

放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化 技術の基盤研究事業 プロジェクト中間評価 補足資料

令和2年2月19日

資源エネルギー庁電力・ガス事業部
原子力立地・核燃料サイクル産業課

総目次

放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業

A. ガラス固化技術の基盤整備

B. 低レベル放射性廃棄物の除染方法の検討

放射性廃棄物の減容化に向けた ガラス固化技術の基盤研究事業

1. 事業の概要及び政策的位置付け

概 要

原子力発電所や使用済燃料再処理施設等の操業・廃止措置に伴い発生する様々な放射性廃棄物を処分するため、放射性物質を長期間安定的に閉じ込めておくことに優れ、かつ廃棄物の減容も可能な処理技術の開発を行う。

【実施テーマ】

- A. ガラス固化技術の基盤整備
- B. 低レベル放射性廃棄物の除染方法の検討

政策的 位置付け

本技術開発は、

「廃炉等に伴って生じる放射性廃棄物の処分については、低レベル放射性廃棄物も含め、発生者責任の原則の下、原子力事業者等が処分に向けた取組を進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進するなど、安全確保のための取組を促進する。」、

「廃棄物を発生させた現世代の責任として将来世代に負担を先送りしないよう、高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要がある。」

としたエネルギー基本計画に基づくものである。

A. ガラス固化技術の基盤整備

目次

1. 事業の概要
2. 事業アウトカム
3. 事業アウトプット
4. 当省(国)が実施することの必要性
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ
6. 研究開発の実施・マネジメント体制等
7. 費用対効果
8. 外部有識者の評価等
9. 提言及び提言に対する対処方針

個別要素技術の達成状況

参考資料

1. 事業の概要

<p>概 要</p>	<p>原子力発電所や使用済核燃料再処理施設等の操業・廃止時の除染等により発生する低レベル放射性廃棄物等に対応したガラス固化技術を確立するため、「ガラス組成」及び「ガラス熔融炉の運転制御技術」に関する調査・基礎試験等を実施する。</p>												
<p>実施期間</p>	<p>平成26年度～令和6年度（11年間）</p>												
<p>評価期間</p>	<p>平成28年度～平成30年度（3年間）</p>												
<p>実施形態</p>	<p>国からの直執行 （放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業）</p>												
<p>予算総額</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>年度</th> <th>H28FY 執行額</th> <th>H29FY 執行額</th> <th>H30FY 執行額</th> <th>H26～H30FYの 総執行額</th> <th>総予算額</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>予算額(億円)</td> <td>6.55</td> <td>3.36</td> <td>3.68</td> <td>27.04</td> <td>69.04</td> </tr> </tbody> </table>	年度	H28FY 執行額	H29FY 執行額	H30FY 執行額	H26～H30FYの 総執行額	総予算額	予算額(億円)	6.55	3.36	3.68	27.04	69.04
年度	H28FY 執行額	H29FY 執行額	H30FY 執行額	H26～H30FYの 総執行額	総予算額								
予算額(億円)	6.55	3.36	3.68	27.04	69.04								
<p>実施者</p>	<p>(株)IHI 日本原燃(株) (国研)日本原子力研究開発機構 (一財)電力中央研究所</p>												
<p>プロジェクト リーダー</p>	<p>(株)IHI 原子力SBU 除染廃炉・原燃技術部 部長 福井 寿樹 日本原燃(株) 技術本部 エンジニアリングセンター 技術開発研究所長 兼平 憲男</p>												

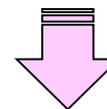
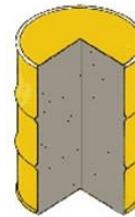
1.1 事業のイメージ(1/2)



例) イオン交換樹脂
濃縮廃液
焼却灰 他

従来技術

アスファルト固化
セメント固化 等



低レベル
放射性廃棄物

溶融ガラス化



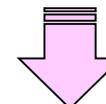
減容・安定化



例) 硝酸Na廃液

新規技術
(日本では実績なし)

ガラス固化



高レベル
放射性廃液

従来技術

ガラス固化

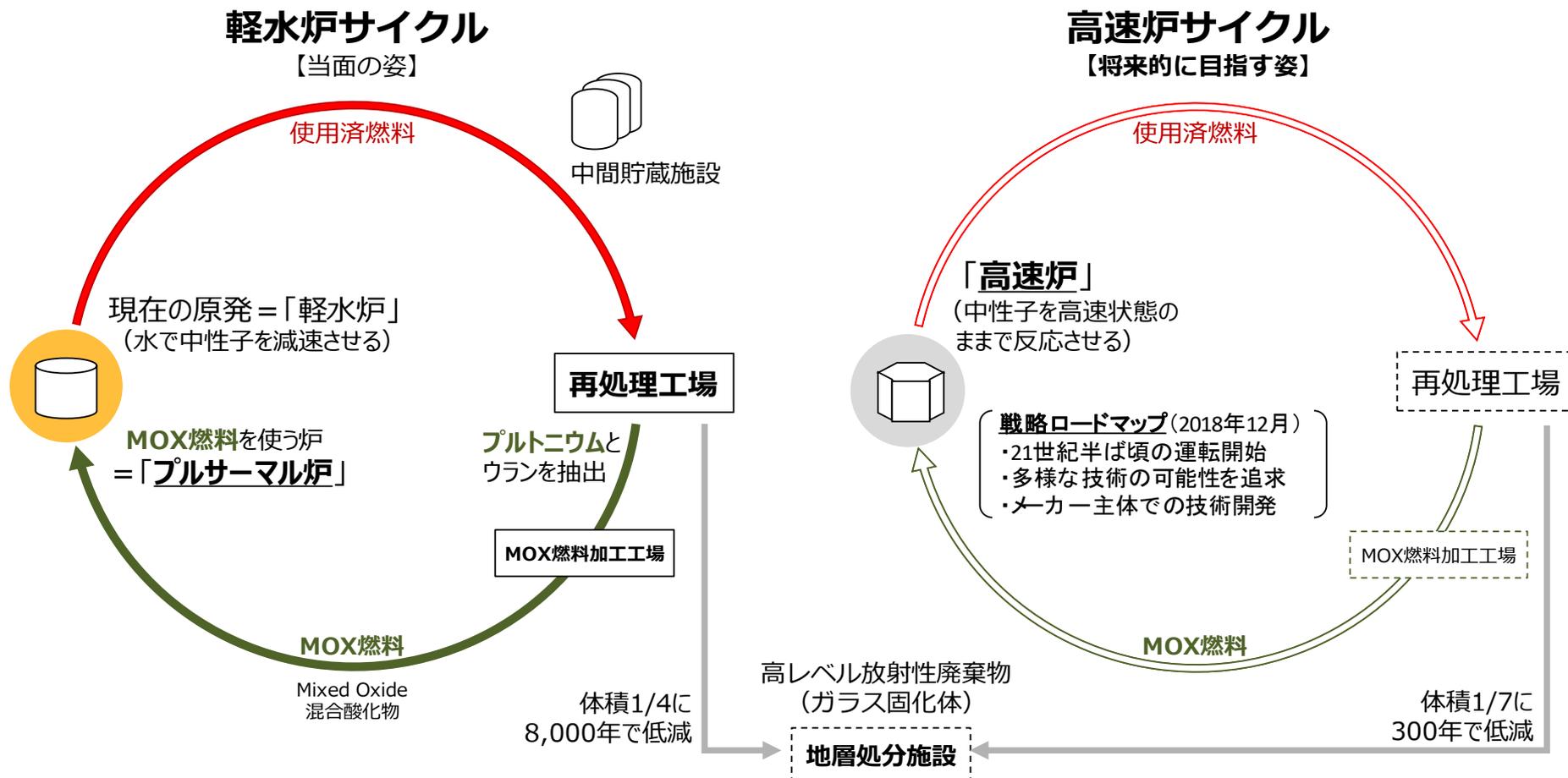


技術の高度化

従来燃料：2～3割減容
燃料の多様化への対応

1. 1 事業のイメージ(2/2)

核燃料サイクルの仕組み



1.2 目的(1/2)

- 国内では、低レベル廃棄物に対してガラス固化は適用されていないが、海外では、比較的放射能レベルの高い廃棄物等にガラス固化技術の導入実績がある
- 今後、我が国においても原子力発電所や再処理施設等の廃止措置等に伴い発生する比較的放射能レベルの高い低レベル放射性廃棄物(除染廃液等)に対する処理技術が必要であり、低レベル廃棄物に対するガラス固化技術の基盤を確立することは重要である
- また、低レベル放射性廃棄物ガラス固化技術の基盤が整備されれば、高レベル廃液のガラス固化技術の高度化にも反映可能であり、高レベル放射性廃液中の核分裂生成物等をより多く、安定的に取り込む技術やガラス溶融炉の運転制御技術なども向上できる
- 当初、本事業は使用済ウラン燃料の再処理等において発生する放射性廃棄物を対象とし、平成30年度に事業を終了する予定であったが、平成30年7月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、使用済MOX燃料の処理の方策について引き続き研究開発に取り組みつつ核燃料サイクル政策を推進することとされたことから、これを踏まえた新たな技術開発に着手することとなった
- 具体的には、これまで開発してきた技術を活用して、使用済燃料の再処理等において発生する様々な種類の放射性廃棄物について、高充填化を妨げる白金族元素の凝集を抑制する技術や、長寿命または発熱性の高い核種を分離する技術等を開発することを目的として、令和6年まで継続実施することとする
- これにより、高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた技術的課題の解決に道筋をつけ、核燃料サイクル政策の推進に資する

1.2 目的(2/2)

本事業では、以下について調査・検討を行う

- ① 原子力発電所および再処理施設等で発生する低レベル廃棄物を対象として、減容性が高く、より安定した廃棄体とするためのガラス固化技術の基盤整備を行う
- ② それら基盤整備で得られた知見を反映し、国内で実用化されている高レベル廃液のガラス固化の高度化や、燃料多様化に伴い発生する様々な種類の高レベル放射性廃液をガラス固化できる技術を開発し、放射性廃棄物の一層の減容化技術の基盤を整備する

政策的位置付け

本技術開発は、「廃炉等に伴って生じる放射性廃棄物の処分については、低レベル放射性廃棄物も含め、発生者責任の原則の下、原子力事業者等が処分に向けた取組を進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進するなど、安全確保のための取組を促進する。」、「廃棄物を発生させた現世代の責任として将来世代に負担を先送りしないよう、高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要がある。」としたエネルギー基本計画に基づくものである。

1. 3 溶融ガラス化技術とその他技術の比較

	ガラス固化技術		溶融固化技術
	ガラス固化(従来)	溶融ガラス化	
概要	<p>廃棄物にホウ珪酸ガラスなどの所定のガラス原料を添加し、ガラス固化する方法</p> 	<p>廃棄物自体に含まれる成分(SiO₂等)をガラス形成成分とすることで、添加物を最小限に抑えて、ガラス固化する方法</p> 	<p>廃棄物を溶融し、スラグとして固化する方法</p> 
減容性	<p>△</p> <p>※ガラス原料添加により、廃棄物充填率を一定に保つため、減容性は低い</p>	<p>○</p> <p>※<u>安定性を確保できる範囲で、添加物量を最小限に抑制するため、減容性は比較的高い</u></p> <p>※但し、廃棄物組成によって減容性は変動する</p>	<p>◎</p> <p>※添加材がないため、減容性が高い</p>
操業性	<p>◎</p> <p>※溶融ガラスの高温物性を一定範囲に管理できるため、加熱・流下(出湯)条件は毎回一定</p> <p>※但し、高レベル廃液の場合は、白金族管理が運転に影響</p>	<p>○</p> <p>※<u>溶融ガラスの高温物性を決められた範囲内に管理できるため、加熱・流下(出湯)条件を大きく変動せずに運転できる</u></p>	<p>△</p> <p>※廃棄物組成によって高温物性が異なるため、加熱・流下(出湯)条件を毎回設定する必要がある</p>
廃棄物安定性	<p>◎</p> <p>※ガラス固化後の組成が常に一定範囲に管理されるため、安定性に優れる</p>	<p>○</p> <p>※<u>添加物を調整することで、安定性を確保できる</u>。但し、廃棄物組成によって安定性は変動する</p>	<p>△</p> <p>※廃棄物組成によってスラグ組成が決まるため、安定性は一定でない</p>

低レベル廃棄物の特徴: SiO₂、Al₂O₃等のガラス形成成分を含む廃棄物が多数ある

1.4 低レベル放射性廃棄物へのガラス固化適用の考え方

(1)低レベル廃棄物の特徴

- 放射能レベル、組成・材質などが多種多様であり、発生量が多い
- ガラス形成成分(Si、Al、P、Fe等)を含有する廃棄物が多数ある

(2)ガラス固化適用の考え方

- 廃棄物自体に含まれるガラス形成成分を利用し、添加物を最小限に抑えて、ガラス化する方法(**溶融ガラス化技術**)を採用
- 溶融ガラス化技術は、事業者ニーズや処分要求に対して、**減容性、操業性、廃棄体安定性**を調整可能
- また、**廃棄物同士を組み合わせることで、安定な廃棄体とすることも可能**

(3)溶融ガラス化の目的

- 溶融ガラス化技術の適用効果が期待される廃棄物を以下の目的から選定

目的Ⅰ：現在検討されている処理技術で**処理が困難な廃棄物を安定化**
例)高線量で無機化が必要なイオン交換樹脂 等

目的Ⅱ：現在検討されている処理技術より**廃棄物発生量を低減化**
例)SiO₂、CaO等を主成分とする焼却灰 等

2. 事業アウトカム

事業アウトカム指標

低レベル放射性廃棄物の成分に適したガラス組成の開発及びそれに対応する信頼性の高いガラス溶融炉の運転制御技術の基礎試験等を実施することにより、低レベル放射性廃棄物の減容化、安定化に優れたガラス固化技術の基盤を整備する。

また、それら基盤整備で得られた知見を反映し、国内で実用化されている高レベル廃液のガラス固化の高度化についても検討することにより、多くの廃棄物(現状の廃棄物充填率の2~3割向上*1を目指す)を安定的に取り込むことができるガラス固化技術の基盤を整備する。

これら基盤の整備により、今後の実証・実用化の道筋をたてる。

*1: 廃棄物充填率約22wt(重量)%(Na₂O約10wt%含む)に対して、2~3割の充填率向上を目標とし、30wt%(Na₂O約10wt%含む)を目標値とする。

アウトカムが実現した場合の効果

本事業により低レベル放射性廃棄物の溶融ガラス化技術の基盤が整備され、その後、実用化に向けた技術課題がクリアされた場合には、原子力発電所等の操業・廃止時に発生する低レベル放射性廃棄物の新たな処理方法として、従来の固化方法では処理が不可能なものを可能とするほか、廃棄物の種類によっては大幅な減容化が可能となり、低レベル放射性廃棄物の処理・処分の円滑化に資する。

また、高レベル放射性廃液のガラス固化技術の廃棄物充填率を2~3割増加させることで、六ヶ所再処理工場にて発生するガラス固化体約40,000本のうち約8,000本~12,000本の低減が可能となることから、それらに係るコスト低減、立地選択肢の拡大等に貢献する。



放射性廃棄物の低減、最終処分場問題の解決に資する

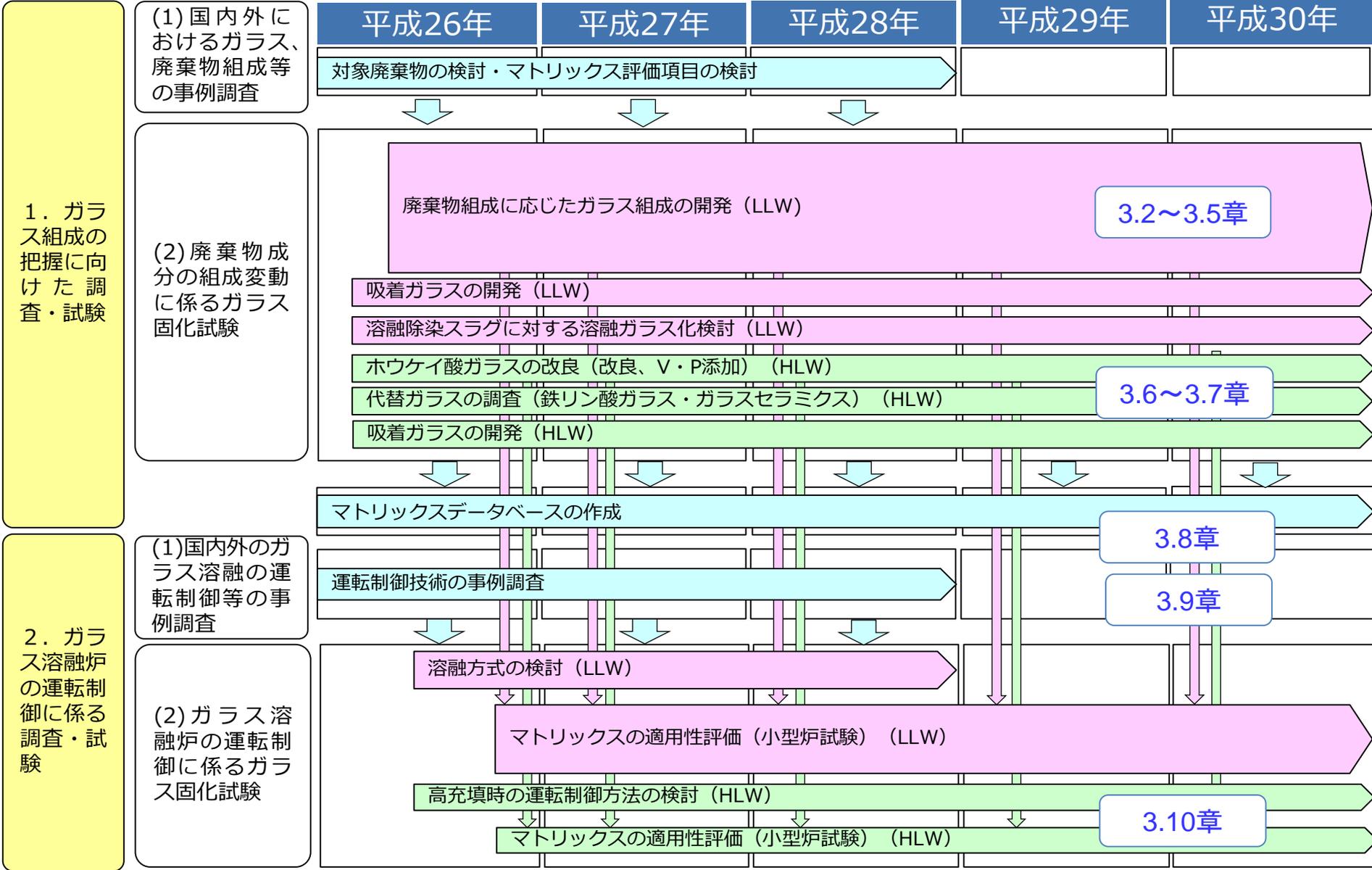
3. 事業アウトプット(1/2)

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠)	目標値(計画)	達成状況(実績値・達成度)	達成度
<p>多種多様な低レベル放射性廃棄物の組成に対応可能なガラス材料の検討に必要な情報を整理するため、原子力発電所や再処理施設等の操業・廃止時の除染等により発生する低レベル放射性廃棄物の組成を調査する。</p> <p>多くの高レベル放射性廃液を安定的に処理できるガラス溶融技術の検討を行うために、国内外の文献等を調査し、有用なガラス組成について把握する。</p> <p>諸外国で研究・実用化が行われている運転制御技術を調査し、有用な技術の適用性を把握する。</p> <p>上記調査の結果等を踏まえ、ガラス組成及び廃棄物組成の関係性等、ガラス固化技術に係るデータベースを作成する。</p>	<p>(中間評価時)</p> <p>中間目標(平成27年度末時点)</p> <p>①ガラス固化が可能な低レベル放射性廃棄物を選定する。</p> <p>②国内外のガラス溶融炉の調査を行い、低レベル放射性廃棄物のガラス固化に適した溶融炉を選定する。</p> <p>③低レベル放射性廃棄物の実用化に必要な評価項目を設定する。</p> <p>④データベースへ登録する項目の整理、基本設計を行う。</p> <p>⑤小規模の試験にて高レベル放射性廃液の充填率を2～3割向上できるガラスマトリクスを開発する。</p> <p>⑥文献等を調査し、廃棄物充填率を向上できる運転制御技術についてガラス溶融炉を用いた試験を行い適用性を確認する。</p>	<p>当初目標達成度:100%</p> <p>①ガラス固化が可能な低レベル放射性廃棄物6種類の非放射性の組成模擬物に対してガラス化できる候補組成を選定した。</p> <p>②上記廃棄物のガラス固化に適したガラス溶融炉を2種類(CCIM, プラズマ)選定した。</p> <p>③ガラス固化体の製造、処分の観点から特性評価項目を20件設定した。</p> <p>④既存のデータベース(INTERGLAD, FactSage)と連携可能なデータ構造、仕様の設計を行い、プログラミングに着手した。</p> <p>⑤高レベル放射性廃液を模擬した非放射性溶液で廃棄物充填率を3割向上できる組成を4種類開発した。</p> <p>⑥文献調査の結果、廃棄物充填率の向上を見込める運転制御技術を4件選定し、そのうち1件についてガラス溶融炉を用いた試験を行い適用性を確認した。</p>	<p>100%</p> <p>100%</p> <p>100%</p> <p>100%</p> <p>100%</p> <p>100%</p>

3. 事業アウトプット(2/2)

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠)	目標値(計画)	達成状況(実績値・達成度)	達成度
<p>多種多様な低レベル放射性廃棄物の組成に対応可能なガラス材料の検討に必要な情報を整理するため、原子力発電所や再処理施設等の操業・廃止時の除染等により発生する低レベル放射性廃棄物の組成を調査する。</p> <p>多くの高レベル放射性廃液を安定的に処理できるガラス溶融技術の検討を行うために、国内外の文献等を調査し、有用なガラス組成について把握する。</p> <p>諸外国で研究・実用化が行われている運転制御技術を調査し、有用な技術の適用性を把握する。</p> <p>上記調査の結果等を踏まえ、ガラス組成及び廃棄物組成の関係性等、ガラス固化技術に係るデータベースを作成する。</p>	<p>(中間評価時)</p> <p>中間目標(平成30年度末時点)</p> <p>①低レベル放射性廃棄物をガラス化できる組成を把握し、ガラス溶融方式の選定、運転方法を確立する。</p> <p>②ガラス固化に係る過去の知見および本事業で得た成果を反映したデータベースを作成する。</p> <p>③高レベル放射性廃液の充填率を2~3割向上できるガラス固化技術を開発する。</p>	<p>当初目標達成度:100%</p> <p>①低レベル放射性廃棄物6種類に対して、製造、処分の観点から、重要な5項目について特性評価を行い、選定された溶融炉方式を用い、特定の廃棄物において、運転方法を確立した。</p> <p>②本事業で得られたガラスの基礎データも含め、データを格納し、物性が予測可能なツールを作製した。</p> <p>③製造処分の観点からの特性評価、運転方法(原料の小径化等)を検討し充填率を2~3割向上したガラス固化技術を開発した。</p>	<p>100%</p> <p>100%</p> <p>100%</p>
	<p>(事業終了時)</p> <p>最終目標(令和6年度)</p> <p>①使用済燃料多様化に伴って発生する様々な廃液に対する安定固化方法を確立する。</p> <p>②廃液から高分離効率でマイナーアクチニドを分離するプロセスを確立する。</p> <p>③高ウラン濃度廃棄物の減容化技術を確立する。</p>	<p>着手</p>	<p>10%</p>

3. 1 事業のロードマップ(平成26年～平成30年)



凡例

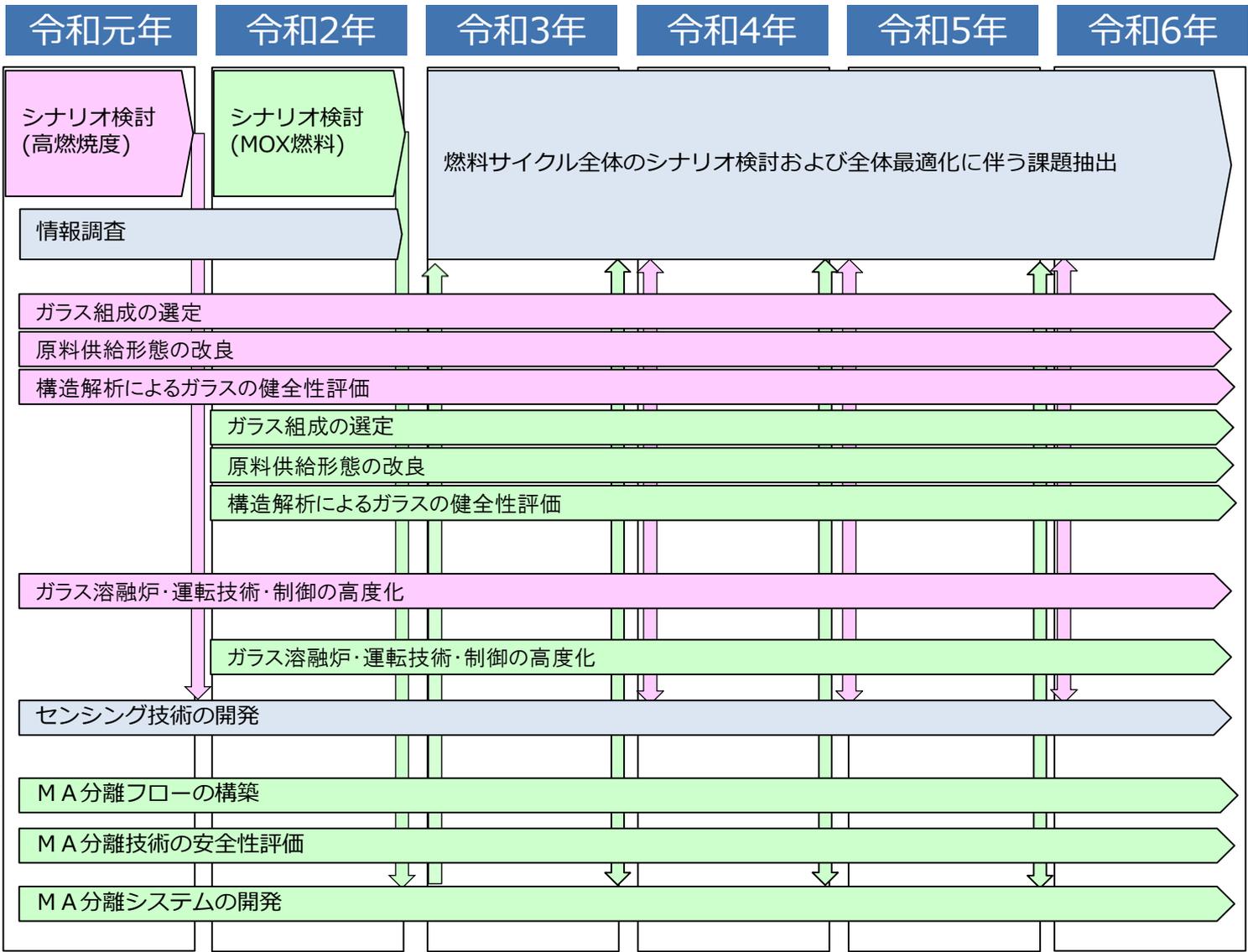
LLW: 低レベル放射性廃棄物

HLW: 高レベル放射性廃液

3. 1 事業のロードマップ(令和元年～令和6年)

1',2' 高レベル廃棄物の対象を拡大(MOX, 高燃焼度)

- (1) 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価
- (2) ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化
- (3) ガラス溶融炉・運転制御技術の高度化
- (4) ガラス固化工程及び固化体貯蔵・処分に適したMA分離技術の適用性検討

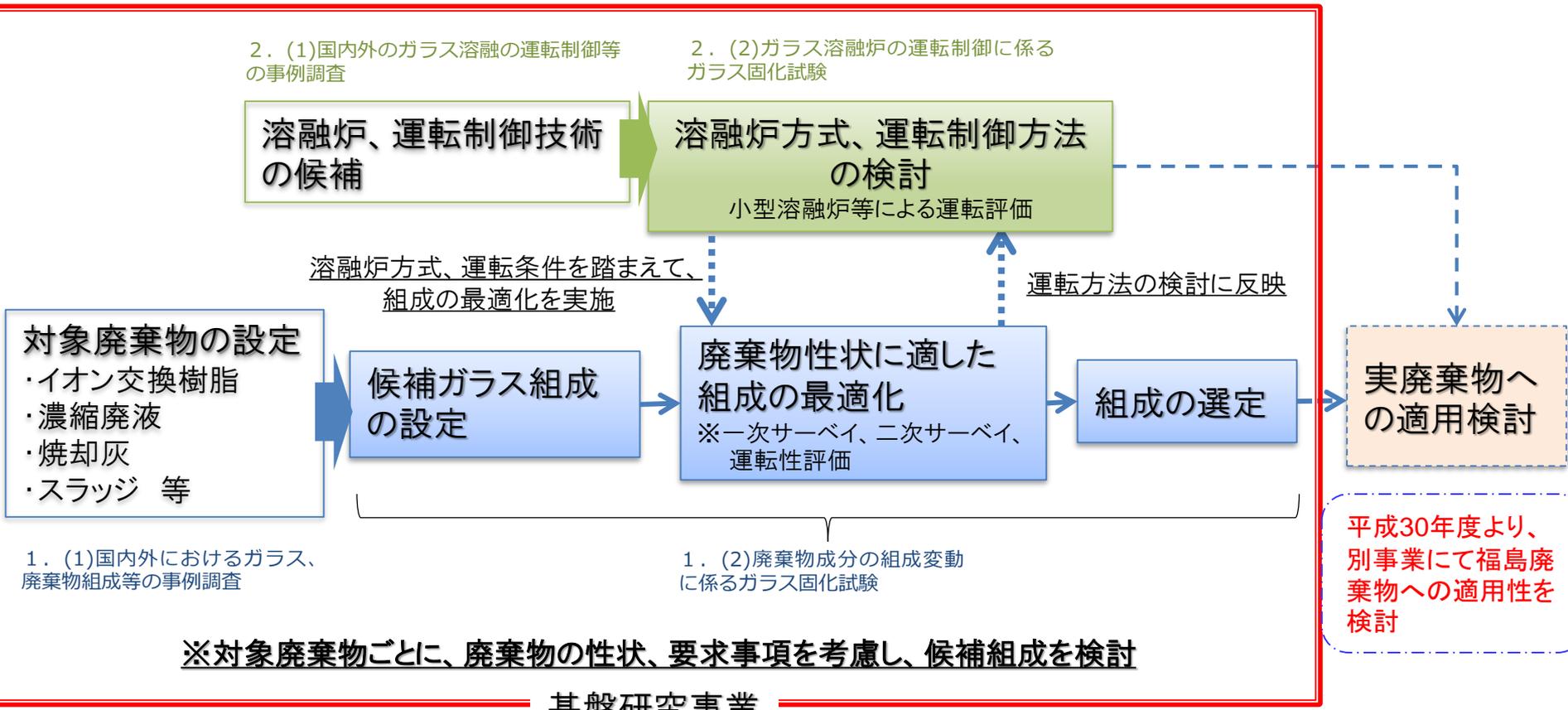


凡例

高燃焼度燃料	MOX燃料	共通
--------	-------	----

3.2 低レベル放射性廃棄物溶融ガラス化の開発概要

- 対象廃棄物ごとにガラス化可能なガラス組成を検討
- 一次サーベイ(基本特性)、二次サーベイ(運転評価、処分に必要な特性等)により組成を絞り込み
- 対象廃棄物毎に廃棄物の性状に適したガラス組成を選定



3.3 対象廃棄物の調査(低レベル放射性廃棄物)

対象廃棄物	目的		特徴	課題解決	
	I	II		ガラス組成 開発	溶融炉 開発
①イオン交換樹脂	○		・高線量 ・水分と有機物を含有	○	○
②低レベル濃縮廃液、除染廃液 (硝酸ナトリウム廃液)	○	○	・硝酸Na濃度が高い	○	○
③低レベル濃縮廃液 (リン酸廃液)		○	・リン酸イオンと少量の硝酸を含有	○	○
④ホウ酸廃液		○	・B、Na、水分を含有	○	—
⑤イオン交換樹脂の溶離液		○	・高線量 ・S濃度が高い	○	○
⑥焼却灰(飛灰含む)		○	・高線量 ・組成変動が大きい	○	—
⑦金属Al(フィルタ)、金属Al板等	○		・金属Alを含む	—	○
⑧スラッジ等		○	・Fe濃度が高い	○	—
⑨アスベスト	○		・化学的には安定、形状が有害	—	○
⑩有害金属廃棄物	○		・鉛、水銀等の重金属を含有	○	○
⑪サンドペーパー		○	・ポリプロピレン製	—	○
⑫液体フィルタ	○		・有機物を含有	—	○
⑬ブラスト材		○	・Al ₂ O ₃ (主成分)、Si、Fe等	○	—
⑭活性炭		○	・C主成分	—	○

目的 I：現在検討されている処理技術で処理が困難な廃棄物を安定化

目的 II：現在検討されている処理技術より廃棄物発生量を低減化



本事業における試験対象廃棄物

3. 4 廃棄物成分の組成変動に係るガラス固化試験 (低レベル放射性廃棄物)

- 原子力発電所、再処理施設から発生する**廃棄物調査**を実施し、調査結果を基に、**従来の固化方法で処理が困難、大幅に減容化が見込まれる廃棄物を対象廃棄物に選定**
- 各廃棄物に対してつぼ規模の試験により、**溶融ガラス化可能なガラス組成を検討**
- 検討したガラス組成に対して、基本特性(廃棄物充填率等)を評価

低レベル放射性廃棄物溶融ガラス化の開発結果概要

*1: 廃棄物成分を酸化物として換算した値

廃棄物	廃棄物充填率*1	ガラス原料組成	溶融ガラス化の有効性
イオン交換樹脂 (主成分:Fe)	34wt%	Al ₂ O ₃ -CaO- Na ₂ O-SiO ₂	<ul style="list-style-type: none"> ・PWRから発生する樹脂を想定 ・全ての評価項目(高温物性、化学的安定性、均質性等)で目標とする結果を得た
高硝酸Na廃液 (主成分:Na)	28wt%	Al ₂ O ₃ -B ₂ O ₃ - CaO-SiO ₂	<ul style="list-style-type: none"> ・高温物性、化学的安定性、均質性等の項目で目標とする結果を得た ・Na濃度が高いため、腐食性は高いため、耐火物や充填率等への考慮は必要
焼却灰 (主成分: Si/Ca/Fe/Si)	44wt%	Al ₂ O ₃ -B ₂ O ₃ - Li ₂ O-Na ₂ O-SiO ₂	<ul style="list-style-type: none"> ・全ての評価項目(高温物性、化学的安定性、均質性等)で目標とする結果を得た ・廃棄物成分(CaO、Fe₂O₃、SiO₂等)の組成変動が大きい場合にも、廃棄物組成が変動した場合のガラス化への影響を確認
高硝酸Na廃液・ リン酸廃液・スラッジ (主成分Fe/P/Na)	29wt%	Fe ₂ O ₃ -P ₂ O ₅	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物の組合せを考慮した溶融ガラス化を検討 ・高温物性、化学的安定性等の項目で目標とする結果を得た ・実際の廃棄物に混入が想定される夾雑元素を含めた場合でも問題なく溶融ガラス化することが可能 ・金属材料を減肉するため、材料選定に考慮が必要
金属アルミニウム (主成分:Al/Si)	約10wt%	SiO ₂ -Na ₂ O- Li ₂ O-B ₂ O ₃	<ul style="list-style-type: none"> ・金属Alを酸化が課題であったが、鉛ホウケイ酸ガラスによる酸化・固化試験できる見通しを得るとともに、処理速度と浸出率を明らかにした。
イオン交換樹脂の 溶離液(主成分:S)	約15wt%	ZnO-Na ₂ O- P ₂ O ₅	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラスセラミックスの採用により、ホウケイ酸ガラスによるガラス化が困難な硫黄を高濃度含む廃棄物に対して、ZnO-Na₂O-SO₃-P₂O₅を母材とするガラスマトリックスを検討 ・CaOまたはFe₂O₃を添加することで揮発率の抑制及び耐水性の向上効果があることを確認した。

種々の低レベル廃棄物に対して、製造、処分の観点から安定なガラス組成を開発した

3.5 低レベル放射性廃棄物へのガラス固化適用のメリット

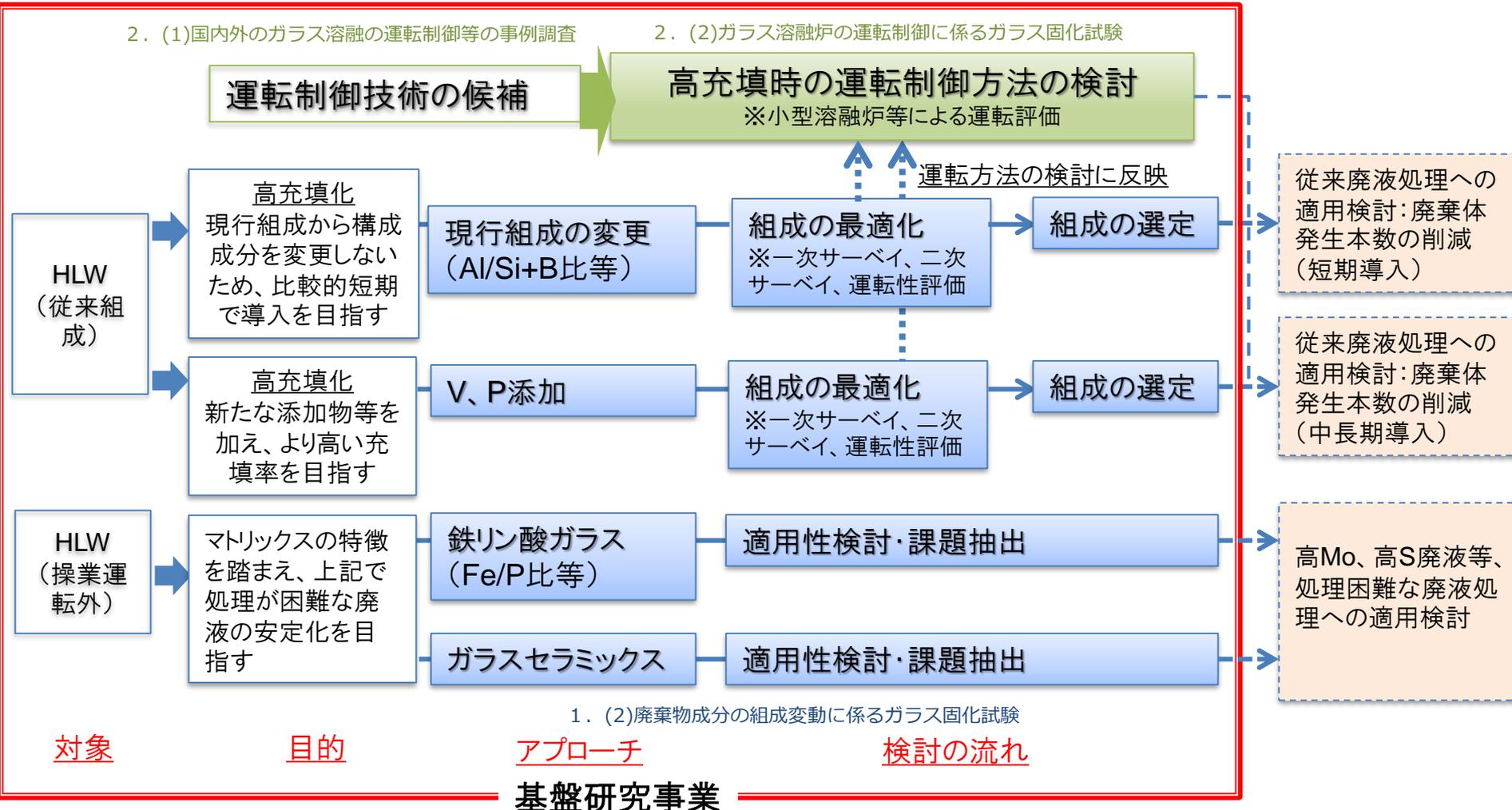
処分場 (廃棄物)		コンクリートピット処分 (L2廃棄物)	余裕深度処分、地層処分 (L1廃棄物、TRU廃棄物)
減容性		○:セメント固化等で充填したものを廃棄物 同士で安定化させることで、 添加材を 最小限に抑制し、減容性も向上	○:左に同じ
操業性	固化体 製造	○:出湯(流下)操作を要するときに、安定 した運転が可能	○:左に同じ
	無機化	△:溶融方式によっては、溶融ガラス化時 に無機化可能	△:左に同じ
廃棄体 特性	高発熱量	— (セメント固化で対応可能)	○: セメント等に比べて、発熱制限は高い が、 結晶化温度によって制限される
	高線量	— (セメント固化で対応可能)	○: セメント等に比べて、線量制限は高い ※ガラス固化体以上の廃棄体はない
	バリア 機能	— (現行施設の安全評価では、導入効果は ない)	△:現在検討中の施設の安全評価のままでは、 導入効果はない ※但し、設計見直し等により、バリア機能 を考慮するようなケースが出てくれば、 効果は期待できる

※○:セメント固化等既存の固化方法に比べ優位性が期待される項目

△:条件によっては、セメント固化等既存の固化方法に比べ優位性が期待される項目

3. 6 高レベル放射性廃液のガラス固化技術の高度化概要

- 高充填、代替組成の設定を目的として、ガラスマトリックスを検討
- 一次サーベイ(基本特性)、二次サーベイ(運転評価、処分に必要な特性等)によりガラスマトリックスの組成を絞り込み
- 適用する廃液種類、導入時期等に応じてガラスマトリックス毎に最適なガラス組成を選定



3. 7 廃棄物成分の組成変動に係るガラス固化試験

(高レベル放射性廃液ガラス固化)

- 事例調査(海外調査、国内知見)等により、**ガラス組成の考え方、組成設定方法について調査**を実施
- 廃棄物充填率を向上できる**組成調整パラメータの影響**を確認
- ガラス化の確認とともに、一部の候補組成に対してガラス物性、耐水性等を評価

高充填マトリクスの開発結果概要

充填率向上方策		廃棄物充填率*1(Na含む)	ガラス原料組成	特徴
現行組成		約22wt%	$\text{Na}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{ZnO}$	各国で高レベル放射性廃液の処理に使用
ホウケイ酸ガラス	現行組成改良	約36wt% (Na_2O 約10wt%含む)	$\text{Na}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{ZnO}$	現行組成から構成成分を変更しないため、比較的短期に開発が可能
	V添加	約29wt% (Na_2O 約9wt%含む)	$\text{Na}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{V}_2\text{O}_5$	Vの添加により多原子イオンが取込まれ易い領域が形成されることから、相分離を抑制する効果が期待
	P添加	約36wt% (Na_2O 約10wt%含む)	$\text{Na}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$	P_2O_5 に対する MoO_3 の溶解度が非常に高いため、相分離を抑制する効果が期待
代替ガラス	鉄リン酸ガラス	約20wt% (Na_2O 約4wt%含む)	$\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$	ホウケイ酸ガラスに比べて1~2割程度密度が大きいいため、同じ充填率でもガラス固化体1本あたりの充填量は大きくできる
	結晶化ガラス	Mo溶解量 15-18wt% (MoO_3 換算)	原料ガラス $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-$ OthersにMoを MoO_3 で15-18wt%分散 (現行ガラスでは、溶解量約1.3wt%)	ガラスに溶解しにくい物質を非水溶性の結晶相(ガラスセラミクス)としてガラス中に分散

*1: 廃棄物充填率約22wt%に対して、3割向上した場合、目標廃棄物充填率は約30wt%となる(Na_2O 濃度を含めた値)

廃棄物充填率2~3割向上させ、製造、処分の観点から安定なガラス組成を開発した

3.8 マトリックスデータベースの作成

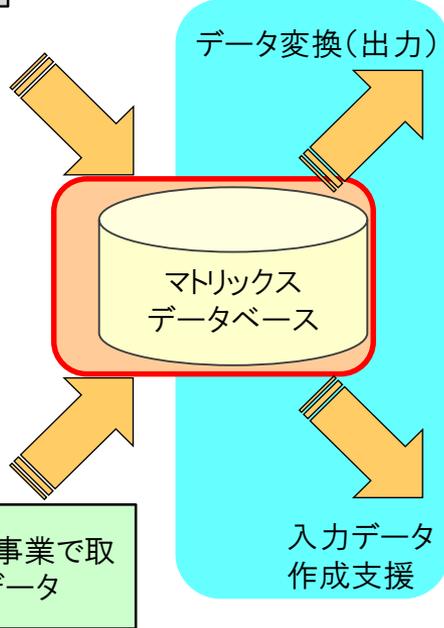
①マトリックスデータベース本体及びこれを利用するためのインターフェイス

- ガラス組成・特性データを格納・追加・検索する機能
- ソフトウェアツール群を用いて行った解析・抽出結果を格納・追加・検索する機能



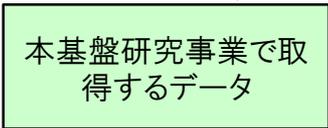
②ソフトウェアツール群との連携支援システム

- ソフトウェアツールへデータを受け渡すためのデータ変換機能



③マトリックスデータベースの管理機能

- ガラス組成・特性データは、元素記号又は分子記号、あるいは特定のキーで検索できるように登録
- 登録は管理者が行う



既存のソフトウェアツール群

国際ガラスデータベース (INTERGLAD)

産業ガラスなどの数十万件のガラス組成・特性データ

特性データからガラス組成の抽出・絞り込み

既存のガラスデータベース

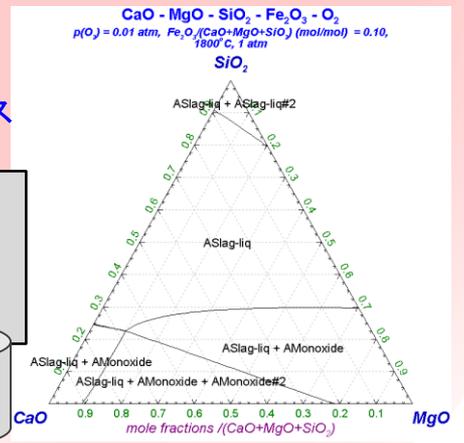


熱力学データベース (FactSage)

状態図の作成

融体粘度の推定

熱力学的諸量データベース



- ソフトウェアツールへ入力するためのデータ作成を支援する機能
- 利用者が希望・必要とする解析、データ抽出を行うソフトウェアツールを提案・入力データを支援するガイド機能

過去の知見および本事業の成果を反映し、**ガラス物性を予測可能なデータベースを作成した**

3.9 国内外のガラス溶融の運転制御等の事例調査

- 有望な溶融炉方式として、低レベル廃棄物に対してはプラズマ炉、コールドクルーシブル炉(CCIM)、高レベル廃液に対してはジュール加熱炉を選定
- 運転制御技術として、バブリング・添加剤・温度管理に着目し、基礎試験により効果を確認
- 国内のガラス産業界の溶融炉を調査し、原子力分野へ適用可能な技術を抽出
- 溶融炉調査の結果から、原料の供給方式、監視箇所、制御技術、流下方式等の一部を運転制御技術の検討内容に反映

溶融炉技術の調査結果概要

	加熱方式			
	ジュール加熱	高周波誘導加熱		プラズマ加熱
		ホットクルーシブル	コールドクルーシブル	
ポトムドレン (フリーズバルブ)	日本:TVF(JAEA) 日本:K施設(日本原燃) 独:VEK 中国:VPC	仏国:AVM/AVH(AREVA) 英国:WVP(Sellafield)	仏国:(AREVA) 仏国:(AREVA) 韓国:(KHNP) ロシア:(RADON) 仏国:Shiva(CEA)	韓国:(KHNP)
ポトムドレン (スライドバルブ)		日本:金属溶融炉(JAEA)		ロシア:(RADON)
ポトムドレン (遠心力調整)				日本:PACT (日本原電) スイス:PACT (ZWIRAG)
サイドドレン (スライドバルブ)	ロシア:(MAYAK)			
サイドドレン (傾動出湯)				日本:雑固体溶融炉 (JAEA)
オーバーフロー (エアリフト)	米国:WVDP, WTP 米国:WTP, VITPP			
オーバーフロー (負圧吸引)	米国:DWPF			
IN-CAN		(米国、英国、独、インド) 日本:IH(IN-CAN)		

赤字:高レベル廃液ガラス固化
青字:低レベル廃棄物溶融もしくはガラス固化
下線:研究施設

運転制御技術の調査結果概要

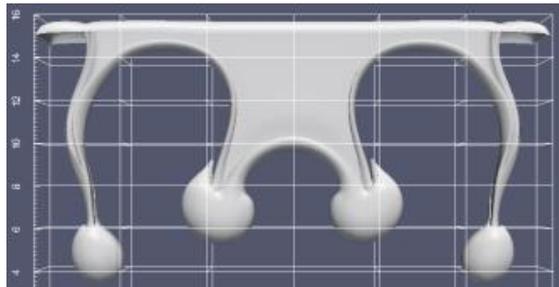
技術	廃棄物、ガラス原料	実績
機械式スターラ及びガスバブリング	<ul style="list-style-type: none"> LLW MLW HLW 	仏国 CCIM*1
ガスバブリング	<ul style="list-style-type: none"> 高濃度Al、Fe、Mnを含むHLW 	米国 JHCM*2
還元剤の添加	<ul style="list-style-type: none"> Na、Sを含む廃棄物 Sを含む廃棄物 高濃度Al、Fe、Mnを含むHLW 	米国 JHCM*2
ガスバブリング 添加物の添加	<ul style="list-style-type: none"> 高濃度のSを含むHLW 原料ガラスにSb₂O₅、廃液にV₂O₅を添加 	独 LFCM*3

*1:CCIM:コールドクルーシブル誘導加熱炉
*2:JHCM:ジュール加熱式セラミックメルター
*3:LFCM:液体供給式セラミックメルター

低レベル廃棄物:プラズマ炉、CCIMを選定、高レベル廃棄物:ジュール加熱炉を選定した。また、運転制御方法に関する技術を抽出した

3. 10 ガラス溶融炉の運転制御に係るガラス固化試験

項目	概要	実施結果
a. ガラス原料供給形態の調査	<ul style="list-style-type: none"> ガラス原料の形態改良により、ガラスに溶解しにくい成分(イエローフェーズなど)のガラスへの溶解性の向上を検討 	<ul style="list-style-type: none"> ガラス原料の形状変更(小粒径、穴あき、微粒子)により、ガラスへイエローフェーズが溶け込みやすくなることを確認した
b. 白金族元素の沈降挙動メカニズムの解明	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物充填率を高めた際に、ガラスに溶解しない白金族元素濃度も増加するため、溶融炉で沈降し、閉塞等が懸念される。沈降メカニズムを解明し、溶融炉運転時の評価を実施。 	<ul style="list-style-type: none"> 白金族元素が凝集する温度および化学形態の一部を明らかにした 炉内対流を定量化した解析モデルを構築し、白金族元素の沈降挙動を再現し、バブリング流量の設定方法を策定した
c. 運転制御技術の調査および小型溶融炉を用いた試験 ※高充填運転時の課題抽出	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物充填率を高め、溶融炉で運転を行う際に、必要な運転制御技術を小型溶融炉で確認 開発したガラスマトリックスを用い、高充填運転した際の課題を抽出 	<ul style="list-style-type: none"> 有効な運転制御技術として、①バブリング、②還元剤添加等を選定した 小型溶融炉試験を行い、バブリングによる処理能力の向上を確認、運転に係る基礎データを取得した 還元剤添加により揮発物の量を抑制できることを確認した



白金族元素の沈降挙動の概要モデル



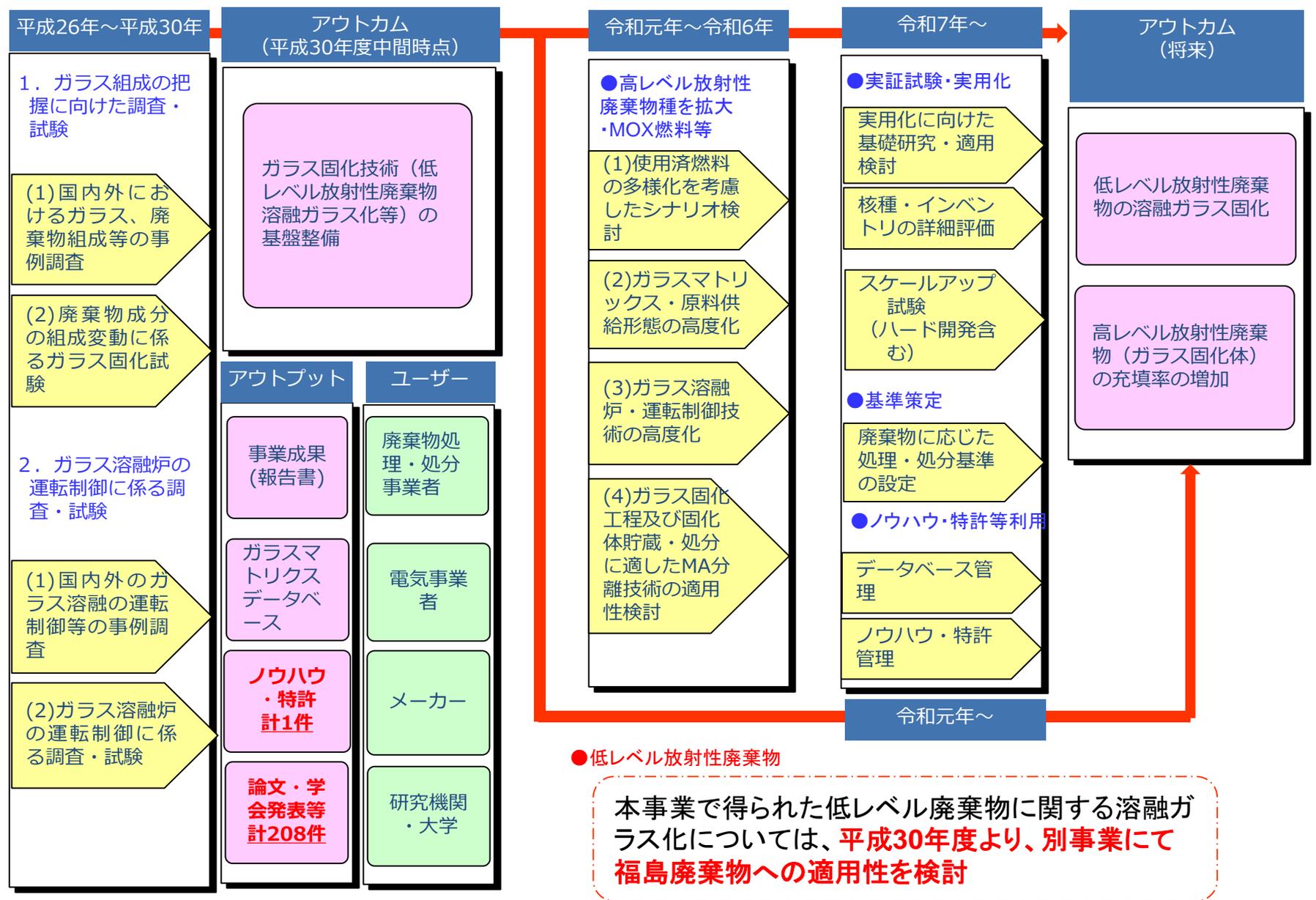
小型ガラス溶融炉

溶融炉の運転において**廃棄物充填率向上に対する技術検討**を行い、小型溶融炉を用いて、確認することができた

4. 当省(国)が実施することの必要性

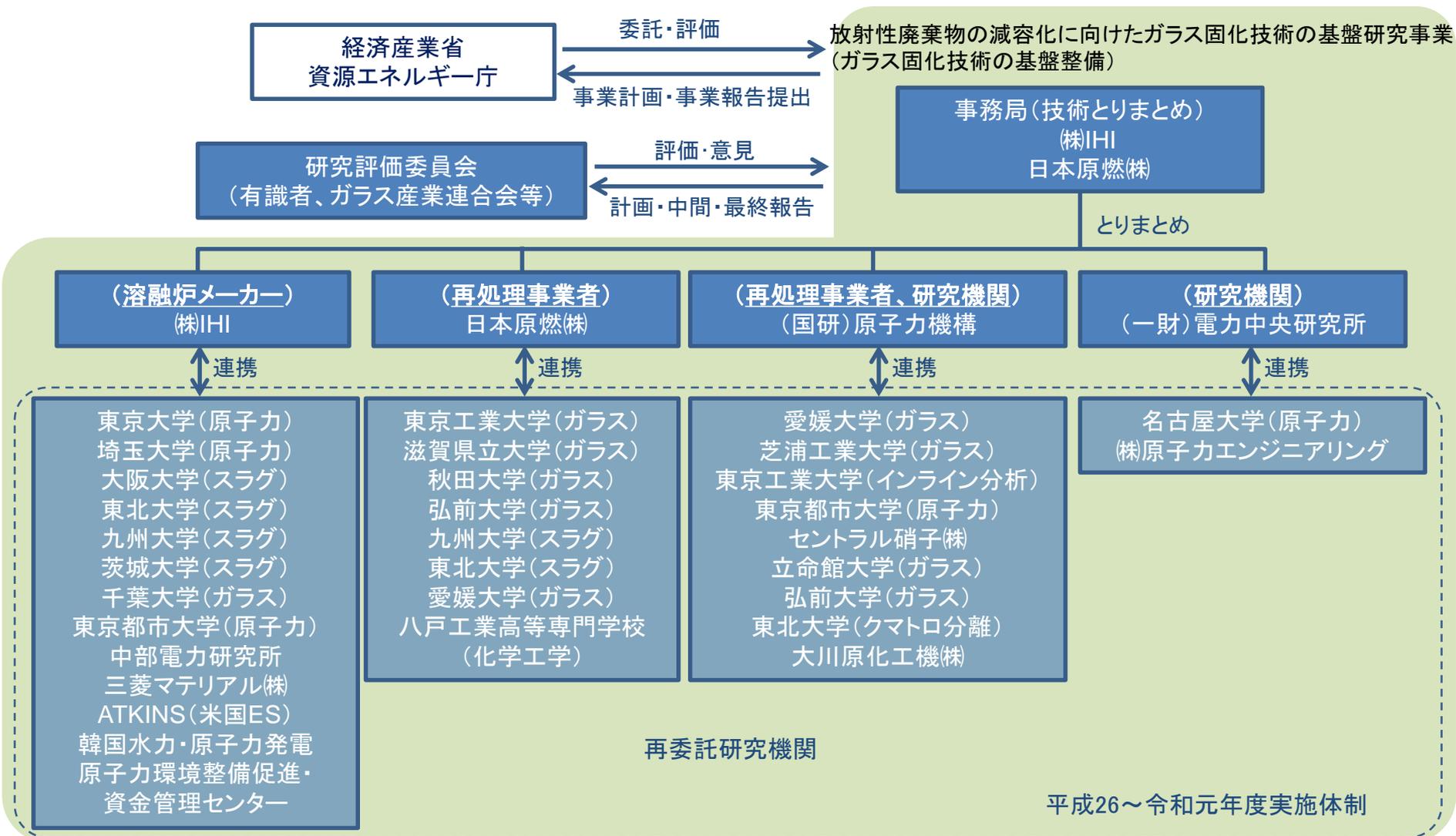
- 放射性廃棄物の安定的かつ減容化を目指した当該ガラス固化技術開発事業は、多種多様の廃棄物に適したガラス組成の選定とそれに対応する信頼性の高い固化技術を開発するため、技術的難度を有するとともに多額の開発費用と長期の開発期間を要する。このため、民間事業者にとっては開発リスクが高い事業であり国の主導で行う必要がある。
- 低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術は、将来当該技術を使用する原子力事業者が多数にわたるとともに、今後の原子力発電所等の原子力施設の廃炉措置の円滑化にも資するものである。また、高レベル放射性廃棄物のガラス固化技術については、最終処分という国が前面に立つべき課題の解決に資するものである。
- 国が前面に立つことにより、放射性廃棄物の処理、最終処分問題に対して、事業者、研究機関、大学、企業等国内外の英知を結集したオールジャパン体制での対応が可能となる。
- 「エネルギー基本計画」においても、低レベルを含む放射性廃棄物の処分については、原子力事業者等が処分に向けた取り組みを進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進すること、高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要があることが明記されている。

5. 事業アウトカムに至るまでのロードマップ



6. 研究開発の実施・マネジメント体制等

- ▶ ガラス固化技術に精通している**4社体制**で共同受託
- ▶ 有識者、ガラス産業界等から構成される**研究評価委員会を設置**（年2～3回開催）
- ▶ ガラス産業・鉄鋼・原子力等を専門とする**研究機関および企業が協力機関として参画**



6.1 事業者の役割分担(平成26年～平成30年)(1/2)

➤ 以下の経験・実績に基づき、本事業を実施

IHI	溶融炉メーカー	ガラス固化施設に関わる設計・開発等の実績・経験
日本原燃(JNFL)	再処理事業者	廃棄物保管及び再処理施設に関わる開発、運転等の実績・経験
原子力機構(JAEA)	再処理事業者・研究機関	廃棄物保管及び再処理施設に関わる研究、開発、運転等の実績・経験
電中研	研究機関	ガラス固化技術に関わる研究開発等の実績・経験

(1) ガラス組成の把握に向けた調査・試験

① 国内外におけるガラス、廃棄物組成等の事例調査

項目	事業者	再委託先
対象廃棄物の検討	IHI/電中研	ATKINS(米国ES)/韓国水力・原子力発電 /原子力エンジニアリング
マトリックスデータベースの作成・管理	JAEA	—
マトリックス評価項目の検討	IHI/電中研/JAEA/JNFL	—

② 廃棄物成分の組成変動に係るガラス固化試験

項目	事業者	再委託先	
廃棄物組成に応じたガラス組成の開発	IHI/JAEA	千葉大/中部電力/九大/阪大/東北大/芝浦工大	
溶融除染スラグに対する溶融ガラス化の検討	IHI	三菱マテリアル	
候補ガラス組成評価	電中研/IHI/JAEA	芝浦工大	
吸着ガラスの開発	JAEA/IHI	中部電力	
高充填マトリックス の開発	改良ホウケイ酸ガラス	JNFL	秋田大/滋賀県大/東工大/弘前大
	バナジウム添加ガラス	IHI	阪大/都市大/九大/東北大/茨城大
	リン添加ガラス	JAEA	—
代替マトリックスの 調査	鉄リン酸ガラス	JAEA	愛媛大/セントラル硝子
	ガラスセラミックス化	電中研	—

6. 1 事業者の役割分担(平成26年～平成30年)(2/2)

(2) ガラス溶融炉の運転制御に係る調査・試験

① 国内外のガラス溶融の運転制御等の事例調査

項目	事業者	再委託先
運転制御技術の事例調査 (ガラス溶融炉、運転制御)	電中研/IHI/JAEA/JNFL	—

② ガラス溶融炉の運転制御に係るガラス固化試験

目的	事業者	再委託先
溶融方式の検討 マトリックスの適用性評価(LLW)	電中研/IHI	—
高充填時の運転制御方法の検討	電中研	名古屋大
	IHI	東大、埼玉大、千葉大
	JNFL	東工大
適用性評価(HLW)	IHI/電中研/JNFL	—

6.2 研究開発のマネジメント

平成26～平成30年度

- ・事務局
- ・IHI
- ・JNFL
- ・JAEA
- ・電中研

第1ステージ

- ・事例調査
- ・候補ガラス組成の設定

第2ステージ

- ・組成の最適化
(1次サーベイ)

第3ステージ

- ・組成の最適化
(2次サーベイ)

組成の選定

1次サーベイの結果
を踏まえた評価、
組成の絞込み

2次サーベイの結果
を踏まえた評価、組
成の絞込み

年度内

- ・事務局
- ・IHI
- ・JNFL
- ・JAEA
- ・電中研

計画作成

前年度成果
を踏まえた
実施内容・
予算配分等
を協議

第1回研究評価
委員会

意見・評価

計画報告

意見・評価
を計画に反
映

学会発表等

意見

研究実施

4社会議
(毎月)

進捗管理・調
整事項等協議

第2回研究評価
委員会

意見・評価

最終報告

意見・評価
を報告書に
反映

7. 費用対効果（低レベル放射性廃棄物）

- 低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術が確立された場合の効果
 - ◆ 減容効果により、**廃棄体の処分費、測定費、輸送費の削減が可能**となる。
 - ◆ ガラス固化の対象となる低レベル放射性廃棄物は、廃樹脂、濃縮廃液、焼却灰等多岐に渡るが、**濃縮廃液を例にガラス固化を適用した場合の削減効果を試算**した。^(*1,2)
 - ◆ 試算の結果、セメント固化体に対するガラス固化体の**発生量が1/4に低減**されるとした場合、輸送費・処分費等が約**133億円の削減**^(*3)が見込まれる。
 - ◆ セメント固化からガラス固化への処理方法変更により、廃棄体の安定性は向上するが、処理費用の増加も考えられる。本費用は含まれていないが、事業終了時には処理コストを含めた総合評価を実施予定。

【試算根拠】

➤ 本試算は、ガラス固化適用により、処分費用中の操業費、測定費用、輸送費用が削減される仮定で算出した。

・地層処分対象の低レベル廃棄物（約18,000m³）の内、濃縮廃液は約8%（1,500m³）^(*1,2)

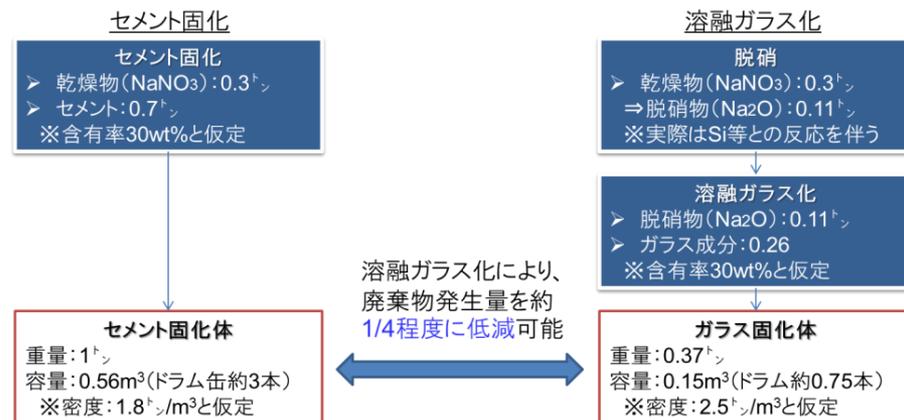
対象廃棄物：低レベル濃縮廃液の乾燥物（硝酸ナトリウム）0.3^ト

・処分費用中の操業費（地層処分） 1,400億円
 ・操業廃棄物輸送・処分中の測定費（地層処分） 9億円
 ・操業廃棄物輸送・処分中の輸送費（地層処分） 800億円

操業費、測定費、輸送費の合計 2,209億円

・濃縮廃液に関わる操業費、測定費、輸送費の合計
 （セメント固化）：2,209億円 × 8% = 177億円
 （ガラス固化）：2,209億円 × 8% × (1/4) = 44億円

削減効果 177億円 - 44億円 = 133億円^(*3)



※含有率、密度は仮定の値を用いて算出

(*1) コスト等検討委員会資料(2011)参照。

(*2) 約40年間の日本原燃(株)の再処理施設、MOX燃料加工施設の操業及び解体に伴い発生する

TRU廃棄物及び海外再処理に伴い返還される低レベル廃棄物のうち、地層処分対象のTRU廃棄物が対象

(*3) TRU廃棄物の処分施設の操業期間全体での削減効果

7. 費用対効果(高レベル放射性廃液)

- 高レベル放射性廃液のガラス固化技術の向上により、より多くの廃棄物を充填(現状の廃棄物充填率の3割向上)できた場合の効果
 - ◆ ガラス固化体発生本数を1,000本/年として、40年操業で、40,000本発生することを前提条件とすると、3割の減容化により12,000本の削減が期待できる。
 - ◆ ガラス固化体が12,000本削減できれば、高レベル放射性廃液の処理費、高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の貯蔵費、輸送費、処分費が削減されると考えられる。
 - ◆ 但し、処理費、処分費は発生本数に比例した削減効果は見込めないため、本試算では、保守的に評価に含めていない。
 - ・処理費(4,700億円^(*1)): 操業期間は廃液発生量に依存。キャニスタ等の購入費は削減。
 - ・処分費(30,219億円^(*2)): 高充填に伴うガラス固化体の発熱量増加を考慮した評価が必要。
 - ◆ 高レベル放射性廃棄物の貯蔵費用、輸送費用として、約2,790億円の削減^(*3)が見込めるものと考えられる。
 - ◆ 但し、高充填化に伴い貯蔵期間が増加した場合、貯蔵費用のコスト増が見込まれる。

【試算根拠】

- 本試算は操業、輸送費用として、以下のデータ^(*1)を用いて算出した。

・高レベル放射性廃棄物貯蔵	7,400億円
・高レベル放射性廃棄物輸送	1,900億円

高レベル放射性廃棄物貯蔵・移送費用合計 9,300億円

削減効果 9,300億円 × 0.3 = 2,790億円

(*1)コスト等検討委員会資料(2011)参照、(*2)原子力発電環境整備機構ホームページ参照、

(*3)処理施設の40年操業期間での削減効果

【参考】事業者の役割分担（平成26年～平成30年）（1／2）

（1）使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価

項目	事業者	再委託先
シナリオ検討	IHI/JNFL/電中研	RWMC
海外調査	IHI	RWMC
課題抽出	IHI/JNFL/電中研	RWMC
MOX燃料利用の情報交換と条件設定の検討	IHI/JNFL/JAEA/電中研	RWMC

（2）ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化

項目	事業者	再委託先
ガラス組成の選定	IHI/JNFL/電中研	秋田大、東工大、九大、東北大、愛媛大、八戸工業高専
原料供給形態の改良	JNFL/電中研	東工大、秋田大
構造解析によるガラスの健全性評価	JAEA	立命館大、弘前大

【参考】事業者の役割分担(平成26年～平成30年)(2/2)

(3) ガラス溶融炉・運転制御技術の高度化

項目	事業者	再委託先
ガラス溶融炉の高度化	IHI/JNFL/電中研	都市大
センシング技術の開発	IHI/電中研	埼玉大、中部電力、
運転技術の高度化	IHI/JNFL/電中研	埼玉大、名大

(4) ガラス固化工程及び固化体貯蔵・処分に適したMA分離技術の適用性検討

項目	事業者	再委託先
MA分離フローシートの構築	JAEA	芝浦工大、東北大、東工大
MA分離技術の安全性評価	JAEA	大川原化工機、芝浦工大、東北大
MA分離システム開発	IHI/JAEA	東工大

8. 外部有識者の評価等

8-1. 評価検討会

評価検討会名称

「放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業」
中間評価検討会

座長

野村 茂雄 元 原子力損害賠償・廃炉支援機構 理事

評価検討会
委員

委員

浅沼 徳子 東海大学工学部原子力工学科 准教授

澁谷 進 公益財団法人
原子力研究バックエンド推進センター フェロー

関 哲朗 文教大学情報学部情報社会学科 教授

山田 基幸 原子力発電環境整備機構 技術部 部長

8-2. 総合評価

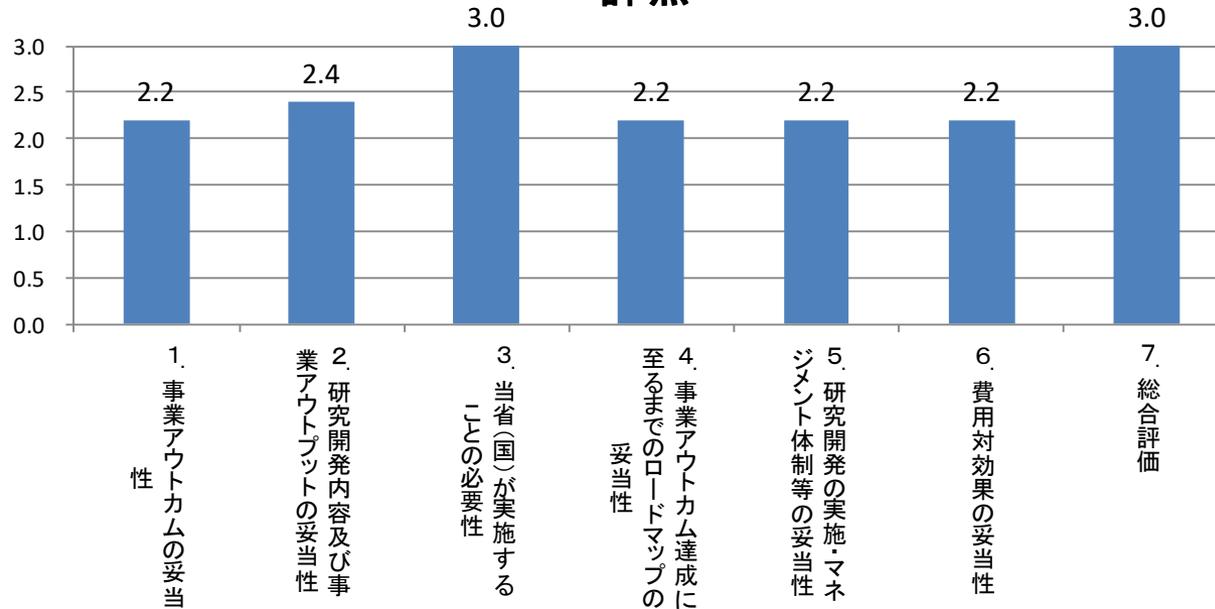
極めて合理的な研究開発計画を策定し、当初の計画以上の成果が得られた。この分野の専門家の英知を結集したオールジャパン体制で、強いリーダーシップとPDCA的な進捗管理のもと、着実な技術開発が行われた。今後、高燃焼度燃料やMOX燃料の処理において発生する廃棄物へも対象を広げていく場合、当事業で整備したデータベースや蓄積した技術的知見が、柔軟かつ適切に活用できるものと推察する。国が積極的に関与しつつ、当事業の成果がきちんと生かされる場を追求し、経済効果や環境負荷低減(処分場の負荷低減)につながるよう継続的な努力を望む。

一方、溶融固化から最終的な処分までの全体最適化の観点に踏み込んで、トレードオフになる課題等を整理の上検討を進めるべきである。また、一定の成果を期待して実施する事業であるので、国民の利益を考慮したベネフィットを明確化し、ベネフィットの達成をもって最終的な成功とすることを評価に加えるべきと考える。

8-3. 評点結果

○「経済産業省技術評価指針」に基づき、プロジェクト中間評価において、評点法による評価を実施した。

評点



【評価項目の判定基準】

評価項目1.~6.
 3点:極めて妥当
 2点:妥当
 1点:概ね妥当
 0点:妥当でない

7. 総合評価

(中間評価の場合)

3点:事業は優れており、より積極的に推進すべきである。
 2点:事業は良好であり、継続すべきである。
 1点:事業は継続して良いが、大幅に見直す必要がある。
 0点:事業を中止することが望ましい。

9. 提言及び提言に対する対処方針(1)

今後の研究開発の方向等に関する提言

- ガラス固化体への廃棄物充填率を向上させることは、固化体の本数を削減できるという意味では効果的に見えるが、管理上も処分場の負荷も大きく変わらない可能性もある。溶融固化から最終的な処分までの全体最適化の観点に踏み込んで、トレードオフになる課題等を整理の上検討を進めることで、より合理的で実用的な成果が期待できると考えられる。

今後、高燃焼度燃料やMOX燃料の処理により発生する廃棄物をガラス固化する場合の検討を進めていくことになるが、充填率の高いガラス固化体を作ることが効果的となるのはどのような条件か、シナリオを検討し選定していくことが必要と考える。

提言に対する対処方針

- 平成31年度以降の事業において、MOX燃料の利用を念頭とした、ガラス固化から最終的な処分までの全体最適化の観点に踏み込んだ処分シナリオ検討を行う。具体的には、ガラス固化体への廃棄物充填率向上に伴う課題の整理を行うとともに、ガラス固化体発生本数及び処分場の面積や管理面などの観点から、最も効果的となる廃棄物充填率等の検討を実施する。

9. 提言及び提言に対する対処方針(2)

今後の研究開発の方向等に関する提言

- 本事業が、国民に対してどのようなベネフィットを提供することに繋がる成果を示せたのかといったようなことを適切に示せるように事業を進めるべきである。

提言に対する対処方針

- 本事業は、我が国の産業活動や国民が享受する電力供給を担う、原子力関連事業から排出される放射性廃棄物の安定化、減容化等を目指した処理技術の開発を行うものであり、この成果は国民生活の安全、安心や環境防護の向上に繋がるとともに、国が推進する原子力政策への信頼性の向上に資すると考えている。そのようなベネフィットを有している点について、「エネルギーに関する基礎用語や基本データ、最新の動向やトピックなど政策に関連する情報をできる限りわかりやすく表現するよう継続的に努めるとともに、その内容を、資源エネルギー庁のホームページなどを活用して、随時、丁寧に発信していく」としたエネルギー基本計画（平成30年7月閣議決定）に基づき示していく。具体的には、資源エネルギー庁のホームページなどで、核燃料サイクルによる高レベル放射性廃棄物の減容効果（ガラス固化体）などを紹介している。引き続き、エネルギー基本計画に基づき、本事業成果を含むエネルギーに関する基礎用語や基本データ、最新の動向やトピックなど政策に関連する情報を随時、丁寧に発信していく。

9. 提言及び提言に対する対処方針(3)

今後の研究開発の方向等に関する提言

- 事業者、国、大学の専門家を集めたこれまでの体制を、世代交代、人材育成を踏まえ、維持、発展できるように、国の強い支援が望まれる。

提言に対する対処方針

- 本事業は令和6年度までの継続事業であることから、今後も得られた成果などを再委託先の関連メーカーや大学など幅広く展開することで、これまで構築してきた体制を一層発展させるとともに、引き続き維持できるように支援していく。

B. 低レベル放射性廃棄物の 除染方法の検討

目次

1. 事業の概要
2. 事業アウトカム
3. 事業アウトプット
4. 当省(国)が実施することの必要性
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ
6. 研究開発の実施・マネジメント体制等
7. 費用対効果
8. 外部有識者の評価等
9. 提言及び提言に対する対処方針

1. 事業の概要

概要

低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除染に伴い発生する廃液等のガラス固化への課題を整理し、ガラス固化の前処理としてのウラン等の除染技術及び除染結果を精密に測定する技術の開発を目的とする。

実施期間

平成26年度～平成29年度(4年間)

実施形態

国からの直執行
(放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業)

執行額

年度	H26FY 執行額	H27FY 執行額	H28FY 執行額	H29FY 執行額	H26～H29FYの 総執行額
執行額(億円)	0.60	1.03	1.54	0.59	3.77

注) 端数処理のため合計が一致しない場合がある

実施者

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(測定技術開発)
原子燃料工業株式会社(除染技術開発)

実施リーダー

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門
人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部 部長 植地 保文

原子燃料工業株式会社 燃料技術部 グループ長 青木豊和

1.1 目的

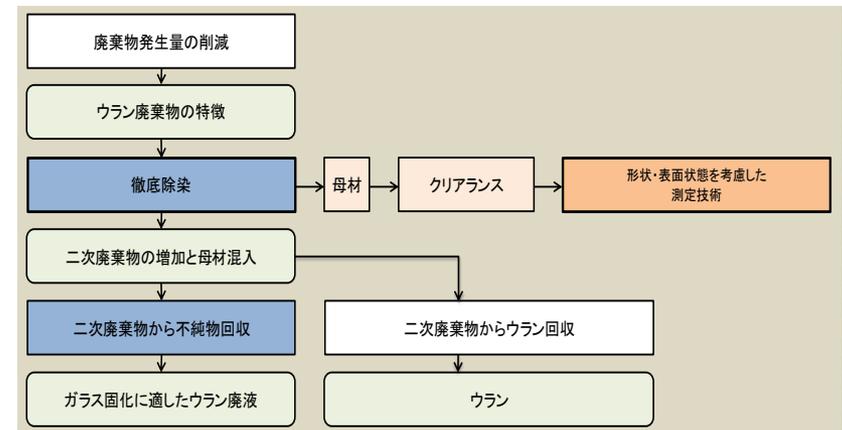
- ・原子力発電所や再処理施設等の操業・廃止時の除染等により発生する低レベル放射性廃液等のガラス固化処理については、諸外国では実用化が進んでいる。我が国としても、低レベル放射性廃液等をより安定に、高含有率でガラス固化する技術の可能性を検討しておくことが重要である。
- ・特に、ウランを取り扱う施設の操業・廃止時に発生する低レベル放射性廃棄物等については、ウランの放射能減衰が期待できないことから、金属等の母材から完全にウランを除去することが重要となる。除染廃液にはウラン等と共にはぎ取られた母材が過剰に含まれることとなり、廃液のガラス固化体の量が不必要に増大するとともに、その安定性にも懸念が生じる。
- ・このため、除染の際に母材の混入量を極力抑え、除染のための薬品等の二次廃棄物の発生を最小化するウラン除染技術を開発するとともに、除染の効果を確認するため、母材からのウラン等の除染結果を精密に測定する技術を開発する。
- ・こうした低レベル放射性廃棄物中のウラン等の処理技術の向上により、ガラス固化体の発生量を減少させることが可能であり、ひいては処分場の面積を縮減でき、将来世代への負担を軽減することが期待される。
- ・本事業では、ウラン等を含む低レベル放射性廃棄物の処理技術について、国内外の文献等の調査、それらを踏まえたウラン等の除染技術の検討、ウラン等を除去した母材に残留しているウラン等の測定技術の開発等を行い、ガラス固化の前処理技術としての基盤を整備する。

＜政策的位置付け＞

本技術開発は、「廃炉等に伴って生じる放射性廃棄物の処分については、低レベル放射性廃棄物も含め、発生者責任の原則の下、原子力事業者等が処分に向けた取組を進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進するなど、安全確保のための取組を促進する。」としたエネルギー基本計画に基づくものである。

1. 2 技術開発の概要(1/2)

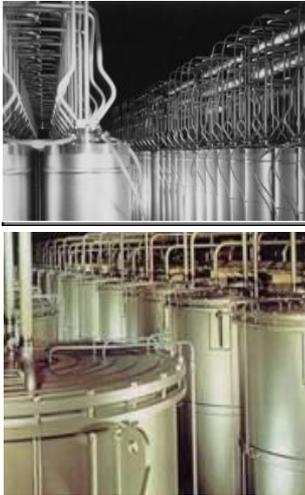
- ・ウランを取り扱う施設では、ウラン酸化物、もしくはウランフッ化物の粉体が表面に一様に付着した金属の低レベル放射性廃棄物が多量に発生する。この中で、少量ではあるものの、金属表面の付着物、金属表面の腐食層、機械による浸食層等にウラン化合物が取り込まれている器材が存在する。
- ・ウランは半減期が極めて長く、放射能の減衰が期待できないという特徴があるため、ウラン等を含む金属の低レベル放射性廃棄物の発生量を削減するためには、除染等によりウラン等を母材から除去し、クリアランス後に母材を再利用することが有効な手段の一つとなる。
- ・このため、母材に付着した**ウラン等を確実にクリアランスレベル(1Bq/g)以下まで除染**できることが求められる他、除染性能と合わせて、除染過程で生じる二次廃棄物の発生量及び廃液組成についてもガラス固化への適応性の観点から考慮することが重要となる。
- ・また、プラント機器や設備の更新等により発生した除染及び測定対象となる器材には、平板や大口径の円筒等の単純形状の物ばかりではなく、バルブやフランジ等の複雑な形状をしている物も存在する。
- ・さらに、材質的な特徴としては、プラント機器や配管等の炭素鋼の他、遠心機等の部品であるアルミニウムやステンレス、ウラン燃料の被覆管のジルコニウム合金等の特殊鋼等がある。
- ・以上のことから、器材の形状・材質や表面状態等の特徴を考慮することが重要となる。



ウラン等を含む金属の低レベル放射性廃棄物の処理技術の一般的な考え方

1.2 技術開発の概要(2/2)

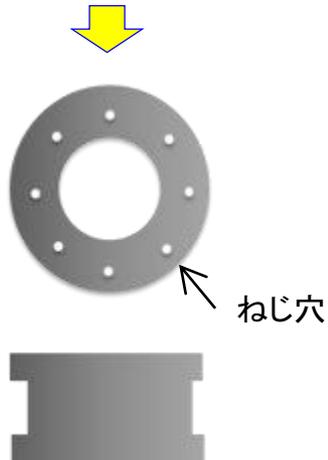
ウランが付着している金属廃棄物の一例



遠心機部品等



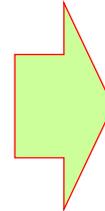
プラント機器・配管等



遠心機部品のイメージ



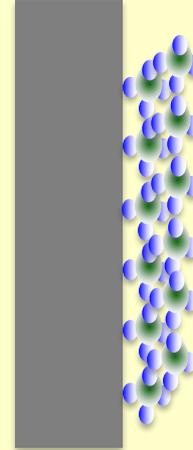
ウラン燃料の被覆管



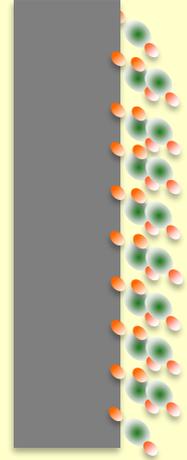
金属表面のウランの付着状態

一般的な表面汚染のイメージ

フッ化物(UF_4 等)

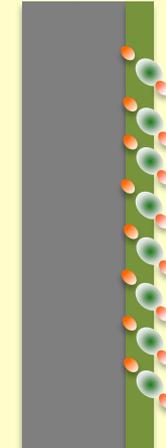


酸化物(UO_2)

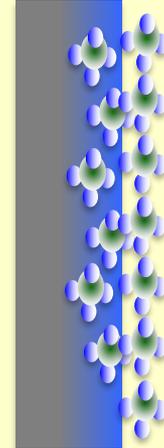


特異な表面汚染のイメージ

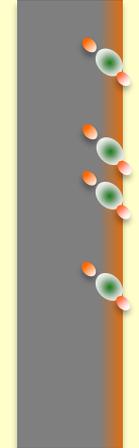
表面付着物
への浸透



腐食層へ
の浸透



機械浸食層
への浸透



1. 3 課題設定(1/2)

・除染及び測定対象の特徴等を考慮し、以下に示した3点の技術課題を設定して、これらの課題を解決するために必要となる調査・検討等を行う。

(1) 低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等(除染技術開発)

【課題1: 金属からのウラン等の除染技術】

- ・ウラン等を選択的に溶解し、母材の混入を極力避けることが可能な酸浸漬法及びウラン等を効率的に切削することが可能なブラスト法に関する調査・検討等を行う。
- ・また、金属表面のウラン等の付着状態を考慮し、器材の発生場所や保管環境等を踏まえ、金属表面のウラン等による汚染状態を再現した上で、除染技術の適用性を評価する。

【課題2: 除染廃液からの不純物分離技術】

- ・課題1の除染技術についての調査・検討等の結果を踏まえ、除染廃液からの母材及びウラン等の分離・回収技術、並びに除染剤の再利用に適用可能な分離・回収技術について、調査・検討等を行う。
- ・なお、分離・回収技術の開発では、母材、ウラン、除染剤等の回収、再利用により、二次廃棄物の発生量を削減することを考慮する。

(2) クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等(測定技術開発)

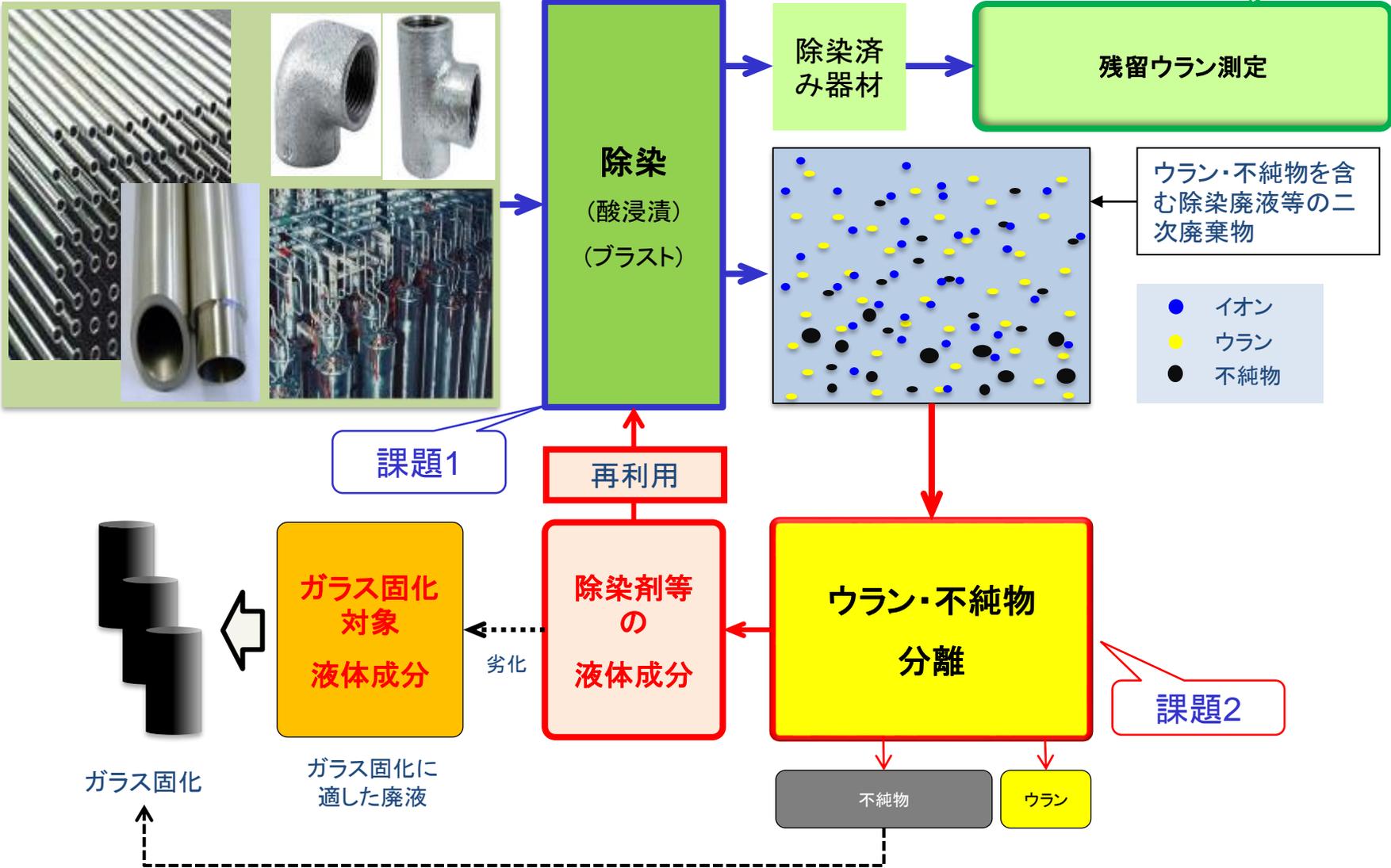
【課題3: 除染済み母材の残留ウラン測定技術】

- ・バルブやフランジ等の複雑な形状の器材に対するクリアランスレベル(1Bq/g)以下の高精度なウラン等の測定では、 α 線が遮蔽されるため、これまでに実用化されている α 線を用いたクリアランス測定の適用が困難と考えられる。
- ・このため、クリアランス対象物全体の約半分を占めている複雑形状の器材の高精度な測定ができなければ、金属の低レベル放射性廃棄物のリサイクルは限定的なものとなる可能性がある。
- ・そこで、測定対象の材質及び形状的な多様性や、除染後にわずかに残留しているウラン等の分布状態、母材の発錆等の表面状態を考慮し、クリアランスに求められる精度で、 α 線による測定(日本原子力研究開発機構の例では約30分)と同程度の実用的な時間で測定することができる γ 線による測定手法の技術的な成立性について調査・検討を行う。

1. 3 課題設定(2/2)

技術的な課題の位置づけと、除染フローの関係

課題3



2. 事業アウトカム

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
<p>1. 除染技術開発 ○低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等</p> <p>【課題1: 金属からのウラン等の除染技術】 【課題2: 除染廃液からの不純物分離技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化の前処理として、母材の混入量を極力抑え、薬品等の二次廃棄物の発生を最小化するウランの除染・分離技術を開発する。 <p>2. 測定技術開発 ○クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等</p> <p>【課題3: 除染済み母材の残留ウラン測定技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・確実にクリアランスするため、母材からのウラン等の除染結果を精密に測定する技術を開発する。 <p>※除染技術開発及び測定技術開発により、2050年頃までに発生するウラン廃棄物のうち、約半数を占める金属のクリアランスが可能であり、以下の効果が見込まれる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・クリアランスの促進 ・ウラン廃棄物の物量低減 ・放射性廃棄物処分場の必要面積の縮減 ・最終処分場の逼迫時期の延命 ・新たな評価手法による検認技術の運用 <p>※事業の実施にあたっては、将来にも亘る実効性のある研究成果を得るために、国内のウラン燃料加工施設やウラン濃縮施設等から発生する低レベル放射性廃棄物の現状を十分に踏まえる。</p>	<p>計画: 事業終了時</p> <p>【金属からのウラン等の除染技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・金属の低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除染技術として、金属表面に残留しているウラン等を選択的に除去し、母材の混入を極力避けることが可能な酸浸漬法及び表面に残留するウラン等を効率的に切削することが可能なプラスト法の技術的実証。 <p>【除染廃液からの不純物分離技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・除染廃液からの母材及びウランの分離・回収技術、並びに除染剤の再利用に適用可能な分離・回収技術の実証。 <p>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・測定対象の材質及び形状的な多様性や、除染後にわずかに残留しているウラン等の分布状態、母材の発錆等の表面状態を考慮し、クリアランスに求められる精度で、α線による測定(日本原子力研究開発機構の例では約30分)と同程度の実用的な時間で測定することができるγ線による測定評価手法の確立。 	<p>実績: 事業終了時</p> <p>【金属からのウラン等の除染技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最適な除染方法として選定したプラスト除染及び酸浸漬除染について、除染条件を最適化した除染試験を実施し有効性を確認。特に、プラスト除染は金属形状に対する柔軟性が高く90%以上の金属廃棄物に適用可能。 <p>【除染廃液からの不純物分離技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・酸除染では、中和・沈殿反応により容易に酸を除去可能。 ・プラスト除染では、除染・分離統合システムを開発。研磨材と水の再利用により二次廃棄物の発生を抑制できることを実証。 ・二次廃棄物からのウラン回収は工程スラッジの処理プロセスの中で実施することが合理的。 <p>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・クリアランス測定装置を製作した。模擬ドラム缶を用いた測定データを取得し、かさ密度1.0g/cm³程度の測定対象について、放射能濃度0.1Bq/g(NU)の測定を60分以内で実現可能であることを確認した。 ・事業終了後も継続して、国内のウラン燃料加工施設やウラン濃縮施設等から発生する低レベル放射性廃棄物の現状を踏まえて電力共通研究を実施。また、標準化(原子力学会)に向けた作業を実施中。 <p>※新たな評価手法を運用するとき、実際の放射性廃棄物(金属鋼材)をドラム缶上下で大きな偏りが無く、且つかさ密度が大きくなり過ぎないように収納することが課題。</p>	

3. 事業アウトプット (除染技術開発)

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	進捗度
<p>1. 除染技術開発 ○低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等 【金属からのウラン等の除染技術】 【除染廃液からの不純物分離技術】</p> <p>・国内外で取組まれている低レベル放射性廃棄物からのウラン等の除去技術を調査し、物理的・化学的な除染・分離、その適用範囲、その際に発生する二次的な廃棄物の発生量、固化ガラスの安定性への影響に係る技術の特徴を整理する。</p> <p>※実規模試験の必要性は、スケールアップ効果の観点から判断した。プラスト法の場合、除染廃液の再利用に遠心分離等の設備機器を用いている。遠心分離の分離効率には設備サイズに合わせて設計の最適化が必要となるため、実規模の試験を行ってデータを取得する必要があることから、統合システム装置を試作した。一方、酸浸漬の効率は原理的に除染対象物の規模に依存せず、小規模試験により性能を確認することができるため、実規模試験は実施しなかった。</p>	<p>(事業開始時)</p> <p>【金属からのウラン等の除染技術】 文献等により、最適な除染方法の選定及び除染で発生する二次廃棄物の特徴を調査する。選定した除染方法による予備的な除染試験を行い、基礎データを得る。 【除染廃液からの不純物分離技術】 文献等により、除染廃液からの母材及びウランの分離、除染材の再利用に適用可能な不純物分離技術を調査する。</p>	<p>【金属からのウラン等の除染技術】 文献調査により、酸浸漬法及びウエットプラスト法を有効な除染候補として絞り込むとともに、予備的な除染試験を行い、二次廃棄物の特徴を含めた基礎データが得られた。 【除染廃液からの不純物分離技術】 文献調査により、酸浸漬の廃液は化学的分離、ウエットプラスト法の廃液は物理分離が有力な候補となりうることを示された。</p>	<p>100%</p>
	<p>(中間評価時)</p> <p>【金属からのウラン等の除染技術】 ・酸浸漬法及びウエットプラスト法による除染試験を行い、最適条件を見出す。 【除染廃液からの不純物分離技術】 ・ウエットプラスト法の模擬溶液を用いた小規模なサイクロン分離機による分離試験を行い、基礎データを得る。</p>	<p>【金属からのウラン等の除染技術】 ・除染試験により、酸浸漬法の最適条件及びウエットプラスト法の最適条件に関するデータを取得した。この条件を実用化における除染条件とすることとした。 【除染廃液からの不純物分離技術】 ・プラスト研磨材と金属表面の研削屑の分離に係る基礎データを取得し、不純物分離に係る技術的見通しを得た。</p>	<p>100%</p>
	<p>(事業終了時)</p> <p>【金属からのウラン等の除染技術】 ・平成27年度までの技術開発により、枢要技術としての除染技術に関する開発目標は達成されたことから、平成29年度に計画している統合システムにおいて、実廃棄物サイズの試料に対する除染効率等を確認し、実規模での技術的成立性を評価する。 【除染廃液からの不純物分離技術】 ・平成27年度に技術的見通しが得られたサイクロン分離機による分離について、実用的な廃液量を処理可能な実規模スケールでの試験を実施し、実規模での技術的成立性を評価する。</p>	<p>【金属からのウラン等の除染技術】 【除染廃液からの不純物分離技術】 ・実廃棄物を想定した模擬廃棄物を用いて、除染から分離までを行う実規模の統合システムを設計・製作。 ・模擬廃棄物を用いて実運用を想定した試験を実施。 ・試験結果から除染性能及び二次廃棄物の分離性能を評価し本装置の技術的成立性を実証。 ・なお、二次廃棄物はガラス固化可能であることを確認(金属100トン当たりガラス固化体12本程度)。</p>	<p>100%</p>

3. 事業アウトプット (測定技術開発)

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	進捗度
<p>2. 測定技術開発 ○クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等 【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</p> <p>・国内で多量に発生している複雑形状の金属廃棄物の特徴を踏まえ、ウラン等の除去後の母材に残留したクリアランスレベルのウラン等の検出が可能となる高感度なγ線測定手法を開発する。</p>	<p>(事業開始時) 【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 γ線測定手法への除染方法の影響評価試験を行い、γ線によるウランの定量法の成立性を検証する。 クリアランス対象物の形状やウラン等の付着状態の違いによる遮蔽効果等を考慮したモデルを検討する。</p>	<p>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 試験及びシミュレーションにより、γ線測定手法に影響する酸浸漬法による除染後の母材表面のU-238とPa-234mの残留状況に関わるデータを取得し、γ線によるウランの定量法の成立性を確認した。 シミュレーションにより、線源の空間的な偏りとγ線遮へい状況が測定対象物の放射能の評価結果へ与える影響についてモデル化してデータを取得した。</p>	<p>100%</p>
	<p>(中間評価時) 【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 ・γ線測定手法への除染方法の影響評価試験を行い、解析結果をデータベース化する検討を行う。 ・線源の空間的な偏りとγ線遮へい状況が、測定対象物の放射能の評価結果へ与える影響について、シミュレーション及び模擬コンテナ等を用いた測定試験を実施し、散乱γ線等価モデル法の適用の妥当性を検証する。 ・ウラン燃料加工施設等におけるクリアランス測定装置設置場所の調査、複数位置測定を模擬した装置によるγ線の効率的な測定を実現するための検出器配置を調査する試験等を実施し、クリアランス測定装置の仕様を決定する。</p>	<p>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 ・酸浸漬法によるウラン化合物、トリウム化合物の溶解度のシミュレーションによる放射平衡状態に関するデータを取得し、データベース化を検討した。 ・シミュレーション及び模擬コンテナ等を用いた測定試験により、各種データを取得した。これにより、散乱γ線等価モデル法適用の妥当性を確認した。 ・各施設でのバックグラウンド測定データを解析し、遮へい体の厚さを設定した。また、既存のドラム缶測定装置の測定データから検出器の台数を設定した。これらの結果をもとに、クリアランス測定装置の仕様を決定し、概念設計を終了した。</p>	<p>100%</p>
	<p>(事業終了時) 【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 ・ドラム缶型容器を対象としたクリアランス測定装置を製作し、定量性能を評価する。実用的な測定時間(60分以内)で、クリアランスレベル(1Bq/g以下)の残留ウランの測定が可能であることを実証する。</p>	<p>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 ・クリアランス測定装置を製作し、模擬ドラム缶を用いた測定試験により、各種データを取得した。これにより、かさ密度1.0g/cm³程度の測定対象について、放射能濃度0.1Bq/g(NU)の測定を60分以内で実現可能であることを確認した。</p>	<p>100%</p>

3. 1 成果の概要 【除染技術開発】(1/4)

除染・分離統合システム装置の開発

- 除染装置(SUS研磨材による湿式ブラスト)及び分離装置(サイクロン、遠心分離、磁気分離)を統合
- 得られた知見に基づき、実規模装置を設計・製作。模擬ウランを付着させた金属(模擬廃棄物)を用いて、実運用を想定した除染試験を実施

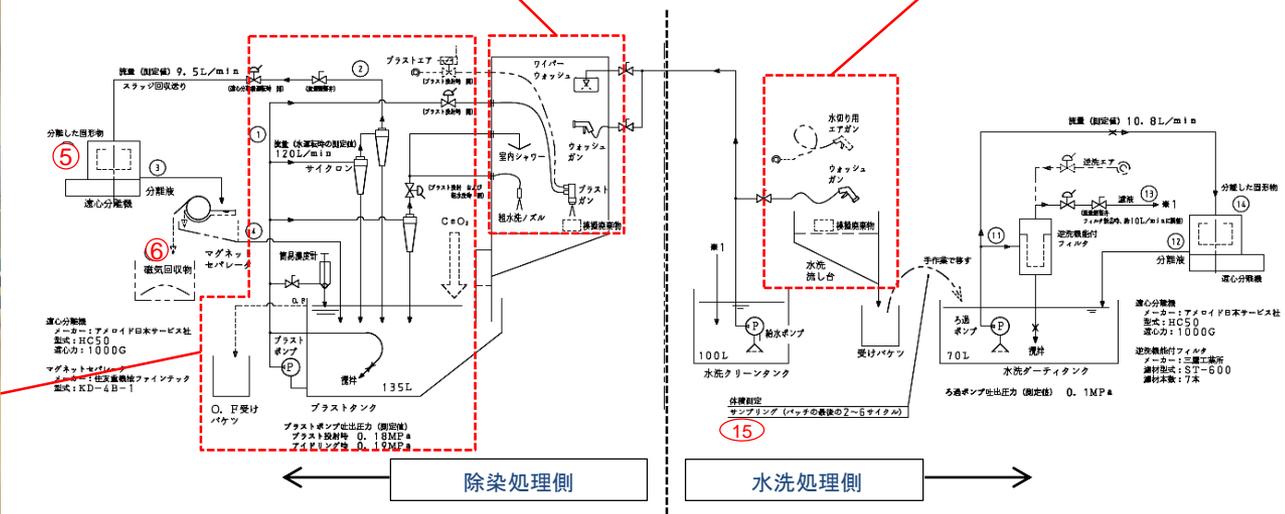


図 除染・分離装置の回路図

3. 1 成果の概要 【除染技術開発】(2/4)

除染・分離統合システム装置の性能

▶ ブラスト処理後の模擬廃棄物を水洗処理し試料表面の二次汚染状況を評価

- クリアランス基準(1Bq/g)を十分下回ることを確認
- 再利用水(クリーンタンク水)を用いても純水の場合と有意な差なし

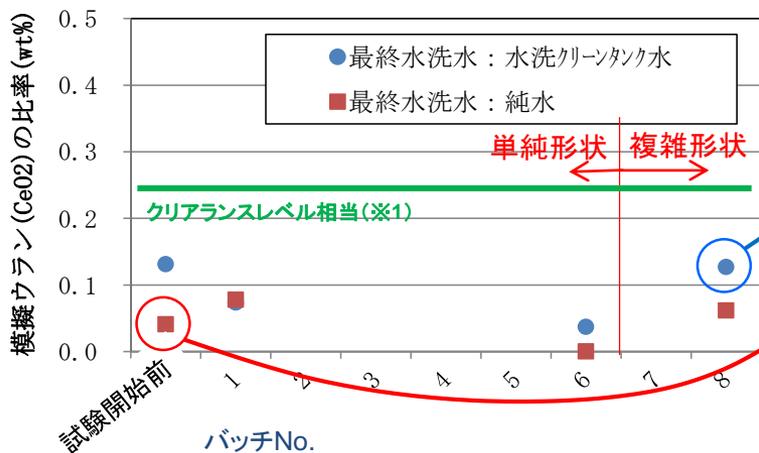


図 ブラスト処理後の二次汚染の分析結果

※1: 汚染源として濃縮度5wt%のウラン(ECGU)を仮定したとき、クリアランスレベルである1Bq/gに相当する値。表面(深さ10μm)の模擬ウランの比率を、対象金属全体に対する比率(密度)に換算することにより算出。

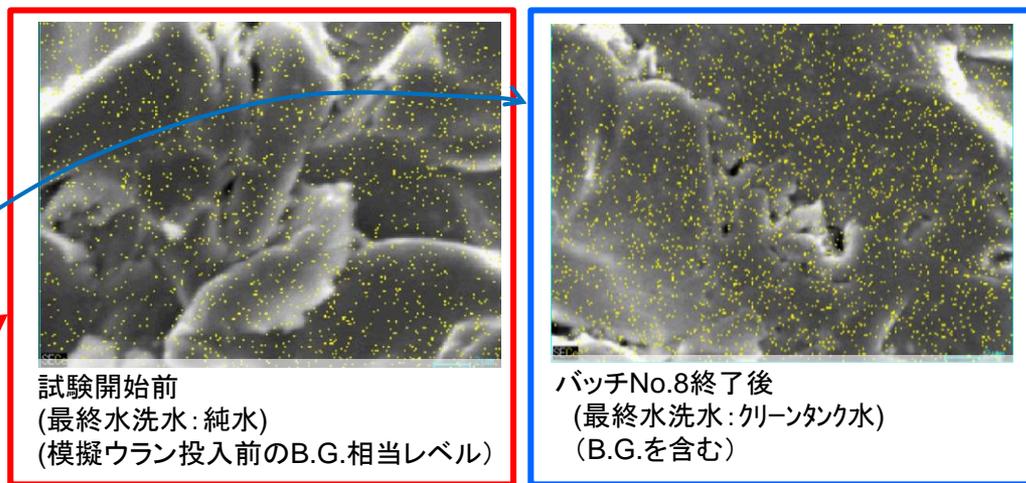


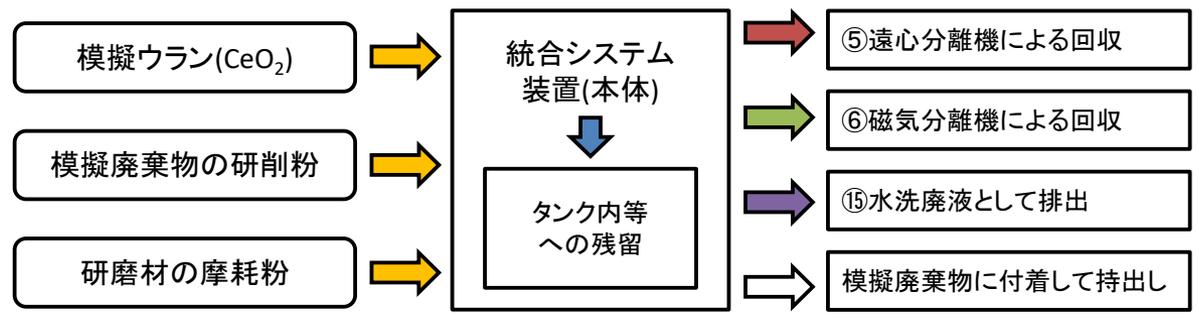
写真 ブラスト処理後の二次汚染の観察結果

(黄点はEDSIによるCe検出位置。
保守側となるよう密度が高い範囲のみを意図的に選択)

3. 1 成果の概要 【除染技術開発】(3/4)

除染・分離統合システム装置の性能

➤ 物質収支を測定し二次廃棄物(模擬廃棄物の研磨粉、及び研磨材の摩耗粉)の回収能力を評価 ⇒ 二次廃棄物の99%が回収可能



	項目	収支	
		g	%
投入	模擬ウラン(CeO ₂)	251	6
	模擬廃棄物の研削粉	2,497	59
	研磨材の摩耗粉※	1,461	35
	計	4,208	100
排出	⑤遠心分離器による回収	4,131	98
	⑥磁気分離機による回収	36	1
	⑮水洗廃液として排出	41	1
	模擬廃棄物に付着して持出し	0	0
	計	4,208	100

※研磨材の摩耗粉の発生量は測定できないため、(排出量の総和)-(模擬ウランの投入量)-(模擬廃棄物の研削粉)から算出

3. 1 成果の概要【除染技術開発】(4/4)

酸浸漬法及び湿式ブラスト法の比較

	二次廃棄物の性状・物量等について			実施コスト等
	特徴	ガラス固化への影響	ウラン濃度低減 (ウラン回収)	
酸浸漬法	<ul style="list-style-type: none"> 主成分はギ酸、硫酸、Fe、Crであり、イオン種、固形物の両方を含有。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃液処理の観点から、ギ酸を用いることが最適(H₂O₂を添加しCO₂+H₂Oに分解・除去し、焙焼等により酸化物に変換しガラス固化材料とできる。) 	<ul style="list-style-type: none"> UO₂付着量を過大に仮定した場合でも、廃棄物100tあたりのウラン量は20kg程度。 Fe、Crは、工程スラッジの代表的な成分の一つである。 	<ul style="list-style-type: none"> 酸化膜を考慮した場合、1バッチ45kgあたり3hr程度での処理が可能※1※2。 ほぼ全ての金属廃棄物に適用可能。 除染効率は反応槽の大きさに大きく依存。
湿式ブラスト法	<ul style="list-style-type: none"> 主成分は、Fe、Crであり、固形物のみを含有。 	<ul style="list-style-type: none"> 固形金属は焙焼等により酸化物に変換し、ガラス固化材料とできる。 		<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物180kgあたり3hr程度での処理が可能※1※3。 90%以上の金属廃棄物に適用可能(切断等を行えば、ほぼ全量に適用可能)。
総合評価	—	<ul style="list-style-type: none"> <u>何れの除染方法でも適切な前処理によりガラス固化に適合する成分とすることが可能。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> 発生するウラン量は少ない。 なお、ウラン濃度の低減が必要な場合には、<u>工程スラッジの処理プロセスの中で実施することが合理的。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> 除染能力に相違はあるが、何れの除染方法でもクリアランス除染への適用が可能。 設備サイズ、除染効率等の観点では、ブラスト除染が優れる(但し、細径管等が多い場合には、事前の切断作業が少ない酸浸漬法の選択も一案)

※1: 廃棄物形状は、H鋼(200x200x800(t1=t2=12)、表面積0.915m²/本)を用いて試算。

※2: 酸浸漬1バッチにおいて、300x300x1000 (=90L)の反応槽でH鋼廃棄物1本の処理すると仮定。

※3: 湿式ブラスト法における除染効率は0.02m²/minと仮定した。

3. 2 成果の概要 【測定技術開発】(1/2)

ドラム缶型容器を対象としたクリアランス測定装置を製作した。このとき、バックグラウンド測定データ等を解析して、クリアランス測定装置の仕様(NaI検出器の台数や遮へい体の厚さ等)を決定した。ウラン定量性能を向上させるため、等価モデル法を適用した。

- ウラン定量誤差を低減するため、線源偏在等を考慮できることが必要である。クリアランス測定装置のデータに等価モデル法を適用し、エネルギーの異なる2種類の γ 線の計数比から線源分布等を推定した。

クリアランス測定装置と等価モデル法適用

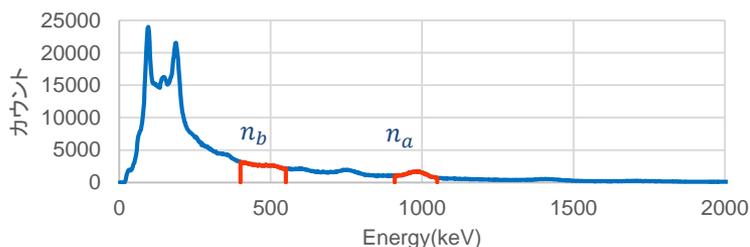


クリアランス測定装置

	仕様
検出器	NaI検出器:6台 (3×5×16インチ)
遮へい体	10cm厚の鉄
回転台	10rpm



模擬ドラム缶



異なるエネルギーでの γ 線の減弱の差(線源の分布に対応)を表す $X_{geometry}$ を定義した。この値は n_a と線形関係が見られる。定数 c は各エネルギーの検出効率等の比に対応する。

$$X_{geometry} = \frac{1}{\left(\ln\left(1/\left(\frac{n_a}{n_b} \times c\right)\right)\right)^2}$$

線源の分布が変化したとき、計数率は $X_{geometry}$ と係数 p, q で線形近似できる。未知の放射能濃度 A で計数率 n_a' が測定された場合、放射能濃度 A_0 で計算した係数 p, q を使って A を計算できる。

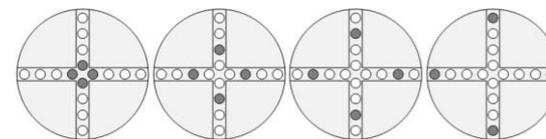
$$A = n_a' \times \frac{A_0}{p \cdot X_{geometry} + q}$$

実測データによる検討例

模擬ドラム缶の線源配置と検量線設定

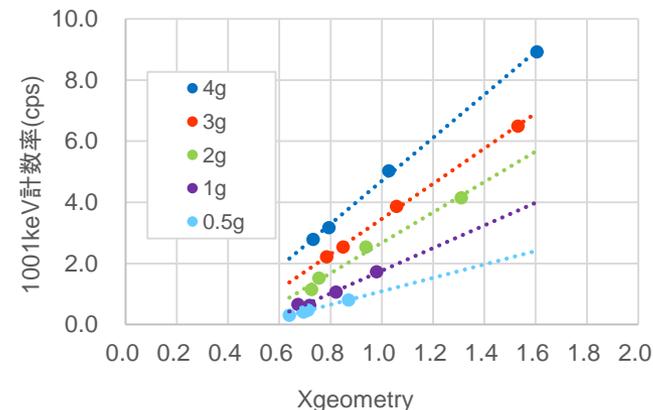
基本の線源位置

クリアランス測定装置で天然ウラン(4g, 3g, 2g, 1g, 0.5g)を基本の線源位置に配置した模擬ドラム缶を測定した。測定時間3600s、模擬ドラム缶重量215kgである。



検量線設定

測定データから $X_{geometry}$ を計算し、対応する1001keV計数率で検量線を設定した。

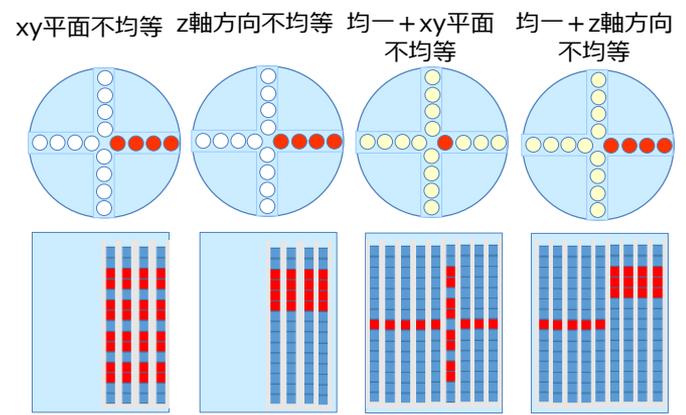


3. 2 成果の概要 【測定技術開発】(2/2)

クリアランス測定装置の定量性能を評価した。実用的な測定時間(60分以内)で、**クリアランスレベル(1Bq/g以下)**の**残留ウランの測定が可能であることを実証した。**

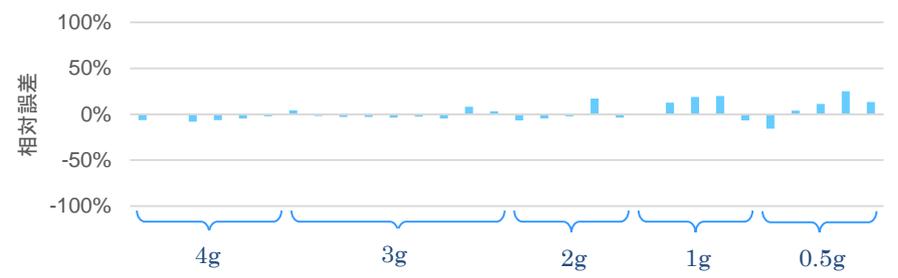
- 天然ウランを偏らせて配置した模擬ドラム缶を用いた測定試験でγ線測定データを取得した。模擬ドラム缶では、線源のx,y方向の偏りやz方向の偏りを検討した。ウラン量を正しく評価するため、1001keVのγ線と400~600keV付近の散乱γ線の間の関係を用いて線源の偏りを補正した。(散乱γ線等価モデル法)
- かさ密度1.0g/cm³程度の測定対象について、放射能濃度0.1Bq/g(NU)の測定を60分以内で実現可能であることを確認した。
- 散乱γ線等価モデル法を用いたクリアランス評価方法の標準化(原子力学会)に向けた作業を実施中。

模擬ドラム缶の線源配置の例



ウラン定量の相対誤差

かさ密度1.0g/cm³程度の測定対象では、天然ウラン放射能濃度0.06Bq/gの測定を60分で、相対誤差25%程度で実現できると考えられる。

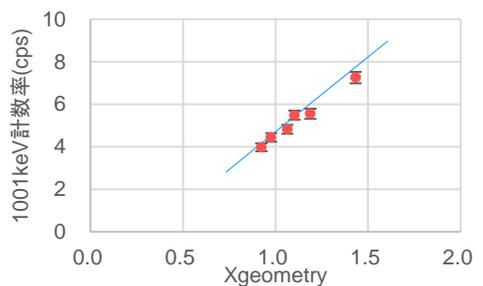


クリアランス評価方法の標準化

標準化の活動状況

事業終了後、電力共通研究を実施するとともに**標準化(原子力学会)に向けた作業を実施中。**

検量線と偏った線源配置の測定データ



ウラン4gを配置した例を示す。線源位置が変わると測定されるγ線計数率が変化する。散乱γ線等価モデル法では、線源分布等を推定するため、定量性能が向上する。

	2019年		2020年	2021年
標準委員会、原子燃料サイクル専門部会等審議			▼	
U・TRUクリアランスレベル検認分科会	3/29	6/13 8/21 10/24	▼	
U・TRUクリアランスレベル検認分科会作業会	5/17	9/2		

3.3 終了時評価(本事業の実績)

① 金属からのウラン等の除染技術(課題1)

▶クリアランスに向けた除染方法として、酸浸漬法及び湿式ブラスト法の技術的成立性を確認。

② 金属除染廃液からの不純物分離技術(課題2)

▶二次廃棄物の発生を抑制する方法について技術的成立性を確認。

▶特に、ブラスト除染では研磨材と水の再利用、研磨材摩耗粉及び母材研削粉の回収を実現(除染・分離統合システム装置を用いた試験による)。

▶なお、二次廃棄物からのウラン回収を行う場合は、ウラン加工施設等の工程から発生するスラッジの処理プロセスの中で実施することが合理的。

⇒令和元年度からの事業にて開発中

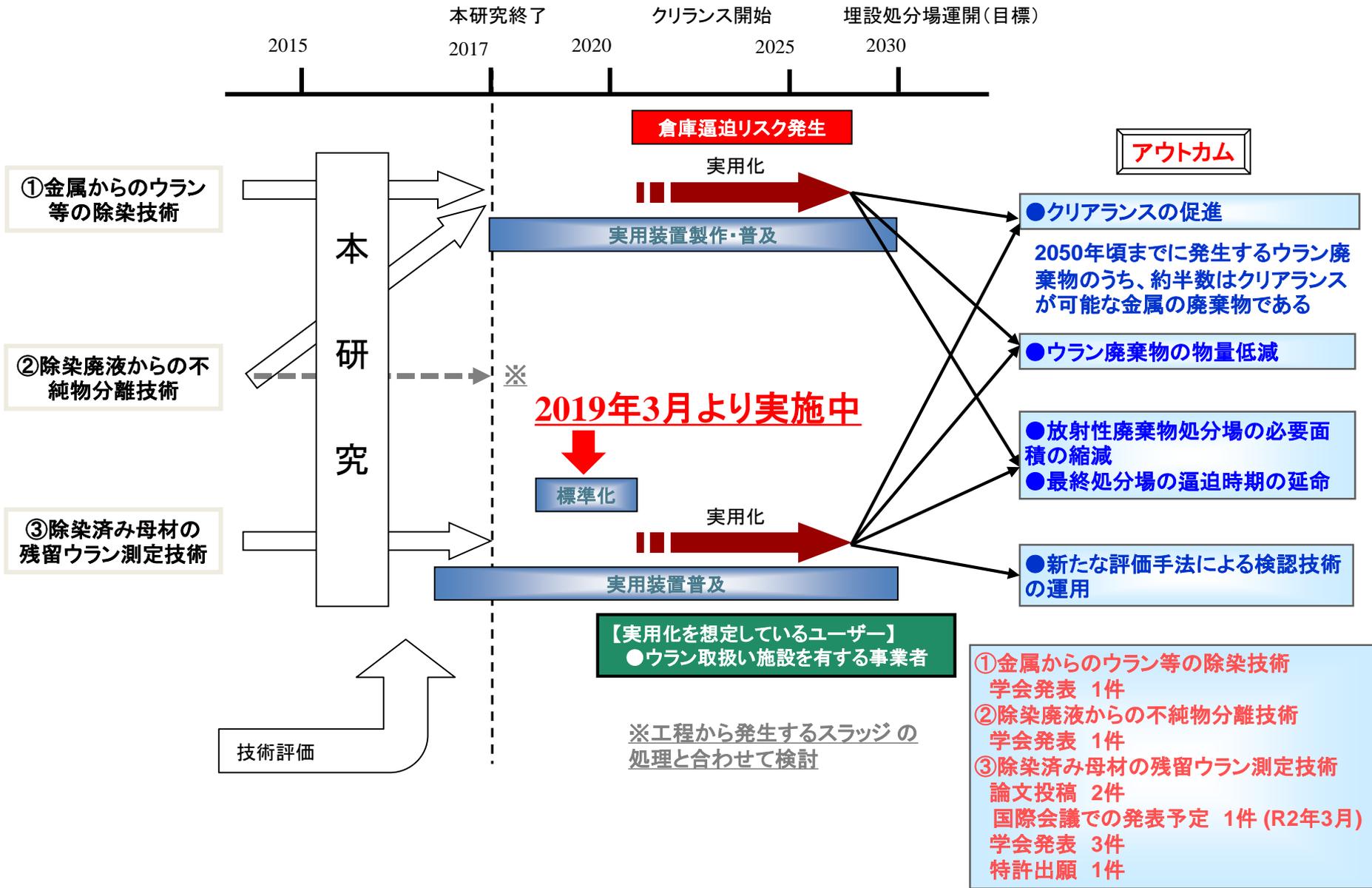
③ 除染済み母材の残留ウラン測定技術(課題3)

▶かさ密度 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 程度の測定対象について、ガンマ線測定によりクリアランスレベルの残留ウランの測定が可能であることを実証した。

4. 当省(国)が実施することの必要性

- ①放射性廃棄物の排出者である核燃料サイクル事業者は、廃棄物の安全、安心な処理処分を行うための技術的及び社会的な共通の課題を有している。これらの課題解決には技術的難度を有するとともに多額の開発費用と長期の開発期間を要するため民間事業者にとって開発リスクが高いと言えることから国が主導で行う必要がある。
- ②国内の主要事業者が一体となって取り組むことで、クリアランスの除染方法及び測定方法について、成果の標準化(例:複雑金属のクリアランス測定方法について学会標準を作成する)が促進され、さらに国内の事業者は本事業の成果を導入しやすくなる。
- ③国の関与によって産学官連携が強まり、開発過程の知見を共有できるため、上記の標準化が進めやすくなるとともに、規制側も多様な手法への対応の負担を軽減できる。
- ④クリアランス及び放射性廃棄物の処理処分は、国が推進する核燃料サイクルの一部であり、その課題のクリアには国の強い関与が不可欠である。
- ⑤「エネルギー基本計画」においても、放射性廃棄物の処分については、原子力事業者等が処分に向けた取組を進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進することが明記されている。

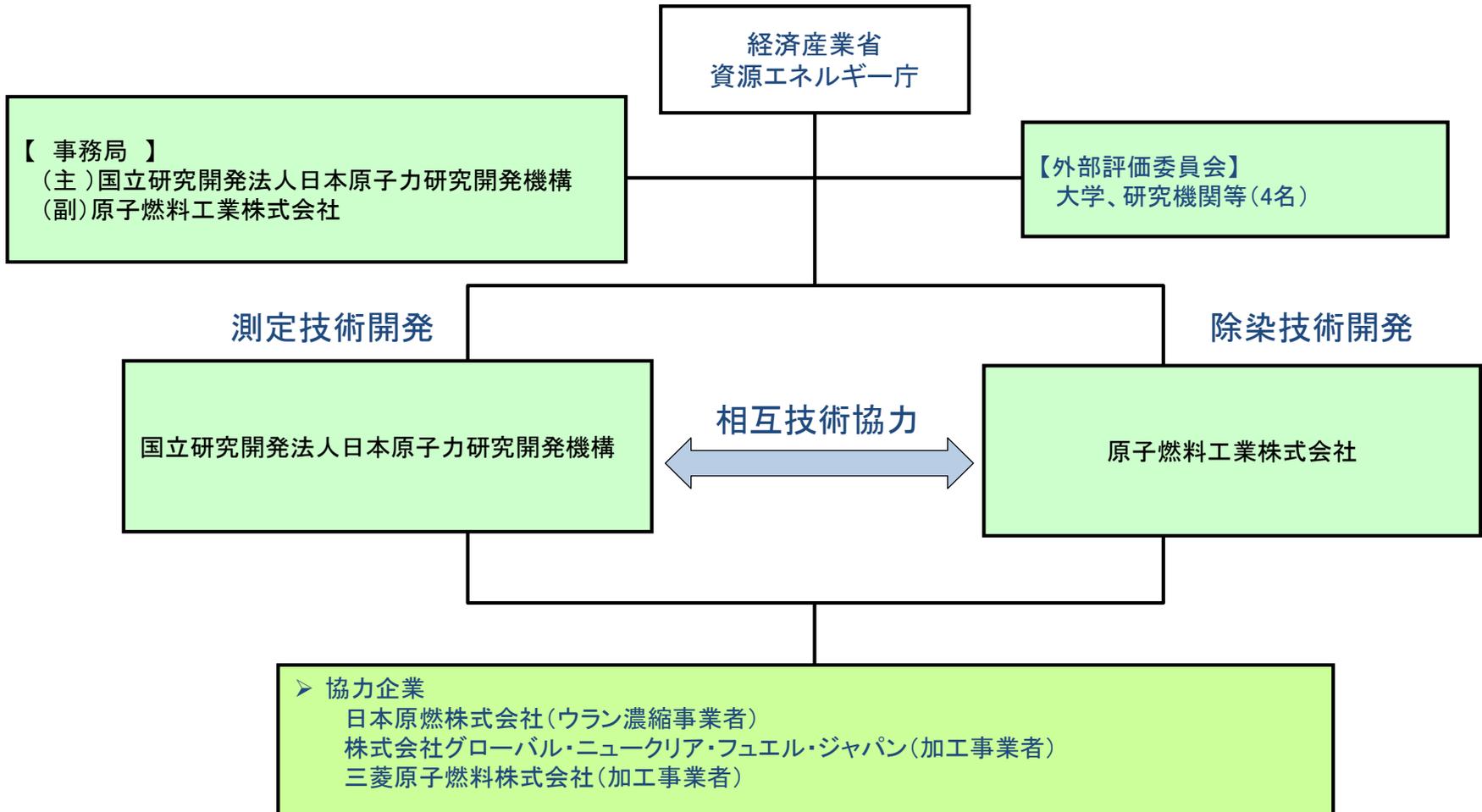
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ



6. 研究開発の実施・マネジメント体制等

【業務実施体制、役割分担】

- ・事業の実施に当たっては、着実かつ有意義な研究成果を得るため、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と原子燃料工業株式会社の2社体制で除染技術と測定技術を開発する。
- ・また、研究協力機関として事業に密接に関連するウラン濃縮・加工事業者の協力を得る。



7. 費用対効果

○投入した国費総額は約4億円(4年間)である。

○本事業により以下のアウトプットが得られる見込みである。

- 除染・分離及び測定に係る装置設計に関する技術情報
- 装置の有効性や評価手法の妥当性に関する技術情報

○国内のウラン取り扱い事業者は、本技術情報を共有する。その結果、国内事業者はクリアランスの実施(アウトカム)に向けて、開発や標準化に必要な費用の重複を回避することができ、規制側も多様な手法への対応を軽減できるため十分な費用対効果が得られる。

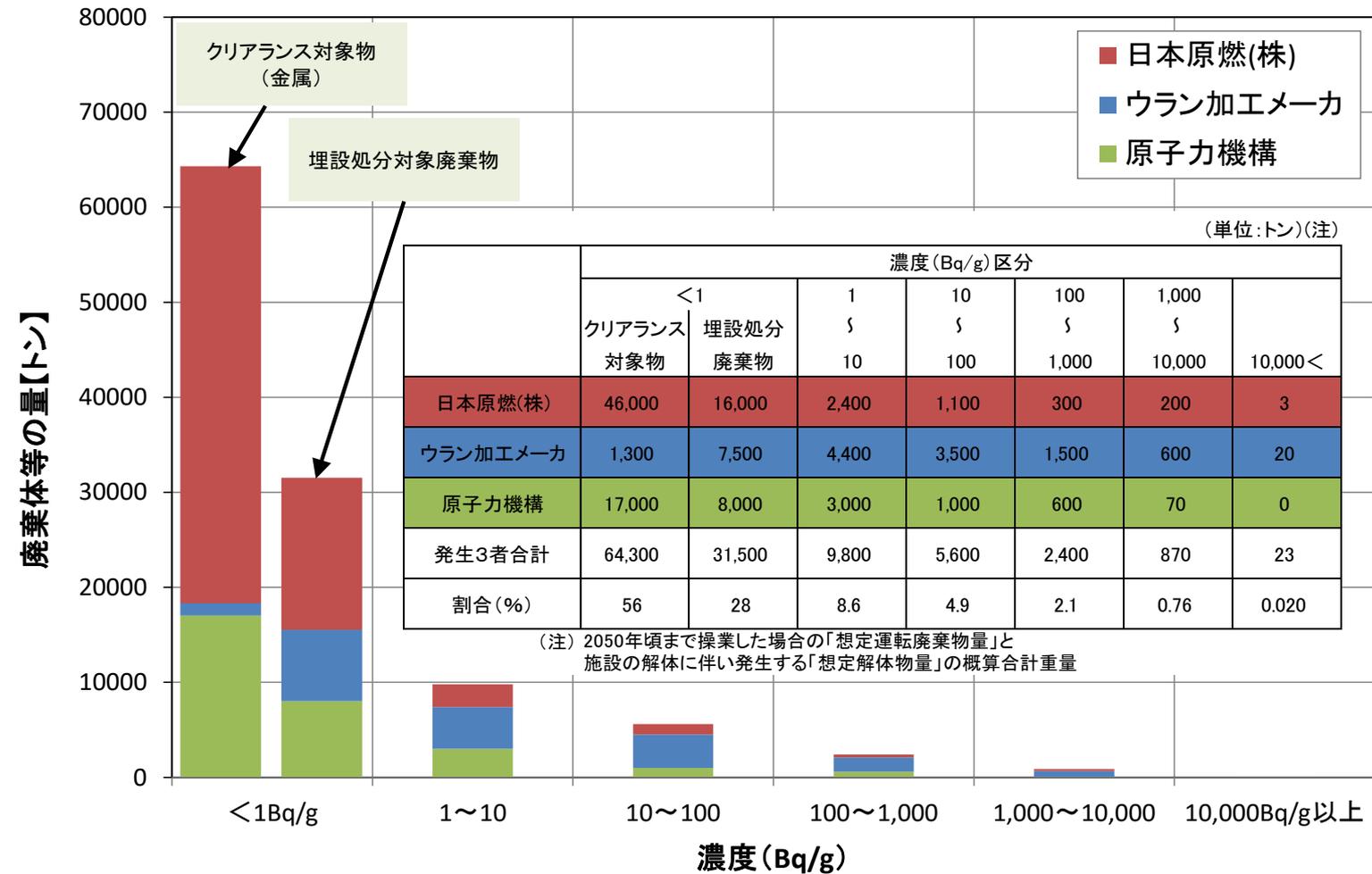
○2050年頃までに加工メーカー及び原子力機構等から発生すると見込まれる低レベル放射性廃棄物のうち、約64,000トンの金属がクリアランスの対象となり得るとされている。本事業で開発した技術の対費用効果を見積もるにあたり、上記の金属のうちの約半数(3万トン= 15万本/200Lドラム缶)のみに本技術を適用するとして十分に保守的な仮定を置いたとしても、少なくとも300億円程度の埋設処分費用の削減が見込める。

➤ 現行、ウラン廃棄物の処分制度が確立していないため、コストの算出にあたっては、第二種廃棄物埋設事業における処分単価*1を参考にした。

*1: 文部科学省 原子力科学技術委員会 研究施設等廃棄物作業部会(第9回)
資料1「埋設処分業務の実施に関する計画」に基づく業務の実施状況について
【トレンチ処分単価: 186千円/本】

➤ トレンチ処分する費用単価を20万円/本と仮定すると、約300億円の処分費用の削減が見込める。

ウラン廃棄物の発生量



2050年頃までの廃棄体等の発生量

※出典元：一般社団法人日本原子力学会「東京電力福島第一原子力発電所事故以降の低レベル放射性廃棄物処理処分の在り方」特別専門委員会「低レベル放射性廃棄物処分におけるウランの扱いについて—浅地中トレンチ処分に係る規制への提言—平成26年度報告書」

8. 外部有識者の評価等

8-1. 評価検討会

評価検討会名称

「放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業」
中間評価検討会

座長

野村 茂雄 元 原子力損害賠償・廃炉支援機構 理事

評価検討会
委員

委員

浅沼 徳子 東海大学工学部原子力工学科 准教授

澁谷 進 公益財団法人
原子力研究バックエンド推進センター フェロー

関 哲朗 文教大学情報学部情報社会学科 教授

山田 基幸 原子力発電環境整備機構 技術部 部長

8-2. 総合評価

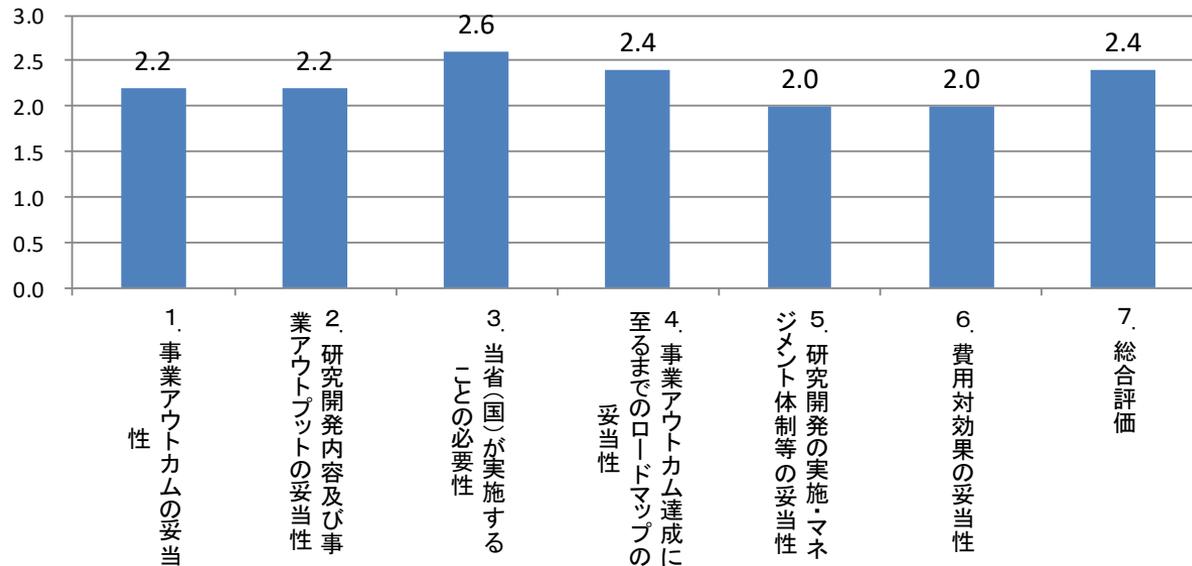
ウラン廃棄物の特性を考慮すると、ウラン廃棄物からのウラン除染・回収及びクリアランスは廃棄物量の低減につながる大変重要なプロセスである。本事業で開発した技術の実用化に向け、厳しいクリアランス制度を満足できる除染技術や残留ウラン測定技術を実証することが肝要で、今後進めることにしている工学規模の試験にしっかり取り組んで頂きたい。また、より網羅的な廃棄物処理処分のため、クリアランス後の廃棄物の有効利用や除去されたウラン等の処理処分についての課題に踏み込んだ取り組みが求められる。

また、本事業は一定の成果を期待して実施してきたものであるため、国民の利益を考慮したベネフィットを明確化し、その達成をもって最終的な成功とすることを評価に加えるべき。

8-3. 評点結果

○「経済産業省技術評価指針」に基づき、プロジェクト中間評価において、評点法による評価を実施した。

評点



【評価項目の判定基準】

評価項目1.~6.
 3点:極めて妥当
 2点:妥当
 1点:概ね妥当
 0点:妥当でない

7. 総合評価

(終了時評価の場合)

3点:事業は優れており、より積極的に推進すべきである。
 2点:事業は良好であり、継続すべきである。
 1点:事業は継続して良いが、大幅に見直す必要がある。
 0点:事業を中止することが望ましい。

9. 提言及び提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言

- 実際に廃棄物のクリアランスを推進するためには、本事業で開発した技術の標準化や基準化、実際の汚染検査過程への適用など、さらに多くの取り組みが必要とされる。現在、原子力学会で取り組んでいる標準化、さらには実廃棄物での実効的データの積み重ねと改善などを着実に進めてほしい。
- 今後、クリアランス後の廃棄物の有効利用や除去されたウラン等の処理処分についての課題に踏み込んだ取り組みが実施されることを期待する。
- 国民の期待に応えているか否かという視点からベネフィット・ベースの最適化、評価を期待したい。

提言に対する対処方針

- 現在取り組んでいる原子力学会での標準化に加え、実廃棄物への検査適用確認などのクリアランス実施に必要な取組を、引き続き確実に進行。
- クリアランス後の廃棄物の有効活用は、ウラン汚染物に限らず、放射性廃棄物に共通の重要な課題と認識している。今後の実用化に向けた課題の一つと考えており、ケーススタディを行う等の検討を行い、クリアランス後の廃棄物の有効活用につなげるための取組を、引き続き確実に進行。
- 2019年度以降の事業では、最終成果物に至るプロセスが、ベネフィットの最大化を基準に最適化されたか否かを評価に加える。