

高浜発電所 4号機 原子炉自動停止について (原因調査の状況)

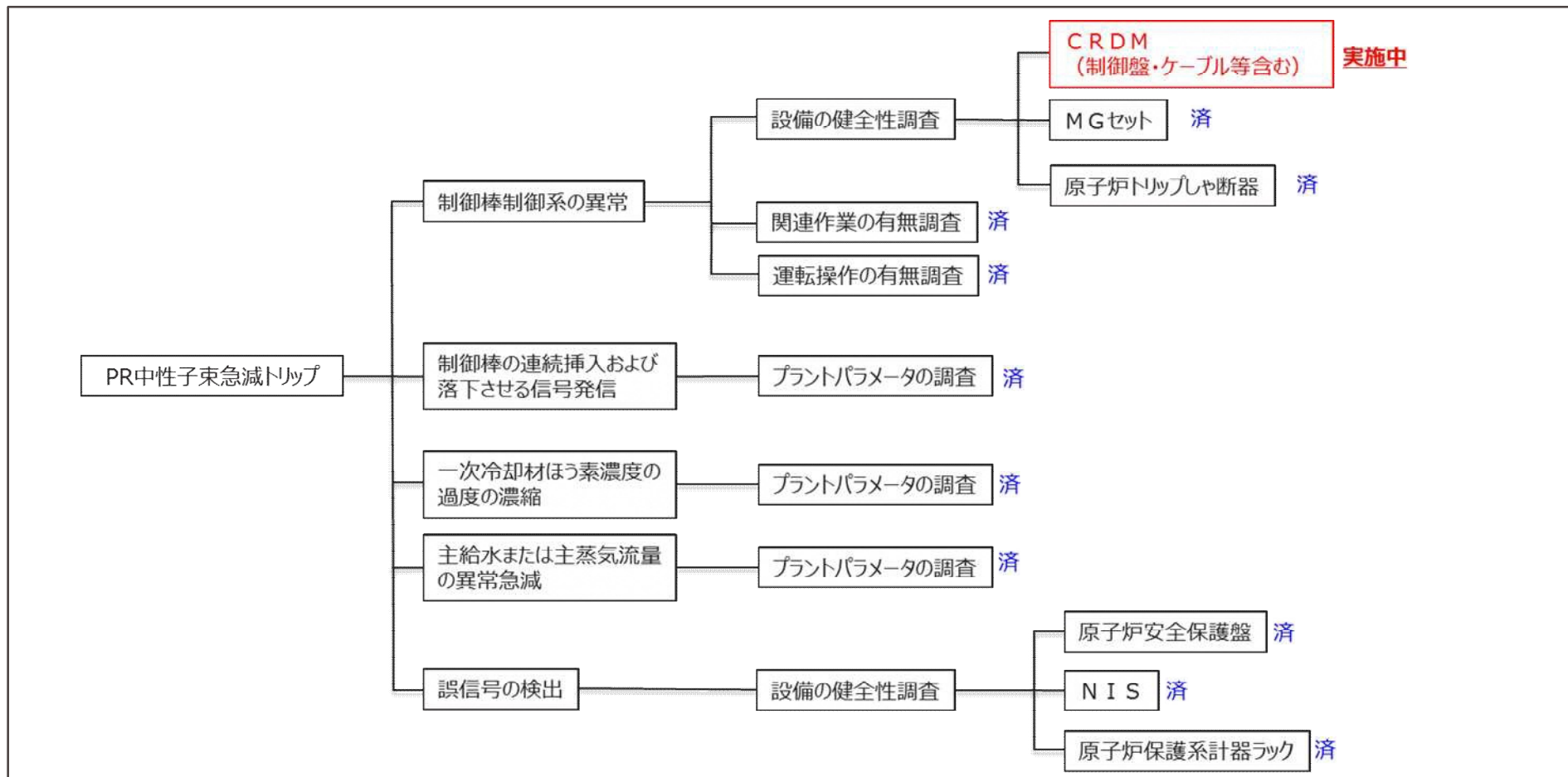
2023年2月27日



：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

	説明項目	ページ番号
1	原因調査	2
2	制御棒部分挿入事象の原因調査	2 2
3	これまでの調査結果のまとめ	2 5

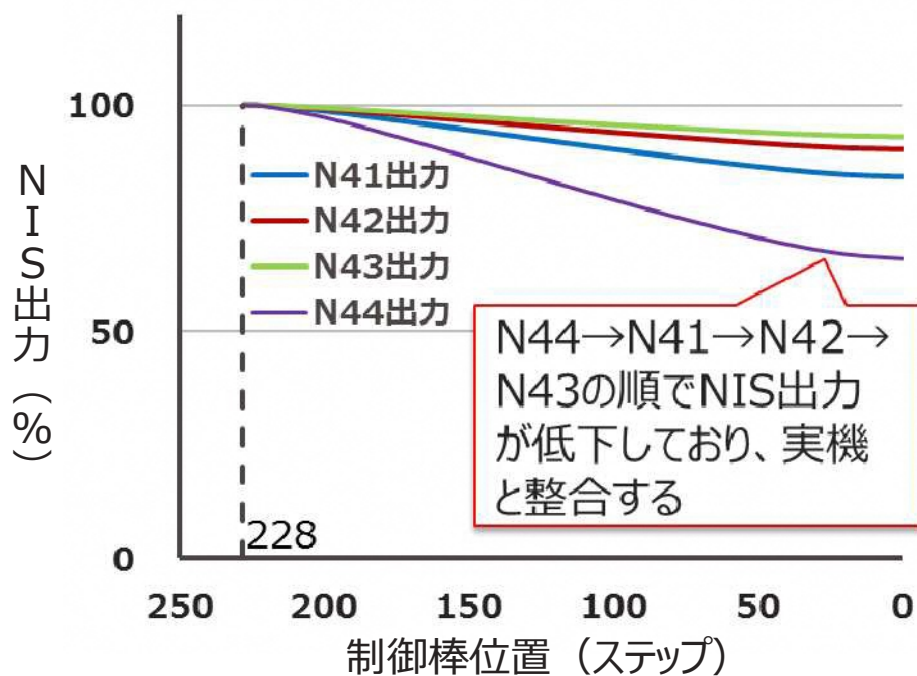
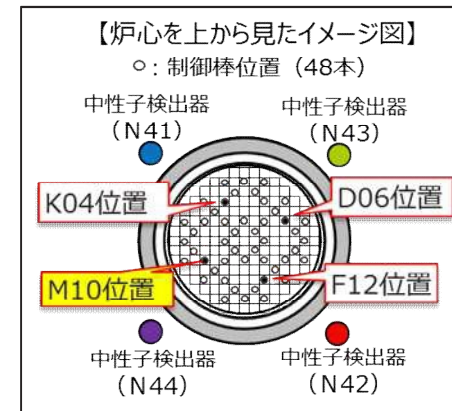
- 1月30日に発生した原子炉自動停止について調査を行ったところ、制御棒制御系（制御盤・ケーブル等含む）に関連する部分以外については異常は認められなかった。
（機械系、N I S 拳動解析結果については本日詳細ご説明）
- 制御棒制御系（制御盤・ケーブル等含む）については、引き続き、現地および工場での詳細調査を継続する。
- また、調査の過程において発生した制御棒 2 本の部分挿入事象（2月5日、2月7日）についても調査を実施する。



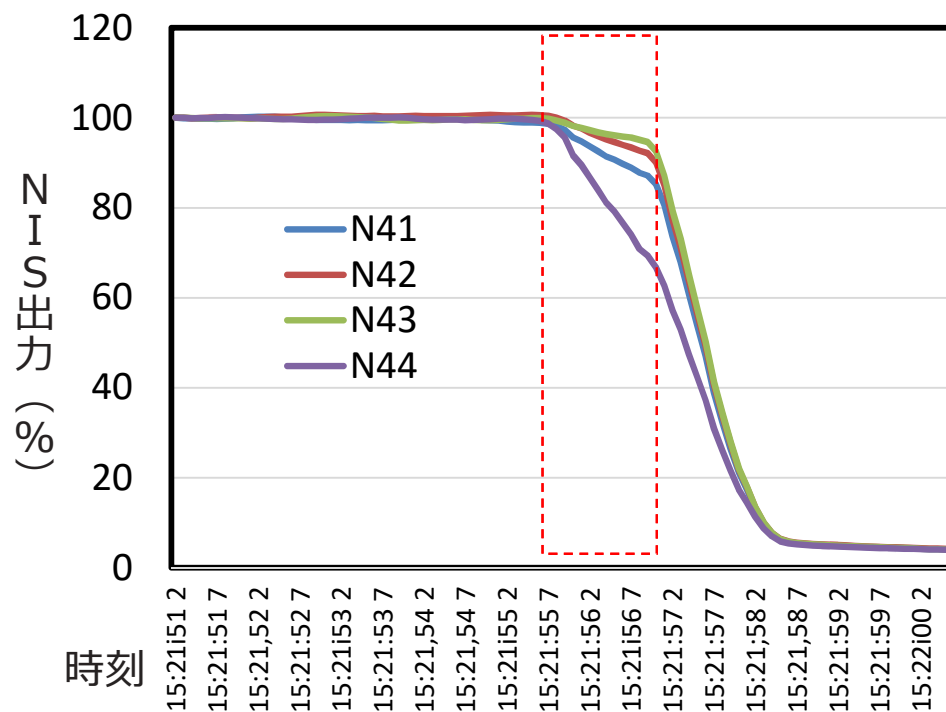
➤ 原子炉が自動停止した際に落下した制御棒を特定するため、2 B D パワーキャビネット（以下、2 B D 盤）で制御される、制御バンク B グループ 2 の 4 本を対象に、単独または複数の組合せで炉心に数十ステップずつ挿入させた場合の挙動を解析し、実機の N I S 出力トレンドとの比較を行った。

【M 1 0 位置の制御棒を単独で挿入した場合】

M 1 0 位置の制御棒を単独で挿入した場合、実機と同様に N 4 4 → N 4 1 → N 4 2 → N 4 3 の順で N I S 出力が低下し、実機の N I S 出力トレンドと同様の挙動であることを確認した。



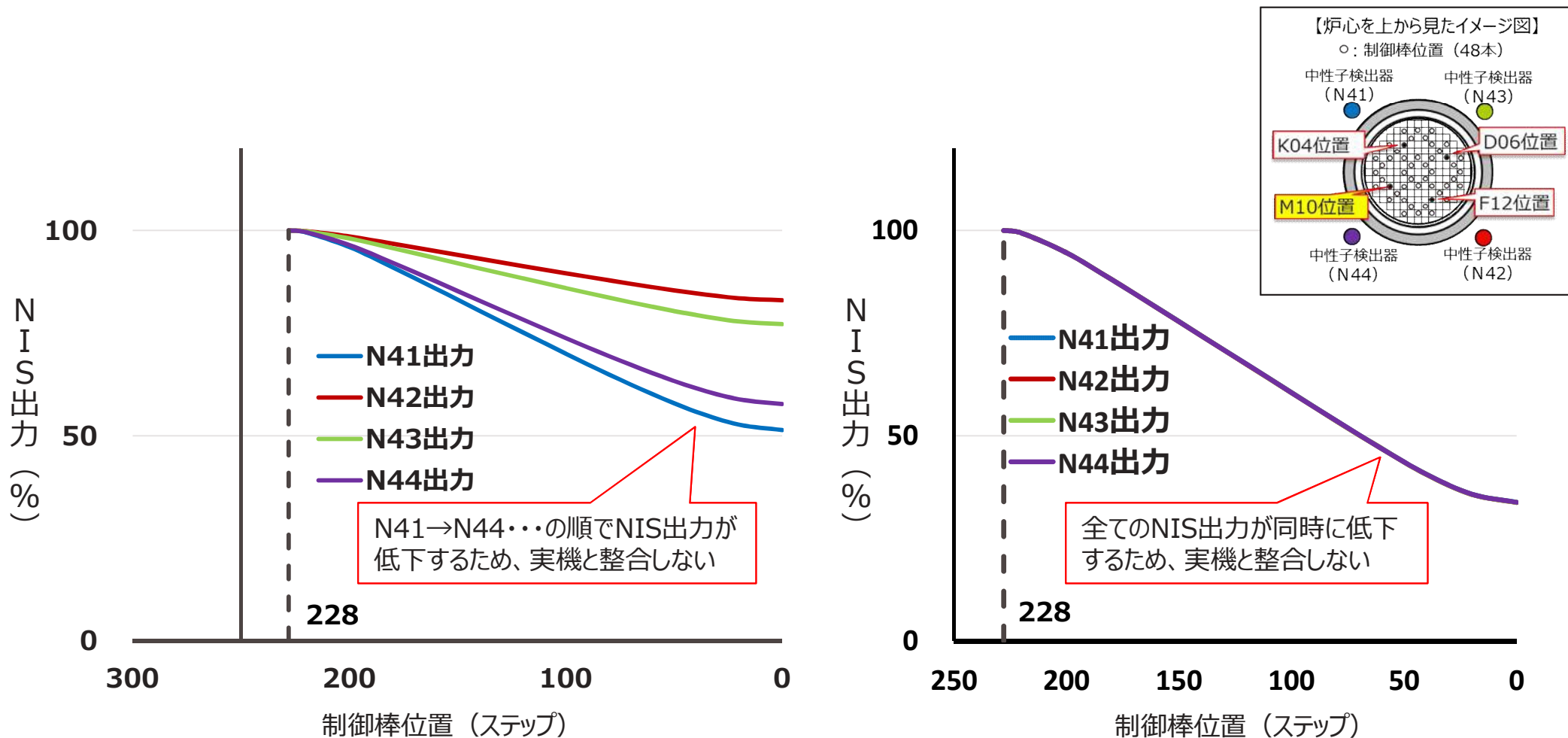
1本 (M 1 0 位置) 挿入の N I S 出力



実機 N I S 出力トレンド

【2本同時挿入および4本同時挿入の場合】

M10と同じ制御バンクBグループ2の制御棒を、2本同時に挿入および4本同時に挿入した場合の解析を行った結果、実機のNIS出力トレンドと挙動が異なることを確認した。

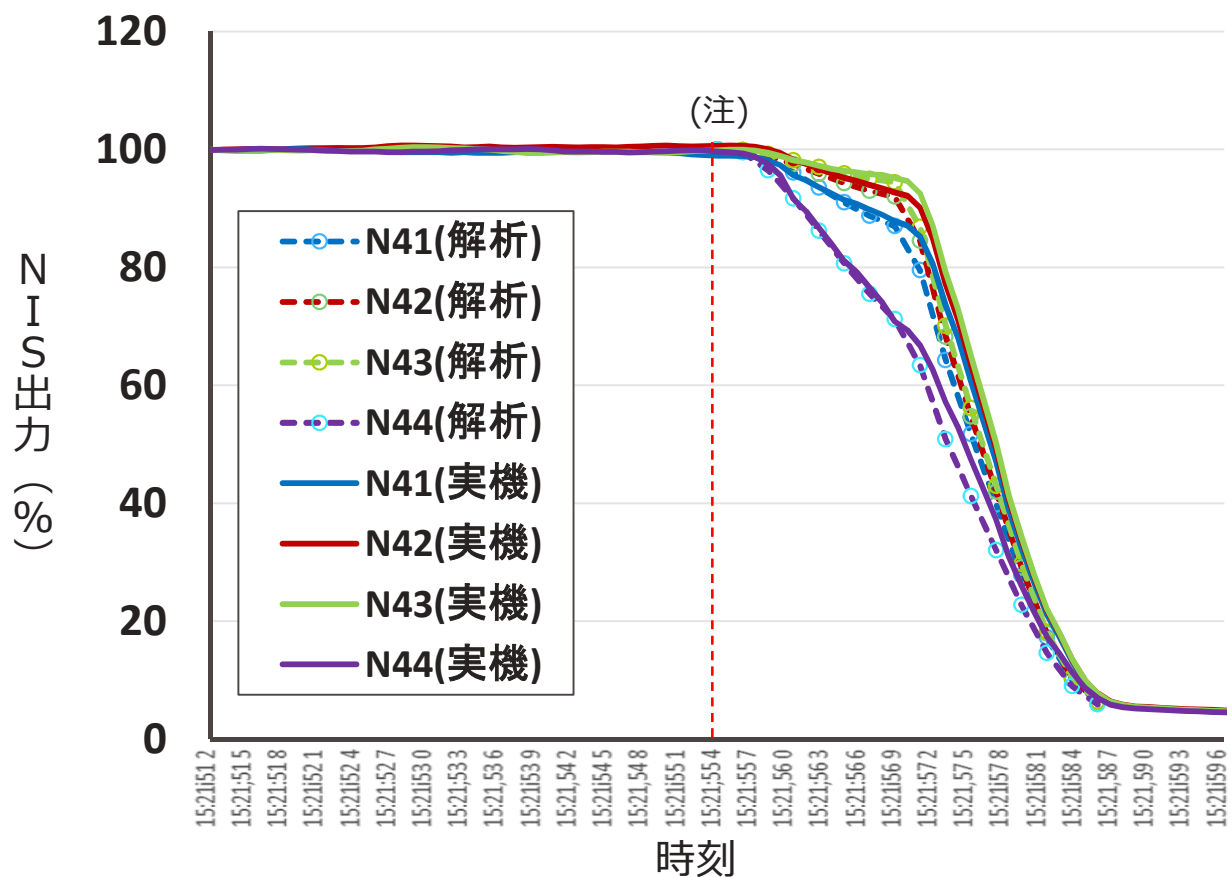


2本（M10位置とK04位置）
同時挿入のNIS出力

4本（M10, K04, D06, F12位置）
同時挿入のNIS出力

- M 1 0 位置の制御棒が実機と同様の時間軸で落下した想定で解析（時刻歴解析）を行った結果、実機のN I S出力トレンドとよく一致しており、M 1 0 位置の制御棒が挿入されたと推定される。

⇒以上のN I S 挙動解析の結果から、M 1 0 位置の制御棒一本が落下したことで原子炉自動停止に至ったものと推定される。



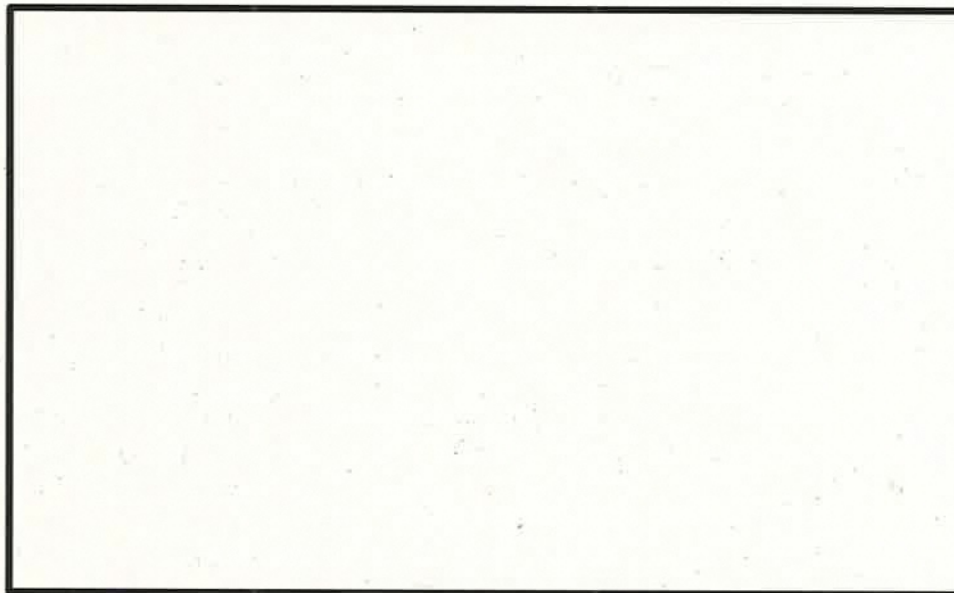
(注) 解析では、時刻 [15:21;55 4] でM 1 0 の挿入開始が生じたものとしている。

1. 原因調査（CRDM駆動機構の調査（1／2））

- 実機動作確認等を実施した結果、CRDM駆動機構の機械的要因により今回の事象が発生する可能性はないことを確認した。

【今回の原因調査として実施】

- 実機動作確認（ステッピング試験（2月10日実施））
0～228STEPの引抜／挿入操作を行い、CRDMコイル電流波形および加速度信号を採取
⇒CRDMの動作に異常はなく、コイル電流波形および加速度信号も正常であることを確認した。
- 再現性確認試験（1月31日～2月2日実施）
SGラッチのみのシングルホールド状態を再現し、制御棒駆動軸が保持されることを確認（10分×6回）
⇒制御棒駆動軸は保持され、同様の事象は再現せず。



ステッピング試験
引抜操作の代表波形（M10：227⇒228）

【運転中や定期検査時の健全性確認】

- 運転中や定期検査においても、CRDMの動作性に異常がないことを確認している。
 - ✓ ステッピング試験（定期検査毎（至近実績：2022年10月18日実施））
0～228STEPの引抜／挿入操作を行い、CRDMの動作性に異常がないことを確認した。
- 制御棒落下試験（定期検査毎（至近実績：2022年10月21日実施））
 - ✓ 228STEP位置より2.5秒以内に制御棒が落下することを確認した。
- 制御棒作動試験（1回／月（至近実績：2023年1月17日実施））
 - ✓ 運転中の制御棒位置より挿入／引抜操作を行い、CRDMの動作性に異常がないことを確認した。



：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

- 制御棒の保持状態に影響を及ぼす可能性がある部位（ラッチアセンブリ、駆動軸、コイルアセンブリ）についても、製造時記録および経年劣化評価結果を確認し、駆動機構に問題がないことを確認した。

● 製造時記録

材料や寸法、作動試験等に問題のないことを確認した。

（参考：取替実績）

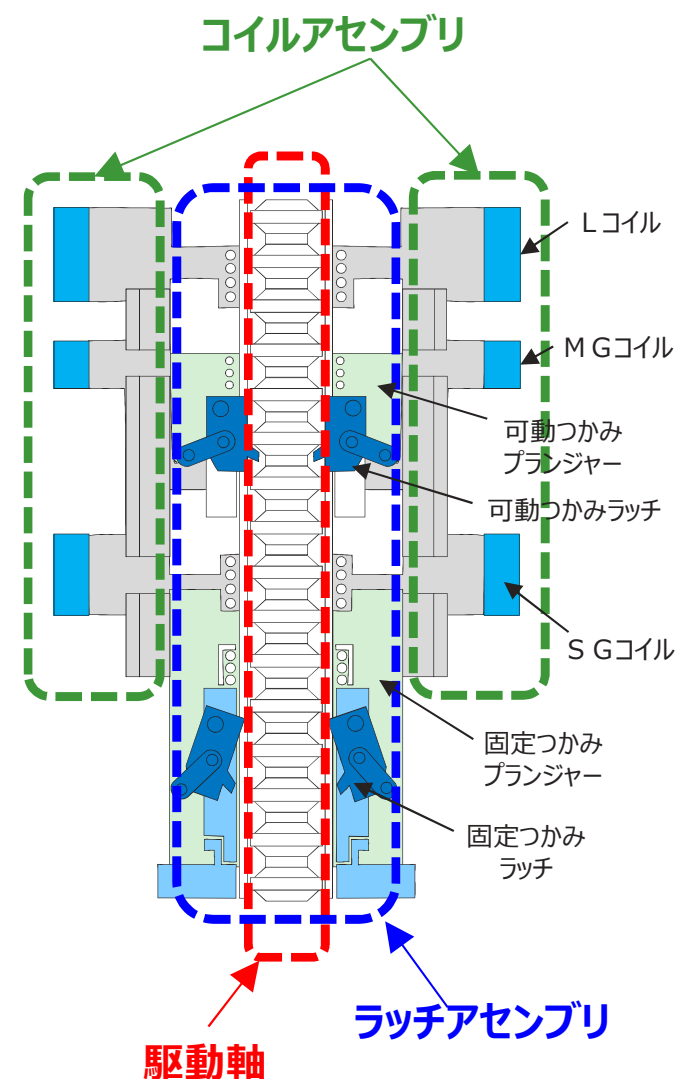
- ✓ ラッチアセンブリ：2007年（原子炉容器上蓋取替に伴う取替）
- ✓ 駆動軸：取替実績なし
- ✓ コイルアセンブリ：取替実績なし

● 経年劣化評価

供用中に想定される経年劣化事象について、これまでおよび今後の使用に対する健全性に問題ないことを確認した。

（PLM評価）

- ✓ ラッチ機構プランジャー摺動部
 - ✓ ラッチアームおよび駆動軸の接触部の摩耗
- ⇒ いずれも、実機取替品（高浜1号機）でのサンプリング調査結果を踏まえ、想定した動作回数での摩耗量が、許容摩耗量と比較して十分小さいことを確認。



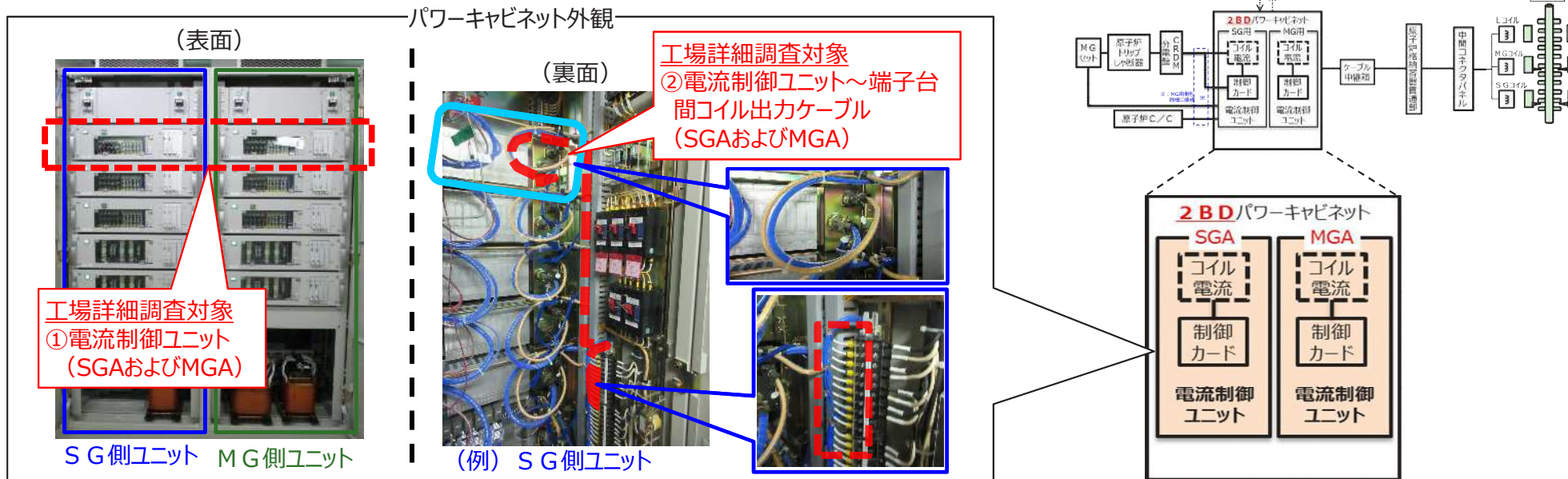
- 前回面談（2月14日）でご説明した内容以降（2月10日（金）以降）、2BD盤内の電流制御ユニット（SGAおよびMGA）を予備品に取り替えた上で、現地およびメーカ工場にて詳細調査を実施した。
- 現地調査における詳細調査中に、CRDM重故障警報が再発したため、定電圧発生器を用い各ケーブル（芯線）およびコイルへ通電した上で電流変化を連続監視し、2BD盤～コイル側のケーブル・コネクタ部の異常有無を調査した。

<時系列>

- 2月10日（金）
 - ✓ 2BD盤内の電流制御ユニット（MGA／SGA）を予備品へ取替
 - ✓ 取外した電流制御ユニットを工場に搬出
- 2月11日（土）～18日（土）
 - <工場> メーカ工場にて電流制御ユニット（MGA／SGA）各部詳細調査
- 2月11日（土）
 - <現地> 予備品の電流制御ユニット他を装着し、工場詳細調査対象以外の範囲について調査開始（各部を接続した状態で電流値を連続確認、他電流制御ユニットとの比較検証）
- 2月12日（日）
 - D6制御棒の電流変動（「CRDM重故障」警報の再発）を確認**
- 2月13日（月）～24日（金）
 - CRDM重故障警報の再発を踏まえ、定電圧発生器を用い各ケーブル（芯線）およびコイルへ通電した上で電流変化を連続監視し、2BD盤～コイル間の異常有無を調査
 - D6・M10・K4制御棒において電流変動を確認

➤ 2 B D 盤内の以下の部位について、メーカ工場詳細調査を実施した結果、全ての項目において異常はなかった。

- ① 電流制御ユニット（SGAおよびMGA）
- ② 電流制御ユニット～端子台間コイル出力ケーブル（SGAおよびMGA）

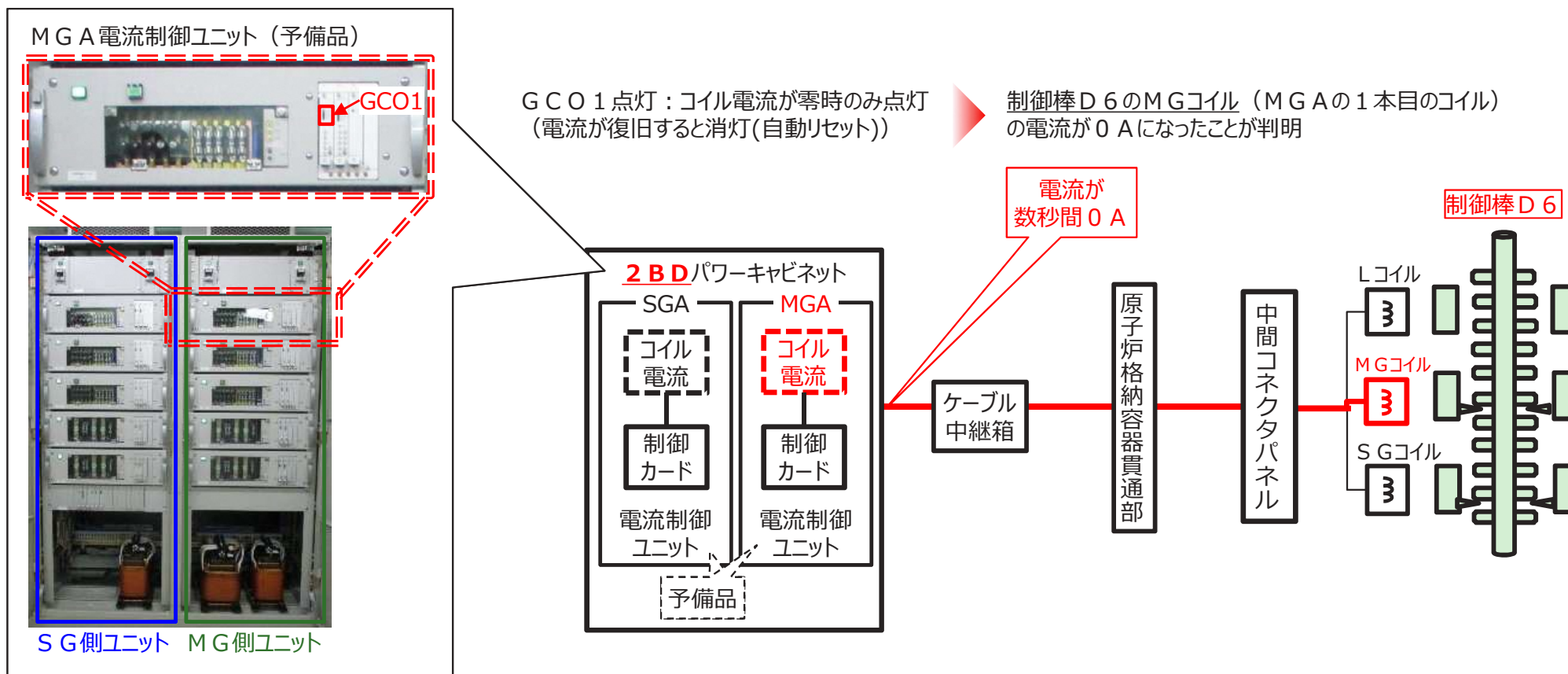


【主要な調査項目】

	部位	項目	内容	結果	
				SGA	MGA
①電流制御ユニット	電流制御ユニット (全体)	外観検査	外観の破損、へこみ等の有無を確認	異常なし	異常なし
		コイル電流測定	模擬コイルを接続し、適切なコイル電流が流れることを確認	異常なし	異常なし
		コイル電流強制ホールド機能確認	強制ホールド機能の異常の有無を確認	異常なし	異常なし
	電流制御素子 (I G B T)	機能確認	出力電圧を測定し、判定基準内であることを確認	異常なし	異常なし
	ホールCT	電圧測定	出力電圧を測定し、判定基準内であることを確認	異常なし	異常なし
	カード	機能試験	カードの機能試験を行い、異常のないことを確認	異常なし	異常なし
	コネクタ・カード接柱	電圧測定	タッピングを実施し、出力電圧の異常の有無を確認	異常なし	異常なし
②コイル出力ケーブル	コネクタピン導通測定	各ピン間の導通がないことを確認	異常なし	異常なし	
	コネクタピン触手確認	触手時の抵抗値に有意な変動がないことを確認	異常なし	異常なし	

➤ D6制御棒の電流変動の再発状況

- メーカー工場詳細調査対象以外の範囲について、「CRDM重故障」警報の原因調査のために、2BD盤に予備品の電流制御ユニットを装着し、コイルの電流値等について計測器を用いて連続監視を行っていたところ、2月12日08:51に「CRDM重故障」警報が再発
- 直ちに現場確認を実施したところ、2BD盤で「重故障」表示灯が点灯しており、その盤内を確認すると、予備品を使用しているMGA電流制御ユニットにてD6制御棒の異常を示す「GCO1」の点灯を確認 (その後、数秒後に消灯)
- 計測された電流波形データを確認したところ、2月12日08:51および09:02に、D6制御棒のMGコイル電流の変動が見られ、数秒間0Aとなっていることを確認



➤ 計測された電流波形データ (D6制御棒のMGコイル電流)

- ✓ 2月12日08:51に計測された電流制御ユニットのコイル電流 (電圧に変換) の計測波形は下図のとおりであった。
- ✓ 電流制御ユニット上流側の電源電圧含め、計測していたデータで異常な変動があったのは、D6制御棒のMGコイル電流のみであった。

SGA電流制御ユニット

- SG電流波形(D6制御棒)
- SG電流波形(F12制御棒)
- SG電流波形(M10制御棒)
- SG電流波形(K4制御棒)

SGC電流制御ユニット

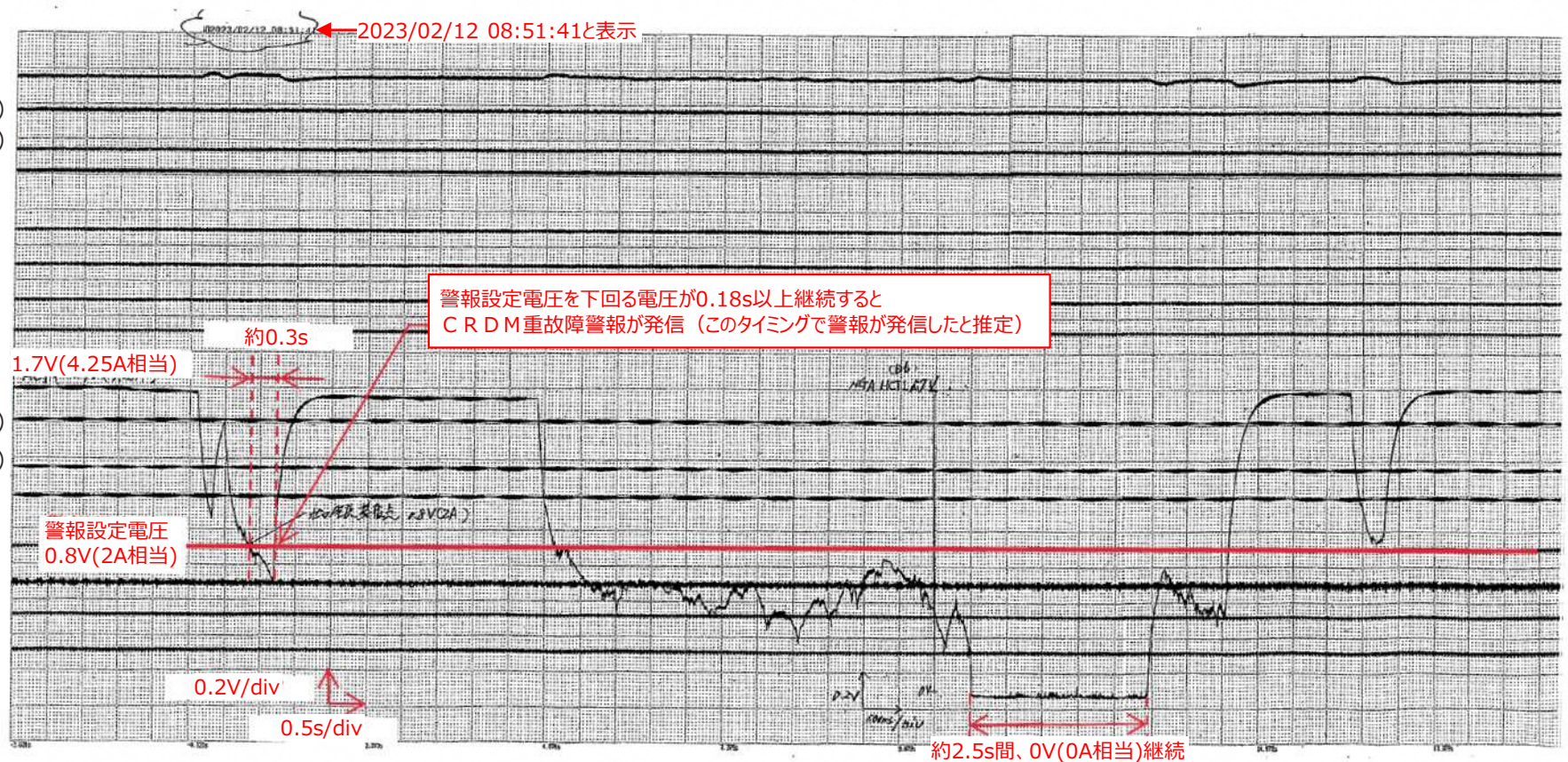
- SG電流波形(G7制御棒)
- SG電流波形(G9制御棒)
- SG電流波形(J9制御棒)
- SG電流波形(J7制御棒)

MGA電流制御ユニット

- MG電流波形(D6制御棒)
- MG電流波形(F12制御棒)
- MG電流波形(M10制御棒)
- MG電流波形(K4制御棒)

MGC電流制御ユニット

- MG電流波形(G7制御棒)
- MG電流波形(G9制御棒)
- MG電流波形(J9制御棒)
- MG電流波形(J7制御棒)

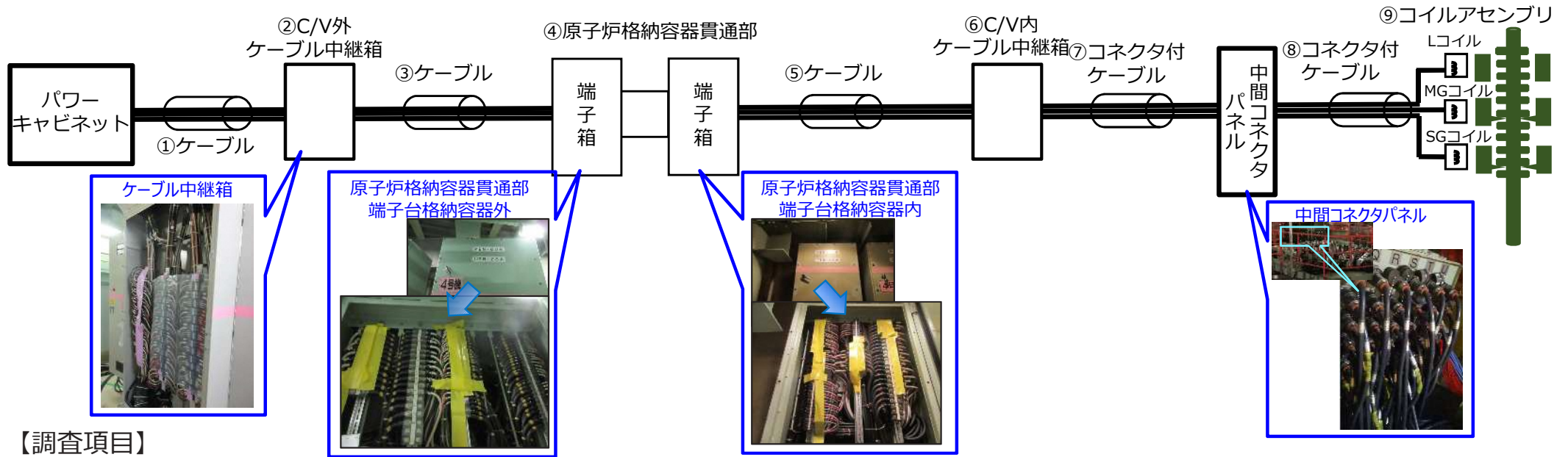


2月12日08:51時点の電流波形データ

注) 当該時間に制御棒駆動装置に関する操作・点検等は実施していない。

1. 原因調査（電流制御ユニット下流側の点検、調査（1 / 5））

2 B D盤外のケーブルについて、各接続箇所での切り分けを実施し、詳細点検を実施した結果、異常はなかった。



【調査項目】

項目	内容		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨		
絶縁抵抗測定	線間、回路間の絶縁抵抗測定値を測定	線間 (+・-)	SG	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	— ※ 2	
			MG	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	— ※ 2	
			L	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	— ※ 2	
		回路間	SG - MG	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
			MG - L	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
			L - MG	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
目視点検	外観に破損等の異常の有無を確認※ 1		異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし		

※ 1 : 可視可能範囲を実施

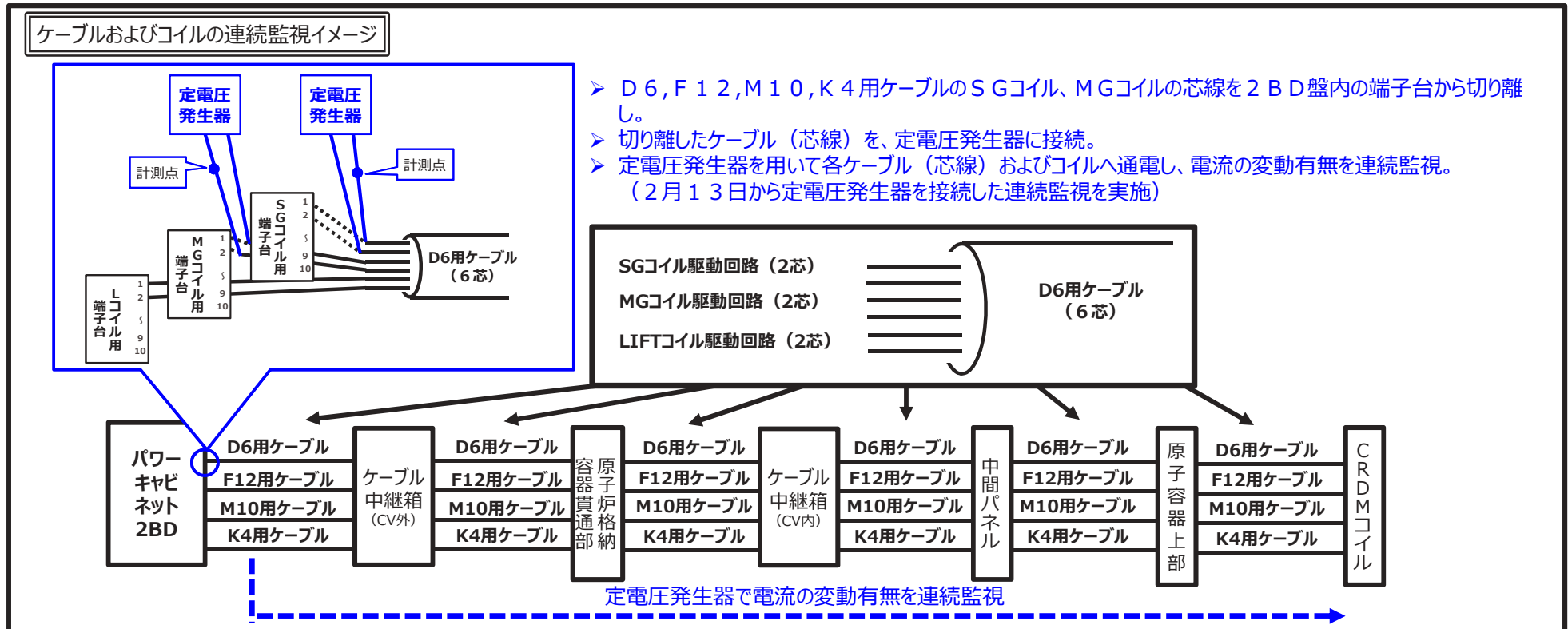
※ 2 : 実施不可

➤ 定電圧発生器を用いた電流制御ユニット下流側連続監視

- 2月13日から2BD盤のSGAおよびMGA電流制御ユニットと連動する制御棒（D6, F12, M10, K4）のケーブルを2BD盤から切り離し、定電圧発生器を用いて各ケーブル（芯線）およびコイルへ通電した上で電流変化を連続監視した。
- 2月16日、19日、20日、21日に以下のコイル駆動回路について電流変動があることを確認した。
 - ✓ 2月15日～16日：M10制御棒のMGコイル
 - ✓ 2月18日～19日：K4制御棒のSGコイル ※：重故障警報発信（電流2.0A以下）相当の変動有り
 - ✓ 2月19日～20日：M10制御棒のSGコイル、D6制御棒のMGコイル※、K4制御棒のSGコイル
 - ✓ 2月20日～21日：M10制御棒のSGコイル、K4制御棒のSGコイル

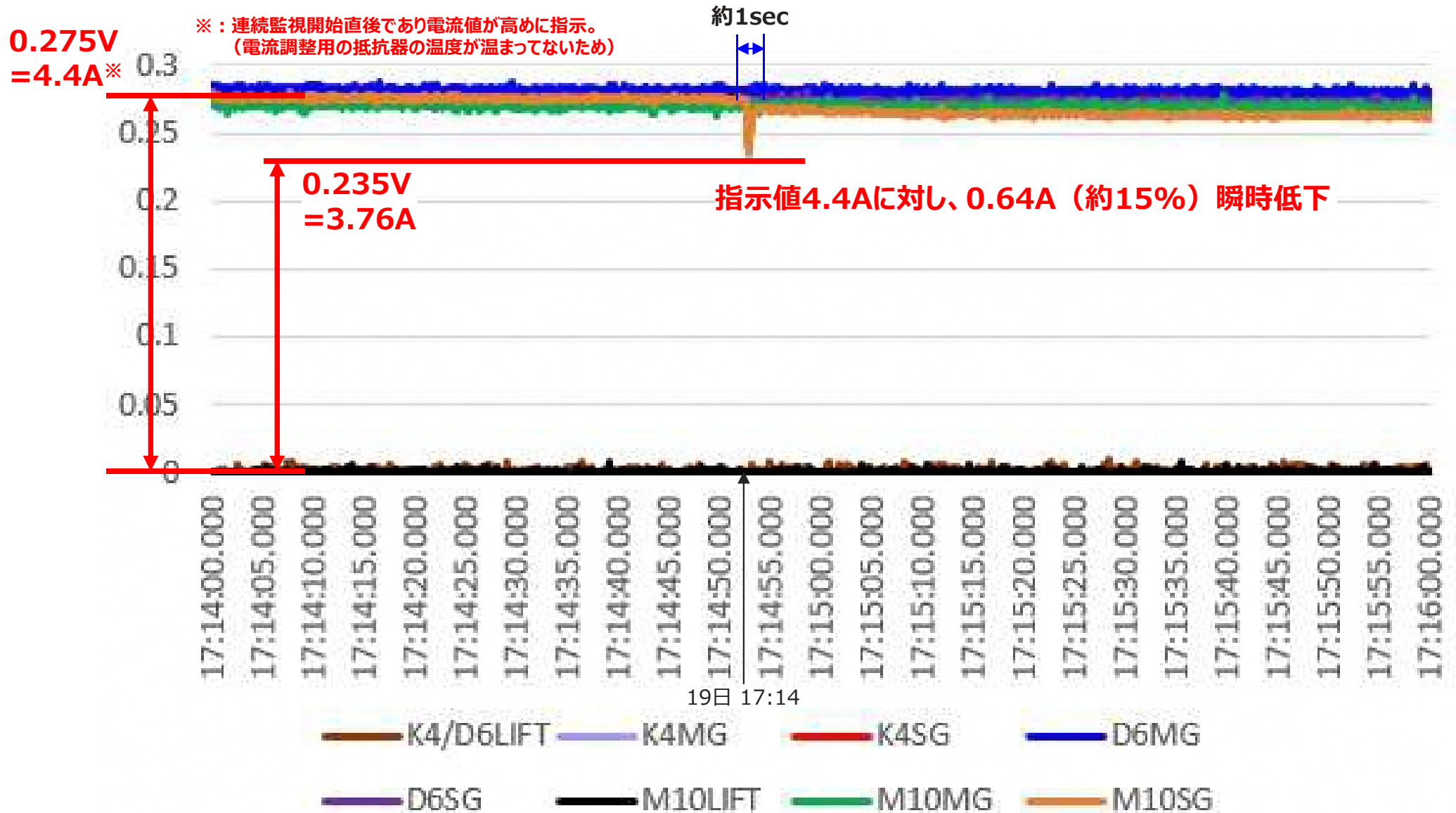
⇒ 16 ~ 18

⇒ D6、M10、K4制御棒において、パワーキャビネット～コイル間で電流変動が発生する可能性がある。



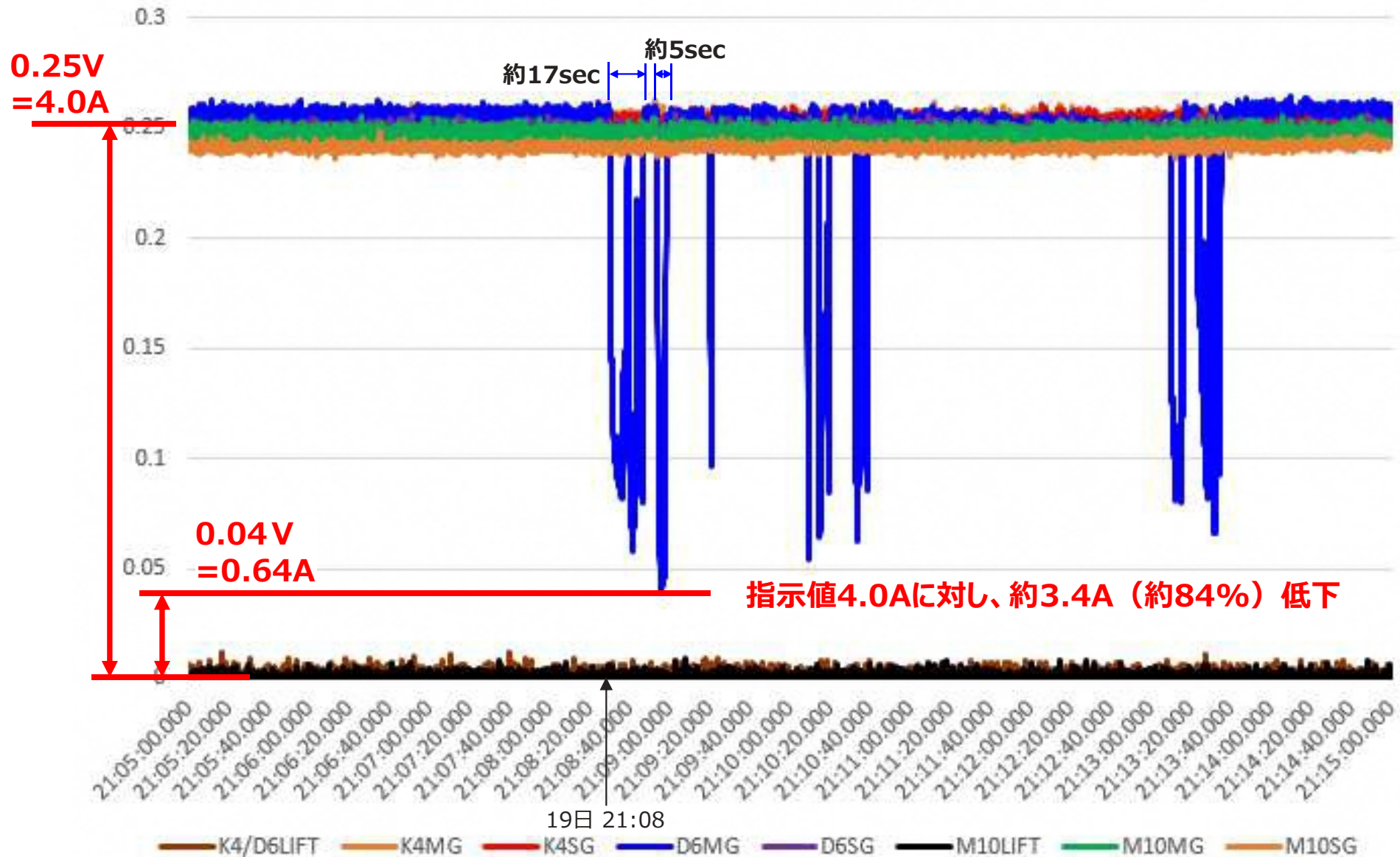
➤ 2月19日～20日の間で確認されたM10制御棒SGコイル電流変動

- 重故障警報の発信や制御棒の保持機能に影響を及ぼすレベルではない、軽微な電流変動が確認された。



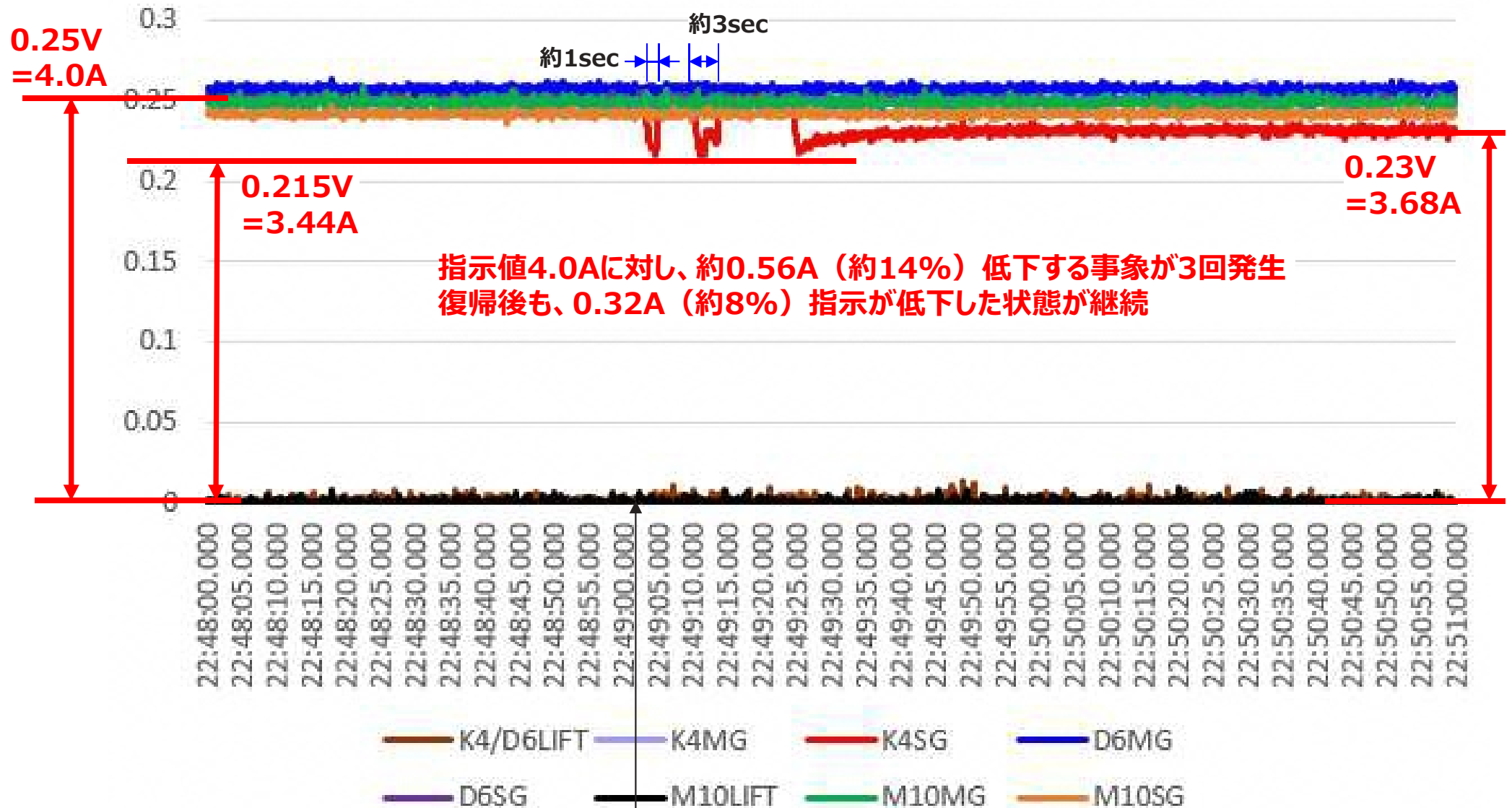
1. 原因調査（電流制御ユニット下流側の点検、調査（4 / 5））

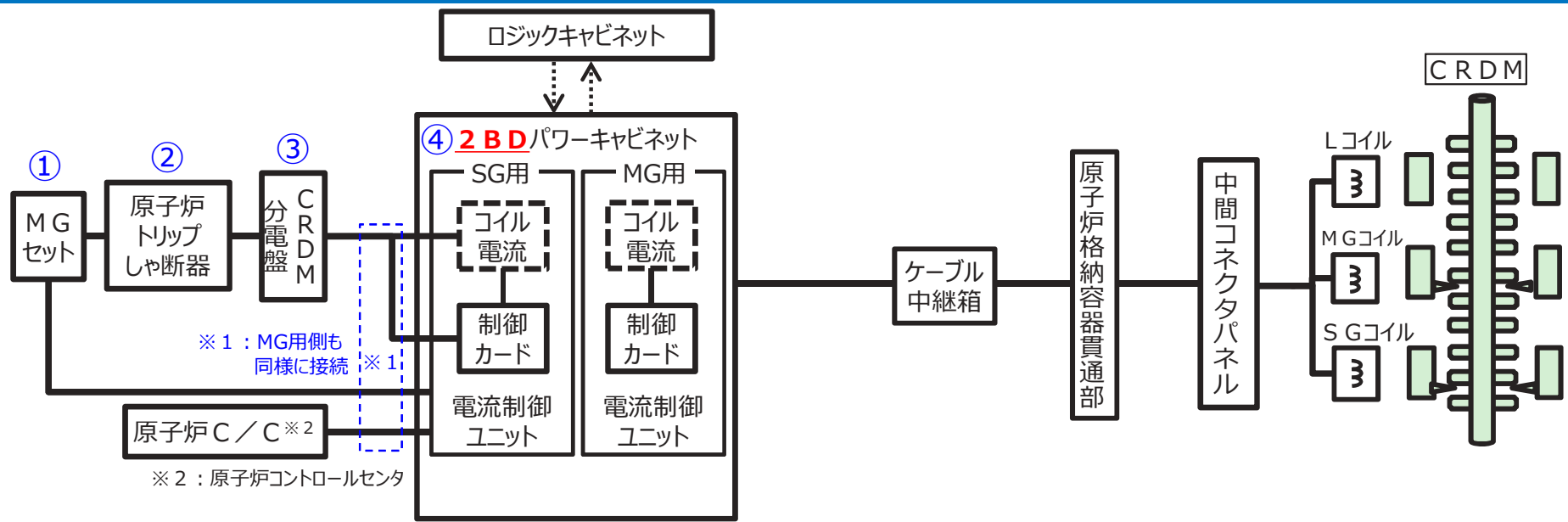
- 2月19日～20日の間で確認されたD6制御棒MGコイル電流変動
 - 重故障警報の発信に相当する電流変動が確認された。



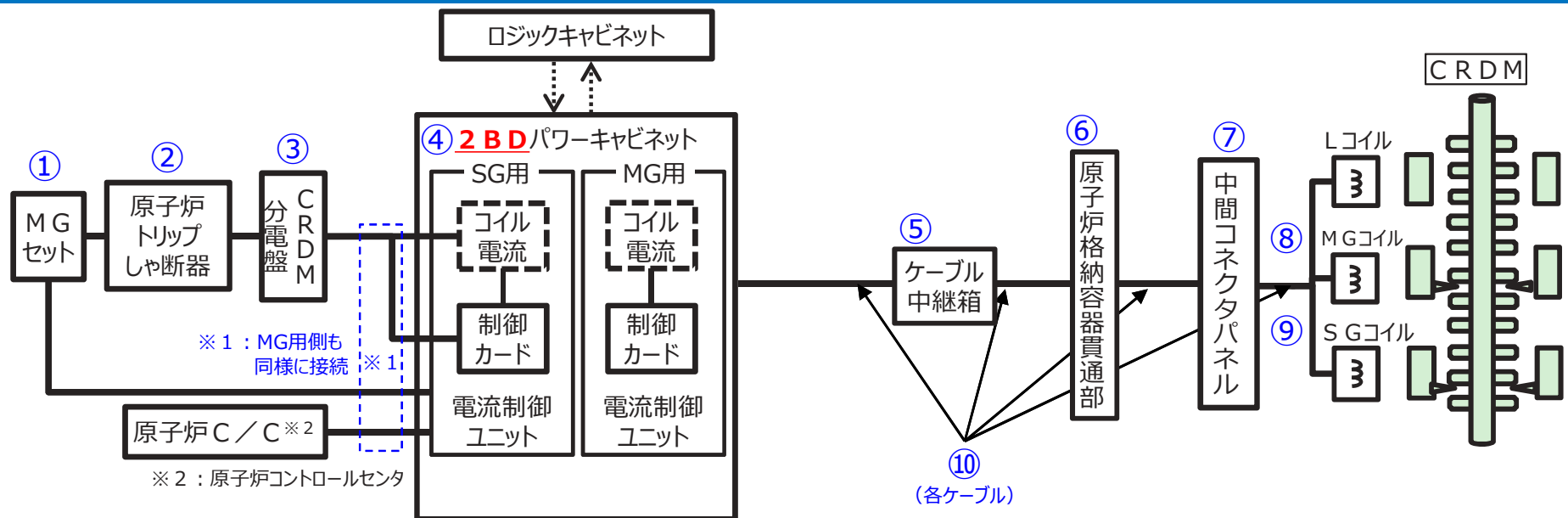
➤ 2月19日～20日の間で確認されたK4制御棒SGコイル電流変動

- 重故障警報の発信や制御棒の保持機能に影響を及ぼすレベルではない、軽微な電流変動が確認された。

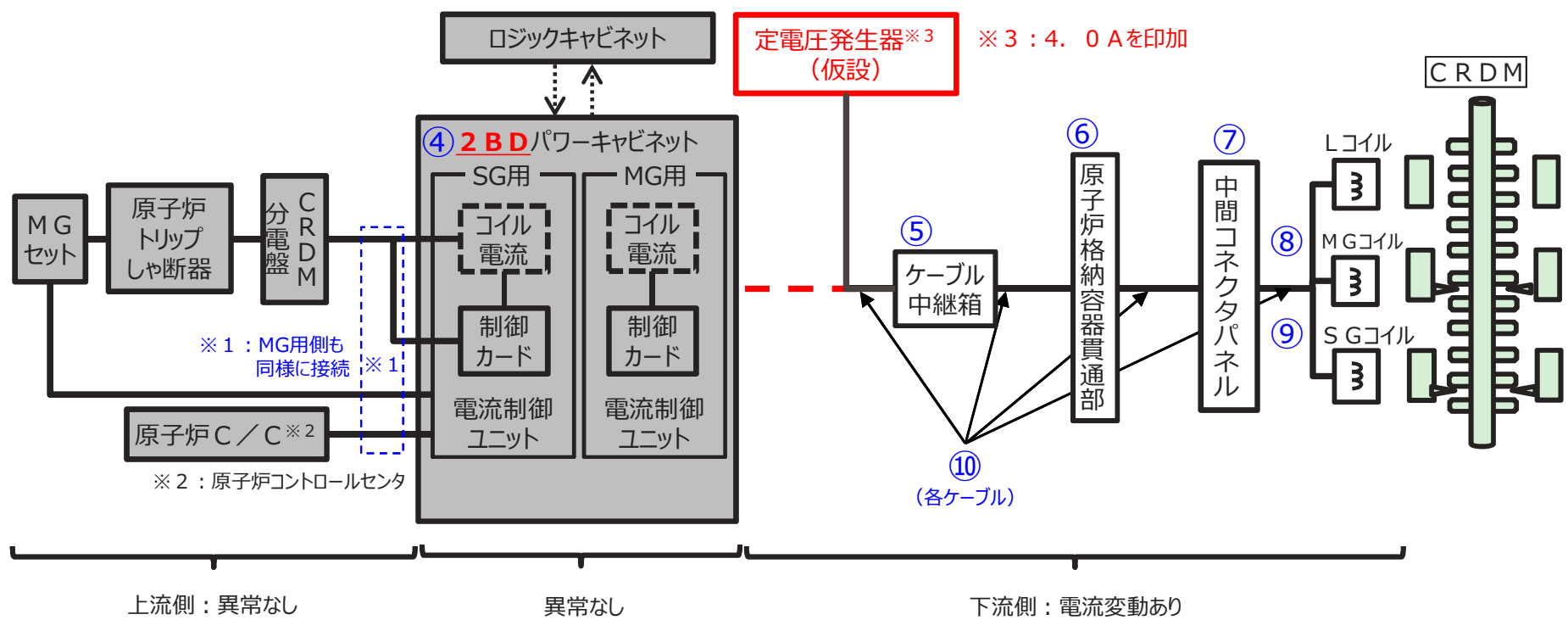




点検部位	点検内容	点検箇所（測定箇所）	判定基準	点検結果
① MGセット	絶縁抵抗測定	MGセット	1 MΩ以上	異常なし (単体)
	試運転	MGセット	メーカー基準を満足すること	
② 原子炉トリップしゃ断器	絶縁抵抗測定	原子炉トリップしゃ断器	10 MΩ以上	異常なし (単体)
	外観点検	原子炉トリップしゃ断器	損傷、変色がないこと	
	動作確認（手動・電動）	原子炉トリップしゃ断器	動作に異常がないこと	
③ CRDM分電盤	NFB状態確認	CRDM分電盤	NFB「入」であること	異常なし (単体)
④ CRDM制御盤 (パワーキャビネット)	制御盤内外観点検	パワーキャビネット	損傷、焼損がないこと	異常なし (単体、連続監視)
	サージアブソーバー単体試験	パワーキャビネット	メーカー基準を満足すること	
	絶縁抵抗測定	パワーキャビネット	1 MΩ以上	
	制御回路電圧測定	パワーキャビネット	メーカー基準を満足すること	
	制御盤内ケーブル接続状態確認	パワーキャビネット	接続状態に異常がないこと	
	再現確認試験（電圧・電流波形測定）	パワーキャビネット	各部位の電圧・電流波形測定	
	電流制御ユニット構成部品他（工場調査）	パワーキャビネット	メーカー基準を満足すること	
模擬コイルを用いたコイル電流変動確認	パワーキャビネット	電流値に異常な変動がないこと		



点検部位	点検内容	点検箇所（測定箇所）	判定基準	点検結果	
⑤	ケーブル中継箱 (C/V内・C/V外)	ケーブル中継箱 (C/V内・C/V外)	接続状態に異常がないこと	異常なし (単体)	
⑥	原子炉格納容器貫通部	原子炉格納容器貫通部	接続状態に異常がないこと	異常なし (単体)	
⑦	中間コネクタパネル	中間コネクタパネル	接続状態に異常がないこと	異常なし (単体)	
⑧	MGコイル	絶縁抵抗測定	ケーブル中継箱	10 MΩ以上	異常なし (単体)
		コイル抵抗測定	ケーブル中継箱	メーカー基準を満足すること	
		コイル電流測定	パワーキャビネット	メーカー基準を満足すること	
⑨	SGコイル	絶縁抵抗測定	ケーブル中継箱	10 MΩ以上	異常なし (単体)
		コイル抵抗測定	ケーブル中継箱	メーカー基準を満足すること	
		コイル電流測定	パワーキャビネット	メーカー基準を満足すること	
⑩	各ケーブル	外観点検	各ケーブル	損傷、変色がないこと	異常なし (単体)
		絶縁抵抗測定	各ケーブル	10 MΩ以上	



点検部位	点検内容	点検箇所（測定箇所）	判定基準	点検結果	
④～⑩	各部を接続した状態	予備品の電流制御ユニットへ取替後のコイル電流変動確認	パワーキャビネット、各ケーブル他	電流値に異常な変動がないこと	電流変動あり (連続監視)
⑤～⑩	ケーブル・コネクタを接続した状態	定電圧発生器を用いたコイル電流変動確認	ケーブル中継箱、各ケーブル他	電流値に異常な変動がないこと	電流変動あり (連続監視)

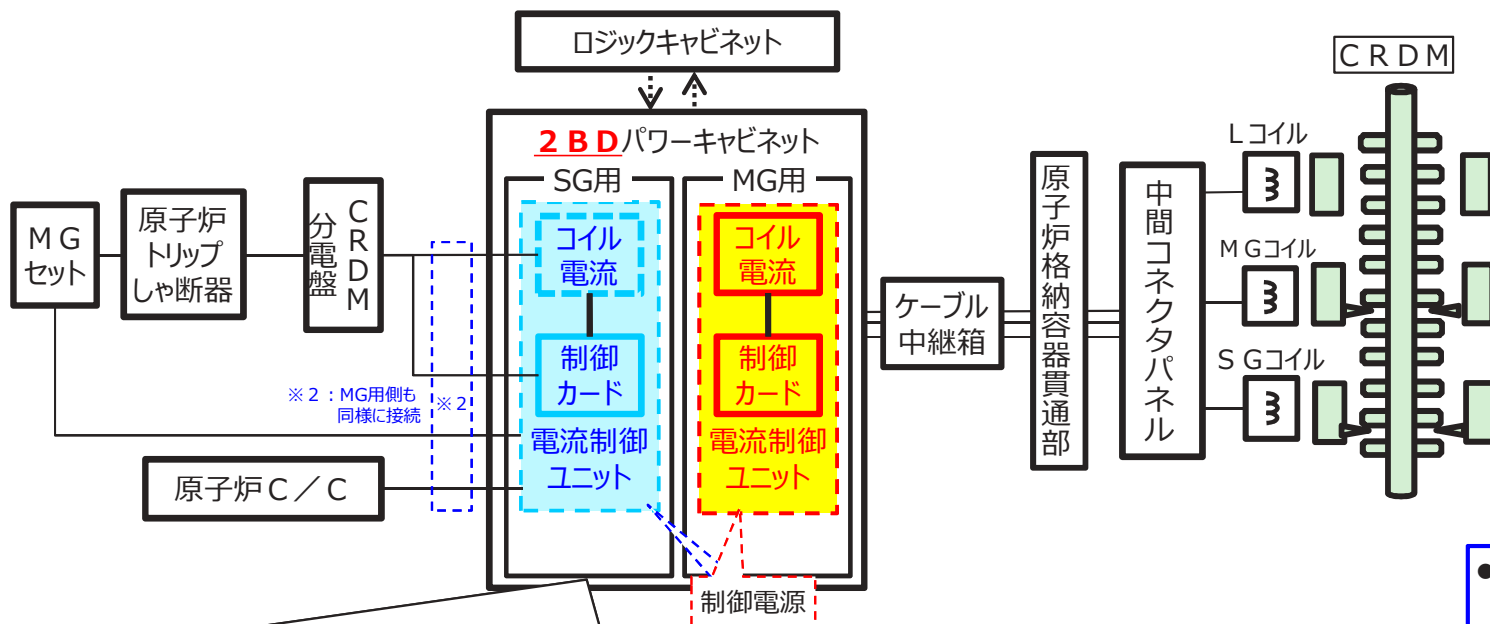
➤ 事象概要

2月5日、原子炉自動停止事象に係る原因調査の一環として、炉心の停止余裕を確保した上で、故障箇所の特定調査のため2BD盤の電流制御ユニットに模擬コイル接続した通電確認を実施していた。

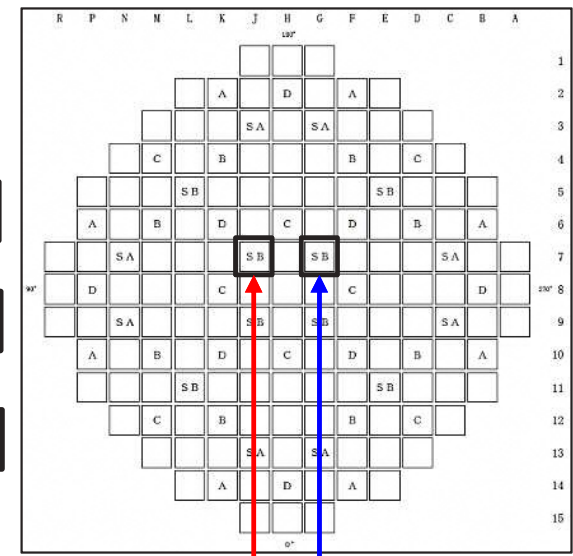
その通電確認後、2BD盤の電流制御ユニットから模擬コイルを取り外すため、MGA、SGA、MGB、SGBの制御電源、主電源を開放後、模擬コイルの取り外しを終え、各部電源の復旧を行っていた。

復旧する電源は計8個あるが、最後の8個目（SGB主電源）の復旧を行ったところ、電源投入を実施したSGBと連動していないMGCおよびSGCと連動する停止バンクの制御棒2本（G7およびJ7）が部分挿入した。※1

※1：2月5日の事象を受け、2月7日に再現試験を実施したところ、7個目（SGA主電源）の電源投入を行った際、2月5日と同じ制御棒2本（G7およびJ7）が部分挿入し、事象の再現が認められた。



制御棒アドレス図



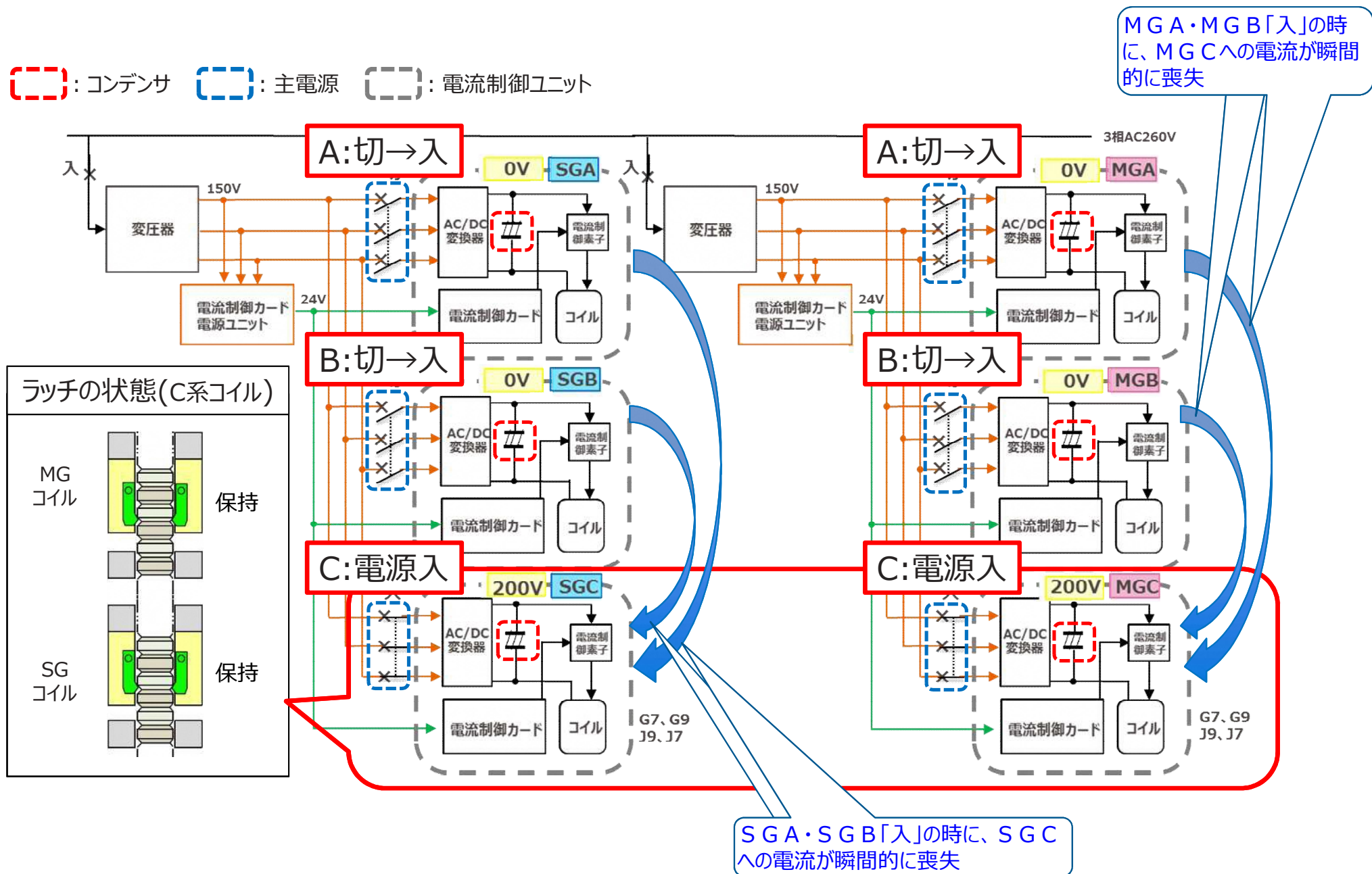
● G7
 ✓ 2/5の部分挿入：228ステップ ⇒ 約186ステップ
 ✓ 2/7の部分挿入：228ステップ ⇒ 約222ステップ

● J7
 ✓ 2/5の部分挿入：228ステップ ⇒ 約222ステップ
 ✓ 2/7の部分挿入：228ステップ ⇒ 約222ステップ

2BD盤のMGA・SGA・MGB・SGBの制御電源および主電源を順に復旧（切⇒入）していた。（電源2種（主電源・制御電源）×4ユニット=計8個）
 復旧順序は次のとおりであり、2月5日では⑧のタイミングで、2月7日では⑦のタイミングで事象が発生した。
 ①MGA制御電源 ⇒ ②MGB制御電源 ⇒ ③MGA主電源 ⇒ ④MGB主電源 ⇒
 ⑤SGA制御電源 ⇒ ⑥SGB制御電源 ⇒ ⑦SGA主電源 (2/7事象) ⇒
 ⑧SGB主電源 (2/5事象)

➤ CRDM (2BD盤) の回路図

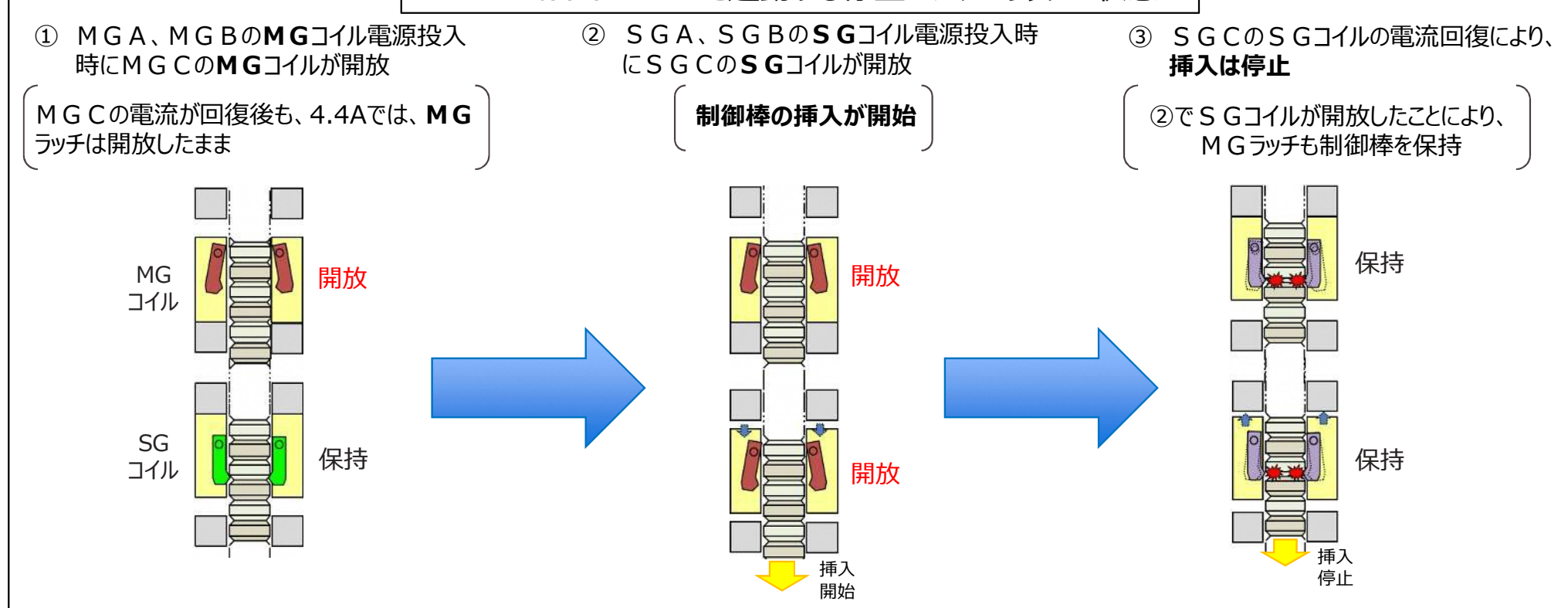
 : コンデンサ
 : 主電源
 : 電流制御ユニット



➤ 推定メカニズム

- ① MGA、MGBのMGコイルの電源投入の際に、MGCのMGコイルの電流が瞬間的に喪失
その後電流が回復したが、MGラッチは開放したまま※ ※：MGコイルの電流が4.4Aの電流が流れるもののSGコイルにより生じる磁力により、その電流ではMGラッチは開放状態が継続
- ② SGA、SGBのSGコイルの電源投入の際に、SGCのSGコイルの電流が瞬間的に喪失
制御棒が挿入開始
- ③ 電流回復により、MG・SGの両コイルにより、制御棒をつかみ、挿入は停止

MGCおよびSGCと連動する停止バンクのラッチの状態



今回の部分挿入事象は、調査の過程において主電源の投入操作に起因した事象であり、**原子炉自動停止事象との関連性はない。**

➤ 調査結果

- N I S 挙動解析結果と実機の N I S 出力トレンドを比較評価した結果、原子炉自動停止の要因は M 1 0 制御棒 1 本が挿入されたことによると推定した。
- C R D M の実機動作確認や製造時記録等の調査等を実施した結果、異常は認められず、M 1 0 制御棒が挿入されたのは、機械的要因ではないことを確認した。
- 調査の過程で発生した部分挿入事象は、主電源の投入操作に起因した事象であり、今回の原子炉自動停止事象との関連性はない。
- 電氣的要因に関する現地調査において、下表の通り「重故障」警報の再発と電流変動が確認された。
なお、2 B D 盤の A グループ以外に関する制御棒においては、警報発信や電流変動は認められなかった。

		1/25	1/29	1/30		2/12	2/15~16	2/18~19	2/19~20	2/20~21	
警 報		重故障	重故障	重故障	トリップ	重故障					
D6	M G	-	-	変動あり (推定)	-	変動あり (大)	-	-	変動あり (大) ※	-	
	S G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
M10	M G	-	-	-	-	-	変動あり (小)	-	-	-	
	S G	-	-	-	変動あり (推定)	-	-	-	変動あり (小) ※	変動あり (小) ※	
K4	M G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	S G	-	-	-	-	-	-	変動あり (小)	変動あり (小) ※	変動あり (小) ※	
F12	M G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	S G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
設備状態		通常運転中				D 6 ・ M 1 0 ・ K 4 ・ F 1 2 共通の電流制御ユニット (M G ・ S G) を予備品に取替えた上で連続監視		パワーキャビネット (2 B D) を切り離し、定電圧発生器による通電状態にて連続監視			

【凡例】 (大) : 重故障警報が発信するレベルの電流変動

※それぞれ異なるタイミングで発生

(小) : 重故障は発信せず、かつ、制御棒保持機能に影響がない範囲の電流変動

補足) 1/31~2/24までの間で電流変化を確認してきたが、警報や電流変動が認めら結果のみを纏めた表である

F T 図に基づき、現地・メーカ工場にて網羅的に原因調査を実施した結果、D 6、M 1 0、K 4 制御棒において、パワーキャビネット~コイル間で電流変動が発生する可能性があることが判明。

- これまでの点検調査により、原子炉自動停止の原因は、C R D Mの電氣的な故障によるものであると推定している。
- 電氣的な故障は、制御棒グループ2 B D盤のAグループ（D 6、F 1 2、M 1 0、K 4）のうち、2 B D盤のパワーキャビネットからコイルの範囲にあると特定した。
- また、電流変動は、原子炉自動停止時に行っていた主電源の開放操作との関連はなく、操作を行っていない状態でも発生し、M GコイルやS Gコイルの電流変動のタイミングが異なっていることから、それぞれが独立した事象であると推定している。
- 従って、M 1 0 制御棒が落下した背景として、シングルホールド状態にあったS Gラッチのコイル単独の電氣的故障にてS Gラッチが開放したものと推定している。

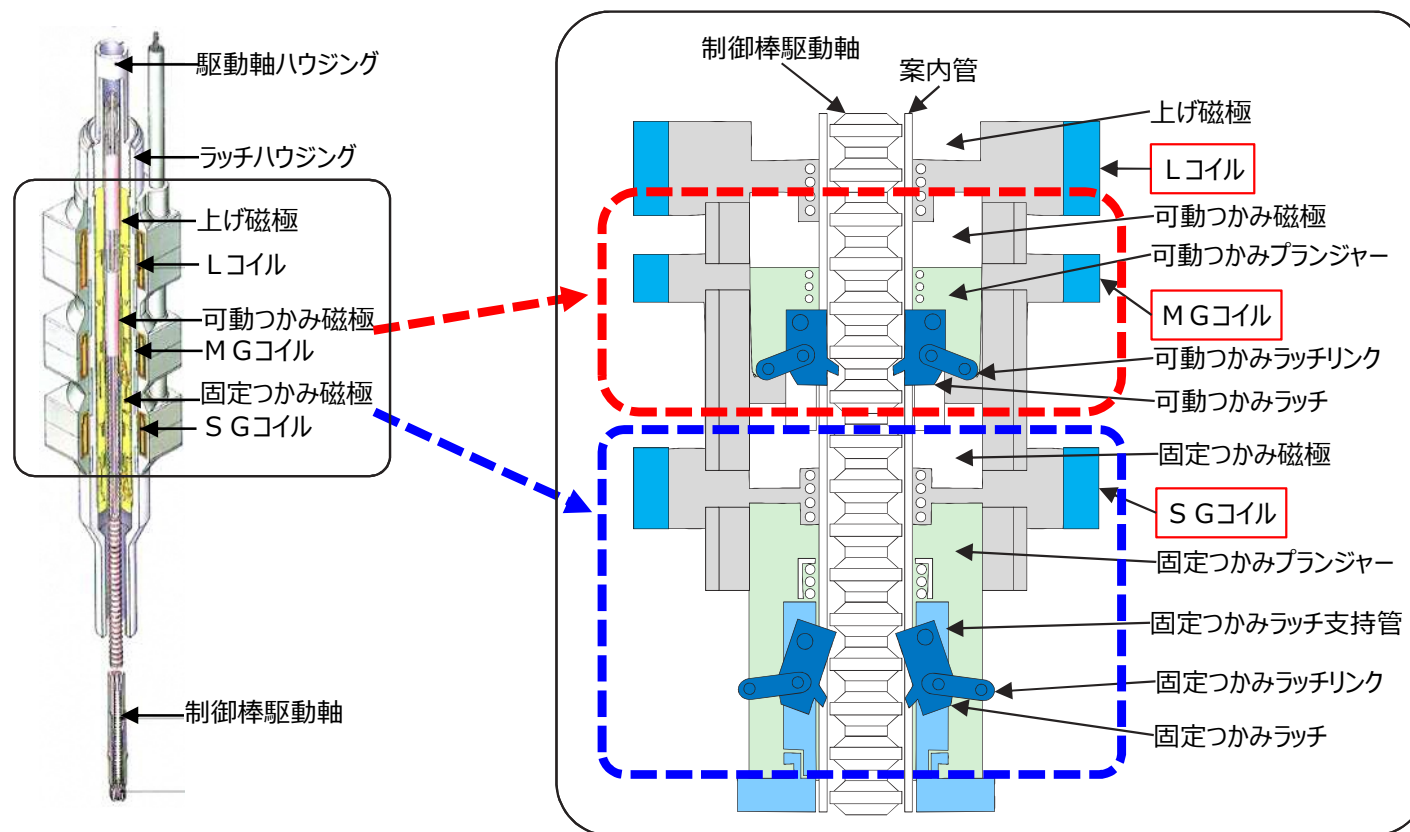
參考資料

➤ CRDMの概要図

CRDMは、上から上げコイル※、MGコイル、SGコイルが設置され、それぞれのコイルを励磁・消磁することにより、ラッチ機構を介して制御棒駆動軸を上下させる。

なお、原子炉トリップ信号または停電でコイルが消磁されると、制御棒駆動軸等の重量でラッチが外れて制御棒は自重で炉心内へ落下する仕組みとなっている。

※：Liftコイル（制御棒を引き抜く際に使用するコイル。以下、Lコイル）



➤ 制御棒駆動システムの構成図

CRDMは、モータ発電機セット（以下、MGセット）および原子炉コントロールセンタ（以下、C/C）から電源が供給され、制御棒駆動軸を上下させる動作を制御している。

中央制御室での操作によりロジックキャビネットに指示が入力され、パワーキャビネットを介してCRDMを動作させている。

なお、原子炉を緊急停止する際には、原子炉トリップしゃ断器を動作させることにより、制御棒が自重で炉心内へ落下する仕組みとなっている。

