

新型ガラス溶融炉のモックアップ試験計画と成果について

2015年1月16日
日本原燃株式会社
兼平 憲男



日本原燃株式会社

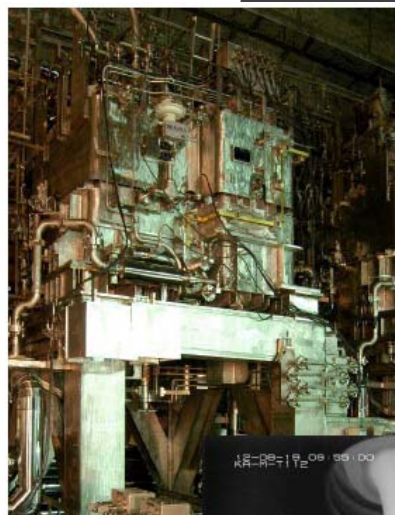
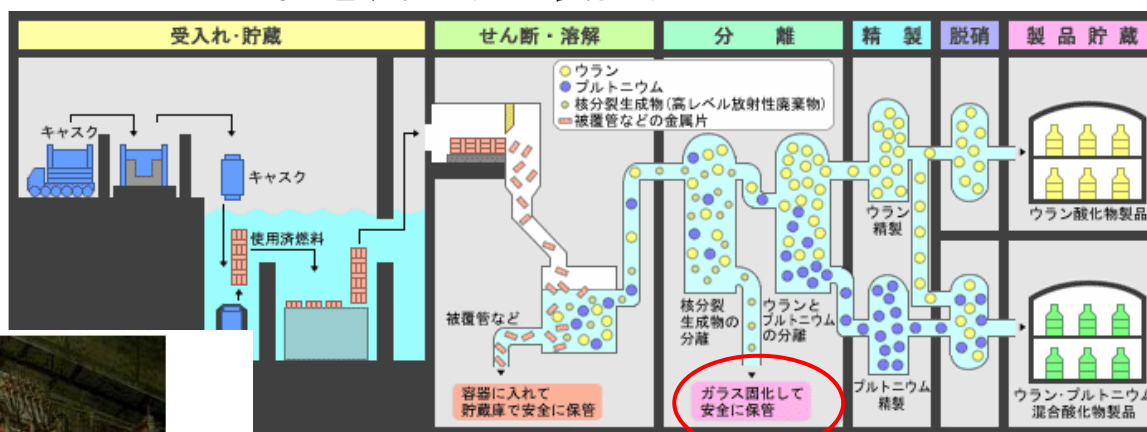
目次



1. ガラス溶融炉とは
2. 六ヶ所再処理工場におけるアクティブ試験
3. 新型ガラス溶融炉開発
4. ガラス固化技術開発施設について
5. 新型ガラス溶融炉のモックアップ試験
6. まとめ

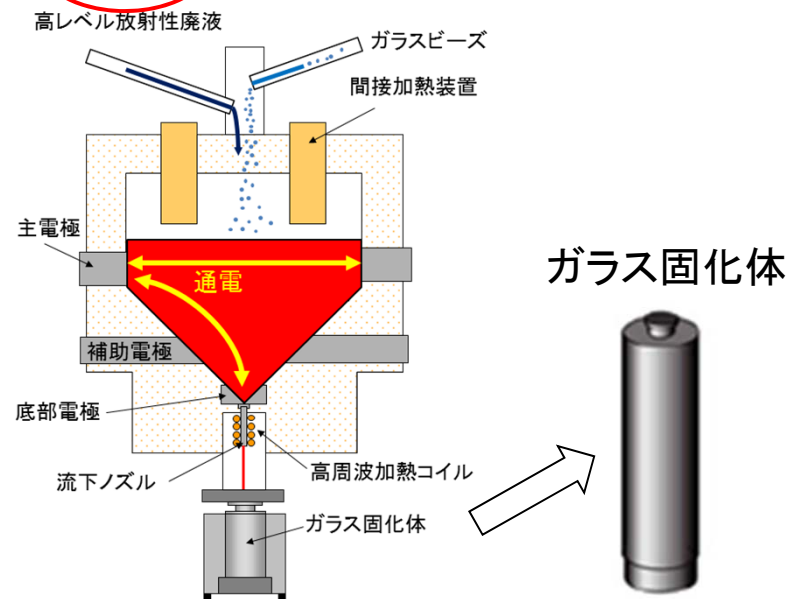
1. ガラス溶融炉とは

ガラス溶融炉は、高レベル廃液をガラス原料とともに直接通電加熱（ジュール加熱）によって1200℃程度で溶融した後、間欠的に固化体容器（キャニスター）に抜き出すことによりガラス固化体を製造する装置。

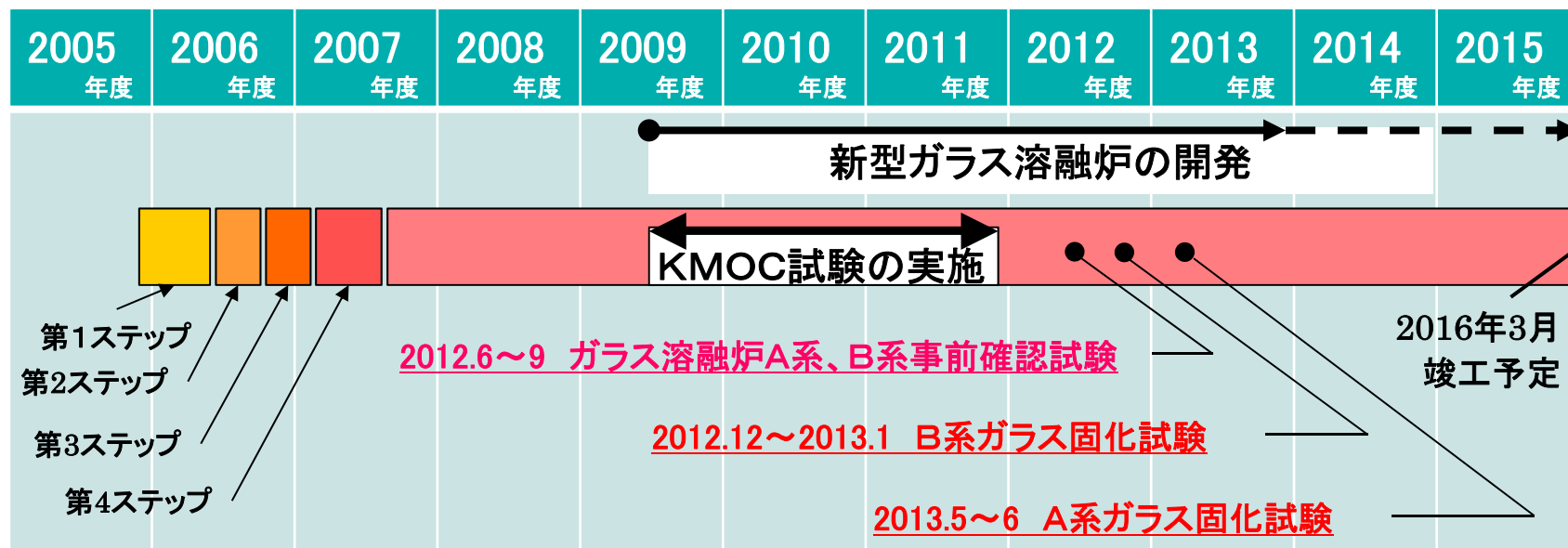


流下時のITVカメラ映像

ガラス溶融炉



2. 六ヶ所再処理工場におけるアクティブ試験



- 六ヶ所再処理工場は、2006年3月にアクティブ試験(使用済み燃料を用いた試験)を開始。現在、最終段階の第5ステップを実施中。
- 使用済み燃料からプルトニウム・ウランを抽出する工程等の主要な工程の試験は完了。
- 高レベル放射性廃液のガラス固化設備において、ガラス溶融炉内への白金族元素の堆積や流下ノズルの閉塞等により、流下性が低下し、試験が中断。
⇒確証改良溶融炉(KMOC)での試験等を通じ、流下性低下の原因究明を行い、運転方法の改善、設備の改造を実施
- ガラス固化試験により、「溶融炉の各温度を目標の範囲内で所定のバッチ数で運転ができること」「設計上の最大処理能力で運転できること」を確認。
⇒国の使用前検査に向けて必要な試験は全て終了。

2. 六ヶ所再処理工場におけるアクティブ試験 KMOC試験による原因究明および対策



- 原因究明と対策確認のため、JAEA東海にある**確認改良溶融炉(KMOC)**を利用し、step by stepで模擬試験を実施(2009年11月～2011年10月)

2009年度											
4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
	試験準備										
							KMOC8次試験(1)				
2010年度											
4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
KMOC8次試験(2)									KMOC8次試験(4)その1		
				KMOC8次試験(3)							
											▼3/11
2011年度											
4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
KMOC8次試験(4)その1						KMOC8次試験(4)その2					



: 原因究明及び対策確認



: アクティブ試験条件の確認

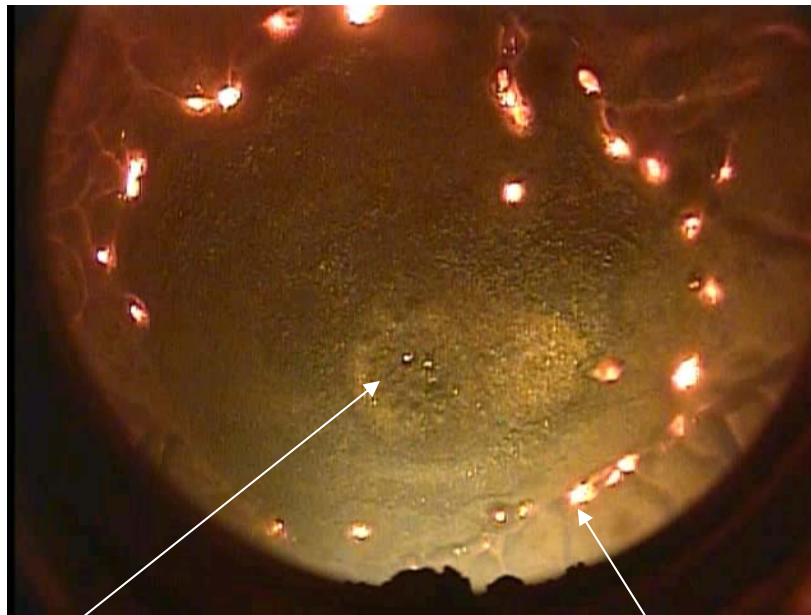


: 実機とKMOCの相違の確認

2. 六ヶ所再処理工場におけるアクティブ試験 ガラス溶融炉運転のポイント①(炉内温度管理)



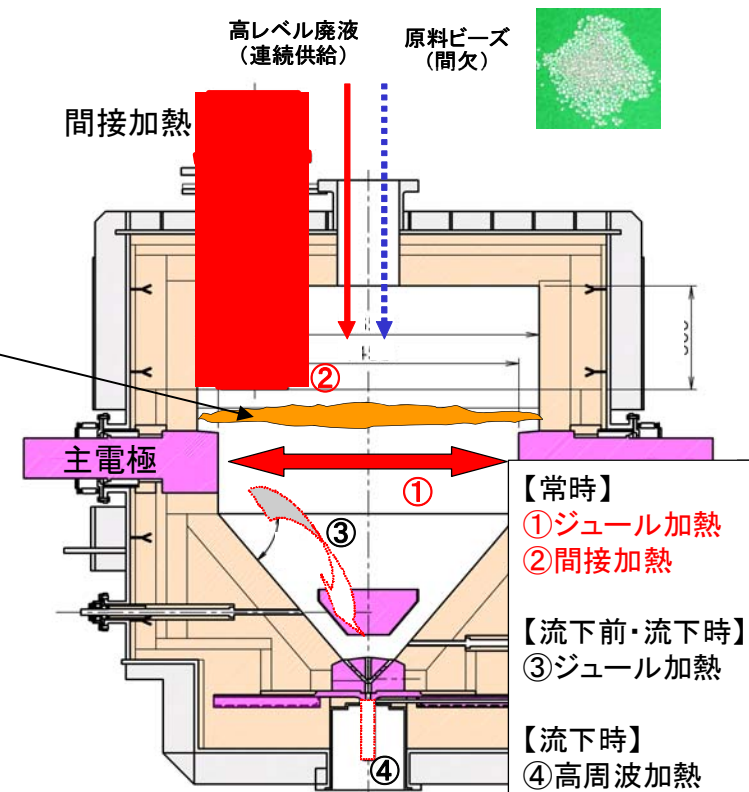
- ガラス溶融炉運転は、ガラス温度と気相温度を目標範囲内に制御する必要があり、①主電極間電力(ジュール加熱)と②間接加熱電力によって調整。
- これまでの経験から、これら温度制御には仮焼層のコントロールが重要であることが分かっている。
- 仮焼層形成の状態は、高レベル廃液の性状(廃液濃度、廃液組成)や電力バランス(主電極間電力と間接加熱電力)等によって変化するため、高レベル廃液の性状等に応じた電力バランスの設定が必要。



廃液プール

仮焼層外観

ホットスポット



2. 六ヶ所再処理工場におけるアクティブ試験 ガラス溶融炉運転のポイント②(白金族管理)



ガラス原料

Si、B、Al、Naなど

+

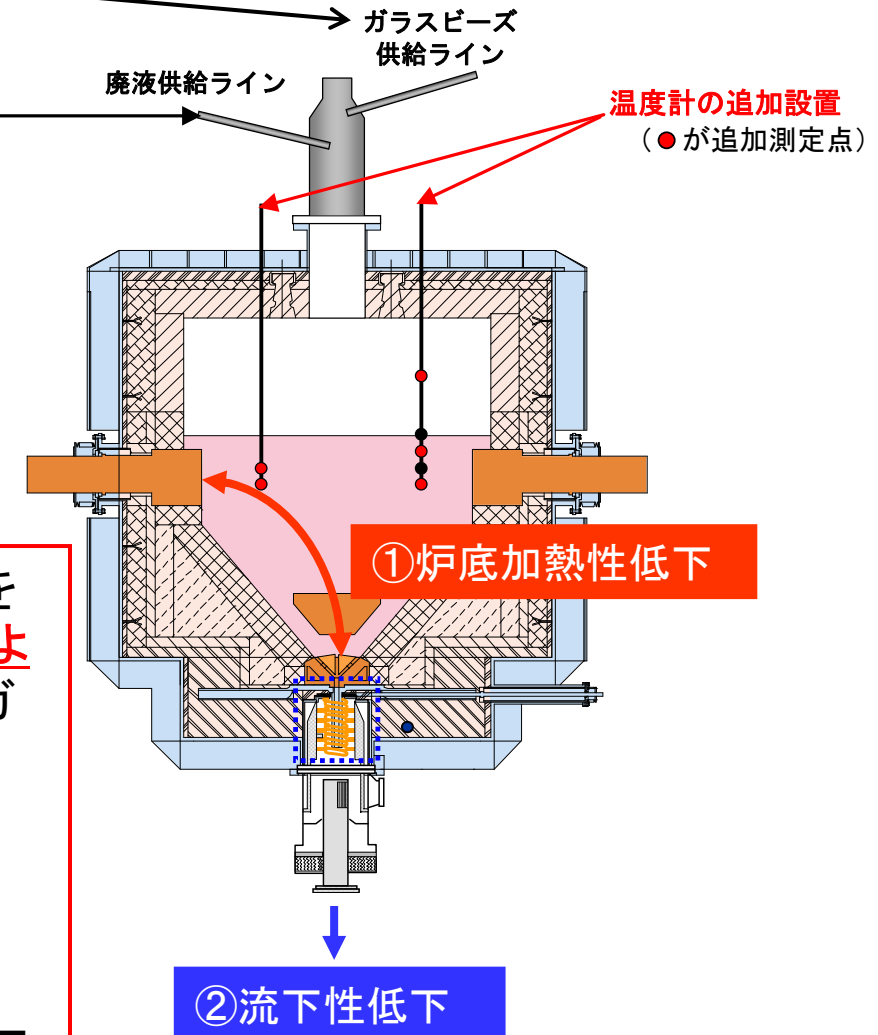
高レベル放射性廃液

Na、Zr、Mo、Cs、Ba、

Ru、Rh、Pd、ランタノイド、

U、アクチノイド等

ジュール加熱式ガラス溶融炉



白金族元素

白金族元素とは、白金および白金に似た性質をもつ元素であり、使用済み燃料中のRu、RhおよびPdの多くが高レベル放射性廃液に移行し、ガラス溶融炉に供給される。

- ・ガラスへの溶融性が悪い
- ・密度が大きいため、沈降しやすい
- ・濃度増加(沈降・堆積)によるガラス粘性上昇
- ・導電率上昇(抵抗低下)による加熱性能の低下

2. 六ヶ所再処理工場におけるアクティブ試験 KMOC試験を踏まえた運転方法・設備の改善



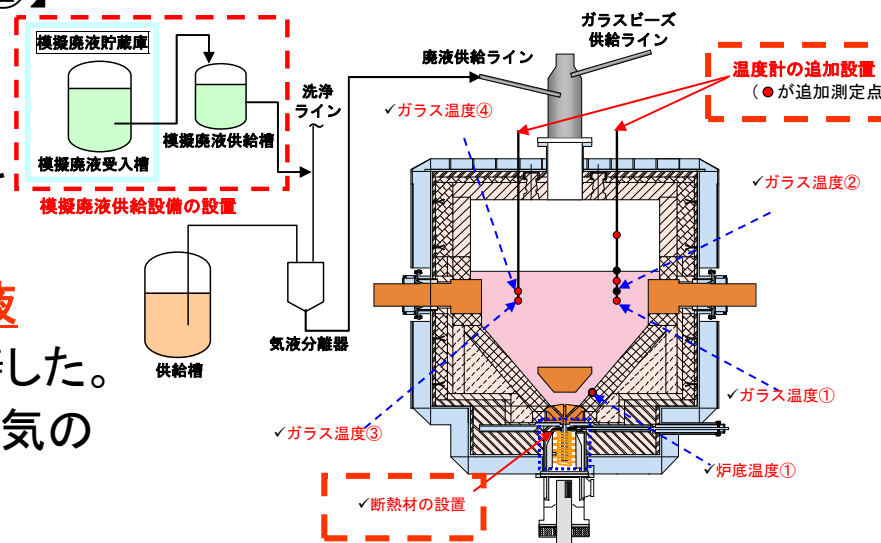
➤ KMOC試験結果を踏まえ、以下の運転方法および設備の改善を実施した。

【ガラス温度、気相温度管理 : 運転ポイント①】

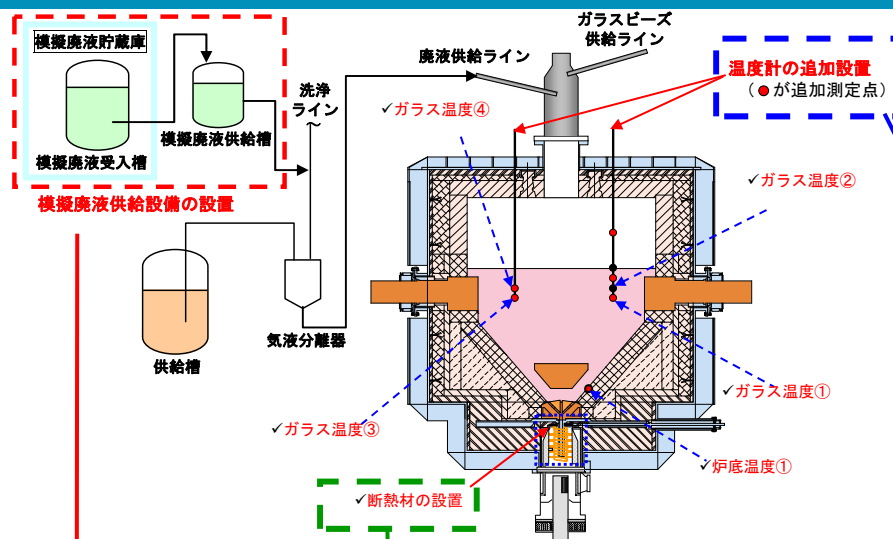
- ガラス温度測定点を増やすための設備改造を実施した。
- 複数の温度計の値の変化を総合的に判断することで電力調整を行う運転方法をKMOC試験で習熟した。
- 電力量を調整する際の支援ツールとして、電力量から炉内温度予測できる熱バランス計算プログラムを改良した。
- 廃液組成や供給流量をパラメータとした安定運転範囲を確認した。

【白金族管理(炉底温度管理) : 運転ポイント②】

- 白金族元素の沈降・堆積を抑制するため、ガラス温度と炉底温度の管理目標を設定。
- 長期連続運転のため、定期的な回復運転を実施することとした。
- 洗浄運転時の仮焼層維持のため、模擬廃液供給設備を設置し、洗浄運転の方法を改善した。
- 流下ノズル上部の温度低下を防ぐために空気の流入を防ぐ断熱材を設置した。



2. 六ヶ所再処理工場におけるアクティブ試験 試験結果と改善策の関係イメージ



KMOC運転習熟

定期的な回復運転

炉内の白金族保有量をコントロール
⇒保有量増加による白金族堆積防止

洗浄運転方法の改善

洗浄運転初期に仮焼層内の白金族が沈降することを防止

流下ノズルの加熱性向上

炉内の白金族抜き出し性が良く、炉内の白金族堆積を抑制

炉底低温管理の改善

ガラス温度・炉底温度上昇による白金族の炉底部への急激な沈降を抑制

複数温度計による電力調整

✓ 炉底部への白金族元素の沈降、堆積を防げた

3. 新型ガラス溶融炉の開発 背景・目的(1)



再処理工場に導入したガラス溶融炉のアクティブ試験において、以下の事象が発生

- 炉底傾斜部に白金族が沈降、堆積すると、①白金族部に電流が流れ、炉底ガラスの加熱性能が低下し、②炉底ガラスの粘性が上昇し、流下性能が低下する。よって、白金族沈降を抑制するための炉底低温運転を採用。しかし、アクティブ試験で白金族の堆積等により流下性能が低下

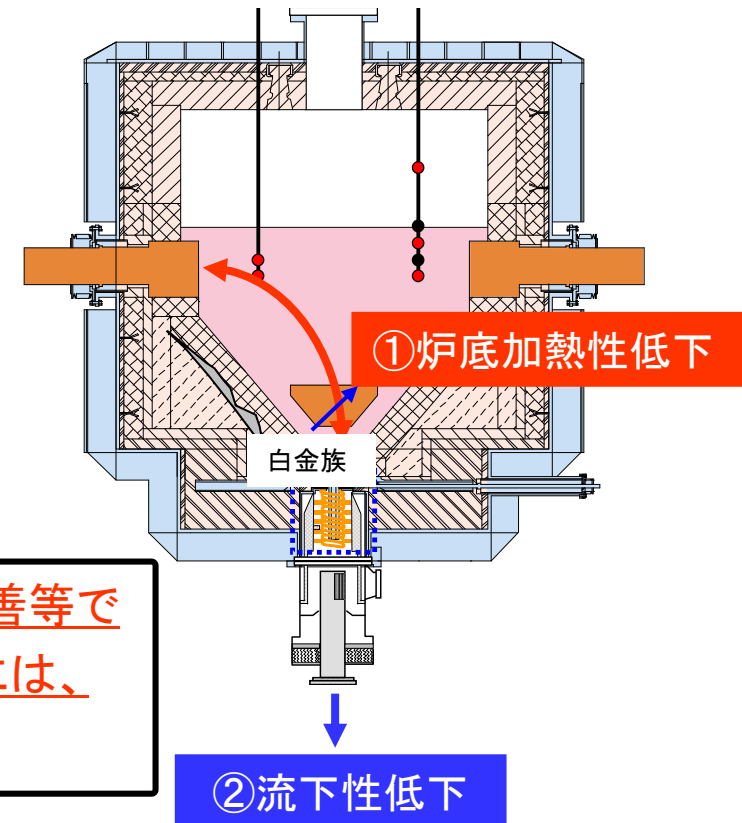
➡ ガラス温度と炉底温度の管理目標を設定するとともに、定期的な回復運転を実施する等により、白金族の沈降、堆積を抑制

- ガラス溶融炉内に溶融炉の運転等に影響を及ぼす低粘性流体(イエローフェーズ)※が発生

➡ 調整液の添加により発生防止できることを確認

※低粘性流体(イエローフェーズ)とは、通常の流下ガラスよりも粘性の低い流体のこと

これら事象については設備改善や運転方法の改善等に対応済であるが、既存のガラス溶融炉の更新時には、更に改良されたガラス固化技術の導入を図る



3. 新型ガラス溶融炉の開発 背景・目的(2)



・改良されたガラス固化技術の開発

① 更なる性能向上(ガラス固化体本数の低減、溶融炉の運転性の向上)

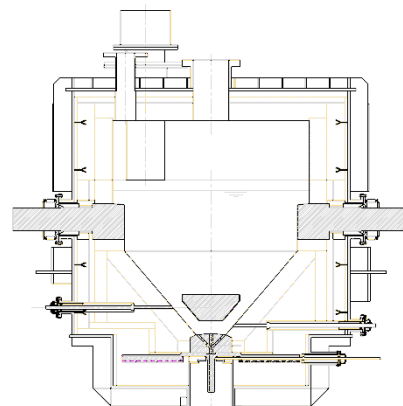
⇒ 新型ガラス素材の開発

- － より多くの高レベル廃液を充填(高充填)可能なガラス素材の開発
- － イエローフェーズの発生を抑制可能な新しいガラス素材を開発

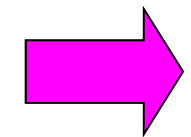
② 現行炉の課題(白金族元素の抜き出し性等)の改善

⇒ 改良炉の開発

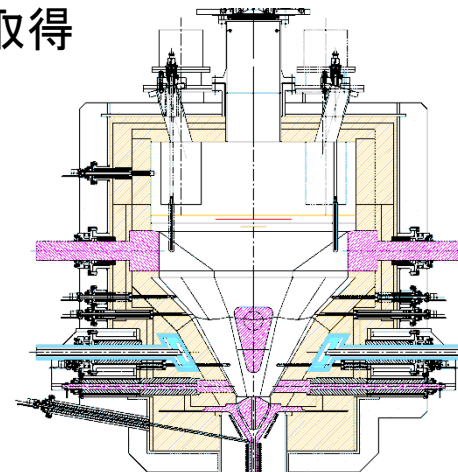
- － 白金族元素の沈降・堆積抑制を図れるガラス溶融炉の構造、炉底部加熱方法等の開発
- － 上記を踏まえた実規模の新型ガラス溶融炉の開発
- － 開発を補完する物性等の基礎データ取得



現行炉



課題の改善



改良炉

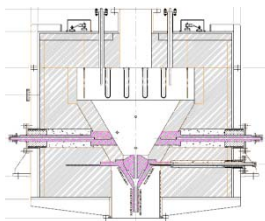
3. 新型ガラス溶融炉の開発 開発全体フロー



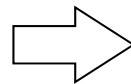
(5) ガラス物性等の基礎試験: 解析コードに必要となるガラス物性データおよび評価モデルの整備、各種メカニズム解明

新型ガラス溶融炉の開発

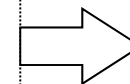
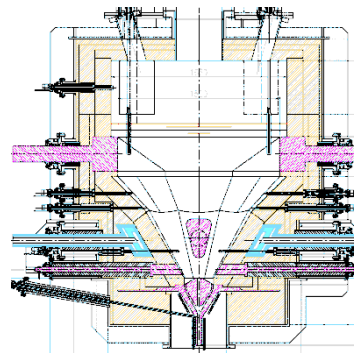
炉底部要素開発



段階的に検証



実規模モックアップ試験

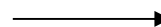


新型ガラス溶融炉を
再処理工場へ導入

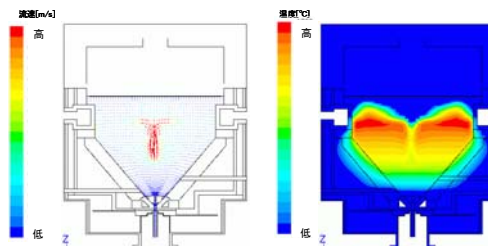
ガラス物性等の 基礎試験



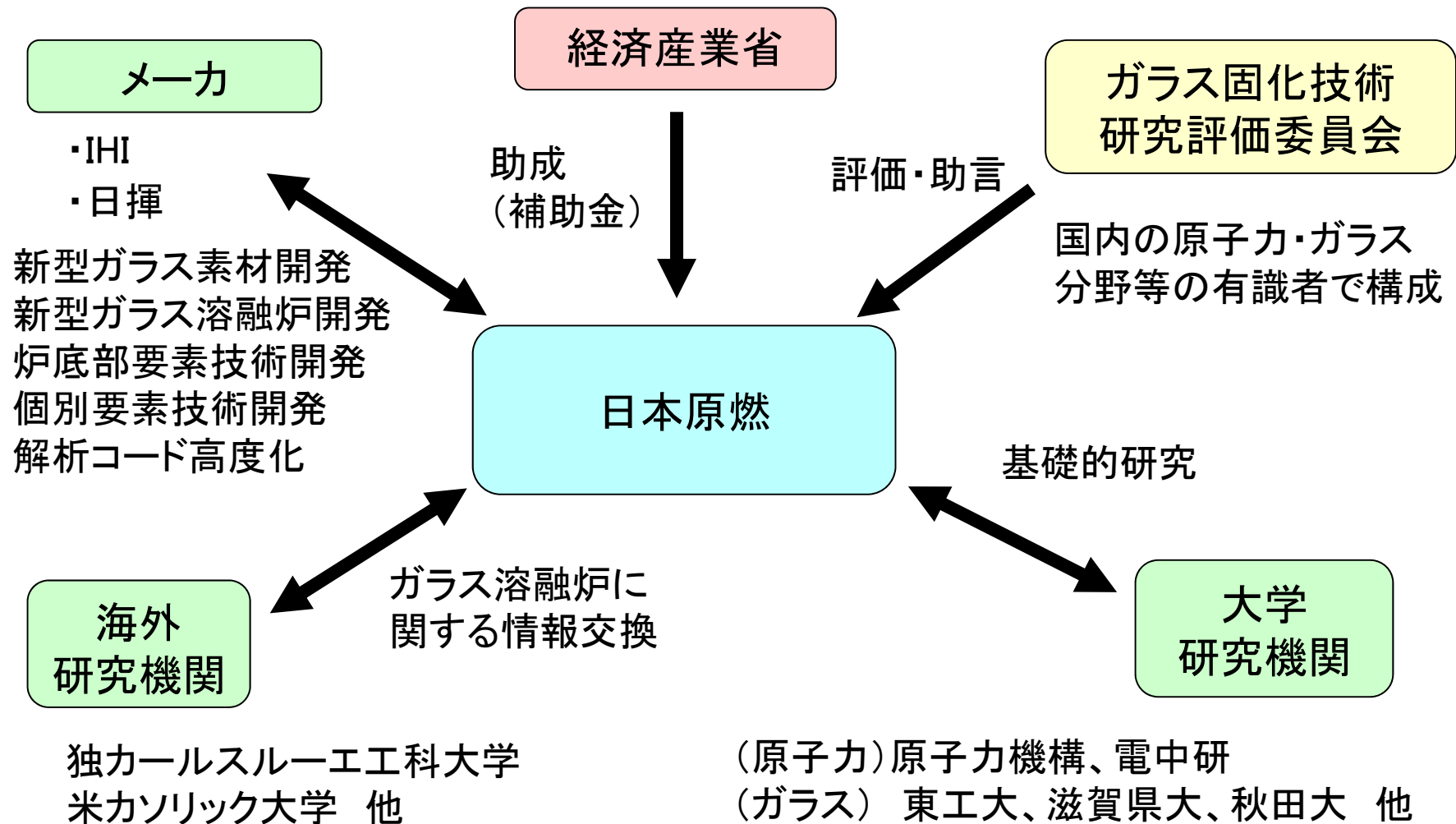
物性
評価モデル



溶融炉解析コードの高度化



3. 新型ガラス溶融炉の開発 研究開発体制



「産・官・学」が連携して開発に取り組む

3. 新型ガラス溶融炉の開発 スケジュール



年度	2009	2010	2011	2012	2013
(1) 新ガラス素材の開発	るつぽ試験、小型炉試験、中型炉試験				
・イエローフェーズ発生抑制					
ガラス素材の開発	るつぽ試験、小型炉試験				
・高減容ガラス素材の開発					
(2) 新型ガラス溶融炉の開発	炉底部要素技術開発／流下ノズル寿命評価試験等				
・炉底部要素技術の開発					
・個別要素技術の開発	かくはん装置／バブリング装置／エアパージ式液位計				
・モックアップ試験	モックアップ試験炉製作／試運転／モックアップ試験				
・解析コードの高度化	解析コード高度化・検証				
・基礎試験	ガラス物性等の基礎試験				

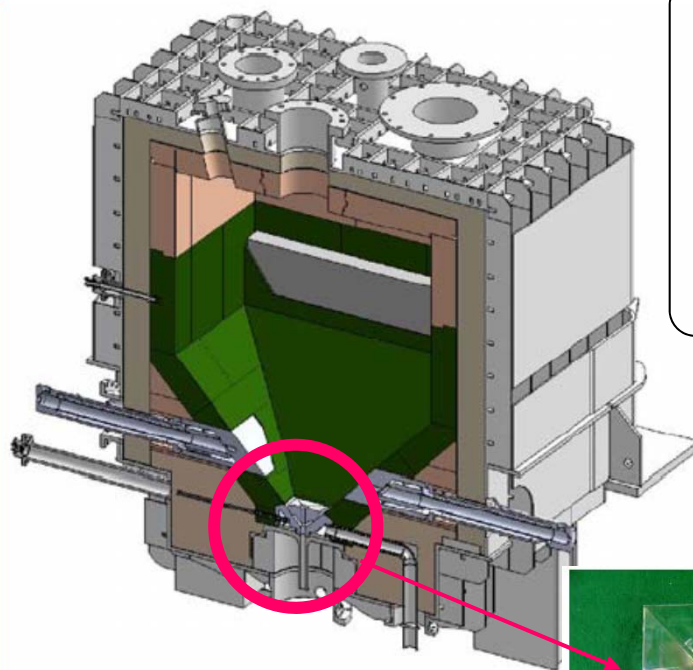
実規模モックアップ
試験を2013年11
月から開始

3. 新型ガラス溶融炉の開発 主な改良点(1) 形状の変更

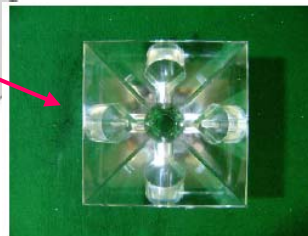


- 高レベル放射性廃液中に含まれる白金族元素(Ru、Rh、Pd)は、溶融炉底部に沈降堆積することで、ガラスの加熱性・流下性が低下
- 新型ガラス溶融炉では、炉底構造の変更や炉底部加熱手段を追加することで、白金族元素の炉底への沈降・堆積を抑制

現行ガラス溶融炉



底部電極構造
(アクリルモデル)

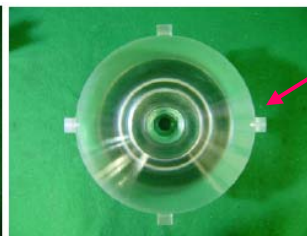
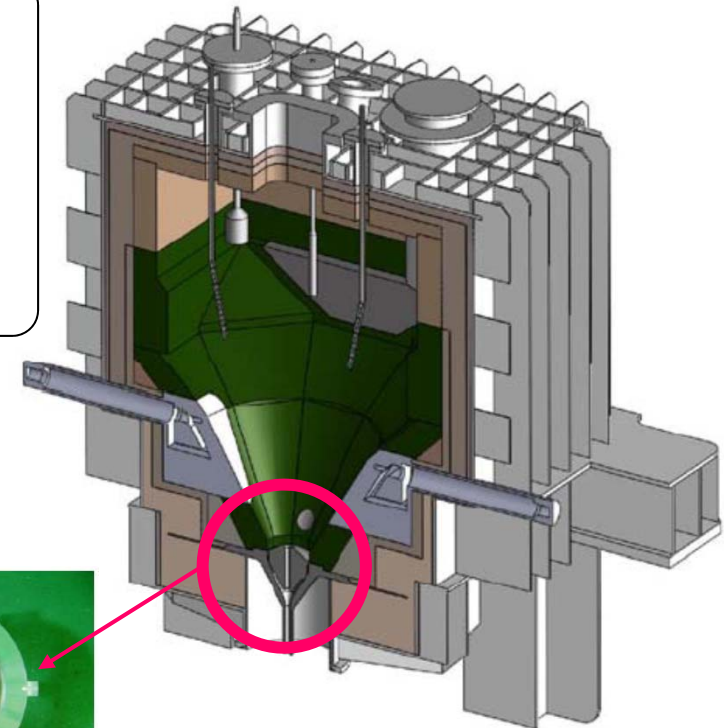


炉底構造の変更

- ・炉底形状の変更
(四角錐⇒円錐)
- ・傾斜角度の変更
(45度⇒60度)



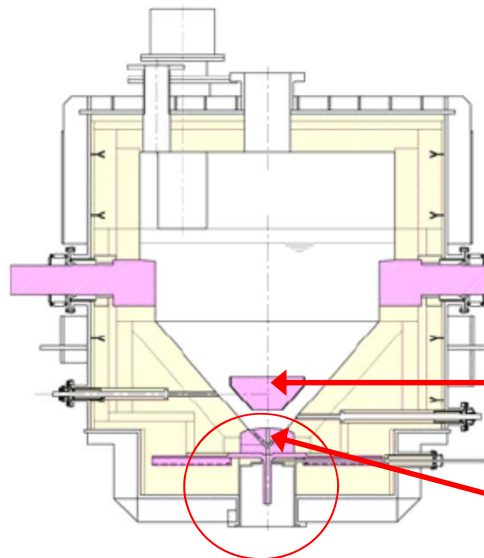
新型ガラス溶融炉



3. 新型ガラス溶融炉の開発 主な改良点(2) 加熱手段の追加



現行ガラス溶融炉



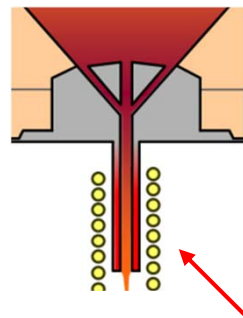
炉底部加熱手段追加

- ・下段補助電極追加
- ・底部電極用高周波加熱追加

主電極

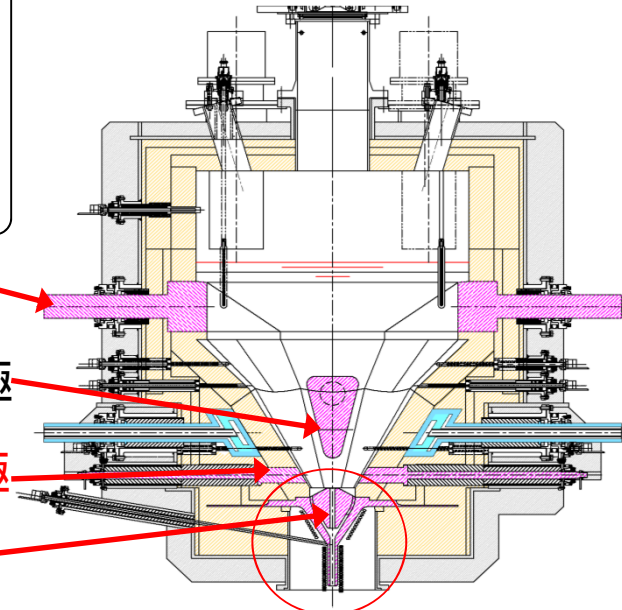
補助電極

底部電極



流下ノズル用
高周波加熱コイル

新型ガラス溶融炉



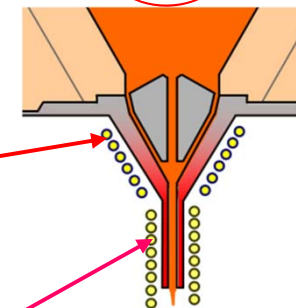
主電極

上段補助電極

下段補助電極

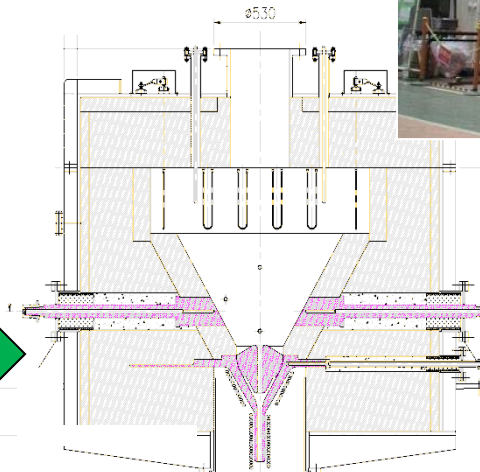
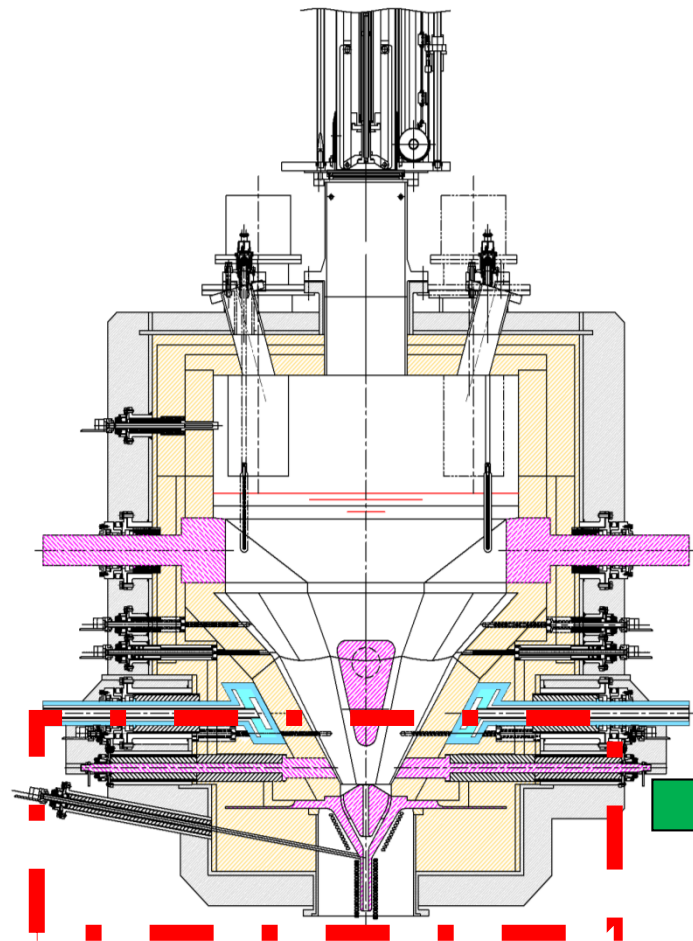
底部電極

底部電極用
高周波加熱
コイル



流下ノズル用
高周波加熱コイル

3. 新型ガラス溶融炉の開発 炉底部要素開発(1)(試験装置の製作)



炉底部モックアップ試験装置



【確認項目】

1. 流下性向上の確認
2. 加熱手段追加効果の確認
3. 白金族堆積防止効果の確認
4. 白金族堆積時の除去性向上の確認(底部電極脱着)

- ・試験装置の構造は、改良炉の炉底部構造を実規模大で模擬
- ・炉底部要素開発は、解析にて設計した改良炉の炉底に適用される新技術を検証する目的で実施

3. 新型ガラス溶融炉の開発 炉底部要素開発(2)(試験結果①)



1. 流下性の向上

- ・高濃度の白金族元素含有ガラスの流下可能

⇒ 初期流下性(50kg/h到達)が良好

- ・流下時間は約2.5時間(推定)

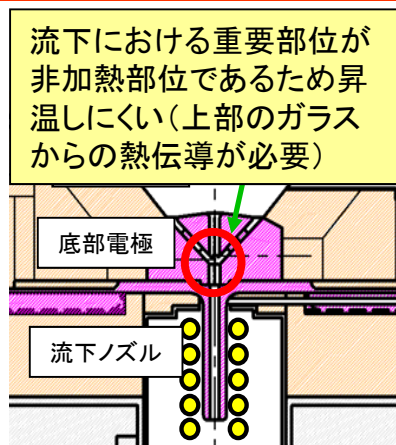
2. 加熱手段追加による効果

- ・底部電極高周波加熱により、底部電極全体を加熱可能

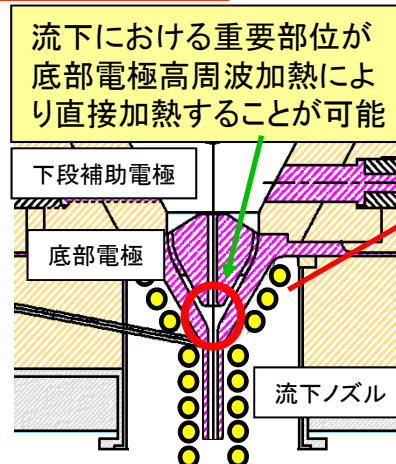
⇒ 初期流下性が安定(偏流なし)

- ・下段補助電極間通電により、底部電極直上のガラスを加熱可能

⇒ 白金族元素が堆積しても良好に流下

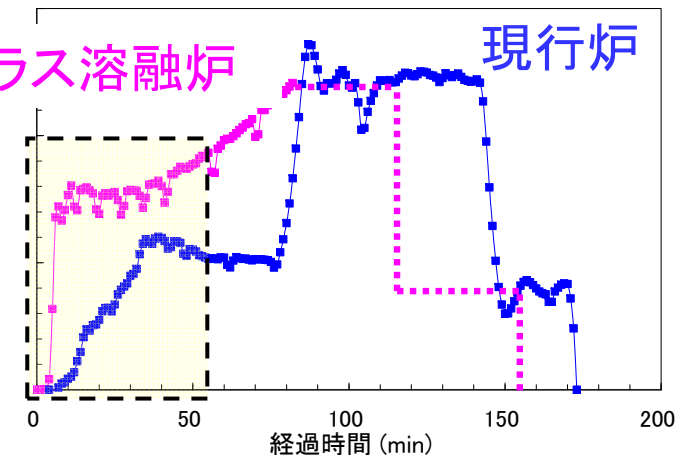


現行炉設計

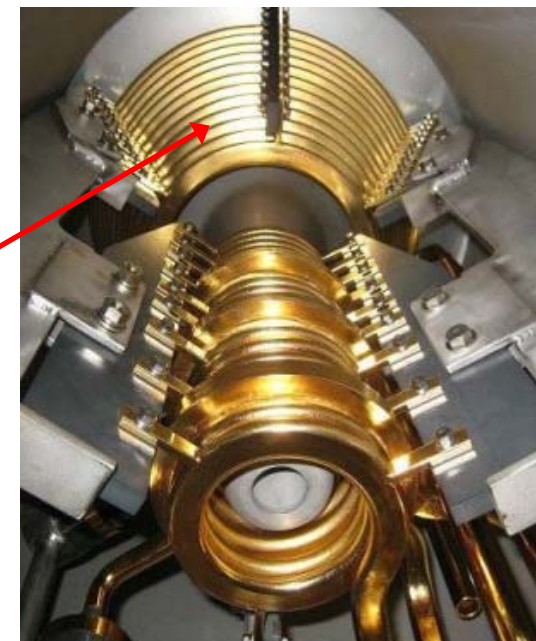


新型ガラス溶融炉設計

加熱性能の違いによる流下性への効果



流下速度到達時間への効果



3. 新型ガラス溶融炉の開発 炉底部要素開発(2)(試験結果②)



3. 白金族堆積防止効果

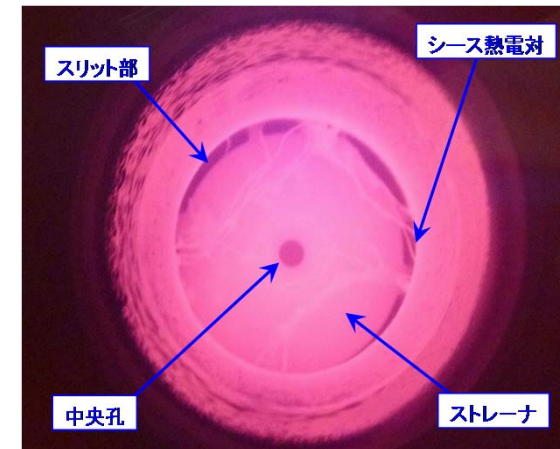
高濃度の白金族含有ガラスの流下後でも、炉底の円錐部及び底部電極上に残留ガラスなし

⇒**良好な白金族堆積防止効果**

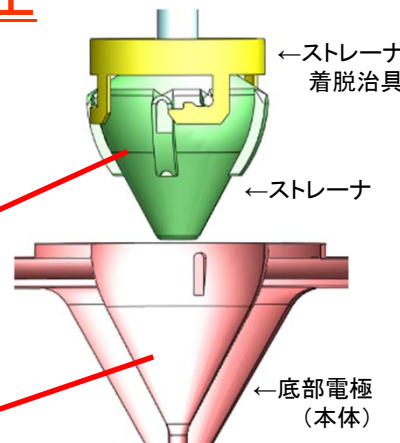
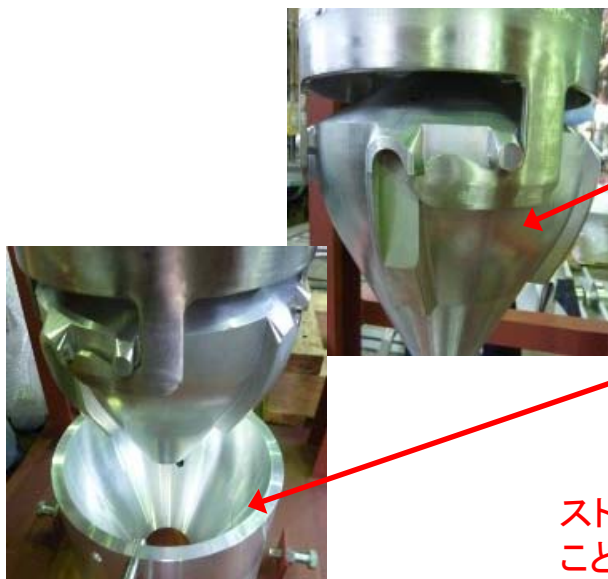
4. 白金族元素堆積時の除去性向上 (底部電極ストレーナの脱着化)

着脱治具を用いることでストレーナを着脱することが可能。

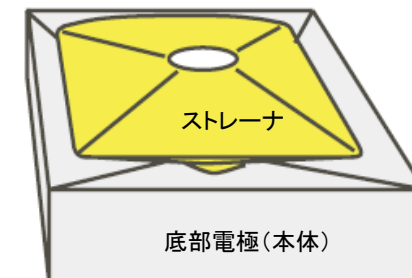
⇒**異常状態からの回復性能を向上**



流下終了後の底部電極上部の状況



新型ガラス溶融炉
ストレーナが装着治具を用いる
ことで底部電極本体から着脱可能



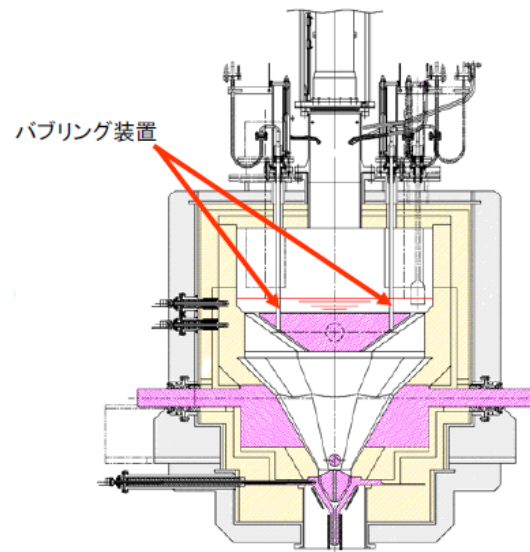
現行炉

底部電極本体とストレーナが一体
構造(削り出し加工)のため着脱不可

3. 新型ガラス溶融炉の開発 個別要素技術の開発(その他技術について)

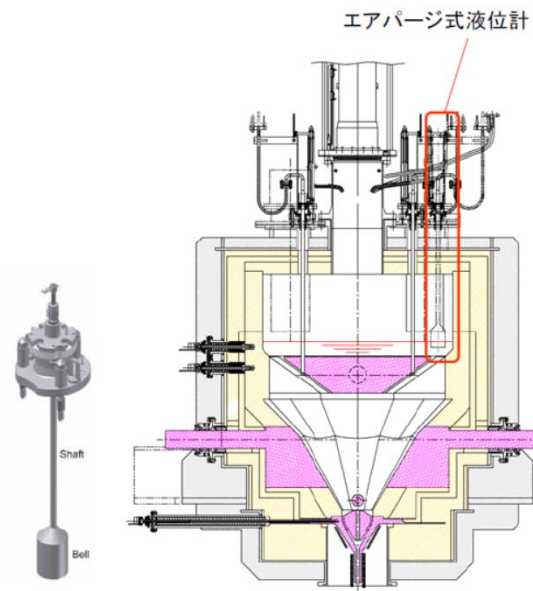


バブリング装置
(ドイツより技術導入)



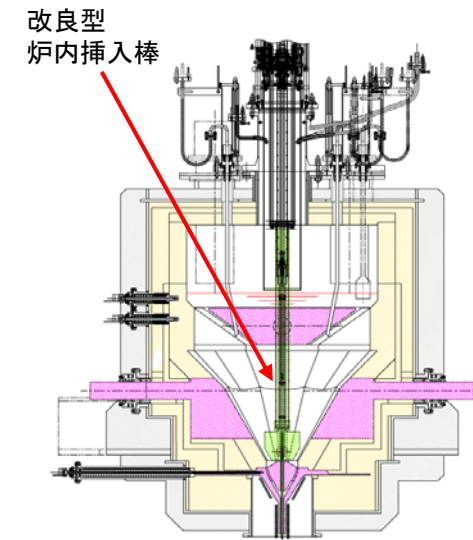
＜イエローフェーズ発生抑制＞
溶融ガラスの流動性を向上させることにより、イエローフェーズ成分の溶解性向上

新型液位計(エアパージ式)
(ドイツより技術導入)



＜運転モニタの改善＞
連続的で精度が高い液位測定

改良型炉内挿入装置
(国内技術を改良)



＜異常状態からの回復性能向上＞
より効果的な貫通性能、排出性能を有する改良型炉内挿入棒【直棒】による回復性能向上



国内外で実績のある技術をもとに新型ガラス炉へ適用

3. 新型ガラス溶融炉の開発 その他の改良点



運転モニタの改善

[ガラス液位計測法の改善]

現行炉 抵抗式液位計によるピンポイントの計測

改良炉 新型液位計(エアパージ式)による連続的計測

イエローフェーズ発生抑制

[新型ガラス素材導入/パブリング導入]

現行炉 調整液添加による発生抑制

改良炉 溶融性を改善したガラス素材の開発
パブリング装置導入

運転モニタの改善

[温度測定点の追加・最適化]

現行炉 溶融ガラス温度、気層部温度、
各電極温度等

改良炉 現行炉測定点+傾斜部温度等
(合計:46点)

温度コントロール性向上

[炉底ガラス冷却機能の強化]

現行炉 底部電極冷却系

改良炉 レンガ構造スリム化による放熱性向上
冷却ジャケット追加

異常状態からの回復性能向上

[ストレーナ脱着による白金族元素除去]

現行炉 底部電極との一体構造

改良炉 遠隔着脱式ストレーナ

異常状態からの回復性能向上

[炉内挿入棒による白金族元素除去]

現行炉 簡易的仮設挿入棒(直棒/曲棒)

改良炉 改良型炉内挿入棒

白金族元素コントロール性向上

[炉底構造・傾斜角度の変更]

現行炉 四角錐

改良炉 円錐、60°

白金族元素コントロール性向上

[白金族元素に影響を受けない加熱手段、複数化]

現行炉 主電極-底部電極間通電

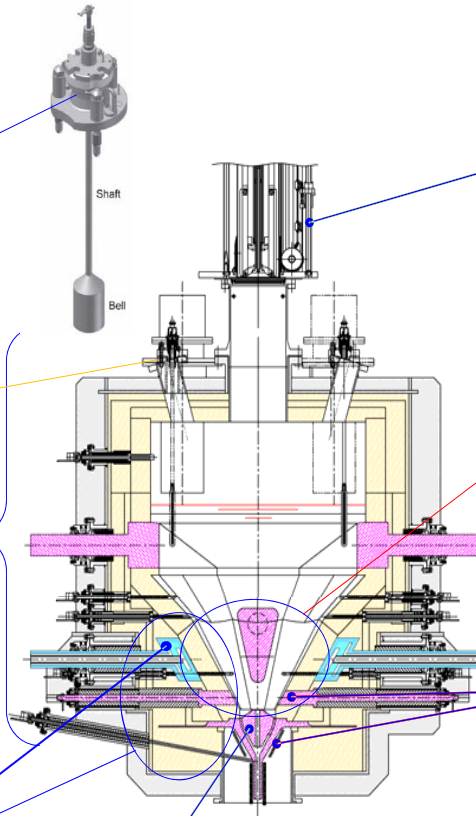
改良炉 ●底部電極高周波加熱装置追加
●下段補助電極追加
●主電極-底部電極間通電
●他複数のジュール加熱手段

白金族元素コントロール性向上

イエローフェーズ発生抑制

運転モニタの改善/温度コントロール性向上

異常状態からの回復性能向上



4. ガラス固化技術開発施設について (**RVL** : **R**okkasho **V**itirification **L**aboratory)



1. 施設の目的

- ガラス溶融炉の開発課題の解決を目的とした研究・開発
- 遠隔操作性の確証試験ならびに運転員等の教育訓練

2. 施設の概要

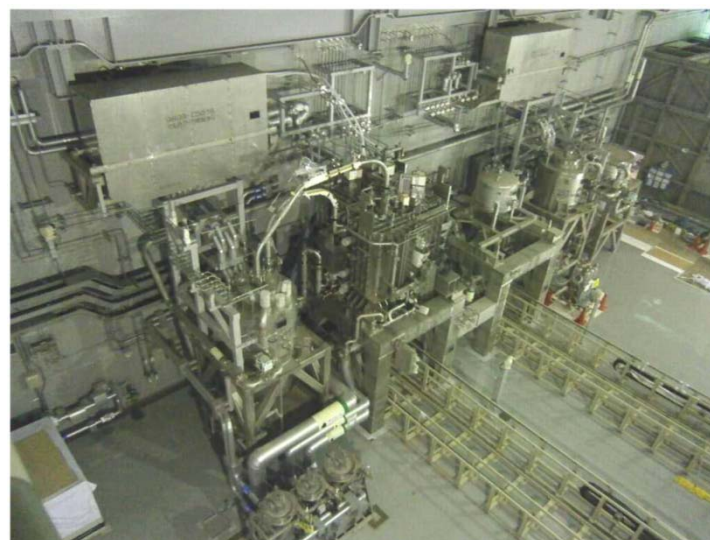
- ・敷地場所：青森県六ヶ所村
(再処理事業所敷地内)
- ・面積：約5,200m²
- ・規模：約91m × 約55m(地上5階建)
- ・しゅん工：2013年10月

<主な設備>

- ・固化セルを模擬した試験エリア
- ・遠隔保守設備
- ・溶融炉解体の模擬エリア
- ・分析設備



施設概観

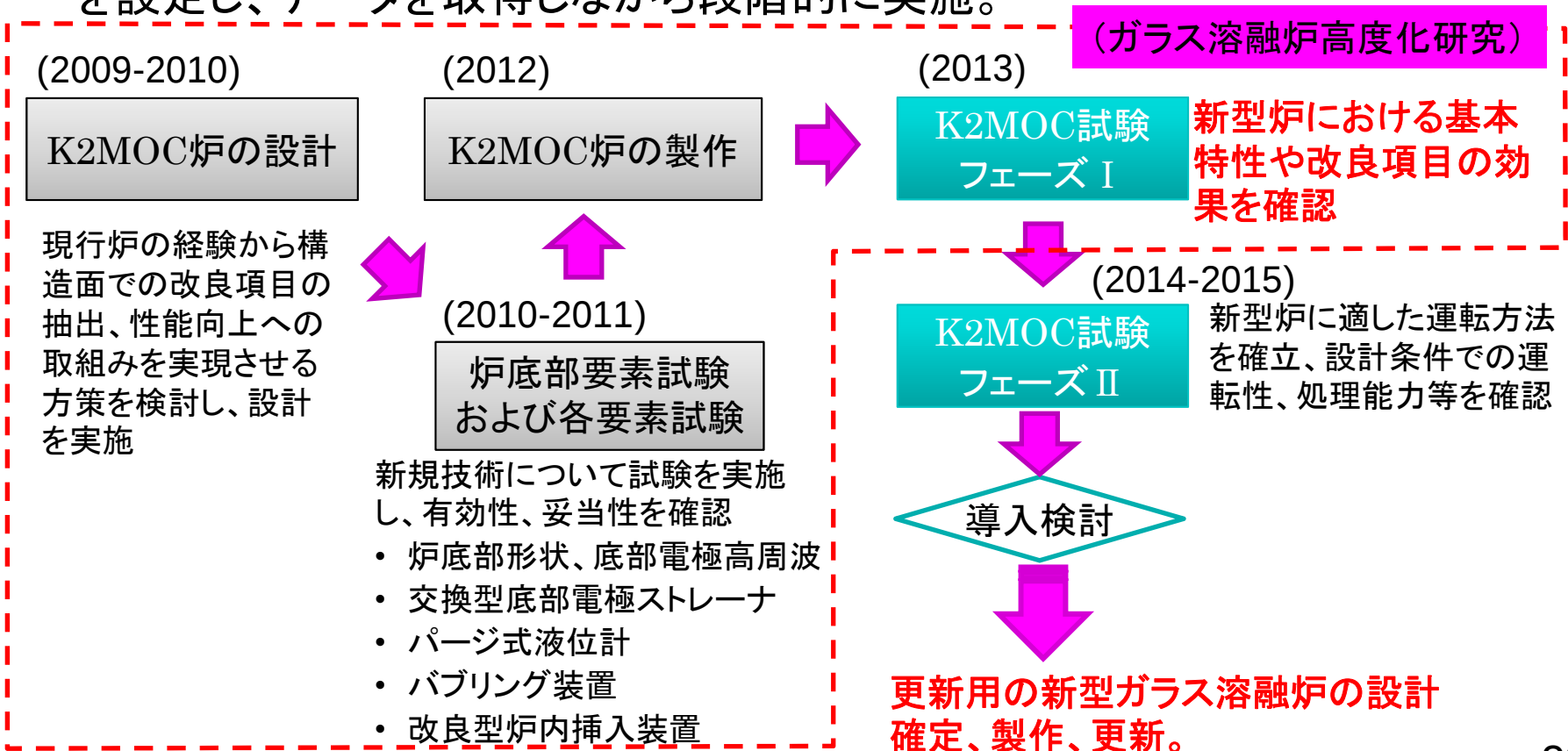


固化セル模擬室

5. 新型溶融炉のモックアップ試験 全体計画



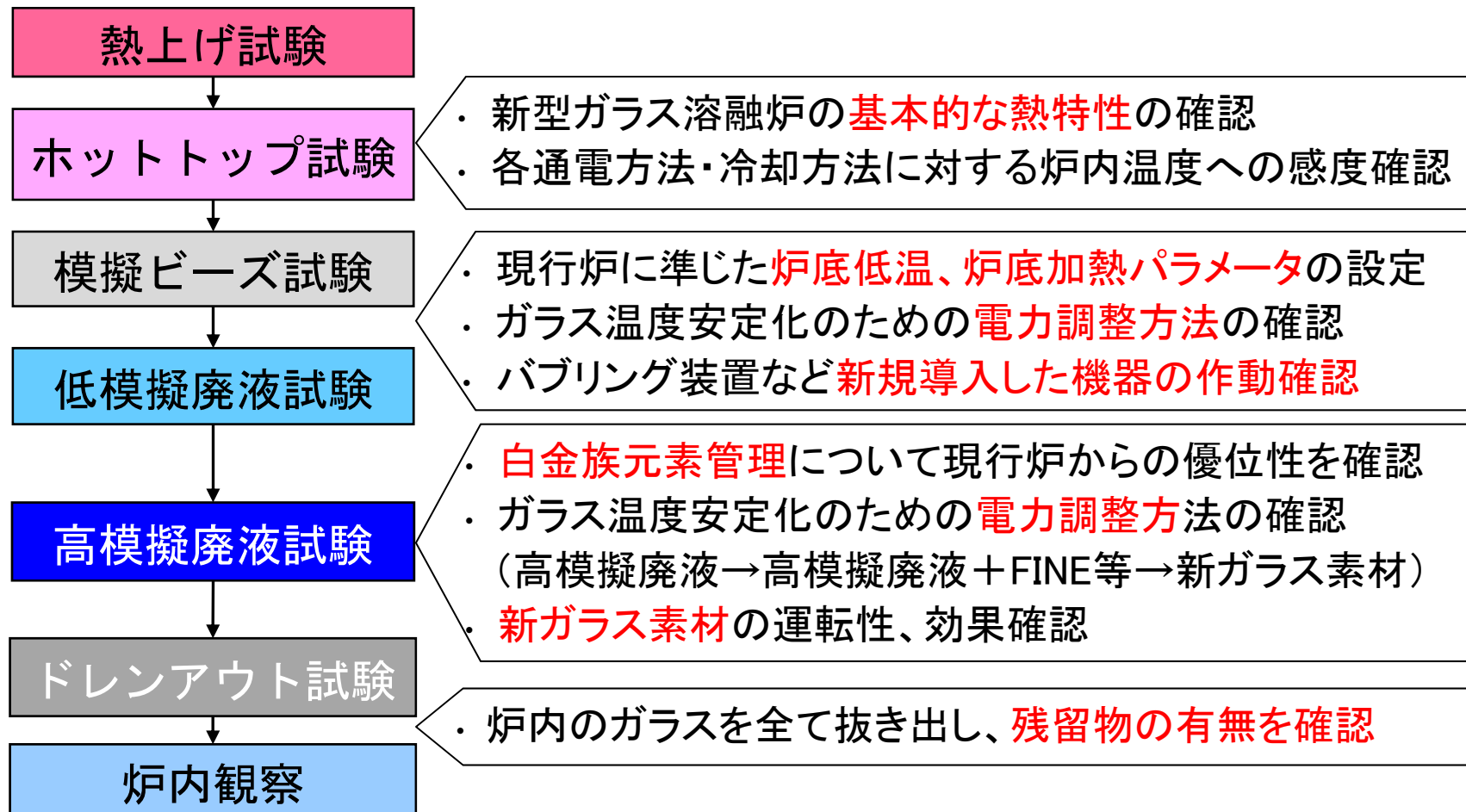
- 更新用の新型ガラス溶融炉(実機)は、現行炉の更新時期までに開発を完了させることを目標としており、試験成果を新型炉の構造に反映し、設計を確定し、製作を着手する計画である。
- 新型炉のモックアップ試験(K2MOC試験)は、目的に応じた試験フェーズを設定し、データを取得しながら段階的に実施。



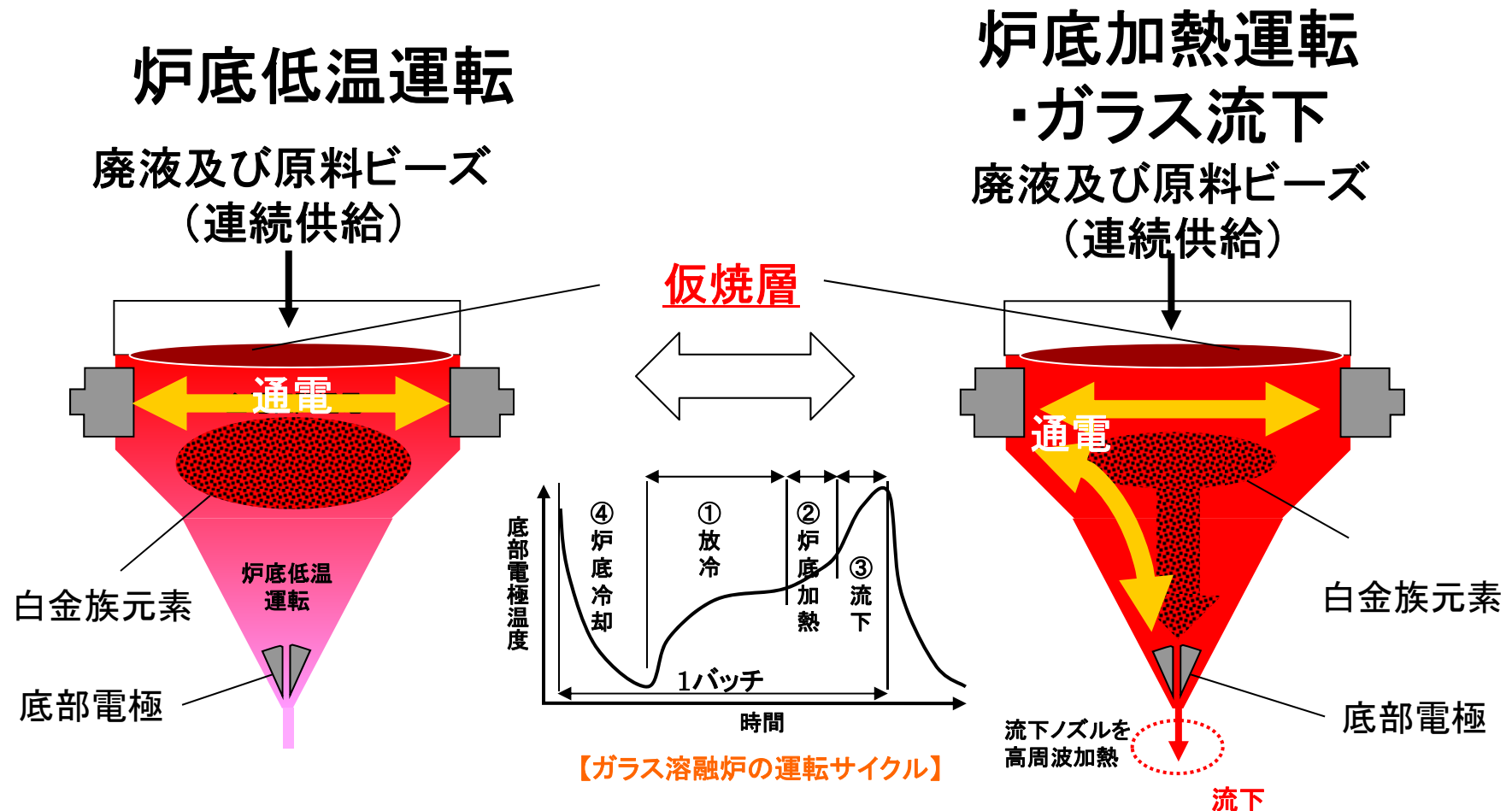
5. 新型ガラス溶融炉モックアップ試験 フェーズ I 試験計画



- ・試験は、高レベル放射性廃液の成分・組成を**非放射性の成分**により模擬したガラスビーズ(**模擬ガラスビーズ**)および廃液(**模擬廃液**)を使用
- ・段階的に新型炉の温度特性を評価しながら、温度管理・ガラス流下性等を**合計100回の流下試験**で確認



5. 新型ガラス溶融炉モックアップ試験 運転方法① -炉底加熱-



- 今回の試験では、**現行ガラス溶融炉と同様の温度分布と炉底低温運転**を実施することで、現行炉に対する新型炉の優位性を評価
- 開発した解析コードを用い、炉内の温度変化等を事前に解析。

5. 新型ガラス溶融炉モックアップ試験 試験結果① -温度管理-

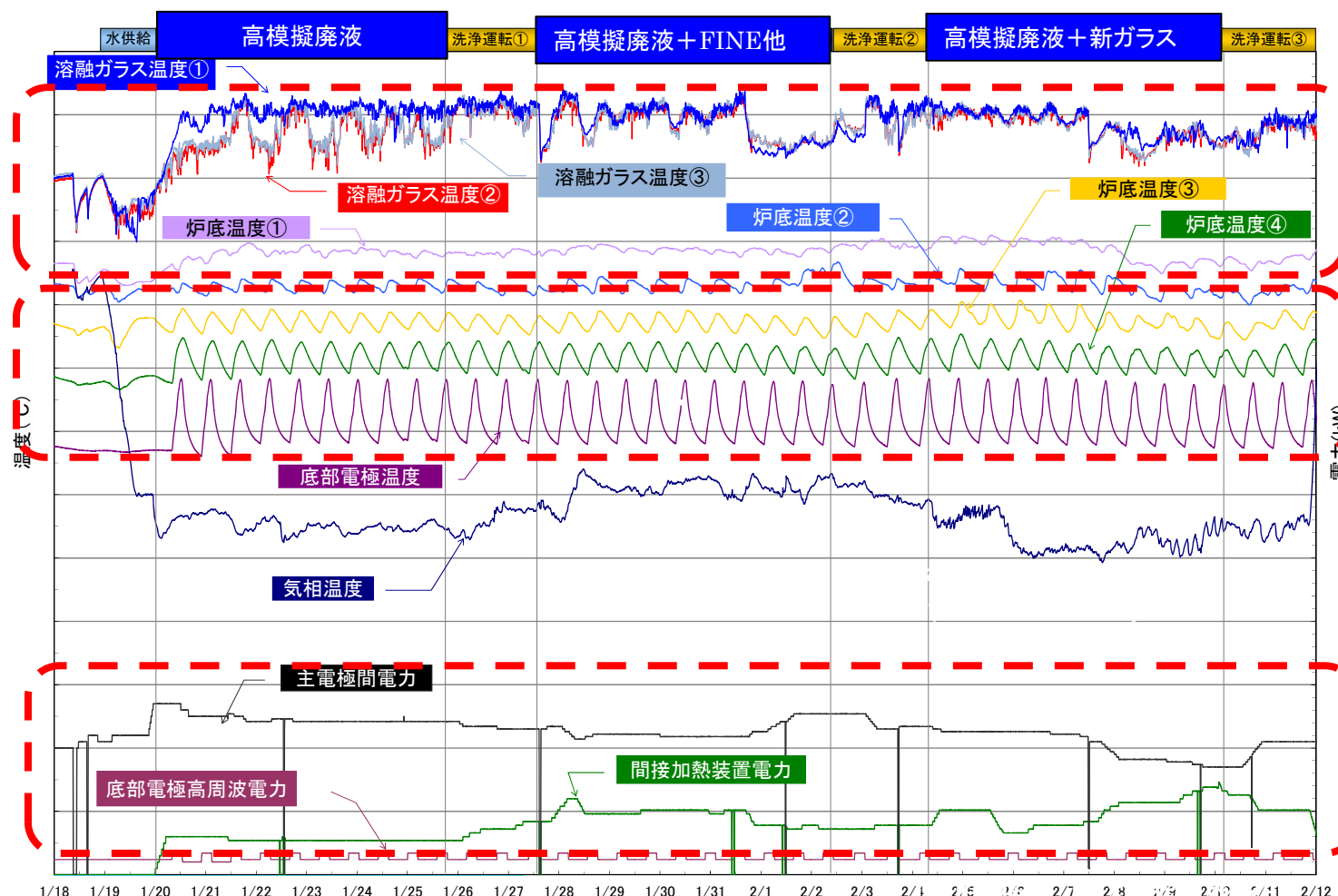


主電極間電力、間接加熱電力、底部電極高周波電力を調整し、ガラス温度および気相温度を目標温度に調整

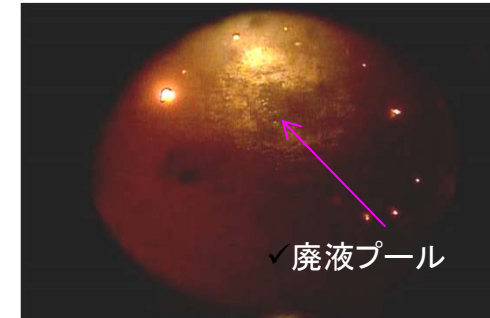
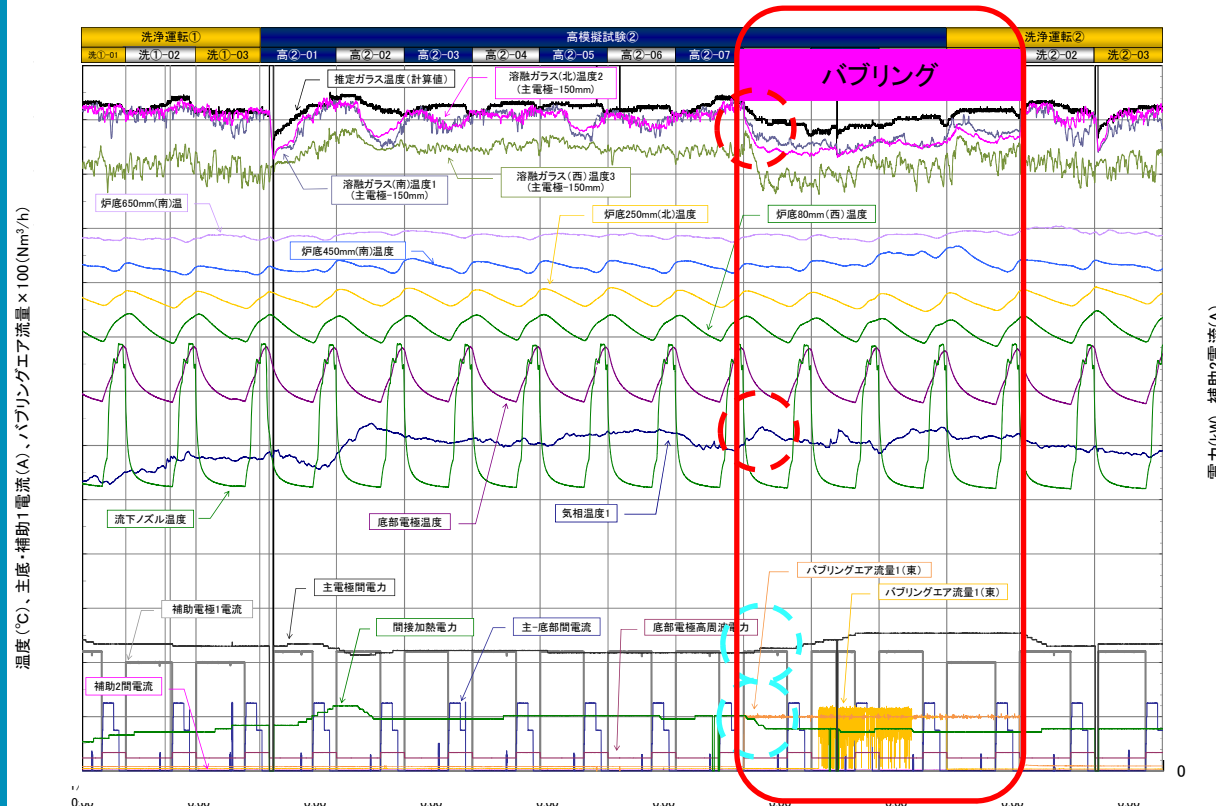
溶融ガラス温度(炉上部)

溶融ガラス温度(炉底部)

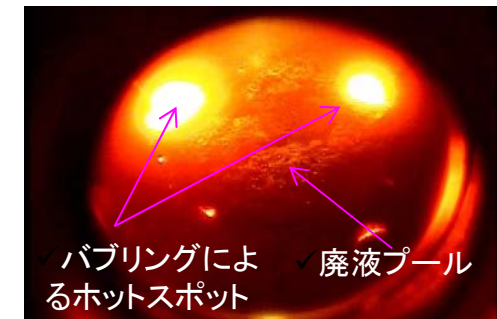
電力調整



5. 新型ガラス溶融炉モックアップ試験 試験結果① -バブリング-



高模擬②-07バッチ(バブリングなし)



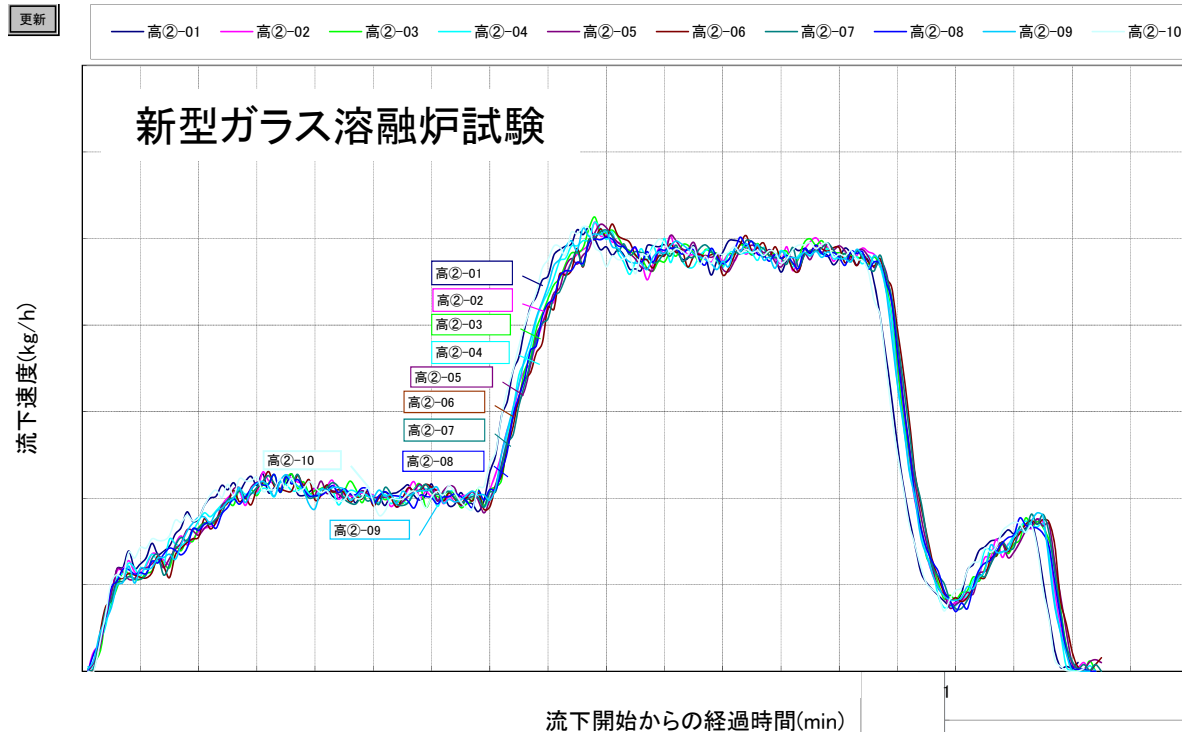
高模擬②-09バッチ(バブリングあり)

- バブリングによる大きなホットスポットが形成
- 溶融ガラスから気相部への熱逃げにより、ガラス温度が低下、気相温度が上昇したことから、主電極間電力の上昇および間接加熱電力の低下を実施
- その結果、間接加熱電力は、バブリング実施前と比較し低下。
⇒ バブリングによる処理能力の向上(廃液供給速度の増加)が見込める

5. 新型ガラス溶融炉モックアップ試験 試験結果② -流下性-

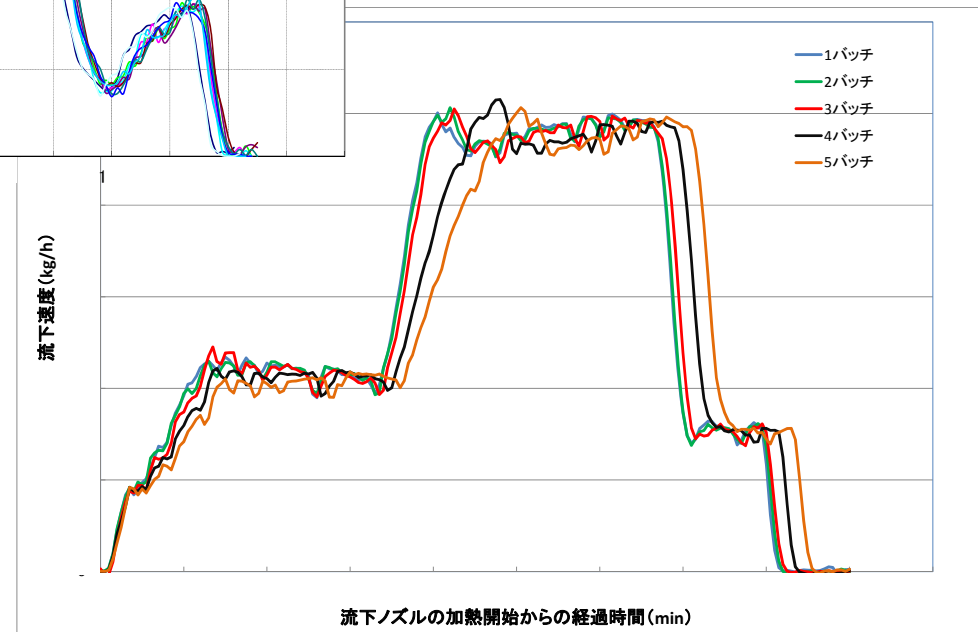


更新



流下開始からの経過時間(min)

- ガラス固化体1本分(約400kg)の流下時の流下速度についても、悪化することなく、安定した流下速度で流下できることを確認
- 流下初期速度 50kg/h到達時間も流下開始から数分程度であり、現行炉と比較しても良好な抜き出しを実現している。



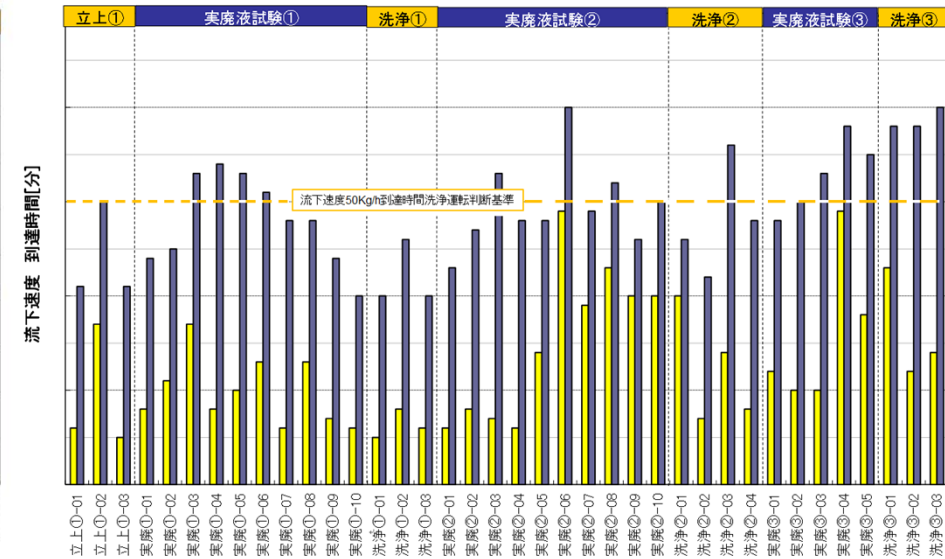
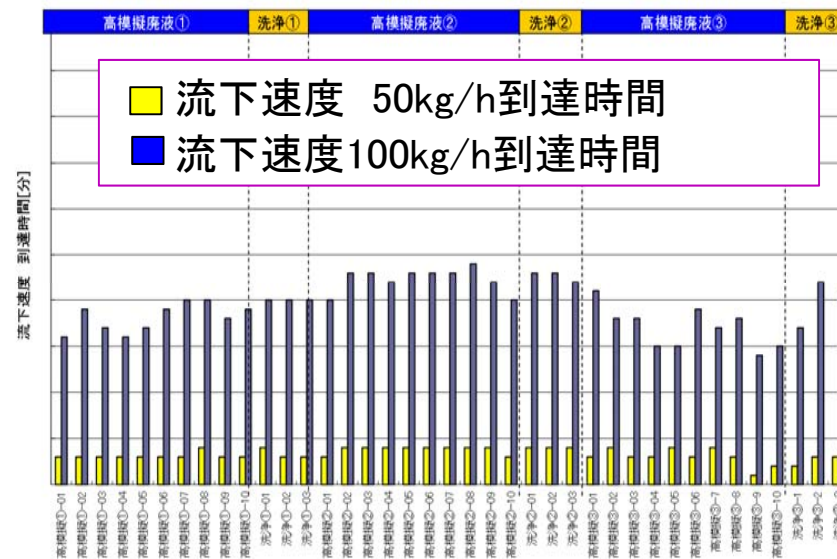
流下ノズルの加熱開始からの経過時間 (min)

KMOC試験

5. 新型ガラス溶融炉モックアップ試験 試験結果③ -白金族管理-



ガラス流下時の流下速度50kg/h、100kg/h到達時間の変化



新型ガラス溶融炉モックアップ試験

- 新型炉モックアップ試験は、流下速度到達時間が短く、流下回数を重ねても変化が少ない
⇒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がない

【参考】再処理工場ガラス溶融炉 A系列
ガラス固化試験（2013年5月）

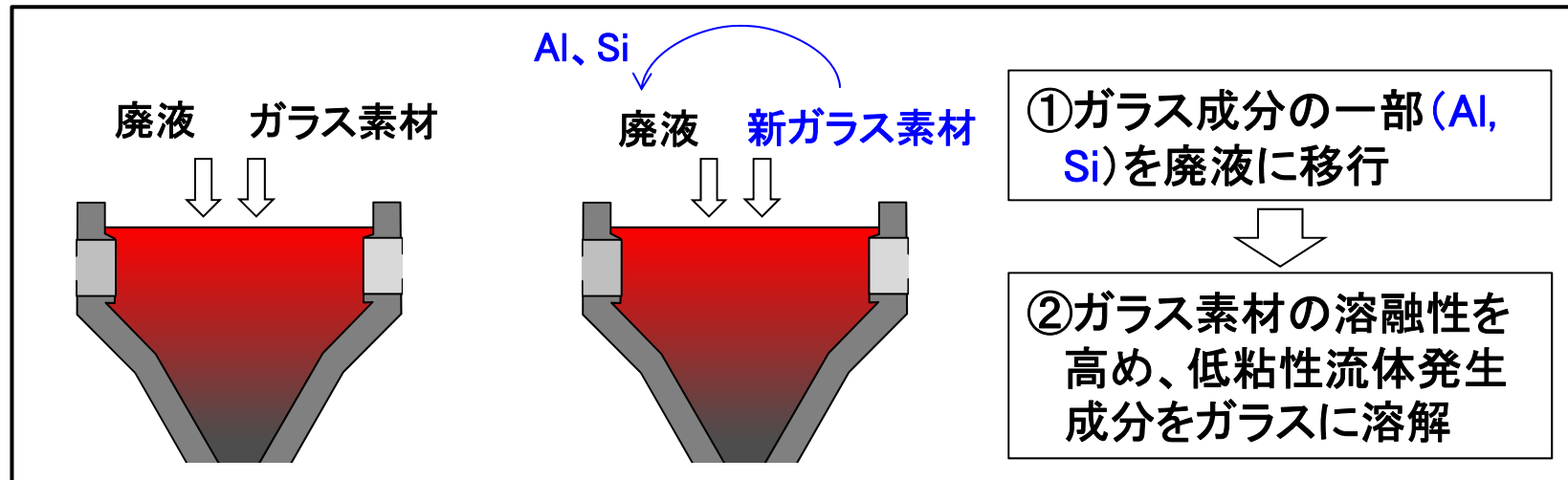


ガラス流下のイメージ

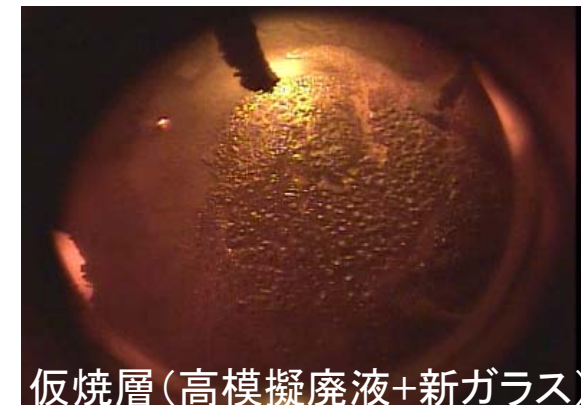
5. 新型ガラス溶融炉モックアップ試験 試験結果④ -新ガラス素材-



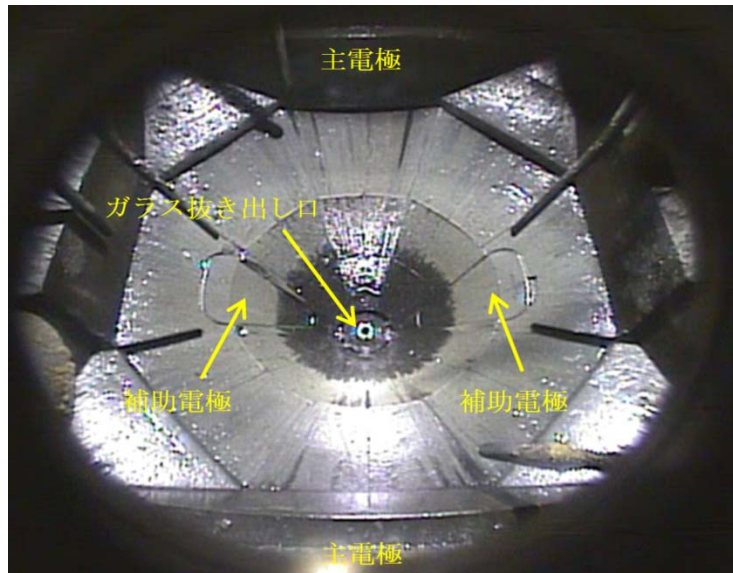
- 低粘性流体の発生を抑制を図ることを目的に新ガラス素材を開発



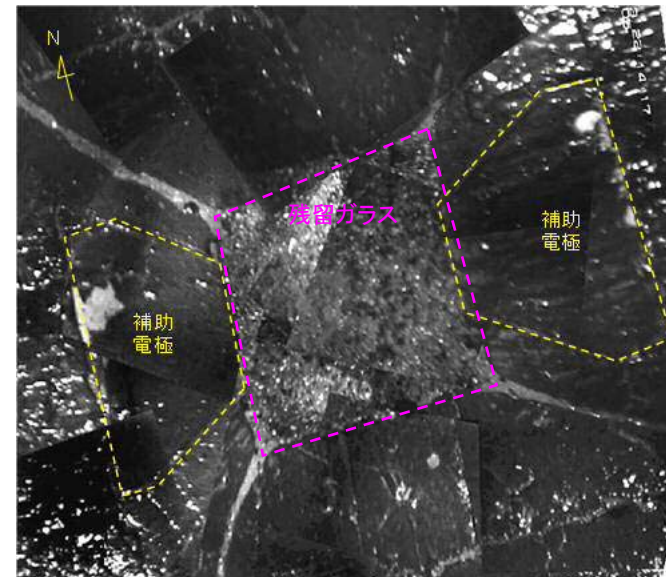
- 高模擬廃液と新ガラス素材の試験では、
⇒従来のガラス素材と同様に、主電極間電力、間接加熱電力を調整し、ガラス温度および気相温度を目標温度に調整
⇒一方、低粘性流体の発生を抑制する効果を確認できず、運転・供給方法の再検討が必要



5. 新型ガラス溶融炉モックアップ試験 試験結果⑤ -ドレンアウト試験-



ドレンアウト後の炉内観察結果
(日本原燃HPより)



(参考)
実機B系ガラス固化試験後の炉内
観察結果 (日本原燃HPより)

- 新型ガラス溶融炉モックアップ試験では、ドレンアウト試験終了後に炉内を観察した結果、**炉内に残留物は確認されなかった。**

5. 新型ガラス溶融炉モックアップ試験 フェーズⅡ試験計画

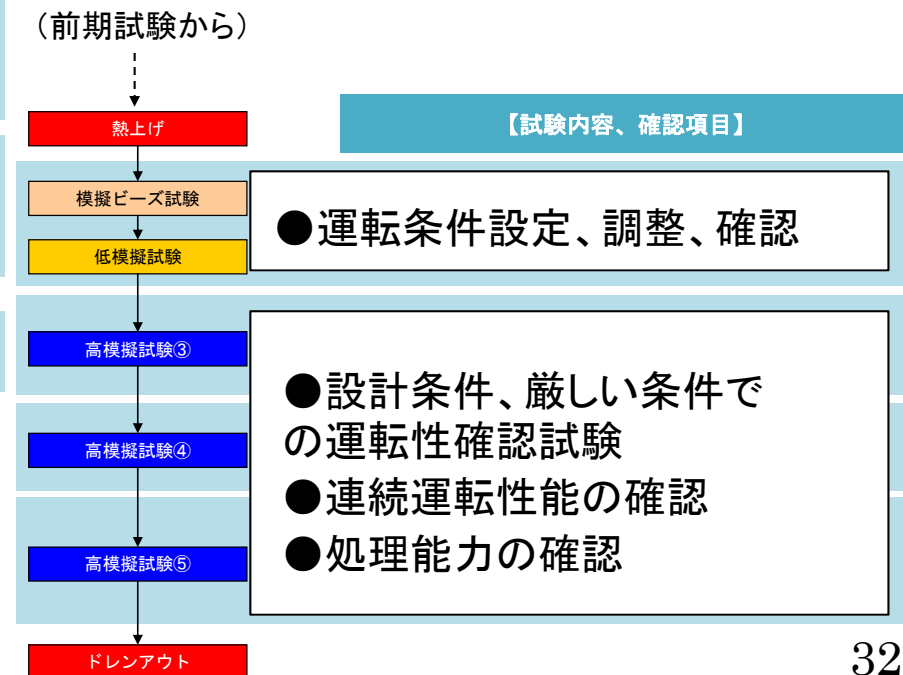


- ・ フェーズⅡは2014年11月～5月頃にかけて実施する予定。
- ・ 前期試験と後期試験に分け、それぞれ熱上げ～ドレンアウトを実施する。
- ・ 長期の安定した継続運転
- ・ 設計条件、より厳しい条件での運転(安定運転を阻害する条件)

前期試験



後期試験



6. まとめ



【モックアップ試験結果のまとめ】

- 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に調整することができた。また、現行炉と同様に安定した炉底低温運転を実施することができた。
- 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。
- ドレンアウト試験後、炉内のガラスは全て排出されており、残留物も確認されなかった。

⇒研究開発したガラス固化技術の有効性が確認

【今後の予定】

- 溶融炉の連続・安定運転等の処理能力の一層の向上などを目的とした第二段(フェーズⅡ)の試験を実施中。2014年11月17日からモックアップ炉の熱上げを開始し、2015年5月まで実施する予定である。

謝辞



本研究は、経済産業省「使用済燃料再処理事業高度化補助金」(2009年～2013年)の交付を受け、日本原燃(株)が実施した補助事業の成果である。