

流下ノズル加熱電源系統における漏れ電流発生の原因及び対策について

令和元年 8 月 15 日
再処理廃止措置技術開発センター

1. 概要

ガラス固化技術開発施設 (TVF) の熔融炉の流下ノズル加熱電源系統において、漏れ電流発生により漏電リレーが作動し、ガラス流下が停止した。調査の結果、漏れ電流は、流下ノズルと流下ノズル加熱コイル (以下、コイルという。) の近接または僅かな接触により生じたものと推定し、原因の特定のための追加調査項目を抽出した。抽出した追加調査においては、漏れ電流の影響緩和策を講じた上で、原因の特定及び対策に向けたデータ取得を行うため、実機を用いた調査運転を行う。

2. 漏れ電流発生の原因調査結果

2. 1 流下ノズル加熱装置の概要

(1) 流下ノズル加熱電源系統の構成

漏れ電流が発生している流下ノズル加熱電源系統について、全体構成及び固化セル内の構成をそれぞれ図-1、2 に示す。なお、流下ノズル加熱電源系統の内、流下ノズル加熱装置 (電源盤、整合盤) については、前回の運転 (17-1CP、平成 29 年 1~6 月) において発生した流下停止を踏まえ、今回の運転 (19-1CP、令和元年 7 月 8 日~) 開始前に更新を行っている。

(2) 流下ノズルの加熱手順

流下ノズル加熱装置による流下ノズルの加熱手順を図-3 に示す。

2. 2 漏れ電流の発生状況

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。

図-4 に流下ノズル電源系統の漏れ電流の発生状況を示す。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。

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。

2. 3 系統の点検結果

(1) セル外系統の点検結果

流下ノズル加熱電源系統の内、セル外に設置されているブスバ及び流下ノズ

ル加熱装置（電源盤及び整合盤）について、絶縁抵抗測定及び外観目視点検を行い、絶縁の低下がないこと、通電部位の変形、絶縁材の破損等がないことを確認した。絶縁測定及び外観目視点検の結果をそれぞれ図-5,6 に示す。

（2）セル内システムの点検結果

流下ノズル加熱電源系統の内、セル内に設置されているコイル及びブスバについて、ITV カメラにより外観目視点検等を行った。

コイルについては、コイル真下からコイルと流下ノズルの位置関係を確認した結果、コイルと流下ノズル間の距離（設計 10mm）が約 3mm 程度まで近接している箇所を確認した。これについては、前回の運転終了後においても、同様に確認している（添付-1 参照）。

ブスバについては、ブスバのカバーの取り外し可能な遠隔接手箇所（2 か所）を確認した結果、ブスバの変形、絶縁材の破損等がないことを確認した（図-7 参照）。

外観を確認できないブスバについては、絶縁抵抗測定の結果から、異常はないと考えられる。

（3）熔融炉運転状況の確認結果

漏電リレーが作動した今回の運転における固化体 8 本目の熔融炉運転状況（通電パラメータ、各部温度）について、漏電リレーの作動が発生していなかった固化体 1 本目から 7 本目までの運転状況と比較したところ、流下ノズル加熱電圧、流下ノズル上部温度等運転状況に有意な変化は見られなかった（図-8 参照）。

2. 4 漏れ電流発生 の推定メカニズム

2. 2 及び 2.3 項の調査結果を踏まえ、添付-2 のとおり漏れ電流発生要因の整理を行った。

要因整理の結果、流下時における熱影響により流下ノズルとコイルが近接または僅かな接触が生じたことにより漏れ電流が発生したものと推定した。

（1）熱影響による流下ノズルとコイルの近接について

2. 3 項において示したように、流下ノズルとコイルは近接していることを確認した。また、流下運転時における流下ノズルの温度分布に基づく概略の熱応力解析の結果（添付-3 参照）、流下ノズルに発生する応力に偏りが見られ、流下ノズルに傾きが生じることが分かった。これらのことより、流下ノズルとコイルが近接または僅かに接触することが考えられる。

また、これまでの流下監視映像から流下ノズルとコイルとの位置関係の推移を確認した結果、ずれが生じていることが分かった（図-9 参照）。

(2) 流下ノズルとコイルの近接または僅かな接触と漏れ電流値との関係

流下ノズルとコイル間の距離が近接することにより、この隙間に生じる静電容量が増大し、電流が流れる。また、僅かに接触した場合も漏れ電流が流れる。この際に生じる流下ノズルへの漏れ電流値は、コイルの電圧、熔融炉の絶縁抵抗値に依存する。

近接により漏れ電流が発生する原理及び近接、接触した場合の漏れ電流のルートを図-10,11 に示す。

また、接触した場合の熔融炉の絶縁抵抗値と漏れ電流との関係を図-12 に示す。

3. 原因特定に向けた追加調査

2. 4項の推定原因の妥当性を確認するため、以下の調査を実施する。

(1) 流下ノズル変形の要因調査

流下ノズル変形に係る要因の整理結果（添付-2 参照）に基づき、熱応力解析等を実施し、流下ノズルとコイルの近接または僅かな接触に至るような流下ノズルの変形の有無について確認を行う。

(2) 漏れ電流発生 の 事象確認

推定した漏れ電流の発生メカニズム（図-10,11 参照）について、小型試験装置等により、高周波電圧を印加したコイルと流下ノズルを接近させ想定した事象が発生するか確認するための事象確認試験を行う。

(3) 実機を用いたデータ採取

事象確認試験や解析では取得できないデータを取得するため、実機により推定原因、対策の妥当性の確認を目的とした調査運転を行う。取得したデータを踏まえて、調査運転後の運転に向けた対策に反映していく。

- ・流下ノズルとコイルの位置関係、位置ずれの進行に関わるデータを取得し、コイル（結合装置）の改良、さらに3号熔融炉の設計へ反映する。
- ・コイル電圧と漏れ電流の関係、環境要因（固化セル内の湿度や温度）の影響に関わるデータを取得し、流下ノズル加熱装置の改良や漏れ電流を抑制する運転パラメータへ反映する。

4. 調査運転に向けた対応

調査運転においては、安全性を確認した上で、漏れ電流発生の影響を緩和するため、以下の対応を図る。

(1) 漏れ電流の抑制対策

① 流下ノズル加熱電圧の低下

図-12 に示す通り、流下ノズル加熱電圧を低下させることで、漏れ電流発生を抑制できることから、流下ノズル加熱電圧を低くするために以下を実施する。

a) 流下ノズル加熱装置（電源盤、整合盤）の調整による漏れ電流抑制

流下ノズル加熱装置において、整合用変圧器の変圧比の調整及びこれに伴う整合用コンデンサの調整を行うことで、流下ノズル加熱用の高周波回路のインピーダンスを調整し、流下ノズル加熱電圧を更新前の流下ノズル加熱装置の設定値まで下げることが可能か確認する。調整の結果、更新前の流下ノズル加熱装置の設定値まで下げられない場合は、b の対策を講じる。

b) 更新前の流下ノズル加熱装置との入れ替え

現行の流下ノズル加熱装置を取り外し、更新前の流下ノズル加熱装置（保管中）に交換する。

② 運転パラメータの変更

漏れ電流発生の事象確認試験及び運転データ等より、固化セル内湿度、流下ノズル温度、流下ノズル電圧など漏れ電流発生の抑制に効果が期待できるパラメータの変更による調査運転を行い、変更したパラメータと漏れ電流のデータは、調査運転後の運転に反映する。

(2) 流下ノズルの健全性

流下ノズルの健全性については、ITV カメラによる外観目視点検では限られた範囲しか確認できないことから、クリープ疲労寿命評価やコールドモックアップ試験設備の外観観察により健全であることを確認する。

なお、流下ノズルの高経年化に係る評価として、クリープ疲労寿命評価を行い、これまでの流下回数約 230 回（溶融炉作動試験での流下含む）に対し、損傷に至るまで、約 1300 回の流下が可能であると評価している。

(3) 漏電リレー設定値の変更及び発電機による電源系統の独立化

流下ノズル加熱装置における漏電リレーの設計上の設定値は 500mA であるが、TVF の給電系統（特高変電所～第 11 受変電設備～動力分電盤～TVF 内各設備）の保護協調をとるため 200mA に設定している。

流下ノズル加熱装置としては 500mA まで漏れ電流を許容できる設計であることから、漏電リレーの設定値を現状の 200mA から 500mA に変更する。漏電リレー作動時の漏れ電流は約 200mA 程度であり、500mA に変更することにより漏電リレー作動による流下停止を低減する。なお、流下ノズル加熱電源系統は冷却水を通したブスバやコイルから構成されており、設計上、500mA までの漏れ電流は考慮されていることから、500mA への変更は安全上問題ない。

事象が進展した場合、漏電リレーの設定値を 500mA に変更しても、漏電リレーが作動することが考えられるが、流下ノズルが加熱できなくなり、ガラスが冷えて固まり流下が停止するため、運転を行うことに対し安全上の問題はない。

本変更に当たっては、保護協調の観点から、流下ノズル加熱装置を既設の TVF の給電系統から切り離し、発電機から給電する。

(4) 調査運転に係る安全性

調査運転開始にあたっては、引き続き、リークモニタにより、漏れ電流の発生状況を監視することにより、漏れ電流発生に係る事象進展の有無を確認する。

漏れ電流発生による人に対する影響について、発電機及び流下ノズル加熱装置電源盤、整合盤は、エリア設定を行い、人が触れないように処置する。また、ブスバはカバーにより隔離されており、流下ノズルは固化セル内であり人が近寄れないことから、安全上の問題はない。

5. 調査運転後の運転に向けた長期的な対策

追加調査の結果を踏まえ原因を特定し、長期的な対策として、電源系統の分離、コイル（結合装置）改良、流下ノズル加熱電圧を低くする運転パラメータの設定等を実施する。また、3号溶融炉にも反映する。

6. 対応スケジュール

原因特定に向けた追加調査について、対応スケジュールを図-13 に示す。

以上

高周波加熱コイル系統

流下ノズル加熱装置

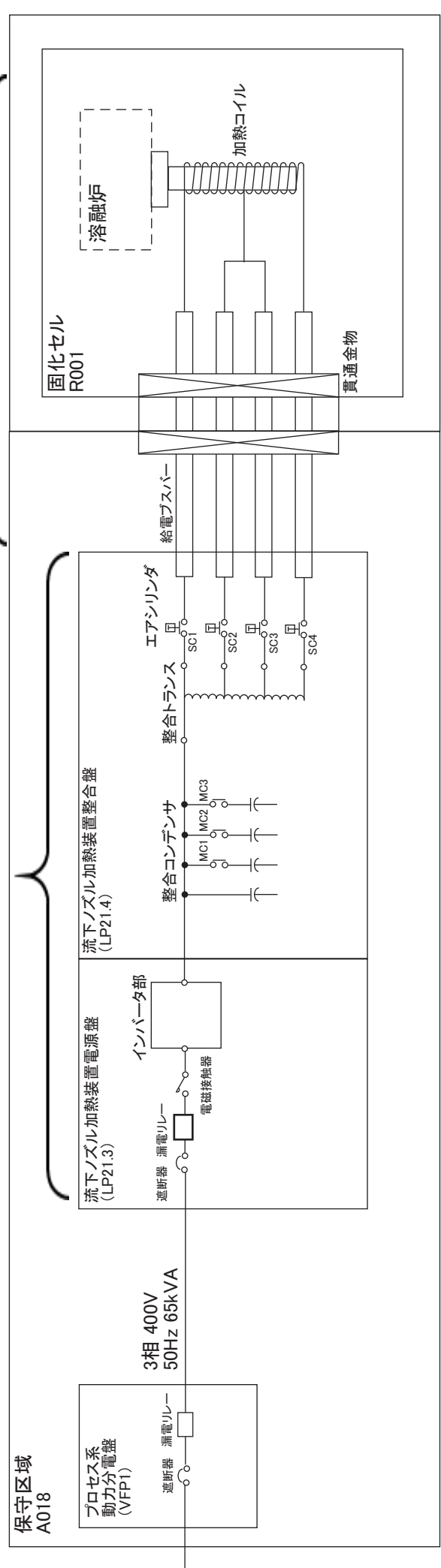


図1 流下ノズル加熱装置系統図

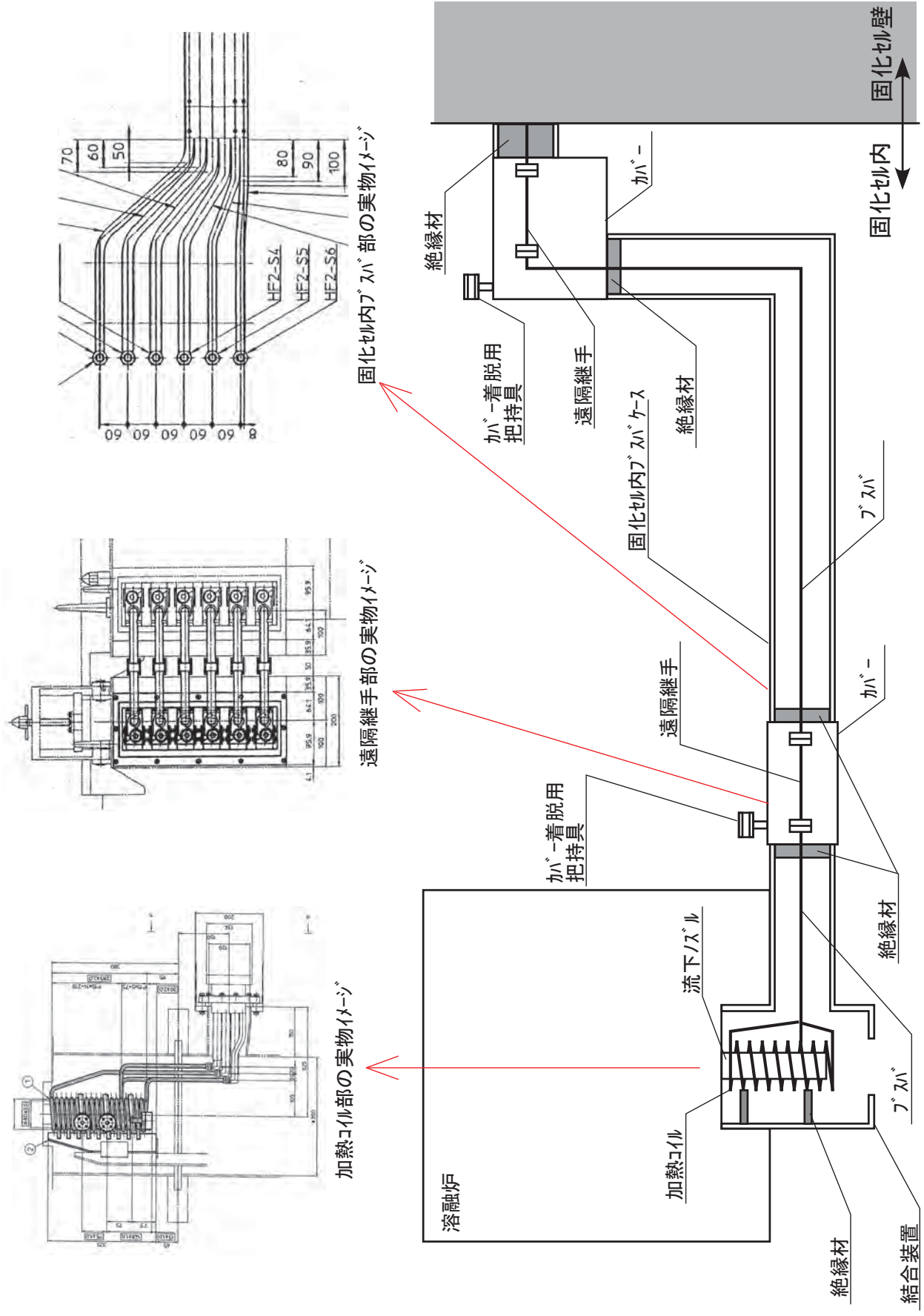
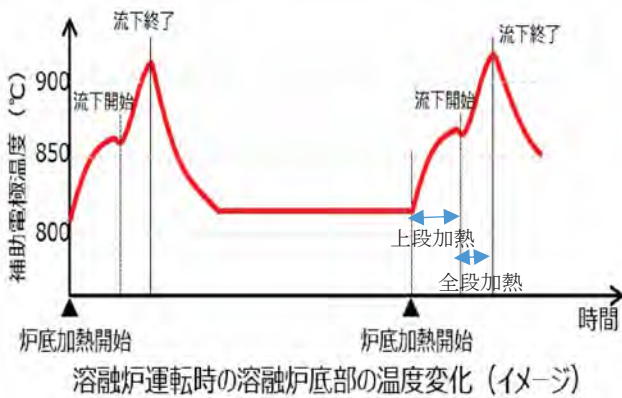
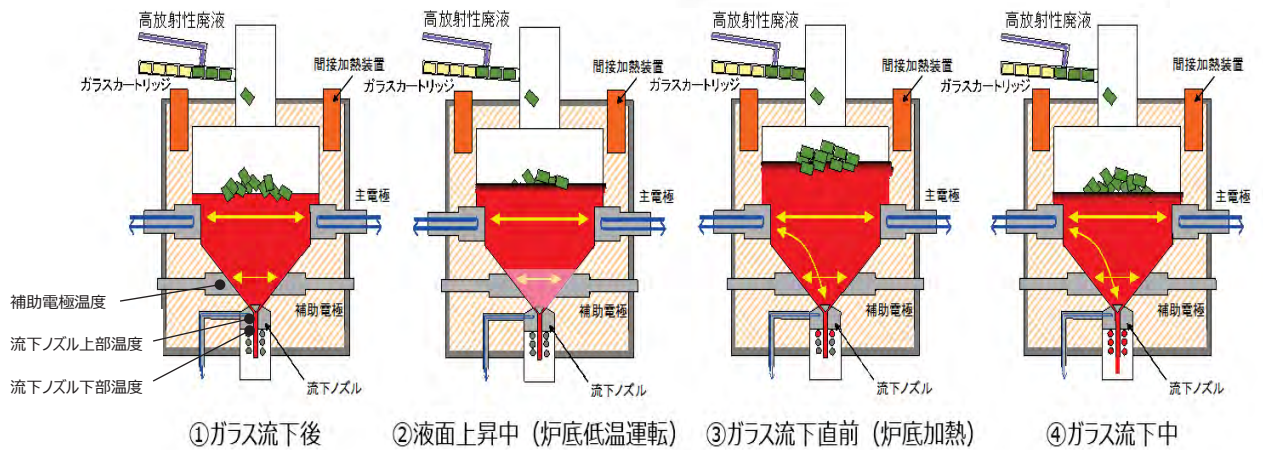
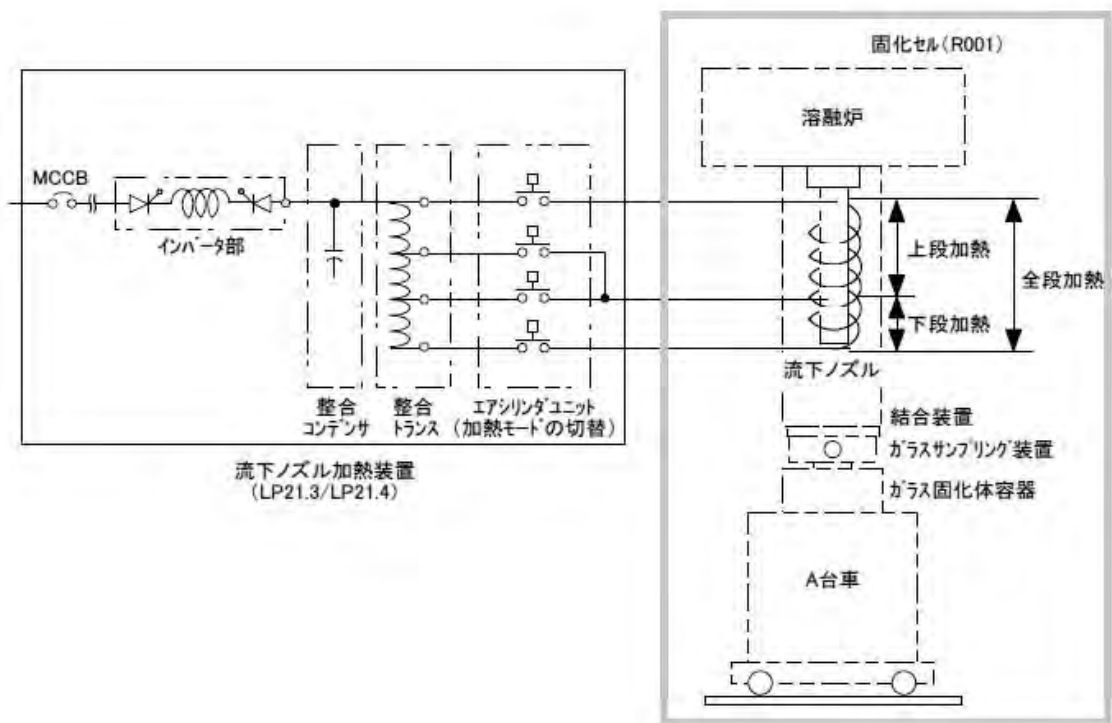


図-2 固化セル内高周波加熱コイル系統



＜運転管理及び操作＞

- 主電極通電によりガラス温度 $1150^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ に保ち、同時に補助電極間電流を調節することで、炉底部のガラス温度を約 850°C とするために、補助電極温度を約 820°C に管理する。
- 流下は、炉底加熱により炉底部の温度を上げる必要がある。また、流下中は、高温のガラスが炉底部に流れ込み温度が高くなる。
- 流下終了後、速やかに炉底低温状態に移行させるために、主電極-流下ノズル間の通電を止めるとともに、底部電極に冷却空気を流して炉底部の温度を下げる運転操作を行う。

図-3 TVF 溶融炉の運転方法

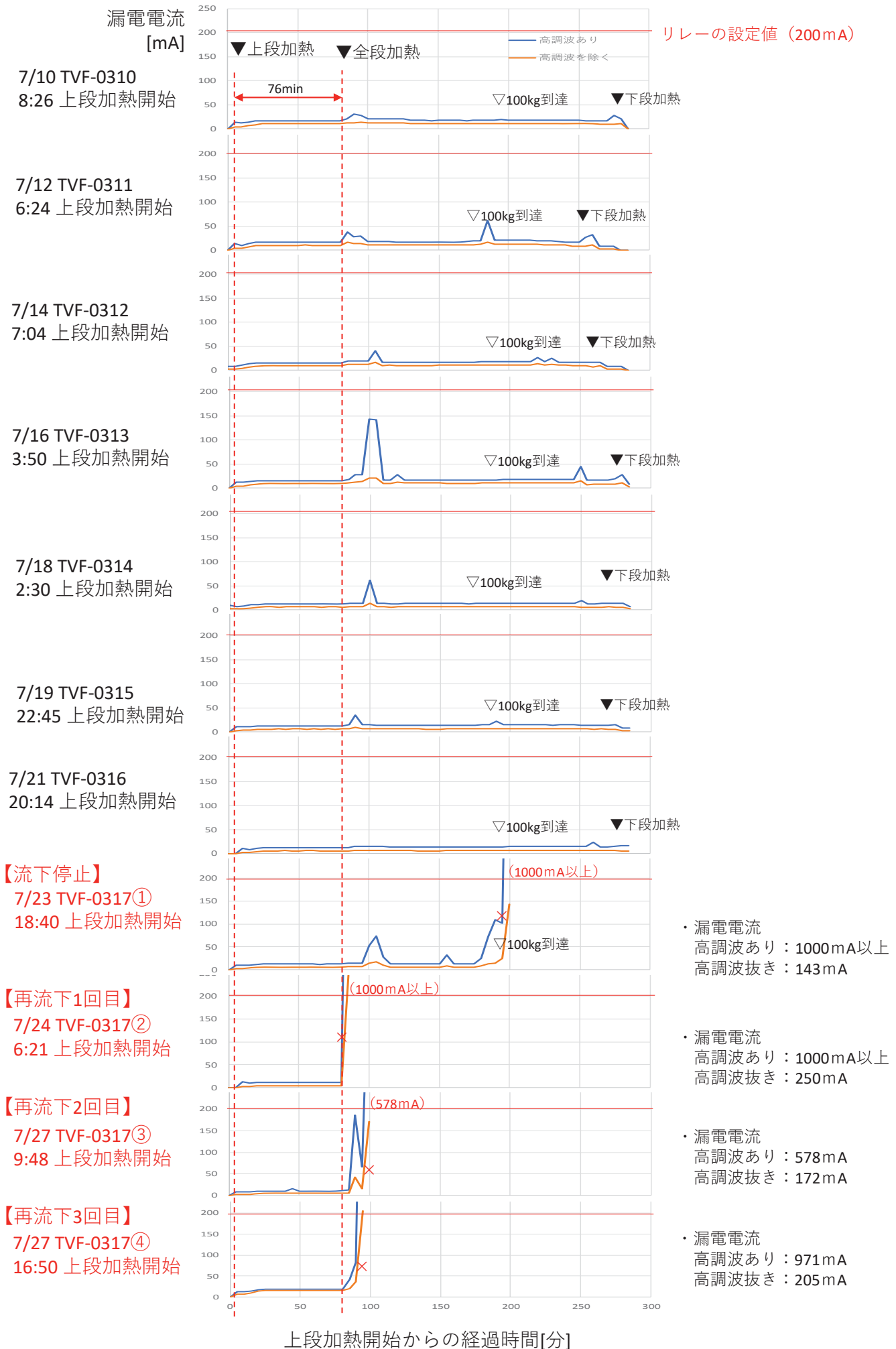
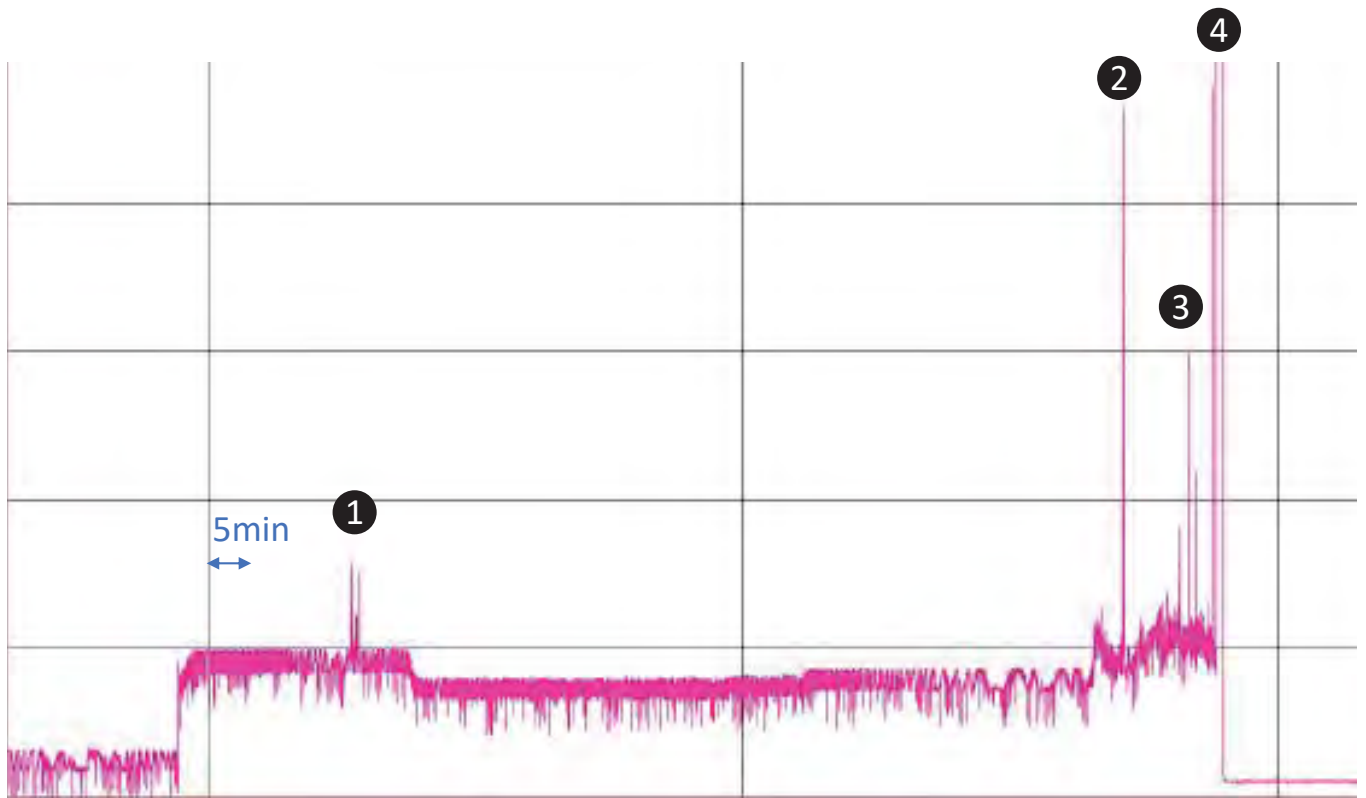


図-4 リークモニタによる各運転での漏れ電流の比較(19-1CP) (1/5) 9



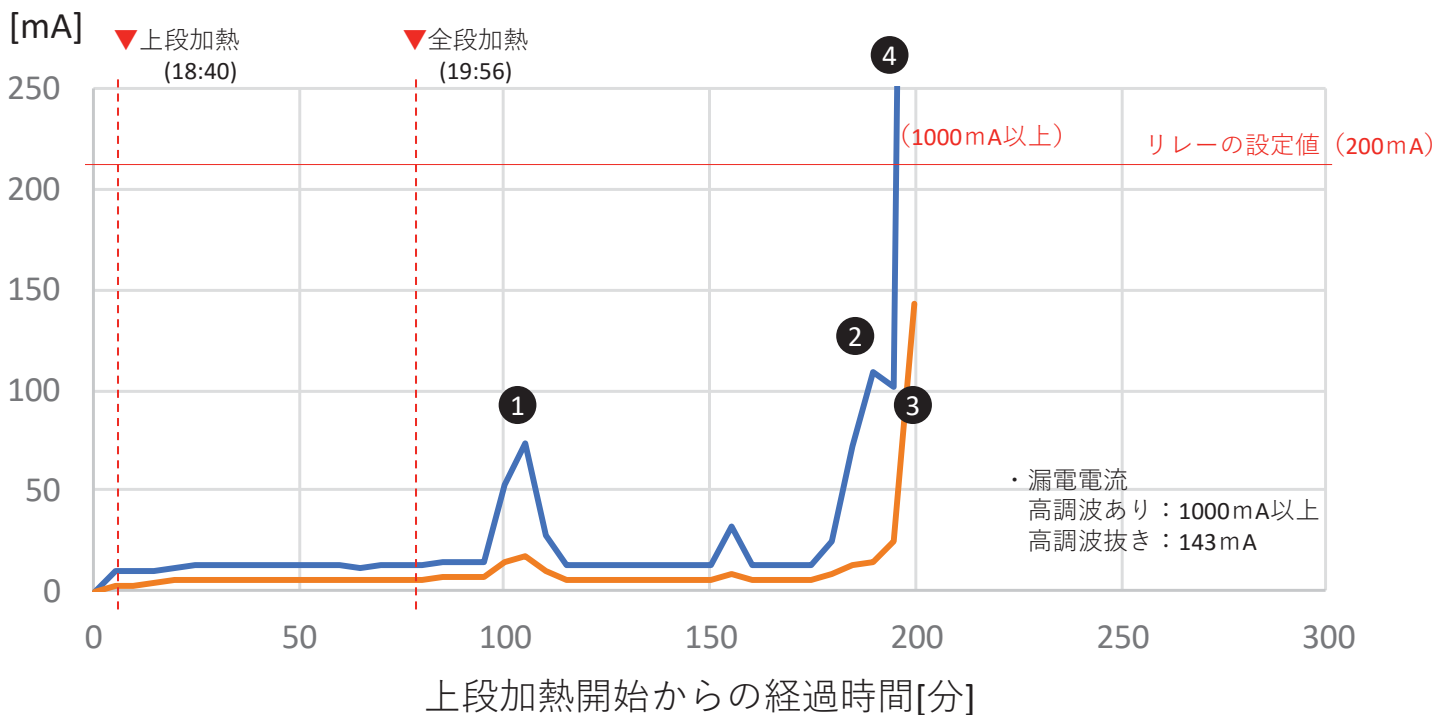
リークモニタ (参考値)

『漏電ピークのグラフについて』

- (1) 下記データは、5分間の漏電の最大値を記録し作成したものであり、断続的な山型のピークとして検出していない。
- (2) 漏電は上記に示すとおり短時間のピークとなっている。

【①～④を参照のこと】

漏電電流



漏電ピークのグラフ比較 (TVF-0317①)

図-4 リークモニタによる各運転での漏れ電流の比較(19-1CP) (2/5)

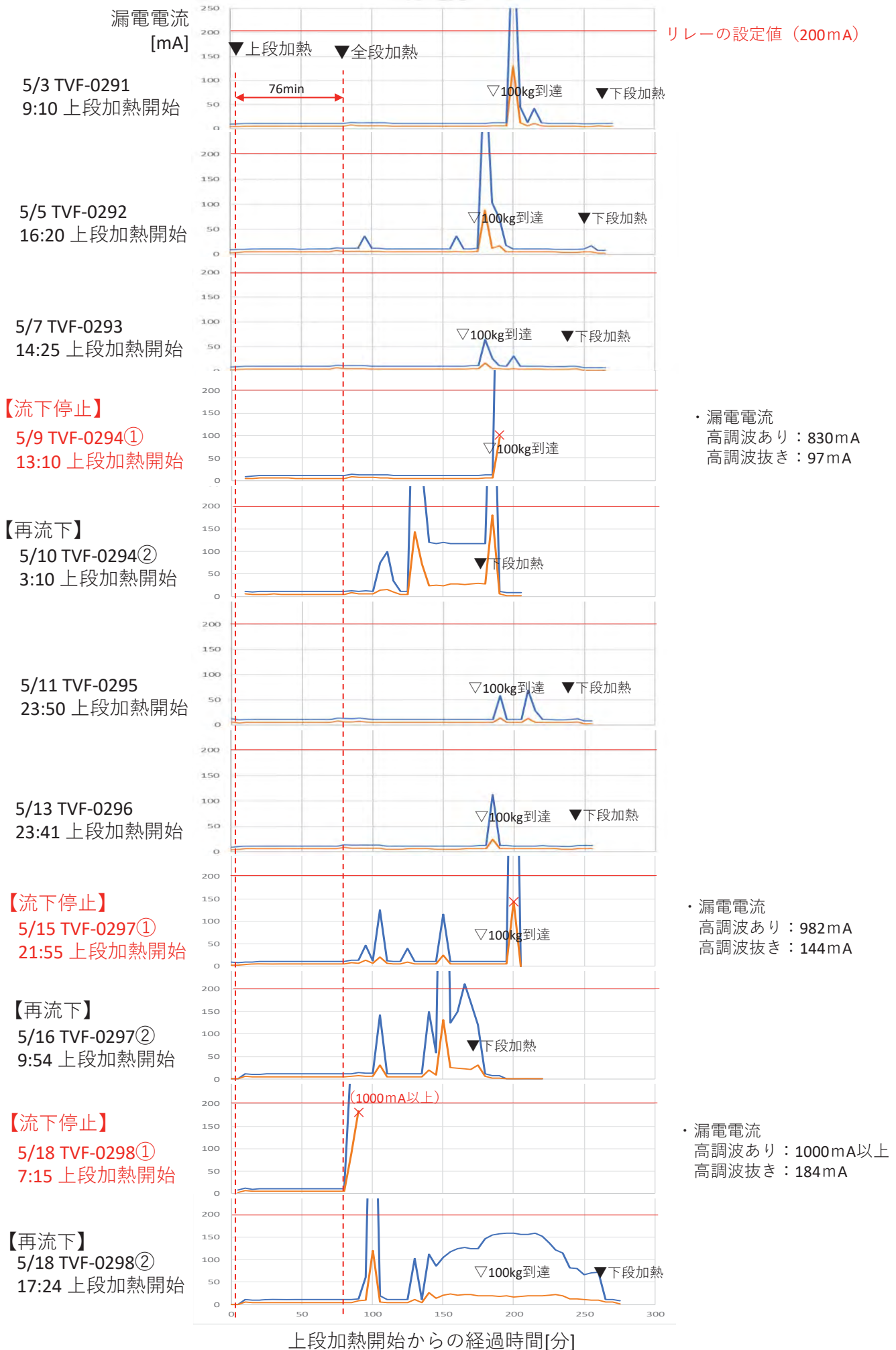


図-4 リークモニタによる各運転での漏れ電流の比較(参考:17-1CP)(3/5) 11

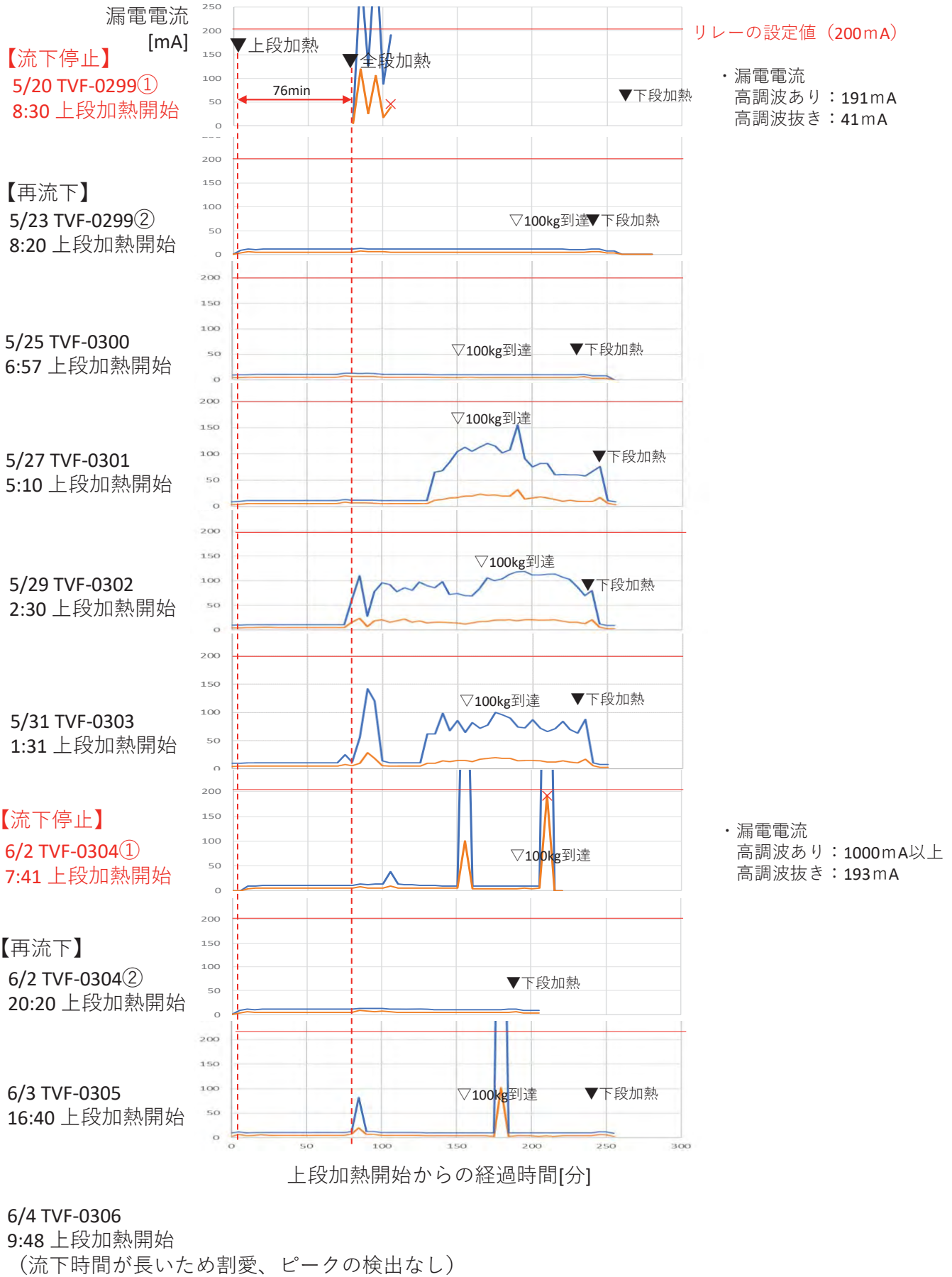


図-4 リークモニタによる各運転での漏れ電流の比較(参考:17-1CP)(4/5)

カレット洗浄時のデータ

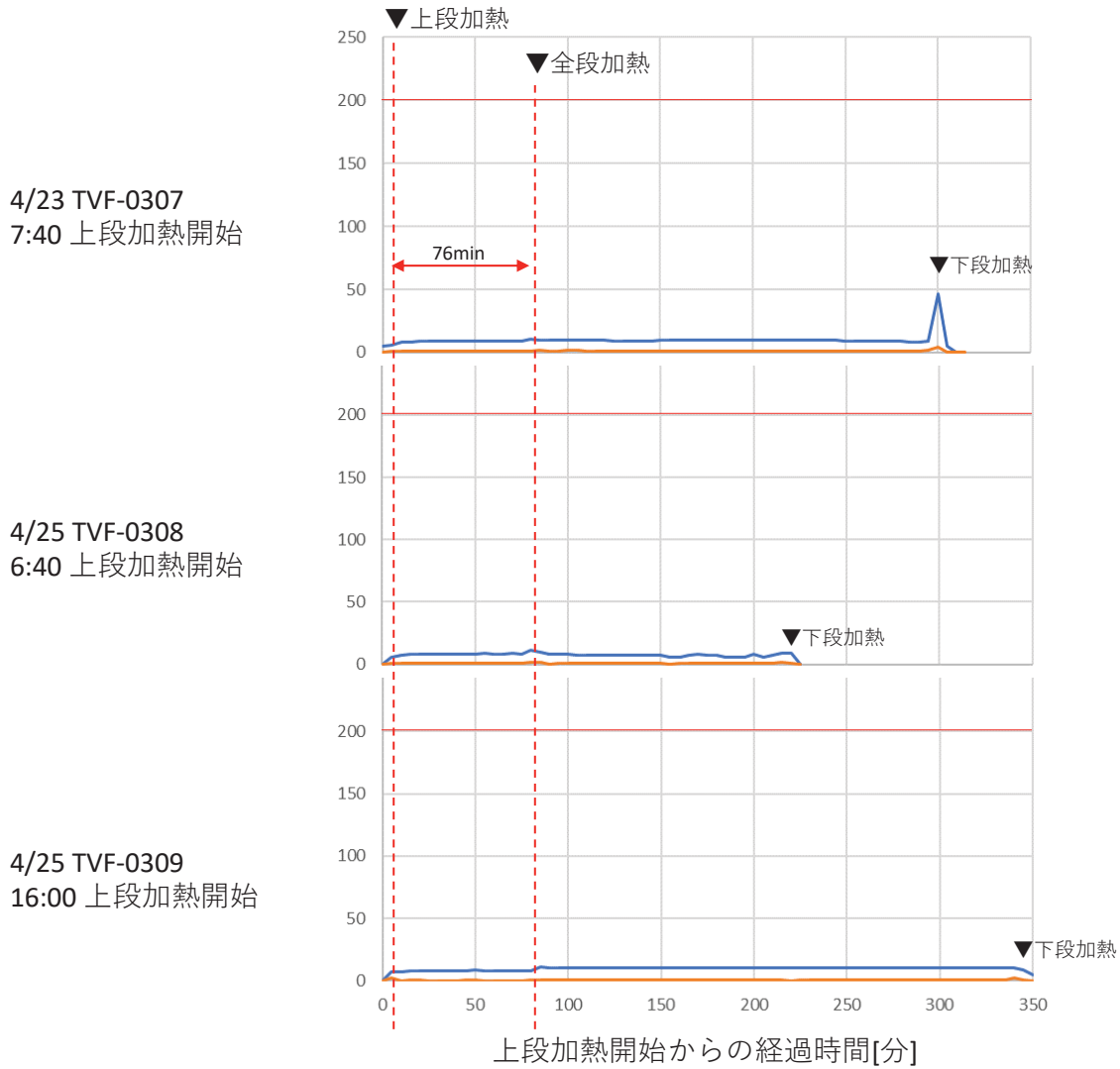
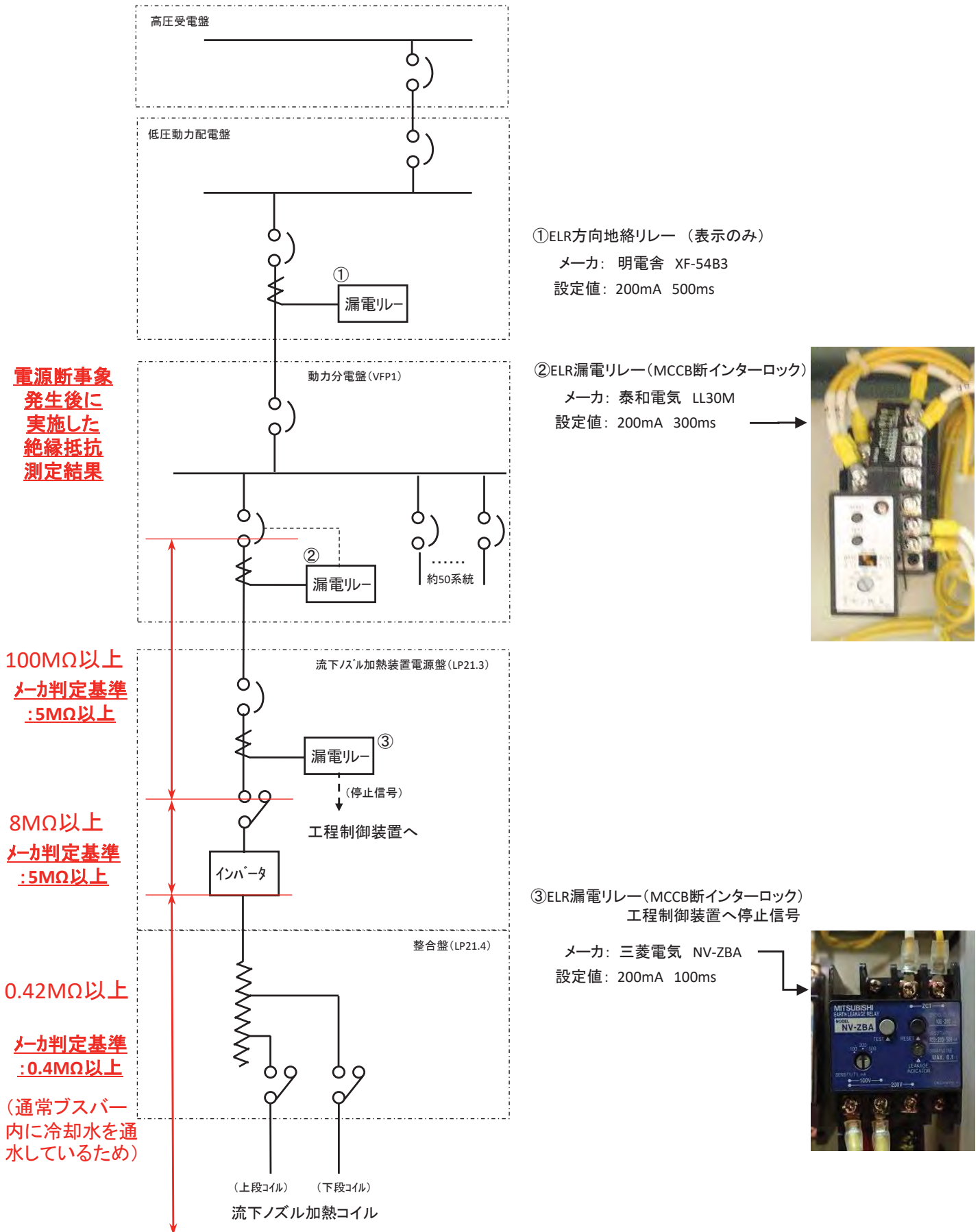


図-4 17-1CP後カレット洗浄時のリークモニタによる各運転での漏れ電流の比較 (5/5)



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、メーカー判定基準値の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-5 流下ノズル加熱装置電源系統と絶縁抵抗測定結果

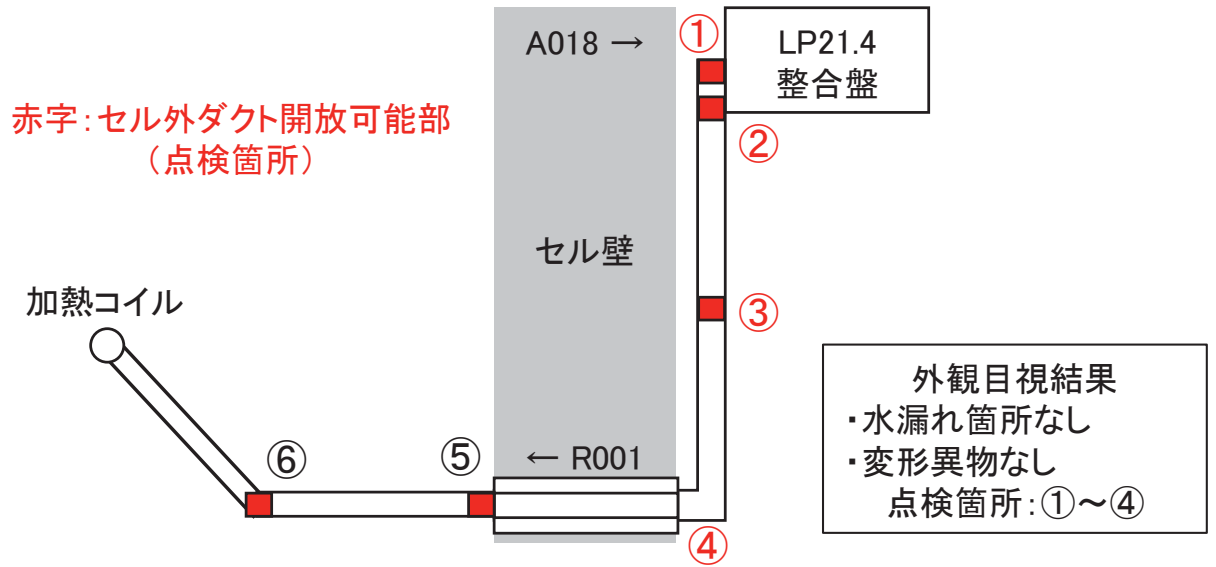
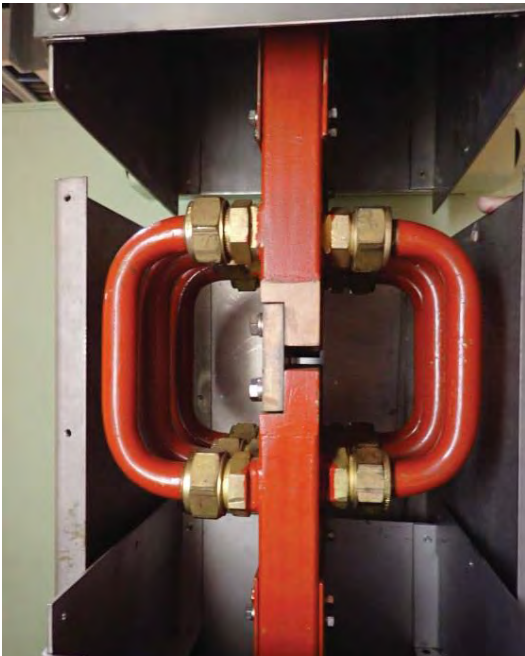
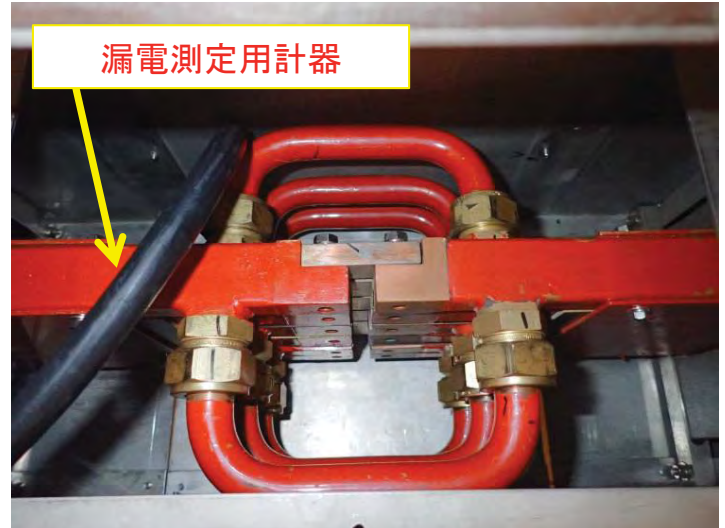


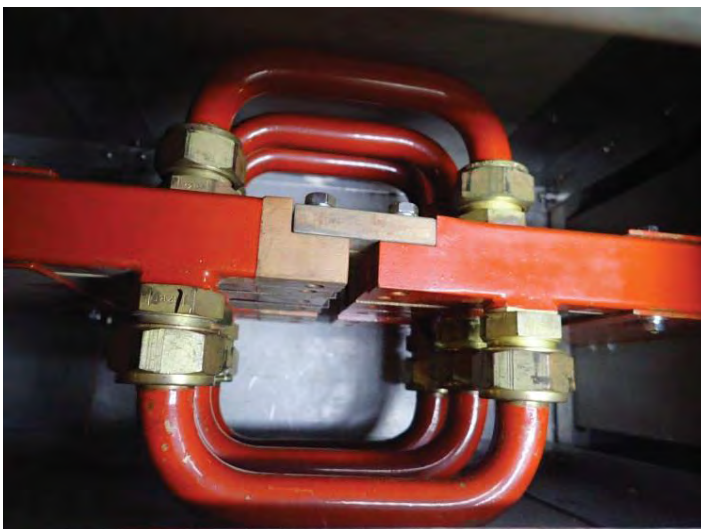
図1 LP21.4-加熱コイルダクトルート俯瞰図



点検箇所①



点検箇所②



点検箇所③



点検箇所④

図-6 固化セル外ブスバの外観目視点検

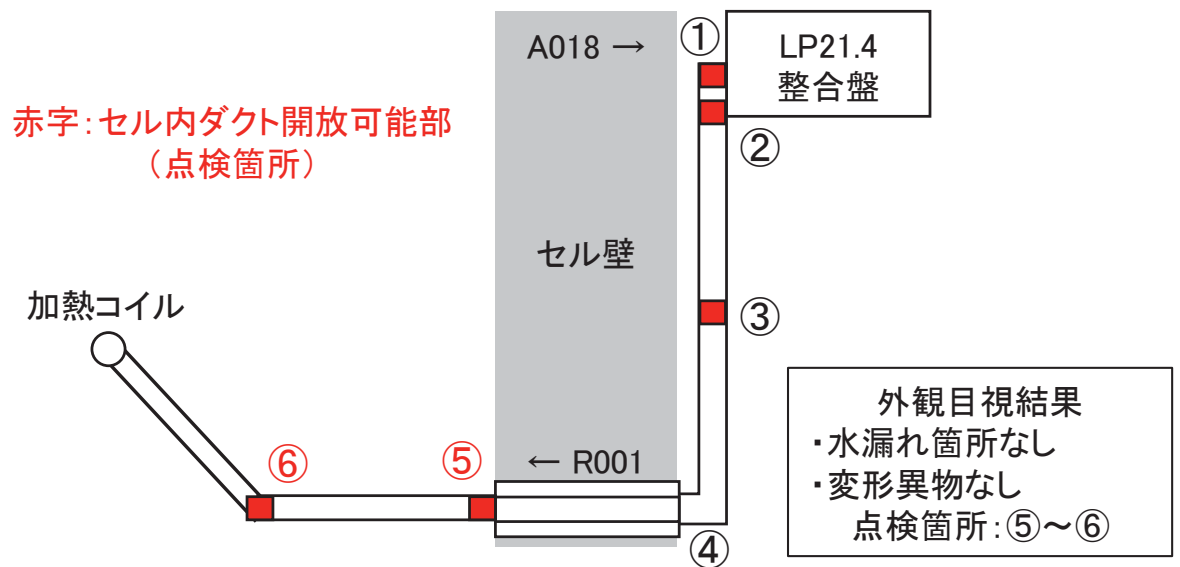
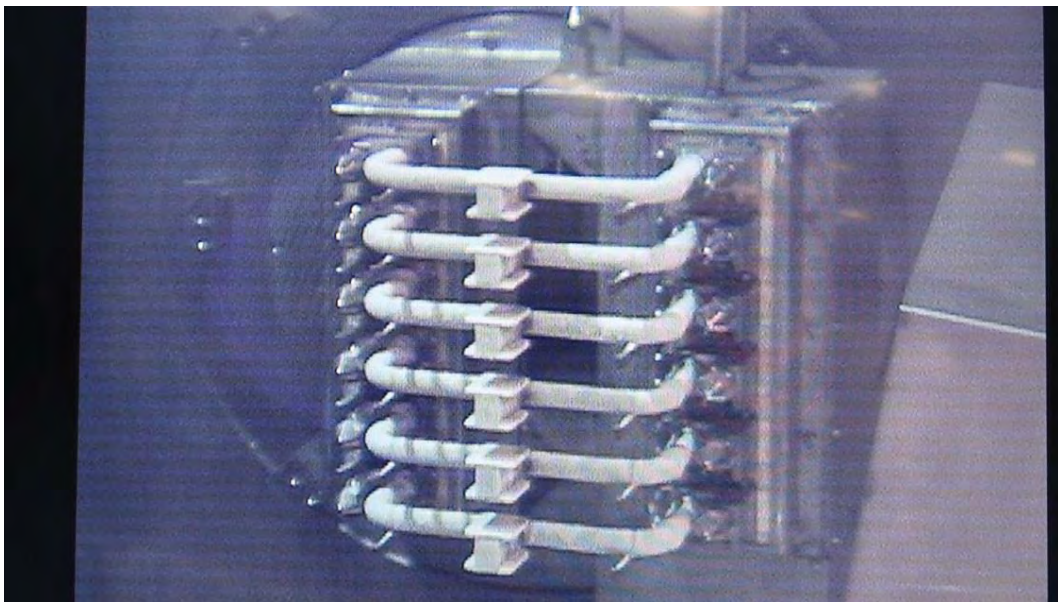


図1 LP21.4-ブスバ間ダクトルート俯瞰図

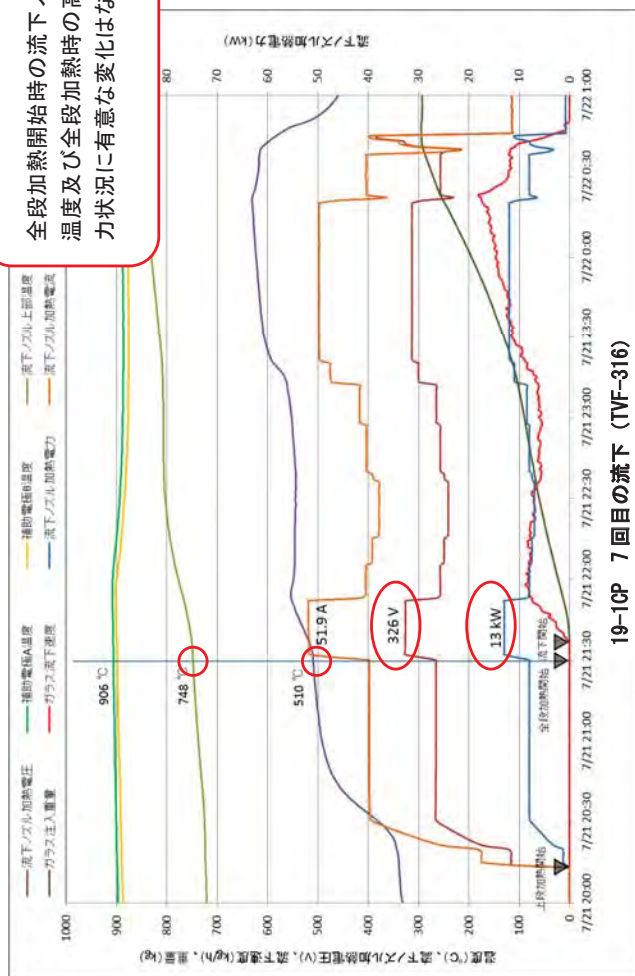
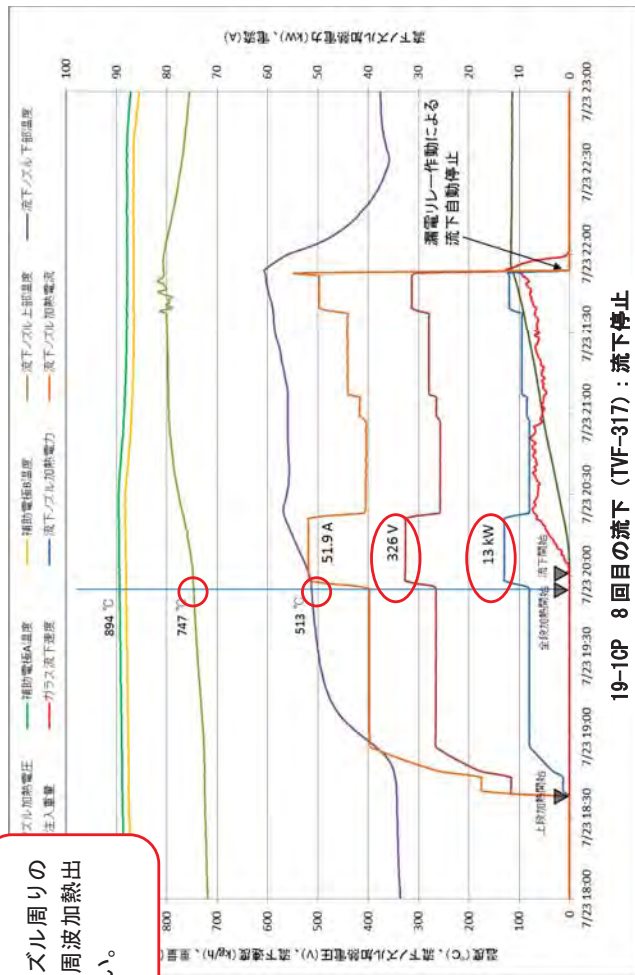
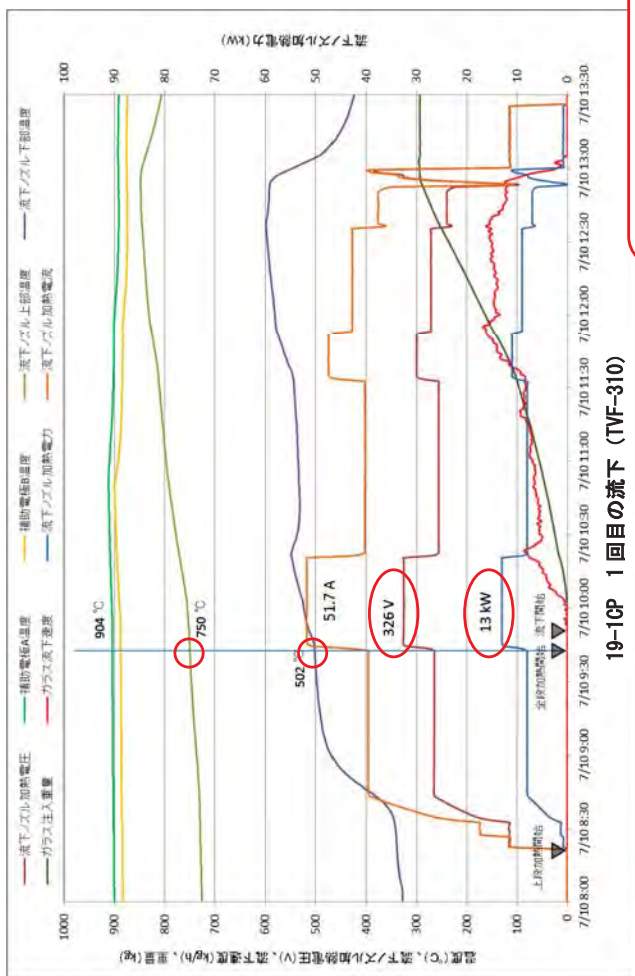
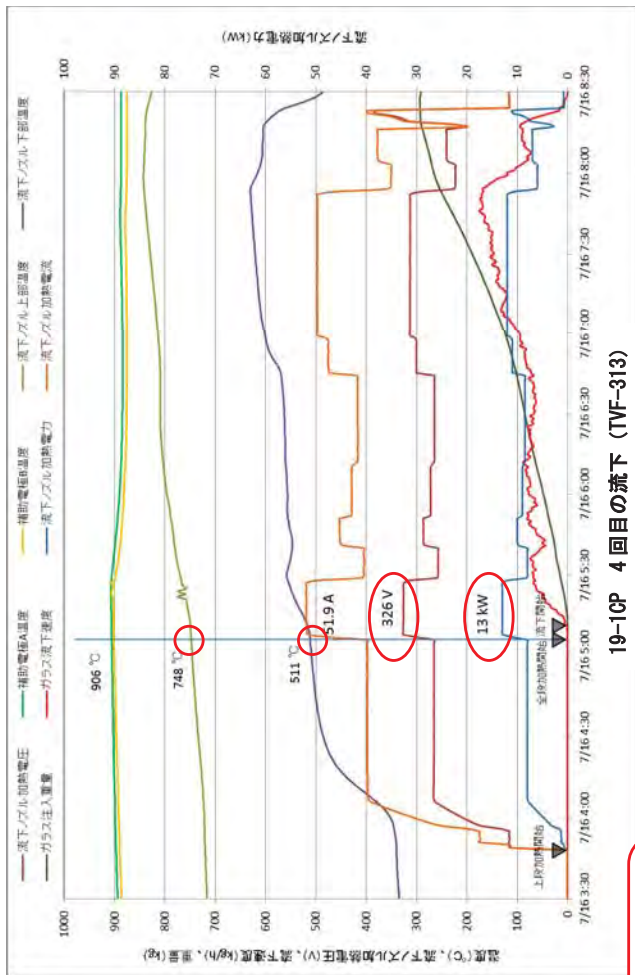


点検箇所⑤



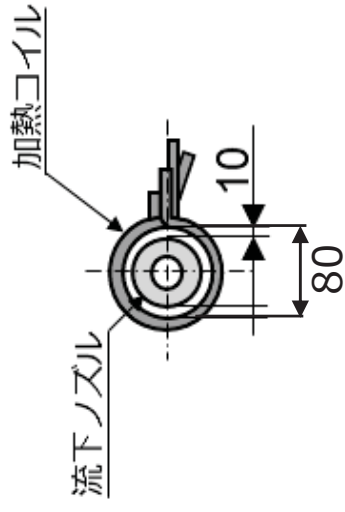
点検箇所⑥

図-7 固化セル内ブスバの外観目視点検 16



全段加熱開始時の流下ノズル周りの温度及び全段加熱時の高周波加熱出力状況に有意な変化はない。

図-8 19-1CP 流下操作時の高周波加熱と温度等の状況

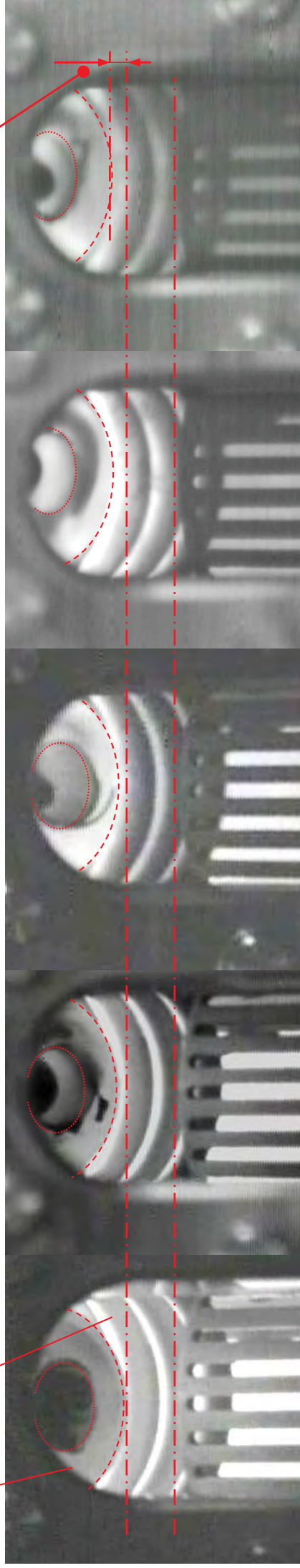


位置のずれ約4mm (目算値)

真上から見た流下ノズルと加熱コイルの概略図
(単位:mm)

流下ノズル
外径60mm 内径28mm

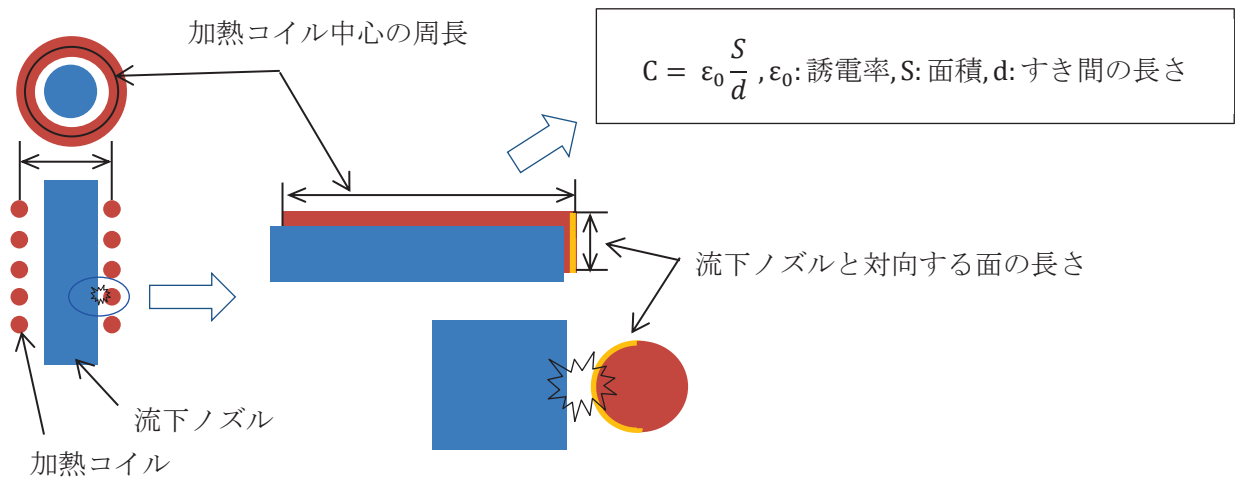
加熱コイル
内径80mm



- 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)

図-9 TVF2号溶融炉での運転経過と流下ノズルの位置関係

流下ノズルおよび加熱コイルは、金属と金属が向き合って配置されているため、すき間にコンデンサが形成される。ここでは、1 ターン分の加熱コイルと流下ノズルが平行板コンデンサであると仮定し、浮遊容量（すき間の静電容量 C）を計算し段数（19 ターン）を乗じる。



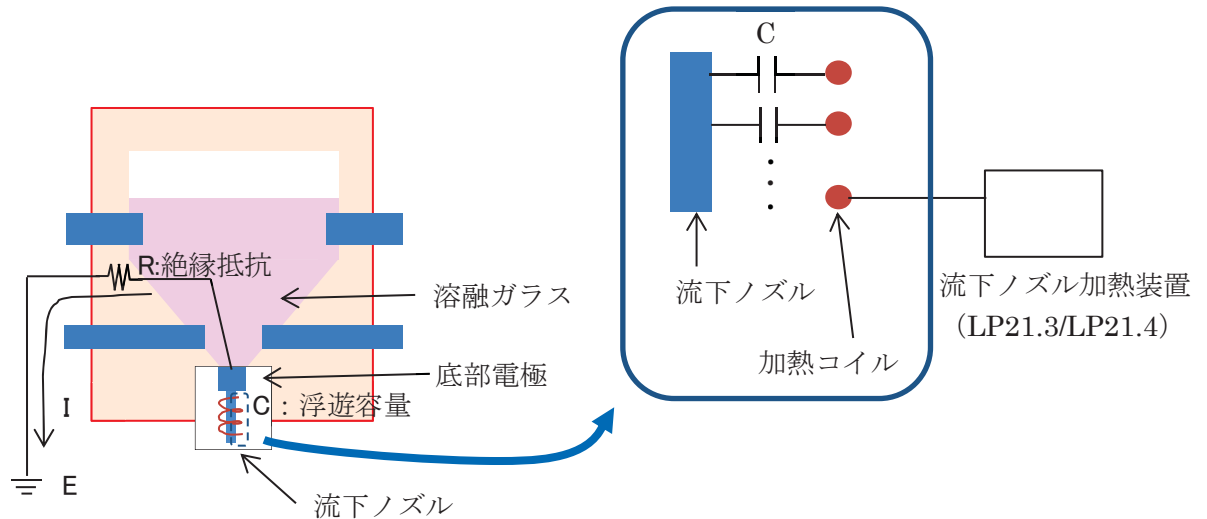
高周波回路における漏れ電流には、下式に示すようすき間の静電容量を考慮する必要がある。

$$I = \frac{V}{Z}, Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}$$

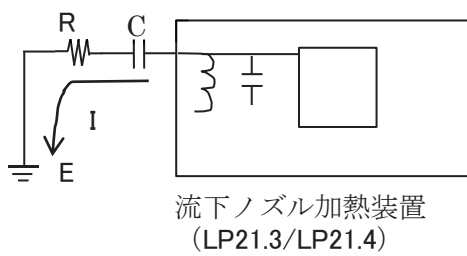
I: 漏れ電流, V: 電圧, Z: インピーダンス, R: 絶縁抵抗, f: 周波数, C すき間の静電容量

図-10 コンデンサ理論による漏れ電流発生 の原理

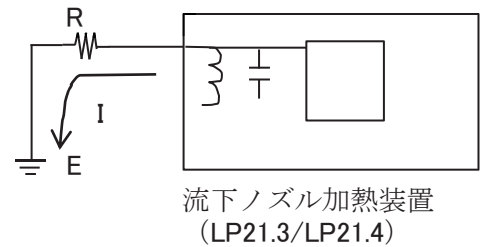
高周波電流は、加熱コイルと流下ノズル間に存在し得る浮遊容量があることから、
 加熱コイル⇒流下ノズル⇒底部電極⇒溶融ガラス⇒溶融炉ケーシングを經由し、漏れ電
 流が流れる。



接地（溶融炉ケーシング固定による）



漏れ電流の等価回路
(離れている場合)



漏れ電流の等価回路
(接触した場合)

図-11 コンデンサ理論による漏れ電流のルート図

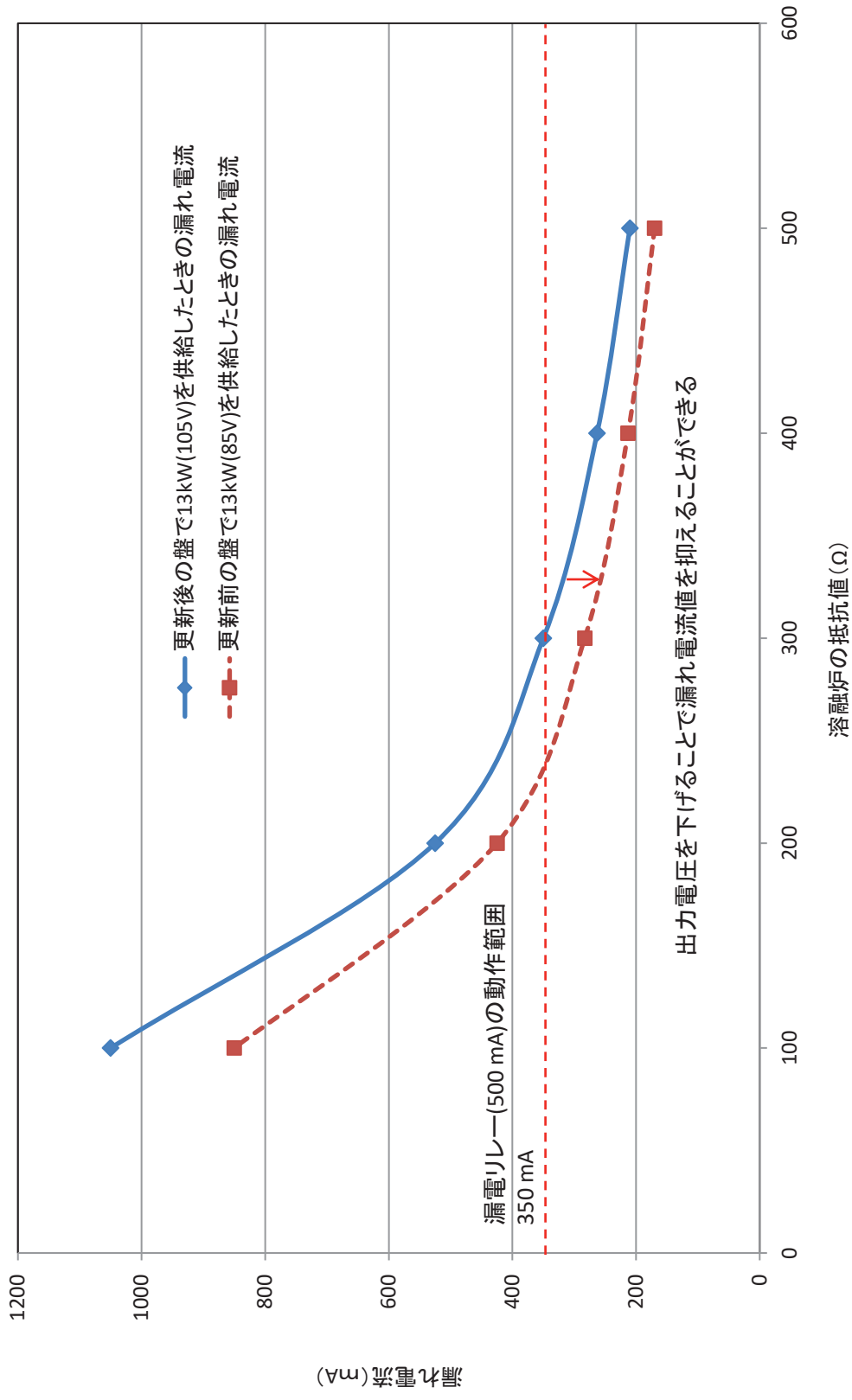
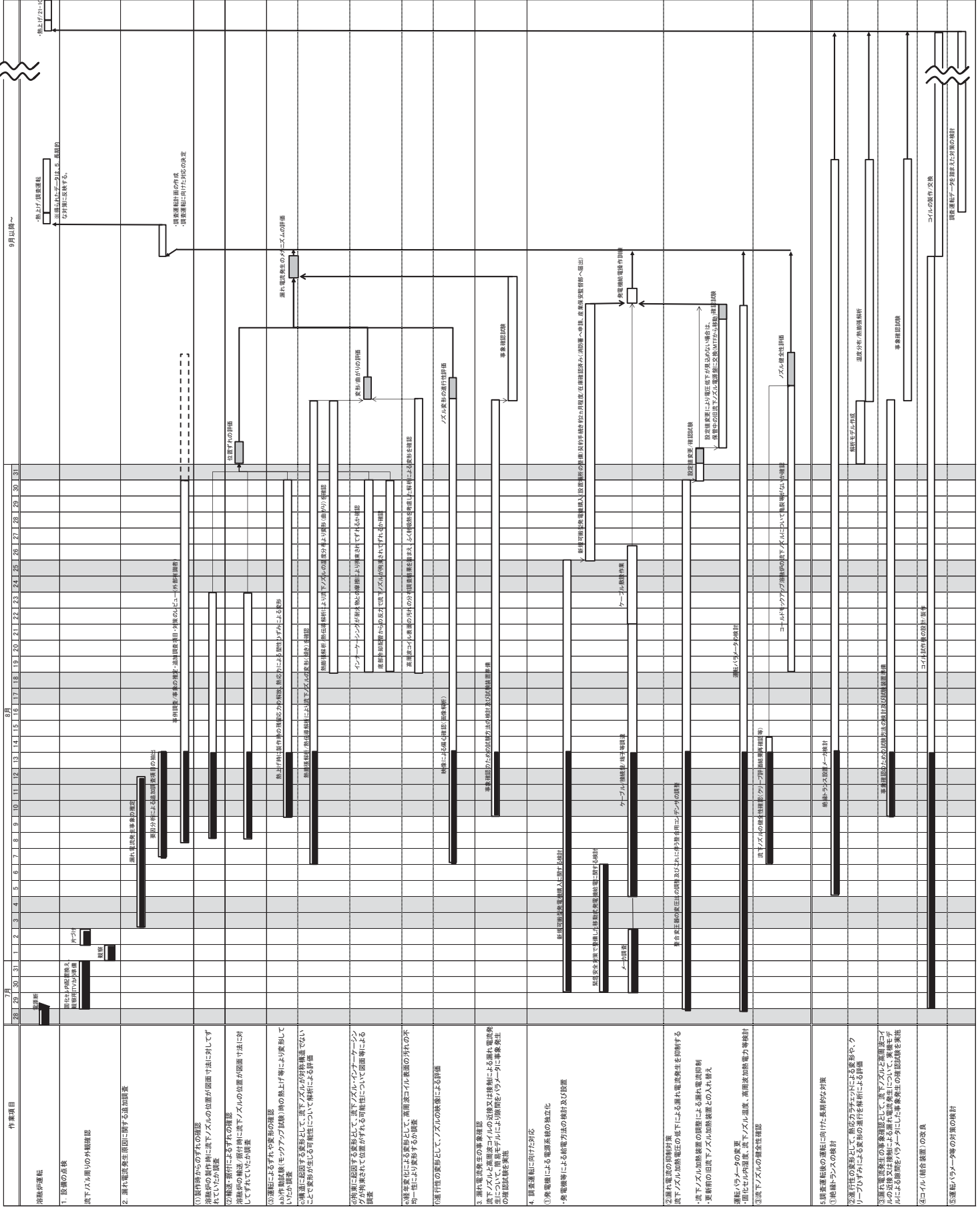


図-12 溶融炉の絶縁抵抗値と漏れ電流の関係

図-13 ガラス固化技術開発施設(TVF)の運転の一時中断後の対応スケジュール



溶融炉流下ノズル周りの観察結果

令和元年 8 月 5 日
ガラス固化処理課

1. 観察の観点

固化セル内における加熱コイルの給電系は多くの部分がダクト内に収められている。ダクト内のうちブスバの接続部（貫通プラグ部及び結合装置部）のみ、BSMによる遠隔操作にてカバーが容易に取り外せるようになっており、遠隔継手が収納されている。この部分については、事象発生後、7月25日にカバーを取外して内部を確認し、絶縁材に割れ、変形、変色等の異常が無いことを確認した。

その他、外観観察が可能な部位は、結合装置内に設置された加熱コイル本体の観察となる。

加熱コイルと流下ノズルや結合装置内の金属部との間に漏れ電流が生じるような位置関係のずれや異物がないかという観点で、流下ノズル周りの外観確認を行った。

2. 方法

流下ノズル周りの外観観察を行うため、ITVカメラをA台車上に上向きに搭載したのち、A台車を前進操作してITVカメラを流下ノズルの真下に移動する。

ITVカメラをA台車上に搭載するに当たっては、固化セル内に既存の置台を搭載し、その上にITVカメラを置くことでITVカメラのパン/チルトを作動することが可能。

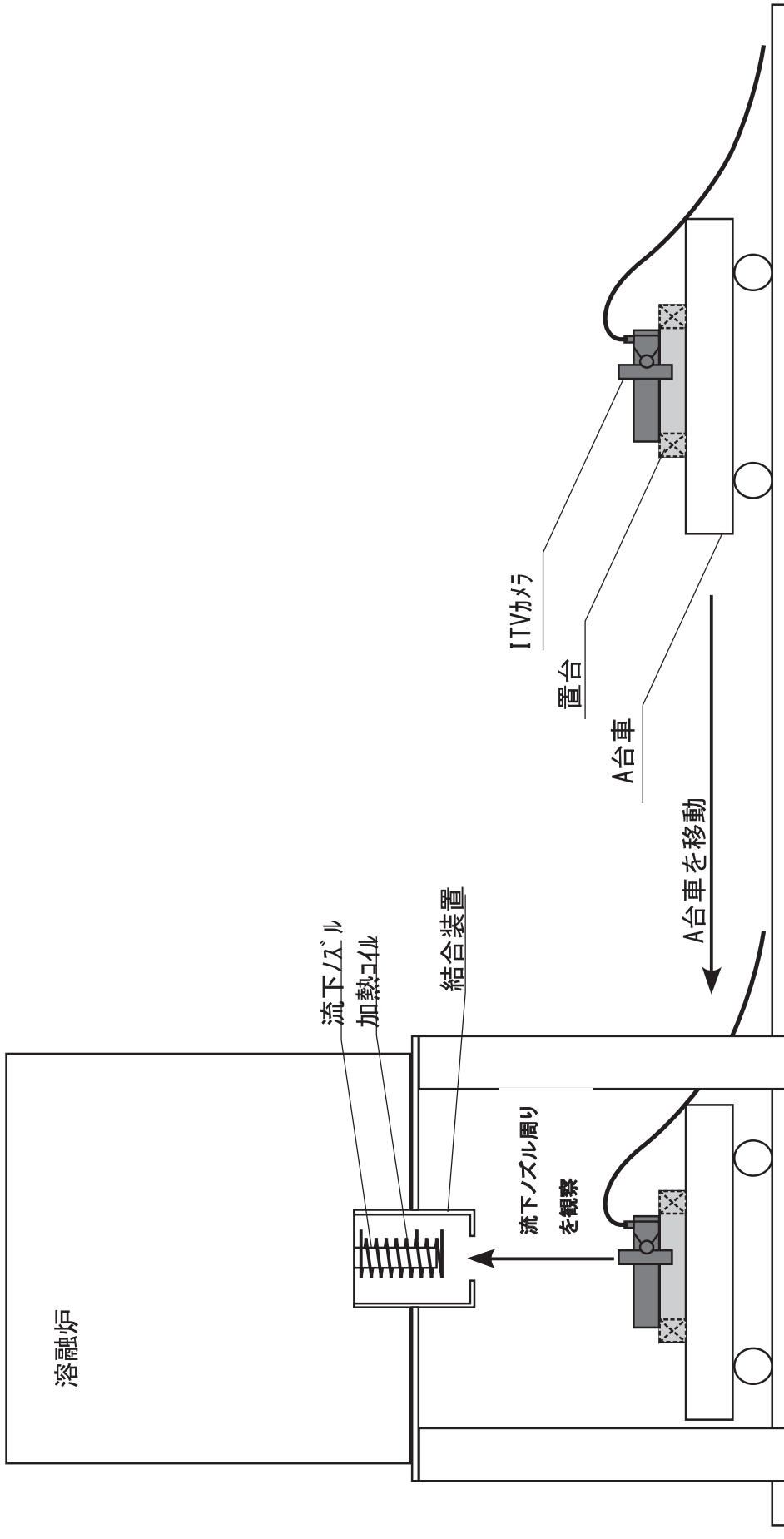
ITVカメラにて流下ノズル周りの加熱コイルの外観を確認し、流下ノズルや結合装置内の金属部との間に漏れ電流が生じるような位置関係のずれや異物がないかを確認した。（次ページ参照）

3. 観察結果

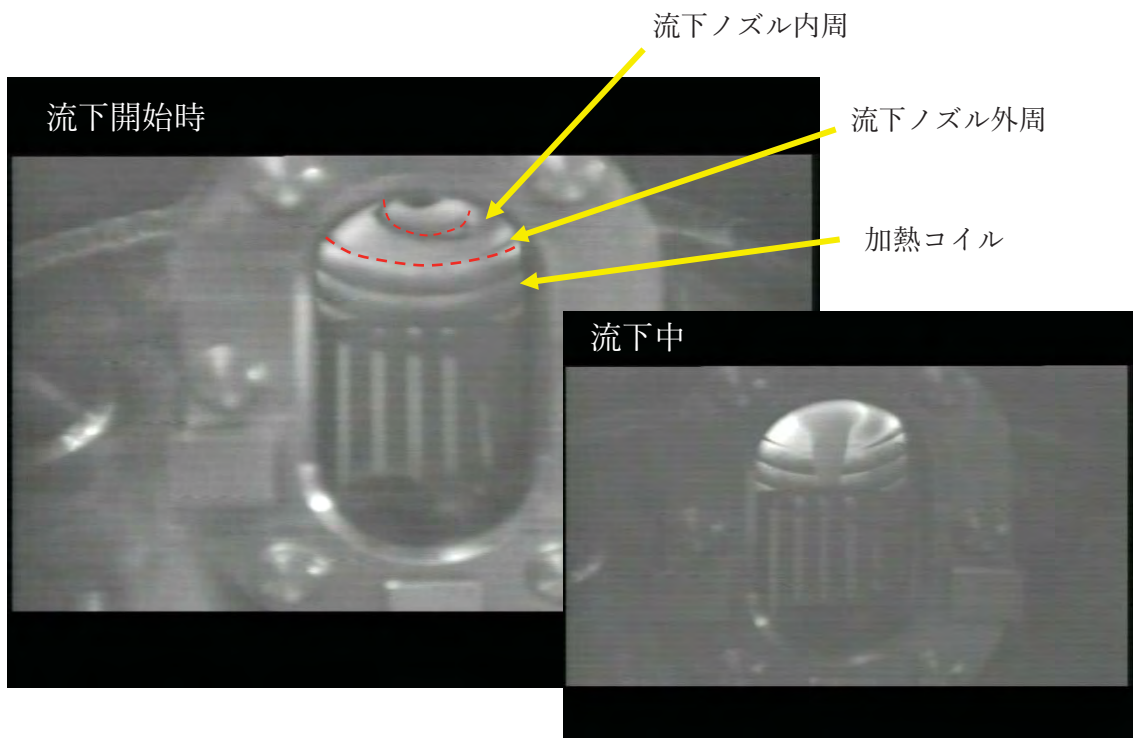
観察を令和元年8月1日に実施した。

加熱コイルと流下ノズル下端部は、現時点で加熱コイルと流下ノズルの中心位置がずれており、最小のクリアランスは約3mm程度であることを確認した。

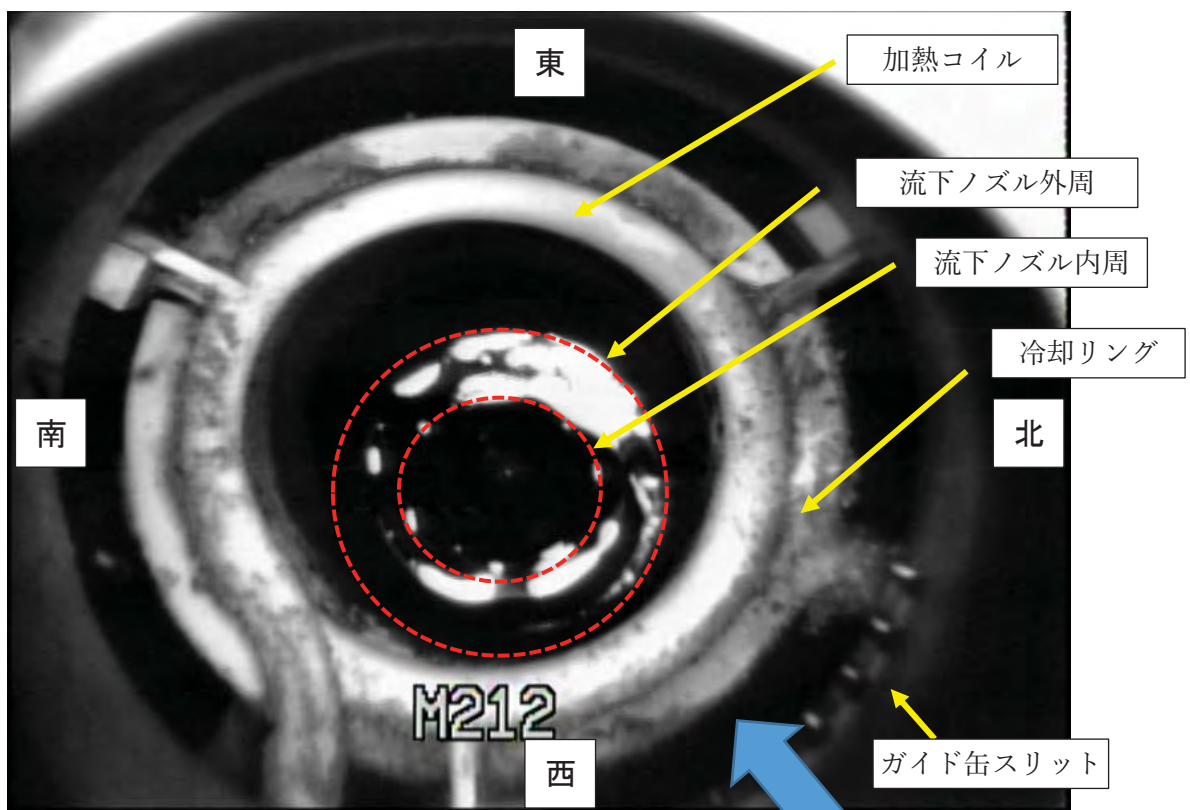
以上



流下ノズル周りの観察方法



流下監視カメラ映像



流下監視カメラ映像位置

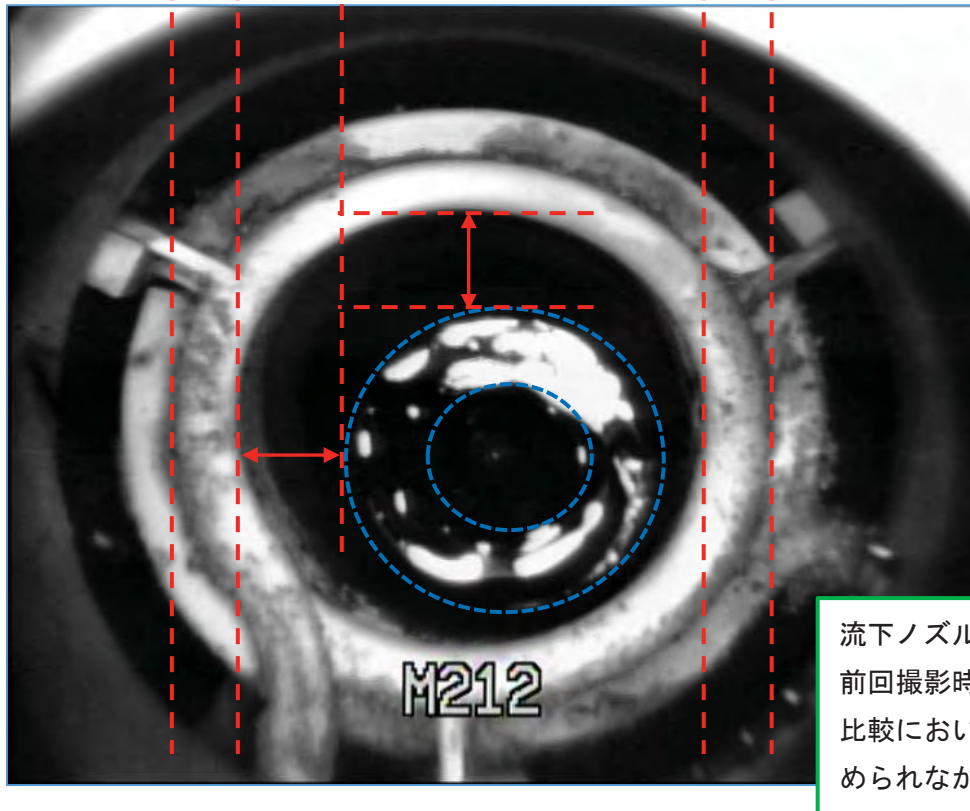
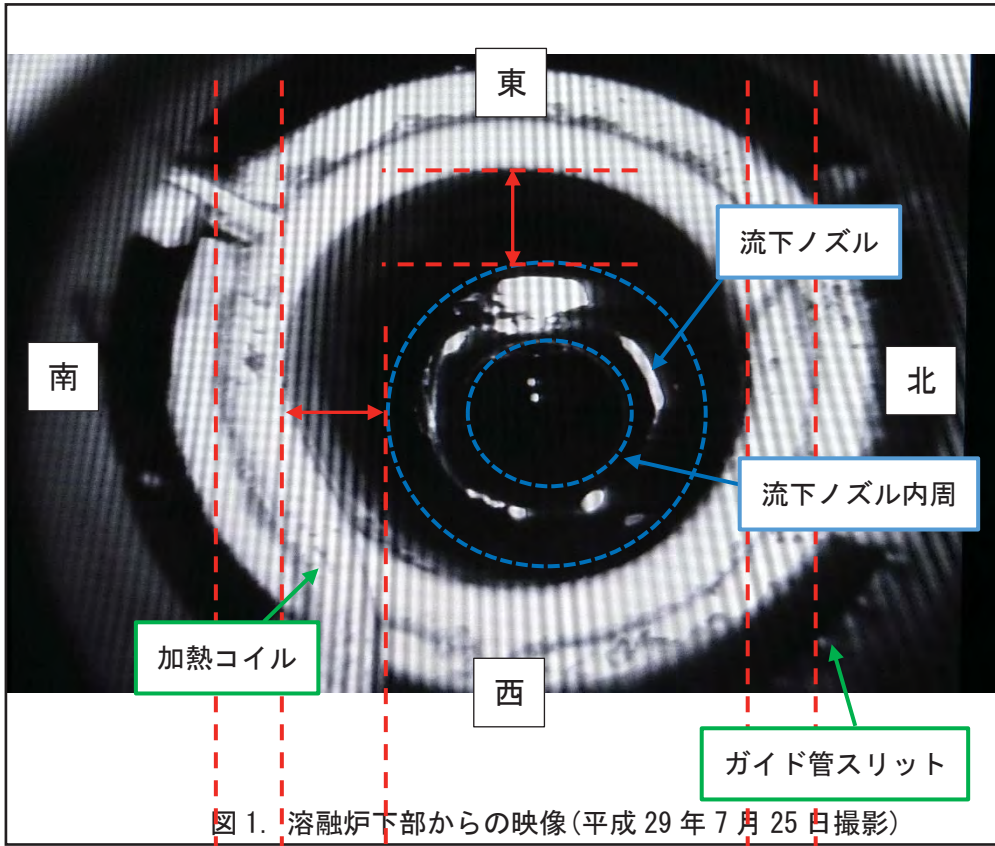
ITV カメラによる観察結果 (令和元年 8 月 1 日撮影)

参考資料.流下ノズル周りの目視点検記録(17-1CP後)

日付：平成29年7月25日、26日

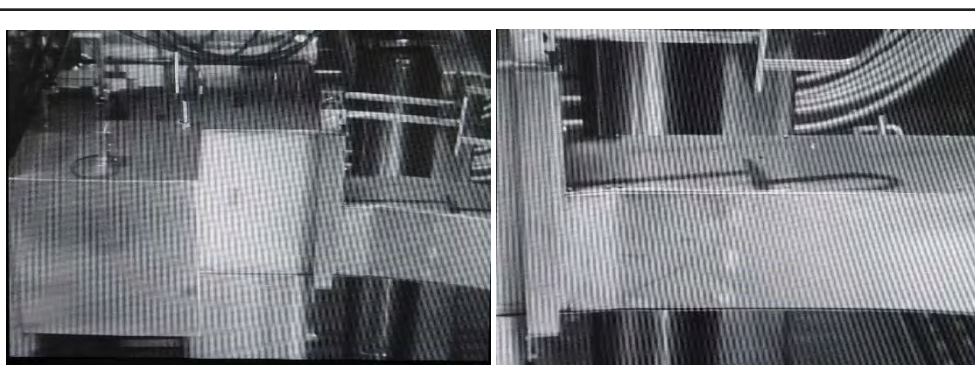
分類	点検の観点	点検方法	判定基準	判定	備考
①加熱コイルと流下ノズルの接触による漏電	1. 流下ノズルに亀裂が生じ、そこから漏れたガラスを介して加熱コイルと流下ノズルが接触	ITVカメラをキャニスタ搬送台車に設置し、流下ノズル直下より観察する。(結合装置が設置された状態で観察する)	加熱コイルと流下ノズルの間に流下ガラスなどの付着物が無いこと	有	添付写真1参照
	2. 加熱コイルと流下ノズルが接触		加熱コイルと流下ノズルが接触していないこと	有	
	3. 高温の流下ガラスが同時に加熱コイルと流下ノズルの両方に接触		加熱コイルと流下ノズルの間に流下ガラスなどの付着物が無いこと	有	
	4.加熱コイルと流下ノズル間に挟まった流下ガラスの破片を介して接触		加熱コイルとガラスガイド管の間に付着物が無いこと	有	
	5. 高温の溶融ガラスが同時に加熱コイルと結合装置の両方に接触		加熱コイルとガラスガイド管の間に付着物が無いこと	有	
②加熱コイルと結合装置の接触による漏電	6. プスバーカバーが変形しプスバーとプスバーカバーが接触	ITVカメラにてプスバーカバーの外観を観察する。	プスバーカバーにプスバーに接するほどの大きな変形が無いこと	有	添付写真2参照
	7. プスバーが変形しプスバーとプスバーカバーが接触		プスバーにプスバーカバーに接するほどの大きな変形が無いこと	有	
	8. プスバーとプスバーカバー間に導電性の異物が付着		プスバーとプスバーカバーが導通する付着物が無いこと	有	
	9. プスバーから水が漏れプスバーとプスバーカバーが接触		プスバー周辺に水漏れの痕跡(しみや変色等)が無いこと	有	
③プスバーとプスバーカバーの接触による漏電	10. サポート部の絶縁部材の絶縁劣化	TRU継手部のプスバーカバーを取り外し、ITVカメラにて観察する。(プスバーの変形、水漏れ、異物等の確認はもっても発生する可能性の高いTRU継手部のみで実施する。)	サポート部の絶縁部材に変色やスパーク痕等が無いこと	有	添付写真3参照
	11. サポート部が変形しプスバーとプスバーカバーが接触		サポート部にプスバーとプスバーカバーが接触するような大きな変形が無いこと	有	
	12. サポート部プスバーから水が漏れプスバーとプスバーカバーが接触		サポート部に水漏れの痕跡(しみや変色等)が無いこと	有	
	13. サポート部に導電性の異物が付着		サポート部とプスバーカバーが導通する付着物が無いこと	有	

添付写真 1 ITV カメラによる結合装置内観察結果

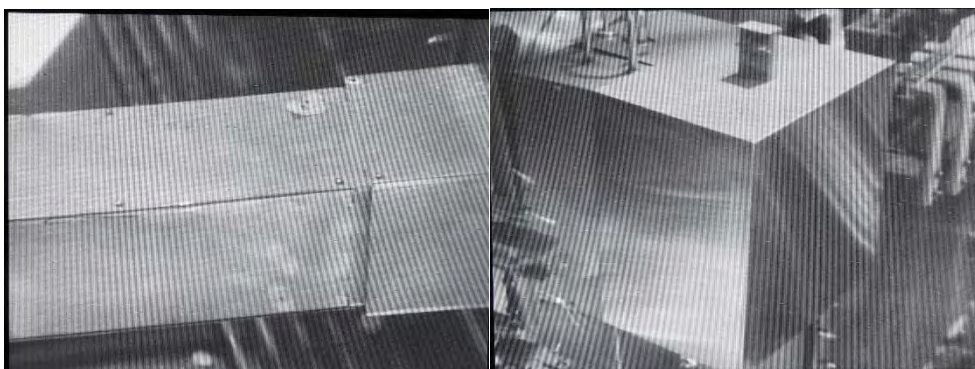


溶融炉下部からの映像 (令和元年 8 月 1 日撮影)

添付写真2 セル内ブスバー及びカバー 観察結果



結合装置側ブスバーカバー



貫通プラグ側ブスバーカバー

図1. ブスバーカバー（平成29年7月26日撮影）



図2. ブスバー結合装置接続部（平成29年7月26日撮影）

添付写真3 セル内ブスバーサポート部 観察結果



図1. 貫通プラグ側サポート部（平成29年7月26日撮影）

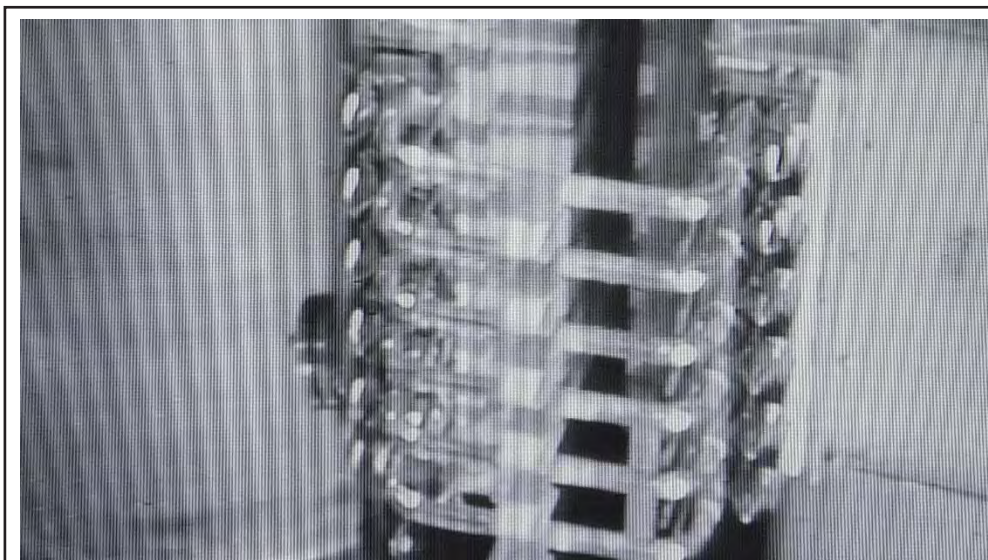


図2. 結合装置側サポート部（平成29年7月26日撮影）

発生事象
 漏電レリーが作動した測定原因
 測定あるいは漏れ電流が発生したと判定される場所1
 測定あるいは漏れ電流が発生したと判定される場所2
 測定あるいは漏れ電流が発生したと判定される場所3
 測定あるいは漏れ電流が発生したと判定される場所4
 測定方法は絶縁抵抗測定
 確認結果
 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)は、○が正しいと判断され、△が正しいと判断され、×が正しいと判断されない。

発生事象	測定あるいは漏れ電流が発生したと判定される場所1	測定あるいは漏れ電流が発生したと判定される場所2	測定あるいは漏れ電流が発生したと判定される場所3	測定あるいは漏れ電流が発生したと判定される場所4	測定方法	確認結果	評価	備考	
①-1-1-4	LP214室内のプラグが脱落し、LP214室内のプラグが脱落して漏電した。	LP214室内のプラグが脱落し、LP214室内のプラグが脱落して漏電した。	LP214室内のプラグが脱落し、LP214室内のプラグが脱落して漏電した。	LP214室内のプラグが脱落し、LP214室内のプラグが脱落して漏電した。	絶縁抵抗測定	【事象発生時】 絶縁抵抗測定 異常なし エアシリンダSD1 ON時 SC1本線~対地間 100MΩ エアシリンダSD2 ON時 SC2本線~対地間 100MΩ エアシリンダSD3 ON時 SC3本線~対地間 100MΩ エアシリンダSD4 ON時 SC4本線~対地間 100MΩ 最終検査日 (7/29~24)	○	△	○
①-1-1-4-1	LP214室内のプラグが脱落し、LP214室内のプラグが脱落して漏電した。	LP214室内のプラグが脱落し、LP214室内のプラグが脱落して漏電した。	LP214室内のプラグが脱落し、LP214室内のプラグが脱落して漏電した。	LP214室内のプラグが脱落し、LP214室内のプラグが脱落して漏電した。	絶縁抵抗測定	【事象発生時】 絶縁抵抗測定 異常なし MG281ハイインピーダンス入口前 > 100MΩ 最終検査日 (7/29~24) イオンコンタクト CL10B-MIT間 0.6MΩ 最終検査日 (7/29~24) 6月に実施した作動試験と同程度であることを確認。	○	×	×
①-1-1-4-2	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	絶縁抵抗測定	【JAEA自主点検】 ①冷却水の配管を辿り、一部は冷却水の導電率とされている10μm厚の樹脂の範囲内であり、絶縁が低下していないことを確認した。 ②冷却水の配管を辿り、絶縁抵抗測定値が低下している箇所を特定し、冷却水の導電率(μS/cm)に対して10μS/cmであり、絶縁抵抗値低下に (参考: 水道水100~200μS/cm)	○	×	△
①-1-1-4-2-1	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	絶縁抵抗測定	【JAEA自主点検】 ①冷却水の配管を辿り、一部は冷却水の導電率とされている10μm厚の樹脂の範囲内であり、絶縁が低下していないことを確認した。 ②冷却水の配管を辿り、絶縁抵抗測定値が低下している箇所を特定し、冷却水の導電率(μS/cm)に対して10μS/cmであり、絶縁抵抗値低下に (参考: 水道水100~200μS/cm)	○	×	△
①-1-1-4-2-2	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	絶縁抵抗測定	【JAEA自主点検】 ①冷却水の配管を辿り、一部は冷却水の導電率とされている10μm厚の樹脂の範囲内であり、絶縁が低下していないことを確認した。 ②冷却水の配管を辿り、絶縁抵抗測定値が低下している箇所を特定し、冷却水の導電率(μS/cm)に対して10μS/cmであり、絶縁抵抗値低下に (参考: 水道水100~200μS/cm)	○	×	△
①-1-1-4-2-3	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	絶縁抵抗測定	【JAEA自主点検】 ①冷却水の配管を辿り、一部は冷却水の導電率とされている10μm厚の樹脂の範囲内であり、絶縁が低下していないことを確認した。 ②冷却水の配管を辿り、絶縁抵抗測定値が低下している箇所を特定し、冷却水の導電率(μS/cm)に対して10μS/cmであり、絶縁抵抗値低下に (参考: 水道水100~200μS/cm)	○	×	△
①-1-1-4-2-4	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	LP214室内から貫通プラグまでの経路を辿って漏電した。	絶縁抵抗測定	【JAEA自主点検】 ①冷却水の配管を辿り、一部は冷却水の導電率とされている10μm厚の樹脂の範囲内であり、絶縁が低下していないことを確認した。 ②冷却水の配管を辿り、絶縁抵抗測定値が低下している箇所を特定し、冷却水の導電率(μS/cm)に対して10μS/cmであり、絶縁抵抗値低下に (参考: 水道水100~200μS/cm)	○	×	△

図 ガラス流下ノズル電源断の要因解析図(全体版) 2/4

詳細(事実として確認されている現象①~③の要因となる可能性の評価)を○か△によってはけがする。○はけがする、△はけがしない。

①漏れ電流の発生
②各相加電時の発生
③漏れ電流がすべて発生している

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

原因結果

事象	要因1	要因2	要因3	要因4	調査・確認方法	調査・確認結果 (検討方針または検討結果)	要因に関する評価結果	対応方法(処置)		
流下ノズル加熱電源系統において、漏れ電流発生により、漏電リレーが作動し、ガラス流下が停止した。	I. 流下ノズル側の要因により、高周波加熱コイルとの距離が近接または接触する。	I. (1)	I. (1)a. ① [製作時の精度] 溶融炉の製作時に流下ノズルの位置が図面寸法に対してずれる。	I. (1)a. ① [単品精度] 流下ノズル単品に變形が生じていた。	製作時の流下ノズル単品の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φ0.04+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	I. (1)a. ① ・変形(偏心)量は、最大に員積もって、1.8mmであり、単独では、要因にならない。			
		I. (1)a. ② [組立精度] 流下ノズルの取付位置が溶融炉に対して、図面からずれている。	I. (1)a. ② [組立精度] 流下ノズル単品に變形が生じていた。	組立時の溶融炉に対する寸法位置記録を調査する。	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、1.7mm	I. (1)a. ② ・変形(偏心)量は、最大でも1.7mmであり、単独では、要因にならない。 [*2参照]			
		I. (2)	I. (2)a. ① [輸送・据付起因] 溶融炉輸送時の流下ノズルの変形、据付時の流下ノズルの位置ズレ	I. (2)a. ① [輸送・据付時] 溶融炉の輸送・据付時に流下ノズルの位置が図面寸法に対してずれる。	I. (2)a. ① [外力による変形] 荷積・輸送・荷降時の衝撃により、流下ノズルの位置がずれる。	組立時の写真からずれを調査する。	・モックアップ試験棟での流下前の真下からの写真では、下部ジャケットコイルと流下ノズルとの位置関係は、ほぼ同芯となっている。[*2参照]	I. (2)a. ① ・変形(偏心)量は、最大でも1.7mmであり、単独では、要因にならない。 [*2]		
		I. (2)b. ① [輸送・据付時 (M/U) の変形] ⇒ 固化セルの変形 溶融炉の輸送・据付時に流下ノズルの位置が図面寸法に対してずれる。	I. (2)b. ① [輸送・据付時 (M/U) の変形] ⇒ 固化セルの変形 溶融炉の輸送・据付時に流下ノズルの位置が図面寸法に対してずれる。	固化セルへの輸送、据付後の寸法記録や写真を調査する。	M/U構への輸送、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での流下前の真下からの写真では、下部ジャケットコイルと流下ノズルとの位置関係は、ほぼ同芯となっている。[*2]	I. (2)b. ① ・変形(偏心)量は、最大でも1.7mmであり、単独では、要因にならない。 [*2]			
		I. (3)	I. (3)a. ① [運転起因] 溶融炉運転時の流下ノズルの位置ズレ、変形	I. (3)a. ① [初回モックアップ試験熱上げ時の変形] 製作直後の初回熱上げ時に流下ノズルが変形し、熱上げ後も変形が残る。	I. (3)a. ① [残留応力] 製作時の残留応力が解放されて、流下ノズルが変形する。	初回熱上げ後の寸法位置記録を調査する。	・モックアップ試験棟での流下後の真下からの写真では、下部ジャケットコイルと流下ノズルとの間には、3~4mm程度の變形(偏心)又はズレがある。 [*3参照]	I. (3)a. ① ・変形(偏心)量は、3~4mm程度であり、単独では、要因にならない。 [*3参照]		
		I. (3)b. ① [モックアップ試験時の変形] 底部冷却機構の冷却空気ファンが試験の影響で流下ノズルが変形する。	I. (3)b. ① [熱応力変形] 温度分布による熱応力により、塑性ひずみが発生し、変形が残る。	試験後の寸法記録や写真を調査する。	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での流下後の真下からの写真では、下部ジャケットコイルと流下ノズルとの間には、3~4mm程度の變形(偏心)又はズレがある。 [*3]	I. (3)b. ① ・変形(偏心)量は、3~4mm程度であり、単独では、要因にならない。 [*3]			
		I. (3)c. ① [構造に起因する変形] 流下ノズルが対称構造でないことで変形が生じる。	I. (3)c. ① [剛性の相違] インナーケーシングの剛性の相違により、変形が生じる。	[*1] ・熱膨張(熱応力)解析により、流下ノズルの温度分布を調査する。	[*1] ・熱膨張(熱応力)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、車構造をモデル化して、熱膨張時の変形を把握する必要がある。	I. (3)c. ① ・変形(偏心)量は、最大でも1.7mmであり、単独では、要因にならない。 [*2参照]			
		I. (3)c. ② [不均一温度分布] 流下ノズルの非対称な温度分布により、変形が生じる。	I. (3)c. ② [不均一温度分布] 流下ノズルの非対称な温度分布により、変形が生じる。	熱膨張(熱応力)解析により、流下ノズルの温度分布を調査する。	熱膨張(熱応力)解析により、流下ノズルの温度分布を調査する。	・流下ノズルが傾いた場合の温度分布を推定し、その変形程度を確認する必要がある。	I. (3)c. ② ・変形(偏心)量は、最大でも1.7mmであり、単独では、要因にならない。 [*2参照]			
							(調査中)		I. (2)b. ①	
									I. (3)a. ①	
									I. (3)b. ①	
									I. (3)c. ①	
							I. (3)c. ②			

<p>I. (3)d. [拘束に起因する変形] 流下ノズル・インナーケーシングが拘束されて位置がずれる。</p>	<p>I. (3)d. ① [耐火物による拘束] インナーケーシングが耐火物との摩擦により拘束されずれる。</p>	<p>・図面から構造を調査する。 ・流下後の写真からすき間を調査する。</p>	<p>・Oリング、イボボード上に流下ノズル、インナーケーシングは乗っており、その上に、底部電極、MRT-70Kレンガが乗っている。</p>	<p>I. (3)d. ① △ ・摩擦力が生じるため、要因からは除外できない。</p>	
<p>I. (3)e. [経年変化による変形] 高周波コイル表面の汚れ(ふく射熱)の不均一性により、変形する。</p>	<p>I. (3)e. ① [不均一温度分布] 流下ノズルの非対称な温度分布により、変形が生じる。</p>	<p>・高周波コイル表面の汚れの分布状態を調査する。 ・[*1]の解析検討</p>	<p>・空冷配管(0°)と温度計ウエル(270°)と流下ノズル/インナーケーシングは取り合っている。</p>	<p>I. (3)e. ① △ ・取合部が対称になっていないため、要因からは除外できない。</p>	
<p>I. (3)f. [進行性の変形] 過大な熱応力や、クリープ効果により、徐々に変形が進行する。</p>	<p>I. (3)f. ① [繰り返し熱応力] 熱応力ラフエットにより変形が進行する。</p>	<p>・繰り返し非弾性解析(弾塑性クリープ)により、進行性の変形であるかどうかを調査する。 ・流下時写真より変形を調査する。</p>	<p>・繰り返し非弾性解析が必要であるが、弾塑性ひずみ式、クリープひずみ式が必要となる。 ・最低、3サイクルの解析結果から繰り返しによる到達変形を予測することが必要である。</p>	<p>I. (3)f. ① I. (3)f. ②</p>	
<p>II. (1) [製作起因] 結合装置製作時の高周波コイルの位置ズレ</p>	<p>II. (1)a. ① [製作精度] 高周波コイルの結合装置への取付位置がずれた。</p>	<p>・高周波コイルの取付時の寸法検査記録を調査する。</p>	<p>II. (1)a. ① (調査中)</p>		
<p>II. (2) [輸送・据付起因] 結合装置輸送時の高周波コイルの変形、据付時の高周波コイルの位置ズレ</p>	<p>II. (2)a. ① [外力による変形] 荷積・輸送・荷降時の衝撃により高周波コイルの位置がずれる。</p>	<p>・高周波加熱コイルの構造を調査する。</p>	<p>・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構造ではない。</p>	<p>II. (2)a. ① × ・位置がズれる構造ではないことから要因とは考えられない。</p>	
<p>II. (3) [運転起因] 溶融炉運転時の高周波コイルの位置ズレ、変形</p>	<p>II. (3)a. ① [入熱による変形] 流下ノズルからの入熱により、不均一温度分布変形する。</p>	<p>・流下ノズルからの不均一人熱を仮定して、高周波コイルの温度分布を調査する。</p>	<p>・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。</p>	<p>II. (3)a. ① × 変形を生じさせるほどの不均一な温度分布は生じず、要因とは考えられない。</p>	

II.
高周波コイル側の要因により、流下ノズルとの距離が近接または接触する。

流下ノズルの偏心に係る熱膨張変位の評価

令和元年 8 月 7 日

ガラス固化処理課

1. 熱伝導と熱膨張解析

流下ノズルの変位について、まず熱伝導解析により流下ノズル及びインナーケーシングの温度分布を求め、得られた温度分布を基に熱膨張解析（静解析）により評価した。

2. 解析結果

流下ノズル上部熱電対 (T10. 11) 及び下部熱電対 (T10. 12) の実測値に従い、流下ノズル上部を 800 °C、下部を 650 °C に設定し熱伝導解析及び熱膨張解析を実施した。

流下ノズルは加熱コイル中心部から熱電対ウェルの方向に偏芯する結果が得られた。

流下ノズルの熱電対ウェルの方向への変位量は 7.86 mm であり、流下ノズル全体の z 軸方向への変位は流下ノズル先端で 14.88 mm、流下ノズルのみの伸びは 2.77 mm であった。

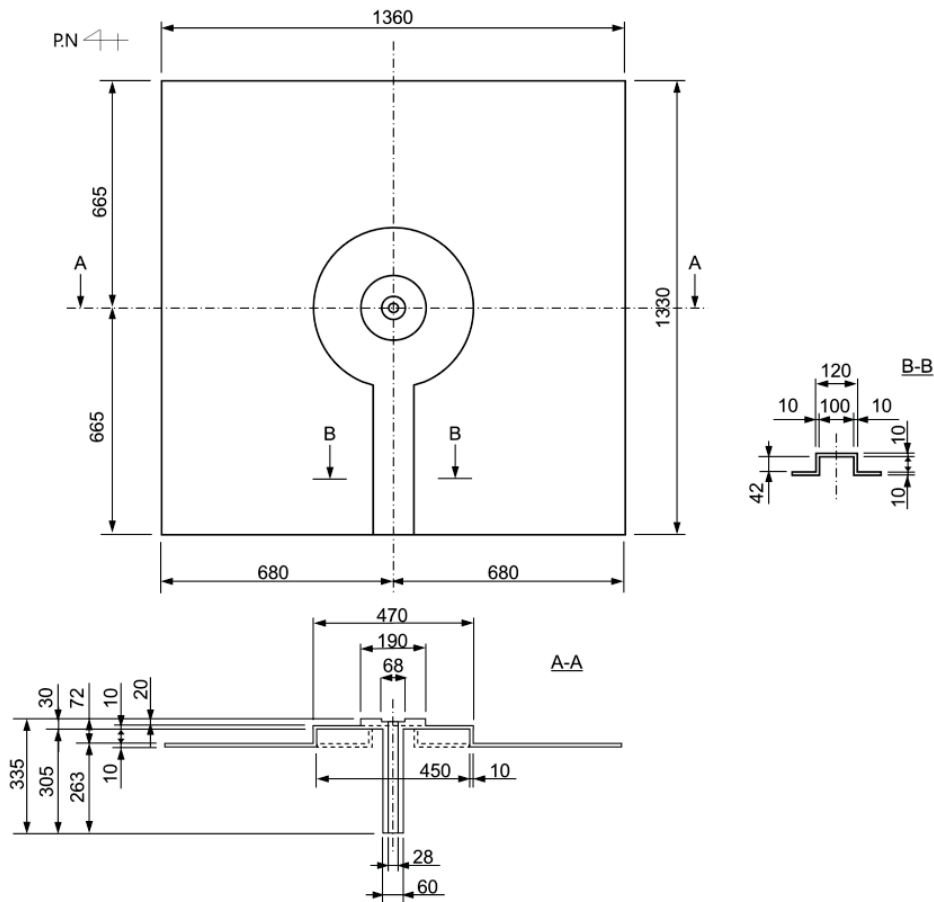


図-添3-1 流下ノズル下部モデル形状(mm)

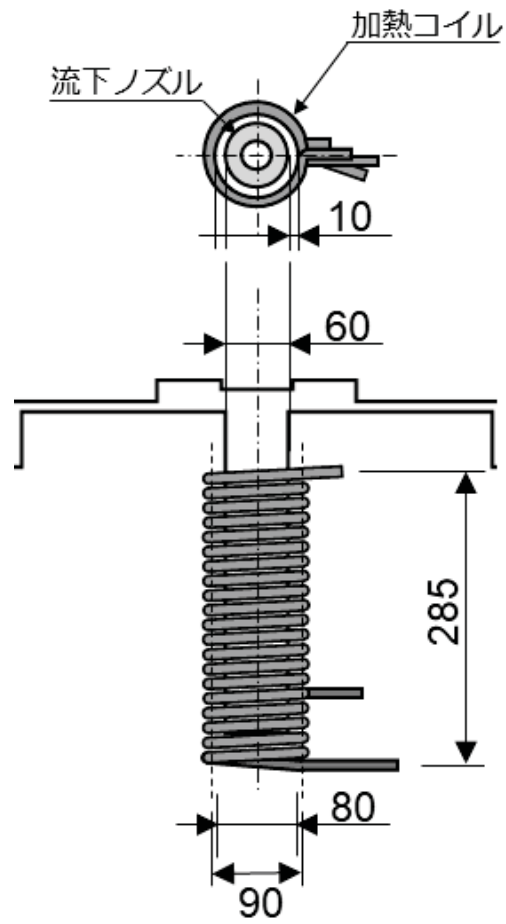


図-添 3-2 加熱コイル概略図(mm)

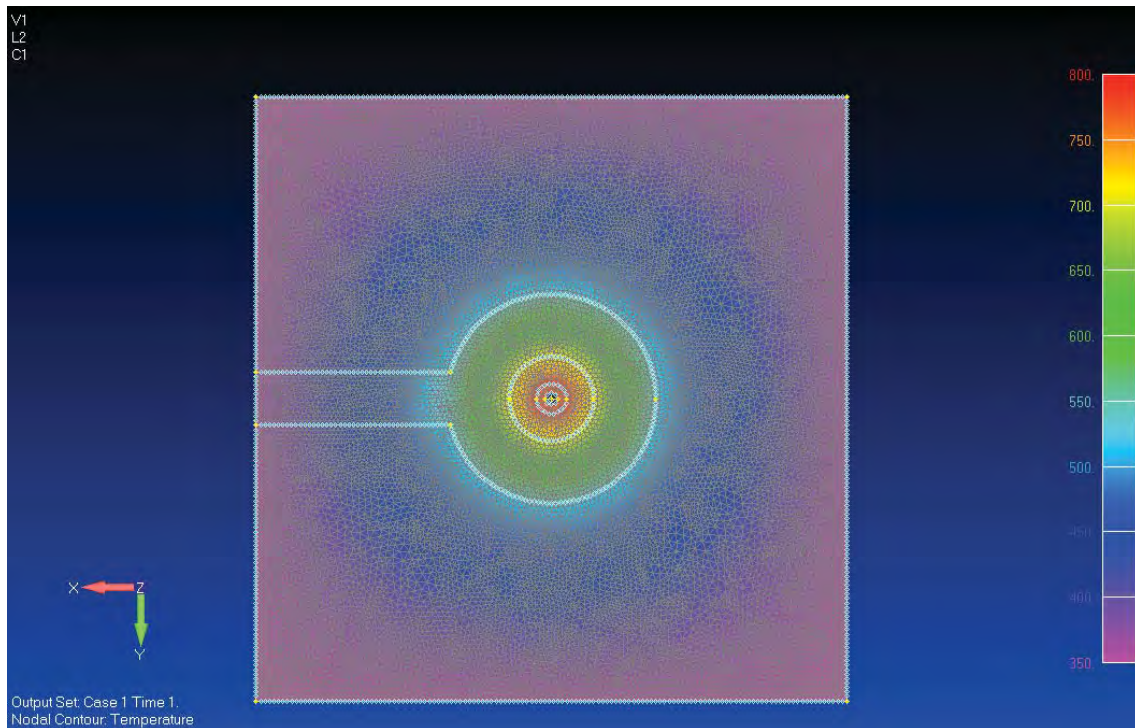


図-添3-3 流下ノズル下部の温度分布(上面図)

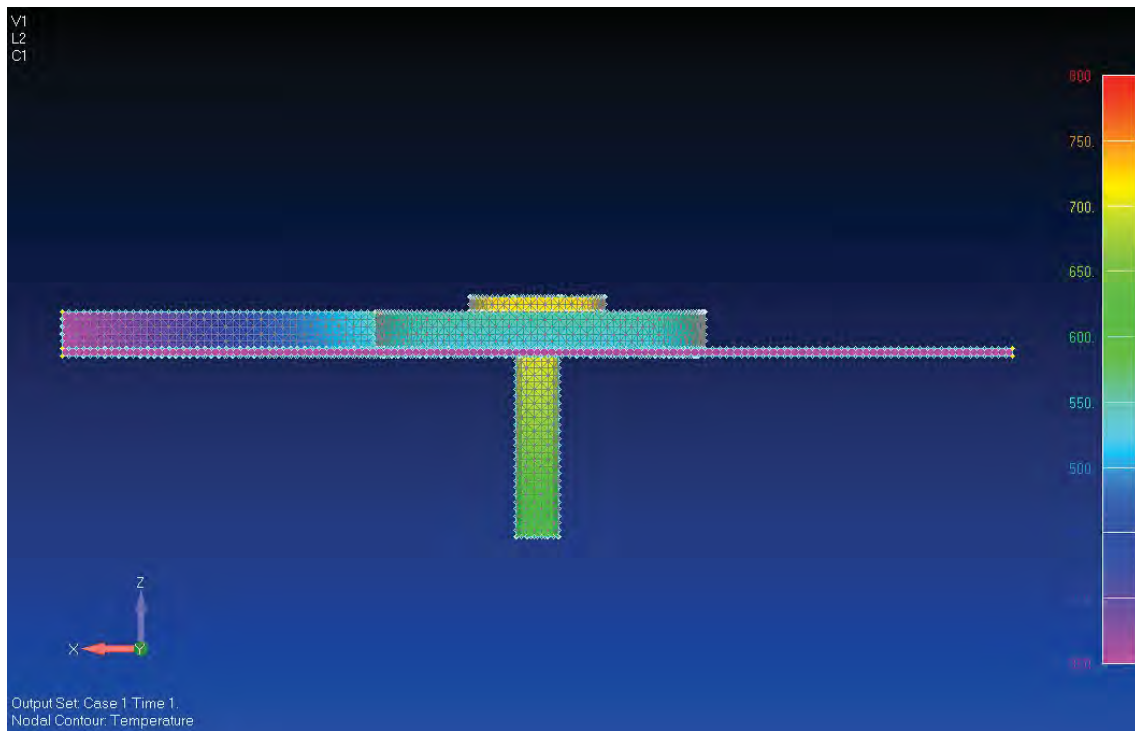


図-添3-4 流下ノズル下部の温度分布(側面図)

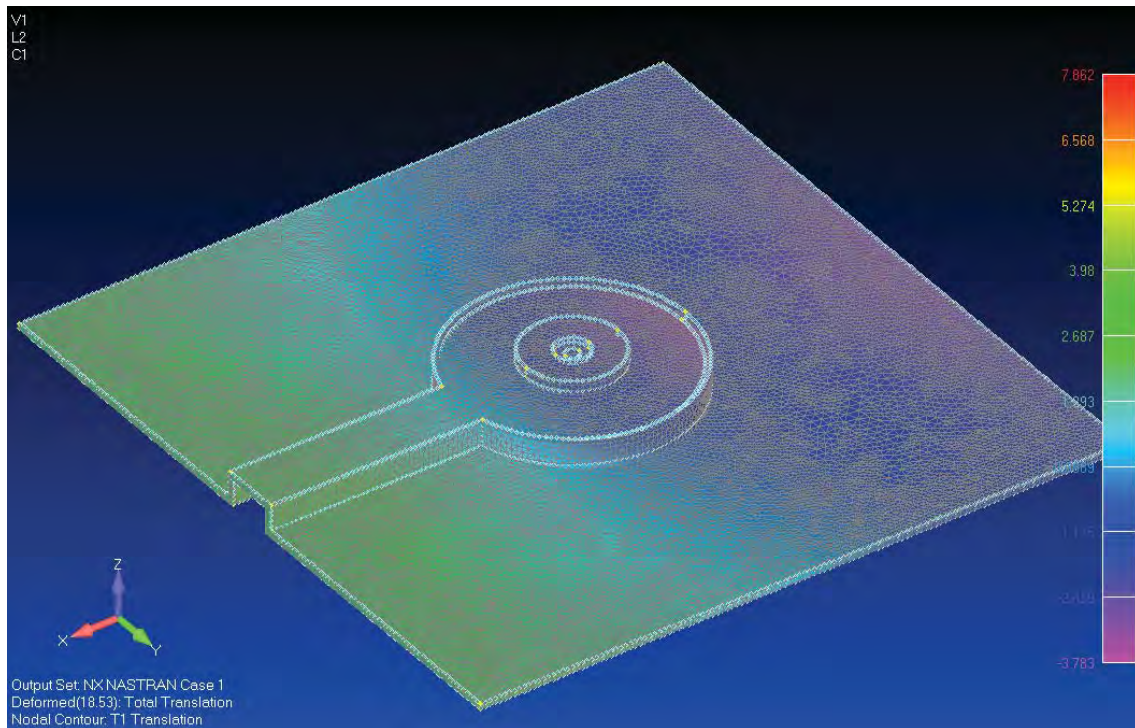


図-添3-5 流下ノズルの熱膨張解析結果(俯瞰図, x 軸方向変位量)

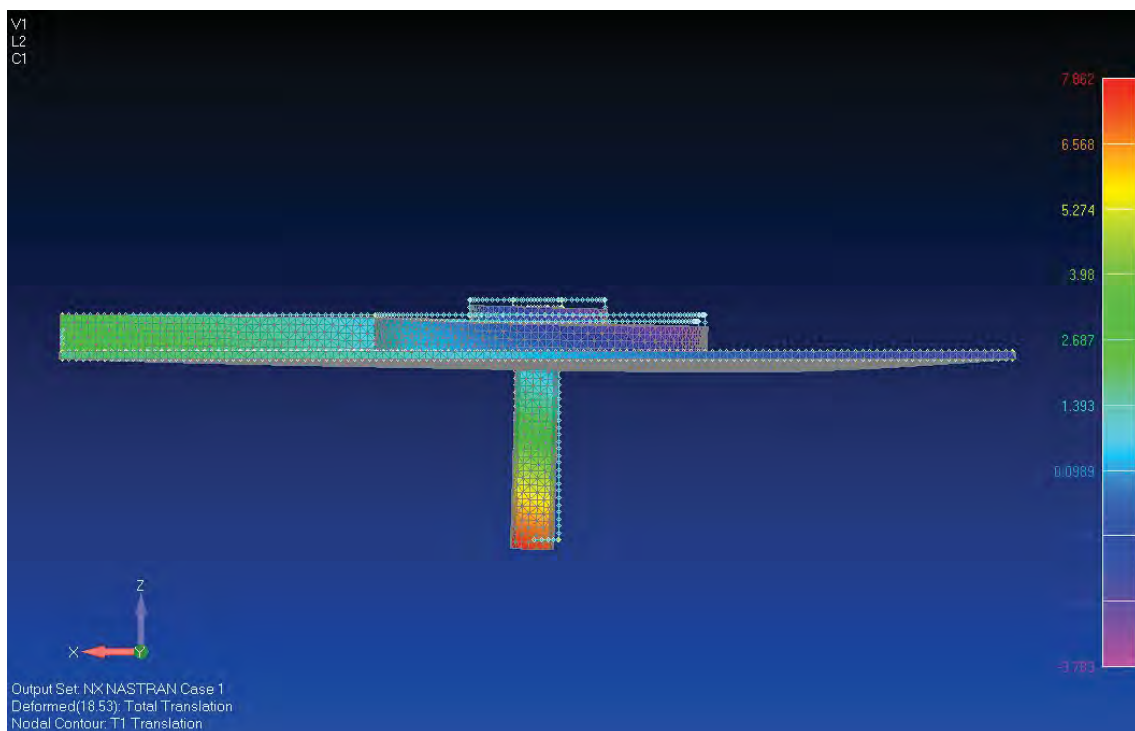


図-添3-6 流下ノズルの熱膨張解析結果(側面図, x 軸方向変位量)