

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)

2019年度-2020年度
1F水処理二次廃棄物処理へのGeoMelt®ICV™の適用性に
関する総合評価

2021年11月

株式会社 キュリオンジャパン/ *Veolia Nuclear Solutions Inc.*

目次

1. はじめに	3
2. 実施概要	8
3. 工学規模溶融試験	10
4. 基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学)	38
5. 基礎試験及びモデリング(2)(Cs揮発抑制メカニズムの研究)	47
6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計	49
7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価	63
8. 本事業のまとめ	82

1. はじめに：実施目的

- 中長期ロードマップでは、1F固体廃棄物をその性状を踏まえて安全かつ合理的な保管・管理を行うこと及び先行的処理（処分の技術的要件が決まる前に行う、処分を念頭に置いた、安定化、固定化のための処理）方法を合理的に選定する手法を構築することとしている。
 - 株式会社キュリオンジャパンが株式会社アトックス(ATOX)から受注したIRIDプログラムの2017年度と2018年度の研究成果(*)に続く補助事業として実施する、2019年度～2020年度「1F水処理二次廃棄物処理へのGeoMelt®容器内ガラス固化(ICV: In Container Vitrification)™の適用性に関する総合評価」プロジェクトは以下を目的とした。
 - ① 2018年度に1F水処理二次廃棄物の主要模擬廃棄物に対して実施したGeoMelt®ICV™の工学規模溶融試験により得られたガラスのセシウム保持率の結果に対して、工学規模溶融試験のプロセス及び機器の改良により、セシウム保持性能を向上させる。
 - ② これらの研究開発試験の結果に基づいて、予備概念設計を行い、1F水処理二次廃棄物へのGeoMelt®ICV™の適用性に関する総合評価を行う。
 - ③ 廃棄物処理用ガラスデータベースの補完・拡充を行う。また、廃棄物組成変動と溶融温度の廃棄物含有率への影響に関するモデリング評価を行う。
 - ④ 実験室規模の溶融試験及びシミュレーションによりCs揮発の抑制効果の研究を行う。
- (*)：2018年度補正予算（固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発）の廃炉・汚染水対策補助事業によるインドラム式ガラス固化技術の適用性評価に関する調査。工学規模溶融試験1～3をこの調査（IRID プログラム、METI 補助事業）の中で実施。

1. はじめに: 実施体制

補助事業者

- ・プロジェクト管理、技術統括、報告書作成
- ・MRI/NDF/TEPCOとの連携・調整

Kurion Japan K.K.

Sadaaki ABETA: プロジェクトマネージャ

東京工業大学 (委託)

- ・ガラス固化に関する技術的専門知識 & 試験・研究能力
- ・Cs揮発抑制に関する研究を実施

KKテクノ (委託)

- ・日本の原子力発電所の工学的ノウハウと経験
- ・PCDのレビューを実施

原子力安全研究協会 (外注及び委託)

- ・ガラス固化体の処理と処分に
関する専門知識
- ・ガラス性能評価を実施

大栄環境 ホールディングス (外注)

- ・日本におけるGeoMelt® ICV™を
使用した有害廃棄物処理の産業
経験
- ・工学規模試験に関するレビューを
実施

Veolia Nuclear Solutions Federal Services (外注)

- ・PNNLが実施するレビューのとりま
とめ

Pacific Northwest National Laboratory

- ・東京工業大学の研究成
果報告書のレビュー

Veolia Nuclear Solutions Inc.

Marc ROOD: 副プロジェクトマネージャ

Veolia Nuclear Solutions Federal Services (外注)

- ・GeoMelt® ICV™に関する専門知
識
- ・工学規模試験等を実施
- ・世界の有害廃棄物及び原子力 廃
棄物処理における工学的ノウハウと
経験

Pacific Northwest National Laboratory

- ・ガラスの配合と分析を実施

CleanAir Engineering Inc.

- ・放出量測定と大気環境の
管理を実施

ALS USA

- ・ガラスサンプルの分析を
実施

Monarch Machine and Tool

- ・試験装置の配管及び サ
ポート工事

Techweigh Technics Industries

- ・供給容器と計量設備を
納入

1. はじめに: GeoMelt®ICV™の開発経緯

- GeoMelt®は放射性廃棄物等の有害廃棄物を安定なガラス固化体とする技術。米国エネルギー省(US DOE)のパシフィックノースウェスト国立研究所(PNNL)で開発され、1993年から商用化。
- GeoMelt®は当初、埋設された放射性廃棄物等の処理をその埋設場所(屋外)で行う「原位置(In-Situ)」ガラス固化 (GeoMelt® ISV™)として使用。
- GeoMelt®ICV™は、放射性廃棄物等を処理施設内に搬入、容器に収納し、その容器内でガラス固化を行う技術として開発。
- GeoMelt®ICV™により、これまでに26,000tonを超える廃棄物を処理。

GeoMelt® ICV™は日本で有害廃棄物の処理に使用されている。



GeoMelt® ICV™ – 10ton大栄環境有害廃棄物溶融処理施設、日本

GeoMelt®は多くの試験・運転実績を有する技術であり、日本と米国で本格的なプラントが稼働している。



**GeoMelt® ICV™ – 放射性試験装置:
500kgのセラフィールド溶融試験施設、英国**



**GeoMelt® ISV™ – マラリング核実験レンジ:
500tonの溶融処理場、豪州**



**GeoMelt® ICV™ – ハンフォード実証バルク固化システム
(DBVS): 50tonの溶融処理施設、米国**

1. はじめに: GeoMelt®ICV™の特徴(1/2)

① 容器内でのガラス溶融、固化(以降、右図参照)

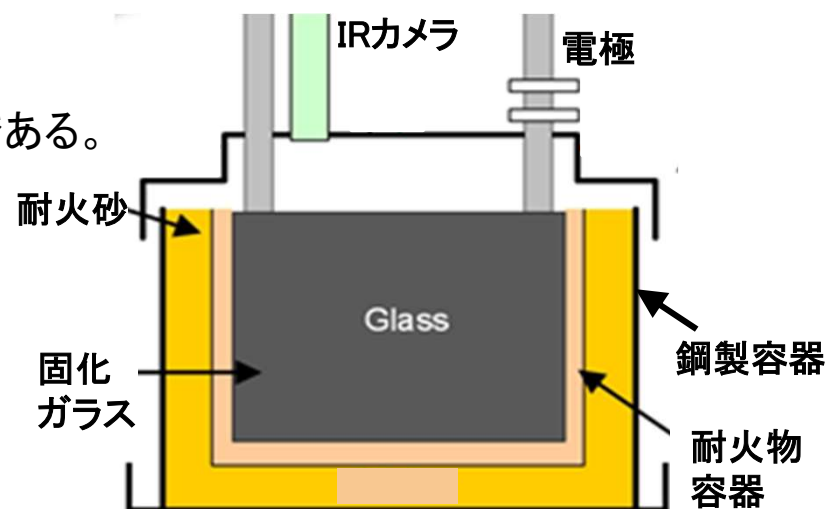
容器に廃棄物を供給しジュール加熱方式で溶融し、ガラスを流下しないでそのままガラス固化する技術である。

② 溶融容器と廃棄体が同一

ガラスの流下を行わないシンプルなバッチ処理で、溶融処理を行う溶融容器自体が処分する廃棄体となる。(バッチ毎に溶融容器を交換)

③ 溶融容器の構造

固化ガラスを収納する耐火物容器、その外側に断熱材としての耐火砂を配置し、最外部に鋼製容器を設置した構造を特色とする。



GeoMelt® ICV™ 溶融容器の構造

④ 溶融による耐火物容器への影響軽減

バッチ処理のため、流下を繰り返して長期に溶融を継続する溶融炉に比し、耐火物容器の腐食が小さく、より高温での溶融が可能である。

⑤ 高い廃棄物含有率が可能

ガラスを流下しないことから粘度を高くできるため、ガラス粘度を下げるためのガラス添加剤が少なく済むことから、その分、廃棄物含有率を高くできる。

⑥ 高粘性と高温溶融、ゼオライトによる共処理

粘度を高くできることにより高温での溶融ができるため、1Fのゼオライト及びチタン酸塩吸着剤等を高温溶融できる。また、ゼオライトは廃棄物のガラス化に必要なガラス形成材として活用可能であり、ゼオライト廃棄物の供処理によりガラス中の廃棄物含有率向上が可能である。

1. はじめに: GeoMelt®ICV™の特徴(2/2)

⑦ コールドキャップ管理による揮発性Csの放出抑制（下図参照）

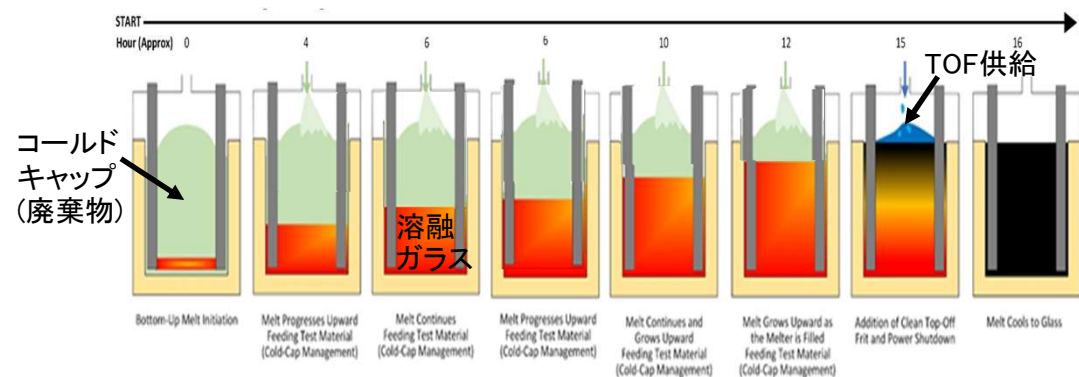
- ・容器内を上部まで廃棄物で充填した後、溶融を継続すると廃棄物の減容化により容器に廃棄物供給分の空き容積ができたところで廃棄物を追加供給する断続的な運転を継続する。この運転で溶融ガラス上に堆積した温度の低い未溶融廃棄物層（溶融ガラス上の低温層をコールドキャップと言う）を最大の厚さに維持する管理（コールドキャップ管理）を常に行うことにより揮発性Csのオフガス系への放出を抑制する。

これは、溶融ガラスを含めて廃棄物から揮発したCsが上部の温度の低いコールドキャップの粒子に凝縮することにより捕捉され、その後廃棄物供給とともに下降して溶融ガラスに取り込まれるものと推測される。

- ・溶融終盤になるとコールドキャップが薄くなるためクリーンなガラスフリット（トップオフフリット：TOF）をコールドキャップとして供給し、最後の廃棄物から揮発するCsをTOFにより凝縮・捕捉するとともに、最終的には溶けたTOFが廃棄物ガラスをカバーすることによりオフガス系へのCs放出を抑制する。

⑧ 幅広い容器規模

処理するニーズに応じて経済的な評価をした上で溶融規模を選択できる。容器は250 kg（工学規模）から最大50ton規模の実績がある。



GeoMelt® ICV™ のコールドキャップ管理

2. 実施概要:2019年度～2020年度のプロジェクト範囲(1/2)

工学規模溶融試験 (VNSFSで実施)

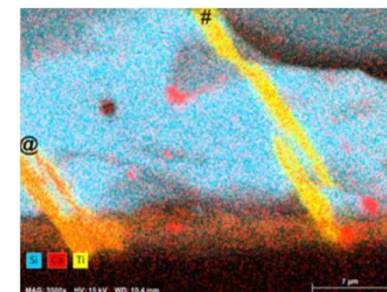
- 1F水処理二次廃棄物の模擬廃棄物(1F模擬土壌を含む)を対象としたガラス溶融試験(溶融試験4-8実施)
- 溶融処理操作(コールドキャップ管理を含む)の実証、溶融の緊急停止後の遠隔による溶融再開の実証
- ガラス溶融試験におけるCs、Srのオフガスへの移行量測定、ガラス固化体へのCs、Sr保持率の評価



GeoMelt® ICV™ 工学規模溶融試験装置

基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学:PNNLで実施)

- 1F水処理二次廃棄物処理用ガラスデータベースの補完・拡充(ガラス配合の解析、るつぼ試験、生成したガラスの詳細分析)
- ガラス組成(含有する廃棄物の種類・量)がガラス性能に与える影響評価、低溶融温度ガラスの性能評価(ガラスのモデリングによる解析)
- ガラスサンプルの詳細分析、浸出試験(MCC-1試験)



工学規模溶融試験ガラスの変質層の
SEM-EDS

基礎試験及びモデリング(2)(Cs揮発抑制メカニズム研究:東工大で実施)

- コールドキャップにおけるCs揮発抑制メカニズム解明のためのるつぼ試験、計算機シミュレーションモデルによる解析

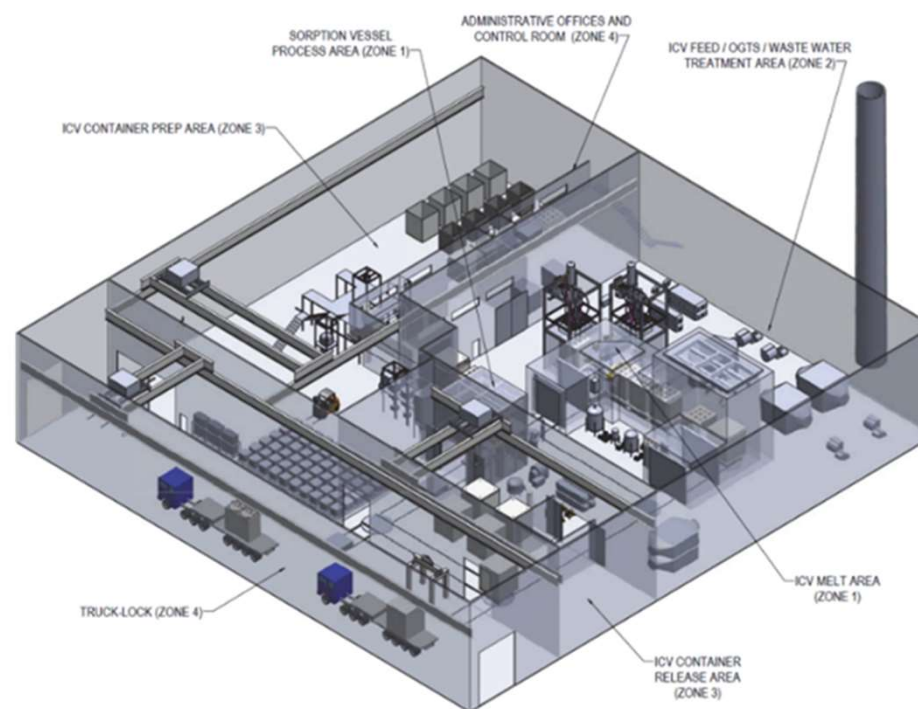


加熱後に取り出した石英
ビーカー内の溶融ガラス

2. 実施概要:2019年度～2020年度のプロジェクト範囲(2/2)

GeoMelt®ICV™処理施設の予備概念設計及び評価(VNSFSで実施)

- GeoMelt®ICV™技術により、1F水処理二次廃棄物をガラス固化する施設を検討。
- 工学規模溶融試験や基礎試験・モデリングの結果及び他のGeoMelt®ICV™施設の経験実績を活用。
- 予備概念設計(Pre-conceptual Design)は概念設計の前段階の設計として、プロセス・機器配管・施設内レイアウト・廃棄物取扱い等の各システムについて検討、施設全体像を構築。
- 本施設について以下の観点から検討評価を実施。
 - － 運転性・保守性
 - － 製品パッケージ(ガラス固化体を収納した容器)の構成、機能
 - － 施設経済性
 - － 施設安全性
 - － 廃棄物の取り出し方法の比較
 - － ガラス性能(閉じ込め機能)



GeoMelt®ICV™処理施設 鳥観図

3. 工学規模溶融試験(1/28): 全体概要

工学規模溶融試験を5回実施(溶融試験4～8*)

①試験対象: 以下、「A+B」を模擬廃棄物、「A+B+C」を試験材料と称する。

- ・A: 1F水処理二次廃棄物の内、KUR-EH, KUR-TSG, ALPSスラリー**、AREVAスラッジを模擬した材料。
- ・B: GeoMelt®ICV™では、水処理二次廃棄物の内、アルミノ珪酸塩鉱物ベースの廃棄物(KUR-EHなどのゼオライト)を、他の水処理二次廃棄物の処理に必要なガラス形成材として使用可能。
- ・C: これらに粘度低下、耐久性向上、溶解度増加のためのガラス添加剤(B_2O_3 、 $LiCO_3$ など)を加え、試験対象物質を配合。
- ・この配合割合は、PNNLが解析設定し、るつぼ試験で確認したガラス組成に対応。

②試験目的:

- ・確実な溶融処理(溶融炉操作)の実証: 溶融温度測定による溶融状態の把握、溶融炉上面のコールドキャップ状態のカメラ観察、廃棄物の追加供給及びトップオフフリット供給の的確な実施によるコールドキャップ管理の実現。
- ・溶融停止後の遠隔による溶融再開方法の実証。
- ・高いCs保持率の実証: 2018年度溶融試験1-3の結果(90%以上であったが試験毎のばらつきが大)に対してより高く安定した保持率の達成。確実なコールドキャップ管理に加え、以下の要因がCs保持率に与える影響を把握。
溶融表面積/体積比の比の減少、
4電極と2電極溶融炉による違い(後者は溶融表面積小)、
溶融開始方式の違い(トップダウン、ボトムアップ)、
試験材料の含水率

③取得データ等:

- ・Cs保持率は、Csのオフガスへの移行量をスタックサンプリング及び試験終了後のオフガス配管等の拭き取りサンプルの分析より算出、
- ・ガラスサンプルのSEM-EDS等分析によりガラスの均質性等を確認。
- ・ガラスサンプルはPNNLにて詳細分析(二次相の観察等)、長期浸出試験を実施

① 1F水処理二次廃棄物処理へのGeoMelt®ICV™の適用性に関する総合評価

工学規模溶融試験の実施内容一覧

試験*	溶融炉/ 溶融開始方式	目的	模擬廃棄物
溶融 試験 4	4電極溶融炉 トップダウン	・溶融処理操作の実証 ・高いCs保持率の達成	KUR-EH+TSG
溶融 試験 5	2電極溶融炉 ボトムアップ	(同上)	KUR-EH+ALPS スラリー
溶融 試験 6	2電極溶融炉 ボトムアップ	(同上)	KUR-EH+TSG
溶融 試験 7	2電極溶融炉 ボトムアップ	(同上)	KUR-EH+AREVA スラッジ
溶融 試験 8	2電極溶融炉 ボトムアップ	・ガラス形成材として模擬 土壌の適用性を確認 ・溶融停止後の溶融再開 を実証	模擬土壌 (1F土壌組成に基づく)

*試験番号は、2017～2018年度プロジェクトで実施した3つの工学規模溶融試験に継続して付番。
溶融試験5～7で用いた模擬廃棄物は、上記プロジェクトの溶融試験 1～3で使用した模擬廃棄物と同様。

**KUR-EH はKurionの工学ハーシュライト。ゼオライト材料で、Cs-134とCs-137をイオン交換。KUR-TSG はKurion の粒状チタノシリケート。シリコチタネート材料で、Sr-90をイオン交換。ALPSスラリーは炭酸塩及び鉄共沈スラリーであり、多核種除去用に使われる吸着剤。

3. 工学規模溶融試験(2/28): 模擬廃棄物とトレーサーの準備

- 溶融試験4-7で使用するCsの質量は、1FのKUR-EHイオン交換容器内のCs-137の平均放射能から算出した。
- 150gのCsClを320Lの水に溶解させた。
- 168kgのKUR-EH*を水に加えた。
- KUR-EHと水をロータリードラムミキサーで混合した。
- 水をサンプリングして、CsがKUR-EHに吸着したことを確認した。
- 水に移した後、Cs吸着KUR-EHを太陽光乾燥ステーションで乾燥させた。
- 乾燥したら、KUR-EHを他の1F模擬廃棄物(KUR-TSG**、またはALPS炭酸塩及び鉄共沈スラリー***、またはAREVAスラッジとガラス添加剤、水及びSrCO₃)と混合した。
- 混合後、この試験材料を5ガロン(19 L)のバケツに小分けした。
- 主要組成及びトレーサー(Cs、Sr)化学特性のラボ分析用に各バケツからサンプリングした。

* KUR-EH はKurionの工学ハッシュライトである。これはゼオライト材料で、1F汚染水からCs-134とCs-137をイオン交換する。ガラス形成材として配合する

** KUR-TSG はKurionの粒状チタノシリケートである。これはシリコチタネート材料で、1F汚染水からSr-90をイオン交換する。

*** ALPS炭酸塩及び鉄共沈スラリーは、多核種除去用に1Fで使用される廃棄物吸着剤である。



太陽光乾燥ステーション



ロータリードラムミキサー

3. 工学規模溶融試験(3/28): 溶融試験4

溶融試験4の目的

- トップダウンによる溶融開始を実証する。
- 同じ配合の模擬廃棄物を使用している溶融試験2からのCs保持率向上を図る。

KUR-EH はKurionの工学ハッシュライトである。これはゼオライト材料で、1F汚染水からCs-134とCs-137をイオン交換する。

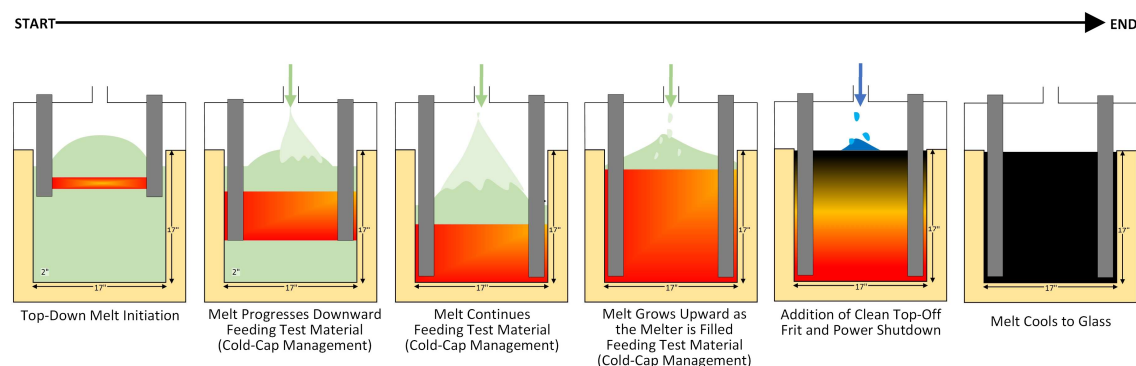
KUR-TSG はKurionの粒状チタノシリケートである。これはシリコチタネート材料で、1F汚染水からSr-90をイオン交換する。

溶融試験4の配合表

成分	質量(kg)	割合(wt%)
KUR-EH	134.00	61.19
KUR-TSG	47.20	21.55
ガラス添加材	37.80	17.26
小計	219.00	100.00
水	20.00	KUR-EHで水分15%; 全体で9%の水
合計	239.00	
トレーサー:		
CsCl	150.00 g	
SrCO ₃	165.00 g	

溶融試験4の結果

- 溶融炉に投入したすべての材料を処理した。
- 廃棄物含有率は、ガラス中の化合物を酸化物で換算したガラス酸化物ベースで76.60%だった。供給した化合物で換算した乾燥供給物ベースでは、廃棄物含有率は77.44%だった。
- ガラス中のCs保持率は99.44%で溶融試験2とほぼ同じ。ガラス中のSr保持率は99.99%。



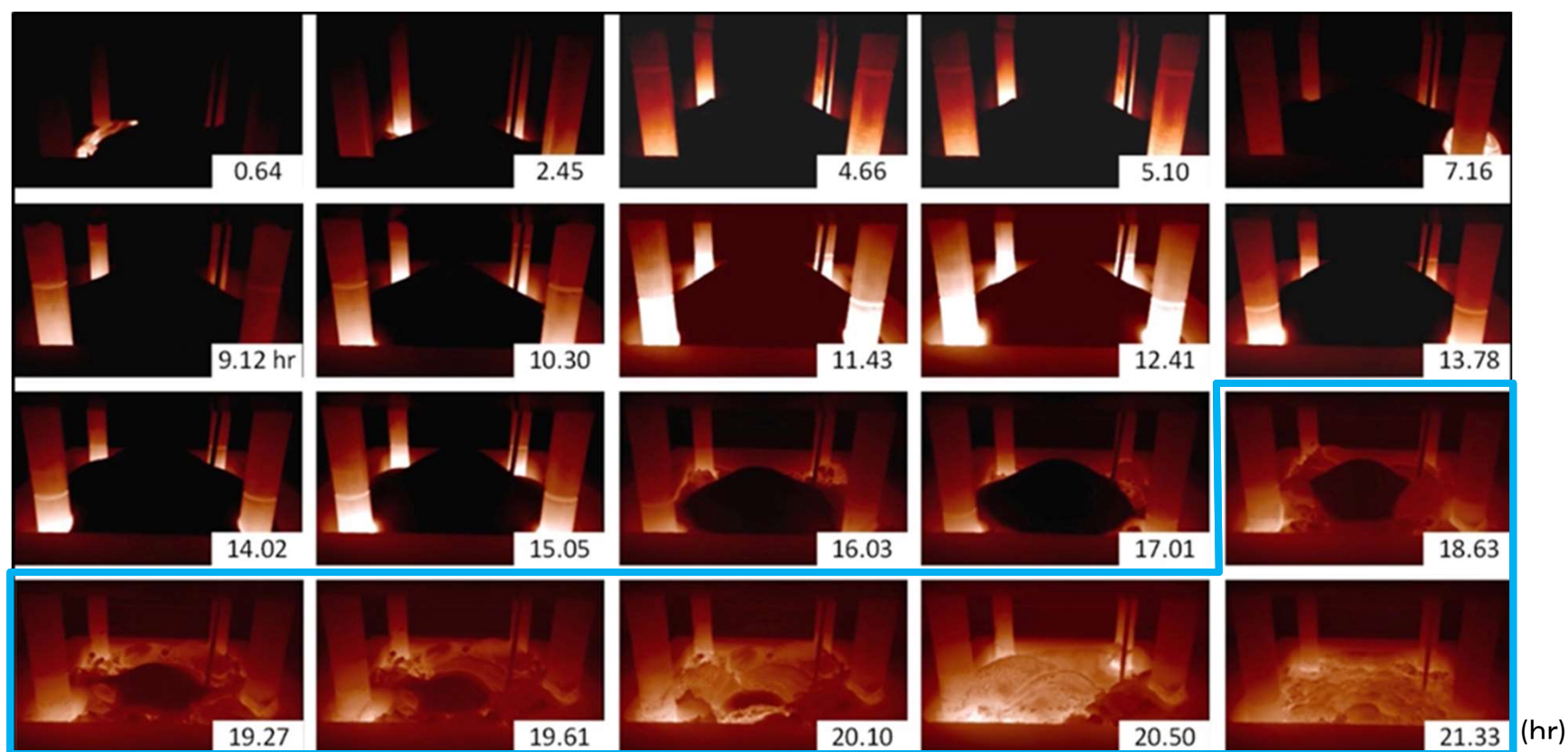
トップダウンによる溶融開始から完了までのGeoMelt® ICV™ の図解



4電極溶融炉

3. 工学規模溶融試験(4/28): 溶融試験4の溶融炉内の赤外線カメラ画像

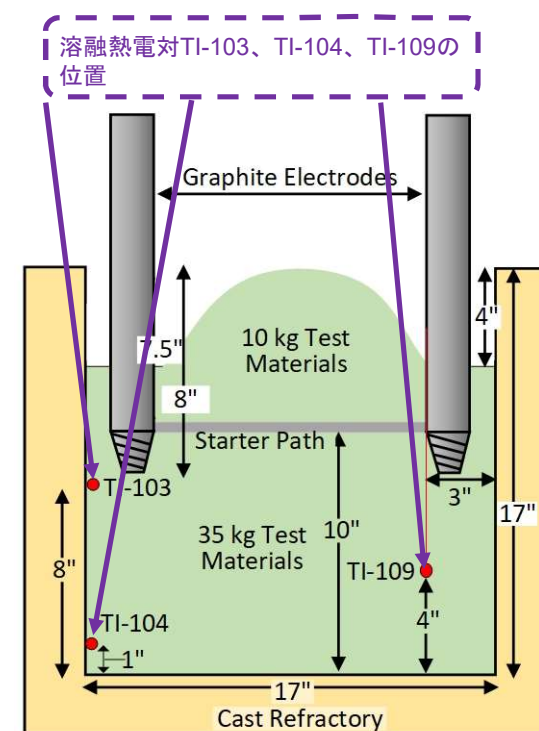
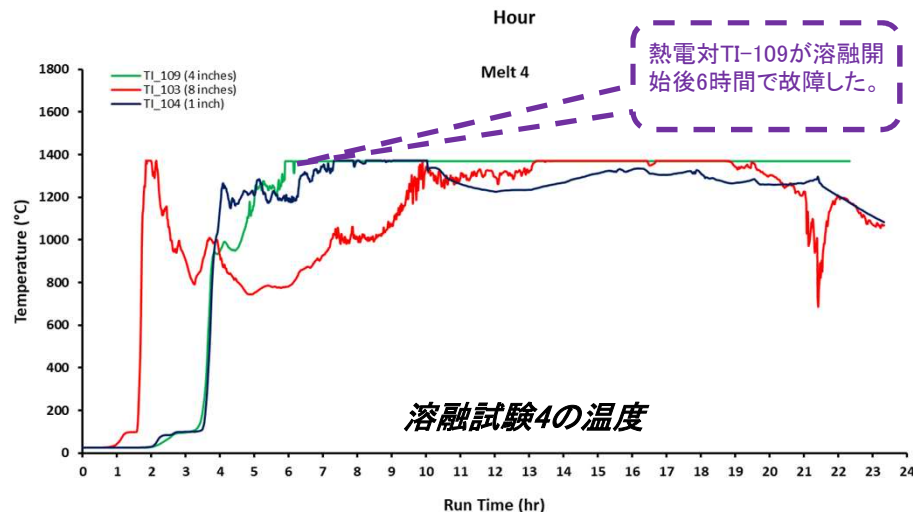
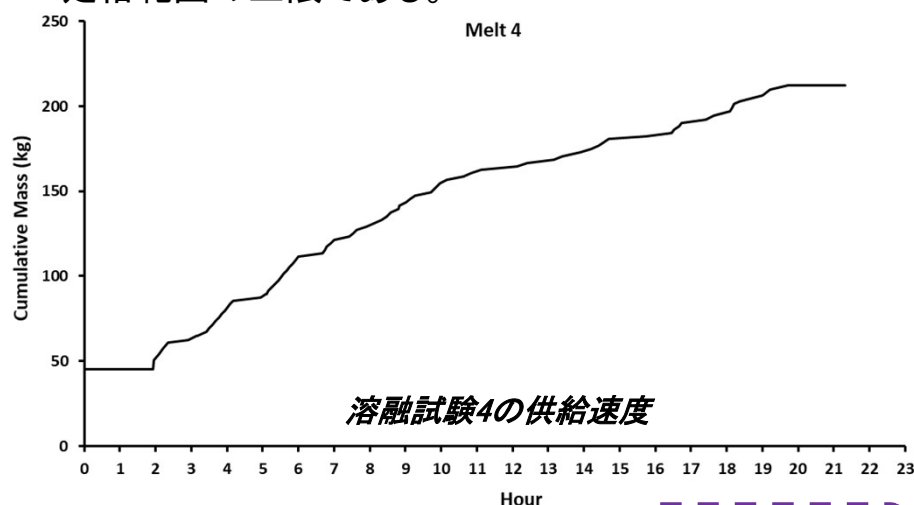
- 溶融を赤外線ビデオカメラで継続的に監視する。
- 模擬廃棄物の溶融に伴い、溶融炉の上部に空き空間が生じる。
- 溶融炉の空き空間に、模擬廃棄物を投入する。
- 最後に模擬廃棄物を含まないガラスフリットを投入し、Csの放出を抑制する。
- すべての材料が溶融したら、電源を切り、ガラスを冷却する。



溶融試験4の赤外線画像のシーケンス(青色の枠はTOF供給後の状態を示す)

3. 工学規模溶融試験(5/28): 溶融試験4の供給速度と溶融温度

- 加熱前に投入する試験材料は45kgで、運転中に167kgの試験材料を溶融炉に投入した。なお、試験材料は、KUR-EH+KUR-TSG+ガラス添加材から成る模擬廃棄物。
- 溶融炉内に熱電対を取り付け、溶融の進行を監視した。
- この溶融試験ではK型熱電対を使用し、記録した最高温度は1371℃だった。これはK型熱電対の測定温度の定格範囲の上限である。



溶融開始時の容器内状況

3. 工学規模溶融試験(6/28): 溶融試験4のガラス中のCsとSrの保持率

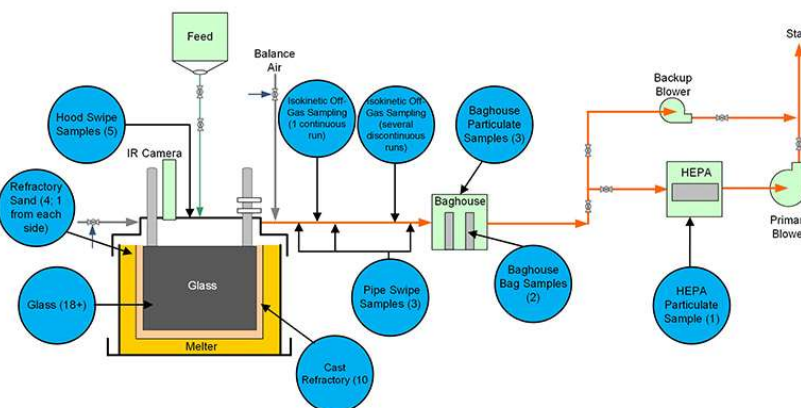
- 連続等速スタックサンプリングによって、溶融炉から放出されるCsとSrの質量を連続的に求める。
- 溶融炉フードとオフガス配管の内面を拭き取りサンプリングして、連続等速スタックサンプリング箇所の前に付着したCsとSrの質量を求めた。拭き取りサンプルの位置については、次のページを参照のこと。
- 放出された質量を付着したCsとSrの質量に加算し、アウトプット質量を求める。
- インプット質量は、試験供給物内のCsとSrの質量である。
- 溶融炉からオフガスへの成分の損失を説明する2つの標準的な方法がある: 1) ガラス中の保持率(v_i)とはガラスに保持される供給物の*i*番目の成分の割合であり、2) 除染係数(DF_i)とは、*i*番目の成分のインプットとアウトプットの比率である(この場合、アウトプットは溶融炉からオフガスを移動)。これらの2つの係数は次のように関連している。

$$v_1 = 1 - \frac{1}{DF_i} \times 100$$

ここで、

$$DF_i = \frac{\text{input mass}}{\text{output mass}}$$

CsとSrのインプット質量は、CsとSrの平均濃度に供給物の質量を掛けたものである。アウトプット質量は、放出速度に試験時間を掛け、この積をオフガス配管の1カ所目(連続等速スタックサンプリング箇所にあるので測定していない)から求めた質量に加算し、さらにフードの拭き取りサンプリング、及び耐火砂と耐火物容器を分析して求めた質量に加算して算出する。オフガス配管の2カ所目と3カ所目、バグハウスバッグ及びHEPAフィルターのCsとSrの質量は、連続等速スタックサンプリングの結果に相当するため、この計算には含まない。



- 溶融試験4の計算に使用した値を以下に提示する。

Melt 4 Results

	Input Mass
	Mass in feed (g)
Cs	85.72
Sr	217.93

供給物サンプルの
分析値

Mass in off-gas (g)	Mass in Hood, First Section of Pipe, Refractory Sand, and Cast Refractory (g)	Output Mass
0.466	0.016	0.482
0.017	0.002	0.019

連続等速スタック
サンプリングの分
析値

配管とフード拭き取り、耐火
砂及び耐火物容器サンプル
の分析値

$DF = \frac{\text{input_mass}}{\text{output_mass}}$
177.78
11363.16

除染係数は、CsとSrのイン
プット質量とアウトプット質量
の比率

$\text{Retention in glass} = 1 - \frac{1}{DF} \times 100$
Retention in glass (%)
99.44
99.99

ガラス中の保持率は良好

3. 工学規模溶融試験(7/28): 溶融試験4のCsとSrの分布

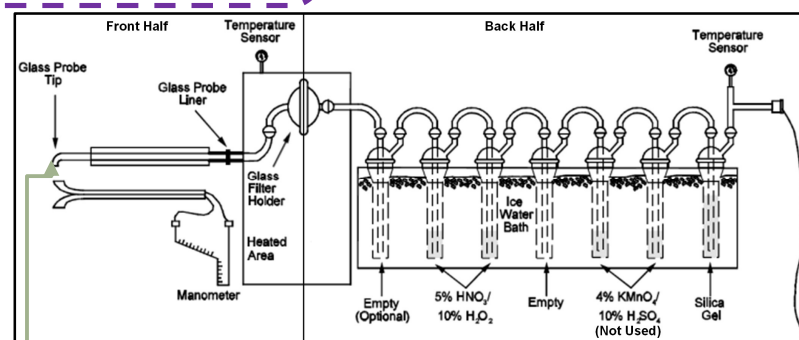
- 溶融炉フード内部、配管及びフィルタからCs 0.25gとSr 0.05gを検出した。
- CsとSrの濃度から自然起源の濃度を差し引くと、耐火物容器ではCs またはSrは検出されなかった。
- 0.25 gのCsは、ガラス中の保持率99.70%に相当し、連続等速スタック サンプルングの結果(99.44%)とよく一致する。

前ページに提示した計算では、溶融炉フード、配管の1カ所目、耐火砂及び耐火物容器のCsとSrの質量の合計を使用している。前ページの計算には、オフガス配管の1カ所目の結果のみを使用していることに留意されたい。このページに提示した結果は、3箇所 の配管すべてのCsとSrの合計を表している。

場所	Cs		Sr	
	(g)	%	(g)	%
耐火砂	0.00003	0.01	0.00007	0.15
耐火物容器	0.00	0.00	0.00	0.00
溶融炉フード	0.01	5.63	0.00	2.16
オフガス配管	0.02	1.40	0.003	3.61
バグハウス	0.13	53.10	0.001	1.14
HEPA フィルタ	0.10	39.87	0.04	92.94
合計	0.25	100.00	0.05	100.00

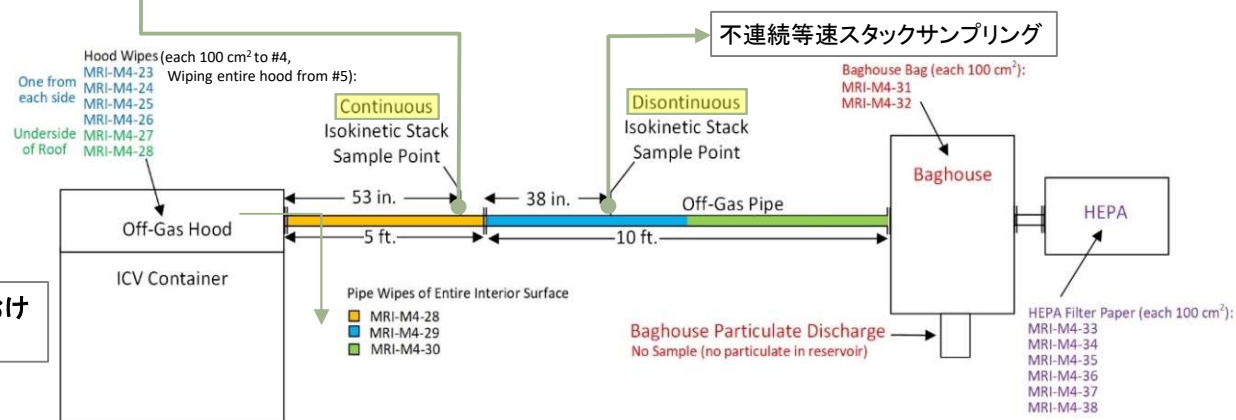
CsとSrの保持率

連続等速スタックサンプルング



← EPAメソッド5のサンプルトレイン

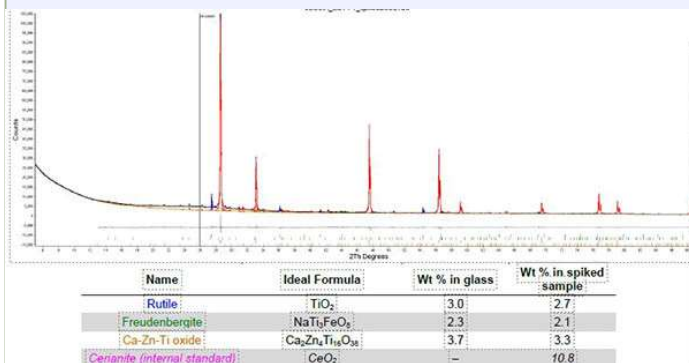
プロセスサンプルングにおける サンプルングの位置



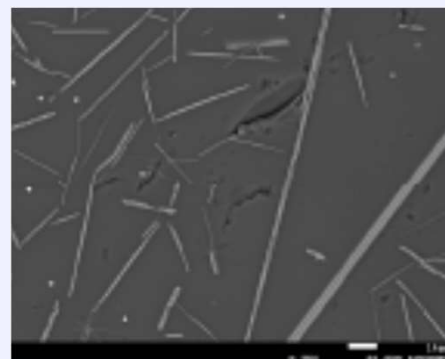
3. 工学規模溶融試験(8/ 28): 溶融試験4のガラス

- ・ 検査とサンプル採取用にガラスを4つの断片に切断した。
- ・ ガラスは半結晶性で、灰色の結晶と灰黒色のガラスがあった(下図参照)。
- ・ サンプルを4つの断片から採取した。右図に提示したCs濃度は、4つの断片に切断する前の2等分の面に投影した形で示したサンプリング場所からのものである。
- ・ ガラス中のCs濃度のばらつきは小さく、ほぼ均質である。

PNNLは、バルクガラス(塊り状のガラスサンプル)の走査型電子顕微鏡法-後方散乱電子・エネルギー分散型X線分光法(SEM-BSE/EDS)及びX線回折(XRD)を実施した。結晶はさまざまな酸化チタンである。



溶融試験4ガラスのXRDの結果



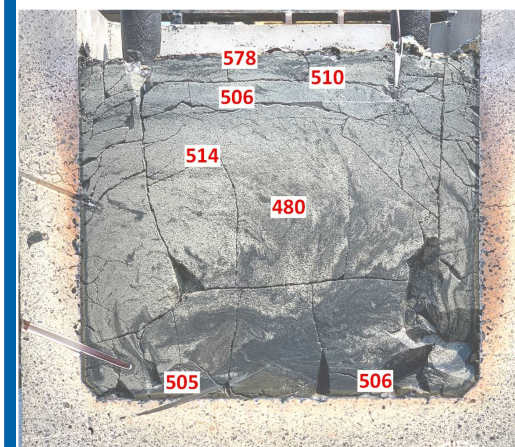
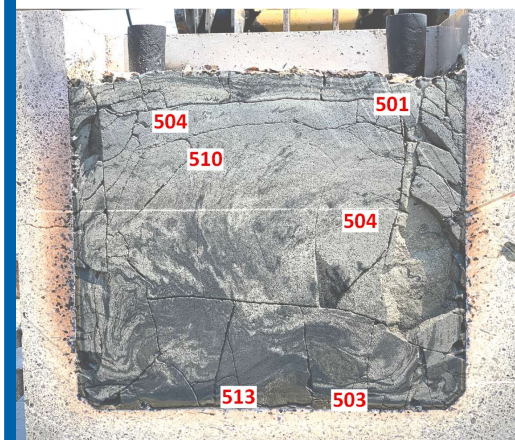
溶融試験4ガラスのSEM-BSE画像



SEM-EDS 画像(Ti)

ガラス中のCs濃度(mg/kg)

溶融試験4 (KUR-EH + TSG)



3. 工学規模溶融試験(9/28): 溶融試験5

溶融試験 5の目的

- ・ オフガスへのCs移行量を減らす可能性のある2電極の低表面積溶融炉を採用。
- ・ 2018年度に実施の溶融試験1のCs保持率(91.46%)を向上させる。1) 厳密なコールドキャップの管理と 2) 表面積の小さい溶融炉によって向上すると予想した。

溶融試験 5 の結果

- ・ 溶融炉に投入したすべての試験材料を処理した。
- ・ 廃棄物含有率は、ガラス中の化合物を酸化物で換算したガラス酸化物ベースで75.55 %だった。供給した化合物で換算した乾燥供給物ベースでは、廃棄物含有率は71.70 %だった。
- ・ ガラス中のCs保持率は97.72%。ガラス中のSr保持率は100%。

溶融試験5 の配合表

成分	質量 (kg)	割合 (wt%)
KUR-EH	116.16	56.97
ALPS炭酸塩スラリー	39.74	19.49
ALPS鉄共沈スラリー	10.56	5.18
ガラス添加材	37.43	18.36
小計	203.89	100
水	22.11	KUR-EHベースで水分19%; 全体で10%の水
合計	226	
トレーサー:		
CsCl	150.00 g	
SrCO ₃	165.00 g	

ALPS炭酸塩及び鉄共沈スラリーは、多核種除去用に1Fで使用される廃棄物吸着剤である。



2電極溶融炉

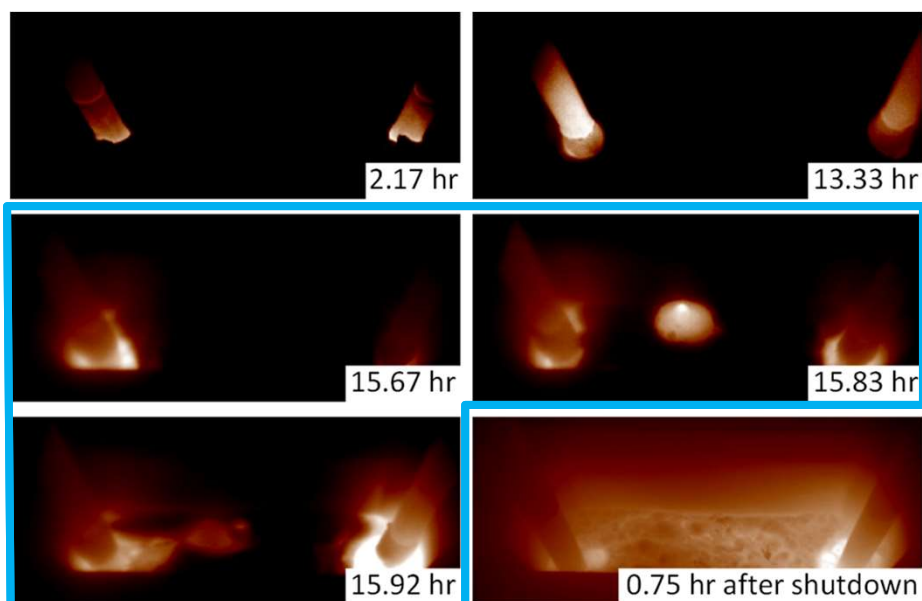
4電極溶融炉と2電極溶融炉の体積は同じだが、2電極溶融炉の表面積ははるかに小さい(正方形の電極配列ではなく長方形の電極配列)。表面積がより小さいことで、オフガスへのCsフラックスが低減すると想定した。

	4電極溶融炉	2電極溶融炉
表面積 (cm ²)	1865	1266
体積 (L)	80	80
表面積/体積	23.31	15.83

3. 工学規模溶融試験(10/28): 溶融試験5の溶融炉内の赤外線カメラ画像

溶融試験 5 の赤外線 カメラ画像

- 溶融試験5では、最後のトップオフフリットが溶融し始めた15.67時間後まで、コールドキャップは適切に管理されていた。
- トップオフフリットが完全に溶融した時点で溶融炉に投入したすべての試験材料がガラス化されたため試験を終了した。



溶融試験5の赤外線画像(青色の枠はTOF供給(15.0~16.3h)の状態を示す)



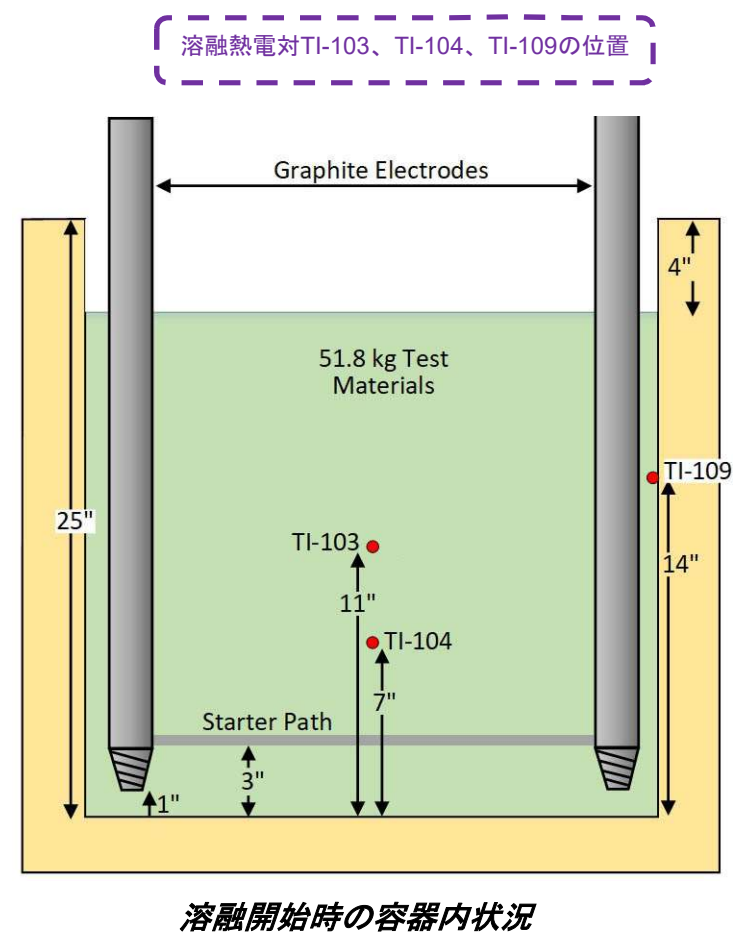
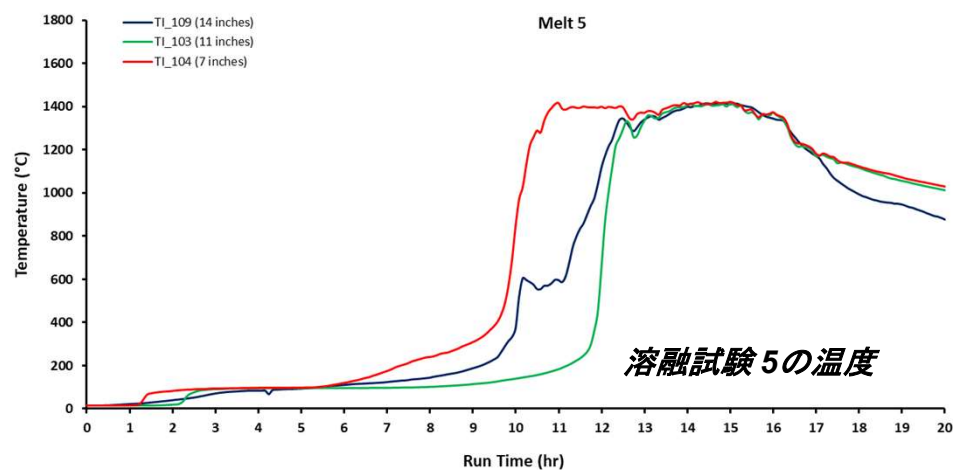
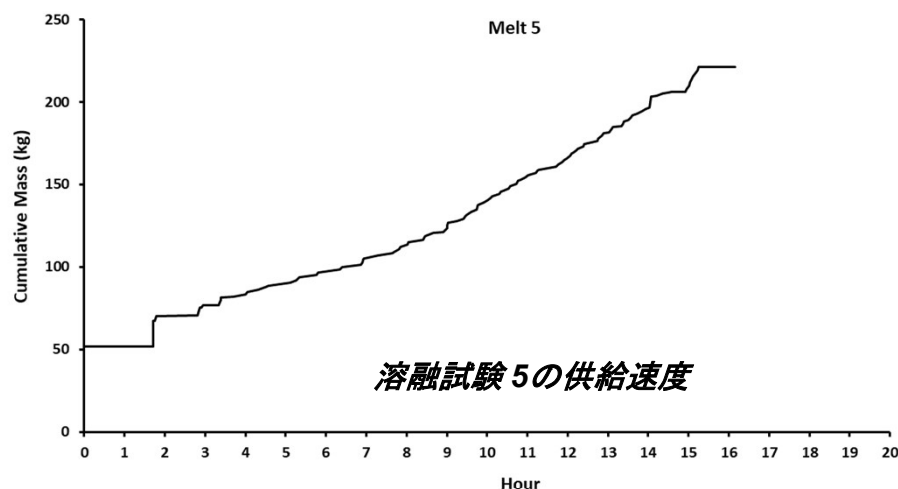
溶融試験5終了時の赤外線画像



切断及びサンプリング前のガラス表面

3. 工学規模溶融試験(11/28): 溶融試験5の供給速度と溶融温度

- 加熱前に投入する試験材料は51.8kgで、運転中に160kgの試験材料を溶融炉に投入した。なお、試験材料は、KUR-EH+ALPSスラリー+ガラス添加材から成る。
- この溶融試験ではR型熱電対を使用し、記録した最高温度は1421℃だった。



3. 工学規模溶融試験(12/28) : 溶融試験5のCsとSrの分布

- 溶融炉フード内部、配管、フィルタからCs 0.9481gとSr 0.0077gを検出した。
- CsとSrの濃度から自然起源の濃度を差し引くと、耐火物容器ではCsまたはSrは検出されなかった。
- 0.9481 gのCsは、ガラス内の保持率98.90%に相当し、連続等速スタックサンプリングの結果(97.72 %)とよく一致する。



Cs及びSr分析用の配管拭き取りサンプリング

場所	Cs		Sr	
	(g)	%	(g)	%
耐火砂	0.00	0.00	0.00	0.00
耐火物容器	0.0007	0.07	0.00	0.00
溶融炉フード	0.0399	4.21	0.0001	12.5
オフガス配管	0.0004	0.04	0.0001	12.5
バグハウス	0.2219	23.40	0.0006	75.00
HEPA フィルタ	0.6852	72.28	0.00	0.00
合計	0.9481	100.00	0.0077	100.00

Melt 5 Results

	Input Mass Mass in feed (g)
Cs	86.09
Sr	221.69

	Mass in off-gas (g)	Mass in Hood, First Section of Pipe, Refractory Sand, and Cast Refractory (g)	=	Output Mass
	1.92	0.04		1.96
	0.007	0.0003		0.007

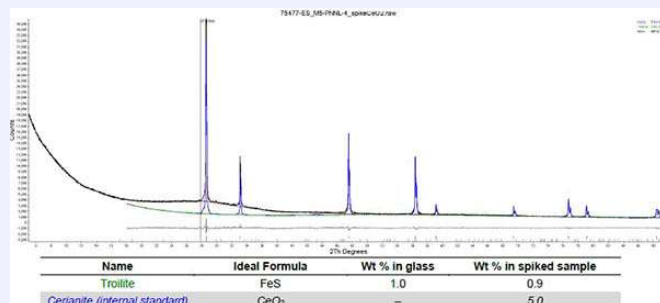
$DF = \frac{\text{input_mass}}{\text{output_mass}}$
43.91
29935.14

$\text{Retention in glass} = 1 - \frac{1}{DF} \times 100$
Retention in glass (%)
97.72
100.00

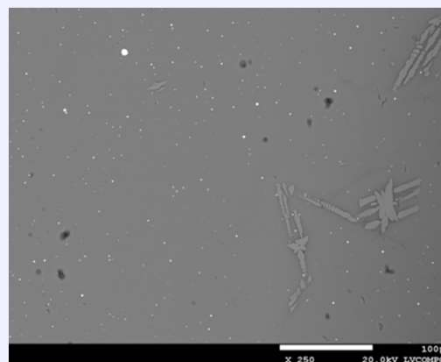
3. 工学規模溶融試験(13/28): 溶融試験5のガラス

- ・ 検査とサンプル採取用にガラスを4つの断片に切断した。
- ・ ガラスは非結晶性で、いくつかの小さなトロイライト(単硫鉄鋼)(FeS)ノジュールがあった。
- ・ サンプルを4つの断片から採取した。右図に提示したCs濃度は、4つの断片に切断する前の2等分の面に投影した形で示したサンプリング場所からのものである。
- ・ ガラス中のCs濃度のばらつきは小さく、ほぼ均質である。

バルクガラスの走査型電子顕微鏡法-後方散乱電子(SEM-BSE)は、いくつかの分散した金属ノジュールを示し、X線回折(XRD)でFeSであると確認した。



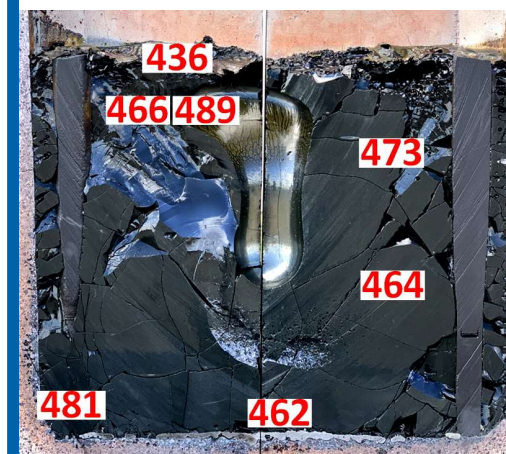
溶融試験5ガラスのXRDの結果



溶融試験5ガラスのSEM-BSE画像

ガラス中のCs濃度(mg/kg)

溶融試験5 (KUR-EH + ALPS)



3. 工学規模溶融試験(14/28): 溶融試験6の目的と結果

溶融試験 6の目的

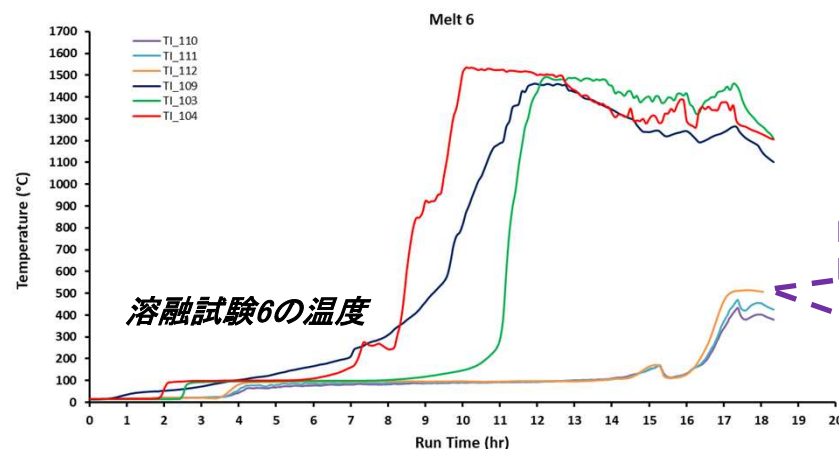
- ・ ボトムアップによる開始、2電極溶融炉
- ・ 2018年度に実施の溶融試験2の優れたCs保持率(99.30%)の再現

溶融試験 6の結果

- ・ 溶融炉に投入したすべての試験材料を処理した。最高溶融温度は1534°Cだった。
- ・ 廃棄物含有率は、ガラス中の化合物を酸化物で換算したガラス酸化物ベースで79.20 %だった。供給した化合物で換算した乾燥供給物ベースでは、廃棄物含有率は76.02 %だった。
- ・ ガラス中のCs保持率は98.77%。ガラス中のSr保持率は100%。

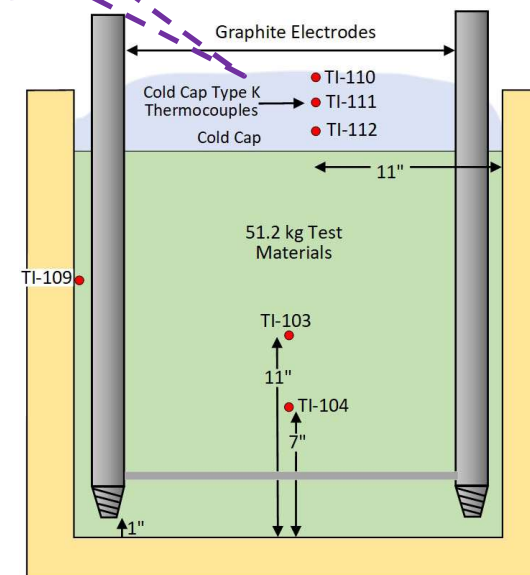
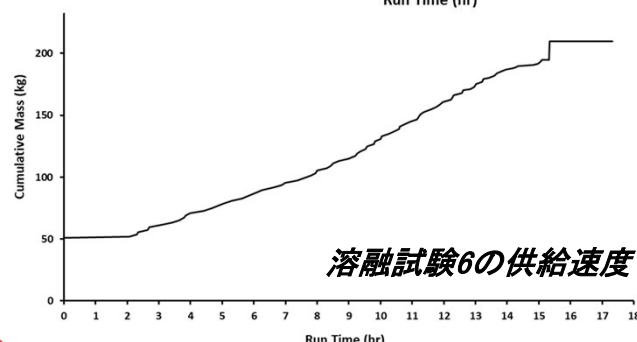
溶融試験6の配合表

成分	質量 (kg)	割合 (wt%)
KUR-EH	103.90	61.19
KUR-TSG	36.59	21.55
ガラス添加材	29.31	17.26
小計	169.80	100
水	24.90	KUR-EHで水分19%; 全体で13%の水
合計:	194.70	
トレーサー:		
CsCl	142.46 g	
SrCO ₃	156.71 g	



K型熱電対を廃棄物供給パイルの上部に取り付け、コールドキャップの温度を監視した。

コールドキャップは溶融中ずっと温度が低く、Csがコールドキャップ内で凝縮したことを示す。



3. 工学規模溶融試験(15/28): 溶融試験6のCsとSrの分布

- 溶融炉フード内部、配管及びフィルタからCs 0.2917 gとSr 0.0004 gを検出した。
- CsとSrの濃度から自然起源の濃度を差し引くと、耐火物容器ではCsまたはSrは検出されなかった。
- 0.2917 gのCsは、ガラス内の保持率99.67%に相当し、連続等速スタックサンプリングの結果(98.77%)とかなりよく一致する。



Cs及びSr分析用のバグハウスバッグサンプリング

場所	Cs		Sr	
	(g)	%	(g)	%
耐火砂	0.00	0.00	0.00006	15.81
耐火物容器	0.00	0.00	0.00	0.00
溶融炉フード	0.02	5.50	0.002	46.04
オフガス配管	0.0005	0.16	0.0001	38.15
バグハウス	0.12	42.62	0.00	0.00
HEPA フィルタ	0.15	51.72	0.00	0.00
合計	0.29	100.00	0.0004	100.00

Melt 6 Results

	Input Mass Mass in feed (g)
Cs	88.83
Sr	246.36

Mass in off-gas (g)	Mass in Hood, First Section of Pipe, Refractory Sand, and Cast Refractory (g)	Output Mass
1.07	0.02	1.09
0.008	0.0004	0.008

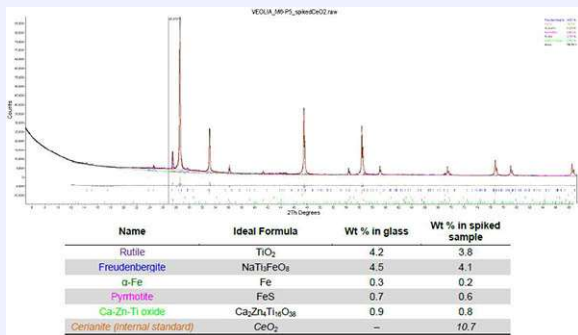
$DF = \frac{\text{input_mass}}{\text{output_mass}}$
81.37
30955.92

$\text{Retention in glass} = 1 - \frac{1}{DF} \times 100$
Retention in glass (%)
98.77
100.00

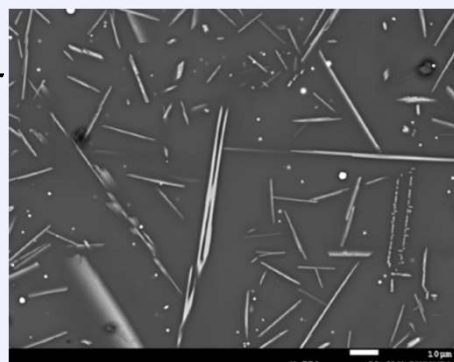
3. 工学規模溶融試験(16/28): 溶融試験6のガラス

- ・ 検査とサンプル採取用にガラスを4つの断片に切断した。
- ・ ガラスは、溶融試験4と同様のチタン相を持つ半結晶性だった。
- ・ サンプルを4つの断片から採取した。右図に提示したCs濃度は、4つの断片に切断する前の2等分の面に投影した形で示したサンプリング場所からのものである。
- ・ ガラス中のCs濃度のばらつきは小さく、ほぼ均質である。

バルクガラスのX線回折(XRD)によって、ルチル(TiO_2 、フロイデンベルグイト($\text{NaTi}_3\text{FeO}_8$)), クリクタイト($(\text{Sr,Ca})(\text{Ti,Fe,V,Cr})_{20}\text{O}_{38}$)及び少量の鉄相を確認した。



溶融試験6ガラスのXRDの結果



溶融試験6ガラスのSEM-BSE画像



SEM-EDS 画像 (Ti)

ガラス中のCs濃度 (mg/kg)

溶融試験6 (KUR-EH + TSG)



3. 工学規模溶融試験(17/28): 溶融試験7の目的と結果

溶融試験 7の目的

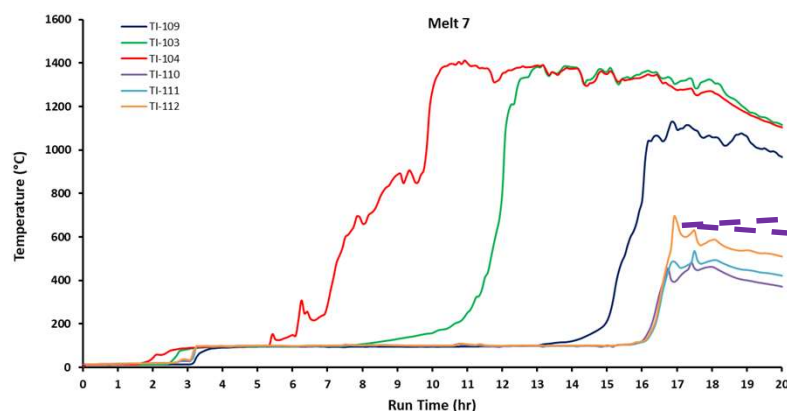
- ボトムアップによる開始、2電極溶融炉
- 2018年度に実施の溶融試験3のCs保持率の向上

溶融試験 7の結果

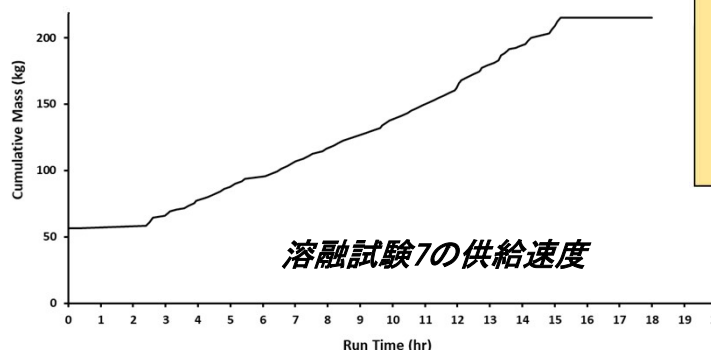
- 溶融炉に導入したすべての試験材料を処理した。最高溶融温度は1398℃。
- 廃棄物含有率は、ガラス中の化合物を酸化物で換算したガラス酸化物ベースで67.00 %。供給した化合物で換算した乾燥供給物ベースでは、廃棄物含有率は64.00 %。
- ガラス中のCs保持率は93.79%が98.47%へ向上。ガラス中のSr保持率は100%。

溶融試験7の配合表

成分	質量(kg)	割合(wt%)
KUR-EH	110.79	63.89
AREVA 模擬スラッジ	9.80	5.65
ガラス添加材	52.82	30.46
小計	173.41	100.00
水	26.59	KUR-EHベースで水分24%; 全体で13%の水
合計	200.00	
トレーサー:		
CsCl		127.65 g
SrCO ₃		140.41 g



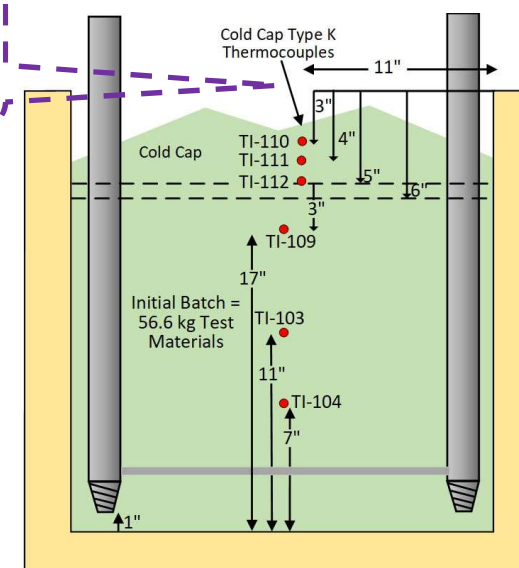
溶融試験7の温度



溶融試験7の供給速度

K型熱電対を廃棄物供給パイルの上部に取り付け、コールドキャップの温度を監視した。

コールドキャップは溶融終了時まで温度が低く、Csがコールドキャップ内で凝縮したことを示す。



溶融開始時の容器内状況

3. 工学規模溶融試験(18/28)：溶融試験 7 のCsとSrの分布

- 溶融炉フード内部、配管及びフィルタからCs 0.4937 gとSr 0.0901gを検出した。
- CsとSrの濃度から自然起源の濃度を差し引くと、耐火物容器ではCsまたはSrは検出されなかった。
- 0.4937 gのCsは、ガラス内の保持率99.42%に相当し、連続等速スタックサンプリングの結果(98.47%)とかなりよく一致する。



Cs及びSr分析用のHEPAフィルタサンプリング

場所	Cs		Sr	
	(g)	%	(g)	%
耐火砂	0.00	0.00	0.00	0.00
耐火物容器	0.00	0.00	0.00	0.00
溶融炉フード	0.00749	1.52	0.00005	0.06
オフガス配管	0.00168	0.34	0.00013	0.14
バグハウス	0.03385	6.86	0.00005	0.06
HEPA フィルタ	0.045072	91.29	0.08989	99.74
合計	0.4937	100.00	0.09012	100.00

Melt 7 Results

	Input Mass Mass in feed (g)
Cs	84.76
Sr	284.20

Mass in off-gas (g)	Mass in Hood, First Section of Pipe, Refractory Sand, and Cast Refractory (g)	Output Mass
1.29	0.01	1.30
0.002	0.0001	0.002

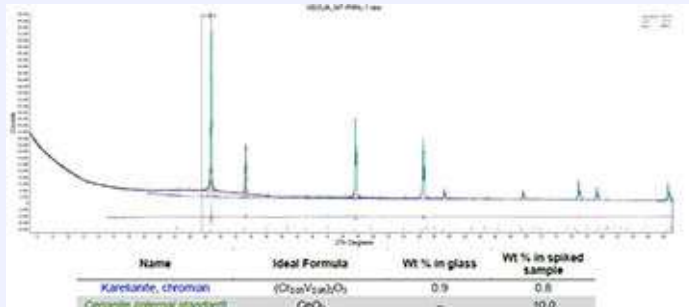
$DF = \frac{input_mass}{output_mass}$
65.30
149,510.49

$Retention\ in\ glass = 1 - \frac{1}{DF} \times 100$
Retention in glass (%)
98.47
100.00

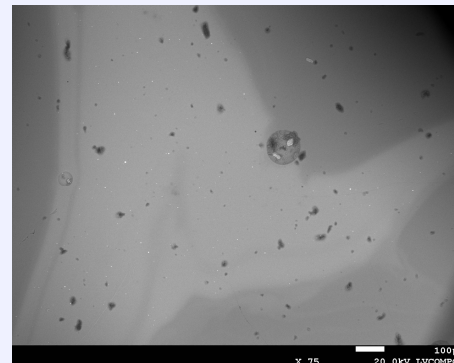
3. 工学規模溶融試験(19/ 28): 溶融試験7のガラス

- ・ 検査とサンプル採取用にガラスを4つの断片に切断した。
- ・ ガラスはアモルファスで均質であり、少量のカレリアナイト $[(Cr_{0.05}V_{0.95})_2O_3]$ 結晶が含まれていた。
- ・ サンプルを4つの断片から採取した。右図に提示したCs濃度は、4つの断片に切断する前の2等分の面に投影した形で示したサンプリング場所からのものである。
- ・ ガラス中のCs濃度のばらつきは小さく、ほぼ均質である。

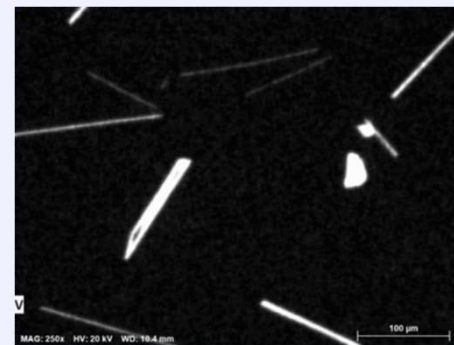
バルクガラスのX線回折(XRD)で、少量のカレリアナイト $[(Cr_{0.05}V_{0.95})_2O_3]$ を確認した。



溶融試験7ガラスのXRDの結果



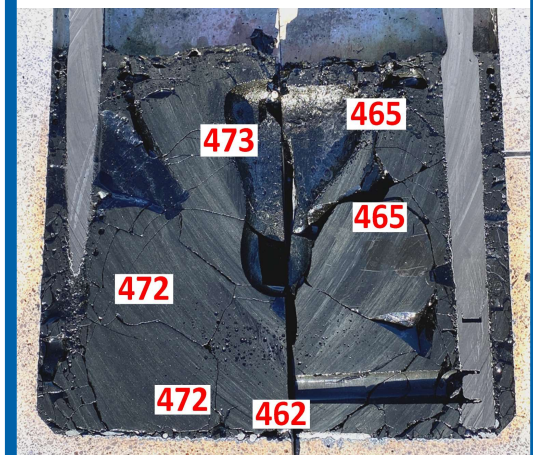
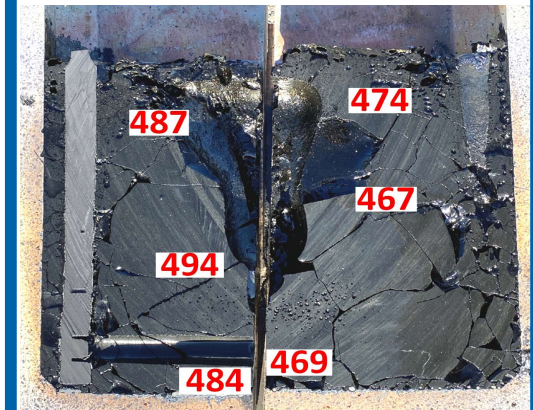
溶融試験7ガラスのSEM-BSE画像



SEM-EDS 画像(V)

ガラス中のCs濃度(mg/kg)

溶融試験7 (KUR-EH + AREVA)



3. 工学規模溶融試験(20/28): 溶融試験8の目的

溶融試験 8の目的

- ボトムアップによる開始、2電極溶融炉
- 事故・事象により溶融が緊急停止し、完全に固化したガラスを再溶融する場合を想定し、溶融の再開方法を実証する。
- 1F水処理二次廃棄物のガラス固化処理ではガラス形成材としてゼオライト(それ自体が廃棄物)を使用するが、ゼオライトを使い切った場合を想定して1F土壌をガラス形成材として使用するプロセスを実証する。

試料名	採取日	採取場所	採取深さ (cm)	重量 (g)	線量率 ^{※1} (μSv/h)
S2-D2-1	2015.3.24	Dエリア	0~5	106	13
S2-F1-1	2015.3.30	Fエリア	0~5	106	8
S2-I2-1	2015.4.16	Iエリア	0~5	105	6
S2-K2-1	2015.3.16	Kエリア	0~5	105	< 0.5
S2-L1-1	2015.4.20	Lエリア	0~5	106	< 0.5
S2-P1-1	2015.5.8	Pエリア	0~5	110	6

試料名	元素 (mg/g)							TOC (mg/g)
	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	
S2-D2	6.9	4	52.6	235	8.5	3.6	23.4	24.4
S2-F1	6.7	3.2	62.1	258	10.8	2.3	30.3	15.5
S2-I2	3.1	5.8	40.4	107	6.7	7.6	23.7	48.4
S2-K2	3.1	3.7	60.3	183	8.2	24.2	31.7	24.9
S2-L1	6.6	3.6	44.5	175	8.7	3	18.2	28.9
S2-P1	6.4	4.1	51.1	194	7.4	7.6	20.7	30.7



土壌試料採取場所

「廃棄物試料の分析結果(土壌、焼却灰、並びに水処理設備(セシウム吸着装置、多核種除去設備)出入口水)」技術研究組合 国際廃炉研究開発機構/日本原子力研究開発機構 平成29年3月30日

溶融試験 8の方法

- 1日目: 最初のバッチのボトムアップ処理+追加の試験材料投入。運転開始6.5時間後に想定に基づき電力供給を停止した。
- 4日間ガラスを冷却した。
- 2日目: フリットとスターターパスを遠隔により炉内の上部表面に設置。それに続きトップダウン処理による溶融再開+追加の試験材料投入+トップオフフリット投入を実施。溶融は運転13時間後に終了した。

1F 模擬土壌

成分	割合 (wt%)
HRTS 土壌	45.41
SiO ₂	38.16
Al ₂ O ₃	11.14
Fe ₂ O ₃	3.33
CaCO ₃	0.31
Mg(OH) ₂	0.53
K ₂ CO ₃	1.13
合計	100.00

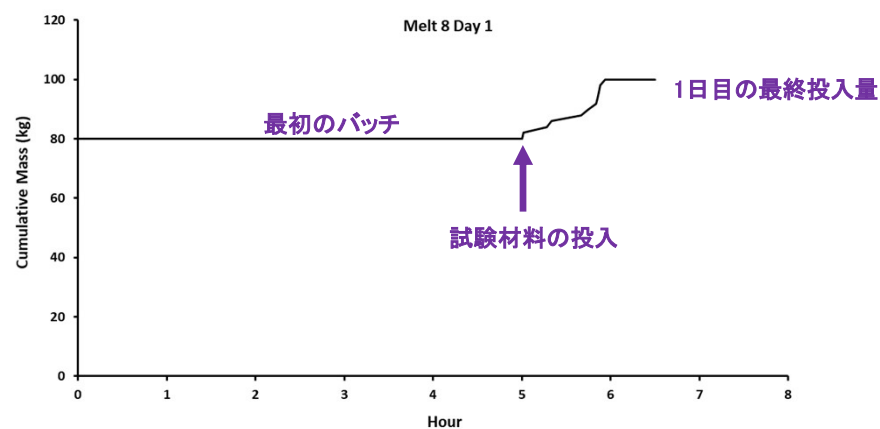
溶融試験 8の配合表

成分	質量 (kg)	割合 (wt%)
1F模擬土壌	74.31	60.00
ALPS炭酸塩スラリー	24.77	20.00
ガラス添加材	24.77	20.00
小計	123.85	100.00
水	11.15	水分15%、1F土壌ベース
合計	135.00	

1F模擬土壌は、2015年にIRIDが収集した6つの1F土壌サンプルの平均組成に近づくように、添加物と米国ワシントン州リッチランド工学規模試験場近傍の土壌(表中のHRTSは試験場の略称)を配合して準備した。

3. 工学規模溶融試験(21/28): 溶融試験8(1日目)

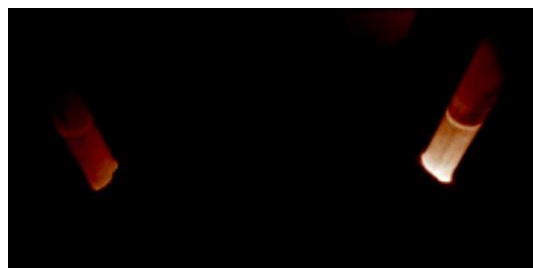
- 1日目はまず加熱前に80kgの試験材料を投入し、溶融開始。
- 試験計画に従って、運転中に試験材料20kgを溶融炉に投入。
- 事故・事象による緊急停止を模擬するため、溶融開始6.5時間後に溶融炉への電力供給を遮断。



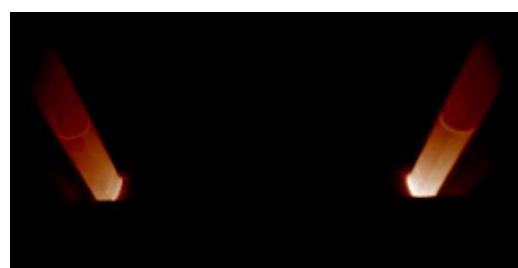
溶融試験8(1日目)の供給速度



80 kgの試験材料、供給配管、電極及び耐火物容器を設置した溶融炉の外観



2時間後の溶融炉内の赤外線画像



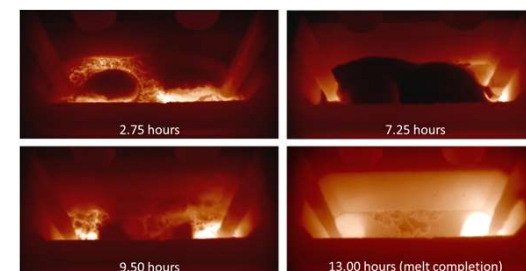
6.5時間後の溶融炉内の赤外線画像
(1日目の終わり)



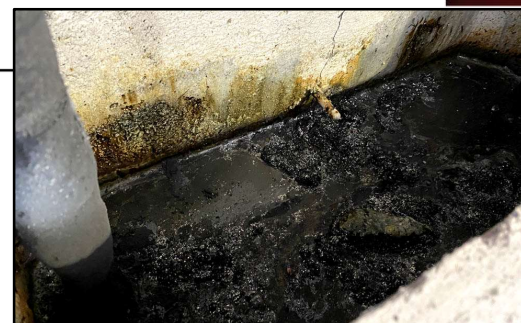
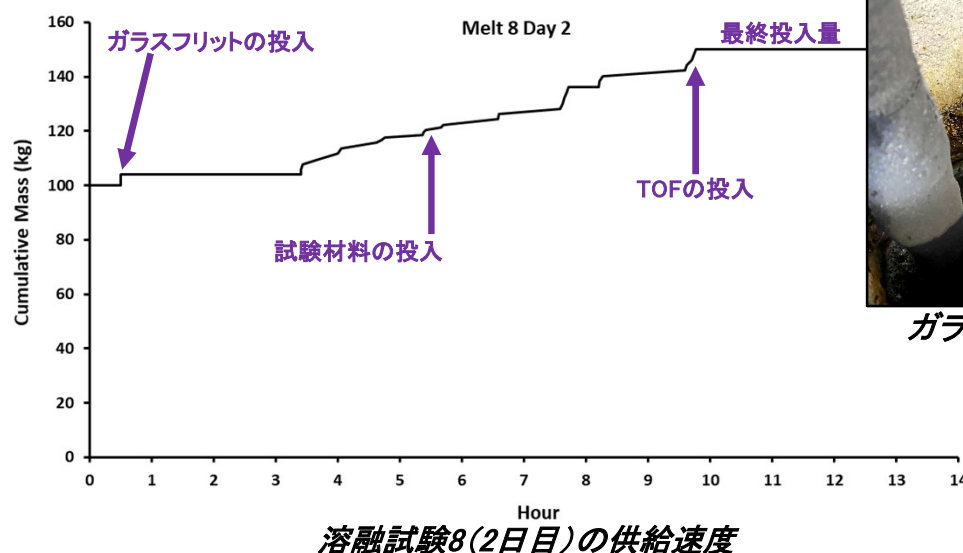
緊急停止を模擬した溶融炉の上部表面を示す画像。試験計画に従って溶融完了前に中断したため、未溶融の試験材料が確認できる。

3. 工学規模溶融試験(22/28): 溶融試験8(2日目)と結果

- ・ ガラスフリット4 kgを1日目の未溶融の試験材料の表面に投入。
- ・ スターターパス1.2kgをガラスフリット上に遠隔にて投入。
- ・ 溶融再開後、試験材料35kgを溶融炉に供給。
- ・ 溶融終盤にトップオフフリット(TOF)11kgを溶融炉に供給(運転中に投入したガラスフリット量は再開前供給の4kgと合わせて15kg)。

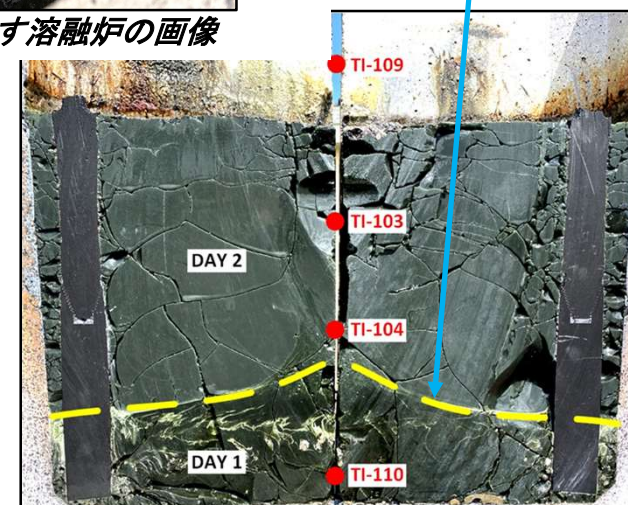


溶融試験8(2日目)の赤外線画像



ガラスの表面を示す溶融炉の画像

1日目のガラスは、冷却・固化され、2日目の溶融中に再加熱(焼き付け)されたため、2日目のガラスよりも暗く見える。



溶融試験8ガラスの断面

溶融試験 8 の結果

- ・ 溶融は計画通り再開され、成功した。
- ・ ガラス表面観察結果と1日目と2日目の溶融物中の熱電対による温度データより溶融炉に投入したすべての試験材料がガラス化されたことがわかる。ガラスを切断して検査し、これを確認した。

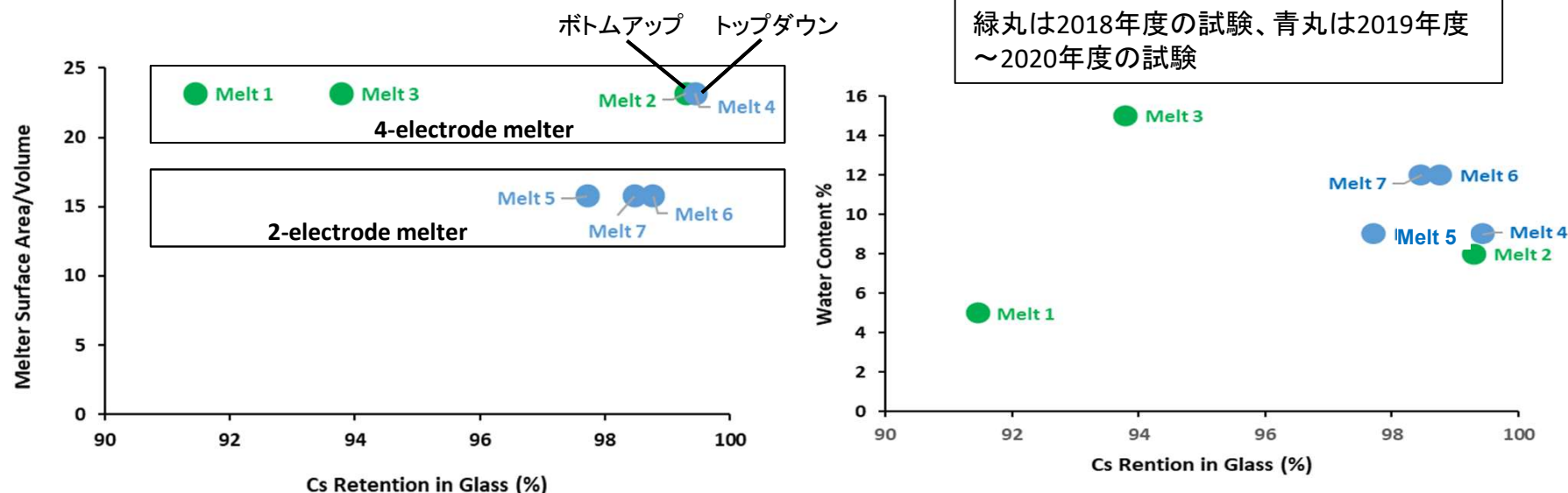
3. 工学規模溶融試験(23/28): 試験一覧表

項目	溶融試験 1	溶融試験 2	溶融試験 3	溶融試験 4	溶融試験 5	溶融試験 6	溶融試験 7	溶融試験 8
溶融炉表面積/体積	23.17	23.17	23.17	23.17	15.77	15.77	15.77	15.77
廃棄物種類	KUR-EH+ ALPS	KUR-EH+ KUR-TSG	KUR-EH+ AREVA	KUR-EH+ KUR-TSG	KUR-EH+ ALPS	KUR-EH+ KUR-TSG	KUR-EH+ AREVA	1F Soil+ ALPS
廃棄物含有率(乾燥供給物 ベース: ガラスフリットを含む)(%)	75.77	77.44	64.39	77.44	75.55	76.02	64.00	71.00
廃棄物含有率(ガラス酸化物 ベース)(%)	71.10	76.60	63.30	76.60	71.70	79.20	67.00	72.42
処理した乾燥試験材料(kg)	195.08	182.73	188.90	181.28	185.85	169.76	173.45	122.64
処理水(kg)	10.92	16.77	36.10	18.22	20.15	24.94	26.55	11.36
含水率(総質量に対する%)	5	8	15	9	9	12	12	8
含水率(総質量に対する%; TOF 含まず)	5	8	16	9	10	13	13	8
処理したトップオフフリット(kg)	15.00	12.50	15.00	12.50	15.00	15.00	15.00	15.00*
処理した総質量(kg)	221.00	212.00	240.00	212.00	221	209.70	215.00	150.00
エネルギー(kWh)	219.82	232.67	336.06	365.02	303.09	345.40	349.04	376.71
平均電力(kW)	16.19	13.89	22.40	17.11	18.65	19.93	19.39	19.32
溶融時間(hr)	13.58	16.75	15.00	21.33	16.25	17.33	18.00	19.50
処理速度(kg/hr)	16.29	12.66	16.00	9.94	13.6	12.10	11.94	7.69
処理効率(kWh/kg)	0.99	1.10	1.40	1.72	1.37	1.65	1.62	2.51
ガラスの質量(kg)	176.60	155.80	169.20	164.26	172.69	166.41	165.00	131.40
質量損失(%)	20	27	29	23	22	21	23	12
処理量(L)	267.55	283.23	317.46	282.67	254.02	241.26	236.97	147.06
ガラスの体積(L)	68.67	63.93	66.00	67.77	60.29	60.29	61.15	51.65
減容率(%)	74	77	79	76	76	75	74	65
ガラス中のCs保持率(%)	91.46	99.30	93.79	99.44	97.72	98.77	98.47	None
ガラス中のSr保持率(%)	99.76	99.99	100.00	99.99	100.00	100.00	100.00	None

*トップダウンによる運転再開時のスターターパスへのフリット4kgと運転終了時のトップオフフリット11kgを含む。

3. 工学規模溶融試験(24/28): 溶融表面積、溶融開始方式、含水率の影響

- 溶融表面積の影響: 溶融試験5、6、7では表面積／体積比の小さい溶融炉を使用。小さな表面積がCs移行率の低下をもたらすかを確認。
- 溶融開始方式(トップダウン、ボトムアップ)の違いの影響: 同じ試験材料に対して溶融試験2はボトムアップ、溶融試験4はトップダウンで実施。
- 含水率の影響: 溶融試験4、5、6、7では含水率を変化。Cs移行率への影響を確認。

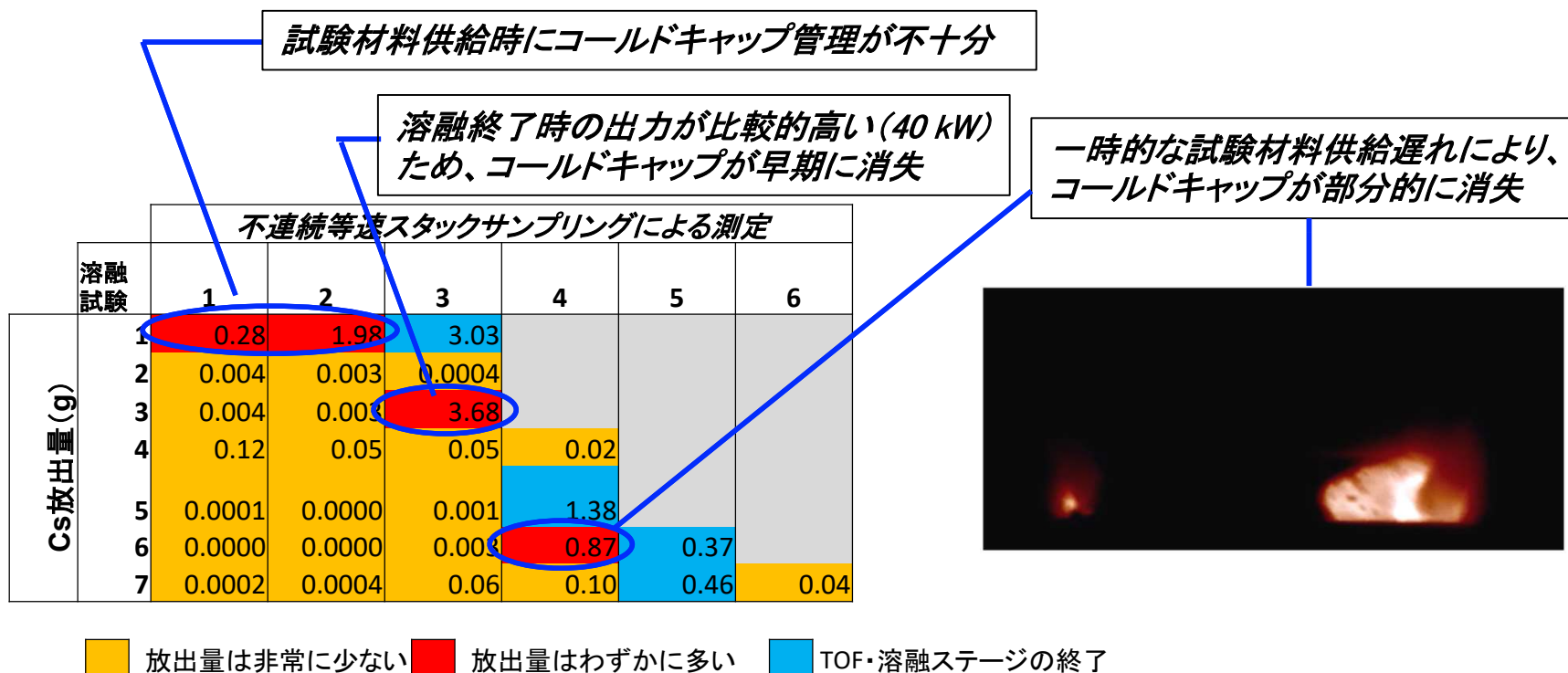


結論:

- Cs保持率99%以上は、2電極または4電極溶融炉のいずれでも達成。両炉では表面積が異なるが、適切なコールドキャップ管理がなされれば、表面積の違いはCs移行率に影響を与えない。
- トップダウン、ボトムアップいずれの溶融開始でも99%以上のCs保持率を達成。
- 8～13%の含水率が適しているとのデータが得られた。しかし溶融試験1と3でCs保持率が低かったことは含水率の影響より、他の要因(溶融試験1ではコールドキャップ管理が不十分であったこと、溶融試験3では溶融終盤の電力が比較的高かったこと)によるものと考えられる。

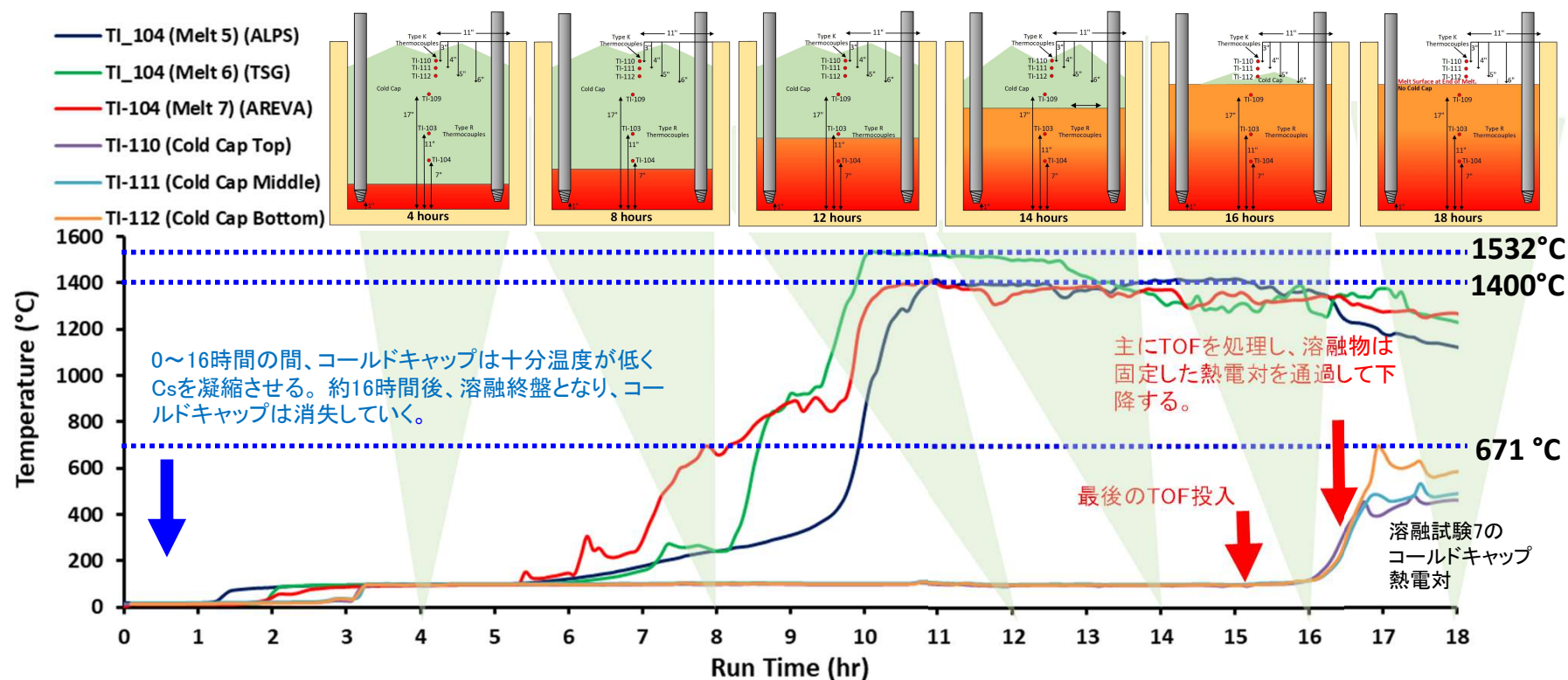
3. 工学規模溶融試験(25/28): 不連続等速スタックサンプリング測定結果のまとめ

- 各溶融試験に対して不連続等速スタックサンプリングを行い、Cs放出量の変動を評価した。
- 結論:
 - 放出量は、溶融終盤(TOF供給と処理)が最も高い。(下表の青色部分)
 要因: 最終的なコールドキャップの溶融。→コールドキャップとして機能するTOFの管理が極めて重要
 - 放出量は、溶融試験のほとんどの期間では、放出量が非常に少ない。(下表の黄色部分)
 要因: 良好なコールドキャップ管理
 - 放出量は溶融試験のいくつかの期間で増加(下表の赤色部分)
 要因: コールドキャップ管理が不十分。



3. 工学規模溶融試験(26/28): 溶融温度とCs保持率の関係

- 最高溶融温度は約1400℃から1532℃の範囲で、Cs保持率は97.72%から98.77%の範囲だった。
- Csは約671℃で凝縮する。コールドキャップは溶融終盤(TOF供給・処理段階)まで約671℃未満で維持されたため、コールドキャップ内でCsは凝縮したままである。
- 溶融ガラスからコールドキャップに移動したCsが保持されるメカニズムは、コールドキャップ内の凝縮とガラスへのコールドキャップの連続溶融である。
- 溶融試験7の3つのコールドキャップ熱電対は、溶融終了時にガラス層の上に露出した。従って、3つのコールドキャップ熱電対は溶融ガラスの温度を記録しなかった。最終的な溶融面レベルに熱電対がなかったとしても、最後のコールドキャップは溶融したため、確実に溶融温度に達していると判断。



3. 工学規模溶融試験(27/28): 28日間の浸出試験の結果

PNNLはMCC-1試験により、溶融試験4から8までのガラスを試験した。28日間の規格化質量損失(NL_{Na})と28日から365日の浸出率(r_{Na})は、米国及び日本の高レベル廃棄物(HLW)基準ガラス(EAガラス及びP0798)よりも低い(優れている)。溶融試験4及び6のチタン酸塩に見られる半結晶性ガラスは、一般に非結晶性ガラスと同じくらい耐久性があり、 TiO_2 結晶による悪影響がないことを示している。

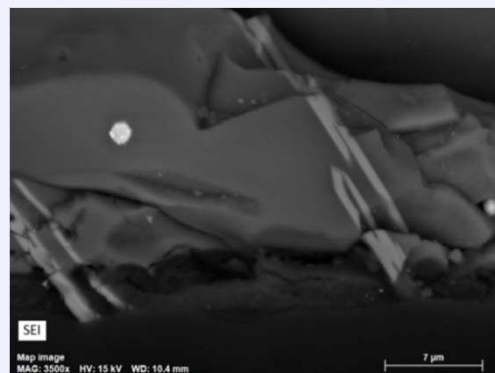
試験	28日目の NL_{Na} (g/m ²)	r_{Na} (g/m ² /d)(28 から365 日)
Melt 4	8.4 ± 2.0	$(6.6 \pm 2.2) \times 10^{-3}$
Melt 5	6.2 ± 0.7	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-2}$
Melt 6	5.9 ± 1.3	$(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-2}$
Melt 7*	5.4 ± 0.4	$(1.2 \pm 0.9) \times 10^{-2}$
Melt 8	6.0 ± 8.4	Not Tested

Reference Glasses	28日目の NL_{Na} (g/m ²)	r_{Na} (g/m ² /d)(28 から 365 日)
EA Glass	34.97	1.9×10^{-1}
P0798	9.59	9.0×10^{-2}

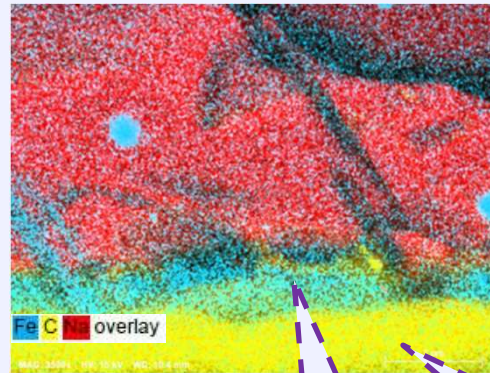
* 365日データがまだ利用できないため、 r_{Na} は270日で計算

溶融試験4ガラスの365日目のMCC-1変質層のSEM検査は、次のとおりである。

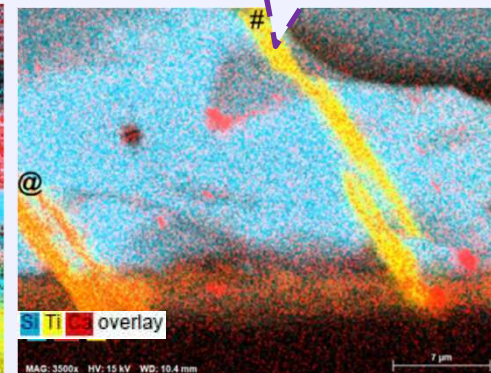
- 1) 結晶相の周りのガラスは優先的に溶解していない。
- 2) 変質域はほとんどNaが枯渇しており、Naがガラス変質の優れたトレーサーであることを確認している。



溶融試験4変質層のSEM-BSE



溶融試験4変質層のSEM-EDS



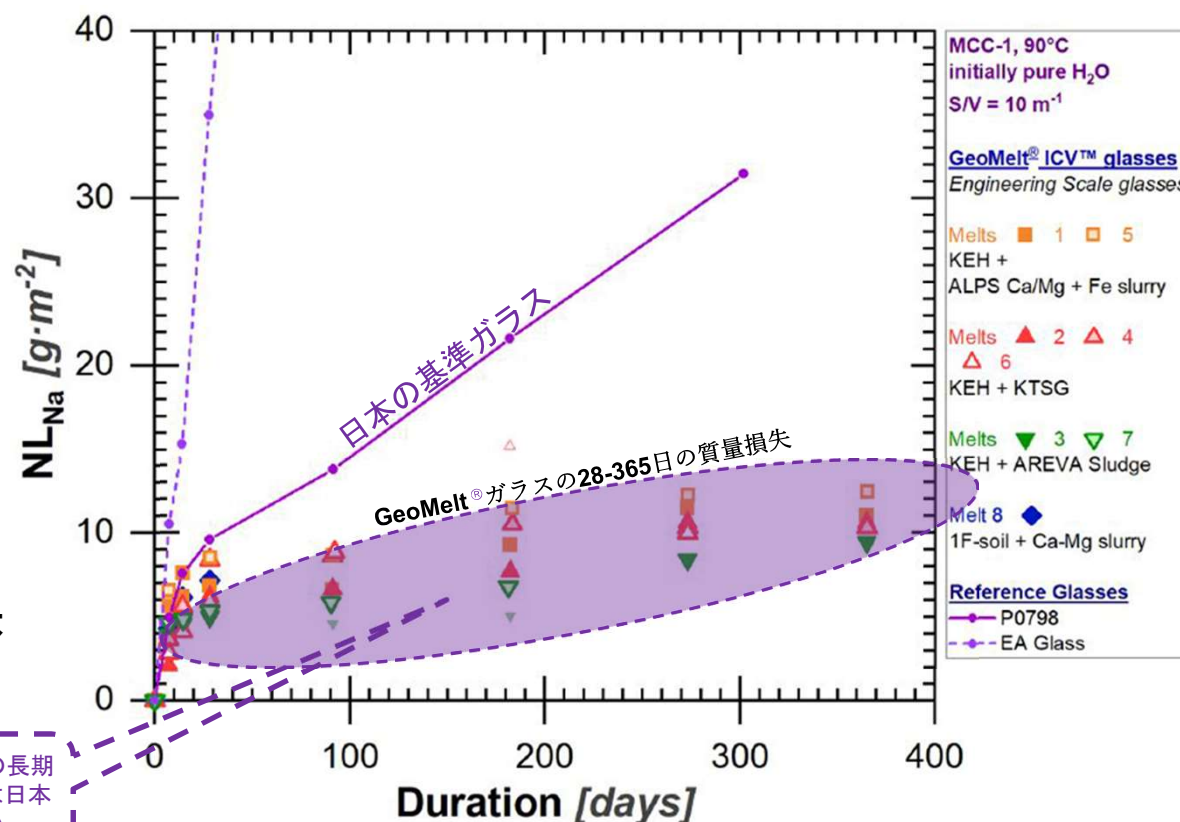
溶融試験4変質層のSEM-EDS

変質層におけるNaの枯渇
ガラスサンプルを埋め込んだ樹脂

Tiに富む結晶は優先的に溶解していない。

3. 工学規模溶融試験(28/28): 365日間の浸出試験の結果

- 本補助事業で行った溶融試験4～8のGeoMelt®ICV™ガラス、及び2018年度IRIDプロジェクトの溶融試験1～3のGeoMelt®ICV™ガラスの長期の規格化質量損失(NL_{Na})を提示している。28日目から365日目の間に複数のデータポイントを取得することで、データの品質を適切に評価し、浸出率を正確に計算できる。
- この図は、GeoMelt®ICV™ガラスの初期の放出がP0798基準ガラスと基本的に同等であることを示している。その後、GeoMelt®ICV™ガラスからのNa元素放出は遅くなり、90日を超えると安定する。これは、GeoMelt®ICV™ガラスからのNa元素放出は遅くなり、90日を超えると安定する。これは、GeoMelt®ICV™ガラスの長期の浸出耐性が基準ガラスよりも優れていることを示している。



GeoMelt®ICV™ガラスの長期間の規格化質量損失は日本の基準ガラスよりも低い。

4. 基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学): 廃棄物処理用ガラスデータベースの補完・拡充(1/4)

- PNNLは、前回試験(2017年～2018年度のIRIDプロジェクト)で実施しなかった廃棄物の新しいガラス配合表を作成

ガラス	廃棄物	制限成分**	結果のまとめ
1F-49	KUR-SMZ	84.6% ゼオライト	透明な茶色のガラス
1F-50	EN-101, KUR-EH	12.2% TiO ₂	結晶なし
1F-51	IE-911, KUR-EH	9.1% TiO ₂ , 5.5% Nb ₂ O ₅	TiO ₂ 結晶
1F-52	FO-36, KUR-EH	20% Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ 結晶
1F-53	Hydro, KUR-EH	8.1% MgO	透明な茶色のガラス
1F-54	GFH, KUR-EH	20% Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ 結晶
1F-55A*	SDVB, KUR-EH	10% SDVB	透明な茶色のガラス
1F-55B	SDVB, KUR-EH	20% SDVB	透明な茶色のガラス
1F-56	EN-101, KUR-EH	9.9% TiO ₂	少量のチタン酸鉄
1F-57	IE-911, KUR-EH	7.6% TiO ₂ , 4.4% Nb ₂ O ₅	結晶なし
1F-58A*	SDVB, KUR-EH	25% SDVB	透明な茶色のガラス
1F-58B	SDVB, KUR-EH	30% SDVB	透明な茶色のガラス

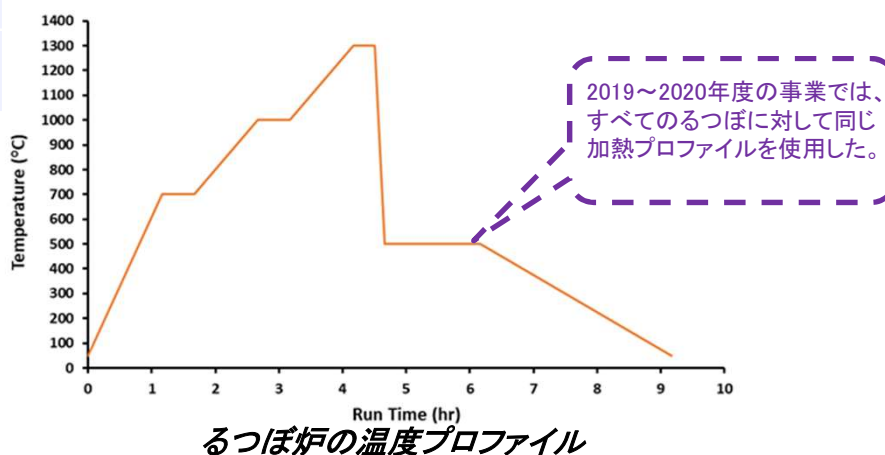
- AとBは、同じガラス組成に対する異なる有機物濃度を示している。

** ガラスの安定性に影響を及ぼす化合物・成分

廃棄物の略語	組成
SMZ	界面活性剤修飾ゼオライト
IE-911	チタン酸ケイ素
EN-101	チタン酸ケイ素
FO-36	キレート樹脂系吸着剤(水酸化鉄)
Hydro	ハイドロタルサイト
SDVB	スチレンジビニルベンゼン樹脂(析出物: アミン基)
GFH	アモルファス粒状水酸化第二鉄

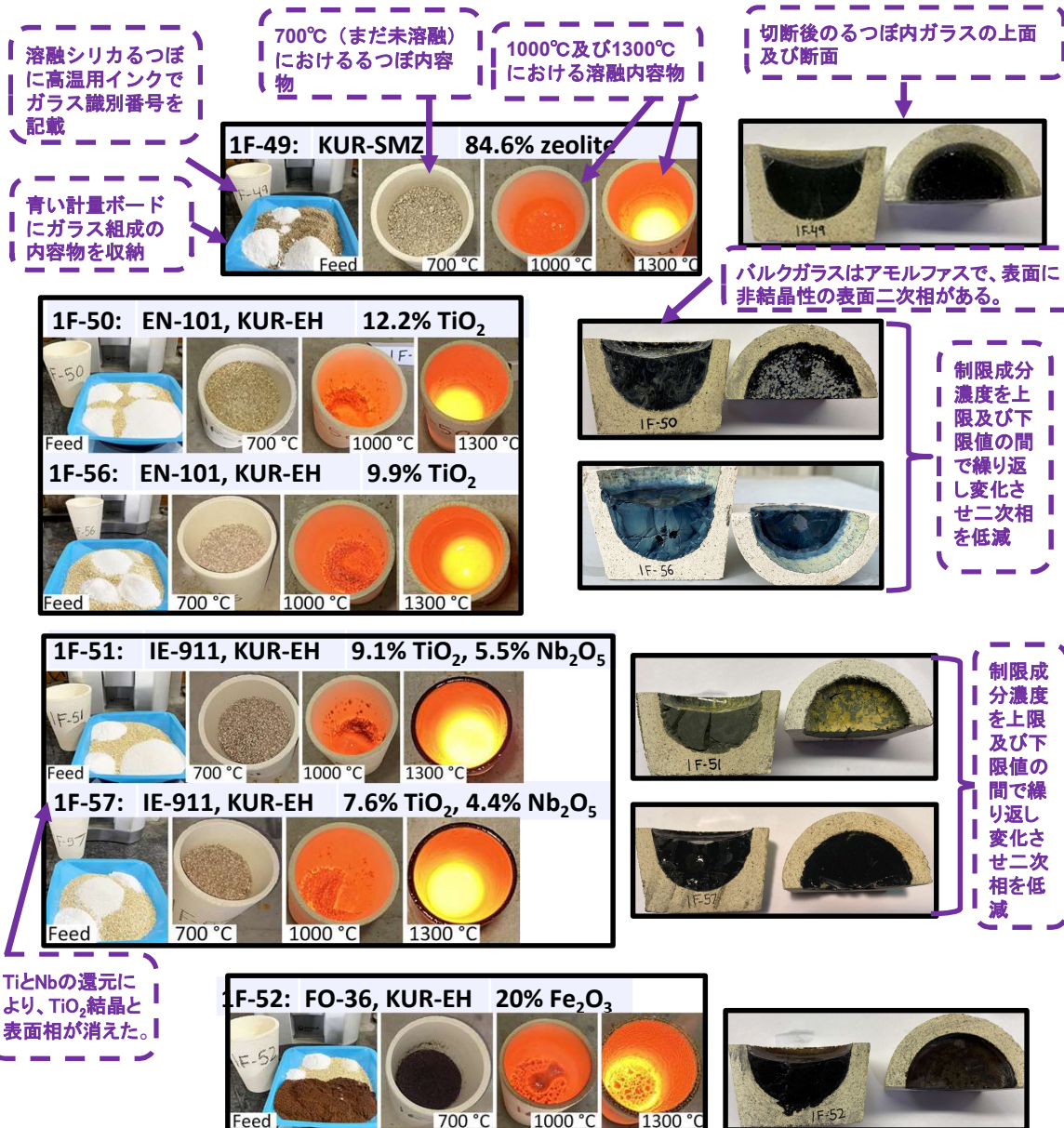
▪ 2017年度には、幅広い化学的特性を有する20種類の模擬廃棄物进行处理するためのガラス配合についてPNNLのガラス組成モデルにより計40のガラス組成を検討し、るつぽ試験を行なった。

▪ 本事業では、これまでに試験していない7つの1F廃棄物の処理のための12のガラスを配合した。合計で、1F水処理二次廃棄物量(2018年度の量)の94% に相当する廃棄物を試験した。



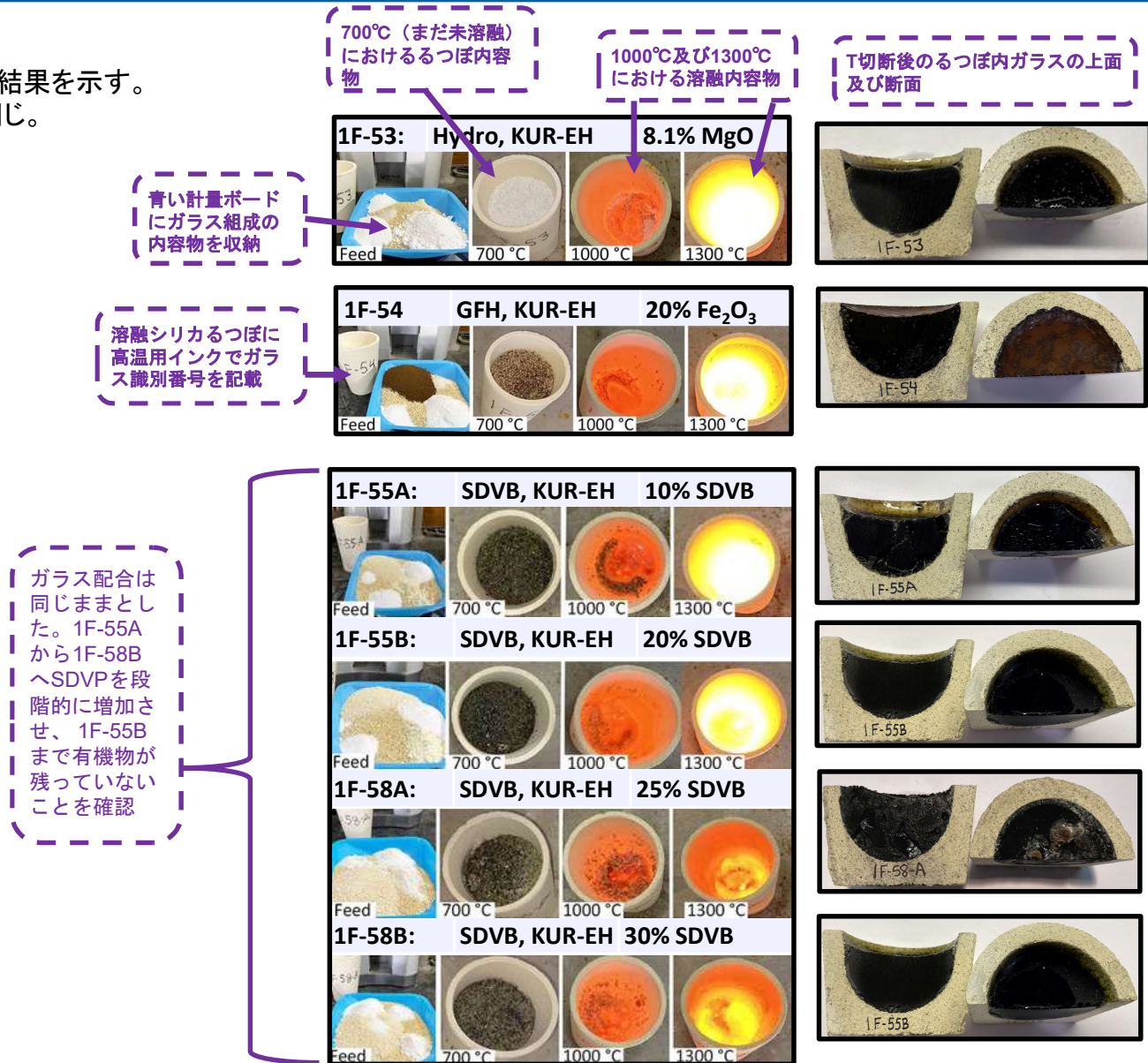
4. 基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学): 廃棄物処理用ガラスデータベースの補完・拡充 (2/4)

- るつぼ試験の目的は、1) 非ガラスの二次相や結晶が存在しないこと、2) 化学的耐久性に優れていること、の観点からガラス配合が適切であることを検証するためのガラスを製造すること。
- 各ガラス配合の準備として、青色計量ボード上の組成に対応するように模擬廃棄物及びガラス添加材を計量。
- 模擬廃棄物とガラス添加材を混合し、熔融シリカるつぼに装荷。
- るつぼを炉に装荷、前ページに記した温度プロフィールに従って加熱。
- 観察と写真撮影のためるつぼを炉から 700 °C, 1,000 °C, 及び 1300 °C の時点で取り出し。
- 1300°C 到達後のるつぼを炉に戻し、500 °C まで焼きなましを行い、ガラス切断時の割れることを防止。
- 検査のためるつぼを半分に切断、ガラスの均質性及び二次相の有無を調査。
- 二次相が存在したいくつかのるつぼについては、制限成分の量を減らした異なるガラス配合で再試験を実施。制限成分については前ページの表に示す。例えば IE-911 はチタニウム (Ti) 及びニオブ (Nb) を含む。これらの元素はガラスへの溶解度が低い。1F-51の配合において IE-911 の割合を下げ、1F-57 ガラスにおいては TiO_2 と Nb_2O_5 の比率を減らした。
- るつぼ試験で得られた3つのガラスについて MCC-1 試験を実施、結果はページ41に示す。



4. 基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学): 廃棄物処理用ガラスデータベースの補完・拡充 (3/4)

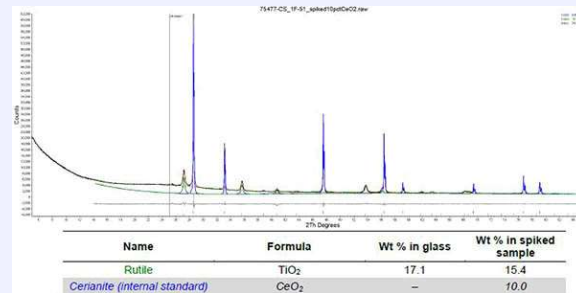
- 前ページに引き続いてるつぼ試験結果を示す。
試験方法等は前ページの記載と同じ。



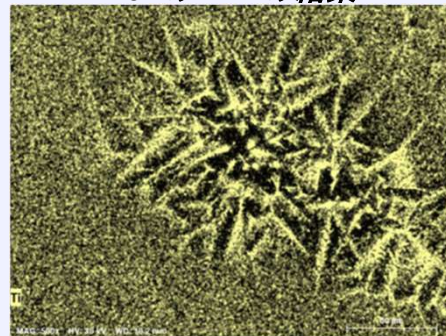
4. 基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学): 廃棄物処理用ガラスデータベースの補完・拡充 (4/4)

- るつぼ試験の目的は、
1) 非ガラスの二次相や結晶が存在しないこと、
2) 化学的耐久性に優れていること、の観点からガラス配合が適切であることを検証するためのガラスを製造すること。
- このページの試験一覧表では廃棄物含有率、質量損失、減容率をまとめた。この表から高い廃棄物含有率、かなり大きい質量損失、高い減容率が得られたことが分かる。大きな量の廃棄物をガラスに取り込み、かなり大きな質量損失や高い減容率が得られることがガラス固化の利点。
- MCC-1 試験を行った3つのるつぼ試験ガラス(1F-49, 53, 57)は参照ガラスより優れた性能(低い規格化質量損失 NL_{Na})を示した。
- るつぼ試験によりこれらの廃棄物が GeoMelt® ICV™ で処理できることが示された。

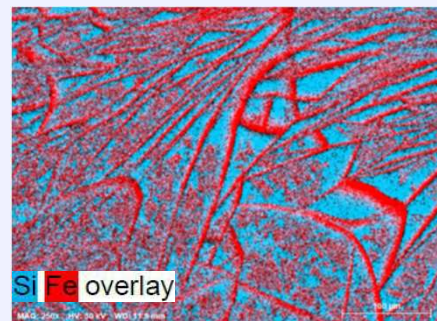
1F-51バルクガラスのXRDによりルチル(TiO_2)を確認した。



1F-52のXRDの結果



1F-51 (T)のSEM-EDS画像



1F-54 (Fe)のSEM-EDS画像

るつぼ試験一覧表

るつぼ試験	廃棄物タイプ	廃棄物含有率(%) (乾燥重量ベース)	廃棄物含有率(%) (ガラス酸化物ベース)	質量損失(%)	減容(%)
1F-49	KUR-SMZ	76.93	81.93	28	79
1F-50	KUR-EH + EN-101 (18%)	86.9	90.01	24	80
1F-56	KUR-EH + EN-101 (14%)	85.96	87.58	22	82
1F-51	KUR-EH + IE-911 (21%)	88.94	91.95	29	89
1F-57	KUR-EH + IE-911 (17%)	86.58	89.58	26	81
1F-52	KUR-EH + FO-36	90.95	88.24	54	86
1F-53	KUR-EH + ハイドロタルサイト	80.9	81.93	27	83
1F-54	KUR-EH + GFH	84.41	70.11	24	83
1F-55-A	KUR-EH + スチレン ジビニルベンゼン(10%)	82.56	84.34	31	82
1F-55-B	KUR-EH + スチレン ジビニルベンゼン(20%)	84.5	84.35	37	84
1F-58-A	KUR-EH + スチレン ジビニルベンゼン(25%)	85.46	84.35	39	82
1F-58-B	KUR-EH + スチレン ジビニルベンゼン(30%)	86.43	84.32	42	85

基準ガラスと比較
するため選択した
ガラスのMCC-1の
結果

Experiment	NL_{Na} at 28 days (g/m^2)
1F-49	3.14
1F-53	11.49
1F-57	5.20
Reference Glasses	
	NL_{Na} at 28 days (g/m^2)
EA Glass	34.97
P0798	9.59

4. 基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学): 廃棄物組成変動と熔融温度の影響に関するモデリング(1/5)

目的

- 廃棄物組成変動の影響調査

方法

- 1F 水処理二次廃棄物の組成変動は不明であるため、廃棄物組成変動の影響調査は廃棄物成分の濃度範囲の変動をモデルに入力したコンピューターモデリングにて実施。成分はガラス酸化物で表示(例; SiO_2 , Al_2O_3 , MgO 等)。
- PNNL 特性-組成相関モデルを使用。このモデルは本事業における工学規模熔融試験とるつぼ試験で使用する GeoMelt®ICV™ ガラス配合設定にも使用。
- 本モデリングにて以下を評価
 - 1F 水処理二次廃棄物の組成変動が最大廃棄物含有率に与える影響
 - 様々な廃棄物の混合による最大廃棄物含有率への影響
 - 高温処理ガラスと低温処理ガラスが廃棄物含有率、評価対象廃棄物全量処理で生成するガラス総量に及ぼす影響
 - モデル予想及びプロセスの不確実性が最大廃棄物含有率及び生成するガラス総量に与える影響

コンピューターモデリングで調査した5つの廃棄物

- ゼオライト(セシウム吸着塔からの KUR-EH 及び IE-96 を含む)
- ARS: AREVA スラッジ、除染装置からの硫化バリウムスラッジ
- CST: 数基のSr 除去装置で使用される結晶質のシリコチタネート
- TSG: KUR-TSG (チタノシリケート粉体) Kurion Sr 吸着塔で使用される別種のCST
- ALPS Ca-Mg: 多核種除去装置で使用されるALPS 炭酸塩スラリー

4. 基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学): 廃棄物組成変動と溶融温度の影響に関するモデリング(2/5)

PNNL モデリングで用いるガラス特性上の制約

- 下表はモデリングで用いるガラス特性上の制約一覧を示す。MCC-1, PCT, 及び VHT は国際的な浸出試験の手順である。LAW SO₃ 溶解度は、米国エネルギー省(DOE)ハンフォードサイトで稼働中の廃棄物処理プラント(WTP)で使われているコンピューターモデリングの特性上の制約である。SO₃ はガラス中の溶解度が限定されており、硫黄を含むガラス配合(例えば、1F AREVA スラッジ配合)ではこの成分は制限される。
- このモデルでは、高温溶融炉は高温(>1250 °C)での溶融ガラス製造、低温溶融炉は低温(<1050 °C)での溶融ガラス製造と規定される。

モデリングで使ったガラス特性の制約

特性	高温溶融炉の制約	低温溶融炉の制約
溶融温度 T_M	1250 °C 及び 1500 °C	1000 °C 及び 1050 °C
MCC-1によるBの規格化質量損失(NLB)、90°Cで28日間	$\leq 7.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$	$\leq 7.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$
PCTによるB、Li、及びNaの規格化質量損失(NL _i 、i = B、Li、Na)、90°Cで7日間	$\leq \text{EA ガラス (B, Li, Naに対して8.35、4.785、6.675 g} \cdot \text{m}^{-2})$	$\leq \text{EA ガラス (B, Li, Naに対して8.35、4.785、6.675 g} \cdot \text{m}^{-2})$
VHT変質深度、200°Cで24日間	$\leq 453 \text{ } \mu\text{m}$	$\leq 453 \text{ } \mu\text{m}$
LAW SO ₃ 溶解度	溶解度 > ガラス中のSO ₃	$0.85 \times \text{溶解度} > \text{ガラス中のSO}_3$
溶融温度 T_M における粘度(η_T)	$1 \leq \eta_T \leq 15 \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$2 \leq \eta_T \leq 8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
溶融温度 T_M における電気伝導度(ϵ_T)	$10 \leq \epsilon_T \leq 70 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$	なし
混和性回避のための規格化アルカリ量	$\geq 0.2 \text{ 質量分率}$	$\geq 0.2 \text{ 質量分率}$
ネフェリン形成回避のための規格化サブ混合物	$\leq 0.3 \text{ 確率}$	$\leq 0.3 \text{ 確率}$
Tiの結晶化	$\text{TiO}_2 \leq 12.18 \text{ wt\%}$	$\text{TiO}_2 \leq 5.49 \text{ wt\%}$

4. 基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学): 廃棄物組成変動と溶融温度の影響に関するモデリング (3/5)

PNNL モデリングで調査した廃棄物

- 選択した5つの廃棄物に対して様々な廃棄物混合を持つ15ケースを評価
- 特性上(化学的耐久性、粘度、電気伝導率など)と組成上の制約を同時に満たしながら、廃棄物含有率を最大化するガラスとなるように配合した
- 右下の表ではモデル化した15ケースを示す。
また、ケースB1～B10では混合廃棄物の質量比を示す

15 ケース. ケース
S1 ～ S5 は1つの
廃棄物のみを含有し
たガラスモデル。
ケース B1 ～ B10
は2つの廃棄物を含
有するガラス。

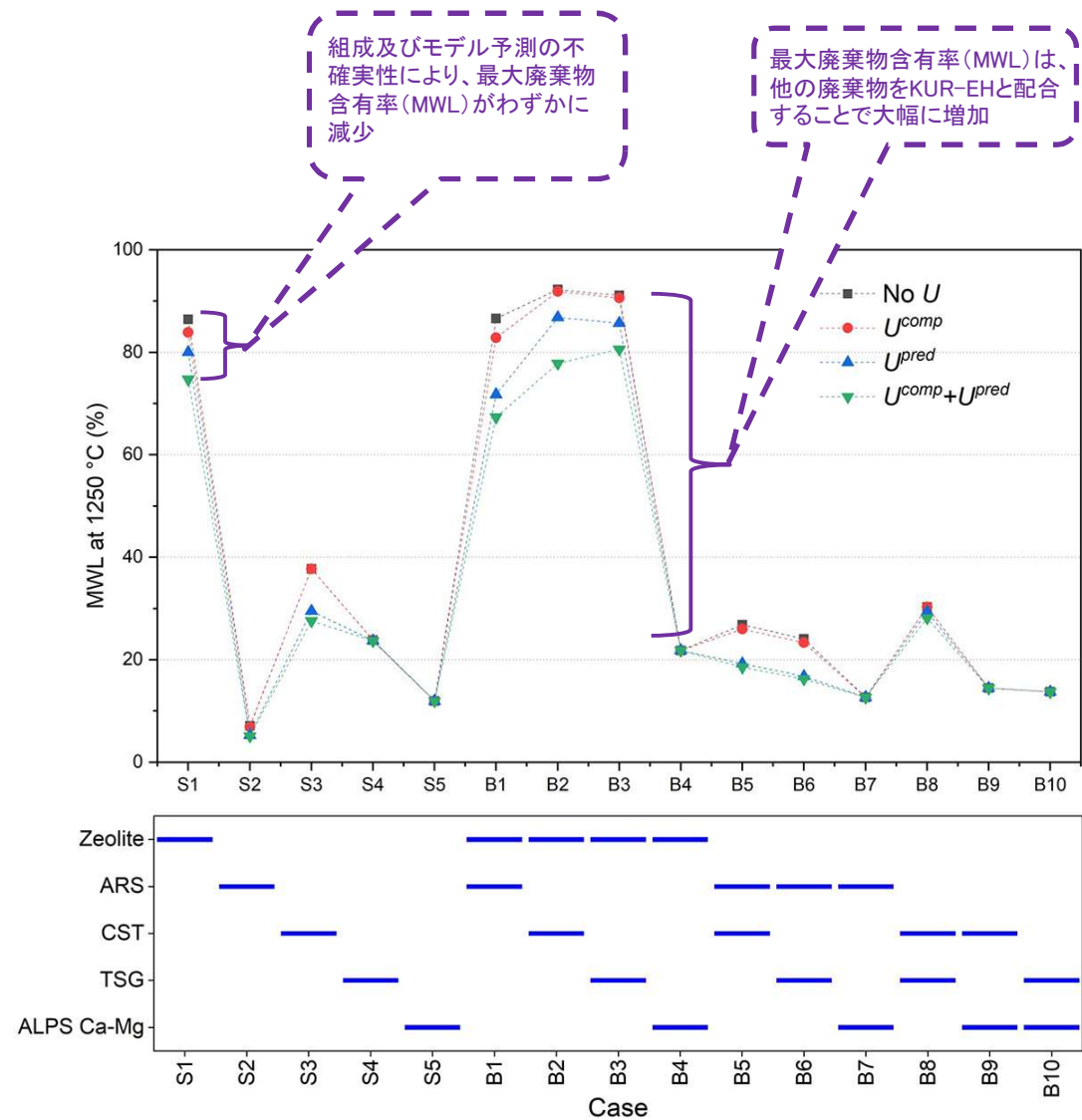
モデル化した15のケースに対する廃棄物混合に関する情報

ケース	廃棄物1	廃棄物2	廃棄物1と廃棄物2 の質量比
S1	KUR-EH/IE-96	なし	—
S2	AREVA スラッ ジ	なし	—
S3	CST	なし	—
S4	TSG	なし	—
S5	ALPS Ca-Mg	ALPS炭酸塩スラリー	—
B1	KUR-EH/IE-96	AREVAスラッジ	15.31
B2	KUR-EH/IE-96	結晶性シリコチタネー ト	4.06
B3	KUR-EH/IE-96	KUR-TSG	5.63
B4	KUR-EH/IE-96	ALPS炭酸塩スラリー	0.87
B5	AREVA スラッジ	結晶性シリコチタネー ト	0.27
B6	AREVA スラッジ	KUR-TSG	0.37
B7	AREVA スラッジ	ALPS炭酸塩スラリー	0.06
B8	CST	KUR-TSG	1.38
B9	CST	ALPS炭酸塩スラリー	0.21
B10	KUR-TSG	ALPS炭酸塩スラリー	0.15

4. 基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学): 廃棄物組成変動と熔融温度の影響に関するモデリング (4/5)

PNNL モデリングの結果 (1/2)

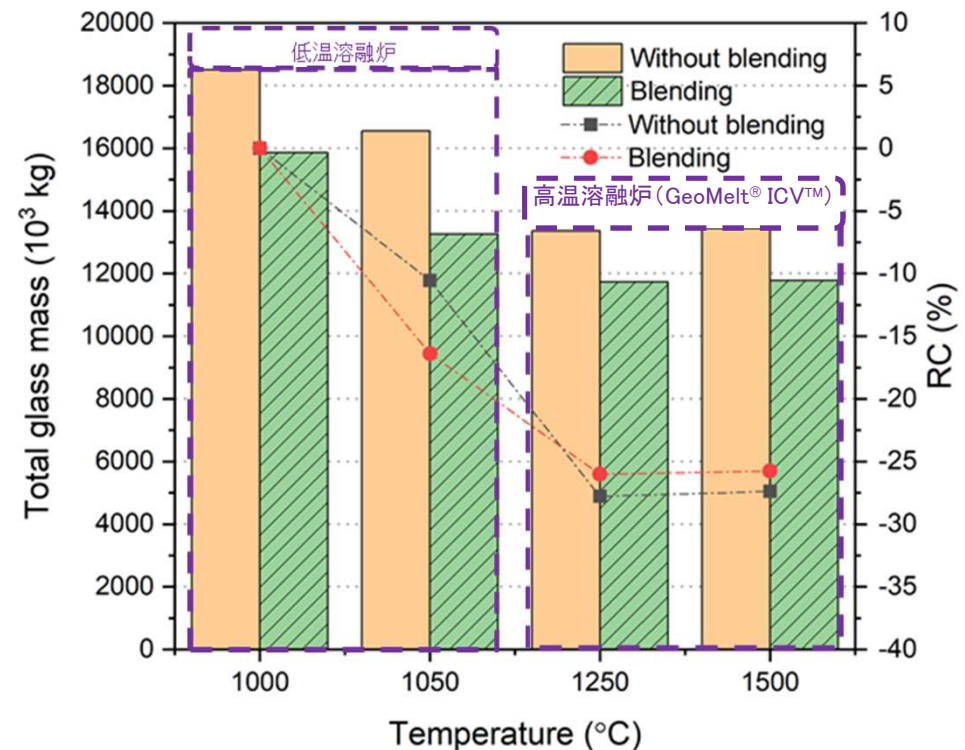
- モデリング結果の一部を図に示す。
- 右上の図はモデル化した15のガラスそれぞれの最大廃棄物含有率を示す。
- 右下の図は単一廃棄物(ケースS1～S5)と混合廃棄物(ケースB1～B10)の構成を右上の図のデータポイントに対応させた線で示している。
- 右上の図はまたモデルの不確実性も表している。「No U」は不確実性無しの略号。 U_{comp} は組成上の不確実性、すなわち廃棄物組成変動の略号。 U_{pred} はモデル予想の変動の略号である。PNNLモデルは実態の正確な複製となっておらず、 U_{pred} はこのモデルで調査した組成範囲のデータの量に関する。
- 個々の廃棄物(ケースS1～S5),または2つの廃棄物の組み合わせ(ケースB1～B10)をガラス固化した場合に達成できる最大廃棄物含有率を様々なガラス化学特性に対応して求めたものである。



4. 基礎試験及びモデリング(1)(ガラス科学): 廃棄物組成変動と溶融温度の影響に関するモデリング (5/5)

PNNLモデリングの結果 (2/2)

- 右図は、モデリングで調査した全ての廃棄物をガラス固化する場合、高温溶融炉 (GeoMelt®ICV™) にて処理することにより生成するガラスがはるかに少なくなる(約28%減少)ことを示している。これは高温溶融炉がより高い廃棄物含有率を達成できるためである。廃棄物含有率がより高ければガラスの中により多くの廃棄物を含有できる。
- 右図はまた、調査した5つの廃棄物全量进行处理する場合、2つの廃棄物を混合することにより生成するガラスの総量をかなり減らすことになる(約12%減少)ことを示している。
- 高温溶融炉は多くの廃棄物と少ないガラス添加剤を取扱い、調査した5つの廃棄物の処理に必要なガラス総量をかなり減らす(約37%減少)ことができる。
- 高温溶融炉は低温溶融炉より効率的である。

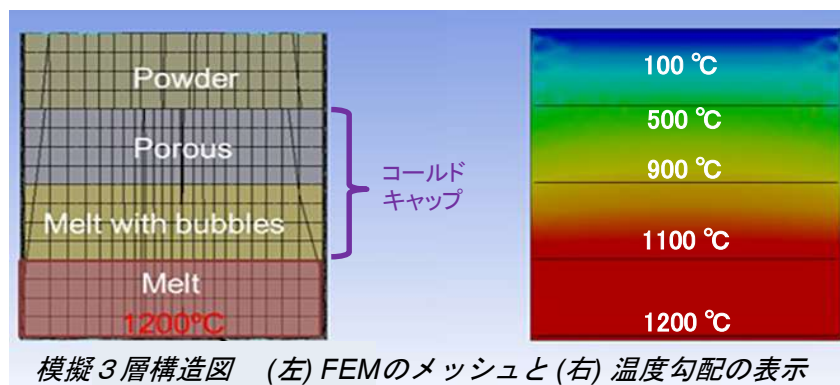


5つの廃棄物を処理するための総ガラス質量に対する溶融温度と混合による効果、及び1000°Cの低温溶融炉の値と比較した総ガラス質量の相対変化(RC) (不確実性なし)

5. 基礎試験及びモデリング(2)(Cs揮発抑制メカニズムの研究)(1/2)

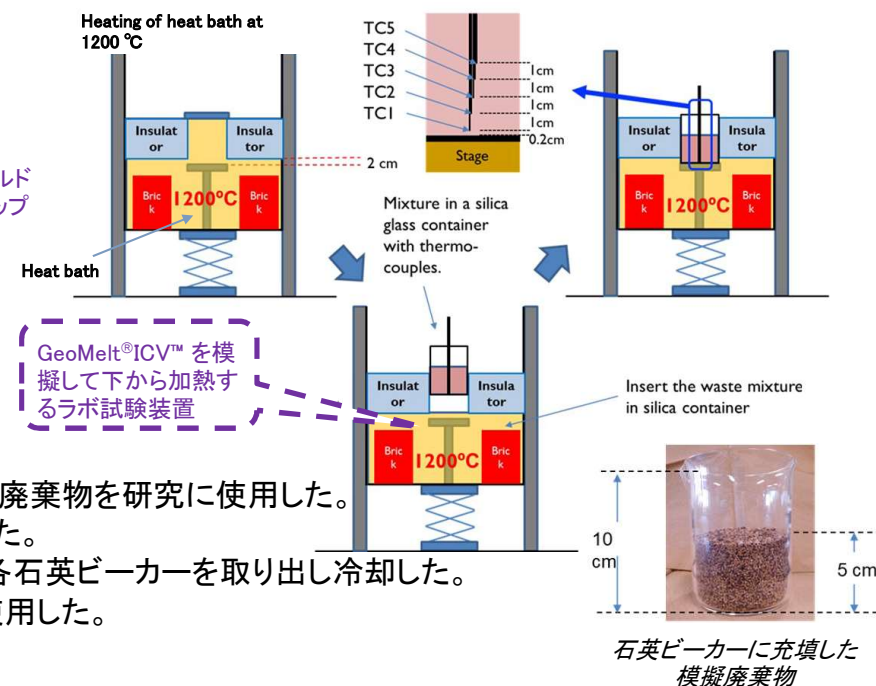
研究内容

- Csの揮発を抑制する定量的かつ可視的なメカニズムの解明に関する研究
- Csの安定化またはシステム外部への損失(放出)を把握するために、GeoMelt®ICV™プロセスをラボレベルで模擬して、定量的に検討した。下部溶融ガラスを外部電気ヒーターで加熱し、インプット熱エネルギーを上向きに伝達して溶融を進行させる温度勾配を模擬できる装置を準備してGeoMelt®ICV™を模擬した。
- GeoMelt®ICV™の運転では溶融ガラス上の未溶融廃棄物をコールドキャップと称しているが、本研究では溶融ガラスと未溶融廃棄物の境界部分の「泡層と仮焼層」(両者を合わせてコールドキャップと呼ぶ)に焦点を当て、未溶融廃棄物/コールドキャップ/ガラス溶融物から成る3層構造を形成して状態を把握した。



試験手順

- 底部の加熱源である熱浴を1200°Cに加熱する。
- 模擬廃棄物を300mLの石英ビーカーに入れる。溶融試験5,6,7の模擬廃棄物を研究に使用した。
- 石英ビーカー内の複数の位置に熱電対を取り付け温度勾配を測定した。
- 石英ビーカー底部の溶融物が1000°Cを超えて一定温度に達したら、各石英ビーカーを取り出し冷却した。
- 内部Cs濃度分布を評価するためにサンプルを収集し、試験片として使用した。



評価

- 廃棄物固化ホウケイ酸ガラスの組成分析で使用方法と手順を用いてCaとCsを分析した(CaはICP-AES、CsはICP-MS)。
- この分析方法では、(絶対濃度を決定できないため)内部標準としてCaOを使用し、CaO濃度とCs分析値を比較することにより、Cs移動の有無を評価した。
- GeoMelt®ICV™溶融炉内でのCsの移動については、Cs金属の蒸気圧に基づき、600~700°Cの温度範囲で高い蒸気圧によって気相となり、温度勾配によって拡散移動していくと考えられていた。

5. 基礎試験及びモデリング(2) (Cs揮発抑制メカニズムの研究) (2/2)

結果

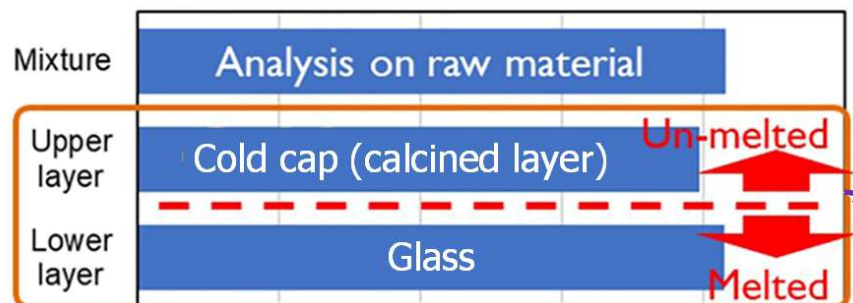
- コールドキャップ中のCs濃度は、最初の廃棄物混合物の濃度及びコールドキャップ下の溶融ガラスとほぼ同じオーダーであることから、コールドキャップの周囲で依然として多くのCsが残っており、加熱中にコールドキャップ上に顕著なCsの移動がないことを示唆している。大きな組成変化を引き起こすような移動拡散は起こらないことを確認した。



加熱後に取り出した石英ビーカーの状態(溶融試験5の材料)

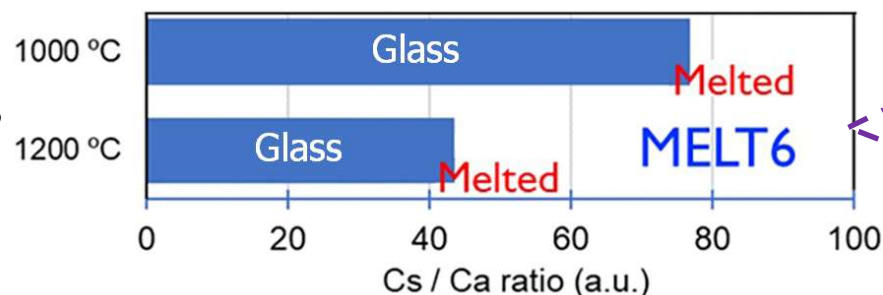


Cs濃度の分析用にサンプルを採取したエリア(溶融試験6)



コールドキャップから採取した溶融及び未溶融のサンプルの分析値(溶融試験6の組成)

①コールドキャップの周囲で依然として多くのCsが残っており、コールドキャップではCsの移動が大きくないことを示している。



コールドキャップなしで1000°C及び1200°Cで溶融したガラスから採取したサンプルの分析値(溶融試験6の組成)

②コールドキャップがなく、大気に溶融面が晒されている状態で加熱されたものは1000°CではCsの揮発は顕著に生じていない。しかし、1200°Cで溶融すると半減したことから、気液界面においてCsの揮発は1000°Cを超える領域で顕著に生じることを示している。

6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(1/13)

予備概念設計(Pre-Conceptual Design)の目的と範囲:

1) 1F水処理二次廃棄物処理のための GeoMelt®ICV™施設予備概念設計の目的

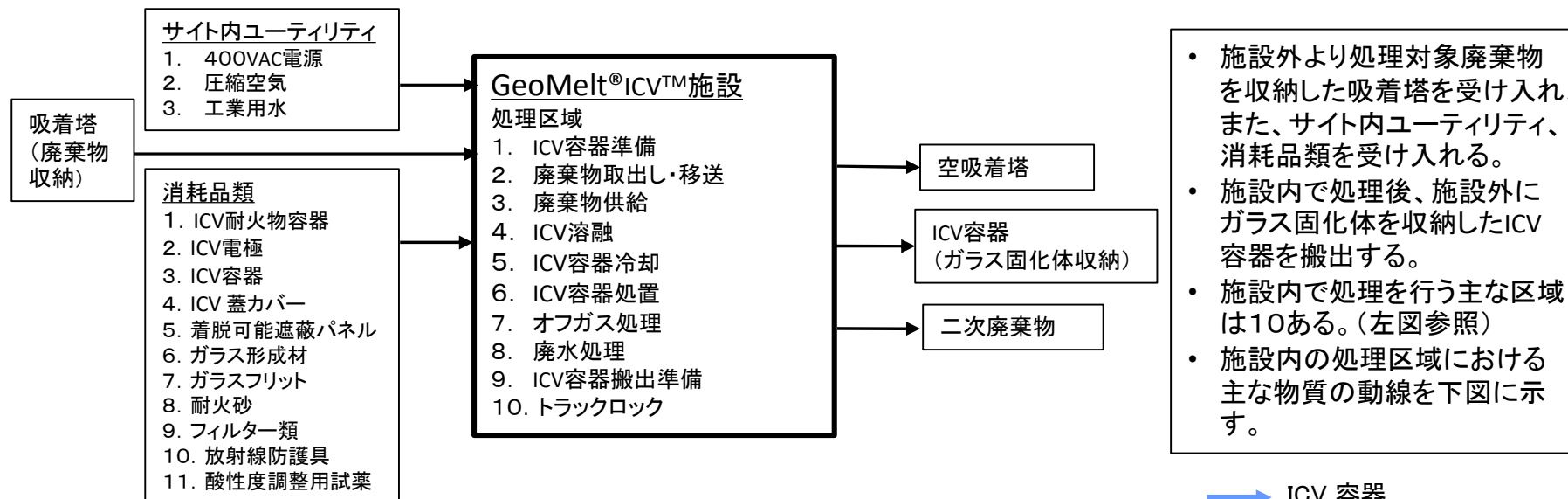
- GeoMelt®ICV™施設の主要な設計要件、仕様及び想定を特定。
- 廃棄物の取扱い、ガラス固化、オフガス処理機器などの運転装置を選択。
- プロセスフロー、主要な配管計装及び概略の設備配置を明確にする基本的な図面(概略図)一式の作成。
- 質量、エネルギー及び放射能の観点から物質収支計算の作成。
- システム構成機器と操作運転方法を明確に規定し、今後の設計に反映させる重要な論点を提示。

2) 予備概念設計の範囲: 以下の項目を検討し、設計図書を作成

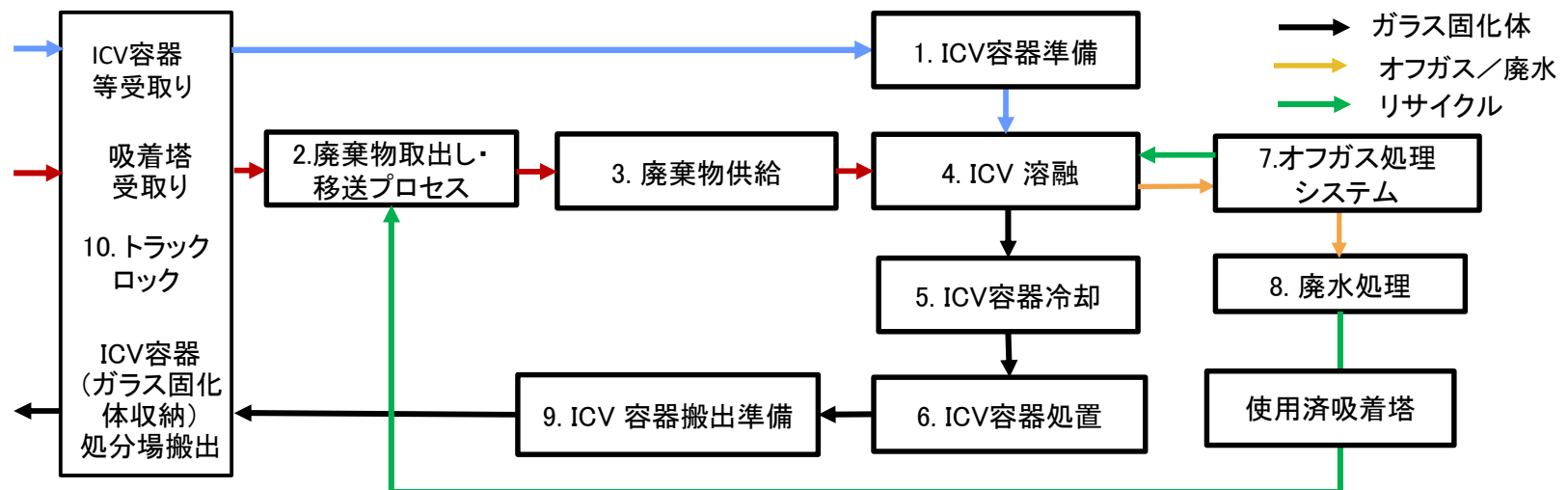
- | | |
|------------------|--------------------|
| ・ 設計要件想定書 | ・ プロセスフロー図 |
| ・ 配管計装図(P & ID) | ・ 物質、エネルギー及び放射能収支表 |
| ・ 溶融炉供給システム検討書 | ・ 個別システム設計解説書 |
| ・ 主要な機器のサイジング設計書 | ・ ユーティリティ要件検討書 |
| ・ 概略配置図 | ・ プラント機器とプロセス検討書 |
| ・ 運転シーケンスの動画 | ・ プラント効率と処理量検討書 |

6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(2/13)

1) 施設内外の取り扱い箇所及び施設内処理区域の構成



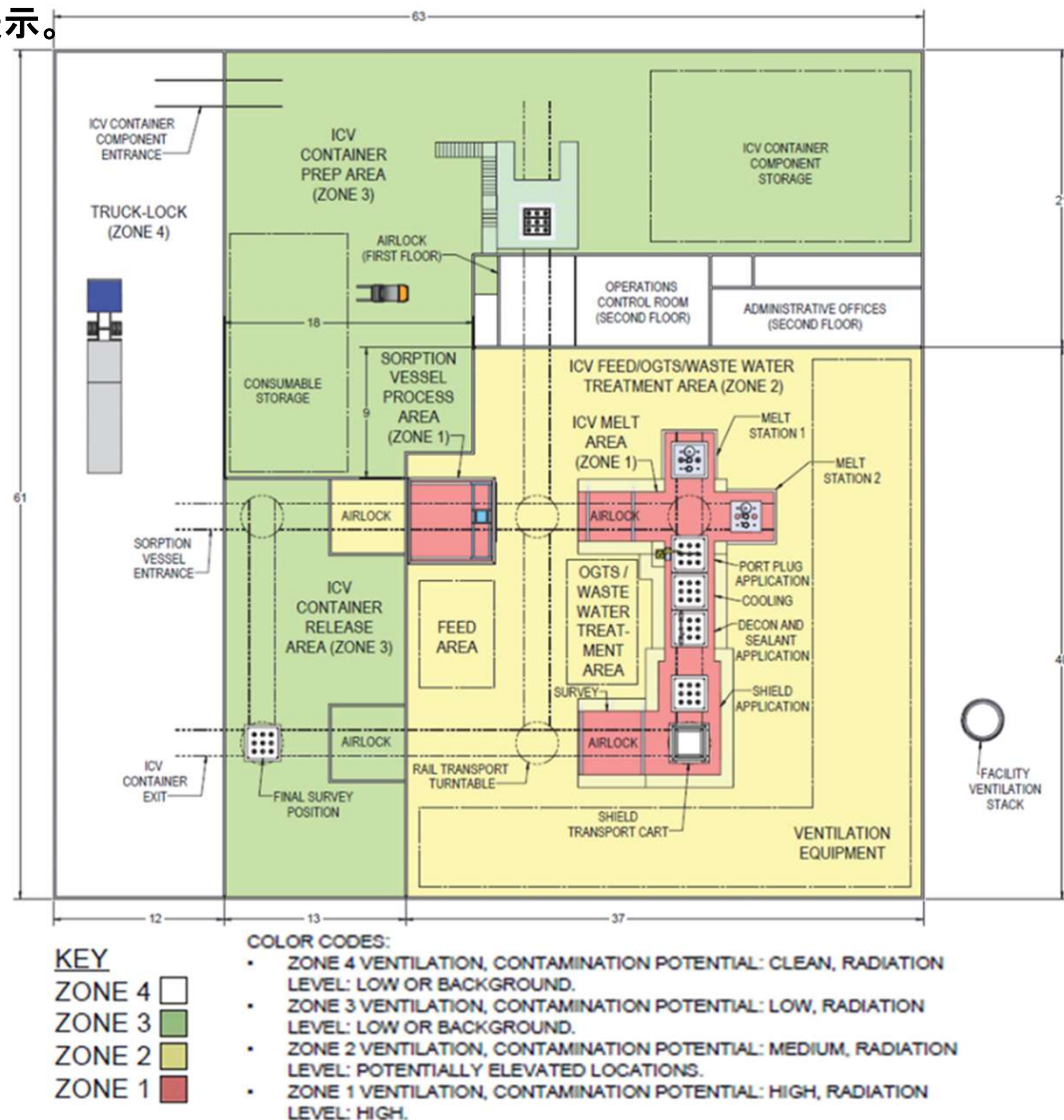
2) 施設内処理区域間の動線



6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(3/13)

GeoMelt®ICV™施設 設備概略配置図:

施設内の区域は放射線レベルと汚染発生の可能性のレベルに応じてレベル1～4に分類、各区域(ゾーン)を赤、黄、緑、白で色分けして表示。



6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(4/13)

廃棄物取り出しシステム:

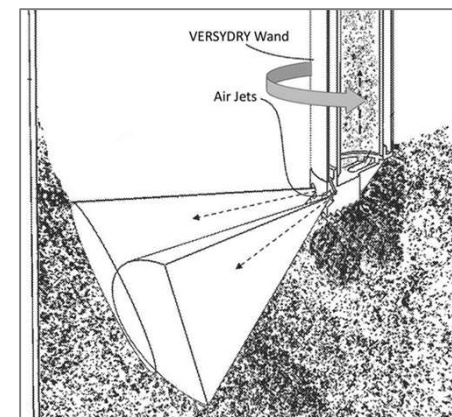
廃棄物吸着塔をGeoMelt®ICV™施設に搬送して、ガラス固化のためにICV™容器に供給できるように廃棄物を取り出す。廃棄物取り出しシステムでは2つの方法(乾式と湿式)を使用する。

1. 乾式廃棄物取り出しシステム

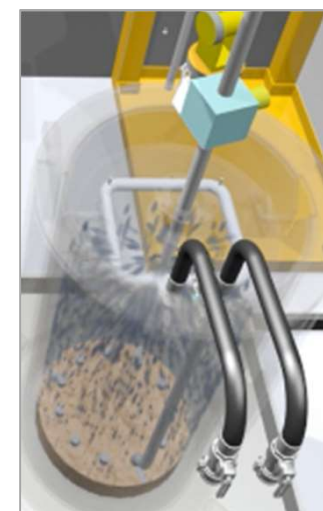
- ① 遠隔操作装置で乾式取り出し棒状装置を制御する。
- ② 棒状装置は回転する中空パイプで、容器から廃棄物を吸引する。
- ③ 棒状装置先端の一方の側から空気を吹き出し、もう一方の側から廃棄物を吸引する。
- ④ 棒状装置下部のカメラを使用して、容器内の廃棄物を目視観察する。
- ⑤ 希薄相空気圧式コンベアで乾燥廃棄物を乾燥廃棄物受槽へ移送する。

2. 湿式廃棄物取り出しシステム

- ① (乾式と同様)
- ② (乾式と同様)
- ③ 棒状装置先端の一方の側から圧力をかけた水を噴射し、もう一方の側から廃棄物を吸引する。
- ④ (乾式と同様)
- ⑤ 希薄相空気圧式コンベアで湿潤廃棄物を空気・廃棄物・水分離器へ移送する。



乾式取り出し棒状装置の機能



湿式取り出しシステム

6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(5/13)

廃棄物等移送システム:

取り出した廃棄物等の混合廃棄物受槽(溶融炉への供給槽)への移送方法

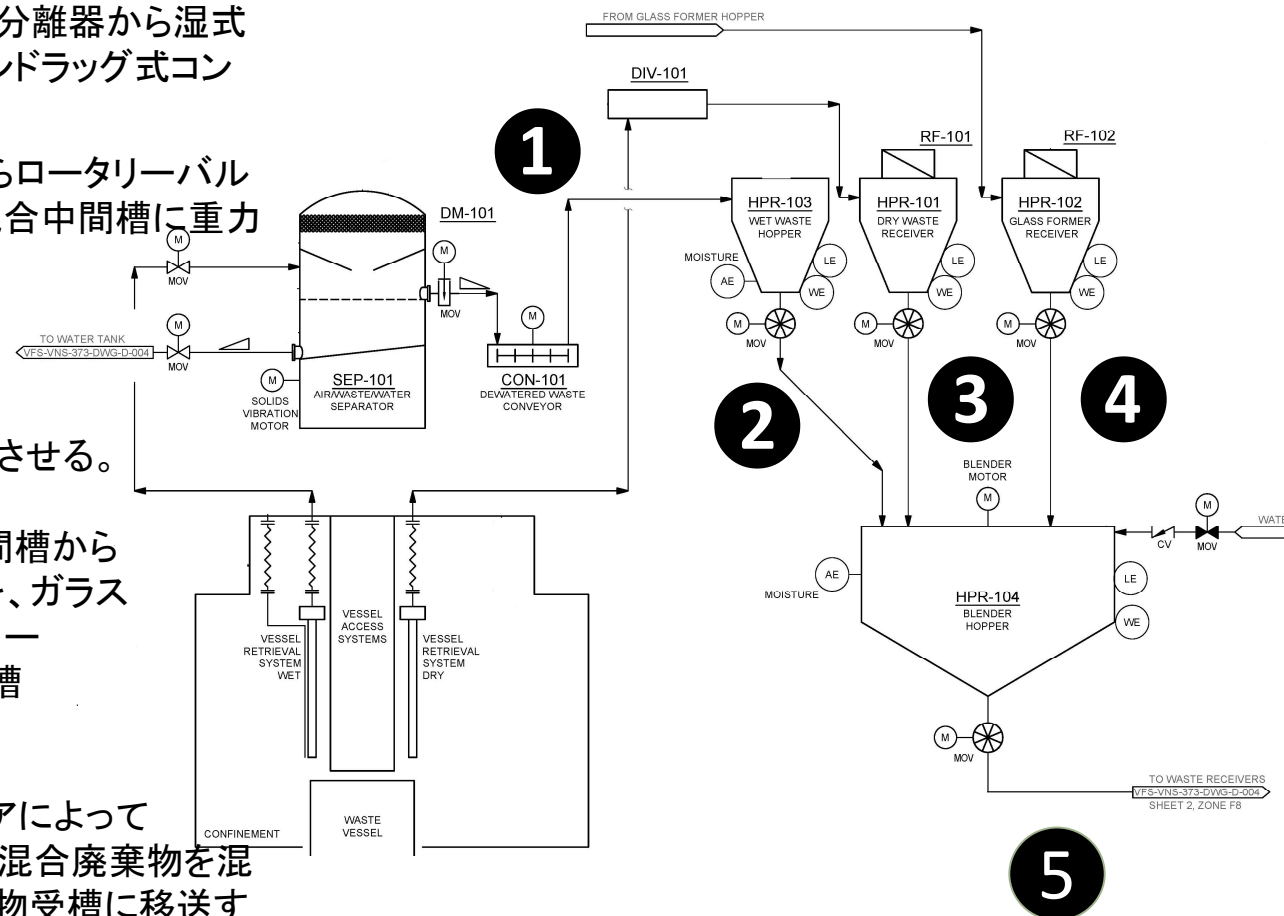
1 チェーンドラッグ式コンベアで分離した廃棄物を空気・廃棄物・水分離器から湿式廃棄物中間槽にチェーンドラッグ式コンベアにて移送する。

2 湿潤廃棄物ホッパーからロータリーバルブに搬出し、廃棄物を混合中間槽に重力落下させる。

3 乾燥廃棄物受槽からロータリーバルブを経て廃棄物を混合中間槽に重力落下させる。

4 空気圧式コンベアで中間槽から移送したガラス形成材を、ガラス形成材受槽からロータリーバルブを経て混合中間槽に重力落下させる。

5 希釈相空気圧式コンベアによってロータリーバルブを経て混合廃棄物を混合中間槽から混合廃棄物受槽に移送する。



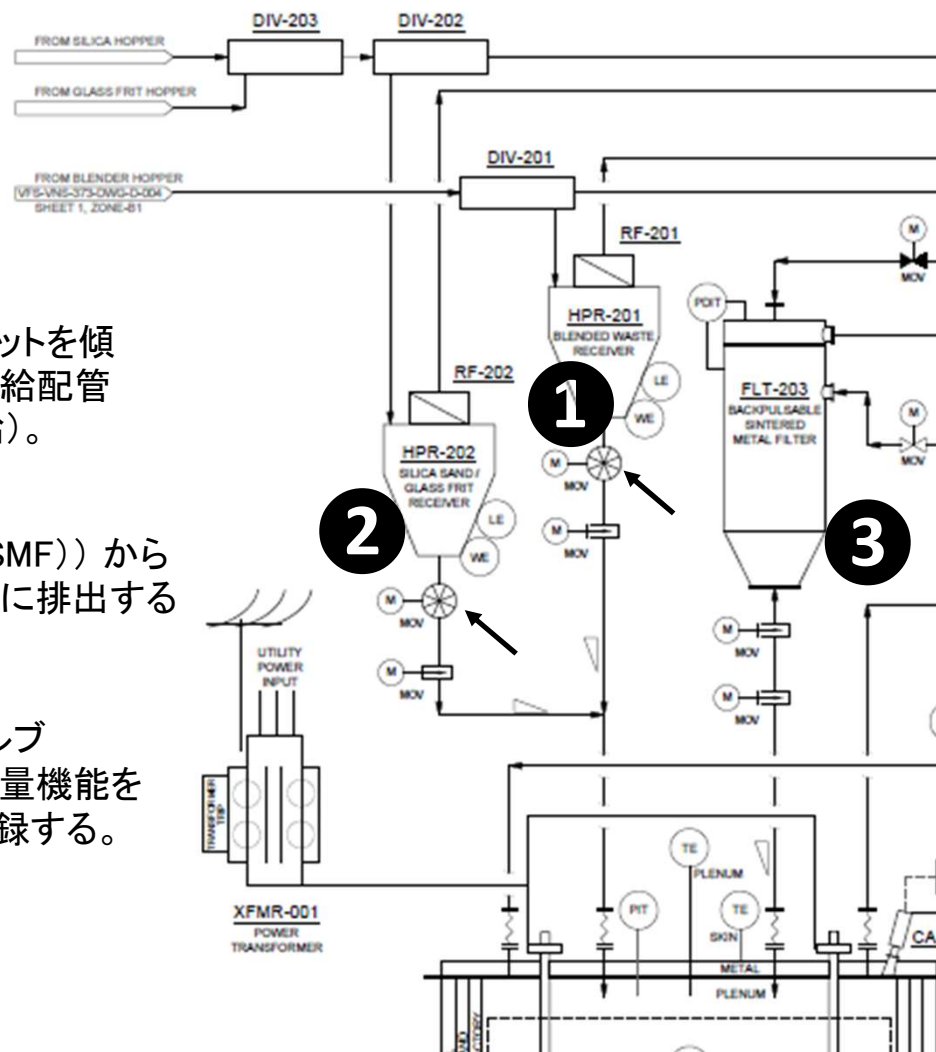
6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(6/13)

廃棄物等の供給:

溶融炉への供給システム

- 1 混合廃棄物レシーバーからロータリー及びゲートバルブシステムを介して混合廃棄物を溶融炉に供給する(重力供給)。
- 2 珪砂・ガラスフリット介して、珪砂とガラスフリットを傾斜(斜行)配管から混合廃棄物レシーバー供給配管へ投入し、次に溶融炉に供給する(重力供給)。
- 3 焼結金属フィルター(Sintered Metal Filter (SMF))からの微粒子を遮断(分離)バルブを経て溶融炉に排出する(重力供給)。

混合廃棄物及び珪砂・ガラスフリットをロータリーバルブ(右図中の↘で示す)で計量する。両方の受槽は計量機能を備えており、溶融炉に供給した廃棄物等の質量を記録する。



6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(7/13)

ICV™ 容器の仕様

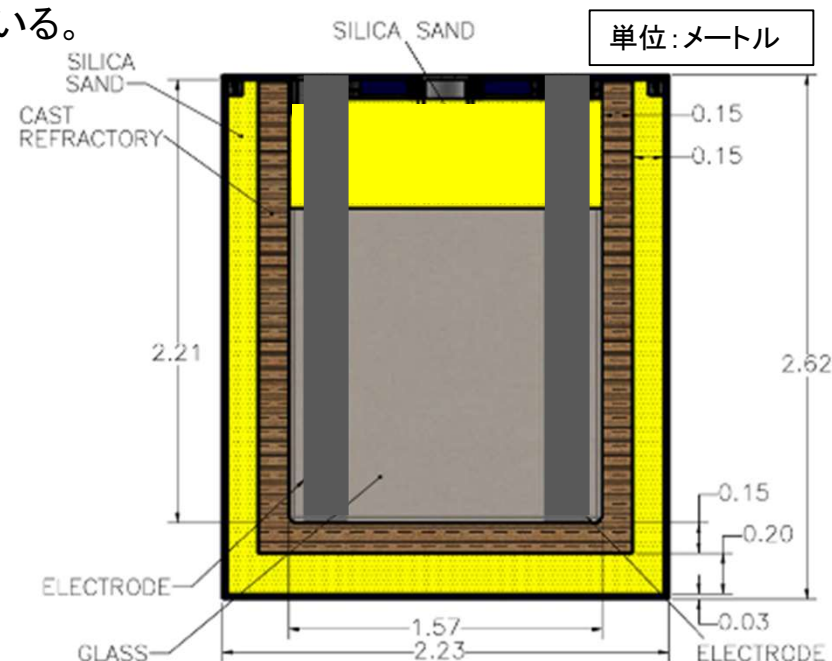
1. ICV™ 容器と蓋は、GeoMelt®ICV™プロセスにおいて溶融炉であり、また廃棄物の処分容器を構成する。
2. ICV™容器は、廃棄物をガラス固化して化学的に安定化し物理的に耐久性のある廃棄物形態としたガラスを収納。
3. ICV™ 容器は、10,000kgのガラスを保持するように設計している。

機器の厚さ

	mm
鋼製(容器と蓋)	25厚さ
耐火砂(側面)	150厚さ
耐火砂(ベース)	200厚さ
耐火砂(上部)(必要な場合)	610厚さ
耐火物容器(側面)	150厚さ
耐火物容器(ベース)	150厚さ
黒鉛電極(4)	200直径

ICV™容器の製造

1. ICV™容器の外壁は25mmの鋼製である。
2. ベースプレートを4面に溶接して製造している。
3. 内部リブ(補強材)やブレース(筋交い)はない。
4. 耐火物容器は一体型成型物であり、焼成して一体型容器を形成する。
強度を持たせるために鋼繊維を含有している。高アルミナ低セメント
キャストブル耐火物(常用温度= 1649℃)を使用する。
5. 耐火砂は99+wt%のSiO₂である。
6. 蓋は25mmの鋼プレート1枚に貫通部を切り出して作製。蓋の下側は、
耐火物容器の内側に適合するシールがある。
これにより、廃棄物が耐火物容器から溢れるのを防止する。



溶融完了後のICV™容器

ガラス上部は溶融運転中はプレナム部であり、溶融後に珪砂を投入してガラス上部の空隙を埋める。

6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(8/13)

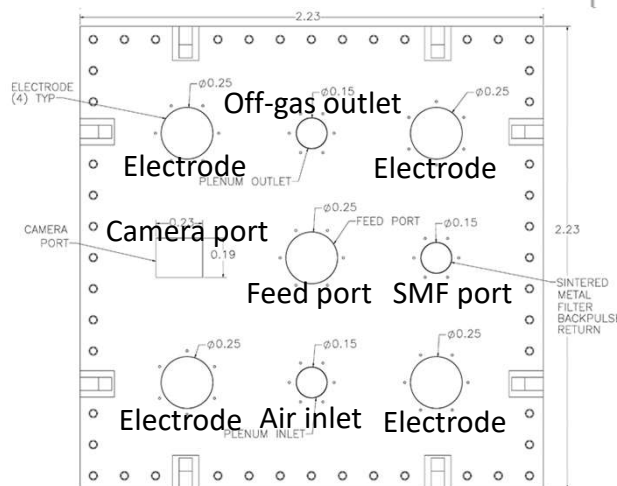
放射線量や汚染が存在しないゾーン3(グリーン区域)であるICV™容器準備区域で溶融運転用にICV™容器を準備する。

溶融前ICV™容器の基本的な準備ステップ:

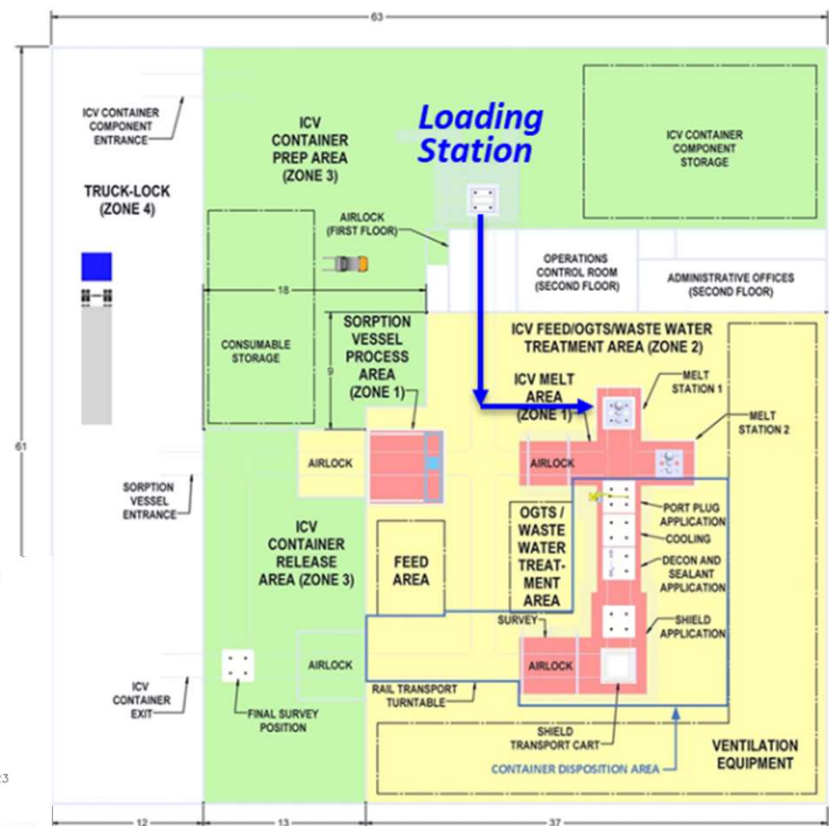
1. 空の鋼製容器をメザニン(中二階)下の装荷ステーションにレールで移動させる。
2. 耐火砂をチェーンドラッグ式コンベアで容器に装荷する。
3. 耐火物容器を天井クレーンで鋼製容器内に設置する。
4. 耐火砂をチェーンドラッグ式コンベアで耐火物容器の外側に装荷する。
5. フリットとスターターパスを耐火物容器のベースに設置する。
6. 容器の蓋を天井クレーンを使用して取り付ける。
7. 電極(4)をスターターパスに取り付ける。

準備完了後、ICV™容器はレールにて溶融ステーションに移動:

溶融ステーションは容器と廃棄物供給、オフガス処理システム、電力供給、計装ラインとを接続し、溶融処理を実施する場所。施設内に2カ所(溶融ステーション1, 2)がある。



ICV™ 容器の蓋の詳細(上面図)



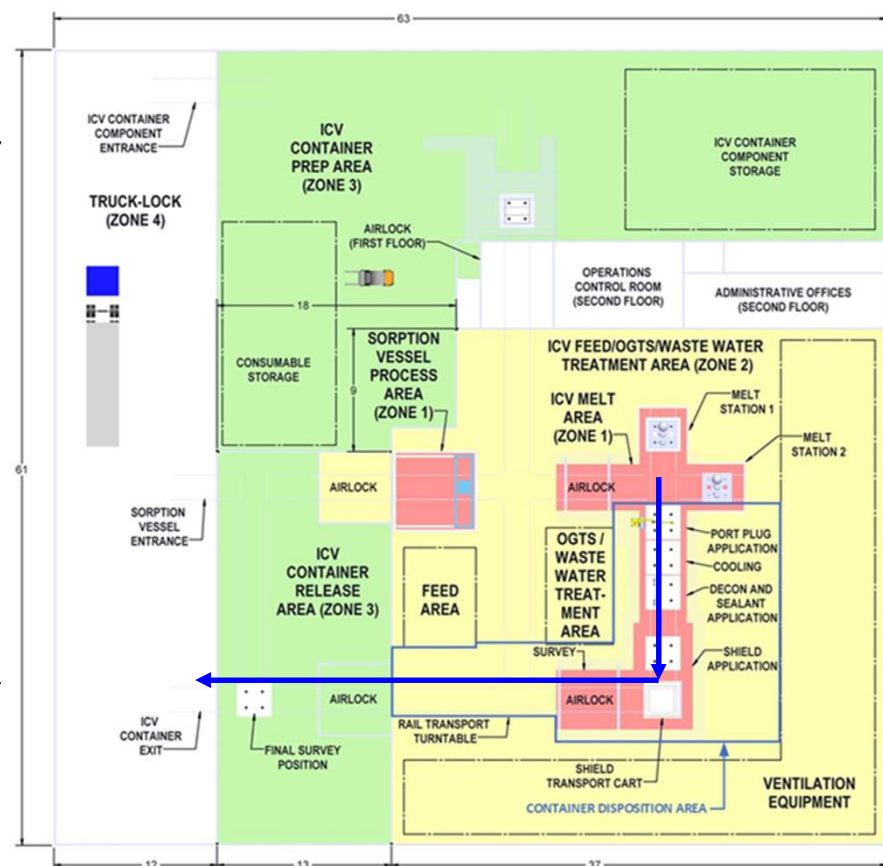
GeoMelt®ICV™施設 設備概略配置図

6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(9/13)

溶融後、ICV™容器冷却・処置区域で搬出のために容器を冷却、封止、検査、遮蔽パネル取り付け

溶融後ICV™容器の冷却と処置の基本的なステップ:

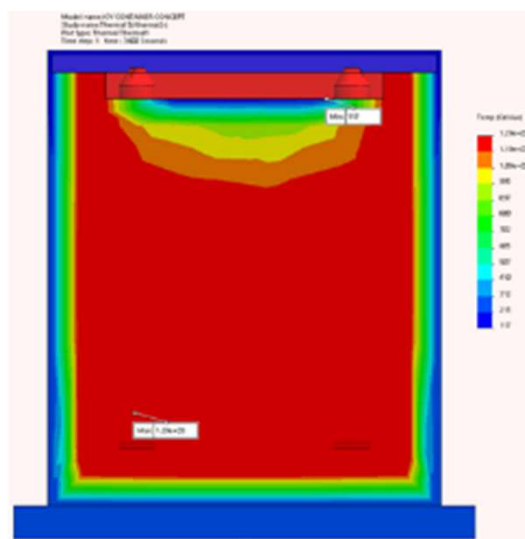
1. 溶融完了後、溶融ステーションで廃棄物供給・オフガス処理システム等との接続を解除する。
2. 容器を容器冷却区域に移動させ、蓋施栓ステーションでポートカバーを遠隔で取り付ける。
3. 容器を除染・封止ステーション移動させ、そこで真空棒状装置を使用してルーズな汚染を除去し、シーリング固定剤をスプレーして残留汚染を固定する。
4. 容器を検査ステーションに移動させ、線量率を測定して線量マップを作成し、製品パッケージの総放射エネルギーを推定する。
5. 容器を遮蔽設置場所に移動させ、着脱可能なモジュール式遮蔽パネル(VNS特許参照: US 10,311,989 B2)を取り付ける。着脱可能なパネルは、厚さ120mmの炭素鋼、または鉛を含む厚さ60mmの炭素鋼である。
6. 遮蔽付きICV™容器: 遮蔽パネルの外側から5cmの位置で0.9mSv/hr。
7. 容器を2つのエアロックを通してゾーン1からゾーン3容器搬出区域に移動させる。
8. 容器を再度汚染検査等してゾーン4トラックロックに移動させ、保管のためにプラントから輸送する。



GeoMelt®ICV™施設 設備概略配置図

6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(10/13)

1. ICV™容器は耐火物で断熱しているため、溶融プロセスによる大きな熱的影響を受けない。
2. 熱モデリング解析によると、溶融完了後1時間での鋼の最高温度は400℃で、鋼の軟化温度である571℃を下回っている。
3. 崩壊熱(唯一の熱源)による最大外部温度は40.5℃になる。



溶融完了後1時間の熱解析
(鋼の最高温度400℃)

分析条件

外面の初期温度
(遮蔽付ICV™容器とICV™容器外側): 300 °C

砂構成部分: 800 °C

耐火物、電極及びガラス: 1300 °C

ガラスの熱伝導率: 1.11 W/(m*K)

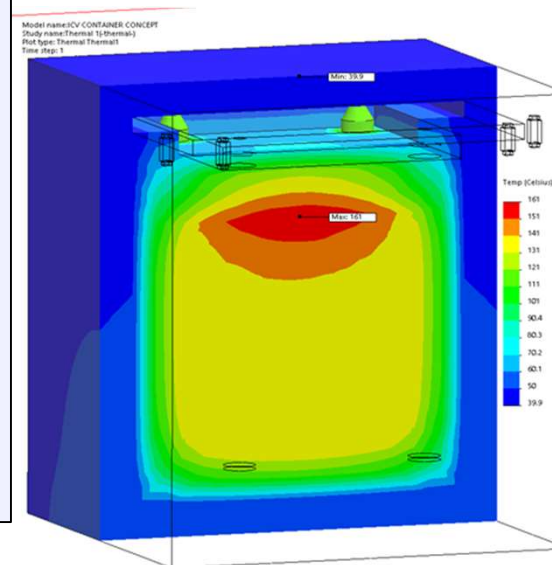
耐火物:
1.74 W/(m*K) @ 540 °C
1.89 W/(m*K) @ 815 °C
2.03 W/(m*K) @ 1093 °C

珪砂: 0.5 W/(m*K)

炭素鋼:

崩壊熱生成密度: 939 W/(m³*K)

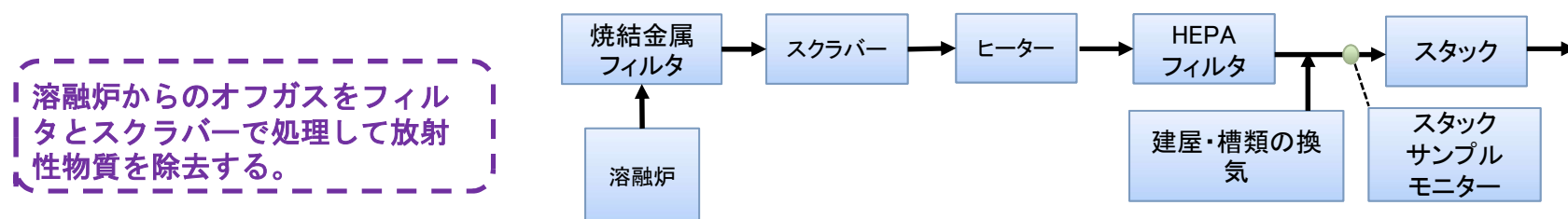
周囲温度: 38 °C



崩壊熱の熱解析
(鋼の最高温度40.5℃)

6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(11/13)

オフガス処理システム(OGTS):



1. ICV™容器のすぐ上の焼結金属フィルタ（SMF）でオフガス処理を開始。ここでオフガス粒子の大部分（99.97％）を除去し、さらに下流のプロセスのために冷氣（バランスエア）を比較的低流量の熱いオフガス排気と混合する。
2. SMFには、高い差圧になった時独立してバックパルスするフィルタキャンドルの束を装着している。同時にバックパルスするフィルタはごくわずかであるため、洗浄サイクル中もフィルタをオンラインのままにすることができる。
3. SMFは水スプレーノズルも備え、バックパルスで完全に除去されない残留物をフィルタキャンドルと内部ハウジングから除去する。その後、バックパルスした粒子状物質と洗浄水は、SMF下のICV™容器内の供給物パイルに直接落下しリサイクルできる。2カ所の溶融ステーションは各々個別のSMFを備えている。
4. オフガスはSMFを通過した後、合流して湿潤スクラバー（充填層スクラバーなど）に入り、そこで少量の有機物やその他の溶解固形物を捕捉して処理する。
5. 湿潤スクラバーを出た後、HEPAフィルタによる最終処理ステージに入る前に、オフガスを加熱して凝縮を防止する。この最後のHEPAフィルタステップでは、オフガススタックを介して大気中に放出される前に、残留粒子の99.97％を除去する。
6. オフガス処理システム全体は排気ファンによって負圧が維持され、この中でオフガスは安全に処理される。

6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(12/13)

物質収支と放射能収支:

- 物質収支を計算して、GeoMelt®ICV™施設のインプット、アウトプット量を算出。
- 放射能収支を計算して、溶融炉オフガス処理システムによる除去、放出量を算出。

Kurion吸着塔廃棄物処理の場合の物質収支

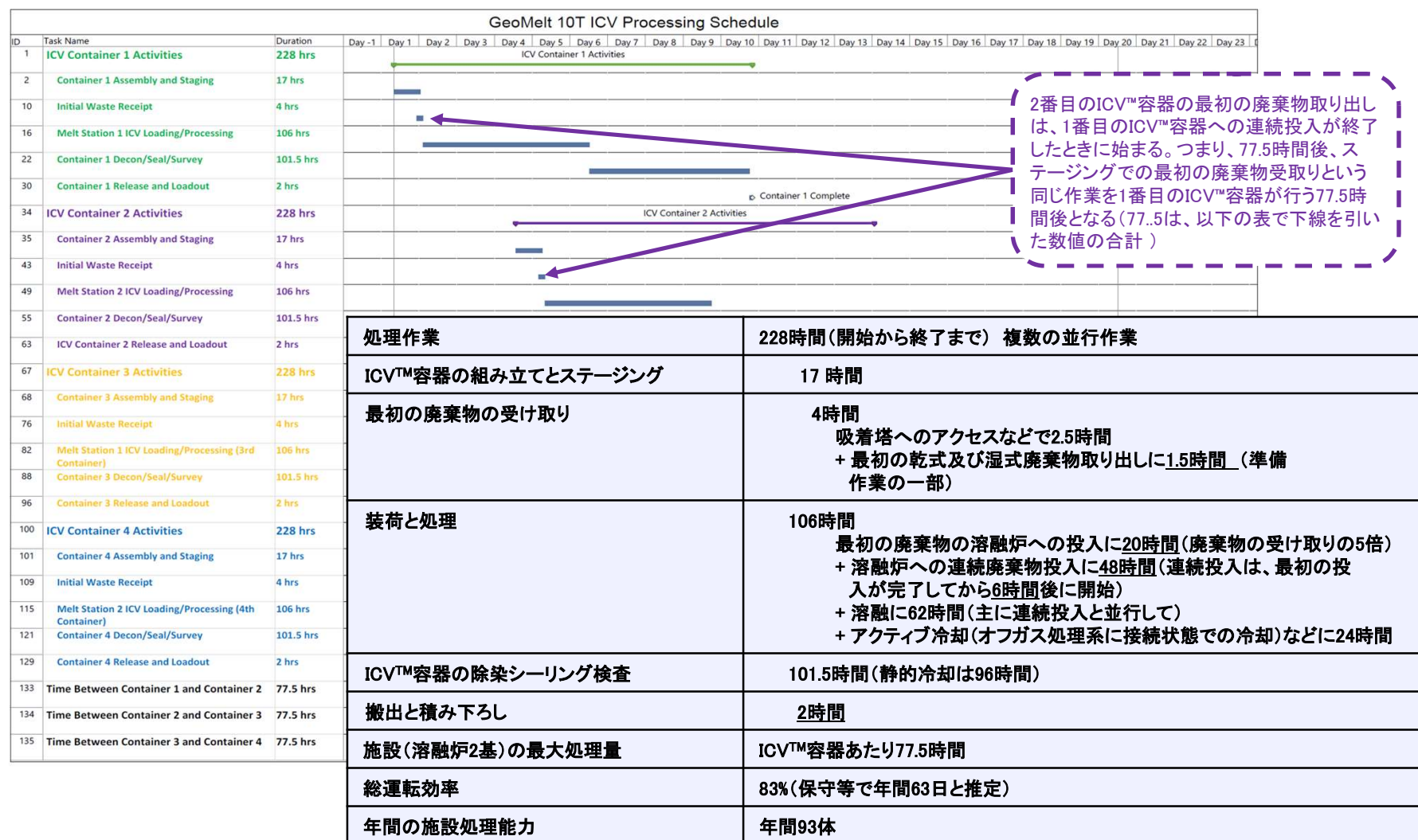


Kurion吸着塔廃棄物処理の場合の放射能収支

項目	Sr-90	Cs-134	Cs-137
ICV™容器あたりの廃棄物とともに溶融炉に投入する量(TBq)	1.65E+03	5.58E+02	8.13E+03
ガラス中の保持率(%)	99.99	99.3	99.3
溶融炉から出たばかりのオフガスの量(TBq)	1.65E-01	3.93E+00	5.73E+01
焼結金属フィルタの捕捉効率(%) 及び処理後の量(TBq)	99.97 4.95E-05	99 1.18E-03 .97	99 1.72E-02 .97
(サブミクロン粒子として)のスクラバーの除去効率(%) 及び処理後の量(TBq)	90		
	4.95E-06	1.18E-04	1.72E-03
プレフィルタとHEPAフィルタの除去効率(2段階)(%) 及び処理後の量(TBq)	90 (プレフィルタ)、99.97 (各HEPA フィルタ)		
	4.46E-14	1.06E-12	1.55E-11
流量とバッチ時間	1566m3/hr 62hr		
放出率(Bq/cm3)	4.28E-13	1.15E-11	1.67E-10
放出制限(施設敷地境界外) (Bq/cm3)	5.00E-06	2.00E-05	3.00E-05

6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(13/13)

- 処理に要する時間を分析して、年間処理量を算出した。



6. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(まとめ)

1. ICV™ 容器(溶融炉かつ処分容器)として 10 tonの固化ガラスを内包する規模を選択。4電極溶融炉、ボトムアップ溶融方式を採用。
溶融処理及びその後の容器冷却、処置時間を勘案し、溶融場所(溶融ステーション:ICV™ 容器と周辺設備(廃棄物供給、オフガス処理、電力供給等)を接続して溶融処理を実施)を2カ所設置。
一方で、溶融処理、容器冷却、処置中に他方で容器の溶融準備が可能。
2. 施設は、77.5時間ごとに1体、年間93体 のガラス固化体製造可能。(現在の789基のKurion吸着塔及び188基のSARRY吸着塔内の廃棄物を1年で処理可能)
3. ICV™ 容器の溶融運転前の準備作業は線源や汚染発生の恐れのないグリーン区域で実施可能。準備完了後、容器は遠隔にてレール上を溶融ステーションに移動、設置。
4. 吸着塔内の処理対象廃棄物取出しは乾式、湿式方式を検討、その組み合わせを採用。取り出した廃棄物の溶融炉までの移送供給方法を検討。
5. 溶融炉の運転(溶融処理)方法は工学規模溶融試験の成果を反映。
6. 溶融炉からのオフガス処理システムの初段に焼結金属フィルターを採用。さらにフィルターで捕捉回収した微粒子を溶融炉にリサイクルする方式により、ガラス固化体の高いCs保持率を確保。

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 安全性評価(1/2)

A. 目的:

1. GeoMelt®ICV™施設の今後の安全基盤を整備する方法について、米国の規制及びガイダンスの例を提供する。
2. 概念設計から最終設計までの安全解析を展開する方法を説明する。

B. 範囲:

1. 米国の規制と他のGeoMelt®プロジェクトからのガイダンスに基づく予備調査（下表参照）
2. 今後、正式な安全解析を実施するために必要な解析とレビューのレベルに関する推奨事項
3. 処理プラントの安全性に影響を与える可能性のあるいくつかの主な危険性と事故シナリオの特定
4. 特定の危険性を軽減または排除するための是正措置の提供

設計は予備概念段階にあるため、安全解析書(SAR)ではない。SARは、今後の詳細設計中に展開される。

- 予備概念設計の段階において、日本国内関係法規(原子炉等規制法、放射線障害防止法等)への適合性、特に、「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して必要な事項を定める告示」等への適合性について問題は無いと判断した。
- 今後、設計の進捗に応じて、幅広く関係法規への適合について詳細具体的に検討確認をすすめるとともに、「福島第一原子力発電所特定原子力施設に係る実施計画」等を参照して設計を実施する。

米国の規制及びガイダンス

基準	US DOE	Guidance
危険性分析	DOE-STD-3009-2014, Preparation of Nonreactor Nuclear Facility Documented Safety Analysis DOE-STD-1189-2008, Integration of Safety Into the Design Process	Center for Chemical Process Safety's Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, Part I DOE-HDBK-1224-2018, Hazard and Accident Analysis Handbook
事故分析	DOE-STD-3009-2014, Preparation of Nonreactor Nuclear Facility Documented Safety Analysis DOE-STD-1189-2008, Integration of Safety Into the Design Process DOE-STD-1020-2012, Natural Phenomena Hazards Analysis and Design Criteria for DOE Facilities	DOE-STD-3014-2006, Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities DOE-HDBK-1224-2018, Hazard and Accident Analysis Handbook
危険制御	DOE-STD-3009-2014, Preparation of Nonreactor Nuclear Facility Documented Safety Analysis DOE-STD-1189-2008, Integration of Safety Into the Design Process	DOE G 423.1-1B, Implementation Guide for Use in Developing Technical Safety Requirements DOE-STD-1186-2004, Specific Administrative Controls.
危険性の分類	DOE-STD-1027-92	—

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 安全性評価(2/2)

GeoMelt®ICV™施設における危険性の例

「危険性のある物質(放射性物質等)」が存在する
GeoMelt®ICV™施設区域

- ・ 廃棄物容器処理区域
- ・ 供給物移送システム
- ・ ICV™ 溶融ステーション
- ・ オフガス処理システム
- ・ 廃水処理区域

作用しうるエネルギー源

- ・ 重力
- ・ 可燃性ガス(プロパン)
- ・ 放射線分解
- ・ 高熱
- ・ 溶融プールの残留エネルギー
- ・ 電気
- ・ 圧力(スクラバー水、空気)
- ・ 廃棄物を混入した空気のフロー

自然または外部事象

- ・ 地すべり、地震、津波、洪水など
- ・ 航空機の墜落、車両事故、ユーティリティの破損、建物の倒壊、爆発
- ・ 一般的な原因(電気、空気、水、スタッフの喪失)

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 運転性と保守性評価(1/2)

A. 目的:

1. 以下について、提案したGeoMelt®ICV™施設を評価する。
 - a. 運転性を低下させたり、保守を妨げたりする可能性のある潜在的な故障メカニズムを特定する。
 - b. 予防的手順を提供し、故障メカニズムを防止または最小限に抑えるための積極的な対応手段を提供。
2. 施設が可能な限り最高レベルの性能、安全性及び効率を発揮することを確実にする。

B. 範囲:

1. ガラス固化及び廃棄物取り出しシステムを含む、GeoMelt®ICV™プロセスに直接関連するシステム
2. 以下の3つのプロジェクトフェーズについての評価:
 - a. 設計、 b. 建設(製作)、 c. 試運転

区域	主要機器	主な懸念事項
ICV™ 容器準備区域	ICV™ 容器と蓋 珪砂とガラスフリット 耐火物ライナーと熔融物内 TC(熱電対) スターターパス 電極	容器の完全性 電極支持 スターターパスの設置 ガラスの閉じ込め ガラスの処理
ICV™ 熔融ステーション	熔融前準備 供給物の投入と熔融開始 圧力センサーと流量センサー 電極接触器 IR カメラ	プロセスラインの遠隔接続 可撓接続の故障 適切な始動と投入管理 除染と輸送の準備 プロセスモニタリングの管理 熔融後のポートの施栓 ICV™ 容器ポートの施栓とパッシブ冷却 除染と蓋の固定剤 容器線量の調査 ICV™ 容器の遮蔽
オフガス処理システム	焼結金属フィルタ(SMF) スクラパーと再循環システム OGTS ヒーター HEPA フィルタ OGTS ファン	長期的信頼性 フィルタとプロセスラインの洗浄 定期的なフィルタの交換と保守 重要機器の冗長性
廃棄物容器取り出し区域	容器アクセスシステム 容器取り出しシステム 遠隔マニピュレーターム 真空ツール 水スプレーツール	長期的信頼性 取り出し効率・容器の清浄度 耐放性 ツールの交換
廃水処理区域	廃水の処理と管理 スクラパー液体の水質管理 水のろ過	長期的信頼性 水質維持 フィルタのモニタリングと交換 水分離効率
供給物取扱い区域	空気圧式移送システム 供給バルブと遮断バルブ 供給ホッパーと受槽	粉塵管理 移送ラインの浸食 移送ラインの速度 供給ラインの詰まりと粘結

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 運転性と保守性評価(2/2)

a. 設計フェーズ

- 潜在的な故障メカニズムを特定し、メカニズムを排除するための措置を講じるか、結果を軽減または最小限に抑える方法を講じる必要がある。
- 特に考慮すべきは、故障とその後の交換が施設の運用に重大な混乱を引き起こすプロセス機器に関連する区域である。
- 設計では、可能であれば、機器をより低い放射能・汚染区域に移動できる機能を組み込むことで、故障した機器の保守も考慮すべきである。
- 特定の機器は、施設の安全な運用に不可欠であり、非安全クラスのシステムから物理的かつ電氣的に分離した専用システムが必要になる。
- 可能な場合は、重要機器と安全関連装置の冗長性を明確にすべきである。
- システム設計はまた、すべての場合において、ALARAの放射線安全原理(合理的に達成可能な限り低い)を適用して、実用的な最大の範囲で危険性を排除または低減しなければならない。

b. 建設(製作)フェーズ

- 運転性と保守性を確保するために適切な品質レベルを維持し、その他の重要な特性を維持することが重要である。
- 提案した製造施設についてその能力を有することを確認するために品質保証担当者がレビューしなければならない。
- 特に考慮すべきは、施設の運転に影響を与えるシステムと安全性に関連するシステムである。

c. 試運転フェーズ

- すべての施設及び支援担当者が適切なO & M訓練を受け、割り当てられた職務に習熟していることを確認する必要がある。
- プロセスと手順を検証し、主要な保守作業の証拠を実証しなければならない。
- 試運転フェーズは、今後の機器性能比較で利用できるベースラインとなる運転データを取得するための貴重な機会でもある。
- 詳細な予備品評価も行い、実用運転の前に適切な予備部品が手元にあることを確認する。
- 運転中断を最小限に抑えるために、このフェーズでは定期的な保守作業を実施すべきである。
- 最適な性能を確保するために、重要な可動部品(ファン、ポンプ、攪拌機)の予防保守を行うべきである。

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 経済性評価(1/5)

A. 目的:

GeoMelt®ICV™施設の経済的利点を流下方式と比較評価する。

B. 評価した領域の範囲:

1. バッチ方式による運転
2. 減容
3. 廃棄物含有率と複数種の廃棄物の処理
4. 消耗品
5. 二次廃棄物と前処理要件
6. プラント効率と処理量
7. 着脱式遮蔽パネルの使用
8. システムの単純さと信頼性

バッチと流下方式の比較:

バッチ方式: 溶融炉内の廃棄物をバッチ単位で処理、ガラス固化体は溶融炉とともに処分

流下方式: 溶融炉内の廃棄物を溶融ガラスとして溶融炉底部からキャニスターに流下、ガラス固化体はキャニスターとともに処分

バッチ方式運転の相対的な利点:

- A. バッチ方式では、各ICV™容器が新しい溶融炉で、特定の廃棄物に対して最適化した処理に合わせて溶融物の化学的性質を独自に調整し、その後、別のバッチで異なる廃棄物処理に対応するように変更できる。流下方式では、溶融炉は1つのみであるが、多くのガラスキャニスターが必要である。
- B. 容器内での優れた熱効率と溶融物の活発な対流により、より大きな処理容器が使用でき、処理量とプロセス効率が向上する。
- C. 耐火物容器は一回のみの使用で、かつその高い耐熱性により、溶融温度を高くできる。これによりシリカが豊富な配合が可能になり、廃棄物含有率を高くできる。
- D. 蓋のサイズが大きく、溶融物の化学的性質を独自に調整できるため、大きな二次廃棄物ストリーム(HEPA、プロセス水フィルタなど)のリサイクルを受け入れることができる。(現在の設計では特別なりサイクル溶融となる)
- E. 容器の誤動作(センサーの誤動作)などによってプロセスが停止することはない-容器の移行(移動)を通常運転の一部として設計しているため、問題が解決するまでオフラインに移動するだけでよい。
- F. 溶融・処理・処分容器が1つであることから、危険な核物質の取り扱いが低減する。
- G. 単純=安全→バブラー、攪拌機、流下口、キャニスター処理装置が不要
- H. 処分可能な溶融炉・処分可能な容器は、従来の溶融炉ガラスキャニスターよりも安価で一般的な材料を使用している。

相対的に不利な点:

- A. バッチごとのICV™容器の交換→これにより、接続箇所の故障リスクが高くなる。最新かつ頑健な設計、開発試験による実証によってリスクを減少させ、管理可能とする。
- B. 一部の消耗品を溶融ごとに廃棄→全体的なコストのごく一部であり、設計中に最適化を検討することで、最も経済的な方法と材料を特定する。

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 経済性評価(2/5)

減容

- 低密度の廃棄物とガラス形成材が溶融中に高密度のガラスに変換される
 - Kurion+ SARRY廃棄物の推定処理量= 1,200 m³
 - 処理後のGeoMelt®ICV™製品の推定量= 360 m³
 - 廃棄物からガラスへの減容率70%削減に相当する。
 - 現在の1Fでの水処理二次廃棄物量(489 カルバート = 17,291 m³)
 - 完全に遮蔽したICV™容器の提案保管量(97 容器 = 1756 m³)
 - $(17,291 \text{ m}^3 - 1756 \text{ m}^3) / 17,291 \text{ m}^3 = 89.8\%$ の減容で、保管量の削減はさらに大きくなる。
- GeoMelt®ICV™プロセスの減容率が高い理由：
 - 10 tonのICV™容器は、小さな廃棄物容器よりもガラス/容器比が大きい。
 - GeoMelt®ICV™は高温(1250～1600℃)で運転するため、低温(1000～1200℃)の流下式溶融炉よりも粘性低下のための添加剤が少ないためガラス中の廃棄物含有量を増やすことができる。
 - 長方形のICV™容器は、円形の容器よりも保管配置が効率的である。

廃棄物含有率

- 廃棄物特性に応じたガラス組成解析とるつぼ及び工学規模試験により、ガラスの品質を維持しながら、本事業において1F廃棄物含有率を最大化した。
- 異なる1F水処理二次廃棄物を混合することにより廃棄物含有率が大幅に向上し、処分するガラスの総量が減少する。
- 廃棄物の組み合わせによるが、廃棄物含有率は最大85%である。
- PNNLの検討結果では、廃棄物の混合とより高いガラス温度の処理によって低温溶融炉よりも多くの廃棄物を含有できることを示している(スライド46)。
- 流下方式溶融炉では耐久性と粘度の観点から、ガラス中の廃棄物含有率が少なくなる。

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 経済性評価(3/5)

消耗品のコスト(ICV™容器を含む)

- ICV™容器は、溶融炉として1回だけ使用し、輸送及び処分容器でもあるため、単純でコストを節約できる。
- 10 tonのICV™容器は、米国のHLW廃棄物キャニスターよりも製造コストが1/7から1/2低く、4倍以上のガラスを保持できると予想される(3.85m³ vs.0.89m³)。
- GeoMelt®ICV™バッチ運転では、より多くの消耗品(珪砂、耐火物容器、熱電対、電極)を使用するが、上記のとおり、これらの消耗品は比較的安価である。複雑な流下、キャニスター及び蓋の取り扱い機器を含む、流下式溶融炉の初期資本コスト、保守コスト及び処分コストと比較すると、さらに安価になる。

二次廃棄物の発生

- GeoMelt®ICV™プロセスは、さまざまなサイズとタイプの二次廃棄物を処理することができる。
- GeoMelt®ICV™施設において、プロセス水フィルタ、HEPAフィルタ、個人防護具、プロセス水洗浄によるイオン交換吸着材等の二次廃棄物が発生。
- GeoMelt®ICV™施設において、これらの二次廃棄物を、二次廃棄物処理専用のICV™容器に装荷して処理することが可能。

前処理要件

- 適切な廃棄物を確実に移送をするための脱水を除いて、計画されている1F水処理二次廃棄物の前処理は不要。
- 上記の二次廃棄物については、細断や配合などの前処理は容易。

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 経済性評価(4/5)

エネルギー伝達(ガラスに供給した電気エネルギーの効率)

- ジュール加熱式溶融炉ではガラスに直接エネルギーを供給し、ガラス自体が発熱するので処理量が高い。
- 他の溶融炉技術(誘導、外部加熱など)では、固有の熱伝達(エネルギー)損失のために効率が低下する。

溶融炉の交換スケジュールとコスト

- GeoMelt®ICV™溶融炉は数時間で交換でき、運転スケジュールに組み込まれる。
- 流下式溶融炉は交換に数ヶ月を要し、その間運転を完全停止する。また、解体、輸送及び処分等に400万から1200万ドルの費用を要すると推定されている(米国廃棄物処理施設)。
- 相対的な運転効率

単純で簡単な交換と保守ができる溶融炉は、長期的な運転効率を大幅に向上させる。

着脱可能な遮蔽パネルの使用

- 着脱可能な遮蔽パネルを採用することによって、ICV™外壁を厚くする場合と比較すると、製造コストと取り扱いの難しさを軽減できる。
- 不要となる内側の遮蔽パネルを撤去できる(隣接する容器が遮蔽となる)ため、この遮蔽パネルの使用により保管スペースが効率的になる。

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 経済性評価(5/5)

システムの信頼性

単純さと信頼性—意図的に単純な設計である。これにより、起こりうる故障メカニズムを回避し、耐用年数が長くなる。

- 機械的故障がほとんど無い。
- 主要機器には冗長性がある(電極、オフガスファン、HEPAフィルタなど)。
- 問題が発生した場合、溶融炉を簡単に取り外すことができるため、プロセス運転を続行できる。
- ICV™容器をパッシブ空冷することで、冷却メカニズムを簡素化できる。
- 過去20年間にわたって多くの形状とサイズで基本的なGeoMelt®ICV™設計を使用しており、その過程で継続的に改善してきた。
- 以上より技術成熟度レベル(TRL*)は高いと評価できる。

* Technology readiness levels



250kgの工学規模試験装置—
米国



500kg の試験設備— 英国



10tonの処理施設— 日本



50tonの処理施設— 米国

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 廃棄物の取り出し、取り扱い、供給システムに関する評価(1/5)

目的： 廃棄物等の①取り出し ②取り扱い ③供給 の各システムを評価

各システムの要件：

- ① 取り出し：吸着塔から廃棄物を除去(取り出し)する。
- ② 取り扱い：前処理(水の追加または除去、ガラス形成材との混合)のためにこれらの材料を移送する。
- ③ 供給：配合した廃棄物を溶融炉(ICV™容器)に運ぶ。

①取り出しシステム： 乾式及び湿式取り出しシステムに共通の要件：

- 吸着塔から移送配管へ廃棄物を取り出す。
- 遠隔操作
- 棒状装置に設置したカメラで見て、目視できる廃棄物が容器内になくなるまで廃棄物を除去する。
- 汚染管理

乾式取り出しシステム独自の要件：

- 粉塵管理

乾式取り出しで除去できなかった目視できる残留廃棄物を湿式取り出しで除去する。

湿式取り出しシステム独自の要件：

- 液体管理

②取り扱いシステムの要件：

- 遠隔操作
- 移送配管を介して乾式及び湿式取り出し廃棄物を廃棄物受槽へ輸送する。
- 湿式取り出し廃棄物を $20 \pm 5\text{wt}\%$ に脱水してから、廃棄物受槽に移す。
- 受槽からブレンダーホッパーへ廃棄物を運ぶ。

③供給システムの要件：

- 遠隔操作
- 混合中間槽で廃棄物とガラス形成材を配合する。
- 混合中間槽に水を加えて $20 \pm 5\text{wt}\%$ の含水量を達成する機能
- 混合廃棄物をICV™容器に投入する。
- 溶融終了時にTOFと珪砂を投入する。

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 廃棄物の取り出し、取り扱い、供給システムに関する評価(2/5)

①取り出しシステム： 2つの方法を比較

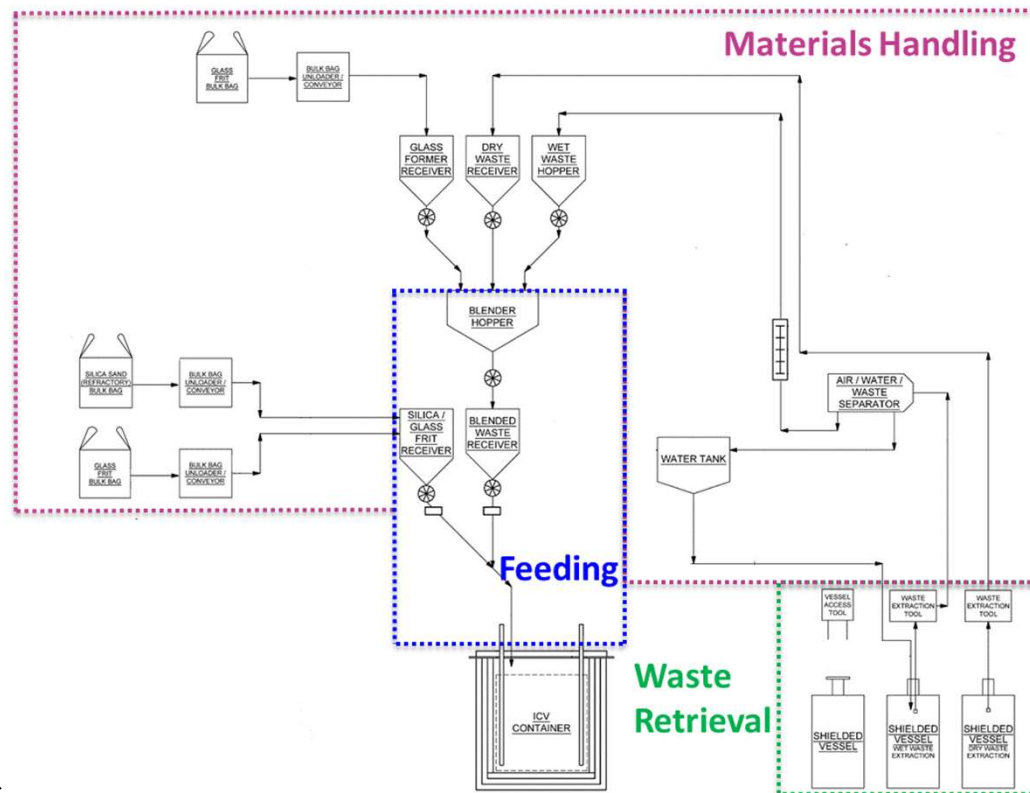
- (a) 乾式取り出しシステム
=乾式真空取り出し
- (b) 湿式取り出しシステム
= 湿式スルーシング取り出し

1) 乾式と湿式取り出しシステムの類似点：

- (1) 中空の剛性パイプ(棒状装置)を使用して、吸着塔から廃棄物を吸引。
- (2) 棒状装置には、吸着塔内に挿入した装置の外側を見るための照明付きカメラを装備。
- (3) 吸引して廃棄物を取り出す。

2) 乾式と湿式取り出しシステムの相違点：

- (1) 乾式：先端にエアジェットと粉砕プレート機能を備えた棒状装置に空気を吹き込んで廃棄物を取り出す。
- (2) 湿式：先端にスルーシングノズル機能を備えた棒状装置に水をポンプで送り、水を噴射して材料を取り出す。



廃棄物の取り出し、取り扱い及び供給システム

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 廃棄物の取り出し、取り扱い、供給システムに関する評価(3/5)

①取り出しシステム： 具体的な操作

- 遠隔操作装置で吸着塔取扱い装置を制御して、吸着塔の遮蔽カバーを取り外して再度取り付け、上部フランジから吸着塔に接近し、廃棄物を取り出した後にプラグを取り付ける。
- SARRY吸着塔の場合も吸着塔取扱い装置で遮蔽カバー等を取り外し、廃棄物を取り出した後にプラグを取り付ける。

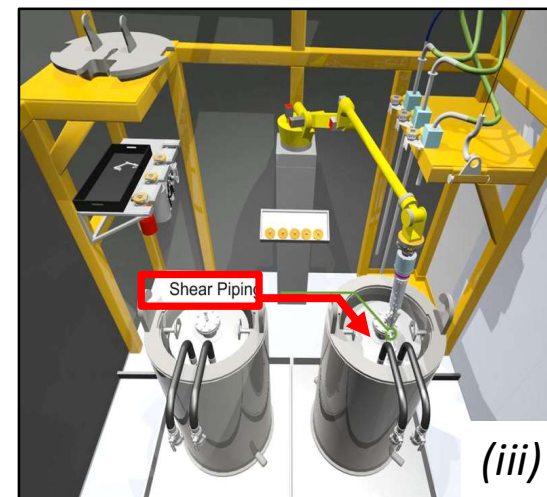
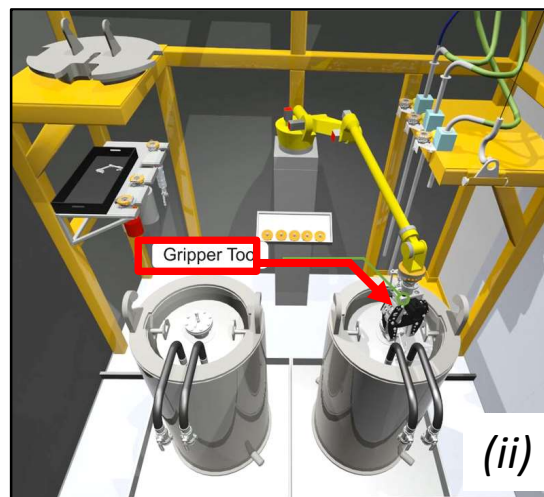
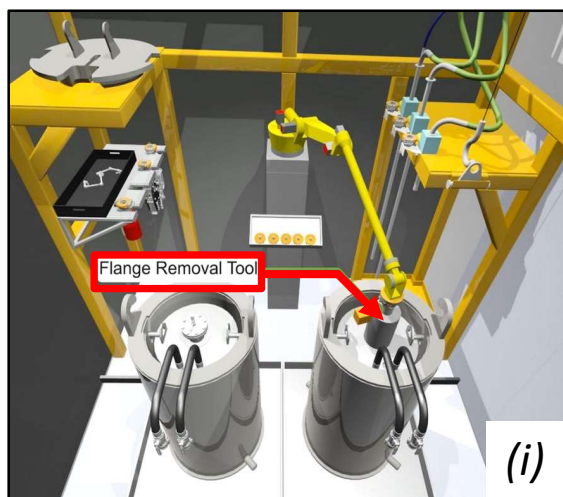
下図はそれぞれ以下を示す。

(i) フランジ取り外し装置を使用したKurion吸着塔上部フランジの取り外し

(ii) 配管保持

(iii) 配管せん断

- 配管をせん断して取り出し吸引用棒状装置で吸着塔に接近

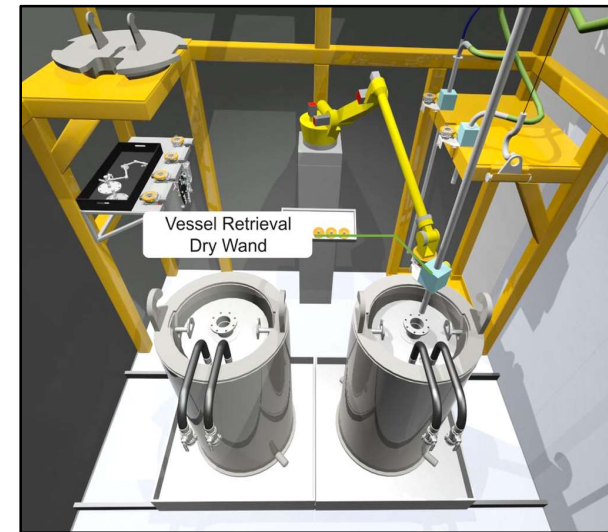


7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 廃棄物の取り出し、取り扱い、供給システムに関する評価(4/5)

①取り出しシステム：装置概要

(a)乾式取り出し棒状装置：(右上図 (i) 参照)

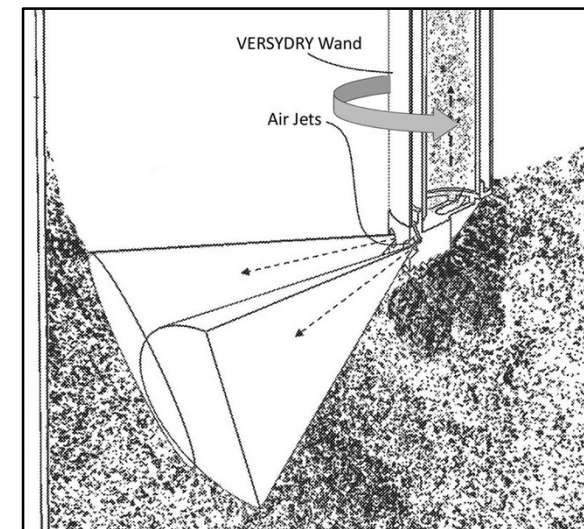
- 遠隔操作装置で乾式取り出し棒状装置を制御する。
- 棒状装置は、容器から廃棄物を吸引する回転式中空パイプである。
- 棒状装置先端は一方の側から空気を吹き出し、もう一方の側は廃棄物を吸引する。(右下図 (ii) 参照)
- 棒状装置先端には、廃棄物を取り除くのに役立つ研磨プレートが付いている場合もある。
- 棒状装置下部に設置したカメラを使用して、吸着塔内の廃棄物を目視する。
- 希薄相空気圧式コンベアによって乾燥廃棄物を乾燥廃棄物受槽に移動させる。



(i) 乾式取り出し棒状装置

(b)湿式取り出し棒状装置：

- 遠隔操作装置で湿式取り出し棒状装置を制御する。
- 棒状装置は、吸着塔から廃棄物を吸引する回転式中空パイプである。
- 棒状装置先端は一方の側から水を汲み出し、もう一方の側では廃棄物を吸引する。
- 棒状装置下部のカメラを使用して、吸着塔内の廃棄物を目視する。
- 希薄相空気圧式コンベアによって廃棄物を空気・廃棄物・水分離器に移動させる。



(ii) 乾式取り出し棒状装置の先端機能

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 廃棄物の取り出し、取り扱い、供給システムに関する評価(5/5)

①取り出しシステム： システムの選択・設定

- 乾式取り出し法は湿式取り出し法よりも簡単で早い。
- 乾式取り出しが利点が多いが、GeoMelt®ICV™施設では両方を設置する。
- GeoMelt®ICV™施設の物質とエネルギーの収支では、廃棄物のうち75%を乾式取り出し、25%を湿式取り出しによる処理と設定する。

②取り扱いシステム：

- バッグ開梱・コンベア(希薄相空気圧式コンベア)にて、以下を移動させる：
 - ガラス形成材を混合中間槽へ
 - 耐火砂をシリカ・ガラスフリット受槽へ
 - ガラスフリットをシリカ・ガラスフリット受槽へ
- 分離した廃棄物をチェーンドラッグ式コンベアで空気・廃棄物・水分離器から湿式廃棄物中間槽へ移動させる。
- ロータリーバルブを経て重力によって廃棄物を乾燥廃棄物受槽と湿潤廃棄物中間槽から混合中間槽に移動させる。
- ロータリーバルブを経て希釈相空気圧式コンベアによって混合廃棄物を混合中間槽から混合廃棄物受槽に移動させる。

③供給システム：

- 混合廃棄物受槽からロータリー及びゲートバルブシステムを経て、希釈相空気圧式コンベアによって廃棄物を溶融炉に供給する。
- シリカ・ガラスフリット受槽からロータリー及びゲートバルブシステムを経て、希釈相空気圧式コンベアによって珪砂とガラスフリットを投入する。

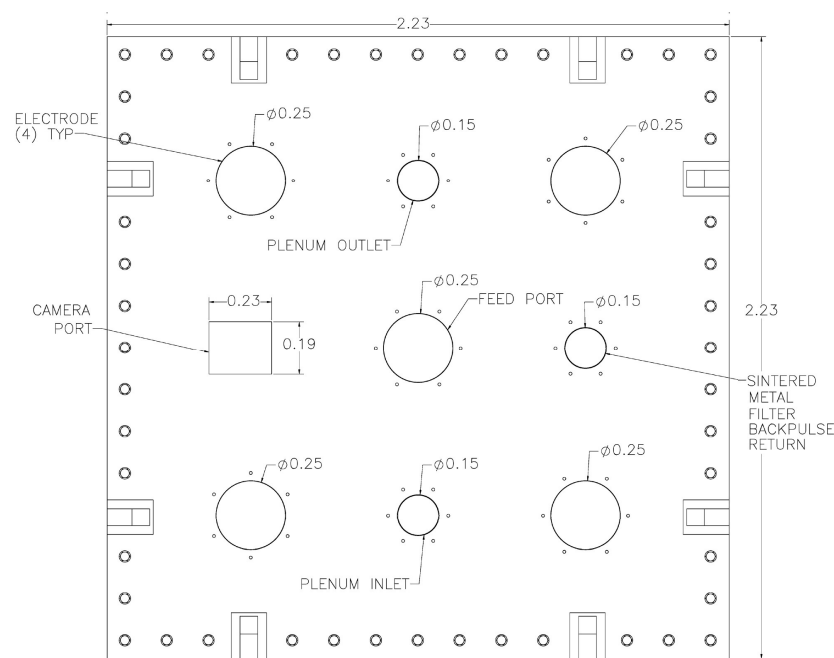
7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 製品パッケージ評価(1/2)

目的

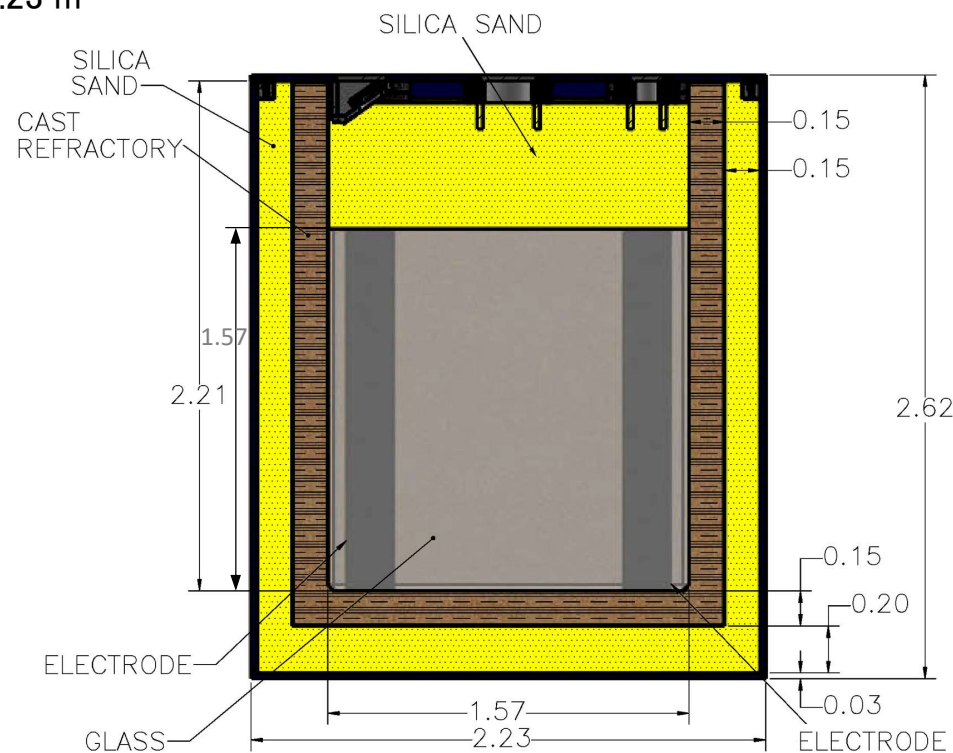
- 最終廃棄物パッケージ(GeoMelt®ICV™容器)の構造を詳述する。

構造説明

- 10 tonのガラスを保持するようにICV™容器を設計
- 製品パッケージ全体(ガラス、耐火物容器、耐火砂、鋼製外壁と蓋)の重量は30,212kg
- 着脱可能な遮蔽パネルを含めると、製品パッケージの重量は65,340kg
- ICV™容器の外形寸法は高さ2.62 m、幅2.23 m x 2.23 m
- 固化ガラスの寸法は1.57 m x 1.57 m x 1.57m



ICV™容器の蓋の詳細(上面図)



ICV™容器と内部(側面図)

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 製品パッケージ評価(2/2)

短期的な熱の影響に対するICV™容器の健全性：

- ICV™容器は、耐火物によって断熱されているため、溶融プロセスによる大きな熱的影響を受けない。予備概念設計で行った熱解析では最大鋼温度400℃であり、571℃の鋼軟化温度を下回っている。
- 崩壊熱による最大外部温度は40.5℃である。

着脱可能な遮蔽パネル*：

- 着脱可能な遮蔽パネル：
厚さ120mmの炭素鋼(または鉛を含む厚さ60mmの炭素鋼)
- ICV™容器の外側の搭載箇所に取り付ける。
- ICV™容器をゾーン3容器搬出区域へ移動させる前に、ゾーン1遮蔽設置場所でこれらを取り付ける。
- ICV™容器は並べて保管し、積み重ねることができる。
- 隣接・積み重ね保管前に、パネルを隣接面から取り外す。

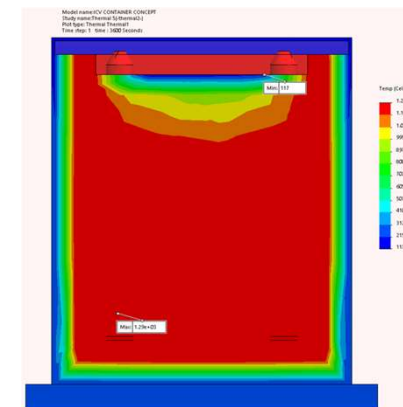
表面線量率：

- 遮蔽したICV™容器：0.9mSv/hr

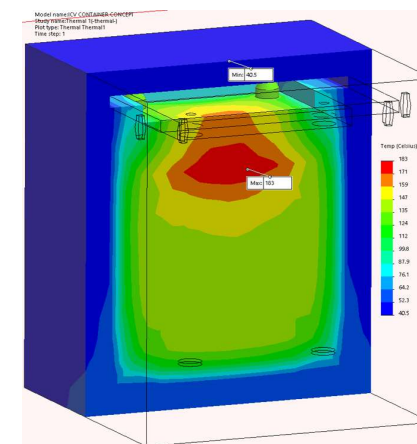
* VNS特許参照(US 10,311,989 B2)



着脱可能な遮蔽パネルを備えた8体のICV™容器



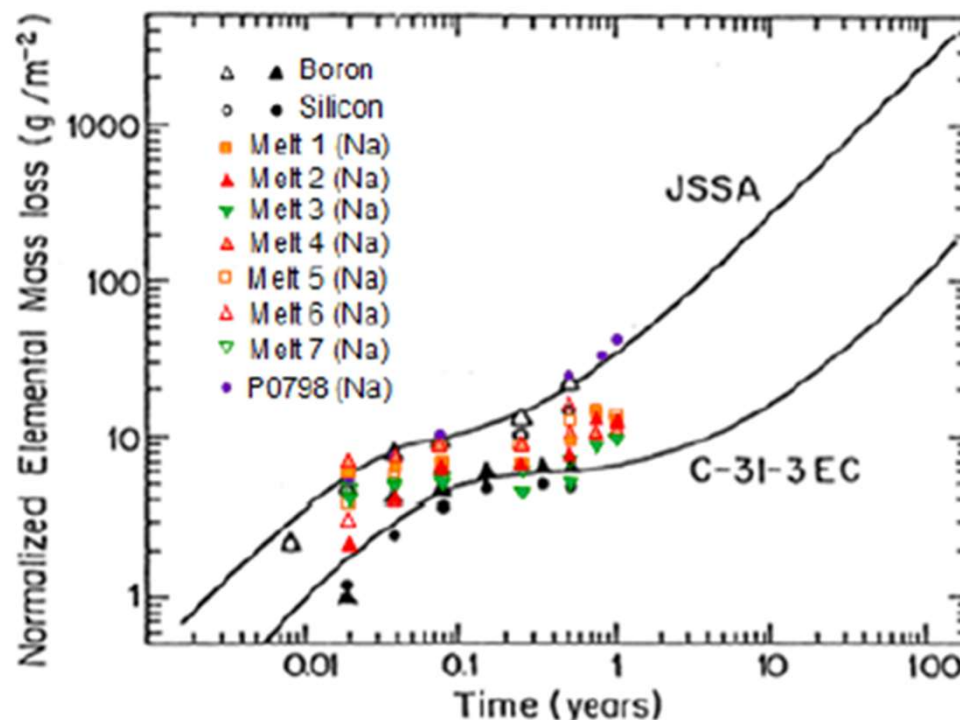
溶融完了後1時間の熱解析
(鋼の最高温度400℃)



崩壊熱の熱解析
(鋼の最高温度40.5℃)

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： ガラス性能評価(1/2)

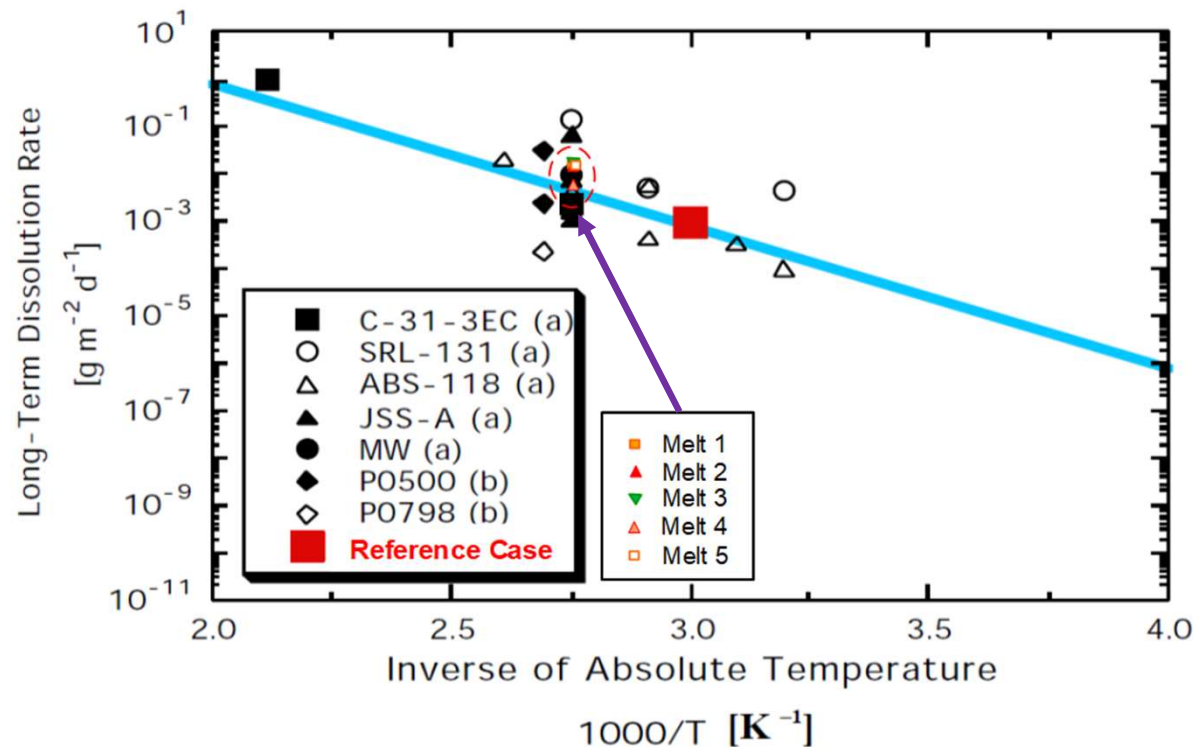
- 工学規模試験で取得したGeoMelt®ICV™ガラス固化体の化学的耐久性等のデータをもとに、ガラス固化体の性能評価として固化体からの核種浸出率(地下水への溶解速度)を評価した。
- 工学規模試験1～7及び基準ガラスのNaの規格化質量損失を他の浸出試験結果によるB及びSiの規格化質量損失と比較した。
- ガラス固化体の溶解特性は、3つのステージ領域からなる；1)初期溶解速度支配領域、2)飽和近傍安定状態領域、及び3)珪酸塩鉱物の急速な溶解による腐食加速領域



JSS A: CRIEPI(日本)、NAGRA(スイス)及びSKB(スウェーデン)が実施した「JSSプロジェクト」で生じた液体放射性廃棄物のガラス固化体(1984-1988) C-3I-3EC: ECの模擬ガラス固化体

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： ガラス性能評価(2/2)

- 溶解珪酸濃度飽和以降の浸出率に基づいて、HLW地層処分に向けたさまざまなガラス固化体の長期溶解速度が算出されている。
- 処分場温度を60°Cとした日本のHLW処分プログラム長期溶解速度の値(レファレンスケース)は、この図に示す回帰直線から $1\text{E-}3 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ と計算されている。



- MCC-1試験結果(37、79ページの図)よりGeoMelt®ICV™ガラスがHLWガラスよりも化学的耐久性が優れていることを確認。
- GeoMelt®ICV™施設ガラス固化体は、溶解速度がHLWガラス固化廃棄物の評価で使用する長期溶解速度($1\text{E-}3 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$)と同等であり、高い放射性核種閉じ込め機能が期待される。

7. GeoMelt®ICV™施設の予備概念設計の評価： 評価結果（まとめ）

1. 安全性評価により、米国の規制ガイダンスに沿った施設安全基盤の整理方法を検討、危険性のある物質や作用するエネルギー等を特定。日本国内関係法規への適合性に問題は無いと考えられるが、今後の設計進捗に応じて幅広く、具体的な検討が必要。
2. 運転性・保守性評価により運転性低下や保守妨害の可能性のある潜在的な故障を特定し、予防的手順をまとめた。
3. 経済性評価により、GeoMelt®ICV™の特徴であるバッチ運転方式の経済的な優位性を明確化。さらに、消耗品や二次廃棄物等の観点からも経済的に優れていることを示した。
4. 廃棄物の取り出し・取り扱い評価では、乾式及び湿式取り出しを比較検討し、その最適な組み合わせを設定した。
5. 製品パッケージ評価により、製品パッケージ（廃棄物を熔融処理した固化ガラスを内包するICV™容器）全体構造について、外側に設置する遮蔽体を含め取りまとめた。
6. ガラス性能評価によって、GeoMelt®ICV™ガラス固化体は、溶解速度がHLWガラス固化体の評価で使用する長期溶解速度（ $1\text{E-3 g/m}^2\cdot\text{d}$ ）と同等であり、高い放射性核種閉じ込め機能を有することを確認した。

8. 本事業のまとめ

1. 1F水処理二次廃棄物のうち主要な模擬廃棄物の工学規模溶融試験4から7では、高い廃棄物含有率(67%~79%)、高い減容率(74%~76%)、非常に高いセシウム(Cs)保持率(97.72~99.44%)、及び日本のHLW基準ガラスと比較して優れた化学的耐久性を実証した。
2. 工学規模溶融試験8では、事故事象を想定した緊急停止後の溶融を遠隔により再開する方法を実証し、また、ゼオライトの代わりにガラス形成材として、1F土壌の処理も実証した。
3. 廃棄物処理用ガラス配合データの拡充のため更なる1F廃棄物に対する新しいガラス配合とるつぼ試験を実施し、GeoMelt®ICV™が1F水処理二次廃棄物の大部分に適用可能であることを実証した。
4. 1F水処理二次廃棄物の組成変動と溶融温度による影響を評価するPNNLのモデリングにて、廃棄物の混合と高い溶融温度によって処分するガラス固化体の総数を減らせることを明らかにした。
5. Cs揮発抑制メカニズムの研究によりコールドキャップ管理(GeoMelt®ICV™溶融における運転方法)の有効性を明らかにした。
6. 1F水処理二次廃棄物をGeoMelt®ICV™にて処理する施設の予備概念設計を実施した。設計した施設では、2基の10ton規模の4電極溶融炉でガラス固化体を77.5時間ごとに1体、年間で93体を製造できる。本施設の乾式及び湿式法による廃棄物取り出し・取り扱い、溶融炉への供給プロセス、溶融炉からのオフガス処理システム等を設計した。
7. GeoMelt®ICV™施設の安全性評価を行い、潜在的危険性を特定するとともに今後の安全基盤整備に向けた手順を検討した。また、運転保守性、経済性を評価し、確実な運転保守のための方策をまとめるとともに、経済的優位性を明らかにした。さらに、廃棄物取出し・取り扱い方法の比較評価、本施設の製品となるガラス固化体パッケージの構造を明らかにした。ガラス性能評価によって、GeoMelt®ICV™ガラス固化体は高い放射性核種閉じ込め機能を有することを確認した。

最後に

以上が廃炉・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）（2019～2020年度）として実施した「1F水処理二次廃棄物処理へのGeoMelt®ICV™の適用性に関する総合評価」の成果となります。