 ^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 粉砕

コンクリート試料（必要に応じて粗粉砕したもの）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砕した。粉砕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砕を行った。

2.2.3 分取・均一性確認

ふるいを通過した試料をポリビンに集め、卓上ポットミルを用いて4時間以上丁寧に攪拌した。混合した試料を台紙（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 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{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、合計 $50\pm 0.1\text{ g}$ になるよう分取した。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、合計 $1\pm 0.1\text{ g}$ になるよう15本ずつ分取した。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、試料毎に最も濃度の高い核種を用いて評価した。主要核種が検出された試料（試料番号NY-912-475及びNY-912-519）は、分取した試料ごとの γ 線測定で得られた放射能濃度が相対標準偏差15%以下となることが分かり、十分な均一性を確認できた。なお、主要核種が検出されない試料（試料番号NY-83Z-1485、NY-878-905及びNY-87Z-1713）は、同様の放射能濃度による均一性の評価が行えないため、試料番号NY-912-475及びNY-912-519と同じ手順で粉砕、分取を行い使用した。

2.2.4 試料の溶解

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。塗料が付着していた試料については、溶解前に灰化作業を追加した。コンクリート試料1 gをビーカーに入れ、時計皿をかぶせて電気炉に入れ、 500°C で灰化後の試料を溶解に用いた。溶解作業では、コンクリート試料1 g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。十分に放冷した後、メンブレンフィルタ（孔径 $0.45\ \mu\text{m}$ ）（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（以下「ろ液(1)」という。）を回収した。残さを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、蛍光X線分析計を用いて元素分析を行い、残さに含まれる元素に応じて適切な試薬を選択し、加熱分解を繰り返して溶液化させた。元素分析の結果、残さに含まれる元素が主にSiであったことから、残さをメンブレンフィルタごと反応容器に移し入れ、濃硝酸5 ml、フッ化水素酸5 mlを加え、マイクロ波加熱

分解を行った。その後、残さをメンブレンフィルタでろ過し、ろ液（以下「ろ液（2）」という。）を回収した。ここで発生した残さに対して、主要核種の残存率を確認するとともに、元素分析を行った結果、含有元素の検出はなかったものの、 ^{152}Eu の残存が確認されたことから、過塩素酸を用いた加熱分解が必要と判断し、以下の操作を行った。残さをメンブレンフィルタごとビーカーに移し入れ、濃硝酸 5 ml を加えて加熱分解し、メンブレンフィルタを完全に溶解させた後、濃硝酸 5 ml、過塩素酸 3 ml を加え、ホットプレートで加熱分解を行った。残さをメンブレンフィルタでろ過し、ろ液（以下「ろ液（3）」という。）を回収した。ここで発生した残さに対して、主要核種の残存率を確認するとともに、元素分析を行った。その結果、主要核種の残存も確認されず、含有元素も検出されなかったことから、回収したろ液（1）及びろ液（3）を混合し、加熱濃縮した後、濃硝酸 5 ml を加えて加熱濃縮する操作を繰り返し行った。また、ろ液（2）に関してはフッ化水素酸を用いたため、テフロン製ビーカーを用いてろ液（2）を加熱濃縮し、濃硝酸 5 ml を加えて加熱濃縮する操作を繰り返し行った後、ろ液（1）及びろ液（3）の濃縮液と混合した。混合した液を加熱濃縮し、1 M 硝酸 100 ml に定容し、これをコンクリート試料溶解液とした。

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。石英ボート上にNi箔を敷き、2.2.1項「 ^3H 分析用試料の分取」において取り分けた ^3H 分析用試料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°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。

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 100°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°C に昇温し、 500°C に到達後、管状電気炉Iを 100°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°C まで昇温し1時間保持した後、 900°C まで昇温し、試料を 900°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。蒸留後の水は総量6~7 mlになるように調製し、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 の測定用試料を調製した。

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¹⁶⁾。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、分析に使用した分離装置を図 6 に示す。2.2.3 項「分取・均一性確認」でポリビンに分取した粉末状のコンクリート試料 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、水分が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かぶせた。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、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。溶解後放冷し、溶解液と融解されなかったコンクリートの懸濁液を 3 ロフラスコに移し、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¹⁶⁾。

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。2.2.3 項「分取・均一性確認」でポリビンに分取した粉末状のコンクリート試料 1 g 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、水分が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かぶせた。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、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、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。ろ液に硝酸を加えて中和した後、再びろ過し、回収したろ液に硝酸を加え、1 M 以上の硝酸溶液に調製した。調製

した溶液をろ過し、そのろ液に 2 wt%硝酸銀-1 M 硝酸溶液 5 ml を加え、塩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。遠沈管の内容物をろ過し、その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 以上の硝酸溶液に調製した。その後、2 wt%硝酸銀-1 M 硝酸溶液 5 ml を加え、塩化銀沈殿を作製し、吸引ろ過した。塩化銀に亜鉛粉末 1 g を加え硫酸 (1+8) 2 ml で塩化銀を溶解し、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 、 ϕ 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 ^{36}Cl の測定用試料とした。

2.5.2 回収率測定

分離における ^{36}Cl の回収率は、 ^{36}Cl の分析前のコンクリート試料に含まれる 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、 ^{36}Cl の分析前のコンクリート試料に含まれる Cl 量は分析前のコンクリート試料をアルカリ融解し、塩化銀として沈殿させ、重量を測定することで求めた。

2.5.3 放射能測定

^{36}Cl 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 36,000 秒測定した。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 ^{41}Ca の分析

2.6.1 分離操作

^{41}Ca の分析フローを図 8 に示す。2.2.4 項「試料の溶解」で 100 ml に定容した溶液 (以下「コンクリート試料溶解液」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。) により Ca 及び Ca 測定の際に妨害となると考えられる 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、コンクリート試料溶解液のうち 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、コンクリート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 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、一旦蒸発乾固させてから濃塩酸 5 ml を加えて溶解した。溶解した試料溶液を濃塩酸でコンディショニングした陰イオン交換樹脂 (富士フイルム和光純薬製 DowexTM 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通液して試料溶液に含まれる Fe や ^{60}Co 等を除去した。試料名 NY-83Z-1485 は Fe の量が多いため、陰イオン交換樹脂を 3 本のカラムにそれぞれ 10 ml 充てんした。その後、下段の陽イオン交換樹脂に 4 M 硝酸 50 ml を通液し、その流出液を蒸発乾固させてから 1 M 塩酸 6 ml を加えて溶解した。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）を通液した。次に、2 M 酢酸アンモニウム+メタノール（1+1）を通液し、その流出液を蒸発乾固させてから 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 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、フィルタ（孔径 1.0 μm ）でろ過し、沈殿を 110°C の恒温槽で 2 時間乾燥させた。φ 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 ^{41}Ca の測定用試料とした。

2.6.2 回収率測定

回収率は元のコンクリートに含まれる Ca の量を考慮して算出している。 ^{41}Ca の分析は、試料中の Ca に含まれる ^{41}Ca 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 X 線検出器（Si-LEPS）を使用し、検出器の効率校正は、濃度が既知の ^{55}Fe 放射能標準を用い、測定用試料と同一形状で ^{41}Ca のエネルギー 3.3 keV、 ^{55}Fe のエネルギー 5.9 keV のシュウ酸カルシウム一水和物沈殿における質量減弱係数を考慮し、放射能を定量した¹⁷⁾。測定時間は 500,000 秒とした。

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

2.7.1 分離操作

2.2.3 項「分取・均一性確認」で U8 容器に分取した粉末状のコンクリート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 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{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）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¹⁸⁾。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 300,000~500,000 秒とした。

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。分析前のコンクリート試料に含まれる安定元素の量を求めるため、コンクリート試料溶解液のうち 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。コンクリート試料溶解液の残存量に応じた液量（最大 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、担体として安定元素の Co、Ni、Sr、Cs 及び Eu を 2 mg 添加した。安定元素を添加した試料溶液は、一旦蒸発乾固させてから 8 M 塩酸溶液に調製し、陰イオン交換樹脂（富士フィルム和光純薬製 DowexTM 1x8、8 ml）を ϕ 10 mm のカラムに 100 mm 詰めたものを用いて、試料溶液に含まれる Fe や ^{60}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 8 M 硝酸溶液に調製して、Sr 用固相抽出樹脂（Eichrom Technologies 製、Sr レジン、5 ml）に通液した。Fe などを 8 M 硝酸で溶離した後、3 M 硝酸-0.05 M シュウ酸を通液し、シュウ酸を 8 M 硝酸で洗い流した。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、蒸発乾固した後、0.05 M 硝酸で 10 ml に定容し、Sr 回収率測定用に一部を分取した。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、LSC による β 線測定を行った。本コンクリート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。 ^{63}Ni の分析に関しては、Sr レジンからの流出液を Ni 用固相抽出樹脂（Eichrom Technologies 製、Ni レジン、5 ml）に通液することにより分離した。Sr レジンからの流出液を蒸発乾固した後、塩酸（1+23）で溶解し、1 M クエン酸アンモニウム、アンモニア水を加え 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 ）でろ過した溶液を Ni レジンに通液した。0.2 M クエン酸アンモニウム-アンモニア溶液で Fe などを溶離した後、アンモニア水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、蒸発乾固した後、0.5 M 塩酸で 10 ml に定容し、Ni 回収率測定用、 ^{63}Ni の放射能測定用試料に取り分けた。LSC による β 線測定を行った。

2.8.2 回収率測定

Sr 及び Ni の回収率は、分析前のコンクリート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 秒とした。

2.9 ^{234}U 及び ^{238}U の分析

2.9.1 分離操作

^{234}U 及び ^{238}U の分析フローを図 10 に示す。コンクリート試料溶解液を 5 ml 分取し、濃硝酸を加えて 3 M 硝酸とし、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 で溶離した。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。この溶液を蒸発乾固させ、1 M 硝酸 1 ml に溶解し、放射能測定に用いた。

2.9.2 回収率測定

U の回収率を確認するため、コンクリート試料溶解液 5 ml に ^{233}U を 0.1 Bq 添加し、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 及び ^{238}U は、タンタル板に分離後の試料溶液を滴下し、焼き付け後、SSB 検出器により α 線を測定した。測定時間は 500,000 秒とした。また、 ^{239}Pu の電着校正線源を用いて、効率校正を行った。

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。コンクリート試料溶解液を 5 ml 分取し、濃硝酸を加え 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。固相抽出樹脂（Eichrom Technologies 製、TRU レジン、5 ml）に通液し、Fe などを 2 M 硝酸-0.3 M アスコルビン酸溶液 20 ml で溶離した後、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 を溶離した液にネオジウム標準溶液とフッ化水素酸を加え、30 分以上静置した後、メンブレンフィルタ（孔径 0.1 μm ）で吸引ろ過し、フッ化ネオジウムとともに Pu のフッ化物をメンブレンフィルタ上に捕集した。

2.10.2 回収率測定

Pu の回収率を確認するため、コンクリート試料溶解液 5 ml に ^{242}Pu を約 0.1 Bq（試料名 NY-87Z-1713 は 0.01 Bq）添加し、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 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、合計した値を $^{239+240}\text{Pu}$ として記載した。また、 ^{241}Am をフッ化ネオジウム沈殿させて校正線源を調製し、効率校正を行った。

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。コンクリート試料溶解液を 5 ml 分取し、濃硝酸を加え 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。固相抽出樹脂 (Eichrom Technologies 製、TRU レジン、5 ml) に通液し、Fe などを 2 M 硝酸-0.3 M アスコルビン酸溶液 20 ml で溶離した後、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 を溶離した液にネオジウム標準溶液とフッ化水素酸を加え、30 分以上静置した後、メンブレンフィルタ (孔径 0.1 μm) 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。

2.11.2 回収率測定

Am 及び Cm の回収率を確認するため、コンクリート試料溶解液 5 ml に ^{243}Am を 0.01 Bq 添加し、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「分離操作」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 秒とした。また、 ^{241}Am をフッ化ネオジウム沈殿させて校正線源を調製し、効率校正を行った。

3. 分析結果

令和元年度は、22 核種 (^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 $^{166\text{m}}\text{Ho}$ 、 $^{233+234}\text{U}$ 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am 、 ^{244}Cm) の放射化学分析を行い、105 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 23 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 及び JPDR 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が取得できた。

謝辞

本報告を執筆するにあたり JRR-3 及び JPDR の保管廃棄物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の方々に感謝の意を表する。

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) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) M. Itoh, K. Watanabe, M. Hatakeyama, et al. Determination of ^{41}Ca in biological-shield concrete by low-energy X-ray spectrometry, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 372, 2002, pp. 532-536.
- 18) S. Raman, C. Yonezawa, H. Matsue, et al. Efficiency calibration of a Ge detector in the 0.1-11.0 MeV region, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 454, 2000, pp. 389-402.

表 1 試料リスト

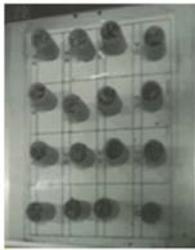
| 保管体番号 | 枝番 | 発生施設 | 材質 | 形状 | 採取年月日 | 外観写真 |
|-------------|------------|-------|--------|----------|-----------|---|
| NY-83Z-1485 | 2 | JRR-3 | コンクリート | 塊状 | H30.11.14 |  |
| NY-878-905 | C-3 D-3 | JRR-3 | コンクリート | 粒状・粉状 | H30.11.26 |  |
| NY-87Z-1713 | C-3 D-4 | JRR-3 | コンクリート | 粒状・粉状 | H30.11.22 |  |
| NY-912-475 | C-3 C-4 | JPDR | コンクリート | 円柱・粒状・粉状 | H30.11.29 |  |
| NY-912-519 | A-2 B-2 | JPDR | コンクリート | ブロック・塊状 | H30.11.30 |  |

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、HTOの形で回収し、液体シンチレーションカウンタを用いてβ線測定 | 液体シンチレーションカウンタ (PerkinElmer製 Tri-Carb B2910TR) | 2019/8/2 | 2019/7/26 |
| 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、液体シンチレーションカウンタを用いてβ線測定 | 液体シンチレーションカウンタ (PerkinElmer製 Tri-Carb B2910TR) | 2019/8/2 | 2019/8/2 |
| ³⁶ Cl | アルカリ融解法による分離の後、AgClの形で回収し、ガスフローカウンタを用いてβ線測定 | ガスフローカウンタ (ALOKA製 LBC-4302B) | 2019/11/19 | 2019/11/20 |
| 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、SLPによりγ線測定 | X線検出器 (ORTEC製 SLP-06165-P) | 2019/10/17 | 2019/12/11～2020/1/20 |
| ⁶⁰ Co | 粉碎後、ゲルマニウム半導体検出器を用いてγ線測定 | ゲルマニウム半導体検出器 (ORTEC製 GMX 70P4-S) | 2019/6/12～6/13 | 2019/6/13～7/5 |
| ⁶³ Ni | 溶解後、陰イオン交換樹脂でCoを除去し、SrレンジでSrを精製し、NiレンジによりNiを精製し、液体シンチレーションカウンタを用いてβ線測定 | 液体シンチレーションカウンタ (PerkinElmer製 Tri-Carb 2910TR/LL LSC102-2) | 2019/11/26 | 2019/11/29 |
| ⁹⁰ Sr | 溶解後、陰イオン交換樹脂でCoを除去した後、SrレンジでSrを精製し、放射平衡が成立した後、 ⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Yを液体シンチレーションカウンタを用いてβ線測定 | 液体シンチレーションカウンタ (PerkinElmer製 Tri-Carb 2910TR/LL LSC102-2) | 2019/11/26 | 2019/11/29 |
| ⁹⁴ Nb | 粉碎後、ゲルマニウム半導体検出器を用いてγ線測定 | ゲルマニウム半導体検出器 (ORTEC製 GMX 70P4-S) | 2019/6/12～6/13 | 2019/6/13～7/5 |
| ^{108m} Ag | 粉碎後、ゲルマニウム半導体検出器を用いてγ線測定 | ゲルマニウム半導体検出器 (ORTEC製 GMX 70P4-S) | 2019/6/12～6/13 | 2019/6/13～7/5 |
| ¹³³ Ba | 粉碎後、ゲルマニウム半導体検出器を用いてγ線測定 | ゲルマニウム半導体検出器 (ORTEC製 GMX 70P4-S) | 2019/6/12～6/13 | 2019/6/13～7/5 |
| ¹³⁷ Cs | 粉碎後、ゲルマニウム半導体検出器を用いてγ線測定 | ゲルマニウム半導体検出器 (ORTEC製 GMX 70P4-S) | 2019/6/12～6/13 | 2019/6/13～7/5 |
| ¹⁵² Eu | 粉碎後、ゲルマニウム半導体検出器を用いてγ線測定 | ゲルマニウム半導体検出器 (ORTEC製 GMX 70P4-S) | 2019/6/12～6/13 | 2019/6/13～7/5 |
| ¹⁵⁴ Eu | 粉碎後、ゲルマニウム半導体検出器を用いてγ線測定 | ゲルマニウム半導体検出器 (ORTEC製 GMX 70P4-S) | 2019/6/12～6/13 | 2019/6/13～7/5 |
| ^{160m} Ho | 粉碎後、ゲルマニウム半導体検出器を用いてγ線測定 | ゲルマニウム半導体検出器 (ORTEC製 GMX 70P4-S) | 2019/6/12～6/13 | 2019/6/13～7/5 |
| ²³⁴ U | 溶解後、UTEVALレンジでマトリックス元素を除去した後、シリコン半導体検出器によりα線測定 | シリコン半導体検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble) | 2019/7/31 | 2019/8/26 |
| ²³⁸ U | 溶解後、UTEVALレンジでマトリックス元素を除去した後、シリコン半導体検出器によりα線測定 | シリコン半導体検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble) | 2019/7/31 | 2019/8/26 |
| ²³⁸ Pu | 溶解後、TRUレンジでマトリックス元素やAmなどと分離した後、シリコン半導体検出器によりα線測定 | シリコン半導体検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble) | 2019/9/9～9/10 | 2019/9/19 |
| ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 溶解後、TRUレンジでマトリックス元素やAmなどと分離した後、シリコン半導体検出器によりα線測定 | シリコン半導体検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble) | 2019/9/9～9/10 | 2019/9/19～10/17 |
| ²⁴¹ Am | 溶解後、TRUレンジでマトリックス元素やPuなどと分離した後、シリコン半導体検出器によりα線測定 | シリコン半導体検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble) | 2019/9/9～9/10 | 2019/9/12 |
| ²⁴³ Am | 溶解後、TRUレンジでマトリックス元素やPuなどと分離した後、シリコン半導体検出器によりα線測定 | シリコン半導体検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble) | 2019/9/9～9/10 | 2019/9/12 |
| ²⁴⁴ Cm | 溶解後、TRUレンジでマトリックス元素やPuなどと分離した後、シリコン半導体検出器によりα線測定 | シリコン半導体検出器 (ORTEC製 Alpha Ensemble) | 2019/9/9～9/10 | 2019/9/12 |

表 3 ^3H の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-----------|--------------------------------|--------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 4.3339 | 96.3 | 2019/7/26 | ND | 6×10^{-3} |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 3.4171 | 97.3 | 2019/7/26 | $(3.6 \pm 0.1) \times 10^{-1}$ | 7×10^{-3} |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 2.4623 | 94.6 | 2019/7/26 | $(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-1}$ | 1×10^{-2} |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 2.3181 | 97.7 | 2019/7/26 | $(6.9 \pm 0.1) \times 10^2$ | 1×10^{-2} |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 2.3627 | 96.6 | 2019/7/26 | $(1.2 \pm 0.1) \times 10^2$ | 1×10^{-2} |

※1 測定開始日を示す。

ND：検出下限値以下であることを示す。

表 4 ^{14}C の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|----------|--------------------------------|--------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 1.0660 | 100 | 2019/8/2 | $(1.4 \pm 0.1) \times 10^{-1}$ | 2×10^{-2} |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 1.0336 | 100 | 2019/8/2 | $(8.8 \pm 0.1) \times 10^{-1}$ | 2×10^{-2} |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 1.0316 | 100 | 2019/8/2 | $(5.6 \pm 0.6) \times 10^{-2}$ | 2×10^{-2} |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 1.0654 | 100 | 2019/8/2 | $(7.6 \pm 0.1) \times 10^0$ | 2×10^{-2} |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 1.0819 | 100 | 2019/8/2 | $(1.2 \pm 0.1) \times 10^0$ | 2×10^{-2} |

※1 測定開始日を示す。

表 5 ³⁶Cl の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-------------------|--------------------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 1.0255 | 93.4 | 2019/11/20 | (1.5 ± 0.3) × 10 ⁻² | 7 × 10 ⁻³ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 1.0394 | 83.5 | 2019/11/20 | ND | 8 × 10 ⁻³ |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 1.0628 | 70.2 | 2019/11/20 | ND | 9 × 10 ⁻³ |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 1.0588 | 62.4 | 2019/11/20 | (1.5 ± 0.1) × 10 ⁻¹ | 1 × 10 ⁻² |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 1.0270 | 84.6 | 2019/11/20 | (3.0 ± 0.3) × 10 ⁻² | 8 × 10 ⁻³ |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 6 ⁴¹Ca の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-------------------|-------------------------------|---------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 5.3864 | 78 | 2019/12/11 | ND | 4 × 10 ⁰ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 5.2980 | 80 | 2019/12/23 | ND | 4 × 10 ⁰ |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 5.2529 | 75 | 2020/1/6 | ND | 7 × 10 ⁰ |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 5.3407 | 73 | 2020/1/14 | (1.3 ± 0.2) × 10 ¹ | 4 × 10 ⁰ |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 5.2257 | 72 | 2020/1/20 | ND | 4 × 10 ⁰ |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 7 ⁶⁰Co の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-------------------|------------------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 49.9410 | 100 | 2019/6/13 | (5.0±0.8) × 10 ⁻³ | 3 × 10 ⁻³ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 50.0840 | 100 | 2019/7/5 | (9.0±0.2) × 10 ⁻² | 3 × 10 ⁻³ |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 50.0886 | 100 | 2019/7/1 | ND | 3 × 10 ⁻³ |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 50.0913 | 100 | 2019/6/24 | (3.0±0.1) × 10 ⁰ | 6 × 10 ⁻³ |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 50.0006 | 100 | 2019/6/18 | (4.1±0.1) × 10 ⁻¹ | 3 × 10 ⁻³ |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 8 ⁶³Ni の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-------------------|------------------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 5.3864 | 79.4 | 2019/11/29 | (5.4±1.4) × 10 ⁻² | 4 × 10 ⁻² |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 5.2980 | 98.4 | 2019/11/29 | ND | 4 × 10 ⁻² |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 5.2529 | 98.7 | 2019/11/29 | ND | 4 × 10 ⁻² |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 5.3407 | 98.6 | 2019/11/29 | (2.4±0.1) × 10 ⁰ | 4 × 10 ⁻² |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 5.2257 | 97.2 | 2019/11/29 | (5.0±0.2) × 10 ⁻¹ | 4 × 10 ⁻² |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 9 ⁹⁰Sr の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|------------|--------------------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 5.3864 | 85.6 | 2019/11/29 | ND | 2 × 10 ⁻² |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 5.2980 | 94.1 | 2019/11/29 | (2.0 ± 0.4) × 10 ⁻² | 2 × 10 ⁻² |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 5.2529 | 93.9 | 2019/11/29 | ND | 2 × 10 ⁻² |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 5.3407 | 91.7 | 2019/11/29 | (2.8 ± 0.4) × 10 ⁻² | 2 × 10 ⁻² |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 5.2257 | 92.8 | 2019/11/29 | ND | 2 × 10 ⁻² |

※1 測定開始日を示す。

ND：検出下限値以下であることを示す。

表 10 ⁹⁴Nb の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-----------|--------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 49.9410 | 100 | 2019/6/13 | ND | 3 × 10 ⁻³ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 50.0840 | 100 | 2019/7/5 | ND | 3 × 10 ⁻³ |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 50.0886 | 100 | 2019/7/1 | ND | 3 × 10 ⁻³ |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 50.0913 | 100 | 2019/6/24 | ND | 2 × 10 ⁻² |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 50.0006 | 100 | 2019/6/18 | ND | 8 × 10 ⁻³ |

※1 測定開始日を示す。

ND：検出下限値以下であることを示す。

表 11 ^{108m}Ag の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 49.9410 | 100 | 2019/6/13 | ND | 3×10^{-3} |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 50.0840 | 100 | 2019/7/5 | ND | 4×10^{-3} |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 50.0886 | 100 | 2019/7/1 | ND | 4×10^{-3} |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 50.0913 | 100 | 2019/6/24 | ND | 1×10^{-2} |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 50.0006 | 100 | 2019/6/18 | ND | 5×10^{-3} |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 12 ¹³³Ba の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 49.9410 | 100 | 2019/6/13 | ND | 4×10^{-3} |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 50.0840 | 100 | 2019/7/5 | ND | 5×10^{-3} |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 50.0886 | 100 | 2019/7/1 | ND | 5×10^{-3} |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 50.0913 | 100 | 2019/6/24 | $(3.0 \pm 0.1) \times 10^{-1}$ | 2×10^{-2} |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 50.0006 | 100 | 2019/6/18 | $(6.9 \pm 0.3) \times 10^{-2}$ | 7×10^{-3} |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 13 ¹³⁷Cs の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-------------------|--------------------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 49.9410 | 100 | 2019/6/13 | (1.5 ± 0.2) × 10 ⁻² | 4 × 10 ⁻³ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 50.0840 | 100 | 2019/7/5 | (1.4 ± 0.2) × 10 ⁻² | 5 × 10 ⁻³ |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 50.0886 | 100 | 2019/7/1 | (7.3 ± 0.2) × 10 ⁻² | 5 × 10 ⁻³ |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 50.0913 | 100 | 2019/6/24 | (5.8 ± 0.5) × 10 ⁻² | 2 × 10 ⁻² |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 50.0006 | 100 | 2019/6/18 | ND | 7 × 10 ⁻³ |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 14 ¹⁵²Eu の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-------------------|--------------------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 49.9410 | 100 | 2019/6/13 | ND | 9 × 10 ⁻³ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 50.0840 | 100 | 2019/7/5 | ND | 2 × 10 ⁻² |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 50.0886 | 100 | 2019/7/1 | ND | 2 × 10 ⁻² |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 50.0913 | 100 | 2019/6/24 | (1.5 ± 0.1) × 10 ⁻² | 3 × 10 ⁻² |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 50.0006 | 100 | 2019/6/18 | (2.3 ± 0.1) × 10 ⁻¹ | 2 × 10 ⁻² |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 15 ¹⁵⁴Eu の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|---------|---------|-----------|--------------------------------|--------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 49.9410 | 100 | 2019/6/13 | ND | 8×10^{-3} |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 50.0840 | 100 | 2019/7/5 | ND | 1×10^{-2} |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 50.0886 | 100 | 2019/7/1 | ND | 1×10^{-2} |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 50.0913 | 100 | 2019/6/24 | $(4.0 \pm 0.1) \times 10^0$ | 3×10^{-2} |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 50.0006 | 100 | 2019/6/18 | $(6.8 \pm 0.1) \times 10^{-1}$ | 2×10^{-2} |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 16 ^{166m}Ho の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|---------|---------|-----------|-------------------|--------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 49.9410 | 100 | 2019/6/13 | ND | 4×10^{-3} |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 50.0840 | 100 | 2019/7/5 | ND | 5×10^{-3} |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 50.0886 | 100 | 2019/7/1 | ND | 5×10^{-3} |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 50.0913 | 100 | 2019/6/24 | ND | 3×10^{-2} |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 50.0006 | 100 | 2019/6/18 | ND | 1×10^{-2} |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 17 ²³⁴U の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-----------|--------------------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 5.3864 | 74.2 | 2019/8/26 | (6.6 ± 0.8) × 10 ⁻³ | 1 × 10 ⁻³ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 5.2980 | 73.7 | 2019/8/26 | (4.0 ± 0.7) × 10 ⁻³ | 2 × 10 ⁻³ |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 5.2529 | 62.2 | 2019/8/26 | (4.9 ± 0.8) × 10 ⁻³ | 2 × 10 ⁻³ |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 5.3407 | 75.3 | 2019/8/26 | (1.1 ± 0.1) × 10 ⁻² | 9 × 10 ⁻⁴ |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 5.2257 | 74.7 | 2019/8/26 | (9.7 ± 0.9) × 10 ⁻³ | 9 × 10 ⁻⁴ |

※1 測定開始日を示す。

表 18 ²³⁸U の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-----------|--------------------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 5.3864 | 74.2 | 2019/8/26 | (5.6 ± 0.7) × 10 ⁻³ | 1 × 10 ⁻³ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 5.2980 | 73.7 | 2019/8/26 | (5.2 ± 0.7) × 10 ⁻³ | 1 × 10 ⁻³ |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 5.2529 | 62.2 | 2019/8/26 | (4.1 ± 0.7) × 10 ⁻³ | 1 × 10 ⁻³ |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 5.3407 | 75.3 | 2019/8/26 | (7.4 ± 0.8) × 10 ⁻³ | 9 × 10 ⁻⁴ |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 5.2257 | 74.7 | 2019/8/26 | (1.0 ± 0.1) × 10 ⁻² | 1 × 10 ⁻³ |

※1 測定開始日を示す。

表 19 ^{238}Pu の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 5.3864 | 85.2 | 2019/9/19 | ND | 6×10^{-4} |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 5.2980 | 80.7 | 2019/9/19 | ND | 6×10^{-4} |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 5.2529 | 78.3 | 2019/9/19 | ND | 9×10^{-4} |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 5.3407 | 79.8 | 2019/9/19 | ND | 7×10^{-4} |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 5.2257 | 86.5 | 2019/9/19 | ND | 7×10^{-4} |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 20 $^{239+240}\text{Pu}$ の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 5.3864 | 85.2 | 2019/9/19 | $(9.6 \pm 2.3) \times 10^{-4}$ | 6×10^{-4} |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 5.2980 | 80.7 | 2019/9/19 | $(8.0 \pm 0.7) \times 10^{-3}$ | 8×10^{-4} |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 5.2529 | 78.3 | 2019/9/19 | ND | 8×10^{-4} |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 5.3407 | 79.8 | 2019/9/19 | $(1.4 \pm 0.1) \times 10^{-2}$ | 4×10^{-4} |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 5.2257 | 86.5 | 2019/10/17 | $(1.6 \pm 0.4) \times 10^{-3}$ | 7×10^{-4} |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 21 ²⁴¹Am の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-----------|--------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 5.3864 | 100 | 2019/9/12 | ND | 4 × 10 ⁻⁴ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 5.2980 | 93.7 | 2019/9/12 | ND | 5 × 10 ⁻⁴ |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 5.2529 | 99.0 | 2019/9/12 | ND | 6 × 10 ⁻⁴ |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 5.3407 | 98.2 | 2019/9/12 | ND | 5 × 10 ⁻⁴ |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 5.2257 | 92.2 | 2019/9/12 | ND | 4 × 10 ⁻⁴ |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 22 ²⁴³Am の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-----------|--------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 5.3864 | 100 | 2019/9/12 | ND | 7 × 10 ⁻⁴ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 5.2980 | 93.7 | 2019/9/12 | ND | 8 × 10 ⁻⁴ |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 5.2529 | 99.0 | 2019/9/12 | ND | 9 × 10 ⁻⁴ |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 5.3407 | 98.2 | 2019/9/12 | ND | 4 × 10 ⁻⁴ |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 5.2257 | 92.2 | 2019/9/12 | ND | 9 × 10 ⁻⁴ |

※1 測定開始日を示す。
 ND：検出下限値以下であることを示す。

表 23 ²⁴⁴Cm の分析結果

| 保管体番号 | 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) |
|-------------|-------|--------|------------|------------|-----------|--------------------|----------------------|
| NY-83Z-1485 | JRR-3 | コンクリート | 5.3864 | 100 | 2019/9/12 | ND | 3 × 10 ⁻⁴ |
| NY-878-905 | JRR-3 | コンクリート | 5.2980 | 93.7 | 2019/9/12 | ND | 4 × 10 ⁻⁴ |
| NY-87Z-1713 | JRR-3 | コンクリート | 5.2529 | 99.0 | 2019/9/12 | ND | 4 × 10 ⁻⁴ |
| NY-912-475 | JPDR | コンクリート | 5.3407 | 98.2 | 2019/9/12 | ND | 4 × 10 ⁻⁴ |
| NY-912-519 | JPDR | コンクリート | 5.2257 | 92.2 | 2019/9/12 | ND | 4 × 10 ⁻⁴ |

※1 測定開始日を示す。

ND：検出下限値以下であることを示す。

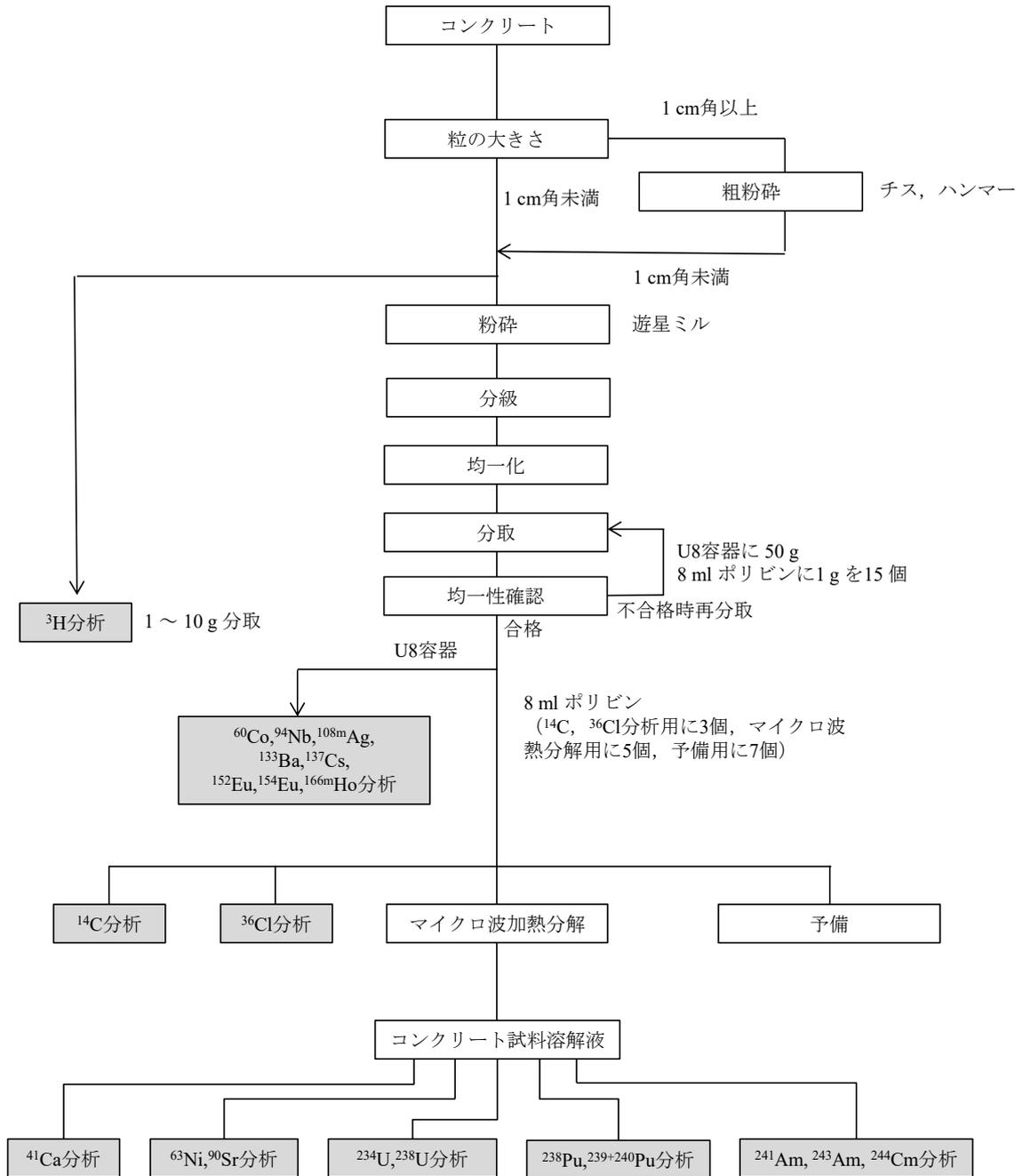


図 1 分析概要フロー

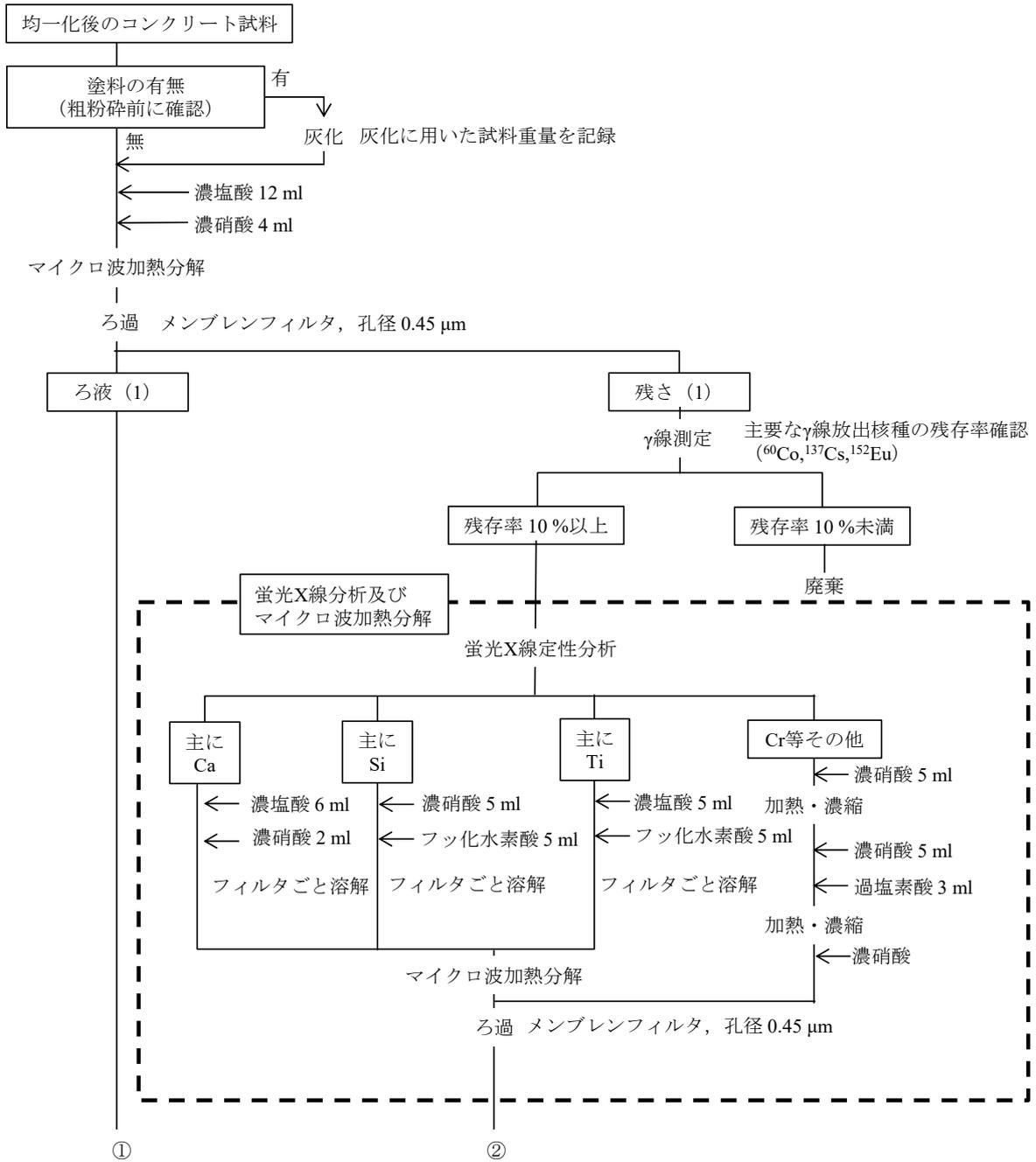


図 2 試料溶解フロー (1/2)

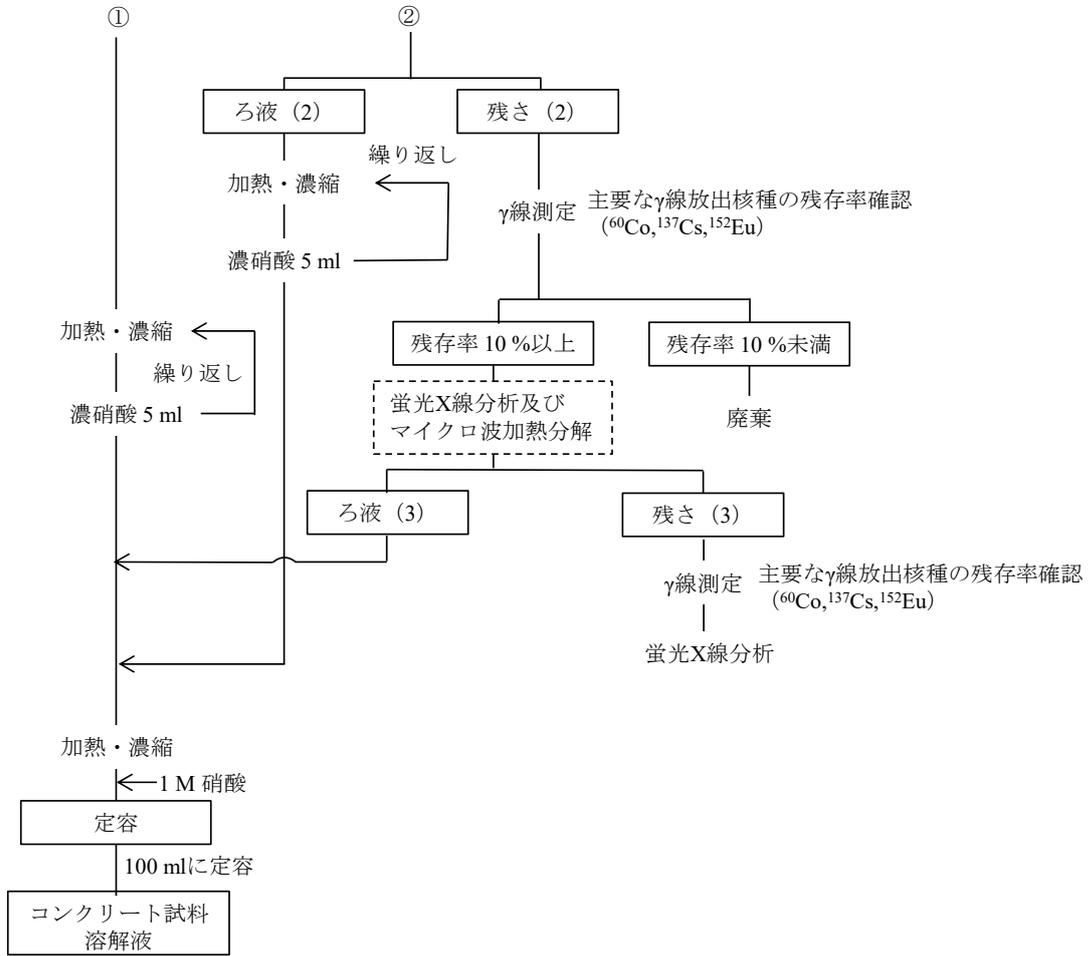


図 2 試料溶解フロー (2/2)

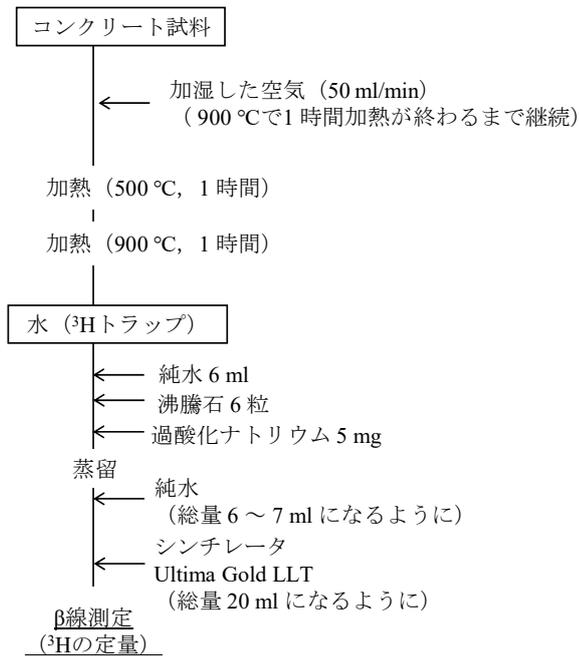


図 3 ³H の分析フロー

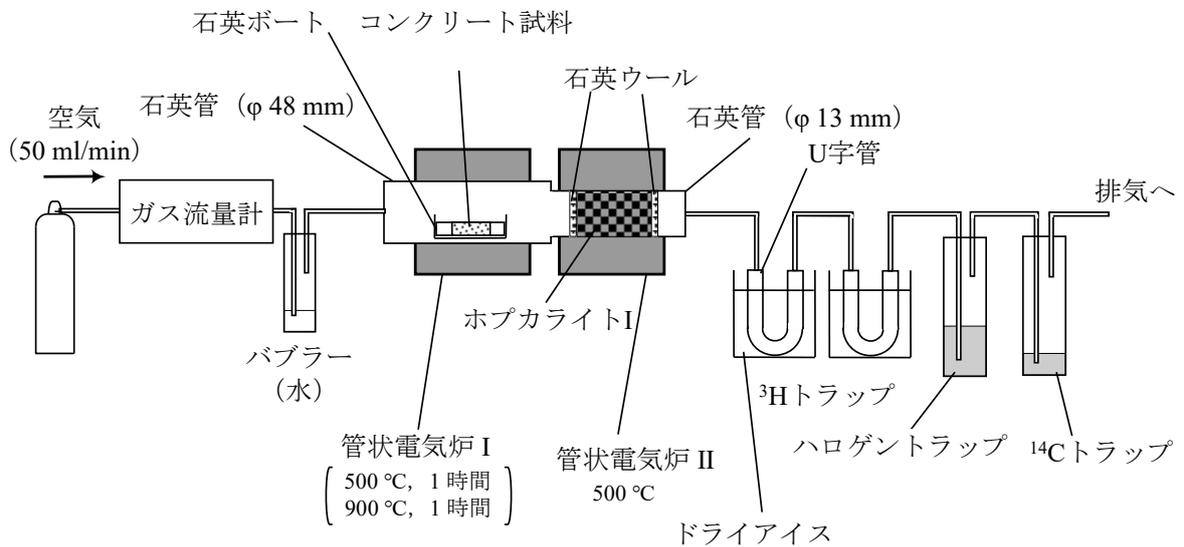


図 4 ³H の分離装置

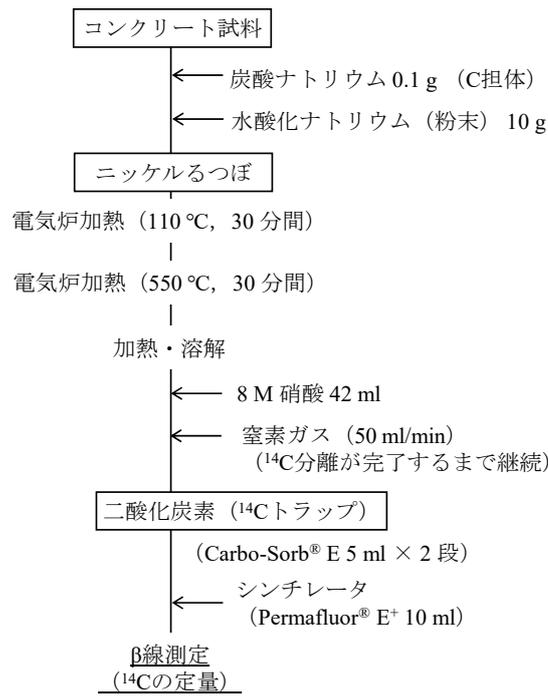


図 5 ^{14}C の分析フロー

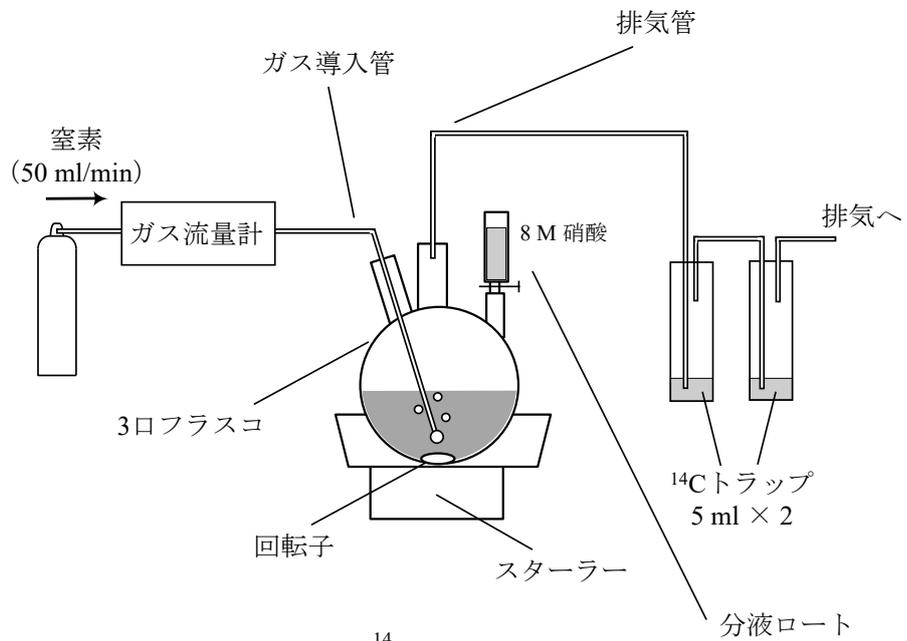


図 6 ^{14}C の分離装置

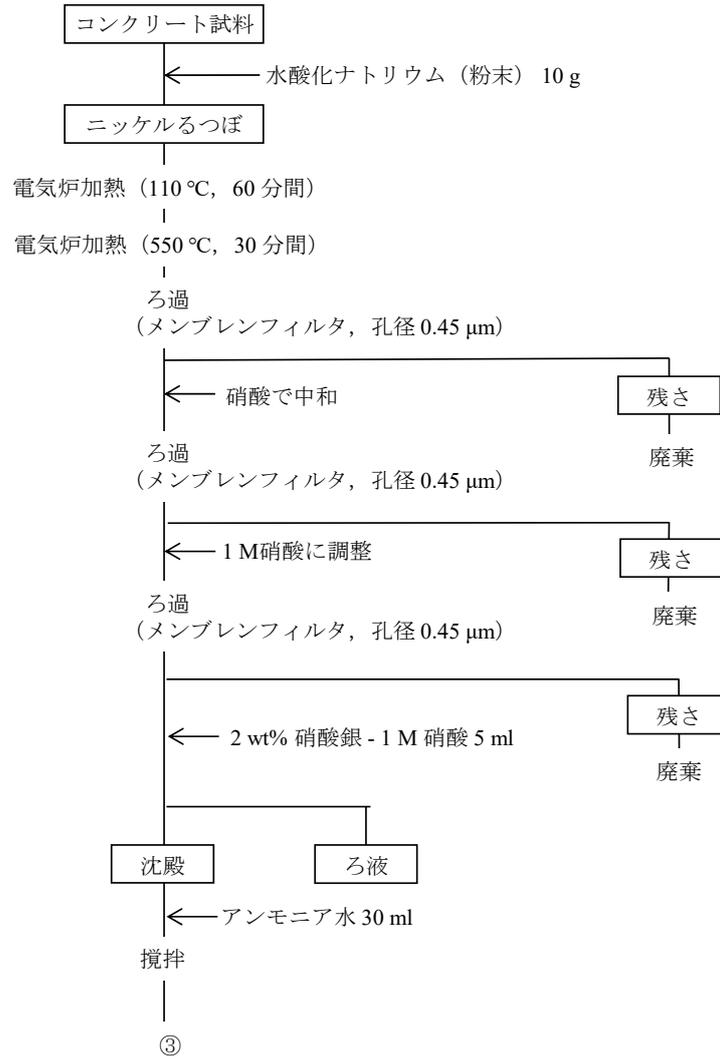


図 7 ^{36}Cl の分析フロー (1/2)

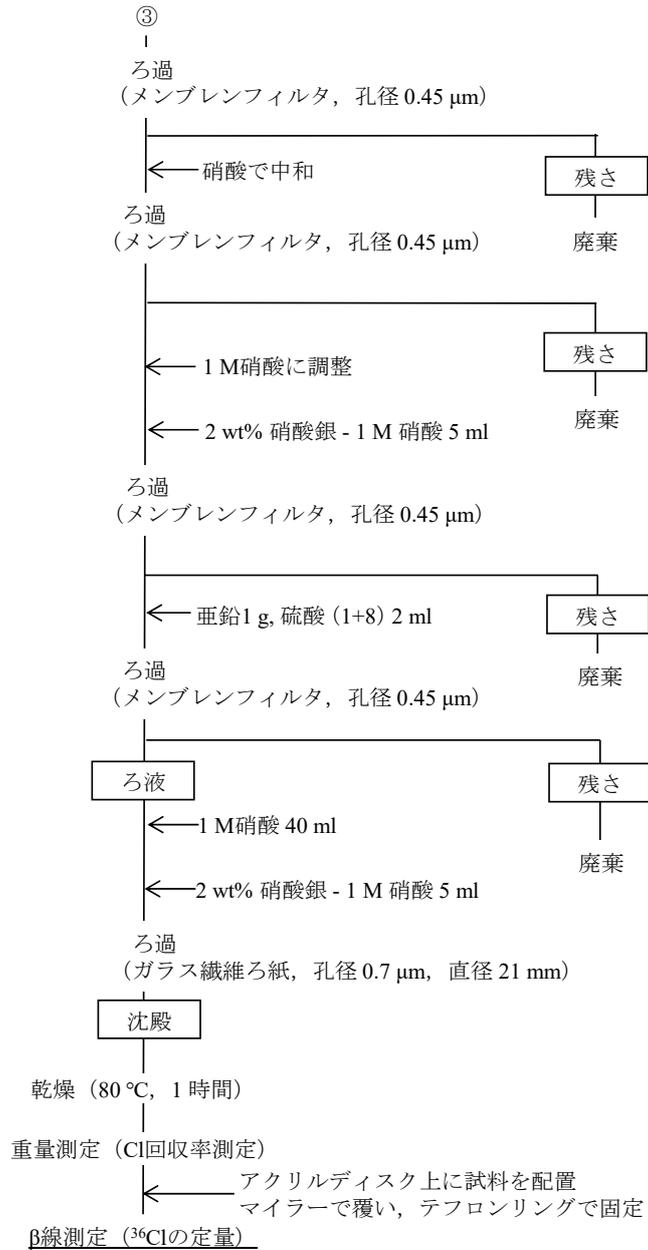


図 7 ^{36}Cl の分析フロー (2/2)

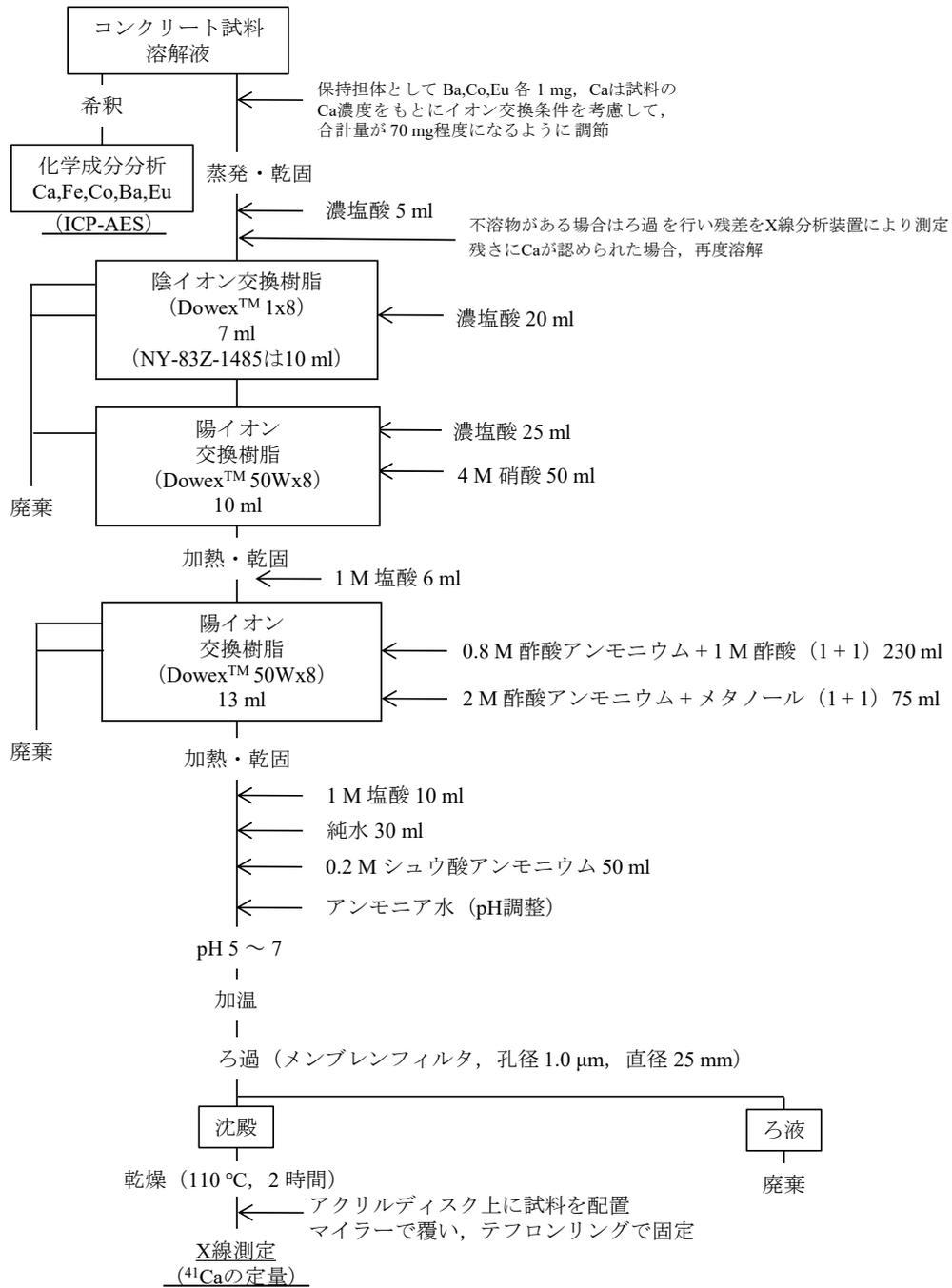


図 8 ⁴¹Ca の分析フロー

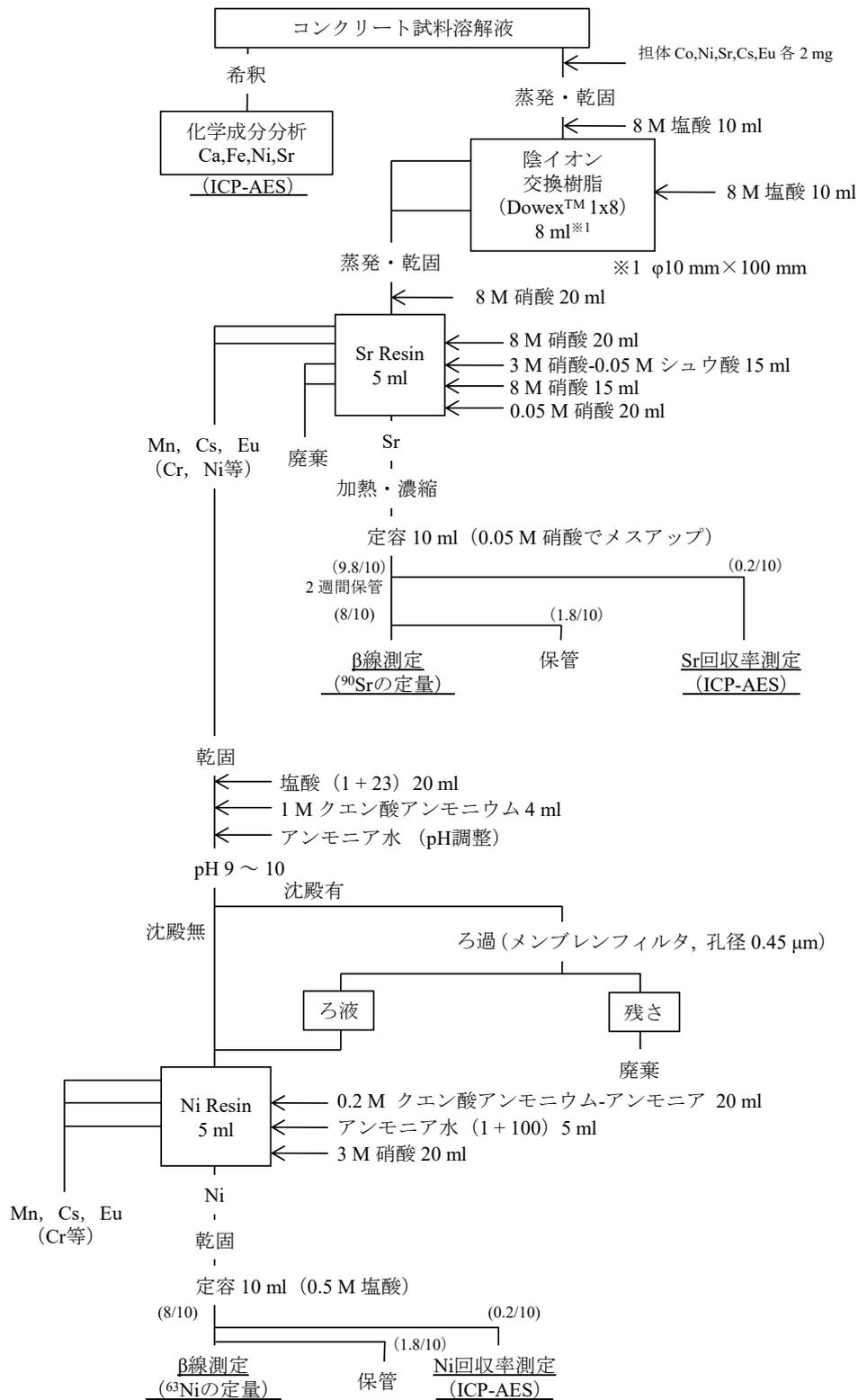


図 9 ⁶³Ni 及び ⁹⁰Sr の分析フロー

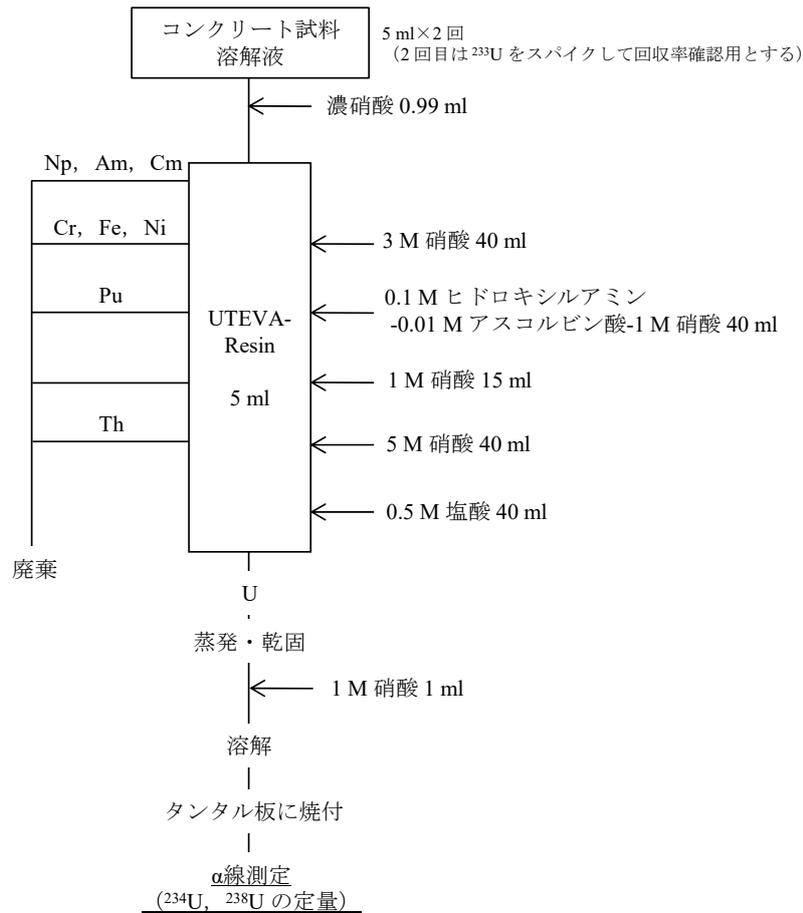


図 10 ^{234}U 及び ^{238}U の分析フロー

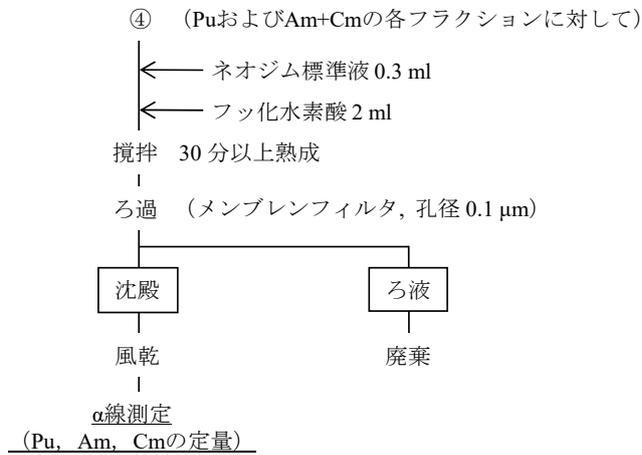
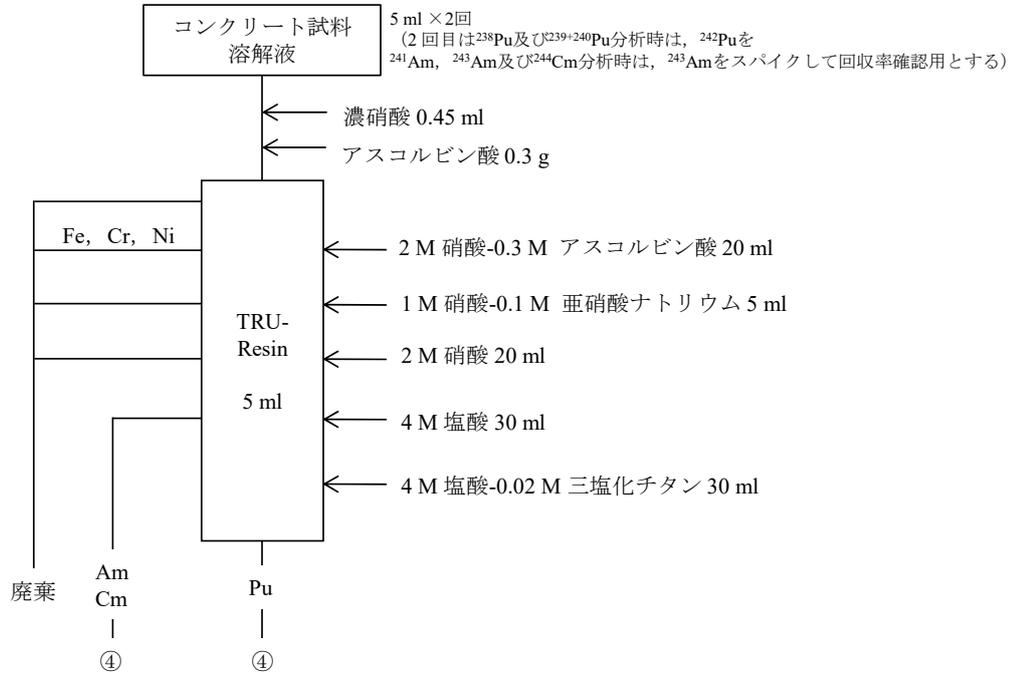


図 11 ²³⁸Pu、²³⁹⁺²⁴⁰Pu、²⁴¹Am、²⁴³Am 及び ²⁴⁴Cm の分析フロー

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 |
| 角速度 | ニュートン毎メートル | N/m | kg s ⁻² |
| 角加速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹ |
| 熱流密度, 放射照度 | ラジアン毎秒毎秒 | rad/s ² | m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻² |
| 熱容量, エントロピー | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg s ⁻³ |
| 比熱容量, 比エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | m ² s ⁻² K ⁻¹ |
| 熱伝導率 | ジュール毎キログラム | J/kg | m ² s ⁻² |
| 体積エネルギー | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | m kg s ⁻³ K ⁻¹ |
| 電界の強さ | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m ⁻¹ kg s ⁻² |
| 電荷密度 | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 電表面積 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ⁻³ 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 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² s A |
| 透磁率 | ファラド毎メートル | F/m | m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| モルエネルギー | ヘンリー毎メートル | H/m | m kg s ⁻² A ⁻² |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル | J/mol | m ² kg s ⁻² mol ⁻¹ |
| 照射線量 (X線及びγ線) | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹ |
| 吸収線量率 | クーロン毎キログラム | C/kg | kg ⁻¹ s A |
| 放射線強度 | グレイ毎秒 | Gy/s | m ² s ⁻³ |
| 放射輝度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³ |
| 酵素活性濃度 | 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 |
| | 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 =10 ⁻²⁸ m ² |
| ノット | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s |
| ネーパ | Np | SI単位との数値的關係は、 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 |
| フオト | 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「△」は対応關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 |

