

高レベル放射性廃液ガラス固化技術の現状と開発状況

2016年8月3日

日本原燃株式会社 再処理事業部 エンジニアリングセンター 技術開発研究所

兼平憲男



日本原燃株式会社

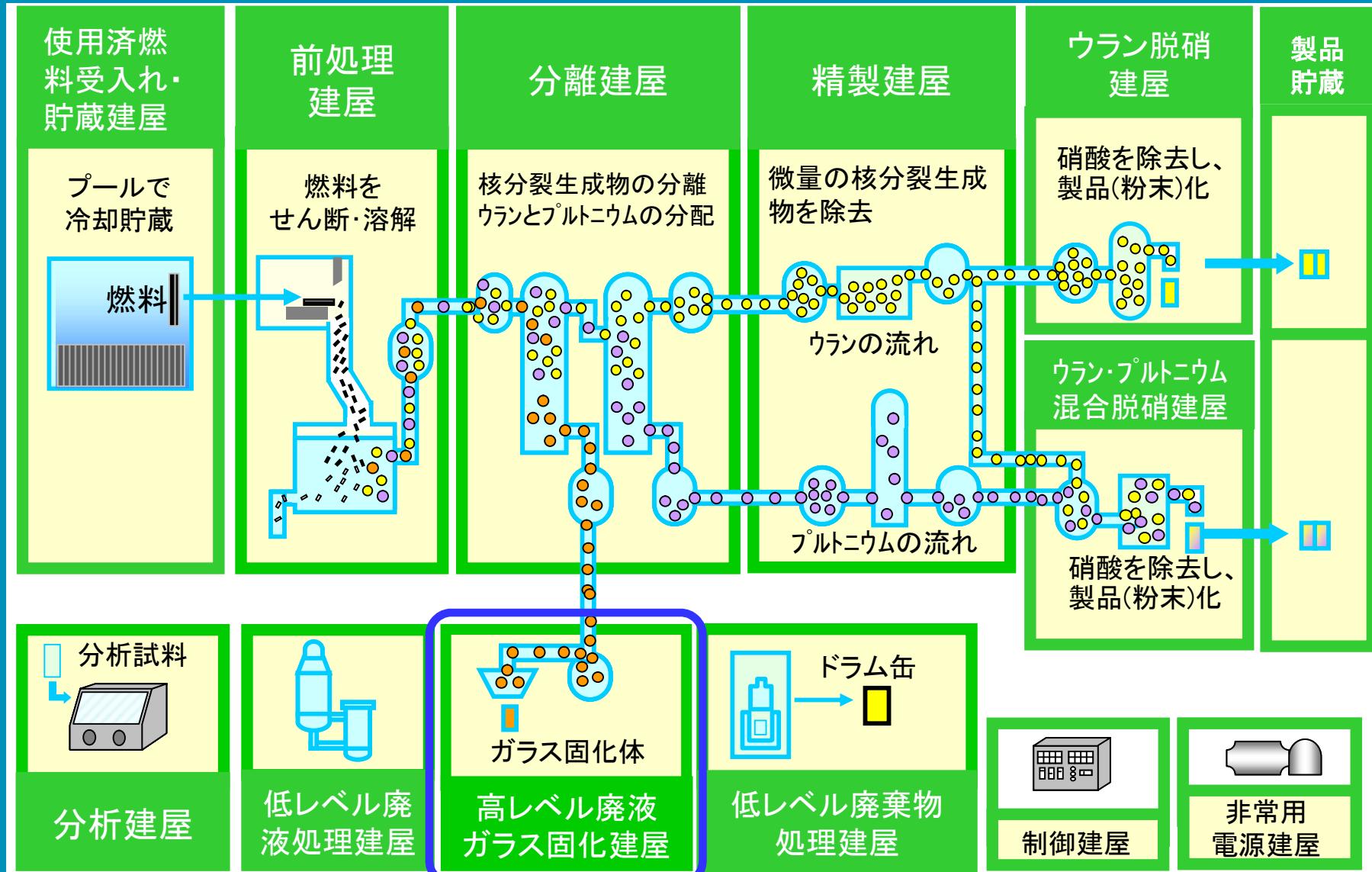
目 次



- ・ 六ヶ所再処理工場におけるガラス固化試験結果について
 1. 六ヶ所再処理工場およびガラス固化設備について
 2. ガラス固化設備の試運転とガラス溶融炉の運転について
 3. ガラス溶融炉の運転について
 4. ガラス固化設備のアクティブ試験の経緯と改善について
- ・ 新型ガラス溶融炉の開発状況について
 5. 新型ガラス溶融炉の開発
 6. 実規模モックアップ試験
 7. 新型ガラス溶融炉の開発 まとめ

1. 六ヶ所再処理工場およびガラス固化設備について

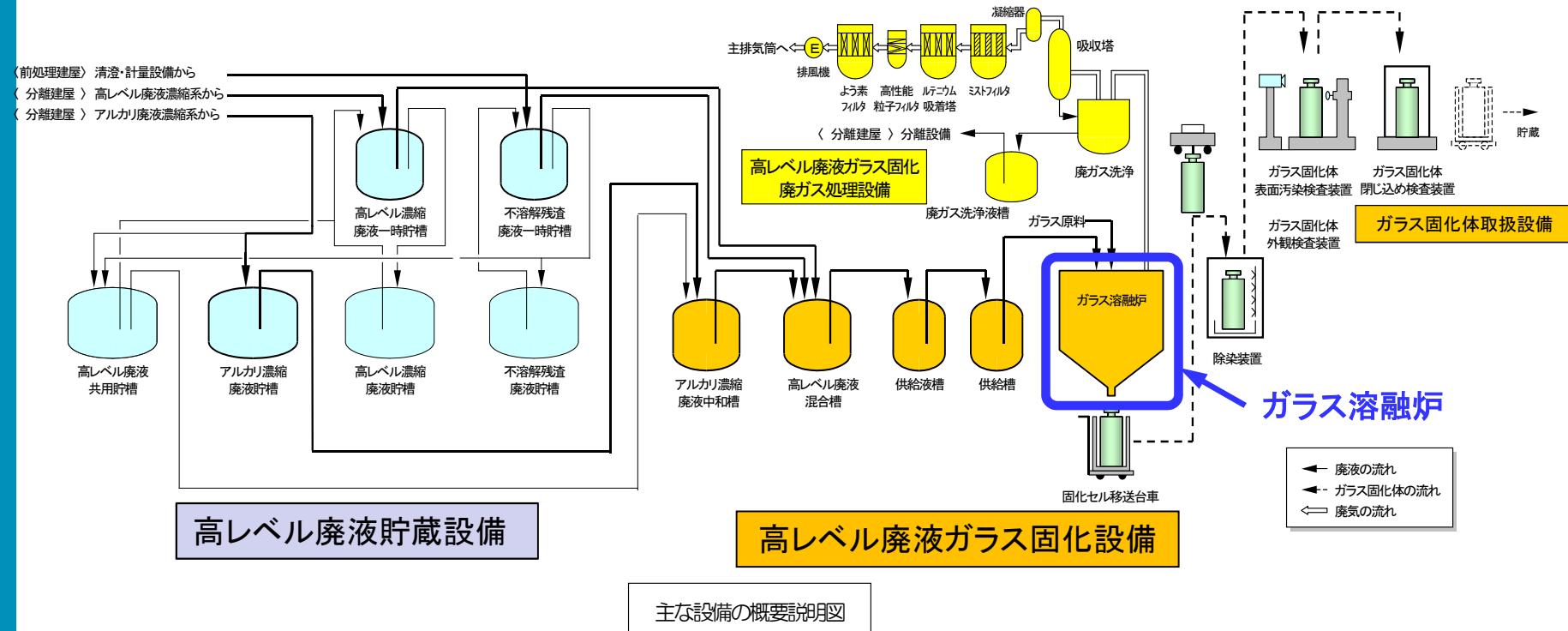
(1) 六ヶ所再処理工場の全体工程について



1. 六ヶ所再処理工場およびガラス固化設備について

(2) ガラス固化設備の工程について

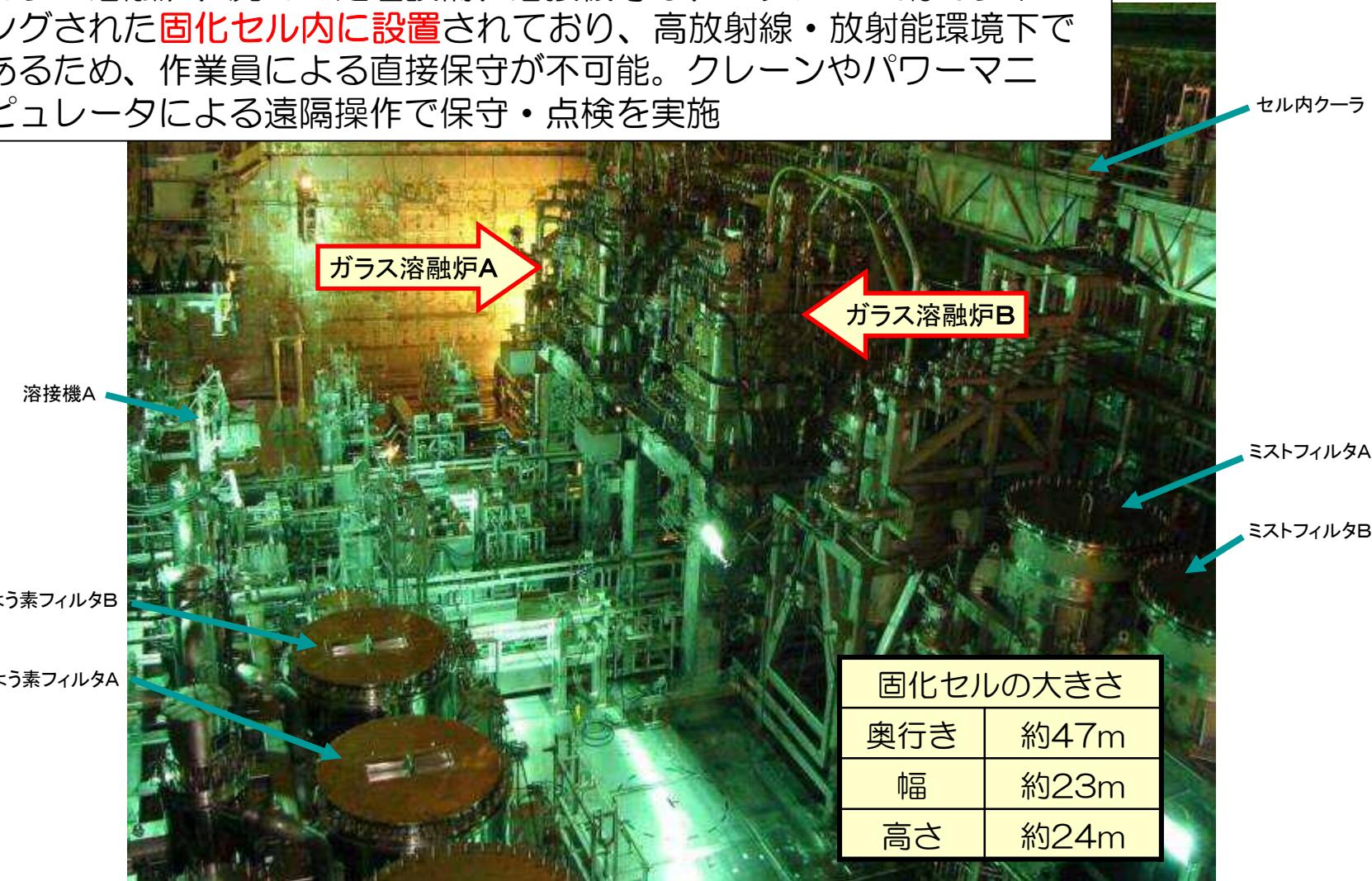
- 高レベル廃液ガラス固化設備は、高レベル廃液（高レベル濃縮廃液、アルカリ濃縮廃液、不溶解残渣廃液）とガラス原料を溶融し、ガラス固化体を製造・検査する設備
- ガラス溶融炉、廃ガス処理設備、溶接機等は、ステンレス鋼でライニングされた固化セル内に設置されており、クレーンやパワーマニピュレータによる遠隔操作で保守・点検を実施



1. 六ヶ所再処理工場およびガラス固化設備について

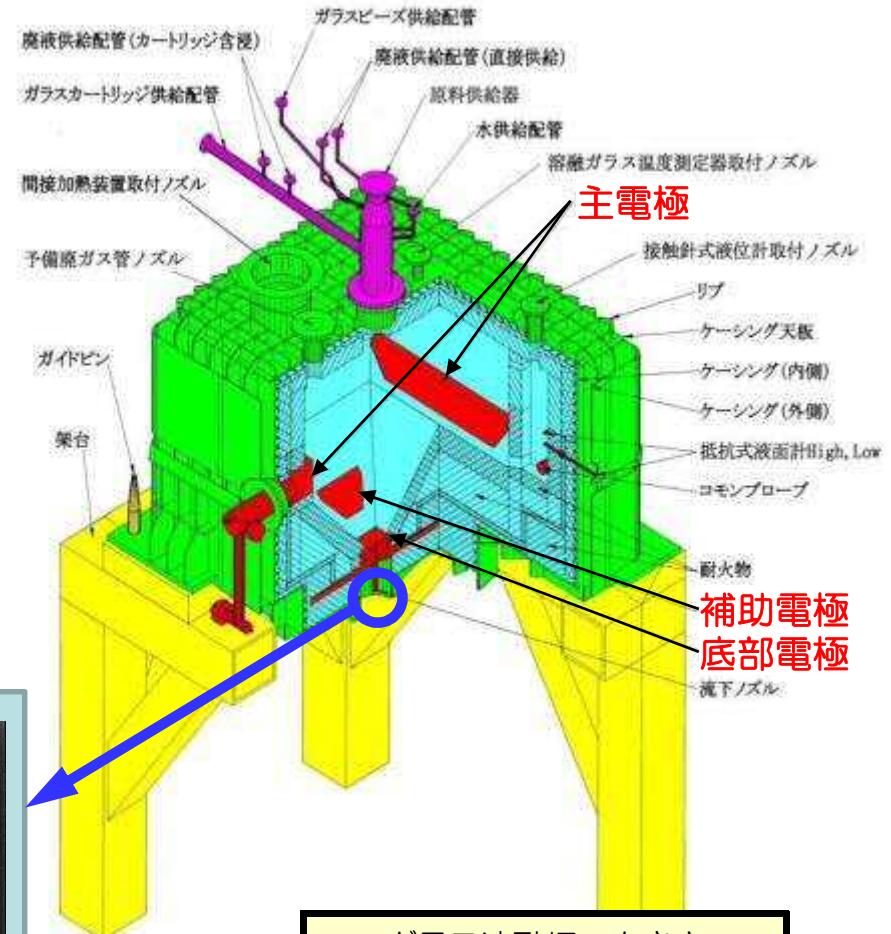
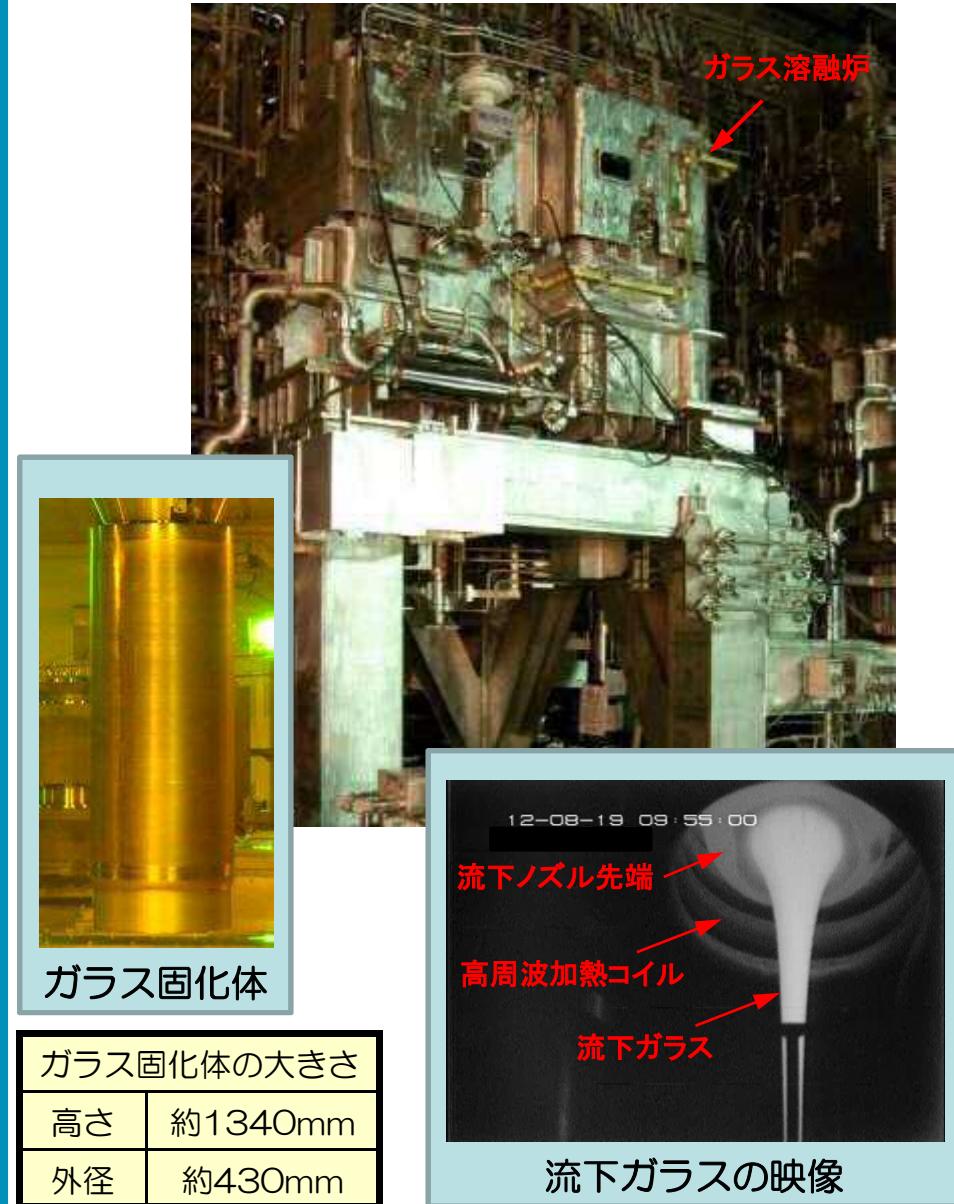
(3) ガラス固化セルの特徴

ガラス溶融炉、廃ガス処理設備、溶接機等は、ステンレス鋼でライニングされた**固化セル内に設置**されており、高放射線・放射能環境下であるため、作業員による直接保守が不可能。クレーンやパワーマニピュレータによる遠隔操作で保守・点検を実施



1. 六ヶ所再処理工場およびガラス固化設備について

(4) ガラス溶融炉の設計



ガラス溶融炉の大きさ	
奥行き	約3m
幅	約3m
高さ(架台除く)	約3m

2. ガラス固化設備の試運転とガラス溶融炉の運転について

(1) ガラス固化設備の試運転



【再処理工場の試運転】

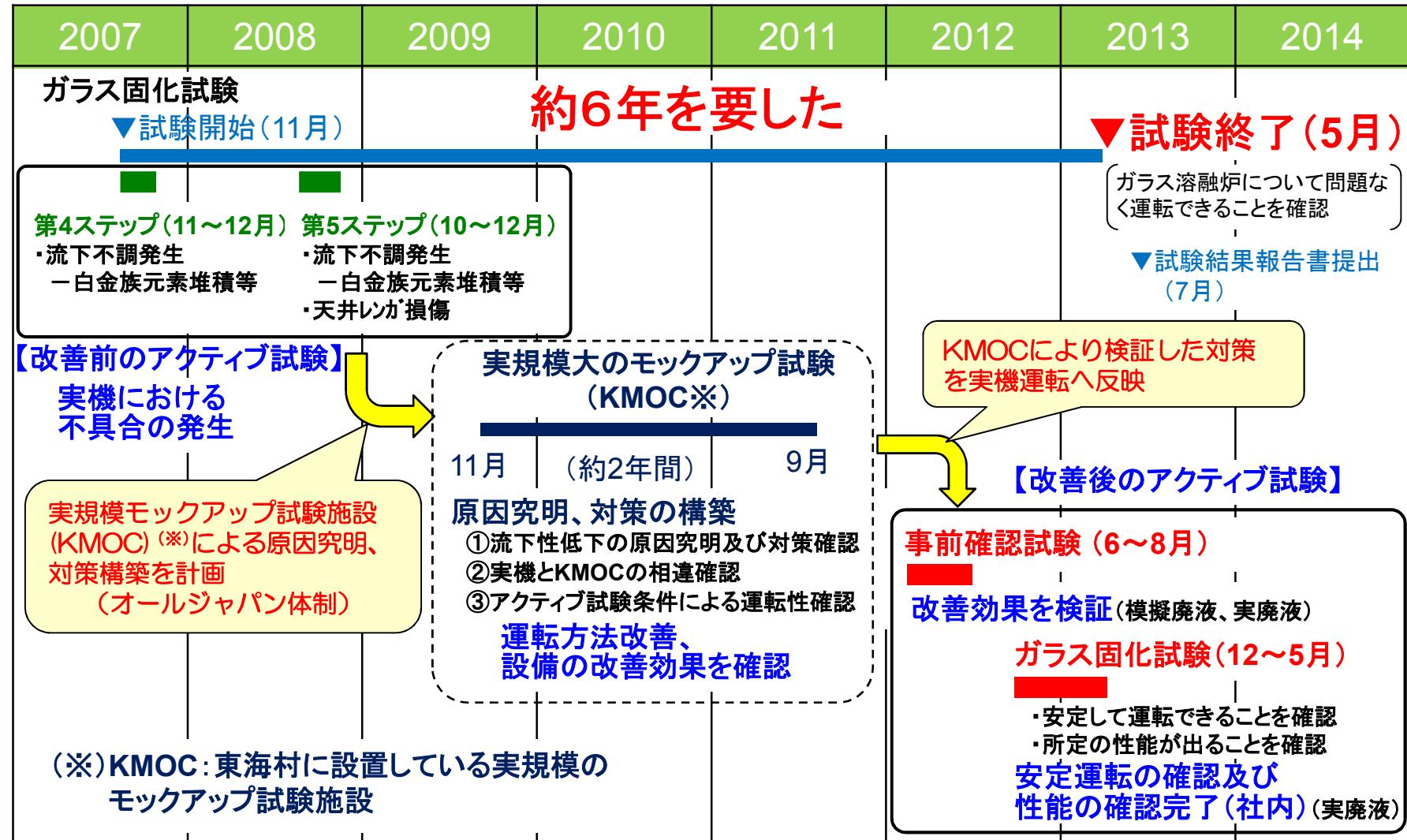
2001. 4	2004. 9	ガラス固化設備の各ステップにおける確認内容
試験	確認内容	
通水作動試験	・蒸気・圧縮空気等のユーティリティと水を用いて、プロセス配管、塔槽類、液移送機器、計測制御機器の機能確認等を実施 ・ガラス溶融炉付属設備の単体作動確認	
化学試験	・模擬廃液を用いたガラス固化体の製造試験を実施し、ガラス固化施設の機能確認を実施 ・ガラス固化体取扱設備も含め、最大処理速度でのガラス溶融炉2系列運転の成立性を確認	
ウラン試験	・ガラス固化施設では対象の試験なし	
アクティブ試験	・高レベル廃液を用いたガラス固化体の製造試験を実施 ・ガラス溶融炉の安定運転性能の確認および処理能力の確認（使用前検査の自社検査）を実施	

2002. 11 ↓ 2005. 12

2004. 12 ↓ 2006. 1

2006. 3 ↓ 実施中

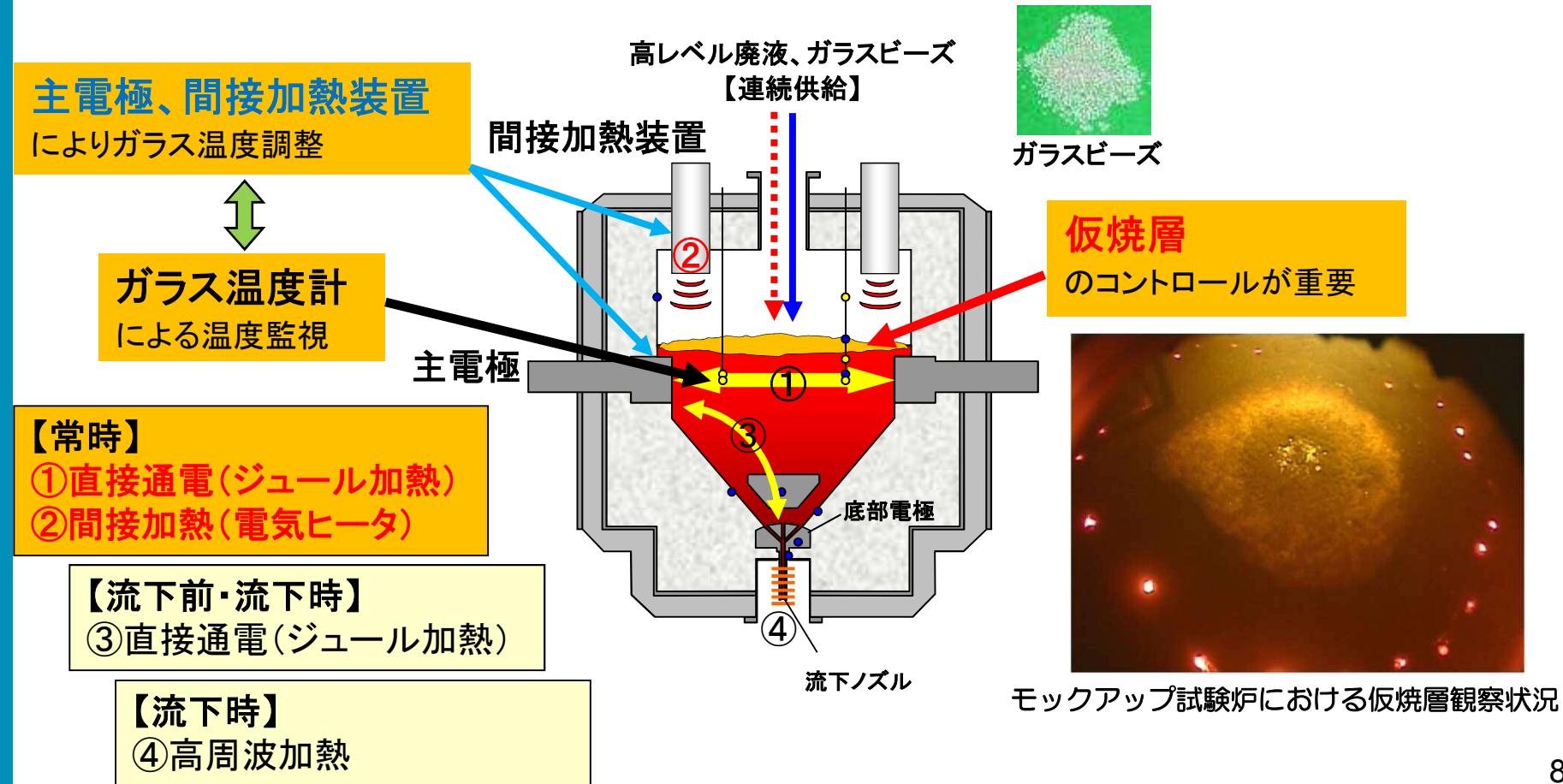
2. ガラス固化設備の試運転とガラス溶融炉の運転について (2) アクティブ試験の経緯



3. ガラス溶融炉の運転について

(1) ガラス溶融炉運転のポイント①(炉内温度、仮焼層管理)

- 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、温度制御には仮焼層のコントロールが重要



3. ガラス溶融炉の運転について (2) ガラス溶融炉運転のポイント②(白金族管理)

ガラス原料

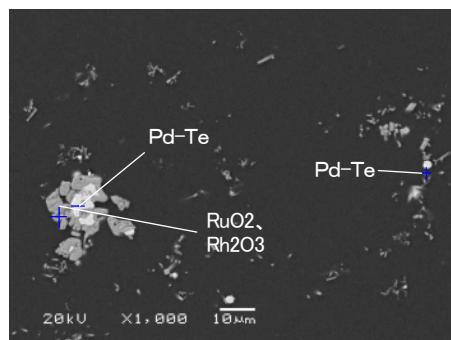
Si、B、Al、Naなど

高レベル放射性廃液

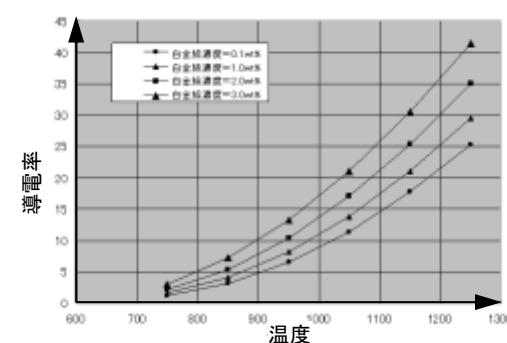
Na、Zr、Mo、Cs、Ba、
Ru、Rh、Pd、ランタノイド、
U、アクティノイド等

白金族元素

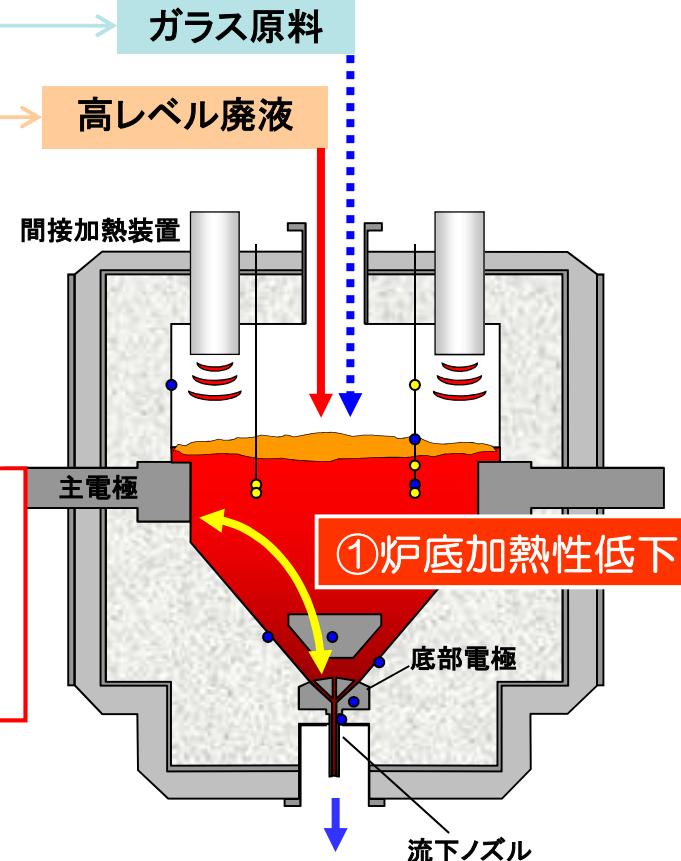
- ・ガラスへの溶融性が小さい
- ・ガラスより密度が大きいため、沈降しやすい
- ・濃度増加（沈降・堆積）によるガラス粘性上昇
- ・導電率上昇（抵抗低下）による加熱性能の低下



ガラス中の白金族元素の存在状態(例)

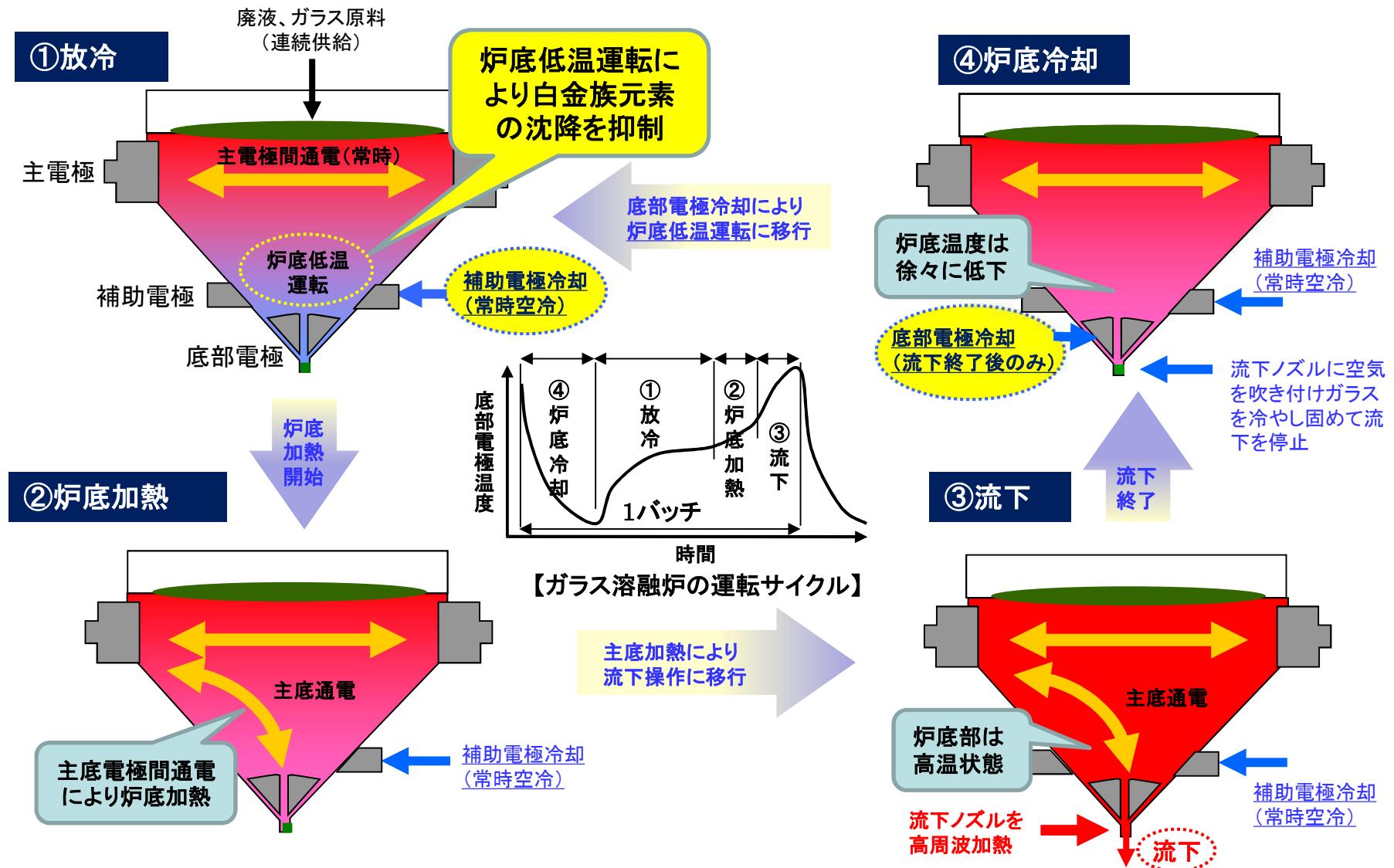


白金族元素濃度と導電率の関係



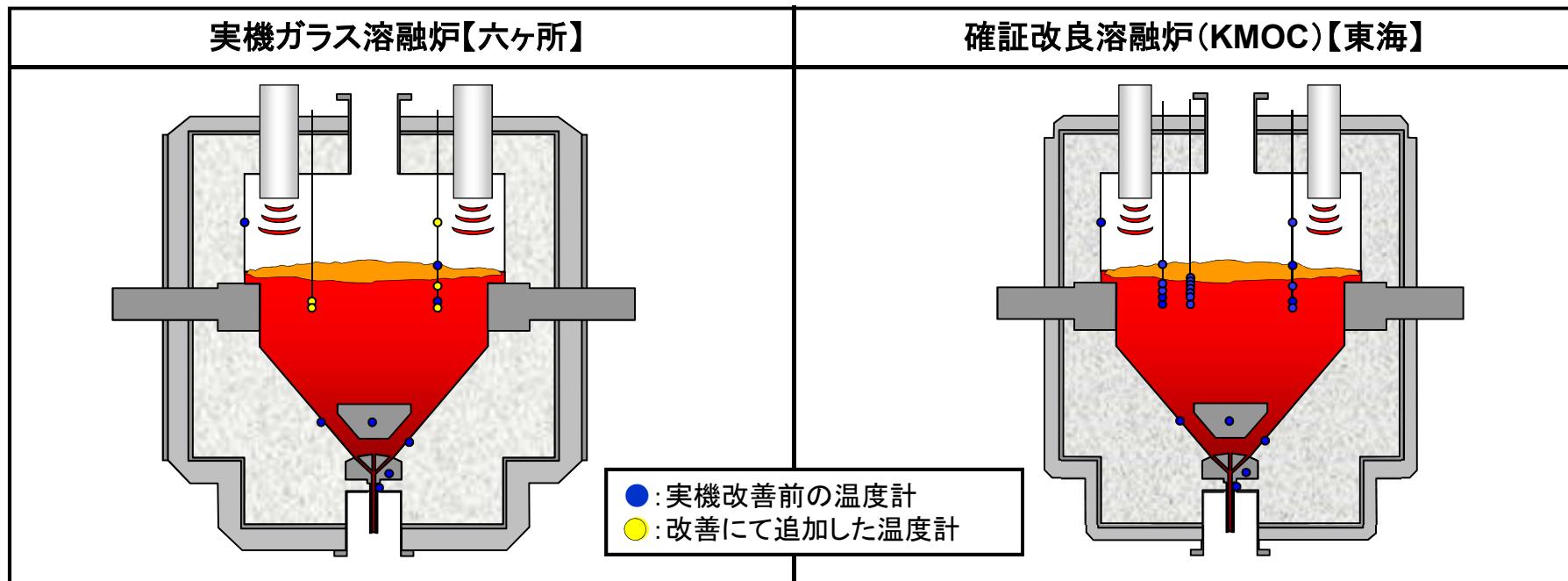
②流下性低下

3. ガラス溶融炉の運転について (3) ガラス溶融炉運転のポイント③(炉底温度管理)



4. ガラス固化設備のアクティブ試験の経緯と改善について (1) 原因究明および対策 実規模大のモックアップ試験(KMOC)①

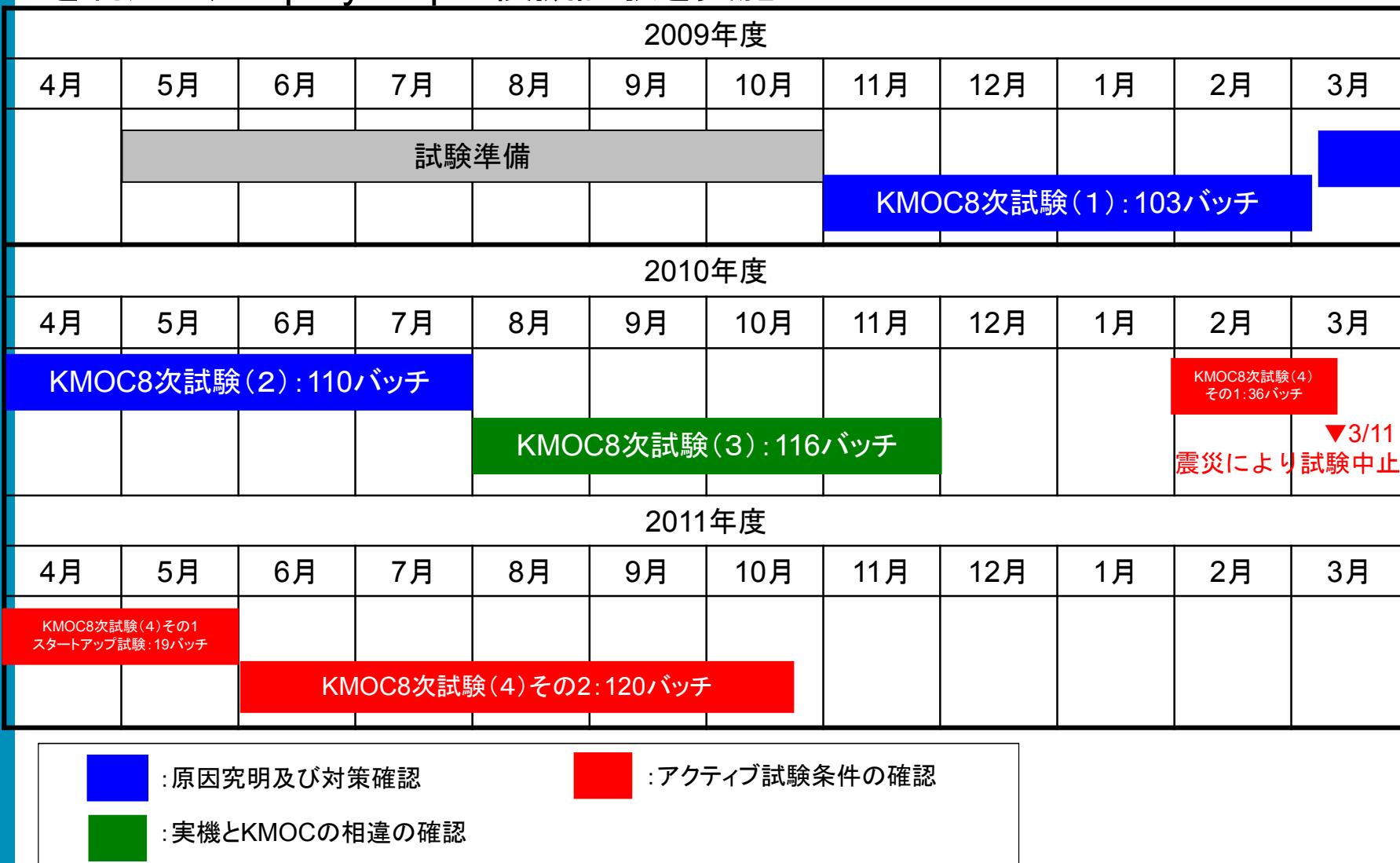
(KMOC; 実規模大のガラス溶融炉モックアップ設備)



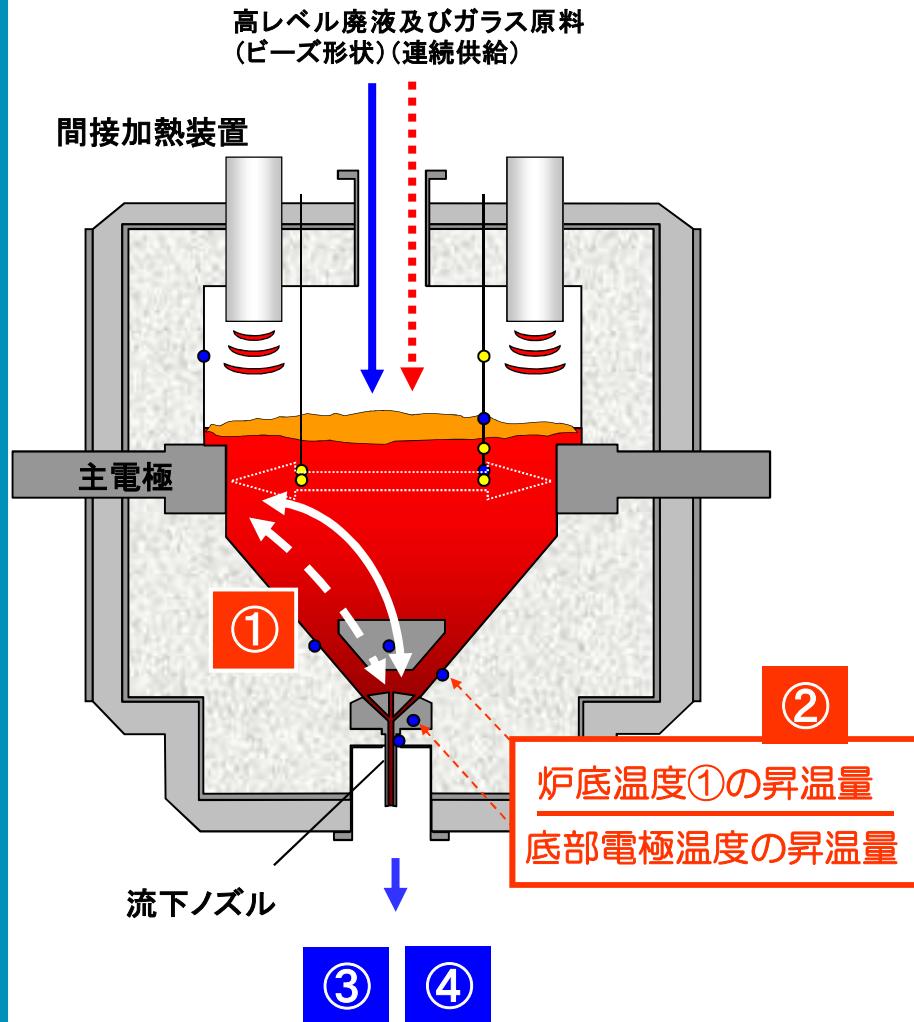
- **構造**: 外部構造の相違により放熱特性等に若干相違があるものの、炉内構造(溶融表面積)は同等
 - 耐火材: レンガ厚みが異なる
 - ケーシング: 形状が異なる(KMOC; 1重、実機; 2重)
- **温度計測点**: KMOCは試験設備であるため、実機に比べて多数の温度計を有す
- **設備の運用**: KMOCは試験設備であるため、仮焼層の観察と流下ガラス中の白金族元素濃度の細かい分析が可能

4. ガラス固化設備のアクティブ試験の経緯と改善について (1)原因究明および対策 実規模大のモックアップ試験(KMOC)②

➤原因究明と対策確認のため、JAEA東海にある**確証改良溶融炉(KMOC)**を利用し、step by stepで模擬試験を実施



4. ガラス固化設備のアクティブ試験の経緯と改善について (2) 改善について(運転管理技術の改善)



白金族元素の堆積に係わる判断指標

炉底加熱性に係わる指標

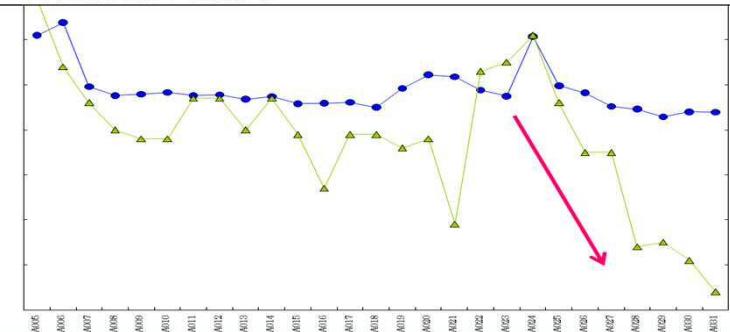
① 主底間抵抗

※白金族の沈降・堆積が進むと低下する。

② 白金族元素堆積指標

※底部電極温度と炉底温度①の昇温比であり、白金族の沈降・堆積が進むと低下する

● 主電極、底部電極間の電気抵抗
△ 白金族元素の堆積指標



流下性に係わる指標

③ 流下速度50kg/h到達時間

④ 流下速度100kg/h到達時間

※白金族の沈降・堆積が進み、流下性が低下すると到達時間が長くなる

4. ガラス固化設備のアクティブ試験の経緯と改善について

(3) 設備の改善

これまでのアクティブ試験の経験やKMOC試験の結果をもとに、複数の設備改善等の効果が、結果として、炉底部への白金族元素の沈降、堆積を防ぐことにつながった

白金族元素の沈降、堆積をいかに抑えるかという技術的課題に対する方策を確認できた

定期的な洗浄運転

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

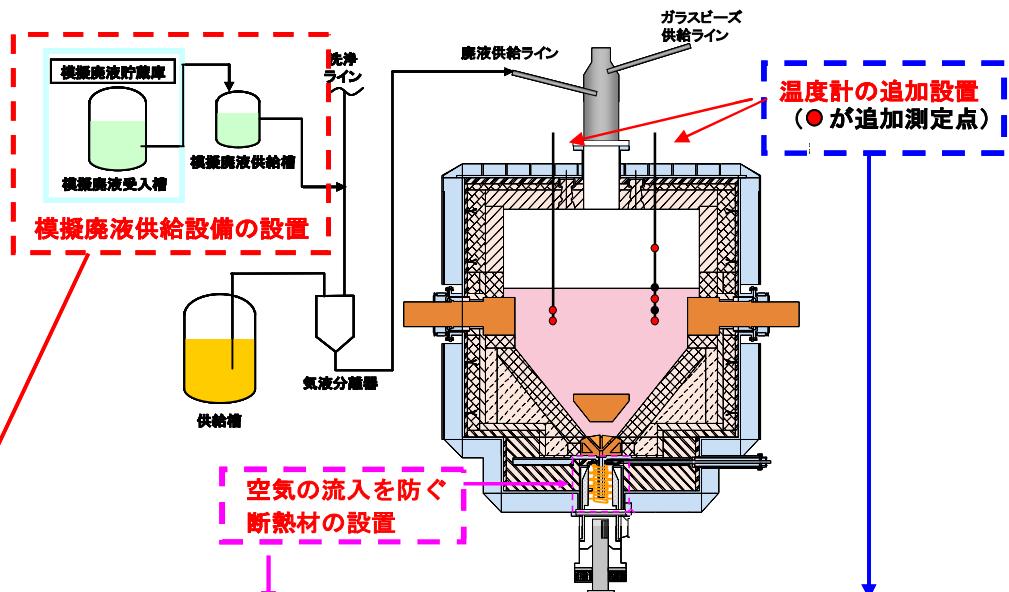
炉内の白金族抜き出し性が良く、炉内の白金族堆積を抑制

複数温度計による電力調整

KMOC運転習熟

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



モックアップ試験にて白金族元素の炉底部への堆積を防ぐことができた

同じ改善を実機でも実施

4. ガラス固化設備のアクティブ試験の経緯と改善について (4) 改善後のガラス固化試験

試験の流れ

【事前確認試験】

KMOC試験結果の反映と
溶融炉運転条件の理解

B系事前確認試験(2012年6月~7月)

- ・機器の作動確認
- ・低模擬廃液
- ・高レベル廃液(25バッチ)

A系事前確認 試験 (2012年8月)

- ・機器の作動確認
- ・低模擬廃液

【ガラス固化試験】

運転状態と性能の確認

B系ガラス固化試験

(2012年12月～2013年1月)

- ・高レベル廃液(30 バッチ)

A系ガラス固化試験 (2013年5月)

- ・高レベル廃液(25 バッチ)

- 安定した温度とともに白金族が適正範囲に維持された運転を確認
- 溶融炉（A系&B系）運転性能として廃液供給速度70L/h の処理が可能であることを確認

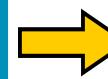
性能の使用前検査(未実施:A、B 溶融炉)

5. 新型ガラス溶融炉の開発

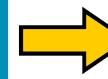
(1) 背景・目的

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

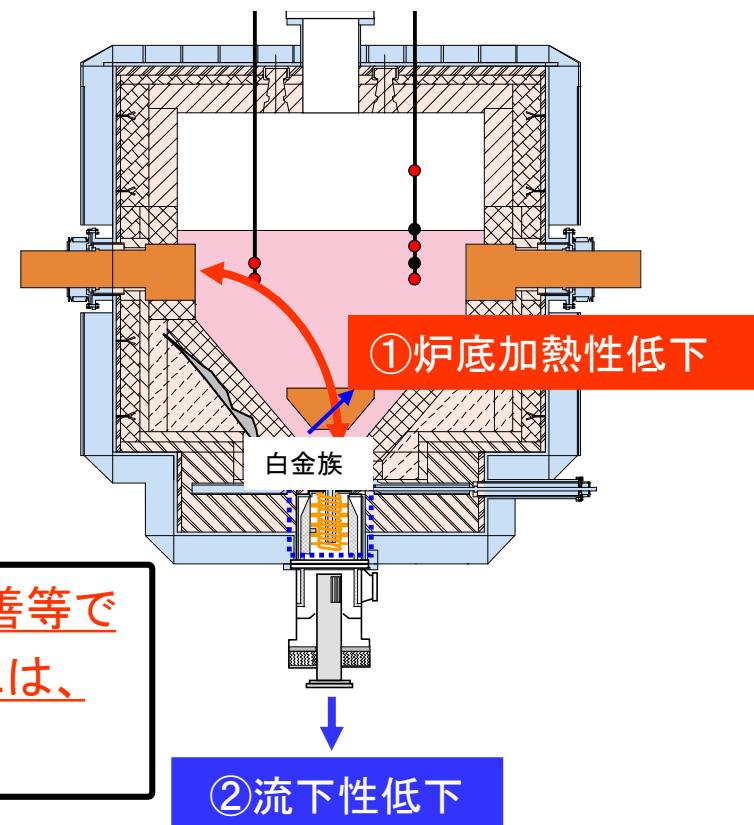
- 炉底傾斜部に白金族が沈降、堆積すると、①白金族部に電流が流れ、炉底ガラスの加熱性能が低下し、②炉底ガラスの粘性が上昇し、流下性能が低下する。よって、白金族沈降を抑制するための炉底低温運転を採用。しかし、アクティブ試験で白金族の堆積等により流下性能が低下

 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

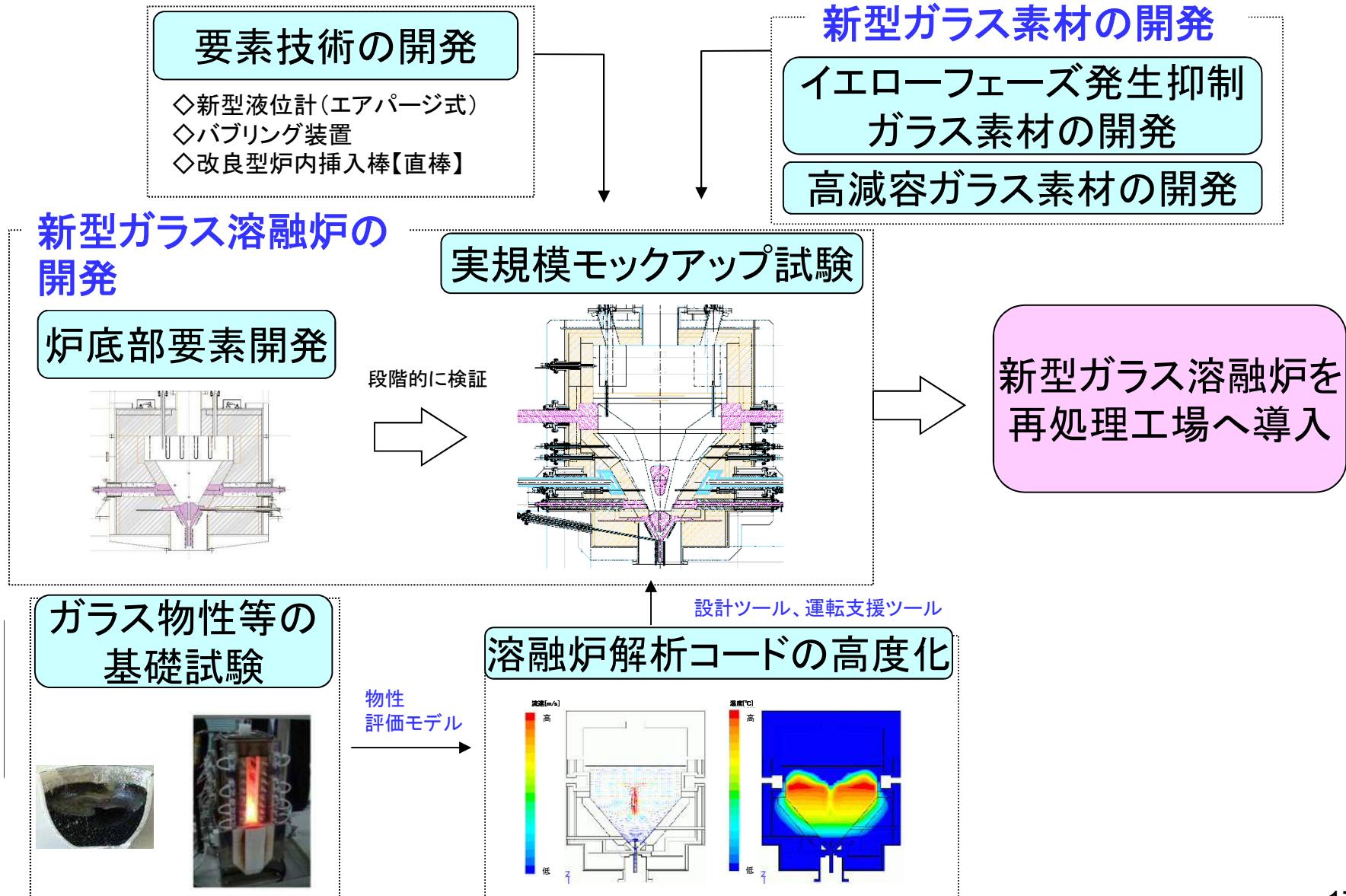
 調整液の添加により発生防止できることを確認

※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

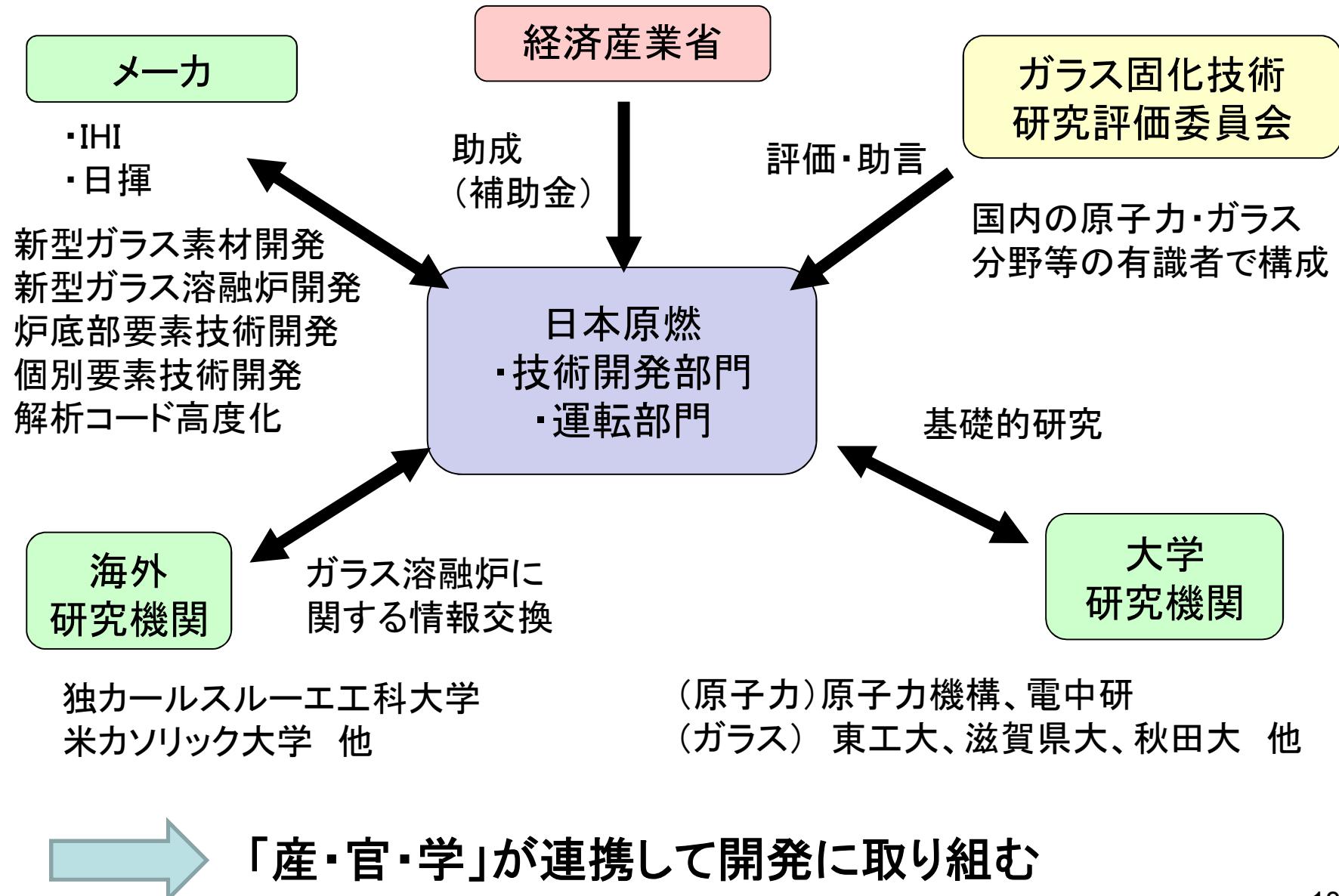


これら事象については設備改善や運転方法の改善等で対応済であるが、既存のガラス溶融炉の更新時には、更に改良されたガラス固化技術の導入を図る

5. 新型ガラス溶融炉の開発 (2) 開発マネジメント①



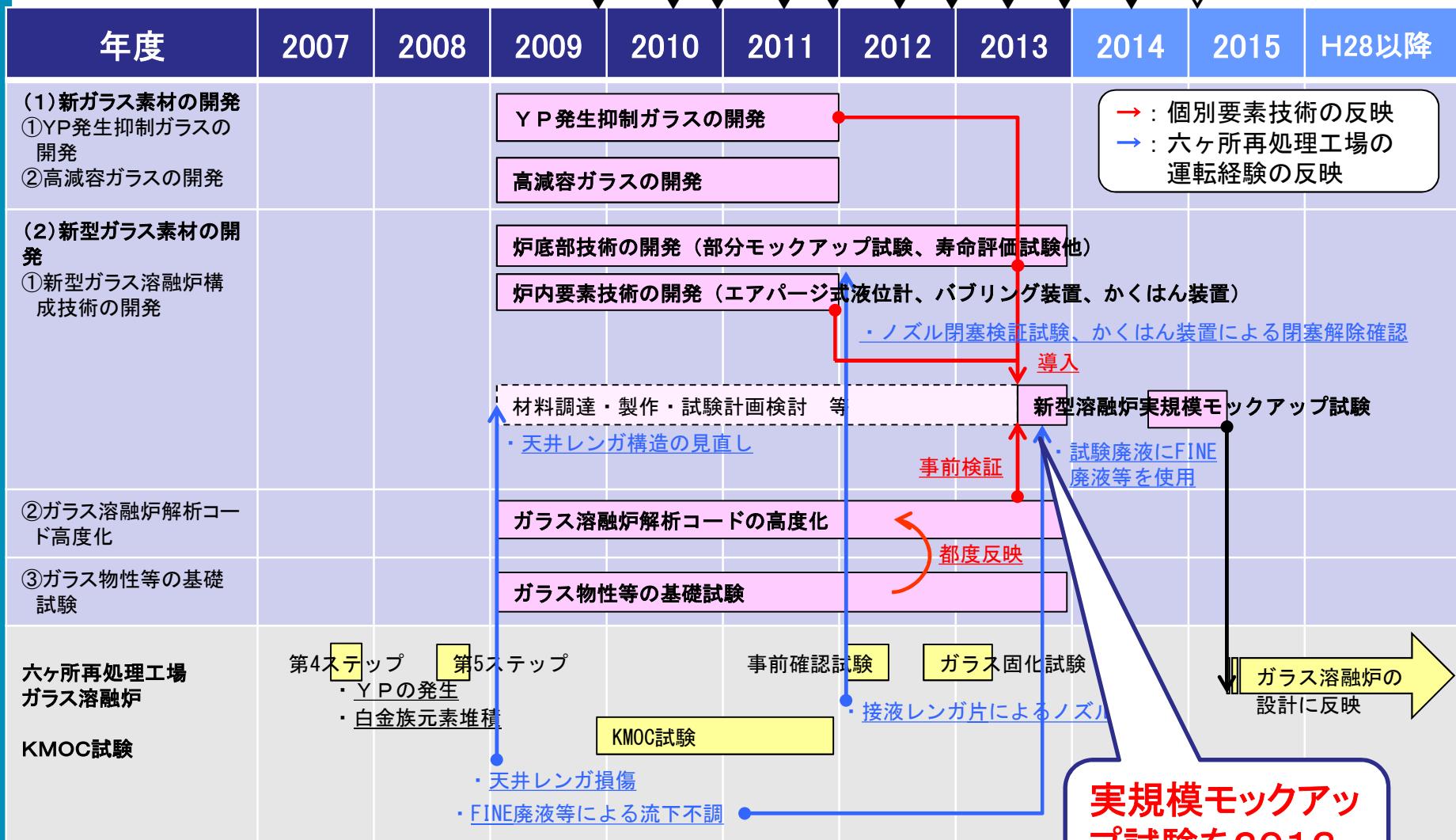
5. 新型ガラス溶融炉の開発 (2) 開発マネジメント②(体制)



5. 新型ガラス溶融炉の開発

(2) 開発マネジメント③(スケジュール)

ガラス固化技術研究評価委員会

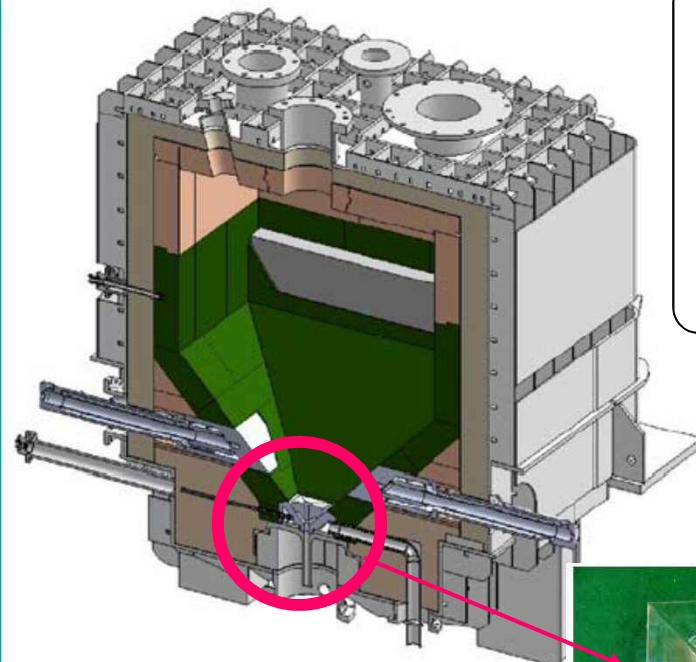


5. 新型ガラス溶融炉の開発

(3) 改良設計①(炉形の変更)

- 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



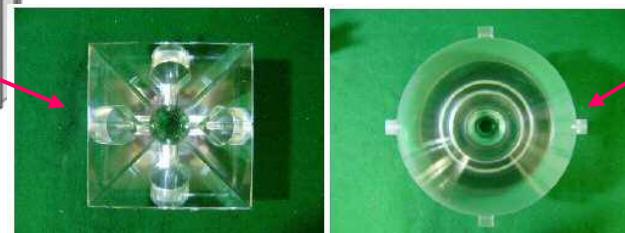
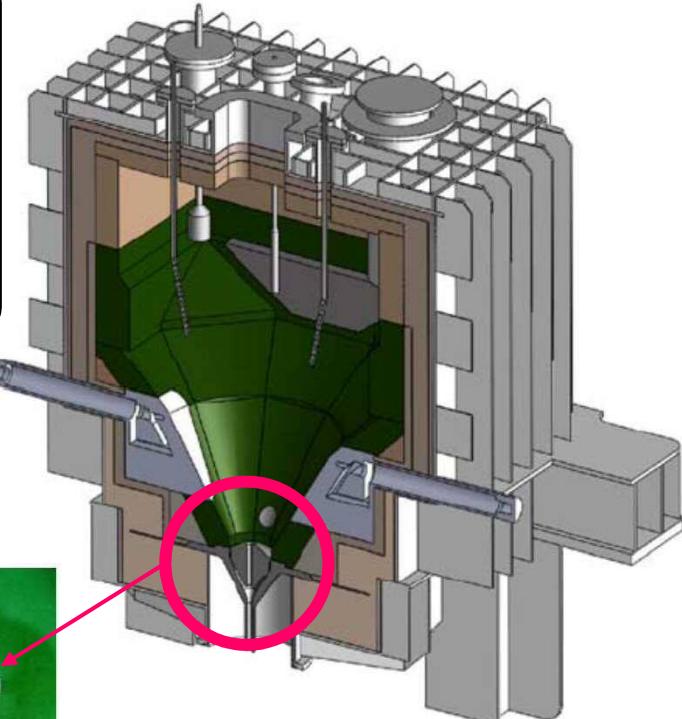
底部電極構造
(アクリルモデル)

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)



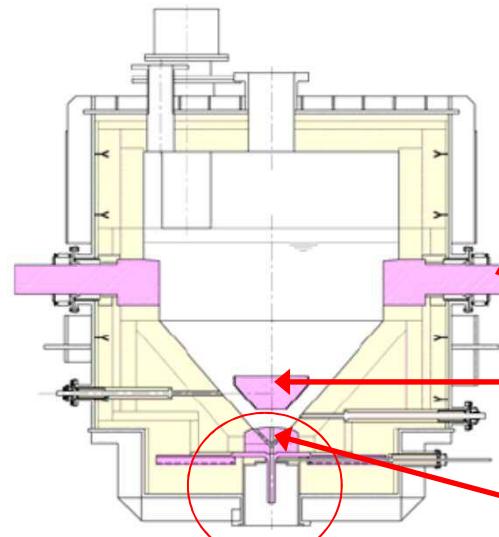
新型ガラス溶融炉



5. 新型ガラス溶融炉の開発

(3) 改良設計②(加熱装置の追加)

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

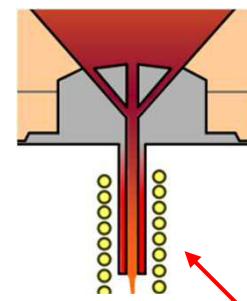
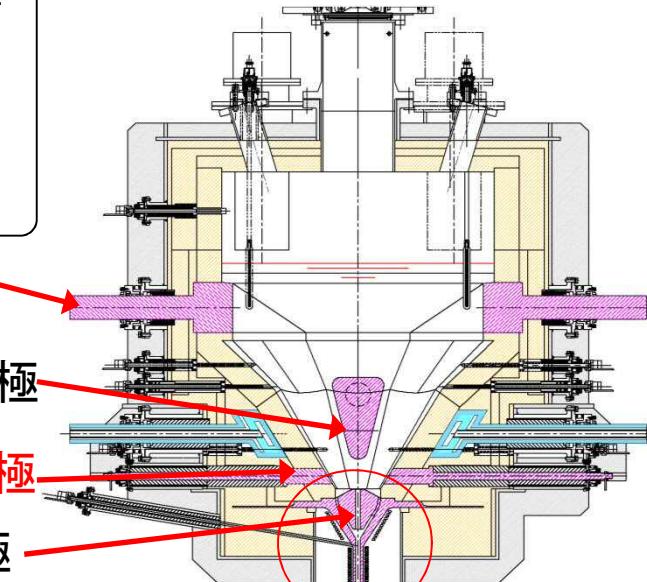
主電極

上段補助電極

下段補助電極

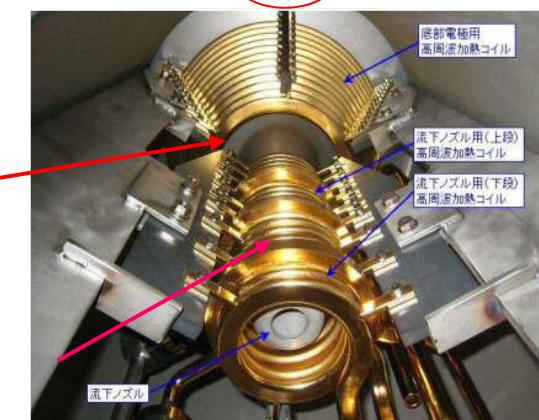
底部電極

新型ガラス溶融炉



流下ノズル用
高周波加熱コイル

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

5. 新型ガラス溶融炉の開発 (3) 改良設計④(全体)

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(エアバージ式)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／バブリング導入]

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
バブリング装置導入

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



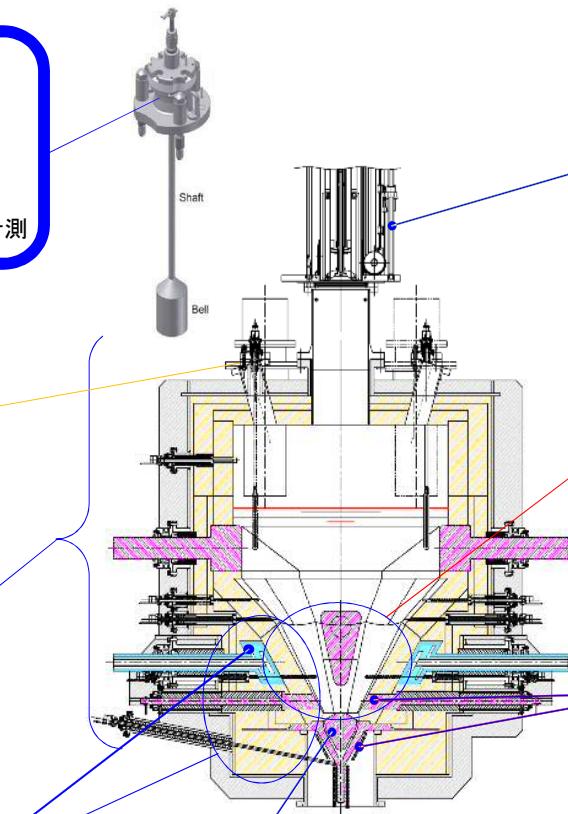
改良炉 現行炉測定点+傾斜部温度等
(合計:46点)

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 [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

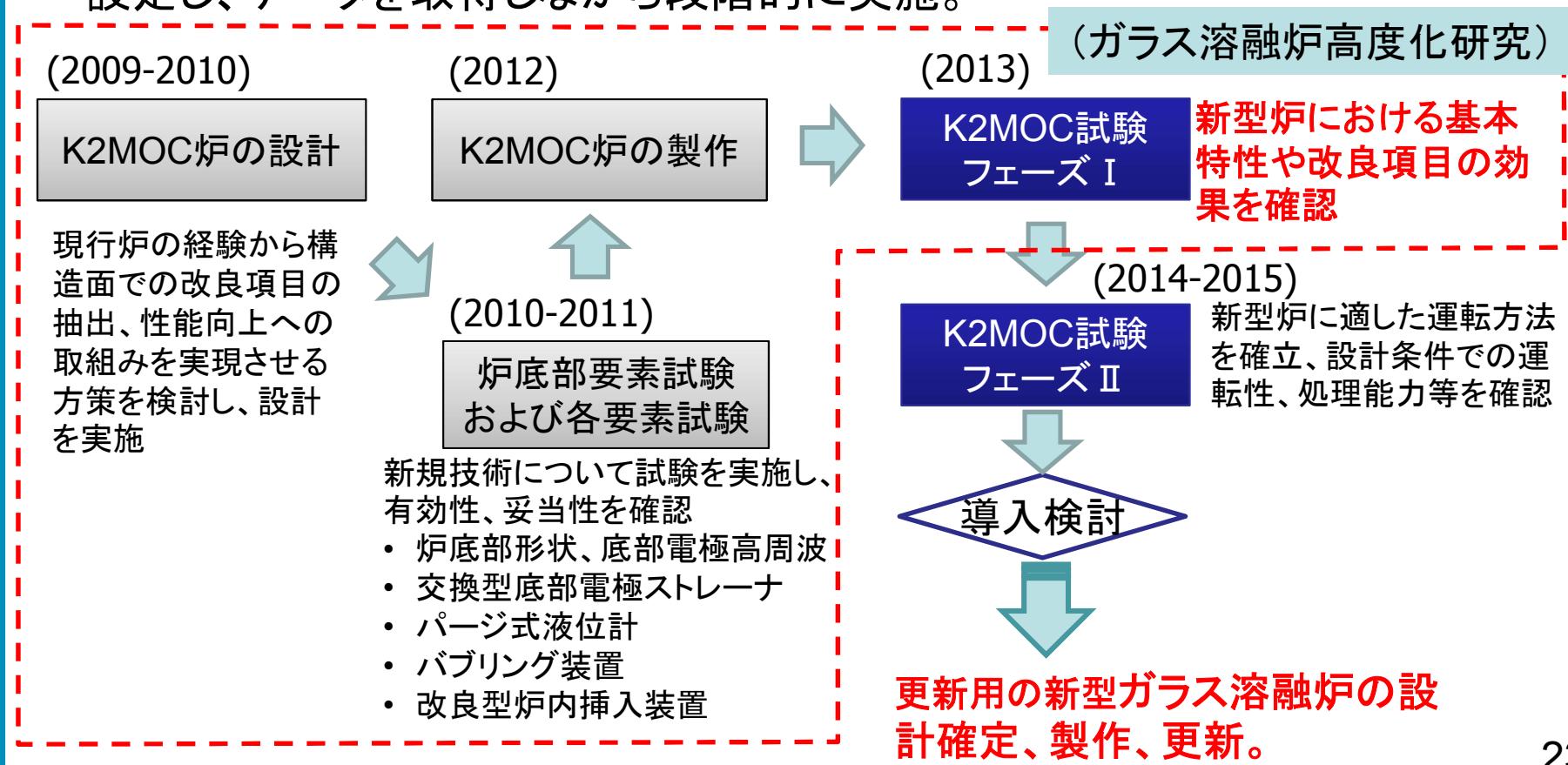
運転モニタの改善/温度コントロール性向上

異常状態からの回復性能向上

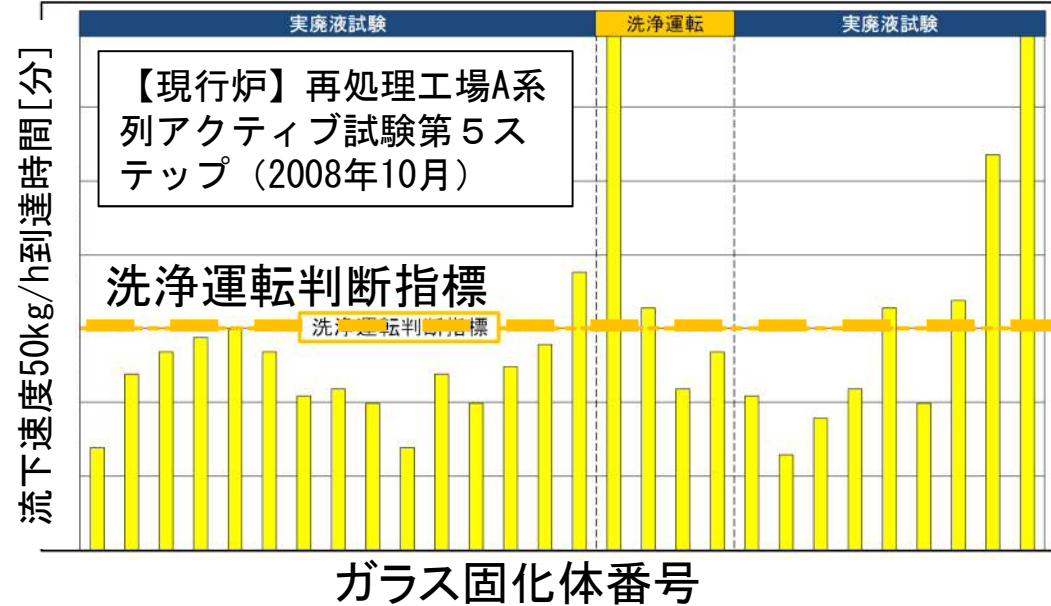
6. 実規模モックアップ試験

(1) 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。



6. 実規模モックアップ試験 (2) 試験結果

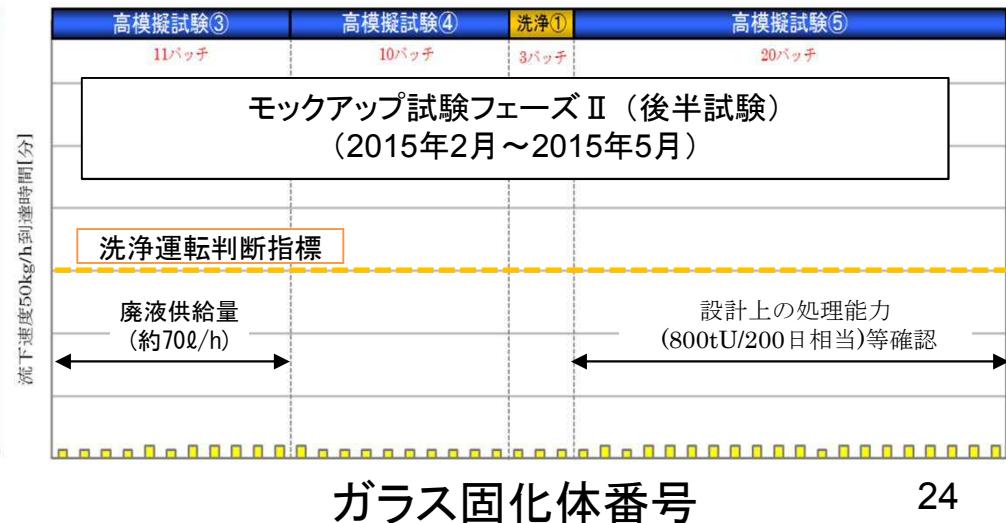
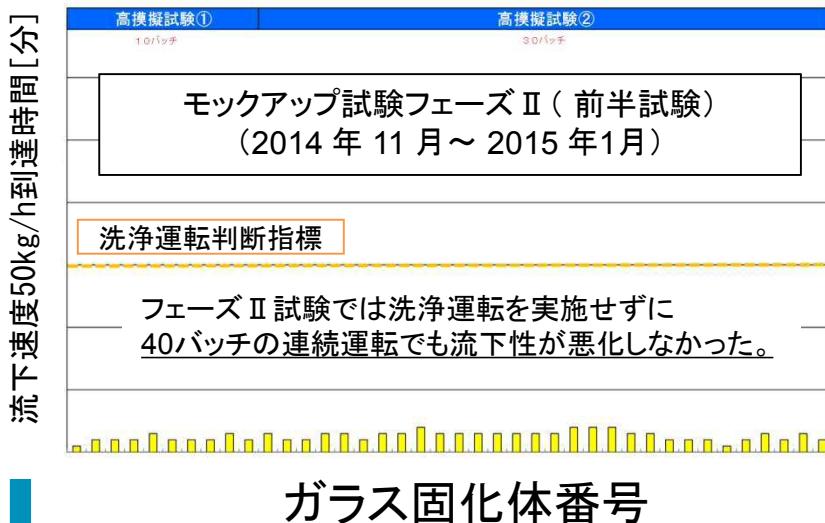


【流下性に係わる指標】

・ 流下速度50kg/h到達時間

※白金族の沈降・堆積が進み、流下性が低下すると到達時間が長くなる

- 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する傾向が見られなかった



7. まとめ

【現行型溶融炉の状況】

- 高放射線環境、高温環境により、運転員が直接的に溶融炉の状態を確認することができないため、限られた遠隔測定システムにより得られる運転データから炉内の状況を把握するシステムを構築。
- アクティブ試験において数々のトラブルを経験したが、フルスケールモックアップ試験による運転管理方法の確立、設備改善により技術的課題を克服した
- 改善後、再度、高レベル廃液を使用したガラス固化試験を実施し大きなトラブルなく試験を終了。ガラス固化設備のアクティブ試験は、国の性能に関する使用前検査を残すのみ

【新型ガラス溶融炉の開発状況】

- 2009年から2015年まで実施した新型ガラス溶融炉は、現行型溶融炉に比べより安定した溶融運転が可能であり、特に現行型溶融炉の課題であった白金族元素の抜き出し性能を飛躍的に向上することに成功した。
- 運転を阻害する廃液条件においても安定した連続運転が可能であることを確認でき、現行型ガラス溶融炉よりも幅広い運転レンジを確保。
- 現行炉と比べ運転管理が容易であり、付帯設備の故障等の外乱に強い。