

1 F 技術会合（第 1 回）

資料 1 - 2

福島第一原子力発電所
特定原子力施設への指定に際し
東京電力株式会社福島第一原子力発電所に
対して求める措置を講ずべき事項について
等への適合性について
(ALPS 処理水の海洋放出に係る運用体制
及び測定・評価対象核種について)
補足説明資料

令和 4 年 11 月

東京電力ホールディングス株式会社

目 次

1 章 特定原子力施設の保安

1.1 特定原子力施設の保安のために措置を講ずべき事項への適合性	1-1
--	-----

1 章 特定原子力施設の保安

1.1 特定原子力施設の保安のために措置を 講ずべき事項への適合性

特定原子力施設への指定に際し東京電力株式会社福島第一原子力発電所に対して求める措置を講ずべき事項について（平成 24 年 11 月 7 日原子力規制委員会決定）

（以下「措置を講ずべき事項」という。）

III. 特定原子力施設の保安のために措置を講ずべき事項

運転管理，保守管理，放射線管理，放射性廃棄物管理，緊急時の措置，敷地内外の環境放射線モニタリング等適切な措置を講ずることにより，「II. 設計，設備について措置を講ずべき事項」の適切かつ確実な実施を確保し，かつ，作業員及び敷地内外の安全を確保すること。

特に，事故や災害時等における緊急時の措置については，緊急事態への対処に加え，関係機関への連絡通報体制や緊急時における医療体制の整備等を行うこと。

また，協力企業を含む社員や作業従事者に対する教育・訓練を的確に行い，その技量や能力の維持向上を図ること。

1.1 措置を講ずべき事項への適合方針

ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設は，運転管理，保守管理，放射線管理，放射性廃棄物管理，緊急時の措置，敷地内外の環境放射線モニタリング等適切な措置を講ずることにより，「II. 設計，設備について措置を講ずべき事項」の適切かつ確実な実施を確保し，かつ，作業員及び敷地内外の安全を確保する。

1.2 対応方針

1.2.1 ALPS 処理水海洋放出の運用体制

ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設に係る保安に関する職務のうち、発電所組織の職務は次のとおり。なお、保全のために行う設計、建設・設置及び保守管理については、施設管理計画に基づき実施する。

- (1) ALPS 処理水プログラム部は、1～4号炉に係る安全確保設備等のうち、多核種除去設備等により、トリチウム以外の放射性物質を告示濃度限度比総和1未満まで浄化処理した水（以下、ALPS 処理水という。）の海洋放出に関連する設備のプロジェクトの計画及び管理、運用方法の検討並びに ALPS 処理水希釈放出設備の運転計画に関する業務並びにこれらに係る機械設備及び土木設備の設計及び建設・設置に関する業務を行う。また、ALPS 処理水の分析の計画に関する業務を行う。
- (2) 電気技術グループは、電気設備の設計に関する業務（配電・電路GMが所管する業務を除く。）を行う。
- (3) 計装技術グループは、計装設備の設計に関する業務を行う。
- (4) 建築建設技術グループは、新設建築設備に係る設計に関する業務を行う。
- (5) 水処理当直は、1～4号炉に係る安全確保設備等のうち、汚染水処理設備等、滞留水を貯留する建屋、多核種除去設備等、サブドレン他水処理施設（地下水ドレン集水設備を除く。）及び ALPS 処理水希釈放出設備の運転管理（運用支援GM、作業管理GM及び水処理計画GMが所管する業務を除く。）に関する業務を行う。
- (6) 運用支援グループは、1～4号炉に係る安全確保設備等、5号炉及び6号炉に係る原子炉施設、その他安全確保設備等のうち、使用済燃料共用プール設備、放射性固体廃棄物等の管理施設及び関連施設（雑固体廃棄物焼却設備及び増設雑固体廃棄物焼却設備を除く。）の運転管理のうち、マニュアル・手順書及び設備管理に関する業務を行う。また、1～4号炉に係る安全確保設備等のうち、原子炉圧力容器・格納容器注水設備（ろ過水タンク、純水タンク及び原水地下タンク）、その他安全確保設備等のうち、放射性固体廃棄物等の管理施設及び関連施設（雑固体廃棄物焼却設備及び増設雑固体廃棄物焼却設備）、大型機器除染設備並びに減容処理設備の運用に関する業務を行う。

- (7) 貯留設備グループは、1～4号炉に係る安全確保設備等のうち、汚染水処理設備等（貯留設備）の土木設備及びALPS処理水希釈放出設備の機械設備の保守管理並びに汚染水処理設備等（貯留設備の付帯設備）及び雨水処理設備等の建設・設置及び保守管理に関する業務を行う。
- (8) 電気設備保守グループは、電気設備の保守管理並びに電源車の運用及び保守管理に関する業務（配電・電路GM及び建築設備保守GMが所管する業務を除く。）を行う。
- (9) 電気設備建設グループは、電気設備の建設・設置に関する業務（配電・電路GMが所管する業務を除く。）を行う。
- (10) 水処理計装設備グループは、1～4号炉に係る安全確保設備等のうち、汚染水処理設備等、滞留水を貯留する建屋、多核種除去設備等、サブドレン他水処理施設、油処理装置、3号機原子炉格納容器内取水設備、ALPS処理水希釈放出設備、5号炉及び6号炉に係る原子炉施設のうち、5・6号炉仮設設備（滞留水貯留設備）、その他安全確保設備等のうち、放射性固体廃棄物等の管理施設及び関連施設、放射性物質分析・研究施設第1棟、大型機器除染設備並びに減容処理設備に係る計装設備の建設・設置及び保守管理に関する業務を行う。
- (11) 土木基盤設備グループは、土木設備の建設・設置及び保守管理に関する業務（土木基盤設備GM以外の各プログラム部長及び各GMが所管する業務を除く。）を行う。
- (12) 建築設備保守グループは、建築設備の保守管理に関する業務（建築設備保守GM以外の各プログラム部長及び各GMが所管する業務を除く。）を行う。また、その他安全確保設備等のうち、大型機器除染設備に係る電気設備の保守管理に関する業務を行う。
- (13) 建築設備建設グループは、建築設備の建設・設置に関する業務（建築設備建設GM以外の各プログラム部長及び各GMが所管する業務を除く。）を行う。
- (14) 放出・環境モニタリンググループは、放射線管理のうち、発電所内外の陸域・海域の環境モニタリング、放射性廃棄物管理のうち、液体廃棄物等の排水管理、1～4号炉等からの気体廃棄物の放出測定管理及び5・6号炉からの放射性気体廃棄物の放出管理に関する業務を行う。

- (15) 分析評価グループは、分析施設の運用、放射能・化学分析機器の管理並びに放射性物質分析・研究施設第1棟の運用及び保守管理、分析・データ評価に関する業務を行う。

1.2.2 ALPS 処理水海洋放出時の測定・評価対象核種の選定

(1) 概要

ALPS 処理水中のトリチウム以外の放射性核種については、多核種除去設備等処理水の主要 7 核種*に炭素 14 及びテクネチウム 99 を加えた放射能濃度の分析結果の合計値と全 β 測定値において、現行の 64 核種以外の放射性核種の存在を疑わせるようなかい離は認められていないことや、ALPS 処理水を海洋放出する時点においては、十分に減衰して存在量が十分少なくなっている ALPS 除去対象核種も考えられること等から、告示濃度限度の比の和が 1 未満を満足すると考えている。

このうえで、告示濃度限度比総和 1 未満を満足することを確実なものとするため、国内における廃止措置や埋設施設に関する知見を踏まえ、汚染水中に有意に存在するか徹底的に検証を実施したうえで、測定・評価の対象とする放射性核種（以下「測定・評価対象核種」という。）を選定する。

※：ALPS は 62 核種を除去対象として、これら核種の告示濃度限度との比の総和が 1 を下回る処理性能を有しているが、62 核種全ての分析には長時間を要するため、廃炉作業を遅延させずに ALPS の性能確認やタンク群に含まれる核種濃度を把握するために代表的な核種を選定し、それらの測定値をもって評価する必要があった。この時、処理水の 62 核種分析を実施し、告示濃度限度に対して有意に検出された 7 核種（Cs-134,Cs-137,Sr-90,I-129,Co-60,Sb-125,Ru-106）を“主要 7 核種”と呼んでいる。

(2) 測定・評価対象核種の選定方針

福島第一原子力発電所の汚染水に有意に含まれる可能性のある核種の検証を行うにあたり、廃止措置や埋設施設に関する知見を踏まえて、核種分析を実施するとともに、1～3 号機の燃料及び構造材を考慮したインベントリ評価を実施する。

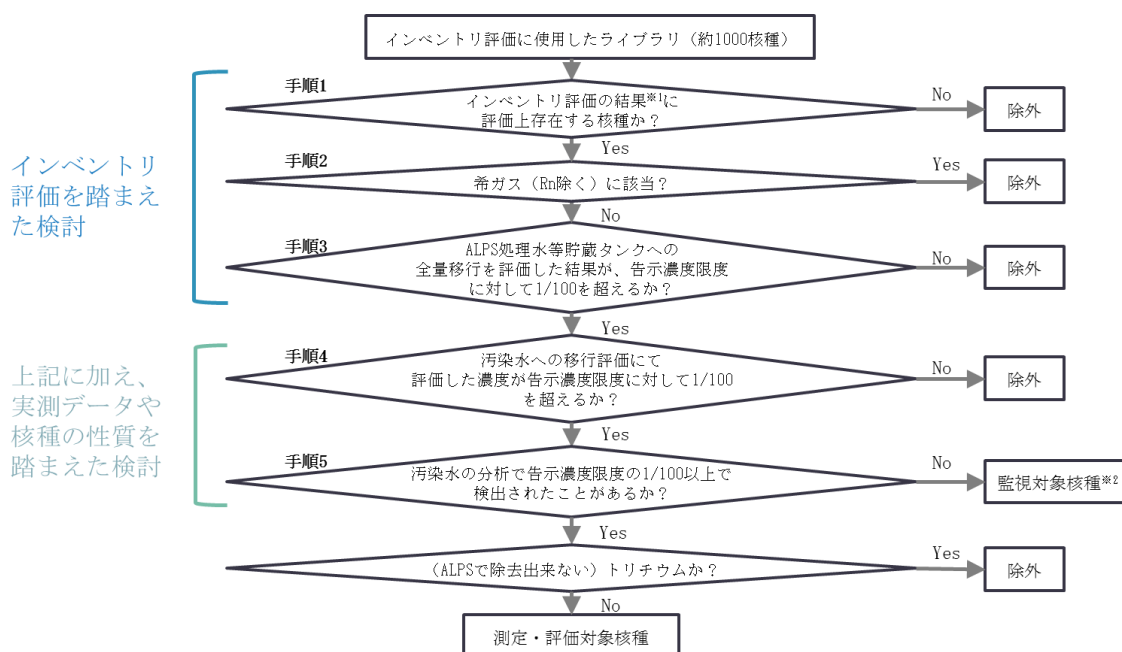
核種分析
廃止措置や埋設施設に関する研究において評価対象としている核種が、汚染水でも有意に存在するか否か、実際に分析して確認する。また、過去の核種分析結果についても確認する。
インベントリ評価
ALPS 除去対象核種検討時と同様に核分裂生成物のインベントリ評価を実施すると共に、廃止措置や埋設施設に関する研究を参考に、原子炉圧力容器内の構造物等の放射化により生成するインベントリ量を評価する。なお、評価に当たっては、震災後から経過する期間を適切に設定したうえで、減衰によるインベントリ量の減少を考慮する。 上記評価結果から、水への移行しやすさ等を考慮したうえで、汚染水中に有意に含まれる可能性のある核種の存在を確認する。

核種分析及びインベントリ評価の結果から、線量評価への影響を踏まえて、測定・評価対象核種を選定する。

(3) ALPS 処理水の測定・評価対象核種の選定

a. ALPS 処理水の測定・評価対象核種の選定の考え方

(2)項の核種分析及びインベントリ評価の結果から、図 1.1-1 に示すフローに従い、測定・評価対象核種を選定する。



※1：インベントリ評価の減衰期間は、選定結果を使用する時期に応じて適切に設定
(初回は 2023 年 (事故後 12 年) に設定)

※2：汚染水中に有意に存在しないか継続して確認する核種

図 1.1-1 ALPS 処理水海洋放出時の測定・評価対象核種選定フロー

b. 放出基準の確認

ALPS 処理水の海洋放出にあたって、図 1.1-1 のフローに基づき選定した測定・評価対象核種にて放出基準 (トリチウムを除く放射性核種の告示濃度限度比の和が 1 未満) を満足しているか確認する。

c. 測定・評価対象核種の定期的な確認

図 1.1-1 のフローに基づき選定した測定・評価対象核種は、過去の分析結果を確認したうえで選定しているが、今後の廃炉作業の進捗によって、その状況に変化が生じる可能性が考えられる。このため、選定した測定・評価対象核種以外の核種（以下「その他核種」という。）が有意に存在しないことを、以下の方法により確認する。この確認の中で、その他核種が有意に存在することが確認された場合は、測定・評価対象核種の再評価を行う。なお、放射性核種の減衰についても、選定フローの中で反映する。

(a) 放出の都度の確認

ALPS 処理水の放出基準を確認する際、全 α 、全 β 、Ge 半導体検出器による測定で、その他核種が有意に存在しないことを確認する。

(b) 汚染水中のトレンド確認

集中 R_w 以降で定期的に確認している汚染水の放射性核種の濃度が、過去に確認された濃度以下であることを確認し、放射性核種の汚染水への移行状況に変化が生じていないことを確認する。

(c) 調査分析

調査分析では、(a)、(b)項で懸念が有る事象が発生した場合に、その他核種を特定するための調査を行う。懸念が無い場合であっても、ALPS 処理前の汚染水において、監視対象核種が有意な濃度で存在しないことの確認を1年に1回の頻度で行い、その他核種の存在を調査する。

ALPS 処理水海洋放出の運用体制変更に関する補足説明

1. 概要

ALPS 処理水プログラム部の設置に関する実施計画の変更申請の際に、ALPS 処理水放出の運転・保守等の運用体制については、放出開始前までに改めて申請する計画としていたが、今回、同体制が具体化したことから、変更内容について説明する。前回と今回の実施計画での申請範囲は図 1.1.1-1 の通り。

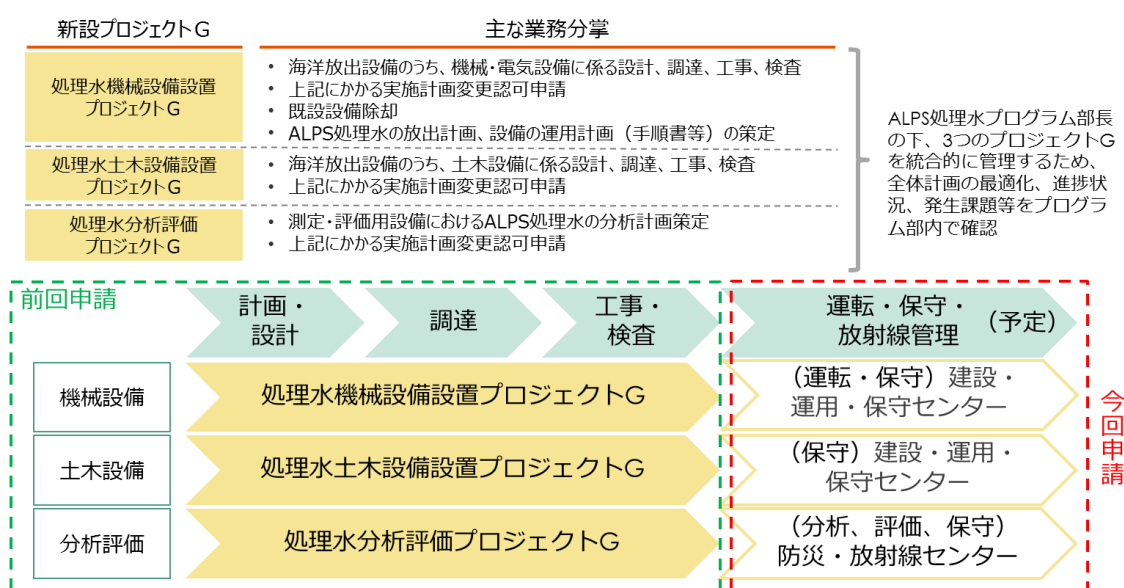


図 1.1.1-1 ALPS 処理水海洋放出に関する業務所掌

2. ALPS 処理水海洋放出に関する業務所掌

2.1 設備の設計，建設・設置，保守管理体制

ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設の設計，建設・設置は，ALPS 処理水プログラム部がプロジェクトの管理（工程管理，予算管理，リスク管理）を行いつつ，各々の業務のうち，機械設備と土木設備はALPS 処理水プログラム部で実施し，その他の電気設備，計装設備及び建築設備は計画・設計センター及び設計・運用・保守センターに委託する形で取り組んでいた。

運用開始後の，設備の保守管理については，表 1.1.1-1 の通り，設計・運用・保守センターにて対応する。

表 1.1.1-1 ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設の
設計，建設・設置，保守管理の業務所掌

設備	前回申請		今回申請
	設計	建設・設置	保守管理
機械設備	ALPS 処理水プログラム部		貯留設備 G
土木設備 (放水設備含む)	ALPS 処理水プログラム部		土木基盤設備 G
電気設備	電気技術 G	電気設備建設 G	電気設備保守 G
計装設備	計装技術 G	水処理計装設備 G	水処理計装設備 G
建築設備	建築設備技術 G	建築設備建設 G	建築設備保守 G

※: 今回の実施計画変更申請にての記載を変更した箇所を朱書きで記載

2.2 設備の運転管理体制

ALPS 処理水希釈放出設備の運転管理については，現在，ALPS 処理水プログラム部で運用方法の検討を行っているが，運用開始後は表 1.1.1-2 の通り，運転管理は設計・運用・保守センターにて対応し，運転計画については ALPS 処理水プログラム部にて対応する。

表 1.1.1-2 ALPS 処理水希釈放出設備の運転管理の業務所掌

業務	前回申請	今回申請
	設計段階	運用開始後
運用方法の検討	ALPS 処理水プログラム部	
運転管理	—	水処理当直
運転管理のうち， マニュアル・手順 書に関する業務	—	運用支援 G
運転計画	—	ALPS 処理水プログラム部

※: 今回の実施計画変更申請にての記載を変更した箇所を朱書きで記載

2.3 ALPS 処理水の海洋放出に係る分析に関する業務

ALPS 処理水の海洋放出に係る分析に関する業務については、現在、ALPS 処理水プログラム部で分析の計画を行っており、運用開始後の分析・データ評価、液体廃棄物等の排水管理は、他の分析に関する業務と同様に、表 1.1.1-3 の通り、防災・放射線センターにて対応する。

表 1.1.1-3 ALPS 処理水の分析に関する業務所掌

業務	前回申請	今回申請
	計画段階	運用開始後
分析の計画	ALPS 処理水プログラム部	
分析・データ評価	—	分析評価 G
液体廃棄物等の排水管理	—	放出・環境モニタリング G

以上

ALPS 処理水海洋放出時の測定・評価対象核種の検討のうち
核種分析に係る補足説明

1. 概要

ALPS 処理水中のトリチウム以外の放射性核種の告示濃度限度比総和 1 未満を満足することを確実なものとするため、国内における廃止措置や埋設施設に関する知見を踏まえ、汚染水中に有意に存在するか徹底的に検証を実施した上で、測定・評価の対象とする放射性核種を選定する方針としている。

検討の進め方は、第 9 回 ALPS 処理水審査会合で説明したフロー（図 1.1.2-1 参照）の通り、核種分析及びインベントリ評価にて行う計画としており、本資料では核種分析について補足説明を行う。

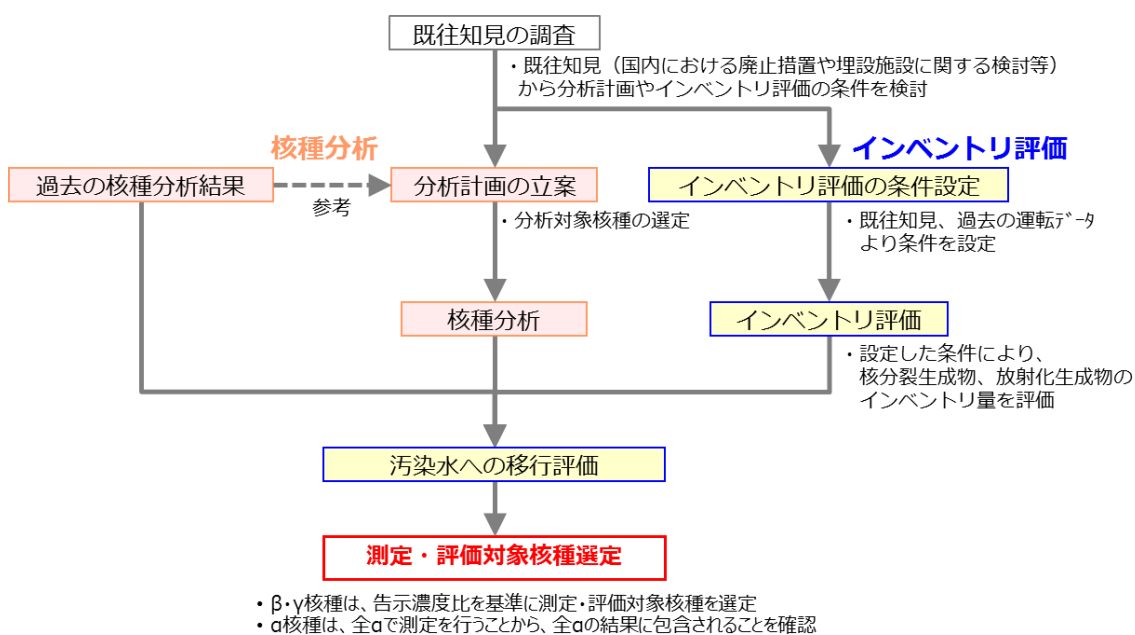


図 1.1.2-1 測定・評価対象核種選定の検討の全体の進め方

【第 9 回 ALPS 処理水審査会合資料より（一部表現修正）】

2. 核種分析

2.1 過去の分析実績の調査

【ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設に係る実施計画の補足説明資料（2022 年7 月）より】

これまでに JAEA 殿及び当社で、表 1.1.2-1 に示す通り、ALPS 除去対象核種（62 核種）、トリチウム、C-14 以外に 20 核種を分析している。

測定・評価対象核種選定の検討に当たり、核種分析計画を策定しているが、当該計画策定に当たっては、過去の分析結果を考慮すると共に、既往知見を参考に、核種分析を実施する核種（以下「分析対象核種」という。）を選定した。

表 1.1.2-1 過去に分析実績がある核種一覧

核分裂生成物（56 核種）						
Rb-86	Sr-89	Sr-90	Y-90	Y-91	Nb-95	Tc-99
Ru-103	Ru-106	Rh-103m	Rh-106	Ag-110m	Cd-113m	Cd-115m
Sn-119m	Sn-123	Sn-126	Sb-124	Sb-125	Te-123m	Te-125m
Te-127	Te-127m	Te-129	Te-129m	I-129	Cs-134	Cs-135
Cs-136	Cs-137	Ba-137m	Ba-140	Ce-141	Ce-144	Pr-144
Pr-144m	Pm-146	Pm-147	Pm-148	Pm-148m	Sm-151	Eu-152
Eu-154	Eu-155	Gd-153	Tb-160	Pu-238	Pu-239	Pu-240
Pu-241	Am-241	Am-242m	Am-243	Cm-242	Cm-243	Cm-244
腐食生成物（6 核種）						
Mn-54	Fe-59	Co-58	Co-60	Ni-63	Zn-65	
上記以外の核種（2 核種）						
H-3	C-14					
64 核種以外の核種（20 核種）						
Cl-36	Ca-41	Ni-59	Se-79	Nb-94	Mo-99	Tc-99m
Te-132	I-131	I-132	La-140	U-233	U-234	U-235
U-236	U-238	Np-237	Pu-242	Cm-245	Cm-246	

2.2 分析計画策定において参考にした既往知見

【ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設に係る実施計画の補足説明資料（2022 年 7 月）より】

核種分析の計画を策定するため、下記の既往知見において着目している核種より、以下基準により分析対象核種を抽出した。

- ・過去に分析が未実施な核種もしくは、分析実績が十分でない核種
- ・ALPS 除去対象核種選定時に検討されていない核種
- ・ β ・ γ 核種等は、既往知見における放射化生成物の炉水の濃度中に、滞留水に含まれる Co-60 の濃度と比較して、1/100 以上存在する核種
- ・ α 核種は、崩壊系列で濃度が評価できる核種を除いた核種

なお、上記条件が当てはまっても、半減期が 1 年未満で、放出までの 12 年で減衰により約 1/1000 以下に減衰する核種は除外している他、逆に上記条件に当てはまらなくても、社外分析機関で分析可能な場合は計画に含めている場合がある。

【既往知見】

- ① 電力共同研究『BWR 型原子炉の廃止措置に関する研究（その 2）』（平成 8 年度）
- ② 東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所 第二種廃棄物埋設事業許可申請『主要な放射性核種の選定について』（平成 30 年 2 月 日本原子力発電株式会社）
- ③ JAEA が 1F 放射性廃棄物性状把握のため、分析対象核種を検討した際の研究資料
 - ・『低レベル放射性廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について』においてトレンチ処分、ピット処分、余裕深度処分を対象に原子炉廃棄物とサイクル廃棄物のいずれかに含まれる核種のうち相対重要度 D/C が最大となる核種に対して上位 3 桁までの核種
 - ・『TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ』において重要核種に選定されているもの
 - ・『わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－総論レポート』において重要核種に選定されているもの
 - ・『日本原燃六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センター（浅地中ピット処分）及び JPDR（浅地中トレンチ処分）の埋設事業許可申請書』

2.3 既往知見から抽出した分析対象核種（ β ・ γ 核種等）

【ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設に係る実施計画の
補足説明資料（2022年7月）より（測定方法を修正）】

2.2 項の既往知見より、 β ・ γ 核種等の分析対象核種を表 1.1.2-2 の通り抽出した。

なお、ここで抽出された核種は、現時点で当社での測定が困難な核種であるため、外部機関を利用した測定を計画した。

また、表 1.1.2-2 に抽出した核種については、福島第一原子力発電所において代表的な核種である Cs-137 (Ba-137m) :0.662MeV (γ 線), Sr-90 (Y-90) :2.28MeV (β 線) と比べると、主にエネルギーが小さい核種が抽出されていることがわかる。

表 1.1.2-2 既往知見から抽出した分析対象核種（ β ・ γ 核種等）

候補核種	既往知見 ^{※1}	壊変形式	エネルギー [MeV]	告示濃度 限度 [Bq/cm ³]	測定方法	備考
Cl-36	①②③	β -	0.709550	9.0E-01	前処理（分離、沈殿）後、低バックグラウンド β 線スペクトロメータ	外部機関にて分析実績有
Se-79	①③	β -	0.150630	2.0E-01	前処理（分離、沈殿、再溶解）後、液体シンチレーションカウンタ	外部機関にて分析実績有
Zr-93	①②③	β -	0.090800	1.0E+00	前処理（分離）後、誘導結合プラズマ質量分析装置（ICP-MS）	—
Pd-107	③	β -	0.034000	2.0E+01	—	—
Ca-41	①②③	EC	0.003310	4.0E+00	前処理（分離、沈殿、再溶解）後、Si (Li) 検出器	外部機関にて分析実績有
Fe-55	①②	EC	0.005900	2.0E+00	前処理（分離）後、低エネルギー光子測定装置（LEPS）	—
Ni-59	①②③	EC	0.006930	1.0E+01		—
Nb-93m	②	IT	0.016615	7.0E+00		—
Mo-93	①②③	EC	0.016615	3.0E-01		—
Sn-121m	③ ^{※2}	β - IT	0.359800 0.026359	2.0E+00		—
Ba-133	①②	EC	0.356013	5.0E-01	ゲルマニウム半導体検出器 (Ge)	—

※1：2.2 項「既往知見」の番号参照

※2：研究資料より、被覆管等のジルカロイから Sn の同位体の中で最も生成されるため抽出

2.4 既往知見から抽出した分析対象核種（ α 核種）

【ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設に係る実施計画の
補足説明資料（2022年7月）より（備考を修正）】

2.2の既往知見より、 α 核種の分析対象核種を表1.1.2-3の通り抽出した。

なお、ここで抽出された核種は、現時点で当社での測定が困難な核種であるため、外部機関を利用した測定を計画した。

下記核種を分析することで、建屋滞留水中に有意に含まれる可能性のある α 核種を確認した。

表 1.1.2-3 既往知見から抽出した分析対象核種（ α 核種）

候補核種	既往知見 ^{※1}	壊変形式	エネルギー [MeV]	告示濃度限度 [Bq/cm ³]	半減期 [y]	測定方法	備考
U-233	③	α	4.824200	2.0E-02	1.6E+05	前処理（分離）後、誘導結合プラズマ質量分析装置（ICP-MS）	外部機関にて分析実績有
U-234	①③	α	4.774600	2.0E-02	2.5E+05		外部機関にて分析実績有
U-235	①③	α	4.395400	2.0E-02	7.0E+08		外部機関にて分析実績有
U-236	①③	α	4.494000	2.0E-02	2.3E+07		外部機関にて分析実績有
U-238	①③	α	4.198000	2.0E-02	4.5E+09		外部機関にて分析実績有
Np-237	①③	α	4.788000	9.0E-03	2.1E+06		外部機関にて分析実績有
Pu-238	①②③	α	5.499030	4.0E-03	8.8E+01	前処理（分離）後、 α スペクトロメータ	Pu-238～Pu-241はALPS除去対象核種。Pu-241は同位体により濃度を推定。
Pu-239	①②③	α	5.156590	4.0E-03	2.4E+04		
Pu-240	①②③	α	5.168170	4.0E-03	6.6E+03		
Pu-241	①②③	β^-	0.020780	2.0E-01	1.4E+01	—	
Pu-242	①③	α	4.902300	4.0E-03	3.8E+05	前処理（分離）後、 α スペクトロメータ	外部機関にて分析実績有
Am-241	①②③	α	5.485560	5.0E-03	4.3E+02	—	Am-241～Am-243はALPS除去対象核種。Am-242mは同位体により濃度を推定。
Am-242m	①③	IT	0.018856	5.0E-03	1.4E+02		
Am-243	①③	α	5.275300	5.0E-03	7.4E+03	前処理（分離）後、 α スペクトロメータ	Cm-242～Cm-234はALPS除去対象核種。Cm-243とCm-244、Cm-245とCm-246はエネルギーが近いため合算値で測定。Cm-245、Cm-246は外部機関にて分析実績有。
Cm-242	③	α	6.112720	6.0E-02	4.5E-01		
Cm-243	③	α	5.785200	6.0E-03	2.9E+01		
Cm-244	①③	α	5.804770	7.0E-03	1.8E+01		
Cm-245	③	α	5.361100	5.0E-03	8.4E+03		
Cm-246	③	α	5.386500	5.0E-03	4.7E+03		

※1：2.2項「既往知見」の番号参照

2.5 分析対象核種の分析結果

2.3～2.4 項で抽出した分析対象核種について、建屋滞留水、ストロンチウム処理水及び ALPS 処理水に有意に存在するか確認を行った。

その結果、一部の核種は建屋滞留水や ALPS 処理前で検出されたものの、ALPS 処理水については、既往知見で着目されている核種（ α 核種を含む）が不検出である※ことを確認した。

※：告示濃度限度の 1/100 以下で検出限界値未満、ウランは環境中に含まれる天然ウランを検出

(1) ALPS 処理水等の分析結果（ $\beta \cdot \gamma$ 核種等）

ALPS 処理水等の $\beta \cdot \gamma$ 核種等に関する分析結果は表 1.1.2-4 の通り。

建屋滞留水と ALPS 処理前のストロンチウム処理水では、目視により懸濁物、浮遊物の存在が確認されたため、 $0.45 \mu\text{m}$ のフィルタでろ過を実施した後、ろ液及び残渣（沈殿している可能性が高い元素について実施）を分けて分析を実施した。なお、一部の ALPS 処理水においても、ろ過を実施しているものの、ろ過後のフィルタの γ 線を測定した結果、ALPS 処理前までのフィルタで検出されていた Cs-134, Cs-137, Co-60 が検出されていないことから、ALPS 処理の過程で不溶性の放射性核種のほとんどが除去されており、ろ過による影響がないことを確認している。

$\beta \cdot \gamma$ 核種等を分析の結果、ほとんどの核種で検出限界値未満であることを確認したものの、建屋滞留水では Fe-55 と Ni-59, ALPS 処理前では Ni-59 について、それぞれ告示濃度限度の約 1/100, 1/1000, 1/5000 で検出されている。また、Se-79 と Pd-107 を分析した結果、建屋滞留水と ALPS 処理前のストロンチウム処理水では、Se-79 が告示濃度の約 1/20, Pd-107 は告示濃度の約 1/80000 以下で検出されているが、ALPS 処理後においては、いずれの分析結果も告示濃度限度の 1/100 以下で検出限界値未満であった。

表 1.1.2-4 分析対象核種の核種分析結果（β・γ核種等）(1/3)

核種	告示濃度限度[Bq/L]	試料の種類	採取箇所	採取日	採取方法※1	基準日	分析値[Bq/L]	測定機器
Fe-55	2.00E+03	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/3/7	< 2.7E+00	低エネルギー 光子測定装置
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/4/14	< 2.3E+00	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/17	< 3.0E+00	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/6/23	< 1.5E+01	
		残渣			2022/9/5	< 4.3E+00		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/22	< 4.1E+00	
		残渣			2022/9/15	1.7E+01		
Ni-59	1.00E+04	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/3/9	< 2.3E+00	
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/4/19	< 6.6E+00	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/23	< 2.3E+00	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/6/27	2.2E+00	
		残渣			2022/9/8	< 1.0E+00		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/26	9.4E+00	
		残渣			2022/9/26	3.5E+00		
Nb-93m	7.00E+03	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/3/8	< 8.6E+00	
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/5/10	< 1.5E+01	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/18	< 7.8E+00	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/6/13	< 5.6E+01	
		残渣			2022/9/26	< 5.2E+00		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/21	< 5.2E+01	
		残渣			2022/9/6	< 4.4E+00		

※1：図 1.1.2-2 にて詳細を示す

表 1.1.2-4 分析対象核種の核種分析結果（ β ・ γ 核種等）(2/3)

核種	告示濃度限度[Bq/L]	試料の種類※1	採取箇所	採取日	採取方法※1	基準日	分析値[Bq/L]	測定機器
Mo-93	3.00E+02	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/3/10	< 1.1E+00	低エネルギー 光子測定装置
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/4/18	< 2.0E+00	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/19	< 1.0E+00	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/6/14	< 1.7E+00	
		残渣				2022/9/21	< 6.4E-01	
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/25	< 1.2E+00	
		残渣			2022/9/7	< 1.4E+00		
Sn-121m	2.00E+03	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/3/4	< 1.7E+00	低エネルギー 光子測定装置
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/4/8	< 5.3E+00	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/20	< 2.0E+00	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/6/16	< 1.2E+01	
		残渣				2022/9/2	< 2.8E+00	
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/28	< 9.2E+00	
		残渣			2022/9/22	< 1.2E+00		
Cl-36	9.00E+02	ろ液	K4-A10 タンク	2022/1/26	(1)	2022/5/13	< 4.2E+00	低バックグラウンド β 線スペクトロメータ
		ろ液	H4-B7 タンク	2022/1/26		2022/5/30	< 5.5E+00	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2022/2/10		2022/5/13	< 3.9E+00	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2022/2/10		2022/5/17	< 3.7E+00	
		ろ液	プロセス主建屋	2022/2/4	(2)-a	2022/5/23	< 4.3E+00	

※1：図 1.1.2-2 にて詳細を示す

表 1.1.2-4 分析対象核種の核種分析結果（ β ・ γ 核種等）(3/3)

核種	告示濃度限度[Bq/L]	試料の種類	採取箇所	採取日	採取方法 ^{※1}	基準日	分析値[Bq/L]	測定機器
Ca-41	4.00E+03	ろ液	K4-A10 タンク	2022/1/26	(1)	2022/6/3	< 7.9E+00	Si(Li)半導体検出器
		ろ液	H4-B7 タンク	2022/1/26		2022/6/6	< 7.9E+00	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2022/2/10		2022/6/1	< 7.4E+00	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2022/2/10		2022/6/14	< 1.9E+01	
		ろ液	プロセス主建屋	2022/2/4	(2)-a	2022/6/13	< 1.4E+01	
Zr-93	1.00E+03	ろ液	K4-A10 タンク	2022/1/26	(1)	2022/5/24	< 8.4E-01	誘導結合プラズマ質量 分析装置
		ろ液	H4-B7 タンク	2022/1/26		2022/5/24	< 8.4E-01	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2022/2/10		2022/5/24	< 8.4E-01	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2022/2/10		2022/5/24	< 8.4E-01	
		残渣			2022/6/7	< 1.3E+00		
		ろ液	プロセス主建屋	2022/2/4	(2)-a	2022/5/24	< 8.4E-01	
		残渣		2022/6/7		< 1.3E+00		
Ba-133	5.00E+02	ろ液	K4-A10 タンク	2022/1/26	(1)	2022/4/23	< 7.3E-01	Ge 半導体検出器
		ろ液	H4-B7 タンク	2022/1/26		2022/4/22	< 7.0E-01	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2022/2/10		2022/4/24	< 7.0E-01	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2022/2/10		2022/4/21	< 4.3E+00	
		ろ液	プロセス主建屋	2022/2/4	(2)-a	2022/6/2	< 2.6E+00	
Se-79	2.00E+02	ろ液	増設 ALPS 処理後	2022/4/22	(1)	※2	< 1.5E+00	液体シンチレーション カウンタ
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2022/4/22		※3	9.0E+00	
		ろ液	プロセス主建屋	2022/4/21	(2)-b	※4	9.7E+00 ^{※5}	
Pd-107	2.00E+04	ろ液	増設 ALPS 処理後	2022/4/22	(1)	2022/10/6	< 7.1E-02	誘導結合プラズマ質量 分析装置
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2022/4/22		2022/10/6	2.4E-01	
		ろ液	プロセス主建屋	2022/4/21	(2)-b	2022/10/6	7.8E-02 ^{※5}	

※1：図 1.1.2-2 にて詳細を示す ※2：2022/9/27,2022/9/27,2022/10/14 ※3：2022/10/2,2022/10/14 ※4：2022/9/21,2022/10/8
 ※5：同一試料で3度分析しており，2度が検出下限値未満であり，検出された1回の値の記載
 (ALPS 処理前，ALPS 処理後においては，3回とも検出/検出下限値未満であり，平均値を記載)

(2) ALPS 処理水等の分析結果 (α 核種)

ALPS 処理水等の α 核種に関する分析結果は表 1.1.1-5 の通り。

建屋滞留水等に有意に含まれる α 核種を確認するため、告示濃度限度の 1/100 以下まで測定を試み、ALPS 処理水ではほとんどの核種が告示濃度比の 1/100 以下で検出下限値未満であったが、U-235 と U-238 については極微量に検出されている。ただ、これは処理の過程で質量比^{※1}が 1.8% (使用済み燃料相当の比率) → 1.2% → 0.7% (天然組成比) と変化していること等^{※2}から、ALPS 処理水に含まれる天然ウランと判断している。

なお、本分析においても、建屋滞留水と ALPS 処理前のストロンチウム処理水では、目視により懸濁物、浮遊物の存在が確認されたため、0.45 μm のフィルタでろ過を実施した後、ろ液及び残渣 (沈殿している可能性が高い元素について実施) を分けて分析を実施している。また、β・γ 核種等と同様に、一部の ALPS 処理水においてもろ過を実施しているものの、ろ過後のフィルタの γ 線を測定した結果、ALPS 処理前までのフィルタでは検出されていた Cs-134, Cs-137, Co-60 が検出されていないことから、ALPS 処理の過程で不溶解性の放射性核種のほとんどが除去されており、ろ過による影響がないことを確認している。

※1 : $X = \lambda w / A \times N_A$ より算出 (X:放射エネルギー, λ :崩壊定数, w:質量, A:原子数, N_A :アボガドロ定数)

※2 : 日本 (沖縄除く) の河川の U 濃度 0.47~488ng/L [本邦河川水中の自然レベルウラン濃度 (望月ら)]
(約 6E-06~6E-03Bq/L : U-238 換算) の範囲内であることや、燃料由来の U-236 が検出されていないこと

表 1.1.2-5 分析対象核種の核種分析結果 (α 核種) (1/5)

核種	告示濃度限度[Bq/L]	試料の種類	採取箇所	採取日	採取方法 ^{※1}	基準日	分析値[Bq/L]	測定機器
U-233	2.00E+01	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/7/14	< 1.4E-02	誘導結合プラズマ 質量分析計
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/7/14	< 1.3E-02	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/7/14	< 1.3E-02	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/7/14	< 1.3E-02	
		残渣			2022/9/27	< 2.4E-03		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/14	< 1.3E-02	
		残渣				2022/9/27	< 1.4E-03	
U-234	2.00E+01	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/7/14	< 8.7E-03	
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/7/14	< 8.7E-03	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/7/14	< 8.7E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/7/14	< 8.7E-03	
		残渣			2022/9/27	< 1.6E-03		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/14	1.3E-01	
		残渣				2022/9/26	2.8E-02	
U-235	2.00E+01	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/7/14	5.0E-05	
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/7/14	9.9E-06	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/7/14	8.8E-06	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/7/14	2.0E-05	
		残渣			2022/9/27	3.9E-06		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/14	3.7E-03	
		残渣				2022/9/26	6.0E-04	

※1：図 1.1.2-2 にて詳細を示す

表 1.1.2-5 分析対象核種の核種分析結果 (α 核種) (2/5)

核種	告示濃度限度[Bq/L]	試料の種類	採取箇所	採取日	採取方法 ^{※1}	基準日	分析値[Bq/L]	測定機器
U-236	2.00E+01	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/7/14	< 9.1E-05	誘導結合プラズマ 質量分析計
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/7/14	< 9.1E-05	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/7/14	< 9.0E-05	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/7/14	1.2E-04	
		残渣			2022/9/27	< 1.6E-05		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/14	2.2E-02	
		残渣				2022/9/26	3.8E-03	
U-238	2.00E+01	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/7/14	1.2E-03	
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/7/14	2.3E-04	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/7/14	2.1E-04	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/7/14	2.3E-04	
		残渣			2022/9/26	7.5E-05		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/14	3.1E-02	
		残渣				2022/9/26	5.5E-03	
Np-237	9.00E+00	—	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/7/15	< 1.5E-03	
		—	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/7/15	< 1.5E-03	
		—	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/7/15	< 1.5E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/7/15	1.2E-02	
		残渣			2022/9/26	8.0E-04		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/7/15	2.1E-01	
		残渣				2022/9/27	8.5E-03	

※1：図 1.1.2-2 にて詳細を示す

表 1.1.2-5 分析対象核種の核種分析結果 (α 核種) (3/5)

核種	告示濃度限度[Bq/L]	試料の種類	採取箇所	採取日	採取方法 ^{※1}	基準日	分析値[Bq/L]	測定機器
Pu-238	4.00E+00	ろ液	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/5/27	< 1.9E-03	表面障壁型 Si 半導体 検出器
		ろ液	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/5/30	< 1.9E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/27	< 2.5E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/5/31	2.8E-01	
		残渣			2022/6/30	4.1E-01		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/6/13	1.2E+00	
		残渣				2022/7/4	2.8E+00	
Pu-239+ Pu240	8.00E+00	ろ液	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/5/27	< 1.9E-03	
		ろ液	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/5/30	< 1.9E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/27	< 1.9E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/5/31	9.1E-02	
		残渣			2022/6/30	1.4E-01		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/6/13	3.9E-01	
		残渣				2022/7/4	9.2E-01	
Pu-242	4.00E+00	ろ液	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/5/27	< 1.9E-03	
		ろ液	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/5/30	< 2.2E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/27	< 1.9E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/5/31	< 4.4E-03	
		残渣			2022/6/30	< 6.1E-03		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/6/13	< 7.9E-03	
		残渣				2022/7/4	< 1.3E-02	

※1：図 1.1.2-2 にて詳細を示す

表 1.1.2-5 分析対象核種の核種分析結果 (α 核種) (4/5)

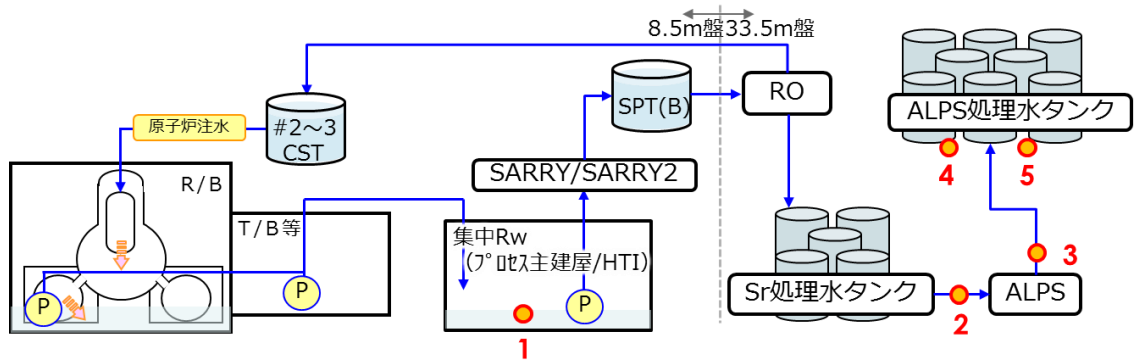
核種	告示濃度限度[Bq/L]	試料の種類	採取箇所	採取日	採取方法 ^{※1}	基準日	分析値[Bq/L]	測定機器
Am-241	5.00E+00	ろ液	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/5/27	< 1.8E-03	表面障壁型 Si 半導体 検出器
		ろ液	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/5/30	< 1.8E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/27	< 1.8E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/6/22	6.8E-02	
		残渣			2022/6/30	1.2E-01		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/6/28	4.0E-02	
		残渣				2022/7/4	5.7E-01	
Am-243	5.00E+00	ろ液	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/5/27	< 1.5E-03	
		ろ液	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/5/30	< 1.5E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/27	< 1.5E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/6/22	< 7.7E-03	
		残渣			2022/6/30	< 5.5E-03		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/6/28	< 5.1E-03	
		残渣				2022/7/4	< 1.7E-02	
Cm-242	6.00E+01	ろ液	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/5/27	< 1.5E-03	
		ろ液	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/5/30	< 1.5E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/27	< 1.6E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/6/22	< 1.6E-03	
		残渣			2022/6/30	5.5E-03		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/6/28	< 1.5E-03	
		残渣				2022/7/4	9.9E-03	

※1：図 1.1.2-2 にて詳細を示す

表 1.1.2-5 分析対象核種の核種分析結果 (α 核種) (5/5)

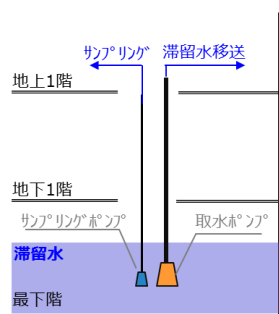
核種	告示濃度限度[Bq/L]	試料の種類	採取箇所	採取日	採取方法 ^{※1}	基準日	分析値[Bq/L]	測定機器
Cm-243 +Cm-244	1.30E+01	ろ液	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/5/27	< 1.5E-03	表面障壁型 Si 半導体 検出器
		ろ液	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/5/30	< 1.5E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/27	< 1.8E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/6/22	6.4E-02	
		残渣			2022/6/30	9.1E-02		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/6/28	2.7E-02	
		残渣				2022/7/4	4.4E-01	
Cm-244 +Cm-245	1.00E+01	ろ液	K4-A10 タンク	2021/11/1	(1)	2022/5/27	< 1.5E-03	表面障壁型 Si 半導体 検出器
		ろ液	H4-B7 タンク	2021/11/1		2022/5/30	< 4.7E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理後	2021/10/28		2022/5/27	< 1.5E-03	
		ろ液	増設 ALPS 処理前	2021/10/28		2022/6/22	< 2.1E-02	
		残渣			2022/6/30	< 2.6E-02		
		ろ液	プロセス主建屋	2021/11/2	(2)-a	2022/6/28	< 1.4E-02	
		残渣				2022/7/4	< 6.0E-02	

※1：図 1.1.2-2 にて詳細を示す

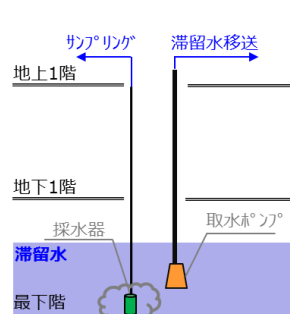


No.	採取箇所	採取方法
1	プロセス主建屋	(2)にて示す。
2	ALPS処理前	ALPS入口に設置されたサンプリングラックから採取。
3	ALPS処理後	ALPS出口に設置されたサンプリングラックから採取。
4	H4-B7タンク	タンク上部から採水器にて採取。
5	K4-A10タンク	

(1) 今回核種分析した試料の採取箇所とその方法



a. サンプリングポンプでの採取※1



b. 採水器での採取※2

※1：サンプリングポンプと取水ポンプの吸い込み高さを合わせて設置。

※2：採水時に建屋底部に沈んでいるスラッジを巻き上げているため、通常より多くのスラッジを含む試料を採取。

(2) プロセス主建屋からの採取方法

図 1.1.2-2 分析対象核種の核種分析における試料採取箇所と方法

(参考) 追加分析における分析手法の補足

今回の分析でプロセス主建屋の建屋滞留水と ALPS 処理前のストロンチウム処理水は、目視で懸濁物、浮遊物が確認されたため、0.45 μ m のフィルタでろ過した上で分析を実施している。

当該分析方法は、軽水炉では溶解性/不溶解性を分別する手法として従前より実施されている手法であり、今回は本手法を採用することで、容易に除去可能な不溶解性の核種と、水に溶解しており、ALPS 等での処理が必要な核種を確認した。

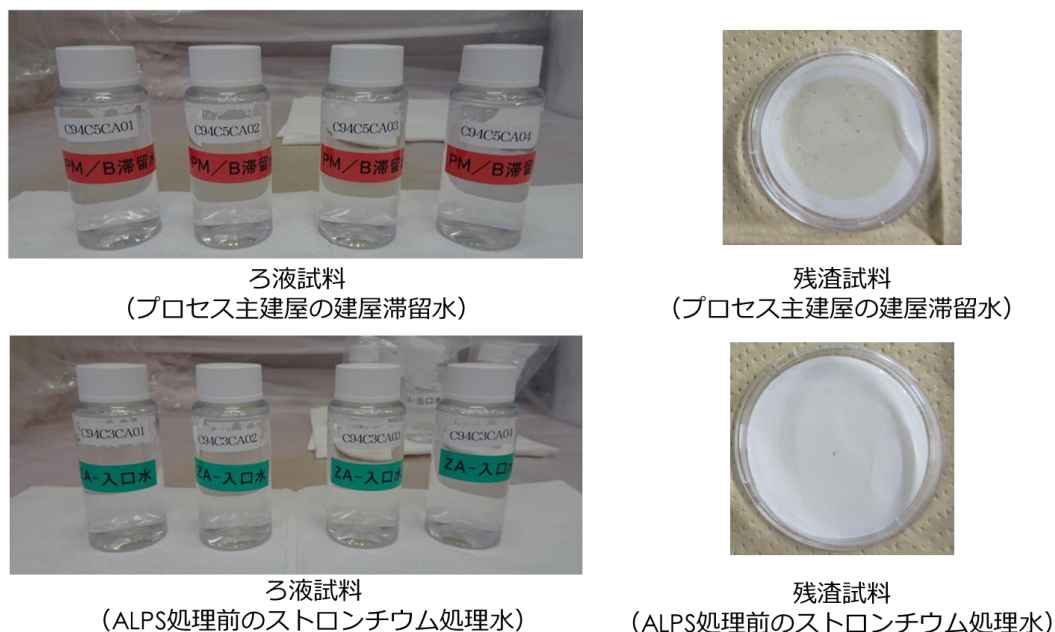


図 1.1.2-3 分析試料（プロセス主建屋水と ALPS 処理前のストロンチウム処理水）のろ液試料と残渣試料

2.6 核種分析のまとめ

今回、ALPS 処理水海洋放出時の測定・評価対象核種を検討するにあたり、廃止措置や埋設施設等で着目されている核種のうち、短半減期の核種を除いて、過去に分析が未実施の核種もしくは分析実績が十分でない核種等について分析した結果、ALPS 処理水では告示濃度限度 1/100 以下で不検出であることを確認した。

この結果から、ALPS 処理水中に有意に存在する可能性がある核種は、主要 7 核種、炭素 14 及びテクネチウム 99 であることを再確認した。

なお、ALPS 処理水海洋放出時の測定・評価対象核種については、上述の 9 核種の他に、建屋滞留水や ALPS 処理前のストロンチウム処理水中に有意に存在する、または存在する可能性がある核種を、海洋放出時に念のため確認するという考え方で選定する。

以上

ALPS 処理水海洋放出時の測定・評価対象核種の検討のうち
インベントリ評価に係る補足説明

1. 概要

ALPS 処理水中のトリチウム以外の放射性核種の告示濃度限度比総和 1 未満を満足することを確実なものとするため、国内における廃止措置や埋設施設に関する知見を踏まえ、汚染水中に有意に存在するか徹底的に検証を実施した上で、測定・評価の対象とする放射性核種を選定する方針としている。

検討の進め方は、第 9 回 ALPS 処理水審査会合で説明したフロー（図 1.1.3-1 参照）の通り、核種分析及びインベントリ評価を実施する計画としており、本資料ではインベントリ評価について補足説明を行う。

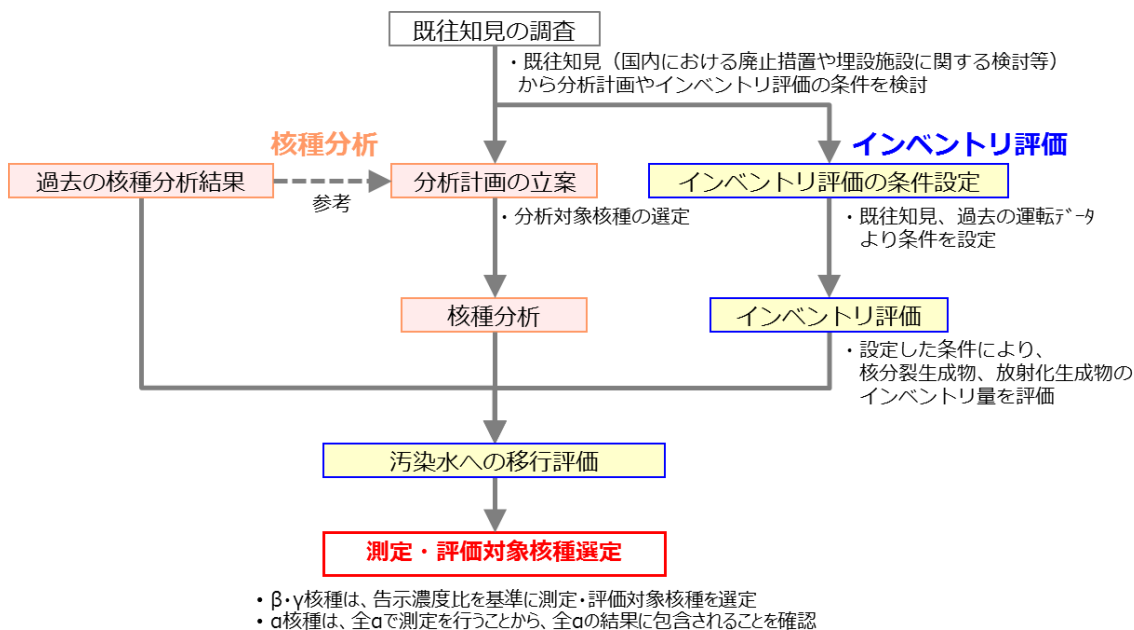


図 1.1.3-1 測定・評価対象核種選定の検討の全体の進め方

【第 9 回 ALPS 処理水審査会合資料より（一部表現修正）】

2. インベントリ評価

【ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設に係る実施計画の補足説明資料（2022 年7 月）より】

インベントリ評価では、これまで原子力発電所の安全評価の中で核分裂生成物を評価している（ALPS 除去対象核種検討にも使用。）他、廃止措置や埋設施設に関する研究では、原子力発電所内の機器の放射化計算が実施されている。本検討では前述の評価を参考に核分裂生成物評価、放射化生成物評価を実施する。

なお、いずれの評価も震災後から放出までに 12 年経過したことを踏まえた、減衰によるインベントリ量の減少についても評価する。

評価に使用するコードは、これまでの安全評価や、既往知見や過去の評価と同様に ORIGEN（ORNL Isotope Generation and Depletion Code：放射性物質の生成、壊変、減損について計算を行うためのコードシステム）とする。

ORIGEN の評価結果から、水への移行のしやすさ等を考慮した上で、建屋滞留水中に有意に含まれる可能性のある核種の存在を確認する。

2.1 核分裂生成物評価

【ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設に係る実施計画の補足説明資料（2022 年7 月）より】

核分裂生成物評価では、ALPS 除去対象核種検討時と同様に、通常の原子炉発電所の安全評価を参考に、福島第一原子力発電所 1～3 号機の原子炉圧力容器内に装荷されていた燃料の条件及び、各燃料の装荷期間から想定される燃焼度等の条件から、2011 年 3 月時点のインベントリ量を評価する。2011 年 3 月以降は、減衰による 12 年間のインベントリ量の減少を計算する。

なお、ORIGEN では、核燃料より生成、壊変、減損されるインベントリ量を評価可能である。核分裂については、ウラン 235 が核分裂する際、主に質量数 95 と質量数 140 付近をピークに 2 つの核種に分裂することを評価する他、ウラン 238 が中性子を吸収して生成するプルトニウムなどの核種や、核分裂生成物が中性子を吸収して生成するセシウム 134 のような核種も発生も評価可能となっている。

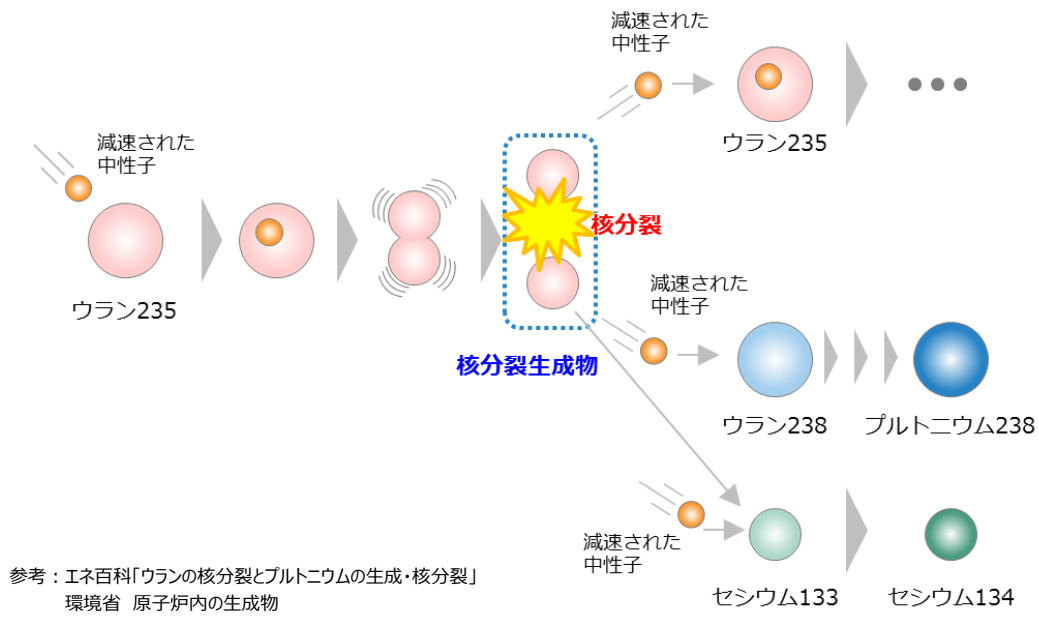
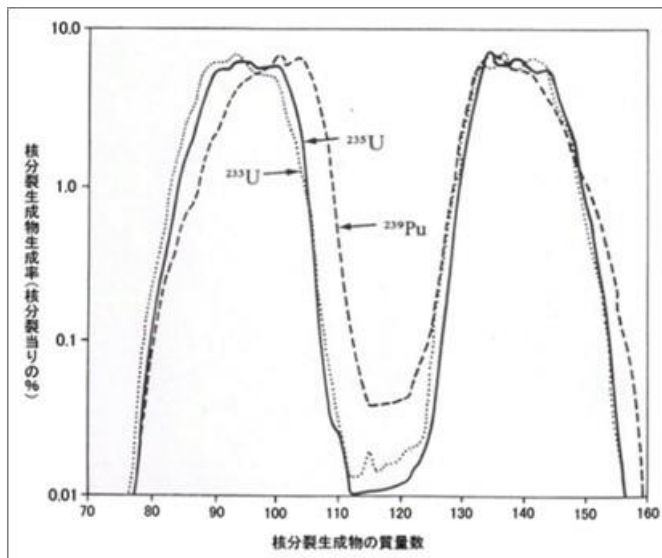


図 1.1.3-2 ウランの核分裂とプルトニウムの生成・核分裂



ATOMICA「核分裂生成物の質量数分布」より
出典：W.マーシャル編：原子炉技術の発展（上），
裳華房，P72

図 1.1.3-3 核分裂生成物の質量分布

2.2 放射化生成物評価

【ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設に係る実施計画の補足説明資料（2022年7月）より】

放射化生成物評価では、廃止措置や埋設施設に関する研究を参考に、原子炉圧力容器内及びその下部に存在する、炉内構造物、燃料体（核燃料物質除く）、圧力容器、ペDESTALの4種類の機器・構造物について、炉心からの照射期間を踏まえた2011年3月時点のインベントリ量を評価する。他に、原子炉冷却システムを構成している機器等の構成材料の腐食、放射化により生成される腐食生成物についても、運転時の給水金属データ等を使用して、2011年3月時点のインベントリ量を評価する。いずれの評価においても、2011年3月以降は、減衰による12年間のインベントリ量の減少を計算する。

なお、炉内構造物や燃料体においては、全ての機器を評価するのではなく、材料が重複する場合は、保守的に炉心に近い（放射化量が多い。）ものを選定して評価を行う。

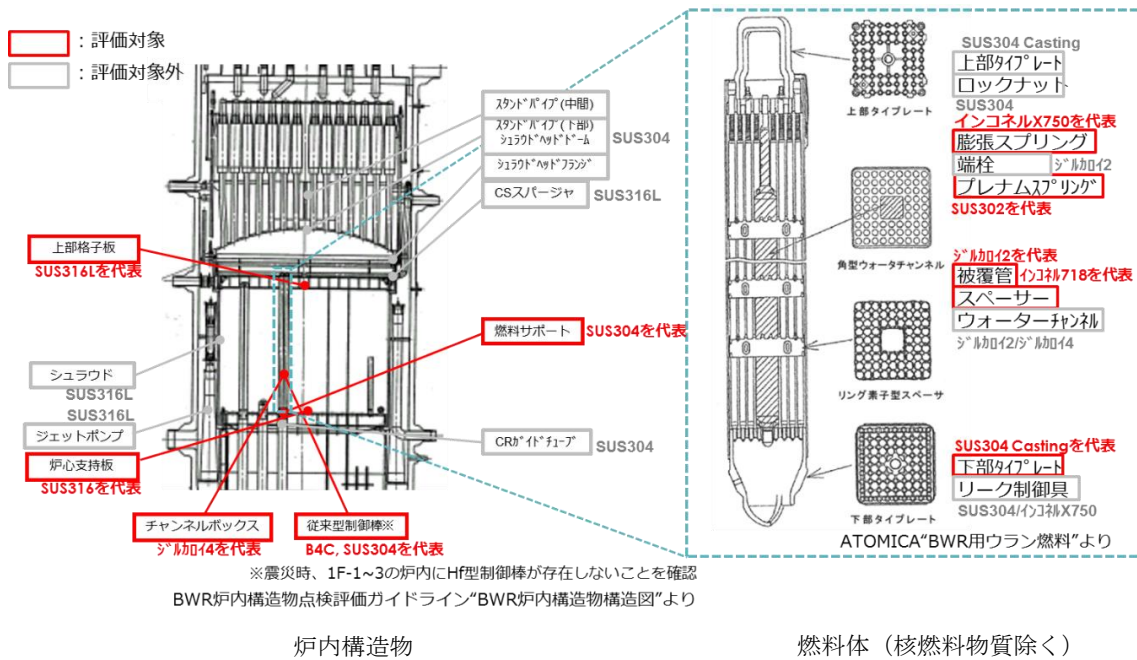


図 1.1.3-4 炉内構造物等のインベントリ評価の対象

2.3 インベントリ評価結果

2.1, 2.2 項の条件を基に、インベントリ評価を実施した結果は表 1.1.3.1~3 の通り。

核分裂生成物評価では燃料から生成されたインベントリ量を 100%考慮する。なお、核分裂生成物のインベントリ評価では通常の原子力発電所の安全評価、ALPS 除去対象核種検討時と同様に燃料から生成されるインベントリ量のみを考慮し、可燃性毒物の存在は考慮していない。

また、放射化生成物評価では、原子炉運転時に炉心に存在し、これまでの調査や事故解析等で溶融していることが想定される、上部格子板、チャンネルボックス、燃料体（全ての部材）、従来型制御棒、燃料サポート、炉心支持板について、放射化して生成した放射エネルギーを 100%考慮している他、原子炉圧力容器は底部の損傷を考慮して総重量の 25%、PCV 下部のコンクリートについては、IRID の補助事業「事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化」で燃料デブリに含まれるコンクリート成分の量（1~3 号機でそれぞれ約 160ton）から、インベントリ量を算出している。各機器の放射化については、電力共同研究において検討してきた、余裕震度対象（L1）廃棄物や高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）およびハル等廃棄物の条件（元素成分条件※、中性子束）及び、運転実績等から評価を行っている。

ORIGEN でインベントリを評価するに当たっては、過去の安全評価や廃止措置の研究と同様に、炉内中性子束の 1 点近似で評価可能な燃料やチャンネルボックス、燃料体、従来型制御棒については ORIGEN2 により評価し、燃料とは中性子スペクトルが異なる上部格子板、炉心支持板、燃料サポート、原子炉圧力容器やコンクリートについては、SCALE5.1/ORIGEN-S にて評価する。また、それぞれ使用している核データライブラリは、それぞれ JENDL4.0、SCALE5.1 の内臓データとした。

※：元素成分は元素周期表の原子番号 1~103 から、Bi, Th, U 以外の放射性元素（20 元素）を除く 83 元素を設定対象としている。本評価では希ガスを除いた元素の条件を入力して解析を実施した。

表 1.1.3-1 インベントリ評価結果：1号機（1/3）

核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]
H-3	4.8E+14	Nb-94	1.9E+11	Te-123m	1.5E+04
Be-10	8.4E+08	Mo-93	2.4E+11	Te-125m	2.9E+14
C-14	5.4E+12	Tc-97	2.9E+06	Te-127	7.8E+03
Na-22	3.6E+07	Tc-98	9.6E+06	Te-127m	8.0E+03
Si-32	7.1E+05	Tc-99	2.7E+13	I-129	4.9E+10
P-32	7.1E+05	Ru-106	2.1E+14	Cs-134	6.9E+15
Cl-36	5.1E+09	Rh-101	1.1E+05	Cs-135	1.1E+12
Ar-39	1.7E+11	Rh-102	7.1E+06	Cs-137	1.5E+17
Ar-42	4.9E+03	Rh-102m	1.6E+07	Ba-133	5.0E+10
K-40	1.6E+08	Rh-106	2.1E+14	Ba-137m	1.5E+17
K-42	4.9E+03	Pd-107	1.9E+11	La-137	1.4E+07
Ca-41	3.5E+09	Ag-108	3.3E+09	La-138	3.1E+04
Ca-45	4.8E+06	Ag-108m	3.8E+10	Ce-139	5.4E+03
Sc-46	3.7E+01	Ag-109m	8.8E+09	Ce-142	5.3E+07
V-49	2.3E+04	Ag-110	3.5E+08	Ce-144	4.1E+13
Mn-54	4.1E+11	Ag-110m	2.6E+10	Pr-144	4.1E+13
Fe-55	2.6E+15	Cd-109	8.8E+09	Pr-144m	6.2E+11
Co-60	8.1E+15	Cd-113m	2.5E+13	Nd-144	3.3E+03
Ni-59	1.4E+13	In-113m	1.7E+04	Pm-144	2.8E+01
Ni-63	1.6E+15	In-115	4.5E+03	Pm-145	1.8E+10
Zn-65	9.9E+08	Sn-113	1.7E+04	Pm-146	1.0E+12
Se-75	1.0E+03	Sn-119m	1.6E+10	Pm-147	1.5E+16
Se-79	1.1E+11	Sn-121	2.1E+13	Sm-145	3.1E+07
Kr-81	1.1E+10	Sn-121m	2.7E+13	Sm-146	2.3E+05
Kr-85	9.2E+15	Sn-123	1.1E+05	Sm-147	1.3E+07
Rb-87	9.4E+07	Sn-126	4.8E+11	Sm-148	8.2E+01
Sr-90	1.1E+17	Sb-125	7.9E+14	Sm-149	1.5E+00
Y-90	1.1E+17	Sb-126	6.8E+10	Sm-151	5.7E+14
Zr-93	3.9E+12	Sb-126m	4.8E+11	Eu-150	3.9E+07
Nb-91	1.0E+05	Te-121	6.1E+02	Eu-152	2.8E+12
Nb-92	1.7E+06	Te-121m	6.1E+02	Eu-154	3.8E+15
Nb-93m	1.8E+12	Te-123	1.3E+04	Eu-155	1.1E+15

表 1.1.3-1 インベントリ評価結果：1号機(2/3)

核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]
Gd-152	4.3E+00	Pb-212	3.8E+10	Th-228	3.8E+10
Gd-153	3.2E+08	Pb-214	5.2E+06	Th-229	4.6E+05
Tb-157	6.8E+08	Bi-208	6.5E+05	Th-230	6.8E+08
Tb-158	6.9E+08	Bi-210	1.8E+06	Th-231	8.4E+10
Dy-159	1.9E+01	Bi-210m	1.7E+05	Th-232	6.3E+06
Ho-163	1.5E+07	Bi-211	2.2E+07	Th-234	8.0E+11
Ho-166m	6.9E+09	Bi-212	3.8E+10	Pa-231	7.6E+07
Tm-170	5.0E+05	Bi-213	4.6E+05	Pa-233	5.0E+11
Tm-171	1.4E+12	Bi-214	5.2E+06	Pa-234	1.0E+09
Lu-176	5.1E+05	Po-210	1.8E+06	Pa-234m	8.0E+11
Lu-177	4.7E+05	Po-211	6.2E+04	U-232	3.9E+10
Lu-177m	2.0E+06	Po-212	2.4E+10	U-233	1.1E+08
Hf-182	2.1E+06	Po-213	4.6E+05	U-234	3.4E+12
Ta-182	2.2E+06	Po-214	5.2E+06	U-235	8.4E+10
W-181	8.3E+02	Po-215	2.2E+07	U-236	5.6E+11
Re-187	1.4E+06	Po-216	3.8E+10	U-237	3.0E+12
Os-194	1.4E+08	Po-218	5.2E+06	U-238	8.0E+11
Ir-192	5.7E+06	At-217	4.6E+05	U-240	5.7E+05
Ir-192m	5.7E+06	Rn-219	2.2E+07	Np-235	2.2E+06
Ir-194	1.4E+08	Rn-220	3.8E+10	Np-236	7.6E+06
Ir-194m	3.6E+03	Rn-222	5.2E+06	Np-237	5.0E+11
Pt-190	2.2E+03	Fr-221	4.6E+05	Np-238	7.9E+10
Pt-193	2.5E+12	Fr-223	3.1E+05	Np-239	2.7E+13
Tl-204	3.6E+12	Ra-223	2.2E+07	Np-240m	5.7E+05
Tl-206	1.7E+05	Ra-224	3.8E+10	Pu-236	3.3E+10
Tl-207	2.2E+07	Ra-225	4.6E+05	Pu-238	4.4E+15
Tl-208	1.4E+10	Ra-226	5.2E+06	Pu-239	6.7E+14
Tl-209	1.0E+04	Ra-228	6.2E+06	Pu-240	8.7E+14
Pb-205	5.1E+05	Ac-225	4.6E+05	Pu-241	1.2E+17
Pb-209	4.6E+05	Ac-227	2.2E+07	Pu-242	3.2E+12
Pb-210	1.8E+06	Ac-228	6.2E+06	Pu-243	2.2E+05
Pb-211	2.2E+07	Th-227	2.2E+07	Pu-244	5.7E+05

表 1.1.3-1 インベントリ評価結果：1号機(3/3)

核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]
Am-241	3.5E+15	Cm-243	2.3E+13	Bk-249	1.8E+05
Am-242	1.6E+13	Cm-244	2.3E+15	Cf-249	5.4E+06
Am-242m	1.6E+13	Cm-245	4.0E+11	Cf-250	3.0E+07
Am-243	2.7E+13	Cm-246	6.9E+10	Cf-251	3.1E+05
Am-245	2.6E+00	Cm-247	2.2E+05	Cf-252	4.3E+06
Cm-242	1.3E+13	Cm-248	5.9E+05		

表 1.1.3-2 インベントリ評価結果：2号機(1/3)

核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]
H-3	6.1E+14	Nb-93m	2.3E+12	Te-123	1.2E+04
Be-10	1.1E+09	Nb-94	3.6E+11	Te-123m	2.0E+04
C-14	9.8E+12	Mo-93	6.0E+11	Te-125m	3.9E+14
Na-22	5.0E+07	Tc-97	4.1E+06	Te-127	1.2E+04
Si-32	1.5E+06	Tc-98	1.1E+07	Te-127m	1.2E+04
P-32	1.5E+06	Tc-99	3.4E+13	I-129	5.9E+10
Cl-36	1.3E+10	Ru-106	2.8E+14	Cs-134	9.1E+15
Ar-39	2.4E+11	Rh-101	1.5E+05	Cs-135	1.2E+12
Ar-42	1.3E+04	Rh-102	9.7E+06	Cs-137	1.9E+17
K-40	1.5E+08	Rh-102m	2.1E+07	Ba-133	6.0E+10
K-42	1.3E+04	Rh-106	2.8E+14	Ba-137m	1.8E+17
Ca-41	6.8E+09	Pd-107	2.2E+11	La-137	1.7E+07
Ca-45	6.8E+06	Ag-108	5.8E+09	La-138	4.1E+04
Sc-46	5.2E+01	Ag-108m	6.7E+10	Ce-139	7.5E+03
V-49	3.8E+04	Ag-109m	1.3E+10	Ce-142	6.7E+07
Mn-54	5.8E+11	Ag-110	4.5E+08	Ce-144	6.4E+13
Fe-55	4.2E+15	Ag-110m	3.3E+10	Pr-144	6.4E+13
Co-60	1.4E+16	Cd-109	1.3E+10	Pr-144m	9.7E+11
Ni-59	2.9E+13	Cd-113m	2.9E+13	Nd-144	4.1E+03
Ni-63	3.4E+15	In-113m	2.4E+04	Pm-144	3.8E+01
Zn-65	1.5E+09	In-115	4.9E+03	Pm-145	3.0E+10
Se-75	1.5E+03	Sn-113	2.4E+04	Pm-146	1.3E+12
Se-79	1.3E+11	Sn-119m	2.2E+10	Pm-147	2.1E+16
Kr-81	1.7E+10	Sn-121	2.6E+13	Sm-145	4.4E+07
Kr-85	1.2E+16	Sn-121m	3.3E+13	Sm-146	2.5E+05
Rb-87	1.1E+08	Sn-123	1.6E+05	Sm-147	1.7E+07
Sr-90	1.5E+17	Sn-126	5.8E+11	Sm-148	9.4E+01
Y-88	1.1E+00	Sb-125	1.1E+15	Sm-149	2.3E+00
Y-90	1.5E+17	Sb-126	8.1E+10	Sm-151	7.8E+14
Zr-93	4.9E+12	Sb-126m	5.8E+11	Eu-150	4.1E+07
Nb-91	4.1E+05	Te-121	9.3E+02	Eu-152	3.1E+12
Nb-92	3.8E+06	Te-121m	9.3E+02	Eu-154	4.6E+15

表 1.1.3-2 インベントリ評価結果：2号機(2/3)

核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]
Eu-155	1.4E+15	Pb-211	2.5E+07	Th-227	2.5E+07
Gd-152	4.7E+00	Pb-212	4.2E+10	Th-228	4.2E+10
Gd-153	3.8E+08	Pb-214	5.5E+06	Th-229	4.4E+05
Tb-157	9.5E+08	Bi-208	9.1E+05	Th-230	8.7E+08
Tb-158	7.6E+08	Bi-210	1.7E+06	Th-231	1.4E+11
Dy-159	2.5E+01	Bi-210m	2.4E+05	Th-232	5.9E+06
Ho-163	2.2E+07	Bi-211	2.5E+07	Th-234	1.1E+12
Ho-166m	9.5E+09	Bi-212	4.2E+10	Pa-231	9.4E+07
Tm-170	7.0E+05	Bi-213	4.4E+05	Pa-233	6.2E+11
Tm-171	1.9E+12	Bi-214	5.5E+06	Pa-234	1.5E+09
Lu-176	7.2E+05	Po-210	1.7E+06	Pa-234m	1.1E+12
Lu-177	6.5E+05	Po-211	7.1E+04	U-232	4.4E+10
Lu-177m	2.8E+06	Po-212	2.7E+10	U-233	1.5E+08
Hf-182	2.9E+06	Po-213	4.3E+05	U-234	5.1E+12
Ta-182	3.0E+06	Po-214	5.5E+06	U-235	1.4E+11
W-181	1.2E+03	Po-215	2.5E+07	U-236	7.3E+11
Re-187	2.2E+06	Po-216	4.2E+10	U-237	3.6E+12
Os-194	2.0E+08	Po-218	5.5E+06	U-238	1.1E+12
Ir-192	6.9E+06	At-217	4.4E+05	U-240	6.1E+05
Ir-192m	6.9E+06	Rn-219	2.5E+07	Np-235	2.8E+06
Ir-194	2.0E+08	Rn-220	4.2E+10	Np-236	9.4E+06
Ir-194m	4.4E+03	Rn-222	5.5E+06	Np-237	6.2E+11
Pt-190	2.1E+03	Fr-221	4.4E+05	Np-238	7.7E+10
Pt-193	3.6E+12	Fr-223	3.5E+05	Np-239	2.8E+13
Tl-204	5.4E+12	Ra-223	2.5E+07	Np-240m	6.1E+05
Tl-206	2.4E+05	Ra-224	4.2E+10	Pu-236	4.0E+10
Tl-207	2.5E+07	Ra-225	4.4E+05	Pu-238	4.8E+15
Tl-208	1.5E+10	Ra-226	5.5E+06	Pu-239	8.7E+14
Tl-209	9.5E+03	Ra-228	5.8E+06	Pu-240	1.1E+15
Pb-205	1.2E+06	Ac-225	4.4E+05	Pu-241	1.5E+17
Pb-209	4.4E+05	Ac-227	2.5E+07	Pu-242	3.4E+12
Pb-210	1.7E+06	Ac-228	5.8E+06	Pu-243	1.9E+05

表 1.1.3-2 インベントリ評価結果：2号機(3/3)

核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]
Pu-244	6.1E+05	Cm-242	1.3E+13	Cm-248	4.8E+05
Am-241	4.1E+15	Cm-243	2.3E+13	Bk-249	1.5E+05
Am-242	1.5E+13	Cm-244	2.2E+15	Cf-249	4.5E+06
Am-242m	1.5E+13	Cm-245	3.9E+11	Cf-250	2.5E+07
Am-243	2.8E+13	Cm-246	6.1E+10	Cf-251	2.5E+05
Am-245	2.2E+00	Cm-247	1.9E+05	Cf-252	3.3E+06

表 1.1.3-3 インベントリ評価結果：3号機(1/3)

核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]
H-3	5.7E+14	Nb-93m	2.2E+12	Te-123	1.2E+04
Be-10	1.1E+09	Nb-94	3.6E+11	Te-123m	2.0E+04
C-14	9.8E+12	Mo-93	6.1E+11	Te-125m	3.8E+14
Na-22	5.0E+07	Tc-97	4.1E+06	Te-127	1.2E+04
Si-32	1.5E+06	Tc-98	1.0E+07	Te-127m	1.2E+04
P-32	1.5E+06	Tc-99	3.2E+13	I-129	5.6E+10
Cl-36	1.3E+10	Ru-106	2.7E+14	Cs-134	8.6E+15
Ar-39	2.4E+11	Rh-101	1.5E+05	Cs-135	1.2E+12
Ar-42	1.3E+04	Rh-102	9.4E+06	Cs-137	1.8E+17
K-40	1.5E+08	Rh-102m	2.0E+07	Ba-133	5.6E+10
K-42	1.3E+04	Rh-106	2.7E+14	Ba-137m	1.7E+17
Ca-41	6.8E+09	Pd-107	2.0E+11	La-137	1.6E+07
Ca-45	6.8E+06	Ag-108	5.8E+09	La-138	4.1E+04
Sc-46	5.2E+01	Ag-108m	6.7E+10	Ce-139	6.9E+03
V-49	3.8E+04	Ag-109m	1.3E+10	Ce-142	6.3E+07
Mn-54	6.1E+11	Ag-110	4.1E+08	Ce-144	6.2E+13
Fe-55	4.4E+15	Ag-110m	3.0E+10	Pr-144	6.2E+13
Co-60	1.4E+16	Cd-109	1.3E+10	Pr-144m	9.4E+11
Ni-59	3.0E+13	Cd-113m	2.8E+13	Nd-144	3.9E+03
Ni-63	3.4E+15	In-113m	2.4E+04	Pm-144	3.7E+01
Zn-65	1.5E+09	In-115	4.9E+03	Pm-145	3.0E+10
Se-75	1.5E+03	Sn-113	2.4E+04	Pm-146	1.2E+12
Se-79	1.3E+11	Sn-119m	2.2E+10	Pm-147	2.0E+16
Kr-81	1.7E+10	Sn-121	2.4E+13	Sm-145	4.4E+07
Kr-85	1.1E+16	Sn-121m	3.1E+13	Sm-146	2.3E+05
Rb-87	1.1E+08	Sn-123	1.7E+05	Sm-147	1.6E+07
Sr-90	1.4E+17	Sn-126	5.5E+11	Sm-148	8.6E+01
Y-88	1.0E+00	Sb-125	1.0E+15	Sm-149	2.3E+00
Y-90	1.4E+17	Sb-126	7.7E+10	Sm-151	8.0E+14
Zr-93	4.7E+12	Sb-126m	5.5E+11	Eu-150	3.8E+07
Nb-91	4.1E+05	Te-121	9.3E+02	Eu-152	3.1E+12
Nb-92	3.9E+06	Te-121m	9.3E+02	Eu-154	4.2E+15

表 1.1.3-3 インベントリ評価結果：3号機(2/3)

核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]
Eu-155	1.3E+15	Pb-211	2.4E+07	Th-227	2.4E+07
Gd-152	4.6E+00	Pb-212	3.8E+10	Th-228	3.8E+10
Gd-153	3.6E+08	Pb-214	5.5E+06	Th-229	4.0E+05
Tb-157	9.5E+08	Bi-208	9.1E+05	Th-230	8.6E+08
Tb-158	6.8E+08	Bi-210	1.8E+06	Th-231	1.4E+11
Dy-159	2.5E+01	Bi-210m	2.4E+05	Th-232	5.9E+06
Ho-163	2.2E+07	Bi-211	2.4E+07	Th-234	1.1E+12
Ho-166m	9.2E+09	Bi-212	3.8E+10	Pa-231	9.0E+07
Tm-170	7.0E+05	Bi-213	4.0E+05	Pa-233	5.8E+11
Tm-171	1.9E+12	Bi-214	5.5E+06	Pa-234	1.4E+09
Lu-176	7.2E+05	Po-210	1.8E+06	Pa-234m	1.1E+12
Lu-177	6.5E+05	Po-211	6.8E+04	U-232	3.9E+10
Lu-177m	2.8E+06	Po-212	2.4E+10	U-233	1.4E+08
Hf-182	2.9E+06	Po-213	3.9E+05	U-234	5.1E+12
Ta-182	3.0E+06	Po-214	5.5E+06	U-235	1.4E+11
W-181	1.2E+03	Po-215	2.4E+07	U-236	7.0E+11
Re-187	2.2E+06	Po-216	3.8E+10	U-237	4.0E+12
Os-194	2.0E+08	Po-218	5.5E+06	U-238	1.1E+12
Ir-192	6.9E+06	At-217	4.0E+05	U-240	5.5E+05
Ir-192m	6.9E+06	Rn-219	2.4E+07	Np-235	2.5E+06
Ir-194	2.0E+08	Rn-220	3.8E+10	Np-236	8.6E+06
Ir-194m	4.4E+03	Rn-222	5.5E+06	Np-237	5.8E+11
Pt-190	2.1E+03	Fr-221	4.0E+05	Np-238	3.0E+11
Pt-193	3.6E+12	Fr-223	3.4E+05	Np-239	2.9E+13
Tl-204	5.4E+12	Ra-223	2.4E+07	Np-240m	5.5E+05
Tl-206	2.4E+05	Ra-224	3.8E+10	Pu-236	3.6E+10
Tl-207	2.4E+07	Ra-225	4.0E+05	Pu-238	6.7E+15
Tl-208	1.4E+10	Ra-226	5.5E+06	Pu-239	1.1E+15
Tl-209	8.6E+03	Ra-228	5.9E+06	Pu-240	1.4E+15
Pb-205	1.2E+06	Ac-225	4.0E+05	Pu-241	1.6E+17
Pb-209	4.0E+05	Ac-227	2.4E+07	Pu-242	4.6E+12
Pb-210	1.8E+06	Ac-228	5.9E+06	Pu-243	1.3E+05

表 1.1.3-3 インベントリ評価結果：3号機(3/3)

核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]	核種	放射エネルギー [Bq]
Pu-244	5.5E+05	Cm-242	4.9E+13	Cm-248	3.3E+05
Am-241	5.6E+15	Cm-243	2.9E+13	Bk-249	1.0E+05
Am-242	5.9E+13	Cm-244	1.9E+15	Cf-249	3.0E+06
Am-242m	5.9E+13	Cm-245	3.1E+11	Cf-250	1.6E+07
Am-243	2.9E+13	Cm-246	4.6E+10	Cf-251	1.6E+05
Am-245	1.5E+00	Cm-247	1.3E+05	Cf-252	2.0E+06

インベントリ計算に用いるコード (ORIGEN-2) について

1. 概要

ORIGEN-2 コードは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された炉内中性子束の1点近似による燃料計算コードである。ORIGEN-2 コードは汎用解析コードであり輸送キャスクの崩壊熱計算等に広く利用されている。

2. 機能

ORIGEN-2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ①燃料の炉内での燃焼計算、炉取出し後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射能量等が求められる。
- ②原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており、任意に選択できる。
- ③計算結果は、放射化生成物、アクチノイド、核分裂生成物に分類して出力される。
- ④燃焼計算に必要な放射性核種データ (崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と (α, n) 反応により発生する中性子源強度等) に関しては、ORIGEN-2 コード専用のライブラリがあり、これを用いる。

3. 計算フロー

ORIGEN-2 コードの計算フローを図 1.1.3-5 に示す。

4. 使用実績

ORIGEN-2 コードは、輸送キャスク、核燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている。

5. 検証方法

汎用コードの導入評価^{※1}が実施されていることが確認されている。大型実験/ベンチマーク試験による検証^{※2}が実施されていることが確認されている。

※1:A.G.Croff, “ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD”, CCC-371(1987)

※2: (社) 日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”, 1989年8月

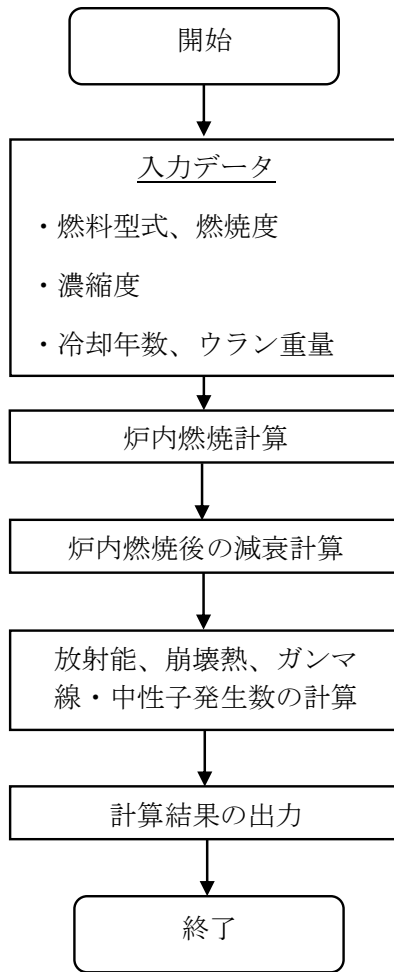


図 1.1.3-5 ORIGEN-2 コードの計算フロー図

以上

インベントリ計算に用いるコード（ORIGEN-S）について

1. 概要

SCALE 5.1/ORIGEN-S コード(以下, ORIGEN-S)は, 米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された高速中性子, 熱外中性子, 熱中性子の3群スペクトルを使用可能な放射化計算コードである。ORIGEN-S コードは汎用解析コードであり炉内構造物の放射化計算, 原子炉施設の廃止措置等に広く利用されている。

2. 機能

ORIGEN-S コードで計算可能な内容は次に示す通りである。

- ①燃料の核種組成 (重量), 照射期間 (運転パターン), 炉内中性子束あるいは炉の比出力を入力することによって, 各核種の放射エネルギー, 中性子やガンマ線発生数, 核分裂生成物やアクチノイド核種の生成量を計算する。
- ②評価対象である構造物の材料組成, 中性子束, 照射履歴を入力することによって, 構造物の放射化放射エネルギーを計算する。
- ③評価対象である材料組成, 中性子束, 照射履歴を入力することによって, 生成, 消滅計算から得られる放射性核種の発熱量を計算する。

3. 計算フロー

ORIGEN-S コードの計算フローを図 1.1.3-6 に示す。

4. 使用実績

ORIGEN-S コードは, 燃料とは中性子スペクトルが異なる炉内構造物の放射化計算や原子炉施設の廃止措置を目的とした原子炉压力容器や生体遮へい材等の放射化計算に広く使用されている。

5. 検証方法

汎用コードの導入評価^{※1}が実施されていることが確認されている。大型実験/ベンチマーク試験による検証^{※2}が実施されていることが確認されている。

※1: SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, ORNL/TM-2005/39, Version 5.1, Vols. I-III, November (2006)

※2: K. Tanaka et al., "Radioactivity evaluation for Main Steam Line and Suppression Chamber of small type BWR", Progress in Nuclear Science and Technology Volume 4 (2014) pp.836-839

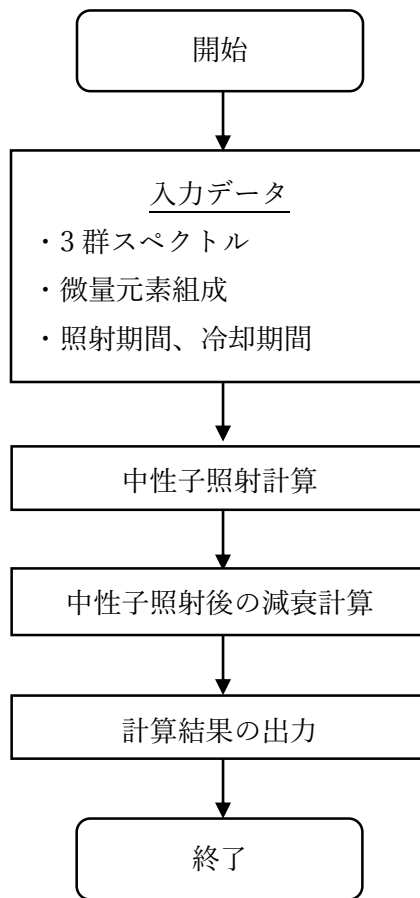


図 1.1.3-6 ORIGEN-S コードの計算フロー図

ALPS 処理水海洋放出時の測定・評価対象核種の検討のうち
核種選定の考え方に係る補足説明

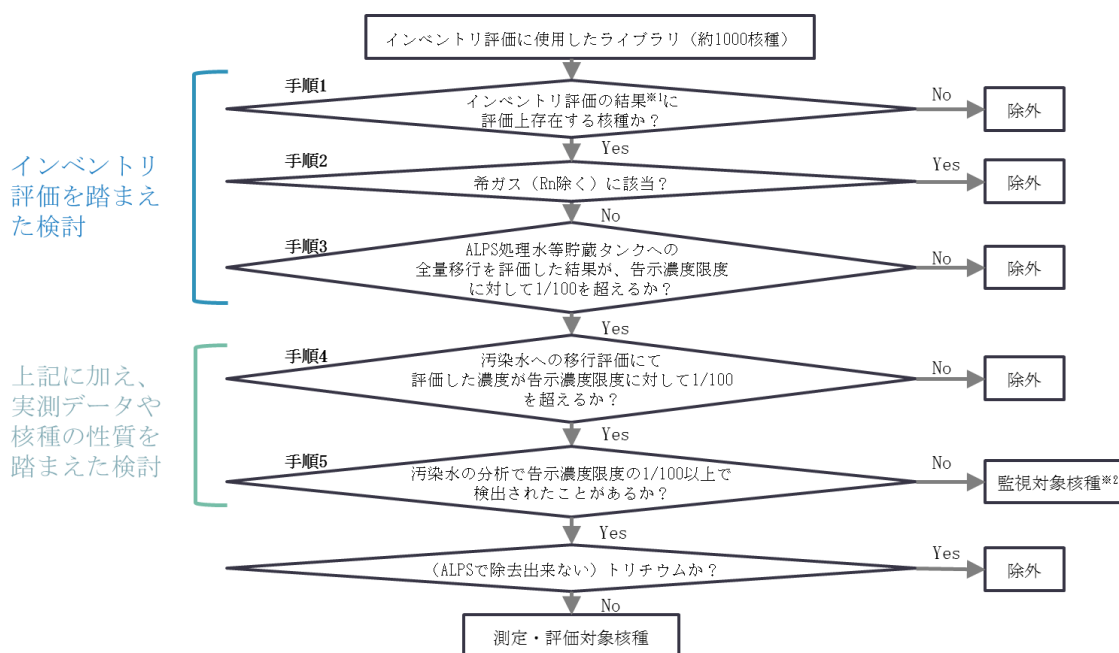
1. 概要

ALPS 処理水中のトリチウム以外の放射性核種の告示濃度限度比総和 1 未満を満足することを確実なものとするため、国内における廃止措置や埋設施設に関する知見を踏まえた核種分析及びインベントリ評価の内容について、別紙－2，別紙－3 で補足説明した。

本資料では、核種分析及びインベントリ評価の結果を用いて、ALPS 処理水海洋放出時の測定・評価対象核種を選定するための考え方について補足説明する。

2. 測定・評価対象核種の選定方法

ALPS 処理水の海洋放出時に確認する測定・評価対象核種は図 1.1.4-1 に示すフローにより、選定する。本項ではそれぞれの手順について補足説明する。



※1：インベントリ評価の減衰期間は、選定結果を使用する時期に応じて適切に設定
(初回は 2023 年 (事故後 12 年) に設定)

※2：汚染水中に有意に存在しないか継続して確認する核種

図 1.1.4-1 ALPS 処理水海洋放出時の測定・評価対象核種選定フロー

2.1 手順1について

手順1の「インベントリ評価の結果に評価上存在する核種か?」という項目について、インベントリ評価の結果、評価上存在するか（1～3号機のそれぞれの炉心に1Bq以上存在するか）という基準により、評価上存在しない核種は当該手順で除外することとしている。

なお、選定フローでは、インベントリ評価の減衰期間は適切に設定することとしているが、今回の評価においては、ALPS処理水海洋放出を開始する、震災後12年（2023年3月）を基準として減衰期間の設定を行った。

この結果、表1.1.4-1に示す210核種が存在することを確認した（インベントリ評価詳細は別紙-3参照）。

表 1.1.4-1 手順1の結果で評価上存在する核種（1/2）

No.	核種	No.	核種	No.	核種	No.	核種	No.	核種
1	H-3	21	Zn-65	41	Rh-102	61	Sb-126	81	Pr-144
2	Be-10	22	Se-75	42	Rh-102m	62	Sb-126m	82	Pr-144m
3	C-14	23	Se-79	43	Rh-106	63	Te-121	83	Nd-144
4	Na-22	24	Kr-81	44	Pd-107	64	Te-121m	84	Pm-144
5	Si-32	25	Kr-85	45	Ag-108	65	Te-123	85	Pm-145
6	P-32	26	Rb-87	46	Ag-108m	66	Te-123m	86	Pm-146
7	Cl-36	27	Sr-90	47	Ag-109m	67	Te-125m	87	Pm-147
8	Ar-39	28	Y-88	48	Ag-110	68	Te-127	88	Sm-145
9	Ar-42	29	Y-90	49	Ag-110m	69	Te-127m	89	Sm-146
10	K-40	30	Zr-93	50	Cd-109	70	I-129	90	Sm-147
11	K-42	31	Nb-91	51	Cd-113m	71	Cs-134	91	Sm-148
12	Ca-41	32	Nb-92	52	In-113m	72	Cs-135	92	Sm-149
13	Ca-45	33	Nb-93m	53	In-115	73	Cs-137	93	Sm-151
14	Sc-46	34	Nb-94	54	Sn-113	74	Ba-133	94	Eu-150
15	V-49	35	Mo-93	55	Sn-119m	75	Ba-137m	95	Eu-152
16	Mn-54	36	Tc-97	56	Sn-121	76	La-137	96	Eu-154
17	Fe-55	37	Tc-98	57	Sn-121m	77	La-138	97	Eu-155
18	Co-60	38	Tc-99	58	Sn-123	78	Ce-139	98	Gd-152
19	Ni-59	39	Ru-106	59	Sn-126	79	Ce-142	99	Gd-153
20	Ni-63	40	Rh-101	60	Sb-125	80	Ce-144	100	Tb-157

表 1.1.4-1 手順 1 の結果で評価上存在する核種 (2/2)

No.	核種	No.	核種	No.	核種	No.	核種	No.	核種
101	Tb-158	123	Tl-207	145	Po-216	167	Th-234	189	Pu-240
102	Dy-159	124	Tl-208	146	Po-218	168	Pa-231	190	Pu-241
103	Ho-163	125	Tl-209	147	At-217	169	Pa-233	191	Pu-242
104	Ho-166m	126	Pb-205	148	Rn-219	170	Pa-234	192	Pu-243
105	Tm-170	127	Pb-209	149	Rn-220	171	Pa-234m	193	Pu-244
106	Tm-171	128	Pb-210	150	Rn-222	172	U-232	194	Am-241
107	Lu-176	129	Pb-211	151	Fr-221	173	U-233	195	Am-242
108	Lu-177	130	Pb-212	152	Fr-223	174	U-234	196	Am-242m
109	Lu-177m	131	Pb-214	153	Ra-223	175	U-235	197	Am-243
110	Hf-182	132	Bi-208	154	Ra-224	176	U-236	198	Am-245
111	Ta-182	133	Bi-210	155	Ra-225	177	U-237	199	Cm-242
112	W-181	134	Bi-210m	156	Ra-226	178	U-238	200	Cm-243
113	Re-187	135	Bi-211	157	Ra-228	179	U-240	201	Cm-244
114	Os-194	136	Bi-212	158	Ac-225	180	Np-235	202	Cm-245
115	Ir-192	137	Bi-213	159	Ac-227	181	Np-236	203	Cm-246
116	Ir-192m	138	Bi-214	160	Ac-228	182	Np-237	204	Cm-247
117	Ir-194	139	Po-210	161	Th-227	183	Np-238	205	Cm-248
118	Ir-194m	140	Po-211	162	Th-228	184	Np-239	206	Bk-249
119	Pt-190	141	Po-212	163	Th-229	185	Np-240m	207	Cf-249
120	Pt-193	142	Po-213	164	Th-230	186	Pu-236	208	Cf-250
121	Tl-204	143	Po-214	165	Th-231	187	Pu-238	209	Cf-251
122	Tl-206	144	Po-215	166	Th-232	188	Pu-239	210	Cf-252

2.2 手順2について

手順2の「希ガス（Rn 除く）に該当？」という項目は、主に原子炉運転中に生成し、希ガスとなっている核種は、震災12年後の炉心に存在していないと考えられる他、仮に残存していたとしても、希ガスは安定元素のため、汚染水に溶けないことから、ALPS処理水海洋放出時の測定・評価対象核種には該当しないと考え、これらの核種を除外している。なお、Rnについては、ウランやネプツニウム等の崩壊系列により、現在でも炉心に存在すると考えられることから、希ガスに該当するものの、当該手順では除外しないこととした。

今回の評価において、Rnを除く希ガスは以下4核種であり、半減期や生成経路も併せて確認した結果は表1.1.4-2の通り。

表 1.1.4-2 手順2で除外される核種とその生成経路

核種（希ガス）	半減期 [y]	主な生成経路
Ar-39	2.7E+02	構造材に含まれる微量成分（K）の放射化により生成
Ar-42	3.3E+01	構造材に含まれる微量成分（K, Ca 等）の放射化により生成
Kr-81	2.3E+05	燃料の核分裂により生成 構造材に含まれる微量成分（Br）の放射化により生成
Kr-85	1.1E+02	燃料の核分裂により生成

2.3 手順3について

手順3の「ALPS処理水等貯留タンクへの全量移行を評価した結果が、告示濃度限度に対して1/100を超えるか？」という項目は、線量評価に与える影響が十分小さいか（告示濃度限度1/100以下）を確認したうえで、この基準を上回る核種について、次の手順に進むこととしている。なお、PCV内に存在するインベントリが全量、2023年3月時点のALPS処理水等貯留タンクの貯蔵量（予測）※に溶けたと想定するため、PCV内部調査で確認された現実の状況を踏まえると十分に保守性を持った条件と考えている。

※：インベントリ評価の条件と合わせた時期とする

$$\text{核種iの濃度} = \text{核種iのインベントリ量(Bq)} \div \frac{\text{ALPS処理水等の貯蔵量 (m}^3\text{)}}{133\text{万m}^3 \text{ (予測値) @2023年3月時点}} < \text{核種iの告示濃度限度} \times 0.01 \text{ (Bq/cm}^3\text{)}$$

また、手順3で炉内に生成したインベントリ量を133万m³で除した結果、後述する手順4におけるアルカリ土類金属（Sr-90他）と同等の汚染水の移行のしやすさを設定することとなり、当該手順で除外される大部分の核種（遷移金属、ランタノイド、アクチノイド等）は、実際の移行のしやすさと比較して100倍以上の保守性を有することになる。このことから、告示濃度限度の1/100未満と合わせて実際の濃度は告示濃度限度比1/10000未満となるため、当該手順における除外の基準は、十分な保守性を有していると考えられる。

この結果、手順4に進む核種は93核種、除外される核種は113核種となる。

表 1.1.4-3 手順 4 に進む核種 (93 核種)

No.	核種	No.	核種	No.	核種	No.	核種	No.	核種
1	H-3	46	Ag-108m	81	Pr-144	159	Ac-227	189	Pu-240
3	C-14	49	Ag-110m	82	Pr-144m	162	Th-228	190	Pu-241
7	Cl-36	50	Cd-109	86	Pm-146	164	Th-230	191	Pu-242
16	Mn-54	51	Cd-113m	87	Pm-147	165	Th-231	194	Am-241
17	Fe-55	55	Sn-119m	93	Sm-151	167	Th-234	195	Am-242
18	Co-60	56	Sn-121	95	Eu-152	168	Pa-231	196	Am-242m
19	Ni-59	57	Sn-121m	96	Eu-154	169	Pa-233	197	Am-243
20	Ni-63	59	Sn-126	97	Eu-155	172	U-232	199	Cm-242
21	Zn-65	60	Sb-125	104	Ho-166m	173	U-233	200	Cm-243
23	Se-79	61	Sb-126	106	Tm-171	174	U-234	201	Cm-244
27	Sr-90	62	Sb-126m	120	Pt-193	175	U-235	202	Cm-245
29	Y-90	67	Te-125m	121	Tl-204	176	U-236	203	Cm-246
30	Zr-93	70	I-129	130	Pb-212	177	U-237	208	Cf-250
33	Nb-93m	71	Cs-134	136	Bi-212	178	U-238		
34	Nb-94	72	Cs-135	141	Po-212	182	Np-237		
35	Mo-93	73	Cs-137	145	Po-216	183	Np-238		
38	Tc-99	74	Ba-133	149	Rn-220	184	Np-239		
39	Ru-106	75	Ba-137m	153	Ra-223	186	Pu-236		
43	Rh-106	79	Ce-142	154	Ra-224	187	Pu-238		
44	Pd-107	80	Ce-144	157	Ra-228	188	Pu-239		

2.4 手順4について

2.4.1 汚染水への移行評価の概要

手順4の「汚染水への移行評価にて評価した濃度が告示濃度限度に対して1/100を超えるか？」という項目は、実際の分析結果を使用して「汚染水への移行評価」を行い、線量評価に与える影響が十分小さいか（告示濃度限度1/100以下）を確認したうえで、この基準を上回る核種について、次の手順に進むこととしている。

本手順では、放射平衡や同位体、核種の性質の類似性から手順4までに進んだ核種のグルーピングを行った後、グループ毎に実際の分析結果から放射性核種毎の水への移行のしやすさ（以下「移行係数」という。）を算出したうえで、同係数を使用して、放射性核種毎の汚染水中の濃度を評価する。具体的には下記式にて評価を実施することとしている。

ここで、告示濃度限度の1/100以下として設定した理由は、線量影響が十分小さいことその他、本評価での評価対象箇所はALPS入口以前の建屋滞留水やストロチウム処理水であるため、その後のALPS処理を踏まえると十分な保守性を有していると考えている。

$$\text{汚染水中の放射性核種の評価濃度 (Bq/L)} = \text{インベントリ量}^{\ast 1} \text{ (Bq)} \times \text{移行係数}^{\ast 2} \text{ (1/L)}$$

※1：ALPS処理水の海洋放出時期を踏まえ、震災後12年の評価結果を使用

※2：汚染水の分析結果 (Bq/L) ÷ インベントリ量 (Bq) にて算出。それぞれは基準日は2011年3月11日に統一した結果を使用

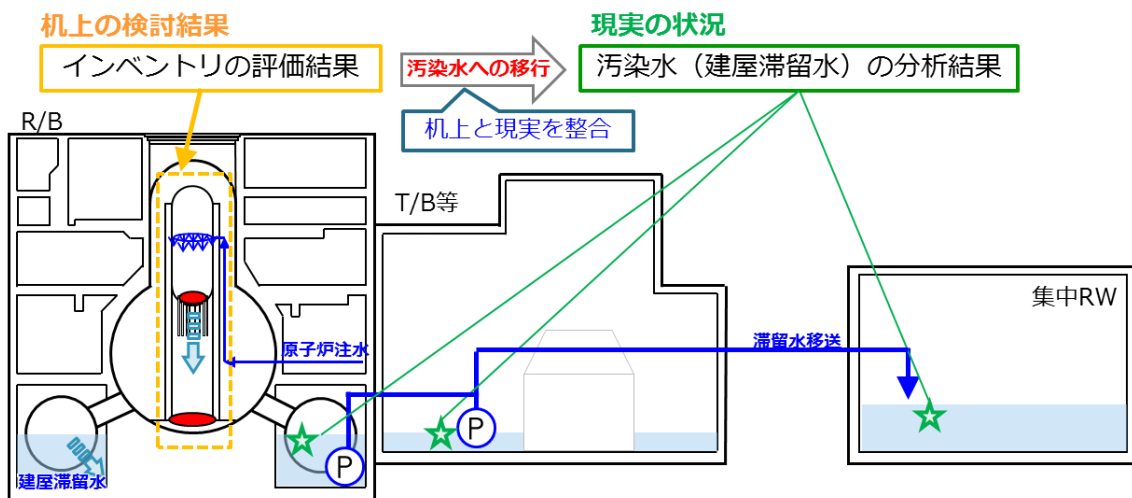


図 1.1.4-2 汚染水への移行評価のイメージ

2.4.2 汚染水への移行評価に使用する分析結果

移行係数の算出に当たって使用する分析結果は、表 1.1.4-4、図 1.1.4-3 に示す通り、4 種類に分けてデータを集約した。

なお、汚染水は全て集中 Rw（プロセス主建屋（PMB）、高温焼却炉建屋（HTI））に集水した後、セシウム吸着装置（SARRY/SARRY2）にて処理を行い、この水が最終的に ALPS 処理水となることから、集中 Rw の分析結果を使用することを基本とする。ただし、集中 Rw の分析結果だけでは全ての放射性核種のデータが揃わないことに加えて、建屋滞留水は Cs の濃度が高い影響から検出下限値が高い等の理由により、分析データ数が少ない核種があることから、それらの核種については、1～4号機建屋滞留水等と ALPS 処理前の分析データで補完することで対応する。

表 1.1.4-4 分析結果の分類

No.	分析の分類	詳細
①	建屋滞留水等@ 1～4号機	1～4号機の PCV 内や建屋滞留水の分析結果
②	建屋滞留水@集中 Rw	集中 Rw（PMB/HTI）、SARRY 等の入口の分析結果
③	セシウム吸着装置～ALPS 入口	セシウム吸着装置出口～ALPS 入口の分析結果
④	ALPS 出口	ALPS 処理後の分析結果

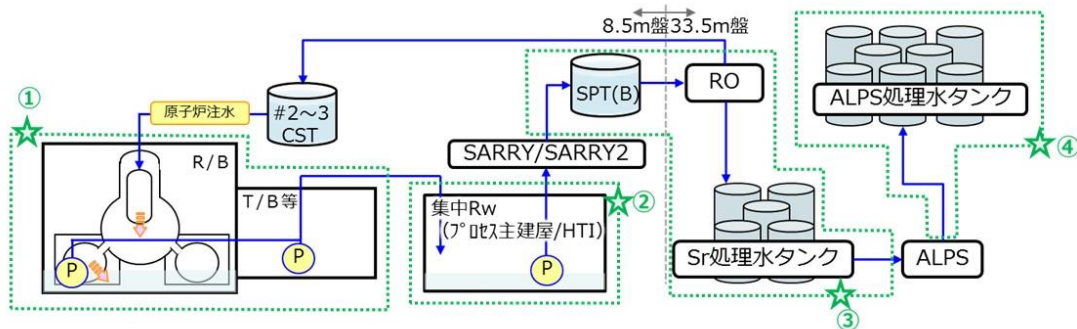
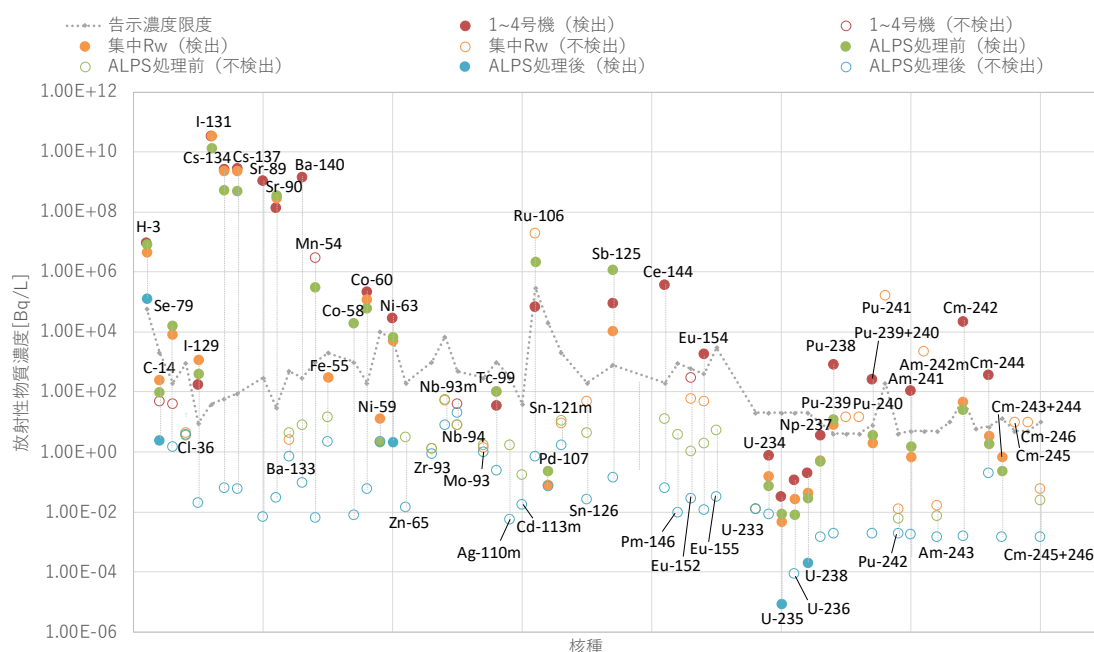


図 1.1.4-3 移行評価で使用する分析結果の分類

表 1.1.4-4 で示した試料の採取箇所毎に分類し、手順 4 まで進んだ放射性核種（短半減期の同位体の検出値含む）の分析結果を図 1.1.4-4 の通り整理した。図 1.1.4-4 では、表 1.1.4-4 における No.①～③は検出値について 2011 年 3 月 11 日まで減衰補正した最大値を、不検出値について分析データの最小値を記載しており、No.④はこれまでの分析結果の最小値を記載している。

本図では、建屋滞留水から ALPS 処理水になるまでに処理される過程の、各放射性核種の濃度の範囲が把握出来ると共に、各核種の告示濃度限度も記載することで、分析結果と告示濃度との比較ができる記載としている。



※1：2013~2014年に既設ALPS入口にSr-90が検出されたことになっているが、擬似検出であるため評価の対象外
 ※2：Pu-238, Am-241, Cm-242について、FRAnDLiのデータは分析値から2011/3/11の基準日へ単純な減衰補正をしているものの、これら核種は親核種からの生成されることから、親核種からの生成を考慮した減衰補正を実施。

図 1.1.4-4 分析結果まとめ

図 1.1.4-4 を作成に当たって、2022 年 9 月時点で JAEA 殿が公開している FRAnDLi のデータ（東電公表分含む）の他、ALPS の性能確認時等の 62 核種分析（2013～2022 年度）、処理水ポータルで公開している ALPS 処理前後のデータ及び、ALPS 処理水等貯留タンクのデータ等を使用している。なお、検出下限値のデータを使用するに当たっては、検出下限値の数値が記載されているデータのみを集計の対象としており、“N.D.”のみが記載されているデータは集計の対象外とした。各放射性核種の分析データ数は表 1.1.4-5 の通り。

表 1.1.4-5 分析データ数 (1/2)

核種	① 1～4号機	② 集中Rw	③ ALPS処理前	④ ALPS処理後
	データ数(うち検出数)	データ数(うち検出数)	データ数(うち検出数)	データ数(うち検出数)
H-3	22 (22)	28 (28)	310 (310)	486 (486)
C-14	5 (0)	15 (1)	25 (13)	341 (341)
Cl-36	0 (0)	10 (0)	12 (0)	3 (0)
Mn-54	2 (0)	0 (0)	1194 (290)	1893 (14)
Fe-55	0 (0)	1 (1)	1 (0)	3 (0)
Co-58	0 (0)	0 (0)	26 (5)	42 (0)
Co-60	40 (20)	41 (27)	1568 (1404)	2330 (2187)
Ni-59	0 (0)	3 (1)	12 (1)	3 (0)
Ni-63	13 (10)	21 (16)	92 (48)	55 (1)
Zn-65	0 (0)	0 (0)	21 (0)	42 (0)
Se-79	10 (0)	15 (9)	47 (12)	5 (0)
Sr-89	4 (3)	0 (0)	65 (17 ^{※1})	128 (0)
Sr-90	41 (40)	40 (40)	844 (833)	1782 (775)
Zr-93	0 (0)	1 (0)	1 (0)	3 (0)
Nb-93m	0 (0)	1 (0)	1 (0)	3 (0)
Nb-94	36 (0)	38 (0)	67 (0)	2 (0)
Mo-93	0 (0)	1 (0)	1 (0)	3 (0)
Tc-99	5 (2)	21 (7)	246 (221)	898 (105)
Ru-106	6 (1)	2 (0)	1255 (972)	2376 (1431)
Pd-107	0 (0)	1 (1)	1 (1)	1 (0)
Ag-110m	0 (0)	0 (0)	21 (0)	42 (0)
Cd-113m	0 (0)	0 (0)	21 (0)	42 (0)
Sn-121m	0 (0)	1 (0)	1 (0)	3 (0)
Sn-126	0 (0)	2 (0)	32 (0)	44 (0)
Sb-125	27 (9)	14 (10)	1618 (1605)	2378 (1589)
I-129	22 (4)	30 (10)	449 (380)	1840 (1550)
I-131	4 (0)	16 (2)	43 (22)	0 (0)

※1：2013～2014年に既設ALPS入口にSr-89が検出されたことになっているが、擬似検出であるため評価の対象外

※2：手順4には進んでいないものの、Te-123m(半減期：119日)が2019年9月9日の増設ALPS(B)出口で告示濃度限度(6.0E+01Bq/L)の1/100以下の1.1E-01Bq/Lで検出されている(検出下限値は0.9E-01Bq/L)

表 1.1.4-5 分析データ数 (2/2)

核種	① 1～4号機	② 集中Rw	③ ALPS処理前	④ ALPS処理後
	データ数(うち検出数)	データ数(うち検出数)	データ数(うち検出数)	データ数(うち検出数)
Cs-134	190 (190)	260 (260)	1502 (1261)	2384 (364)
Cs-137	224 (224)	300 (300)	1745 (1699)	2391 (1512)
Ba-133	0 (0)	1 (0)	1 (0)	3 (0)
Ba-140	4 (2)	0 (0)	21 (0)	42 (0)
Ce-144	3 (3)	0 (0)	21 (0)	42 (0)
Pm-146	0 (0)	0 (0)	21 (0)	42 (0)
Eu-152	36 (0)	40 (0)	92 (0)	44 (0)
Eu-154	38 (2)	40 (0)	113 (0)	47 (0)
Eu-155	0 (0)	0 (0)	21 (0)	42 (0)
U-233	0 (0)	3 (0)	8 (0)	3 (0)
U-234	25 (7)	23 (11)	22 (7)	3 (0)
U-235	26 (19)	23 (14)	44 (14)	6 (3 ^{*1})
U-236	20 (7)	23 (12)	22 (8)	3 (0)
U-238	31 (26)	23 (18)	44 (20)	6 (3 ^{*1})
Np-237	9 (9)	13 (9)	16 (7)	3 (0)
Pu-238	38 (17)	41 (22)	73 (16)	8 (0)
Pu-239	0 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)
Pu-240	0 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)
Pu-239+240	38 (12)	40 (12)	73 (10)	8 (0)
Pu-241	0 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)
Pu-242	0 (0)	4 (0)	8 (0)	3 (0)
Am-241	37 (11)	41 (6)	62 (3)	7 (0)
Am-242m	0 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)
Am-243	0 (0)	3 (0)	8 (0)	3 (0)
Cm-242	7 (2)	1 (1)	2 (1)	3 (0)
Cm-244	37 (7)	40 (2)	61 (6)	4 (0)
Cm-243+244	0 (0)	1 (1)	1 (1)	3 (0)
Cm-245	0 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)
Cm-246	0 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)

※1: ALPS 処理水に含まれる天然ウランを検出 (別紙-2 参照)

2.4.3 核種のグルーピング

2.4.3.1 核種のグルーピングの考え方

(1) 放射平衡の子孫核種

手順4まで進んだ核種のうち、放射平衡で存在する核種は、表 1.1.4-6、表 1.1.4-7 に示す。表 1.1.4-6 に示す子孫核種は半減期が短く、ALPS 処理水を海洋放出する震災 12 年後には、基本的に親核種の崩壊によってのみ存在する核種となることから、汚染水への移行評価では親核種と一緒に挙動しているとみなす。一方、表 1.1.4-7 に示す子孫核種は半減期が長く、2022 年現在においても放射平衡に達していないため、今回は親核種と子孫核種は別々に評価する。

表 1.1.4-6 放射平衡により親核種と一緒に挙動していると評価する子孫核種

No.	親核種		子孫核種	
	核種	半減期	核種	半減期
1	Sr-90	2.88E+01 [y]	Y-90	2.67 [d]
2	Ru-106	1.02E+00 [y]	Rh-106	30.07 [s]
3	Sn-121m	4.39E+01 [y]	Sn-121	1.13 [d]
4	Sn-126	2.30E+05 [y]	Sb-126	12.35 [d]
			Sb-126m	19.15 [m]
5	Sb-125	2.76E+00 [y]	Te-125m	57.40 [d]
6	Cs-137	3.01E+01 [y]	Ba-137m	2.552 [m]
7	Ce-144	7.81E-01 [y]	Pr-144	17.28 [m]
			Pr-144m	7.2 [m]
8	Pu-241	1.43E+01 [y]	U-237	6.752 [d]
9	Am-242m	1.41E+02 [y]	Np238	2.112 [d]
10	Am-242m	1.41E+02 [y]	Am-242	16.02 [h]
			Cm-242	162.8 [d]
11	Am-243	7.37E+03 [y]	Np-239	2.356 [d]

表 1.1.4-7 放射平衡でも親核種と別に挙動していると評価する子孫核種

No.	親核種		子孫核種	
	核種	半減期	核種	半減期
1	Zr-93	1.61E+06 [y]	Nb-93m	1.61E+01 [y]

(2) ウラン，ネプツニウム等の崩壊系列から生成される核種

手順4まで進んだ核種のうち，ウラン，ネプツニウム等の崩壊系列により存在している核種は図 1.1.4-5 の赤枠の通り。これらの核種について，汚染水への移行評価では，大元の親核種（ネプツニウムやウラン）と一緒に挙動しているとみなして評価を行う。

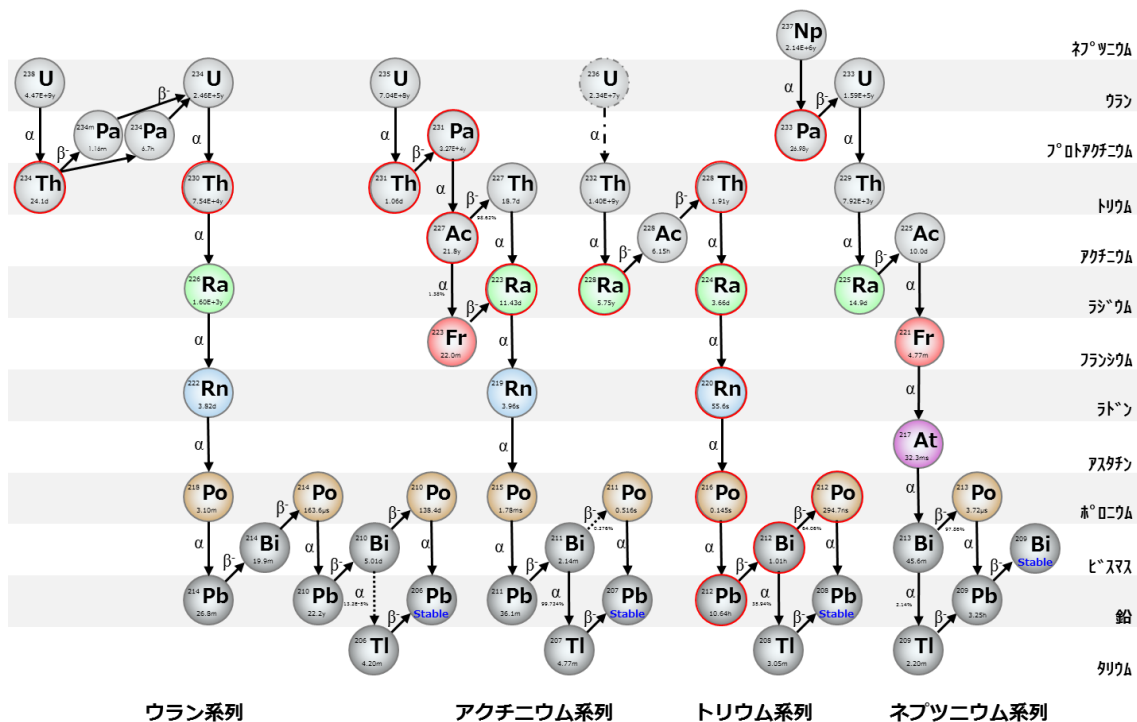


図 1.1.4-5 ウラン，ネプツニウム等の崩壊系列での生成核種

(3) 水中における性質に類似性がある核種

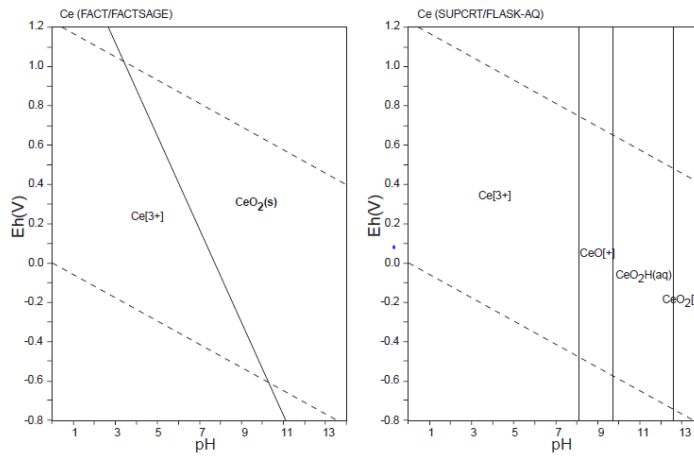
(1), (2)以外に，2022 年時点で分析技術が確立しておらず，個別分析が困難等の理由により，分析結果がない核種が存在する。これらの核種については，核種の水中における化学形態やイオン半径等の類似性を確認の上，類似性が確認された場合，分析結果が存在している核種と同等の水の移行のしやすさとみなして評価を行う。なお，確認においては，Eh-pH 図等を用いて水中における化学形態を確認する他，イオン半径や水処理における吸着性能にも着目する。

① ランタノイド元素 (Pm, Sm, Ho, Tm)

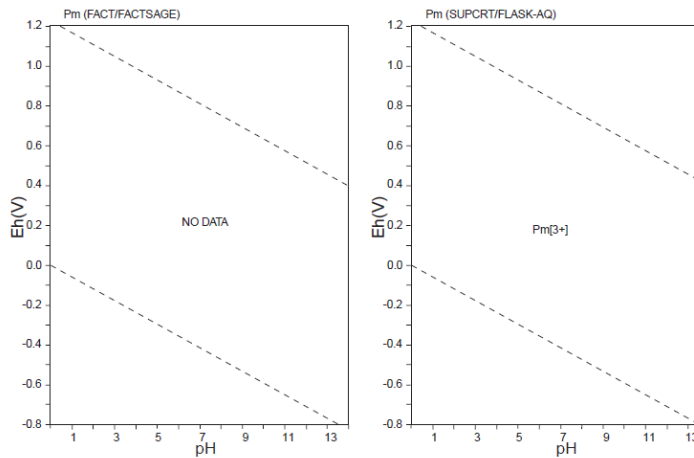
ランタノイド元素については、ALPS 除去対象核種として、Ce-141, Ce-144, Pm-146, Pm-148, Pm-148m, Eu-152, Eu-154, Eu-155, Gd-153, Tb-160 を分析評価しているが、ALPS 処理前後の分析において、これまでに検出された実績はない。また、建屋滞留水においても Eu-152, Eu-154 を各々、約 80 回程度分析して検出された実績はないものの、過去の 2, 3 号機の PCV 内部調査にて、採水した PCV 内滞留水について分析した結果、Ce-144 と Eu-154 が検出されている。

今回、この PCV 内で検出された Ce-144 と Eu-154 の結果に基づき、他のランタノイド元素についても汚染水の移行評価を行うことから、Eh-pH 図を用いてその妥当性について確認を行った (図 1.1.4-6 参照)。

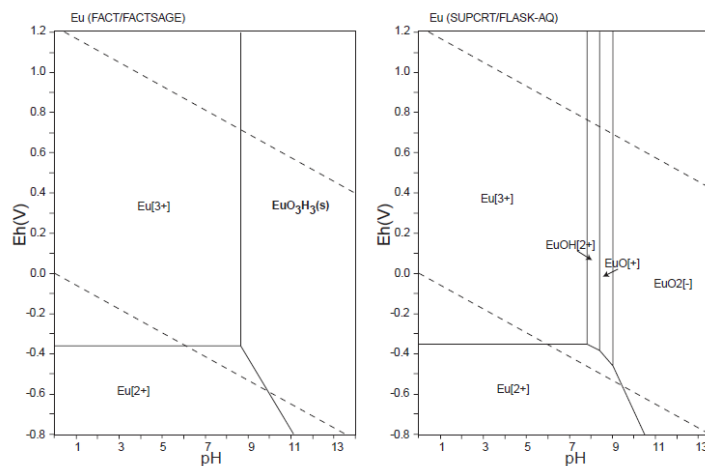
確認した結果、ランタノイド元素は原子炉注水や建屋滞留水における水素イオン指数 (pH) 6~8 において、主に 3 価の陽イオンで安定するという、類似性があることを確認した。なお、ランタノイドについては、一般的に各々の性質がよく似ていることで知られており、今回の確認結果を踏まえて、ランタノイド元素は全て同じグループとして評価することは妥当であると考ええる。



(1) セリウム (Ce)



(2) プロメチウム (Pm)



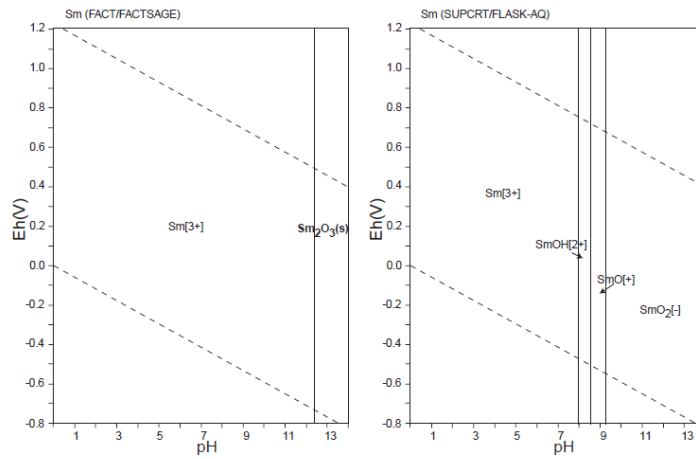
(3) ユロピウム (Eu)

※Fact : GFT-Technologies 製 ソフトウェア FactSage5.2 に添付のデータベース

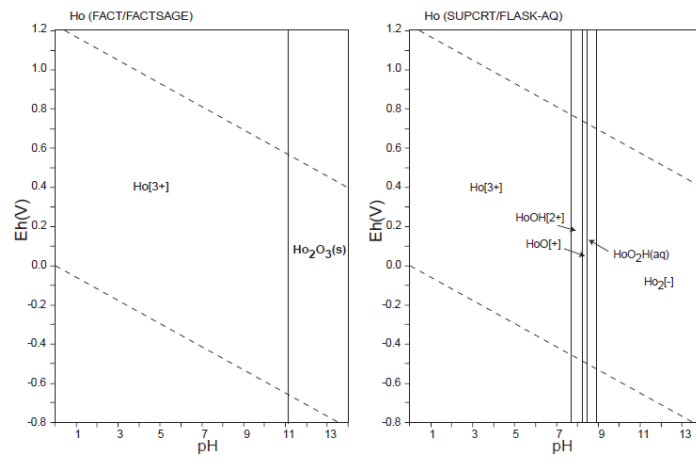
Supcrt : LLNL の研究者が開発したソフトウェアで使用されているデータベース

“Eh-pH 図アトラス 熱力学データベースの相互比較” (産業技術総合研究所) より

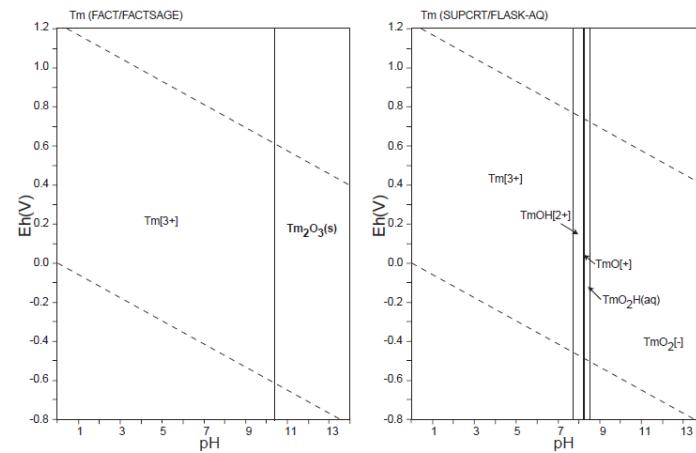
図 1.1.4-6 ランタノイド元素の比較 (1/2)



(4) サマリウム (Sm)



(5) ホルミウム (Ho)



(6) ツリウム (Tm)

※Fact : GTT-Technologies 製 ソフトウェア FactSage5.2 に添付のデータベース
 Supert : LLNL の研究者が開発したソフトウェアで使用されているデータベース
 “Eh-pH 図アトラス 熱力学データベースの相互比較” (産業技術総合研究所) より

図 1.1.4-6 ランタノイド元素の比較 (2/2)

② 白金族 (Ru, Pd, Pt)

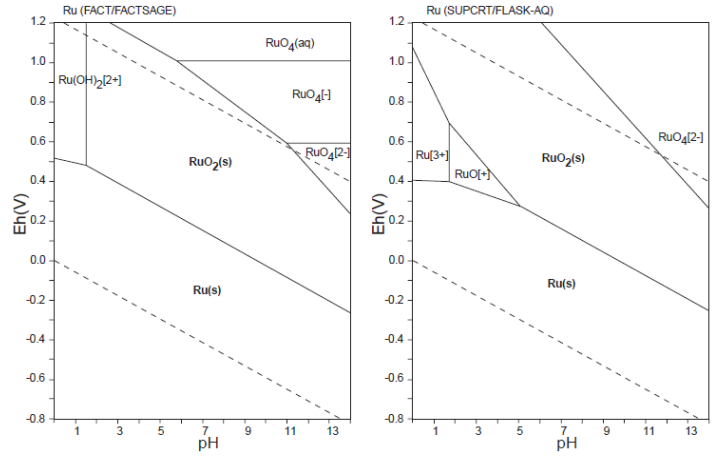
白金族については、ALPS 除去対象核種として、Ru-103 (Rh-103m) Ru-106 (Rh-106) を分析評価しており、これまでに Ru-106 (Rh-106) が検出されている (Rh は両者とも Ru からの崩壊で生成)。なお、Ru-106 は ALPS の性能確認等を実施するための代表核種である、主要 7 核種にも選定されている。また、今回追加で実施した核種分析により、Pd の分析を実施しており、建屋滞留水や ALPS 処理前のストロンチウム処理水において、非常に低濃度で検出されている。他に、Pt-193 が手順 4 まで進んでいるものの、当該核種については個別に測定するための手法が確立されておらず、分析実績がない。

このため、Ru-106 や Pd-107 の分析結果に基づき、Pt の汚染水への移行評価をするに当たって、Eh-pH 図等を用いてその妥当性の確認を行った (図 1.1.4-7 参照)。

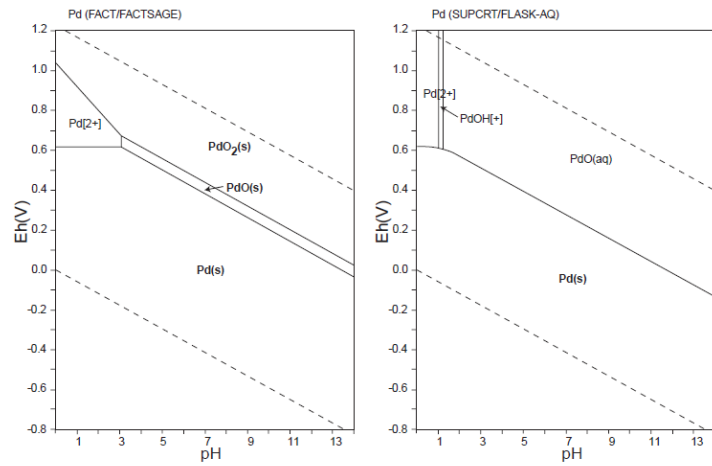
確認した結果、白金族は原子炉注水や建屋滞留水における水素イオン指数 (pH) 6~8 において、主に固体で存在することを確認。なお、固体の存在形態としては、Ru は金属単体もしくは酸化物の固体、Pd, Pt は金属単体での固体として存在しており、水への溶解度がそれぞれ Ru (単体) : $2.0E-10$ mol/L^{※1}, Ru (酸化物) : $6.0E-10$ mol/L^{※1}, Pd : $1.0E-09$ mol/L^{※2}, Pt : $4.1E-10$ mol/L^{※1} と非常に低いことを確認 (Ru (酸化物) の溶解度は、文献に記載の値をもとに、最も保守的な溶解度である無水化合物の溶解度より算出した)。また、白金族については、一般的に物理的性質や化学的性質が互いによく似ており、水とは反応せず酸や塩基に侵されにくい性質を持つとされることから、今回 Pt は、Ru-106 や Pd-107 と同じグループとして汚染水への移行評価することは妥当であると考え。

※1 : “The International Platinum Group Metals Association, “Safe Use of Platinum Group Metals in the Workplace”, Chapter 2 PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF PLATINUM GROUP METALS (2017)” より

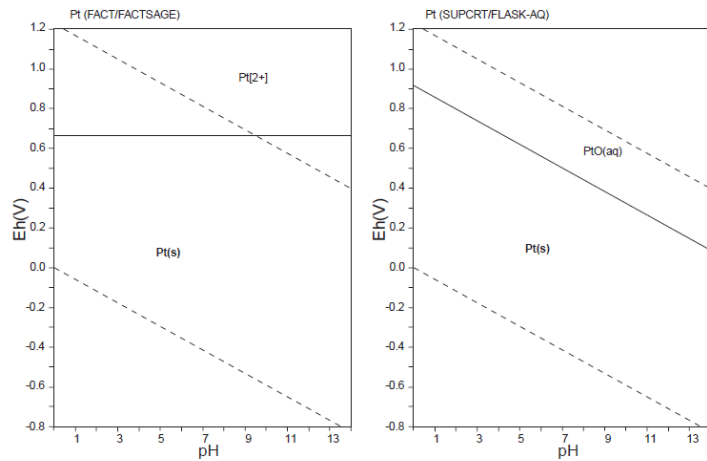
※2 : “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ” (2000 年レポート) より



(1) ルテニウム (Ru)



(2) パラジウム (Pd)



(3) 白金 (Pt)

※Fact : GTT-Technologies 製 ソフトウェア FactSage5.2 に添付のデータベース
 Supcrt : LLNL の研究者が開発したソフトウェアで使用されているデータベース SUPCRT92
 “Eh-pH 図アトラス 熱力学データベースの相互比較” (産業技術総合研究所) より

図 1.1.4-7 白金族の比較

③ タリウム (Tl)

タリウムについて、Tl-204 が手順 4 まで進んでいるものの、当該核種については個別に測定するための分析手法が確立されておらず、分析実績がない。ただし、当該核種は主に β 崩壊し、そのエネルギーは約 760keV と高く、ALPS 処理水における全 β 分析の結果と、主要 7 核種に Tc-99 と C-14 を足した結果に乖離がないため、ALPS 処理水には有意な濃度で存在していないと考えられる。

一方、今回汚染水への移行評価に当たって調査した結果、タリウムはアルカリ金属 (Cs) と類似の性質を持つことを確認したことから、Eh-pH 図、イオン半径や水処理における吸着性にて、その妥当性について説明する。

Eh-pH 図を確認した結果、Tl は第 13 元素ではあるが、原子炉注水や建屋滞留水における水素イオン指数 (pH) 6~8 において、1 価の陽イオンで安定であることを確認 (図 1.1.4-8 参照)。また、Tl イオンについては、その半径が 1.64 Å (6 配位), 1.73 Å (8 配位) であり、アルカリ金属である Cs イオンの半径 1.81 Å (6 配位), 1.81 Å (8 配位), K イオンの半径 1.51 Å (4 配位), 1.52 Å (6 配位), 1.65 Å (8 配位) の中間であり、ゼオライトによる陽イオンの選択性は、K イオンと同等と評価されている^{※1}。また、鉱山等で発生する廃液中の Tl イオンは、Cs イオンと同様にフェロシアン化合物、活性炭、チタン酸、粘土鉱物に吸着することが知られている^{※2} 他、土壌に対しても Cs と同等の吸着性能を持つ報告もある^{※3}。

このことから、タリウムはアルカリ金属と同じグループとして、汚染水への移行から水処理まで同様に挙動するとして評価することは妥当であると考えられる。

※1：新田，青村，“合成 A 型ゼオライトによる交換カチオンの差異と選択性に関する研究”より

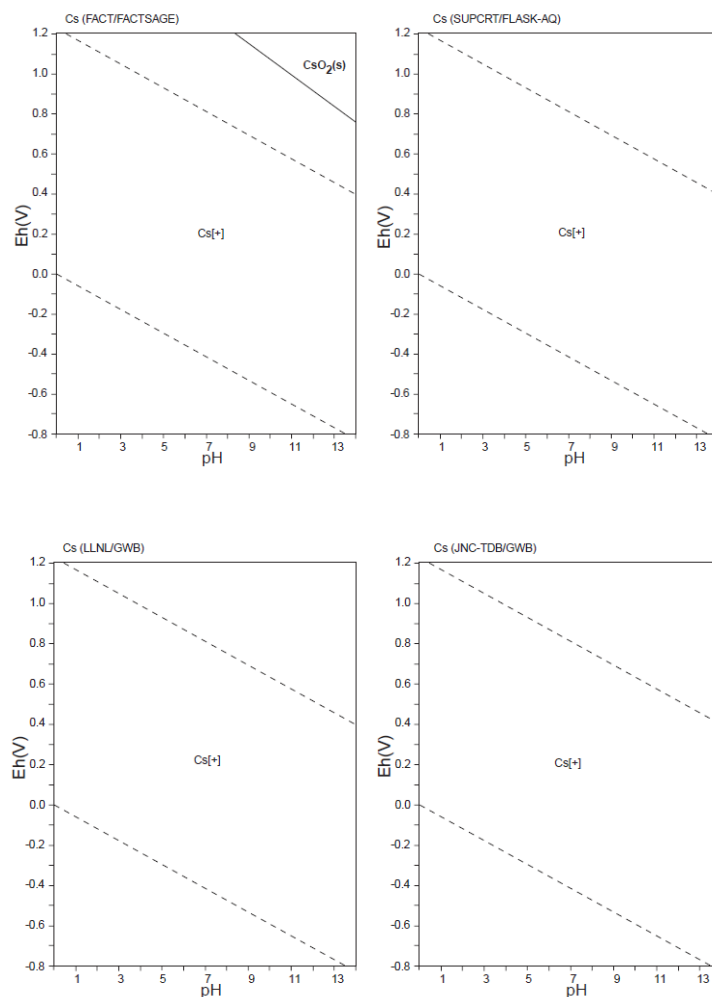
※2：Hariyin Xu, Yuanling Luo, et al. “Removal of thallium in water-wastewater”, 2019-Water Research

Juan Liu, Xuwen Luo, et al. “Thallium pollution in China and removal technologies for waters”, 2019-Environment International

L.G.Twidwell, C. Williams-Beam, “Potential Technologies for Removing Thallium from Mine and Process Wastewater”, Twidwell2002

小林，山元，明石，“放射線事故時におけるセシウム除去としてのプルシアンブルー”より

※3：John E.Till, Helen A.Grogan, "Radiobiological Risk Assessment and Environmental Analysis", Oxford University Press (2008). より



(1) セシウム (Cs)

※Fact : GTT-Technologies 製 ソフトウェア FactSage5.2 に添付のデータベース

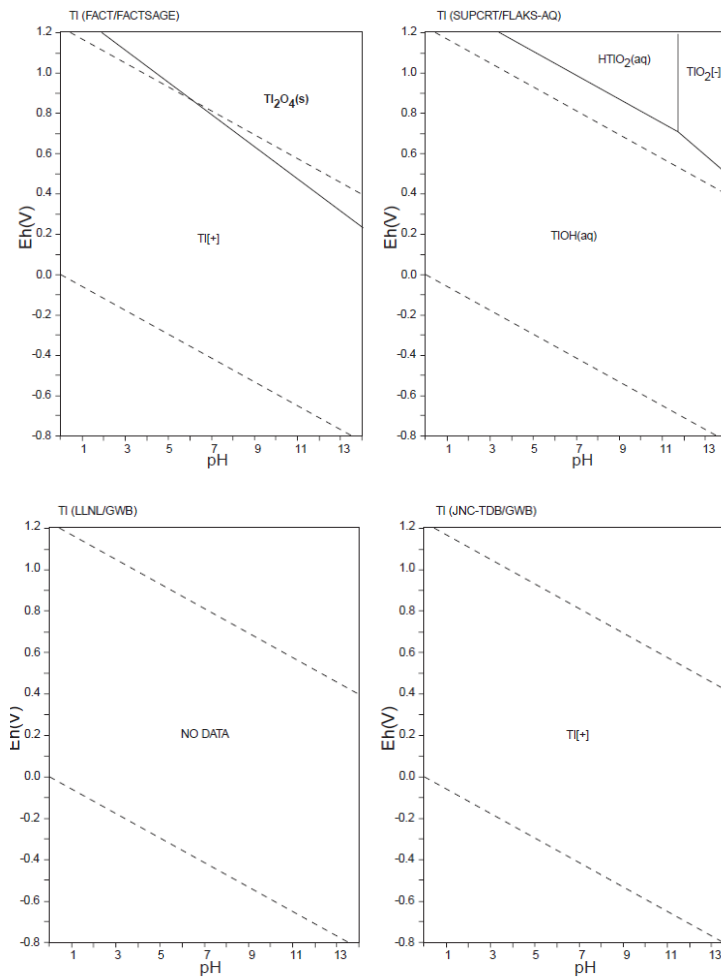
Supcrt : LLNL の研究者が開発したソフトウェアで使用されているデータベース SUPCRT92

LLNL : イリノイ大学が開発したソフトウェアに標準的に添付されているデータベース

JNC-TDB : 旧核燃料サイクル機構によって整備されたデータベース

“Eh-pH 図アトラス 熱力学データベースの相互比較” (産業技術総合研究所) より

図 1.1.4-8 タリウムとセシウムの比較 (1/2)



(2) タリウム (TI)

※Fact : GTT-Technologies 製 ソフトウェア FactSage5.2 に添付のデータベース
 Supcrt : LLNL の研究者が開発したソフトウェアで使用されているデータベース SUPCRT92
 LLNL : イリノイ大学が開発したソフトウェアに標準的に添付されているデータベース
 JNC-TDB : 旧核燃料サイクル機構によって整備されたデータベース
 “Eh-pH 図アトラス 熱力学データベースの相互比較” (産業技術総合研究所) より

図 1.1.4-8 タリウムとセシウムの比較 (2/2)

④ カリホルニウム (Cf)

カリホルニウムについて、Cf-250 が手順 4 まで進んでいるものの、分析実績がない。ただし、当該核種は主に α 崩壊し、ALPS 処理水における全 α 分析は不検出であることから、ALPS 処理水に有意な濃度で存在しないと考えられる。

一方、今回汚染水への移行評価に当たって、Cf と類似の性質を持つ核種を確認し、Am, Cm と類似の性質を持つとして評価することから、水中における化学形態や、イオン半径等を確認してその妥当性について説明する。

カリホルニウムについては、Eh-pH 図が確認できなかったものの、水溶液中は 3 価の陽イオンが安定と記載されている他、3 価の超プルトニウム元素 (Am, Cm) に非常に似通った化学挙動であることを確認^{※1}。また、Am, Cm, Cf の 3 価の陽イオンの半径はそれぞれ、 1.12 \AA (6 配位)、 1.11 \AA (6 配位)、 1.09 \AA (6 配位)^{※2} と、ほぼ同等のイオン半径であることを確認した。

このことから、Cf は Am や Cm と同じグループとして汚染水への移行評価することは妥当であると考ええる。

※1 : Laster R.Morss, Norman M.Edelstein, Jean Fuger, “The Chemistry of The Actinide And Transactinide Elements_4thEd”

※2 : R.D.Shannon, “Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides”

2.4.3.2 核種のグルーピング結果

2.4.3.1 項で示した核種のグルーピングの考え方に基づいて、手順4で残っている核種をグルーピングした結果は、表 1.1.4-8～表 1.1.4-19 の通り。これらの核種については、ALPS 処理までの過程で同様に挙動するとみなして評価する。

グルーピングした核種は、グループの中の最も線量影響の大きい代表核種と比較した上で、代表核種との相対比が 1/100 以下の場合に除外を行う。これは、グループ内の核種は同じ挙動を示すことから、処理する過程ではインベントリ比は保持した状態となるため、告示濃度限度比総和 1 未満の ALPS 処理水となった際の線量影響を踏まえると、代表核種が十分に除去出来ていれば、相対比が 1/100 以下の核種の線量影響は無視するという考え方に因るものである。

表 1.1.4-8 グループ 1 (Ni 同位体)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Ni-59	7.60E+04 [y]	7.3E+13	1.0E+04	0.0052	除外
Ni-63	1.01E+02 [y]	8.5E+15	6.0E+03	1	代表核種

表 1.1.4-9 グループ 2 (Sr-90 放射平衡)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Sr-90	2.88E+01 [y]	3.9E+17	3.0E+01	1	代表核種
Y-90	2.67 [d]	3.9E+17	3.0E+02	0.10	

表 1.1.4-10 グループ 3 (Nb 同位体)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Nb-93m	1.61E+01 [y]	6.3E+12	7.0E+03	0.50	
Nb-94	2.03E+04 [y]	9.0E+11	5.0E+02	1	代表核種

※：Nb-93m は今後、Zr-93 と放射平衡となるため暫定評価

表 1.1.4-11 グループ 4 (Ru-106 放射平衡)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Ru-106	1.02E+00 [y]	7.5E+14	1.0E+02	1	代表核種
Rh-106	30.07 [s]	7.6E+14	3.0E+05	0.00033	除外

表 1.1.4-12 グループ 5 (Sn 同位体, Sn-126 放射平衡)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Sn-119m	293.1 [d]	5.9E+10	2.0E+03	0.00065	除外
Sn-121	1.13 [d]	7.1E+13	4.0E+03	0.39	
Sn-121m	4.39E+01 [y]	9.1E+13	2.0E+03	1	代表核種
Sn-126	2.30E+05 [y]	1.6E+12	2.0E+02	0.18	
Sb-126	12.35 [d]	2.3E+11	4.0E+02	0.012	
Sb-126m	19.15 [m]	1.6E+12	2.0E+04	0.0018	除外

表 1.1.4-13 グループ 6 (Sb-125 放射平衡)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Sb-125	2.76E+00 [y]	2.9E+15	8.0E+02	1	代表核種
Te-125m	57.40 [d]	1.1E+15	9.0E+02	0.33	

表 1.1.4-14 グループ 7 (Cs 同位体, Cs-137 放射平衡, Tl-204)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Cs-134	2.06E+00 [y]	2.5E+16	6.0E+01	0.070	
Cs-135	2.30E+06 [y]	3.5E+12	6.0E+02	0.00000099	除外
Cs-137	3.01E+01 [y]	5.3E+17	9.0E+01	1	代表核種
Ba-137m	2.552 [m]	5.0E+17	8.0E+05	0.00011	除外
Tl-204	3.78E+00 [y]	1.4E+13	7.0E+02	0.0000035	除外

表 1.1.4-15 グループ 8 (ランタノイド)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Ce-142	5.00E+16 [y]	1.8E+08	7.0E-01	0.0000082	除外
Ce-144	284.91 [d]	1.7E+14	2.0E+02	0.027	
Pr-144	17.28 [m]	1.7E+14	2.0E+04	0.00027	除外
Pr-144m	7.2 [m]	2.5E+12	4.0E+04	0.000002	除外
Pm-146	5.53E+00 [y]	3.6E+12	9.0E+02	0.00013	除外
Pm-147	2.62E+00 [y]	5.6E+16	3.0E+03	0.59	
Sm-151	9.00E+01 [y]	2.2E+15	8.0E+03	0.0085	※
Eu-152	1.35E+01 [y]	9.0E+12	6.0E+02	0.00048	除外
Eu-154	8.60E+00 [y]	1.3E+16	4.0E+02	1	代表核種
Eu-155	4.75E+00 [y]	3.8E+15	3.0E+03	0.04	
Ho-166m	1.20E+03 [y]	2.6E+10	4.0E+02	0.000002	除外
Tm-171	1.92E+00 [y]	5.3E+12	7.0E+03	0.000024	除外

※：代表核種 Eu-154 より半減期が長く、放出期間中に相対比が 0.01 を上回ることから除外しない。

表 1.1.4-16 グループ 9 (U 同位体)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
U-232	6.89E+02 [y]	1.2E+11	3.0E+00	0.06	
U-233	1.59E+05 [y]	4.0E+08	2.0E+01	0.000030	除外
U-234	2.45E+05 [y]	1.4E+13	2.0E+01	1	代表核種
U-235	7.04E+08 [y]	3.7E+11	2.0E+01	0.027	
U-236	2.34E+07 [y]	2.0E+12	2.0E+01	0.15	
U-238	4.47E+09 [y]	3.0E+12	2.0E+01	0.22	

表 1.1.4-17 グループ 10 (Pu 同位体)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Pu-236	2.86E+00 [y]	1.1E+11	1.0E+01	0.0000027	除外
Pu-238	8.77E+01 [y]	1.6E+16	4.0E+00	1	代表核種
Pu-239	2.41E+04 [y]	2.6E+15	4.0E+00	0.17	
Pu-240	6.56E+03 [y]	3.3E+15	4.0E+00	0.21	
Pu-241	1.43E+01 [y]	4.3E+17	2.0E+02	0.55	
U-237	6.752 [d]	1.1E+13	1.0E+03	0.0000027	除外

表 1.1.4-18 グループ 11 (Am 同位体, Am242m/Am-243 放射平衡)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Am-241	4.33E+02 [y]	1.3E+16	5.0E+00	1	代表核種
Am-242	16.02 [h]	9.0E+13	3.0E+03	0.000011	除外
Am-242m	1.41E+02 [y]	9.0E+13	5.0E+00	0.0069	除外
Am-243	7.37E+03 [y]	8.5E+13	5.0E+00	0.0065	除外
Np-238	2.112 [d]	4.5E+11	9.0E+02	0.00000019	除外
Np-239	2.356 [d]	8.5E+13	1.0E+03	0.000032	除外
Cm-242	162.8 [d]	7.4E+13	6.0E+01	0.00047	除外

表 1.1.4-19 グループ 12 (Cm 同位体, Cf-250)

核種	半減期	インベントリ量 (12 年後) [Bq]	告示濃度限度 [Bq/L]	代表核種との 相対比	評価結果
Cm-243	2.91E+01 [y]	7.5E+13	6.0E+00	0.014	
Cm-244	1.81E+01 [y]	6.5E+15	7.0E+00	1	代表核種
Cm-245	8.42E+03 [y]	1.1E+12	5.0E+00	0.00024	除外
Cm-246	4.76E+03 [y]	1.8E+12	5.0E+00	0.000038	除外

2.4.3 移行係数の評価

2.4.2 項で設定したグループ及び、その他の個別核種において、図 1.1.4-4 に示した分析結果から、2011 年 3 月 11 日のインベントリ評価の結果を使用して移行係数を算出する。なお、前述の通り、移行係数の評価には基本的に集中 R_w の結果の最大値を使用することに加え、分析値のバラつきを考慮して、評価では桁上がりさせた移行係数を使用する。

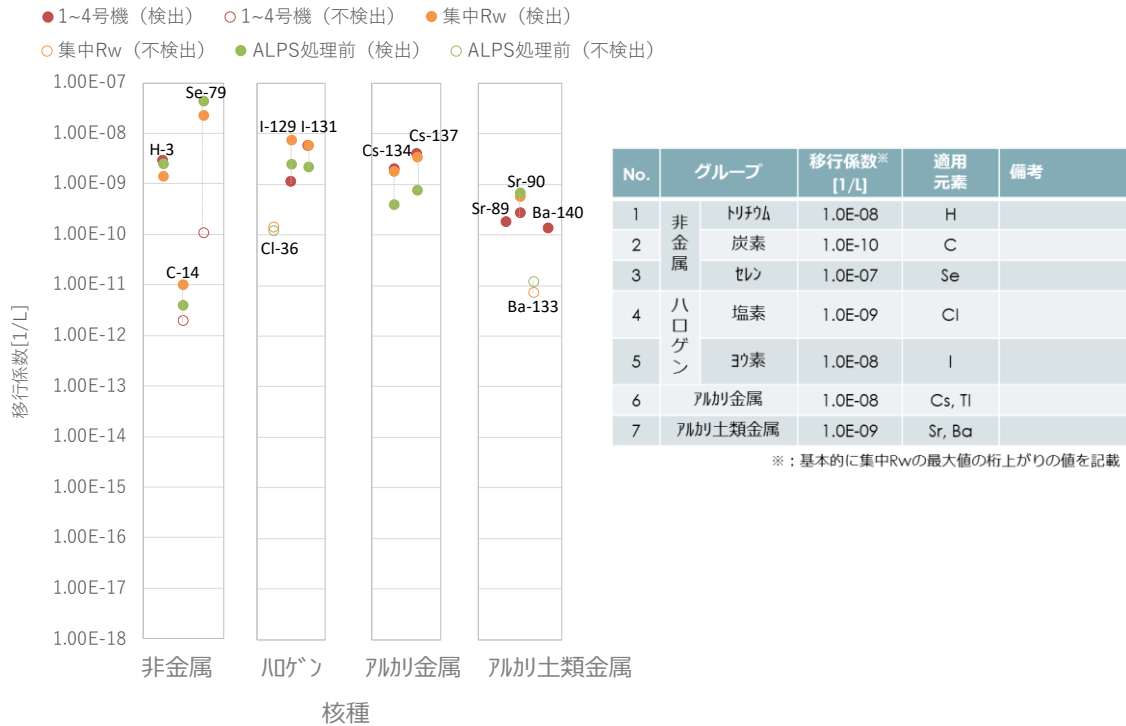


図 1.1.4-9 移行係数 (1/3)

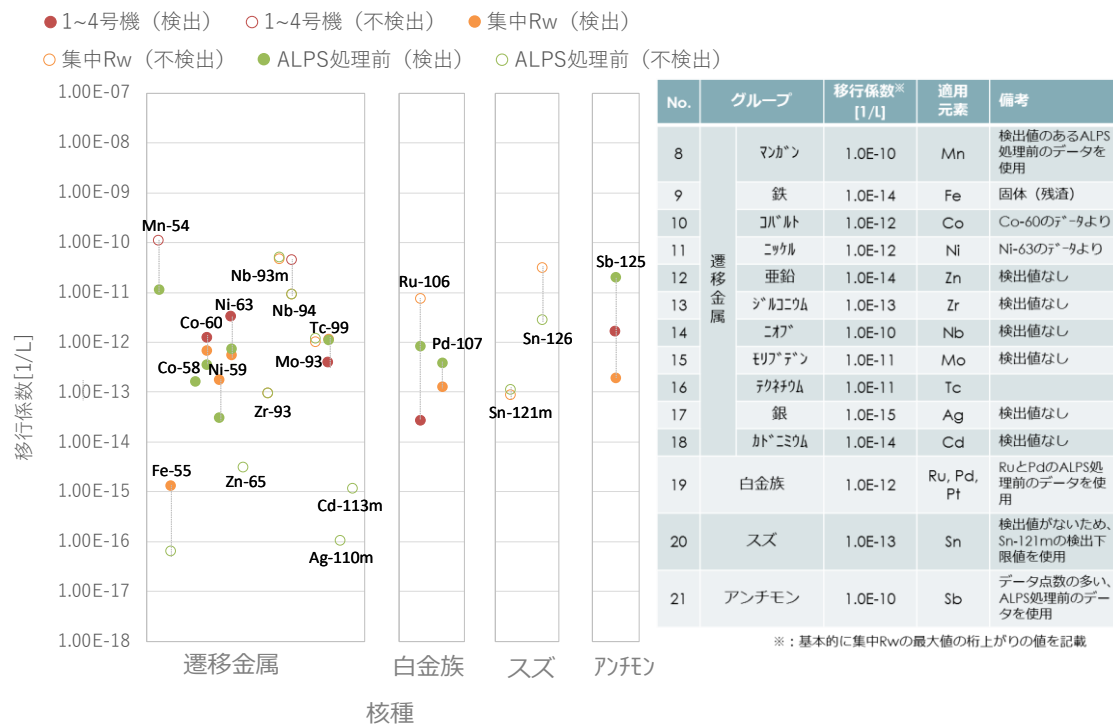


図 1.1.4-9 移行係数 (2/3)

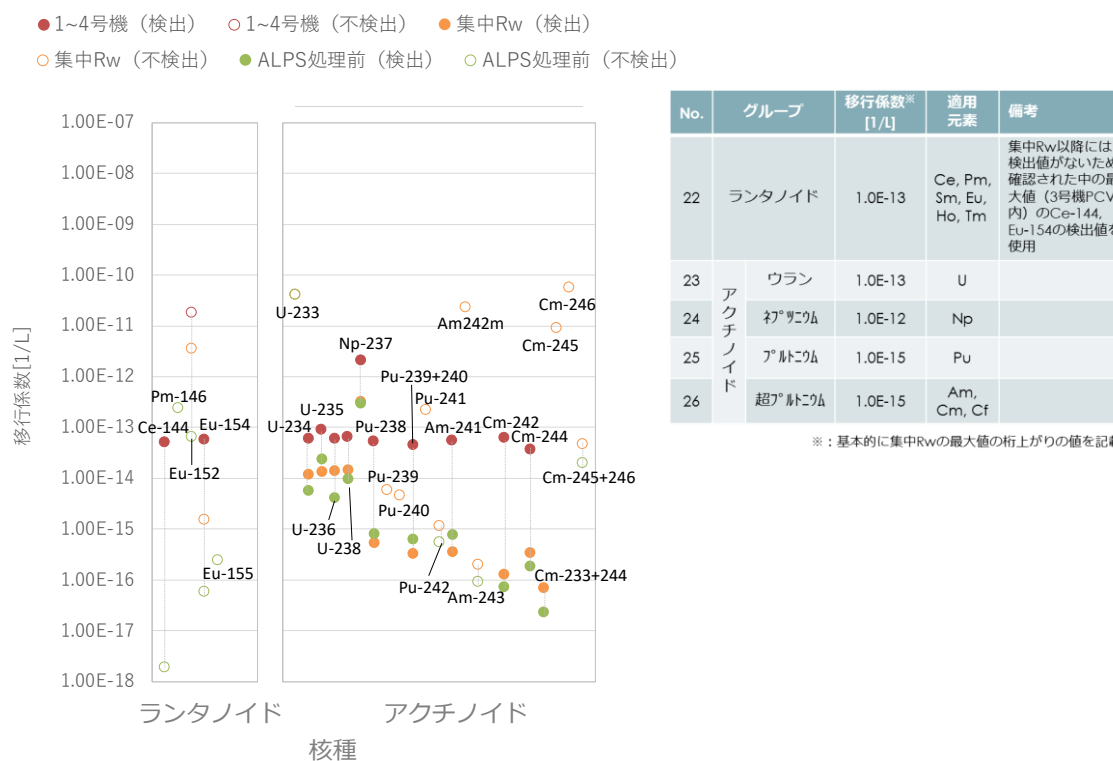


図 1.1.4-9 移行係数 (3/3)

2.4.4 汚染水への移行評価の結果

2.4.3 項で評価した移行係数を用いて、汚染水への移行評価を行った結果、手順 5 に進む核種は 37 核種、除外される核種は 56 核種となる。

表 1.1.4-20 手順 5 に進む核種 (37 核種)

No.	核種	No.	核種	No.	核種	No.	核種	No.	核種
1	H-3	27	Sr-90	60	Sb-125	93	Sm-151	189	Pu-240
3	C-14	29	Y-90	67	Te-125m	96	Eu-154	190	Pu-241
7	Cl-36	33	Nb-93m	70	I-129	97	Eu-155	194	Am-241
16	Mn-54	34	Nb-94	71	Cs-134	174	U-234	200	Cm-243
17	Fe-55	35	Mo-93	73	Cs-137	178	U-238	201	Cm-244
18	Co-60	38	Tc-99	74	Ba-133	182	Np-237		
20	Ni-63	39	Ru-106	80	Ce-144	187	Pu-238		
23	Se-79	51	Cd-113m	87	Pm-147	188	Pu-239		

2.5 手順5について

手順5では、当該手順まで進んだ核種のうち、過去の汚染水での分析結果で有意な濃度（告示濃度限度の1/100以上）で検出されたことがあるか確認したうえで、この基準を上回る核種について、次の手順に進み、下回る核種については、監視対象核種とすることとしている。

手順5の目的は、手順4の汚染水への移行評価では、検出下限値を含めて評価しており、その値を使用したため除外されずに残っている核種や、Fe-55のように汚染水中の濃度が告示濃度限度の1/100未満であり、かつ容易に除去可能な不溶解性で存在することが確認された核種は、ALPS処理水に含まれている可能性は極めて低いと考えられることから、これを放出の都度確認する測定・評価対象核種に選定するのは、非常に保守的と考えているためである。一方、これらの核種は手順5まで進んできている（インベントリ量も比較的多い）ことに加えて、半減期も長い核種であることから、現時点では有意な濃度で確認されていないものの、今後の廃炉の進捗によって、この状況が変化する可能性がある。このことから、これらの核種は海洋放出の都度測定せずに、汚染水中に有意に存在しないか継続して確認する監視対象核種として設定する。なお、後述する測定・評価対象核種の定期的な確認の中で分析実績を重ね、その結果を踏まえて、監視対象核種についても、選定フローに基づき、適宜見直しを行う。

今回選定した具体的な監視対象核種は表1.1.4-21の通り。

表 1.1.4-21 監視対象核種

核種	分析数（括弧内は検出数）			分析値 [Bq/L]	告示濃度 [Bq/L]
	① 1~4号機	② 集中Rw	③ ALPS処理前		
Cl-36	0 (0)	10 (0)	12 (0)	< 4.3E+00	9.0E+02
Fe-55	0 (0)	1 (1)	1 (1)	1.7E+01	2.0E+03
Nb-93m	0 (0)	1 (0)	1 (0)	< 5.2E+01	7.0E+03
Nb-94	36 (0)	38 (0)	67 (0)	< 1.0E+01	5.0E+02
Mo-93	0 (0)	1 (0)	1 (0)	< 1.4E+00	3.0E+02
Ba-133	0 (0)	1 (0)	1 (0)	< 2.6E+00	3.0E+02

なお、6核種中4核種は、分析数が少ないものの、原子炉注水に使用している水は主にRO淡水であり、注水に使用する水質を保安規定で「40mS/m以下@25°C（これを超える場合、塩化物イオン濃度100ppm以下）」として、これを満足した注水を継続していることから、炉内環境に変化はなく、放射性核種の移行状況に大きな変化が生じる状況ではないことから、今回の選定に問題はないと考えている。

2.6 選定結果

図 1.1.4-1 に示したフローに基づき、測定・評価対象核種の選定した核種は表 1.1.4-22 の通り 30 核種となる。これら核種について、現在計画している定量方法についても併せて示す。なお、海洋放出前には下表の 30 核種と合わせて、希釈倍率を設定するために H-3 濃度を測定する計画である。

表 1.1.4-22 測定・評価対象核種とその定量方法

No.	核種	定量方法	No.	核種	定量方法
1	C-14	化学分離後, β 線測定	16	Ce-144	γ 線核種分析
2	Mn-54	γ 線核種分析	17	Pm-147	代表核種 (Eu-154) の 放射能濃度より評価
3	Co-60	γ 線核種分析	18	Sm-151	
4	Ni-63	化学分離後, β 線測定	19	Eu-154	γ 線核種分析
5	Se-79	化学分離後, β 線測定	20	Eu-155	γ 線核種分析
6	Sr-90	化学分離後, β 線測定	21	U-234	全 α 放射能に包含され るものとして評価
7	Y-90	Sr-90 と放射平衡	22	U-238	
8	Tc-99	ICP-MS 測定	23	Np-237	
9	Ru-106	γ 線核種分析	24	Pu-238	
10	Cd-113m	化学分離後, β 線測定	25	Pu-239	
11	Sb-125	γ 線核種分析	26	Pu-240	
12	Te-125m	Sb-125 と放射平衡	27	Pu-241	代表核種 (Pu-238) の 放射能濃度より評価
13	I-129	ICP-MS 測定	28	Am-241	全 α 放射能に包含され るものとして評価
14	Cs-134	γ 線核種分析	29	Cm-243	
15	Cs-137	γ 線核種分析	30	Cm-244	

3. 測定・評価対象核種の定期的な確認

2項で選定した測定・評価対象核種は、過去の分析結果に基づき選定しているが、今後の廃炉作業の進捗によって、その状況に変化が生じる可能性が考えられる。このため、選定した測定・評価対象核種以外の核種（以下「その他核種」という。）が有意に存在しないことを、以下の方法により確認する。この確認の中で、その他核種が有意に存在することが確認された場合は、測定・評価対象核種の再評価を行う。なお、放射性核種の減衰についても、選定フローの中で反映する。

3.1 放出の都度の確認

海洋放出前に放出基準を満足しているか確認する際、下表の測定で、その他核種が有意に存在しないことを確認する。

表 1.1.4-23 放出の都度の確認方法

線種	確認方法
α 核種	告示濃度限度（4Bq/L）の 1/100 オーダ以下の検出限界値未満であることを全 α の値で確認する
β 核種	測定・評価対象とした核種以外が有意な濃度で存在していないことを全 β の値で確認する
γ 核種	Ge 半導体検出器の γ 線スペクトルにて、測定・評価対象核種以外に汚染水由来の有意なピークがないことを確認する

3.2 汚染水中のトレンド確認

集中 Rw 以降で、設備運転中には 1 か月に 1 回以上の頻度で定期的に確認している汚染水の放射性核種の濃度が、過去に確認された濃度以下であることを確認し、放射性核種の汚染水への移行状況に変化が生じないことを確認する。これは、廃炉の進捗により、これまでの放射性核種の水への移行状況が変わる際に、単独の核種の状況のみが変化することは考えづらく、現在、定期的に測定している核種も含めて変化が生じることが考えられるためである。そのため、汚染水への移行状況の変化は、1 回の放射性核種の分析結果から判断するのではなく、複数回の分析結果や、類似の性質を持つ核種の分析結果の確認の上で、変化の有無について判断する。

なお、建屋滞留水の処理の進捗に伴い、 α 核種の濃度上昇が見られているため、Cs 吸着装置の後段に α 核種除去設備を設置する計画もあることから、集中 Rw の建屋滞留水の α 核種の濃度が上昇したとしても、直接、ALPS 処理水の海洋放出時の測定・評価対象核種へ影響する訳ではない。このため、集中 Rw の建屋滞留水は参考として確認するものの、本確認において、主に確認するのは ALPS 処理前の汚染水の放射能濃度とする。

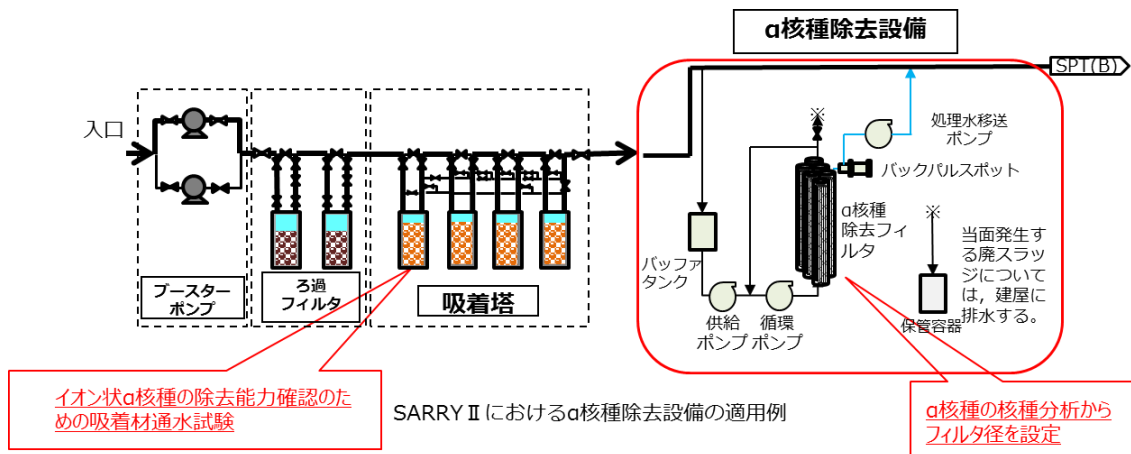


図 1.1.4-10 α核種除去設備の適用例

3.3 調査分析

調査分析では、3.1、3.2 項で懸念が有る事象を確認した場合に、その他核種の存在を調査する。懸念が無い場合であっても、ALPS 処理前の汚染水において、監視対象核種が有意な濃度で存在しないことの確認を 1 年に 1 回の頻度で行い、その他核種の存在を調査する。なお、監視対象核種については 2.5 項で記載の通り、分析実績を重ねて、選定フローに基づき、適宜見直しを行う。

以上