

高浜発電所 4号機の 原子炉自動停止の原因と対策

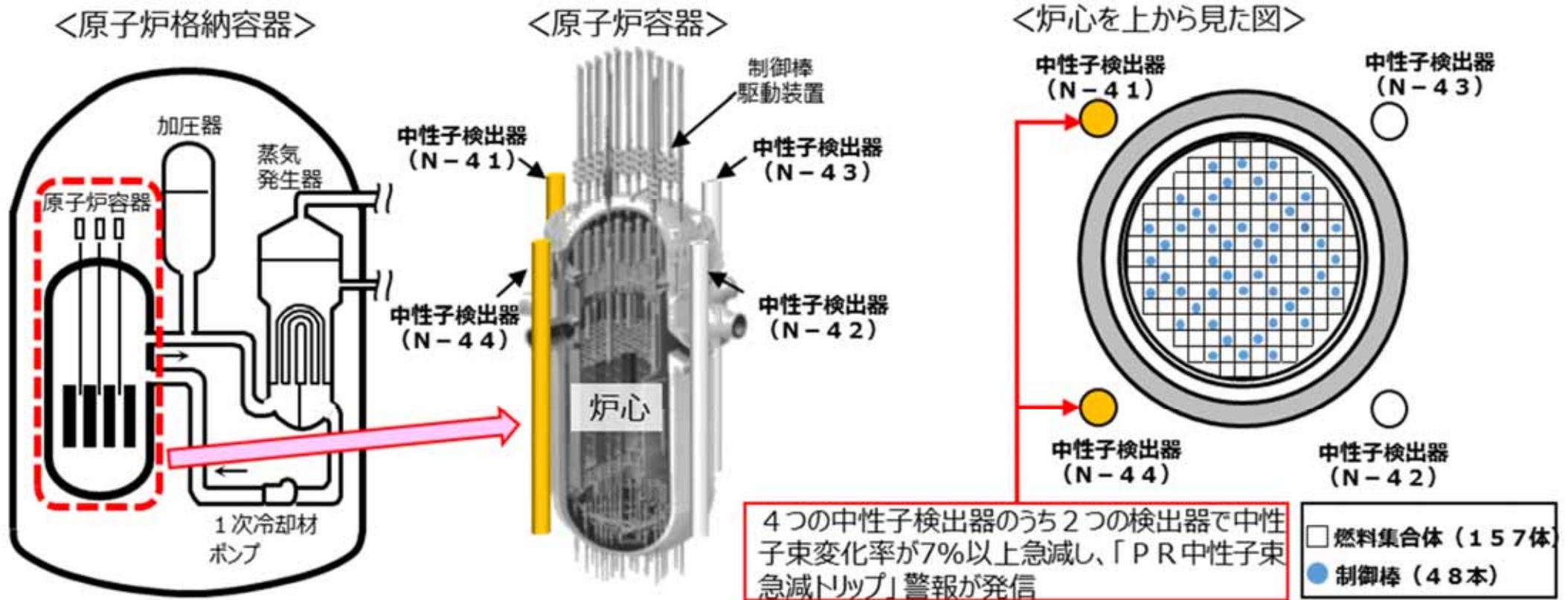
関西電力株式会社

2023年4月21日

<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※」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分に冷温停止状態（モード5）へ移行した。



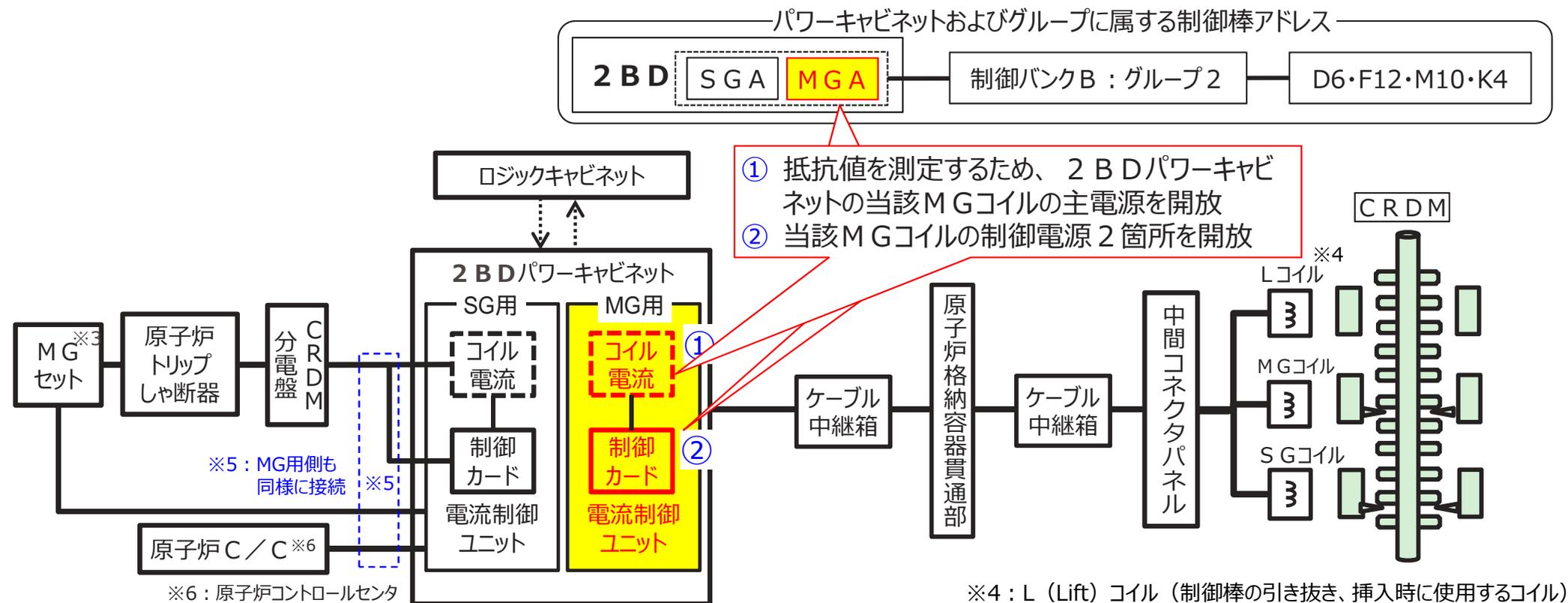
※：運転中（出力領域（PR））の中性子束を測定する検出器が4つ設置されており、2つの中性子束検出に異常があった場合、原子炉を停止させる警報が発信する。（PR：Power Range）

事象発生の際の経緯

<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※1」警報が発信した。（1月25日7時24分、1月29日16時46分の警報発信時は、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つ※2の保持機構を動作させる電磁コイルのうち、MGコイルの電流値が通常よりも低かったことから、コイルに電流を供給しているキャビネットの当該MGコイルおよび制御電源2箇所の電源を開放し、キャビネット内でMGコイルの抵抗測定をしている途中、「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。



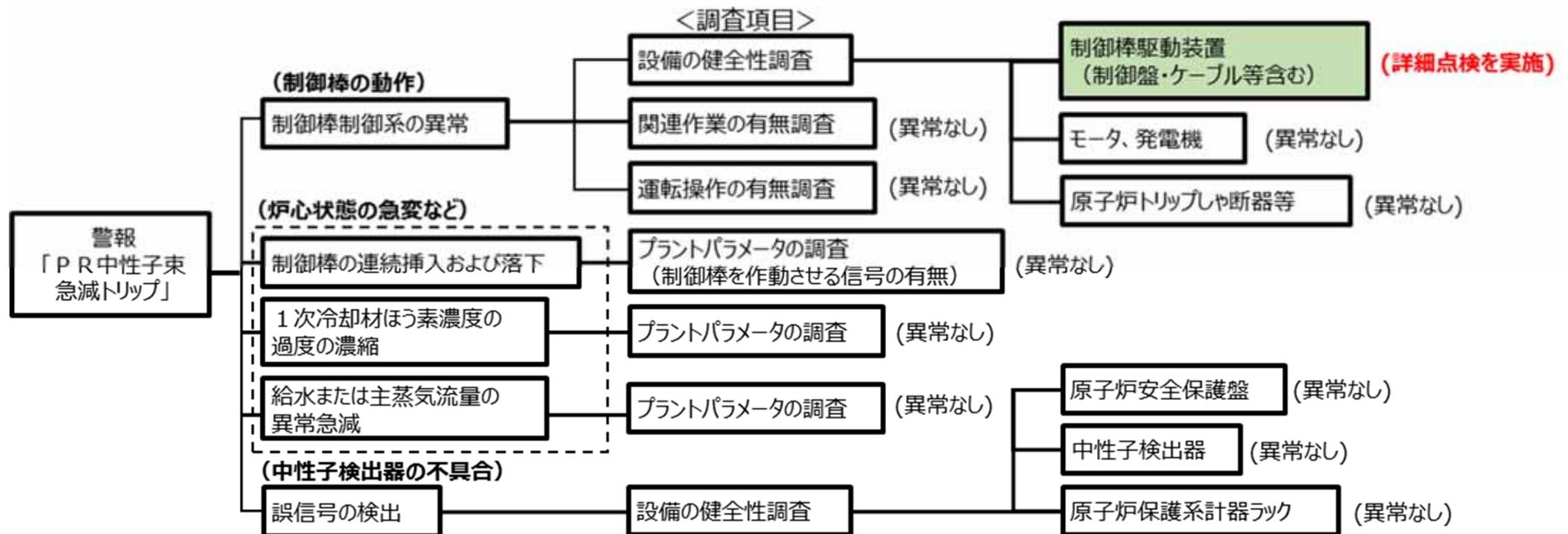
※1：制御棒駆動装置（以下「CRDM」）の故障を示す警報であり、制御棒を電磁力で保持している2箇所の保持機構（以下「ラッチ」）のうち、1箇所以上で電流の異常を検知するなど、駆動装置の不調を検知した場合に発信する。

※2：可動ラッチ（Movable Gripper：以下「MG」）および固定ラッチ（Stationary Gripper：以下「SG」）

※3：電動機の電源が瞬時的に喪失しても負荷側へ安定した電力を供給するために、フライホイールを設置した交流電源装置（モータ発電機(Motor Generator)セット）

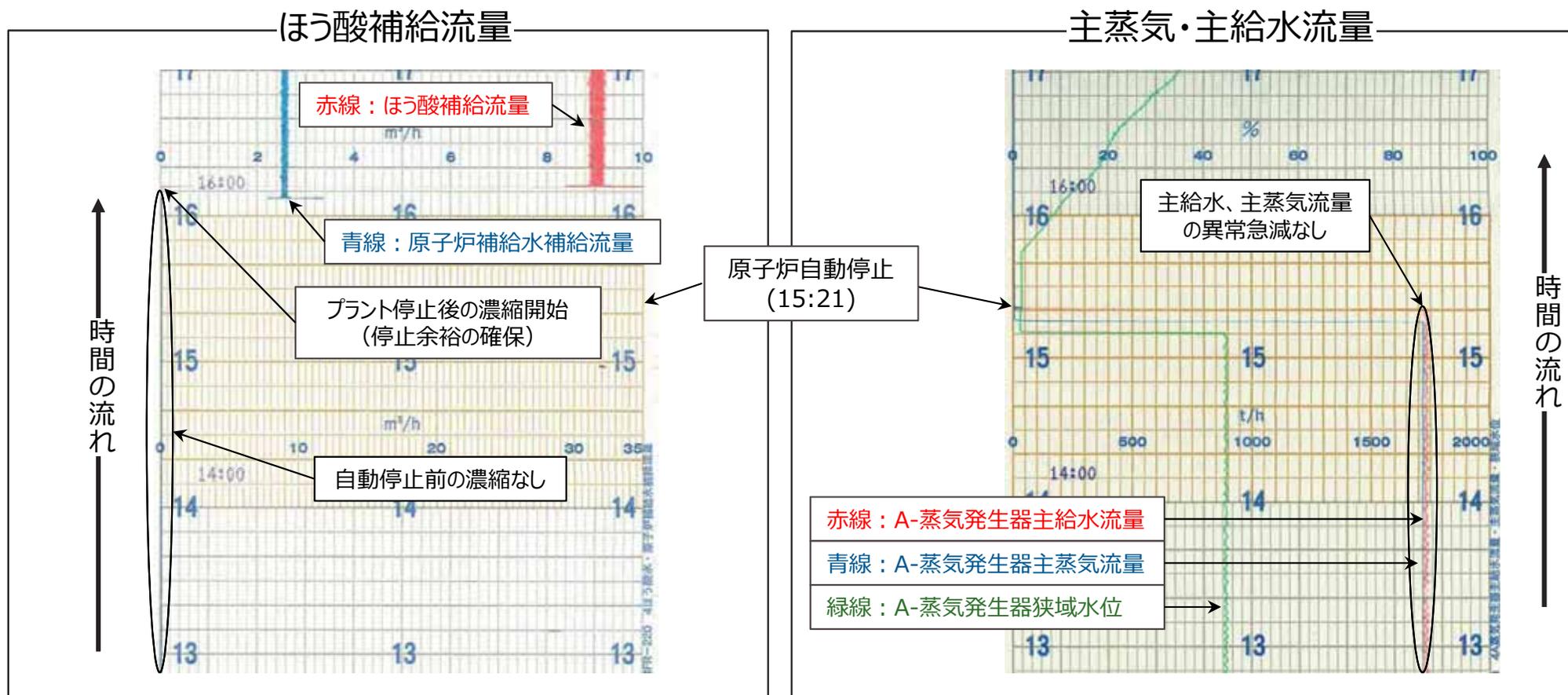
<原因調査>

- ・事象発生前後のプラントパラメータ、中性子検出器等の設備の健全性、運転操作や関連作業の有無に係る調査を実施した結果、異常なし
- ・制御棒が実際に挿入されたことにより、検出器の指示値が大きく低下し、警報発信に至った可能性があることと推定したことから、CRDMの詳細点検を実施



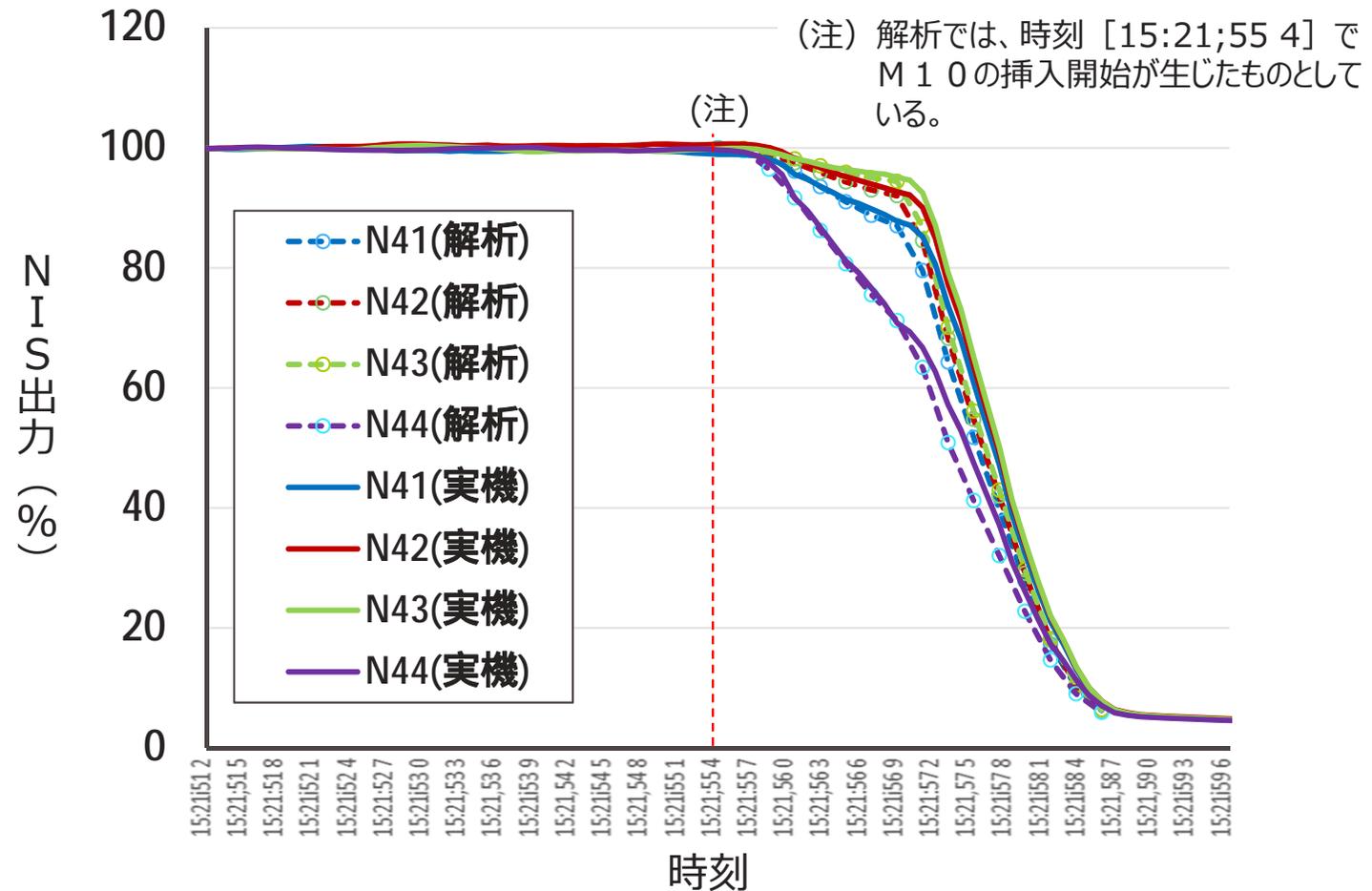
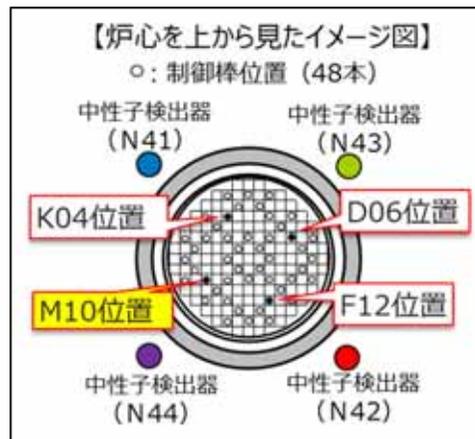
原因調査（プラントパラメータ等の確認）

- 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、運転員および保守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。



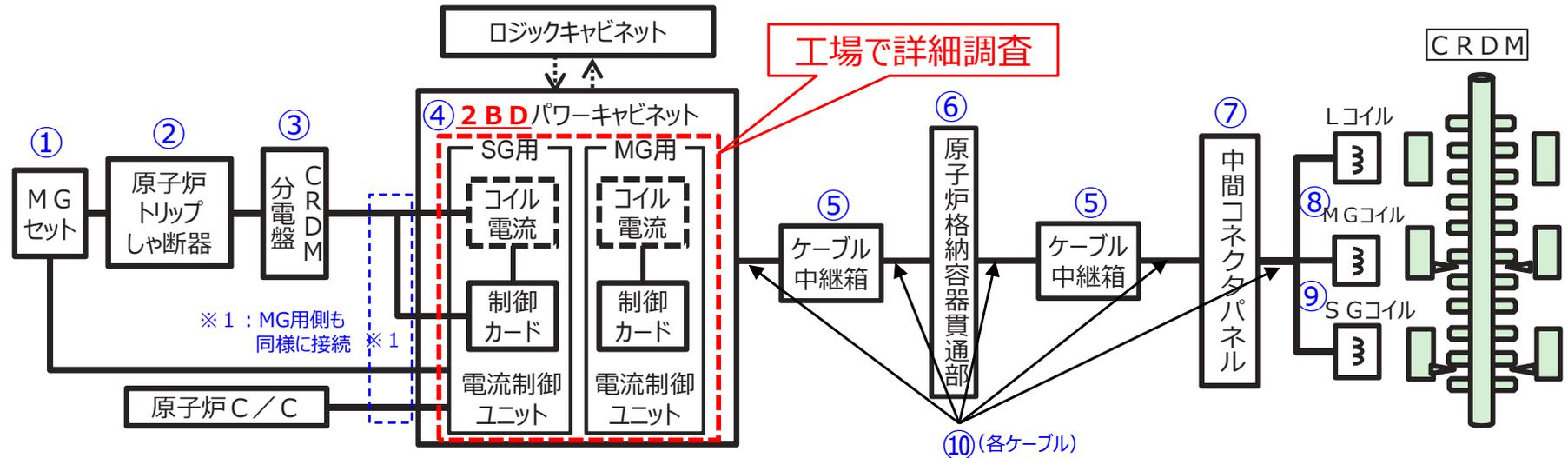
原因調査（落下した制御棒の特定（中性子検出器の挙動解析結果））

- 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の挙動を解析し、実機の中性子検出器（以下「N I S」）出力トレンドとの比較を実施
 - 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
- ⇒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



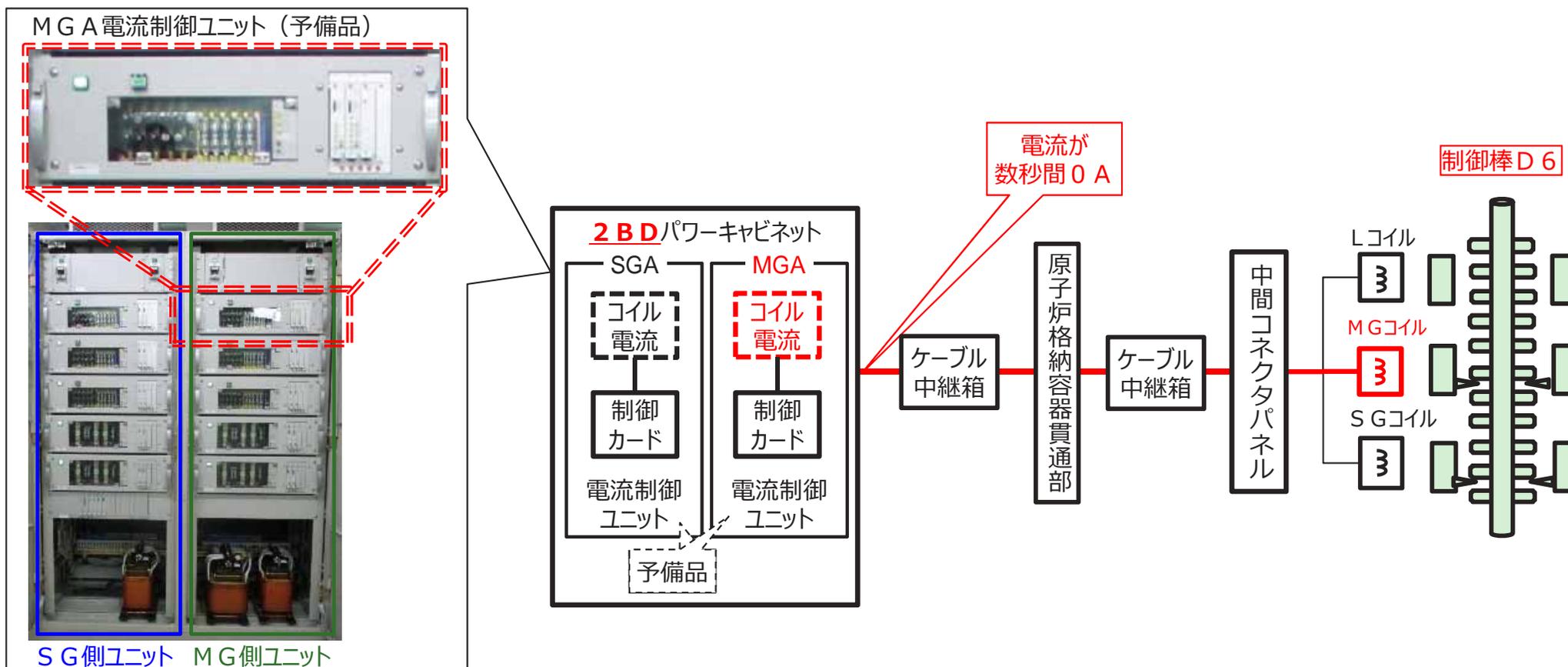
原因調査（CRDM制御盤・ケーブル等の調査）

- 実機動作確認等を実施した結果、CRDM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
- 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し、異常は無かった。



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

- 制御棒駆動装置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
 - 計測された電流波形データを確認したところ、2月12日に、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
- ⇒ これまでの調査結果から、「CRDM重故障」警報発信時には電流制御ユニット下流側のみで電流の異常な変動が発生していること、その変動は予備品の電流制御ユニットに取り替えた後に発生していることから、SGAとMGAの下流側各ケーブル・コイル等の調査が必要と判断

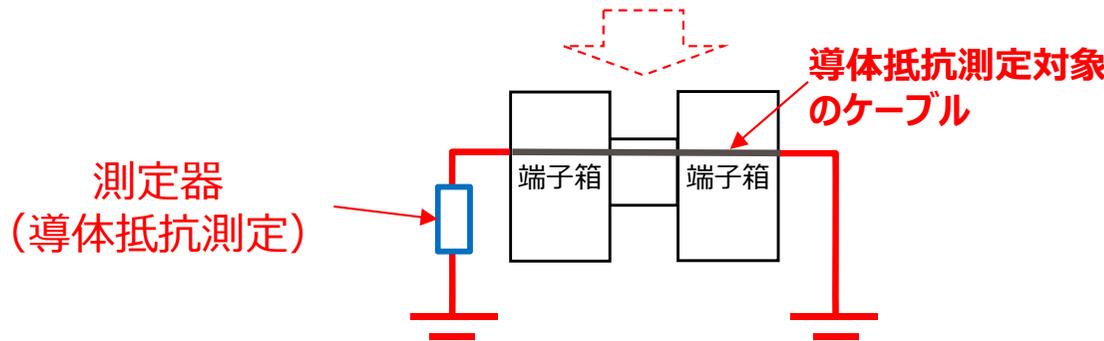
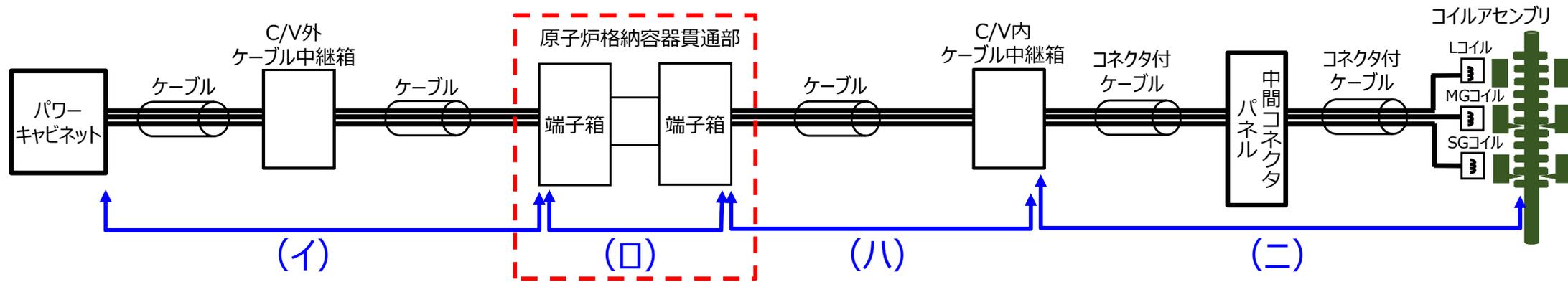


原因調査（電流制御ユニット下流側の点検、調査）

➤ 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

- 下図（イ）～（二）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した結果、（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

※定電圧発生器：任意の電圧を高精度で安定して発生させる装置



導体抵抗測定結果

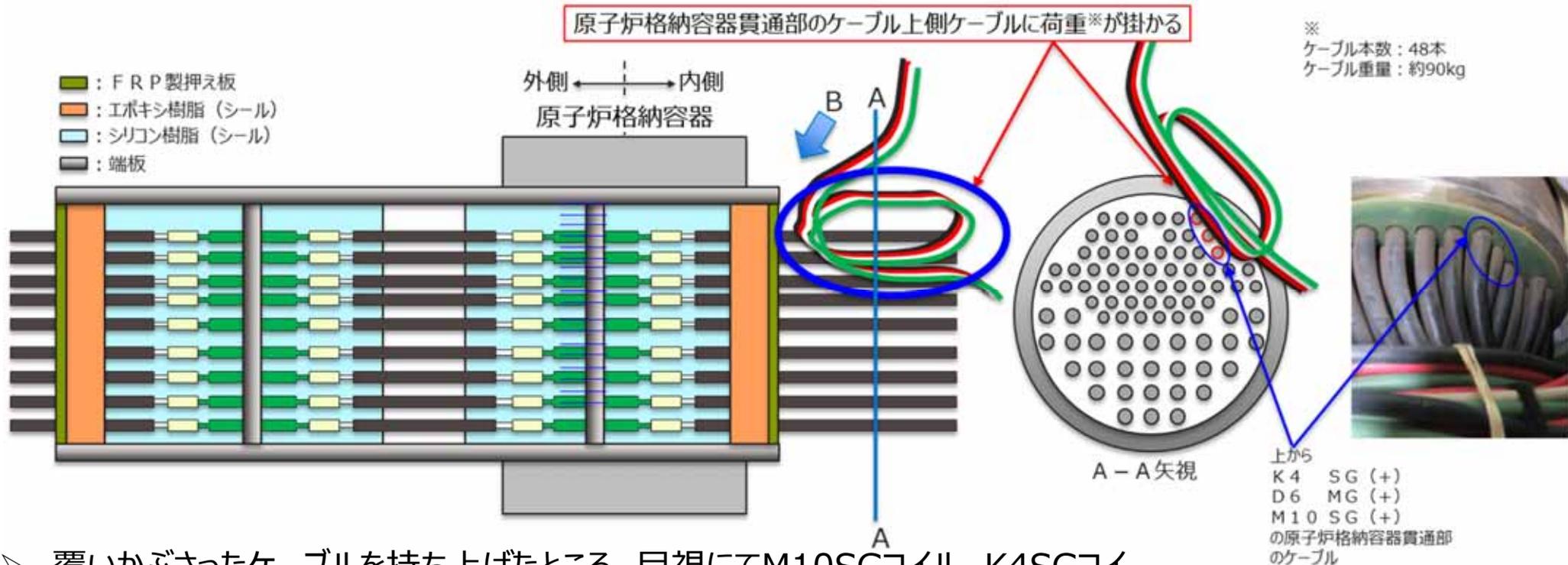
対象		導体抵抗値
D 6	MGコイル (+)	93.18Ω
	MGコイル (-)	0.40Ω
M 1 0	SGコイル (+)	3.03Ω
	SGコイル (-)	0.41Ω

通常値：約0.4~0.5Ω程度

- 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）（二）の部位においては、有意な電流変動は確認されていない。

原因調査（原子炉格納容器貫通部の端子箱～端子箱の間の詳細確認）

- 原子炉格納容器内の、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、CRDM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
- K4SGコイル、D6MGコイル、M10SG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敷設され、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



- 覆いかぶさったケーブルを持ち上げたところ、目視にてM10SGコイル、K4SGコイルに電流変動を確認
- 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
- K4、D6、M10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

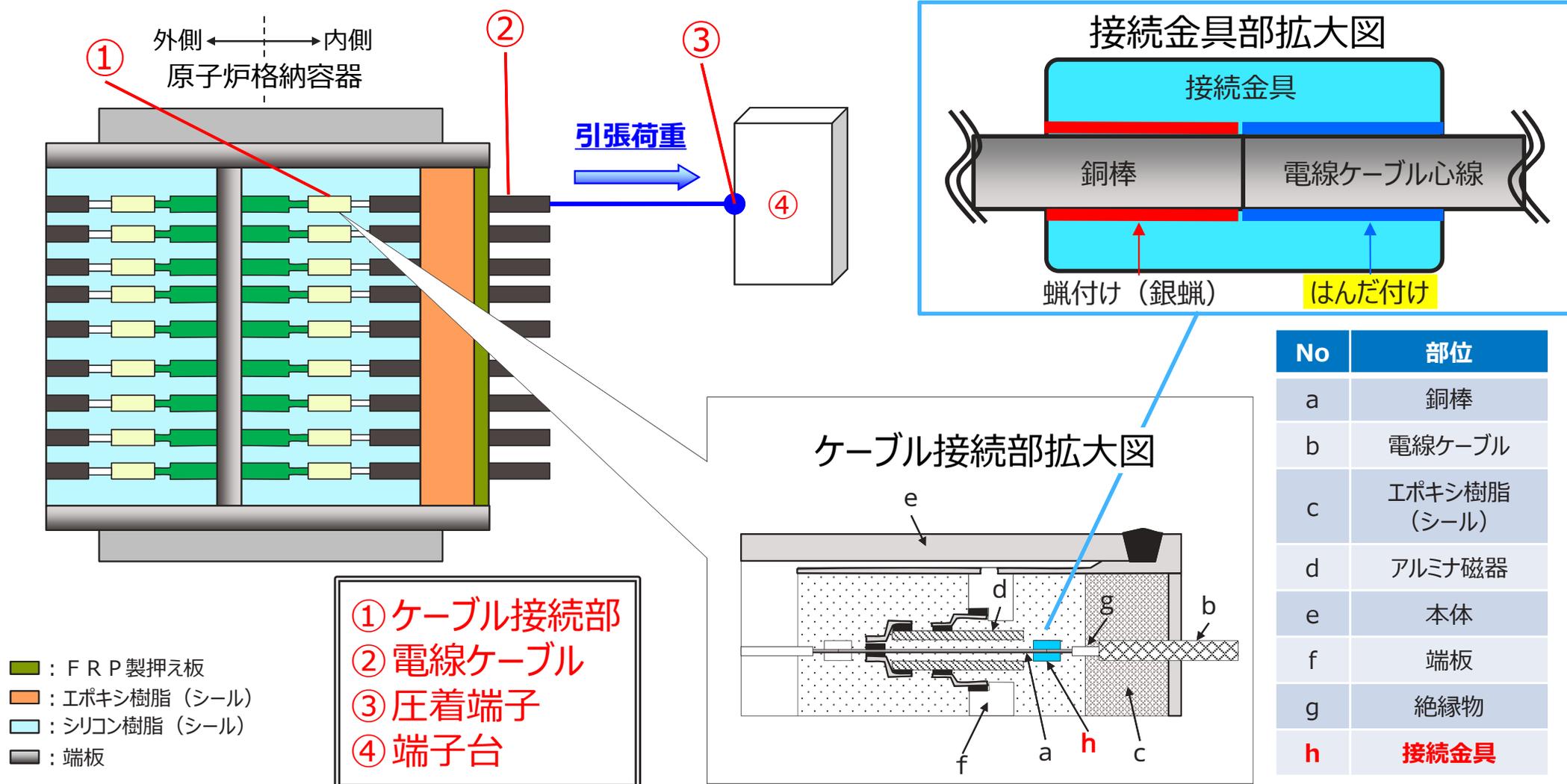
⇒原子炉格納容器貫通部出口から原子炉格納容器内側の端子台の間でケーブルが導通不良を起こしているものと推定

対象		抵抗値 (Ω)
K 4	SGコイル(+)	0.707~1.05
D 6	MGコイル(+)	63~数k
M 1 0	SGコイル(+)	4.827~5.34
M 1 0	MGコイル(+)	0.907

通常値：約0.4~0.5Ω程度

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）

- 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。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
- 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。



推定原因

○原子炉が自動停止した「P R 中性子束急減トリップ」警報発信の原因

点検のために、制御棒を保持している2つの保持機構のうち、可動ラッチのコイルの電源を切り、保持ラッチのみで制御棒を保持していたところ、原子炉格納容器貫通部内で接続している電気ケーブルに接触不良が発生したことにより、制御棒駆動部のコイルに供給する電流値が低下し、保持ラッチが開放され、制御棒1本（M10）が挿入されたためと推定

○電気ケーブルの接触不良の原因

原子炉格納容器貫通部出口（格納容器内側）と端子台の間において、貫通部出口側電気ケーブルに、コイル側電気ケーブルが覆いかぶさっていたことにより、原子炉格納容器貫通部内から引き抜かれる方向に力が働いていたためと推定

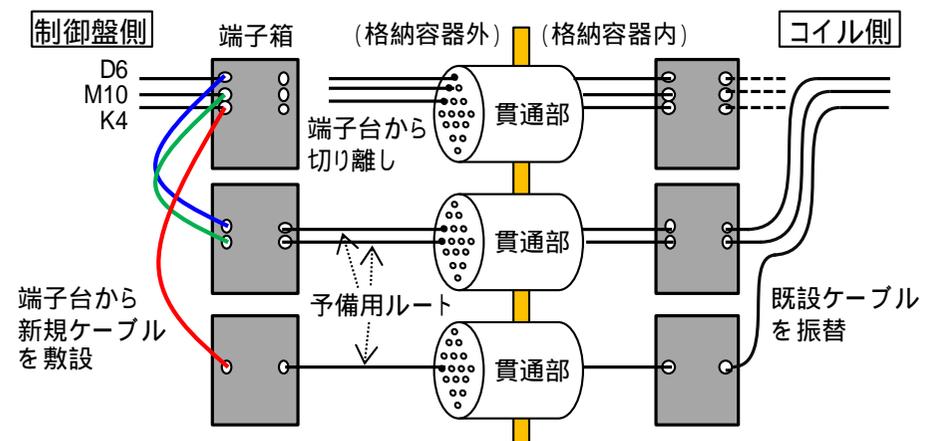
対策

○3本の制御棒（D6,M10,K4）の原子炉格納容器貫通部の端子箱（原子炉格納容器外側）から、同貫通部の端子箱（原子炉格納容器内側）までの電路について、電流低下が認められた電気ケーブルを介さずに、予備用として敷設されている他の原子炉格納容器貫通部のルートに変更（3/16実施済）

【下図参照】

○今回の事象を踏まえ、原子炉格納容器貫通部のケーブルに関する点検・保守方法や、ケーブル敷設時の注意事項を社内マニュアルに反映（3/22実施済）

○高浜4号機のおの他の原子炉格納容器貫通部55箇所の端子箱内の点検を実施し、今回のようなケーブル束のよりかかりがないことを確認（3/3実施済）



当社は、原因と対策をまとめた報告書について、3月7日に原子力規制庁に提出し、同日および14日の公開会合において内容の確認が行われた。その後、規制庁は、原因と対策を妥当とする評価書を取りまとめ、22日に原子力規制委員会に報告し、了承された。

規制当局による主な指摘事項は以下のとおり。

① 格納容器貫通部におけるケーブル接続部の確認

- ・電流低下の原因が貫通部内での電気ケーブルの接触不良であることは、妥当と評価するが、当該貫通部の取替えを行う機会には、異常が見られたケーブルの接続部の状況を確認すること

② ケーブルの点検・保守管理の検討

- ・長期にわたり定期検査で貫通部ケーブルの不良を検知することができなかったことを踏まえ、今後の点検・保守方法を検討すること

③ 警報発信時の手順の検討

- ・重故障警報の発信を受けて実施された点検調査の過程で原子炉が自動停止したことを踏まえ、今後、重故障警報発信時の慎重な原因調査を行うための対応手順を検討すること

④ 他プラントへの水平展開

- ・他プラントの貫通部や類似ケーブルの施工状態を確認すること

公開会合等で規制当局からの主な指摘事項に対する当社の対応方針は以下のとおり。

①格納容器貫通部に係る調査の実施

- ・今後、他プラントを含め原子炉格納容器貫通部取替工事等において、取り外した貫通部を活用し、強度試験等を検討する。
- ・当該貫通部の取替えを行う機会には、調査方法を含めて検討する。

②ケーブルの点検・保守管理に係る今後の対応

- ・貫通部のケーブルに関する点検・保守方法をマニュアルに反映する。
具体的には、定期検査時に、全ての格納容器貫通部端子箱内において、貫通部出口から端子台までのケーブルへの荷重の有無の確認を行う。また、今回の事例を踏まえ、電気回路の電流の連続的なデータを採取・評価し、健全性を確認する。

③警報発信時における点検手順の策定

- ・重故障警報が発信した際は、制御棒を2つの保持機構で保持した状態で、電気回路の連続監視やケーブルの接続状況を確認するなど、慎重に調査を進める。

④他の運転中および定期検査中プラントへの水平展開

- ・高浜1, 2号機は今定期検査中、運転中の美浜3号機、大飯3, 4号機、高浜3号機は、次回定期検査で貫通部の端子箱の点検を行う。
- ・次回定期検査までの間は、警報が発信した際に故障内容を早期に特定することを目的に、制御棒駆動装置の現地制御盤にカメラを設置して動画データを保存する。(4/7までにカメラ設置済)

參考資料

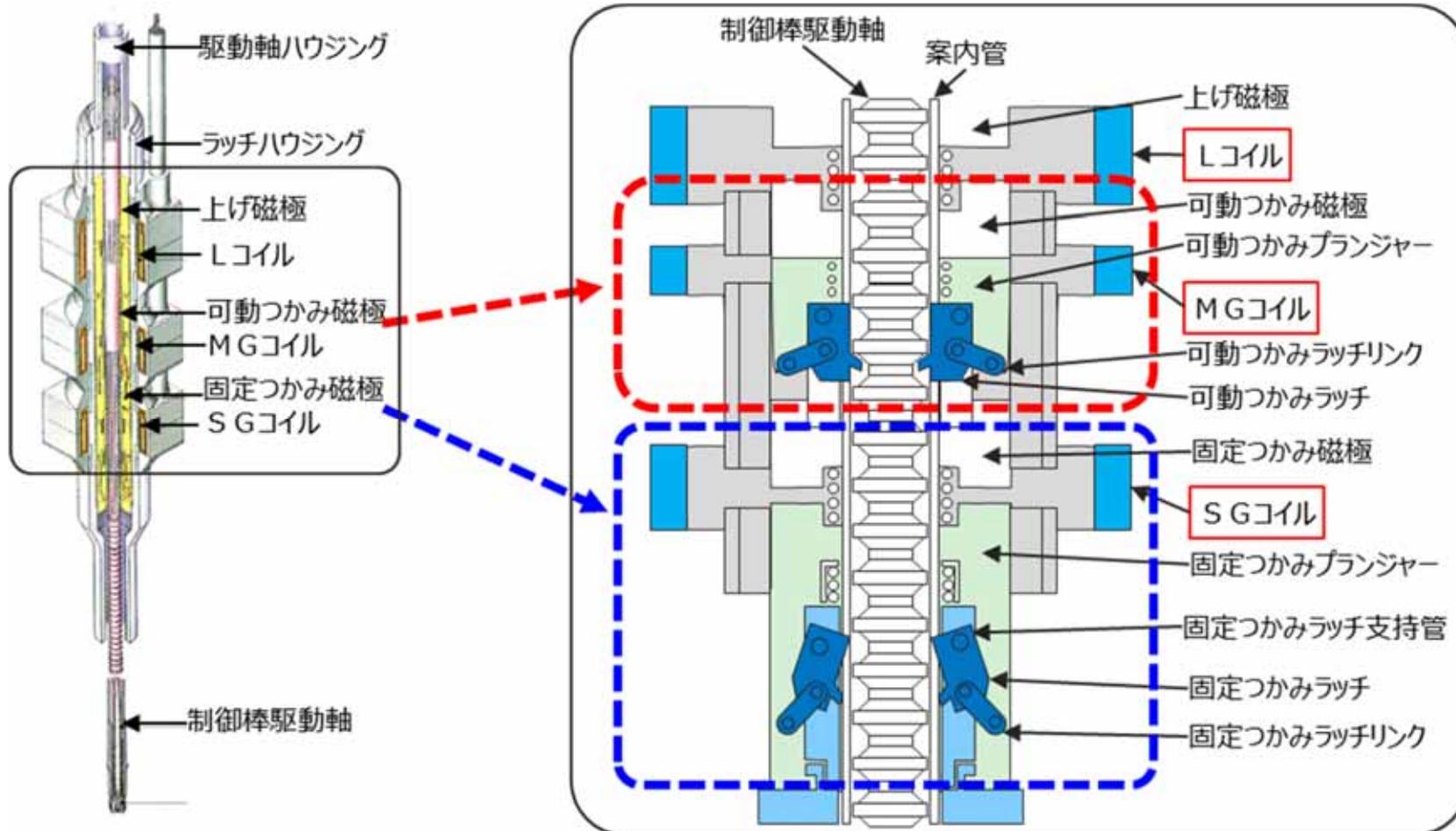
制御棒駆動装置 (CRDM) の概要

➤ CRDMの概要図

CRDMは、上からL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。

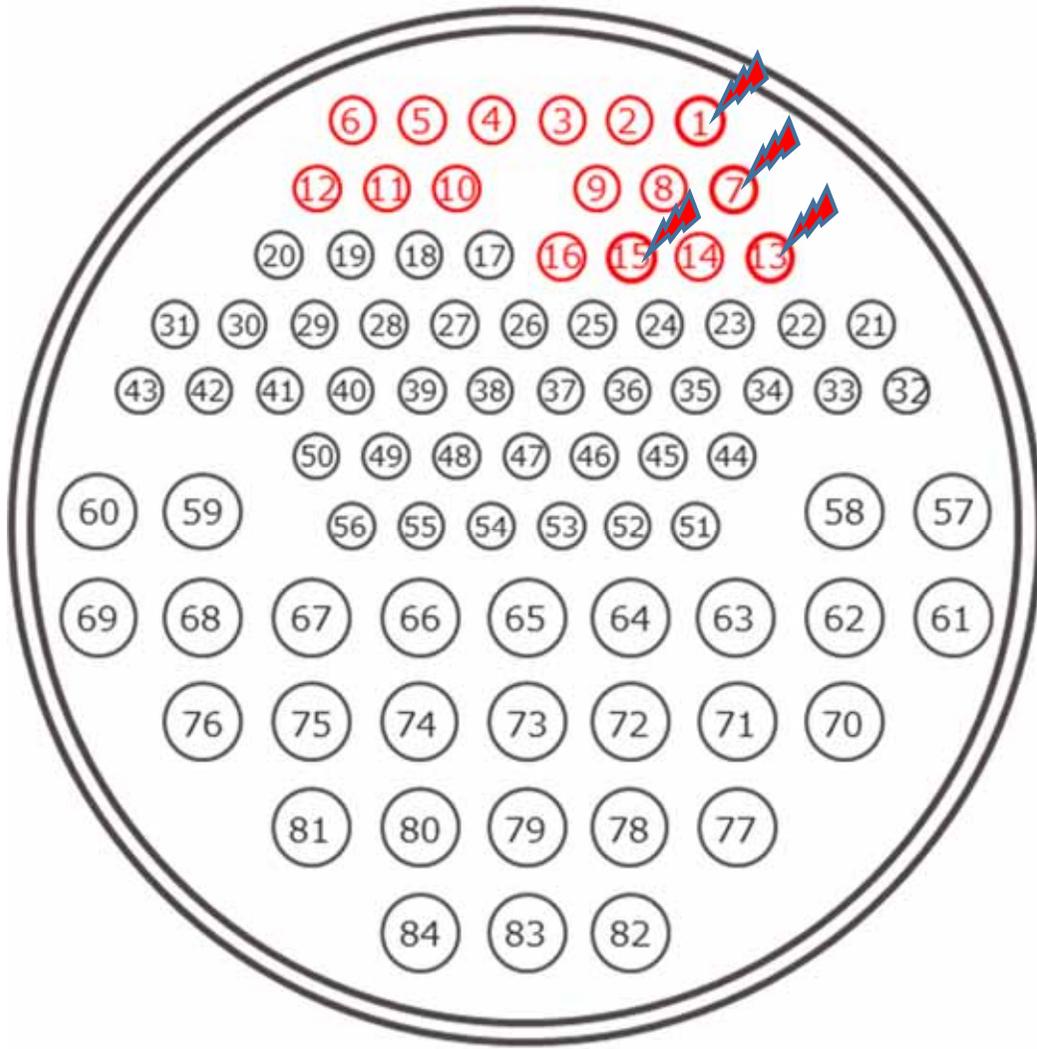
なお、原子炉トリップ信号または停電でコイルが消磁されると、制御棒駆動軸等の重量でラッチが外れて制御棒は自重で炉心内へ落下する仕組みとなっている。

※：Liftコイル（制御棒を引き抜く際に使用するコイル）



原子炉格納容器貫通部

PENE-606



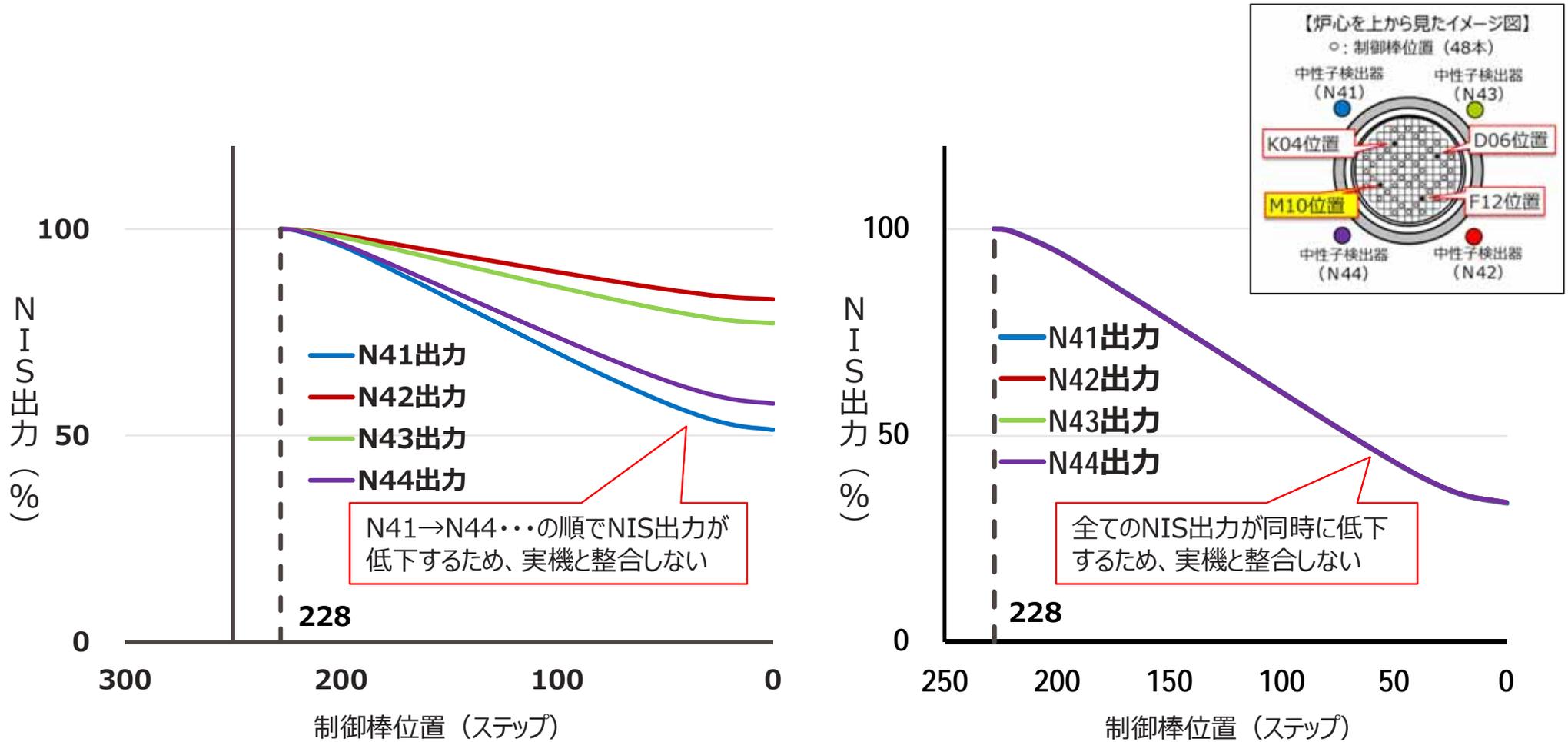
※原子炉格納容器内から見た図

番号	接続先
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 (+)
1 0	F 1 2 制御棒 S Gコイル (-)
1 1	F 1 2 制御棒 M Gコイル (+)
1 2	F 1 2 制御棒 M Gコイル (-)
1 3	M 1 0 制御棒 S Gコイル (+)
1 4	M 1 0 制御棒 S Gコイル (-)
1 5	M 1 0 制御棒 M Gコイル (+)
1 6	M 1 0 制御棒 M Gコイル (-)

原因調査（N I S 挙動解析の結果（落下した制御棒の特定））

【2本同時挿入および4本同時挿入の場合】

M 1 0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N I S出力トレンドと挙動が異なることを確認した。



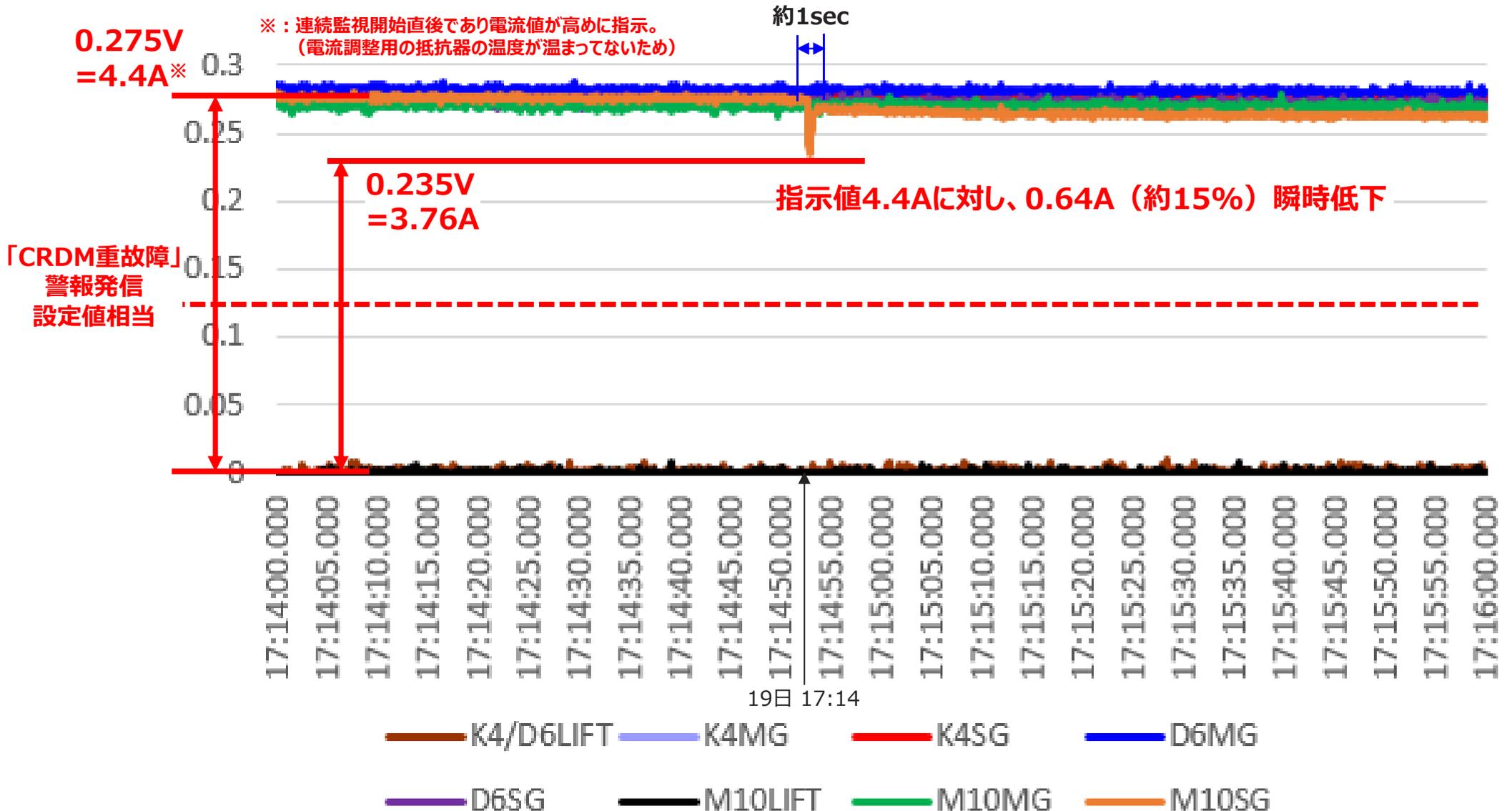
2本 (M 1 0 位置とK 0 4 位置)
同時挿入のN I S出力

4本 (M 1 0, K 0 4, D 0 6, F 1 2 位置)
同時挿入のNIS出力

原因調査（電流制御ユニット下流側の点検、調査）

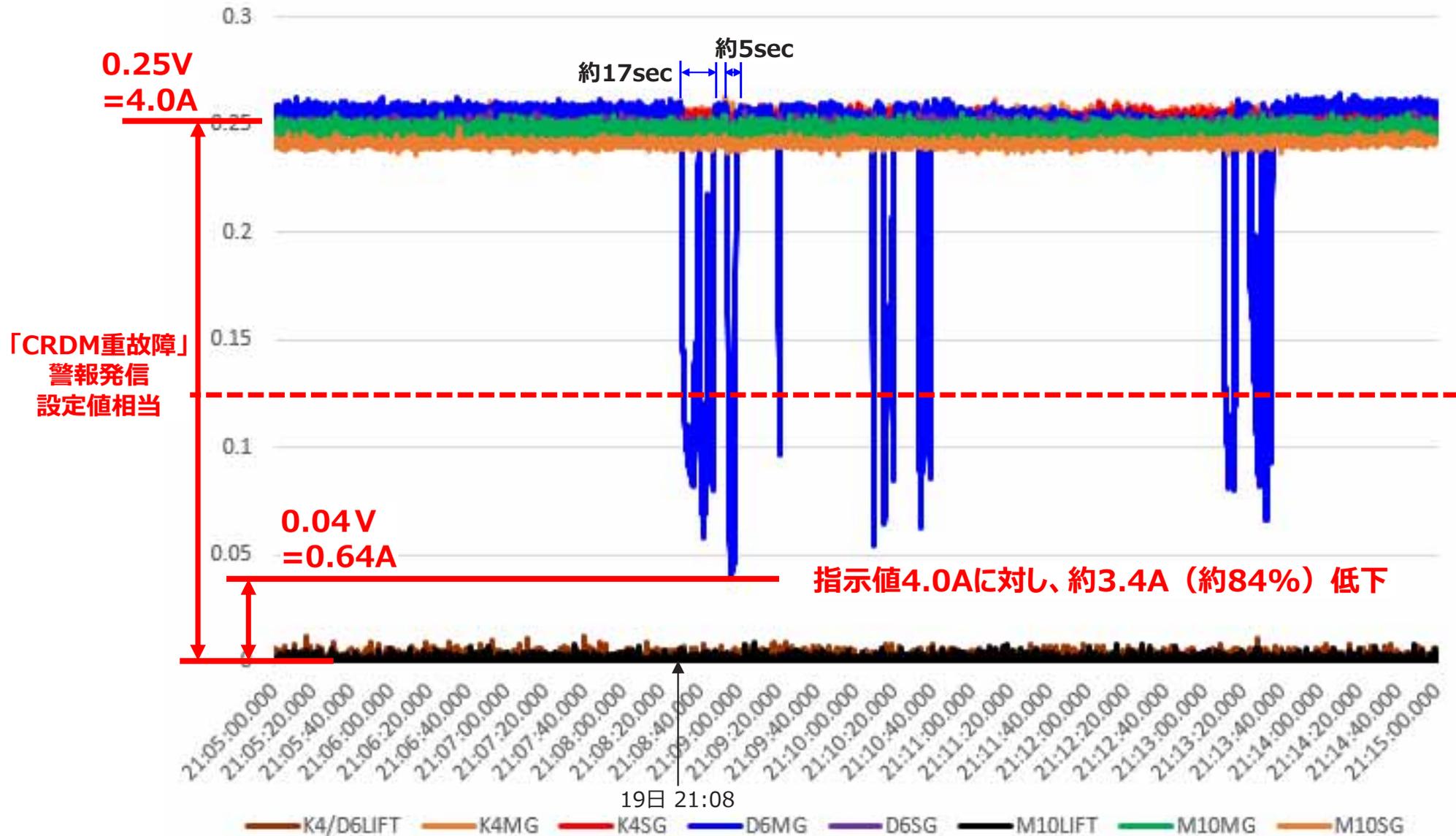
➤ 2月19日～20日の間で確認されたM 1 0 制御棒 S G コイル電流低下

- 「CRDM重故障」警報の発信（設定値：電流2A以下）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。



原因調査（電流制御ユニット下流側の点検、調査）

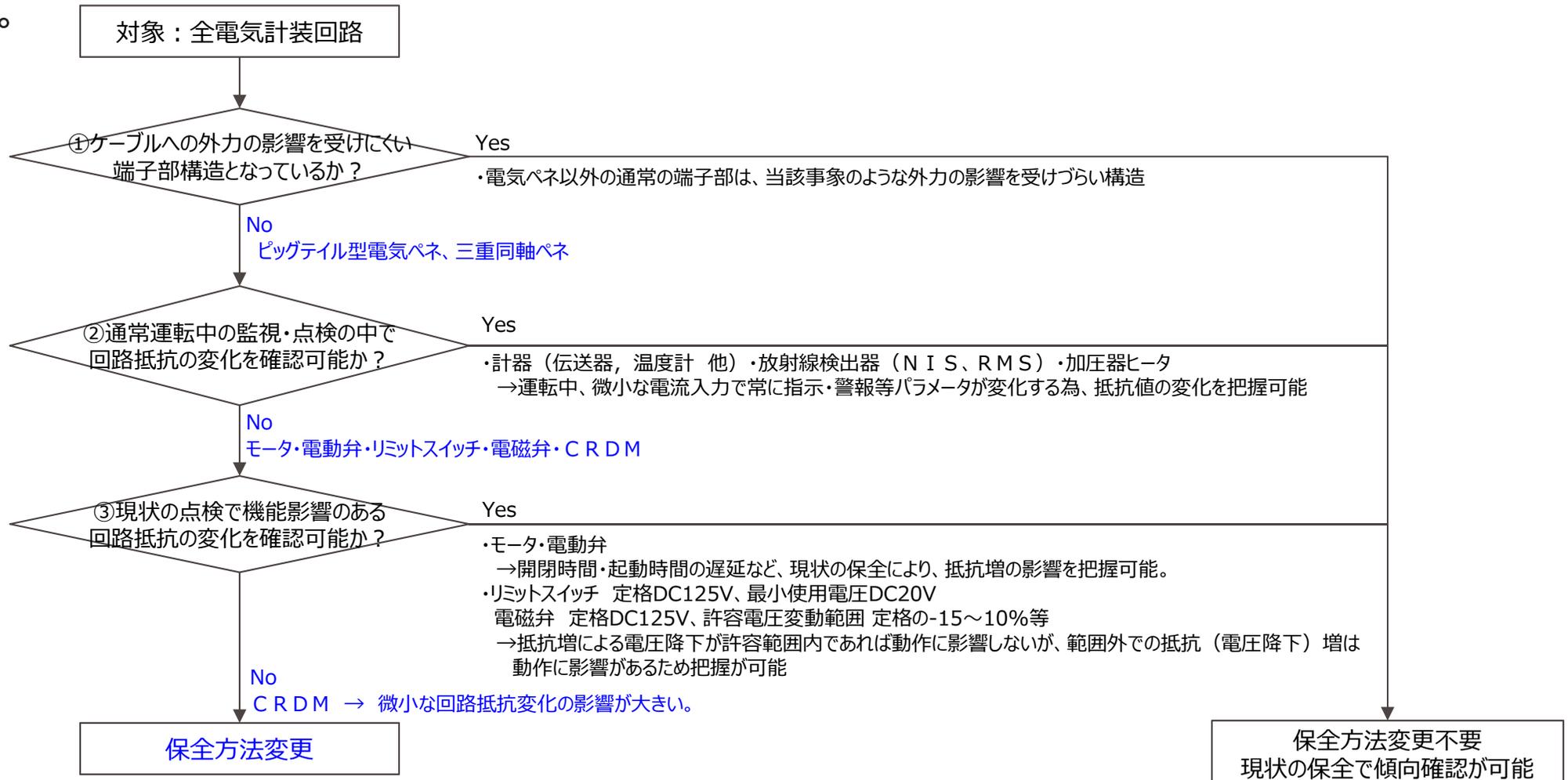
- 2月19日～20日の間で確認されたD 6 制御棒MGコイル電流低下
 - 「CRDM重故障」警報の発信（設定値：電流2A以下）に相当する電流低下が確認された。



格納容器貫通部のケーブルに関する点検項目の追加

【ケーブルの点検】

- C R D M回路を除く電気計装回路は、現状の点検、運転中の監視・機器の動作にて確認が可能であることから、定期検査中の点検において電氣的な点検追加が必要な対象となるC R D M回路について保全方法を変更する。
- C R D M回路について、定期検査中の点検において連続監視を行い回路抵抗変化の傾向を監視する。



CRDM：定期検査中の点検において連続監視を行い回路抵抗変化の傾向を監視する。

○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

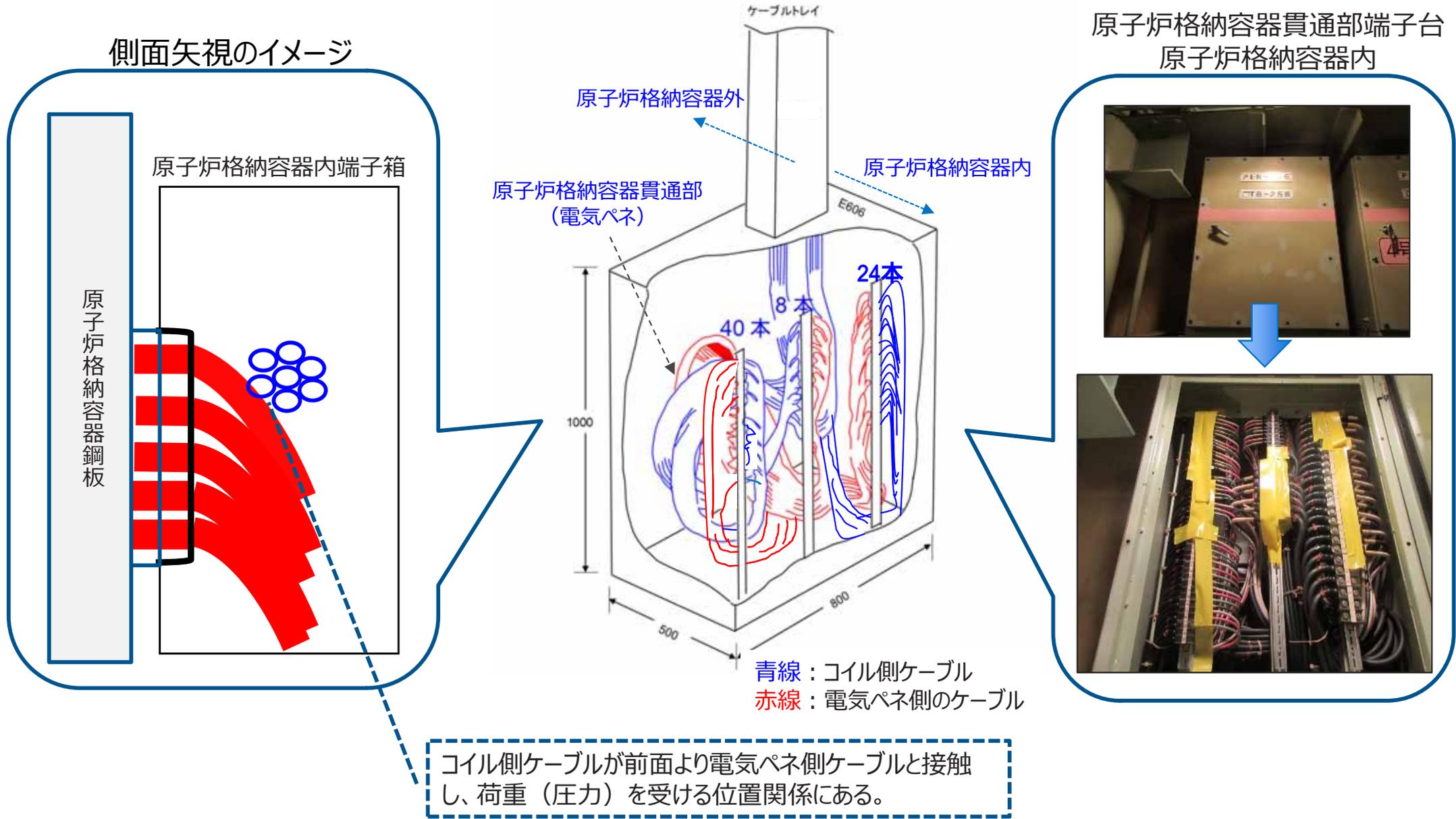
- 今回の不具合箇所（電気ペネの電線ケーブル）に対して、高経年化技術評価では、経年劣化事象として導通不良を想定している。その評価において、「大きな荷重が作用しなければ、断線による導通不良に至ることはなく着目すべき経年劣化事象ではない」としている。

○今回の不具合内容の取扱い

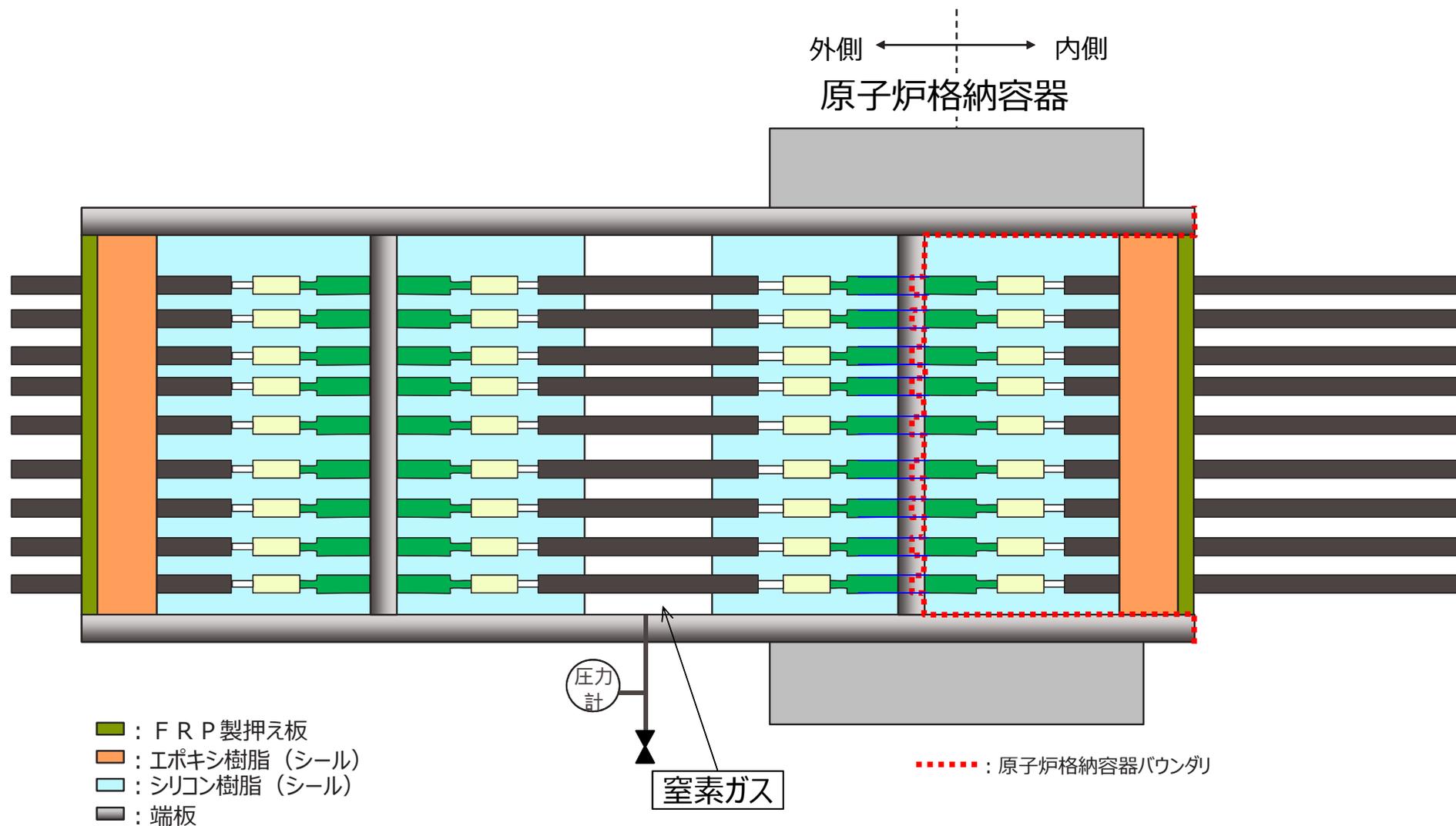
- 高経年化、経年劣化とは、設計通りの施工を前提として、時間経過に伴い、使用環境や条件により、機能、性能に影響を及ぼすおそれがある事象である。
- 今回は、施工時に他の余長ケーブルが覆いかぶさった状態が継続し、ケーブル接合部に設計上想定していない引張力が作用し続けた結果、発生した事象であり、施工内容に起因したもので、施工時に荷重がかからないように設置すれば発生しない事象であることから、経年劣化事象には該当しないと考える。
- 制御棒駆動装置のケーブルは、定検毎に絶縁抵抗測定を行い、絶縁性能に問題がないことを確認している。本事象の原因調査においても問題がないことを確認しており、本事象は経年劣化事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

➤ 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



電気ペネトレーションには格納容器側の気密性を確認するために以下の通り窒素を封入している。



原子炉保護系・原子炉制御系について

○原子炉保護系の目的

安全保護動作が必要な場合に確実に動作するように多重性および独立性を備え、単一故障によってもその安全保護機能が妨げられない回路を形成し、原子炉トリップおよび非常用炉心冷却設備等の作動を行う。

○原子炉制御系の目的

設計負荷変化に起因する過渡現象を減衰させ、平衡状態を回復維持すること。

<炉外中性子束検出器の例>

