

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

— 漏れ電流発生の今後の対応 —

令和2年2月5日

日本原子力研究開発機構(JAEA)

- ✓ 廃止措置段階に移行した東海再処理施設が保有しているリスクを早期に低減していくため、**高放射性廃液のガラス固化処理の早期再開の重要性を強く認識し、運転再開に向けて3ケースの対策を原因調査と並行して進めている。(別添資料-1)**

対策ケース	メリット	デメリット
<p>【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)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・溶融炉: 継続使用 ・加熱コイル: 継続使用 	<ul style="list-style-type: none"> ・最短で運転できる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・傾斜パッキンを用いて加熱コイルを傾かせることで、流下ノズルと加熱コイル間のクリアランスを確保できるか否か成立性を要検討。 ・仮に成立しても確保可能なクリアランスは小さく、長期対策とならない可能性が高い。
<p>【ケース2】 結合装置(加熱コイルを含む)の製作/交換</p> <ul style="list-style-type: none"> ・溶融炉: 継続使用 ・加熱コイル: 新規 	<ul style="list-style-type: none"> ・流下ノズルの芯ズレや傾きを踏まえた加熱コイルの製作が可能となる。 ・一定程度のクリアランスを確保できる確実性があり、長期対策となりえる可能性が高い(当初予定どおり2号溶融炉で約180本製造可能)。 	<ul style="list-style-type: none"> ・結合装置を新たに製作することから、運転再開までに時間を要する。
<p>【ケース3】 新規溶融炉(3号溶融炉)の製作/交換</p> <ul style="list-style-type: none"> ・溶融炉: 新規 ・加熱コイル: 新規 	<ul style="list-style-type: none"> ・流下ノズル部を含めた溶融炉全体を製作/交換することから、流下ノズルの傾き等に対する対策を打つことが可能となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・溶融炉を新たに製作することから、ケース2よりも運転再開までにさらに時間を要する。 ・2号溶融炉を使用せず、ケース3のみで対応した場合、溶融炉の設計寿命(500本製造)を踏まえると、さらに4号溶融炉が必要となる。

- ✓ 対策
 - ケース1及びケース1'の成立性判断
 - 流下ノズル及び加熱コイルは再使用可能であるが、流下ノズルと加熱コイルのクリアランス確保のための傾斜パッキンを取り付けた状態で結合装置を固定できないことから、成立しないと判断した。
 - 運転再開に向けた対策
 - ケース2(結合装置の製作/交換)により運転再開する。
 - 並行して、ケース3(3号溶融炉の製作)を進める。
 - ケース2(結合装置の製作/交換)の対応状況
 - R2年1月末より材料手配に着手した。
 - 更なる工程短縮として、検査のタイミングの見直し等により、約1ヶ月の工程短縮を図った(前回会合で示した21.0ヶ月→15.5ヶ月への短縮をさらに14.5ヶ月へ短縮)。
 - ケース3(3号溶融炉の製作)の対応状況
 - 材料手配の前倒しを検討し、前回会合で示した時期から約1.5ヶ月前倒した。
 - さらなる工程短縮を図るべく、検討を継続する。
- ✓ 原因調査
 - 流下ノズルの傾きの進展傾向
 - カレット洗浄等による流下ノズルの変位のバラツキ、カレット洗浄後(140本目)以降の変位のバラツキについて、非定常解析等により評価した。
 - 評価の結果、流下ノズルの傾きは、約0.013 mm/1本で進展すると考えられる。

1. ケース1及びケース1'の成立性判断

- ✓ 早期のリスク低減の観点から、既存の2号溶融炉及び結合装置(加熱コイルを含む)の継続使用を前提に、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た。
- ✓ 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した。

(1)成立性判断1(図面による成立性の検討)

① ケース1

- ・ 結合装置との取り合い部は既存設備を改造しないで結合装置と取り合う(遠隔継手接続部のズレ: ± 1 mm以内(設計値))ことを前提に、確保可能な流下ノズルと加熱コイルのクリアランスを図面により検討した。
- ・ 検討の結果、**約0.06 mmクリアランスを増加できる**ことが分かった。(6頁参照)
- ・ **確保できるクリアランスは小さく**、流下ノズルの熱膨張(軸方向:約6.8 mm、径方向:約0.5 mm)、結合装置の取付け精度(± 0.35 mm(設計公差))から、**成立しないと判断**した。

② ケース1'

- ・ 結合装置との取り合い部を一部改造して結合装置を取り付けることを前提に、確保可能な流下ノズルと加熱コイルのクリアランスを図面により検討した。
- ・ 検討の結果、溶融炉のガイドピンと結合装置のガイド穴の公差より、結合装置を最大 0.95° まで傾けることが可能であり、**約2 mmクリアランスを増加できる**ことが分かった。(7頁参照)
- ・ 結合装置を傾けたことにより、**ブスバの遠隔継手接続部を溶融炉架台に固定する部分に約22.7 mmの隙間が生じ**、既存の取付け方法では遠隔継手接続部が固定できないことから、この隙間に**スペーサを設置**する方法を検討した。

(2)成立性判断2(結合装置取外し後の観察結果を踏まえた検討)

① ケース1' (8頁参照)

- ・結合装置取付時、結合装置は、水平の状態ではしか上昇させることができない構造である。結合装置の取付け前にスペーサを設置した場合、**スペーサがブスバの遠隔継手接続部を溶融炉架台に固定する部分と干渉して、結合装置を取付け位置まで上昇できないことが分かった。**
- ・このため、結合装置の取付後、スペーサの設置を検討したところ、固定金具や取付け台等の**干渉等のため、両腕型マニプレータ(BSM)により約22.7 mmの隙間にスペーサを設置できないことが分かった。**

② 流下ノズル、加熱コイル等の外観観察(9-10頁参照)

- ・有意な変形や損傷等がないことを確認した。

以上のことから、流下ノズル及び加熱コイル等は健全であるが、**傾斜パッキン取付状態で結合装置を固定できないことから、ケース1'は成立しないと判断した。**

【検討の結果】

ケース1及びケース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))は、成立しないと判断した。

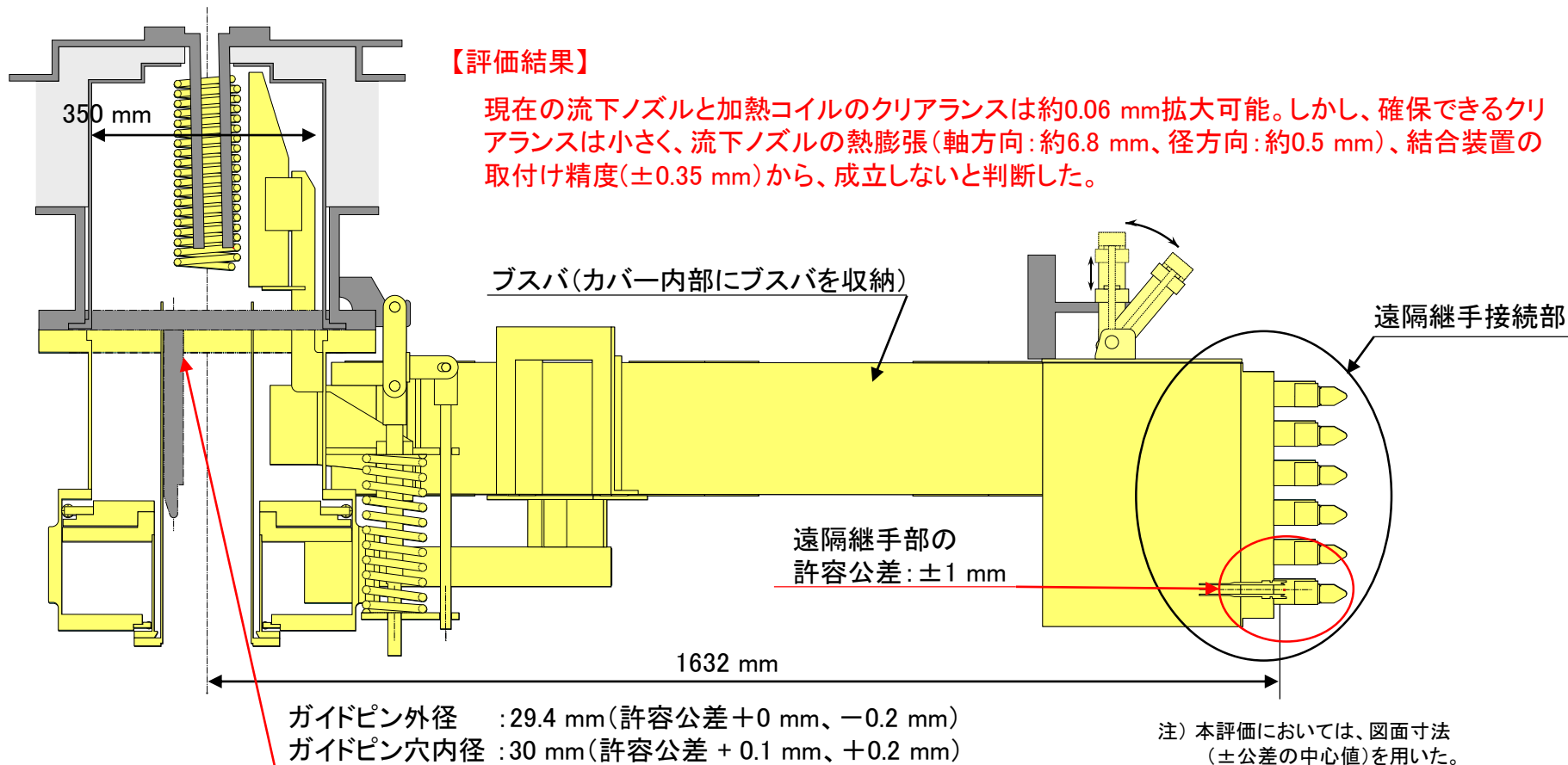
- ケース1及びケース1'の成立性判断(3/7) -

成立性判断1: 図面による成立性検討

(1) ケース1(結合装置との取り付け部は既存設備を改造しない方法)

【評価の方法】

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拡大可能かを確認した。

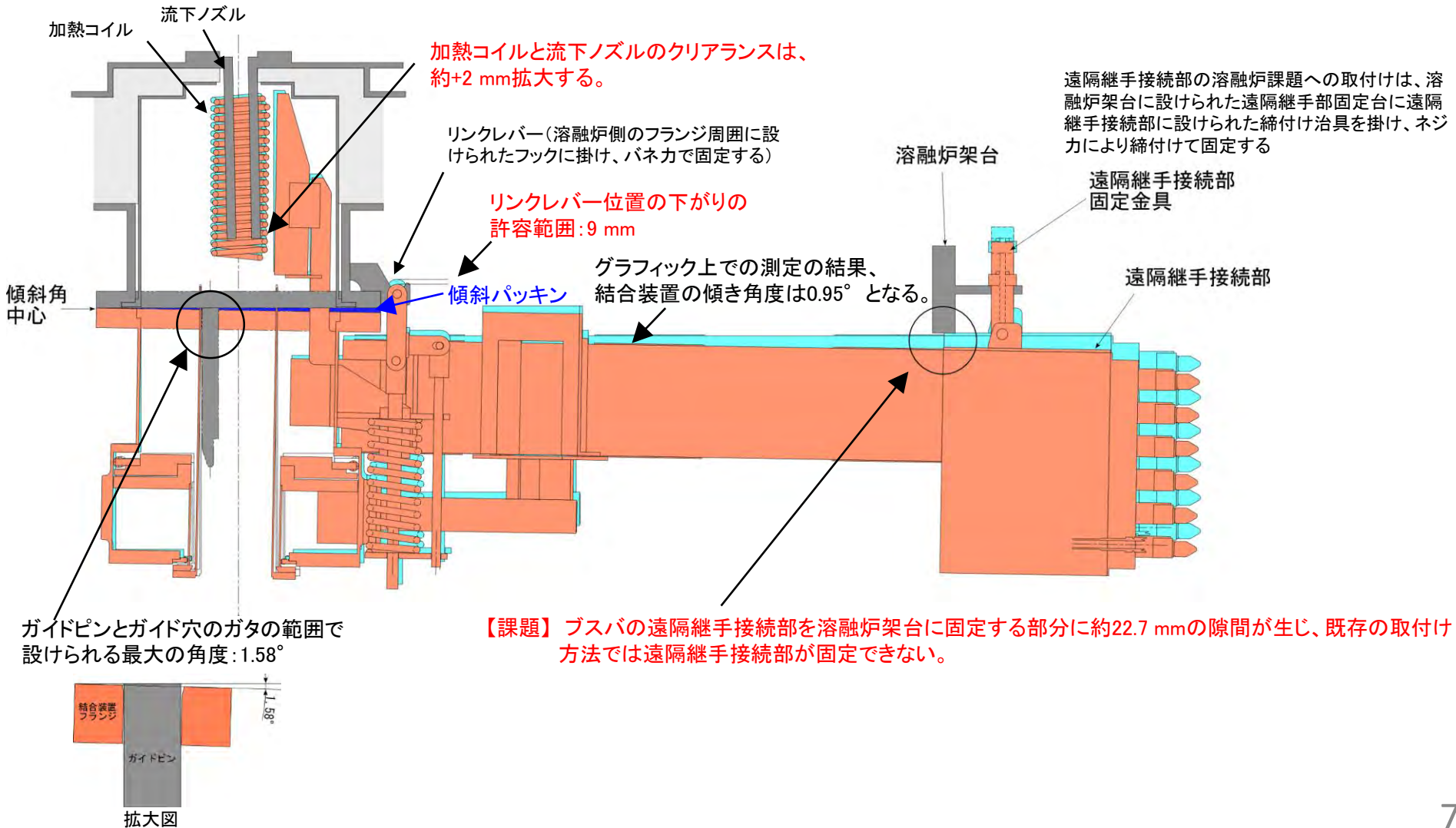


傾斜パッキンによる調整のイメージ図

- ケース1及びケース1'の成立性判断(4/7) -

成立性判断1: 図面による成立性検討

(1) ケース1' (結合装置との取り合い部(遠隔接手)を一部改造する方法)

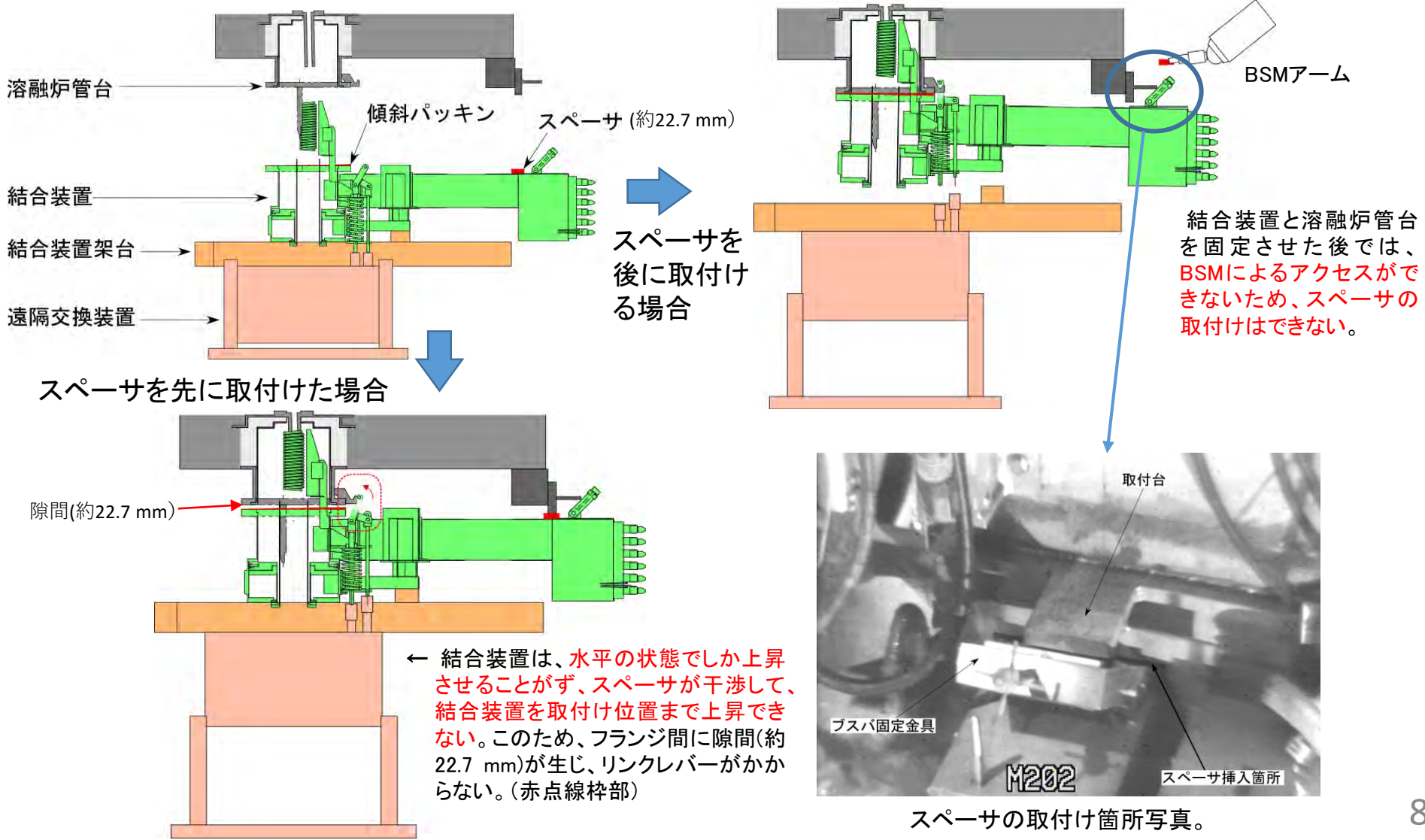


2. 対策

- ケース1及びケース1'の成立性判断(5/7) -

成立性判断2: (結合装置取外し後の観察結果を踏まえた検討)

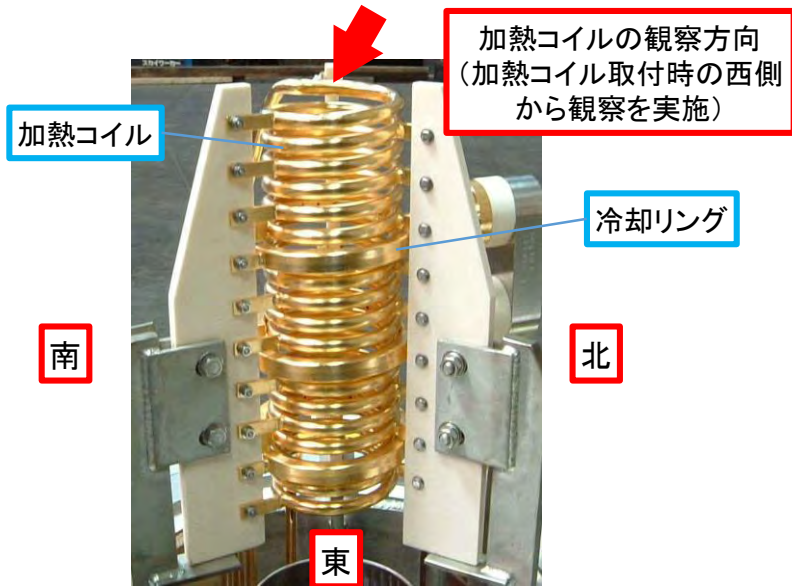
・スペーサ設置方法の検討



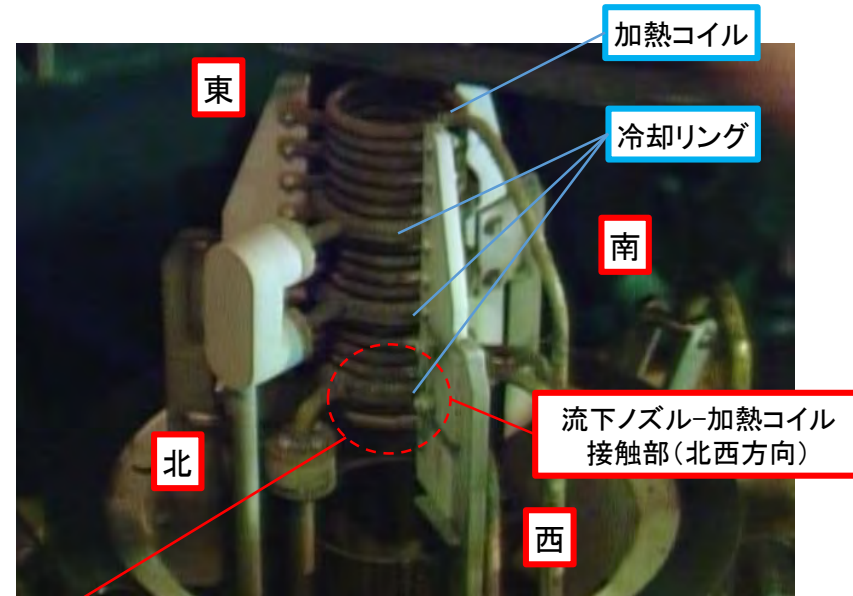
2. 対策

- ケース1及びケース1'の成立性判断(6/7) -

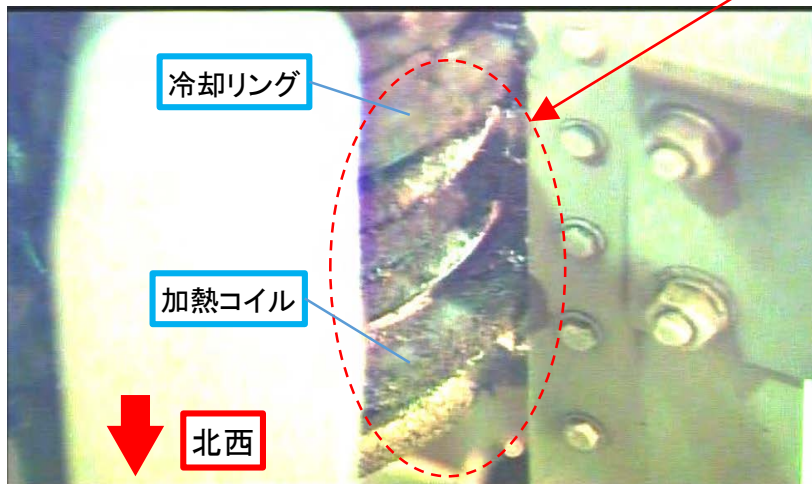
- ・結合装置取り外し後の流下ノズルと加熱コイル外観観察(ITVカメラによる)



2号溶融炉使用前の加熱コイル外観(参考)



↑ 加熱コイル外観観察結果: 流下ノズルとの接触箇所外面の加熱コイル、冷却リング、絶縁材、配管等に変形、亀裂等がないことを確認した。

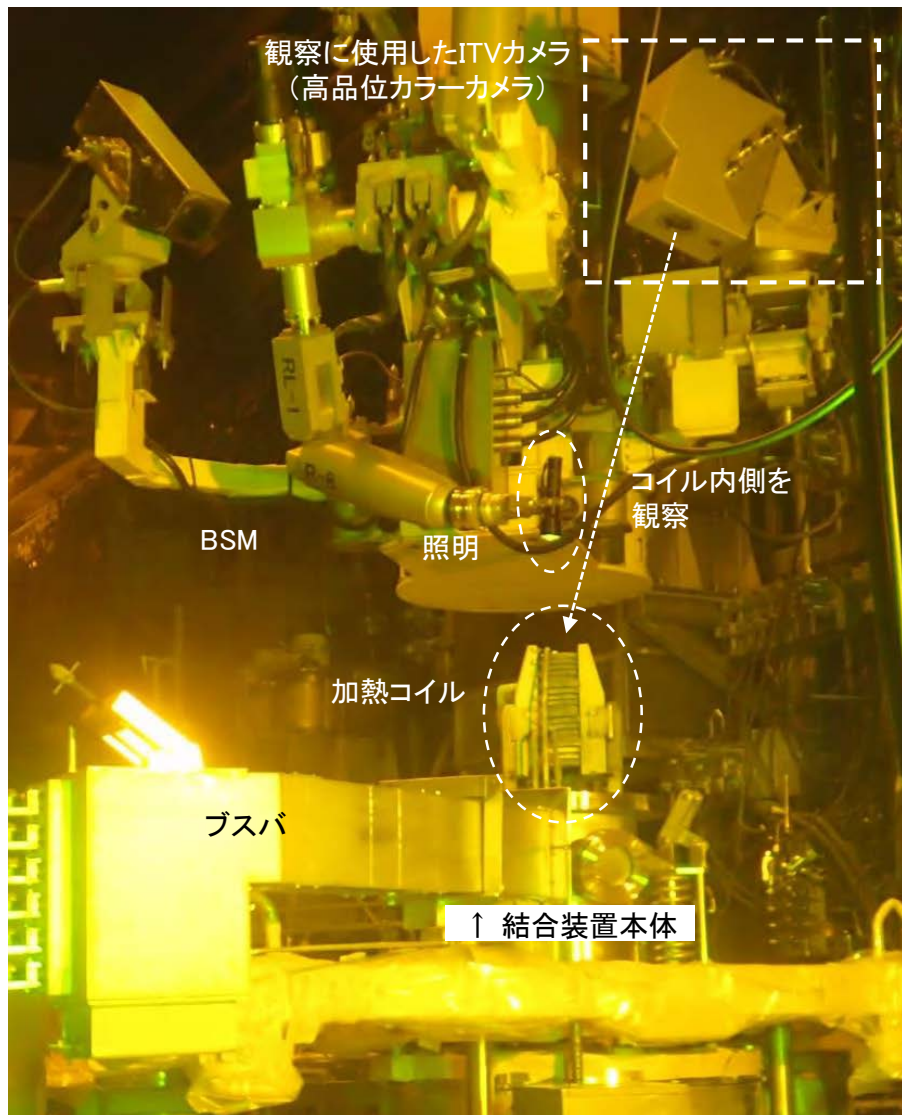


← 流下ノズル-加熱コイル接触部観察結果: 流下ノズルとの接触箇所外面の加熱コイルに変形、亀裂等がないことを確認した。

2. 対策

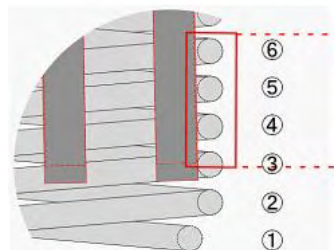
- ケース1及びケース1'の成立性判断(7/7) -

・結合装置取り外し後の流下ノズルと加熱コイル内面観察(ITVカメラによる)



BSMによる観察の様子

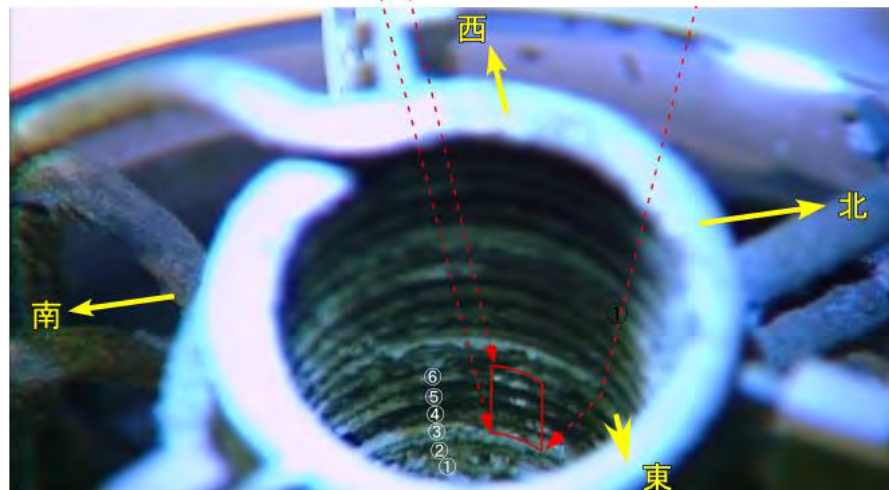
流下ノズルが接触していたエリア(赤印部)



流下ノズル/加熱コイル断面図



流下ノズル/加熱コイル下からの写真



加熱コイル内側西面の観察写真

流下ノズルの接触箇所は、加熱コイル内側の西北西方向の下から3段目から6段目と推定している。この位置に相当する部位(点線枠内)に黒色の付着物がはがれて、白くなっている箇所が認められており、この箇所に流下ノズルが接触したと推定した。

観察の結果、推定した接触箇所を含め、加熱コイル内面に変形や亀裂、溶融痕等がないことを確認した。

2. 対策

－ 運転再開に向けた対策：ケース2(1/3) －

【ケース2】 結合装置(加熱コイルを含む)の製作/交換の対応状況

(1)工程短縮検討

- 前回監視チーム会合で示した15.5ヶ月に対し、更なる工程の短縮として、メーカーと協議し、検査のタイミングの見直し等により、詳細な工程を検討した。これにより、さらに**約1ヶ月の工程短縮を図った**。(別添資料-2)
- また、**工程管理を行うためのマイルストーンを設定した**。今後は、設定したマイルストーン毎に監視チーム会合にて進捗を報告する。

(2)工程管理

- R2年1月末より材料手配に着手した。
- 作業の進捗を踏まえ、各項目の詳細工程の精査により、更なる工程短縮を検討する。
- **短縮検討の結果は、マイルストーンのタイミングで工程を調整し、反映する。**

－ 運転再開に向けた対策：ケース2(2/3) －

(3)対策

【加熱コイル径の拡大】

- 流下ノズルの傾き及びズレを考慮し、加熱コイル径を拡大するとともに、加熱コイル位置をズラすことにより、確保可能な最大のクリアランス(約10 mm)を確保する。
(画像解析の結果から、今後約300バッチ繰り返した場合の変位の増加分は最大で標準誤差(95%信頼区間)を考慮すると約6.1 mmと推定している。)
- クリアランス約10 mmは、結合装置の構造上の制約等を踏まえ、加熱コイル内径をΦ80 mm→Φ90 mmに拡大すること、中心位置を傾きの方向に約5 mmオフセットすることにより確保する(13頁参照)。
- 加熱コイル内径拡大(Φ80 mm→Φ90 mm)に伴う加熱性については、解析により問題ないことを確認した。試験においても確認中。
- 流下ノズルの傾きの進展傾向が変化した場合を考慮して、加熱コイルへの絶縁材設置による流下ノズルと加熱コイルの絶縁確保について検討する。検討においては、絶縁材を設置した場合の影響を試験により確認する。
- また、漏れ電流発生時、他設備/機器への影響を防止するため、加熱コイルの給電系統に絶縁トランスの設置を検討する。
- 結合装置予備品については、3号溶融炉と共用できるように検討を進めている。

【ケース2の対策の概要】

流下ノズルが根本部から水平に
約3.5 mmズレている。

インナーケーシング

流下ノズル根元

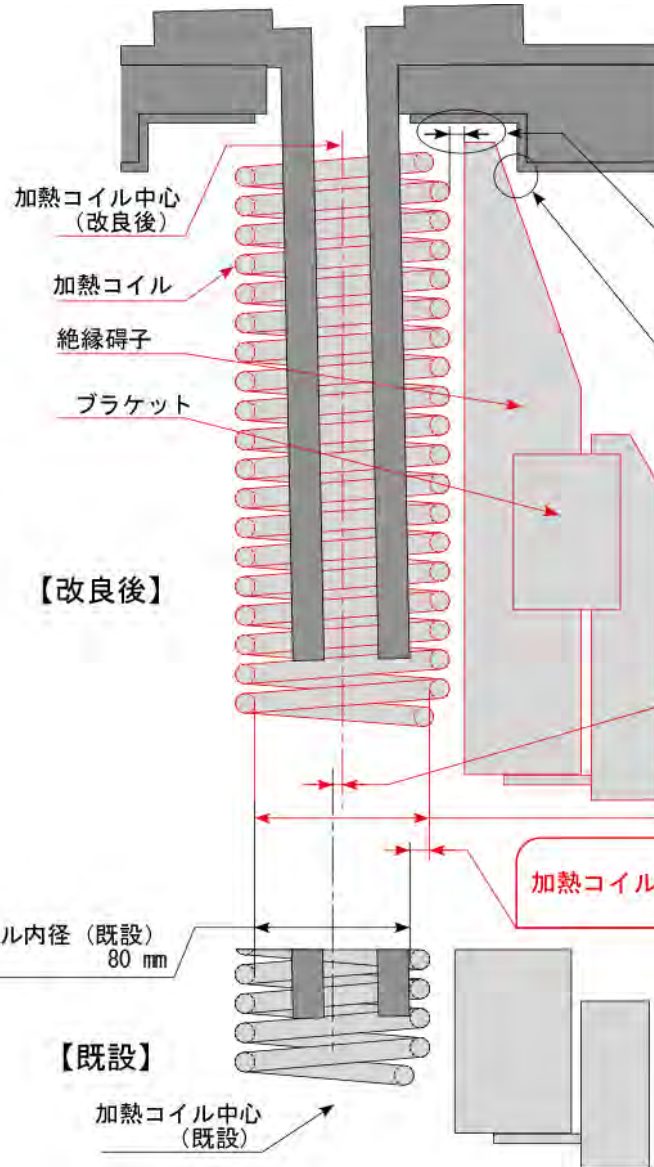
流下ノズルが
1.2° 傾いている。
(映像からの計算値)

断熱ボード

加熱コイル
上端

流下ノズル
加熱コイル

絶縁碍子



以下の理由から、加熱コイル外
縁の既設からのオフセットは、
最大10 mm。

- ・加熱コイルを絶縁碍子に取付
ける金具のスペースを確保
- ・加熱コイルの冷却空気噴射用
リングの入るスペースを確保
- ・絶縁碍子の強度を確保
- ・結合装置の遠隔取付け時の揺
れにより、絶縁碍子が溶融炉
底部構造物に干渉しないよう
必要な隙間を確保

① 加熱コイル中心を
5 mmオフセット

② 加熱コイル内径 (改良後)
90 mm (片側5 mm拡大)

① + ②
加熱コイルと流下ノズルの間隔を
10 mm拡大

【改良後】

【既設】

加熱コイル中心
(既設)

加熱コイル径拡大のイメージ図

【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10 mm広げる。
・加熱コイルの内径を10 mm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5 mm水平にオフセットする。

【ケース3】 新規溶融炉(3号溶融炉)の製作/交換

(1)工程短縮検討

- ・前回監視チーム会合で示した工程に対し、**材料手配の前倒しを検討し、約1.5ヶ月の工程短縮を図った。**(別添資料-3)
- ・今後、契約締結後にメーカーから提示される各項目の詳細工程の精査により、**可能な限り工程短縮を図るべく検討を継続する。**

(2)対策

- ・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ケーシングの形状が関係しているものと推定しており、流下ノズルの傾きを抑制するため、**インナーケーシング構造変更(非対称構造→対称構造等)の妥当性について、熱応力解析により確認中。**
- ・インナーケーシング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。
- ・インナーケーシングの熱伸びやひずみを吸収する設計とするとともに、組立時の検査項目(寸法検査等)を検討する。
- ・**運転中の流下ノズルの傾きを考慮し、加熱コイルとのクリアランスの確保※や位置調整機能を有する加熱コイルのサポート等**を検討する。

※ 溶融炉を固化セルへ搬入する前に流下ノズルの位置情報を確認し、確認結果を基に加熱コイルの取付け位置調整、加熱コイル径の拡大等を行うことを検討する。

➤ 漏電リレー作動の原因

- これまでの原因調査から、全段加熱時に熱膨張により寸法が変化する固化セル内の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。**
- ITVカメラによる加熱コイルの観察の結果、**流下ノズルが接触していたと想定する部位が白くなっており、接触により黒色の付着物が剥がれたものと推定している。**

➤ 流下ノズルの傾きのメカニズム

- 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**インナーケーシング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、流下ノズルに傾きを生じたことによるものと推定した**(参考資料36-37頁参照:第35回会合で報告)。
- 流下ノズルと加熱コイルの設計上のクリアランス(約10 mm)に対し、**流下ノズルのズレ(西北西方向に約3.5 mm^{*})と、流下ノズルの傾き(西北西方向に約6 mm^{*})に加え、流下ノズルの加熱による熱膨張(径方向:約0.5 mm、軸方向:約6.8 mm)により、流下ノズルが加熱コイルに接触したものと判断した**(参考資料31-32頁参照:第35回会合で報告)。

※ 溶融炉の運転を停止した状態(冷態時)での観察結果。

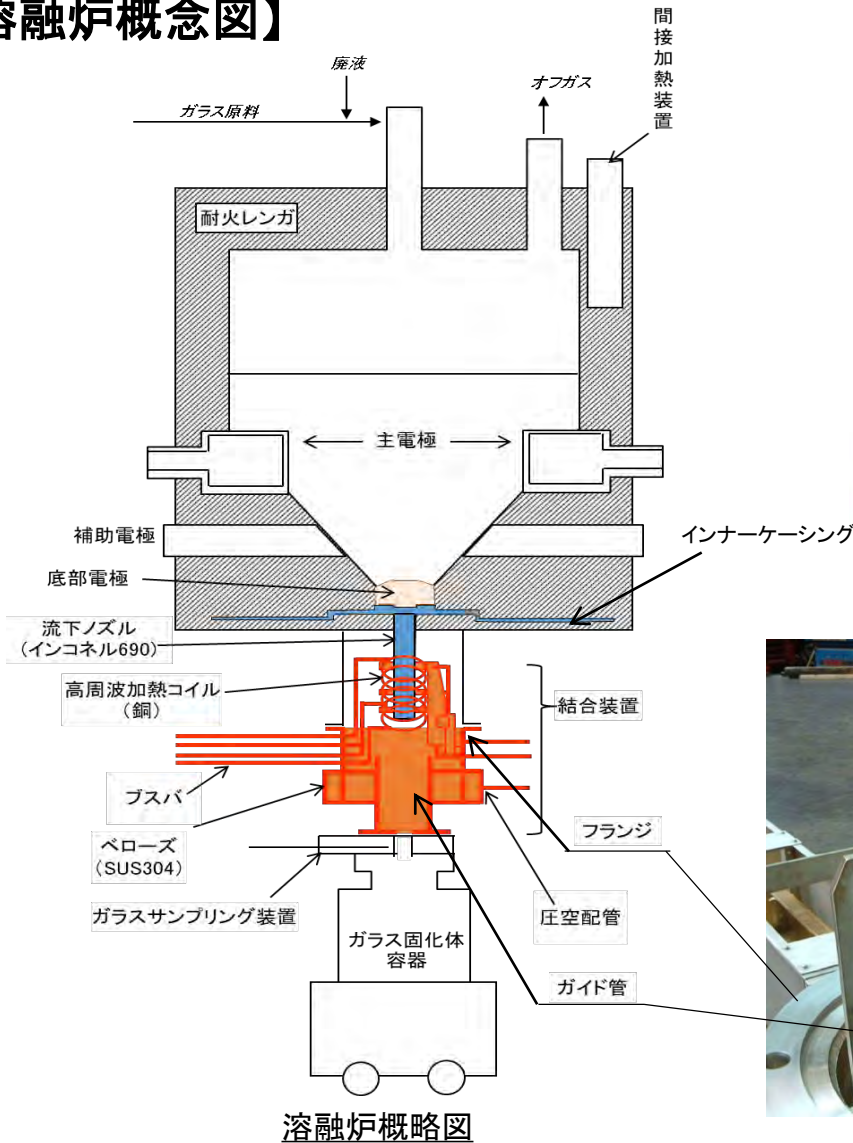
- なお、流下ノズルのズレ(西北西方向に約3.5 mm)は、インナーケーシングと耐火レンガのクリアランス(最大約5 mm)内であり、インナーケーシングの**ズレと流下ノズルの傾きに因果関係はない**と考えている。(参考資料30頁参照:第36回会合で報告)

➤ 流下ノズルの傾きの傾向

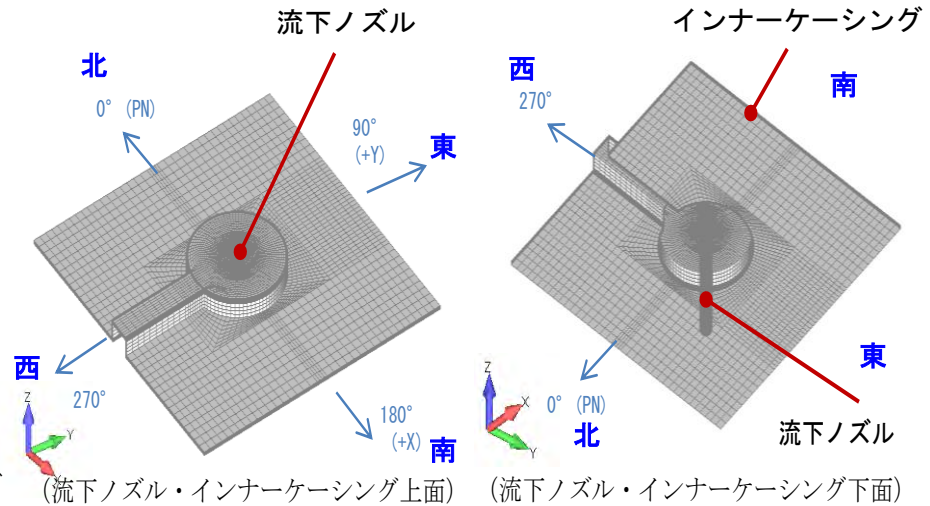
- 流下ノズルの変位の推移について、流下開始時の流下ノズル映像を基に評価(画像解析)した。その結果、流下ノズルの変位の進展傾向は、**約20本目の流下以降、運転の経過に伴い一定の割合で変位が蓄積されていることが分かった**(21頁参照)。
- 非定常解析により、流下ノズルの変位の進展傾向のメカニズムを確認した(18-19頁参照)。

3. 漏れ電流発生の原因調査状況 - 流下ノズルの傾きのメカニズム(1/4) -

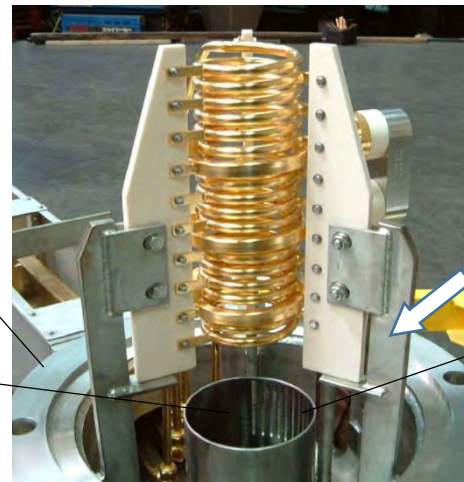
【溶融炉概念図】



溶融炉概略図



流下ノズル・インナーケーシング 3Dモデル図



結合装置写真

流下監視カメラの向き (北西方向から)

ガイド管スリット

【定常解析結果】

- 定常解析により、流下ノズルの傾きのメカニズムを確認した。
- 流下中、インナーケーシングが熱膨張し、A部に塑性ひずみが生じる。
- 流下後の炉底冷却時、インナーケーシングが熱収縮し、塑性ひずみを生じたA部が流下ノズル上部を斜め下方向に押すことにより、流下ノズルが約280°方向に傾く。

【通常時の流下操作の概要】

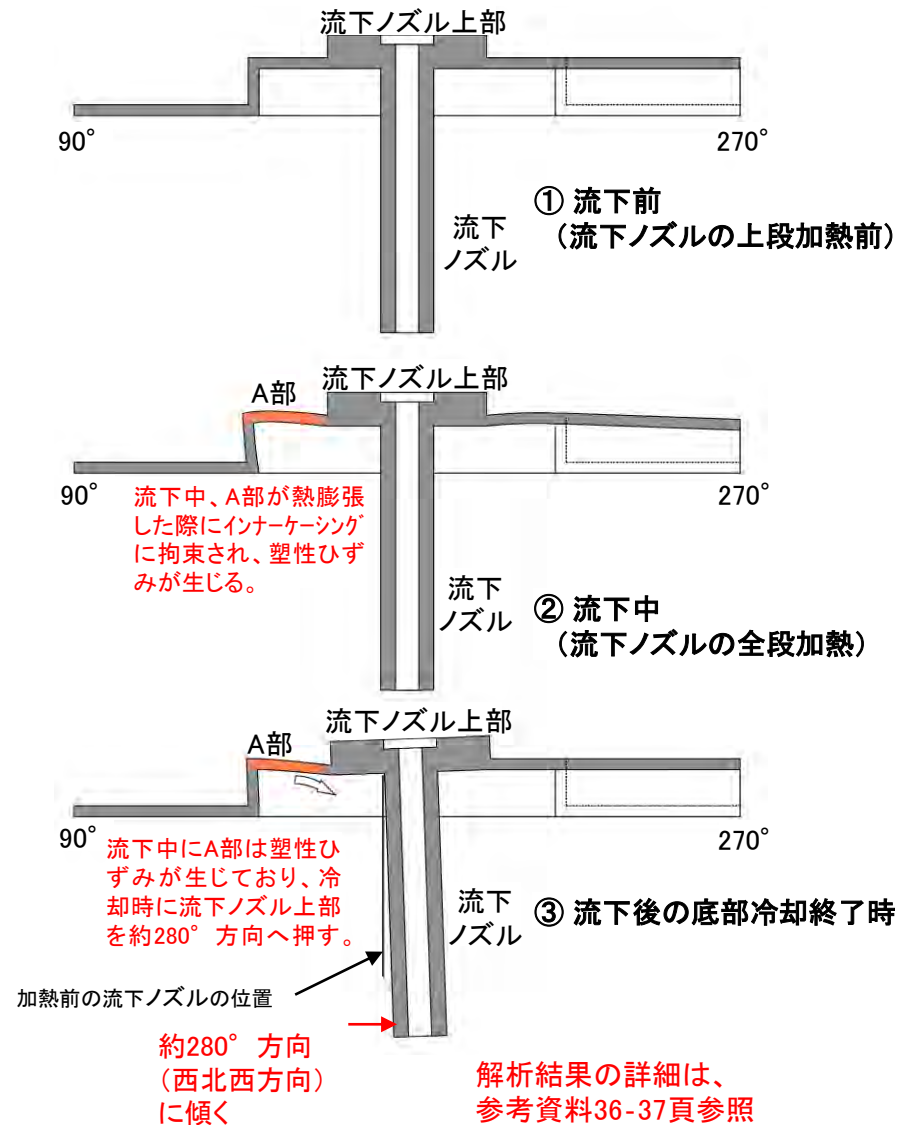
- ① 流下の準備操作として、上段加熱により、流下ノズル上部を高周波加熱する。

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。

- ② 流下中は、全段加熱を継続する。
流下ノズルの温度は、約1000℃(根元部:約820℃)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。

- ③ 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。

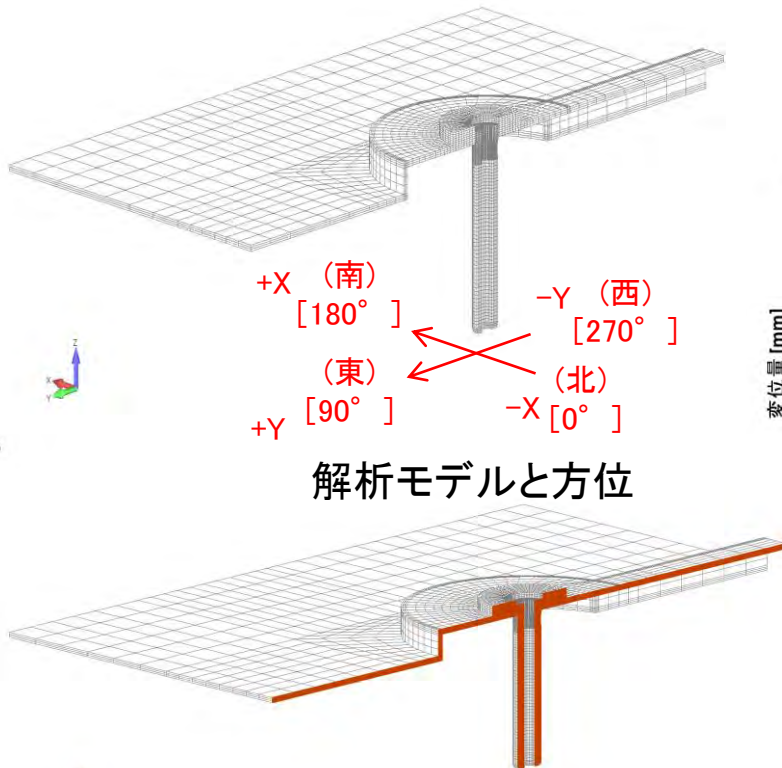


流下ノズルが傾くメカニズム(イメージ図)

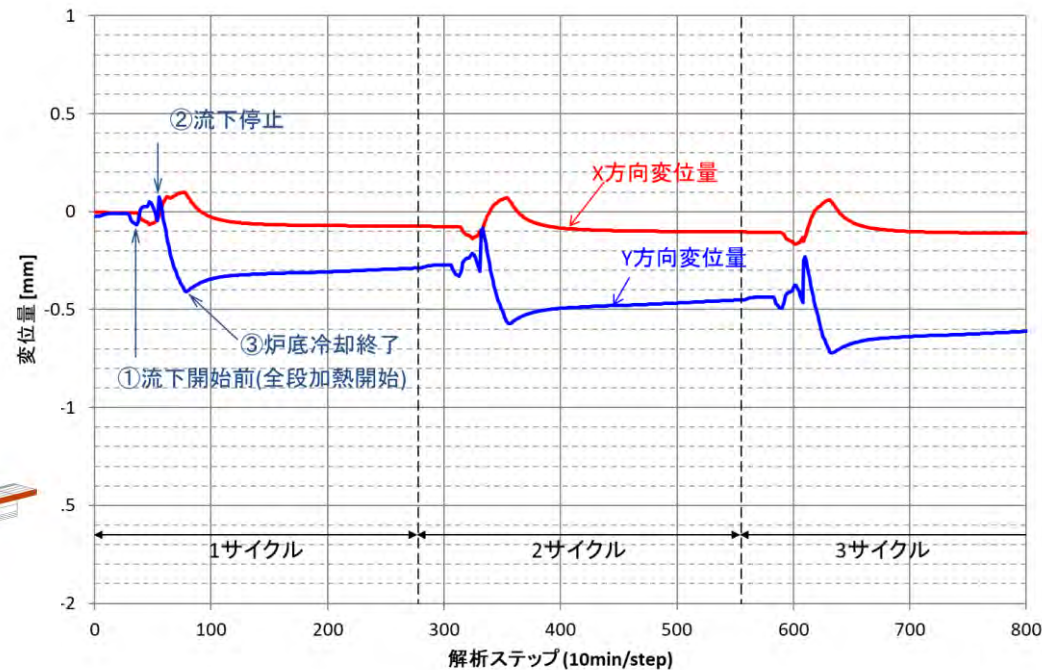
3. 漏れ電流発生の原因調査状況 - 流下ノズルの傾きのメカニズム (3/4) -

【流下ノズルの傾きのメカニズムの妥当性確認】

- 定常解析と同様の解析条件及び解析モデルにより非定常解析を実施し、流下ノズル先端の時刻歴変化を確認した。
- 流下ノズルの傾きは、西北西方向(約280°)方向に進展している傾向があり、観察の結果と一致している(参考資料31-32頁参照:第35回会合で報告)。



流下ノズルのY軸(東西方向)中心断面



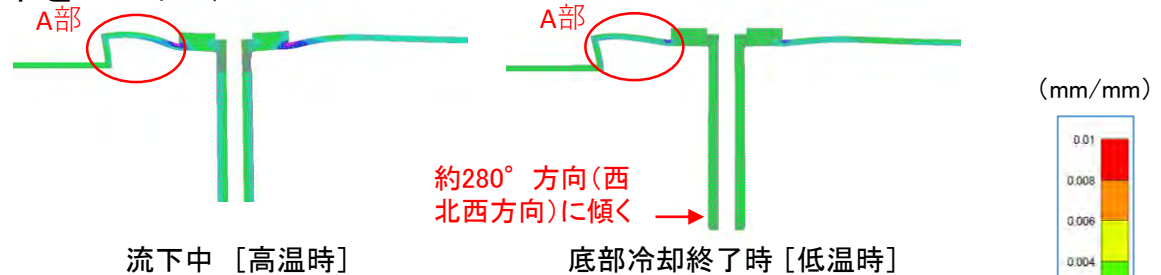
流下ノズル先端中心の変位(非定常解析)

3. 漏れ電流発生の原因調査状況 - 流下ノズルの傾きのメカニズム (4/4) -

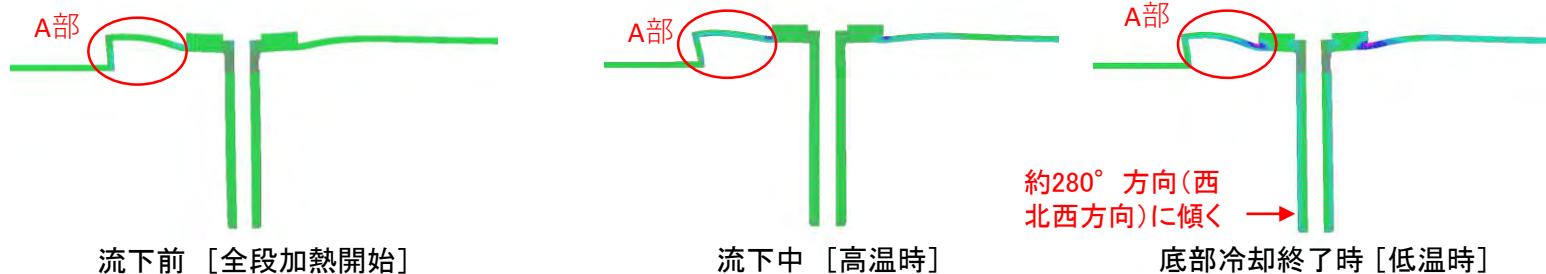
【流下ノズルの傾きのメカニズムの妥当性確認】

- 流下中、熱膨張した際に低温のインナーケーシングに拘束される。左右のインナーケーシングの形状(剛性)の相違により、A部で熱膨張を吸収するようになり、塑性ひずみが生じる。
- 流下後の冷却により、熱膨張が小さくなる過程で流下ノズルを約280° 方向に傾ける(流下中にA部には塑性ひずみが生じているため)。

○定常解析 (変形図に塑性ひずみ分布をプロット)



○非定常解析 (変形図に塑性ひずみ分布をプロット)



- ✓ 流下ノズルの傾きは、定常解析と同じ傾向(約280° 方向)を示し、塑性ひずみ分布についても、同様の傾向を示している。
- ✓ 従って、定常解析で示した流下ノズルの傾きのメカニズムは妥当と判断した。

3. 漏れ電流発生の原因調査状況 － 流下ノズルの傾きの進展傾向について －

【画像解析】

- ・ 熱応力解析の結果から、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ケーシング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た。
- ・ 傾きの進展傾向を把握し、対策の妥当性を評価するため、流下ノズルの変位の推移について、流下開始時の流下ノズル映像を基に評価(画像解析)した。

【解析結果】

- ・ 約20本目の流下以降、運転の経過に伴い一定の割合で流下ノズルの変位が蓄積されていることが分かった(21頁参照)。
- ・ また、約70バッチ以降、変位の小さいバッチを確認した。

【カレット洗浄時等の変位のバラツキの要因】

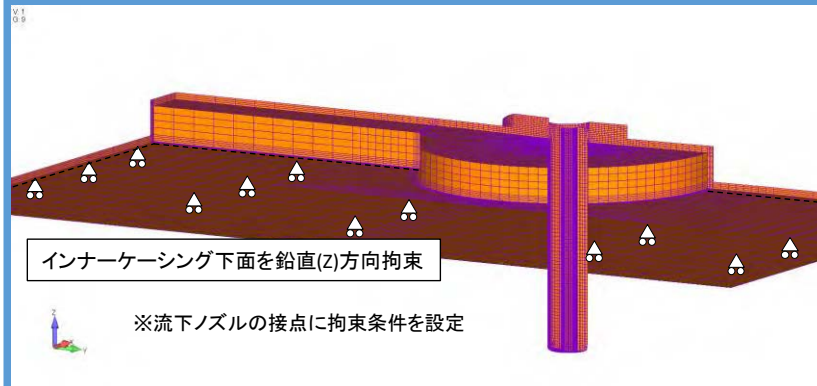
変位の小さいバッチについて、流下ノズル上面へのガラスの加重や流下ノズル周りの温度の違いによる影響について確認した。

- ・ 流下ノズル上面へのガラスの加重の有無(3本分:900 kgと、0 kg)による影響について、数mmのバラツキに対して十分に小さい(22頁参照)。
- ・ 流下ノズル周りの温度の違いによる影響について、通常の流下時に比べて流下ノズル周りの温度が高めの傾向であり、流下ノズルの変位が見かけ上小さく算出されたものと推定※した(23頁参照)。

※ 基準位置との差で算出するため、温度が高い場合、見かけ上変位が小さく算出される。

3. 漏れ電流発生の原因調査状況 - 流下ノズルの傾きの進展傾向について(1/4) -

【ガラス重量の影響】



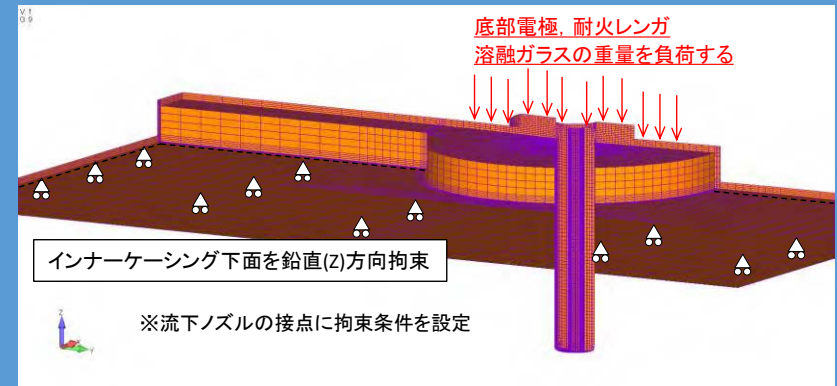
溶融ガラス，耐火レンガの荷重なし

1サイクル終了時点での変位置量

0.298 mm(284° 方向)

X方向：-0.073 mm

Y方向：-0.289 mm



溶融ガラス，耐火レンガの荷重あり

1サイクル終了時点での変位置量

0.305 mm(285° 方向)

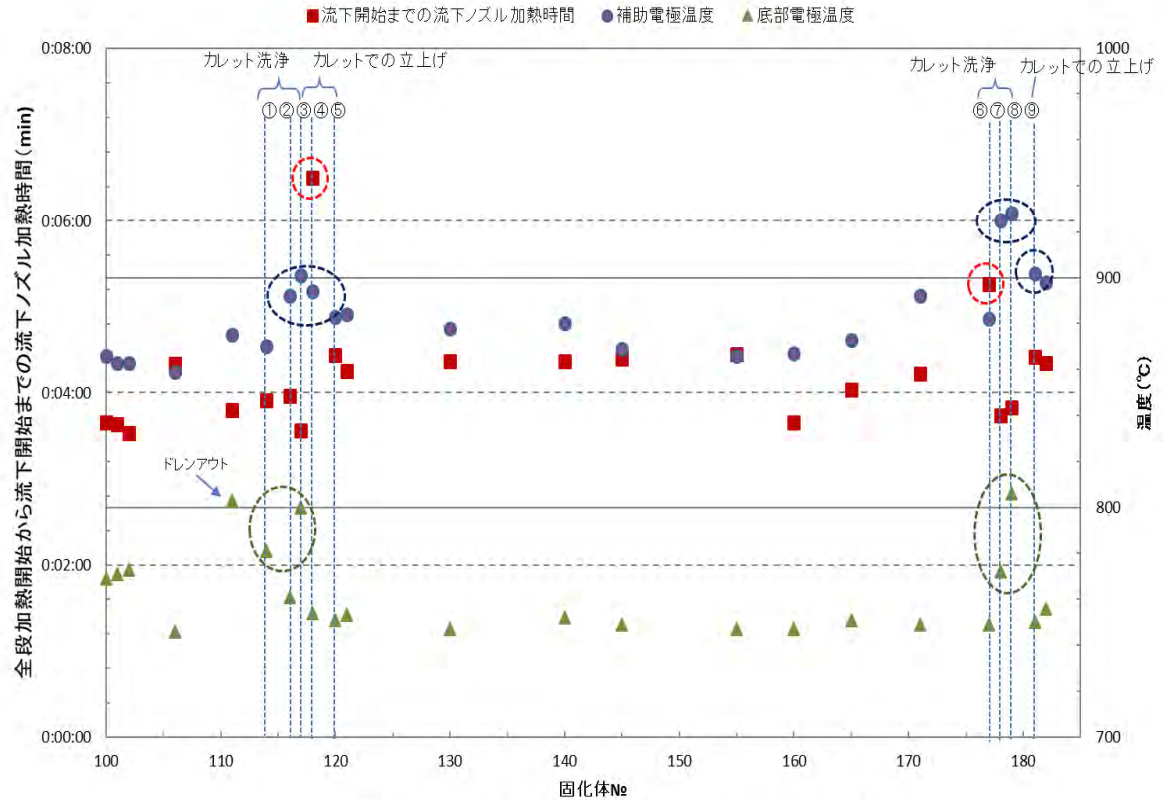
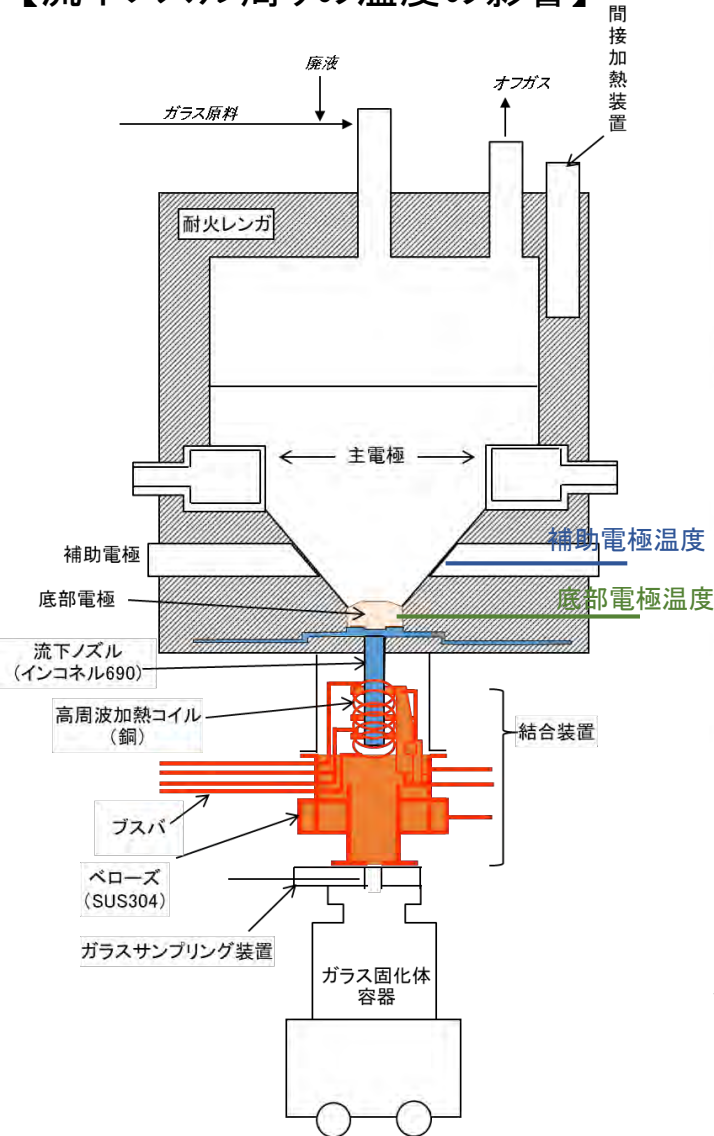
X方向：-0.078 mm

Y方向：-0.295 mm

✓ ガラス重量の影響は、数mmのバラツキに対して、約0.01 mmと十分に小さい。

3. 漏れ電流発生の原因調査状況 - 流下ノズルの傾きの進展傾向について(2/4) -

【流下ノズル周りの温度の影響】

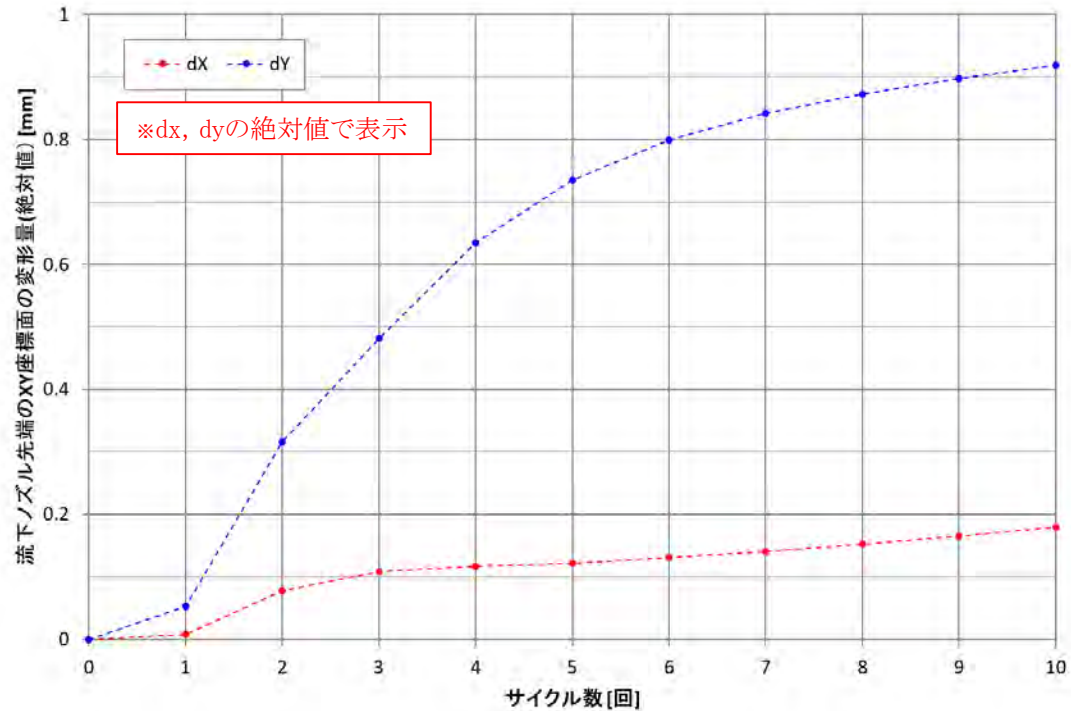
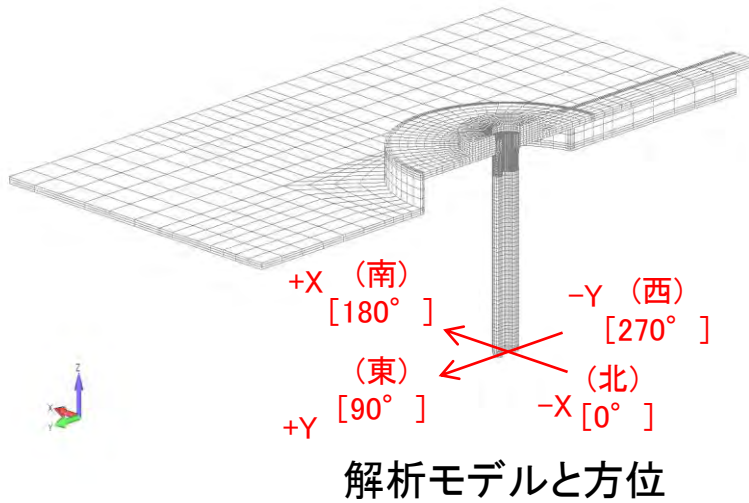


TVF2号溶融炉における流下開始までの所要時間、温度の推移

✓ 変位が小さい①～⑨(21頁参照)については、流下ノズル周りの温度が高めの傾向にあり、見かけ上変位が小さくなっていると推定した(参考資料35頁参照)。

3. 漏れ電流発生の原因調査状況 - 流下ノズルの傾きの進展傾向について(3/4) -

(2) 流下ノズルの傾きの進展性評価 非定常解析による変形の進展性



- 流下ノズルの傾きの進展性について、非定常解析により流下開始時の流下ノズルの変形量の変化を求めた。
- 変形は、**進展するものの収束傾向**を示し、10サイクル目の増分は約0.03 mmとなった。
- この結果より、**流下ノズルの今後の傾きの進展傾向**は、画像解析結果で示すように、ほぼ**線形で外挿**することで評価可能である。

3. 漏れ電流発生の原因調査状況

－ 流下ノズルの傾きの進展傾向について(4/4) －

流下ノズルの変位は、全体的にガラス固化体の製造を繰り返すごとに増加しており、保守的に線形外挿して今後の変位の増加量を求めることとした。

- 今後、約300本繰り返した場合の変位の増加分は最大で標準誤差(95%信頼区間)を考慮すると約6.1 mmと推定する。
- 現状、流下ノズル先端部は、加熱コイルの中心から約9.6 mm(加熱コイルとのクリアランス約0.4 mm)の位置にある。(参考資料 32頁参照)
今後、300本のガラス固化体を製造した場合、流下ノズル先端部は、加熱コイルの中心から約15.7 mmの位置になると推定する。
- 加熱コイル径を拡大等するケース2の対策を施すことで、今後2号溶融炉の寿命を踏まえ300本のガラス固化体を製造したとしても、流下ノズルと加熱コイルのクリアランスは保守的にみても約4.3 mm確保可能と考えられる。

4. 対策への反映(1/2)

原因調査から得られた「流下ノズルと加熱コイルの位置関係が変化する」ことを踏まえた流下ノズルと加熱コイルのクリアランスの管理

(1) ケース2、ケース3共通の対応

項 目		対 応
設計	最大のクリアランスを確保する方法(加熱コイルの下部の径を広げる、径の異なる複数の加熱コイルの準備等)	流下ノズル傾きの進展傾向(約0.013 mm/本)を踏まえ、既存の結合装置に取り付け可能な最大の加熱コイル径を設定し、約10 mmのクリアランスを確保する。
設計	位置関係の変化にすぐに対応できるような結合装置の設計	遠隔にて加熱コイルの位置を調整する機能を結合装置に加えることができるか検討したが、既存の結合装置の配管等の取合いを踏まえると困難である。 従って、流下ノズル傾きの進展傾向が増大した場合を考慮し、加熱コイルに絶縁材を設置する等の処置を講じ、流下ノズルと加熱コイルの接触による漏電を防止する。
運転	予備品の準備	予備品を部品段階で準備しておくことにより、加熱コイルの位置調整が必要となった場合、位置調整を行い結合装置を組み上げ、交換する。
運転	流下ノズルと加熱コイルのクリアランスの管理	運転中は漏電の発生の有無を確認するとともに、キャンペーン終了時に流下ノズルと加熱コイルの位置関係を確認する。 流下ノズルと加熱コイルが接触し、漏電の発生を確認した場合は、結合装置を予備品と交換する。

(2) ケース3への対応

項 目		対 応
設計	流下ノズルの傾きの抑制	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ケーシングの構造に起因するものと考えている。 原因調査結果を踏まえて、インナーケーシングの熱伸びやひずみを吸収するため、流下ノズルの傾きを抑制する構造（例：非対称構造→対称構造 等）に変更する。（構造検討中）
設計 据付	流下ノズルの初期の芯ズレの抑制	3号溶融炉の設計において、インナーケーシングの形状やインナーケーシングと耐火物とのクリアランス等を検討する。
設計 据付	流下ノズルの初期の芯ズレの吸収	コールド試運転後（溶融炉を固化セルへ搬入前）の芯ズレを計測する。 計測結果を基に、流下ノズルが加熱コイルの中心となるよう加熱コイルの位置を調整し、結合装置を取り付ける。

参考資料

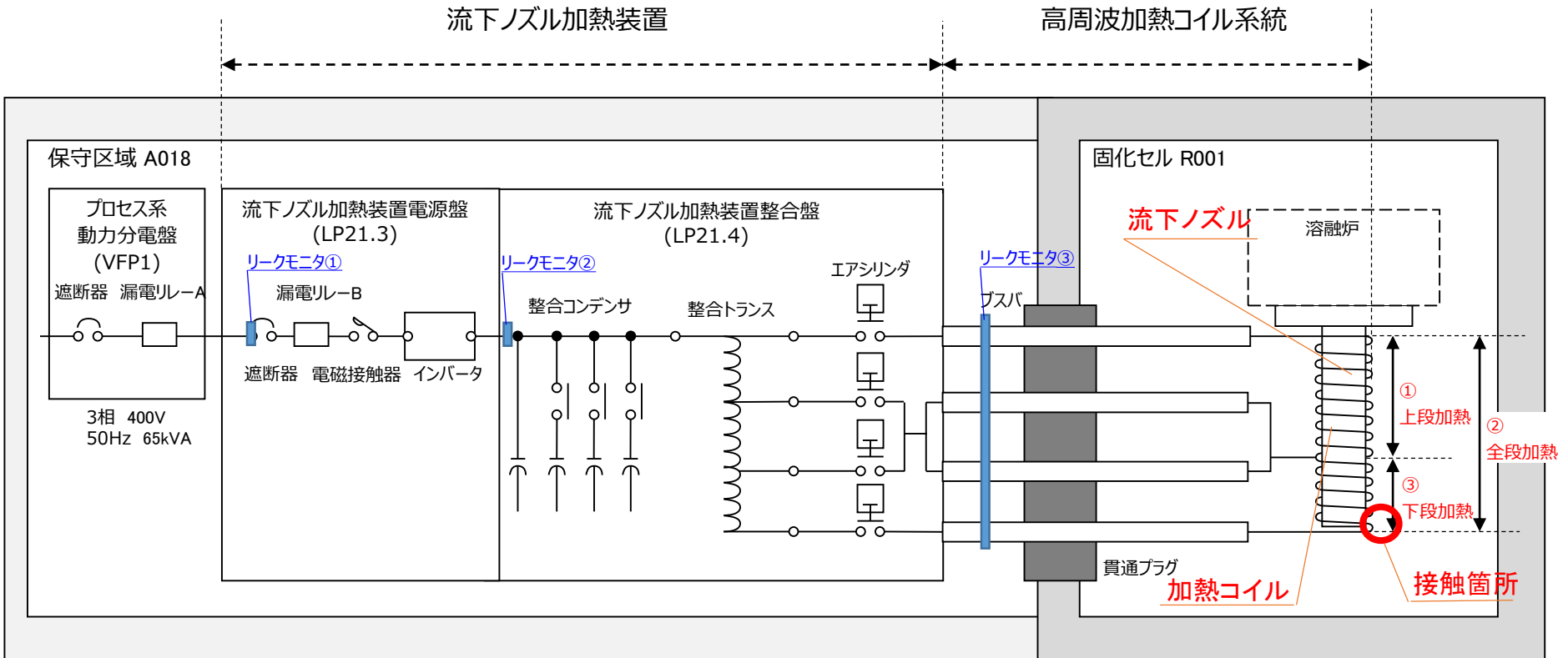


図. 加熱コイル給電系統

- 流下ノズル(インナーケーシング)のズレについて -

(1) インナーケーシングと耐火レンガのクリアランス

➤ 構造

- インナーケーシングは、溶融炉の築炉時に耐火レンガ(C1)上に載せた後、その中央の上部に底部電極を載せ、その周りに耐火レンガ(MRT70K)を配置している。

➤ クリアランス

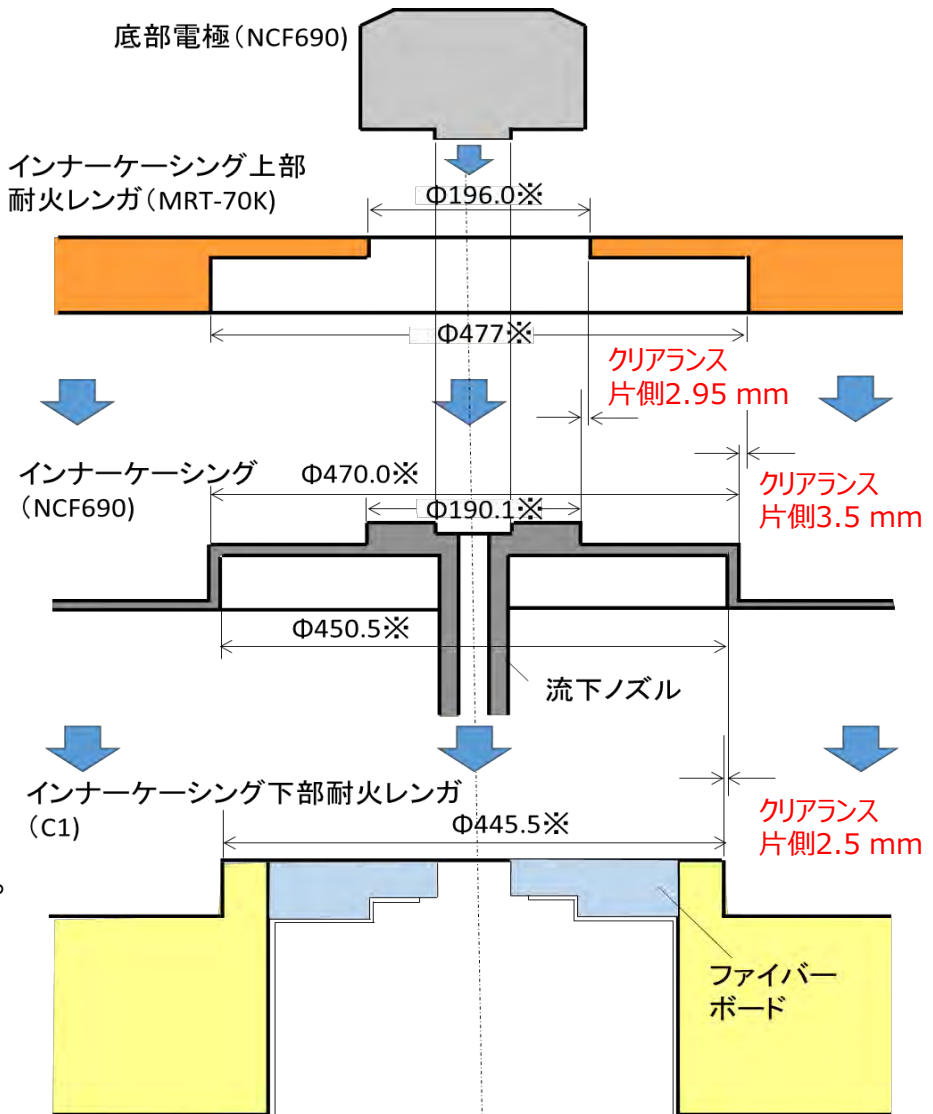
- インナーケーシングは、上部及び下部の耐火レンガ(上部:MRT-70K、下部:C1)に対して、設計上の芯位置に対して水平方向に片側約2.5 mmのクリアランスを有している(築炉時芯がズれていれば最大5 mm)。

(2) インナーケーシングのズレ

- 流下ノズルの設計上の芯位置に対するズレが約3.5 mm(西北西方向)* (観察結果:参考資料31-32頁参照)。
* 溶融炉の運転を停止した状態(冷態時)での観察結果。
- なお、2号溶融炉の築炉時の施工記録が残っておらず、実際据付誤差がどの程度あったか確認できない。



- 2号溶融炉においては、インナーケーシングの据付誤差等の管理が出来ていなかった。
- 今回の事象を踏まえ、3号溶融炉の製作においては、インナーケーシングの据付誤差等の管理を行う。



【流下ノズルと加熱コイルの観察結果】

【推定方法】

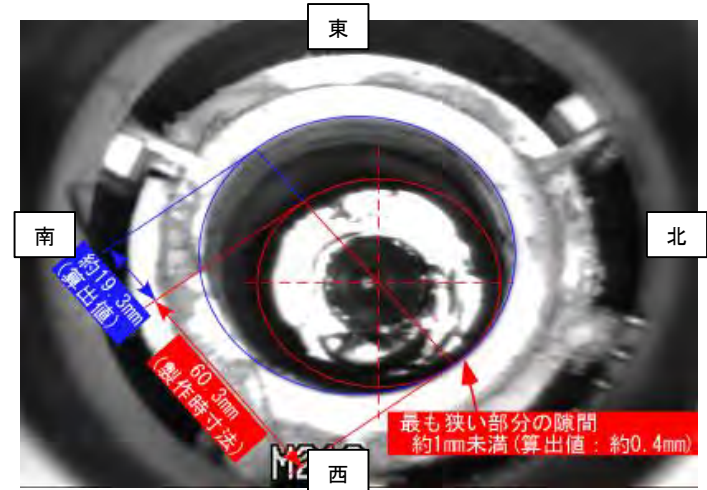
- 流下ノズル外径60.3 mm(製作時の実測寸法)を基準として、画像上での計測値を換算して寸法を算出した。
- 加熱コイルの内径は設計値80 mmとした。

① 流下ノズル先端部

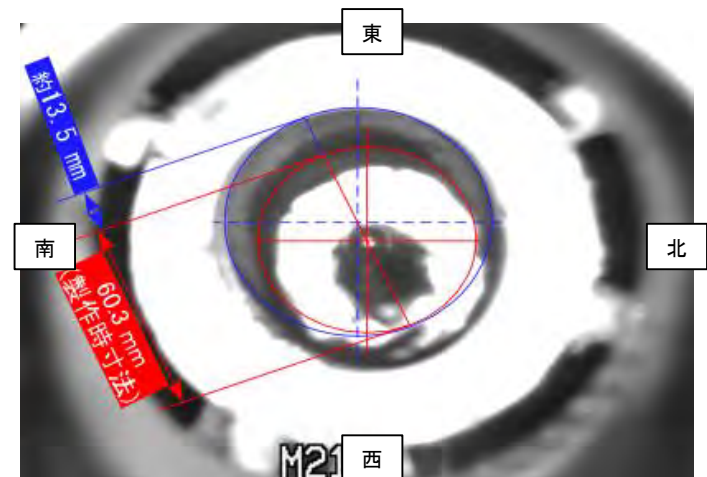
- 流下ノズル先端部と加熱コイルの間隔は、最も広い箇所で約19.3 mm。
- **流下ノズル先端部と加熱コイルの間隔は、最も狭い箇所**で約0.4 mmと推定。

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、最も広い箇所で約13.5 mm。
- **流下ノズル根本部のズレは、北西側に約3.5 mmと推定。**

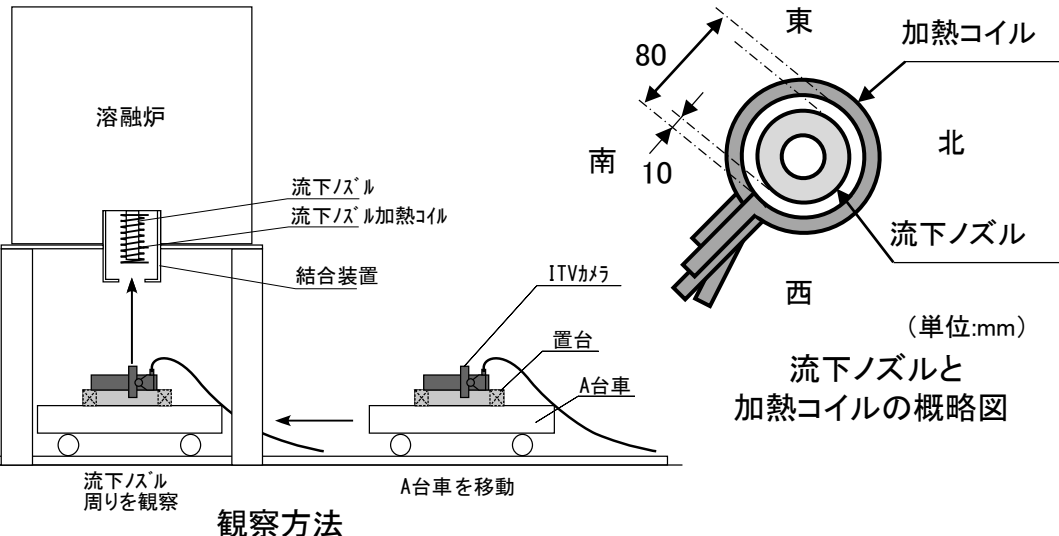


① 流下ノズル先端部の観察結果

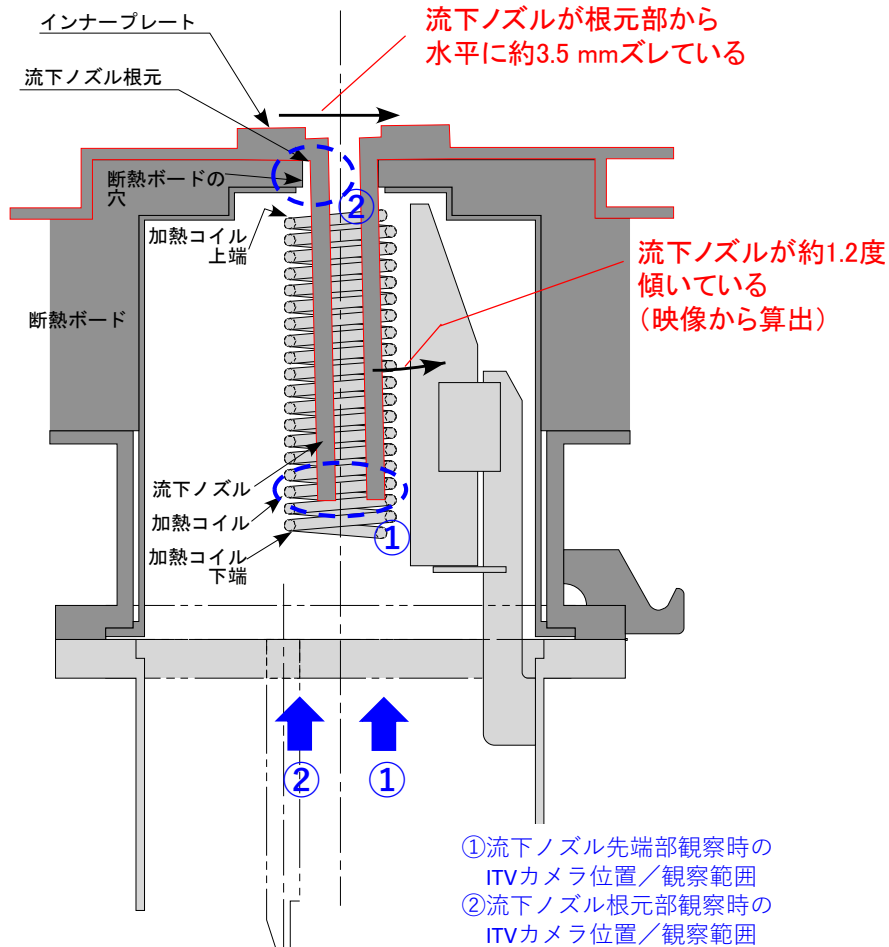


② 流下ノズル根本部の観察結果

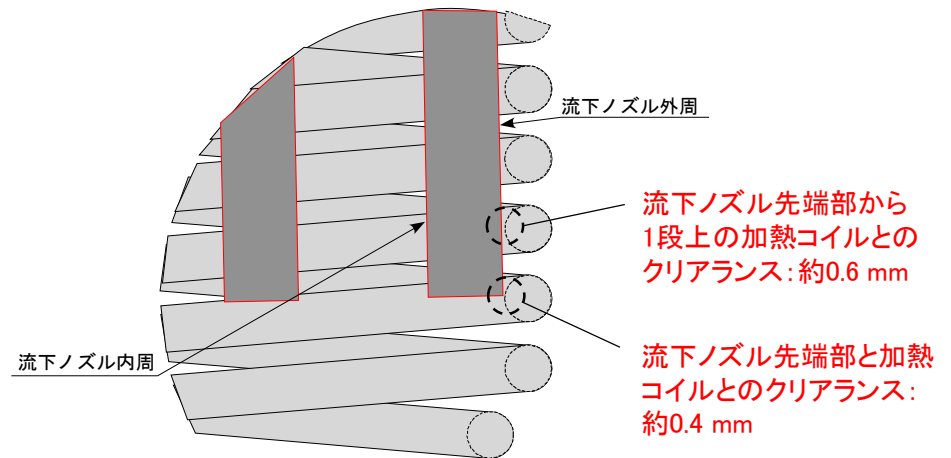
観察結果



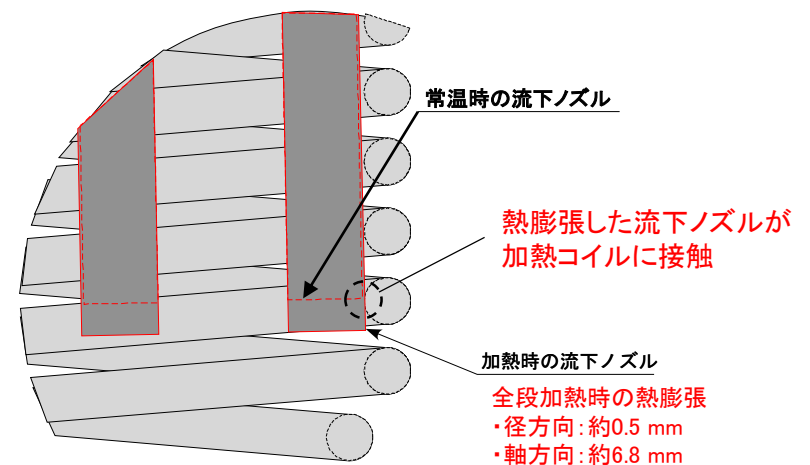
✓ 現状、室温の状態では流下ノズル先端部と加熱コイルのクリアランスは最も狭い箇所で約0.4 mmと推定でき、全段加熱時の流下ノズルの熱膨張(軸方向に約6.8 mm、径方向に約0.5 mm膨張する)により、加熱コイルに接触したと考えられる。



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)

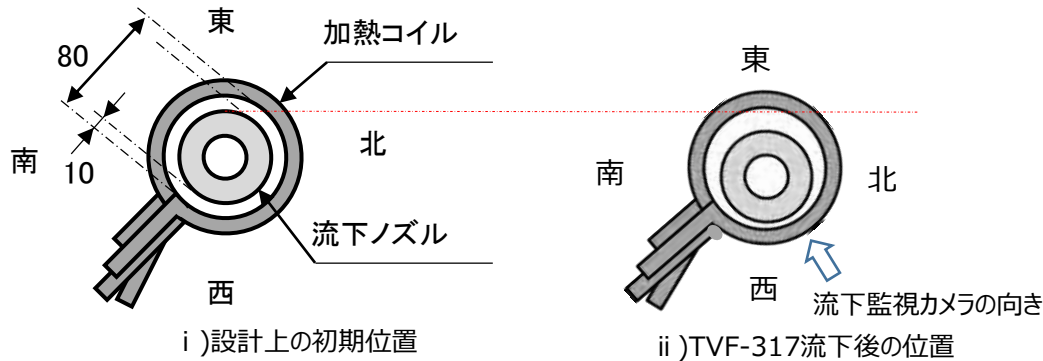


流下ノズルと加熱コイルの位置関係拡大図(常温時)

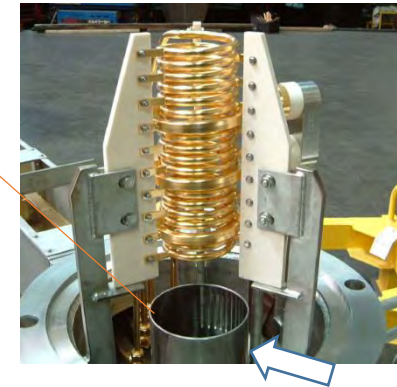


流下ノズルと加熱コイルの位置関係拡大図(全段加熱時)

【画像解析の概要】



結合装置内
ガイド管スリット



流下監視カメラの向き

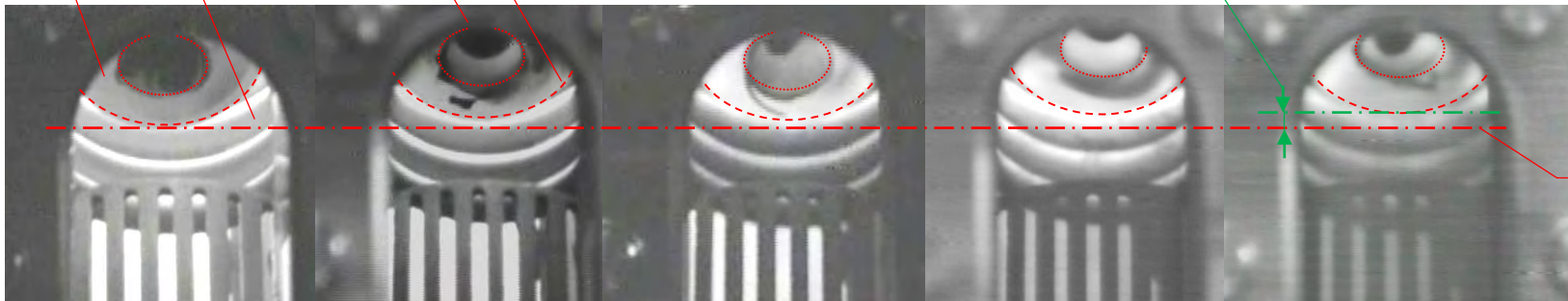
流下ノズル
(外径60 mm)

加熱コイル
(内径80 mm)

流下ノズル内周

流下ノズル外周

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)

【画像解析の方法】

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、進展性を評価した。

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。

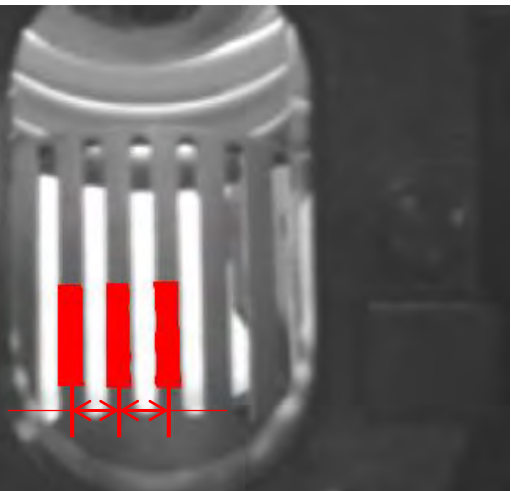
【X方向の変位算出】

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。

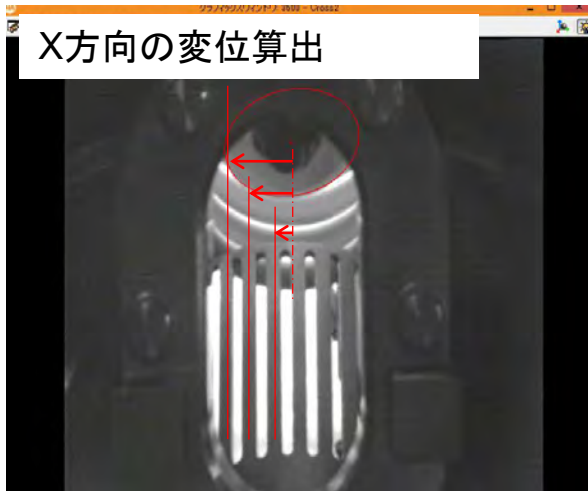
【Z方向の変位の算出】

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した。

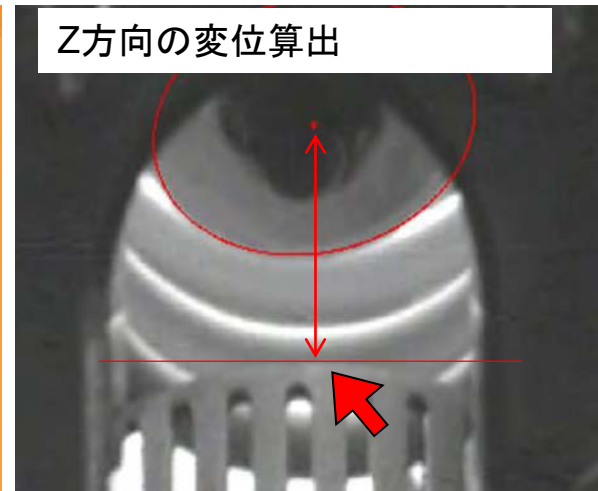
①



X方向の変位算出



Z方向の変位算出



【流下ノズル温度が画像解析結果へ与える影響について】

流下ノズル周りの温度が基準バッチと同じ場合	流下ノズル周りの温度が基準バッチより高い場合
<p>計測箇所 b_0 a_0 (基準バッチ)</p> <p>観察方</p>	<p>流下ノズルが下側に変形</p> <p>計測箇所 b_2 a_0 (基準バッチ)</p> <p>観察方向</p>
<p>計測箇所の寸法 $b_0 > b_2$</p>	
<p>※同じ変位角度θであっても流下ノズル周りの温度が高い場合、流下ノズルの下側への変形量が大きくなり、測箇所の寸法が短く計測され、変位量が小さく評価される。</p>	

【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。

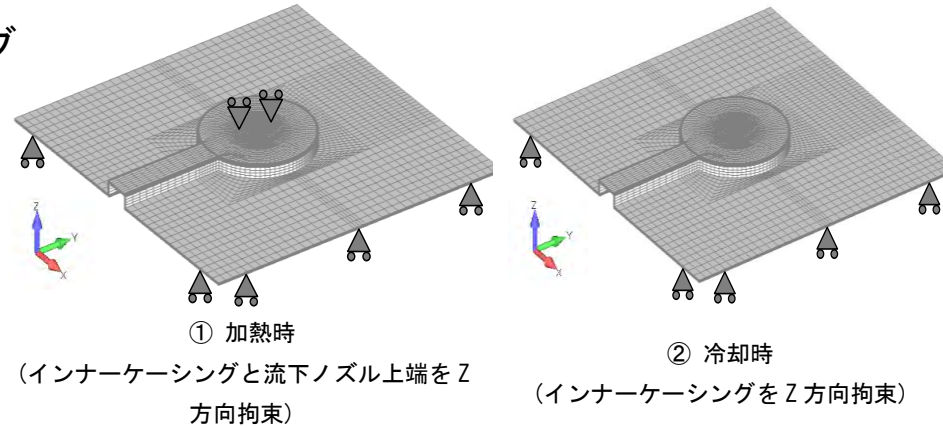
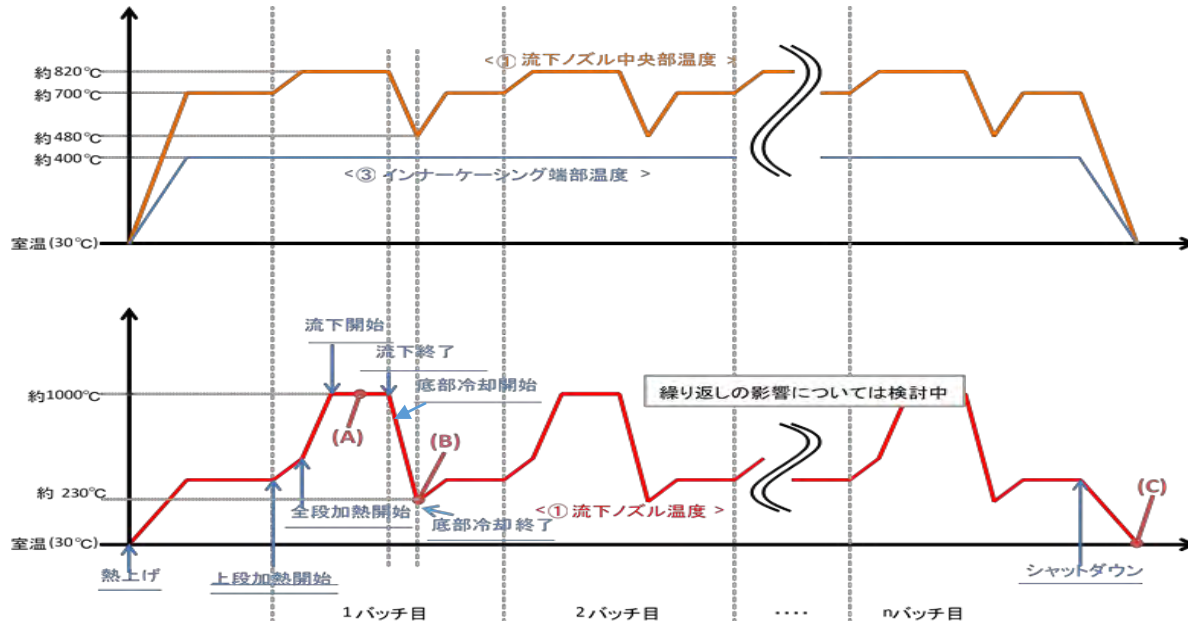


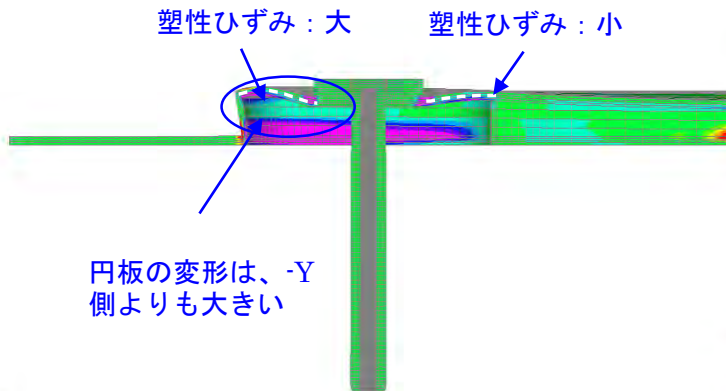
図3 熱応力解析の拘束条件



- 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】

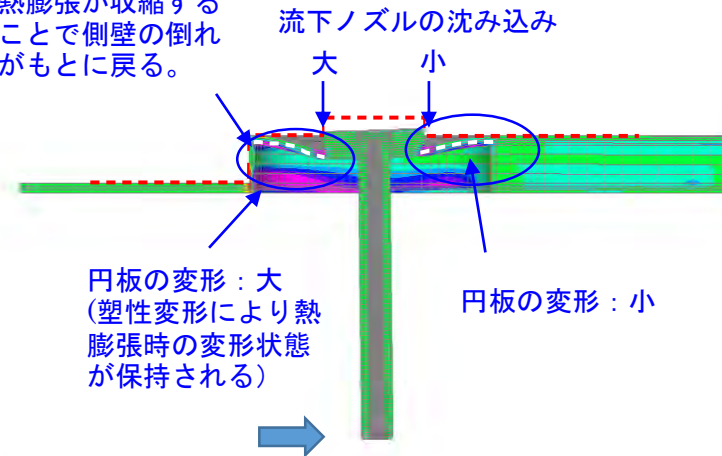
流下ノズル温度計の段差部がある側(-Y)よりその反対側(+Y)の応力が大きいことから、塑性ひずみも+Y側で大きく発生している。



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

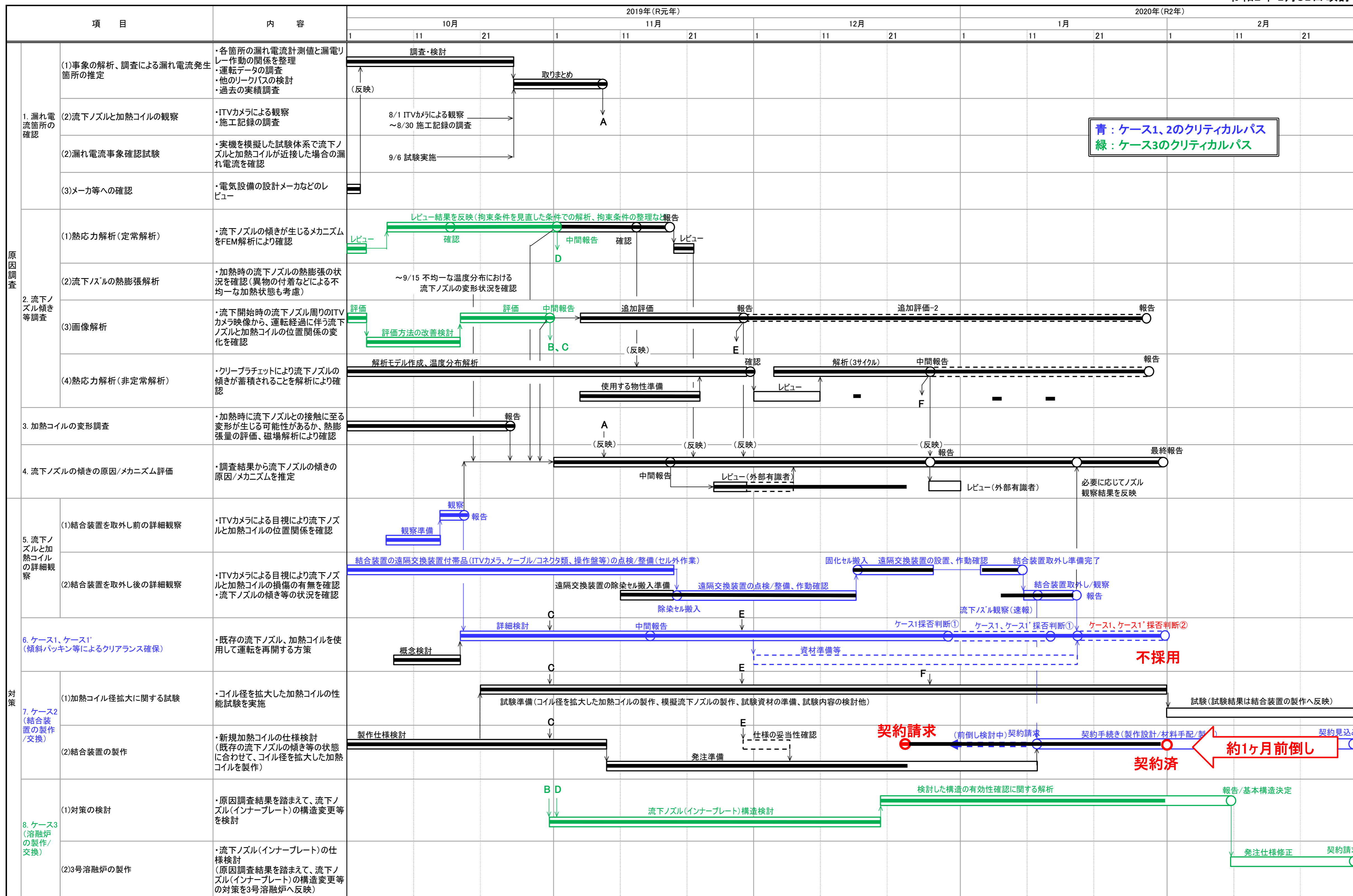
【mm/mm】



流下停止に係る原因調査、対策スケジュール

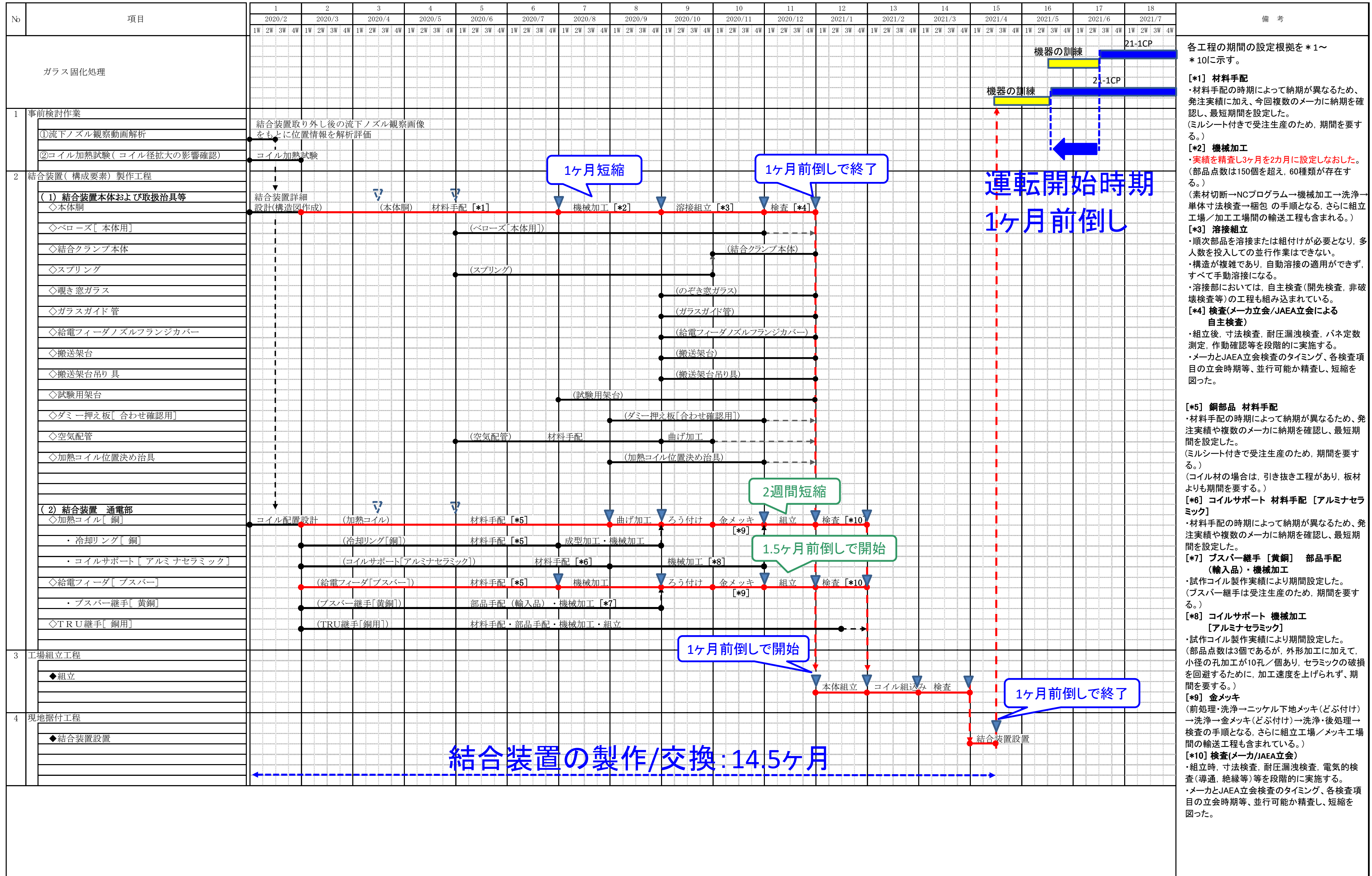
別添資料-1

令和元年11月27日作成
令和2年1月31日改訂



ケース2 全体詳細工程（工程短縮ケース）

令和2年1月30日作成



備考

各工程の期間の設定根拠を*1~*10に示す。

[*1] 材料手配
 ・材料手配の時期によって納期が異なるため、発注実績に加え、今回複数のメーカーに納期を確認し、最短期間を設定した。
 (ミルシート付きで受注生産のため、期間を要する。)

[*2] 機械加工
 ・実績を精査し3ヶ月を2カ月に設定しなおした。
 (部品点数は150個を超え、60種類が存在する。)
 (素材切断→NCプログラム→機械加工→洗浄→単体寸法検査→梱包)の手順となる。さらに組立工場/加工工場の輸送工程も含まれる。)

[*3] 溶接組立
 ・順次部品を溶接または組付けが必要となり、多人数を投入しての並行作業はできない。
 ・構造が複雑であり、自動溶接の適用ができず、すべて手動溶接になる。
 ・溶接部においては、自主検査(開先検査、非破壊検査等)の工程も組み込まれている。

[*4] 検査(メーカー立会/JAEA立会による自主検査)
 ・組立後、寸法検査、耐圧漏洩検査、パネ定数測定、作動確認等を段階的に実施する。
 ・メーカーとJAEA立会検査のタイミング、各検査項目の立会時期等、並行可能か精査し、短縮を図った。

[*5] 銅部品 材料手配
 ・材料手配の時期によって納期が異なるため、発注実績や複数のメーカーに納期を確認し、最短期間を設定した。
 (ミルシート付きで受注生産のため、期間を要する。)
 (コイル材の場合は、引き抜き工程があり、板材よりも期間を要する。)

[*6] コイルサポート 材料手配 [アルミナセラミック]
 ・材料手配の時期によって納期が異なるため、発注実績や複数のメーカーに納期を確認し、最短期間を設定した。

[*7] プスパー継手 [黄銅] 部品手配 (輸入品)・機械加工
 ・試作コイル製作実績により期間を設定した。
 (プスパー継手は受注生産のため、期間を要する。)

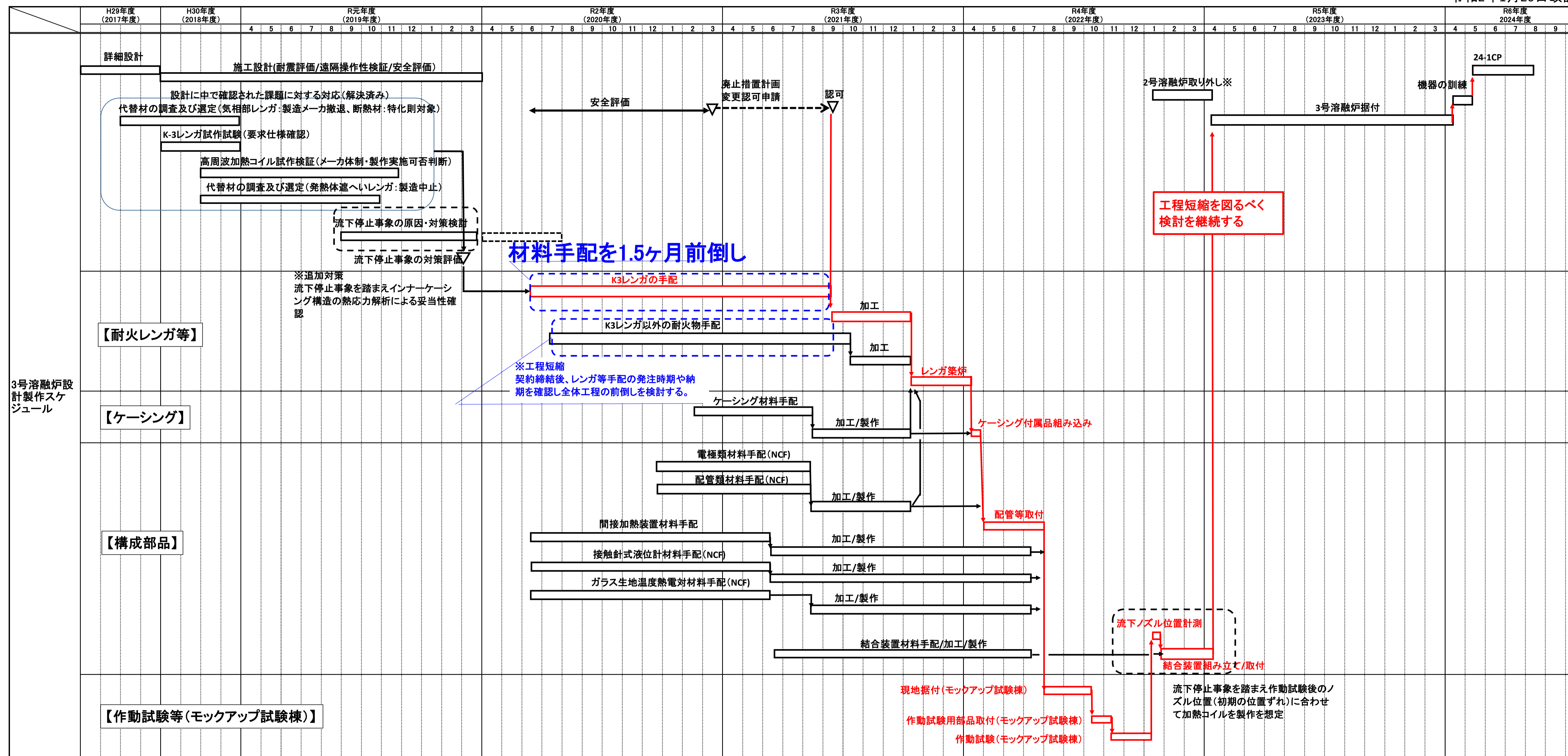
[*8] コイルサポート 機械加工 [アルミナセラミック]
 ・試作コイル製作実績により期間を設定した。
 (部品点数は3個であるが、外形加工に加えて、小径の孔加工が10孔/個あり、セラミックの破損を回避するために、加工速度を上げられず、期間を要する。)

[*9] 金メッキ
 (前処理・洗浄→ニッケル下地メッキ(どぶ付け)→洗浄→金メッキ(どぶ付け)→洗浄→後処理→検査)の手順となる。さらに組立工場/メッキ工場間の輸送工程も含まれている。)

[*10] 検査(メーカー/JAEA立会)
 ・組立時、寸法検査、耐圧漏洩検査、電気的検査(導通、絶縁等)等を段階的に実施する。
 ・メーカーとJAEA立会検査のタイミング、各検査項目の立会時期等、並行可能か精査し、短縮を図った。

TVF3号溶融炉の製作に係るスケジュール(1次ドラフト)

令和元年12月24日作成
令和2年1月20日改訂



- ・ 製作・据付の工程短縮を検討中
- ・ 2号溶融炉取り外し前に、ガラスの抜き出しが必要。実施時期は調整中。