

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11月28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塑性ひずみを生じて、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

流下停止の原因は、流下ノズルとコイルの接触によるものと判断しており、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。
 - ・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。
- (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、漏電リレー作動時、全てのリークモニ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0.4M Ω (メーカー判定基準値:0.2M Ω)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すると評価により確認した。

4. 漏れ電流値: 参考資料25P参照

- (1) 事象確認試験結果から、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の結果、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、接触していると推察した。

5. 漏れ電流発生の可能性

- (1) 要因を整理した結果から、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流下ノズルに傾きが生じ、加熱コイルに接触したことにより漏れ電流が発生し、漏電リレーが作動したと評価した。

2. 原因調査の状況

- 漏れ電流発生箇所(2/2) -

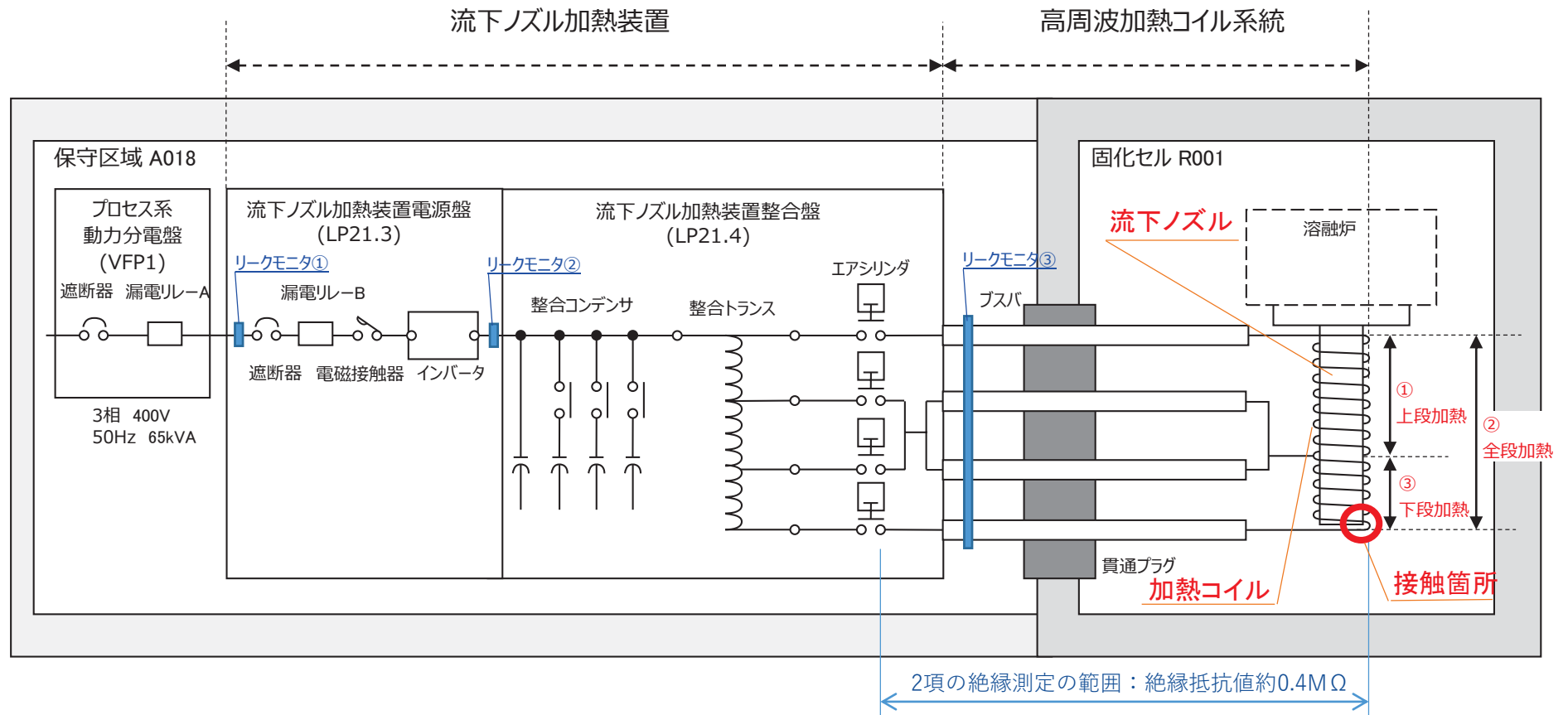


図. 加熱コイル給電系統



2. 原因調査の状況

- 流下ノズルの傾き(1/4) -

以下の原因調査から、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塑性ひずみを生じて、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号溶融炉据付後のガラス固化体製造開始(TVF-131)時点で、流下ノズル先端部と加熱コイルのクリアランスは、設計上の10mmに対し、北西方向で約6.5mmとなっていた。
- (2) TVF-317の流下中断後、流下ノズル先端部と加熱コイルのクリアランスは、冷態時、北西方向で約0.4mmと評価している。
- (3) TVF-317の流下中断後、流下ノズルの根元部を観察したところ、冷態時、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号溶融炉の据付時(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、その後の変位は僅かである(TVF-200からTVF-317までの変位や、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。

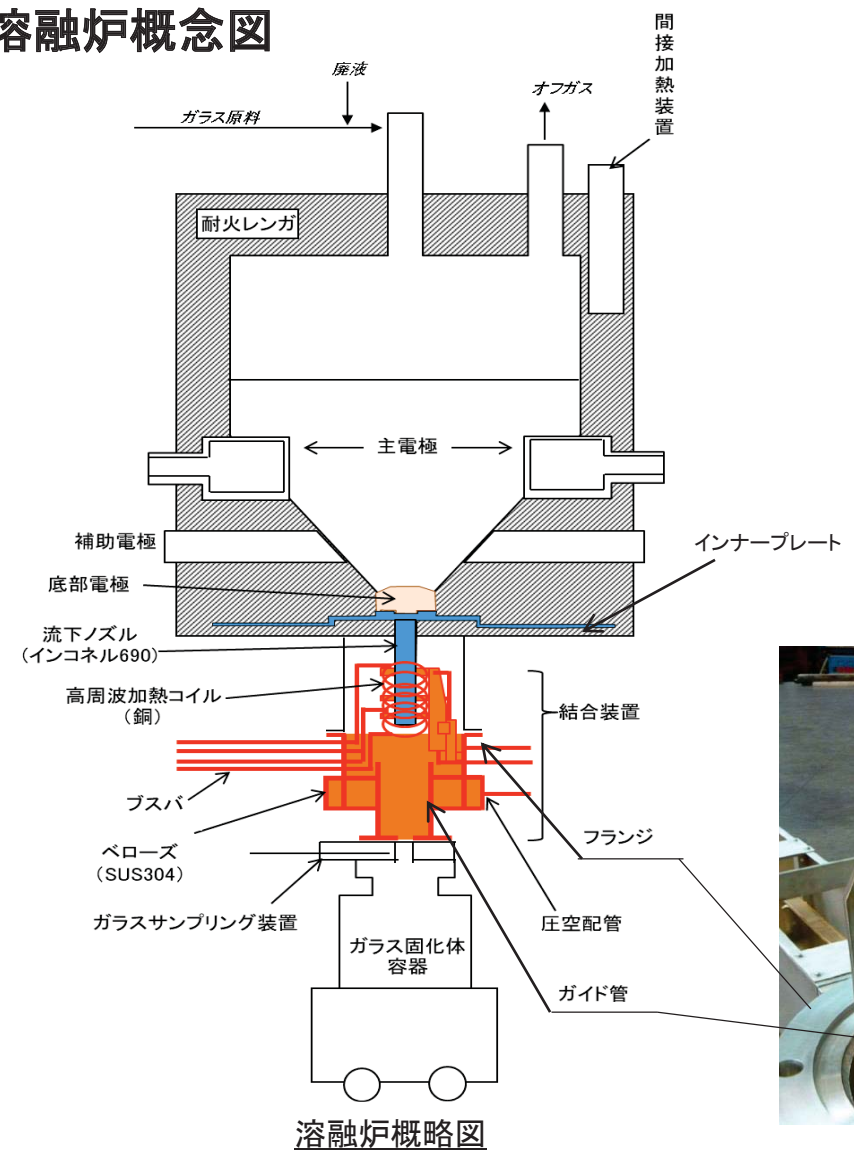
4. 熱応力解析(定常解析): 8P、参考資料23P~24P参照

- (1) 流下中(全段加熱時)、インナープレートが熱膨張し、その一部に塑性ひずみを生じる。また、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) 流下後の底部冷却時に塑性ひずみを生じたインナープレートが収縮し、流下ノズルが北西方向に傾く。(推定)

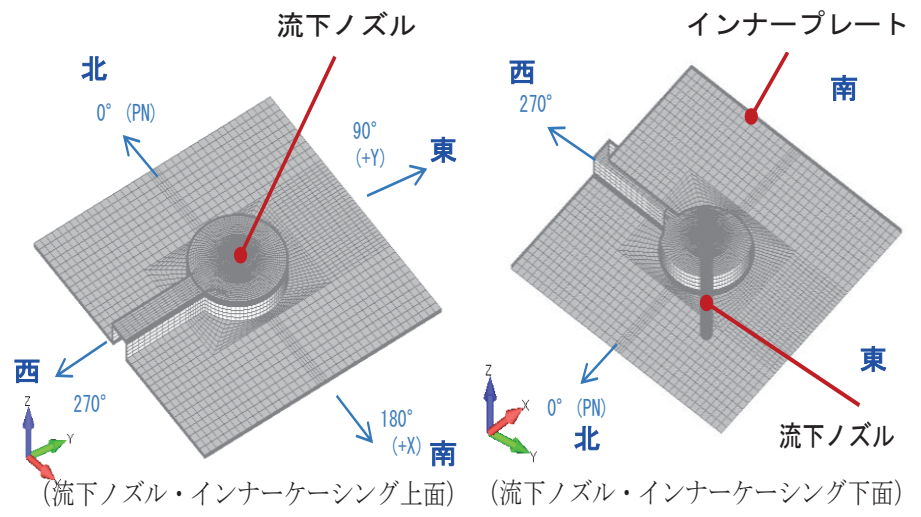
2. 原因調査の状況

- 流下ノズルの傾き(2/4) -

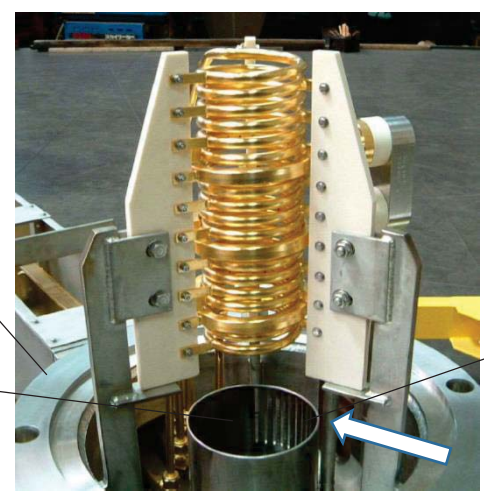
溶融炉概念図



溶融炉概略図



流下ノズル・インナープレート 3Dモデル図



結合装置写真

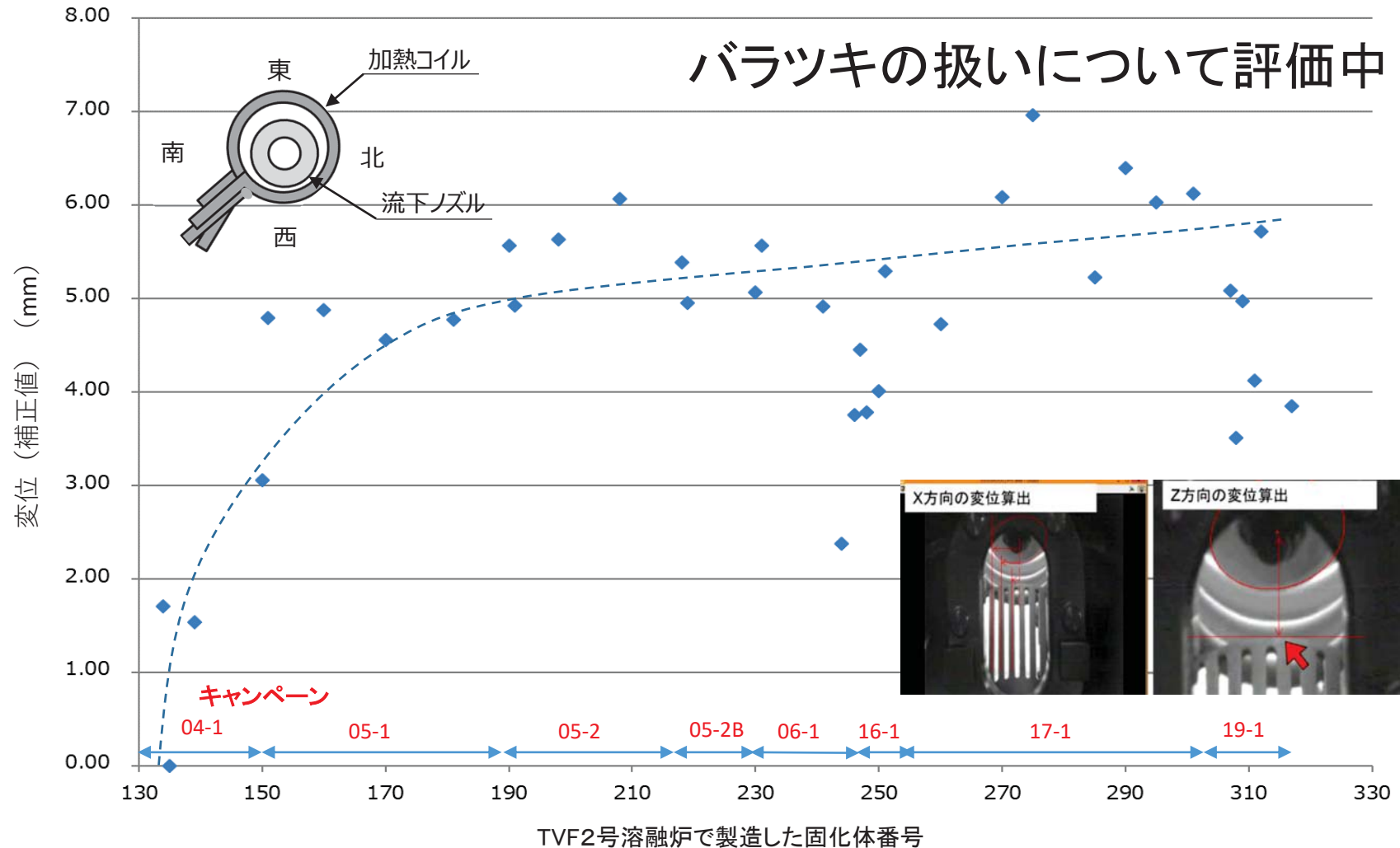
ガイド管スリット
流下監視カメラの向き (北西方向から)

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から、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を算出し、流下ノズルの北西方向への変位を求めた。



2. 原因調査の状況

- 流下ノズルの傾き(4/4) -

流下ノズルが傾くメカニズム

【流下操作の概要】

流下の準備操作として、上段加熱により、流下ノズル上部を高周波加熱する。



流下開始時は、流下ノズルの加熱を全段加熱に切り替え、流下ノズル全体を高周波加熱する。



流下中は、全段加熱を継続する。

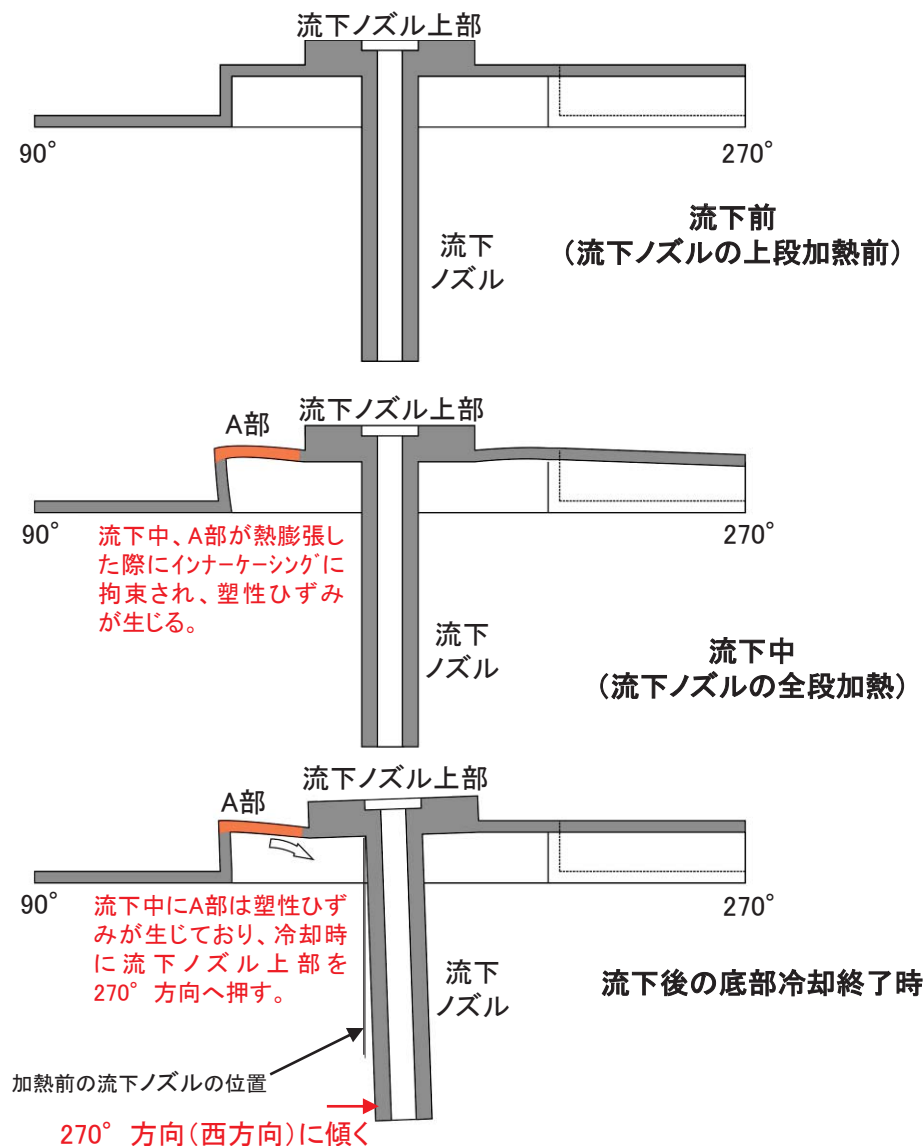
流下ノズルの温度は、約1000°C(根元部:約820°C)に達する。



流下停止は、流下ノズルの冷却(エア吹付け)及び高周波加熱の停止により行う。



流下ノズルへの冷却エア吹付け終了後、底部電極にエアを通気し、炉底部の冷却(炉底低温運転へ早期に移行するための操作)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(傾斜パッキンによる調整※等)

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て、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: 図面等から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。

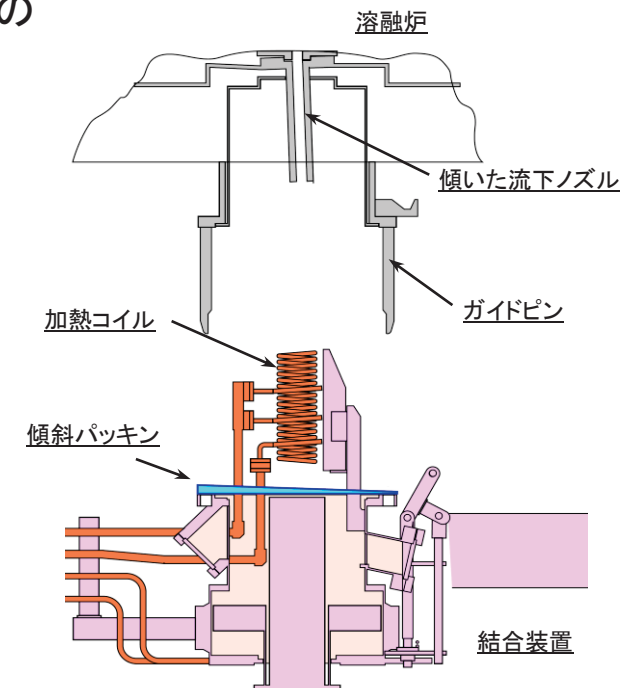
ブスバー等既存機器との取り合い部(遠隔継手)の位置ずれが許容可能か。

- 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から継続使用可能か。

- 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。



(1) ケース1の検討状況

① 傾斜パッキンによるクリアランス調整

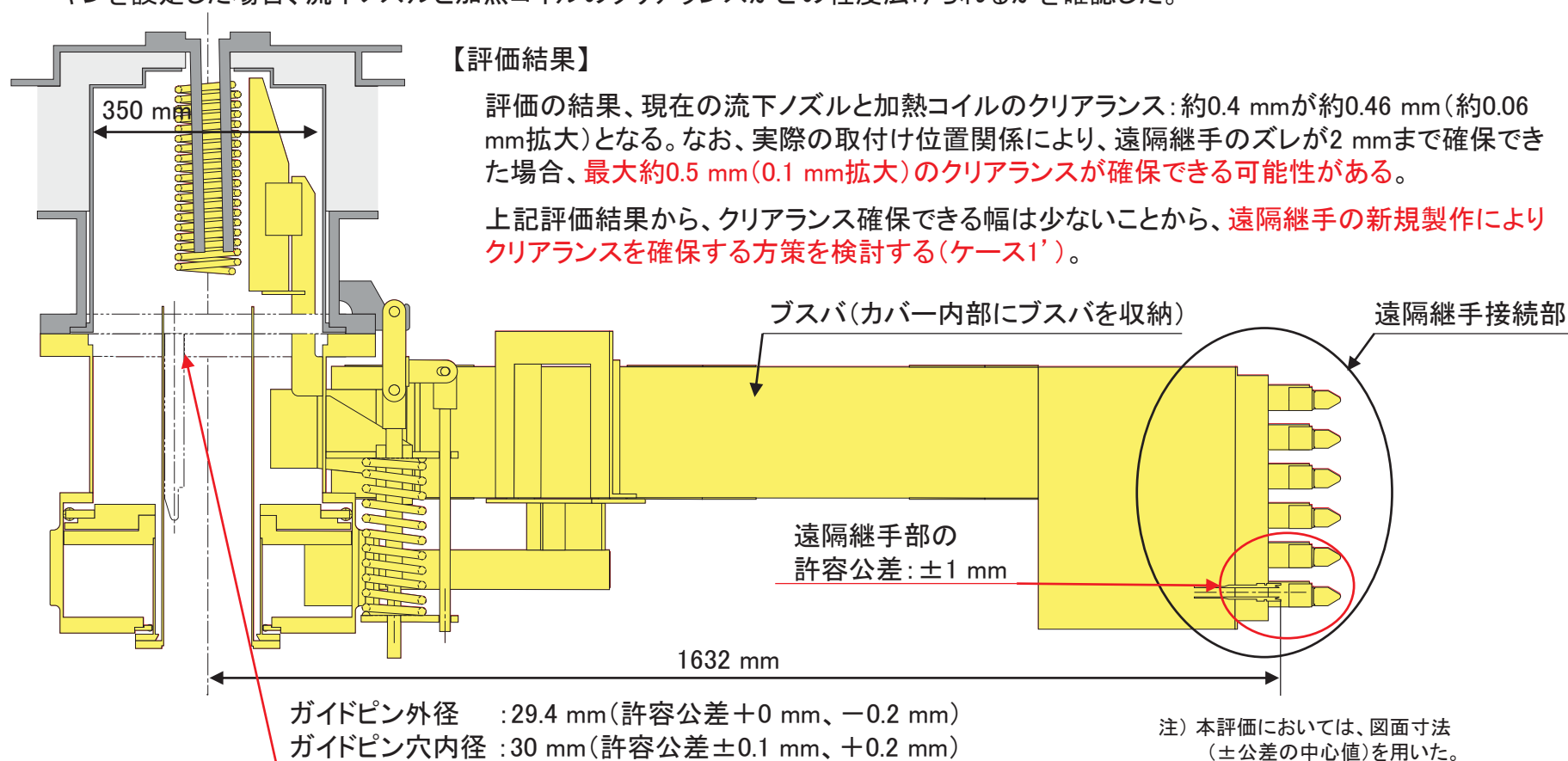
【評価の仕方】

結合装置を傾斜させると、ブスバの先端に設置された遠隔継手接続位置がズれる。このズレ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、流下ノズルと加熱コイルのクリアランスがどの程度広げられるかを確認した。

【評価結果】

評価の結果、現在の流下ノズルと加熱コイルのクリアランス：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、遠隔継手のズレが2 mmまで確保できた場合、**最大約0.5 mm（0.1 mm拡大）のクリアランスが確保できる可能性がある。**

上記評価結果から、クリアランス確保できる幅は少ないことから、**遠隔継手の新規製作によりクリアランスを確保する方策を検討する（ケース1'）。**



傾斜パッキンによる調整のイメージ図

② その他のクリアランス調整

方 法	課 題	課題への対応	評 価
1. 結合装置を取外した後、遠隔操作で流下ノズルを切削し加熱コイルとのクリアランスを確保する。	(1) 既存の遠隔機器(BSM、固化セルクレーン)では、直接、流下ノズルにアクセスできず、切削できない。	① 熔融炉下部の狭隘なスペース(φ350mm)で流下ノズル(インコネル690)を切削できる機能、切削粉を回収できる機能を備えた専用の遠隔操作装置を設計/製作する。	装置製作に期間を要し、最短ケースとして成立しない。
2. 結合装置を取外した後、遠隔操作で流下ノズルを曲げて加熱コイルとのクリアランスを確保する。	(1) 既存の遠隔機器(BSM、固化セルクレーン)では、直接、流下ノズルにアクセスできず、流下ノズルを曲げられない	① 熔融炉下部の狭隘なスペース(φ350mm)で流下ノズル(インコネル690)を曲げる機能、備えた専用の遠隔操作装置を設計/製作する。	装置製作に期間を要し、最短ケースとして成立しない。
	(2) 流下ノズルが取り付けられているインナープレートは、熔融炉内の耐火レンガに挟み込まれており、流下ノズルに力を加えることによりレンガを損傷させる恐れがある。	① 流下ノズルとインナープレートの接続部は、耐火レンガに覆われており、外部から固定することができない。	物理的に成立しない。
3. 結合装置を取外した後、加熱コイルを変形させて流下ノズルとのクリアランスを確保する。	(1) 加熱コイル(厚さ1mmの銅管)は、セラミックのプレートに120°ピッチで固定されており、遠隔操作で加熱コイルを変形させた場合、セラミックのプレートを破損させる恐れがある。	① 加熱コイルを変形させる機能を備えた専用の遠隔操作装置を設計/製作する。	装置製作に期間を要し、最短ケースとして成立しない。
		② 取り外した結合装置を直接保守セルに搬送し、直接手で加熱コイルを変形させる。	ガラスが付着しており、線量が高いため、直接作業は極めて困難である。

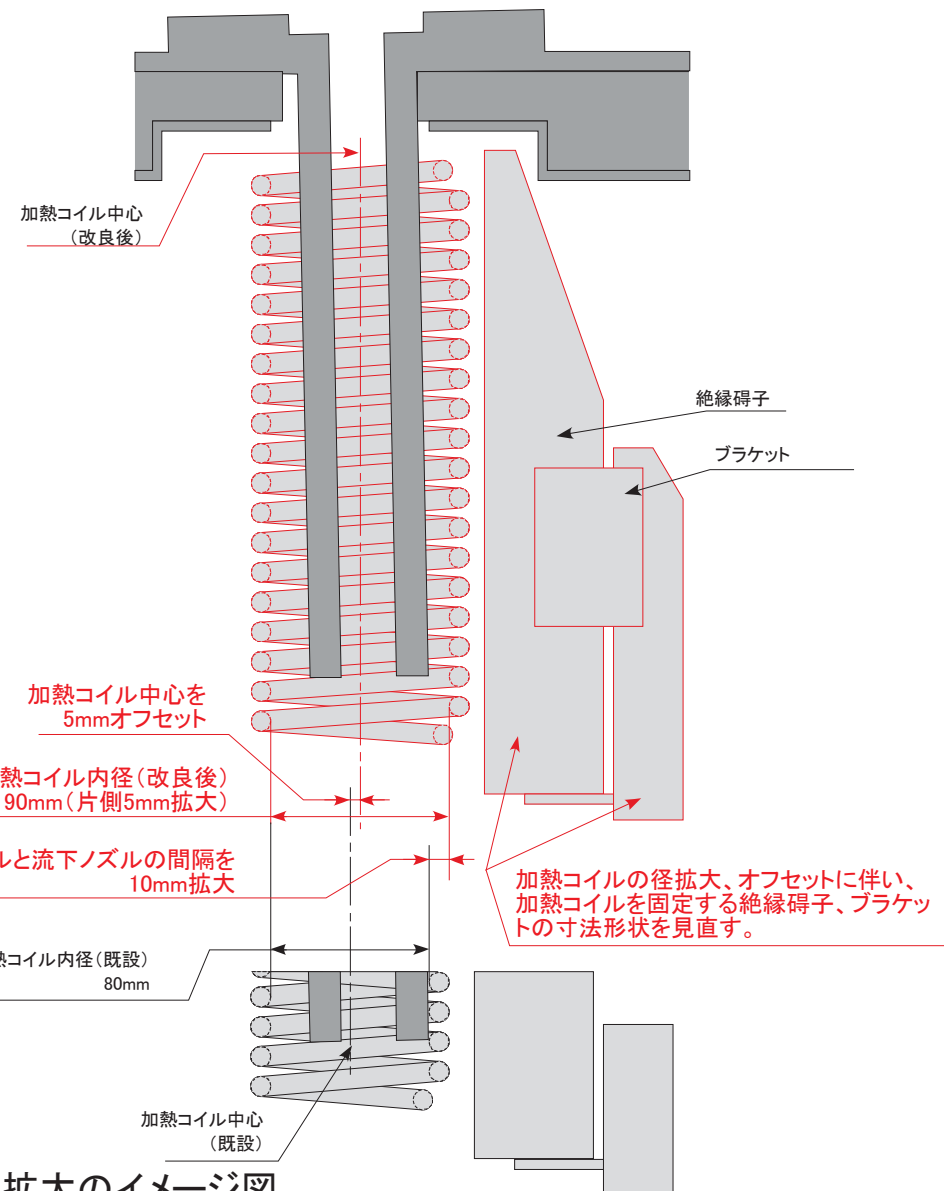
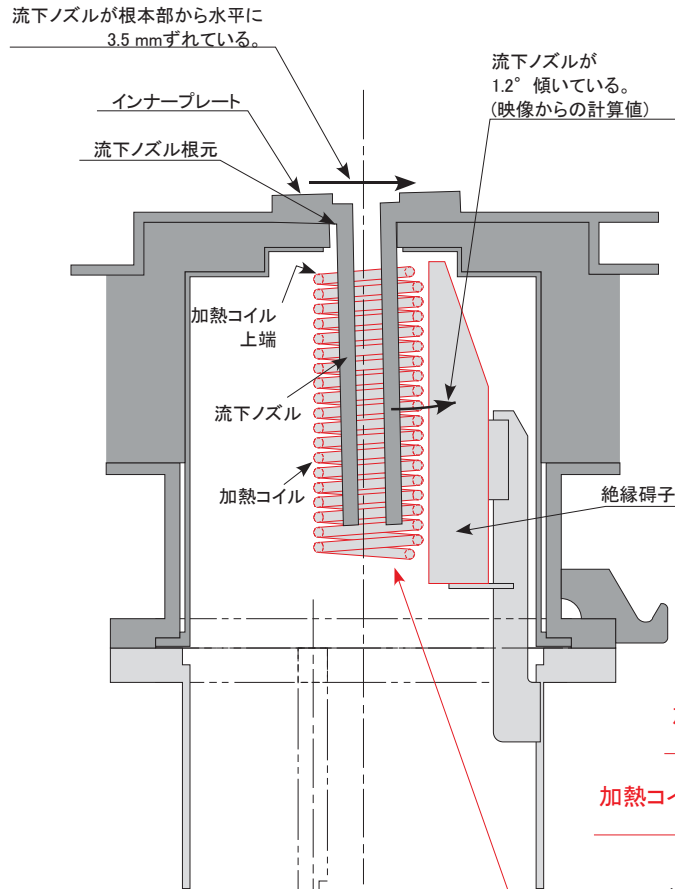
【ケース2】 結合装置(加熱コイルを含む)の製作/交換

- 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結果を踏まえ、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する。
- 加熱コイル内径の拡大後の流下ノズル加熱性能を把握する。
 - ➡ 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。
- 結合装置の製作/交換において、技術基準への適合性に該当する項目
 - 結合装置は閉じ込め等の安全機能を有していない。
 - ガラス固化処理に係る施設であることから、性能維持施設に該当すると考えている。
 - 性能維持施設として、流下ノズルが加熱でき、流下できることを検査項目として検討中。

ケース2の検討状況



【加熱コイルの改良概要】
 以下の改良を行うことにより、流下ノズルと加熱コイルの間隔を約10mm広げる。
 ・加熱コイルの内径を10mm大きくする。
 ・加熱コイルを流下ノズルが傾いている方向へ5mm水平にオフセットする。

加熱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。
- 新規溶融炉の製作/交換において、技術基準への適合性に該当する項目
 - 高放射性廃液をガラス固化する設備であることから、第5条の2 閉じ込め、第6条 耐震、第7条 材料に該当すると考えている。また、ガラス固化処理に係る施設であることから、性能維持施設に該当すると考えている。
 - 第5条の2 耐震
耐震クラスがSクラスであることを確認する。
 - 第6条 材料
耐火レンガ、電極: 溶融ガラスに対して十分に耐食性のある材料であることを確認する。
 - 第7条 閉じ込め
高放射性廃液を含む溶融したガラスが溶融槽を形成する耐火レンガの温度勾配で閉じ込められることを確認する。
 - 性能維持施設として、高放射性廃液を含むガラスを溶融でき、流下できることを検査項目として検討中。



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に示す。
 - ・ **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、遠隔交換装置の作動を確認したうえで、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の場合、運転再開時期はR2年5月頃
 - ・ **ケース2は、ケース1の採否に関わらず進める**。
 - ・ **ケース2の場合**、過去の作業実績や類似作業実績、メーカーの作業工程等の情報を基に各作業の必要期間を見積り、関連作業との干渉を考慮し、積み上げ、**運転再開時期をR3年11月頃としているが、結合装置の製作/交換の工程短縮及び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進める**。



5. インセンティブ・モチベーション維持・向上 (再処理廃止措置技術開発センターの取り組み)

廃止措置の意義を従業員全員で共有 役員、所長、センター長より従業員にメッセージを発信

- 当面の目標の明確化 ①段階的な目標設定、進捗の確認、達成感の共有
長期間要する業務を分割し、段階的な目標を設定し業務を実施。
分割した業務毎に進捗を確認し、全員で達成感を共有。
良好事例、改善すべき点をまとめ、今後の作業に反映。
- 目標達成に必要な経営資源を現場に配布 ②経営資源の柔軟な運用
業務の進捗や困難の状況に応じて、配布された経営資源を柔軟に
運用・配置する。 必要があれば再処理センター外にも協力を仰ぐ。
- 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 ③埋もれた成果の発掘と評価(再処理廃止措置技術開発センター独自の
取り組み)
多くの業務に埋もれた成果にも光を当て評価する。
センター長表彰について検討する。
- 経営層から現場まで良好なコミュニケーション ④風通しの良い職場環境
様々なことが報告連絡できる、議論することができる、知恵を出し合う
ことができる職場環境を維持発展。
挨拶の励行。 管理職は現場の話を傾聴。

参考資料

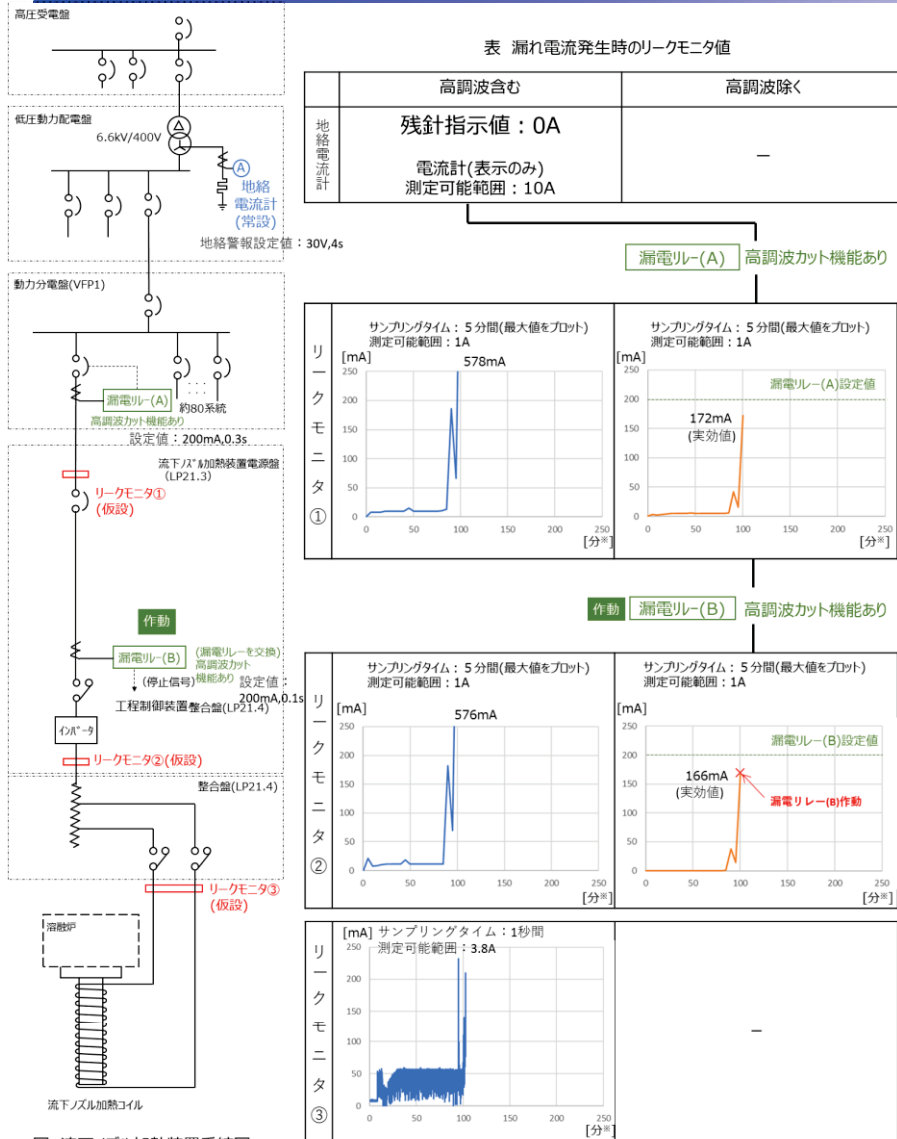
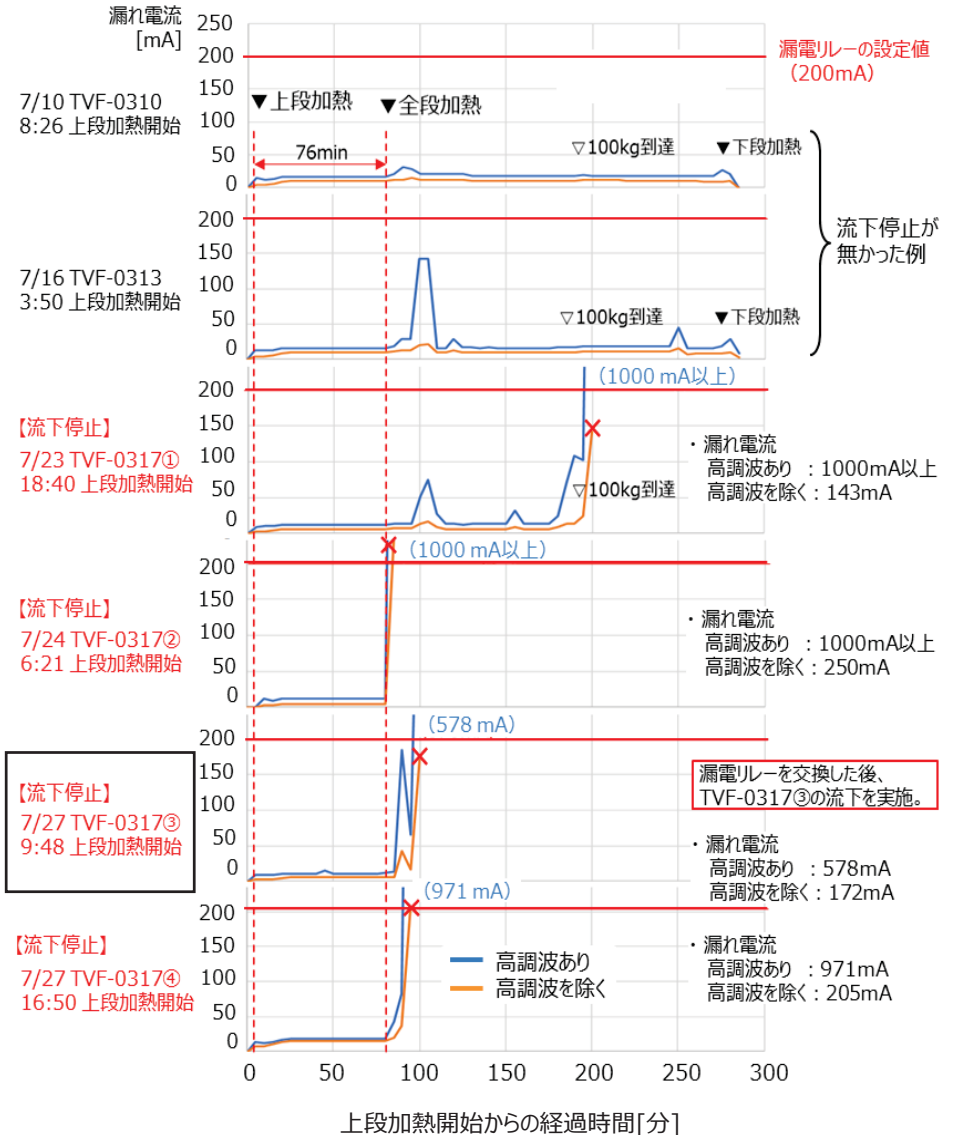


図 流下ノズル加熱装置系統図

7月27日 TVF-317③ (11:17 流下停止)



流下ノズル加熱装置電源盤に設置したリークモニタ①による計測結果

【流下ノズルと加熱コイルの観察結果】

【推定方法】

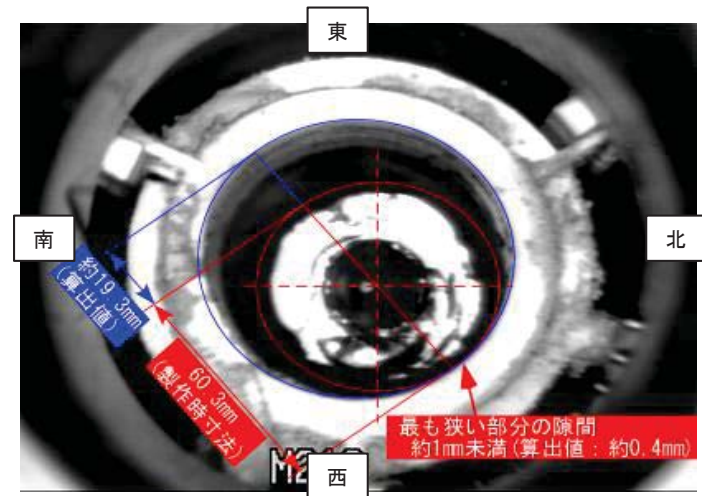
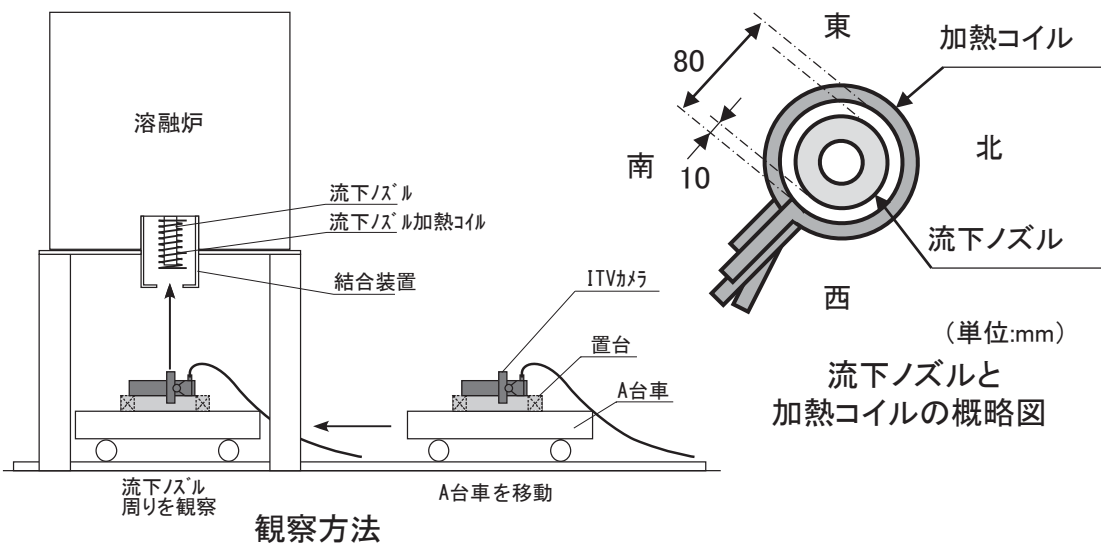
- 流下ノズル外径60.3mm(製作時の実測寸法)を基準として、画像上での計測値を換算して寸法を算出した。
- 加熱コイルの内径は設計値80mmとした。

① 流下ノズル先端部

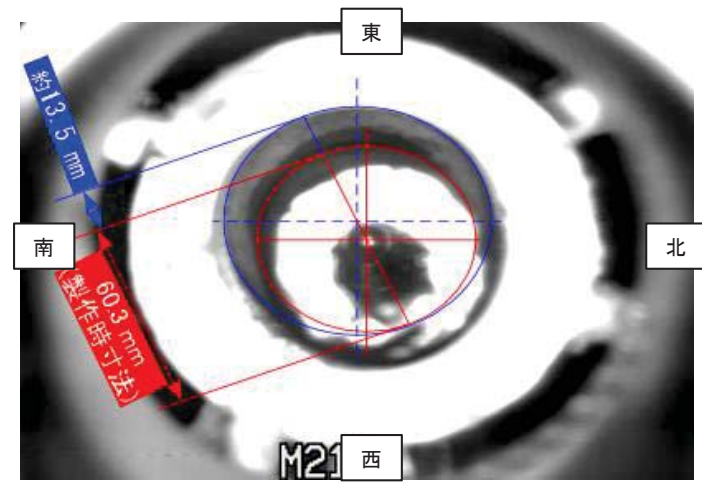
- 流下ノズル先端部と加熱コイルの間隔は、最も広い箇所では約19.3mm。
- **流下ノズル先端部と加熱コイルの間隔は、最も狭い箇所では約0.4mmと推定。**

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、北西側に約3.5mmと推定。**

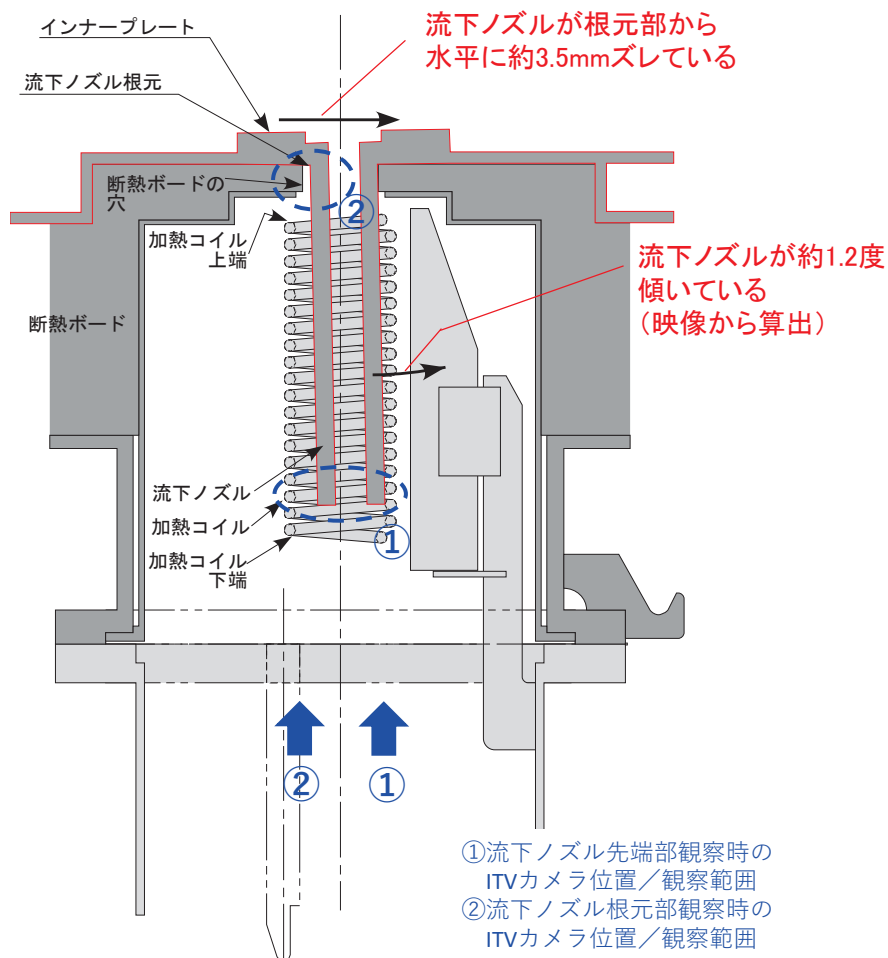


① 流下ノズル先端部の観察結果

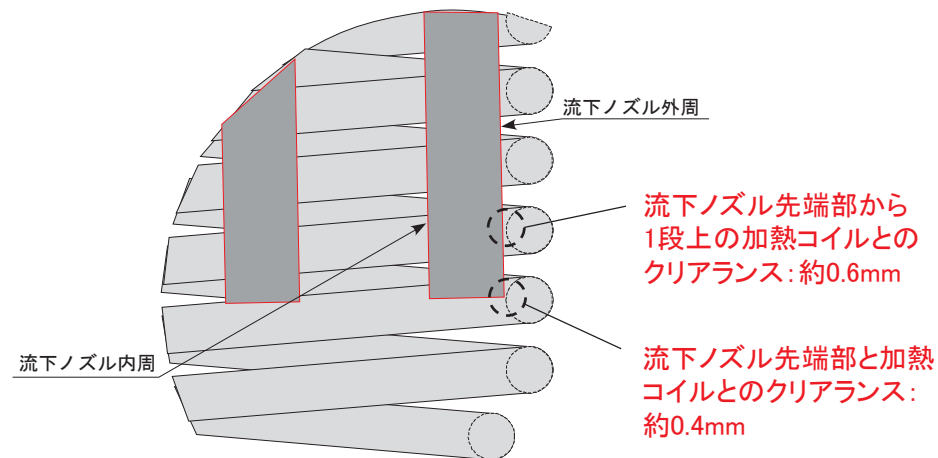


② 流下ノズル根本部の観察結果
観察結果

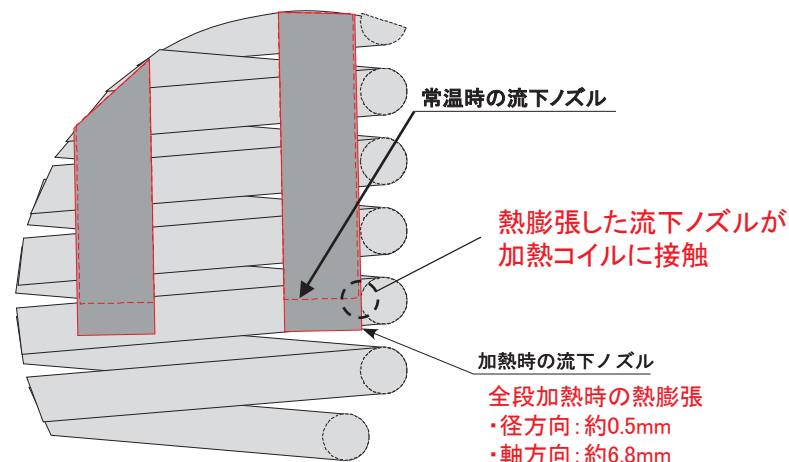
✓ 現状、室温の状態では流下ノズル先端部と加熱コイルのクリアランスは最も狭い箇所で約0.4mmと推定でき、全段加熱時の流下ノズルの熱膨張(軸方向に約6.8mm、径方向に約0.5mm膨張する)により、加熱コイルに接触したと考えられる。



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)

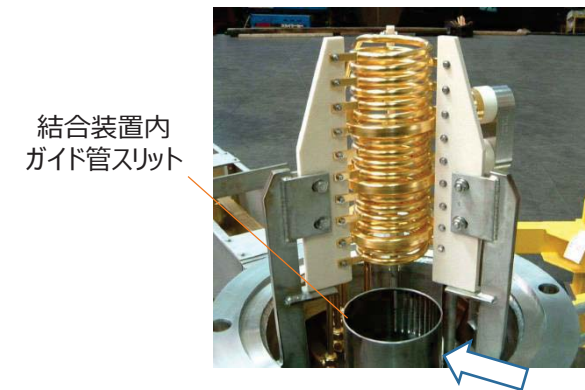
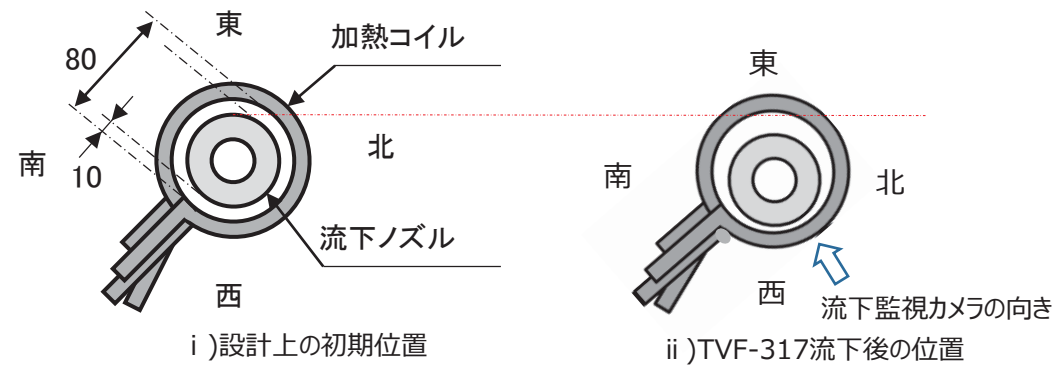


流下ノズルと加熱コイルの位置関係拡大図(常温時)

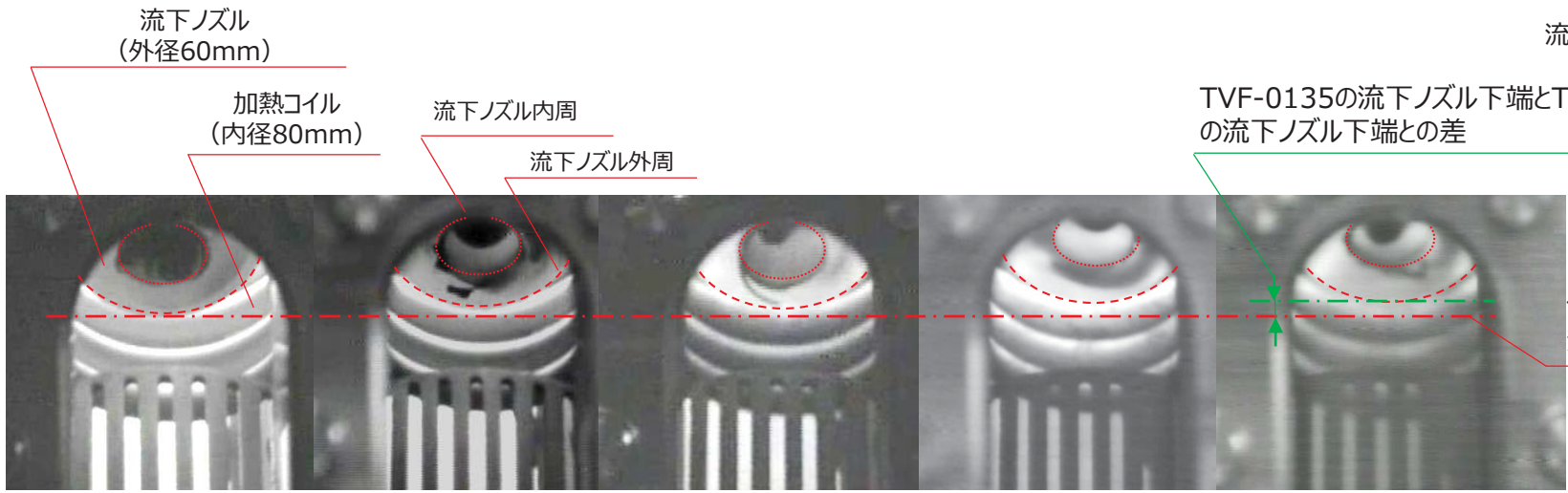


流下ノズルと加熱コイルの位置関係拡大図(全段加熱時)

【画像解析状況】



流下監視カメラの向き



- 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号溶融炉での流下ノズルの位置関係の推移例

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。

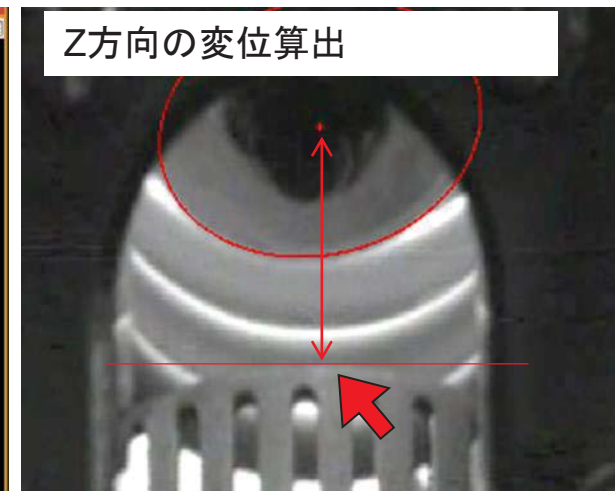
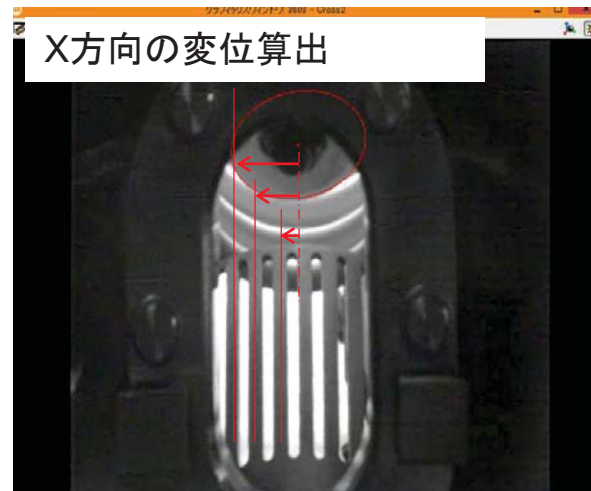
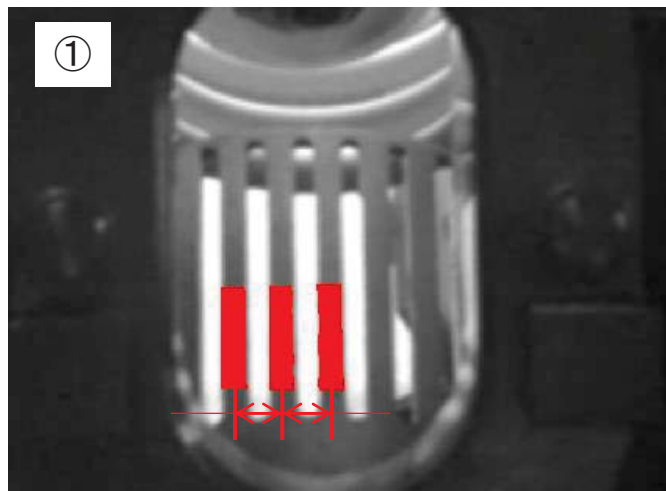
- ①格子がくっきり映っている範囲において、2値化処理(白と黒の2階調に変換)で3本の格子範囲を抽出
- ②各格子範囲の中心位置から左右方向の格子間隔を求め、TVF-135の間隔を「1」とした際のスケーリング係数を算出する。
- ③各画像を再スケーリングし、楕円をあてはめ中心座標を求める。

【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)した。

【Z方向の変位算出】

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



【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した。

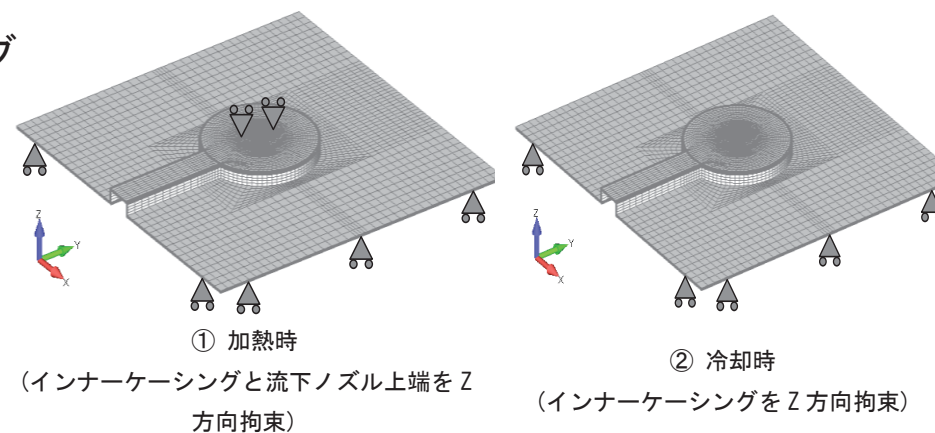
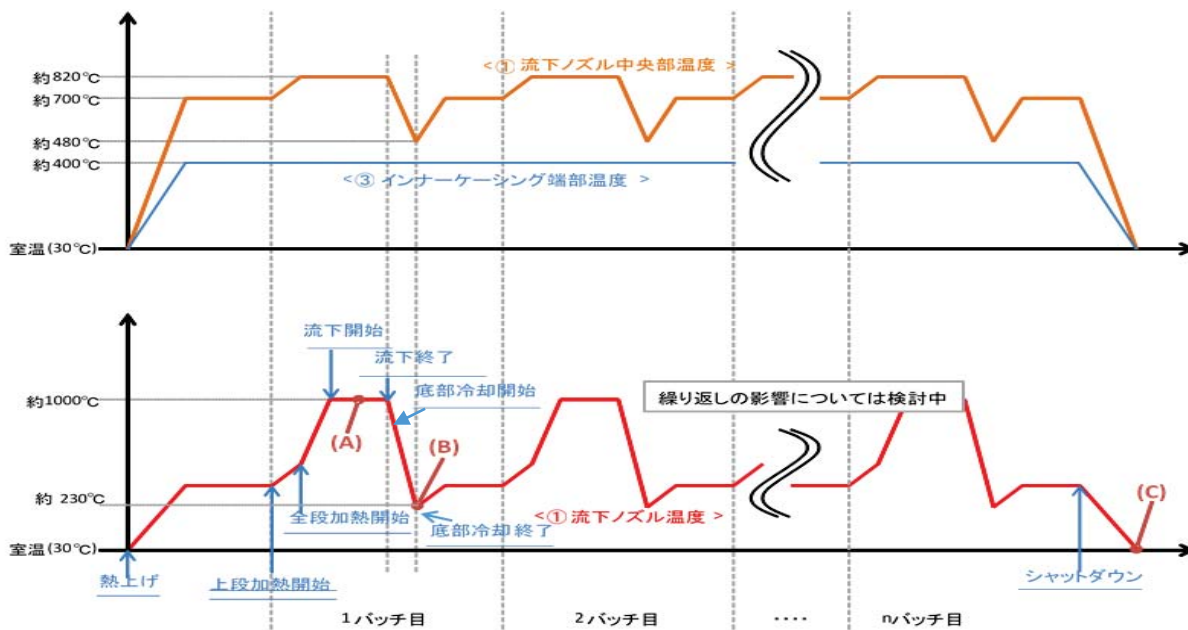


図3 熱応力解析の拘束条件



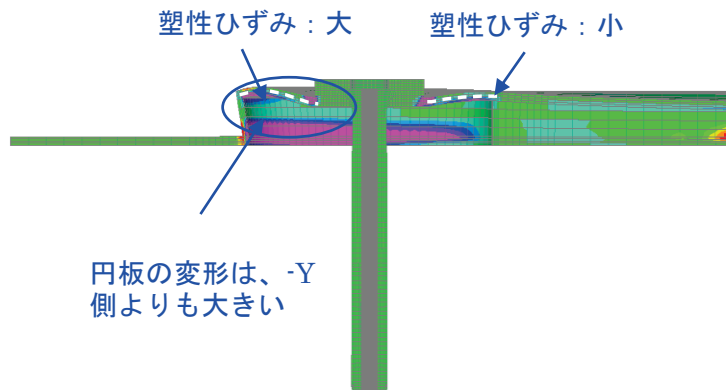
熱応力解析(定常解析)

- 流下ノズルの傾き(2/2) -

- 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。
- 流下ノズルの熱膨張による変位が周囲の耐火レンガに拘束されることで応力が生じる。発生した応力が降伏応力に達した部位では塑性ひずみが生じる。この状態では、耐火煉瓦の拘束により流下ノズルに傾きは生じてない。
- 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形状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】

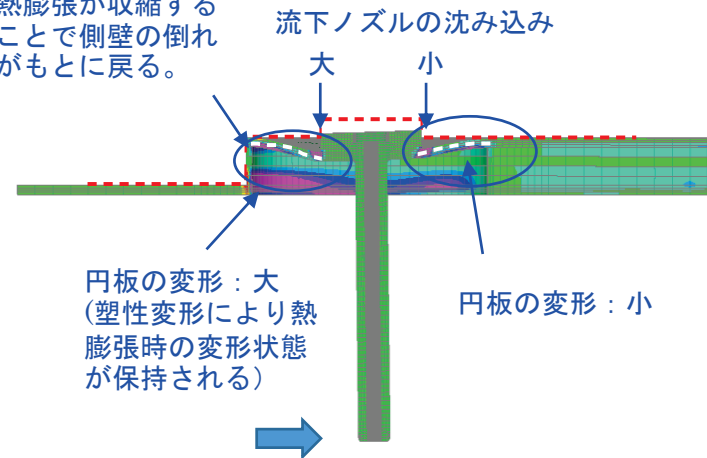
流下ノズル温度計の段差部がある側(-Y)よりその反対側(+Y)の応力が大きいことから、塑性ひずみも+Y側で大きく発生している。



アウトプットセット: Step 1, Inc 8
変形(6.384): Total Translation
要素コンタ: Plastic Strain-2

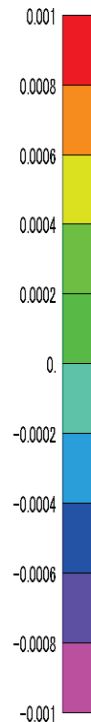
【底部冷却終了時】

熱膨張が収縮することで側壁の倒れがもどに戻る。



アウトプットセット: Step 2, Inc 1
変形(1.637): Total Translation
要素コンタ: Plastic Strain-2

【mm/mm】



事象確認試験結果

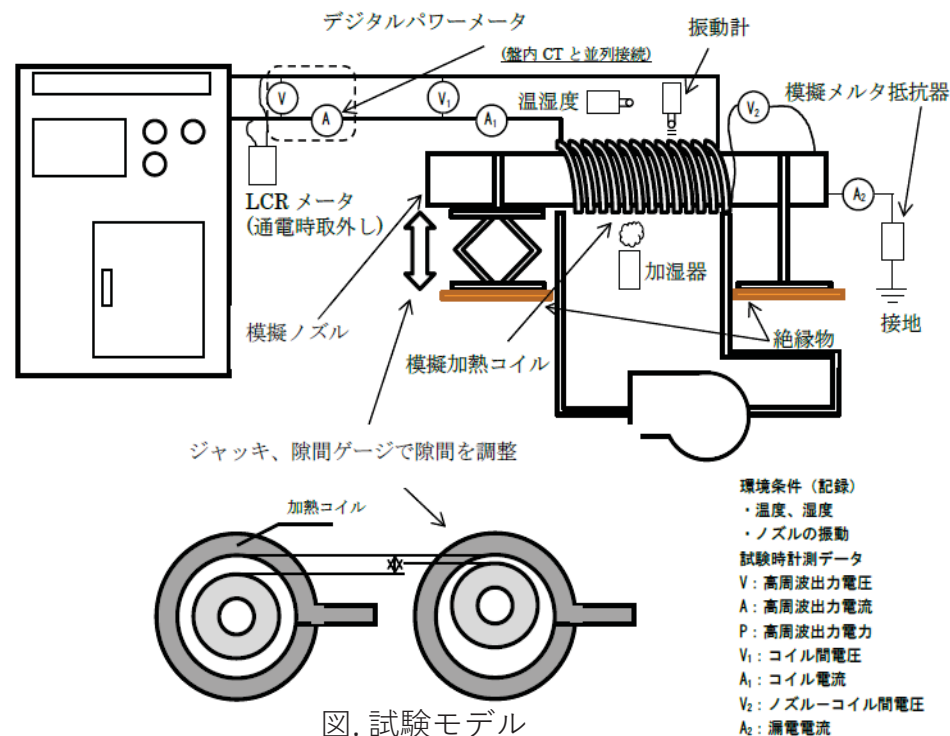


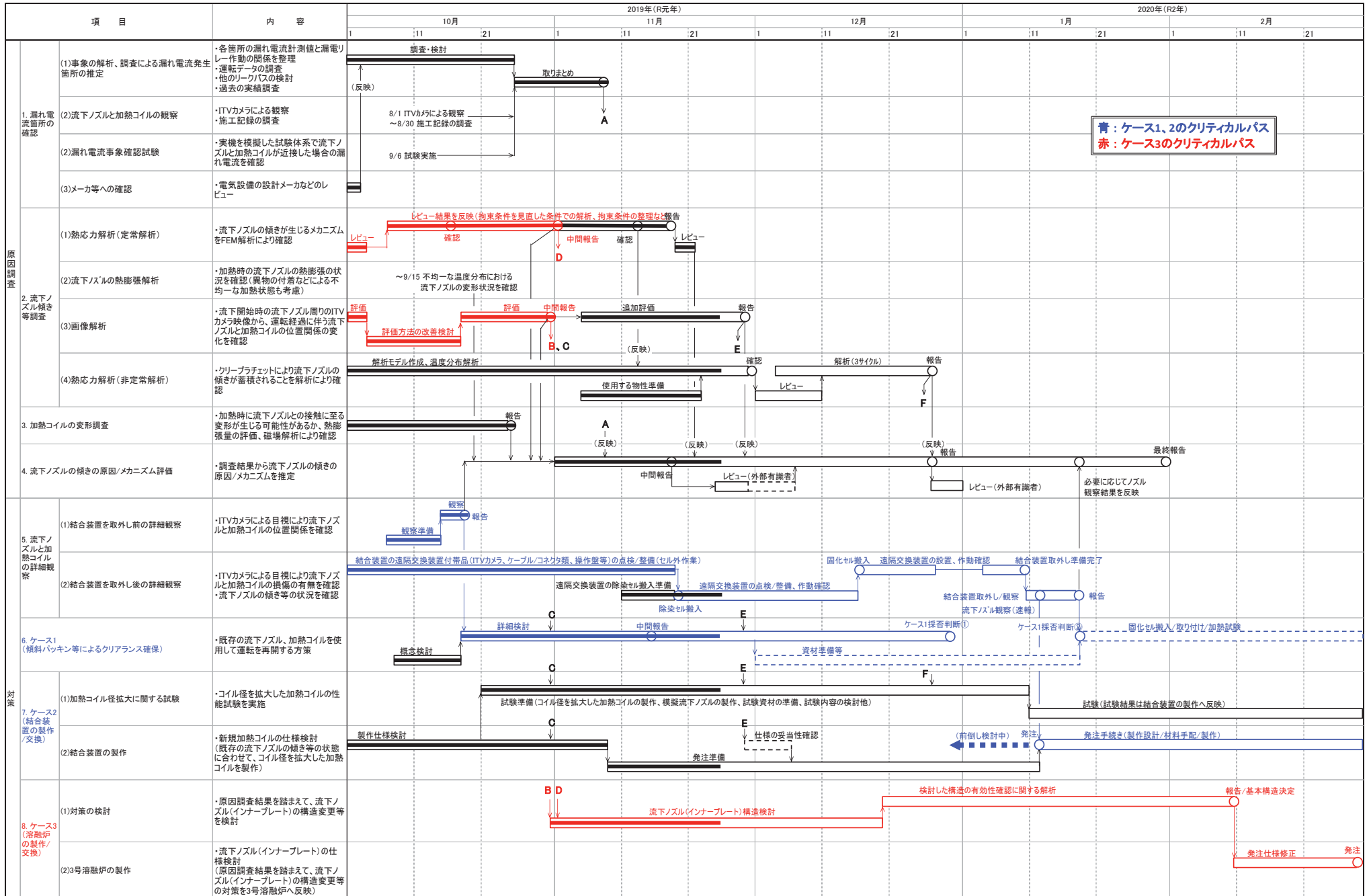
図. 試験モデル

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。)

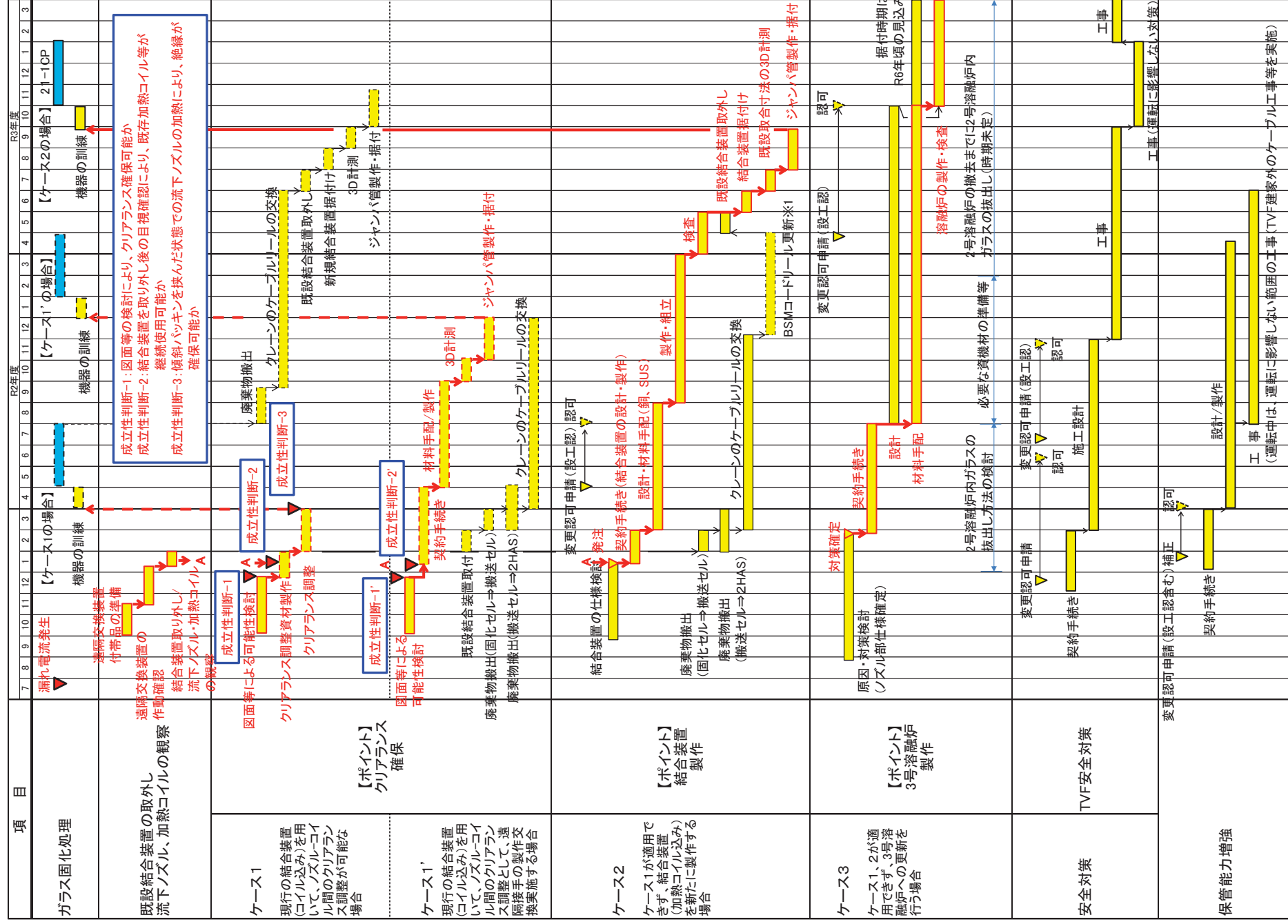
流下停止に係る原因調査、対策スケジュール



青：ケース1、2のクリティカルパス
赤：ケース3のクリティカルパス

TVF次回運転までのスケジュール

別添資料-2



※1： 工程の進捗に応じて、R2年12月からR3年4月の期間での実施の可否を検討する。

凡例： 赤線)クリティカルパス、点線)成立性判断で成立するとした時の工程

工程は随時見直し、早期のリスク低減を図る。