C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業

目 次

1. 事業の)目的・政策的位置付け
1 — 1	事業の目的1
1 — 2	政策的位置付け
1 — 3	国の関与の必要性
2. 研究開	引発目標·······3
2 — 1	研究開発目標
2 — 1	- 1 全体の目標設定4
2 — 1	- 2 個別要素技術の目標設定4
3.成果、	目標の達成度6
3 — 1	成果6
3 — 1	- 1 全体成果
3 — 1	- 2 個別要素技術成果6
3 — 1	-3 特許出願状況等
3 – 2	目標の達成度
4. 事業化	≾、波及効果⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯28
4 — 1	事業化の見通し
4 — 2	波及効果
5.研究開	発マネジメント・体制・資金・費用対効果等
5 — 1	研究開発計画
5 — 2	研究開発実施者の実施体制・運営31
5 — 3	資金配分
5-4	費用対効果
5 — 5	変化への対応

1. 事業の目的・政策的位置付け

<u>1-1 事業目的</u>

原子力政策大綱(平成17年10月)に示されているように、我が国において は、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用す るという基本的方針を踏まえ、当面、プルサーマルを着実に推進することとし ており、事業者には核燃料サイクルの要である六ヶ所再処理工場の着実な操業 運転を進めることが期待されている。

本プロジェクトは、再処理施設で用いられるガラス固化技術についてより多 くの白金族元素等を含む高レベル廃液を溶融可能な新しい性状のガラスを開発 するとともに、これに対応しうる新型のガラス溶融炉を開発することにより、 我が国の使用済燃料再処理技術の高度化を図るものである。

また、新型ガラス溶融炉の開発に際しては、六ヶ所再処理工場の運転経験を 反映する研究もあわせて行う。

六ヶ所再処理工場ガラス溶融炉の概要を図1に示す。



ガラス溶融炉(写真)

図 1 六ヶ所再処理工場 ガラス溶融炉の概要

1-2 政策的位置付け

ガラス固化技術は、使用済燃料の再処理により発生した高レベル廃液をガラ スとともに固化するものであり、再処理工場を円滑に運転していく上で重要な 技術である。

したがって、ガラス固化技術を高度化することは再処理工場の安定運転につ ながるとともに、最終的には安定的な核燃料サイクルの推進に寄与するもので ある。 核燃料サイクルの基本的な考え方に関しては、原子力政策大綱(平成 17 年 10 月)において、以下のように示されている。

「第3章 原子力利用の着実な推進
3-1.エネルギー利用
3-1-3.核燃料サイクル
(1)使用済燃料の取扱い(核燃料サイクルの基本的考え方)
(中略)我が国においては、核燃料資源を合理的に達成できる限り
において有効に利用することを目指して、安全性、核不拡散性、環境
適合性を確保するとともに、経済性にも留意しつつ、 <u>使用済燃料を再</u>
<u>処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用することを基</u>
<u>本的方針とする</u> 。使用済燃料の再処理は、核燃料サイクルの自主性を
確実なものにする観点から、国内で行うことを原則とする。」

また、核燃料サイクル政策の推進に関しては、エネルギー基本計画(平成 26 年4月)において、以下のように示されている。

「第3章 エネルギーの需給に関する長期的、総合的かつ計画的に講ずべき施 策

第4節 原子力政策の再構築

4. 対策を将来へ先送りせず、着実に進める取組

(2) 核燃料サイクル政策の推進

我が国は、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有 害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルト ニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針として いる。

核燃料サイクルについては、六ヶ所再処理工場の竣工遅延やもん じゅのトラブルなどが続いてきた。このような現状を真摯に受け止 め、これら<u>技術的課題やトラブルの克服など直面する問題を一つつ</u> つ解決することが重要である。その上で、使用済燃料の処分に関す る課題を解決し、将来世代のリスクや負担を軽減するためにも、高 レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減や、資源の有効利用等に 資する<u>核燃料サイクルについて、これまでの経緯等も十分に考慮し、</u> 引き続き関係自治体や国際社会の理解を得つつ取り組むこととし、 再処理やプルサーマル等を推進する。」 1-3 国の関与の必要性

日本原燃は国内で唯一の民間再処理工場の実施主体であり、再処理工場を円 滑に運転していく上で重要な技術であるガラス固化技術を高度化させ、民間事 業として定着させるためには国が支援する必要がある。これらは、原子力政策 大綱において、以下のとおり示されている。

原子力政策大綱(平成 17 年 10 月 14 日、閣議決定)

- 第4章 原子力研究開発の推進
- 4-1. 原子力研究開発の進め方
 - 4-1-5.既に実用化された技術を改良・改善するための研究開発 既に実用化された技術を改良・改善するための研究開発既に実用化された技術を改良・改善する研究開発は事業者自ら資源を投じて実施すべきである。ただし、その成果が多くの事業者間で共有されることが 望ましい場合や、その研究開発の成功が公益に資するところが大きい 場合等には、国が、その内容を適宜適切に評価しつつ、共同開発の仕 組み等を整備して、これを支援・誘導することが妥当である。

なお、今後、原子力発電所の新規建設の停滞が続くことが予想され、 産業界に築き上げられてきた技術基盤の維持に懸念が生じているが、 このような技術開発の推進は、この技術基盤の維持に貢献することに も留意する必要がある。

この段階の主要な活動としては、既存軽水炉技術の高度化、遠心法ウ ラン濃縮技術の高度化、我が国初の民間 MOX 燃料加工工場へ適用する MOX 燃料加工技術の確証、高レベル放射性廃液のガラス固化技術の高度 化を図るための技術開発等がある。

<u>2. 研究開発目標</u>

2-1 研究開発目標

六ヶ所再処理工場で採用しているガラス固化方法は、独立行政法人日本原子 力研究開発機構が開発したガラスに直接電流を流して加熱する直接通電加熱方 式のため運転効率が高く、炉の寿命も海外の同種のガラス溶融炉より長くでき るといった長所を有している。しかしながら、それでも5年程度の期間で更新 が必要であるため、この更新に際してより性能の高い新ガラス素材および新型 ガラス溶融炉が利用できれば、処分時の安全裕度の一層の向上や、ガラス固化 体の製造本数の削減などの効率化を図ることが可能となる。

このため、より多くの白金族元素を含む高レベル廃液を溶融可能なガラス素 材およびガラス溶融炉の開発等によって、より高品質のガラス固化体を製造可 能なガラス固化技術を開発する。 ガラス固化技術は、5年程度で更新が計画されている六ヶ所再処理工場のガラ ス溶融炉および同工場のガラス固化施設の運転制御に反映する予定であり、そ の結果、六ヶ所再処理工場の安定運転が可能となり、ひいては我が国の核燃料 サイクルの着実な推進に寄与することが期待される。

また、白金族元素等をより多く含むことができ、ガラス固化体から環境への 放射性物質の浸出率を低くすることができるガラス素材およびガラス溶融炉を 開発することにより、ガラス固化体処分の効率性、安全裕度の一層の向上を図 ることができる。

2-1-1 全体の目標設定

全体の目標・指標および設定理由・根拠を表1に示す。

目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
より多くの白金族元素等を含む高レベ	核燃料サイクルの安定性向上に寄与
ル廃液を溶融可能なガラス素材および	するとともに、ガラス固化体処分の効
ガラス溶融炉を開発する。	率性、安全裕度の一層の向上を図るた
	め。

表1 全体の目標

2-1-2 個別要素技術の目標設定

個別要素技術の目標・指標および設定理由・根拠を表 2 に、各個別要素技術 の相関関係を図 2 に示す。

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等		
(1)新ガラス素材の開発	・イエローフェーズ (YP)	・YP 発生を抑制できるガ		
①イエローフェーズ	の発生を可能な限り抑	ラス素材を開発する必要		
(YP) 発生抑制ガラス素	制する新ガラス素材を	があるため。		
材の開発	開発する。	・ガラス素材の試験を段階		
	・開発したガラスの性能	的にスケールアップして		
	については、るつぼ試	新ガラス素材の性能を確		
	験、小型・中型溶融炉試	認することで、YP 発生の		
	験、新型ガラス溶融炉実	抑制効果およびスケール		
	規模モックアップ試験	アップによる影響を評価		
	において確認する。	しながら開発を進める必		
		要があるため。		

表 2 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等		
②高減容ガラス素材の	・より多くの高レベル廃	・より多くの高レベル廃液		
開発	液を取り込める新ガラ	をガラスに充填できるガ		
	ス素材を開発する。	ラス素材を開発する必要		
	・開発したガラスの性能	があるため。		
	については、るつぼ試	・ガラス素材の試験を段階		
	験、小型溶融炉試験にお	的にスケールアップして		
	いて確認する。	新ガラス素材の性能を確		
		認することで、廃棄物含有		
		率およびスケールアップ		
		による影響を評価しなが		
		ら開発を進める必要があ		
		るため。		
(2)新型ガラス溶融炉の	・白金族元素の堆積抑制	・より多くの白金族元素等		
開発	および抜き出し性の向上	を含む高レベル廃液を溶		
①新型ガラス溶融炉構	を目的として、新型ガラ	融可能とするために、白金		
成技術の開発	ス溶融炉を構成する技術	族元素の堆積抑制および		
	(炉底部技術、炉内要素	抜き出し性の向上を図る		
	技術)を開発する。	必要があるため。		
	・開発した各構成技術に	・白金族元素の堆積抑制お		
	ついては新型ガラス溶融	よび抜き出し性の向上を		
	炉の実規模モックアップ	図るために必要となる構		
	試験において検証を行	成技術を個別に開発・検証		
	う。	した後、実規模のモックア		
		ップ試験で総合的な検証		
		を行う必要があるため。		
②ガラス溶融炉解析コ	・ガラス溶融炉内の温度	・新型ガラス溶融炉のモッ		
ードの高度化	および白金族元素分布等	クアップ試験において事		
	の挙動を模擬できる解析	前に運転条件を設定する		
	コードを開発する。	ために、炉内挙動を模擬で		
		きる解析コードを開発す		
		る必要があるため。		
③ガラス物性等の基礎	・白金族元素および模擬	・ガラス溶融炉解析コード		
試験	廃液成分を含有したガラ	に使用するガラス物性等		
	スの物性等の基礎データ	の基礎データを取得する		
	を取得する。	必要があるため。		



図 2 個別要素技術の相関図

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

<u>3-1-1 全体成果</u>

個別要素技術として、新ガラス素材および新型ガラス溶融炉の開発を行って いる。新ガラス素材の開発は、実験室規模での試験(るつぼ試験)、小型溶融炉 での試験等と段階的に評価を行った。また、新型ガラス溶融炉の開発は、炉底 部のみを模擬した部分モックアップ試験装置やアクリル製容器等を使用した可 視化試験等で段階的に評価を行った。最終的には、新型ガラス溶融炉の実規模 モックアップ試験により検証を行い、従来のガラス溶融炉を上回る安定性をも つことを確認した。

3-1-2 個別要素技術成果

個別要素技術成果を以下に示す。

- (1) 新ガラス素材の開発
- ①イエローフェーズ発生抑制ガラス素材の開発
 - ガラス溶融炉におけるイエローフェーズ(Yellow phase、以下「YP」 という。)の発生については、従来から考慮されてきたモリブデン(Mo) 酸塩の溶解限度に加え、原料ガラスビーズと廃液成分の溶解初期過程に おける反応速度が大きく影響していると考えられている。

そのため、アルミニウム(AI)、ケイ素(Si)等の原料ガラスビーズ中

のガラス成分の一部を廃液側に分配し、ガラスの溶融性を高める方法(再 分配法)により、廃液中に含まれるモリブデン(Mo)酸塩等と原料ガラ スビーズの初期の溶解反応速度を向上させてYP発生の抑制を行った。な お、ガラス固化体の組成の変更は、ガラス溶融炉の運転方法等に影響を 与えることから、製造するガラス固化体の最終的な組成は変更しないこ ととした。再分配法の概念図を図3に示す。



図 3 再分配法の概念図

YP 発生抑制効果の確認は、るつぼ試験、小型溶融炉試験、中型溶融炉 試験、新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験の順で段階的に実施 した。各試験における目的を表 3 に示す。

試験	目的		
るつぼ試験	YP 発生抑制ガラス素材の組成の選定		
小型溶融炉試験	ガラス溶融炉運転時に想定されるプロセス変動範		
	囲における YP 発生抑制効果の確認		
中型溶融炉試験	ガラス溶融炉をスケールアップした条件における		
	YP 発生抑制効果の確認		
実規模モックアップ	新型ガラス溶融炉における YP 発生抑制効果の確認		
試験			

表 3 YP 発生抑制ガラス素材の開発における試験と目的

a. るつぼ試験

高レベル廃液の模擬廃液成分を用いたるつぼ試験では、従来の原料ガ ラスと比較し、YP 発生抑制効果を確認するとともに、原料ガラス成分の うち、アルミニウム(AI)とケイ素(Si)の一部を廃液側に再分配する 組み合わせが有効であることを確認し、以降の試験で使用する組成として選定した。

b. 小型溶融炉試験

模擬廃液を用いた小型溶融炉試験では、ガラス溶融炉運転時に想定されるプロセス変動範囲(溶融ガラス温度、気相温度等の変動範囲)において、調整液を添加しない条件でYP発生抑制効果を確認した。

c. 中型溶融炉試験

中型溶融炉試験では、溶融炉をスケールアップした条件、また、ガラ ス溶融炉の運転(炉底低温運転)を模擬した条件において、調整液を添 加しない条件で YP 発生抑制効果を確認した。

d. 実規模モックアップ試験

実規模モックアップ試験において、調整液を添加しない条件で新ガラ ス素材を使用してガラス温度および気相温度を目標温度に制御すること ができた。また、YP発生抑制効果については、運転条件の最適化を図る 等の課題を確認することができた。

②高減容ガラス素材の開発

YP 発生抑制ガラス素材の開発で採用した再分配法は、廃棄物と原料ガラ スビーズの初期の溶融反応速度を向上させて YP 発生の抑制を図ることを目 的としていることから、高減容ガラス素材への適用も可能と推測される。 また、製造するガラス固化体の組成の変更を許容することにより、自由度 の高い開発を行うことが可能となる。そのため、再分配法を用いるととも に、製造するガラス固化体の組成を変更する条件で高減容ガラス素材の開 発を行った。

高減容ガラス素材の開発は、るつぼ試験および小型溶融炉試験を用いて 実施した。各試験における目的を表 4 に示す。

試験	目的		
るつぼ試験(その1)	高減容ガラス素材の組成の選定およびガラスの物性		
	データの取得		
小型溶融炉試験	YP 発生抑制効果の確認		
るつぼ試験(その2)	るつぼ試験(その1)および小型溶融炉試験の試験結		
	果を踏まえた高減容化に向けたガラス組成の検討		

表 4 高減容ガラス素材の開発における試験と目的

a. るつぼ試験(その1)

るつぼ試験(その1)では、高レベル廃液の模擬廃液成分を用いたるつ ぼ試験、縦型温度勾配炉試験を行い、原料ガラス成分のうちアルミニウ ム(AI)とホウ素(B)の一部を廃液側に分配し、バナジウム(V)を添 加した組成がYP発生抑制効果に有効であることを確認した。また、当該 ガラスの高温粘度、電気伝導度、浸出率等の物性データを取得した。

b. 小型溶融炉試験

高レベル廃液の模擬廃液を用いた小型溶融炉試験では、原料ガラス中の酸化ナトリウム(Na₂0)寄与分を除いた廃棄物含有率 30wt%~34wt%の範囲において、YP 発生抑制効果を確認した。

c. るつぼ試験(その2)

a項およびb項の試験結果を踏まえ、るつぼ試験(その2)では、仮焼 層の温度条件も模擬した縦型温度勾配炉試験を行い、バナジウム(V)以 上に YP 発生抑制効果をもつ添加物がないこと、現行の廃棄物含有率 20.8wt%に対して、高減容ガラス素材を使用することにより廃棄物含有率 34wt%を達成できる見通しがあることを確認した。

(2) 新型ガラス溶融炉の開発

①新型ガラス溶融炉構成技術の開発

新型ガラス溶融炉は、現行のガラス溶融炉と比較すると、白金族元素 の堆積防止、抜き出し性向上を目的として、底部電極用高周波加熱コイ ルの追加等、炉底部の構造を変更した(図4参照)。

また、新型ガラス溶融炉は、白金族元素の炉底部への堆積時における 対策、炉内のガラス保有量の正確な把握、YPの発生抑制対策として、そ れぞれかくはん装置、エアパージ式液位計、バブリング装置を開発した。

上記のガラス溶融炉構成技術は個別に開発を進め、最終的には新型ガ ラス溶融炉のモックアップ試験でそれらの性能を検証した。各試験にお ける目的を表 5 に示す。



図 4 現行ガラス溶融炉と新型ガラス溶融炉の構造の比較

試験名称		目的			
炉底部技	炉底部モックア	炉底部の性能(流下性、加熱手段追加効果、			
術の開発	ップ試験	白金族元素堆積防止効果、白金族元素堆積時			
		の除去性)の確認			
	流下ノズル寿命	底部電極・流下ノズルの構造健全性の確認			
	評価試験				
	耐火物腐食試験	接液レンガの腐食データの取得			
炉内要素技術の開発		かくはん装置、エアパージ式液位計およびバ			
		ブリング装置の検討および設計			
新型ガラス溶融炉の実規模		炉底部技術および炉内要素技術の実規模モ			
モックアップ試験		ックアップ試験による検証			

表 5 新型ガラス溶融炉構成技術の開発における試験と目的

a. 炉底部技術の開発

(a) 炉底部モックアップ試験 新型ガラス溶融炉の炉底部のみを模擬」

新型ガラス溶融炉の炉底部のみを模擬した部分モックアップ試験装置 (図 5 参照)を用い、白金族元素含有模擬ガラスによる加熱試験、流下 試験等を実施し、炉底部の性能を確認した(表 6 参照)。







表	6	炉底部モ	ックア	ッフ	パ試験の	試験結果
---	---	------	-----	----	------	------



(b) 流下ノズル寿命評価試験

新型ガラス溶融炉の底部電極・流下ノズルの構造健全性について、実際 の破壊現象を忠実に評価するため、実規模形状・寸法を模擬した試験装置 (図 6 参照)を用いて、流下ノズル寿命評価試験(運転期間 5 年に相当す る加速試験)を実施した結果、底部電極・流下ノズルにき裂や変形も確認 されなかった。



図 6 流下ノズル寿命評価試験装置(左)と試験中の流下ノズル(右)

(c) 耐火物腐食試験

新型ガラス溶融炉の接液部に使用している耐火物について、溶融ガラス による腐食試験を実施し、腐食速度を取得した。

b. 炉内要素技術の開発

新型ガラス溶融炉の炉内に適用するかくはん装置、エアパージ式液位計、バ ブリング装置の各種機器の技術開発を行った。新型ガラス溶融炉の炉内要素技 術の概要を図 7 に示す。



図 7 新型ガラス溶融炉の炉内要素技術の概要

(a) かくはん装置

かくはん装置は、ガラス溶融炉の原料供給器の上部に設置し、白金族元 素が堆積した場合に、早期にかつ効率的に炉底のかくはん操作(堆積した 白金族元素の除去操作)を行う。また、レンガ片により流下ノズルが閉塞 した場合に、閉塞解除が可能な構造としている。新型ガラス溶融炉の炉底 部を模擬したアクリル製容器と溶融状態のガラス粘度を模擬した模擬流体 を用いた試験結果等から、かくはん部構造としてインペラー型を採用し、 腐食試験の結果から最も溶融ガラスへの耐侵食性を有するニッケル合金を かくはん部の主材料として使用することとした。

(b) エアパージ式液位計

エアパージ式液位計は、圧縮空気を吹き込む と先端の液圧と管内圧が等しくなることを利 用する測定方式である。また、連続測定が可能 であり、計測器の耐熱性、耐放射線性の考慮が 不要であるという特徴を有するとともに、炉内 のガラス量がより正確に把握できる。ただし、 溶融ガラスに浸漬する部分の腐食対策および 先端部(ベル部)の閉塞対策が必要である。ア



図 8 エアパージ式液位 計先端

クリル製容器と模擬流体を用いた試験結果から、エアパージ式液位計の先端のベル部(図 8 参照)内径を設定した。

(c) バブリング装置

バブリング装置は、仮焼層下面に挿入したノズルから空気を吹き込み、 溶融炉上部のガラスを強制的に撹拌させることに より、YP 発生抑制や処理能力の向上が期待できる 装置である。

バブラー管形状は、かくはん効果および耐食性に 影響するため、アクリル製容器と模擬流体を用いた 結果より、一定の角度をもたせた曲棒型(図9参 照)とするとともに、バブラー管の本数を2本とし



た。また、バブリング流量については、試験結果を踏まえ、最適化した。

c. 実規模モックアップ試験

開発した炉底部技術および炉内要素技術の効果について、新型ガラス溶融 炉の実規模モックアップ試験炉(図 10、表 7参照)を用いた試験で検証を行

った。



図 10 実規模モックアップ試験炉の外観

主要寸法	外径寸法 約 3m×約 3m×約 3m
	炉底部傾斜角度 60°、円すい形状
加熱方式	直接通電
	ヒータ加熱(気相部)
	誘導加熱(底部電極、流下ノズル)
ガラス原料供給方式	炉上部からのビーズ供給
ガラス抜き出し方式	誘導加熱によるフリーズバルブ方式

表 7 実規模モックアップ試験炉の仕様

(a) 試験計画

模擬ビーズ試験(高レベル廃液の模擬廃液成分を含んだガラスビーズを 供給)、低模擬廃液試験(白金族元素の含まない模擬廃液を供給)、高模擬 廃液試験(白金族元素を含んだ模擬廃液を供給)と段階的に試験を行い、 炉の熱特性・ガラスの流下性・安定運転等を合計 100 バッチの流下で確認 した(図 11 参照)。なお、現行ガラス溶融炉との比較・評価のため、現行 ガラス溶融炉がこれまで実施してきた炉底低温運転¹を踏襲した。



ガラス液位を一定のままとして、ガラス・廃 液等を供給せずに、炉上部を高温で保持した 状態で熱特性等を確認

模擬ビーズを供給し、仮焼層がない状態でガ ラスの流下を行い、熱特性等を確認

原料ガラスおよび低模擬廃液を供給し、仮焼 層がある状態でガラスの流下を行い、熱特 性、ガラスの流下性等を確認

原料ガラスおよび高模擬廃液(FINE²、DBP³ なし)を供給し、仮焼層がある状態でガラス の流下を行い、熱特性等を確認

原料ガラスおよび高模擬廃液(FINE、DBP あり)を供給し、仮焼層がある状態でガラスの 流下を行い、安定運転状態等を確認

新ガラス素材の原料ガラスおよび高模擬廃 液(FINE、DBP なし)を供給し、安定した運 転が可能であること、および YP 発生抑制効 果を確認

ドレンアウト後の炉内の残留物等を確認

図 11 新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験フロー

[「]炉底低温運転:ガラス流下終了後に炉底部の温度を低下させ、流下後の白金族元素の炉底部への沈降を抑制する運転。

² 不溶解残渣(FINE):使用済燃料の溶解工程において、硝酸で溶けずに残るもの。原子炉内での核分裂により生成する合金(Mo、Ru、 Rh、Pd、Tc)およびせん断時に発生する燃料被覆管の粉末(Zr、Fe)が主な成分である。

³ リン酸ニブチル (DBP) :使用済燃料を硝酸で溶解した溶解液からウランとプルトニウムを抽出するための溶媒抽出に用いるリン酸三ブ チル (TBP) が放射線分解 (劣化) して生成される。これが溶媒再生工程でアルカリ廃液へ移行し、高レベル廃液に含まれることになる。

(b) 試験結果

①温度管理

高模擬廃液試験の温度推移を図 12 に示す。各ガラス温度計指示値をも とに主電極電力、間接加熱電力を調整することで、ガラス温度および気 相温度を目標温度(試験により異なる)に制御することができた。



図 12 新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験における温度 および電力の推移

②ガラスの流下性

バッチ毎に、ガラス流下時の流下速度が 50kg/h に到達した時間の推移を図 13 に示す。本到達時間は、現行ガラス溶融炉において、白金族元素の堆積によりガラス流下速度が顕著に悪化する前に回復運転(洗浄運転)に移行するための流下性低下の判断指標として用いている。試験の結果、流下回数を重ねても、流下性は良好であり、白金族元素が炉底部に堆積した傾向は確認されなかった。また、現行ガラス溶融炉の試験結果と比較しても、安定した流下が継続できることが確認できた。



図 13 新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験(左)と六ヶ所再処理工場 A 系列ガラス固化試験(2013年5月)(右)におけるガラス流下速度 50kg/h 到 達時間

また、ドレンアウト試験後の炉内観察結果を図 14 に示す。現行ガラス溶 融炉と異なり、モックアップ試験炉では炉内のガラスは全て排出されて おり、白金族元素等の残留物も確認されなかった。



図 14 新型炉モックアップ試験(左)と六ヶ所再処理工場 B 系列ガラ ス固化試験(右)のドレンアウト試験後の炉内観察結果

③その他

エアパージ式液位計による液位測定等、その他の改良技術についても 良好な性能・効果が確認できた。

(3) ガラス溶融炉解析コードの高度化

新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験の試験計画を検討するために は、事前にガラス溶融炉の運転条件(目標温度、投入電力量等)を設定する 必要がある。その際、試験を効率的に進めるためには、投入電力量等の入力 条件の範囲をある程度絞っておく必要がある。そのために、ガラス溶融炉の 運転条件に応じた炉内状況を再現(シミュレーション)できるガラス溶融炉 解析コードの高度化を行った。

ガラス溶融炉解析コードの機能構成を図 15 に示す。



図 15 ガラス溶融炉解析コードの機能構成と改良・検証項目

a. 炉内温度分布および白金族元素挙動の再現

ガラス溶融炉解析コードによる炉内温度分布の再現性を確認するために、 現行ガラス溶融炉に係る機能の確証を目的とした各種試験を行うための実 規模大のガラス溶融炉(以下、「KMOC」という。)を対象にして解析モデル を組み(図 16参照)、過去のKMOC 試験での運転と同様の加熱・冷却条件を 与えることで、これらの温度変化の再現性を確認し、ガラス溶融炉解析コ ードの修正を行った。



図 16 KMOC の解析モデル

KMOC 試験結果とガラス溶融炉解析コードにより計算した炉内温度の比較を 図 17 に示す。KMOC 試験の試験結果を踏まえた解析モデルの適用やガラス 物性値の導入等によるガラス溶融炉解析コードの高度化により、計算した 炉内温度はガラス溶融炉内の温度分布を再現できることを確認した。



図 17 KMOC 試験結果とガラス溶融炉解析コードによる解析結果の比較

また、ガラス溶融炉解析コードにより炉内の白金族元素の分布(図 18 参照) と流下による白金族元素の抜き出し量を解析し、KMOC 試験における白金族元 素の抜き出し量の推移と比較し、解析コードにより炉内の白金族元素の挙動 を再現できることが確認できた。



b. 実規模モックアップ試験の事前検討

実規模モックアップ試験において、事前にガラス溶融炉の運転条件(目 標温度、投入電力量等)を設定する必要がある。その際、試験を効率的に 進めるためには、投入電力量等の入力条件の範囲をある程度絞っておく必 要がある。

ガラス溶融炉解析コードに適用した新型ガラス溶融炉の解析モデルと解 析メッシュは以下のとおりである(図 19参照)。



図 19 新型ガラス溶融炉の解析モデル図(左)と解析メッシュ(右)

新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験では、六ヶ所再処理工場の ガラス溶融炉の炉底低温運転を踏襲することから、六ヶ所再処理工場のガ ラス溶融炉の温度分布を元に実規模モックアップ試験炉における目標温度 分布を設定し、ガラス溶融炉解析コードにより各加熱ツール(主電極・補 助電極・底部電極間の各通電、底部高周波加熱コイル)の感度解析を実施 したうえで、目標温度分布に近づける入熱量(電力量)を設定した(図 20 参照)。



図 20 ガラス溶融炉解析コードで設定した新型ガラス溶融炉の目標温度

(4) ガラス物性等の基礎試験

ガラス溶融炉解析コードの高度化で必要となる白金族元素を含有した溶 融状態のガラスの物性データの取得や評価モデルの整備を行うとともに、ガ ラス溶融炉内の白金族元素の粒子挙動や仮焼層形成のメカニズムの解明等 を目的に、基礎試験を実施した。

実施テーマは図 21 のとおりである。



図 21 ガラス物性等の基礎試験の実施テーマ

- a. 仮焼層形成に係るメカニズム解明
- (a) 仮焼層における熱挙動

仮焼層状態を把握するためには、仮焼層内における物質移動を考慮す る必要がある。仮焼層においては、廃液供給から溶融ガラスまでの温度 勾配があることから、まず、各温度における物質の化学形態について整 理するため、化学物質単独のデータを整理した。

次に、混合系(模擬廃液)の熱挙動(反応速度)のデータ取得を行った。 単独系の熱データから計算した各温度における反応速度および混合系の 実験データを図 22に示す。単独系の計算データと混合系の試験データに ついてほぼ一致するデータが得られたことから、単独系で想定した各温 度における化学物質の形態変化が仮焼層で起こっていることが分かった。



模擬廃液成分の熱的挙動データ 赤:単独元素からの計算によるデータ 青:模擬廃液の試験データ

図 22 各温度における廃液成分の反応速度変化

(b) 仮焼層構造

仮焼層の熱伝導等を考慮する場合には、仮焼層の構造が重要な因子と なる。そこで、約800℃~1200℃の高温下において仮焼層を模擬できる装 置を開発し、X線を用いて直接仮焼層内部構造を観察した。本装置では、 空隙率に着目し観察を行い、廃液成分と原料ガラスビーズが反応してい く様子を可視化した。装置の外観図および得られた画像を図23に示す。



図 23 仮焼層観察装置外観図および計測画像

各温度における空隙率の変化を図 24 に示す。本結果から、仮焼層の空隙 率(構造)を明らかにし、ガラス溶融炉解析コードにおける仮焼層の熱伝 導を考慮する際については本データを参照している。



図 24 各温度領域における仮焼層内の空隙率の変化

(c) 空隙率と白金族元素の凝集性について

白金族元素の炉内挙動を把握することは、ガラス溶融炉の運転を行 う上で必要な基礎データとなる。仮焼層の空隙構造と白金族元素の移 動挙動について、XAFS (X-ray absorption fine structure、X 線吸収 微細構造)を用いて可視化した(図 25 参照)。その結果、廃液が蒸発 し、発泡する際に、泡の隙間で白金族元素の粒子が凝集することが分 かった。

また、空隙が小さくなる小粒子径の原料ガラスビーズを用いた場合 に白金族元素の凝集物も小さくなることが示唆された。

これらの結果から、白金族元素の凝集については、仮焼層の空隙構造等に影響を受けることが分かった。



図 25 XAFS による仮焼層イメージ(泡の像)

- b. 炉内白金族元素の粒子の物理挙動の把握
 - (a)白金族元素の粒子の沈降速度、成長

ガラス溶融炉内の白金族元素の粒子の移動挙動を把握するため、ガ ラス中における白金族元素の粒子の沈降速度データを種々の白金族元 素濃度および温度に関して取得した(図 26 参照)。沈降速度について は界面沈降速度を定式化し、解析へ反映を行った。



図 26 白金族元素濃度、温度を変化させたガラスの界面沈降

(b) 白金族元素の化学形態に及ぼす REDOX 影響

各温度、酸素分圧を変化させた白金族元素の化学形態を XAFS により 測定し、白金族元素の化学形態と REDOX(酸化還元状態)の関係につい て整理した。本データを利用して、ガラス溶融炉から採取したガラス 内の白金族元素の化学状態から、炉内の REDOX を評価することができ た。

c. ガラス溶融炉解析コードのための物性取得

新規に白金族元素含有ガラスの物性計測を行い、ガラス溶融炉解析コードに適用した(表 8 参照)。

No.	評価項目	測定方法			
1	密度(熱膨張率)	低温域:熱機械測定(TMA:Thermomechanical			
		analysis)			
		中温域:塩化物溶融塩によるアルキメデス法			
		高温域:アルキメデス2球法による測定			
2	比熱	低温域:示差走査熱量測定(DSC:Differential			
		scanning calorimetry)			
		高温域:落下熱量測定			
3	粘度	平行平板回転法を用いた粘度計測			
		粒子モデル実験・シミュレーションからの粘性式を			
		導出(粒子懸濁液の粘性に係る実験式を適用)			
4	熱伝導度	熱拡散率計測から熱伝導率を算出した値に赤外線吸			
		収率を考慮するロッセランド近似で輻射の熱伝導相			
		当を加算した式を適用			

表 8 ガラス物性の取得

d. 小型溶融炉を用いたバブリング効果確認試験

本試験において小型溶融炉(図 27 参照)を製作し、運転データを取得 した。小型溶融炉上部には、覗き窓が 2 箇所設置されており、常時仮焼 層が観察でき、仮焼層をサンプリングできる構造としている。

各種の運転条件における仮焼層の試料について分析を行い、廃棄物成 分の濃度分布データを取得した。

また、小型溶融炉にバブリング装置を設置し、試験を行った結果、処 理能力が向上することを確認した。





図 27 小型溶融炉外観(左)およびサンプリングした仮焼層(右)

3-1-3 特許出願状況等

要素技術	論文数	論文の被	特許等件	特許権の	ライセン	取得ライ	国際標準
		引用度数	数(出願を	実施件数	ス供与数	センス料	への寄与
			含む)				
(2)新型ガ	12	0	0	0	0	0	0
ラス溶融							
炉の開発							

表 9 特許·論文等件数

表 10 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期			
論文	Glass Technology: European Journal of Glass Science and	2012.12			
	Technology Part A 「X-ray CT imaging of the vitrified				
	glasses containing pseudo-radioactive wastes -				
	Structure and chemical reactions of glass beads and				
	wastes in Cold Cap -j				

	Physics and Chemistry of Glasses 「Density measurement of simulated radioactive waste glass by Archimedean method using molten chloride salts」	2013. 6		
	Journal of Nuclear Materials 「High-temperature heat capacity and density of simulated high-level waste			
	glass」			
	他9件、投稿中2件			
投稿	なし			
発表	GLOBAL2011 「Development of New Method for Yellow Phase	2011.12		
	Suppression by Redistribution of Frit Components			
	日本原子力学会 2012 年秋の大会「ガラス溶融炉高度化	2012.9		
	研究(2)ガラス溶融炉の開発」			
	DGG-ACerS GOMD 2014 「Full-Scale Inactive Test for	2014. 5		
	Development of the Advanced Melter in RRP」			
	日本保全学会 第11回学術講演会「ガラス溶融炉高度化研	2014. 7		
	究」			
	他 132 件			
特許	なし			

<u>3-2 目標の達成度</u>

要素技術ごとに設定した目標・指標について、それぞれの成果および達成度 を表 11 に示す。各要素技術とも、設定された指標に対して所定の成果を得てお り、全ての事業目標を達成した。

要素技術	目標・指標	成果	達成度	
(1)新ガラス	・イエローフェーズ	・るつぼ試験により、YP 発生	達成	
素材の開発	(YP)の発生を可能	抑制ガラス素材の組成 (従来ガ		
①イエローフ	な限り抑制する新ガ	ラス素材中のアルミニウム		
ェーズ発生抑	ラス素材を開発す	(AI)とケイ素(Si)の一部を		
制ガラス素材	る。	廃液側に分配)を選定した。		
の開発	・開発したガラスの性	・小型および中型溶融炉試験に		
	能については、るつ	おいて、調整液を添加しない条		
	ぼ試験、小型・中型	件で YP 発生抑制効果を確認す		
	溶融炉試験、新型ガ	ることができた。		
	ラス溶融炉実規模モ	・新型ガラス溶融炉の実規模モ		

表 11 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
	ックアップ試験にお ックアップ試験において、調整		
	いて確認する。	液を添加しない条件で新ガラ	
		ス素材を使用して、適切な温度	
		管理ができ、安定した運転が可	
		能であった。また、YP 発生抑	
		制効果については、運転条件の	
		最適化を図る等の課題を確認	
		することができた。	
②高減容ガラ	・より多くの高レベル	・るつぼ試験により、高減容ガ	達成
ス素材の開発	廃液を取り込める新	ラス素材の組成(従来ガラス	
	ガラス素材を開発す	素材中のアルミニウム(AI)	
	る。	とホウ素 (B) の一部を廃液側	
	・開発したガラスの性	に分配、バナジウム(V)の添	
	能については、るつ	加)を選定した。	
	ぼ試験、小型溶融炉	・小型溶融炉試験において、廃	
	試験において確認す	棄物含有率 34wt%(現行は	
	る。	20.8wt%)を達成できることを	
		確認できた。	
(2)新型ガラ	・白金族元素の堆積抑	・炉底部形状を円すい、傾斜角	達成
ス溶融炉の開	制および抜き出し性の	度を60°に変更し、炉底部の	
発	向上を目的として、新	加熱手段を追加した炉底部の	
①新型ガラス	型ガラス溶融炉を構成	モックアップ試験等により、	
溶融炉構成技	する技術(炉底部技術、	現行ガラス溶融炉と比べ、白	
術の開発	炉内要素技術)を開発	金族元素の堆積抑制および抜	
	する。	き出し性、ならびにガラスの	
	・開発した各構成技術	流下性が向上することを確認	
	については新型ガラス	した。また、通常の約5倍の	
	溶融炉の実規模モック	白金族元素濃度のガラスにお	
	アップ試験において検	いても、良好に流下すること	
	証を行う。	ができた。	
		・新型ガラス溶融炉の実規模モ	
		ックアップ試験により安定し	
		た温度管理が可能であり、白	
		金族元素の堆積抑制、抜き出	
		し性およびガラスの流下性が	
		向上することを確認した	

要素技術	目標・指標	成果	達成度
②ガラス溶融	・ガラス溶融炉内の温	・解析コードに仮焼層のモデル	達成
炉解析コード	度および白金族元素分	やガラス物性値の反映等をす	
の高度化	布等の挙動を模擬でき	ることで、従来の解析コード	
	る解析コードを開発す	と比べ、ガラス溶融炉内のガ	
	る。	ラス温度および白金族元素分	
		布の再現性が向上した。	
		・解析コードを用いて、新型ガ	
		ラス溶融炉の実規模モックア	
		ップ試験の運転条件の事前検	
		討を行うことができた。	
③ガラス物性	・白金族元素および模	白金族元素を含有したガラス	達成
等の基礎試験	擬廃液成分を含有した	の物性値、炉内の白金族元素の	
	ガラスの物性等の基礎	挙動、仮焼層の構造等のデータ	
	データを取得する。	を取得し、ガラス溶融炉解析コ	
		ードの高度化等に利用した。	

4. 事業化、波及効果について

<u>4-1 事業化の見通し</u>

本事業において開発されたガラス固化技術は、実用化に向けた更なる技術検 証を進めたうえで、5年程度で更新が計画されている六ヶ所再処理工場のガラス 溶融炉の設計に反映することができる。

また、本事業により開発されたガラス固化技術を六ヶ所再処理工場に適用す ることにより、ガラス溶融炉の運転で行っている定期的な洗浄運転(廃液供給 10 バッチに対して模擬廃液による洗浄運転3バッチ)を低減または不要とする ことによるガラス固化体の発生本数の低減も期待できる。

<u>4-2 波及効果</u>

本事業により開発されたガラス固化技術により、ウランおよびプルトニウム を準国産エネルギーとして利用する我が国の核燃料サイクルの要である再処理 および高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)処分の効率化、処分に際しての 安全裕度の一層の向上に資することが期待できる。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5-1 研究開発計画

新ガラス素材の開発においては、候補となるガラス素材について実験室規模 での試験(るつぼ試験)や小型溶融炉等を用いた試験を段階的に進めて評価を 行い、最終的には新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験により性能を確 認する計画とした。

また、新型ガラス溶融炉の開発においては、ガラス溶融炉の構成技術である 炉底部技術および炉内要素技術の開発を進めるとともに、それらを反映した新 型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験炉の設計・製作を行い、モックアッ プ試験を実施して開発技術の検証を行った。また、ガラス物性等の基礎試験で 得られた基礎データ等を元にガラス溶融炉解析コードの高度化を行い、実規模 モックアップ試験の検討に利用した。

これらの開発においては、技術的確証すべき目標に向けて要素試験ごとに達 成すべき目標、試験内容を設定して、計画的な取り組みを行った。さらに、実 規模モックアップ試験により、要素開発の関連性が十分考慮されていることか ら、事業の開発内容、スケジュールは妥当であった。

研究開発計画を図 28 研究開発計画に示す。



図 28 研究開発計画

5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、日本原燃が経済産業省から補助金の交付を受けて実施した。

研究開発を統括する実施責任者としては、日本原燃再処理計画部長 中村裕行(H21年度~H24.12.11)、エンジニアリングセンター長 越智英治(H24.12.12~H25年度)とし、その下でプロジェクト運営・研究開発部門(再処理計画部(H21年度~H24.12.11)、エンジニアリングセンター(H24.12.12~H25年度))と運転部門(ガラス固化施設部)が連携して事業に取り組んでおり、事業全期間を通じて適切な実施体制を維持した。

日本原燃は本事業の実施にあたり、試験計画の策定、実施、評価等について 総括的に管理を行っており、新ガラス素材および新型ガラス溶融炉の開発に係 る専門的・工業規模での試験を六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉の設計・製作・ 試運転の実績を有するメーカに、新型ガラス溶融炉の開発における基礎的研究 を大学・研究機関・メーカに請負または委託した。また、日本原燃は、必要に 応じて試験の請負および委託先と会議体を設けて情報の共有化を図り、実施者 間の連携が行われる体制とした。

なお、日本原燃は本事業の遂行にあたり、ガラス、製鉄溶鉱炉および原子カの専門家等の外部有識者から構成されるガラス固化技術研究評価委員会を開催し、試験の計画策定、実施等において評価・助言を受けた。

本研究開発の実施体制を図 29 に示す。



図 29 研究開発実施体制

5-3 資金配分

本事業の予算については、各技術開発項目の進捗や社会環境の変化等を踏ま え、必要な実施項目と支出予算を精査した上で、各年度において適切な資金配 分を行った。資金配分を表 12 に示す。

平成 21 年度分の資金は、平成 22 年度に繰越しを行った。また、東北地方太 平洋沖地震(平成 23 年 3 月 11 日)の影響により平成 23 年度に試験を行うため の資機材の準備等が困難になったことから、当初平成 23 年度分までの資金配分 を、平成 25 年度までの資金配分に変更した。

(羊匹)							
	年度 平成	2 1	22	23	24	2 5	合計*
労務費		34	30	10	7	7	89
諸経費		10	6	3	3	1	23
試験費	新ガラス素材 の開発	101	165	126	_	_	393
	新型ガラス溶 融炉の開発	1, 376	1, 346	528	941	1, 021	5, 211
승計*		1, 522	1, 547	667	952	1, 029	5, 717

表 12 資金配分

(単位:百万円)

※ 四捨五入しているため、各費用と合計は一致しない。

<u>5-4 費用対効果</u>

開発されたガラス固化技術は、5年程度で更新が計画されている六ヶ所再処理 工場のガラス溶融炉に反映される。その結果、六ヶ所再処理工場の安定運転が 可能となり、ひいては我が国の核燃料サイクルの着実な推進に寄与することが 期待される。

また、より多くの白金族元素を含む高レベル廃液を溶融可能なガラス素材お よびガラス溶融炉が実用化された場合には、ガラス固化体の製造本数が削減で き、ガラス固化体の処分費用等の低減が期待できる。

現行のガラス溶融炉で行っている洗浄運転が不要となった場合、ガラス固化 体の発生本数を2割程度低減できる。

<u> 5-5 変化への対応</u>

本プロジェクトの実施期間中に六ヶ所再処理工場におけるガラス溶融炉の試 験運転で得られた課題について、適切に新型ガラス溶融炉の開発に反映した(図 28 参照)。

以上