

ガラス固化技術開発施設（TVF）における 固化処理状況について

令和3年12月2日

日本原子力研究開発機構（JAEA）



1. TVF次回運転に向けた取り組み状況

(1) 現在の状況

- ✓ 今回の運転(21-1CP)において、主電極間補正抵抗値が管理指標まで低下したことから、運転要領書に従い停止操作を進め、溶融炉の運転を一時中断した(9月16日)。その後、溶融炉内部の観察を行い、炉底部(炉底部補助電極間及び西側炉底傾斜面上部)に白金族濃度が高いと考えられる残留ガラスを確認した。次回運転に向けてこれらの残留ガラスを除去する必要があると判断し、今回の運転を終了することとした(10月4日)。
- ✓ 今回の運転では、主電極間補正抵抗値が予想よりも早く低下したことから、炉内点検整備(残留ガラス除去)と併行して要因の絞り込みを行い、対策を検討し、次回の運転に反映する。
- ✓ 残留ガラス除去作業に向け、クリティカルとなる固化セル内の高放射性固体廃棄物の搬出を進め、その期間を活用し、炉底部の残留ガラスの状態を踏まえた除去作業訓練を実施し、除去作業を着実に進める。

▶高放射性固体廃棄物の払い出し

固化セル内の高放射性固体廃棄物は、除去作業と作業場所が干渉するため搬出場所である搬送セルに移動し、第2高放射性固体廃棄物貯蔵施設(2HASWS)へ払い出すことから、除去作業を開始する前までに行う計画である。

この準備作業として、10月20日までに搬送セル内の養生を実施した。その後、10月27日から搬送セルへ固化セル内の高放射性固体廃棄物の移動を開始し、11月8日から2HASWSへの払い出しを開始しており、15缶中4缶まで搬出を完了した。

▶残留ガラス除去

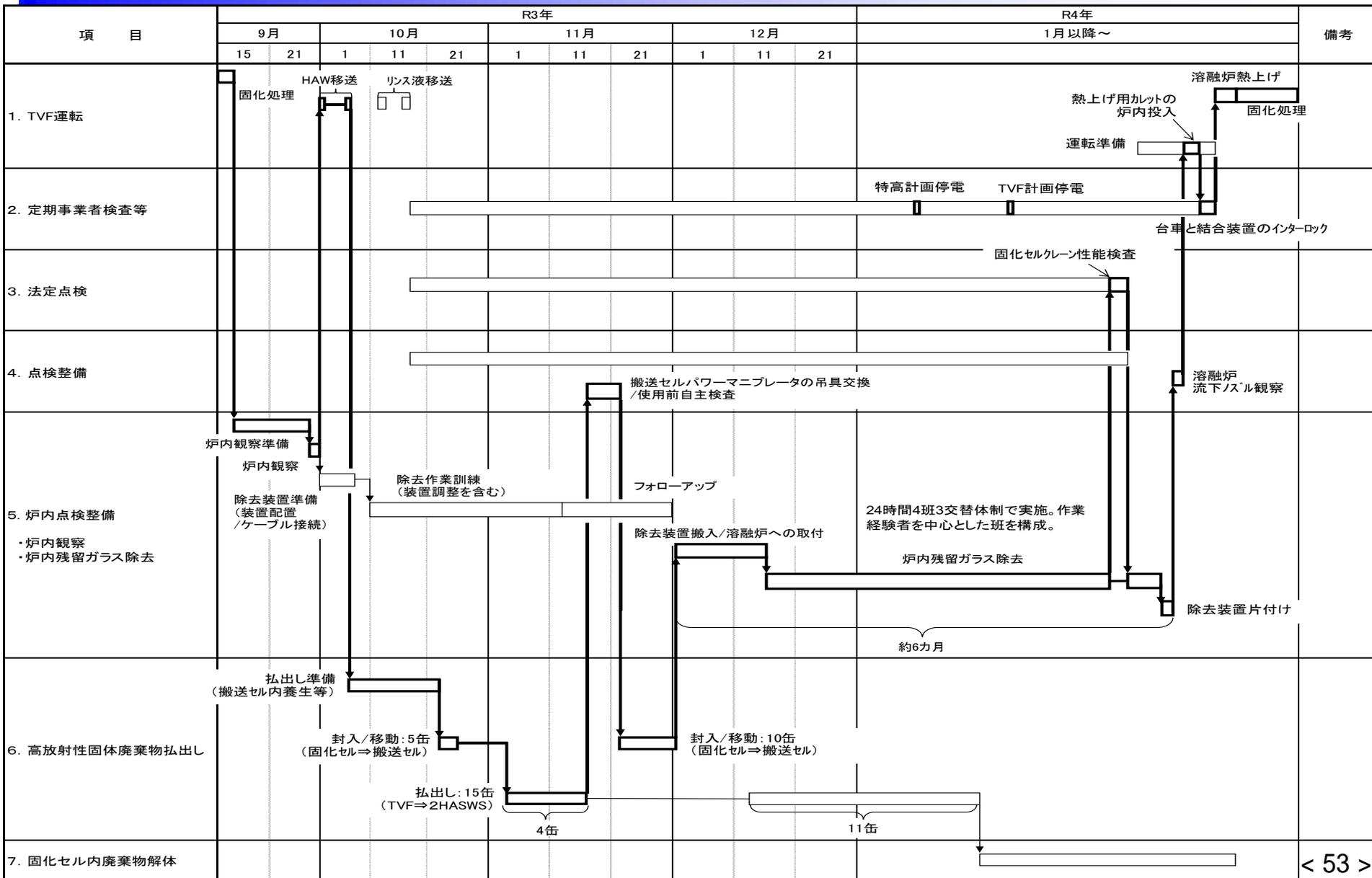
10月12日から11月16日までの期間、コールド施設(工学試験棟)において実作業を模擬(模擬溶融炉、模擬ガラス)した操作訓練を2交替で実施した。本訓練では、作業手順の確認、作業員のスキルアップを図るとともに、除去装置の作動確認を行った。以降、訓練結果を踏まえたフォローアップを実施中。

12月14日から除去装置を固化セル内に搬入して溶融炉に設置し、動作確認の後、炉内残留ガラス除去作業(4班3交替)を開始する予定。



1. TVF再開に向けた取り組み状況

(2) 次回運転までのスケジュール



1. TVF再開に向けた取り組み状況

(3) 残留ガラス除去(1/3)

主電極間補正抵抗値が管理指標まで低下したら、運転要領書に従い停止操作(ドレンアウト=炉内溶融ガラス全量(3本分)の抜き出し)に移行する。その後、溶融炉内部の観察を行い、残留ガラスの状態(残留場所や残留量)を踏まえ、必要に応じて残留ガラス除去作業を実施し、運転を再開・継続する。

R3.9.16 炉内ガラスの抜き出し終了

(抜き出し後の炉内残留ガラス量：約36kg)

R3.9.17~28 炉内冷却

R3.9.29~30 炉内観察

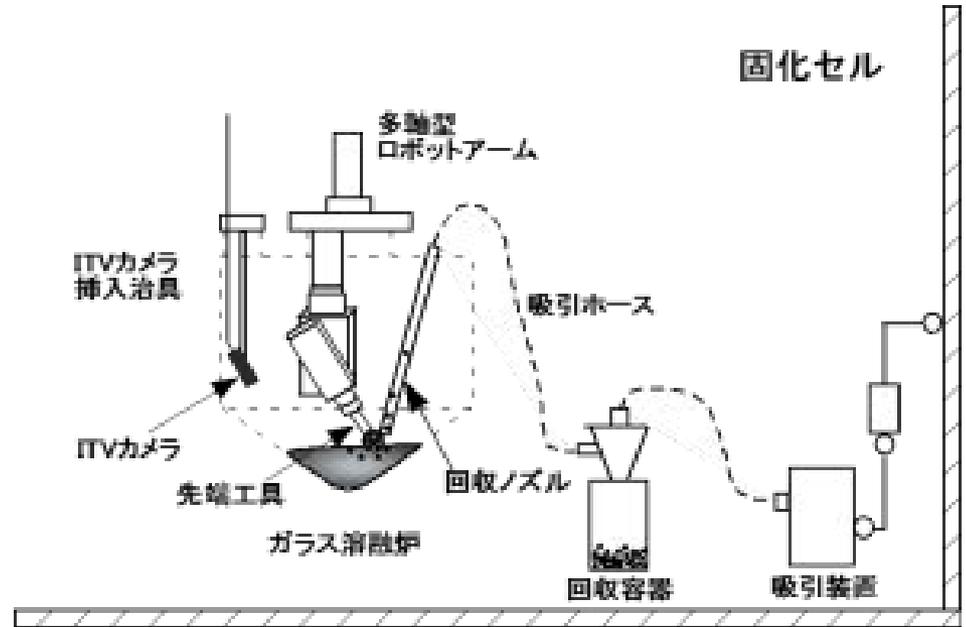
(残留ガラス：炉底部補助電極間
西側炉底傾斜面上部)

R3.10中旬~R3.11中旬

残留ガラスの除去訓練実施

1. 装置作動確認
 2. 操作訓練 (技術継承・習熟含む)
- ・ ガラスの残留状態を踏まえ、訓練に反映し、より実践的な訓練を行う。

R3.12中旬~ 残留ガラス除去開始



除去作業の機器配置概略図

<模擬ガラスを使用した除去訓練の様子>



▲ 模擬溶融炉及び
残留ガラス除去装置の外観



▲ 開口部を覆った
模擬溶融炉の外観



▲ 目視及びITVカメラ映像により、
除去装置の動きやカメラの視野
を確認している様子



▲ 残留ガラスの切削や粉砕等に
使用する先端工具の使い方を
訓練している様子 (ダイヤモンド
カッターの例)

先端工具の一例

ダイヤモンドカッター ▶
(ガラスの切削)

残留ガラスの表面を
切削する



エアチッパー ▶
(ガラスの破碎)

切削した表面を叩
き破碎する



空圧ハンド ▶
(ガラス片所持)

破碎で生じたガラス
片を回収する



ニードルスケーラ ▶
(レンガ表面の仕上げ)

レンガ表面の残留ガ
ラスを除去する



1. TVF再開に向けた取り組み状況

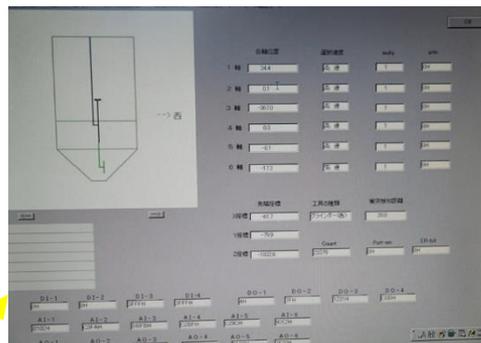
(3) 残留ガラス除去(3/3)

<模擬ガラスを使用した除去訓練の様子>

ITVカメラ映像、目視等により、除去装置の姿勢や、除去装置と炉壁や残留ガラスとの位置関係を確認



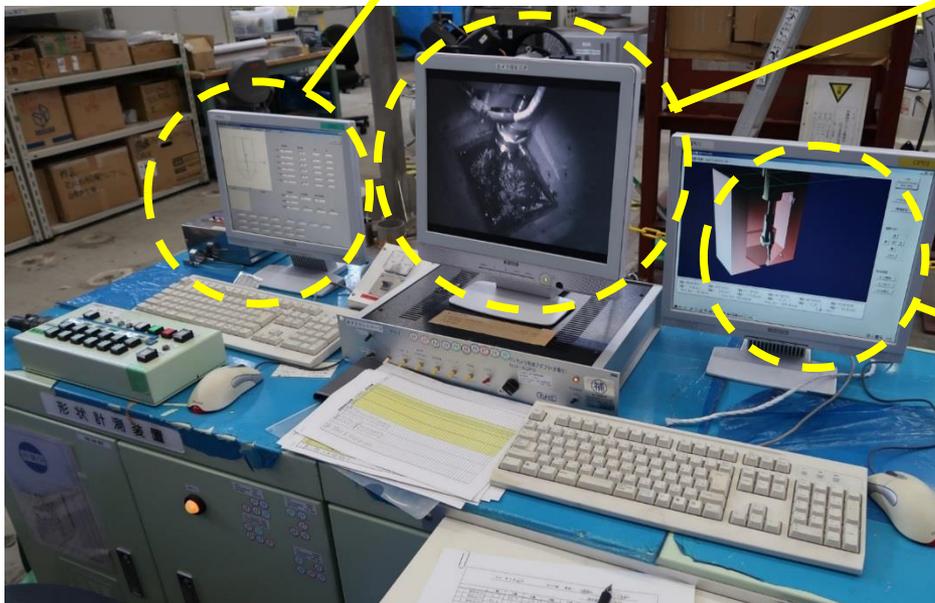
▲ 目視による姿勢確認



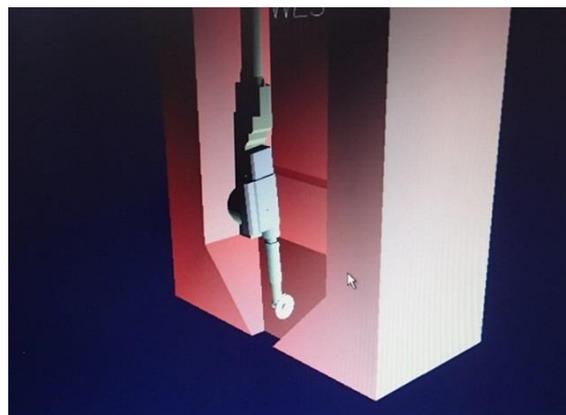
▲ 位置情報画面による姿勢確認



▲ ITVカメラ映像による姿勢確認



▲ 除去装置の操作に用いる制御盤の外観



▲ 3D画面による姿勢確認< 56 >

(1) 原因調査の概要

運転の経緯

年	2017	2018	2019	2020	2021
運 転	46本製造 17-1CP	残留ガラス除去	7本製造 19-1CP		13本製造 21-1CP

前々回運転(17-1CP)

- 44本目で主電極間補正抵抗値が管理指標まで低下したため、溶融炉を停止した。
- ドレンアウト後、炉内の残留ガラス除去を行った。

前回運転(19-1CP)

- 1～7本目の流下は正常に終了した。
- 8本目の流下において、約120kg流下した時点で漏電により流下停止事象が発生した。
- その後、3回の流下を試みたが漏電により流下できず溶融炉内にガラスを保有した状態で停止した。
- 漏電対策として結合装置の交換を行った。

今回運転(21-1CP)

- 8本目(累計15本目)に溶接機の調整のため2日間の保持運転を行った。
- 9本目(累計16本目)に閉じ込め確認の再検査のため3日間の保持運転を行った。
- 11本目(累計18本目)で主電極間補正抵抗値が管理指標まで低下したため、溶融炉を停止した。
- ドレンアウト後、炉内残留ガラス除去を行う予定。

原因調査の概要

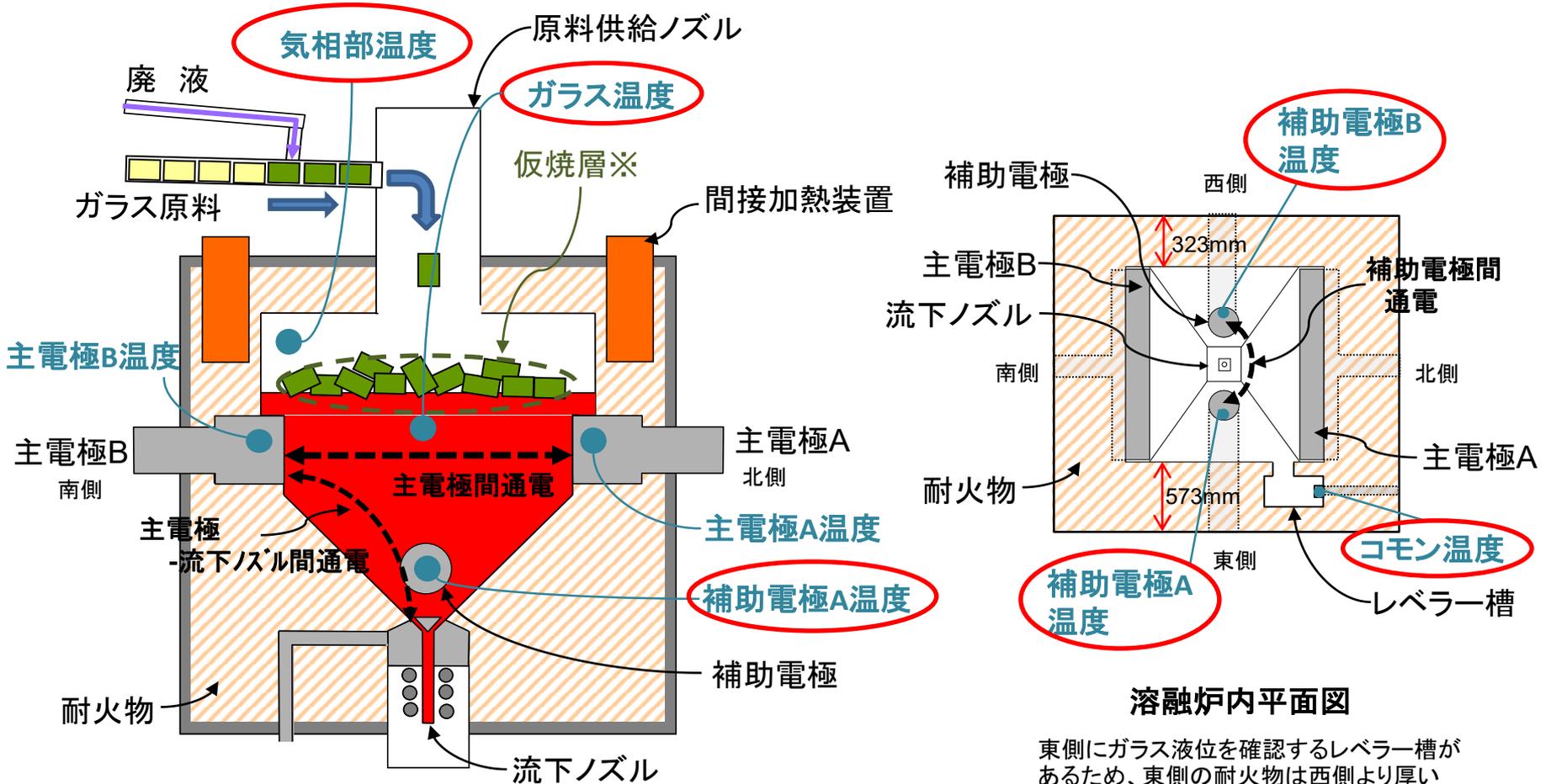
21-1CP開始時とドレンアウト前の炉内状態の推定

- 19-1CPと21-1CPの運転データの比較
(19-1CP停止時の影響を検討)
- 21-1CP運転経過に伴う運転データの変化からドレンアウト前の炉内状態を推定
- 炉内観察の結果を(2)で推定した炉内状態と照合

21-1CPドレンアウト前の炉内状態に至った要因の絞込み

- 21-1CPのこれまでの運転との違いや変更点(結合装置の交換、溶接機の調整に伴う保持運転など)を踏まえた要因解析図により、想定よりも少ない本数で主電極間補正抵抗が低下した要因の洗出し
- 流動解析などにより、洗出した要因の絞込み

2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査 (2) ガラス溶融炉の構造概念図



溶融炉内平面図

東側にガラス液位を確認するレベラー槽があるため、東側の耐火物は西側より厚い

※仮焼層：廃液をしみ込ませたガラス原料を加熱することにより、溶融ガラス表面において、廃液の水分の蒸発、脱硝酸、酸化等の反応が起こるとともに、ガラス原料が溶融し廃棄物成分と混ざり合う過程の層を形成する。
溶融炉の運転において溶融ガラス表面を覆う仮焼層の表面積が小さくなると溶融ガラス表面から気相部への放熱量が増えて気相部の温度が上昇し、大きくなると溶融ガラス表面から気相部への放熱量が減り、気相部の温度が低下する。

2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査

(3) 19-1CPと21-1CPの運転データ比較

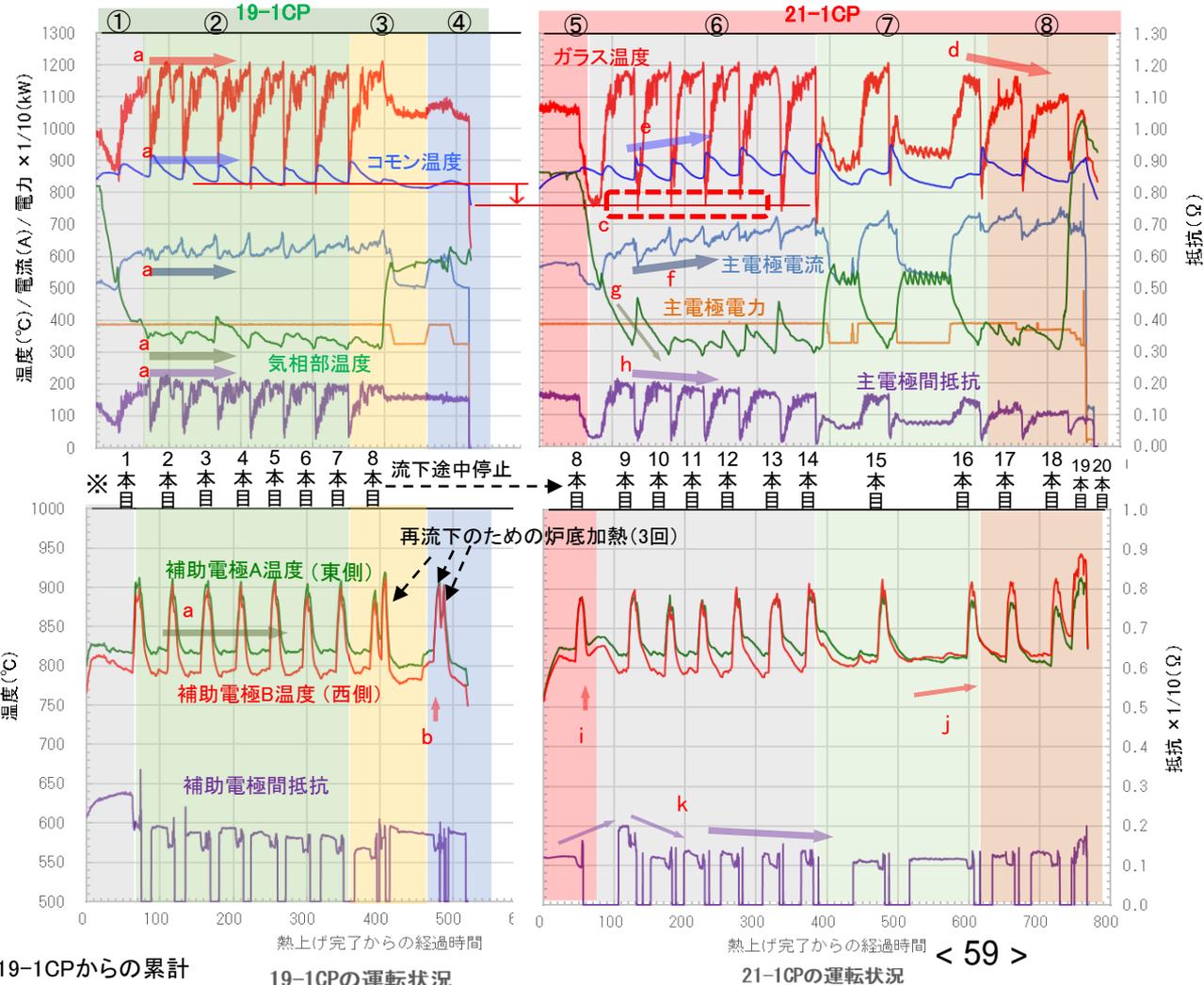
- ✓ 21-1CP開始時とドレンアウト前の炉内状態を推定するため、19-1CP及び21-1CPの運転データから、各運転パラメータの変化の傾向を踏まえ、以下のとおり①～⑧に分類した。
- ✓ このうち、安定していた19-1CPの1本目～7本目と比べ、各運転パラメータの変化が確認された③、④、⑤、⑥、⑧の炉内状況を推定した。

【19-1CP】

- ①1本目
- ②2～7本目
ガラス温度、主電極間電流/抵抗、気相部温度、補助電極温度等一定：**a**
- ③8本目(流下停止事象 保持運転含む)
- ④8本目(再流下の加熱操作→流下できず 運転終了)
補助電極温度差が減少：**b**

【21-1CP】

- ⑤8本目(仕掛品)
補助電極温度の逆転、流下後のガラス温度の低下：**i,c**
- ⑥9～14本目
流下後のガラス温度の低下、主電極電流の増加、主電極間抵抗の低下、コモン温度の上昇、気相温度低下：**c,e,f,g,h**
- ⑦15～16本目(機器不具合等による保持運転を含む)
補助電極温度の上昇：**j**
- ⑧16～18本目
ガラス温度の低下：**d**



※本数(1～20本目)は、除去作業後から運転を開始した19-1CPからの累計

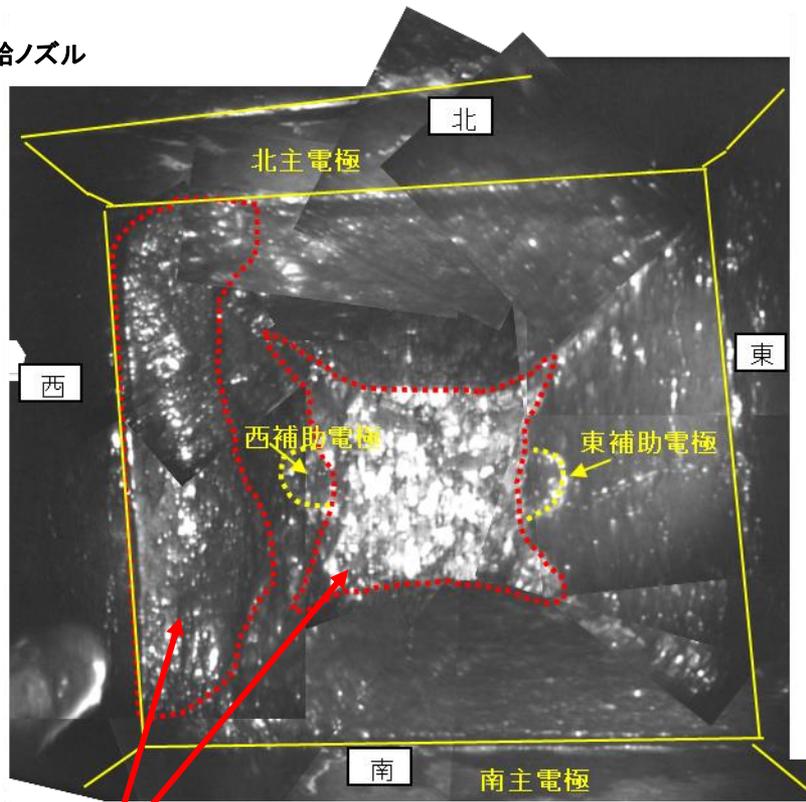
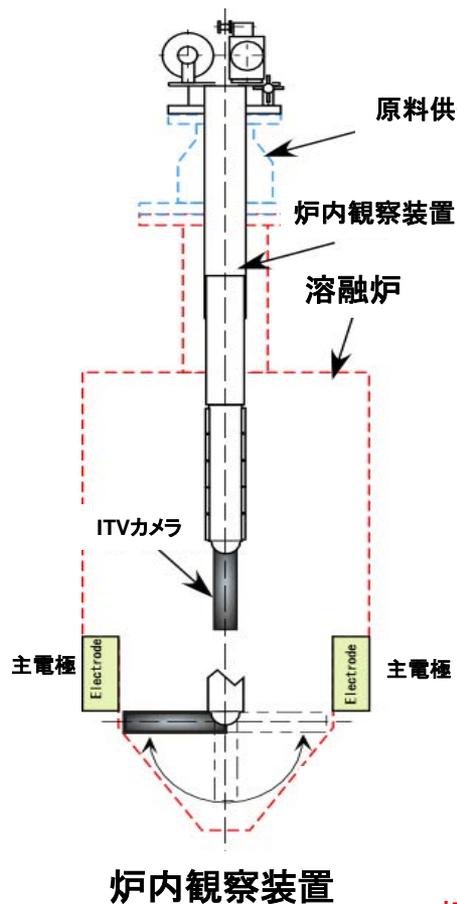
19-1CPの運転状況

21-1CPの運転状況

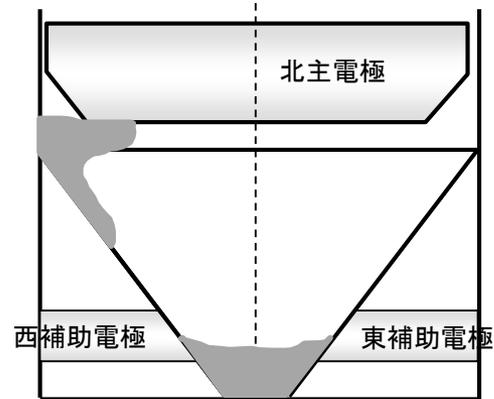
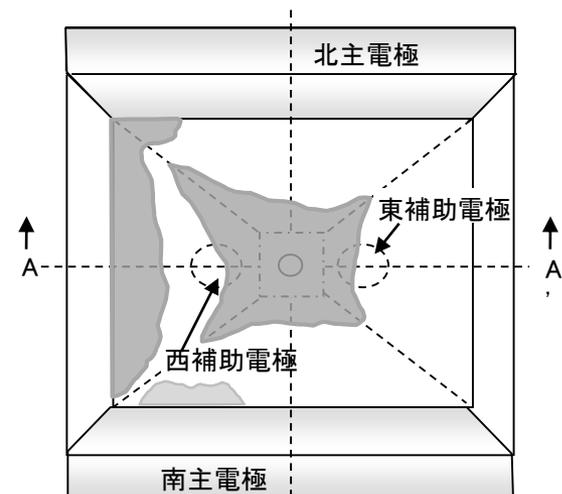
< 59 >

2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査 (4) 21-1CP後(ドレンアウト後)の溶融炉内観察結果

【炉内観察の結果】



炉内に残留しているガラス

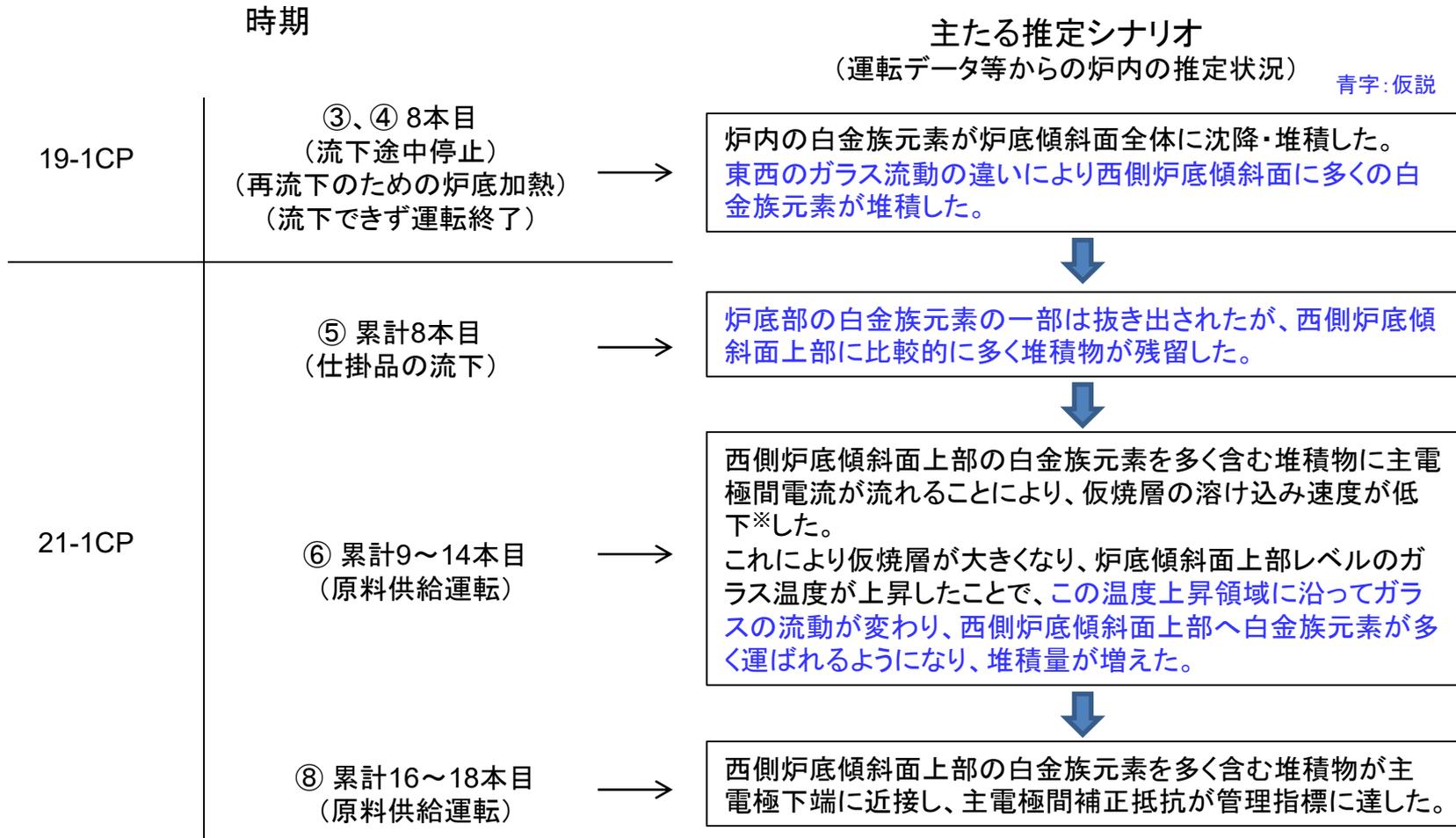


A-A' 断面

2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査

(5) 主電極間補正抵抗が低下した推定シナリオ

運転データ、炉内観察結果、要因解析から、想定よりも早く白金族元素の堆積に係る管理指標に達した主たるシナリオを以下のとおり推定している。



累計は、除去作業後から運転を開始した19-1CPからのガラス固化体製造本数

*: 仮焼層の溶け込み速度の低下の加速要因として、廃液供給速度等が影響していると推定している(詳細検討中)。

2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査

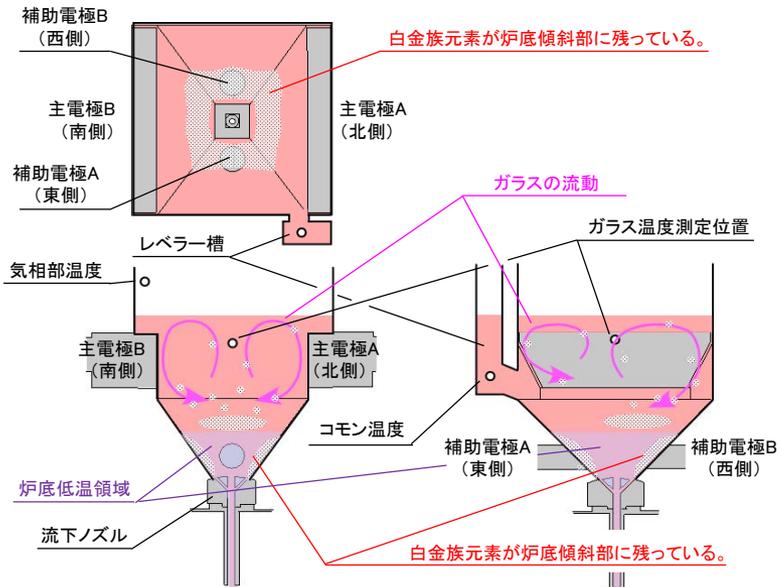
(6) 炉内状態の推定(1/5)

【19-1CP】

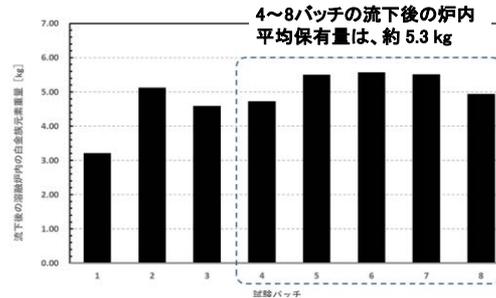
③: 8本目の流下停止事象(保持運転を含む)

推定事象

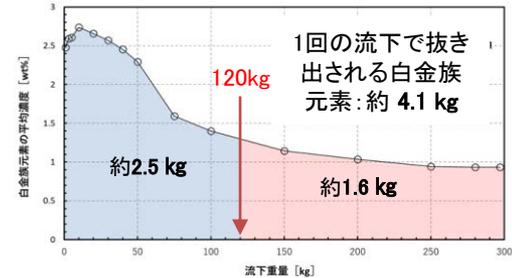
- ・溶融ガラスを約120kg流下したところで流下が途中停止した(通常300kg流下)。
- ・残り180kgを流下するために、再度、炉底加熱を行い、流下を試みたが、同様に流下が停止したことから、一旦保持運転(炉底低温運転)に移行した。
- ⇒ 残り180kgの流下で拔出される白金族元素(約1.6 kg)が炉内に残り、約6.9kg(約5.3kg + 約1.6 kg)の白金族元素の一部が炉底部及び炉底傾斜面に沈降・堆積した。



【流下途中停止後の保持運転(炉底低温)時の炉内推定イメージ】



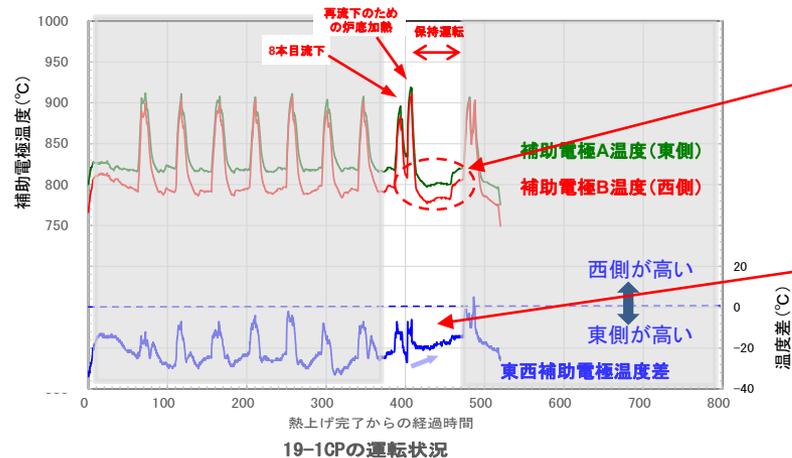
流下後の溶融炉内白金族元素重量
(2号炉コールド作動試験データ)



流下重量と白金族元素濃度の関係
(2号炉コールド作動試験データ)

白金族元素重量は、流下重量等で補正した値

流下の途中停止により、残り180kgの流下で拔出される白金族元素(約1.6 kg)が炉内に残り、19-1CP終了時には、最終的に炉内に約6.9 kg(約5.3 kg + 約1.6 kg)の白金族元素を保有する状態となった。



19-1CPの運転状況

✓ 再流下のための炉底加熱後の保持運転では、炉底低温運転ができています。

✓ 8本目の流下(途中停止)とその次の炉底加熱後、西側と東側の補助電極温度差が小さくなっていることから、西側に多く堆積したものと推定した。

8本目の流下途中停止後、再度流下を試みたが流下ができなかったことから、炉底冷却を行い、保持運転に移行した。

再流下の炉底加熱後、補助電極温度差が小さくなっていることから、炉底加熱のガラスの流動で炉底部及び炉底傾斜面に運ばれた白金族元素が西側に多く沈降・堆積した。< 62 >

2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査

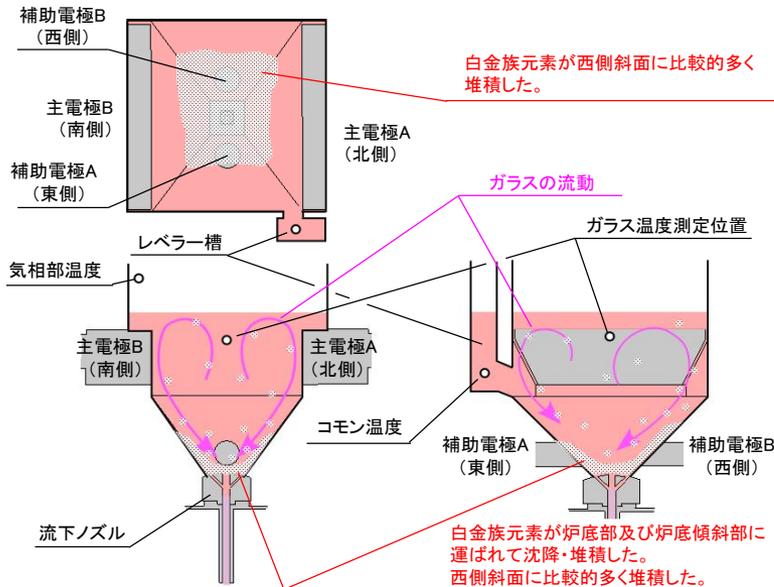
(6) 炉内状態の推定 (2/5)

【19-1CP】

④: 再流下に向けた加熱操作 (流下できずに運転終了)

推定事象: ④-1 再流下のための炉底加熱

- ・保持運転後、再流下のための炉底加熱を2回行った。
- ・炉底加熱のガラスの流動により、ガラス中の白金族元素が炉底部及び炉底傾斜部に運ばれて沈降・堆積した。

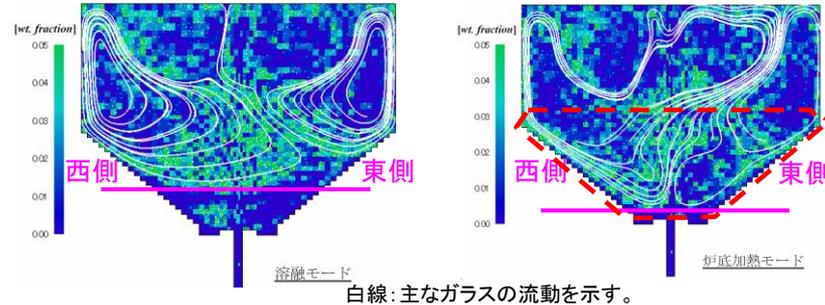


【再流下のための炉底加熱時の炉内推定イメージ】

推定事象: ④-2 ガラスを保持した状態での熔融炉停止

- ・再流下では開始直後に流下停止事象が発生し、数kgしか流下ができなかったため、炉底部及び炉底傾斜面に沈降・堆積した白金族元素を抜き出すことができず、炉底部及び炉底傾斜面に残った。
- ・西側の補助電極温度が上昇していることから、西側炉底傾斜面に白金族元素が多く堆積したと推察している。

○炉内粒子流動解析

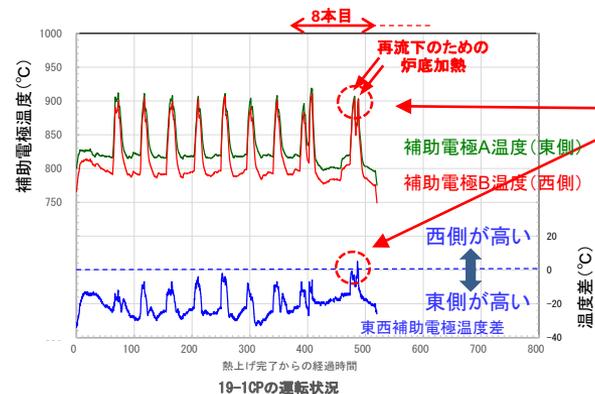


炉底低温運転時の流動
(炉底ガラス温度: 830°C)

炉底部のガラス温度を上げた場合の流動
(炉底ガラス温度: 1000°C)

炉底部を加熱することにより、炉底部までガラスの流動が達し、粒子が炉底部及び炉底傾斜面の全体に運ばれる。

炉底加熱を繰り返したことにより、炉内に保有する白金族元素は炉底部全体に運ばれ、多くの白金族元素が炉底傾斜面に沈降、堆積した。



- ✓ 運転開始から補助電極温度は、東側の方が高かったが、再流下のための炉底加熱時に西側の補助電極温度が上昇して温度差がなくなった。
- 炉底加熱時の主電極-流下ノズル間通電の電流は、電気抵抗が低い西側傾斜面の堆積物流れ、西側の補助電極温度が上昇する。

東側より西側炉底傾斜面に多くの白金族元素が堆積していることから、炉底加熱時の主電極-ノズル間電流が西側に流れやすくなり、西側の補助電極温度が昇温した。

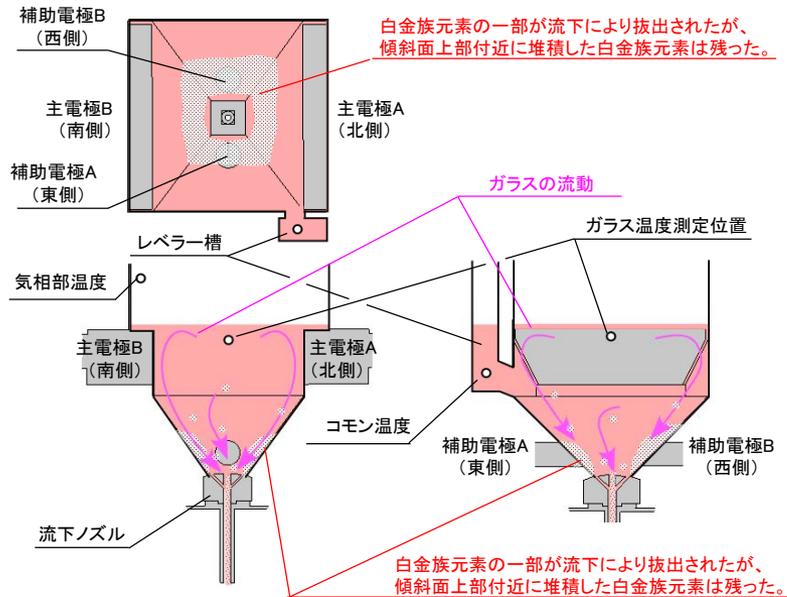
2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査 (6) 炉内状態の推定 (3/5)

【21-1CP】

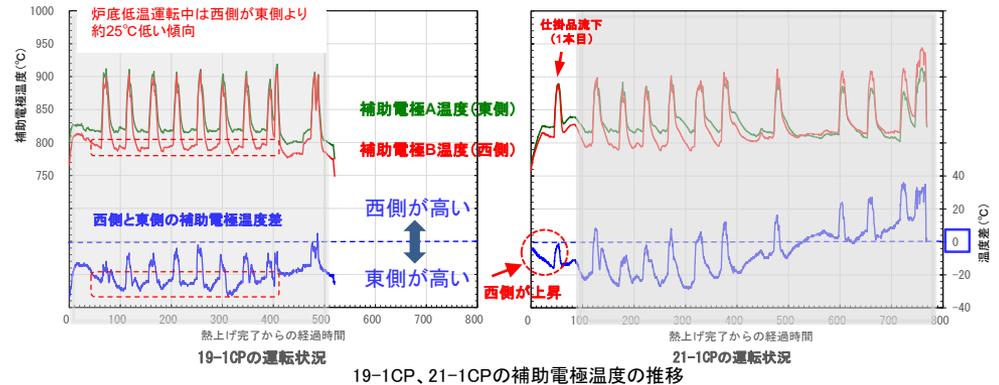
⑤: 仕掛品の流下(累計8本目)

推定事象

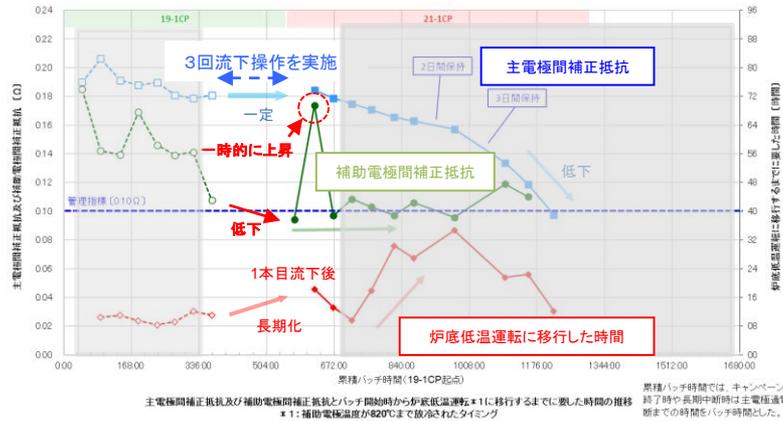
- 21-1CPは流下途中(300kg流下するところ約120kgで流下停止)で運転を終了した状態から熱上げを行い、仕掛品(残り180kg)の流下(1本目)を行った。
- 補助電極間補正抵抗が一時的に上昇していることから、仕掛品の流下により、補助電極近傍に堆積した白金族元素の一部が抜き出されたと推察している。
- また、21-1CP開始時、西側の補助電極温度が上昇していることから、西側炉底傾斜面上部付近に堆積した白金族元素は同様の位置に残ったものと推察している。



【仕掛品の流下時の炉内推定イメージ】



21-1CPの1本目(仕掛品流下前)の炉底低温運転時、西側の補助電極温度が19-1CP時比べて上昇していることから、西側炉底傾斜面に多くの白金族元素が堆積したものと推定した。



流下により、炉底部(補助電極間)に沈降・堆積していた白金族元素の一部が抜き出され、炉上部の白金族元素濃度の低いガラスに置き換わったことから、一時的に補助電極間抵抗が上昇した。

19-1CP終了時、炉底部に白金族元素が沈降・堆積したため、21-1CPの1本目(仕掛品)の補助電極間抵抗が低下した。
また、炉底傾斜面上部に白金族元素が沈降・堆積したため、主電極間電流の一部が炉底部に流れ、1本目の流下後、炉底低温運転に移行する時間が長期化した。 < 64 >

2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査

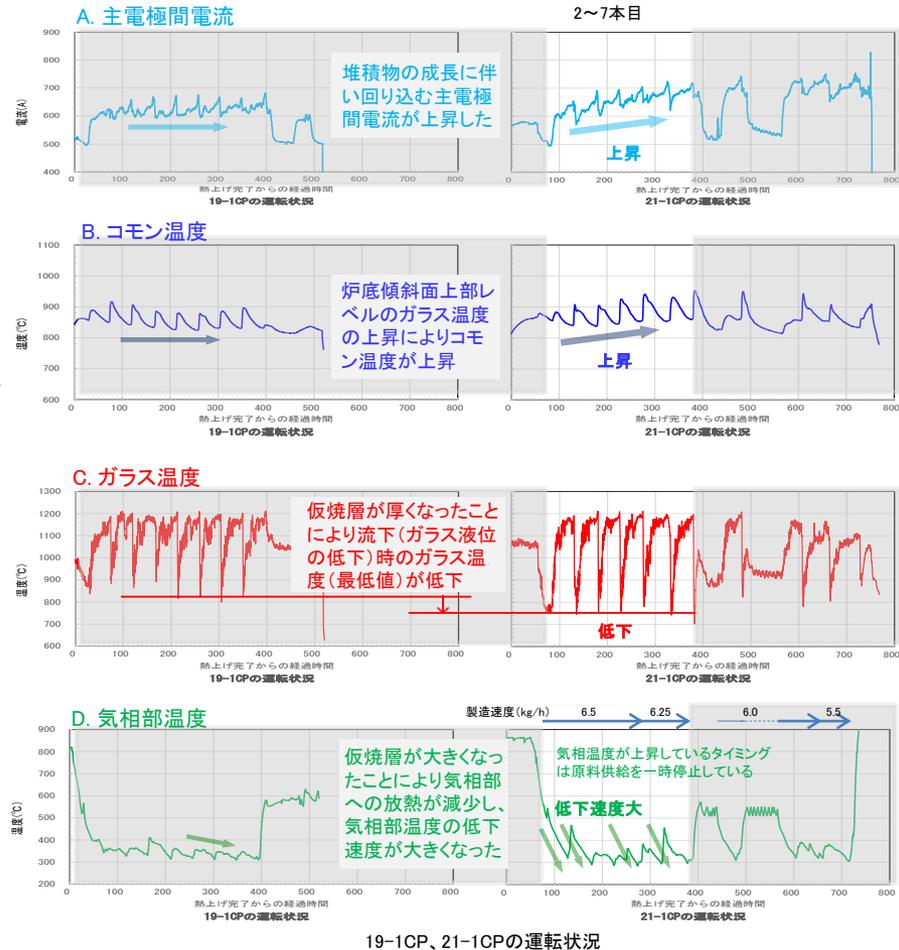
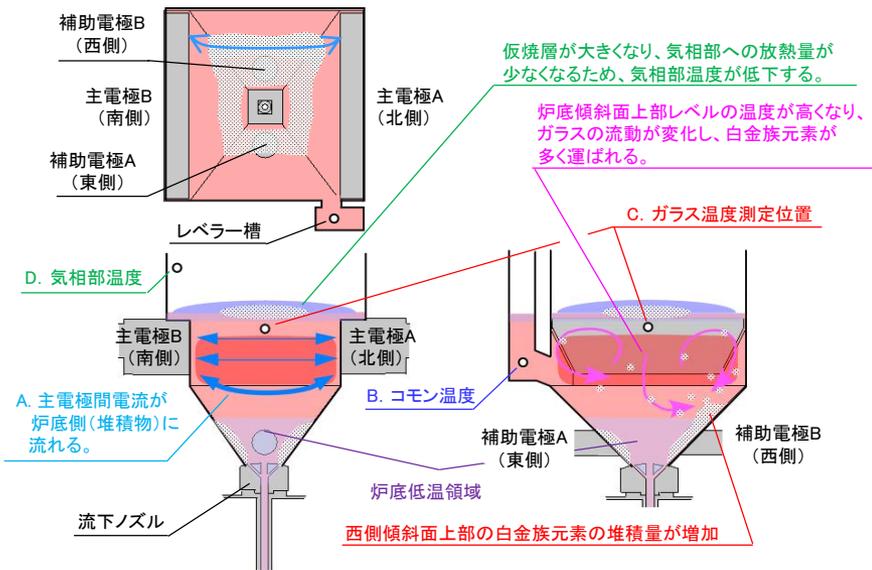
(6) 炉内状態の推定 (4/5)

【21-1CP】

⑥ 2～7本目(累計9～14本目)

推定事象

- 西側炉底傾斜面上部の堆積物(白金族元素を多く含ため電気抵抗が小さい)に流れる主電極間電流が多くなり、炉底傾斜面上部レベルのガラス温度(コモン温度)が上昇した。
→ 仮焼層付近のガラスに流れる主電極間電流が減少したため、当該付近の温度が低下し、供給した原料の溶け込み速度が低下した。
- 仮焼層が大きくなって溶融ガラスの表面を覆い、気相部への放熱が少なくなり、気相部温度が低下した。
- 炉底傾斜面上部レベルの温度が高くなることにより、ガラスの流動が変化して、白金族元素が炉底傾斜面上部に多く運ばれ、堆積量が増えたと推察している。
- 炉底傾斜面上部の白金族元素の堆積量が増えることにより、より多くの主電極間電流が堆積物に流れ、上記の事象が加速していった。



21-1CP開始時から、炉底傾斜面上部の堆積物(白金族元素)に主電極間電流が流れ、炉底傾斜面上部の温度が高くなった。また、主電極間電流が炉底傾斜面上部の堆積物(白金族元素)に流れることにより供給した原料の溶け込み速度が低下したため、仮焼層が厚く、大きくなり、ガラス温度(最低値)が低下し、気相部温度の低下速度が大きくなった。

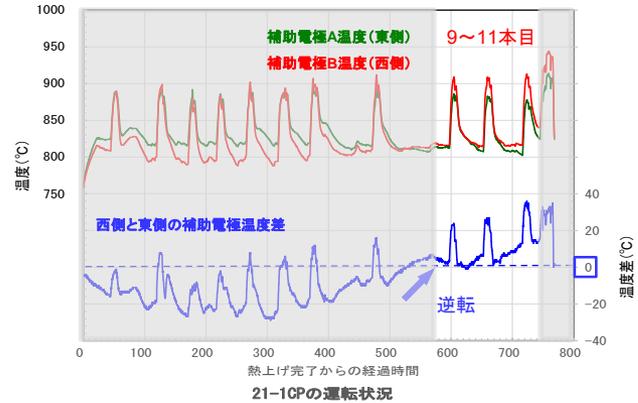
2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査 (6) 炉内状態の推定(5/5)

【21-1CP】

⑧ 9～11本目(累計16～18本目)

推定事象(主電極間抵抗の低下)

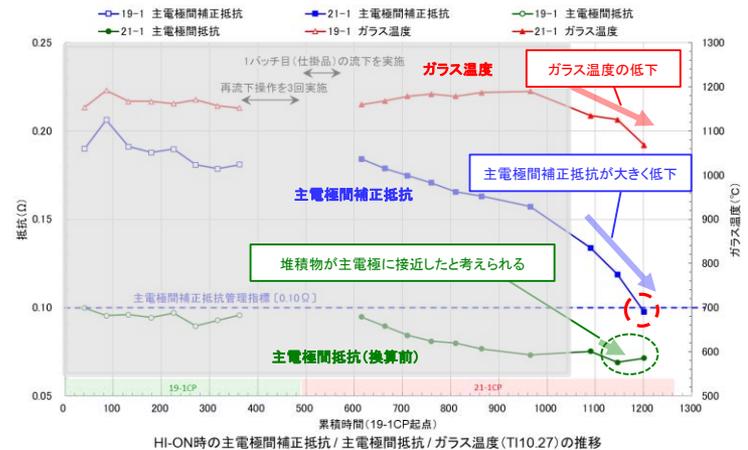
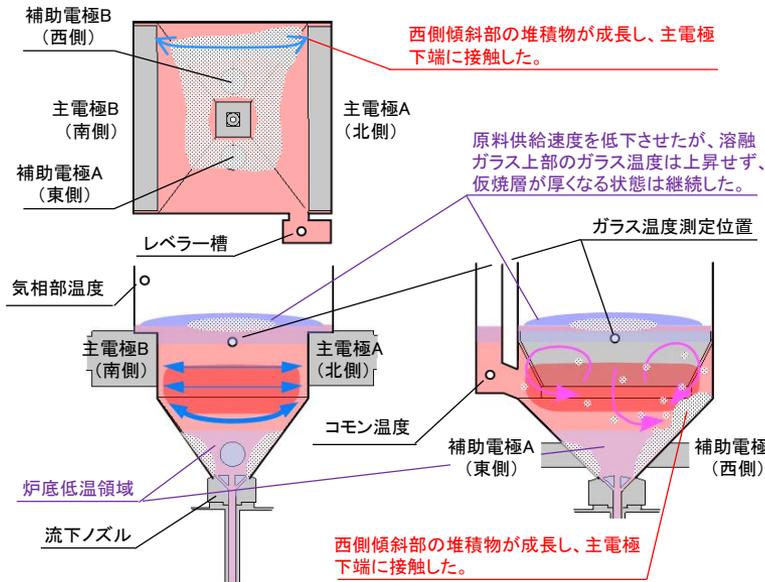
- ・気相部温度の低下速度が大きいことから、仮焼層が大きく、厚い状態が継続しているものと考え、原料供給速度を低下させた。
- ・原料供給速度を低下させたが、気相部温度の低下速度が大きい状況は改善されなかった。
- ・西側の補助電極温度がさらに上昇し、西側と東側の補助電極温度が逆転していることから、西側炉底傾斜面上部への白金族元素の堆積量はさらに増え、主電極間電流が多く流れる状況になった。
また、主電極間補正抵抗が急激に低下していることから、白金族元素を多く含む堆積物が主電極下端に近接したと推定した。



西側の補助電極温度が上昇し、西側と東側の補助電極温度が逆転した。



西側炉底傾斜面及び炉底部への白金族元素の堆積量が増えていった。



※ 補正抵抗: ガラス温度により抵抗値は変わるため、1000°C時の抵抗値に換算している。

11本目では西側炉底傾斜面の堆積物が、主電極下端に近接し、主電極間補正抵抗(1000°C換算値)が大きく低下し、管理指標に達した。 < 66 >

【運転後半(11本目)の炉底低温運転中の炉内推定イメージ】



2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査 (7) 主電極間補正抵抗が低下する要因解析(1/3)

炉内状況の推定と並行して、要因分析により、想定よりも少ない本数で主電極間補正抵抗が低下した要因の洗出しを進めている。

要因分析:主電極間補正抵抗の早期低下に係る要因分析(これまでの運転との違い)

A: これまでの運転との違いがあり炉溶炉運転に影響がある
B: 主電極間抵抗低下(白金族元素堆積)に影響がある
C: 傾斜面への堆積に影響がある

行No.	事象	要因1	要因2	要因3	要因4	要因5	想定される影響、事象	調査項目	調査確認結果	A	B	C
1	炉底部に白金族元素が早期に堆積したことについて、これまでの運転との違いを調査する。	供給系: ガラス原料及び廃液の影響	ガラス原料	ガラス原料の仕様	ガラス原料の組成		・ガラス原料の成分組成がこれまでの運転と違いがあることにより、溶解性に影響が出る。構成成分のうち、ホウ素(B)、リチウム(Li)は粘性を下げる働きがある。 ・製造ロットが異なると溶解性に違いが出る可能性がある。	・ガラス原料組成等(工場検査記録)確認	〈調査済み〉 ・ガラス原料工場検査記録から各組成の含有率に問題はなかった。 ・21-1CPの初期(3バッチまで)は19-1CPと同様のロット(LotNo.191113)を使用しており違いはない。	×	×	×
2					ガラス原料の物性		・ガラス原料の物性がこれまでの運転と違いがあることにより、炉内での状態が異なり、溶解性に影響が出る。重量、寸法、浸み込み性及び落下強度の違いがないことを確認する。	・ガラス原料組成等(工場検査記録)確認 ・重量、寸法、浸み込み性、落下強度	〈調査済み〉 ・ガラス原料工場検査記録から重量(67.5g±20g)、寸法(70mm±1mm)、浸み込み量(3.2ml/g)等の検査結果に問題はなかった。	×	×	△
3				ガラス原料の供給状態	ガラス原料の供給誤差	積算カウンタの誤差	・ガラス原料の投入数(カウンタの積算値)に違いがあると仮焼層の状態や溶解性に違いが生じ、運転状態に影響が出る。	・積算カウンタ校正記録	〈調査済み〉 ・積算カウンタの校正記録から30個連続動作させ誤差は0であり、カウンタの作動に問題はなかった。	×	×	×
4						ガラス原料の供給量	・ガラス原料の投入数(供給量)に違いがあると仮焼層の状態や溶解性に違いが生じ、運転状態に影響が出る。 ・炉内に投入する前に発生する粉塵の量が多いと投入数(カウンタ積算)から求める供給重量が異なり、運転状態に影響が出る。	・ガラス積算と実供給量との差 ・粉塵発生量の確認	〈調査済み〉 ・全体のガラス積算約33,100個と実供給数約33,000個との差は0.3%であり問題はない。 ・粉塵発生量は、19-1CPが0.45%、21-1CPが0.36%であり、設定した0.5%範囲内であり問題ではない。	×	×	×
5					ガラス原料の供給速度		・ガラス原料の供給速度が計画した製造速度と違いがあると炉内の温度バランスが崩れ、運転状態に影響が出る。	・廃液・ガラス原料供給記録(固体体組成記録)確認 ・ガラス積算記録(供給速度)の確認	〈調査済み〉 ・製造したガラス固体体の組成記録から組成比に問題はなく、また、ガラス積算記録からガラス原料の投入は所定の範囲で行われており、各バッチで供給速度にずれが生じるなどの問題はなかった。	×	×	×
6		廃液	廃液の組成		分析誤差		・高放射性廃液の成分組成の分析結果に基づき、廃液の調整や供給量を決定していることから、分析値に違いがあると運転状態に影響が出る。	・分析装置、分析値の校正記録確認	〈調査済み〉 ・分析機器の校正記録及び分析前後で実施する検量線の確認から、測定誤差は管理基準以内であり問題はない。	×	×	△
7					受入れた廃液成分		・高放射性廃液の含有組成、組成比の違いにより溶解性に影響が出る。特に、全酸化物(WO)とNa ₂ Oの比(WO:Na ₂ O=15:10)は、運転条件の指標としていることから運転状態に影響が出る。	・受入廃液の元素分析記録確認 ・全酸化物(WO)とNa ₂ Oの比、各成分含有率 ・受入槽、濃縮器の液量管理の状況確認	〈調査済み〉 ・過去の運転(16-1~19-1CP)と比較した結果、 HAW受入後の分析結果、WOに対するNa₂Oの比が高かった 。WOの中では、沈殿成分、CP成分及び二次廃液処理系から受け入れた廃液中のガラス由来成分の減少が見られた。 ・液量管理(受入槽5.5m ³ 、濃縮器1.0m ³)のもと廃液を取扱った。	△	△	△
8					供給した廃液成分	白金族元素濃度、割合	・供給した廃液の白金族元素濃度や割合が高い場合、白金族元素の沈降・堆積する量が多くなり、運転状態に影響が出る。	・受入廃液の元素分析記録確認 ・廃液・ガラス原料供給記録(固体体組成記録)確認	〈調査済み〉 ・過去の運転(16-1~19-1CP)と比較した結果、 HAW受入後の分析結果に白金族元素の濃度割合に大きな違いはなかった 。 ・製造したガラス固体体の組成比から白金族元素濃度に問題は無い。	×	×	×
9					全酸化物、Na ₂ O等(白金族元素以外)		・供給した廃液の成分組成、組成比の違いにより溶解性に影響が出る。特に、全酸化物(WO)とNa ₂ Oの比(WO:Na ₂ O=15:10)は、運転条件の指標としていることから運転状態に影響が出る。	・受入廃液の元素分析記録確認 ・廃液・ガラス原料供給記録(固体体組成記録)確認 ・流下ガラスのサンプルの組成確認	〈調査中〉 ・Na ₂ OとWOは、10wt%、25wt%付近で供給されており、著しい違いは無い(問題はない)。 ・流下ガラスサンプルの分析結果からNa ₂ O濃度が10.7wt%であり、溶解性は問題ない。それ以外の元素も過去の分析結果と同様であり問題ない。	×	×	×

赤文字はこれまでの運転との違いを確認したもの

〔凡例〕
○:影響あり、△:可能性あり、×:影響なし

2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査

(7) 主電極間補正抵抗が低下する要因解析(2/3)

10			廃液の供給状態	供給量の誤差 (供給流量の校正記録等)	・廃液供給量に違いがあると仮焼層の状態や溶融性に違いが生じ、運転状態に影響が出る。	・廃液供給に係る貯槽の液位計等の校正記録、供給流量のループ校正記録確認	〈調査済み〉 ・各貯槽の液位、密度、供給流量のループ校正記録から流量 $\sim 40L/h$ において誤差は最大0.04L/h(0.1%)であり、問題のない。	×	×	×
11			廃液の供給速度		・廃液供給速度に違いがあると仮焼層の状態や溶融性に違いが生じ、運転状態に影響が出る。 ・廃液供給量と実際の量と計算値と異なっていると運転状態に影響が出る。	・廃液・ガラス原料供給記録(固化体相成記録)確認 ・廃液供給量、供給速度の記録確認	〈調査中〉 ・供給した廃液の濃度(廃棄物含有率)に問題はなかった。 ・21-1CPで供給開始した2,3リッチ目の廃液供給速度が大きい(約13L/h)。19-1CP(平均12.5L/h)よりも廃液熱量が約0.4kW多くなる。	○	△	△
12	運転操作系: 溶融炉運転の影響	供給運転	温度管理	温度指示値	・溶融炉の運転において、温度計指示値に違いがあると運転性に影響が出る。	・温度指示値のループ校正記録確認	〈調査済み〉 ・温度指示値のループ校正記録から問題はないことを確認した。校正結果の近似直線から炉底低温やガラス溶融に係る温度範囲(700~1050℃)の誤差は最大3℃程度であり問題ない。	×	×	×
13			溶融運転	温度バランス	・溶融炉はガラス製造速度に対して、主電極電力を39kW一定として、ガラス原料及び廃液の供給量とガラス温度、気相部温度が安定して推移することが重要である。 ・温度バランスが崩れた場合は、炉底低温運転ができなくなるなど運転状態に影響が出る。	・炉内気相部温度、ガラス温度のトレンド記録確認 ・定常解析実施 炉底部(炉底傾斜面上部)に白金族元素が堆積している条件にて、定常解析を実施し、主電極間電流の取り込みの有無、炉底傾斜面上部の温度上昇の有無を確認する。	〈調査中〉 ・21-1CPでは従来どおり原料供給初期から主電極間電力約39kW、製造速度6.9kg/hで運転した。 ・初期バッチから気相部温度の低下速度が大きくなり、低下後のガラス温度の最低値が低いことから仮焼層が厚くなり、原料の溶解速度が低下している。	○	△	△
14				通電系(投入電力等)	・溶融炉に投入する電力に違いがあると運転性に影響が出る。 ・表示した電力値と出力される電力に違いがあると運転性に影響が出る。	・主電極電力指示値のループ校正記録確認 ・炉内気相部温度、ガラス温度のトレンド記録確認 ・模擬負荷運転による新旧電力盤の出力確認	〈調査中〉 ・主電極電力指示値のループ校正記録から指示値には問題はない。 ・バッチの継続に伴い主電極間電流値が大きくなった。 ・新旧電力盤の出力確認結果により、通常出力39kWに対して新電力盤では旧電力盤より0.6kW小さかった。	○	△	△
15				主電極冷却空気流量	・溶融炉の運転は、温度バランスが重要であり、主電極冷却空気流量が異なると運転性に影響が出る。	・ガラス温度等のトレンド記録確認 ・主電極冷却空気流量の設定状態確認	〈調査済み〉 ・主電極冷却空気流量(出力)は、21-1CPで64~66%であり、19-1CPの64%と同様であるが、21-1CPではガラス温度指示値の最低値が低くなっている。主電極冷却空気流量以外の要因で仮焼層が厚くなっている可能性がある。	△	△	△
16				炉底低温運転	・炉底部への白金族元素の沈降・堆積を抑制するため、炉底低温運転を行っている。この温度状態に違いがあると白金族元素の沈降・堆積や抽出性に影響が出る。	・補助電極温度等のトレンド記録確認 ・炉底低温移行時間の確認	〈調査中〉 ・6~8本目に炉底低温移行時間が27時間~34時間に長くなったが、9本目以降、短くなった。 ・これまでは主電極間補正抵抗が低下する前に炉底低温移行時間が短縮化するが、21-1CPでは炉底低温運転ができていた。	△	△	△
17			液位管理		・溶融炉は運転中にL-on/H-on間でガラス液位を確認し、低下操作を実施している。液位に違いがある場合は、炉内の温度や通電状態に影響が出る可能性がある。	・溶融炉制御盤(ガラスレベル検知システム内蔵)の点検整備記録確認 ・運転中のL-on、H-onの管理	〈調査済み〉 ・溶融炉制御盤の点検整備記録から問題はないことを確認した。 ・21-1CPは、19-1CPと比し、H-on時は202gに対して平均約4kg(液位で2.3mm)多い程度であり液位管理に問題ない。	×	×	×
18		保持運転	温度管理	19-1CPでの保持運転 (炉底停止事業) (炉底加熱実施)	・運転中の不具合等により復旧までに時間が掛かる場合は、保持運転を行い、復旧後、すぐに再開できるようにしている。 ・19-1CPで実施した保持運転に従来と違いがある場合は運転性に影響が出る可能性がある。	・ガラス温度、補助電極温度のトレンド記録確認 ・保持運転前後での各電極間抵抗の確認	〈調査中〉 ・流下途中停止後(再流下の炉底加熱を含む)の東西の補助電極温度差から西側の温度が上昇し、保持運転時の炉底加熱時に西側の温度が高くなった。 ・21-1CPは流下前には補助間抵抗値が低下したことから、白金族元素が炉底部に沈降堆積したと推定。	○	△	△
19				21-1CPでの保持運転 (炉底低温)	・運転中の不具合等により復旧までに時間が掛かる場合は、保持運転を行い、復旧後、すぐに再開できるようにしている。 ・21-1CPで実施した保持運転に従来と違いがある場合は運転性に影響が出る可能性がある。	・ガラス温度、補助電極温度のトレンド記録確認 ・保持運転前後での各電極間抵抗の確認	〈調査中〉 ・8,9本目の保持運転中において、9本目の炉底低温運転では東西の補助電極温度差が小さくなり、途中から西側の方が高くなった。	○	△	△

□ 白金族元素の沈降・堆積に影響したと推定するもの

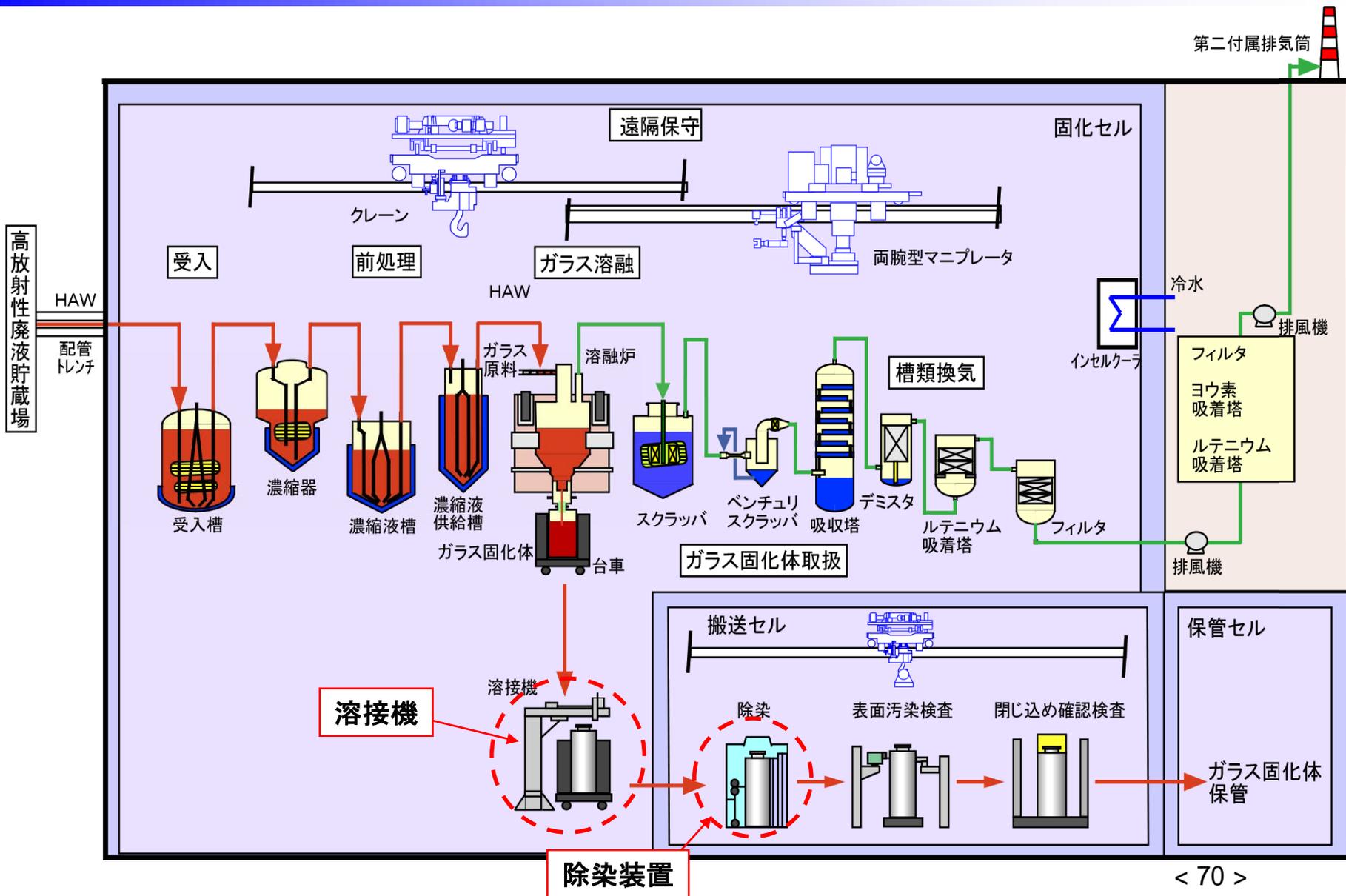
□ 白金族元素の沈降・堆積の加速要因として影響したと推定するもの



2. 主電極間補正抵抗の早期低下に係る原因調査 (7) 主電極間補正抵抗が低下する要因解析(3/3)

20	流下操作系: 流下による影響(抜出性)	炉底加熱操作	温度管理		・流下前に炉底部の加熱を行う。炉底部を加熱することは、白金族元素の沈降・堆積に影響を与える。加熱時の温度はガラスの粘性に影響する。	・流下操作前の炉底加熱時のトレンド記録確認	〈調査済み〉 ・すべてのバッチで炉底加熱により全段加熱時の底部電極(流下ノズル上段)温度を約745℃に昇温しており違いはない。	×	×	×
21			加熱操作		・流下前に炉底部の加熱を行う。炉底部を加熱することは、白金族元素の沈降・堆積に影響を与える。加熱操作は、炉底部の状態(白金族元素の挙動)に影響する。	・補助電極間通電、主ノズル間通電のトレンド記録確認	〈調査済み〉 炉底加熱時の補助電極間通電、主ノズル間通電の通電時間、各電流値に大きな違いはなく、加熱操作に問題はない。	×	×	×
22		流下操作	流下重量		・1本流下することにより、炉内から1本分の白金族元素の抜出し、白金族元素保有量のバランスを稼いでいる。流下重量に違いがあると白金族元素の抜出性に影響が出る。	・流下速度を算出するための重量計の校正記録確認	〈調査済み〉 重量計の校正記録、ループ試験記録から入力292.5kg(バネ定数補正後)に対してD0表示値292.7kg(差0.2kg)であり、問題ないことを確認した。	×	×	×
23			流下速度		・ガラスの流下は所定温度から開始し、流下初期は流速を抑え、約3時間で流下することで約1本分の白金族元素の放出を行っている。このバランスに違いがあると白金族元素の抜き差しに影響が出る可能性がある。	・流下速度のトレンド記録確認	〈調査済み〉 流下のトレンドから流下状況(操作、流下速度)に異常のないことを確認した。	×	×	×
24	排気系: 溶融炉廃気の影響(除熱)	排风量	排気量		・溶融炉の安定運転には温度バランスが重要である。溶融炉からの排気量に違いがあると運転性に影響が出る。	・溶融炉換気系の排気風量、温度のトレンド記録確認	〈調査中〉 溶融炉からの換気温度(19-1CPと21-1CPで同様)、溶融炉換気系のインターキブ間温度に除熱を促進する状況は確認されなかった。	×	×	×
25			インリーク量		・溶融炉の安定運転には温度バランスが重要である。21-1CP前の結合装置交換後における結合装置からのインリーク量が多いと運転性に影響が出る。	・21-1CP前の結合装置交換後における結合装置からのインリーク量評価(簡易計算) ・溶融炉へのバージエア量の確認	〈調査済み〉 結合装置交換前と交換後のインリーク量を結合装置内圧調整弁の開度と結合装置内圧、炉内圧から算出した結果、2.1%の増加(除熱量は0.016kW増加)であり影響しない。	×	×	×
26		温度	炉内気相部温度		・溶融炉の安定運転には温度バランスが重要である。炉内気相部温度に違いがあると運転性に影響が出る。	・炉内気相部温度、ガラス温度のトレンド記録確認	〈調査済み〉 初期バッチから気相部温度の低下速度が速く、流下後のガラス温度指標値の最低値が低いことから仮層が大きく、仮層部の溶融速度が低下している。	△	△	△
27	設備	溶融炉	溶融炉本体	溶融炉健全性	・溶融炉はケーシング内に耐火物を積積し、ケーシングは架台に据え付けている。 ・溶融炉本体が健全でないとは運転性に影響が出る。	・検査成績書により溶融炉と溶融炉架台の積きの確認 ・炉内観察	〈調査済み〉 溶融炉架台、溶融炉の検査結果により、著しい積きは無いことを確認した。 炉内観察から斜面上部に残留物が確認されたが、炉内に損傷等は確認されていない。	×	×	×
28			残留ガラス除去	映像等による評価	・2号溶融炉は白金族元素の堆積を確認した場合は、ドレリアウトし、残留ガラス除去を行うこととしている。 ・残留ガラスが除去されていないと運転性に影響が出る。	・19-1CP前の炉内残留ガラス除去作業結果の検証(過去の炉内残留ガラス除去作業後の炉内観察結果(16-1CP前)との比較)	〈調査済み〉 19-1CP前の除去作業の結果は、16-1CP前の結果と比較し、同程度に除去されていた。	×	×	×
29				運転状態による評価	・2号溶融炉は白金族元素の堆積を確認した場合は、ドレリアウトし、残留ガラス除去を行うこととしている。 ・残留ガラス除去後、炉内の状態に違い(目視では確認困難)があると運転性に影響が出る。	・16-1CPと19-1CPとの熱上げ状態、初期バッチの状態の比較	〈調査済み〉 16-1CPと19-1CPの熱上げ時の温度状況等はほぼ同様である。 ・運転開始初期の補助電極間抵抗は19-1CPが16-1CPより低い。	△	△	△
30			結合措置		・21-1CP前に更新した結合装置による影響により運転状態に違いがある場合には、運転性に影響が出る。	・結合装置内圧等のトレンド記録確認	〈調査済み〉 流下操作時は-0.4kPa(MV約70%)で制御されていた。 ・流下操作時以外は、24項目(インリーク量)と同様。	×	×	×
31	制御系	工程制御装置			・19-1CP前に更新した工程制御装置の出力や表示値に違いがある場合は、運転性に影響が出る可能性がある。	・主電極電力指示値のループ校正記録(電力値～工程監視盤、工程制御装置)	〈調査済み〉 電力値の外部端子から工程制御装置へ模擬入力を行い、制御装置側(工程監視盤(O)側)工程制御装置(O)側の指示値を確認し、精度±0.2%内であり問題ない。	×	×	×

3. 今回のTVF固化処理(21-1CP)の実績 主な不具合の対応(1/2)



3. 今回のTVF固化処理(21-1CP)の実績 主な不具合の対応(2/2)

- 今回のガラス固化処理(21-1CP)の実績を踏まえ、次回運転に向けて以下の対応を図る。

ガラス固化体除染装置(高圧水ポンプ)の停止

⇒高圧水ポンプ出口の水圧(約35MPa)を計測している圧力計に指示針の脈動を抑えるため圧力ダンパーを設置している。この圧力ダンパーの閉塞により、高圧水ポンプ出口の水圧が検出されず、高圧水ポンプが停止した。

圧力ダンパーの開度調整(閉塞解除)後は、同様の事象は発生していないが、次回運転前までに圧力計や配管の点検清掃を行い、圧力ダンパー閉塞のリスク低減を図る。

ガラス固化体蓋溶接の溶接機の停止

⇒溶接作業(電極交換、位置検出、テストアーク、仮付け溶接、温度測定、本溶接)のうち、Z軸に温度測定子を把持させて温度測定位置に移動中(X,Y方向に移動中)、Z軸の高さ制御が不安定になっていることを確認した。

Z軸を一定の高さに自動で補正するプログラムに修正した。その後、同様の停止事象は発生していないが、その他の溶接作業時(本溶接等)にもZ軸を使用することから、同様のZ軸を一定の高さに自動で補正するプログラムに修正する。

- 上記の事象以外についても、溶融炉の運転が継続できるように固化体取扱工程を中心に、設備機器の点検整備、予備品への交換、代替策の検討を進める。

➤ 運転再開に向けた対応

- ① 溶融炉内に残留したガラスを機械的に除去(残留ガラス除去)する。残留ガラス量は、溶融炉へのガラス原料の供給量・抜き出し量の収支から約36kgと想定しており、作業期間は6ヶ月程度を想定している。その後、流下ノズルと加熱コイルのクリアランス観察や熱上げ用のガラスカレットの炉内投入などの運転準備作業を行った後に運転を再開する。
- ② 今回の運転における主電極間補正抵抗の低下による溶融炉の停止は、予め想定していた事象であったものの想定よりも少ない本数で低下したことから、残留ガラス除去と併行して要因の絞り込みを行い、対策を検討し、次回の運転に反映する。また、溶接機などの不具合事象の対策を検討する。
- ③ ガラス固化処理計画については、今回の運転結果、前述の対策を踏まえ、キャンペーン毎の運転本数や3号溶融炉への更新時期の前倒し等の検討を行い、ガラス固化処理を着実に進めていく。
- ④ 3号溶融炉の製作については、工程どおり進捗し、耐火レンガ、電極、ケーシング等の加工に着手しており、R4年1月頃より築炉を開始する計画である。
また、結合装置の予備品については、2号炉用(予備品)及び3号炉用として共用可能な段階まで準備を進めており、メーカーにて、材料手配及び加工を実施中。

参考資料



模擬ガラスによる静置沈降による沈降挙動評価

- 試験条件
- ・溶融ガラスの流動 : なし
 - ・溶融ガラスの温度 : 1000°C、1100°C 一定
 - ・溶融ガラスの白金族元素濃度 : 1.1 wt%(TVF標準ガラス組成に合わせた)
 - ・所定の時間後の白金族粒子の懸濁した粒子層と上澄み層の界面から底部までの距離を測定

➤ 試験結果

条件	沈降速度	沈降状況
1000°C 保持	約 0.4 mm/h (~24h)	<p>12h保持 24h保持 48h保持 72h保持</p>
1100°C 保持	約 1.7 mm/h (~24h)	<p>2h保持 8h保持 12h保持 16h保持 20h保持 24h保持 240h保持 720h保持</p> <p>均一に分散 → 凝集沈降 → 界面沈降 → 圧密沈降</p> <p>SEM 観察 (2値化)</p> <p>白金族元素粒子が分散 白金族元素粒子が凝集 凝集が大きくなる</p> <p>3つの画像は同じスケール</p> <p>✓ 凝集性を有する界面沈降を示した。</p> <p>< 74 ></p>



模擬ガラスによる静置沈降による沈降挙動評価

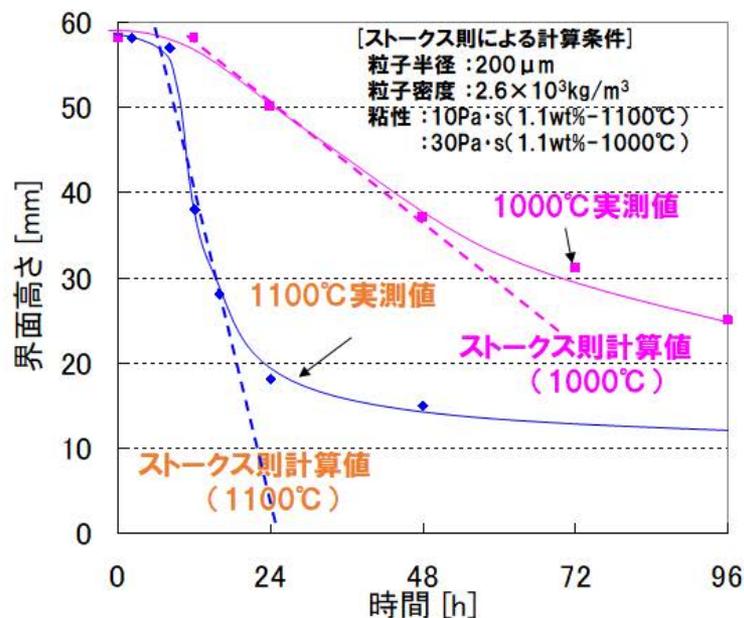
- 結論
- ✓ 沈降速度は1000℃(約0.4 mm/h)と1100℃(約1.7 mm/h)となり、低温の方が遅くなる(約1/4倍)。
 - ✓ 沈降が進むと圧密の影響により、沈降速度が遅くなる。
 - ✓ 圧密せずに沈降する領域では、ストークスの式に概ね近似できる。

ストークスの方程式(粘性流体中の粒子の沈降速度を表す式)

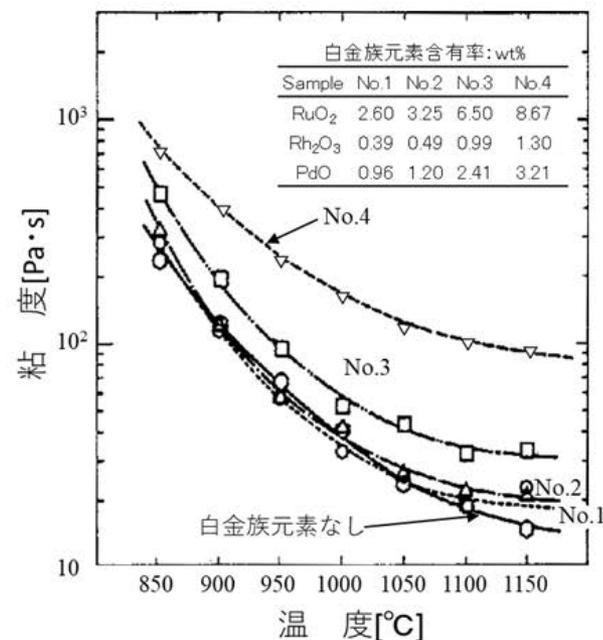
$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_n - \rho_m)}{\eta} \cdot g \cdot r^2$$

v : 終末沈降速度、 r : 粒子径、 ρ_n : 粒子密度、 ρ_m : ガラス密度、 η : 粘度

⇒ 熔融ガラス中の静止状態での沈降速度は、約1~2 mm/h程度(1000~1100℃)であると考える。



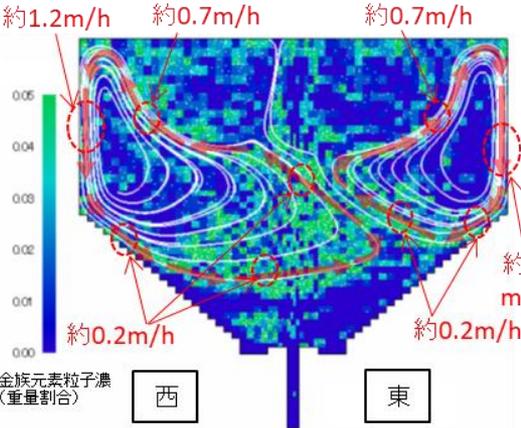
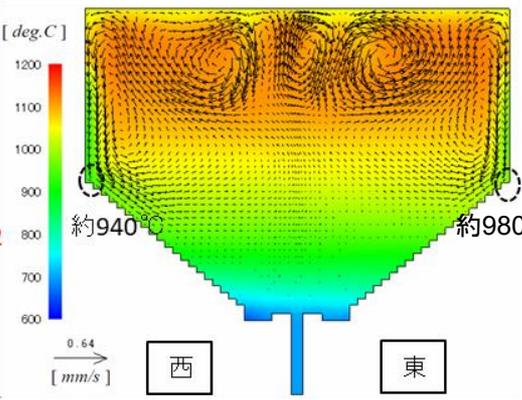
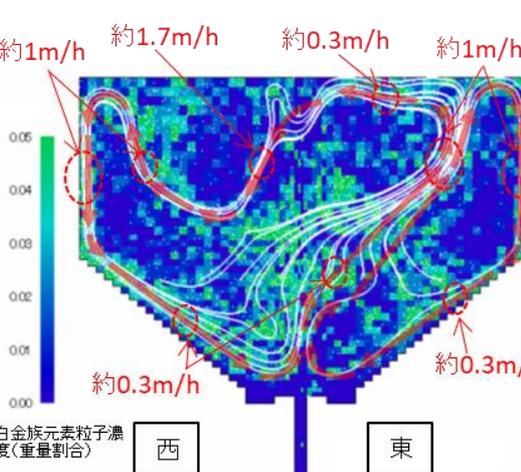
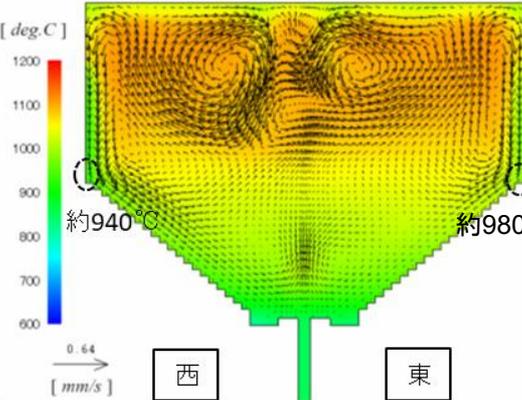
白金族濃度1.1wt%ガラス沈降曲線



白金族元素含有ガラスの粘度と温度の関係 < 75 >

ガラスの流動と白金族元素濃度に係る解析評価

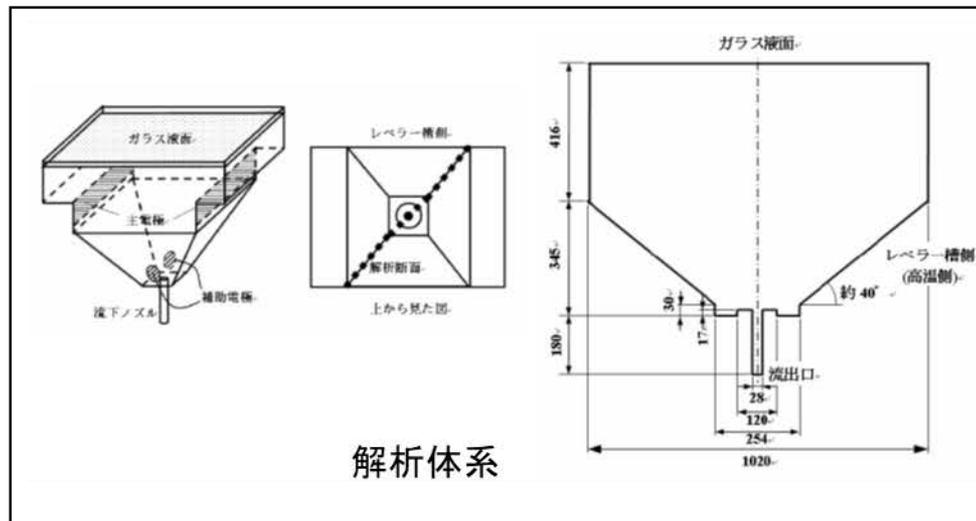
- 白金族元素粒子は、ガラスの流れに沿って分布している。
- 斜面近傍では、流れが遅くなり、白金族元素濃度が高くなる。

溶融炉運転モード	ガラスの流動等の特徴	ガラスの主要な流れと白金族元素粒子分布	流速及び温度分布
溶融モード(炉底低温運転)	<ul style="list-style-type: none"> • 白金族元素粒子は、主電極近傍に形成された渦の流れに沿って分布している。 • ガラスは、約0.2~1.2m/hの速度で対流している。 • 西側の方が東側よりも渦が大きい。 	 <p>白金族元素粒子濃度(重量割合)</p>	
流下前の炉底加熱モード	<ul style="list-style-type: none"> • 白金族元素粒子は、主電極近傍に形成された渦の流れに沿って分布している。 • 炉底部を加熱することで、渦は炉底部まで広がり、白金族元素粒子が炉底部まで運ばれる。 • ガラスは、約0.3~1.7m/hの速度で対流している。 • 斜面近傍では、流速が遅くなり、白金族元素粒子の濃度が高くなる。 • 西側の方が東側よりも渦が大きい。 	 <p>白金族元素粒子濃度(重量割合)</p>	



ガラスの流動と白金族元素濃度に係る解析評価

溶融炉運転モード	ガラスの流動等の特徴	ガラスの主要な流れと白金族元素粒子分布	流速及び温度分布
<p>【参考】 流下モード</p>	<ul style="list-style-type: none"> ガラスが抜き出される流れが支配的になり、炉底加熱時の大きな渦が打ち消される。 ガラスは、最大約14m/hの速度で流下ノズルに向けて流れる。 	<p>白金族元素粒子濃度(重量割合)</p>	





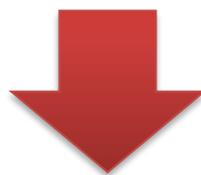
白金族元素の沈降・堆積挙動について

○ 溶融ガラス中の白金族元素の沈降速度

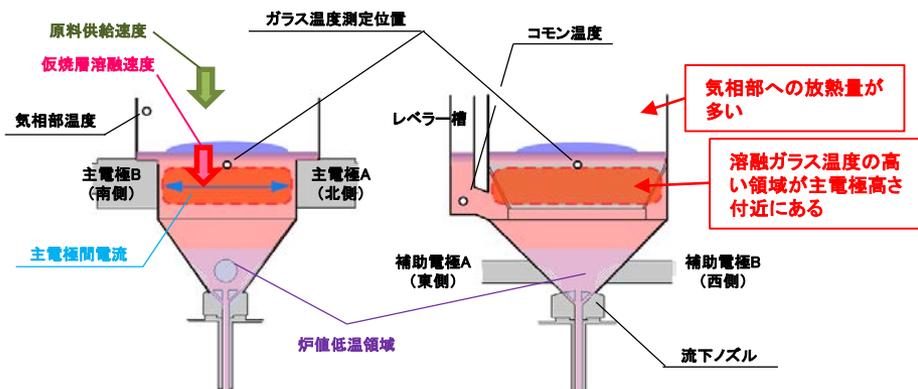
・溶融ガラス中の白金族元素の沈降速度 約 1~2 mm/h

○ 溶融炉内の溶融ガラス中の白金族元素の流動

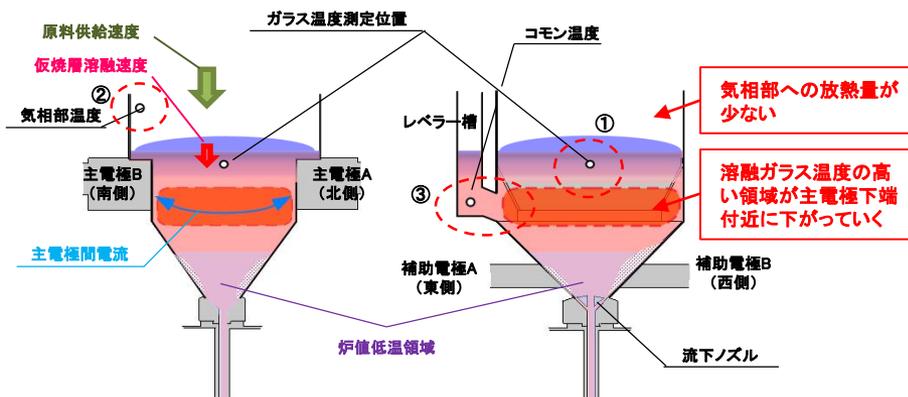
・溶融ガラス中の白金族元素の流動速度 約 0.2~1.7 m/h



白金族元素の沈降・堆積は、溶融ガラスの流動により運ばれて炉底に沈降し、堆積していくものと考える。



19-1CPの炉内状態
(原料供給速度*1(一定)に対して仮焼層の溶融速度が等しい)



21-1CPの炉内状態
(原料供給速度*1(一定)に対して仮焼層の溶融速度が小さい)

① ガラス温度(流下後の最低温度)

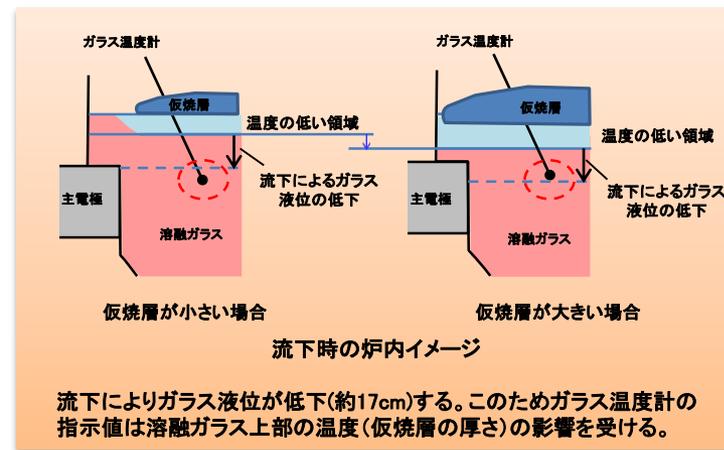
仮焼層が大きい(厚い)(原料供給速度に対して仮焼層の溶融速度が小さい)場合、熔融ガラス温度の高い領域が主電極下端側にあるため、流下により炉内ガラスレベルが下がると厚くなっている仮焼層の影響を受けガラス温度指示値が800℃を下回る(19-1CPに比べて50~100℃程度低い)。

② 気相部温度*2

原料供給速度と仮焼層の溶融速度のバランスが取れている場合、熔融ガラスから気相部への放熱量が安定しているため、気相部温度は一定の範囲内で推移する。原料供給速度に対して仮焼層の溶融速度が小さい場合は、仮焼層が大きくなり、気相部への放熱量が減少し、気相部温度が低下する。

③ コモン温度*3(レベラー槽内のコモンプローブの温度)

仮焼層が大きい(厚い)場合、熔融ガラス上部の温度が低下することから主電極間通電の領域が下がり、熔融ガラス温度の高い領域が主電極下端側に下がるため、コモン温度測定位置付近の温度が上昇する。



流下によりガラス液位が低下(約17cm)する。このためガラス温度計の指示値は熔融ガラス上部の温度(仮焼層の厚さ)の影響を受ける。

*1 原料供給速度：ガラス原料と廃液を合わせた供給速度

*2 気相部温度：気相部では供給した廃液の揮発成分の蒸発が行われる。気相部の温度は、熔融ガラス表面からの放熱や、流下により炉内ガラスレベルが下がることで、熔融ガラスと接触していた炉壁からの放熱により上昇し、原料供給に伴って徐々に低下していく温度変化を繰り返す。

*3 コモン温度：流下による炉内ガラス液位の低下に伴い、熔融ガラス温度の高い領域が下がり、コモン温度測定位置付近の温度が上昇する。ガラス液位の上昇に伴って徐々に温度は低下していく推移を繰り返す。