

廃炉・汚染水対策事業費補助金  
(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)  
CCIMによるガラス固化技術  
2021年度及び2022年度事業成果概要



2023年12月

株式会社 **IHI**

資源・エネルギー・環境事業領域  
原子力SBU

# 目次

1. 研究の背景・目的
2. 本研究の実施項目：開発全体の流れ
3. 実施スケジュール
4. 実施体制
5. 全体成果概要
6. 実施内容
  - 6-1. CCIMの運転成立性の確認
  - 6-2. 廃棄物の高充填化
  - 6-3. 多様な廃棄物に対する適用性評価
  - 6-4. CCIMの低温運転に向けた開発
  - 6-5. 廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討
  - 6-6. 廃棄物性状を踏まえた廃ガス処理系の検討
  - 6-7. 建屋配置検討
7. 全体成果まとめ

# 1. 研究の背景・目的

## ◆ 事業目的

- ガラス固化技術(溶融ガラス化技術)を福島第一原子力発電所の固体廃棄物の処理方法に適用することを目的とする
- 同時に、溶融ガラス化を行う溶融炉として、多種多様な廃棄物への適用性が高く、減容性及び安定性が高い廃棄体を作製可能なコールドクルーシブル誘導加熱炉(Cold Crucible Induction Melter: 以下 **CCIM**)を用いることとする
- 本技術が固体廃棄物の処理に適用できる見通しを得るため、工学的規模のCCIM試験装置等を用いて、適用性評価に必要なデータの取得及びその評価を合理的に行うとともに、廃ガス処理等のプロセスの成立性も併せて検討する



- 本事業により、汚染水処理等により発生する固体廃棄物を安全かつ合理的に保管・管理できる廃棄体とすることで、福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水対策を円滑に進める
- 国内外の研究機関の英知を結集し、当該廃棄物処理技術の開発に取り組むことにより、我が国の科学技術の水準の向上に資する

本事業は、以下を開発のポイントとして、検討を実施

### I. ガラス組成開発:

- ・廃棄物成分の未溶融物がなく、CCIMの運転に必要な基準値を満たすガラス組成を設定
- ・その上で、安定性(低い浸出率)、減容性(高い廃棄物充填率)を満足するガラス組成を選定

### II. Cs揮発対策:

- ・ガラス組成(溶融温度の低温化)及びCCIM運転方法(バブリング条件等)検討によるCsの揮発抑制対策
- ・廃ガス処理設備におけるCs等の回収処理による建屋からの放出抑制について検討

### III. CCIM適用性確認:

- ・炉内温度、核種移行:Cs等の廃ガスへの移行率、ガラス固化体の品質、運転制御性を評価

# 1. 研究の背景・目的

## 原子力発電所における低レベル廃棄物

### 【要求事項】

- ① 廃棄物処理の目的は、減容化と固定化であり、廃棄体自身のバリア機能は期待しないこと
- ② (廃棄物組成変動が大きい) 組成変動に対する柔軟性が高いこと  
※セメント固化が一般的、焼却灰等には技術課題あり
- ③ (処分コストに見合う) 処理コストであること  
※焼却、圧縮、セメント固化が一般的な処理

## 福島第一原子力発電所の固体廃棄物

### 【要求事項】

- ④ ゼオライトなど、ガラス形成成分を含有する廃棄物があり、溶融ガラス化の適用が可能であること
- ⑤ Cs含有廃棄物が多い(揮発抑制対策が必要)
- ⑥ 多種多様な廃棄物が存在し、高線量の廃棄物も含まれる

### 【将来期待される要求事項】

- ⑦ インベントリ評価(均一性, 代表サンプリング)
- ⑧ 廃棄体のバリア機能(化学的安定性, 均一性)

## 提案技術

### 溶融ガラス化(ガラス固化)の採用

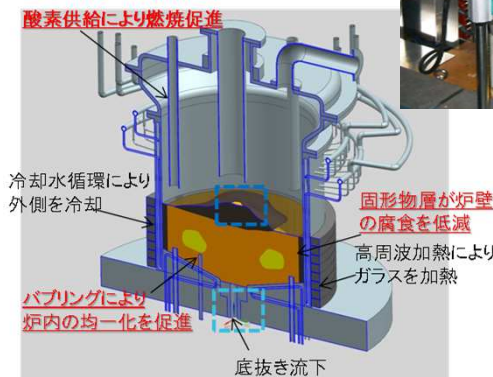
〔 廃棄物自体に含まれる成分(例えば、 $\text{SiO}_2$ )などをガラス形成成分とすることで、添加物を最小限に抑えて、ガラス固化する方法 〕

- ・ 廃棄物同士を組合せる等による減容性を期待【①, ④】
- ・ ガラス物性(粘性, 導電率等)の制御で, 操業性を確保【②】
- ・ 溶融温度を下げることで, Cs揮発を抑制【⑤】
- ・ 廃棄体の化学的安定性も調整可能【⑥, ⑧】

### CCIMの採用

〔 コールドクルーシブル誘導加熱炉(CCIM: Cold Crucible Induction melter) 本事業では韓国KHNP社\*1が保有する技術を採用 〕

- ・ スカル層の形成により, 広範囲なガラス組成に対応可能【④】
- ・ バブリングにより, ガラスの均一性を向上【⑥, ⑦, ⑧】
- ・ 流下方式の採用により, 高充填可能, また高い処理速度  
また, 安価な容器を使用可能【③】
- ・ 流下サンプルの採取により, 将来インベントリ評価が可能【⑦】



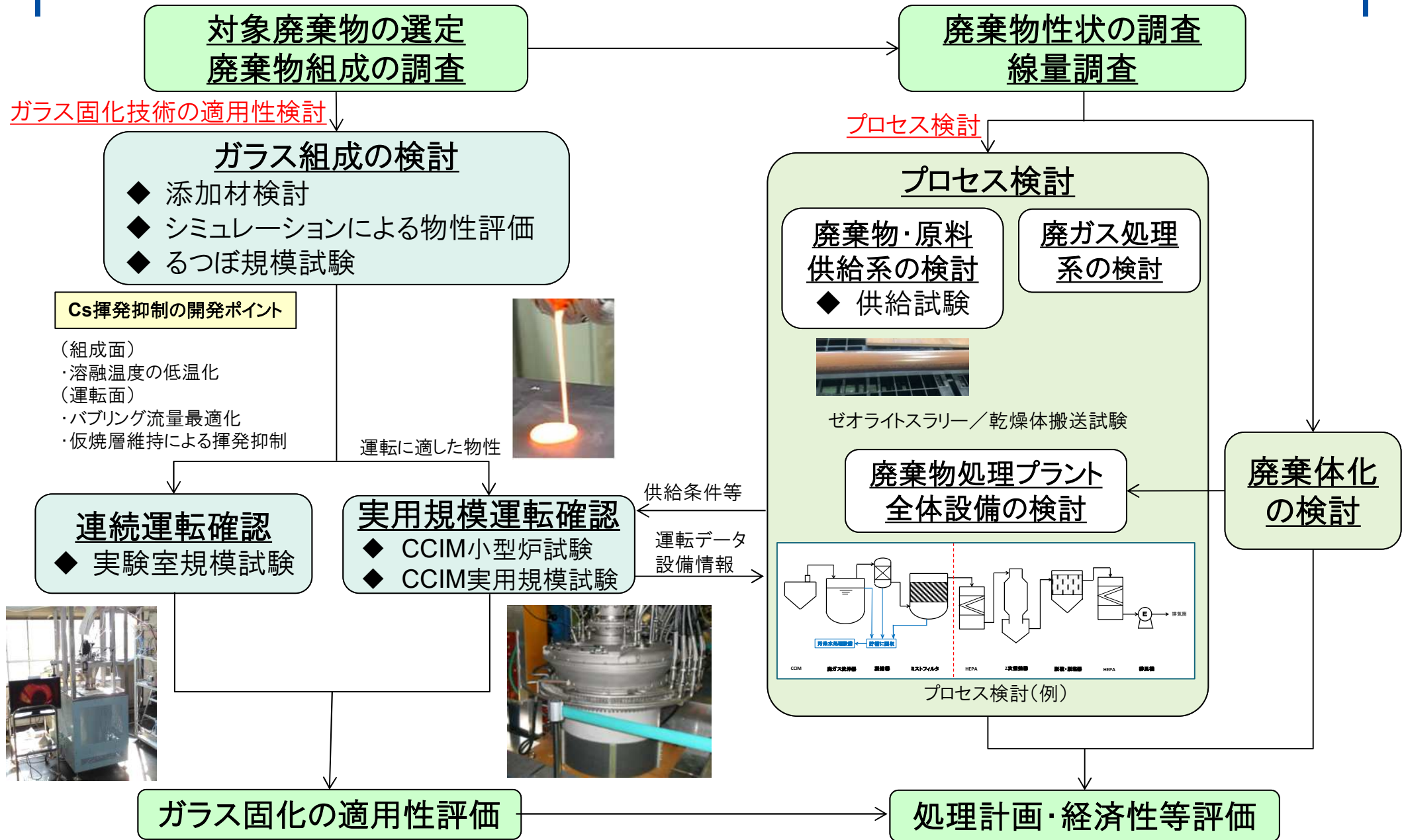
韓国KHNP  
試験装置

CCIMの概念図と外観写真

# 1. 研究の背景・目的

- ◆ IHIの福島第一原子力発電所の廃棄物処理に向けたこれまでの取り組み
  - 2011年の震災から、福島事故廃棄物処理に関する調査を開始 **【社内研究】**
    - ⇒福島事故廃棄物に対する溶融ガラス化の適用を検討
  - 2012年度より、低レベル廃棄物の処理実績を有する韓国KHNPと協定を結び、福島事故廃棄物のCCIM適用性検討を開始 **【社内研究】**
    - ⇒2013～2017年までに実規模CCIMを用いたコールド実証試験を実施し、CCIMの適用性が高いことを確認
    - ・2013年度：ゼオライト＋焼却灰の実証試験
    - ・2014年度：AREVA社スラッジ(鉄リン酸ガラスをガラスマトリクスとして使用)の実証試験
    - ・2015年度：ALPSスラリー(炭酸塩スラリー)の実証試験
    - ・2016～2017年度：Na含有量が高い液体廃棄物の実証試験
  - 2014～2018年度に、日本原燃殿/JAEA殿/電中研殿と共同で次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業を受託 **【資源エネルギー庁委託事業】**
    - ⇒原子力発電所・再処理工場で発生する低レベル廃棄物に対するガラス組成開発等を実施
  - 2018年度から、廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発(先行的処理手法及び分析手法に関する研究開発))の事業に参画し、適用性データ取得を実施。
    - ・2018年度：ALPSスラリー(炭酸塩スラリー)の実証試験(最新分析結果反映, 2015年度に比べより実廃棄物組成に近い模擬廃棄物を使用)
    - ・2019～2020年度：ALPS由来(炭酸塩スラリー, 鉄共沈スラリー, 樹脂系廃棄物, 活性炭), 除染装置由来(フェロシアン化物スラッジ), SARRY由来(ゼオライト, ケイチタン酸塩)の実証試験, 添加材共通化試験, 組合せ処理試験
- 低レベル廃棄物処理において、実績<sup>※2</sup>を有する韓国のCCIMを導入することで、開発に関わるコスト及び期間の合理化を図る
  - ※2: 1994年から本格的に研究開発し、1996年パイロットプラント試験開始, 2002年ハヌル発電所ガラス固化施設建設開始, 2009年商用運転開始
- 実用規模炉による試験結果を基にしたガラス組成開発及びCCIM運転性確認, さらに, ガラス固化システム構築(廃棄物特有の廃ガス処理等の周辺機器の設計, 実用化に向けた国内規制への対応等)に注力する計画。

## 2. 本研究の実施項目：開発全体の流れ



### 3. 実施スケジュール(2021年度分)

大分類	小分類	手段	担当	2021年度(令和3年度)															
				4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3				
主要マイルストーン	—	—	—														▽ 中間報告	▽ 中間報告	
CCIMの運転性確認	①CCIM運転成立性の確認	CCIM実用規模試験	IHI/KHNP														▽ 中間報告	▽ 実用規模試験完了	
		シミュレーション技術	IHI																
		高温物性取得	IHI/東北大 /愛媛大																
	②廃棄物の高充填化の検討	CCIM実用規模試験	IHI/KHNP																
		③多様な廃棄物に対するCCIMの適用性評価	CCIM実用規模試験	IHI/KHNP															
		④CCIMの低温運転に向けた開発	るつぼ規模試験 /CCIM小型炉試験	IHI/九州大 /千葉大 /東北大															
供給系及び廃ガス処理系の検討	⑤廃棄物供給系の検討	要素試験	IHI																
	⑥廃ガス処理系の検討	プロセス検討	IHI																
廃棄体化検討	⑦建屋配置検討	概念検討	IHI																
評価・まとめ	評価・成果まとめ	—	IHI																
委員会 (事業者主催)	有識者による協議, 評価	—	IHI																▽
成果報告 (事務局主催)	進捗, 成果報告	—	IHI															▽	▽

### 3. 実施スケジュール(2022年度分)

大分類	小分類	手段	担当	2022年度(令和4年度)													
				4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
主要マイルストーン	—	—	—													▽ 最終報告	
CCIMの運転性確認	①CCIM運転成立性の確認	CCIM実用規模試験	IHI/KHNP														
		シミュレーション技術	IHI														
		高温物性取得	IHI/東北大 /愛媛大														
	②廃棄物の高充填化の検討	CCIM実用規模試験	IHI/KHNP														
	③多様な廃棄物に対するCCIMの適用性評価	CCIM実用規模試験	IHI/KHNP														
	④CCIMの低温運転に向けた開発	CCIM小型炉試験	IHI													装置故障に対する装置復旧	試験
供給系及び廃ガス処理系の検討	⑤廃棄物供給系の検討	要素試験	IHI														
	⑥廃ガス処理系の検討	プロセス検討	IHI														
廃棄体化検討	⑦建屋配置検討	概念検討	IHI														
評価・まとめ	評価・成果まとめ	—	IHI														
委員会 (事業者主催)	有識者による協議, 評価	—	IHI														
成果報告 (事務局主催)	進捗, 成果報告	—	IHI													▽	



## 4. 実施体制

### 委託先の体制及び内容

#### 株式会社IHI

溶融炉の運転や供給系及び廃ガス処理系における高レベル廃液の処理等での知見を活用

#### 韓国水力・原子力発電(KHNP)中央研究所: 実用規模試験の実施及びデータ取得

韓国の原子力発電所の運転時に発生する低レベル放射性廃棄物の処理等の経験を有し、[CCIM技術及びCCIMの実用規模試験装置を保有](#)。対象廃棄物に対する実用規模のCCIM試験装置での試験の実施が可能  
(項目①, ②, ③の実用規模試験を実施)

#### 東北大学: ガラス組成の検討・評価

ガラス等の高温融体の界面反応, 物性, 構造等の研究実績を有し、[放射性廃棄物に対するガラスマトリックスの検討, ガラス構造の観点からの評価等の研究実績](#)を有する。本事業では, ガラス組成の検討, 高温物性の評価等を実施。(項目①での高温物性の取得, 項目④での低温運転に向けた開発での組成検討を実施)

#### 千葉大学: ガラス固化体の評価

ガラスやセラミックス等の材料に対する構造評価等に関する研究実績を多く有し、[放射性廃棄物のガラス固化体の処分時のガラス挙動の評価等の研究実績](#)を有する。本事業では, 対象廃棄物のガラス固化体に対して, ガラス組成の検討・評価を実施。  
(項目④での低温運転に向けた開発での組成検討を実施)

#### 愛媛大学: ガラス組成の検討・評価

放射性廃棄物固化ガラスに関するガラスマトリックス及び高温融体の高温物性・特性等の実績を有し、[福島第一原子力発電所の固体廃棄物の内, 汚染水処理で発生する放射性スラッジの固化方法の研究実績](#)を有する。本事業では, 対象廃棄物のガラス固化に関わる高温物性の検討・評価を実施。  
(項目①での高温物性の取得を実施)

#### 九州大学: ガラス組成の検討・評価

[ガラス固化体の組成とセシウムの揮発, ガラス固化体の処分に関連する研究実績, 知見](#)を有する。本事業では, ガラス固化体の処分に係る検討・評価を実施。  
(項目④での低温運転に向けた開発で検討したガラス等の処分に係るデータ取得(化学的安定性)を実施)

# 5. 全体成果概要(ガラス固化技術の適用性検討):2018-2022年度分

項目		炭酸塩スラリー	鉄共沈スラリー	フェロシアン化物スラッジ	樹脂系吸着剤	活性炭	ゼオライト	ケイチタン酸塩	ゼオライト + 炭酸塩スラリー	ゼオライト + フェロシアン化物スラッジ	炭酸塩スラリー + 鉄共沈スラリー + フェロシアン化物スラッジ	
		単独での高充填化							組合せ処理		添加材共通化	
ガラス組成検討 (るつぼ規模 数十～数百g 規模)		30wt%以上 高充填化 (組成変動)	40wt%以上 高充填化 (組成変動)	充填率 6wt% (ホウケイ酸) 38wt% (鉄リン酸)		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 充 填率 20wt%						炭酸塩スラリー: 20wt% 鉄共沈スラリー: 25wt% フェロシアン化物 スラッジ:6wt%
		↓ 揮発抑制 低温化組成 を検討	↓ 揮発抑制 低温化組成 を検討	↓ 高温粘度 の改良確認 物性評価し 運転調整可能 範囲へ改良	1/4以上に 減容	炭酸塩スラ リーとの混合 処理	1/15以上に 減容	充填率 65wt%	充填率 40wt%	充填率 72wt%	充填率 67wt%	
連続運転確認 (実験室規模 数十kg規模)		—	—	—		連続処理 による 運転適用 性を確認	連続処理に よる 運転適用性 を確認	連続処理に よる運転適 用性確認 (Cs揮発 抑制)	連続処理に よる運転適 用性確認 溶融温度を 1050℃に低 下	連続処理に よる運転適 用性確認 溶融温度を 1050℃に低 下	—	
CCIM 運転性確認  CCIM実用規 模試験(数百 kg規模) or CCIM小型炉 試験(50kg規 模)*	  	連続運転に よる運転適 用性を確認  ↓ ・更なる充填率向上 ・廃棄物形態模擬 ・低温化(小型炉試験)	間欠運転	—		連続運転 による運 転適用性 を確認	—	—	—	—	※Cs吸着の多い廃棄物は特に揮発抑制に主眼  間欠運転 連続運転 (保持無)  ※フェロシアン 化物スラッジ は充填率が 見込める組 合せで試験	

\*低温化のみ小型炉試験を実施

  : 2018～2020年度実施内容
   : 2021年度実施内容
   : 2022年度実施内容

# 5. 全体成果概要(プロセス検討): 2018-2021年度分

- 供給系の搬送試験を行い, 廃棄物毎の搬送方法を選定。供給系設備の概略系統図を設定した。
- 脱水体及びゼオライトに対して空気搬送可能な状態まで乾燥・粉砕し, 移送試験により空気移送および定量供給できることを確認した。



ダブルディスクドライヤ装置外観



乾燥粉砕前後の模擬炭酸塩スラリーの外観



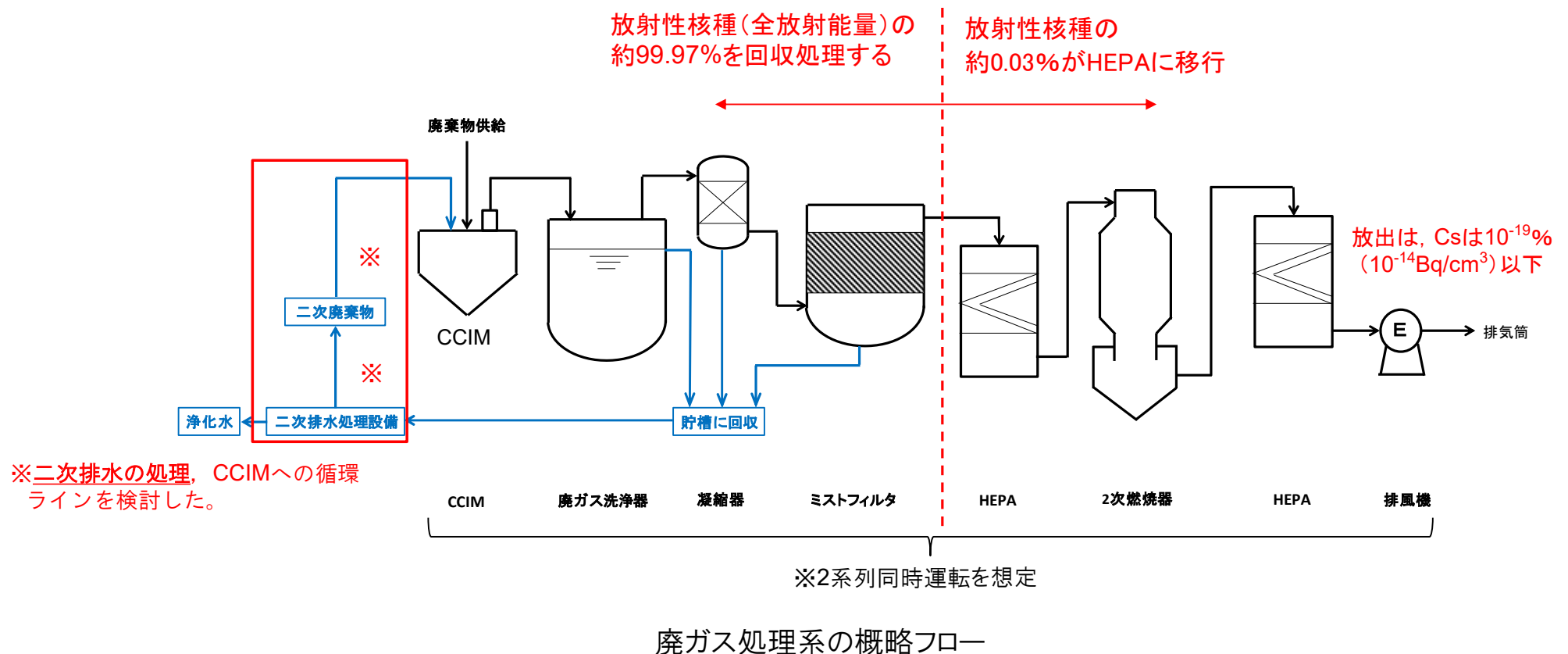
試験中のドライヤ内の様子(ゼオライト)

無軸スクリーフィーダ移送試験(模擬炭酸塩スラリー: 定量供給) 移送試験前後アクリル配管部の様子

供給試験項目		脱水体供給(炭酸塩スラリー等)	固体状廃棄物供給(ゼオライト等)
<b>固体搬送</b> 利点: 二次排水無し, 熱負荷低	<b>空気輸送(大量移送),                      スクリューフィーダー                      (定量供給)</b>	乾燥・搬送性試験(脱水体): ダブルディスクドライヤにより乾燥・粉砕し, 空気移送および定量供給可 基本プロセスを設定	搬送性試験: 大量移送・定量供給ともに移送可 (高含水率40~50%時, 移送安定性が悪くなる課題)
			↓ <b>乾燥状態の改善</b> 乾燥・粉砕試験: ダブルディスクドライヤにより空気搬送可能な状態まで 乾燥可 ↑ <b>基本プロセスを設定</b> 停止後再起動性の改善
<b>スラリー搬送</b> 利点: 汚染拡散防止性, 均質性	<b>ポンプ                      (大量移送, 定量供給)</b>	搬送性試験: 配管勾配を持たせることで良好に搬送可 基本プロセスを設定	搬送性試験: 流量大で搬送可(停止時, 閉塞リスク高)

## 5. 全体成果概要(プロセス検討)：2018-2021年度分

- 廃ガス処理系に関して、代表的な固体廃棄物に対して、基本プロセスを設定し、概略系統図を設定した。
- 廃棄物毎に放出放射能収支も算出。
- 全体プロセスを検討し、設備機器の配置検討および物量評価を実施した。
- 代表機器に対する線量評価を実施し、ガラス固化体容器および運用方法を設定した。
- 2020年度までの検討で、想定廃棄物量より、将来のガラス固化設備ではCCIMは2系列必要であると考えられたことから、CCIMの2系列同時運転を想定した際に発生する廃ガスを処理する廃ガス処理設備を設定した。
- 発生する二次排水の処理設備の概略系統図を設定した。



# 6. 実施内容:CCIM運転のポイント

## 【ポイント①(炉内状態の安定維持)】

- 目標のガラス温度維持  
 熔融ガラス温度(試験目標): 1100℃  
 ゼオライト系廃棄物は1050℃
- ガラス液位増減の影響  
 ガラス液位: 液位増減において  
**運転継続可能**

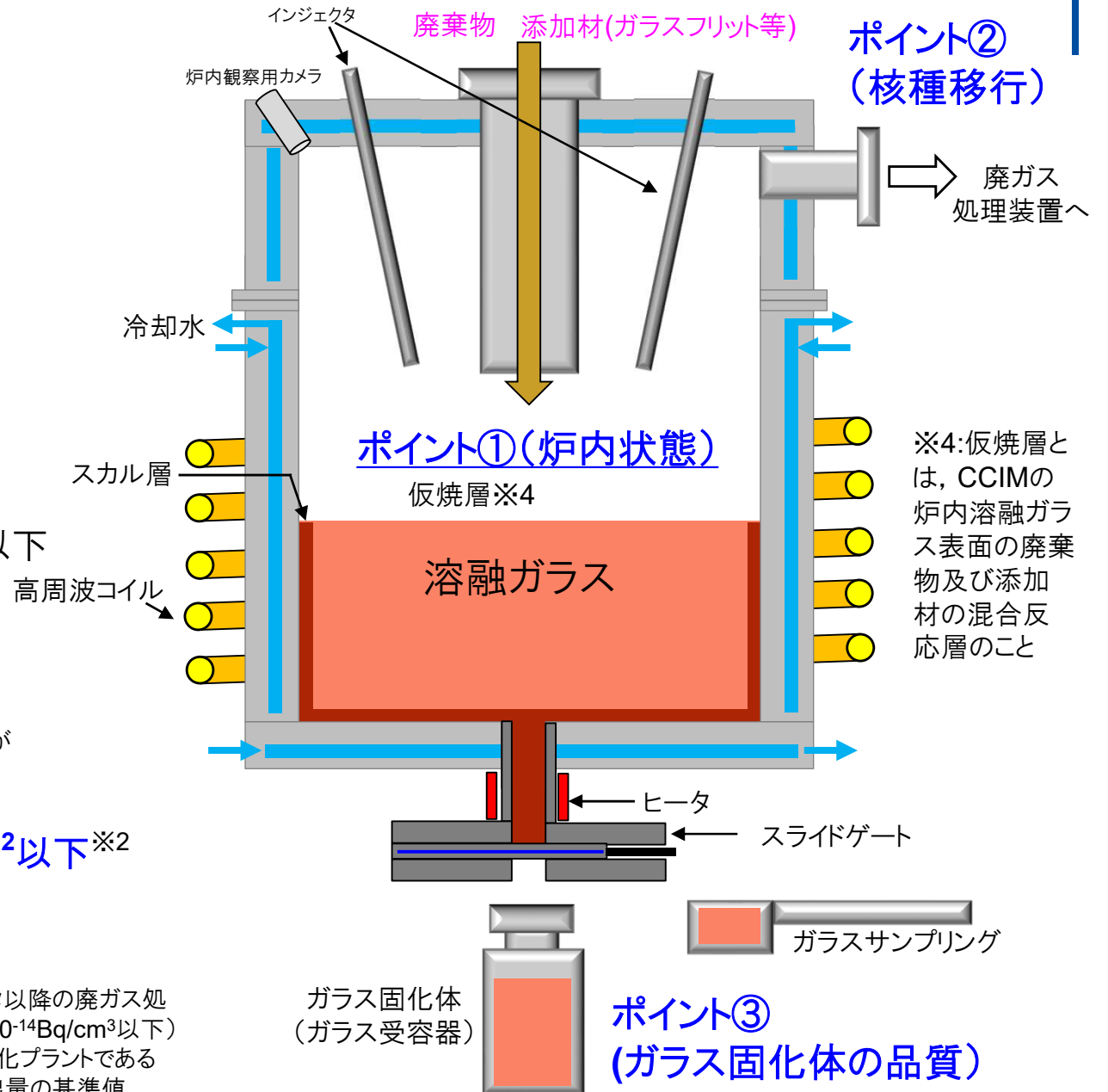
## 【ポイント②(核種移行の抑制)】

- Cs等の廃ガスへの移行率  
 (目標)Cs:10wt%以下<sup>※1</sup>, Sr:1wt%以下

## 【ポイント③(ガラス固化体の品質)】

- 均質性  
**ガラス化<sup>※</sup>, 未熔融物無し**  
 ※廃棄物そのままガラスに残らず, ガラス中に一部結晶が存在する程度であれば問題ない
- 化学的安定性  
 浸出試験(PCT-A試験): 浸出量**2g/m<sup>2</sup>以下**<sup>※2</sup>
- 圧縮強度  
**1.5MPa以上**<sup>※3</sup>

※1: 99.97wt%以上は回収処理されるため, HEPAフィルタ以降の廃ガス処理設備への移行は0.03wt%以下となる(Csの放出は $10^{-14}$ Bq/cm<sup>3</sup>以下)  
 ※2: 韓国のKHNPや米国のハンフォード廃棄物処理・固定化プラントであるWTPにおける低レベル廃棄物を固化するガラスの浸出量の基準値  
 ※3: 均質・均一固化体の廃棄体の埋設基準値



CCIMの炉内イメージ

# 6-1. CCIMの運転成立性の確認

## (1) CCIM緊急停止後の再立上げ性の確認

- 目的** ➤ 2020年度までにCCIMの通常運転は実用規模試験にて確認ができた。一方で、事故等によりCCIMを緊急停止し、炉内のガラスが固化した場合の復旧運転は試験未実施であり、中間報告会で確認を推奨するコメントがあった。そこで、CCIMを緊急停止した場合を想定し、CCIMの炉内のガラスが排出せず高い液位で固化した場合に再溶融（再立上げ）可能であることを確認する。
- 計画** ➤ 実用規模CCIMを用いて、運転中の**ガラス最高液位**※の状態を加熱を停止し、CCIMの炉内のガラスを固化させた後、再加熱を行う。  
※最も再立上げしにくい条件であるガラス最高液位にて確認することとした。
- 成果** ➤ 最高液位の状態（炉内に約300kgのガラスを保有）で緊急停止しガラスが完全に固化した場合においても、**再立上げ可能であることを確認**した。



実用規模CCIM内で  
ガラスが固化した様子



ガラスの上に模擬ガラスと  
金属リングを設定

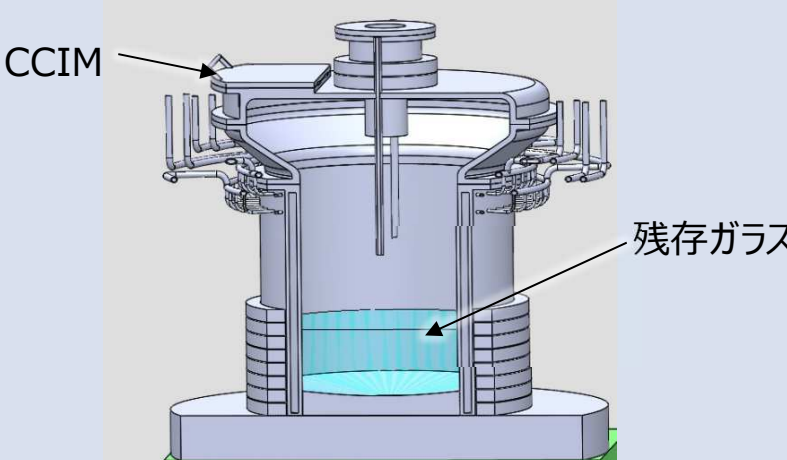
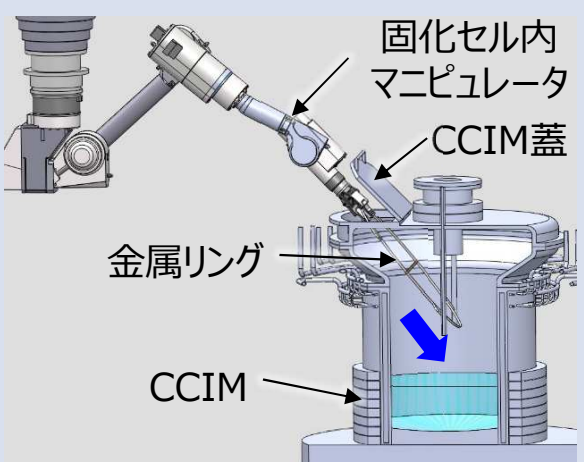


再加熱により炉内ガラスが  
溶融した状態

# (1) CCIM緊急停止後の再立上げ性の確認

- 再立上げ作業では、蓋を開けて、金属リングの設置・模擬ガラスの投入を行う。この際、実機での周辺環境(固化セル内)は高線量であり、人が炉に近づいての直接作業は難しい。そのため、実作業を想定し、遠隔操作による再立上げの準備作業ステップを検討した。
- CCIM緊急停止後における遠隔での再立上げについて、3Dシミュレーションツールを用いて準備作業ステップを検討し、準備作業を遠隔操作により可能であることをシミュレーション上で確認した。

## 【作業イメージ図】

作業	初期の運転停止状態	金属リング設置
イメージ図	 <p>①CCIMが非常停止し、CCIM内に残存ガラスがある</p>	 <p>①固化セル内マニピュレータにてCCIM蓋を開 ②固化セル内マニピュレータにて金属リングをCCIM内へ挿入し、ゆっくりとCCIM内に降ろし、設置する。</p>
使用機材	—	・固化セル内マニピュレータ

このセッティングを遠隔操作にて行うことにより、通常通りの起動が可能である。

## (2) 炉内状況の把握のためのシミュレーション技術の構築

### 炉内熱流動シミュレーション概要

#### 目的

- 運転パラメータの設定には、炉内の代表温度と炉内の温度分布との関係を明確化する必要があるが、試験における計測内容および点数では炉内状況の把握が限定される。
- そこで、炉内状況の把握に向けた解析手法の検討を行う。

#### 計画

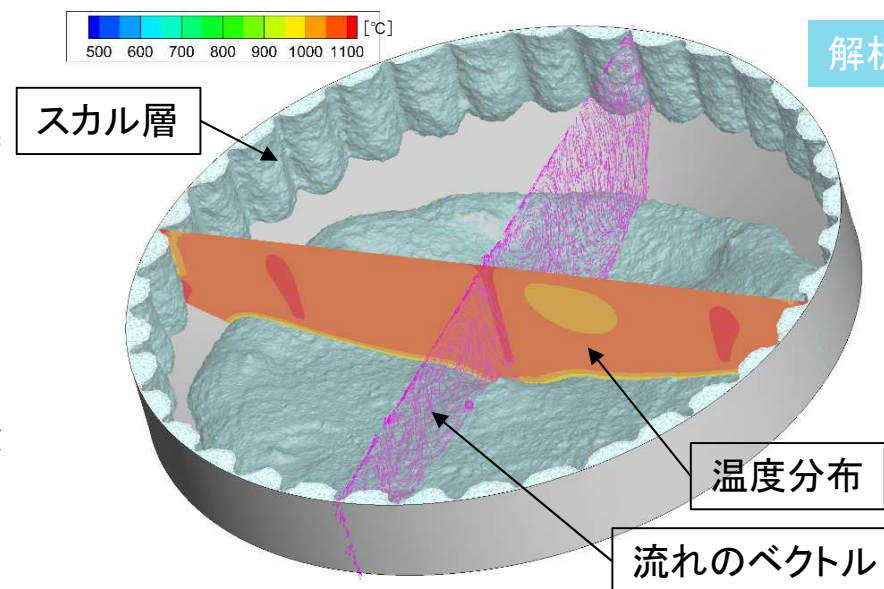
- 計測データを基に、運転条件を変化させた際の変化を正しく予測できる解析手法の妥当性検証と課題の抽出を行う。
- 精度向上のため、高温物性をモデルに反映させる。(炭酸塩スラリーガラスを想定)

#### 成果

- 熱流動解析(ANSYS Fluent)により予測したスカル層を元に電磁場解析を行い、ジュール熱およびローレンツ力分布を取得し、更新した状態で再度熱流動解析を行う連成解析のステップにて、スカル層形成状態(広がり, 厚み)の再現性が向上した。
- ガラスの高温物性が炉底部スカル層形成に大きく影響することを明らかにし、初期条件および境界条件を見直して実態に近いスカル層の形成状況を得ることができた。

#### 解析の評価物理量と目的

- 炉内流れ・温度分布
- スカル層形成状態 (広がり, 厚み)
- 炉内状況の把握
- バブリング流量などの運転条件の調整





## 6-2. 廃棄物の高充填化(炭酸塩スラリー): ガラス組成の設定

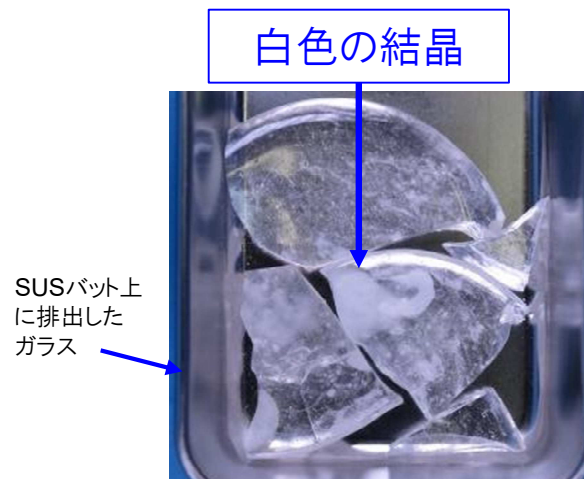
### 目的

- 廃棄体への廃棄物の高充填化は廃棄体の発生本数を減らすことができる。
- 一方で、ガラス中に結晶物が発生しやすくなることが確認されているため、CCIMの運転への影響を実用規模試験にて確認する。

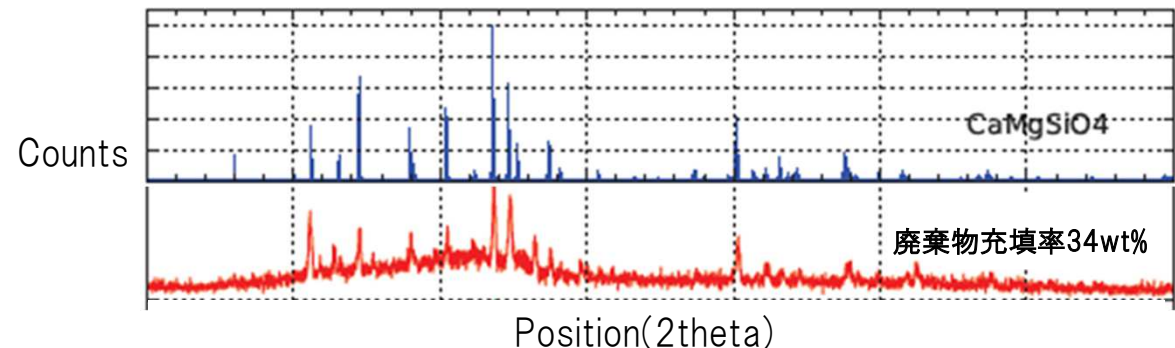
### 計画

- これまで廃棄物充填率20wt%でCCIMに適用可能であることを確認している。更なる高充填として、**廃棄物充填率34wt%\***とし、CCIMによる運転試験を行う。

※るつぼを用いたガラス化試験により、廃棄物充填率30wt%まで結晶が無く高品質なガラスとなり、30wt%以上で結晶が発生することを確認した。36wt%以上となるとガラス化しにくくなることから、結晶が析出するがガラス化可能な34wt%を採用。



るつぼを用いたガラス化試験  
ガラス外観(34wt%)  
※加熱温度1100°C



るつぼを用いたガラス化試験  
ガラス粉末のXRDパターン(34wt%)

## 6-2. 廃棄物の高充填化(炭酸塩スラリー): 予備試験(ガラス製造速度の設定) IHI

### 目的

- 今回、廃棄物充填率を20wt%から34wt%に上げるため、廃棄物充填率20wt%の場合のガラス固化体の製造速度(ガラス製造速度)<sup>※1</sup>から廃棄物充填率34wt%に上げた場合のガラス製造速度へ調整を行い、廃棄物充填率34wt%において運転可能なガラス製造速度を設定する。

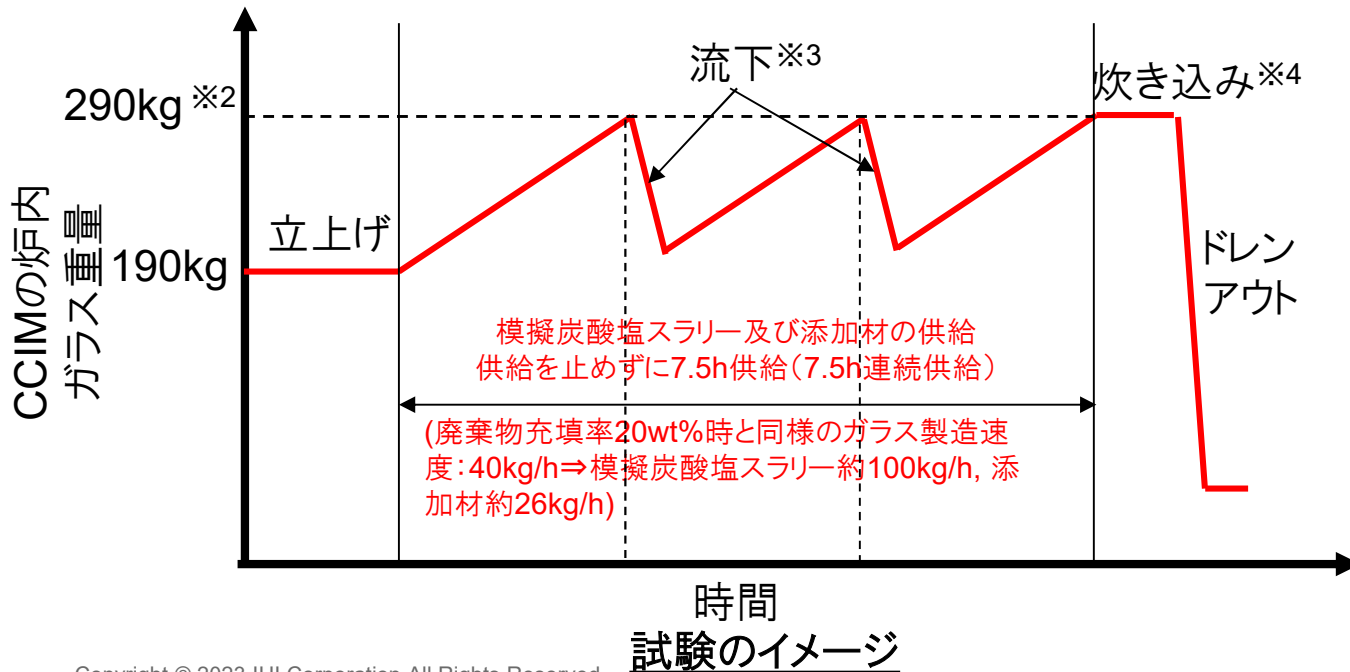
※1 ガラス製造速度は廃棄物供給速度及び添加材の供給速度によって決まる。

### 計画

- 実用規模CCIMにて模擬炭酸塩スラリーを用いて供給速度をパラメータとした試験を行う。廃棄物充填率20wt%時に安定し運転可能な供給速度と同様の条件から運転を行い、以下の観点から供給速度を調整し、廃棄物充填率34wt%における廃棄物供給速度を確認し、ガラス製造速度を設定する。

目標のガラス温度維持: **1100°Cで維持**できることの確認

ガラス液位増減の影響: 模擬炭酸塩スラリーの供給と熔融ガラスの流下による**液位の変化に応じて運転を継続**できることの確認



### 試験条件

項目	条件
目標温度	1100°C
廃棄物充填率	34wt%
供給時間	7.5h

※2 ガラス製造速度40kg/hにおいて運転した場合の炉内ガラス最大重量であり、ガラス製造速度を変更した場合は炉内ガラス最大重量は変わる。

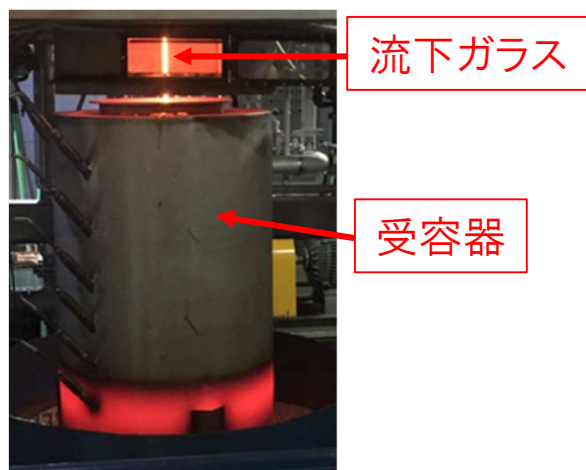
※3 熔融ガラスの流下は炭酸塩スラリーの供給を継続した状態で行う。

※4 吹き込みとは、ドレンアウトの前に仮焼層の溶かし込みを行うことである。

## 6-2. 廃棄物の高充填化(炭酸塩スラリー): 予備試験(ガラス製造速度の設定) **IHI**

### 成果

- 廃棄物充填率を34wt%と上げた場合に、模擬炭酸塩スラリーの供給と溶融ガラスの流下による液位の変化に対し運転を継続できることを確認した。
- 目標のガラス温度を1100°Cに維持し、運転できる見込みがあるガラス製造速度として20kg/hに設定した。
- 通常はガラス中に結晶が析出しないような廃棄物充填率(20wt%)での運転を考えているが、今回の結果より、運転中に一時的に供給廃棄物の偏りや密集など部分的な過剰充填率となるガラス部ができる等の原因で、結晶が析出するようなことが起きた場合においても、運転を継続可能であることを確認できた。



ガラス流下のイメージ

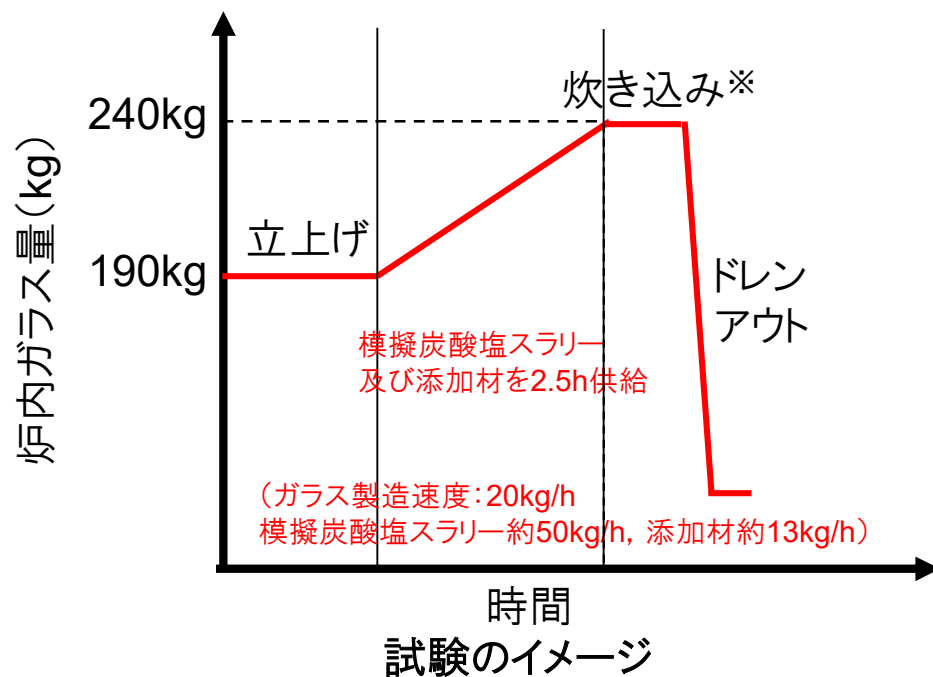


炉内写真(供給開始50min)

## 6-2. 廃棄物の高充填化(炭酸塩スラリー):本試験(運転性の確認)

- 目的** ➤ 設定したガラス製造速度(20kg/h)において安定した運転ができることを確認する。
- 計画** ➤ 実用規模CCIMを用いて、設定したガラス製造速度(20kg/h)の模擬炭酸塩スラリー処理試験を2.5h行い、以下を確認する。

目標のガラス温度維持: **1100°Cで維持**できることの確認



### 試験条件

項目	条件
目標温度	1100°C
廃棄物充填率	34wt%
供給時間	2.5h

※吹き込みとは、ドレンアウトの前に仮焼層の溶かし込みを行うことである。

- 成果** ➤ 事前に実施し設定したガラス製造速度20kg/hにて2.5h模擬炭酸塩スラリーを供給し運転した際に、目標のガラス温度を1100°Cに維持した運転が可能であることを確認した。
- 今回、ガラス中への廃棄物充填率は、廃棄物由来の結晶がガラス中に析出するように高く(34wt%)設定しており、その厳しい条件においても運転可能であることを確認できた。

## 6-3. 多様な廃棄物に対する適用性評価

### (1) 樹脂系廃棄物

**目的** ➤ 樹脂系廃棄物(キレート樹脂を使用)に対し, CCIM処理の適用性を確認する。

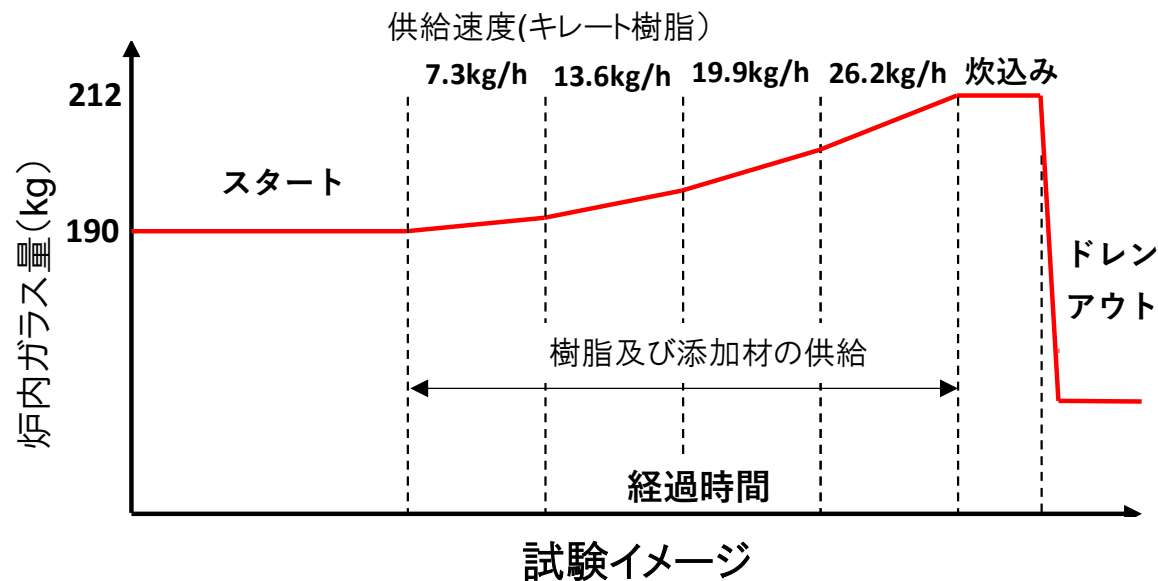
**計画** ➤ 供給速度をパラメータとし, 実用規模CCIMにてキレート樹脂の処理試験を行い以下を評価する。※キレート樹脂には, Feを8.8wt%(FeとFeOOH状態)含有させる。

目標のガラス温度維持: 1100°Cで維持できることの確認

ガラス固化体の品質: 有機物の無機化確認(ガラス固化体中の炭素(C)の残留確認)

※本試験では, 有機物の分解促進のため, 上部から挿入設置されているインジェクタ(p13炉内イメージ図参照)から酸素供給する。

※樹脂26.2kg/hはガラス  
製造速度11.5kg/hに相当



試験に用いるキレート樹脂外観  
(樹脂にFeを吸着させ,  
FeOOHと混合した状態)

# (1)樹脂系廃棄物

## 成果

### 【ポイント①(炉内状態の安定維持)】

- 供給速度7.3～26.2kg/hにてガラス温度を **目標温度に維持可能**であることを確認したことから、供給速度が最も早い26.2kg/hが適切と判断した。
- 樹脂を十分に分解し炭素(C)をCO<sub>2</sub>とするために、供給する樹脂中のCの約3倍のmol量の酸素(O<sub>2</sub>)をバブリングとは別にCCIM上部(インジェクター)から常に供給した。

### 【ポイント③(ガラス固化体の品質)】

- ガラス中に残存する炭素は供給量に対し0.15wt%であり、供給した樹脂が **無機化できた**と判断した。



(1kg流下時)



(100kg流下時)



(145kg流下時)

ドレンアウト時のサンプリングガラスの外観

( )はサンプリングのタイミング

※ドレンアウト時の総流下量は180kg



炉内写真(26.2kg/h供給開始2min)

### ガラス中の炭素の残存率

供給炭素(C)量	12.7kg
ガラス中の炭素濃度	0.009wt%
ガラス中の炭素量	0.019kg
炭素の残存率 (ガラス中の炭素量 / 供給炭素量 × 100)	<b>0.15wt%</b>

※乾燥樹脂中のC濃度:61.7wt%

## (2) 炭酸塩スラリー脱水体

**計画** ※本試験では、代表して、模擬炭酸塩スラリー脱水体にて試験を実施する。

- フィルタープレスで作製した模擬炭酸塩スラリー脱水体を乾燥・粉砕したもの※1を用いて実用規模CCIMIにてガラス固化処理試験を2回(Test2-1, Test2-2)行う。
- Test2-1では模擬炭酸塩スラリー脱水体を2.5h供給し、溶融ガラスを目標のガラス温度に維持可能な運転条件(電力やバブリング流量等)の確認を行い、Test2-2ではTest2-1の運転条件結果を基に、脱水体を連続供給しガラス固化を行い以下を評価する。

※1: ディスクドライヤで粉砕乾燥し、供給試験した後のものを用いる。

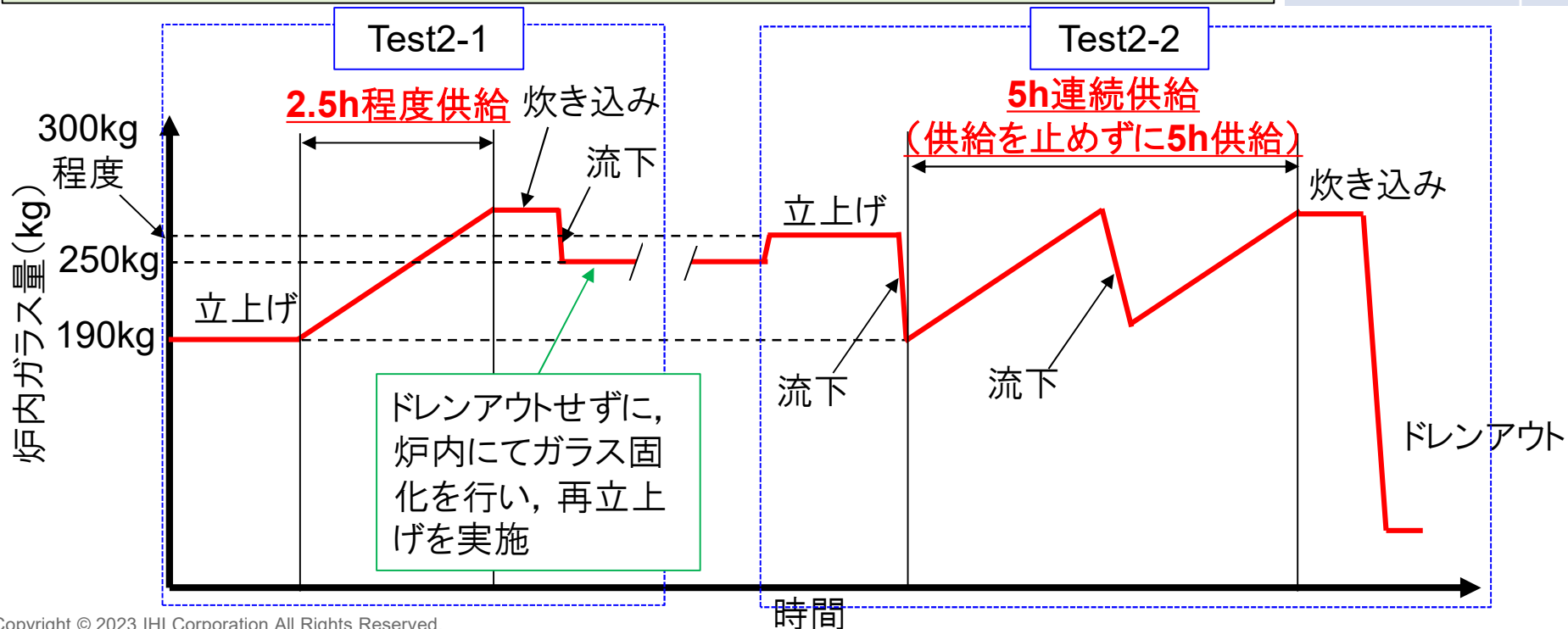
試験条件

項目	条件
目標温度	1100°C
廃棄物充填率	20wt%
供給時間	(1回目)2.5h (2回目)5.0h

目標のガラス温度維持: **1100°Cで維持**できることの確認

ガラス液位増減の影響: 模擬炭酸塩スラリー脱水体の供給と溶融ガラスの流下による**液位の変化に応じて運転を継続**できることの確認

ガラス固化体の品質: 流下する溶融ガラスのサンプリングにて、均質性、化学的安定性、圧縮強度を取得・評価



## (2) 炭酸塩スラリー脱水体

### 成果 【ポイント①(炉内状態の安定維持)】

- Test2-1では、供給速度(13.7kg/h)\*において、ガラス温度を目標温度に維持可能な運転条件(電力やバブリング流量等)を確認した。

※供給速度13.7kg/hはガラス製造速度40kg/hに相当(炭酸塩スラリー状態での処理速度と同等)

- Test2-2では、**模擬炭酸塩スラリー脱水体の供給を継続しながら、溶融ガラスの流下が可能**であることを確認した。炉内は非常に安定しており運転しやすい廃棄物であることを確認した。



炉内写真 (Test2-2)  
(13.7kg/h供給開始約73min)

### 【ポイント③(ガラス固化体の品質)】

- Test2-2のサンプリングガラスは外観上結晶は見られず、また、XRDからも結晶ピークが無く均質であることを確認した。ガラス組成は分析結果より廃棄物成分であるCaOとMgOが目標通り含まれており、脱水体を処理し均質なガラス固化が可能である見通しが得られた。
- ガラスの規格化浸出量も制限値より低く、圧縮強度も72MPaであり均質・均一固化体の埋設基準値(1.5MPa以上)を十分に満足することを確認し高品質なガラスであった。

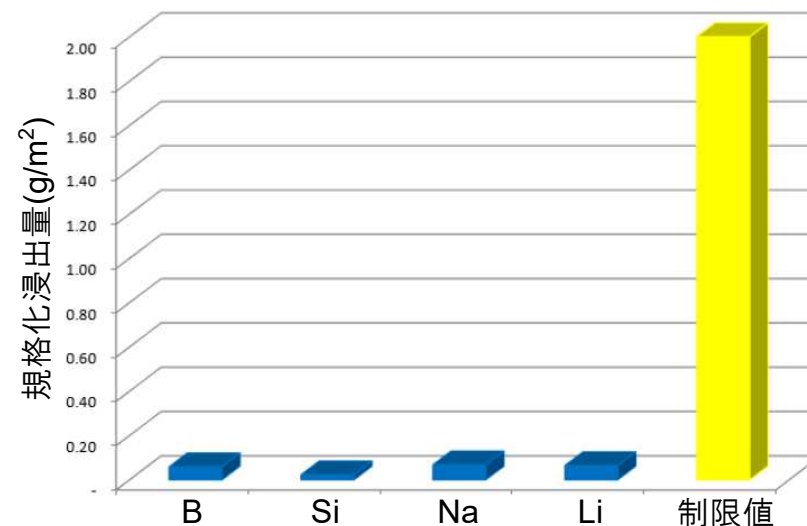


(10kg流下時)

(70kg流下時)

(ドレンアウト200kg流下時)

流下ガラス外観(Test2-2)



PCT-A試験(75~150μmの粉末ガラスを90°C純水に7日間浸漬させた際の元素浸出)(Test2-2試料)



## 6-4.CCIMの低温運転に向けた開発

### (1) ガラス組成開発(鉄共沈スラリー)

#### 目的

- 2019年度までに模擬鉄共沈スラリーを熔融温度1100°Cで35wt%含有できるガラス組成を開発した。Csの揮発抑制を目的として、これまで開発したガラス組成の熔融温度より低下させ、1000°C以下(可能な限り低い温度を検討)でガラス化可能な組成(低温化組成)を開発する。

#### 計画

- 熔融温度を1100°Cから低下できる組成を検討し、ガラスを作製し、ガラス化状態の評価を目視および結晶物の確認等から行う。
- 候補組成の物性評価(高温粘度, 電気伝導度)を実施する。

#### 成果

- 2019年度の開発組成から、粘度低減および電気伝導度増大のため、SiO<sub>2</sub>の一部をNa<sub>2</sub>OとLi<sub>2</sub>Oに分配し、候補組成を設定。
- 900°Cで熔融したガラス固化したサンプルを目視およびXRDで観察し、未熔融物が無く、ガラス化状態が良好であることを確認した。
- 候補組成の模擬鉄共沈スラリーのガラスについて、高温粘度・電気伝導度を測定し、CCIMへの適用性を評価。
- いずれの候補組成もCCIMへ適用するための判断基準を満足することを確認。

## 6-4.CCIMの低温運転に向けた開発

### (1) ガラス組成開発(炭酸塩スラリー)

#### 目的

- 2019年度までに模擬炭酸塩スラリーを1100°Cで20wt%含有できるガラス組成を開発した。Csの揮発抑制を目的として、溶融温度を低下させたガラス組成を開発する。

#### 計画

- 溶融温度を1100°Cから低下できる組成を検討し、ガラスを作製し、ガラス化状態の評価を目視および結晶物の確認等から行う。
- 候補組成の物性評価(高温粘度, 電気伝導度)を実施する。

#### 成果

- ガラス組成と温度から物性(粘度と電気伝導度)を予測するモデルを開発し、950°Cにて物性がCCIMへ適用するための判定基準を満たす候補組成を設定した。
- 候補組成について、るつぼ試験で、模擬廃棄物と添加材を900/950°Cで溶融したサンプルを目視で観察し、未溶融物が無く、ガラス化状態が良好であることを確認した。
- ガラス化を確認した候補組成の模擬炭酸塩スラリーのガラスについて、高温粘度・電気伝導度を測定し、CCIMへの適用性を評価。
- CCIMへ適用するための判断基準を満足することを確認した。

低温化ガラス  
ガラス組成開発

CCIM小型炉による連続運転試験  
供給30時間程度  
(p26以降記載)

## 6-4.CCIMの低温運転に向けた開発

### (2) 低温化に対するCCIM小型炉試験

- 計画
- 模擬炭酸塩スラリーを対象に、これまで1100°Cをガラス熔融温度としてきたが、Csの揮発抑制の観点からより低い温度(1000°C以下)にてガラス化可能な組成(低温化ガラス)を開発した(p25記載成果)。
  - 本試験では、CCIM小型炉を用いて、開発した低温化ガラスによる30時間程度の長時間の連続運転を行い低温化運転性の評価を行う。

低温化ガラス  
ガラス組成開発  
(p25記載)

CCIM小型炉による連続運転試験  
供給30時間程度

試験名	目的
連続運転試験	<ul style="list-style-type: none"><li>• 長期連続運転性確認</li><li>• 核種(Cs,Sr)の廃ガスへの移行率取得</li><li>• ガラス固化体の均質性評価</li></ul>



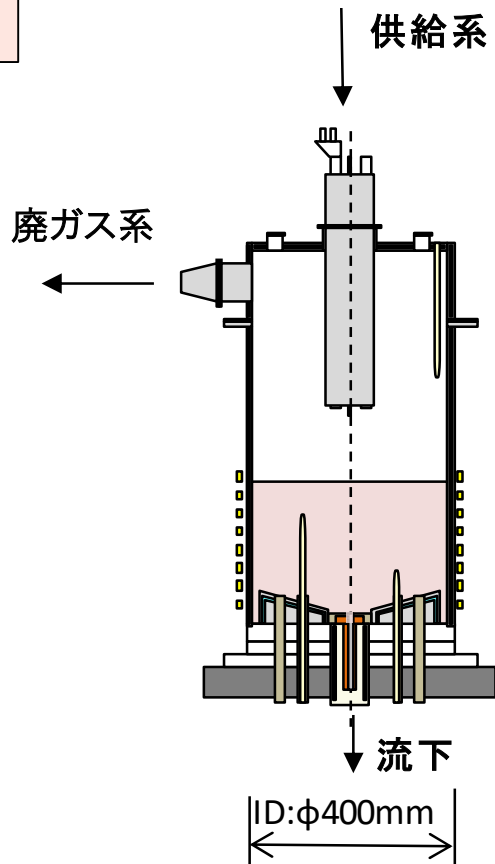
模擬炭酸塩スラリー  
(タンク内で攪拌している様子)

※スラリーはタンクに入れ、ポンプを用いてCCIM小型炉に定量供給を実施した。

# 6-4.CCIMの低温運転に向けた開発

## (2) 低温化に対するCCIM小型炉試験

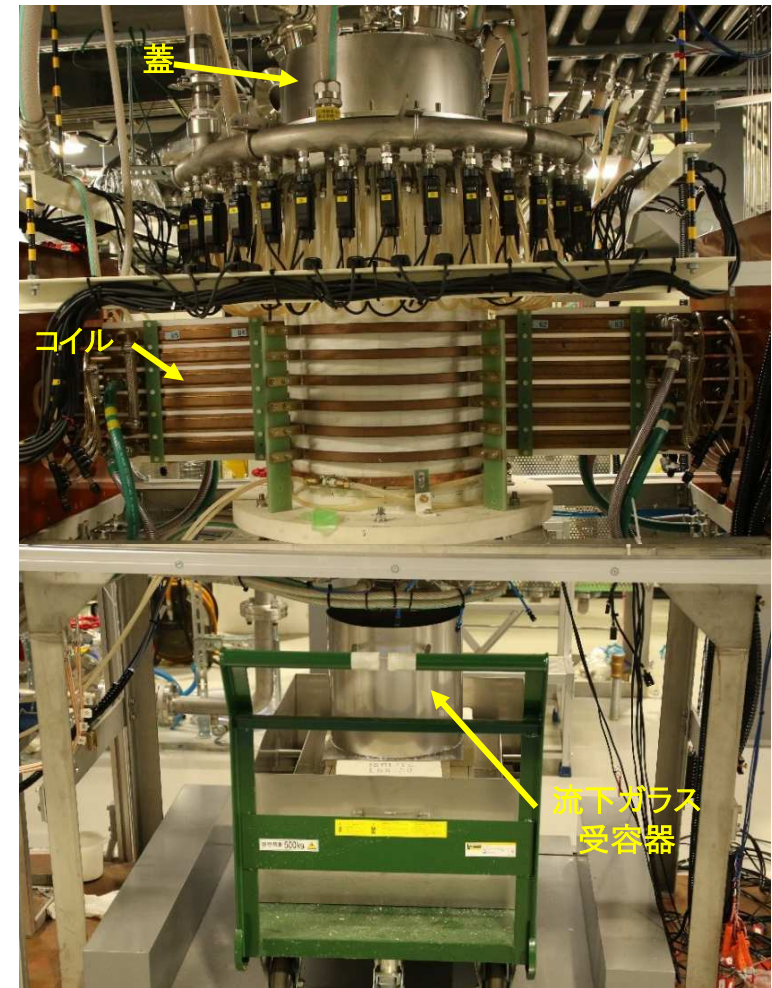
### CCIM小型炉



**CCIM小型炉概要図**

加熱方式	高周波誘導
冷却方式	壁面, 蓋部, 底部を水冷
炉直径	400mm
バブリング	空気バブリングあり, 炉底部より挿入(9箇所)
ガラス温度計	3本(炉底部より挿入), 高さ方向7~9点
流下方式	炉底部から下抜き流下(フリーズバルブ)
廃ガスサンプリング	熔融炉出口で等速吸引サンプリングを実施

定格出力	定格電流	定格電圧
200kVA	550A	400V



**CCIM小型炉外観**

# 6-4.CCIMの低温運転に向けた開発

## (2) 低温化に対するCCIM小型炉試験

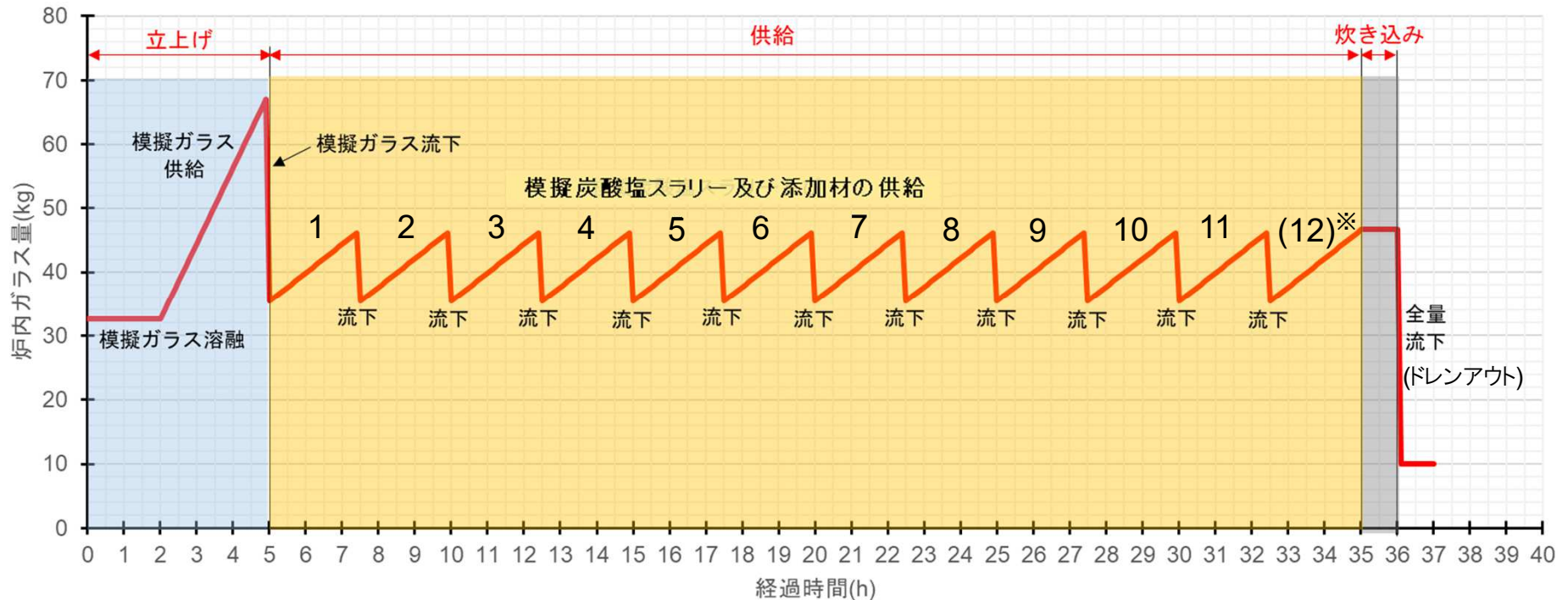
計画: 長期連続運転試験(当初計画)

長期連続運転試験条件

項目	条件
1バッチ時間	2.5h
1バッチのガラス製造量	11kg
バッチ数	12バッチ(30h)
目標ガラス温度	1000°C

流下終了から次の流下  
終了を1バッチと定義

※: 12バッチ目については,  
流下流量から炊込み前まで  
を1バッチとした



# 6-4.CCIMの低温運転に向けた開発

## (2) 低温化に対するCCIM小型炉試験

計画:連続運転試験(試験中に変更した計画)

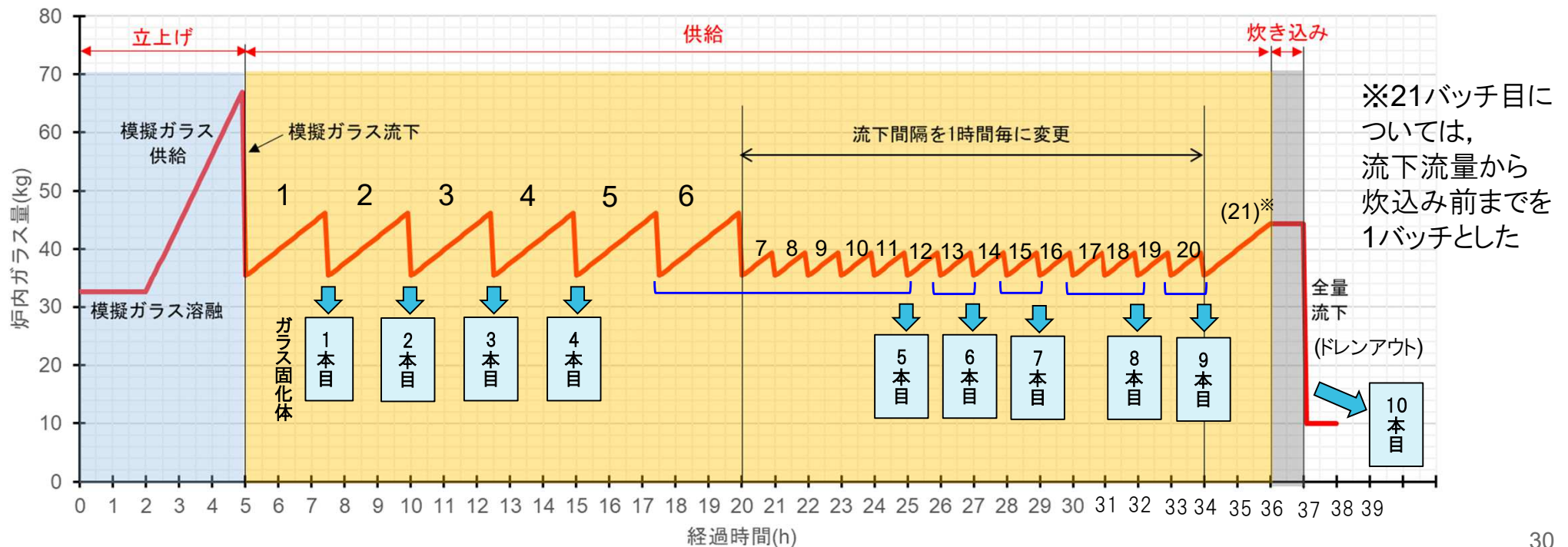
- 流下は2.5時間経過時に、2.5時間における炉内の増加量相当のガラスを流下する予定であったが、2.5時間毎の流下ではガラス液位の上下の変化が大きく、仮焼層を維持することが困難になったため、7バッチ目以降、ガラス液位の上下の変化を小さくすることを目的として1時間毎の流下に計画を変更した。

連続運転試験条件(当初計画)

項目	条件
1バッチ時間	2.5h
1バッチのガラス製造量	11kg
バッチ数	12バッチ(30h)



項目	条件
1バッチ時間	<b>1h(最終バッチのみ2h)</b>
1バッチのガラス製造量 (7バッチ以降)	<b>4.5kg</b>
バッチ数	<b>21バッチ(30h)</b>



※21バッチ目については、流下流量から炊込み前までを1バッチとした

## 6-4.CCIMの低温運転に向けた開発 (2) 低温化に対するCCIM小型炉試験

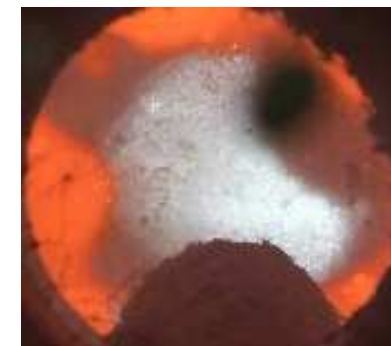
成果

### 【ポイント①(炉内状態の安定維持)】

- 6バッチ目までは、2.5時間毎の流下にて運転を試みたが、ガラス液位の変動が大きくなった。このため、ガラス液位が高い状態では、最低流量のバブリングにおいて、仮焼層が急激に反応し、仮焼層の維持が困難となった。仮焼層の急激な反応が起きると、低温化ガラスの目標ガラス温度範囲以上にガラス温度が上昇し、また、炉底温度が低下したため、模擬炭酸塩スラリーの供給を停止して、炉内の熔融を安定させる必要があった。
- 7バッチ目以降は、流下間隔を1時間に変更し、ガラス液位の変化を少なくすることで運転を安定させることを試みた。その結果、流下間隔の変更後は、仮焼層を維持した運転に改善した。17バッチ以降は、ガラス温度を目標の1000°Cに維持することができ、運転方法を調整することで低温化ガラスをCCIMに適用できる見通しを得た。

### 【ポイント②(核種移行の抑制)】

- 廃ガスの等速吸引サンプリングを実施した結果、Cs及びSrは、実規模における1100°Cの運転における移行率と同程度となることが分かった。
- これは、ガラスの高温粘度(1000°C)が規定範囲内(10～150poise)ではあるが、低粘度側(13poise)であり、それに対し、バブリング流量が高かったことが原因であると考えられる。バブリング流量を下げ、それに応じて供給速度を下げることで改善できる可能性がある。



運転中の仮焼層

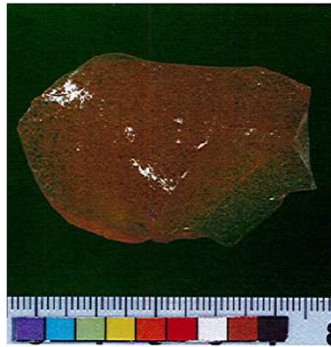
# 6-4.CCIMの低温運転に向けた開発

## (2) 低温化に対するCCIM小型炉試験

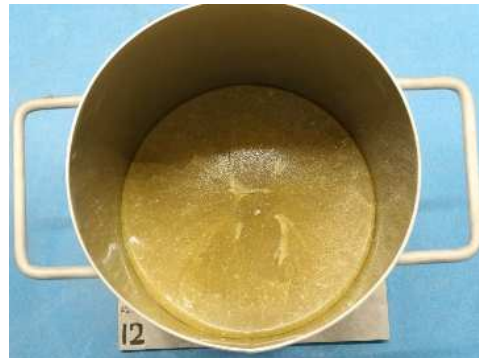
成果

### 【ポイント③(ガラス固化体の品質)】

- 全部で21回流下を行い、10本のガラス固化体を作製した。5本目のガラス固化体は半分に切断し、切断面について外観上、未溶融物及び結晶は確認されず、ガラスは光沢があり外観観察上均質であると判断した。
- 半分に切断した5本目のガラス固化体については、7回分(5~11回)の流下にてガラス固化体を作製したが空隙なく作製できていることを確認できた。

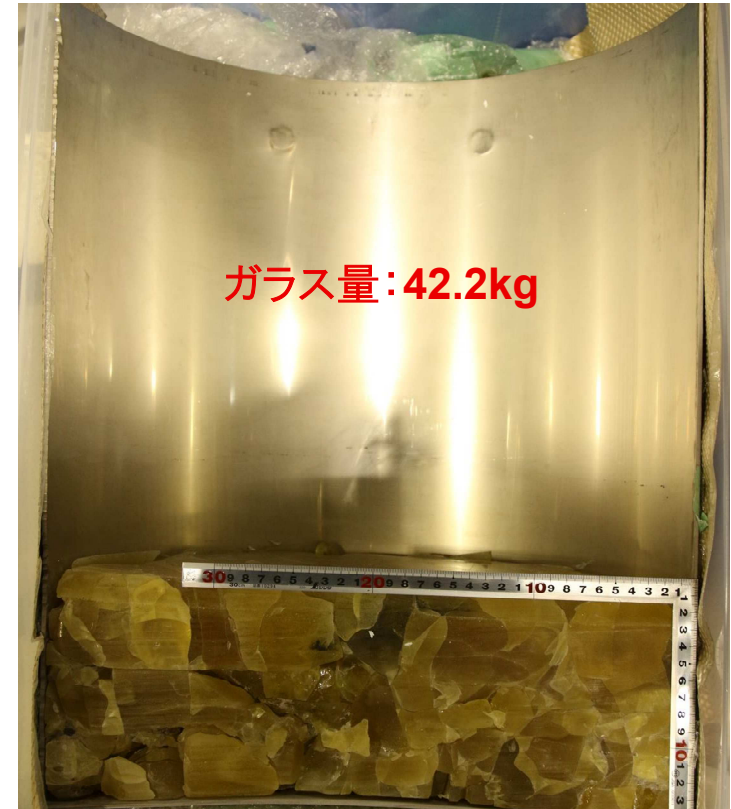


1本目(1回目の流下にて作製)



9本目(20回目の流下にて作製)

ガラス固化体容器中の流下ガラスおよび容器から回収した流下ガラスの外観



5本目(5~11回目の流下にて作製)切断面

※ウォータージェット切断

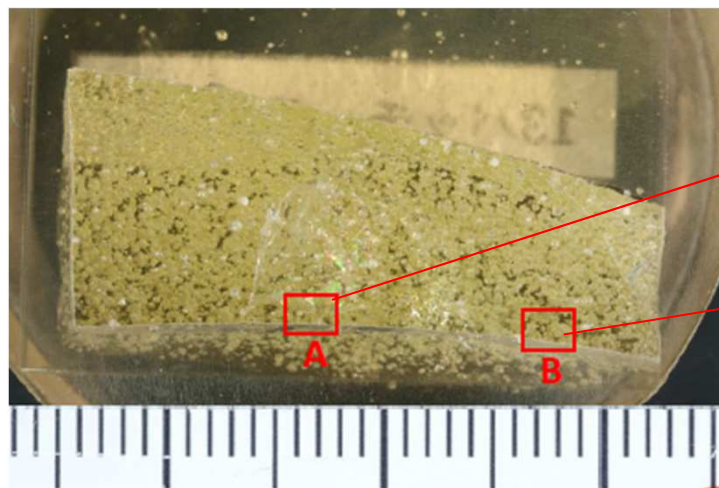


## 6-4.CCIMの低温運転に向けた開発 (2) 低温化に対するCCIM小型炉試験

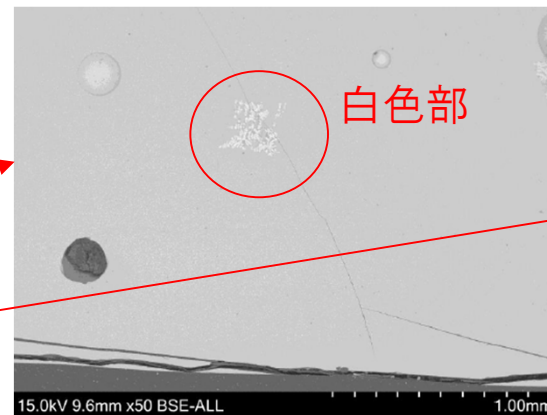
成果

【ポイント③(ガラス固化体の品質)】

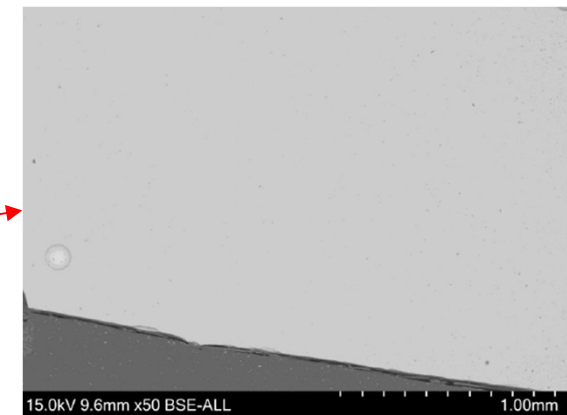
- 作製した10本のガラス固化体について組成分析, SEM観察を実施した。ガラス固化体の組成については1本目から10本目まで大きな差異はなく, 均質であることが確認できた。
- ガラス固化体のSEM観察結果からは, 良質なガラス質であることが確認された。 極わずかに白色の結晶が見られるが, これはMg濃度が低く, Ca濃度が高い箇所であることを確認した。これら結晶は凝集していないことからガラス固化体の性状に影響を与えるものではなく, 均質な状態であると判断した。



ガラス固化体のSEM観察点(10本目)



SEM観察A点



SEM観察B点

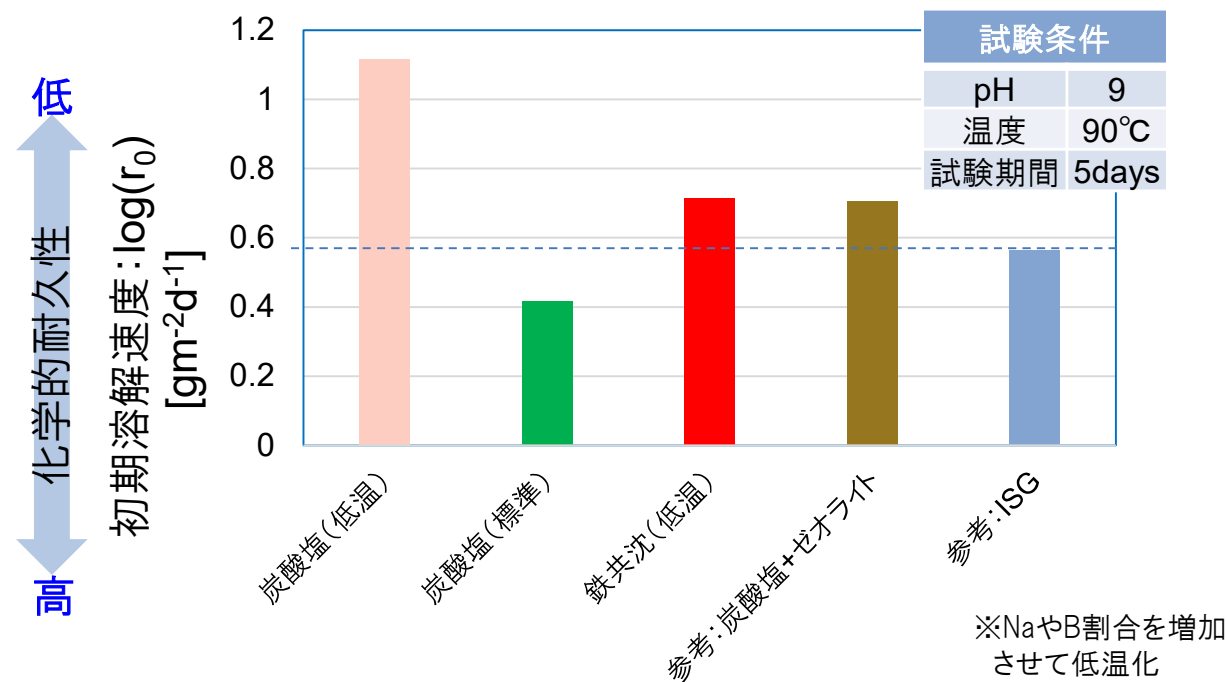
### ガラス固化体の状態観察結果(SEM観察)

# 6-4.CCIMの低温運転に向けた開発

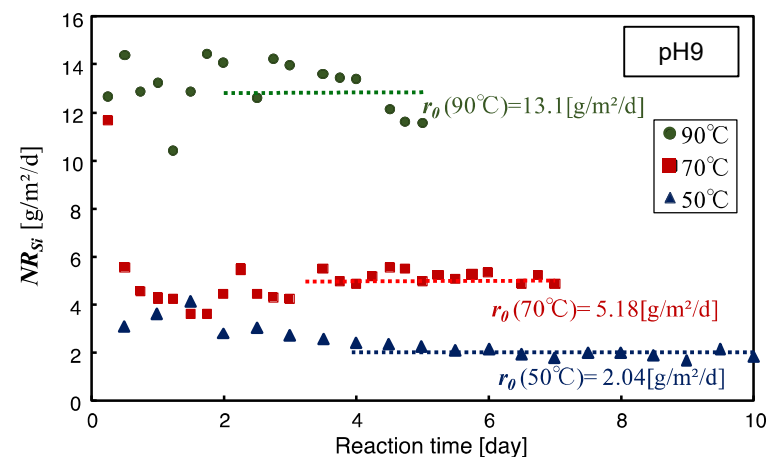
## (3) ガラス組成開発: 化学的耐久性(炭酸塩スラリー)

### 成果

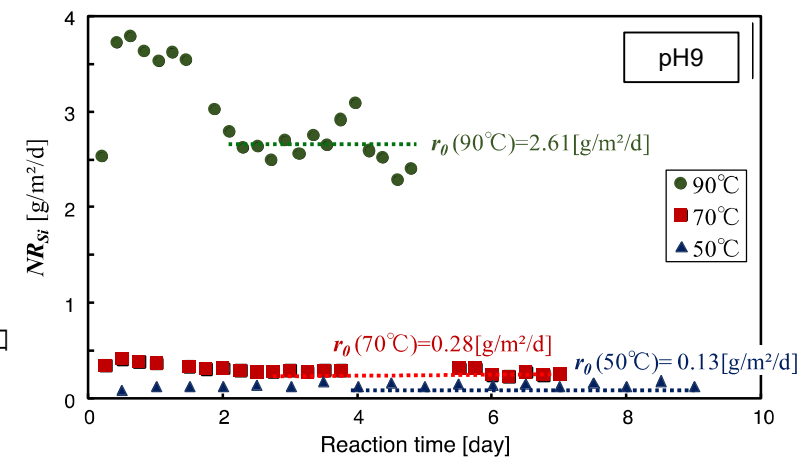
- 各廃棄物に対する選定組成において、マイクロチャンネル流水試験法によって、試料の浸漬時の温度条件を変化(50-90°C)させたときの化学的耐久性(初期溶解速度( $r_0$ ))を取得した。
- 鉄共沈スラリーの低温化組成の初期溶解速度は、標準ガラス(ISG)と同程度であった。
- 炭酸塩スラリーの低温化組成の初期溶解速度は、標準組成(溶融温度1100°C)に比べ増加したが、その増加割合は10倍未満であった。



炭酸塩(低温): 模擬炭酸塩スラリー20wt% 低温化組成  
 炭酸塩(標準): 模擬炭酸塩スラリー20wt% 標準組成(溶融温度1100°C)  
 鉄共沈(低温): 模擬鉄共沈スラリー35wt% 低温化組成  
 炭酸塩+ゼオライト: (参考) 模擬炭酸塩スラリー+ゼオライト混合組成(2020年度成果)  
 ISG: (参考) ISG(国際標準6成分高レベル模擬ガラス固化体)



炭酸塩スラリー20wt% 低温化組成



炭酸塩スラリー20wt% 標準組成

### 規格化溶解速度の比較

$NR_i$ ; 規格化溶解速度: 各元素の溶解速度をガラス全体としての溶解速度に換算した値

## 6-5.廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

## 2021年度の試験実施内容

⇒2019～2020年度の試験結果から、2021年度は固体廃棄物(含水体)の乾燥粉碎に係る試験を実施

試験 No.	実施項目	確認事項
1	乾燥装置の選定	・含水した固体廃棄物を空気移送出来るレベルまで、乾燥・粉碎可能な装置の選定
2	含水ゼオライトの乾燥粉碎試験	・固体廃棄物の含水率をパラメータとした乾燥粉碎試験を実施し、乾燥粉碎試験後の固体廃棄物の状態を確認
3	模擬炭酸塩スラリー脱水体の乾燥粉碎試験	(模擬炭酸塩スラリー及び模擬鉄共沈スラリーは、フィルタプレス済みであるため、含水率のパラメータを振っていない)
4	模擬鉄共沈スラリー脱水体の乾燥粉碎試験	・乾燥中の廃ガスへのCs移行量測定 (＊含水ゼオライトの乾燥粉碎試験のみ実施)
5	乾燥粉碎試験後の模擬炭酸塩スラリーの移送試験	・乾燥粉碎試験後の模擬炭酸塩スラリー及び模擬鉄共沈スラリーを用いた減圧式による空気輸送および無軸スクルーフィーダによる供給
6	乾燥粉碎試験後の模擬鉄共沈スラリーの移送試験	・移送誤差、ハンドリング上の課題の抽出

## 6-5.廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

### (1)乾燥装置の選定

- 含水状態の砂状固形物(ゼオライト, ケイチタン酸塩)及び脱水処理体(模擬炭酸塩スラリー, 模擬鉄共沈スラリー, フェロシアン化物スラッジ)を乾燥・粉砕可能な既存の乾燥装置の調査を行った。
- 乾燥装置の選定に先立ち, 1時間あたりの乾燥処理量, 乾燥装置への原料供給方法, 乾燥原料の排出方法及び乾燥原料の排出性, 乾燥時に発生する廃ガスの処理方法, 乾燥運転終了後における乾燥原料の装置内への残留量, 配置の自由度, メンテナンス性を考慮して採用可能な乾燥装置を選定した。

主な選定項目	選定項目の理由	採用可能技術
対象廃棄物を乾燥粉砕することに適している	後工程の供給設備に輸送技術が適用可能な状態にするため	<p>◎<u>ダブルディスクドライヤ</u></p> <p>×<u>ロータリードライヤ</u></p> <p>(ロータリードライヤは伝熱面積が小さく, 熱効率が悪い, 据付面積が大きくなることから, 運転時の装置立ち上げ, 立ち下げの応答性が悪い)</p>
乾燥粉砕した廃棄物の搬送, 排出能力を有している	連続処理のために乾燥粉砕した廃棄物の自動排出が可能とするため	
廃ガス処理運転が可能	処理で発生する蒸気やダストを吸引し, 適切に処理を行い, 回収するため	
伝熱面積が大きく, 据付面積が小さい	機器を小型化し, 設備全体を大きくしないため	
運転時の装置立ち上げ, 立ち下げが容易	CCIMの運転に合わせて, 廃棄物を速やかに乾燥粉砕処理を行うために, 起動・停止性が優れていることが望ましいため	
装置内になるべく廃棄物が残留しない	装置の保守性や廃棄物の取替時の混入汚染を防ぐために装置内に廃棄物が残留しないことが望ましいため	

⇒ ダブルディスクドライヤを用いて, 含水ゼオライト, 模擬炭酸塩スラリー脱水体, 模擬鉄共沈スラリー脱水体の移送試験を実施する。

## 6-5.廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

### (2) 含水ゼオライトの乾燥粉碎試験

#### ○ダブルディスクドライヤを用いた含水ゼオライトの乾燥粉碎試験 【試験結果】

##### ➤ 含水率45wt%のとき

⇒蒸気圧0.19MPa(G)の乾燥条件においては、乾燥後の含水率が4.0～5.0wt%で安定することを確認した。

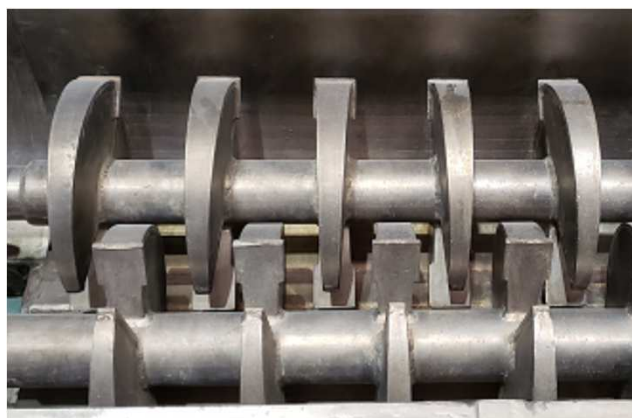
⇒蒸気圧0.10MPa(G)の乾燥条件においては、乾燥後の含水率11～12wt%で安定することを確認した。

##### ➤ 含水率60wt%のとき

⇒蒸気圧0.19MPa(G)の乾燥条件においては、乾燥後の含水率が7.0～8.0wt %で安定することを確認した。



試験中のドライヤ内の様子



試験前後のディスク羽根の様子

【成果】 含水率45wt%および60wt%のゼオライトをダブルディスクドライヤを用いて蒸気圧0.19MPa(G)で乾燥・粉碎し、**空気輸送が可能な状態(含水率 10wt%以下)まで乾燥・粉碎することができた。**

## 6-5.廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

### (2) 含水ゼオライトの乾燥粉碎試験

➤ 本乾燥装置で原料を乾燥粉碎させた際に発生する廃ガスへのCs移行量を把握する。

⇒未使用状態の固体状ゼオライト30kgにイオン交換水100L，約400gの塩化セシウム試料を加え，24時間攪拌した後，遊離水を除去した。

⇒未使用状態の固体状ゼオライトに非放射性的Csを吸着させた後に乾燥粉碎試験を行い，試験中に発生する廃ガスを熱交換器を通じて凝縮水として回収，ICP-MS法により分析し，Csの廃ガスへの移行量を測定した。

#### 【結果】

分析試料	Cs量 分析結果	Csの移行率
ゼオライトにCsを吸着させたときの溶液	1.6 mg	(乾燥前のゼオライト中のCs量)
廃ガスからの回収凝縮水	0.009 mg	Csの廃ガスへの移行率:0.56% ( $0.009 \div 1.6 \times 100$ )

ゼオライトにCsを吸着させた溶液中のCs量に対する，乾燥装置の廃ガスからの回収凝縮水中のCs量の比率(移行率)

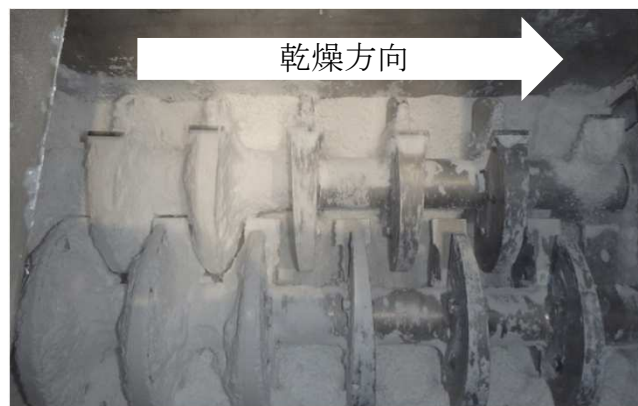
⇒Csの廃ガスへの移行率は0.56%であり，乾燥を行ってもほぼ廃ガス中へ移行しないことを確認した。

## 6-5.廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

### (3) 模擬炭酸塩スラリー脱水体の乾燥粉碎試験

#### ○ダブルディスクドライヤを用いた模擬炭酸塩スラリー脱水体の乾燥粉碎試験【結果】

- 蒸気圧**0.19MPa(G)**の乾燥条件において、乾燥粉碎試験前の含水率は約**17wt%**だったが、乾燥後の含水率は**1.0wt%未満**で安定することを確認した。
- 蒸気圧**0.10MPa(G)**の乾燥条件においても、乾燥粉碎試験前の含水率は約**17wt%**だったが、乾燥後の含水率が**1.0wt%未満**で安定することを確認した。



試験中のドライヤ内の様子



固着を確認



乾燥粉碎前後の模擬炭酸塩スラリーの外観

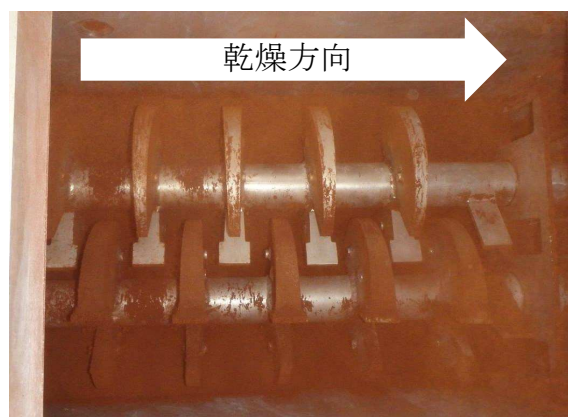
【成果】 模擬炭酸塩スラリー脱水体をダブルディスクドライヤを用いて乾燥・粉碎し、  
空気輸送が可能な状態(含水率 **1.0wt%未満**)まで乾燥・粉碎することができた。

## 6-5.廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

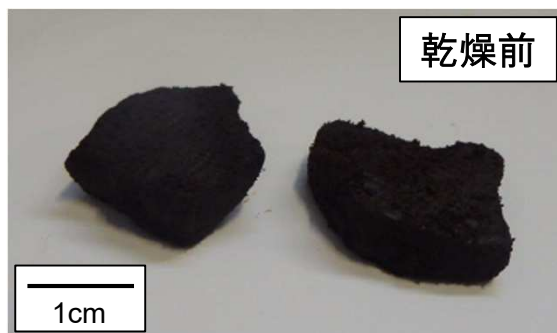
### (4) 模擬鉄共沈スラリー脱水体の乾燥粉碎試験

#### ○ダブルディスクドライヤを用いた模擬鉄共沈スラリー脱水体の乾燥粉碎試験 【結果】

- 蒸気圧**0.19MPa(G)**の乾燥条件においては、乾燥粉碎試験前の含水率は約**44wt%**だったが、乾燥後の含水率が**2.0wt%**程度で安定することを確認。(供給量:9.6kg/h)
- 処理能力に余裕が見られたことから、単位時間あたりの供給量を**1.5倍**にして乾燥粉碎試験を継続し、乾燥粉碎試験前の含水率は約**44wt%**だったが、乾燥後の含水率が**3.5wt%**程度で安定することを確認。(供給量:14.4kg/h)
- ディスク羽根やケーシングに固着することは無かった。



試験中のドライヤ内の様子



乾燥粉碎前後の模擬鉄共沈スラリー



【成果】 模擬鉄共沈スラリー脱水体をダブルディスクドライヤを用いて乾燥・粉碎し、  
空気輸送が可能な状態(含水率 **3.5wt%**以下)まで乾燥・粉碎することができた。

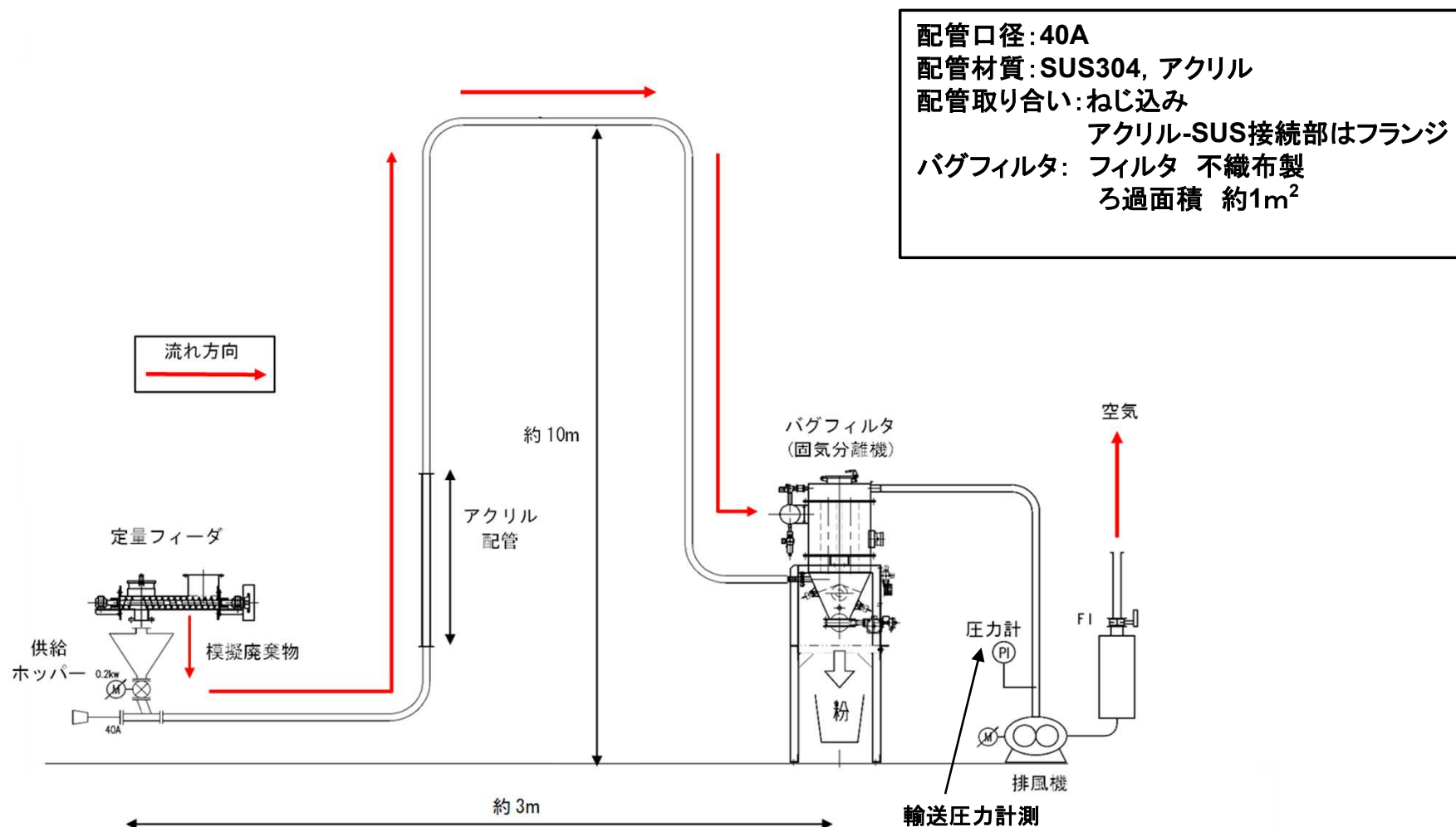


## 6-5. 廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

### (5) 乾燥粉碎試験後の模擬炭酸塩スラリーの移送試験

#### ○ 空気輸送装置（減圧式）移送試験【試験装置】

- 下記のような試験装置を用いて、模擬炭酸塩スラリーの空気輸送装置（減圧式）による移送試験を行った。



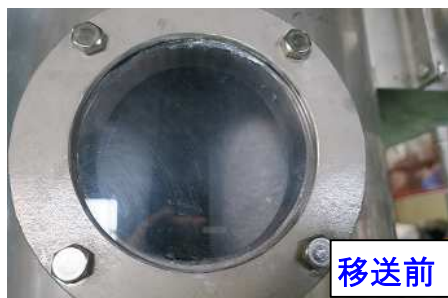
## 6-5.廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

## (5)乾燥粉碎試験後の模擬炭酸塩スラリーの移送試験

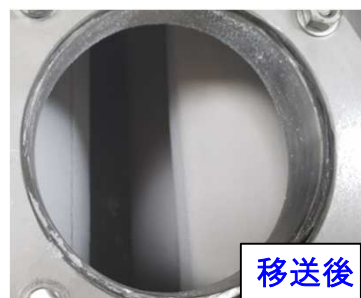
## ○空気輸送装置（減圧式）移送試験【結果】

- 移送試験の結果、輸送圧力が安定していたとともに、目標移送速度120kg/h\*に対して最大誤差は±3%未満程度であった。また、フランジからのリーク、配管の閉塞、バグフィルタの目詰まりは無かった。（\*CCIMでの目標供給速度(約19kg/h)に対して、約6時間に1回の輸送を行うことを想定した値。）

	模擬炭酸塩スラリー移送試験結果		
	1回目	2回目	3回目
移送速度(kg/h) (誤差(%))	120.31 (+0.260%)	123.12 (+2.600%)	118.69 (-1.092%)
輸送圧力(kPa)	-15.8~-19.2	-15.4~-19.1	-14.3~-18.8



移送前



移送後

移送試験前後バグフィルタの様子  
(フィルタの表面に乾燥物の付着はみられるものの、移送速度の減少や運転継続ができなくなるほどのフィルタの差圧上昇は見られなかった。)



移送前



移送後

移送試験前後の透明アクリル配管部の様子  
(移送後の配管内にはほこり程度の付着しか確認されず、配管内で問題になるような残留はみられなかった。)

【成果】 乾燥粉碎後の模擬炭酸塩スラリーを安定して移送可能であることを確認した。

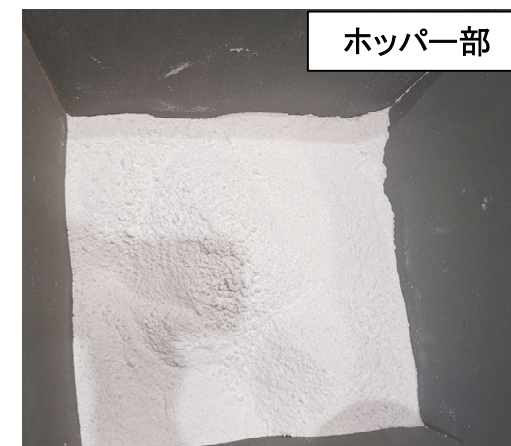
## 6-5.廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

### (5)乾燥粉碎試験後の模擬炭酸塩スラリーの移送試験

#### ○無軸スクリーフィーダ移送試験【結果】

- 無軸スクリーフィーダによる移送試験の結果、目標移送速度**40kg/h\***に対して誤差は**3～5%**程度であり、フィーダ内に付着や閉塞を生じることなく安定的に乾燥・粉碎後の模擬炭酸塩スラリーを移送することができた。（\*CCIMでの炭酸塩スラリー単独処理(廃棄物充填率:20wt%, ガラス製造速度:40kg/h)時の目標供給速度(約19kg/h)に運転裕度を持たせた値に設定した。）

	模擬炭酸塩スラリー移送試験結果		
	1回目	2回目	3回目
移送速度(kg/h) (誤差(%))	38.50 (-3.750%)	38.16 (-4.600%)	38.28 (-4.300%)



【成果】 乾燥粉碎後の模擬炭酸塩スラリーを安定して移送可能であることを確認した。

## 6-5.廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

## (6)乾燥粉碎試験後の模擬鉄共沈スラリーの移送試験

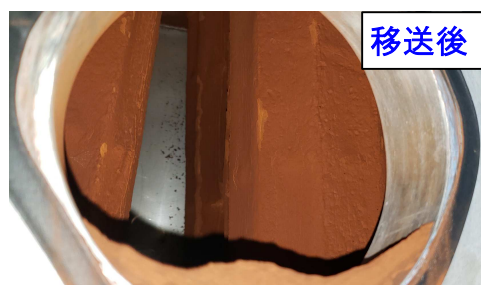
## ○空気輸送装置（減圧式）移送試験【結果】

- 移送試験の結果、輸送圧力が安定していたとともに、目標移送速度120kg/h\*に対して最大誤差は±3%未満程度であった。また、フランジからのリーク、配管の閉塞は無かった。

\*CCIMでの目標供給速度(約26.3kg/h)に対して、約4時間に1回の輸送を行うことを想定した値。

- バグフィルタに目詰まりや損傷は無かったが、フィルタ表面に4mm程度乾燥粉碎後のスラリーが積層していた。積層したスラリーはフィルタ内部まで入り込んでおらず、圧空により逆洗(再パルス)することで払い落すことができた。

	模擬鉄共沈スラリー移送試験結果		
	1回目	2回目	3回目
移送速度(kg/h) (誤差(%))	123.36 (+2.800%)	123.54 (+2.950%)	117.42 (-2.150%)
輸送圧力(kPa)	-19.6~-15.6	-20.1~-16.0	-21.8~-16.0



移送後

表面はがす  
約4mm積層



再パルス



フィルタ内側  
↓  
目詰まり無し

【成果】 乾燥粉碎後の模擬鉄共沈スラリーを安定して移送可能であることを確認した。

## 6-5. 廃棄物性状を踏まえた廃棄物供給系の検討

### (6) 乾燥粉碎試験後の模擬鉄共沈スラリーの移送試験

#### ○ 無軸スクリーフィーダ移送試験 【結果】

- 無軸スクリーフィーダによる移送試験の結果、目標移送速度**35kg/h\***に対して誤差は**1%程度**であり、フィーダ内に付着や閉塞を生じることなく安定的に乾燥・粉碎後の模擬炭酸塩スラリーを移送することができた。（\* CCIMでの鉄共沈スラリー単独処理（廃棄物充填率:35wt%, ガラス製造速度:40kg/h)時の目標供給速度(約26.3kg/h)に運転裕度を持たせた値に設定した。また、試験では模擬鉄共沈スラリーの移送速度が約35kg/hになるモータ周波数設定を調整して試験を行った。）

	模擬鉄共沈スラリー移送試験結果		
	1回目	2回目	3回目
移送速度(kg/h) (誤差(%))	34.99 (-0.028%)	35.13 (+0.371%)	35.39 (+1.114%)



【成果】 乾燥粉碎後の模擬鉄共沈スラリーを安定して移送可能であることを確認した。

## 6-6.廃棄物性状を踏まえた廃ガス処理系の検討

### 2021年度の廃ガス処理設備の検討内容

- 2020年度までの検討で将来のガラス固化設備ではCCIMは2系列必要なことがわかった。  
2系列同時運転を行うことを想定して、廃ガス処理設備の見直しを行った。

#### a. CCIM2系列同時運転での廃ガス処理設備(案)

- ◆ 2基のCCIMを同時運転した場合でもCCIMの気相圧力を2基とも目標値に制御できること。  
→HEPAまでをそれぞれのCCIMの専用の系統とする。
- ◆ 2基のCCIMを同時運転した場合でも放出放射能濃度が規制値以下であること。  
→放射能収支計算により、問題ないことを確認。(規制値の1/100以下であることを確認した)

放出放射能濃度の規制値 :  $^{90}\text{Sr}$   $5 \times 10^{-6}$  Bq/cm<sup>3</sup>  
 $^{137}\text{Cs}$   $3 \times 10^{-5}$  Bq/cm<sup>3</sup>

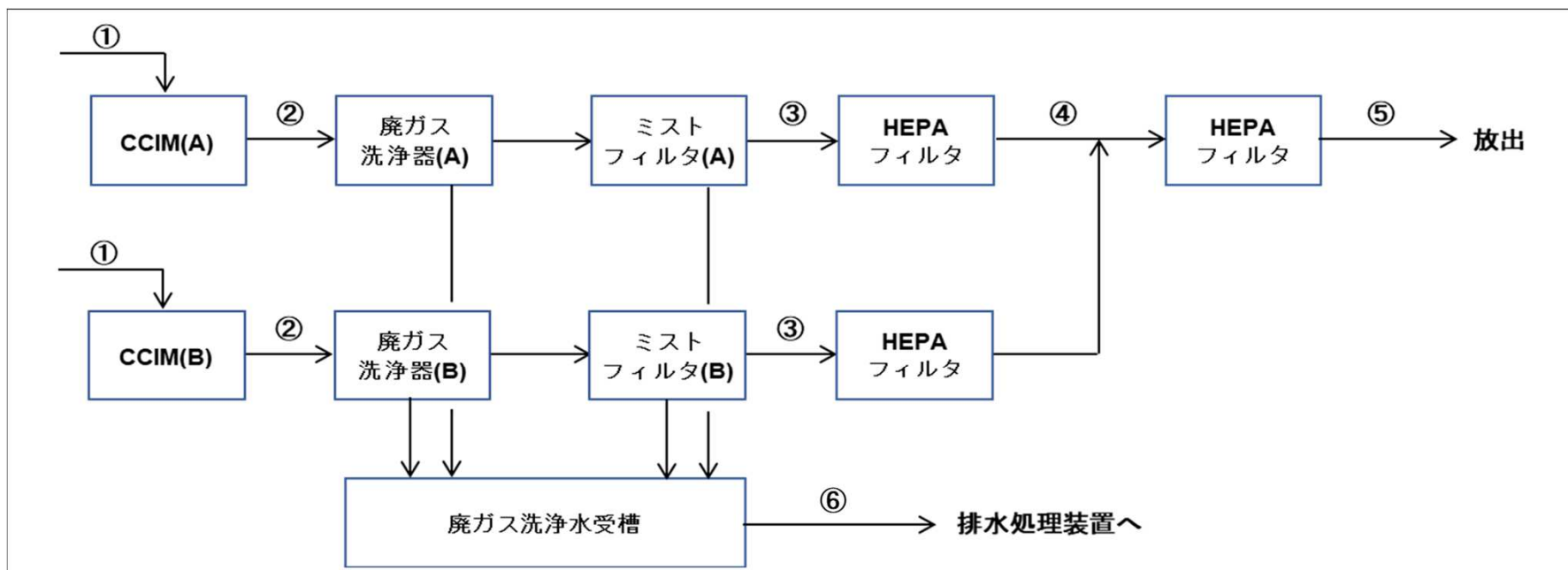
(東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則) より)

【成果】 2系統のCCIM運転にて放出放射能濃度の規制値に対して十分に裕度のある廃ガス処理系統構成であることを確認した。

## 6-6.廃棄物性状を踏まえた廃ガス処理系の検討

### 廃ガス処理設備の放射能収支;混合処理

#### 炭酸塩スラリー+ゼオライト(混合処理)



評価点と流体		①	②	③	④	⑤	⑥
		廃棄物+添加材	廃ガス	廃ガス	廃ガス	廃ガス	排水
炭酸塩スラリー+ゼオライト							
廃棄物含有率：72.0wt%							
ガラス製造速度：40kg/h相当							
全βγ	Bq/d	1.20E+15	1.20E+14	4.00E+11	8.00E+05	8.00E+02	2.39E+14
Cs	Bq/d	1.20E+15	1.20E+14	3.99E+11	7.99E+05	7.99E+02	2.39E+14
Sr	Bq/d	6.44E+12	1.93E+11	6.44E+08	1.29E+03	1.29E+00	3.85E+11
放出廃ガス流量	Nm <sup>3</sup> /h					600	
放出放射能濃度							
全βγ	Bq/cm <sup>3</sup>					5.56E-08	
Cs	Bq/cm <sup>3</sup>					5.55E-08	
Sr	Bq/cm <sup>3</sup>					8.95E-11	

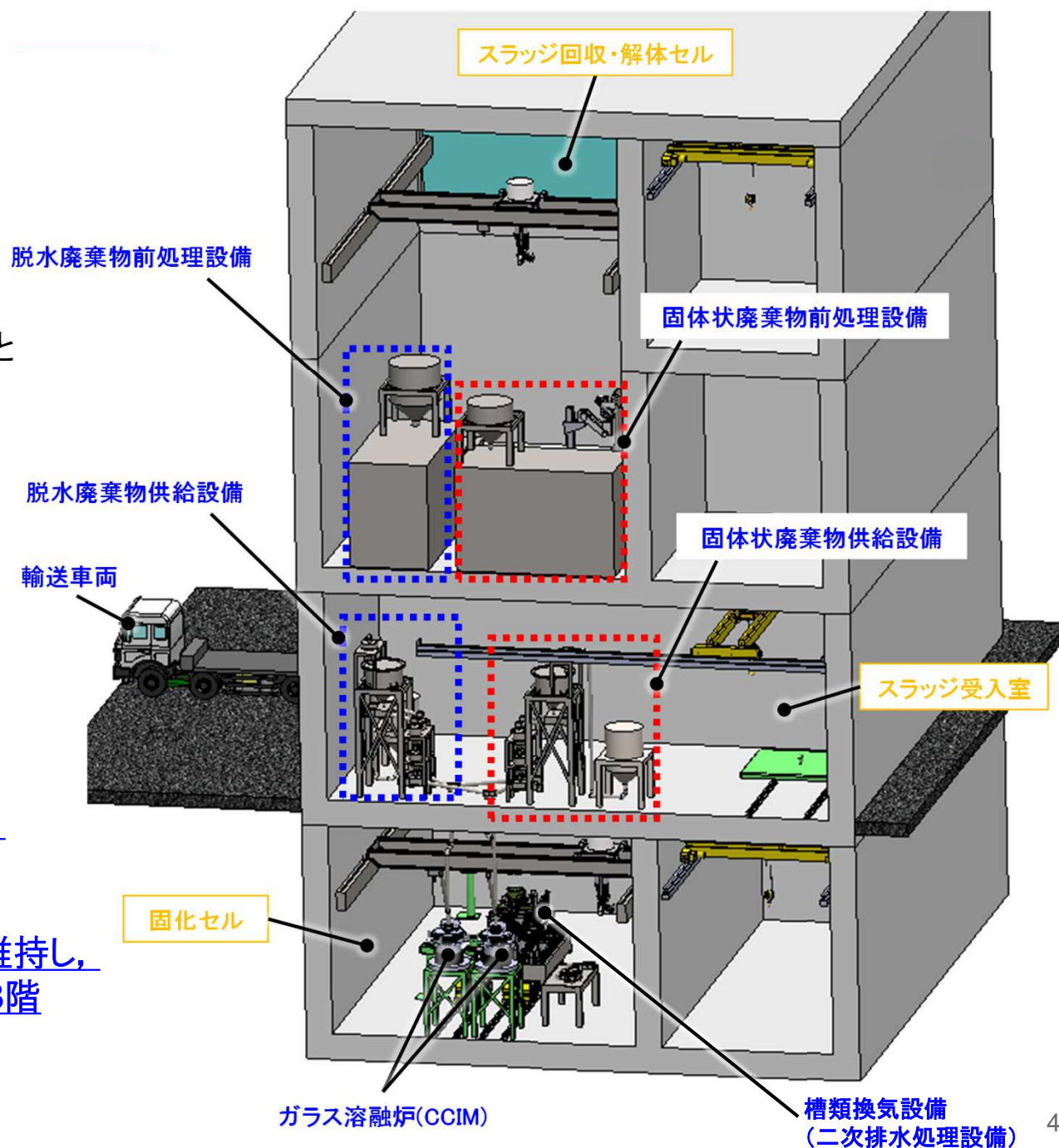
## 6-7.建屋配置検討

### 設備全体イメージ

- 2020年度の検討結果から、主に以下を更新した。
  - ・乾燥・粉砕機を前処理設備に追加
  - ・CCIM廃ガス処理機器の2系統化
  - ・供給設備の固体廃棄物の乾燥粉砕機等から発生するダスト等の回収用として槽類換気設備を追加
  - ・廃ガス処理設備等で発生する二次排水の処理設備を追加

#### 【成果】

CCIMを2基設置し、  
廃棄物受入れから前処理、  
固体系及び液体系の供給、  
熔融運転とガラス固化体の  
製造、遠隔ハンドリング・搬送、  
保管、払出し、容器解体設備、  
槽類換気、排水処理に加え、  
共通ユーティリティまで、  
2020年度検討の敷地面積を維持し、  
建屋を分離することなく、地上3階  
地下1階の1つの建屋とできる  
ことを確認した。





## 7. 全体成果まとめ

### ガラス固化技術の適用性について(各種廃棄物に対して)(1/2) ……ALPS由来廃棄物

廃棄物		これまでの成果
炭酸塩スラリー	組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <u>廃棄物充填率20wt%</u>で良好にガラス化でき、物性の判定基準を満たすガラス組成を選定。</li> <li>○ 廃棄物組成変動した場合、<u>広範囲(5σ)で高品質</u>なガラスが製造できることを確認。</li> <li>○ <u>30wt%以上に高充填化</u>した条件で高品質のガラスを製造できることを確認。<u>34wt%の結晶化する充填率</u>においても、安定的に処理可能な供給速度を確認するとともに、<u>流下可能</u>であることを実用規模炉で確認。</li> <li>○ Cs揮発抑制を目的として、運転に必要なガラス物性を満足しつつ、<u>熔融温度を1100°Cから950°Cまで低下できるガラス組成</u>を開発した。</li> <li>○ <u>低温化組成に対して、CCIM小型炉試験によるガラス化状態、Cs等の移行率の評価を実施し、低温で均質なガラスを製造できることを確認した。</u>但し、本評価結果を基に、安定性向上を考慮した組成の最適化が有効と考えられる。</li> </ul>
	運転性	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 開発したガラス組成(充填率20wt%)にて、実用規模試験を実施。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉内温度：<u>熔融温度1100°Cを維持</u>した運転が可能。</li> <li>・ Csの廃ガスへの移行率：<u>5%程度</u>(等速吸引廃ガスサンプリング結果)。</li> <li>・ ガラス固化体の品質：均質であり、化学的安定性が高く、圧縮強度も高く<u>高品質</u>であった。</li> <li>・ 流下性：繰り返し流下可能。<u>供給中に仮焼層を維持する保持運転無しで運転継続可能</u>。</li> </ul> </li> <li>○ <u>乾燥、粉砕処理後の模擬炭酸塩スラリーの脱水体に対して、安定した運転が可能</u>であることを確認した。今後、廃棄物供給中のダスト抑制のための含水量の調整が有効と考えられる。</li> <li>○ 低温化のガラス組成の場合は、組成に応じた更なる運転調整が有効と考えられる。</li> </ul>
鉄共沈スラリー	組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <u>廃棄物充填率35wt%</u>で良好にガラス化でき、物性の判定基準を満たすガラス組成を選定。</li> <li>○ 廃棄物組成変動した場合、SiO<sub>2</sub>濃度が低くなる場合に結晶化する傾向があるものの、<u>広範囲(5σ)で高品質</u>なガラスが製造できることを確認。</li> <li>○ <u>40wt%以上に高充填化</u>した条件で高品質のガラスを製造できることを確認。</li> <li>○ ガラス物性を満足しつつ、<u>熔融温度を1100°Cから1000°C以下に低下できるガラス組成</u>を開発した。</li> </ul>
	運転性	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 開発したガラス組成(充填率35wt%)にて、実用規模試験を実施。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉内温度：<u>熔融温度1100°Cを維持</u>した運転が可能。</li> <li>・ Csの廃ガスへの移行率：<u>5%程度</u>(等速吸引廃ガスサンプリング結果)。</li> <li>・ ガラス固化体の品質：均質であり、化学的安定性が高く、圧縮強度も高く<u>高品質</u>であった。</li> <li>・ 流下性：繰り返し流下可能。</li> </ul> </li> </ul>

## 7. 全体成果まとめ

### ガラス固化技術の適用性について(各種廃棄物に対して)(2/2)・・・SARRY/除染装置由来廃棄物

廃棄物		これまでの成果
ケイチタン酸塩	組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Csの揮発抑制し、目標とするガラス物性を満足するガラス組成を開発。<a href="#">溶融温度を1050°Cに低下</a>。</li> <li>○<a href="#">廃棄物充填率40wt%</a>で良好にガラス化でき、物性の判定基準を満たすガラス組成を選定。</li> </ul>
	運転性	<ul style="list-style-type: none"> <li>○実験室規模(ガラス作製量約10kg)試験にて、開発したガラス組成が<a href="#">連続処理可能</a>であることを確認。</li> </ul>
フェロシアン化物スラッジ	組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>○鉄リン酸ガラスおよびホウケイ酸ガラス組成によるガラス組成を開発。</li> <li>○ホウケイ酸ガラス組成に比べ、<a href="#">鉄リン酸ガラス組成では、大幅に廃棄物充填率を向上(38wt%)</a>できる見通しを得た。</li> </ul>
樹脂, 活性炭	組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>○<a href="#">減容性が高く</a>, 高品質にガラス化できるガラス組成を設定。</li> </ul>
	運転性	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ガラス化処理により、<a href="#">廃棄物の大幅な減容可能であることを確認</a>した。</li> <li>○実用規模試験の試験を行い、<a href="#">目標温度を維持した非常に安定した運転が可能</a>であった。供給速度を向上できる見通しがあり、処理能力向上に向けた運転最適化が可能である見込み。</li> </ul>
ゼオライト+炭酸塩スラリー混合	組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Csの揮発抑制し、目標とするガラス物性を満足するガラス組成を開発。<a href="#">溶融温度を1000°Cに低下</a></li> <li>○廃棄物充填率合計<a href="#">72wt%</a>で良好にガラス化でき、物性の判定基準を満たす候補組成を選定。</li> </ul>
ゼオライト+フェロシアン化物スラッジ混合	組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Csの揮発抑制し、目標とするガラス物性を満足するガラス組成を開発。<a href="#">溶融温度を1050°Cに低下</a>。</li> <li>○廃棄物充填率合計<a href="#">67wt%</a>で良好にガラス化でき、物性の判定基準を満たすガラス組成を選定。</li> </ul>
	運転性	<ul style="list-style-type: none"> <li>○開発したガラス組成(充填率67wt%)にて実用規模試験を実施。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・炉内温度：<a href="#">溶融温度1050°Cを維持</a>した運転が可能。</li> <li>・Csの廃ガスへの移行率：仮焼層を維持した運転(保持運転なし)により、Csの廃ガスへの移行率を<a href="#">1%以下に抑制</a>することができた。</li> <li>・ガラス固化体の品質：外観上均質であり、化学的安定性が高く、圧縮強度も高く<a href="#">高品質</a>であった。</li> <li>・流下性：繰り返し流下可能。<a href="#">供給中に仮焼層を維持する保持運転なしで運転継続可能</a>。</li> </ul> </li> </ul>

## 7. 全体成果まとめ

### CCIM運転性およびプロセス検討(供給系, 廃ガス処理系への適用性, 廃棄体化条件の検討)について

項目	これまでの成果
運転性 (廃棄物 共通)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○CCIM緊急停止時の対応として、<a href="#">運転時間に大きな影響を及ぼすことなく、再立ち上げが可能</a>であることを実用規模炉で確認するとともに、実機を想定した<a href="#">遠隔操作手法</a>を検討した。</li> <li>○CCIMの炉内の温度分布を把握する手法として、<a href="#">炉内シミュレーションモデルを構築</a>した。今後、熱伝導率等の高温物性やCCIM小型炉で構築した境界条件等のフィードバックにより、モデルの再現性の向上が見込まれる。</li> <li>○長時間(30時間以上)の連続運転時の運転データを取得し、長時間運転および仮焼層を形成した状態での流下の成立性を見通しを得た。</li> </ul>
供給系	<ul style="list-style-type: none"> <li>○<a href="#">移送技術として空気輸送装置(減圧式)および無軸スクルーフィーダを選定</a></li> <li>○固体状廃棄物の乾燥, 粉碎できる能力を有し, 乾燥粉碎後の固体状廃棄物が空気輸送可能であると考えられる<a href="#">ダブルディスクドライヤ(伝導伝熱加熱装置)</a>を選定</li> <li>○固体状ゼオライト(含水体), 模擬炭酸塩スラリーおよび模擬鉄共沈スラリーの脱水体に対しては, <a href="#">ダブルディスクドライヤにより, 空気輸送可能な状態まで乾燥, 粉碎できることを確認</a></li> <li>○乾燥状態でのゼオライト, 乾燥, 粉碎処理後の模擬炭酸塩スラリー脱水体に対して, <a href="#">空気輸送装置および無軸スクルーフィーダを用いてを移送(空気移送, 定量供給)可能であることを確認</a></li> <li>○上記の結果を反映して, <a href="#">供給系設備の概略系統図を設定</a>。</li> <li>○今後, 供給設備の改良(乾燥装置への供給方法の検討, 乾燥装置バグフィルタの改善等)が有効と考えられる。</li> </ul>
廃ガス 処理系	<ul style="list-style-type: none"> <li>○5種類の廃棄物に対して, 廃ガス処理設備(湿式処理, 乾式処理)の概略フローの設定及び<a href="#">放出放射能収支</a>を算出。CCIMの2系列同時運転を想定した廃ガス処理設備を設定。</li> <li>○<a href="#">基本プロセスを設定し, 概略系統図を設定</a>。</li> <li>○廃ガス処理設備から発生する<a href="#">2次排水の処理方法を設定</a>した。</li> <li>○今後, 実機同様の廃ガス処理装置を組み込んだCCIMIにて廃ガス処理機器のDF等評価が必要。</li> </ul>
廃棄体化 条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ガラス固化の代表機器に対する<a href="#">線量評価</a>を実施し, <a href="#">ガラス固化体の容器及び運用方法を設定</a>。</li> <li>○固化体取扱い設備等の基本プロセスを設定し, 供給系, 廃ガス処理系等を含んだ<a href="#">全体プロセス, 主要設備の機器配置を設定</a>。</li> </ul>

## 7. 全体成果まとめ

### ◆ 事業目的

- ガラス固化技術(溶融ガラス化技術)を福島第一原子力発電所の固体廃棄物の処理方法に適用することを目的とする。
- 同時に、溶融ガラス化を行う溶融炉として、多種多様な廃棄物への適用性が高く、減容性及び安定性が高い廃棄体を作製可能なCCIMを用いることとする。
- 本技術が固体廃棄物の処理に適用できる見通しを得るため、工学的規模のCCIM試験装置等を用いて、適用性評価に必要なデータの取得及びその評価を合理的に行うとともに、廃ガス処理等のプロセスの成立性も併せて検討する。



### ◆ 全体成果

- スラリー、ゼオライト、フェロシアン化物スラッジ、樹脂系吸着材等の代表的な固体廃棄物に対して、ガラス固化技術およびCCIMの適用性評価に必要な項目として、CCIMの運転性やガラス固化体の性状等に関して、実用規模のCCIM等を用いてデータを取得した。
- その結果、それぞれの廃棄物に対して、以下を実施し、CCIMを固体廃棄物の処理に適用できる見通しが得られた。
  - ✓ CCIMの運転に必要なガラス物性を満足する最適なガラス組成を設定した。
  - ✓ 設定したガラス組成をCCIMに適用した場合に工学的規模のCCIMにて目標の炉内温度で安定した運転を行うことが可能であった。
  - ✓ 作製したガラス固化体も均質であり、化学的安定性が高く、圧縮強度も高く高品質であることを確認した。
  - ✓ Csの揮発対策として、ガラス組成設定および仮焼層を形成しつつ運転することによる揮発抑制を行うとともに、CCIMからの移行率データを取得し廃ガス処理設備における回収処理を検討することで建屋からのCsの放出抑制方法を検討した。
- さらに、システム化を行う上で、廃棄物の供給系および廃ガス系について、それぞれ基本プロセスを設定し、概略系統図を設定するとともに、固化体取扱い設備等も含めた全体プロセス、主要設備の機器配置を設定した。

**IHI**

**Realize your dreams**