

令和6年度開始廃炉・汚染水・処理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(柔軟で合理的な廃棄物対策実現のための技術オプションの検討))
最終報告

2026年8月

株式会社ヴェオリアニュークリアソリューションズジャパン

1. はじめに	3
2. タスク1の結果	6
2.1 実験室規模溶融試験の結果	11
2.2 1t規模溶融試験の結果	22
2.2.1 電熱解析の結果	22
2.2.2 溶融試験の結果	28
2.3 プロセスフローの検討結果	67
2.3.1 ガレキ類の移送・供給設備の検討結果	68
2.3.2 オフガス処理設備の検討結果	72
2.4 タスク1のまとめ	86
3. タスク2の結果	87
3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果	91
3.1.1 るつぼ溶融試験結果	91
3.1.2 工学規模溶融試験結果	96
3.2 鉄共沈スラリー脱水物のベンチ規模溶融試験結果	121
3.3 予備概念設計の更新	138
3.4 タスク2のまとめ	156
参考資料	158

弊社では、福島第一原子力発電所（1F）の放射性廃棄物へのGeoMelt®ICV™によるガラス固化の適用性を検討している。

本補助事業では、令和5年度に実施した補助事業※の成果をもとに以下の2つの研究開発を実施した。

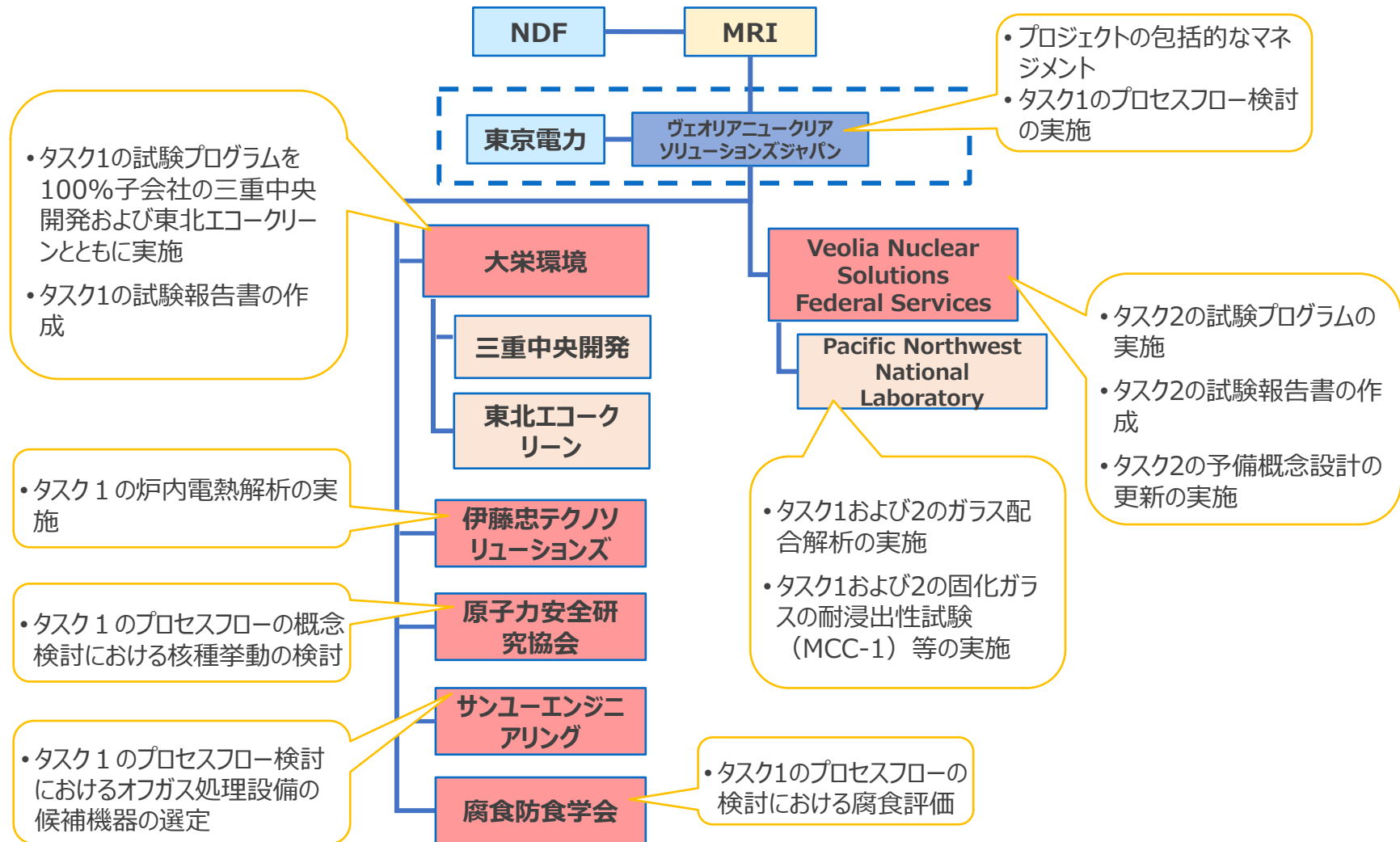
タスク1：分別困難なガレキ類を一括固化する技術の検討

タスク2：脱水処理後のALPSスラリーを脱水物保管容器ごと処理する技術の検討

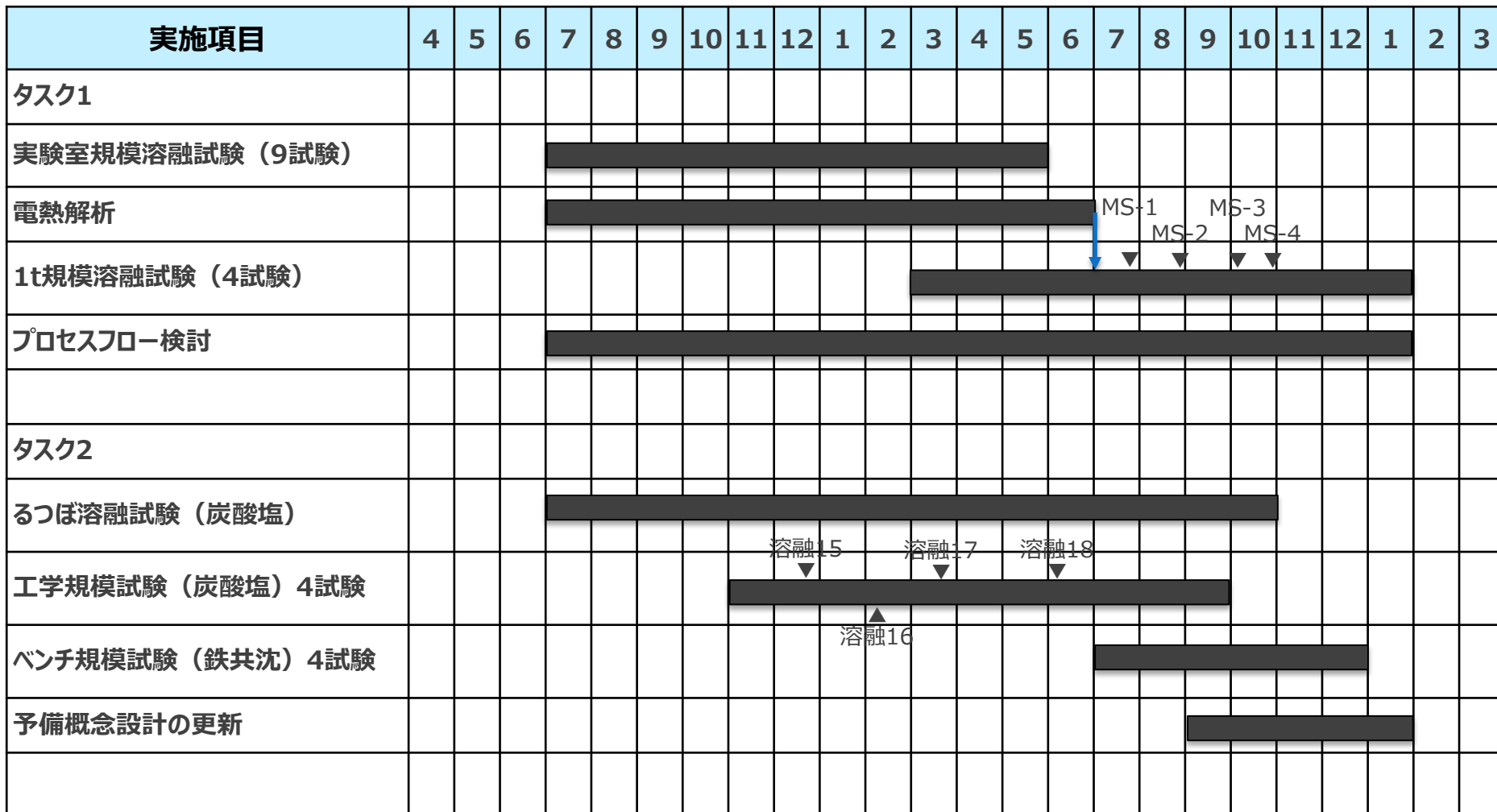
両タスクとも、金属を含む廃棄物を追加投入にて処理する方法を検討し、溶融による減容効果を最大化することを主たる目的としている。

※ 令和5年度開始廃炉・汚染水・処理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（柔軟で合理的な廃棄物対策実現のための技術オプションの予備的検討）

実施体制



実施工程



2. タスク1の結果

背景

福島第一原子力発電所（1F）において、今後、原子炉建屋内、タービン建屋内等の機器の撤去が進められると、高濃度のCsやSrを含む滞留水に浸漬したコンクリートや保温材、多種の部品で構成された電気・計装設備である盤類の放射性廃棄物が発生する。これらの廃棄物は、保管及び処分のために適切に減容・固化される必要がある。しかしながら、これらの廃棄物は線量が高いものが多く、人手による高度な分別を行うことが難しい。

目的

令和5年度に実施した補助金事業では、「初期充填方式」にて、廃棄物を分別なしに一括固化できる見通しが得られた。しかしながら、この方式の場合、処理後の廃棄体の体積は処理前のガレキよりも大きくなるため、減容効果が期待できない。

そのため、新たに考案した次頁の「溶融プール方式」にて、ガレキを溶融処理できるとともに減容化できることを実証する。

また、ガレキのうち電気盤類は、金属材として鉄、銅が使用されているほか、導線被覆やブレーカ筐体として塩ビやプラスチック等の燃焼を伴う物質が含有されている。電気盤類が運転に支障を与えることなく、溶融・減容処理可能なことも確認する。

溶融プール方式について

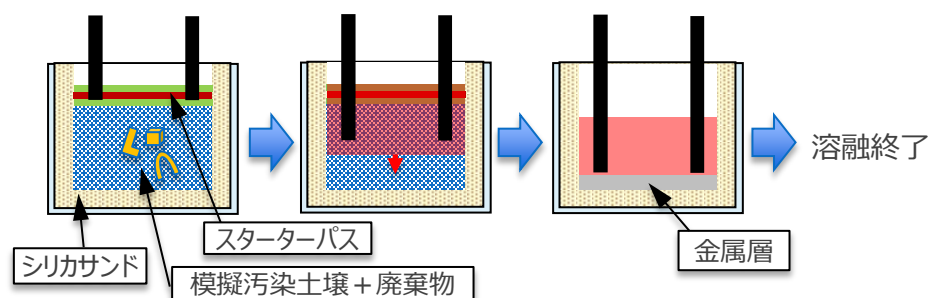
- 令和5年度実施の事業で行った雑多な廃棄物の溶融運転は、右図の上段に示す初期充填方式で実施した。
- しかしながら、本方式の場合、人手にて炉内にガレキ類を充填することは放射線被ばくの観点から、重機や遠隔装置等の検討が必要となる
- 一方、繰返しの追加投入を行う場合は、下段に示す溶融プール方式の採用が考えられる。
- この方式の場合、初期作業としては、電極棒とスターターパスの設置のみであり、実機においても放射線の被ばくのおそれがない。また、耐火物容器の上端近くまで溶融ガラスを充填できるため、減容効果が期待できる。

令和5年度実施の事業の運転方式（初期充填方式）

模擬汚染土壌及び廃棄物を充填した状態で溶融開始。

下方に向けて廃棄物の溶融を継続する。

すべての廃棄物を溶融する。

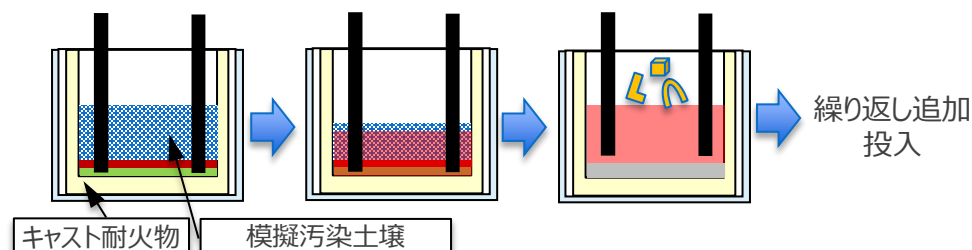


溶融プール方式

スターターパス、電極を設置した後、模擬汚染土壌を供給し、溶融開始。

上方に向けて模擬汚染土壌を溶融し、溶融プールを形成する。

溶融プールに廃棄物を投入する。金属層による短絡を防ぐため徐々に電極棒を上昇する。



実施内容

1. 実験室規模溶融試験（10kg規模）

溶融プール方式の運転方法を検討するにあたり、まず実験室規模にて、ガレキの種類をパラメータとした溶融試験を実施した。本試験より、各ガレキの溶融挙動を確認するとともに、溶融に必要な条件を確認し、1t規模溶融試験に反映した。

2. 1t規模溶融試験

より実機（10t規模を想定）に近い1t規模溶融炉にて、ガレキの溶融挙動を確認するとともに、耐火物容器をガラスで満たす定格処理を行い、溶融処理による減容効果を確認した。

なお、金属の溶融による通電影響が懸念されることから、溶融試験に先立ち、溶融ガラスの発熱分布を評価する電熱解析を実施し、1t規模溶融試験の運転方法に反映した。

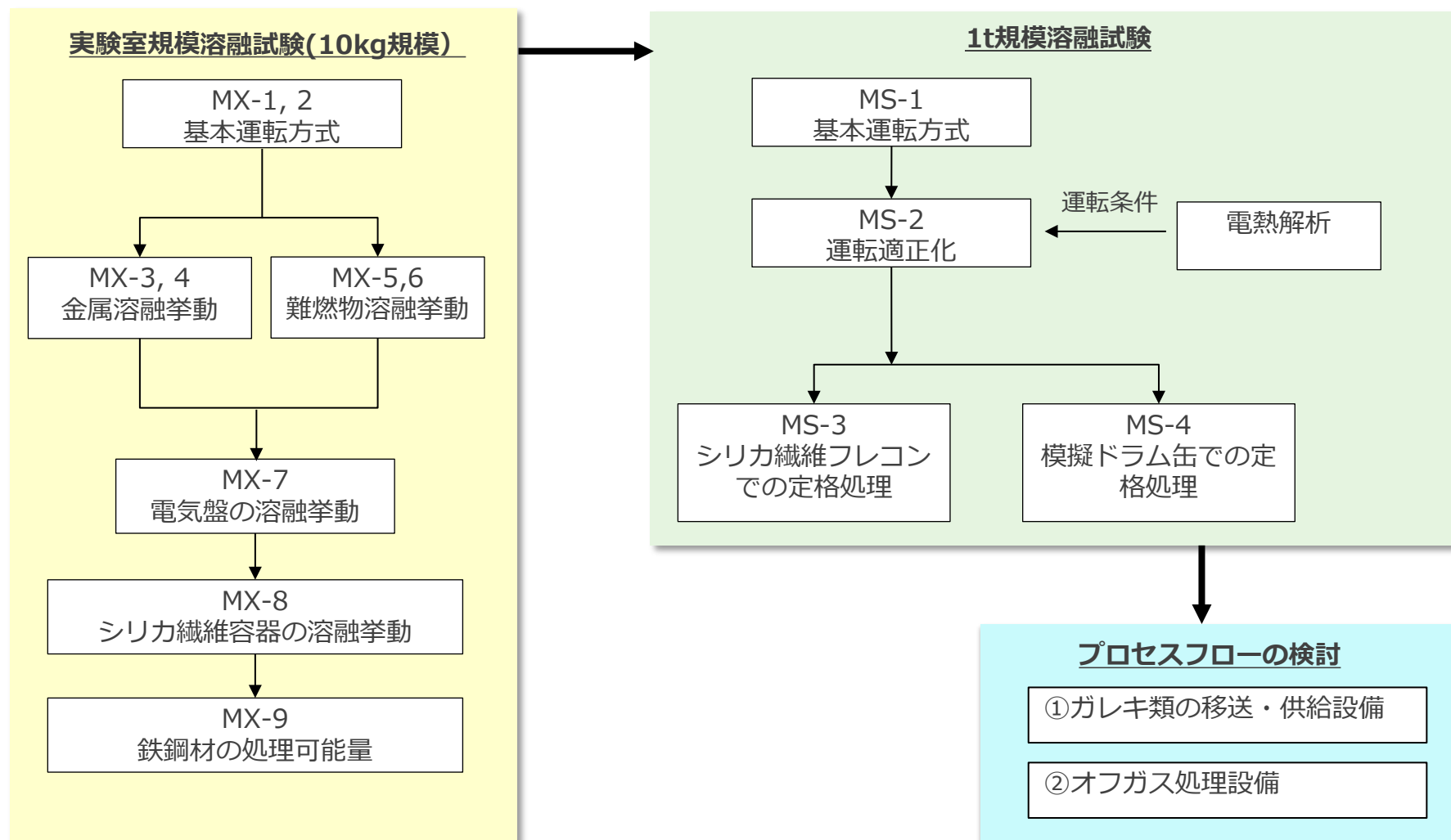
3. プロセスフローの検討

ガレキを対象としたGeoMelt®溶融プラントでは、溶融炉本体以外にも各種設備の検討が必要である。このうち、特に重要と考えられる以下の付帯設備について、溶融試験結果を基に概念検討を行った。

- ・ ガレキ類の移送・供給設備
- ・ オフガス処理設備

実施フロー

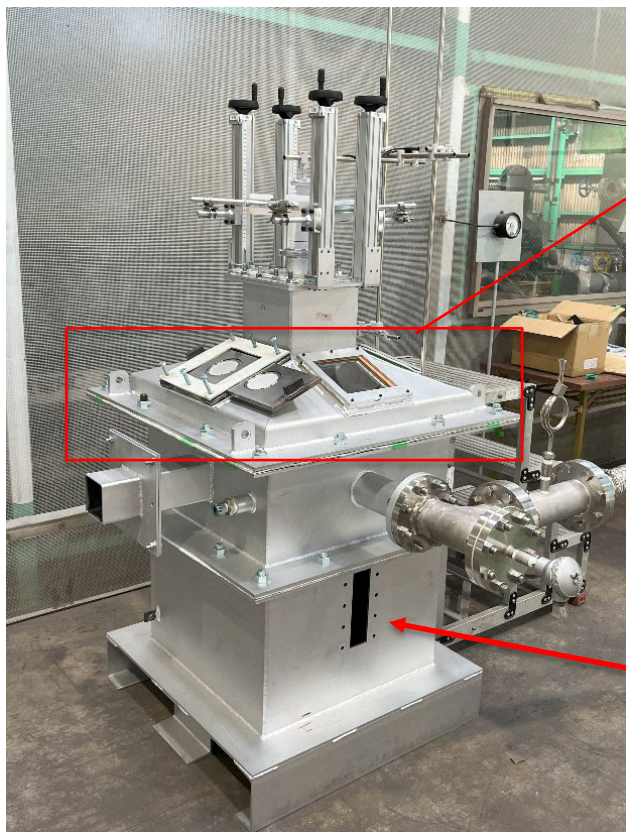
実施内容の全体フローを以下に示す。



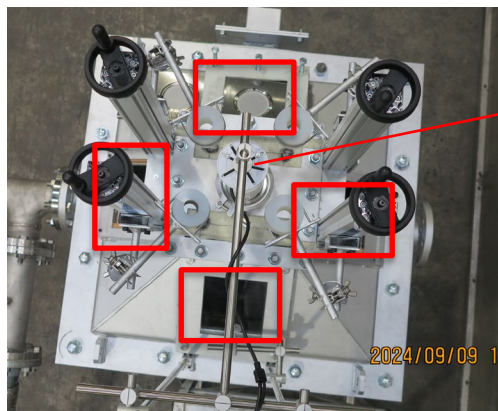
実験室規模溶融炉の設備概要

投入物の溶融挙動を把握できるように、IRカメラ、光学カメラおよび熱電対を設置可能な小型の溶融炉（容量約10L、20kg程度の固化ガラスに相当）を製作。本機器を使用して実験室規模溶融試験を実施した。

実験室規模溶融炉の外観



溶融フード



中央光学カメラ

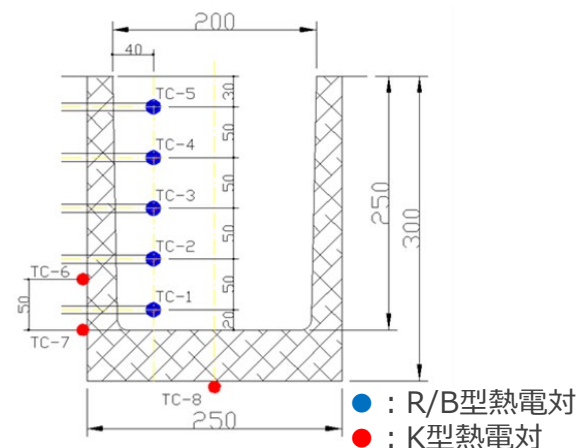
覗き窓×4

- ・IRカメラ
- ・光学カメラ
- ・目視×2

耐火物容器



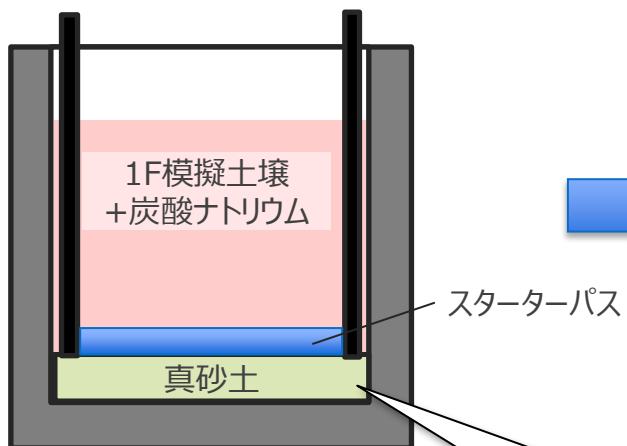
熱電対挿入孔



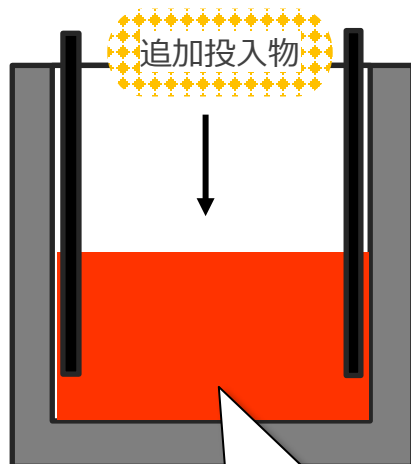
実験室規模溶融試験の運転概要

基本的な運転方法は以下の通り。はじめに、耐火物容器に模擬土壌および炭酸ナトリウムを初期充填し、これらを溶融して溶融プールを形成する。その後、コンクリートや鋼材等を追加投入し、溶融挙動および溶融に必要な条件等を確認した。

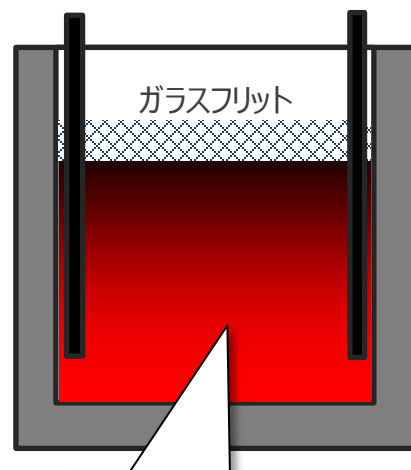
1. 初期充填



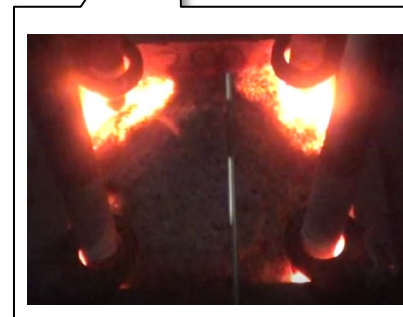
2. 溶融プール形成 追加投入



3. 溶融終了



※ MX-1～4および7は保温材も初期充填物に加えた。これは、比重の小さい保温材は、追加供給での溶融が困難な可能性があり、その場合に初期充填物として溶融することを考慮したものである。結果として追加供給で保温材も問題なく溶融できることが確認できたため、1t規模溶融試験では初期充填物に保温材は加えないこととした。



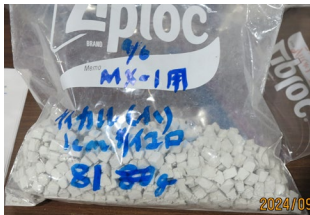
各試験の目的および基本条件

No.	試験名称	目的	投入物	
			初期充填	追加投入
MX-1	基本運転方式の確認	溶融プールの適正な組成および量を 確認する。比較的溶融しやすい コンクリート、保温材 の溶融挙動を確認する。	模擬土壌 保温材	コンクリート 保温材
MX-2			模擬土壌 保温材 炭酸ナトリウム	
MX-3	金属の溶融挙動確認	盤類に多量に含まれる 鋼、銅 が炉内に投入されたときの溶融または沈降の挙動を確認する。また、目標とする炉底部の金属層の形成に必要な運転方法を確認する。	同上	鋼片 鋼ボルト・ナット
MX-4				銅線

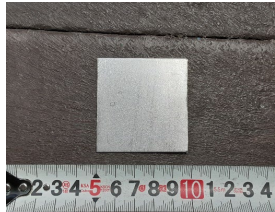
各試験の目的および基本条件

No.	試験名称	目的	投入物	
			初期充填	追加投入
MX-5	難燃物の溶融挙動確認	盤類に含まれる 難燃物 について、燃焼時の煤や黒煙の発生および塩化水素等の有害ガス成分の発生量を確認する。	難燃物含有土壌 炭酸ナトリウム	難燃物含有土壌
MX-6				難燃物含有土壌 電気盤部品
MX-7	電気盤の溶融挙動確認	複合廃棄物である 電気盤 の溶融挙動を確認する。	模擬土壌 保温材 炭酸ナトリウム	電気盤模擬物 コンクリート 保温材
MX-8	シリカ繊維容器の溶融挙動確認	1t規模溶融試験で使用する シリカ繊維（耐熱1000℃） の溶融性を確認する。	模擬土壌 炭酸ナトリウム	シリカ繊維容器（コンクリート、鋼ナット等を内包）
MX-9	鉄鋼材の処理可能量の確認	MX-3の結果を踏まえて適正化した運転方法にて 鋼材の最大処理可能量 を確認する。	同上	鋼板 鋼ボルト・ナット

投入物の概要

投入物	仕様	写真
模擬土壌	真砂土に試薬を添加し1F汚染土壌の組成を模擬した土壌。 配合割合 真砂土 : 74.4% SiO₂ : 24.5% Mg(OH)₂ : 0.45% K₂CO₃ : 0.65% 合計 : 100.0%	
保温材	ケイ酸カルシウム製。 1cm角（約0.2g/個）と5cm角（約2.5g/個）の2種を用意。	 
コンクリート	廃コンクリート破砕物。 1辺1cm程度（約1.5g/個）と1辺5cm程度（約30g/個）の2種を用意。	 

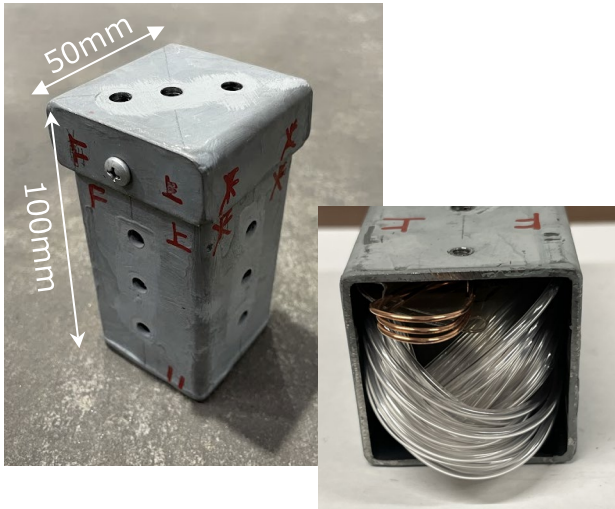
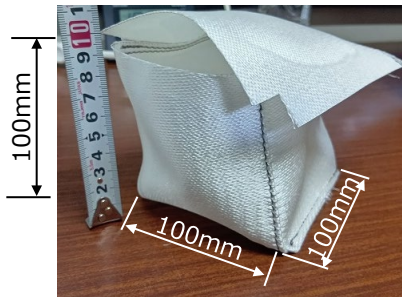
投入物の概要

投入物		仕様	写真
鋼材	鋼片	炭素鋼。 □50mm、t=1.2mm、約24g/枚	
	ボルト・ナット	炭素鋼、メッキなし M 1 6 × L 3 0 + ナット、約105g/個	
	鋼板	炭素鋼。 50×100mm、t=2.3mm 約86g/枚	
銅線		Φ1.2mm×約10cm、約33g/束 (2.5m分を小型平坦に折り曲げ)	

投入物の概要

投入物	仕様	写真
難燃物	難燃物の溶融挙動の確認のため、模擬土壌に難燃物を混合させたもの。総難燃物の割合は5wt%と10wt%の2種を用意。各難燃物の構成比率は、計装電気盤（大栄環境所有）の調査結果に基づく。 ・塩化ビニル : 50wt% ・ポリアミド : 15wt% ・ポリカーボネート : 25wt% ・フッ化樹脂 : 10wt%※ ※フッ化樹脂は計装電気盤には含まれていなかったが、オフガスへのフッ化物の移行挙動を確認するため加えた。	 
	実際の電気盤の部品。 変圧器：ヘマトイト鉄心＋銅線 52×32×33mm、93g/個 遮断器：フェノール樹脂ケース 70×32×53mm、87g/個 端子台：フェノール樹脂ケース 62×30×22mm、47g/個	変圧器  遮断器  端子台 

投入物の概要

投入物	仕様	写真
電気盤模擬物	筐体： 炭素鋼、ジンク塗装あり 50×50×100mm、t=2.3mm 約470g 内容物： 銅線 5.4g 鉛粒 5.4g 塩化ビニル樹脂 29g ポリアミド樹脂 9.1g ポリカーボネート樹脂 14g フッ化樹脂 6.0g	
シリカ繊維容器	100×100×100mm 内容物が異なる以下の4種類を用意。 ・ 保温材 60g ・ コンクリート 700g ・ M6ナット 500g ・ 三種混合（保温材30g、コンクリート 250g、M6ナット200g）	

実験室規模溶融試験の結果概要（溶融プール形成）

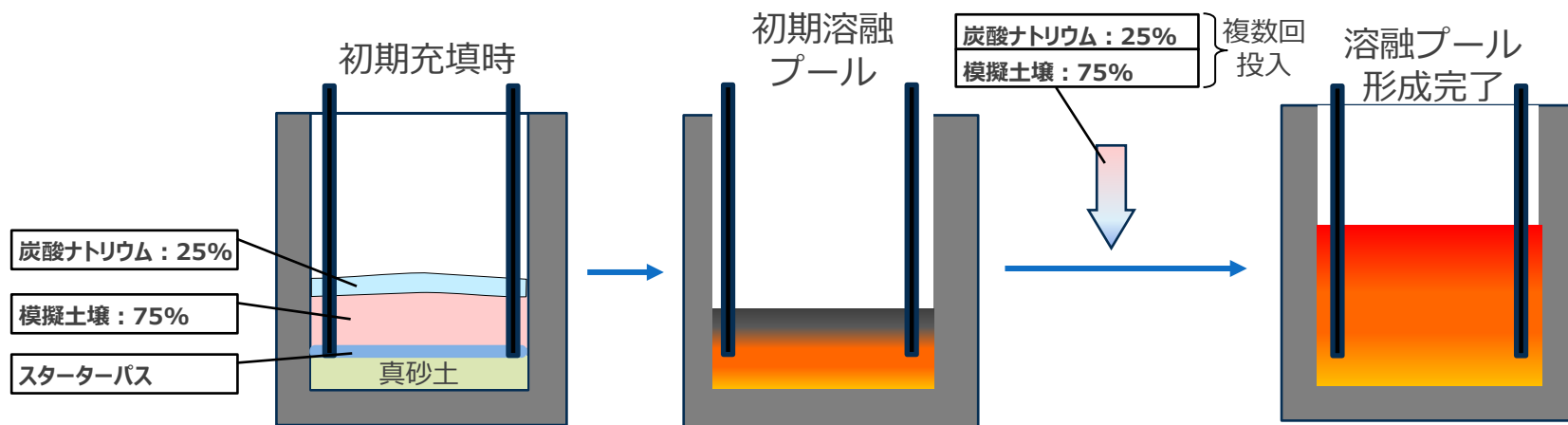
試験結果より適度な溶融プール形成には以下が必要であることが分かり、1t規模溶融試験に反映した。

（１）模擬土壌への炭酸ナトリウムの添加

模擬土壌のみの溶融ガラスは粘度が高く、溶融プールの形成が困難だった。そのため、実験室規模では、模擬土壌に16wt%の炭酸ナトリウムを添加し粘度を調整した。（1t規模試験では、溶融プール形成促進のため再度ガラス配合解析を行い、炭酸ナトリウムの添加率を25wt%に設定した。）

（２）模擬土壌および炭酸ナトリウムを複数回に分けて投入

初期充填量が多いと、表面の模擬土壌が部分的に固まり溶融が阻害されること（ブリッジ）があった。そのため、模擬土壌および炭酸ナトリウムは、初期溶融プール形成後に複数回に分けて投入する必要があることが分かった。



実験室規模溶融試験の結果概要（追加投入物）

各追加投入物の溶融結果は以下の通りであり、1t規模溶融試験の運転に反映した。

投入物	実験室規模溶融試験における結果
模擬土壌 (MX-1～9)	16wt%炭酸ナトリウムを添加することで、溶融プールを形成することができた。1t規模溶融試験においては、より速やかに溶融プールを形成させるために、添加量を25wt%に増やすこととした。
保温材 (MX-2)	サイズおよび数量によらず溶融可能。
コンクリート (MX-2)	サイズおよび数量によらず溶融可能。
鋼材 (MX-3、9)	溶融ガラス温度を 1550℃以上に維持 することで、厚みのあるボルトでも溶融できた。投入間隔が短いと溶融ガラス温度が低下したまま未溶融の鋼材が積み上がり溶融困難となるため適度な投入間隔が必要。鋼材を完全に溶融できた時のガレキ中鋼材の最高割合は45%だった。
銅線 (MX-4)	溶融ガラス温度を1500℃程度に維持することで溶融できた。鋼材の溶融条件を満足できれば銅線は問題なく溶融可能と考える。

実験室規模溶融試験の結果概要 追加投入物

投入物	実験室規模溶融試験における結果
難燃物 (MX- 5 ～6)	燃焼による塩化水素、ダイオキシン等の有害ガスが発生。オフガス処理設備での対応が必要。 追加投入物中の難燃物の割合が10wt%までであれば、IRカメラにて炉内監視の継続が可能であることを確認。
電気盤模擬物 (MX-7)	溶融ガラス温度を1550℃以上に維持し続けることで、完全溶融し底部金属層を形成できることを確認した。 運転後半で電気盤模擬物が電極棒に接触し運転継続が困難となった。電気盤の投入時にはなるべく電極棒から離隔する必要がある。
シリカ繊維容器 (MX-8)	溶融ガラス表面にて問題なく溶融されることを確認。 一方、気相部では溶融しなかった。1t規模溶融試験では溶融炉表面もある程度高温となるが、容器の破れ等のおそれはないと判断した。

はじめに

ガレキに含まれる金属成分による溶融ガラス中の電流および発熱分布の変動を評価し、電極棒の昇降操作等の運転操作に資することを目的に電熱解析を実施した。電熱解析は、試験で使用する1t規模溶融炉と同じ寸法の三次元モデルにより行った。

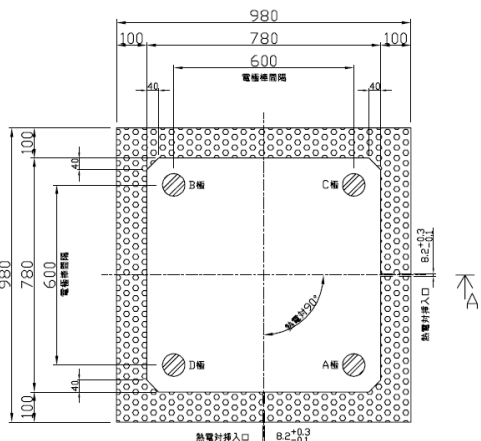
2.2 1t規模溶融試験の結果

2.2.1 電熱解析の結果

23

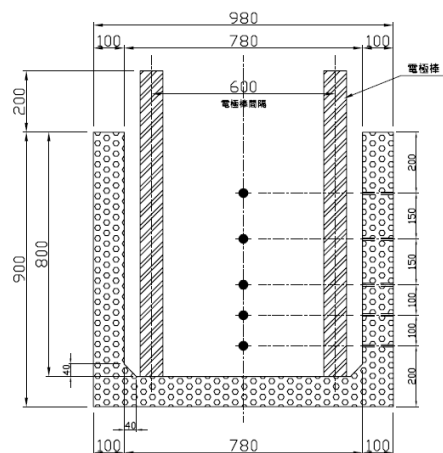
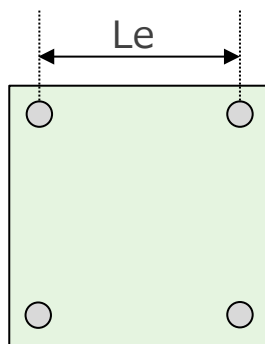
モデル：1t規模溶融炉および溶融試験で使用する模擬電気盤の形状を再現

1t規模溶融炉 構造図

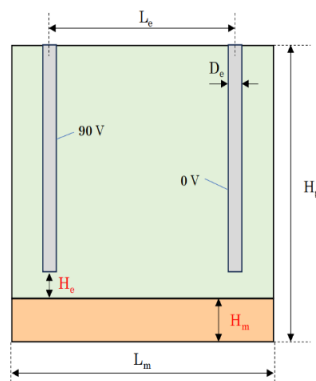


平面図

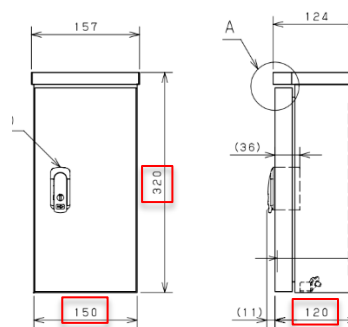
解析モデル



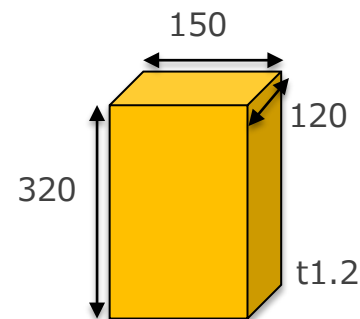
A-A'断面



模擬電気盤 構造図



解析モデル



モデルは、箱型で内部は溶融ガラスが充填していると仮定した。耐火物容器内の位置はパラメータスタディ。

モデル化箇所	寸法[mm]
電極間長さ L_e	600.4※
電極棒直径 D_e	75
電極棒高さ H_e	パラメータスタディ
耐火物容器幅 L_m	780
ガラス液面高さ H_g	700
底部金属層高さ H_m	パラメータスタディ

※ 設計進捗により実際の1t規模溶融炉の最終寸法は600mmとなり解析モデルとは相違が生じた。しかしながら差はわずかであり、ほとんど影響はない。

2.2 1t規模溶融試験の結果

2.2.1 電熱解析の結果

24

解析条件

物理モデル : 電位場モデル

熱移動 : 対流、熱伝導は考慮しない

物性値 : 文献調査結果に基づき下表に示す各物質の1550℃の電気伝導率を設定。

通電条件 : 2相交流（実際の1t規模溶融炉と同じ）

電気伝導率設定値

材質	電気伝導率 (S/m)
溶融ガラス	20.0
鉄	7.81×10^5
銅	1.04×10^7

2.2 1t規模溶融試験の結果

2.2.1 電熱解析の結果

25

解析結果の概要および1t規模溶融試験への反映

下表に解析ケースの一覧を示す。次頁に解析結果の概要を示す。

解析ケースの一覧

ケース名	模擬電気盤	底部金属層		電極棒高さ He (mm)
		種別	高さHm (mm)	
1-8	なし	Fe	0	30
1-1	なし	Fe	100	30
1-2	なし	Fe	100	100
1-3	なし	Fe	100	200
1-9	なし	Fe	100	350
2-1	炉中央	Fe	0	100
2-2	電極棒接近 (距離100mm)	Fe	0	100
2-3	電極棒接触	Fe	0	100
2-4	炉中央	Fe	100	100
2-5	電極棒接近 (距離100mm)	Fe	100	100
2-6	電極棒接触	Fe	100	100

底部金属層の影響評価

電極棒高さをパラメータとした影響評価

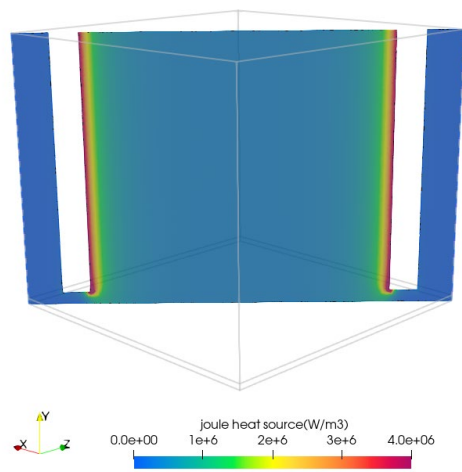
電気盤位置をパラメータとした影響評価

底部金属層の影響

- 金属ガレキが溶融し炉底部に金属層が生じると、電極棒間の通電が金属層を迂回する。その結果、**電極棒と底部金属層の間に局所加熱が生じる一方、炉中央の発熱が低下する結果**となった。**電極棒を上昇させることで、局所加熱は抑制できるものの、炉中央の発熱は回復しきらず、特に炉底部の発熱が弱く沈降した金属ガレキの溶融性が懸念された。**
- 底部金属層による運転影響が大きいことから、**運転序盤に底部金属層は形成させないことが望ましい。**そのため、**ガレキの投入順序として運転序盤は、保温材やコンクリート等の金属以外のガレキを投入し、その後に金属ガレキを投入するのがよい**と考えた。

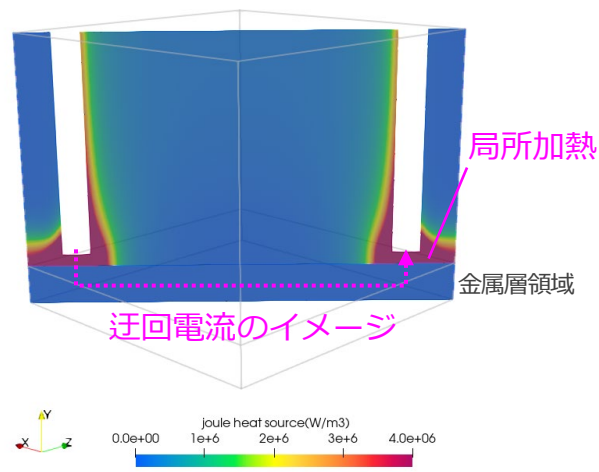
ジュール発熱密度分布図（対角線の鉛直断面）（ W/m^3 ）

case1-8



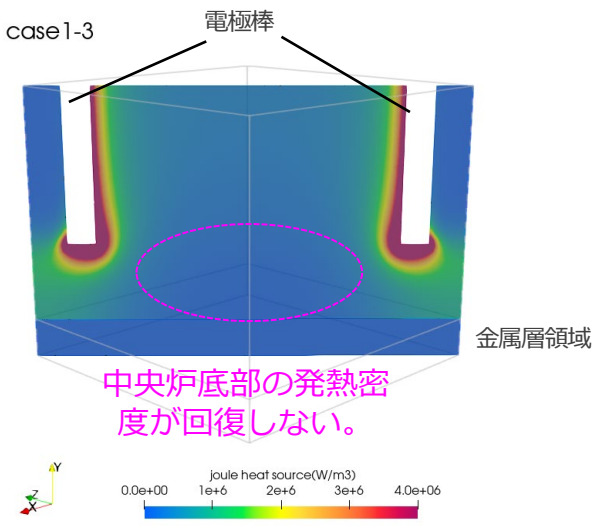
ケース1-8 金属層なし

case1-1



ケース1-1 電極-金属層30mm

case1-3

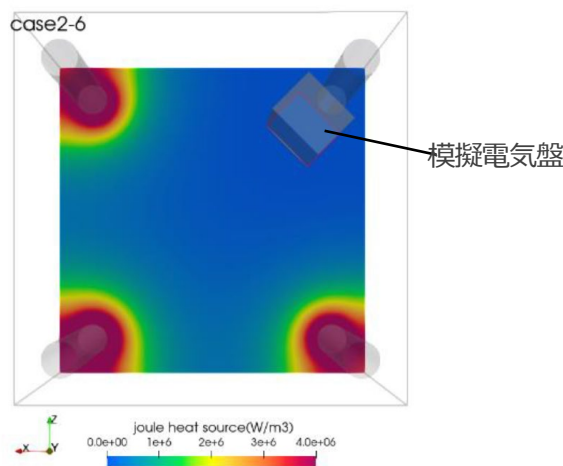


ケース1-3 電極-金属層200mm

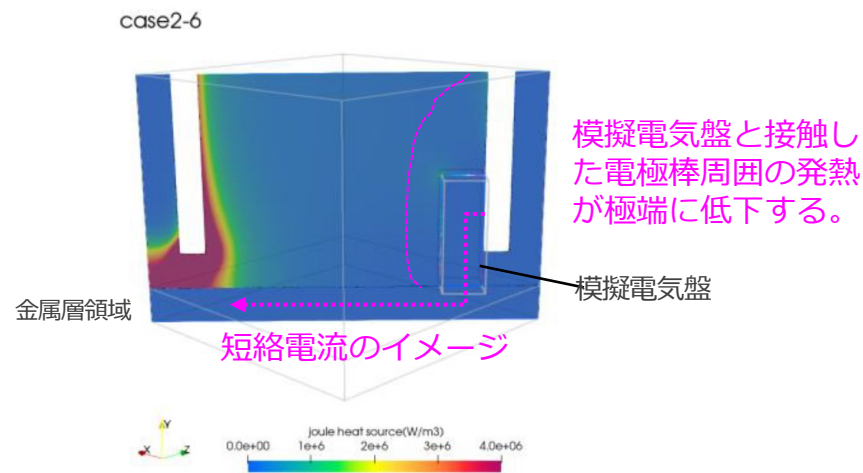
模擬電気盤の影響

- 模擬電気盤の位置が中心からずれて電極棒に接近した場合（距離100mm）にも、その影響は小さいことが分かった。
- 一方で、炉底部に金属層が生じた状態で模擬電気盤が電極棒に接触すると、当該電極棒は短絡しその近傍のガラスの発熱が極端に低下する結果となった。この状態が続くと、実際の運転ではガラスの温度が低下し固化するため、運転継続は難しいと想定される。
- 1t規模溶融試験では、模擬電気盤が電極棒に接触しないよう**なるべく中央に投入すること**とした。

ジュール発熱密度分布図（ケース2-6：電極棒接触ケース）（ W/m^3 ）



水平断面：炉底+150mm
(電極棒下端と金属層表面の間)



対角線の鉛直断面

1t規模溶融試験設備の概要

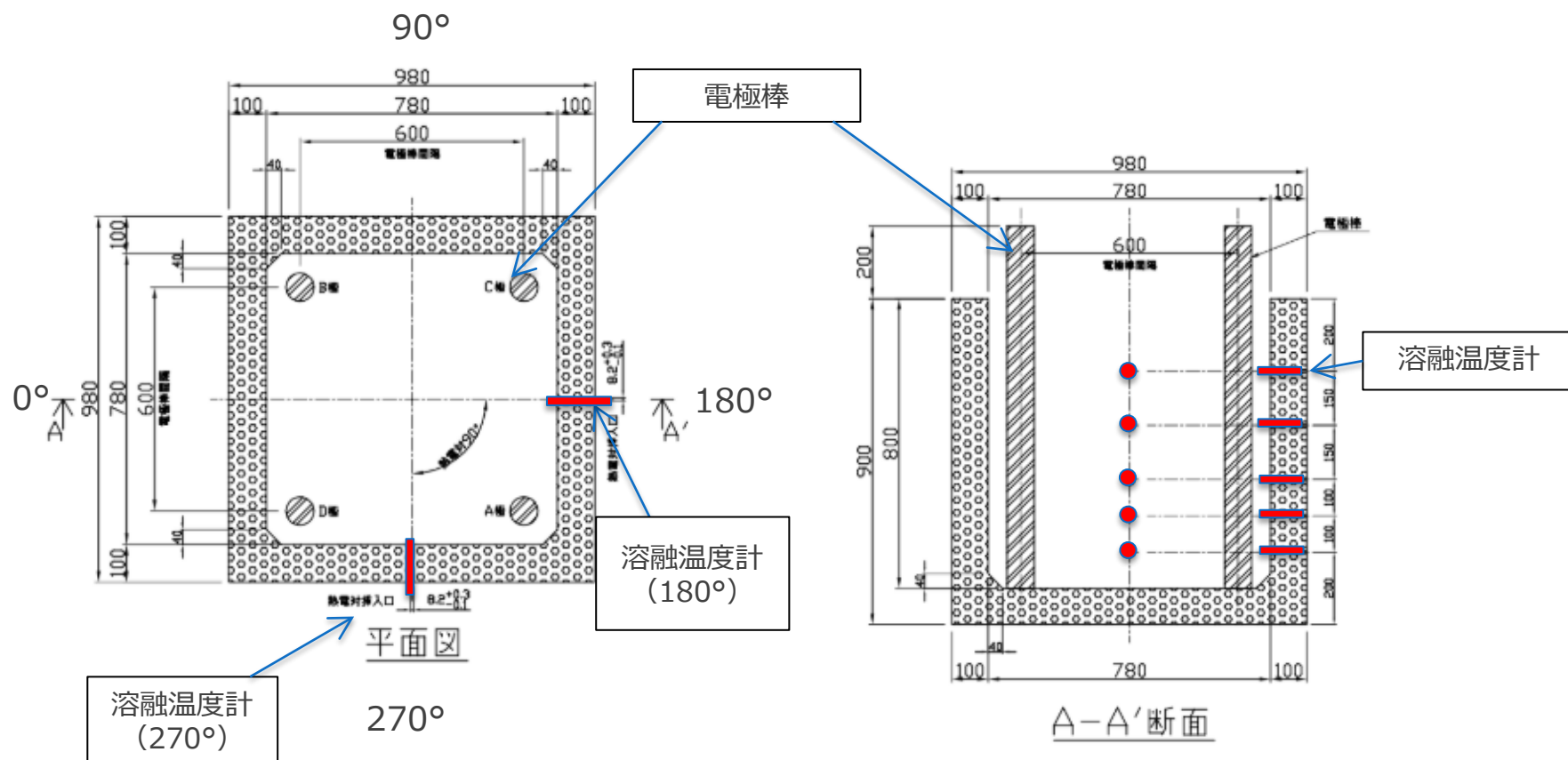
より実機（10t規模を想定）に近いスケールにてガレキの溶融処理を実証するため、既設備を改造し本事業用の1t規模溶融試験設備を用意した。

1t規模溶融炉は、実験室規模溶融炉と同様にIRカメラ、光学カメラを有し、最大で約1100kgの固化ガラスを製作する。

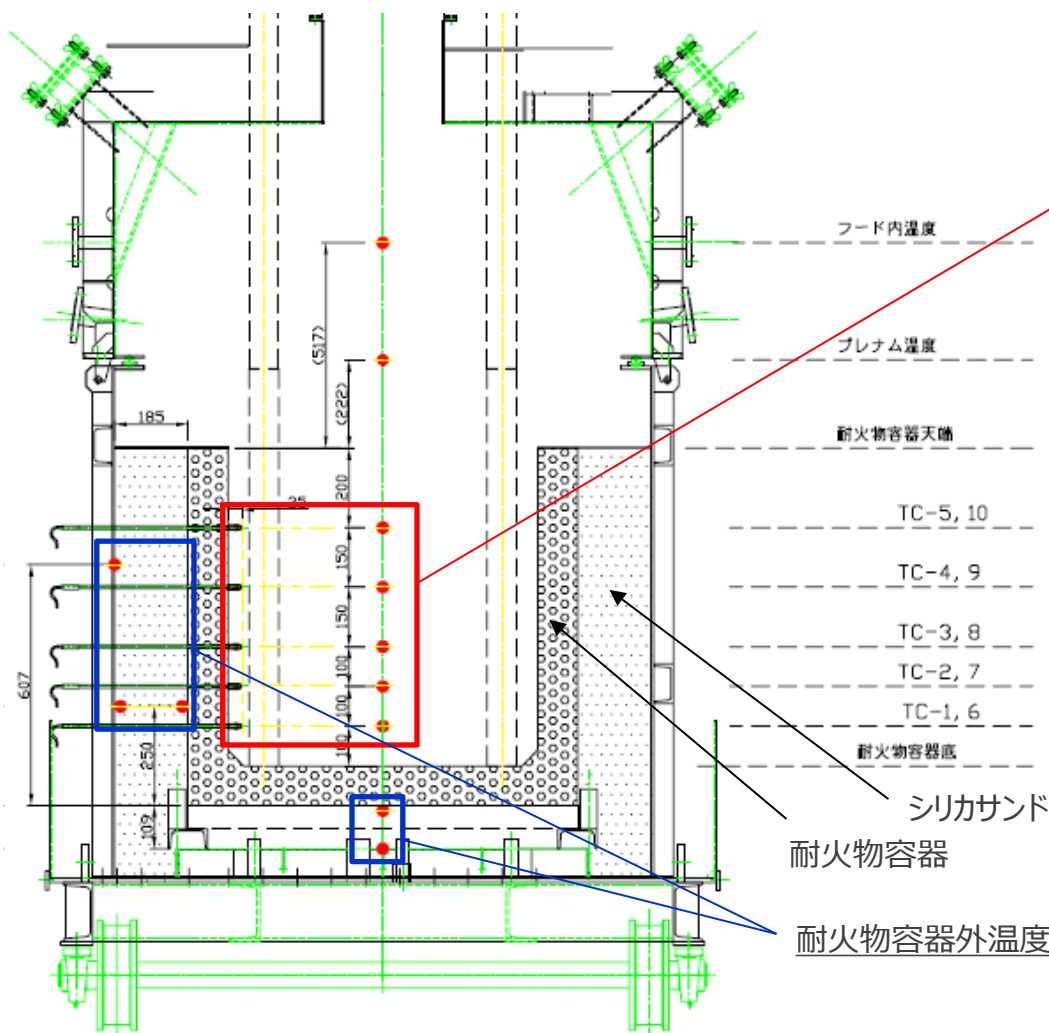
溶融炉全景



耐火物容器の構造



温度計設置位置の詳細



溶融温度計（計10個）

耐火物容器高さ mm	180°	270°
600	TC-5 (R型)	TC-10 (R型)
450	TC-4 (R型)	TC-9 (R型)
300	TC-3 (R型)	TC-8 (B型)
200	TC-2 (R型)	TC-7 (B型)
100	TC-1 (R型)	TC-6 (B型)

溶融時間が長く、R型だと保たない可能性があるため一部はB型熱電対を使用する。

耐火物容器外温度計（K型）（計5個）

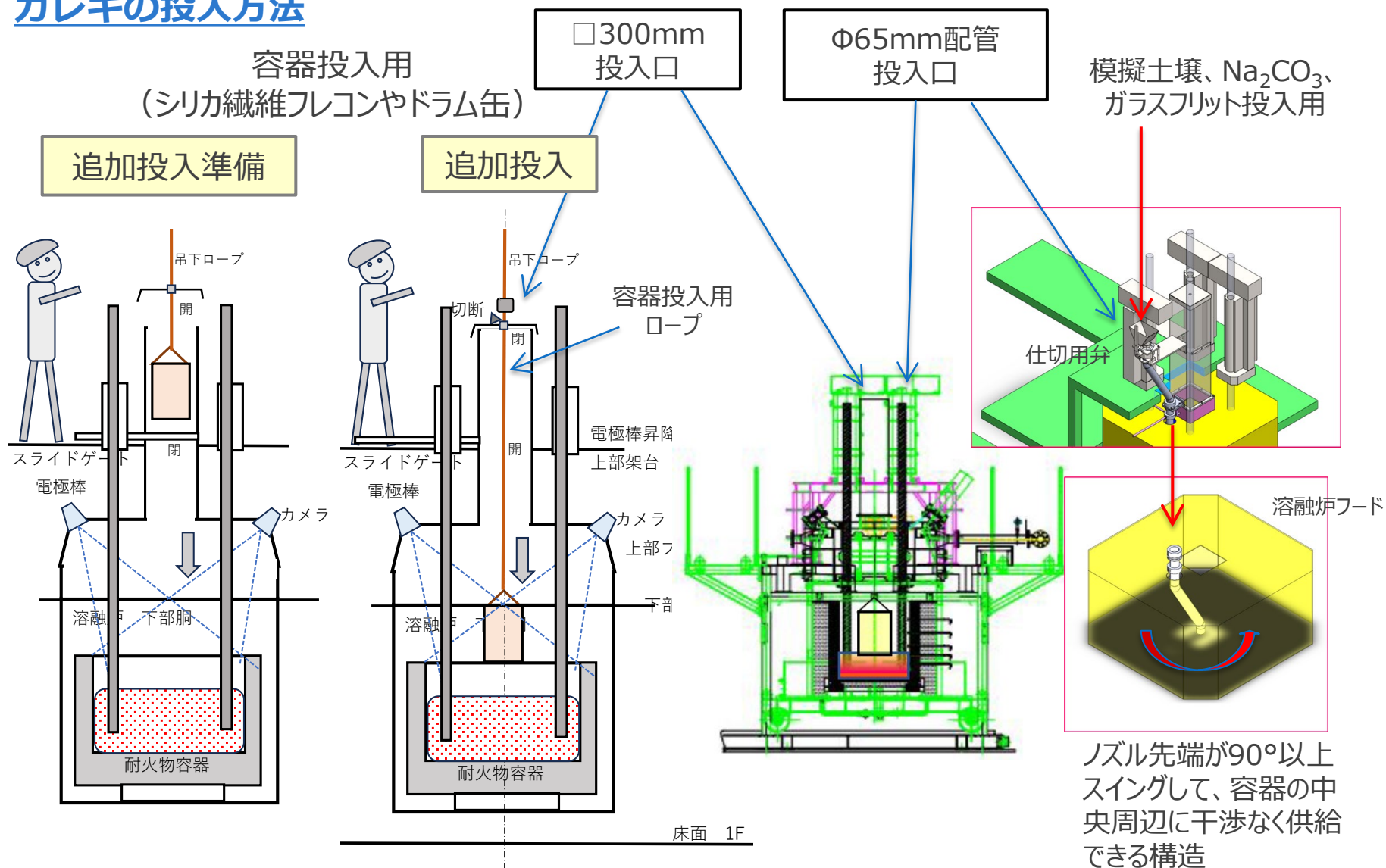
ガレキの投入方法

後述するプロセスフローの検討のなかで、多様な形状のガレキに広範に適用できる供給方式としていったんなんらかの容器にガレキを収納し、容器ごと溶融炉に供給する方式を採用した。

容器の種類は、非放射性および放射性廃棄物の収納用途に広く使用されている**フレコン**および**ドラム缶**の2つを候補とした。ただし、フレコンについては、通常材質はポリプロピレンまたはポリエチレンであるが耐熱が100℃と低く炉内投入前に破損するおそれがあることから、**シリカ繊維（耐熱1000℃）**を候補とした。

1t規模溶融試験では、容器の電極棒への接触防止および落下衝撃による溶融ガラスの飛散を抑制するために、ガレキを内包した容器をロープで吊って□300mm投入口から溶融炉へ投入するものとした。ただし、土壌、炭酸ナトリウム、ガラスフリットといった粒状の投入物は実機においても配管からの投入が可能と考え試験においてもΦ65mm配管投入口から投入することとした。1t規模溶融試験における投入設備の概要および写真を次頁に示す。

ガレキの投入方法

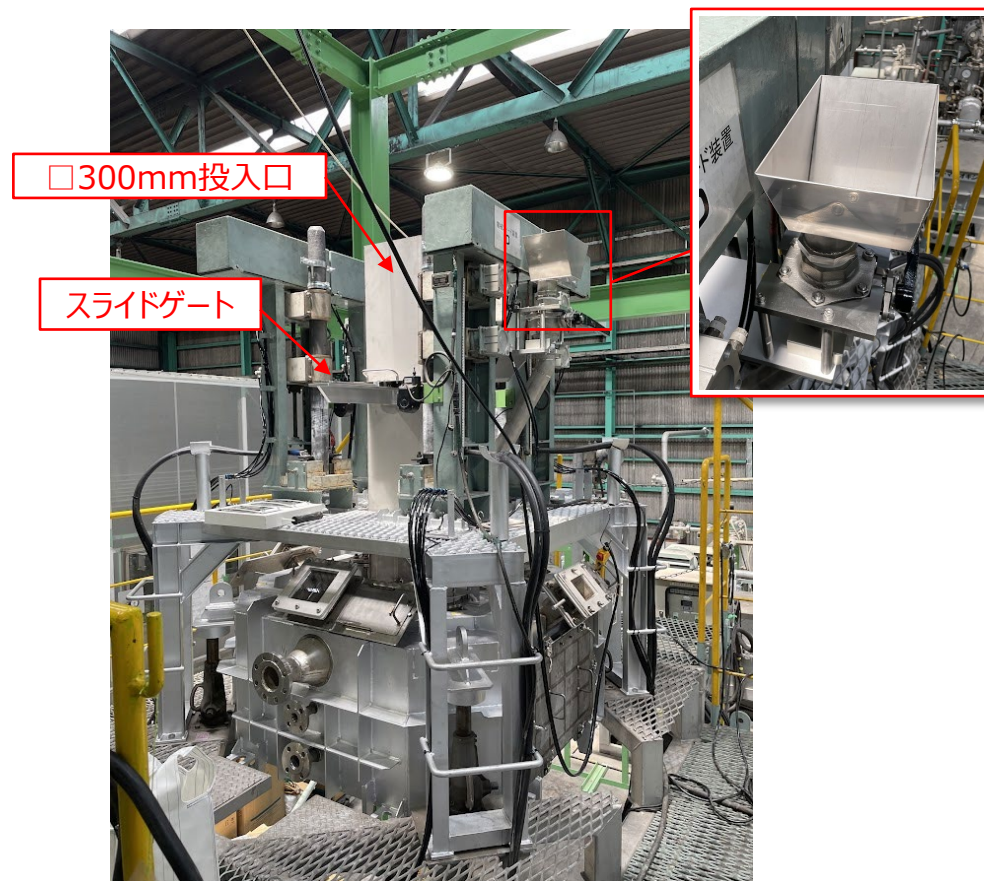


溶融炉および投入機構

溶融炉全景



溶融フード上部

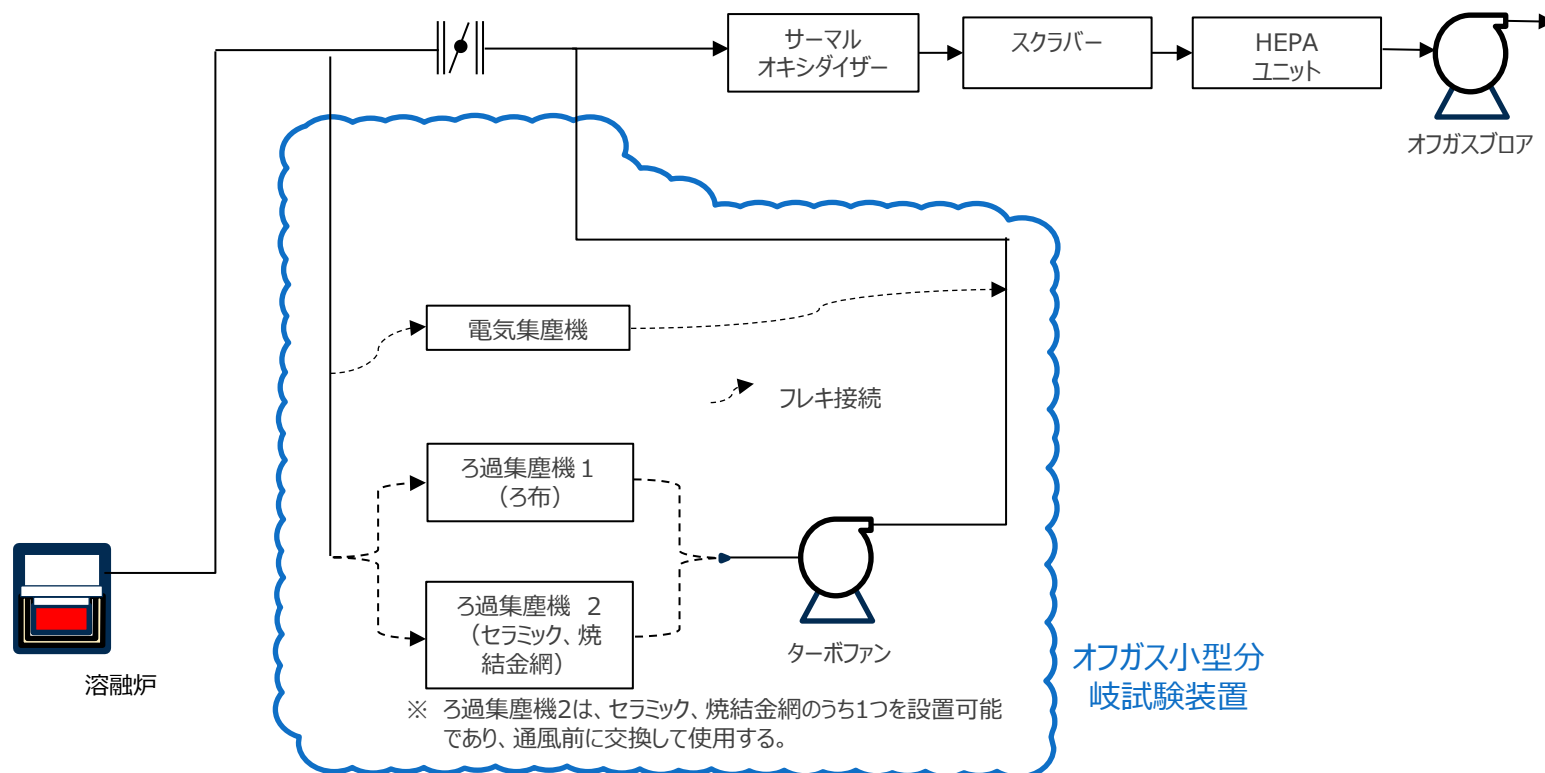


[illegible]

オフガス処理装置（既存設備）

オフガス処理設備

1t規模溶融炉には、既設のオフガス処理設備（サーマルオキシダイザー、スクラバー、HEPA フィルタ等から構成）があるが、プロセスフローの検討に資するデータを取得するため、サーマルオキシダイザーの上流に小型分岐試験装置を新設した。本装置は、電気集塵機1基、ろ過式集塵機2基より構成される。ろ過式集塵機は、ろ布、セラミック、焼結金網の3種のエレメントを使用できる。溶融試験時に、各機器個別にオフガスを通風し、ダスト除去率等のデータを取得した。



オフガス小型分岐試験装置



2.2 1t規模溶融試験の結果

2.2.2 溶融試験の結果

37

各試験の目的および基本条件

No.	試験名称	試験目的	初期充填	追加投入	
				容器	模擬ガレキ
MS-1	基本運転方式の確認	溶融プール方式での運転が成立することを確認するとともに容器を含めた模擬ガレキの溶融挙動を確認する。	模擬土壌 炭酸ナトリウム	シリカ繊維フレコン 模擬ドラム缶	コンクリート 保温材 鋼材
MS-2	運転適正化	MS-1の結果をもとに、初期充填量、電極棒の昇降操作、追加投入の間隔等の運転操作を適正化する。また、盤および電気部品の溶融挙動を確認する。	同上	シリカ繊維フレコン 模擬ドラム缶	コンクリート 保温材（Cs、Sr添加） 鋼材 模擬電気盤
MS-3	シリカ繊維フレコンでの定格処理	多数のフレコン容器および内包するガレキを処理し、耐火物容器内容積の8～9割程度の固化ガラスを形成できることを確認する。投入したガレキの減容率を評価する。	同上	シリカ繊維フレコン	コンクリート 保温材（Cs、Sr添加） 鋼材 模擬電気盤
MS-4	模擬ドラム缶での定格処理	容器を模擬ドラム缶とし、MS-3と同様の確認を行う。	同上	模擬ドラム缶	コンクリート 保温材（Cs、Sr添加） 鋼材 模擬電気盤（亜鉛合金製の取っ手、接地端子を除去）

投入物の概要（容器）

模擬ドラム缶（t0.6）

重量：約2.1kg、容量：20.5L

上蓋：Φ24mm気抜穴×9個

アルミテープで密閉※



※ 上蓋を密閉するためアルミテープを選定。

シリカ繊維フレコン

重量：約0.50kg、容量：21.9L

上蓋：ホッチキスで固定※



※ テープはシリカ繊維への粘着性が悪い
ためホッチキス止めを採用。

投入物の概要（模擬ガレキ）

模擬ガレキ	重量/容器		仕様
	シリカ繊維フレコン	模擬ドラム缶	
保温材	約1.3kg（11個） 	約1.05kg（9個） 	ケイ酸カルシウム Φ120mm半割れ×150mm
コンクリート	約18.8kg（6個） 	約15.7kg（5個） 	コンクリートブロック 145×105×100mm
鋼材	約19.3kg 	約19.3kg 	鋼板：□150、t3.2mm ×10個 アングル材：30×150×t3mm×30個 鉄筋：Φ35×150mm×2個 ボルト：M24ハイテンションボルト×23個

投入物の概要（模擬ガレキ）

模擬ガレキ	重量/容器（詳細は次頁）		仕様※	
	シリカ繊維フレコン	模擬ドラム缶		
模擬電気盤	標準ケース：(約4.1kg)×2 変圧器ケース：(約5.5kg)×2 数量：模擬電気盤2個/フレコン 	標準ケース：(約4.1kg)×1 変圧器ケース：(約5.5kg)×1 数量：模擬電気盤1個/模擬ドラム缶 	盤筐体： 150×120×320mm	
			<u>標準ケース</u> 端子台×2個 遮断器×1個 IV電線×25m 鉛粒×40g	<u>変圧器ケース</u> 変圧器×1個

※ 変圧器は鉄心を有し、その他の電気盤部品に比べて鉄比率が高く重量も大きい。溶融挙動に相違が生じることが想定されたため、模擬電気盤は、標準ケースと変圧器ケースの2種を用意した。しかしながら、結果として溶融試験において差はほとんど見られなかった。

2.2 1t規模溶融試験の結果

2.2.2 溶融試験の結果

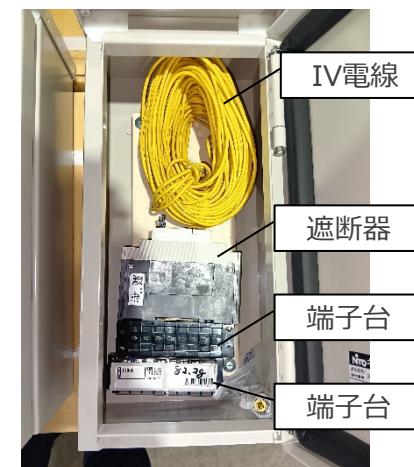
41

模擬電気盤の内訳

標準ケース

構成物	数量	単位	重量							
			鉄	銅	亜鉛	難燃物		紙類	鉛	小計
						塩ビ	その他			
			g	g	g	g	g	g	g	g
電気盤筐体	1	個	3056	0	144	0	0	0	0	3200
端子台	2	個	77	0	0	0	86	1.1	0	164
遮断器	1	個	120	42	0	0	136	0.6	0	299
IV電線 (1.25mm ²)	25	m	0	240	0	205	0	0	0	445
鉛粒	40	g	0	0	0	0	0	0	40	40
合計	—	—	3253	282	144	205	222	1.7	40	4148
合計 (比率)	—	—	78.4%	6.8%	3.5%	4.9%	5.4%	0.0%	1.0%	100%
(参考)MX-7 模擬電気盤	—	—	88.0%	1.0%	0.0%	5.0%	5.0%	0.0%	1.0%	100%

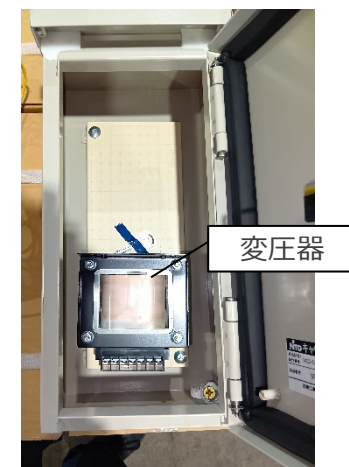
標準ケース盤内の写真



変圧器ケース

構成物	数量	単位	重量							
			鉄	銅	亜鉛	難燃物		紙類	鉛	小計
						塩ビ	その他			
			g	g	g	g	g	g	g	g
電気盤筐体	1	個	3056	0	144	0	0	0	0	3200
変圧器	1	個	1750	539	0	0	35	0	0	2325
合計	—	—	4806	539	144	0	35	0	0	5525
合計 (比率)	—	—	87.0%	9.8%	2.6%	0.0%	0.6%	0.0%	0.0%	100%

変圧器ケース盤内の写真



模擬ガレキの調製

保温材へのCs、Srの添加

溶融時のCs、Srのガラス保持率を評価するため、模擬ガレキのうち、保温材に安定Cs、Srを添加した。保温材の重量に対して、CsCl、SrCl₂のそれぞれの濃度が1000mg/kg程度になるように、保温材1個（概ね110g）あたり1%濃度溶液を10mL滴下・浸透させた。これにより保温材1個あたりCsCl、SrCl₂が各々100mg（Csが78.9mg、Srが55.3mg）添加されることになり、保温材の投入個数から処理対象物中のトレーサ重量が計算できる。



保温材1個(概ね110g)あたり

試薬(mg)		トレーサ(mg)	
CsCl	100	Cs	78.9
SrCl ₂	100	Sr	55.3

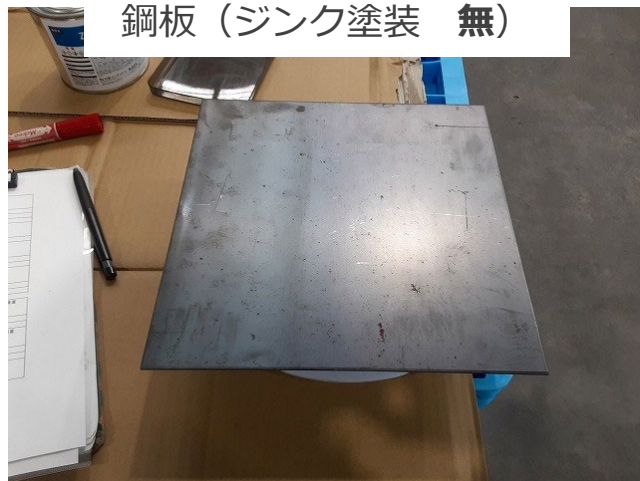
模擬ガレキの調製

鋼材（鋼板）へのジンク塗装

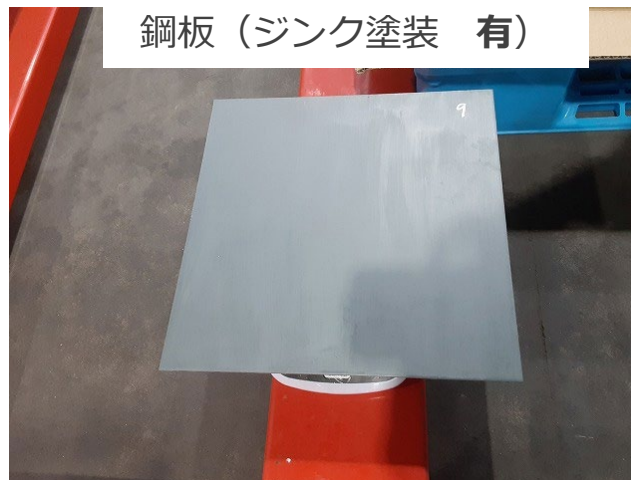
模擬ガレキのうち、鋼板（□150、t3.2mm）には揮発亜鉛による炉内視認性およびオフガス処理設備への影響を確認するために、片面をジンク塗装（塗膜厚さ80 μ m程度）した。

また、溶融試験におけるマスバランスを確認するために塗布重量を記録した。

鋼板（ジンク塗装 無）



鋼板（ジンク塗装 有）



ジンク塗装（一例）



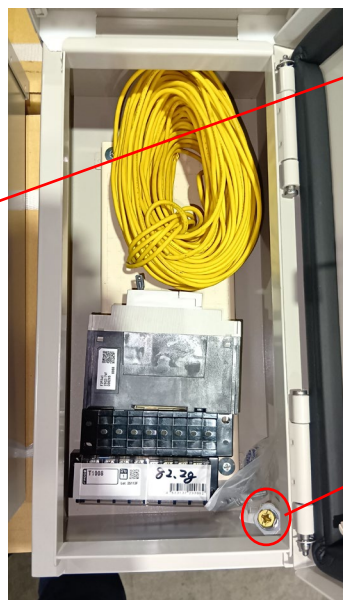
過去試験時の膜厚測定（参考）



模擬ガレキの調製

模擬電気盤中の亜鉛合金部品の取外し（MS-4のみ）

模擬電気盤を投入したMS-2、MS-3で、オフガスのダスト量が多い傾向にあり、その中でも特に亜鉛のダスト量が多かった。模擬電気盤には、亜鉛合金製の部品（ハンドル部、接地端子ネジ部）が含まれるため、比較評価のためMS-4ではこれらの部品を外して試験に供した。



ハンドル部

接地端子ネジ部



ハンドル部：亜鉛ダイカスト

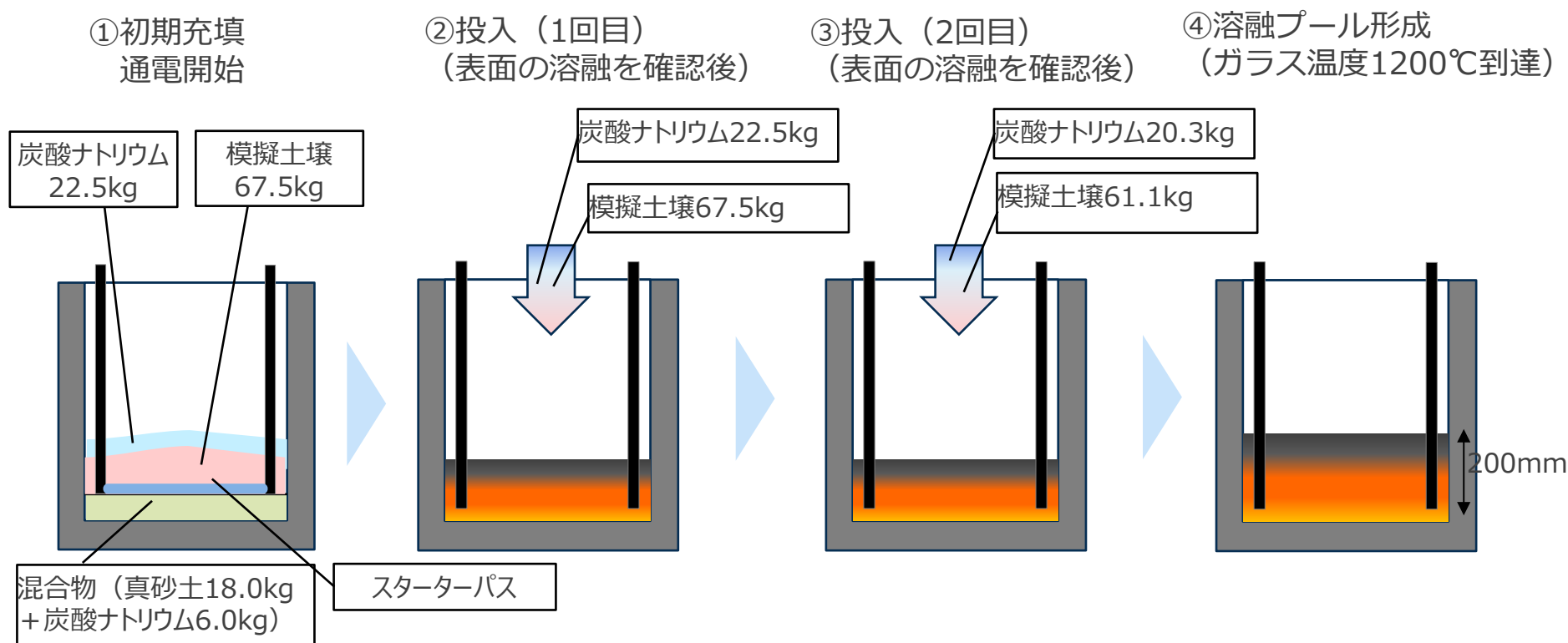
接地端子ネジ部：黄銅

MS-1および2の結果およびMS-3、4への反映事項

MS-1、2の2回の溶融試験にて、模擬ガレキの溶融挙動を確認し、適切な運転方法の検討を行った。その結果、溶融プール方式の運転方法として、以下を考案した。

1. 溶融プールの形成

溶融プールの原料である模擬土壌および炭酸ナトリウムの投入は、初期充填+2回の投入にて行う。これは、1度に多量の模擬土壌を供給すると未溶融の模擬土壌が固着し溶融に支障が生じるためである（MS-1においてその傾向が見られた）。



MS-1および2の結果およびMS-3、4への反映事項

2. ガレキの追加投入

(1) ガレキの投入順序

保温材およびコンクリートを先に供給し、模擬電気盤および鋼材をその後に供給する。
(底部金属層による影響を極力抑制するため)

(2) プレナム温度（耐火物容器上端+222mm位置）の管理

溶融ガラス表面近傍での電極棒の酸化減肉を抑制するため、プレナム温度の上昇を抑制する。その方策として、**溶融ガラス表面をガレキまたは模擬土壌で覆う**こととし、以下のとおりガレキの投入を行う。

MS-3（シリカ繊維フレコン）

- ・ 保温材およびコンクリート：3個ずつ6個セットで投入
- ・ 模擬電気盤：3個セットで投入
- ・ 鋼材：3個セットで投入

MS-4（模擬ドラム缶）

模擬ドラム缶1個につき、模擬土壌3.75kg、炭酸ナトリウム1.25kgを共投入する。

なお、共通事項として、プレナム温度（耐火物容器上端+222mm）が630℃（めやす）を超える場合は、模擬土壌7.5kg、炭酸ナトリウム2.5kgを投入し電極棒を保護する。

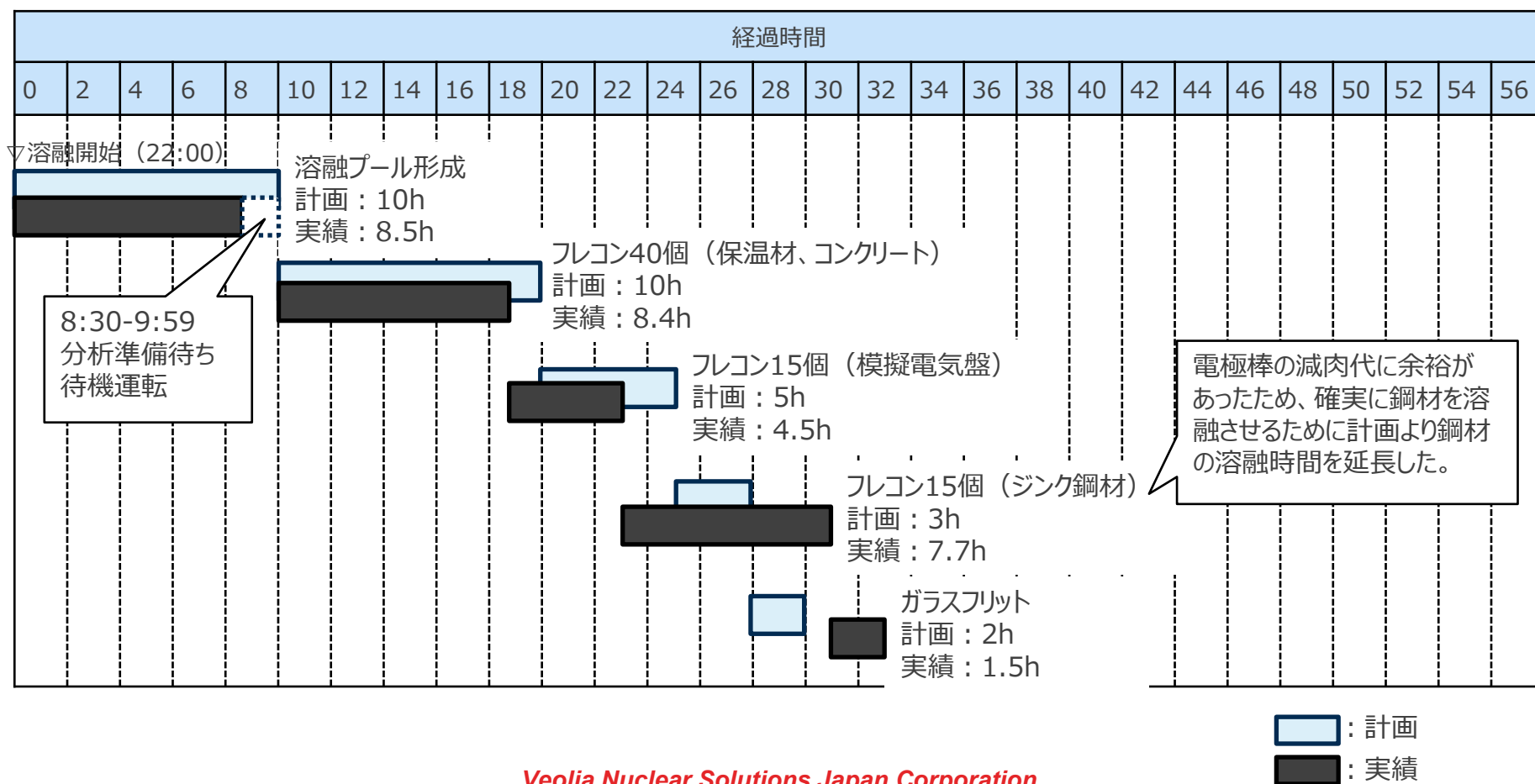
MS-3、4の溶融試験結果の概要

- MS-1、2で得られた各ガレキの溶融挙動および前頁の運転方法より、MS-3、4における投入容器数および運転スケジュールを計画し、試験を実施した。下表に主要な結果を示す。
- **MS-3は、ほぼ計画どおりの運転時間にてすべてのガレキを内包したシリカ繊維フレコンを処理することができた。**
- **MS-4は、模擬ドラム缶自体がシリカ繊維フレコンと比べて溶融に時間を要することから、MS-3よりも数量は少ないものの、合計50個の容器を処理することができた。**

項目		MS-3（フレコン）		MS-4（模擬ドラム缶）	
		計画	実績	計画	実績
容器処理数	保温材	20	同左	15	12
	コンクリート	20	同左	15	12
	模擬電気盤	15	同左	15	11
	鋼材	15	同左	15	同左
	合計	70	同左	60	50
運転時間		30h	33h	48h	41.8h

MS-3の溶融試験結果の詳細

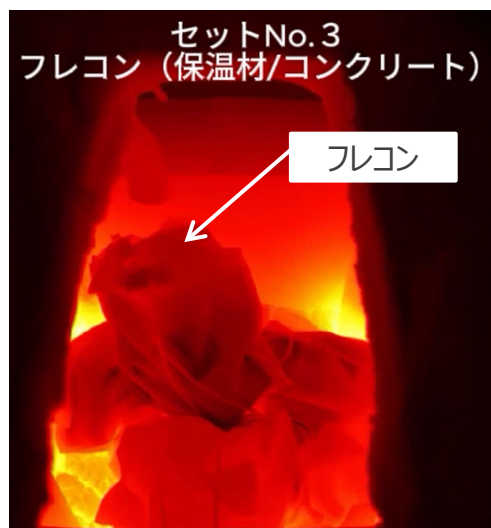
- 溶融プールの形成および各ガレキについて、概ね計画通りに処理を行うことができた。



MS-3（シリカ繊維フレコン）で溶融が円滑に進んだ理由について

- シリカ繊維フレコンは、材質が柔軟であることから、溶融ガラス上に容易に積層させることができた。また、投入したガレキが完全に溶融する前に、次の投入を行ったことで上記の積層状態を維持することができた。
- これにより、気相部への溶融ガラスの熱逃げを抑制し効率的にガレキを昇温し溶融させることができた。また、積層させることで、上層のガレキが下層のガレキを溶融ガラス中に押し込むことでも溶融の促進につながった。

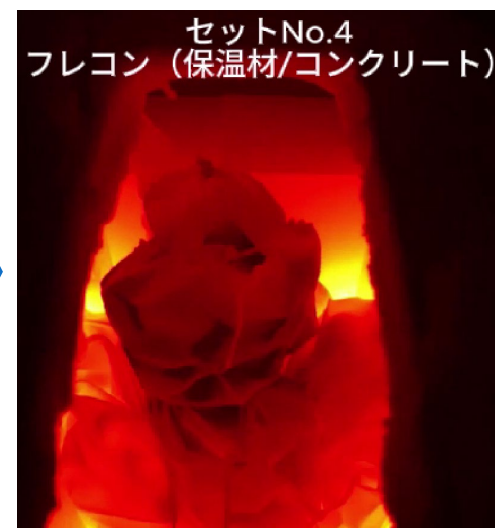
フレコン6個（保温材3個、
コンクリート3個）投入直後



半分程度溶融が進んだ状態

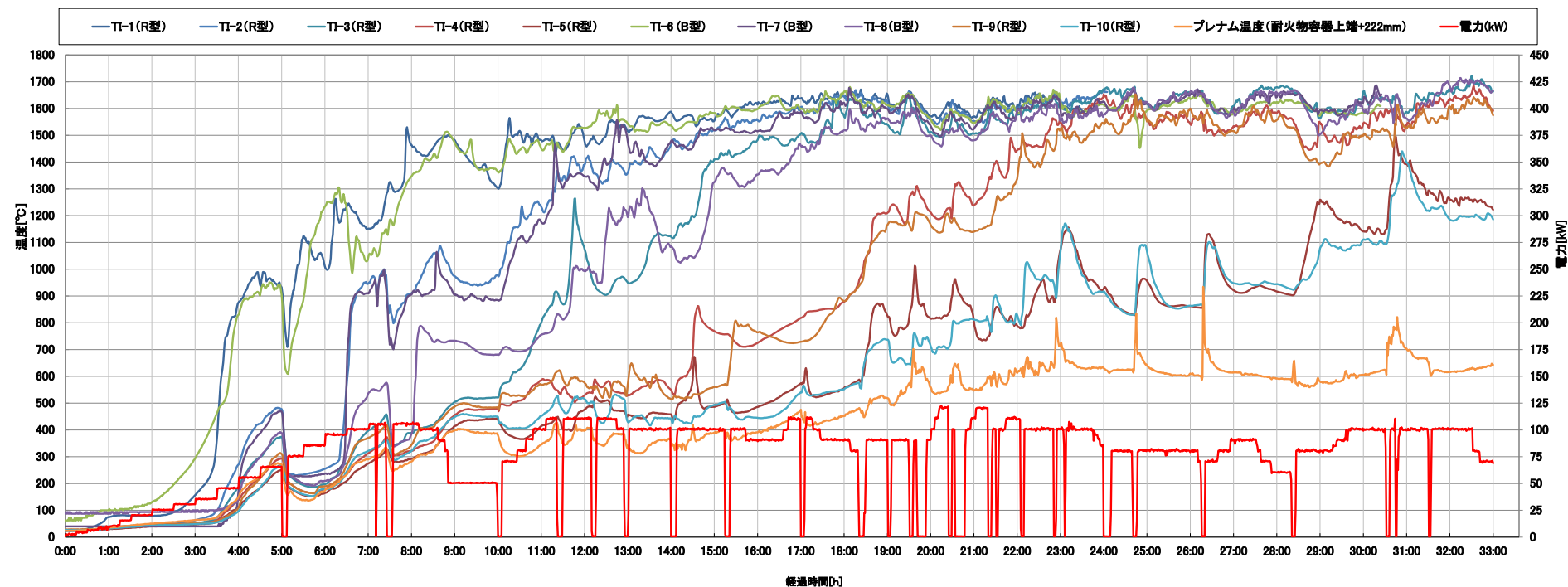
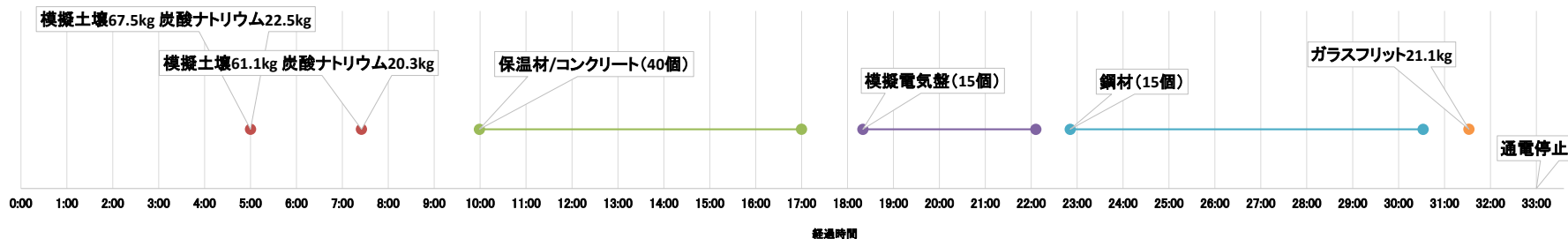


次のフレコン6個投入



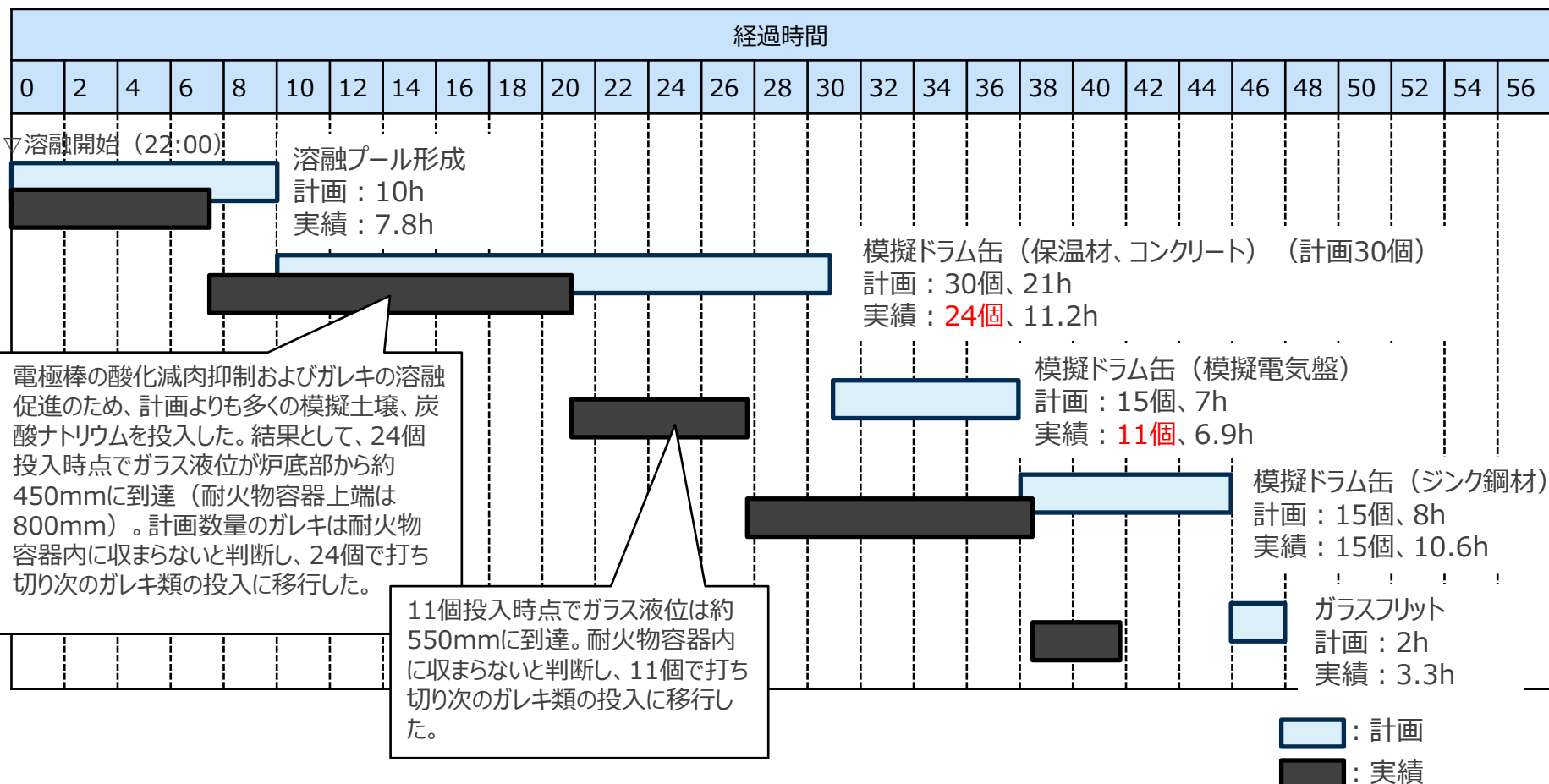
繰返し

MS-3 運転トレンド



MS-4の溶融試験結果の詳細

- MS-3よりも少ないものの合計50個の模擬ドラム缶を処理できた。



MS-4（模擬ドラム缶）で模擬ドラム缶投入数が減少した理由について

- 模擬ドラム缶は、シリカ繊維フレコンと異なり容器形状が維持されるため、積層させることはできず、溶融ガラス表面上に置くことが可能な数は2～3個までだった。そのため、溶融ガラス表面全体を覆うことができず、プレナム温度が上昇しやすかった。
- また、模擬ドラム缶自体もシリカ繊維フレコンと比べて溶融に時間を要した。特にガレキが保温材の場合、重量が軽く溶融ガラス表面に長時間留まる傾向にあった。
- 上記の改善のため、模擬土壌および炭酸ナトリウムの供給量を計画より増やした（次頁参照）。結果として、ガラス液位が計画よりも早く上昇し、耐火物容器上端に達する可能性があったため、模擬ドラム缶投入数は計画よりも減った。

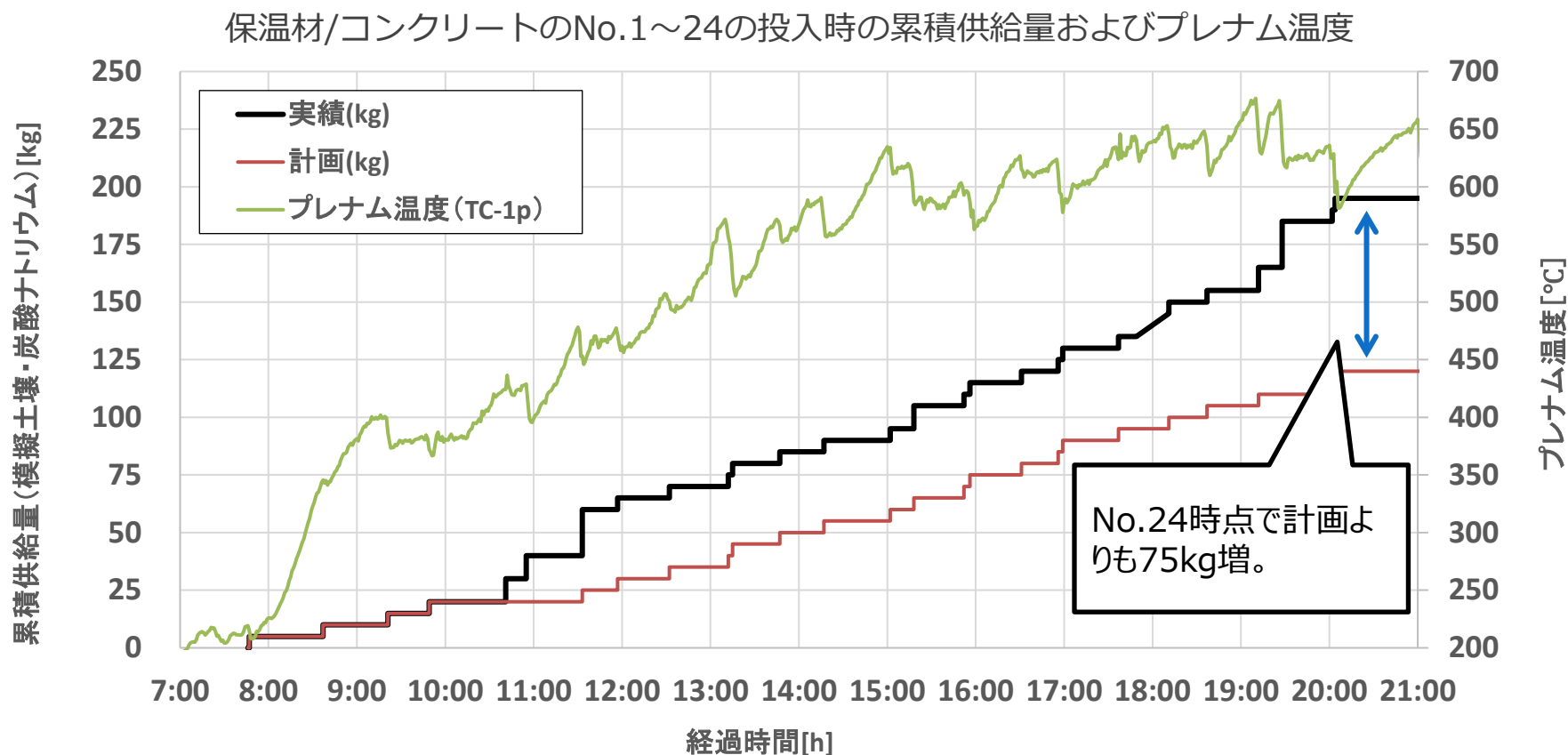
溶融ガラス表面
の模擬ドラム缶



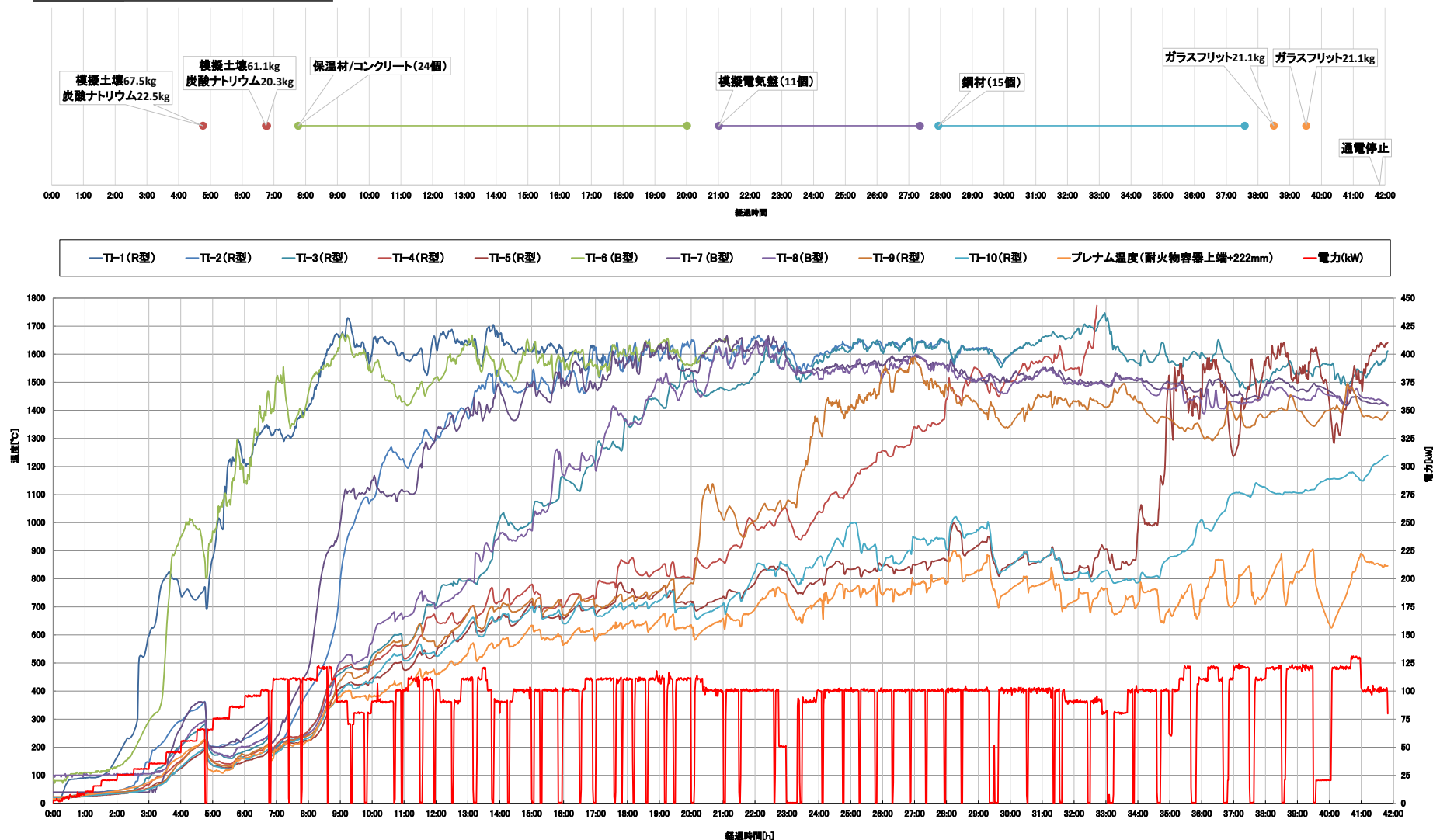
追加の模擬土壌および
炭酸ナトリウムの供給



模擬ドラム缶の溶融促進およびプレナム温度（めやす630℃以下）の上昇抑制のため、模擬土壌および炭酸ナトリウムを計画より多く投入した。結果として、No.24のコンクリートを投入時点で、累積供給量は195kgと、計画よりも75kg多く、ガラス液位が高くなっていた。そのため、次の模擬電気盤の供給に移行した。



MS-4 運転トレンド



溶融処理における減容率

減容率 = 耐火物容器の体積 / 供給廃棄物の体積

= 耐火物容器の体積 / (フレコンの体積 + 模擬ドラム缶の体積 + 模擬土壌の体積)

MS-3の減容率 = 864L / 1724L = **0.501**

MS-4の減容率 = 864L / 1383L = **0.625**

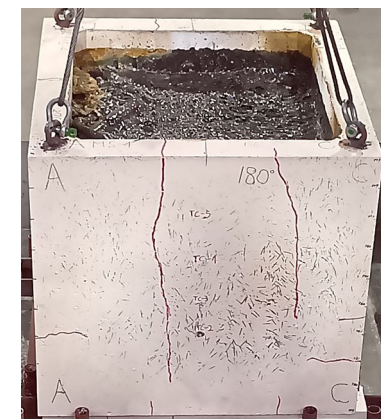
溶融処理により**廃棄物の体積を概ね半分程度**にできた。ただし、実機では耐火物容器外側に断熱材と鋼製ケーシングが設置されるため減容率は若干悪くなる。

MS-3の供給廃棄物の体積

廃棄物	個数		体積換算		体積	
	数量	単位	係数	単位	数量	単位
シリカ繊維フレコン※	70※	個	21.9	L/個	1533	L
模擬土壌	256.1	kg	0.744	L/kg	191	L
合計	—	—	—	—	1724	L

耐火物容器の体積

864L
(W980×L980×H900)



※ 写真はMS-4の耐火物容器

MS-4の供給廃棄物の体積

廃棄物	個数		体積換算		体積	
	数量	単位	係数	単位	数量	単位
模擬ドラム缶※	50※	個	20.5	L/個	1025	L
模擬土壌	481.1	kg	0.744	L/kg	358	L
合計	—	—	—	—	1383	L

※模擬ドラム缶内容物の内訳：保温材12個、コンクリート12個、模擬電気盤11個、鋼材15個

供給廃棄物中の金属割合

供給廃棄物中の金属割合は以下の通り。約35%の金属割合を達成できた。

単位：kg

供給物（初期充填含む）		MS-3	MS-4
模擬土壌		256.1	481.1
炭酸ナトリウム		91.4	166.4
コンクリート		375.2	186.3
保温材		25.5	11.5
難燃物		7.5	3.8
シリカクロス		35.5	0.0
金属	鋼	403.0	434.5
	銅	11.3	3.5
	鉛	0.7	0.4
	亜鉛	6.2	1.9
	合計	421.2	440.3
合計		1212.4	1289.2
金属割合		34.7%	34.2%

オフガスダストの分析結果

溶融炉出口スタックサンプリング

MS-2～4において、追加投入開始から溶融終了1時間後までの期間の溶融炉出口のスタックサンプリングを行った（サンプリング位置は次頁参照）。捕集したダストについて、粒子状物質（PM）、Cs、Sr、鉛、亜鉛の量を分析した。下表に各物質のオフガス移行総量を示す。

模擬電気盤には、亜鉛合金（取っ手、接地端子）が含まれており、30個（＝15容器×2個）の模擬電気盤を供給したMS-3ではPMに対する亜鉛の割合が56.6%に達した。一方、MS-4はこれらの亜鉛合金を排除して試験を行った結果、亜鉛の割合は23.9%だった。

オフガス移行総量（溶融炉出口連続サンプリング結果）

単位：g

項目	MS-2 (通電開始10:00-39:00)	MS-3 (通電開始9:55-34:00)	MS-4※1 (通電開始7:45-42:55)
PM	4906.4	7353.4	6432.8
Cs（元素）	1.54	1.52	1.15
Sr（元素）	0.0027	0.0045	0.0058
鉛（元素）	82.0	242.5	43.2
亜鉛（元素）	1347.6	3250.9	1200.9
PMに対する亜鉛の割合※2	34.2%	55.0%	23.2%

※1 MS-4のみ投入物の模擬電気盤に含まれる亜鉛を試験前に除去した。

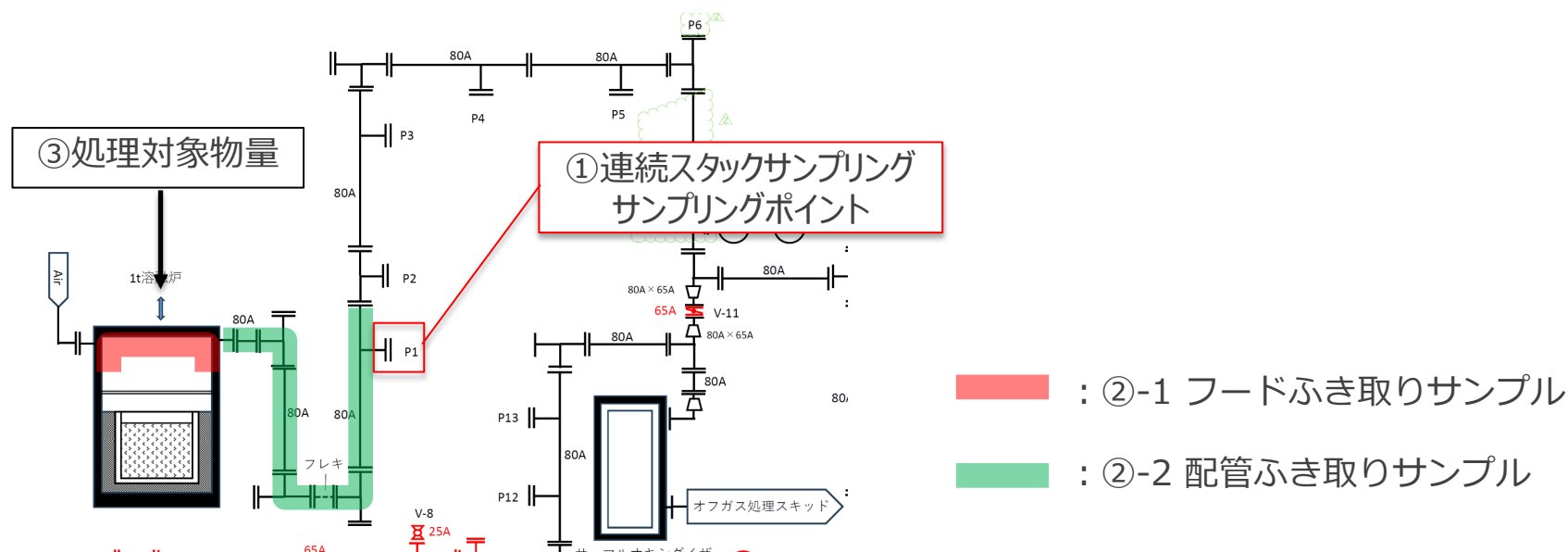
※2 亜鉛は主として酸化亜鉛として存在すると考えられるため、原子量65.38のZnを分子量81.38のZnOに換算して割合を算出した。

各トレーサーのガラス保持率

溶融炉出口スタックサンプリングおよびサンプリングポイントより上流のフード・配管のふき取りサンプルの分析結果より、各トレーサーのガラス保持率を評価した。

$$\text{ガラス保持率(\%)} = (1 - (\text{①} + \text{②}) / \text{③}) \times 100$$

※トレーサーは、Cs、Sr、鉛、亜鉛の4種



各トレーサーのガラス保持率

下表に各トレーサーのガラス保持率を示す。

Csのガラス保持率は90%前後、Srのガラス保持率は99.8%以上でありほとんどオフガスに移行しないことが分かった。Csの保持率は、容器にシリカ繊維フレコンを使用したMS-3のほうがMS-4よりも高かった。MS-4で使用した模擬ドラム缶はシリカ繊維フレコンに比べて溶融するのに時間を要したため、その間の揮発Csの量が多かったのではないかと考えられる。

亜鉛のガラス保持率は、30～40%台であり、亜鉛合金やジンク塗装中の亜鉛は多くがオフガスへ移行することが分かった。

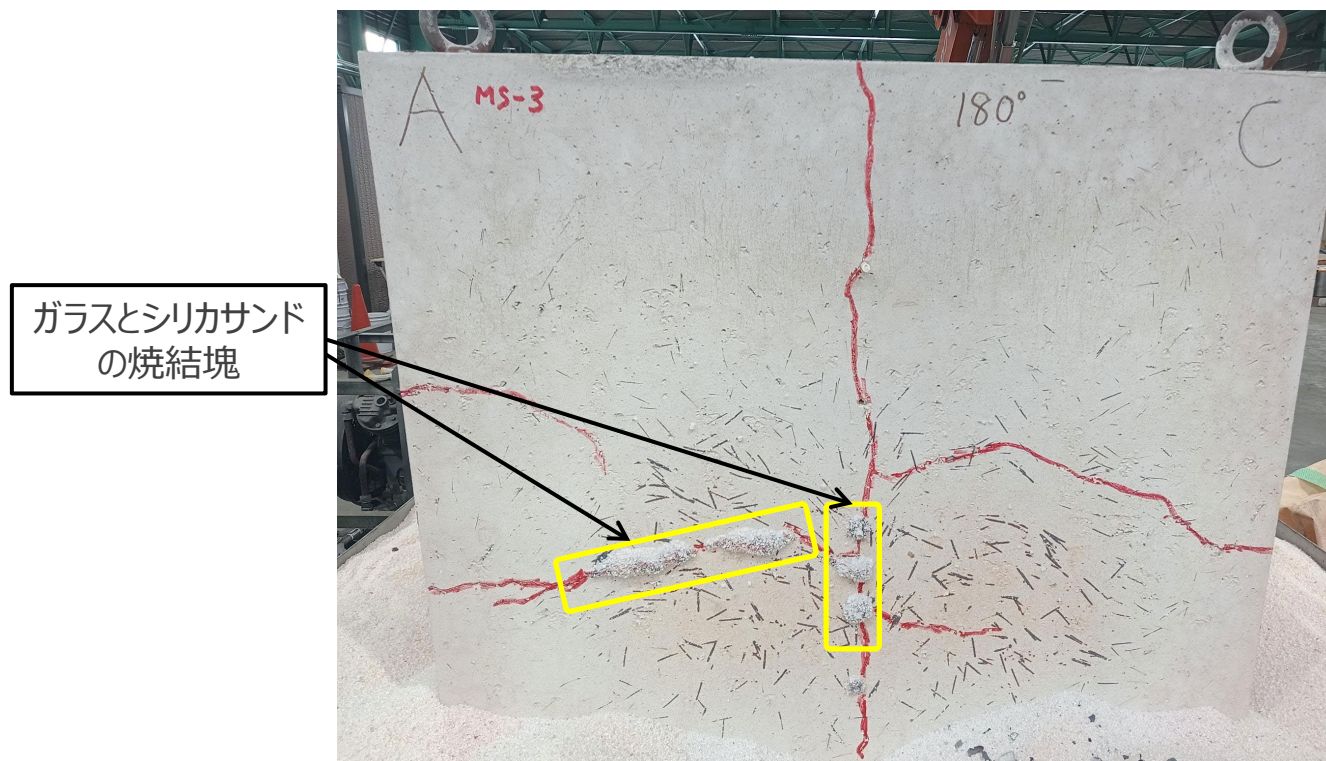
各トレーサーのガラス保持率

トレーサー	添加対象	MS-2 (フレコン&ドラム缶)	MS-3 (フレコン)	MS-4 (ドラム缶)
Cs	保温材	89.1%	91.1%	86.2%
Sr	保温材	99.9%	100.0%	99.8%
鉛	模擬電気盤 (鉛粒)	75.4%	63.3%	86.1%
亜鉛	・模擬電気盤 ・ジンク鋼材	39.7%	45.4%	31.6%

耐火物容器表面の観察結果

運転後の耐火物容器表面を観察したところ、4試験すべてにおいて亀裂が確認された。また、MS-2～4では、微量のガラスが亀裂を通じて容器内から漏れ出し、外側のシリカサンドと焼結塊を形成していることが確認された。

MS-3 180°方向耐火物容器側面



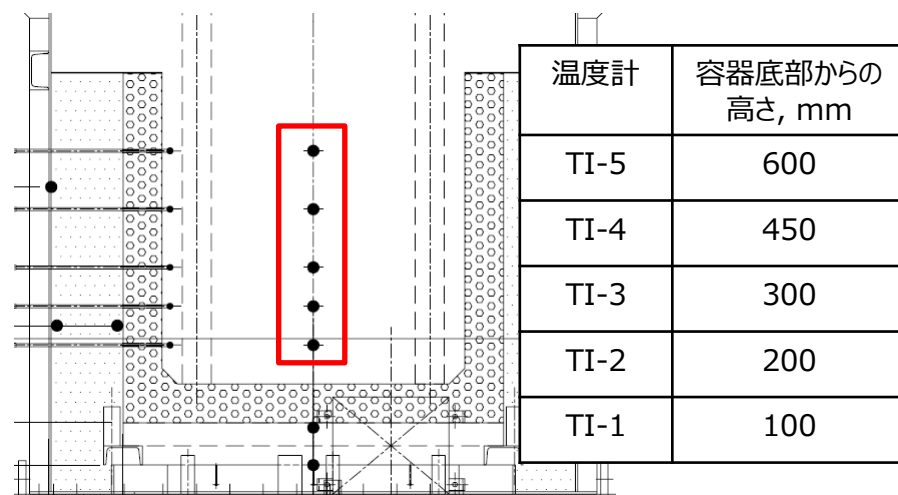
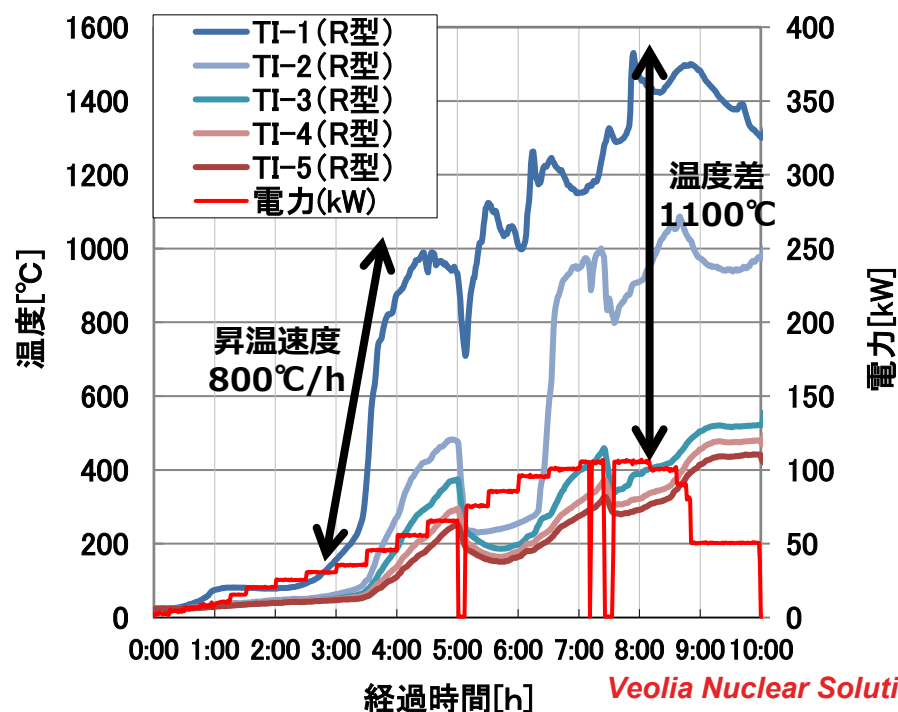
※亀裂位置を確認しやすいように、亀裂近傍を赤インクでマーキングしている。

亀裂発生 の 推定要因

溶融プール方式では、運転序盤に耐火物容器下部に少量の溶融ガラスが形成される。これにより、容器下部が高温となる一方、上部には溶融ガラスがないため比較的低温のままとなる。下図に示すように、MS-3では通電開始8:00に、TI-1（炉底100mm）とTI-3（炉底300mm）で最大1100℃の温度差が生じていた。この温度差により、耐火物容器の側壁中央部に熱応力が発生し、亀裂が生じたと考えられる。

また、運転序盤は昇温速度も大きく（+800℃/h）、この温度変化も亀裂発生に影響した可能性がある。

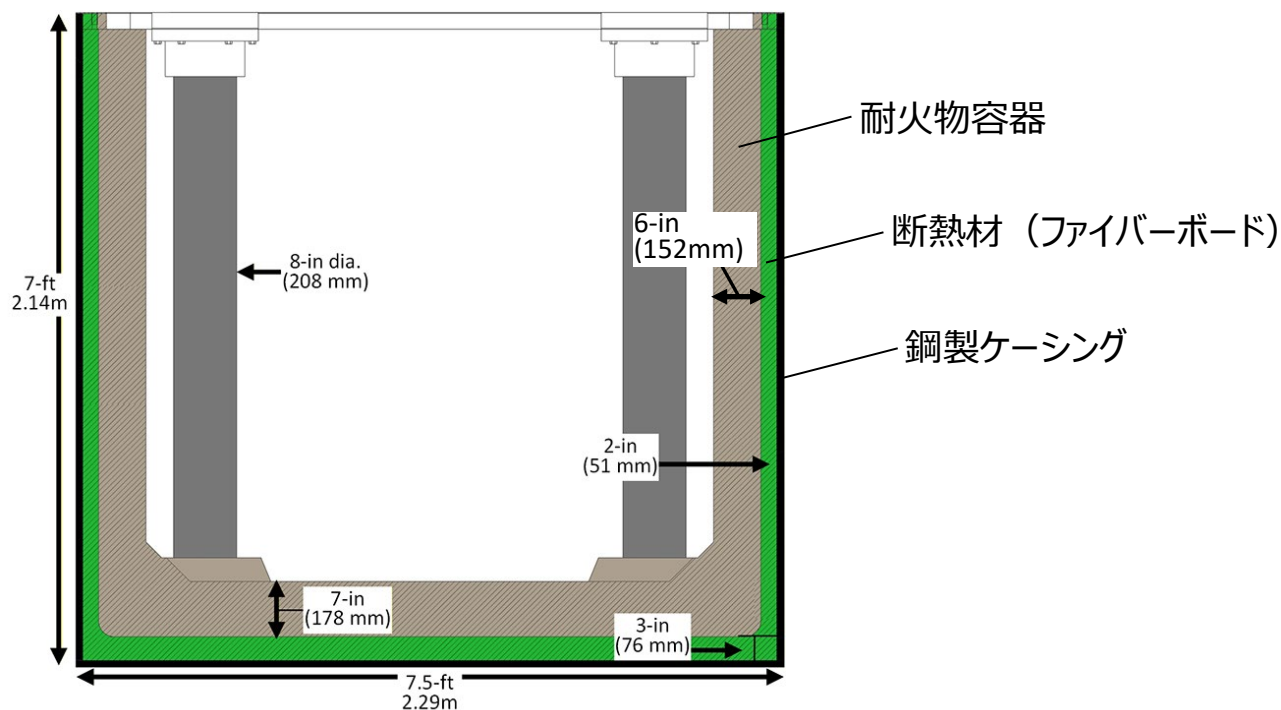
MS-3 運転序盤の温度推移



亀裂への対応について

運転初期の電力上昇を緩やかにし序盤の昇温速度を抑えること、亀裂の発生を抑制できる可能性はある。しかしながら、亀裂の発生を完全に防ぐことは難しいと考えられるため、タスク2で検討している廃棄体構造により溶融ガラスの漏洩を防ぐことを根本的な対策とする（3.3 予備概念設計の更新を参照）。本構造では、耐火物容器に亀裂が発生しガラスが漏れたとしても、断熱材によりそれ以上の漏洩を抑えるとともに、鋼製ケーシングの温度上昇を抑制することで、廃棄体の健全性を維持する。

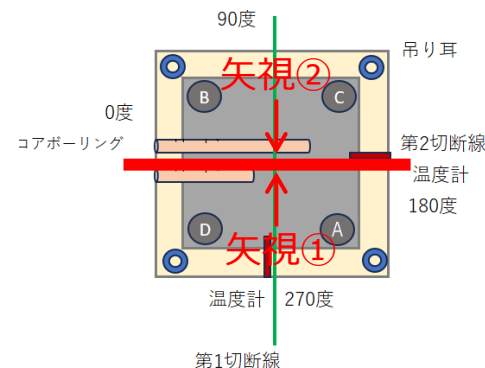
タスク2で検討している廃棄体の構造



ガラス固化体の断面観察結果（MS-3、0-180°断面）

耐火物容器は十字に切断し、4分割した。

厚さ約110mmの金属層が形成されており、未溶融の金属はなかった。



矢視①

矢視②



B電極
ブロック

C電極
ブロック



A電極
ブロック

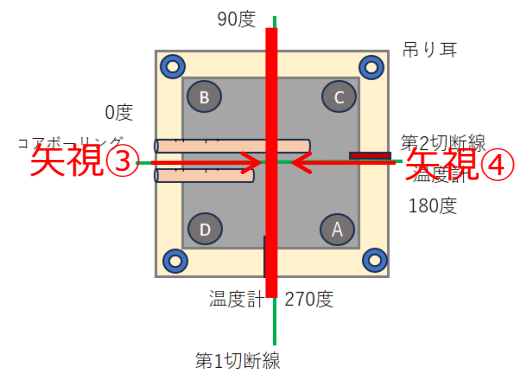
D電極
ブロック

2.2 1t規模溶融試験の結果

2.2.2 溶融試験の結果

64

ガラス固化体の断面観察結果（MS-3、90-270°断面）



矢視③

矢視④



C電極
ブロック

A電極
ブロック



D電極
ブロック

B電極
ブロック

ガラス相
約550mm

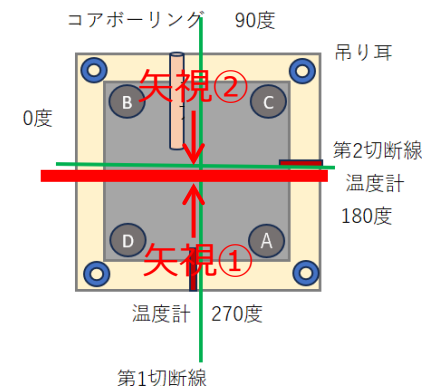
90°

金属相
約100mm

ガラス固化体の断面観察結果（MS-4、0-180°断面）

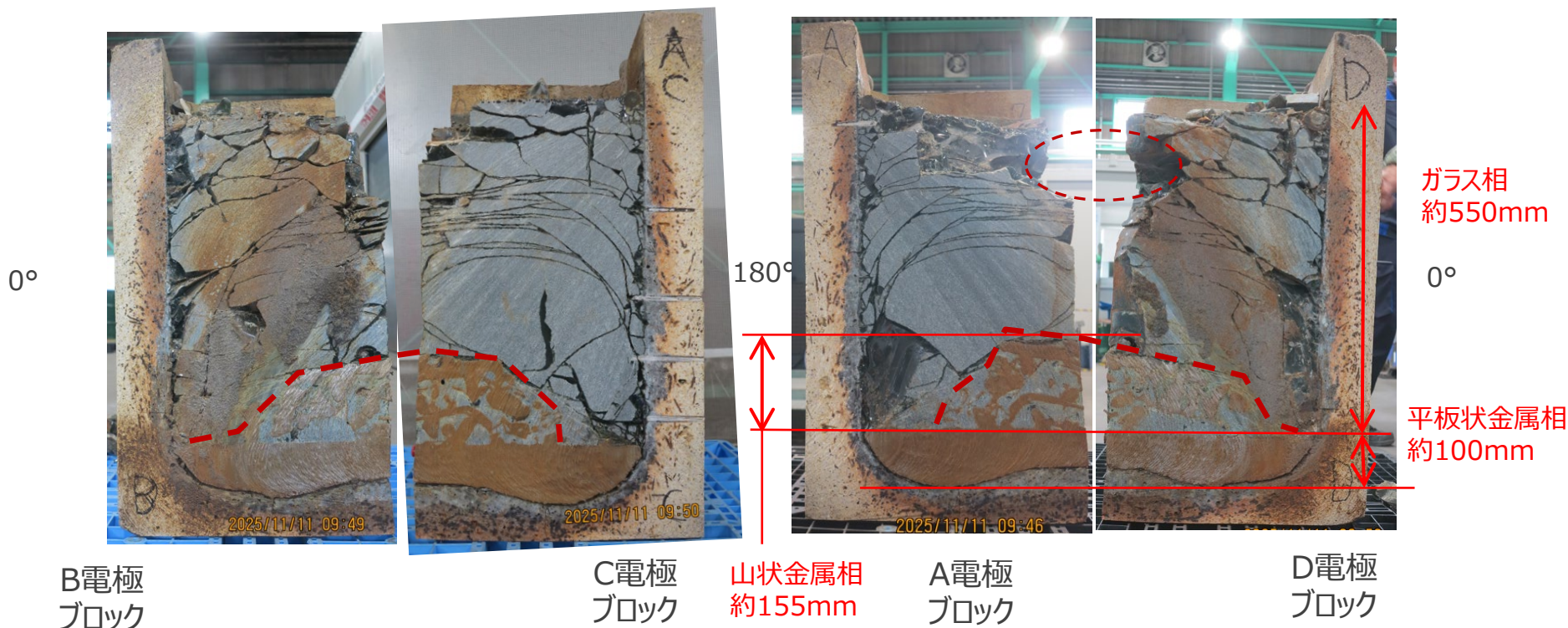
耐火物容器は十字に切断し、4分割した。

上面はほぼ平坦で、多くの鋼材は溶融されて底部に厚さ約100mmの平板を形成した。一方、一部の鋼材は完全には溶融されず高さ約155mmの山状に堆積されていた。



矢視①

矢視②



2.2 1t規模溶融試験の結果

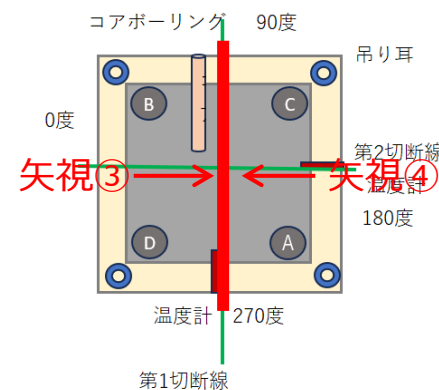
2.2.2 溶融試験の結果

66

ガラス固化体の断面観察結果（MS-4、90-270°断面）

0°-180°断面と比較し、90°-270°の断面では未溶融鋼材が耐火物側壁付近まで達していた。MS-4の運転後半は、270°方向の温度が上昇しにくかったが、この未溶融鋼材が影響していた可能性がある。

模擬ドラム缶は、投入後に中央に留まるものは少なく、沈降するまでに炉壁側に移動することが多かった。炉壁近傍は中心よりも温度が低く溶融には時間を要する。炉壁近傍の未溶融の鋼材が起点となって、中央部も含め未溶融鋼材が生じたと考えられる。



矢視③

C電極
ブロックA電極
ブロック

矢視④

D電極
ブロックB電極
ブロックガラス相
約550mm

90°

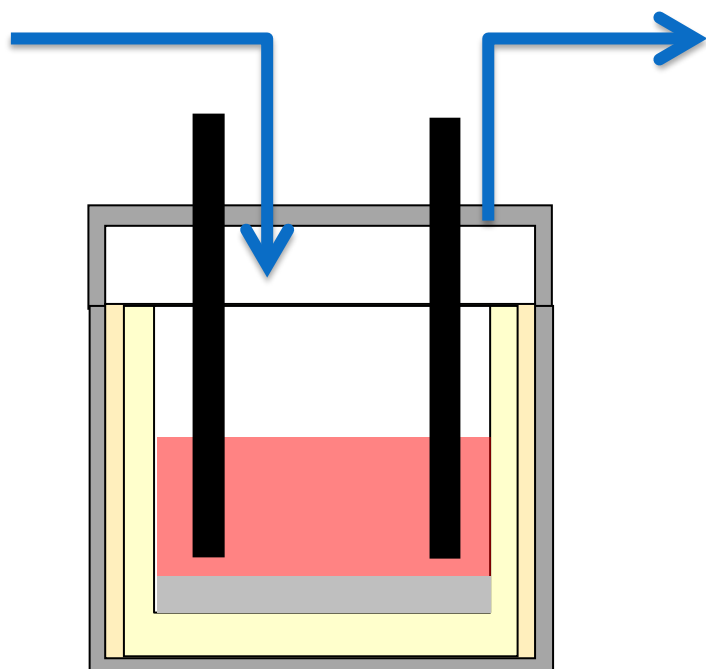
金属相
約100mm

はじめに

- 実機のGeoMelt®プラントでは、「ガレキ類の移送・供給設備」と「オフガス処理設備」が溶融炉の主要な付帯設備になると想定される。
- タスク1では、1t規模溶融試験結果を踏まえて、これらのプロセスフローの概念検討を行った。

①ガレキ類の移送・供給設備

②オフガス処理設備



①ガレキ類の移送・供給設備

- ガレキ類は、形状、重量およびサイズも多様であることが想定され、これらに対応可能な移送、供給方法を検討する。

②オフガス処理設備

- ガレキ類には、難燃物や金属も含まれるため、溶融時における塩化水素、ダイオキシン類、亜鉛等のオフガスへの移行を考慮する必要がある。
- 放射性核種については、Cs、Sr以外にも建屋内滞留水中に含まれる核種も考慮に入れる必要があり、これらに対処可能なオフガス処理設備を検討する必要がある。

2.3 プロセスフローの検討結果

2.3.1 ガレキ類の移送・供給設備の検討結果

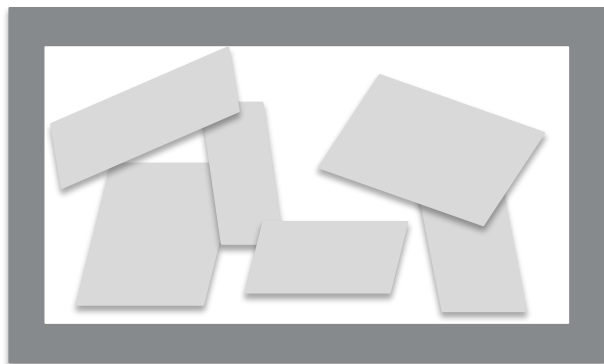
68

ガレキ搬入形態の想定

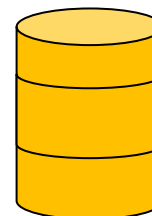
GeoMelt®溶融施設へ搬入される保温材、コンクリート、電気盤等のガレキは、6m³コンテナおよび200Lドラム缶で封入された状態で搬入されることを想定する。

これは、施設間の放射性廃棄物の運搬には容器の密閉性が求められるためである。6m³コンテナは福島第一原子力発電所において廃棄物の保管に広範に使用されている。また、200Lドラム缶も低レベル放射性廃棄物の容器として一般的に使用されており、この2つの形態で搬入されることを想定する。

6m³コンテナ



200Lドラム缶



2.3 プロセスフローの検討結果

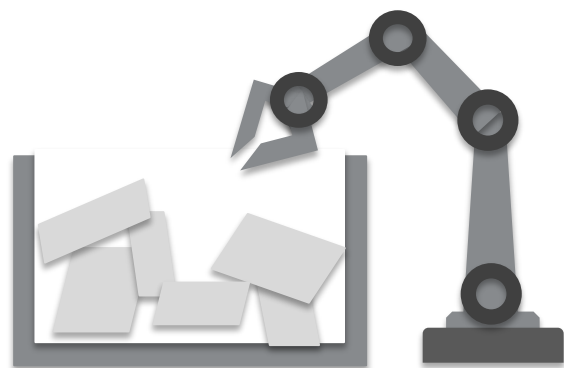
2.3.1 ガレキ類の移送・供給設備の検討結果

69

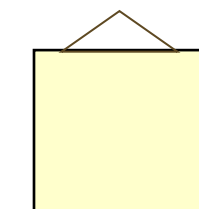
6m³コンテナのハンドリング

ガレキを6m³コンテナから直接溶融炉へ投入することは困難なため、マニプレータやクレーン等でコンテナから取り出しシリカ繊維フレコンに収納する。その後、金属廃棄物の投入順序をコントロールするために、金属有無およびおおよその量をX線撮影にて把握し、クレーンまたはコンベヤで溶融炉へ投入する。ただし、マニプレータ等でシリカ繊維フレコンに移す際は、作業の過程においてカメラ等で確認することになるため、金属系のガレキと非金属系のガレキを個別のシリカ繊維フレコンに分けることも考えられる。

マニプレータ等による取出し

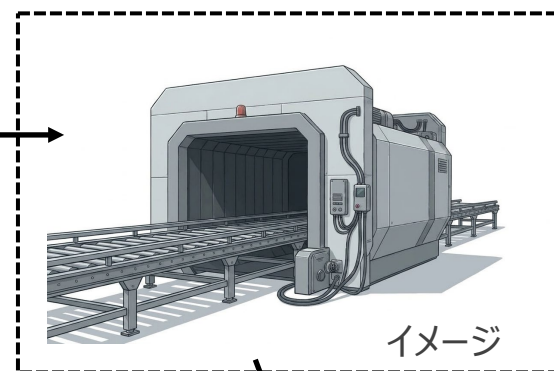


必要に応じてギロチン破断等によりシリカ繊維フレコンに入る寸法にする。



シリカ繊維フレコンの大きさは200Lドラム缶と同程度

X線撮影による金属有無および量の推定



イメージ

クレーンまたはコンベヤにより移送、溶融炉へ投入（タスク2の供給方法と一本化することも考えられる。）

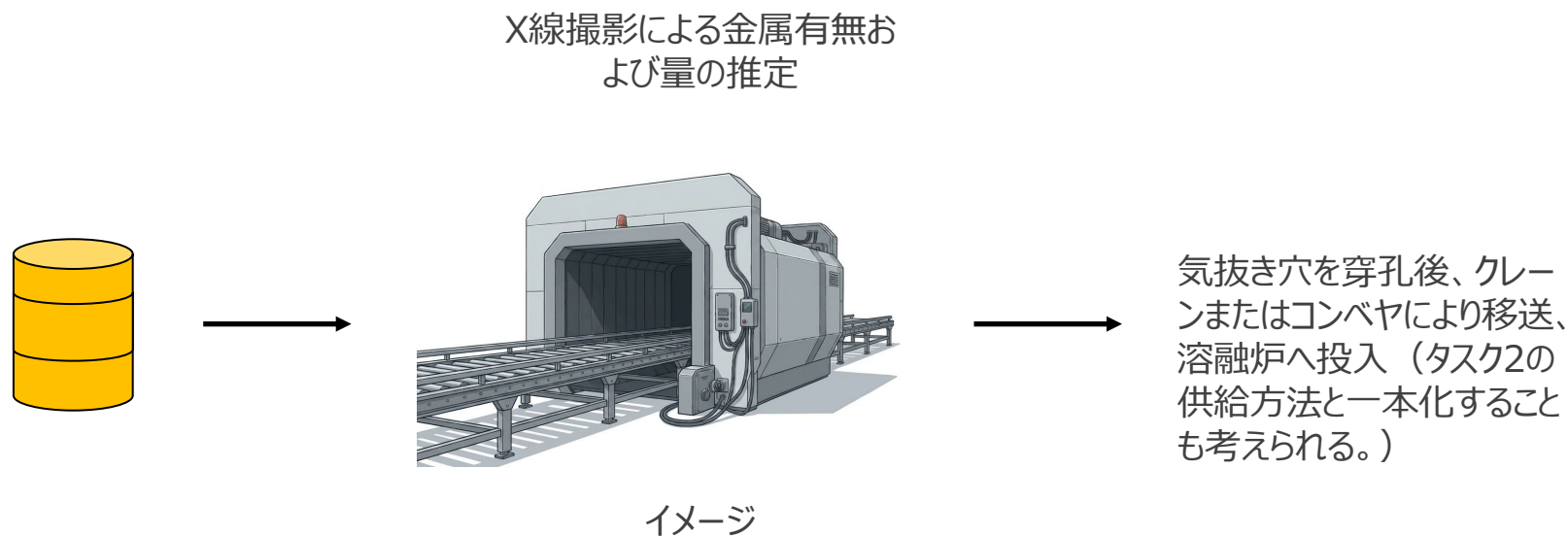
2.3 プロセスフローの検討結果

2.3.1 ガレキ類の移送・供給設備の検討結果

70

200Lドラム缶のハンドリング

ドラム缶ごとガレキを溶融炉へ投入することができる。そのため、シリカ繊維フレコンと同様に、ドラム缶容器のまま金属有無および量をX線撮影にて把握する。その後、ドラム缶上蓋に気抜き穴をせん孔し溶融炉へ投入する。



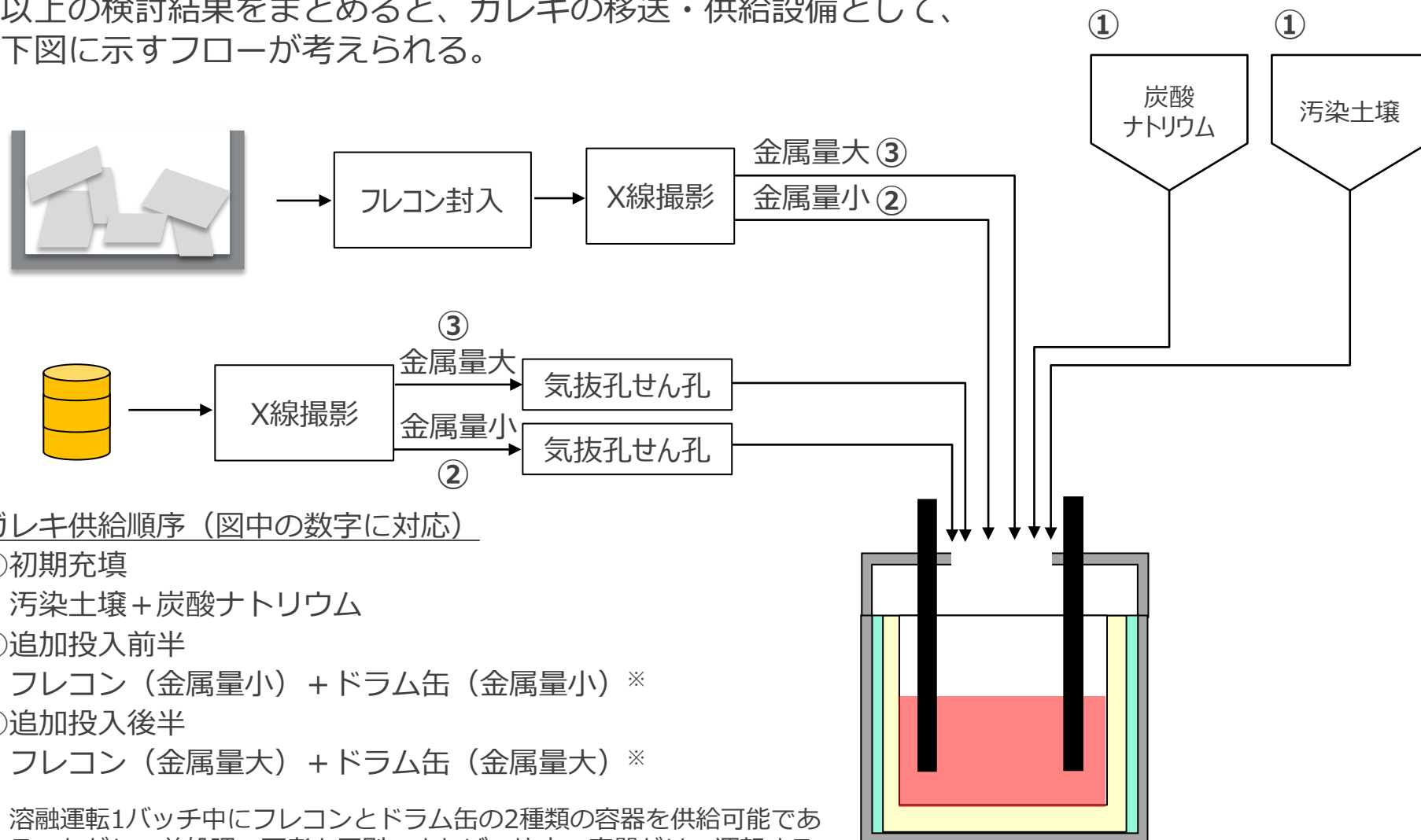
2.3 プロセスフローの検討結果

2.3.1 ガレキ類の移送・供給設備の検討結果

71

ガレキ類の移送・供給方法のまとめ

以上の検討結果をまとめると、ガレキの移送・供給設備として、下図に示すフローが考えられる。



ガレキ供給順序（図中の数字に対応）

①初期充填

汚染土壌 + 炭酸ナトリウム

②追加投入前半

フレコン（金属量小） + ドラム缶（金属量小）※

③追加投入後半

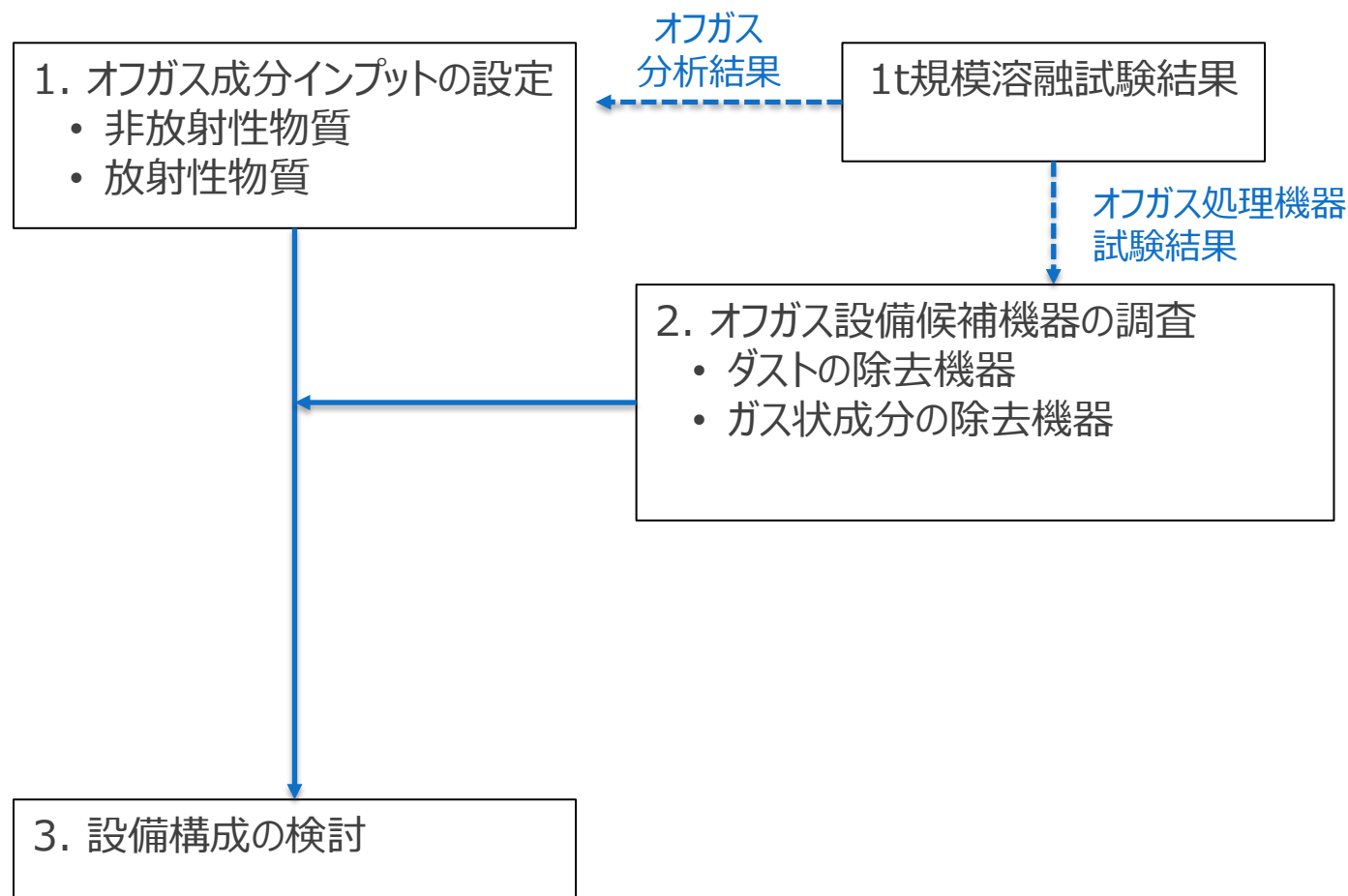
フレコン（金属量大） + ドラム缶（金属量大）※

※ 溶融運転1バッチ中にフレコンとドラム缶の2種類の容器を供給可能である。ただし、前処理で両者を区別できれば、片方の容器だけで運転することも可能である。

はじめに

オフガス処理設備の検討は以下の流れで行った。

1.および2.の要素検討結果を踏まえて、3.にてオフガス処理設備の構成を検討した。



1. オフガス成分インプットの設定（非放射性物質）

1t規模溶融試験結果を踏まえて、以下の成分を設定した。特に、ばいじん、HCl、ダイオキシン類は、炉出口で大気汚染防止法基準値を超過しており、除去機器が必須である。

種別	成分	単位	1t規模溶融炉 出口濃度（最大）	（参考）大気汚染防 止法基準
ダスト	ばいじん（PM）	mg/Nm3	17356	150
	亜鉛	－	ばいじんの57%	基準なし
	鉛	－	ばいじんの3%	基準なし
ガス	HCl	mg/Nm3	960	700
	SOx	ppm	120	基準なし
	NOx	ppm	29	250
	フッ素化合物	mg/Nm3	15	基準なし
	CO	ppm	2800	基準なし
	ダイオキシン類	ng-TEQ/Nm3	140	5

1. オフガス成分インプットの設定（放射性物質）

「ALPS 処理水の海洋放出に係る運用体制及び測定・評価対象核種について」補足説明資料※を参考に、建屋内滞留水で考慮すべき核種を選定、そこからさらに既往文献や化学形態を基にオフガスへの移行を考慮すべき核種として13核種を選定した。

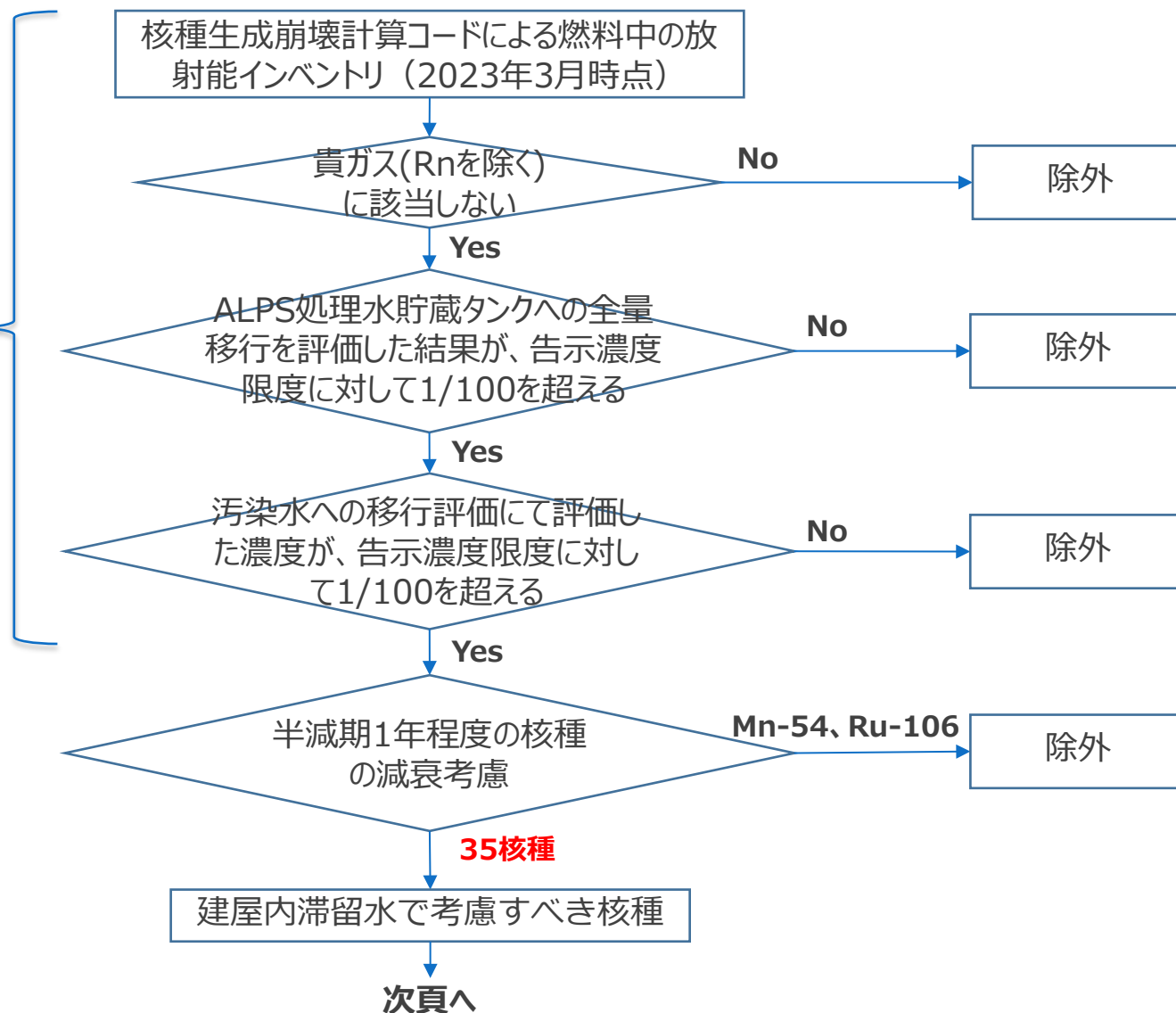
選定フローを次頁に示す。

形態	核種	形態	核種
ダスト	Se-79	ガス	H-3
	Nb-93m		C-14
	Nb-94		Cl-36
	Tc-99		I-129
	Cd-113m		
	Sb-125		
	Te-125m		
	Cs-134		
	Cs-137		

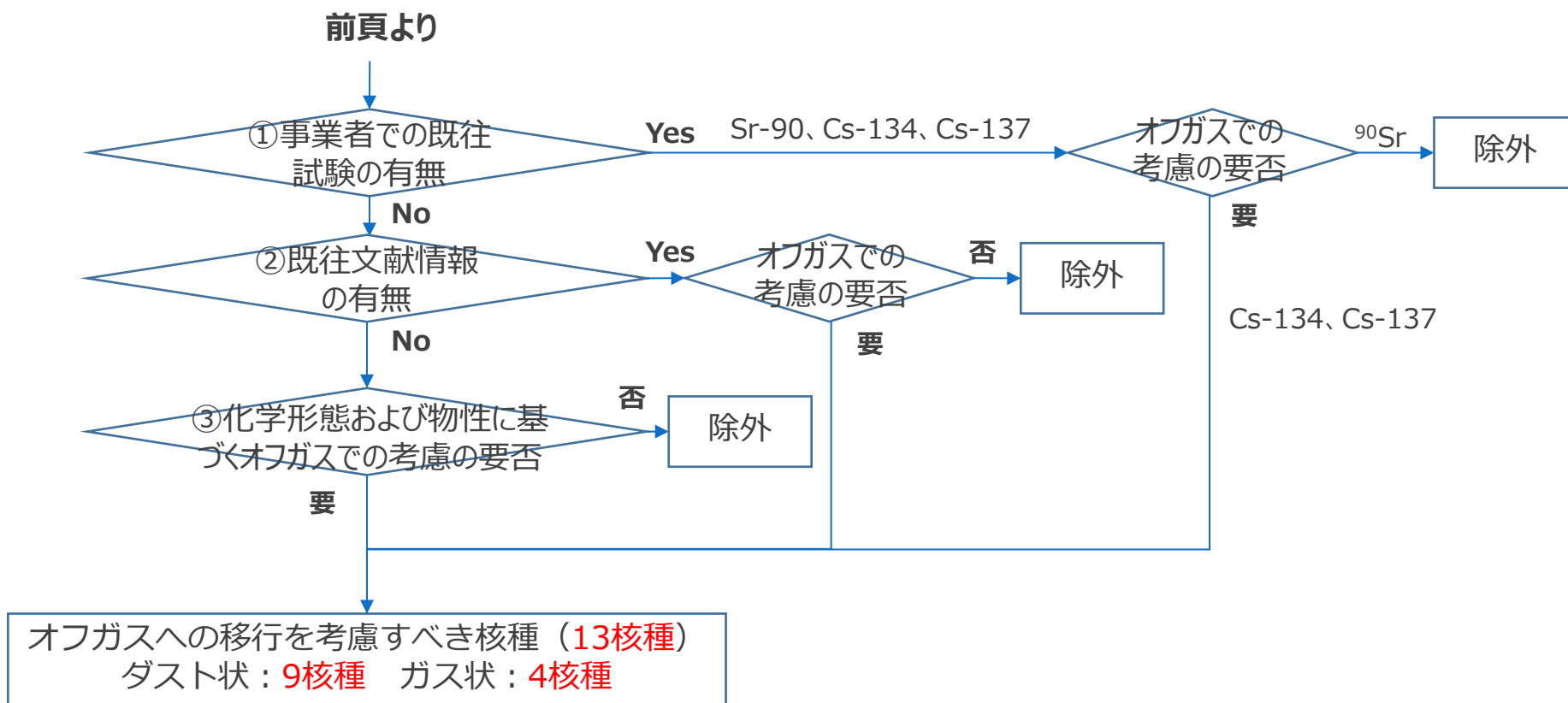
※ 福島第一原子力発電所特定原子力施設への指定に際し東京電力株式会社福島第一原子力発電所に対して求める措置を講ずべき事項について等への適合性について（ALPS 処理水の海洋放出に係る運用体制及び測定・評価対象核種について）補足説明資料, 令和4年11月, 東京電力ホールディングス株式会社

オフガス成分インプット（放射性物質）の選定フロー（1/2）

「ALPS 処理水の海洋放出に係る運用体制及び測定・評価対象核種について」補足説明資料と同じスクリーニング方法



オフガス成分インプット（放射性物質）の選定フロー（2/2）



2. オフガス設備候補機器の調査（非放射性物質）

前項で設定したオフガス成分に対して、除去を期待できる機器を調査した。

候補に挙げた機器に対して、1t規模溶融試験において以下の方法により試験評価を行った。

成分		候補機器	試験機器	評価方法
ダスト		電気集塵機	分岐機器	除去率、払落し性を評価する。
	ろ過式	ろ布	分岐機器	除去率、払落し性、差圧を評価する。
		焼結金網	分岐機器	除去率、払落し性、差圧を評価する。
		セラミック	分岐機器	除去率、払落し性、差圧を評価する。
	遠心力	サイクロン	－	ダスト粒径より適用性を評価する。
	洗浄式	ベンチュリスクラバ	本設機器	除去性、排水性状を評価する。
ガス	HCl	アルカリスクラバ	本設機器	除去率を評価する。
	SOx			
	フッ素			
	CO	サーマルオキシダイザー	本設機器	除去率を評価する。
	ダイオキシン類	サーマルオキシダイザー＋活性炭フィルタ	本設機器	除去率を評価する。

ダスト除去機器の評価結果

試験結果および機器仕様に基づく評価結果を以下に示す。タスク2でも使用実績のある焼結金網およびろ布が総合評価が高い結果となった。焼結金網はろ布よりも高い差圧が許容できるが、その一方、高い静圧の排風機が要求される。どちらのフィルタを採用するかは、将来的なオフガス処理設備の系統設計のなかで判断すべきと考える。

項目	電気集塵機	ろ過式集塵機			遠心力集塵
		ろ布	焼結金網	セラミックフィルタ	サイクロン
ダスト除去率 (試験結果)	△※1	◎ 99%以上	◎ 99%以上	○ 95%以上	× ダスト粒径が小さく 除去困難※2
ダスト払落し (試験結果)	×※1	△※3	△※3	×～△※3	不明
許容差圧	◎ 原理的に低圧損	△ ～2.0kPa※4	○ ～4.0kPa※4	△ ～2.0kPa※4	◎ 原理的に低圧損
耐熱性※5	○ ～300℃	○ ～250℃	○ ～480℃	○ ～900℃	○ ～500℃
耐腐食性	○	◎ PTFE/ガラス繊維 とも高耐食性	○ 標準はSUS316L だが高耐食ハステ ロイ等も採用可能。	◎ 主材質のケイ酸アル ミニウムは高耐 食性	○
総合評価	× 払落しに難があり 下流へのダスト通 過が起こりうる。	○	○	△ 払落し性が若干 劣る一方、許容差 圧に制限があるた め系統設計上課 題がある。	× 高除去率を期待 できないため不適

- ※1 電気集塵機のダスト除去率および払落しについて
1t規模溶融試験において、電気集塵機は放電極および集塵極に付着したダストの払落し性が悪く、機器下流へダストが移行した。メーカへヒアリングしたところ、実機においても基本は試験と同じつち打での払落しとなるが、その性能が大きく変わることはない。また、圧空による払落しもあるが、その間は通風量が増えるため下流へダストが移行する可能性があるのことだった。そのため、除去率および払落し性の観点で他の機器よりも劣ると判断した。
- ※2 サイクロンのダスト除去率について
サイクロンで対象となるダストの推奨粒径は $3\mu\text{m}$ 以上である一方、今回の試験結果では $1\mu\text{m}$ 未満の粒径の割合も多いことが分かった。そのため、サイクロンでの除去は困難と評価した。
- ※3 ろ過式集塵機のダスト払落しについて（ろ布、セラミック、焼結金網）
今回の試験結果では、パルス逆洗により差圧の回復は確認されなかったが、運転は継続できた。セラミックフィルタは一般的に細かい粒子が内部に入った場合に逆洗が難しいため他より劣る評価とした。
- ※4 許容差圧について
ろ布およびセラミックフィルタは、一般的には差圧は 2.0kPa 程度を上限に運用することが推奨されている。一方、焼結金網は水処理でも使用されており、より高い圧力でも運用が可能である。タスク2では差圧が 4.0kPa 時にパルス払落しを行い通常運転範囲に回復することが確認できている。
- ※5 耐熱性について
ダスト中に低融点の物質（塩化亜鉛： 290°C 、鉛： 327.5°C ）があること、またセシウムをなるべく固体粒子状態とする必要がある（塩化セシウムの 600°C の飽和蒸気圧： 7.25Pa ）ことから、除塵機器内のガス温度は 250°C 程度まで下げる必要がある。そのため、すべての機器において“○”の評価とした。

ガス除去機器の評価結果

次頁に示すように各ガス成分を高効率で除去できており、アルカリスクラバー、サーマルオキシダイザーとも有効性を確認できた。

サーマルオキシダイザー温度は820℃に設定し温度制御していたが、模擬電気盤投入後に一時的に最高970℃まで温度が上昇した。これは、模擬電気盤に含まれる難燃物が分解し発生した可燃性ガスがサーマルオキシダイザーで二次燃焼したためと考えられる。発生する分解ガスとしては、次々頁に示すようなものが考えられるが、これらが下流のオフガス処理設備に移行すると火災・爆発のリスクがある。そのため、炉出口にサーマルオキシダイザーを設置し、これらの分解ガスをすぐに完全燃焼することが望ましいと考えられる。

2.3 プロセスフローの検討結果

2.3.2 オフガス処理設備の検討結果

81

ガス除去機器の評価結果

下表に示すように各ガス成分を高効率で除去できており、アルカリスクラバー、サーマルオキシダイザーとも有効性を確認できた。

1t規模溶融試験におけるオフガス成分の除去結果

オフガス成分	単位	MS-2 (通電開始14:30～18:30)			MS-3 (通電開始18:20～22:20)			MS-4 (通電開始21:00～25:00)			大気汚染 防止法基 準	主要除去機器※1
		炉出口	大気放出口(下段は 換算濃度 ※2)	除去率 (%)	炉出口	大気放出口(下段は 換算濃度 ※2)	除去率 (%)	炉出口	大気放出口(下段は 換算濃度 ※2)	除去率 (%)		
HCl	mg/m ³	0.9	<0.6 (<0.5)	33以上	960	<0.6 (<0.5)	99.9 以上	0.9	<0.6 (<0.6)	33以上	700	ベンチュリスクラバー (アルカリスクラ バー)
SOx	ppmv	26	<0.5	98 以上	120	<0.5	99.6 以上	<0.5	<0.5	算出不可	基準 なし	ベンチュリスクラバー (アルカリスクラ バー)
CO	ppmv	2600	<10 (<8)	99.6 以上	2800	<10 (<9)	99.6 以上	2000	<10 (<9)	99.5以上	基準 なし	サーマルオキシダイ ザー
ふっ化物	mg/m ³	4.9	<1.0	79以上	15	<1.0	93 以上	<1.0	<1.0	算出不可	基準 なし	ベンチュリスクラバー (アルカリスクラ バー)
ダイオキシ ン類	ng/m ³	4000	2.3	99.9	18000	1.3	99.99	240	0.66	99.7	基準 なし	サーマルオキシダイ ザー+活性炭フィルタ
	(毒性当量) ng-TEQ/m ³	37	0.025	—	140	0.013	—	2.3	0.0075	—	5	

※1 オフガス設備の構成は、炉⇒サーマルオキシダイザー⇒ベンチュリスクラバー（アルカリスクラバー）⇒HEPA⇒活性炭フィルタ

※2 換算濃度は12%O₂換算濃度である。

2.3 プロセスフローの検討結果

2.3.2 オフガス処理設備の検討結果

82

電気盤に含まれる難燃物の不完全燃焼時の生成物

難燃物	不完全燃焼時の生成物
塩化ビニル (PVC) (CH ₂ CHCl) _n [田中義樹ほか, 1998]	ポリエン
	クロロベンゼン (C ₆ H ₅ Cl)
	3-クロロ-3-メチルペンタン (CH ₃ C(C ₂ H ₅) ₂ Cl)
	塩化水素(HCl)
ポリカーボネート (PC) (C ₁₆ H ₁₄ O ₃) _n [上野智永ほか, 2006]	メタン (CH ₄)
	一酸化炭素 (CO)
	フェノール類 (C ₆ H ₄ OH-X)
	ビスフェノールE (CH ₃ CH(C ₆ H ₄ OH) ₂)
	ビスフェノールA ((CH ₃) ₂ C(C ₆ H ₄ OH) ₂)
ポリアミド (PA) 例: ナイロン6 (C ₆ H ₁₁ NO) _n [長瀬裕ほか, 1979]	ε-カプロラクタム (C ₆ H ₁₁ NO)
	アンモニア (NH ₃)
	一酸化炭素 (CO)
	水素 (H ₂)
	メタノール (CH ₃ OH)
	エチレン (C ₂ H ₄)
ポリエチレンテレフタレート (PET) (C ₁₀ H ₈ O ₄) _n [Osmanほか, 2020]	炭化水素 (C ₅ , C ₆)
	H-O-C=O化合物
	アセトアルデヒド (CH ₃ CHO)
	水素 (H ₂)
	ベンゼン (C ₆ H ₆)
	トルエン (C ₆ H ₅ CH ₃)
	メタン (CH ₄)
	エタン (C ₂ H ₆)
	一酸化炭素 (CO)
	安息香酸類 (C ₆ H ₄ COOH-X)
	ベンゾフェノン (C ₆ H ₅) ₂ CO)
	アセトフェノン (CH ₃ COC ₆ H ₅)
	テレフタル酸 (C ₆ H ₄ (COOH) ₂)
	ビニルテレフタレート(C ₁₀ H ₈ O ₄)

表中の赤字は爆発性ガスであり、爆発限界 (Vol% 空气中) は以下の通り。

・ 水素	4.0～75%
・ 一酸化炭素	12.5～74%
・ メタン	5.0～15%
・ エタン	3.0～12.5%
・ エチレン	2.7～36%
・ メタノール	6.0～36.5%
・ アセトアルデヒド	4.1～55%
・ ベンゼン	1.2～8.0%
・ トルエン	1.27～7.0%
・ アンモニア	15～28%
・ C5-C6炭化水素	1.1～7.5% (ヘキサン)

出典

田中義樹ほか, ポリ塩化ビニルの熱分解における脱塩化水素反応モデル, 日本化学会誌 No.10 p684-689, 1998

上野智永ほか, モデル物質を用いたポリカーボネートの熱分解生成物の定量的解析, 高分子論文集 vol.63 No.12 p791-798, 2006

長瀬裕ほか, ポリアミドの熱分解, 日本化学会誌 No.11 p1560-1568, 1979

Osmanほか, Pyrolysis kinetic modelling of abundant plastic waste(PET) and in-situ emission monitoring, Environmental Sciences Europe vol.32 No.112, 2020

3. オフガス処理設備構成の検討

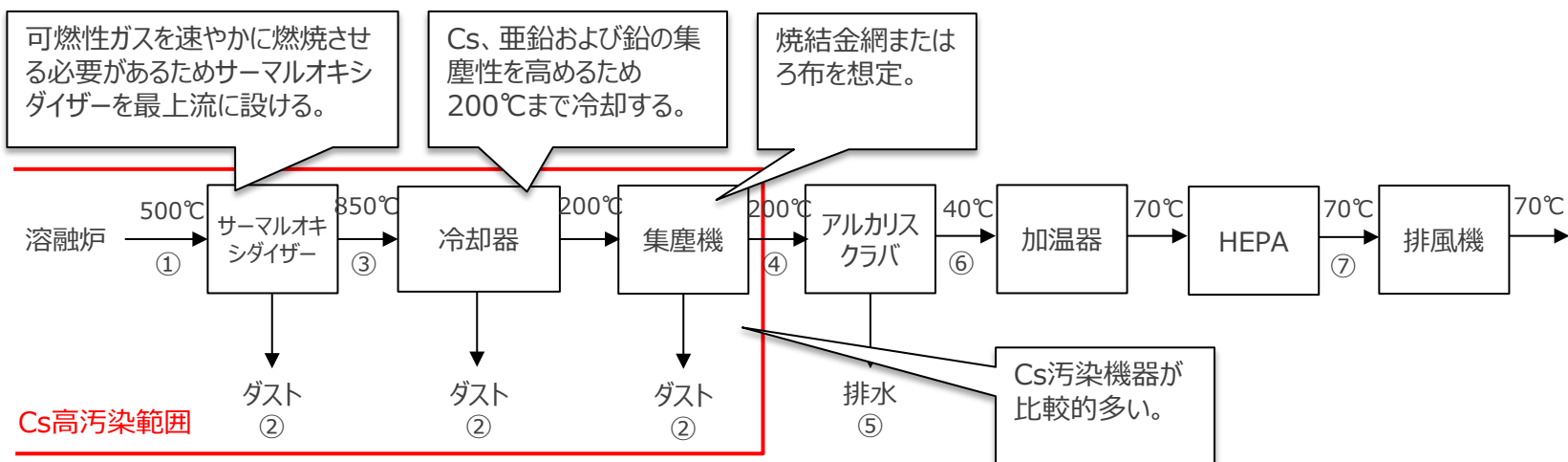
前頁までの検討結果を踏まえて、オフガス処理設備の構成を検討した。様々な種類のガレキを処理する場合には、次頁に示す設備構成が有力と考えた。

本構成であれば、非放射性および放射性のオフガス成分（ダスト状、ガス状とも）の除去が可能であるが、放射性Csの汚染範囲が比較的広範に及ぶ。これらの汚染機器のメンテナンスや処理の方法についても今後検討していく必要がある。

2.3 プロセスフローの検討結果

2.3.2 オフガス処理設備の検討結果

84



オフガス成分※1		① 炉出口	② ダスト	③ サーマル出口	④ 集塵機出口	⑤ スクラバ排水	⑥ スクラバ出口	⑦ HEPA出口
非放射性	ダスト	ばいじん	○	○	微量		微量	
		亜鉛	○	○	微量		微量	
		鉛	○	○	微量		微量	
	ガス	HCl	○	○	○	○		
		SO _x	○	○	○	○		
		HF	○	○	○	○		
		CO	○					
		ダイオキシン類	○					
放射性	ダスト	可燃性ガス(CH ₄ 等)	○					
		Cs-134, 137	○	○	微量		微量	
		その他	○	○	微量		微量	
	ガス	H-3	○	○	○	○	○	○
		C-14※2	○	○	○	○	○	○
		Cl-36	○	○	○	○		
		I-129	○	○	○	○		

※1 ○は各オフガス成分の主要な移行経路または到達範囲を表している。

※2 C-14はCO₂の形態でオフガスへ移行することが想定されるが、効率よく回収することが難しいため、まずは実際のガレキにおける存在量を評価することが重要と考える。

二次廃棄物の扱いについて

本設備構成の場合、二次廃棄物としてダストとスクラバ排水が生じる。その扱いとして、以下を想定する。

ダストについて

Cs-134、137のガラス保持率を高めるため、回収ダストは溶融炉へ供給するものとする。金属亜鉛は溶融時のオフガス移行率が高かったが、ダスト中の亜鉛の主要な化学形態は揮発のしにくいZnOと考えられる。また、ZnOは、SiO₂、Na₂Oと広い組成範囲でガラスを形成可能と考えられるため、再溶融処理は可能と考えられる。

スクラバ排水について

必要に応じて中和等の処理を行った後に、ALPS等の既存の水処理設備へ移送することを想定する。上流の集塵機にて亜鉛、鉛等が除去されており、特段の困難さはないものとする。

想定される二次廃棄物（前頁より抜粋）

オフガス成分			② ダスト	⑤ スクラバ排水
非放射性	ダスト	ばいじん	○	
		亜鉛	○	
		鉛	○	
	ガス	HCl		○
		SO _x		○
		HF		○
		CO		
		ダイオキシン類		
		可燃性ガス(CH ₄ 等)		
放射性	ダスト	Cs-134, 137	○	
		その他	○	
	ガス	H-3		○
		C-14		○
		Cl-36		○
		I-129		○

事業成果のまとめ

- 実験室規模および1t規模の溶融試験の結果、GeoMelt®ICV™により分別困難な多様なガレキを一括溶融処理できることが確認できた。また、追加投入することによりガレキを減容化できることも確認できた。
- 試験結果に基づくプロセスフローの検討を実施した結果、ガレキの移送・供給設備およびオフガス処理設備について実現可能性が高い設備構成案を導出できた。

今後の課題

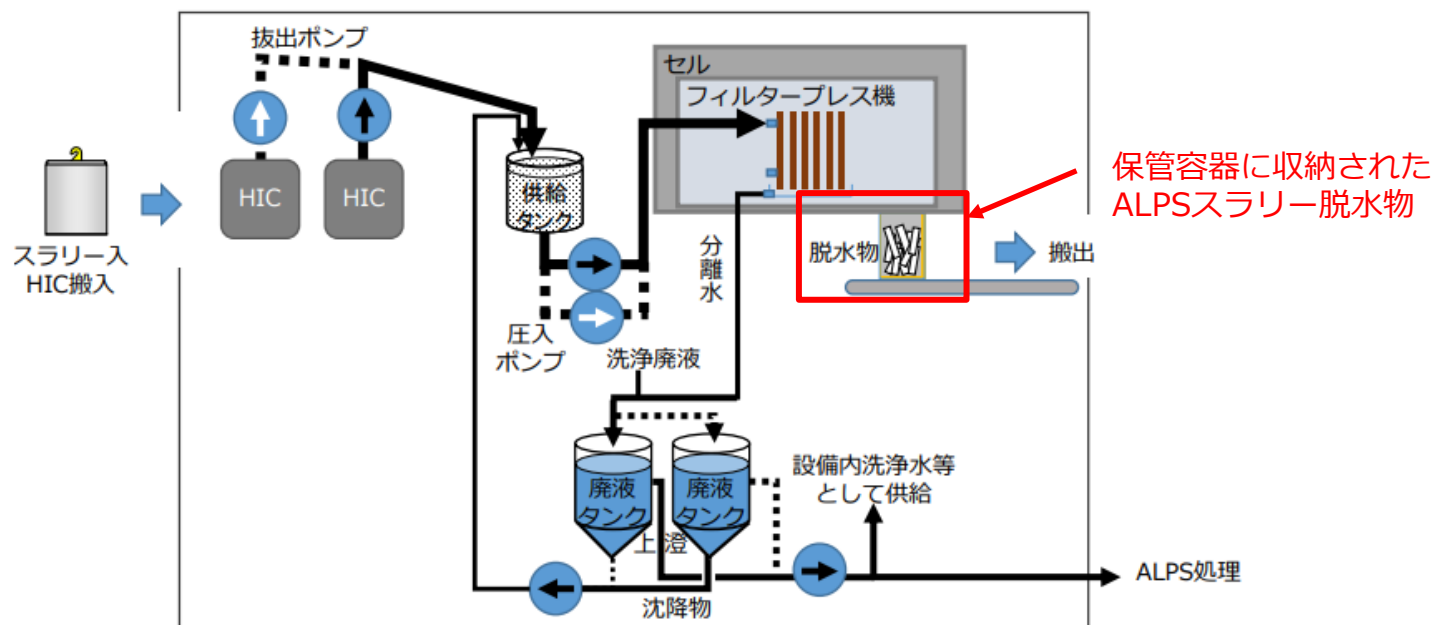
- 溶融炉単独の課題として、以下が確認されたため、実機化を図るにあたり検討が必要と考える。
 - ✓ 運転中の溶融ガラスの漏洩を確実に防止できる廃棄体構造の考案および検証
 - ✓ 運転の律速となりうる電極棒の酸化減肉リスクを低減するためのコーティング材等による延命化の検証
 - ✓ 多量の亜鉛を含むオフガスダストの溶融処理が可能であることの検証
- 現状、処理対象となるガレキのインプット条件（種類、量、サイズ、構成割合、放射能インベントリなど）が未知であることから、本事業では様々な仮定の下、結果を導出した。今後、インプット条件がより具体的になれば、溶融炉、付帯設備ともにより合理的な設備提案も可能となる。また、これらの検討に合わせて、常に安定した運転を実現するための運転管理方法も確立する必要がある。

3. タスク2の結果

背景

水処理二次廃棄物であるALPSスラリーは、フィルタプレスで脱水し、脱水物保管容器に収納して保管することが計画されている。その後、固化する場合、保管容器からALPSスラリー脱水物を取り出す作業が必要となるが、ダスト飛散や容器内壁に脱水物が固着する等の課題が考えられる。

そこで、本タスクでは、ALPS スラリー脱水物を保管容器から取出さず、保管容器ごと溶融処理する技術を検討する。



スラリー安定化処理設備の概要*

* 「ALPSスラリー安定化処理設備設置の検討状況について」（第 19 回 特定原子力施設の実施計画の審査等に係る技術会合資料1-1、2024年5月27日、東京電力ホールディングス株式会社）

目的

令和5年度実施の補助金事業では、初期充填方式にてALPS炭酸塩スラリー脱水物を保管容器とともに溶融する工学規模試験を実施し、これら进行处理可能であることが確認できた。しかしながら、この場合、タスク1と同様に減容効果が期待できない。

令和5年度の時点では、保管容器は追加投入が難しい大型の保管容器が想定されていたが、その後、東京電力では小サイズの保管容器も検討されている。実機で想定する10t規模の溶融炉の場合、200Lドラム缶サイズであれば溶融フードのスペース的に追加投入が可能である。そこで、工学規模にてドラム缶を模擬した容器の追加投入の試験を行い、本コンセプトの実証を行う。また、試験結果に基づき、過去に実施した予備概念設計に保管容器の追加投入設備を追加する。

一方で、追加投入により脱水物の割合が高くなると、固化ガラス中の結晶析出や耐浸出率の低下が懸念される。そこで、工学規模試験に加え、るつぼ試験も実施し脱水物の充填率が高くなることによる固化ガラスの特性への影響を確認する。

実施フロー

実施内容の全体フローを以下に示す。

るつぼ試験（ALPS炭酸塩スラリー脱水物）

目的：脱水物の高充填条件での固化ガラス特性への影響確認

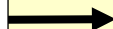


工学規模溶融試験（ALPS炭酸塩スラリー脱水物）

目的：ドラム缶の追加投入による溶融処理技術の実証

溶融準備

- 模擬ALPS炭酸塩スラリー脱水物の製作
- ドラム缶投入方法の検討と工学規模試験設備の改造



溶融試験（計4回）

溶融15 ドラム缶、ガラス形成材の投入方法の確立（容器23個処理）
溶融16 追加投入の運転方法の最適化（容器46個処理）
溶融17 長時間連続追加投入運転の確認（容器50個処理）
溶融18 最大ドラム缶処理数の確認（容器50個処理、事前乾燥）



ベンチ規模試験（ALPS鉄共沈スラリー脱水物）（計4回）

BS-1A 鉄共沈単独（廃棄物充填率58.3wt%）
BS-1B 鉄共沈単独（廃棄物充填率50wt%）
BS-1C 鉄共沈単独（廃棄物充填率28.6wt%）
BS-2 炭酸塩&鉄共沈の混合（廃棄物充填率50wt%）



運転方法、処理可能ドラム缶本数

予備概念設計の更新

- 脱水物保管容器の供給設備の追加
- ICV容器構成の改良
- 各種評価の更新

3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.1 るつぼ溶融試験結果

脱水物が高充填率の場合の耐浸出性の評価

試験条件（原料組成）

- ALPS炭酸塩スラリー脱水物（主成分：Ca、Mg）が高充填率の場合のガラス中の結晶生成および耐浸出性を把握するため、充填率をパラメータとした11条件の配合を用意しるつぼ溶融試験を行った。るつぼ試験原料には水が含まれていないが、実スラリー脱水物と同様に50%含水率を想定すると、炭酸塩スラリー脱水物の充填率としては、41.4～91.6%相当の試験条件である。
- なお、原料組成の設定においては、Ca、Mgの充填率の増加に応じて、SiO₂を減じた。Al₂O₃、B₂O₃、Na₂CO₃は、電気伝導性や耐久性等の観点で必要となるため大きく減少させなかった。

るつぼ番号		AC-11	AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06	AC-07	AC-08	AC-09	AC-10
Ca、Mgの酸化物換算充填率 (wt%)		18.6	30.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0
ALPS炭酸塩スラリー脱水物の充填率 (wt%)		41.4	56.6	66.8	71.1	74.9	78.4	81.5	84.4	87.0	89.4	91.6
るつぼ試験における原料組成												
炭酸塩スラリー脱水物成分	CaCO ₃ (wt%)	13.50	20.07	25.49	28.02	30.43	32.74	34.96	37.06	39.09	41.05	42.90
	Mg(OH) ₂ (wt%)	12.62	19.44	24.70	27.14	29.48	31.72	33.87	35.91	37.87	39.75	41.56
添加材	Al ₂ O ₃ (wt%)	9.88	3.29	3.14	3.06	2.99	2.93	2.83	2.80	2.75	2.69	2.64
	B ₂ O ₃ (wt%)	8.83	4.10	3.92	3.83	3.75	3.66	3.53	3.51	3.43	3.36	3.30
	Na ₂ CO ₃ (wt%)	6.13	7.03	6.70	6.55	6.40	6.25	6.04	6.00	5.87	5.75	5.64
	SiO ₂ (wt%)	49.05	46.07	36.05	31.40	26.95	22.70	18.77	14.72	10.99	7.40	3.96
合計 (wt%)		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

(例) AC-01

ALPS炭酸塩スラリー脱水物の充填率への換算の例：
50wt%含水率を想定し、CaCO₃およびMg(OH)₂の
合計量と同量のH₂Oを加えて100%換算した。

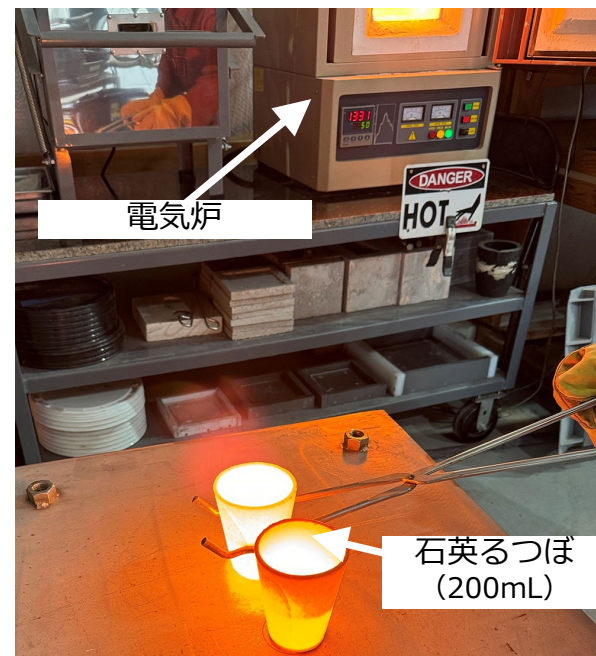
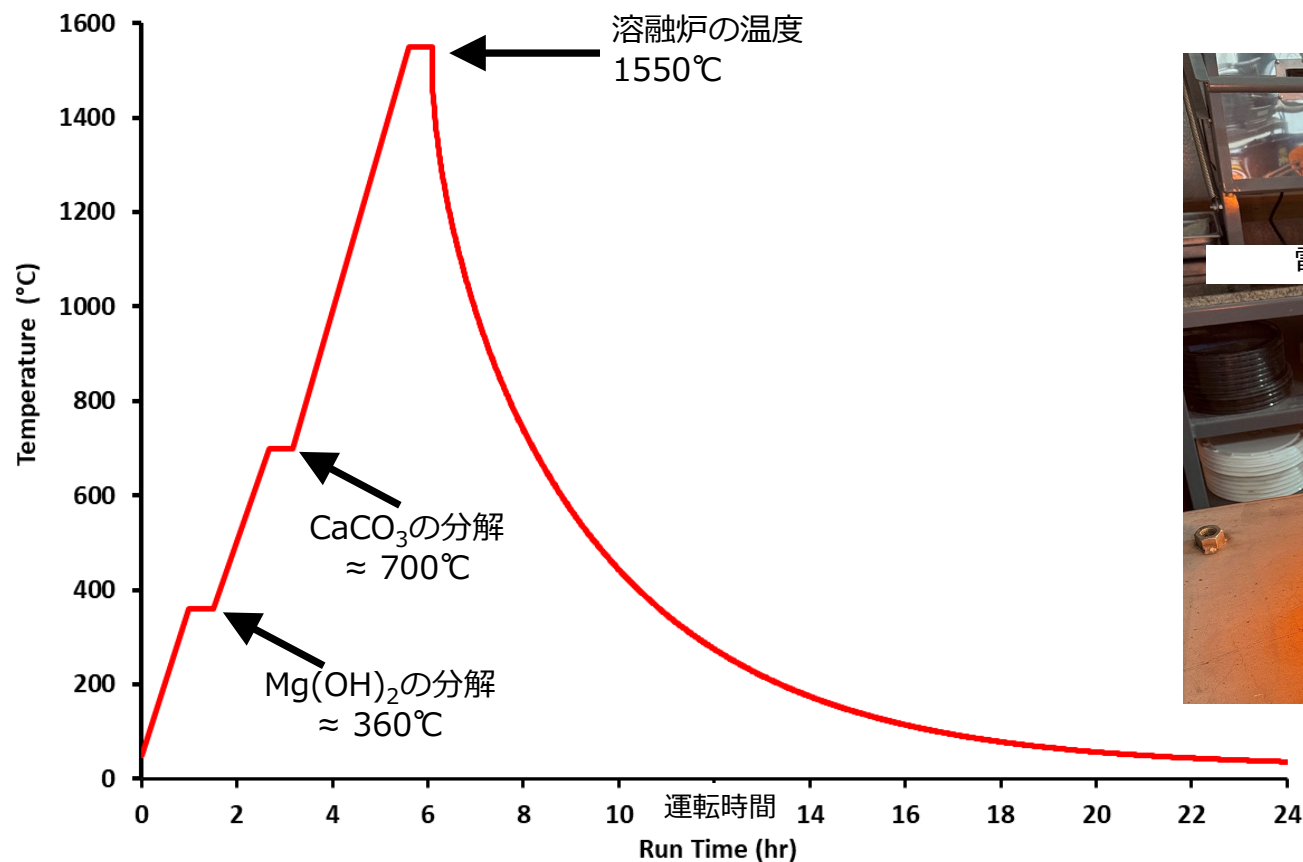
炭酸塩スラリー脱水物成分	CaCO ₃	28.32wt%	56.64wt%
	Mg(OH) ₂	28.32wt%	
添加材	H ₂ O	28.32wt%	100.00wt%
	Al ₂ O ₃	2.36wt%	
	B ₂ O ₃	2.95wt%	
	Na ₂ CO ₃	5.04wt%	
	SiO ₂	33.02wt%	
	合計	100.00wt%	

3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.1 るつぼ溶融試験結果

試験条件（溶融条件）

- るつぼ溶融試験は、電気炉を使用し、最高温度1550℃（工学規模溶融試験の目標温度）の条件で実施した。
- 電気炉内の温度推移は下図のとおり。ガス発生を考慮して、360℃と700℃で加熱を一時停止した。
- るつぼは全て、電気炉内で一晩かけて冷却した。



3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

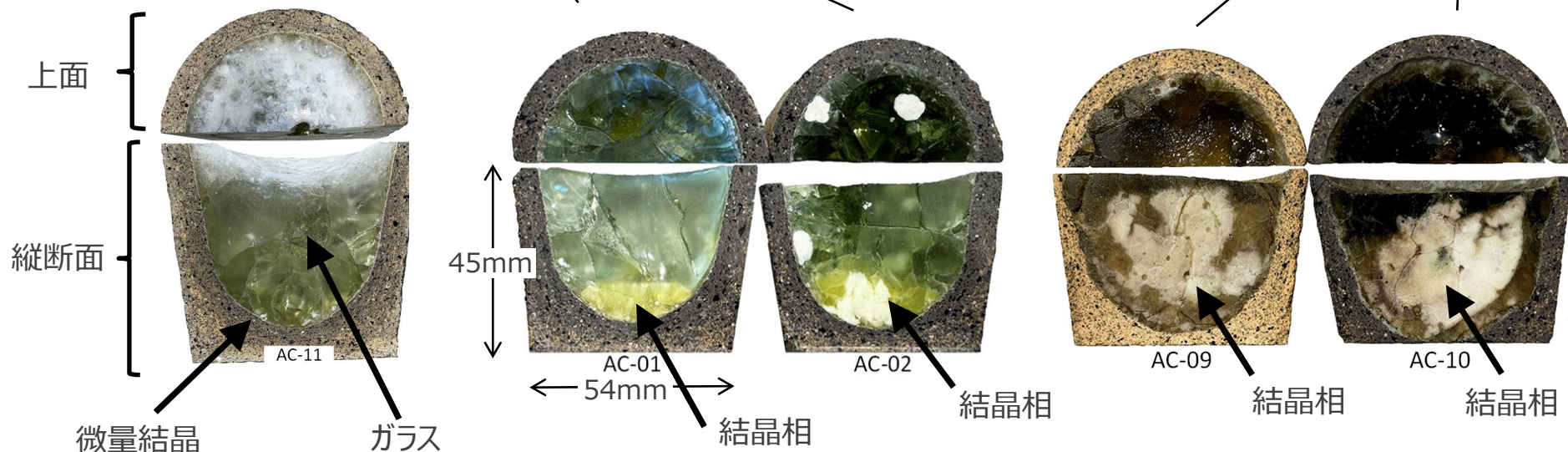
3.1.1 るつぼ溶融試験結果

試験結果（断面観察）

- AC-11を除くAC-01～10において、ガラスとは異なる結晶相が生成されていることを確認した。
- 充填率が概ね50%以上になると溶融処理による減容効果が得られるため、**減容効果を出すには結晶の生成は避けられない**と判断した。

るつぼ番号	AC-11	AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06	AC-07	AC-08	AC-09	AC-10
脱水物換算充填率(%)※	41.4	56.6	66.8	71.1	74.9	78.4	81.5	84.4	87.0	89.4	91.6
結晶相の生成	微量	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり

※含水率50%の脱水物に換算した充填率



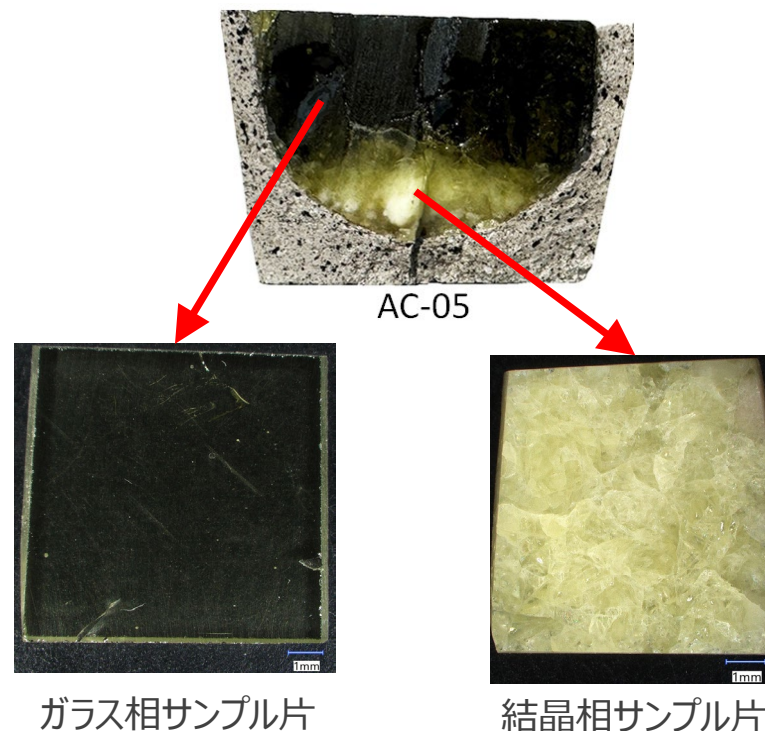
3.1.1 るつぼ溶融試験結果

試験結果（耐浸出性）

- 耐浸出性を評価するため、AC-11を除く各るつぼガラスのガラス相と結晶相からサンプル片を採取し、1つの試験用容器と一緒にに入れてMCC-1浸出試験を実施した。
- ただし、両方の相のサンプリングが困難だったAC-01、07、09は1つの相のみでMCC-1浸出試験を実施した。サンプル採取結果を下表に示す。

MCC-1試験用サンプル片採取結果

るつぼ番号	ガラス相	結晶相
AC-01	採取可	不可
AC-02	採取可	採取可
AC-03	採取可	採取可
AC-04	採取可	採取可
AC-05	採取可	採取可
AC-06	採取可	採取可
AC-07	不可	採取可
AC-08	採取可	採取可
AC-09	不可	採取可
AC-10	採取可	採取可



3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.1 るつぼ溶融試験結果

試験結果（耐浸出性）

- 28日間のMCC-1浸出試験の結果は下表の通り。AC-02を除き、**充填率が80%程度までであれば**、規格化浸出量は日本の高レベル模擬ガラスP0798より低く、**耐浸出性に優れることが分かった**。（AC-02は未溶融原料のコンタミ等の可能性も考えられる。）
- 工学規模溶融試験では、脱水物保管容器を溶融するために、ある程度のガラス形成材が必要であることから、**まずは減容効果が期待できる50%以上の充填率**を達成することを目標とした。
- なお、本サンプルは365日まで試験期間を延長し、浸出量を測定したが、傾向に変わりはない。

MCC-1における各元素の規格化浸出量（28日間）

るつぼ番号	脱水物換算 充填率※1 wt%	NL _B g/m ²	NL _{Ca} g/m ²	NL _{Na} g/m ²	NL _{Mg} g/m ²
AC-01	56.6	8.4 ± 0.8	6.5 ± 0.6	< 3.9	< 0.3
AC-02	66.8	42.4 ± 4.1	2.5 ± 0.2	24.3 ± 2.4	< 0.2
AC-03	71.1	< 4.7	2.1 ± 0.2	< 3.5	< 0.2
AC-04	74.9	< 3.9	2.6 ± 0.2	< 3.0	< 0.1
AC-05	78.4	6.4 ± 0.6	2.1 ± 0.2	< 2.9	< 0.1
AC-06	81.5	7.5 ± 0.7	1.9 ± 0.2	< 3.3	< 0.1
AC-07	84.4	< 5.3	1.9 ± 0.2	< 4.0	< 0.1
AC-08	87.0	29.3 ± 2.9	1.6 ± 0.2	28.7 ± 2.8	< 0.09
AC-09	89.4	25.8 ± 2.5	9.1 ± 0.9	32.9 ± 3.2	< 0.09
AC-10	91.6	40.7 ± 4.0	4.6 ± 0.4	23.9 ± 2.3	< 0.1
P0798	-	9.7 ± 0.9	7.8 ± 0.8	9.6 ± 0.9	n/a※3
EA glass※4	-	36.9 ± 3.7	< 5.5	35.0 ± 3.5	< 0.4

MCC-1試験条件

時間 : 28d
 温度 : 90℃
 溶媒 : 超純水
 S/V※2 : 10 m⁻¹

- ※1 含水率50%の脱水物に換算した充填率
 ※2 固体サンプルの表面積と溶液の体積の比
 ※3 P0798ガラスにMgは含まれていない。
 ※4 米国の高レベル放射性廃棄物の基準となる模擬ガラス

赤字：日本の高レベル模擬ガラスP0798よりも規格化浸出量が高い項目。

溶融準備

模擬ALPS炭酸塩スラリー脱水物の製作

- 本事業では、結晶が生成されうるような高充填率での炭酸塩スラリー脱水物のガラス溶融を行う。その影響を正確に評価するため、実スラリーの組成になるべく近い脱水物を使用する必要があった。
- そのため、事業者にて**実スラリーの組成分析結果に基づく**模擬スラリーを製作し、それをフィルタープレスして脱水物を製作した。
- また、脱水物に含まれる水分が容器内において急激に気化膨張する可能性があり、その影響を評価するために、**含水率**も公開されている情報をもとに**30～50%の範囲**※1,2を目標に調整した。

※1 ALPSスラリー安定化処理設備設置に係る指摘事項に対する回答（1F技術会合（第21回）資料3-1）、2024年7月25日、東京電力ホールディングス株式会社

※2 ALPSスラリー固化処理技術選定にあたっての考慮事項について（改訂版）（1F技術会合（第15回）資料1-3）、2023年12月4日、原子力損害賠償・廃炉等支援機構

3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.2 工学規模溶融試験結果

97

模擬ALPS炭酸塩スラリーの組成の設定

模擬ALPS炭酸塩スラリーは、公開されている実スラリーの分析結果をもとに、ガラス溶融処理における代表性を考慮して設定した。（設定方法の詳細は参考資料-1を参照）

ALPS炭酸塩スラリー分析結果※

試料番号	物質構成比〔wt%〕（代表的な物質を想定）										
	B	Na ₂ CO ₃	Mg(OH) ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃	Ti(OH) ₂	FeO(OH)・H ₂ O	SrCO ₃	Ce(OH) ₃	その他
1 AAL-S8-1	0.06	0.47	25.9	0.20	0.21	38.8	1.1	0.96	-	-	32.3
2 AAL-S8-6	0.06	5.29	31.9	0.16	6.85	46.6	0.6	1.06	0.03	0.04	7.3
3 AAL-S8-8	0.05	4.74	32.3	0.17	8.03	44.6	0.7	1.13	0.03	0.05	8.3
再掲 AAL-S1-1	0.04	9.3	53.3	-	0.93	36.2	-	0.16	0.12	-	0.1

No.	試料番号	質量比 (%)	
		固体	液体
1	AAL-S8-1(深さ60cm)	6.8	93.2
2	AAL-S8-6(深さ100cm)	7.3	92.7
3	AAL-S8-8(深さ150cm)	8.7	91.3
参考	AAL-S1-1	12.1	87.9



模擬ALPS炭酸塩スラリーのレシピ (wt%)

Na ₂ CO ₃	Mg(OH) ₂	CaCO ₃	水
0.6	3.9	5.5	90.0

※ ALPSスラリー固化処理技術選定にあたっての考慮事項について（改訂版）（第 15 回特定原子力施設の実施計画の審査等に係る技術会合資料1-3、2023年12月4日、原子力損害賠償・廃炉等支援機構）

3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.2 工学規模溶融試験結果

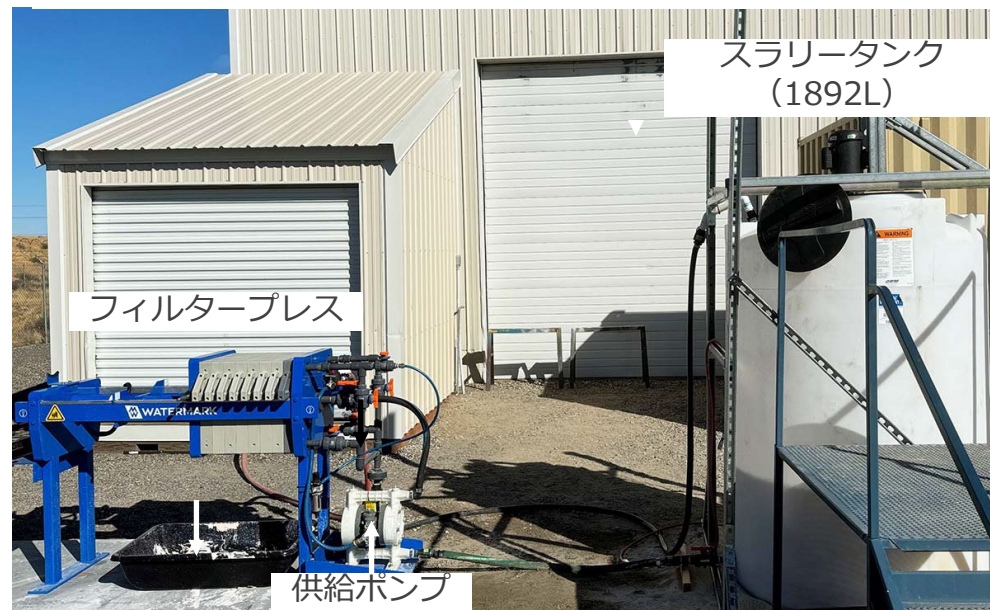
98

模擬ALPS炭酸塩スラリー脱水物の試作

まず、スラリートank内で前頁の配合組成となるように試薬類を混合し、模擬ALPS炭酸塩スラリーを調製した。なお、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 は実機のようにタンク内で粒子を生成するのではなく、粒状試薬として添加する簡易な方法とした。

この模擬ALPS炭酸塩スラリーをフィルタープレスし、脱水物を試作した。試作にあたっては、含水率30～50%を目標に、各種条件を変更し繰り返し行った。

模擬ALPS炭酸塩スラリー脱水物の製作機器



模擬ALPS炭酸塩スラリー



脱水物



脱水物

3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.2 工学規模溶融試験結果

99

模擬ALPS炭酸塩スラリー脱水物の試作

各種条件を変更した際の脱水物の含水率を次表に示す。No.1の条件では目標値（30～50%）を下回ったため、No.2～6は供給ポンプ圧などの運転条件を調整したが、目標範囲内には至らなかった。そこで、添加する CaCO_3 試薬を試薬Aから、より粒径の小さい試薬Bに変更したところ、含水率を40%台まで引き上げることができた。

ただし、この脱水物は保水力が弱く、脱水直後は問題ないものの、溶融試験用模擬ドラム缶に入れて静置すると水分が分離して表面に浮き出すという課題があった。実機での脱水物ではこうした水分の分離は生じないため、その点において今回の脱水物は性状が異なる。しかし、溶融時における水分の気化膨張の影響を評価するには40%程度の含水率が必要であると判断し、最終的に CaCO_3 試薬Bを採用、No.7の条件にて工学規模試験用の脱水物を製作することとした。

No.	試薬 CaCO_3 種類※1	フィルタープレス運転条件			脱水物含水率 (%)
		供給ポンプ圧 (PSI)	ポンプ稼働時間 (分)	エアブロー時間 (分)	
1	試薬A	100	135	10	13
2	試薬A	70	120	10	23
3	試薬A	50	135	10	22
4※2	試薬A	70	30	10	23
5	試薬A	70	70	10	22
6	試薬A	70	30	0	22
7	試薬B	70	30	10	45
8	試薬B	100	60	10	44



溶融試験用容器中の脱水物

※1 試薬A：粒径中央値 $14.0\mu\text{m}$ （重量基準）

試薬B：粒径中央値 $1.9\mu\text{m}$ （重量基準）

※2 本条件のみフィルタープレス脱水ろ液をタンクに戻さないシングルパスで実施した。

溶融準備

ドラム缶投入方法の検討と工学規模試験設備の改造

工学規模溶融試験では、脱水物を円筒型の模擬ドラム缶に封入し、溶融フードから炉内に投入する必要がある。容器の投入は、自動で行うものとし、実機でも採用できるように以下を考慮した投入機構を検討し、試験設備の改造を行った。

①移送に関する事項

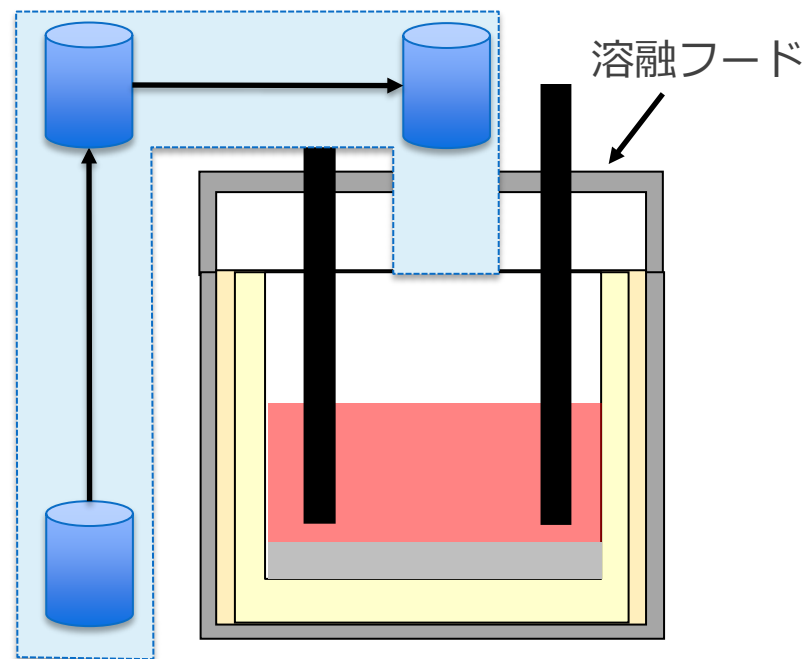
脱水物保管容器は、溶融フードの中央から供給するため、最低限以下の動作が必要である。

- i. 溶融フード上部までの垂直移動
- ii. 溶融フード中央までの水平移動

②炉内負圧維持に関する事項

脱水物保管容器の供給時は必然的に開口が生じる。このときにも、放射性物質の放出防止のために炉内の負圧維持が必要である。

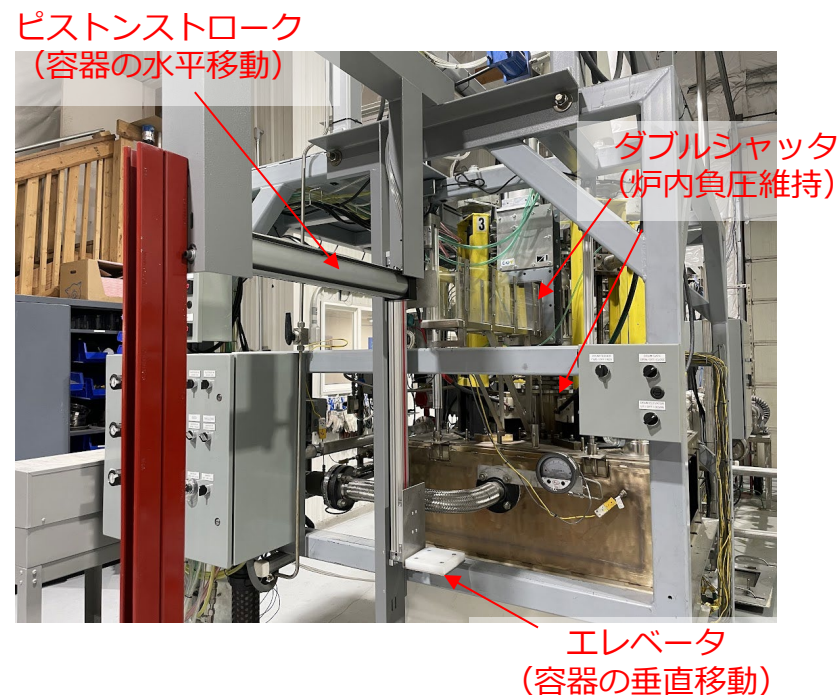
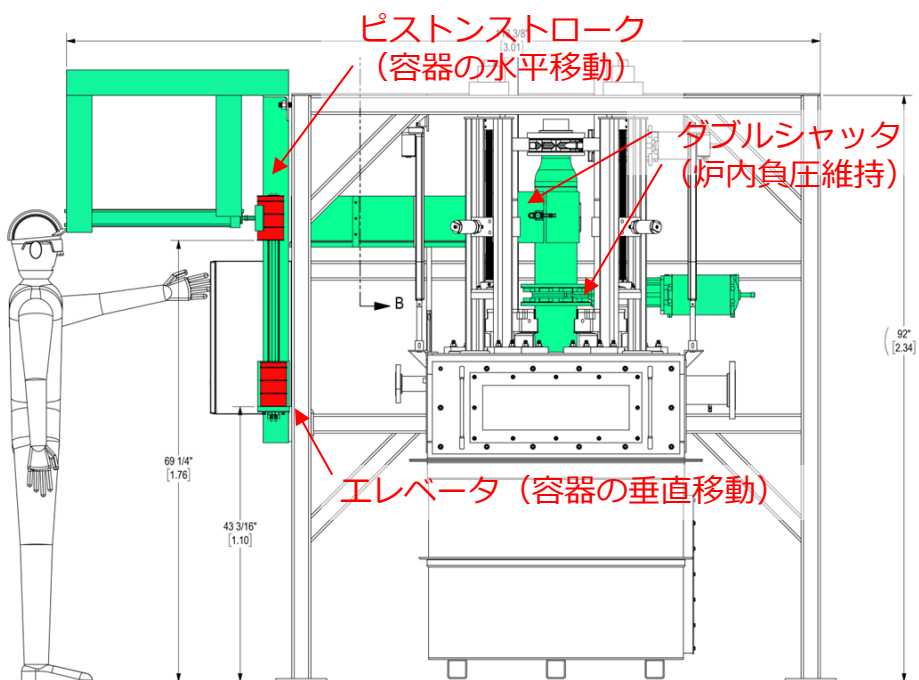
脱水物保管容器の供給設備の概念



工学規模試験設備の改造の概要

左下図が脱水物容器の投入機構を組み込んだ工学規模溶融試験設備である。本機構は現場操作盤により、人手による容器の取扱い操作をせずに容器を炉内に投入することが可能である。また、右下図に写真を示す。

脱水物容器の移送・供給の動画



3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.2 工学規模溶融試験結果

102

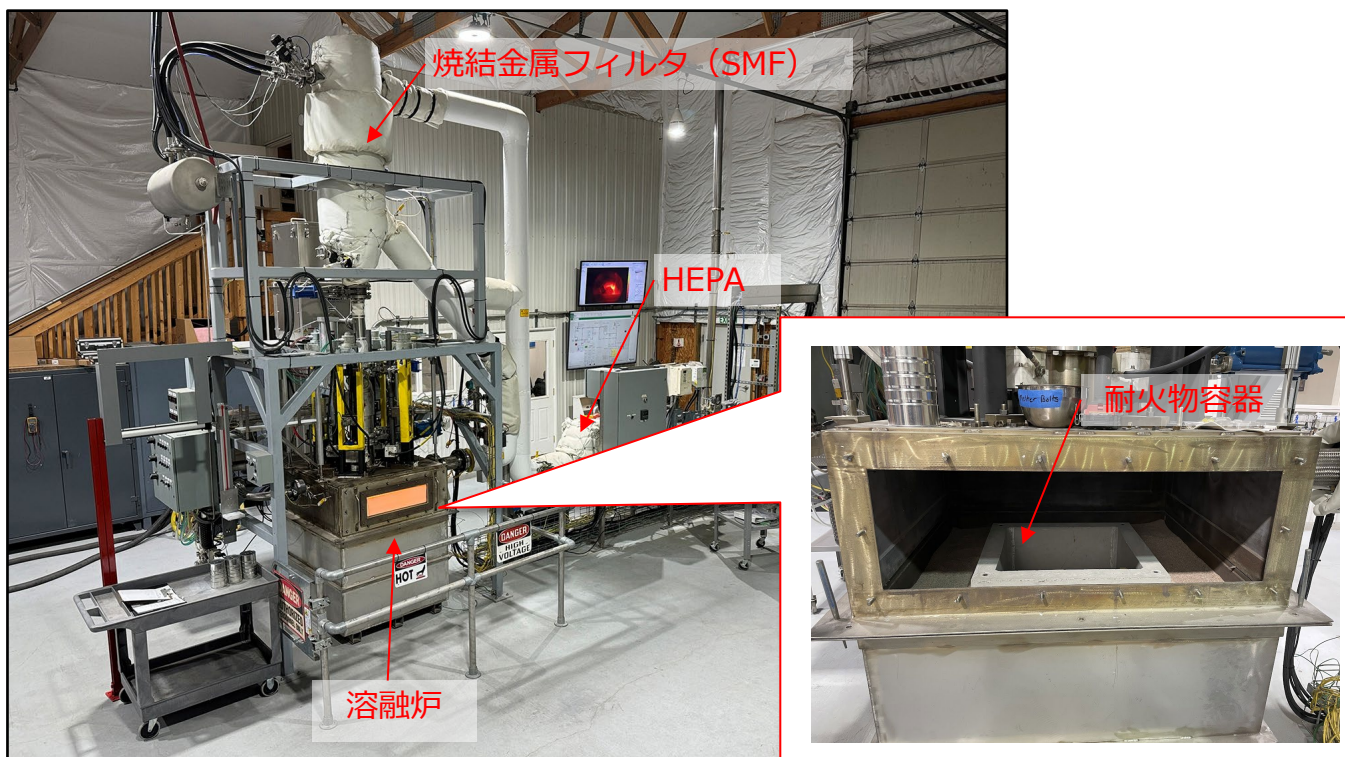
工学規模溶融試験の目的および基本条件

No.	試験目的	容器投入数	廃棄物充填率
溶融15	追加投入により脱水物を容器ごと溶融可能なことを確認する。そのため、廃棄物充填率は特に問題のなかった令和5年度の事業と同程度に抑えて試験を行う。	23	25.3%
溶融16	廃棄物充填率（容器投入数）を増やした条件とし、追加投入による処理が可能なことを確認する。試験結果をもとに容器の投入間隔等の運転方法を最適化する。結晶が生じうるつば溶融試験AC-11で廃棄物充填率（41.4%）を超えるため、放冷後の固化ガラスの状態を詳細確認する。	46	43.0%
溶融17	減容化の観点で目標とする廃棄物充填率を50%に設定し、溶融処理の実証を行う。結晶がさらに生じると考えられるため、固化ガラスの状態を詳細確認する。	50	50.0%
溶融18	基本は溶融17と同じ。ただし、溶融16と溶融17において水蒸気の気化膨張による飛散事象が確認されたため、脱水物を溶融前に事前乾燥し、事象の抑制が可能かを確認する。	50	50.0%

工学規模溶融試験設備の概要

前述の容器の投入機構を組み込んだ工学規模溶融試験設備を使用した。オフガス処理設備は、焼結金属フィルタ（SMF）およびHEPAを備えており、オフガスへ移行したダストの除去が可能である。

工学規模溶融試験設備



3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.2 工学規模溶融試験結果

104

耐火物容器の構成

溶融炉内の耐火物容器の構成は右図の通り。

なお、耐火物容器底部の厚さは、溶融15では64mmだったが、溶融中に減肉したことから、溶融16～18では114mmとした。

脱水物容器および脱水物



容器材質：すずメッキ鋼板

容器寸法：Φ108mm x H178mm

容器容量：1.4L

容器重量：150g

脱水物充填量：2.0kg

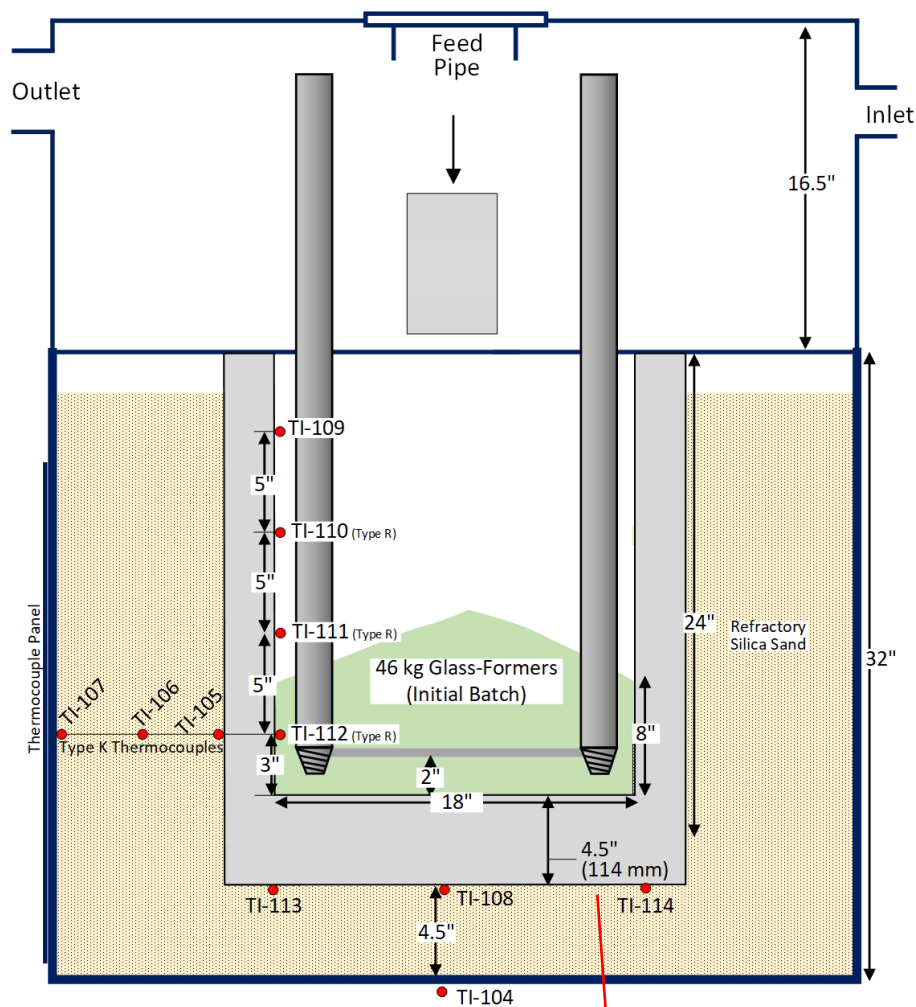
容器蓋の通気孔：Φ6.35mm×3※

※令和5年度実施の事業と同じ開口割合

脱水物容器

耐火物容器

溶融16の耐火物容器の構成



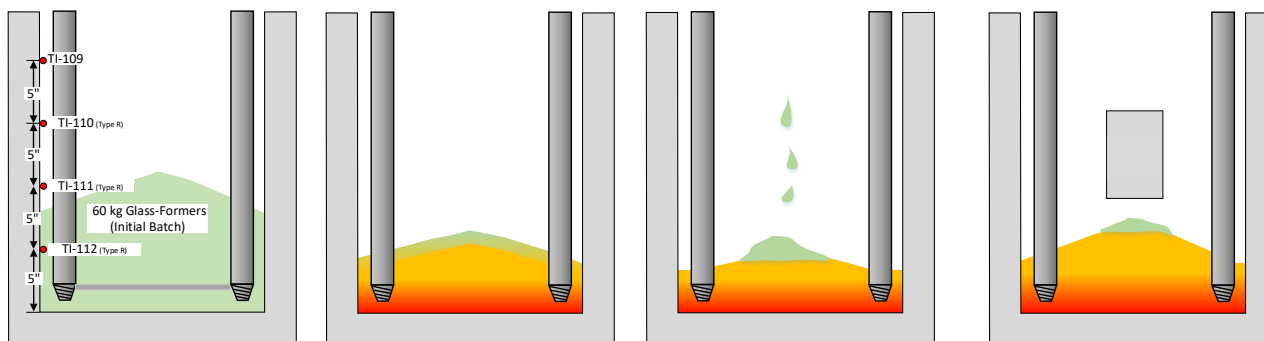
溶融15では64mm

工学規模溶融試験設備の運転方法

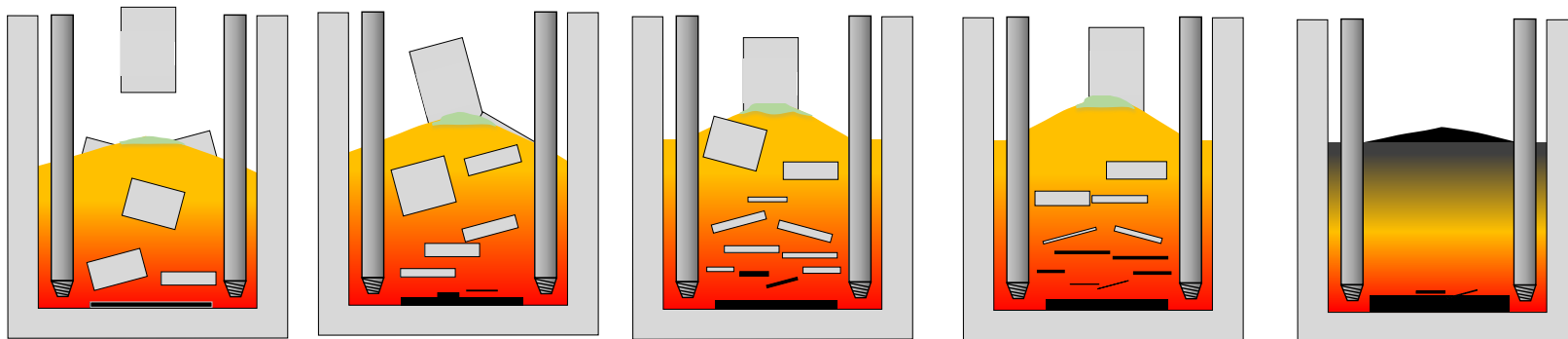
基本的な運転方法は以下の通り。なお、ガラス形成材の初期充填量、1回あたりの追加投入量、容器の投入本数は試験ごとに異なる。

繰り返し

- ①ガラス形成材の初期充填
②ガラス形成材（初期充填分）の溶融
③ガラス形成材の投入
④容器の投入



- ⑤所定の数量の容器を投入し、溶融できた時点でガラスフリットを投入。溶融を終了する。



工学規模溶融試験15の結果

- 下表に示す量のガラス形成材（初期充填分）にて通電加熱を開始し、通電開始4:00から脱水物容器の追加投入を開始した。
- 1回の容器の投入の都度、ガラス形成材を2～3kg投入し、合計で23個の容器と61kgのガラス形成材を追加投入した。

主要な試験実績

項目	単位	溶融15
投入脱水物容器数	個	23
脱水物含水率	%	45.0
脱水物投入量	kg	46.0
ガラス形成材（初期充填分）	kg	60.0
ガラス形成材（追加投入分）	kg	61.0
ガラスフリット投入量	kg	15.0
総投入量	kg	182.0
廃棄物充填率	wt%	25.3
容器1個当たりのガラス形成材追加投入量	Kg/個	2.65
運転時間	h	15.0

ガラス形成材の配合組成

成分	溶融15
Al ₂ O ₃	9.5%
B ₂ O ₃	8.5%
Na ₂ CO ₃	13.0%
SiO ₂	69.1%
合計	100.0%

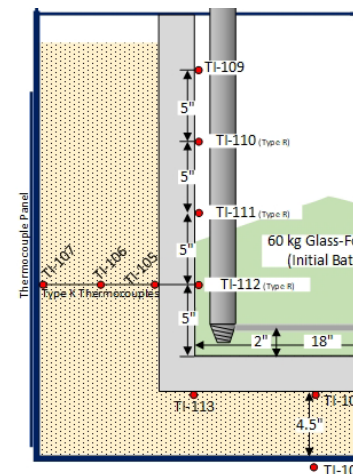
3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.2 工学規模溶融試験結果

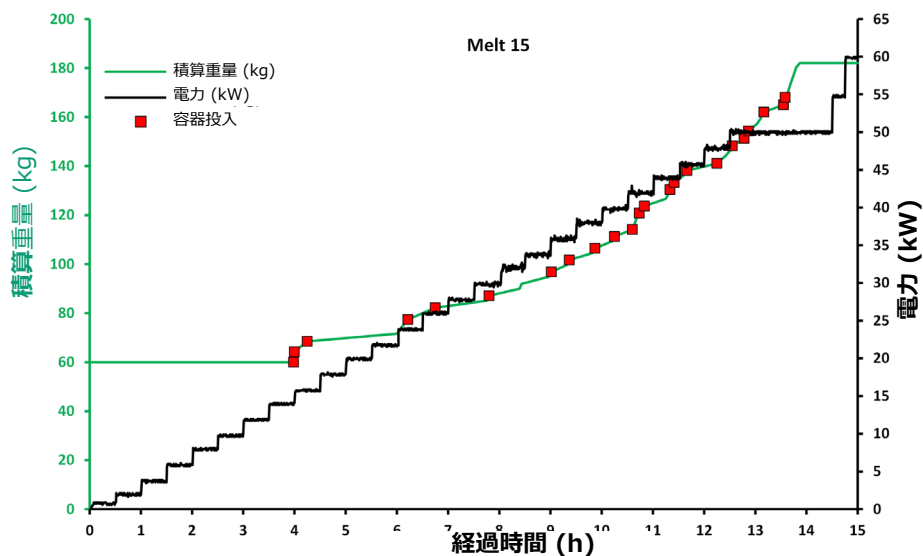
107

工学規模溶融試験15 運転トレンド

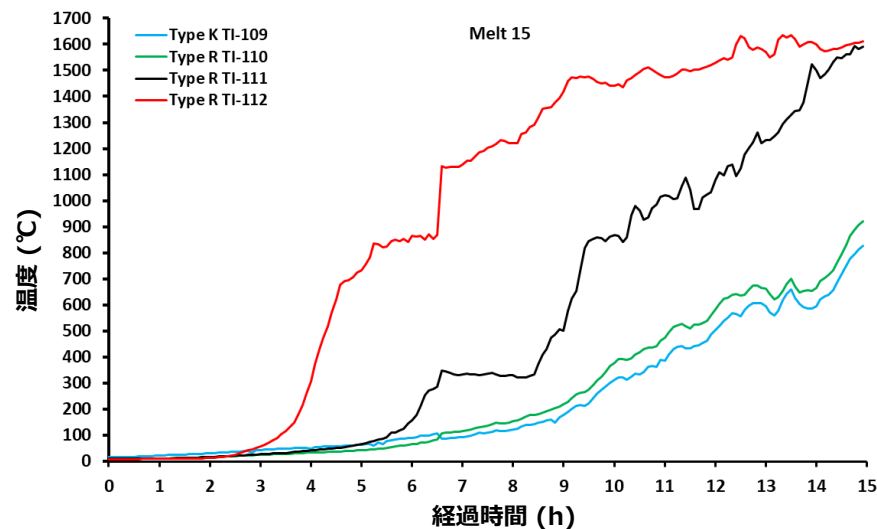
通電電力は計画どおりの速度で上昇させた。その結果、ガラス温度も順調に上昇し、TI-112およびTI-111について目標とする1550℃以上（容器の溶融に必要な温度）にできた。



溶融15 電力および供給トレンド



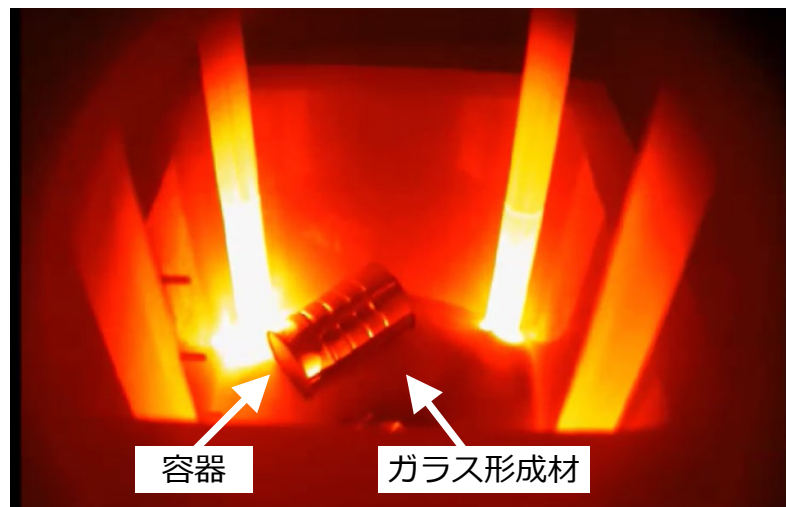
溶融15 ガラス温度トレンド



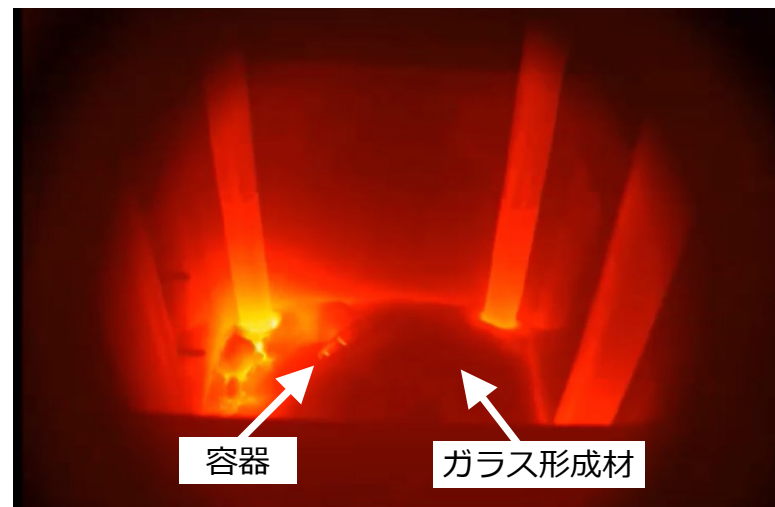
工学規模溶融試験15 脱水物および容器の溶融挙動

- 容器1個当たりのガラス形成材追加投入量が平均2.65kgと、比較的多かったことから粒状の廃棄物のみの溶融処理に比べると薄いもののコールドキャップを形成、維持でき安定した運転を行うことができた。
- 投入した容器をガラス形成材で覆うことができ、容器の溶融を促進することができた。

容器投入直後



追加のガラス形成材投入後



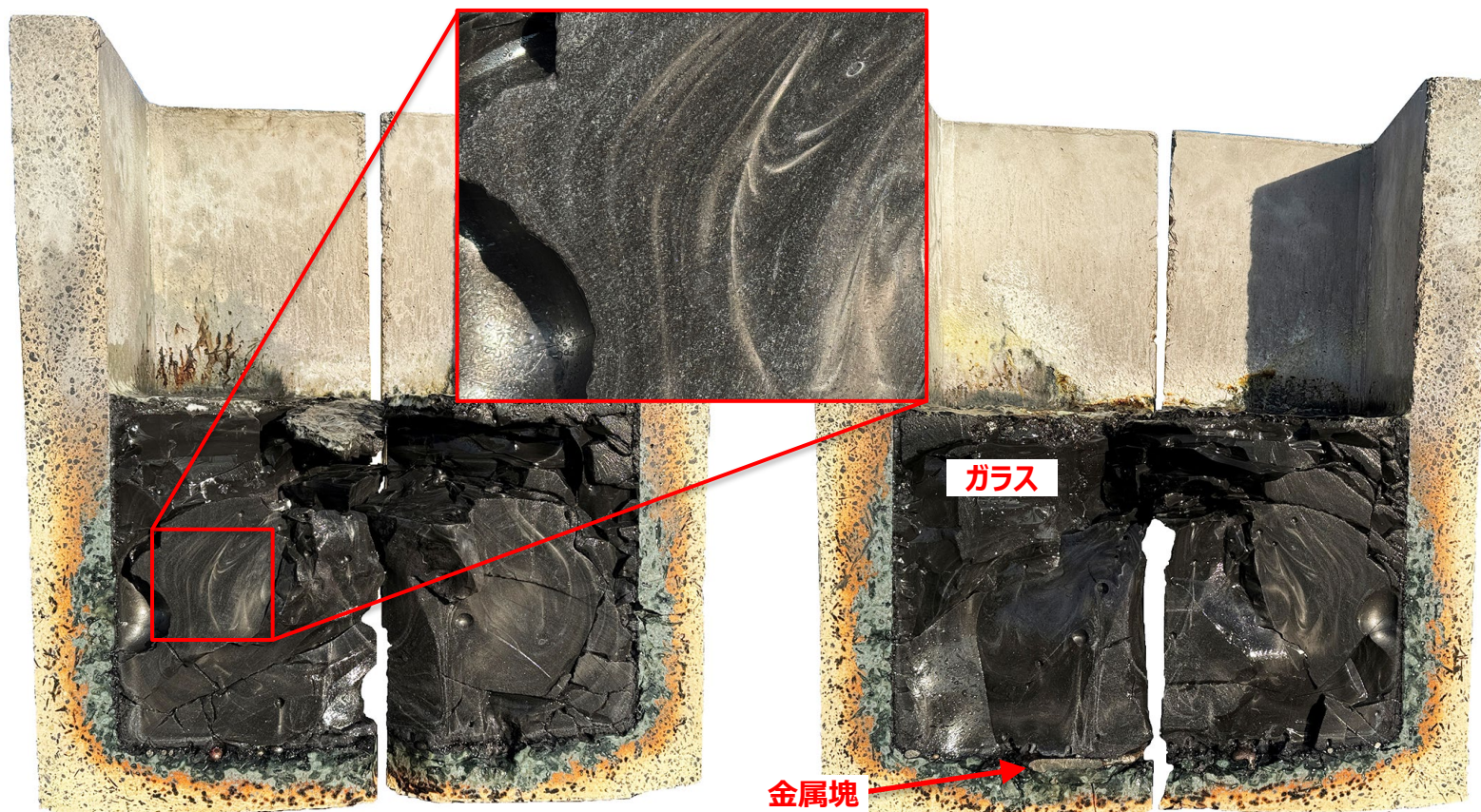
3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.2 工学規模溶融試験結果

109

工学規模溶融試験15 ガラス固化体断面観察

- ガラスは緻密でほぼ均質だったが、わずかに微結晶を含む組織が見られた。
- 容器および脱水物は完全に溶融されており、炉底部に容器由来と思われる金属塊が生じた。
- 耐火物容器内面全体に黒い変色が確認された。また、底部耐火物には減肉も確認されたため、溶融16～18では底部耐火物を114mm（溶融15は64mm）とした。



工学規模溶融試験16および17の結果

- 下表に示す量のガラス形成材（初期充填分）にて通電加熱を開始し、溶融16は通電開始4:00から、溶融17では通電開始3:00から脱水物容器の追加投入を開始した。
- 1回の容器の投入の都度、ガラス形成材を1.0kg投入し、溶融16は計46個、溶融17は計50個の容器を追加投入した。
- どちらの試験でも脱水物中の水の気化膨張による未溶融原料およびガラスの飛散が確認された。なお、溶融ガラス温度はどちらの試験も1550℃以上に到達できた。

主要な試験実績

項目	単位	溶融16	溶融17
投入脱水物容器数	個	46	50
脱水物含水率	%	45.0	40.5
脱水物投入量	kg	92.0	100.0
ガラス形成材（初期充填分）	kg	46.0	35.0
ガラス形成材（追加投入分）	kg	61.0	50.0
ガラスフリット投入量	kg	15.0	15.0
総投入量	kg	199.0	200.0
廃棄物充填率	wt%	43.0	50.0
容器1個当たりのガラス形成材追加投入量	Kg/個	1.0	1.0
運転中の水の気化膨張による飛散	回	2	11
運転時間	h	16.5	14.0

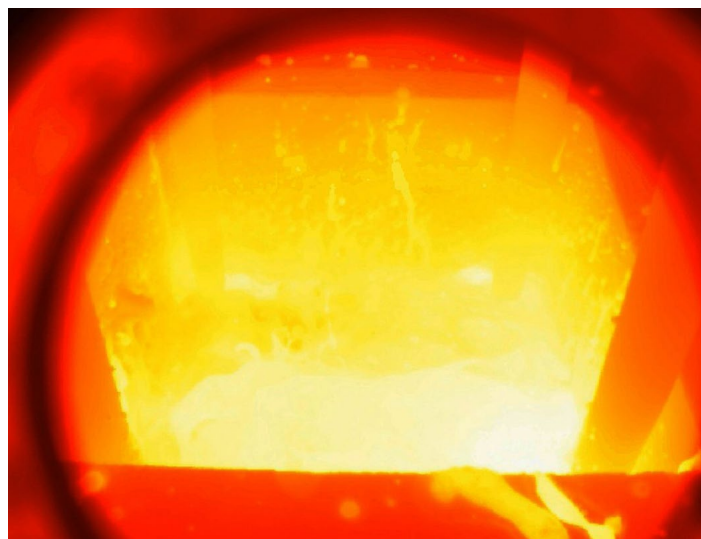
ガラス形成材の配合組成

成分	溶融16&17
Al ₂ O ₃	13.0%
B ₂ O ₃	6.5%
Na ₂ CO ₃	9.0%
SiO ₂	71.6%
合計	100.0%

工学規模溶融試験16および17 脱水物および容器の溶融挙動

- 容器1個当たりのガラス形成材追加投入量が1.0kgと少なく、ガラス上部に十分なコールドキャップが形成されず、粘性の低い溶融ガラスが存在する状態だった。
- 粘性の低い部分に、容器そのものあるいは容器から漏れ出した水が接触すると、**水が急激に気化膨張し、未溶融原料および溶融ガラスが飛散**する事象が発生した。このような飛散は、溶融16で2回、溶融17で11回確認された。

溶融16における2回目の飛散事象（通電開始13.01）

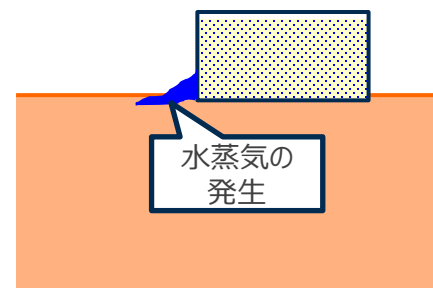
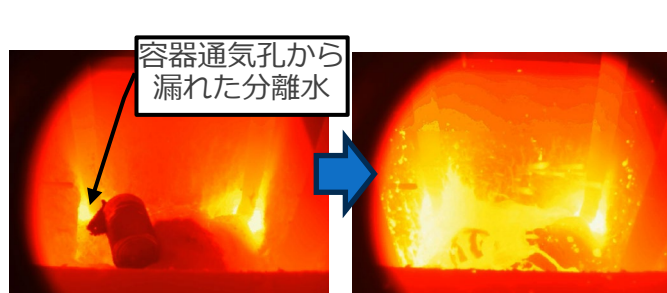


水の急激な気化膨張による飛散に関する考察

本事象の発生メカニズムには、以下の2つが考えられた。

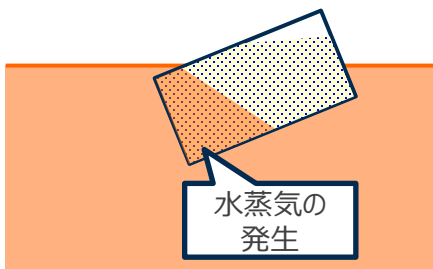
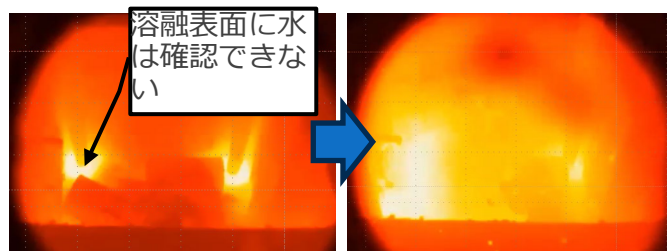
①容器からの漏水による水蒸気発生

前述したとおり今回製作した脱水物は容器内で分離水が生じていた。容器の溶融炉への投入後、容器蓋の通気孔から分離水が漏れ、溶融ガラスと接触し急激に水蒸気が生じた。



②脱水物と溶融ガラスが接触することによる水蒸気発生

上記の漏水がない場合であり、脱水物自体の含水と溶融ガラスが接触することで水蒸気が発生した。



水の急激な気化膨張による飛散に関する考察

実脱水物では分離水は生じないため、溶融16および17における水蒸気発生は回数、規模とも過剰となっていた可能性がある。

しかしながら、溶融試験では溶融フード内圧は正圧とはならなかったものの、実機でこのような事象が発生した場合、より規模が大きく正圧となる可能性がある。また、飛散したガラスにより溶融フードの電極棒貫通部が固着し電極棒の操作ができなくなるといった事象の発生も考えられる。

そのため、溶融18では、事前乾燥により水分を除外した脱水物を用いることとした。

工学規模溶融試験18の結果

- 溶融17と同じ初期充填量35kgのガラス形成材にて通電加熱を開始し、通電開始3:00から事前乾燥した脱水物を内包する容器の追加投入を開始した。1回の容器投入ごとにガラス形成材を1.0kg投入し、計50個の容器を追加投入した。
- ガラスの飛散等の事象はなく、ガラス上面は常に安定した状態で溶融が進行した。

主要な試験実績

項目	単位	溶融18	
		乾燥前	乾燥後
投入脱水物容器数	個	50	
脱水物含水率	%	44.5	ほぼゼロ
脱水物投入量	kg	100.0	55.6
ガラス形成材（初期充填分）	kg	35.0	
ガラス形成材（追加投入分）	kg	50.0	
ガラスフリット投入量	kg	15.0	
総投入量	kg	200.0	155.6
廃棄物充填率	wt%	50.0	35.7
容器1個当たりのガラス形成材追加投入量	Kg/個	1.0	
運転中の水の気化膨張による飛散	回	0	
運転時間	h	13.25	

ガラス形成材の配合組成

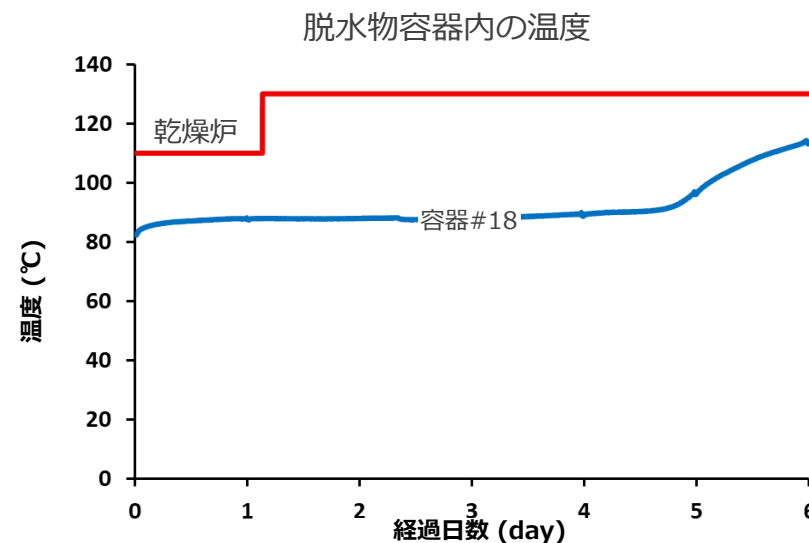
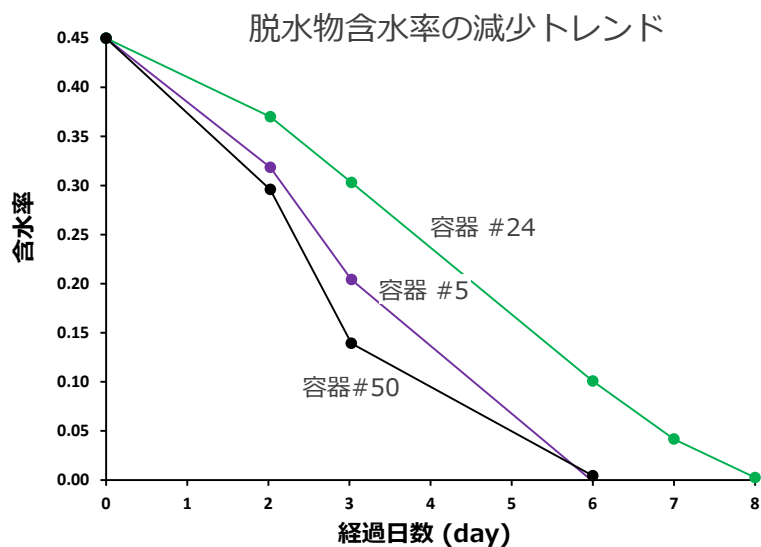
成分	溶融18
Al ₂ O ₃	13.0%
B ₂ O ₃	6.5%
Na ₂ CO ₃	8.9%
SiO ₂	71.6%
合計	100.0%

工学規模溶融試験18 脱水物の事前乾燥

- 脱水物を内包した50個の容器を電気乾燥炉で加熱乾燥した。
- 容器50個のうち3個（#5、#24、#50）は、乾燥中、定期的に取り出して重量を測定し水分の減少量を確認した。また、中央の容器#18は、容器内部の脱水物中に熱電対を挿入し温度を取得した（右写真参照）。
- 乾燥前の脱水物は、2.0kg/個だったのに対し、乾燥後は平均1.11kg/個であった。重量減少率は44.4%であり、乾燥前の含水率44.5%と一致したことから、水分をほぼ全量除去できたと考えられる。



電気乾燥炉で加熱する脱水物容器



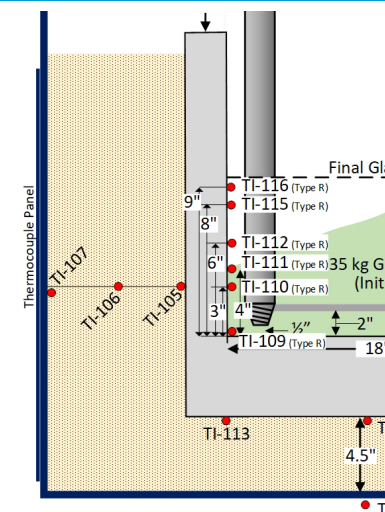
3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.2 工学規模溶融試験結果

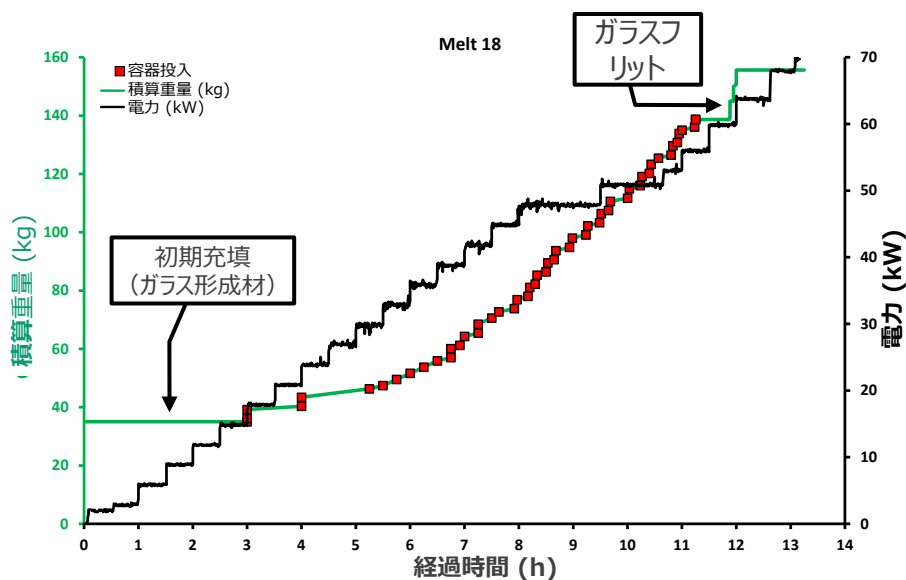
116

工学規模溶融試験18 運転トレンド

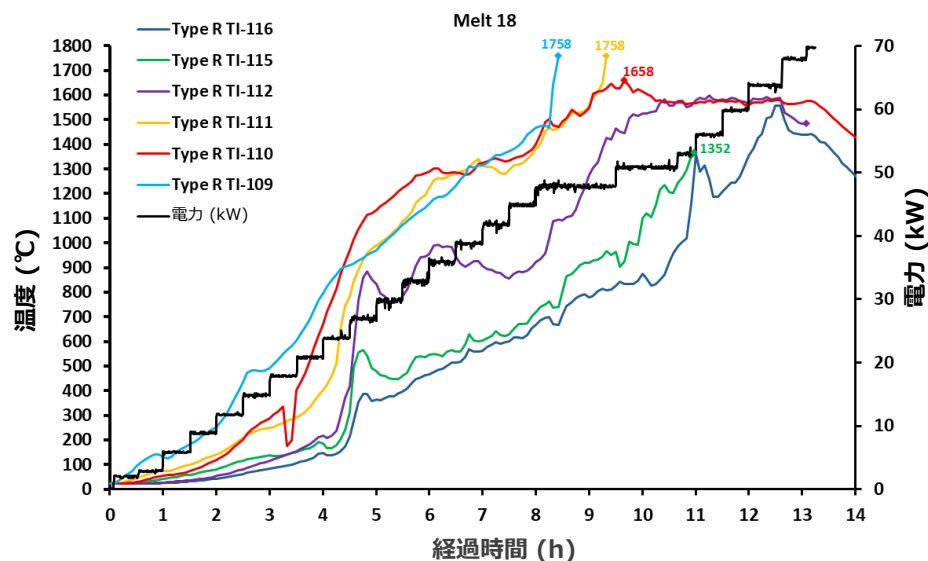
通電電力は計画どおりの速度で上昇させた。その結果、ガラス温度も順調に上昇し、目標とする1550℃以上（容器の溶融に必要な温度）にできた。



溶融18 電力および供給トレンド



溶融18 ガラス温度トレンド



工学規模溶融試験18 脱水物および容器の溶融挙動

- 容器1個当たりのガラス形成材追加投入量が1.0kgと少なく、ガラス上部に十分なコールドキャップが形成されなかった。
- しかし、脱水物が水分を含まないことから、ガラスの飛散等の事象はなく、ガラス上部は安定した状態で、容器は時間をかけて沈降、溶融していった。

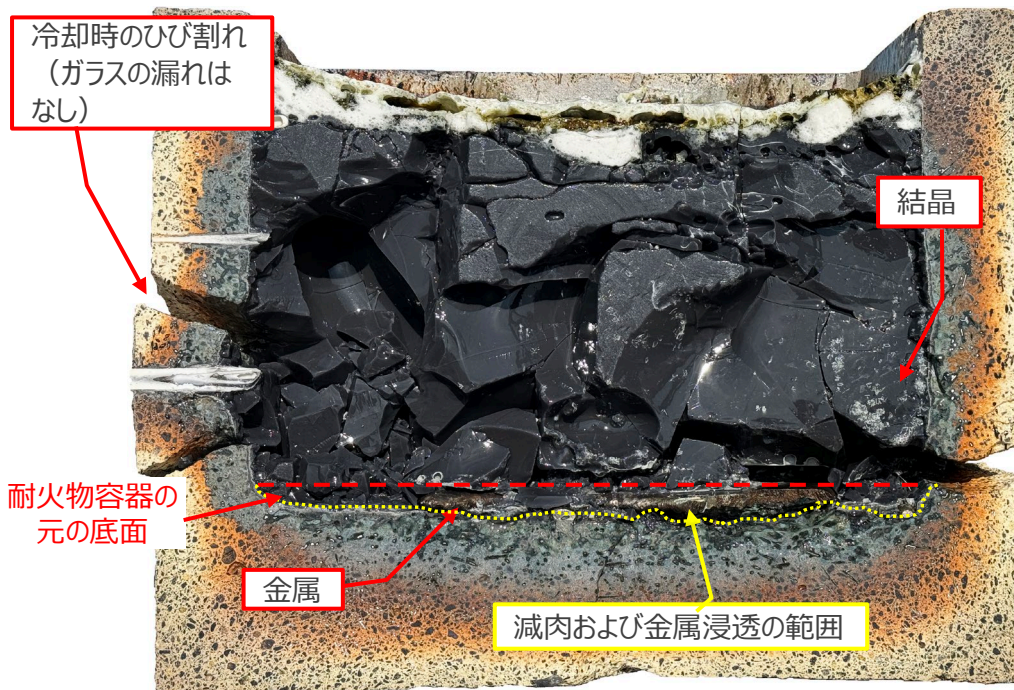
溶融18の炉内の状況



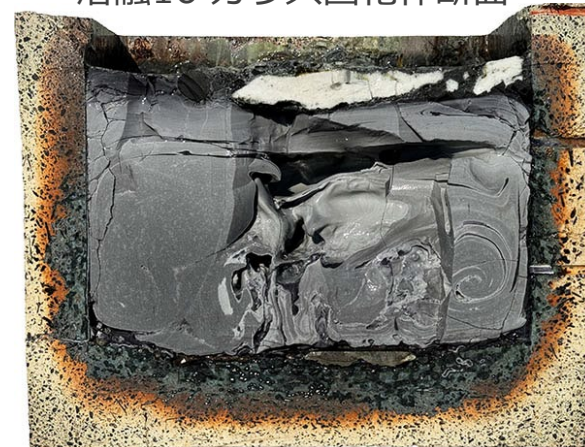
工学規模溶融試験18 ガラス固化体断面観察

- ガラスは緻密でほぼ均質だったが、下部に結晶が見られた。
- 耐火物容器内面全体に黒い変色と、底部耐火物には最大31.8mmの腐食による減肉が確認された。
- 上記の特徴は、溶融16および17でも確認された。

溶融18 ガラス固化体断面



溶融16 ガラス固化体断面



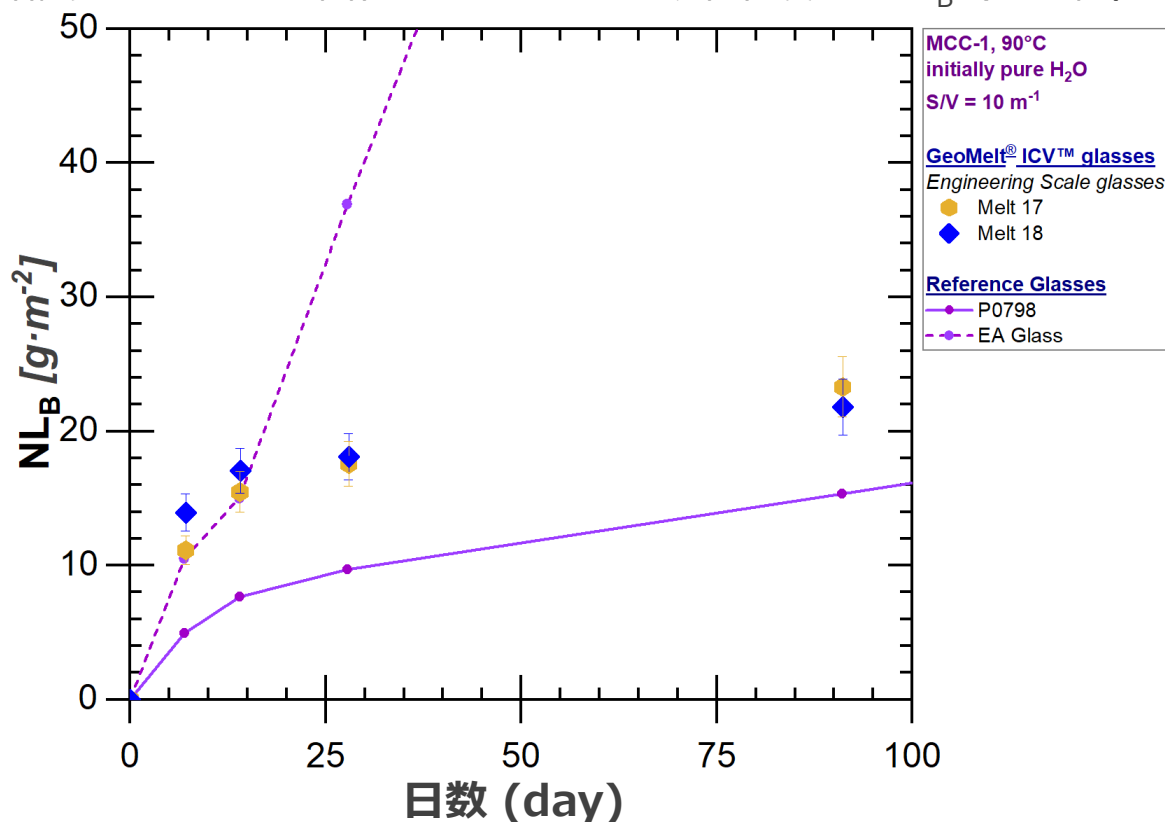
溶融17 ガラス固化体断面



工学規模溶融試験17および18 MCC-1浸出試験結果（90日間）

- 溶融17および18の固化ガラスについて、90日間のMCC-1浸出試験を実施した。
- 日本の模擬高レベルガラスP0798よりも若干規格化浸出量（ NL_B ）は高いものの、28日間～90日間の長期浸出の増加量は小さく、P0798の浸出量に近づいていく傾向にあることが確認できた。

溶融17および18 固化ガラスのMCC-1規格化浸出量 NL_B （90日間）



3.1 炭酸塩スラリー脱水物の溶融試験結果

3.1.2 工学規模溶融試験結果

120

工学規模溶融試験結果のまとめ

- ・ 段階的に実施した4回の溶融試験により、廃棄物充填率は最高50%（投入容器数50個）にて、脱水物および容器を完全に溶融処理することができた。
- ・ 固化ガラス中に結晶が生成されたものの分散しており、るつぼ試験のように相として広く存在することはなかった。
- ・ 脱水物が水分を含んでいると、急激に水蒸気が発生し、未溶融原料およびガラスを飛散することがあった。ただし、今回使用した脱水物は分離水が生じていたため、実脱水物よりも水蒸気発生回数、規模が過剰となっていた可能性はある。
- ・ 脱水物を事前乾燥し、水分を除去すれば上記の飛散現象は発生しなかった。

各試験の主要な試験実績

項目	単位	溶融15	溶融16	溶融17	溶融18	
					乾燥前	乾燥後
投入脱水物容器数	個	23	46	50	50	
脱水物含水率	%	45.0	45.0	40.5	44.5	ほぼゼロ
脱水物投入量	kg	46.0	92.0	100.0	100.0	55.6
ガラス形成材（初期充填分）	kg	60.0	46.0	35.0	35.0	
ガラス形成材（追加投入分）	kg	61.0	61.0	50.0	50.0	
ガラスフリット投入量	kg	15.0	15.0	15.0	15.0	
総投入量	kg	182.0	199.0	200.0	200.0	155.6
廃棄物充填率	wt%	25.3	43.0	50.0	50.0	35.7
容器1個当たりのガラス形成材追加投入量	Kg/個	2.65	1.0	1.0	1.0	
運転中の水の気化膨張による飛散	回	0	2	11	0	
運転時間	h	15.0	16.5	14.0	13.25	

はじめに

ALPSスラリーには、炭酸塩スラリーよりも量は少ないものの鉄共沈スラリーがある。鉄共沈スラリーも脱水後に保管容器に入れて保管される計画であり、炭酸塩スラリー脱水物と同様に保管容器ごと溶融処理が可能かを本事業において検証した。

高充填率の鉄共沈スラリー脱水物を保管容器ごと処理するのは、はじめての試みであるため、主に溶融時の挙動確認および処理の見通しを得ることを目的に、工学規模より小さいベンチ規模（10kg規模）での溶融試験を実施した。

溶融試験は、大きく以下2つのパターンを実施した。

ベンチ規模試験1：鉄共沈スラリー脱水物単独の溶融試験（3試験）

ベンチ規模試験2：鉄共沈スラリーおよび炭酸塩スラリー脱水物の混合溶融試験（1試験）※

※ 混合溶融することで、鉄分による溶融への影響を緩和できるとともに、炭酸塩スラリー脱水物はガラスの原料となるため、単独溶融よりもガラス形成材の投入量を低減でき総合的な減容効果を高めることが期待できる。

模擬ALPS鉄共沈スラリー脱水物の作製

- 模擬ALPS鉄共沈スラリー脱水物は、まず右表の配合のスラリーを作製し、炭酸塩と同じフィルタプレスにて脱水を行い作製した。
- 脱水物の含水率は35wt%であった。
- 容器に入れた脱水物は、溶融18の炭酸塩と同様に乾燥炉に入れて乾燥させた。乾燥は130℃*で、46時間行った。

* FeOOHは250～300℃で脱ヒドロキシ化反応を起こして分解するが、130℃であればそのおそれはない。

鉄共沈スラリーの配合

配合物	重量,
FeOOH	20 kg
水 (40ガロン)	151.4 kg
人工海水	3.04 kg

フィルタプレスによる脱水の様子



模擬ALPS鉄共沈スラリー



模擬ALPS鉄共沈スラリー脱水物
(含水率35wt%)

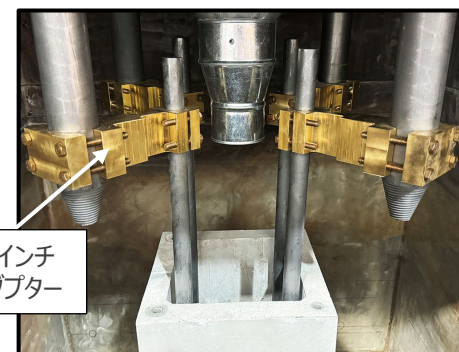


乾燥後のALPS鉄共沈スラリー脱水物 (左)

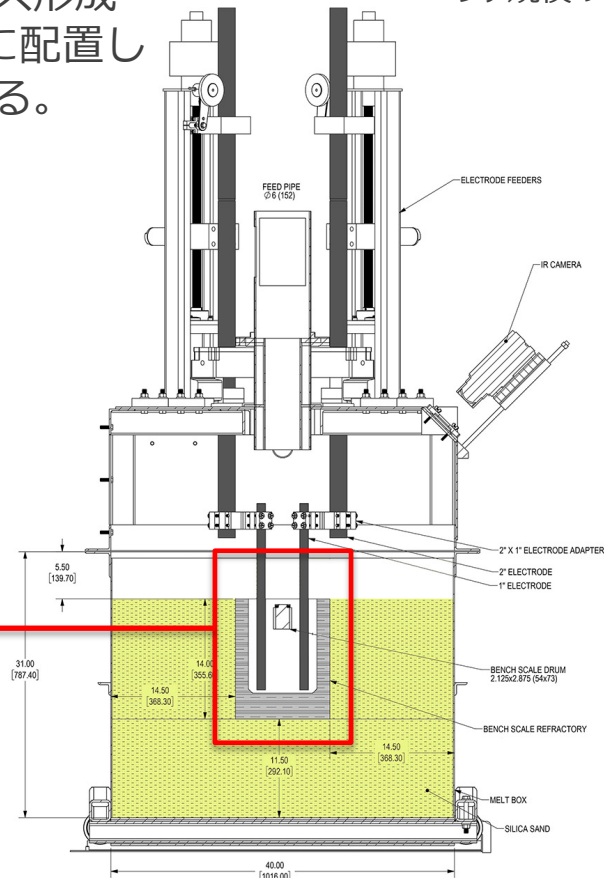
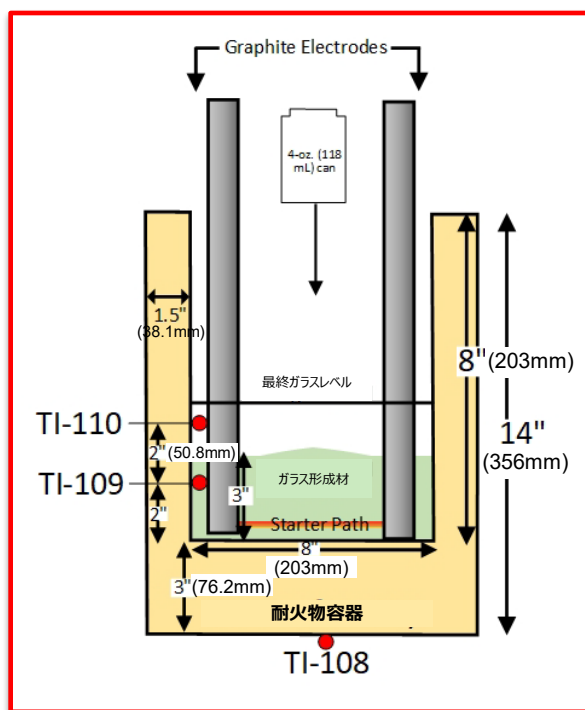


ベンチ規模試験設備の概要

- ベンチ規模試験の耐火物容器は、工学規模溶融炉内に設置した。ベンチ規模試験では1インチ電極棒を使用するため、工学規模用の2インチ電極棒をアダプターで接続し1インチにサイズダウンした。（右図参照）
- ベンチ規模溶融試験では、工学規模と同様に少量の初期充填物のみで溶融を開始し、次に模擬容器とガラス形成材を投入する。 模擬容器は、耐火物容器の上部に配置した接続管から工学規模の投入設備を介して投入する。



ベンチ規模の電極アダプター



ベンチ規模試験2（BS-2）の結果：鉄共沈および炭酸塩スラリー脱水物の混合溶融

廃棄物充填率

- ・ 廃棄物充填率は、工学規模試験と同様に乾燥前で50wt%に設定した。
- ・ 炭酸塩と鉄共沈の容器数は、実スラリーの体積比率を基に設定した。

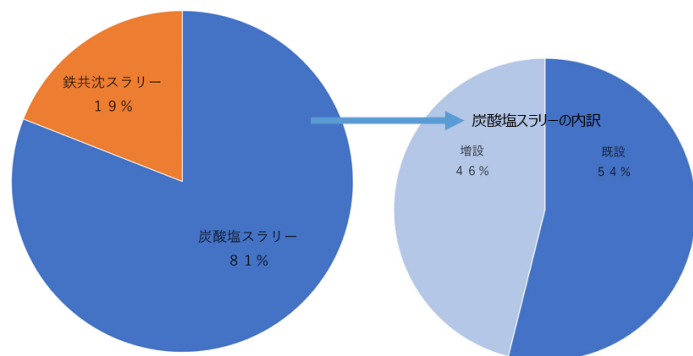
炭酸塩スラリーと鉄共沈スラリーの割合※

ALPSスラリーの保管状況

TEPCO

保管HICの本数割合

炭酸塩スラリー：鉄共沈スラリー = 8 : 2
うち炭酸塩は、既設ALPS：増設ALPS = 1 : 1



ベンチ規模試験2の配合組成

溶融試験材		質量 (g)	質量割合 (wt%)
廃棄物	鉄共沈スラリー脱水物 6容器、332g/容器、含水率40wt%換算)	1992 (乾燥後1195)	15.0
	炭酸塩スラリー脱水物 24容器、197g/容器、含水率40wt%換算)	4728 (乾燥後2837)	35.0
	小計	6720	50.0
	ガラス形成材		
	Al ₂ O ₃	538	4.0
	B ₂ O ₃	323	2.4
	Na ₂ CO ₃	1398	10.4
	SiO ₂	4461	33.2
	小計	6720	50.0
合計		13440	100.0

5

※ALPSスラリーの当面の分析計画について（1F技術会合（第23回）資料2-2）,東京電力ホールディングス株式会社, 2024年12月5日

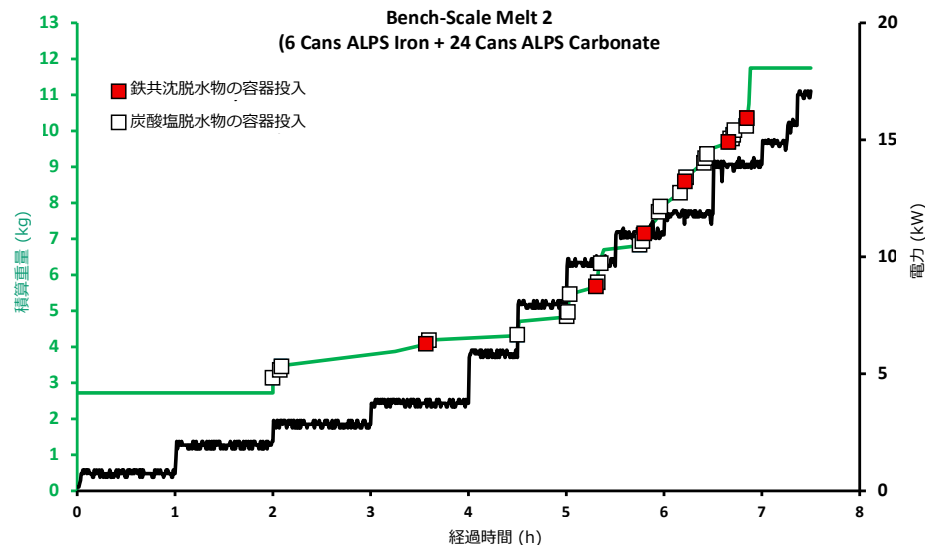
ベンチ規模試験2 運転結果

- 初期充填量2.72kgのガラス形成材にて通電を開始し、通電開始2:00から容器の投入を開始した。
- 電力上昇とともに熔融ガラス温度は順調に上昇し、最高1563℃に達した。

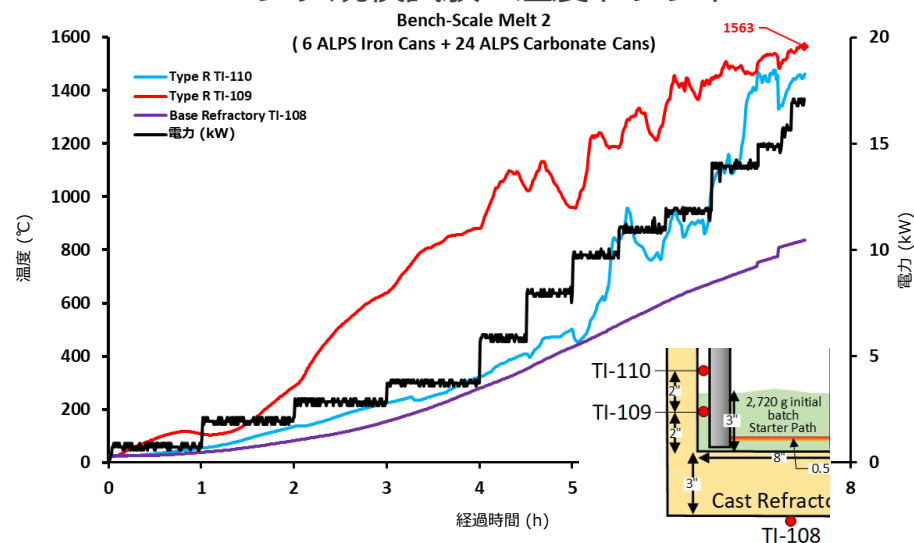
ベンチ規模試験2 炉内状況



ベンチ規模試験2 供給および電力トレンド



ベンチ規模試験2 温度トレンド



ベンチ規模試験2 ガラス固化体断面観察

- 均質な暗緑色のガラスが生成された。
- 底部に金属相が生成された。下表に示す通り、金属相の重量は構成容器の重量よりも大きく、計算上、半分程度のFeOOHが還元されることが推察される。

金属相に関する重量データ

項目	単位	数量
①金属相の重量	g	1601
②供給した容器の重量	g	1200
③FeOOH由来の還元鉄（②-①）	g	401
④FeOOHの供給量	g	1195
⑤上記の金属鉄換算重量	g	751
⑥推定還元割合（③÷⑤）	%	53.4



ベンチ規模試験2 ガラス固化体断面

ベンチ規模試験1（BS-1AおよびB）の結果：鉄共沈スラリー脱水物の単独溶融

廃棄物充填率

- 廃棄物充填率は、工学規模試験と同様の高充填とし、BS-1A：58.3wt%（40容器）、BS-1B：50.0wt%（30容器）とした。

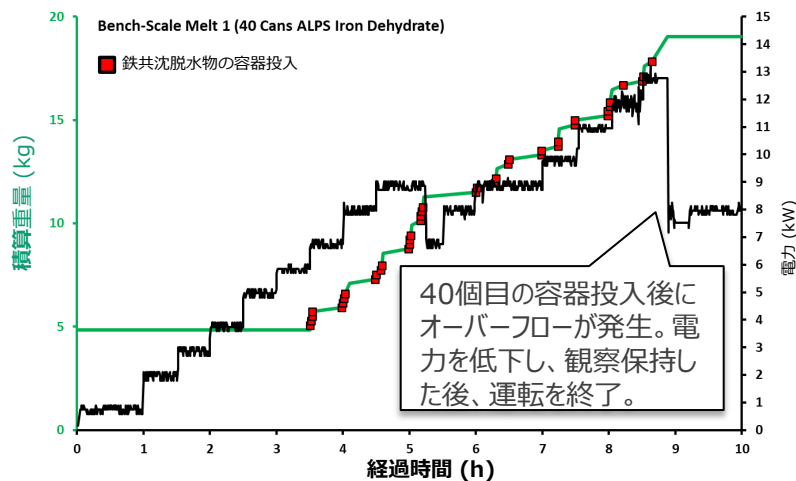
ベンチ規模試験1Aおよび1Bの配合組成

溶融試験材		BS-1A		BS-1B	
		質量 (g)	質量割合 (wt%)	質量 (g)	質量割合 (wt%)
廃棄物	鉄共沈スラリー脱水物 (含水率40wt%換算)	14470 (乾燥後8680) (容器数40)	58.3	9950 (乾燥後5970) (容器数30)	50.0
ガラス形成材	Al ₂ O ₃	1000	4.0	422	2.1
	B ₂ O ₃	460	1.9	478	2.4
	Na ₂ CO ₃	2800	11.3	2813	14.1
	SiO ₂	6090	24.5	6237	31.3
	小計	10350	41.7	9950	50.0
合計		24820	100.0	19900	100.0

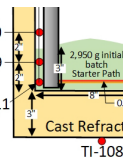
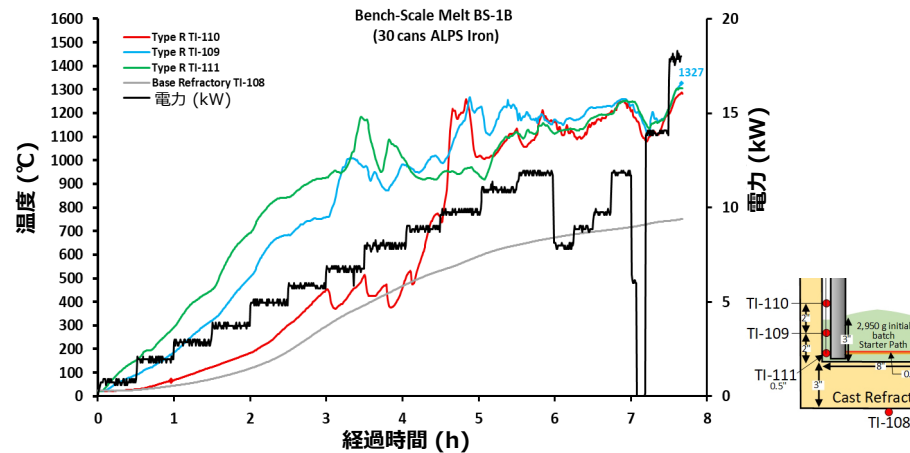
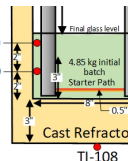
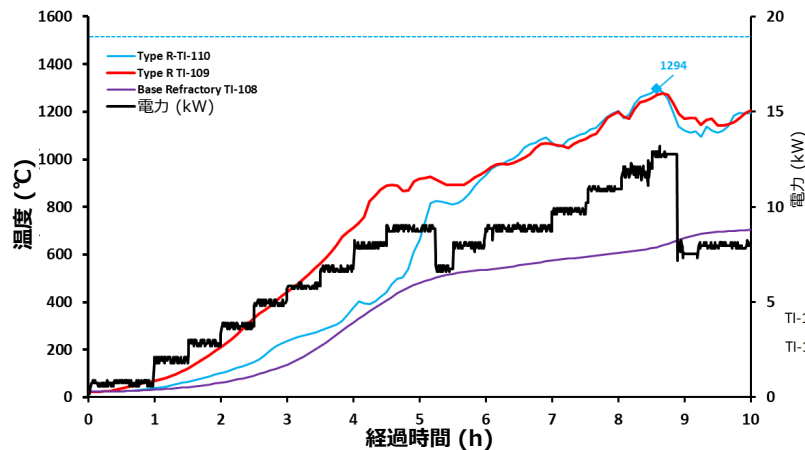
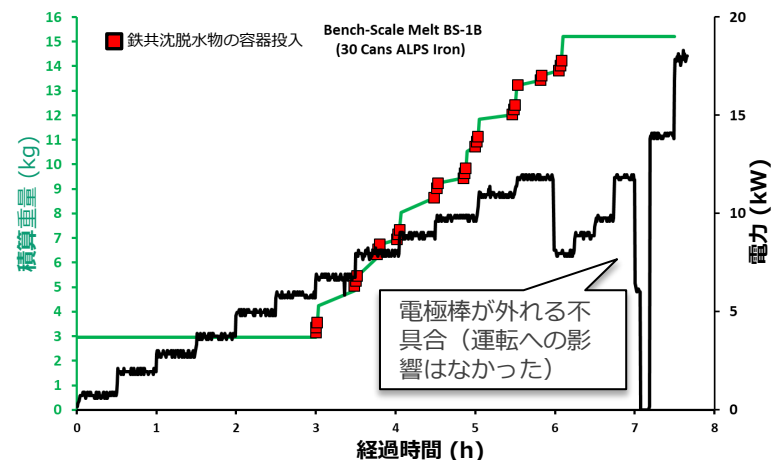
ベンチ規模試験1Aおよび1B 運転結果

- 計画どおり電力を上昇させたものの、溶融ガラス温度が上がりにくく、最高温度はベンチ規模試験1A：1294℃、1B：1327℃と容器の溶融に必要な1550℃に到達しなかった。

ベンチ規模試験1A 運転トレンド
(上：供給、下：溶融ガラス温度)



ベンチ規模試験1B 運転トレンド
(上：供給、下：溶融ガラス温度)



ベンチ規模試験1Aのオーバーフローについて

- 40個目の容器投入後に、溶融ガラスが沸き上がり、耐火物容器上端を超えて溶融ガラスがオーバーフローした。
- 本事象が発生した原因は、未溶融の容器が積み重なっていたためにガラス液位が高かったことと（次頁参照）、FeOOHの還元に伴う発泡によるものと考えられた。
- 鉄共沈スラリー脱水物中のFeOOHの溶融ガラス中での反応は以下の通りであり、高温環境ではO₂を放出して還元される。ベンチ規模試験1Aでは、脱水物および容器の溶融が滞ったことにより還元反応で生じた酸素ガス（O₂）が溶融ガラスの中で蓄積された可能性がある。そして、40個目の容器投入のタイミングで、一気にガスが解放され溶融ガラスの沸き上がり起きたのではないかと考えられる。

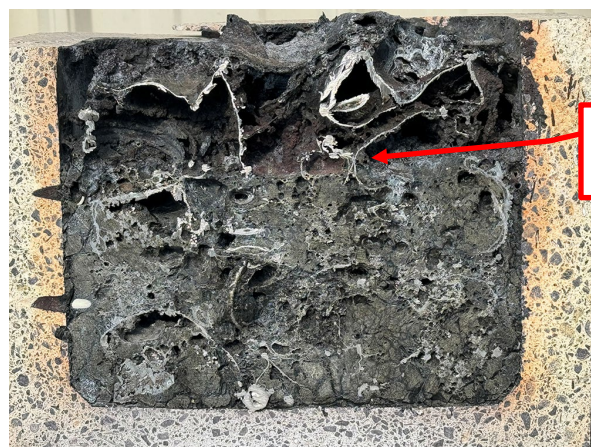


ベンチ規模試験1A
オーバーフロー発生時の炉内状況



ベンチ規模試験1Aおよび1Bガラス固化体断面観察

- 熔融ガラス温度が1550℃に到達しなかったため、どちらのガラス固化体中にも多数の未熔融の容器が積み重なっていた。
- ガラスは暗緑色だった。
- ベンチ規模試験1Bのガラスサンプルを採取し、XRDによる結晶構造解析を実施した。



未熔融の容器
(多数)

ベンチ規模試験1A ガラス固化体断面

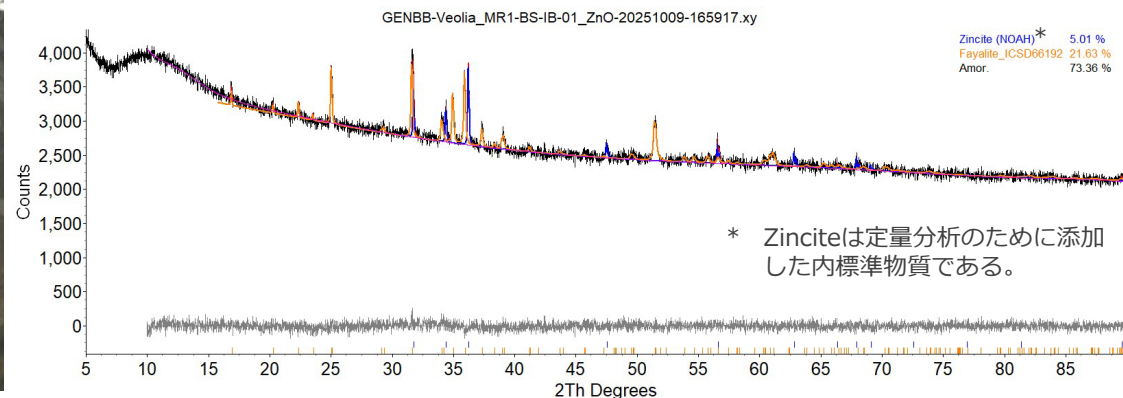
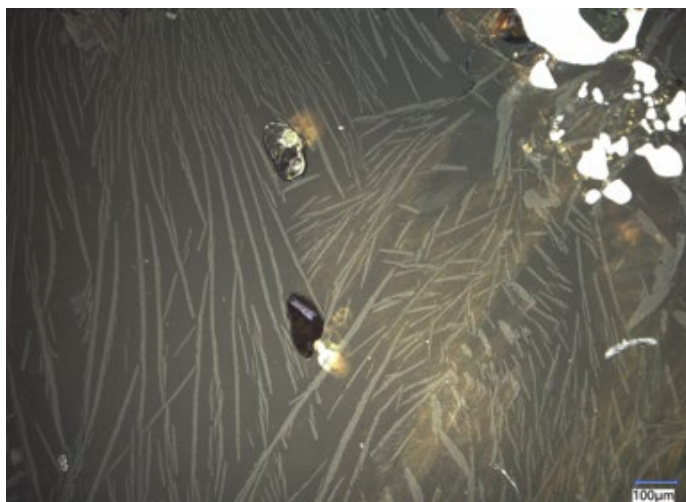


未熔融の容器
(多数)

ベンチ規模試験1B ガラス固化体断面

ベンチ規模試験1B XRDによる結晶構造解析

- XRDで分析した結果、Fayalite (Fe_2SiO_4) が約23wt%含まれていることが分かった。
- Fayaliteは樹枝状結晶を形成し、今回のような高濃度で溶融ガラス中に存在すると、粘度を増大させて溶融ガラスのジュール加熱が支障を及ぼすと考えられる。そのため、ベンチ規模試験1Aおよび1Bでは、溶融ガラス温度が上昇しなかったと考えられる。



ベンチ規模試験1B ガラスの工学顕微鏡画像
(Fayaliteの樹枝状結晶が確認できる。)

ベンチ規模試験1B ガラスサンプル (MRI-BS-1B-01) のX線回折パターン

ベンチ規模試験1Cに向けた試験条件の見直し

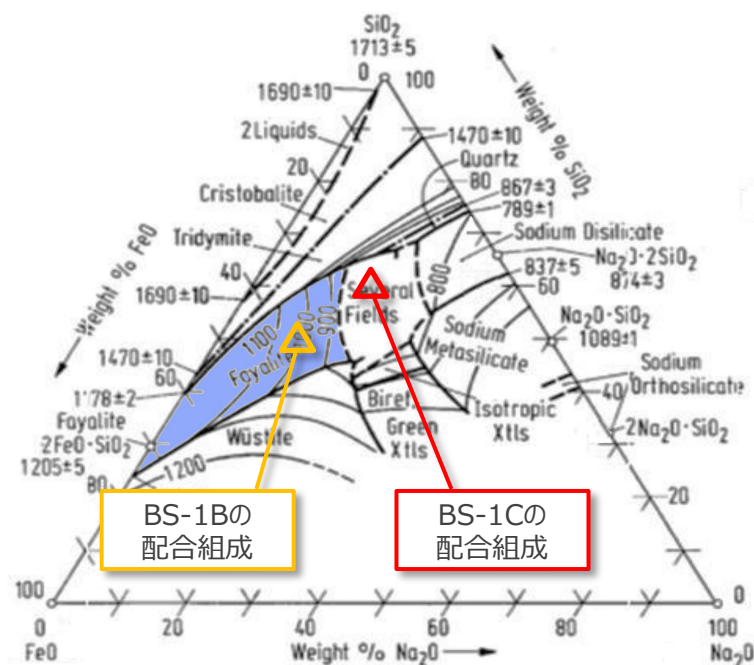
ベンチ規模試験1Aおよび1Bの結果を踏まえ、以下のとおり試験条件を見直し3回目の溶融試験（1C）を実施することにした。

① 配合組成の見直し

右図に SiO_2 - FeO - Na_2O の相図を示す。高廃棄物充填率を目指したBS-1Aおよび1Bの配合組成は、Fayaliteの生成領域だった。BS-1Cでは FeOOH を減らす一方、 Na_2O を増やしFayaliteが生成しにくい配合組成とする。

② 運転方法

BS-1AおよびBS-1Bでは、比較的早いタイミングで容器の投入を行い、結果として溶融ガラス温度を上昇させることができなかった。BS-1Cでは初期充填のガラス形成材のみで加熱を継続しなるべく 1550°C に近づけてから容器の投入を開始することとする。



$\text{Na}_2\text{O}:\text{FeO}:\text{SiO}_2$ 相図

ベンチ規模試験1（BS-1C）の結果：鉄共沈スラリー脱水物の単独溶融

廃棄物充填率

- 廃棄物充填率は、組成見直しにより、28.6wt%（20容器）とした。

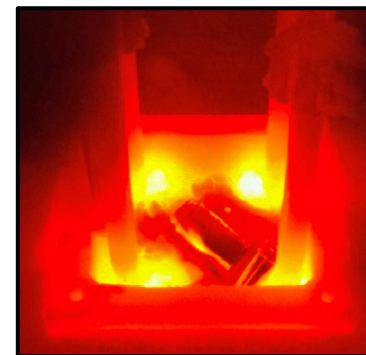
ベンチ規模試験1Cの配合組成

溶融試験材		（参考）BS-1A		（参考）BS-1B		BS-1C	
		質量 (g)	質量割合 (wt%)	質量 (g)	質量割合 (wt%)	質量 (g)	質量割合 (wt%)
廃棄物	鉄共沈スラリー脱水物 (含水率40wt%換算)	14470 (乾燥後8680) (容器数40)	58.3	9950 (乾燥後5970) (容器数30)	50.0	6640 (乾燥後3984) (容器数20)	28.6
ガラス形成 材	Al ₂ O ₃	1000	4.0	422	2.1	1215	5.2
	B ₂ O ₃	460	1.9	478	2.4	656	2.8
	Na ₂ CO ₃	2800	11.3	2813	14.1	5451	23.5
	SiO ₂	6090	24.5	6237	31.3	9248	39.8
	小計	10350	41.7	9950	50.0	16570	71.3
合計		24820	100.0	19900	100.0	23210	100.0

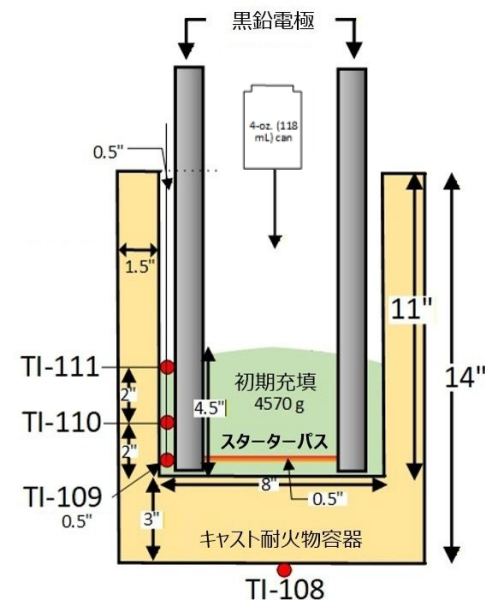
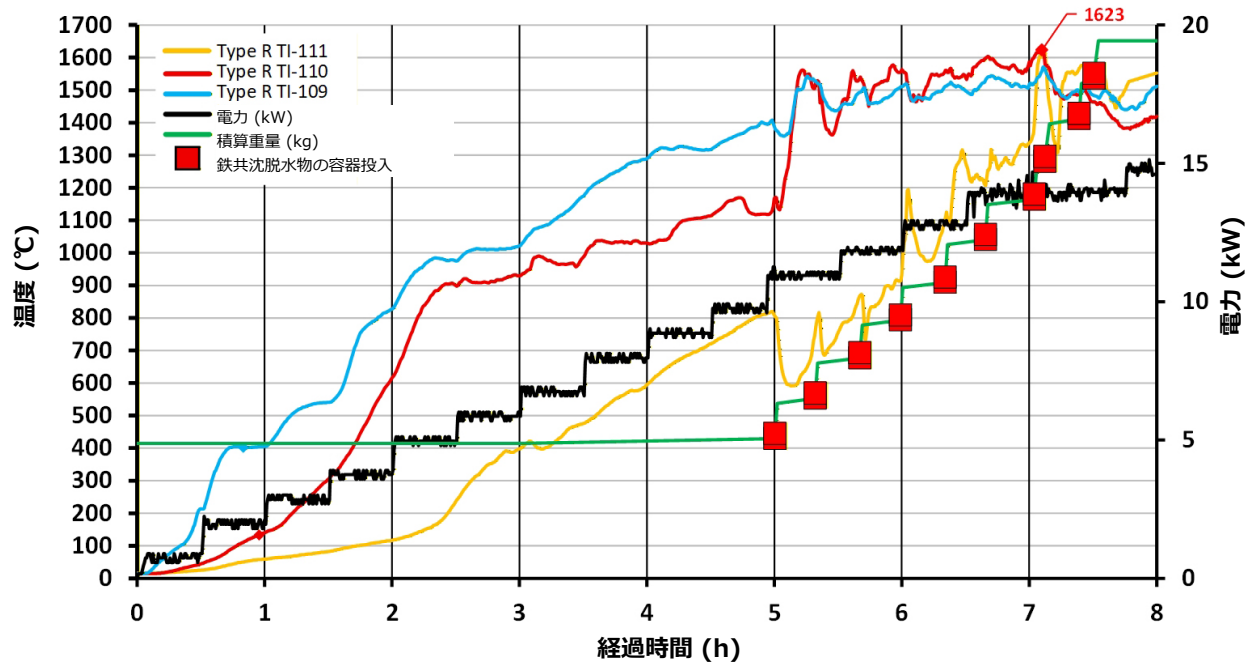
ベンチ規模試験1C 運転結果

- 初期充填量4.57kgのガラス形成材にて通電を開始し、通電開始5:00（溶融ガラス温度TI-109：1409℃）から容器の投入を開始した。
- 溶融ガラス温度は、その後速やかに1550℃（TI-110）に到達し、運転終了まで高い値をキープした（最高温度：1623℃）。

ベンチ規模試験1Cの炉内状況
（19および20番目の容器投入時）



ベンチ規模試験1C 運転トレンド

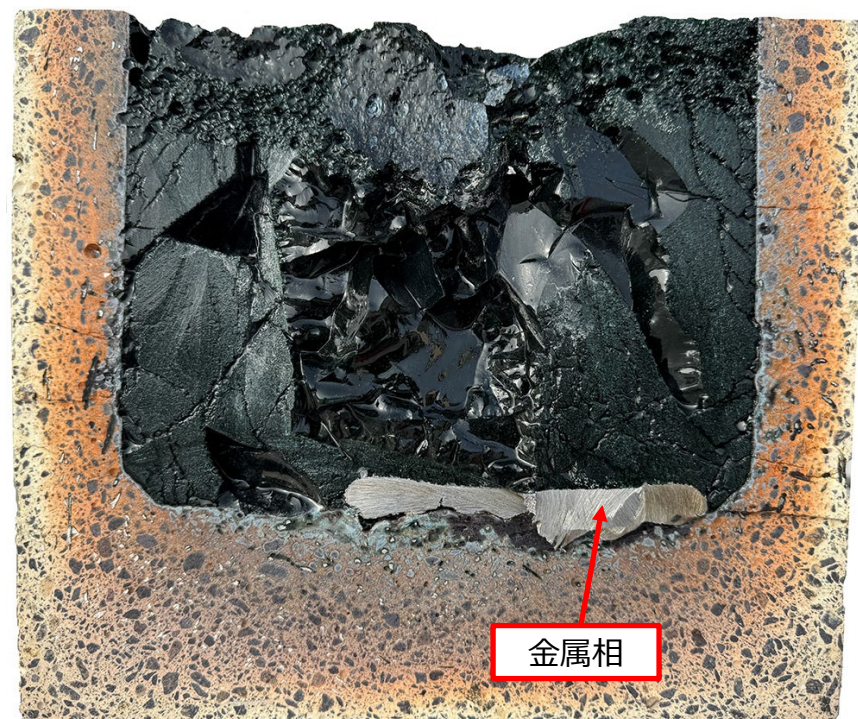


ベンチ規模試験1C ガラス固化体断面観察

- 未熔融の容器はなかった。
- 暗緑色のガラスが生成された。ガラスサンプルの組成分析の結果、ガラス中に約16%の鉄（ Fe_2O_3 換算）が含まれていた。
- 底部に金属相が生成された。下表に示す通り、金属相の重量は鋼製容器の重量よりも大きく、一部の FeOOH が金属鉄まで完全に還元されたことが推察される。

金属相に関する重量データ

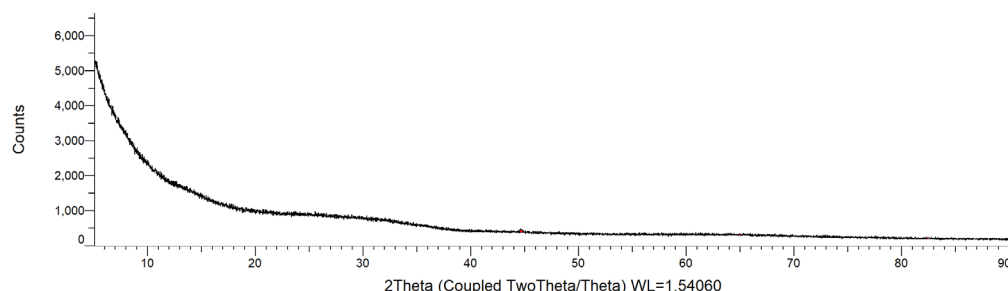
項目	単位	数量
①金属相の重量	g	1450
②供給した鋼製容器の重量	g	770
③ FeOOH 由来の還元鉄（②-①）	g	680
④ FeOOH の供給量	g	3984
⑤上記の金属鉄換算重量	g	2504
⑥推定還元割合（③÷⑤）	%	27.2



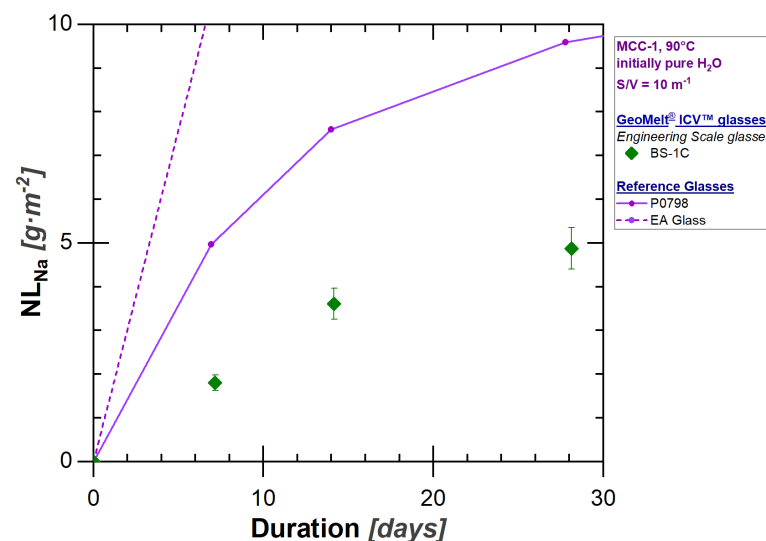
ベンチ規模試験1C ガラス固化体断面

ベンチ規模試験1C XRDによる結晶構造解析およびMCC-1浸出試験結果（28日間）

- 固化ガラスについて、XRDによる結晶構造解析と28日間のMCC-1浸出試験を実施した。
- BS-1CのXRDでは、BS-1Bで確認されたFayaliteを含め結晶成分は同定されず、全体が非晶質で形成されていることが確認できた。
- MCC-1では、日本の模擬高レベルガラスP0798よりも規格化浸出量が低く、耐浸出性に優れたガラスであることが確認できた。



ベンチ規模試験1C ガラスサンプル（MRI-BS-1C-02）
のX線回折パターン



ベンチ規模試験1C 固化ガラスのMCC-1規格
化浸出量NL_{Na}（28日間）

ベンチ規模溶融試験結果のまとめ

- ベンチ規模試験2は、スラリーの発生量に基づき鉄共沈と炭酸塩スラリー脱水物が2:8での混合溶融を実施した。鉄共沈の割合が低いため、特に問題なく溶融を行うことができ、合計の廃棄物充填率は減容化のめやすとなる50wt%を達成できた。
- 鉄共沈スラリー脱水物の単独溶融を実施したベンチ規模試験1は、高廃棄物充填率の場合、Fayaliteの形成により溶融ガラス温度を上げることができなかった。廃棄物充填率を28.6%に下げた3回目の試験（BS-1C）において溶融ガラス温度を1550℃以上とし、容器を完全に溶融することができた。また、耐浸出性に優れた固化ガラスであることが確認できた。
- 各ベンチ規模試験の試験結果を下表に示す。鉄共沈単独の溶融については、処理可能な最大廃棄物充填率を見極めるとともに、スケールアップした工学規模での検証も必要と考える。

各ベンチ規模試験結果の比較

項目	単位	鉄共沈単独溶融			混合溶融
		BS-1A	BS-1B	BS-1C	BS-2
廃棄物充填率（含水率40wt%換算）	wt%	58.3	50.0	28.6	50.0 炭酸塩35 鉄共沈15
投入容器数	個	40	30	20	30 炭酸塩24 鉄共沈6
容器投入間隔※	個/h	6.2	6.5	6.7	1.5
ガラス最高温度（目標1550℃）	℃	1294	1327	1623	1563
容器の完全溶融	—	未達	未達	達成	達成
オーバーフロー	—	あり	なし	なし	なし

※鉄共沈脱水物容器の投入数を初回投入から運転終了までの時間で割った値

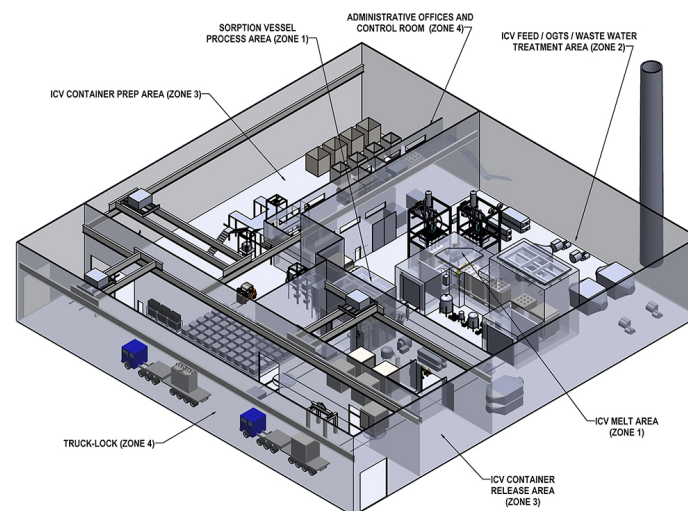
はじめに

弊社は2019年度開始の補助金事業※において、セシウム吸着材（キュリオン装置）等の水処理二次廃棄物を対象としたGeoMelt®ICV™施設の予備概念設計を実施した。今回、炭酸塩スラリー脱水物を内包した脱水物容器の溶融処理の見通しが得られたことから、本廃棄物を処理対象に加える更新を行った。

主な変更点は以下の通り。なお、脱水物中の水の急激な気化膨張の影響は、不確定な部分があるが、事前乾燥により防げることが確認できたため、オプションとして事前乾燥設備の導入を検討した。

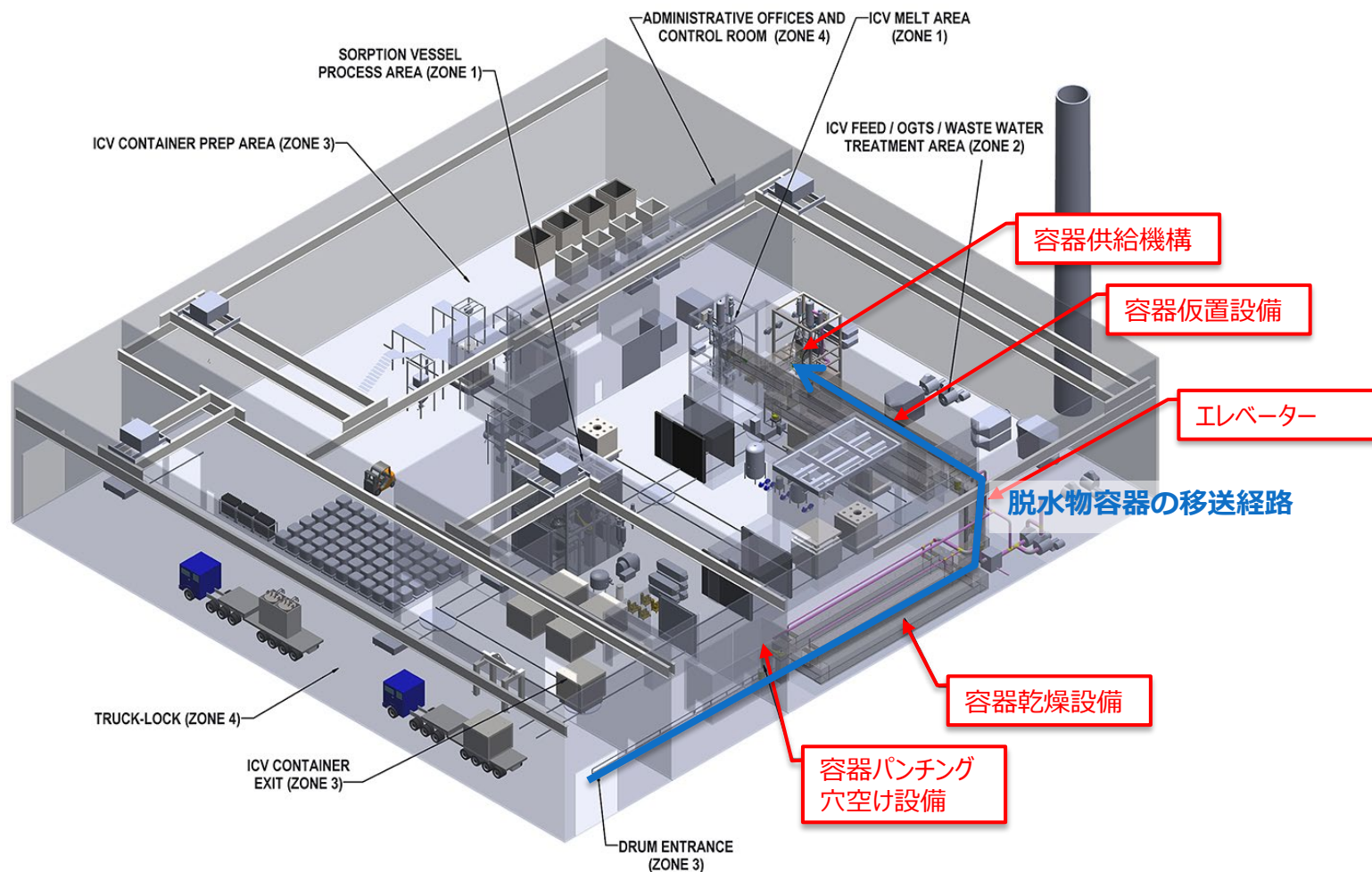
1. 脱水物保管容器（200Lドラム缶を想定）の供給設備の追加
（オプションとして事前乾燥設備含む）
2. ICV容器構成の改良
3. 各種評価の更新
 - ✓ 処理量評価
 - ✓ マスバランス、放射能バランス評価
 - ✓ ICV容器表面線量率評価

※ 平成29・30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業」に関する補助事業（第一次公募、固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発）



予備概念設計の機器配置（2019年度）

1. 脱水物保管容器の供給設備の追加（オプションとして事前乾燥設備含む）

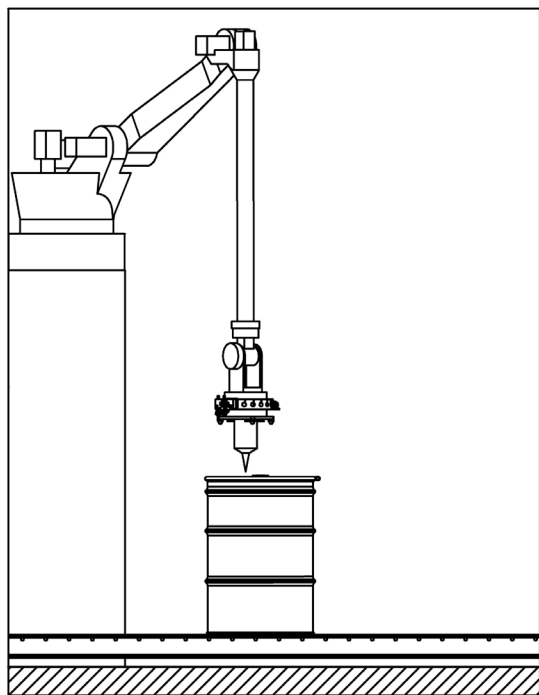


更新後のGeoMelt®ICV™施設の配置図

容器パンチング穴あけ設備

乾燥および溶融時の気抜き用の容器への穴あけは遠隔操作マニピュレータで1つずつ複数をパンチングすることを想定した。

穴あけ設備は容器乾燥設備の上流のエアロック内に配置する。



容器乾燥設備（方式）

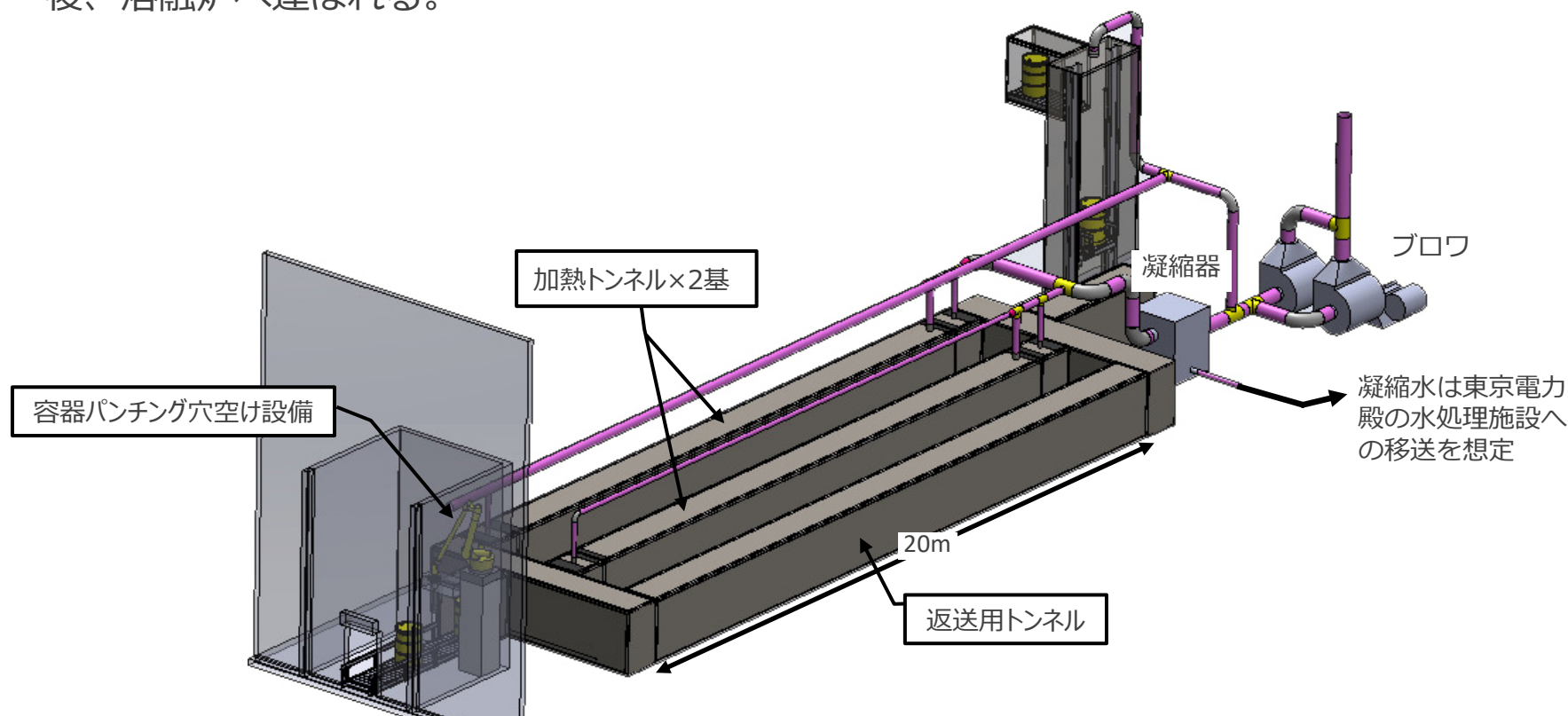
オプションとしての容器内の脱水物の乾燥は、コンベヤを有する加熱トンネル内で電気ヒーターにより容器ごと加熱する方式とした。

加熱時に発生する蒸気ミストには放射性物質が含まれるため、常時トンネルの換気を行い、トンネル内の負圧を維持する。



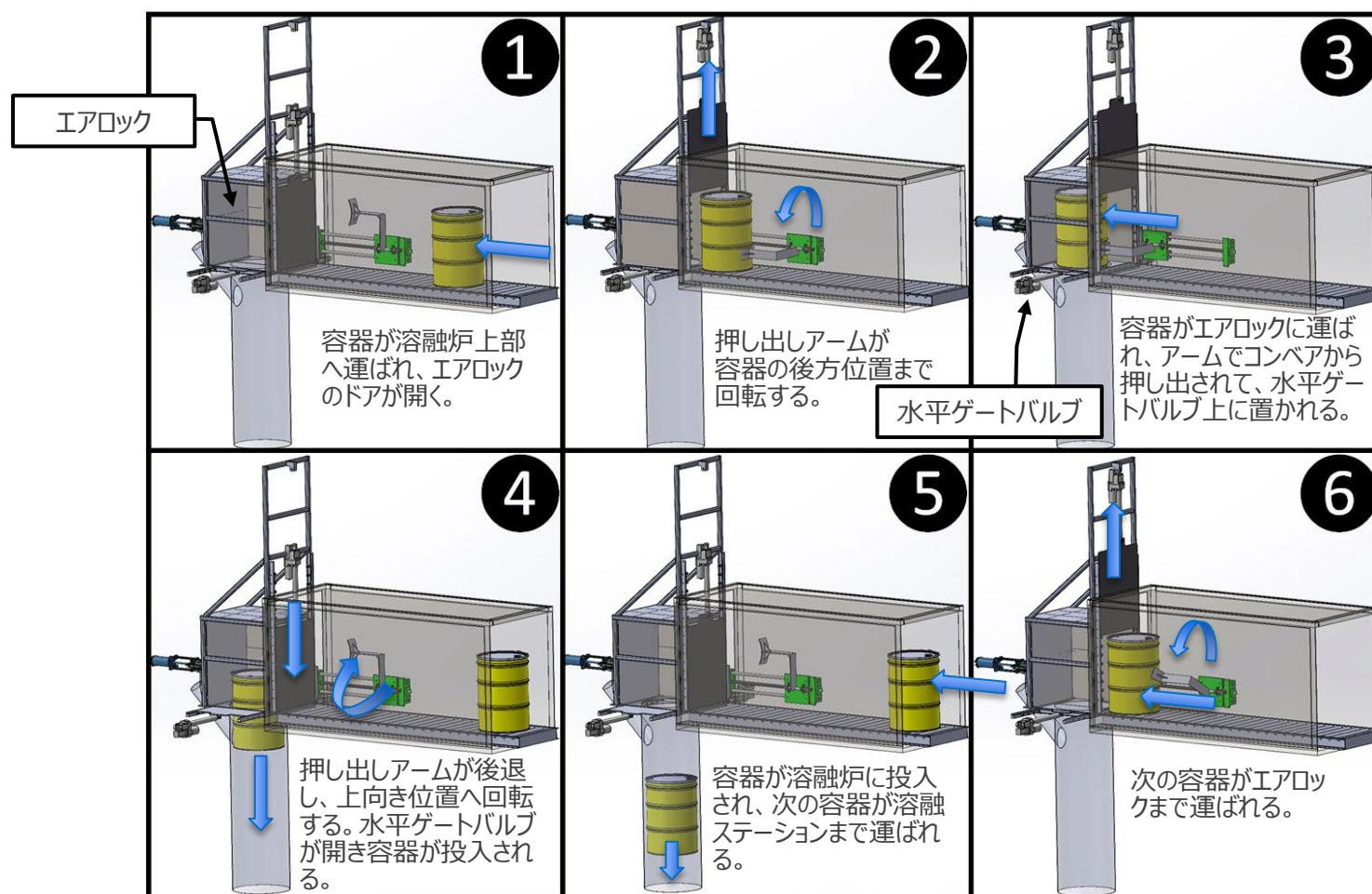
容器乾燥設備（全体）

- 25個の容器を同時乾燥可能な加熱トンネル2基を並列配置している。
- 加熱トンネルとは別の返送用のトンネルを有し、乾燥が不十分な場合（乾燥時の重量や蒸気発生量等による確認を想定）は、加熱トンネルの入口に戻ることができる。
- トンネル内空気はブロフで吸引し、凝縮器により水蒸気を凝縮する。（凝縮水は東京電力殿の水処理施設への移送を想定している。）
- 乾燥後の容器はエレベーターで、コンベヤとトンネルを有する容器仮置設備へ搬送。その後、溶融炉へ運ばれる。



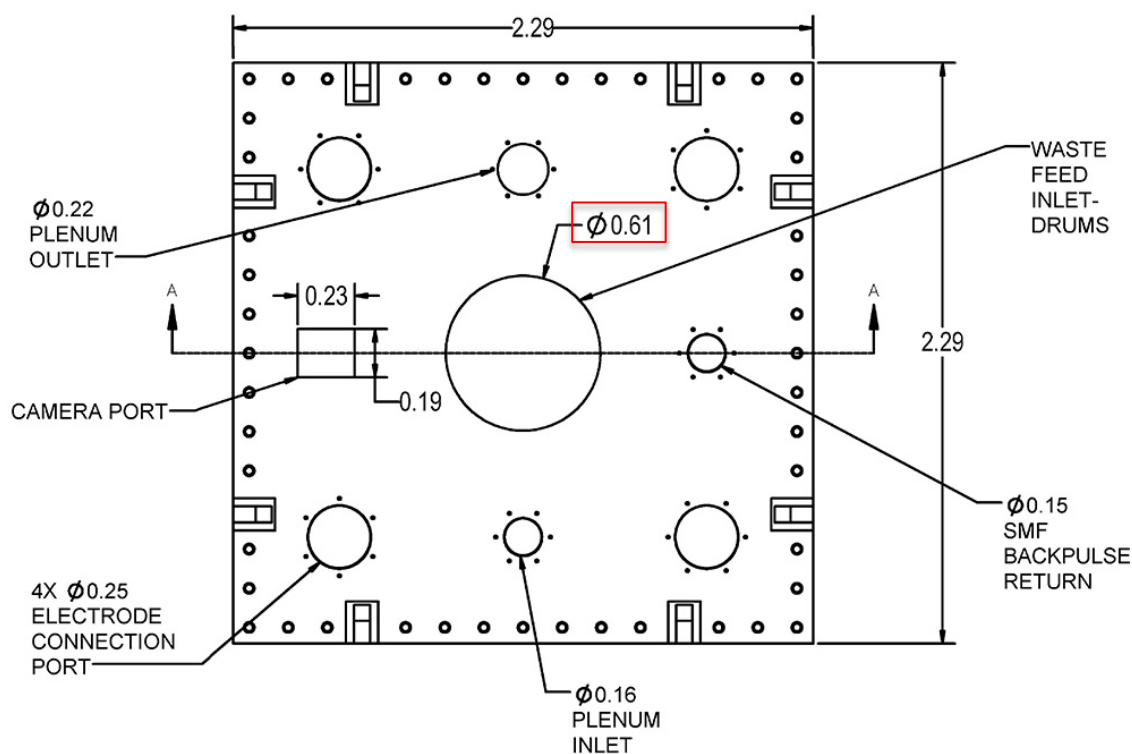
容器供給機構

溶融炉上方まで搬送された容器は、工学規模溶融試験と同様にプッシュ式の水平搬送とエアロックを使用し、炉内負圧を維持しながら溶融炉へ供給される。なお、約200Lの容量を持つ容器が炉内へ自由落下すると、ガラスの飛散や電極棒の損傷リスクがあるため、今後、容器の落下速度を抑制して供給する方法も検討が必要と考えている。

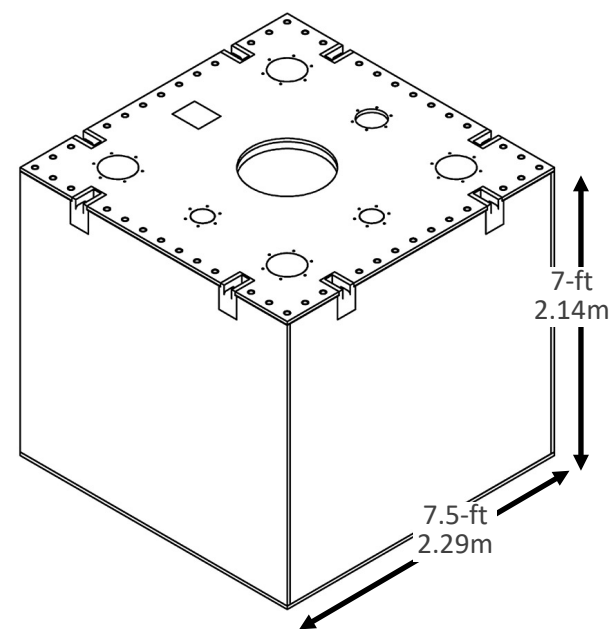


溶融フードの変更

溶融フードは、ドラム缶を投入できるように中央の供給管を大きくした。
($\Phi 250\text{mm} \Rightarrow \Phi 610\text{mm}$)



更新した予備概念設計の溶融フード



更新した予備概念設計のICV容器

2. ICV容器構成の改良

実機のGeoMelt®ICV™は、溶融炉自体がそのまま廃棄体（ICV容器）となる。脱水物容器の溶融処理には1550℃以上のガラス温度が必要であること、処理による減容効果を高めるためにICV容器構成の改良を行った。

耐火物材質の変更（耐火物A ⇒ 耐火物B）

使用温度は1650℃と変わらないが、耐火物Bのほうが熱伝導率が低く断熱性が高い。

耐火物A : 1.3W/mK

耐火物B : 0.92W/mK

断熱材の変更（シリカサンド ⇒ ファイバーボード）

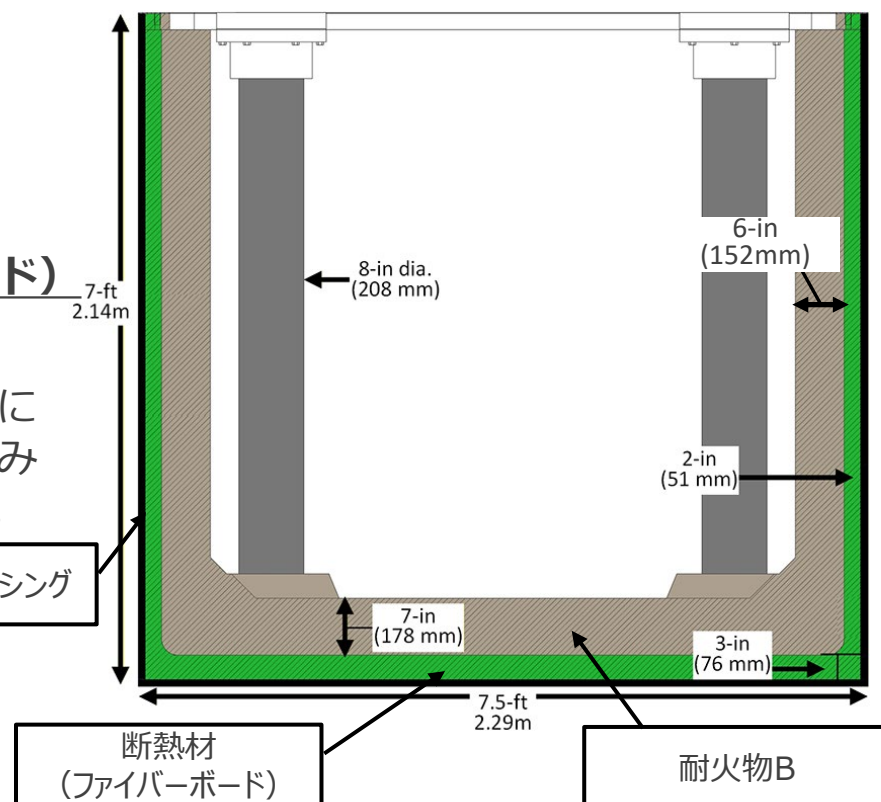
断熱性の高い（熱伝導率の低い）高密度アルミナ・シリカ製のファイバーボードを採用。これにより、耐火物と鋼製ケーシングの間の断熱材厚みが大きく低減し、ICV容器をコンパクト化した。

シリカサンド (0.5W/mK)

: 6インチ

ファイバーボード (0.18W/mK)

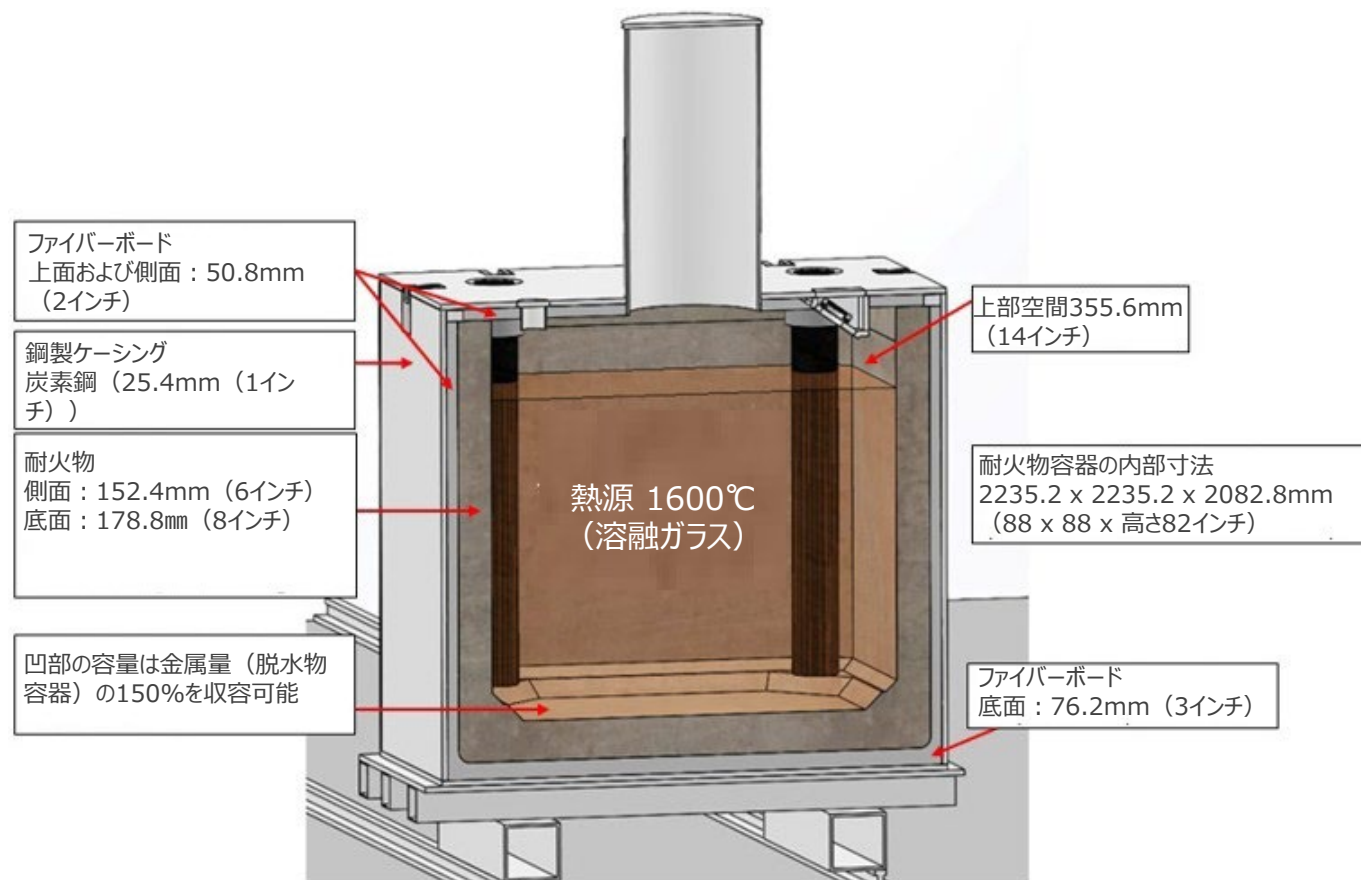
: 側面2インチ、底面3インチ



ICV容器の耐火物と断熱材の断面図

改良したICV容器の熱解析

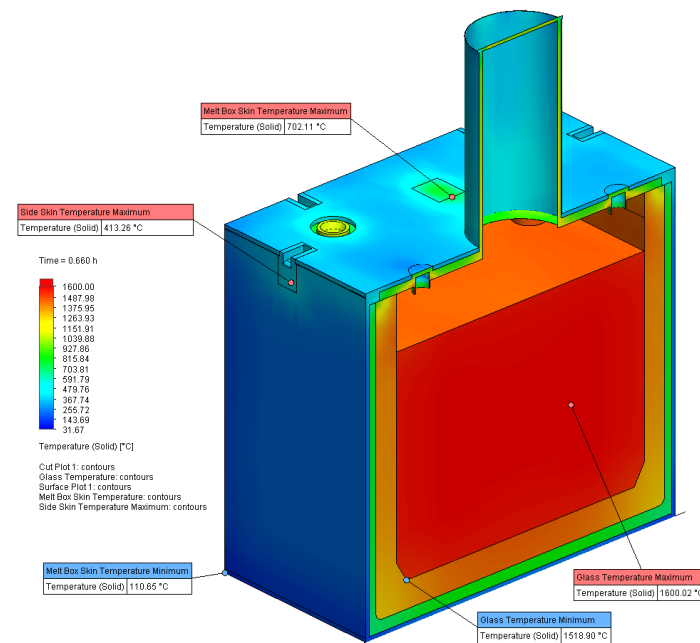
- 改良したICV容器の鋼製ケーシングの最高温度および運転終了後の冷却時の温度変化を確認するため、熱解析を実施した。
- 解析モデルは、SolidWorks Premium 2023 SP5.0を使用した。解析モデルを下図に示す。初期状態はコールドキャップがなく1600℃均一の溶融ガラスが存在する保守的な条件とし、プレナム内の入排気と溶融ガラス表面からの放熱を非定常解析を用いて計算している。



熱解析モデル

鋼製ケーシングの最高温度は冷却開始0.66時間時点に確認された。温度分布図を下図に示す。最高温度は413℃であり、これは米国の10t規模商業施設（テキサス州）における許容温度570℃を下回った。

改良したICV容器は、高温環境での運転に十分耐えられると考えられる。



鋼製ケーシングが最高温度となった時点の温度分布図
(冷却0.66時間時点)

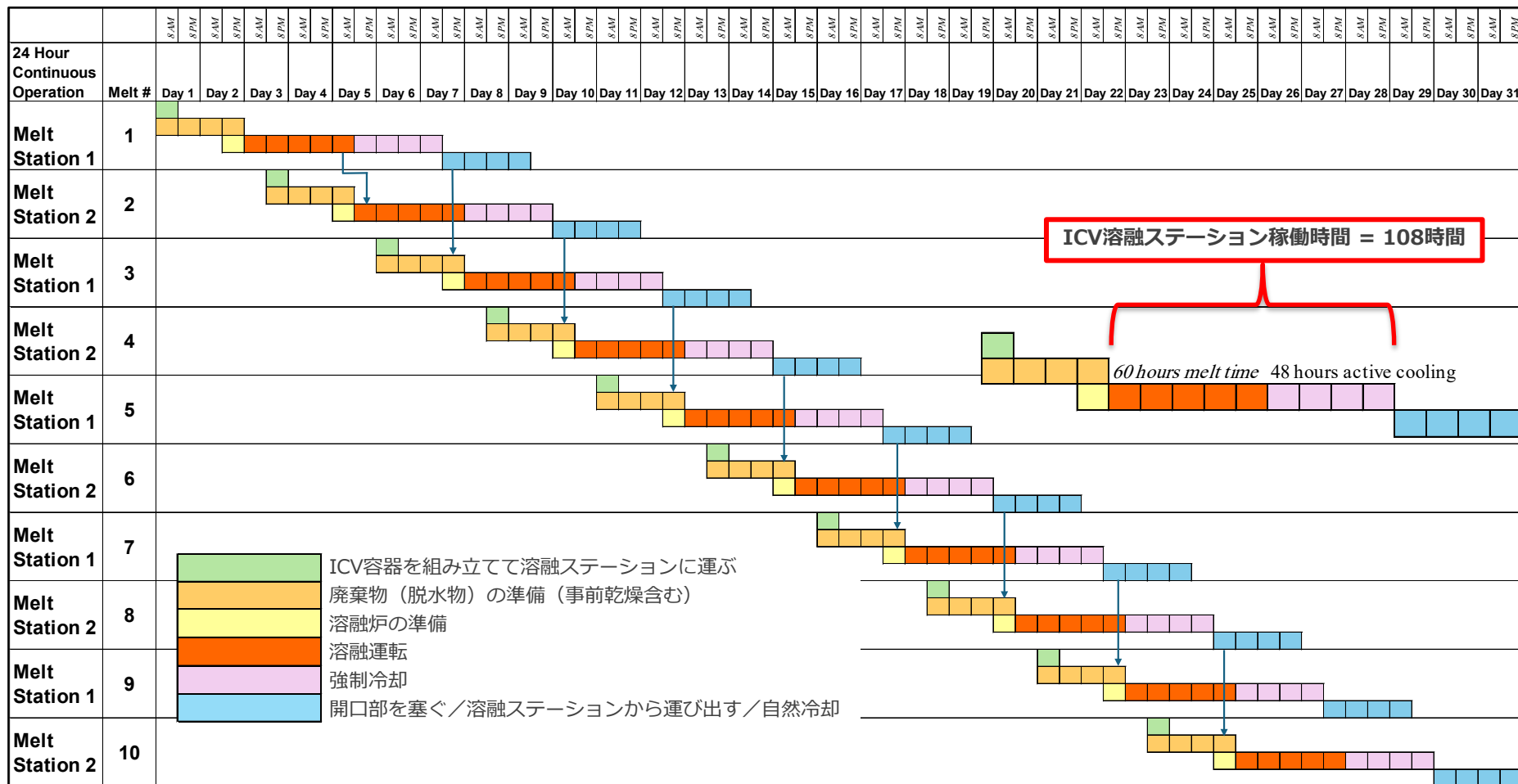
3. 各種評価の更新

処理量評価

- GeoMelt®ICV™施設は、2基の溶融炉を有し、交互に溶融運転を実施する。
- 次頁に、準備作業、溶融運転、冷却等のタイムスケジュールを示す。
- ICV容器が溶融ステーションに留まり続ける必要があるのは、溶融60時間 + 強制冷却48時間の合計108時間である。片系の準備作業をもう片系の運転中に完了できるように、スケジュールリングすることで2基の溶融炉を交互連続的に運転処理可能と考える。
- 稼働率80%とすると、年間94回の溶融運転が可能であり、これは年間6110個の炭酸塩スラリー脱水物容器（852tの炭酸塩スラリー脱水物に相当）に相当する。

項目	更新後	(参考) 2019年度
溶融+強制冷却時間	108h	106h
1バッチ処理時間 (2系列交互運転時)	3.1日	3.2日
年間運転回数	94回（稼働率80%）	93回（稼働率83%）

炭酸塩スラリー脱水物容器の運転スケジュール
(31日で10回の溶融処理)



マスバランス評価

- 溶融炉およびオフガス処理設備のマスバランスは、工学規模試験結果を基に、廃棄物充填率50%、溶融時間60hで65個の脱水物容器を処理するものとして評価した。また、事前乾燥なしの脱水物含水率40%、事前乾燥ありの脱水物含水率8%の2パターンで計算を行った。以下に計算結果を示す。なお、各streamの番号は、次頁のフロー図中の番号と対応している。
- 事前乾燥なしの場合、水蒸気のみだけオフガス流量が大きく（溶融炉出口で約+300m³/h）、ファンや配管径の検討にあたって考慮する必要がある。

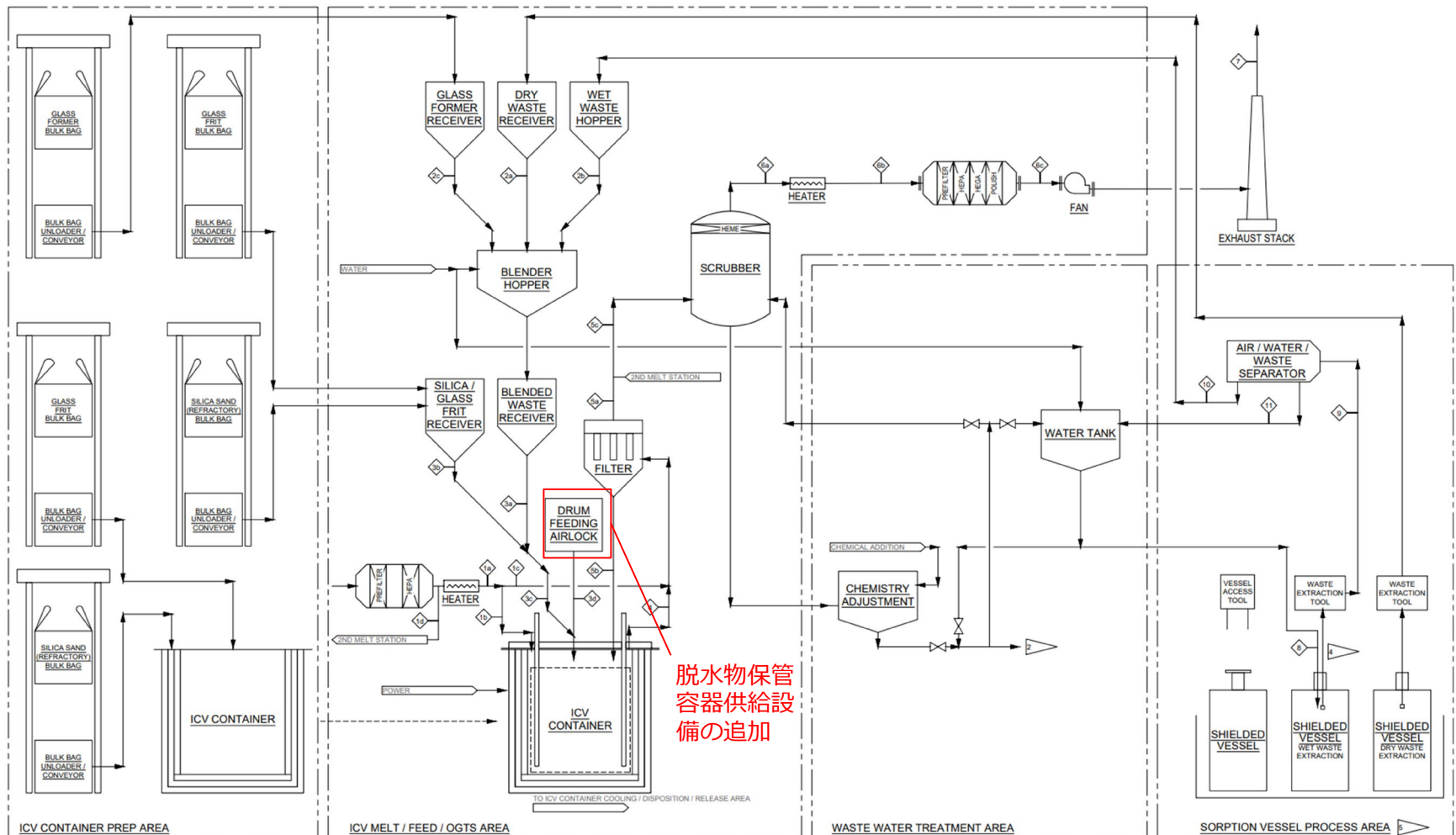
マスバランス（事前乾燥なし（含水率40%））

Stream Number		Stream 1a	Stream 1b	Stream 1c	Stream 1d	Stream 2c	Stream 3d	Stream 4	Stream 5a	Stream 5b	Stream 5c	Stream 6a	Stream 6b	Stream 6c	Stream 7
Stream Name	Units	Inlet Air	Air Sweep	Air Dilution	2nd Melt Station Cooling Air	Glass Former Feed	ALPS Waste Feed	Melter Offgas	SMF Offgas	Filter Recirc	Scrubber Inlet Offgas	Scrubber Exhaust	Heater Exhaust	Fan Inlet	Stack Offgas
Phase		Gas	Gas	Gas	Gas	Solid	Solid	Gas	Gas	Solid	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas
Operating Mass Flow	kg/hr	181	181	0	1000	151	172	426	425	0	1430	1430	1430	1430	1430
Volumetric flow	m ³ /hr	149	149	0	965	0.059	0.226	693	706	0	1470	1380	1470	1490	1390
Temperature	°C	16	16	16	65	16	16	250	250	250	70.6	38	57	57	57
Pressure	kPa	101.3	101.3	101.3	101.3	N/A	N/A	100.8	98.8	N/A	98.7	96.2	95.8	94.7	101.5

マスバランス（事前乾燥あり（含水率8%））

Stream Number		Stream 1a	Stream 1b	Stream 1c	Stream 1d	Stream 2c	Stream 3d	Stream 4	Stream 5a	Stream 5b	Stream 5c	Stream 6a	Stream 6b	Stream 6c	Stream 7
Stream Name	Units	Inlet Air	Air Sweep	Air Dilution	2nd Melt Station Cooling Air	Glass Former Feed	ALPS Waste Feed	Melter Offgas	SMF Offgas	Filter Recirc	Scrubber Inlet Offgas	Scrubber Exhaust	Heater Exhaust	Fan Inlet	Stack Offgas
Phase		Gas	Gas	Gas	Gas	Solid	Solid	Gas	Gas	Solid	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas
Operating Mass Flow	kg/hr	66.5	66.5	0	1000	151	120	259	259	0	1260	1270	1270	1270	1270
Volumetric flow	m ³ /hr	54.9	54.9	0	965	0.059	0.147	395	403	0	1260	1190	1270	1290	1200
Temperature	°C	16	16	16	65	16	16	250	250	250	68	38	57	57	57
Pressure	kPa	101.3	101.3	101.3	101.3	N/A	N/A	100.8	98.8	N/A	98.7	96.2	95.8	94.7	101.5

GeoMelt®ICV™施設 プロセスフロー図



放射能バランス評価

- 放射能バランスを更新し、煙突出口における核種濃度を算出した。脱水物放射能に対して、プロセスの各段階で以下の係数を使用し算出した。
 - ガラス保持率
 - SMFおよびHEPA除去効率（I-129を除く）：99.97%
 - プレフィルタ除去効率（I-129を除く）：50%
 - スクラバ除去効率：90%
 - HEGA（高性能ガス吸着フィルタ）効率（I-129用）：99.9%
- 「事前乾燥あり」のケースにおける計算結果は下表のとおり。

オフガス系の放射能バランス計算結果（事前乾燥ありのケース）

核種※1	脱水物中総放射能※1 (Bq)	ガラス保持率※2	溶融炉出口 (Bq/h)	SMF出口 (Bq/h)	スクラバ出口 (Bq/h)	HEPA出口 (Bq/h)	HEGA出口 (Bq/h)	煙突出口 空気流量 (m3/h)	煙突出口 核種濃度 (Bq/cm ³)
Co-60	3.30E+08	96.41%	1.98E+05	5.93E+01	5.93E+00	8.89E-04	8.89E-04	1200	7.41E-13
Ni-63	8.76E+06	99.90%	1.46E+02	4.38E-02	4.38E-03	6.57E-07	6.57E-07	1200	5.47E-16
Sr-90	1.73E+15	99.96%	1.15E+10	3.46E+06	3.46E+05	5.19E+01	5.19E+01	1200	4.32E-08
TC-99	1.09E+09	95.00%	9.08E+05	2.72E+02	2.72E+01	4.09E-03	4.09E-03	1200	3.41E-12
Ru-106	1.65E+09	99.90%	2.75E+04	8.25E+00	8.25E-01	1.24E-04	1.24E-04	1200	1.03E-13
Sb-125	5.78E+09	90.23%	9.41E+06	2.82E+03	2.82E+02	4.24E-02	4.24E-02	1200	3.53E-11
I-129	5.43E+06	0.00%	9.05E+04	9.05E+04	9.05E+03	9.05E+03	9.05E+03	1200	7.54E-09
Cs-134	5.25E+08	80.65%	1.69E+06	5.08E+02	5.08E+01	7.62E-03	7.62E-03	1200	6.35E-12
Cs-137	1.61E+09	80.65%	5.19E+06	1.56E+03	1.56E+02	2.34E-02	2.34E-02	1200	1.95E-11
Pu-238	1.32E+07	99.96%	9.02E+01	2.71E-02	2.71E-03	4.06E-07	4.06E-07	1200	3.38E-16

※1 核種の種類および放射能は、第25回特定原子力施設の実施計画の審査等に係る技術会合、2025年3月5日、資料2-1「スラリー安定化処理設備設置の検討状況について」の“高線量脱水物”のインベントリを使用した。

※2 Sr-90、Cs-134、Cs-137のガラス保持率は、脱水物を事前乾燥した工学規模溶融試験18の結果を使用。その他核種は既往研究結果や沸点等の化学的性質に基づく想定値。

- 計算結果における煙突出口濃度と告示濃度限度との比較を次頁に示す。事前乾燥ありのケースの場合、煙突出口濃度は告示濃度限度より十分小さい。
- 一方で、脱水物の事前乾燥がなく、水蒸気の急激な気化膨張がある場合、Sr-90のガラス保持率は99.96%⇒95%程度に低下する。（工学規模溶融試験17におけるCaとMgのオフガス移行率3.5%および2.4%より設定。溶融17では正確なSrのオフガス移行率が取得できなかった。）
この場合、煙突出口濃度は $5.49\text{E-}06 \text{ Bq/cm}^3$ となり、告示濃度限度（ $5\text{E-}06 \text{ Bq/cm}^3$ ）を上回る。水蒸気の急激な気化膨張は、脱水物の分離水が影響した可能性があり、分離水がない場合のガラス保持率について、追加的な評価が必要と考える。
- Cs-134、Cs-137についても水蒸気の急激な気化膨張がある場合、ガラス保持率が低下する。しかしながら、炭酸塩スラリー脱水物のこれらの放射能は低いため、仮に全量がオフガスに移行したとしても、煙突出口濃度は以下のとおりとなり、告示濃度限度は超えない。
Cs-134 : $3.28\text{E-}11 \text{ Bq/cm}^3$ （告示濃度限度 $2.00\text{E-}05 \text{ Bq/cm}^3$ ）
Cs-137 : $1.01\text{E-}10 \text{ Bq/cm}^3$ （告示濃度限度 $3.00\text{E-}05 \text{ Bq/cm}^3$ ）

水蒸気の急激な気化膨張によりガラス保持率が95%まで低下すると、煙突出口濃度は $5.49\text{E-}06\text{ Bq/cm}^3$ となり告示濃度限度を超える。

全量がオフガスに移行した場合にも、煙突出口濃度は以下のとおり。告示濃度限度は超えない。
Cs-134
: $3.28\text{E-}11\text{ Bq/cm}^3$
Cs-137
: $1.01\text{E-}10\text{ Bq/cm}^3$

煙突出口核種濃度と告示濃度限度との比較（事前乾燥ありのケース）

核種	単位	煙突出口核種濃度	告示濃度限度※	告示濃度限度との比率
Co-60	Bq/cm ³	7.41E-13	4E-06	1.85E-07
Ni-63	Bq/cm ³	5.47E-16	3E-04	1.82E-12
Sr-90	Bq/cm ³	4.32E-08	5E-06	8.65E-03
Tc-99	Bq/cm ³	3.41E-12	3E-05	1.14E-07
Ru-106	Bq/cm ³	1.03E-13	2E-06	5.16E-08
Sb-125	Bq/cm ³	3.53E-11	3E-05	1.18E-06
I-129	Bq/cm ³	7.54E-09	1E-06	7.54E-03
Cs-134	Bq/cm ³	6.35E-12	2E-05	3.17E-07
Cs-137	Bq/cm ³	1.95E-11	3E-05	6.49E-07
Pu-238	Bq/cm ³	3.38E-16	3E-09	1.13E-07
			合計	0.0162

※ 「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」の別表第一における第五欄 周辺監視区域外の空気中の濃度を使用。各化学形態ごとに濃度限度が定められており、各核種に対して下線部の化学形態の値を使用した。

(Co-60) 酸化物・水酸化物・ハロゲン化物・硝酸塩：4E-06、その他：1E-05
(Ni-63) ニッケルカルボニル：6E-05、その他：3E-04
(Sr-90) チタン酸ストロンチウム：8E-07、その他：5E-06
(Tc-99) 酸化物・水酸化物・ハロゲン化物・硝酸塩：3.00E-05
(Ru-106) 四酸化物：6E-06、ハロゲン化物：4E-06、酸化物および水酸化物：2E-06
(Sb-125) 酸化物・水酸化物・ハロゲン化物・硫化物・硫酸塩・硝酸塩：3E-05
(I-129) ヨウ素蒸気：1E-06、ヨウ化メチル：2E-06、その他：3E-06
(Cs-134) 全ての化合物：2E-05
(Cs-137) 全ての化合物：3E-05
(Pu-238) 不溶性酸化物：8.00E-09、その他の化合物：3.00E-09

廃棄体インベントリ

ガラス固化体のマスおよび放射能バランス評価結果を下表に示す。

項目		数量
1バッチ分の炭酸塩スラリー脱水物重量 (kg)		9069 (うち水分 3628)
1バッチ分の投入ドラム缶	個数	65
	重量 (kg)	1268
1バッチ分の投入ガラス形成材重量 (kg)		9069
ICV容器内の固化ガラス	重量 (t)	11.65
	体積 (m ³)	4.482
固化ガラスのSr-90放射能濃度 (Bq/t)		1.49E+14
固化ガラスのCs-137放射能濃度 (Bq/t)		1.11E+08
固化ガラスの崩壊熱 (W/m ³)		70.64

廃棄物充填率
50%

溶融処理による減容性の評価は以下のとおり。工学規模溶融試験で実証された廃棄物充填率50%の条件において、減容効果があることを確認できた。

$$\text{減容率} = \text{ICV容器の外容積} / \text{ドラム缶65本の収容スペース} = \mathbf{0.615}$$

ICV容器の外容積：11.2m³ (=2.29m x 2.29m x 2.12m)

ドラム缶65本の収容スペース：18.2m³ (=0.565m x 0.565m x 0.876m x 65)

ICV容器表面線量率評価

- 前頁のガラス固化体インベントリをインプットとして、ICV容器の表面線量率を計算した。計算コードはMicroShield® Pro 13.11を用いた。
- 表面線量率の算出結果は、 $1.32\text{E-}03\text{mGy/h}$ ($=1.32\mu\text{Sv/h}$) と小さく、基本的にはICV容器に対して追加遮蔽は不要と考えられた。

ICV容器表面線量率の計算条件とモデル

Nuclide	Cl	Bq	$\mu\text{Ci/cm}^3$	Bq/cm^3
Ba-137m	3.32E-02	1.23E+09	6.99E-03	2.59E+02
Co-60	8.59E-03	3.18E+08	1.81E-03	6.69E+01
Cs-134	1.15E-02	4.24E+08	2.41E-03	8.92E+01
Cs-137	3.51E-02	1.30E+09	7.39E-03	2.73E+02
I-129				
Ni-63	2.36E-04	8.75E+06	4.97E-05	1.84E+00
Rh-106	4.46E-02	1.65E+09	9.38E-03	3.47E+02
Ru-106	4.46E-02	1.65E+09	9.38E-03	3.47E+02
Sb-125	1.41E-01	5.22E+09	2.97E-02	1.10E+03
Sr-90	4.68E+04	1.73E+15	9.83E+03	3.64E+08
Tc-99	2.78E-02	1.03E+09	5.85E-03	2.17E+02
Y-90	4.68E+04	1.73E+15	9.83E+03	3.64E+08

Buildup	
Buildup: The material reference is Shield 3.	

Mass Attenuation Library	
NIST Library	

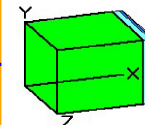
Integration Parameters	
X Direction	40
Y Direction	40
Z Direction	40

Project Info			
Case Title	ICV Melt Box Case 2		
Description	ICV Melt Box - No Shielding		
Geometry	13 - Rectangular Volume		

Source Dimensions	
Length	183.0 cm (6 ft .047 in)
Width	183.0 cm (6 ft .047 in)
Height	142.0 cm (4 ft 7.906 in)

Dose Points			
No.	X	Y	Z
#1	206.86 cm (6 ft 9.441 in)	71.0 cm (2 ft 3.953 in)	91.0 cm (2 ft 11.827 in)

Shields			
Shield Name	Dimension	Material	Density (g/cm ³)
Source	4.76E+06 cm ³	Borosilicate Glass (Pyrex)	2.6
Shield 1	15.24 cm	CerCast 300	2.1
Shield 2	5.08 cm	Fiber Board	0.35
Shield 3	2.54 cm	Iron	7.86
Air Gap		Air	0.00122



Results with Buildup: Dose Point No. 1 - (X = 206.86, Y = 71, Z = 91) cm						
Energy (MeV)	Activity (Photons/sec)	Energy Flux (MeV/cm ² /sec)	Photon Flux (Photons/cm ² /sec)	Exposure Rate (mR/hr)	Absorbed Dose Rate (mrad/hr)	Absorbed Dose Rate (mGy/hr)
1.50E-02	2.71E+08	2.52E-25	1.68E-23	2.16E-26	1.88E-26	1.88E-28
3.00E-02	2.42E+09	4.84E-24	1.61E-22	4.80E-26	4.19E-26	4.19E-28
4.00E-02	2.35E+08	7.19E-25	1.80E-23	3.18E-27	2.78E-27	2.78E-29
8.00E-02	5.97E+03	1.13E-13	1.41E-12	1.78E-16	1.55E-16	1.55E-18
1.00E-01	1.36E+07	1.41E-07	1.41E-06	2.16E-10	1.89E-10	1.89E-12
1.50E-01	1.31E+07	5.39E-05	3.59E-04	8.87E-08	7.75E-08	7.75E-10
2.00E-01	3.96E+08	1.92E-02	9.59E-02	3.38E-05	2.95E-05	2.95E-07
3.00E-01	2.19E+07	1.08E-02	3.59E-02	2.04E-05	1.78E-05	1.78E-07
4.00E-01	1.63E+09	2.81E+00	7.01E+00	5.47E-03	4.77E-03	4.77E-05
5.00E-01	8.87E+08	3.45E+00	6.89E+00	6.76E-03	5.90E-03	5.90E-05
6.00E-01	3.67E+09	2.60E+01	4.33E+01	5.08E-02	4.43E-02	4.43E-04
8.00E-01	4.06E+08	6.86E+00	8.57E+00	1.30E-02	1.14E-02	1.14E-04
1.00E+00	3.65E+08	1.15E+01	1.15E+01	2.13E-02	1.86E-02	1.86E-04
1.50E+00	3.43E+08	3.17E+01	2.11E+01	5.33E-02	4.65E-02	4.65E-04
Total	1.07E+10	8.23E+01	9.86E+01	1.51E-01	1.32E-01	1.32E-03

事業成果のまとめ

- 炭酸塩スラリー脱水物を内包する保管容器について、工学規模溶融試験の結果、GeoMelt®ICV™によりガラス固化および減容化が可能であることが確認できた。また本処理方式について、予備概念設計を実施し、実機施設の実現可能性を確認できた。
- 鉄共沈スラリー脱水物は、ベンチ規模試験の結果、今回は28.6%までの廃棄物充填率において、容器ごと処理する方式で固化処理できることが確認できた。

今後の課題

- 炭酸塩スラリー脱水物の水分により、溶融運転中に急激な気化膨張の発生が確認された。本事象は、事前乾燥することで完全に防止できることを確認できたが、その場合、実機において追加の設備が必要となる。急激な気化膨張は、脱水物の分離水が影響していた可能性があり、実脱水物のように分離水がない場合に発生しうるか追加的な検証を行うことが望ましいと考える。
- 工学規模の固化ガラスは200kg程度に対し、実機溶融炉は10t規模を想定している。工学規模では、現実的な溶融時間で50%廃棄物充填率を達成できたが、スケールアップすると溶融挙動が変わってくる可能性がある。そのため、実規模での溶融試験による検証も必要と考える。
- 鉄共沈スラリー脱水物は、減容効果を出すために、処理可能な最大の廃棄物充填率を確認するとともに、スケールアップした工学規模での確認も必要と考える。

END

参考資料

1. はじめに

模擬ALPS炭酸塩スラリーの組成は、実スラリーに近い組成かつガラス溶融処理における代表性を考慮して設定した。その設定根拠を次項に示す。

2. 模擬ALPS炭酸塩スラリー組成の設定根拠

(1) 参照する実ALPS炭酸塩スラリーの分析結果

実ALPS炭酸塩スラリーの組成は、以下の資料にある分析結果を使用した。

- ALPSスラリー固化処理技術選定にあたっての考慮事項について（改訂版）（第 15 回特定原子力施設の実施計画の審査等に係る技術会合資料1-3、2023年12月4日、原子力損害賠償・廃炉等支援機構）

試料番号		元素組成比 [wt%]										採取 深さ
		B	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Fe	Sr	Ce	
1	AAL-S8-1	0.06	0.21	10.8	0.10	0.10	15.5	0.62	0.50	<0.06	ND	60cm
2	AAL-S8-6	0.06	2.29	13.3	0.08	3.20	18.7	0.38	0.55	0.02	0.04	100cm
3	AAL-S8-8	0.05	2.06	13.5	0.09	3.75	17.8	0.40	0.59	0.02	0.05	150cm
再掲	AAL-S1-1	0.04	4.0	22.2	ND	0.43	14.5	ND	0.08	0.07	ND	

試料番号		物質構成比 [wt%]（代表的な物質を想定）										
		B	Na ₂ CO ₃	Mg(OH) ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃	Ti(OH) ₂	FeO(OH)・H ₂ O	SrCO ₃	Ce(OH) ₃	その他
1	AAL-S8-1	0.06	0.47	25.9	0.20	0.21	38.8	1.1	0.96	-	-	32.3
2	AAL-S8-6	0.06	5.29	31.9	0.16	6.85	46.6	0.6	1.06	0.03	0.04	7.3
3	AAL-S8-8	0.05	4.74	32.3	0.17	8.03	44.6	0.7	1.13	0.03	0.05	8.3
再掲	AAL-S1-1	0.04	9.3	53.3	-	0.93	36.2	-	0.16	0.12	-	0.1

※ 「その他」には溶解残渣を含む。AAL-S8-1の溶解処理で溶解残渣が発生したため、溶解処理方法の改善を行い、AAL-S8-6及びAAL-S8-8の処理を行い、残渣の量が低減した。

2. 模擬ALPS炭酸塩スラリー組成の設定根拠

(2) 模擬ALPSスラリー炭酸塩スラリー組成の設定方法

以下の考えにより組成を設定。

- ① 少量の元素は、ガラス溶融において大きな影響がないことから、元素組成として1wt%未満の元素は模擬しないものとする。
- ② Siは、主要なガラス形成元素であり、ガラス溶融処理においてはスラリーに含まれているほうが有利となる。ただし、AAL-S1-1のようにSiが少ない炭酸塩スラリーも存在する。このようなSiが非常に少ない炭酸塩スラリーの脱水物においてもガラス溶融処理が可能であることを確かめるために、模擬スラリーにはSiを含めないものとする。
- ③ AAL-S1-1は、炭酸塩スラリーの主要元素であるCaとMgの組成比がCa : Mg = 0.65 : 1とMgの比率が高い。しかしながら、建屋内滞留水の多くのサンプルは、CaのほうがMgよりも高く、AAL-S1-1の分析結果は特殊である。そのため、AAL-S1-1の分析結果は、模擬スラリーの設定においては除外する。
- ④ AAL-S8-1は、前頁の表下の注釈の記載の通り溶解残渣を再溶解せずに分析しており、同定されていない成分が多いことから、模擬スラリーの設定においては除外する。
- ⑤ 以上より、使用する分析結果は、AAL-S8-6およびAAL-S8-8とし、2つの平均値を採用し、模擬する物質は、 Na_2CO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 の3つとする。100%換算したこれらの物質の組成比が下表となる。

本事業で調整する模擬ALPS炭酸塩スラリーの組成

Na_2CO_3	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	CaCO_3
6.0%	38.8%	55.2%