

ガラス固化技術開発施設(TVFF)における 固化処理状況について

— 漏れ電流発生の今後の対応 —

令和元年〇月〇日

日本原子力研究開発機構(JAEA)

1. 漏れ電流発生の原因調査及び対策について

- ✓ 原因調査及び対策のスケジュールを別添資料1(作成中)に示す。
- ✓ 早期のリスク低減のため、3ケースの対策を原因調査と並行して進めている。

➤ 原因調査の状況

- ・これまでの原因調査から、漏れ電流の発生箇所は、全段加熱時に固化セル内で変化する部位は流下ノズル以外になく、**流下ノズルと加熱コイルが接触して漏れ電流が発生したと判断した。**
- ・流下ノズルと加熱コイルの接触は、流下ノズルが取り付けられているインナープレートが溶融炉の運転に伴う加熱及び冷却によりひずみを生じて、**流下ノズルが傾き、この傾きが蓄積されたことによるものと推定している(調査継続中)。**

➤ 対策の状況

- ① 早期のリスク低減のため、ケース1~3の**対策を原因調査と並行して最速で進めている。**
 - ・ ケース1 : 2号溶融炉の再流下に向けた、**流下ノズルと加熱コイル間のクリアランス確保**
(結合装置の製作/交換までの間にガラス固化処理を進めるための方策の検討)
最短ケースとして成立性をできるだけ速やかに評価する必要がある。
 - ・ ケース2 : 2号溶融炉の再流下に向けた、**結合装置(加熱コイル含む)の製作/更新**
 - ・ ケース3 : **3号溶融炉の製作/更新**

2. 原因調査の状況

－ 漏れ電流発生箇所(1/2) －

以下の原因調査結果から、漏れ電流の発生箇所は、全段加熱時に固化セル内で変化する部位は流下ノズル以外になく、流下ノズルと加熱コイルが接触して漏れ電流が発生したと判断した。

1. 漏れ電流の検出状況(4回の検出時のリークモニタ①～③の状況): 参考資料18P参照

- (1) 全てのリークモニタで漏れ電流を検出していることから、漏れ電流はリークモニタ③から固化セル内である(推定)。
- (2) 全段加熱時しか漏れ電流による漏電リレーは作動していない。また、全てのリークメータで漏れ電流を検出している。

2. 絶縁抵抗測定

- (1) 流下停止後(約1時間)の測定結果より、流下ノズル加熱装置整合盤(LP21.4)のエアシリンダから固化セル内の絶縁は約 $0.4\text{M}\Omega$ (メーカ判定基準値: $0.2\text{M}\Omega$)であった。

3. 流下ノズルと加熱コイルの観察結果: 参考資料19P～20P参照

- (1) 流下ノズルと加熱コイルは、室温時、約1mm以下まで近接している。
- (2) 全段加熱時、熱膨張により流下ノズルが加熱コイルに接触した(推定)。

4. 漏れ電流値: 参考資料25P参照

- (1) 事象確認試験結果より、接触しない状況では数mA(実効値)程度しか流れない。
- (2) リークモニタでの測定結果、漏電リレー作動時には約150～250mA(実効値)以上の漏れ電流を計測していることから、接触している(推定)。

5. 漏れ電流発生の可能性

- (1) 要因を整理した結果より、流下ノズルが対称構造でないことで傾き等が生じ、加熱コイルに近接、もしくは僅かに接触したことにより漏れ電流が発生したもの(推定)。

2. 原因調査の状況

- 漏れ電流発生箇所(2/2) -

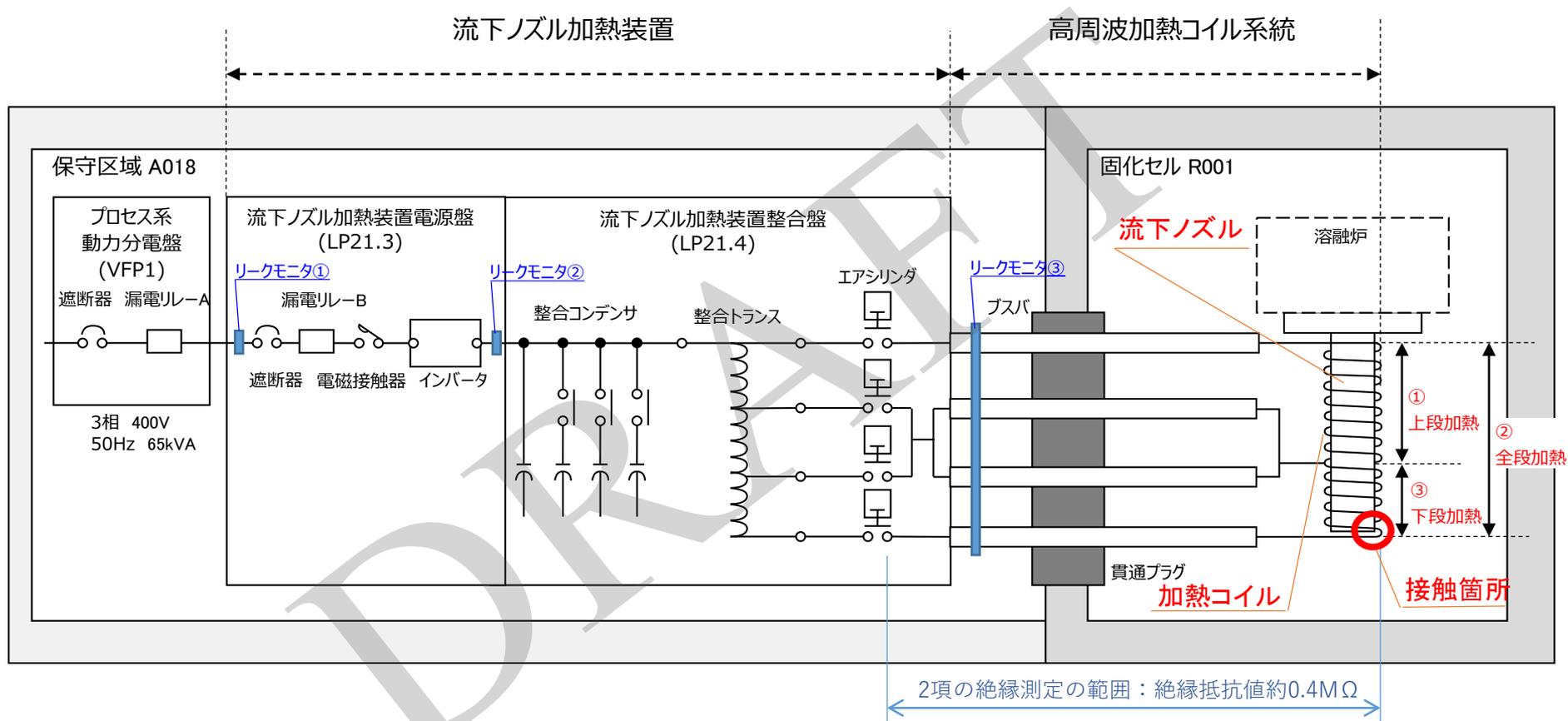


図. 加熱コイル給電系統

2. 原因調査の状況

- 流下ノズルの傾き(1/4) -

流下ノズルと加熱コイルの接触は、流下ノズルが取り付けられているインナープレートが溶融炉の運転に伴う加熱及び冷却によりひずみを生じて、流下ノズルが傾き、この傾きが蓄積されたことによるものと推定している(画像解析/非定常解析等評価継続中)。

1. 流下ノズルの観察: 参考資料19P~20P参照

- (1) TVF2号炉据付後のガラス固化体製造開始(TVF-131)時点で、流下ノズルと加熱コイルの中心位置は、北西方向に約3.5mmズレていた。
- (2) 現時点(TVF-317)での流下ノズルと加熱コイルの北西方向のクリアランスは冷態時で約0.4mmと評価している。
- (3) 流下ノズルの根元部を観察したところ、北西方向に約3.5mmズレていることを確認した。

2. 画像解析: 7P、参考資料21P~22P参照

- (1) TVF2号炉での据付時(TVF-131)から約70バッチ(TVF-200)までの範囲で変位が最も大きく、その後変位は僅かである(TVF-200バッチからTVF-317バッチまでの変位量や、今後の進行性については、現在評価中)。

3. 流下ノズルの熱膨張評価

- (1) 全段加熱時の加熱により流下ノズルは径方向に約0.5mm、軸方向に約6.8mm熱膨張する。

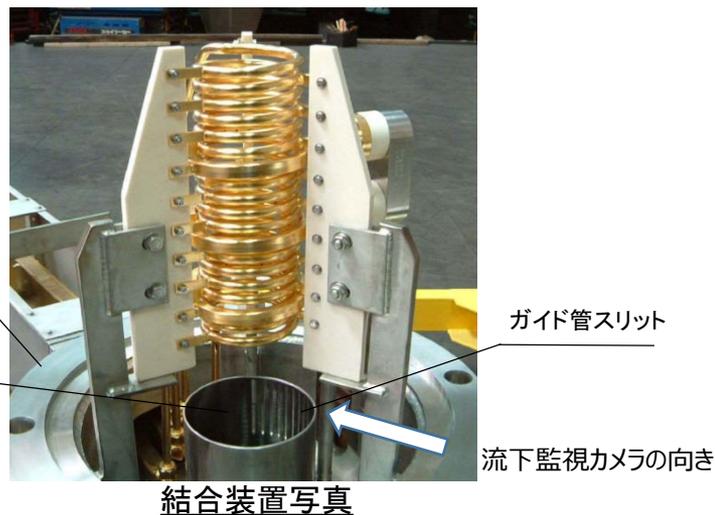
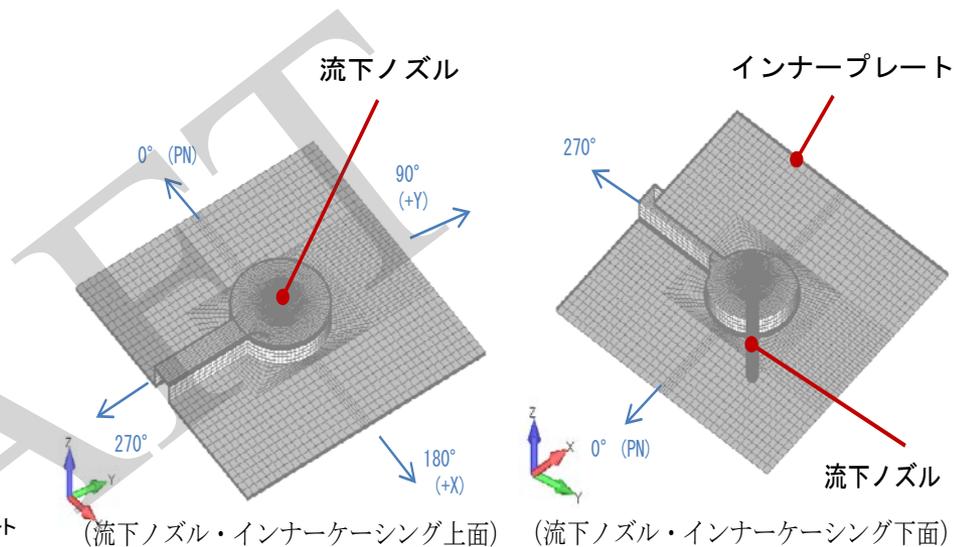
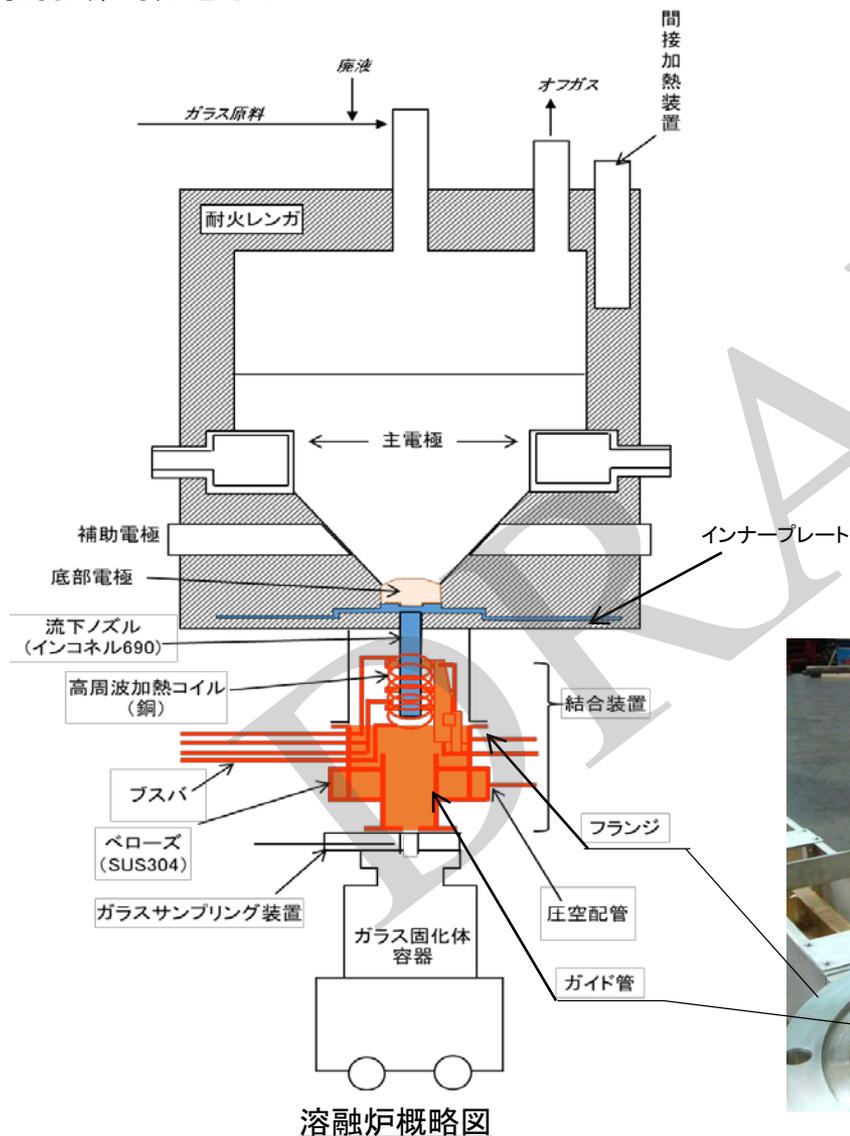
4. 熱応力解析(定常解析): 8P、参考資料23P~24P参照

- (1) 加熱時は流下ノズルは下方向へ熱膨張するものの流下ノズルの傾きは生じない。
- (2) 流下停止後の底部冷却時にインナープレートがひずみを生じ、流下ノズルが北西方向に傾く。(推定)

2. 原因調査の状況

- 流下ノズルの傾き(2/4) -

溶融炉概念図

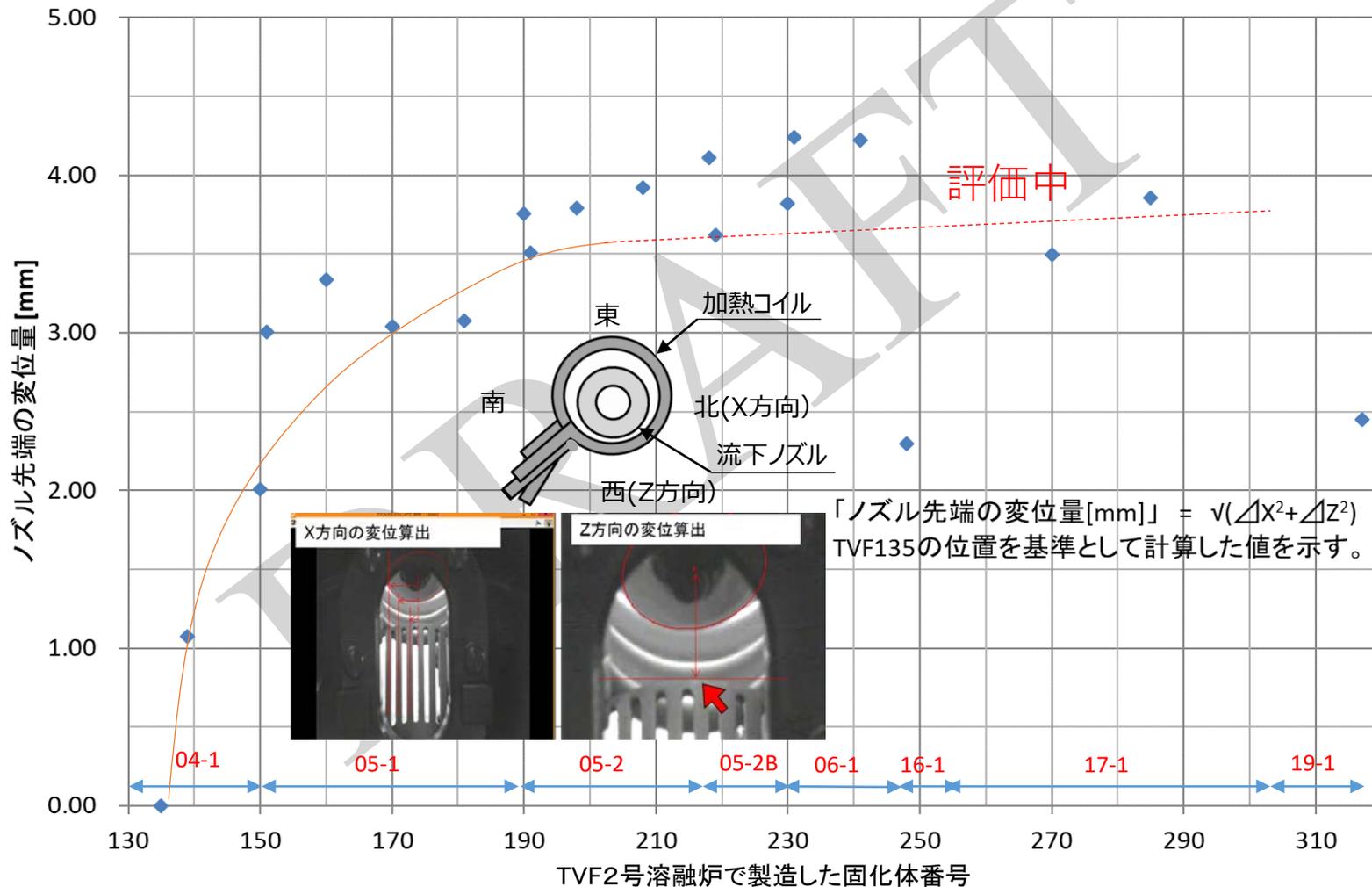


2. 原因調査の状況

- 流下ノズルの傾き(3/4) -

【画像解析状況】

流下監視カメラ映像より、北方向(X方向)と西方向(Z方向)について、ガイド管スリットを基準に流下ノズル先端の変位量を算出し、流下ノズルの北西方向への変位量を求めた。



2. 原因調査の状況

- 流下ノズルの傾き(4/4) -

流下ノズルの傾くメカニズム

上段加熱(加熱オイルの上段を高周波加熱)することにより、流下ノズル温度が上昇し始める。



全段加熱開始時(流下前)は、加熱コイルの全段を高周波加熱することにより流下ノズル全体を加熱する。



全段加熱中(流下中)は、全段加熱を継続することにより、流下ノズル内のガラスが熔融し、熔融ガラスが流下する。

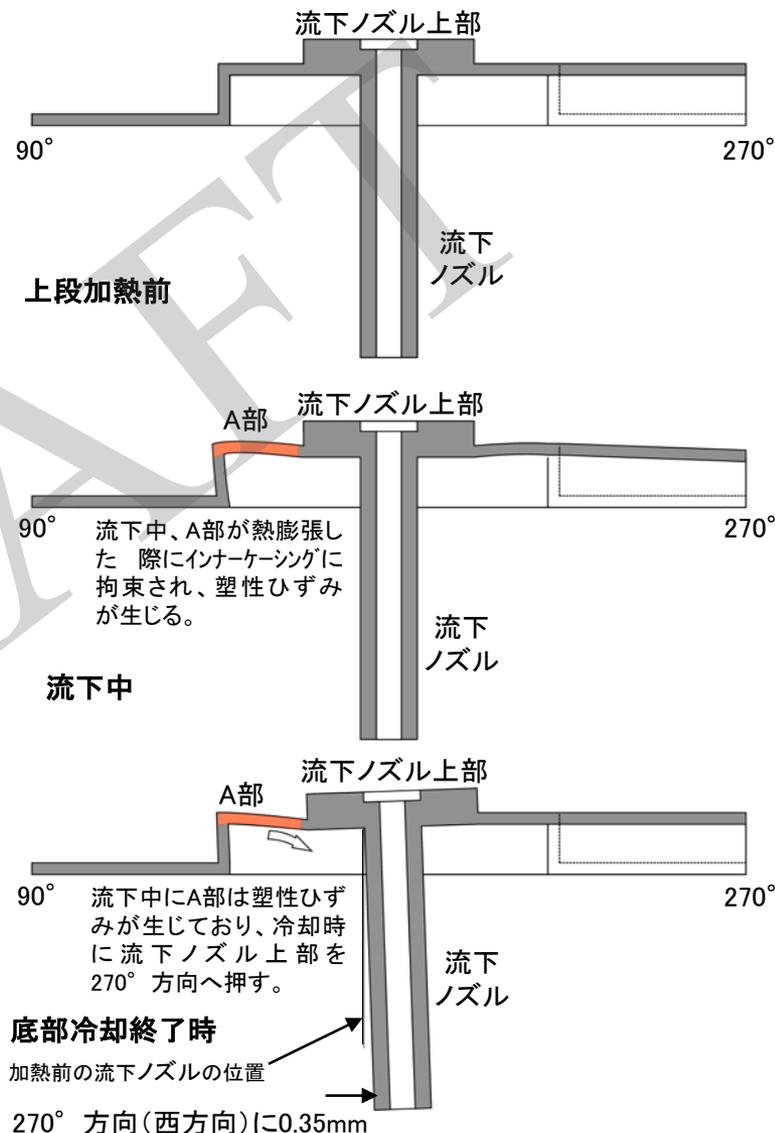
流下ノズルは1000度、流下ノズル上部が約820度に達する。



流下終了により加熱コイルによる高周波加熱が終了及び冷却エア吹付により流下ノズルが冷却され流下が停止する。



流下ノズルへの冷却エア吹付終了後、底部電極にエアを通気し、炉底部の冷却(炉底低温運転)を行う。



【ケース1】 流下ノズルと加熱コイル間のクリアランス確保(傾斜パッキン等による調整※)

早期のリスク低減の観点から、速やかに固化処理を再開可能なケースとし、その成立性の検討を進めている。

- 既存の2号溶融炉及び結合装置(加熱コイルを含む)の継続使用を前提としている。
- 流下ノズルと加熱コイルの位置関係に関する詳細観察等を踏まえ、以下の観点から段階的にその成立性を判断する。

- 成立性判断-1: 図面等より流下ノズルと加熱コイルのクリアランスが確保できるか。

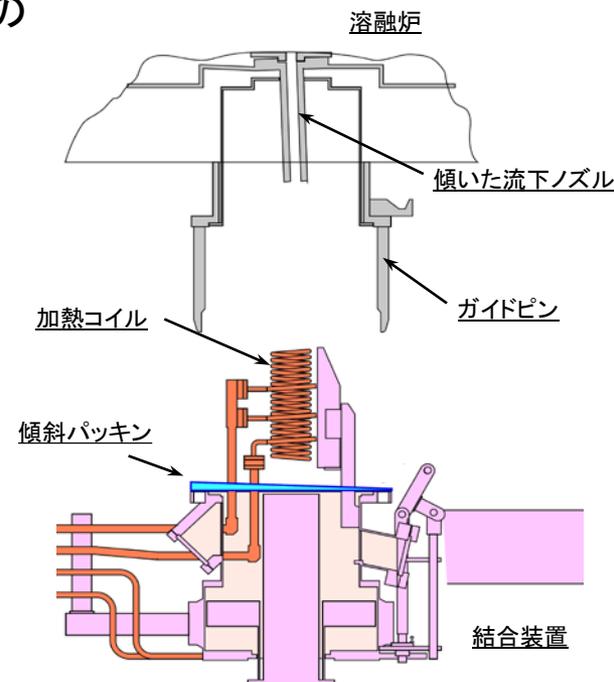
ブスバー等既存機器との取り合い部(遠隔継手)の位置ずれが許容可能か。

- 成立性判断-2: 既存の結合装置を取り外し、加熱コイルの目視点検結果より継続使用可能か。

- 成立性判断-3: 傾斜パッキンを挟んで結合装置を取り付け、コイルを加熱し、絶縁が確保されるかどうか最終確認。

※: 傾斜パッキン等による調整

溶融炉と結合装置のフランジ間に傾斜パッキンを挟み、流下ノズルの傾きを踏まえて結合装置(加熱コイルを含む)全体を傾けることにより、クリアランスを確保する。



ケース1の検討状況

傾斜パッキンのイメージ図

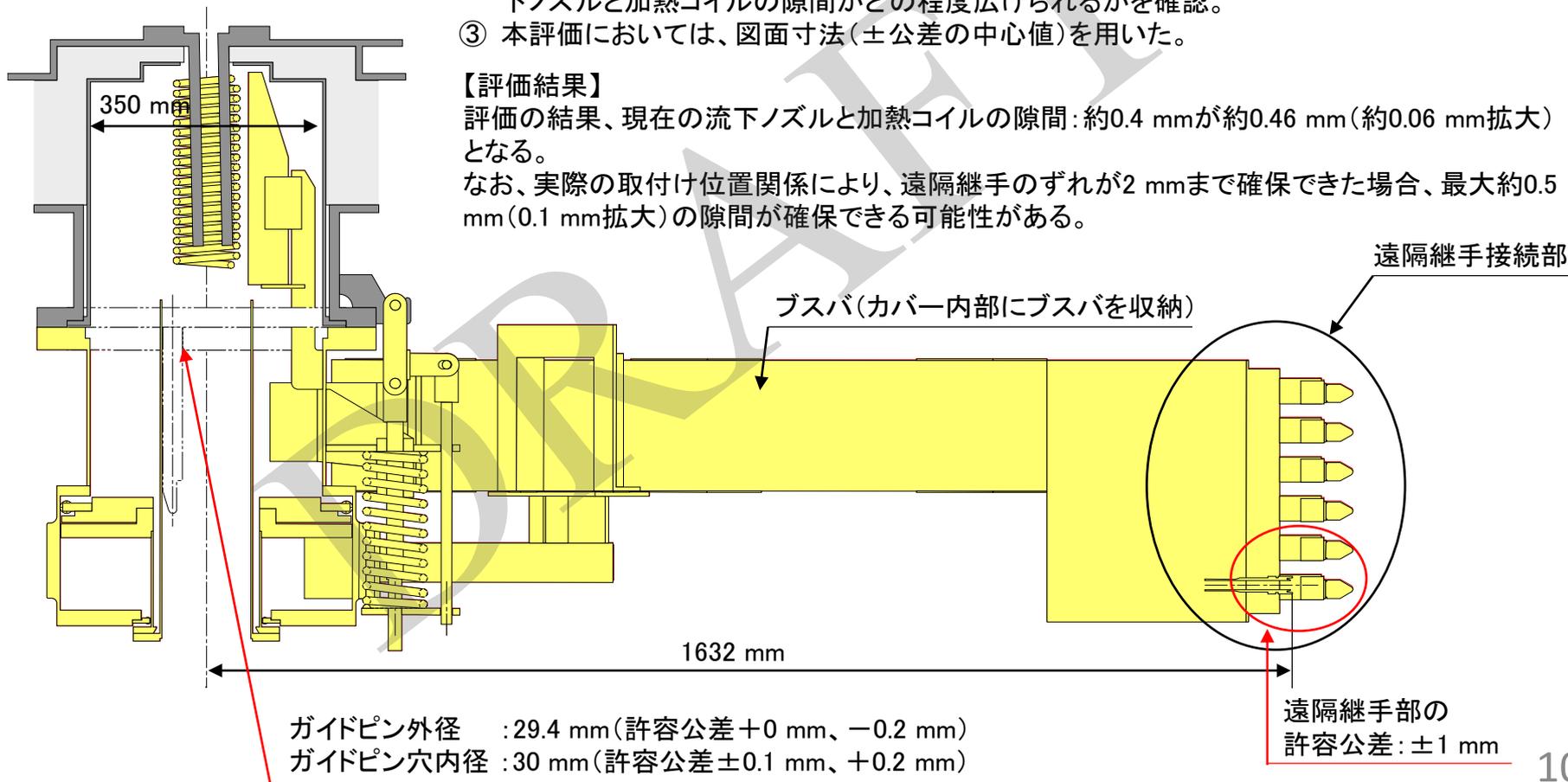
【評価の仕方】

- ① 本評価は、結合装置(図中、黄色部分)のフランジと溶融炉下部フランジの間に傾斜パッキンを挟むことを想定。
- ② 結合装置が傾斜すると、ブスバ部の先端に設置された遠隔継手接続部がずれるため、このずれが設計許容範囲に入るように傾斜パッキンを設定した場合の流下ノズルと加熱コイルの隙間がどの程度広げられるかを確認。
- ③ 本評価においては、図面寸法(±公差の中心値)を用いた。

【評価結果】

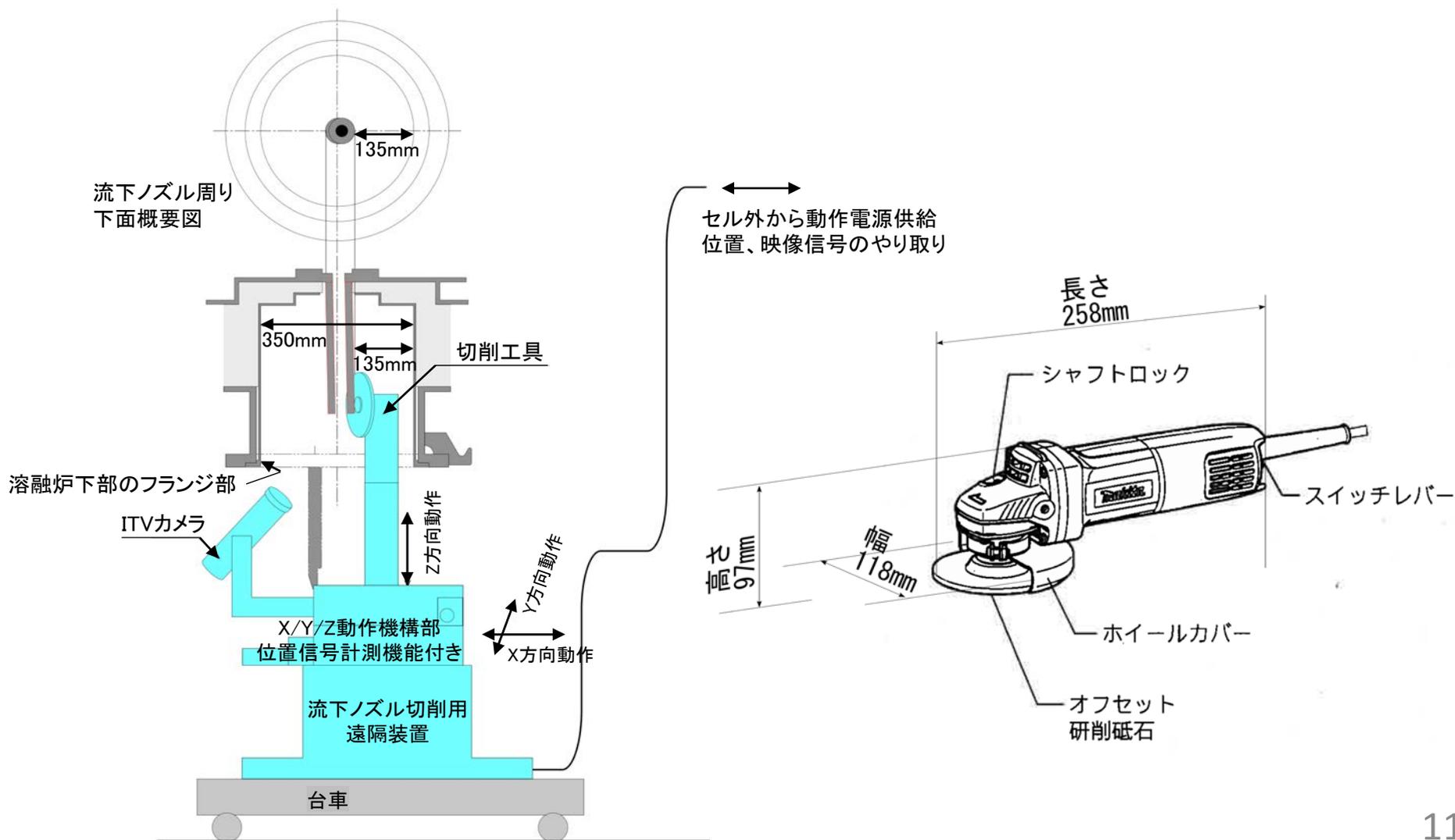
評価の結果、現在の流下ノズルと加熱コイルの隙間:約0.4 mmが約0.46 mm(約0.06 mm拡大)となる。

なお、実際の取付け位置関係により、遠隔継手のずれが2 mmまで確保できた場合、最大約0.5 mm(0.1 mm拡大)の隙間が確保できる可能性がある。



ケース1の検討状況

ノズル切削時のイメージ図



【ケース2】 結合装置(加熱コイルを含む)の製作/交換

- 既存の2号溶融炉を継続使用することを前提に、結合装置の製作/交換(加熱コイルを含む)を行うもの。
- 結合装置の製作にあたっては、流下ノズルと加熱コイルの位置関係に関する詳細観察を踏まえ、流下ノズルと加熱コイルのクリアランスを確保するため、以下の検討を行い仕様を決定する。

【加熱コイル径の拡大】

- 結合装置の構造上の制約等から加熱コイル内径の拡大の可能性を確認
- 加熱コイル内径の拡大後の流下ノズル加熱性能を把握
 - ➡ 加熱コイル径をパラメータとした流下ノズル加熱性試験により加熱範囲等を確認
 - ➡ 試験結果をもとに、流下ノズルの温度分布を評価し、さらなる傾き等を確認
- 結合装置予備品については、3号溶融炉との共用も踏まえて検討を進める。

ケース2の検討状況

コイル径拡大のイメージ図



【ケース3】 新規溶融炉(3号溶融炉)の製作/交換

- 解析の状況から、流下ノズルの傾きは、流下ノズルが取り付けられているインナープレートの形状が関係しているものと推定している。
- インナープレート構造の検討にあたっては、他の溶融炉の設計情報や運転状況を考慮する。
- 変更したインナープレート構造の妥当性は、熱応力解析により確認する。

DRAFT

4. 次回運転までのスケジュール

- ✓ 次回運転までのスケジュールを別添資料2(作成中)に示す。
- ✓ 運転再開時期は、ケース1の場合、R●年●月頃。ケース2の場合、R●年●月となる見込み。
 - ・ ケース1について、図面等により流下ノズルと加熱コイルのクリアランス確保は、課題が多く、適用は難しい見込み。しかしながら、既存の結合装置を取り外し、加熱コイルの目視、流下ノズルの位置関係より、R2年1月に成立性を判断する。
 - ・ ケース1の成立性判断は、ケース2の運転再開時期に影響しないようにするため、R2年2月末までに判断する。
 - ・ ケース2は、ケース1の採否に関わらず進める。
 - ・ ケース2の工程短縮に向け、結合装置製作/交換の工程短縮を検討するとともに、この期間中に実施する作業工程の前倒し、組み換え等の検討を継続する。

- 現場のモチベーション維持のための取り組みをより丁寧に継続していく。

《仕事の意義をしっかりと共有》

- ① 当面の目標の明確化
- ② 目標達成に必要な経営資源を現場に配布
- ③ 現場の主体性を尊重しつつ、その進捗状況を適宜フォロー
- ④ 経営層から現場まで良好なコミュニケーション

向上策を記載予定

参考資料

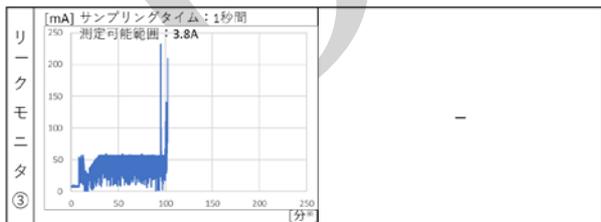
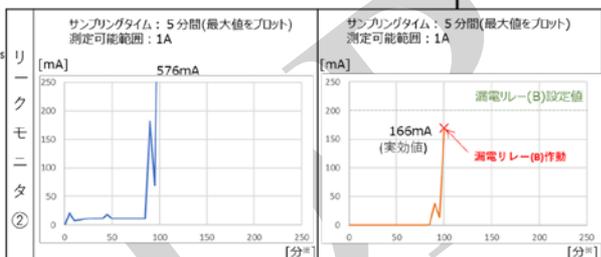
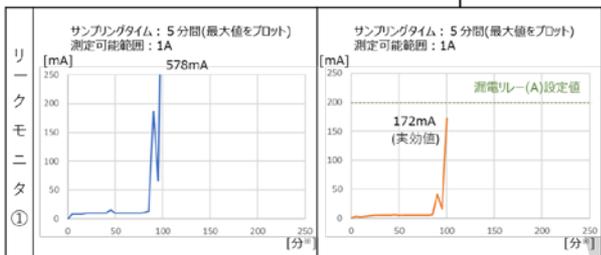
DRY-FET



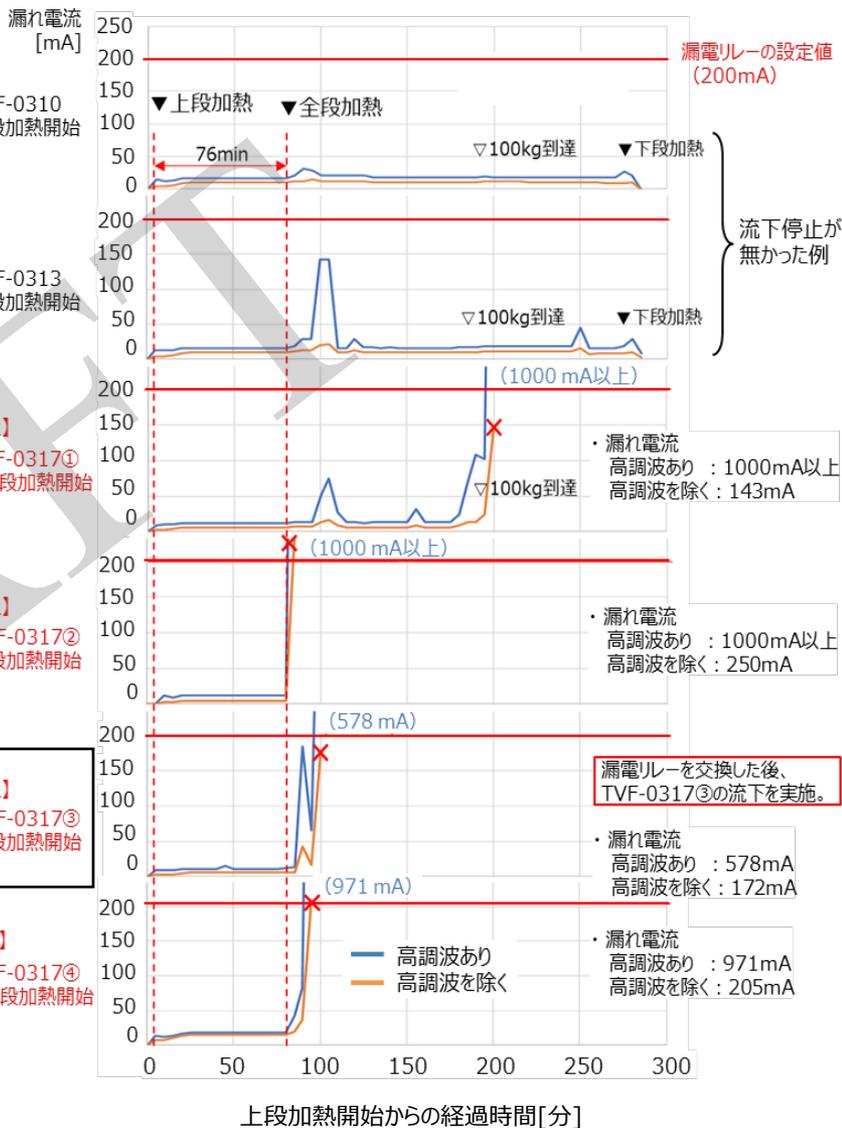
図 流下ノズル加熱装置系統図

表 漏れ電流発生時のリークモニタ値

	高調波含む	高調波除く
地絡電流計	残針指示値：0A 電流計(表示のみ) 測定可能範囲：10A	-



※ 横軸は上段加熱開始からの時間



流下停止が無かった例

【流下ノズルと加熱コイルの観察結果】

【推定方法】

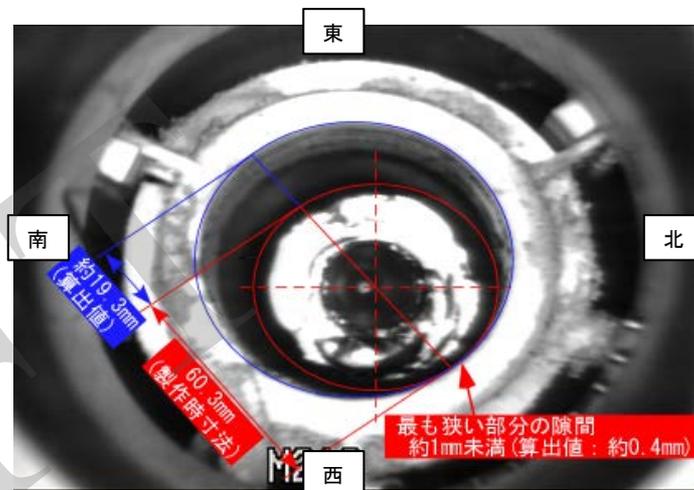
- 流下ノズル外径60.3mm(製作時の実測寸法)を基準として、画像上での計測値を換算して寸法を算出した。
- 加熱コイルの内径は設計値80mmとした。

① 流下ノズル先端部

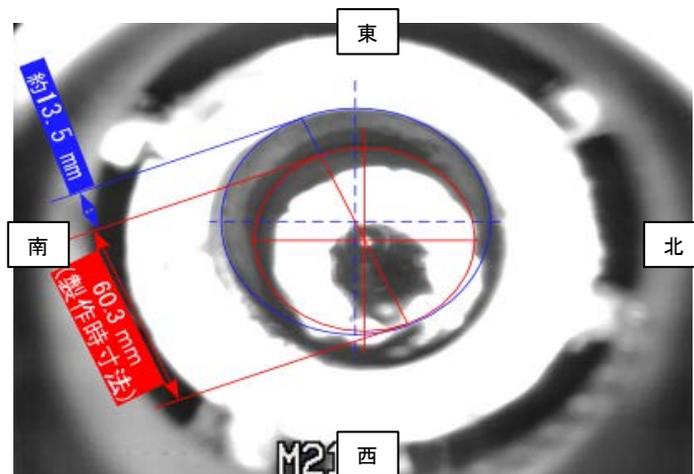
- 流下ノズル先端部と加熱コイルの間隔は、最も広い箇所では約19.3mm。
- **流下ノズル先端部と加熱コイルの間隔は、最も狭い箇所では約0.4mmと推定。**

② 流下ノズル根本部

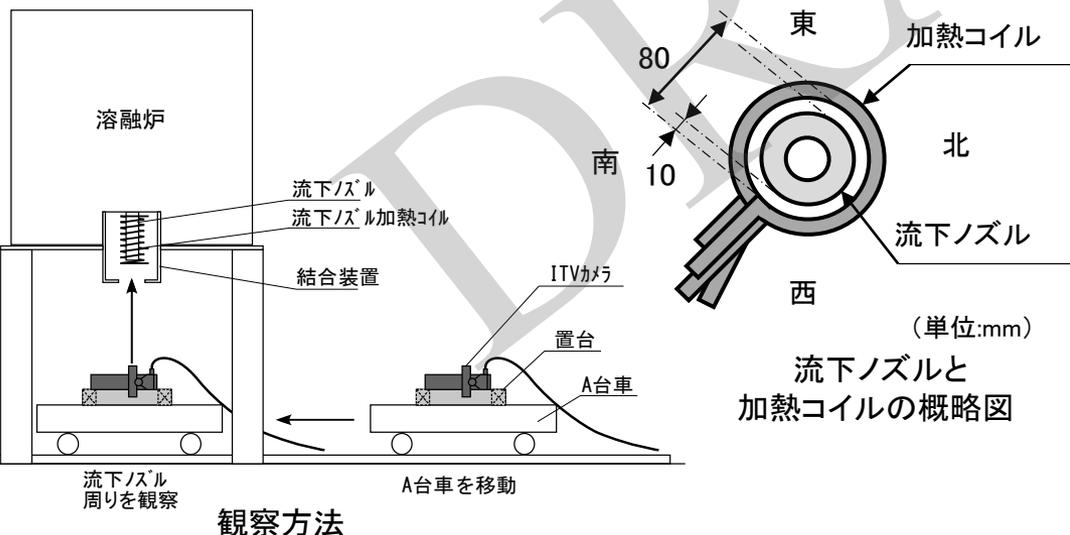
- 流下ノズルの根本付近と加熱コイル上部の間隔は、最も広い箇所では約13.5mm。
- **流下ノズル根本部のずれは、西側に約3.5mmと推定。**



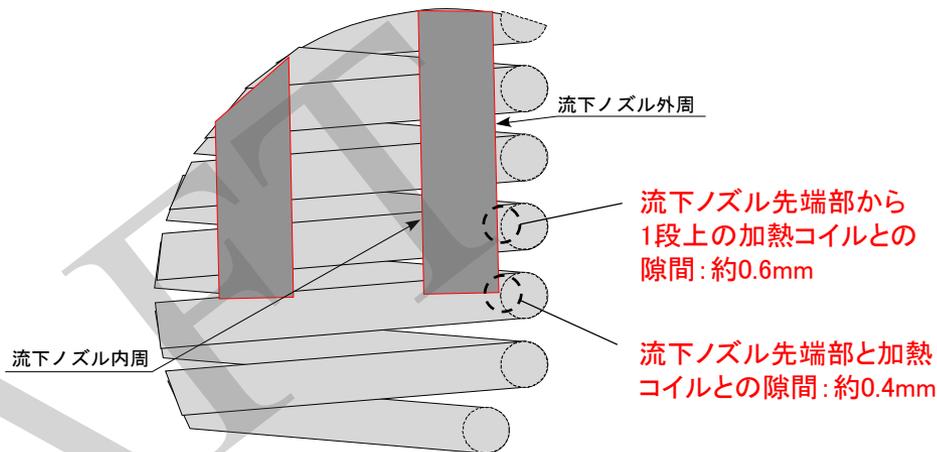
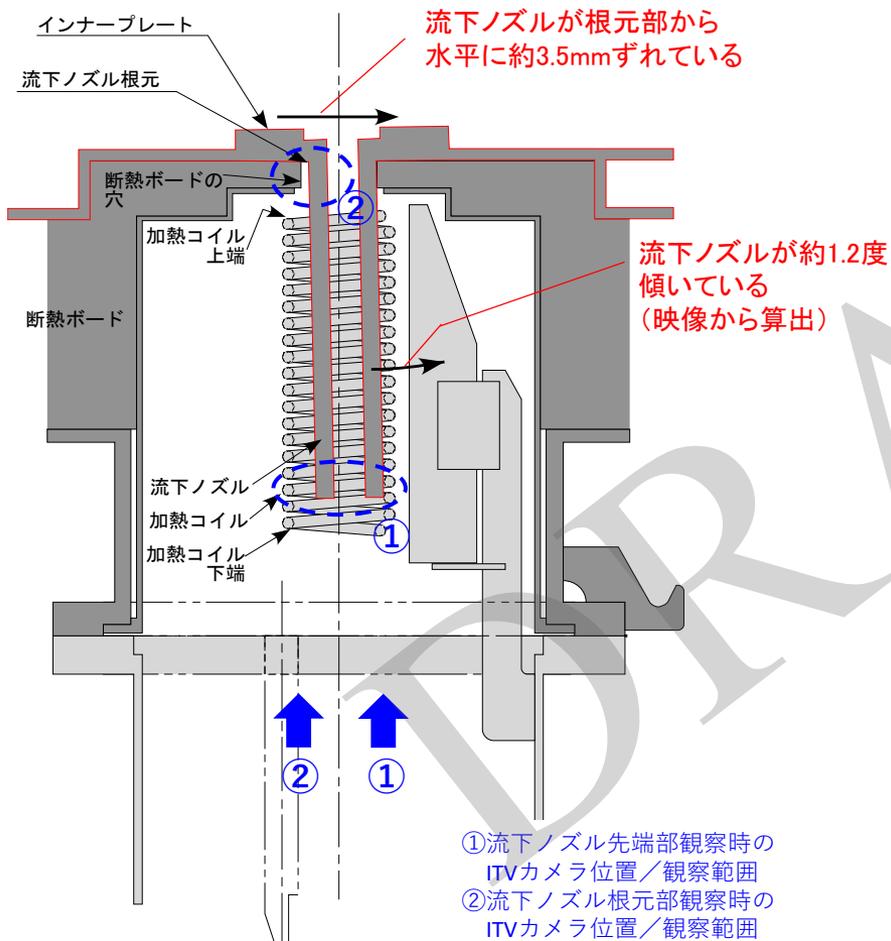
① 流下ノズル先端部の観察結果



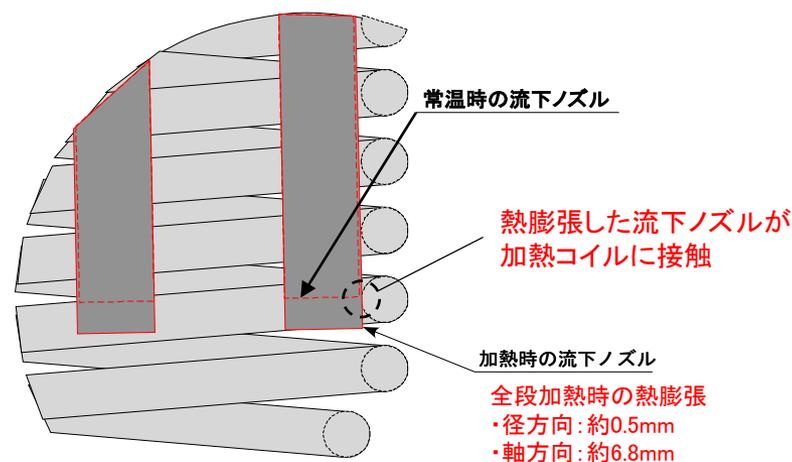
② 流下ノズル根本部の観察結果
観察結果



✓ 現状、室温の状態では流下ノズル先端部と加熱コイルの隙間は最も狭い箇所でも約0.4mmと推定でき、全段加熱時の流下ノズルの熱膨張(軸方向に約6.8mm、径方向に約0.5mm膨張する)により、加熱コイルに接触したと考えられる。



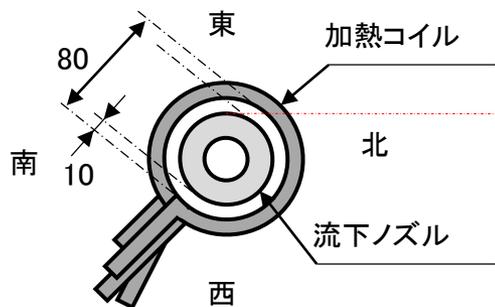
流下ノズルと加熱コイルの位置関係拡大図(常温時)



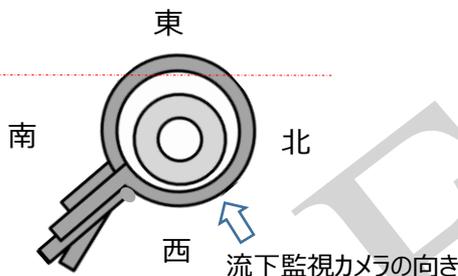
流下ノズルと加熱コイルの位置関係拡大図(全段加熱時)

観察結果から推定した
流下ノズルと加熱コイルの位置関係(常温時)

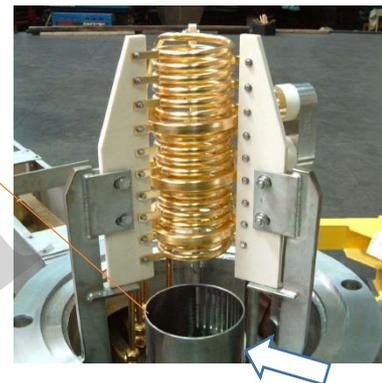
【画像解析状況】



i) 設計上の初期位置

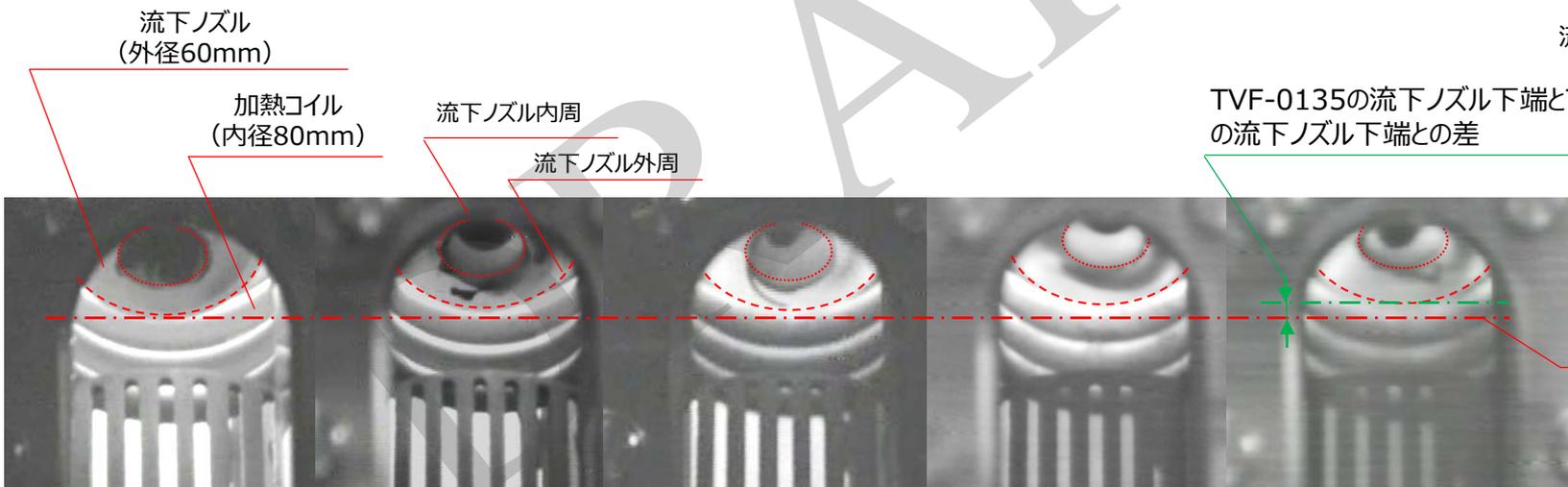


ii) TVF-317流下後の位置



流下監視カメラの向き

TVF-0135の流下ノズル下端とTVF-0317の流下ノズル下端との差



TVF-0135の流下ノズル下端

○TVF-0135
(5本目の流下映像)
流下日：2004年10月30日
(04-1キャンペーン)

○TVF-0185
(55本目の流下映像)
流下日：2005年4月27日
(05-1キャンペーン)

○TVF-0235
(105本目の流下映像)
流下日：2007年2月11日
(07-1キャンペーン)

○TVF-0285
(155本目の流下映像)
流下日：2017年4月20日
(17-1キャンペーン)

○TVF-0317
(187本目の流下映像)
流下日：2019年7月27日
(19-1キャンペーン)

TVF2号炉での据付時(TVF-131)から現在(TVF-317)までの範囲でX方向及びZ方向の変位を以下の方法で算出し、変位量から、進行性については評価中する。

画像により倍率や左右位置が異なるため、次の方法でX方向(北方向)、Z方向(西方向)の変位を算出した。

- ①格子がくっきり映っている範囲において、2値化処理(白と黒の2階調に変換)で3本の格子範囲を抽出
- ②各格子範囲の中心位置から左右方向の格子間隔を求め、TVF-135の間隔を「1」とした際のスケーリング係数を算出する。
- ③各画像を再スケーリングし、楕円をあてはめ中心座標を求める。

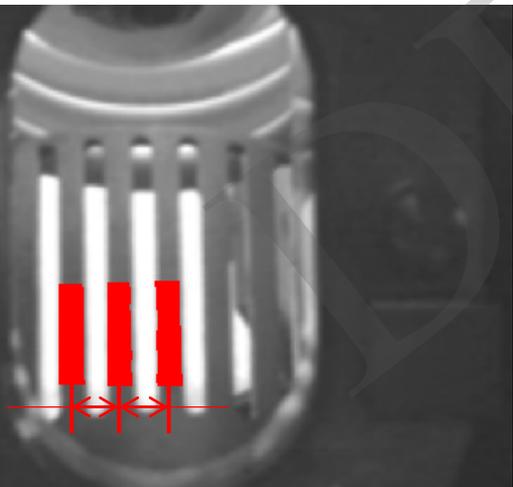
【X方向の変位算出】

左右方向変位は、3本の格子の中心位置と楕円中心の位置関係から算出(3点の平均値)。

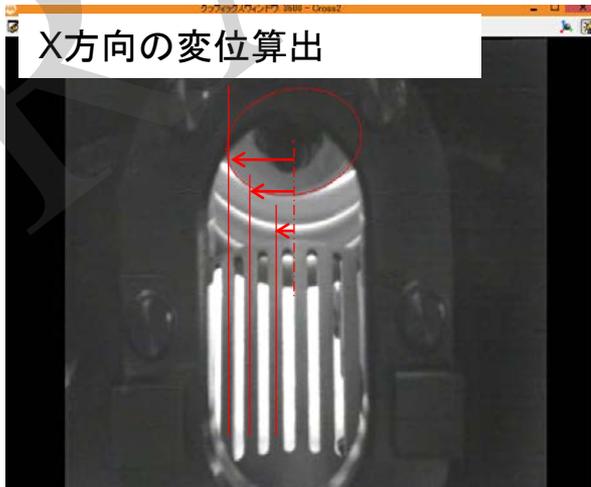
【Z方向の変位の算出】

上下方向変位は、格子の頂点部分を目で見て判断し、楕円中心との位置関係から算出。

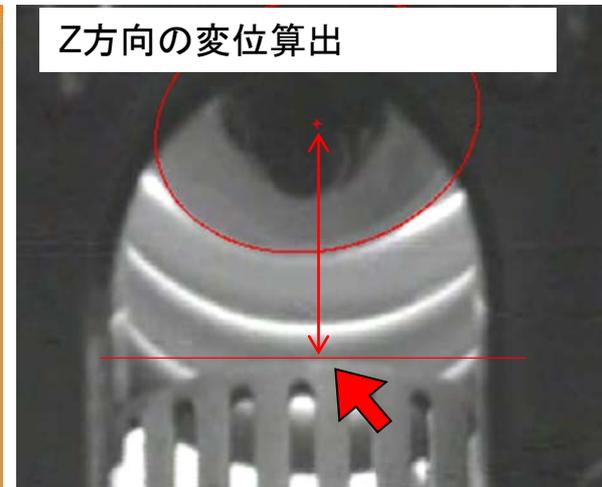
①



X方向の変位算出



Z方向の変位算出



【解析による傾き等評価】

1. 解析条件及び解析モデル

- (1) 解析対象 : 流下ノズル・インナーケーシング
- (2) 解析モデル : 3次元ソリッド要素モデル
- (3) 解析手順

熔融炉運転時の代表的な時点[下図の(A: 流下中[流下ノズル温度が最も高いとき]), (B: 底部冷却終了時[流下ノズル温度が最も低いとき])]について, 運転データをもとに定常伝熱解析で流下ノズル全体の温度分布を求め, その温度条件を使用して熱応力解析(弾塑性解析)を実施し, 流下ノズルの傾きを検討

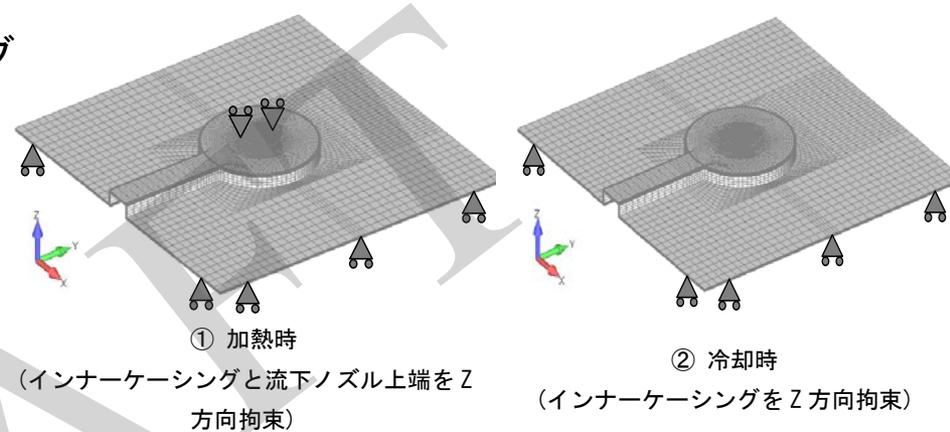
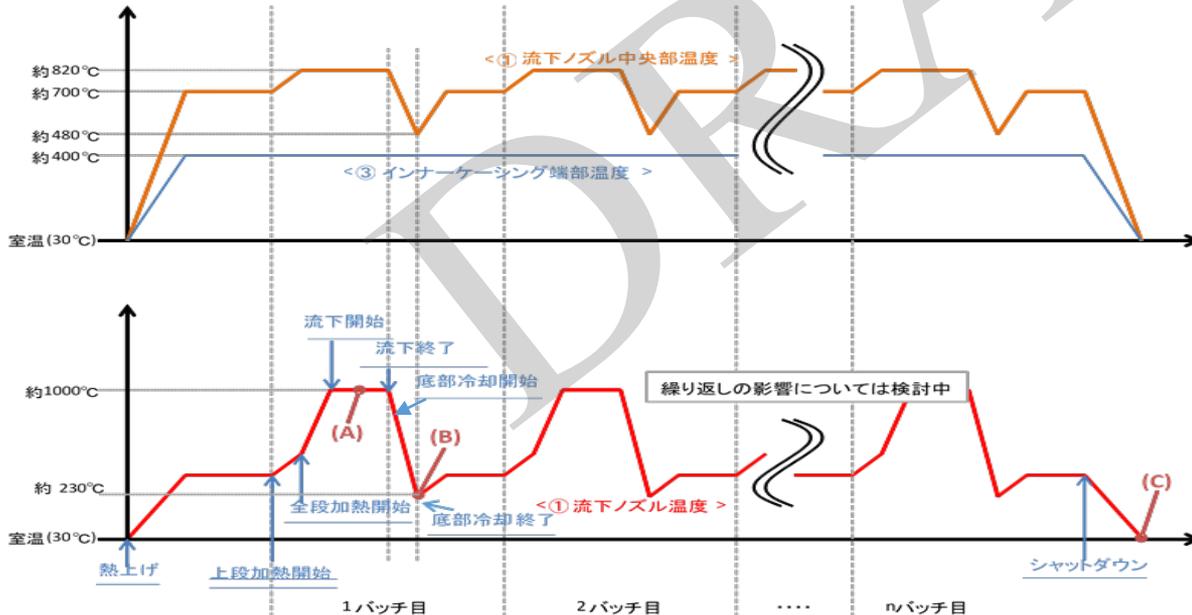


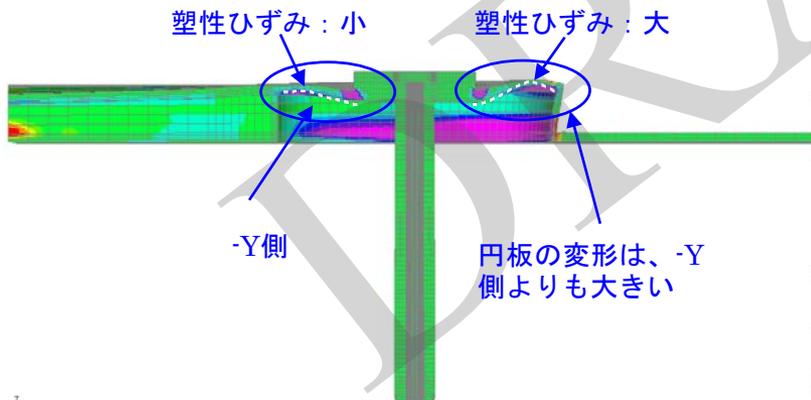
図3 熱応力解析の拘束条件



- 溶融炉の熱上げにより流下ノズルの温度も上昇し熱膨張を生じる。
- 流下ノズル周囲の耐火レンガによりその熱膨張による変形が拘束されることで熱応力が生じ、降伏応力に達した部位では塑性ひずみが生じる。ただし、流下ノズルに傾きは生じない。
- 底部冷却時等、流下ノズルの温度が低下すると熱膨張が収縮し元の状態に戻ろうとする。この時、高温時に生じた塑性ひずみにより加熱前の元の状態には戻らず変形が生じる。
- 高温時に発生した塑性ひずみの分布により、流下ノズルの温度を下げたときにノズルを傾ける変形が生じる。

流下中

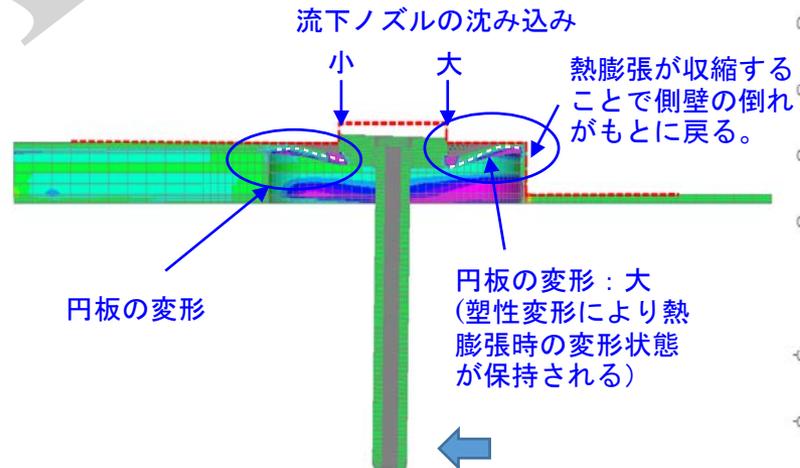
流下ノズル温度計の段差部がある側(-Y)よりその反対側(+Y)の応力が大きいことから、塑性ひずみも+Y側で大きく発生している。



先端の移動量： $\Delta x \doteq 0\text{mm}$

アットプラント Step 1, Inc 8
変形(16384), Total Translation
塑性ひずみ Plastic Strain-2

底部冷却終了時

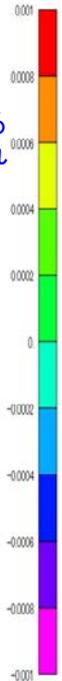


先端の移動量： $\Delta y \doteq -0.35\text{mm}$ 西方向へ

アットプラント Step 2, Inc 1
変形(1637), Total Translation
塑性ひずみ Plastic Strain-2

-----:流下ノズル変形前(加熱前の元の形状)の外形線

【mm/mm】



事象確認試験結果

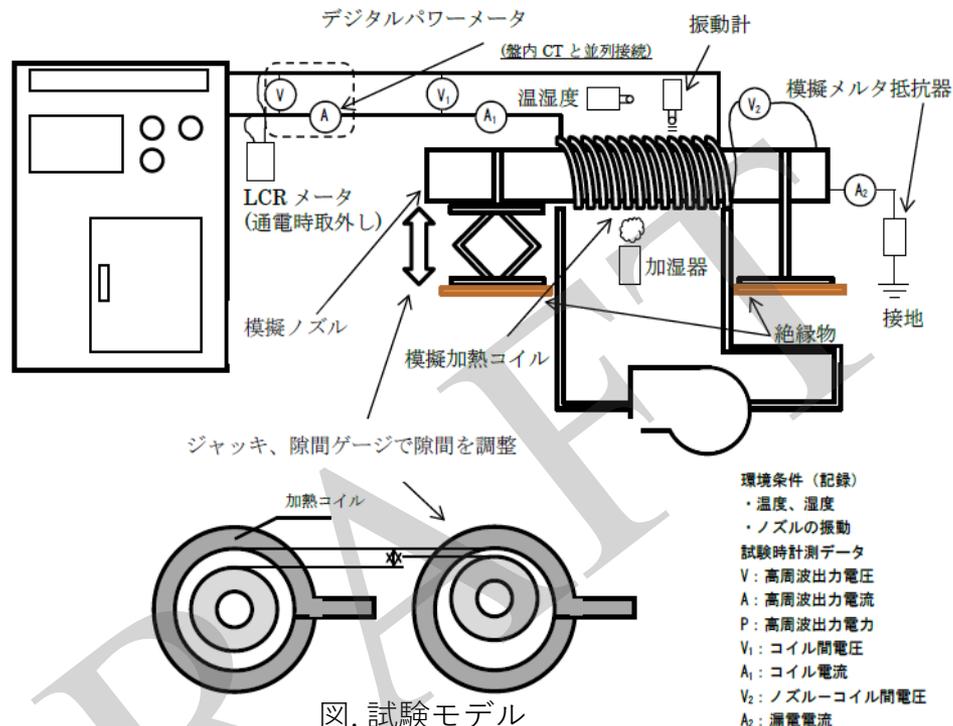


図. 試験モデル

表. 試験結果

	試験条件						試験結果
	電圧 (V)	周波数 (Hz)	ポリシート	隙間 (μm)	加湿	接地抵抗 (Ω)	漏れ電流量 (mA) 実効値※1
1	95	6	1 枚	12.5	無し	10	5
2	↓	↓	2 枚	25.0	↓	↓	5
3	↓	↓	3 枚	37.5	↓	↓	5
4	↓	↓	0 枚	12.5	↓	↓	5
5	↓	↓	0 枚	12.5	有り	↓	5
6	100	↓	↓	↓	無し	↓	5
7	150	↓	↓	↓	↓	↓	6
8	200	↓	↓	↓	↓	↓	6

※1 実効値：漏洩電流波形の生波形を実効値演算したもの。(測定器の制約からノイズを含んだ信号であり参考値とする。)