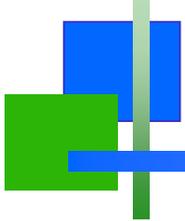


---

## 8. 原因究明

## 8. 原因究明

- 原因究明として、①「流下ノズル上端部にガラスが付着していた」状況に至ったこと及び②「流下停止が発生した」ことに対する要因分析を実施した
- ①「流下ノズル上端部にガラスが付着していた」状況に至ったことについては以下の要因が考えられ、これらに対して評価を実施。
  - a. 流下ノズル出口がガラス等で塞がれた状態になり、流下ノズルから流れ出たガラスが上昇した
  - b. 流下ノズル上端部周辺のクラック等からガラスが流出した
  - c. ガラス中の揮発性物質が揮発し付着した
- ①-a. 「流下ノズル出口がガラス等で塞がれた状態になり流下ノズルから流れ出たガラスが上昇した」が要因のひとつとして考えられる。（48～53頁）
- ①-b. 「流下ノズル上端部周辺のクラック等からガラスが流出した」ことについては、溶融炉の運転時間の実績と流下ノズルの寿命の関係との評価により、要因としての可能性は極めて低い（54～60頁）が、流下ノズル健全性及び流下性確認試験において確認。
- ①-c. 「ガラス中の揮発性物質が揮発し付着した」については、化学試験終了時に流下ノズル上端部に付着物がないことが確認されていることから、要因となる可能性はない。



## 8. 原因究明

---

### 「流下ノズルと加熱コイル間におけるガラスの上昇」 に係る評価

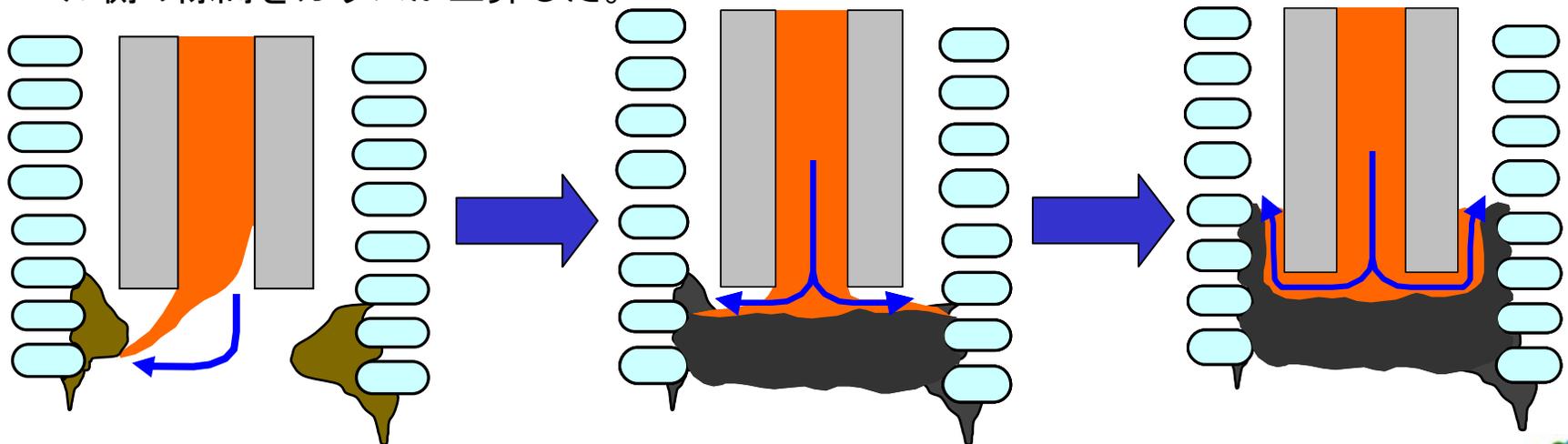
※ 「流下ノズル出口がガラス等で塞がれた状態」に係る評価は、別途実施

## 8. 原因究明

### 【流下ノズルと加熱コイル間におけるガラスの上昇に関する推定】

流下ガラスが流下ノズルと高周波加熱コイル間を上昇し、流下ノズル上端まで達したことについて推定した。

- ・全段加熱開始後、流下ガラスが高周波加熱コイルの付着物に接触し、そこを起点として流下ガラスが蓄積し、流下ノズル下端部が閉塞した。
- ・ガラスにはヘッド圧が作用するため、流下ノズル近傍の温度が高くガラスが流動できる部分が徐々に上昇して流下ノズル上端まで達した。
- ・流下ノズルは高周波加熱により高温であるが、高周波加熱コイルは冷却水で冷却されていることから温度が低いため、高周波加熱コイル側では冷却されて固化し、コイル間の隙間から外側へガラスが漏えいすることはなく、それを壁にした状態で流下ノズル側の隙間をガラスが上昇した。



流下ガラスの上昇イメージ

## 8. 原因究明

### 【流下ノズルと加熱コイル間におけるガラスの上昇に係る評価】

ガラスの上昇に関する推定の技術的成立性を検討するため、ガラスがコイル上端までに達する時間のオーダーを把握する目的で概略評価を行った。評価式は、溶融炉のガラスのヘッド圧を受けて、流下ノズル外面から一定の幅で一定温度のガラスが上昇するものとして、同心二重円管内充満流の圧力損失を計算する以下の式※を使用した。

※管路・ダクトの流体抵抗（日本機械学会技術資料）

$$Q = \frac{\pi}{8\mu} P \left\{ a^4 - b^4 - \frac{(a^2 - b^2)^2}{\log a/b} \right\}$$

ここで、

Q : 流量 [m<sup>3</sup>/s]

P : 圧力勾配 [Pa/m] = (h - L) / L × ρ × g

h : ガラスの液位 [m]

L : 上昇した液位 [m]

ρ : ガラスの密度 [kg/m<sup>3</sup>]

μ : 粘度 [Pa·s]

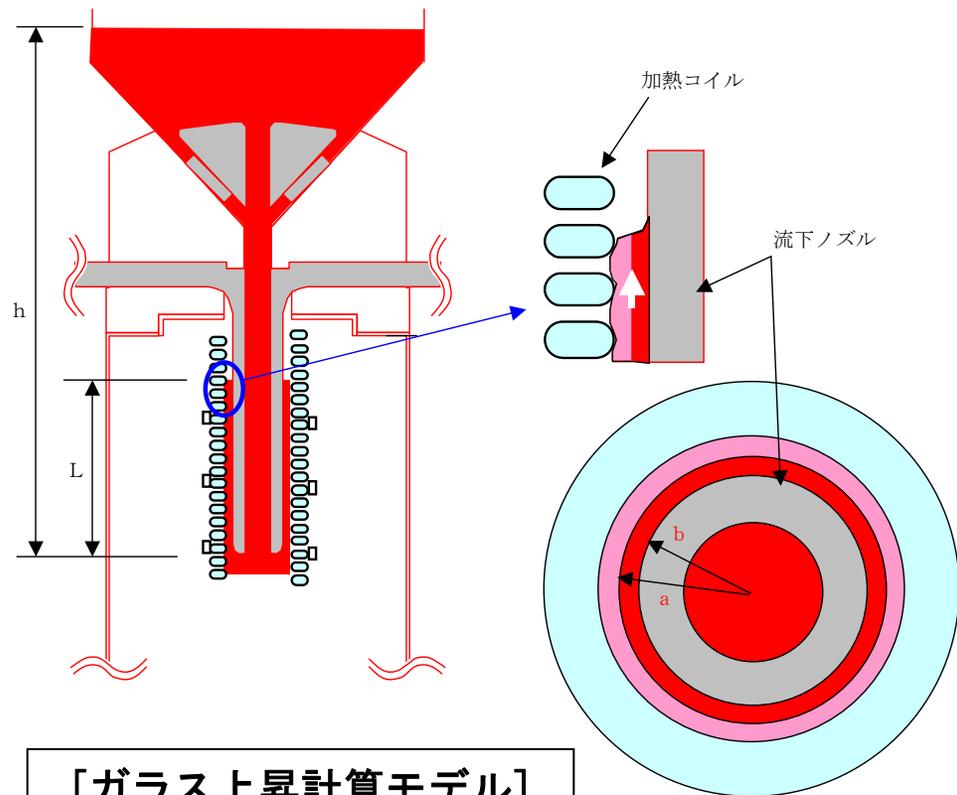
a : 外径 (流下ノズル外周部ガラスの外径) [m]

b : 内径 (流下ノズル外径) [m]

g : 重力加速度

ガラスの上昇速度は、流下ノズル外周部ガラスの面積  $A [m^2] = \pi \times (a^2 - b^2)$  で流量を割って求められる。

上昇速度  $F [m/s] = Q / A$

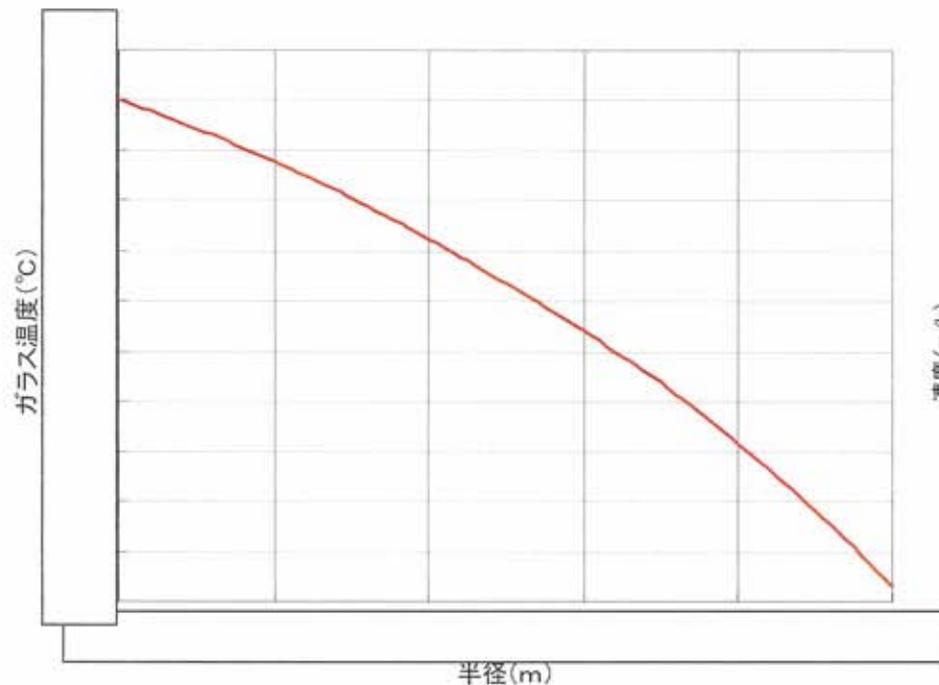


【ガラス上昇計算モデル】

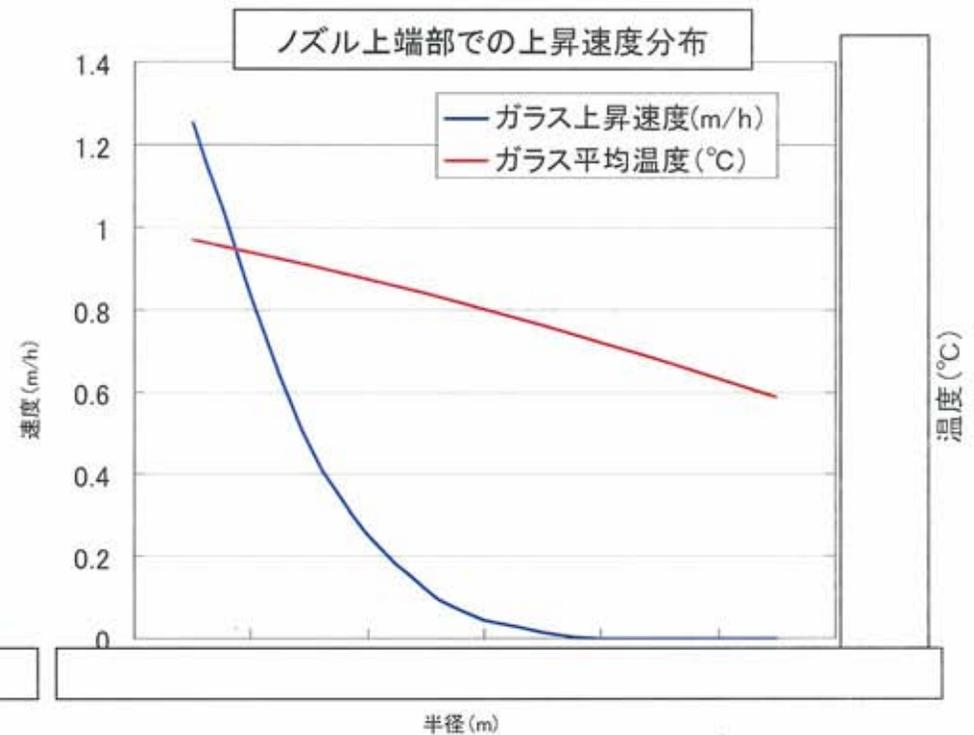
## 8. 原因究明

### 【流下ノズルと加熱コイル間におけるガラスの上昇に係る評価】

- ・ 流下ノズルを□℃、高周波加熱コイルを□℃と仮定し、流下ノズルと高周波加熱コイルの間にガラスが充満していると仮定した場合の温度分布を評価した（左下図参照）。
- ・ さらに、上記温度分布に基づき、流下ノズル下端からの距離ごとにガラス上昇速度を算出した（右下図参照）。□℃以下は流動しないものとした。



流下ノズルーコイル間の温度分布

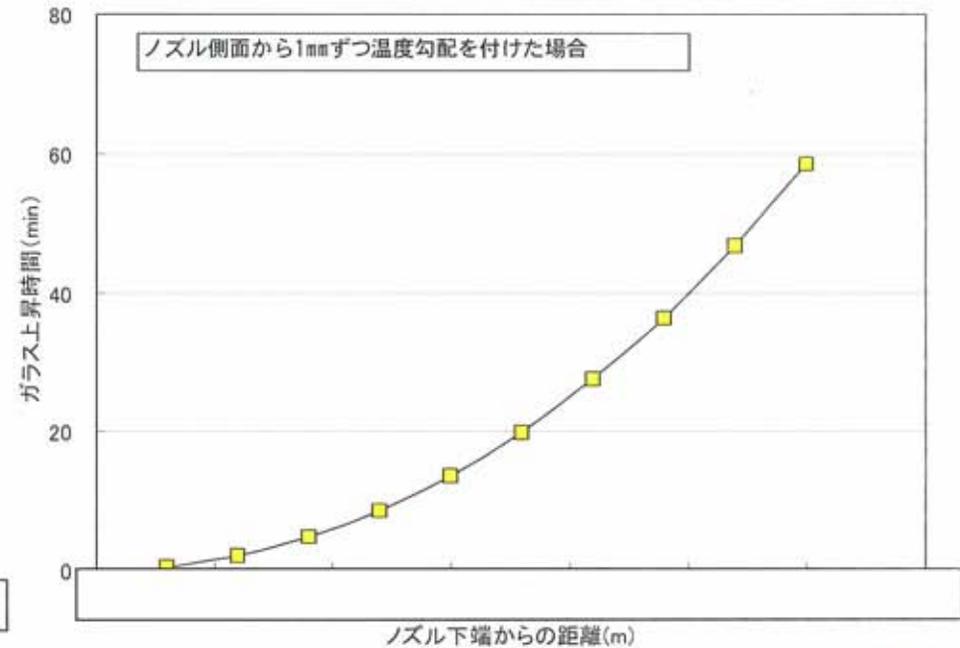
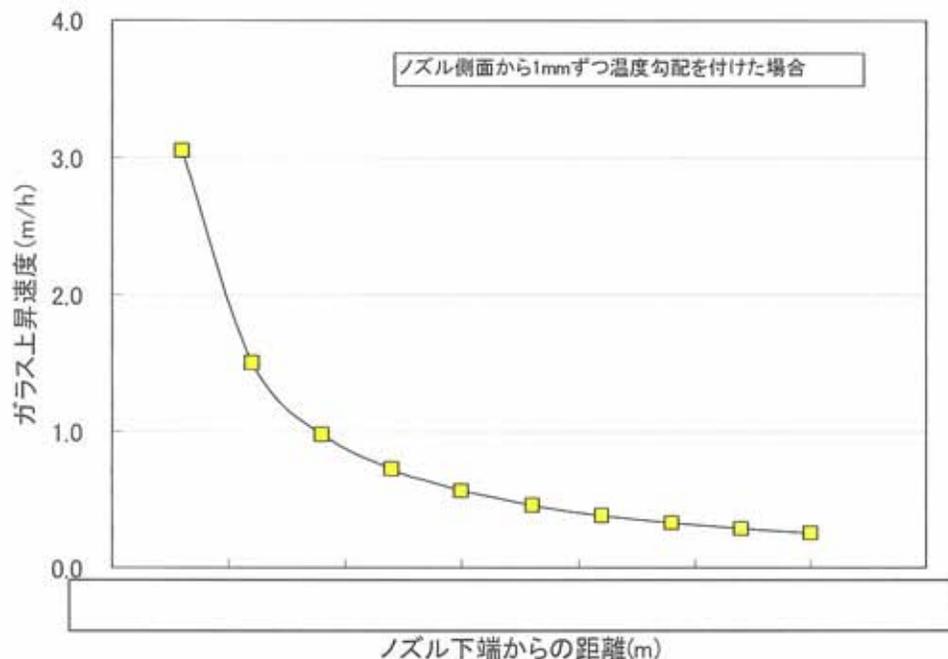
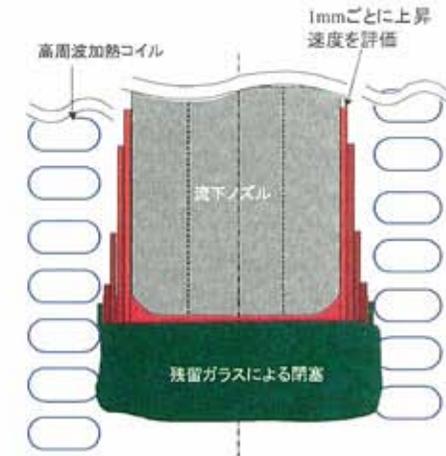


流下ノズルーコイル間のガラス上昇速度

## 8. 原因究明

### 【流下ノズルと加熱コイル間におけるガラスの上昇に係る評価】

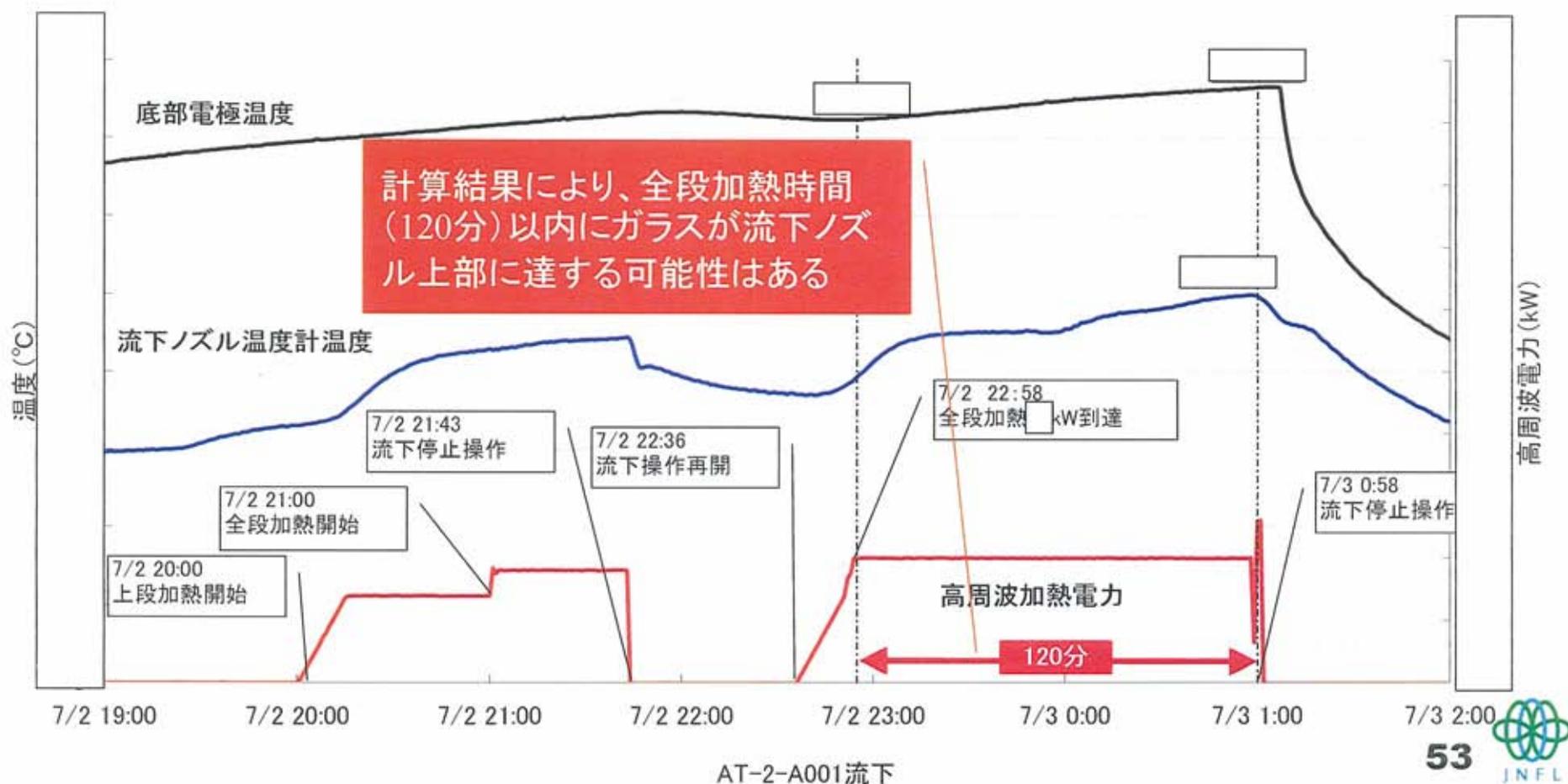
- 流下ノズル下端からの距離ごとの上昇速度分布に基づき、各距離ごとの平均上昇速度を算定する（左下図参照）。
- 上昇するガラスの膜は実際にはコイル側に流れて固まるということを繰り返すので、実際の上昇速度は円環の断面積比に応じて遅くなると考えるのが妥当である。  
これを考慮した場合の流下ノズル上端までの到達時間は下図に示すようになり、**約60分で流下ノズル上端まで上昇する計算結果**となる。

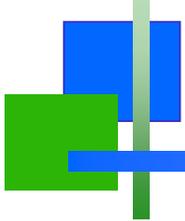


## 8. 原因究明

### 【流下ノズルと加熱コイル間におけるガラスの上昇に係る評価】

計算結果より、全段加熱時間（120分）の範囲で流下ノズル上端まで上昇したことは十分に可能性があると考える。





## 8. 原因究明

---

「流下ノズル上端部周辺のクラック等からガラスが流出した」  
ことに対する評価

## 8. 原因究明

「流下ノズル上端部周辺のクラック等からガラスが流出した」ことに対する評価

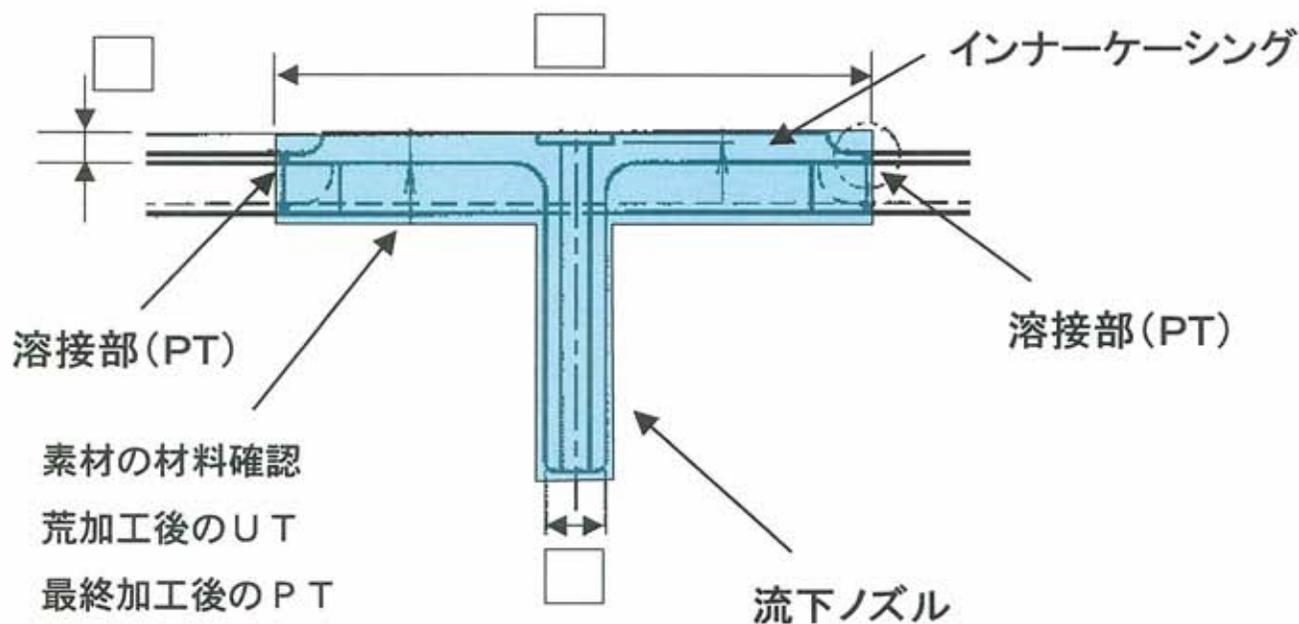
### ○素材段階における検査

流下ノズルとインナーケーシングは、一体鍛造材からの削り出しであり、素材そのものについて材料確認及び荒加工後（図の青色部分）の超音波探傷試験（UT）を実施して、材料に問題がないことを確認している。

### ○最終加工後の検査

最終加工後について、浸透探傷試験（PT）及び寸法・外観検査により表面に有意な欠陥がないことを確認している。

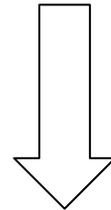
⇒構造的にクラック等が発生する可能性は低い



## 8. 原因究明

### 高温クリープ及び疲労による 流下ノズルの寿命評価

- ① 運転中の流下ノズルの温度履歴を入力条件とした熱伝導解析を実施し、流下ノズル熱弾塑性クリープ解析用温度入力データ(温度分布)を作成する。
- ② 上記温度分布を用いた熱弾塑性クリープ解析を実施する。
- ③ 得られた応力・ひずみの時間変化(解析結果)から流下ノズルのクリープ疲労寿命予測を実施する。



評価の結果、流下可能回数は2800回(ガラス溶融炉の寿命期間中の流下本数は約2500本)となり、現在までの流下回数である200回程度  
⇒流下可能回数に対して流下実績は少なく十分に余裕があることから、疲労により流下ノズルにクラック等が発生した可能性は低い。

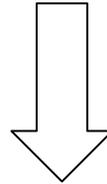
## 8. 原因究明

「流下ノズル上端部周辺のクラック等からガラスが流出した」ことに対する評価

### 流下ノズルの耐食性

日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）では、ガラス溶融炉材料の耐食性評価において、流下ノズル材料の動的侵食試験を実施している。動的侵食試験は、流下ノズル内を通過するガラスによる流下ノズル材料の侵食速度を評価するものである。

正木敏夫ら；”ガラス溶融炉材料の耐食性評価”、（社）日本原子力学会「1991年春の年会」K44



○JAEAにおける動的侵食試験の結果より、侵食速度は最大 $3.0 \times 10^{-4}$  mm/hであることから、侵食量は約0.24mm。

（条件）

- ・ ガラス溶融炉Aでのガラス固化体製造実績：200本程度
- ・ 流下時間：4時間（仮定）
- ・ 流下時間：800時間

○流下ノズルは肉厚  mmである

⇒侵食によってクラック等が発生し、ガラスが流出したとは考えられない。

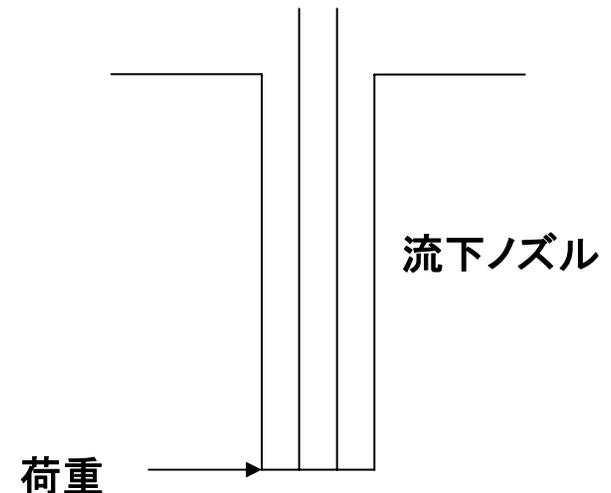
## 8. 原因究明

### 機械的荷重による流下ノズルの破壊応力（横方向）評価

流下ノズル下端部への機械的荷重による流下ノズルの破壊応力を評価した結果、1000℃において流下ノズルの最下端部において657kgfの水平荷重をかけたときに、流下ノズルが損傷すると評価される。

しかしながら、建設及び試験運転中に、このような大きな荷重がかかったとは考え難い。（流下ノズルは、結合装置に内蔵されており、保護されているため。）

⇒機械的荷重により流下ノズルにクラック等が発生した可能性は低い



## 8. 原因究明

「流下ノズル上端部周辺のクラック等からガラスが流出した」ことに対する評価

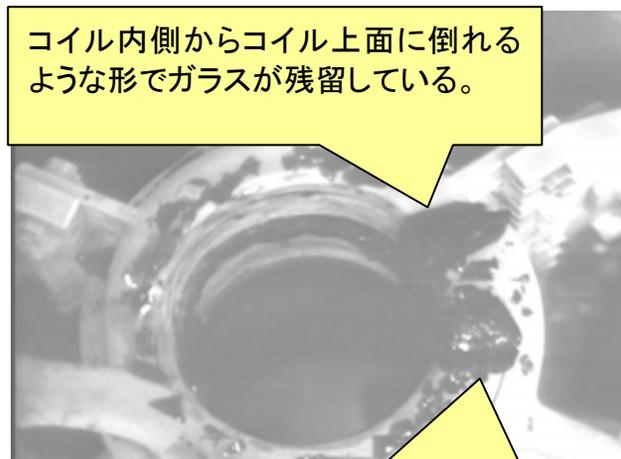
- クラック等によってガラスが流出した場合、局所的に流出し、残留すると考えられる。
- 一方、結合装置内の観察結果からは、流下ノズル上端部の観察される範囲全てと高周波加熱コイルの上部のほぼ全周にガラスが残留していた。

⇒結合装置の観察結果からは、クラック等が発生した可能性は低い

流下ノズル上部の観察される範囲にガラスが付着している。



コイル内側からコイル上面に倒れるような形でガラスが残留している。

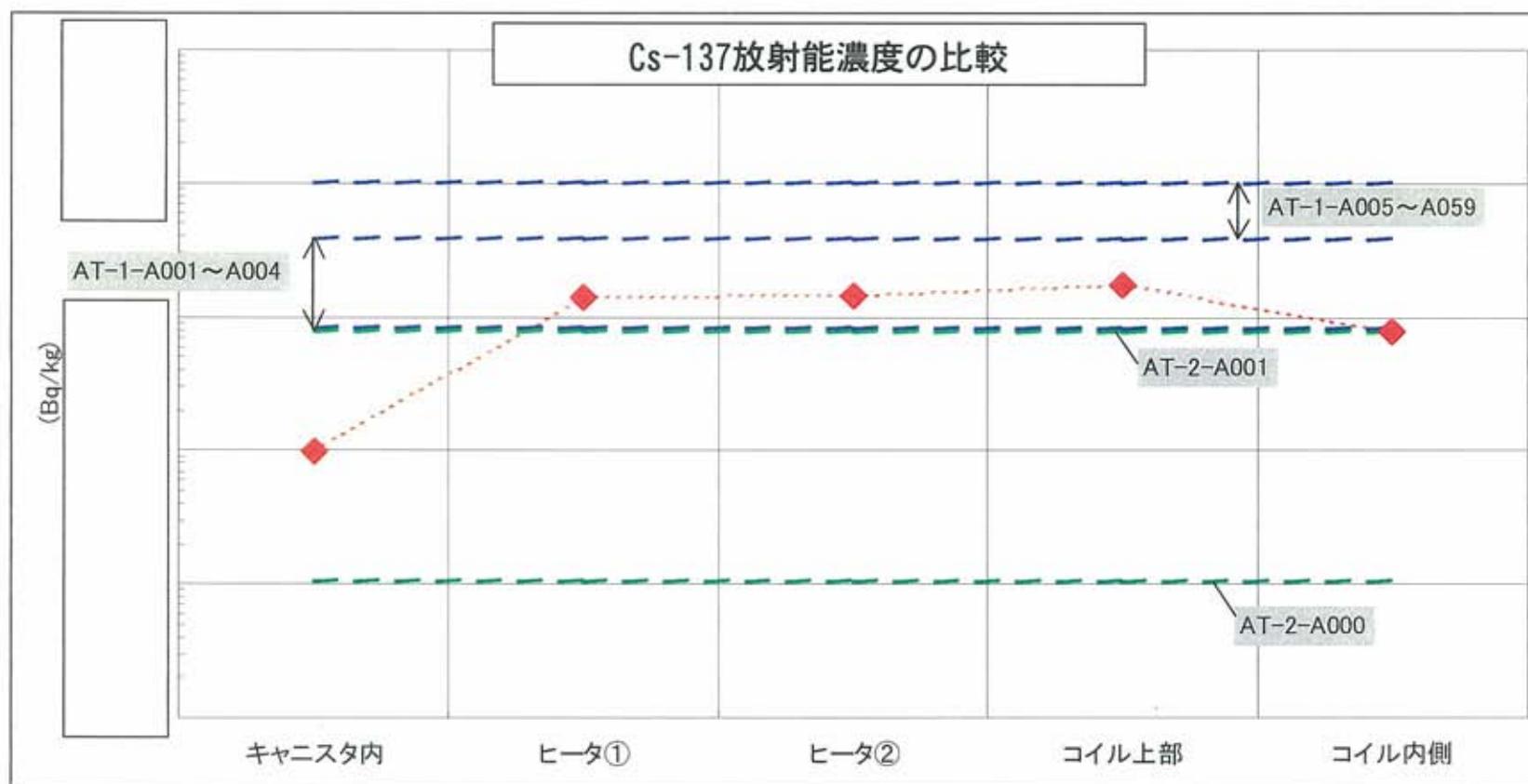


結合装置取外し時に、ガラスの一部がコイル上面に残留した。

## 8. 原因究明

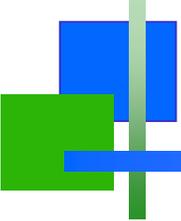
### 【第4ステップでのCs-137放射能濃度との比較】

第4ステップの5バッチ（AT-1-A005）以降のCs-137放射能計算値と比較し今回の分析結果はいずれも低い値を示している。



⇒流下ノズルと高周波加熱コイルの間等に付着していたガラス等が第4ステップにおける流下ガラスである可能性は極めて低い。→第4ステップの時点で流下ノズルにクラック等が発生していた可能性は極めて低い

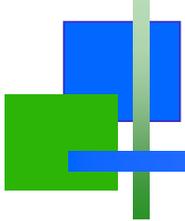
→仮に、クラック等から流出したとすると今回の運転に限られる。



## 8. 原因究明

---

- ②「流下停止が発生した」ことについては、結合装置内部及び流下ノズル出口の点検結果から、「高周波加熱コイルと流下ノズルとの間にガラスが流下ノズル出口を塞ぐように付着・堆積した」を起点として要因分析を実施した
- 「高周波加熱コイルと流下ノズルとの間にガラスが流下ノズル出口を塞ぐように付着・堆積した」については以下の要因が考えられ、これらに対し評価を実施。
  - a. 流下が真直ぐではなかった
  - b. 結合装置内流路に障害物があった
  - c. 流下ノズル上端部周辺のクラック等からガラスが流出した



## 8. 原因究明

- ②-a. 「流下が真直ぐではなかった」については、②-a-i. 「流下ガラス温度が低い」（63～66頁）ことと、②-a-ii. 「異物等による流下ノズル内の一部閉塞」が要因として考えらる。
  - ②-a-i. 「流下ガラス温度が低い」については「高周波加熱コイルへのふく射放熱量の増加」（68～70頁）及び「溶融炉へのリークエア量の増加による放熱量の増加」（71、72頁）による放熱量の増加が要因として考えられる。
  - ②-a-ii. 「異物等による流下ノズル内の一部閉塞」については、溶融炉内の残留ガラスの除去を実施した後に洗浄運転を実施していることから、要因としての可能性は極めて低いが、流下性確認試験において確認。
  
- ②-b. 「結合装置内流路に障害物があった」については、高周波加熱コイル内側等にガラス等の付着物が確認されていることから、流下ガラスが偏流した場合にはガラスが付着する要因として考えられる。（67頁）
  
- ②-c. 「流下ノズル上端部周辺クラック等からガラスが流出した」については、溶融炉の運転時間の実績と流下ノズルの寿命との関係の評価により、要因としての可能性は極めて低いが、流下性確認試験において確認。

## 8. 原因究明

### 数値流体解析 (CFD) による流下ガラスの挙動 (偏流現象) の評価

#### ○手法概要

- ・VOF (Volume of Fluid) 法による溶融ガラスと周囲空気間の界面追跡
- ・平面二次元定常計算
- ・FLUENT6.3

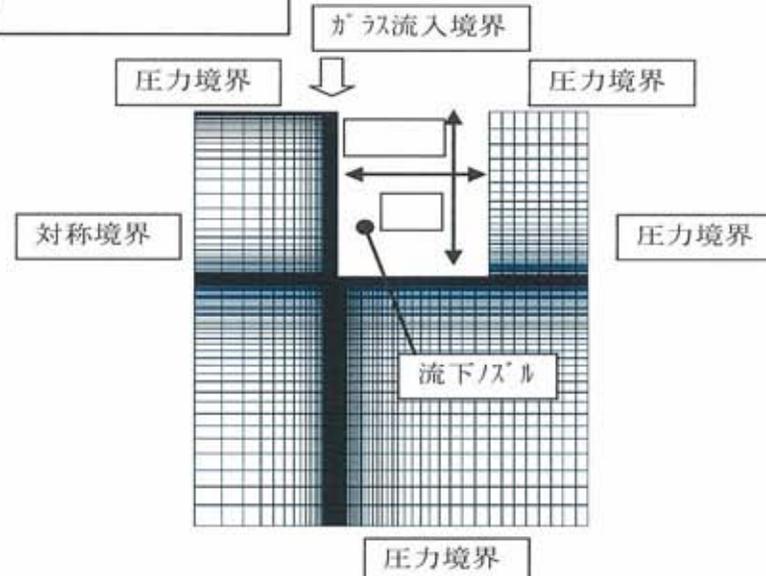
#### ○解析等に使用した溶融ガラス物性

物性	単位	ガラス温度900℃	ガラス温度1200℃
密度	kg/m <sup>3</sup>		
粘性係数	Pa·s		
表面張力 <sup>[1]</sup>	N/m		0.3
接触角 <sup>[2]</sup>	deg		70

[1] Guerro, H. N., et al., Computer Modeling of a Glass Stream Departing from a Pour Spout Knife Edge, *Proc. of the 3<sup>rd</sup> ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM99-7778*, (1999).

[2] Pech, J., et al., Wetting, interfacial interactions and sticking in glass/steel systems, *Materials Science and Engineering A* 384, (2004).

- #### ○実機流下ノズルの形状を反映した解析メッシュを作成し、溶融ガラスの物性値を用いて溶融ガラスの流下挙動の計算を実施した。計算パラメータは流量、動粘度 (ガラス温度) および周囲空気の流れの有無とした。



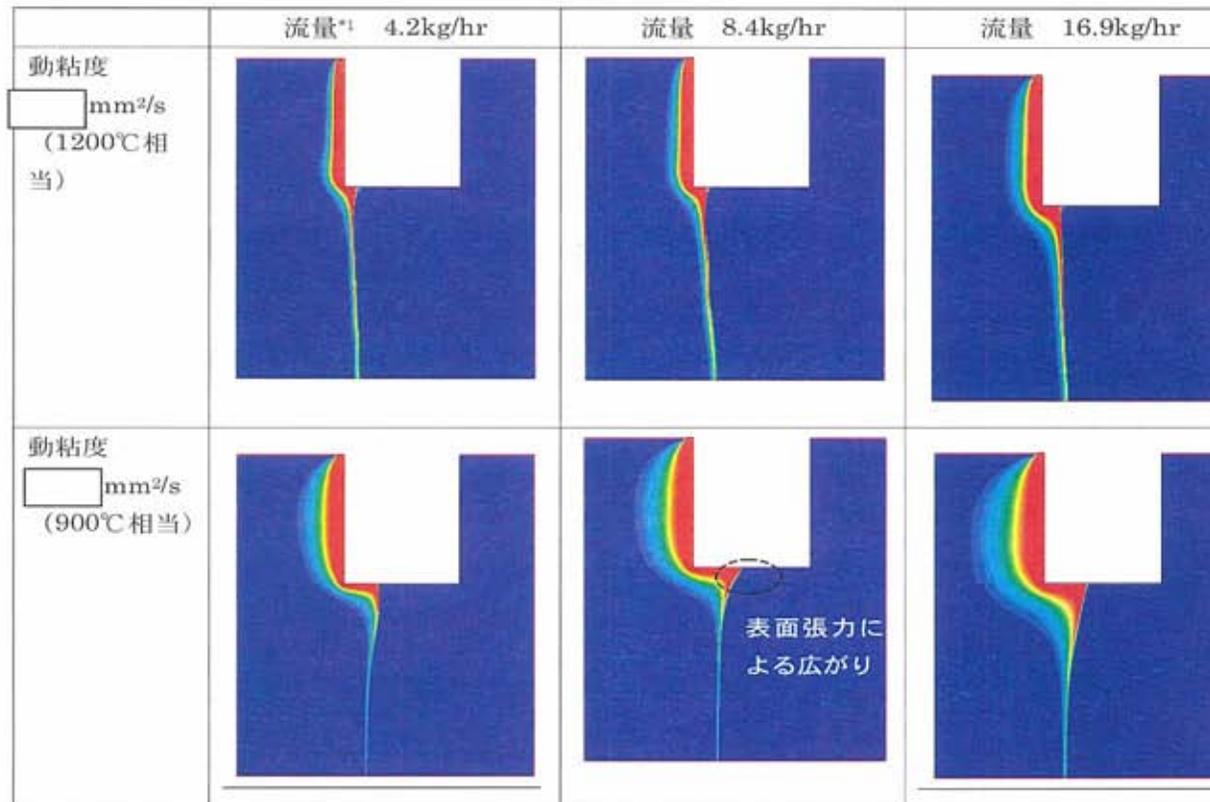
ガラス溶融流下ノズルの解析メッシュ

## 8. 原因究明

### 数値流体解析 (CFD) による流下ガラスの挙動 (偏流現象) の評価結果

○解析結果を下図に示す。

- ・動粘度が小さい (ガラス温度が高い) 場合、動粘度が大きい (ガラス温度が低い) 場合に比べて、壁面上を流下するガラスの流速が速く薄い液膜が形成され、慣性力が大きいため、壁面下端のエッジ部分近くで壁から離脱して自由流下液膜となる。
- ・一方動粘度が大きい場合、壁面下端で液膜はすぐに離脱せず、下端に沿って表面張力により広がっていく傾向がみられる。

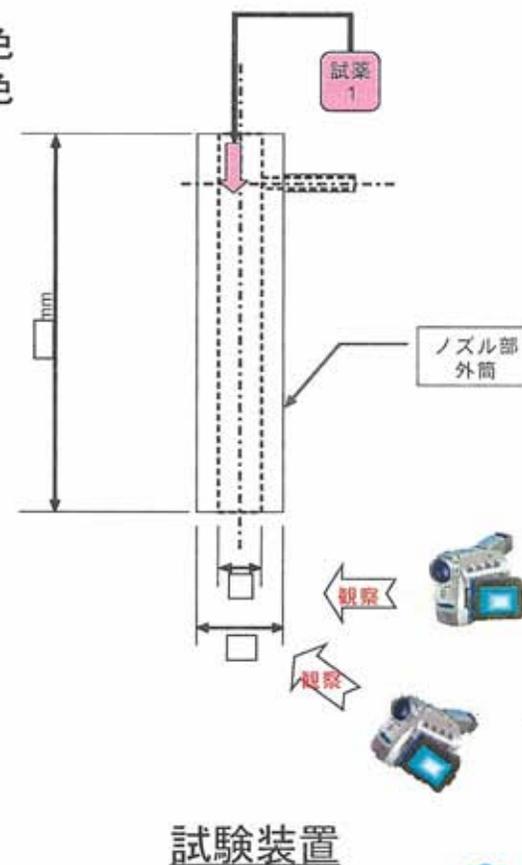
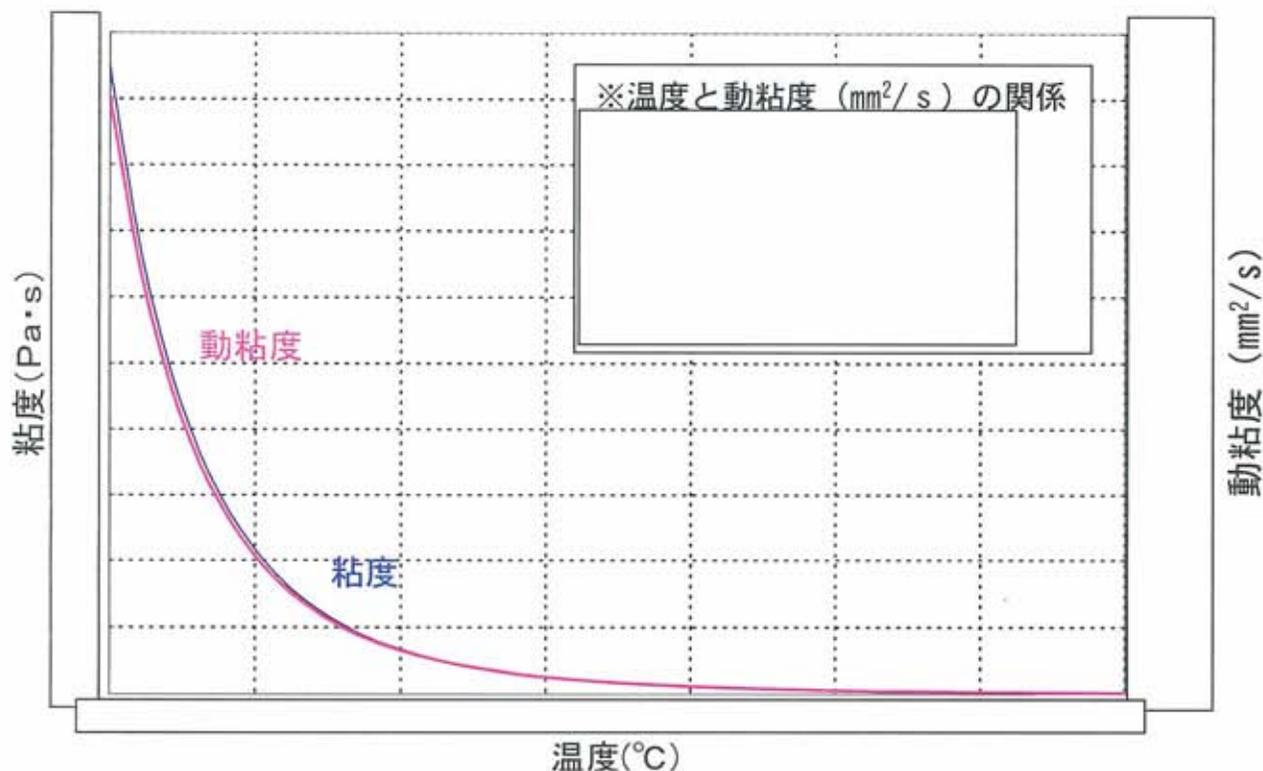


## 8. 原因究明

### 流下ガラス不安定現象に関する模擬粘性流体による試験

- 流下ガラスの不安定現象について、模擬粘性流体を用いて流下ノズルからのガラス流下状態を観察し、偏流等現象への粘度等関係因子の影響について調査した。
- 次の3試料について、油溶性染料(0.02wt%)を添加し、約12時間放置養生を行い自然脱泡による調製を行った。
  - ①標準流下模擬ガラスA：動粘性係数 約37,000mm<sup>2</sup>/s (at25°C)、赤色
  - ②高粘性模擬流体 B1：動粘性係数 300,000 mm<sup>2</sup>/s (at25°C)、青色
  - ③高粘性模擬流体 B2：動粘性係数 500,000 mm<sup>2</sup>/s (at25°C)、緑色

標準ガラスの温度と粘度 (Pa·s)、動粘度 (mm<sup>2</sup>/s) の関係を以下に示す。



## 8. 原因究明

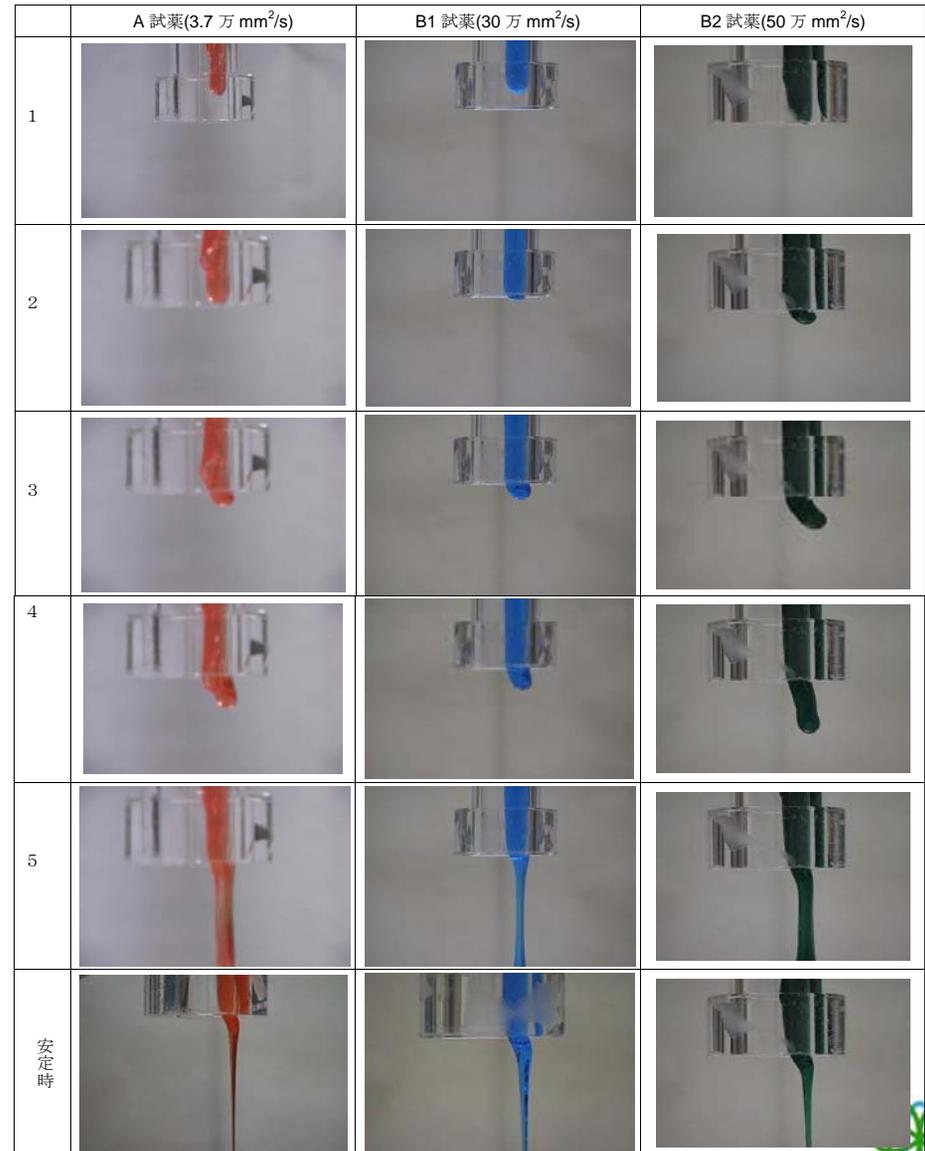
### 流下ガラス不安定現象に関する模擬粘性流体による試験結果

①全ての試料において、ノズル下端エッジ部でティーポット現象によるノズル外側に向かう回り込みが見られた。

②A、B1、B2と粘度が大きくなるに従い下端部の回り込みの程度が大きくなった。  
試料B2では、最大約10mm程度の回り込みが観察された。

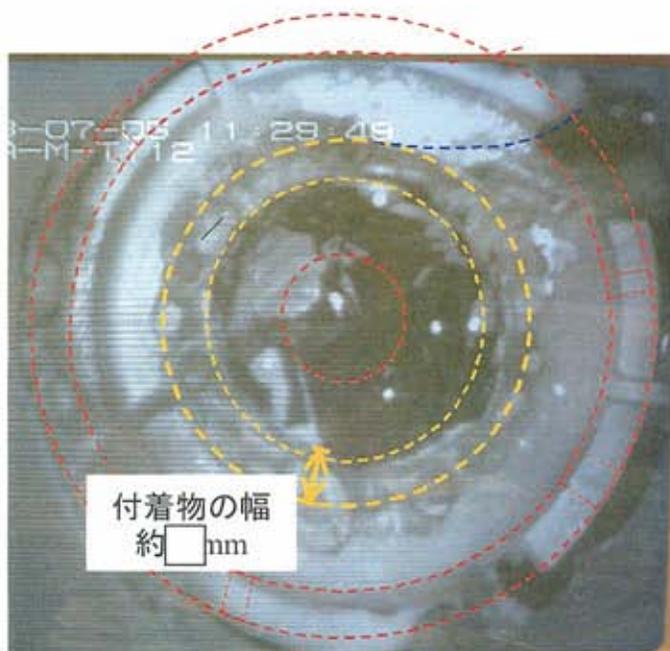
③全ての試料において、下端部のエッジで回り込みが生じるが重力による垂流下に移ると、エッジ部から外側に若干回り込んだ状態（2～3mm程度）で安定した流下となる。この時点での回り込みの程度には顕著な差はなかった。

但し、本試験は、粘度一定の模擬粘性流体を用いており、実際の流下ガラスでは冷却による粘性増加も影響することから、更り回り込むことが考えられる。

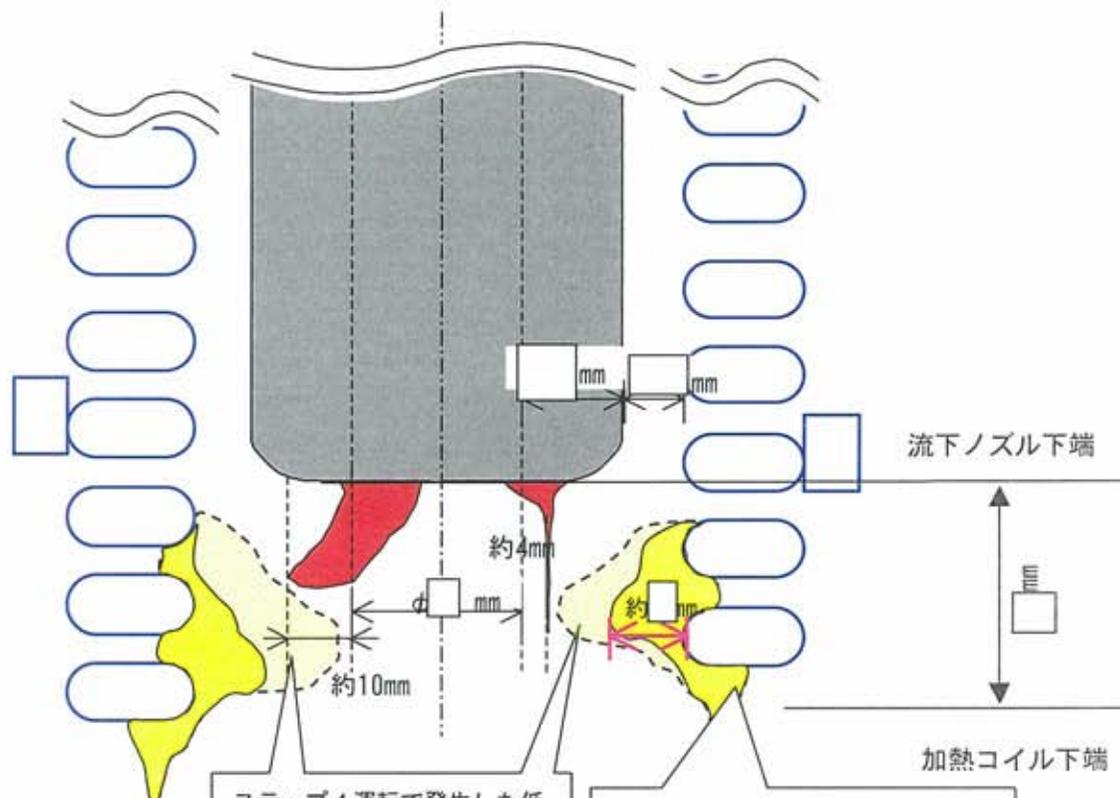


## 8. 原因究明

### 流下ガラスの高周波加熱コイル下端付着物に接触・付着する可能性



流下ノズルおよび高周波加熱コイル(付着物あり)  
(2008/7/6撮影)



ステップ4運転で発生した低粘性流体の付着成長状態の推定。(今回運転開始前状態の確認映像はない。)

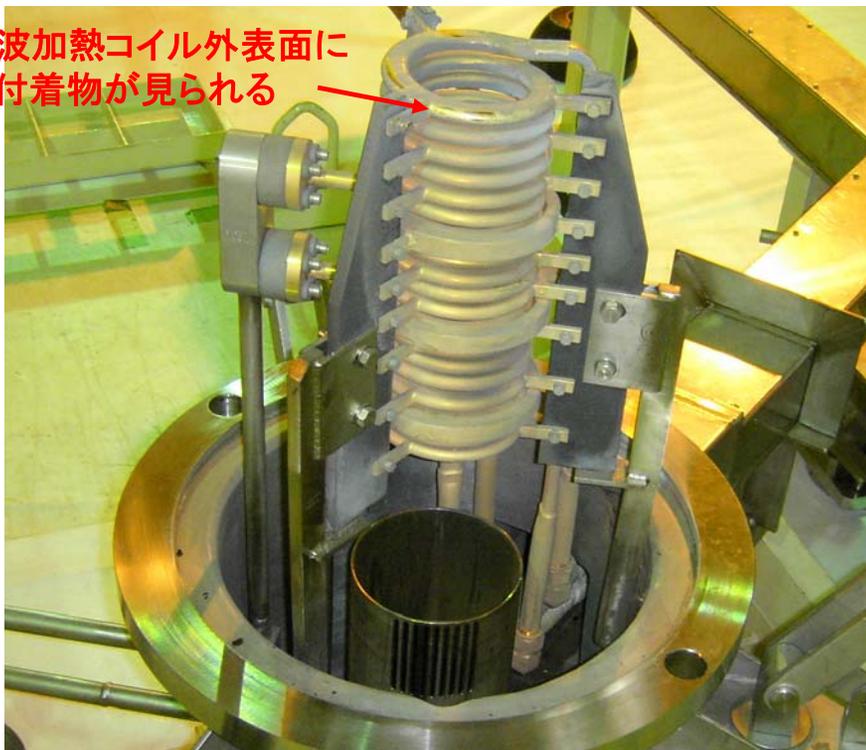
映像(2008/7/6)から付着物が加熱コイル内側にせり出している状態の推定。ガラス流下と流下ノズル加熱試験で付着物は流下開始前よりも減少した状態。

結合装置下方からの映像および数値流体解析、模擬粘性流体試験による結果を踏まえて評価すると、流下ノズル温度が低い状態での流下することにより流下ガラスの粘性が高く鉛直に流れ難くなり、付着物(第4ステップの運転で発生した低粘性流体が起源)に接触した可能性は十分考えられる。→接触した部分を起点として流下ノズル出口に向けて徐々に流下ガラスが付着しノズル出口を塞ぐ堆積となったと考えられる。

## 8. 原因究明

「流下ガラス温度が低い」ことに対する要因  
→高周波加熱コイルへのふく射放熱量の増加

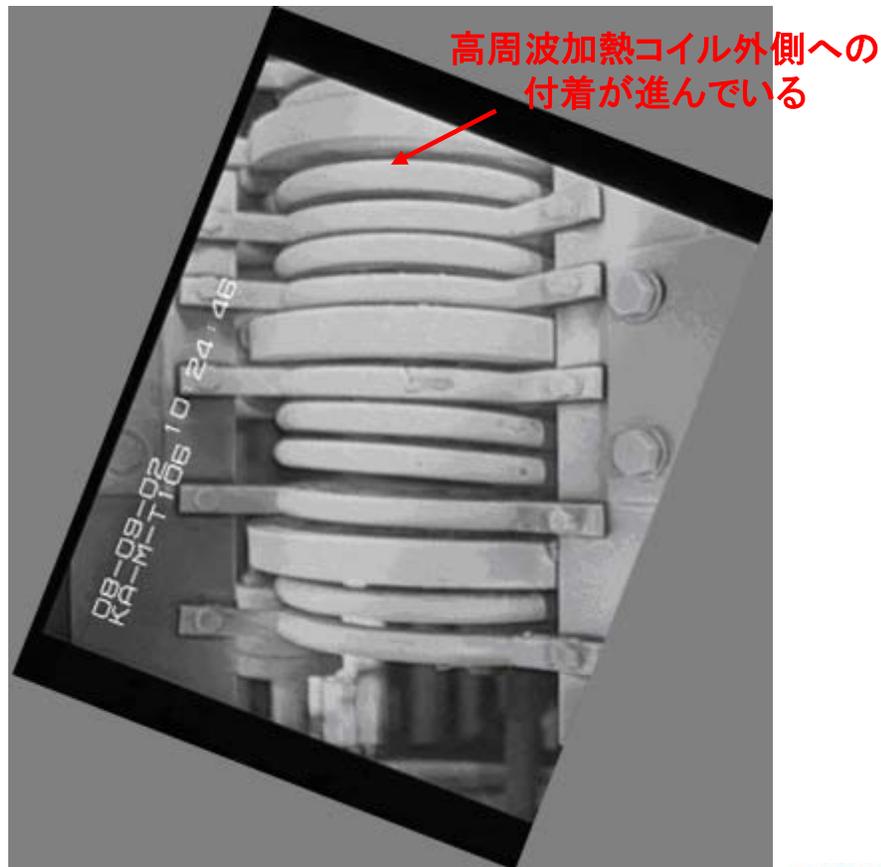
高周波加熱コイル外表面に  
付着物が見られる



【化学試験終了後】

高周波加熱コイルへのガラス等の  
付着によるふく射放熱量の増加が、  
流下ノズル温度の低下に影響する  
ことを解析により確認した。

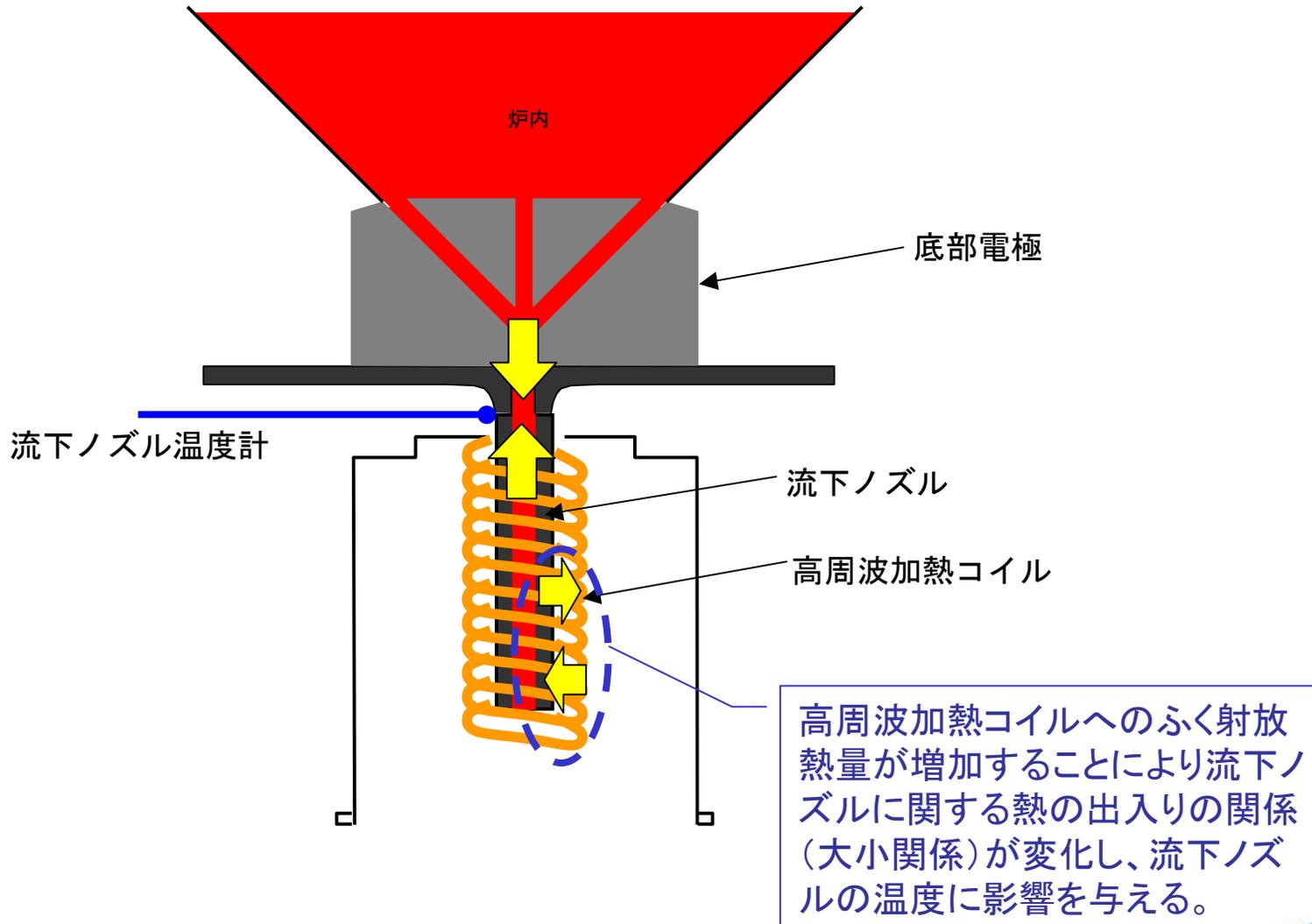
【今回取外し後】



高周波加熱コイル外側への  
付着が進んでいる

## 8. 原因究明

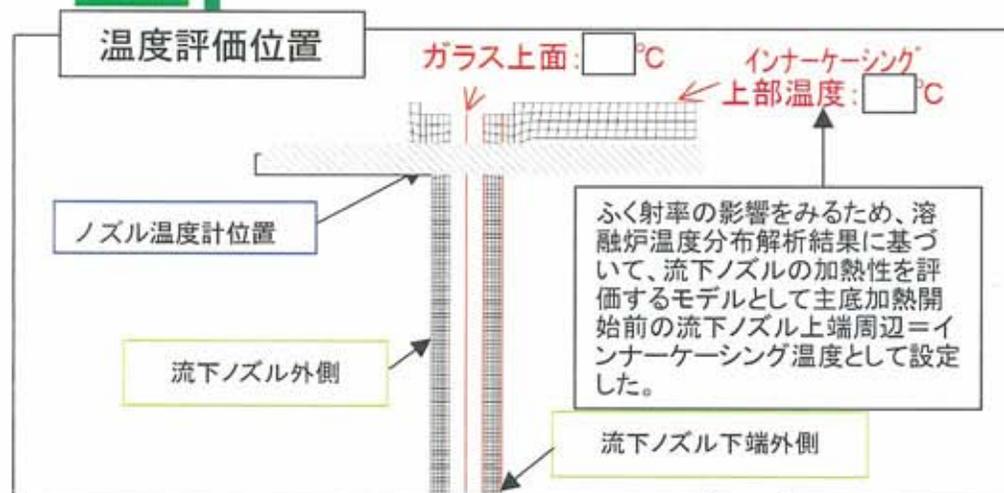
「流下ガラス温度が低い」ことに対する要因  
→高周波加熱コイルへのふく射放射熱量の増加



流下ノズルに関する熱の出入りの関係

## 8. 原因究明

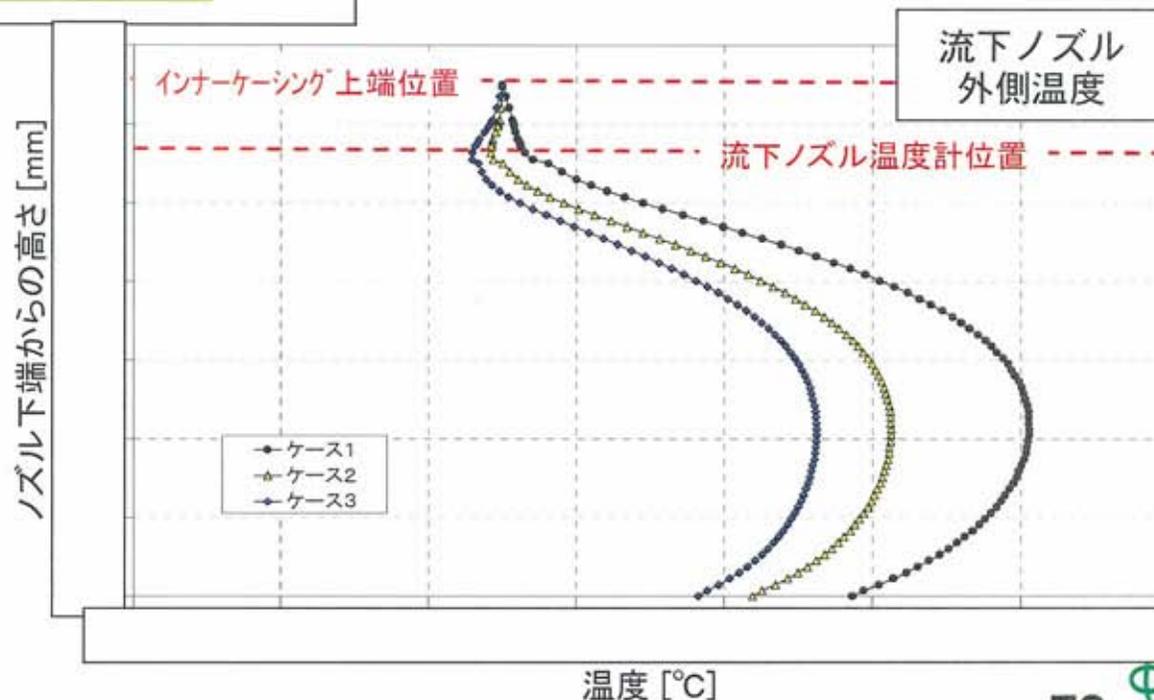
「流下ガラス温度が低い」ことに対する要因  
→高周波加熱コイルへのふく射放熱量の増加



実効加熱電力 :  kW  
 ノズル表面ふく射率:   
 結合装置排気流量 :  Nm<sup>3</sup>/h  
 コイル温度 :  °C  
 セル温度 :  °C

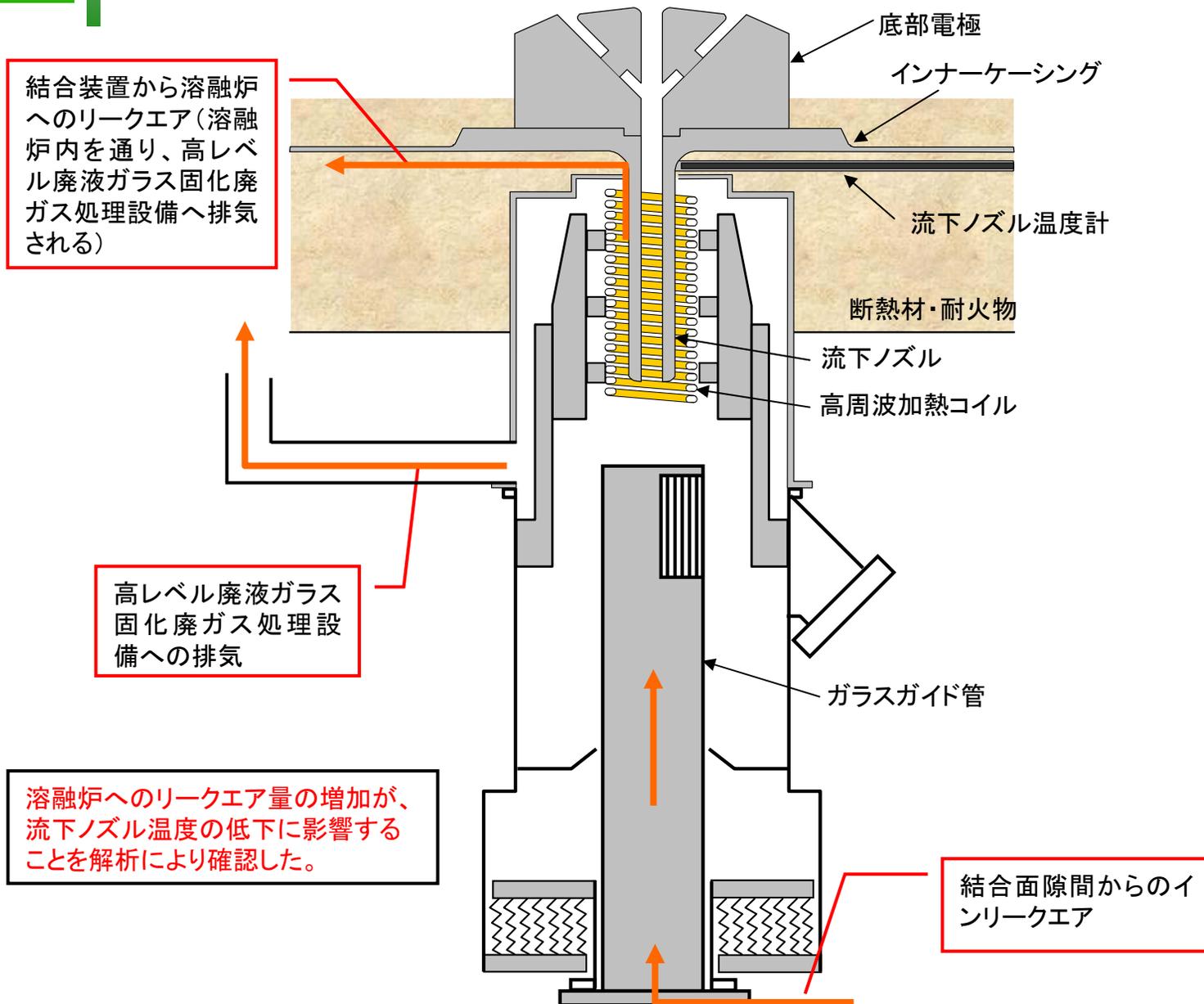
	ケース1	ケース2	ケース3
高周波コイル表面のふく射率	0.1	0.3	0.5

ふく射率が増加すると流下ノズル全体の温度が低くなる傾向であることを解析により確認した。



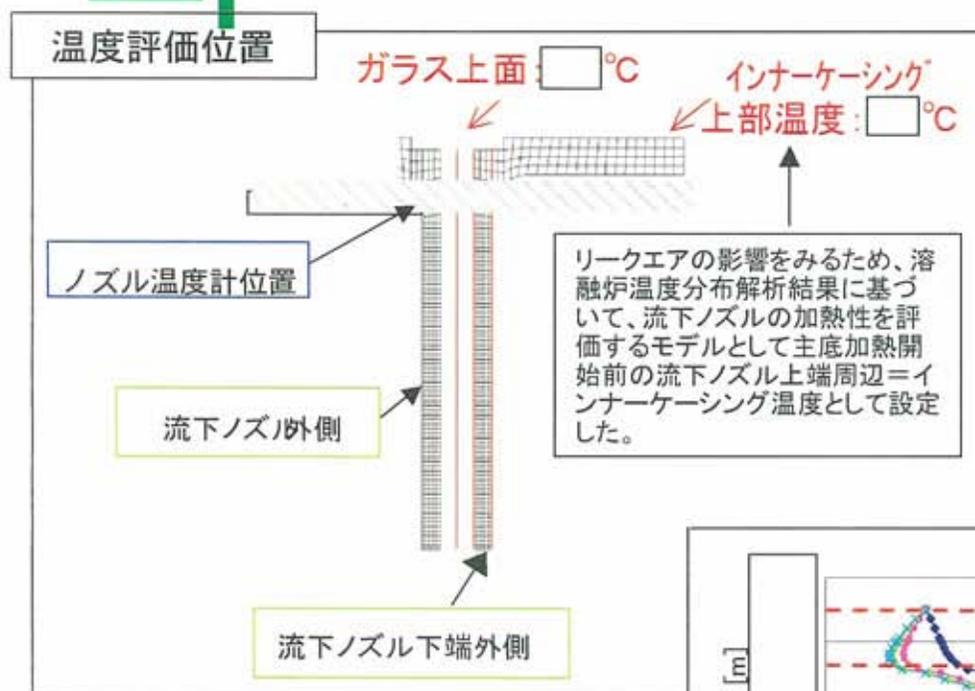
## 8. 原因究明

「流下ガラス温度が低い」ことに対する要因  
→ 溶融炉へのリークエア量の増加による放熱量の増加



## 8. 原因究明

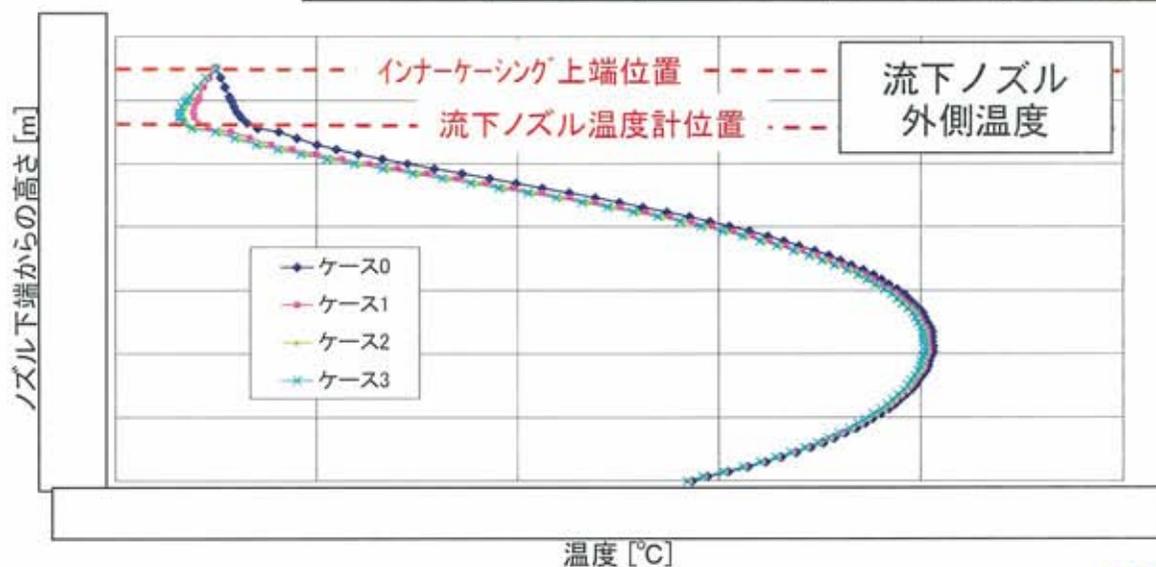
「流下ガラス温度が低い」ことに対する要因  
→溶融炉へのリークエア量の増加

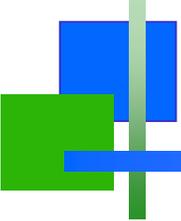


実効加熱電力	: <input type="text"/> kW
コイル表面ふく射率	: 0.1
ノズル表面ふく射率	: <input type="text"/>
コイル温度	: <input type="text"/> °C
セル温度	: <input type="text"/> °C

	ケース0	ケース1	ケース2	ケース3
結合装置 排出流量	<input type="text"/> Nm <sup>3</sup> /h			
溶融炉への 流出流量	0Nm <sup>3</sup> /h (0%)	<input type="text"/> Nm <sup>3</sup> /h (10%)	<input type="text"/> Nm <sup>3</sup> /h (20%)	<input type="text"/> Nm <sup>3</sup> /h (30%)

溶融炉へのリークエア量が増加すると流下ノズル温度計温度が低くなる傾向であることを解析により確認した。



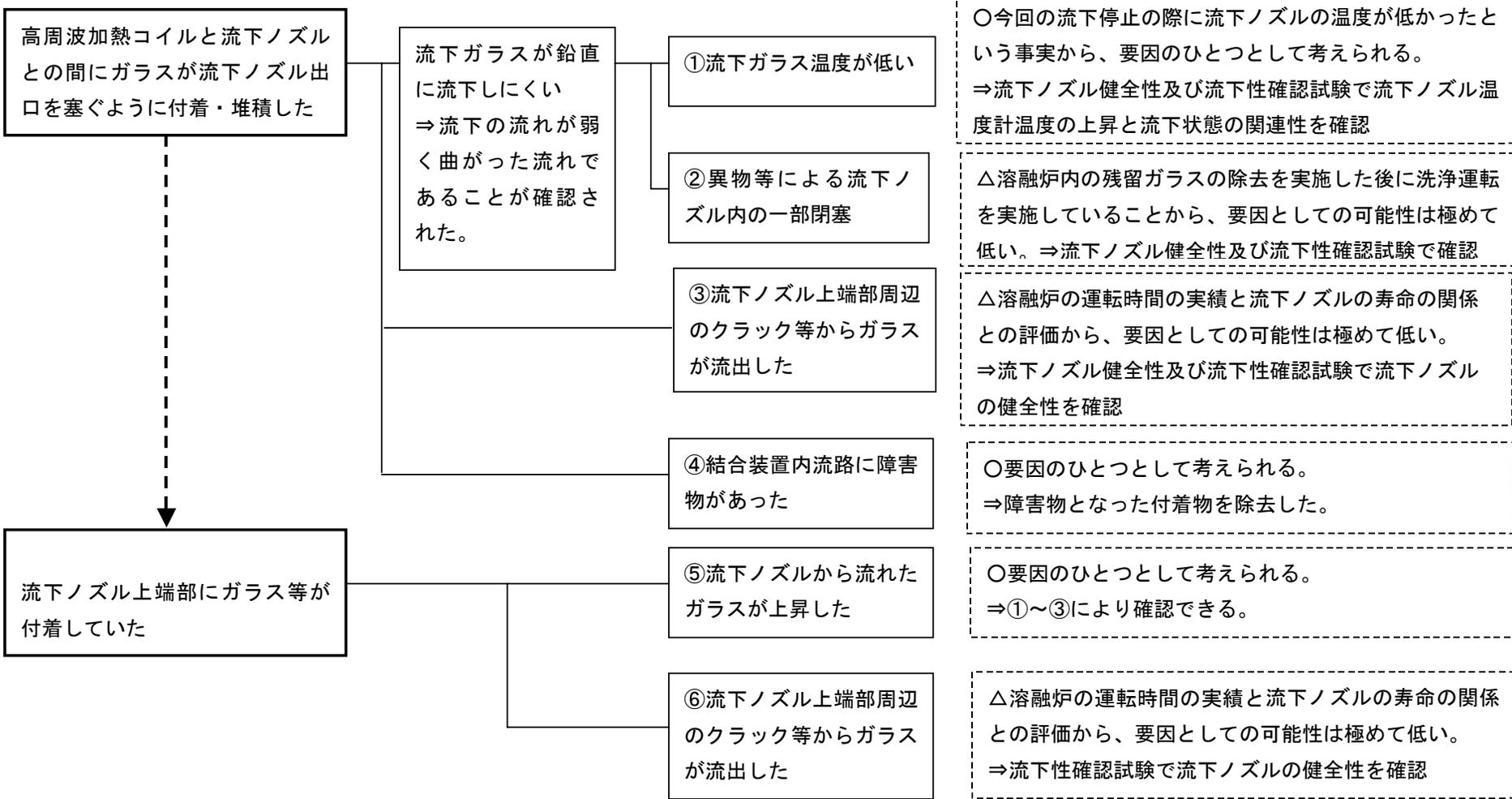


---

## 9. 流下ノズル健全性及び流下性確認試験

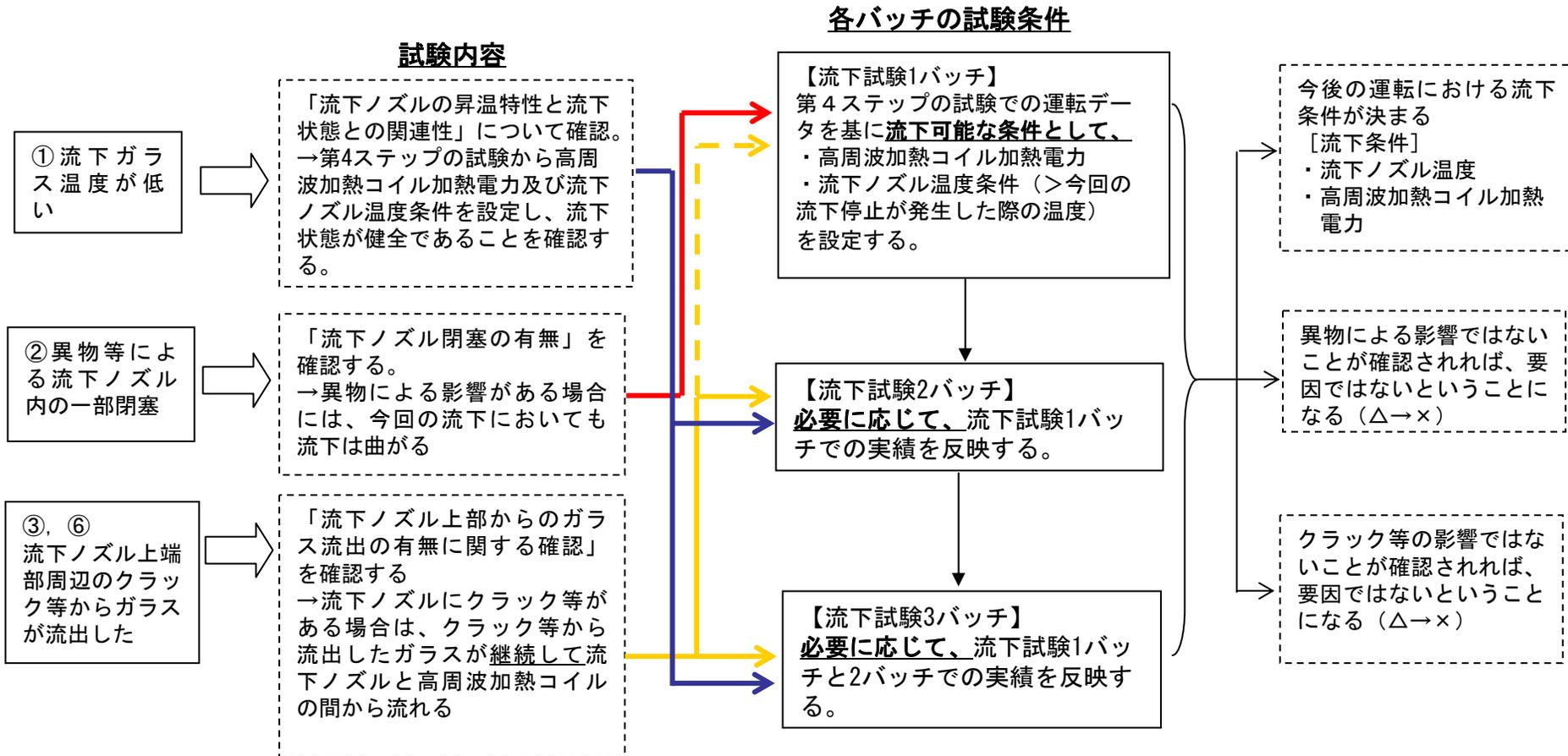
### 9. 1 試験方法

# 9. 1 試験方法

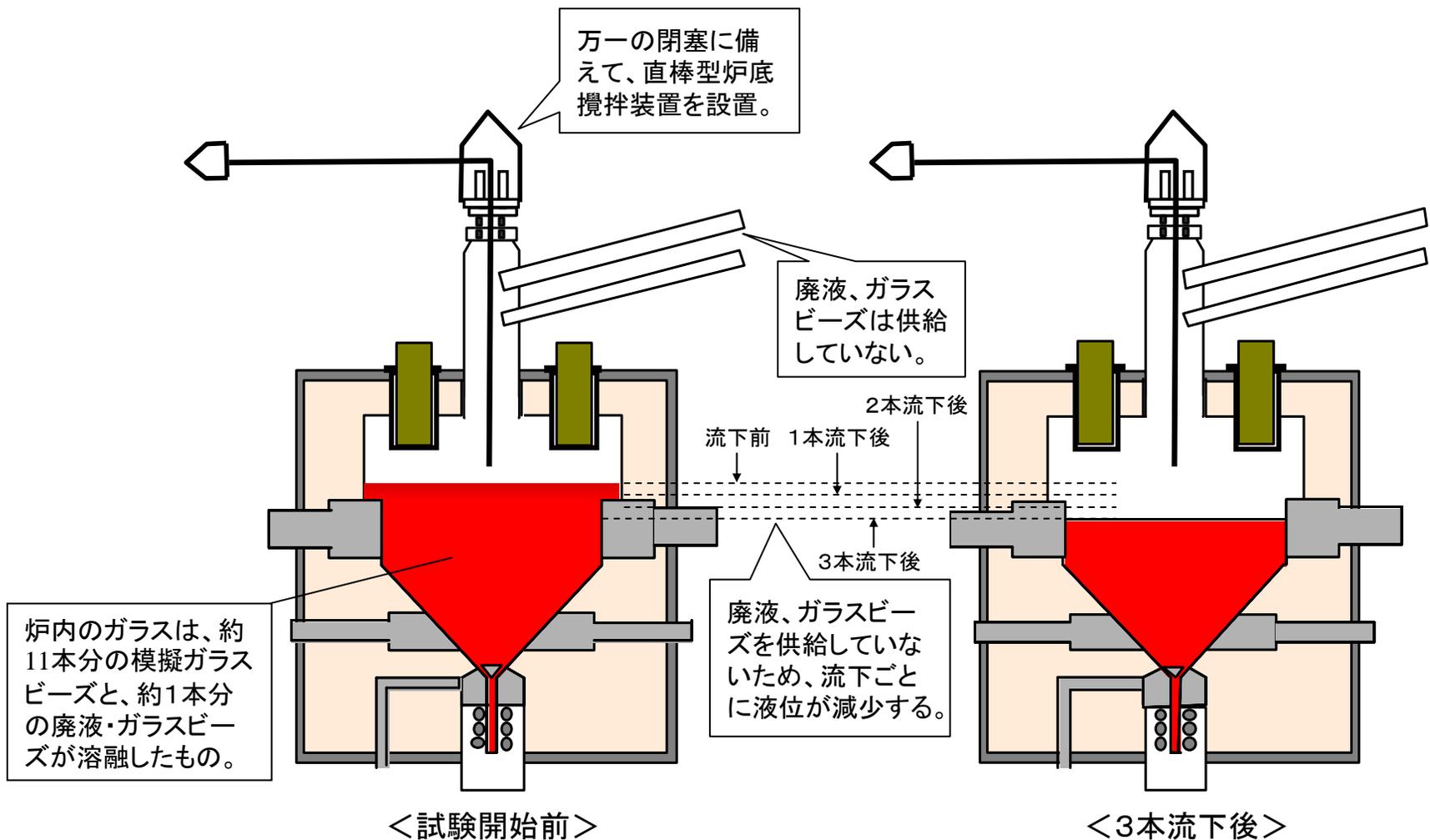


# 9. 1 試験方法

原因究明の結果、「高周波加熱コイルと流下ノズルとの間にガラスが流下ノズル出口を塞ぐように付着・堆積した」等の要因として考えられるものに対して流下ノズル健全性及び流下性確認試験により確認する。



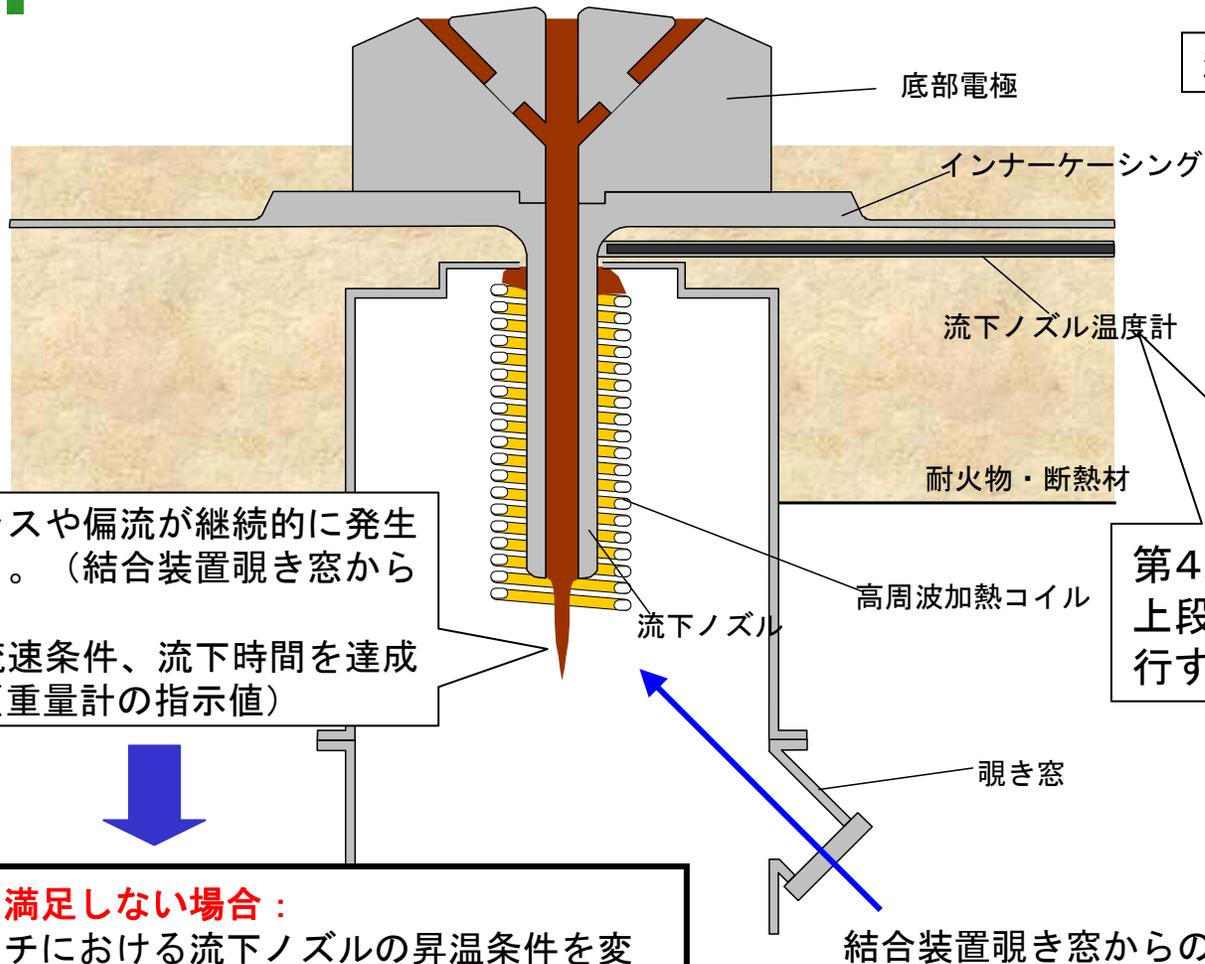
# 流下ノズル健全性および流下性確認試験 概略図



試験概略図

## 9. 1 試験方法

### 【流下ノズルの昇温特性と流下状態との関連性確認方法の詳細】



流下試験 2、3 バッチで確認

第4ステップの実績に基づき  
上段加熱⇒全段加熱に移  
行する温度を設定

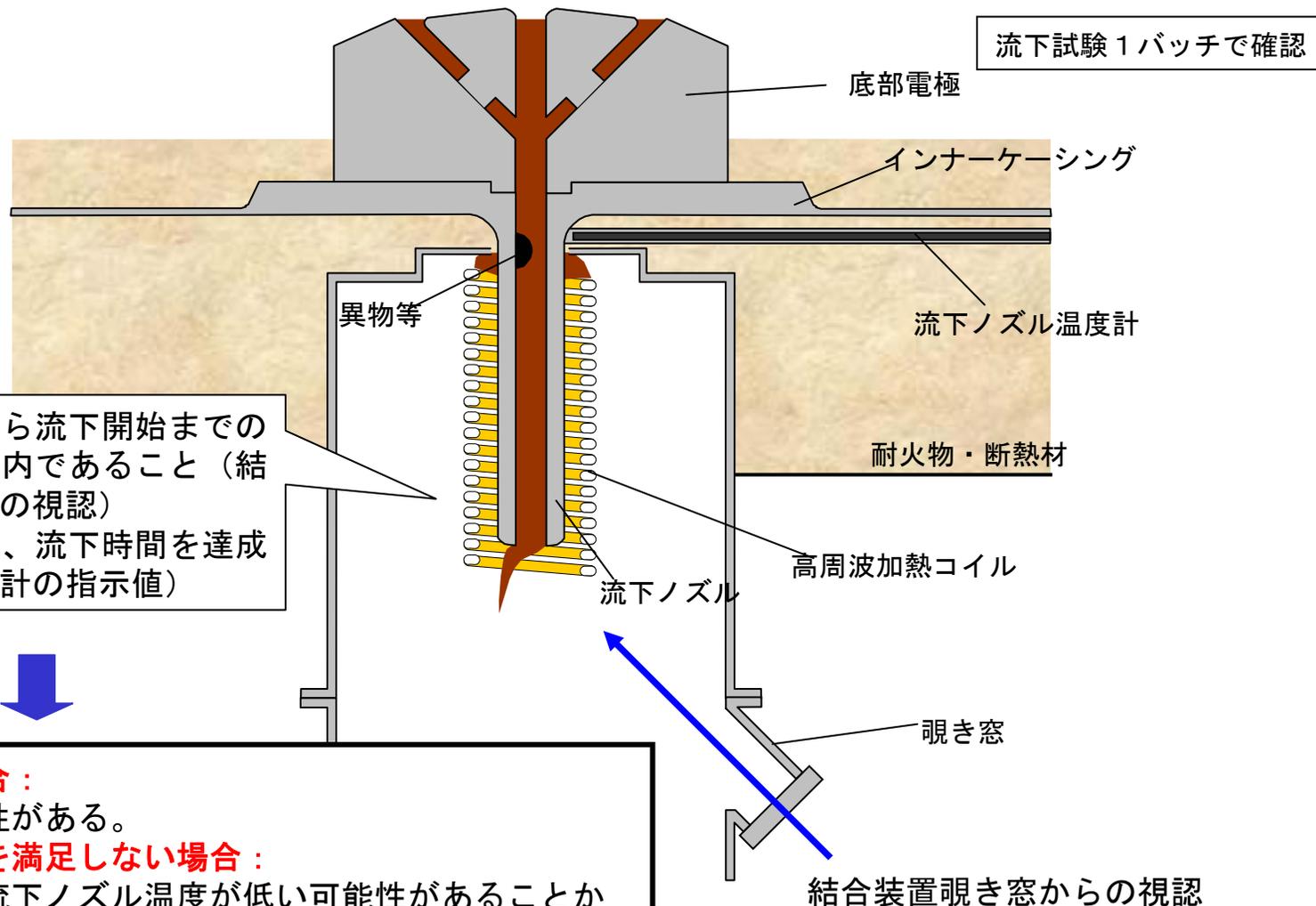
- ①糸状ガラスや偏流が継続的に発生しないこと。(結合装置覗き窓からの視認)
- ②所定の流速条件、流下時間を達成すること(重量計の指示値)

#### ①or②を満足しない場合：

次バッチにおける流下ノズルの昇温条件を変更し、再度流下状態を確認し、安定流下に必要な昇温条件を設定する。

## 9. 1 試験方法

### 【流下ノズル閉塞の有無確認方法の詳細】



- ①全段加熱開始から流下開始までの時間が所定時間以内であること（結合装置覗き窓からの視認）
- ②所定の流速条件、流下時間を達成すること。（重量計の指示値）

#### ①を満足しない場合：

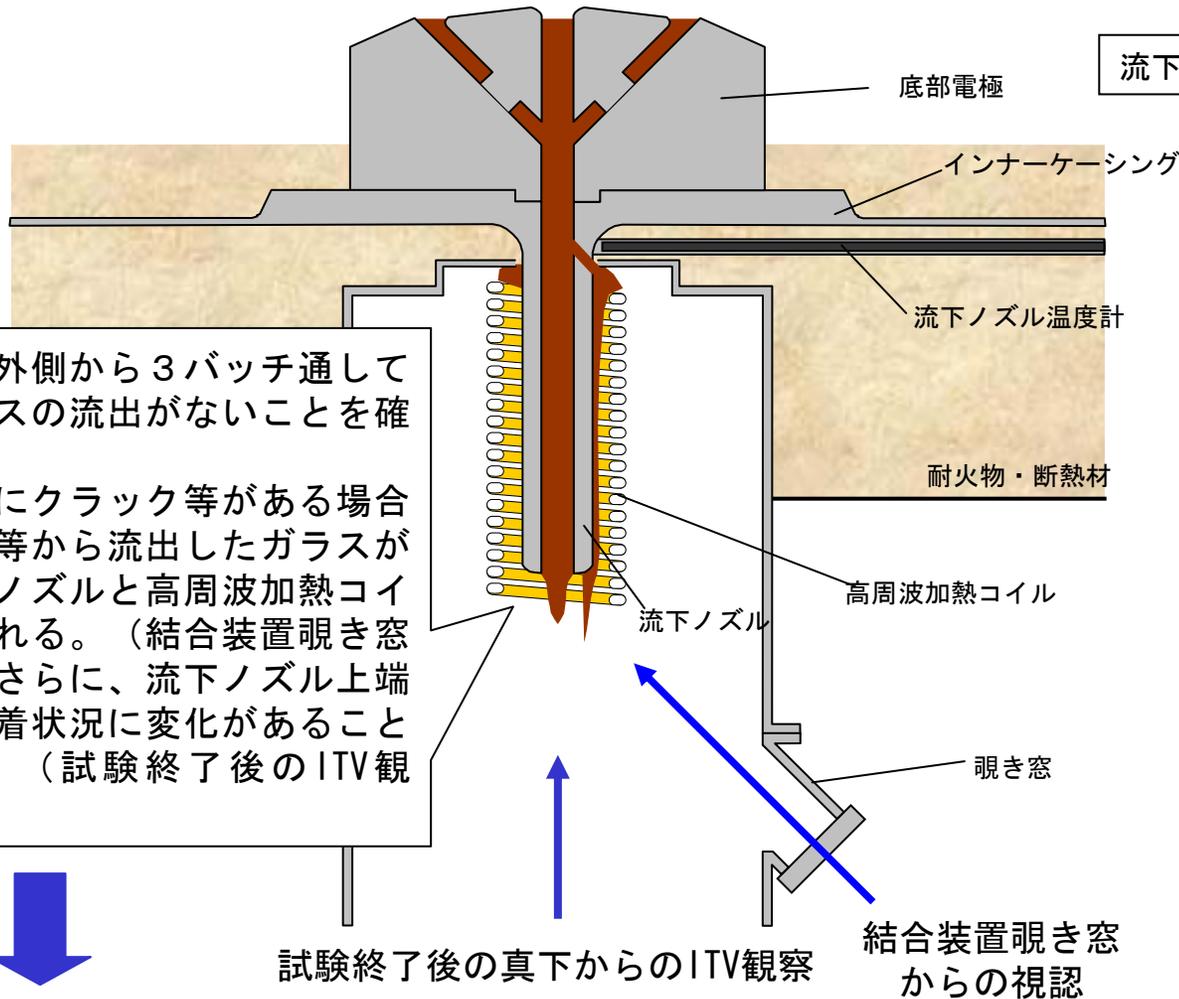
閉塞有りの可能性がある。

#### ①を満足して、②を満足しない場合：

閉塞の可能性と流下ノズル温度が低い可能性があることから、次バッチにおける流下ノズルの昇温条件を変更し、再度流下状態を確認し、安定流下に必要な昇温条件を設定する。

## 9. 1 試験方法

### 【流下ノズル上部からのガラス流出の有無に関する確認方法の詳細】



流下ノズルの外側から3バッチ通して継続したガラスの流出がないことを確認する。  
⇒流下ノズルにクラック等がある場合は、クラック等から流出したガラスが継続して流下ノズルと高周波加熱コイルの間から流れる。(結合装置覗き窓からの視認) さらに、流下ノズル上端部のガラス付着状況に変化があることを確認する。(試験終了後のITV観察)

流下試験 1~3 バッチで確認



流下ノズルのみから流下するケース



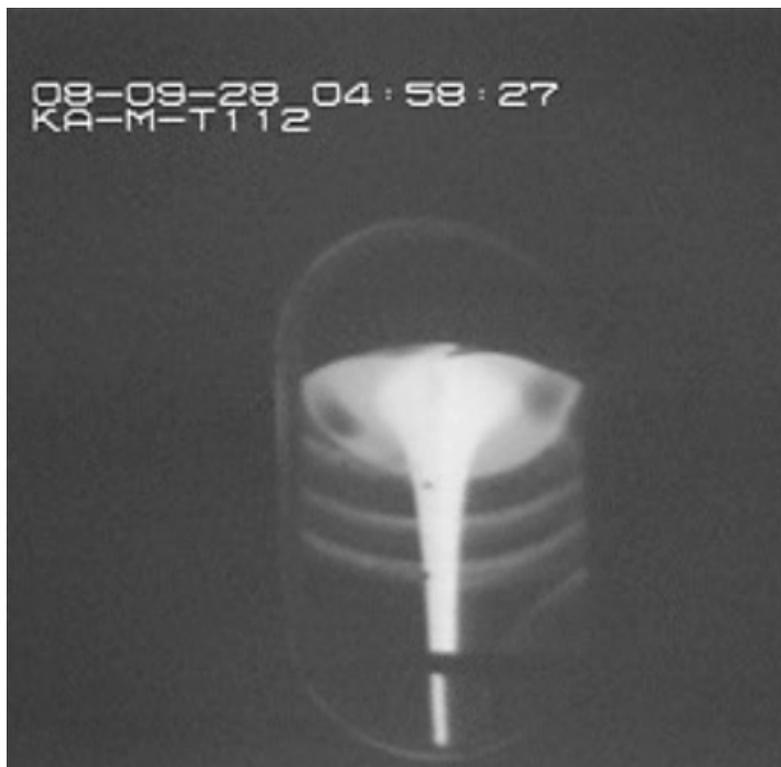
流下ノズルの外側からも断続的に流下するケース

流下ノズル上端部からガラスが流出していることが観察された場合は、結合装置を取外してノズル上端部の詳細観察を行う。

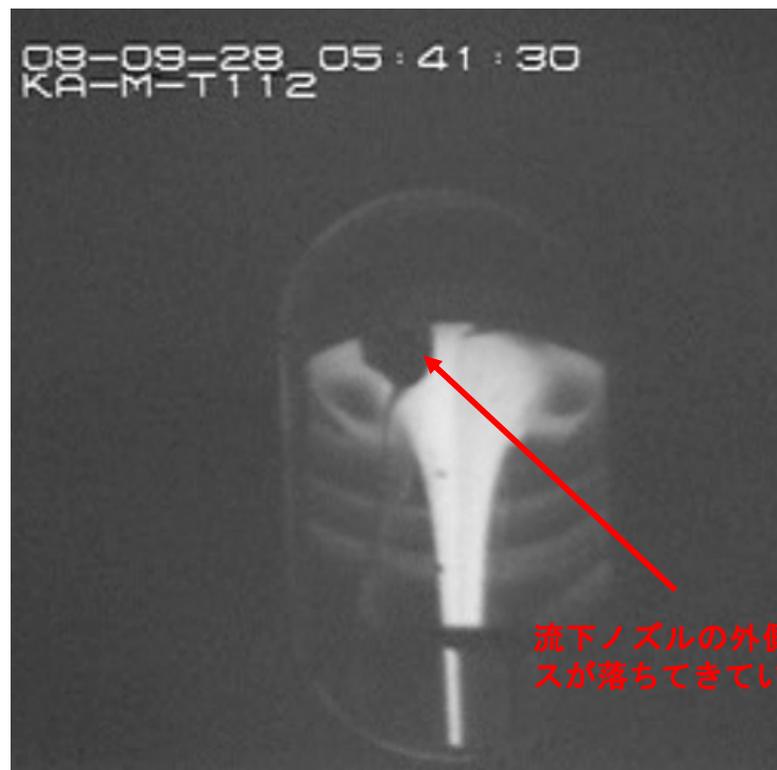
## 9. 1 試験方法

### 【流下ノズル上部からのガラス流出の有無に関する確認方法の詳細】

「流下ノズルの外側から3バッチ通して継続したガラスの流出がないこと」については、結合装置覗き窓からの視認により、下の映像のように流下ノズルから流れるものと流下ノズルの外側（高周波加熱コイルと流下ノズルの間）を流れるものの違いを確認する。



流下ノズルからの流下



流下ノズルの外側からガラスが落ちてきている。

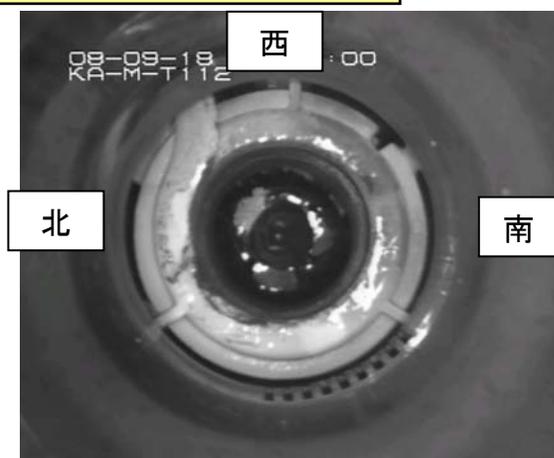
高周波加熱コイルと流下ノズル間のガラスが流れる様子

## 9. 1 試験方法

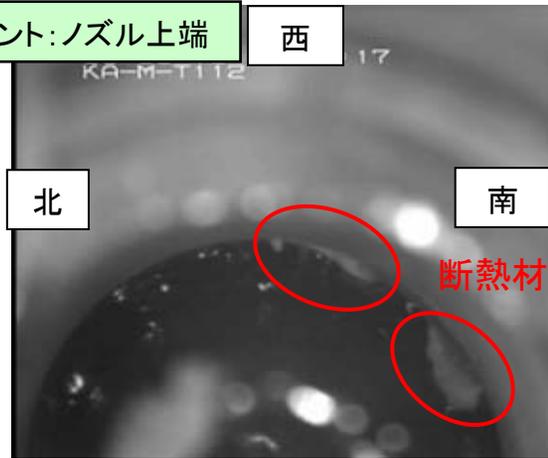
### 【流下ノズル上部からのガラス流出の有無に関する確認方法の詳細】

流下ノズル健全性及び流下性確認試験後に、真下からのITV観察により流下ノズル上端部のガラス付着状況を確認する。

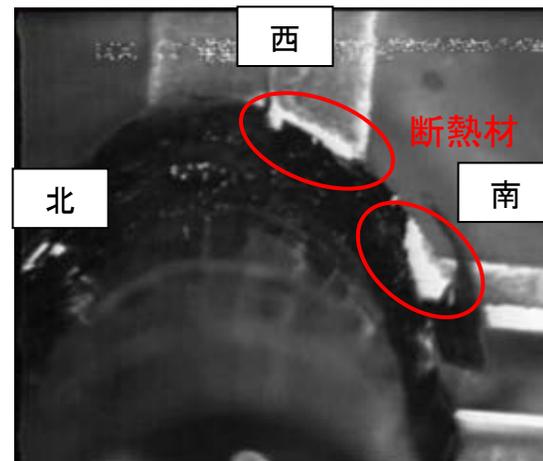
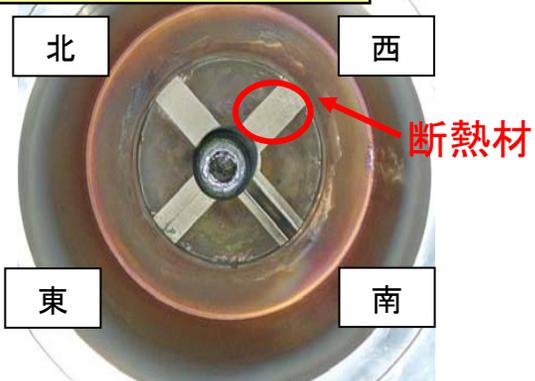
結合装置装着後



ピント:ノズル上端



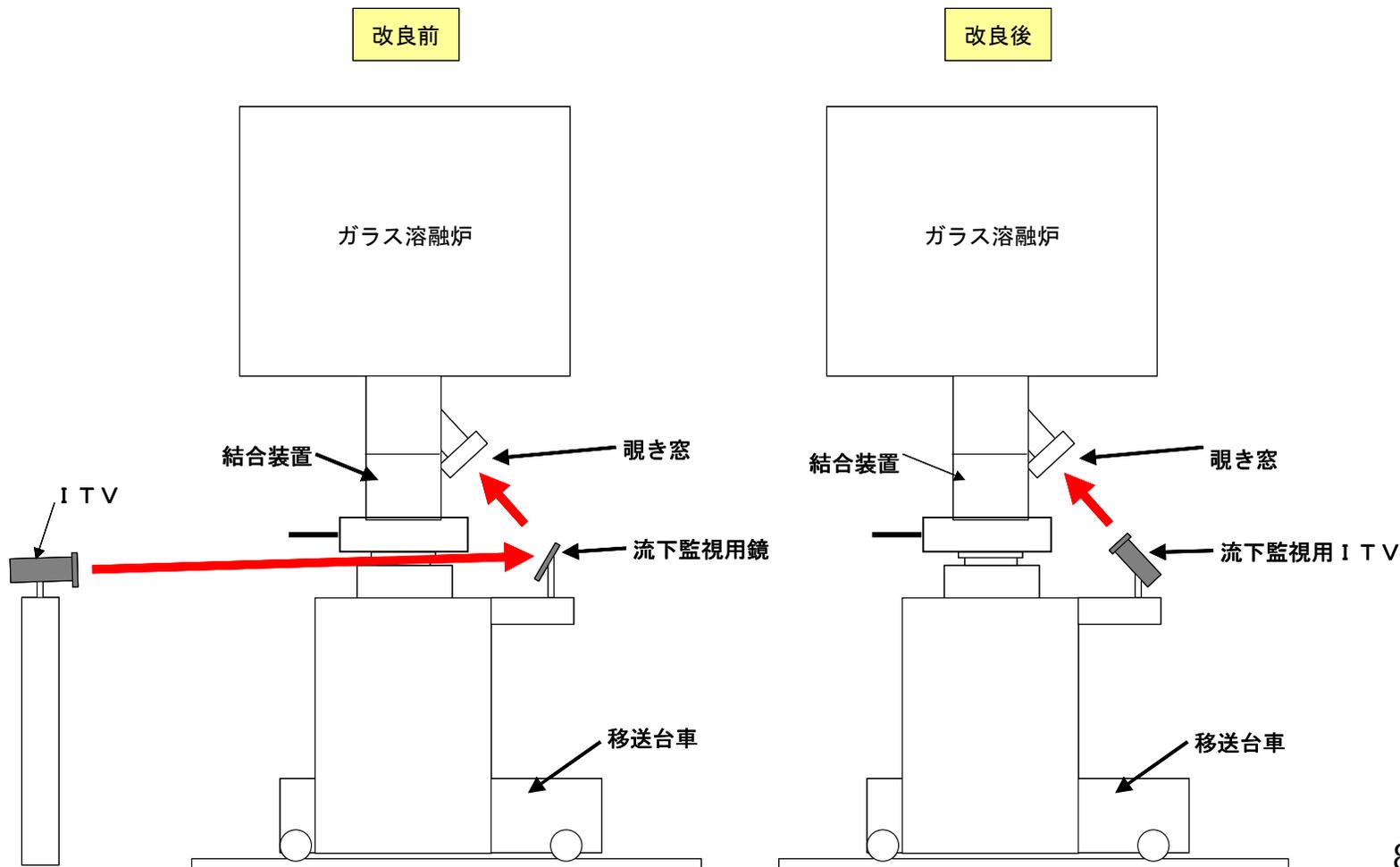
結合装置取り外し時



## 9. 1 試験方法

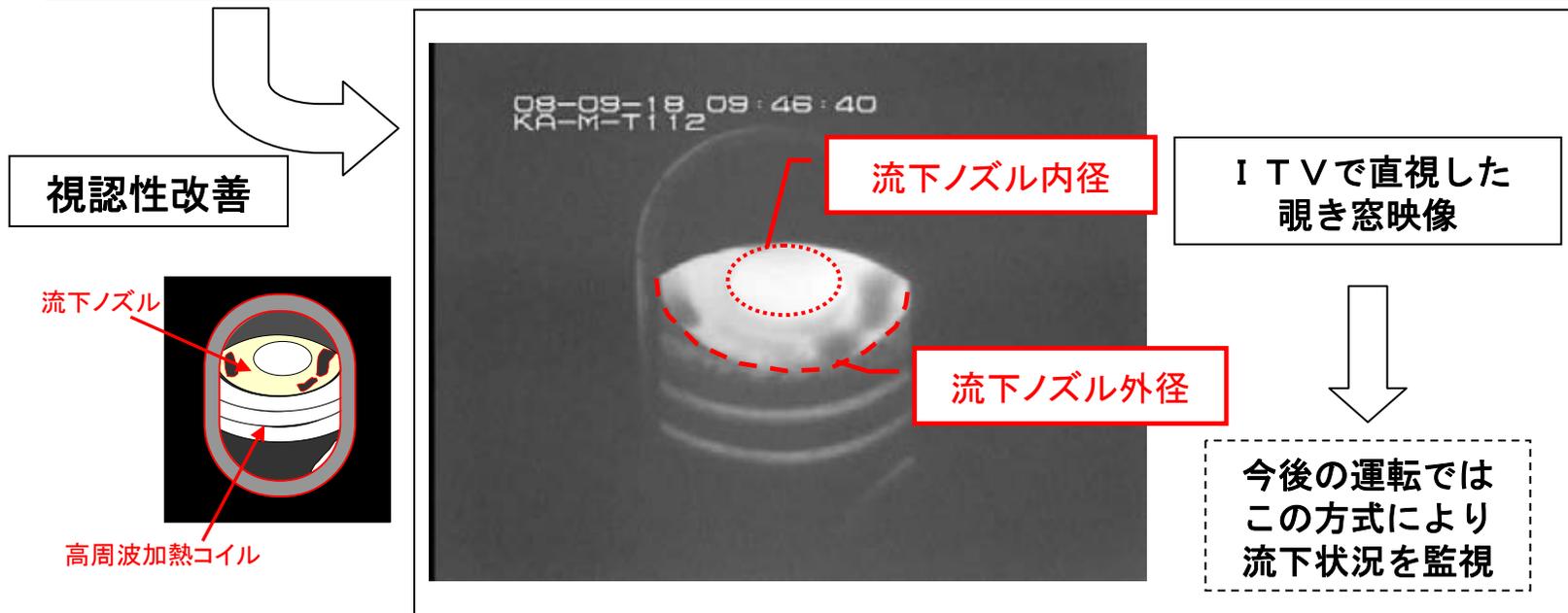
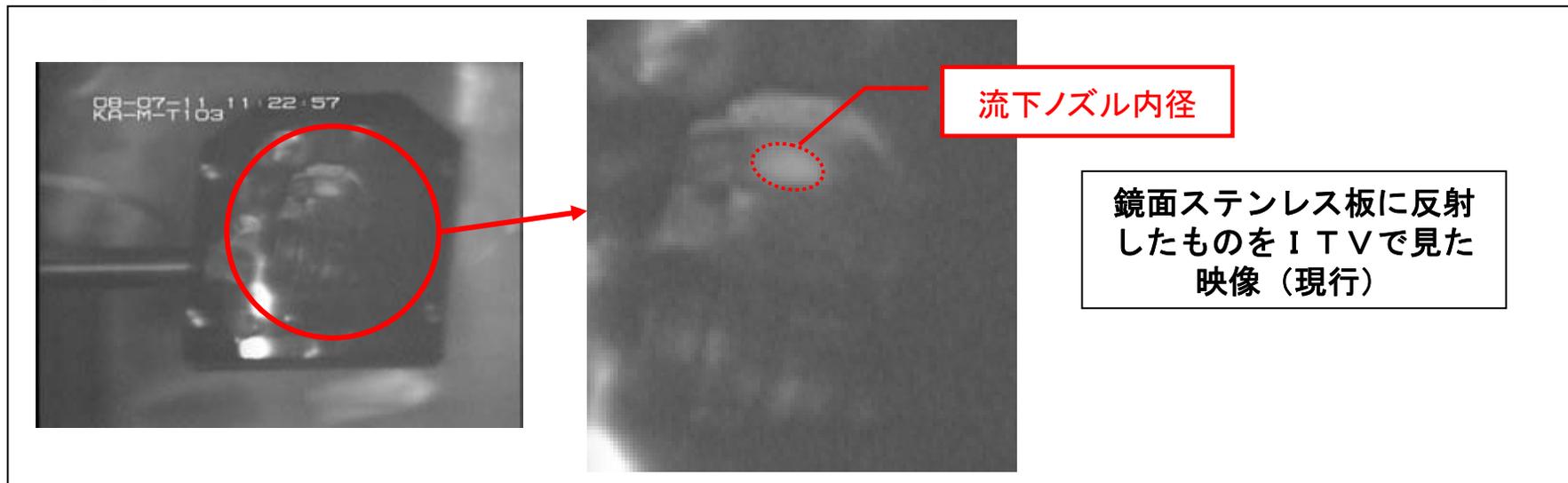
### 【結合装置覗き窓から確認（視認性）】

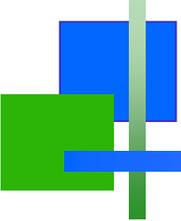
流下性確認試験における確認方法が、結合装置覗き窓からの観察であることから、覗き窓を直接的に覗き窓をITVで監視することで視認性を向上した。



# 9. 1 試験方法

## 【結合装置覗き窓から確認（視認性）】





---

## 9. 流下ノズル健全性及び流下性確認試験

### 9. 2 試験結果

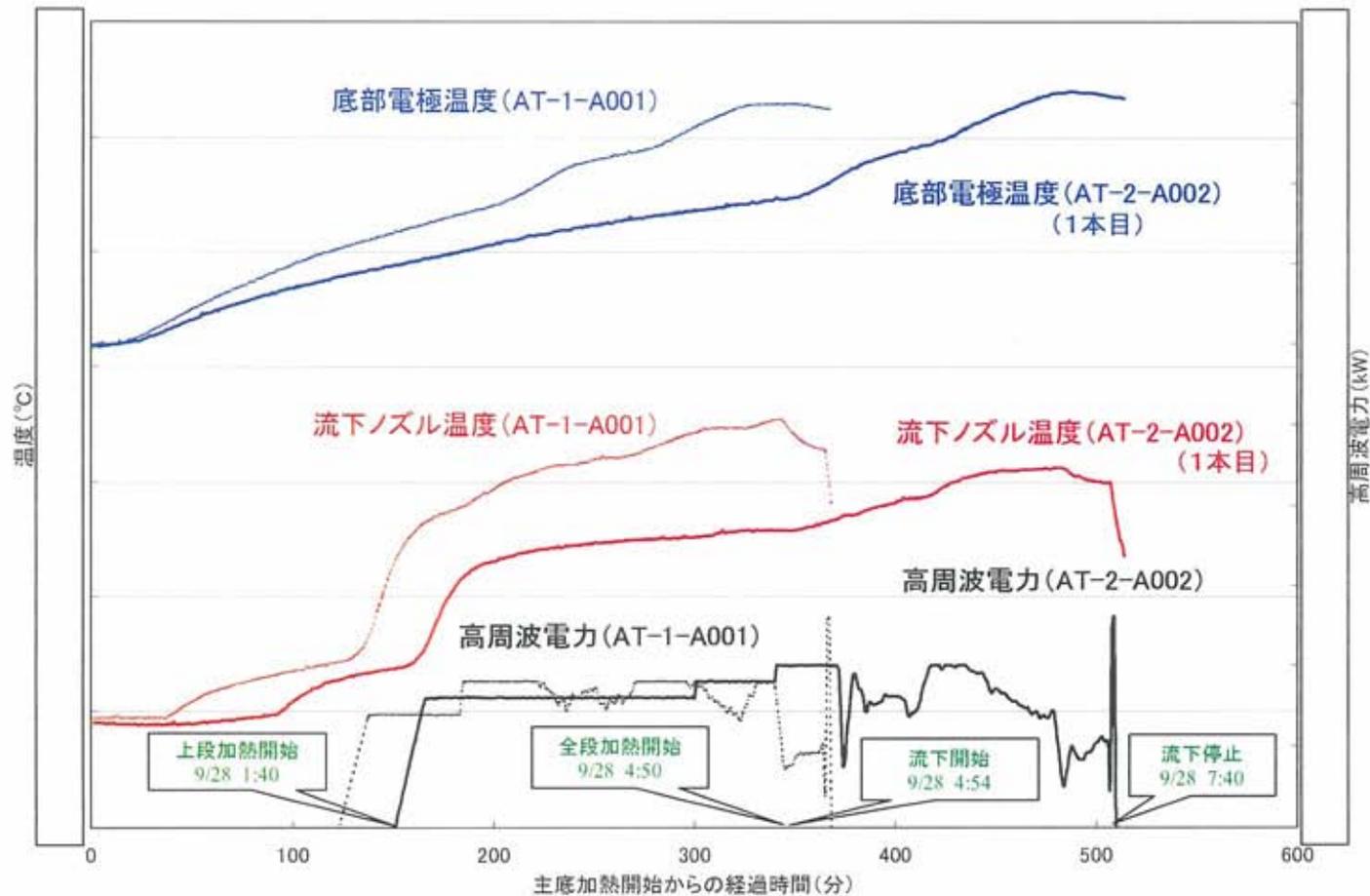
## 9. 2 試験結果

### 流下試験 1 バッチ

目的：流下ノズル閉塞の有無の確認（併せて、流下ノズル上端部の付着物の溶融の有無確認）

条件：高周波加熱電力 上段加熱：kW→kW 全段加熱：kW 流下ノズル温度：°C

流下開始条件 流下ノズル温度：°C※（設定：°C） 底部電極温度：°C（設定：°C）



※ °C到達後、  
全段開始移行時  
に値が変動した。

## 9. 2 試験結果

### 流下試験 1 バッチ

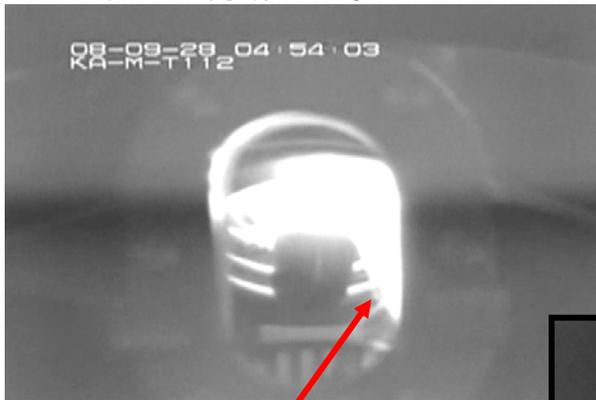
確認結果：

(流下ノズル閉塞の有無確認)

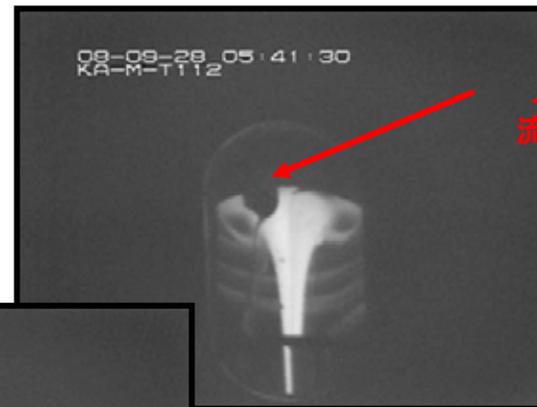
- ・ 流下は鉛直に流れる安定した流下であった。
- ・ 流下初期に低粘性流体が発生した。
- ・ 流下開始が所定の時間以内であり、流速条件も満足したことから、閉塞の可能性が無いと判断した。

(流下ノズル上端部の付着物の溶融の有無確認)

- ・ 流下ノズル外側からの流下が一部確認された。これは流下ノズル上端部付着物が溶融したことによるものと判断した。



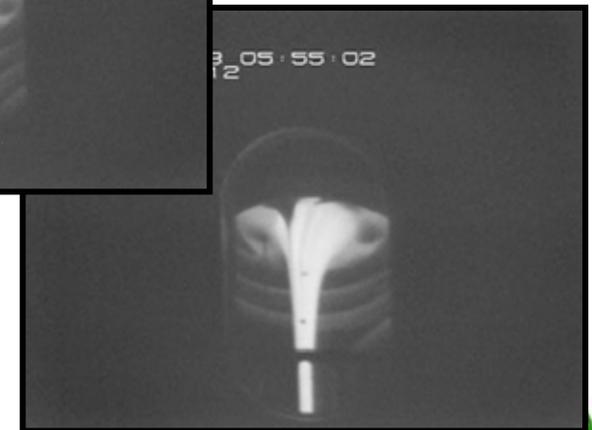
流下初期に低粘性流体  
が発生



ノズル外側から  
流れ落ちたガラス



偏流等なく安定した流れ

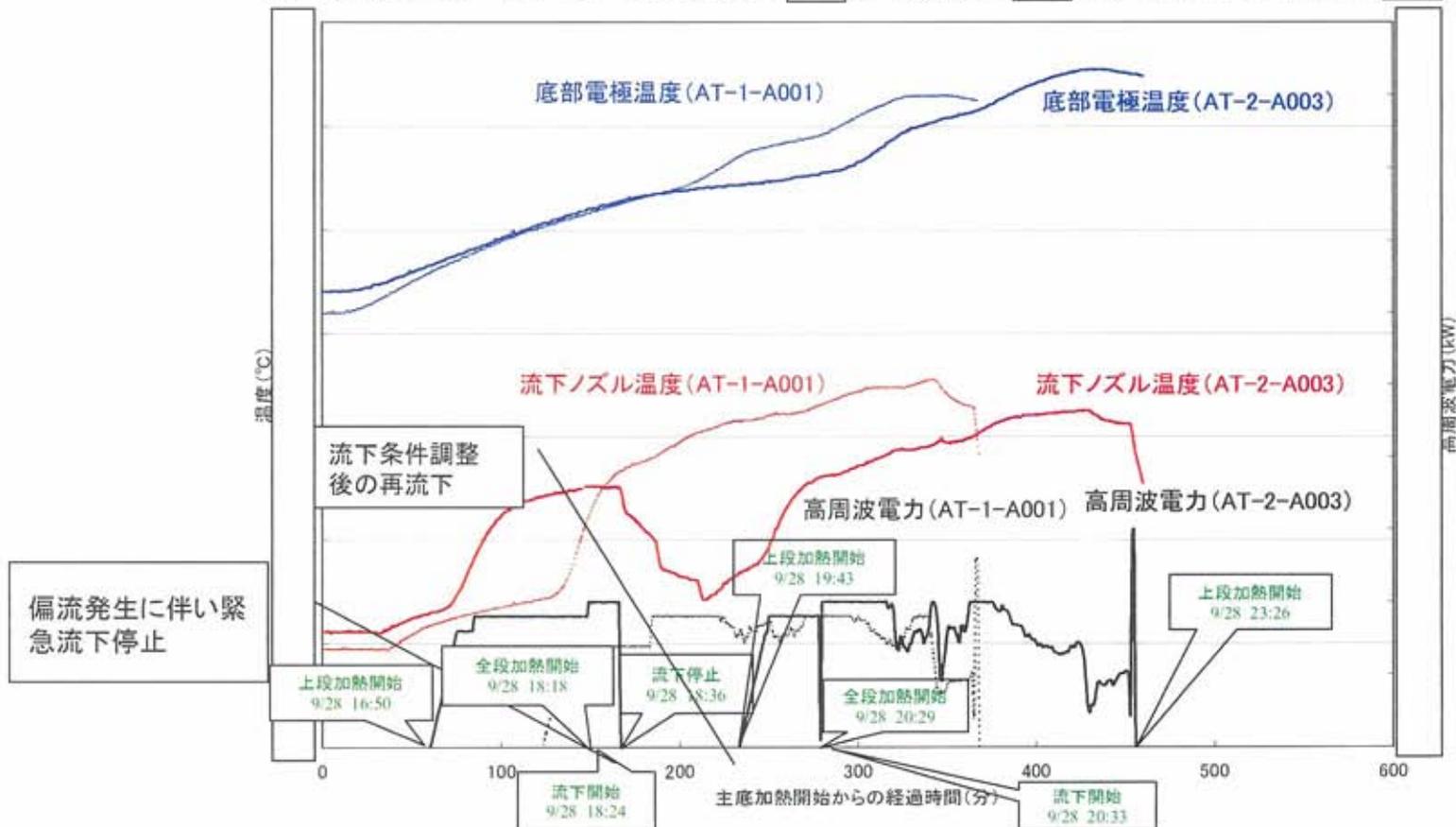


## 9. 2 試験結果

### 流下試験 2 バッチ

目的：流下ノズルの昇温特性と流下状態との関連性確認、流下ノズル上部からのガラス流出の有無の確認

条件：1回目 高周波加熱電力 上段加熱： kW 全段加熱： kW  
 流下開始条件 流下ノズル温度： °C（設定： °C）底部電極温度： °C（設定： °C）  
 2回目 高周波加熱電力 上段加熱： kW 全段加熱： kW  
 流下開始条件 流下ノズル温度： °C（設定： °C）底部電極温度： °C（設定： °C）



## 9. 2 試験結果

### 流下試験 2 バッチ

確認結果：

(流下ノズルの昇温特性と流下状態との関連性確認)

- ・ 流下ノズル外側から流れたガラスと流下ノズルから流下したガラスが接触したため、ガラスは鉛直に流れずに大きく曲がり、一部ガラスが滞留する事象が発生した。
- ・ 底部電極温度及び流下ノズル温度を高く設定し、再度流下（2回目）を行った結果、流下は鉛直に流れる安定した流下であった。また、流下開始が所定の時間以内であった。流速条件についても満足していたことから、流下条件（高周波加熱電力および流下ノズル温度の設定）は適切であったと判断した。

(流下ノズル上端部の付着物の溶融の有無確認)

- ・ 2回目で流下ノズル外側からの流下が一部確認されたが、流下初期に確認されたのみで継続しなかったことから、これは流下ノズル上端部付着物が溶融したことによるものと判断した。



□ : 1回目  
□ : 2回目（調整後）

※滞留したガラスは、緊急流下停止を実施し、結合装置解除により除去された。

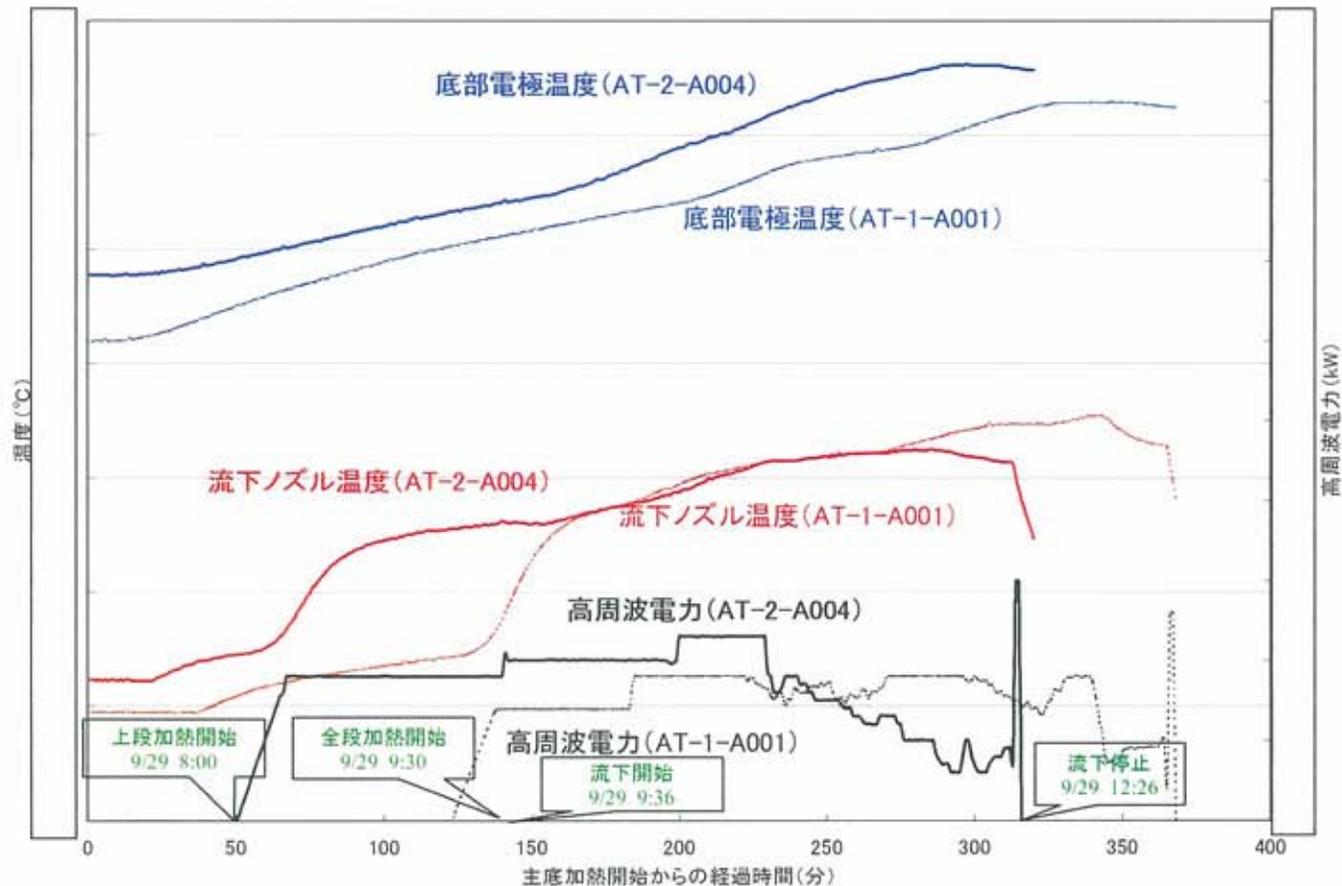
## 9.2 試験結果

### 流下試験 3 バッチ

目的：流下ノズルの昇温特性と流下状態との関連性確認、流下ノズル上部からのガラス流出の有無の確認

条件：高周波加熱電力 上段加熱：kW 全段加熱：kW

流下開始条件 流下ノズル温度：°C（設定：°C） 底部電極温度：°C（設定：°C）



## 9. 2 試験結果

### 流下試験 3 バッチ

確認結果：

(流下ノズルの昇温特性と流下状態との関連性確認)

- ・ 流下は鉛直に流れる安定した流下であった。
- ・ 流下開始が所定の時間以内であったが、流速条件については、一部の要注意条件を満足しなかった。

(流下ノズル上端部の付着物の溶融の有無確認)

・ 流下ノズル外側からの流下は確認されなかったことから、流下ノズル上端部付着物のうち、溶融可能なガラスは2バッチ目までで流れたものと考えられる。



## 9. 2 試験結果

### 確認結果：

#### (流下ノズル閉塞の有無確認)

- ・流下開始が所定の時間以内であった等から閉塞は無いと判断した。

#### (流下ノズルの昇温特性と流下状態との関連性確認)

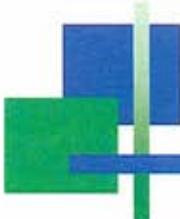
- ・流下ノズル外側から流れたガラスと流下ノズルから流下したガラスが接触したため、ガラスは鉛直に流れずに大きく曲がり、一部ガラスが滞留する事象が発生した。
- ・3バッチの試験より、高周波加熱電力および流下ノズル温度の条件を以下のとおり設定することとした。なお、廃液供給運転時は、ガラス温度が高くなり、炉底ガラス温度も変動するため、底部電極温度は、これまでの運転実績と今回の試験結果を考慮し、適宜設定するものとする。

上段加熱：kW 全段加熱：kW 流下ノズル温度：℃

#### (流下ノズル上端部の付着物の溶融の有無確認)

- ・流下ノズルと高周波加熱コイルの間からの流下が継続しなかったことから、流下ノズル上端部のクラック等の発生の可能性は無いと判断した。

		判定基準		1バッチ目	2バッチ目	2バッチ目再流下	3バッチ目
		洗浄運転	要注意	AT-2-A002	AT-2-A003(1)	AT-2-A003(2)	AT-2-A004
上段加熱電力	kW						
全段加熱電力	kW						
底部電極温度(設定値)	℃						
底部電極温度(実績)	℃						
流下ノズル温度(設定値)	℃						
流下ノズル温度(実績)	℃						
全段→流下開始時間	分						
外側からの流下	有無						
流速20kg/h到達時間	分						
流速50kg/h到達時間	分						
流下重量10kg到達時間	分						
流速100kg/h到達時間	分						



## 9. 2 試験結果

### 【流下性確認試験での流下性】

確認結果から3バッチ目において流下性条件の要注意時間を上回るものがあった。

#### (3バッチ目の状況)

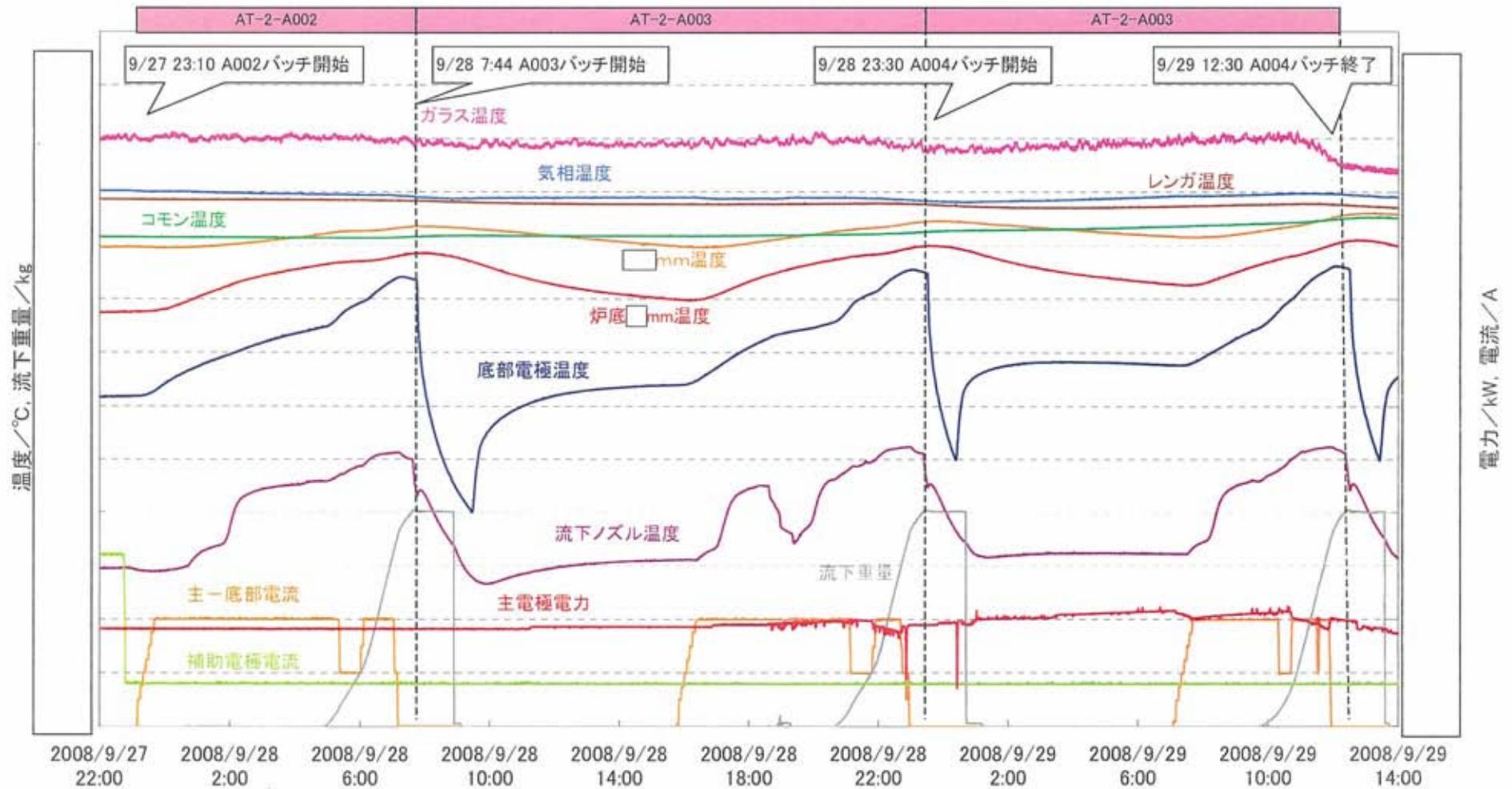
- ・主底加熱時間が短かったため2バッチ目より底部電極直上部のガラス温度が低かった
- ・ガラス温度が通常運転時より□℃以上低く、流下バッチを経過したときの炉底の温度上昇は通常運転より小さい

#### (推定原因)

- ① 主底加熱量の半減で底部電極直上のガラス温度が低めだった
- ② 液位の低下でヘッド圧が低下していた
- ③ ガラス□℃運転のため上方から降下してくるガラス温度が低めだった

		1バッチ目	2バッチ目	2バッチ目再流下	3バッチ目
全段加熱までの 主底加熱時間					
流下ノズル下端からの液位					
ガラス温度 (平均)					
全段 開始 時	底部電極温度				
	流下ノズル温度				
	□mm温度				
	□mm温度				

# 流下ノズル健全性および流下性確認試験 における温度トレンド

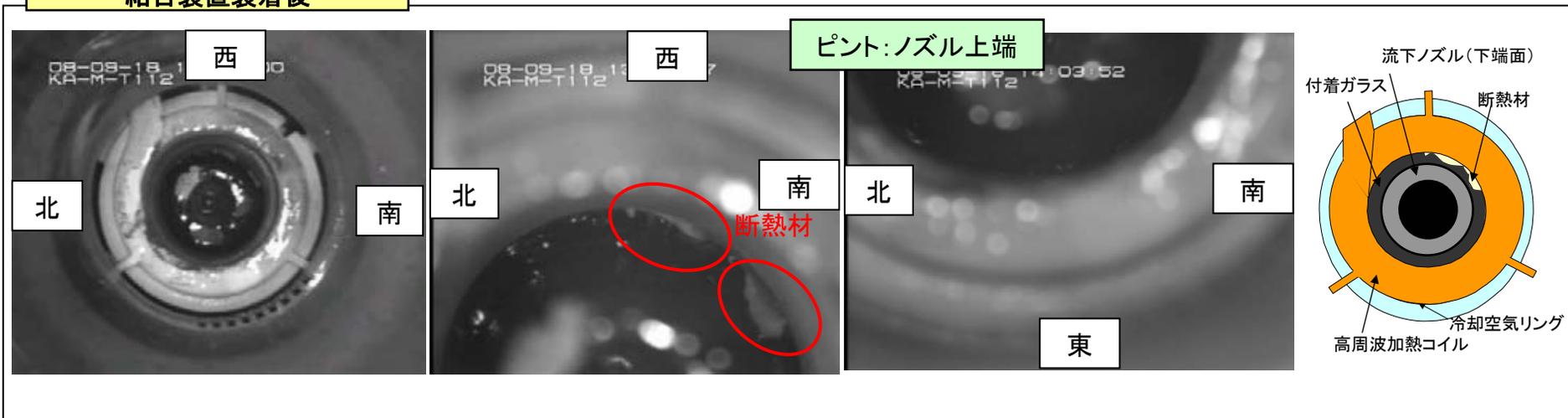


流下性確認 1~3

## 9. 2 試験結果

### 【試験後のノズル上端の観察結果】

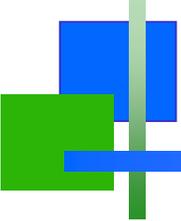
結合装置装着後



流下ノズル健全性及び流下性確認試験後



流下ノズル上端部の附着ガラスは、流下ノズルと断熱材の間の附着ガラスの一部を残して大部分が除去できた。



---

## 9. 流下ノズル健全性及び流下性確認試験

### 9. 3 試験結果のまとめ

## 9. 3 試験結果のまとめ

- 構造的にクラック等が発生する可能性は低い
- 流下可能回数に対して流下実績は少なく十分に余裕があることから、疲労により流下ノズルにクラック等が発生した可能性は低い。
- 侵食によってクラック等が発生し、ガラスが流出したとは考えられない。
- 機械的荷重により流下ノズルにクラック等が発生した可能性は低い

流下ノズル上端部のクラック等の発生について確認するため流下ノズル健全性及び流下性確認試験を実施

- 流下ノズルと高周波加熱コイルの間からの流下が 3 バッチを通して継続しなかった
- 試験後のノズル上端の観察により、流下ノズル上端部の付着ガラスは、流下ノズルと断熱材の間の付着ガラスの一部を残して大部分が除去でき、ガラスの付着量は減少し増加していないことが確認できたことから、流下ノズル上端部のクラック等の発生の可能性は無いと判断した

### 【試験結果を受けた評価】

今回の「流下停止が発生した」及び「流下ノズル上端部にガラス等が付着していた」ことに関する原因は、

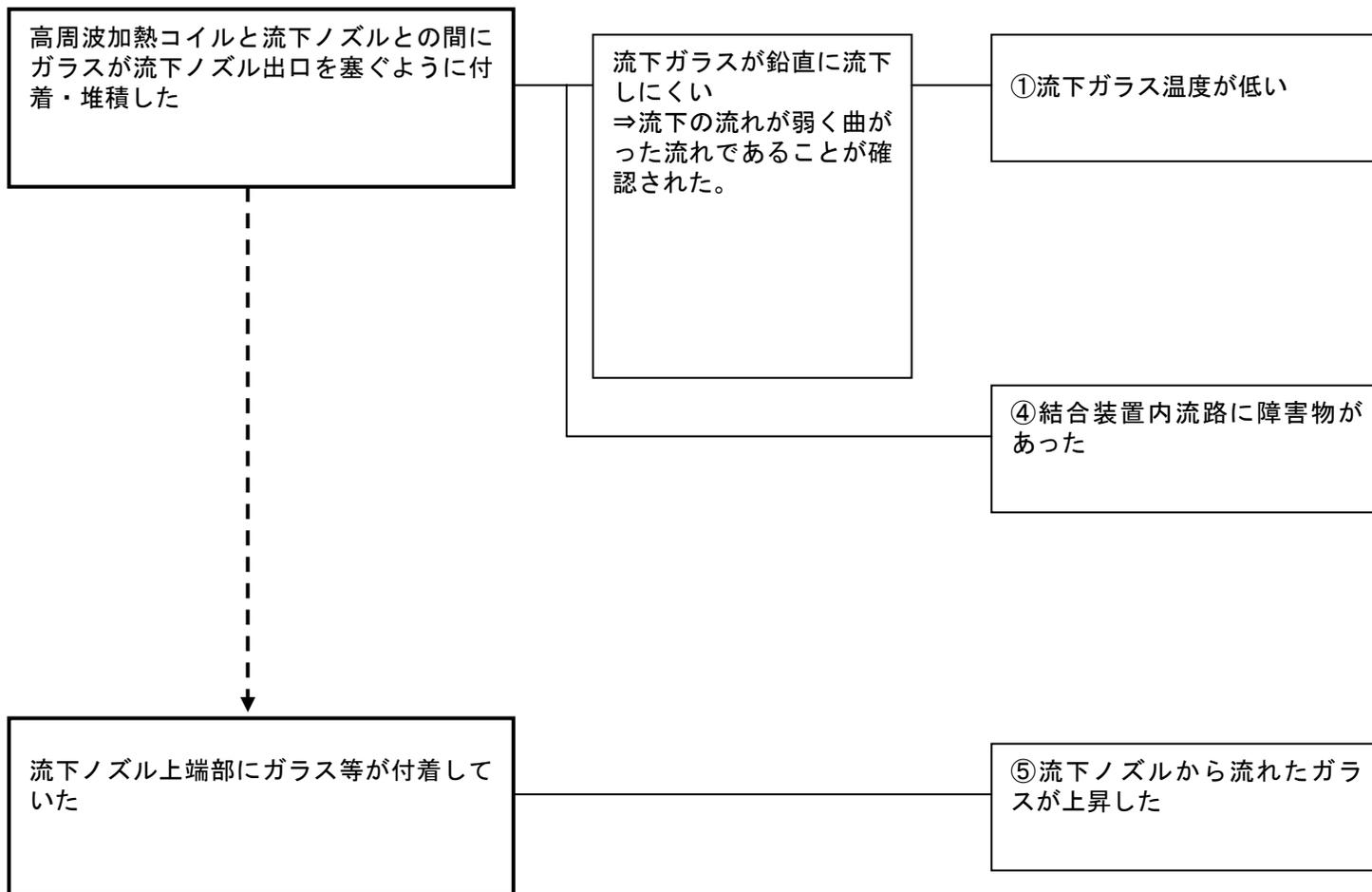
「流下停止が発生した」：流下ノズル温度が低い

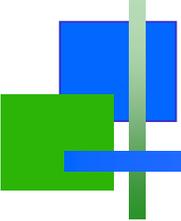
「流下ノズル上端部にガラス等が付着していた」：流下ノズルから流れたガラスが上昇したに特定できた。

また、流下ノズル温度が低いに関しては、今回の流下において適切な温度設定等について確認することができた。

## 9. 3 試験結果のまとめ

### 【流下停止等に至った各原因の関係】

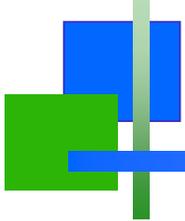




---

## 1 0. 原因及び再発防止対策

- 1 0. 1 原因究明の結果、流下ノズル健全性及び流下性確認試験の結果を受けて推定した流下停止に至った経緯



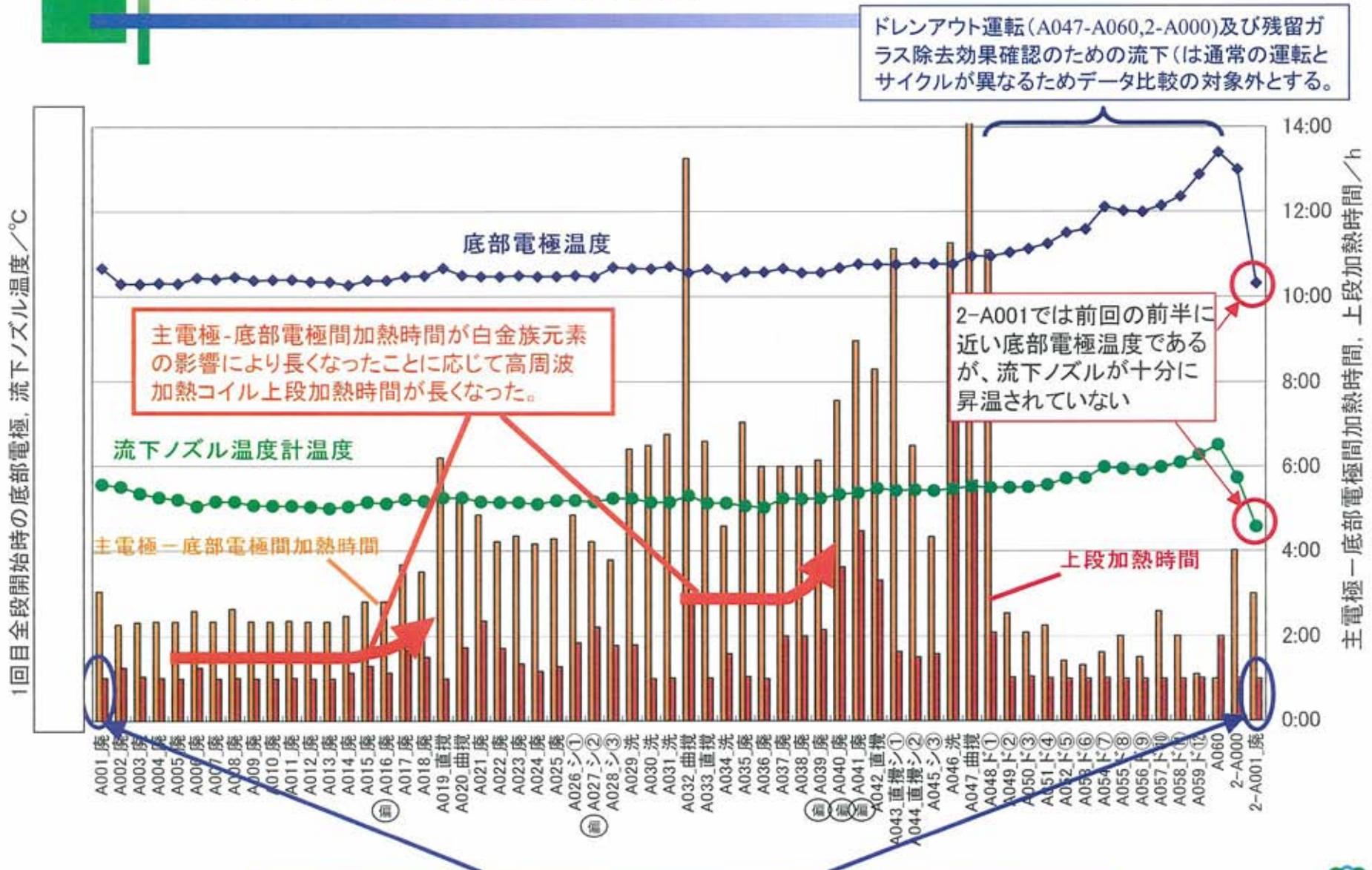
## 10. 1原因究明の結果、流下ノズル健全性及び流下性確認試験の結果を受けて推定した流下停止に至った経緯

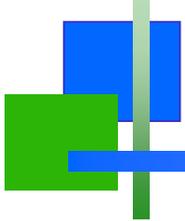
原因究明及び「流下ノズル健全性及び流下性確認試験」の結果を踏まえ、今回の流下ノズル上端部にガラス等が付着したこと及び流下停止に至った経緯として、以下のことが推定される。

- ① 第4ステップ開始以降、流下ガラスの揮発成分等の付着物の発生等の影響を受け「流下ノズルの放熱量の増加」が発生し、流下ノズル温度の上昇が鈍くなった。
- ② 第4ステップ開始以降、低粘性流体が発生し、その一部が高周波コイル下端付近表面に付着し、流下ガラス流路が狭くなった。
- ③ 第4ステップ後半では、白金族元素の影響で底部電極温度が目標の温度に到達するまでの時間が長くなり、それに応じて上段加熱時間も延長され、流下ノズル温度が溶融ガラスの流下を開始するのに問題がない温度まで上昇していた。  
(100頁参照)

※流下操作は、主電極－底部電極間通電、高周波加熱コイル上段加熱、高周波加熱コイル全段加熱の順で行う。高周波加熱コイル上段加熱から高周波加熱コイル全段加熱に移行する条件としては、高周波加熱コイル上段加熱時間が1時間以上であることと底部電極温度が所定の温度に到達していることである。

10. 1 原因究明の結果、流下ノズル健全性及び流下性確認試験の結果を受けて推定した流下停止に至った経緯  
【第4ステップでの上段加熱時間等の推移】

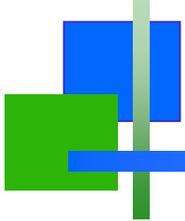




## 10. 1 原因究明の結果、流下ノズル健全性及び流下性確認試験の結果を受けて推定した流下停止に至った経緯

---

- ④ 第4ステップ終了後、ガラス溶融炉内の残留ガラスを除去したことにより、白金族元素の堆積状況が改善され、抵抗値も通常の状態に戻ったことから、流下開始操作に移るための底部電極目標温度、高周波加熱コイルによる流下ノズルの上段加熱時間を通常の設定条件に戻して運転を行った。
- ⑤ ①～③のことから、第4ステップ試験中から鈍くなっていた流下ノズル温度の上昇を補っていた高周波加熱時間の延長による入熱が少なくなり、流下ノズル温度が低く、流下ガラスが十分に加熱されなかった。

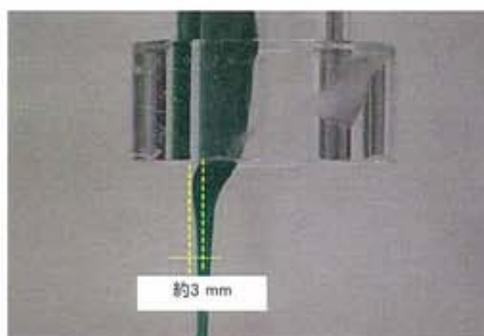
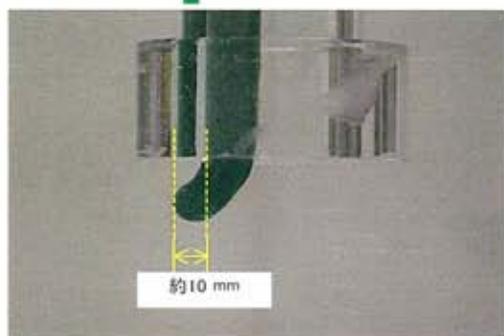


## 10. 1 原因究明の結果、流下ノズル健全性及び流下性確認試験の結果を受けて推定した流下停止に至った経緯

---

- ⑥ 上記の結果、流下ガラスの粘性が高く、流下ガラスが真直ぐに流れにくくなり、高周波加熱コイル付着物等に接触した。
- ⑦ 上記⑤の状態を解消する連続的な流下に至らず、流下状況が改善、解消することなく流下操作を継続したことにより、接触した部分を起点として流下ノズル出口に徐々に流下ガラスが蓄積し、流下ノズル出口全体を塞ぐ付着・堆積となった。
- ⑧ 流下ノズル出口付近に付着・堆積したガラスにより流下経路が塞がれたため、流下ノズルから出るガラスが下に流下できなくなり、高周波加熱コイルと流下ノズルの間を上昇し、流下ノズル上端部に達した。

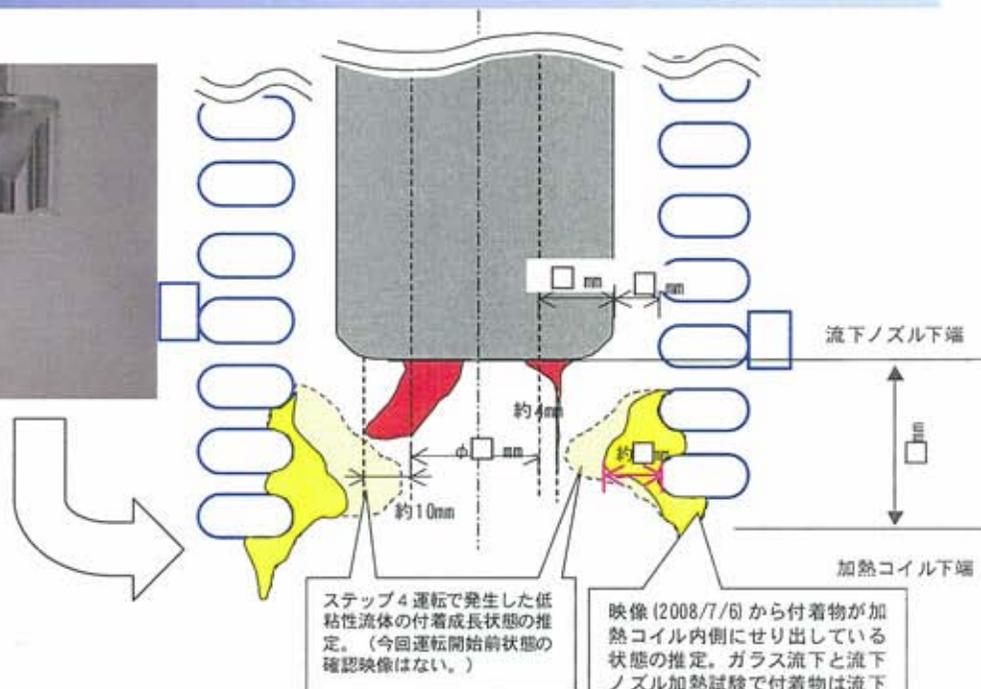
# 10. 1 原因究明の結果、流下ノズル健全性及び流下性確認試験の結果を受けて推定した流下停止に至った経緯



模擬粘性流体による流下開始時の状況

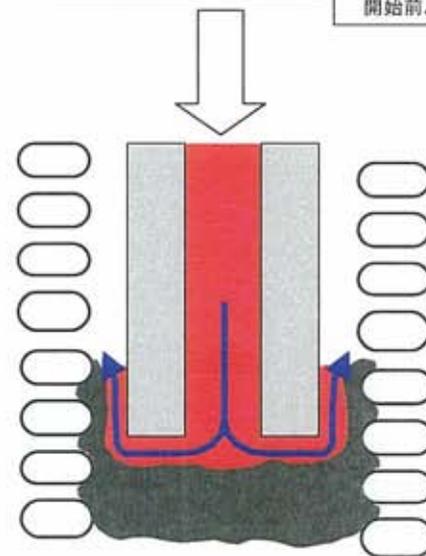
動粘度係数  $50 \text{万} \text{mm}^2/\text{s}$  (ガラス温度約  $\square$  °C相当)

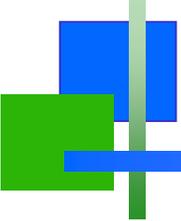
※本試験は、粘度一定の模擬粘性流体を用いており、実際の流下ガラスでは、ガラス冷却による粘性増加も影響することから、更り回り込むことと考えられる。



流下ノズル温度が低いことにより粘性が高く鉛直に流れ難くなり、高周波加熱コイル下端の付着物に接触し、流下ガラスが付着しノズル出口を塞ぐ堆積となったとその後、更に流下ノズルからガラスの流下が行われ、流下ノズル上端部までガラスが上昇した。

**粘性大⇒曲がり⇒接触⇒閉塞⇒上昇**





---

# 1 0 . 原因及び再発防止対策

## 1 0 . 2 原因及び再発防止対策

## 10.2 原因及び再発防止対策

### 【原因】

今回の流下停止に至った原因としては、円滑な「流下に必要な流下ノズル温度を確保できなかった」こと。

### 【再発防止対策】

○原因に対する対策として、その要因である放熱量の増加を補う高周波加熱による入熱を確保することで対応。

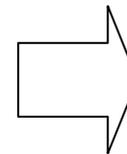
○高周波加熱による入熱の確保としては、「高周波加熱コイル上段加熱及び全段加熱における高周波加熱電力の増加」を行い、入熱が確保され必要な温度に到達していることを流下ノズル温度計で確認した後に高周波加熱コイル全段加熱に移行するという運転手順とする。

具体的には、

上段加熱：□ kW（第4ステップ前半は、□ kW）

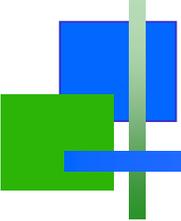
全段加熱：□ kW（第4ステップ前半は、□ kW）

流下ノズル温度：□ °C（以前は設定値無し）



今後は、流下ノズル温度の上昇速度を監視することにより高周波加コイル加熱電力の設定変更の必要性について評価していく

○流路障害の原因と考えられる高周波加熱コイルの付着物については、ヒータ方式などにより除去した。さらに、今後運転においては、6月11日の「安定運転条件検討結果報告」に示した対策の実施により、その発生要因と考えられる低粘性流体の付着を抑制することが期待できる。



---

# 參考資料

○流下ガラスにみられた偏流現象について、数値流体解析 (CFD) によって流下ガラスの挙動を評価した。

○CFDによって流体挙動を再現し、各パラメータ (流量, 物性, 周囲気体の影響など) の影響を明らかにするとともに、流下ガラス噴流のノズル中心からの偏りを評価する。

### ○手法概要

- ・VOF (Volume of Fluid) 法による溶融ガラスと周囲空気間の界面追跡
- ・平面二次元定常計算
- ・FLUENT6.3

### ○解析等に使用した溶融ガラス物性

物性	単位	ガラス温度	ガラス温度1200°C
密度	kg/m <sup>3</sup>		
粘性係数	Pa·s		
表面張力 <sup>[1]</sup>	N/m	0.3	
接触角 <sup>[2]</sup>	deg	70	

[1] Guerro, H. N., et al., Computer Modeling of a Glass Stream Departing from a Pour Spout Knife Edge, *Proc. of the 3<sup>rd</sup> ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, FEDSM99-7778, (1999).

[2] Pech, J., et al., Wetting, interfacial interactions and sticking in glass/steel systems, *Materials Science and Engineering A 384*, (2004).

# 数値流体解析 (CFD) による流下ガラスの挙動 (偏流現象) の評価

○想定されている偏流現象の模式図を下図 (左) 示す. 流量が十分大きいときはノズル中心に軸対称の噴流が形成されるが, 流下初期の低流量時には, ノズルの一方に偏った内壁に沿う流れが形成される. さらにteapot効果 (下図 (右)) によって, さらにノズル外側へ偏った流れになる可能性がある。

流下ノズル



偏流現象の模式図

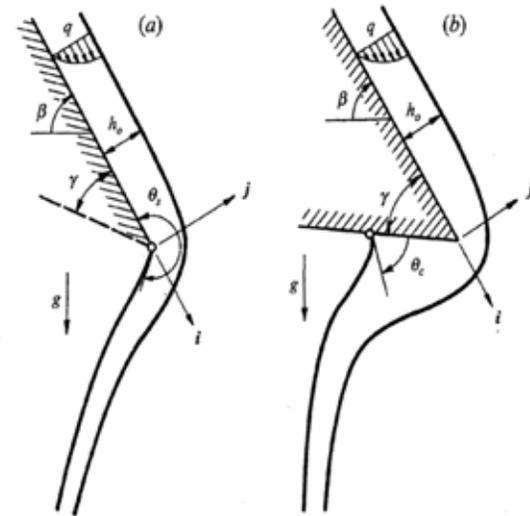


FIGURE 1. A two-dimensional viscous film falling from the lip of an inclined plate to form an unsupported liquid sheet, or curtain: (a) contact line pinned; (b) contact line free to migrate.

teapot効果

# 数値流体解析 (CFD) による流下ガラスの挙動 (偏流現象) の評価

○グリセリン水溶液を用いたteapot効果に関する二次元自由落下液膜流の実験結果が報告されており、CFDによる液膜挙動計算の妥当性を確認する目的で、この実験体系(下図)を対象とした計算を実施した。計算パラメータとして、以下の二つが定義される。

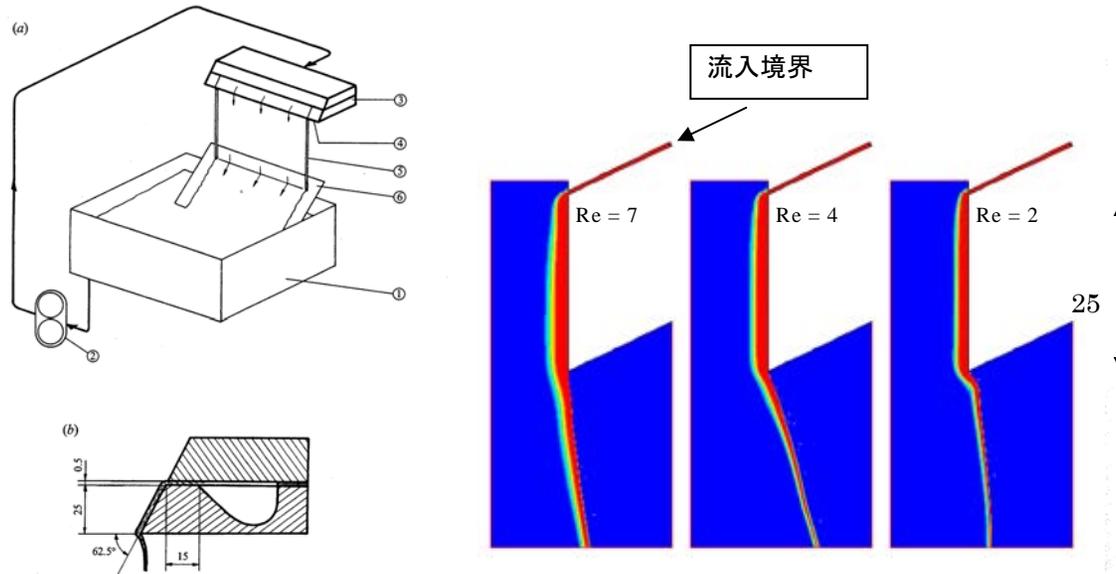


FIGURE 6. Curtain flow apparatus: (a) schematic of flow system; (b) die design (dimensions are in mm).

実験系

解析結果

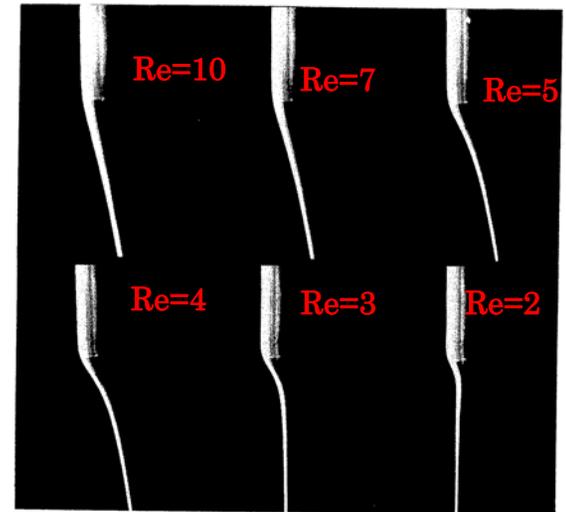


FIGURE 9. Hydrodynamic deflection of viscous liquid sheet falling from lip of vertical plane: section photographs.

実験結果

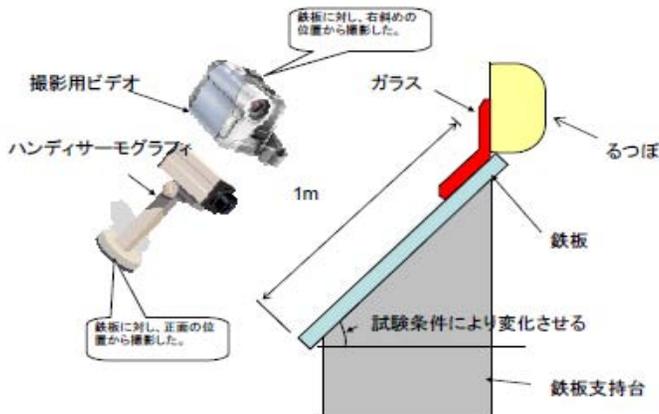
## 【流下ノズルと加熱コイル間におけるガラスの上昇に係る評価】

○溶融したガラスを傾斜面に流した際に流動性がなくなる様子をサーモグラフィで観察した。（下図参照）

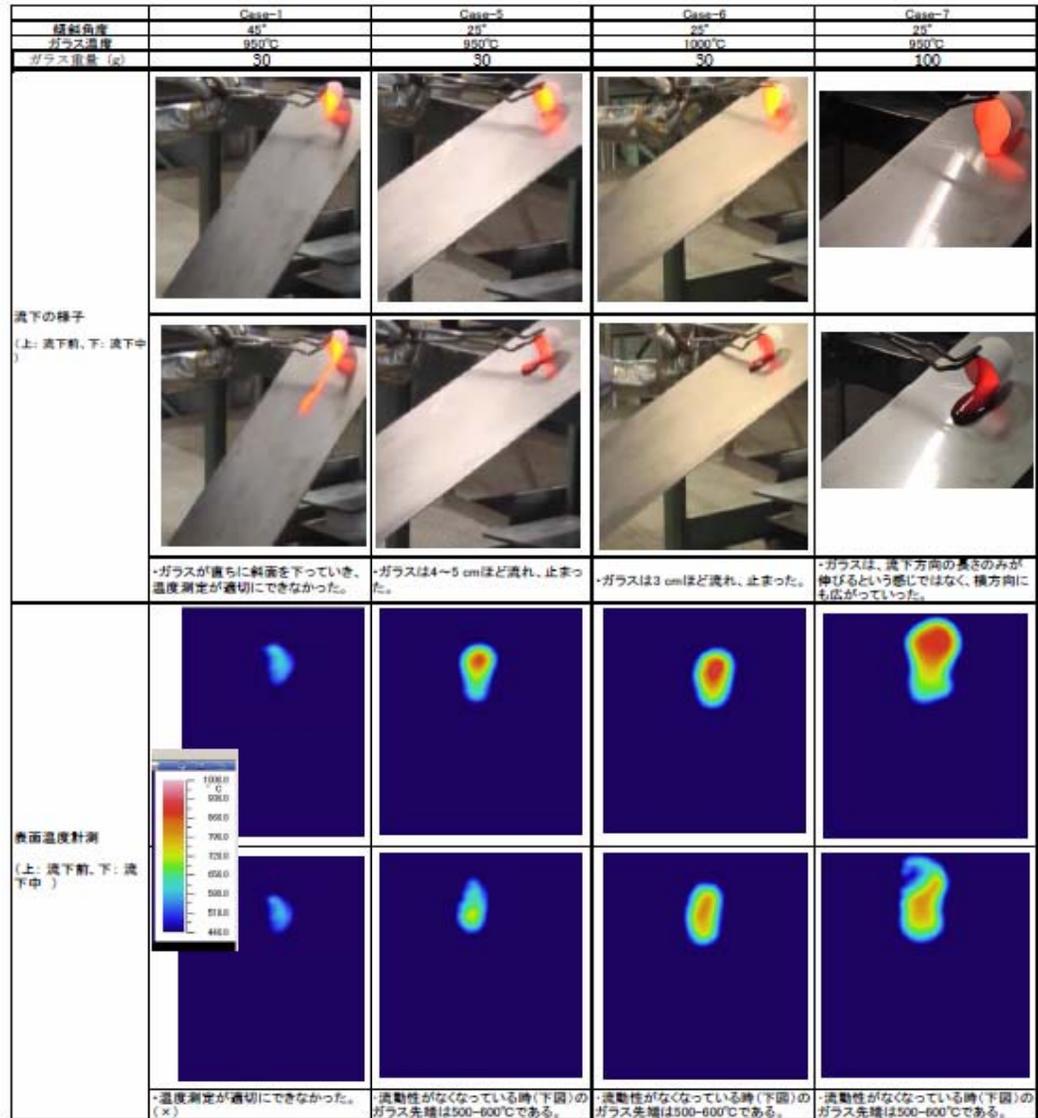
○試験は、溶融ガラス温度や傾斜角度をパラメータとして実施した。

○サーモグラフィによる観察結果より、試験条件に拘わらず 500~600℃で流動性を失うことが分かった。

→溶融ガラスはコイルと接触する前に流動しなくなることが考えられる。



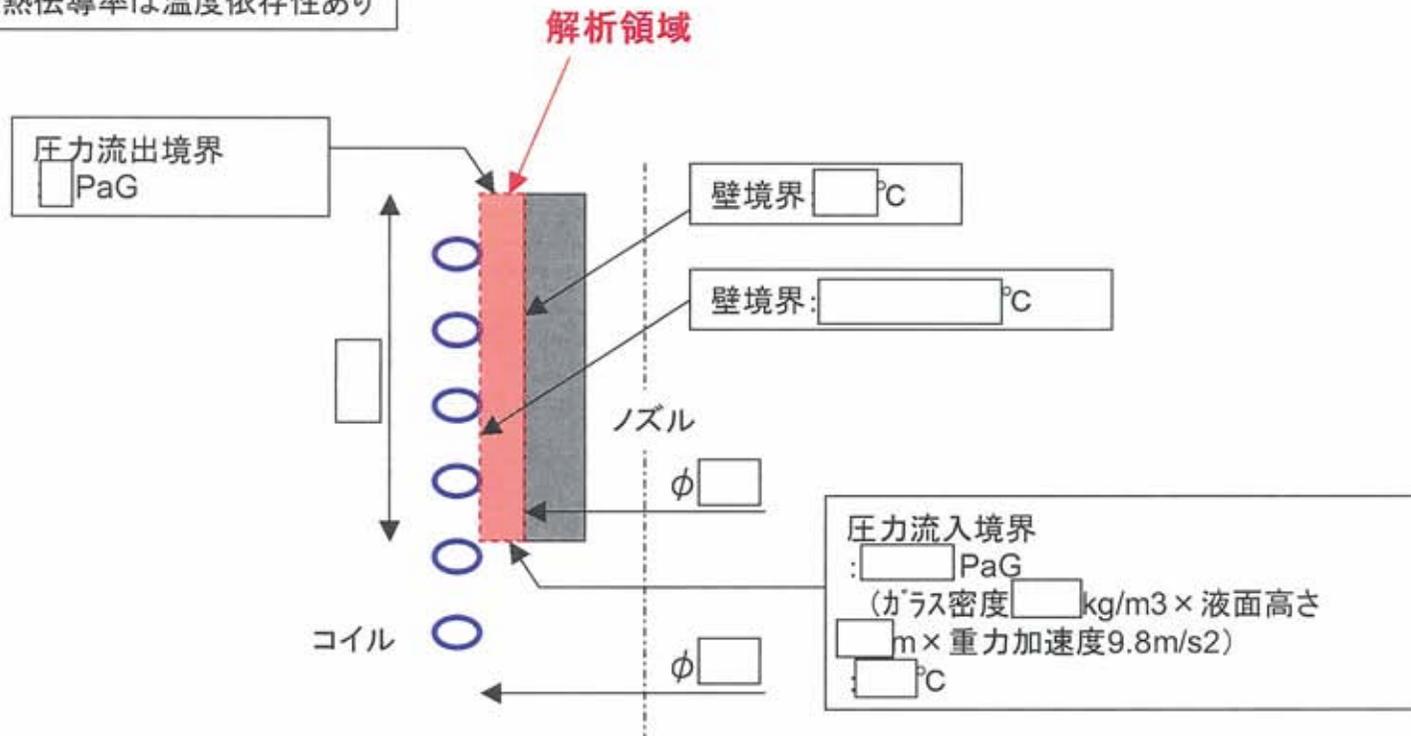
試験装置



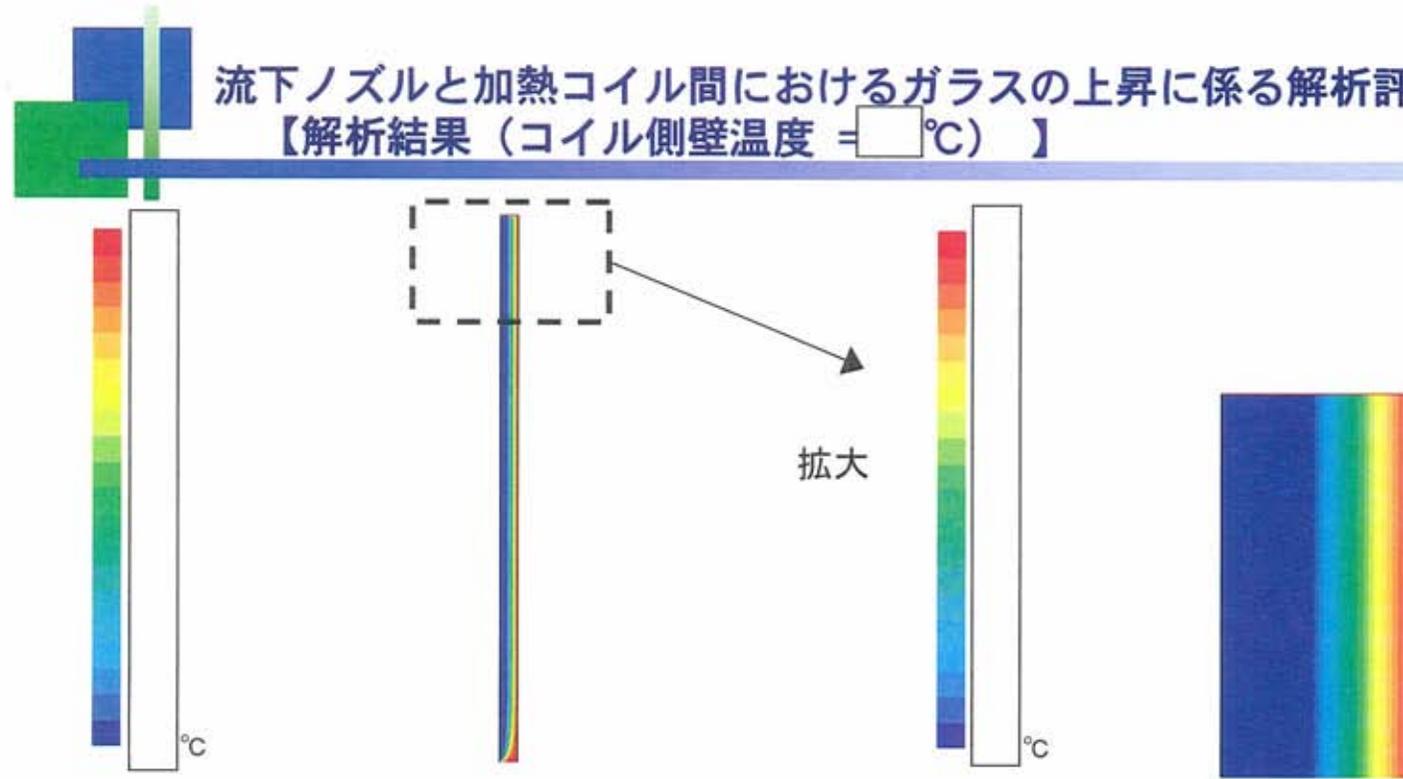
# 流下ノズルと加熱コイル間におけるガラスの上昇に係る解析評価 【解析領域と境界条件】

## 解析方法

- ・FLUENT6.3
- ・軸対称二次元
- ・定常
- ・ガラス粘性と熱伝導率は温度依存性あり



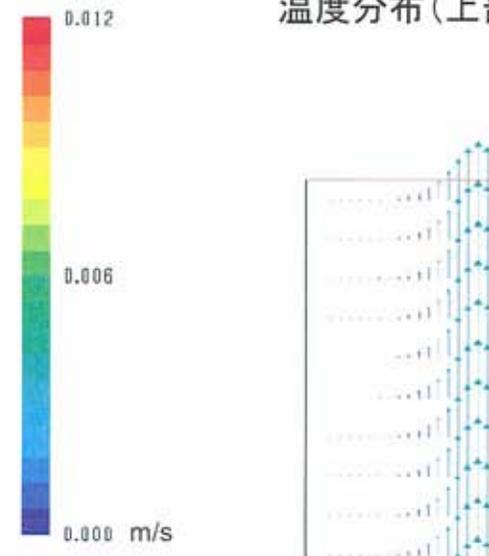
流下ノズルと加熱コイル間におけるガラスの上昇に係る解析評価  
 【解析結果 (コイル側壁温度 =  °C)】



温度分布 (領域全体)

温度分布 (上部拡大)

コイル温度	質量流量kg/s
<input type="text"/> °C	<input type="text"/>
断面平均流速mm/s	最大流速mm/s
0.1431	0.878



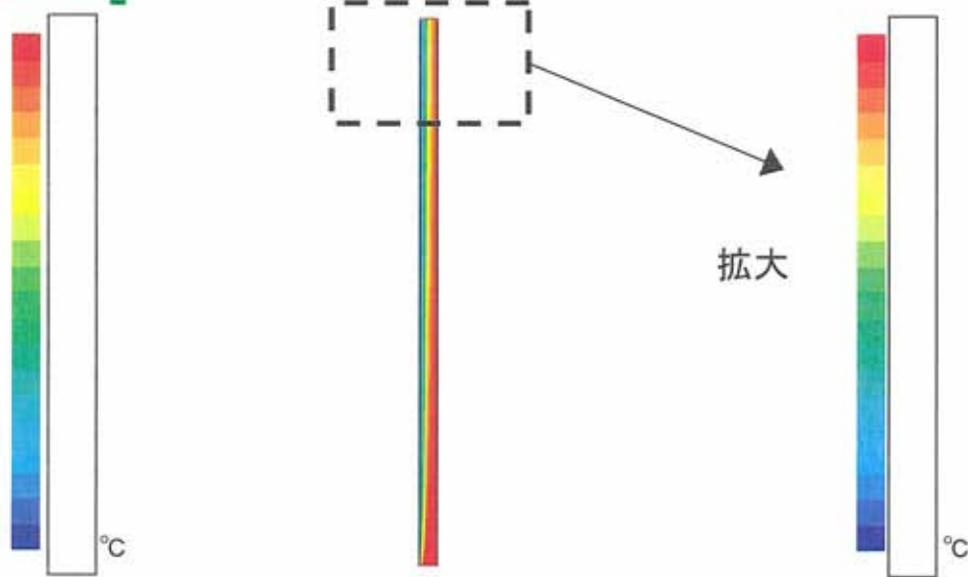
流速ベクトル (上部拡大)

コイル-ノズル間の隙間をガラスで埋める⇒隙間体積を埋める時間

35.1 [min]

# 流下ノズルと加熱コイル間におけるガラスの上昇に係る解析評価

【解析結果 (コイル側壁温度 =  °C)】

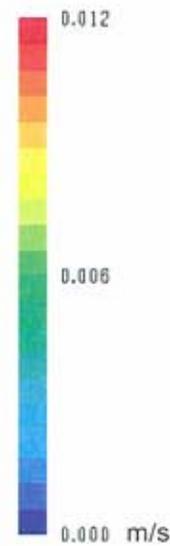


温度分布 (領域全体)



温度分布 (上部拡大)

コイル温度	質量流量kg/s
<input type="text"/> °C	<input type="text"/>
断面平均流速mm/s	最大流速mm/s
0.5833	2.318



流速ベクトル (上部拡大)

コイルーノズル間の隙間をガラスで埋める⇒隙間体積を埋める時間

7.6[min]