

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

—漏れ電流発生の原因調査状況と
今後の対応—

令和元年 10 月 7 日

日本原子力研究開発機構(JAEA)

1. 概要

ガラス固化技術開発施設(TVF)の溶融炉の流下ノズル加熱装置において、流下中に漏電リレーが作動し流下が停止する事象に対して、原因調査を行っている。

これまでの調査により、流下操作に伴い、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熱膨張及び収縮の過程により塑性変形を生じ、流下ノズルに傾きが生じ、加熱コイルに接触することにより漏電リレーが作動した可能性が考えられる。

現状、調査は継続しており、調査運転の必要性を判断できる状況にない。

調査と並行して、2号溶融炉の再流下に向けた検討・対応、3号溶融炉の製作手配を進める。

2. 原因調査

2.1 前回の監視チーム会合(8/29)までの調査結果

漏れ電流が発生した際、流下ノズル加熱装置(電源盤)の漏電リレーの作動による「接地異常」表示の点灯を確認した。その他、「過電流」や「インバータ過電圧」等の表示は点灯していない。

本事象発生時、流下監視用ITVカメラの映像にちらつき、溶融炉に設置されている一部の温度計指示値に変動が見られた(図-1)。

今回の運転において、ピーク状の漏れ電流(最大約250mA)が繰り返し生じており、各流下における漏れ電流の発生のタイミング、電流値について規則性は見られなかった(図-2,3)。

漏電リレー作動による流下停止後の絶縁抵抗測定の結果、異常は認められていない(図-4)。

ガラス流下時の映像から、2号溶融炉運転初期から流下ノズルと加熱コイルの位置関係に変化がみられた(図-5)。

本事象の要因を整理し、整理結果(図-6)から、流下ノズルが加熱コイルに近接、もしくはわずかに接触したことにより漏れ電流が発生したものと推定した。

2.2 前回の監視チーム会合(8/29)以降の追加調査状況

① 運転データの確認

過去の運転データも含めた調査により、今回の運転では流下ノズル加熱装置(電源盤)に給電している上位の低圧動力配電盤で漏れ電流が検出されていることを確認した(図-3)。

また、平成7年(結合装置内のガラス閉塞事象)にも当該低圧動力配電盤で漏れ電流が検出されている。

② 漏えい電流発生に係る確認試験

モックアップ試験の試験体系では、流下ノズルと加熱コイルが近接した状態では流下ノズルと加熱コイル間の間隔や介在物の有無、湿度及び加熱コイル電圧の変化に係らず、漏れ電流はせいぜい数mA(実効値)しか流れず、変化がないことを確認した(添付-1)。

この確認試験から評価すると、漏れ電流の経路を流下ノズル～炉内のガラス～溶融炉ケーシング～セルライニング～アース(図-7)と仮定した場合、流下ノズルが加熱コイルに接触して漏電リレーが作動する漏れ電流(数百 mA)が流れたと考えられる。

③ 熱応力解析(定常解析)

有限要素法(解析コード:ABAQUS)を用いた熱応力解析(定常解析)を実施している。拘束条件等を検証中であるが、この解析から、流下操作に伴い、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熱膨張及び収縮の過程により塑性変形を生じ、流下ノズルに傾きが生じる可能性がある(添付-2)。

流下ノズルの傾きが、流下操作の繰り返しにより蓄積されたと仮定した場合、流下時に流下ノズルが熱膨張することにより、流下ノズル先端付近が加熱コイルに接触すると考えられる。

3. 調査運転の可否

原因調査は継続しており(表-1)、現状、調査運転の必要性を判断できる状況にない。

4. 今後の対応

4.1 今後の原因調査

流下ノズルの傾き等に係る熱応力解析、漏れ電流の発生要因や漏れ電流の経路について引き続き調査を進める。なお、原因調査のため、流下はしないものの、溶融炉を加熱した状態でなければ確認できない炉の抵抗測定や漏れ電流の測定のための流下ノズルの加熱等について、実施するかどうか検討を進める。

4.2 調査と並行した検討

- ① 2号溶融炉の再流下に向け、流下ノズルと加熱コイル間のクリアランス調整の可能性の検討及び結合装置(加熱コイル含む)の更新等に係る検討を進める(図-8)。

これと並行して、

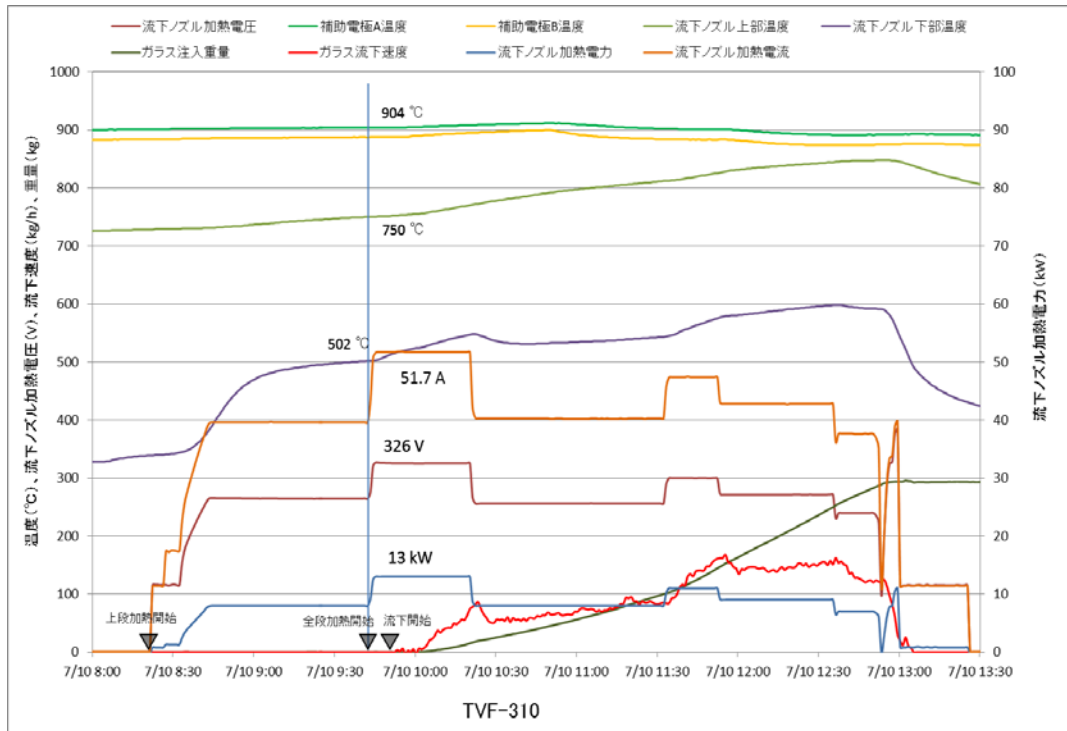
- ② 3号溶融炉の製作手配(今回の事象の対策を含めた検討が必要)を進める。(仮に、2号溶融炉が継続的に運転できないと判断された場合には、3号溶融炉に切り替える必要があり、2号溶融炉内に保有しているガラス(約780kg)を何らかの方法で抜き出す検討も進める。)

これらの対策に要する期間や12.5年計画への影響については、速やかに整理する。

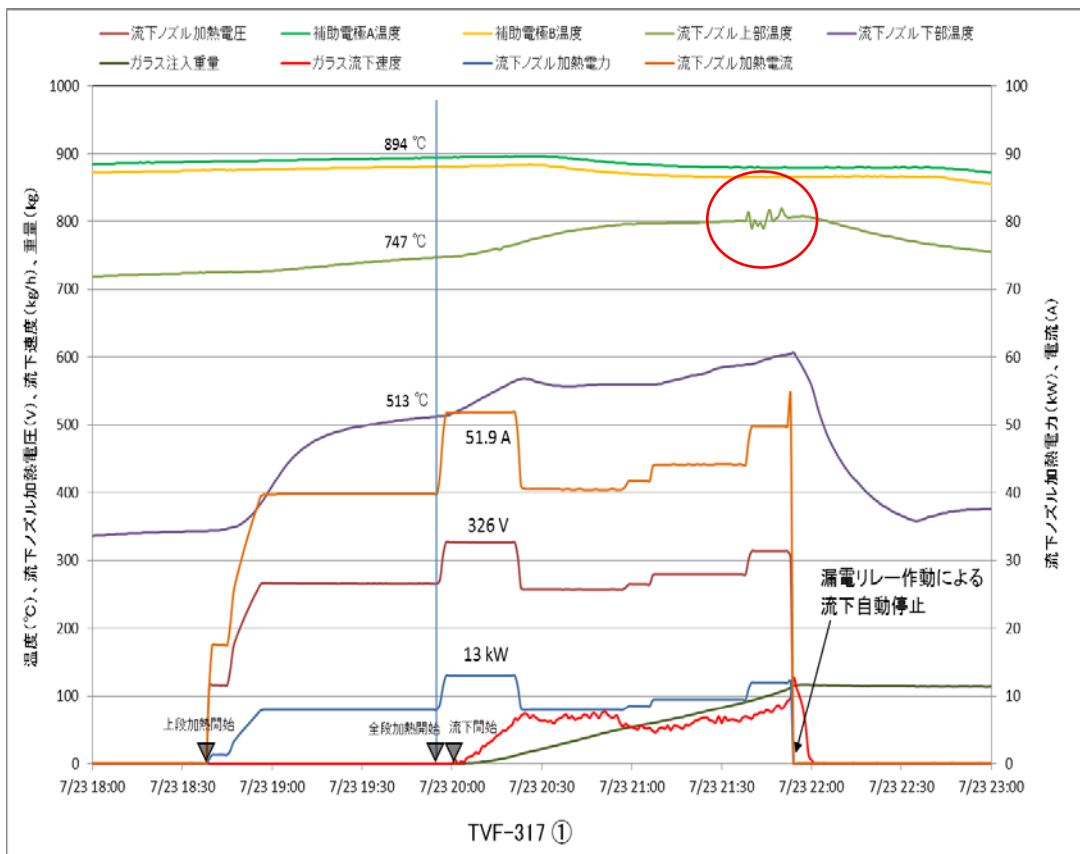
以上

表-1 要因解析に基づく実施項目の整理リスト

調査項目	調査内容	調査・確認方法	調査・確認結果	これまでの評価	今後の調査内容等	
[製作起因] 溶融炉製作時の 流下ノズルの 位置ずれ, 変形	溶融炉製作時の単品、 組立時の位置ずれの有 無を確認する。	・製作時の流下ノズル 単品の図面, 寸法検査 記録を調査する。	・流下ノズル単品外径は、φ60.3mm (公差 φ60±0.5, -0) ・流下ノズル溶接後の倒れはインナー ケーシングに対して1.5mm以内で設計	モックアップ試験棟での作動確認 後、下部ジャケットコイルと流下ノ ズルの間には、3.5mm程度(製作 時、輸送時、据付時のずれを含む) の偏芯があった。	-	
		・組立時の溶融炉 に対する寸法位置 記録を調査する。	・流下ノズル位置決め治具(φ61.7mm) に基づき組み立てており、最大ずれ量 は、0.85mm(=1.7mm÷2)程度			
		・組立時の写真から すき間を調査する。	・モックアップ試験棟での流下前の写真では、下 部ジャケットコイルと流下ノズルとの偏芯はよく 判らない。			
	[輸送・据付起因] 溶融炉輸送時・据付時 の流下ノズルの 位置ずれ	輸送、据付時の外力に より流下ノズルにずれ がなかったかを確認す る。	・M/U棟への輸送、 据付後の寸法記録 や写真を調査する。			・モックアップ試験棟への輸送後にレンガ等がず れていないことを確認している。
			・固化セルへの輸送、 据付後の寸法記録 や写真を調査する。			・モックアップ試験棟からTVFまでは低速で移動 している。
			製作時の残留応力の影 響確認として、初回熱上 げ後の状態を確認す る。			・初回熱上げ後の 寸法位置記録を 調査する。
・初回熱上げ後の 写真からすき間を 調査する。	・モックアップ試験棟の流下ノズル下端と溶融炉 結合装置取付けフランジとの位置関係を計測し た記録から3.5mmずれていることを確認してい る。					
モックアップ試験時の変 形の有無を確認する。	・試験後の寸法記録 や写真を調査する。	・モックアップ試験棟の流下ノズル下端と溶融炉 結合装置取付けフランジとの位置関係を計測し た記録から3.5mmずれていることを確認してい る。				
[運転起因] 溶融炉運転時の 流下ノズルの 位置ずれ, 変形	構造(ノズル単体)に起 因する変形の有無を解 析により確認する。	・熱伝導解析により、 流下ノズルの温度分布 を調査する。	・インナーケーシングが非対称構造であるので、 実構造をモデル化して、熱膨張時の変形を解析 した結果、90°方向の流下ノズル上部(イン ナーケーシング)に塑性変形が生じる。	流下操作に伴い、流下ノズルが取 り付けられているインナーケーシ ングの熱膨張及び収縮の過程によ り塑性変形を生じ、流下ノズルに傾 きが生じる可能性がある。	・インナーケーシングの熱膨張に関 する設計情報から解析に用いた拘 束条件を検証する。 ・モックアップ試験による検証(要否 を含む)を検討する。	
		・熱膨張(熱応力)解析 により、流下ノズルの 変形を調査する。	・加熱後の冷却時の解析から、加熱時の90°方 向のインナーケーシングの塑性変形の影響によ り、流下ノズルが270°方向に傾く。			
		構造(レンガとの組み合 わせ)による位置ずれの 有無を確認する。	・図面から構造を 調査する。			・インナーケーシング端は4方向をC-1レンガで 拘束されている。
	・流下後の写真から すき間を調査する。		・空冷配管の最大熱膨張量7.6mmに対し、隙間が 8.6mmあり熱膨張を拘束しない構造となってい る。	設計上は熱膨張等の反力は拘束 しない構造であり、流下ノズルの位 置ずれは生じない。	-	
	運転状態(運転経過)で のノズルのずれを確認 する。		・流下時の映像からノズ ルのずれを調査する。	・2号炉の運転の経過に伴い、ノズルの先端位 置が西方向に変化していることが確認された。	運転経過に伴い、流下ノズルと加 熱コイルの位置関係に変化が生じ た可能性がある。	・進展の傾向(変化の割合が一定 か又は増加・減少)について詳細 に画像解析を継続する。
	進行性の評価として、繰 り返し熱応力、クリープ 変形を確認する。	・高周波コイル表面の 汚れの分布状態を 調査する。	・汚れの不均一性がある場合の高周波コイルの ふく射吸熱を考慮した解析の結果、変形量はこ くわずかであった。	加熱コイルが不均一に加熱され た場合、流下ノズルの変形はこく わずか。	-	
・繰り返し非弾性解析 (弾塑性クリープ) により、進展性の 変形であるかどうか を調査する。		・解析実施中	評価中	評価結果に応じて実施する。		
[製作起因] 結合装置製作時の 高周波コイルの 位置ずれ		・製作時の加熱コイル 単品の図面, 寸法検査 記録を調査する。	・加熱コイル単品内径は、φ80mm (公差 φ80±2) ・工場試験検査記録で確認した結果 測定値はφ80mm	製作時の個々の測定値及び公差 から、最大ずれ量は2.5mm。	-	
	・高周波コイルの 取付時の寸法検査 記録を調査する。	・高周波コイル位置決め治具(φ79±0.5mm) に基づき組み立てている。 ・取り付けフランジと加熱コイルの中心の公差は 2mmであることから、最大ずれ量は2mm。				
	[輸送・据付起因] 結合装置輸送時・ 据付時の高周波コイル の位置ずれ	輸送、据付時の外力に よりコイルにずれがな かったかを確認する。	・高周波加熱コイルの 構造を調査する。			・高周波加熱コイルは、3方向で結合装置と支 持されており、位置がずれる構造ではない。
[運転起因] 溶融炉運転時の 高周波コイルの変形		[入熱による変形] ・流下ノズルからの不均 一入熱を仮定して、高周 波コイルの温度分布を 調査する。	・高周波コイルは水冷されており、 材料の銅の熱伝導率も高いことから、 有意な温度差は生じない。	評価中	評価結果に応じて実施する。	
		[入熱による変形] ・流下ノズル、加熱コ イルモデルの磁場解析に より電磁力を確認する。	・流下ノズルと加熱コイル間に生じる 電磁力は、斥力であり、今回の事象 (近接)の要因とは考えにくい が、解析により電磁力の程度を確認中			
	[構造に起因する変形] ・加熱コイルの温度分 布と熱膨張量を検討す る。	・加熱コイル・水冷配管は、水冷により、 温度が低く、熱膨張量が小さい。 ・水冷配管の引き回しにより、熱膨張を 吸収できる構造である。				
[事象確認] ピーク状の漏れ電流(数 百mA)の発生	発生した事象の再現性 を確認する。	コイルとノズルを模擬し た装置により事象確認 試験を実施する。	接近状態では、電圧、隙間の間隔、絶縁材、湿 度を変化させた条件において、いずれの場合も 漏れ電流は数mAであった。	・流下ノズルと加熱コイルが接触し た場合の漏れ電流はオームの法 則に従う。 ・漏れ電流の経路を流下ノズル ～炉内のガラス～溶融炉ケーシ ング～セルライニング～アースと仮定し た場合(漏れ電流の抵抗を300Ω 程度と仮定した場合)、流下ノズル が加熱コイルに接触して漏れ電 リレーが作動する漏れ電流(数百 mA)が流れた可能性がある。	・事象の整理結果から、他に漏電 経路がないか検証。 ・漏れ電流の経路(流下ノズル ～炉内のガラス～溶融炉ケーシ ング～セルライニング)の抵抗値の調 査。	
		モックアップ試験等によ り事象確認を実施する	・モックアップ試験による検証(要否を含む)を検 討中。	検討中	検討中	

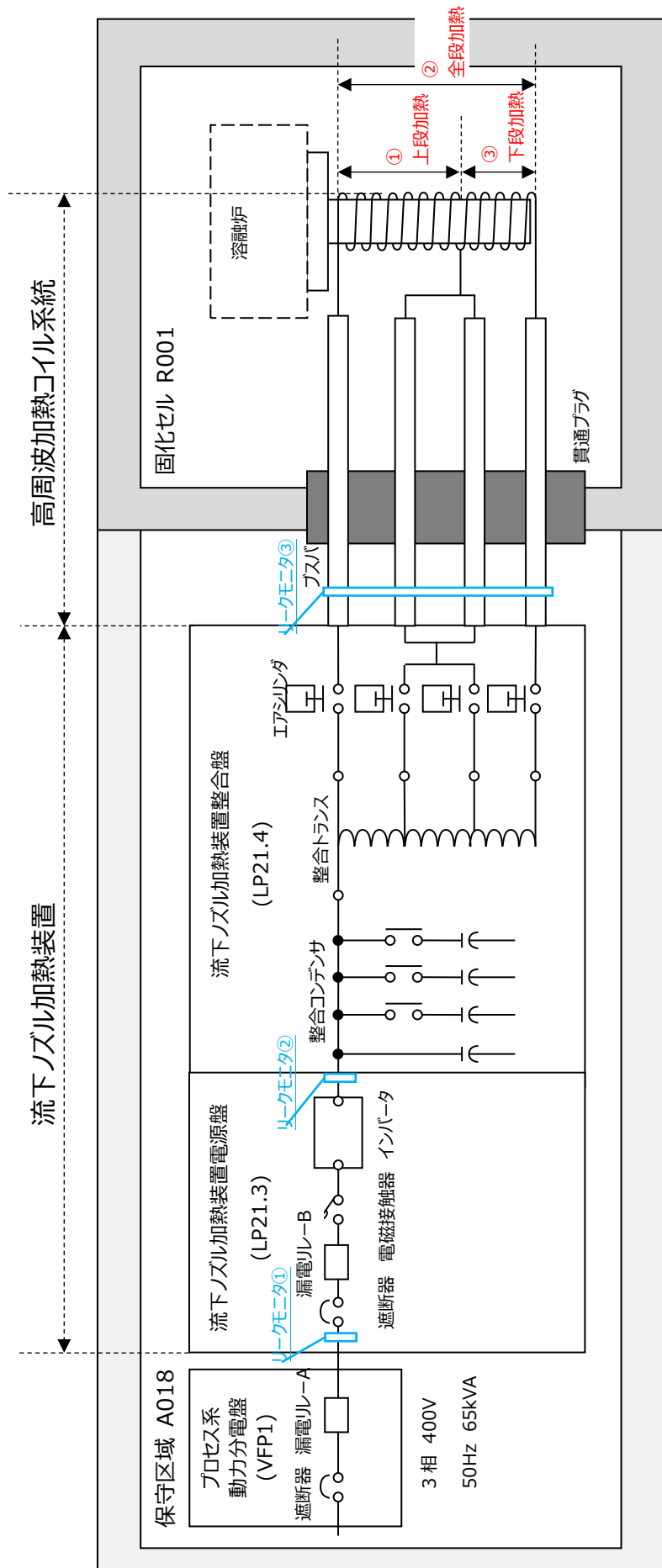


19-1CP 1本目の流下 (TVF-310)



19-1CP 8本目の流下 (TVF-317)

図-1 19-1CP 流下操作時の高周波加熱と温度等の状況



【流下ノズル加熱手順】

- ガラス溶融炉の下部に設置している流下ノズルを加熱コイルにより加熱し、流下ノズル内のガラスを溶かしガラス流下を開始する。
- 流下操作は、①上段加熱、②全段加熱、③下段加熱の3段階を進める。
- ① 上段加熱で76分間加熱(8kW)する。
- ② 全段加熱で3分～5分間加熱(13kW)することにより流下を開始する。
- ③ 流下重量が50kgに到達した後は、全段加熱電力を8kW～12kWの範囲で調整しながらガラスの流下を行う。
- ③ 流下重量が290kgに到達すると全段加熱から下段加熱(11kW)に自動で切換え流下を終了する。

図-2 流下ノズル加熱装置系統

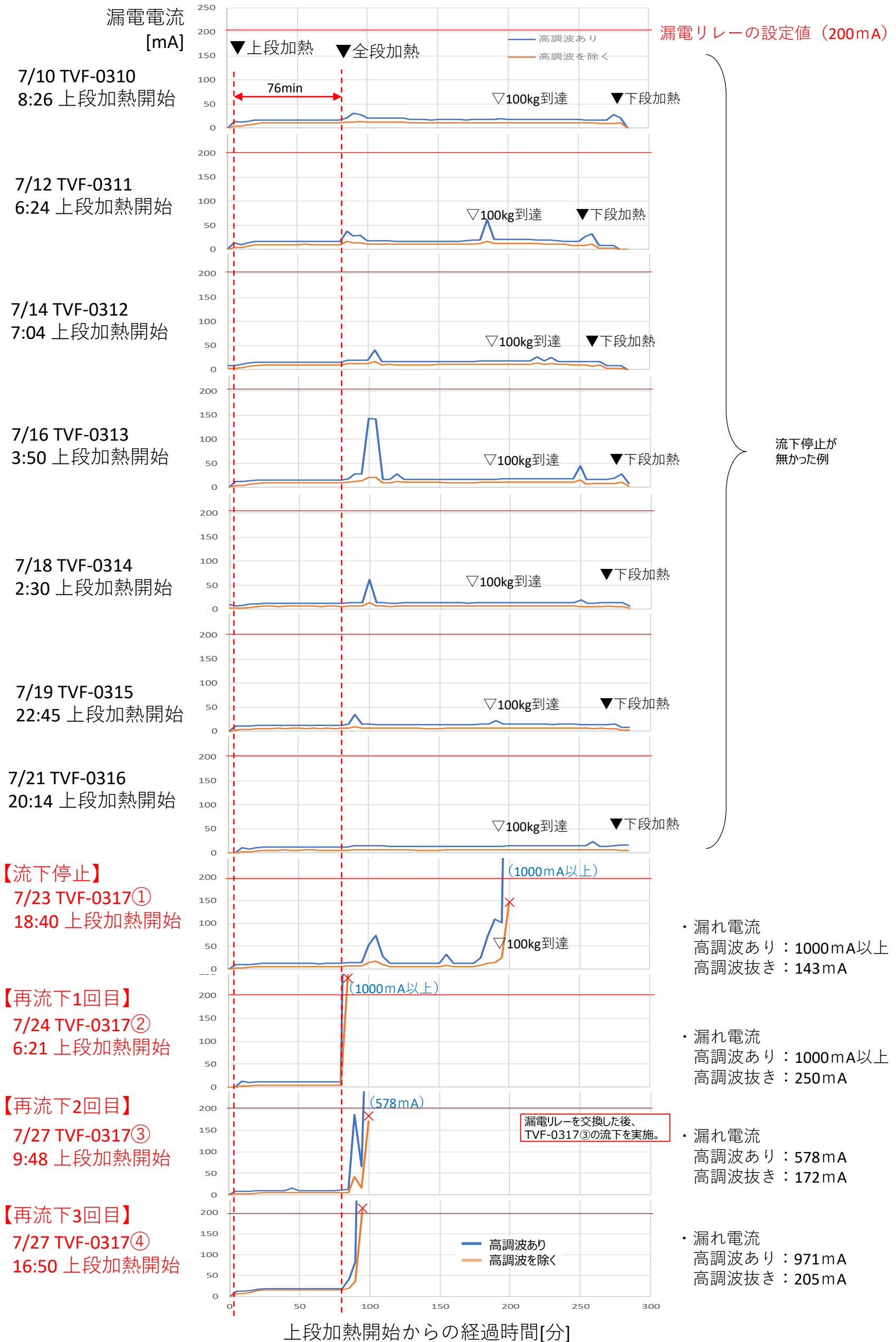
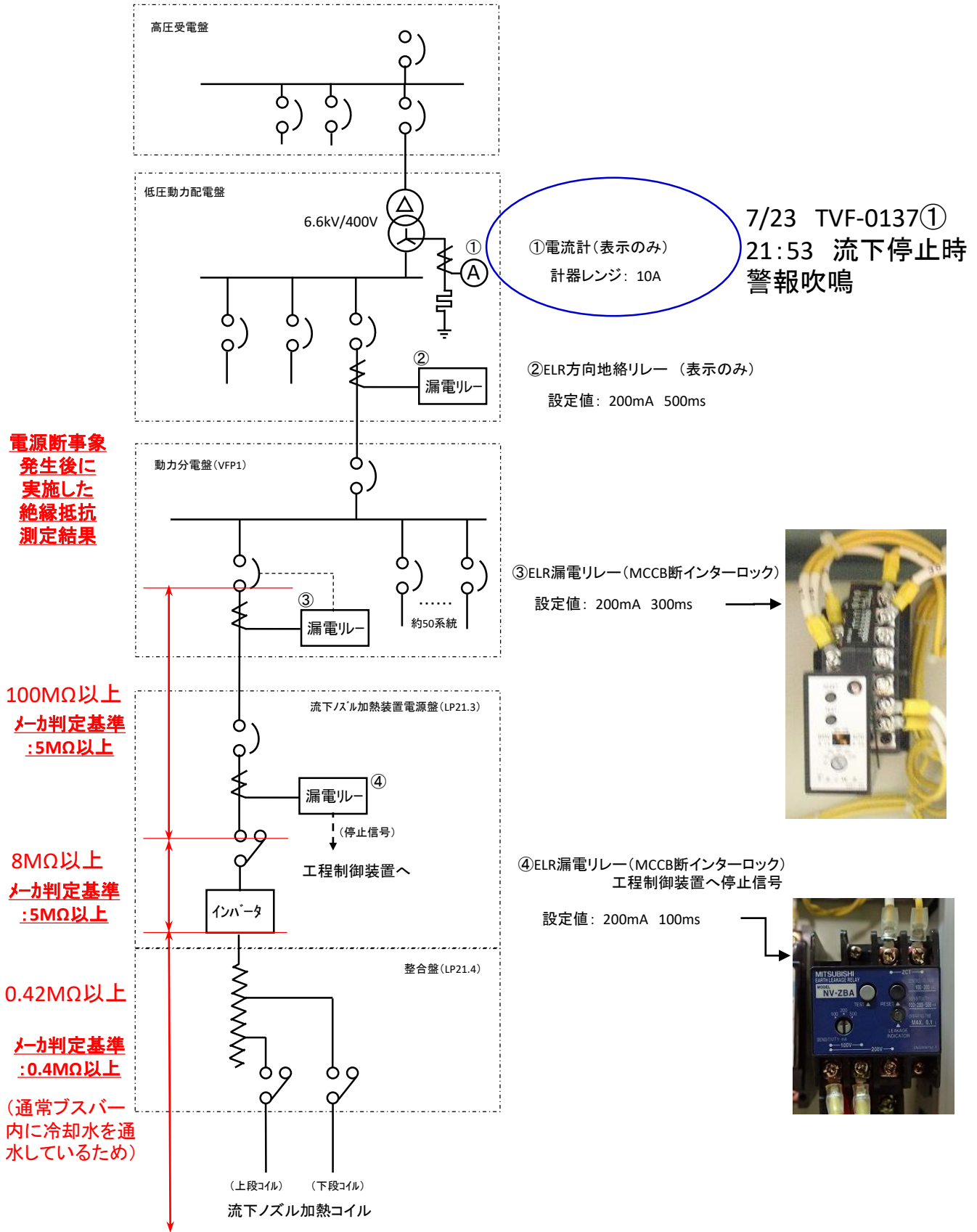


図-3 流下ノズル加熱装置電源盤に接地したリークモニタ①による計測結果



漏電リレー作動後の健全性確認における絶縁抵抗測定の結果、
メカ判定基準値の5MΩ以上であり給電システムの絶縁性能に異常はなかった。

図-4 流下ノズル加熱装置電源系統と絶縁抵抗測定結果

流下ノズルと加熱コイルとの位置関係の推移を流下時のカメラ映像により確認したところ、流下ノズルと加熱コイルとの位置関係に変化がみられた。

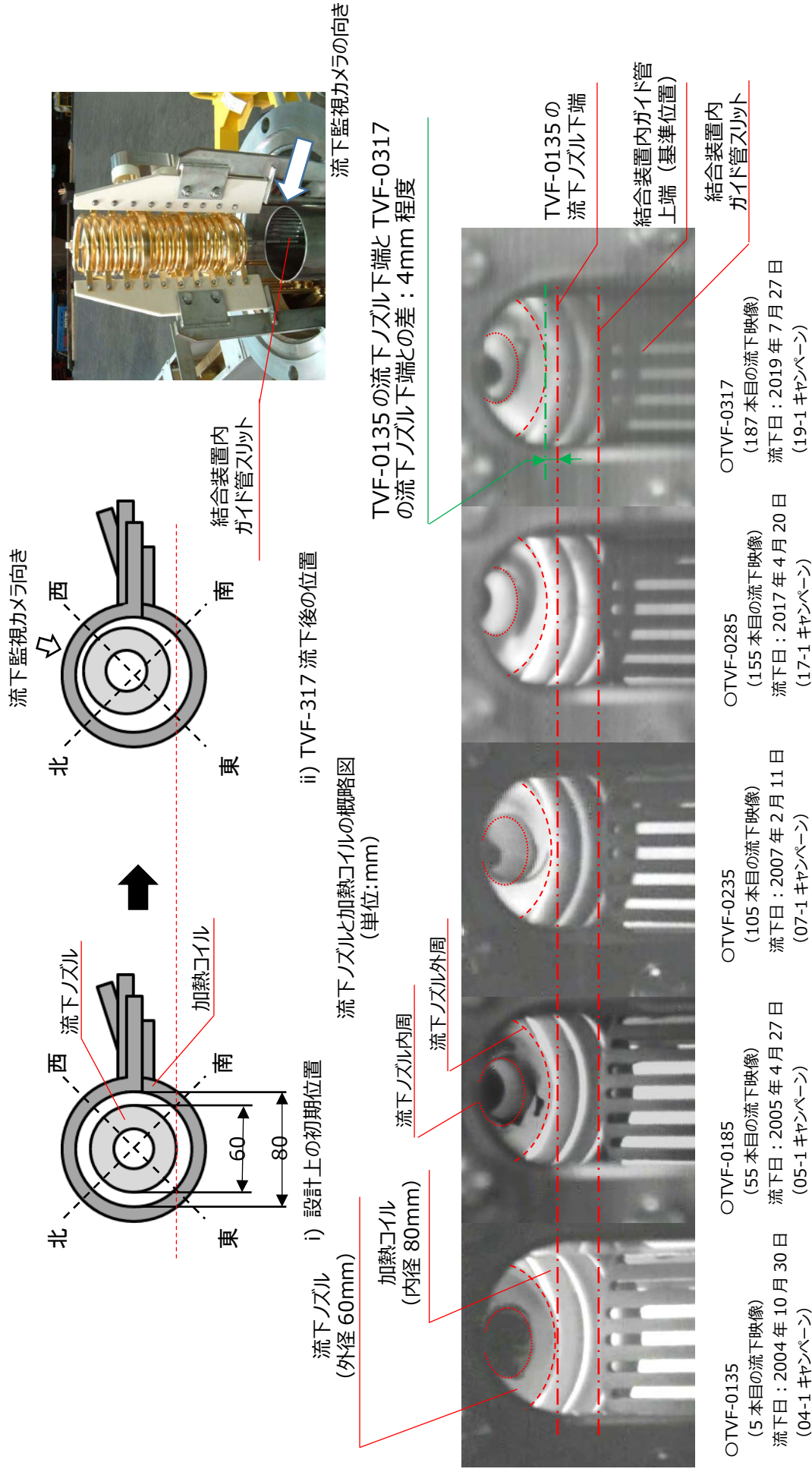


図5 TVF2号溶融炉での流下ノズルと加熱コイルとの位置関係の推移 (画像解析中)

発生事象	漏電リレーが作動した推定原因	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所1	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所2	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所3	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所4	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所5	確認方法	確認結果	総合評価	評価【事実として確認されている事象①～③の要因となる可能性の評価】 ○: なりうる △: 状況によってはなりうる ×: なりえない			処置
										①漏れ電流の波形がピークである	②全段加熱時のみ発生する	③漏れ電流がすべての計測箇所(2か所)で計測される	
① VFP1もしくはLP21.3の漏電リレーが作動し加熱が停止した 凡例) VFP1: 動力分電盤(VFP1) LP21.3: 流下ノズル加熱装置電源盤(LP21.3) LP21.4: 流下ノズル加熱装置整合盤(LP21.4)	①-1 漏電、あるいは漏れ電流(以下、漏電等)によりVFP1もしくはLP21.3の漏電リレーが作動し、加熱が停止した	①-1-1 VFP1から下流で漏電等が発生したため、VFP1もしくはLP21.3の漏電リレーが作動し、加熱が停止した	①-1-1-1 VFP1～LP21.3の経路で漏電等が発生した	①-1-1-1-1 VFP1盤内部品の絶縁劣化により漏電等が発生した	①-1-1-1-2 VFP1～LP21.3盤MCCB0間の配線経路で絶縁が低下し漏電等が発生した	①-1-1-2-1-1 インバータ素子 ①-1-1-2-1-2 コンタクタ(88) (電磁接触器) ①-1-1-2-1-3 その他の部品 ①-1-1-3-1-1 コンデンサ ①-1-1-3-1-2 トランス	絶縁抵抗測定	【実施済み】 絶縁抵抗測定結果:異常なし VFP1～MCCB0間: >100MΩ 点検実施日(7/23～24)	×	○	×	×	
			絶縁抵抗測定	【実施済み】 絶縁抵抗測定結果:異常なし VFP1～MCCB0間: >100MΩ 点検実施日(7/23～24)	×		○	×	×				
			絶縁抵抗測定	【実施済み】 絶縁抵抗測定結果:異常なし MCCB1～インバータ入口間: >100MΩ 点検実施日(7/23～24) インバータ以降LP21.4入口A.B～MT間: 0.6MΩ 点検実施日(7/23～24) 6月に実施した作動試験と同程度であることを確認。	×		○	×	×				
			波形確認	【実施済み】 -盤更新後の作動試験においてインバータからの出力波形確認済み:異常なし	×								
			絶縁抵抗測定	【実施済み】 絶縁抵抗測定結果:異常なし MCCB1～インバータ入口間: >100MΩ 点検実施日(7/23～24)	×		○	×	×				
			目視確認	【実施済み】 異常なし(7/23～24)	×								
			絶縁抵抗測定	【実施済み】 絶縁抵抗測定結果:異常なし MCCB1～インバータ入口間: >100MΩ 点検実施日(7/23～24) インバータ以降LP21.4入口A.B～MT間: 0.6MΩ 点検実施日(7/23～24) 6月に実施した作動試験と同程度であることを確認。	×		○	×	×				
			目視確認	【実施済み】 異常なし(7/23～24)	×								
			絶縁抵抗測定	【実施済み】 絶縁抵抗測定結果:異常なし インバータ以降LP21.4入口A.B～MT間: 0.6MΩ 点検実施日(7/23～24) 6月に実施した作動試験と同程度であることを確認。	×		○	○	○				
			目視確認	【実施済み】 目視による破損確認:異常なし(7/23～24)	×								
			絶縁抵抗測定	【実施済み】 絶縁抵抗測定結果:異常なし インバータ以降LP21.4入口A.B～MT間: 0.6MΩ 点検実施日(7/23～24) 6月に実施した作動試験と同程度であることを確認。	×		○	×	×				
			目視確認	【実施済み】 目視による破損確認:異常なし(7/23～24)	×								

図6 ガラス流下ノズル電源断の要因解析図(全体版) 1/4

発生事象	漏電リレーが作動した推定原因	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所1	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所2	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所3	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所4	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所5	確認方法	確認結果	総合評価	評価【事実として確認されている事象①～③の要因となる可能性の評価】 ○なりうる △状況によってはなりうる ×なりえない	処置		
					①-1-1-3-1-3 エアシリンダの絶縁低下		絶縁抵抗測定	【実施済み】 絶縁抵抗測定結果:異常なし エアシリンダSC1 ON時 SC1本体～対地間:100MΩ エアシリンダSC2 ON時 SC2本体～対地間:100MΩ エアシリンダSC3 ON時 SC3本体～対地間:100MΩ エアシリンダSC4 ON時 SC4本体～対地間:100MΩ 点検実施日(7/23～24) 前回不適合にて是正処置済み	×	○	△	○	
					①-1-1-3-1-4 その他の部品		絶縁抵抗測定	【実施済み】 絶縁抵抗測定結果:異常なし MCOB1～インバータ入口間:>100MΩ 点検実施日(7/23～24) インバータ以降LP21.4入口A.B～MT間:0.6MΩ 点検実施日(7/23～24) 6月に実施した作動試験と同程度であることを確認。	×	○	×	×	
							目視確認	【実施済み】 異常なし	×	○	×	×	
		①-1-1-4 LP21.4盤内エアシリンダ以降から貫通プラグまでの経路を經由して漏電した	①-1-1-4-1 LP21.4盤内部分のブスバーを經由して漏電した	①-1-1-4-1-1 LP21.4盤内の冷却水配管を經由して絶縁が低下した	①-1-1-4-1-1-1 冷却水の絶縁が低下した		絶縁測定	【JAEA自主点検】 冷却水の導電率を測定し、一般的な純水の導電率とされている1～10μS/cmの範囲内であり、絶縁が低下していないことを確認した。 TVF施設立ち上げ時に純水を装荷。純水の導電率1μS/cmに対して16μS/cmであり、絶縁性能低下には至らない (参考 水道水100～200μS/cm)	×	×	×	△	
						①-1-1-4-1-1-2 冷却水に導電性の異物の混入により冷却水の導電率が上昇し絶縁性能が低下し漏電等が発生した	冷却水の目視確認	【JAEA自主点検】 漏電の要因となるような異物がないことを確認した。	×	×	×	△	
						①-1-1-4-1-1-3 冷却水配管が筐体等の構造物(アース系)へ接触した	目視確認	【JAEA-メーカー点検】 冷却水配管の継手がエアシリンダのエア配管の継手に接触している箇所がないことをメーカーとともに確認した。	×	×	△	△	
			①-1-1-4-2 LP21.4盤外から貫通プラグまでの経路を經由して漏電した	①-1-1-4-2-1 ブスバーのカバーを經由して漏電した	①-1-1-4-2-1-1 ブスバーカバーが変形しブスバーとブスバーカバーが接触した		目視確認	【JAEA自主点検】 ブスバーカバー(4ヶ所)を外し、ブスバーとブスバーカバーとの接触がないことを確認した。また、ブスバーとブスバーカバーとの絶縁抵抗測定の結果、問題はなかった。	×	×	×	○	
						①-1-1-4-2-1-2 ブスバーが変形しブスバーとブスバーカバーが接触した	目視確認	【JAEA自主点検】 ブスバーカバー(4ヶ所)を外し、ブスバーとブスバーカバーとの接触がないことを確認した。また、ブスバーとブスバーカバーとの絶縁抵抗測定の結果、問題はなかった。	×	×	×	○	
						①-1-1-4-2-1-3 ブスバーとブスバーカバー間に導電性の異物が付着した	目視確認	【JAEA自主点検】 ブスバーカバー(4ヶ所)を外し、ブスバーとブスバーカバーとの間に5mm程度の隙間があること、導電性の異物等の付着がないことを確認した。また、ブスバーとブスバーカバーとの絶縁抵抗測定の結果、問題はなかった。	×	×	×	○	
						①-1-1-4-2-1-4 ブスバー冷却水配管の接続部から水がもれブスバーとブスバーカバーが導通状態となった	目視確認	【JAEA自主点検】 ブスバーカバー(4ヶ所)を外し、水漏れの痕跡がないことを確認した。また、ブスバーとブスバーカバーとの絶縁抵抗測定の結果、問題はなかった。	×	×	×	○	
				①-1-1-4-2-2 ブスバーのサポート部を經由して漏電した	①-1-1-4-2-2-1 サポート部の絶縁部材の絶縁劣化		目視確認	【JAEA自主点検】 ブスバーカバー(4ヶ所)を外し、サポート部の絶縁部材(ポリイミドガラスクロス)に変形がないことを確認した。また、ブスバーと絶縁材との絶縁抵抗測定を実施し、問題はなかった。	×	×	×	○	
						①-1-1-4-2-2-2 サポート部が変形しブスバーとブスバーカバーが接触した	目視確認	【JAEA自主点検】 ブスバーカバー(4ヶ所)を外し、ブスバーとブスバーカバーとの接触がないことを確認した。また、ブスバーとブスバーカバーとの絶縁抵抗測定の結果、問題はなかった。	×	×	×	○	
						①-1-1-4-2-2-3 サポート部ブスバーから水がもれブスバーとブスバーカバーが接触した	目視確認	【JAEA自主点検】 ブスバーカバー(4ヶ所)を外し、水漏れの痕跡がないことを確認した。また、ブスバーとブスバーカバーとの絶縁抵抗測定の結果、問題はなかった。	×	×	×	○	
						①-1-1-4-2-2-4 サポート部に導電性の異物が付着した	目視確認	【JAEA自主点検】 ブスバーカバー(4ヶ所)を外し、サポート部に導電性の異物等の付着がないことを確認した。また、ブスバーとブスバーカバーとの絶縁抵抗測定を実施し、問題はなかった。	×	×	×	○	

図6 ガラス流下ノズル電源断の要因解析図(全体版) 2/4

発生事象	漏電リレーが作動した推定原因	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所1	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所2	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所3	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所4	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所5	確認方法	確認結果	総合評価	評価【事実として確認されている事象①～③の要因となる可能性の評価】 ○なりうる △状況によってはなりうる ×なりえない	処置		
		貫通プラグ(セル内側)から結合装置(コイル含む)までの経路を經由して漏電した	①-1-1-4-3 貫通プラグを経路を經由して漏電した	①-1-1-4-3-1 貫通プラグ内での冷却水もれ	①-1-1-4-3-2 貫通プラグ近傍のプスパー間に異物(導体)が接触した	①-1-1-5-1-1 プスパーのカバーを經由して漏電した	目視確認	【JAEA自主点検】 プスパーカバー(4ヶ所)を取外し、貫通プラグ部に水漏れの痕跡がないことを確認した。また、プスパーとプスパーカバーとの絶縁抵抗測定を実施し、問題なかった。	×	×	×	○	
		①-1-1-5 貫通プラグ(セル内側)から結合装置(コイル含む)までの経路を經由して漏電した	①-1-1-5-1 固化セル内のプスパー経路を經由して漏電した	①-1-1-5-1-1 プスパーのカバーを經由して漏電した	①-1-1-5-1-1-1 プスパーカバーが変形しプスパーとプスパーカバーが接触した	①-1-1-5-1-1-2 プスパーが変形しプスパーとプスパーカバーが接触した	目視確認	【JAEA自主点検】 プスパーカバーに変形がないことを確認した。	×	×	×	○	
				①-1-1-5-1-2 プスパーのサポート部を經由して絶縁が低下した	①-1-1-5-1-2-1 サポート部の絶縁部材の絶縁劣化	①-1-1-5-1-2-2 サポート部が変形しプスパーとプスパーカバーが接触した	目視確認	【JAEA自主点検】 プスパーカバー(2ヶ所)を取外し、サポート部に異常がないことを確認した。	×	×	×	○	
					①-1-1-5-1-2-3 サポート部プスパーから水がもれプスパーとプスパーカバーが接触した	①-1-1-5-1-2-4 サポート部に導電性の異物が付着した	目視確認	【JAEA自主点検】 プスパーカバー(2ヶ所)を取外し、サポート部に水もれの痕跡がないことを確認した。	×	×	×	○	
			①-1-1-5-2 固化セル内の結合装置を經由して漏電した	①-1-1-5-2-1 コイルが変形し結合装置と接触した	①-1-1-5-2-2 高温の流下ガラス(導電性あり)が同時にコイルと結合装置の両方に接触した	①-1-1-5-3-1 高温の流下ガラス(導電性あり)が同時にコイルとガラス溶融炉の両方に接触した	絶縁抵抗測定	インバータ以降LP21.4入口A.B～MT間:0.6MΩであること、リークモニタの結果より、漏電電流は250mA程度であり、接触の可能性は無いことを確認した。	×	×	△	○	
			①-1-1-5-3 固化セル内のガラス溶融炉を經由して漏電した	①-1-1-5-3-2 コイルと流下ノズル(溶融炉)が接触した			目視確認	【JAEA自主点検】 流下時の映像を確認し、高温の流下ガラスの接触はなかった。	×	○	△	○	
							目視確認	【JAEA自主点検】 流下時の映像を確認し、確認できる範囲においてコイルと流下ノズルの接触はなかった。TVF2号溶融炉開始時から観察の結果より、流下ノズルが変形している可能性がある。	△	○	△	○	・流下ノズルの変形により、加熱コイルとの距離が近接又は接触することについて、要因分析を行う。 ・クリアランス現状による漏電発生時の再現性試験を行う。 ・一般産業界での事例調査する。
							目視確認	【JAEA自主点検】 流下時の映像を確認し、確認できる範囲においてコイルと流下ノズルの接触はなかった。TVF2号溶融炉開始時から観察の結果より、流下ノズルが変形している可能性がある。	△	○	△	○	・同上

要因見直し結果

図6 ガラス流下ノズル電源断の要因解析図(全体版) 3/4

発生事象	漏電リレーが作動した推定原因	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所1	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所2	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所3	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所4	漏電あるいは漏れ電流が発生したと推定される場所5	確認方法	確認結果	総合評価	評価【事実として確認されている事象①～③の要因となる可能性の評価】 ○なりうる △状況によってはなりうる ×なりえない	処置	
①-1-2 漏電リレーが誤作動した	①-1-2-1 VFP1～LP21.3に誤作動の要因が発生した	①-1-1-4 流下操作などの請動作時に漏電やノイズが発生し漏電リレーが誤作動した	①-1-1-4-1 補助電極電流の変更	①-1-1-5-3-3 流下ガラスを介してコイルと流下ノズルが接触し漏電等が発生した	①-1-1-5-3-3-1 偏流した流下ガラスを介してコイルと流下ノズルが接触し漏電等が発生した	①-1-1-5-3-3-2 流下ノズルに亀裂が生じ、そこから漏れたガラスを介してコイルと流下ノズルが接触し漏電等が発生した	流下映像確認	【JAEA自主点検】 流下時の映像を確認し、高温の流下ガラスの接触はなかった。	×	○	△	○
				①-1-1-5-3-4 コイルと流下ノズル間に挟まったガラス(固体)の破片を介して接触し漏電等が発生した	ノズル・コイル間の異物有無の目視調査	【JAEA自主点検】 流下ノズル冷却エアの吹付けによりガラスの破片は除去した。	×	△	△	○		
				①-1-1-4-2 加熱コイル切替え操作	要因となる作業や機器動作の有無	メーカと点検内容 漏電リレー作動や漏れ電流ピークの発生タイミングと、以下のタイミングと関連していないか確認し、補助電極電流等の変更とは関連していないことを確認した。	×	×	×	×		
				①-1-1-4-3 流下ノズル加熱電力変更	要因となる作業や機器動作の有無	メーカと点検内容 漏電リレー作動や漏れ電流ピークの発生タイミングは、以下のタイミングと関連していないか確認した。 ・加熱コイル切替え操作	×	×	×	×		
				①-1-2-1-1 漏電リレーの故障により誤作動した	調査	LP21.3出口側のリークモニタに、漏電ピークが検出されていることから、VFP1～LP21.3に誤作動の要因はない。	×	○	×	×		
				①-1-2-1-2 一次側で発生したサージにより漏電リレーが誤作動した	電流測定	【実施済み】 一次電源が不安定になったことは無かった。	×	×	×	×		
				①-1-2-1-2-2 雷によるサージにより漏電リレーが誤作動した	調査	【実施済み】 流下中、落雷による電圧変動等は無かった。	×	×	×	×		
				①-1-2-2 LP21.4よりも下流側で誤作動の要因が発生した	①-1-2-2-1 漏電リレーの故障により誤作動した	調査	7/23の流下停止事象は、漏電の電流値が142mA(基本波)であり、漏電リレーの設定値(200mA)よりも低い値で作動していた。これは、200mAよりも高く発生している高調波成分により作動したか、142mAでも検出する感度または検知範囲を有しているものと考えられる。	△	○	△	○	・高調波成分カットの漏電リレーに変更 ・漏電リレーの作動状況、機器の設計条件を踏まえ、設定値の変更を検討する。

図6 ガラス流下ノズル電源断の要因解析図(全体版) 4/4

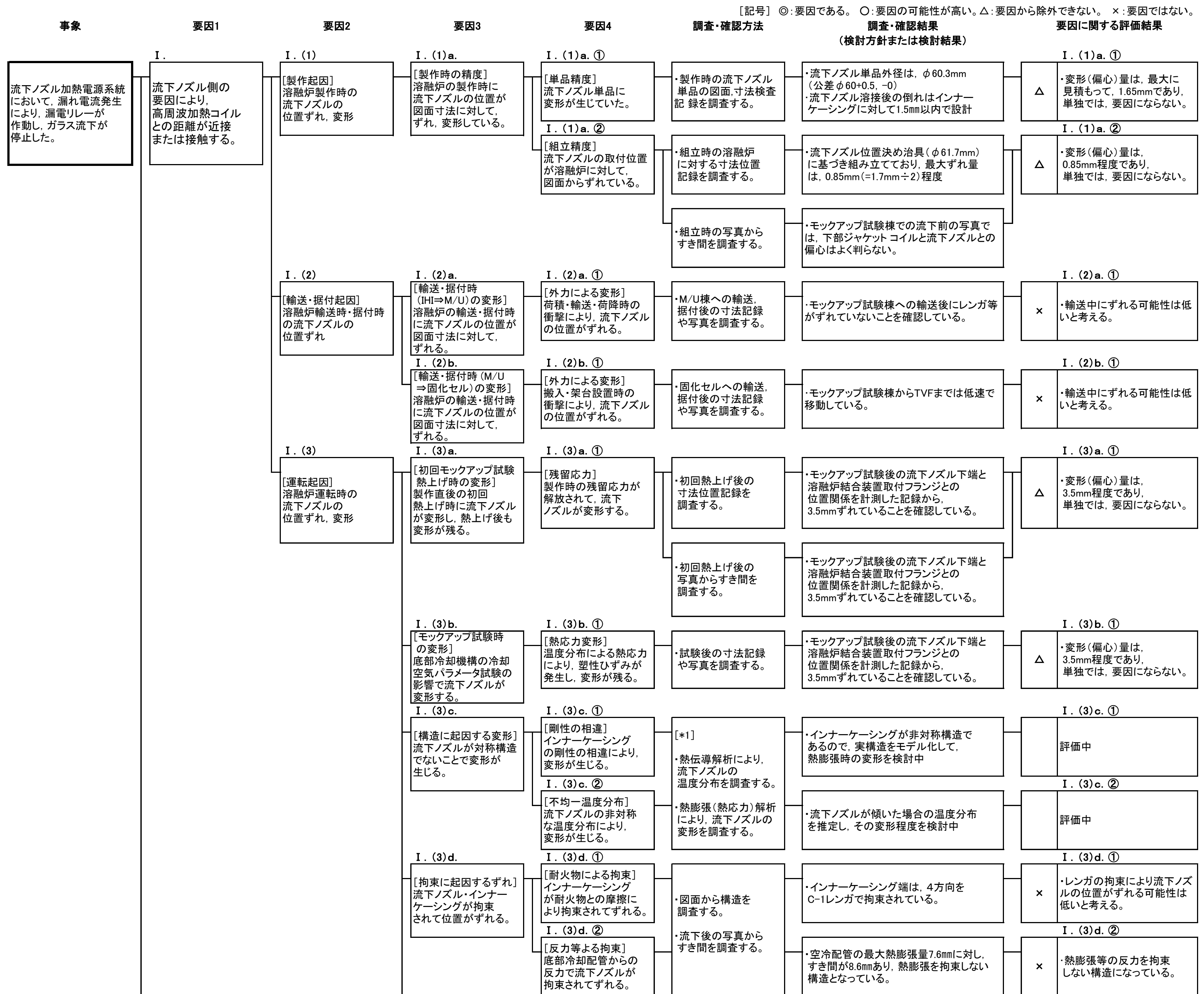


図-6 ガラス流下ノズル電源断の要因解析図(流下ノズル、加熱コイルの変形) 1/2

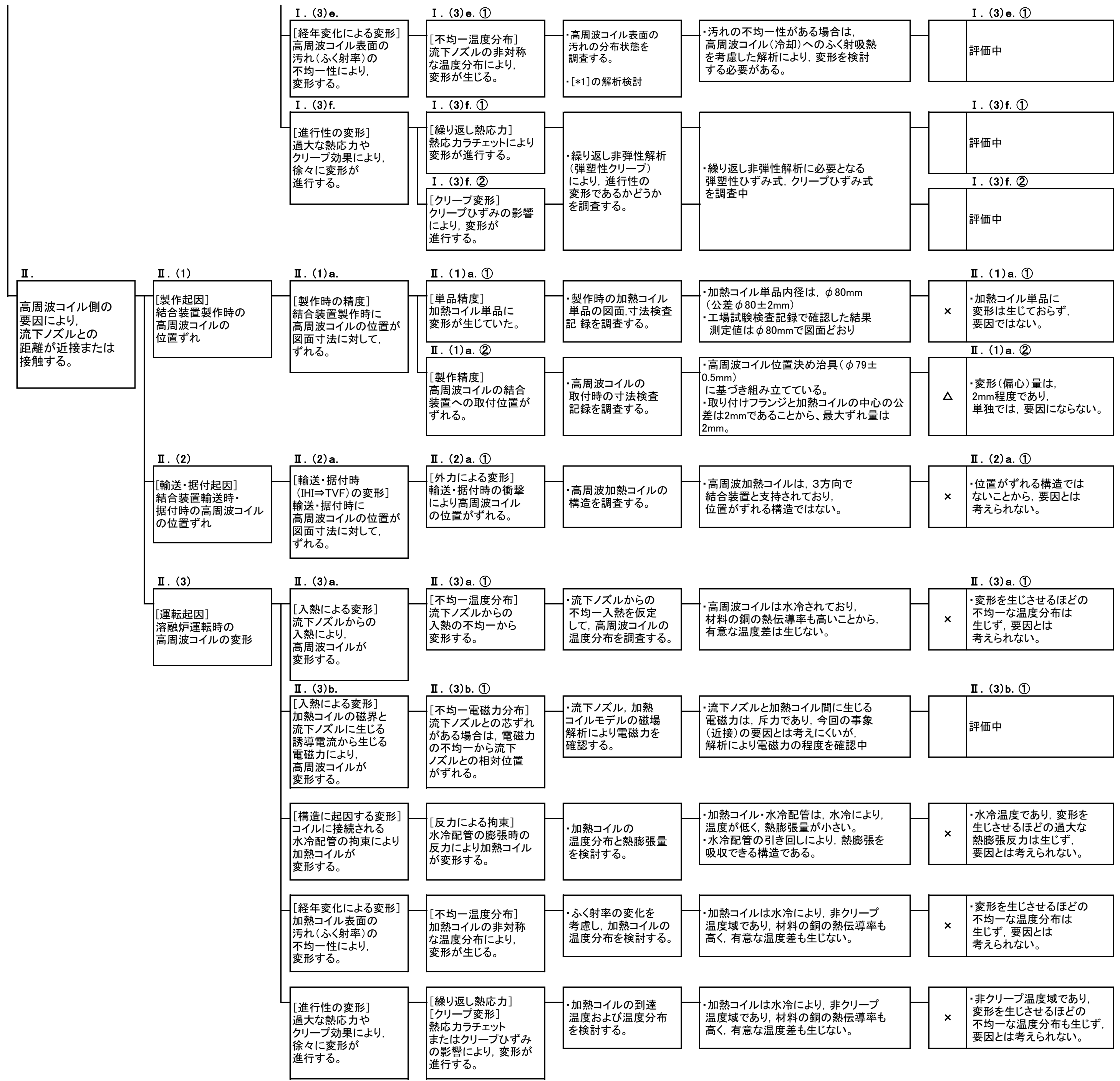


図-6 ガラス流下ノズル電源断の要因解析図(流下ノズル、加熱コイルの変形)2/2

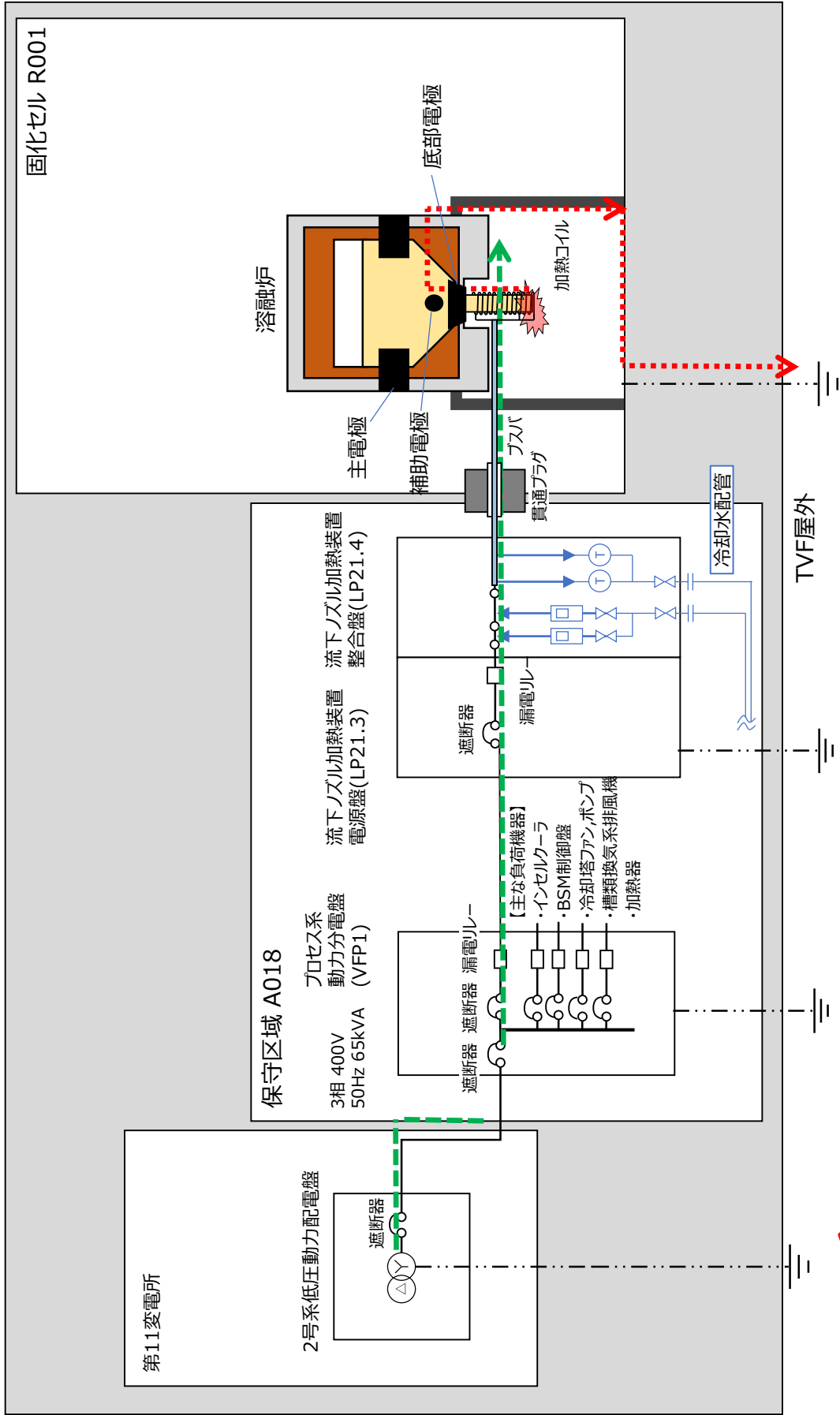


図-7 漏電経路概念図

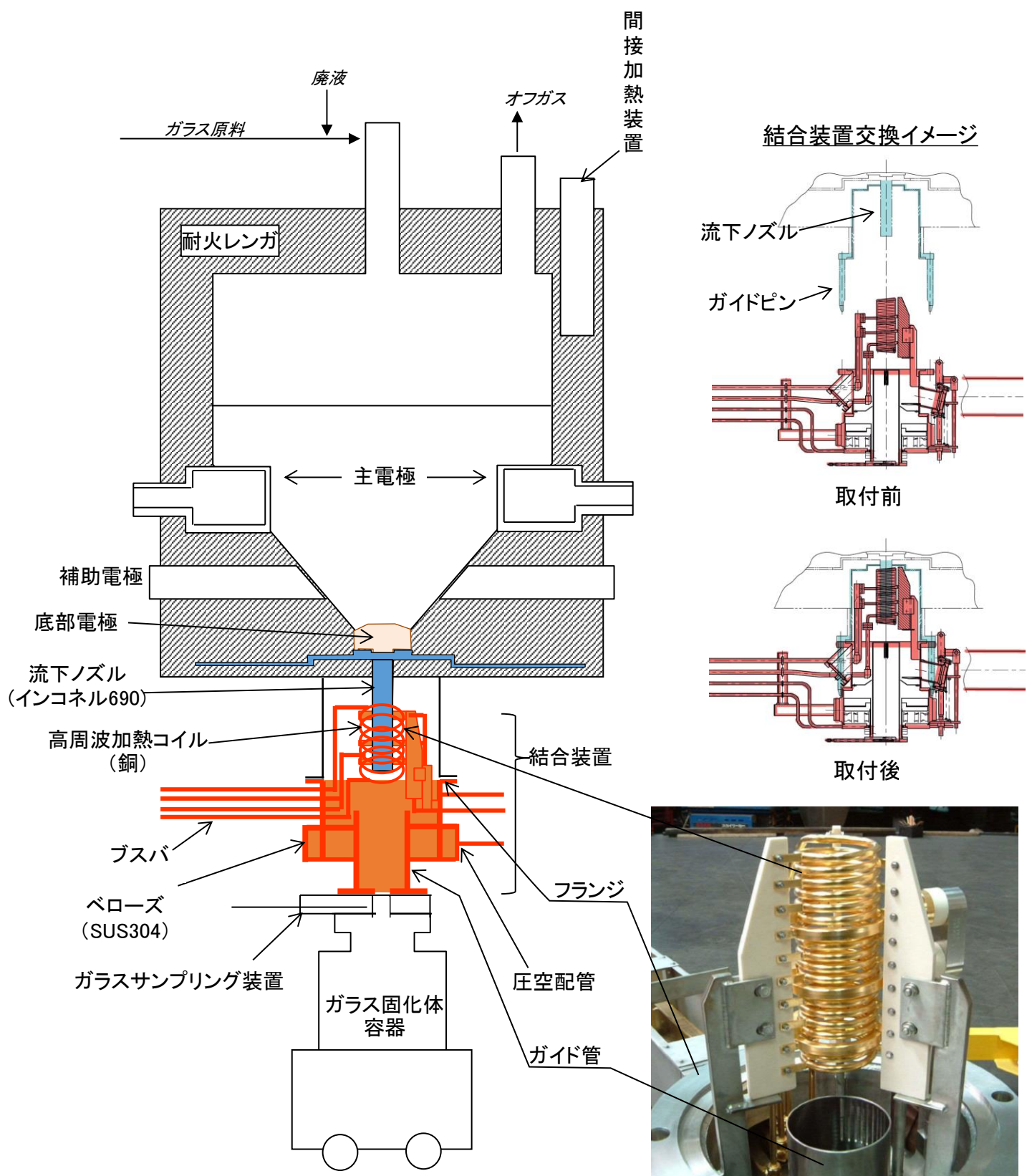


図-8 溶融炉・結合装置(加熱コイル込み)概略図

事象確認試験状況について

1. 簡易試験モデル及び試験条件

(1) 簡易試験モデル：流下ノズルの加熱状態を模擬しない流下ノズル試験体と加熱コイルを使用した試験装置の構成を示す。

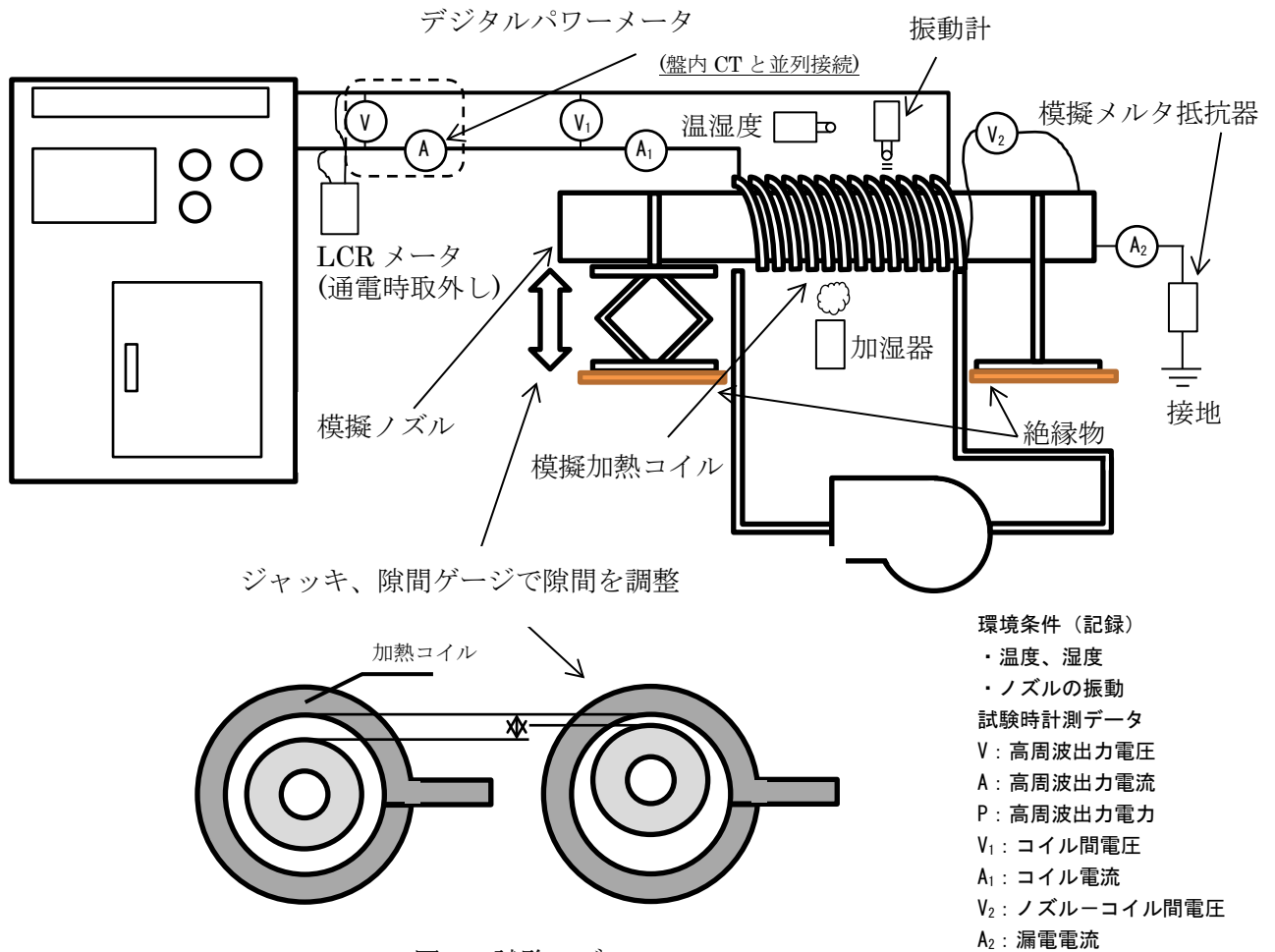


図-1 試験モデル



図-2 試験時の状況

表-1 実機と試験器との比較

	試験器	実機
加熱コイル	内径Φ150mm	内径Φ80mm
被加熱物	外径Φ115mm	外径Φ60mm
クリアランス	17.5mm	10mm
周波数	6kHz	3kHz
コイルターン数	19 ターン	19 ターン
高周波電力	13kW*1	13kW
コイル電圧	(調整しない)	105V
模擬メルト抵抗	10Ω,100Ω	(不明)

*1 安全を確認しながら徐々に電力を上げ、導線の状態等により 13kW 以下となる場合もある。

(2) TVF と簡易試験モデルにおける試験装置構成の比較

簡易モデルでは、加熱コイル駆動用のインバータの後段に高周波絶縁トランスが挿入されている。このため、流下ノズルと加熱コイルが接触 ($C_P \rightarrow$ 無くなる) しても、近接 (非接触) と同様にコンデンサ (C_T) を介した状態となる。なお、近接 (非接触) 状態での挙動については、 C_t と C_p の直列接続回路となり、合成容量は $C = C_t \cdot C_p / (C_t + C_p)$ で $C_t \gg C_p$ の場合 $C_t + C_p \approx C_t$ とみなすことができることから $C = C_p$ 程度となる。従って近接 (非接触) 状態では TVF と同様の事象となるが、接触するとコンデンサ (C_t) の影響で TVF とは異なる事象となる。

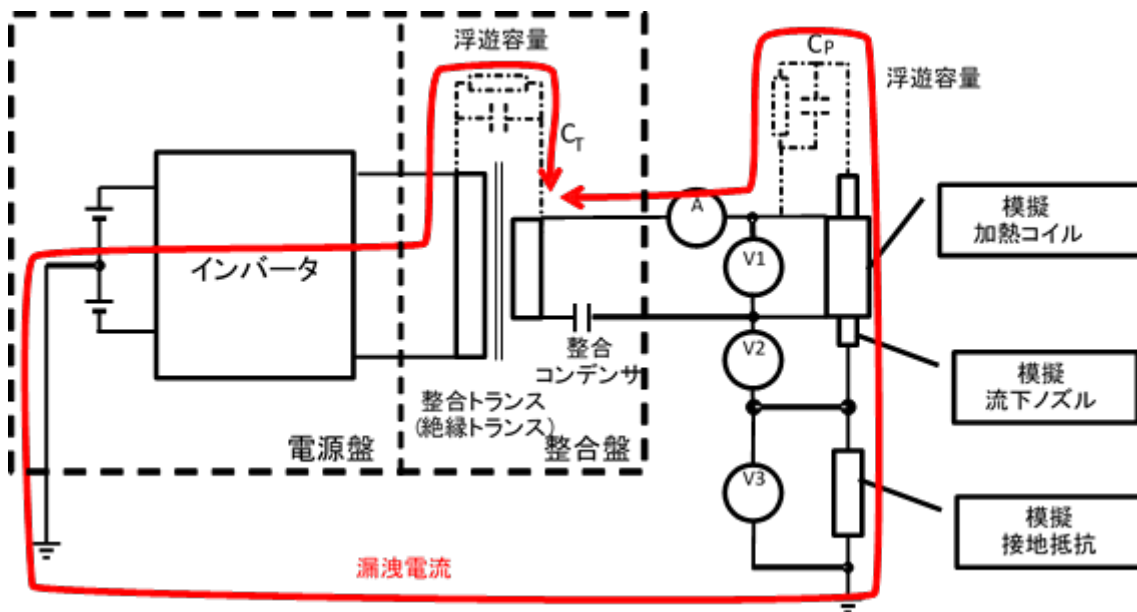


図-3 試験装置等価回路

TVFにおける接触時の漏れ電流は、図4に示すように単純な回路となることから、加熱コイルの対地間電圧を熔融炉の対地間抵抗（対地インピーダンス）で除した値（オームの法則）と考えられる。

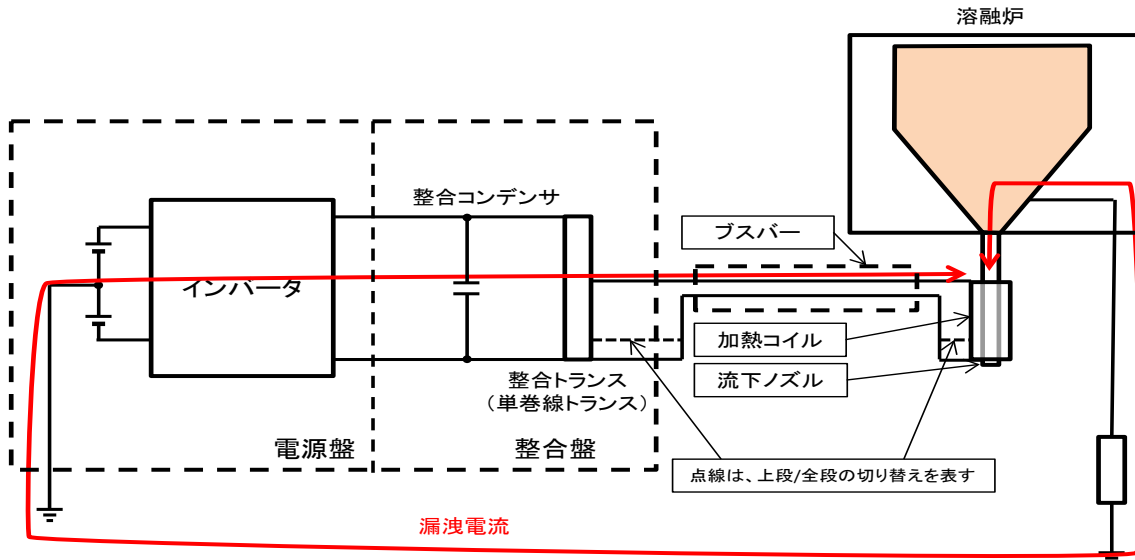


図4 TVFにおける加熱コイル駆動回路関連の等価回路

(3) 試験条件

① 近接による漏れ電流発生メカニズム確認

コイルとノズルの間に空隙 ($12.5\mu\text{m}$) をつくり、加熱コイルに電圧（コイル間電圧 106.6V ）を印加し、**漏れ電流**を計測する試験を実施する。また、**放電**の有無を目視確認する。また、加熱コイルに電圧（コイル間電圧 100V 、 150V 、 200V ）を印加し、**漏れ電流**を計測する。

（放電の検証、コンデンサモデルの検証）

② 流下ノズルと加熱コイル間に絶縁物があった場合の漏れ電流発生確認

コイルとノズルの間に絶縁体（ポリイミドフィルム、 $12.5\mu\text{m}$ ）を挿入し、加熱コイルに電圧（コイル間電圧 106.6V ）を印加し、**漏れ電流**を計測する試験を実施する。

（コンデンサモデルの検証）

③ 流下ノズルと加熱コイル間の環境影響（湿度）による漏れ電流発生確認

固化セル内の湿度は外気の影響を受けることから、漏れ電流と湿度の関係について、加湿器を使用し、コイル近傍の湿度を上げて、隙間ゲージによりコイルとノズルの間に空隙 ($12.5\mu\text{m}$) をつくり、加熱コイルに電圧（コイル間電圧 106.6V ）を印加し、**漏れ電流**を計測する試験を実施する。また、**放電**の有無を目視確認する。

（湿度と漏れ電流との関係の検証）

2 試験結果

試験結果を以下の通り整理した。なお、リークモニタ等で検出される漏れ電流量は、以下の実効値（漏えい電流波形の生波形を実効値演算したもの）である。

図-5 TVF漏電試験結果

	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) 最大値※1	漏れ電流量(mA) 平均値※2	漏れ電流量(mA) 実効値※3
1	95	6	1枚	12.5	無し	10	116	51	5
2	↓	↓	2枚	25.0	↓	↓	88	48	5
3	↓	↓	3枚	37.5	↓	↓	96	51	5
4	↓	↓	0枚	12.5	↓	↓	104	58	5
5	↓	↓	0枚	12.5	有り	↓	92	53	5
6	100	↓	↓	↓	無し	↓	80	62	5
7	150	↓	↓	↓	↓	↓	96	78	6
8	200	↓	↓	↓	↓	↓	74	68	6

※1 最大値：パルス状の正負電流波形の絶対値の最大値

※2 平均値：個々のパルス状の正負電流波形の絶対値の平均値

※3 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。）

※4 接触：本試験モデルでは絶縁トランスが挿入されているので近接状態と同様にコンデンサを介した状態となる。

① 近接による漏れ電流発生メカニズム確認

流下ノズルに加熱コイルが近接（非接触）した状態においてもパルス状の漏れ電流が流れることが確認された。しかしながら、流下ノズルと加熱コイルの近接による漏れ電流はTVFにおける漏電リレーが作動する様な漏れ電流は発生しない（図-6）。

また、加熱コイル電圧を上昇することにより漏れ電流は僅かに上昇することを確認した。

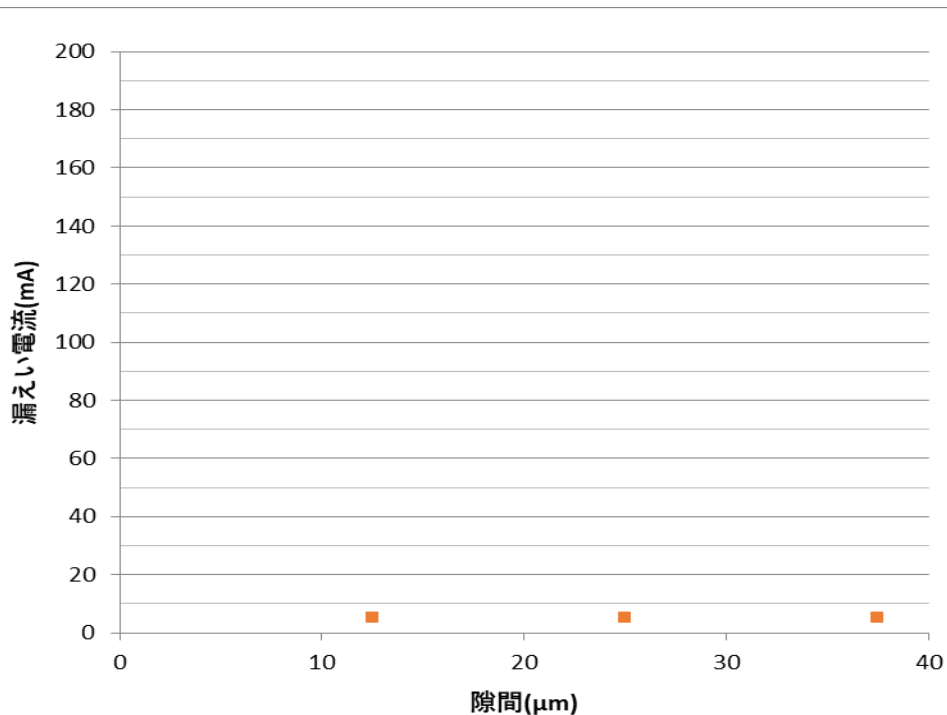


図-6 隙間と漏れ電流の関係

- ③ 流下ノズルと加熱コイル間に絶縁物があった場合の漏れ電流発生の確認
流下ノズルと加熱コイルの間に絶縁物あり、その状態（厚さ）が変化しても漏れ電流の値は変化しない。
- ④ 流下ノズルと加熱コイル間の環境影響（湿度：相対湿度 58%⇒73%）による漏れ電流発生の確認
湿度の変化による漏電への有意な影響は認められなかった。

3 結論

本試験結果より、流下ノズルと加熱コイルの隙間を変化させたとき、加熱コイルの電圧を変化させたとき、流下ノズルと加熱コイルの間に介在物を挿入した時、流下ノズルと加熱コイル間の湿度を変えた時で、漏れ電流は約 5mA で変化しなかった。

この確認試験から評価すると、漏れ電流の経路を流下ノズル～炉内のガラス～熔融炉ケーシング～セルライニング～アースと仮定した場合、流下ノズルが加熱コイルに接触して漏電リレーが作動する漏れ電流（数百 mA）が流れたと考えられる。

以 上

流下ノズルの傾きに関する解析評価について

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 [図1]
- (3) 解析手順

溶融炉運転時の代表的な時点[図2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ている。

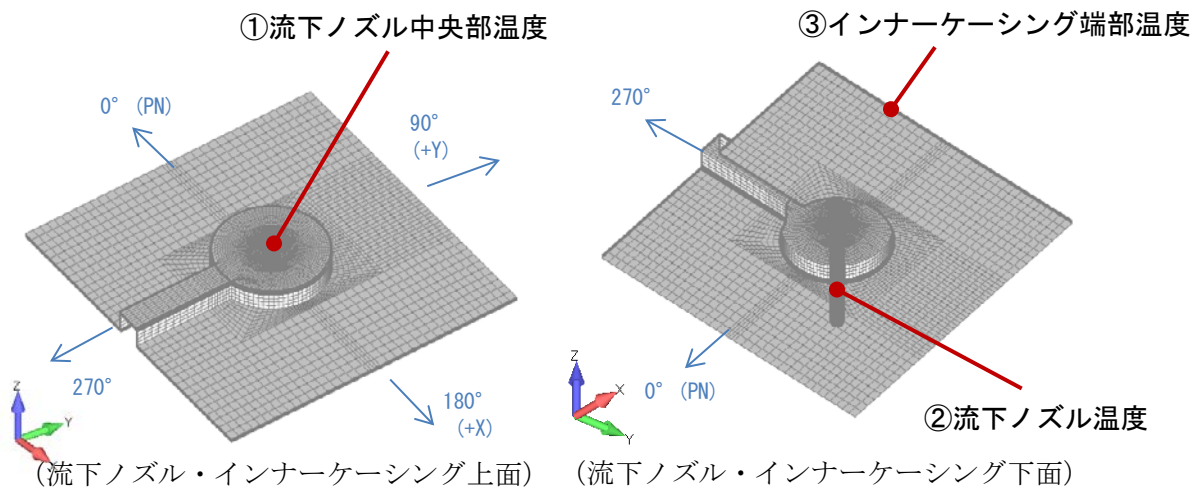


図1 流下ノズル・インナーケーシング 3Dモデル図

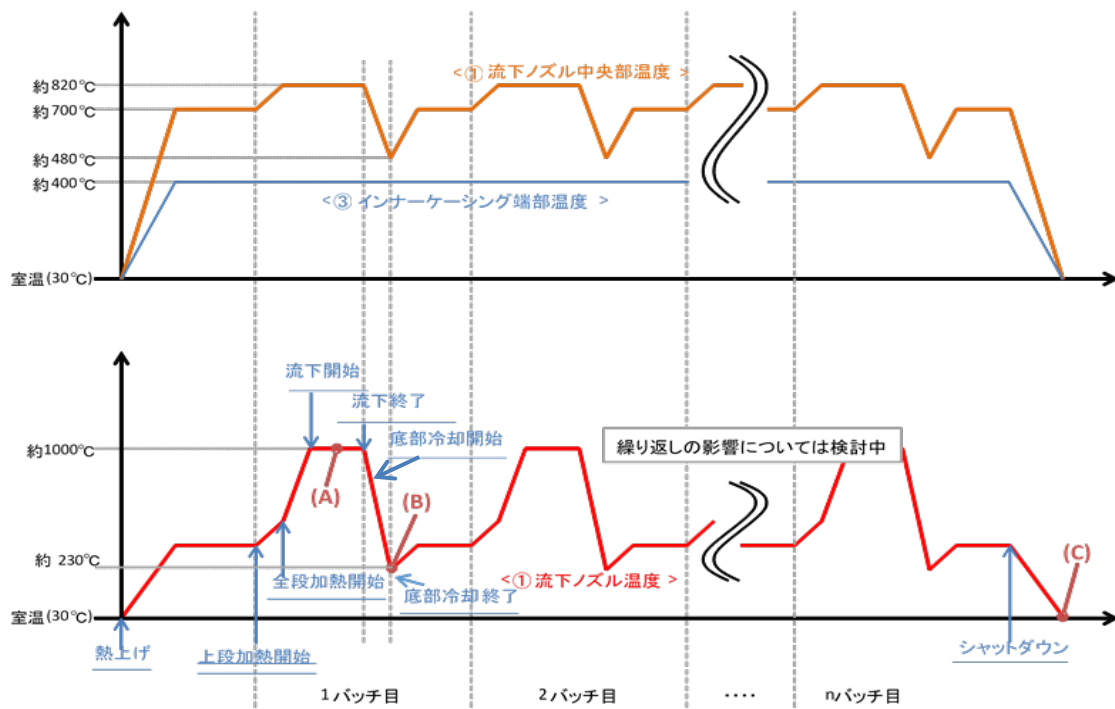


図2 溶融炉運転時の温度サイクル

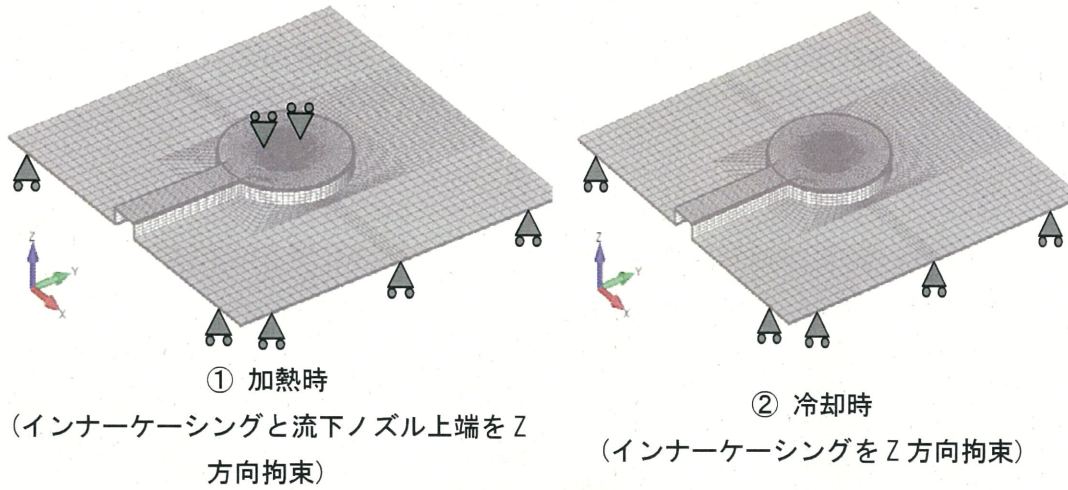


図3 熱応力解析の拘束条件

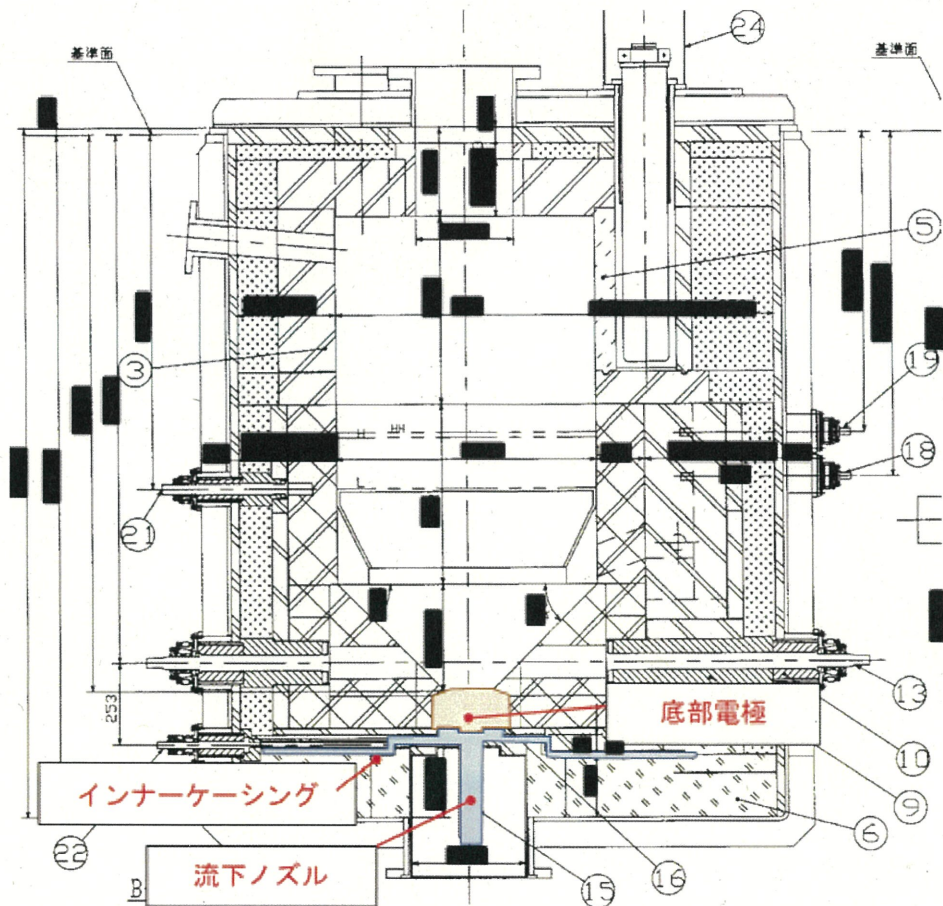


図4 溶融炉構造図 (断面図)

2. 解析の状況

解析評価を継続中。以下に、温度分布図の一例を示す。今後、拘束条件等の検証も含め、熱応力解析を進める。

2. 1 (A) 流下中〔流下ノズル温度が最も高いとき〕の解析の状況

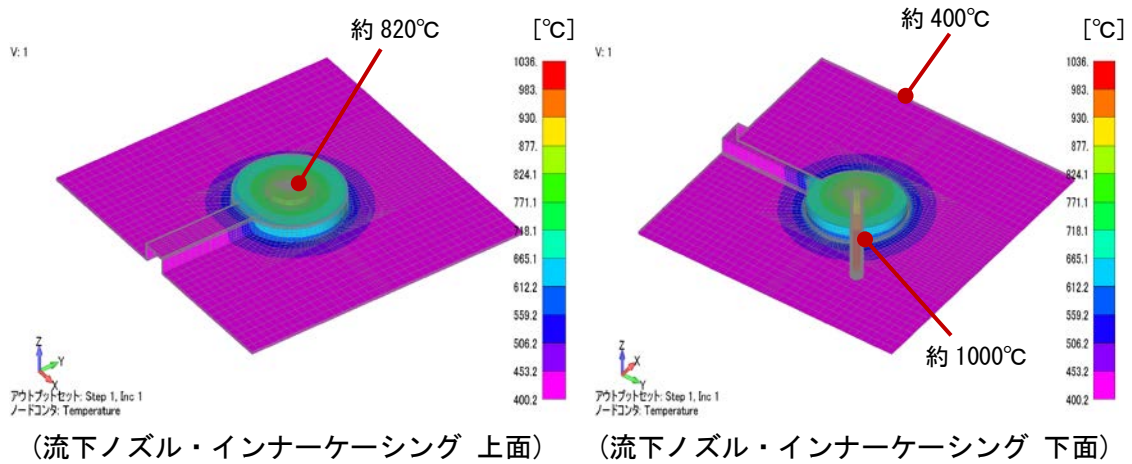


図-5 温度分布図

2. 2 (B) 底部冷却終了時〔流下ノズル温度が最も低いとき〕の解析の状況

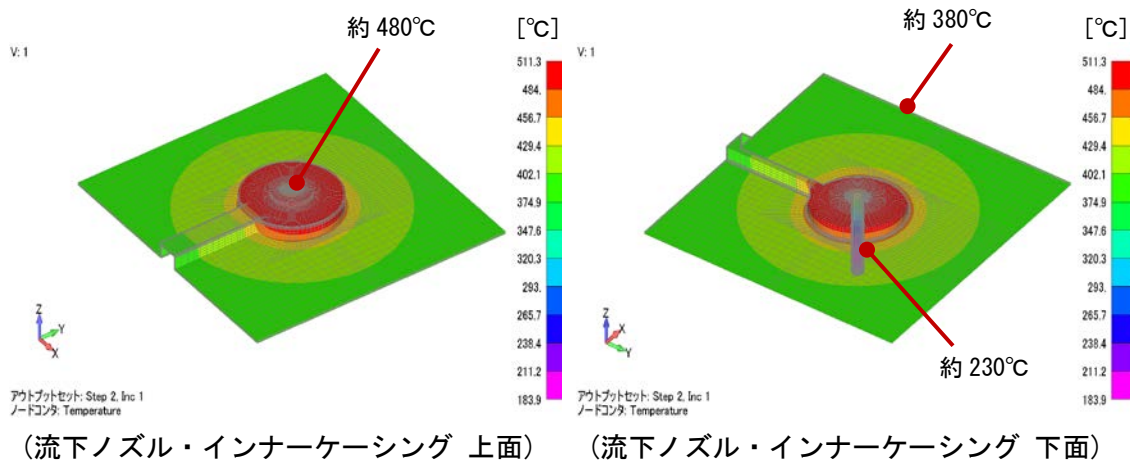
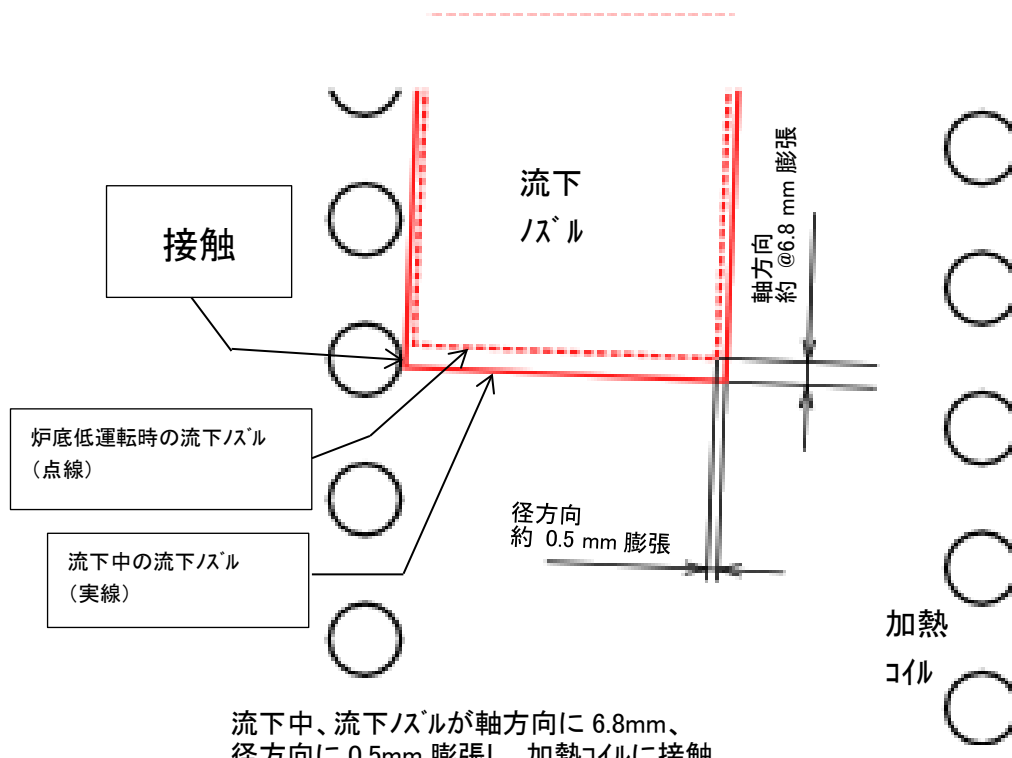


図-6 温度分布図

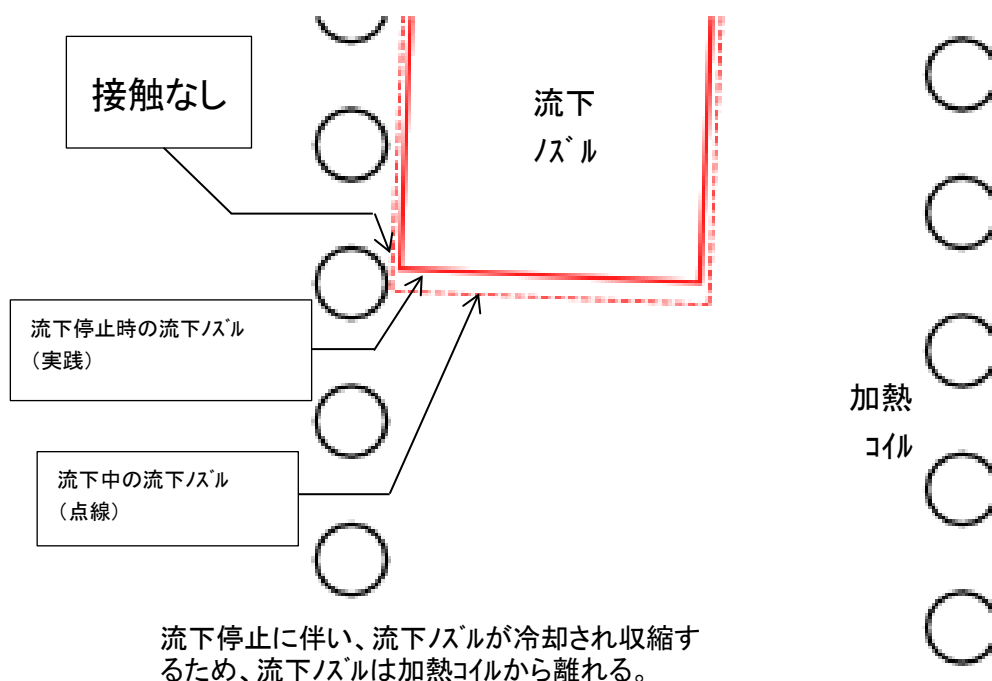
図-7 流下ノズル傾きのイメージ (想定)

溶融炉運転時の温度サイクル		流下ノズルと加熱コイルの状況	
<p>熱上げ</p>	<p>●溶融炉運転のため、熱上げを行う。</p>		<p>●熱上げにより、流下ノズル中央部はセル内温度約30℃から約700℃まで温度上昇する。</p>
<p>溶融運転中 (炉底低運転)</p>	<p>●溶融炉が運転中となる。(高放射性廃液とガラス原料を連続的に溶融炉へ供給し、溶融を行い、所定の量に達したら溶融ガラスをガラス固化体容器へ流下する操作を繰り返す。)</p>		<p>●流下ノズル中央部は約700℃で維持される。</p>
<p>流下に係る流下ノズル加熱操作</p>	<p>上段加熱</p>	<p>●加熱コイルの上段を高周波加熱することにより流下ノズル上部を加熱する。</p>	<p>●流下ノズル中央部の温度が上昇し始める。</p>
	<p>全段加熱 (流下前)</p>	<p>●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。</p>	<p>●流下ノズル中央部の温度が上昇し、約820℃に達する。</p>
	<p>全段加熱 (流下中)</p>	<p>●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溶融し、溶融ガラスが流下する。</p>	
<p>流下終了</p>	<p>●加熱コイルによる高周波加熱終了及び冷却エア吹付けにより流下ノズルが冷却され、流下が停止する。</p>		<p>●流下ノズル温度が低下する。</p>
<p>底部冷却</p>	<p>●冷却エア吹付け終了後、底部電極にエアを通気し、底部冷却を行う。</p>		<p>●流下ノズル中央部が一旦約480℃に低下し、流下中に最も熱膨張した状態となっていた流下ノズルが炉底低運転時の状態まで収縮する。 ●流下ノズルの冷却に伴い、流下ノズルのインナーケーシング部に生じた熱応力による変形により、流下ノズルが西に傾く。</p>
<p>運転停止 (シャットダウン)</p>	<p>●溶融炉の運転を停止するため、溶融炉の加熱を停止する。</p>		<p>●溶融炉全体の温度が低下していくのに伴い、流下ノズル中央部及び流下ノズルが室温約30℃に低下する。 ●流下ノズルの温度が下がるとともに、膨張した状態が運転前の状態まで収縮する。</p>



流下中、流下ノズルが軸方向に 6.8mm、径方向に 0.5mm 膨張し、加熱コイルに接触。

流下中の流下ノズルと加熱コイルの関係 概要
(流下ノズル温度が最も高いとき)



流下停止に伴い、流下ノズルが冷却され収縮するため、流下ノズルは加熱コイルから離れる。

炉底冷却後の流下ノズルと加熱コイルの関係 概要
(流下ノズル温度が最も低いとき)

図 8 流下ノズルと加熱コイルの接触 イメージ図