



燃料デブリ



放射性廃棄物管理



環境回復



放射線共通研究・基盤

部門報告③

廃棄物管理と性状把握に係る研究開発

廃炉環境国際共同研究センター
ディビジョン長 駒 義和

- 東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所（1F）では、事故とその後の対応に伴い、多種・多量の放射性廃棄物が発生している。
- 廃止措置等に向けた取り組みの進展に伴い、汚染物・廃棄物は継続して発生し、保管されている。

瓦礫類等の管理状況（8月31日）^{*1}

廃棄物	分類	保管量
瓦礫類	固体廃棄物貯蔵庫	28,000 m ³
	覆土式一時保管施設、容器 (1-30 mSv/h)	16,800 m ³
	シート養生 (0.1-1 mSv/h)	47,600 m ³
	屋外集積 (<0.1 mSv/h)	238,000 m ³
伐採木	屋外集積 (幹・根・枝・葉)	102,700 m ³
	一時保管槽 (枝・葉)	37,300 m ³
保護衣	屋外集積 (容器)	29,600 m ³

水処理二次廃棄物の管理状況（9月1日）^{*1}

種類	保管量
セシウム吸着装置使用済ベッセル	779基
第二セシウム吸着装置使用済ベッセル	254
第三セシウム吸着装置使用済ベッセル	13
多核種除去設備等保管容器 (HIC)	4,042
高性能多核種除去設備使用済ベッセル	91
多核種除去設備処理カラム	17
モバイル式処理装置等使用済ベッセル及びフィルタ類	221
廃スラッジ	492 m ³



^{*1} 東京電力ホールディングス株式会社, 瓦礫類・伐採木・使用済保護衣等の管理状況, 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議 (第106回), 2022年9月29日。

1. 廃棄物の発生量
 - 通常は放射性廃棄物にならないものが汚染されているため、全体の発生量が多い。
2. 放射線の強度（線量率）と量の関係
 - 線量率の低い廃棄物が多いが、通常の原子炉廃止措置と比べると高い線量率の廃棄物の割合が高い可能性がある。
3. 廃棄物の種類
 - 事故により汚染したので、通常は廃棄物とならないものが含まれる。
4. 放射性核種の種類
 - 運転中の核燃料が損傷したため、燃料の成分による汚染が主体である。

表1 1F 瓦礫類の線量率と量*1

線量率	分類	保管量
≥30 mSv/h	固体廃棄物貯蔵庫	28,000 m ³
1–30 mSv/h	覆土式一時保管施設、容器	16,800 m ³
0.1–1 mSv/h	シート養生	47,600 m ³
<0.1 mSv/h	屋外集積	238,000 m ³

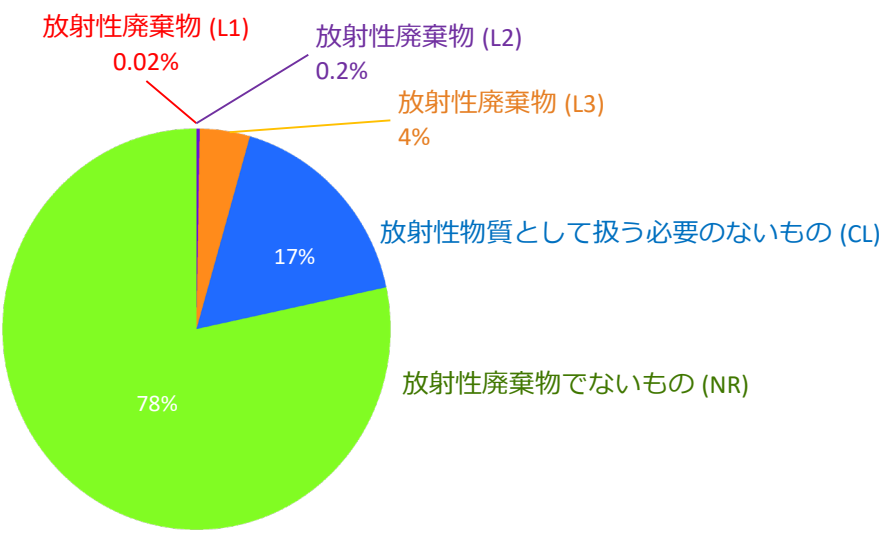
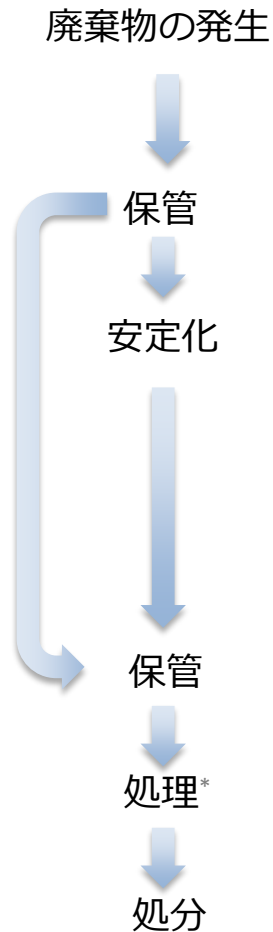


図1 通常の原子力発電所廃止措置での推定発生量 *2

*1 東京電力ホールディングス株式会社, 瓦礫類・伐採木・使用済保護衣等の管理状況, 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第106回）, 2022年9月29日.

*2 浜岡原子力発電所1,2号機 廃止措置計画全体概要, 中部電力株式会社.

廃棄物管理の流れ



1F の放射性廃棄物

- 汚染水の処理、使用済み燃料・燃料デブリの取り出しなど、1F での廃炉の進展とともに廃棄物が発生している。
- 一時的な保管であり、解消に向けて取り組まれている。
- 汚染水処理の水処理二次廃棄物の一部は、リスク低減のために脱水の処理が予定されている。
- 保管量を低減するために、可燃物を焼却処理している。
- コンクリートや金属の減容や再利用が進められている。
- 屋外で保管されている廃棄物を屋内収納が進められている。
- 固体廃棄物貯蔵庫等の増設が進められている。

* 処理・処分検討の結果に応じて分類して廃棄体化・保管

廃棄物管理の流れ

廃棄物の発生

保管

安定化

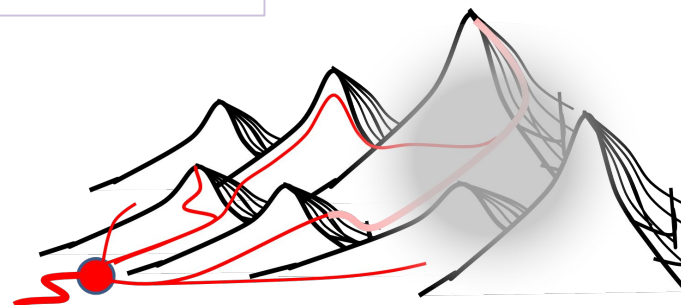
保管

処理*

処分

JAEA の役割

JAEAは原子力専門家として
シェルパをめざす



性状把握

- これら技術検討のために必要な廃棄物の性状を調べる。

保管

- リスク低減のための脱水処理などを実施する上で必要なデータや知見を提供する。

処理

- 将来行う廃棄物処理に備え、有望な技術を検討する。

処分

- 将来行う廃棄物処分に備え、有望な技術を検討する。

* 処理・処分検討の結果に応じて分類して廃棄体化・保管

- 主要なリスク源として性状を把握すべき、建屋内滞留水、濃縮廃液スラリー、ゼオライト及び活性炭土囊、ALPS スラリー及び吸着材を分析した。
- 安定な保管等のリスク低減対策のための基礎データとして東京電力に利用されている。

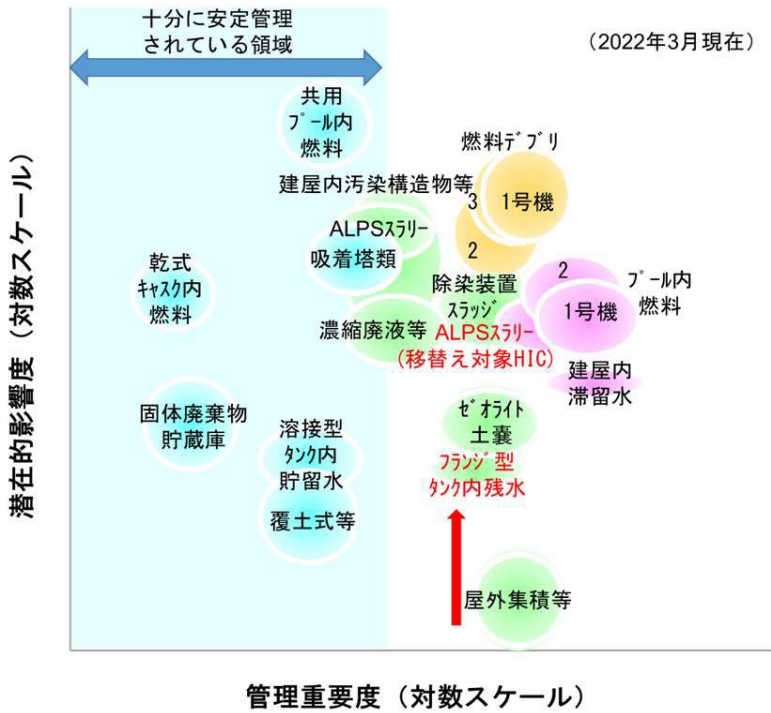


表 JAEA が分析した試料

分類	試料
瓦礫類	原子炉建屋等内のコンクリートなど*
	原子炉建屋周辺のコンクリートなど
	覆土式一時保管施設のコンクリートなど
汚染水	建屋滞留水（原子炉建屋、タービン建屋、集中廃棄物処理建屋）の滞留水
	処理設備（セシウム吸着装置、ALPSなど）の工程水、処理水
水処理二次廃棄物	多核種除去設備スラリー・吸着材
	除染装置スラッジ、土囊ゼオライト など
可燃物	保護衣等焼却灰
土壌	土壌
植物	枝葉、落葉、表土

* 本報告して性状把握の状況を説明。

図 主要なリスク源とそのリスクレベル^{*1}

^{*1} 原子力損害賠償・廃炉等支援機構, “東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の 廃炉のための技術戦略プラン 2022,” 2022年10月11日.

- 建屋滞留水中の放射性物質を吸着した土囊の回収に向けて、土囊に充填された吸着材（ゼオライト、活性炭）を分析した。
- 安全な回収方法検討のための基礎データとして利用されている。



ゼオライト（11粒、0.10 g、2.1 mSv/h）



活性炭（2.0 g、 γ ：0.07 mSv/h、 $\beta\gamma$ ：1.4 mSv/h）

ゼオライト試料

Cs粗分離

溶出液

蛍光X線

粉碎

アルカリ融解

ろ過

残渣

溶解液

放射能分析

図1 試料の外観

図2 ゼオライトの分析フロー

表1 土囊中のゼオライトと活性炭の放射性核種組成（採取日2020年2月27日での補正值）

	ゼオライト	活性炭
⁵⁴ Mn	ND	<0.0043%
⁶⁰ Co	ND	0.087%
⁹⁴ Nb	ND	<0.0017%
¹³⁴ Cs	5.3%	2.9%
¹³⁷ Cs	87.8%	46.8%
¹⁵² Eu	ND	<0.0026%
¹²⁵ Sb	ND	0.068%
⁹⁰ Sr	6.9%	50.2%
²³⁸ Pu	ND	0.00014%
²³⁹ Pu+ ²⁴⁰ Pu	ND	0.000045%
²⁴¹ Am	0.00000015%	0.00048%
²⁴⁴ Cm	ND	0.00016%

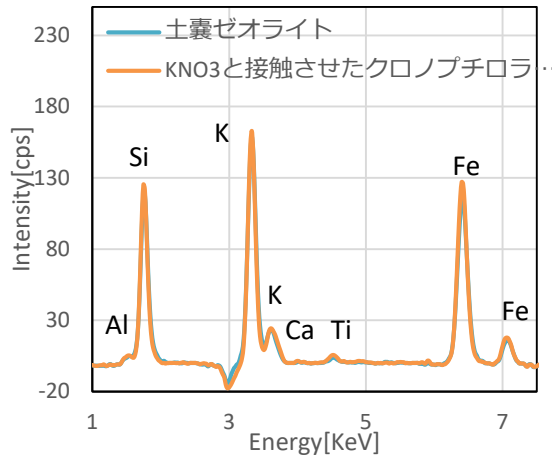


図3 ゼオライトの蛍光x線測定データ（ゼオライトとクリノプチロライトの比較、Cs粗分離処理を模擬したもの）

*1 東京電力ホールディングス株式会社, “HTIにおける地下階環境調査の結果について,” 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第91回）, 令和3年6月24日.

- 廃棄物の性状把握は、分析に係る一連の工程（サンプリングから分析、データベース化）により成る。
- 得られた分析データを用いて、廃棄物の放射エネルギーを推定し、処理、処分の検討に役立てる。

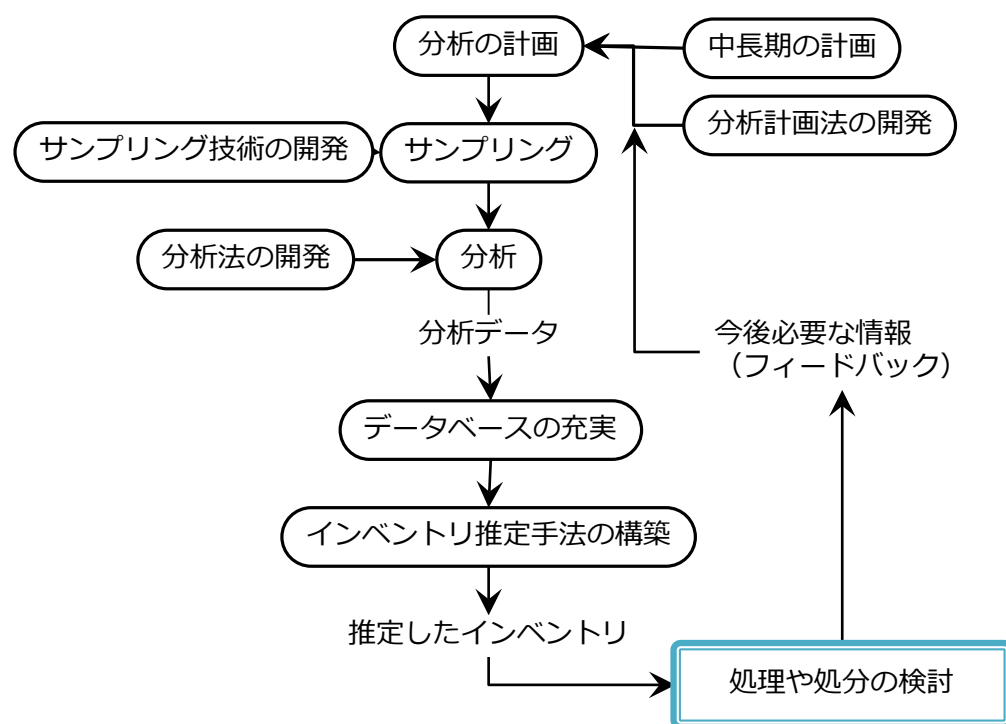


図2 試料採取と分析の様子

図1 性状把握の流れ、成果の利用とフィードバック

- 従来確立されていなかった**難分析核種**の**分析手法**や、分析**実績**のない**廃棄物の前処理手法**を開発して、分析を進めている。
- **分析を効率化**するため放射線測定に代える ICP-MS 分析技術、化学分離操作の自動化など、さらなる技術開発に取り組んでいる。

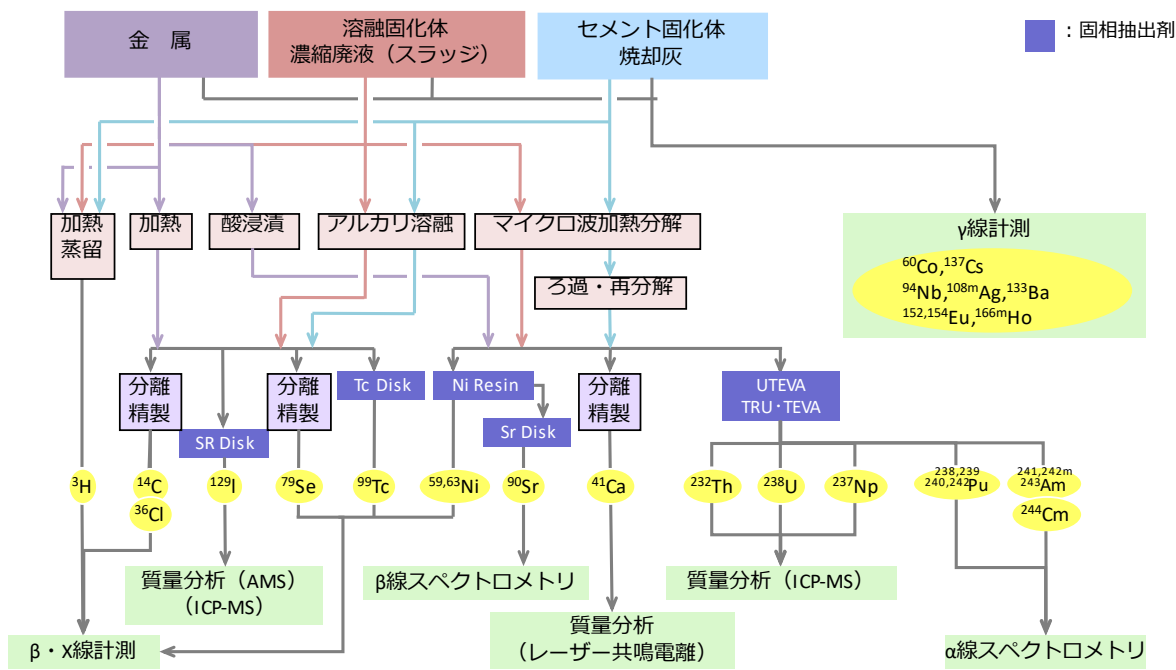


図1 廃棄物に含まれる難測定核種の分析法

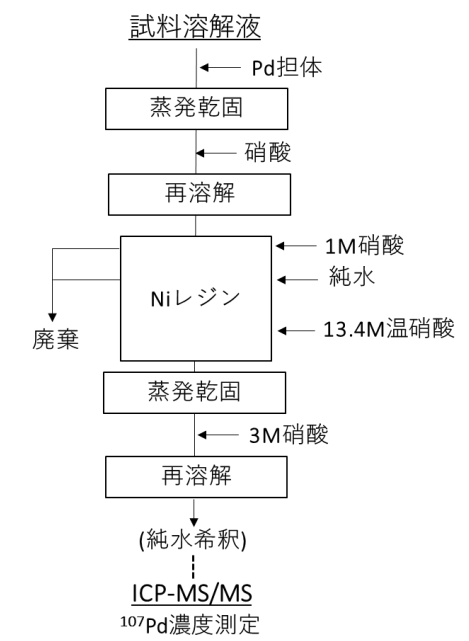


図2 難測定核種 ^{107}Pd のために開発した化学分離法

- 放射性廃棄物は多種多様、多量であり、分析データを蓄積し、これを関係者が利用する必要がある。
- 廃棄物の含有放射エネルギーを中心に収録する分析データのデータベース“FRAnDLi”を構築し、公開している。

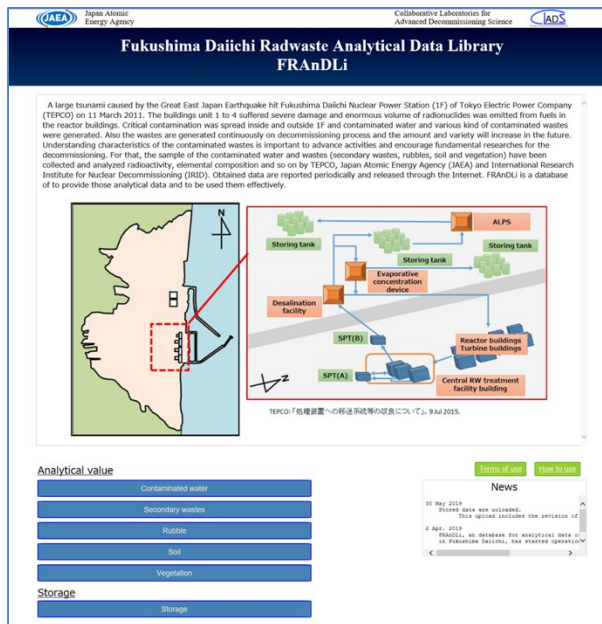


図1 トップページ（英語版の例）

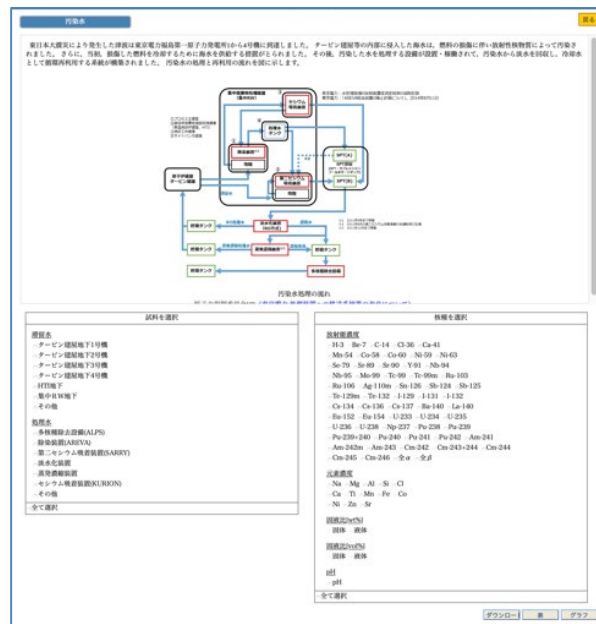


図2 データ検索の画面

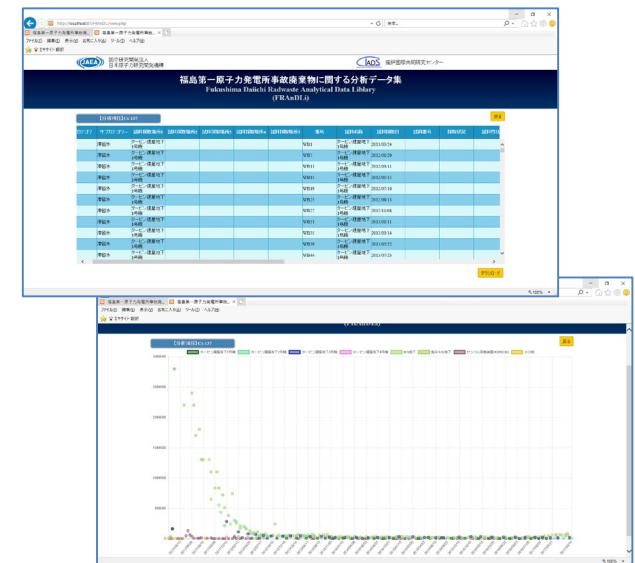


図3 検索結果の表示
（表とプロットの例）

- 放射性核種が事故の際に移行した挙動を知ることは、汚染の推定や廃棄物の処理方法を検討する上で重要である。
- 建屋滞留水等の汚染水中の粒子（スラッジ）を分級ろ過して、効果的なろ過の条件を見出し、鉄を主成分とする α 核種を含む粒子の分析データを得た。
- α 核種を含むスラッジを安全に除去するシステムの検討に利用されている。

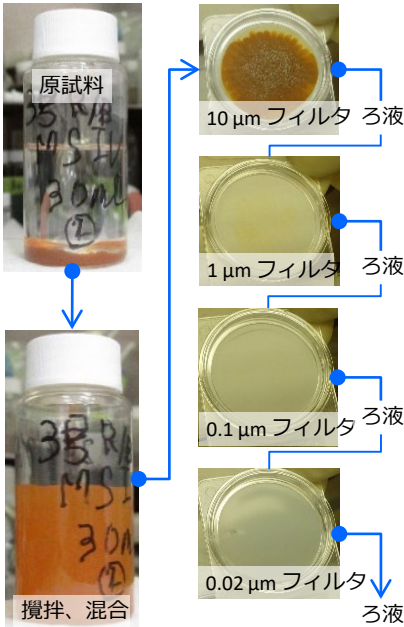


図1 3号機滞留水の分級操作

表1 3号機滞留水試料の含む固体への核種の物質収支

フィルタ	粒子 (g)	U-238	Pu-238	Am-241	Cs-137
10 μ m	0.036	99.8%	99.97%	99.97%	25.8%
1 μ m	ND	0.014%	0.026%	0.022%	0.172%
0.1 μ m	ND	0.018%	0.0048%	0.0043%	0.050%
0.02 μ m	ND	0.11%	<0.00026%	<0.00075%	0.13%
ろ液		0.020%	<0.00087%	<0.00250%	73.8%

*採取日 2021年7月13日に補正。

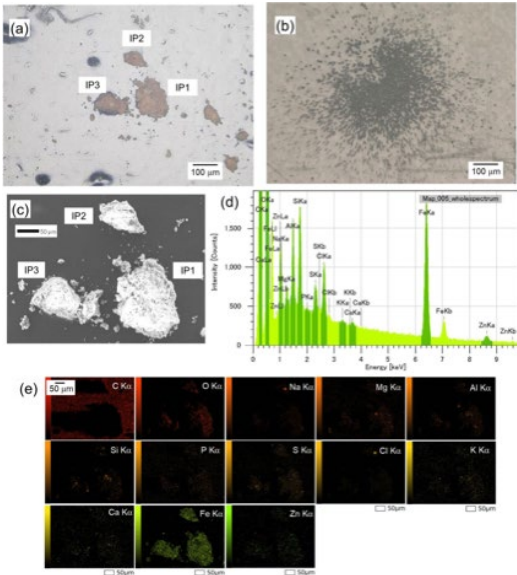


図2 α トラック法により同定した α 核種を含む鉄粒子の例*2

*1 東京電力ホールディングス株式会社, “建屋滞留水処理等の進捗状況について,” 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第100回）, 令和4年3月31日。
 *2 Yomogida et al., “Analysis of particles containing alpha-emitters in stagnant water at torus room of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station’s Unit 2 reactor,” Scientific Reports, 12, 7191 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11334-1>

- 瓦礫などの廃棄物の分析データにより、放射性核種の濃度の関係を調べ、核種の割合が系統的である知見を得た。

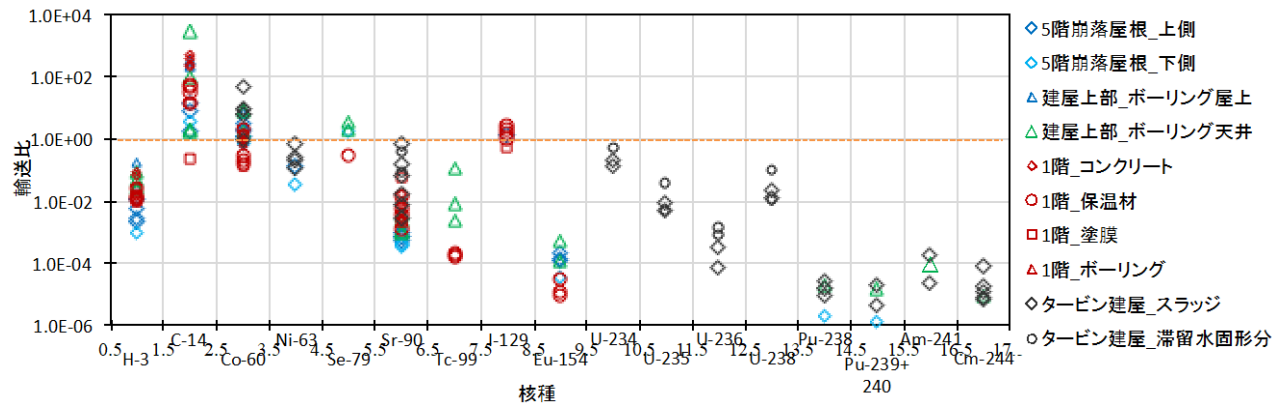


図1 1号機原子炉建屋及びタービン建屋内で採取された瓦礫への核種の移行挙動（「輸送比」による整理）

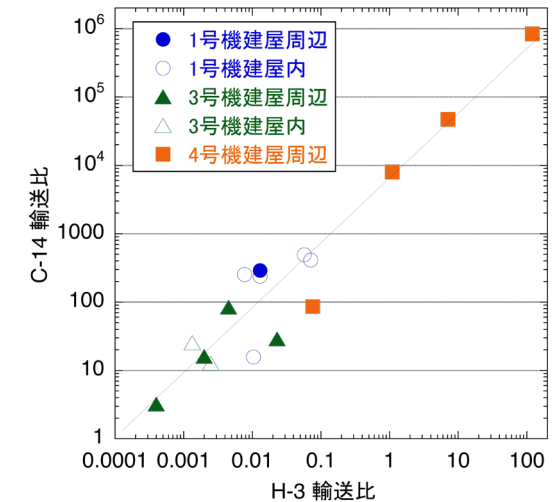
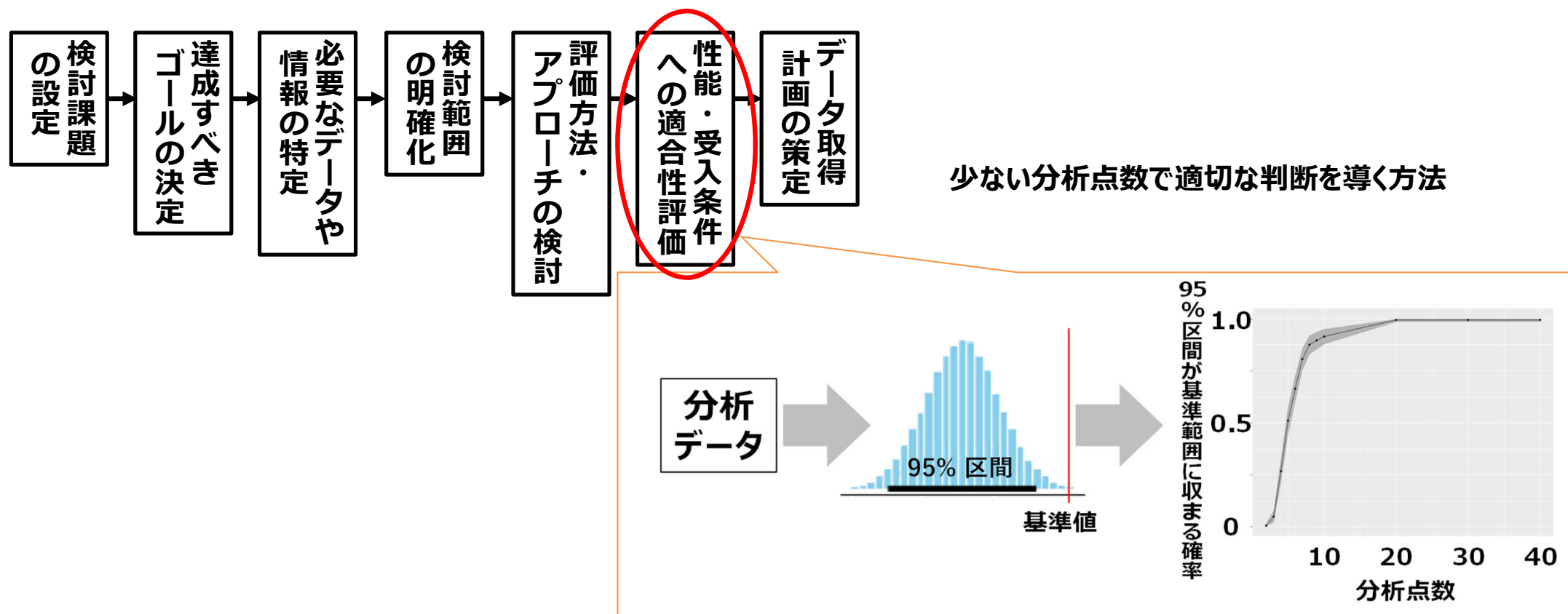


図2 原子炉建屋の内外で採取された瓦礫の³Hと¹⁴C輸送比の相関

- 廃棄物に含まれる放射性核種の量を推定するため、分析データと手法を組み合わせ、評価値の不確かさの定量化、低減を検討している。
- また、少ない分析点数で適切な判断を導く方法論の開発を進め、1Fの分析計画への適用を目指している。
- これらの新しい手法が性状把握に有効と考えられる。



- 「放射性物質分析・研究施設第1棟」では、廃棄物の分析とともにALPS処理水の第三者としての分析を行っていく。
 - 処理水中のトリチウムの濃度とALPSで取り除いた放射性物質の濃度を確かめる。

トリチウム濃度の分析

【前処理】蒸留して測定妨害となる不純物を除去



フード



【測定】トリチウムのβ線を液体シンチレーションカウンタ (LSC) で測定



LSC の例

トリチウム以外の放射性核種 (^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{99}Tc 等) の分析

【前処理】「固相抽出」(目的の核種を樹脂に吸着) などにより対象核種を分離



フード



【測定】核種毎に適した測定装置により測定



Ge半導体検出器



ICP-MS

廃棄物管理の流れ

廃棄物の発生

保管

安定化

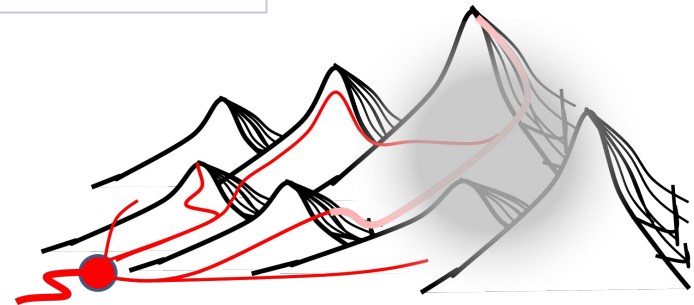
保管

処理*

処分

JAEA の役割

JAEAは原子力専門家として
シェルパをめざす



性状把握

- これら技術検討のために必要な廃棄物の性状を調べる。

保管

- リスク低減のための脱水処理などを実施する上で必要なデータや知見を提供する。

処理

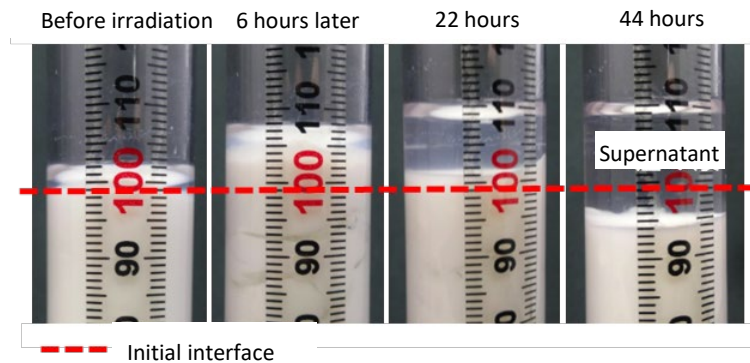
- 将来行う廃棄物処理に備え、有望な技術を検討する。

処分

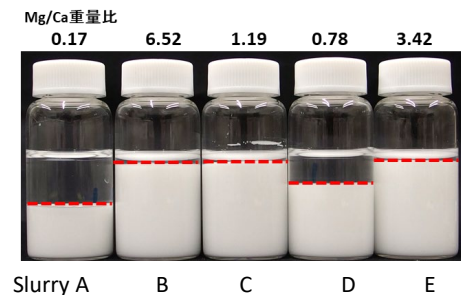
- 将来行う廃棄物処分に備え、有望な技術を検討する。

* 処理・処分検討の結果に応じて分類して廃棄体化・保管

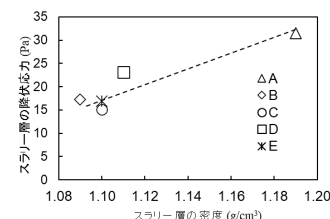
- 水処理二次廃棄物（ALPS スラリー、セシウム吸着塔）を安全に保管する上で必要なデータ、知見を実験と解析により求め、東京電力に提供している。



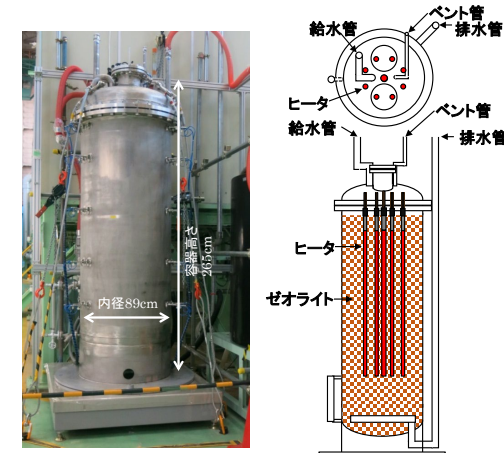
模擬スラリーにガンマ線を照射して再現した体積の変化



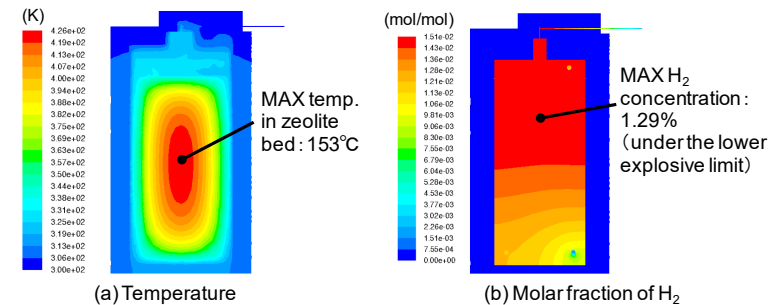
模擬スラリーとその物性の例



降伏応力



実機を用いた試験装置（内部の水分、温度の挙動把握）



塔内の水素濃度の解析計算

図1 ALPSスラリーの上澄みが保管容器から漏出した事象への対応

図2 セシウム吸着塔の水素安全への対応

- 水処理二次廃棄物は、新たな固化プロセスの開発が必要であり、固化が可能な条件を設定するための基礎的なデータを収集、蓄積している。
- 複数の候補技術から実用化の方法を選定するために必要な情報を整理し、検討を進めている。

処理分類		処理技術方式	
高温	ガラス	流下式	ジュール加熱(LFCM) 誘導加熱(AVM, AVH) 誘導加熱(CCIM)
		In-Can式	ジュール加熱(GeoMelt) 外部加熱(Dem&Melt)
	熔融	流下式	誘導加熱 プラズマ加熱
		In-Can式	誘導加熱(ホットクルーシブル) 誘導加熱(超高周波加熱)
低温	焼結		
	成型		
	セメント	イン/アウトドラム式	
	AAM		

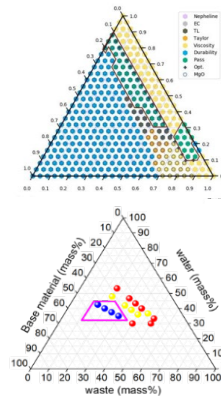


図1 抽出した技術(左)と導出した配合条件(右)

右上: CCIMにおけるゼオライトと炭酸塩スラリー混合溶融時の適用範囲(赤囲部)

右下: 炭酸塩スラリーのセメント(OPC)固化時の適用範囲(緑部)

IS系	LI			
	Sr	Sn	Cs	Ce
OPC	8.7	14.7	7.1	—
M	14.3	10.1	8.8	12.3

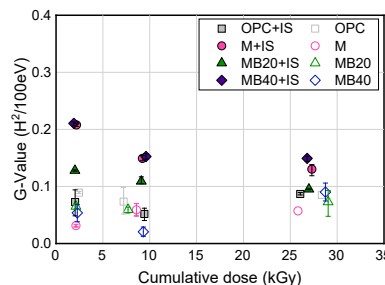


図2 取得した特性データの例
上: 鉄共沈スラリーのセメント(OPC)とAAM固化体の溶出特性(L値)
下: 鉄共沈スラリー固化体の水素発生特性(G値)

技術	LFCM (ガラス固化 流下式)	GeoMelt (ガラス固化 In-Can式)	プラズマ加熱 (熔融固化 流下式)	誘導加熱(ホットクルーシブル) (熔融固化 In-Can式)	超高周波加熱 (熔融固化 In-Can式)
対象水処理二次廃棄物 → 固化体製品	炭酸塩スラリー → ガラス固化体	ゼオライト+炭酸塩/鉄共沈スラ リー→ ガラス固化体	炭酸塩スラリー → 熔融固化体(スラグ)	炭酸塩スラリー → 熔融固化体(スラグ)	炭酸塩スラリー→ 熔融固 化体(スラグ)
プロセス性能	処理温度 1100~1200℃ 処理速度 ~0.2t/h	1300℃(1150~1500℃) 0.18~0.32t/h	1500~1600℃ 約0.2~0.3t/h(概算推定値)	~1500℃ 約0.055~0.137t/h(概算推定値)	1500~1650℃程度 約0.07t/h(130L/8h)
安全性・健全性	Cs揮発率 Cs 1~10%	0.70~8.54%	実測値なし。Cs揮発率55%未満を担 保する運転条件は確立済(LLW)	実測値なし。Cs揮発率50%未満 を担保する運転条件は確立済 (LLW)	実測値なし。これまでのす べての測定実績として10% ~70%
プロセスリスク	出流部の閉塞 コールドキヤップ制御不能	出流部の閉塞 コールドキヤップ制御不能	出流部の閉塞 コールドキヤップ制御不能	出流部の閉塞 コールドキヤップ制御不能	出流部の閉塞 コールドキヤップ制御不能
維持・保守・安全・環境	セラムの交換、 溶融コンテナの交換(数年に1回)、 溶融コンテナの保守負担は小さい	セラムの交換、 溶融コンテナの交換(数年に1回)、 溶融コンテナの保守負担は小さい	セラムの交換、 溶融コンテナの交換(数年に1回)、 溶融コンテナの保守負担は小さい	セラムの交換、 溶融コンテナの交換(数年に1回)、 溶融コンテナの保守負担は小さい	セラムの交換、 溶融コンテナの交換(数年に1回)、 溶融コンテナの保守負担は小さい
主要加熱設備構成	ガラスメルト、サンプリング 装置、出流装置	ガラスメルト(高給電機、容器) 装置、出流装置、サンプリング 装置	ガラスメルト、高給電機、容器、 出流装置、サンプリング 装置	ガラスメルト、高給電機、容器、 出流装置、サンプリング 装置	ガラスメルト、高給電機、容器、 出流装置、サンプリング 装置
消耗品	強磁セラミック	セラミック(耐火物込み)、高給電機	セラミック(耐火物込み)、高給電機	セラミック(耐火物込み)、高給電機	セラミック(耐火物込み)、高給電機
発生二次廃棄物	HEPAフィルタ、フィルタ洗浄、 電線、強磁セラミック	オフガス系フィルタ類	交換した耐火物、フィルタ類	交換した耐火物、フィルタ類	交換した耐火物、フィルタ類
廃棄物	ホウケイ酸ガラス固化体同等で、 耐浸透性は高い	主成分CaO、MgO、SiO2の スラグに同等と予測(1×10 ⁻⁶ kg/m ² /d(28日) (Ca、Sr)と予測)	主成分CaO、MgO、SiO2の スラグに同等と予測(1×10 ⁻⁶ kg/m ² /d(28日) (Ca、Sr)と予測)	主成分CaO、MgO、SiO2の スラグに同等と予測(1×10 ⁻⁶ kg/m ² /d(28日) (Ca、Sr)と予測)	主成分CaO、MgO、SiO2の スラグに同等と予測(1×10 ⁻⁶ kg/m ² /d(28日) (Ca、Sr)と予測)

図3 整理した技術比較情報の一例

高温処理5種に対する、プロセス性能、運転・安全性、経済性、固化体特性情報

- 1F廃棄物に含まれる化学物質（海水成分など）が処分の安全に与える影響を評価している。
 - 人工バリア材による核種収着への影響を定量的に評価する手法を開発している。
 - 化学物質の影響を考慮した収着低減係数を整備している。
- 過剰な安全側とならない合理的な処分概念の構築を目指す。

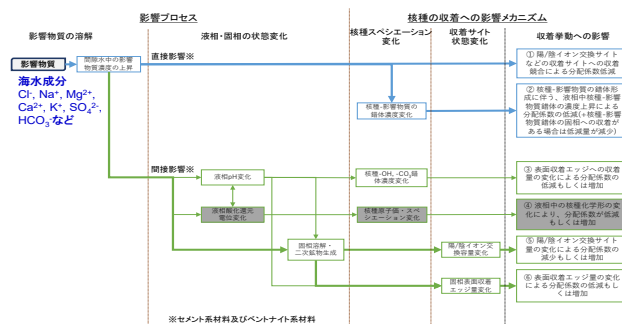


図1 影響プロセスと核種収着への影響メカニズムの整理例（海水成分による影響）

手法①：溶解度上昇等の影響データからの収着低減係数の設定
 溶解度や錯形成に関する半定量的かつ限定的な情報が得られる状況において有効

手法②：熱力学データによる錯形成の定量的情報に基づく収着低減係数の設定
 錯形成の定量的な評価が可能な状況において有効

手法③：影響物質共存下での収着データに基づく収着低減係数の設定
 最も信頼性の高い評価手法であり、最終的にはこの手法での設定が目標

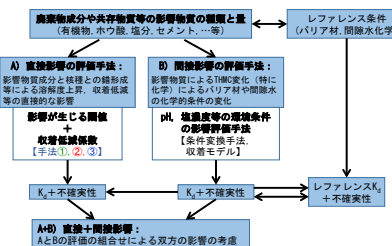


図2 影響物質が核種収着に及ぼす影響評価の手法

元素群	代表元素	影響発現濃度（しきい値）と収着低減係数（SRF）					
		有機物（ISA）	海水	ホウ酸	フェロシアン化合物		
		しきい値	SRF	しきい値	SRF	しきい値	SRF
アルカリ金属	Cs	1	2	—	—	—	—
アルカリ土類金属	Sr	$1 \times 10^{-3} \text{ M}^{\text{a}}$	10	8	1	—	1
II 価遷移金属	Ni	—	1	—	1	—	1
IV 価遷移金属	Sn	$1 \times 10^{-4} \text{ M}$	100	10	—	課題有	課題有
V 価遷移金属	Nb	$1 \times 10^{-4} \text{ M}$	100	10	—	課題有	課題有
III 価アクチニド	Am	$1 \times 10^{-4} \text{ M}$	10	10	—	1	—
IV 価アクチニド	Th	$1 \times 10^{-4} \text{ M}$	100	10	—	課題有	課題有
V 価アクチニド	Np	$1 \times 10^{-4} \text{ M}$	10	10	—	1	$1 \times 10^{-3} \text{ M}$
VI 価アクチニド	U	$5 \times 10^{-4} \text{ M}$	10	10	$1 \times 10^{-3} \text{ M}$	500	$1 \times 10^{-3} \text{ M}$
ハロゲン	I	— ²⁾	1	— ²⁾	$1 \times 10^{-4} \text{ M}$	1.3	—
除イオン種	Se	— ²⁾	1	— ²⁾	課題有	課題有	課題有

影響物質	pH領域	State I	State II	State IIIa	State IIIb
無し		0.1	0.03	0.1	0.1
ISA $\sim 0.021 \text{ M}$		0.01	1.6×10^{-3}	0.01	0.01
ホウ酸 $\sim 0.4 \text{ M}$		0.025	7.5×10^{-3}	0.025	0.025
ホウ酸 $\sim 0.04 \text{ M}$		0.1	0.03	0.1	0.1
海水 $\sim 0.6 \text{ M}$		0.017	5×10^{-2}	0.017	0.017
海水 $\sim 6 \text{ M}$		1.7×10^{-3}	5×10^{-4}	1.7×10^{-3}	1.7×10^{-3}

図3 影響物質に対するバリア材への収着低減効果の整理例

上：直接的影響による各元素群ごとの収着低減係数
 下：間接的影響を含む収着低減係数（セメント材に対するSr）

- 放射性廃棄物の保管、処理、処分方法の確立に向け、性状把握を進めつつ、技術開発に取り組んでいる。
- 瓦礫や水処理二次廃棄物などの主要なリスク源とされる種々の廃棄物の分析を行い、その性状を明らかにするとともに、分析手法やインベントリ推定などの手法を開発してきた。
 - 放射性物質分析・研究施設第1棟を活用し、分析をさらに推進していく。
- 性状把握で得られた廃棄物の情報を提供し、保管は喫緊の課題、また、処理と処分は将来の技術選定に資するために、それぞれで活用されている。
- 今後も、1Fでのニーズ、中長期的な開発目標の達成に向けて取り組んでいく。
- また、ALPS処理水の第三者分析に向けた準備を進め、信頼性の高い分析結果を提供する。