

高浜発電所 4号機 原子炉自動停止について (概要版)

2023年3月7日



	説明項目	ページ番号
1	事象の概要	3
2	原因調査	7
3	制御棒部分挿入事象の原因調査	3 3
4	原因調査のまとめ	3 6
5	推定原因と対策	3 9

<事象概要>

高浜発電所4号機は定格熱出力一定運転中（モード1）のところ、2023年1月30日15時21分、B中央制御室に「PR中性子束急減トリップ※1」警報が発信し、原子炉が自動停止するとともにタービンおよび発電機が自動停止した。

その後、1月30日15時35分に高温停止状態（モード3）、1月31日10時12分にモード4、同日20時33分にモード5へ移行した。

本事象は、発電用原子炉の運転中において、発電用原子炉施設の故障により原子炉の運転が停止していることから、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを1月30日15時21分に判断した。

<事象発生経緯>

1月25日7時24分、1月29日16時46分および1月30日00時12分において「CRDM重故障※2」警報が発信した。（1月25日7時24分および1月29日16時46分の警報発信時は、いずれも電流値等に異常はなく、警報をリセット）

1月30日00時12分の警報発信時は、制御棒を電磁力で保持している2箇所※3のコイルのうちMGコイルの電流値が通常よりも低かった。（09時05分 同事象の再発を検知できるようにするため、警報をリセット）

そのため、「PR中性子束急減トリップ」警報が発信する直前までCRDM制御盤内の詳細点検（MGコイルの抵抗測定）を行っていた。（15時18分～21分頃 当該MGコイル（ケーブル含む）の抵抗値を測定するため、2BDパワーキャビネットの当該MGコイルおよび制御電源2箇所の電源を開放）

※1：運転中（出力領域（PR））の中性子束を測定する検出器が4つ設置されており、2つの中性子束検出に異常があった場合、原子炉を停止させる警報が発信する。（PR：Power Range）

※2：CRDMの故障を示す警報であり、制御棒を電磁力で保持している2箇所のラッチのうち、1箇所以上で電流の異常を検知するなど、駆動装置の不調を検知した場合に発信する。

※3：可動つかみコイル（Movable Gripperコイル：以下、MGコイル）および固定つかみコイル（Stationary Gripperコイル：以下、SGコイル）

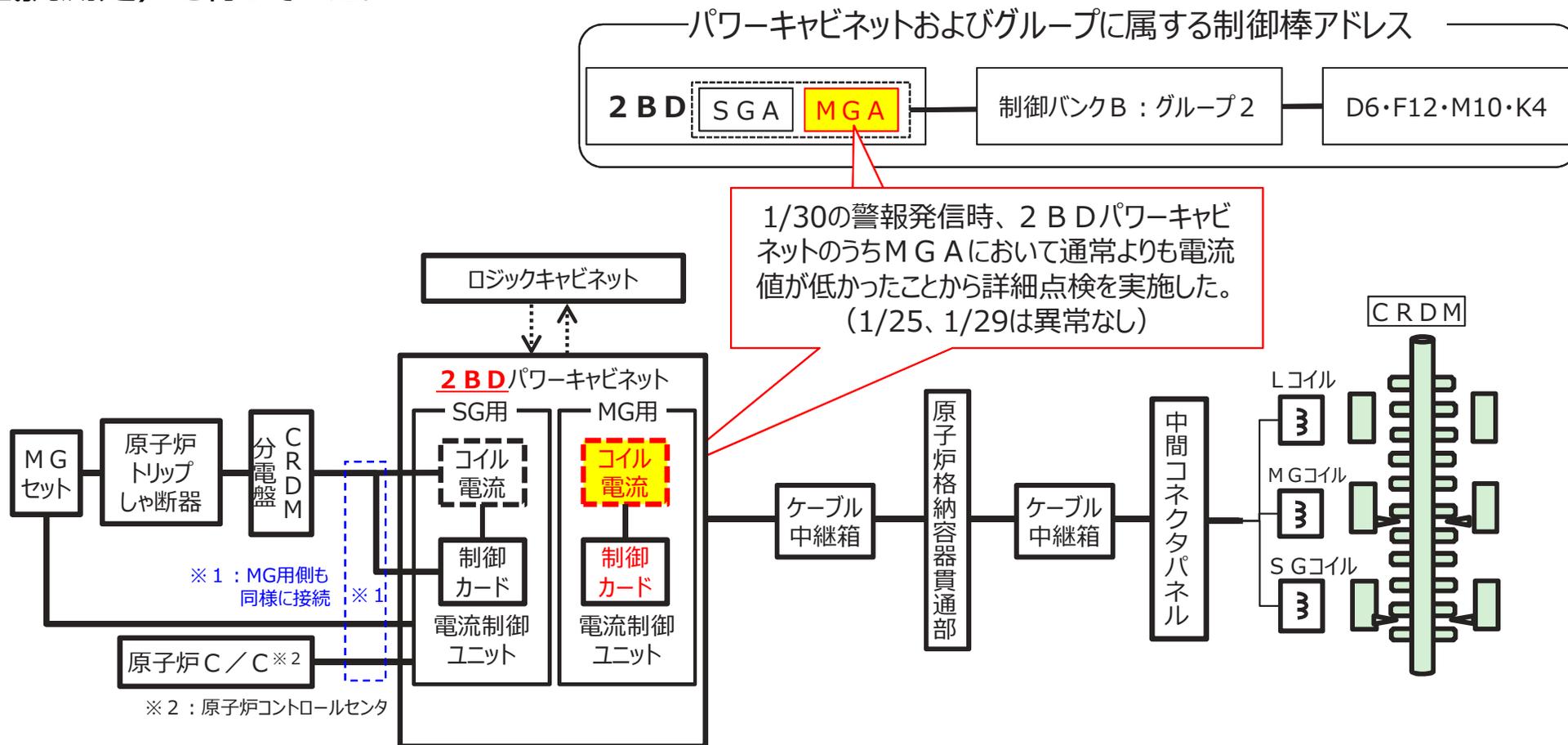
1. 事象の概要（原子炉自動停止の経緯（1 / 3））

（事象発生の際の経緯）

1月25日7時24分、1月29日16時46分および1月30日00時12分において「CRDM重故障」警報が発信した。

1月25日7時24分および1月29日16時46分の警報発信時には、いずれも電流値等に異常はなく、警報をリセットすることができていたが、1月30日00時12分の警報発信時は、制御棒を電磁力で保持している2箇所（MGコイル・SGコイル）の coilsのうちMGコイルの電流値が通常よりも低かった。

そのため、「PR中性子束急減トリップ」警報が発信する直前までCRDM制御盤内の詳細点検（MGコイルの抵抗測定）を行っていた。



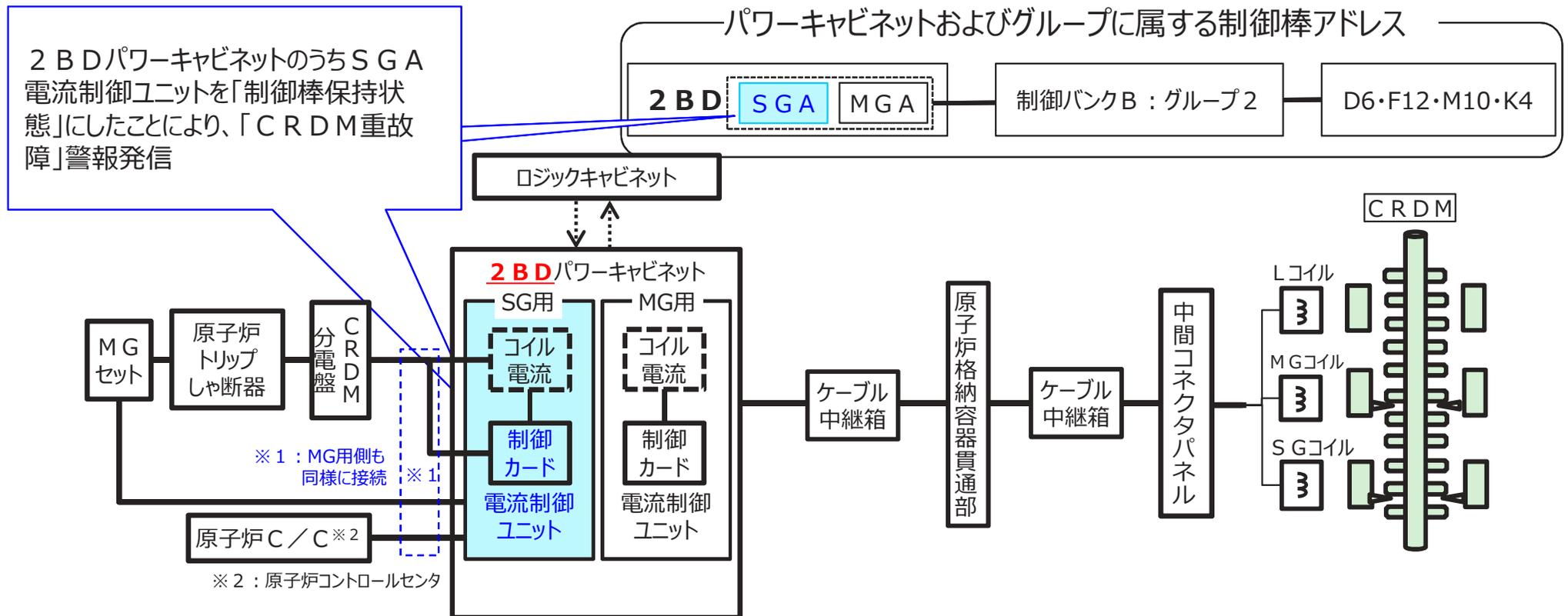
1. 事象の概要（原子炉自動停止の経緯（2 / 3））

1月30日00時12分に「CRDM重故障」警報が発信した際に、MGコイルの電流値が通常よりも低かったことから、同日14時00分より詳細点検（MGコイルの抵抗測定の前準備）を開始した。

点検の手順は次のとおりであり、その点検をしている途中、「PR中性子束急減トリップ」警報が発信し、原子炉が自動停止した。

- 09時05分 同事象の再発を検知できるようにするため、警報のリセット操作を実施
- 15時頃 パワーキャビネット2BD SGA電流制御ユニットを「制御棒保持状態」にしたことにより、「CRDM重故障」警報発信※

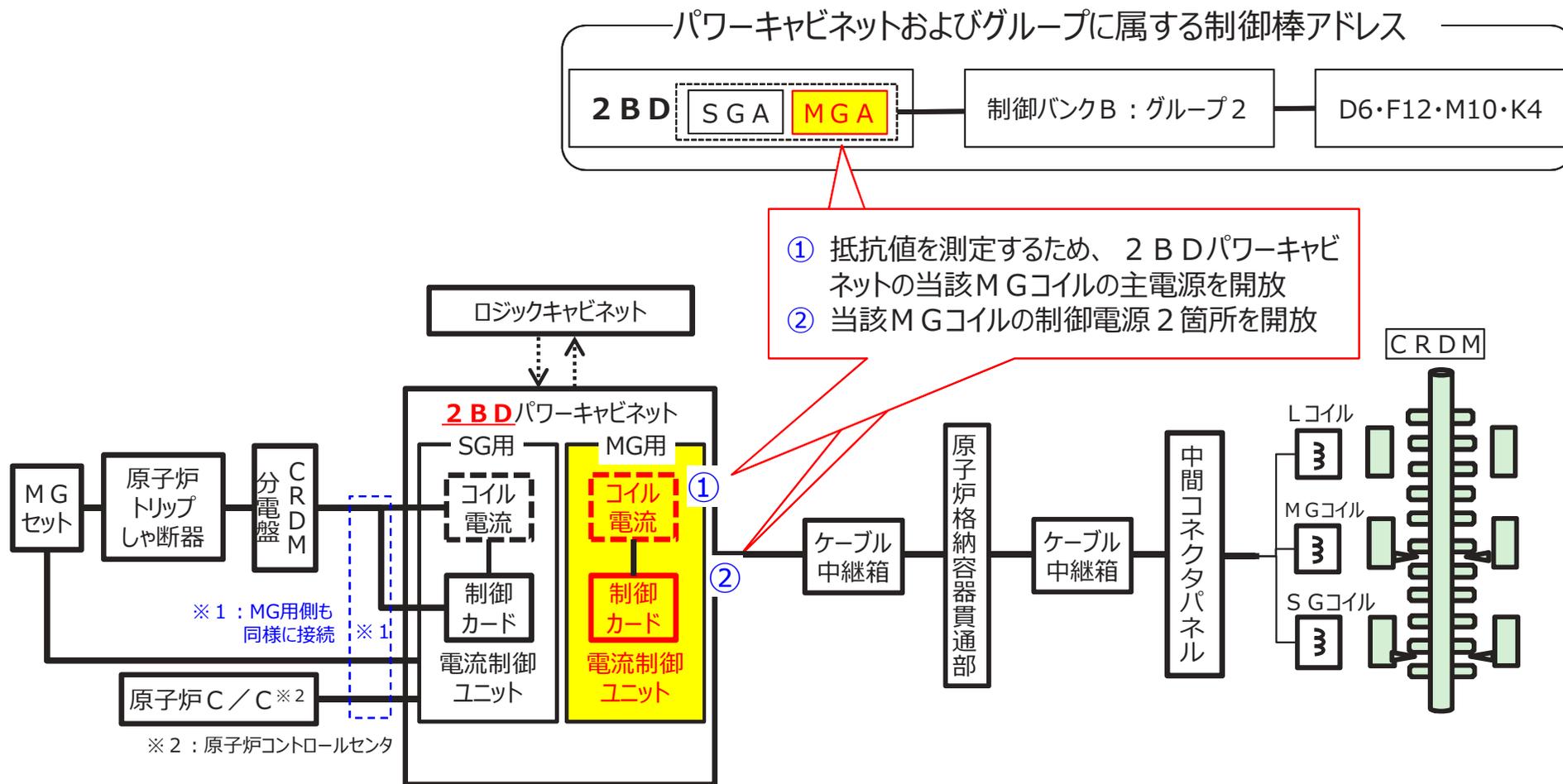
※：MGAを点検する際、間違えてSGAが消磁し、誤って制御棒が炉心内に落下しないよう、制御棒保持状態とし、ラッチが外れないようにする操作。この操作により「CRDM重故障」警報が発信することは想定していたものである。なお、この状態でも原子炉保護信号が発信すれば原子炉トリップ遮断器が開放され、全てのラッチが外れ原子炉は自動停止する。



1. 事象の概要（原子炉自動停止の経緯（3 / 3））

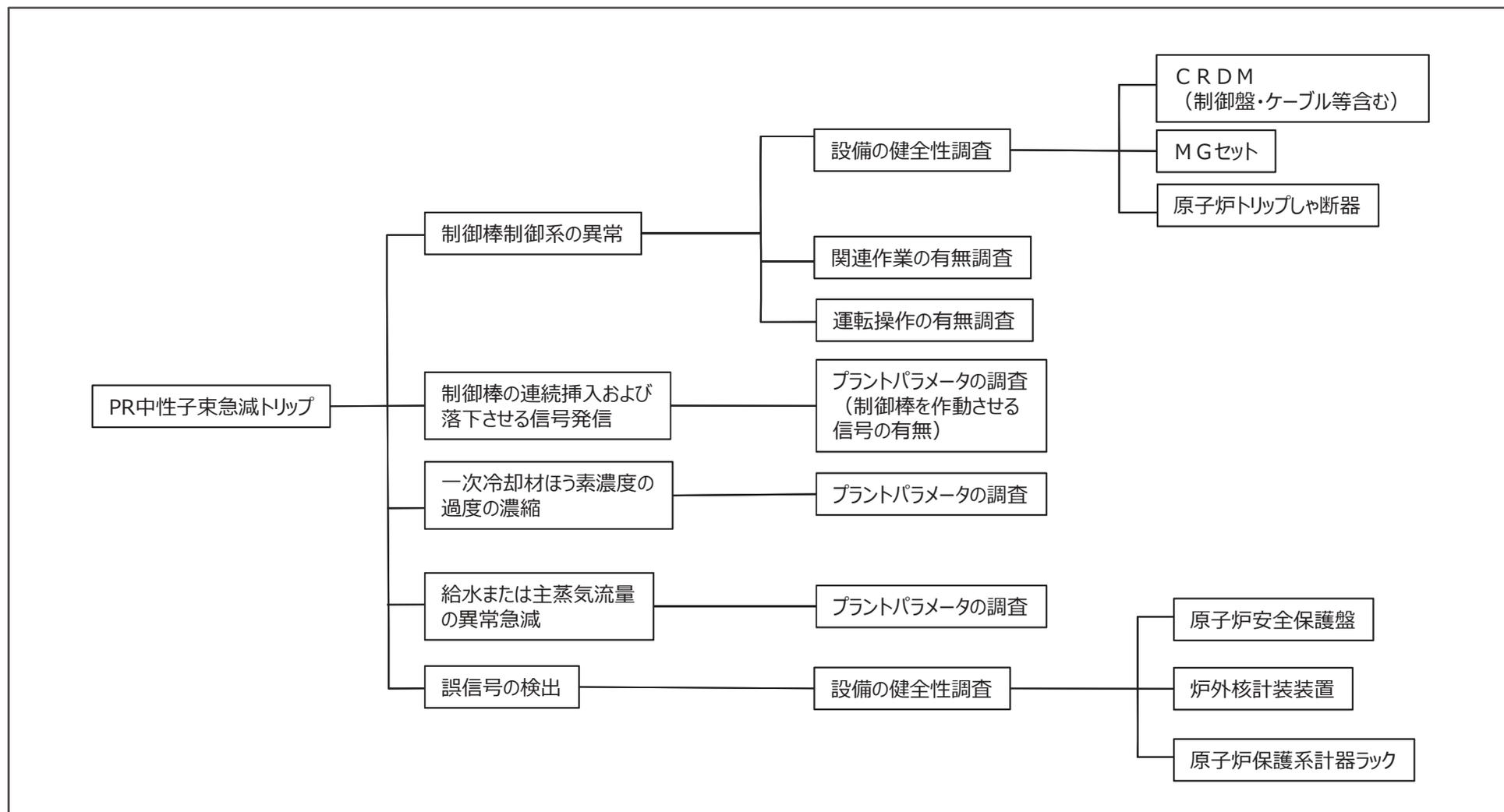
（時系列続き）

- 15時18分頃 当該M Gコイル（ケーブル含む）の抵抗値を測定するため、2 B D
～ パワーキャビネットの当該M Gコイルの電源を開放
- 15時21分頃 当該M Gコイルの制御電源 2 箇所を開放
- 15時21分 B 中央制御室に「P R 中性子束急減トリップ」警報が発信し、原子炉が自動停止
ならびにタービンおよび発電機が自動停止

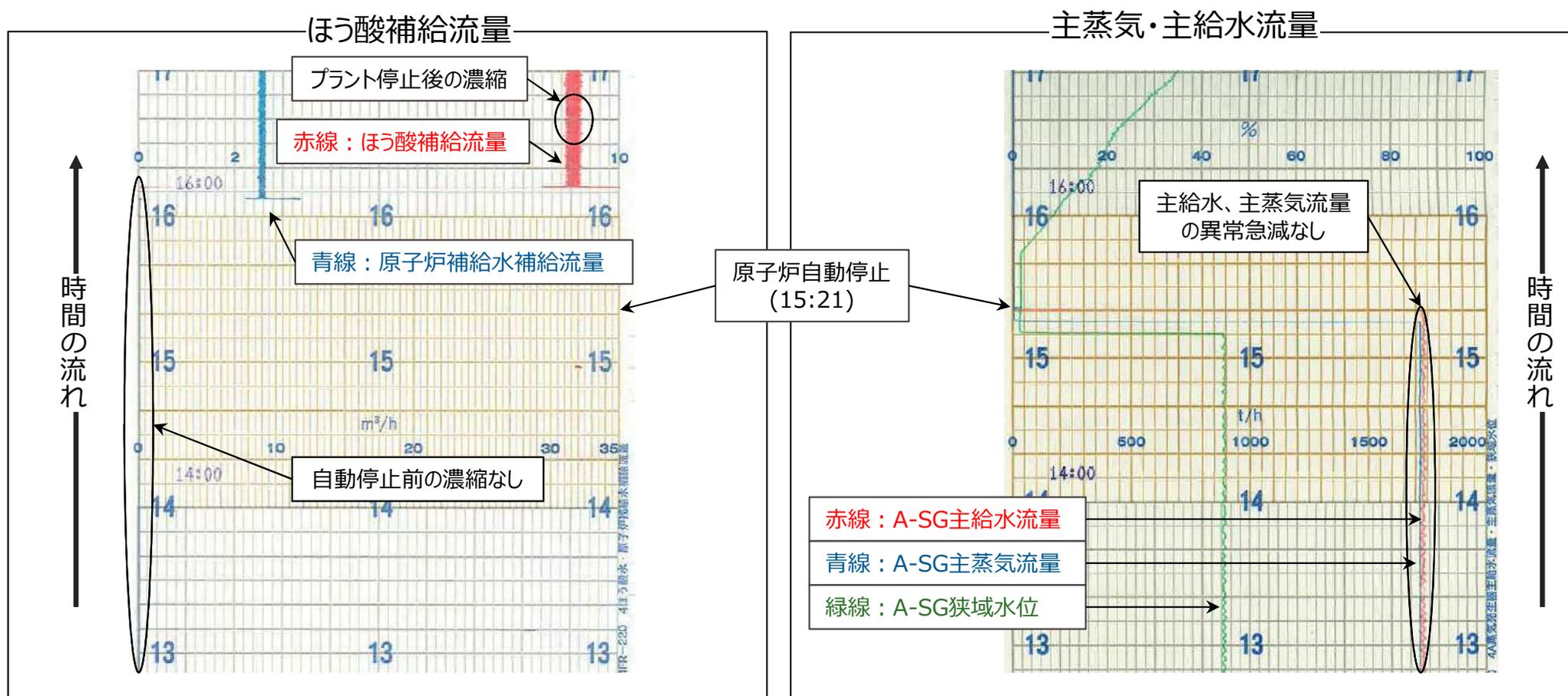


➤ 原因調査に関する点検項目（要因分析）

✓ 原子炉自動停止の原因について要因分析を踏まえた点検・調査を行った。



- 警報発信の要因として、一次冷却材系統のほう素濃度の過度の濃縮や主給水、主蒸気流量の異常急減などが考えられることから、それらのパラメータの履歴等を調査した結果、異常はなかった。
- 定期検査終了から原子炉自動停止までの運転期間中のプラントパラメータに異常はなかった。
- 運転操作および作業の有無について、運転員および保修課員に聞き取りを行った結果、制御棒に関する操作および作業は行っていないことを確認した。



2. 原因調査（炉外核計装装置の点検・健全性確認）

➤ 炉外核計装装置（以下、N I S）の検出器および制御盤の点検・健全性確認を実施した結果、異常がないことを確認した。

検出器の点検および健全性確認

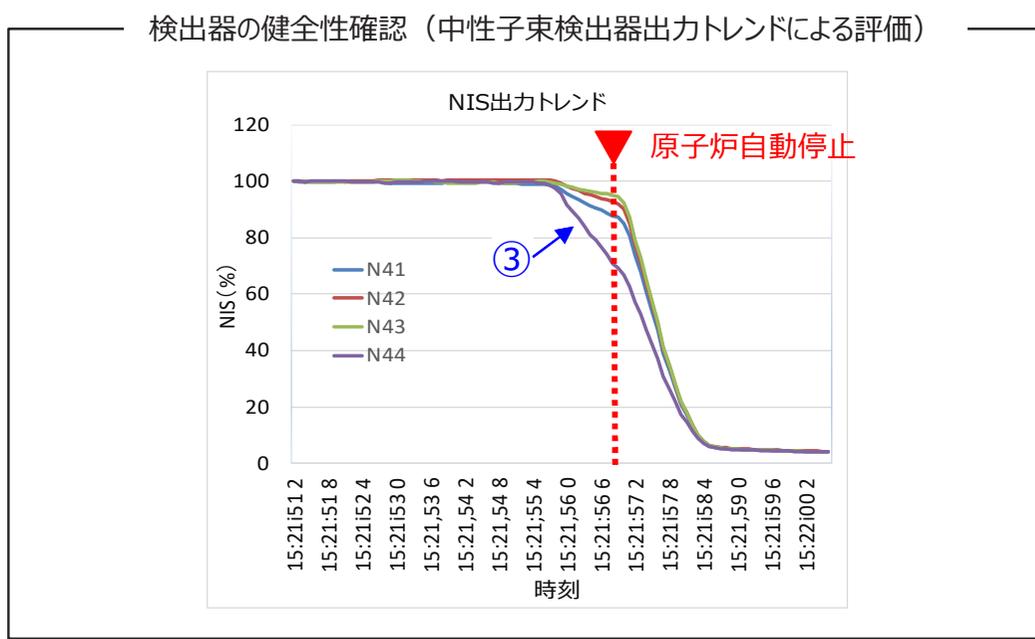
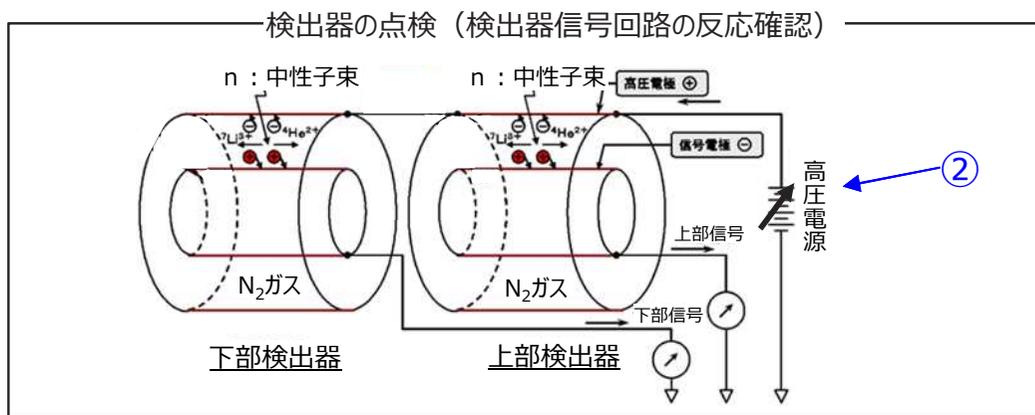
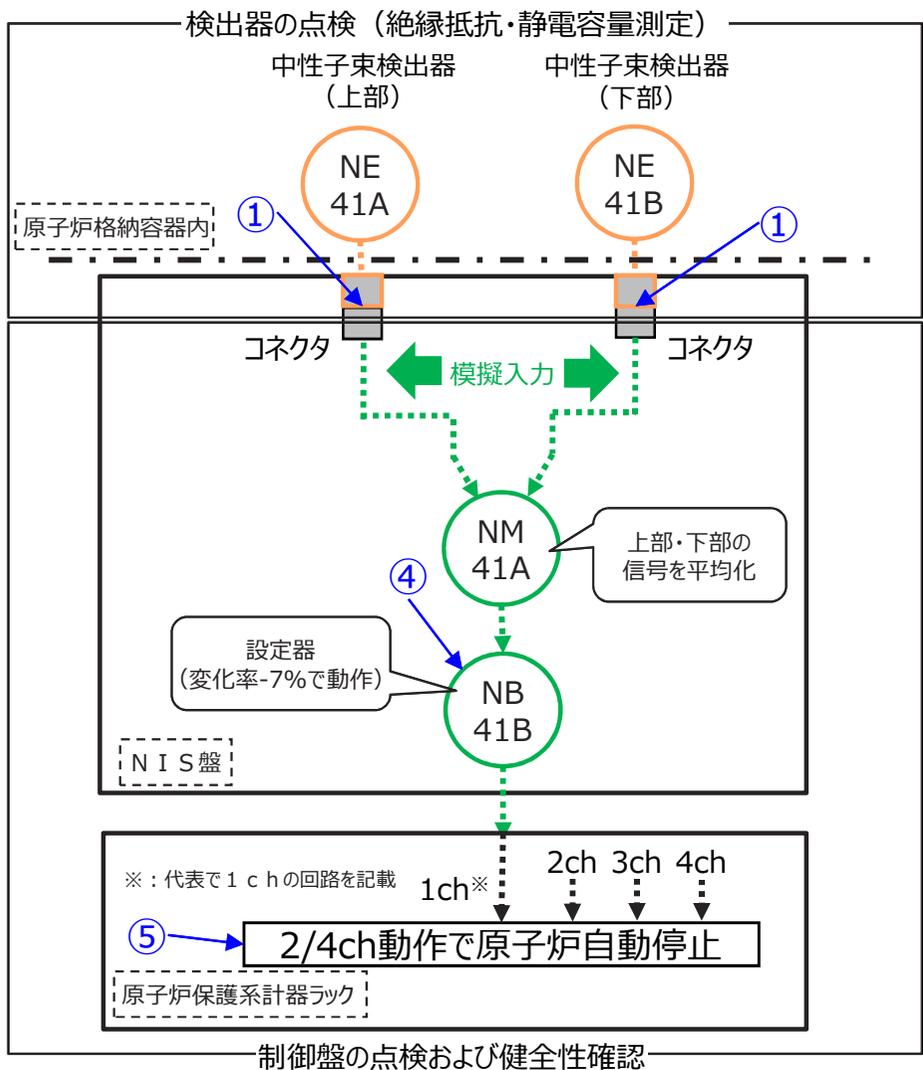
- ①コネクタで切り離し、検出器側の絶縁抵抗、静電容量測定を実施
- ②高圧電源をステップ状に上昇させて信号回路の反応を確認
- ③原子炉自動停止時の検出器の指示値は4chとも低下傾向を示しており、故障の可能性は低い

異常なし

制御盤の点検および健全性確認

- ④模擬入力により設定器が動作することおよび動作信号が原子炉保護系計器ラックへ伝達していることを確認
- ⑤原子炉保護系計器ラック以降の制御盤は実際に中性子束の指示値が低下し、動作していることを確認

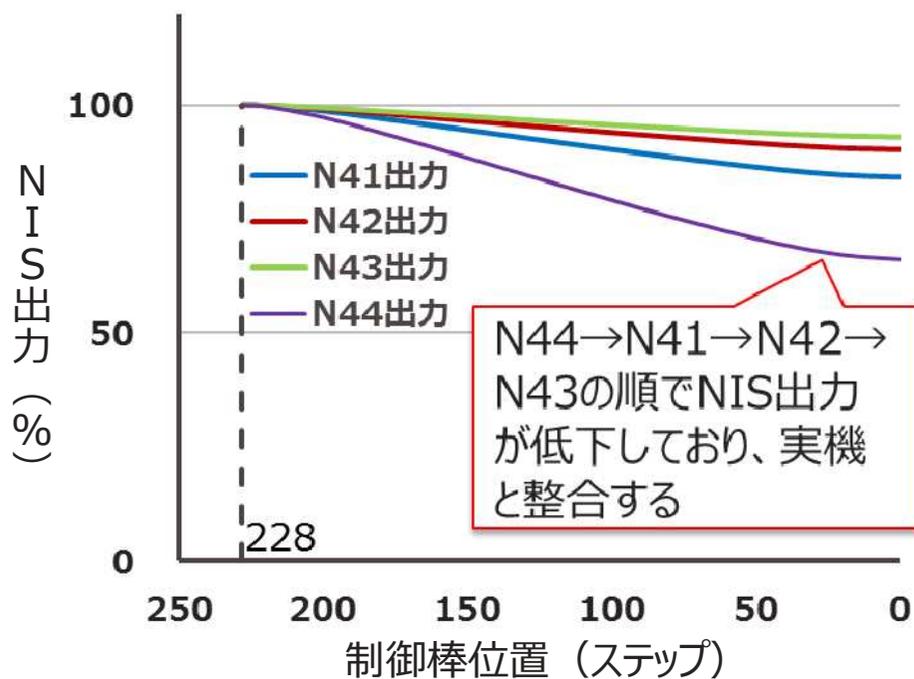
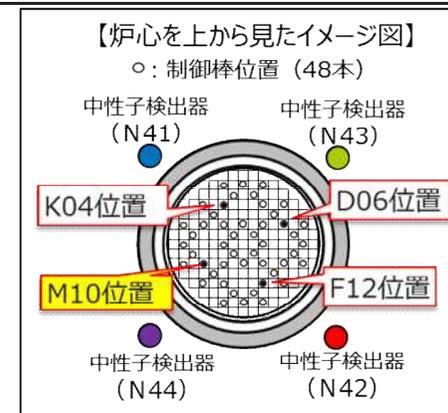
異常なし



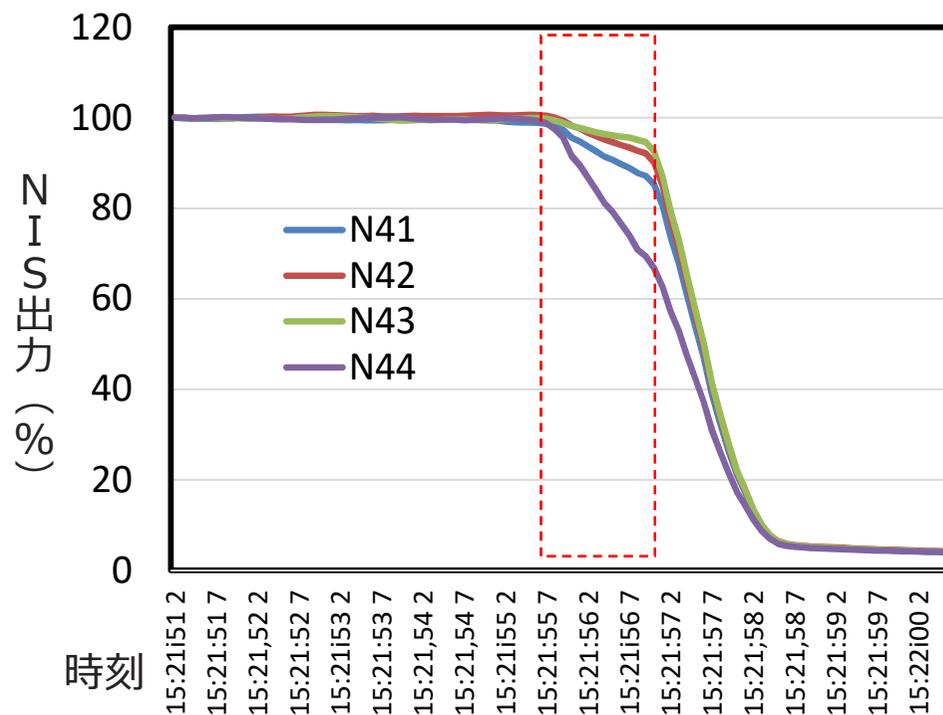
- 原子炉が自動停止した際に落下した制御棒を特定するため、2 B D パワーキャビネット（以下、2 B D 盤）で制御される、制御バンク B グループ 2 の 4 本を対象に、単独または複数の組合せで炉心に 2 0 ステップずつ挿入させた場合の挙動を解析し、実機の N I S 出力トレンドとの比較を行った。

【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。



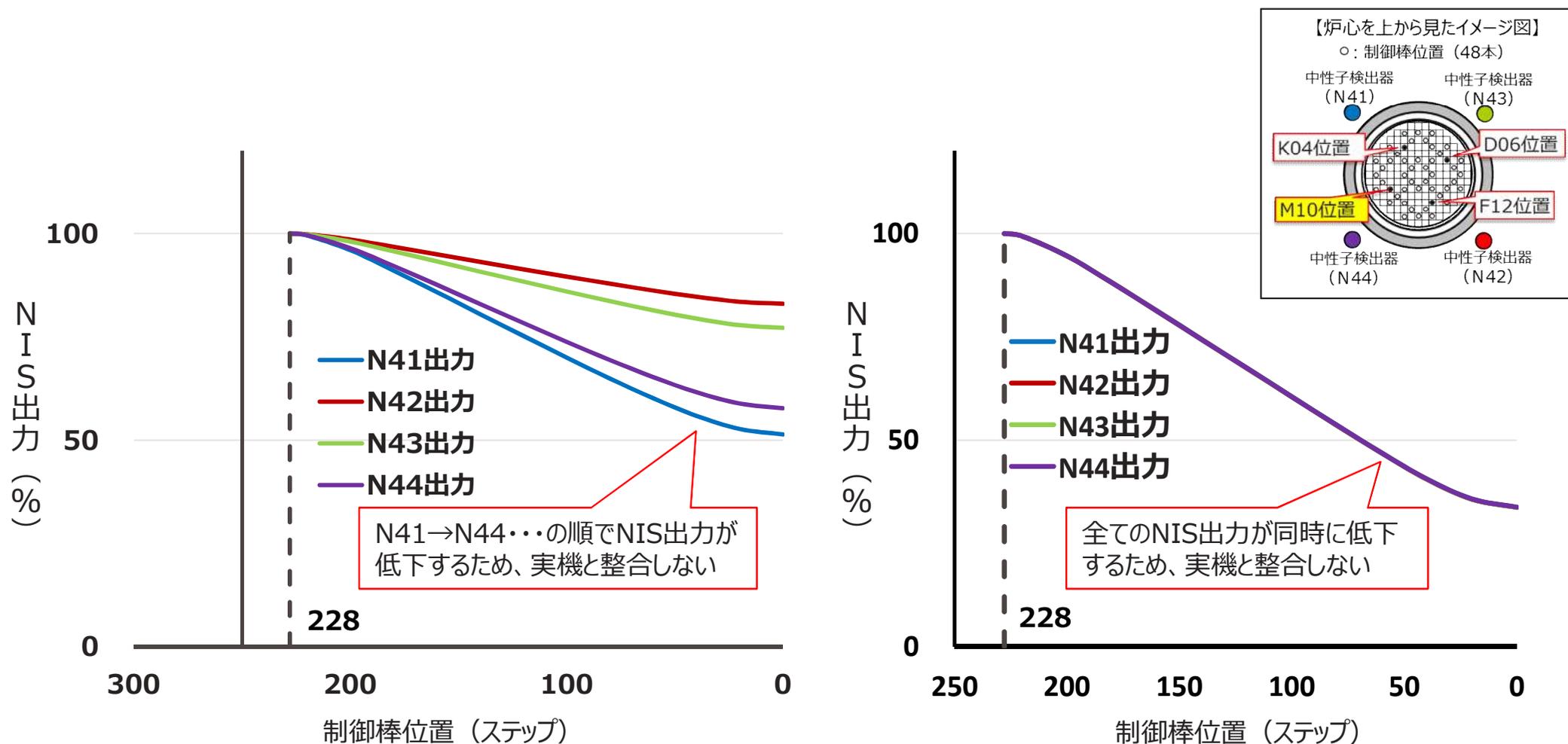
1本 (M 1 0 位置) 挿入の N I S 出力



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。

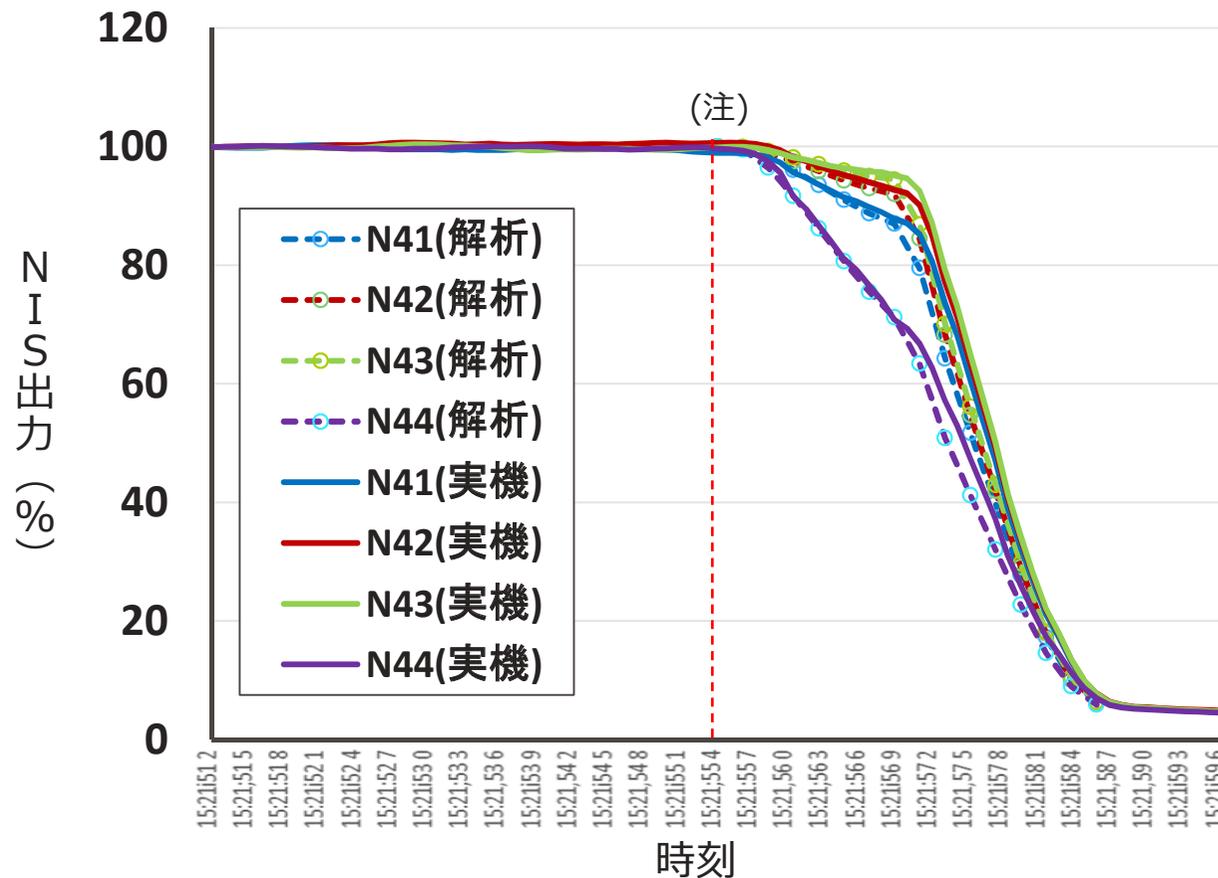


2本（M10位置とK04位置）
同時挿入のNIS出力

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。

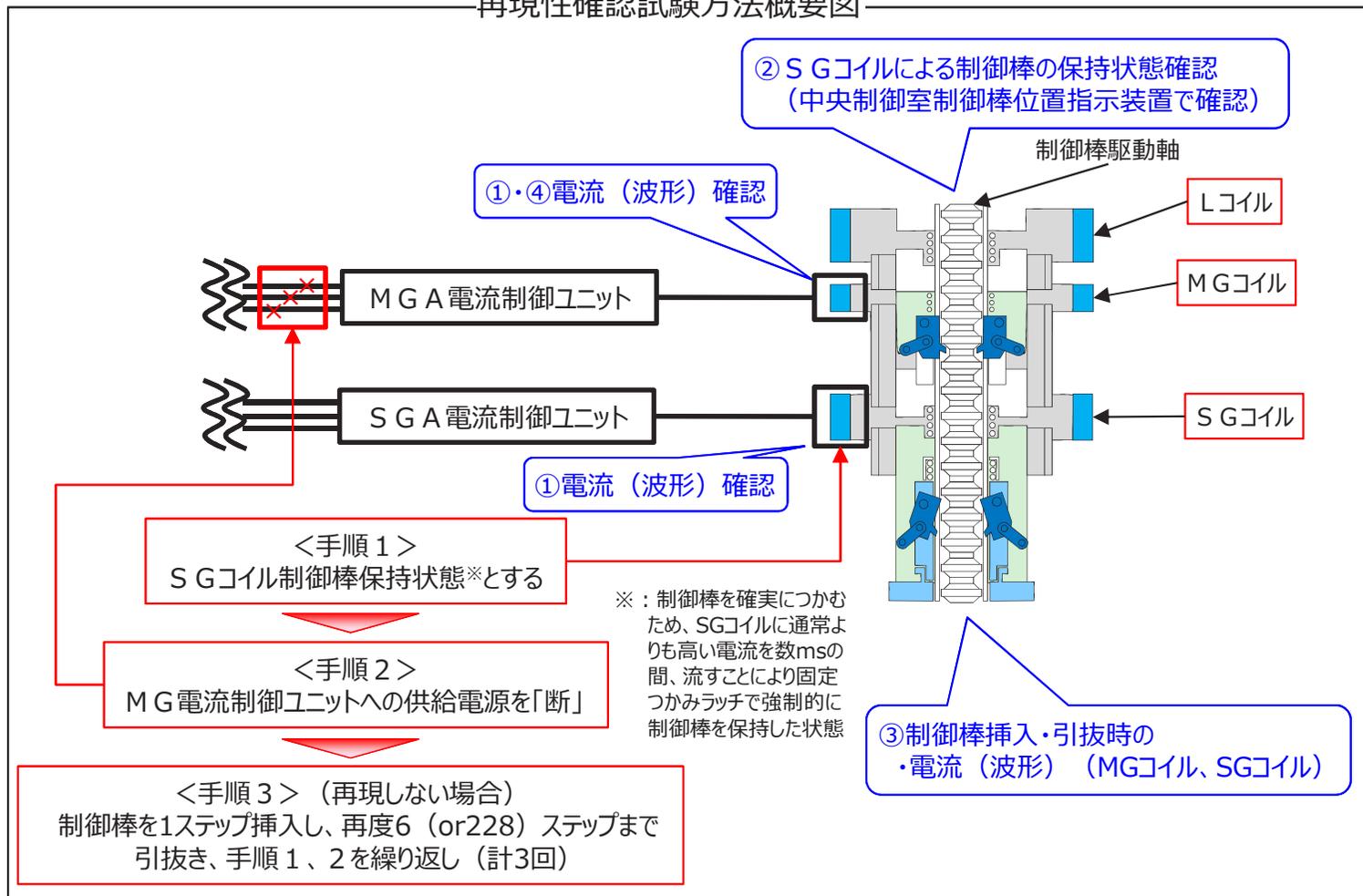


(注) 解析では、時刻 [15:21;55 4] でM 1 0 の挿入開始が生じたものとしている。

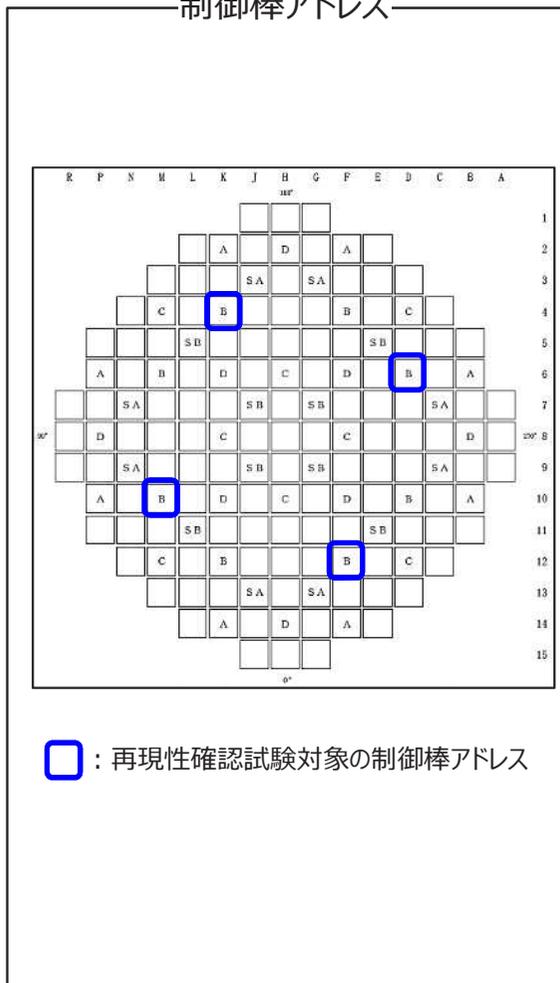
➤ MGコイルを電源断とした時の、SGコイルによる制御棒の保持状態への影響有無について、以下の方法で確認した結果、6ステップおよび228ステップともに再現性は確認できなかった。

- ① 2BD盤のMGA電流制御ユニット電源を「断」としたときのSGコイル電流およびMGコイル電流をレコーダで確認・記録
- ② SGコイルの保持状態を、中央制御室制御棒位置指示装置で確認・記録
- ③ 挿入・引抜の際は、SGコイル電流・MGコイル電流を確認
- ④ MGコイル制御棒保持状態のMGコイル電流をレコーダで確認・記録

再現性確認試験方法概要図



制御棒アドレス



2. 原因調査（CRDM駆動機構の調査（1／2））

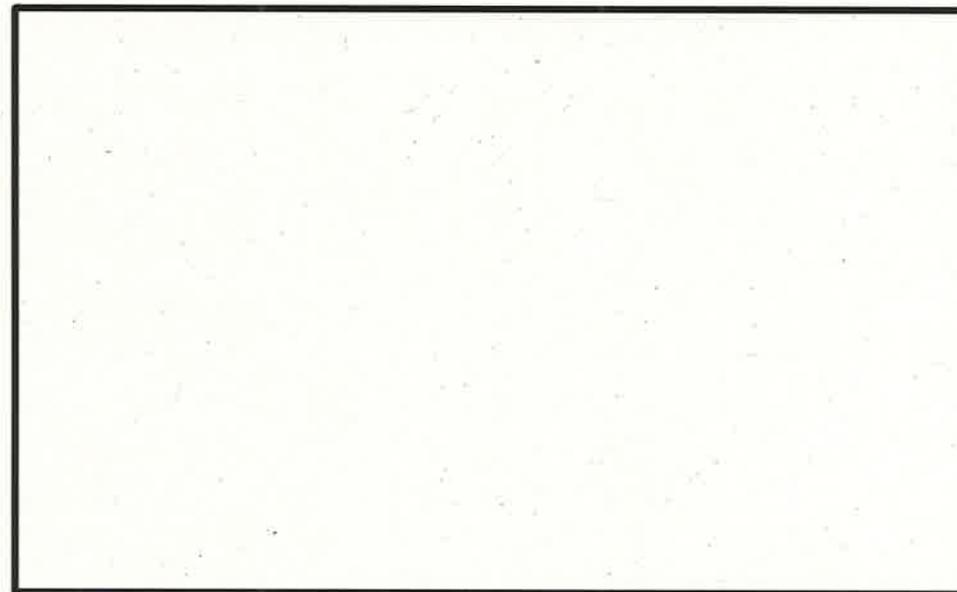
- 実機動作確認等を実施した結果、CRDM駆動機構の機械的要因により今回の事象が発生する可能性はないことを確認した。

【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））
0～228ステップの引抜／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。

【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））
0～228ステップの引抜／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））
✓ 228ステップ位置より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。



ステッピング試験
引抜操作の代表波形（M10：227⇒228）

- 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）

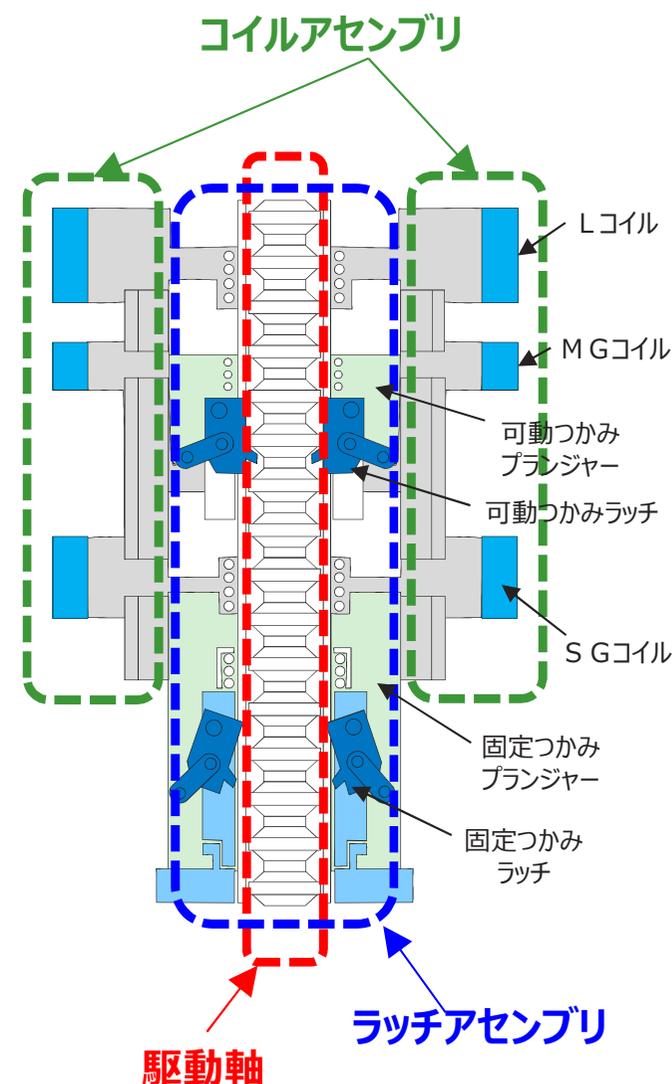
- ✓ ラッチアセンブリ：2007年（原子炉容器上蓋取替に伴う取替）
- ✓ 駆動軸：取替実績なし
- ✓ コイルアセンブリ：取替実績なし

● 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。

（P L M評価）

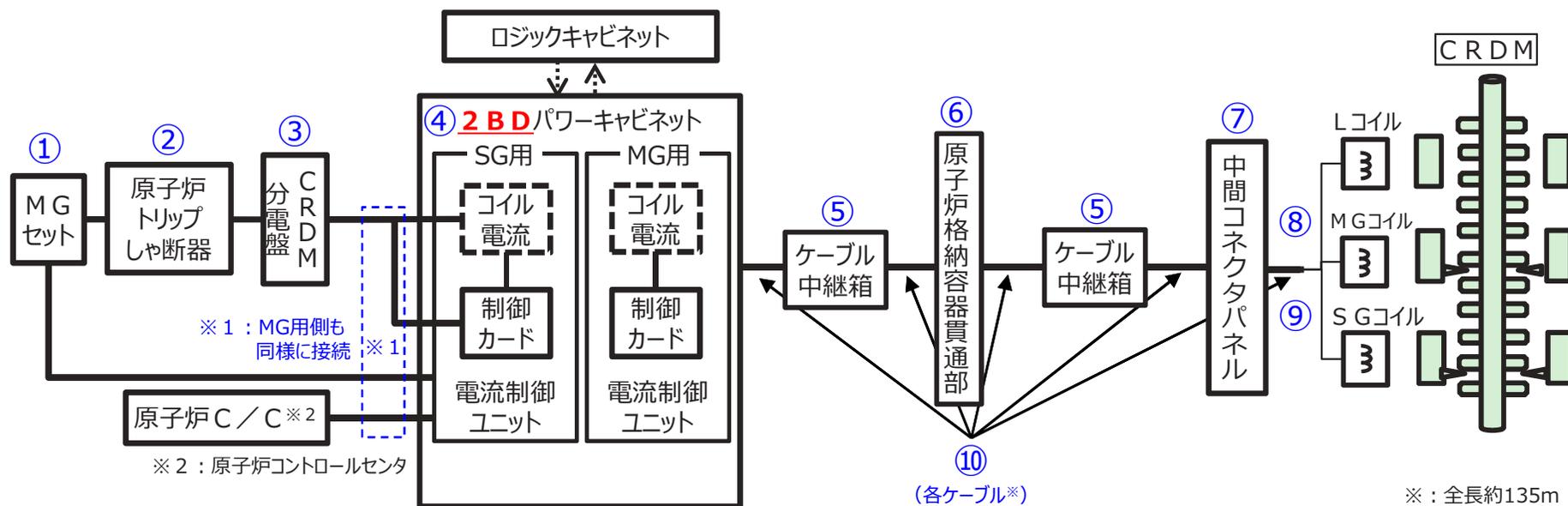
- ✓ ラッチ機構プランジャー摺動部
 - ✓ ラッチアームおよび駆動軸の接触部の摩耗
- ⇒ いずれも、実機取替品（高浜1号機）でのサンプリング調査結果を踏まえ、想定した動作回数での摩耗量が、許容摩耗量と比較して十分小さいことを確認。



2. 原因調査（CRDM制御盤・ケーブル等の調査）

- CRDM制御盤やケーブル等の以下の電気関係機器について、現場において各機器個別（単体）で点検を実施し、全ての機器で異常は確認できなかった。
- そのため、原子炉自動停止前にMGコイルの電流値が通常よりも低かったことを踏まえ、2BD盤内機器を対象にメーカ工場で詳細調査を実施。 ➡ 17

点検部位	主な点検内容
① モータ発電機セット（MGセット）	絶縁抵抗測定、試運転
② 原子炉トリップしゃ断器	絶縁抵抗測定、外観点検、動作確認（手動・電動）
③ CRDM分電盤	NFB状態確認
④ CRDM制御盤（2BD盤）	制御盤内外観点検、絶縁抵抗測定、再現確認試験（電圧・電流波形測定）
⑤ ケーブル中継箱（C/V外、C/V内）	ケーブル接続状態確認
⑥ 原子炉格納容器貫通部	外観点検
⑦ 中間コネクタパネル	外観点検
⑧ MGコイル	絶縁抵抗測定、コイル抵抗測定、コイル電流測定
⑨ SGコイル	絶縁抵抗測定、コイル抵抗測定、コイル電流測定
⑩ 各ケーブル	外観点検、絶縁抵抗測定



➤ 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）

パワーキャビネット外観

(表面)

(裏面)

工場詳細調査対象
①電流制御ユニット (SGAおよびMGA)

工場詳細調査対象
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)

SG側ユニット MG側ユニット

(例) SG側ユニット

2BDパワーキャビネット

SGA MGA

コイル電流

制御カード

電流制御ユニット

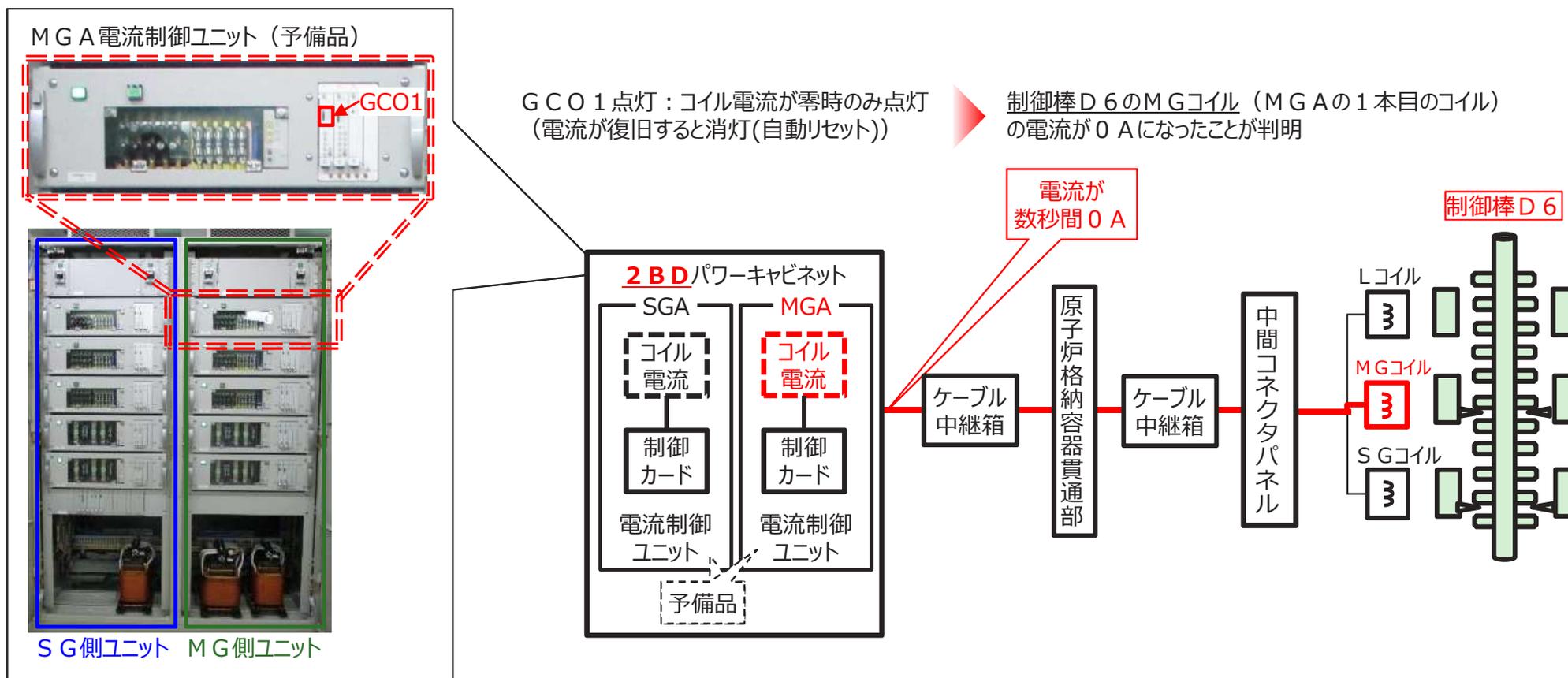
電流制御ユニット

【主な調査項目】

	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 (IGBT)	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・カード接栓	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	

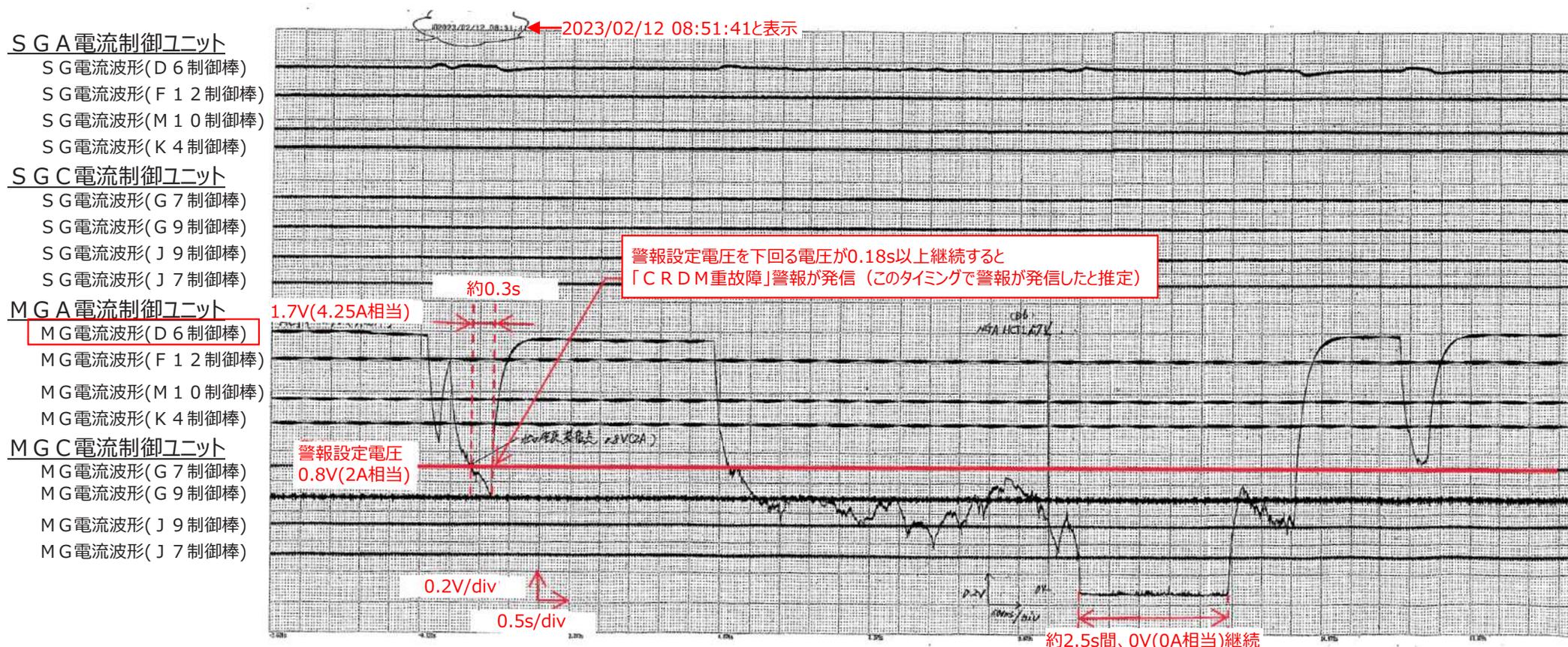
➤ D 6 制御棒の電流低下の再発状況

- 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時51分に「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D 6 制御棒の異常を示す「GCO 1」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時51分および09時02分に、D 6 制御棒のMGコイル電流の変動が見られ、数秒間0 Aとなっていることを確認



➤ 計測された電流波形データ (D 6 制御棒のMGコイル電流)

- ✓ 2月12日08時51分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低下があったのは、D 6 制御棒のMGコイル電流のみであった。

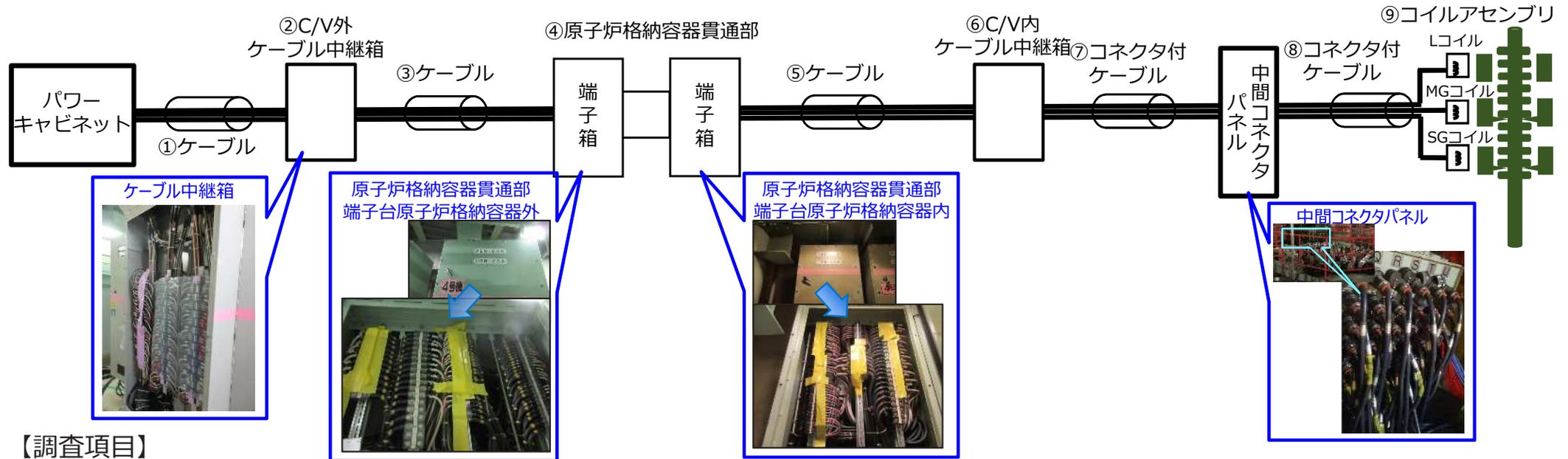


2月12日08時51分時点の電流波形データ

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。

2. 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 (+・-)	S G	異常なし	— ※ 2							
			M G	異常なし	— ※ 2							
			L	異常なし	— ※ 2							
		回路間	S G - M G	異常なし	異常なし							
			M G - L	異常なし	異常なし							
			L - M G	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		

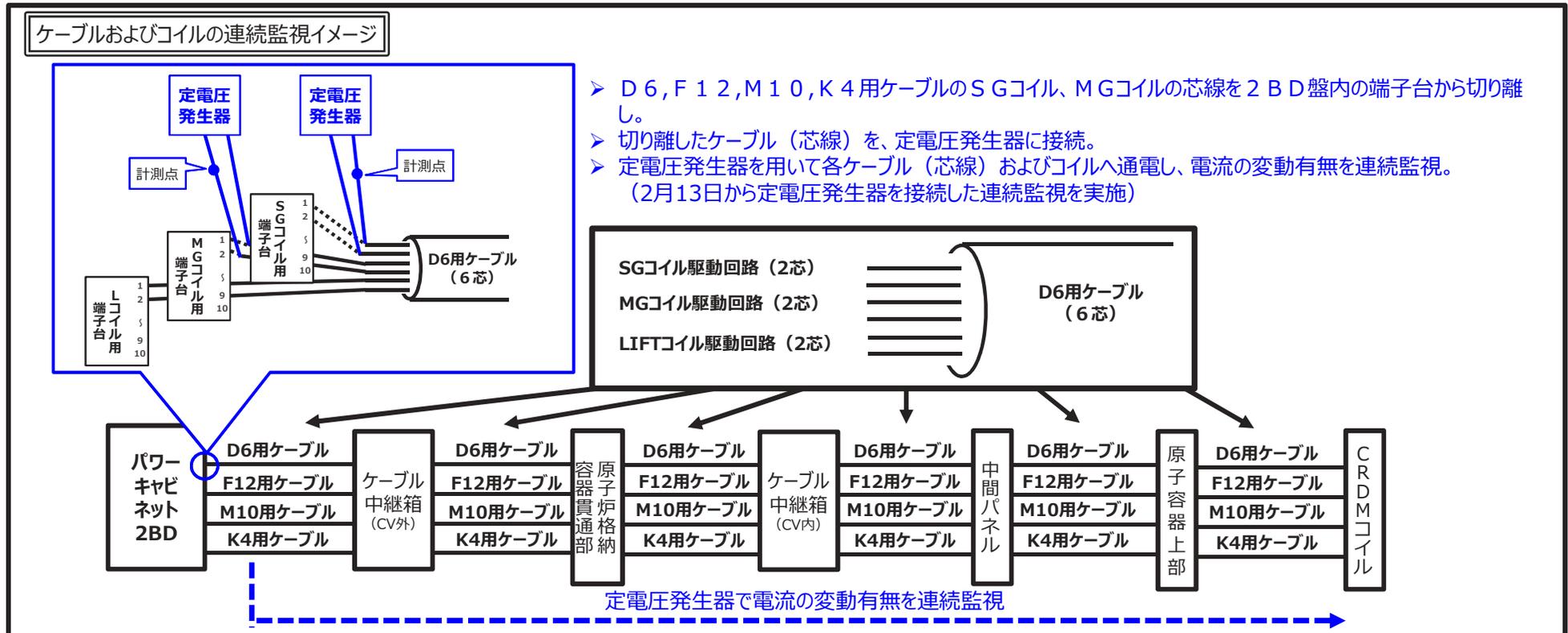
※ 1 : 可視可能範囲を実施
 ※ 2 : 実施不可

➤ 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2 B D盤のS G AおよびM G A電流制御ユニットと連動する制御棒（D 6, F 1 2, M 1 0, K 4）のケーブルを2 B D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低下があることを確認した。
 - ✓ 2月15日～16日：M 1 0 制御棒のM Gコイル
 - ✓ 2月18日～19日：K 4 制御棒のS Gコイル ※：「CRDM重故障」警報発信（電流2.0A以下）相当の低下有り
 - ✓ 2月19日～20日：M 1 0 制御棒のS Gコイル、D 6 制御棒のM Gコイル※、K 4 制御棒のS Gコイル
 - ✓ 2月20日～21日：M 1 0 制御棒のS Gコイル、K 4 制御棒のS Gコイル

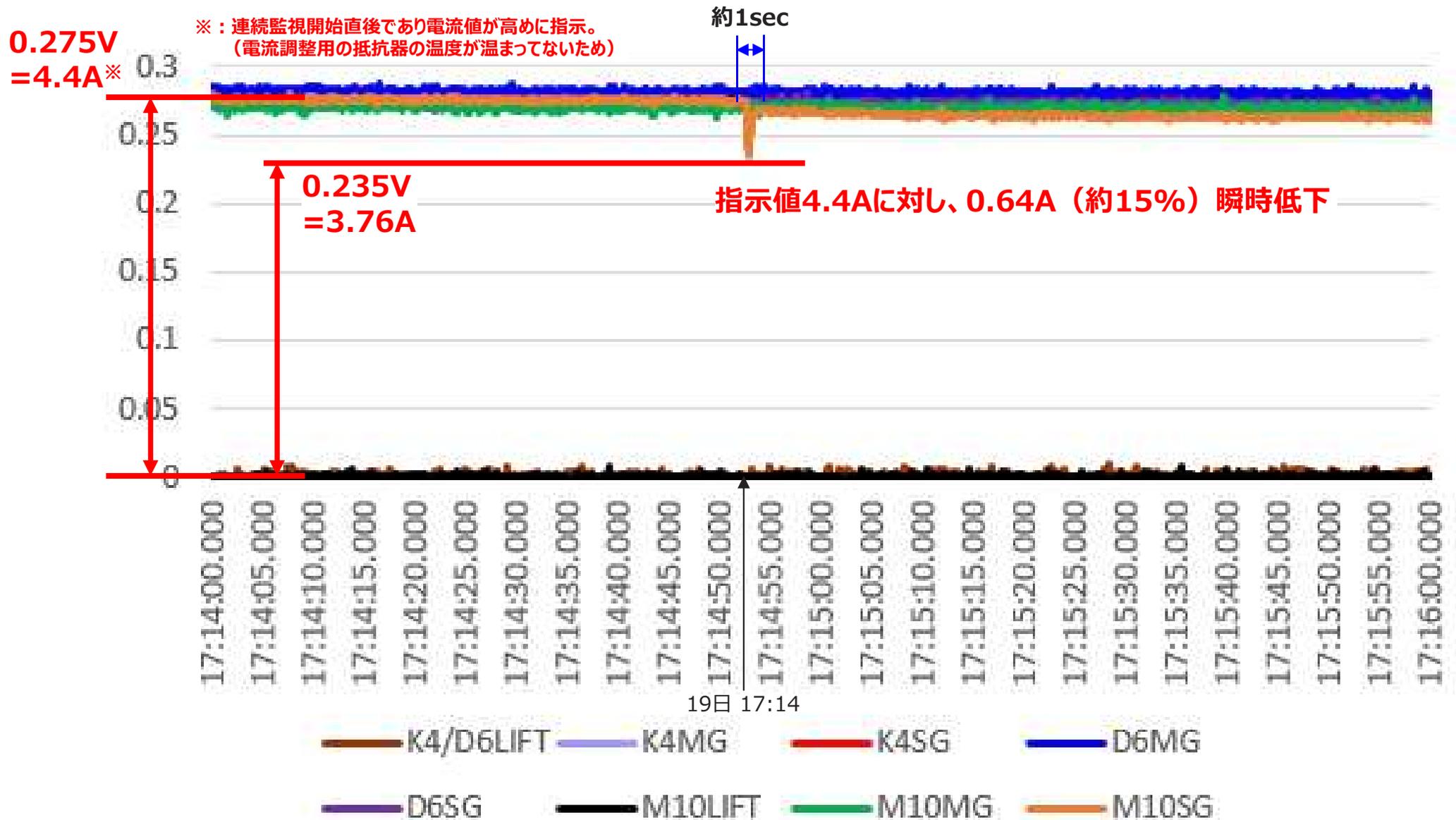
⇒ 23 ~ 25

⇒ D 6、M 1 0、K 4 制御棒において、パワーキャビネット～コイル間で電流低下が発生する可能性がある。

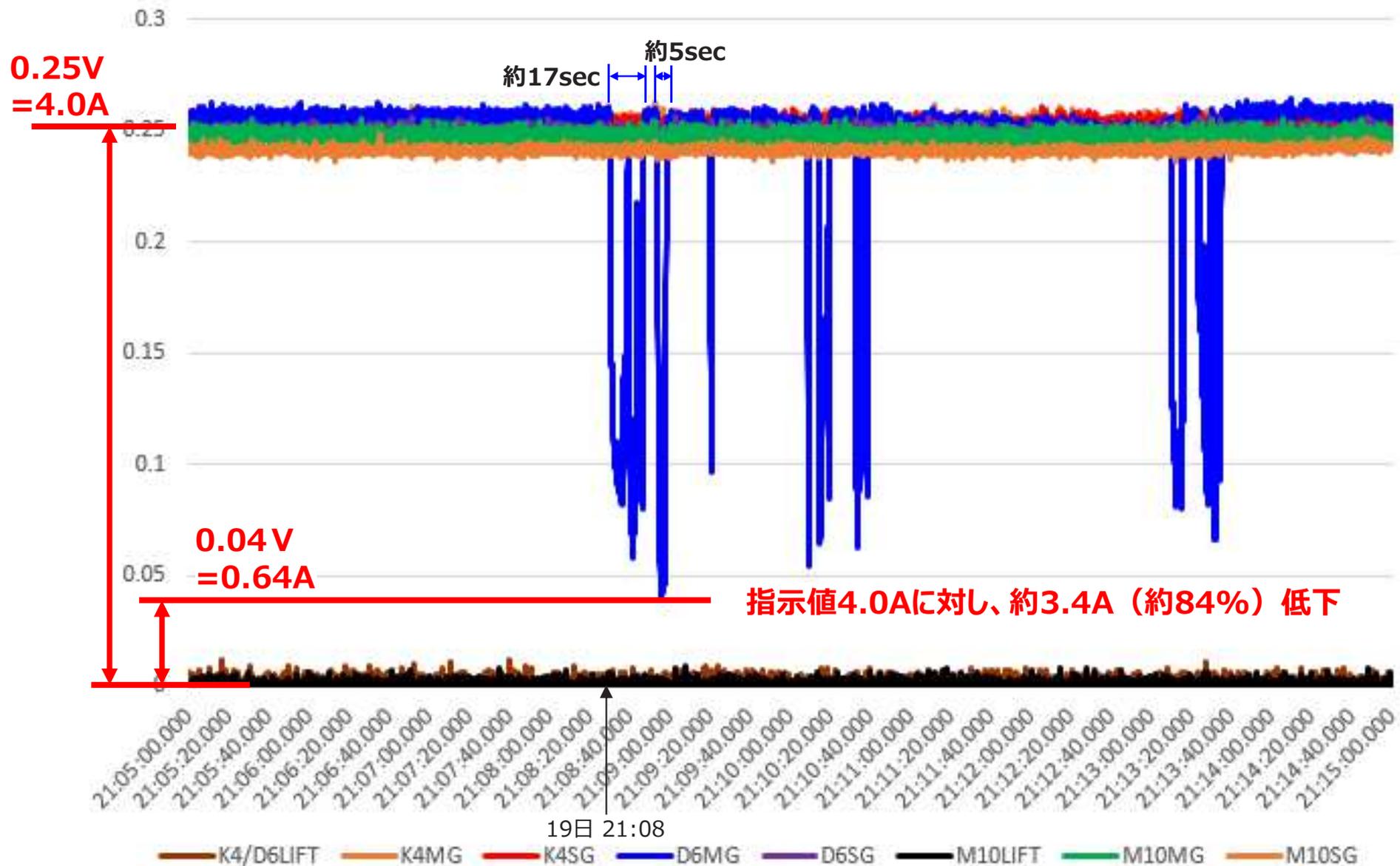


➤ 2月19日～20日の間で確認されたM10制御棒SGコイル電流低下

- 「CRDM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、軽微な電流低下が確認された。

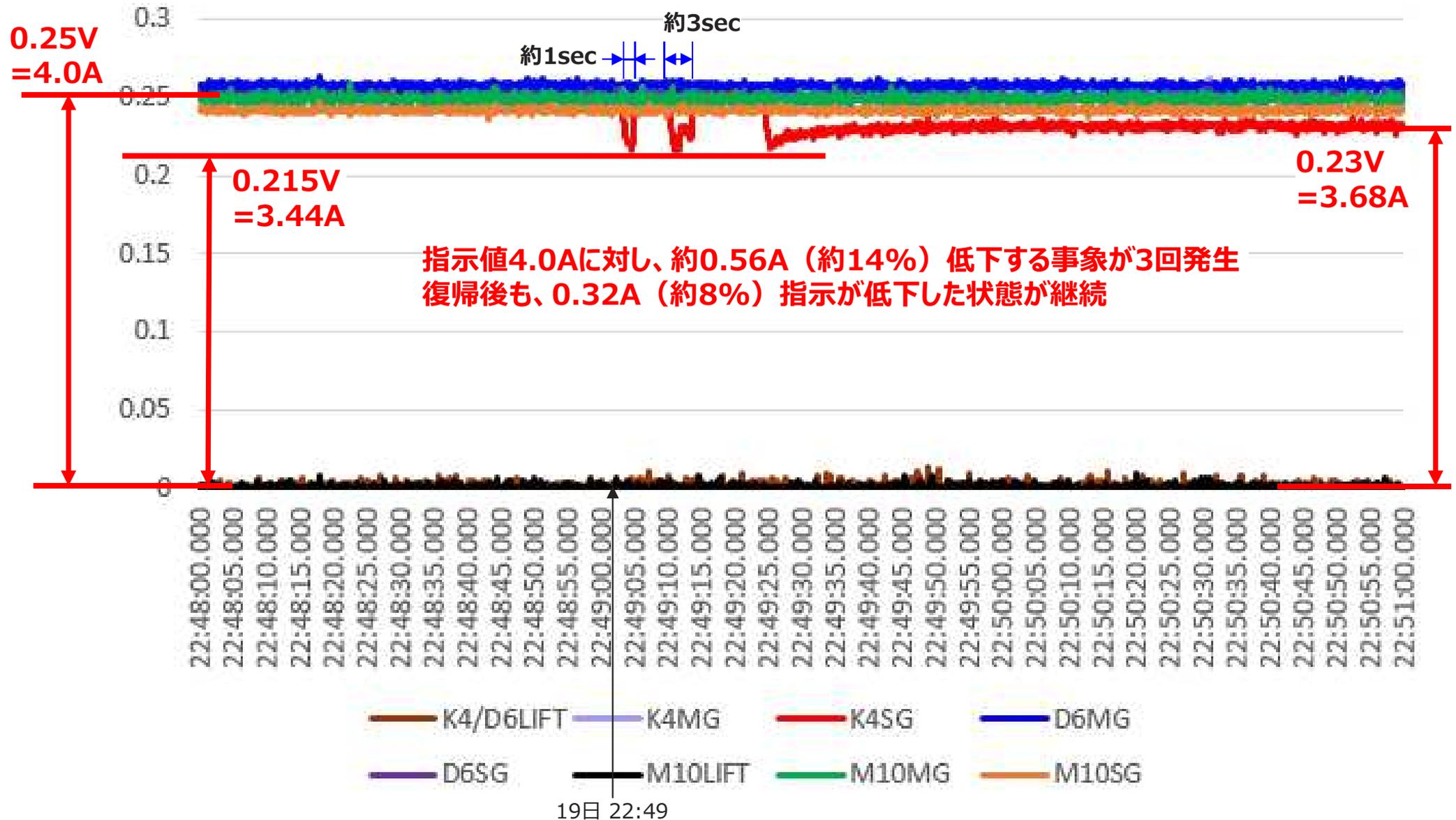


- 2月19日～20日の間で確認されたD 6 制御棒MGコイル電流低下
 - 「CRDM重故障」警報の発信に相当する電流低下が確認された。



➤ 2月19日～20日の間で確認されたK 4 制御棒 S Gコイル電流低下

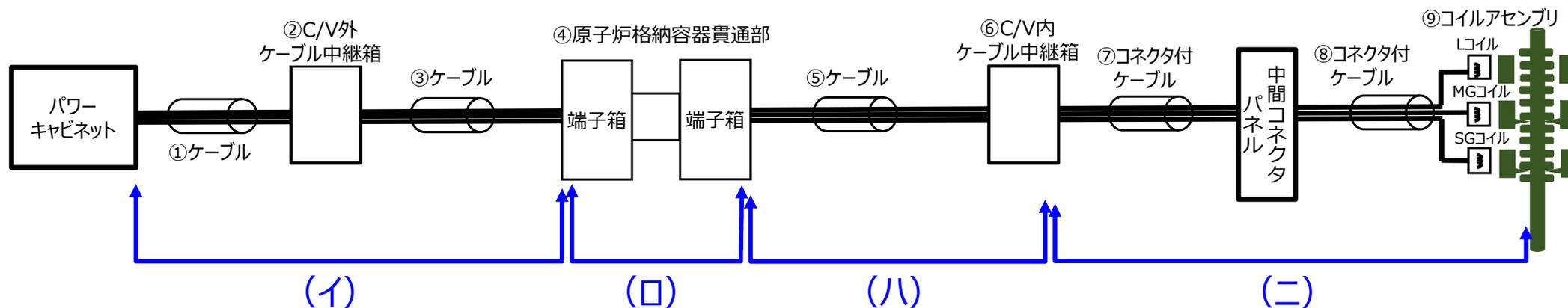
- 「CRDM重故障」警報の発信や制御棒の保持機能に影響を及ぼすレベルではない、軽微な電流低下が確認された。



➤ 故障が発生している箇所のさらなる特定方法

- 以下の回路を対象に、下図（イ）～（ニ）それぞれを切り離した状態で、定電圧発生器を用いて通電し、電流変化の有無を連続監視（2月23日～）

- M 1 0 制御棒 M G コイル
- M 1 0 制御棒 S G コイル
- D 6 制御棒 M G コイル
- K 4 制御棒 S G コイル

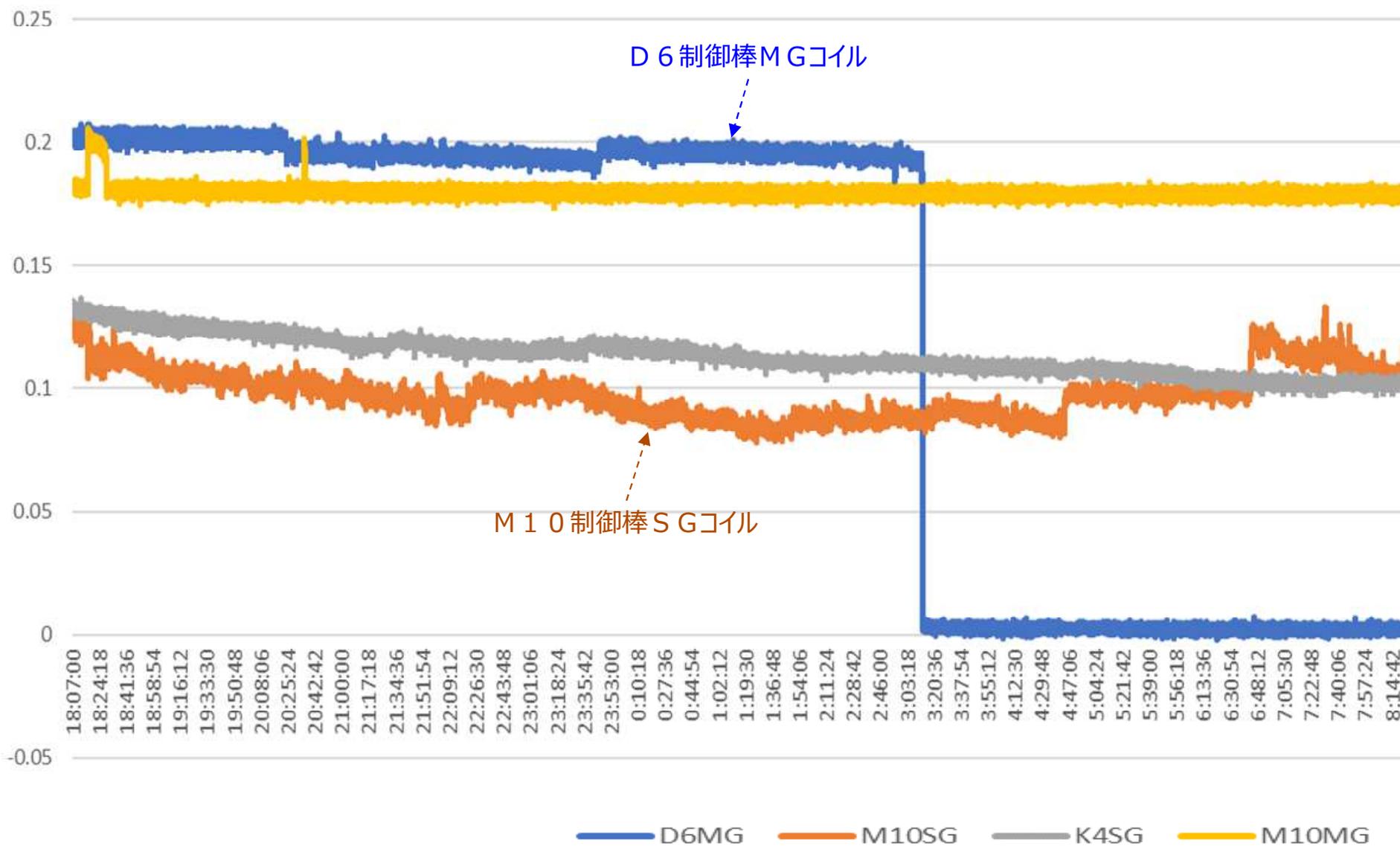


2月24日～25日の間に、（ロ）原子炉格納容器貫通部の端子箱～端子箱の間において、異常な電流低下を確認

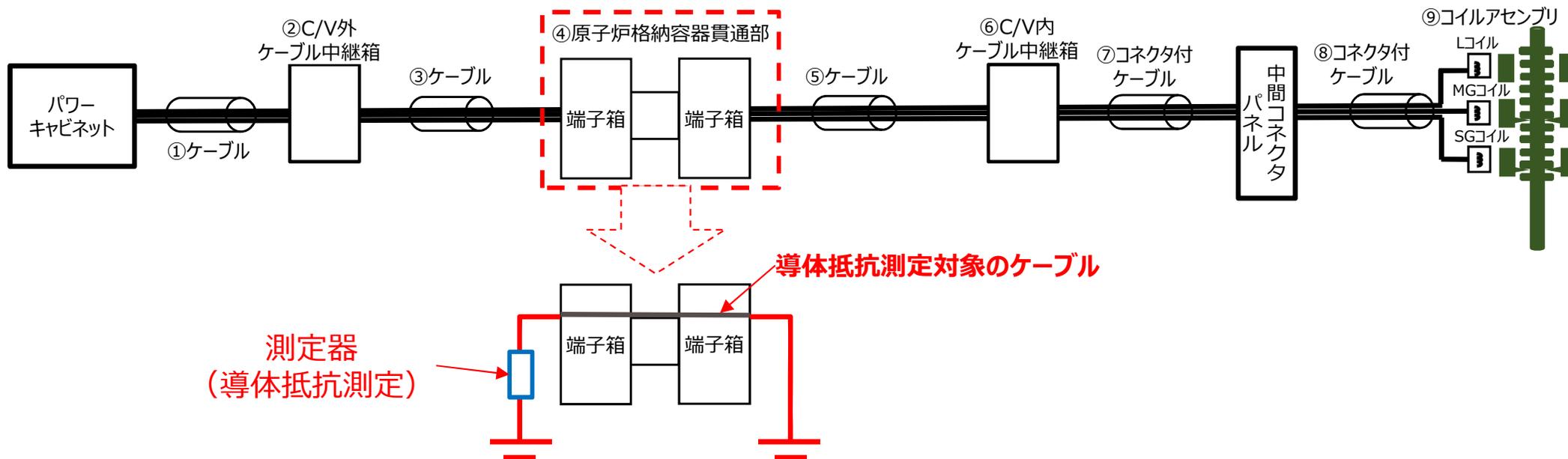
2. 原因調査（故障が発生している箇所のさらなる特定（2 / 3））

➤ 原子炉格納容器貫通部の端子箱～端子箱の間で確認された電流低下

2月24日～25日 (□) 原子炉格納容器貫通部の端子箱～端子箱の連続監視結果



➤ 原子炉格納容器貫通部の端子箱～端子箱の間で確認された導体抵抗増加事象を踏まえた調査

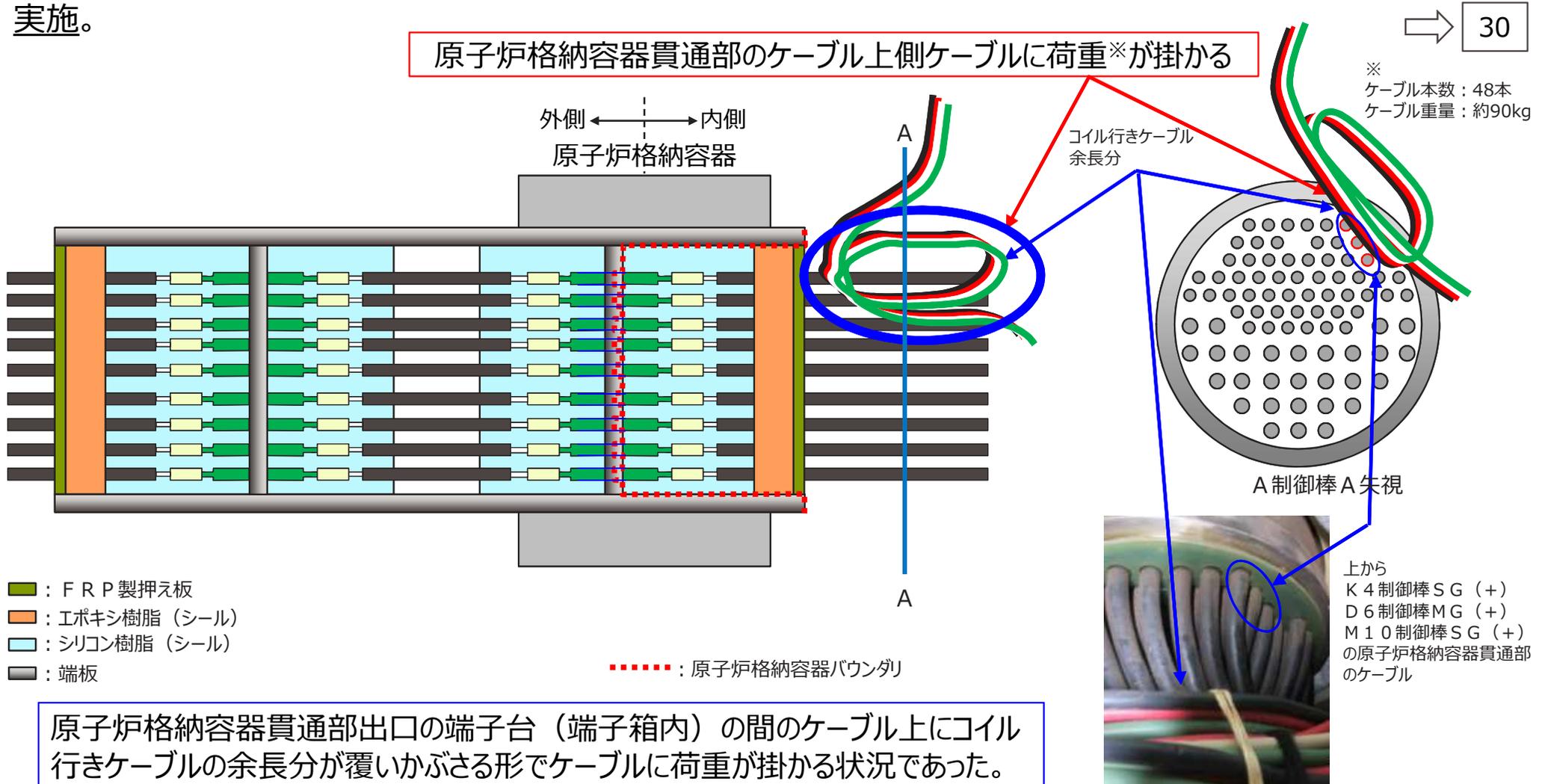


原子炉格納容器貫通部の端子箱～端子箱の間の導体抵抗測定結果（2月25日）

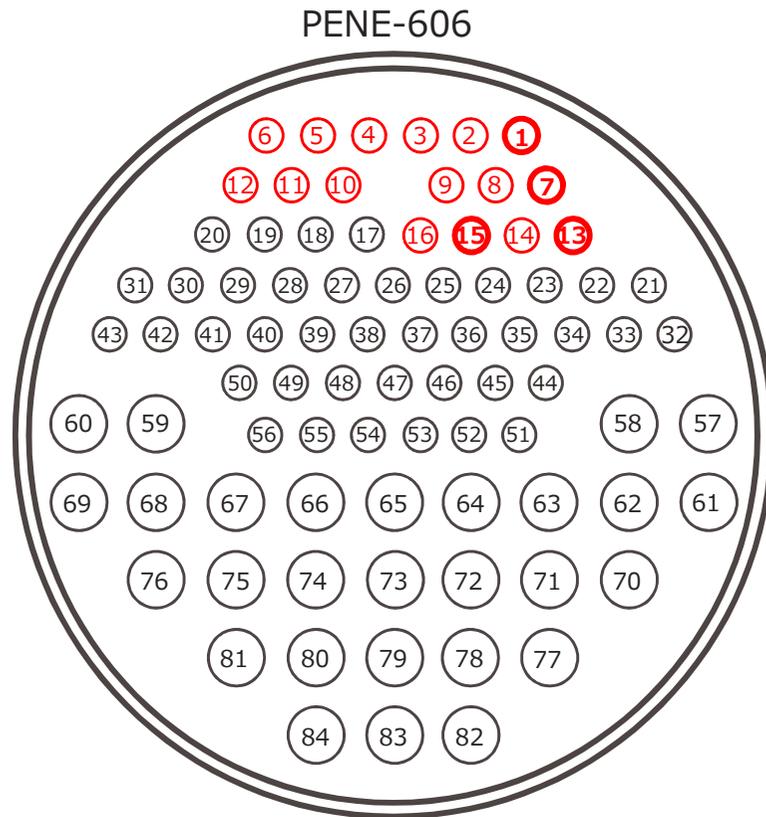
対象		導体抵抗値
K 4 制御棒	SGコイル (+)	0.46 Ω
	SGコイル (-)	0.44 Ω
D 6 制御棒	MGコイル (+)	93.18 Ω
	MGコイル (-)	0.40 Ω
M 1 0 制御棒	SGコイル (+)	3.03 Ω
	SGコイル (-)	0.41 Ω

D 6 制御棒MGコイルおよびM 1 0 制御棒SGコイルの回路について、導体抵抗値が高くなっていることを確認。原子炉格納容器貫通部の端子箱～端子箱の間における導体抵抗の大幅な増加が電流低下事象の要因と推定。なお、その他の (イ) (ハ) (ニ) の部位においては、有意な電流変動は確認されていない。

- 2月28日、原子炉格納容器内において、原子炉格納容器貫通部出口から端子台（端子箱内）間のケーブル上に、コイル行きケーブルの余長分が束なった状態で覆いかぶさっていることを確認した。
- D 6 制御棒 M G コイル、M 1 0 制御棒 S G コイル、K 4 制御棒 S G コイルのケーブルは、原子炉格納容器貫通部の上方に纏まって布設され、束ねたケーブルが覆いかぶさっており荷重を受けやすい状況であった。
- また、覆いかぶさったケーブルを持ち上げたところ、目視にて M 1 0 制御棒 S G コイル、K 4 制御棒 S G コイルに電流変動を確認した。
- そのため、原子炉格納容器貫通部のケーブル（原子炉格納容器内）を揺らしながら当該ケーブルの導体抵抗測定を実施。



➤ ケーブルを揺らしながらの抵抗値測定結果



※原子炉格納容器内から見た図

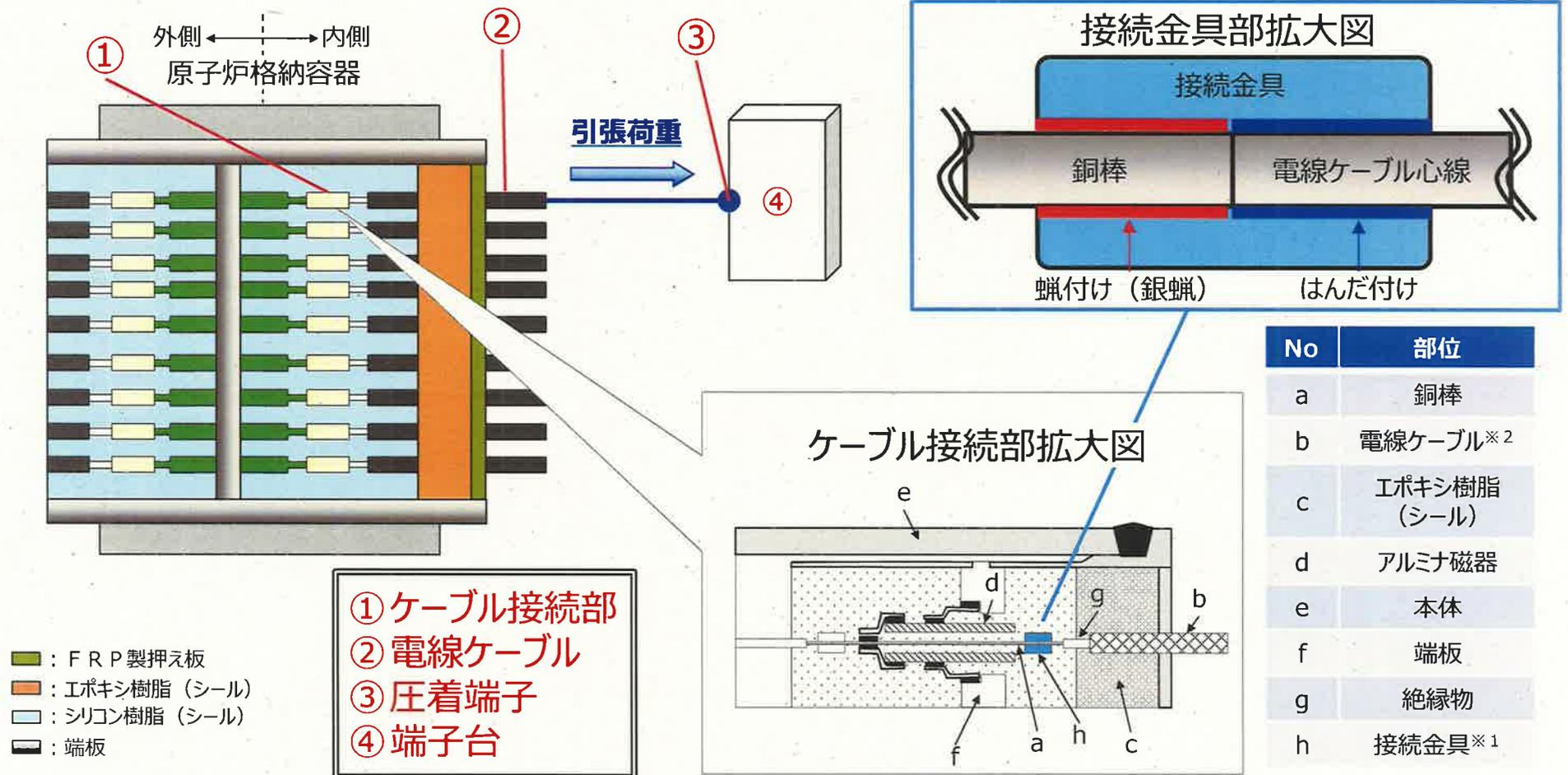
番号	対象	抵抗値 (Ω)
1	K 4 制御棒 S G コイル (+)	0.707~1.05
2	K 4 制御棒 S G コイル (-)	0.506
3	K 4 制御棒 M G コイル (+)	0.469
4	K 4 制御棒 M G コイル (-)	0.467
5	D 6 制御棒 S G コイル (+)	0.519
6	D 6 制御棒 S G コイル (-)	0.460
7	D 6 制御棒 M G コイル (+)	63~数千
8	D 6 制御棒 M G コイル (-)	0.465
9	F 1 2 制御棒 S G コイル (+)	0.458
10	F 1 2 制御棒 S G コイル (-)	0.518
11	F 1 2 制御棒 M G コイル (+)	0.460
12	F 1 2 制御棒 M G コイル (-)	0.458
13	M 1 0 制御棒 S G コイル (+)	4.827~5.34
14	M 1 0 制御棒 S G コイル (-)	0.460
15	M 1 0 制御棒 M G コイル (+)	0.907
16	M 1 0 制御棒 M G コイル (-)	0.460

- ✓ K 4 制御棒、D 6 制御棒、M 1 0 制御棒の回路について、導体抵抗値が変動することや高くなっていることを確認した。
- ✓ 上記より、原子炉格納容器貫通部出口から原子炉格納容器内側の端子台の間にケーブルが導通不良を起こしているものと推定した。
- ✓ なお、2 B D 盤以外のパワーキャビネットの制御棒も含め上記以外の制御棒 4 5 本のコイル電流については、パワーキャビネットに計測器を接続し、連続監視を実施しているが、有意な電流変動※は確認されていない。

※：電流値が約 5 % (約 0.3 A) 以上変動した場合に、電流波形を記録するように設定しているが、3 月 1 日現在において、電流波形は記録されていない。

2. 原因調査（原子炉格納容器貫通部のケーブル抵抗値増加のメカニズム（1/2））

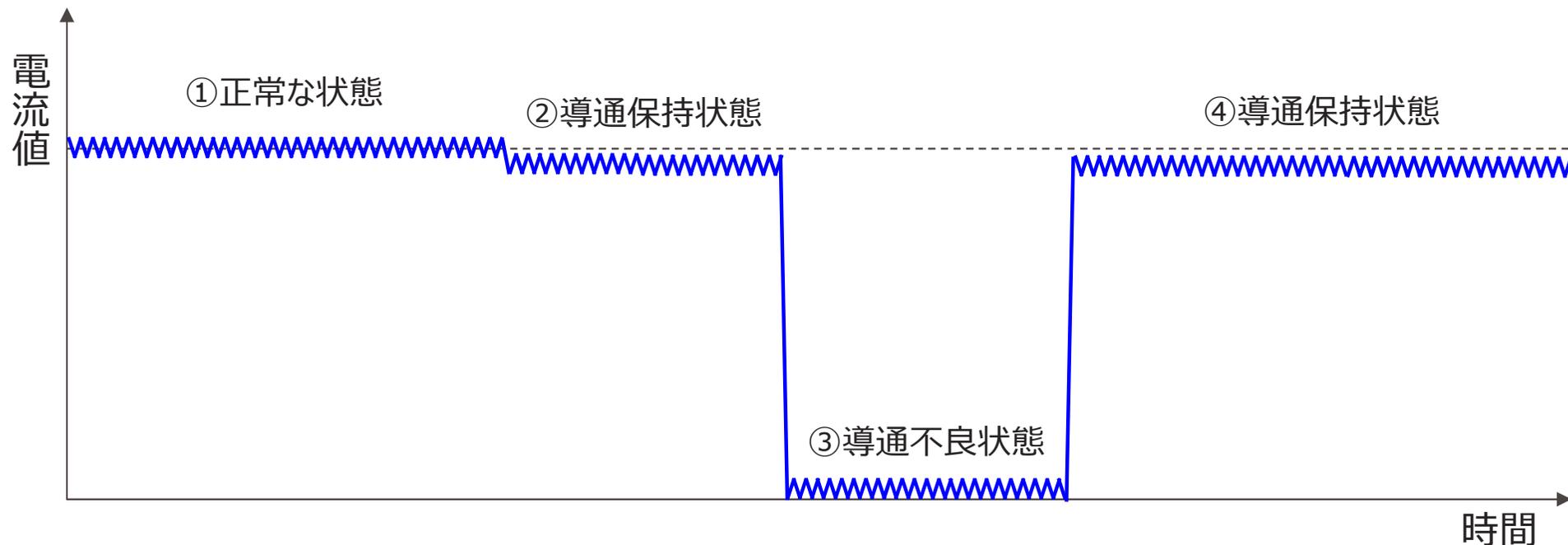
- ✓ 抵抗値の増加を計測した原子炉格納容器貫通部周辺部は、下図の①～④で構成されるが、現地調査にて③、④の健全性は確認済みである。また、ケーブル（②）の強度を考えると、不具合が生じていると考えられるのは原子炉格納容器貫通部内部の接続金具（①）と特定した。
- ✓ ケーブル(②)に過大な荷重（ケーブル自重：100N+外部ケーブルの積載重量：900N=約1000N）が作用することで、引張荷重が作用し接続金具(①)のはんだ付け部に不具合が生じる可能性が考えられる。



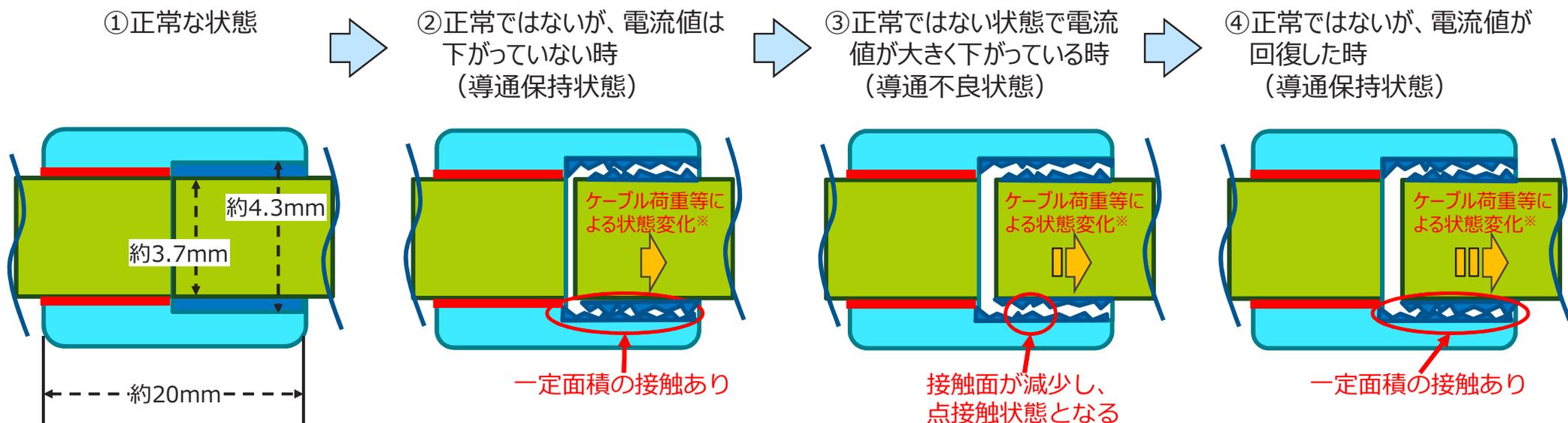
※1 接続金具のはんだ付け部耐力：個体差等の影響により約 ※2 ケーブル心線の耐力：約

: 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。

➤ 電流波形 (イメージ)



➤ 接続金具部の接触状態 (イメージ)



※：ポッティング材により大きく動くものではない

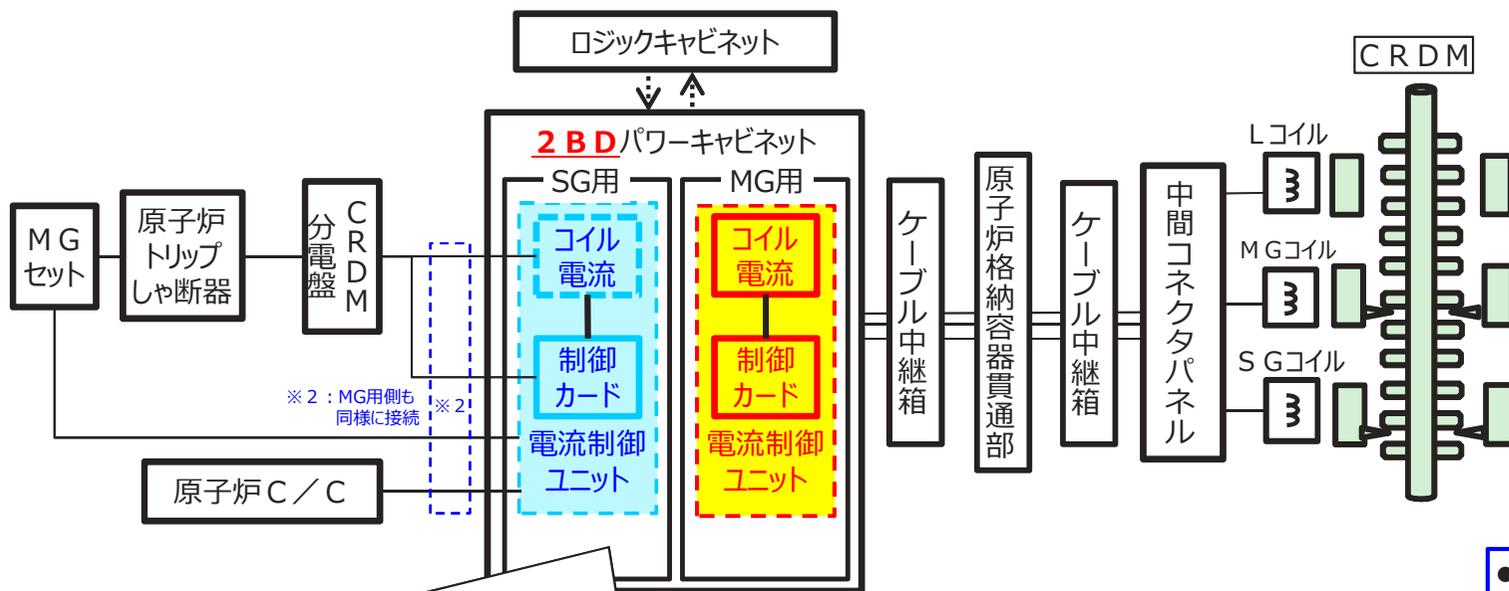
➤ 事象概要

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2 B D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。

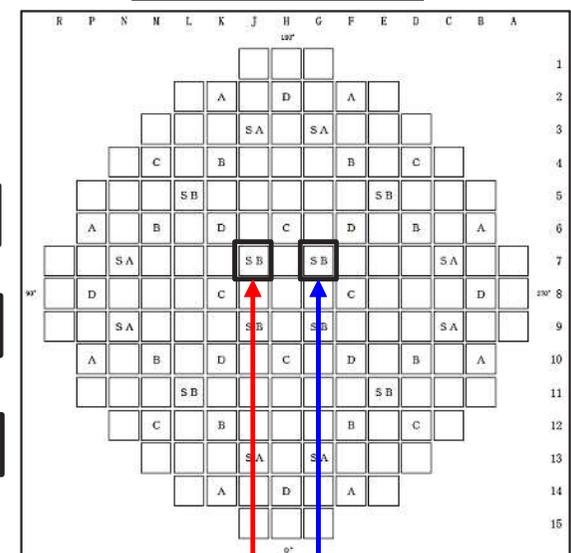
その通電確認後、2 B D盤の電流制御ユニットから模擬コイルを取り外すため、M G A、S G A、M G B、S G Bの制御電源、主電源を開放後、模擬コイルの取り外しを終え、各部電源の復旧を行っていた。

復旧する電源は計8個あるが、最後の8個目（S G B主電源）の復旧を行ったところ、電源投入を実施したS G Bと連動していないM G CおよびS G Cと連動する停止バンクの制御棒2本（G 7およびJ 7）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（S G A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



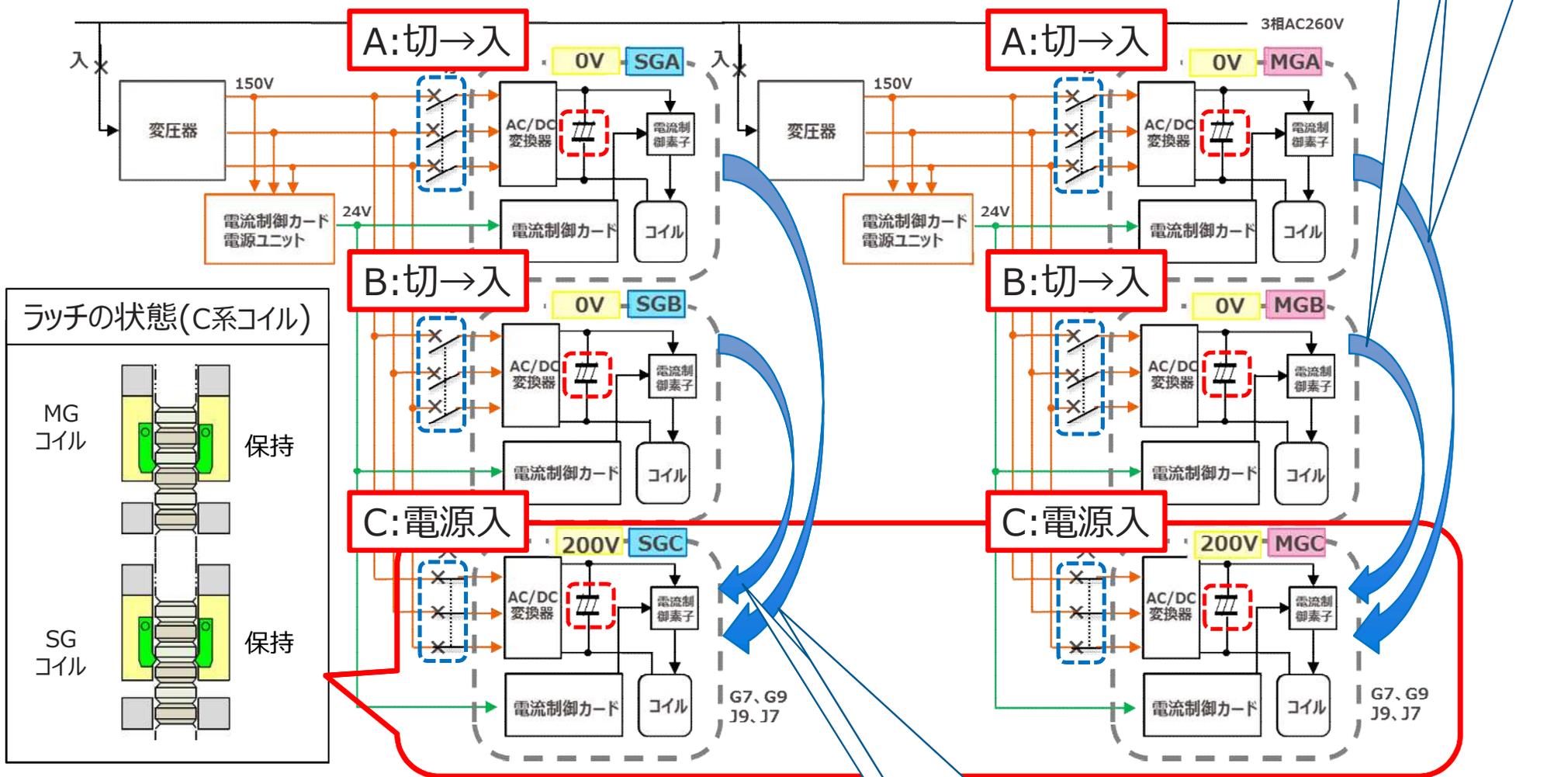
- G 7
 - ✓ 2/5の部分挿入：228ステップ ⇒ 約186ステップ
 - ✓ 2/7の部分挿入：228ステップ ⇒ 約222ステップ

- J 7
 - ✓ 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

2 B D盤のM G A・S G A・M G B・S G B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。
 ①M G A制御電源 ⇒ ②M G B制御電源 ⇒ ③M G A主電源 ⇒ ④M G B主電源 ⇒
 ⑤S G A制御電源 ⇒ ⑥S G B制御電源 ⇒ ⑦S G A主電源 (2/7事象) ⇒
 ⑧S G B主電源 (2/5事象)

➤ CRDM (2BD盤) の回路図

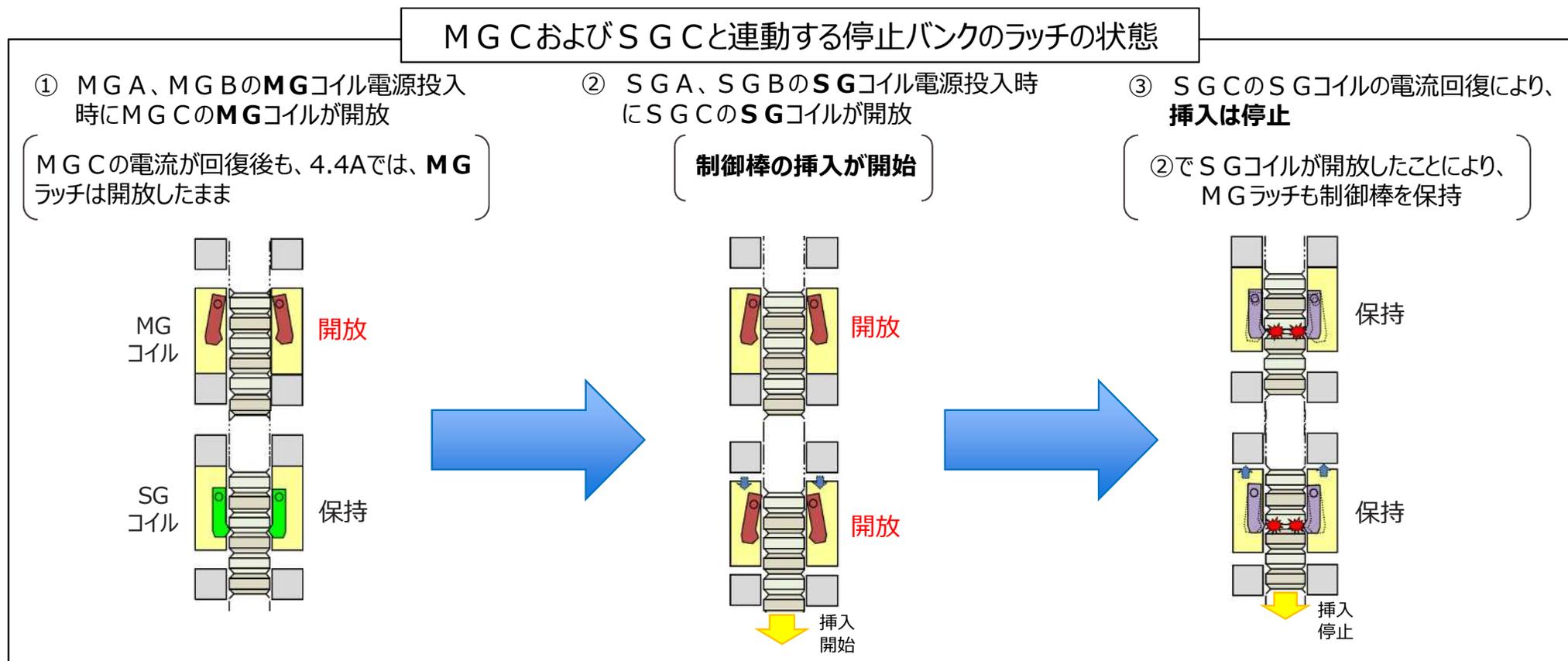
 : コンデンサ
 : 主電源
 : 電流制御ユニット



➤ 推定メカニズム

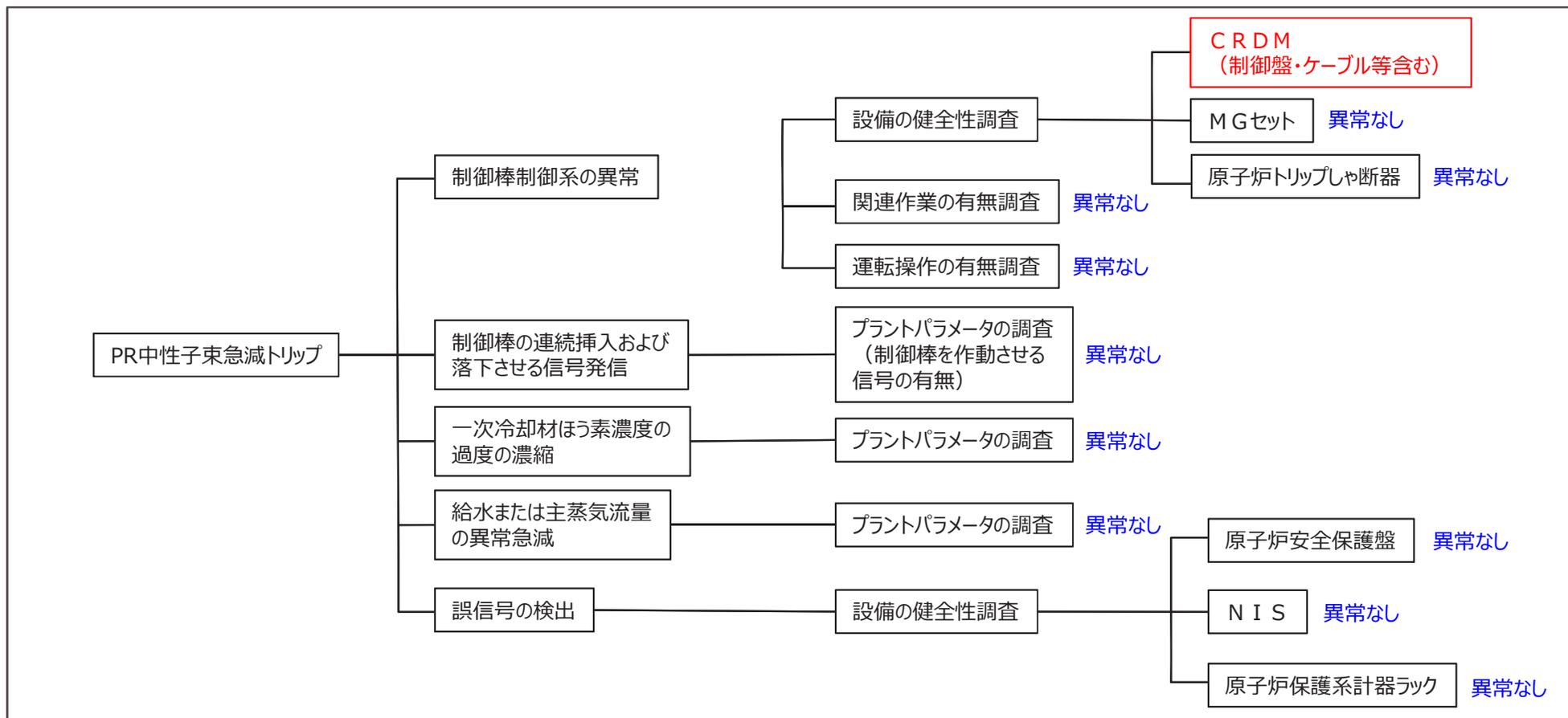
- ① MGA、MGBのMGコイルの電源投入の際に、MGCのMGコイルの電流が瞬間的に喪失
その後電流が回復したが、MGラッチは開放したまま※ ※：MGコイルの電流が4.4Aの電流が流れるもののSGコイルにより生じる磁力により、その電流ではMGラッチは開放状態が継続
- ② SGA、SGBのSGコイルの電源投入の際に、SGCのSGコイルの電流が瞬間的に喪失
制御棒が挿入開始
- ③ 電流回復により、MG・SGの両コイルにより、制御棒をつかみ、挿入は停止

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、主電源を開放操作し時間差で発生した**原子炉自動停止事象との関連性はない。**

- 「PR中性子束急減トリップ」の警報発信前のプラントパラメータに急変はなく、運転操作も実施していなかった。また、全ての中性子束検出器や安全保護回路等を点検した結果、異常は認められず、誤動作したものでないことを確認した。
- 警報発信は、制御棒が実際に挿入された可能性が高く、実機のNIS出力トレンドとNIS挙動解析結果を比較評価したところ、M10制御棒1本が挿入したものであると特定した。また、2チャンネルのNISが中性子束急減トリップの設定値で正常に動作していることを確認した。
- M10制御棒の挿入は、CRDMを実機動作した際の確認結果や製造記録等の調査にて機械的な要因でないことを確認した。



- 電氣的な要因調査として、CRDM制御盤からCRDMまでの構成部品について点検を行った結果、部品単体での異常は認められなかった。
 しかしながら、各構成部品を接続状態として連続監視していたところ、CRDM制御盤内の2BD電流制御ユニットを予備品と取り替えた後に再度、「CRDM重故障」の警報が発信し、D6制御棒のMGコイルにて大幅な電流低下を確認した。
- 2BD電流制御ユニットを切り離し、CRDMへの電力供給を定電圧発生器に切り替えて監視していたところ、複数の制御棒にてMGコイルおよびSGコイルに大小の電流低下を確認し、低下のタイミングや期間に連動は認められず、制御盤内でのスイッチ操作等は行っていなかった。

		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	MG	-	-	低下あり(推定)	-	低下あり(大)	-	-	低下あり(大)※	-
	SG	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M10	MG	-	-	-	-	-	低下あり(小)	-	-	-
	SG	-	-	-	低下あり(推定)	-	-	-	低下あり(小)※	低下あり(小)※
K4	MG	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SG	-	-	-	-	-	-	低下あり(小)	低下あり(小)※	低下あり(小)※
F12	MG	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SG	-	-	-	-	-	-	-	-	-
設備状態		通常運転中				D6・M10・K4・F12共通の電流制御ユニット(MG・SG)を予備品に取替えた上で連続監視		パワーキャビネット(2BD)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) : 「CRDM重故障」警報が発信するレベルの電流低下
 (小) : 「CRDM重故障」警報は発信せず、かつ、制御棒保持機能に影響がない範囲の電流低下
 ※それぞれ異なるタイミングで発生
 補足) 1月31日~2月24日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

- 以上の結果より、電流制御ユニットの上流側に異常はなく、CRDMまでの下流側に故障の要因があると判断した。

- 故障が発生している箇所に絞り込むため、原子炉格納容器貫通部の前・後に設置している端子台の間にて導体抵抗を測定した結果、D 6・M 1 0・K 4 制御棒のケーブルにて高い抵抗値が認められた。
- そのため、当該の原子炉格納容器内の端子箱内にある端子台の裏面を詳細観察したところ、原子炉格納容器貫通部から端子台に接続しているケーブル上に C R D M コイルに向かって布設しているケーブルが覆いかぶさっていることを確認した。なお、他の格納容器貫通部においては、ケーブルが覆いかぶさり荷重がかかっている箇所は認められなかった。
- D 6・M 1 0・K 4 のケーブルは、原子炉格納容器貫通部の上方に纏まって布設されており、比較的荷重を受けやすい環境であった。
また、原子炉格納容器貫通部出口のケーブルを揺らしながら導体抵抗を測定した結果、K 4 S G コイル、D 6 M G コイル、M 1 0 S G コイルにて抵抗値の変動が認められたことから、原子炉格納容器内の端子箱内にある端子台の間でケーブルが接触不良を起こしているものと推定した。
- 更に、これまでの連続監視にて 2 B D の A グループに属する D 6・M 1 0・K 4 の制御棒 3 本で認められた電流低下は、同グループに属する F 1 2 制御棒や他の制御グループに属する 4 4 本の制御棒では認められなかった。



原子炉格納容器貫通部の構造等から、D 6・M 1 0・K 4 制御棒のケーブル接続部で導通不良が発生しているものと推定。

なお、他のケーブルに導通不良はなく異常はないことを確認した。

➤ 推定原因

- ✓ 原子炉停止に至った「P R 中性子束急減トリップ」警報発信の原因は、C R D Mの電氣的な故障によるものであると推定した。
- ✓ また、シングルホールド状態にあったM 1 0のS Gラッチにおいて、コイルに電流を供給するケーブルのうち、原子炉格納容器貫通部の内部にあるケーブル接続部に引張力が作用することではんだ付けが剥離し、導通不良に伴う電流値の低下により、S Gラッチが開放されたものと推定した。
- ✓ このことにより、M 1 0制御棒が挿入され、2チャンネルのN I Sが中性子束急減トリップ設定値に至ったため、原子炉が自動停止したものと推定した。
- ✓ なお、コイルの電流低下は、主電源の開放操作を行っていない状態でも発生しており、原子炉自動停止時に行っていた作業との関連性はないものと推定した。

➤ 対策

- ✓ 電流低下が認められたD 6、M 1 0およびK 4のS GおよびM Gコイルのケーブルについて、以下の対策を行い電流低下の要因を排除する。
 - ① 制御棒3本のケーブルについては、他の原子炉格納容器貫通部にある予備ケーブルを使用する新たなルートに変更する。なお、予備ケーブルを使用する際には、健全性を確認したうえで接続する。
 - ② 原子炉格納容器貫通部出口のケーブルについては、覆いかぶさっていたケーブルの不要な余長を切断し再整線する。

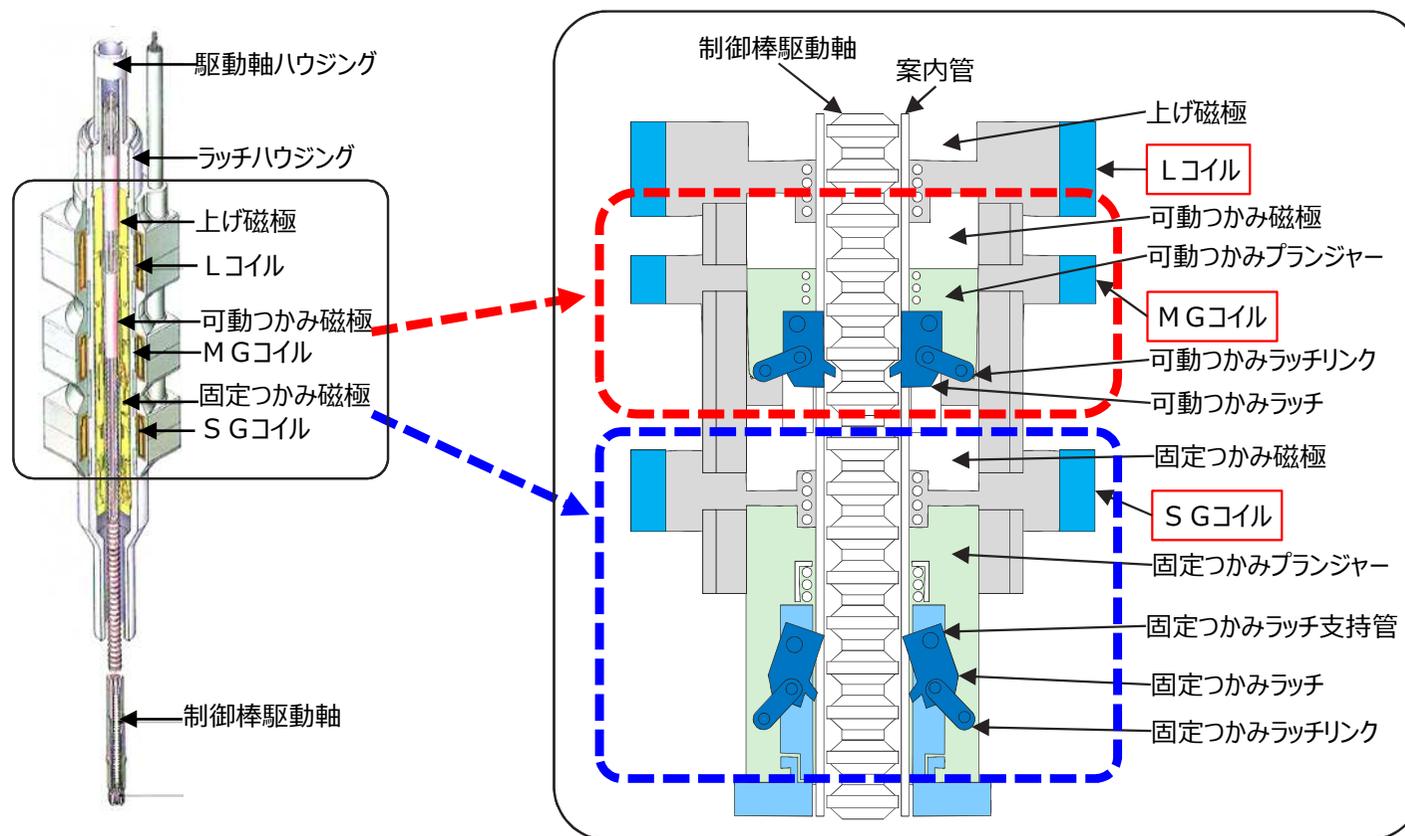
參考資料

➤ 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）

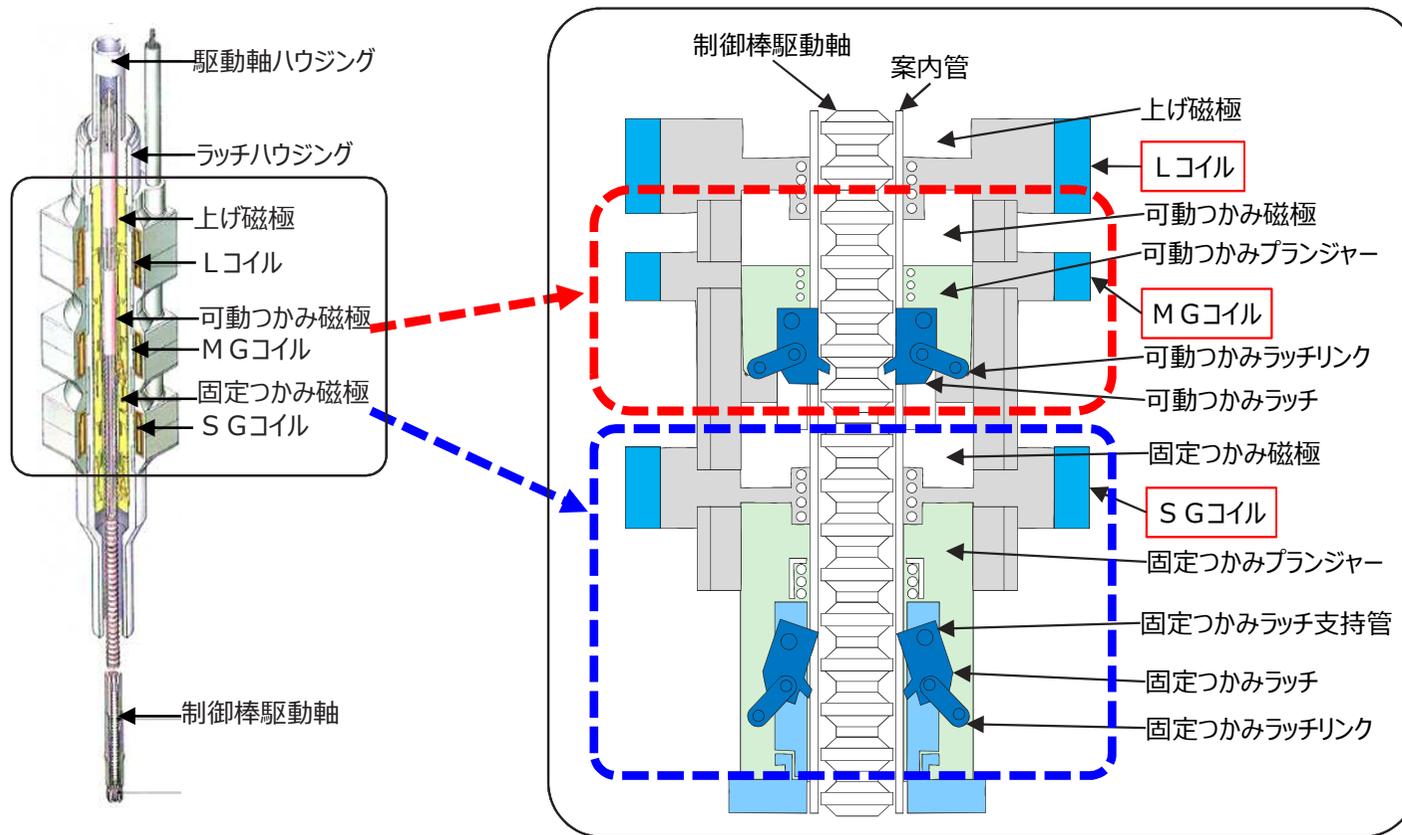


CRDM概要図

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。

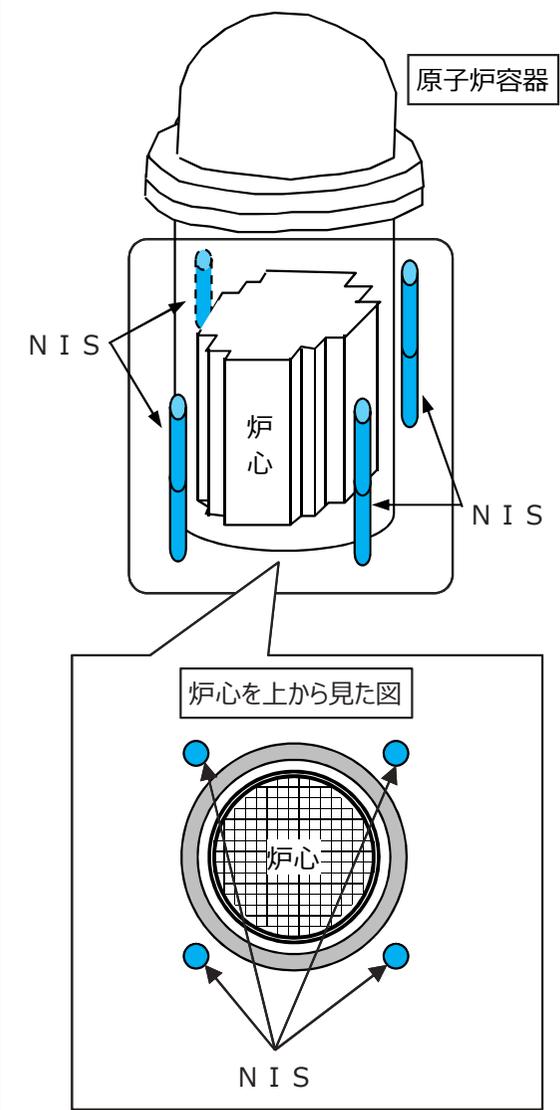
なお、原子炉トリップ信号または停電でコイルが消磁されると、制御棒駆動軸等の重量でラッチが外れて制御棒は自重で炉心内へ落下する仕組みとなっている。

※：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）



NIS（検出器）位置図

NISは、運転中の中性子束を測定する検出器を4つ設置している。
2つ以上の中性子束検出に異常があった場合、原子炉を停止させる。

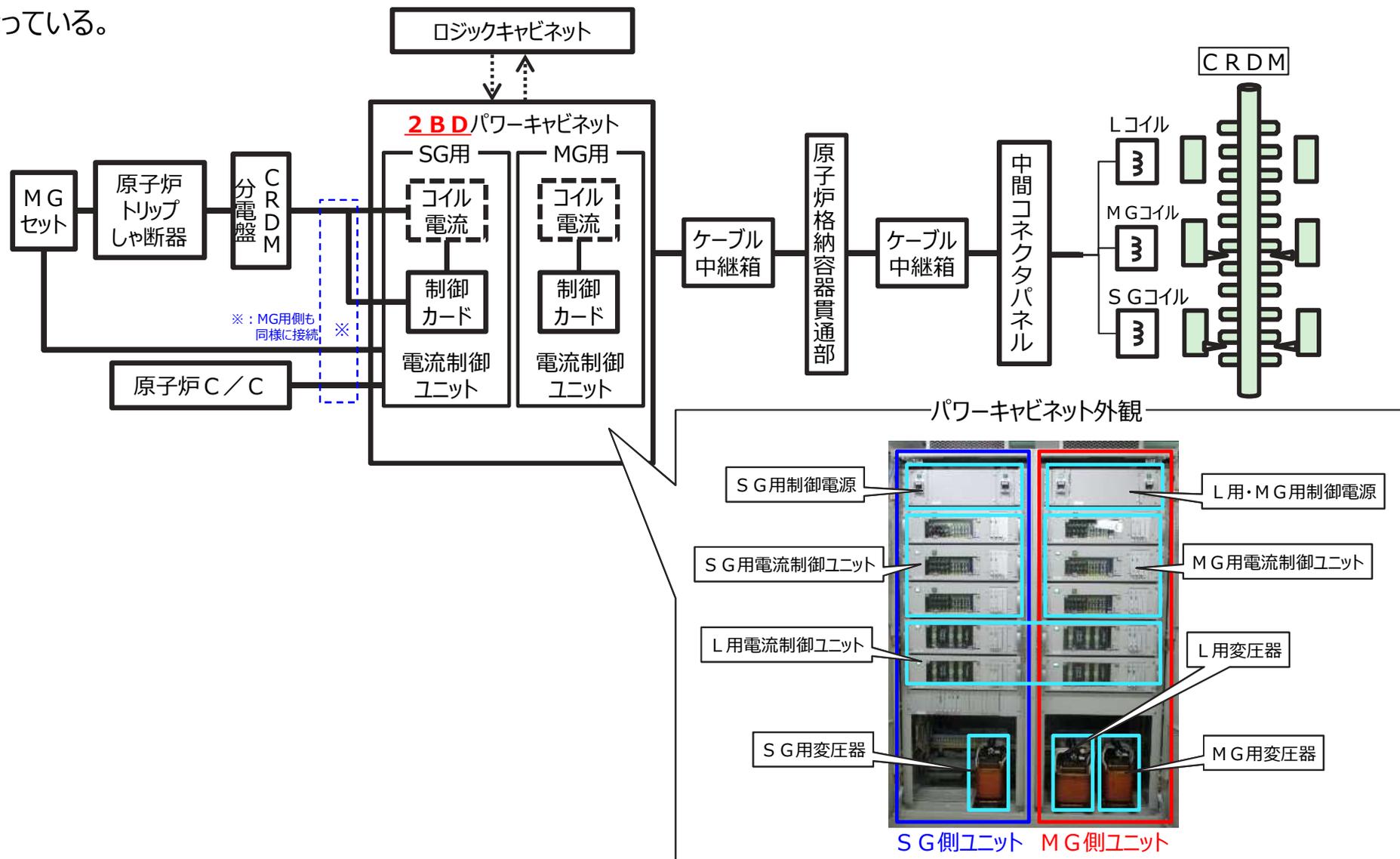


➤ 制御棒駆動システムの構成図

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。

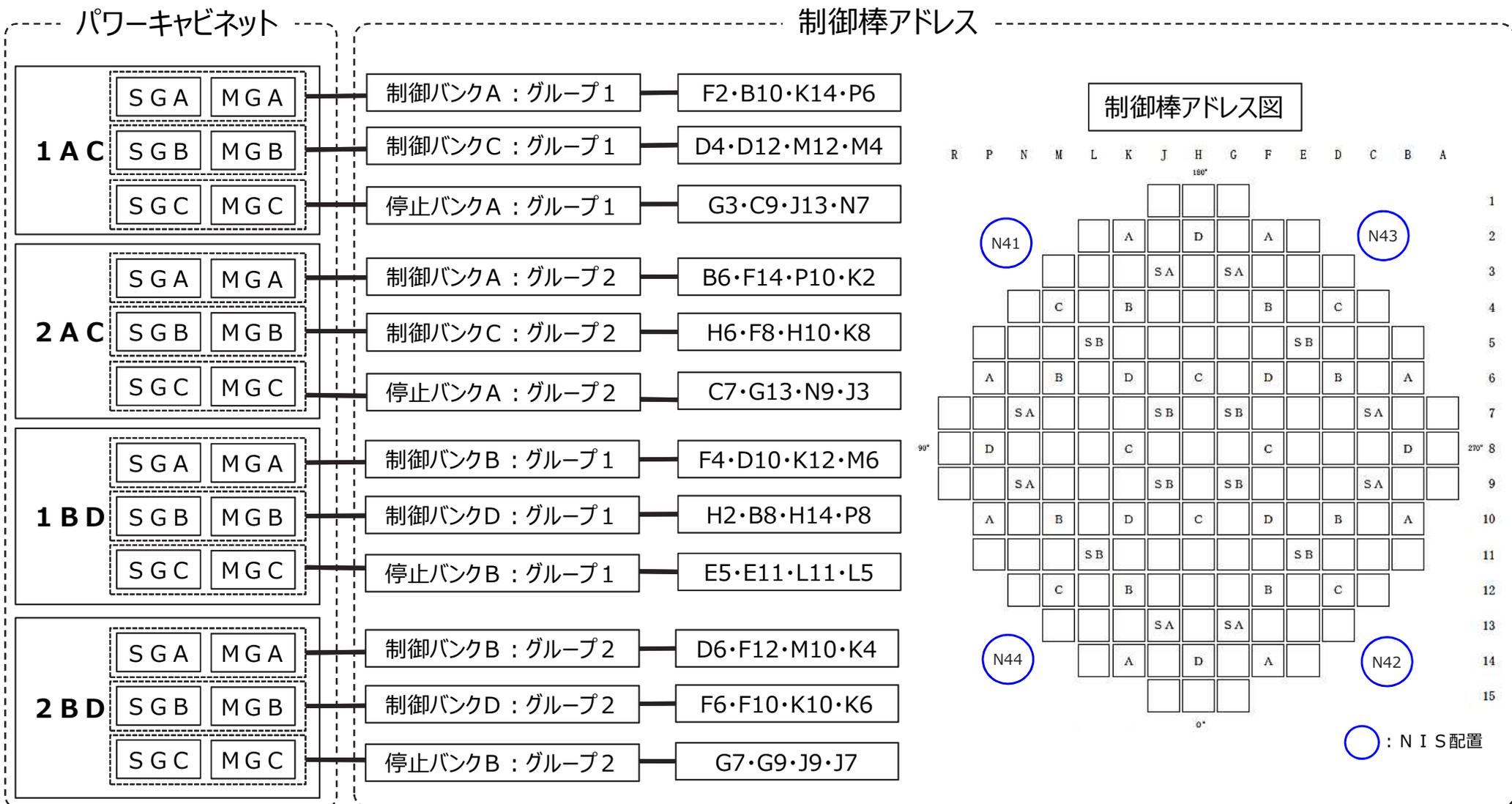
なお、原子炉を緊急停止する際には、原子炉トリップしゃ断器を動作させることにより、制御棒が自重で炉心内へ落下する仕組みとなっている。

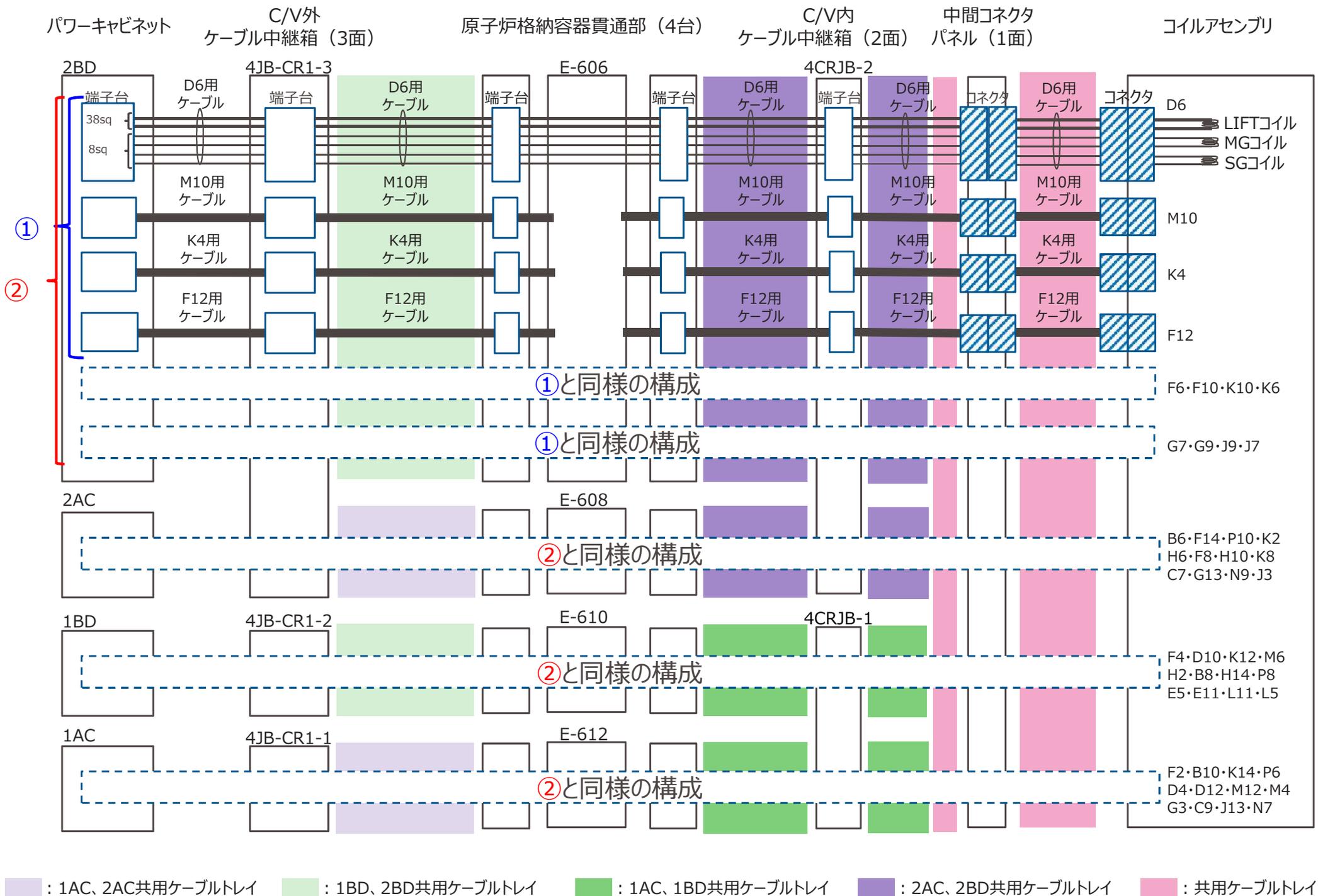


➤ パワーキャビネットの構成図

全体で48本ある制御棒は、入力電源の異なる4面のパワーキャビネットに制御されている。各パワーキャビネットは、それぞれ3つずつのグループで構成されている。それぞれのグループは、1つのグループで4本の制御棒を動作させる構成となっている。

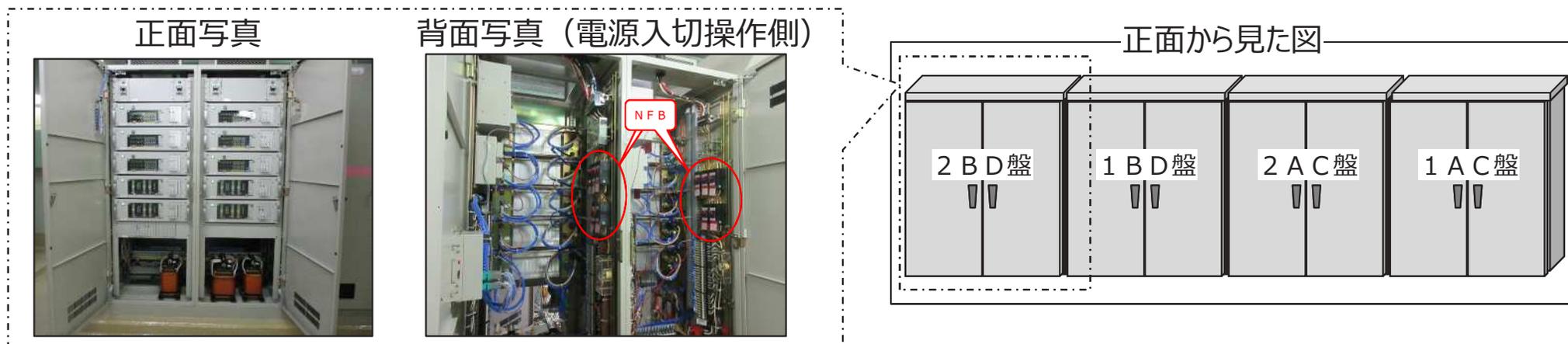
各パワーキャビネットおよびグループに属する制御棒のアドレスは「制御棒アドレス図」のとおりである。





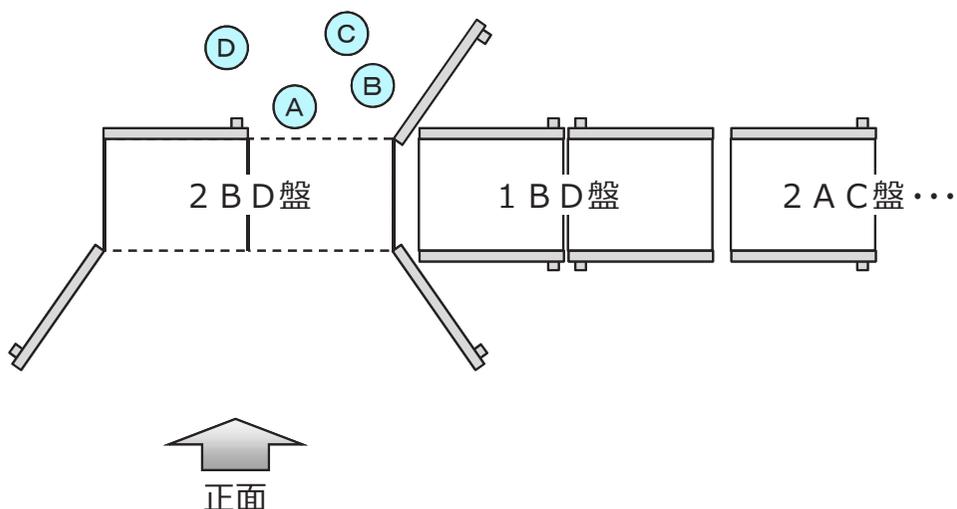
パワーキャビネットは外周建屋 2 階の制御棒駆動装置制御盤室に設置されており、「CRDM重故障」警報発信に伴う点検については、当該の 2 B D 盤で作業を実施していた。

パワーキャビネットの配置および作業実施時の作業員の配置は以下のとおりである。



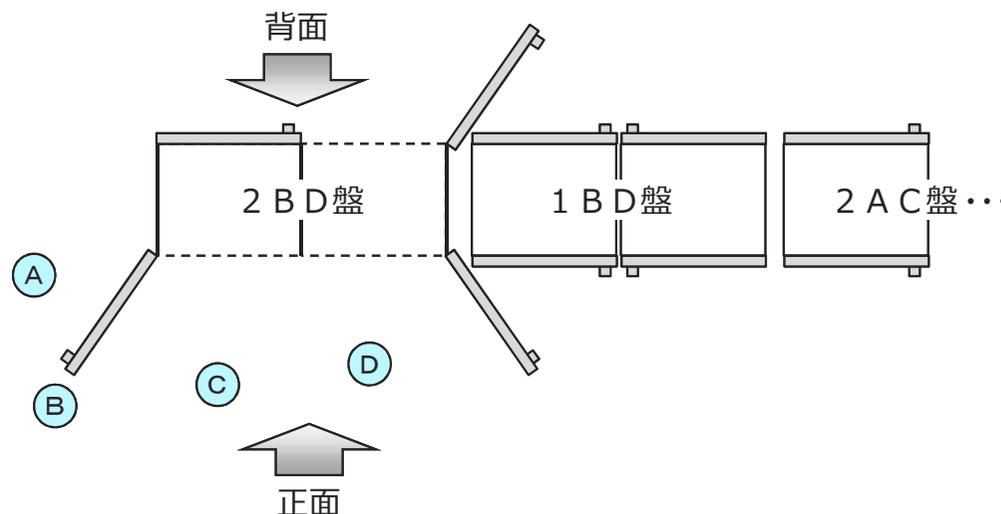
点検時の作業員配置
(上から見た図)

点検に伴うスイッチ操作時は、作業員全員がパワーキャビネットの裏側に配置し、盤内の作業を行っていた。



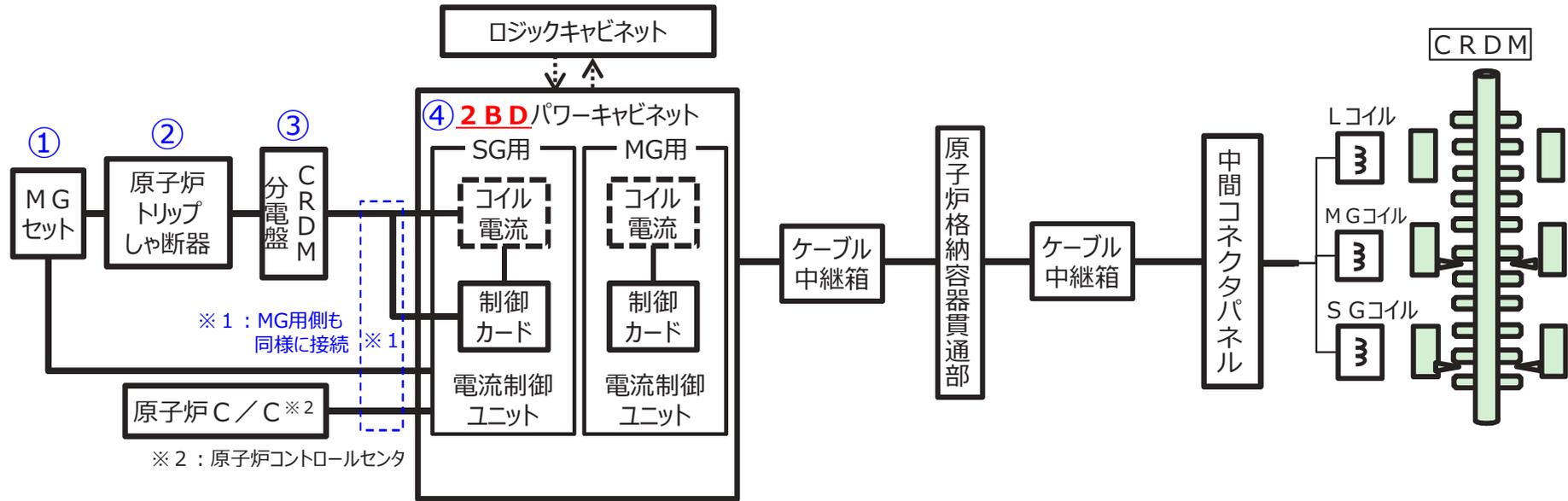
原子炉自動停止時の作業員配置
(上から見た図)

原子炉自動停止時は、作業員全員がパワーキャビネットの正面側に移動しており、関係者は作業を行っていない。

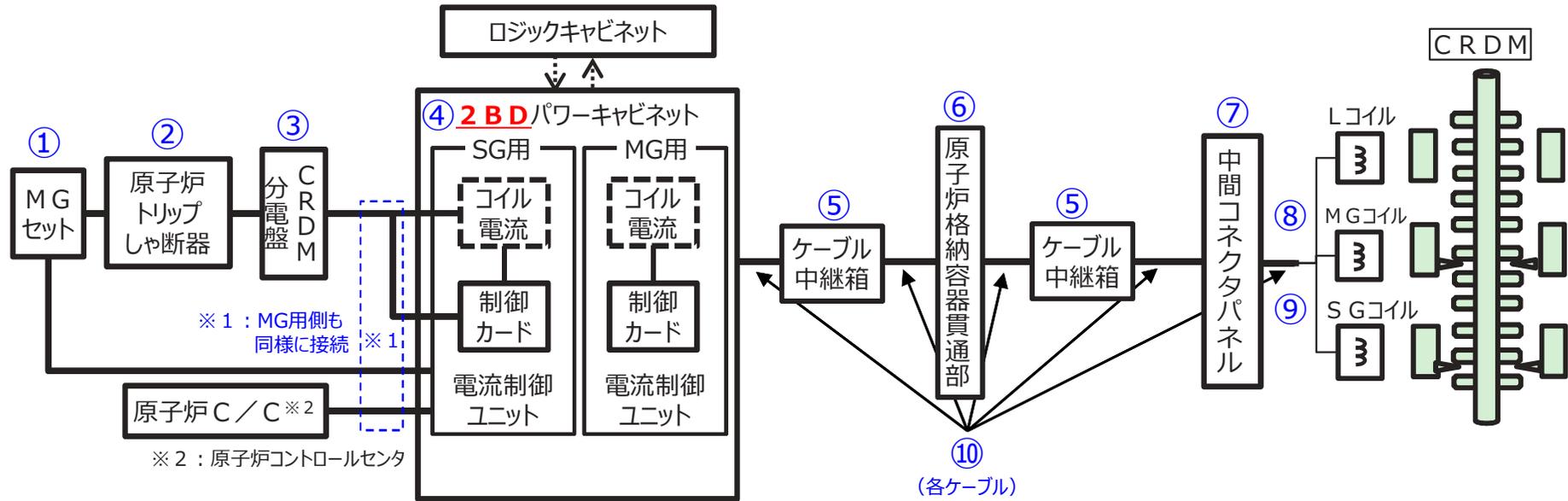


- (A) : 協力会社作業員
- (B) : 協力会社作業責任者
- (C) : 協力会社品質管理責任者
- (D) : 当社作業責任者

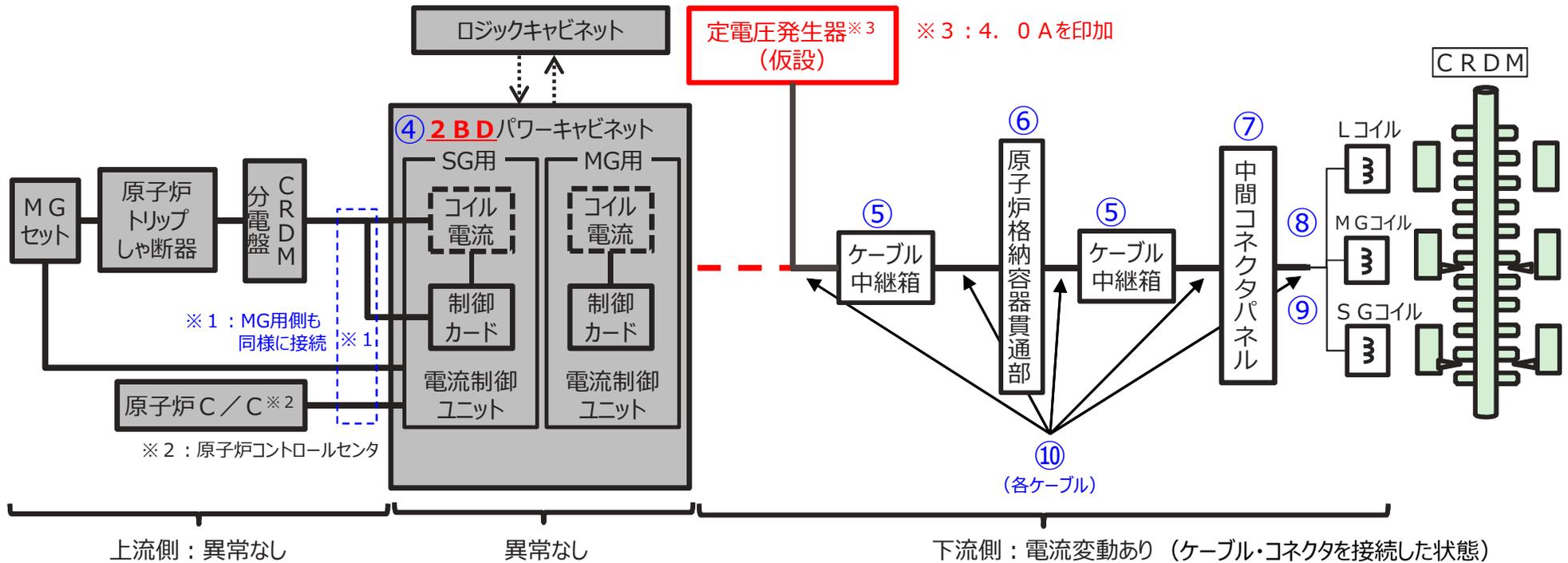
	1月			2月																									3月				
	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	1		
	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水		
プラント状態	原子炉トリップ ▼15:21			▼1:30RCS降温開始			▼3:00RCS降温完了			▼制御棒部分挿入事象										▼「CRDM重故障」警報発信（再発）													
運転パラメータ	運転操作等			プラントパラメータ挙動調査																													
NIS	データ評価・事象説明			NIS挙動解析																													
原因調査	再現性確認試験（電流変化の確認）			再現性なし																													
	パワーキャビネット点検			MGセット、原子炉トリップしゃ断器他点検										各部接続状態とした連続監視										2BD盤、ケーブル・コイルの連続監視					1AC盤、2AC盤、1BD盤での連続監視				
	<ul style="list-style-type: none"> ・NFB目視点検 ・電圧試験、導通試験、絶縁抵抗確認 			<ul style="list-style-type: none"> ・2/5部分挿入事象の原因調査（制御電源の要因箇所特定） ・追加動作試験、データ分析 										<ul style="list-style-type: none"> 盤、ケーブル・コイルの電流変動有無を連続確認（通常運転状態） 										<ul style="list-style-type: none"> ・定電圧発生器をケーブルに接続した状態でケーブル・コイルの電流変動有無を連続確認 ・2BDパワーキャビネットに模擬コイルを接続した状態で盤の電流変動有無を連続確認 					健全である盤での電流変動有無を連続監視				
	ケーブル点検			ステッピング試験										警報発信に伴う点検										ケーブル再点検					格納容器貫通部詳細点検				
CRDM（電気系）	<ul style="list-style-type: none"> 接続部目視点検 コネクタ部タッピング 導通試験 絶縁抵抗確認 			通電試験										<ul style="list-style-type: none"> ・コイル出カケーブルコネクタ部点検 ・制御電源ユニット内部点検 ・警報発信時のデータ分析 										<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブル外観確認 ・電流値を監視しながらのケーブルタッピング ・原子炉格納容器貫通部詳細点検 					<ul style="list-style-type: none"> ・導体抵抗測定 ・電流値を監視しながらのケーブルタッピング 				
CRDM（機械系）	再現性確認試験（動作性確認）			健全性評価（PLM等）										駆動機構の健全性確認										メーカー工場詳細調査					<ul style="list-style-type: none"> ・電流制御ユニット構成部品異常有無確認 ・コイル出カケーブル屈曲確認・X線観察 				



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		



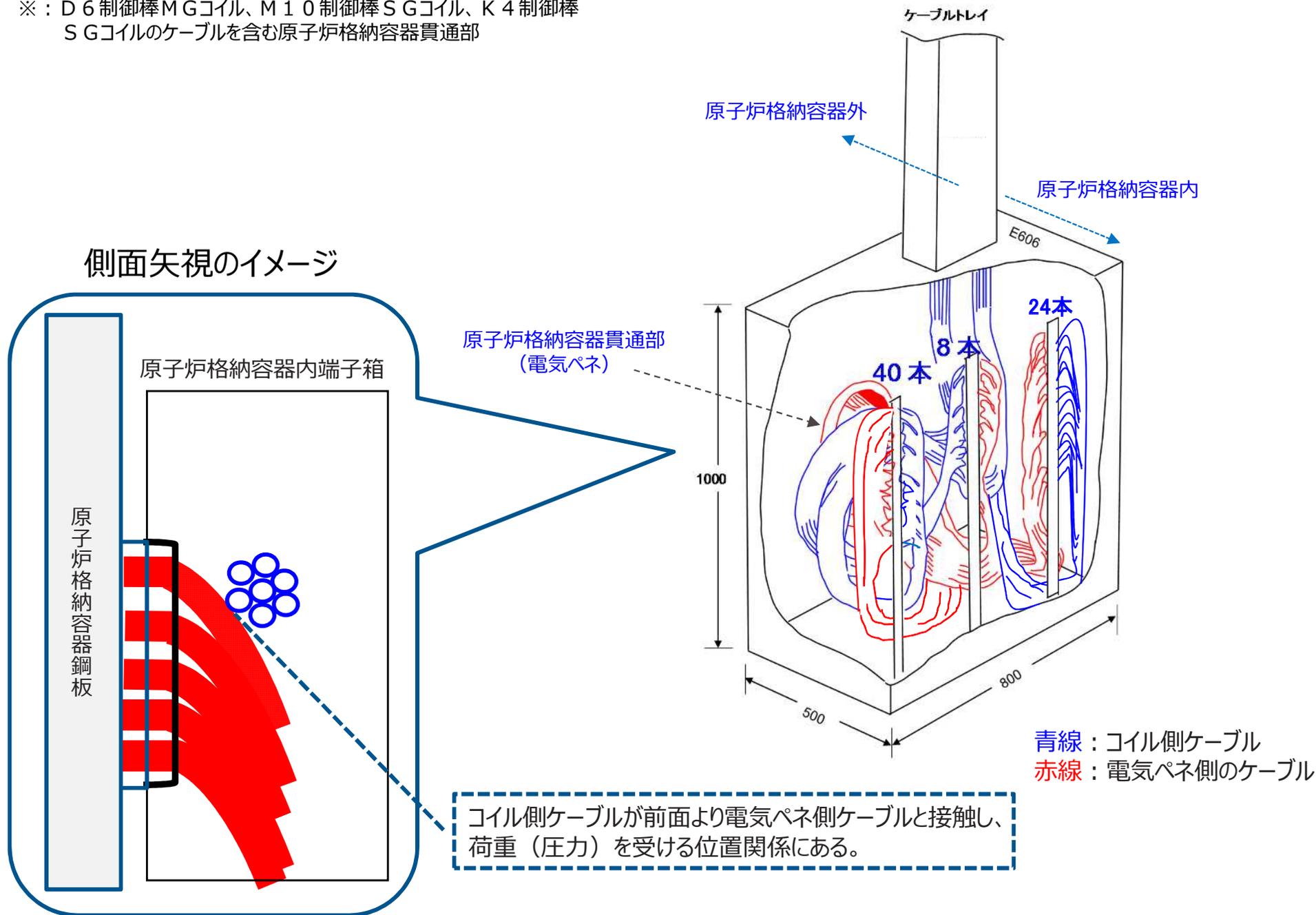
点検部位	点検内容	点検箇所（測定箇所）	判定基準	点検結果
⑤ ケーブル中継箱 (C/V内・C/V外)	ケーブル接続状態確認	ケーブル中継箱 (C/V内・C/V外)	接続状態に異常がないこと	異常なし (単体)
⑥ 原子炉格納容器貫通部	外観点検	原子炉格納容器貫通部	接続状態に異常がないこと	異常なし (単体)
⑦ 中間コネクタパネル	外観点検	中間コネクタパネル	接続状態に異常がないこと	異常なし (単体)
⑧ MGコイル	絶縁抵抗測定	ケーブル中継箱	10 MΩ以上	異常なし (単体)
	コイル抵抗測定	ケーブル中継箱	メーカー基準を満足すること	
	コイル電流測定	パワーキャビネット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



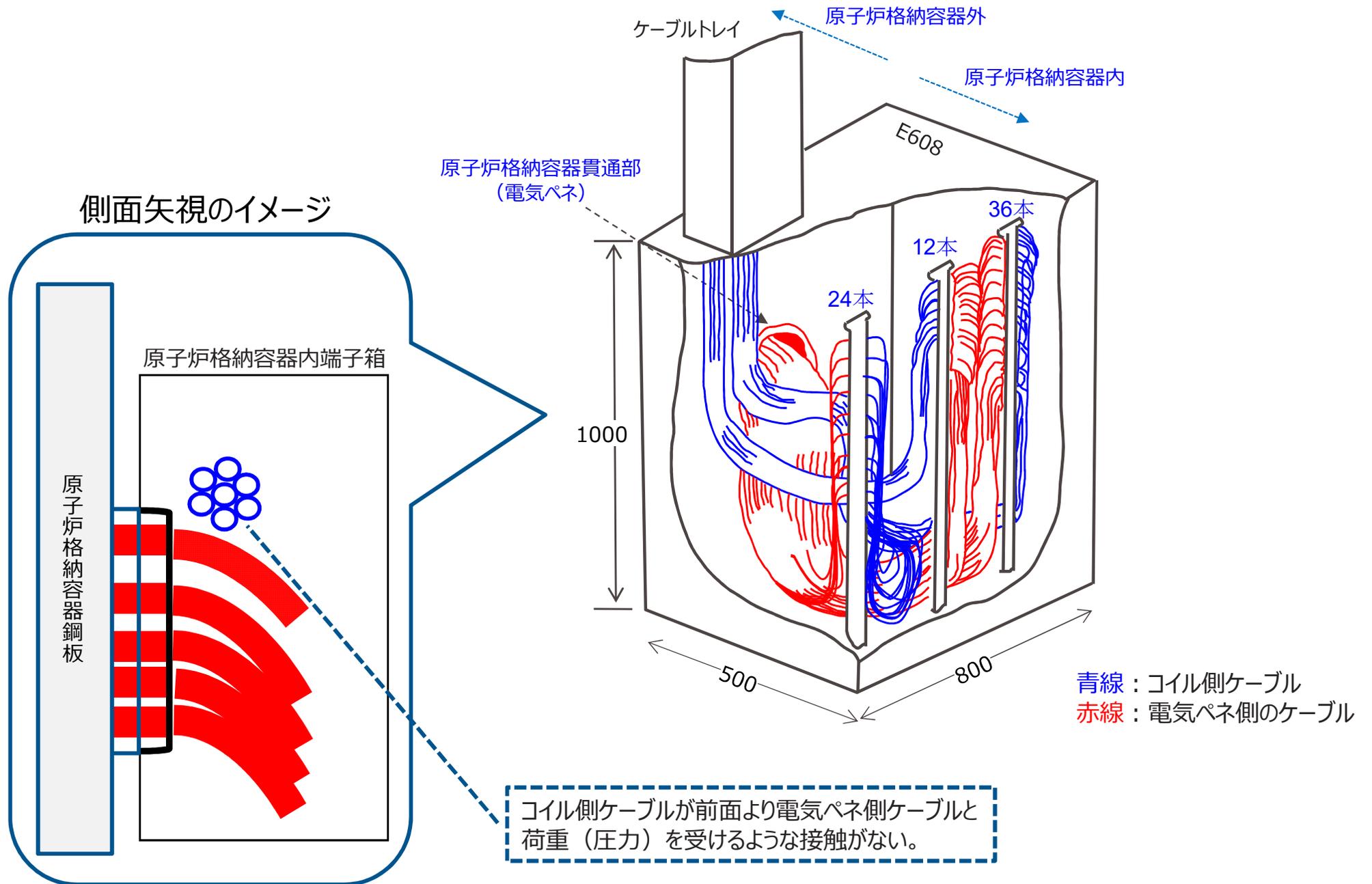
点検部位	点検内容	点検箇所（測定箇所）	判定基準	点検結果	
④～⑩	各部を接続した状態	予備品の電流制御ユニットへ取替後の コイル電流変動確認	パワーキャビネット	電流値に異常な変動がないこと	電流低下あり (連続監視)
⑤～⑩	ケーブル・コネクタを接続した状態	定電圧発生器を用いたコイル電流変動確認	ケーブル	電流値に異常な変動がないこと	電流低下あり (連続監視)
⑤、⑩	ケーブル中継箱 (C/V内・C/V外)	各区分ごとに切り離れた状態 定電圧発生器を用いたコイル電流変動確認	ケーブル	電流値に異常な変動がないこと	異常なし (連続監視)
⑥	原子炉格納容器貫通部		原子炉格納容器貫通部		電流低下あり (連続監視)
⑦、⑧、 ⑨、⑩	中間コネクタパネル、 MGコイル、SGコイル、 各ケーブル	ケーブル		異常なし (連続監視)	
⑥	原子炉格納容器貫通部	導通抵抗測定（触手含む）	原子炉格納容器貫通部		異常あり (単体)

➤ PENE-606※

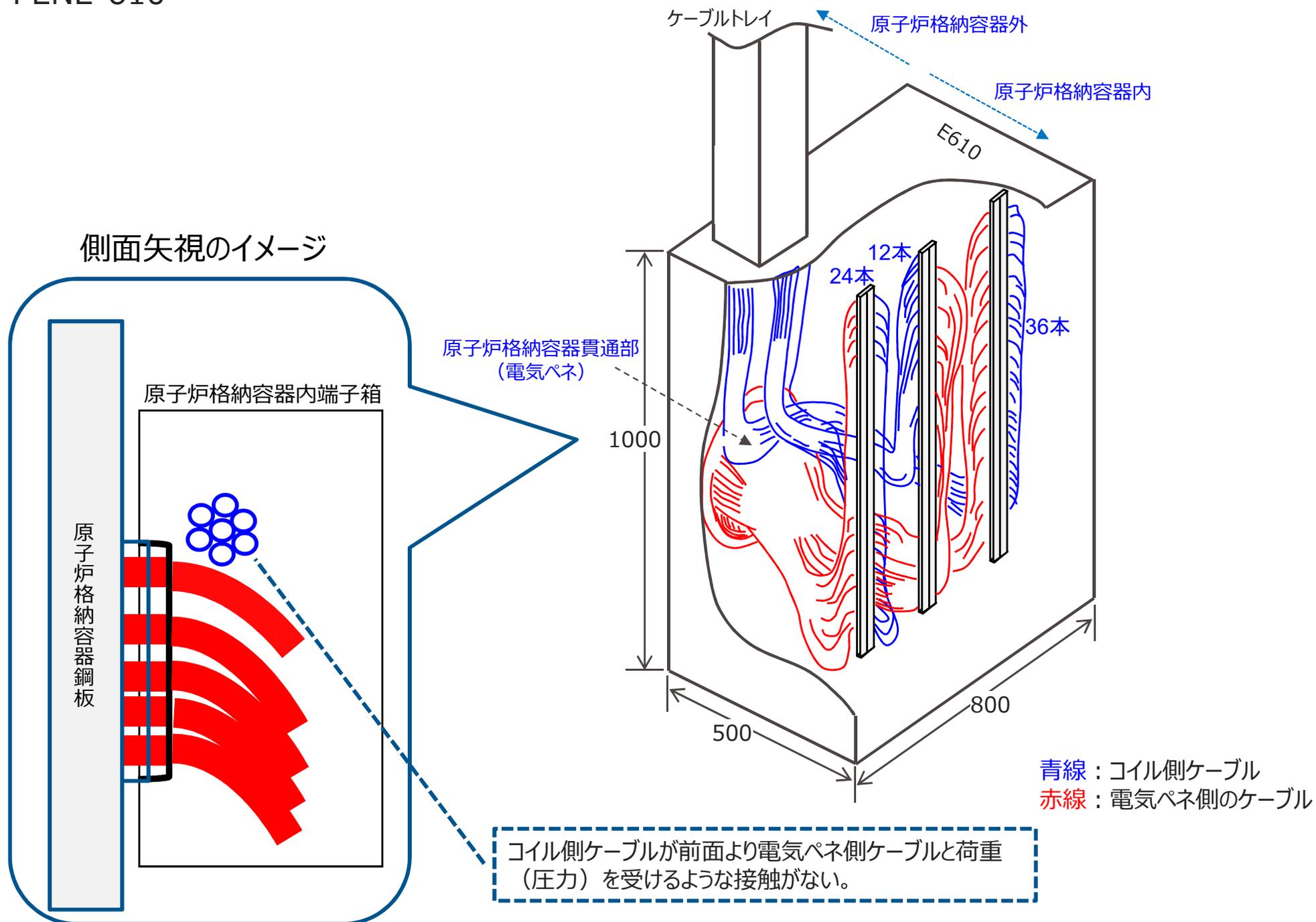
※：D 6 制御棒MGコイル、M 1 0 制御棒SGコイル、K 4 制御棒SGコイルのケーブルを含む原子炉格納容器貫通部



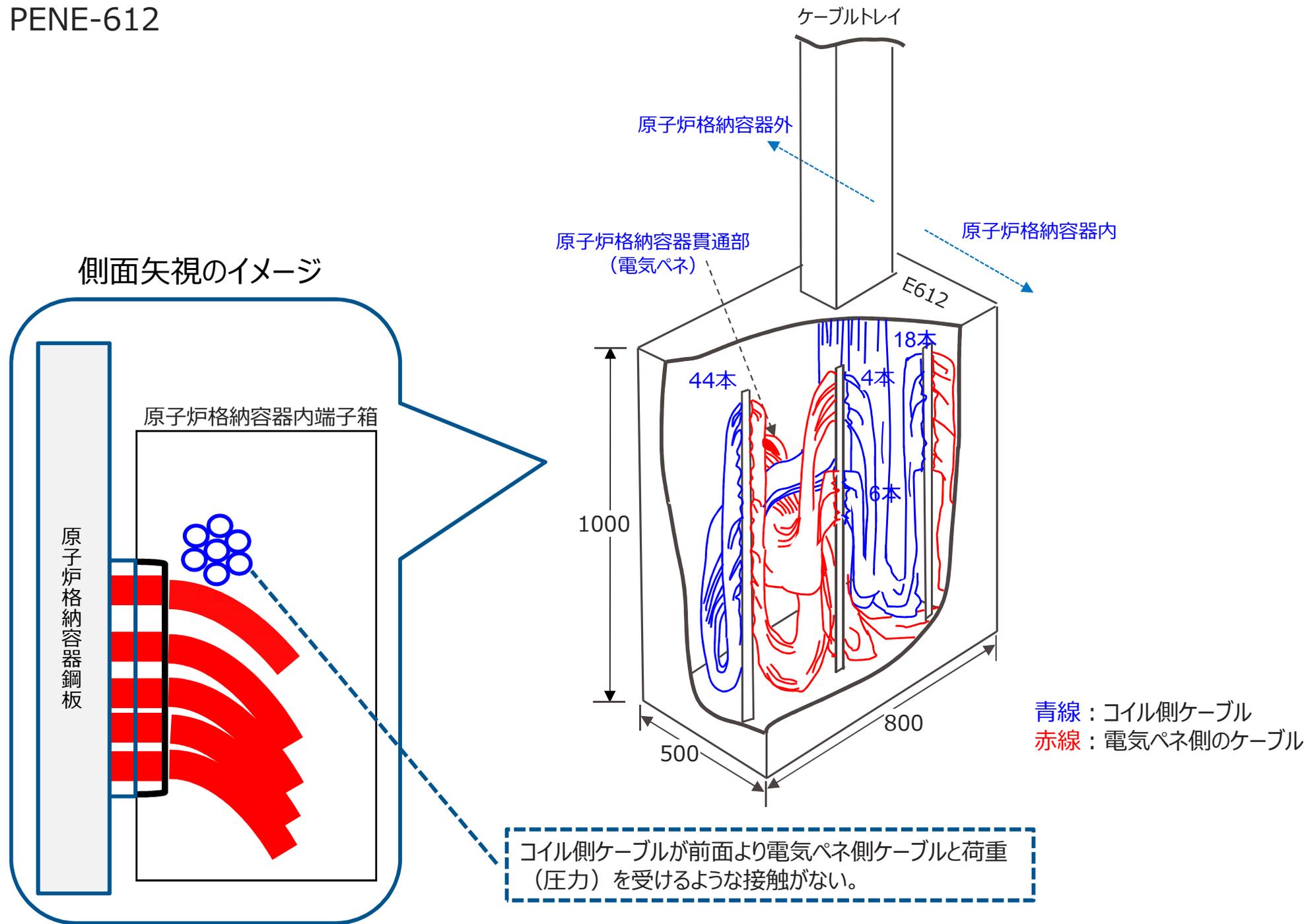
➤ PENE-608



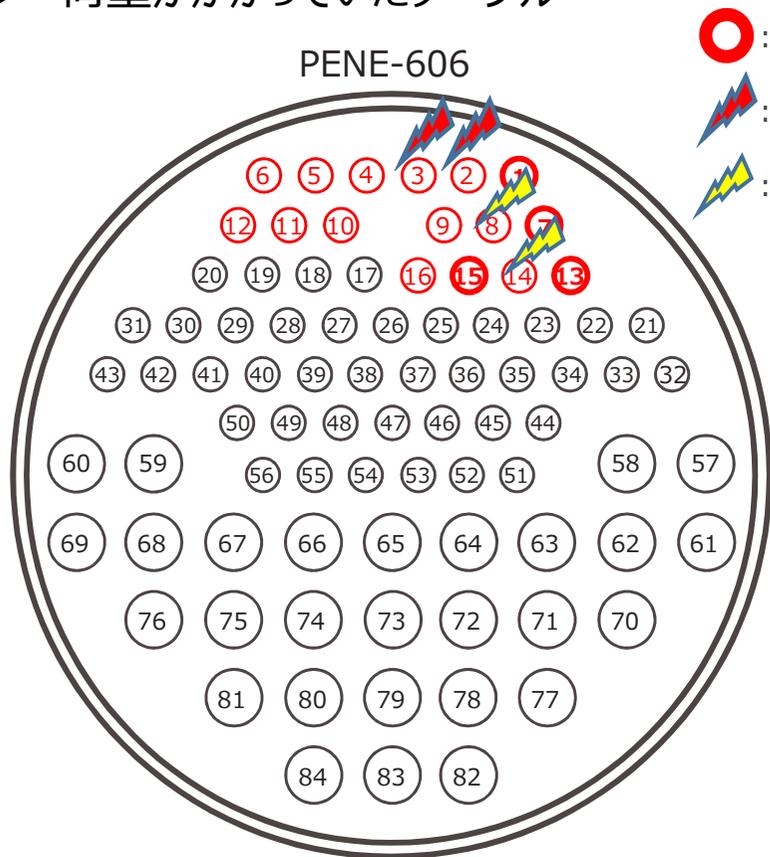
➤ PENE-610



➤ PENE-612

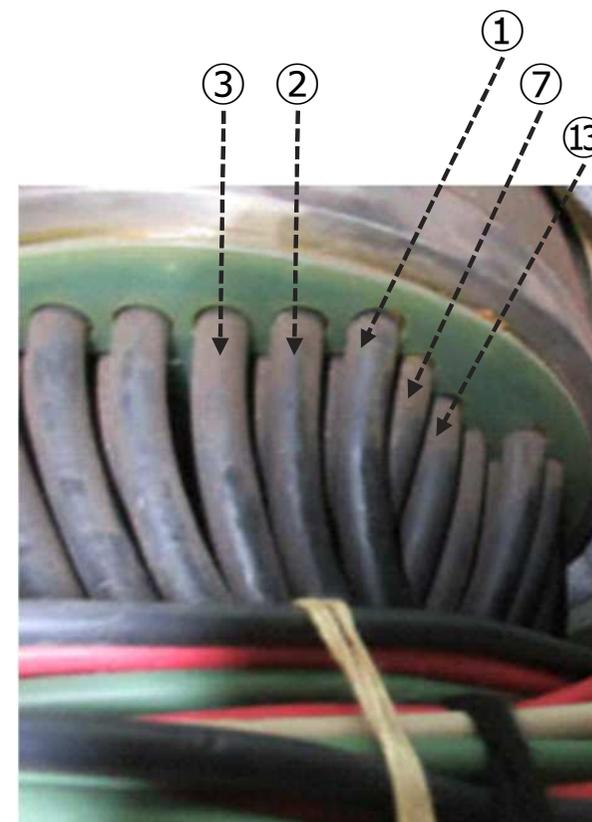


➤ 荷重がかかっていたケーブル



- : 電流値変動あり
- ⚡ : 痕跡あり
- ⚡ : 影響を受けていた可能性

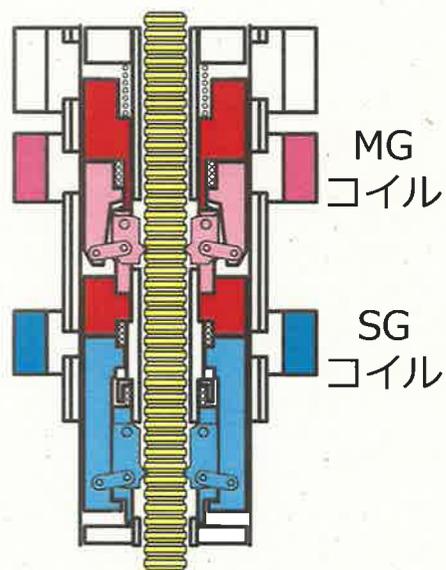
番号	対象
1	K 4 制御棒 S G コイル (+)
2	K 4 制御棒 S G コイル (-)
3	K 4 制御棒 M G コイル (+)
4	K 4 制御棒 M G コイル (-)
5	D 6 制御棒 S G コイル (+)
6	D 6 制御棒 S G コイル (-)
7	D 6 制御棒 M G コイル (+)
8	D 6 制御棒 M G コイル (-)
9	F 1 2 制御棒 S G コイル (+)
10	F 1 2 制御棒 S G コイル (-)
11	F 1 2 制御棒 M G コイル (+)
12	F 1 2 制御棒 M G コイル (-)
13	M 1 0 制御棒 S G コイル (+)
14	M 1 0 制御棒 S G コイル (-)
15	M 1 0 制御棒 M G コイル (+)
16	M 1 0 制御棒 M G コイル (-)



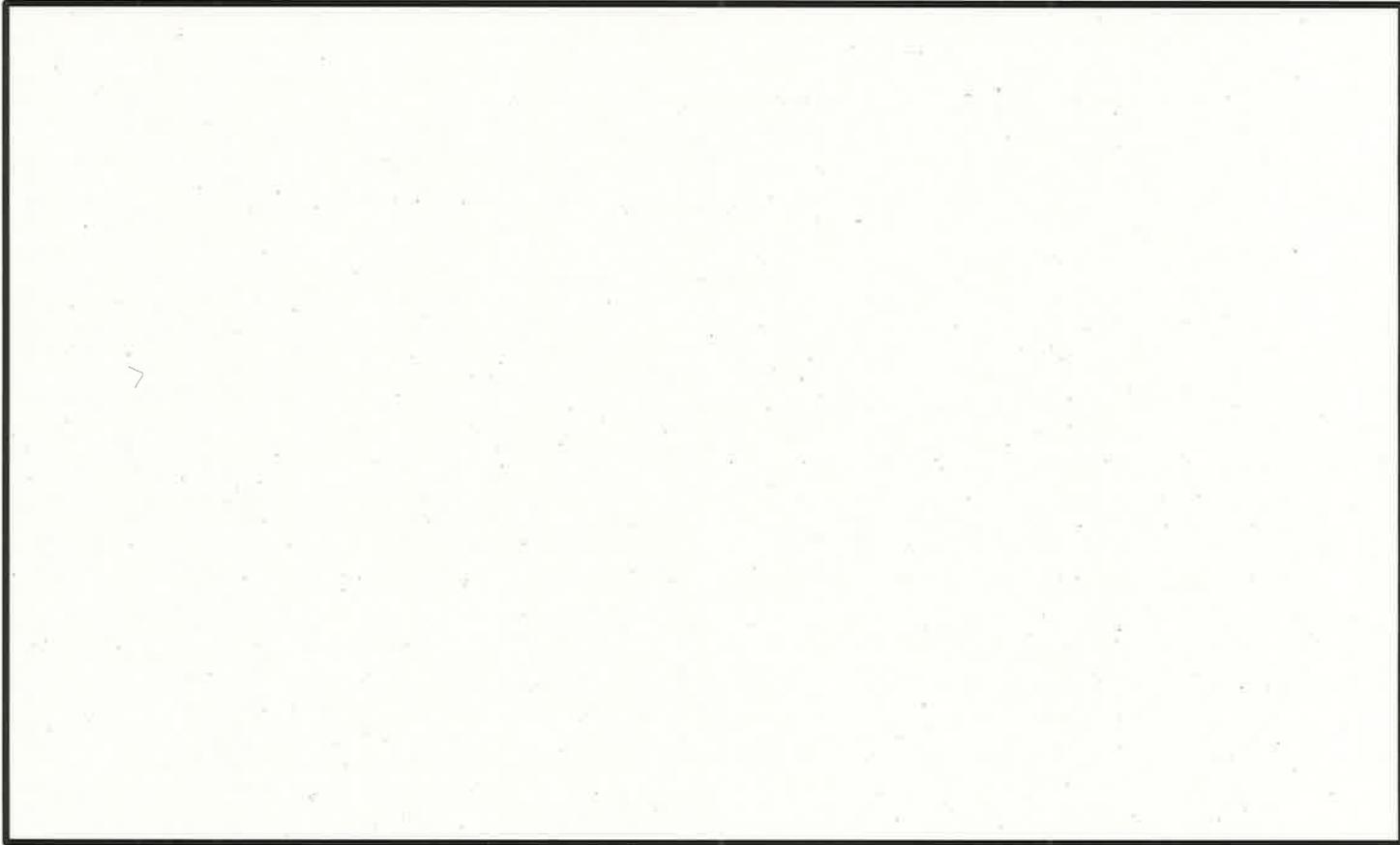
※原子炉格納容器内から見た図

- ✓ 荷重がかかっていたと考えられるケーブルは、以下のとおり。
 - 覆いかぶさったケーブルの荷重により接合部に接触不良を起こし、明らかな電流変動を確認した、以下の4本
 - ①K4-SG(+)、⑦D6-MG(+)、⑩M10-SG(+)、⑮M10-MG(+)
 - 加えて、当該ペネの最上部にあり、覆いかぶさったケーブルの痕跡が残る、以下の2本
 - ②K4-SG-、③K4-MG+
 - 加えて、上記6本の間であり、荷重による影響を受けていたと思われる以下のケーブル2本
 - ⑧D6-MG-、⑭M10-SG-
- ✓ 荷重がかかっていたと考えられるケーブル8本を含むD 6、M 1 0 および K 4 の 3 本の制御棒の駆動に関連するケーブルを対策を行う対象とする。

- 制御棒は、MG/SG両ラッチによるダブルホールドにより保持しており、各コイル電流値がMG：、SG：に低下しない限り、保持が可能である。
- 「CRDM重故障」警報は、どちらかのコイル電流値が2.0A以下に低下した際に発信されることから、「CRDM重故障」警報発信を常時監視にすることで、制御棒の保持性能を確保することができる。（警報発信は、中央制御室で音・表示にて確認可能）



**MG・SG
ダブルホールドによる
保持**



MG/SGラッチによるダブルホールド状態におけるコイル電流値と保持状態の関係

: 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。

MG / SGコイル電流低下とラッチ振込・開放の関係整理

➤ 振込状態から開放動作

対象	コイル通電状態	動作電流
MGラッチ	MGおよびSGラッチのコイルに対し両方通電時	<input type="text"/>
	MGラッチのコイルに対し片方通電時	<input type="text"/>
SGラッチ	MGおよびSGラッチのコイルに対し両方通電時	<input type="text"/>
	SGラッチのコイルに対し片方通電時	<input type="text"/>

➤ 開放状態から振込動作

対象	コイル通電状態	動作電流
MGラッチ	SGラッチのコイルに対し片方通電時	<input type="text"/>
	SGラッチのコイルに対し非通電時	<input type="text"/>
SGラッチ	MGラッチのコイルに対し片方通電時	<input type="text"/>
	MGラッチのコイルに対し非通電時	<input type="text"/>

➤ 高経年化技術評価について

- ✓ 高経年化技術評価においては、各設備に対して、使用条件（材料、環境条件等）から想定される経年劣化事象を抽出し、高経年化プラントの運転に際して考慮すべき事項を評価している。
- ✓ なお、高経年化技術評価における、経年劣化事象には、設計や施工等に起因する事象は含まない。

➤ 不具合箇所の高経年化技術評価の内容

- ✓ 今回の不具合箇所（電気ペネの電線ケーブル）に対して、高経年化技術評価では、経年劣化事象として導通不良を想定している。その評価において、「大きな荷重が作用しなければ、断線による導通不良に至ることはなく着目すべき経年劣化事象ではない」としている。

➤ 今回の不具合内容の取扱い

- ✓ 高経年化、経年劣化とは、設計通りの施工を前提として、時間経過に伴い、使用環境や条件により、機能、性能に影響を及ぼすおそれがある事象である。
- ✓ 今回は、施工時に他の余長ケーブルが覆いかぶさった状態が継続し、ケーブル接合部に設計上想定していない引張力が作用し続けた結果、発生した事象であり、施工内容に起因したもので、施工時に荷重がかからないように設置すれば発生しない事象であることから、経年劣化事象には該当しないと考える。
- ✓ 制御棒駆動装置のケーブルは、定検毎に絶縁抵抗測定を行い、絶縁性能に問題がないことを確認している。本事象の原因調査においても問題がないことを確認しており、本事象は経年劣化事象によるものではないと考えている。