

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 (ガラス固化技術の基盤整備) 概要

令和元年11月25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

株式会社IHI

日本原燃株式会社

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

一般財団法人電力中央研究所

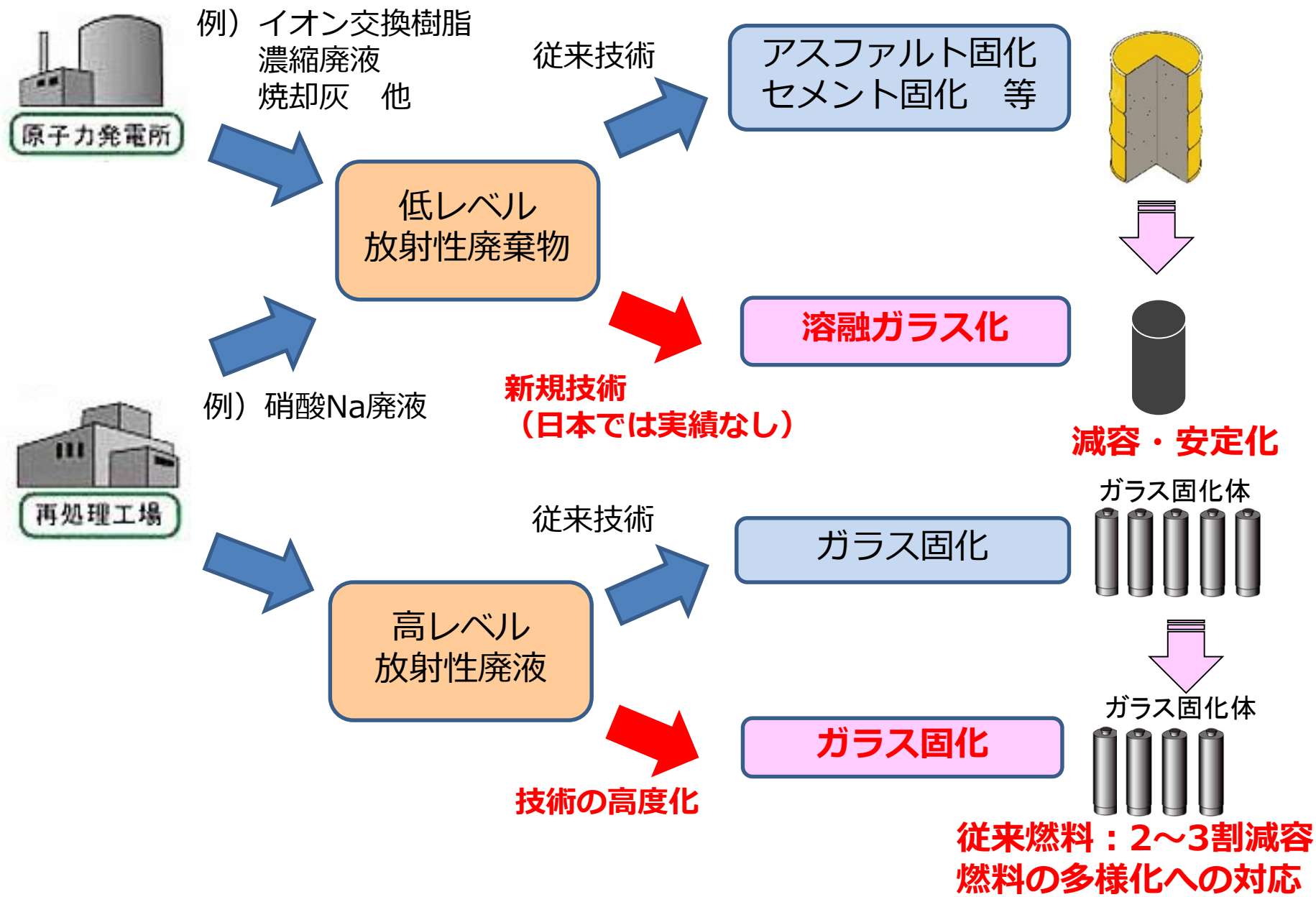
目 次

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(評価検討会)の所見及び同所見を踏まえた改善点等
9. 産構審評価ワーキンググループの所見及び同所見を踏まえた改善点等

1. 事業の概要

概 要	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。																
実施期間	平成26年度～令和6年度（11年間）																
評価期間	平成28年度～平成30年度（3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）																
予算総額	<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												
実 施 者	(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																
プロジェクト リーダー	(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																

1. 1 事業のイメージ



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	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 	廃棄物自体に含まれる成分(SiO_2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 	廃棄物を溶融し、スラグとして固化する方法 
減容性	△ ※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	○ ※<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> ※但し、廃棄物組成によって減容性は変動する	◎ ※添加材がないため、減容性が高い
操業性	◎ ※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 ※但し、高レベル廃液の場合は、白金族管理が運転に影響	○ ※<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>	△ ※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
廃安定体性	◎ ※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	○ ※<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	△ ※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

低レベル廃棄物の特徴: SiO_2 、 Al_2O_3 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)%(Na_2O 約10wt%含む)に対して、2～3割の充填率向上を目標とし、30wt%(Na_2O 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

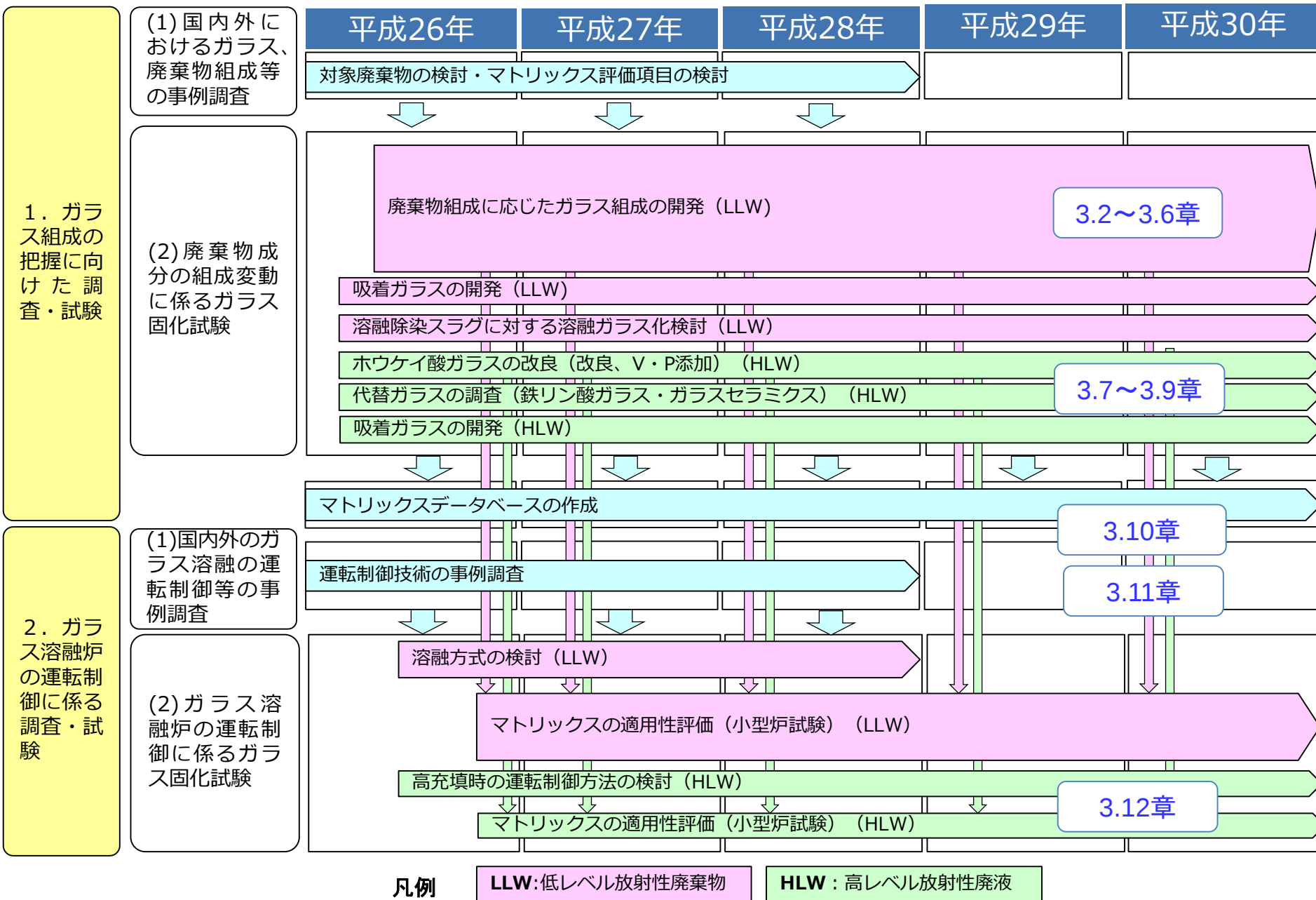
3. 事業アウトプット(1/2)

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
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となる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。 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。 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。 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。	(中間評価時) 中間目標(平成27年度末時点) 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。 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。 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。 ④データベースへ登録する項目の整理、基本設計を行う。 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。 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。	当初目標達成度:100% 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。 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。 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。 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。 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。 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。	100% 100% 100% 100% 100% 100%

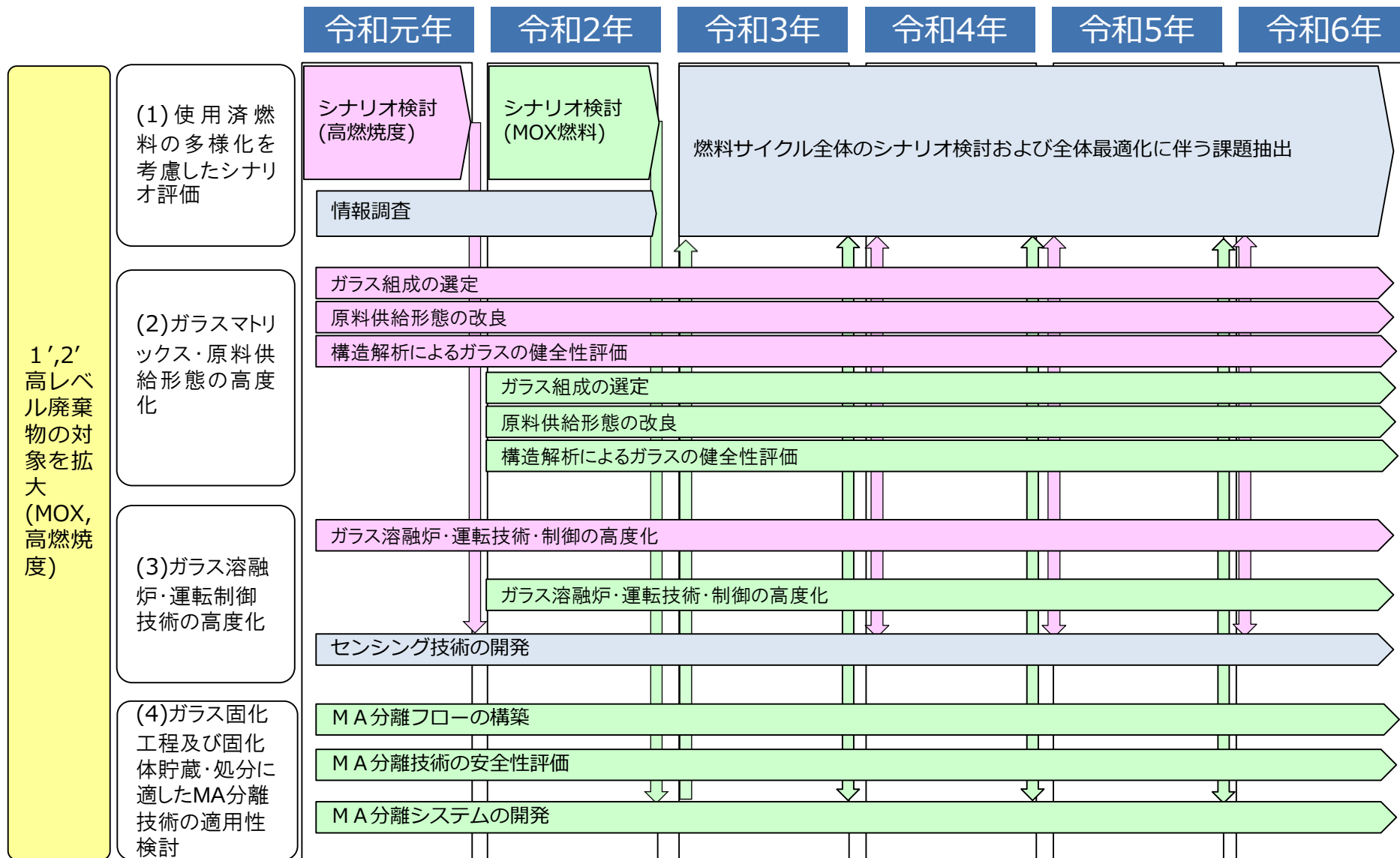
3. 事業アウトプット(2/2)

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
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。 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。 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。 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。	(中間評価時) 中間目標(平成30年度末時点) 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。 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。 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。	当初目標達成度:100% 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。 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。 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。	100% 100% 100%
	(事業終了時) 最終目標(令和6年度) 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。 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。 ③高ウラン濃度廃棄物の減容化技術を確立する。	着手	10%

3. 1 事業のロードマップ(平成26年～平成30年)



3. 1 事業のロードマップ(令和元年～令和6年)



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

2. (1)国内外のガラス溶融の運転制御等の事例調査

2. (2)ガラス溶融炉の運転制御に係るガラス固化試験

溶融炉、運転制御技術の候補

溶融炉方式、運転制御方法の検討
小型溶融炉等による運転評価

溶融炉方式、運転条件を踏まえて、組成の最適化を実施

運転方法の検討に反映

対象廃棄物の設定

・イオン交換樹脂
・濃縮廃液
・焼却灰
・スラッジ 等

候補ガラス組成の設定

廃棄物性状に適した組成の最適化
※一次サーベイ、二次サーベイ、運転性評価

組成の選定

実廃棄物への適用検討

1. (1)国内外におけるガラス、廃棄物組成等の事例調査

1. (2)廃棄物成分の組成変動に係るガラス固化試験

平成30年度より、別事業にて福島廃棄物への適用性を検討

※対象廃棄物ごとに、廃棄物の性状、要求事項を考慮し、候補組成を検討

基盤研究事業

3. 3 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. 4 対象廃棄物の調査

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. 5 低レベル放射性廃棄物溶融ガラス化におけるガラス組成評価項目

- 「減容性」・「操業性」・「廃棄体の安定性」の観点からガラス特性の評価項目を設定(※1)
- 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

項目		1次 サーベイ	2次 サーベイ	評価基準	
				L2廃棄物 L3廃棄物	L1廃棄物 TRU廃棄物
減容性	廃棄物充填率	○	—	より高い充填率のものを選定する	
	密度(常温)	○	—	より高い密度のものを選定する。(但し、固化体ハンドリング装置の制限を超えないものとする。)	
	揮発率	○	—	目標組成に対して、著しい成分の減少がないこと	
	ガラス成分 対象元素	—	—※1	—	
操業性	溶融温度	○	—	1100℃:目標温度	
	溶融ガラス物性	粘度	○	10～150poise(1100℃)	
		導電率	—	0.2～0.7S/cm(1100℃)	
		密度	—	—	
		比熱	—	—	
		熱伝導率	—	—	
	浸食挙動	レンガ	○※2	腐食性の有無を確認し、必要な適用できる溶融炉の種類や運転方法を評価する	
		金属	○※2		
廃棄体の安定性	化学的安定性	短期試験	○	—	< 2 g/m2参考値
		中・長期試験	—	○	初期溶解速度を取得し、相対的に評価する
	均質性(ガラス化)		○	①結晶がなく均質であること ②但し、結晶物が存在する場合、結晶凝集物の局所的な偏りがなく、均一な状態であること 冷却後の結晶物について確認する	
			—	○※3	
	結晶化温度		—	—※1	
	固化体物性	熱容量	—	—※1	—
		熱伝導率	—	—※1	—
		熱膨張係数	—	—※1	—
		機械強度	—	—※1	—

※1:平成29年度に取得項目の見直しを実施し、2次サーベイの対象外とした。

※2:対象廃棄物毎に要否を判断し実施した。 ※3:冷却速度を考慮した場合のガラスの均質性について確認した。

3. 6 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ぽ規模の試験により、熔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熔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	熔融ガラス化の有効性
イオン交換樹脂 (主成分:Fe)	34wt%	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-}$ $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2$	・PWRから発生する樹脂を想定 ・ <u>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</u>
高硝酸Na廃液 (主成分:Na)	28wt%	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-}$ CaO-SiO_2	・ <u>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</u> ・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%	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-}$ $\text{Li}_2\text{O-Na}_2\text{O-SiO}_2$	・ <u>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</u> ・廃棄物成分(<u>CaO、Fe_2O_3、SiO_2</u> 等)の組成変動が大きい場合にも、 <u>廃棄物組成が変動した場合のガラス化への影響を確認</u>
高硝酸Na廃液・ リン酸廃液・スラッジ (主成分Fe/P/Na)	29wt%	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$	・廃棄物の組合せを考慮した熔融ガラス化を検討 ・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 ・ <u>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熔融ガラス化することが可能</u> ・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%	$\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-}$ $\text{Li}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$	・金属Alを酸化が課題であったが、 <u>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。</u>
イオン交換樹脂の 溶離液(主成分:S)	約15wt%	$\text{ZnO-Na}_2\text{O-}$ P_2O_5	・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、 <u>$\text{ZnO-Na}_2\text{O-SO}_3\text{-P}_2\text{O}_5$を母材とするガラスマトリックスを検討</u> ・CaOまたは Fe_2O_3 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. 7 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

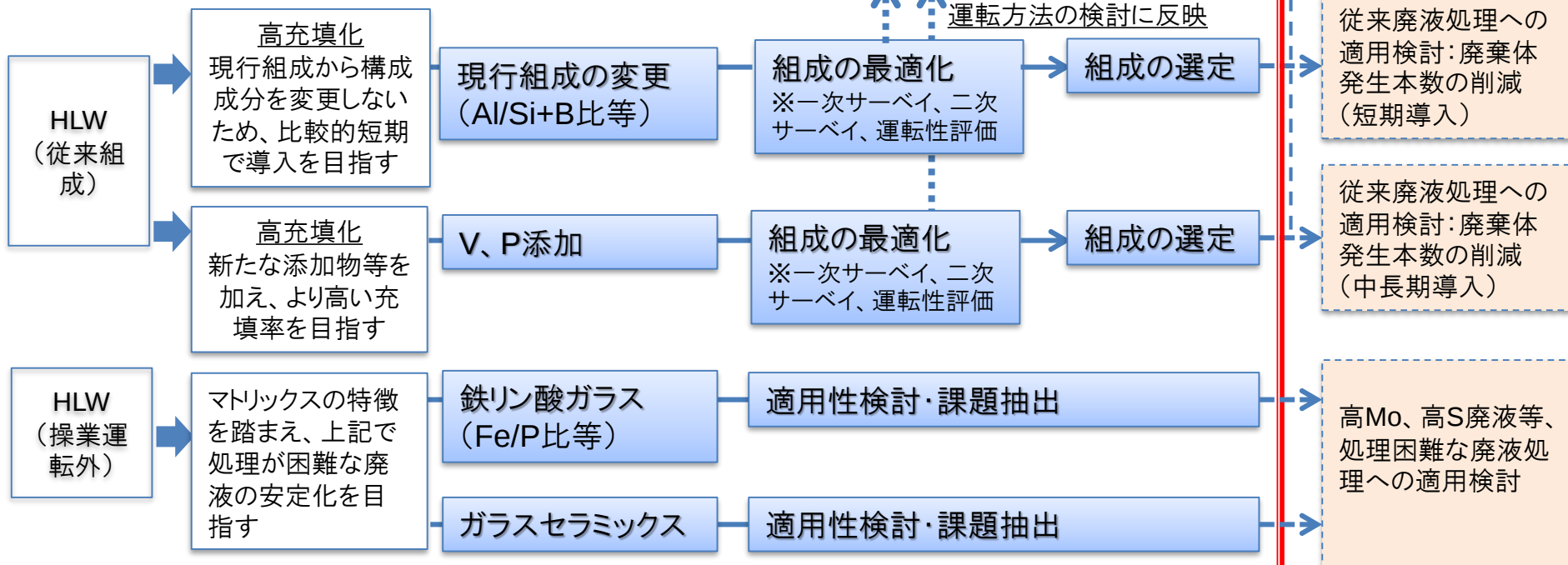
2. (1)国内外のガラス溶融の運転制御等の事例調査

2. (2)ガラス溶融炉の運転制御に係るガラス固化試験

運転制御技術の候補

高充填時の運転制御方法の検討

※小型溶融炉等による運転評価



1. (2)廃棄物成分の組成変動に係るガラス固化試験

対象

目的

アプローチ

検討の流れ

基盤研究事業

3. 8 高レベル放射性廃液のガラス固化におけるガラス組成評価項目

- 製造、貯蔵・輸送、処分の観点から、高レベル廃液のガラス固化における特性評価項目を抽出し、評価シーケンスを検討

項目			1次サーベイ	2次サーベイ	評価基準
製造(溶融プロセス)	廃棄物充填率		○	—	20、26wt%(Na ₂ O除く)
	揮発率		—	—	
	均質性(ガラス化状態)		○ (急冷)	○ (徐冷)	・現行のガラス組成と同程度であること
	溶融温度		○	—	1150～1200℃
	溶融ガラス物性	粘度	○	—	10～150poise(1100℃)
		導電率	—	○	・現行のガラス組成と同程度であること
		密度	—	—※1	
		比熱	—	—※1	
		熱伝導率	—	—※1	
	固化体物性	密度	○	—	2.7～2.8g/cm ³ 程度
		比熱	—	—※1	
		熱伝導率	—	—※1	
	浸食挙動	レンガ	—	○	・現行のガラス組成と同程度であること
		金属	—	○	
貯蔵・輸送	固化体物性	密度	—	—※1	
		導電率	—	—※1	
		熱容量	—	—※1	
処分	化学的安定性	短期試験	○	—	Si:2.7E-4kg/m ² /d B:1.2E-3kg/m ² /d Na:8.0E-4kg/m ² /d
		中・長期試験	—	○	・現行のガラス組成と同程度であること
	固化体物性	密度	○	—※1	
		熱容量	—	—※1	
		熱伝導率	—	—※1	

※1：平成29年度に取得項目の見直しを実施し、2次サーベイの対象外とした。

3. 9 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

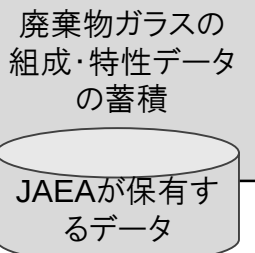
*1: 廃棄物充填率約22wt%に対して、3割向上した場合、目標廃棄物充填率は約30wt%となる(Na_2O 濃度を含めた値)

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. 10 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

データ変換(出力)

マトリックスデータベース

入力データ作成支援

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

本基盤研究事業で取得するデータ

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

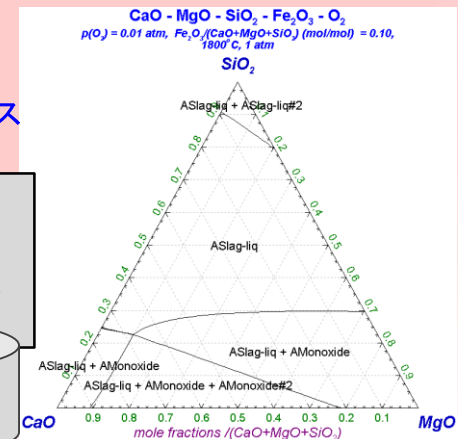
既存のガラスデータベース



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. 11 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	
固化体製造方式	ボトムドレン (フリースバルブ)	日本:TVF(JAEA) 日本:K施設 (日本原燃) 独国: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)
	ボトムドレン (スライドバルブ)		日本:金属溶融炉(JAEA)	ロシア:(RADON)
	ボトムドレン (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、独国、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

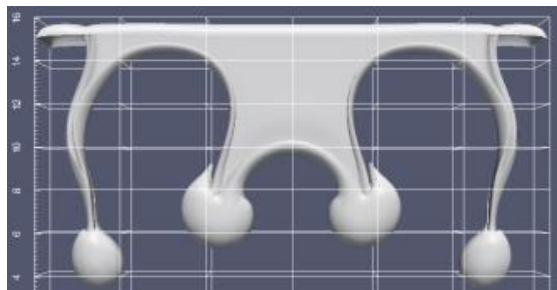
技術	廃棄物、ガラス原料	実績
機械式スターラ及びガスバブリング	- LLW - MLW - HLW	仏国 CCIM*1
ガスバブリング	高濃度Al、Fe、Mnを含むHLW	米国 JHCM*2
還元剤の添加	Na、Sを含む廃棄物	米国 JHCM*2
	- Sを含む廃棄物 - 高濃度Al、Fe、Mnを含むHLW	
ガスバブリング 添加物の添加	- 高濃度のSを含むHLW - 原料ガラスにSb₂O₅、廃液にV₂O₅を添加	独国 LFCM*3

*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. 12 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	ガラス原料の形態改良により、ガラスに<u>溶解しにくい成分</u>(イエローフェーズなど)の<u>ガラスへの溶解性の向上を検討</u>	<u>ガラス原料の形状変更(小粒径、穴あき、微粒子)</u>により、ガラスへイエローフェーズが<u>溶け込みやすくなる</u>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	廃棄物充填率を高めた際に、<u>ガラスに溶解しない白金族元素濃度も増加</u>するため、<u>溶融炉で沈降</u>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。	- 白金族元素が<u>凝集する温度および化学形態の一部を明らかにした</u> <u>炉内対流を定量化した解析モデルを構築し</u>、白金族元素の<u>沈降挙動を再現し</u>、バブリング流量の<u>設定方法を策定した</u>
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	- 廃棄物充填率を高め、溶融炉で運転を行う際に、必要な<u>運転制御技術を小型溶融炉で確認</u> - 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	- 有効な運転制御技術として、<u>①バブリング、②還元剤添加等</u>を選定した <u>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</u>、運転に係る基礎データを取得した <u>還元剤添加</u>により揮発物の量を<u>抑制できる</u>ことを確認した



白金族元素の沈降挙動の概要モデル



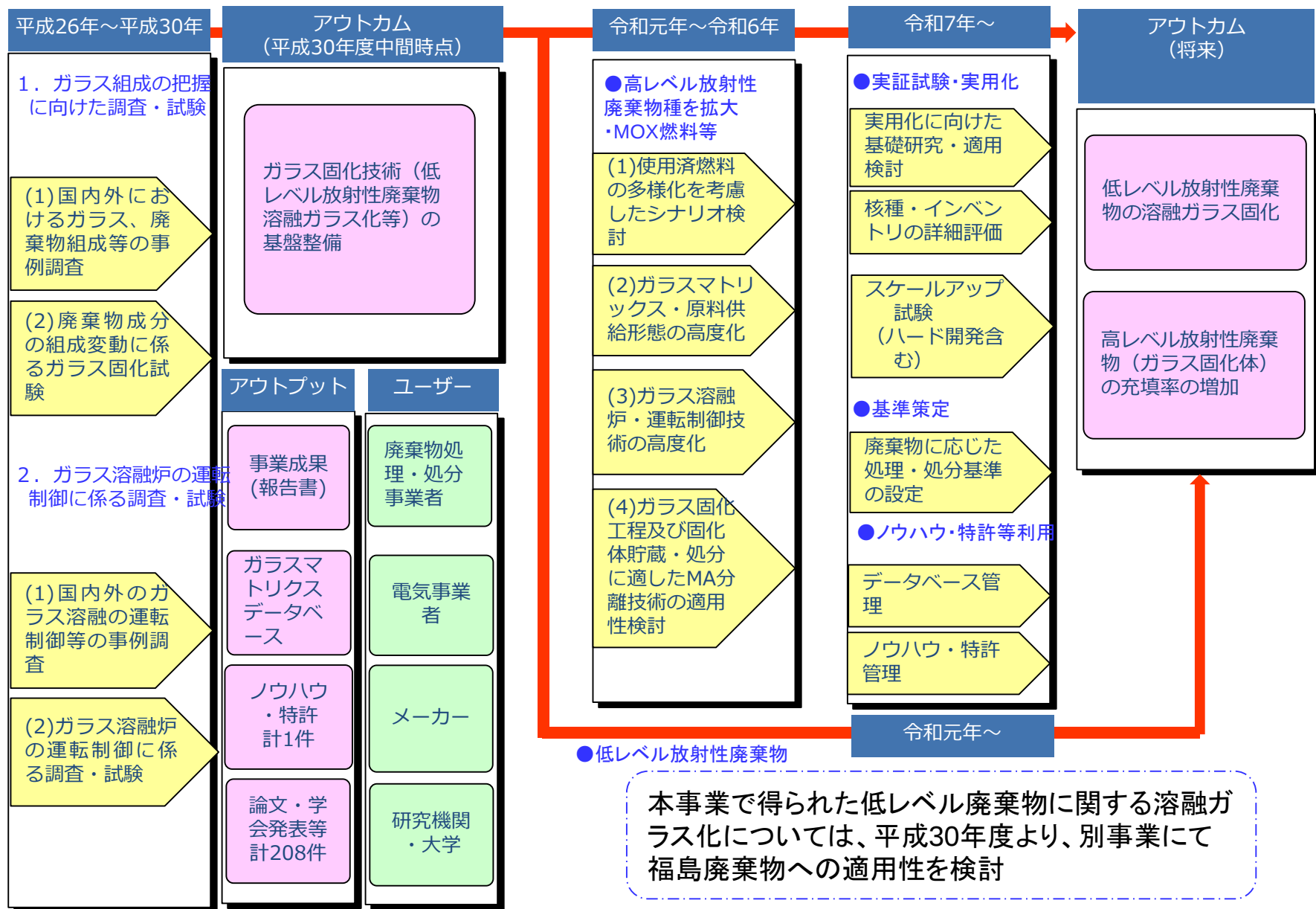
小型ガラス溶融炉

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

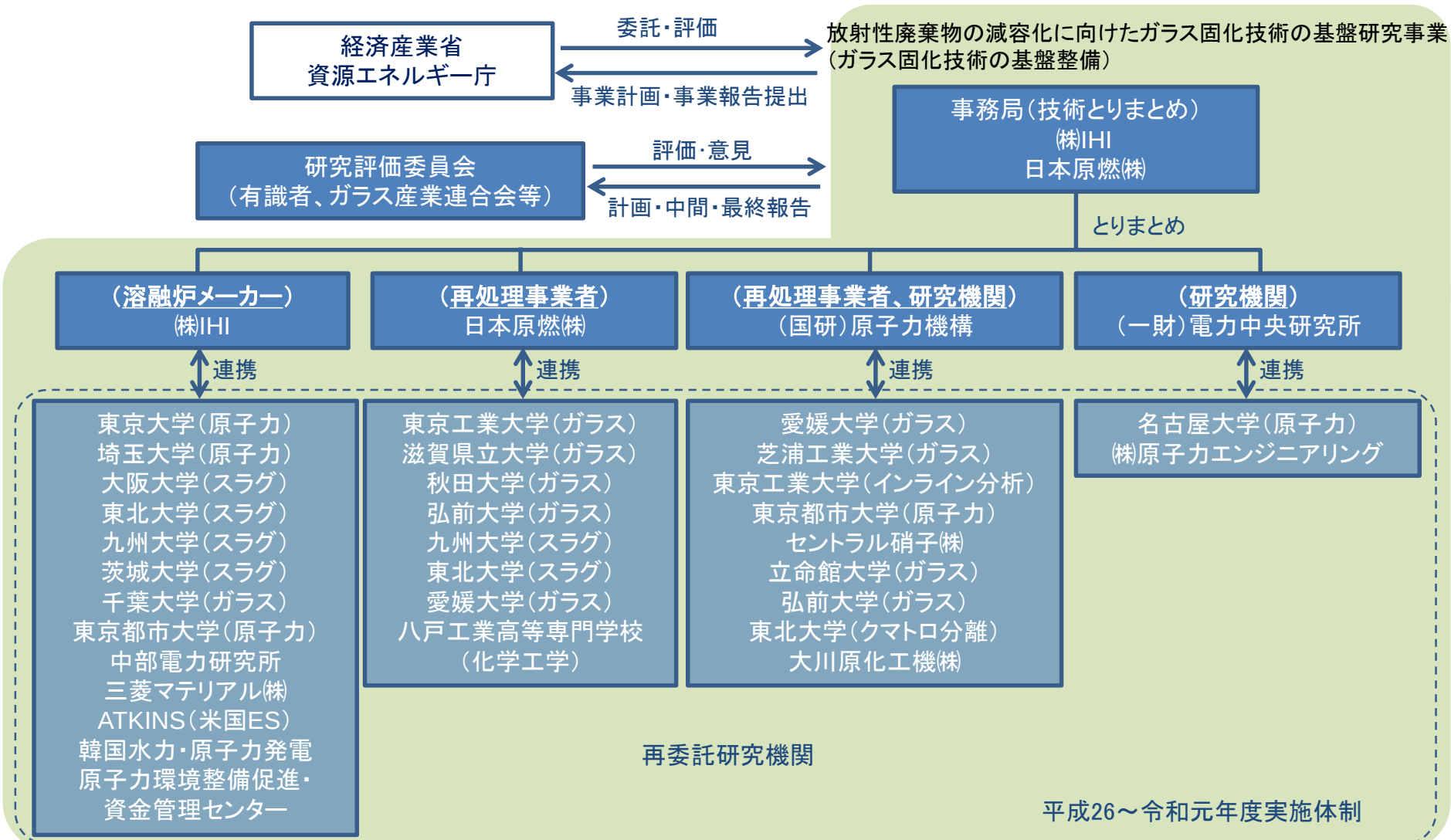
- 放射性廃棄物の安定的かつ減容化を目指した当該ガラス固化技術開発事業は、多種多様の廃棄物に適したガラス組成の選定とそれに対応する信頼性の高い固化技術を開発するため、技術的難度を有するとともに多額の開発費用と長期の開発期間を要する。このため、民間事業者にとっては開発リスクが高い事業であり国の主導で行う必要がある。
- 低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術は、将来当該技術を使用する原子力事業者が多数にわたるとともに、今後の原子力発電所等の原子力施設の廃炉措置の円滑化にも資するものである。また、高レベル放射性廃棄物のガラス固化技術については、最終処分という国が前面に立つべき課題の解決に資するものである。
- 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. 1 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

6. 1 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

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

計画報告

意見・評価
を計画に反
映

研究実施

4社会議
(毎月)

進捗管理・調
整事項等協議

最終報告

意見・評価
を報告書に
反映

第1回研究評価
委員会

意見・評価

学会発表等

意見

第2回研究評価
委員会

意見・評価

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

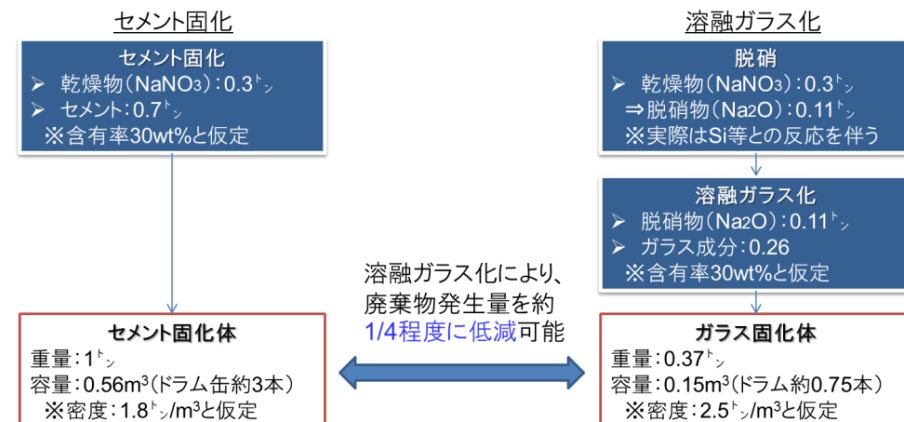
削減効果 177億円 - 44億円 = 133億円^(*3)

(*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



※含有率、密度は仮定の値を用いて算出

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 $9,300\text{億円} \times 0.3 = 2,790\text{億円}$

(*)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

8. 外部有識者(評価検討会)の所見及び同所見 を踏まえた改善点等

外部有識者の所見	所見を踏まえた改善点(対処結果)等
＜研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性＞ ・減容化とともに安全性を確保する技術の着実な進展を図ること。 ＜事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性＞ ・現時点で特許等の将来に向けた独自性や競争力の主張に繋がる取り組みが明確化されていない。 ＜研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性＞ ・当初計画通りに進まない事態も予想されるため、予算配分の見直しを行う等、柔軟に対応をしていくこと、また、明確にベネフィットの定義を行い、これの達成を目標に組み込むことを期待する。 ＜今後の研究開発の方向等に関する提言＞ ・福島の高レベル廃棄物への適用の可能性を検討すること。	＜研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性＞ ・本事業においては、計画当初より安全性を確保するための試験・評価についても実施することとしており、本事業が国民の安全・安心に繋がるよう、引き続き着実な技術の進展を図った。 ・本事業においては、これまでも海外の技術・動向を注視しながら実施してきており、引き続きこの取組みを継続するとともに、知的財産権の確保・ノウハウ管理を図った。 ＜事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性＞ ・実証段階に向けた体制・仕組みづくりについては、低レベル放射性廃棄物においては、韓国水力・原子力発電から協業できるよう調整を図った。高レベル放射性廃棄物においては、再処理事業者を中心として、今後の事業の進捗を踏まえると共に関係事業者との調整を行いながら検討を進めている。 ＜研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性＞ ・これまでの事業成果においては一定の成果を挙げており、現時点で実用化できる要素技術もあるが、エネルギー基本計画の改定も鑑み、燃料の変化に対応した安全かつ合理的な処理・処分の実現に向けて、さらに6年継続で基盤研究事業を進めることとした。 ＜今後の研究開発の方向等に関する提言＞ ・国が主導する高レベル放射性廃棄物の処理・処分の研究開発プロジェクトの中で、福島の高レベル放射性廃棄物により発生した高レベル放射性廃棄物の処理方法に関する1案として、本技術の適用の検討が進められている。

9. 産構審評価ワーキンググループの所見 及び同所見を踏まえた改善点等

評価ワーキンググループの所見	所見を踏まえた改善点(対処結果)等
＜研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性＞ ・減容化とともに安全性を確保する技術の着実な進展を図ること。 ＜事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性＞ ・多くの大学・機関が関係しているので、実証に向けた体制・仕組みづくりを早めに検討すること。 ＜研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性＞ ・ノウハウや特許等の知財を確保し、将来の国際的なビジネス展開を視野に入れて、国際的な優位性を図ること。 ・福島 of 廃棄物への適用の可能性を検討すること。	＜研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性＞ ・本事業においては、計画当初より安全性を確保するための試験・評価についても実施することとしており、本事業が国民の安全・安心に繋がるよう、引き続き着実な技術の進展を図っている。 ＜事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性＞ ・実証段階に向けた体制・仕組みづくりについては、低レベル放射性廃棄物においては、韓国水力・原子力発電から協業できるよう調整を図った。高レベル放射性廃棄物においては、再処理事業者を中心として、今後の事業の進捗を踏まえると共に関係事業者との調整を行いながら検討を進めている。 ＜研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性＞ ・本事業においては、これまでも海外の技術・動向を注視しながら実施してきており、引き続きこの取組みを継続するとともに、国際的なビジネス展開が見込まれる技術的な成果が得られる場合には、積極的に知的財産権の確保・ノウハウ管理を図っていく。 ・福島 of 事故により発生した廃棄物へのガラス固化技術の適用の検討については、国が主導する固体廃棄物の処理・処分の研究開発プロジェクトの中で、処理方法に関する1案として検討が進められている。

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 (ガラス固化技術の基盤整備)

個別要素技術の達成状況

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

・ガラス組成の把握に向けた調査・試験

要素技術	目標・指標	成果	達成度
対象廃棄物の検討	原子力発電所の操業・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・特性等を把握する。	原子力発電所、再処理施設において発生する低レベル放射性廃棄物の種類、性状等を調査により把握した。さらに、本事業で対象とする6種類の廃棄物を選定すると共に、ガラス組成の検討(試験計画)に反映した。 【対象廃棄物】 a. イオン交換樹脂 b. 低レベル放射性濃縮廃液(高硝酸ナトリウム廃液) c. 焼却灰 d. スラッジ混合物 e. 金属アルミニウム f. イオン交換樹脂の溶離液	100%
マトリックス評価方法の検討	低レベル放射性廃棄物及び高レベル放射性廃液に対するガラス組成の検討における評価項目を設定する。	文献調査およびH29年度検討において評価項目を以下のとおり設定した。 ・低レベル:12項目 ・高レベル:11項目	100%
データベースの作成・管理	ガラスマトリックスの組成・物性の検索機能、物性予測機能等を有するマトリックスデータベース開発する。	マトリックスデータベースを作成した。既存のデータや本事業で取得した成果を作成したデータベースへ反映し、物性が予測可能なツールを開発した。	100%
溶融除染技術の調査	再処理施設の廃止措置等で発生する金属廃棄物への溶融除染の適用性を確認する。	金属の溶融除染係数は10000以上である事を明らかにし、再処理施設等の廃止措置で発生する金属廃棄物に対して、溶融除染が適用可能である事を確認した。	100%

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

・ガラス組成の把握に向けた調査・試験 - 低レベル放射性廃棄物の溶融ガラス化 -

要素技術	目標・指標	成果	達成度
廃棄物組成に応じたガラス組成の開発	①より多くの低レベル放射性廃液を安定的に取り込むことができるガラス組成を基礎試験により選定し、ガラス固化体の基本特性を取得する。 ②硫黄が高濃度で含まれる廃液に対して、ガラス化可能な組成を明らかにする。	①ガラス化する低レベル放射性廃棄物を5種類選定し、粘度、短期浸出率のデータを取得し、いずれにおいても良好な結果を得た。 a. イオン交換樹脂: 充填率約34wt% b. 低レベル放射性濃縮廃液: 充填率約28wt% c. 焼却灰: 充填率約44wt% d. スラッジ混合物: 充填率約29wt% e. 金属アルミニウム: 充填率約10wt% ②ガラスセラミックスを用いガラス化できる見通しを得た。 SO₃充填率(イオン交換樹脂の溶離液): 約15wt%	100%
溶融除染スラグに対する溶融ガラス化の検討	溶融除染で発生したスラグに対して、溶融ガラス化による安定化が可能なことを確認する。	溶融除染の処理条件を調整することで、除染後のスラグを充填率80wt%程度でガラス化が可能であることを確認した。	100%
吸着ガラスの開発	ガラス自体を吸着材として用いる多孔質ガラスの組成、製造方法を明らかにすると共に、溶融ガラス化の適用性を確認する。	コバルト等を吸着分離可能な多孔質ガラスの組成、製造条件を設定するとともに、るつぼ規模で多孔質ガラスに溶融ガラス化が適用可能となることを確認した。	100%

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

・ガラス組成の把握に向けた調査・試験-高レベル放射性廃液ガラス固化-

要素技術	目標・指標	成果	達成度
ホウケイ酸ガラスの改良	現行のホウケイ酸ガラスを改良することにより、廃棄物充填率20wt%(Na除く)以上が可能な組成を開発する。 a. 改良ホウケイ酸ガラス b. バナジウム添加ガラス c. リン添加ガラス	a. $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3=1.75$(mol比) かつ$\text{Al}_2\text{O}_3$濃度を2倍に増加させた組成において、廃棄物充填率36wt%(Na_2O濃度10wt%含)を達成。Mo溶解度も向上し、耐水性は良好な結果を得た。 b. バナジウムを添加しアルカリ比を0.22～0.27(mol/mol)にすることで、廃棄物充填率29wt%(Na_2O濃度9wt%含)を達成。Mo溶解度も向上する見通しを得た。 c. P_2O_5の添加により、廃棄物充填率36wt%(Na_2O濃度10wt%含)を達成。MoO_3溶解度も向上することを確認した。	100%
代替ガラスの調査	現行のホウケイ酸ガラスでは処理が困難な廃棄物について、安定的にガラス固化できる新しい組成を検討する。 a. 鉄リン酸ガラス b. ガラスセラミックス化	a. 鉄リン酸ガラス - 鉄リン酸ガラスマトリックスで、高レベル放射性廃液の模擬物をガラス固化できることを確認した。ただし、現在の組成範囲では、Zr等のリン酸塩結晶が析出することを確認した。 - 浸出速度は低く、耐水性は良好であることを確認した。 b. ガラスセラミックス化 - 非水溶性のCaMoO_4結晶相を充填率15-18wt%(MoO_3相当)で分散できることを確認した。	100%
吸着ガラスの開発	ガラス固化技術を応用した新しい概念を検討する。	抽出材を含浸させた SiO_2 担体による抽出クロマトグラフィ法を選定し、模擬廃棄物成分を吸着させた吸着材を用い、熔融ガラス化できることを確認した。	100%

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

・国内外のガラス溶融炉の運転制御等の事例調査

要素技術	目標・指標	成果	達成度
国内外のガラス溶融炉の事例調査	国内外で実用化されているガラス溶融炉について調査し、本事業で対象とするにふさわしい技術を選定する。	- 対象とした低レベル放射性廃棄物6項目に対し有用性の高い溶融方式を2項目選定した。 - コールドクルーシブル処理 - プラズマ溶融処理 - 高レベル放射性廃液処理用のガラス溶融炉は、情報の入手性および溶融炉の規模の観点から、本事業ではジュール加熱方式を選定した。	100%
国内外のガラス溶融炉の運転制御等の事例調査	国内外のガラス溶融炉にて開発・実用化されている運転技術や開発動向を把握し、調査結果を本事業の運転制御試験に反映するため、適用可能な技術を選定する。	国内外で開発・実用化され、原子力施設に利用されているガラス溶融炉を調査し、17件の有効性のある技術を確認した。そのうち、高充填を見込める4件の運転技術を選定した。 - ガスバブリング - 還元剤の添加 - ガスバブリング＋添加物の添加 - 攪拌器＋ガスバブリング	100%
低レベル放射性廃棄物溶融ガラス化の開発	選定した溶融方式において、溶融ガラス化をできる事を確認する。	基礎試験にて溶融ガラス化できる見通しを得た焼却灰およびイオン交換樹脂に対し、プラズマ溶融炉にて溶融ガラス化試験を実施し、ガラス化できる見込みを得た。ただし、原料の供給方法については改善の余地がある。	100%
高レベル放射性廃液ガラス固化の高度化	廃棄物充填率の向上に伴い発生する運転課題の抽出と対策方法を検討する。 - 処理能力の向上 - イエローフェーズ成分の溶解性の向上 - 白金族元素の沈降抑制 - 原料の供給形態の影響評価・ガラス化反応の解明	- 溶融ガラス中にてバブリングを実施することにより、処理能力(ガラス固化体製造速度)が33%向上することを確認した。(廃棄物充填率:14wt%時) d. 原料ガラスを小径化し、ガラス固化することで、YPの溶解性が向上し、発生しにくくなることを確認した。 - バブリングを実施した際の白金族元素の沈降挙動を解析モデルにより把握し、沈降を制御するための知見を得た。 - 原料ガラスの小径化に伴うYP抑制効果は、ガラスへの溶解性と関連し比表面積に影響することがわかった。	100%

参考資料

事業目的(ガラス固化技術の基盤整備) (P4の再掲)

- 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

事業目的(ウラン分離・回収技術開発)

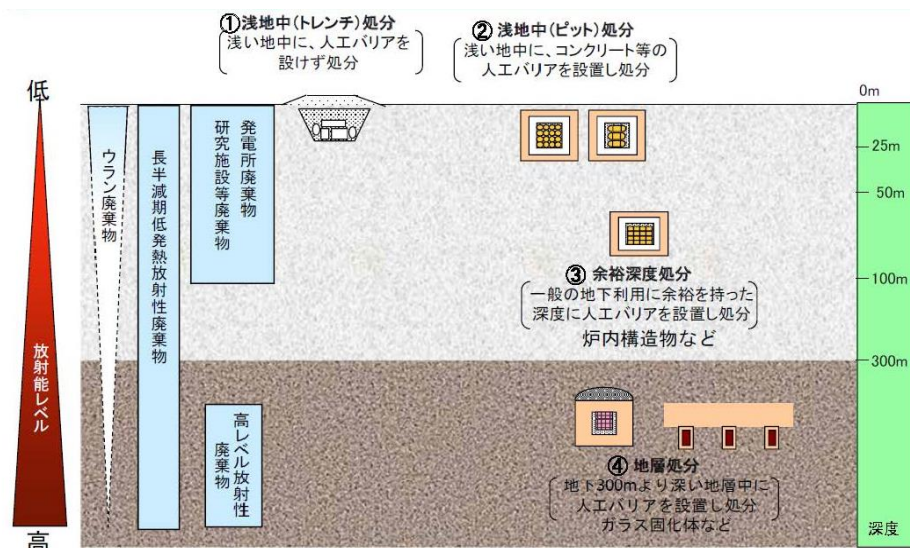
(背景)

- 使用済燃料の再処理過程で発生する高レベル放射性廃液は、放射性物質を長期間安定的に閉じ込めておくことができるガラス固化体にして、最終的には地下300メートル以深の地層に処分する計画である。
- この場合、処分場の容量を可能な限り削減するため、放射能レベルの高い様々な種類の廃液等に対応して、その減容化・有害度低減、ガラス固化・廃液の高充填化を図ることが肝要である。

(目的)

- 燃料加工施設等のウラン取り扱い施設から生じるスラッジ状の廃棄物についてはウラン濃度が高いことから、例えば浅地中処分などにより適切に処分できるよう、ウラン濃度を低減する技術(廃棄物からウランを分離・回収する技術)を開発する。
- 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。

放射性廃棄物の処分概念※1



※1 原子力委員会新大綱策定会議(第5回)(平成23年3月8日)
資料第3-1号「放射性廃棄物の処理・処分を巡る取組の現状について」を基に修正

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

・使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
国内外のシナリオ調査	フランスを中心に原子力利用及び燃料サイクル・処分に關する研究・事業を調査し、先行事例としてシナリオ検討・検証に反映させる。	着手	 10%
シナリオ検討	サイクル条件の多様性を考慮した評価システムを構築し、地層処分と整合的な技術オプションシナリオを提示する。	着手	 10%
シナリオ検証	関連技術の開発成果や原子力利用及びサイクル・処分事業の進捗を考慮することでシナリオを検証し、地層処分の負荷低減を提示すると共に、サイクル全体の課題を抽出する。	着手	 10%

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

・ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
ガラス組成の選定	- 平成30年度までに開発したホウケイ酸ガラス組成をベースに、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に適用可能なガラス組成の開発を実施する。 - アルカリ廃液をより多く安定的に固化可能なガラスマトリックスについて検討する。	着手	 10%
原料供給形態の改良	ガラスマトリックスの改良で検討した組成に対して、原料ガラスのスラリー化や、比表面積が大きいガラスなど、原料供給形態の変更による影響を調査し、物質移動の促進やYP抑制などの効果を確認する。	着手	 10%
構造解析によるガラスの健全性評価	近距離～長距離の視点で段階的にガラス構造の解析を行い、ガラス組成や製造条件による違いを明確化し、ガラス固化技術高度化のために資するデータとして蓄積する。	着手	 10%

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

・ガラス溶融炉・運転制御技術の高度化

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
ガラス溶融炉の高度化	・廃液多様化への対応 濃度変化等の廃液多様化に対応したガラス溶融炉を開発するために必要な課題抽出を行う。 ・溶融炉の調査・検討 溶融炉や耐火物の調査を行い、適用性について検討を行う。	着手	 10%
センシング技術の開発	ガラスと仮焼層の構造情報を得るために、計測技術を調査し電気化学的センシング等の手法を検討する。	着手	 10%
運転技術の高度化	白金族元素の形態と沈降等のメカニズムを解明および廃液中のNa量の低減、廃液供給方法の変更等の高度化により、白金族元素の沈降やイエローフェーズの生成を抑制しプロセスを安定化する。	着手	 10%

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

・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

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
MA分離フローシートの構築	・供給液組成の変動による分離回収製品への影響評価を行う。 ・上記に必要なとなるシミュレーションコード用入力データ整備する。	着手	 10%
MA分離技術の安全性評価	・微粒子の流入防止のために、遠隔操作性に優れたフィルター概念の提示を行う。 ・吸着材放射線劣化生成物の同定を行う。 ・吸着材物性に及ぼす造粒条件の影響を把握する。 ・吸着材の再生方法、分解・減容方案を提示する。	着手	 10%
MA分離システム開発	・分離塔流出液の迅速分析手法、制御フロー案を提示する。 ・良好な耐久性を備えた装置機器概念を具体化する。	着手	 10%

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

・ウラン分離・回収技術の開発

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
スラッジ類の性状把握及び類型化	・合理的な処理方法の開発のため、スラッジ類の分析を通して後段の処理の簡略化に必要な類型化を行う。	着手	 10%
ウラン回収試験の必要に応じたコールド及びホット試料の作製	・スラッジ類の分析結果を踏まえ、後段のウラン回収試験に必要な模擬スラッジ(コールド)及び浸出液(ホット)等を作製する。	着手	 10%
ウラン前処理技術の開発	・ウランの浸出を効果的に実施する為に浸出前のスラッジ処理方法を検討する。	着手	 10%
ウラン浸出方法の検討	・ウランの分離・回収に効果的な浸出方法を検討すると共に、その成分を把握し、後段の回収試験に情報を提供する。	着手	 10%
ウラン回収技術の開発	・共存化学種やウラン濃度に分離性能を左右されにくいプロセスの開発を行う。	着手	 10%
処理液再利用または分解技術の開発	・処理液の再利用または分解技術を開発し、廃棄物の発生量の低減を図る。	着手	 10%
有害物・化合物の把握	・スラッジ状廃棄物の固化試験のための性状把握を行う。 ・合理的な処理対策の検討のための情報取得およびスラッジの類型化を行う。	着手	 10%
有害物を含む廃棄物の安定固化技術の開発	・有害物を含む多種多様なスラッジの固化に対応でき、かつ固化材の添加量ができる限り低減したプロセスを開発する。	着手	 10%

参考:従来方法によるガラス固化について

概要

- 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



適用例

- 高レベル放射性廃液ガラス固化
- 低レベル放射性廃棄物ガラス固化

溶融炉

- ①ジュール加熱式溶融炉
- ②高周波加熱式溶融炉

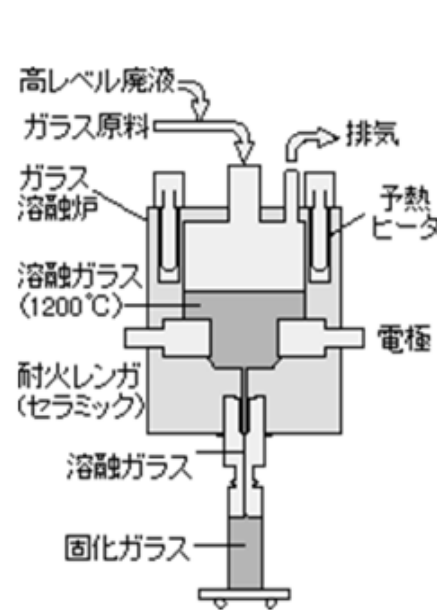
評価

減容性: ガラス原料の添加により、減容性は低い(△)

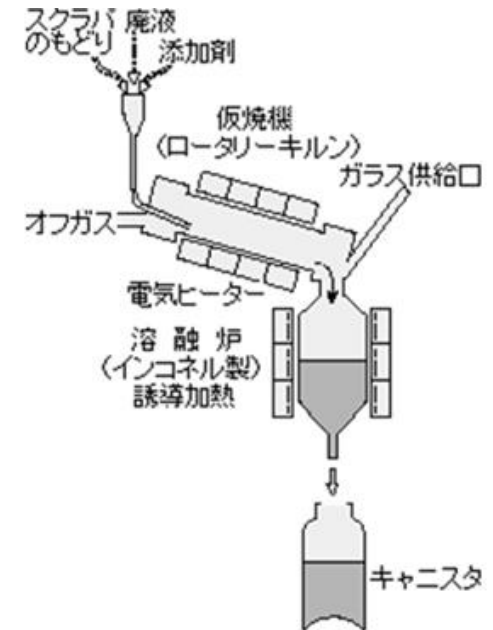
操業性: 溶融ガラスの高温物性を一定範囲に管理。加熱・流下条件は一定(◎)

※高レベル放射性廃液の場合、白金族元素の沈降・堆積によって、高温物性(粘性及び導電率)が変化するため、白金族元素管理に影響される

廃棄体安定性: ガラス組成一定に管理され、化学的安定性に優れる(◎)



LFCM法の概念図^[1]



AVM法の概念図^[1]

[1] 原子力環境整備促進・資金管理センターライブラリ「ポケットブック・代表的なガラス固化処理法」より図を抜粋

参考: ガラス原料を使用しない溶融固化技術について

概要

- 廃棄物を真密度まで溶融し、スラグとして固化する方法



適用例

- 原子力発電所の雑固体廃棄物の溶融固化

溶融炉

- ① プラズマ加熱式溶融炉
- ② 高周波加熱式溶融炉 (IN-CAN)

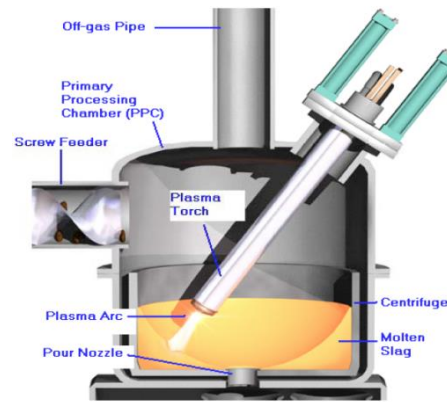
評価

減容性: 添加材がないため、減容性が高い(◎)

操業性: 廃棄物組成によってスラグ物性が異なるため、加熱・流下条件が変動(△)
⇒ 流下操作を伴わないIN-CAN溶融炉が採用されている理由の一つ

廃棄体安定性: スラグ組成によって、化学的安定性は変動(△)

塩基度 (CaO/SiO ₂)	低	高
操業性	↓ (高粘度)	↑ (低粘度)
廃棄体安定性	↑ (高い)	↓ (低い)

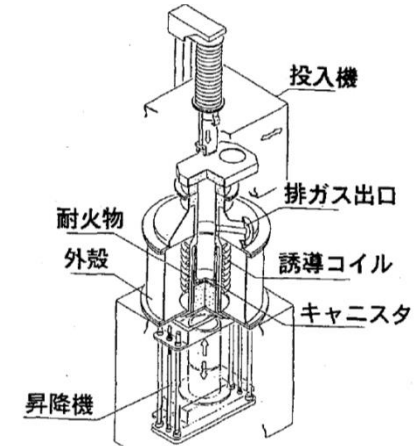


(スイスZwilag、日本)^[1]

プラズマ加熱式溶融炉

[1] M.W.Shuey, "LLW Processing and Operational Experience using a Plasma ARC Centrifugal Treatment (PACTTM) System, WM'06

[2] 小畑ら; 高周波誘導加熱方式による溶融体製作時の核種挙動、原子力バックエンド研究 4(2), 21-30, 1998



(IN-CAN、日本)^[2]

高周波加熱式溶融炉

参考：溶融ガラス化技術について

概要

- 廃棄物自体に含まれる成分（例えば、 SiO_2 ）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



適用例

- 国内での実績なし
- 海外では廃棄物組成に応じてガラス原料の添加を調整する等の実績あり

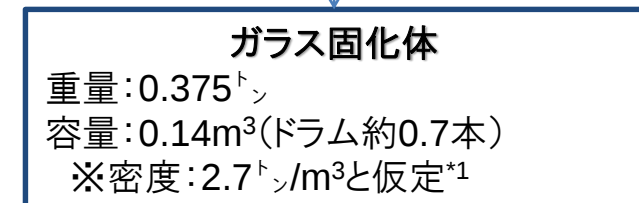
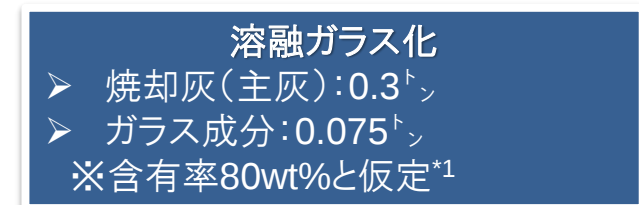
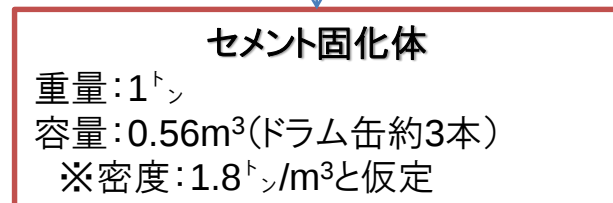
評価

減容性：添加物量を最小限に抑制することで、減容性は比較的高い（○）

※但し、廃棄物組成によって減容性は変動する

操業性：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・流下条件は大きく変動しない（○）

廃棄体安定性：安定性に対する要求に応じて、添加物量を調整（○）

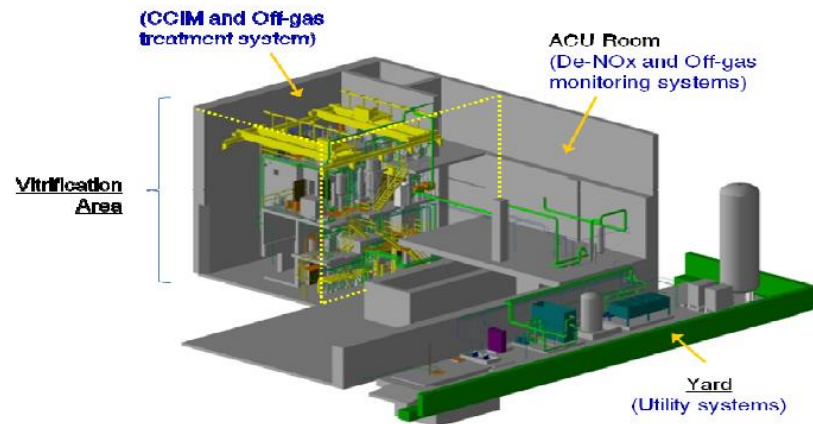


約1/4程度に低減



*1: 2015年度の結果から設定

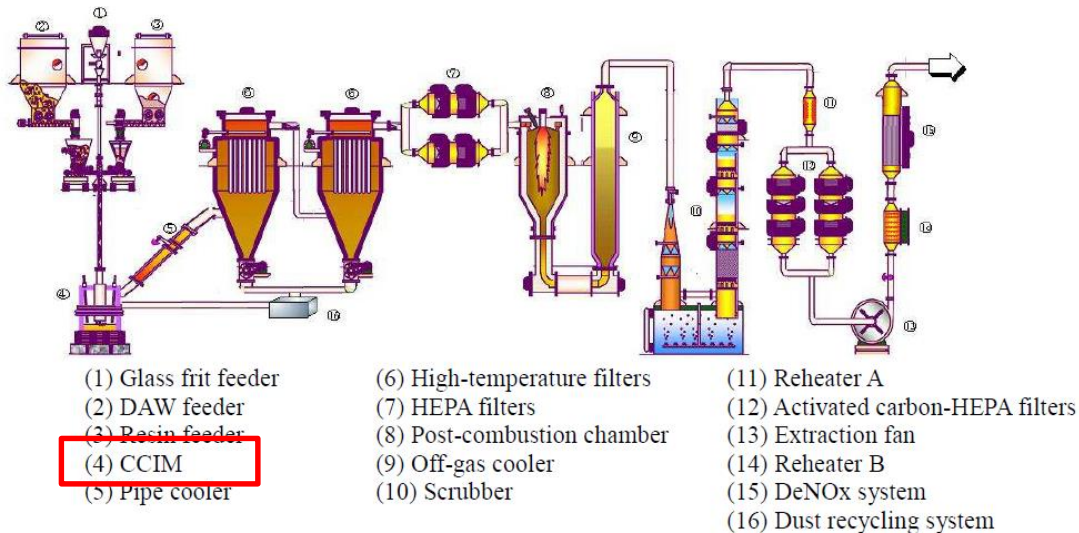
参考：韓国KHNPにおける低レベル廃棄物のガラス固化実績



ガラス固化施設の鳥瞰図



CCIM外観



Ulchin Vitrification Facility (UVF) の処理システム

CCIMの特徴

- ◆ 高周波加熱を熱源とし、接液部に金属を用いたガラス溶融炉
- ◆ 炉壁の水冷によるスカル層形成によってガラスの腐食性を低減（腐食性の高いガラスにも適用可能、長寿命化）
- ◆ スタートアップ、シャットダウンを短時間に実施（容易に処理廃棄物を変更可能）

・2009年より実廃棄物処理開始
・対象廃棄物は、イオン交換樹脂、可燃物等

```

graph TD
    M[Waste] --> GlassForming[Glass Forming Chemicals]
    GlassForming --> Duramelt[Duramelt 5000]
    Duramelt -- Glass --> DurableGlass[Durable Glass]
    DurableGlass --> MAreaPad[M-Area Pad]
    MAreaPad --> HazMix[Haz/Mix Waste Vaults]
    MAreaPad -- Delisted --> LowLevel[Low Level E-Vaults]
    Duramelt -- Off-Gas --> Quencher[Quencher]
    Quencher --> Scrubber1[Scrubber 1]
    Scrubber1 -- Liquid --> DETF[DETF]
    Duramelt --> Scrubber2[Scrubber 2]
    Scrubber2 --> Baghouse[Baghouse Filter]
    Baghouse --> HEPA[HEPA Filter]
    HEPA --> Out[ ]
  
```

The flowchart illustrates the Duramelt process for M-Area waste treatment. It begins with waste entering the Duramelt 5000 unit, which also receives glass forming chemicals. The process produces durable glass (sent to M-Area pads and then to waste vaults) and off-gases (sent to a quencher and scrubbers). The scrubbers produce liquid for DETF, and the off-gases are further treated by a baghouse and HEPA filter before being released.

Vender Treatment Facility (VTF)の処理システム

[illegible]

Waste Treatment Plant(WTP)の処理システム

- 引用1) Carol M. Jantzen et al; Savannah River Site Waste Vitrification Projects Initiated Throughout the United States:Disposal and Recycle Options,WSRC-MS-2000-00105
- 引用2) M. J. Lawrence; RIVER PROTECTION PROJECT – WASTE TREATMENT PLANT CONCEPT AND APPROACH(2000)
- 引用3) Ian L. Pegg; West Valley and M-Area: Key Steps in JHCM Technology Advancement(2010)