

本資料のうち、枠囲みの範囲は
機密に係る事項ですので公開す
ることはできません。

伊方発電所第3号機
原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の
制御棒クラスタ引き上がりについて

令和2年3月
四国電力株式会社

1. 件名

伊方発電所第3号機 原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスタ引き上がりについて

2. 事象発生の日時

令和2年1月12日 13時20分（引抜き操作を行っていない制御棒が管理位置から移動したことを確認した日時）

3. 事象発生の発電用原子炉施設

計測制御系統施設 制御材 制御棒クラスタ

4. 事象発生前の運転状況

第15回定期検査中

5. 事象発生の状況

伊方発電所第3号機（定格電気出力89万キロワット）は第15回定期検査（令和元年12月26日解列）中、原子炉からの燃料取出の準備作業のため、原子炉容器上蓋を開放し、制御棒クラスタと駆動軸との切り離し^{※1}を行った後、原子炉容器の上部炉心構造物を吊り上げていたところ、令和2年1月12日13時20分、制御棒クラスタ1体が上部炉心構造物とともに引き上げられていることを確認した。

その後、上部炉心構造物を吊り下ろして当該制御棒クラスタと駆動軸が結合されていないことを確認した後、再度上部炉心構造物を吊り上げ、当該制御棒クラスタが引き上がらないことを確認し、令和2年1月13日10時34分、上部炉心構造物の取り外しを完了した。

本事象は、引抜き操作を行っていない制御棒が管理位置から移動したこと、その際、炉心に燃料体が装荷された状況であったことから、令和2年1月15日9時00分に実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当すると判断した。

なお、本事象による外部への放射能の影響はなかった。

※1 燃料取替クレーンを使用し、制御棒クラスタ（48体）と駆動軸（48本）を専用の取り外し工具（1個）を用いて切り離しを行う作業。

（添付資料－1～6）

6. 発電用原子炉施設への影響

燃料取出にあたっては、原子炉格納容器内封機能および1次冷却材ほう素濃度等、原子炉施設の状態を事前に確認するとともに、原子炉出力、1次冷却材温

度、放射線監視設備等を監視し、正常な状態であったことを確認した。

また、燃料取出を行う原子炉運転モード6においての1次冷却材ほう素の濃縮は完了しており、臨界管理は1次冷却材の希釈系統を隔離する等、1次冷却材ほう素濃度にて管理することを規定している。

(添付資料-2-1、3)

7. 環境への影響

発電所に設置しているエリアモニタおよびプロセスモニタの指示値ならびに発電所周辺に設置している野外モニタの指示値には有意な変動はなく、本事象による外部への放射能の影響はなかった。

(添付資料-2-2)

8. 制御棒クラスタと駆動軸の結合状況等の確認

事象発生後（令和2年1月12日～13日）、以下のとおり、制御棒クラスタと駆動軸の結合、切り離し確認等を実施し、正常に結合、切り離しができること等を確認した。

- ・事象発生後、上部炉心構造物を吊り上げた状態から吊り下ろして、作業開始前の状態に戻した後、駆動軸取り外し工具にて当該駆動軸を引き上げたところ、この時点では制御棒クラスタは引き上がり、制御棒クラスタと駆動軸は結合されていないことを確認した。
- ・その後、駆動軸取り外し工具にて駆動軸と制御棒クラスタの結合、切り離し作業を実施し、正常に結合、切り離しができることを確認した。
- ・駆動軸と制御棒クラスタを結合させた状態で、上下方向に操作して、上部炉心構造物と干渉せずスムーズに操作できることを確認した。

その後、上部炉心構造物を再度吊り上げた際には、制御棒クラスタは引き上がることはなく、本事象は再現しなかった。

以上のことから、事象発生時の結合状態は通常と異なる不完全な結合状態であった可能性がある。

9. 調査結果

原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスタ引き上がりの原因について、要因分析図に基づき現地調査および図面や製造記録等の調査を行った。

(添付資料-7)

(1) 作業体制および手順等

a. 作業体制

- ・制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業は、作業責任者1名の指揮のもと、駆動軸取り外し工具の操作（寸法・動作確認を含む）を行う作業員（工具操作者）2名、制御棒クラスタと駆動軸の切り離しできたことを重量および寸法により確認を行う作業員（記録者）1名、駆動軸取り外し工具と駆動軸

のラッチのためセンタリング確認を行う作業員(センタリング確認者)2名、クレーン操作を行う作業員(クレーン操作者)1名、計7名の複数人で実施しており、過去に十分な実績のある作業体制と同じであることを確認した。

また、1月12日の作業前ミーティングでは、当日の作業内容の説明、配員の周知および体調や勤務状況の確認を含む安全確認を行っていた。

b. 作業責任者、作業員の力量

- ・制御棒クラスタと駆動軸の切り離しのため駆動軸取り外し工具の操作を行う作業責任者(経験年数10年以上)および工具操作者(経験年数7年以上)等の主要な操作を行う者は、過去に伊方発電所の原子炉容器の開放作業において制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業を経験しており、現場操作に十分な経験と知識を有していた。

c. 作業手順書

- ・制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業は、当社が承認した作業手順書に基づき実施している。また、今回の作業手順書は過去の定期検査(第1回～第14回)時と同様であり、過去の定期検査時に同様の事象は発生していないことを確認した。
- ・現地作業開始前には作業手順書の読み合わせを実施しており、作業手順の確認、過去の不具合事例紹介および安全管理、品質管理、放射線管理上の注意事項等について確認を行っていた。
- ・今回の作業手順書は、重量確認と寸法確認で確実に制御棒クラスタと駆動軸が切り離されていることを確認できる手順書であったが、切り離し確認以降に通常とは異なる不完全な結合状態に至った場合は制御棒クラスタの引き上がりが生じる可能性がある。

d. 作業記録

- ・今回の作業記録を確認し、定められた手順どおりに重量確認と寸法確認が実施され、確実に制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業が行われていることを確認した。また、過去の定期検査(第1回～第14回)の作業記録と比べても、今回の作業記録に特異な点は確認されなかった。

なお、今回上部炉心構造物とともに引き上げられた制御棒クラスタの切り離し作業は、48体中6体目の作業であった。

- ・事象発生後の駆動軸引き上げ時に制御棒クラスタは引き上がらなかったことから、切り離し操作自体をしていないといった重要な手順の抜けやアドレス間違い等の作業ミスは考え難い。

e. 作業環境

- ・作業場所における照明、騒音、気温および作業エリアの観点から確認を行った。制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業を行った作業場所は、原子炉格納容器内であり、照明、騒音および気温について問題はなかった。作業エリアについては、燃料取替クレーン歩廊上で実施したが、これまでの定期検査時と同様で当該作業においては十分な作業エリアであり問題なかった。

- ・作業時の装備については、管理区域標準装備（管理服、綿手袋、靴下）に加えて、防護服（1重）、ゴム手袋（2重）、靴下（1重）を着用しての作業であるが、これまでの定期検査時にも同様の装備での作業であり、安全面も含めて問題はなかった。

また、当該作業時に全面マスク等の着用は必要なく、作業員間のコミュニケーションに問題はなかった。

f. 聞き取り調査

- ・作業員等への聞き取りにより、制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業時、作業責任者、作業員は、制御棒クラスタと駆動軸の切り離し操作をするため、作業手順書に従い駆動軸取り外し工具の操作、荷重計（ロードセル）による重量確認および寸法確認等を行っており、作業手順に問題がないことを確認した。また、操作および計測時は、複数人による確認を行い、作業が確実に行われていることを確認した。

当該作業時、当社立会により、作業が確実に行われていることを確認している。

なお、当該駆動軸切り離しの確認作業時に制御棒クラスタを切り離すために駆動軸取り外し工具を揺する操作をしたことが確認されたが、当該駆動軸に限った操作ではなく、他のほとんどの駆動軸で同様の操作を行っていることおよびこれまでの定期検査時にも同様の操作を行っているとのことであり、一般的に行っている操作であることを確認した。

（添付資料－8－1）

（2）駆動軸取り外し工具

- ・駆動軸取り外し工具の外観確認を実施し、傷、変形、付着物はなく駆動軸取り外し工具と駆動軸の取り合いに問題ないことを確認した。
- ・駆動軸取り外し工具と模擬駆動軸を用いた動作確認を実施し、駆動軸取り外し軸の引き上げ、押し下げ動作に異常がなく、正常に動作することを確認した。

（添付資料－8－2）

（3）計測器

- ・使用された荷重計（ロードセル）について、作業記録により、使用前点検で荷重計表示が出ていることおよび遠隔表示機の表示値が本体表示値と同じであることを確認するとともに外観確認により有意な損傷等がないことを確認した。また、今回の調査にて、ウェイトを用いた動作確認により表示値に異常がないことを確認した。
- ・使用されたスケールについて、外観確認により有意な損傷等がないことを確認した。

（添付資料－8－3）

（4）制御棒クラスタおよび制御棒クラスタ案内管（上部炉心構造物）

制御棒クラスタの調査については、事象が発生したアドレスの他に比較対象

として他の2か所のアドレスを選定し、計3か所について調査を実施した。

- ・当該制御棒クラスタ（アドレス：M-4）
- ・他の制御棒クラスタ2体（アドレス：M-12、J-7）

a. 図面確認

- ・図面確認により、制御棒クラスタのスパイダ頭部と制御棒クラスタ案内管（上部炉心構造物）の位置関係から、設計上、物理的に干渉する可能性がないことを確認した。

b. 外観確認

制御棒クラスタのスパイダ頭部の外観確認を実施し、損傷、変形の有無を確認するとともに、異物の有無を確認した。また、水中カメラをスパイダ頭部に近づけて外観の詳細確認を実施した。

(a) 原子炉容器内点検

燃料取出前（令和2年1月13日）に水中カメラ（白黒）で制御棒クラスタのスパイダ頭部全体の外観確認を実施し、外観形状に異常はなく、スパイダ頭部と制御棒クラスタ案内管（上部炉心構造物）との干渉の痕跡は認められなかった。

また、当該制御棒クラスタ（M-4）のスパイダ頭部内（駆動軸との結合部内部）に堆積物が確認された。

なお、堆積物はM-12、J-7にも同様に確認された。

(b) 使用済燃料ピット内点検

燃料取出後、使用済燃料ピットにおいて、水中カメラ（カラー）で制御棒クラスタのスパイダ頭部の外観確認を実施した結果、上述のとおり、当該制御棒クラスタ（M-4）のスパイダ頭部内（駆動軸との結合部内部）に堆積物が確認された。

また、M-12、J-7の制御棒クラスタについても比較のため外観確認を実施した結果、M-4の制御棒クラスタと同様に堆積物が確認された。

(c) 使用済燃料ピット内点検（詳細確認）

水中カメラを制御棒クラスタのスパイダ頭部に近づけてスパイダ頭部外観の詳細確認を実施した結果、当該制御棒クラスタ（M-4）のスパイダ頭部の円環部上面に接触痕（色調の変化）が確認された。円環部上面の接触痕（色調の変化）はM-12にも同様に確認されたが、M-4のほうが広範囲であった。なお、使用期間が短いJ-7に接触痕（色調の変化）は確認されなかった。

また、M-4のスパイダ頭部の内部テーパ面に接触痕（色調の変化）が確認され、M-12にも同様に確認された。

スパイダ頭部内で確認された堆積物の詳細確認結果は（6）に示す。

（添付資料-8-4）

(5) 駆動軸 (制御棒クラスタとの結合部含む)

駆動軸の調査については、事象が発生したアドレスの他に比較対象として他の2か所のアドレスを選定し、計3か所について調査を実施した。

- ・当該駆動軸 (アドレス: M-4)
- ・他の駆動軸2本 (アドレス: M-12、J-7)

a. 外観確認 (M-4およびM-12の型取り観察含む)

駆動軸の外観確認を実施し、接手内外面 (位置決めナット含む) および駆動軸取り外し工具の取り合い部の傷、変形、付着物の有無を確認した。また、接手内外面 (位置決めナット含む) の型取り観察により詳細性状を確認した。

(a) 接手外面

イ. 外観確認

当該駆動軸 (M-4) および比較のため当該駆動軸以外の駆動軸 (M-12、J-7) について外観確認を実施した結果、当該駆動軸 (M-4) の接手外面の直線部に局所的な金属光沢を有する接触痕を確認した。一方、M-12、J-7の駆動軸でも接触痕は確認されたが、金属光沢は確認されなかった。

また、駆動軸 (M-4、M-12、J-7) の接手外面の先端テーパ部には周方向の接触痕が確認されたが、周方向の接触痕は切り離し操作後のスパイダ頭部の内面と取り合う箇所と相当し、金属光沢はなかった。

このため、当該駆動軸 (M-4) の接手外面に確認された金属光沢を有する接触痕は今回生じた可能性がある。

なお、外観確認により、目視可能範囲に異物は確認されなかった。

ロ. 型取り観察

接手部の型取りを実施し、M-4に見られた接手外面の局所的な接触痕は、M-12の当該接触痕よりも有意に深かった。また、通常、駆動軸切り離し操作後の駆動軸着座位置では接手外面テーパ部とスパイダ頭部の内面が取り合うが、その周方向の接触痕は局所的な接触痕よりも軽微であった。

(b) 接手内面

イ. 外観確認

当該駆動軸 (M-4) の駆動軸取り外し軸を引き上げた状態での外観確認を行った結果、接手内面直線部に金属光沢を有する接触痕を確認した。

接手内面直線部は位置決めナットおよびロックボタンが摺動する部位であるが、比較対象であるM-12、J-7には有意な接触痕はないことから、当該駆動軸 (M-4) の接手内面に確認された金属光沢を有する接触痕は今回生じた可能性がある。

また、駆動軸取り外し軸を押し下げた状態での外観確認を行った結果、M-4の位置決めナットに線状の接触痕が確認された。

なお、外観確認により、目視可能範囲に異物は確認されなかった。

ロ. 型取り観察

接手内面および位置決めナットの型取りを実施した結果、M-4に見られた接手内面直線部の接触痕と位置決めナットの接触痕は共に線状であり、両者が取り合う箇所であることから、位置決めナットの上下降時に生じた可能性がある。

また、型取り観察結果より、接触痕発生には介在物が関与しており、接触痕の大きさから、1mm程度の大きさの介在物が存在した可能性がある。

(c) 駆動軸取り外し工具との取り合い部

イ. 外観確認

駆動軸取り外し工具との取り合い部である駆動軸頂部(取り外しボタン)および駆動軸つかみ部周辺に対して、外観確認を行った結果、異常な噛み込み等の痕跡は確認されなかった。

b. 寸法計測

- ・駆動軸(M-4、M-12、J-7)について、駆動軸取り外し軸の押し下げ位置で、接手部周りの寸法を計測した結果、全て設計値を満足していることを確認し、M-4の寸法に有意な差はなかった。

c. 動作確認

- ・実機駆動軸および駆動軸取り外し工具を組み合わせたうえで、駆動軸取り外し工具にて、駆動軸取り外し軸を操作し、当該駆動軸(M-4)の動作状況の確認を行った結果、駆動軸取り外し工具および駆動軸(駆動軸取り外し軸)の動作に異常はなく、ストロークは設計寸法を満足していた。
- ・駆動軸(M-12、J-7)についても比較のため動作確認を実施した結果、当該駆動軸(M-4)との差はなく、M-4の動作状況に問題はなかった。
(添付資料-8-5)

(6) 堆積物

堆積物の調査については、事象が発生した制御棒クラスタのアドレスの他に比較対象として他の2か所のアドレスを選定し、計3か所について調査を実施した。

- ・当該制御棒クラスタ(アドレス:M-4)
- ・他の制御棒クラスタ2体(アドレス:M-12、J-7)

a. 堆積物の調査結果

水中カメラにて制御棒クラスタのスパイダ頭部内の堆積物を確認するとともに、堆積物を回収し、実体顕微鏡にてサイズおよび形状等を観察した。

また、走査電子顕微鏡(SEM)観察するとともに、電子線プローブマイクロアナライザ(EPM)による組成分析およびX線回折により形態を調査した。

(a) 堆積物の確認

(4) 項の制御棒クラスタの外観確認でも確認された、制御棒クラスタの

スパイダ頭部内の堆積物量に関し、原子炉容器内の水中カメラ（白黒）確認では、M-4、M-12、J-7共にスパイダ頭部内底部の機械加工模様が堆積物で覆われていた。

その後の使用済燃料ピット内の水中カメラ（カラー）確認では、堆積物の偏り傾向を確認した。堆積物の偏りは燃料移送中の制御棒クラスタの横倒しが影響したと考えられる。

原子炉容器内で撮影された写真より、M-4の堆積物は制御棒クラスタのスパイダ頭部の上から三山目より下の領域に堆積しており、スパイダ頭部の三山目より下の容積である約20cc相当の堆積物があったと推定される。

(b) 堆積物のサイズ・形状

堆積物のサイズ、形状については、黒色の粒子状および薄膜状の形状であり、M-4で回収された薄膜状の堆積物は数mm程度の大きさであり厚さは0.1mm程度であった。

また、M-4とM-12で堆積物のサイズ、形状に差はなく、J-7では粒子状の堆積物のみ回収された。

(c) 堆積物の分析

堆積物のSEM画像を確認した結果、M-4とM-12で回収された薄膜状の堆積物は、一体構造であるがひび割れが認められることから脆い物質と推定される。一方、M-4、M-12、J-7で回収された粒子状の堆積物は数十～数百 μm の粒子が集まって形成されていた。

また、EPMAによる組成分析およびX線回折による形態分析を実施した結果、薄膜状の堆積物はマグネタイト (Fe_3O_4) であった。粒子状の堆積物も同様にマグネタイト (Fe_3O_4) であった。

(d) まとめ

以上から、制御棒クラスタ (M-4、M-12、J-7) のスパイダ頭部内で確認された堆積物 (スラッジ^{※2}) は硬くて脆い性質であるマグネタイトであり、1次冷却材中に一般的に存在する鉄の酸化物の一種である。

堆積物 (スラッジ) の生成過程については次項で考察するが、プラント起動初期段階の高溶存酸素環境において駆動軸内表面で生成した鉄酸化物が、運転時間の経過に伴いマグネタイトに変態したもの、またはプラント運転中に1次冷却系統内の機器から1次冷却材中に溶出した鉄イオンが、機器・部品表面に付着してマグネタイトとなり、それが剥離し堆積したもの (スラッジ) と推定される。

また、制御棒クラスタ48体のうち、上記3体以外の制御棒クラスタ45体についても使用済燃料ピット内で外観確認を実施したところ、上記の3体と同様に堆積物があり、過去の定期検査でも確認されている。

※2 本報告書では、スパイダ頭部内で確認された堆積物をスラッジという。

b. 堆積物 (スラッジ) の生成過程

堆積物 (スラッジ) の生成過程について考察した。

(a) 駆動軸内表面で生成

イ. プラント起動初期段階

プラント起動初期段階の高溶存酸素環境において、原子炉容器上蓋上の制御棒クラスタ駆動装置圧力ハウジングは、その構造上、1次冷却システム水張時に加圧された空気が残留することから、溶存酸素が有意に高くなる期間が存在する。

このとき、駆動軸は全引抜状態にあり（制御バンクDは除く）、駆動軸内側は全長にわたり高溶存酸素・高温環境におかれているため、駆動軸内表面では鉄酸化物が生成する。運転時間の経過に伴って、生成した鉄酸化物はマグネタイトに変態するため、駆動軸内面のマグネタイト生成にはプラント起動段階の高溶存酸素環境における鉄酸化物が関与する。

ロ. プラント運転中

駆動軸近傍は上端に比べ下端が高温の条件にあると推定され、駆動軸内部では温度差（密度差）を駆動源とする1次冷却材の自然循環流が生じている可能性が考えられる。この循環する過程の温度変化に伴って鉄イオンの溶解度が変化し、析出した鉄イオンが駆動軸内表面でマグネタイトを形成する。

上記のイ. 項、ロ. 項を踏まえると、駆動軸内表面ではプラント起動時とプラント運転中に生成したマグネタイトが重畳し、時間の経過とともに成長したマグネタイトが剥離、脱落してスパイダ頭部内に堆積する可能性がある。

数mmの大きさの薄膜状の堆積物がこれに該当している可能性が高く、また、脱落の過程で粒子状に変化することもあると考えられる。

(b) 1次冷却システム内で生成

プラント運転中、1次冷却システム内で生成したマグネタイトが、結合状態にある駆動軸接手と制御棒クラスタのスパイダ頭部の隙間を経て侵入し堆積する可能性がある。

粒子状の堆積物（スラッジ）がこれに該当すると推定される。

駆動軸の保護筒下端と制御棒クラスタのスパイダ頭部の隙間は数mm程度と狭いことから、今回、スパイダ頭部内で確認された堆積物は、(a)の駆動軸内表面で生成したマグネタイトが剥離、落下、堆積したもののほうが比較的多いと推定される。

c. 1次冷却材中の堆積物（スラッジ）の挙動

- ・1次冷却材中のスラッジ（今回、スパイダ頭部内で確認されたスラッジも一部含む）については、1次冷却材システムや化学体積制御システムなどを循環、対流する間に細かく微粒子状になり、冷却材フィルタ等で捕捉される。
- ・一般的に、鉄の酸化物の一種であるマグネタイトは従来から1次冷却システム内に存在するものであり、これまでこれが原因で燃料集合体等に損傷を与えるような事象は発生していないことから、原子炉施設の安全性に影響を与える

ものではない。

(添付資料－８－６)

(7) 接触痕および堆積物まとめ

以上の調査結果から、制御棒クラスタの引き上がり事象には、以下の接触痕および堆積物が関与していた可能性がある。

- ・ 接手外面直線部の局所的な接触痕
- ・ 接手外面テーパ部の周方向接触痕
- ・ 接手内面直線部の接触痕
- ・ 位置決めナット直線部の接触痕
- ・ スパイダ頭部の円環部上面の接触痕 (色調の変化)
- ・ スパイダ頭部の内部テーパ面の接触痕 (色調の変化)

(添付資料－８－７)

(8) 製造履歴調査

- ・ 制御棒クラスタについて、製造記録より材料、寸法が設計どおり製作されていることおよび模擬駆動軸接手を用いた嵌合性試験に問題がなかったことを確認した。
- ・ 駆動軸について、製造記録より材料、寸法が設計どおり製作されていることを確認した。

また、駆動軸と模擬制御棒クラスタを組み合わせたのステッピング試験により、両者の嵌合に問題がなかったことを確認した。

駆動軸接手については、熱処理記録より適切に熱処理が実施されていることを確認した。

- ・ 制御棒クラスタ案内管 (上部炉心構造物) について、上部炉心構造物に組み込まれた制御棒クラスタ案内管単体に対する拘束力試験で、制御棒クラスタ案内管と制御棒クラスタのインターフェースに問題がないことを確認した。

(添付資料－９－１)

(9) 点検履歴調査

- ・ 制御棒クラスタについて、これまでの定期事業者検査 (制御棒クラスタ検査) で実施した外観確認で異常が確認されていないことを確認した。
- ・ 駆動軸については、第 1 3 回定期検査の再稼働に向けた点検において、駆動軸全数を取り外しての外観確認で異常が確認されていないことを確認した。

(添付資料－９－２)

(10) 運転履歴調査

- ・ 制御棒クラスタの運転履歴を調査した結果、制御棒クラスタ駆動装置および制御棒位置指示装置の動作状況に問題なかったことを記録により確認したことから、プラント運転中の制御棒クラスタの引抜きおよび挿入動作に問題なかった。
- ・ 本定期検査のプラント停止操作において、制御棒クラスタに対する制御信号、プラント停止時の警報履歴および制御棒クラスタ位置の記録により、制御棒

クラスタ制御信号と制御棒クラスタ位置に偏差が生じたような記録は確認されなかったことから、プラント停止操作中における制御棒クラスタの動作機能に問題なかった。

- ・以上より、今回実施した上部炉心構造物吊り上げ、吊り下げの一連の作業において引き上がりが生じた制御棒クラスタが、プラント運転中およびプラント停止操作中、円滑に引抜き、挿入されていたことを確認した。
- ・駆動軸取り外し工具の駆動源である所内用空気について、所内用空気圧力の異常を示す警報の発信は確認されず、空気圧に異常な低下がなかったことを確認した。
- ・制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業時、キャビティ水位および余熱除去流量は安定しており、水流による揺れ等の影響はないことを確認した。

(添付資料-9-3)

(11) 類似事例調査

a. 制御棒クラスタ引き上がり事象の類似事例調査

(a) 国内事例

類似事例を調査した結果、国内の加圧水型軽水炉において燃料取出前の上部炉心構造物吊り上げ時に同時に制御棒クラスタが引き上がった事象は確認されなかった。

(b) 海外事例

海外の加圧水型軽水炉において、燃料取出前の上部炉心構造物吊り上げ時に同時に制御棒クラスタが引き上がった事象について調査した結果、5件の事例を確認した。

海外の発電事業者は、一部に原因は特定できていない事例はあるものの、全ての事例において、推定される原因に対して作業要領の見直し等により再発防止対策を行っている。

b. 駆動軸に関する不具合事例調査

(a) 国内事例

国内の加圧水型軽水炉において駆動軸の不具合事例を抽出した結果、7件の事例を確認したが、当該不具合事例が制御棒クラスタ引き上がりに発展する可能性を踏まえても、伊方3号機における今回の事象の発生原因となる可能性は無いことを確認した。

(b) 海外事例

海外の加圧水型軽水炉において駆動軸の機械的なトラブル事例を抽出した結果、5件の事例を確認したが、当該不具合事例が制御棒クラスタ引き上がりに発展する可能性を踏まえても、伊方3号機における今回の事象の発生原因となる可能性は無いことを確認した。

c. まとめ

海外で類似事例が確認されたことから詳細調査を実施した結果を踏まえても、

当社の制御棒クラスタと駆動軸の切り離し操作自体に問題となる点はなかった。
(添付資料－9－4)

10. 引き上がり事象発生時の結合状態ケース検討

9. の調査結果（製造記録、外観確認等）を踏まえ、制御棒クラスタの引き上がり事象が起こり得るか否か（整合するか否か）のケース検討を実施した。

ここで、今回の事象は、駆動軸切り離し作業後、制御棒クラスタと駆動軸の意図しない再結合により制御棒クラスタが引き上がったと考えられること、その後、制御棒クラスタと駆動軸の切り離し操作を行うことなく制御棒クラスタが切り離されていたことから、不完全結合状態として以下のケースを抽出した。

(1) 検討ケース

ケース1 仮置き状態で不完全結合

- ・仮置き（駆動軸着座）状態で押し付け力がかかった場合、くさび効果^{※3}により制御棒クラスタの引き上がりが生じる可能性がある。

ケース2 スパイダ頭部1山目位置で不完全結合

- ・スパイダ頭部の上端から1山目と接手先端テーパ部が接触した場合、くさび効果により制御棒クラスタの引き上がりが生じる可能性がある。

ケース3 スパイダ頭部2山目位置で不完全結合

- ・ケース2と同様、くさび効果により制御棒クラスタの引き上がりが生じる可能性がある。

ケース4 スパイダ頭部3山目位置で不完全結合

- ・ケース2と同様、くさび効果により制御棒クラスタの引き上がりが生じる可能性がある。

ケース5 位置決めナットがボタンアップ位置にあり不完全結合

- ・接手部のみ完全結合位置に着底し、位置決めナットがボタンアップ位置にあり不完全結合した場合、制御棒クラスタの引き上がりが生じる可能性がある。

ケース6 スパイダ頭部外部側で不完全結合

- ・水平方向のアライメントずれにより、駆動軸がスパイダ頭部の外部側に跨いだ場合、駆動軸の接手がスパイダ頭部に噛み込むことにより制御棒クラスタの引き上がりが生じる可能性がある。

ケース7 スパイダ頭部外部側で、位置決めナットがボタンアップ位置で不完全結合

- ・駆動軸取り外し軸が下降途中の状態であり、水平方向のアライメントずれにより、駆動軸がスパイダ頭部の外部側に跨いだ場合、ケース6と同様、駆動軸の接手がスパイダ頭部に噛み込むことにより制御棒クラスタの引き上がりが生じる可能性がある。

※3 鋭角を有するくさび状のものに力を与えた場合、その角度によって、与えられた力より大きな押し広げ力（本事象ではこの押し上げ力に比例する摩擦力により制御棒クラスタを引き上げる力になる）が発生すること。

(2) 検討結果

ケース毎に、スパイダ頭部と接手の幾何学的な関係、外観確認で見られた接触痕との関係、作業手順との関係からケース検討を実施した。

a. 幾何学的な整合

ケース1～5の不完全結合状態は整合するという結果になった。一方、ケース6、7では、製作、組立公差や駆動軸の傾きを最大限考慮しても整合しないという結果となった。

b. 外観確認結果との整合

全ての接触痕と整合する不完全結合状態はなかったが、全てのケースにおいて、いずれかの接触痕がつく可能性はあるという結果となった。

c. 作業手順との整合

ケース1、6は、駆動軸切り離し後に、位置決めナットが所定の位置まで下降しているため、整合する。また、ケース2～4は、位置決めナットが所定位置まで下降しないという条件付きの場合において整合し、ケース5、7においては、位置決めナットがボタンアップ位置に留まっており、整合しないという結果になった。

(3) まとめ

以上より、幾何学的な関係、外観確認で見られた接触痕との関係、作業手順との関係がいずれも整合する（条件付きで整合する場合含む）ケース1～4で制御棒クラスタの引き上がり事象が発生する可能性があることを確認した。

このため、これらのケースについて次項にて実証試験を行った。

(添付資料-10)

1.1. 部分モデルによる引き上がり状態実証試験

前項「1.0. 引き上がり事象発生時の結合状態ケース検討」に示したとおり、制御棒クラスタの引き上がりが発生する可能性があるケース1、ケース2およびケース3を選定し、駆動軸と制御棒クラスタの取り合いを部分的に模擬した供試体を用いて、以下の試験を実施した。なお、ケース4は引き上げ力が比較的小さいと想定されるケース3で代表して試験を実施した。

(1) 引き上がり状態実証試験

a. ケース1 仮置き状態で不完全結合

供試体の接手およびスパイダ頭部の接触面が面荒れありの状態（静止摩擦係数が大きく引き上がりが生じやすい場合）においても、制御棒クラスタ引上荷重は0kgfであり、制御棒クラスタの引き上がりは発生しなかった。

b. ケース2 スパイダ頭部1山目位置で不完全結合

供試体の接手外面（接手およびスパイダ頭部）の接触面および接手内面（位置決めナットおよび接手）の接触面が面荒れなしの状態（静止摩擦係数が小さく引

き上がりが生じにくい場合) で制御棒クラスタ引上荷重が41～61kgf、面荒れありの状態では制御棒クラスタ引上荷重が114～147kgfを確認したことから、実機においても制御棒クラスタの引き上がりが発生する可能性があることを確認した。

c. ケース3 スパイダ頭部2山目位置で不完全結合

供試体の接手外面の接触面および接手内面の接触面が面荒れなしの状態でも、制御棒クラスタ引上荷重が1,000kgf以上と非常に大きく、制御棒クラスタの引き上がり後に操作を行うことなく切り離されていた今回の事象とは異なる結果となった。

(2) 摩擦係数確認試験

- ・摩擦係数確認試験の結果、供試体の静止摩擦係数は、実機と同材かつ水中環境の静止摩擦係数と概ね一致しており、今回の引き上がり状態実証試験の結果は実機材かつ水中環境においても再現され得ることが分かった。

(3) まとめ

上記(1)、(2)項から、ケース2の状態においてのみ、今回の事象が発生する可能性が高いことを確認した。

また、実証試験後の接触面の接触痕も実機駆動軸(M-4)にて観察された局所的な接触痕と同様の様相を呈していたことから、ケース2の状態では制御棒クラスタの引き上がり事象が発生したことを裏付けるものと推定される。

(添付資料-11)

1.2. 推定原因

9. 項～11. 項の結果より、本事象は、制御棒クラスタと駆動軸との切り離し作業を定められた作業手順に従い実施しているなかで、添付資料-12に示すとおり、以下のメカニズムにより発生したものと推定した。

- ・駆動軸取り外し軸下降時、ロックボタン廻りに付着した堆積物(スラッジ)が位置決めナットと接手の間に挟まり、駆動軸取り外し軸がスタックした(詰まった)。
- ・その状態で制御棒クラスタに駆動軸を着座させた後、駆動軸が制御棒クラスタのスパイダ頭部内へ沈み込む不完全結合状態(ケース2の状態)となり、上部炉心構造物吊り上げ時に制御棒クラスタ引き上がり事象が発生した。
- ・今回のように、堆積物の影響で駆動軸取り外し軸がスタックし、駆動軸着座後に制御棒クラスタと駆動軸が意図せず再結合するといった、通常発生しない非常に稀なケースが起こった場合、その不完全な再結合を引き起こす状態を確認する手順になっていなかった。

(添付資料-12)

1 3. 設備の健全性

9. 項の調査結果等を踏まえ、駆動軸、制御棒クラスタおよび燃料集合体の健全性を以下のとおり確認した。

(1) 駆動軸

- ・ 接手内外面で軽微な接触痕が確認されたものの、駆動軸の外観確認により損傷や変形がないことを確認したこと、寸法計測や動作確認でも問題なかったことから、制御棒クラスタの保持機能には問題なく、当該駆動軸の健全性に問題はない。

(2) 制御棒クラスタ

- ・ 図面確認により制御棒クラスタと上部炉心構造物が物理的に干渉する可能性がないこと、スパイダ頭部の外観確認により損傷や変形がないことから、制御棒クラスタの保持機能には問題なく、当該制御棒クラスタの健全性に問題はない。
- ・ なお、制御棒クラスタは中性子照射量の制限等の観点から取替基準を定めており、当該制御棒クラスタは今回の定期検査にて取替予定であり、再使用の予定はない。

(3) 燃料集合体

- ・ 上部炉心構造物とともに制御棒クラスタが引き上げ、引き下げされた際、当該制御棒クラスタが挿入されていた燃料集合体への影響について評価を行った。
- ・ 上部炉心構造物の吊り上げ、吊り下げ作業中、上部炉心構造物はガイドスタッドにより水平方向のずれが制限された状態を維持しており、両者の隙間は十分小さいことから、上部炉心構造物の吊り上げ、吊り下げ作業中の制御棒クラスタと燃料集合体の水平方向の軸ずれ量は十分小さく、制御棒クラスタと燃料集合体の水平方向の干渉の程度は軽微であり、燃料集合体の健全性への影響はない。
- ・ また、上部炉心構造物吊り下げ作業中に制御棒クラスタが落下した場合を仮定しても、原子炉緊急停止時の制御棒クラスタおよび駆動軸の落下時に発生する荷重よりも小さいことから、燃料集合体の健全性に影響はない。
- ・ なお、当該燃料集合体を使用するまでに、制御棒クラスタと燃料集合体が干渉する可能性のある部位を対象に有意な傷や損傷等がないことを確認する。

(添付資料-13)

1 4. 対 策

1 2. 項の推定原因を踏まえ、上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスタの引き上がり防止のために、以下の対策を講ずるとともに従来実施している上部炉心構造物吊り上げ時の水中カメラによる監視を引き続き実施していく。

- ・ 駆動軸取り外し軸が下降時にスタックしていないことを、駆動軸取り外し軸の押し下げ動作状況により確かめるため、駆動軸取り外し工具の指示管（インジ

ケーターロッド) のマーキング位置を確認する手順を追加する。

- ・上記手順により、今回のような駆動軸取り外し軸のスタックを起因とした事象の再発防止は可能である。さらに、より確実なものとするため、駆動軸着座後の再度の重量確認および位置計測（ベースプレート高さ）をする手順を追加する。
- ・前述の手順の見直しにより、本事象への再発防止は可能であるが、制御棒クラスタのスパイダ頭部内には、プラント運転中などに発生したスラッジが堆積する可能性があることから、定期検査毎に使用済燃料ピット内で制御棒クラスタ（次サイクルで使用するもの）のスパイダ頭部内の状況を確認し、堆積物が確認された場合は除去する。

(添付資料－14)

以 上

添 付 資 料

添付資料－1	時系列	18
添付資料－2	事象発生時のプラント状況	20
	－2－1 発電用原子炉施設の影響記録	21
	－2－2 放射線管理モニタ記録	24
添付資料－3	モード6における停止余裕の管理	29
添付資料－4	各機器の構造図	31
	－4－1 原子炉容器	32
	－4－2 制御棒クラスタ駆動装置	34
	－4－3 駆動軸	35
	－4－4 上部炉心構造物	36
	－4－5 制御棒クラスタ	37
添付資料－5	事象発生時の作業状況	38
添付資料－6	駆動軸と制御棒クラスタの結合・切り離し説明図	41
添付資料－7	要因分析図	42
添付資料－8	各機器等の調査結果	43
	－8－1 作業体制および手順等の調査結果	44
	－8－2 駆動軸取り外し工具の調査結果	51
	－8－3 計測器の調査結果	54
	－8－4 制御棒クラスタの調査結果	56
	－8－5 駆動軸の調査結果	61
	－8－6 堆積物の調査結果	75
	－8－7 接触痕および堆積物まとめ	88
添付資料－9	製造履歴等調査結果	90
	－9－1 製造履歴調査結果	91
	－9－2 点検履歴調査結果	93
	－9－3 運転履歴調査結果	94
	－9－4 類似事例調査結果	105
添付資料－10	引き上がり事象発生時の結合状態ケース検討	109
添付資料－11	部分モデルによる引き上がり状態実証試験	115
添付資料－12	推定メカニズム	133
添付資料－13	制御棒クラスタによる燃料集合体への影響評価	145
添付資料－14	再発防止対策	148
参考資料	用語解説	153

時系列

令和元年12月25日(水)

20時20分 発電機負荷降下開始

令和元年12月26日(木)

0時20分 発電機解列

0時53分 タービントリップ(タービン保安装置検査のため)

1時01分 原子炉運転モード2達成

2時22分 原子炉停止(全制御バンク制御棒挿入完了)

原子炉運転モード3達成

2時31分 原子炉運転モード5までのRCS濃縮開始

4時44分 原子炉運転モード5までのRCS濃縮完了

7時14分 全制御バンク制御棒5ステップ引抜(RCS冷却準備のため)

11時48分 原子炉運転モード4達成

21時00分 原子炉運転モード5達成

令和元年12月27日(金)

1時25分 原子炉運転モード6までのRCS濃縮開始

9時45分 原子炉運転モード6までのRCS濃縮完了

10時31分 全制御バンク制御棒全挿入

10時41分 全停止バンク制御棒全挿入

10時46分 原子炉手動トリップ(全原子炉トリップ遮断器開放)

13時43分 制御棒位置指示装置隔離実施

令和2年1月7日(火)

15時58分 原子炉容器開放実施
運転モード6(キャビティ低水位)達成

令和2年1月11日(土)

10時15分 原子炉容器上蓋取り外し作業開始

19時42分 運転モード6(キャビティ高水位)達成

20時08分 原子炉容器上蓋取り外し作業完了

令和2年 1月12日 (日)

9時32分 制御棒クラスタ切り離し作業開始
10時59分 制御棒クラスタ切り離し作業終了
11時43分 上部炉心構造物吊り上げ作業開始
12時24分 上部炉心構造物の吊り上げに伴い、制御棒クラスタ1体が引き上がっている恐れがあることを確認したため、吊り上げ作業を中断
13時20分 制御棒クラスタ1体が引き上がっていることを現場で保修員が確認
17時32分 上部炉心構造物吊り下ろし作業開始
18時41分 上部炉心構造物吊り下ろし作業終了
21時20分 制御棒クラスタと駆動軸の結合状況調査作業開始
21時50分 制御棒クラスタと駆動軸の結合状況調査作業終了

令和2年 1月13日 (月)

9時17分 制御棒クラスタ切り離しの確認作業開始
9時20分 制御棒クラスタ切り離しの確認作業終了
9時51分 上部炉心構造物吊り上げ作業開始
9時59分 上部炉心構造物から全ての制御棒クラスタが切り離されていることを確認
10時34分 上部炉心構造物吊り上げ作業終了
21時00分 燃料取出作業開始

令和2年 1月15日 (水)

9時00分 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条第13号に該当すると判断

令和2年 1月16日 (木)

10時16分 燃料取出作業終了

事象発生時のプラント状況

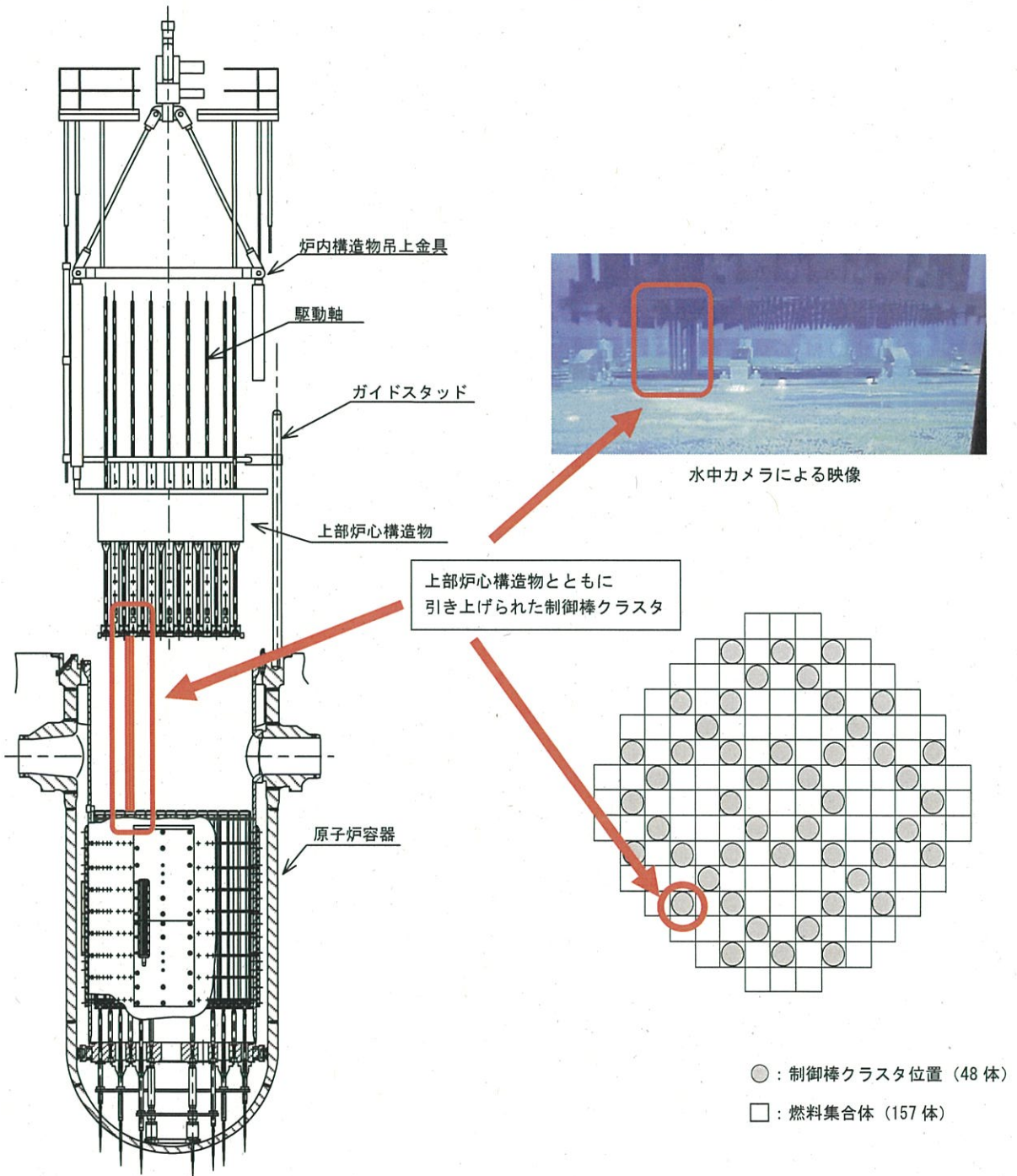
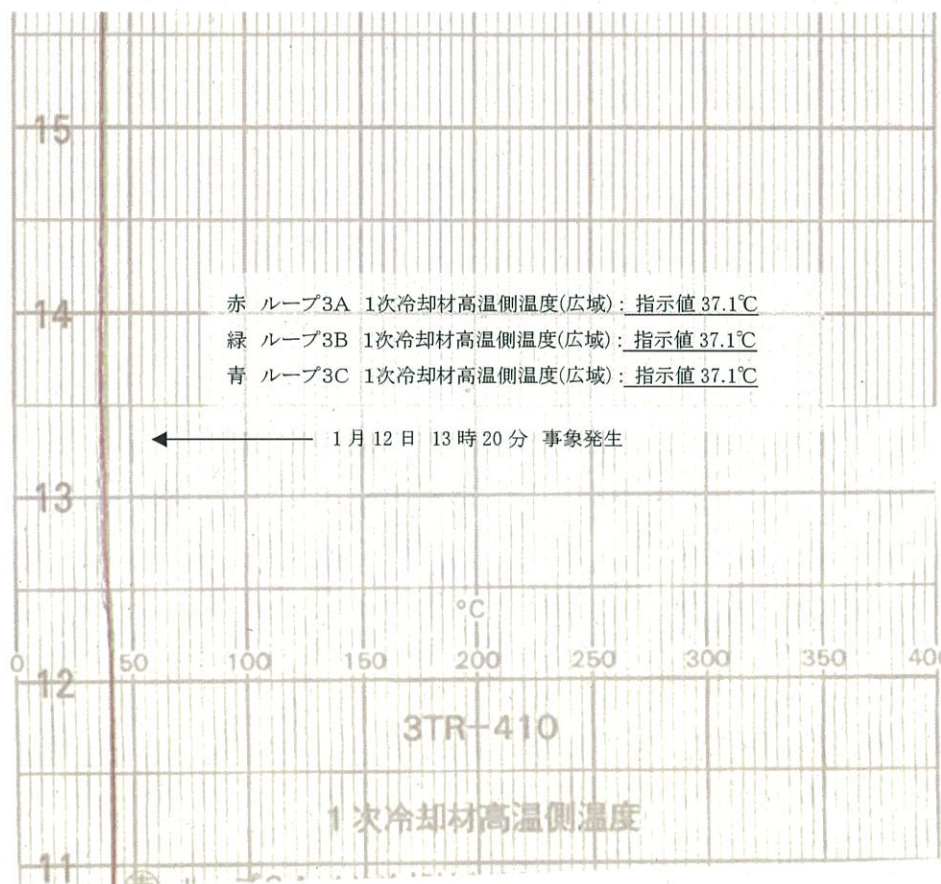


図-1 事象概要図

発電用原子炉施設の影響記録

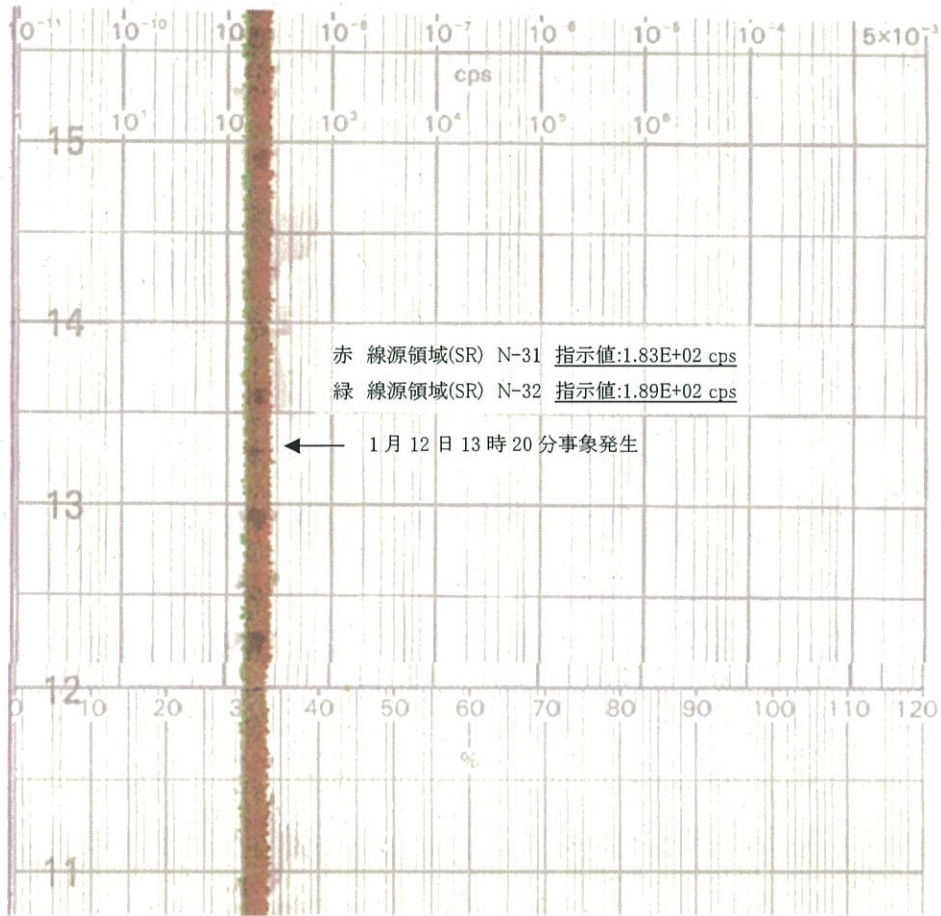
○ 1次冷却材高温側温度

[1月12日 11時00分～15時30分]

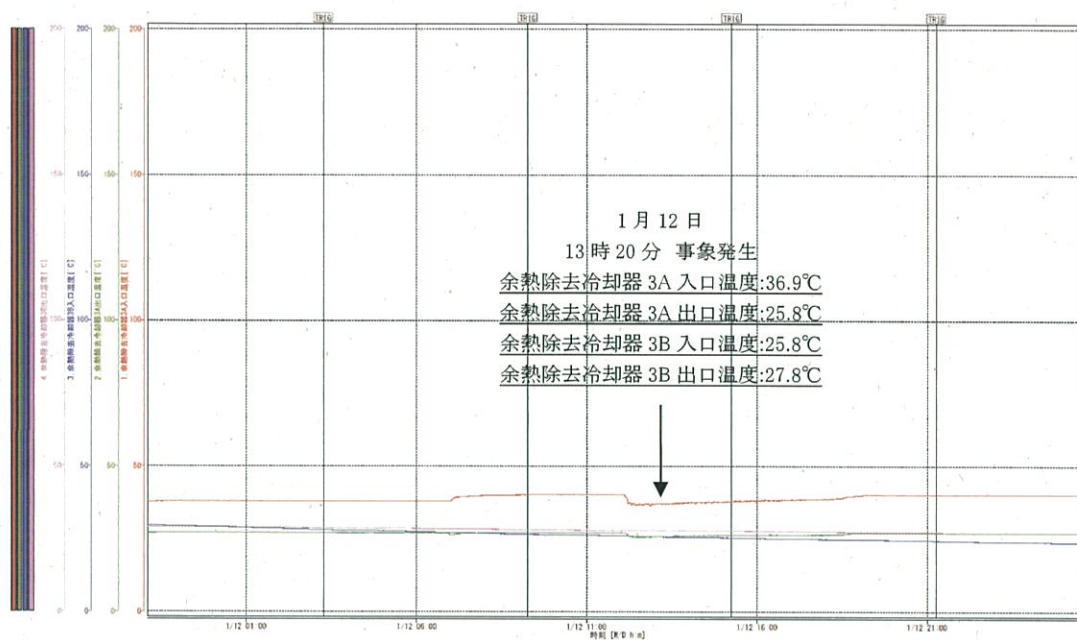


○原子炉出力

[1月12日 11時00分~15時30分]



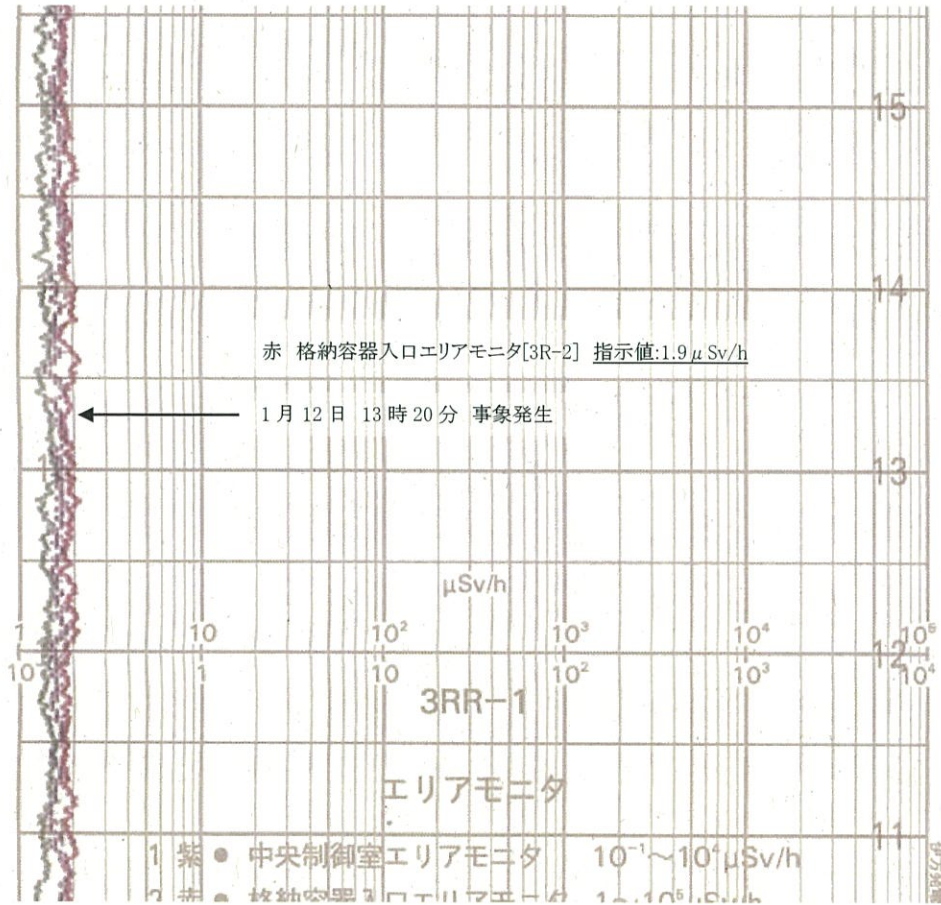
○余熱除去冷却器入口・出口温度
[1月12日 1時00分~21時00分]



放射線管理モニタ記録

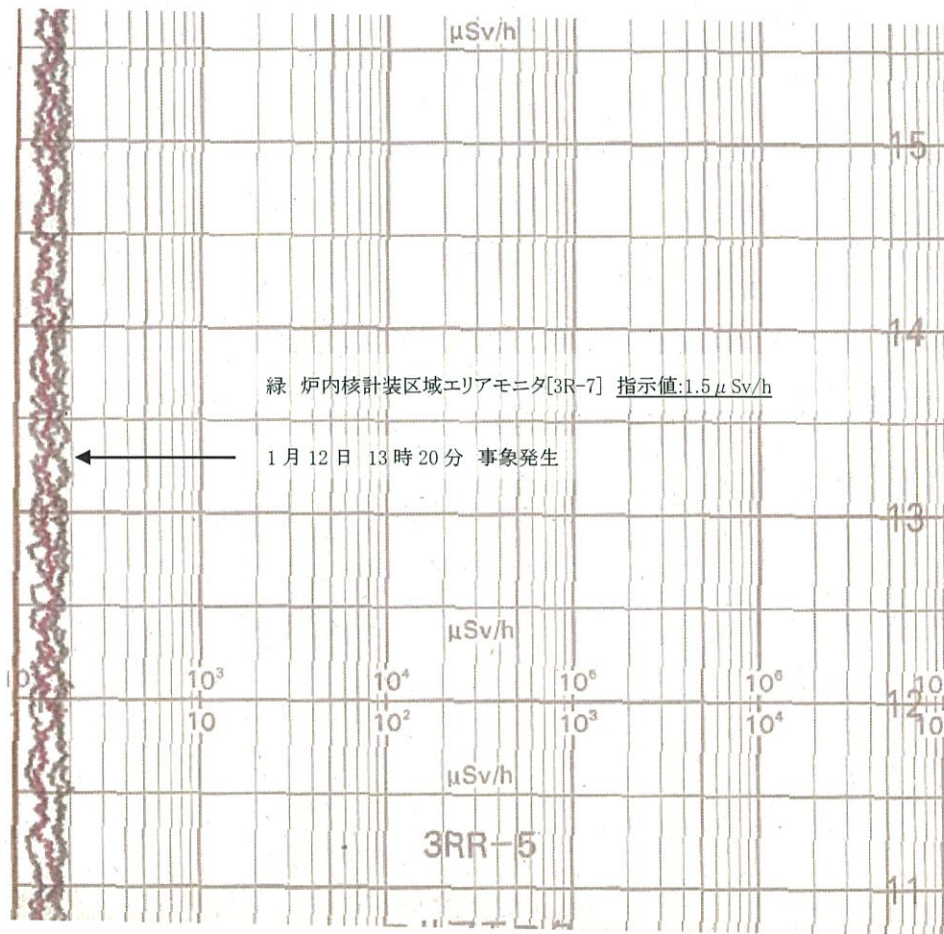
○エリアモニタ (1/2)

[1月12日 11時00分~15時30分]



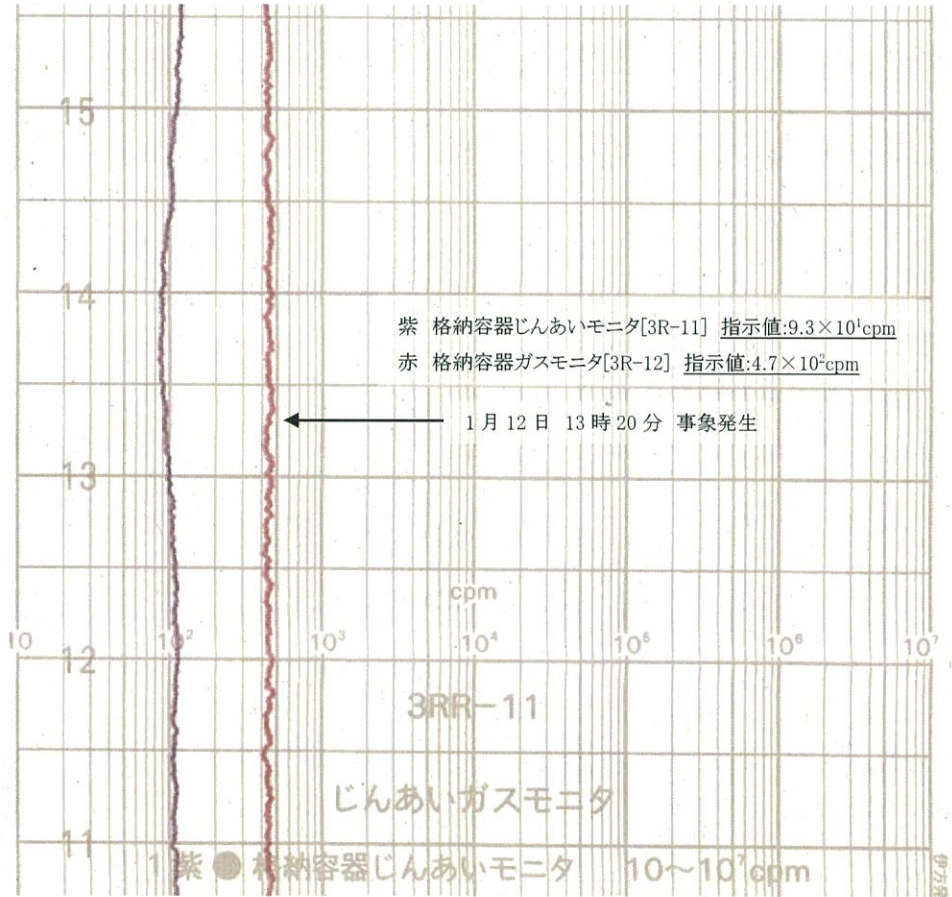
○エリアモニタ (2/2)

[1月12日 11時00分~15時30分]



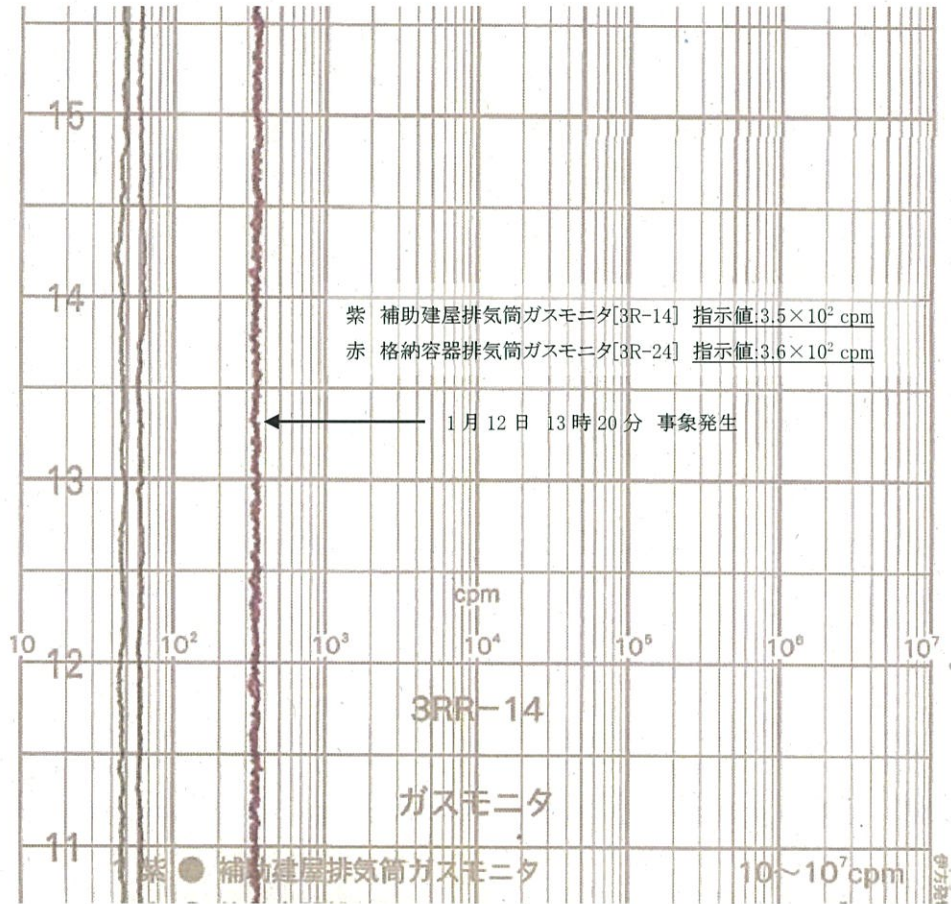
○プロセスモニタ (1/2)

[1月12日 11時00分~15時30分]



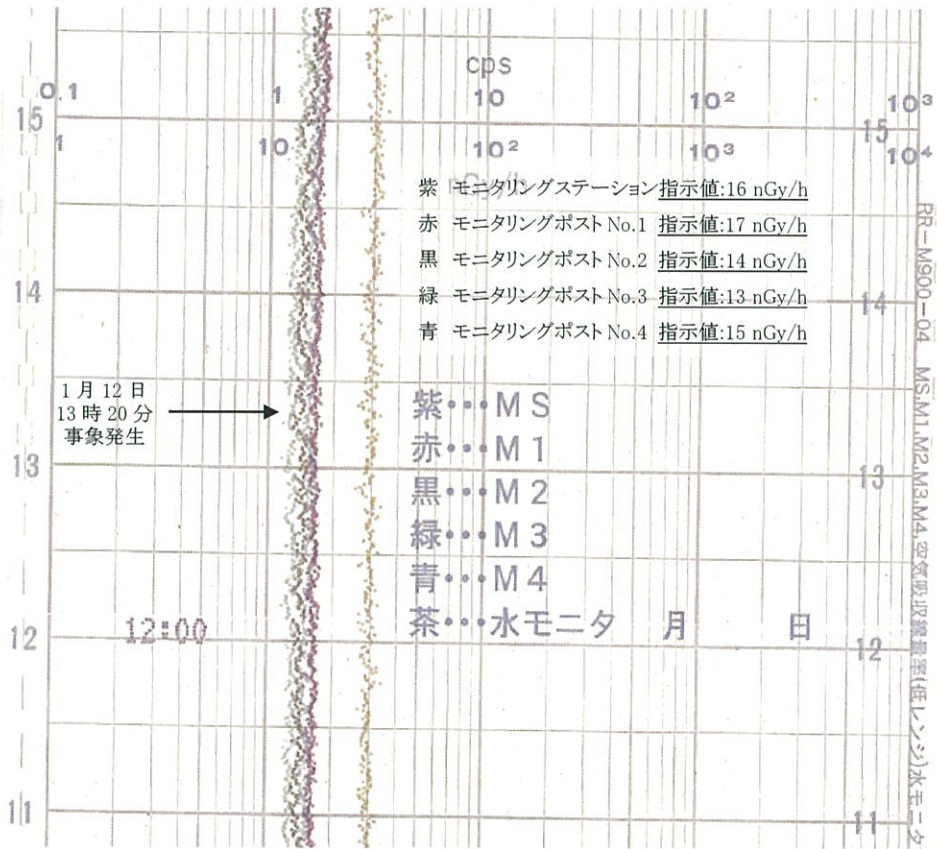
○プロセスモニタ (2/2)

[1月12日 11時00分~15時30分]



○野外モニタ

[1月12日11時~15時30分]



モード6における停止余裕の管理

1. サンプルング結果

モード6においての1次冷却材中のほう素濃度については、保安規定第80条で定められており、4400ppm以上確保することを運転上の制限として定め、3日に1回、1次冷却材中のほう素濃度を確認することとしている。

本定検のプラント停止時のモード6において、運転上の制限の燃料取替時のほう素濃度と1次冷却材のサンプルング結果の比較を表-1に記載する。

1次冷却材中のほう素濃度のサンプルングの結果から、モード6において、サンプルング結果が、保安規定第80条に定めるほう素濃度を下回ることなく、運転上の制限以上のほう素濃度が確保されていたことを確認した。

表-1. モード6においての1次冷却材ほう素濃度サンプルング結果

サンプルング日時	モード	運転上の制限の 燃料取替時のほう素濃度 [ppm]	サンプルング結果 [ppm]
1月 8日 9時55分	モード6	4400	4597
1月10日 9時40分	モード6	4400	4591
1月12日 9時55分	モード6	4400	4553
1月13日 16時00分	モード6	4400	4560
1月14日 10時00分	モード6	4400	4559
1月15日 9時55分	モード6	4400	4546

2. 事象発生時の未臨界性について

制御棒クラスタ引き上がり事象発生時の炉心の未臨界性を確認するために、本事象より厳しい条件として、全制御棒クラスタが引き上がった場合においても、炉心が1% $\Delta K/K$ の未臨界を確保できるための1次冷却材中ほう素濃度（最小停止ほう素濃度）を評価した。

表-2に示す通り、全制御棒クラスタが引き上がった場合の最小停止ほう素濃度は、1703 ppmとなる。本事象発生時のほう素濃度はこれよりも十分に高いことから、仮に炉心から全制御棒クラスタが引き上がったとしても、炉心の未臨界性は十分に確保される。

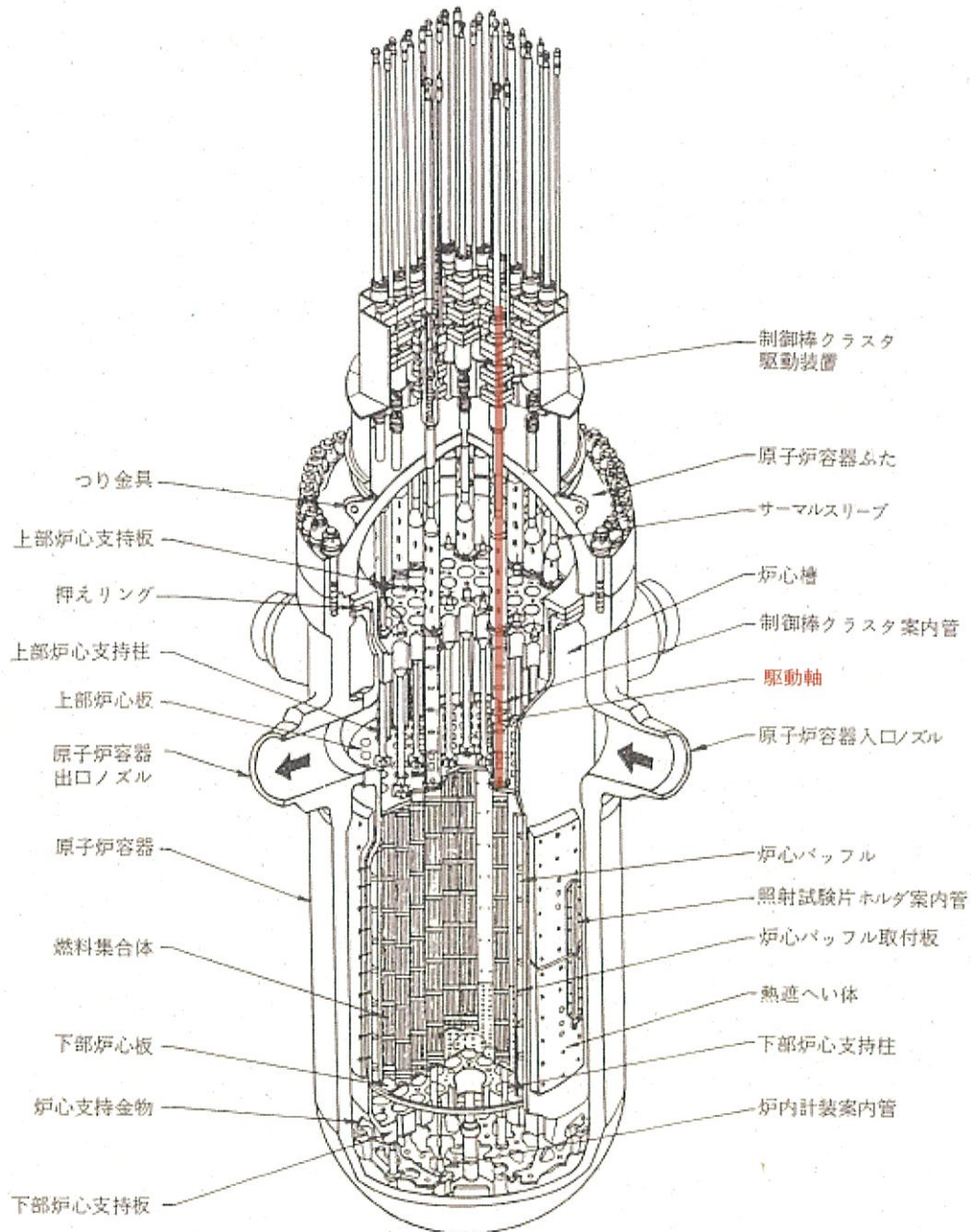
このことから、制御棒クラスタが1本引き上がった本事象発生時においても、炉心の未臨界性は十分に確保されている。

表-2. 全制御棒クラスタ引き上がり時の最小停止ほう素濃度 評価結果

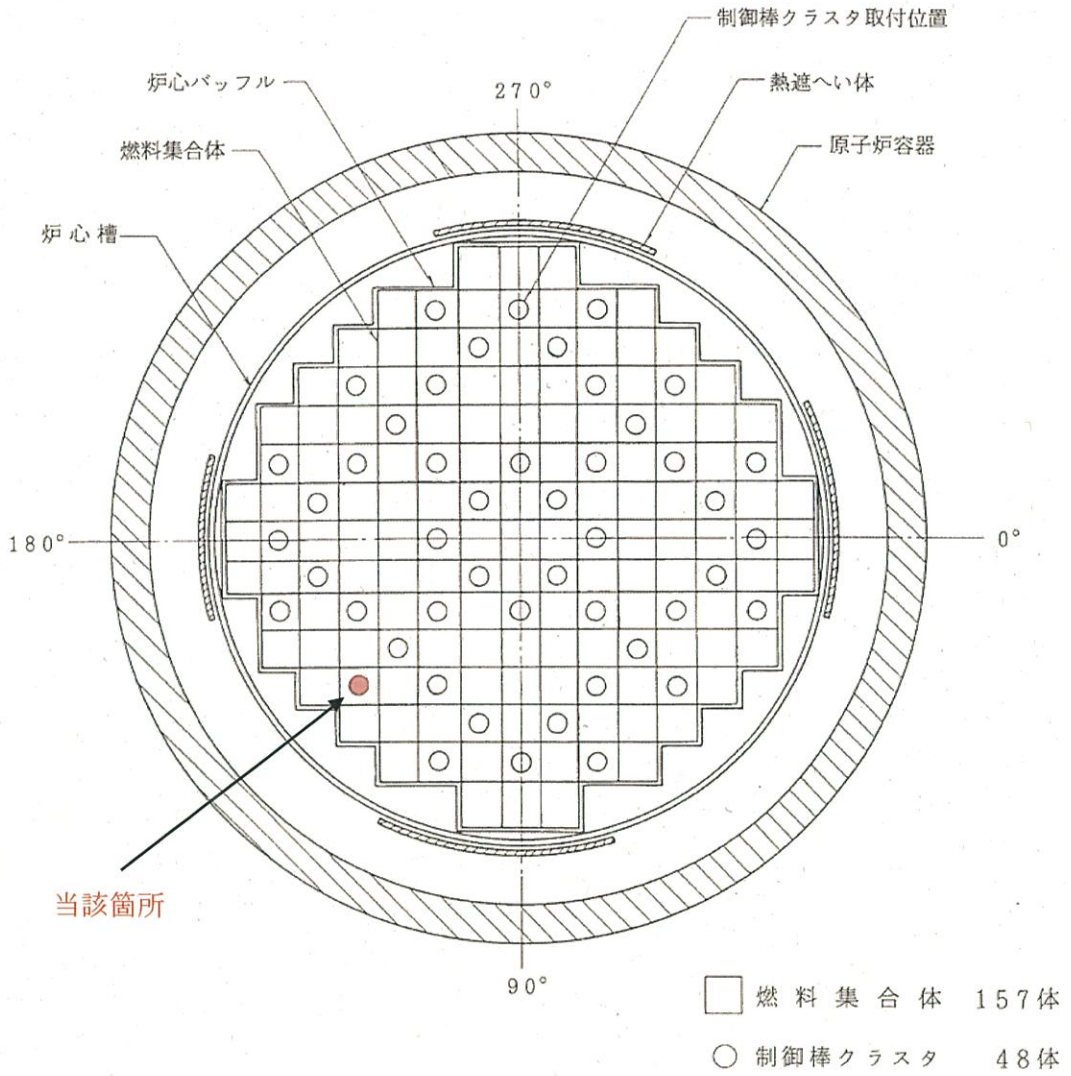
全制御棒クラスタ引き上がり時の最小停止ほう素濃度※ (ppm)	事象発生時のほう素濃度 サンプリング結果 (ppm)
1703	4553

※ 評価値に対して、100 ppmの余裕を含む。

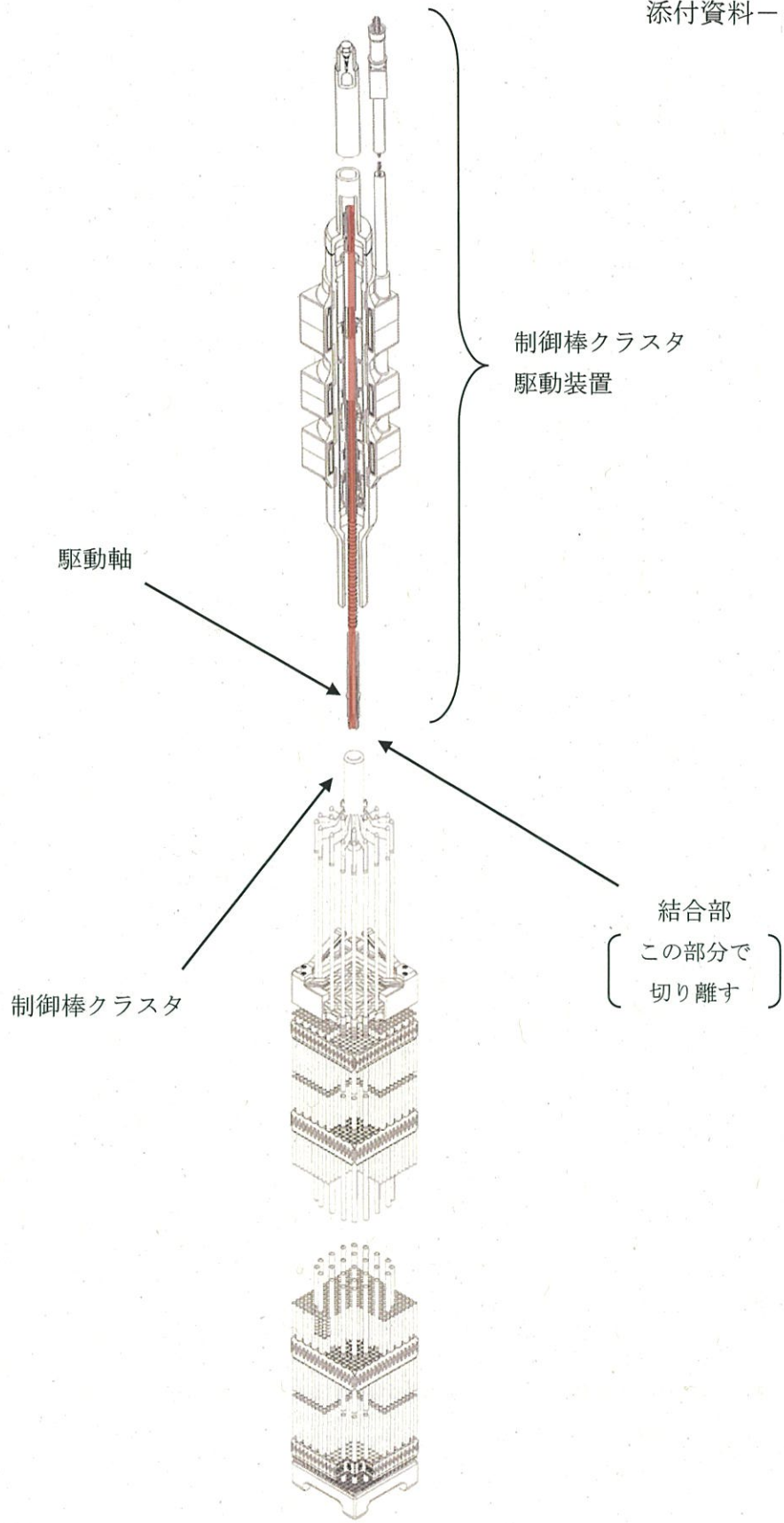
各機器の構造図



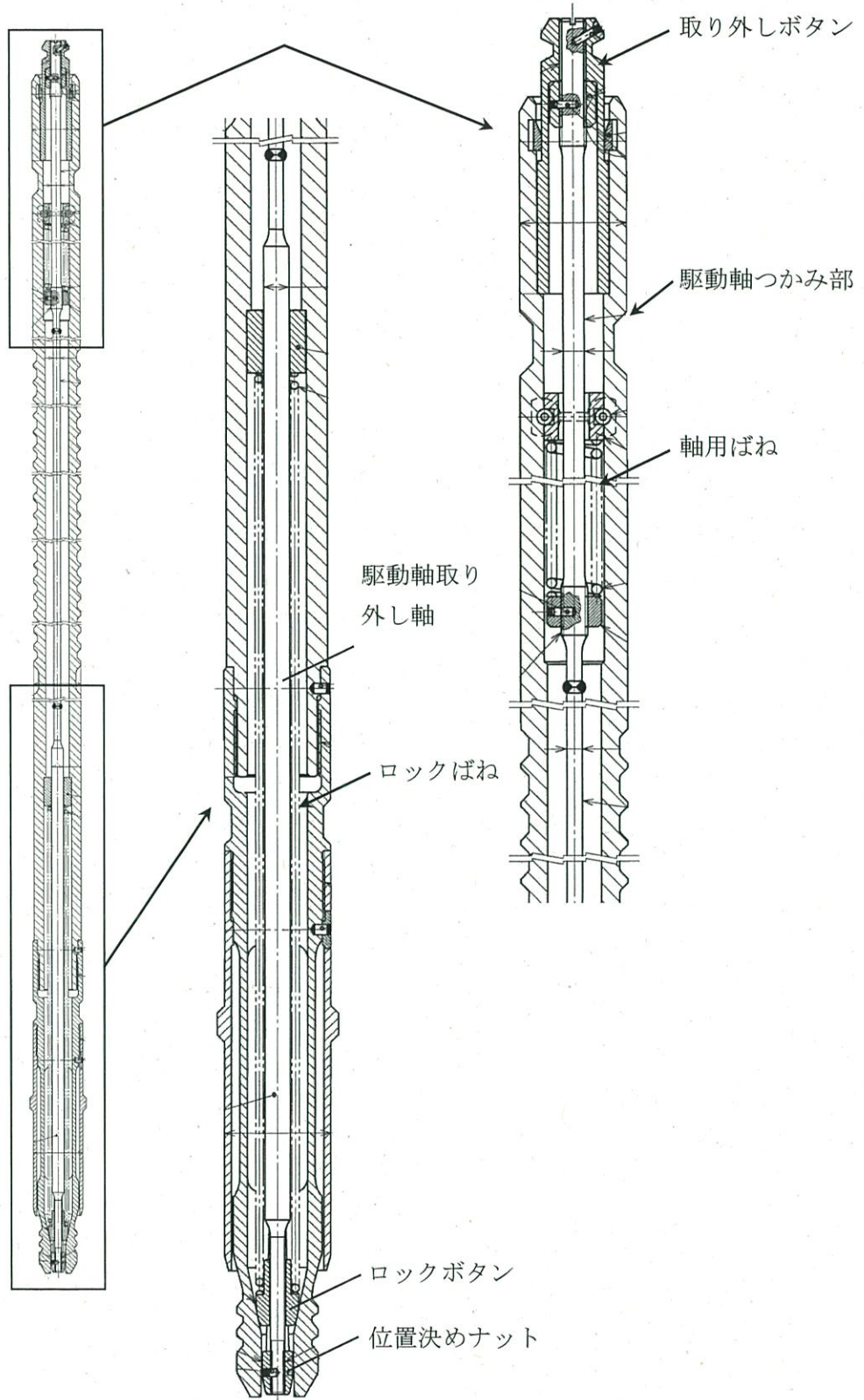
原子炉容器 (内部構造図)



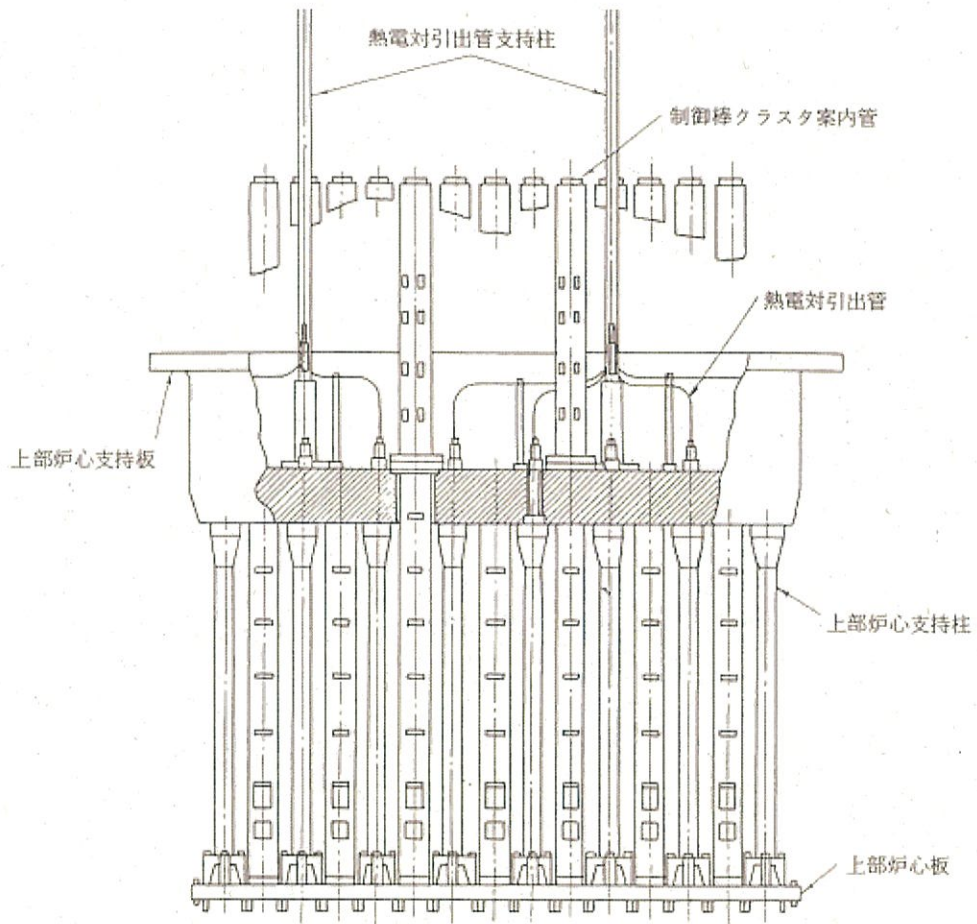
原子炉容器 (炉心断面図)



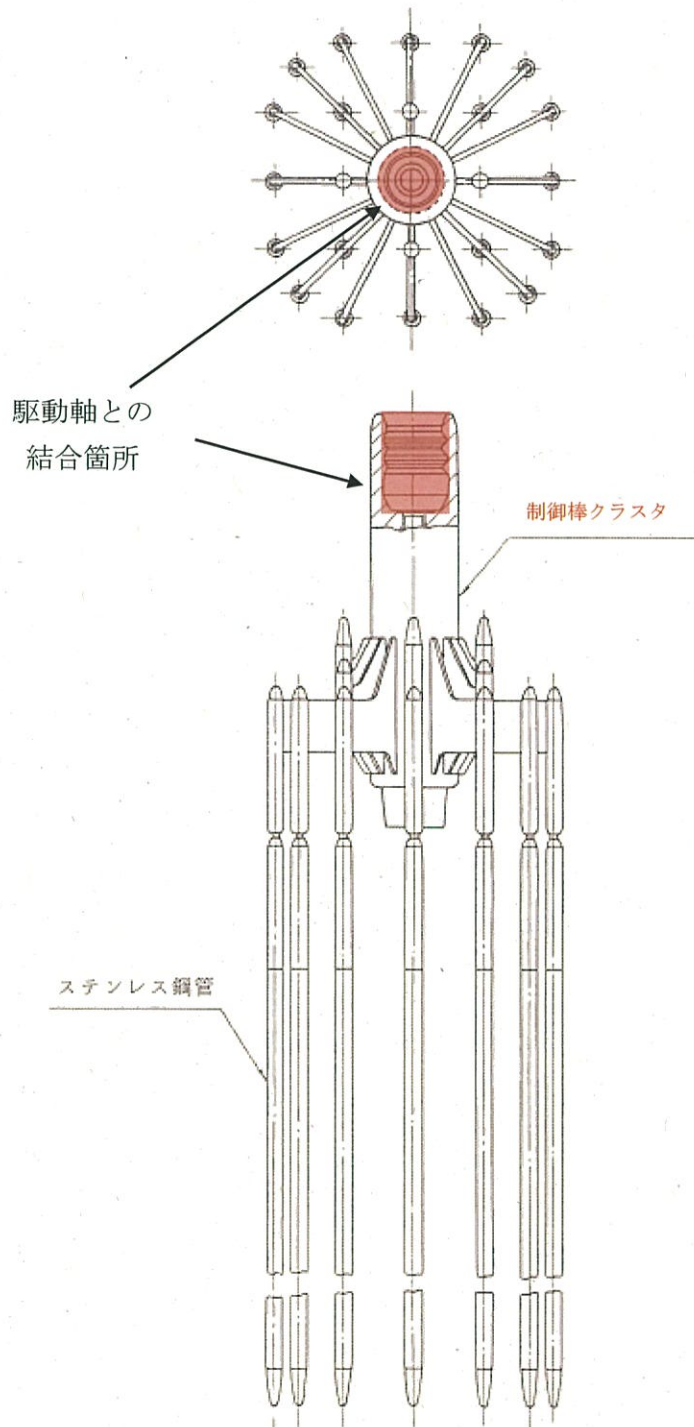
制御棒クラスタ駆動装置



駆動軸



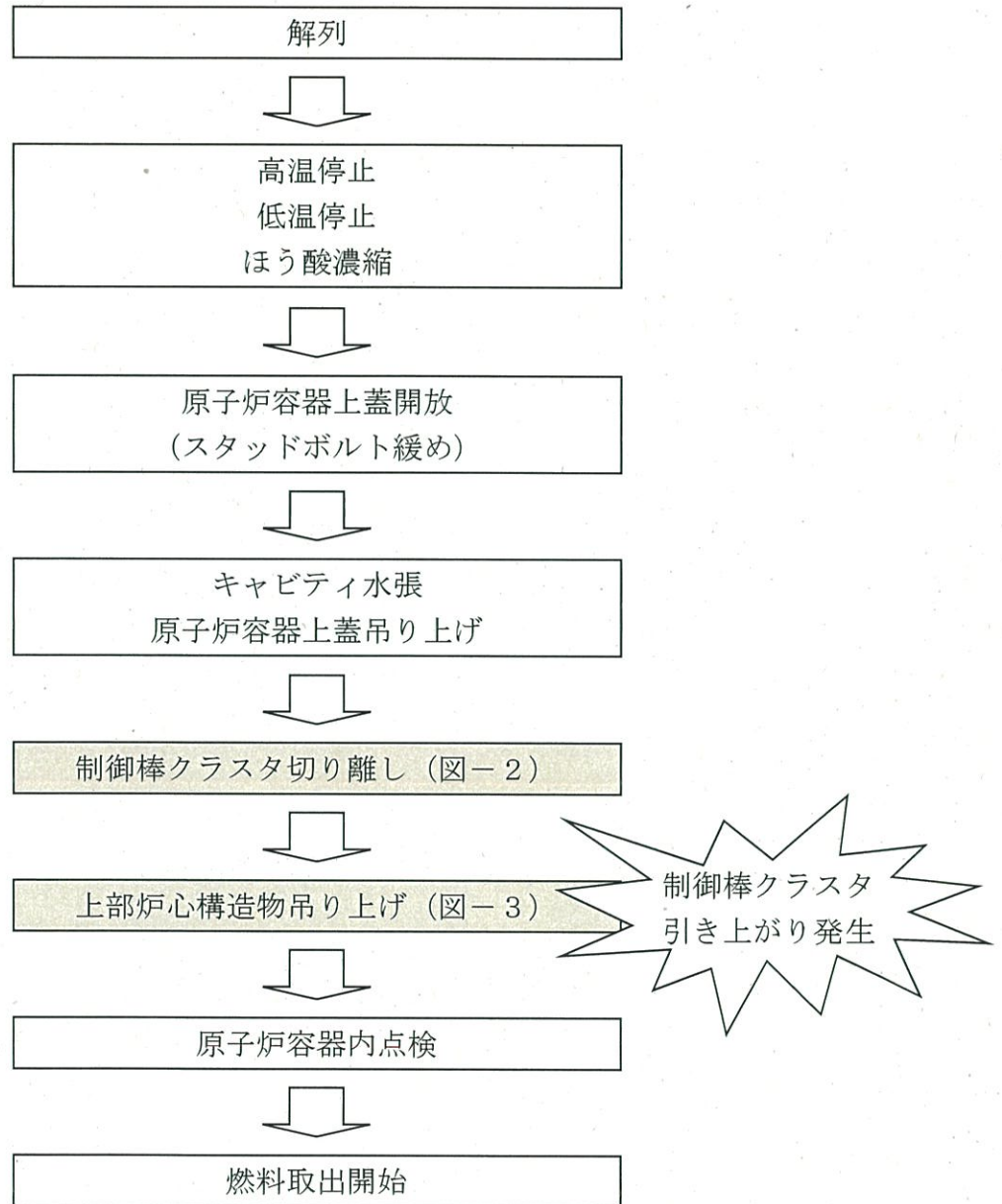
上部炉心構造物



制御棒クラスタ

事象発生時の作業状況

原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスタ引き上がり事象発生時の作業状況を以下に示す。



図－ 1 解列から燃料取出開始まで主要作業フロー

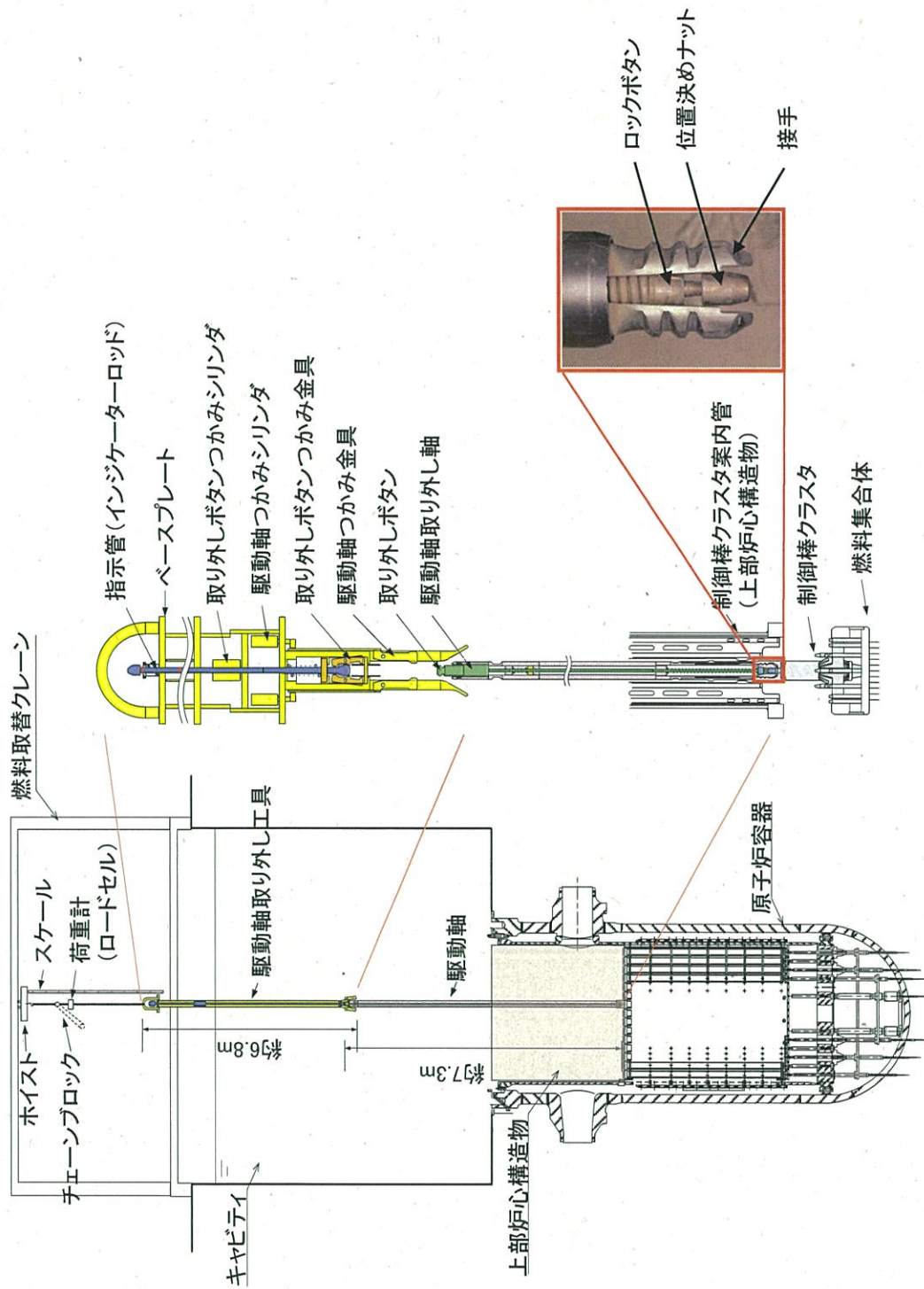
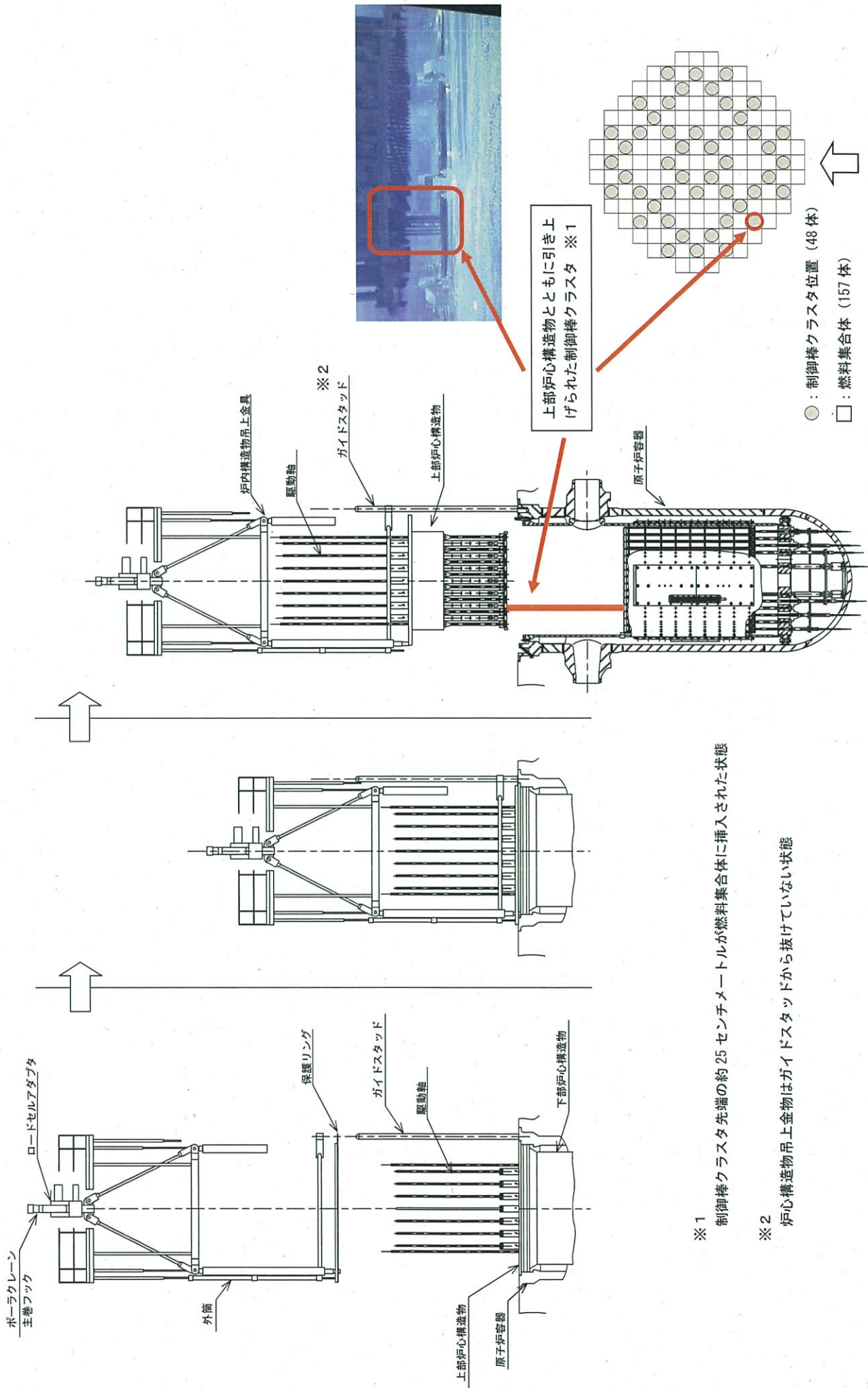


図-2 制御棒クラスタ切り離し

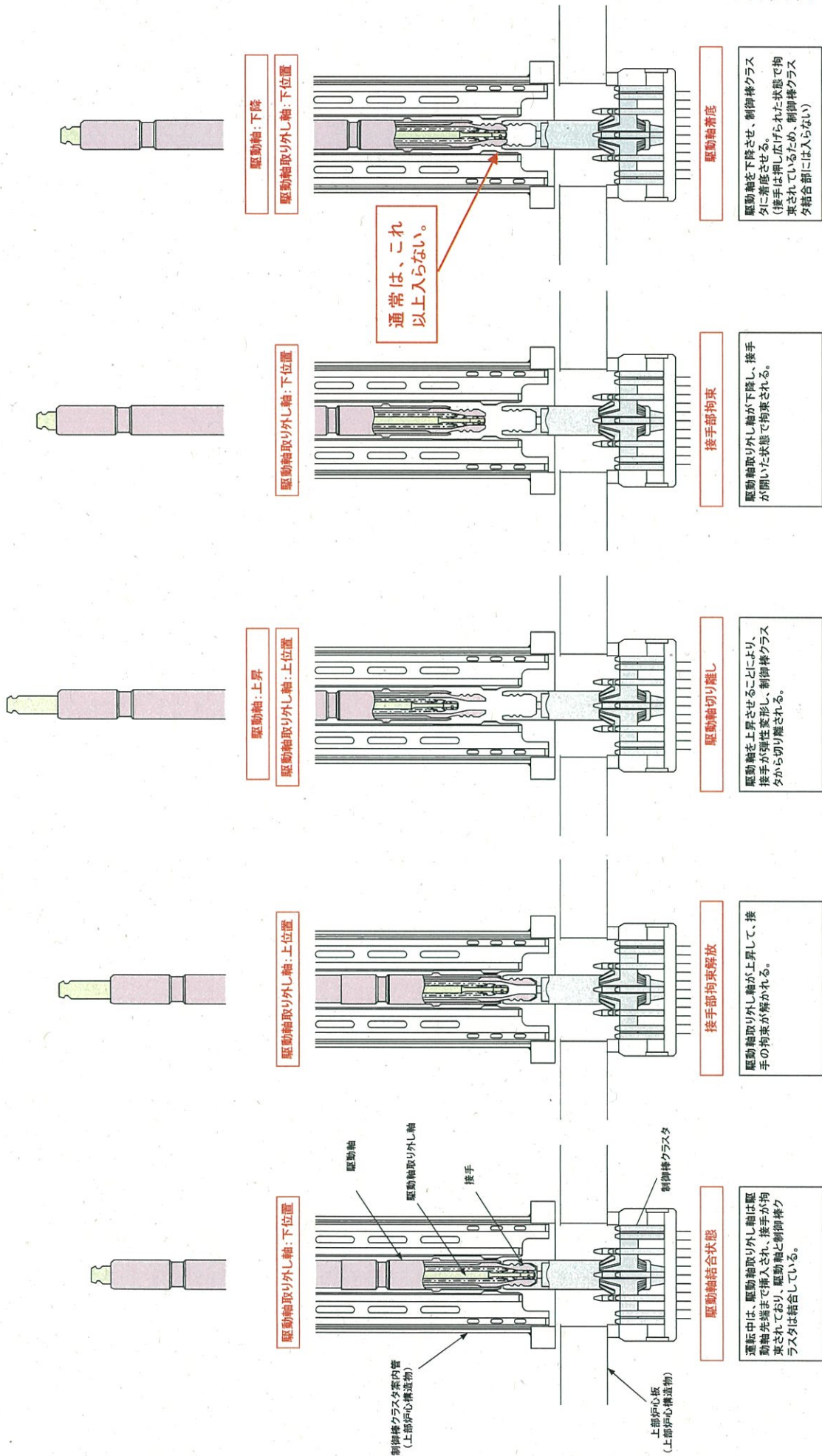


※1 制御棒クラスタ先端の約25センチメートルが燃料集合体に挿入された状態

※2 炉心構造物吊上金具はガイドスタッドから抜けていない状態

図-3 上部炉心構造物吊り上げ

駆動軸と制御棒クラスタの結合・切り離し説明図



通常は、これ以上入らない。

駆動軸を下降させ、制御棒クラスタに清度させる。
(接手は押し広げられた状態で拘束されているため、制御棒クラスタ結合部には入らない)

駆動軸取り外し軸が下降し、接手が閉じた状態で拘束される。

駆動軸を上昇させることにより、接手が弾性変形し、制御棒クラスタから切り離される。

駆動軸取り外し軸が上昇して、接手の拘束が解かれる。

運転中は、駆動軸取り外し軸は駆動軸先端まで挿入され、接手が拘束されており、駆動軸と制御棒クラスタは結合している。

要因分析図

事象	要因	調査項目	調査結果	評価	添付	
上部炉心構造物用リ上 切部の制御クワスタ 引き上がり	制御クワスタ 入る際、駆動 軸の結合	駆動軸取り外し 工具の動作不良	・駆動軸取り外し工具の外観確認を省略し、僅、姿勢、付着物が無いことを確認した。 ・駆動軸取り外し工具の動作確認を実施し、取り外し軸の引き上げ、押し下げ動作に異常な無く、正常に動作することを確認した。	△	8-2	
			・計測器調査	・使用された荷重計について、使用前点検で異常が確認されていないこと、およびウエイトを用いた動作確認により表示値に異常が無いことを確認した。 ・使用されたスケールについて、外観確認により有意な損傷等が無いことを確認した。	×	8-3
			・作業記録確認 ・制御クワスタと駆動軸の結合状況確認 ・閉き取り調査 ・類似事例調査	・作業記録より、当社にて承認された手順に基づき実施していることを確認した。また、今回の作業で用いた手順書は過去の定規と同様であり、過去の発注と同様の事象は発生していないことを確認した。 ・今回の作業手順書は、重量確認と寸法確認で確認した制御クワスタと駆動軸が切り離されることを確認していること、切り離し確認の際に通常とは異なる完全な閉き状態に至った場合は制御クワスタの引き上げが完了する可能性があること、 ・重量確認の際に発生した事象は、当該駆動軸の切り離し作業に問題となる点とは異なっていた。	△	8-1 9-4
			・作業記録確認 ・制御クワスタと駆動軸の結合状況確認 ・閉き取り調査 ・類似事例調査	・作業記録および閉き取り調査より、定められた手順どおり動作が行われていることを確認した。また、当社立会いにより、作業が確実に行われていることを確認した。 ・事象発生後の駆動軸引き上げ時に制御クワスタは引き上げがならなかったことから、手順の抜けやアトレス間違い等の根本的な作業ミスは考えられない。 ・作業員への聞き取りにより、当該駆動軸の切り離し作業時に制御クワスタを切り離すために駆動軸取り外し工具を用いたことを確認した。また、当該駆動軸の切り離し作業時に、他のほとんどの駆動軸と同様の操作を行っていること、およびこれまでの定規時にも同様の操作を行っていること、 ・類似事例の発生原因等も調査したが、当該駆動軸の切り離し操作に問題となる点はなかった。	×	8-1 9-4
			・運転履歴調査	・駆動軸の駆動履歴を調査し、作業履歴に異常な変動がなかったことを確認した。	×	9-3
			・製造履歴調査	・図面より、駆動軸と制御棒の結合部の機構は、十分な強度がある17×17燃料タイププラントの標準設計であることを確認した。	×	9-1
			・製造履歴調査	・駆動軸について、製造記録より材料、寸法が設計どおり製作されていること、および駆動軸と制御棒クワスタを組み合わせるステップで試験を実施し、かつ両者の適合に問題なかったことを確認した。 ・制御クワスタについて、製造記録より材料、寸法が設計どおり製作されていること、および駆動軸と制御棒クワスタを組み合わせるステップで試験を実施し、かつ両者の適合に問題なかったことを確認した。	×	9-1
			・点検履歴調査	・制御クワスタについて、これら2回の点検記録より、駆動軸と制御棒クワスタの結合部において、外観確認で異常が確認されていないことを確認した。 ・駆動軸について、これら2回の点検記録より、駆動軸と制御棒クワスタの結合部において、外観確認で異常が確認されていないことを確認した。	×	9-2
			・外観確認(制御クワスタと駆動軸の結合部の異常)	・駆動軸の外観確認を実施し、当該駆動軸の接合部の異常な腐食やひび割れが確認されなかった。 ・制御クワスタの外観確認を実施し、スライダ部の上端部およびスライダ部内側のスライダ面に接合部(色塗りの変化)が確認された。 ・一部の接合部には腐食が認められており、比較対象がないことから発生したものである可能性がある。 ・制御クワスタの外観確認により、スライダ部内側に堆積物が確認され、分析の結果、マグネサイトであることを確認した。 ・駆動軸の寸法計測を実施し、接合部の寸法計測を満足していることを確認した。	△	8-4 8-5 8-6
			・外観確認(駆動軸、工具)	・外観確認により、駆動軸の取合部に異常な腐食やひび割れが確認されなかった。 ・駆動軸の寸法計測を実施し、接合部の寸法計測を満足していることを確認した。	×	8-2 8-5
上部炉心構造物と制御棒クワスタの結合	駆動軸取り外し 工具の異常 (空気)	・運転履歴調査 ・駆動軸動作確認	・所内用空気圧について、異常発生時、所内用空気圧の異常を発生させることがないことを確認した。 ・製造記録より、異常発生時の空気圧は、異常発生時の空気圧に比べて低下していることを確認した。 ・駆動軸の寸法計測を実施し、接合部の寸法計測を満足していることを確認した。 ・駆動軸の外観確認を実施し、当該駆動軸の接合部の異常な腐食やひび割れが確認されなかった。 ・制御クワスタの外観確認を実施し、スライダ部の上端部およびスライダ部内側のスライダ面に接合部(色塗りの変化)が確認された。 ・一部の接合部には腐食が認められており、比較対象がないことから発生したものである可能性がある。 ・制御クワスタの外観確認により、スライダ部内側に堆積物が確認され、分析の結果、マグネサイトであることを確認した。 ・駆動軸の寸法計測を実施し、接合部の寸法計測を満足していることを確認した。	×	8-5 9-3	
		・外観確認(駆動軸) ・駆動軸動作確認	・ロックはけについては、接合部からの可視範囲の外観確認により、ばね押しつけ状態に異常は無いことを確認した。 ・また、駆動軸の寸法計測を実施し、接合部の寸法計測を満足していることを確認した。 ・ばねの異常は無いことを確認した。	×	8-5	
		・外観確認(駆動軸) ・駆動軸動作確認 ・堆積物調査	・外観確認により、目視可能な範囲に異常は確認されなかった。 ・駆動軸の寸法計測を実施し、接合部の寸法計測を満足していることを確認した。 ・制御クワスタの外観確認により、スライダ部内側に堆積物が確認され、分析の結果、マグネサイトであることを確認した。	△	8-5 8-6	
		・製造履歴調査 ・運転履歴調査 ・外観確認(制御棒)	・図面により、上部炉心構造物と制御棒の位置関係から物理的に干渉する箇所が確認されなかった。 ・製造記録より、上部炉心構造物に組み込まれた制御棒クワスタ系内管単体に対する荷重試験で、制御棒クワスタ系内管と制御棒クワスタのインターフェースに問題が無いことを確認した。 ・前回定規以降の制御棒クワスタの動作において、異常な動作がなかったことを確認した。 ・事象発生後、駆動軸と制御棒クワスタを結合させた状態で、上下方向に操作して、上部炉心構造物と制御棒クワスタの結合を確認した。 ・制御棒クワスタの外観確認により、スライダ部内側に堆積物が確認され、分析の結果、マグネサイトであることを確認した。	×	8-4 9-1 9-3	

各機器等の調査結果

作業体制および手順等の調査結果

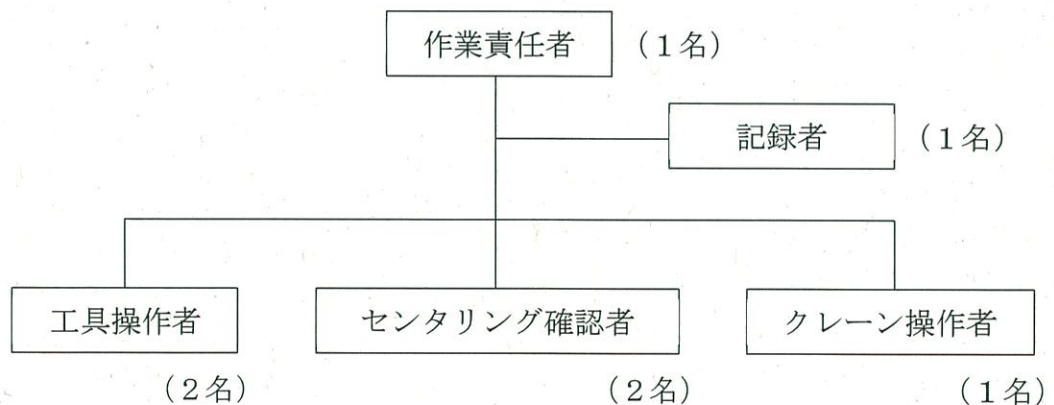
本事象は、上部炉心構造物吊り上げ時に、制御棒クラスタと駆動軸の切り離し操作を行ったにもかかわらず、制御棒クラスタが引き上がった状況であることから、事象発生時の作業管理状況の調査および作業員等への聞き取り調査により、不適切な操作の有無、操作中に特異な事象が発生していなかったかどうかについて確認した。

1. 作業管理

(1) 作業体制

制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業は、図－1に示すとおり、作業責任者1名の指揮のもと、駆動軸取り外し工具の操作（寸法・動作確認を含む）を行う作業員（工具操作者）2名、制御棒クラスタと駆動軸の切り離しができたことを重量および寸法により確認を行う作業員（記録者）1名、駆動軸取り外し工具と駆動軸のラッチのためセンタリング確認を行う作業員（センタリング確認者）2名、クレーン操作を行う作業員（クレーン操作者）1名、計7名の複数人で実施しており、過去に十分な実績のある作業体制と同じであることを確認した。

また、1月12日の作業前ミーティングでは、当日の作業内容の説明、配員の周知および体調や勤務状況の確認を含む安全確認を行っていた。



図－1 作業体制図

(2) 作業責任者、作業員の力量

制御棒クラスタと駆動軸の切り離しのため駆動軸取り外し工具の操作を行う作業責任者（経験年数10年以上）および工具操作者（経験年数7年以上）等の主要な操作を行う者は、過去に伊方発電所の原子炉容器の開放作業において制御

棒クラスタと駆動軸の切り離し作業を経験しており、現場操作に十分な経験と知識を有していた。

表-1 作業要員経歴

要員		経験年数		当該作業経験
作業責任者	1名	A	10年以上	有 (伊方有り)
記録者	1名	B	10年以上	有 (伊方有り)
工具操作者	2名	C	10年以上	有 (伊方有り)
		D	7年	有 (伊方有り)
クレーン操作者	1名	E	10年以上	有 (伊方有り)
センタリング 確認者	2名	F	4年	有 (伊方有り)
		G	1年	無

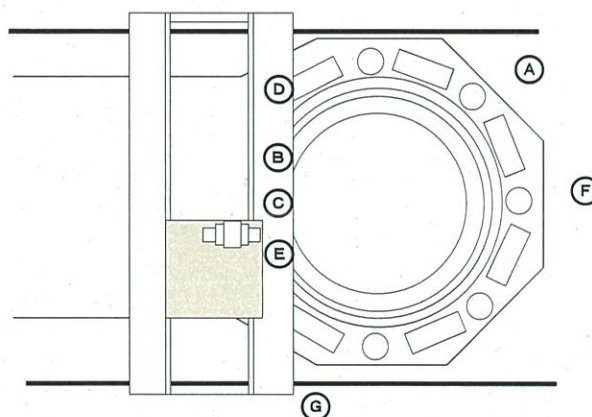


図-2 要員配置図

(3) 作業手順書

制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業は、当社が承認した作業手順書に基づき実施している。また、今回の作業手順書は過去の定検（第1回～第14回）時と同様であり、過去の定検時に同様の事象は発生していないことを確認した。

今回の作業手順書は、重量確認と寸法確認で確実に制御棒クラスタと駆動軸が切り離されていることを確認できる手順書であったが、切り離し確認以降に通常とは異なる不完全な結合状態に至った場合は制御棒クラスタの引き上がりが生

じる可能性がある。

制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業状況概要図を図-3に示す。また、作業手順を図-4、5に示す。

なお、現地作業開始前には元請会社従業員、下請会社従業員ならびに当社設備担当課長、副長および担当者が参加して作業手順書の読み合わせを実施しており、原子炉容器の開放作業に係る一連の作業手順の確認、過去の不具合事例紹介および安全管理、品質管理、放射線管理上の注意事項等について確認している。

また、1月12日の作業当日には、TBM-KYにて、当日の作業内容の再確認、役割分担、過去の経験から得た教訓や注意事項の共有を行っていた。

(4) 作業記録

制御棒クラスタ切り離し時の作業記録より、定められた手順どおりに重量確認と寸法確認が実施され、確実に制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業が行われていることを確認した。また、過去の定検（第1回～第14回）の作業記録と比べても、今回の作業記録に特異な点は確認されなかった。

なお、今回上部炉心構造物とともに引き上げられた制御棒クラスタの切り離し作業は、48体中6体目の作業であった。

事象発生後の駆動軸引き上げ時に制御棒クラスタは引き上がらなかったことから、切り離し操作自体をしていないといった重要な手順の抜けやアドレス間違い等の作業ミスは考え難い。

(5) 作業環境

作業場所における照明、騒音、気温および作業エリアの観点から確認を行った。制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業を行った作業場所は、原子炉格納容器内であり、照明、騒音および気温について問題はなかった。作業エリアについては、燃料取替クレーン歩廊上で実施したが、これまでの定検時と同様で当該作業においては十分な作業エリアであり問題なかった。

作業時の装備については、管理区域標準装備（管理服、綿手袋、靴下）に加えて、防護服（1重）、ゴム手袋（2重）、靴下（1重）を着用しての作業であるが、これまでの定検時にも同様の装備での作業であり、安全面も含めて問題はなかった。

また、当該作業時に全面マスク等の着用は必要なく、作業員間のコミュニケーションに問題はなかった。

2. 作業員等への聞き取り調査

(1) 制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業時

作業責任者、作業員は、制御棒クラスタと駆動軸の切り離し操作をするため、作業手順書に従い駆動軸取り外し工具の操作、荷重計（ロードセル）による重量確認および寸法確認等を行っており、作業手順に問題ないことを確認した。また、

操作および計測時は、複数人による確認を行い、作業が確実に行われていることを確認した。

当該作業時、当社立会により、作業が確実に行われていることを確認している。

なお、当該駆動軸切り離しの確認作業時に制御棒クラスタを切り離すために駆動軸取り外し工具を揺する操作をしたことが確認されたが、当該駆動軸に限った操作ではなく、他のほとんどの駆動軸で同様の操作を行っていることおよびこれまでの定検時にも同様の操作を行っているとのことであり、一般的に行っている操作であることを確認した。

(2) 上部炉心構造物吊り上げ作業時

作業責任者、作業員および四電担当者は、上部炉心構造物吊り上げ操作をするため、作業手順書に従い炉内構造物吊上金具の取付、荷重計（ロードセル）による上部炉心構造物等の重量確認および水中カメラによる上部炉心構造物吊り上げ状況確認等を行っており、作業手順に問題はなかった。

当該作業時、当社立会により作業が確実に行われていることを確認した。

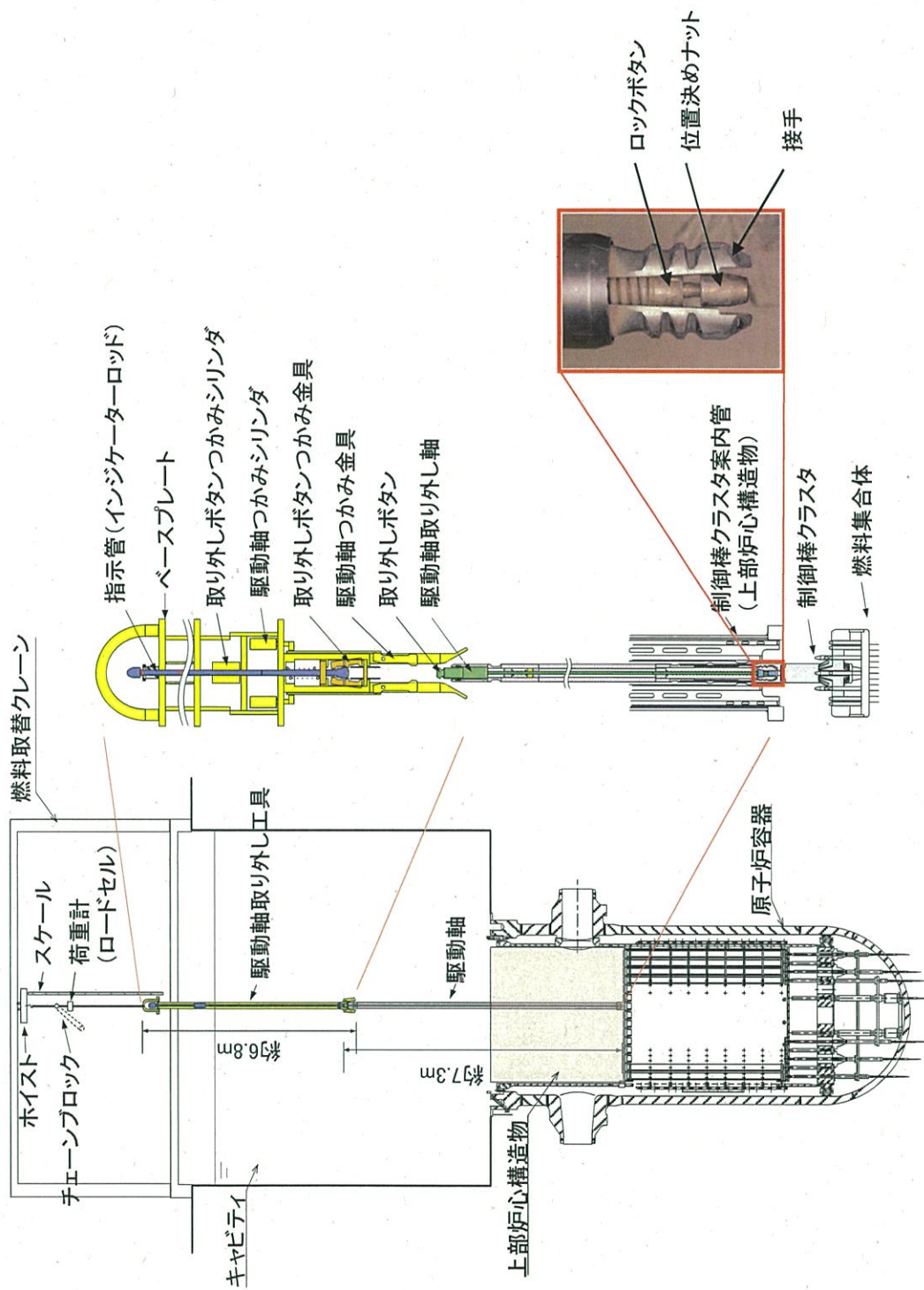
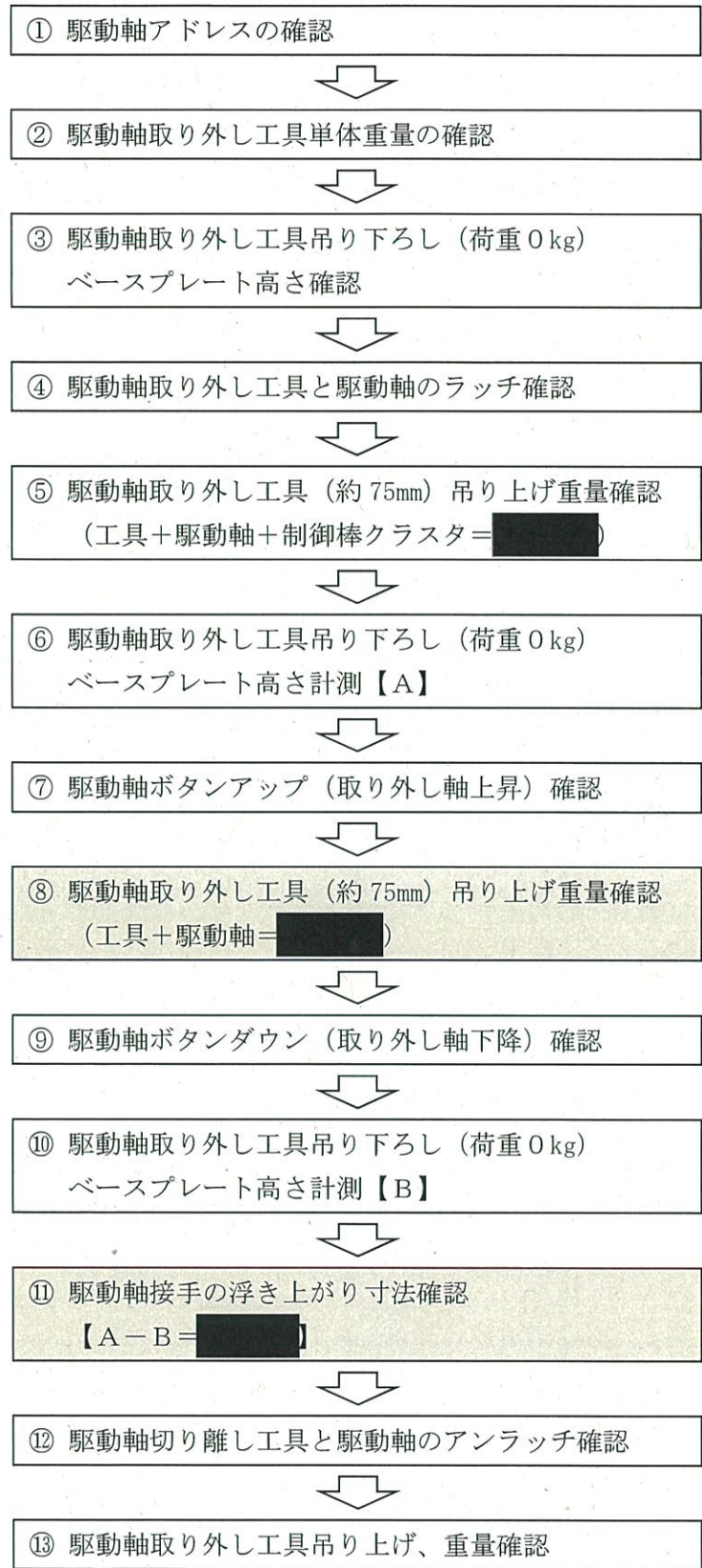


図-3 作業状況概要図

枠囲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。



今回の記録(※)

M- 4:	[redacted]
M-12:	[redacted]
J- 7:	[redacted]

(※)M-4 :当該アドレス
M-12, J-7:他のアドレス

制御棒クラスタと切り離されていることを確認

今回の記録(※)

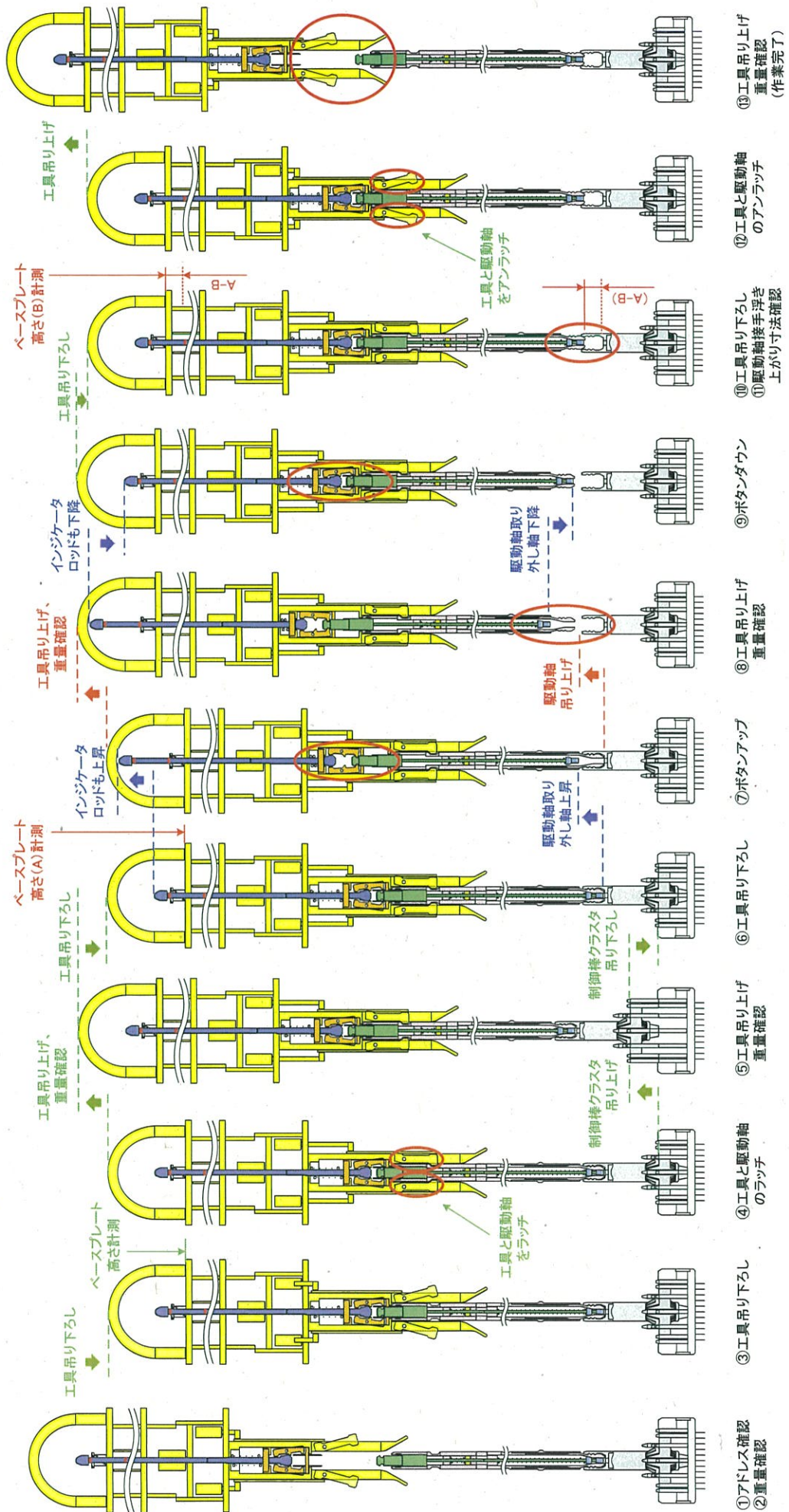
M- 4:	[redacted]
M-12:	[redacted]
J- 7:	[redacted]

制御棒クラスタと切り離されていることを確認

今回の記録(※)

M- 4:	48mm
M-12:	44mm
J- 7:	44mm

図-4 作業フロー図

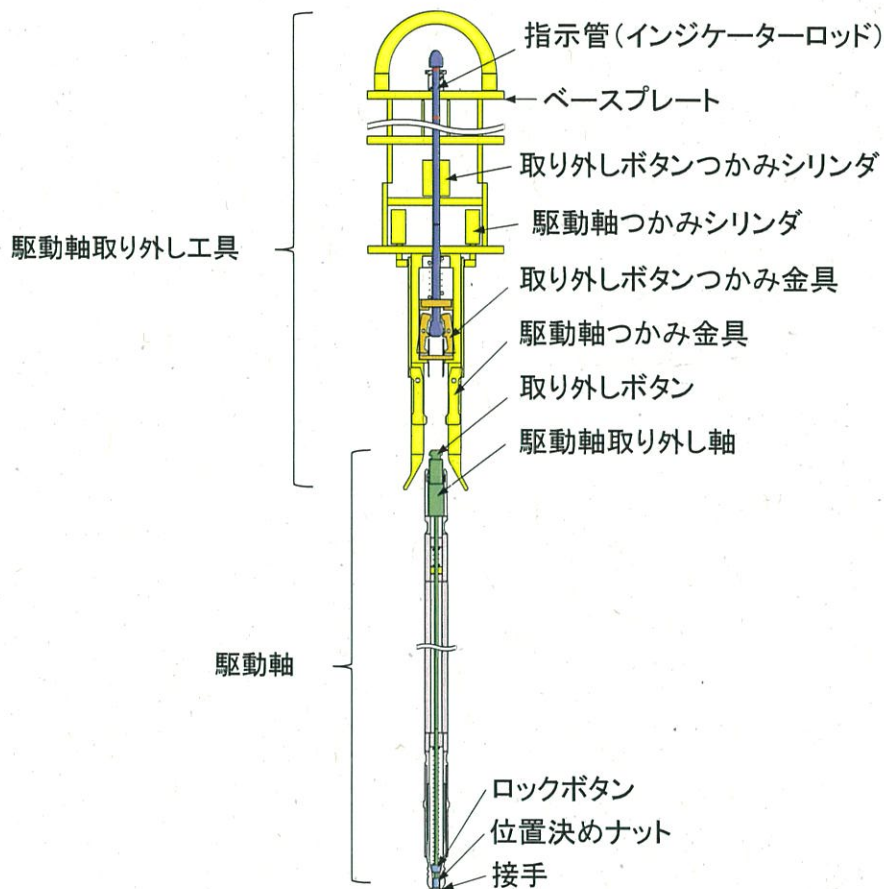


図一 5 作業手順概要図

駆動軸取り外し工具の調査結果

1. 調査対象

駆動軸取り外し工具



図－ 1 駆動軸取り外し工具

2. 調査内容

(1) 駆動軸取り外し工具の調査内容

① 外観確認

傷、変形、付着物の有無を確認する。

② 駆動軸取り外し工具単体での、駆動軸取り外し軸の引き上げ位置／押し下げ位置操作に係る動作確認を行う。(ストローク確認含む)

表-1 ストローク確認表

項目	判定値 [mm]
①取り外しボタンのラッチ/アンラッチに関わるストローク (作動ボタンがシャフトに接するまでのストローク:A寸法)	■
②取り外しボタンの上昇/下降に関わるストローク (つかみ金具ハウジングの上昇ストロークの確認:B寸法)	■

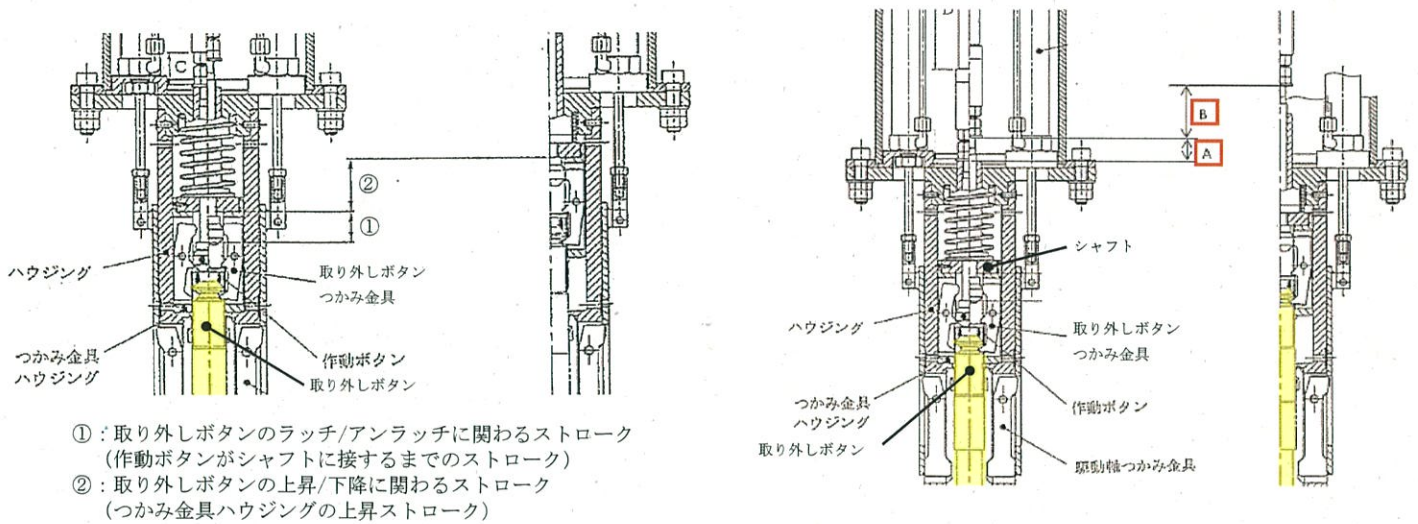

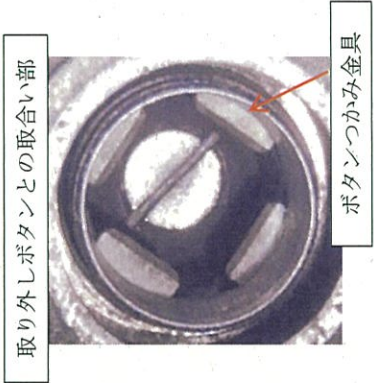
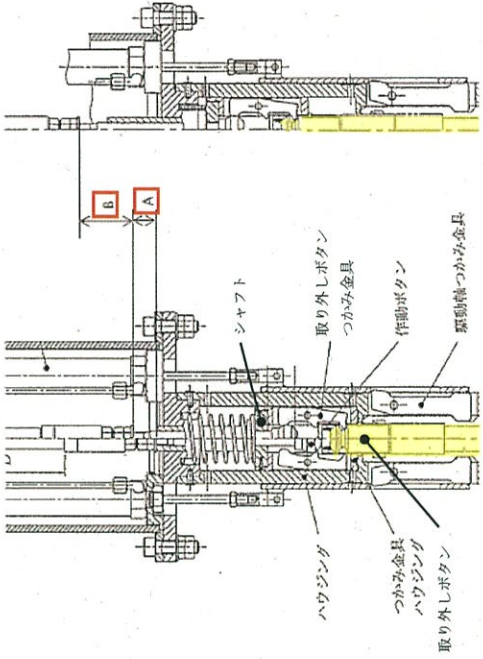


図-2 ストローク確認のための計測箇所

枠囲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。

3. 調査結果

調査項目	調査結果	工具と駆動軸の 取り合いの問題 なし																					
<p>外観</p>	<p>✓ 工具と駆動軸本体の取り合い部に、傷、変形、付着物等の異常なし</p> <p>✓ 工具と取り外しボタンの取り合いに、傷、変形、付着物等の異常なし</p>  																						
<p>駆動軸取り外し工具</p> <p>ストローク・取り外し軸引き上げ荷重</p>	<p>✓ 工具動作は設計値を満足</p> <table border="1" data-bbox="826 1220 1023 1921"> <thead> <tr> <th>ストローク</th> <th>計測値 (mm)</th> <th>設計値 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>取り外しボタンの把持</td> <td>28.5</td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>取り外しボタン上昇ストローク</td> <td>48.0</td> <td>■</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" data-bbox="1038 1220 1326 1921"> <thead> <tr> <th>取り外し軸引き上げ荷重</th> <th>計測値 (kg)</th> <th>設計値 (kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>空気圧 0.588 MPa (6.0kgf/cm²)</td> <td>340</td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>空気圧 0.637MPa (6.5kgf/cm²)</td> <td>364</td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>空気圧 0.686MPa (7.0kgf/cm²)</td> <td>400</td> <td>■</td> </tr> </tbody> </table> 	ストローク	計測値 (mm)	設計値 (mm)	取り外しボタンの把持	28.5	■	取り外しボタン上昇ストローク	48.0	■	取り外し軸引き上げ荷重	計測値 (kg)	設計値 (kg)	空気圧 0.588 MPa (6.0kgf/cm ²)	340	■	空気圧 0.637MPa (6.5kgf/cm ²)	364	■	空気圧 0.686MPa (7.0kgf/cm ²)	400	■	<p>• 工具による駆動軸取り外し軸の引き上げ/押し下げ動作に問題なし</p>
ストローク	計測値 (mm)	設計値 (mm)																					
取り外しボタンの把持	28.5	■																					
取り外しボタン上昇ストローク	48.0	■																					
取り外し軸引き上げ荷重	計測値 (kg)	設計値 (kg)																					
空気圧 0.588 MPa (6.0kgf/cm ²)	340	■																					
空気圧 0.637MPa (6.5kgf/cm ²)	364	■																					
空気圧 0.686MPa (7.0kgf/cm ²)	400	■																					

枠囲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。

計測器の調査結果

1. 調査対象

- (1) 荷重計 (ロードセル)
- (2) スケール

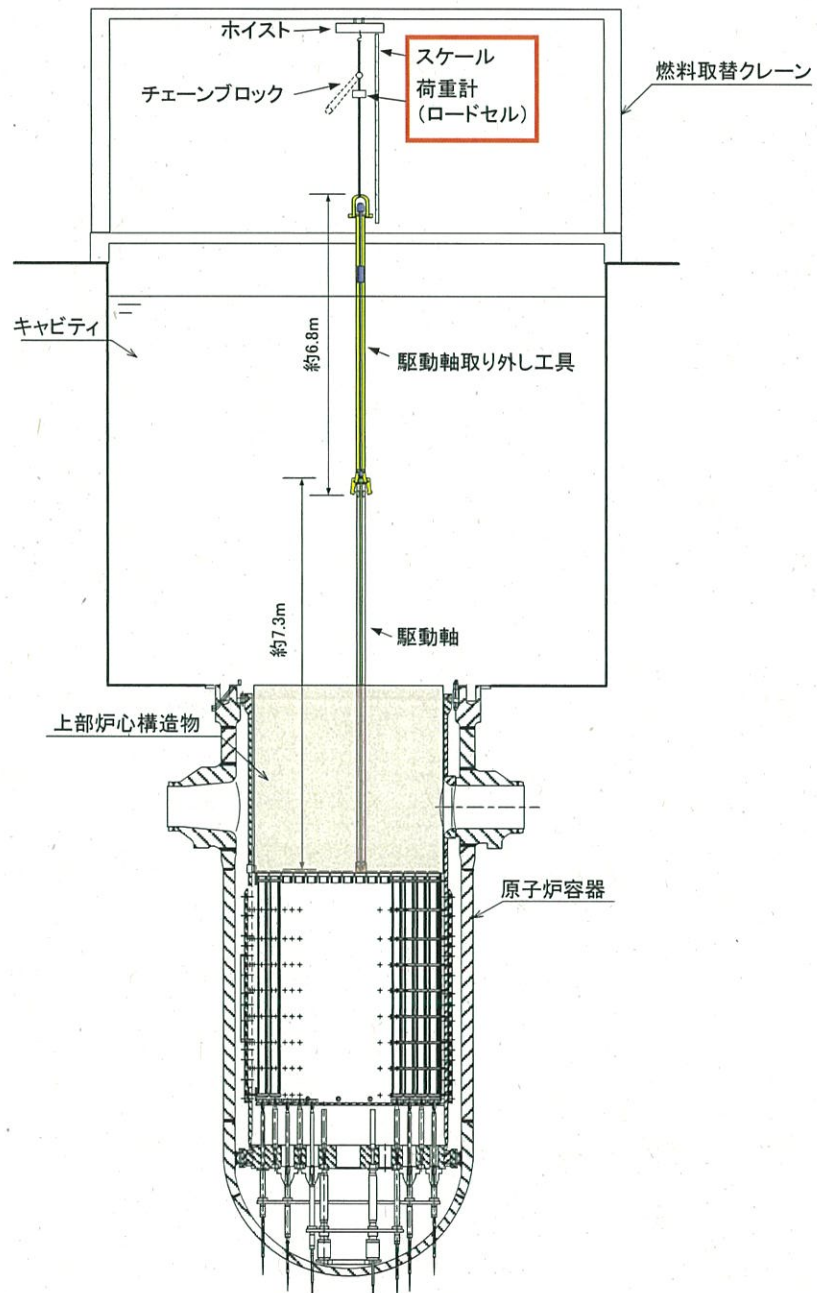


図-1 荷重計およびスケール

2. 調査内容

(1) 荷重計（ロードセル）の調査内容

荷重計（ロードセル）の点検記録、作業記録により計測器の動作に問題がないことを確認する。

- ・使用前点検記録確認
- ・おもり（ウェイト）による動作確認（140kg、200kg、260kg）※1

※1 駆動軸取り外し工具 [REDACTED]、駆動軸 [REDACTED]、制御棒クラスター [REDACTED]
合計 [REDACTED] を考慮

(2) スケールの調査内容

スケールについて、外観確認およびJ I Sマークを確認する。

3. 調査結果

(1) 荷重計（ロードセル）の調査結果

荷重計（ロードセル）の使用前点検、作業記録の確認および動作確認を行った結果、計測器の動作に問題がないことを確認した。

表-1 荷重計（ロードセル）の調査結果

調査項目	調査結果
使用前点検	<ul style="list-style-type: none">・荷重計（ロードセル）表示が出ていること、遠隔表示機の表示値が本体表示値と同じであることを確認した。・外観確認により有意な損傷等がないことを確認した。
動作確認	<ul style="list-style-type: none">・140kg、200kg、260kgのおもり（ウェイト）による動作確認を実施し、荷重計（ロードセル）表示値が各重量（140kg、200kg、260kg）を示すことを確認した。

(2) スケールの調査結果

スケールについて、外観確認により有意な損傷等がないことおよびJ I S 1級であることを確認した。

枠囲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。

制御棒クラスタの調査結果

1. 調査対象

番号	アドレス	使用期間	選定理由	
R45	M-4	15Cy	当該制御棒クラスタ	
R47	M-12	15Cy	比較対象	制御棒クラスタの使用期間が同等
R66	J-7	1Cy		炉心中心近傍のアドレス

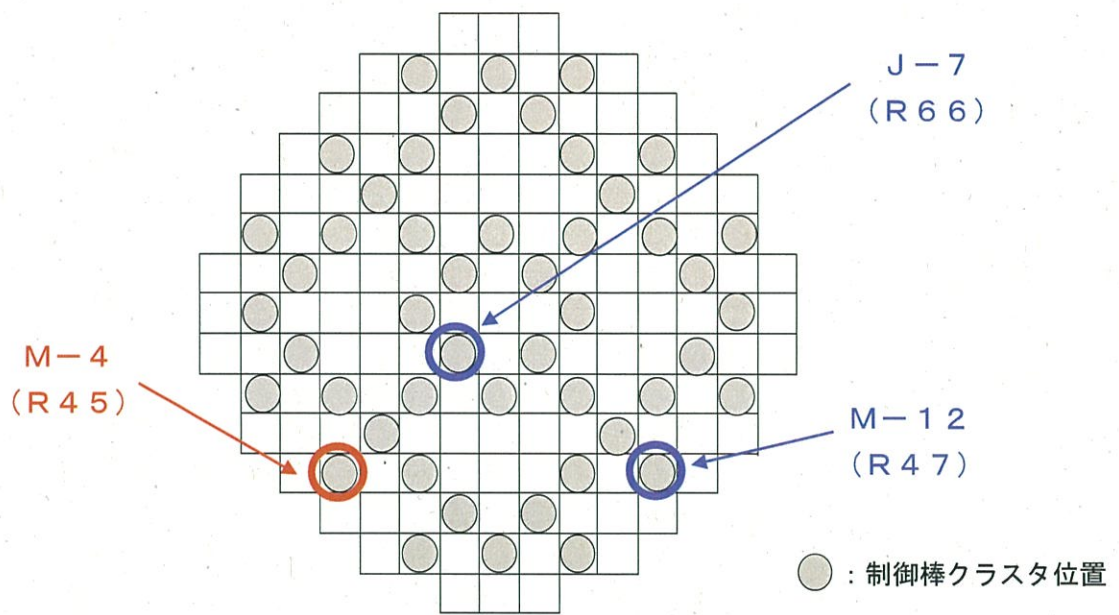


図-1 制御棒クラスタのアドレス

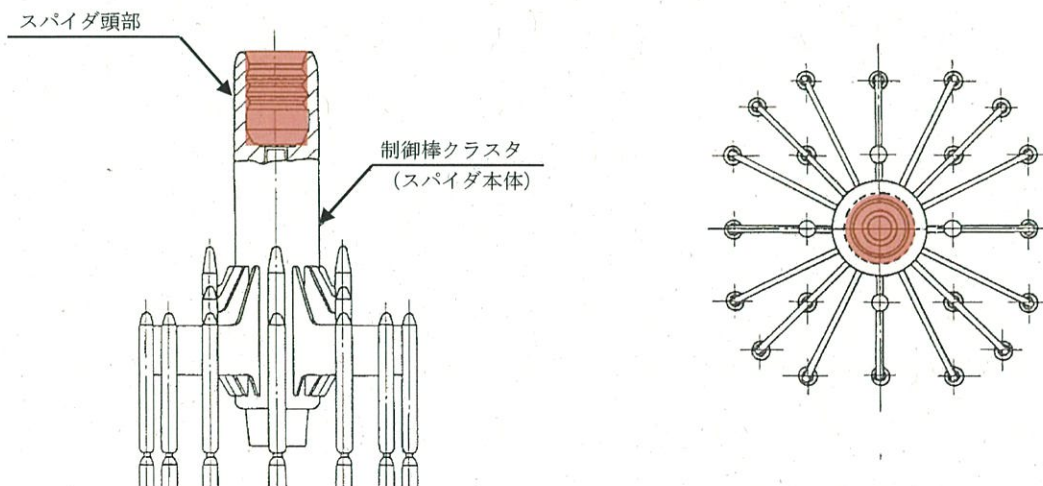


図-2 制御棒クラスタ・スパイダ頭部詳細図

2. 調査内容

(1) 図面確認

制御棒クラスタのスパイダ頭部と制御棒クラスタ案内管（上部炉心構造物）が、設計上、物理的に干渉しないことを図面により確認する。

(2) 外観確認

制御棒クラスタのスパイダ頭部の外観確認を実施し、損傷、変形の有無を確認するとともに、異物の有無を確認する。

また、詳細確認のため、水中カメラを制御棒クラスタのスパイダ頭部に近づけて外観確認を実施し、損傷、変形の有無を確認する。

3. 調査結果

(1) 図面確認結果

制御棒クラスタのスパイダ頭部と制御棒クラスタ案内管（上部炉心構造物）との位置関係から、設計上、物理的に干渉する可能性がないことを確認した。

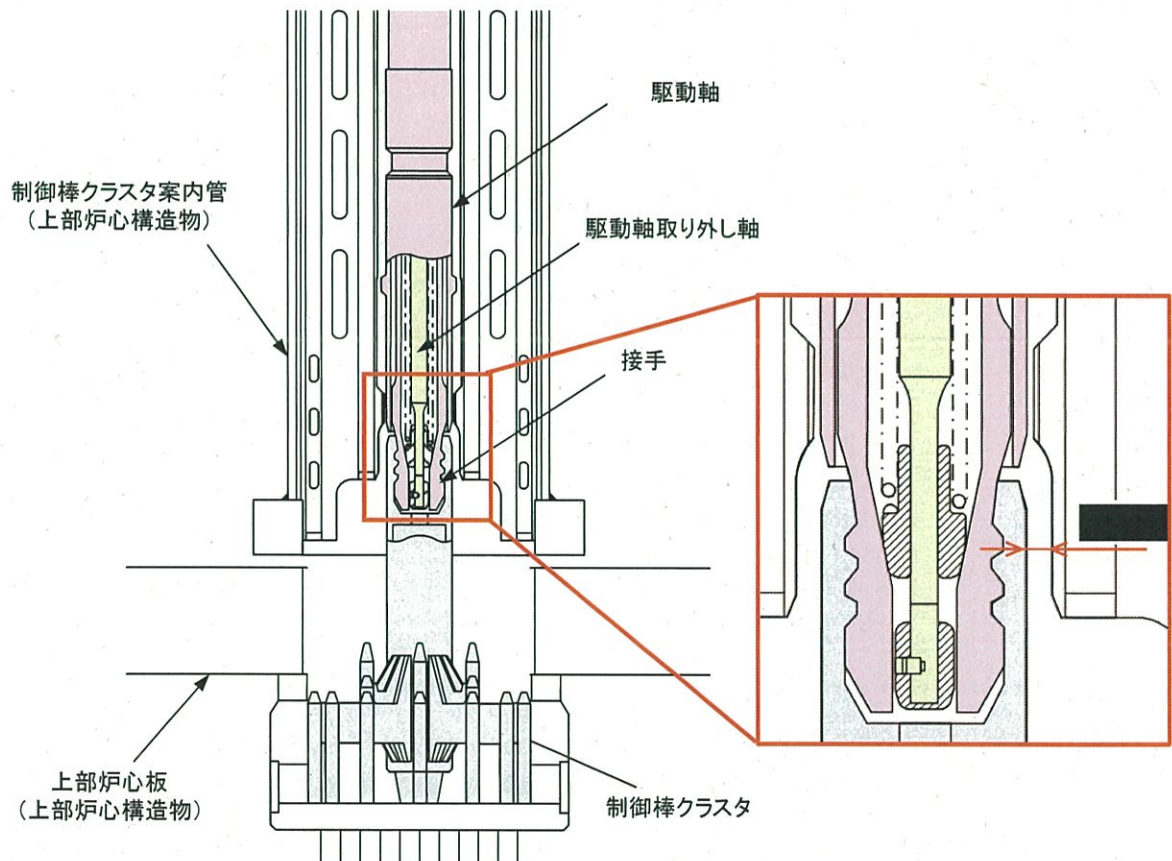
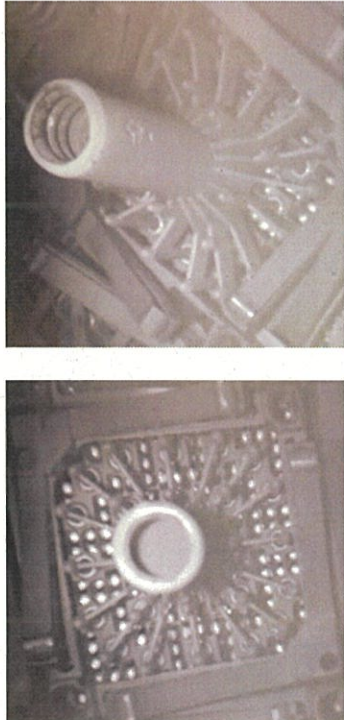
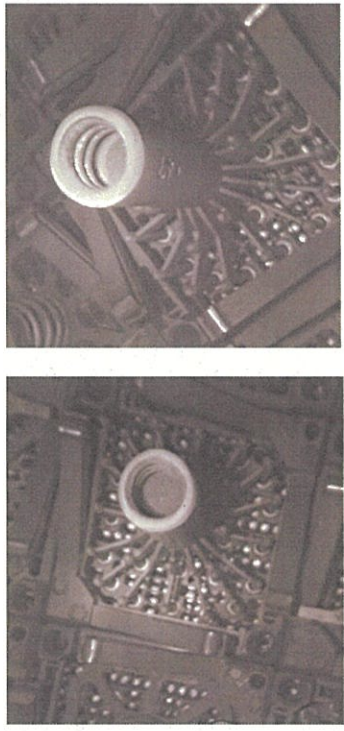
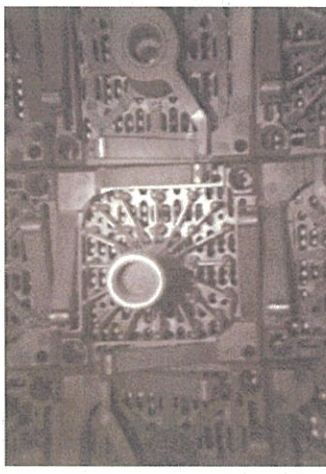
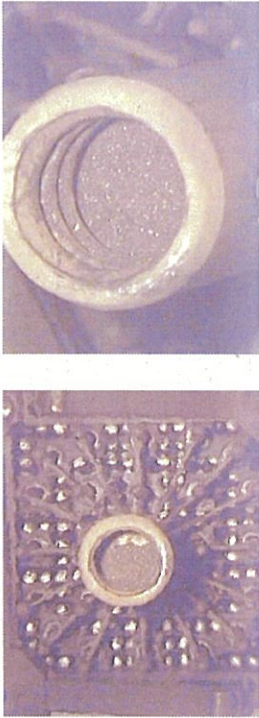
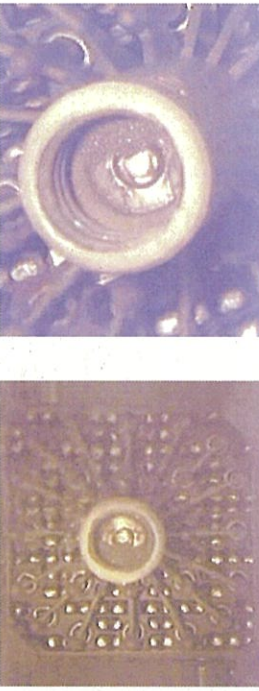



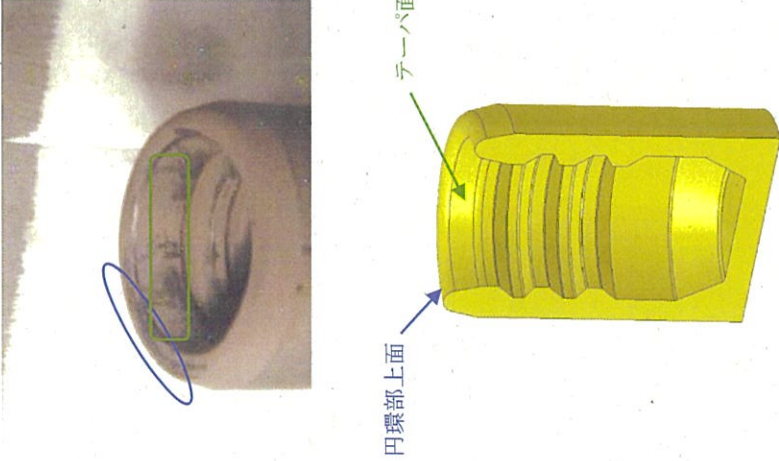
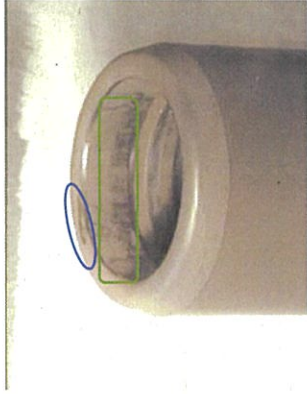

図-3 位置関係 概略図

(2) 外観確認結果

調査項目	M-4 の調査結果	比較対象アドレスの調査結果	
制御棒クラスタ	<p>【原子炉容器内点検】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 水中カメラ（白黒）により、スパイダ頭部を確認したところ外観形状に異常はないことを確認 ✓ スパイダ内部に堆積物あり 	<p>【原子炉容器内点検】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 同左  <p style="text-align: center;">M-1 2</p>  <p style="text-align: center;">J-7</p>	<ul style="list-style-type: none"> • スパイダ頭部に堆積物が確認された • 制御棒クラスタ案内管（上部炉心構造物）との干渉の痕跡は認められない

スパイダ頭部
外観

調査項目	M-4 の調査結果	比較対象アトレスの調査結果	
	制御棒クラスタ		
外観	スライダ頭部		
	<p>【使用済燃料ピット内点検】</p> <p>✓ 水中カメラ（カラール）による確認の結果、スライダ内 部に堆積物あり</p> 	<p>【使用済燃料ピット内点検】</p> <p>✓ 水中カメラ（カラール）による確認の結果、スライダ内 部に堆積物あり</p>  <p style="text-align: center;">M-12</p>  <p style="text-align: center;">J-7</p>	<ul style="list-style-type: none"> スライダ頭部に堆積物が確認された

<p>調査項目</p>	<p>制御棒クラスタ</p>	<p>外観</p>	<p>スパイダ頭部</p>
<p>【使用済燃料ピット内点検】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 水中カメラ（カラー）による詳細確認の結果、スパイダ頭部の円環部上面に接触痕（色調の変化）（青枠）あり ✓ スパイダ頭部の内部テーパ面に接触痕（色調の変化）（緑枠）あり 		<p>【使用済燃料ピット内点検】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ M-12はスパイダ頭部の円環部上面に接触痕（色調の変化）（青枠）あり、M-4に比べて軽微 ✓ M-12のスパイダ頭部の内部テーパ面の接触痕（色調の変化）（緑枠）はM-4と同程度 ✓ 使用期間が短いJ-7は、スパイダ頭部の円環部上面の接触痕（色調の変化）なし  <p>M-12</p>  <p>J-7</p>	<p>M-4のスパイダ頭部の円環部上面に接触痕（色調の変化）が確認された比較対象（M-12）でも同様の箇所に接触痕（色調の変化）が確認されたが、M-4の接触痕のほうが広範囲であった</p> <ul style="list-style-type: none"> • M-4のスパイダ頭部の内部テーパ面に接触痕（色調の変化）が確認された比較対象（M-12）でも同程度 • 使用期間が短いJ-7は、スパイダ頭部の円環部上面の接触痕（色調の変化）なし

駆動軸の調査結果

1. 調査対象

アドレス	使用期間	選定理由	
M-4	15Cy	当該駆動軸	
M-12	15Cy	比較対象	制御棒クラスタの使用期間が同等
J-7	15Cy		炉心中心近傍のアドレス

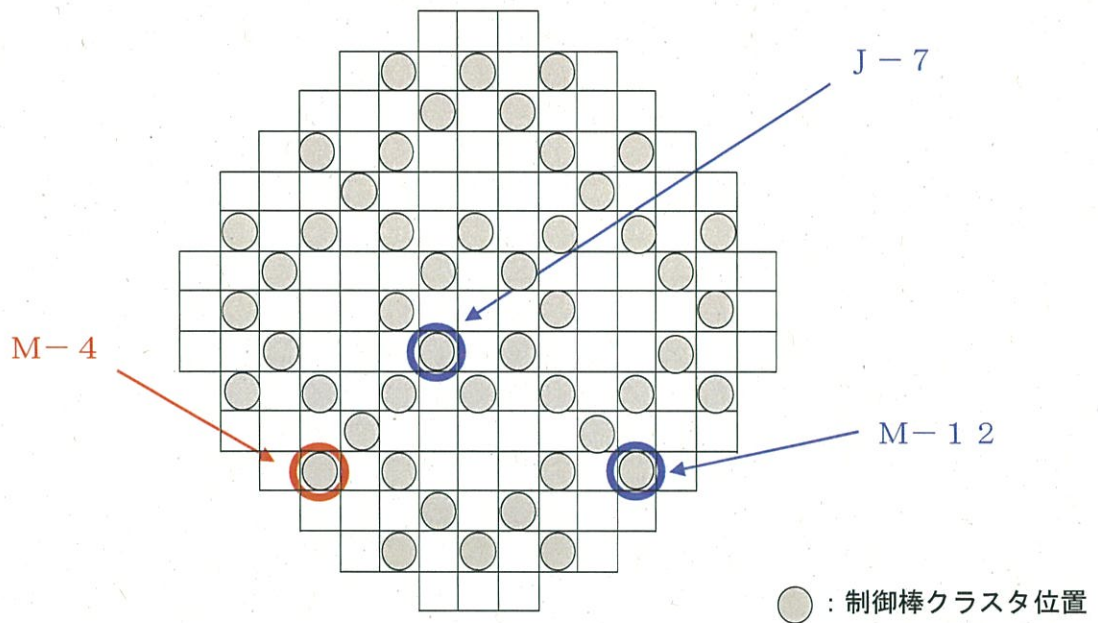


図-1 駆動軸に対応する制御棒クラスタのアドレス

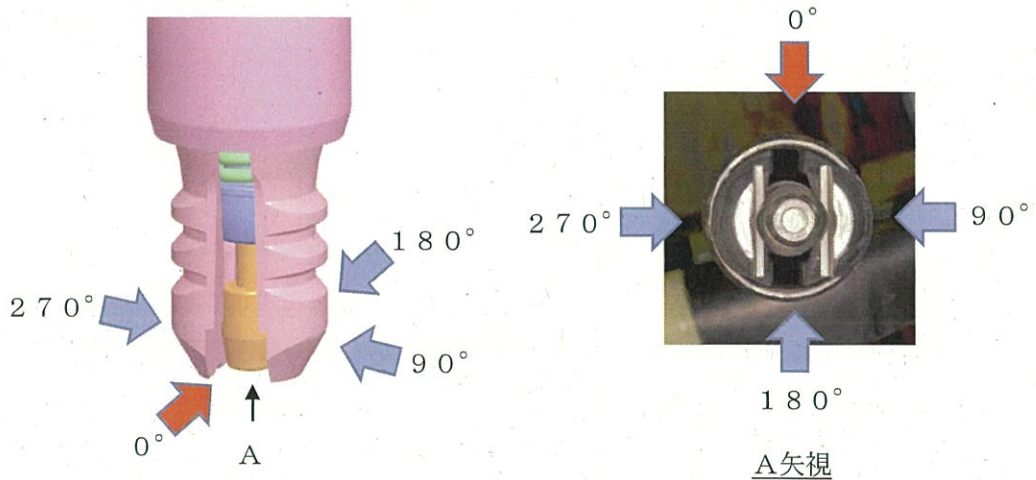


図-2 写真撮影方向

2. 調査内容

(1) 外観確認・寸法計測

駆動軸（M-4、M-12、J-7）について、外観確認を実施する。また、それらの駆動軸について、駆動軸取り外し軸の押し下げ位置で、接手周りの寸法を計測する。

① 接手外面の外観確認

傷、変形、付着物の有無を確認する。

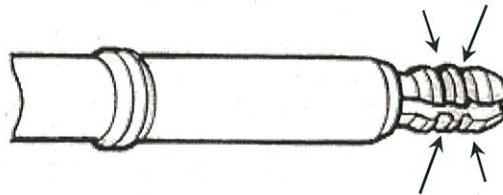


図-3 駆動軸の接手部

② 接手内面の外観確認

駆動軸取り外し軸の引き上げ位置／押し下げ位置のそれぞれの状態で、傷、変形、付着物の有無を確認する。

③ 駆動軸取り外し工具との取り合い部の外観確認

駆動軸取り外し工具との取り合い部である駆動軸頂部近傍に対して、傷、変形、付着物の有無を確認する。

④ 接手部の型取り

接手部の型取りを実施し、外面および内面の詳細性状を確認する。

⑤ 接手部の寸法計測

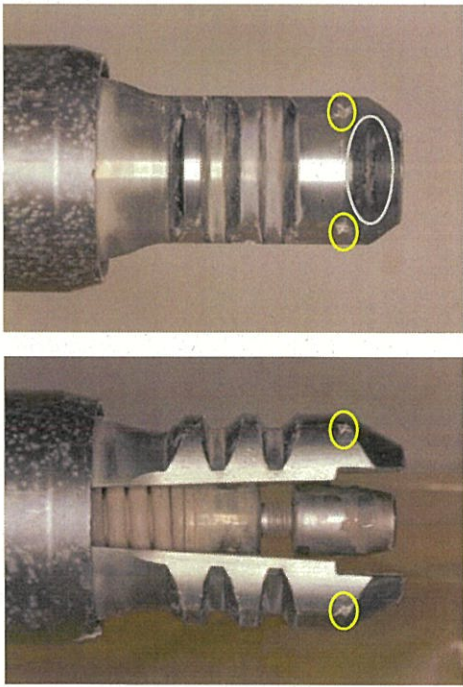
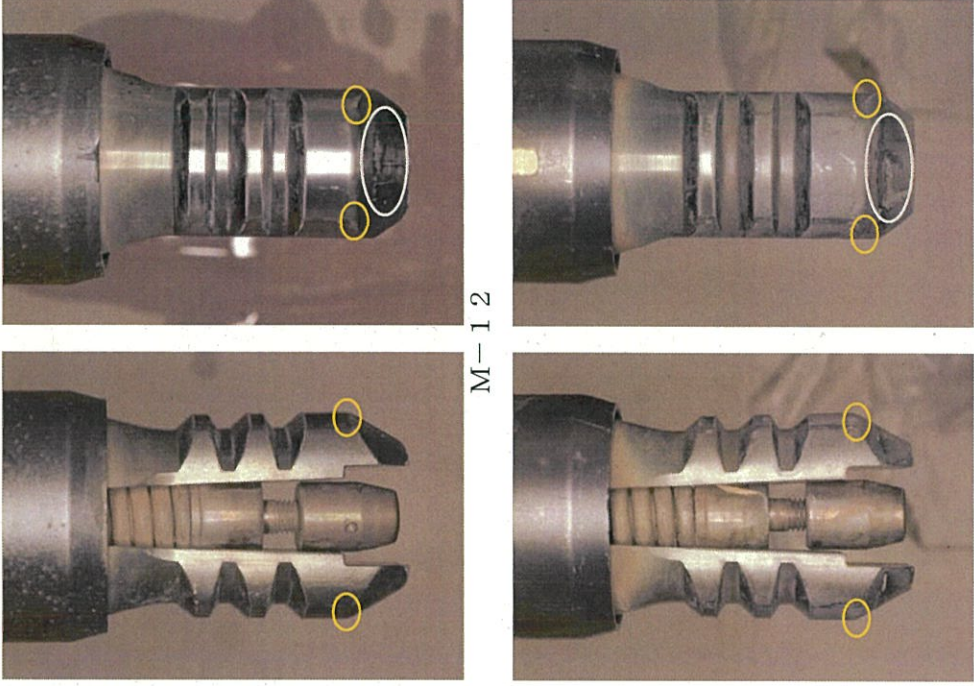
駆動軸取り外し軸の押し下げ位置で、以下の接手部周りの寸法を計測する。

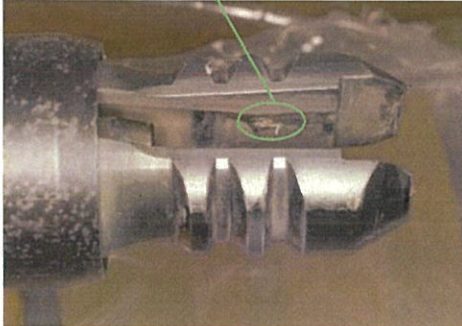
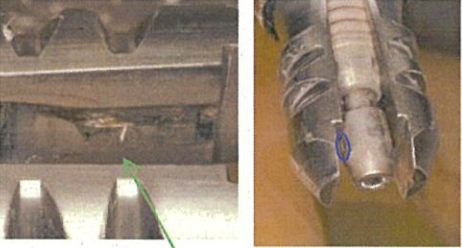

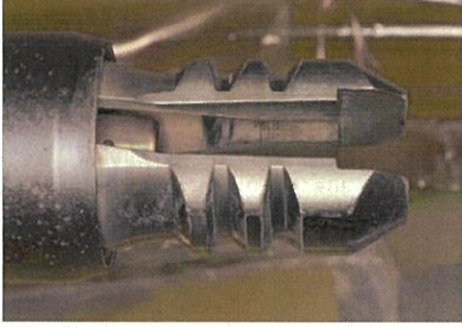
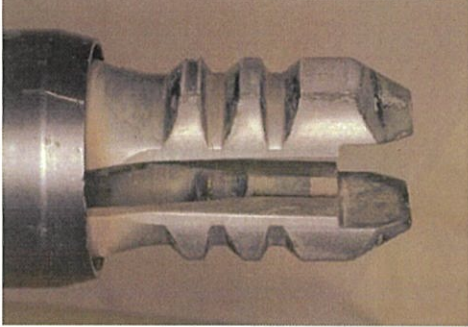
- ・ 接手の外径
- ・ 位置決めナットの位置（接手先端からの距離）



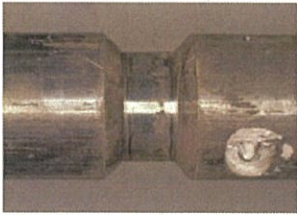

(2) 動作確認調査

実機駆動軸および駆動軸取り外し工具を組み合わせた際の動作を確認するため、駆動軸（M-4、M-12、J-7）および駆動軸取り外し工具を組み合わせたうえで、駆動軸取り外し工具にて駆動軸取り外し軸を操作し、動作状況の確認（ストローク量確認含む）を行う。


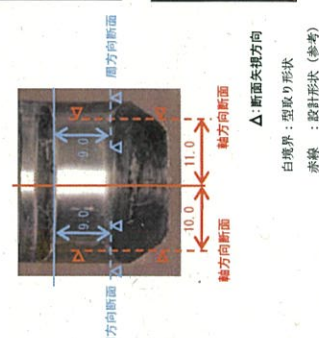
3. 調査結果

調査項目	M-4の調査結果	比較対象アトレスの調査結果	
駆動軸 外觀 接手外面	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 外面の直線部に局所的な接触痕あり（4か所、金属光沢の強い接触痕）…黄色枠 ✓ 接手先端テーパー部に周方向の接触痕あり（金属光沢なし）…灰色枠 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 外面の直線部に局所的な接触痕あり（金属光沢のない軽微な接触痕）…橙色枠 ✓ 接手先端テーパー部に周方向の接触痕あり（金属光沢なし）…灰色枠 	<ul style="list-style-type: none"> • 金属光沢を有するM-4接触痕（黄色枠）は今回生じた可能性がある • 比較対象でも同様の箇所に接触痕（橙色枠）が確認されたが金属光沢はなかった • テーパー部の周方向接触痕（灰色枠）は切り離し操作後の駆動軸仮置きでスパイダヘッドの内面テーパー部と取り合う箇所に相当し、金属光沢はなかった

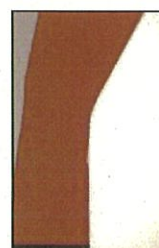

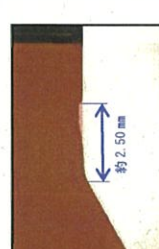
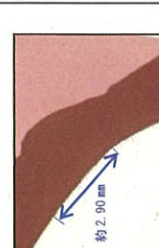
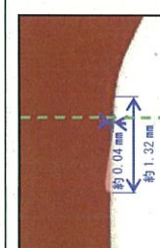
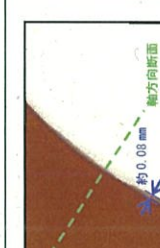
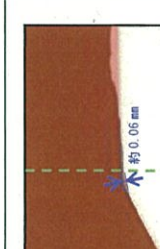

調査項目	M-4の調査結果	比較対象アドレスの調査結果	
駆動軸	<p>✓ 接手内面直線部に接痕あり（金属光沢、線状…緑枠）</p>  	<p>✓ 接手内面直線部に金属光沢を有する接痕なし</p>   <p>M-1 2</p>	<ul style="list-style-type: none"> 金属光沢を有するM-4接痕（緑枠）は今回生じた可能性がある 内面直線部は位置決めナット/ロックボタンの摺動する部位であるが、比較対象には有意な接痕なし。したがって、M-4接痕は今回生じた可能性がある
外観		 <p>J-7</p>	<ul style="list-style-type: none"> M-4位置決めナット直線部に線状の接痕（青枠）が確認された

調査項目	M-4 の調査結果	比較対象アドレスの調査結果	
駆動軸 外観 ※取り外しボタン	✓ 特に異常なし (異常な噛み込み等の痕跡なし) 	✓ M-4 と有意差なし 	・駆動軸取り外し軸の引き上げ時の押し下げ操作時の駆動軸取り外し工具とM-4取り外しボタンのインタフェースに問題なし
※駆動軸つかみ部周辺	✓ 特に異常なし (異常な噛み込み等の痕跡なし) 	✓ M-4 と有意差なし 	・駆動軸ラッチアッパ時に駆動軸取り外し工具と合うM-4 駆動軸つかみ部周辺に有意的な傷なし

※ 駆動軸取り外し工具との取り合い部

調査項目	M-4 の調査結果	比較対象アドレスの調査結果 (M-12)	M-4に見られた接手外面の局所的な接触痕はM-12の当該接触痕に比べて有意に深かった。当該接触痕は、今回生じた可能性がある
✓	<p>✓ 接手外面直線部 (90°)</p>  <p>型取り断面観察結果 (倍率 25 倍)</p> <p>左側接触痕軸方向断面 右側接触痕軸方向断面</p> <p>左側接触痕周方向断面 右側接触痕周方向断面</p> <p>周方向断面 軸方向断面</p> <p>△: 断面矢視方向 白境界: 型取り形状 赤線: 設計形状 (参考)</p>	<p>✓ 接手外面直線部 (90°)</p>  <p>型取り断面観察結果 (倍率 25 倍)</p> <p>左側接触痕軸方向断面 右側接触痕軸方向断面</p> <p>左側接触痕周方向断面 右側接触痕周方向断面</p> <p>周方向断面 軸方向断面</p> <p>△: 断面矢視方向 白境界: 型取り形状 赤線: 設計形状 (参考)</p>	

✓ M-4 と比較対象アドレスの外面の局所的接触痕深さの差は 0.04~0.08mm 程度

		左側接触痕		右側接触痕		
		軸方向断面	周方向断面	軸方向断面	周方向断面	
倍率10倍			約 3.20 mm			約 2.90 mm
倍率25倍			約 0.04 mm 約 1.32 mm			約 0.08 mm

白境界: M-4
赤境界: 比較アドレス
ピンク: 差 (M-4の方が凸)
灰色: 差 (M-4の方が凹)

部位	計測値 (mm)
外面の局所的接触痕 (90° 左側)	長さ: 約 1.32 幅: 約 3.20 深さ: 約 0.04~0.08
外面の局所的接触痕 (90° 右側)	長さ: 約 2.50 幅: 約 2.90 深さ: 約 0.06~0.08

接手部の型取り

駆動軸

調査項目

M-4 の調査結果

比較対象アトレスの調査結果 (M-1 2)

✓ 接手外面直線部 (270°) 型取り断面観察結果 (倍率25倍)

左側接触痕軸方向断面
右側接触痕軸方向断面
左側接触痕周方向断面
右側接触痕周方向断面

△: 断面矢印方向
白境界: 型取り形状
赤線: 設計形状 (参考)

✓ 接手外面直線部 (270°) 型取り断面観察結果 (倍率25倍)

左側接触痕軸方向断面
右側接触痕軸方向断面
左側接触痕周方向断面
右側接触痕周方向断面

△: 断面矢印方向
白境界: 型取り形状
赤線: 設計形状 (参考)

✓ M-4 と比較対象アトレスの外面の局部的接触痕深さの差は 0.04~0.12mm 程度

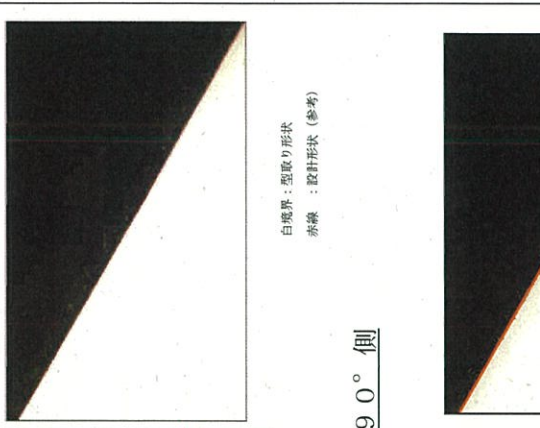
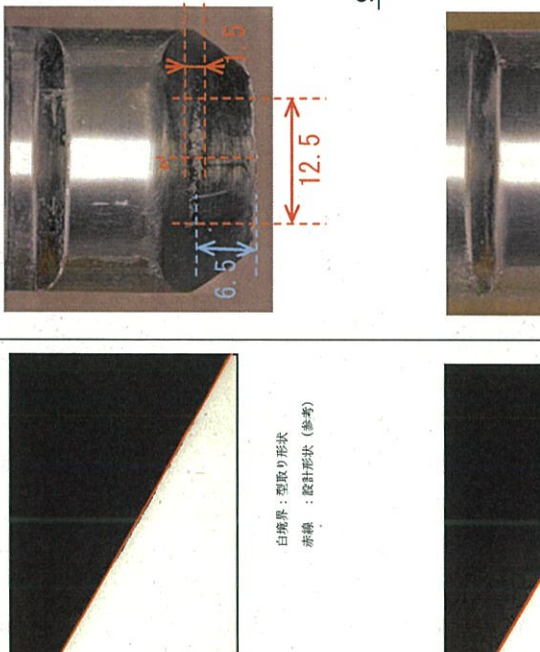
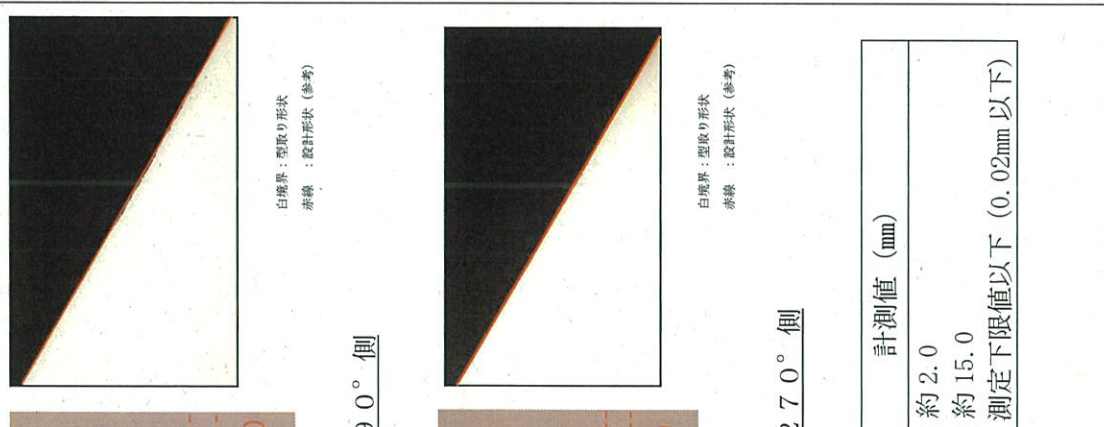
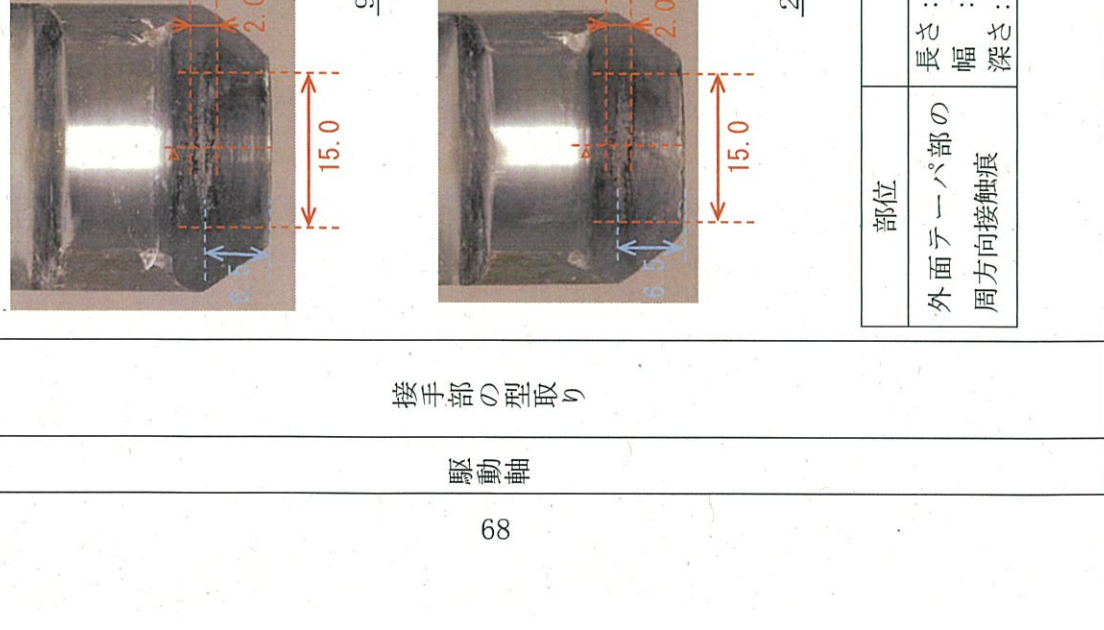
	左側接触痕		右側接触痕	
	軸方向断面	周方向断面	軸方向断面	周方向断面
倍率10倍				
倍率25倍				

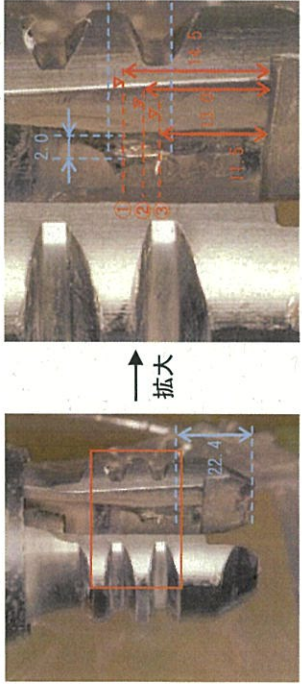
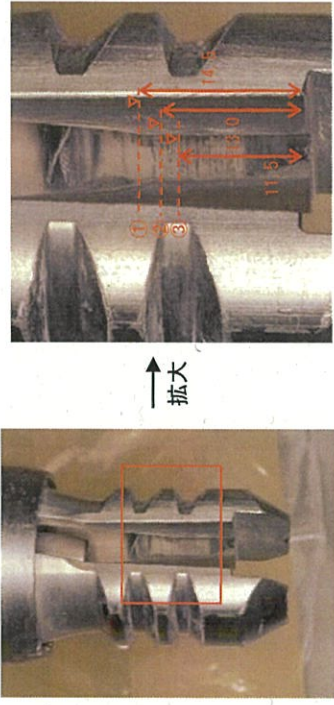
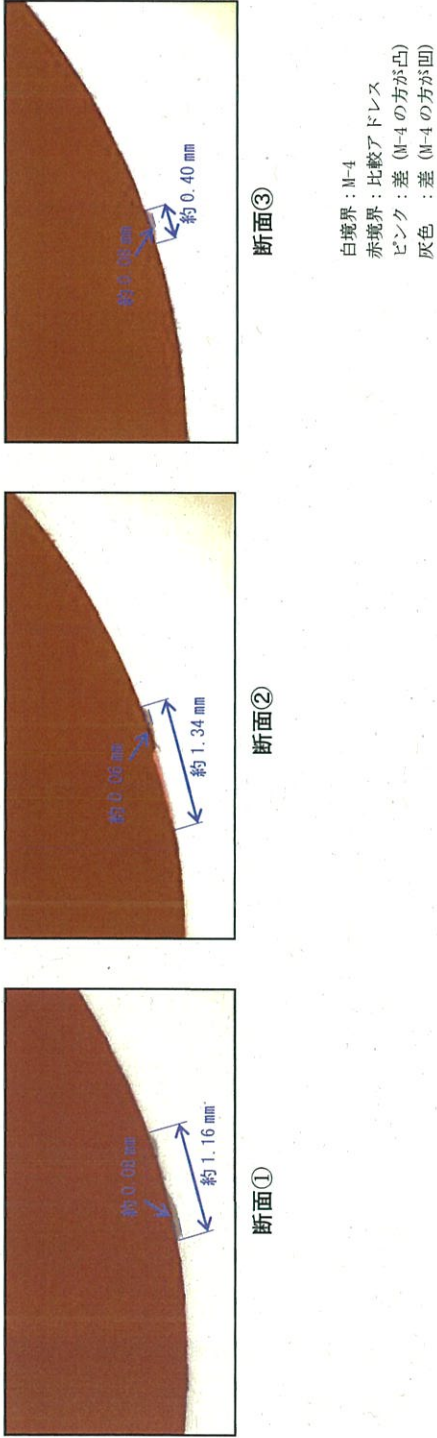
白境界: M-4
赤境界: 比較アトレス
ピンク: 差 (M-4 の方が凸)
灰色: 差 (M-4 の方が凹)

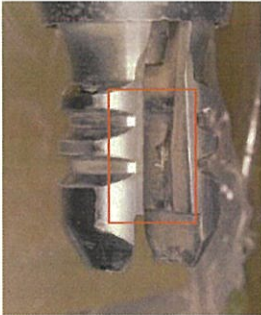
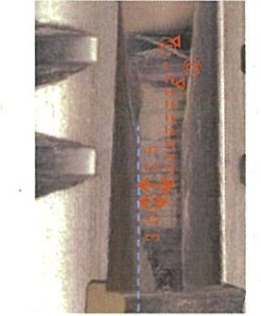


部位	計測値 (mm)
外面の局部的接触痕 (270° 左側)	長さ: 約 1.40 幅: 約 1.16 深さ: 約 0.04
外面の局部的接触痕 (270° 右側)	長さ: 約 2.36 幅: 約 3.12 深さ: 約 0.08~0.12

接手部の型取り

駆動軸

調査項目	M-4 の調査結果	比較対象アドレスの調査結果 (M-1 2)					
<p>駆動軸</p> <p>接手部の型取り</p>	<p>✓ M-4 の外面テーパ部接触痕深さは測定下限値である 0.02 mm 以下程度</p>  <p>白境界：型取り形状 赤線：設計形状 (参考)</p> <p>90° 側</p>  <p>白境界：型取り形状 赤線：設計形状 (参考)</p> <p>270° 側</p>	<p>✓ 比較対象アドレスの外面テーパ部接触痕深さは測定下限値である 0.02 mm 以下程度</p>  <p>白境界：型取り形状 赤線：設計形状 (参考)</p> <p>90° 側</p>  <p>白境界：型取り形状 赤線：設計形状 (参考)</p> <p>270° 側</p>	<ul style="list-style-type: none"> 外面テーパ部周方向接触痕は M-4 接手外面の局所的な接触痕に比べ軽微 M-4 と M-1 2 の接触痕に有意な差なし <table border="1" data-bbox="319 1612 829 1982"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>計測値 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>外面テーパ部の周方向接触痕</td> <td>長さ：約 1.5～約 2.0 幅：約 12.5～約 13.0 深さ：測定下限値以下 (0.02mm 以下)</td> </tr> </tbody> </table>	部位	計測値 (mm)	外面テーパ部の周方向接触痕	長さ：約 1.5～約 2.0 幅：約 12.5～約 13.0 深さ：測定下限値以下 (0.02mm 以下)
部位	計測値 (mm)						
外面テーパ部の周方向接触痕	長さ：約 1.5～約 2.0 幅：約 12.5～約 13.0 深さ：測定下限値以下 (0.02mm 以下)						

調査項目	<p>M-4の調査結果</p> <p>✓ 接手内面直線部 (270° 周方向)</p>  <p>→ 拡大</p>		<p>比較対象アドレスの調査結果 (M-12)</p> <p>✓ 接手内面直線部 (270° 周方向)</p>  <p>→ 拡大</p>	<p>M-4の接手内面直線部に線状の接痕が確認された。M-12では同様の接痕は確認されなかった</p>
駆動軸	<p>✓ M-4とM-12のプロファイル比較 (周方向)</p> <p>型取り断面観察結果 (倍率25倍)</p>  <p>断面①</p> <p>断面②</p> <p>断面③</p> <p>白境界: M-4 赤境界: 比較アドレス ピンク: 差 (M-4の方が凸) 灰色: 差 (M-4の方が凹)</p>			

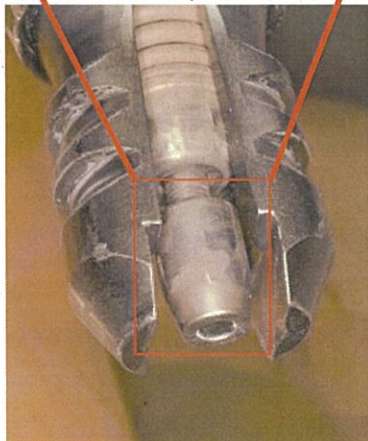
調査項目	M-4 の調査結果	比較対象アドレスの調査結果 (M-12)						
	<p>✓ 接手内面直線部 (270° 軸方向)</p>  <p>①は基準線 (内面エッジ) から 3.0 mm位置 ②は基準線 (内面エッジ) から 3.5 mm位置</p>	<p>✓ 接手内面直線部 (270° 軸方向)</p>  <p>①は基準線 (内面エッジ) から 3.0 mm位置 ②は基準線 (内面エッジ) から 3.5 mm位置</p>						
<p>駆動軸</p> <p>接手部の型取り</p>	<p>✓ M-4とM-12のプロファイル比較 (軸方向)</p> <p>型取り断面観察結果 (倍率 25 倍)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="790 1254 957 1803">  <p>断面①</p> </div> <div data-bbox="790 571 957 1176">  <p>断面②</p> </div> </div> <table border="1" data-bbox="1077 1075 1268 1769" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>計測値 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">内面テーパー部近傍の接触痕</td> <td>長さ：約 6.5</td> </tr> <tr> <td>幅：約 2.0</td> </tr> <tr> <td>深さ：約 0.08</td> </tr> </tbody> </table> <p style="margin-left: 200px;">白境界：M-4 赤境界：比較アドレス ピンク：差 (M-4の方が凸) 灰色：差 (M-4の方が凹)</p>		部位	計測値 (mm)	内面テーパー部近傍の接触痕	長さ：約 6.5	幅：約 2.0	深さ：約 0.08
部位	計測値 (mm)							
内面テーパー部近傍の接触痕	長さ：約 6.5							
	幅：約 2.0							
	深さ：約 0.08							

調査項目

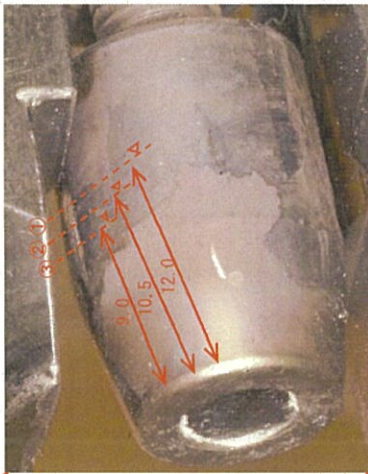
位置決めナットの型取り

駆動軸

M-4の調査結果



拡大

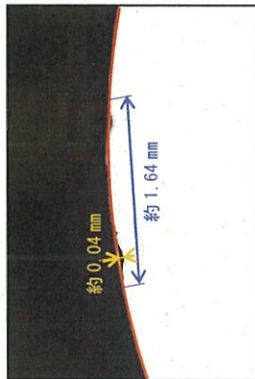


- ①はナット先端から 12.0 mm位置
- ②はナット先端から 10.5 mm位置
- ③はナット先端から 9.0 mm位置

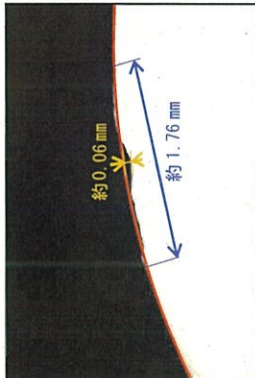
- ④は270°を上側にした中央線から時計回りに 1.5 mm位置の一番深いキズを円中心に向かって切断した断面図

- 位置決めナットの直線部に線状の接触痕が確認された

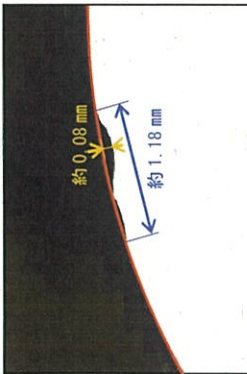
✓ M-4のプロファイル



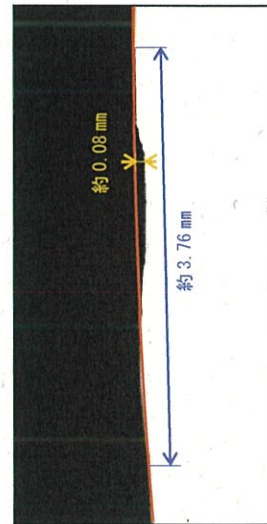
断面①



断面②



断面③



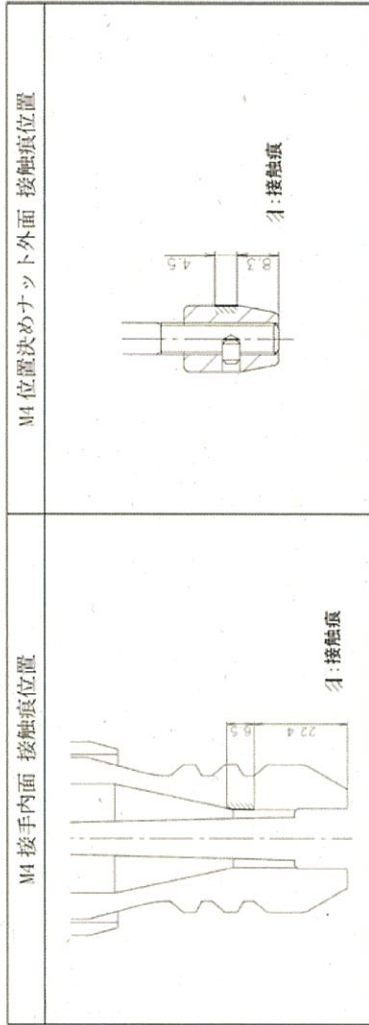
断面④

白線：型取り形状
赤線：設計形状（参考）

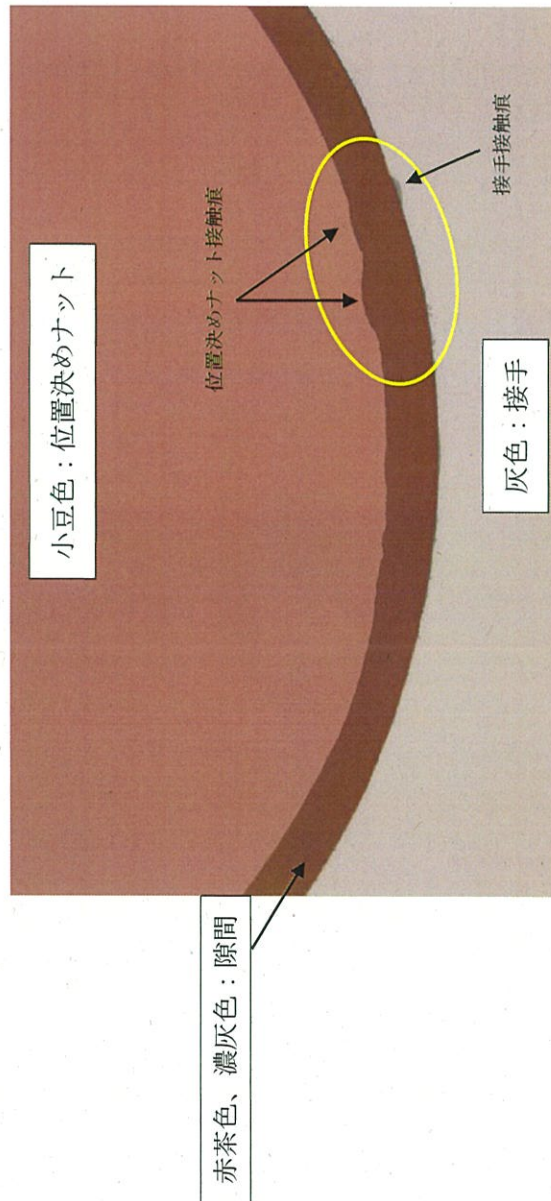
部位	計測値 (mm)
位置決めナットの接触痕	長さ：約 4.5
	幅：約 1.5
	深さ：約 0.08

M-4の調査結果

✓ 接手内面と位置決めナットの接触痕は、共に線状であり、方向も一致している。



接手内面および位置決めナットの接触痕位置

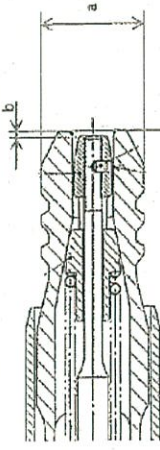
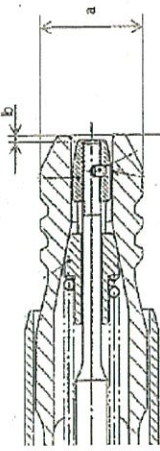
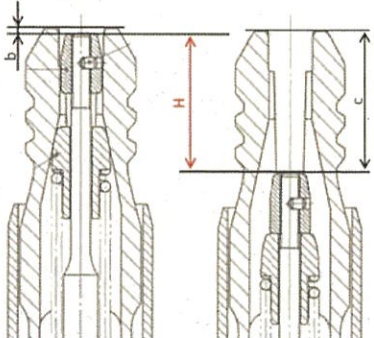
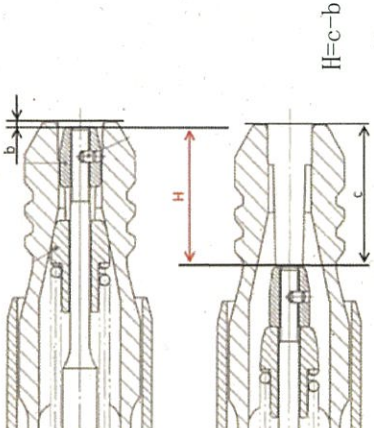


接手内面および位置決めナット接触痕の型取り重ね合わせ結果

- 位置決めナットの直線部と接手の内面の直線部が接触する位置であり、位置決めナットの上下降時に生じた可能性がある
- 幾何学的に接触痕発生には介在物が関与した可能性が高く、接触痕の大きさは約1mm程度のもので存在している可能性がある

接手および位置決めナットの型取り

駆動軸

調査項目	M-4 の調査結果	比較対象アドレスの調査結果													
接手部の寸法計測	<p>✓ 設計上想定される寸法を満足</p>  <table border="1" data-bbox="430 1220 582 1915"> <thead> <tr> <th>計測値 (mm)</th> <th>参考値 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td> <td>39.6</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>1.3</td> </tr> </tbody> </table>	計測値 (mm)	参考値 (mm)	a	39.6	b	1.3	<p>✓ M-4 と有意差なし、設計上想定される寸法を満足</p>  <table border="1" data-bbox="430 459 582 1153"> <thead> <tr> <th>計測値 (mm)</th> <th>参考値 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td> <td>38.9 (M-12) 39.0 (J-7)</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>1.3 (M-12) 1.2 (J-7)</td> </tr> </tbody> </table>	計測値 (mm)	参考値 (mm)	a	38.9 (M-12) 39.0 (J-7)	b	1.3 (M-12) 1.2 (J-7)	<ul style="list-style-type: none"> 駆動軸取り外し位置でのM-4接手寸法に問題なし
計測値 (mm)	参考値 (mm)														
a	39.6														
b	1.3														
計測値 (mm)	参考値 (mm)														
a	38.9 (M-12) 39.0 (J-7)														
b	1.3 (M-12) 1.2 (J-7)														
駆動軸 駆動軸取り外し軸動作点検	<p>✓ 位置決めナットのストロークは設計寸法を満足</p>  <table border="1" data-bbox="1077 1243 1181 1937"> <thead> <tr> <th>計測値 (mm)</th> <th>設計値 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H</td> <td>45.8</td> </tr> </tbody> </table>	計測値 (mm)	設計値 (mm)	H	45.8	<p>✓ 同左、M-4 と有意差なし</p>  <table border="1" data-bbox="1077 459 1181 1153"> <thead> <tr> <th>計測値 (mm)</th> <th>設計値 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H</td> <td>45.4 (M-12) 45.7 (J-7)</td> </tr> </tbody> </table>	計測値 (mm)	設計値 (mm)	H	45.4 (M-12) 45.7 (J-7)	<ul style="list-style-type: none"> M-4 位置決めナットのストロークに問題なし 比較対象軸との有意差なし 				
計測値 (mm)	設計値 (mm)														
H	45.8														
計測値 (mm)	設計値 (mm)														
H	45.4 (M-12) 45.7 (J-7)														

枠囲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。

堆積物の調査結果

1. 調査対象

番 号	アドレス	使用期間	選定理由	
R 4 5	M- 4	1 5 C y	当該制御棒クラスタ	
R 4 7	M- 1 2	1 5 C y	比較対象	制御棒クラスタの使用期間が同等
R 6 6	J- 7	1 C y		炉心中心近傍のアドレス

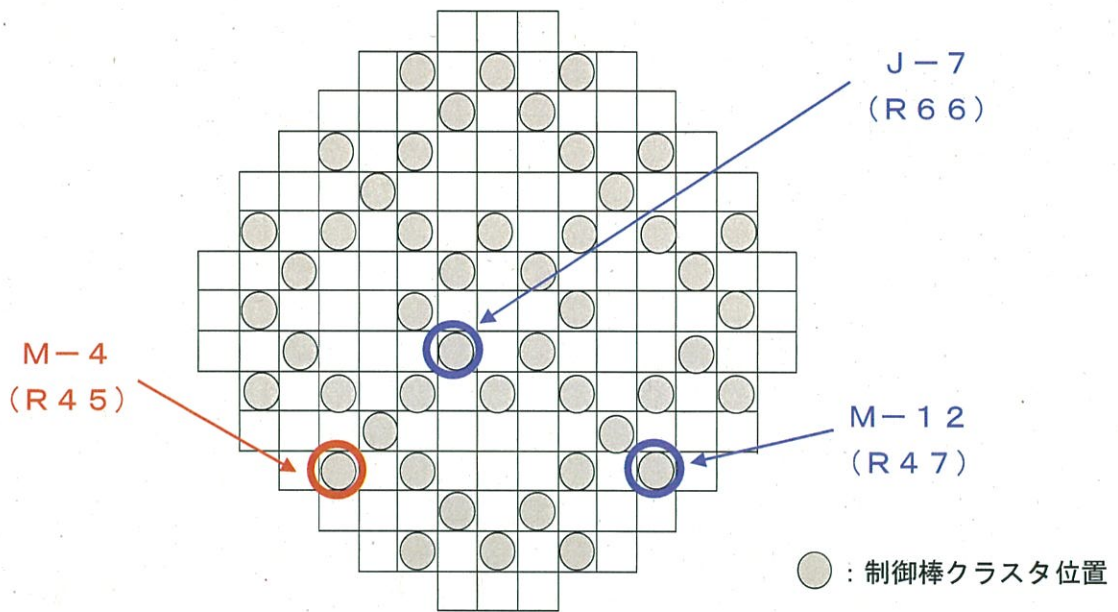


図-1 制御棒クラスタのアドレス

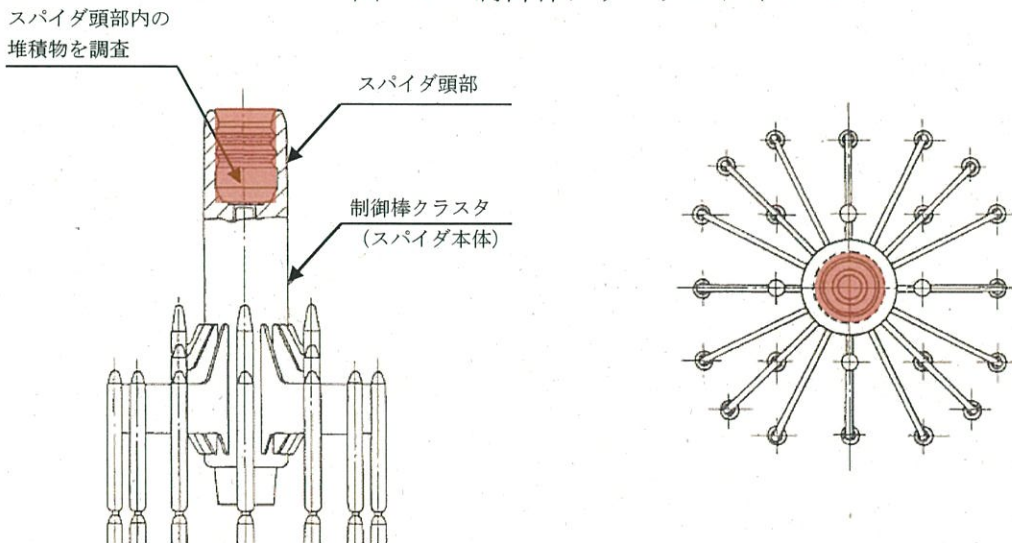


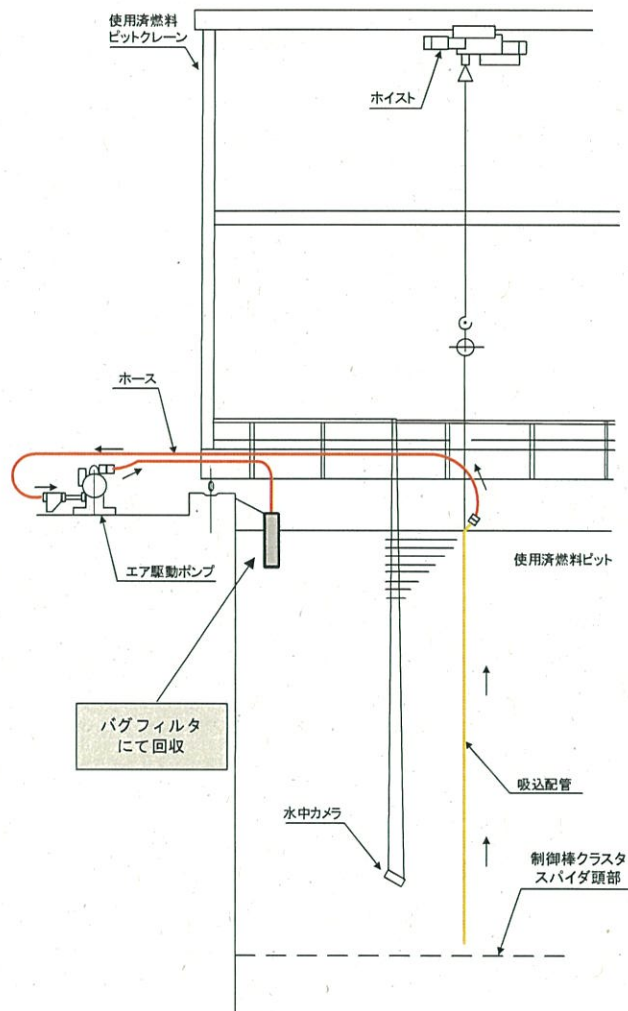
図-2 制御棒クラスタ・スパイダ頭部詳細図

2. 調査内容

(1) 堆積物の確認

- ・ 原子炉格納容器内にて制御棒クラスタのスパイダ頭部全体の外観確認をした水中カメラ（白黒）映像について、堆積物の観点で再確認する。
- ・ 使用済燃料ピット内において、水中カメラにて制御棒クラスタのスパイダ頭部内の堆積物を確認するとともに、堆積物を回収する。

図－3に堆積物回収の状況概要図を示す。



図－3 堆積物回収の状況概要図

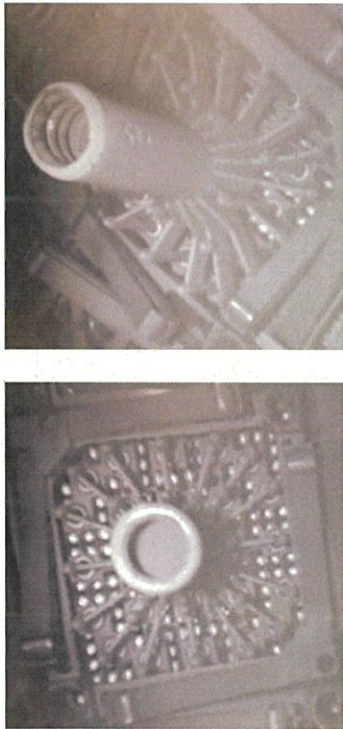
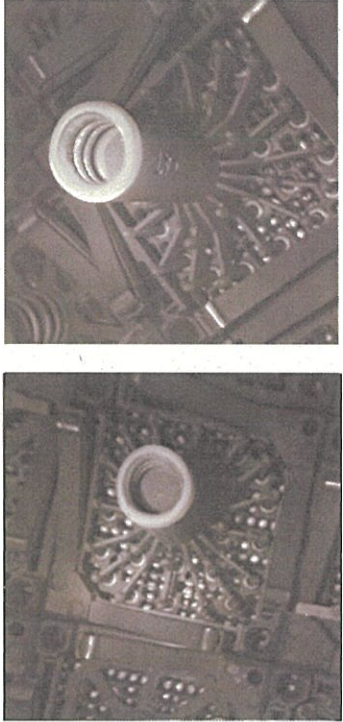
(2) 堆積物のサイズ、形状の確認

- (1) で回収した堆積物について、サイズおよび形状等を確認する。

(3) 堆積物の分析

- (1) で回収した堆積物について、走査電子顕微鏡 (SEM) 観察するとともに、電子線プローブマイクロアナライザ (EPMA) による組成分析およびX線回折による形態分析を行う。

(1) 堆積物の確認結果

調査項目	M-4の調査結果	比較対象アドレスの調査結果	
制御棒クラスタ	【原子炉容器内点検】 ✓ 水中カメラ（白黒）により、スパイダ頭部を確認したところスパイダ内部に堆積物あり	【原子炉容器内点検】 ✓ 同左	スパイダ頭部に堆積物が確認された
堆積物			M-4の堆積物はスパイダ頭部内底部の円形の機械加工模様が見えないう程度
スパイダ頭部	M-12	M-12	M-4の堆積物はスパイダ頭部内の上から三山目よりも下の領域に堆積
	J-7	J-7	

調査項目	制御棒クラスタ 堆積物 スパイダ頭部	M-4の調査結果	【使用済燃料ピット内点検】 ✓ 水中カメラ（カラール）による詳細確認の結果、スパイダ内部に堆積物あり 【堆積物回収前】   【堆積物回収後】 	比較対象アドレスの調査結果	【使用済燃料ピット内点検】 ✓ 同左 【堆積物回収前】   M-12 J-7 【堆積物回収後】   M-12 J-7	・スパイダ頭部に堆積物が確認された ・燃料移送中の横倒しにより堆積物に偏りが生じている
------	--------------------------	----------	---	---------------	--	--

○堆積物量の推定

原子炉格納容器内で撮影された写真より、M-4の堆積物は制御棒クラスタのスパイダ頭部の上から三山目より下の領域に堆積しており、スパイダ頭部の三山目より下の容積である約20cc相当の堆積物があったと推定される。(図-4)

なお、スパイダ頭部内に堆積物があったとしても、駆動軸接手廻りには隙間があるため、駆動軸がスパイダ頭部内の堆積物を押しのけてスパイダ頭部に挿入される。また、駆動軸と制御棒クラスタの結合作業にあたっては、駆動軸取り外し工具の指示管(インジケータロッド)が完全に下降していることを確認したうえで、重量確認と位置確認により確実に結合していることを確認している。(図-5)

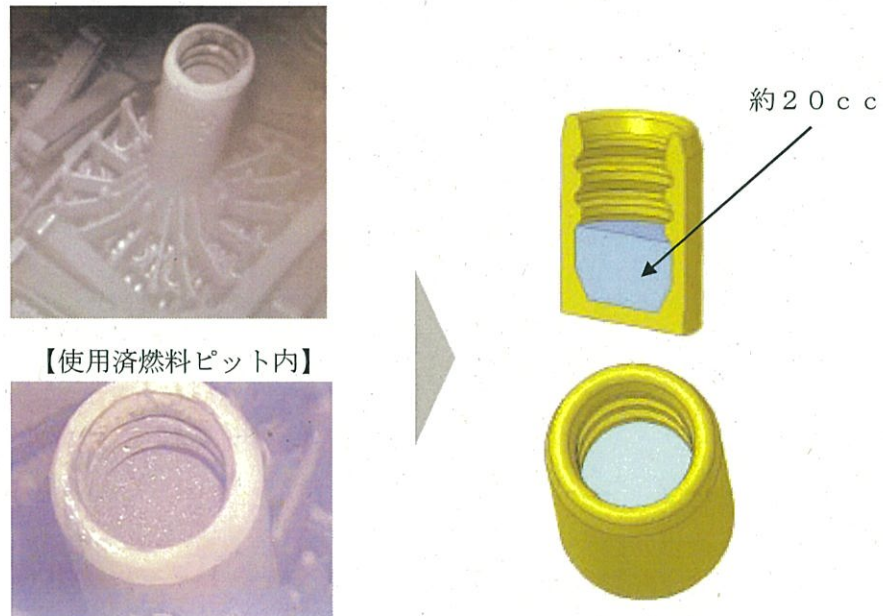


図-4 スパイダ頭部内の堆積物の状況

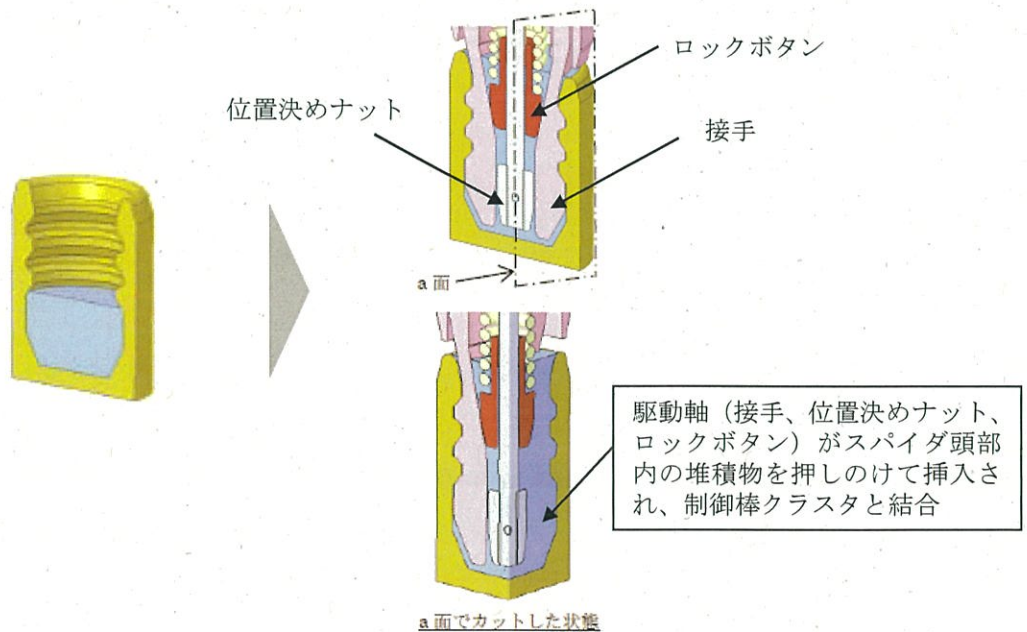


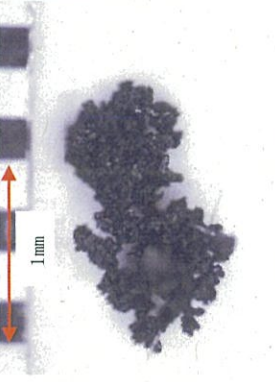
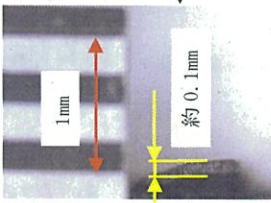
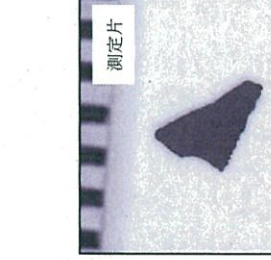



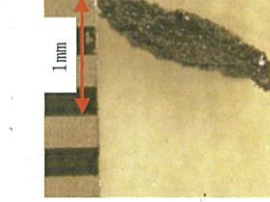
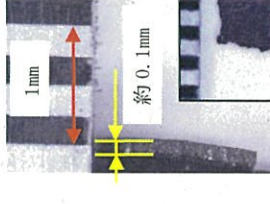
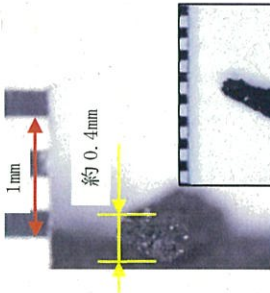
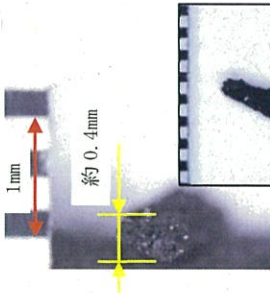
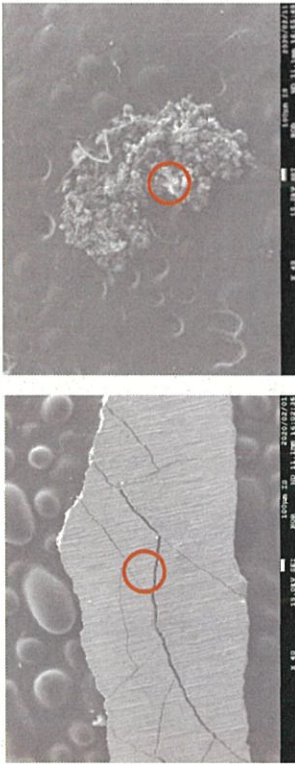
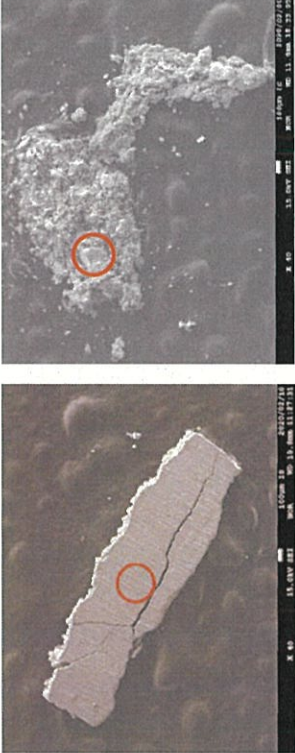


図-5 駆動軸と制御棒クラスタの結合状況

(2) 堆積物のサイズ、形状の確認結果

調査項目	M-4 の調査結果	比較対象アドレスの調査結果	
堆積物	<p>✓ 粒子状：黒色</p> <p>✓ 薄膜状：黒色、数 mm 程度の大きさ</p> <p>【回収した堆積物（一部）】</p>  <p>【実体顕微鏡写真（一部）】</p>  <p>M-4 薄膜状</p>  <p>M-4 粒子状</p>  <p>※ 測定片を立てて 厚さ方向を計測</p>  <p>M-4 薄膜状（厚さ）</p>	<p>✓ 粒子状：黒色</p> <p>✓ 薄膜状：黒色、数 mm 程度の大きさ（M-12のみ）</p> <p>【回収した堆積物（一部）】</p>  <p>M-12</p> <p>【実体顕微鏡写真（一部）】</p>  <p>M-12 薄膜状</p>  <p>J-7</p>  <p>M-12 粒子状</p>  <p>※ 測定片を立てて 厚さ方向を計測</p>  <p>J-7 薄膜状（厚さ）</p>  <p>J-7 粒子状（厚さ）</p>	<ul style="list-style-type: none"> M-4 のスパイダヘッド内から回収した堆積物は黒色の粒子状および薄膜状であり、薄膜状の堆積物は数 mm 程度の大きさで厚さは 0.1mm 程度 堆積物のサイズ形状については、M-4 と M-12 で差なし J-7 は粒子状のみ回収された

(3) 堆積物の分析結果

調査項目	M-4 の調査結果	比較対象アドレスの調査結果																																																																																					
SEM画像	 <p>M-4 薄膜状</p> <p>M-4 粒子状</p> <p>○ : 測定点</p>	 <p>M-12 薄膜状</p> <p>M-12 粒子状</p> <p>J-7 粒子状</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 薄膜状の堆積物には、ひび割れが認められることから脆いと推定される ・ なお、ひび割れは回収および分析の過程で付いた可能性もある ・ 粒子状の堆積物は数十～数百μmの粒子が集まって形成されている 																																																																																				
組成分析・X線回折	<p>組成分析 (単位: atom%)</p> <table border="1" data-bbox="957 481 1364 1870"> <thead> <tr> <th>元素名 試料名</th> <th>B</th> <th>C[※]</th> <th>O</th> <th>Al</th> <th>Si</th> <th>P</th> <th>Cl</th> <th>Ca</th> <th>Cr</th> <th>Fe</th> <th>Ni</th> <th>Zn</th> <th>X線回折 主成分</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>M-4 薄膜状</td> <td>6.1</td> <td>2.7</td> <td>55.1</td> <td>-</td> <td><1</td> <td><1</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>1.3</td> <td>31.0</td> <td>1.8</td> <td><1</td> <td>Fe₃O₄</td> </tr> <tr> <td>M-4 粒子状</td> <td>-</td> <td>14.5</td> <td>52.2</td> <td><1</td> <td><1</td> <td>-</td> <td><1</td> <td>-</td> <td><1</td> <td>30.7</td> <td><1</td> <td>-</td> <td>Fe₃O₄</td> </tr> <tr> <td>M-12 薄膜状</td> <td>6.2</td> <td>4.2</td> <td>53.8</td> <td>-</td> <td><1</td> <td><1</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>1.1</td> <td>33.1</td> <td>1.1</td> <td>-</td> <td>Fe₃O₄</td> </tr> <tr> <td>M-12 粒子状</td> <td>3.1</td> <td>5.8</td> <td>60.6</td> <td>-</td> <td><1</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td><1</td> <td>29.2</td> <td><1</td> <td>-</td> <td>Fe₃O₄</td> </tr> <tr> <td>J-7 粒子状</td> <td>6.7</td> <td>5.1</td> <td>53.0</td> <td>-</td> <td><1</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td><1</td> <td>33.5</td> <td><1</td> <td>-</td> <td>Fe₃O₄</td> </tr> </tbody> </table> <p>※. 測定バックグラウンドの影響によるCも検出されていると考えられる。</p>			元素名 試料名	B	C [※]	O	Al	Si	P	Cl	Ca	Cr	Fe	Ni	Zn	X線回折 主成分	M-4 薄膜状	6.1	2.7	55.1	-	<1	<1	-	-	1.3	31.0	1.8	<1	Fe ₃ O ₄	M-4 粒子状	-	14.5	52.2	<1	<1	-	<1	-	<1	30.7	<1	-	Fe ₃ O ₄	M-12 薄膜状	6.2	4.2	53.8	-	<1	<1	-	-	1.1	33.1	1.1	-	Fe ₃ O ₄	M-12 粒子状	3.1	5.8	60.6	-	<1	-	-	-	<1	29.2	<1	-	Fe ₃ O ₄	J-7 粒子状	6.7	5.1	53.0	-	<1	-	-	-	<1	33.5	<1	-	Fe ₃ O ₄
元素名 試料名	B	C [※]	O	Al	Si	P	Cl	Ca	Cr	Fe	Ni	Zn	X線回折 主成分																																																																										
M-4 薄膜状	6.1	2.7	55.1	-	<1	<1	-	-	1.3	31.0	1.8	<1	Fe ₃ O ₄																																																																										
M-4 粒子状	-	14.5	52.2	<1	<1	-	<1	-	<1	30.7	<1	-	Fe ₃ O ₄																																																																										
M-12 薄膜状	6.2	4.2	53.8	-	<1	<1	-	-	1.1	33.1	1.1	-	Fe ₃ O ₄																																																																										
M-12 粒子状	3.1	5.8	60.6	-	<1	-	-	-	<1	29.2	<1	-	Fe ₃ O ₄																																																																										
J-7 粒子状	6.7	5.1	53.0	-	<1	-	-	-	<1	33.5	<1	-	Fe ₃ O ₄																																																																										
堆積物	<ul style="list-style-type: none"> ・ 主成分はFeとOであった ・ 堆積物はFe₃O₄(マグネサイト)であった 																																																																																						

4. 調査結果まとめ

(1) 堆積物の確認

制御棒クラスタのスパイダ頭部内で確認された堆積物量に関し、原子炉容器内の水中カメラ（白黒）確認では、M-4、M-12、J-7共にスパイダ底部の機械加工模様が堆積物で覆われていた。その後の使用済燃料ピット内の水中カメラ（カラー）確認では、堆積物の偏り傾向を確認した。堆積物の偏りは燃料移送中の制御棒クラスタの横倒しに影響したと考えられる。原子炉容器内で撮影された写真より、M-4の堆積物は制御棒クラスタのスパイダ頭部の上から三山目より下の領域に堆積しており、スパイダ頭部の三山目より下の容積である約20cc相当の堆積物があったと推定される。

(2) 堆積物のサイズ・形状

堆積物のサイズ、形状については、黒色の粒子状および薄膜状の形状であり、M-4で回収された薄膜状の堆積物は数mm程度の大きさであり厚さは0.1mm程度であった。また、M-4とM-12で堆積物のサイズ、形状に差はなく、J-7では粒子状の堆積物のみ回収された。

(3) 堆積物の分析

堆積物のSEM画像を確認した結果、M-4とM-12で回収された薄膜状の堆積物は一体構造であるがひび割れが認められることから脆い物質と推定される。一方、M-4、M-12、J-7で回収された粒子状の堆積物は数十～数百 μm の粒子が集まって形成されていることが確認された。また、EPMAによる組成分析およびX線回折による形態分析を実施した結果、薄膜状の堆積物はマグネタイト(Fe_3O_4)であった。粒子状の堆積物も同様にマグネタイト(Fe_3O_4)であった。

(4) まとめ

以上から、制御棒クラスタ(M-4、M-12、J-7)のスパイダ頭部内で確認された堆積物(スラッジ)は硬くて脆い性質であるマグネタイトであり、1次冷却材中に一般的に存在する鉄の酸化物の一種である。

堆積物(スラッジ)の生成過程については次項で考察するが、プラント起動初期段階の高溶存酸素環境において駆動軸内表面で生成した鉄酸化物が、運転時間の経過に伴いマグネタイトに変態したもの、または1次冷却系統内の機器から1次冷却材中に溶出した鉄イオンが、機器・部品表面に付着してマグネタイトとなり、それが剥離し堆積したもの(スラッジ)と推定される。

また、制御棒クラスタ48体のうち、上記3体以外の制御棒クラスタ45体についても使用済燃料ピット内で外観確認を実施したところ、上記の3体と同様に堆積物があり、過去の定検でも確認されている。

5. スパイダ頭部の堆積物（スラッジ）生成過程について

スパイダ頭部にスラッジが堆積する現象には次の2つのケースが考えられる。

- ① 駆動軸内表面で生成したマグネタイトが剥離、落下、堆積
- ② 1次冷却系統内で生成したマグネタイトが当該部に侵入、堆積

(1) 駆動軸内表面で生成

a. プラント起動初期段階

ケース①のマグネタイト生成には2つの可能性が考えられる。1つは「プラント起動初期段階の高溶存酸素環境における生成」である。原子炉容器上蓋上の制御棒クラスタ駆動装置（CRDM）圧力ハウジングは、その構造上、1次冷却系統水張時に空気が残留する。そのため、プラント起動初期段階のCRDM圧力ハウジング内には加圧された空気が残留し、CRDM圧力ハウジング内部は溶存酸素が有意に高くなる期間が存在する（図-6参照）。

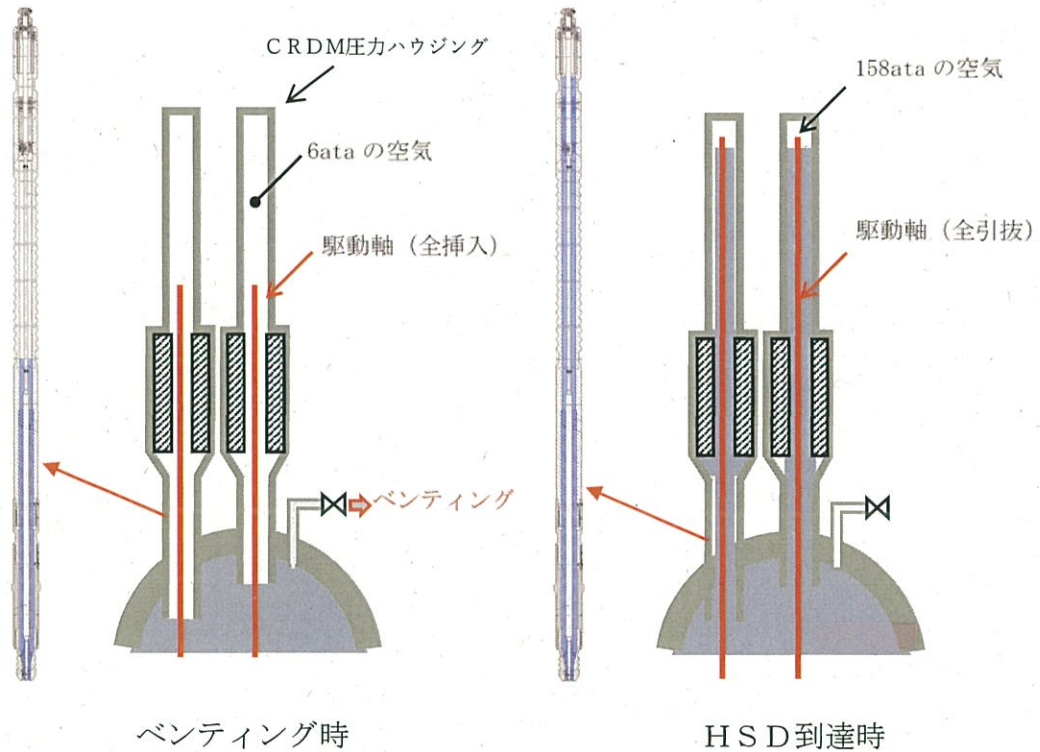


図-6 プラント起動初期のCRDM圧力ハウジング内部の環境

プラント起動初期の駆動軸は全引抜状態にあり（制御バンクDは除く）、この際、駆動軸内側は全長にわたり高溶存酸素・高温環境に置かれ、SUS410製駆動軸内表面では鉄酸化物が生成する。運転時間の経過に伴って、生成した鉄酸化物はマグネタイトに変態するため、駆動軸内面のマグネタイト生成量にはプラント起動段階の高溶存酸素環境における鉄酸化物量が関与する。

b. プラント運転中

もう1つは「プラント運転中の1次冷却材環境における生成」である。プラント運転中の駆動軸接手と制御棒クラスタのスパイダ頭部は図-7に示す結合状態にあり、図-7の緑色の経路（駆動軸の保護筒下端と制御棒クラスタのスパイダ頭部の隙間）を経て鉄イオンを含む1次冷却材が駆動軸内部に浸入する。

運転中の駆動軸近傍は下端が300℃前後、上端が■■■■℃前後の条件にあると推定され、駆動軸内部では温度差（密度差）を駆動源とする1次冷却材の自然循環流が生じている可能性が考えられる。（図-8参照）

一般的に、1次冷却材中の鉄イオン溶解度は温度の関数であることから、駆動軸内部を循環する過程の温度変化に伴って溶解度が変化し、析出した鉄イオンが駆動軸内表面でマグネタイトを形成する可能性が考えられる。

上記のa. 項、b. 項を考え合わせると、駆動軸内面では高溶存酸素環境で生成した初期マグネタイトと1次冷却材環境で生成したマグネタイトが重畳し、時間の経過とともに成長する。そして、ある時期に剥離、脱落して制御棒クラスタのスパイダ頭部に堆積する可能性が考えられる。堆積物調査で確認された数mmの大きさの薄膜状の堆積物がこれに該当している可能性が高く、また、脱落の過程で粒子状に変化することもあると考えられる。

(2) 1次冷却系統内で生成

ケース②は駆動軸外部で生成したマグネタイトが図-7の黄色の経路（駆動軸の保護筒下端と制御棒クラスタのスパイダ頭部の隙間）を経てスパイダ頭部と駆動軸接手の隙間部に侵入し堆積することになる。粒子状のスラッジの一部がこれに該当すると考えられる。

駆動軸の保護筒下端と制御棒クラスタのスパイダ頭部の隙間は数mm程度と狭いことから、今回、スパイダ頭部内で確認された堆積物は、ケース①の駆動軸内表面で生成したマグネタイトが剥離、落下、堆積したもののほうが比較的多いと推定される。

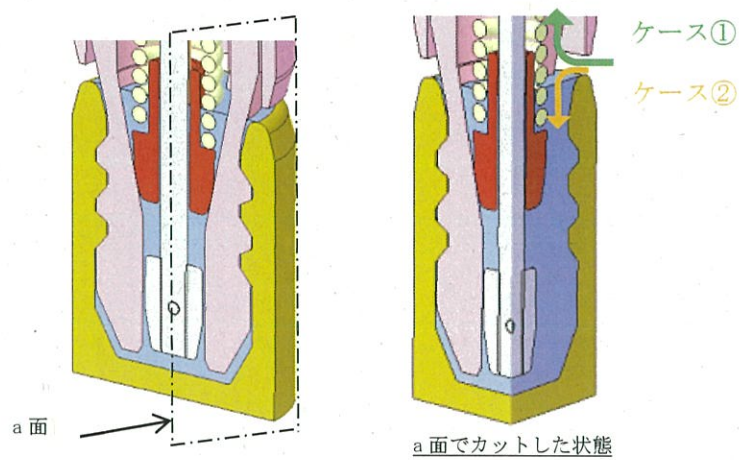


図-7 スパイダ頭部内への侵入経路

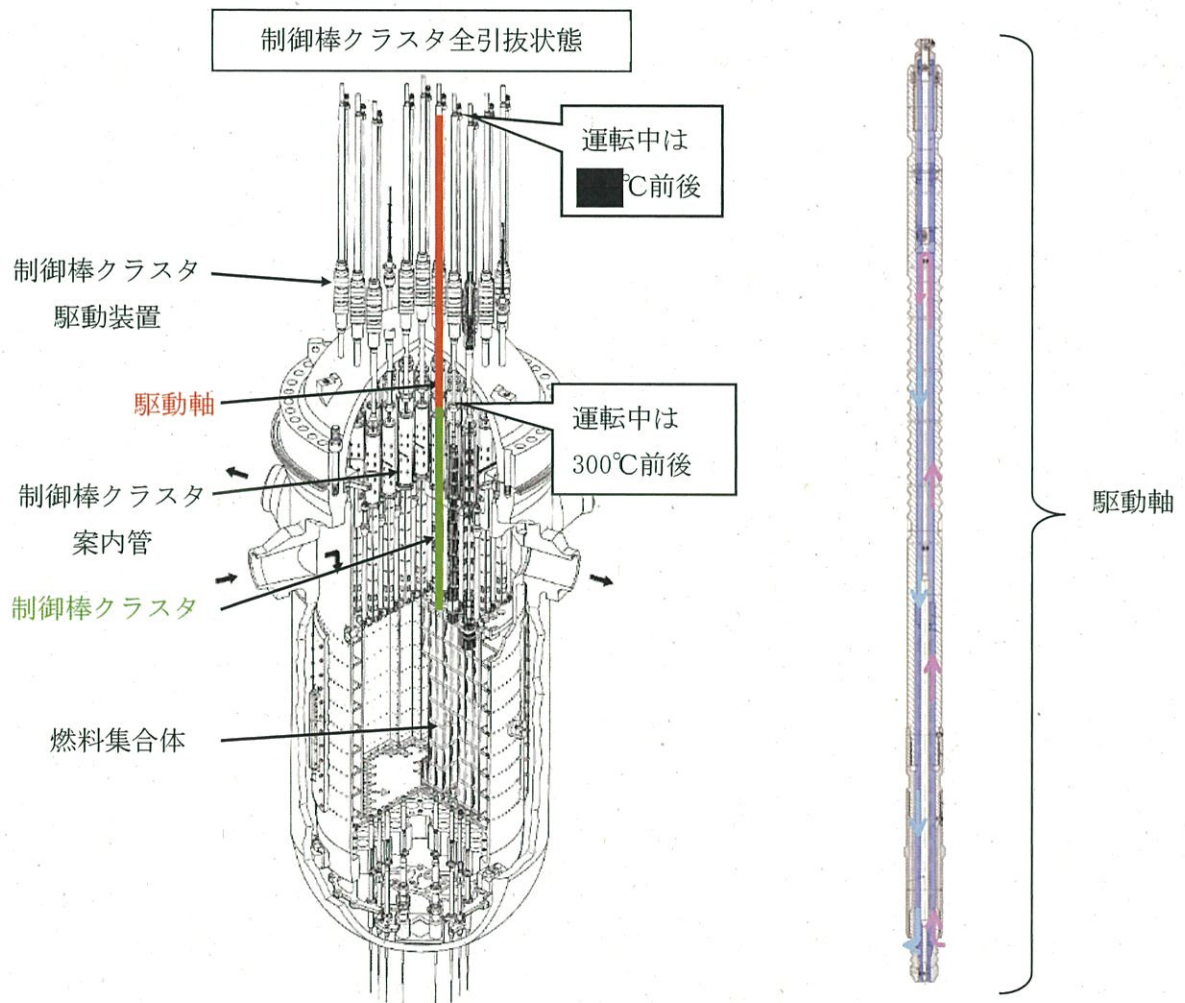


図-8 運転中の駆動軸・制御棒クラスタ位置と駆動軸内部の自然循環流

枠囲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。

6. 1次冷却材中の堆積物（スラッジ）の挙動

1次冷却材中のスラッジ（今回、スパイダ頭部内で確認されたスラッジも一部含む）については、1次冷却材系統や化学体積制御系統などを循環、対流する間に細かく微粒子状になり、冷却材フィルタ等で捕捉される。

プラント停止操作に伴う脱ガス運転時、1次冷却材系統において、水質分析用フィルタで回収されたスラッジの性状を表-1に示す。

また、化学体積制御系統に設置された冷却材フィルタ等の配置を示す系統図を図-9に、過去の冷却材フィルタ等の交換実績を表-2に示す。冷却材フィルタ等は主に定検時に取り替え、固体廃棄物処理設備にて処理を行う。冷却材フィルタ等の取替頻度は、長期停止の影響により3-13運転サイクルで多いものの、運転サイクル期間で比較した場合はいずれの運転サイクルも同程度の取替頻度であった。

鉄の酸化物の一種であるマグネタイトは従来から1次冷却系統内に存在するものであり、これまでこれが原因で燃料集合体等に損傷を与えるような事象は発生していないことから、原子炉施設の安全性に影響を与えるものではない。

また、制御棒クラスタのスパイダ頭部内で確認された堆積物（スラッジ）は、粒子状もしくは脆い薄膜状のマグネタイトであることが確認されており、切粉などの金属片ではないことから、仮に一次冷却材中に流出したとしても、フレットィング※1により燃料棒を摩耗させることはなく、燃料健全性に影響はない。

※1 切粉などの金属片が燃料集合体の支持格子と燃料棒の間にはさまり、1次冷却材の流体振動により燃料棒を摩耗させ、燃料棒に微小孔（ピンホール）が発生する現象

表-1 1次冷却材系統で回収されたスラッジの性状

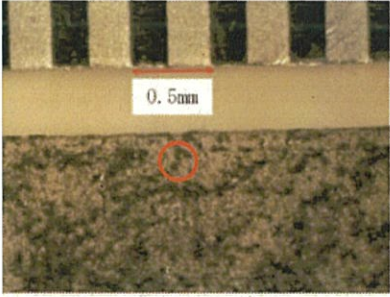
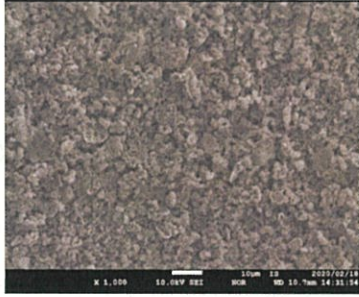

実態顕微鏡写真	SEM画像	
 <p>○ : SEM画像取得箇所</p>		<ul style="list-style-type: none"> 数μmの粒子で構成された黒色の微粒子状のスラッジが認められるが、スパイダ頭部内で確認されたような粒子状および薄膜状の堆積物（スラッジ）はない
<p>✓ 水質分析用フィルタ</p> 	<p>採取場所：ループB（高温側） 採取方法：0.45μmのフィルタでろ過 採取量：5L</p>	<ul style="list-style-type: none"> 通常運転中の採取であればフィルタに着色はないが、採取量が多いと左記のように黒色の着色が見られる

表-2 冷却材フィルタ等の取替実績

運転 サイクル	期 間	脱塩塔入口 フィルタ※1	冷却材 フィルタ※2	備 考
3-11	平成20年9月 ～ 平成22年1月	2回	0回	
3-12	平成22年1月 ～ 平成23年4月	1回	2回	
3-13	平成23年4月 ～ 平成29年10月	12回	3回	長期停止の影響
3-14	平成29年10月 ～ 令和元年12月	4回	2回	
3-15	令和元年12月 ～	0回	0回	2月末現在

※1 脱塩塔入口フィルタ (メッシュサイズ : $0.45\mu\text{m}$ 、取替基準 : フィルタ差圧)
 ※2 冷却材フィルタ (メッシュサイズ : $1\mu\text{m}$ 、取替基準 : フィルタ差圧)

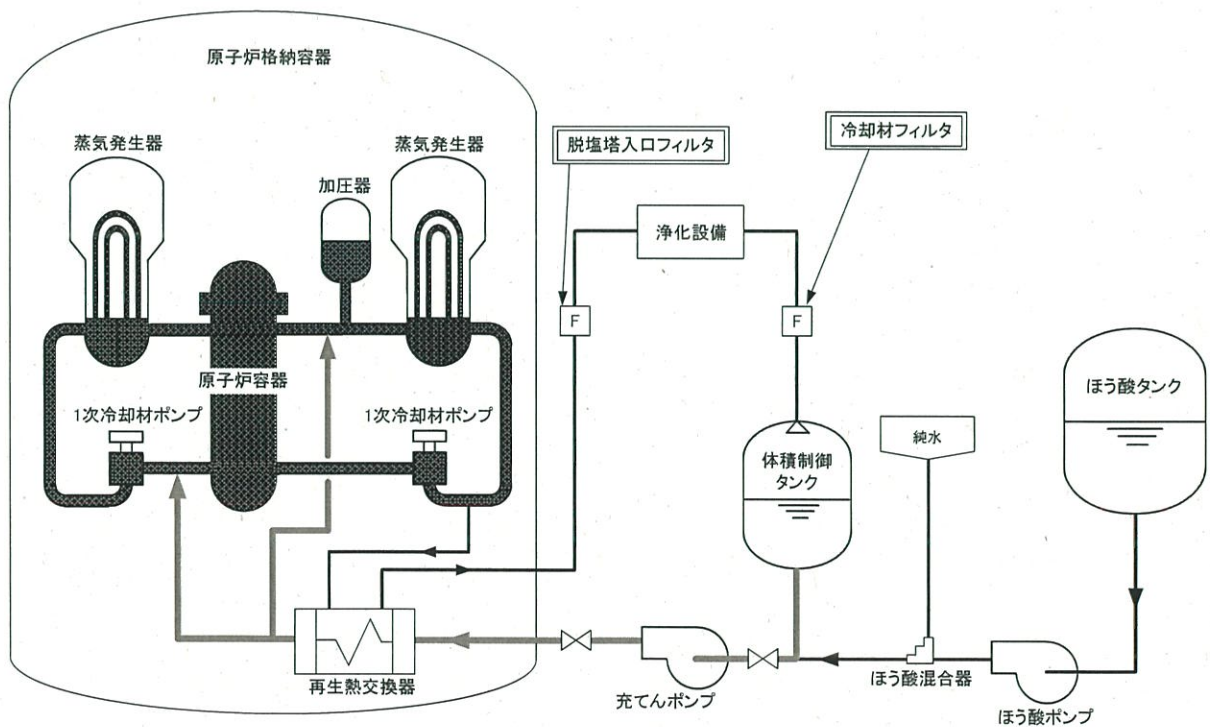
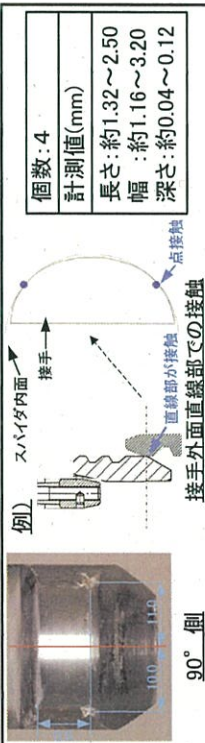


図-9 冷却材フィルタ等の配置を示す系統図

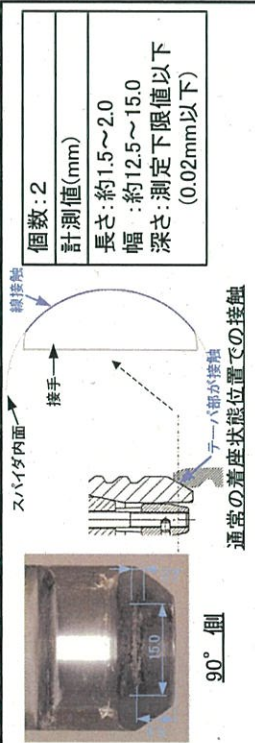
①、②、③、④ 接手外面直線部



個数: 4
計測値(mm)
長さ: 約1.32~2.50
幅: 約1.16~3.20
深さ: 約0.04~0.12

・M-4の接手外面直線部に金属光沢を有する接触痕が確認された。金属光沢を有しており、比較対象には確認されていないことから、今回生じた可能性がある。
・接触痕は、比較対象(M-12)と比べて有意に深かった。
・接触痕は、スパイダ頭部の内面と4点で取り合う箇所に対応し、通常着座位置とは異なる位置で生じた可能性がある。

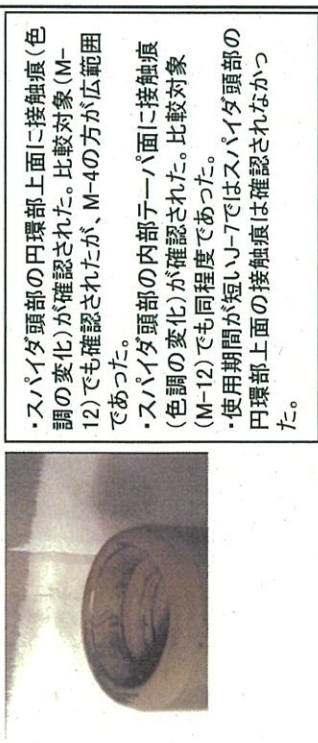
⑤ 接手外面テーパー部



個数: 2
計測値(mm)
長さ: 約1.5~2.0
幅: 約12.5~15.0
深さ: 測定下限値以下 (0.02mm以下)

・M-4の接手外面テーパー部に周方向の接触痕(金属光沢なし)が確認された。比較対象でも同様であり、切り離し操作後の駆動軸置きでスパイダ頭部の内面と線状に取り合う箇所に相当し、通常の着座状態で生じたと考えられる。

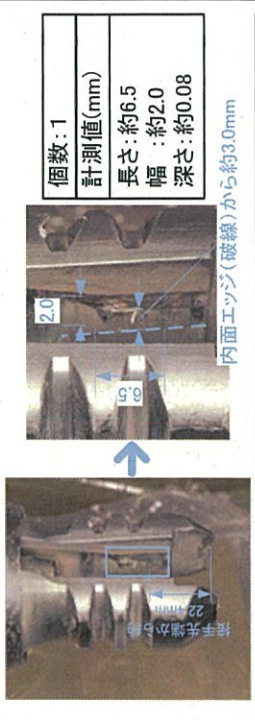
⑧ 制御棒クラスタのスパイダ頭部



・スパイダ頭部の円環部上面に接触痕(色調の変化)が確認された。比較対象(M-12)でも確認されたが、M-4の方が広範囲であった。
・スパイダ頭部の内部テーパー面に接触痕(色調の変化)が確認された。比較対象(M-12)でも同程度であった。
・使用期間が短いJ-7ではスパイダ頭部の円環部上面の接触痕は確認されなかった。

⑥、⑦ 接手内面直線部と位置決めナット直線部

⑥ 接手内面直線部



個数: 1
計測値(mm)
長さ: 約6.5
幅: 約2.0
深さ: 約0.08

・M-4の接手内面直線部に金属光沢を有する線状の接触痕が確認された。金属光沢を有しており、比較対象にないことから今回生じた可能性がある。
・接触痕は、位置決めナット/ロックボタンが摺動する部位に相当する。

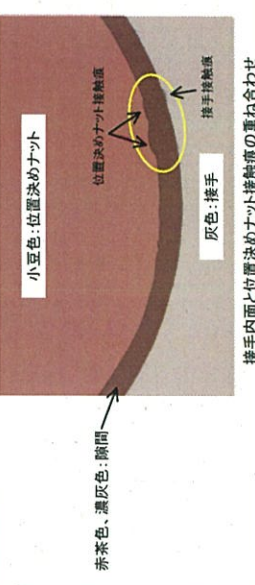
⑦ 位置決めナット直線部



個数: 1
計測値(mm)
長さ: 約4.5
幅: 約1.5
深さ: 約0.08

・M-4の位置決めナット直線部に線状の接触痕が確認された。比較対象にないことから今回生じた可能性がある。

⑥、⑦ 接手内面と位置決めナットの重ね合わせ



・接触痕は、接手内面直線部と位置決めナット直線部が接触する取り合いであり、位置決めナットの上下降時に生じた可能性がある。
・幾何学的に接触痕発生には介在物が関与した可能性が高く、接触痕の大ききから、介在物は約1mm程度の大きさのものが存在していた可能性がある。

接触痕および堆積物まとめ (2 / 2)

① 堆積物の確認結果

【原子炉格納容器内】

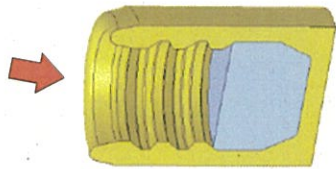


【使用済燃料ピット内】



<制御棒クラスタ>

- ・スパイダ頭部内(M-4, M-12, J-7)に堆積物が確認された。
- ・M-4の堆積物はスパイダ頭部の三山目より下の容積である約20cc相当の堆積物があったと推定される。



③ SEM画像、組成分析、X線回折



○ : 組成分析・X線回折測定点

<組成分析>

- ・M-4, M-12, J-7の薄膜状および粒子状の堆積物ともに、主成分はFeとOであった。

<SEM画像>

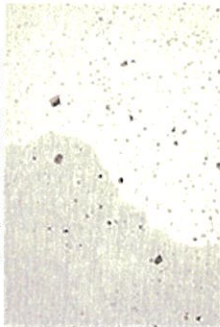
- ・薄膜状の堆積物は、ひび割れが認められることから脆いと推定される。
- ・粒子状の堆積物は数 μ mの粒子が集まって形成されている。

<X線回折>

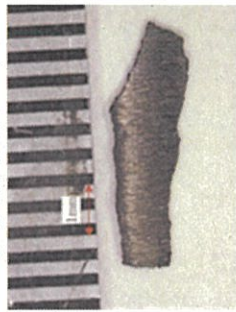
- ・M-4, M-12, J-7の薄膜状および粒子状の堆積物ともに、 Fe_3O_4 (マグネタイト)であった。

② 堆積物のサイズ・形状

【回収した堆積物(一部)】



【実体顕微鏡写真(一部)】



M-4 薄膜状

M-4 粒子状

<サイズ・形状>

- ・M-4のスパイダ頭部内から回収した堆積物は黒色の粒子状または薄膜状の形状であり、薄膜状の堆積物は数mm程度の大きさで厚さは0.1mm程度。
- ・堆積物のサイズ形状については、M-4とM-12で差なし。
- ・J-7は粒子状のみ回収された。

製造履歷等調査結果

製造履歴調査結果

○駆動軸

・材料調査

部品名称	材料	記録確認結果
接手	SUS403 (JIS G 4303)	材料成績書記載値が、規格値を満足していることを確認した。
保護筒	SUS410 (JIS G 4303)	同上
ロックボタン	コバルト合金	同上
位置決めナット	SUS304 (JIS G 4303)	同上
取り外しボタン	SUS410 (JIS G 4303)	同上
ロックばね、軸用ばね	NCF750 相当 (JIS G 4901)	同上

・寸法調査

部品名称	記録確認結果
駆動軸	全体組立寸法記録により、設計どおりの寸法で製作されていることを確認した。
ロックばね、軸用ばね	ばね試験成績書により、設計どおりの寸法で製作されていることを確認した。

・製造時作動試験

部品名称	記録確認結果
駆動軸	駆動軸と模擬制御棒クラスタを組み合わせたのステッピング試験により、両者の嵌合に問題がなかったことを確認した。

・熱処理調査

部品名称	記録確認結果
接手	熱処理記録により、駆動軸接手の熱処理が適切に実施されていることを確認した。

○制御棒クラスタ

・材料調査

部品名称	材料	記録確認結果
スパイダ本体	SUS304 相当 (ASTM A276 304)	材料成績書記載値が、規格値を満足していることを確認した。

・製造時試験検査（寸法調査含む）

部品名称	記録確認結果
制御棒クラスタ	試験検査記録により、設計どおりの寸法で製作されていることを確認した。 また、模擬駆動軸接手による嵌合性に問題がないことを確認した。

○制御棒クラスタ案内管

・製造時拘束力試験

部品名称	記録確認結果
制御棒クラスタ案内管 (上部炉心構造物)	上部炉心構造物に組み込まれた制御棒クラスタ案内管単体に対する拘束力試験で、制御棒クラスタ案内管と制御棒クラスタのインターフェースに問題が無いことを確認した。

点検履歴調査結果

定検回	実施時期※1	駆動軸	制御棒クラスタ
第13回	平成23年4月 ～ 平成28年8月	外観点検	外観点検
		<ul style="list-style-type: none"> 長期停止後の再稼働に向けた点検において、駆動軸48本全数を取り外しての外観点検を実施し、異常がないことを確認した。 (平成28年6月) 	<ul style="list-style-type: none"> 定期事業者検査(制御棒クラスタ検査(I3-107))にて、制御棒クラスタの機能、性能に影響を及ぼす恐れのある損傷、変形がないことを確認した。 (平成23年6月)
第14回	平成29年10月 ～ 平成30年10月	—	外観点検
			<ul style="list-style-type: none"> 定期事業者検査(制御棒クラスタ検査(I3-107))にて、同上の確認を行った。 (平成29年12月)

※1 定検の解列～並列までの期間を記載

運転履歴調査結果

1. サーベランス結果

保安規定第22条において、モード1，2（臨界状態）においては、サーベランスにて、3カ月に1回、全挿入されていない制御棒をバンク毎に動かして、各制御棒位置が変化することにより、制御棒が固着していないことを確認することとなっている。

サーベランスは、出力変動を伴う制御棒制御バンクDと、その他の制御棒で日程を分けて実施している。サーベランスの確認事項としては、各制御棒を実際に操作し、制御棒位置指示装置にて制御棒が挿入、引き抜きされたことを確認することを要求している。3-14サイクル期間中に実施した各サーベランス結果を表-1に示す。

また、3-14サイクル運転履歴から、定格熱出力運転中に制御棒位置が変化した記録および制御棒が落下した記録は確認されておらず、制御棒にスリップが発生していないことを確認した。

サーベランスおよび3-14サイクル運転履歴確認の結果により、期間中において制御棒動作機能について問題ないことを確認した。

表-1. 3-14サイクル制御棒動作試験サーベランス結果

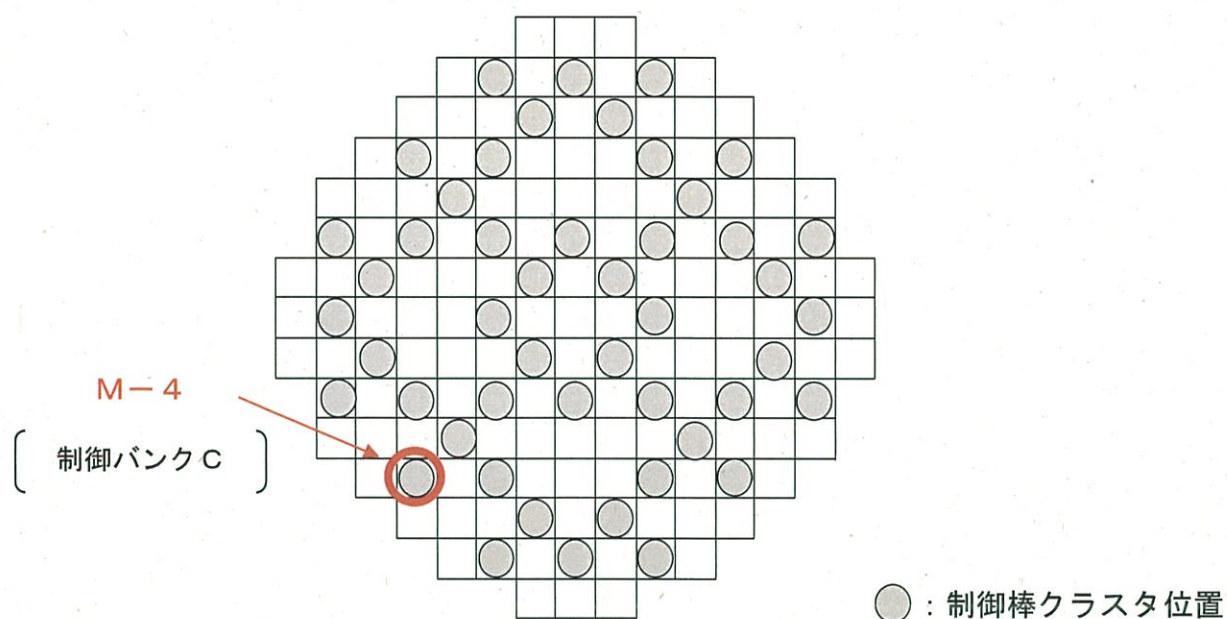
制御バンクD以外		制御バンクD	
サーベランス日時	サーベランス結果	サーベランス日時	サーベランス結果
平成30年11月16日	良	平成30年12月16日	良
平成31年 1月10日	良	平成31年 2月17日	良
平成31年 3月14日	良	平成31年 4月14日	良
令和元年 5月 9日	良	令和元年 6月23日	良
令和元年 7月11日	良	令和元年 8月11日	良
令和元年 9月12日	良	令和元年10月20日	良
令和元年11月 6日	良	令和元年12月15日	良

2. プラント停止操作における制御棒動作の確認

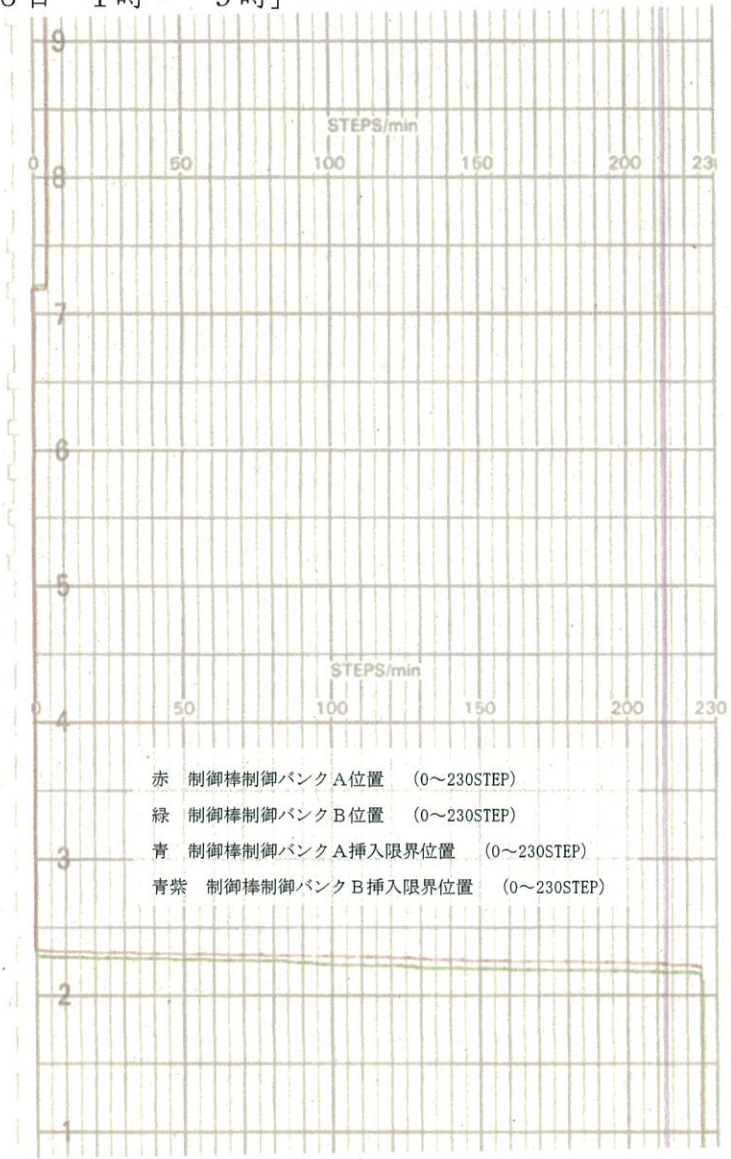
本定検のプラント停止操作における制御棒動作を記録により確認した。なお、今回引き上がり事象のあった制御棒は、制御バンクCのものである。

制御棒に対する制御信号、プラント停止時の警報履歴、および制御棒位置の記録により、制御棒制御信号と制御棒位置に偏差が生じたような記録は確認されておらず、制御棒にスリップが発生していないことを確認したことから、プラント停止操作中における制御棒動作機能について問題ないことを確認した。

○当該制御棒クラスタのアドレス



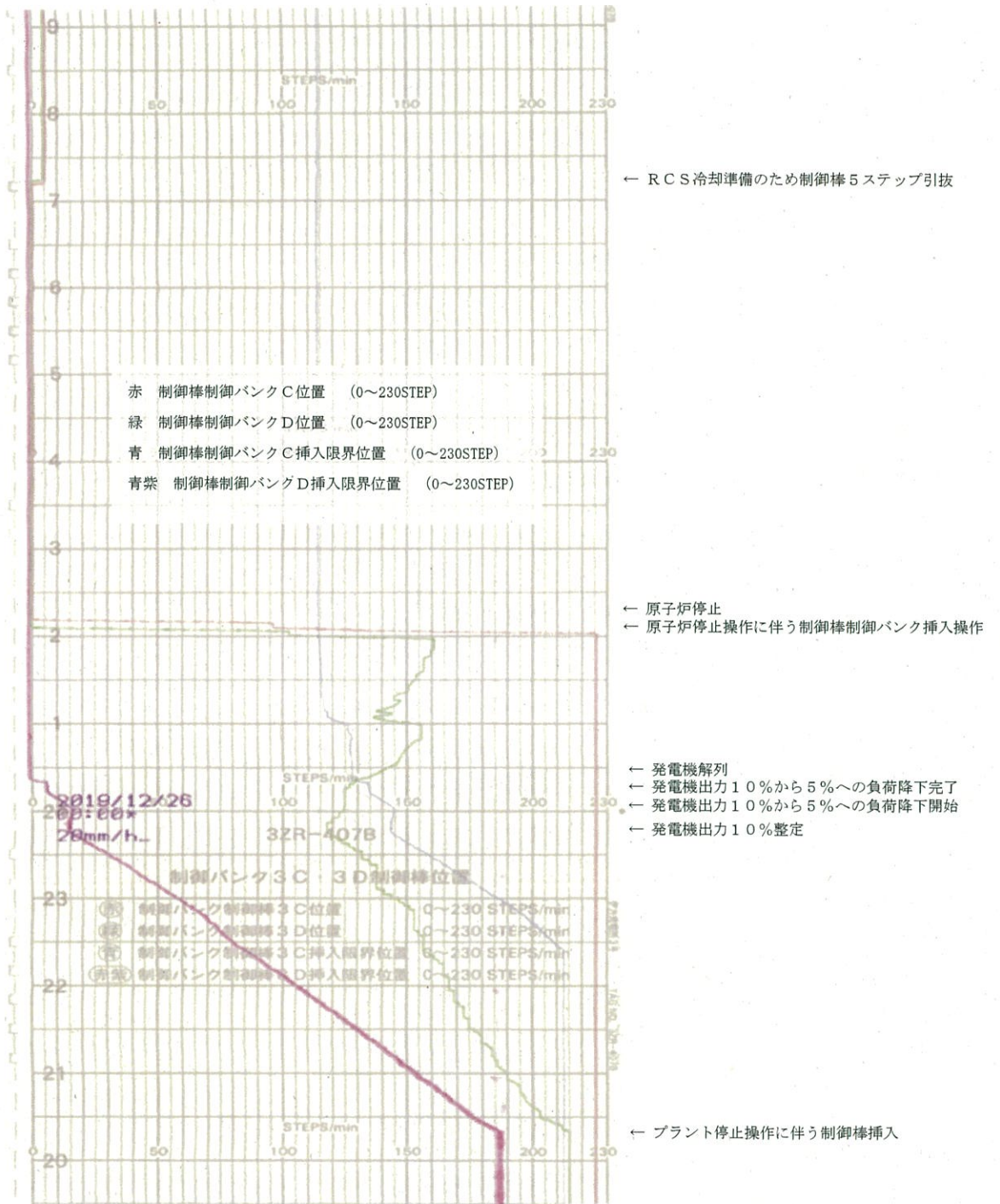
○制御棒位置 制御バンク A・B 制御棒位置
 [12月26日 1時～ 9時]



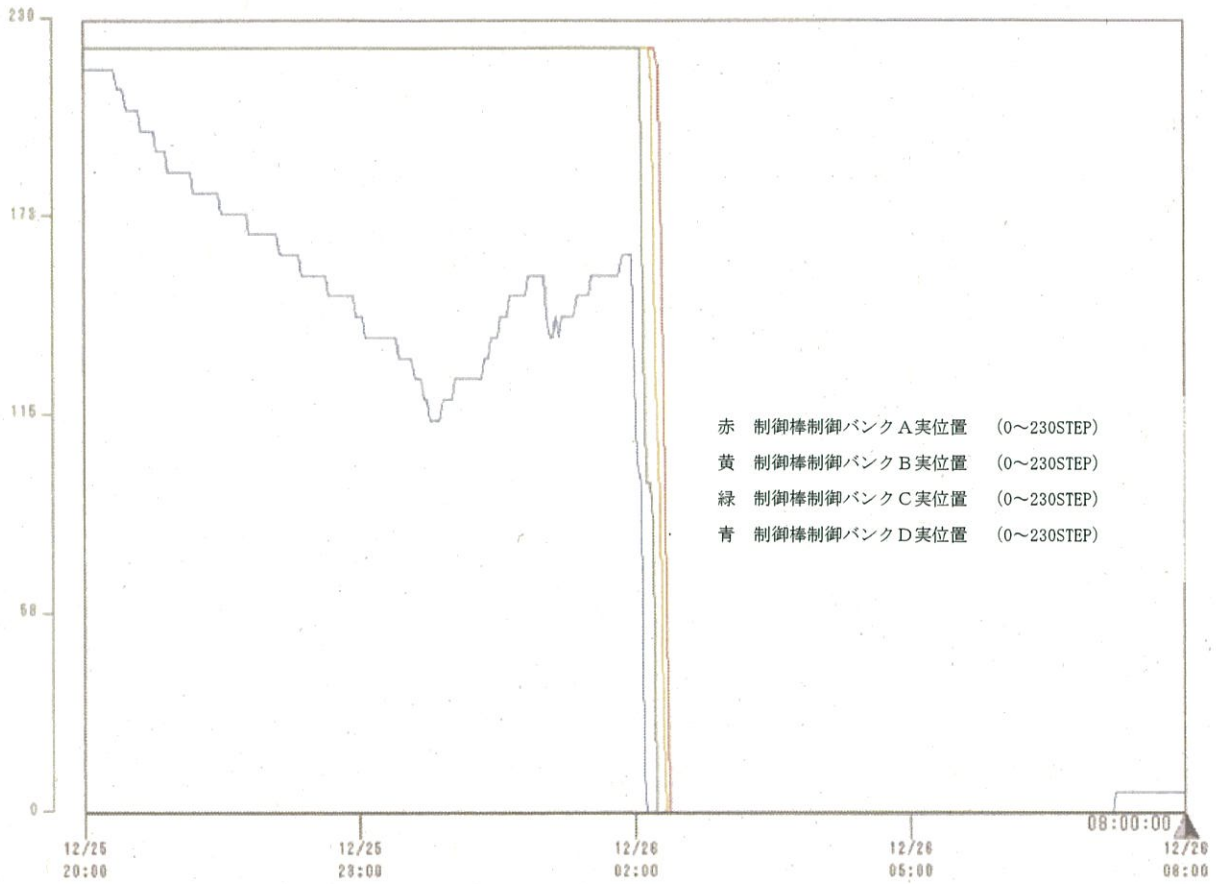
← RCS冷却準備のため制御棒5ステップ引抜

← 原子炉停止
 ← 原子炉停止操作に伴う制御棒制御バンク挿入操作

○制御棒位置 制御バンク C・D 制御棒位置
 [12月25日20時~26日 9時]



○制御棒位置 制御バンク A・B・C・D制御棒位置
 [12月25日20時～26日 8時]



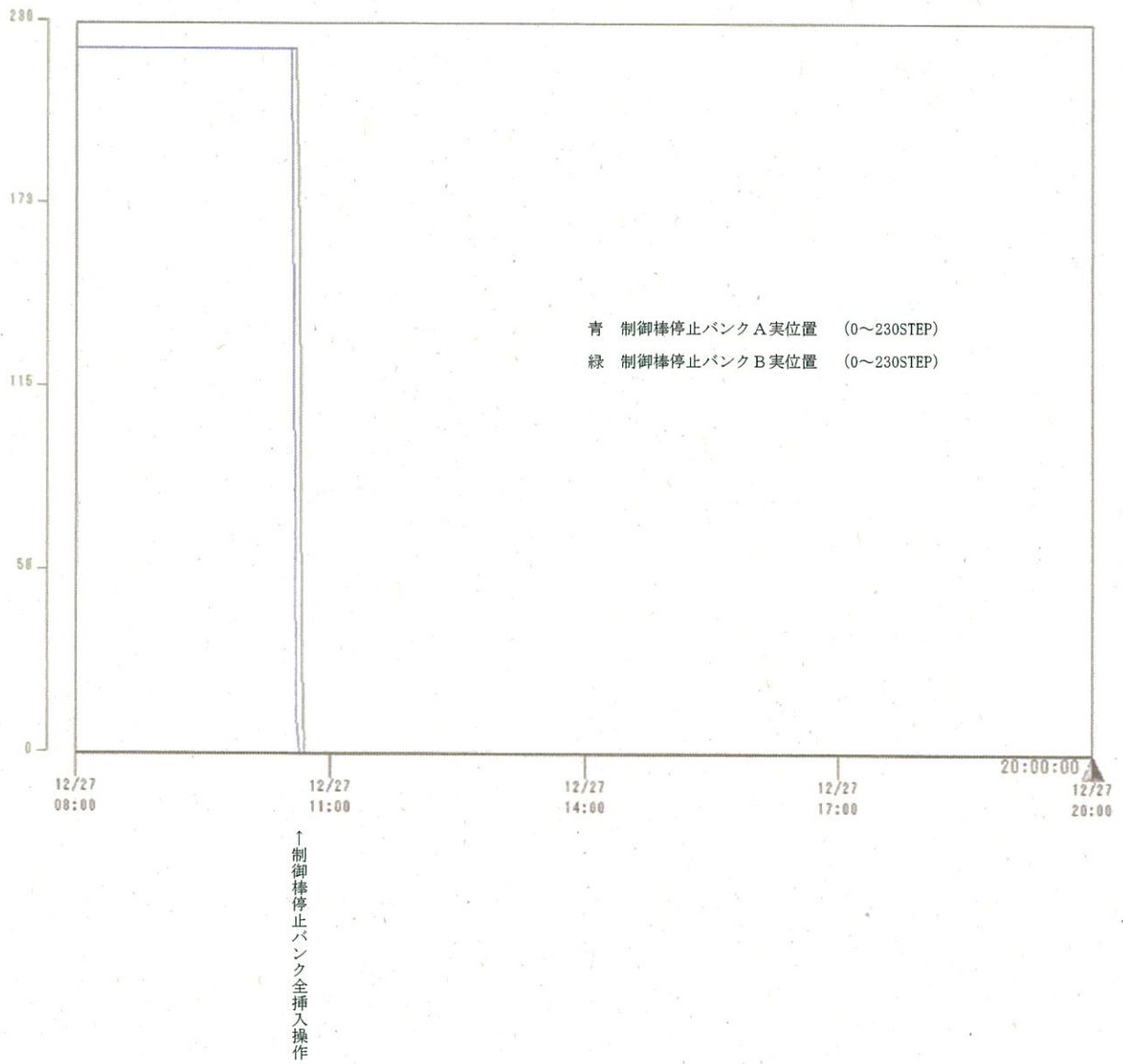
↑プラント停止操作に伴う制御棒挿入

↑発電機出力10%から5%への負荷降下開始
 ↑発電機出力10%整定
 ↑発電機解列

↑原子炉停止に伴う制御棒制御バンク挿入操作
 ↑原子炉停止

↑RCS冷却準備のため制御棒5ステップ引抜

○制御棒位置 停止バンク A・B 制御棒位置
[12月27日 8時～27日20時]



3. 駆動軸取り外し工具の駆動源の確認

駆動軸取り外し工具の駆動源である所内用空気について確認した。

所内用空気が、0.69MPa以下となれば、中央制御室に警報が発信する機能を有しているが、事象発生付近において所内用空気圧力の異常を示す警報の発信は確認されず、駆動軸取り外し工具の駆動源である所内用空気の圧力に異常な低下がないことを確認した。

4. 燃料取替作業時の余熱除去流量の制限について

燃料取替作業時の燃料取出完了までは、余熱除去系統にて、燃料の崩壊熱を除去し、1次冷却材系統の温度を維持している。

燃料取替作業時の余熱除去流量は原則 $300\text{ m}^3/\text{h}$ とする。余熱除去流量制限は以下の2つの相反する条件を満足するため、設けられている。

- ・RCS（1次冷却材系統）温度管理のため冷却水流量の確保
- ・UCI（上部炉心構造物）、燃料、R/V（原子炉容器）隔離蓋作業時の水流による揺れ防止のための流量制限

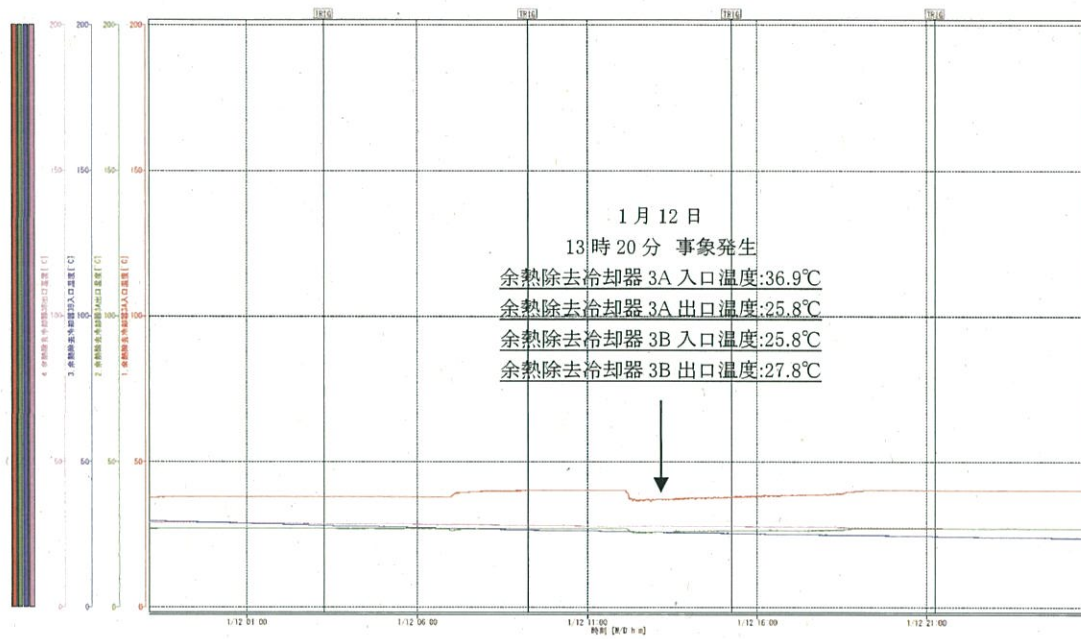
また、RCS温度が維持できない場合は、 $350\text{ m}^3/\text{h}$ までの流量増加を可能とするが、水流による影響を受けやすいので次の期間は、流量の増加を禁止している。

- ・UCI吊り上げ時、吊り込み時
 - ・燃料取り出し前と装荷後の炉内点検のように投げ込み式カメラを使用する場合
- また、 $350\text{ m}^3/\text{h}$ まで流量増加しても温度維持ができない場合は、燃料取り扱い機器操作者との連絡調整を行い、徐々に流量調整を行うものとしている。

これらの事項を遵守し、燃料取替中の1次冷却材温度が $45\text{ }^\circ\text{C}$ 以下となるように管理している。

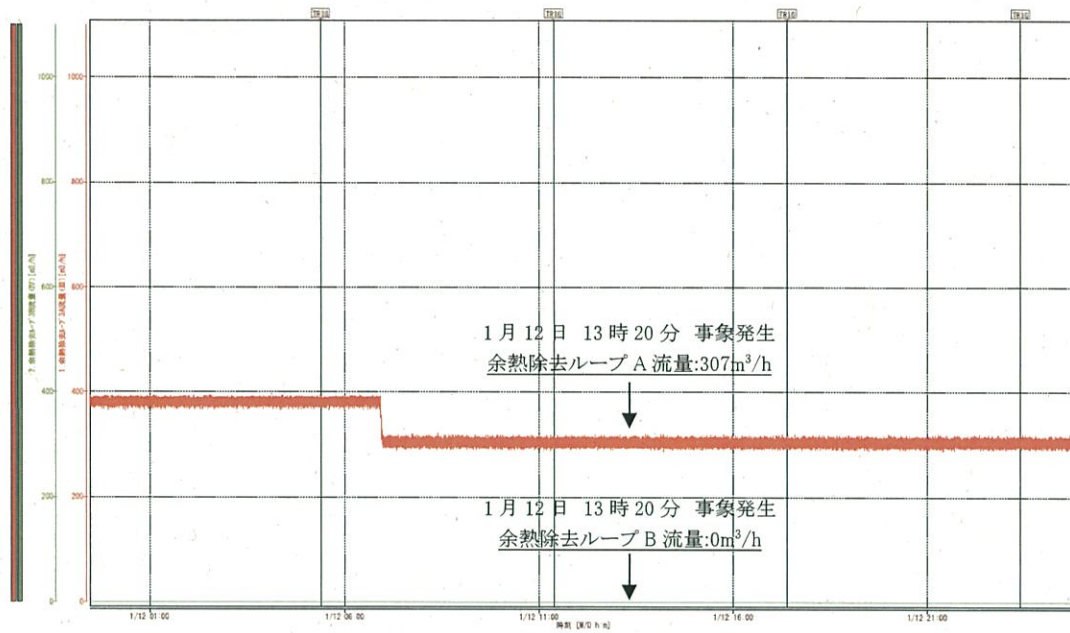
○余熱除去冷却器入口・出口温度

[1月12日 1時00分～21時00分]



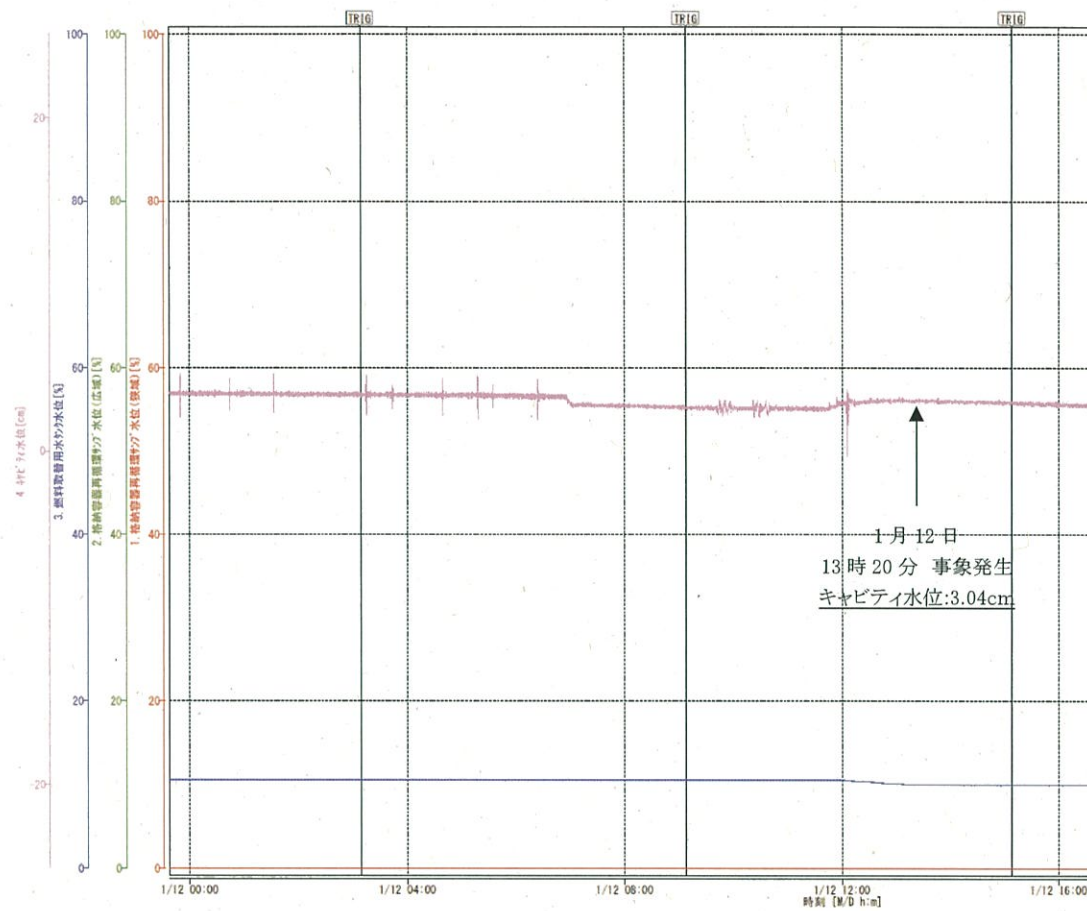
○余熱除去ループA, B流量

[1月12日 1時00分~21時00分]



○キャビティ水位

[1月12日 0時00分~16時00分]



類似事例調査結果

1. 制御棒クラスタ引き上がり事象の類似事例調査

(1) 国内事例

国内の加圧水型軽水炉において燃料取出前の上部炉心構造物吊り上げ時に同時に制御棒クラスタが引き上がった事象は確認されなかった。

(2) 海外事例

海外の加圧水型軽水炉において、燃料取出前の上部炉心構造物吊り上げ時に同時に制御棒クラスタが引き上がった事象について調査した結果、表－1のとおり5件の事例を確認した。

海外の発電事業者は、一部に原因は特定できていない事例はあるものの、全ての事例において、推定される原因に対して作業要領の見直し等により再発防止対策を行っている。

2. 駆動軸に関する不具合事象の事例調査

(1) 国内事例

国内の加圧水型軽水炉において駆動軸の不具合事例を抽出した結果、表－2のとおり7件の事例を確認した。

当該不具合事例が制御棒クラスタ引き上がりに発展する可能性を踏まえても、伊方3号機における今回の事象の発生原因となる可能性は無いことを確認した。

(2) 海外事例

海外の加圧水型軽水炉において駆動軸の機械的なトラブル事例を抽出した結果、表－2のとおり5件の事例を確認した。

当該不具合事例が制御棒クラスタ引き上がりに発展する可能性を踏まえても、伊方3号機における今回の事象の発生原因となる可能性は無いことを確認した。

表一 1 制御棒クラスタ引き上がり事象の類似事例 (海外)

発電所	発生日	制御棒数 ^{※1}	推定原因		主な対策		当社の状況
			当社の状況	推定原因	当社の状況	主な対策	
HBロビンソン ^{※2} (米国)	1974. 5. 26	1	<p>【作業ミスの疑い】</p> <ul style="list-style-type: none"> 工具類及び手順書の不備を確認できなかったことから、制御棒クラスタと駆動軸の切り離し作業中に何らかの作業を怠ったと推測される。 	<ul style="list-style-type: none"> 作業記録および聞き取り調査より、定められた手順どおりに操作が行われていることを確認した。 	<ul style="list-style-type: none"> ①各切り離し作業後の重量確認を追加した。 	<ul style="list-style-type: none"> ①従来から実施済み 	
トル ^{※2} (ベルギー)	1976. 11. 15	9	<p>【作業ミスの疑い】</p> <ul style="list-style-type: none"> 作業ミスにより制御棒クラスタと駆動軸が部分的に再結合したと推測される。 	<ul style="list-style-type: none"> 作業記録および聞き取り調査より、定められた手順どおりに操作が行われていることを確認した。 	<ul style="list-style-type: none"> ①各切り離し作業後の重量確認の追加した。 ②全切り離し作業終了後、キャビティ水位を駆動軸上端部まで下げての駆動軸高さを確認を追加した。 	<ul style="list-style-type: none"> ①従来から実施済み ②キャビティ水位を下げずに各切り離し作業後に駆動軸高さを確認を実施 	
7エッパ/A1号 ^{※2} (フランス)	1979. 3. 17	3	<p>【作業ミス】</p> <ul style="list-style-type: none"> 手順書に記載されている作業を怠ったことにより制御棒クラスタと駆動軸が再結合した。 	<ul style="list-style-type: none"> 作業記録および聞き取り調査より、定められた手順どおりに操作が行われていることを確認した。 	<ul style="list-style-type: none"> ①各切り離し作業の前後に、駆動軸上端部の高さを確認を追加した。 	<ul style="list-style-type: none"> ①従来から実施済み 	
ピュ ^{※2} (フランス)	1981. 7. 20	48 (全数)	<p>【作業ミス】</p> <ul style="list-style-type: none"> 作業手順書とチェックシートの不整合により、不完全な切り離し作業となり、制御棒クラスタと駆動軸が再結合した。また、切り離し確認手順が抜けたこととで再結合に気付かなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> 今回の作業手順書は過去の定検時と同様であり、過去の定検時に同様の事象は発生していない。また、作業手順書とチェックシートは整合している。 	<ul style="list-style-type: none"> ①作業要領書の内容を忠実にチェックシートに追記した。 ②各切り離し作業の前後に、駆動軸上端部の高さを確認を追加した。 	<ul style="list-style-type: none"> ①作業要領書とチェックシートは整合 ②従来から実施済み 	
セント ^{※3} (米国)	1997. 10. 27	1	<p>【作業ミス、設備不良】</p> <ul style="list-style-type: none"> 作業ミスにより制御棒クラスタと駆動軸の部分的な結合が継続した。 当該駆動軸の摩耗力が高い状態であり、切り離し作業に手間取った。 	<ul style="list-style-type: none"> 作業記録および聞き取り調査より、定められた手順どおりに操作が行われていることを確認した。 駆動軸動作確認により、駆動軸取外し軸の上下動作に問題は無く、他の駆動軸とも有意な差は無いことを確認した。 	<ul style="list-style-type: none"> ①音声付き水中カメラでの結合/切り離し作業の確認を必須としたが、現在、新工器具を導入したことにより廃止している。 ②全結合/切り離し作業終了後の重量確認を追加したが、現在、全結合/切り離し作業終了後の重量確認は実施しておらず、各結合/切り離し作業後の重量確認のみ実施している。 	<ul style="list-style-type: none"> ①当該プラントの新工具相 ②各結合/切り離し作業後の重量確認は従来から実施済み 	

※1：同時に引き上がった制御棒クラスタの数

※2：出典 (IPSN, Analyse De L' Incident Du 20 Juillet 1981 A La Centrale Nucleaire De Bugey - Tranche 2, "Extraction Intempestive des Grappes de Contrôle Lors de la Levée des Internes Supérieurs", Dec. 1982)

※3：出典 (Nuclear Regulatory Commission - Home Page ; LICENSEE EVENT REPORT DOCKET NUMBER: 05000335)

表一 2 駆動軸に関する不具合事象の事例 (国内)

発電所	発生日	事象概要	推定原因	主な対策	今回の事象との関連
美浜発電所1号 ^{※1}	1981. 8. 18	定期検査中に、上部炉心構造物の駆動軸頂部が他に比較して教せん程度低いことを確認した。駆動軸を点検調査した結果、ピックアップボタン部に怪傷があるのを確認した。	原子炉容器上蓋の駆動軸と制御棒クラストとの結合作業において、制御棒クラスト1体の引抜き時に過大な荷重が生じた。点検した結果、当該制御棒クラストベーン損傷及び制御棒クラスト案内管のさや板均圧孔に異物(ボルト)を確認した。	当該駆動軸は念のため取替えるとともに、駆動軸頂部については干渉をさけるため全致について面取りを実施する。	原子炉容器上蓋の駆動軸案内管と駆動軸の干渉に関する不具合であり、今回の事象との関連はない。
敦賀発電所2号 ^{※1}	1986. 4. 23	燃料装荷後の駆動軸と制御棒クラストとの結合作業において、制御棒クラスト1体の引抜き時に過大な荷重が生じた。点検した結果、当該制御棒クラストベーン損傷及び制御棒クラスト案内管のさや板均圧孔に異物(ボルト)を確認した。	キャピティから混入したボルトは、1次冷却材の流れにより、上部炉心構造物制御棒クラスト案内管さや板均圧孔にはさまったものと推定される。	当該制御棒クラストおよび制御棒クラスト案内管を新品に交換するとともに、異物管理を強化する。	制御棒クラストと制御棒クラスト案内管が異物により異常結合した場合は、制御棒クラストの引き上げりに発展する可能性があるが、今回の制御棒クラスト切り離し作業時に制御棒クラストと制御棒クラスト案内管の干渉は確認されていない。
高浜発電所1号 ^{※1}	1996. 5. 9	原子炉容器上蓋取替作業中に、駆動軸と制御棒クラストとの接続不良が発生し、駆動軸先端接合部が変形した。	駆動軸先端接合部の熱処理が不備であり、熱処理が不備で芯ずれが大きい場合には変形が生じることが確認された。	駆動軸先端部の接手については、全制御棒48本について適切に熱処理を実施したものと取り替えるとともに、品質管理を強化する。	駆動軸の接手に変形が生じた場合は、制御棒クラストの引き上げりに発展する可能性があるが、伊方3号機の駆動軸接手は適切に熱処理されたものを使用していることを確認しており、外観確認でも変形は確認されていない。
大飯発電所2号 ^{※1}	1999. 1. 29	定期検査中の調整運転時に、制御棒引抜き操作中のところで、制御棒1本が落下した。この原因調査のため、制御棒を挿入していたところ、別の制御棒1本がスリップした。	取替原子炉容器上蓋が長期間湿度状態に置かれていたことにより、制御棒駆動装置ラッチアッセンブリ内で発生した腐食生成物が、駆動装置リフト動作時間遅れを引き起こし、制御棒の落下およびスリップが発生したものと推定される。	制御棒駆動装置のラッチアッセンブリを全数新品に取り替える。	制御棒クラスト動作中のラッチ機構に関する不具合であり、今回の事象との関連はない。
美浜発電所3号 ^{※1}	2006. 5. 16	定期検査中に、仮設の制御棒駆動軸清掃装置にキャピティ浄化装置のススキマフイルタを接続するため、ホースをつなぎ変える作業を行っていたところ、当該取り外し箇所から水漏れが発生した。	運転中であったキャピティ浄化装置のホースを取り外したことから、漏えいが発生した。	作業手順書の明確化および浄化装置を運転状態を容易に識別可能となるように表示を行う。	キャピティ浄化装置に関する不具合であり、今回の事象との関連はない。
伊方発電所2号 ^{※1}	2006. 12. 16	炉物理検査中に、制御棒1本の位置指示が、他の制御棒より約20ステップ下方にずれていることが確認された。	駆動軸へ付着したクラッドが、制御棒駆動装置内の可動つかみ部動作部分に付着し、摺動抵抗が高くなったことにより、可動つかみ部の動作遅れが発生し、制御棒が自重によりスリップしたと考えられる。	プラント停止時の脱ガス運転時および起動時においては、制御棒動作の間は浄化流量を最大とし、クラッドの低減に努める。	制御棒クラスト動作中のラッチ機構に関する不具合であり、今回の事象との関連はない。
高浜発電所2号 ^{※1}	2007. 10. 2	定期検査中に、バンクオーバーバンプ操作検査を実施中のところ、全挿入位置であるはずの制御棒1本がほぼ全引抜き位置にあることが分かった。点検の結果、制御棒の動作不良であると判断した。	制御棒の動作時に、下部制御棒案内管のCチューブと制御棒の隙間に異物が挟まり、当該制御棒の動作不良が発生したものと推定した。	当該機器については新品等に取り替えるとともに、異物混入防止対策を行う。	制御棒クラストと制御棒クラスト案内管が異物により異常結合した場合は、制御棒クラストの引き上げりに発展する可能性があるが、今回の制御棒クラスト切り離し作業時に制御棒クラストと制御棒クラスト案内管の干渉は確認されていない。

※1: 原子力施設情報公開ライブラリー (ニューシージャ) 登録情報から炉型「PWR」および全文検索「制御棒&駆動軸」から抽出した結果ならびにメーカーに確認した結果

表一3 駆動軸に関する不具合事象の事例 (海外)

発電所	発生日	事象概要	推定原因	主な対策	今回の事象との関連
ブレッド・カット1号 ^{※1} (米国)	1987. 2. 24	高温停止時、制御棒位置指示計のサーベイランス試験を実施したところ、制御棒を47ステップ挿入したにもかかわらず、位置指示計では制御棒1体が18ステップ挿入と表示されていた。位置ずれの上限である24ステップを超えていたため、原子炉を手動トリップした。	制御棒位置がずれた原因は不明であるが、制御棒駆動装置ラッチ箇所に関するラッドが蓄積したことが原因である可能性が高い。	制御棒は引き抜き、挿入中は正常な動作をしていただいたため、設備上の対策はなし。	制御棒クラスタ動作中のラッチ機構に関する不具合であり、今回の事象との関連はない。
ブレッド・カット2号 ^{※2} (米国)	1994. 4. 5	タービントリップ後の原子炉トリップにおいて、制御棒が231ステップから210ステップまでしか挿入されなかった。調査の結果、金属製の異物が制御棒案内板内にあり、制御棒の挿入を妨げていた。	異物となった、原子炉内の熱電対コラムノズルのファンネルピンは、設計通りに溶接されていたいなかった。	全ての熱電対ノズルファンネルに対して、追加の溶接を実施した。	制御棒クラスタと制御棒クラスタ案内管が異物により異常結合した場合は、制御棒クラスタの引き上げりに発展する可能性があるが、今回の制御棒クラスタ切り離し作業時に制御棒クラスタと制御棒クラスタ案内管の干渉は確認されていない。
ピナククル2号 ^{※3} (米国)	1994. 7. 22	原子炉容器上蓋を原子炉容器へ据え付ける作業中に、駆動軸がサーマルスリーブ案内管と芯ずれを起したことから、上蓋を下降させる際に駆動軸が損傷した。点検の結果、サーマルスリーブに接続されていたファンネルが外れ、上部炉心構造物の駆動軸に吊り下がっていた。	流れによる振動等により、サーマルスリーブファンネルの保持ピンが摩耗したため、ファンネルが外れた。	サーマルスリーブファンネルを加工してピンを撤去した後に、サーマルスリーブに溶接した。	原子炉容器上蓋のサーマルスリーブ案内管と駆動軸の干渉に関する不具合であり、今回の事象との関連はない。
ペブル2号 ^{※4} (フランス)	1998. 6. 11	出力運転中、格納容器スプレイが誤作動し、原子炉が自動緊急停止したものの、原子炉停止の際に、制御棒1体が高い位置で固着した。	制御棒駆動装置のネジが破損したため、制御棒クラスタが固着していた。	当該制御棒駆動装置の交換およびその他の制御棒駆動装置の点検を実施する。	制御棒駆動装置に関する不具合であり、今回の事象との関連はない。
サガフヤ1号 ^{※5} (米国)	2010. 2. 3	原子炉上蓋取替後の出力運転中、制御棒動作定期試験において、制御棒1本が引き抜きできなくなったため、出力を75%以下まで低下させた。他の制御棒については、動作に問題はなかった。一ヶ月後の定期試験において、別の制御棒1本が引き抜きできなかったことからプラント停止することに決めた。停止操作中、別の制御棒1本が不整合でなくなったことが確認された。停止操作後の追加の試験において、さらに別の制御棒1本が炉底から引き抜けないことが分かった。	新しく取替えた制御棒駆動装置のラッチ機構の加工と不動態化工程で生成する腐食生成物の除去と分散が不十分だったため、腐食生成物が原因による摩擦増加で制御棒が動作不能となった。	腐食生成物を除去するため、再起動前に、全引抜位置からの10回の制御棒落下を含め、制御棒を全挿入位置から全引抜位置になるまで複数回動作させる。	制御棒クラスタ動作中のラッチ機構に関する不具合であり、今回の事象との関連はない。

※1: 出典 (NRC Licensee Event Report (LER Number:4561987015))

※2: 出典 (NRC Information Notice 94-40, "Failure of a Rod Control Cluster Assembly to Fully Insert Following a Reactor Trip at Braidwood Unit2", May 26, 1994.)

※3: 出典 (NRC Information Notice 94-40, Supplement 1, "Failure of a Rod Control Cluster Assembly to Fully Insert Following a Reactor Trip at Braidwood Unit2", Dec.15, 1994.)

※4: 出典 ("INES Level 2 Event Cleanup to Keep Belleville-2 Shut Three More Week", Nucleonics Week, June 25, 1998, pp. 1-2)

※5: 出典 (NRC Licensee Event Report (LER Number:4982010001))