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）

2021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

2022年12月5日

（株）キュリオン ジャパン

VEOLIA NUCLEAR SOLUTIONS

目　次

1. 目 的
2. 実施スケジュール
3. 実施体制
4. GeoMelt®ICV™の特徴
5. GeoMelt®ICV™ 適用のための検討項目
6. これまでの補助事業における実施内容・結果と2021年度実施項目の関係
7. 2021年度補助事業の実施内容と成果
   7.1 溶融終盤のCs揮発抑制に関する試験
   7.2 工学規模システムの改造とチェックアウト溶融試験
   7.3 工学規模溶融試験
   7.4 ガラス配合・耐久性試験
   7.5 GeoMelt®ICV™の適用性の総合評価
8. まとめ

1. 目 的

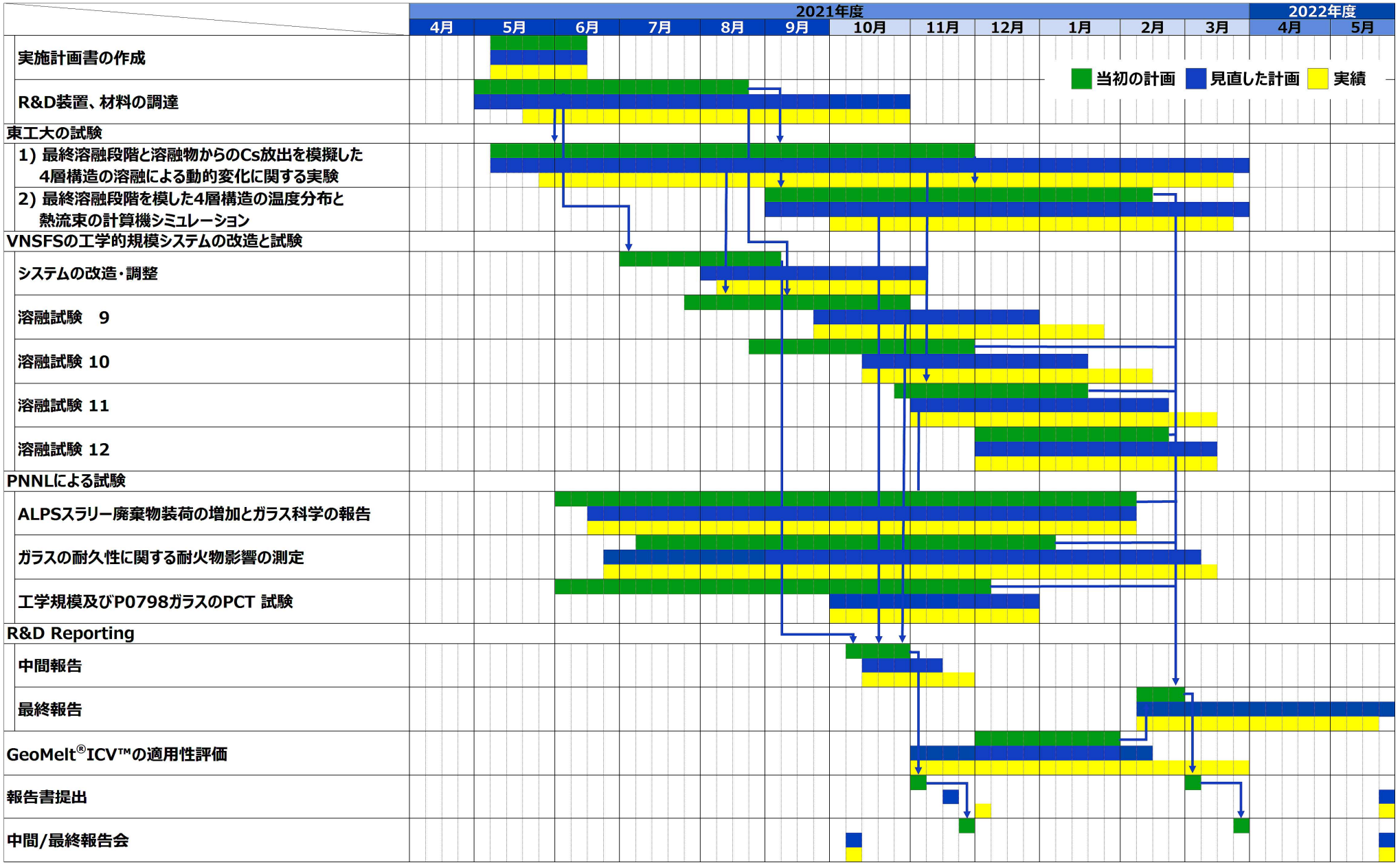
1) 東京電力ホールディングス株式会社（TEPCO）福島第一原子力発電所（以降1F と称す）で発生している莫大な量の水処理二次廃棄物（使用済吸着材［ゼオライト等］、スラリー及びスラッジ）の安定化、固定化の処理方法として、GeoMelt®ICV™技術を適用する総合評価を昨年度までの補助金事業から継続して実施する。

2) 昨年度までの補助金事業では、工学規模溶融試験、ガラス配合・るつぼ試験、製造したガラスの耐久性試験、Cs揮発抑制に関する基礎試験、処理施設の予備概念設計等を実施。この結果、水処理二次廃棄物処理中のCs放出を低減させ（ガラスのCs 保持率97.22%～99.44%）、かつ耐久性に優れたガラス固化体にできることを実証した。

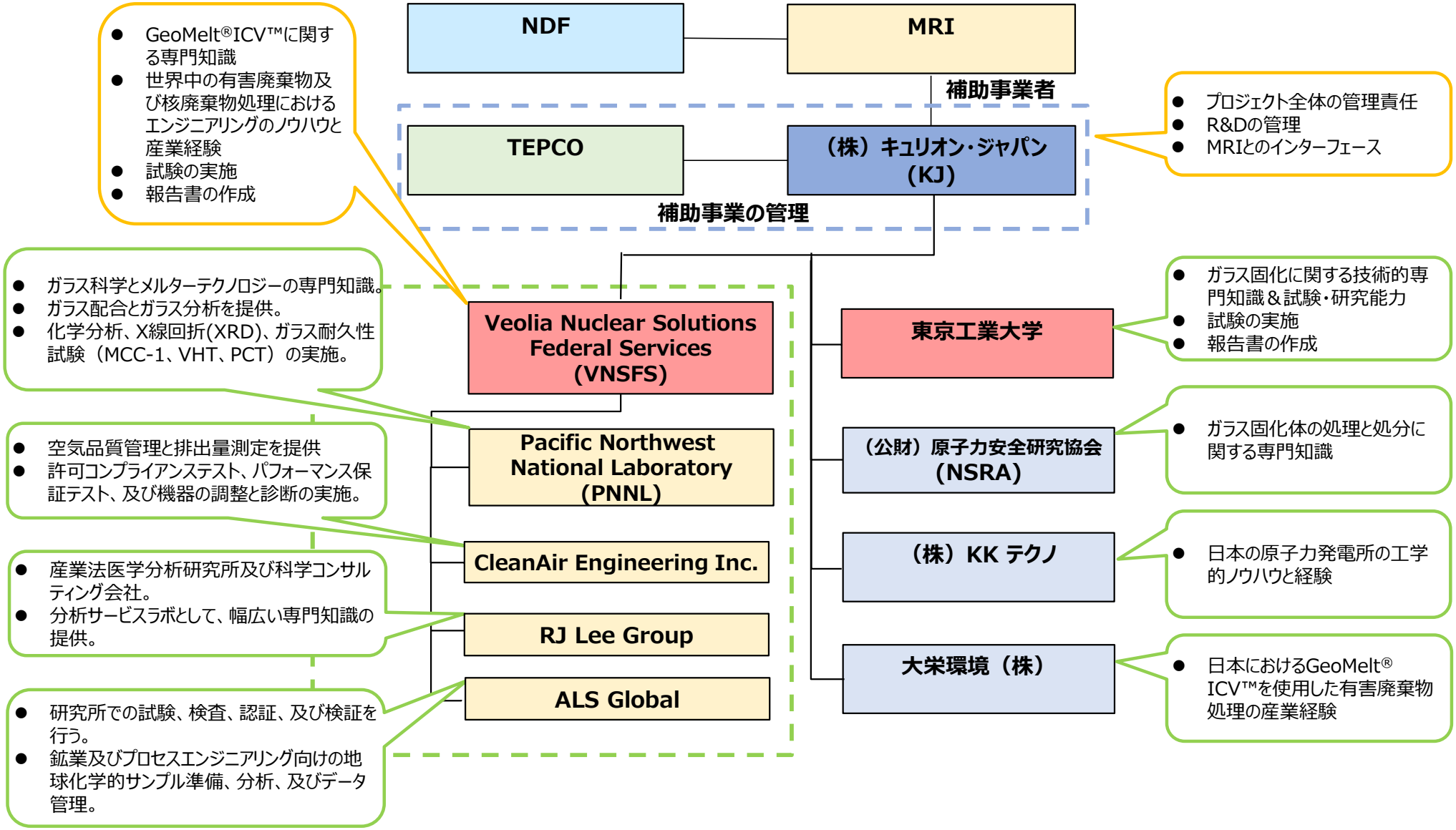
3) 2021年度の補助金事業では、残る技術的課題への対応、廃棄物処理プロセス改善及びCs保持の更なる改善を目的として、溶融終盤のCs揮発抑制に関する試験、焼結金属フィルターを組み込んだ溶融試験装置による工学規模溶融試験（廃棄物としてALPSスラリー脱水物[1]を含む）等を実施。これまでの補助金事業の成果を含めて、GeoMelt®ICV™の適用性の総合評価を行う。

1：ALPS 炭酸塩脱水物及び鉄共沈脱水物は、ALPS 炭酸塩スラリー及び鉄共沈スラリーを㈱ATOXがそれぞれ脱水処理したものである。

2. 実施スケジュール


2021年度
2022年度
4月
5月
6月
7月
8月
9月
10月
11月
12月
1月
2月
3月
4月
5月
当初の計画
見直した計画
実績
実施計画書の作成
R&D装置、材料の調達
東工大の試験
1) 最終溶融段階と溶融物からのCs放出を模擬した4層構造の溶融による動的変化に関する実験
2) 最終溶融段階を模した4層構造の温度分布と熱流束の計算機シミュレーション
VNSFSの工学的規模システムの改造と試験
システムの改造・調整
溶融試験　9
溶融試験 10
溶融試験 11
溶融試験 12
PNNLによる試験
ALPSスラリー廃棄物装荷の増加とガラス科学の報告
ガラスの耐久性に関する耐火物影響の測定
工学規模及びP0798ガラスのPCT 試験
R&D Reporting
中間報告
最終報告
GeoMelt®ICV™の適用性評価
報告書提出
中間/最終報告会

3. 実施体制


NDF
MRI
補助事業者
TEPCO
（株）キュリオン・ジャパン
(KJ)
補助事業の管理
GeoMelt®ICV™に関する専門知識
世界中の有害廃棄物及び核廃棄物処理におけるエンジニアリングのノウハウと産業経験
試験の実施
報告書の作成
プロジェクト全体の管理責任
R&Dの管理
MRIとのインターフェース
Veolia Nuclear Solutions Federal Services (VNSFS)
ガラス科学とメルターテクノロジーの専門知識。
ガラス配合とガラス分析を提供。
化学分析、X線回折(XRD)、ガラス耐久性試験（MCC-1、VHT、PCT）の実施。
Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)
空気品質管理と排出量測定を提供
許可コンプライアンステスト、パフォーマンス保証テスト、及び機器の調整と診断の実施。
CleanAir Engineering Inc.
RJ Lee Group
産業法医学分析研究所及び科学コンサルティング会社。
分析サービスラボとして、幅広い専門知識の提供。
ALS Global
研究所での試験、検査、認証、及び検証を行う。
鉱業及びプロセスエンジニアリング向けの地球化学的サンプル準備、分析、及びデータ管理。
東京工業大学
ガラス固化に関する技術的専門知識＆試験・研究能力
試験の実施
報告書の作成
（公財）原子力安全研究協会 (NSRA)
ガラス固化体の処理と処分に関する専門知識
（株）KK テクノ
日本の原子力発電所の工学的ノウハウと経験
大栄環境（株）
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

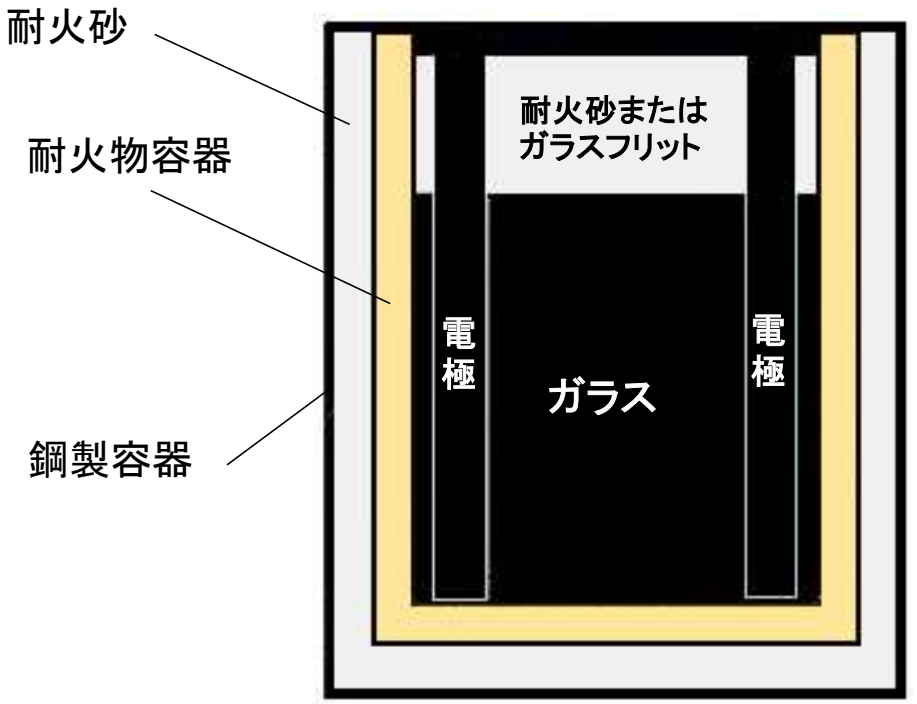
4. GeoMelt®ICV™の特徴（1/2）

① 溶融容器内でのガラス溶融、固化（右図）
- 溶融容器に廃棄物を供給・溶融。
- 溶融容器底部から溶融ガラスを流下させず、溶融容器内でそのままガラス固化体とする。

② 溶融容器と廃棄体が同一
- バッチ溶融処理を行う溶融容器自体が処分する廃棄体（バッチ毎に溶融容器を交換）。

③ 溶融容器の構造
- ガラスを収納する耐火物容器、その外側に耐火砂、最外部に鋼製容器を設置。

④ 溶融による耐火物容器への影響軽減
- バッチ処理による耐火物容器への加熱時間の短縮。
- 高温での溶融でも溶融容器の腐食が小さい。



GeoMelt®ICV™ 溶融容器の構造

⑤ 高温溶融により高含有廃棄物の溶融が可能
- GeoMelt®ICV™でのバッチ処理では、より高い温度で（1600℃以上）の処理が可能。これにより、シリカに富むゼオライトをより多く含めることができるため、高い廃棄物の含有が可能。

⑥ ゼオライト又は汚染土壌による同時処理
- ガラスへの廃棄物の含有は、他の1F廃棄物と同時に処理することでさらに廃棄物含有率の拡大が可能。

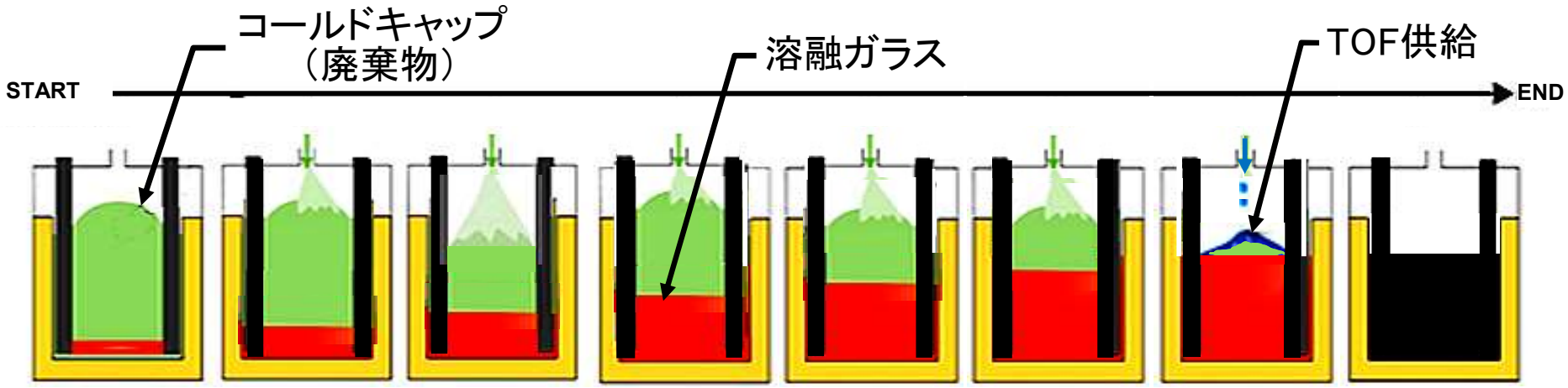
4. GeoMelt®ICV™の特徴（2/2)

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）

- 溶融ガラス上にコールドキャップ（廃棄物）を適切な厚さに維持して管理することにより揮発性Csの放出を抑制。
- 揮発したCsは上部のコールドキャップ内で凝縮し、その後溶融ガラスに再度取り込まれる。
- 溶融終盤では、コールドキャップが薄くなるのでトップオフフリット（TOF)を供給し、揮発したCsをTOFで凝縮し、そして最終的にTOFがCsの溶融取り込みを促進。

⑧ 幅広い溶融容量

- 溶融容量は処理量のニーズに応じて選択でき、100kg未満から最大50トンまでの実績を有する。



GeoMelt®ICV™ の運転スキーム（コールドキャップ管理）

5. GeoMelt®ICV™適用のための検討項目

1F水処理二次廃棄物処理にガラス固化技術であるGeoMelt®ICV™を適用するために検討項目を摘出。これらについて、2017年度以降、補助金事業で検討を進め、解決を図ってきた。

A. ガラス配合[1]・るつぼ試験

① 各廃棄物組成に対応して耐久性のあるガラスの組成の設定　（本事業で継続）

② ALPSスラリー廃棄物の廃棄物含有率増加を可能とするガラス組成の設定（本事業）

B. 溶融処理運転の実証（工学規模溶融試験）

① コールドキャップ管理による良好なCs放出抑制の実証（本事業で継続）

② 溶融終盤のTOF供給によるCs放出抑制の検証（本事業で継続）

③ オフガス処理系焼結金属フィルター（SMF）のバックパルス使用によるより高いCs保持の実証（本事業）

C. Cs揮発抑制に関するメカニズムの定量的解明

① コールドキャップ管理におけるCs揮発挙動の　定量的把握（済み）

② 溶融終盤でのCs揮発抑制に関する試験（本事業）

D. ガラスの耐久性の確認

① 工学規模溶融試験で製造されたガラスの長期の化学的耐久性の確認（本事業で継続）

② 耐火物が処分環境においてガラス耐久性に与えうる影響の確認（本事業）

E. 適用性評価

① 溶融容器及びその周辺設備（供給系、オフガス処理系等）を含めた施設概念の検討、評価（済み）

② 実処理プラントへの適用性の調査（本事業で継続）

1:　様々な組成の廃棄物を組み合わせてガラス化することをガラス配合（手段）として、そのガラス配合の結果からガラス性能を満たすガラス組成を設定します。

6. これまでの補助金事業における実施内容・結果と2021年度実施項目の関係（1/3）

2017～2018年度[1]	2019～2020年度	2021年度

A. ガラス配合・るつぼ試験

ガラス配合・るつぼ試験

- 1F水処理二次廃棄物の内、主要な廃棄物に対応したガラス配合40種類を設定。
- るつぼ試験にてガラス特性を把握。

→ 溶融試験 1から3 のガラス配合を設定。

ガラス配合・るつぼ試験

- 1F水処理二次廃棄物の内、存在量が比較的少ない廃棄物に対応したガラス配合を12種類設定。
- るつぼ試験にてガラス特性を把握。

→ （前年度実施分と合わせて）廃棄物固化用ガラスデータベースを拡充。

ガラス配合・るつぼ試験

- ALPSスラリー廃棄物含有率増加に対応したガラス配合10種類を設定。
- るつぼ試験にてのガラス特性を把握。

→ 溶融試験 12のガラス組成を設定。

ガラスモデリング解析

- 廃棄物組成変動による影響を評価。
- 異なる種類の廃棄物を混合処理する場合のガラス製造量削減の効果を評価。
- 溶融処理温度の違いによるガラス製造量への影響を評価、

→ GeoMelt®ICV™（高温処理）優位性を確認。

補記）

- 溶融試験 4 から10のガラス組成と溶融試験 1、2、3のガラス組成の関係は次頁参照。
- 溶融試験 11のガラス組成は、ALPS脱水物の組成を把握して設定。

1: 2017～2018年度の試験は、IRIDプログラムの一環として(株)ATOXから（株）キュリオンジャパンが受注。

6. これまでの補助金事業における実施内容・結果と2021年度実施項目の関係（2/3）

B. 溶融処理運転の実証（工学規模溶融試験）

2017～2018年度[1]	2019～2020年度	2021年度

2017～2018年度[1]

4電極正方形型溶融容器：ボトムアップ

- **溶融試験 1**：KUR-EH+ALPS炭酸塩・鉄共沈スラリー
- **溶融試験 2**：KUR-EH+KUR-TSG
- **溶融試験 3**：KUR-EH+AREVAスラッジ

＜結果＞
- Cs保持率91.46 ～99.30%。

＜課題＞
- Cs保持率の更なる向上、安定化。

（Cs保持率にばらつきがあったため。）
→溶融表面積の小さい長方形型。
溶融容器で試験。

注）KUR-EH：ゼオライト（ガラス形成材）
KUR-TSG：珪チタン酸塩

1: 2017～2018年度の試験は、IRIDプログラムの一環として(株)ATOXから（株）キュリオンジャパンが受注。

2019～2020年度

4電極正方形型溶融容器：トップダウン

- **溶融試験 4**：KUR-EH+KUR-TSG

＜結果＞ ・トップダウンとボトムアップによるCs保持率の違いは無い。

2 電極長方形型溶融容器：ボトムアップ

- **溶融試験 5**：KUR-EH+ ALPS炭酸塩・鉄共沈スラリー
- **溶融試験 6**：KUR-EH+KUR-TSG
- **溶融試験 7**：KUR-EH+AREVAスラッジ

＜結果＞
- 良好なコールドキャップ管理によりCs保持率向上安定（ 97.22%～99.44%）。
- 長方形溶融容器の優位性は確認できず。

＜課題＞
- TOF供給処理時のCs保持率の向上、操作の最適化。

- **溶融試験 8**：土壌+ALPS炭酸塩スラリー

<結果＞
- 長期溶融停止時の溶融再開方法の実証。
- 土壌をKUR-EHに替わるガラス形成材として使用することを実証。

2021年度

4 電極正方形型溶融容器：ボトムアップ

オフガス処理系にSMF（**S**intered **M**etal **F**ilter：焼結金属フィルター）を付設。

- **溶融試験 9**：KUR-EH+KUR-TSG
- **溶融試験 10**：KUR-EH+KUR-TSG
- **溶融試験 11**：KUR-EH+ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物
- **溶融試験 12**：KUR-EH+ALPS炭酸塩スラリー（廃棄物の高含有化）

＜実施項目＞
- TOF供給溶融段階の操作最適化。
- SMFの機能を確認。
- ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物の処理。
- ALPS炭酸塩スラリーの高含有での処理。

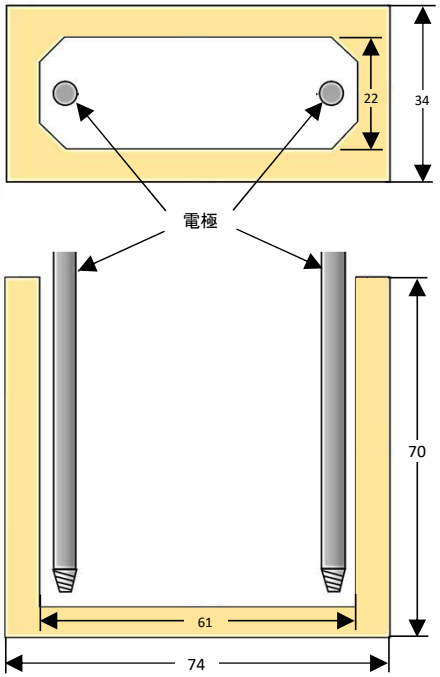
<結果＞
- SMF捕捉微粒子のリサイクルとそのCs保持率向上（99.98～100.00%）を実証。
- ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物の混合、供給、処理を実証。
- ALPS炭酸塩スラリー含有率の増加（19.49%から29.46%）。

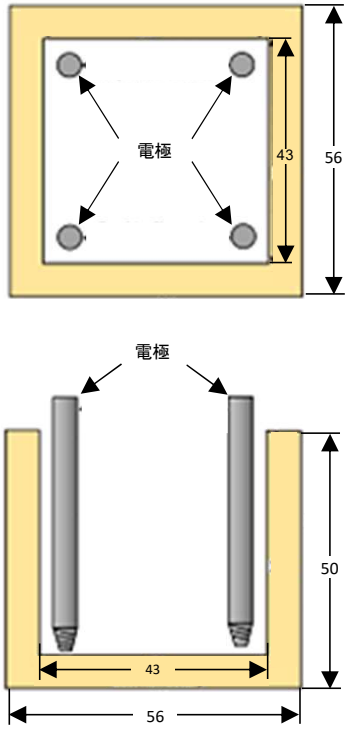
（参考）2電極及び4電極耐火物容器の比較

<u>2電極耐火物容器</u>
内部寸法:
61.0cm(L)×21.6cm(W)×63.5cm(H)
溶融表面積: 約1266 cm^2（4つの角の面積を引いた表面積）

<u>4電極耐火物容器</u>
内部寸法:
43.2cm(L)×43.2cm(W)×43.2cm(H)
溶融表面積: 約1866 cm^2

（単位: cm）





<u>2電極耐火物容器</u>
（溶融試験 5, 6, 7, 8）

<u>4電極耐火物容器</u>
（溶融試験 1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12）

6. これまでの補助金事業における実施内容・結果と2021年度実施項目の関係（3/3）

2017～2018年度[1]	2019～2020年度	2021年度

C. Cs揮発抑制に関するメカニズムの定量的解明

- コールドキャップ管理におけるCs揮発挙動の定量的把握：溶融容器内を3層構造として試験・解析。

→ メカニズムを把握。

- 溶融終盤でのCs揮発抑制に関する試験：溶融容器内を4層構造として試験・解析。

→溶融試験 9以降の溶融終盤操作に反映。

D. ガラス耐久性の確認

- 溶融試験 1から3のガラスのMCC-1[2]試験。

→ 耐久性を確認。

- 溶融試験 4から8の長期（365日間）MCC-1試験。溶融試験 4、5については完了。溶融試験 6から8については28日間のデータを取得）。

→ 耐久性を確認。

- 溶融試験 6から8のガラスのMCC-1試験（365日間）。
- 耐火物共存下でのガラスのMCC-1試験（28日間）。
- 溶融試験 5から7のガラスのPCT試験。

E. GeoMelt®ICV™適用性の評価

- 予備概念設計、各種評価書。

↓

- 10トン規模溶融容器2基を設置した施設の全体像を提示。
- 経済性、運転保守性等を評価。

- 実処理プラントへの適用性を検討。

<前頁参照>
- 2020年度までの工学規模溶融試験・基礎試験の結果等。

<前頁参照>
- 2021年度の工学規模溶融試験・基礎試験の結果等。

1: 2017～2018年度の試験は、IRIDプログラムの一環として(株)ATOXから(株)キュリオンジャパンが受注。

2: MCC-1試験の例
- ASTM標準番号C1220
- 供試材は約 14mm x 14mm x 厚さ 1.5 mm
- 試験容器はSavillex® Teflon®の変質容器
- 表面積と溶液の体積(S/V)の比率は10 m^{-1}
- ASTM 1 型水 (DIW 水、＞ 18.0 MΩ·cm)
- 90 ℃で試験を実施
- サンプル水を7、14、28日目に採取し、ガラス中の主要な元素(Na, B等)について水を分析

7. 2021年度補助金事業の実施内容と成果

7.1 溶融終盤のCs 揮発抑制に関する試験

① トップオフフリット(TOF)を含む溶融終盤での加熱条件とCs揮発の関係に関する調査。
② 4層構造（TOF/廃棄物混合物/仮焼層/溶融ガラス）の温度分布と下部からの熱流束の関係解析。

7.2 工学規模溶融試験装置の改造とチェックアウト溶融
7.3 工学規模溶融試験

① 工学規模溶融試験装置改造： 直接的なバックパルス及び洗浄が可能なSMF仕様の確定、溶融容器オフガス処理系第一段に設置。
② ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物の物性評価。移送及び供給に関する確認試験。
③ 工学規模溶融試験 9から12
- TOF供給処理段階の操作の検証（7.1①の成果反映）。
- オフガス中に放出された微粒子中Csの99.98%のSMFによる捕捉及び溶融容器へのリサイクル。これにより、ガラスのCs保持率がほぼ100%に向上。

上記2項によるガラスのCs保持率の向上。
- 以下の廃棄物を模擬した試験材料による溶融試験。
  KUR-EH とKUR-TSG（溶融試験 9、10）
  KUR-EH とALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物（溶融試験 11）
  KUR-EHと高廃棄物含有率組成のALPS炭酸塩スラリー（溶融試験 12）

7.4 ガラス配合・耐久性試験

ガラス配合・るつぼ試験

① ガラス配合とるつぼ試験、粘度、耐久性等の評価データによるガラス組成モデル更新。 ALPS炭酸塩スラリー廃棄物の含有率を増加するガラス組成を設定。

ガラス耐久性試験

① 溶融試験 5から7のガラスサンプルのProduct Consistency Test （PCT）試験。
② GeoMelt®ICV™廃棄体を構成する耐火物が処分環境条件下でガラスの耐久性に与えうる影響の確認試験。
③ 溶融試験 6から8のガラスサンプルの長期MCC-1試験。

7.5 GeoMelt®ICV™の適用性の総合評価

固体廃棄物に対するGeoMelt®ICV™の実処理プラントへの適用性について、技術的な観点から総合的に評価。

7.1 溶融終盤のCs揮発抑制に関する試験

トップオフフリット(TOF)を含む溶融終盤での加熱条件とCs揮発の関係に関する試験

➢ 試験目的

- TOF供給段階でのCs揮発量が比較的多く、かつバッチでの変動も一定していない（不安定）ので、TOF段階でのCs揮発を抑制するために廃棄物混合物とTOFの溶融の関係を把握。

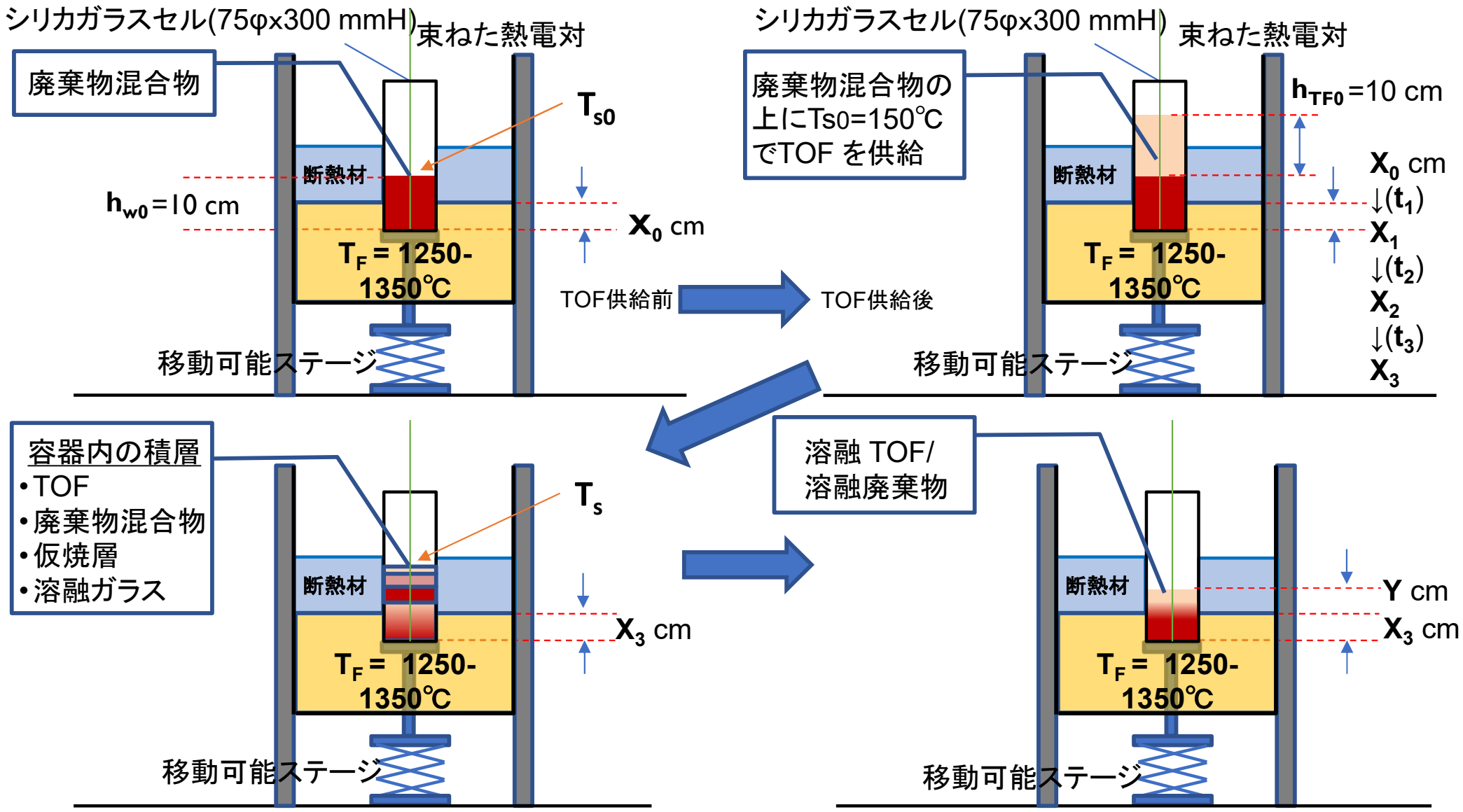
➢ 試験内容

- TOFを含んだGeoMelt®溶融終盤での加熱条件とCs損失の関係、及びTOFのCs揮発抑制に対する役割を把握する試験を実施。
- 試験に供した廃棄物混合物

  KUR-EH＋ALPS炭酸塩・鉄共沈スラリー

  KUR-EH＋KUR-TSG
- Cs損失を算出する揮発Csの回収の精度に関して、揮発Csの回収とTOF（Time Of Flight）-SIMS（Secondary Ion Mass Spectrometry）による状態の推定を実施。
- 溶融終盤を模擬したTOFを含む4層構造の温度分布と熱流束の関係について有限要素法（Finite Element Method: FEM）による計算機シミュレーションを実施。

7.1.1 Cs揮発量とTOF投入量との関係
(1) 長尺シリカガラスセルでのTOF/廃棄物混合物の溶融

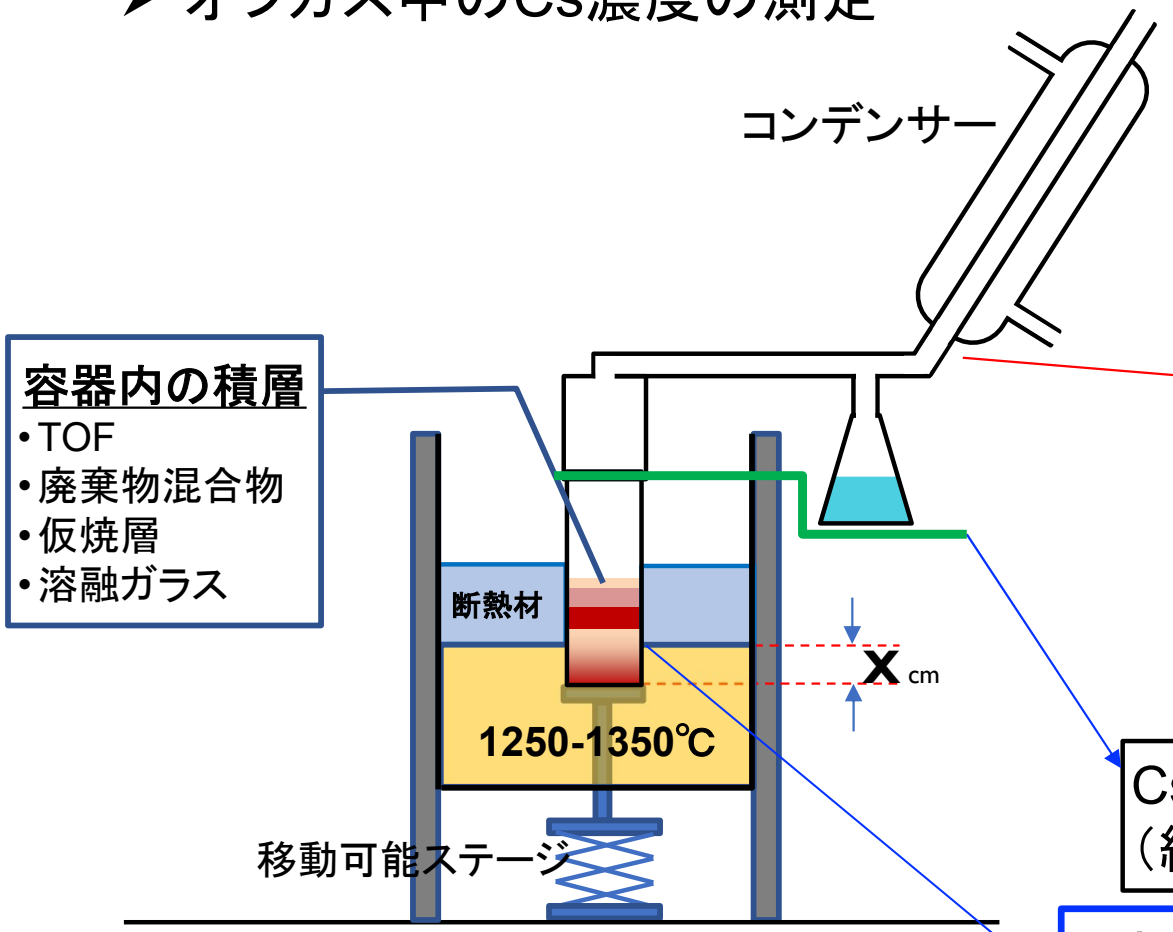


(2) 溶融パラメータリスト

パタメータ	定義	標準的な値
h_{W0} (cm)	セルに充填される廃棄物混合物の初期高さ	10
h_{TF0} (cm)	廃棄物混合物上に供給されるTOFの高さ	10
T_F (℃)	炉の運転温度	1250～1350
T_{S0} (℃)	廃棄物混合物上にTOFを供給開始する廃棄物混合物表面温度	150
T_S (℃)	熱電対により監視されるTOFの表面温度	
X_i (cm)	炉に投入されたセルの長さ. i =0; 初期値, i =3; 最終	2 (i =0), 4 (i =1), 6 (i =2), 8 (i =3)
Y (cm)	炉上端からの推定表面レベル	1 (h_{W0}=10, h_{TF0}=10)
t_i (分)	各 i に対する持続時間	2 (i =1), 2 (i =2), 2 (i =3)

(3) オフガス分析

➢ オフガス中のCs濃度の測定



- ➢ 温度勾配電気炉での溶融中に発生するオフガスは、水冷コンデンサーにて凝縮する。
- ➢ 実験終了後に、ガラス機器を洗浄する。
- ➢ 凝縮水及び洗浄水をICP-MSで分析し、溶融廃棄物からのCsの総量を求める。

Csをトラップするためのガラス機器（緑線より上のガラス器一式）

内部のCs濃度を評価するために、溶融ガラスサンプルのICP-MS分析も実施。

(4) 表面温度のモニタリングと材料からのCsトラップ試験の手順

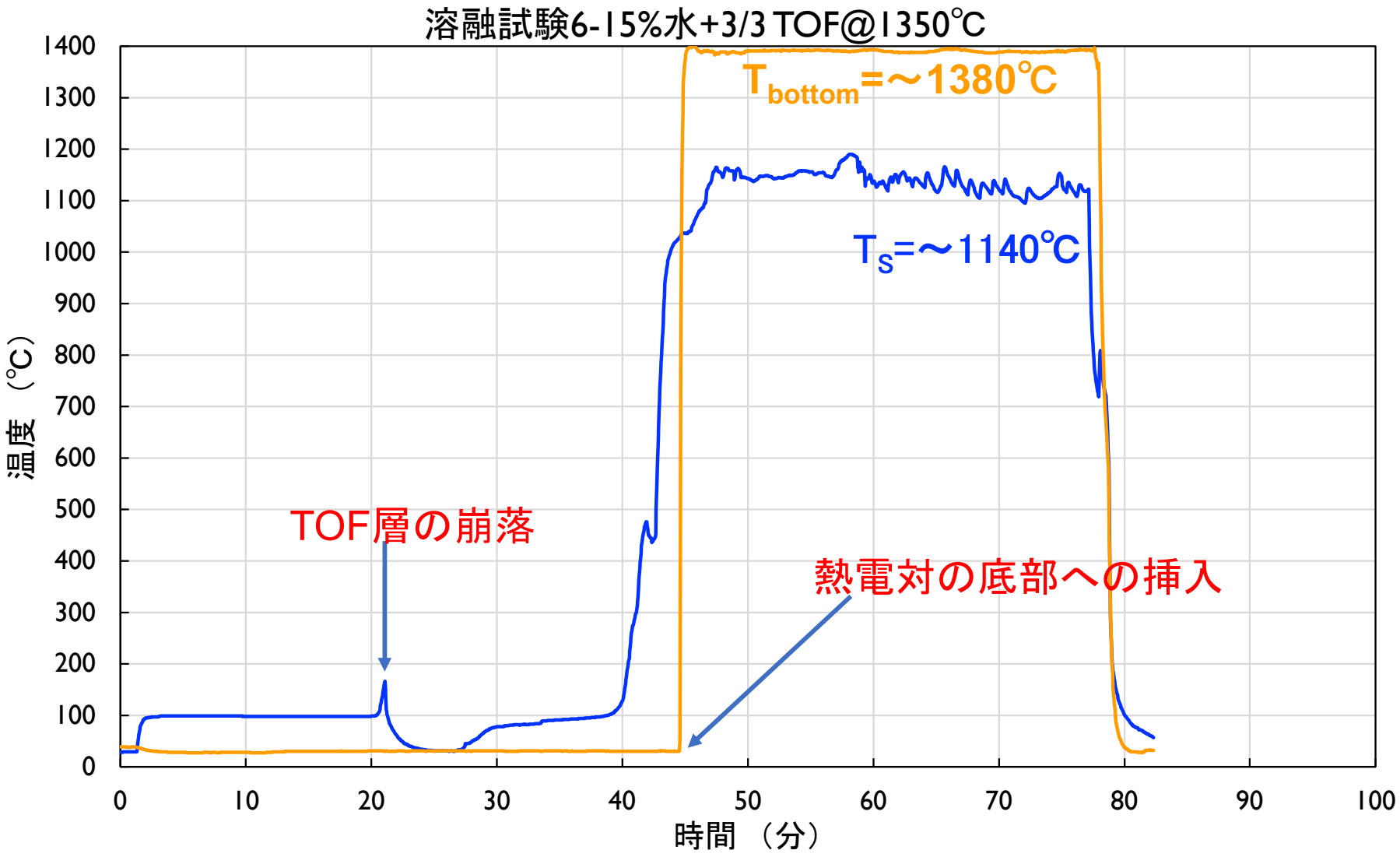
➢ Tsのモニタリング

溶融試験6-15%水, -20%水, 重量: 330-350 g for h_{W0}=10 cm
溶融試験5-10%水, 重量: 285-305 g for h_{W0}=10 cm
T_F=1250℃, 1300 ℃, 1350℃
TOF 重量: 520 g for h_{TF0}=10 cm
T_F=1350℃
TOF 重量: ～520 g
for h_{TF0}=10(3/3), 6.7(2/3), 3.3(1/3), 0(0/3) cm

➢ 材料からのCsのトラップ

- 試験条件・手順は、Tsをモニタリングするための実験と同じ。
- TOFを溶融試験6-15%水、-20%水、溶融試験5-10%水にTs> 150℃で供給した直後に、Csをトラップするためのガラス機器をシリカガラスセルに固定した。
- ステージ（シリカガラスセル）を2分ごとにX =2cm→ 8cmまで2cmずつ下に移動し、Tsが一定後1時間保持した。
- ガラス機器を純水で洗浄し、水中のCsをICP-MSで分析した。

(5) 廃棄物混合物とTOFの溶融試験



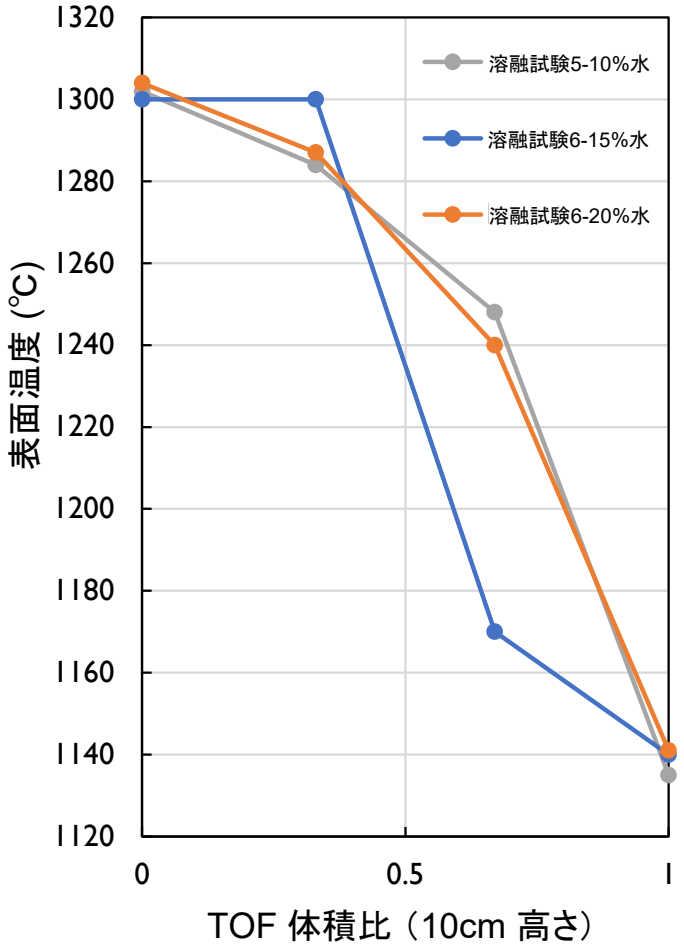
廃棄物混合物とTOFの溶融試験

(6) 廃棄物混合物から発生しトラップされたCs損失関係のデーター覧表

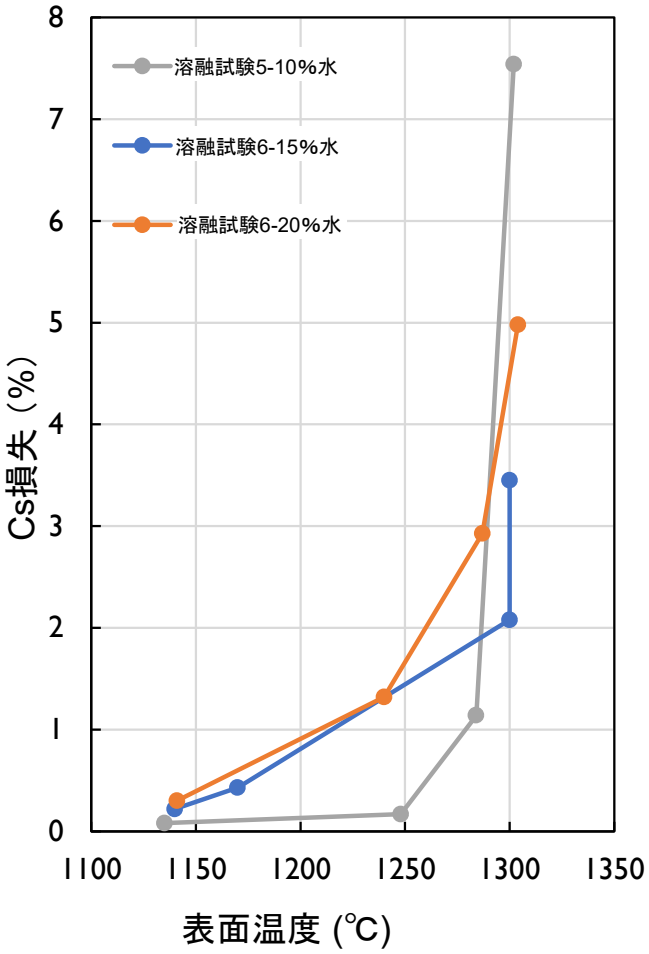
実験	T_F (℃)	T_S (℃)	T_{bottom} (℃)	Cs 損失（%）
溶融試験6-15%水+3/3TOF	1350	1140	1390	0.08
溶融試験6-15%水+2/3TOF	1350	1170	-	0.63
溶融試験6-15%水+1/3TOF	1350	1300	-	2.08
溶融試験6-15%水+0/3TOF	1350	1300	-	3.59
溶融試験6-15%水+3/3TOF_2回目	1350	-	-	0.22
溶融試験6-15%水+2/3TOF_2回目	1350	-	-	0.43
溶融試験6-15%水+1/3TOF_2回目	1350	-	-	2.08
溶融試験6-15%水+0/3TOF_2回目	1350	-	-	3.45
溶融試験6-20%水+3/3TOF	1350	1141	1363	0.30
溶融試験6-20%水+2/3TOF	1350	1240	-	1.32
溶融試験6-20%水+1/3TOF	1350	1287	-	2.93
溶融試験6-20%水+0/3TOF	1350	1304	-	4.98
溶融試験5-10%水+3/3TOF	1350	1135	1352	0.08
溶融試験5-10%水+2/3TOF	1350	1248	-	0.17
溶融試験5-10%水+1/3TOF	1350	1284	-	1.14
溶融試験5-10%水+0/3TOF	1350	1302	-	7.54
溶融試験5-10%水+3/3TOF_2回目	1350	-	-	0.10

「-」: 各温度を測定しなかったことを示す

(7) Cs損失と表面温度T_sとの間の関係



TOF体積比と表面温度との関係



表面温度とCs損失%との関係

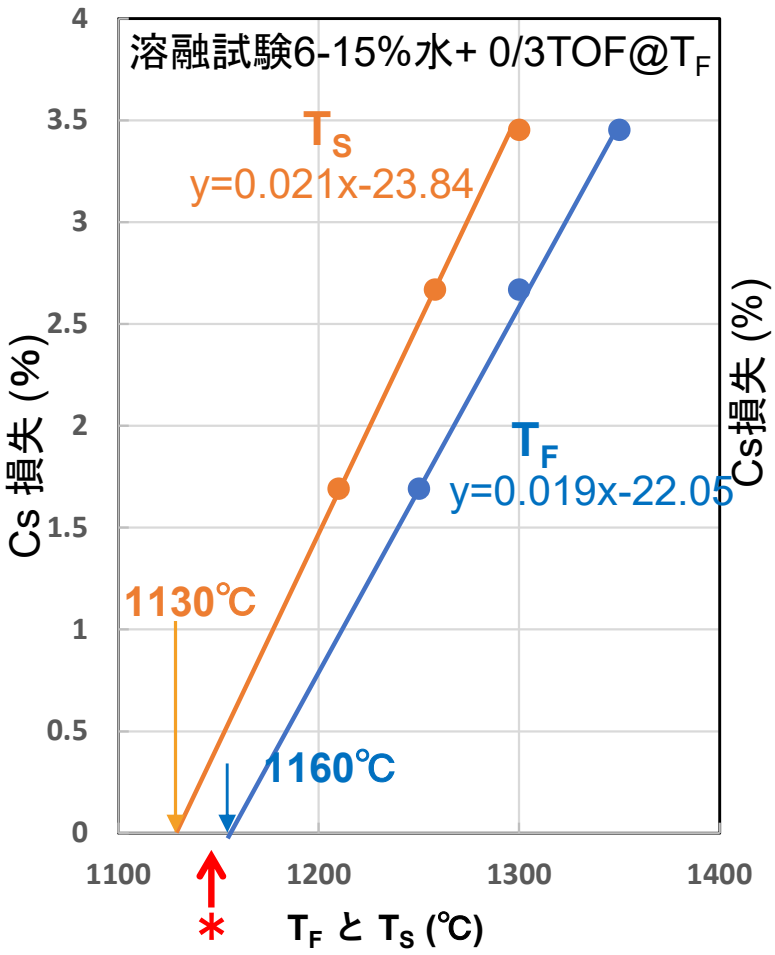
（左図）

TOFの量が少なくなると伝熱量が上がって表面温度が上昇する。廃棄物の含水率を含む化学組成が違うことにより表面温度の上がり方が違ってくる。

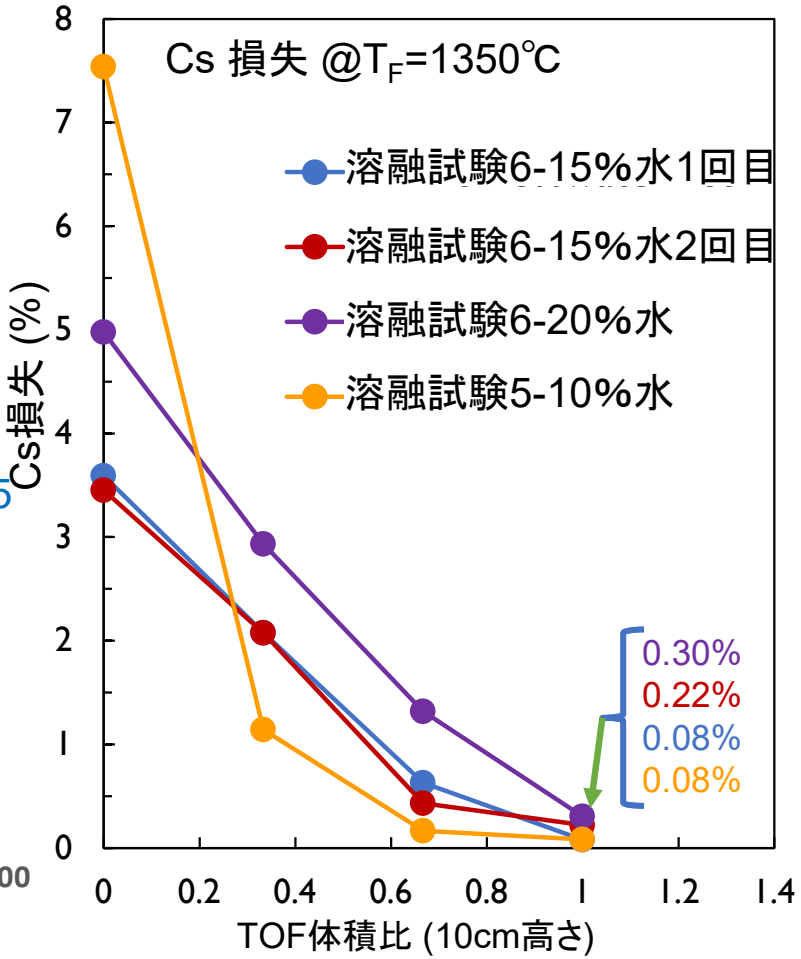
（右図）

溶融試験6は含水率に関わらず、表面温度が上がってくると徐々にCsの揮発量が増えるのに対して、溶融試験5では1250℃を超えると揮発量が非常に大きく増えるような挙動を示す。

(8) Cs損失とTF及びTsならびにTOF体積比との関係



Cs損失%とTF及びTsとの関係



Cs損失%とTOF体積比との関係

（右図）

- 溶融試験5 -10%水の溶融プロセスからのCs損失量は、10cm TOFで覆うことにより、溶融試験6混合物と同じ低いレベルに低減された。
- しかし、溶融試験5のより薄いTOFは、おそらく溶融物の性質（組成、溶融物の特性など）の違いのために、溶融試験6よりも高いCs揮発を示した。

TOF層がない時にCs損失ゼロ*は、炉運転温度TF が約1150℃以下または廃棄物混合物表面温度Tsが1130℃以下で達成されるが、TF が1150℃以上またはTsが1130℃以上に加熱されるとCsの揮発が促進される。

(9) まとめ－Cs揮発量とTOF投入量との関係（1/2）

- TOFの溶融には、廃棄物混合物の溶融によって引き起こされる大きな空隙形成（体積収縮は60～70%）による廃棄物混合物上のTOF層の下方への「崩落」が含まれる。
- TOF層の崩落は、空隙に内包された気相の放出を引き起こす。これは、廃棄物からCsを排出するルートとなる可能性がある。
- 表面温度T_Sの測定結果と表層の崩落の関係から、表層の水分の蒸発が終了する前にTOFを投入する必要がある。

  このことにより廃棄物混合物の溶融時に形成される空隙をTOFが逐次埋め、廃棄物混合物が高温で溶融される過程を表面ではなく、TOFの下部で進行させることができる。
- TOFによる被覆が十分でないと、自由表面で廃棄物の溶融が進行し、1130℃以上でCs揮発が促進されることが推定される。

(9) まとめーCs揮発量とTOF投入量との関係（2/2）

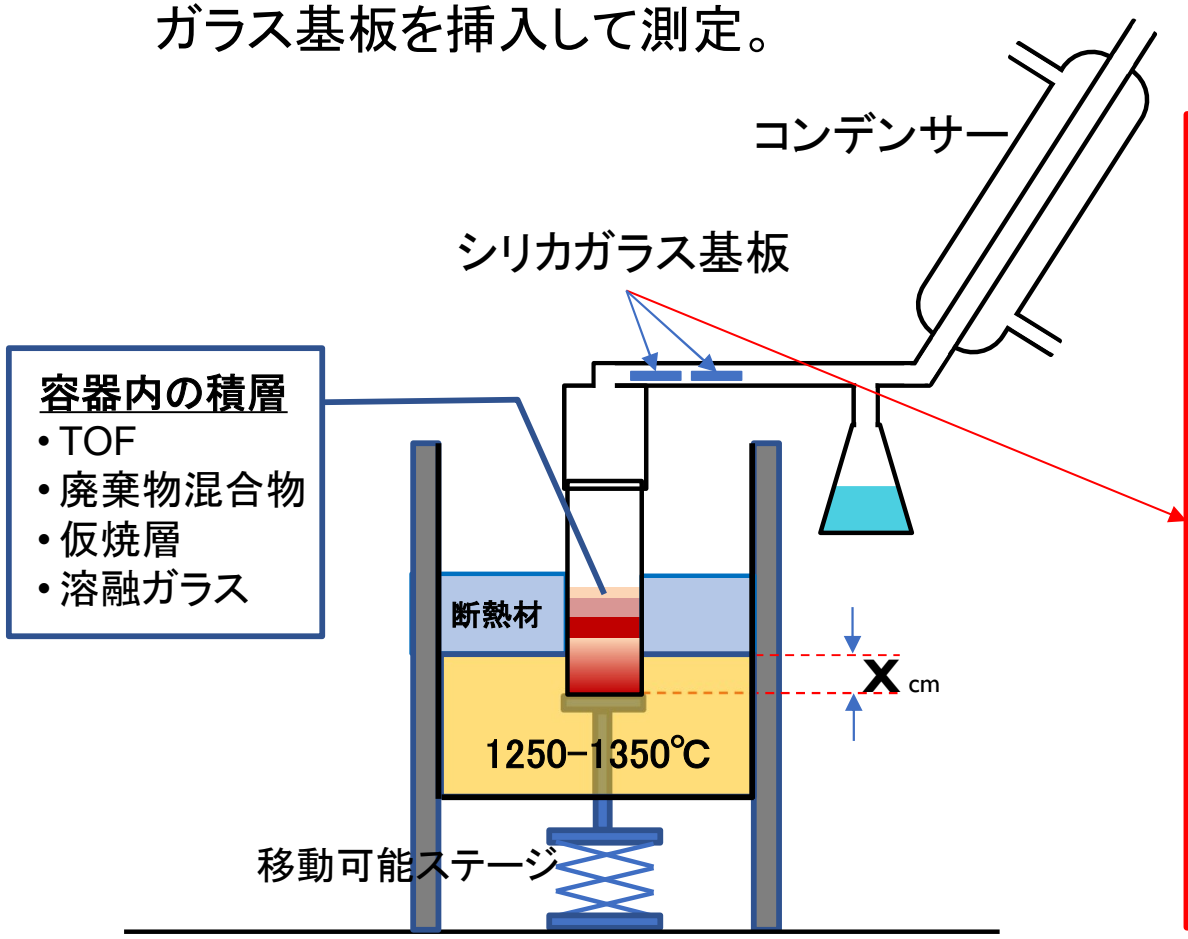
- TOFの溶融と溶融廃棄物との混合を完了するには、T_S>1100℃が必要である。
  この結果、室温に冷却した後、滑らかなガラス表面が形成された。

- TOF（h_{TF0} = 10cm）の下での廃棄物からのCs排出量は、最大T_F（= 1350℃）を使用した廃棄物中のCsの～0.3%であった。
  廃棄物のTOF層が薄くなると、Cs排出量が増加した。
  TOF量の関数としてのCs排出量の傾向は、廃棄物粉末（おそらく、含水率及び成分の化学組成）に依存している。

- 融液の粘度の観点から、溶融した廃棄物混合物とTOFの混合は液性（粘度）が同じレベルとなった場合に促進されることから、同じ粘度となるT>1100℃での保持が望ましい。同時に、対流によって混合が進むのであれば、Cs揮発を抑制する表面温度T_S<1130℃を満たす運転が理想的である。

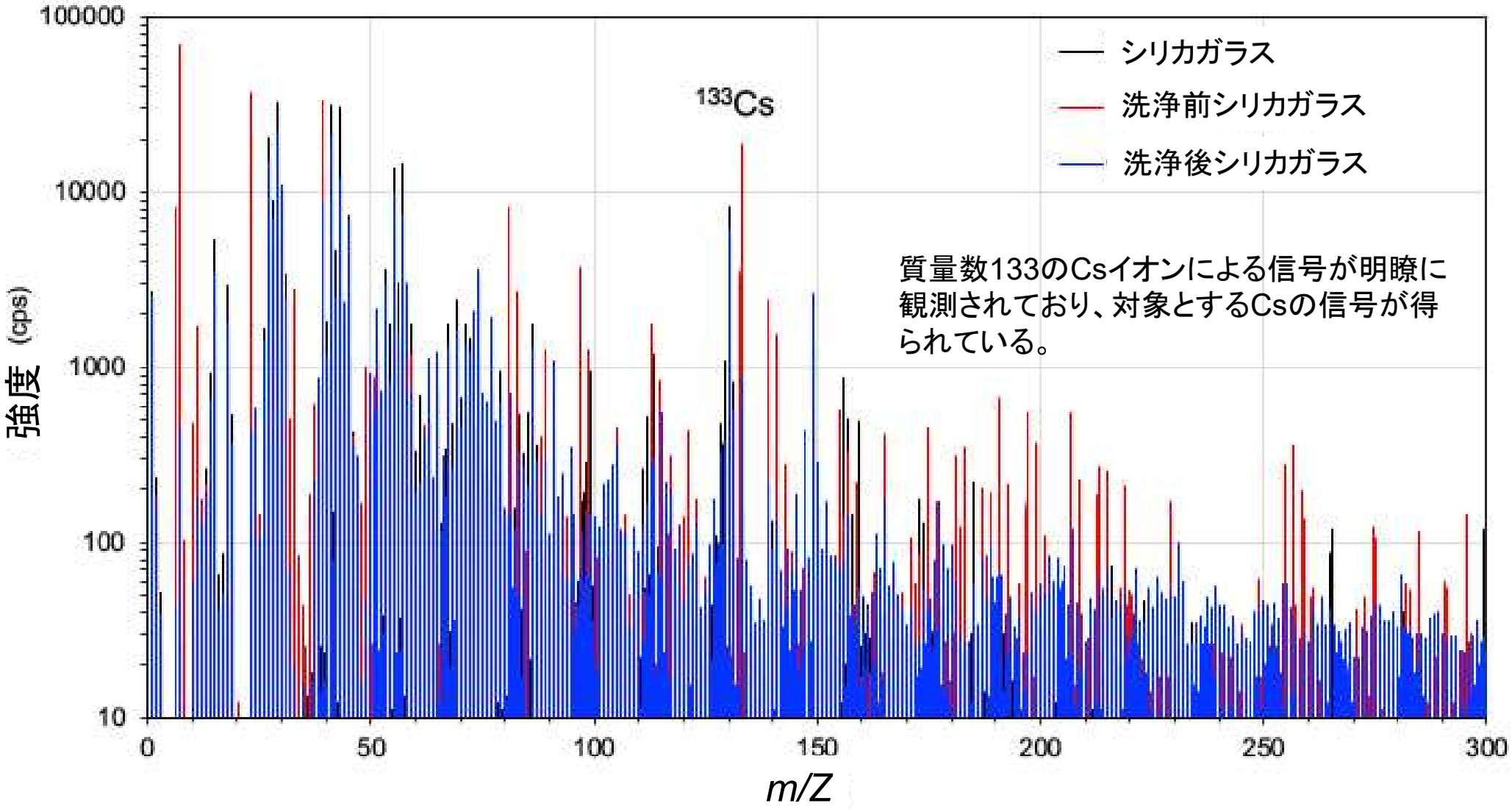
7.1.2 揮発Csの回収精度と状態の推定
(1) オフガス分析(Cs捕捉と分析)

- Cs回収精度を確認するためにシリカガラス基板を挿入して測定。



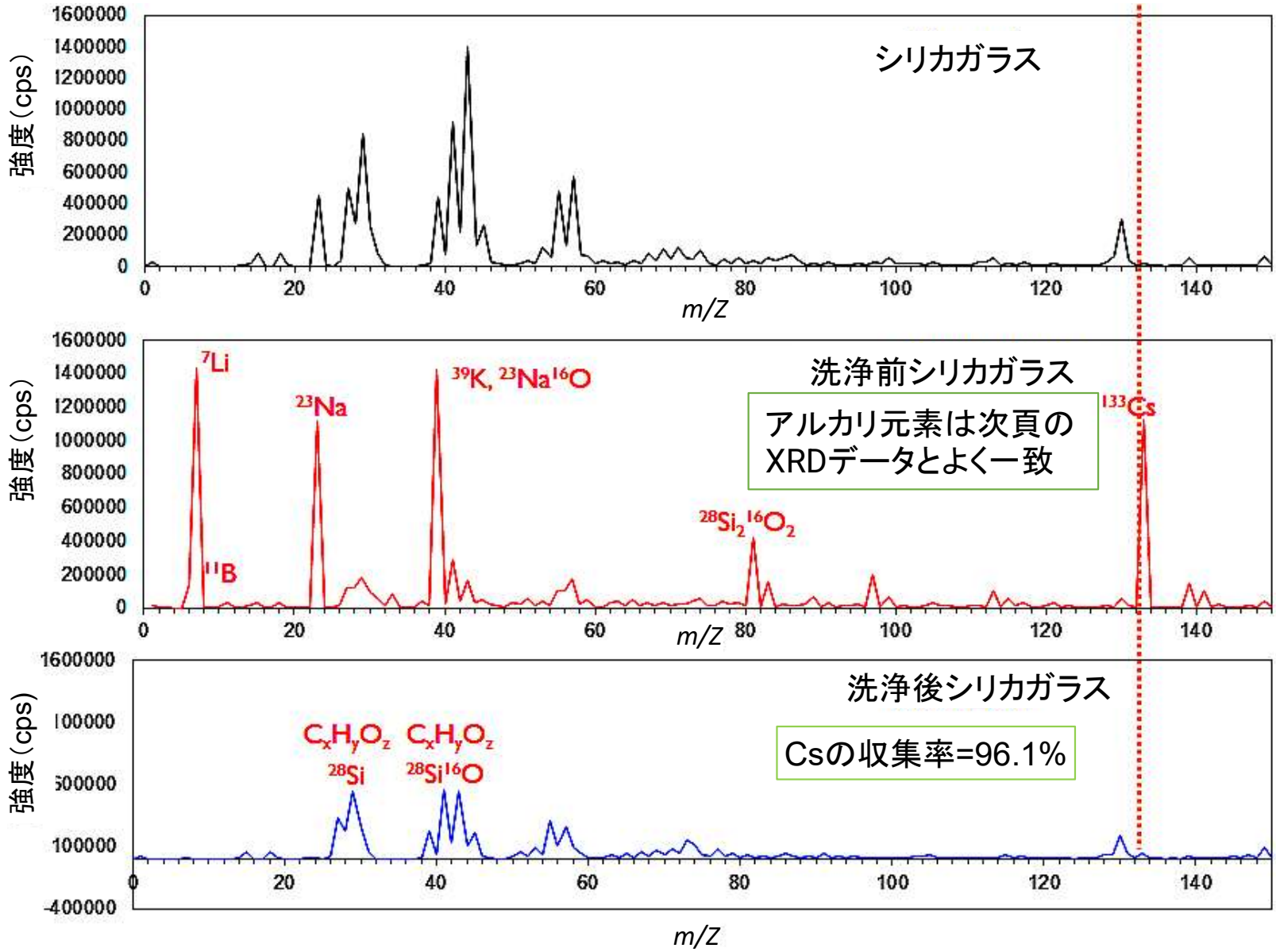
- 温度勾配電気炉での溶融中に発生するオフガスは、水冷コンデンサーにて凝縮する。
- 数枚のきれいなシリカガラス基板を入れ、実験終了後に回収する。
- バックグラウンド測定用基板はCsトラップ試験と同じ処理を行うことによって洗浄される。
- これらの基板は、TOF-SIMS分析を使用して分析される。これは、高感度で表面の元素を分析するものである。

(2) シリカガラス基板表面にトラップされた物質のTOF-SIMSスペクトル（正）



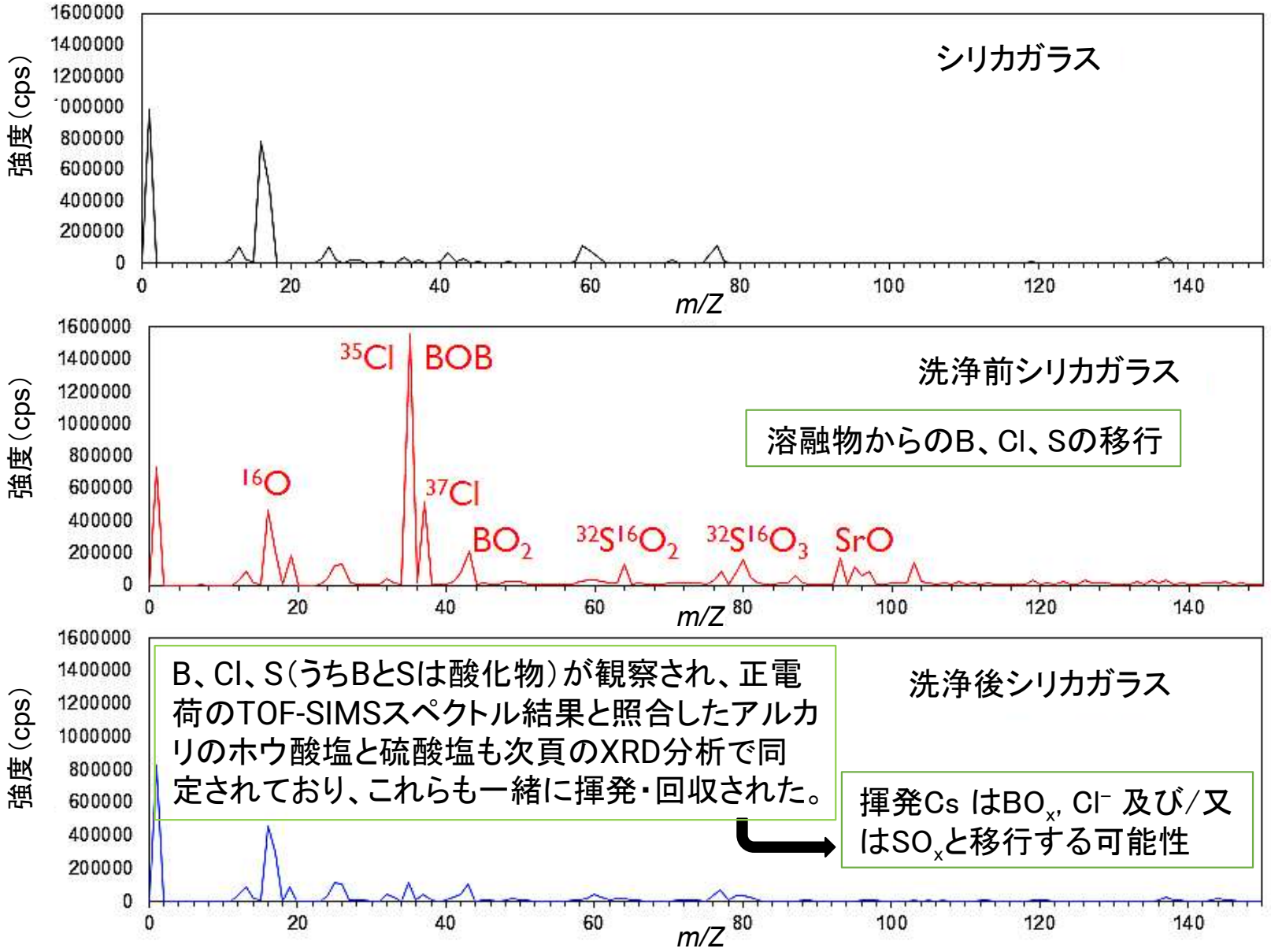
シリカガラス基板から収集されたTOF-SIMSスペクトル（正電荷）

(3) 基板から収集されたTOF-SIMSスペクトル（正電荷）



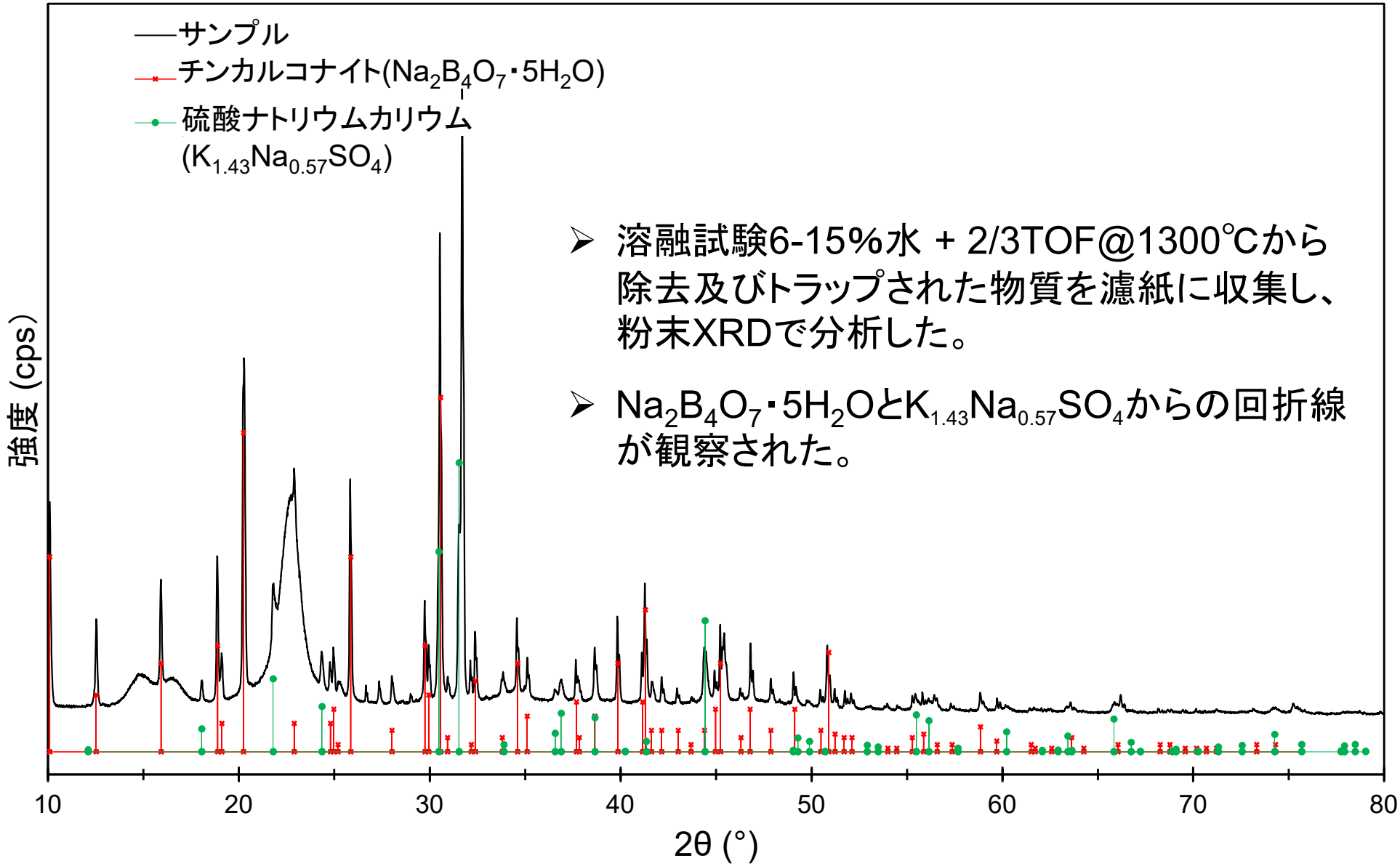
（上）未使用の基板、（中央）洗浄前の基板、（下）洗浄後の基板から収集されたTOF-SIMSスペクトル（正電荷）

(4) 基板から収集されたTOF-SIMSスペクトル（負電荷）



（上）未使用の基板、（中央）洗浄前の基板、（下）洗浄後の基板から収集されたTOF-SIMSスペクトル（負電荷）

(5) シリカガラスセルの内壁から収集されたサンプルの粉末X線回折パターン



- 溶融試験6-15%水 + 2/3TOF@1300℃から除去及びトラップされた物質を濾紙に収集し、粉末XRDで分析した。
- $Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$と$K_{1.43}Na_{0.57}SO_4$からの回折線が観察された。

シリカガラスセルの内壁から収集されたサンプルの粉末x線回折パターン

(6) まとめ－揮発Csの回収精度と状態の推定

- ガラス機器の内壁にトラップされたCsの96%以上は、ICP-MS用に収集される水に洗い流すことができるので、Cs揮発量の測定としては十分な信頼性をもって測定できている。
- アルカリ金属、B、S、及びClとの加熱時に廃棄物からCsが放出されたことをTOF-SIMSデータから明らかにした。

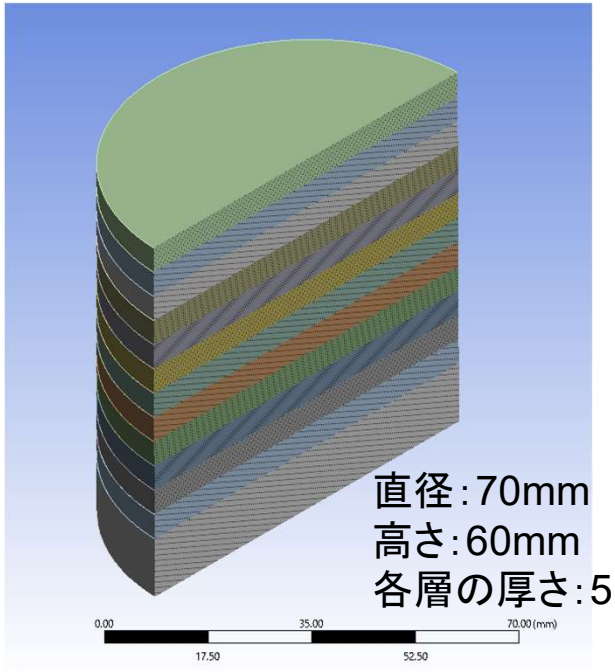
  Csの揮発形態は不明ではあるものの、アルカリがホウ酸、硫酸または水酸化物として揮発し、一緒に飛んできている可能性が考えられる。

- このTOF-SIMS分析手法は、時間の関数として放出された物質を定性的に積み重ねるために使用されるが、水の蒸気圧が大きいため、現時点では定性的な測定には適用されない。

- 考えられる形態は、ホウ酸塩、硫酸塩、塩化物、水酸化物、または金属蒸気である。

7.1.3 有限要素法（FEM）を用いたシミュレーションによる溶融物の温度勾配と熱流束の関係の解析 (1) TOF/廃棄物混合物の溶融過程のシミュレーションモデル

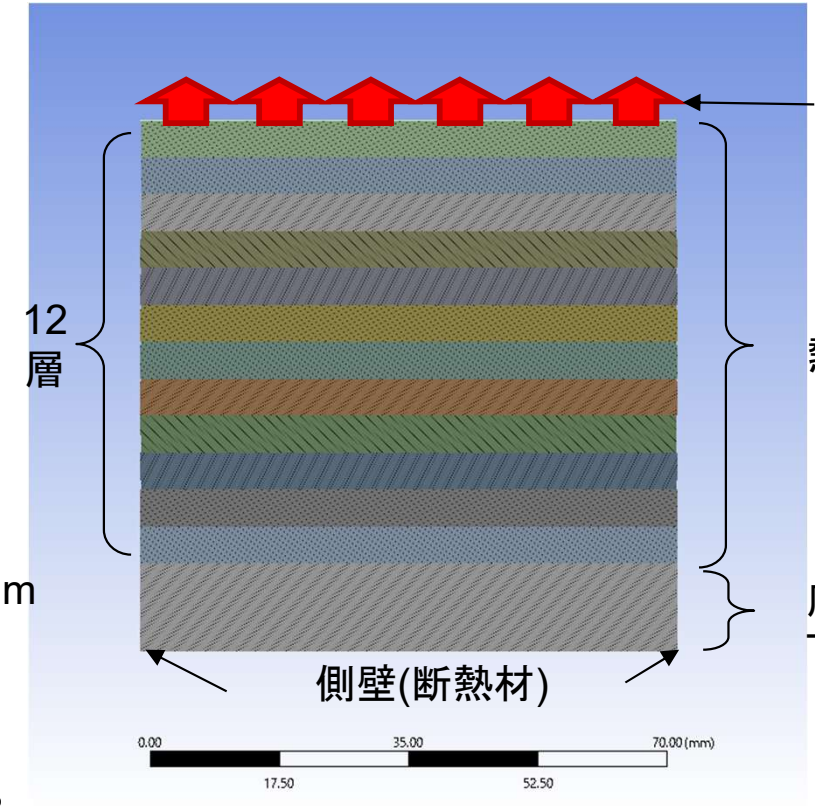
メッシュで形成した容器中の階層構造に境界条件と熱伝導度を与えて温度プロファイルを再現。



計算は12層（層0～11）から成る。

層 0：下部の溶融層で一定温度を仮定。
層11：最上部の空気と接する層

12層からなるFEMシミュレーションモデル



各層に与えられたパラメータとモデルの熱伝導の基本条件

パラメータλjとqは、温度プロファイルをシミュレートするように設定し、実験結果と比較。

（2）熱伝導度のモデル
― Maxwell-Eucken モデル ―

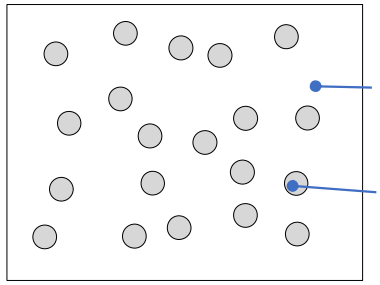
溶融試験による溶融物の断面構造の観察から現実の様相を最も反映できる構造モデルのためMaxwell-Euckenモデルを適用。

$$\lambda_{\mathrm{Eucken}} = \lambda_c \frac{1+2\,\varepsilon_p \left(1-\frac{\lambda_c}{\lambda_d}\right) / \left(2\,\frac{\lambda_c}{\lambda_d}+1\right)}{1-\varepsilon_p \left(1-\frac{\lambda_c}{\lambda_d}\right) / \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_d}+1\right)}$$

λ_c: 連続相の熱伝導度
λ_d: 分散相の熱伝導度
ε_p: 気相の体積分率

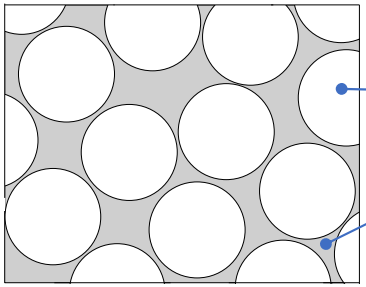
バルク

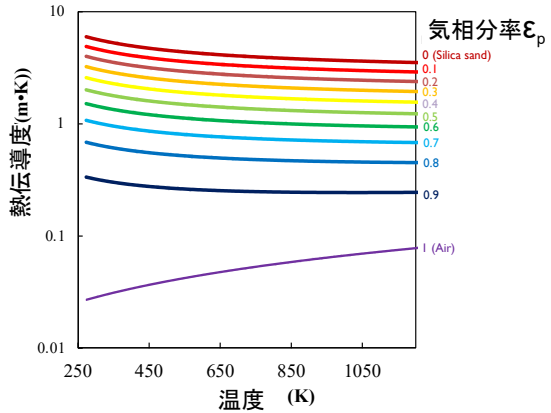
気泡分散モデル
連続相: 固体

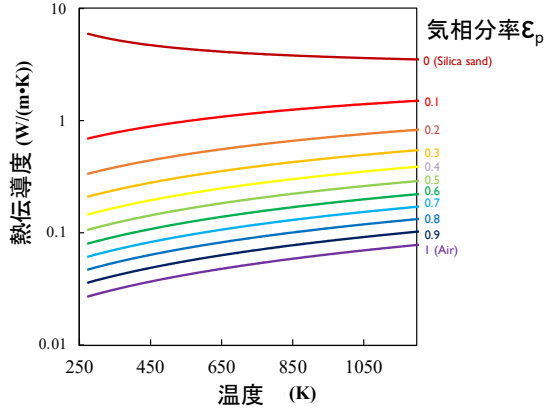


粉体

ガラス粒子充填モデル
連続相: 空気





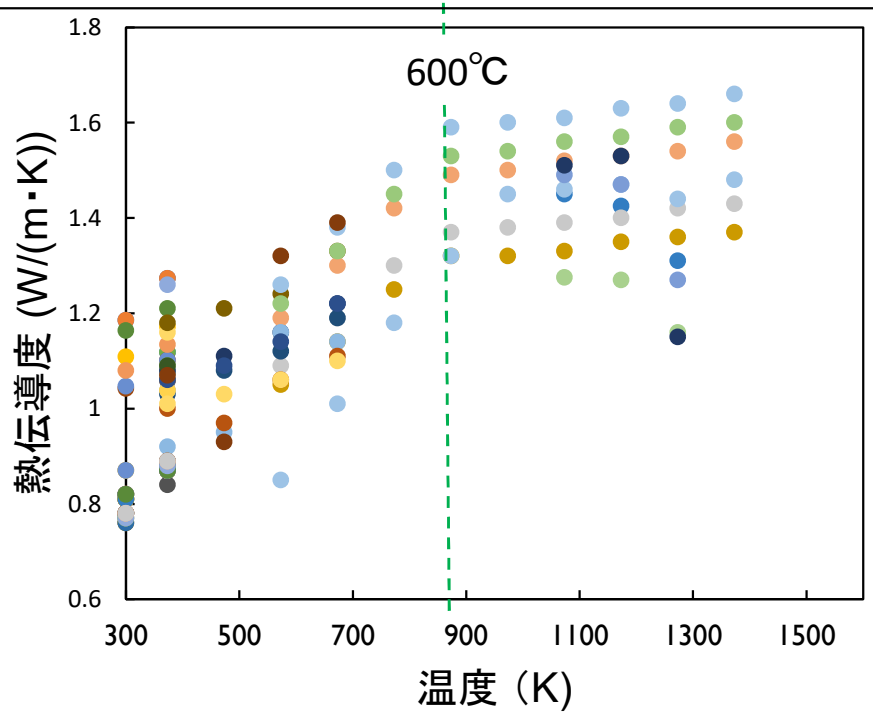


各モデルの$\lambda_{\mathrm{Eucken}}$と$\varepsilon_p$の温度依存性

(3) モデリングのための様々なホウケイ酸ガラス融液の熱伝導度

熱伝導度の温度依存性は低温領域と高温領域で異なり、その境界はガラス転移温度Tgとなっている。 T<Tgの温度域では、大きな温度依存性を示し、線形的に変化し、温度が高いほど熱伝導度は増加する。 T>Tgの温度域では、温度依存性は非常に小さく、ほとんど一定の値となっている。

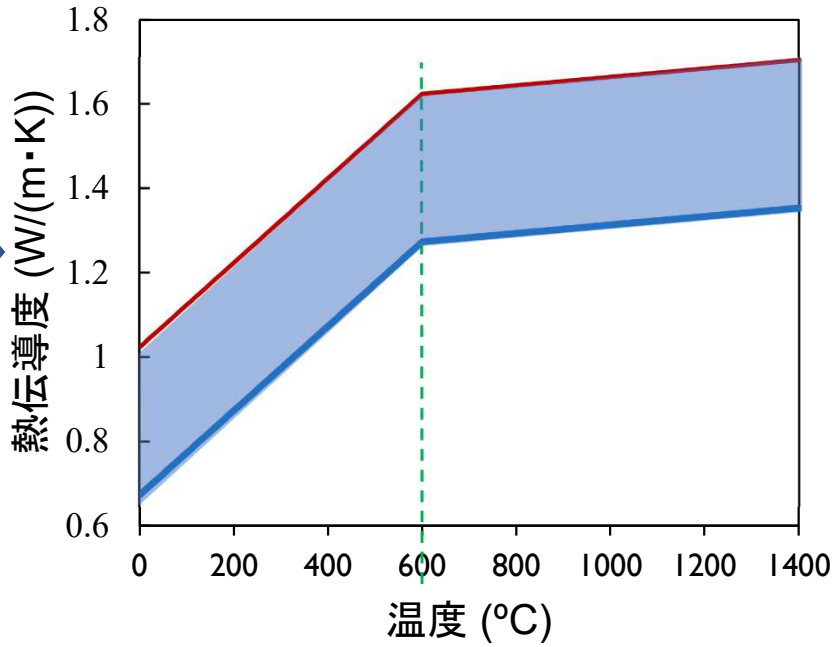
モデル化した温度依存性では、Tgを600℃とし、その前後でTに対して熱伝導度が線形的に変化する関数（a × T℃ + b）として表されるものとした。



ガラスデータベースInterGrad®から収集された熱伝導データ

ホウケイ酸ガラスの熱伝導度
(Ref: glass database, InterGrad ver.8.0)

注：データベースのガラス組成の違いによりプロットの色を変えて表示

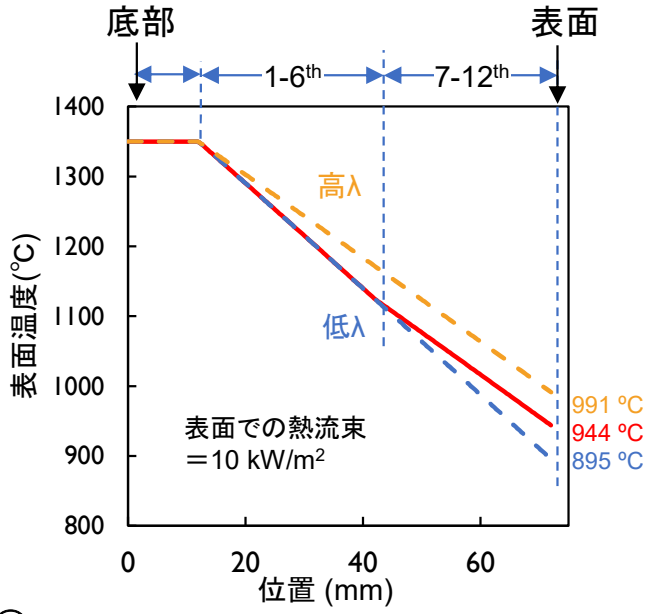


ホウケイ酸ガラス融液の熱伝導度の単純化された温度依存性

測定された温度プロファイルに合うように、この実験データ領域でλを設定する。

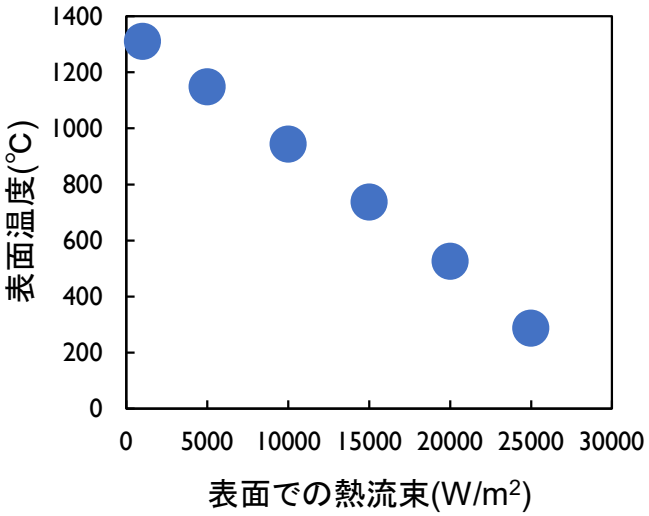
(4) ガラス融液伝導度データを用いたモデル計算 (1/2)

FEMによるシミュレーションに与える熱伝導度、空隙率、熱流束の各因子の影響を確認し、その計算結果を基に実測温度勾配を再現。各因子の影響を確認した結果を下記に①～③を示し、次ページに④～⑥を示す。



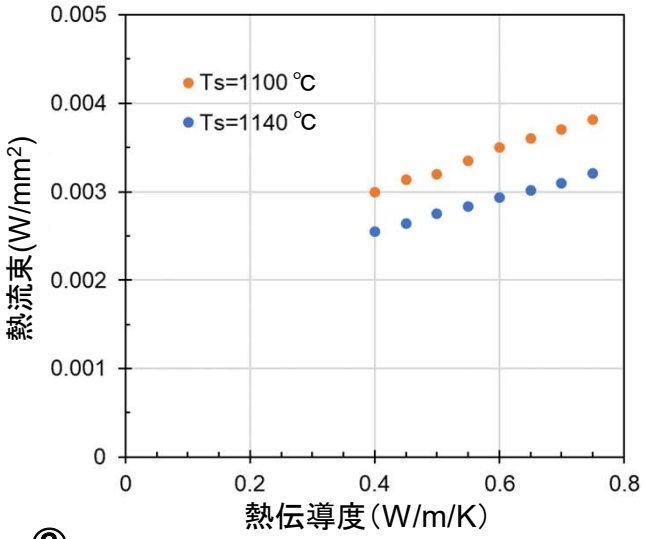
①

- 2種のガラス（熱伝導度：高λ、低λ）を想定して求めた温度勾配。
- 熱伝導度が大きい方が表面温度は高くなる。



②

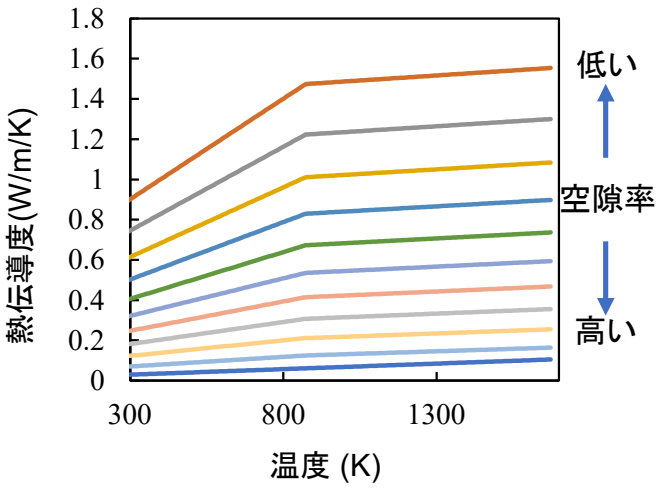
- 2つの異なるガラスを積層させた系で熱流束を変えることでTsは変化する。
- 実測されたTsは1150℃以上であるので、熱流束は5kW/m2程度の範囲にあると推測。

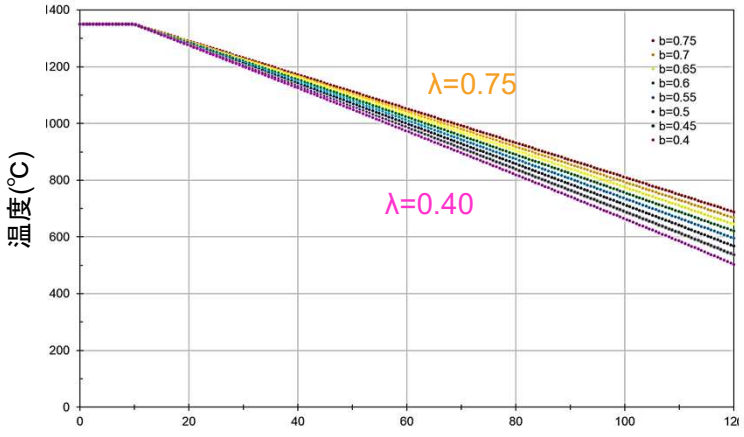


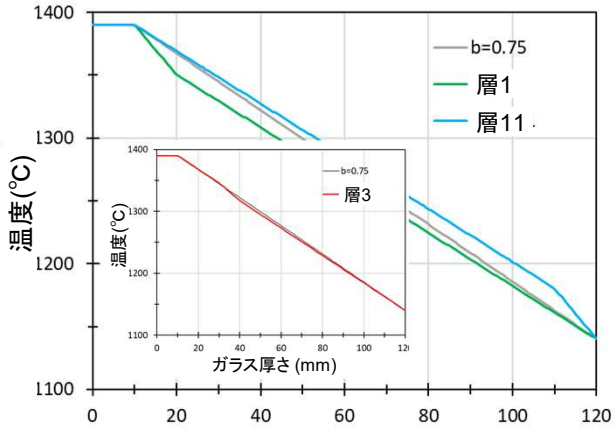
③

- 表面温度が実測に近い温度となる条件は、実際のガラスの熱伝導度データではb>0.65であるため熱流束q>3.0kW/m2（0.003W/mm2）が予測される。

(4) ガラス融液伝導度データを用いたモデル計算 (2/2)







④

- 空隙率εpを変えた場合のMaxwell-Euckenモデルの温度変化を示す。
- εpが大きいと熱伝導度は低下し、断熱的になることが分かる。計算では各層は見かけの熱伝導度が用いられ、その解釈は実際の物質の構造を反映させなければならない。

⑤

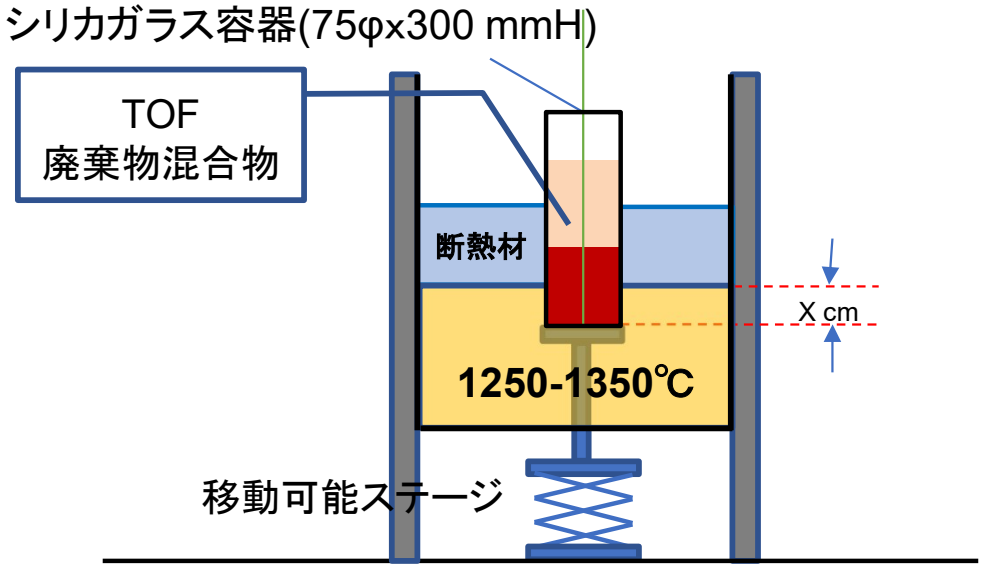
- λを0.4～0.75まで0.05刻みで変化させ線形のプロファイルを得、Tsは503～688℃であった。熱流束は0.01 W/mm^2 固定。
- Tsを実測の1100～1140℃に合わせるには熱流束qを0.003W/mm^{2}程度に下げる必要がある。

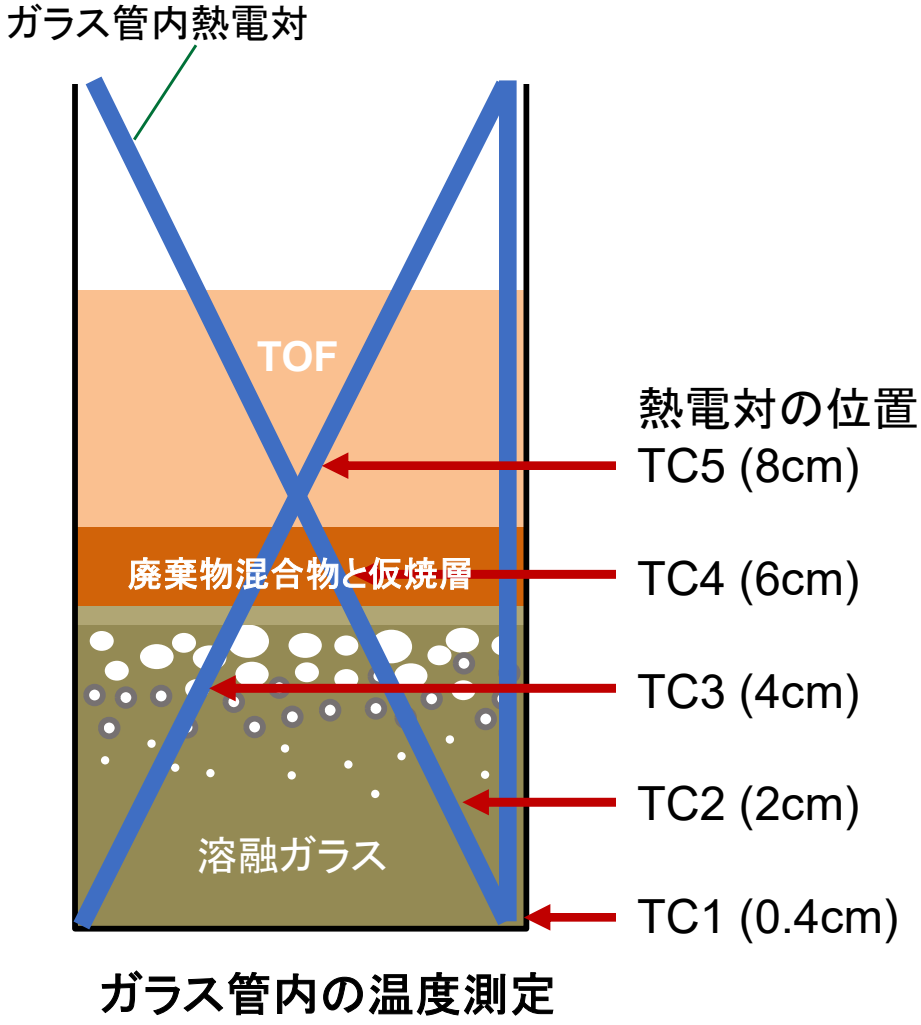
⑥

- 泡を含む層を1層挿入した場合、温度分布には屈曲が現れる。
- 泡を含む層の挿入を順次増加した場合、挿入数が多くなるにつれ温度勾配がきつくなる。
- 全てが泡層を含むようになると違いがなくなるが、これはTsを一定としているため。

(5) 温度勾配の測定方法

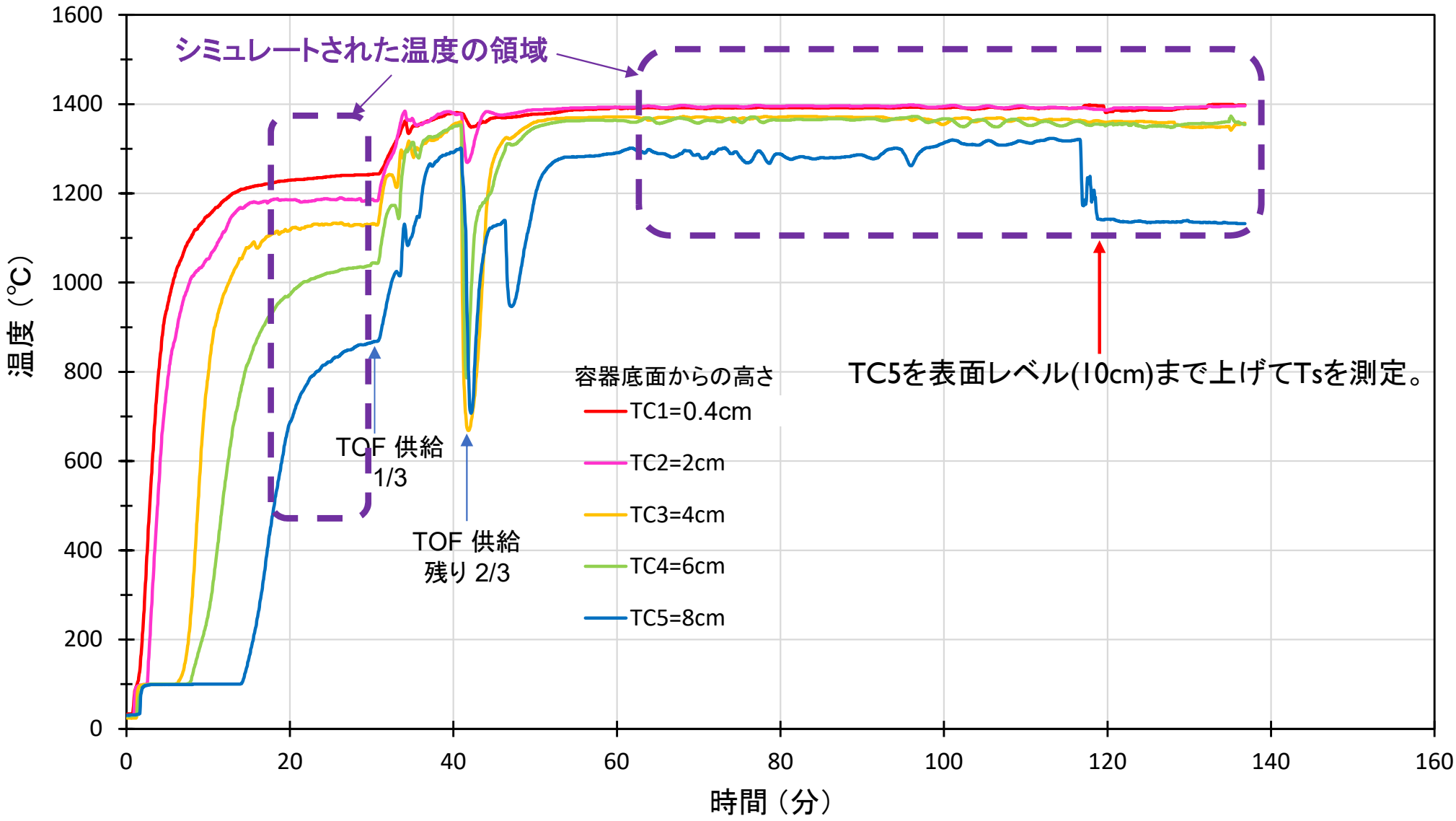
- 溶融試験6-20%水/TOF (3/3) のT_F = 1350℃における温度勾配の測定。
- 測定方法
  溶融試験6のTOF/廃棄物混合物の各層に熱電対（合計5本）を配置し、Cs排出の実験と同じ方法で電気炉で加熱。





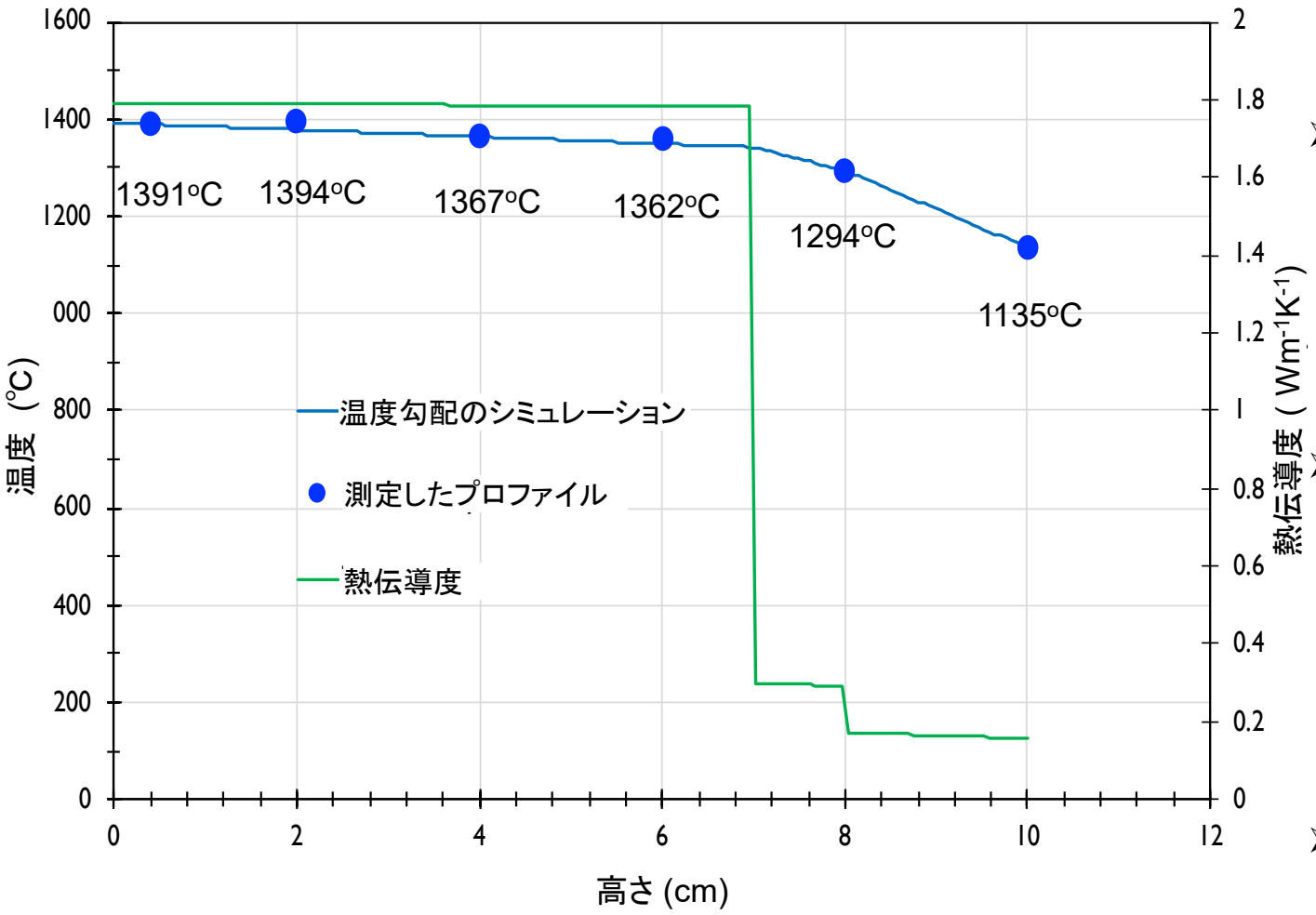
ガラス管内の温度測定

(6) 実測した温度データ



セル内の材料の温度プロファイル作成のために測定された温度トレース

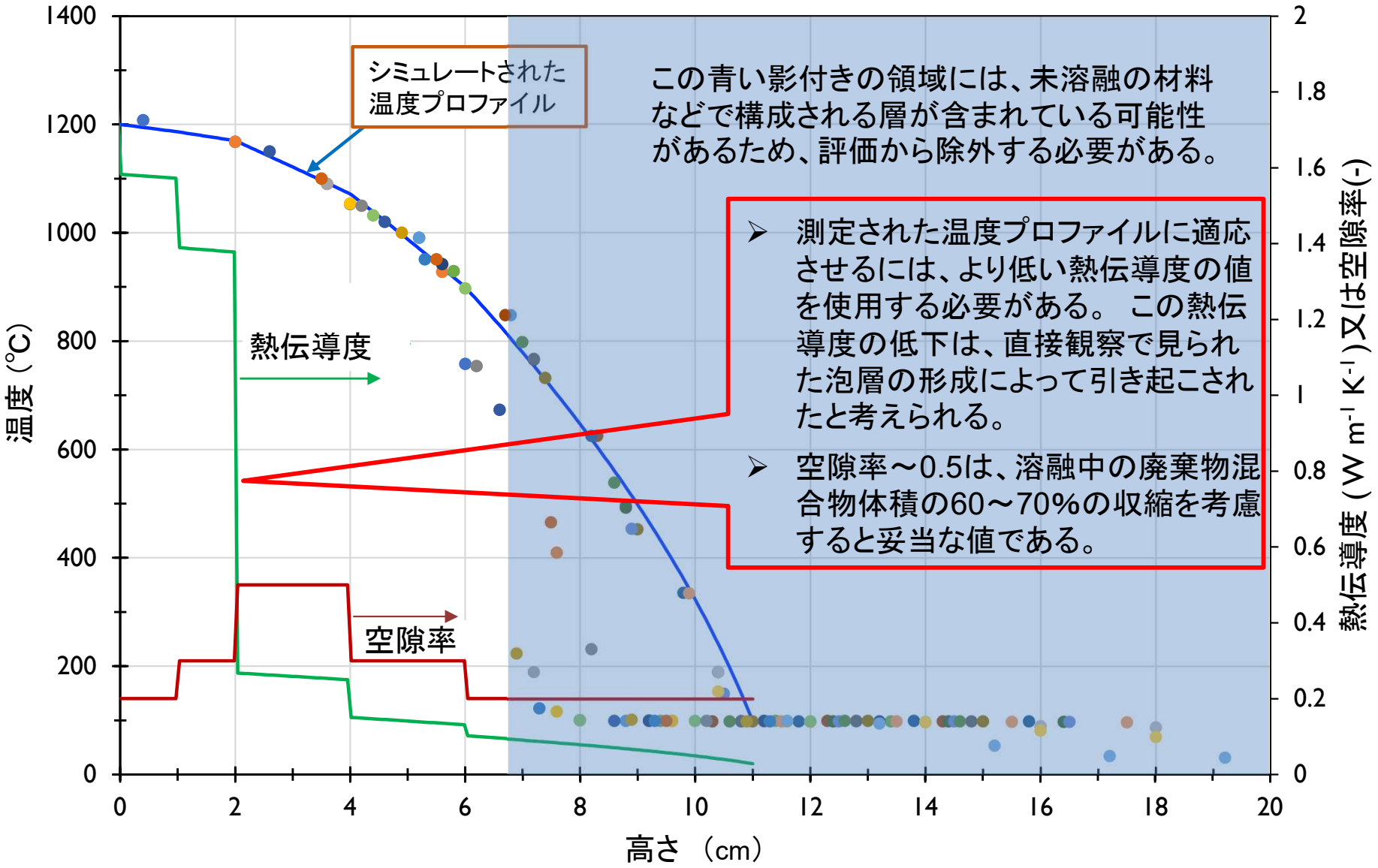
(7) FEMを用いた最終段階での温度のシミュレーション



セルの底面からの高さに対する測定データーに対してシミュレートされた温度プロファイル

- 熱伝導度は底面から7cmの高さで急激に低下した。これは溶融した廃棄物混合物とTOFの間の界面のレベルに対応していた。
- このレベルより上の溶融したTOFは透明性が高く、輻射伝熱の効果が大きい。このため輻射伝熱で熱エネルギーが散逸していくので、伝導伝熱で伝わる熱エネルギーは低下し、実際の表面温度は低くなったと考えられる。
- そのため、最表面から3~4cm程度下の下部の領域において、溶融した廃棄物混合物（不透明）が1300℃以上であっても、溶融したTOFの透明性により最表面温度がTs<1150℃程度に維持されるので、Cs揮発を抑制する表面温度の条件（Ts<1130℃）を満たすことになる。
- 十分なTOFが充填されない場合、その熱伝導は伝導伝熱であり、最表面温度は熱流束を維持するために温度が高くならざるを得ず、Cs揮発が起きやすい状態を形成してしまう。

(8) 溶融初期段階での溶融廃棄物混合物層の温度プロファイル



セルの底面からの高さに対する測定データーに対してシミュレートされた温度プロファイル

(9) まとめ－有限要素法（FEM）を用いたシミュレーションによる溶融物の温度勾配と熱流束の関係の解析

- 溶融ガラス表面周辺の温度勾配は、熱拡散（伝導伝熱）と熱放射（輻射伝熱）のバランスによる熱伝導メカニズムに依存する。TOFの厚さによってこの勾配が変わる。TOFが薄いほど温度勾配が徐々に減少し、T_Sが高くなる。
- 実験室規模実験では、工学規模試験と比較すると、溶融中の溶融物の対流は非常に弱かった。透明なTOFが不透明な廃棄物混合物を覆っていて、これらの溶融が完了し粘性による流動が発生した後には、これらの対流と混合が生じているはずである。
- 溶融したTOF層/廃棄物混合物層の最終の溶融状態での温度プロファイルを求めるために定常熱伝導のFEMシミュレーション用に12層モデルを構築した。このFEMシミュレーションにより適切な熱伝導度値を使用して実測した温度プロファイルと良好な一致が見られた。
- 溶融した廃棄物混合物上の溶融したTOF層は、光学的透明度（伝導伝熱に対し輻射伝熱の割合）が高いため、見かけの熱伝導度が低くなる可能性がある。
- Maxwell-Euckenモデルは空隙の因子を組み込んでいるので、泡層を含む層（初期段階）のシミュレーションに適している。

7. 2 工学規模溶融試験装置の改造とチェックアウト溶融
(1) 目的／方法

- 工学規模溶融試験装置改造の目的と方法

目的:

- Cs回収用の焼結金属フィルタ（SMF: Sintered Metal Filter）の追加。
- 溶融状況監視用のIRカメラ／覗き窓の改良。

方法:

- SMFの重量を支えるため炉外側鋼製容器の寸法を拡大して強度を増加。
- SMF及びオフガス配管、装置内における温度低下によるオフガス中水分の凝縮防止のためヒートトレース及び断熱材を設置。
- 供給装置、配管内での結露発生に伴う供給試験材料（廃棄物＋ガラスフリット）の固着等の発生をヒートトレース等による温度上昇により防止。

- チェックアウト溶融の目的と方法

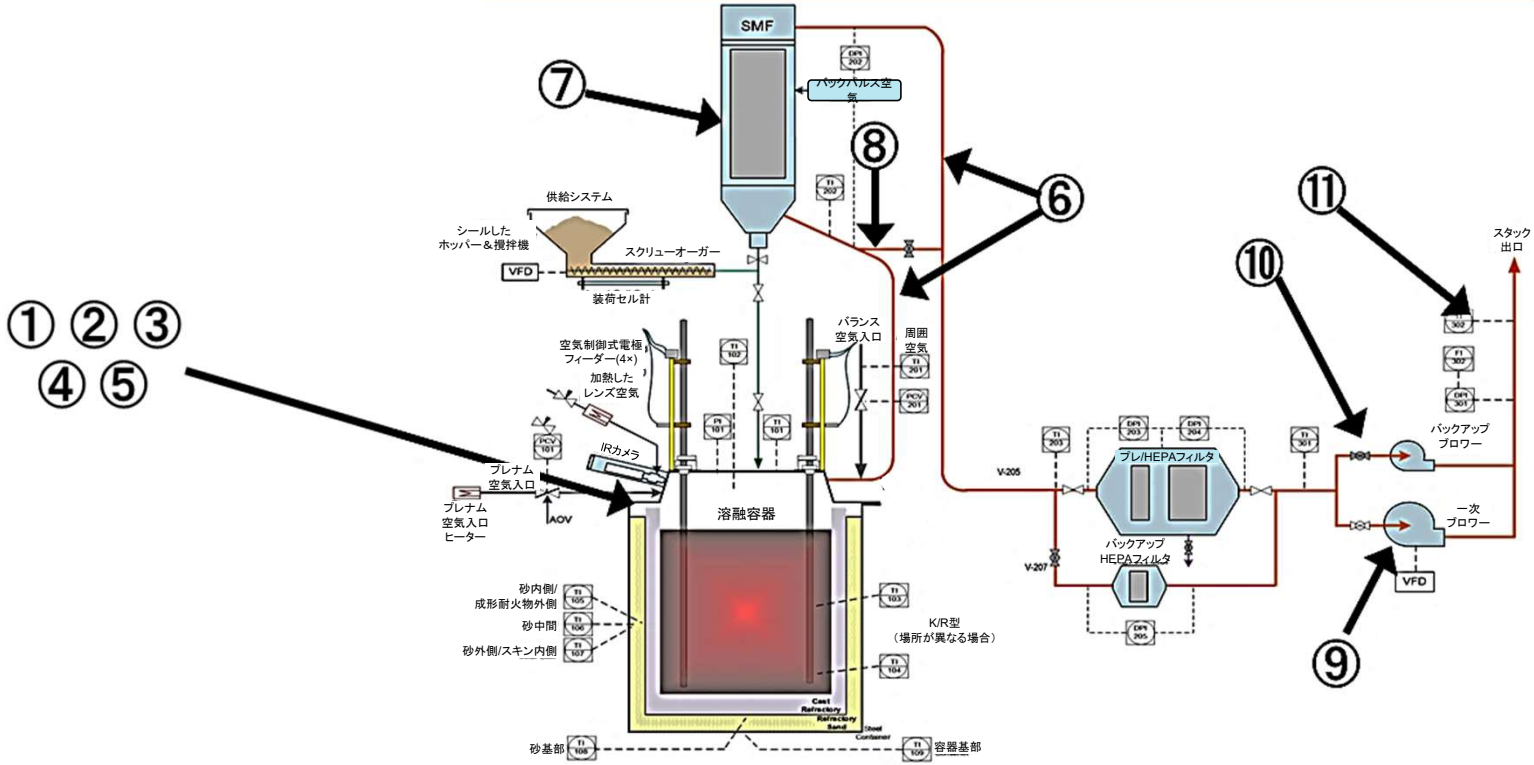
目的:

- 装置改造部分の作動確認、SMFのバックパルスの最適な実施方法の確認のためにチェックアアウト溶融を実施。変更した溶融試験準備方法の確認、試験操作員の訓練。

方法（新しい溶融処理試験の手順を確認）:

- 溶融準備で、ベースフリットを投入、スターターパスを設置。
- 溶融場所に移動し、オフガスフード設置後に遠隔により電極を設置してスターターパスと接続（実処理プラントで想定される手順に対応している）。

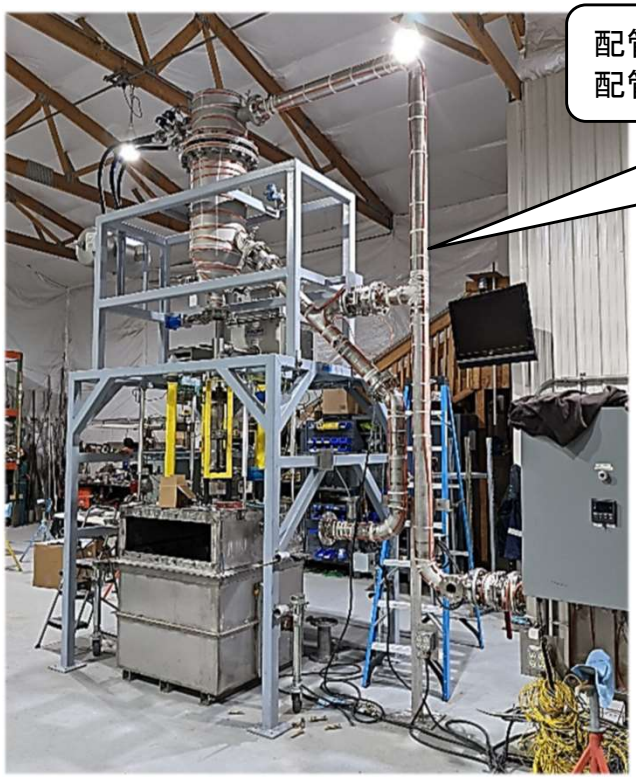
(2) 工学規模溶融試験装置の改造箇所



#	機器	改造した項目	理由
①	フード	供給配管ーサイズを直径3″から4”に拡大	供給物の固着を防ぎ、より大型のSMF出口配管に合わせる。
②	フード	出口配管ーサイズを3″から4”に拡大	粒子状物質のキャリーオーバーを最小化し、より大型のSMF配管に合わせる。
③	フード	前部ハッチ窓ーサイズを10%拡大	溶融容器システムの準備とセットアップのため。
④	フード	新しいIRカメラに応じた架台・窓の改造	表面につながる新しいIRカメラを合わせる。
⑤	溶融容器	溶融容器の外周フランジの寸法を拡大	新しいより大型のフードの寸法に合わせる。
⑥	オフガス配管	溶融容器からSMFへのサイズを3″から4”に拡大	より大型のSMF入口に合わせる。
⑦	第1ステージのフィルタ	布製バグハウスフィルタをSMFに交換	SMFへの交換でオフガスシステムをより効率的にし、1F GeoMelt®ICV™予備概念設計に適合させる。
⑧	第1ステージのフィルタのバイパス	バイパスラインの直径を2″から4”に拡大	新しいオフガス配管のサイズに合わせる。
⑨	1次ブロワー	オフガスファンを新しい大型のファンと交換	取り付けたより大型のファンをSMF要件により良く適合させる。
⑩	バックアップブロワー	オフガスバックアップファンを大型のファンと交換	取り付けたより大型のファンをオフガスシステムによりよく合わせる。
⑪	スタックオフガス配管	ファンの出口配管を2″から4”に拡大	新しいオフガスシステムの流量を増やすため。

布製バグハウスフィルターの撤去とSMFの設置による流量の変更に伴い、主にオフガス配管の寸法と送風機の容量が変更された。

(3) 改造した工学規模溶融試験装置の構成

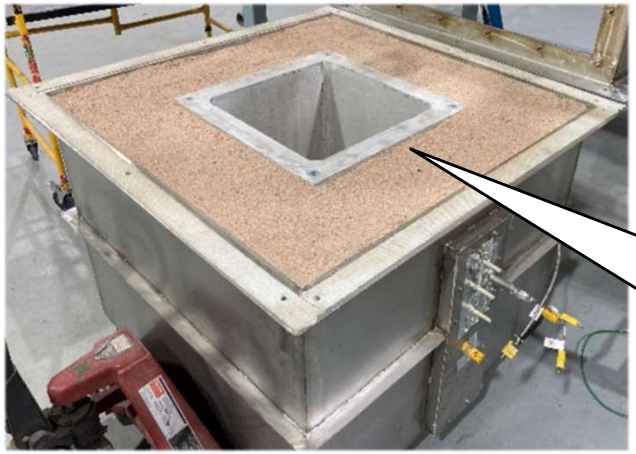


配管壁で凝縮が発生しないようにするために、ヒートトレースをSMFとオフガス配管に取り付け

断熱材装着前のオフガスシステム

SMFとオフガス配管に断熱材を使用した工学規模溶融試験装置の最終構成

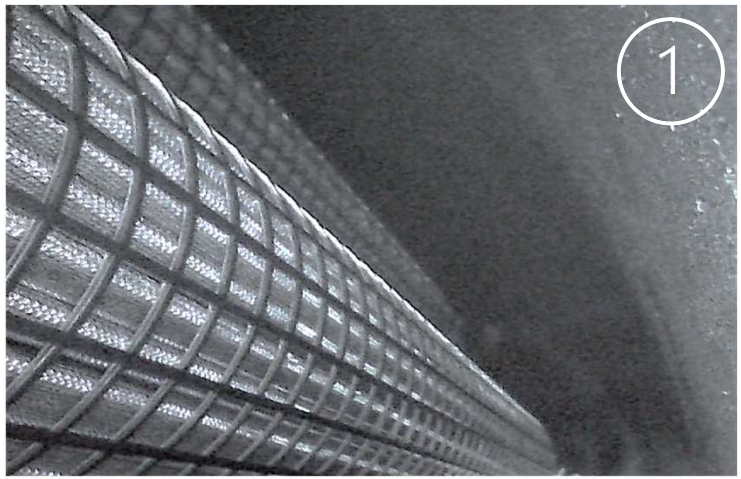
チェックアウト溶融中のシステム



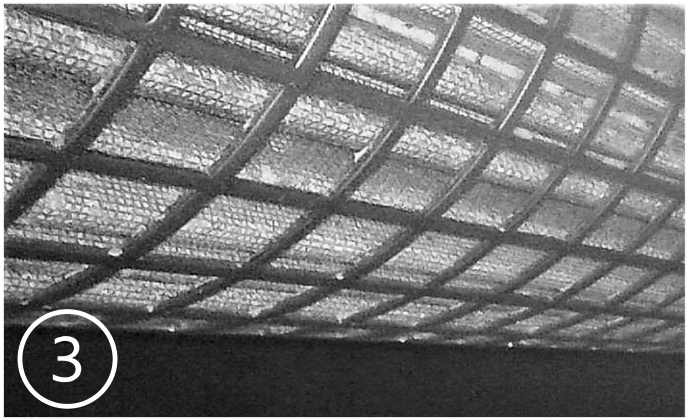
溶融容器の準備

オフガスフードの下に配置する新しい溶融容器の構成
（将来、耐火物容器の拡大を可能とする大きな寸法の鋼製容器を採用）

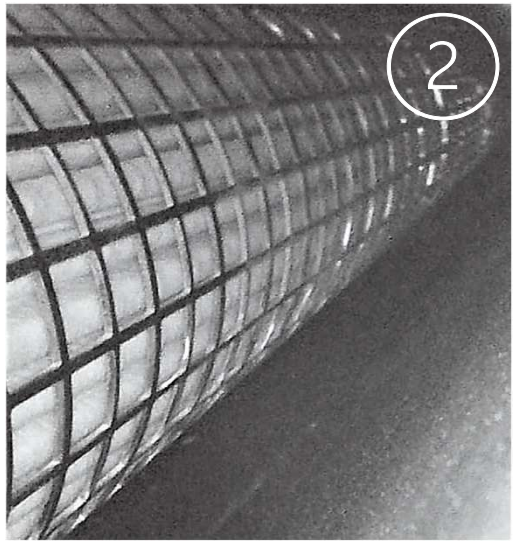
(4) チェックアウト溶融の結果（SMFの動作状況）



新しいカートリッジを備えたクリーンなSMF内部
（試験開始前のクリーンなカートリッジ差圧：1.5）



溶融後のバックパルス後の
クリーンなSMFカートリッジ
（バックパルスによるカートリッジのろ過時の
差圧：1.5（元に戻る））



チェックアウト溶融前の珪藻土
コーティングを施したSMFカートリッジ
（カートリッジへのコーティング時の差圧： 4.0）

チェックアウト溶融後のクリーンなSMF壁

目的：

- ✓ カートリッジ（フィルターエレメント）への詰まりがバックパルスにより除去・洗浄されることを確認する。

結果：

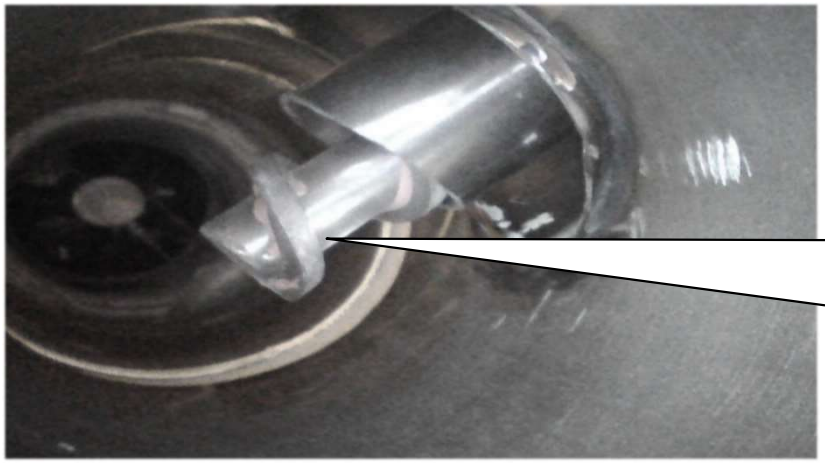
- ✓ 模擬的な詰まり（コーティング）がバックパルスにより除去できたことを差圧の回復とSMF内部の良好な清浄度により確認した。

フィルタ試験条件	差圧（インチH_2O）
①	1.5 (=3.73 mbar)
②	4.0 (=9.95 mbar)
③	1.5 (=3.73 mbar)

運転前後の差圧（バックパルスにより差圧が基準圧力に戻せることを確認。）

結論： SMFは、チェックアウト溶融中に設計どおりに動作し、溶融試験に適用できることを確認。

(5) チェックアウト溶融の結果（スクリューオーガー、IRカメラ／覗き窓の動作状況）



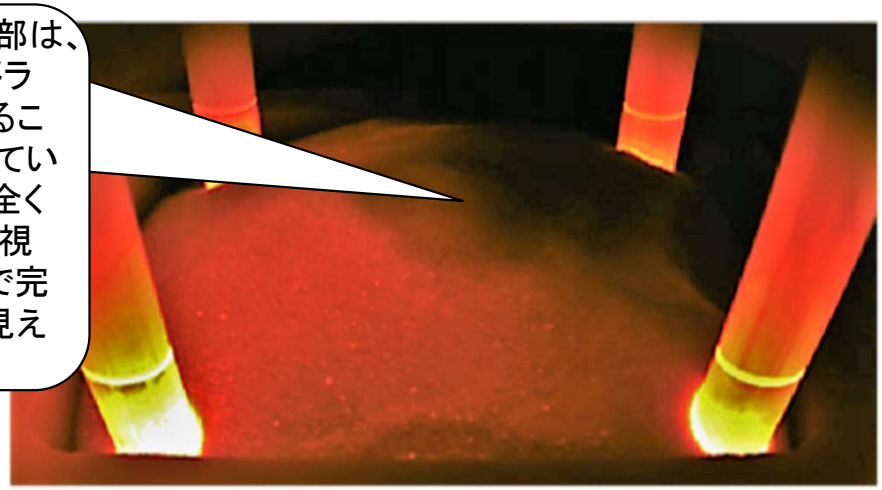
チェックアウト溶融後の供給配管と
オーガー出口の内側（上方から下方視）

スクリューオーガー及び供給配管への試験材料の蓄積なし

チェックアウト溶融後の耐火物容器内の
供給配管出口（下部側から上方視）

溶融開始（通電開始）2時間後（覗き窓から観察）

耐火物容器内部は、側面窓とIRカメラの両方から見ることができる。見ている炉内状況は全く同じであるが、視野角が違うので完全に同じには見えない。



溶融開始（通電開始）2時間後（IRカメラ）

(6) 工学規模溶融試験装置の改造及びチェックアウト溶融の結果のまとめ

検証項目	結果
1. 焼結金属フィルタ(SMF)の動作の検証	① SMFの監視・操作システムは設計通りに機能。具体的には、SMFの設定温度はオフガス配管と同様に100℃以上(設計限界は300℃)で、差圧の設計限界は20インチH_2Oであり、それぞれをSMFの監視・操作システムで監視。バックパルスの持続時間は制御システムで測定、その持続時間は0.3秒。また、バックパルスの周波数は監視・操作システムで自動設定。 ② バックパルスにより、差圧が基準圧力に戻せたことを確認。(44頁:試験による差圧変化参照) ③ 溶融後のフィルターハウジング内部の観察により、フィルターエレメント(SMFカートリッジ)の良好な清浄度を確認。(44頁:試験ごとのSMFの内部及びカートリッジ等の状態参照)
2. SMF及びオフガス配管内での凝縮の防止	① 溶融容器への給気を加熱するインレットヒーター等により、常に溶融容器プレナム部の温度を露点以上に維持することができるので、オフガス配管の凝縮の防止にも寄与。 ② 試験全体を通じてオフガスシステムでの凝縮発生を防止できたことを確認。
3. 試験材料(廃棄物＋ガラスフリット)の供給装置、配管内での固着等の発生防止	① 供給装置(スクリューオーガー・遮断バルブ)や供給配管内部での詰まり・固着・蓄積等は発生せず、溶融試験後のカメラによる点検で形跡も認められなかったことから、供給装置及び供給配管は設計どおりに機能。 ② 供給制御装置(計量システム)は中断や誤動作なしに設計どおりに機能したことを確認。
4. プロセス表示の改善(IRカメラ、覗き窓の改良)の検証	① IRカメラは、溶融開始から溶融完了までの全てのプロセス温度範囲で問題なく動作。解像度アップ、覗き窓の改良と合わせてプロセスの運転監視が向上。 ② 溶融熱電対を用いた校正により、より正確な温度表示のための放射率値の校正が可能.。
5. 新しい溶融処理試験の手順確認	① 溶融準備で、ベースフリットを投入、スターターパスを設置、溶融場所に移動。 ② オフガスフード設置後に遠隔により電極を設置、スターターパスと接続。新しい手順による溶融処理準備作業を問題無く実施。

結論:　新しい工学規模溶融試験装置のチェックアウト溶融を実施し、溶融試験で使用できることを確認。

7.3 工学規模溶融試験
(1) 目的／方法

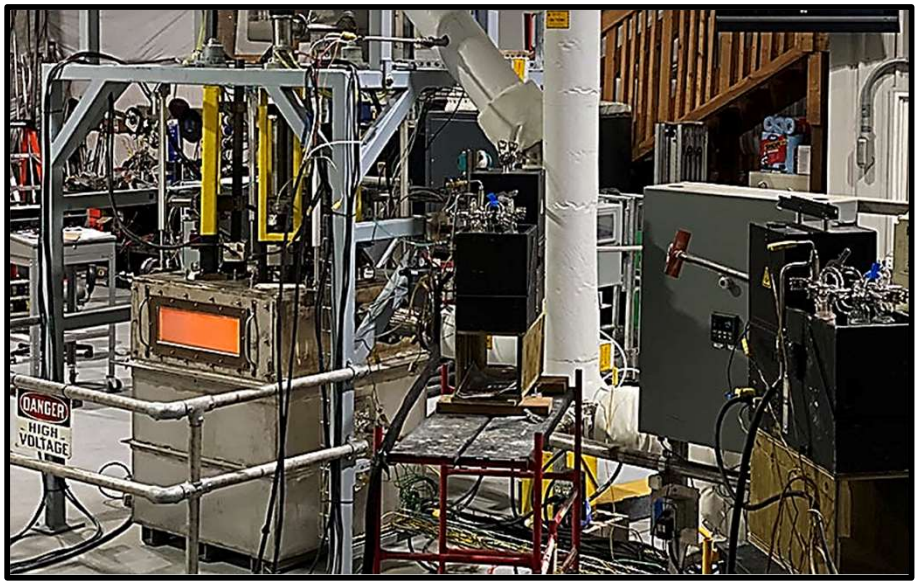
- 2020年度までの溶融試験1から8に引き続き、2021年度は溶融試験9から12を実施。
- 4つの溶融試験共通の目的/方法
  - ・工学規模（各試験で廃棄物180kgを処理）での溶融処理の実証。
  - ・試験装置改造で設置した焼結金属フィルター（SMF)の操作性と性能を確認、評価。
  - ・Cs と Sr の放出量を連続/不連続スタックサンプリングにより定量的に把握、評価。
  - ・溶融終盤の操作において、基礎試験により得られた知見を活用、評価。
  - ・溶融後のガラスサンプリングにより、ガラス中のCs分布の均質性を把握。
- 溶融試験における目的/方法
  - ・溶融試験 9: 廃棄物としてKUR-EH+KUR-TSGを処理。
    SMF捕捉微粒子は溶融容器にリサイクルせずに回収、微粒子量とCs濃度を測定。
  - ・溶融試験10: 廃棄物としてKUR-EH+KUR-TSGを処理。溶融試験9と同様だが、高含水率での処理を実証[1]するため含水率を15%→20%に増加。SMF捕捉微粒子は溶融処理中に溶融容器にリサイクル。
  - ・溶融試験11: 廃棄物としてKUR-EH+ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物を処理。なお、本脱水物はATOX製の模擬物。
    溶融試験に先行して当該廃棄物の搬送性・供給性を基礎試験で確認。SMF捕捉微粒子は溶融処理中に溶融容器にリサイクル。
  - ・溶融試験12: 廃棄物としてKUR-EH+ALPS炭酸塩スラリーを処理。
    溶融試験1及び5はALPS炭酸塩・鉄共沈スラリーだが、本試験では炭酸塩スラリー含有率（廃棄物中MgO含有率）を高めた配合。SMF捕捉微粒子は溶融処理中に溶融容器にリサイクル。

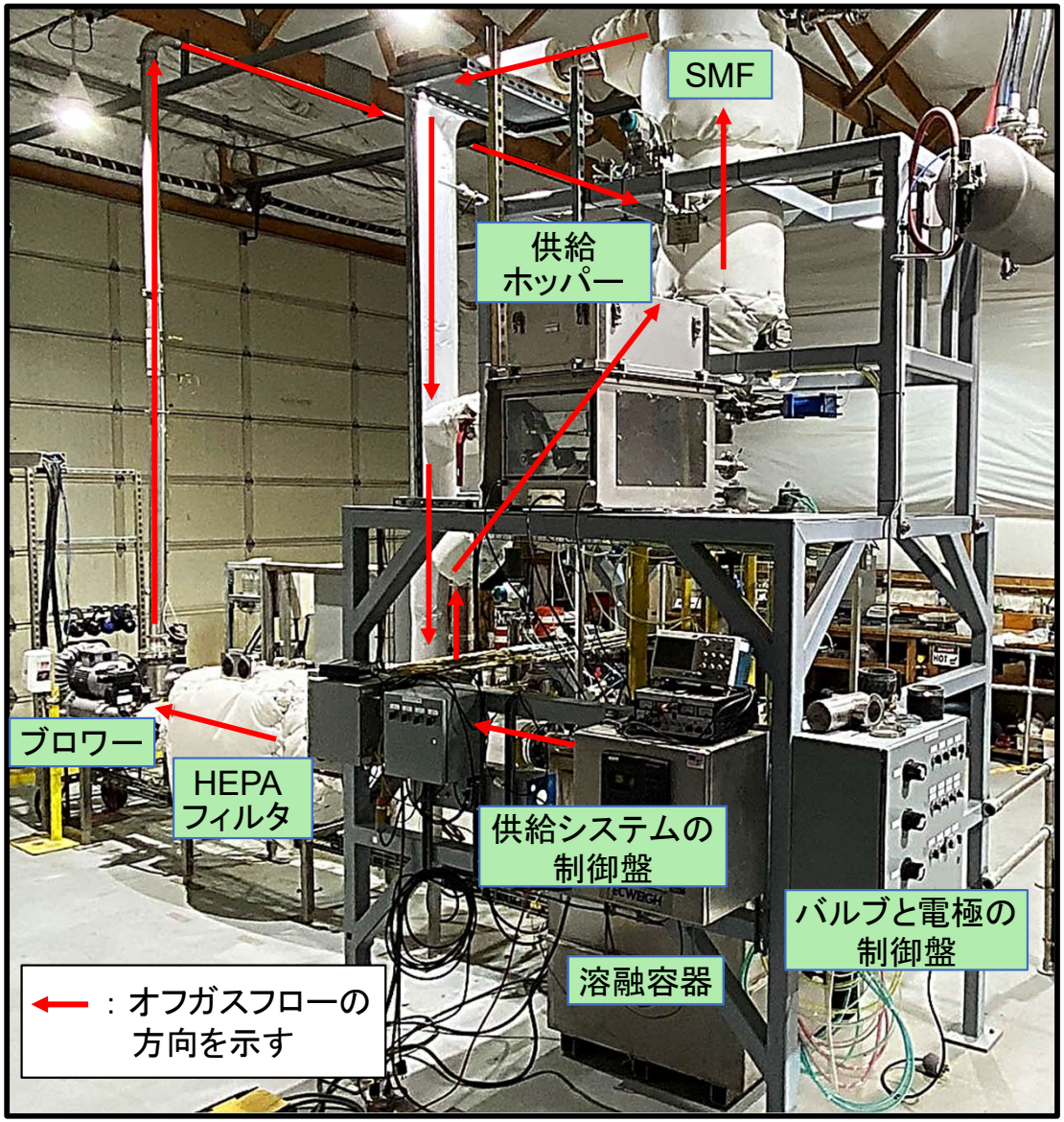
1: 高含水率廃棄物処理実証の目的:
GeoMelt®ICV™では多様な廃棄物組成（組み合わせ）の処理が可能。組成調整の過程で含水率の調整も可能。高含水率廃棄物でも溶融処理自体は問題無いが、溶融容器供給までの取り扱いで問題（固着等）が起こりうると想定。この点から高含水率廃棄物の処理（取扱い）を実証。この実証により実処理プラントでの廃棄物組成の調整は確認できる。

(2) 装置外観

（右図） 改造した工学規模溶融試験装置
2021年度の4つの試験で使用。
溶融容器上部に廃棄物供給ホッパーとSMFを設置。

（下図） 反対側から見た試験装置
4電極溶融容器のオレンジ色部分が覗き窓（溶融試験中のためオレンジ色）。





(3) 試験材料（廃棄物＋ガラス添加材）の調整

- 混合前にCsをKUR-EHに吸着。
- PNNLガラス組成に従って、廃棄物（ガラス形成材となるKUR-EHを含む）とガラス添加材を混合中に水を加え、含水率を調整して試験材料とする。
- Csトレーサー (CsCl) を吸着したKUR-EHを含む試験材料とSrトレーサー ($SrCO_3$) を混合して最終の試験材料を調製。
- 試験材料を計量、分析用にサンプリング。

混合した試験材料、
バイアル容器にてサンプリング

試験材料の組成

成分	溶融試験 9		溶融試験 10		溶融試験 11		溶融試験 12	
	質量(kg)	wt%	質量(kg)	Wt%	質量(kg)	Wt%	質量(kg)	Wt%
KUR-EH	93.62	61.19	88.11	61.19	75.60	50.21	65.62	45.57
KUR-TSG	32.97	21.55	31.03	21.55				
ALPS 炭酸塩脱水物					42.02	27.91		
ALPS 鉄共沈脱水物					15.84	10.52		
ALPS 炭酸塩スラリー							42.42	29.46
SiO_2	1.61	1.05	1.51	1.05	5.04	3.35	10.92	7.59
B_2O_3	7.13	4.66	6.71	4.66	5.40	3.59	4.75	3.30
Li_2CO_3	12.09	7.90	11.38	7.90	2.52	1.67	8.35	5.58
Na_2CO_3	5.58	3.65	5.26	3.65				
ZrO_2					3.06	2.03	11.67	8.10
ZnO					1.08	0.72	0.27	0.19
小計	153.00	100.00	144.00	100.00	150.56	100.00	144.00	100.00
水	27.00	15[1]	36.00	20[1]	29.44	16.3[1,2]	36.00	20[1]
ベースフリット	5.00		5.00		5.00		5.00	
TOF	15.00		15.00		15.00		15.00	
合計	200.00		200.00		200.00		200.00	
トレーサー:								
CsCl	83.59 g		78.67 g		67.50 g		58.59 g	
$SrCO_3$	156.32 g		156.32 g		156.32 g		156.32 g	

[1] 試験材料の総供給量に対する水の割合。ベースフリットとTOFを含まない。
[2] ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物に含有する水分のみによる含水率の調製。

(4) ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物の搬送性・供給性に関する試験

- ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物（以降、「ALPS 脱水物」と称す。）の化学組成を分析 → 右下表のとおり。
- 溶融試験11を実施する前に、ALPS脱水物のガラス形成剤及びガラス添加剤との混合性、搬送性及び供給性について試験。
- 混合試験： スパイラルミキシングアームとバケツにて混合
  → ALPS脱水物はスパイラルミキシングアームによりガラス形成剤及びガラス添加剤とよく混合。
- 搬送・供給試験： 混合した試験材料の搬送・供給をスクリューオーガー装置にて模擬
  →問題なし（固着や詰まり等の問題は発生せず）。
- 溶融試験11の試験材料の調整： 500L垂直型リボン混合機で混合（2時間）。
- 溶融処理中にオフガスに移行した微粒子量増加（後述）：
  ← 試験材料の混合時間が2時間と長すぎたために過度に粉塵化。
- 溶融試験12の試験材料の調整： 同装置にて試験材料の混合時間を20分間に短縮。（試験材料の粉塵化を防止）。

ALPS炭酸塩脱水物　　ALPS鉄共沈脱水物

ALPS 脱水物外観

ALPS 脱水物の陰イオン組成

	ALPS炭酸塩脱水物 (%)	ALPS鉄共沈脱水物 (%)
硫酸塩	0.0646	0.111
塩化物	3.11	11.8
硝酸塩	ND	ND

ALPS 脱水物の酸化物組成

酸化物	ALPS炭酸塩脱水物 (%)	ALPS鉄共沈脱水物 (%)
SiO_2	1.09	0.79
Al_2O_3	0.14	0.15
Fe_2O_3	0.29	55.9
CaO	15.85	0.56
MgO	17.6	1.15
Na_2O	17.5	10.2
K_2O	0.08	0.05
LOI [1]	42.5	31.6
合計	95.05	101.04

1 分析中に失われる一部のミネラルに存在する水と二酸化炭素の割合を表わす

スパイラルミキシングアームを使用した混合試験

搬送・供給要素試験

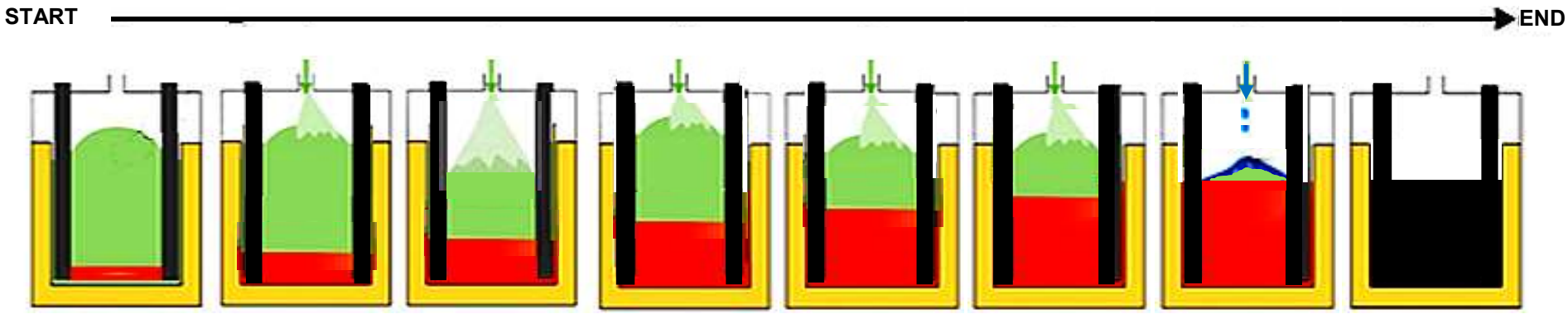
500-L垂直型リボン混合機

(5) 溶融試験準備作業及び溶融試験方法

試験準備作業

- 耐火物容器内にベースフリット及びスターターパスを設置。
- 溶融容器にオフガスフードを取り付け。
- 電極を遠隔で取り付け、スターターパスに接続。
- 最初の試験材料を耐火物容器に投入し、スターターパスを覆う。

溶融試験12の溶融前の耐火物容器内の状況

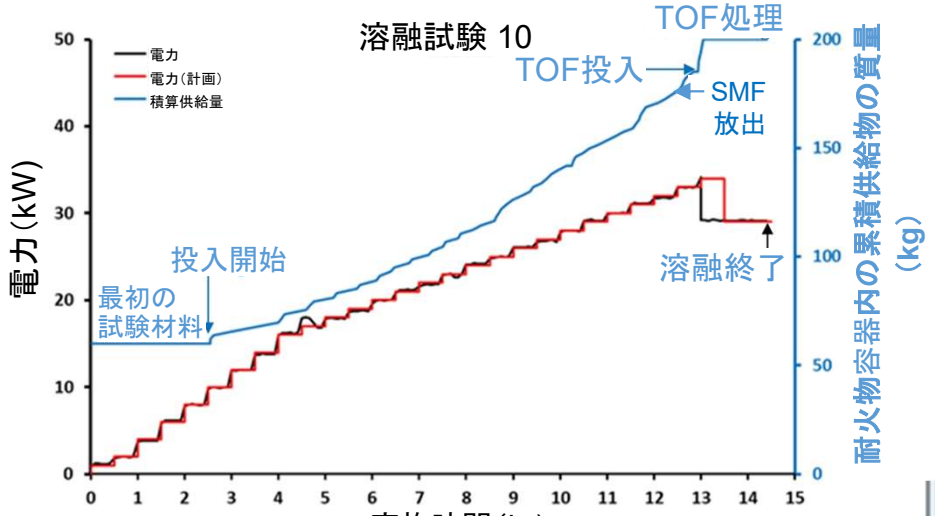


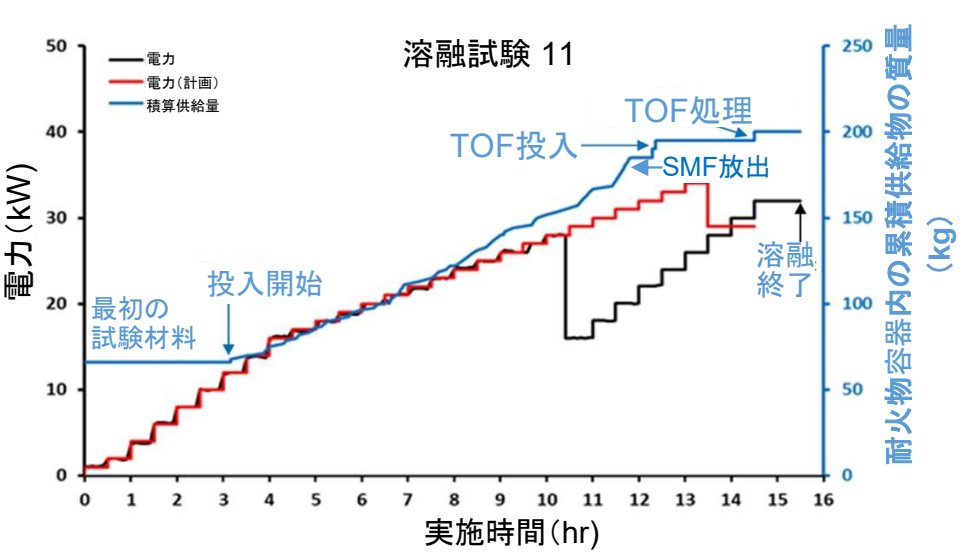
溶融試験方法

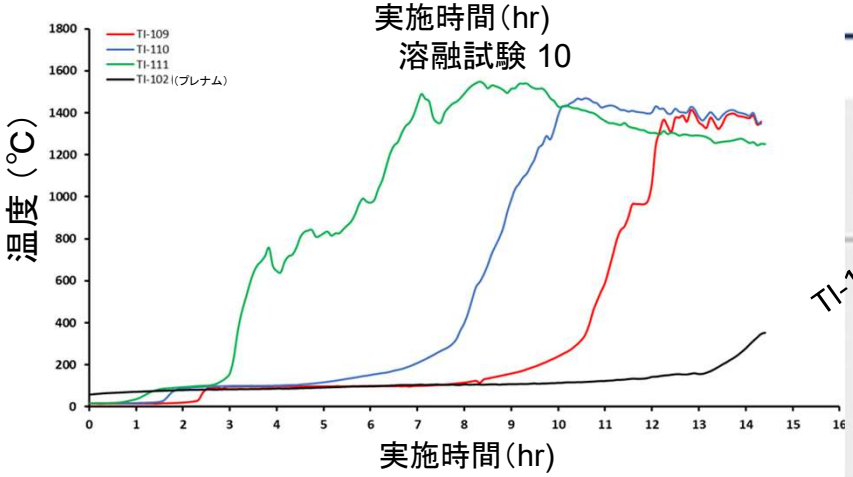
- スターターパスに電力を供給し、溶融開始、溶融はボトムアップ方式で上部へ進行。試験材料を追加投入。
- 全ての試験材料を投入した後にTOFを投入。耐火物容器内の全てのTOF処理が終了したら、溶融は終了。

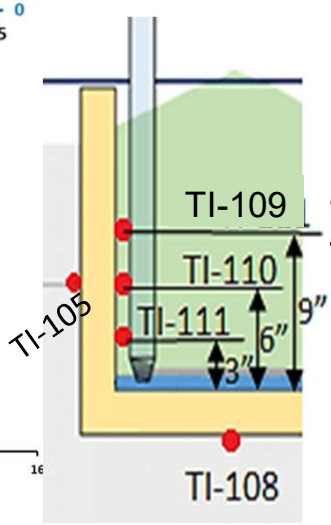
(6) 溶融試験の溶融電力上昇、試験材料供給、炉内温度、プレナム温度

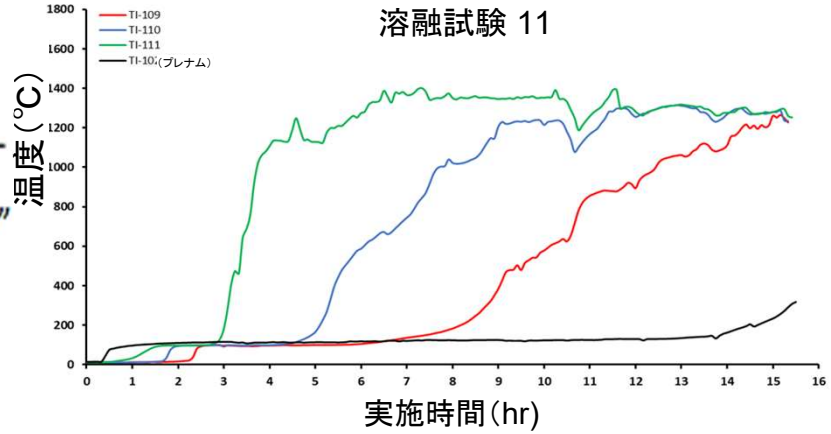
- 溶融電力は細かく段階的に増加。 TOF供給開始時に溶融電力を5 kW低下させた（Cs 揮発抑制のため）。 溶融試験11では溶融途中でCO_2発生が顕著となり、これを抑えるため、一時電力を低下させた。（溶融状況により電力調整）。
- 試験材料が溶融して体積が減少し、耐火物容器内に空きが発生したら試験材料を追加供給（コールドキャップ管理）。
- 炉内温度は下部からの溶融進行（ボトムアップ）に応じて底部の熱電対から上昇。細かな温度変化は試験材料の化学特性に依存。珪チタン酸塩の溶融（溶融試験9と10）は、ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物（溶融試験11）やALPS炭酸塩スラリー（溶融試験12）の溶融温度よりも高かった。なお、溶融試験9、12の温度、電力データは、それぞれ溶融試験10、11とほとんど同じであった。
- プレナム温度は、TOFが溶け始めるまで125℃未満のままで、溶融面が露出すると300℃前後まで上昇する。





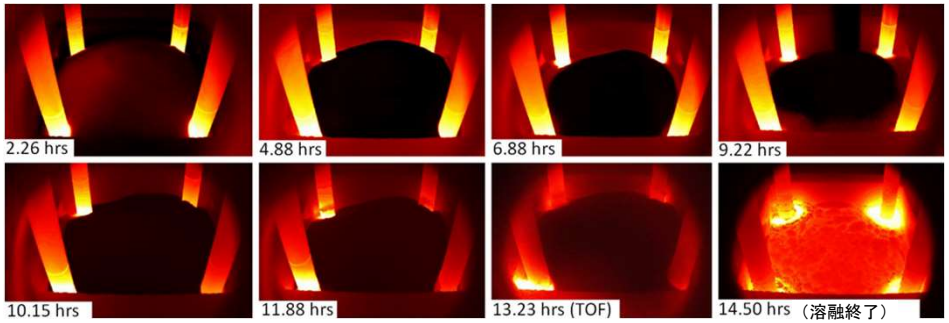




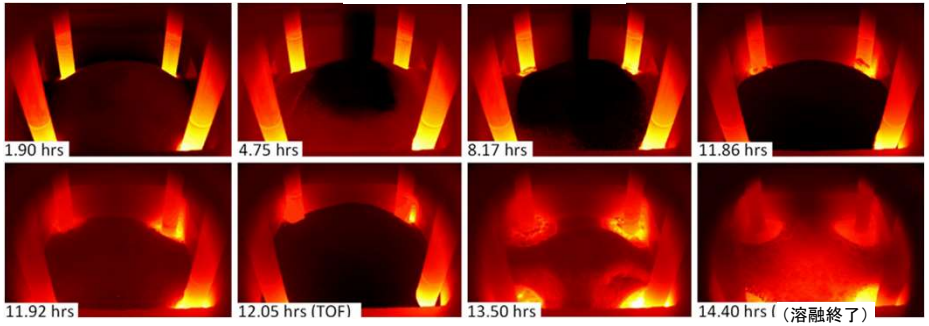


(7) 溶融の進捗状況（IRカメラ）

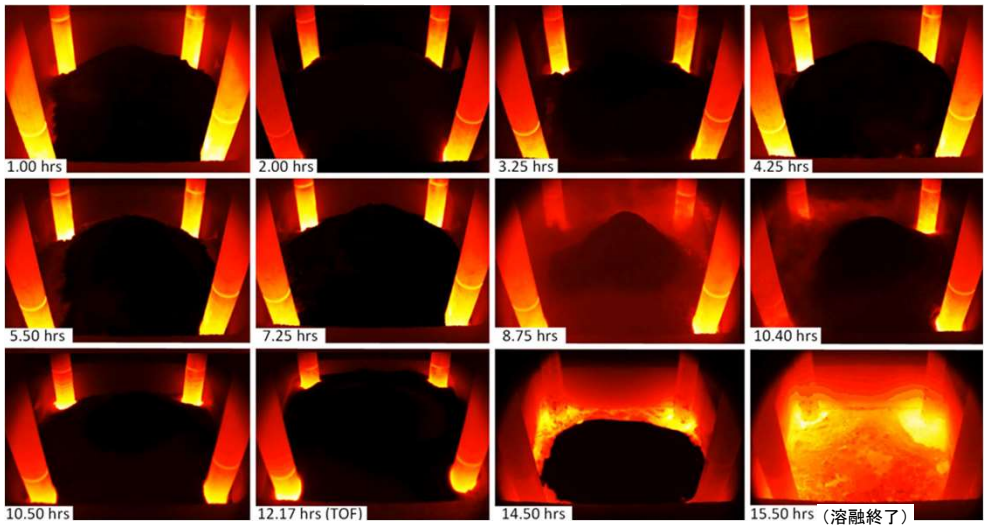
溶融試験 9[1]



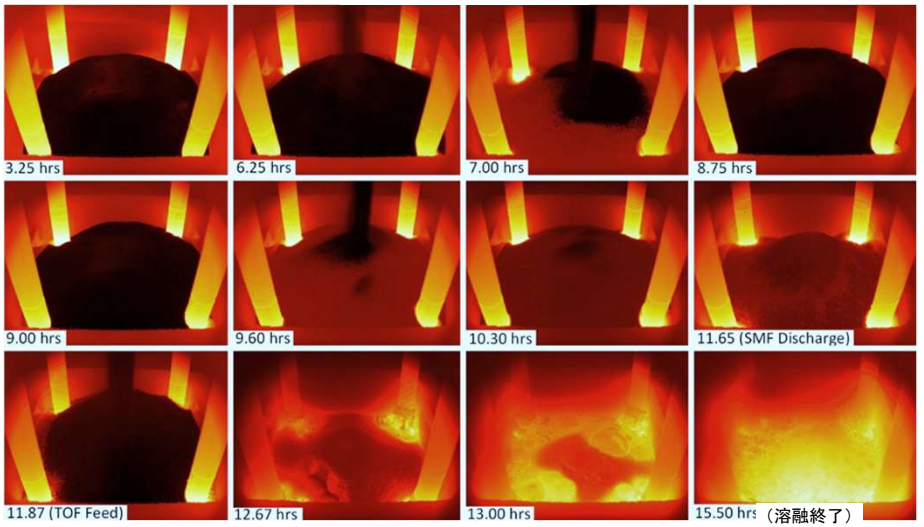
溶融試験 10[1]

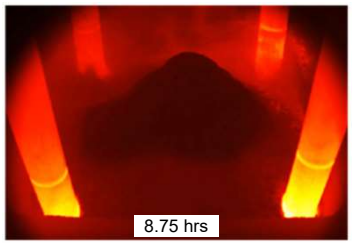


溶融試験 11

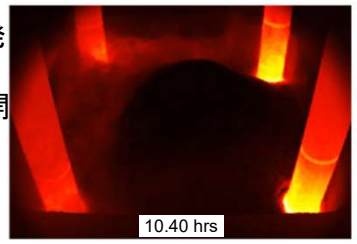


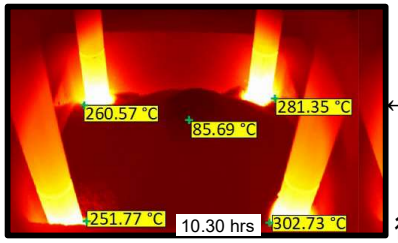
溶融試験 12





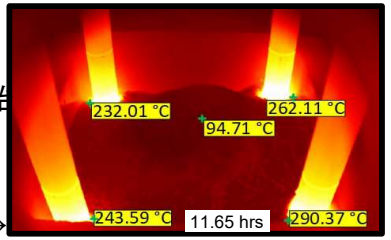
溶融試験11
顕著な2回のCO_2発生（左:溶融開始後8.75時間・右:溶融開始後10.40 時間）





溶融試験12
SMF捕捉
微粒子供給
←直前:溶融開始後10.30時間

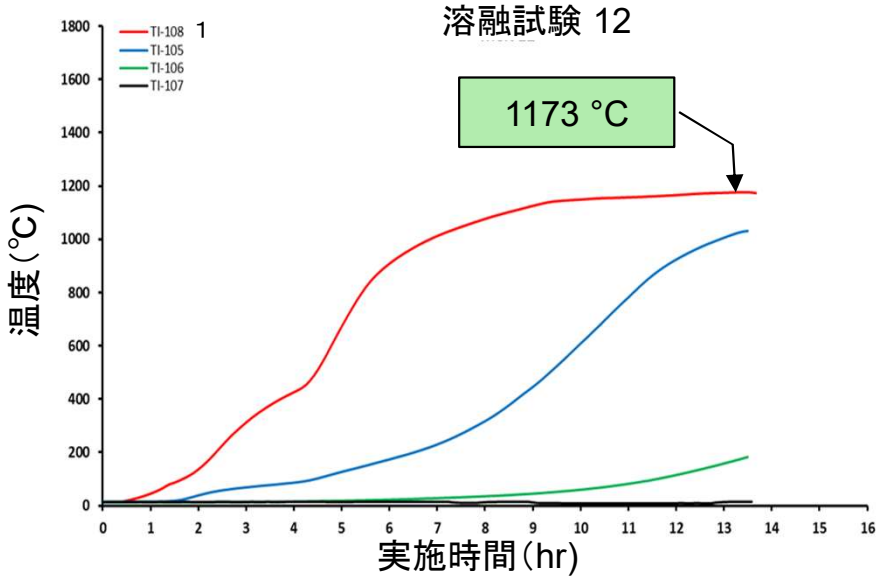
直後:溶融開始後11.65 時間→

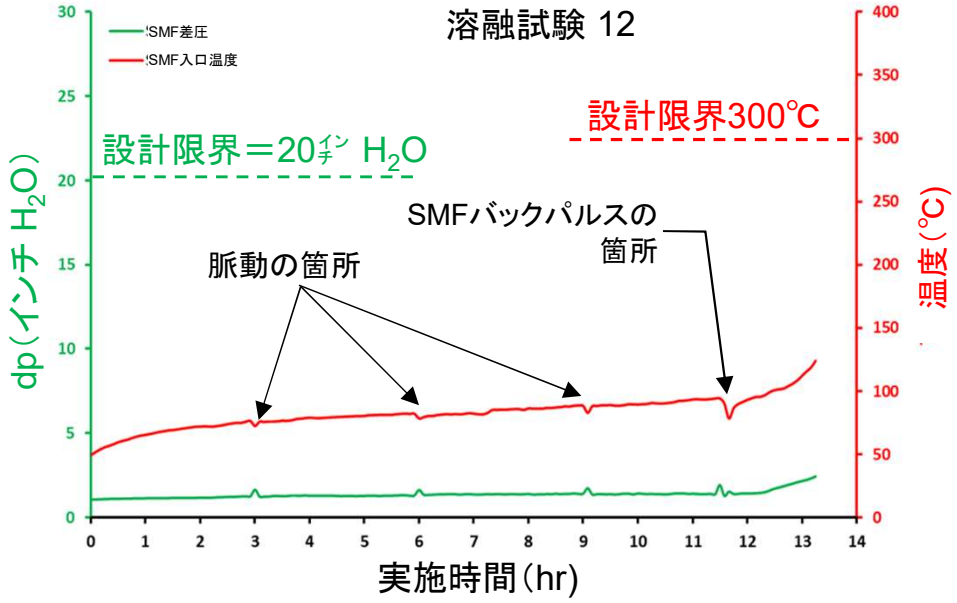


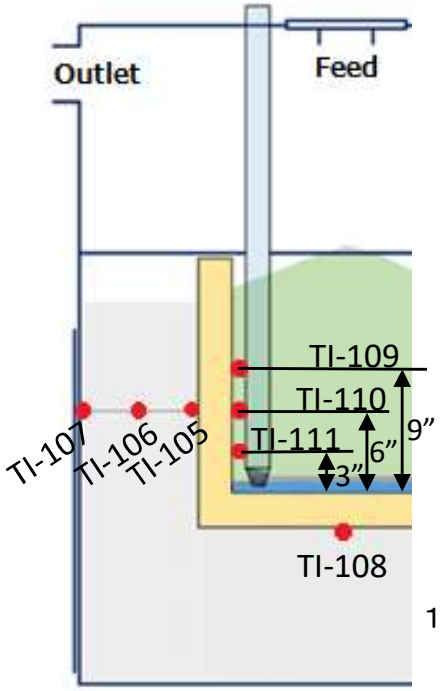
1：溶融試験9、10は特異な事象等は発生しなかった。

(8) 溶融容器内耐火物温度、SMFの温度・差圧

- 耐火物下部温度(TI-108: 上左図の赤線)、耐火物側面温度(TI-105: 上左図の青線): 溶融処理中の最高温度1100～1200℃。 これらの耐火物温度は通常使用される炉内の常用温度(1650℃)を十分下回る。
- SMFの入口温度(上右図の赤線)、差圧(上右図の緑線)は溶融処理中、設計使用上限(温度: 300℃、差圧20インチH_2O)を下回る。
- TOF供給直前にSMFをバックパルス。
- 溶融処理中、不連続スタックサンプリングのサンプル交換時にかすかな脈動がある。







1: グラフ上の温度を示す熱電対の配置レベルは左図の通り。

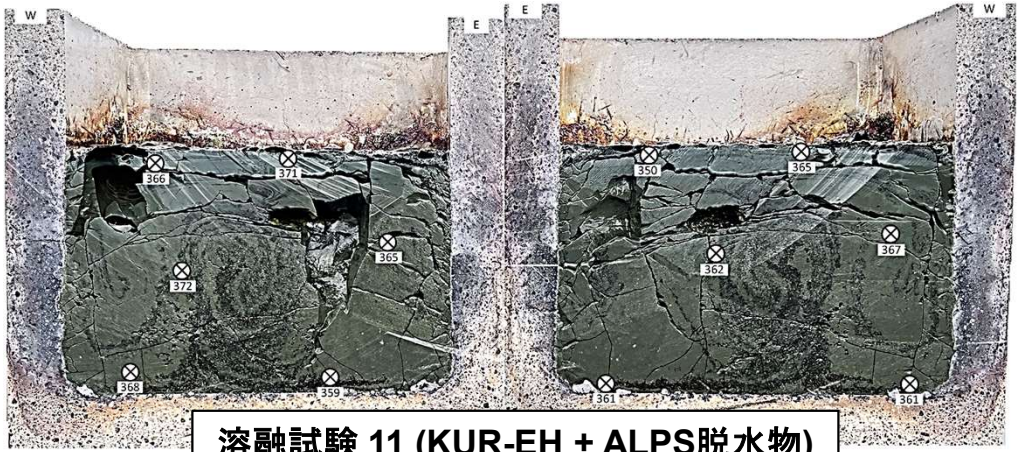
(9) 生成したガラスの状況

- ガラスを4つの部分に切断し、それぞれの部分から3つのガラスサンプルを採取（計12サンプル）。
- 測定結果はCsがガラス全体に均質に分布していた。
- 溶融試験 9の表面に一部残留のTOFが観察された。残留TOFのCs濃度は珪砂または耐火物のバックグラウンド値以下で、溶融物からのCsではない可能性がある。

残留TOF中のCsはバックグラウンド以下

溶融試験 9 (KUR-EH + KUR-TSG)

溶融試験 10 (KUR-EH + KUR-TSG)



溶融試験 11 (KUR-EH + ALPS脱水物)

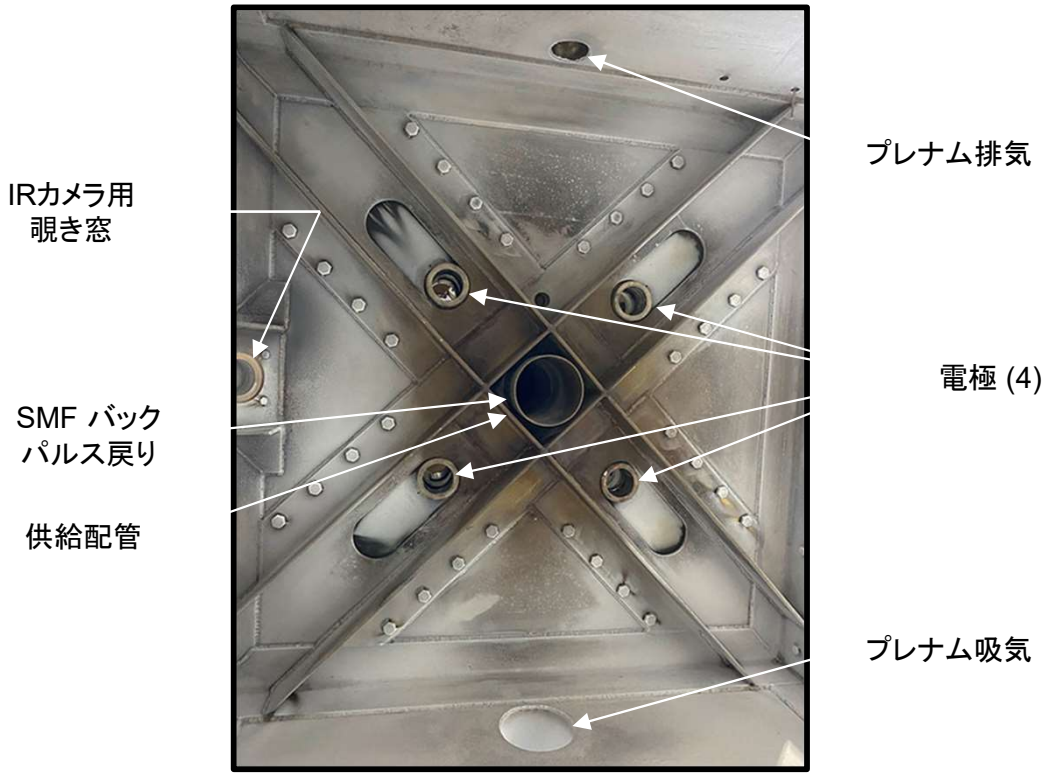
溶融試験 12 (KUR-EH + ALPS炭酸塩スラリー)

(10) 溶融容器上部フードの下面の状況

- 溶融容器上部のフードの下面を供給配管出口（中央部）、電極挿入口（4カ所）、IRカメラ用覗き窓とともに示す。
- 溶融試験9（含水率15%）と溶融試験10（含水率20%）を比較して、含水率増加によっても供給配管の詰まり等の問題は発生していない（溶融試験11、12でも同様）。
- フード下面全体とオフガス配管のSMF前のスタックサンプリング場所までの内面を拭き取りサンプリングし、Cs放出量評価に用いた（後述）。

溶融試験9

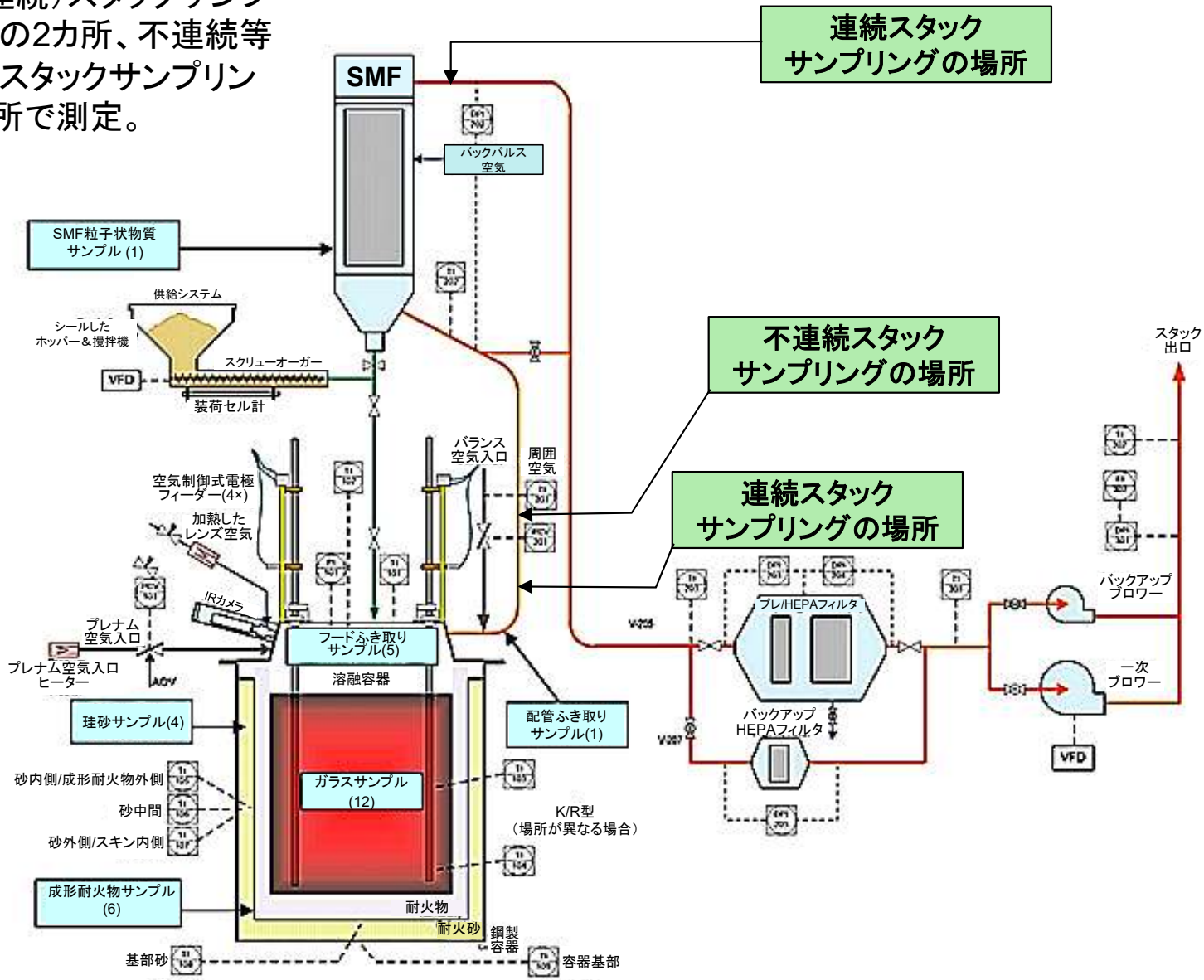
溶融試験10



拭き取りサンプリング前のフード下側

(11) オフガスのスタックサンプリング箇所

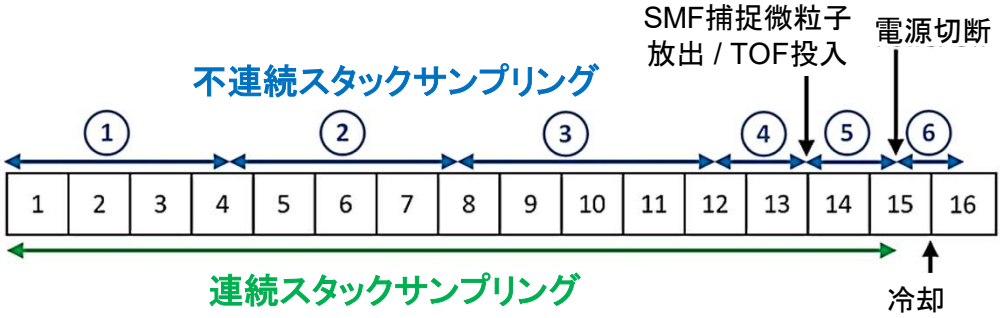
- 連続等速（以降、連続）スタックサンプリングはSMF前後の2カ所、不連続等速（以降、不連続）スタックサンプリングはSMF前の1カ所で測定。



(12) スタックサンプリング測定結果

- オフガススタックサンプリングは米国EPA（環境保護庁）規定の「Method 29」に従い実施。
- 連続スタックサンプリングは溶融開始から溶融電力遮断時点まで通して実施。不連続スタックサンプリングは溶融開始から溶融電力遮断1時間後まで、時間及び処理段階に応じて6つに区切って実施。
- 測定結果を前年度までの溶融試験結果と対比。
- 溶融試験 9、10、12における微粒子放出量は、ほぼ前年度までの試験結果と同等。
- 溶融試験 11における微粒子放出量は、ラン 4と5で特に高かった。これは、試験材料調整段階での過度の粉塵化のため。溶融試験 12では混合時間を短くして過度の粉塵化を防止、その結果、微粒子放出量は低下。
- 溶融試験 9と10では、溶融試験 5、6、7よりもTOF処理段階で放出量がわずかに高かった。新しいIRカメラの取付角度により供給物の供給状況の見え方が変わったため、TOFが耐火物容器から溢れ出ないようTOFの供給を慎重に行った。このため、TOF処理段階前のコールドキャップが薄くなり、放出量が僅かに高かったと考えられる。
- 溶融試験 11では、TOF処理段階（ラン5）でCs放出量が高い。過度の粉塵化、ALPS脱水物に含有されている高い塩化物濃度のため、及びTOF処理段階の時間が長かったため。
- 溶融試験 12では、TOF処理段階（ラン5）でのCs放出量が増加。これは、溶融試験 12のTOF供給前のSMF捕集微粒子のリサイクルにおいて、溶融試験 11のTOF処理段階で残留した微粒子も合わせてリサイクルしたため。

溶融試験10におけるサンプリング（他の試験においても同様）



		ラン 1	ラン 2	ラン 3	ラン 4	ラン 5	ラン 6
微粒子放出量 (g)	溶融試験 5	1.31	0.52	1.13	26.27		
	溶融試験 6	0.85	0.87	0.75	50.67	25.62	
	溶融試験 7	0.19	0.32	47.69	45.87	20.09	1.73
	溶融試験 9	0.0003	0.002	0.45	0.67	0.59	0.03
	溶融試験 10	0.72	1.10	14.4	28.65	41.18	1.7
	溶融試験 11	0.00	59.7	25.5	150.43	1140.23	77.3
	溶融試験 12	1.8	1.5	1.2	1.76	89.33	9.3

		ラン 1	ラン 2	ラン 3	ラン 4	ラン 5	ラン 6
Cs放出量 (g)	溶融試験 5	0.00	0.00	0.00	1.35		
	溶融試験 6	0.00	0.00	0.00	0.97	0.37	
	溶融試験 7	0.00	0.00	0.06	0.10	0.44	0.01
	溶融試験 9	0.00	0.00	0.45	0.67	0.59	0.03
	溶融試験 10	0.00	0.00	0.28	0.68	0.70	0.02
	溶融試験 11	0.00	0.18	0.02	0.23	9.03	0.05
	溶融試験 12	0.02	0.01	0.00	0.02	2.09	0.14

オレンジ色の欄はTOF処理段階を示す。

(13) SMFによるCsの捕捉、回収を含めたCs量の測定結果

- 溶融試験における各箇所でのCs量測定結果は下表のとおり。
  - ① 供給試験材料中のCs量
  - ② フード内、配管（最初の連続スタックサンプリング地点まで）内のCs付着量（ワイプサンプリング）
  - ③ 連続/不連続スタックサンプリング（SMF前の連続及び不連続ラン6）でのCs量
  - ④ 連続/スタックサンプリング（SMF前の連続のみ）でのCs量
  - ⑤ SMFからのリサイクルCs量
  - ⑥ 連続スタックサンプリング（SMF後の連続）でのCs量

- 溶融試験では、SMFで捕捉した微粒子（Cs)について以下のように処理。

  溶融試験 9: 全溶融処理中で捕捉。捕捉微粒子（Cs) は溶融容器にリサイクルせず別途回収、微粒子量とCs濃度を測定。

  溶融試験10: 溶融処理中のTOF供給開始直前までに捕捉した微粒子（Cs) は溶融容器にリサイクル。リサイクル量は溶融試験9での測定値と同じと推定。

  溶融試験11: 溶融処理中のTOF供給開始直前までに捕捉した微粒子（Cs) は溶融容器にリサイクル。リサイクル量は測定せず。

  TOF処理段階で捕捉した微粒子（Cs）は別途回収、微粒子量とCs濃度を測定。

  溶融試験12: 溶融処理中のTOF供給開始直前までに捕捉した微粒子（Cs) は、溶融試験11での残留微粒子とともに溶融容器にリサイクル。TOF処理段階で捕捉した微粒子（Cs）は別途回収、微粒子量とCs濃度を測定。SMF前のスタックサンプリングの値は連続と不連続で差がある。

単位：メタル質量(g)

	① 試験材料中のCs量	② ﾌｰﾄﾞ･配管内(SMF前まで) のCs量	③SMF前の連続/不連続スタックサンプリング ラン6のCs量	④ SMF前の連続スタックサンプリングのCs量	⑤ SMFからのリサイクルのCs量	⑥ SMF後の連続スタックサンプリングのCs量
溶融試験 9	73.10	0.04	1.74	1.71	1.02	0.0003
溶融試験 10	79.36	0.05	1.56	1.54	測定せず	0.00001
溶融試験 11	60.36	0.08	7.87	7.82	5.51	0.0006
溶融試験 12	49.64	0.04	2.15	2.01	0.75	0.0001

(14) SMFによるCsの捕捉、回収とSMFを含めたCs保持率の算出

- Cs保持率については以下の3つのシナリオに応じて算出、評価。

  シナリオA: コールドキャップによるガラスのCs保持率（前年度までの試験と同様）
  {(①－②－③)/①} x 100 （%）

  シナリオB: SMFで捕捉してリサイクルした量を加味したCs保持率
  {(①－②－③＋⑤)/①} x 100 （%）

  シナリオC: コールドキャップとSMF出口の前の全てのオフガス排出のリサイクルによるCs保持率（実処理プラントで想定されるシナリオ）
  {(④－⑥)/④} x 100（%）

- シナリオAとシナリオBの保持率の比較により、SMF設置による保持率の改善が評価できる。

- 実処理プラントの設計評価としては、SMFで捕捉したCsは同じバッチ[1]または後続のバッチ[1]で溶融容器にリサイクルでき、また、SMFハウジングやSMFまでのオフガス配管内部等に付着したCsは、溶融完了後に水により溶融容器に洗い流すことが可能であるため、シナリオCの値を用いることが妥当と考える。

- SMF単体としての濾過性能は④と⑥の比から求まる。メーカー性能公称値（HEPA相当）以上であると実証された。

シナリオ別Cs保持率（%）

溶融試験	9	10	11	12
シナリオA	97.56	97.97	86.82	95.59
シナリオB	98.96	99.26[2]	95.95	97.10
シナリオC	99.98	100.00	99.99	100.00

SMF単体での捕集効率（%）

溶融試験	9	10	11	12
Cs	99.98	100.00	99.99	100.00

1: 固化体1体あたりの溶融処理をバッチと称す。
2: 溶融試験10のシナリオBの計算に使用されたリサイクル量は溶融試験9と試験条件が同じであるため、溶融試験9のリサイクル量を使用。

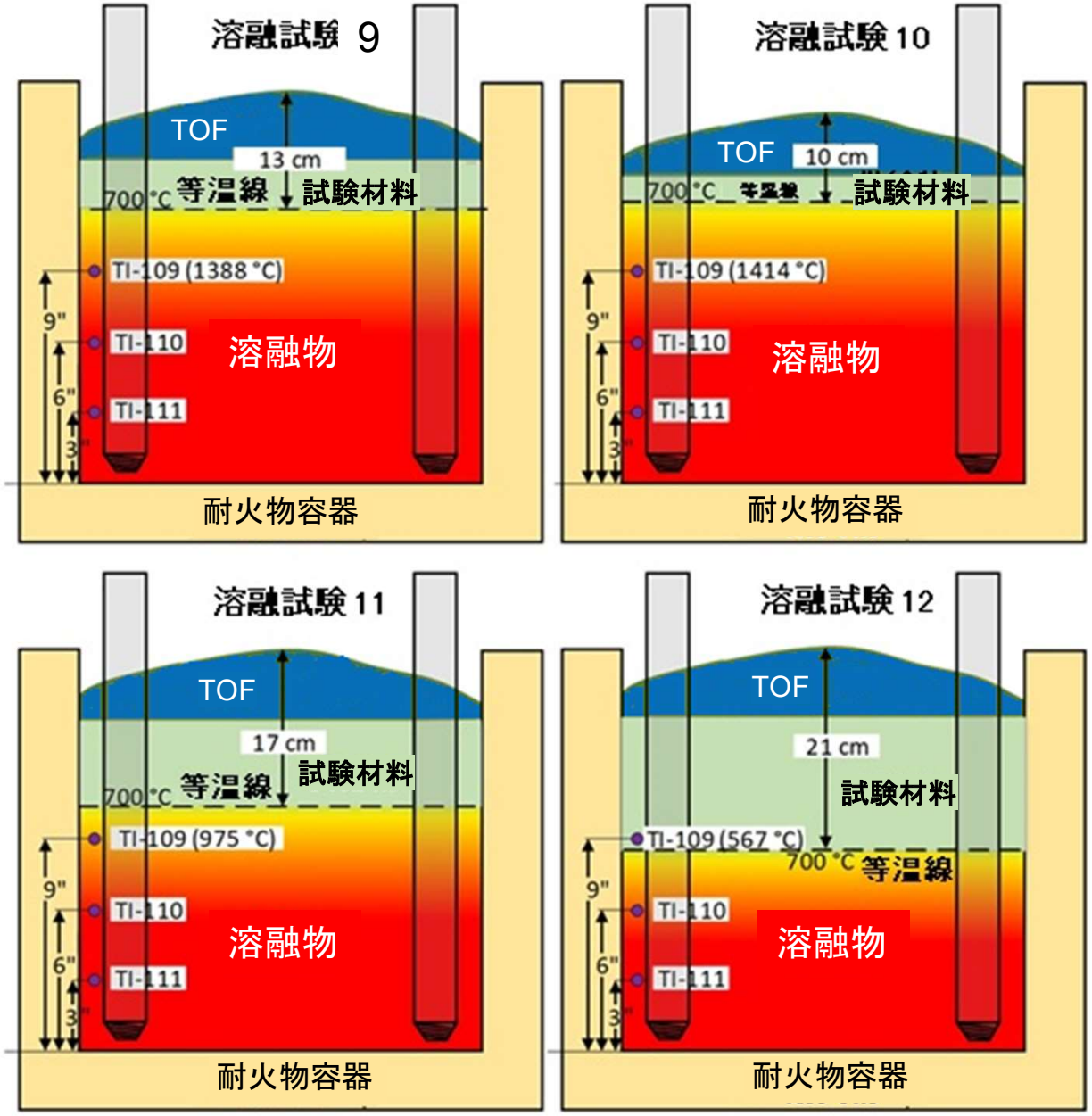
(15) Cs放出抑制のための溶融終盤における運転条件

- TOF処理段階でのコールドキャップの厚さを
  - ① TOF投入前の最終供給試験材料表面のIR画像
  - ② TOF投入時のTI-109の温度勾配と温度

  を組み合わせて算出。

- 溶融試験9と10では新しいIRカメラの取付角度により、試験材料の追加供給を慎重に行ったため、コールドキャップ厚さは薄かった。

- 溶融試験11と12ではこの点を改善した結果、コールドキャップはかなり厚くなった。



(16) Cs放出抑制のための溶融終盤における運転条件（溶融終盤のCs揮発抑制に関する基礎試験の反映）

- 2021年度の工学規模溶融試験には、「溶融終盤のCs揮発抑制に関する基礎試験」を反映。

基準	基礎試験の結果	工学規模溶融試験への反映方法	工学規模溶融試験の結果
TOFの厚さ	Cs揮発量はTOFの厚さに反比例する。TOF（h_{TF0}=10cm）下の廃棄物からのCs揮発量は、最大T_F（1350℃）を使用した廃棄物中の総Csの～0.3%だった。廃棄物のTOF層が薄くなると、Cs揮発量が増加した。	TOF厚さを10㎝以上とする。	TOF投入後のコールドキャップの厚さ: 溶融試験9: 13cm 溶融試験10: 10cm 溶融試験11: 17cm 溶融試験12: 21cm
TOF投入のタイミング	廃棄物混合物へのTOF投入は、廃棄物混合物の表面が崩落する前に行う方がよい。	TOFの投入は、試験材料の供給が終了したらできるだけ早く供給する。	最後の試験材料を投入した後、IRカメラで確認しながら実施可能な限り早くTOFを供給した。
TOF投入前の試験材料の表面温度 (T_s)	廃棄物混合物からの水分（～100℃）が廃棄物混合物の上部を加熱し、完全に乾燥するまでT_Sをほぼ一定に保つため、実際には、廃棄物混合物が崩落する直前でT_S～100℃となる。	IRカメラでのTsが経時的に測定できないので、TOF投入の目安にはできなかった。	最初のTOF投入前の試験材料のT_sは、104℃から147℃の範囲だった。
溶融TOFと溶融廃棄物混合物の混合完了時の溶融表面温度 (溶融 T_s)	TOFを溶融し溶融廃棄物との混合を完了するには、溶融T_S>1100℃が必要である。ガラスを冷却した後、滑らかなガラス表面が形成された。	同上の理由により溶融Tsの管理はできなかった。	混合完了時の溶融T_sは232℃から815℃の範囲だった。GeoMelt®ICV™の表面温度はプレナム空気によって冷却されるため基礎試験よりも低くなっている。
TOF段階でのTI-109の温度	溶融終盤でのCs揮発を抑制するためには溶融T_Sが＜1200℃とする必要があり、このためには熱電対TI-109を< 1300℃に保つことが求められた。（溶融試験12の実施前）。	溶融Tsが直接測定できないので、TI-109の温度を利用する方法で溶融試験12を実施した。	溶融試験12のTOF段階でのTI-109の最高温度は1291℃で、反映した1300℃以下だった。

(17) 工学規模溶融試験の試験条件と結果の一覧表

項目		溶融試験 9	溶融試験 10	溶融試験 11	溶融試験 12
廃棄物		KUR-EH KUR-TSG	KUR-EH KUR-TSG	KUR-EH ALPS 脱水物	KUR-EH ALPS炭酸塩 スラリー
廃棄物含有率 (wt%) [水を含まない] [フリットを含む]		73% (54% KUR-EH 19% TSG)	73% (54% KUR-EH 19% TSG)	78% (44% KUR-EH 25% ALPS炭酸塩・ 9% ALPS鉄共沈脱水物)	66% (40% KUR-EH 26% ALPS 炭酸塩 スラリー)
含水率 (%)		15.00	20.00	16.30	20.00
溶融実施時間 (時間)		14.50	14.40	15.50	13.33
TOFの最適化	TOF投入	最後の供給試験材料の投入直後			
	TOF段階での電力削減	34→29 kW	34→29 kW	なし (TOF 電力=32 kW)[1]	31→26 kW
	TOF量 (kg)	15 kg			
	TOF段階のTI-109	1380 – 1287℃	1414 – 1324℃	894 – 1278℃	590 – 1291℃
	TOF段階の実施時間 (時間)	1.3	1.5	3.3	1.8
SMFからのCsのリサイクル		なし	あり	あり	あり
オフガススタックサンプリング		2つの連続スタックサンプリング（各1回測定）と1つの不連続スタックサンプリング（6回のランを測定）			
Cs保持率 (%)	シナリオA: Cs保持率	97.56	97.97	86.82	95.59
	シナリオB: SMF放出後のCs保持率	98.96	99.26	95.95	97.10
	シナリオC: ガラスとSMF中の保持率	99.98	100.00	99.99	100.00
Sr保持率		99.97	99.99	99.74	100.00

1:ガス発生に対応するため、溶融の早い段階で電力を削減したため、TOF中は電力削減なし。

(18) まとめ–工学規模溶融試験　（1/3）

- 4回の工学規模溶融試験を実施。
- 新たに設置した焼結金属フィルター（SMF)の機能を実証。
  - 濾過性能、溶融処理中に捕捉した微粒子のバックパルスと溶融容器へリサイクルする操作性を実証。
  - SMFの使用条件（温度）は仕様の範囲内。溶融処理中の差圧の上昇はわずか。
- CsとSrの放出量を連続及び不連続スタックサンプリングにより定量的に把握し、評価に活用。
- 溶融終盤の運転において、基礎試験により得られた知見を活用。
- 含水率を20%に高めた廃棄物の溶融処理を問題無く実施（供給配管の閉塞等は発生せず）。
- ALPS脱水物の搬送性、供給性を基礎試験で確認。工学規模においても搬送性、供給性を含め溶融処理を実証。
- ALPS炭酸塩スラリー廃棄物含有率を19.49%から29.46%に高めたガラス組成での溶融処理を実施。
- 溶融後のサンプリングと分析により、得られたガラスにCsが均質に分布している（溶融試験9から12のCsサンプルのCV値（分散係数）が十分小さい：1.56から3.76%）ことを確認。

(18) まとめ−工学規模溶融試験　（2/3）

- コールドキャップによるガラスのCs保持率（シナリオA)

  溶融試験 9、10：前年度までに実施した溶融試験5から7に比べ、保持率がやや低下。 新しいIRカメラの取付角度により供給物の供給状況の見え方が変わったため、TOFが耐火物容器から溢れ出ないようTOFの供給を慎重に行った。このため、TOF処理段階のコールドキャップが薄くなり、保持率がやや低かったと考えられる。

  溶融試験 11：保持率がかなり低下。その原因は試験材料の過度の粉塵化、ALPS 脱水物に含まれる高い塩化物濃度の影響、TOF処理段階が長時間に及んだ影響と考えられる。

  溶融試験 12：保持率は予想した値より低い。溶融試験11でTOF処理段階で捕捉した残留Csを、溶融試験12においてTOF供給直前までに捕捉したCsと一緒にリサイクルしたためと考えられる。

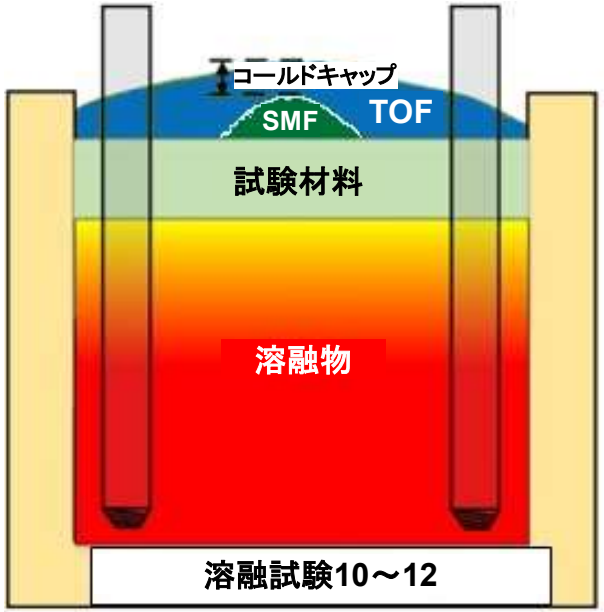
- SMF捕捉Csリサイクルによるガラスの Cs保持率の改善（シナリオB)
  - SMF捕捉Csを溶融容器にリサイクルすることにより保持率が改善（86.82～97.97%から 95.95～99.26%）することが示された。

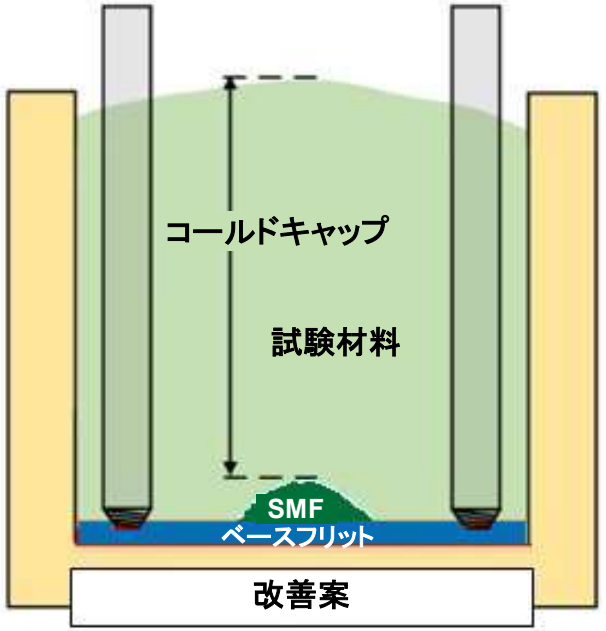
- コールドキャップとSMFによるガラスのCs保持率の改善（シナリオC)
  - 溶融試験 9から12を通して、高い保持率（99.98～100.00%）が得られた。

(18) まとめ−工学規模溶融試験　（3/3）

- 実処理プラントの設計評価としては、SMFで捕捉したCsは同じ溶融処理バッチ[1]のみならず、後続の溶融処理バッチ[1]でも溶融容器にリサイクルでき、また、SMF及びオフガス配管内部等に付着したCsは溶融完了後に水により溶融容器に洗い流すことが可能であるため、シナリオCの値を用いることが妥当と考えられる。なお、溶融終了後にオフガス配管等に付着したCsを洗い流す設備について、実プラントの溶融設備の設計段階で検討する。
- 1つの溶融処理バッチ[1]では、Csの放出のほとんどはTOF処理段階で発生する。SMF捕捉微粒子中のCs濃度は供給廃棄物及び生成ガラス固化体中での濃度より数倍高い。この高Cs濃度の微粒子をSMFにて確実にリサイクルできることが重要である。また、コールドキャップ管理は高いCs保持率確保において重要であるが、廃棄物の性状（粉塵化）によってはその機能が十分発揮できない（溶融試験11での高い塩化物濃度）。この場合でもSMFにより高いCs保持率が確保できる。
- SMFで捕捉したCsを溶融容器にリサイクルした後、それの再放出を防止するためには、リサイクルを同一溶融処理バッチ[1]のTOF供給開始直前に実施（溶融試験10から12での操作）するのではなく後続の溶融処理バッチ[1]の開始段階（最初の廃棄物供給前）にリサイクルする方が良いと考えられる。これにより、SMFで捕捉した高Cs濃度の微粒子を厚いコールドキャップの下で溶融処理することができる。なお、この処理は同一廃棄物を処理している場合に限る。リサイクルを異なる廃棄物で行った場合、作製される固化体のインベントリ評価方法の検討が必要である。（右図に示す）
- 後続の溶融処理バッチ[1]まで長期間停止する場合は、SMFで捕捉した微粒子をバックパルスし、高線量下の設備として設計されたSMF内の下部保持部分にSMF微粒子を適切に保管することで対応できる。

1: 固化体1体あたりの溶融処理をバッチと称す。





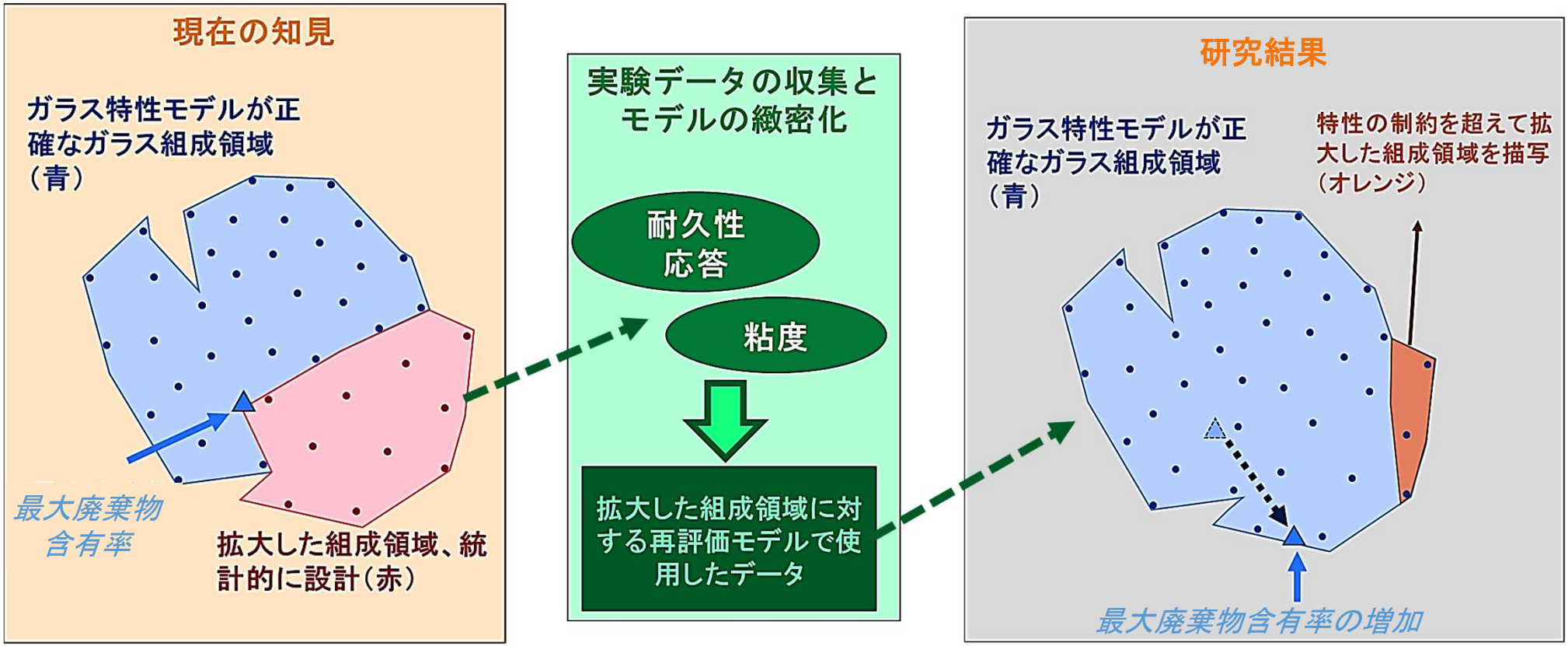
(19) 補助金事業による工学規模溶融試験結果の一覧表

	溶融試験											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
耐火物容器の表面積/体積 (cm^2/L)	23.17	23.17	23.17	23.17	15.77	15.77	15.77	15.77	23.17	23.17	23.17	23.17
廃棄物の種類	KUR-EH ALPSスラリー[1]	KUR-EH KUR-TSG	KUR-EH AREVA スラッジ	KUR-EH KUR-TSG	KUR-EH ALPSスラリー[1]	KUR-EH KUR-TSG	KUR-EH AREVA スラッジ	1F土壌 ALPSスラリー[2]	KUR-EH KUR-TSG	KUR-EH KUR-TSG	KUR-EH ALPS 脱水物[3]	KUR-EH ALPSスラリー[2]
乾燥投入廃棄物の含有率（フリットを含む）(%)	75.77	77.44	64.39	77.44	75.55	76.02	64.00	71.00	73.17	72.64	78.25	65.88
ガラス酸化物廃棄物の含有率（フリットを含む）(%)	71.10	76.60	63.30	76.60	71.70	79.20	67.00	72.42	76.20	76.20	76.50	72.05
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	153.00	144.00	150.56	144.00
処理水 (kg)	10.92	16.77	36.10	18.22	20.15	24.94	26.55	11.36	27.00	36.00	31.08	36.00
処理水（総質量の%;フリットを含まない）	5	8	16	9	10	13	13	8	15	20	17	20
処理フリット (kg)	15.00	12.50	15.00	12.50	15.00	15.00	15.00	16.00*	20.00	20.00	20.00	20.00
総処理量 (kg)	221.00	212.00	240.00	212.00	221	209.70	215.00	150.00	200.00	200.00	200.00	200.00
エネルギー (kWh)	219.82	232.67	336.06	365.02	303.09	345.40	349.04	376.71	290.63	344.34	275.57	314.16
平均電力 (kW)	16.19	13.89	22.40	17.11	18.65	19.93	19.39	19.32	20.04	23.91	17.78	23.55
溶融時間（hr）	13.58	16.75	15.00	21.33	16.25	17.33	18.00	19.50	14.50	14.40	15.50	13.33
処理速度 (kg/hr)	16.29	12.66	16.00	9.94	13.6	12.10	11.94	7.69	13.79	13.89	12.90	15.00
処理効率 (kWh/kg)	0.99	1.10	1.40	1.72	1.37	1.65	1.62	2.51	1.45	1.72	1.38	1.57
ガラスの質量 (kg)	176.60	155.80	169.20	164.26	172.69	166.41	165.00	131.40	148.00	135.10	136.34	129.80
質量損失 (%)	20	27	29	23	22	21	23	12	26	32	32	35
処理量 (L)	267.55	283.23	317.46	282.67	254.02	241.26	236.97	147.06	155.80	225.99	214.70	201.20
ガラスの体積 (L)	68.67	63.93	66.00	67.77	60.29	60.29	61.15	51.65	59.71	58.01	52.09	52.09
減容率 (%)	74	77	79	76	76	75	74	65	78	74	75.74	74.11
ガラス中のSr保持率 (%)	99.76	99.99	100.00	99.99	100.00	100.00	100.00	None	99.97	99.99	99.74	100.00
シナリオA:ガラス中のCs保持率 (%)	91.46	99.30	93.79	99.44	97.72	98.77	98.47	None	97.56	97.97	86.82	95.59
シナリオB：SMFからのリサイクルによるガラス中のCs保持率 (%)									98.96	99.26	95.95	97.10
シナリオC：ガラスとSMF中のCs保持率 (%)									99.98	100.00	99.99	100.00

1: ALPS炭酸塩・鉄共沈スラリー、2: ALPS炭酸塩スラリー、3: ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物を示す。

7.4 ガラス配合・耐久性試験
7.4.1 ALPS炭酸塩スラリーの廃棄物含有率増加
（1）技術的アプローチ

目的：信頼性のある高ALPS Ca-Mgスラリー配合[1]（単独または他の1F廃棄物と一緒に）を可能にするために、ガラス特性モデルが正確であることが判っているガラス組成領域を拡大する。



1: ALPS炭酸塩スラリーにはMg, Ca, Naが含まれ、炭酸塩の廃棄物含有率を高めるにはMgを従来よりも高める必要があるが、作製するガラスの特性にはMg, Caが影響し、これらは同様に増減するため、「高ALPS Ca-Mgスラリー」として配合を検討。

（2）試験ガラスデータを用いた溶融試験12のガラス組成設定

- 現行のガラス特性データベースでデータが不足している部分（高MgO領域）を把握。
- データベースが不足している部分を効率的に満たすガラス組成を設定し、溶融ガラスを製造し、それを急冷及び徐冷したサンプルを用いて特性を測定。
- ガラス特性測定データを用いて、①粘度、②ネフェリン結晶化、③Mg含有相結晶化、④無結晶ガラスMCC-1応答の影響及び⑤MCC-1応答に対する結晶の影響、といった5つの特性をガラス組成の関数として予測する5つの特性モデルを開発。
- 新しい特性モデルとこれまでの特性モデルを組み合わせて、ガラス特性の制約（粘性、耐久性、相安定性、溶融温度、電気伝導度等）を満足しつつ高ALPS炭酸塩スラリー含有率を達成できる最適なガラス組成を設定。
- 更新したガラス組成−特性モデルを使用して溶融試験12用ガラス組成を配合し、溶融試験を実施。

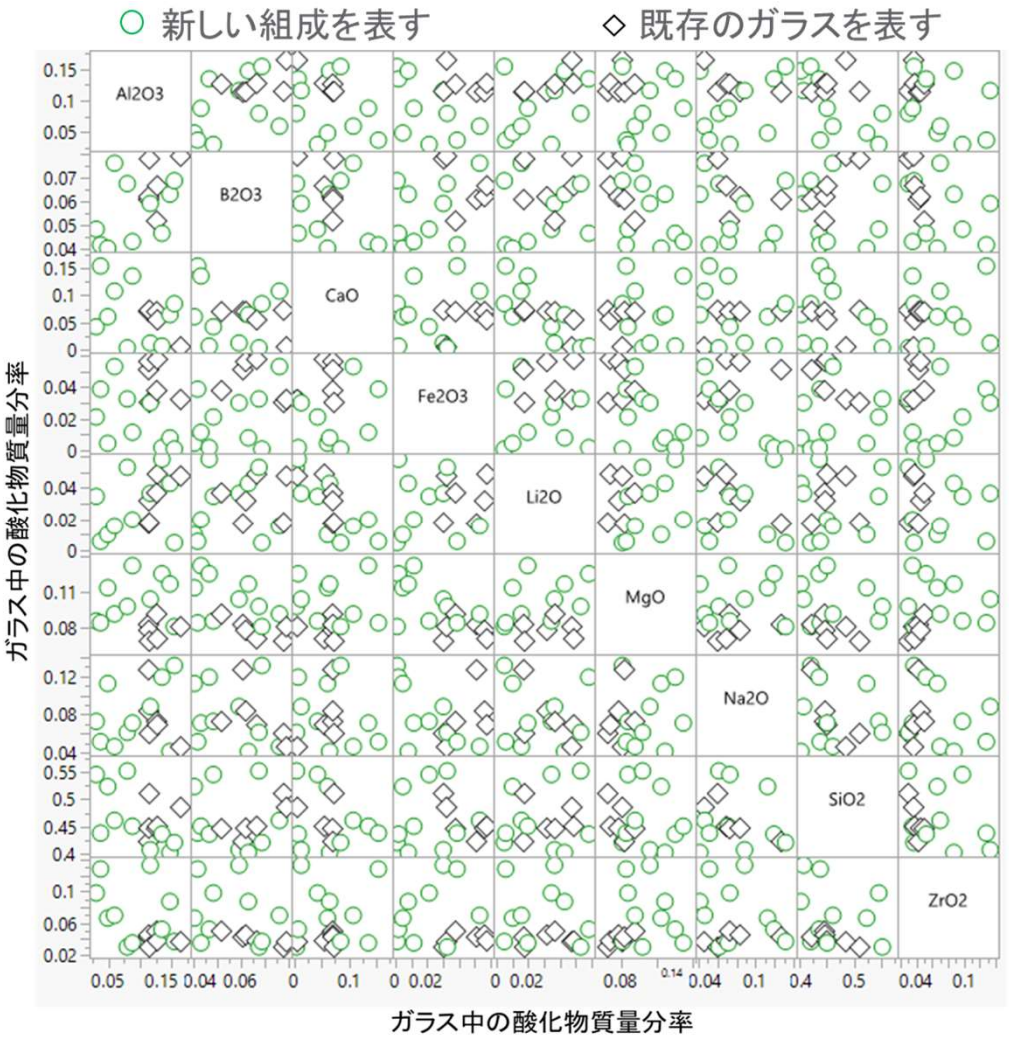
(3)ALPS-MgOマトリックス設計

ステップ:

1. 対象となる組成領域を評価する(既存のガラスを収集し、MgOが現在の6wt%の制限よりも高いモデルでガラスを生成)。
2. ガラス成分の境界を設定する。
3. ガラス溶融を可能にする特性上の制約を設定する(1300℃ で粘度 2< Pa.s <10)(28日目でMCC-1 NL_B<10 g/m^2)。
4. 空間充填設計を行い、対象の構成領域で既存のガラスを10個の新しいガラスで効率的に埋め込む。

高ALPS Ca-Mgを含有した1F廃棄物ガラスの対象となるガラス組成範囲(酸化物質量分率)

酸化物	最小	最大	マイナー元素	平均濃度
Al_2O_3	0.019	0.165	TiO_2	0.005
B_2O_3	0.04	0.08	Cs_2O	0.001
CaO	0	0.16	SO_3	0.00036
Fe_2O_3	0	0.06	SrO	0.001
K_2O	0	0.01	BaO	0.001
Li_2O	0	0.06	Cl	0.005
MgO	**0.08**	**0.135**	Cr_2O_3	0.0001
Na_2O	0.04	0.14	P_2O_5	0.0001
SiO_2	0.4	0.6	NiO	0.0001
ZrO_2	0.03	0.135	合計	0.0137
マイナー元素	0.0096	0.0178		



成分濃度分布の散布図マトリックス

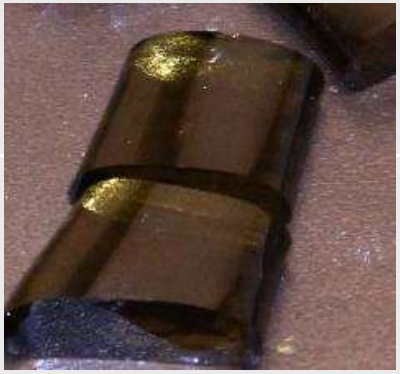
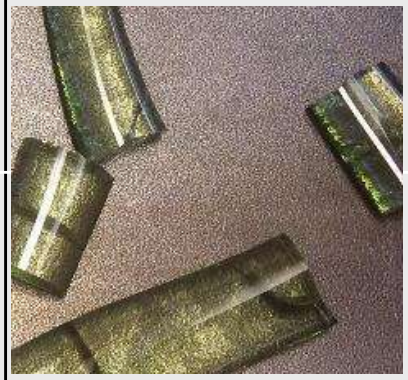
（4）ガラス組成

ガラス組成（酸化物質量分率で表示）

Glass ID	Al_2O_3	B_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	Li_2O	MgO	Na_2O	SiO_2	ZrO_2	Others
VNS-Mg-01	0.0880	0.0431	0.1359	0.0115	0.0009	0.0196	**0.1322**	0.0712	0.4507	0.0352	0.0117
VNS-Mg-02	0.1160	0.0592	0.0122	0.0301	0.0028	0.0366	**0.1040**	0.0884	0.4073	0.1332	0.0102
VNS-Mg-03	0.0376	0.0417	0.1544	0.0388	0.0098	0.0058	**0.0841**	0.0514	0.4380	0.1283	0.0100
VNS-Mg-04	0.1472	0.0631	0.0646	0.0080	0.0095	0.0429	**0.1167**	0.0413	0.4024	0.0873	0.0169
VNS-Mg-05	0.0597	0.0761	0.1080	0.0531	0.0015	0.0157	**0.0915**	0.0464	0.4613	0.0699	0.0166
VNS-Mg-06	0.1541	0.0688	0.0848	0.0009	0.0057	0.0049	**0.0810**	0.1316	0.4207	0.0370	0.0107
VNS-Mg-07	0.0490	0.0403	0.0608	0.0045	0.0079	0.0101	**0.1136**	0.1126	0.5237	0.0664	0.0110
VNS-Mg-08	0.0799	0.0675	0.0035	0.0326	0.0088	0.0531	**0.0978**	0.0614	0.5524	0.0301	0.0130
VNS-Mg-09	0.1345	0.0466	0.0068	0.0018	0.0037	0.0582	**0.1254**	0.1193	0.4361	0.0523	0.0152
VNS-Mg-10	0.0307	0.0483	0.0423	0.0212	0.0044	0.0347	**0.0856**	0.0729	0.5458	0.0981	0.0160

- ガラスを製造し、急冷及び徐冷されたサンプル（次頁）について粘度とMCC-1及び結晶化度を測定。
- 測定結果をガラス特性の範囲の拡大に使用→より高いMgO含有率への更新したガラス組成－特性モデルの適用。

（5）急冷ガラス

VNS-Mg-01	VNS-Mg-02	VNS-Mg-03	VNS-Mg-04	VNS-Mg-05
				
VNS-Mg-06	**VNS-Mg-07**	**VNS-Mg-08**	**VNS-Mg-09**	**VNS-Mg-10**
				

- 急冷ガラス：9個のガラスにはアモルファスを確認、1個のガラスには結晶を確認（VNS-Mg-02、これはZrO_2を含む）。

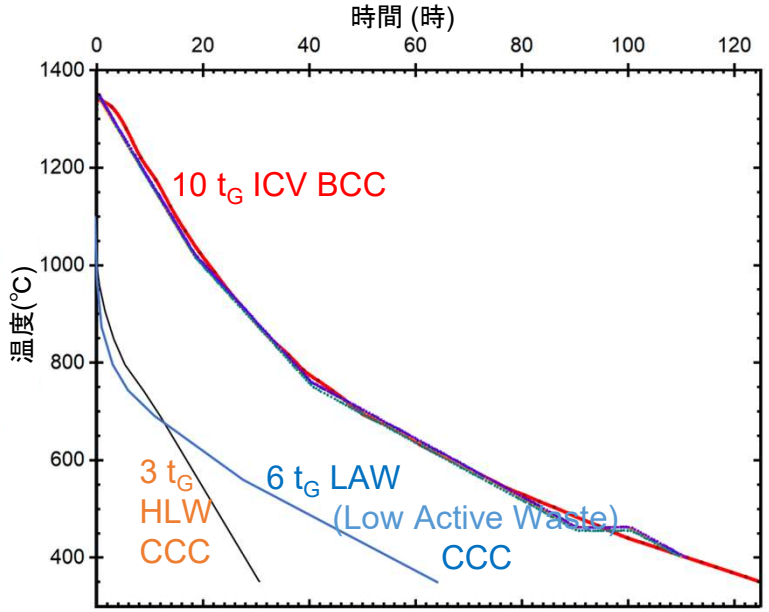
（6）ボックス センター クーリング (BCC)

- BCCの冷却条件（右図のBCC：Box Center Cooling）に従ってガラスを冷却[1]した。BCC冷却とは、
  - 耐火物容器内の10 t_G ガラスの中心が冷却の基準
  - 試験用の耐火ボックス内の冷却のうちで、MCC-1耐久性の点から最悪のシナリオ
  - 溶融からガラス転移温度T_gまで4日以上の冷却
  - ハンフォード廃棄物処理プラント(WTP)の約1日の冷却と比較
- BCC冷却は最も冷却速度が遅くなるので、結晶化が起こり易く（下表参照）、冷却のうちでガラスの特性に対して最悪の条件となる。

1: 溶融した後のガラス試料を耐火ボックスに入れて、その中心の温度をBCC冷却条件に従って制御して冷却処理する。
下図のBCC冷却の青線は10t_GガラスのBCC冷却データをモデル化した炉温調節プログラムを示し、赤線は青線のプログラムに従って冷却したときのガラス試料の温度プロファイルを示す。

全てのVNS-Mgガラスの焼き鈍し、BCCガラスの28日でのNL(B)及びBCCガラスの総結晶化度（冷却過程で生成する結晶の総割合）

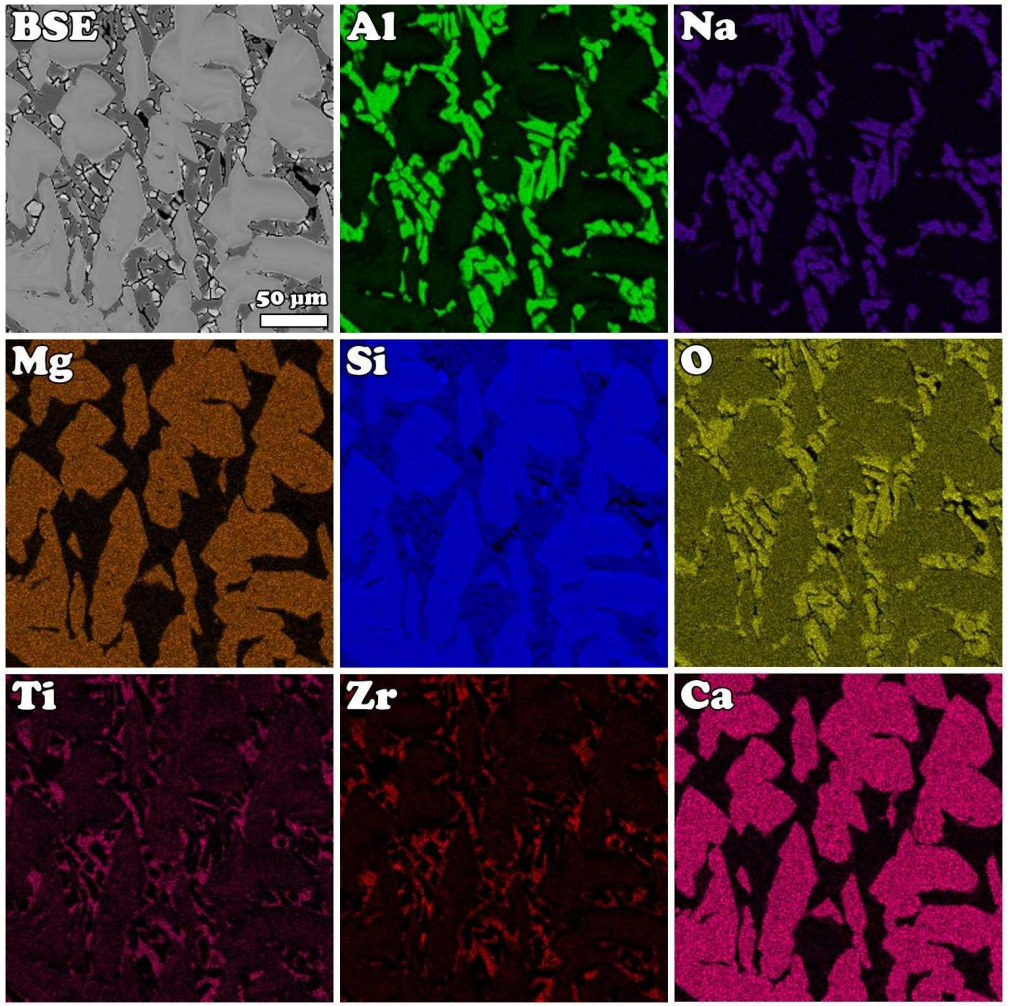
ガラス	NLB(28日) 焼き鈍し $g \cdot m^{-2}$	NLB(28日) BCC $g \cdot m^{-2}$	総結晶化度 BCC wt. %
VNS-Mg-01	7.5 ± 0.7	2600±250	72.8
VNS-Mg-02	9.7 ± 0.9	17.7 ± 1.7	22.9
VNS-Mg-03	9.1 ± 0.9	33.0 ± 3.2	59.9
VNS-Mg-04	9.4 ± 0.9	117 ± 11	36.4
VNS-Mg-05	8.2 ± 0.8	19.3 ± 1.8	48.6
VNS-Mg-06	11.2 ± 1.1	17.0 ± 1.6	3.8
VNS-Mg-07	12.7 ± 1.2	13.1 ± 1.3	7.8
VNS-Mg-08	7.5 ± 0.7	7.3 ± 0.7	0.1
VNS-Mg-09	9.7 ± 0.9	329 ± 31	54.0
VNS-Mg-10	10.0 ± 1.0	11.5 ± 1.1	7.1



BCCとCCCの冷却プロファイル

（7）SEM（EPMA)-EDS分析の結果

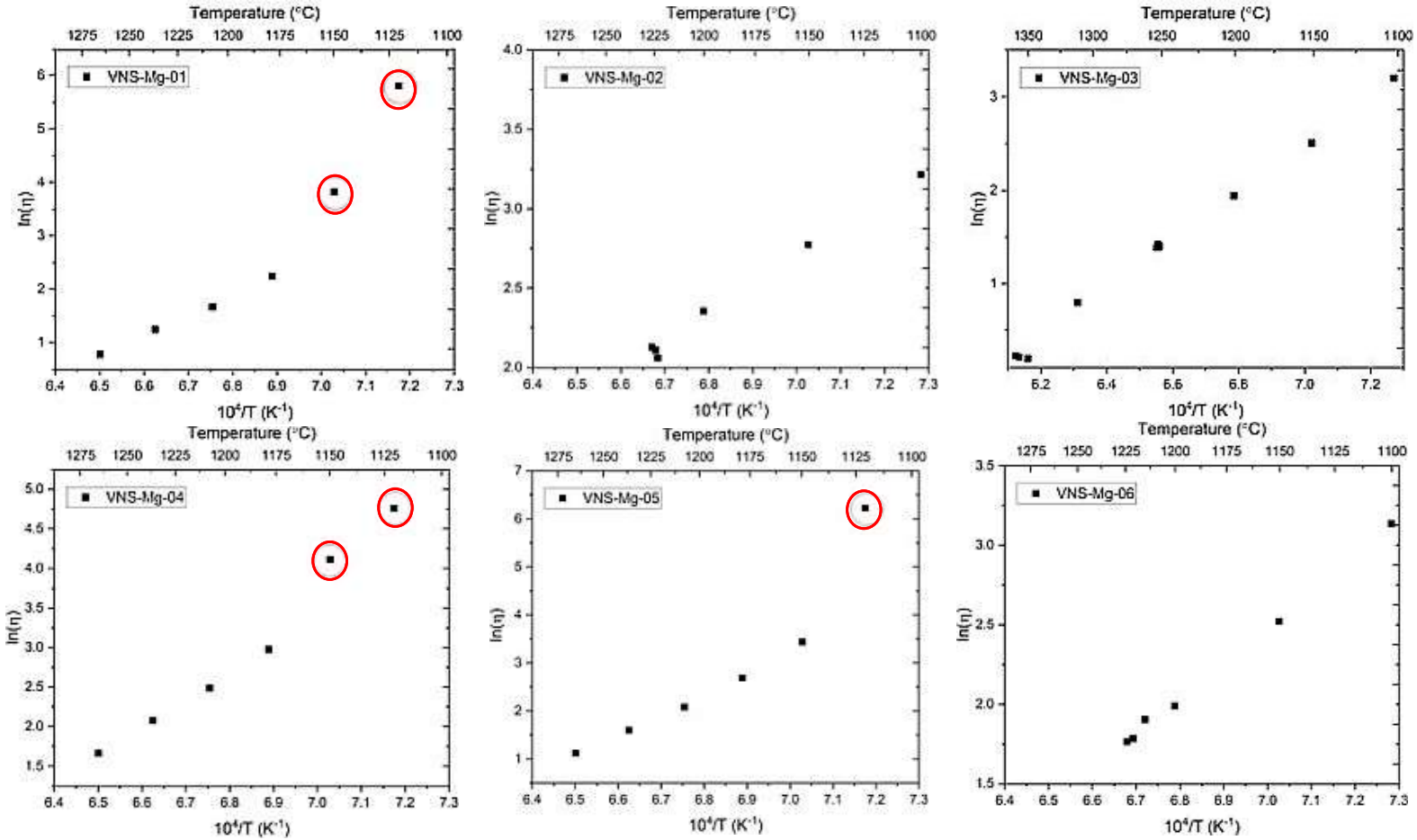
- 本研究で作成した20個のサンプル（急冷10個、BCC10個）のうち、5個をSEM-EDS分析用に選択。結晶化後の主要元素の分布を示し、元素Al、B、Na、Mg、SiをWDSで収集し、Ca、Ti、Cl、Cr、Cs、Ni、P、S、ZrをEDSで収集。
- 全てのサンプルでZrに富む領域を観察、これらのサンプルではバデライト（ZrO2）として観察。場合によっては、TiはZrに富む領域に関連か。
- Mg、Ca、Siで一般的に相関関係があり、XRDで観察した輝石族（普通輝石と透輝石）及びかんらん石族（フォルステライト）相とよく一致。
- Al、Na、Siはすべてのサンプルで相関関係があり、一部のサンプル（VNS-Mg-01、-04、-09）は、XRDで確定したネフェリンとよく一致。
- その他の場合、サンプルVNS-Mg-03と-05では、Al、Na、Si、Bで相関関係があり、残りのガラス相を表している。
- XRD分析に基づくとユークリプタイトである可能性のあるVNS-Mg-04サンプルでAl、Siに富むデンドライトを観察。ただし、Li はEPMA（EDSでもWDSでも）では測定できないため、その存在を想定して実施。



分析結果の一例：EPMA WDS（Al、B、Mg、Na、Si）及びEDS（O、Ca、Zr、Ti）で測定したVNS-Mg-01元素分布マップ。Al、Na、Siに富むネフェリン、Mg、Ca、Siに富む透輝石、Zr、Ti に富むバデライト。

（8）粘度測定データ

- 粘度の結果を下図にl ln(η) vs 10^4/Tとしてプロットした。粘度の単位はPa·s、温度の単位はKである。2番目の（上）x軸は、簡単に参照できるように温度を℃で示す。
- いくつかのガラスでは、1150℃及び／または1100℃での測定値は、おそらく溶融物の結晶化の結果として、より高温のデータポイントからの線から外れる。
- 下図の赤で囲んだデータポイントは、ガラスのモデルフィッティングには使用しない。



粘度測定の例：VNS-Mgガラスの測定時の粘度データ。粘度はPa·sで表示。

(9) ALPS炭酸塩スラリーの廃棄物含有率増加

- 高含有ALPS炭酸塩スラリーをガラス化することが可能な領域において正確な組成の予測を可能とするために、試験（73頁参照）で取得したガラス特性データ（結晶化度、MCC-1等）に基づく新しいモデルを開発。
- 新しい特性モデルを組成検討に適用。
  - *MCC-1 耐久性モデル*
  - *BCCでのアルミノケイ酸塩の結晶化モデル*
  - *Mg含有相の結晶化モデル*
- 更新したガラス組成−特性モデルにより、KUR-EH、ALPS炭酸塩・鉄共沈スラリーを様々に配合して15個のガラス配合を検討し、溶融試験12の組成を決定（右表：溶融試験12）。

- 新しい特性モデルによる想定と制約
  - *溶融温度= 1300 °C*
  - *28日目でMCC-1 NL_B = 7.46 g/m^2 （新モデル）*
  - *US HLW制限とPCT応答は同じ*
  - *US LAW制限とVHT応答は同じ*
  - *粘度は10～100 poiseの間*
  - *電気伝導率は10～70 S/m*
  - *ネフェリンやユークリプタイトは形成なし（新モデル）*
  - *Mg含有相は45 wt% 以下（新モデル）*
  - *非混和性の相分離なし（Taylor法）*
  - *分離された硫酸塩なし*

ガラス	溶融試験 1, 5 （従来モデル）	溶融試験 12 （新モデル）	
廃棄物含有率	81.7	75.1	
ALPS炭酸塩スラリー	19.5	29.5	⇒ 51相対パーセント増加
KUR-EH	57.0	45.6	
ALPS鉄共沈スラリー	5.2	0	
ガラス中の濃度			
MgO	8.3	12.5	⇒ 51相対パーセント増加

（10）まとめ–ALPS炭酸塩スラリーの廃棄物含有率増加

- 本研究では、MgOを8～13.5wt%のガラス組成について検討。
- 統計的に設計した10個のガラス組成で試験を実施。
  - 急冷及び徐冷ガラス（焼き鈍し、BCC）へのMCC-1、XRDで結晶化を観察
  - 5個のガラスをSEM測定
  - 粘度測定
- 試験で収集したデータにより、ガラス組成－特性モデルを更新。
  - 焼き鈍しガラスサンプルのMCC-1耐久性モデル[1]を更新
  - 結晶化度モデル[1]を更新
  - BCCガラスサンプルの新しいMCC-1耐久性モデル[1]
  - 粘度モデル[1]を更新
- 更新したガラス組成－特性モデルを使用して、溶融試験12用ガラスを配合。このガラス配合によりALPS炭酸塩スラリーの廃棄物含有率は51相対パーセント増加（19.5%から29.5%に増加）。なお、大量に保管されている ALPS 炭酸塩スラリー中の$Mg(OH)_2$ 含有量が炭酸塩スラリー廃棄物含有率増大の制限要因であるため、ガラス中のMgO増加にはALPS炭酸塩スラリーの廃棄物含有率を高める必要がある。

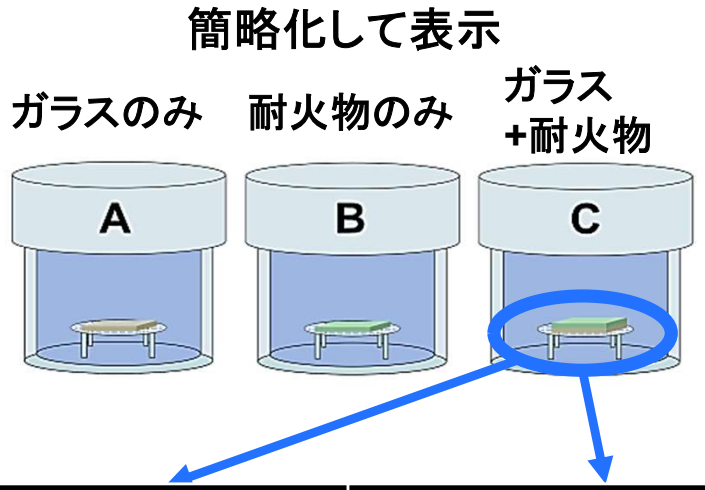
1: 追加試験によるガラス特性測定データをガラス組成の関数として開発した特性モデル（粘度、ネフェリン結晶化、Mg含有相結晶化、無結晶ガラスMCC-1応答の影響及びMCC-1応答に対する結晶の影響）は、最終的なガラス組成の配合を解析するガラス組成−特性モデルに用いる制約条件等を解析するモデル。

7.4.2 ガラスの耐久性への耐火物による影響
(1) 目標と対照実験

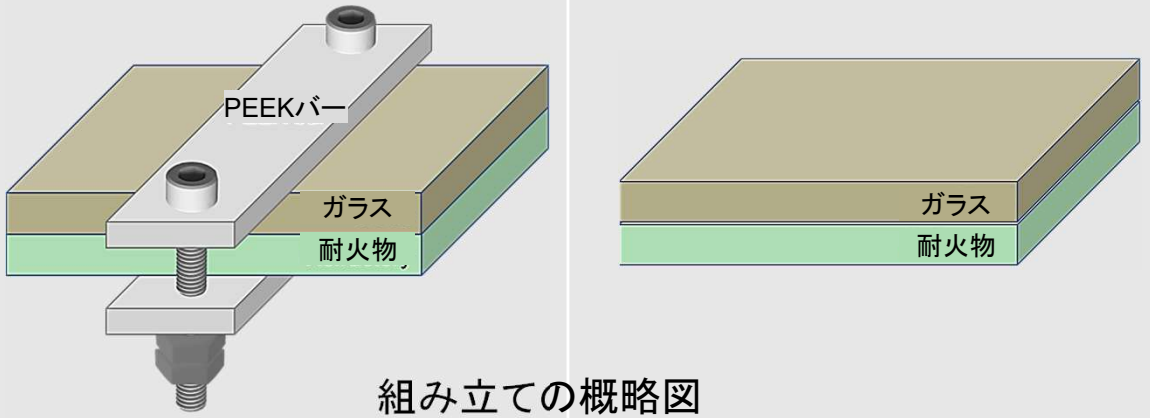
目標:ガラスの耐久性への耐火物による影響を評価する。

- 2つの対照実験:
  - A – ガラスのみからの元素放出を定量化する
  - B – 耐火物のみからの元素放出を定量化する
- ガラス+耐火物実験:
  - C – 2つの異なる構成で実施

    タイト構成とルーズ構成
    右図と次のスライドで詳述



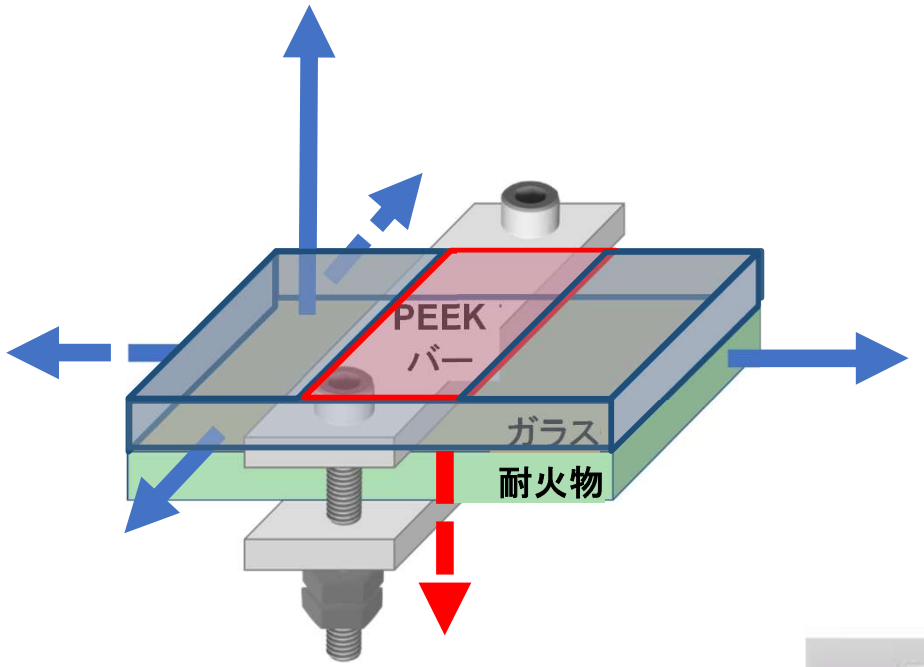
C – タイト構成	C – ルーズ構成
ガラスと耐火物の間の水の浸透がゼロから最小の場合の耐火物による影響	ガラスと耐火物の間に水を浸透させた場合の耐火物による影響

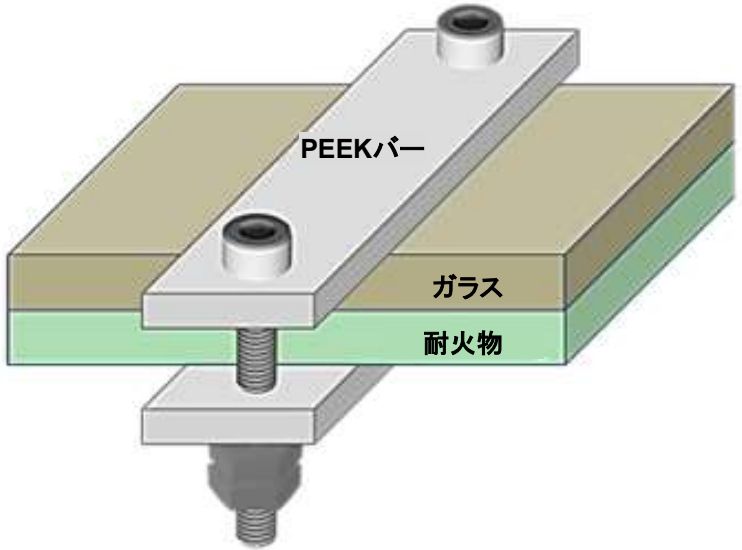


組み立ての概略図

PEEK: **P**oly **E**ther **E**ther **K**etone
ポリエーテルエーテルケトン樹脂

(2) タイト構成

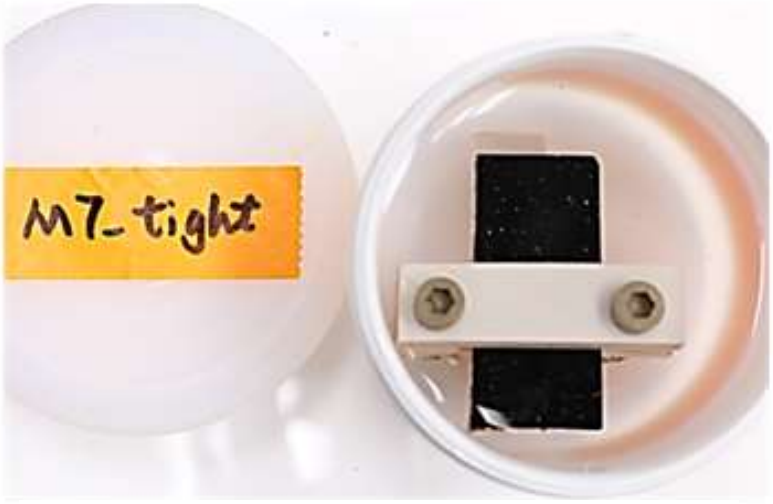




A－タイト構成の概略図

ガラス試験片の5つの面（青）は水に曝される（→）が、耐火物と接している面は水に曝されない（↓）。
さらに、ガラス上面のPEEKバーと接している部分（▱）は水に曝されない。

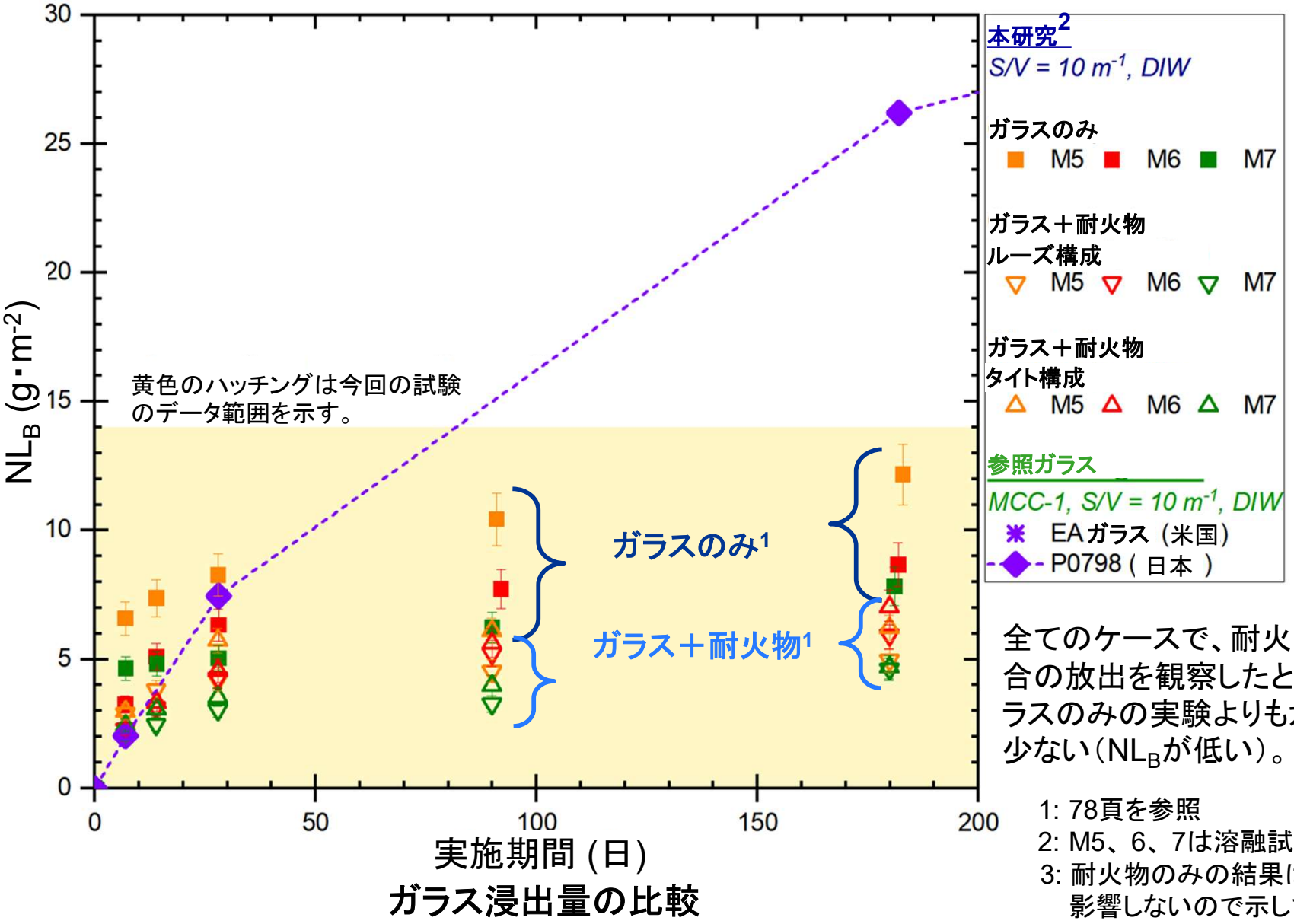
B－M7[1]タイト実験のセットアップ



C－セットアップでの容器中のM7[1]タイト実験

1: M7は溶融試験 7を示す。試験としては他にM5、6があり、同様。

(3) ガラス浸出量の比較（ボロン放出より）



ガラス浸出量の比較

全てのケースで、耐火物が存在する場合の放出を観察したところ、対応するガラスのみの実験よりもガラスの浸出量が少ない（NL_Bが低い）。

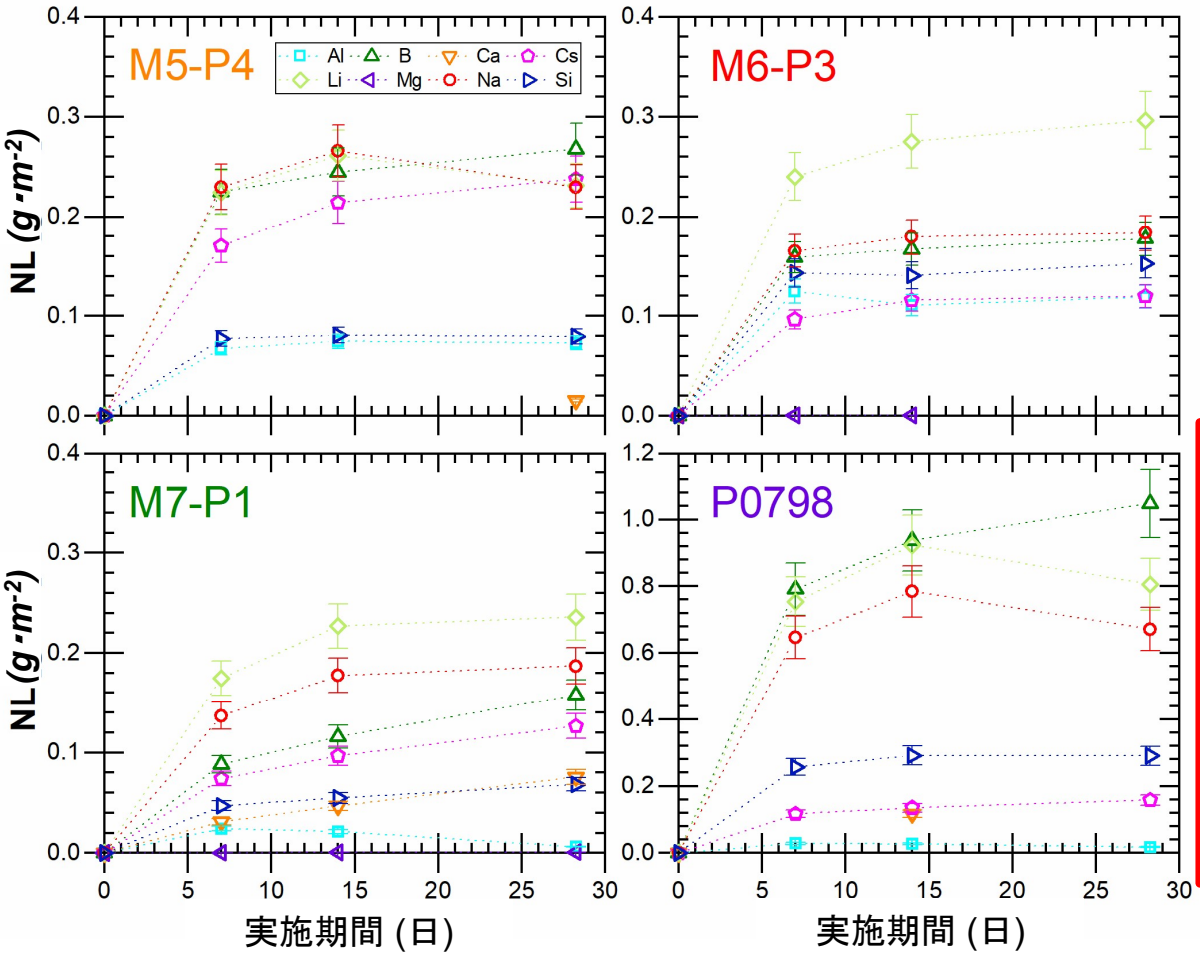
1: 78頁を参照
2: M5、6、7は溶融試験 5、6、7を示す。
3: 耐火物のみの結果は、ガラス耐久性へ影響しないので示していない。

(4) まとめ－ガラスの耐久性への耐火物による影響

- 耐火物はガラスの近くにある共存材料であり、ガラスの耐久性に影響を与える可能性がある。
- 試験容器に共存させたガラスと耐火物の耐久性を評価した。
- 耐火物の共存により、ガラスのみの場合と比較して有益な効果（処分時のガラスの浸出量が低下）が得られた。
- ガラスと耐火物の異なる構成（タイト構成とルーズ構成）による耐火物共存時のガラスの耐久性への影響には、有意な差は見られなかった。

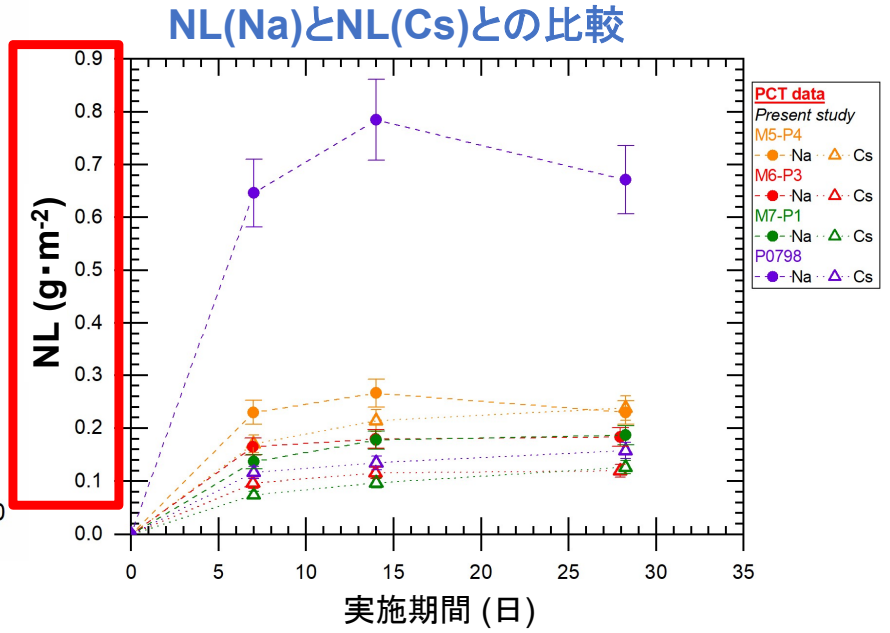
7.4.3 ガラス耐久性試験
(1) PCT の結果

- 3つのガラス（ M5/M6/M7[1] ）全てで同じ様にNa/B/Li（ガラス浸出トレーサー）が放出されるが、その量はP0798[2]よりも低い。
- M5/M6/M7のCs放出はP0798と同様で、Na放出よりも低くなっている。



1：M5、6,、7は溶融試験 5、6、7を示す。

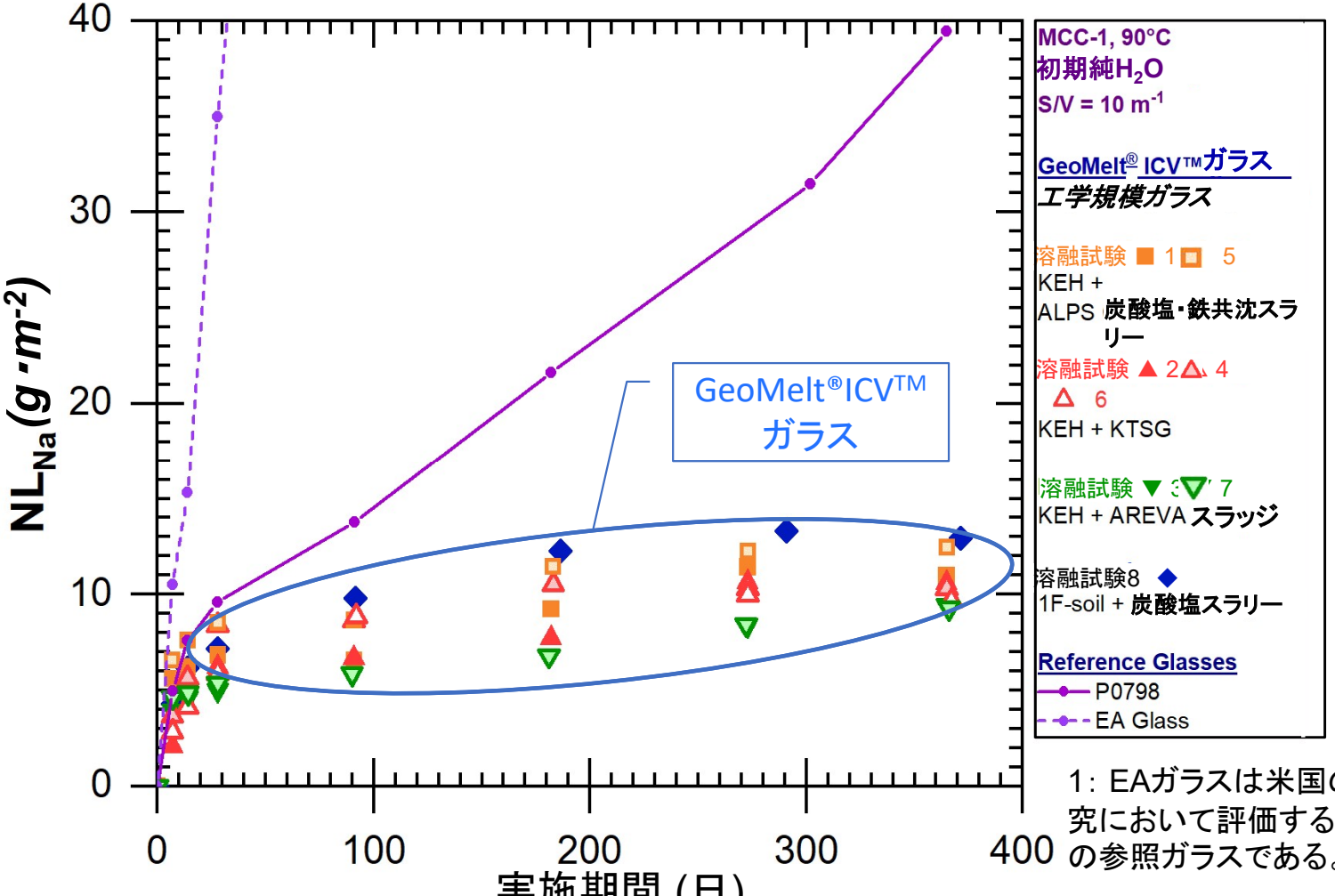
2：P0798ガラスは日本のHLW ガラスで、本研究において評価するガラスを比較するための参照ガラスである。



ガラス耐久性試験（PCT)結果

(2) MCC-1長期耐久性試験の結果

- 各ガラスの3つのサンプルからの平均データ（本事業では溶融試験 6、7、8のガラスを継続実施）。
- 28日目（以降）の全てのNL(Na) はP0798に対するNL(Na)より小さい。
- 初期放出が速く、その後速度が低下し、28～90日目を超えて安定する。
- 全てのガラスは日本及び米国の参照ガラス（それぞれ、P0798、EAガラス[1]）よりも浸出が小さい。



MCC-1長期耐久性試験結果

1：EAガラスは米国のHLW ガラスで、本研究において評価するガラスを比較するための参照ガラスである。

(参考) MCC-1長期耐久性試験のデータ

MCC-1の平均結果を下表に示す。

更新したNaのMCC−1規格化質量損失 NL_{Na} とNaの浸出率(平均)

ガラス	NL_{Na} at 28 日 (g/m²)	28–365 日 浸出率 (g/m²·d)
溶融試験1	6.8 ± 1.1	$(1.8 \pm 2.0) \times 10^{-2}$
溶融試験2	6.2 ± 0.7	$(1.6 \pm 0.5) \times 10^{-2}$
溶融試験3	5.0 ± 0.2	$(1.6 \pm 0.5) \times 10^{-2}$
溶融試験4	8.4 ± 2.0	$(6.6 \pm 2.2) \times 10^{-3}$
溶融試験5	8.5 ± 0.0	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-2}$
溶融試験6	5.9 ± 1.3	$(7.6 \pm 7.5) \times 10^{-3}$
溶融試験7	5.4 ± 0.4	$(1.1 \pm 0.8) \times 10^{-2}$
溶融試験8	6.0 to 8.4	5.1×10^{-3}
P0798	9.59	9.0×10^{-2}

不確かさ = 2 × 標準偏差; 溶融試験8については2つのサンプルしか作成しなかったため得られなかった。

7.5 GeoMelt®ICV™の適用性の総合評価
(1) 目的と方法

- **目的**

  GeoMelt®ICV™技術の実処理プラントへの適用性の総合評価

- **方法**

  過去の試験や予備概念設計の結果、及び本事業で得られた試験結果等をもとに、技術的な観点から、以下項目について、総合評価を行う。

1. 廃棄物の取り出し、搬送、供給
2. 固化処理機器
3. オフガス及び二次廃棄物の処理
4. 規制の遵守
5. 廃棄物の仕様と組成変動による影響
6. Cs等のオフガスシステムへの移行速度
7. 固化した材料からの核種の浸出率
8. 熱の影響を受けた容器の処分時の健全性
9. 容器の経済性
10. 10トン溶融容器における溶融の技術的課題

(2) 評価結果[1]（1/4）

項目	試験結果	設計検討結果	評価
1. 取り出し、搬送、供給	✓ ALPS炭酸塩・鉄共沈脱水物（以降、ALPS脱水物という）を含む主要な1F廃棄物を問題無く溶融容器に供給できることを実証。	✓ 予備概念設計（Preliminary Conceptual Design: PCD)にて、Kurion及びSARRY吸着塔からの廃棄物取り出し、搬送、供給システムを設計。	✓ ALPS脱水物を含む主要な1F廃棄物の搬送・供給において問題は無いと考えられる。 ✓ PCDで検討した廃棄物取り出しの実証が必要と考えられる。
2. 固化処理機器	✓ 固化処理機器（溶融容器及び周辺機器）を用いた溶融試験装置により、1F廃棄物の溶融処理を実証。 ✓ 実処理プラントを想定して設定した溶融準備作業手順を実証。	✓ PCDにて10トン規模の溶融容器及び周辺機器システムを設計。	✓ 工学規模溶融試験設備での固化処理機器の運転には問題はない。 ✓ 10トン規模においても問題は無いと考えられる。
3. オフガス及び運転に伴い発生する二次廃棄物の処理	✓ 溶融試験にてオフガス処理系に設置した焼結金属フィルタ（SMF）の高い微粒子（Csを含む）捕捉効率を実証。 ✓ 捕捉した微粒子を溶融処理中においても溶融容器にリサイクルできることを実証。	✓ PCDにてSMF、スクラバー、HEPAで構成したオフガス処理系を設計、その除去効率を検討。 ✓ オフガス処理系や廃棄物取り出し系からの廃水のリサイクル、運転に伴い発生する二次廃棄物の溶融処理等を検討。	✓ SMFの有効性が溶融試験で確認され、PCDで検討したオフガス処理系の構成に問題は無いと考えられる。 ✓ 運転に伴い発生する二次廃棄物の固化処理機器での効率的な処理が可能と考えられる。

1: 本事業で実施した試験結果に基づいて、今までの事業で実施したPCDをレビューし、本事業で評価した。

(2) 評価結果（2/4）

調査項目	試験結果	設計検討結果	評価
4. 規制の遵守	✓ 試験は実施していない。	✓ PCDにて日本の法規への適用性を検討。	✓ 日本の規制への準拠に関して問題はないと予測される。
5. 廃棄物の仕様と組成変動による影響	✓ 廃棄物仕様に対応したガラス配合を設定、るつぼ試験で生成ガラスの性状を確認。	✓ PNNLガラスモデル（ガラス組成−特性モデル）により、組成変動及び溶融温度の影響を把握。	✓ GeoMelt®ICV™では高温・高粘性度のガラスの取り扱いが可能であり、ガラス配合の設定に融通性が高い。また廃棄物の混合と高い溶融温度によって組成変動を最大化してもガラス固化体の体数を最小化することが可能。 ✓ 様々な仕様の廃棄物が存在する1F廃棄物処理への適用性が高い。
6. Cs等のオフガスシステムへの移行速度	✓ 工学規模溶融試験にて、溶融処理の各段階におけるCs等のオフガス移行量を測定。 ✓ 溶融終盤で移行量は増えても、コールドキャップ管理により溶融処理全体としての値は供給量の数%以下。 ✓ 移行したCsの大部分はSMFで捕捉し、溶融容器にリサイクルできることを実証。	✓ PCDにて、溶融試験結果を基に移行速度を設定、オフガス処理系を設計。	✓ コールドキャップ管理とSMFによってほぼ100%のCs保持率が得られる。

(2) 評価結果（3/4）

調査項目	試験結果	設計検討結果	評価
7. 固化した材料からの核種の浸出率	✓ 溶融試験にて得られたガラスの浸出試験（MCC-1）を実施、浸出率を把握。 ✓ 日本及び米国の参照ガラス（それぞれ、P0798、EAガラス）と比較して浸出率が低い。 ✓ GeoMelt®ICV™ガラスの処分環境での耐火物共存における浸出率についても把握し、浸出を加速させる因子とはならないことを確認。	✓ 核種閉じ込め性能を考慮した評価モデル[1]を適用することができれば濃度上限値の観点からはピット処分に区分できる可能性があるとの評価。	✓ GeoMelt®ICV™ガラスはピット処分に区分できる可能性があると考えられる。
8. 熱の影響を受けた容器の処分時の健全性	✓ 試験は実施していない。	✓ PCDにて10トン規模溶融容器の構造にて、溶融処理による熱影響を評価。 ✓ 鋼製容器の最高温度は鋼の軟化温度を十分下回ることを確認。	✓ GeoMelt®ICV™では溶融処理による高温が容器の健全性に影響は与えないと考えられる。
9. 容器の経済性	✓ 試験は実施していない。	✓ PCDにて容器構造の単純さ、高温度溶融ガラスへの対応、供給エネルギー効率等の観点から経済性を評価。 ✓ 流下方式の炉等と比較して優位性がある。	✓ 経済性に有利な要素が多いと考えられる。

1: 今までの事業により作成。

(2) 評価結果（4/4）

調査項目	試験結果	設計検討結果	評価
10. 10トン溶融容器での溶融の技術的課題			✓ PCDで廃棄物処理の課題を評価し、溶融試験で検証した。 ✓ GeoMelt®ICV™では1F用10トン規模の溶融容器の運転に関する技術的課題は解決できると考えられる。
① システムの運転性、運転条件	① 溶融試験にて、溶融容器の運転（溶融処理）は安定して行えることを実証。廃棄物の種類により、電力供給量を調整して安定運転が実施できることを実証。	① PCDでは、過去20年間にわたり問題なく使用されたGeoMelt®ICV™ 設計に基づく運転方法を1F用GeoMelt® ICV™設備に適用することを検討。なお、SMFの効果については、「3. オフガス及び運転に伴い発生する二次廃棄物の処理」、「6. Cs等のオフガスシステムへの移行速度」の項に記載。	
② 廃棄物の均一供給	② 溶融試験にて、単一の供給管からの供給により、廃棄物、ガラスフリット、SMFからのリサイクルはほぼ均一に供給できることを確認。		
③ 温度分布と生成物ガラスの均質性	③ 溶融試験にて、溶融容器内の温度分布を測定、予想どおりの結果が得られた。生成ガラスのサンプリング分析により、ガラスの均質性を確認。		
④ 中断後のガラス固化の再開	④ 溶融試験にて、溶融処理途中で溶融を中断し、その後固化したガラスの溶融再開を試験。溶融を再開することが可能で、処理が完了できることを実証。	④ PCDでは、工学規模試験装置で実施した方法を基に、遠隔にて操作できる機器設備を検討。	

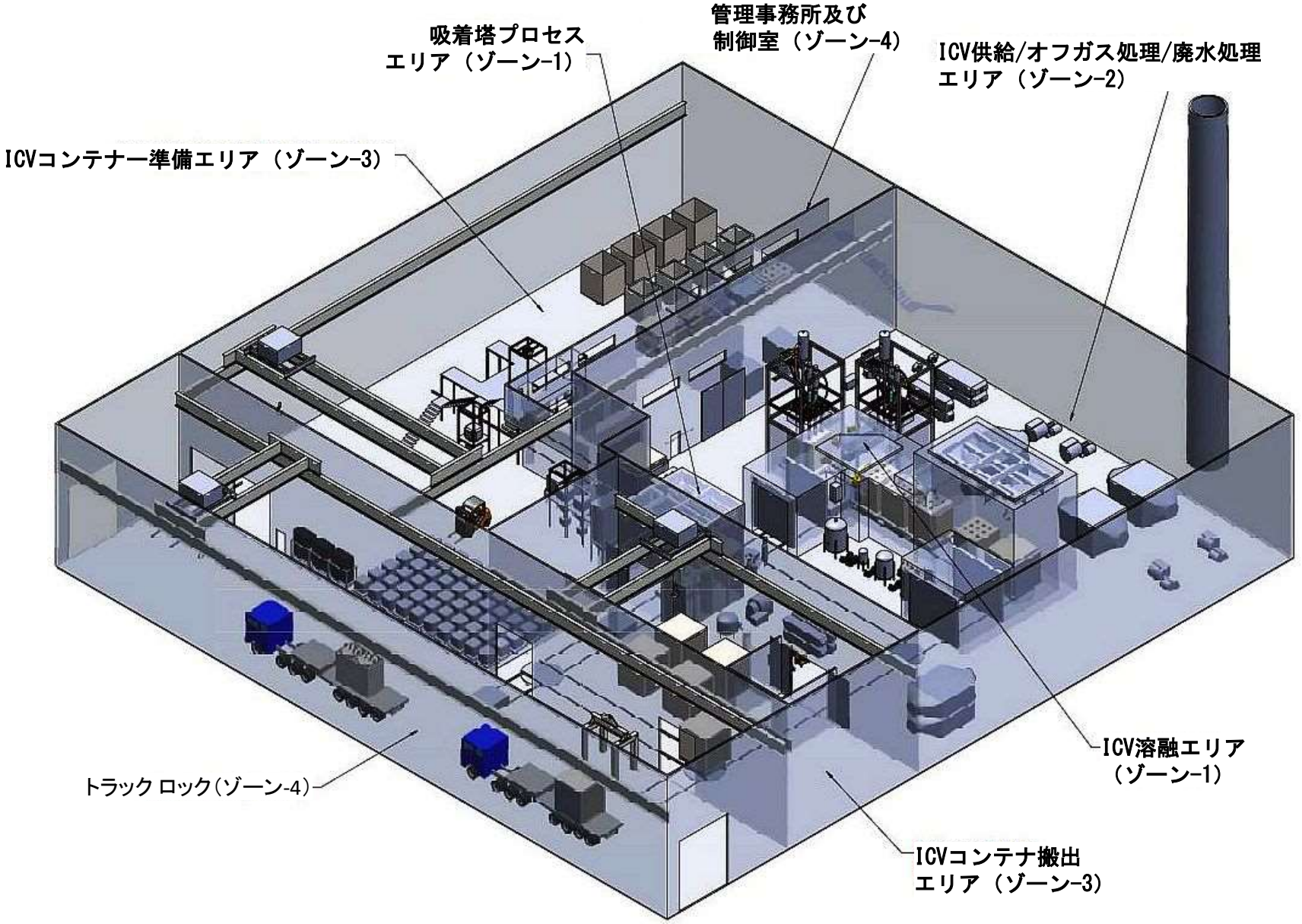
8. 本事業のまとめ (1/2)

- **溶融終盤のCs揮発抑制に関する試験**:
  - ✓ 溶融終盤における廃棄物供給完了後に供給するトップオフフリット(TOF)の供給のタイミング、供給量(TOF層の厚さ)、及び溶融表面温度とCs揮発量の関係に関するデータを取得。
  - ✓ 基礎試験装置を用いてTOF層の厚さ10cmで Cs揮発は廃棄物中のCsの～0.3%に抑制。TOF層が薄くなるとCs揮発は増加、TOF層が無い状態では、表面温度が1130℃以上で大幅に増加。
  - ✓ TOF供給タイミングは、廃棄物混合物表面からの水分蒸発終了前とすることが適切。廃棄物供給後できるだけ早く供給するという工学規模溶融試験の操作方法は妥当。
  - ✓ FEMを用いて廃棄物溶融ガラスとTOF溶融ガラスの上下方向の温度分布についてシミュレーションを実施。泡層の存在、TOF溶融ガラスの透明性による輻射伝熱の増加等を考慮して熱伝導度を設定することにより、基礎試験による温度測定結果を模擬。輻射伝熱の増加により表面温度上昇が抑えられることもTOFのCs揮発抑制のメカニズム。
- **工学規模の溶融試験**:
  - ✓ 工学規模溶融試験装置を一部改造(SMFの設置等)し、溶融試験を4回実施。
  - ✓ 含水率を増加(20%)した廃棄物、ALPS脱水物、廃棄物含有率を高めた(19.49%から29.46%)ALPS炭酸塩スラリーを対象に溶融試験を行ない、溶融処理を実証。ALPS脱水物については溶融試験に先行して、搬送性と供給性を基礎試験で確認。

8. 本事業のまとめ (2/2)

- **工学規模の溶融試験（つづき）:**
  - ✓ TOF供給直前のタイミングで捕捉微粒子を溶融容器にリサイクル。SMFの操作性を実証。
  - ✓ Cs保持率はコールドキャップ管理のみでは 86.82%～97.97%、SMFからのリサイクルを考慮すると95.95%～99.26%に向上。また、SMFのCsフィルター効率は99.98%～100.00%。
  - ✓ SMFからの溶融容器への微粒子リサイクルをTOF供給直前ではなく、次の溶融処理バッチの最初の供給廃棄物としてリサイクルすることにより、Cs保持はより確実になると期待。さらに、SMFハウジングやSMFまでの配管内に付着したCsは溶融完了後に水により溶融容器に洗い流すことが可能であるため、実処理プラントの設計ではCs保持率を99.98%とすることは妥当。
- **ガラス耐久性:**
  - ✓ 処分環境で溶融容器の構成部材である耐火物がガラスと共存することの影響を把握する試験を実施。
  - ✓ ガラスと耐火物共存の条件とガラスのみの条件で耐久性試験結果を比較して、耐火物共存条件で有益な効果（ガラス浸出量の低下）があることを確認。耐火物から放出される元素（Si、Al、Caと想定）が影響している可能性がある。
- **1F水処理二次廃棄物処理へのGeoMelt®ICV™技術の適用性の総合評価:**
  - ✓ 補助金事業により実施してきた試験及び予備概念設計結果等をもとに、固化処理機器、Cs等のオフガスシステムへの移行速度、廃棄物の仕様と組成変動による影響等について評価。
  - ✓ GeoMelt®ICV™技術が1F水処理二次廃棄物処理への適用性に優れていることを総合的に評価。実処理プラントの鳥瞰図（次頁参照）。

実処理プラントの鳥瞰図（PCDによる10トンバッチ）



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）（2021年度）として実施した「1F水処理二次廃棄物の処理・処分に関する研究開発事業（GeoMelt®ICV™）」の成果です。