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１７日 提出
令和２年４月　３日 補正
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していたところ、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）、以下の確認を実施し、上部炉心構造物を下ろした時点では制御棒クラスタと駆動軸は結合されていないことや正常に結合、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らず、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。

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も、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に相当し、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（ＥＰＭＡ）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※2）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次冷却系統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次冷却系統内で生成

プラント運転中、１次冷却系統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。

・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。

（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て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１３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．駆動軸等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等の不具合事例を抽出した結果、８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等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不完全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広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）

１１．部分モデルによる引き上がり状態実証試験

前項「１０．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も、ケース２の状態で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）

１２．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。
・今回の作業手順書には、駆動軸着座前に駆動軸取り外し軸が正規の位置まで下降したことを確認する手順がなく、駆動軸取り外し軸のスタックを確認することができなかった。

（添付資料－１２）

１３．今回の事象が発生した制御棒クラスタ等の健全性

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、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した。

（添付資料－１３）

１４．対　策

１２．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を防止するために、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。これにより、駆動軸取り外し軸のスタック要因に関わらず、スタックを起因とした事象の再発防止は可能となる。

・上記手順により、今回の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不完全結合状態ケース検討 …… 111
添付資料－１１　部分モデルによる引き上がり状態実証試験 …… 117
添付資料－１２　推定メカニズム …… 135
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 …… 147
添付資料－１４　再発防止対策 …… 152

参考資料　用語解説 …… 161

添付資料－１

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

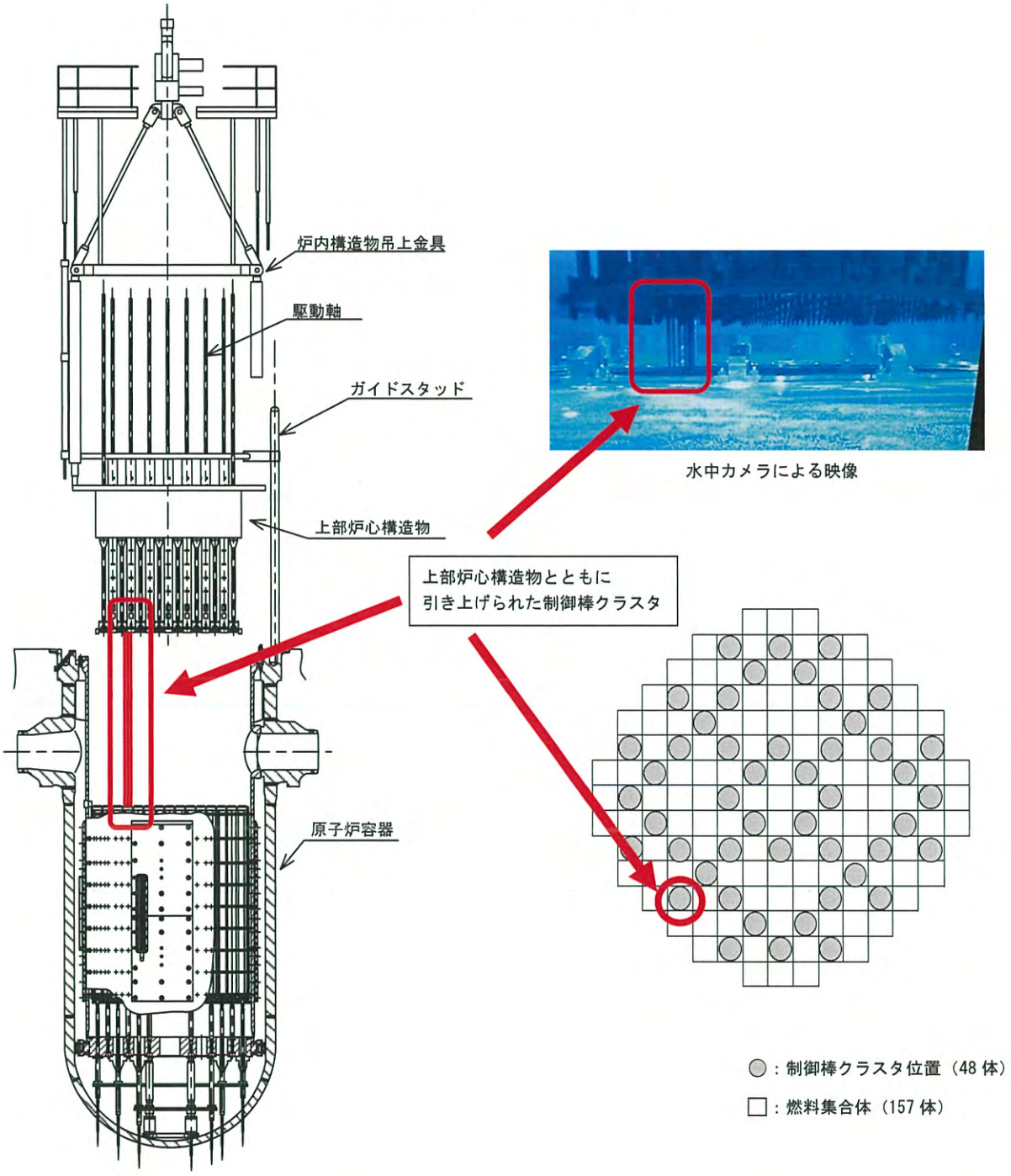
令和２年　１月１５日（水）

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



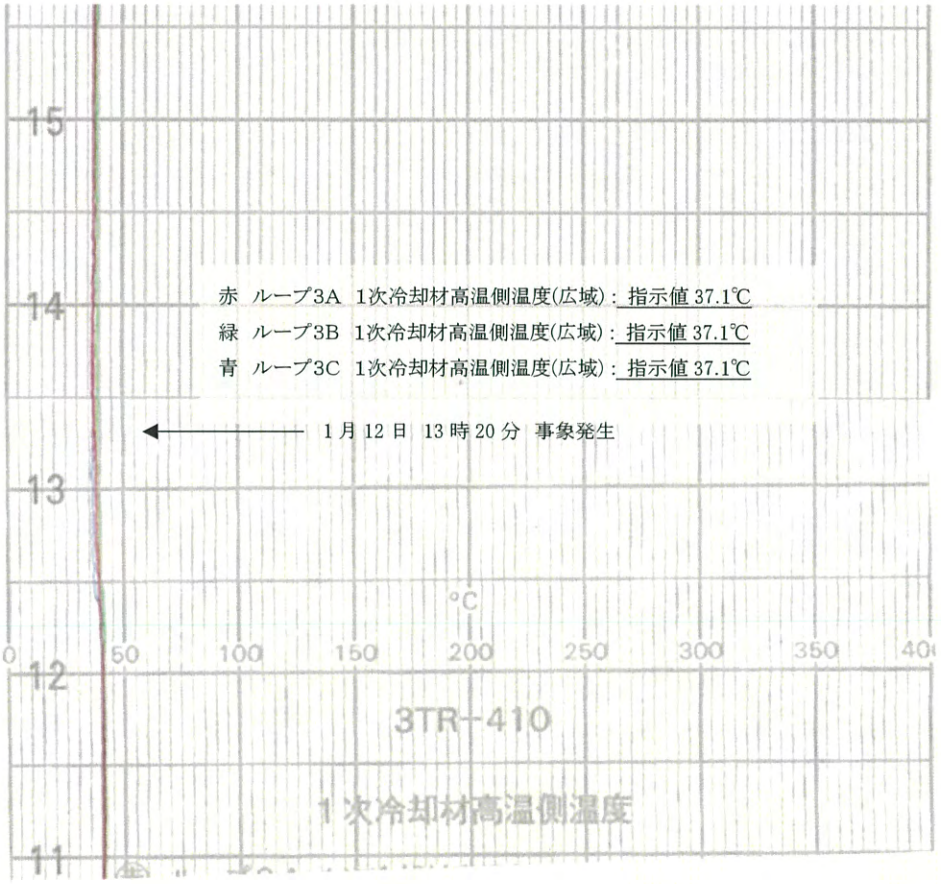
図－１　事象概要図

添付資料－２－１

発電用原子炉施設の影響記録

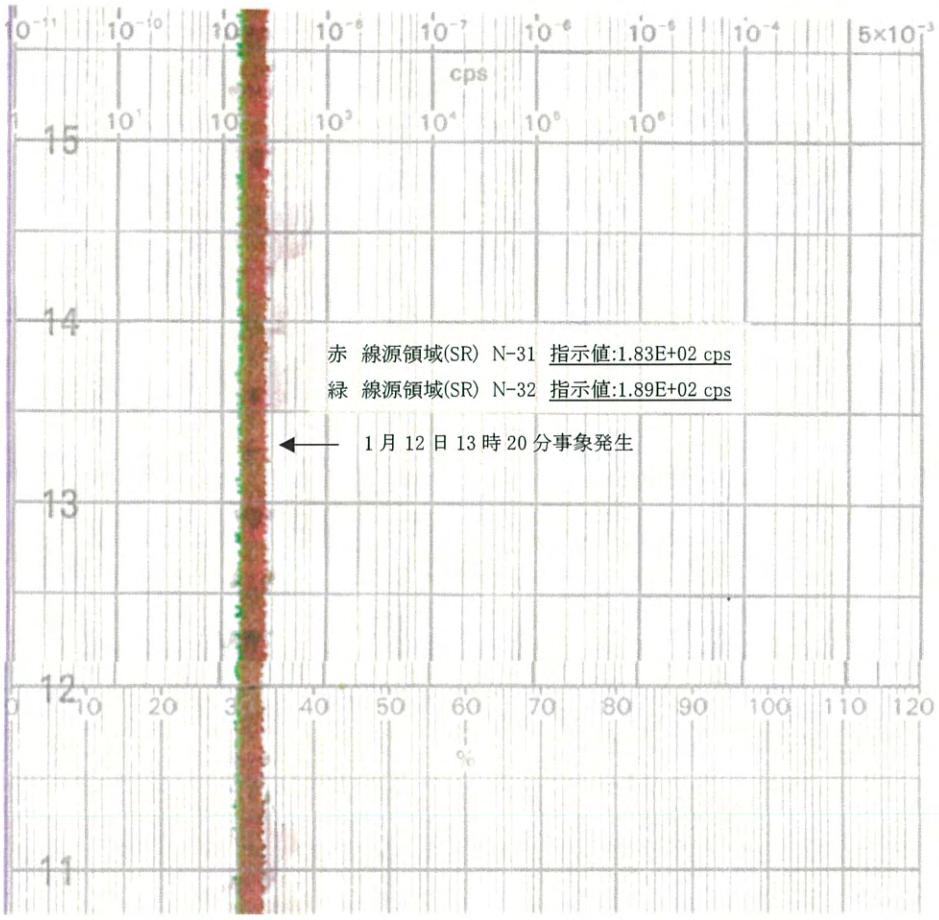
○１次冷却材高温側温度

［１月１２日　１１時００分～１５時３０分］



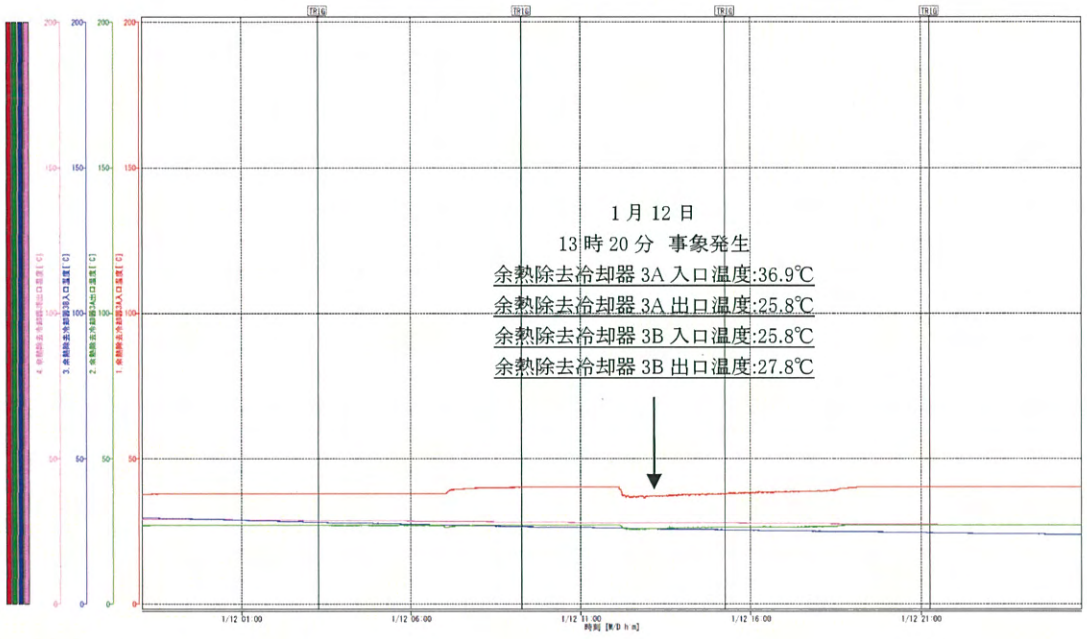
○原子炉出力

［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］

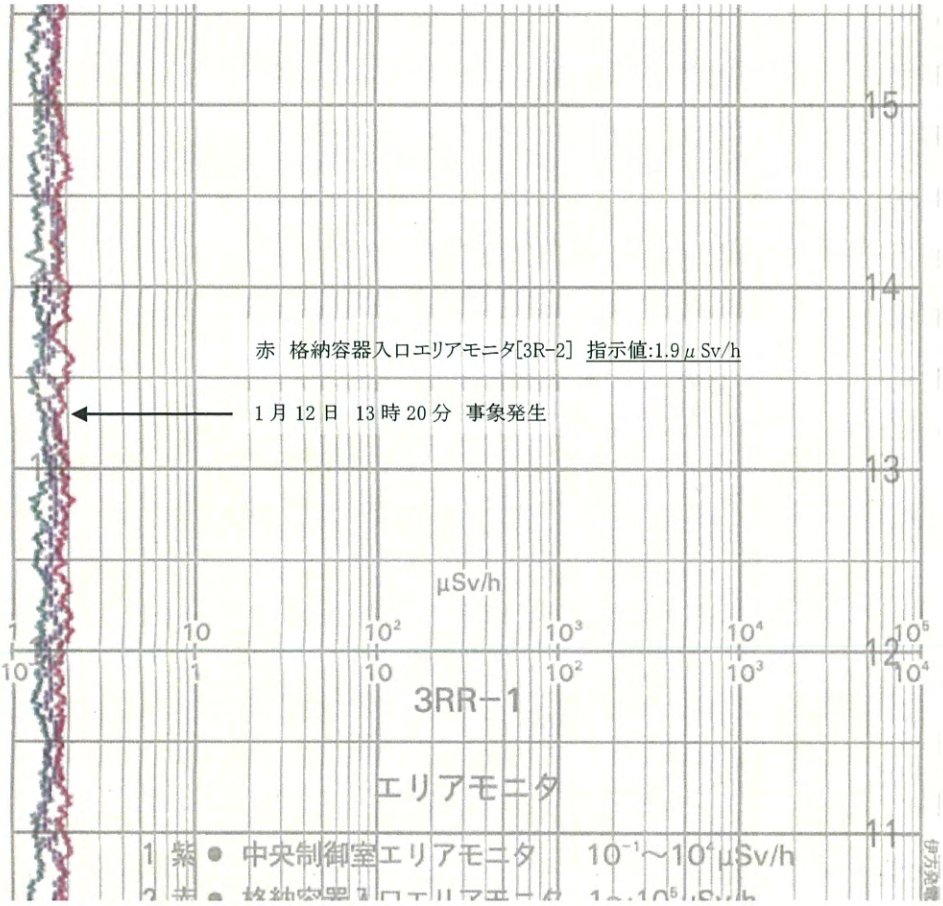


添付資料－２－２

放射線管理モニタ記録

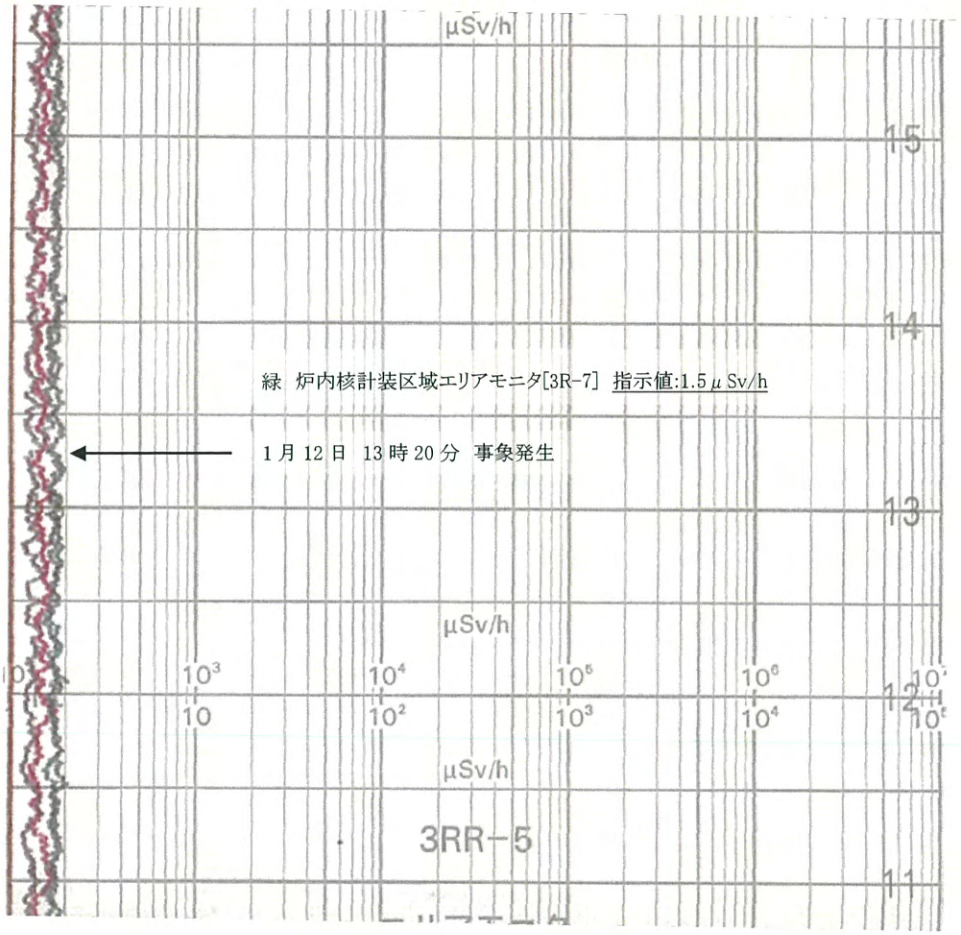
○エリアモニタ（１／２）

［１月１２日　１１時００分～１５時３０分］



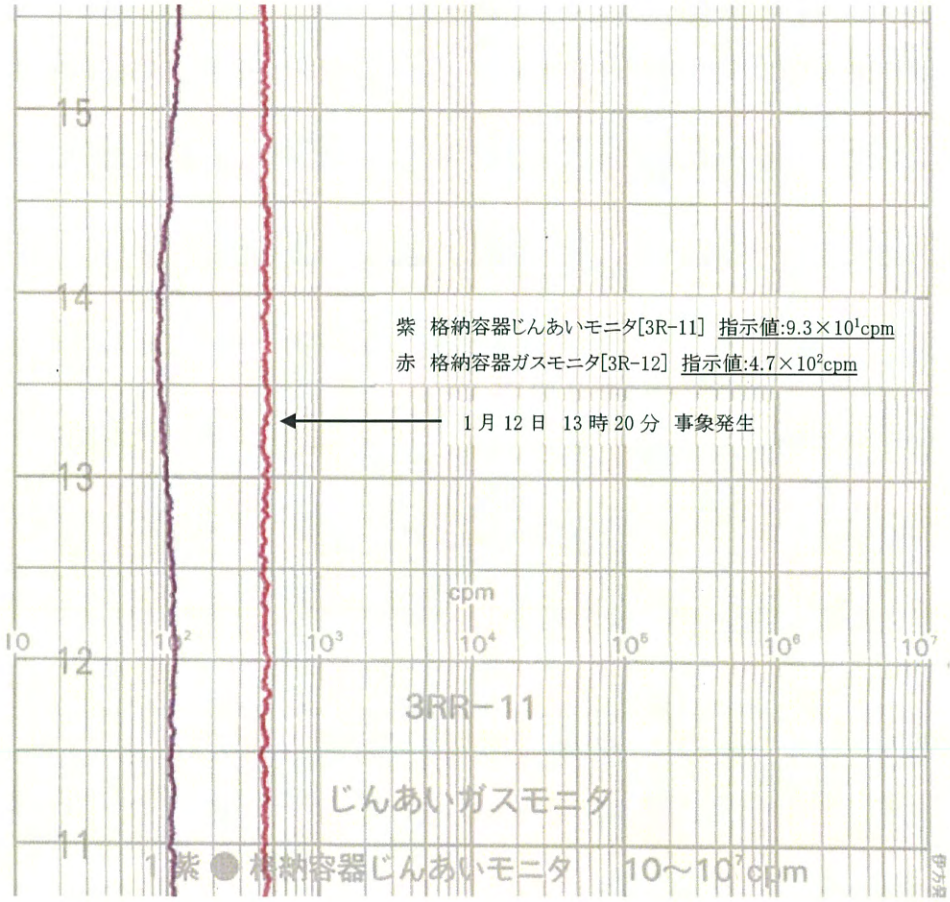
○エリアモニタ（２／２）

［１月１２日　１１時００分～１５時３０分］



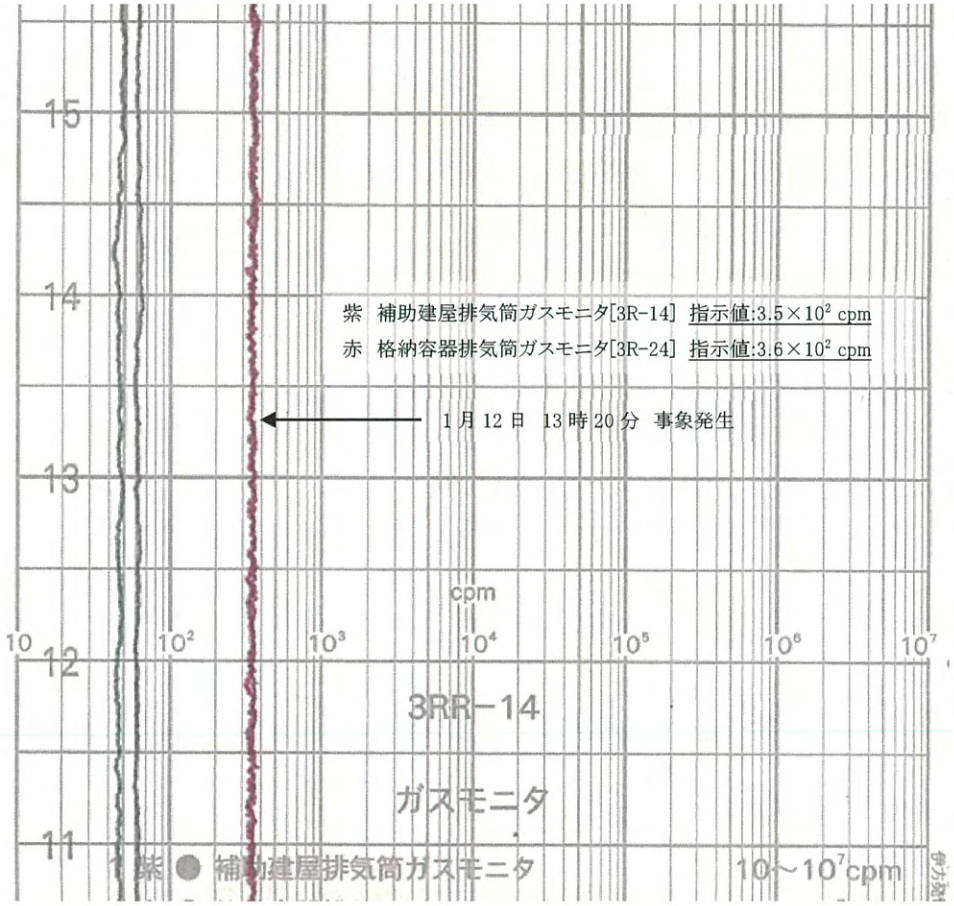
○プロセスモニタ（１／２）

［１月１２日　１１時００分～１５時３０分］



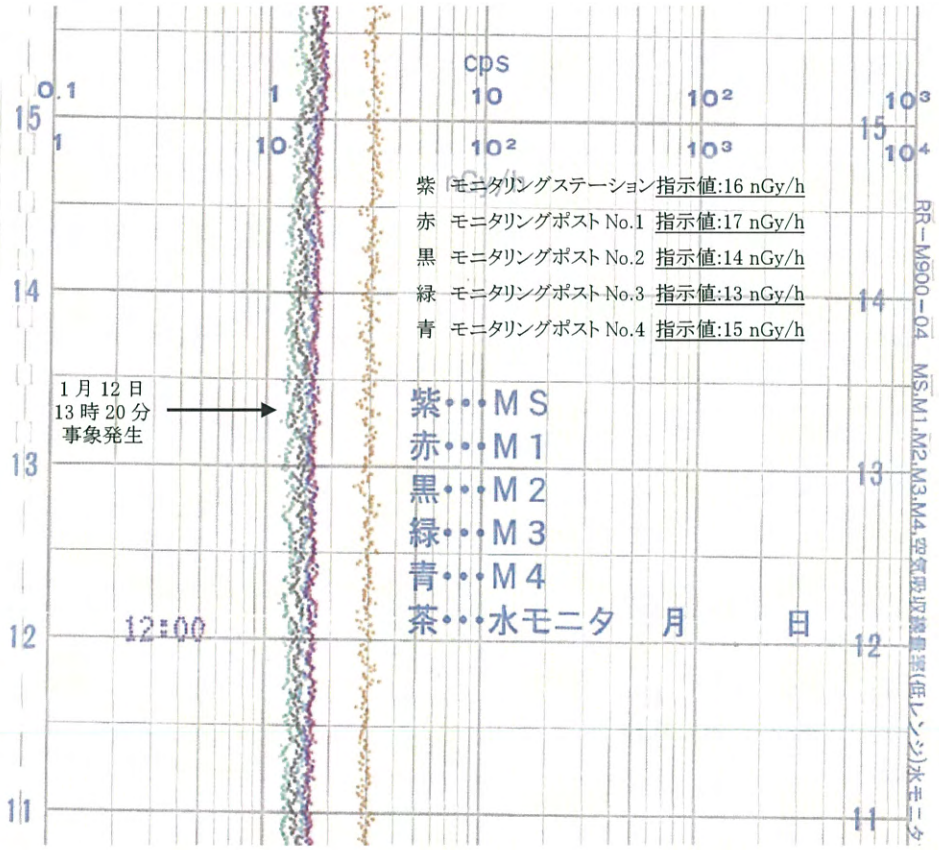
○プロセスモニタ（２／２）

［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］



添付資料－３

モード６における停止余裕の管理

１．サンプリング結果

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次冷却材のサンプリ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リングの結果から、モード６において、サンプリング結果が、保安規定第８０条に定めるほう素濃度を下回ることはなく、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リング結果

サンプリング日時	モード	運転上の制限の 燃料取替時のほう素濃度 ［ｐｐｍ］	サンプリング結果 ［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％ΔＫ/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、１７０３ｐｐｍ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。

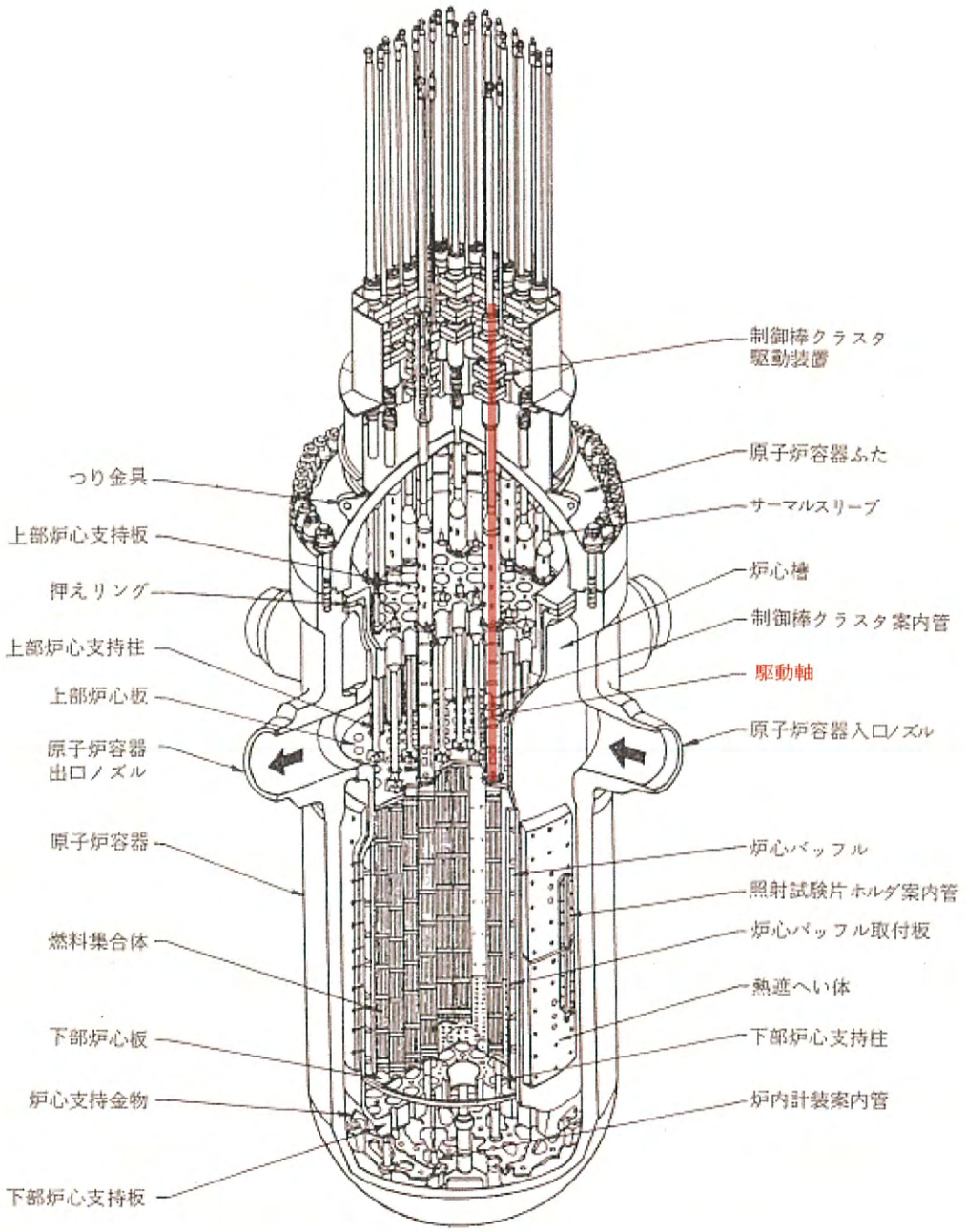
このことから、制御棒クラスタが１本引き上がった本事象発生時においても、炉心の未臨界性は十分に確保されている。

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

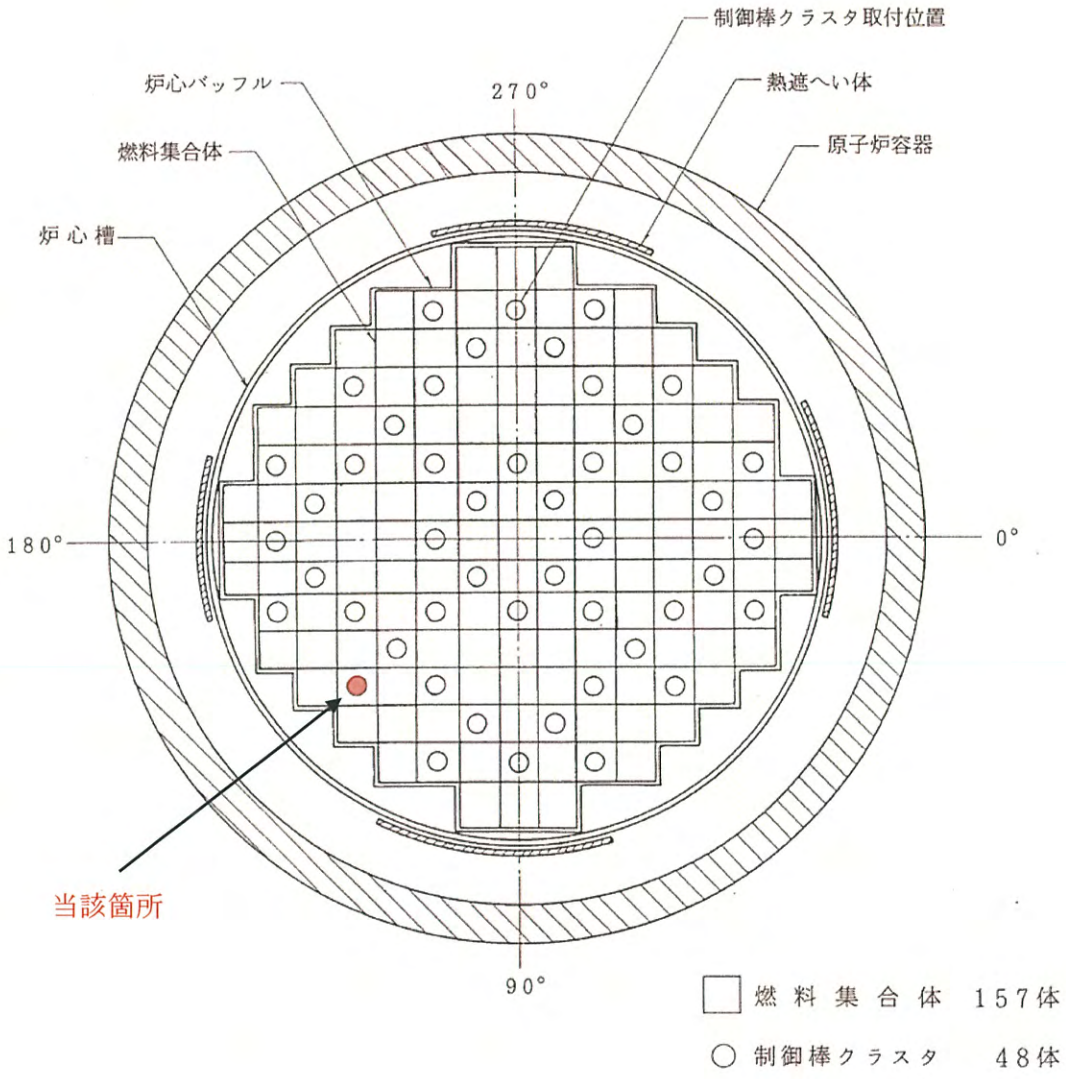
全制御棒クラスタ引き上がり時の最小停止ほう素濃度※（ｐｐｍ）	事象発生時のほう素濃度サンプリング結果（ｐｐｍ）
１７０３	４５５３

※ 評価値に対して、１００ｐｐｍの余裕を含む。

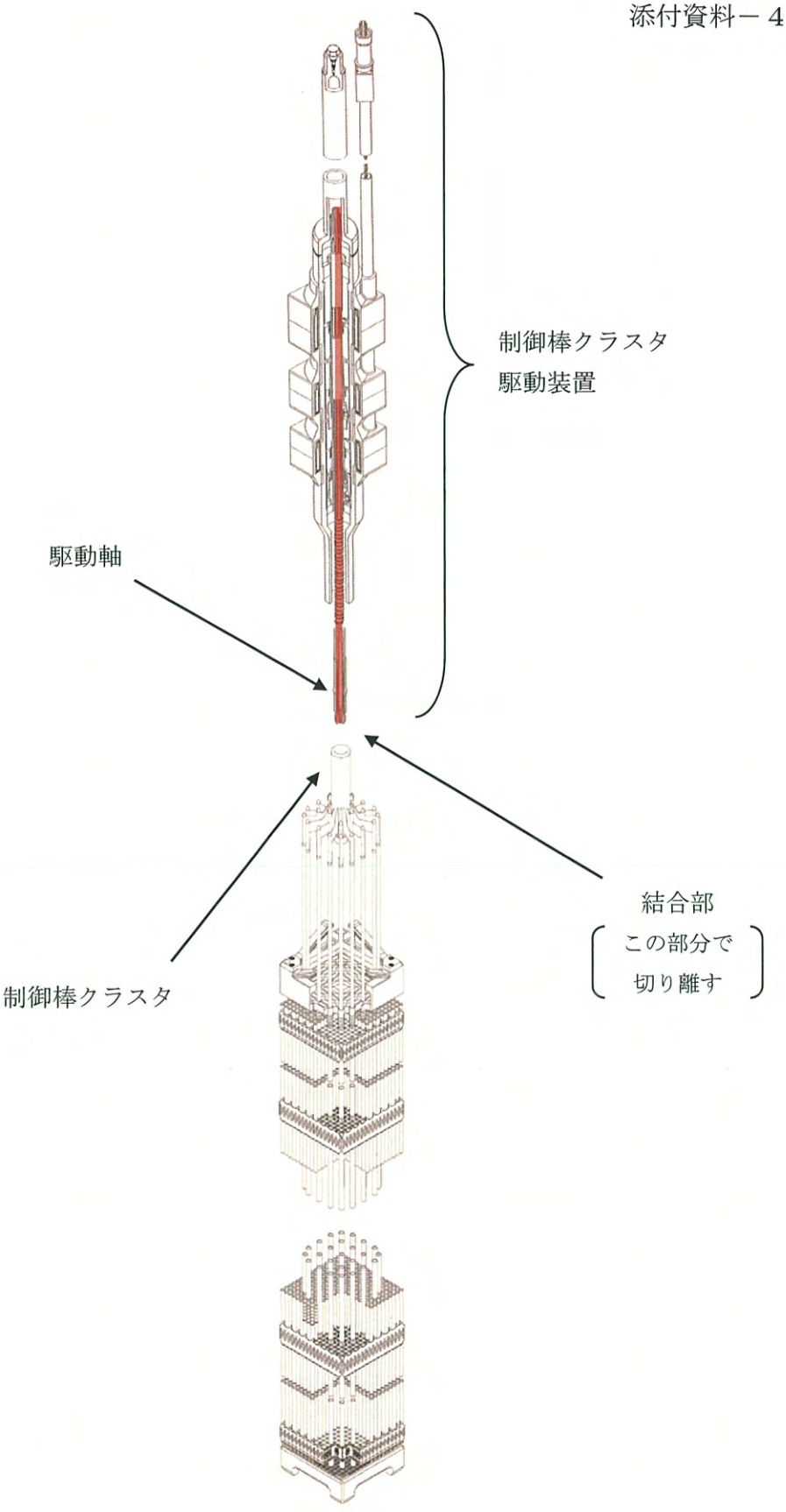
各機器の構造図


制御棒クラスタ
駆動装置
原子炉容器ふた
サーマルスリーブ
炉心槽
制御棒クラスタ案内管
駆動軸
原子炉容器入口ノズル
炉心バッフル
照射試験片ホルダ案内管
炉心バッフル取付板
熱遮へい体
下部炉心支持柱
炉内計装案内管
つり金具
上部炉心支持板
押えリング
上部炉心支持柱
上部炉心板
原子炉容器
出口ノズル
原子炉容器
燃料集合体
下部炉心板
炉心支持金物
下部炉心支持板

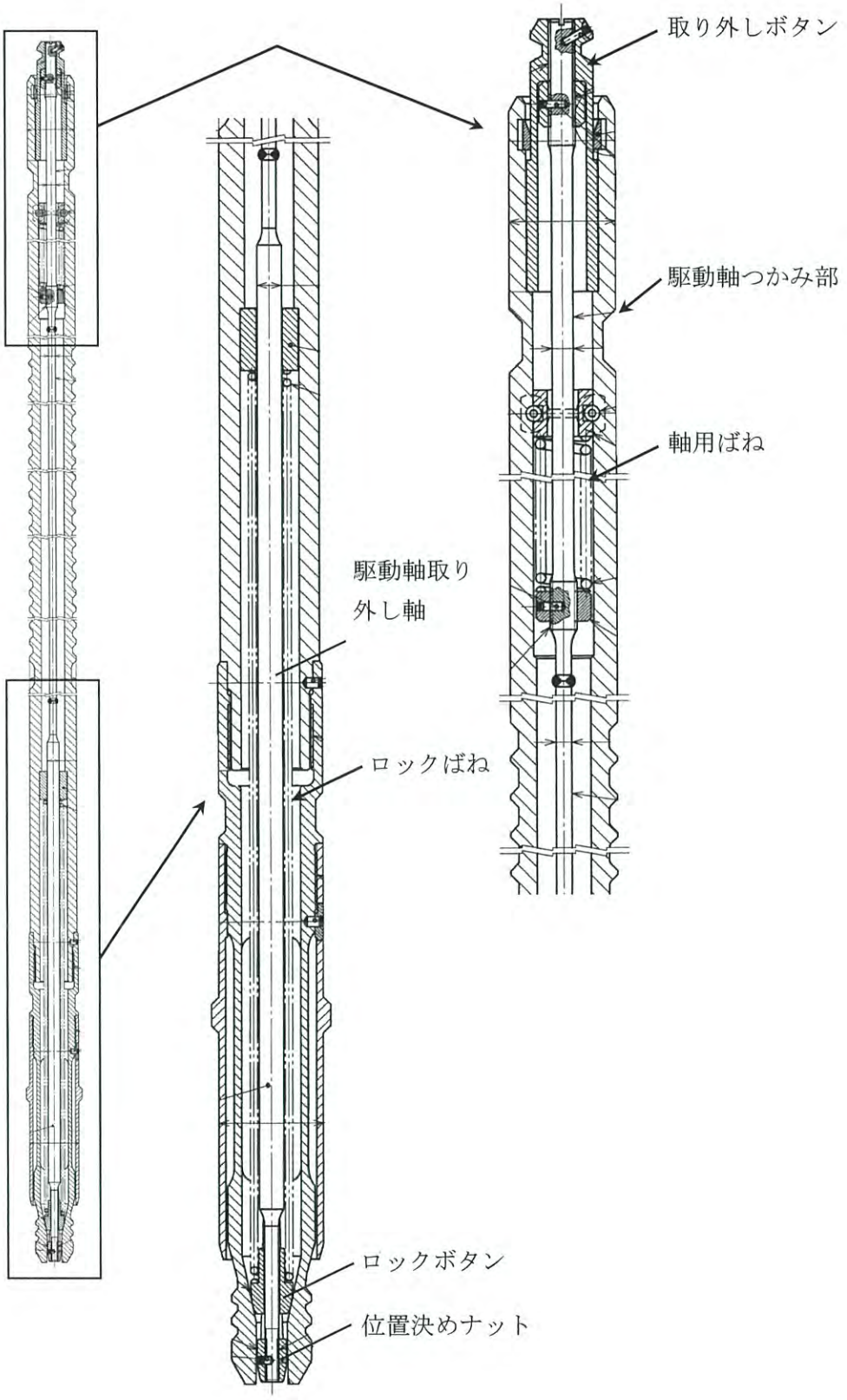
原子炉容器（内部構造図）


制御棒クラスタ取付位置
炉心バッフル
270°
熱遮へい体
燃料集合体
原子炉容器
炉心槽
180°
0°
当該箇所
90°
燃料集合体 157体
制御棒クラスタ 48体

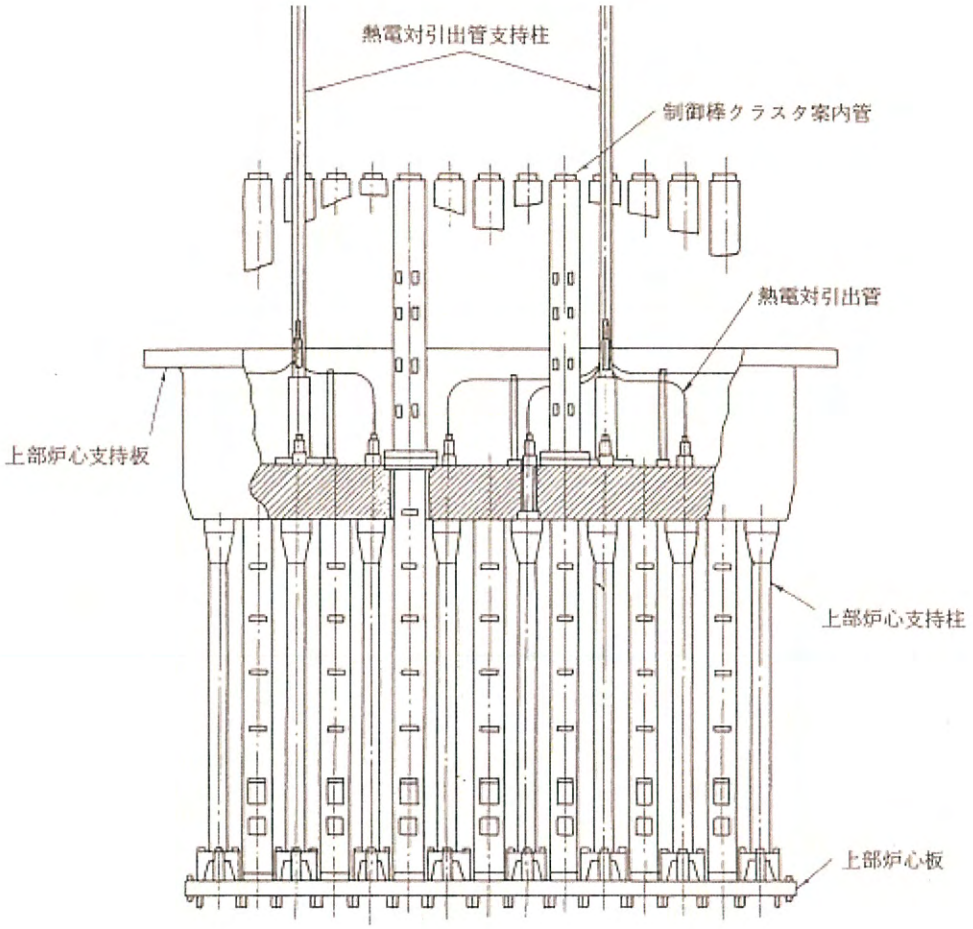
原子炉容器（炉心断面図）



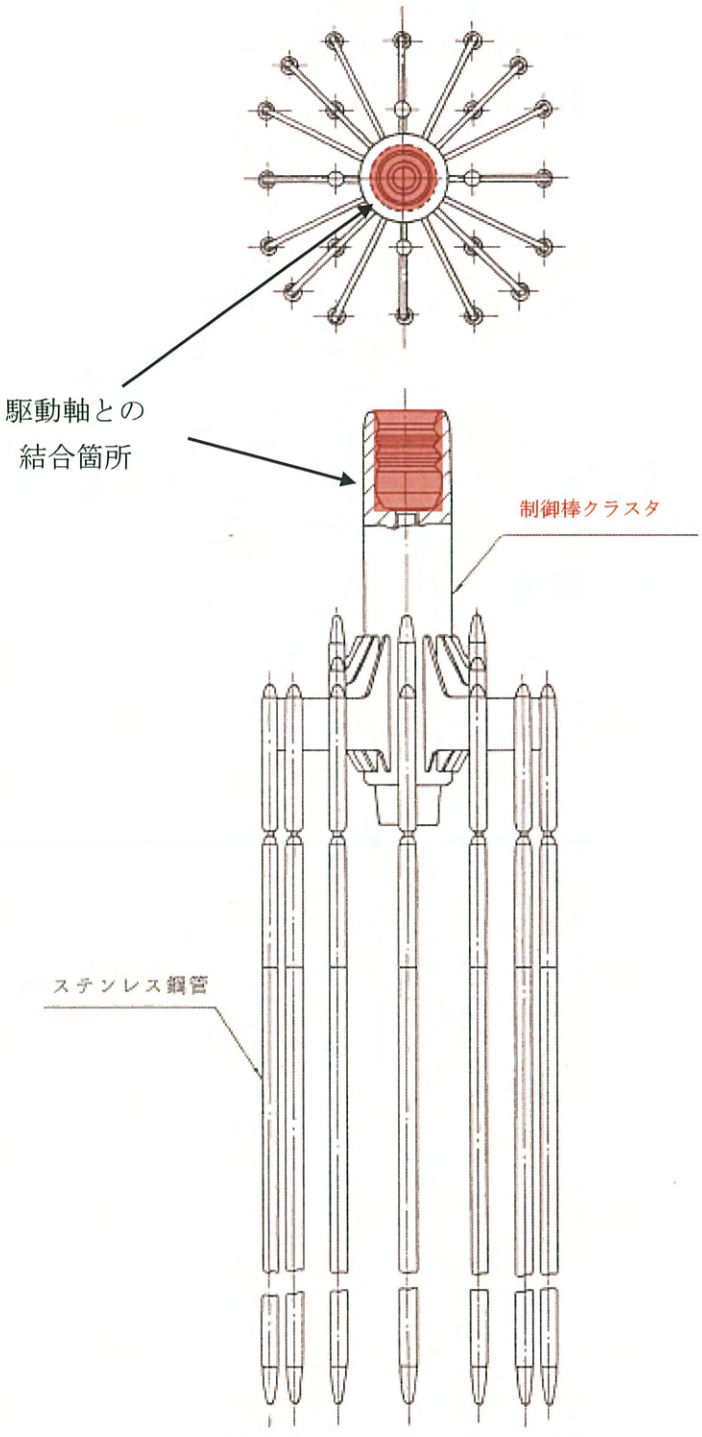
制御棒クラスタ駆動装置



駆動軸



上部炉心構造物

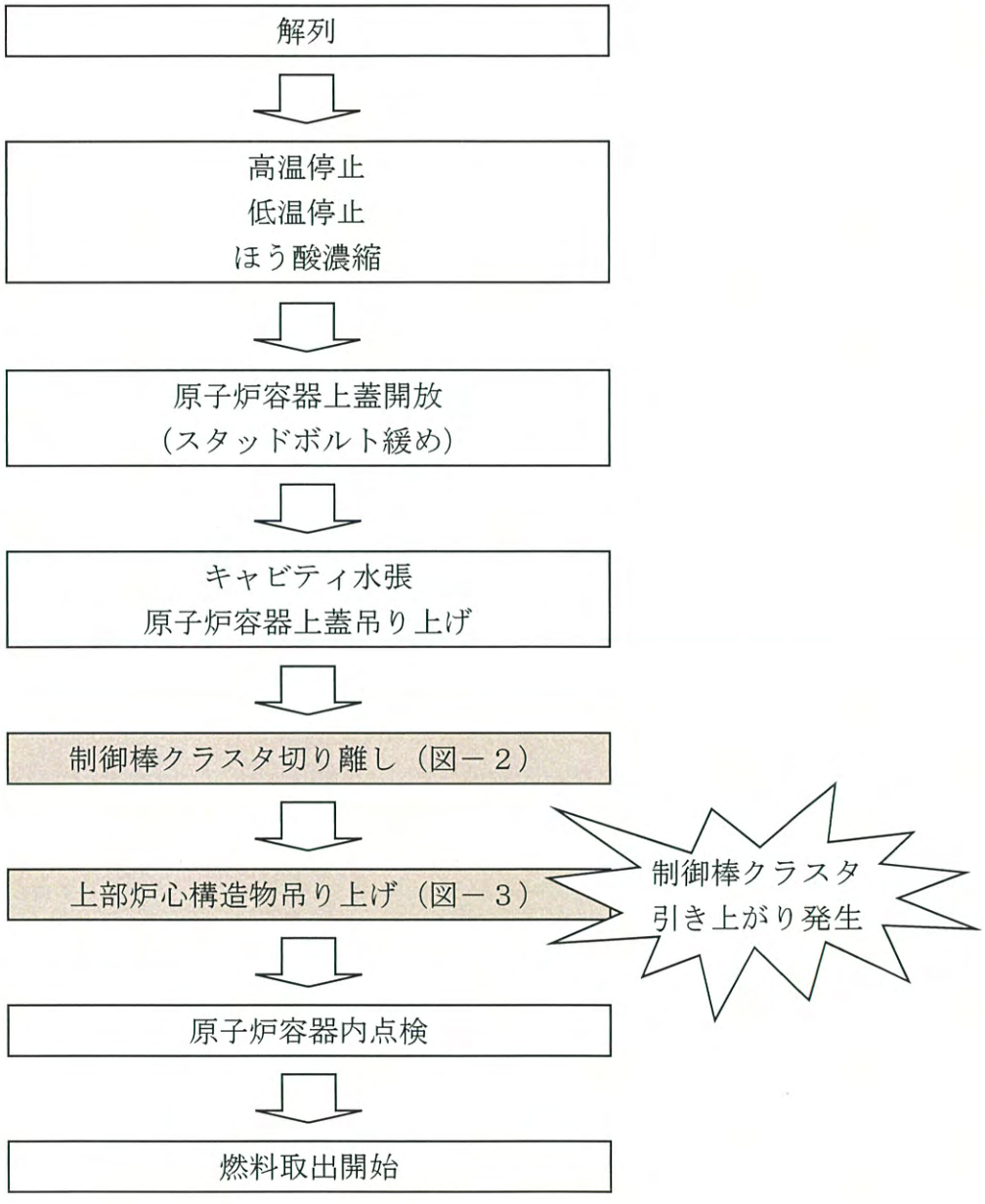


制御棒クラスタ

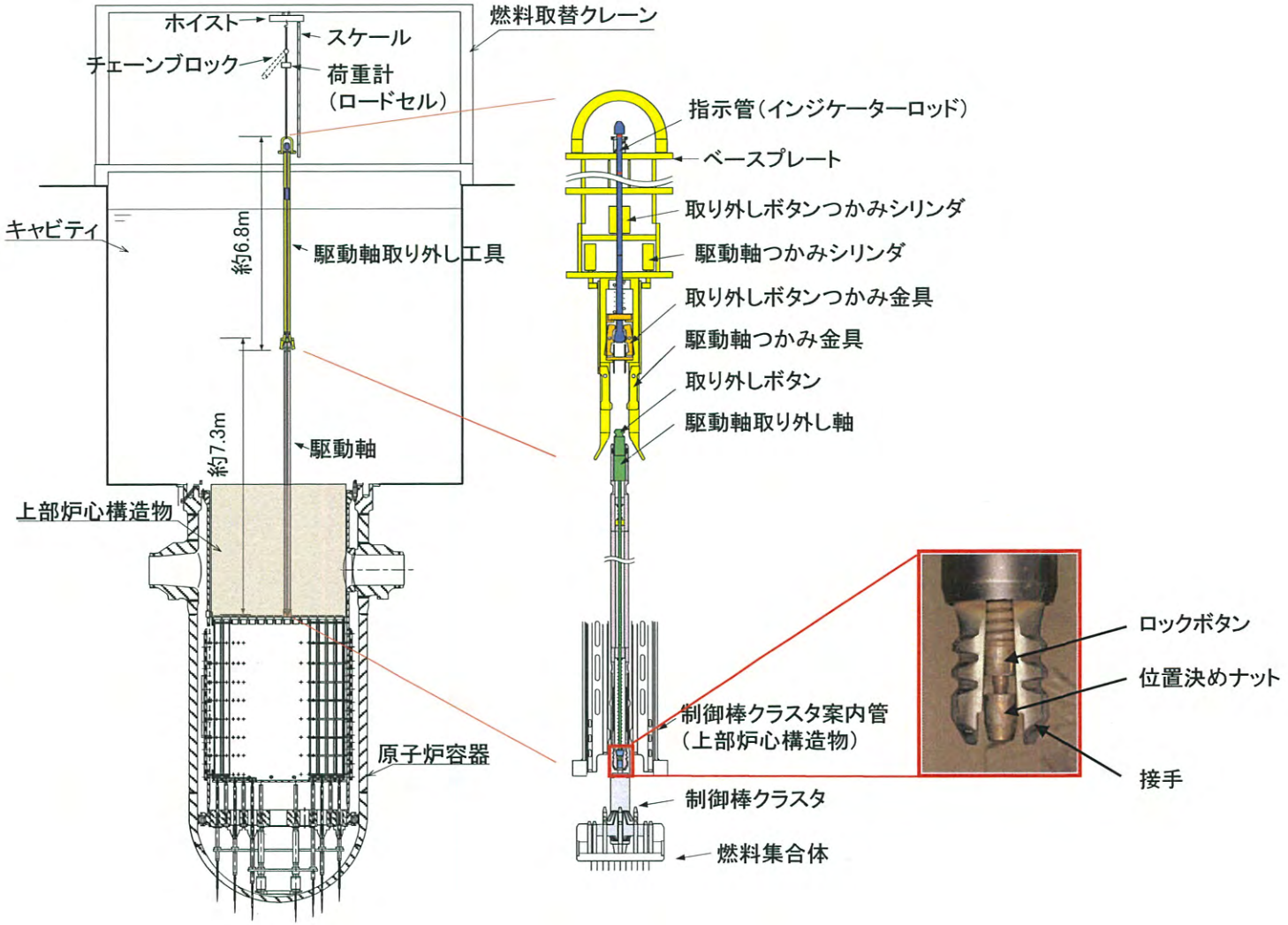
添付資料－５

事象発生時の作業状況

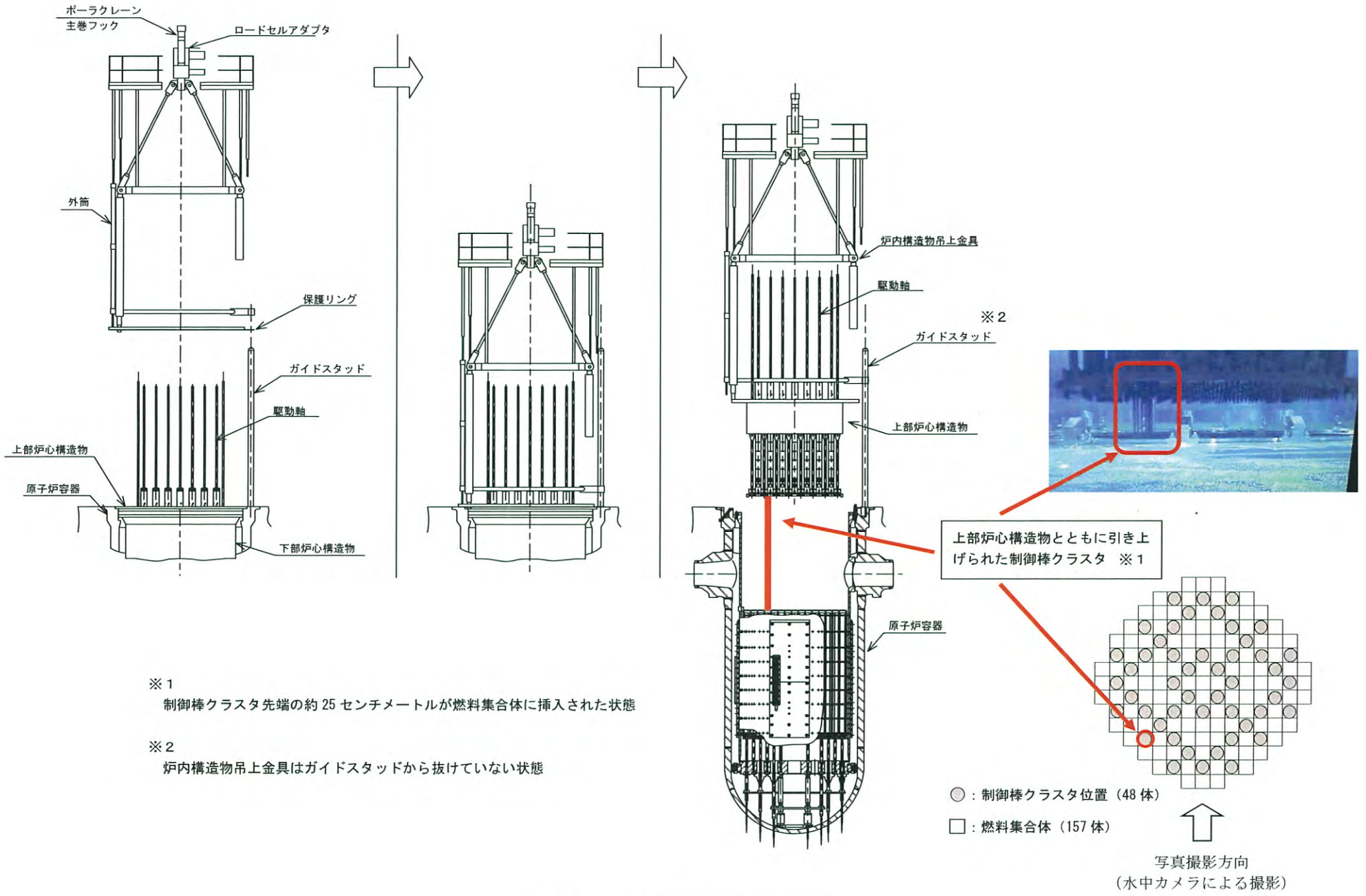
原子炉容器上部炉心構造物吊り上げ時の制御棒クラスタ引き上がり事象発生時の作業状況を以下に示す。



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

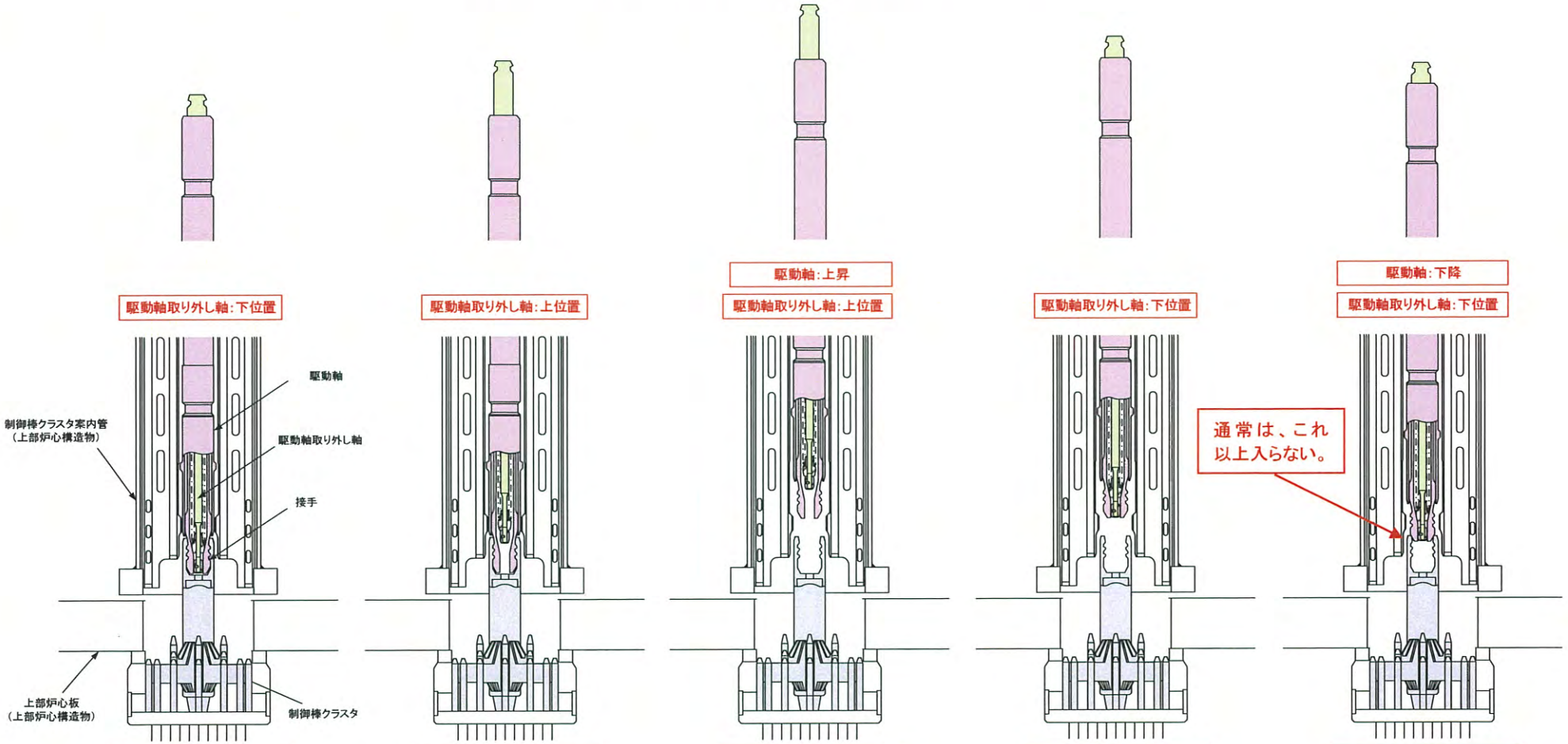


※1
制御棒クラスタ先端の約 25 センチメートルが燃料集合体に挿入された状態

※2
炉内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



要因分析図

△：可能性あり
×：可能性なし

事象	要因			調査項目	調査結果	評価	添付
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	制御棒クラスタと駆動軸の結合	駆動軸切り離し操作の不良	駆動軸取り外し工具の動作不良	・駆動軸取り外し工具の動作確認	・駆動軸取り外し工具の外観確認を実施し、傷、変形、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
			駆動軸切り離し作業に用いる計測器の不良	・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、およびウェ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
			駆動軸切り離し作業における操作不良	手順書の不備 ・作業記録確認 ・類似事例調査	・作業記録より、当社にて承認された手順書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検時と同様であり、過去の定検で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。 ・類似事例の推定原因等を踏まえても、当社の制御棒クラスタと駆動軸の切り離し操作に問題となる点はなかった。	△	8-1 9-4
				不適切な操作 ・作業記録確認 ・制御棒クラスタと駆動軸の結合状況確認 ・聞き取り調査 ・類似事例調査	・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。また、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。 ・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も、手順の抜けやアドレス間違い等の根本的な作業ミスは考え難い。 ・作業員への聞き取りにより、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。 ・類似事例の推定原因等を踏まえても、当社の制御棒クラスタと駆動軸の切り離し操作に問題となる点はなかった。	×	8-1 9-4
				作業環境の影響 ・運転履歴調査	・駆動軸切り離し作業中のキャビティ水位や余熱除去ループ流量等に、作業環境に影響を与えるような有意な変動がなかったことを確認した。	×	9-3
		駆動軸切り離し動作の不良	設計不良 ・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、十分な実績がある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
			製造不良 ・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、および駆動軸と模擬制御棒クラスタを組合わせてステッピング試験を実施しており両者の嵌合に問題なかったことを確認した。 ・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。	×	9-1
			点検不良 ・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、13回定検の再稼働に向けた点検において、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
			制御棒クラスタと駆動軸の結合部の異常 ・外観確認(制御棒クラスタ、駆動軸) ・接手型取り観察 ・駆動軸の寸法計測 ・堆積物調査	・駆動軸の外観確認を実施し、当該駆動軸の接手の内外面および位置決めナットに接触痕が確認された。 ・制御棒クラスタの外観確認を実施し、スパイダ頭部の円環部上面およびスパイダ内部のテーパ面に接触痕（色調の変化）が確認された。 ・一部の接触痕は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ものである可能性がある。 ・制御棒クラスタの外観確認により、スパイダ頭部内に堆積物が確認され、分析の結果、マグネタイトであることを確認した。 ・駆動軸の寸法計測を実施し、接手廻りの寸法が設計値を満足していることを確認した。	△	8-4 8-5 8-6
			駆動軸取り外し工具と駆動軸の取合部の異常 ・外観確認(駆動軸、工具) ・駆動軸動作確認	・外観確認により、駆動軸取り外し工具と駆動軸の取合部に異常な噛み込み等の痕跡が無いことを確認した。 ・駆動軸動作確認により、駆動軸の結合・切り離し、駆動軸取り外し軸の上下動作に問題が無いことを確認した。	×	8-2 8-5
			駆動軸取り外し軸の動作不良	駆動軸取り外し工具の駆動源（空気）の異常 ・運転履歴調査（所内用空気圧） ・駆動軸動作確認	・所内用空気圧について、事象発生時、所内用空気圧力の異常を示す警報は発信しておらず、空気圧に異常な低下がないことを確認した。 ・駆動軸動作確認により、規定の所内用空気圧（約0.7MPa）で、問題なく駆動軸取り外し軸の引き上げ操作ができることを確認した。なお、空気圧が低い状態（約0.2MPa）では取り外し軸の引き上げが不十分となるが、他の駆動軸と同様であり、特異なものではないことを確認した。	×	8-5 9-3
				駆動軸取り外し軸のばねの異常 ・外観確認(駆動軸) ・駆動軸動作確認	・ロックばねについては、接手側面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の無いことを確認した。 ・また、駆動軸動作確認により、駆動軸取り外し軸の上下動作に問題はなく、他の駆動軸とも有意な差は無いことから、ばね（軸用ばね、ロックばね）の異常は無いと考えられる。	×	8-5
				異物混入 ・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、目視可能範囲に異物は確認されなかった。 ・駆動軸動作確認により、駆動軸取り外し軸の上下動作に問題はなく、他の駆動軸とも有意な差は無いことを確認した。 ・制御棒クラスタの外観確認により、スパイダ頭部内に堆積物が確認され、分析の結果、マグネタイトであることを確認した。	△	8-5 8-6
	上部炉心構造物と制御棒クラスタの結合			・製造履歴調査 ・運転履歴調査 ・制御棒クラスタと駆動軸の結合状況確認 ・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無いことを確認した。 ・製造記録により、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。 ・前回定検以降の制御棒クラスタの操作において、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。 ・制御棒クラスタの外観確認により、スパイダ頭部の外面に上部炉心構造物(制御棒クラスタ案内管)と干渉した痕跡が無いことを確認した。	×	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

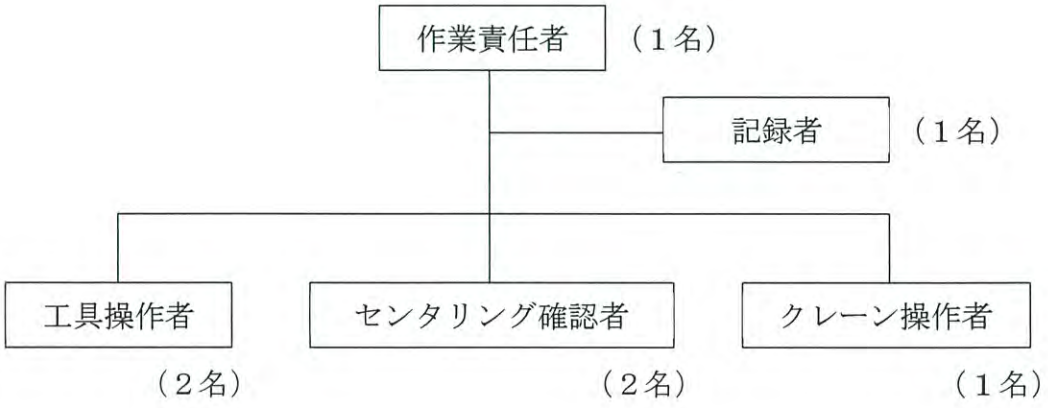
本事象は、上部炉心構造物吊り上げ時に、制御棒クラスタと駆動軸の切り離し操作を行ったにもかかわらず、制御棒クラスタが引き上がった状況であることから、事象発生時の作業管理状況の調査および作業員等への聞き取り調査により、不適切な操作の有無、操作中に特異な事象が発生していなかったかどうかについて確認した。

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

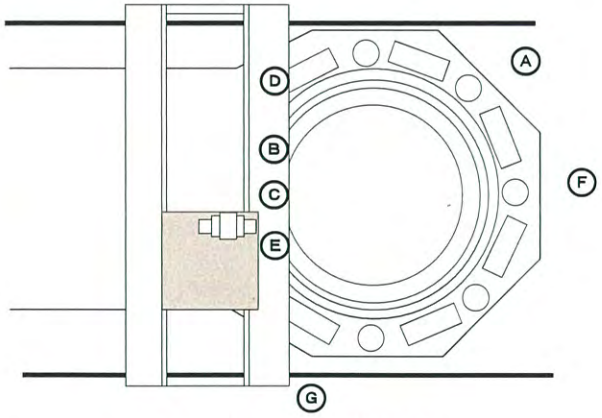
（２）作業責任者、作業員の力量

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も、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。

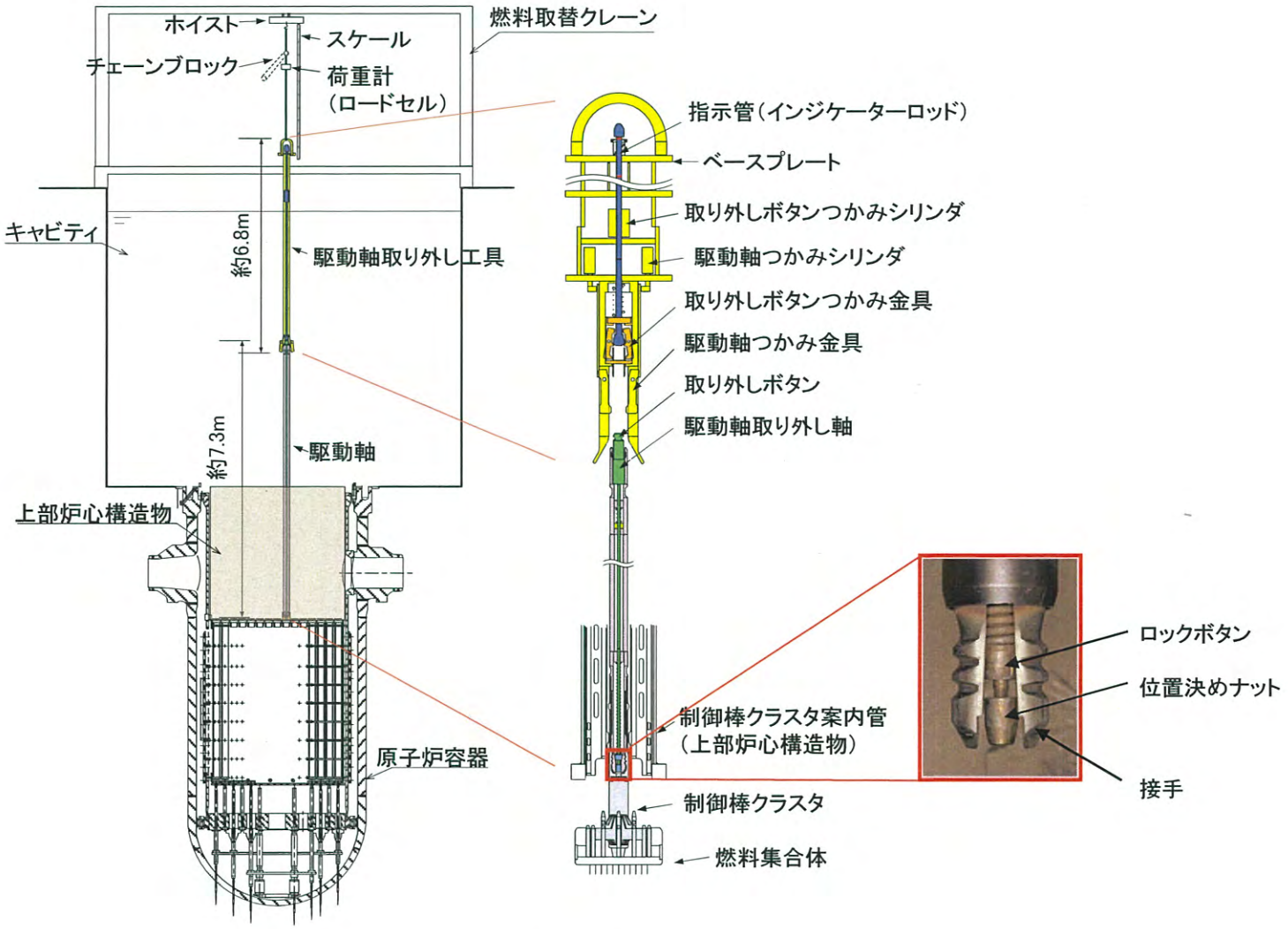
当該作業時、当社立会により、作業が確実に行われていることを確認している。

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

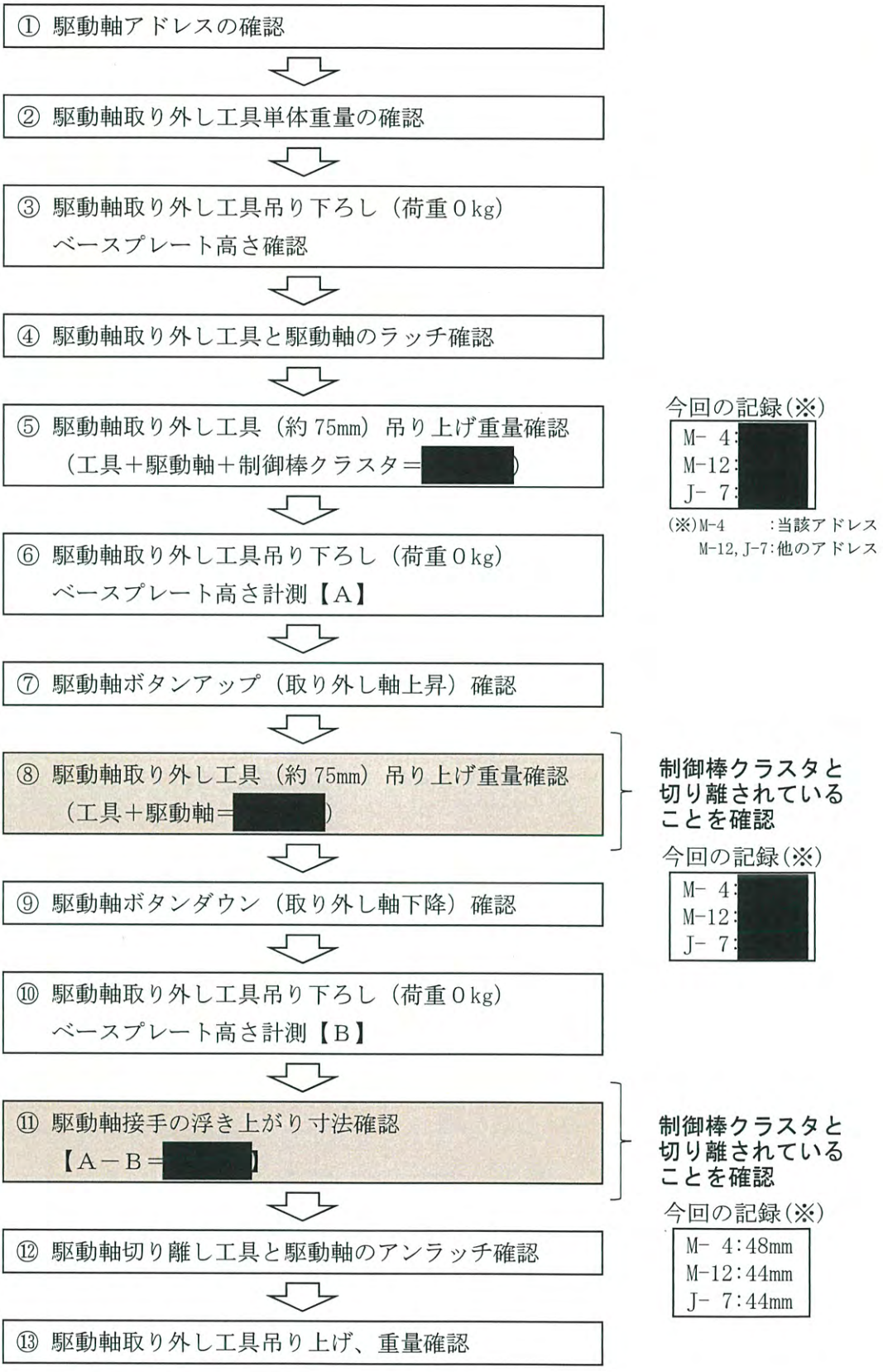
作業責任者、作業員および四電担当者は、上部炉心構造物吊り上げ操作をするため、作業手順書に従い炉内構造物吊上金具の取付、荷重計（ロードセル）による上部炉心構造物等の重量確認および水中カメラによる上部炉心構造物吊り上げ状況確認等を行っており、作業手順に問題はなかった。

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。

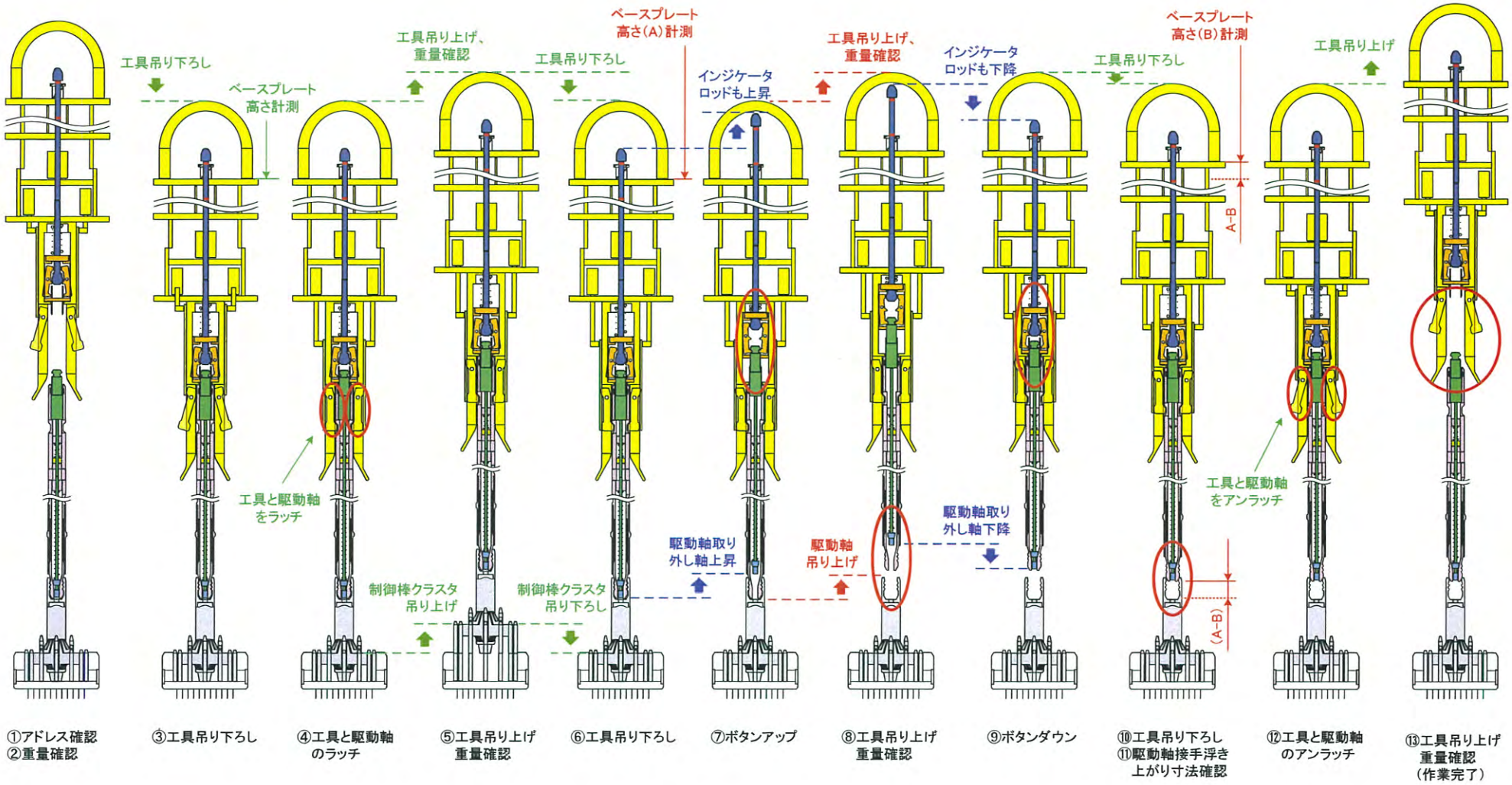

ホイスト
スケール
チェーンブロック
荷重計
（ロードセル）
燃料取替クレーン
キャビティ
約6.8m
駆動軸取り外し工具
約7.3m
駆動軸
上部炉心構造物
原子炉容器
指示管（インジケーターロッド）
ベースプレート
取り外しボタンつかみシリンダ
駆動軸つかみシリンダ
取り外しボタンつかみ金具
駆動軸つかみ金具
取り外しボタン
駆動軸取り外し軸
制御棒クラスタ案内管
（上部炉心構造物）
制御棒クラスタ
燃料集合体
ロックボタン
位置決めナット
接手

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。



図－４　作業フロー図

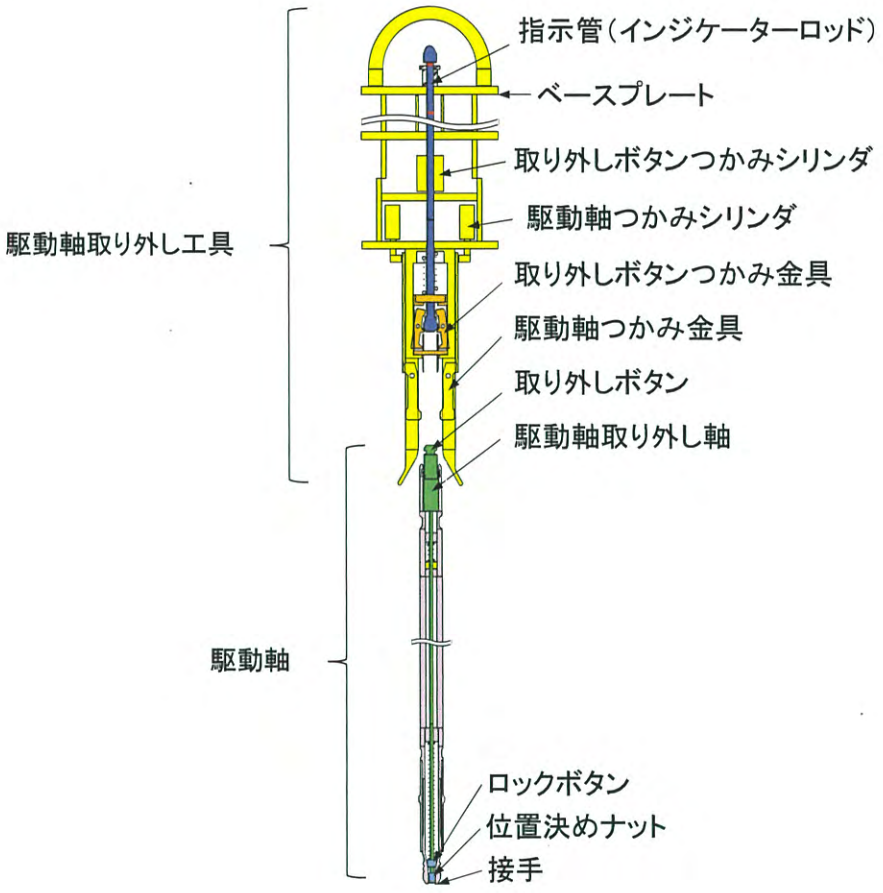

工具吊り下ろし
ベースプレート
高さ計測
工具と駆動軸
をラッチ
工具吊り上げ、
重量確認
制御棒クラスタ
吊り上げ
工具吊り下ろし
制御棒クラスタ
吊り下ろし
ベースプレート
高さ(A)計測
インジケータ
ロッドも上昇
駆動軸取り
外し軸上昇
工具吊り上げ、
重量確認
駆動軸
吊り上げ
インジケータ
ロッドも下降
駆動軸取り
外し軸下降
工具吊り下ろし
ベースプレート
高さ(B)計測
A-B
(A-B)
工具と駆動軸
をアンラッチ
工具吊り上げ
①アドレス確認
②重量確認
③工具吊り下ろし
④工具と駆動軸
のラッチ
⑤工具吊り上げ
重量確認
⑥工具吊り下ろし
⑦ボタンアップ
⑧工具吊り上げ
重量確認
⑨ボタンダウン
⑩工具吊り下ろし
⑪駆動軸接手浮き
上がり寸法確認
⑫工具と駆動軸
のアンラッチ
⑬工具吊り上げ
重量確認
(作業完了)

図－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

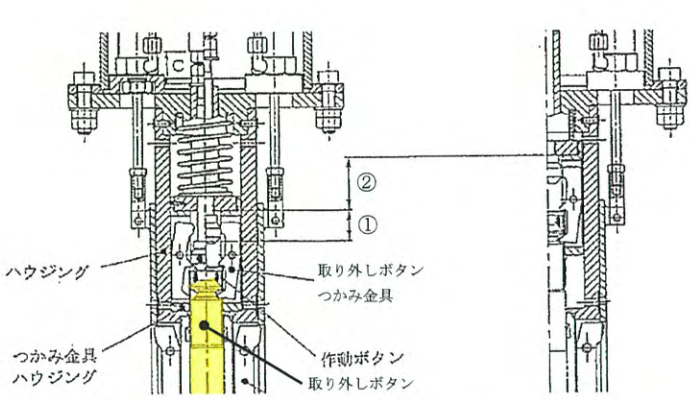
① 外観確認

傷、変形、付着物の有無を確認する。

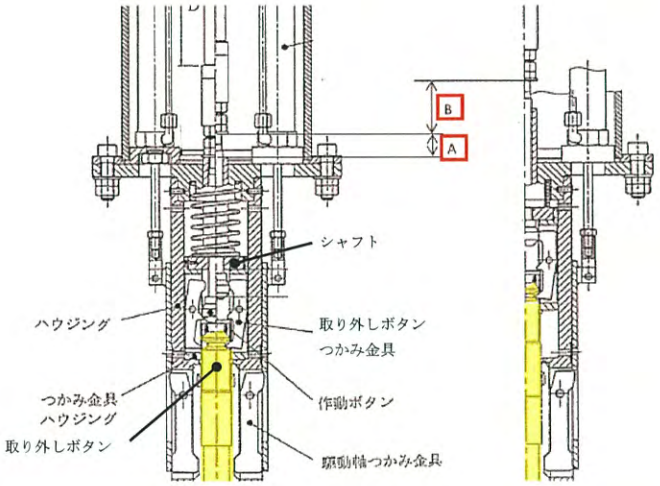
② 駆動軸取り外し工具単体での、駆動軸取り外し軸の引き上げ位置／押し下げ位置操作に係る動作確認を行う。（ストローク確認含む）

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）	[redacted]
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）	[redacted]



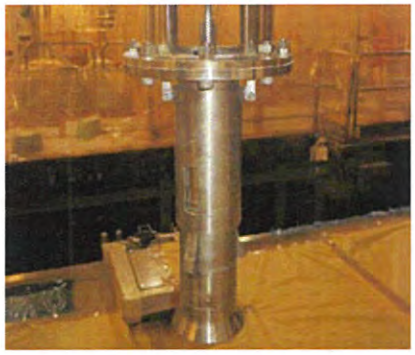
①：取り外しボタンのラッチ/アンラッチに関わるストローク
（作動ボタンがシャフトに接するまでのストローク）
②：取り外しボタンの上昇/下降に関わるストローク
（つかみ金具ハウジングの上昇ストローク）

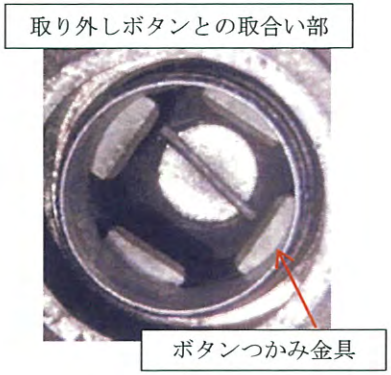
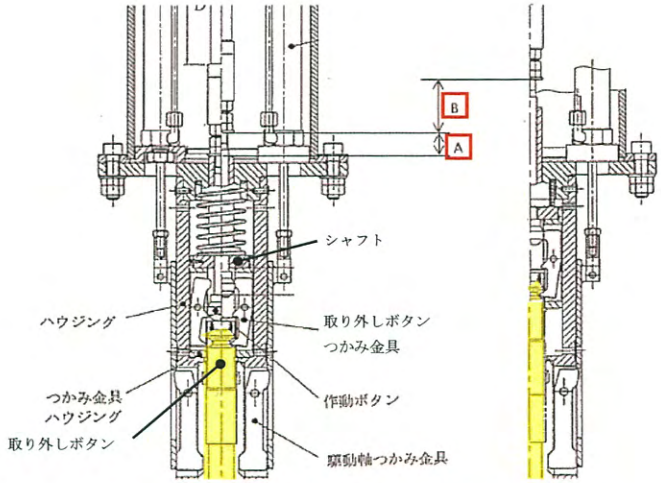


図－２　ストローク確認のための計測箇所

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

<table>
<tr><th colspan="2">調査項目</th><th>調査結果</th><th></th></tr>
<tr><td rowspan="2">駆動軸取り外し工具</td><td>外観</td><td>✓ 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
✓ 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


</td><td>・工具と駆動軸の取り合いに問題なし</td></tr>
<tr><td>ストローク・取り外し軸引き上げ荷重</td><td>✓ 工具動作は設計値を満足
<table><tr><th>ストローク</th><th>計測値（mm）</th><th>設計値（mm）</th></tr><tr><td>取り外しボタンの把持</td><td>28.5</td><td>[redacted]</td></tr><tr><td>取り外しボタン上昇ストローク</td><td>48.0</td><td>[redacted]</td></tr></table><table><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><tr><td>空気圧
0.588 MPa
(6.0kgf/cm²)</td><td>340</td><td>[redacted]</td></tr><tr><td>空気圧
0.637MPa (6.5kgf/cm²)</td><td>364</td><td>[redacted]</td></tr><tr><td>空気圧
0.686MPa (7.0kgf/cm²)</td><td>400</td><td>[redacted]</td></tr></table></td><td>・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</td></tr>
</table>

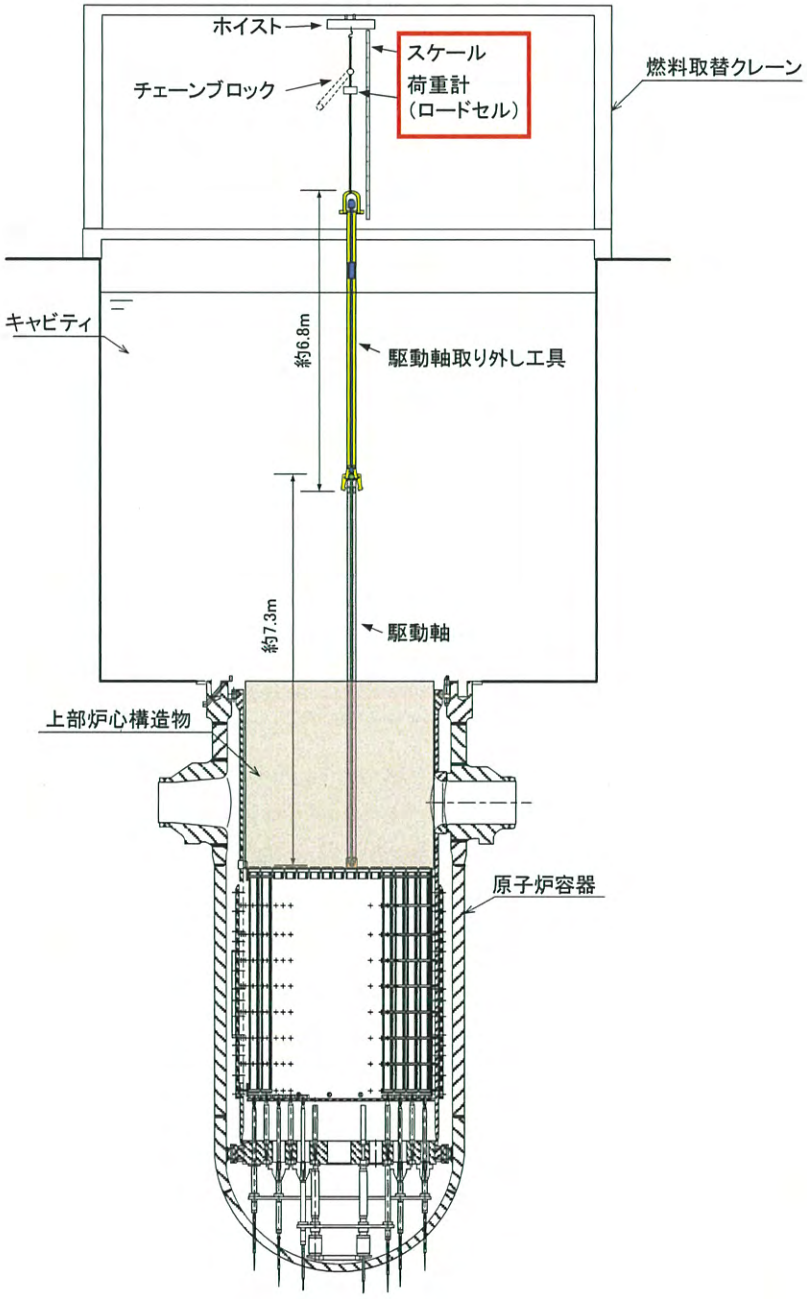
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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[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ＪＩＳ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	・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	・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

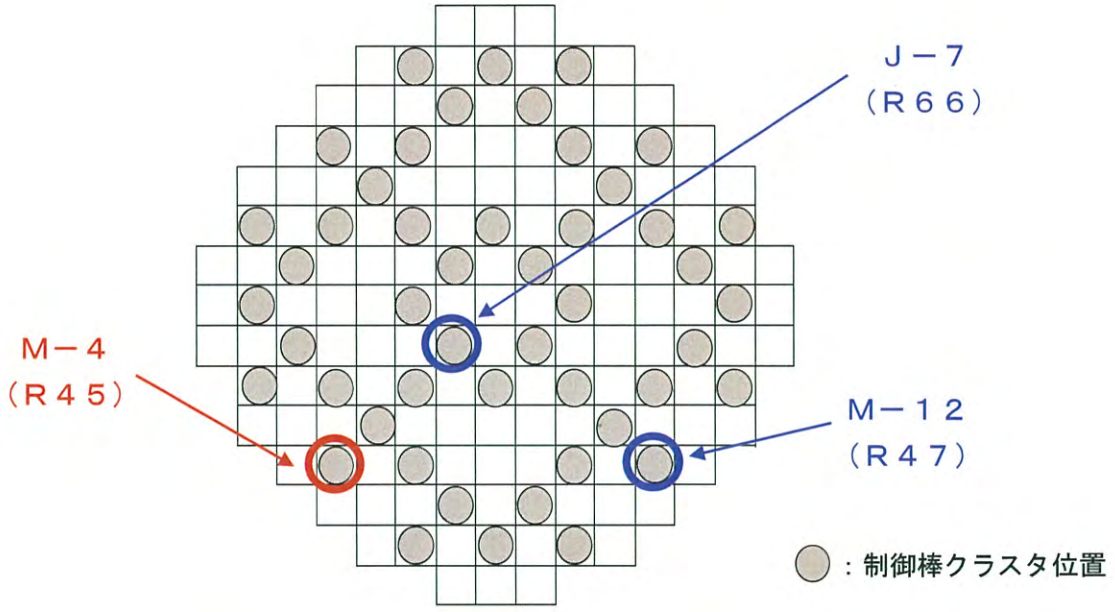
スケールについて、外観確認により有意な損傷等がないことおよびＪＩＳ１級であることを確認した。

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。

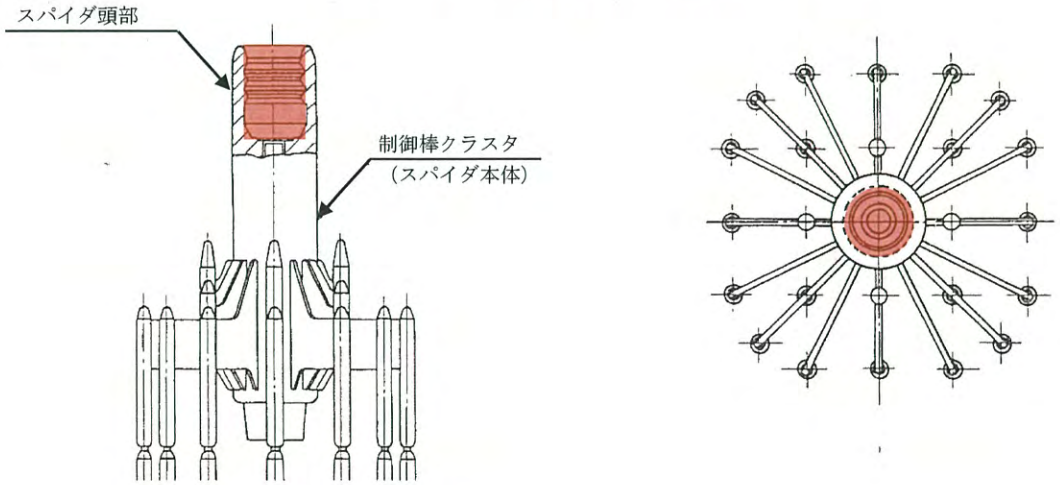
制御棒クラスタの調査結果

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

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。

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

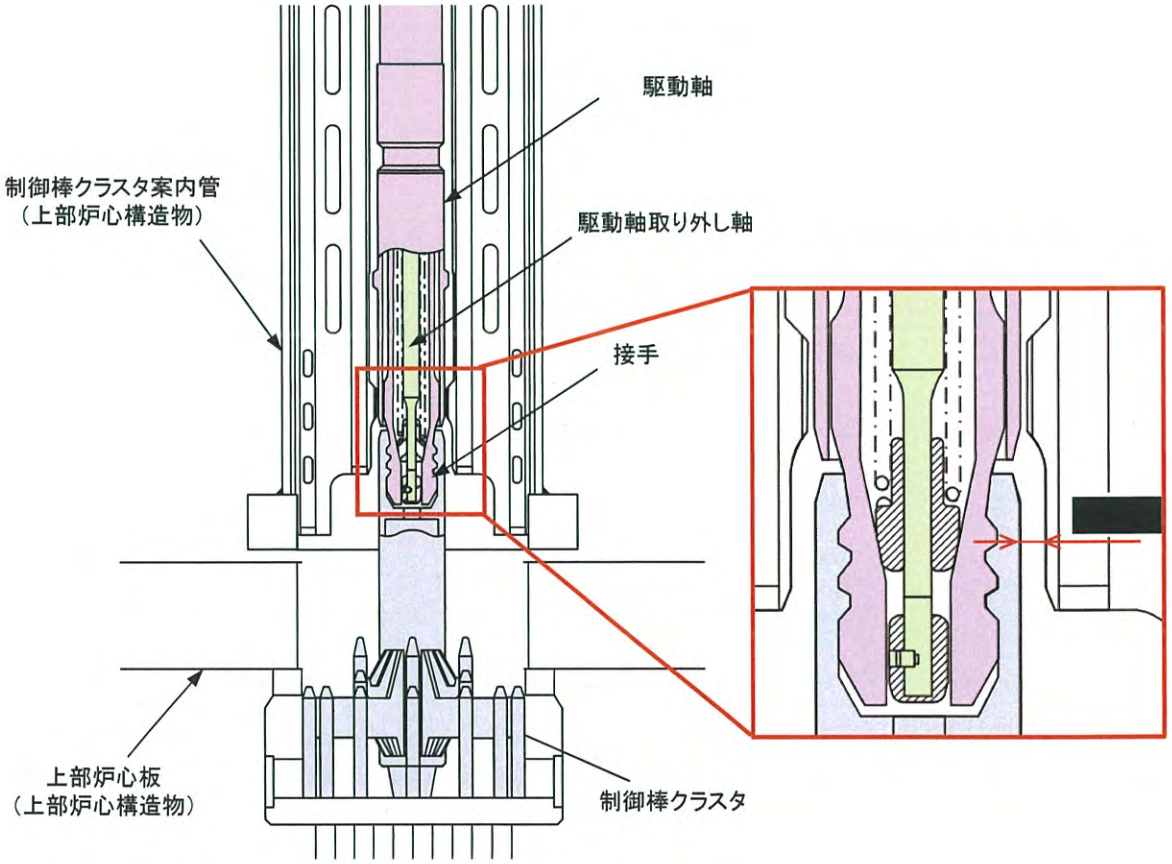
制御棒クラスタのスパイダ頭部の外観確認を実施し、損傷、変形の有無を確認するとともに、異物の有無を確認する。

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

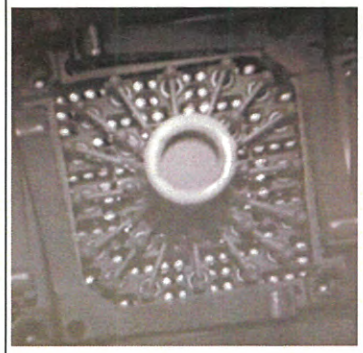
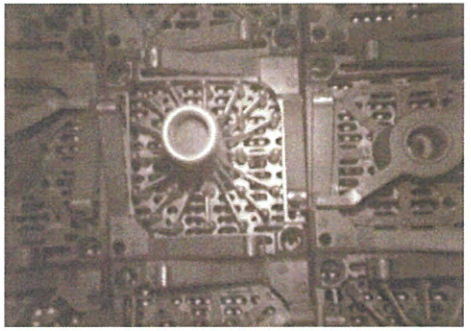
（1）図面確認結果

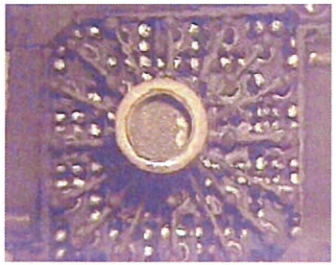
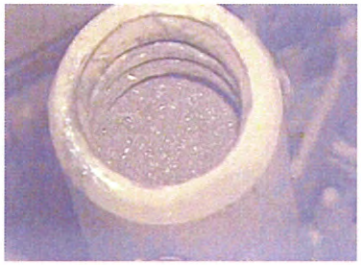
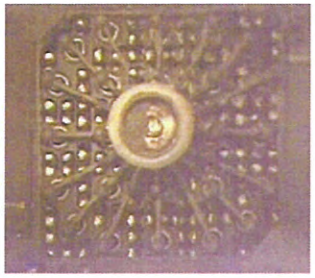
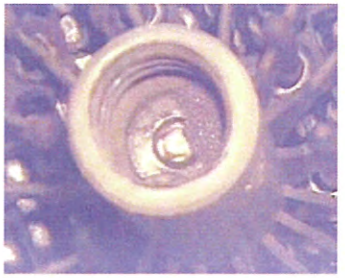
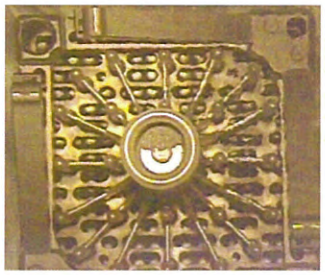
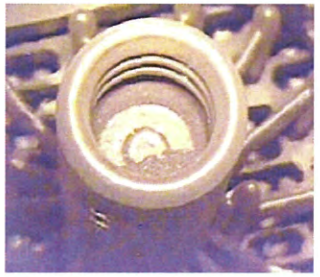
制御棒クラスタのスパイダ頭部と制御棒クラスタ案内管（上部炉心構造物）との位置関係から、設計上、物理的に干渉する可能性がないことを確認した。

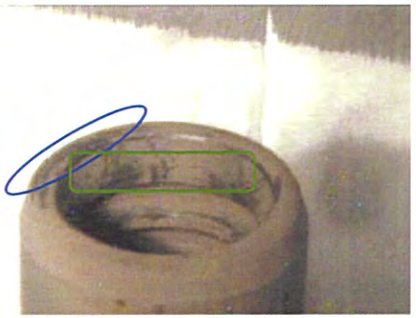
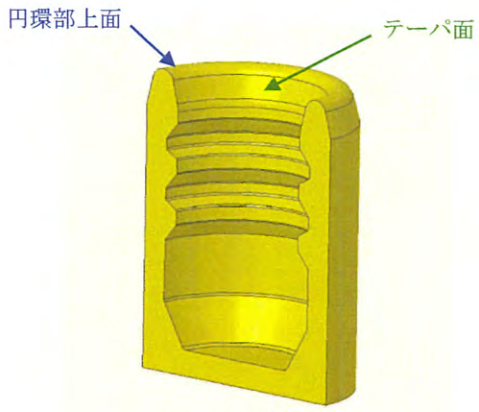
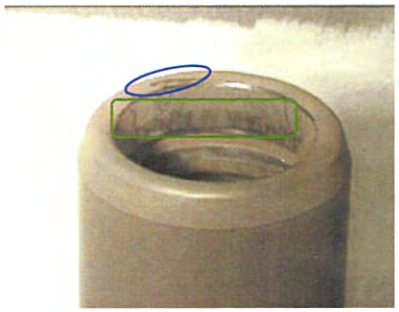
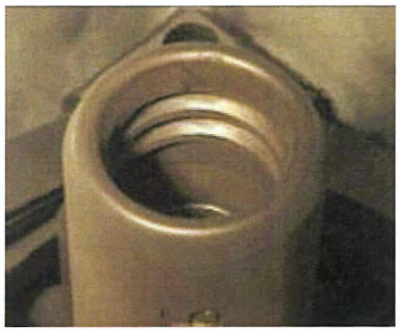


図－3　位置関係　概略図

（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	外観	スパイダ頭部	【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  	【原子炉容器内点検】 ✓ 同左   Ｍ－１２  Ｊ－７	・スパイダ頭部内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

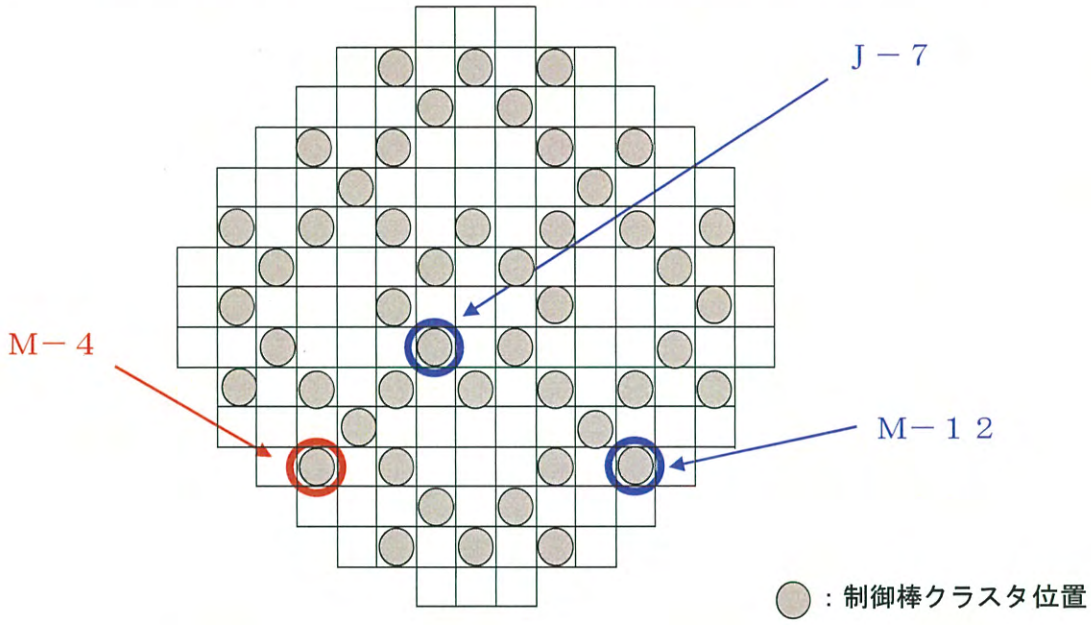
調査項目			M－４の調査結果	比較対象アドレスの調査結果	
制御棒クラスタ	外観	スパイダ頭部	【使用済燃料ピット内点検】 ✓ 水中カメラ（カラー）による確認の結果、スパイダ内部に堆積物あり  	【使用済燃料ピット内点検】 ✓ 水中カメラ（カラー）による確認の結果、スパイダ内部に堆積物あり   M－１２   J－７	・スパイダ頭部内に堆積物が確認された

調査項目			M－４の調査結果	比較対象アドレスの調査結果	
制御棒クラスタ	外観	スパイダ頭部	【使用済燃料ピット内点検】 ✓ 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   スパイダ頭部	【使用済燃料ピット内点検】 ✓ 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  M－１２  Ｊ－７	・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 ・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

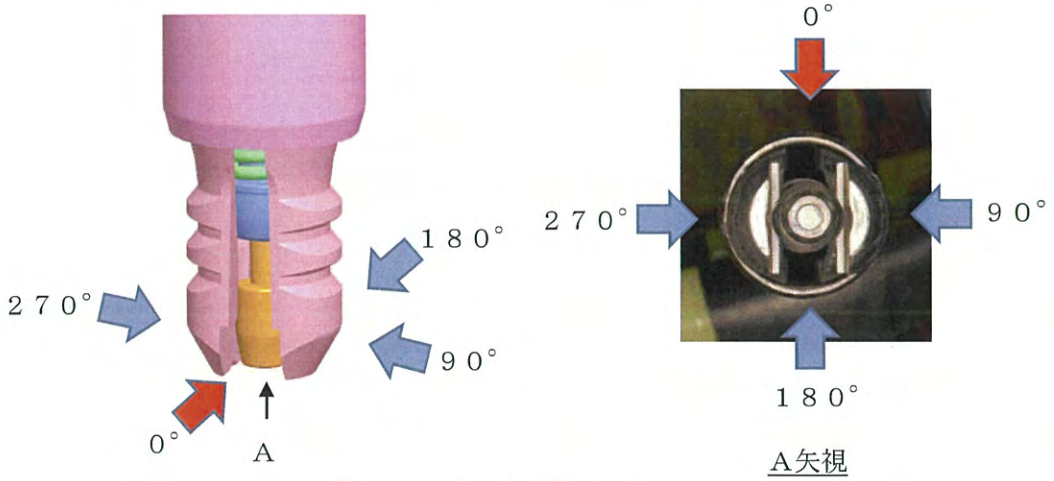
駆動軸の調査結果

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

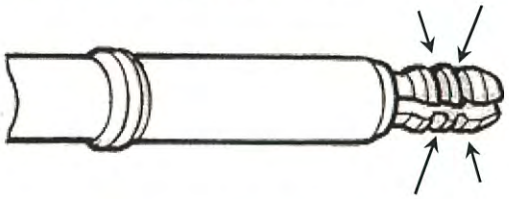
２．調査内容

（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。

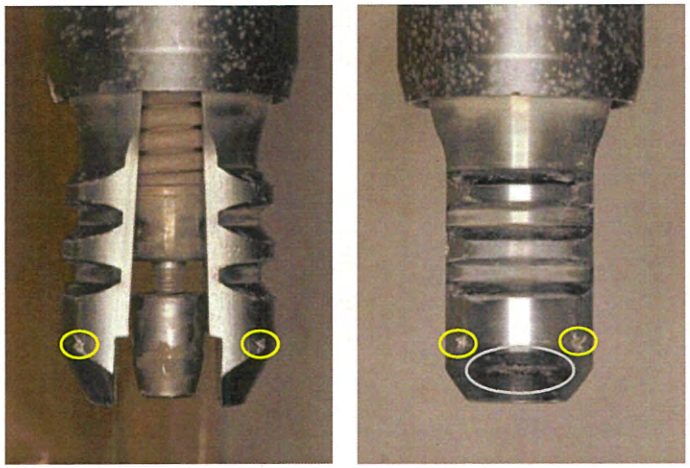
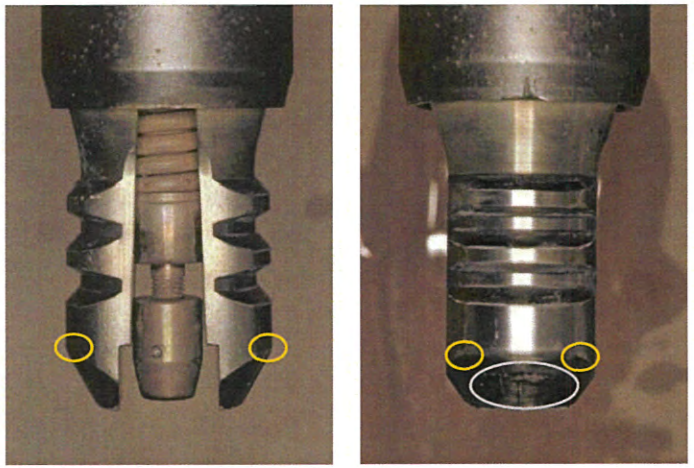
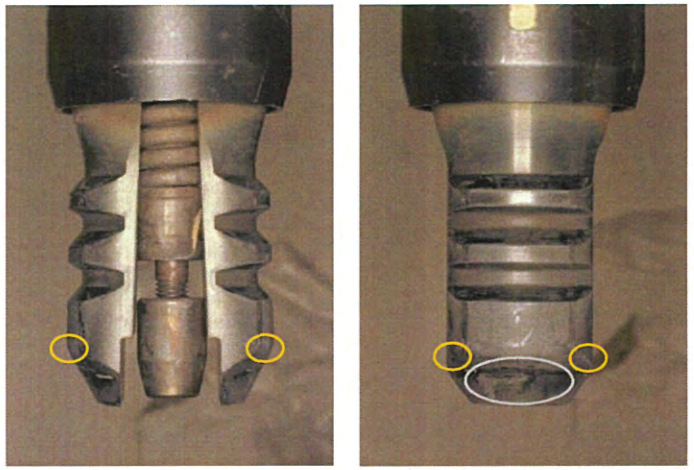
・接手の外径

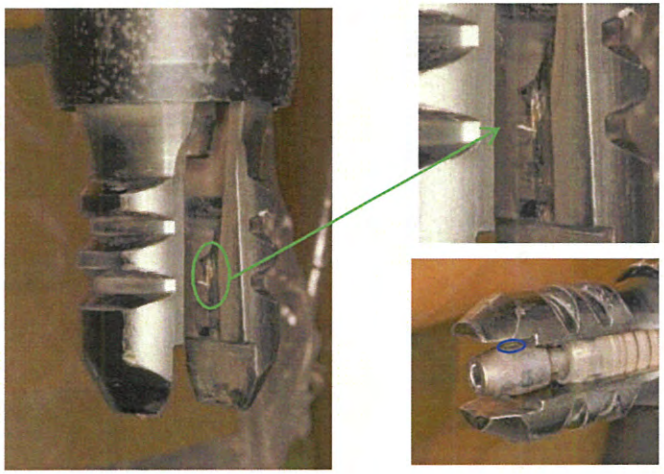
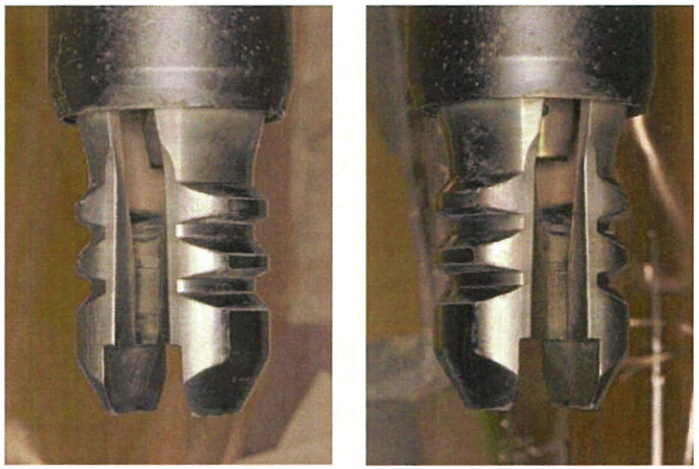
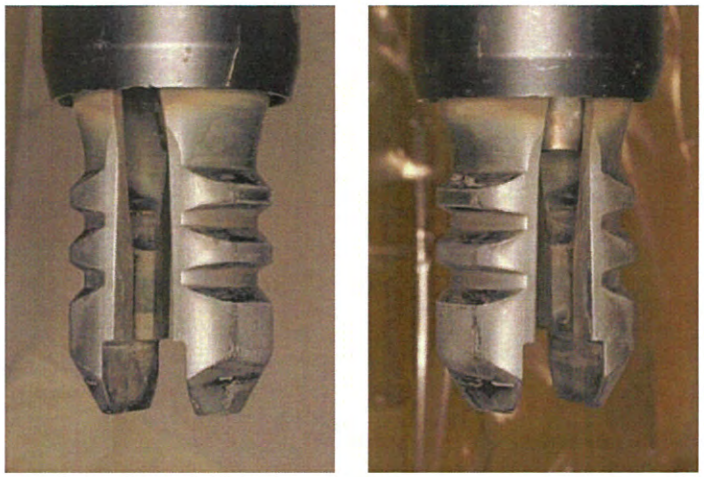
・位置決めナットの位置（接手先端からの距離）

（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。

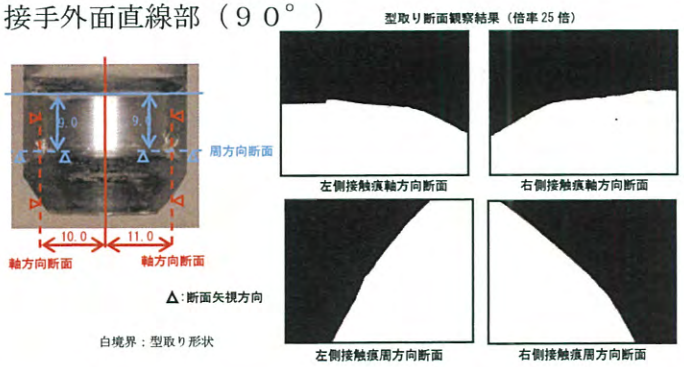
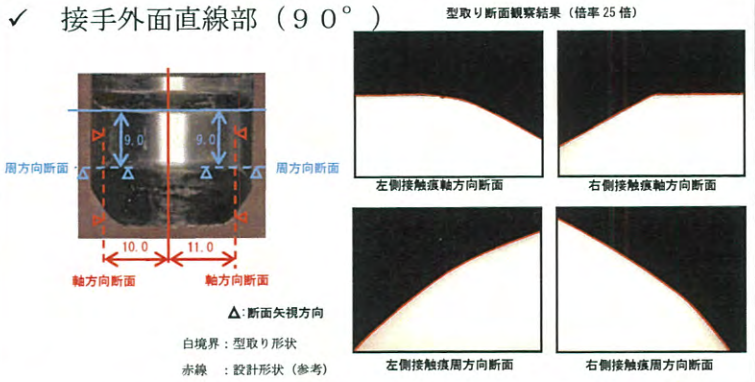
3．調査結果

調査項目			M－４の調査結果	比較対象アドレスの調査結果	
駆動軸	外観	接手外面	✓ 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 ✓ 接手先端テーパ部に周方向の接触痕あり（金属光沢なし）…灰色枠 	✓ 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 ✓ 接手先端テーパ部に周方向の接触痕あり（金属光沢なし）…灰色枠  M－１２  Ｊ－７	・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頭部の内面テーパ部と取り合う箇所に相当し、金属光沢はなかった

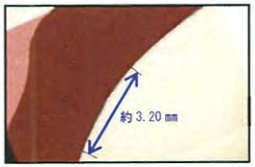
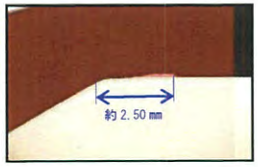
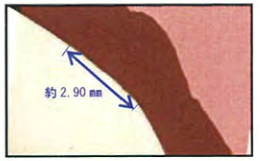
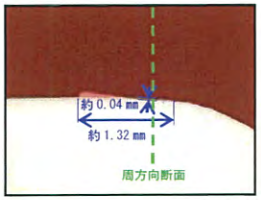
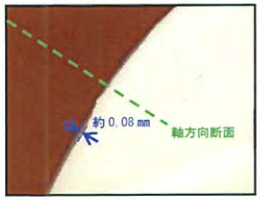
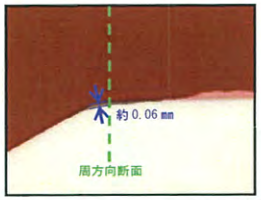
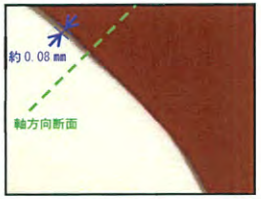
調査項目			M－４の調査結果	比較対象アドレスの調査結果	
駆動軸	外観	接手内面	✓ 接手内面直線部に接触痕あり（金属光沢、線状…緑枠） 	✓ 接手内面直線部に金属光沢を有する接触痕なし  M－１２  Ｊ－７	・金属光沢を有するM－４接触痕（緑枠）は今回生じた可能性がある ・内面直線部は位置決めナット/ロックボタンが摺動する部位であるが、比較対象には有意な接触痕なし。したがって、M－４接触痕は今回生じた可能性がある ・M－４位置決めナット直線部に線状の接触痕（青枠）が確認された

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  M－１２  J－７	・駆動軸取り外し軸の引き上げ／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ー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  M－１２  J－７	・駆動軸ラッチ／アンラッチ操作時に駆動軸取り外し工具と取り合うM－４駆動軸つかみ部周辺に有意な傷なし

※　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）	
駆動軸	接手部の型取り	✓ 接手外面直線部（９０°）  	✓ 接手外面直線部（９０°）  	・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有意に深かった ・当該接触痕は、今回生じた可能性がある

✓ 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 0.04～0.08㎜ 程度

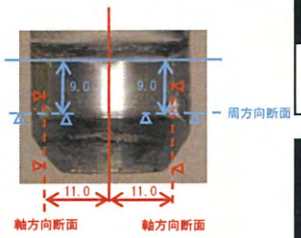
	左側接触痕		右側接触痕	
	軸方向断面	周方向断面	軸方向断面	周方向断面
倍率10倍				
倍率25倍				

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）

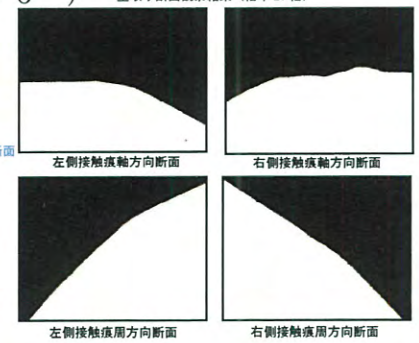
部位	計測値（㎜）
外面の局所的接触痕 （９０° 左側）	長さ：約 1.32 幅　：約 3.20 深さ：約 0.04～0.08

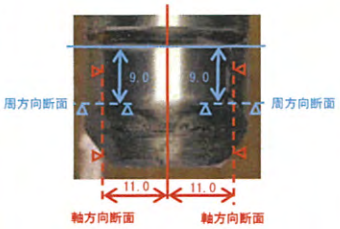
部位	計測値（㎜）
外面の局所的接触痕 （９０° 右側）	長さ：約 2.50 幅　：約 2.90 深さ：約 0.06～0.08

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）	
駆動軸	接手部の型取り	✓ 接手外面直線部（２７０°）	✓ 接手外面直線部（２７０°）	

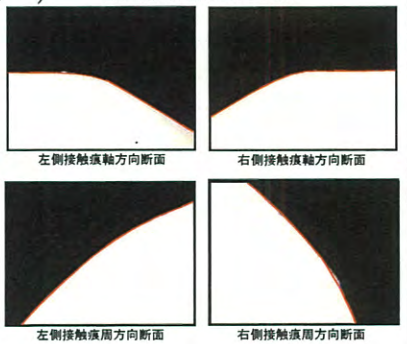


型取り断面観察結果（倍率 25 倍）

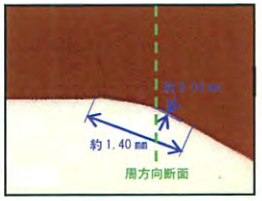
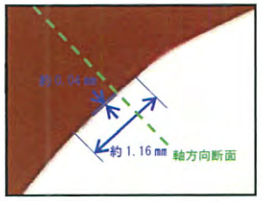
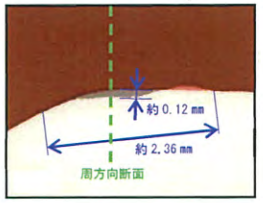
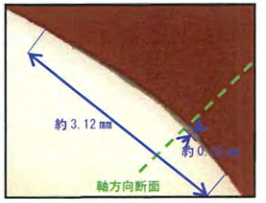




型取り断面観察結果（倍率 25 倍）



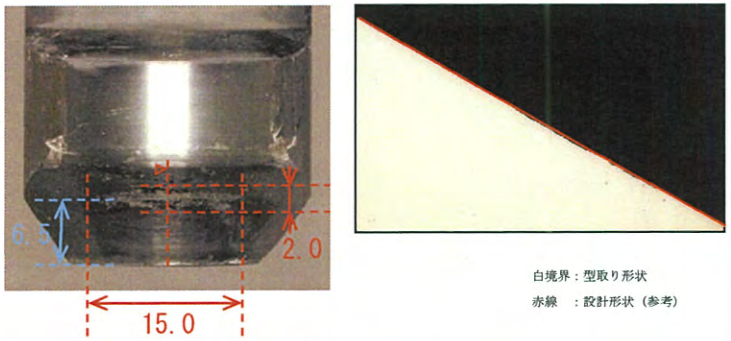
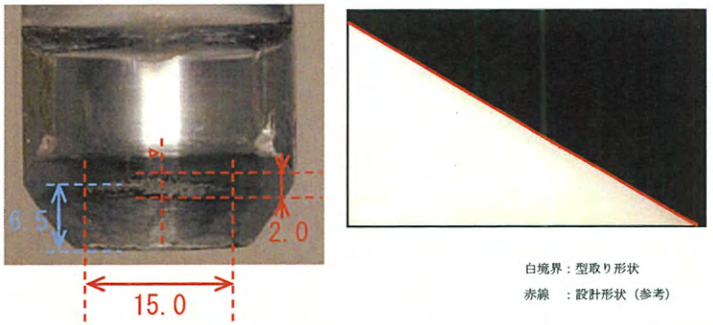
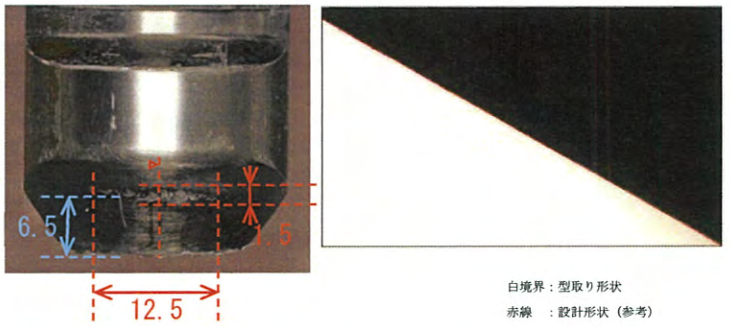
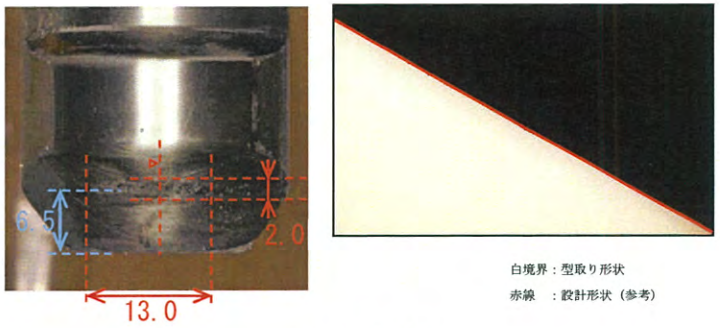
✓ M－４と比較対象アドレスの外面の局所的接触痕深さの差は 0.04～0.12mm 程度

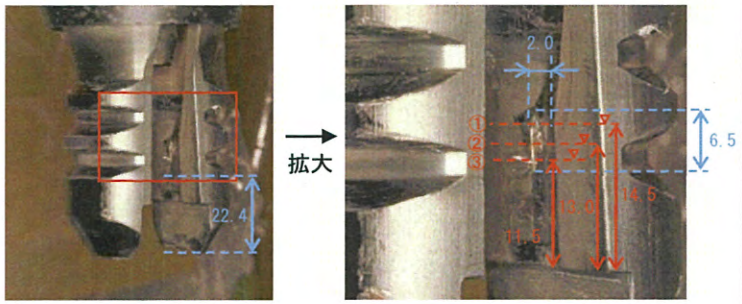
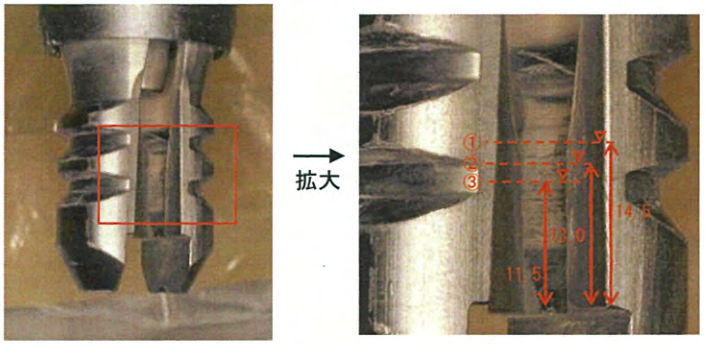
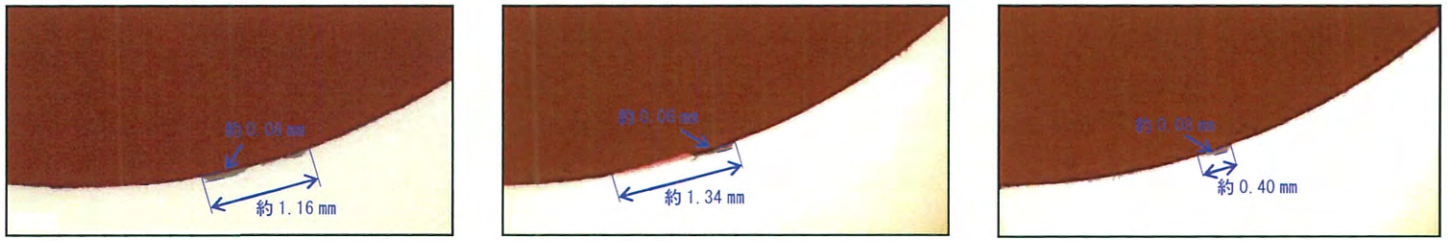
	左側接触痕		右側接触痕	
	軸方向断面	周方向断面	軸方向断面	周方向断面
倍率10倍				
倍率25倍				

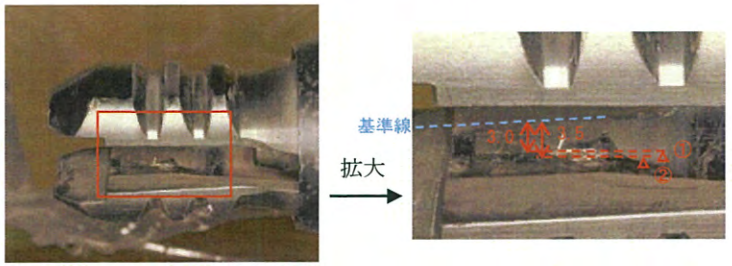
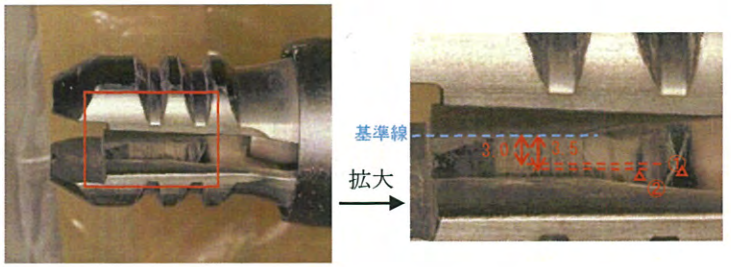
部位	計測値（mm）
外面の局所的接触痕（２７０° 左側）	長さ：約 1.40 幅　：約 1.16 深さ：約 0.04

部位	計測値（mm）
外面の局所的接触痕（２７０° 右側）	長さ：約 2.36 幅　：約 3.12 深さ：約 0.08～0.12

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）

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）	
駆動軸	接手部の型取り	✓ 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㎜以下程度  ９０°側  ２７０°側 部位：外面テーパ部の周方向接触痕 計測値（㎜）：長さ：約2.0 幅　：約15.0 深さ：測定下限値以下（0.02㎜以下）	✓ 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㎜以下程度  ９０°側  ２７０°側 部位：外面テーパ部の周方向接触痕 計測値（㎜）：長さ：約1.5～約2.0 幅　：約12.5～約13.0 深さ：測定下限値以下（0.02㎜以下）	・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－１２の接触痕に有意な差なし

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）	
駆動軸	接手部の型取り	✓ 接手内面直線部（２７０° 周方向） 	✓ 接手内面直線部（２７０° 周方向） 	・M－４の接手内面直線部に線状の接触痕が確認された。M－１２では同様の接触痕は確認されなかった
		✓ M－４とM－１２のプロファイル比較（周方向） 型取り断面観察結果（倍率 25 倍）  断面①　断面②　断面③ 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）		

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）	
駆動軸	接手部の型取り	✓ 接手内面直線部（２７０° 軸方向）  ①は基準線（内面エッジ）から 3.0 ㎜位置 ②は基準線（内面エッジ）から 3.5 ㎜位置	✓ 接手内面直線部（２７０° 軸方向）  ①は基準線（内面エッジ）から 3.0 ㎜位置 ②は基準線（内面エッジ）から 3.5 ㎜位置	

✓ M－４とM－１２のプロファイル比較（軸方向）

型取り断面観察結果（倍率 25 倍）



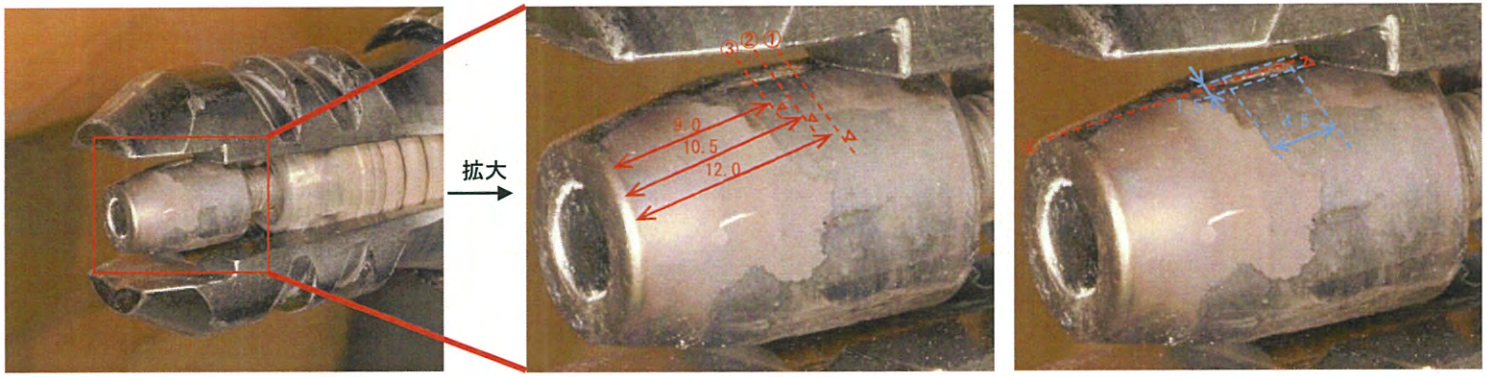
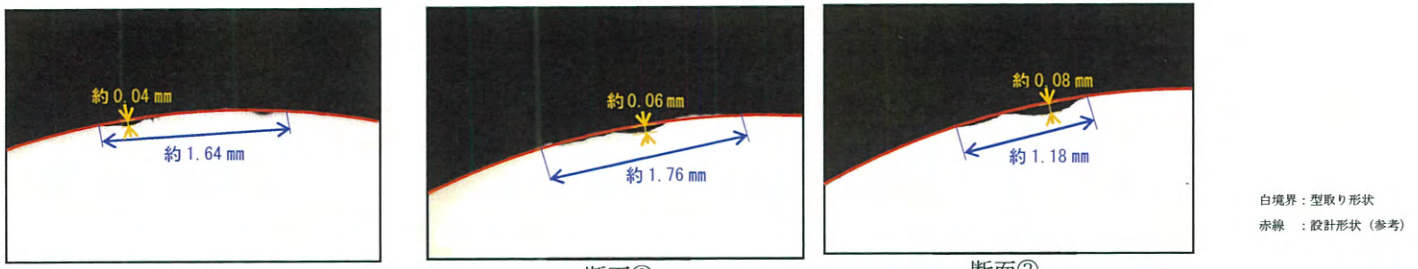
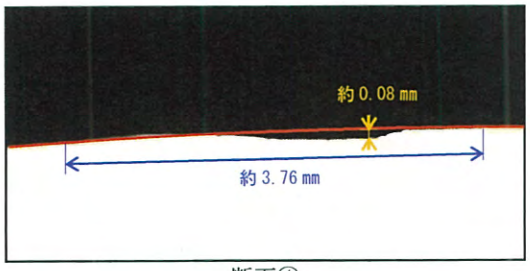
断面①



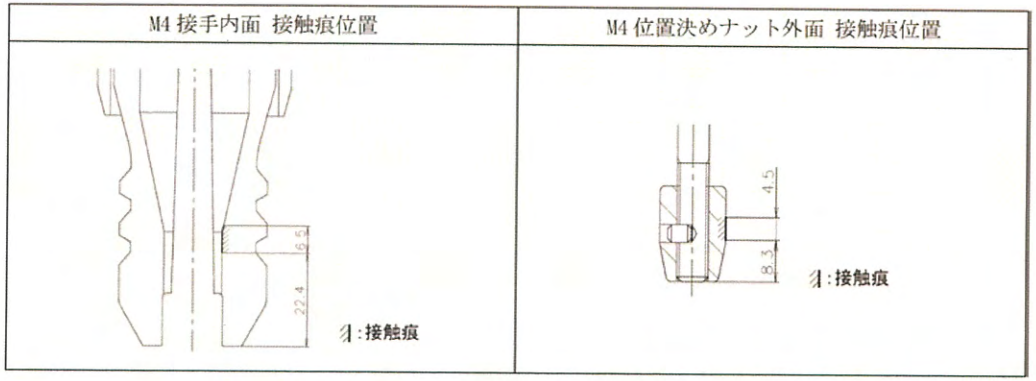
断面②

部位	計測値（㎜）
内面テーパ部近傍の接触痕	長さ：約 6.5 幅　：約 2.0 深さ：約 0.08

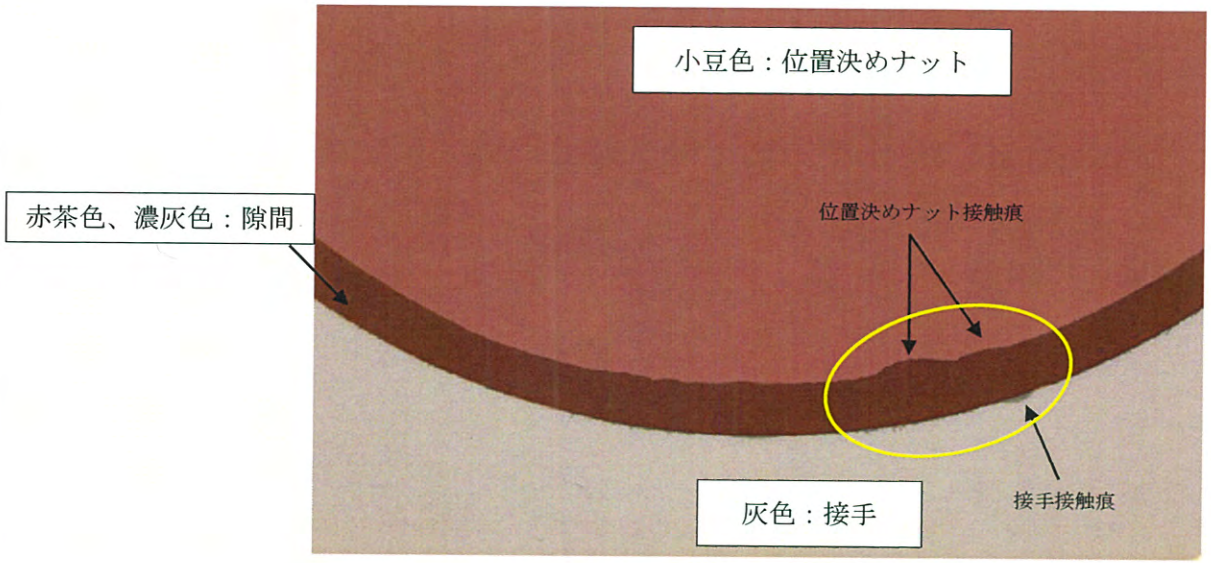
白境界：M-4
赤境界：比較アドレス
ピンク：差（M-4 の方が凸）
灰色　：差（M-4 の方が凹）

調査項目		M－４の調査結果	
駆動軸	位置決めナットの型取り	 ①はナット先端から 12.0 ㎜位置 ②はナット先端から 10.5 ㎜位置 ③はナット先端から 9.0 ㎜位置 ④は270° を上側にした中央線から時計回りに 1.5 ㎜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 ✓ M－４のプロファイル  断面①　断面②　断面③ 白境界：型取り形状 赤線　：設計形状（参考）  断面④ 部位：位置決めナットの接触痕 計測値（㎜）：長さ：約 4.5 幅　：約 1.5 深さ：約 0.08	・位置決めナット直線部に線状の接触痕が確認された

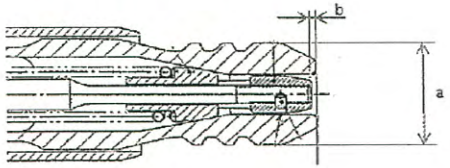
調査項目		M－４の調査結果	
駆動軸	接手および位置決めナットの型取り	✓ 接手内面と位置決めナットの接触痕は、共に線状であり、方向も一致している。	・位置決めナットの直線部と接手内面の直線部が接触する取り合いであり、位置決めナットの上下降時に生じた可能性がある ・幾何学的に接触痕発生には介在物が関与した可能性が高く、接触痕の大きさから、介在物は約1mm 程度の大きさのものが存在していた可能性がある

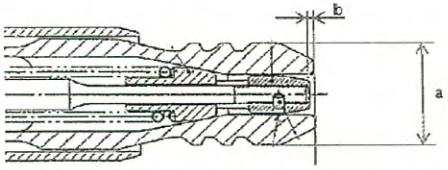


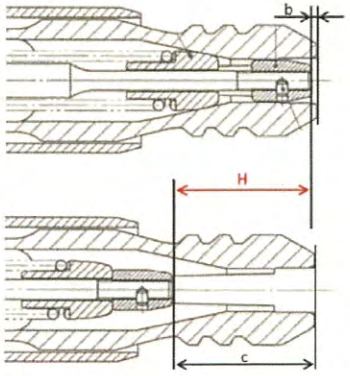
接手内面および位置決めナットの接触痕位置

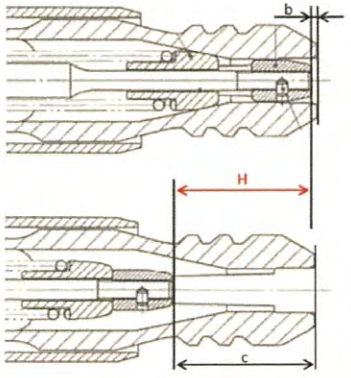


接手内面および位置決めナット接触痕の型取り重ね合わせ結果

<table>
<tr><th colspan="2">調査項目</th><th>M－４の調査結果</th><th>比較対象アドレスの調査結果</th><th></th></tr>
<tr><td rowspan="2">駆動軸</td><td>接手部の寸法計測</td><td>✓ 設計上想定される寸法を満足


<table><tr><th></th><th>計測値（mm）</th><th>参考値（mm）</th></tr><tr><td>a</td><td>39.6</td><td>[redacted]</td></tr><tr><td>b</td><td>1.3</td><td></td></tr></table></td><td>✓ M－４と有意差なし、設計上想定される寸法を満足


<table><tr><th></th><th>計測値（mm）</th><th>参考値（mm）</th></tr><tr><td>a</td><td>38.9（M-12）
39.0（J- 7）</td><td>[redacted]</td></tr><tr><td>b</td><td>1.3（M-12）
1.2（J- 7）</td><td></td></tr></table></td><td>・駆動軸取り外し軸の押し下げ位置でのM－４接手寸法に問題なし</td></tr>
<tr><td>駆動軸取り外し軸動作点検</td><td>✓ 位置決めナットのストロークは設計寸法を満足


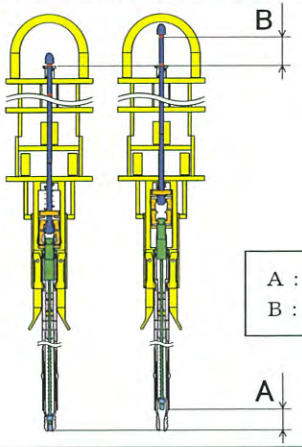
H=c-b
<table><tr><th></th><th>計測値（mm）</th><th>設計値（mm）</th></tr><tr><td>H</td><td>45.8</td><td>[redacted]</td></tr></table></td><td>✓ 同左、M－４と有意差なし


H=c-b
<table><tr><th></th><th>計測値（mm）</th><th>設計値（mm）</th></tr><tr><td>H</td><td>45.4（M-12）
45.7（J- 7）</td><td>[redacted]</td></tr></table></td><td>・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な差なし</td></tr>
</table>

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。

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）	
駆動軸	駆動軸取り外し軸動作点検	詳細（工具側含む）	✓ 駆動軸取り外し軸の押し下げ動作に異常なし ✓ 押し下げ動作方向に空気加圧しなくても取り外し軸廻りのばね力のみで押し下げ動作完結 【設計値】 位置決めナット： 位置決めナット下端のストローク量（設計値：[redacted]） 工具（操作軸）： 操作軸（ケガキ線位置）のストローク量（設計値：[redacted]）	✓ 同左、M－４と有意差なし （M－１２動作結果）	・M－４ストローク量、追従性に問題なし ・なお、空気圧が低い状態（約0.2MPa）では駆動軸取り外し軸の引き上げが不十分となるが、他の駆動軸と同様であり、特異なものではないことを確認した

所内用空気供給圧力（MPa）	引き上げ動作時間（秒）	押し下げ動作時間（秒）	ストローク量（mm）		フルストローク動作
			位置決めナット位置	工具ケガキ線位置	
0.7（定格）	1	1未満	45.8	77.0	○
0.6	1	1未満	45.9	77.0	○
0.5	1	1未満	45.7	77.0	○
0.4	1	1未満	45.8	77.0	○
0.3	2	1未満	46.0	77.0	○
0.2	—	—	22.5	54.3	×
排気操作のみ					○



A：位置決めナット下端のストローク量
B：操作軸（ケガキ線位置）のストローク量

所内用空気供給圧力（MPa）	引き上げ動作時間（秒）	押し下げ動作時間（秒）	ストローク量（mm）		フルストローク動作
			位置決めナット位置	工具ケガキ線位置	
0.7（定格）	1	1未満	45.4	77.0	○
0.6	1	1未満	45.1	77.0	○
0.5	1	1未満	45.1	77.0	○
0.4	1	1未満	45.2	77.0	○
0.3	2	1未満	45.1	77.0	○
0.2	—	—	22.4	54.0	×
排気操作のみ					○

（J－７動作結果）

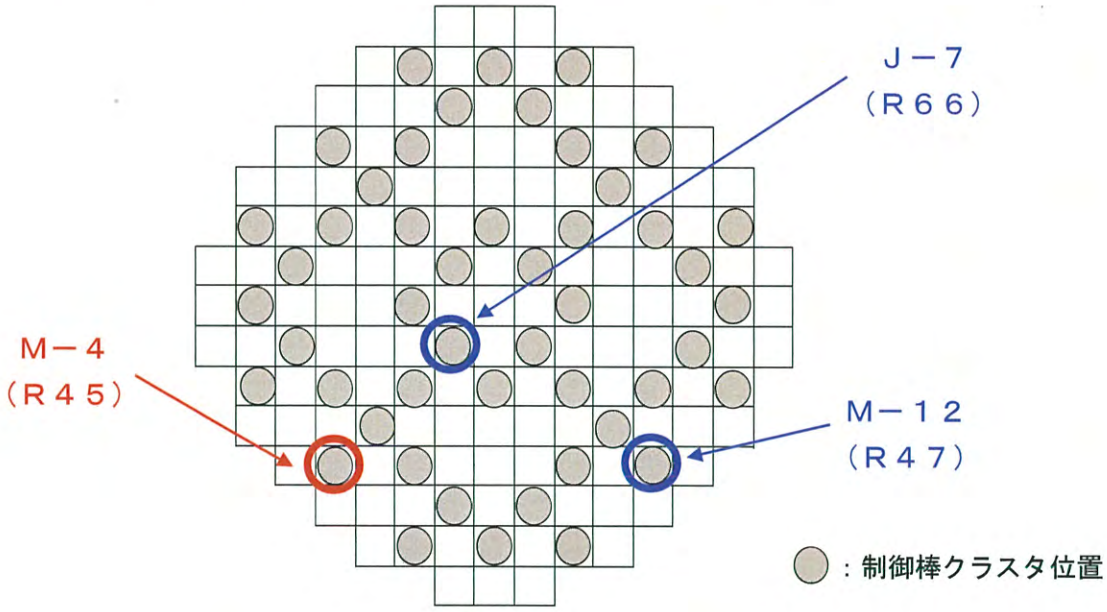
所内用空気供給圧力（MPa）	引き上げ動作時間（秒）	押し下げ動作時間（秒）	ストローク量（mm）		フルストローク動作
			位置決めナット位置	工具ケガキ線位置	
0.7（定格）	1	1未満	45.7	77.0	○
0.6	1	1未満	45.6	77.0	○
0.5	1	1未満	45.6	77.0	○
0.4	1	1未満	45.5	77.0	○
0.3	2	1未満	45.5	77.0	○
0.2	—	—	18.7	48.5	×
排気操作のみ					○

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。

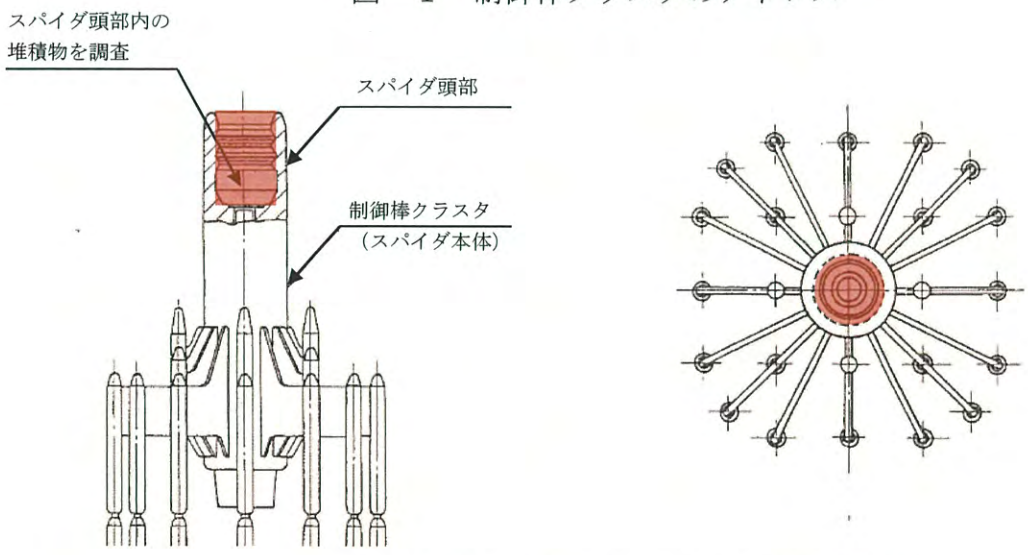
堆積物の調査結果

１．調査対象

番　号	アドレス	使用期間	選定理由	
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



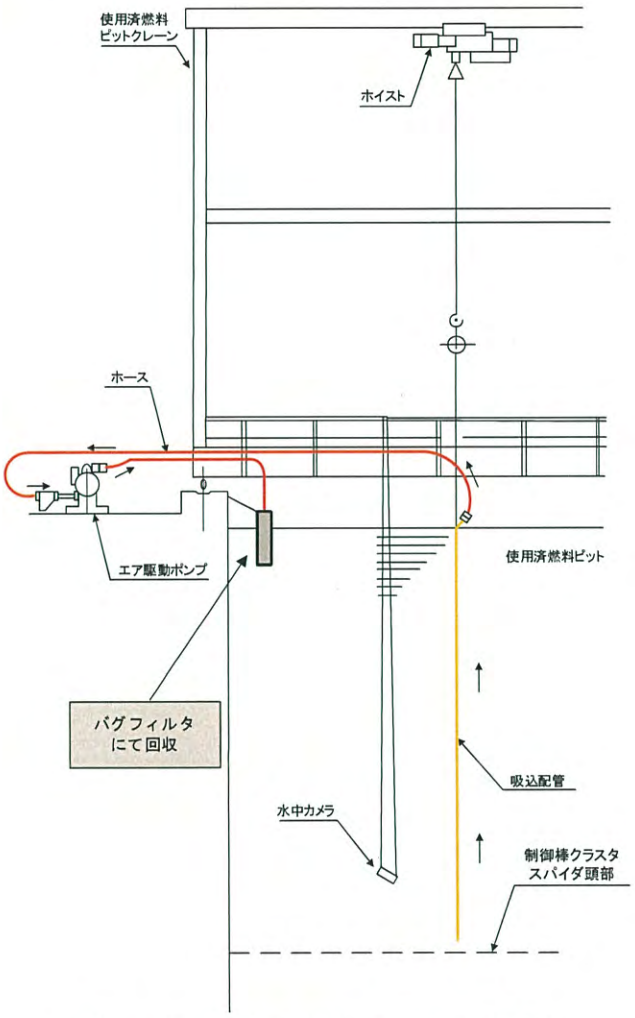
図－２　制御棒クラスタ・スパイダ頭部詳細図

2．調査内容

（1）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

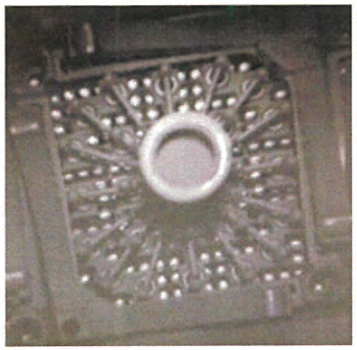
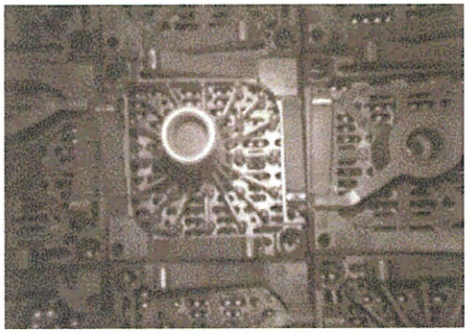
（2）堆積物のサイズ、形状の確認

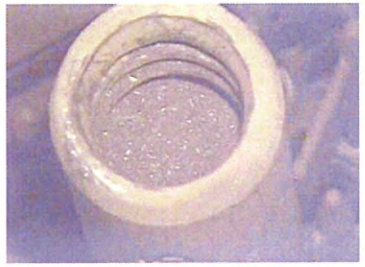
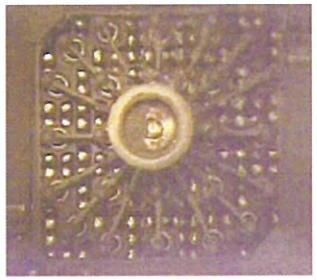
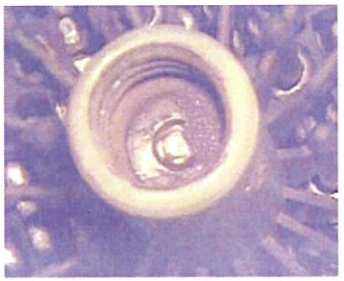
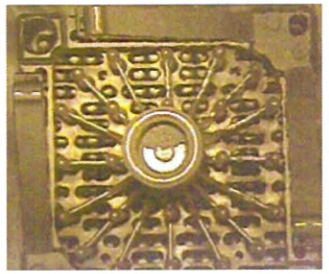
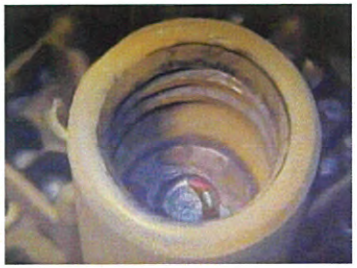
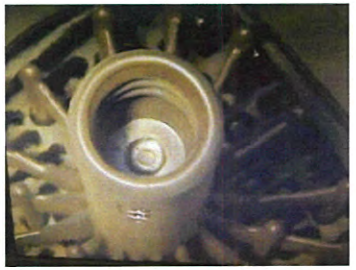
（1）で回収した堆積物について、サイズおよび形状等を確認する。

（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

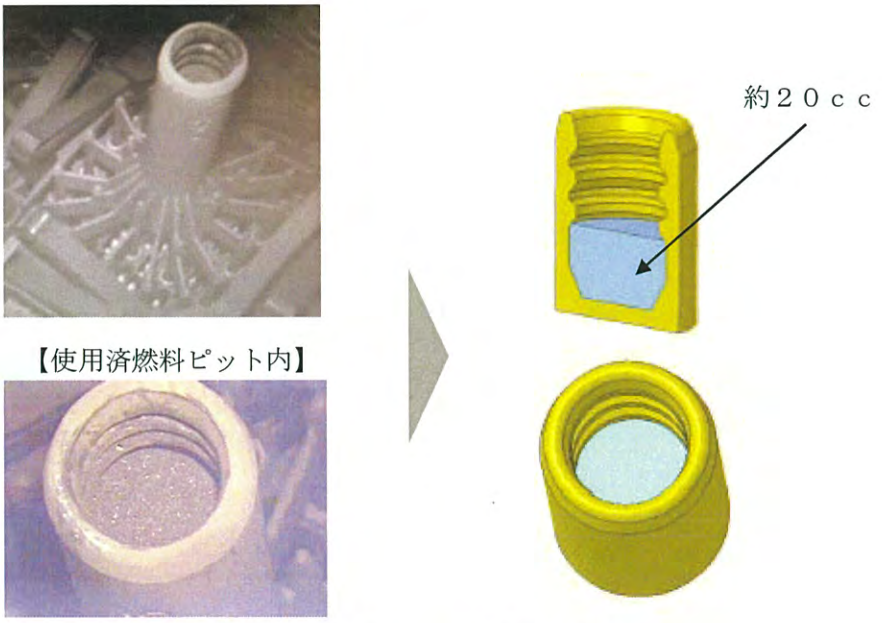
調査項目			Ｍ－４の調査結果	比較対象アドレスの調査結果	
制御棒クラスタ	堆積物	スパイダ頭部	【原子炉容器内点検】 ✓ 水中カメラ（白黒）により、スパイダ頭部を確認したところスパイダ内部に堆積物あり  	【原子炉容器内点検】 ✓ 同左   Ｍ－１２  Ｊ－７	・スパイダ頭部内に堆積物が確認された ・Ｍ－４、Ｍ－１２、Ｊ－７の堆積物量はスパイダ頭部内底部の円形の機械加工模様が見えない程度 ・Ｍ－４の堆積物はスパイダ頭部内の上から三山目よりも下の領域に堆積

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	堆積物	スパイダ頭部	【使用済燃料ピット内点検】 ✓　水中カメラ（カラー）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】 	【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	・スパイダ頭部内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

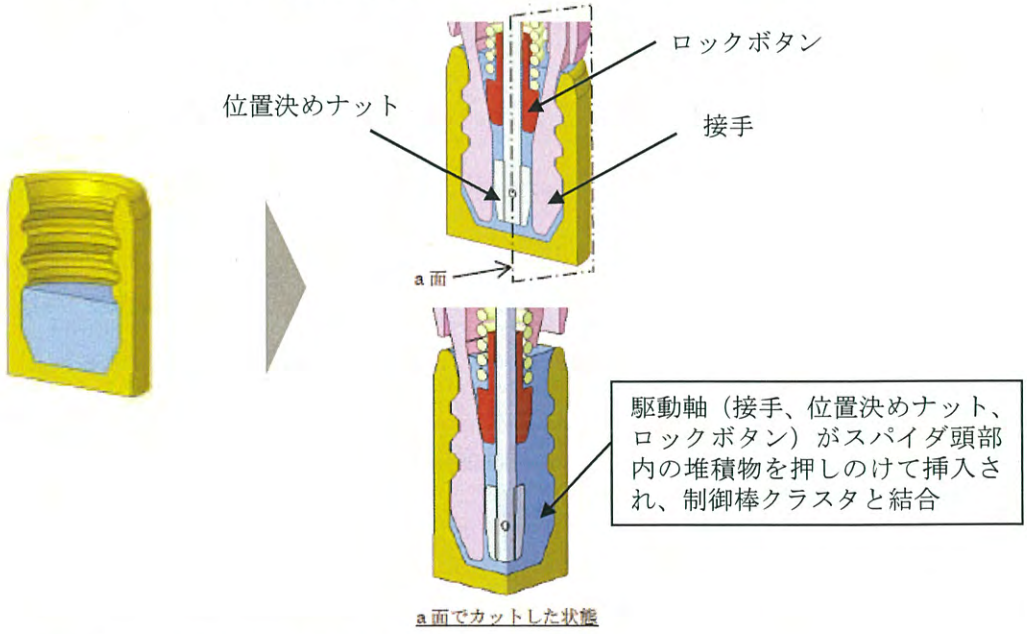
○堆積物量の推定

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）

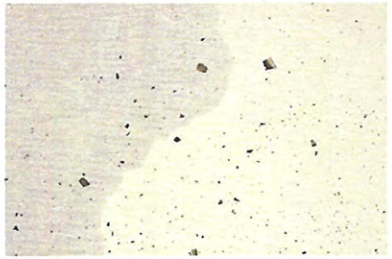
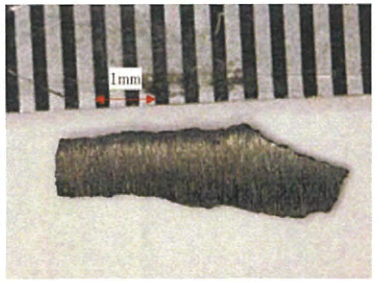


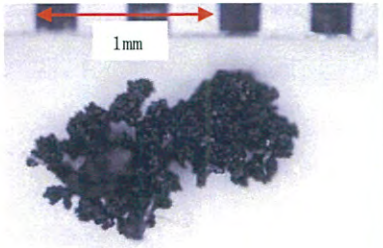
図－４　スパイダ頭部内の堆積物の状況

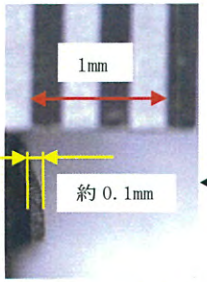


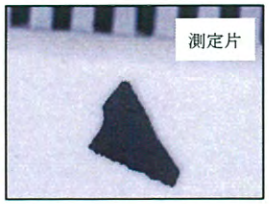
図－５　駆動軸と制御棒クラスタの結合状況

（２）堆積物のサイズ、形状の確認結果

<table>
<tr><th colspan="2">調査項目</th><th>Ｍ－４の調査結果</th><th>比較対象アドレスの調査結果</th><th></th></tr>
<tr><td rowspan="2">堆積物</td><td>サイズ・形状</td><td>
✓ 粒子状：黒色
✓ 薄膜状：黒色、数 mm 程度の大きさ
【回収した堆積物（一部）】

【実体顕微鏡写真（一部）】


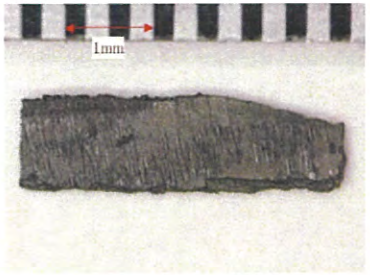
Ｍ－４　薄膜状


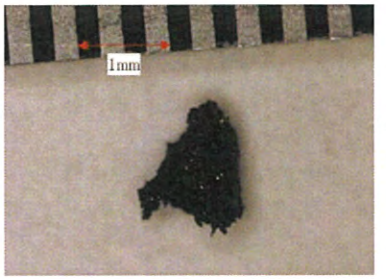
Ｍ－４　粒子状


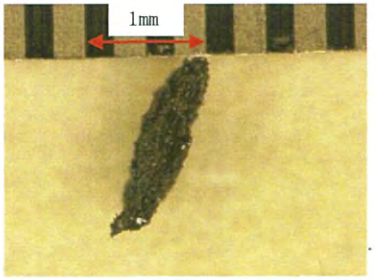
※


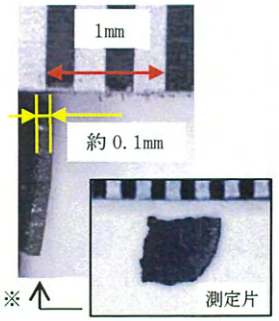
※ 測定片を立てて厚さ方向を計測
Ｍ－４　薄膜状（厚さ）
</td><td>
✓ 粒子状：黒色
✓ 薄膜状：黒色、数 mm 程度の大きさ（Ｍ－１２のみ）
【回収した堆積物（一部）】

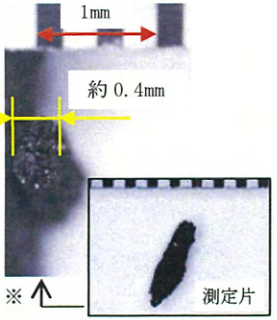
Ｍ－１２

Ｊ－７
【実体顕微鏡写真（一部）】


Ｍ－１２　薄膜状


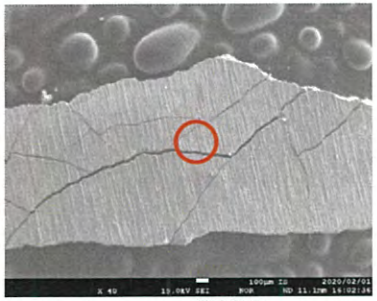
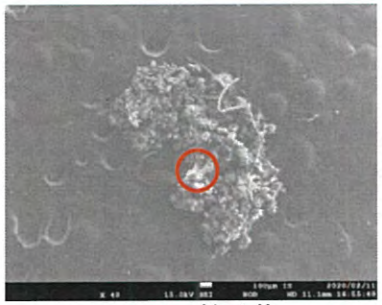
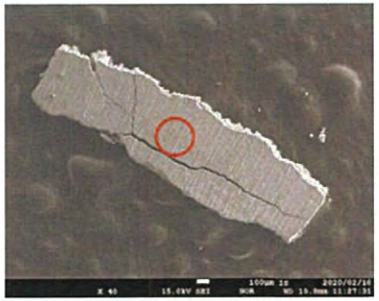
Ｊ－７　粒子状
※ 測定片を立てて厚さ方向を計測


Ｍ－１２　粒子状


※
Ｍ－１２　薄膜状（厚さ）


※
Ｊ－７　粒子状（厚さ）
</td><td>
・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および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
</td></tr>
</table>

（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	
堆積物	SEM画像	 M－４　薄膜状  M－４　粒子状 ○：測定点	 M－１２　薄膜状  J－７　粒子状  M－１２　粒子状	・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	組成分析（単位：atom%） / X線回折		・主成分はFeと0であった ・堆積物はFe_3O_4（マグネタイト）であった

試料名＼元素名	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_3O_4
M－　4　粒子状	－	14.5	52.2	<1	<1	－	<1	<1	<1	30.7	<1	－	Fe_3O_4
M－１２　薄膜状	6.2	4.2	53.8	－	<1	<1	－	－	1.1	33.1	1.1	－	Fe_3O_4
M－１２　粒子状	3.1	5.8	60.6	－	<1	－	－	－	<1	29.2	<1	－	Fe_3O_4
J－　7　粒子状	6.7	5.1	53.0	－	<1	－	－	－	<1	33.5	<1	－	Fe_3O_4

※.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。

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。

（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㎜程度の大きさであり厚さは０．１㎜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。

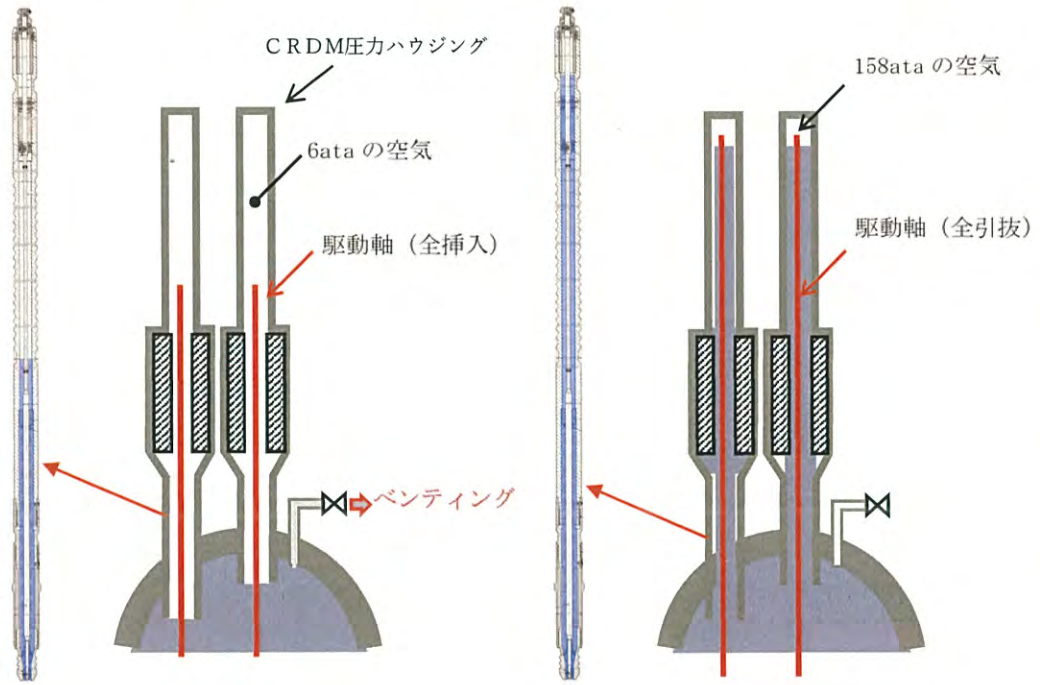
① 駆動軸内表面で生成したマグネタイトが剥離、落下、堆積

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[redacted]℃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。

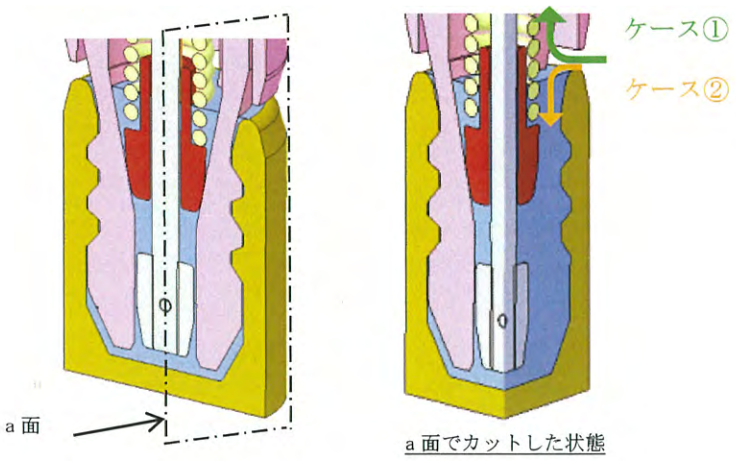
上記のａ．項、ｂ．項を考え合わせると、駆動軸内面では高溶存酸素環境で生成した初期マグネタイトと１次冷却材環境で生成したマグネタイトが重畳し、時間の経過とともに成長する。そして、ある時期に剥離、脱落して制御棒クラスタのスパイダ頭部内に堆積する可能性が考えられる。堆積物調査で確認された数㎜の大きさの薄膜状の堆積物がこれに該当している可能性が高く、また、脱落の過程で粒子状に変化することもあると考えられる。

（２）１次冷却系統内で生成

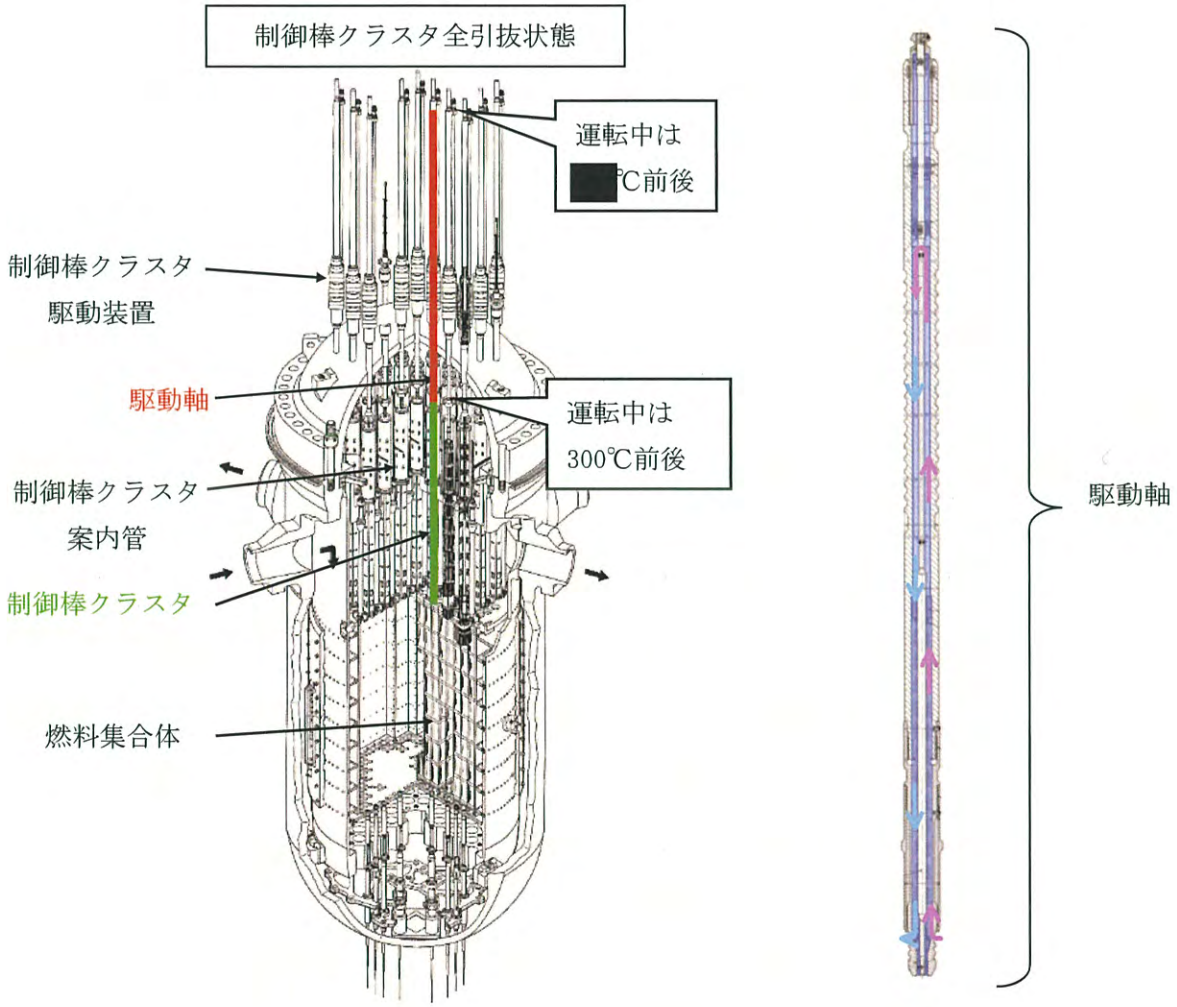
ケース②は駆動軸外部で生成したマグネタイトが図－７の黄色の経路（駆動軸の保護筒下端と制御棒クラスタのスパイダ頭部の隙間）を経てスパイダ頭部と駆動軸接手の隙間部に侵入し堆積することになる。粒子状のスラッジの一部がこれに該当すると考えられる。

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㎜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。

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。



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。

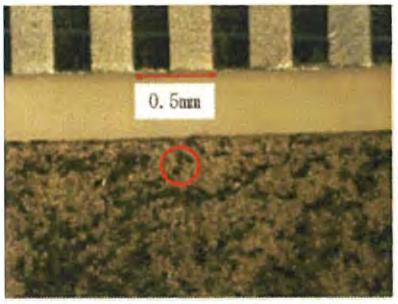
また、化学体積制御系統に設置された冷却材フィルタ等の配置を示す系統図を図－９に、過去の冷却材フィルタ等の交換実績を表－２に示す。冷却材フィルタ等は主に定検時に取り替え、固体廃棄物処理設備にて処理を行う。冷却材フィルタ等の取替頻度は、長期停止の影響により３－１３運転サイクルで多いものの、運転サイクル期間で比較した場合はいずれの運転サイクルも同程度の取替頻度であった。

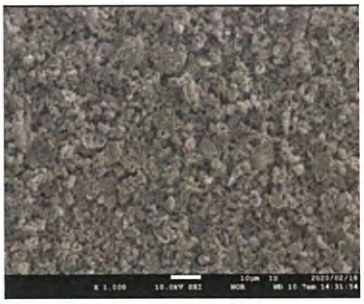
鉄の酸化物の一種であるマグネタイトは従来から１次冷却系統内に存在するものであり、これまでこれが原因で燃料集合体等に損傷を与えるような事象は発生していないことから、原子炉施設の安全性に影響を与えるものではない。

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、フレッティング※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、燃料棒に微少孔（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

<table>
<tr><th>実態顕微鏡写真</th><th>ＳＥＭ画像</th><th></th></tr>
<tr><td>

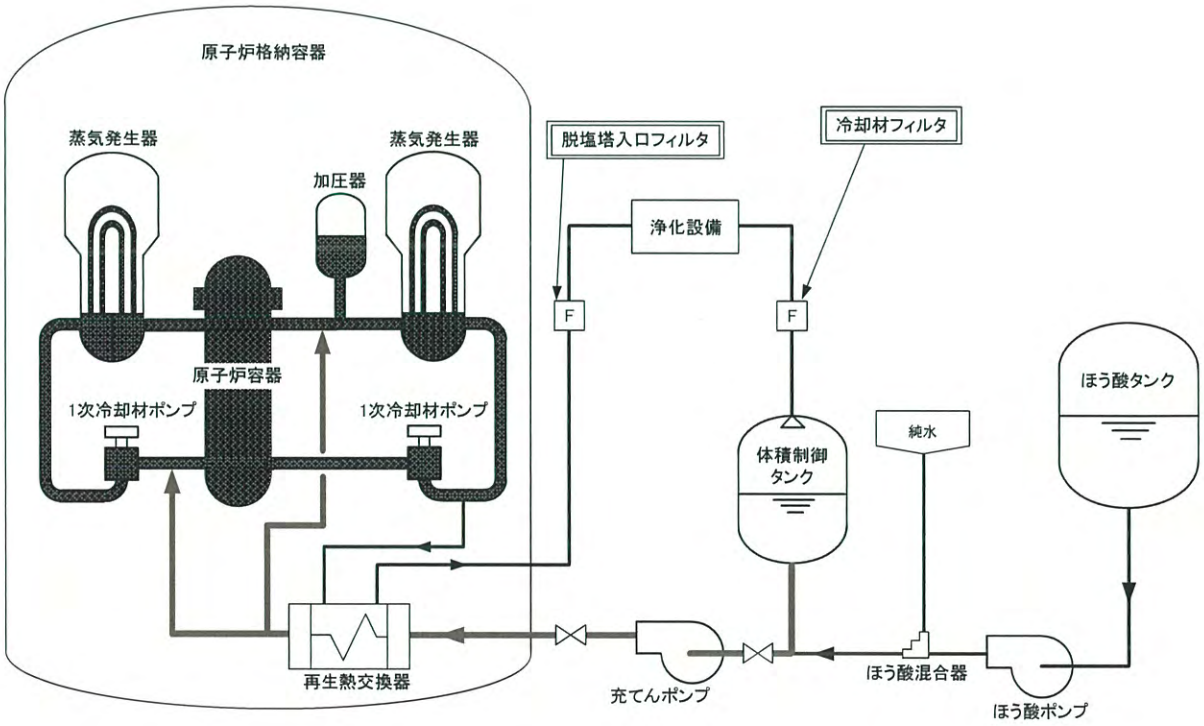
○：ＳＥＭ画像取得箇所</td><td></td><td>・数μｍの粒子で構成された黒色の微粒子状のスラッジが認められるが、スパイダ頭部内で確認されたような粒子状および薄膜状の堆積物（スラッジ）はない</td></tr>
<tr><td colspan="2">✓　水質分析用フィルタ

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</td><td>・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</td></tr>
</table>

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

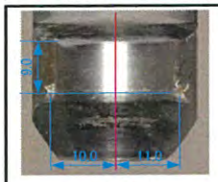
※１　脱塩塔入口フィルタ（メッシュサイズ　：0.45μｍ、取替基準：フィルタ差圧）
※２　冷却材フィルタ（メッシュサイズ　：1μｍ、取替基準：フィルタ差圧）



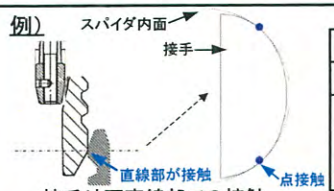
図－９　冷却材フィルタ等の配置を示す系統図

接触痕および堆積物まとめ（1／2）

①、②、③、④ 接手外面直線部



90° 側

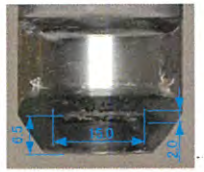


接手外面直線部での接触

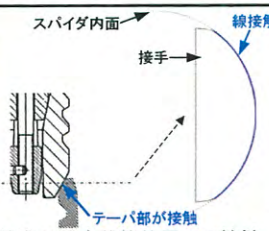
個数：4
計測値(mm)
長さ：約1.32～2.50 幅　：約1.16～3.20 深さ：約0.04～0.12

・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相当し、通常着座位置とは異なる位置で生じた可能性がある。

⑤ 接手外面テーパ部



90° 側



通常の着座状態位置での接触

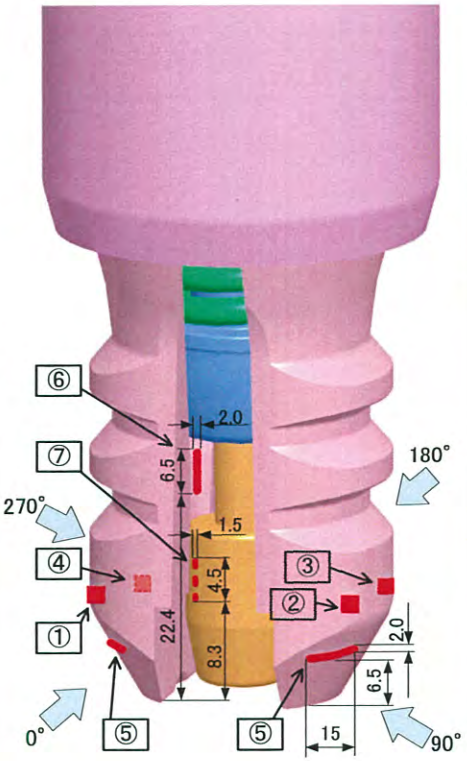
個数：2
計測値(mm)
長さ：約1.5～2.0 幅　：約12.5～15.0 深さ：測定下限値以下 （0.02mm以下）

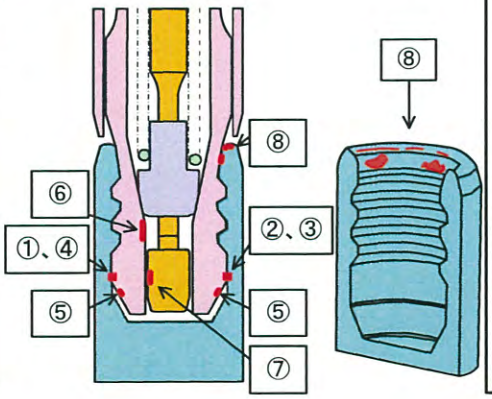
・M-4の接手外面テーパ部に周方向の接触痕（金属光沢なし）が確認された。比較対象でも同様であり、切り離し操作後の駆動軸仮置きでスパイダ頭部の内面と線状に取り合う箇所に相当し、通常の着座状態位置で生じたと考えられる。

⑧ 制御棒クラスタのスパイダ頭部



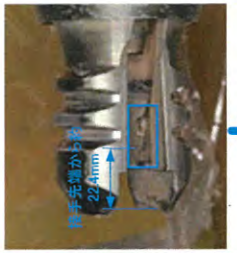
・スパイダ頭部の円環部上面に接触痕（色調の変化）が確認された。比較対象（M-12）でも確認されたが、M-4の方が広範囲であった。
・スパイダ頭部の内部テーパ面に接触痕（色調の変化）が確認された。比較対象（M-12）でも同程度であった。
・使用期間が短いJ-7ではスパイダ頭部の円環部上面の接触痕は確認されなかった。

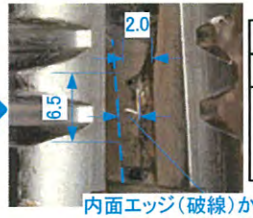




⑥、⑦ 接手内面直線部と位置決めナット直線部

⑥ 接手内面直線部





内面エッジ（破線）から約3.0mm

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

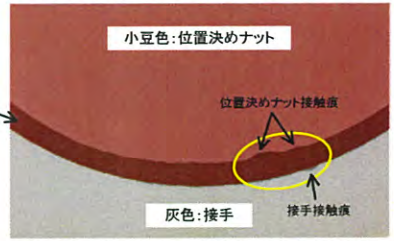




個数：1
計測値(mm)
長さ：約4.5 幅　：約1.5 深さ：約0.08

・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



接手内面と位置決めナット接触痕の重ね合わせ結果

・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、接触痕の大きさから、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。

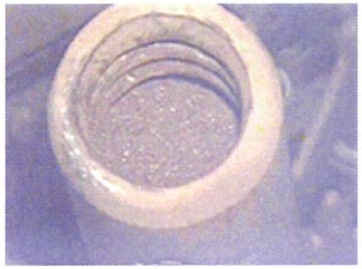
接触痕および堆積物まとめ（２／２）

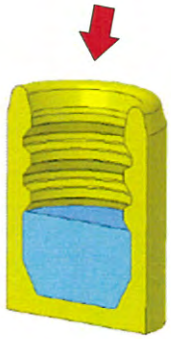
① 堆積物の確認結果

【原子炉格納容器内】



【使用済燃料ピット内】

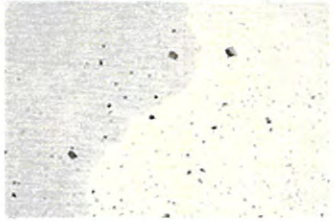




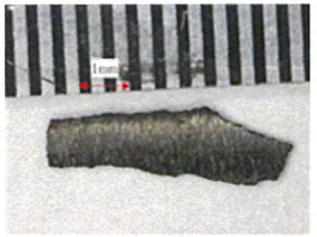
＜制御棒クラスタ＞
・スパイダ頭部内（M－4、M－12、J－7）に堆積物が確認された。
・M－4の堆積物はスパイダ頭部の三山目より下の容積である約20cc相当の堆積物があったと推定される。

② 堆積物のサイズ・形状

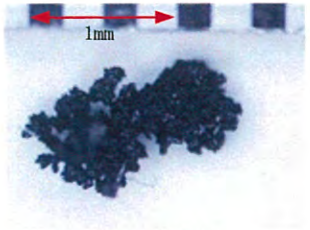
【回収した堆積物（一部）】



【実体顕微鏡写真（一部）】



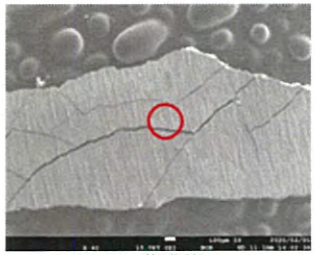
M－4 薄膜状



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。

③ SEM画像、組成分析、X線回折



M－4 薄膜状



M－4 粒子状

○ :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十～数百μm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。

製造履歴等調査結果

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て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。

添付資料－９－２

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 ・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）	外観点検 ・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 ・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

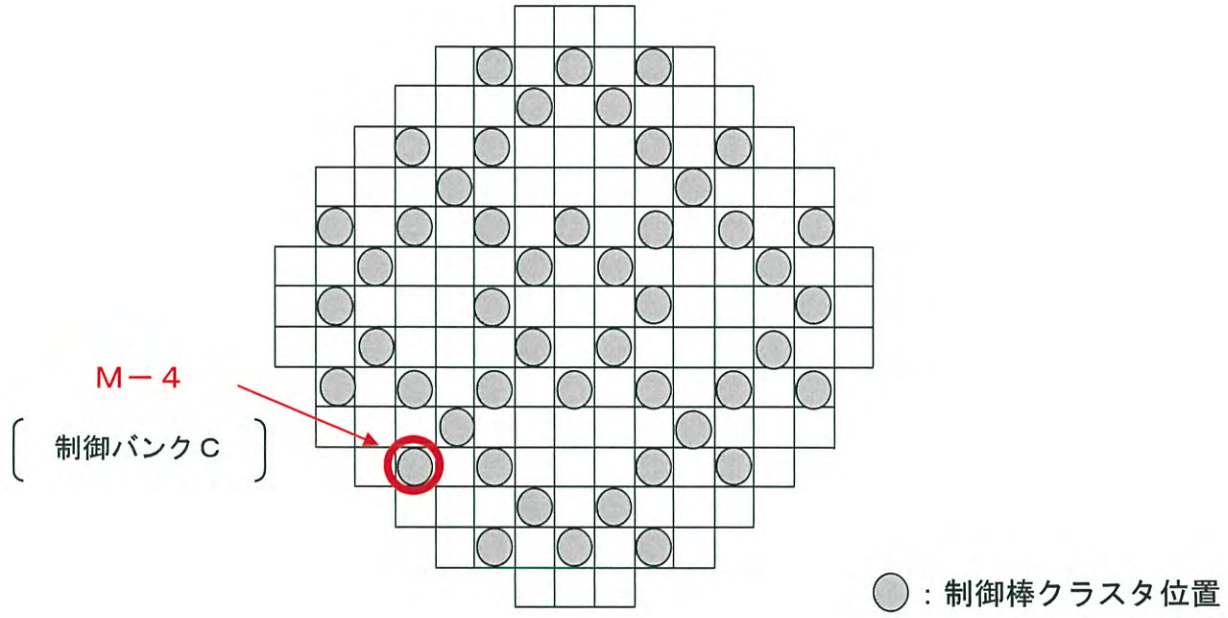
制御バンクＤ以外		制御バンクＤ	
サーベランス日時	サーベランス結果	サーベランス日時	サーベランス結果
平成３０年１１月１６日	良	平成３０年１２月１６日	良
平成３１年　１月１０日	良	平成３１年　２月１７日	良
平成３１年　３月１４日	良	平成３１年　４月１４日	良
令和元年　５月　９日	良	令和元年　６月２３日	良
令和元年　７月１１日	良	令和元年　８月１１日	良
令和元年　９月１２日	良	令和元年１０月２０日	良
令和元年１１月　６日	良	令和元年１２月１５日	良

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。

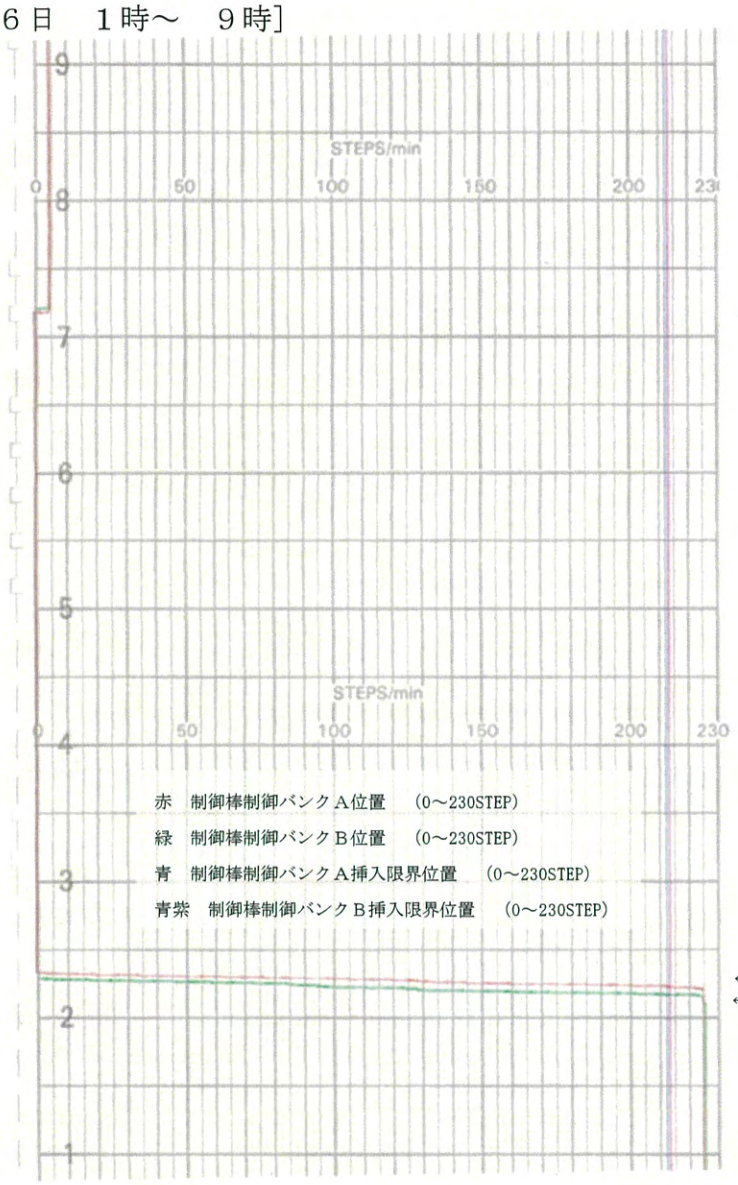
制御棒に対する制御信号、プラント停止時の警報履歴、および制御棒位置の記録により、制御棒制御信号と制御棒位置に偏差が生じたような記録は確認されておらず、制御棒にスリップが発生していないことを確認したことから、プラント停止操作中における制御棒動作機能について問題ないことを確認した。

○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］



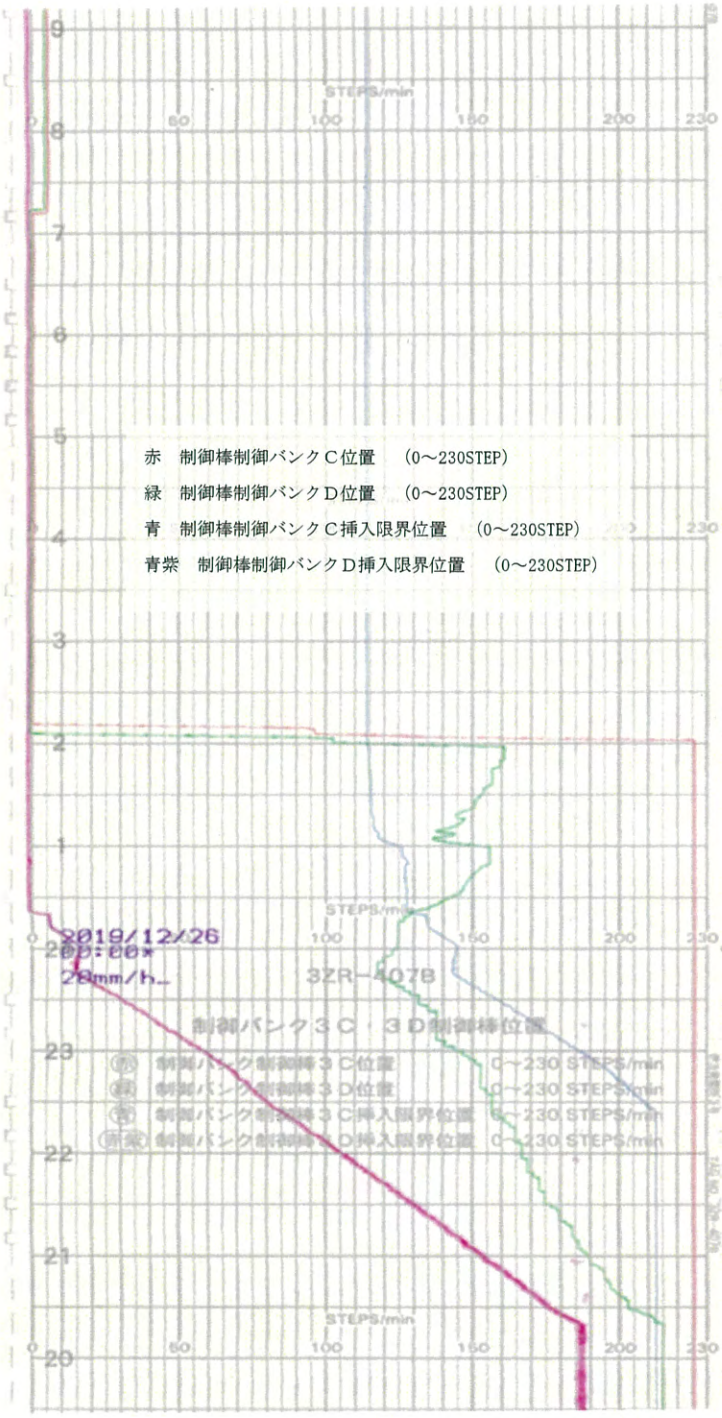
← ＲＣＳ冷却準備のため制御棒５ステップ引抜

← 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］



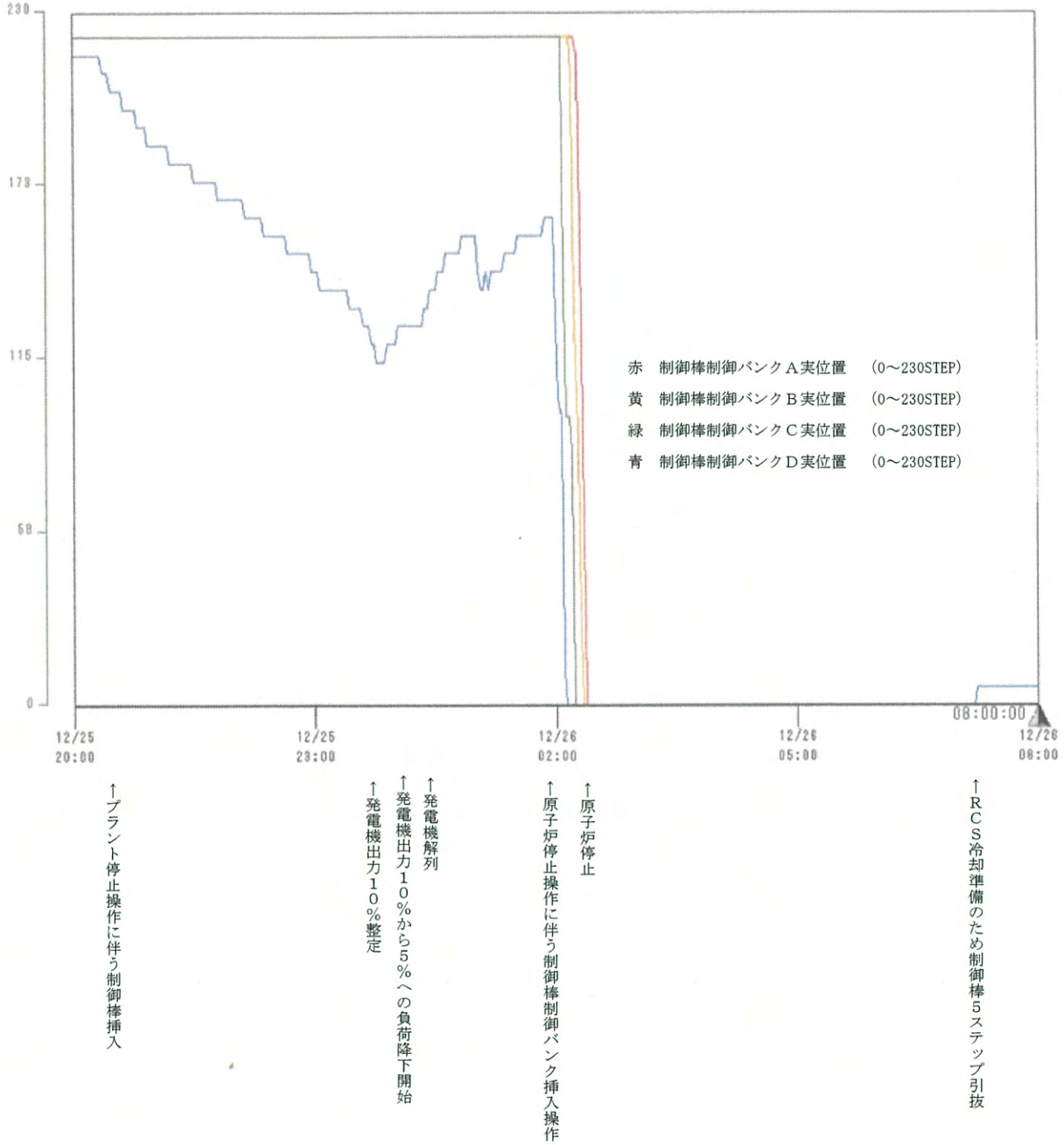
← ＲＣＳ冷却準備のため制御棒５ステップ引抜

← 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

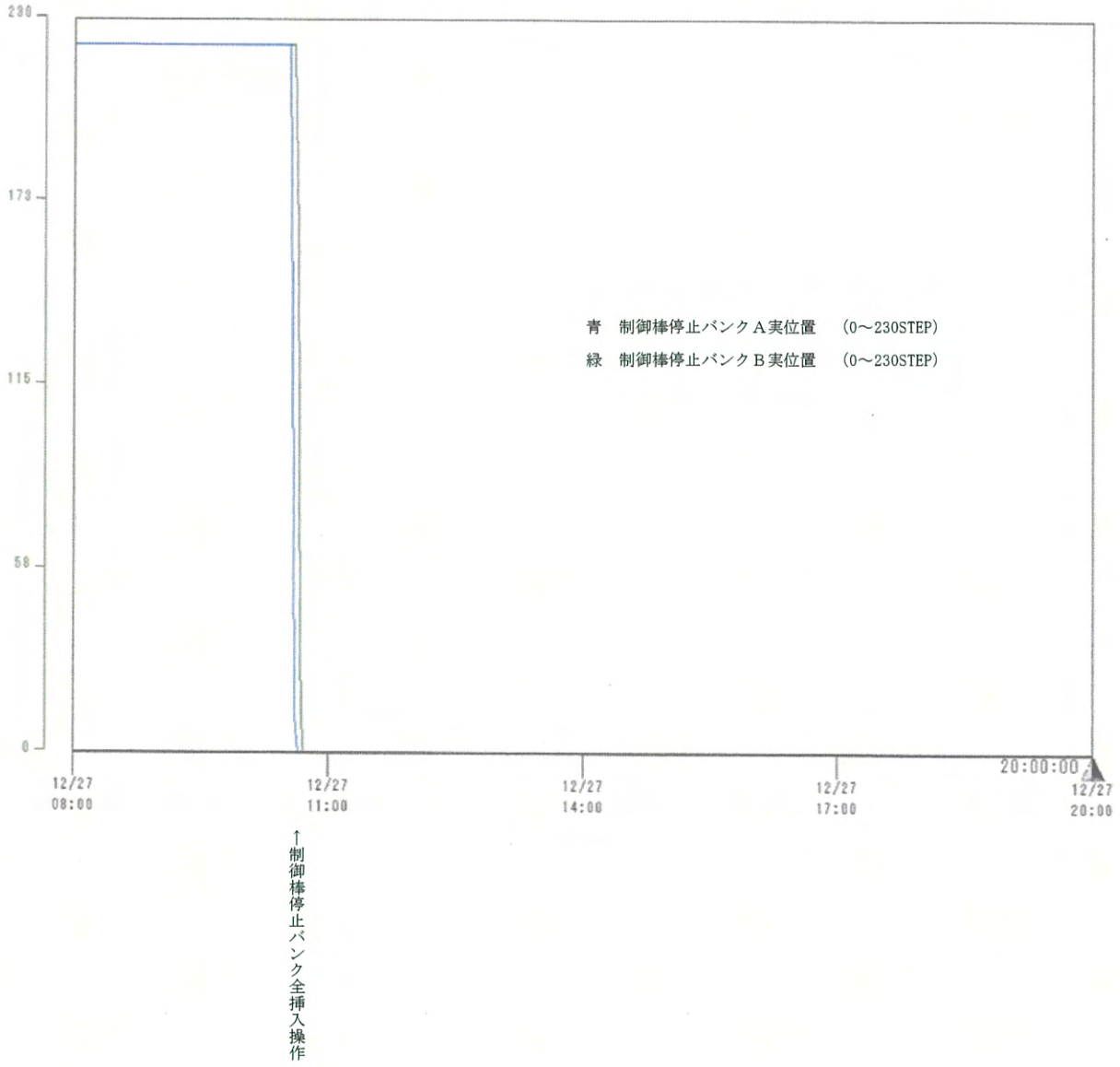
← 発電機解列
← 発電機出力１０％から５％への負荷降下完了
← 発電機出力１０％から５％への負荷降下開始
← 発電機出力１０％整定

← プラント停止操作に伴う制御棒挿入

○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］



○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３００m^3／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、３５０m^3／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

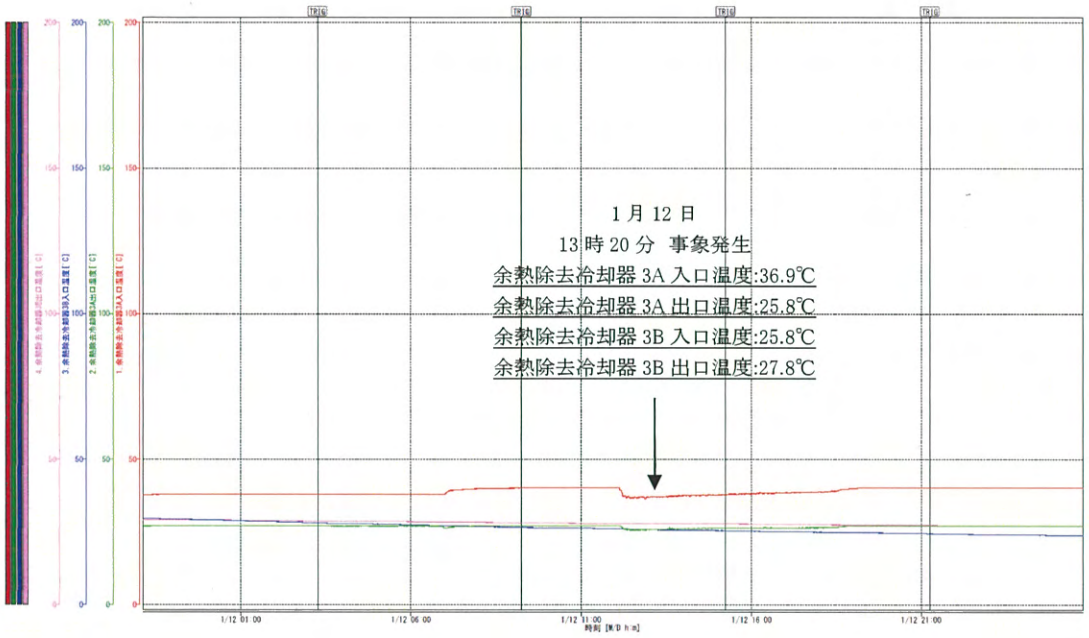
・燃料取り出し前と装荷後の炉内点検のように投げ込み式カメラを使用する場合

また、３５０m^3／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℃以下となるように管理している。

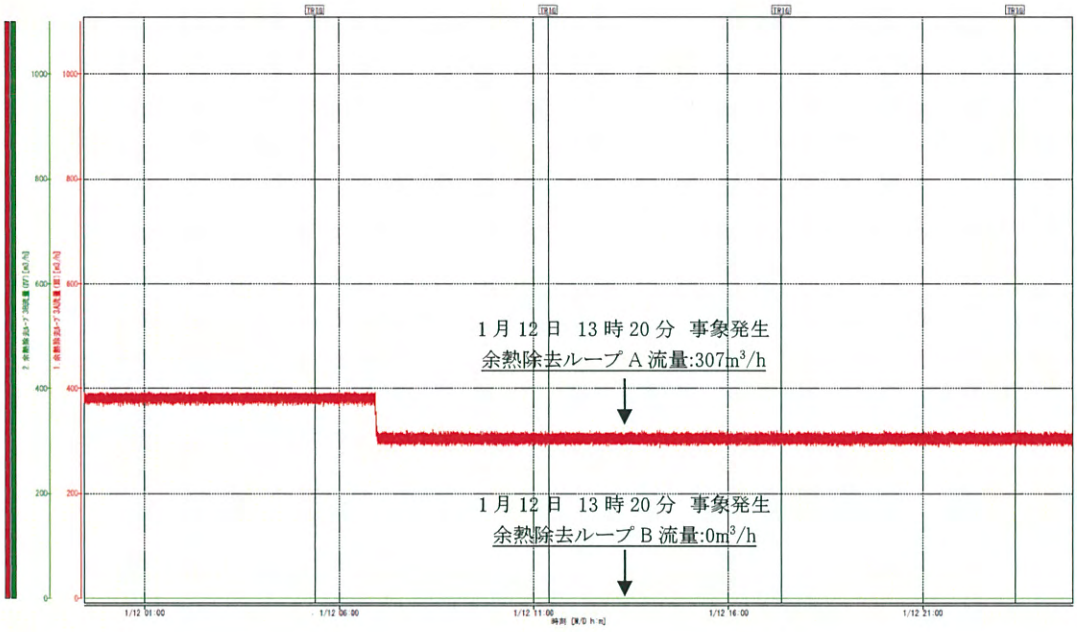
○余熱除去冷却器入口・出口温度

［１月１２日　１時００分～２１時００分］



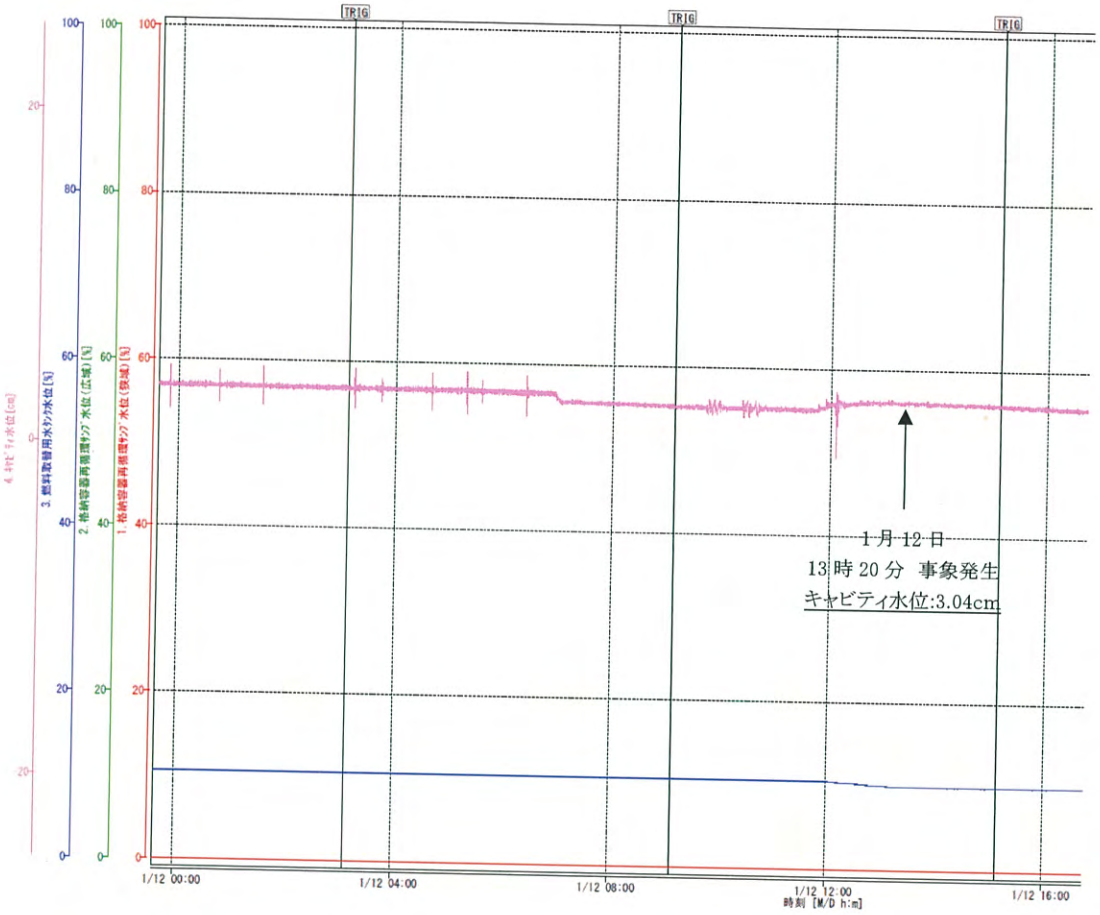
○余熱除去ループＡ，Ｂ流量

［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］



添付資料－９－４

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．駆動軸等に関する不具合事例調査

（１）国内事例

国内の加圧水型軽水炉において駆動軸等の不具合事例を抽出した結果、表－２のとおり８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。

なお、伊方２号機および大飯２号機のクラッドによる制御棒クラスタ動作中のラッチ機構の不具合事例（制御棒位置のずれ事象）については、伊方３号機では、伊方２号機の事象の対策と同様の対策を実施しており問題はない。（別添）

（２）海外事例

海外の加圧水型軽水炉において駆動軸等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－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
HBﾛﾋﾞﾝｿﾝ2号※2 （米国）	1974.5.26	1	【作業ミスの疑い】 ・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。	・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。	①各切り離し作業後の重量確認を追加した。	①従来から実施済み
ﾄﾞｰﾙ2号※2 （ベルギー）	1976.11.15	9	【作業ミスの疑い】 ・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。	・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。	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確認を追加した。	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確認を実施
ﾌｪｯｾﾝﾊｲﾑ1号※2 （フランス）	1979.3.17	3	【作業ミス】 ・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。	・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。	①各切り離し作業の前後に、駆動軸上端部の高さ確認を追加した。	①従来から実施済み
ﾋﾞｭｼﾞｪｲ2号※2 （フランス）	1981.7.20	48 （全数）	【作業ミス】 ・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で再結合に気付かなかった。	・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。	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確認を追加した。	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
ｾﾝﾄﾙｰｼｰ1号※3 （米国）	1997.10.27	1	【作業ミス、設備不良】 ・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。 ・当該駆動軸の摩擦力が高い状態であり、切り離し作業に手間取った。	・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なく、他の駆動軸とも有意な差は無いことを確認した。	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。	①当該プラントの新工具相当の工具を使用 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 Levé des Internes Supérieurs", Dec. 1982）
※3：出典（Nuclear Regulatory Commission - Home Page ; LICENSEE EVENT REPORT DOCKET NUMBER: 05000335）

表－2　駆動軸等に関する不具合事例（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数センチ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掻傷があるのを確認した。	原子炉容器上蓋の駆動軸案内管下端部の構造から、本定検中キャビティ水抜きのため原子炉容器上蓋を取付けた時に、駆動軸頂部と案内管下端部とが干渉したためと考えられる。	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数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タとの結合作業において、制御棒クラスタ1体の引抜き時に過大な荷重が生じた。点検した結果、当該制御棒クラスタベーンの損傷及び制御棒クラスタ案内管のさや板均圧孔に異物（ボルト）を確認した。	キャビ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タ案内管さや板均圧孔にはさまったものと推定される。	当該制御棒クラスタおよび制御棒クラスタ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が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。
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タ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ったことが判明した。再現試験により、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体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、制御棒クラスタの引き上が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、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潤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。
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ビティ浄化装置のスキマフィ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ビ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。	キャビ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。
高浜発電所2号※1	2007.10.2	定期検査中に、バンクオーバラッ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が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。
大飯発電所2号※1	2008.3.12	定格運転中に、制御棒動作確認試験を実施していたところ、制御棒を引抜した際に制御棒1本が滑り落ちたことから、原子炉熱出力を75%以下とした。	1次冷却材中に存在するクラッドが、制御棒駆動機構内に侵入し、制御棒駆動機構の摺動部位に入り込み、摺動抵抗が増したことにより、制御棒駆動機構の動作遅れが発生し、制御棒が自重で滑り落ちたと推定した。	プラント起動時に、低温停止状態で実施している動作確認に加え、高温停止状態においても新たに動作確認を実施する。	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：原子力施設情報公開ライブラリー（ニューシア）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－３　駆動軸等に関する不具合事例（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
ﾌﾞﾚｲﾄﾞｳｯﾄﾞ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ク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。
ﾌﾞﾚｲﾄﾞｳｯﾄﾞ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が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。
ｾｺﾔｰ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こしたことにより、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。
ﾍﾞﾙﾋﾞﾙ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。
ｻｳｽﾃｷｻｽ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。一月後の定期試験において、別の制御棒１本が引き抜けなくなったことからプラント停止することになった。停止操作中、別の制御棒１本が不整合であることが確認された。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,Supplment 1, "Failure of a Rod Control Cluster Assembly to Fully Insert Following a Reactor Trip at BraidwoodUnit2", 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））

添付資料－９－４
別添

制御棒クラスタ駆動装置の動作不良への対策

○ 伊方２号機の制御棒位置のずれ事象への対応として、伊方３号機において以下の対策を実施している。

・ プラント停止時の脱ガス運転時および起動時の高温停止時において浄化流量を最大とし、クラッド低減に努める。

・ プラント起動時の低温停止および高温停止時における制御棒の全挿入・全引抜き操作の回数を従来よりも増やすことにより、クラッド排出を促進する。

○ なお、制御棒クラスタ駆動装置の駆動機構に関連する点検としては下表の点検を実施している。

表　制御棒クラスタ駆動装置の駆動機構に関連する点検内容

点検項目		点検内容
低温停止時	ステッピング検査等	モード５※1のステッピング検査において、すべての制御棒について、引抜き・挿入操作を実施し、駆動機構の動作タイミングが適切であり、正常に作動することを確認。 また、バンクオーバーラップ検査等において、すべての制御棒について、引抜き・挿入操作を２往復実施し、動作遅れやすべりの傾向がないことを確認。 【伊方２号事象対応；停止バンクの引抜き・挿入操作２往復を追加実施】
高温停止時	高温ならし運転	モード３※2において、すべての制御棒について、引抜き・挿入操作を４往復実施し、動作遅れやすべりの傾向がないことを確認。 【伊方２号事象対応；本項目を追加実施】
	制御棒位置指示確認検査	モード３※2の１００％流量において、ほう素による停止余裕を確保したうえで、すべての制御棒について、引抜き・挿入操作を１往復実施し、それぞれの制御棒位置で制御棒位置指示に問題ないことを確認。
	制御棒落下検査	モード３※2の１００％流量において、ほう素による停止余裕を確保したうえで、すべての制御棒を全引抜き位置まで引抜いた状態にて原子炉トリップ信号を発信させ、挿入時間が２．５秒以下であることを確認。
運転中	制御棒動作試験	プラント運転中において、１回／３カ月の頻度にて、すべての制御棒について、６～１５ステップを挿入・引抜きし、制御棒動作に問題ないことを確認。
	制御棒位置確認	プラント運転中は運転員により常時監視しており、１時間ごとに制御棒の位置が正常であることを確認している。

※１：約２．７５ＭＰａ、約７５℃
※２：約１５．４ＭＰａ、約２８６℃
※３：原子炉トリップ信号発信から全ストロークの８５％に至るまでの時間

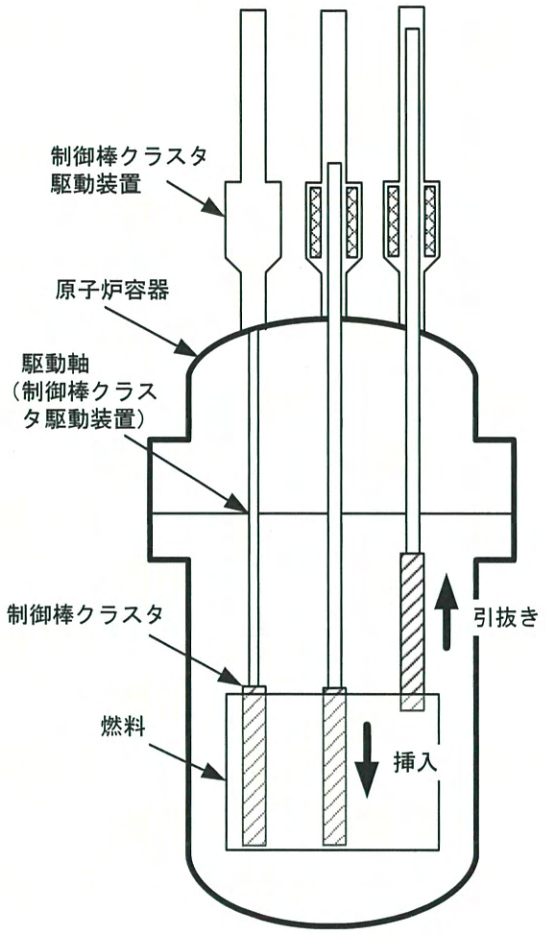


図　制御棒引抜き・挿入操作概略図

引き上がり事象発生時の不完全結合状態ケース検討

１．目的

本検討では、今回の調査結果（製造記録、外観確認等）との整合性の観点から、引き上がり事象発生時の結合状態を推定する。

ここで、制御棒クラスタと駆動軸の結合状況等の確認において、上部炉心構造物と制御棒クラスタが引き上がった後、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、完全に結合している状態ではなく、不完全な結合状態であったと考えられる。

よって、不完全結合状態として、以下のケースを想定する。（図－１参照）

・ケース１：仮置き状態位置で不完全結合している場合
・ケース２：スパイダ頭部１山目位置で不完全結合している場合
・ケース３：スパイダ頭部２山目位置で不完全結合している場合
・ケース４：スパイダ頭部３山目位置で不完全結合している場合
・ケース５：完全結合位置であるが、位置決めナットはボタンアップ位置にあり、不完全結合している場合
・ケース６：スパイダ頭部外部側で不完全結合している場合
・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している場合

２．実施内容

（１）検討項目

ａ．幾何学的な整合

ケース毎のスパイダ頭部と接手の不完全結合位置が幾何学的な観点から起こり得るか否か（整合するか否か）を検討した。

検討の観点としては、

・設計図での検討
・Ｍ－４個別の測定値での検討

の２点とし、それぞれを重畳させた場合でも起こり得るか否かを総合評価として判断した。

ここで、製造記録確認結果から、駆動軸および制御棒クラスタは、設計図通り製作されていたことから、設計図の検討では、製作・組立時の公差を考慮すると共に製作・組立公差を駆動軸が最も大きく傾くように仮定した場合の駆動軸の傾きについても考慮する。

ｂ．外観確認結果との整合

ケース毎のスパイダ頭部と接手の不完全結合位置を想定した場合に、図－２に

示す外観確認で確認された接手内外面の接触痕、位置決めナットの接触痕が生じ得るか否か（整合するか否か）を検討した。

c．手順との整合

ケース毎のスパイダ頭部と接手の不完全結合状態が、今回の事象が発生した際の手順において起こり得るか否か（整合するか否か）を検討した。

3．検討結果

表－1にケース毎の検討項目a，b，cに対して検討した結果を示す。

a．幾何学的な整合

ケース1～5の不完全結合状態については、起こり得る（整合する）という結果になった。一方、ケース6，7の不完全結合状態については、製作・組立公差および駆動軸の傾きを最大限考慮し、M－4の接手の開きも重畳させたとしても起こり得ない（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った。

c．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。

以上より、ケース1～7のうち、検討項目a，b，cが3つとも整合する（条件付きで整合する場合含む）ケース1～4については、その不完全結合状態が起こり得ると考えられるため、部分モデルによる引き上がり状態実証試験を行い、当該不完全結合状態で実際に制御棒クラスタを引き上げ得るか添付資料－11で確認する。

以上

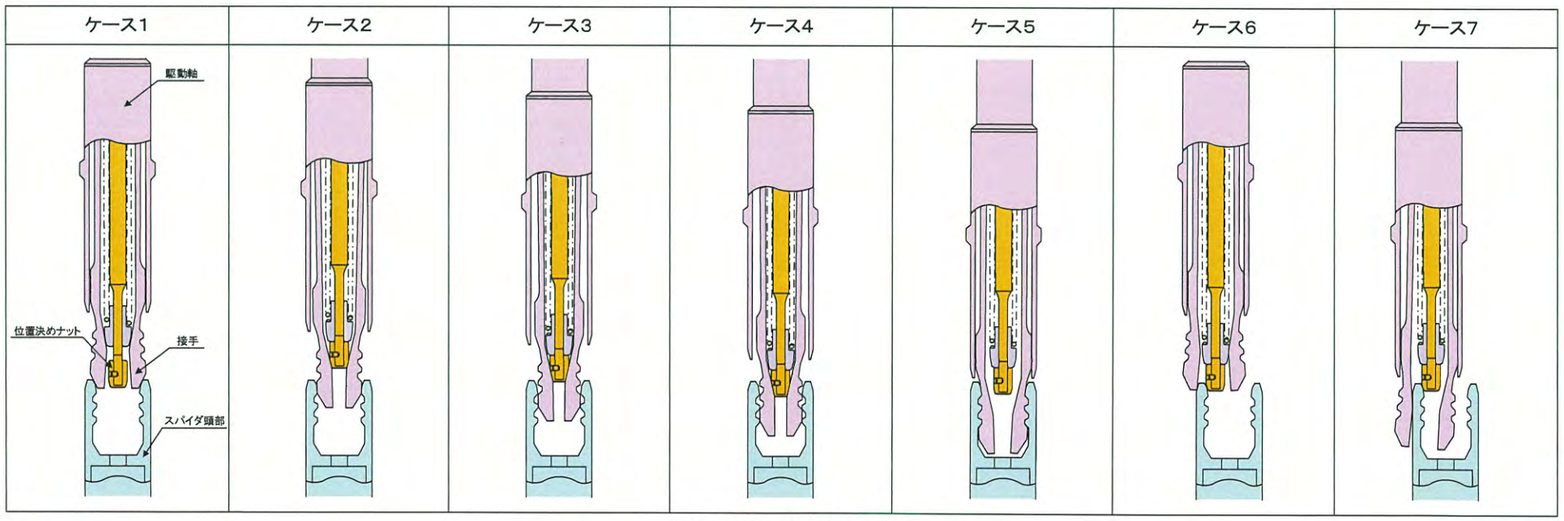
表1　引き上がり事象発生時の不完全結合状態ケース検討

不完全結合状態		a. 幾何学的な整合				b. 外観確認結果との整合						c. 手順との整合	部分モデル実証試験の要否
		設計図（共通）		M－4個別	総合評価	①	②	③	④	⑤	⑥		
不完全結合位置	ケースNo.	製作・組立公差を考慮	駆動軸の傾き※1	測定値（接手の開き）		接手外面直線部の局所的な接触痕（4カ所）	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）		
仮置き状態位置	ケース1	○ 製作・組立公差内であれば、当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 駆動軸が直立位置から最大傾き範囲内であれば、当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 接手部の寸法計測で得られた39.6mmの接手の開きを考慮しても当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 製作・組立公差、駆動軸の傾き、測定結果を重畳させても起こり得るため、整合する	× 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部が接触せず、整合しない	○ 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部が接触するため、整合する	× 接手の当該接触痕位置と位置決めナットが接触せず、整合しない	× 位置決めナットの当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	× スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	○ スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触するため、整合する	○ 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	○ 幾何学的な整合、外観確認結果との整合、手順との整合いずれとも整合しているため、実施する
スパイダ頭部1山目位置	ケース2	○ 製作・組立公差内であれば、位置決めナットの位置次第で当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 駆動軸が直立位置から最大傾き範囲内であれば、位置決めナットの位置次第で当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 接手部の寸法計測で得られた39.6mmの接手の開きを考慮しても位置決めナットの位置次第で当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 製作・組立公差、駆動軸の傾き、測定結果を重畳させても起こり得るため、整合する	○ 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部1山目が接触するため、整合する	× 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部が接触せず、整合しない	× 接手の当該接触痕位置と位置決めナットが接触せず、整合しない	× 位置決めナットの当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	× スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	× スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	△ ボタンダウン操作を実施したが、何らかの要因で位置決めナットが所定位置まで下降しきらなければ起こる	○ 幾何学的な整合、外観確認結果との整合と整合し、手順との整合においても起こりうる可能性があるため、実施する
スパイダ頭部2山目位置	ケース3	○ 製作・組立公差内であれば、位置決めナットの位置次第で当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 駆動軸が直立位置から最大傾き範囲内であれば、位置決めナットの位置次第で当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 接手部の寸法計測で得られた39.6mmの接手の開きを考慮しても位置決めナットの位置次第で当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 製作・組立公差、駆動軸の傾き、測定結果を重畳させても起こり得るため、整合する	○ 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部2山目が接触するため、整合する	× 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部が接触せず、整合しない	× 接手の当該接触痕位置と位置決めナットが接触せず、整合しない	× 位置決めナットの当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	× スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	× スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	△ ボタンダウン操作を実施したが、何らかの要因で位置決めナットが所定位置まで下降しきらなければ起こる	○ 幾何学的な整合、外観確認結果との整合と整合し、手順との整合においても起こりうる可能性があるため、実施する
スパイダ頭部3山目位置	ケース4	○ 製作・組立公差内であれば、位置決めナットの位置次第で当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 駆動軸が直立位置から最大傾き範囲内であれば、位置決めナットの位置次第で当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 接手部の寸法計測で得られた39.6mmの接手の開きを考慮しても位置決めナットの位置次第で当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 製作・組立公差、駆動軸の傾き、測定結果を重畳させても起こり得るため、整合する	○ 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部3山目が接触するため、整合する	× 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部が接触せず、整合しない	× 接手の当該接触痕位置と位置決めナットが接触せず、整合しない	× 位置決めナットの当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	× スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	× スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	△ ボタンダウン操作を実施したが、何らかの要因で位置決めナットが所定位置まで下降しきらなければ起こる	○ 幾何学的な整合、外観確認結果との整合と整合し、手順との整合においても起こりうる可能性があるため、実施する
完全結合位置（位置決めナットはボタンアップ位置）	ケース5	○ 製作・組立公差内であれば、当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 駆動軸が直立位置から最大傾き範囲内であれば、当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 接手部の寸法計測で得られた39.6mmの接手の開きを考慮しても当該位置に接手は位置するため、整合する	○ 製作・組立公差、駆動軸の傾き、測定結果を重畳させても起こり得るため、整合する	× 位置決めナットがスパイダ頭部内に入っていれば、接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部は接触するが、位置決めナットが当該位置であれば、接触せず、整合しない	× 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部が接触せず、整合しない	× 接手の当該接触痕位置と位置決めナットが接触せず、整合しない	× 位置決めナットの当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	× スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	○ スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触するため、整合する	× ボタンダウン操作を実施しているため、位置決めナットがボタンアップ位置に留まることはなく整合しない	× 手順との整合において、不整合が起こっているため、実施しない
スパイダ頭部外部側	ケース6	× 製作・組立公差を最大限考慮してもスパイダ頭部外面側に接手は位置せず、整合しない※2	× 駆動軸の傾きを最大限考慮してもスパイダ頭部外面側に接手は位置せず、整合しない※2	× 接手部の寸法計測で得られた39.6mmの接手の開きを考慮してもスパイダ頭部外面側に接手は位置せず、整合しない※2	× 製作・組立公差、駆動軸の傾き、測定結果を重畳させても起こりえず、整合しない※2	× 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部が接触せず、整合しない	× 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部が接触せず、整合しない	× 接手の当該接触痕位置と位置決めナットが接触せず、整合しない また、接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部も接触せず、整合しない	× 位置決めナットの当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない また、位置決めナットの当該接触痕位置とスパイダ頭部も接触せず、整合しない	× スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	○ スパイダ頭部の当該接触痕位置と位置決めナットが接触するため、整合する	○ 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	× 幾何学的な整合において、不整合が起こっているため、実施しない
スパイダ頭部外部側（位置決めナットはボタンアップ位置）	ケース7	× 製作・組立公差を最大限考慮してもスパイダ頭部外面側に接手は位置せず、整合しない※2	× 駆動軸の傾きを最大限考慮してもスパイダ頭部外面側に接手は位置せず、整合しない※2	× 接手部の寸法計測で得られた39.6mmの接手の開きを考慮してもスパイダ頭部外面側に接手は位置せず、整合しない※2	× 製作・組立公差、駆動軸の傾き、測定結果を重畳させても起こりえず、整合しない※2	× 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部が接触せず、整合しない	× 接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部が接触せず、整合しない	× 接手の当該接触痕位置と位置決めナットが接触せず、整合しない また、接手の当該接触痕位置とスパイダ頭部も接触せず、整合しない	× 位置決めナットの当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない また、位置決めナットの当該接触痕位置とスパイダ頭部も接触せず、整合しない	× スパイダ頭部の当該接触痕位置と接手が接触せず、整合しない	○ スパイダ頭部の当該接触痕位置と位置決めナットが接触するため、整合する	× ボタンダウン操作を実施しているため、位置決めナットがボタンアップ位置に留まることはなく整合しない	× 幾何学的な整合と手順との整合において、不整合が起こっているため、実施しない

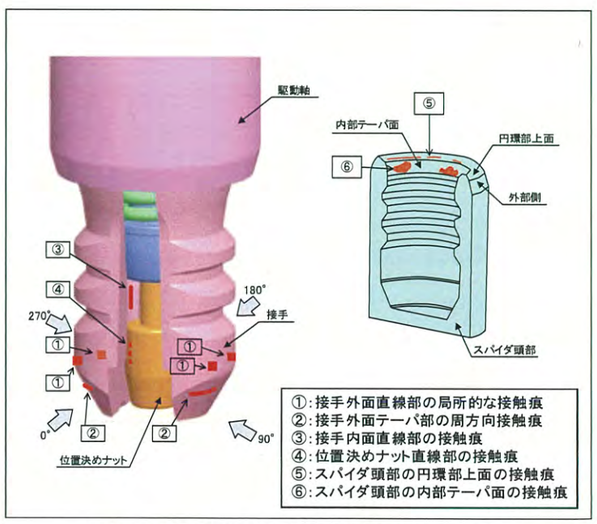
※1：製作・組立公差を駆動軸が最も大きく傾くように仮定した場合の駆動軸の傾きを考慮する。（詳細は別添参照）

※2：詳細は別添参照。

○：整合する
△：条件付きで整合する
×：整合しない



図－1：各ケースの概要図



図－2：駆動軸およびスパイダ頭部の外観確認結果

添付資料－１０
別添

ケース６，７における幾何学的な整合検討結果

１．はじめに

不完全結合状態であるケース６，７の状態が幾何学的に起こり得るか否か（整合するか否か）を検討した結果を示す。

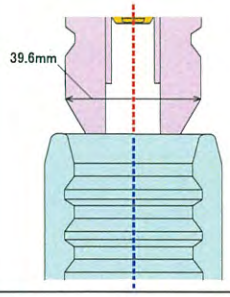
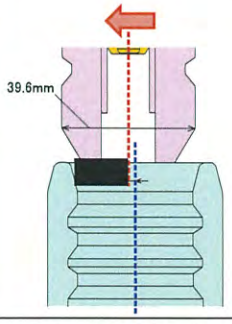
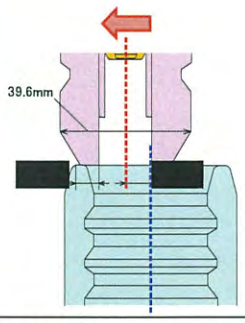
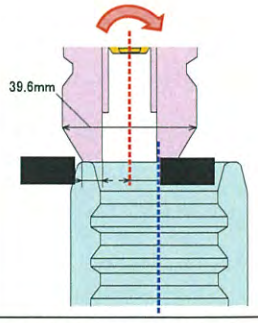
２．検討結果

ケース６，７の状態が、幾何学的に起こり得るか否かを検討する際、駆動軸の接手先端がスパイダ頭部の円環部上面を乗り越えるか否かが重要となる。

ここで、検討に際しては、設計上考え得る接手先端とスパイダ頭部の水平方向のずれおよび測定結果であるＭ－４の接手の開き量３９．６ｍｍを考慮してもスパイダ頭部の円環部上面を乗り越えるか否かを表－１のとおり、ステップ毎に検討した。各ステップは以下のとおり。

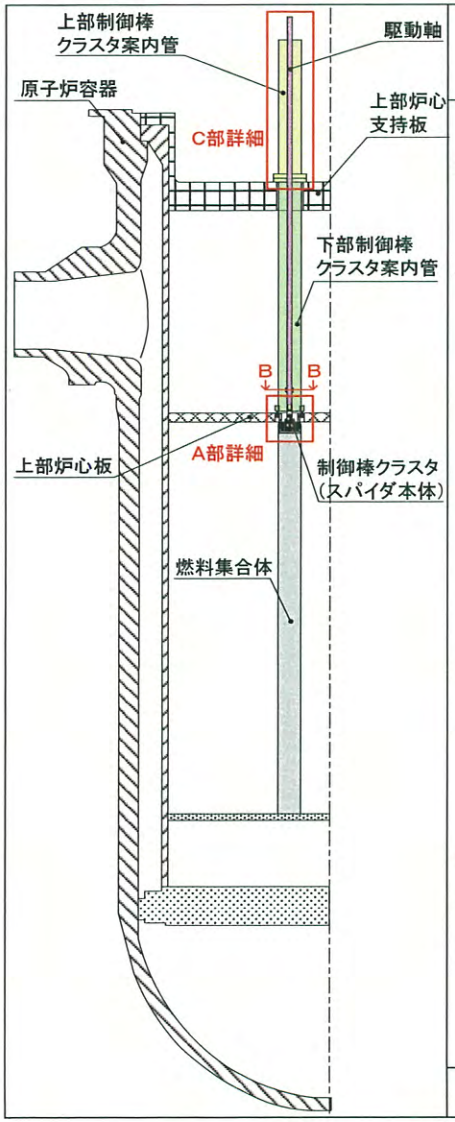
・ステップ１：Ｍ－４の接手の開き量３９．６ｍｍを考慮する。
（駆動軸とスパイダ頭部のアライメントのズレなし）
・ステップ２：設計上考え得る製作・組立公差を保守的に絶対和で積み上げ、その値を接手先端とスパイダ頭部のアライメントのズレとし、ステップ１の接手の開き量に付加する。（表－２参照）
・ステップ３：ステップ１，２の状態で、駆動軸全体を制御棒クラスタ案内管内部の空間の範囲内で傾かせる。（表－２参照）

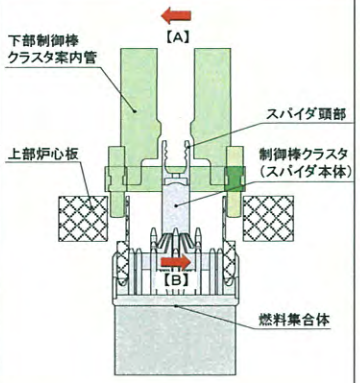
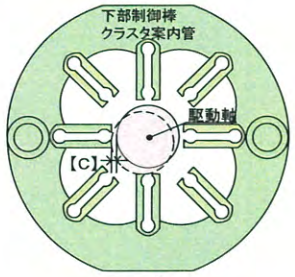
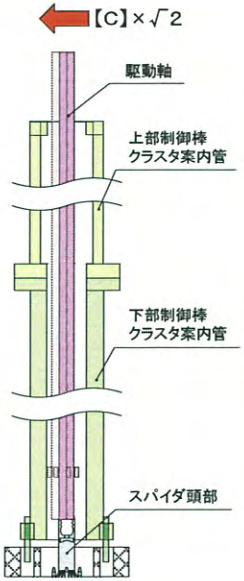
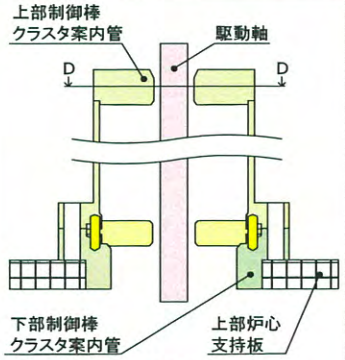
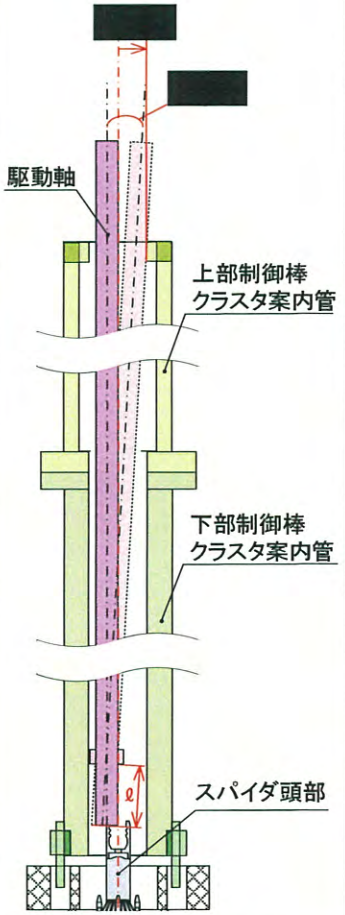
表－１　幾何学的な整合における各ステップでの検討

ステップ１	ステップ２	ステップ３	
			
アライメントのズレなしの状態でＭ－４の接手の開き量39.6mmを考慮。	保守的に製作・組立公差の絶対和の積み上げ［redacted］をアライメントのズレとして考慮。	駆動軸を制御棒クラスタ案内管内部の空間の範囲内で最大［redacted］水平移動。	駆動軸全体を制御棒クラスタ案内間内部の空間の範囲内で傾かせる。この時の傾き［redacted］）による水平方向ずれ量は、［redacted］

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。

表－２　ステップ２，３で考慮した水平方向のズレ



[redacted]の積み上げの考え方	[redacted]の考え方	駆動軸全体の傾き量の考え方	
		駆動軸上端位置の考え方	[redacted]の考え方
 A部詳細 ・上部炉心板（網掛け部分）と下部制御棒クラスタ案内管（緑色部分）のずれ量（公差の積み上げ）【A】 ・上部炉心板（網掛け部分）と制御御棒クラスタのスパイダ頭部（水色部分）のずれ量（公差の積み上げ）【B】	 ＢＢ断面 ・最大隙間【C】 	 Ｃ部詳細 ・下部制御棒クラスタ案内管と上部制御棒クラスタ案内管のずれ量（公差の積み上げ）【D】  ＤＤ断面 ・最大隙間【E】	
【A】＋【B】	【C】×√2	【D】＋【E】	ℓ×ｓｉｎ[redacted]

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。

表－１より、幾何学的に設計上考え得る接手先端とスパイダ頭部の水平方向のずれおよび測定結果であるM－４の接手の開き量を考慮してもスパイダ頭部の円環部上面を乗り越えることはなく、ケース６，７の様にスパイダ頭部外部側で不完全結合することはないと考えられる。

以上

部分モデルによる引き上がり状態実証試験

１．目的

本試験では、制御棒クラスタと駆動軸の切り離し操作後の意図しない駆動軸と制御棒クラスタの再結合により、制御棒クラスタが引き上がる可能性を想定して、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、制御棒クラスタの引き上がりが生じるかどうかを確認する。

また、制御棒クラスタと駆動軸の結合状況等の確認において、上部炉心構造物と制御棒クラスタが引き上がった後、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、実証試験においては、引き上がり後に容易に切り離されるかの観点でも確認を行う。

実証試験は、添付資料－１０で選定したケース１，２，３，４とするが、ケース４については、ケース３で代表し、引き上がり状態が生じた可能性がケース１，２よりケース３の方が高い場合に実施する。

ここで、表－１にケース１，２，３の不完全結合イメージとモデル化した供試体を示す。

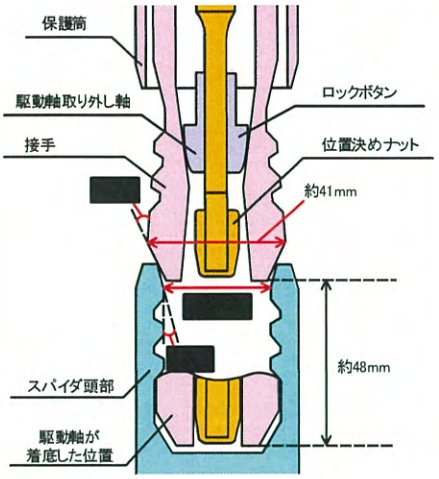
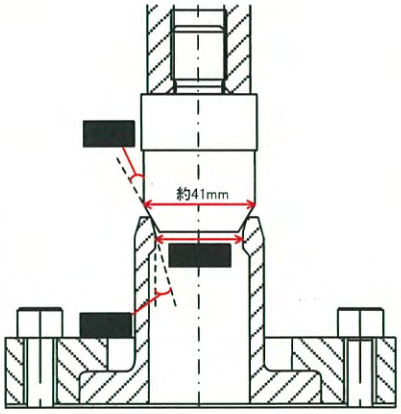
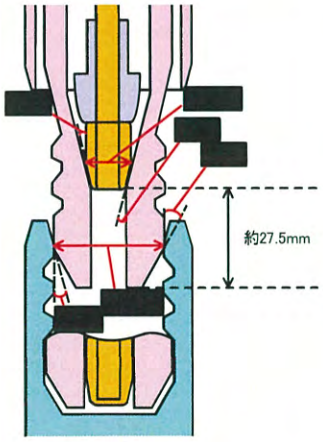
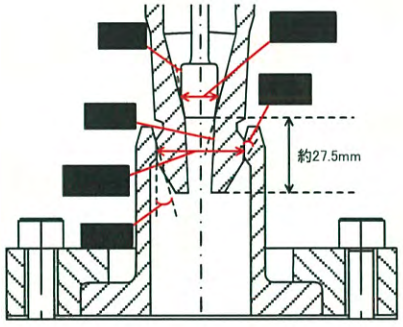
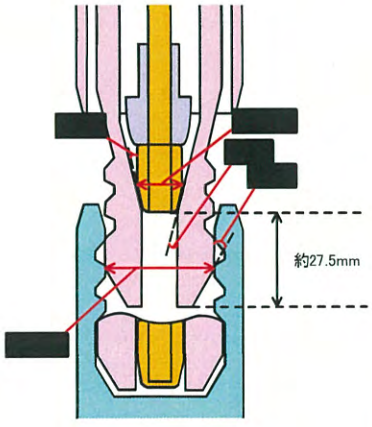
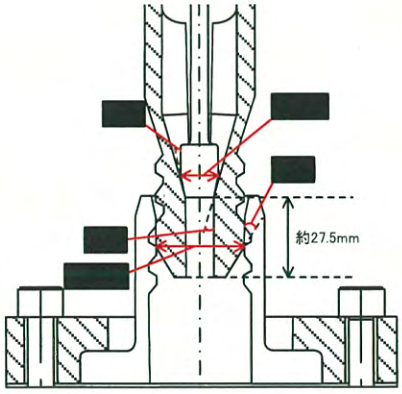
・ケース１：仮置き位置（駆動軸が着座した位置：駆動軸が制御棒クラスタと結合した状態（駆動軸が着底した位置）から４８ｍｍ上方）で押付け力がかかった場合

・ケース２：スパイダ頭部の上端から１山目の直線部分と接手先端から１山目の直線部分（局所的な接触痕が観察された位置）が接触した場合
（幾何学的な関係から位置決めナットは接手先端から約２７．５ｍｍ上方）

・ケース３：スパイダ頭部の上端から２山目の直線部分と接手先端から１山目の直線部分（局所的な接触痕が観察された位置）が接触した場合
（幾何学的な関係から位置決めナットは接手先端から約２７．５ｍｍ上方）

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。

表－１　ケースごとの供試体

	不完全結合イメージ図	モデル化	供試体
ケース1		⇒	
ケース2		⇒	
ケース3		⇒	

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。

2．実施内容

（1）試験項目

①　吊り上がり状態実証試験

・ケース１（仮置き位置で押付け力がかかった場合）

接手テーパ部とスパイダ頭部内面のテーパ部同士が接触し、仮置き時の荷重である[redacted]ｋｇｆの荷重（駆動軸＋吊り上げ工具の水中重量に相当する荷重）がかかった場合、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か確認する。

このとき、１５サイクルの使用を勘案するため、接手外面が面荒れなしの場合（機械加工後の静止摩擦係数が小さい状態）、面荒れありの場合（表面状態が粗く静止摩擦係数の大きい状態）の２種類で実施する。

・ケース２（スパイダ頭部の上端から１山目の直線部分と接手先端から１山目の直線部分（局所的な接触痕が観察された位置）が接触した場合）

接手ストレート部とスパイダ頭部内面の１山目ストレート部同士が接触し、くさび効果による制御棒クラスタの引き上がりが生じるか確認する。ここで、当該接触状況においては、幾何学的な関係から位置決めナットは接手先端から約２７．５ｍｍ上方に位置し、仮置き後に駆動軸が沈み込んだ位置関係になる。

このとき、１５サイクルの使用を勘案するため、接手内外面が面荒れなしの場合（機械加工後の静止摩擦係数が小さい状態）、面荒れありの場合（表面状態が粗く静止摩擦係数の大きい状態）の２種類で実施する。なお、接手内面のテーパ面は通常摺動しないため、面荒れなしの場合のみとし、位置決めナットの表面状態についても、実機ではクロムメッキが施されており面が荒れることは無いと考えられるため、面荒れなしの場合のみとする。

・ケース３（スパイダ頭部の上端から２山目の直線部分と接手先端から１山目の直線部分（局所的な接触痕が観察された位置）が接触した場合）

接手ストレート部とスパイダ頭部内面の２山目ストレート部同士が接触し、くさび効果による制御棒クラスタの引き上がりが生じるか確認する。ここで、当該接触状況においては、幾何学的な関係から位置決めナットは接手先端から約２７．５ｍｍ上方に位置し、仮置き後に駆動軸が沈み込んだ位置関係になる。

このとき、１５サイクルの使用を勘案するため、接手内外面が面荒れなしの場合（機械加工後の静止摩擦係数が小さい状態）、面荒れありの場合（表面状態が粗く静止摩擦係数の大きい状態）の２種類で実施する※。なお、接手内面のテーパ面は通常摺動しないため、面荒れなしの場合のみとし、位置決めナットの表面状態についても、実機ではクロムメッキが施されており面が荒れることは無いと考えられるため、面荒れなしの場合のみとする。

※：面荒れなしの状態で制御棒クラスタの引き上がりが生じ得る荷重が発生したため、面荒れありの場合の試験は省略する。

② 摩擦係数確認試験

ケース１，２，３の接触面の静止摩擦係数を試験により確認する。確認方法としては、供試体の静止摩擦係数を測定すると共に、当該供試体は実機と材料および環境（水中／気中）が異なるため、実機材料および水中環境での静止摩擦係数を測定し、比較を行う。

（２）試験条件

ａ．供試体・試験体

① 引き上がり状態実証試験

引き上がり状態実証試験に用いる供試体（ケース１，２，３）は、表－１に示す不完全結合状態を模擬するのに必要な範囲を製作し、寸法については、伊方３号機のスパイダ頭部および駆動軸の図面をもとに、同寸法となるように製作した。なお、接手の材料については、特殊な材料であるため、硬さを模擬した材料を使用した。（表－２、図－１参照）

② 摩擦係数確認試験

摩擦係数確認試験に用いる試験体は、供試体と同等である材料および実機と同等である材料を固定片（接手材：２５×６ｍｍ）、運動片（位置決めナット材、スパイダ頭部材：８０×１０ｍｍ）の形状に加工した。（表－３参照）

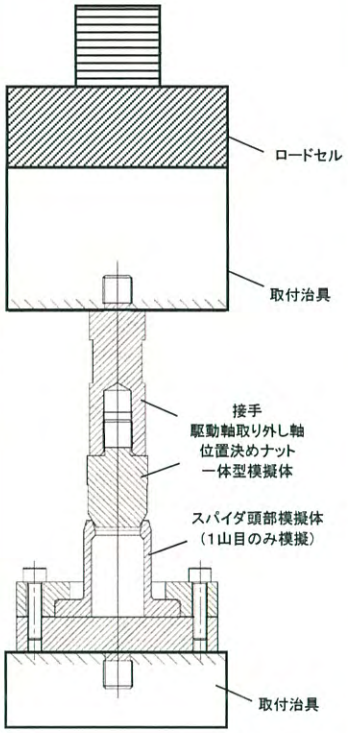
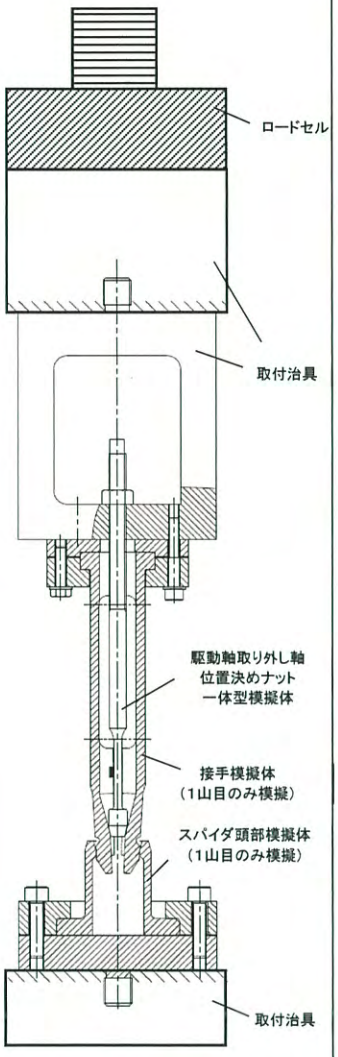
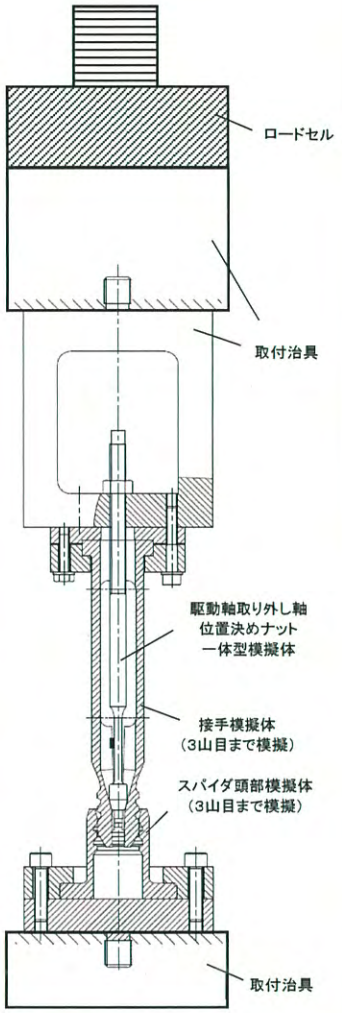
表－２　実機材と供試体の材料比較

	実機	ケース1供試体	ケース2供試体	ケース3供試体
接手	SUS403 （熱処理材）	炭素鋼[注1]	炭素鋼[注1]	炭素鋼[注1]
駆動軸取り 外し軸	SUS304	接手と一体	位置決めナットと一体	位置決めナットと一体
位置決めナット	SUS304 （クロムメッキ）	接手と一体	SUS304[注2]	SUS304[注2]
スパイダ頭部	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304

注1：接手の材料（SUS403熱処理材）は特殊な材料であるため、供試体には、実機材の硬さ（HB：248）と同等の硬さ（HB：257）の炭素鋼を使用した。

注2：ケース2，3の供試体では、位置決めナット表面のクロムメッキを模擬していないが、静止摩擦係数がクロムメッキを施工した場合と同等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。

	ケース1供試体	ケース2供試体	ケース3供試体
形状			
荷重	[redacted]kgf[注1] （駆動軸+工具の水中重量に相当する荷重）	[redacted]kgf[注2] （ばね力）	[redacted]kgf[注2] （ばね力）

注1：スパイダ頭部模擬体に作用する荷重

注2：一体型模擬体（駆動軸取り外し軸、位置決めナット）の駆動軸取り外し軸下端の位置決めナットに作用する荷重

図－1　供試体イメージ図

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。

表－３　摩擦係数確認試験の試験体条件

	供試体と同等材			実機と同等材		
	材料	荒さ	組合せ	材料	荒さ	組合せ
スパイダ頭部	SUS304	・面荒れなし ・面荒れあり注1	2種類	SUS304	・面荒れなし ・面荒れあり注1	2種類
接手	炭素鋼	・面荒れなし ・面荒れあり注1	1種類	SUS403 （熱処理材）	・面荒れなし ・面荒れあり注1	1種類
位置決めナット	SUS304	・面荒れなし		SUS304 （クロムメッキ）	・面荒れなし	

注1：面荒れありの条件では、接触部の表面をサンドペーパ＃40で仕上げた。

ｂ．荷重条件

①　吊り上がり状態実証試験

・ケース１

スパイダ頭部の模擬体（１山目のみ模擬）に対して、実機と同じく[redacted]ｋｇｆ（駆動軸＋吊り上げ工具の水中重量に相当する荷重）が作用するように、一体型模擬体（接手、駆動軸取り外し軸、位置決めナット）を[redacted]ｋｇｆの荷重でスパイダ頭部の模擬体に押し付ける。

・ケース２

スパイダ頭部の模擬体（１山目のみ模擬）に対して、接手の模擬体を接触させた状態で、実機と同じく位置決めナットが接手先端から約２７．５ｍｍ上方に位置するときのバネ力（[redacted]ｋｇｆ）を一体型模擬体（駆動軸取り外し軸、位置決めナット）の駆動軸取り外し軸下端の位置決めナットに作用させる。

・ケース３

スパイダ頭部の模擬体（３山目まで模擬）に対して、接手の模擬体を接触させた状態で、実機と同じく位置決めナットが接手先端から約２７．５ｍｍ上方に位置するときのバネ力（[redacted]ｋｇｆ）を一体型模擬体（駆動軸取り外し軸、位置決めナット）の駆動軸取り外し軸下端の位置決めナットに作用させる。

②　摩擦係数確認試験

静止摩擦係数を取得するため、実機および引き上がり状態実証試験で各接触面に発生すると想定される荷重範囲（約[redacted]～[redacted]ｋｇｆ）を試験体に作用させる。

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）試験方法・判定基準

①　引き上がり状態実証試験

各ケースの荷重を作用させた後、引張試験機を用い、各ケースの駆動軸模擬体とスパイダ頭部模擬体間に生じている荷重（制御棒クラスタ引上荷重）を測定し、約[redacted]ｋｇｆ（制御棒クラスタの水中重量に相当する荷重）以上の荷重が発生するか否かを確認する。試験装置を図－２に示す。

・ケース１

Ａ）一体型模擬体（接手、駆動軸取り外し軸、位置決めナット）を、スパイダ頭部の模擬体（１山目のみ模擬）へ静的に[redacted]ｋｇｆで押付ける。

Ｂ）スパイダ頭部の模擬体を下方向に引き下げ、その際に必要となる荷重を測定する。（実機では、駆動軸側が上方向に引き上げられるが、試験装置の都合上、荷重の向きは実機と逆方向とする。）

・ケース２

Ａ）スパイダ頭部の模擬体（１山目のみ模擬）に接手の模擬体を挿入する。

Ｂ）駆動軸取り外し軸の模擬体頂部の位置決めナットに[redacted]ｋｇｆの締め付け荷重を作用させることで、位置決めナットを接手の模擬体に対して押付ける。

Ｃ）この状態でスパイダ頭部の模擬体を下方向に引き下げ、その際に必要となる荷重を測定する。（実機では、駆動軸側が上方向に引き上げられるが、試験装置の都合上、荷重の向きは実機と逆方向とする。）

・ケース３

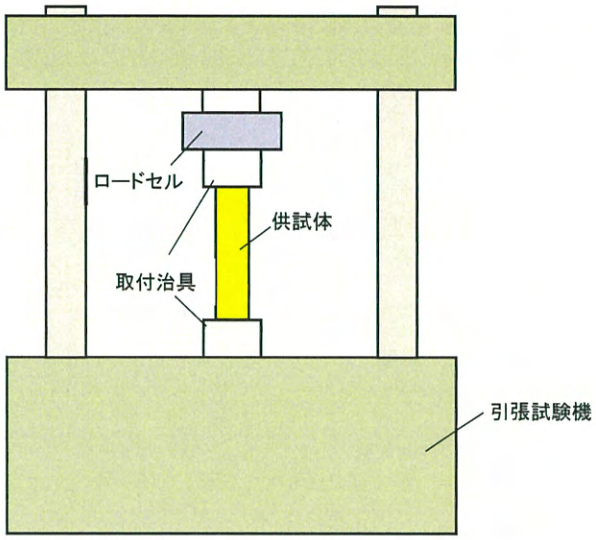
Ａ）スパイダ頭部の模擬体（３山目まで模擬）に接手の模擬体を挿入する。

Ｂ）駆動軸取り外し軸の模擬体頂部の位置決めナットに[redacted]ｋｇｆの締め付け荷重を作用させることで、位置決めナットを接手の模擬体に対して押付ける。

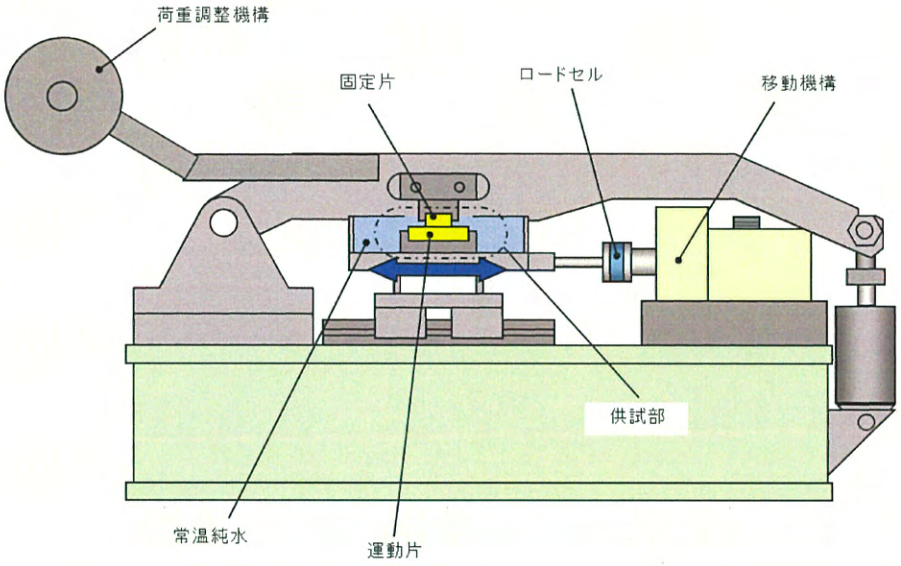
Ｃ）この状態でスパイダ頭部の模擬体を下方向に引き下げ、その際に必要となる荷重を測定する。（実機では、駆動軸側が上方向に引き上げられるが、試験装置の都合上、荷重の向きは実機と逆方向とする。）

②　摩擦係数確認試験

平板摺動試験装置を用い、押付荷重約[redacted]～[redacted]ｋｇｆを作用させ、摺動方向の荷重（運動片が動き出す直前の荷重）を測定することで、静止摩擦係数を算出する。試験装置を図－３に示す。



図－２　吊り上がり状態実証試験装置（概念図）



図－３　摩擦係数確認試験（概念図）

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。

3．試験結果

① 引き上がり状態実証試験

引き上がり状態実証試験のケース１，２，３の結果を表－４，５，６に示す。ケース１の場合は、面荒れありの状態（静止摩擦係数が大きく引き上りが生じやすい場合）でも、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いことを確認した。

一方、ケース２の場合は、面荒れなしの状態において、制御棒クラスタ引上荷重が４１～６１ｋｇｆ、面荒れありの状態において、制御棒クラスタ引上荷重が１１４～１４７ｋｇｆであり、制御棒クラスタの引き上がりが発生することを確認した。また、ケース３の場合には、面荒れなしの状態でも、制御棒クラスタ引上荷重が１，０００ｋｇｆ以上となり、制御棒クラスタの引き上がりが発生することを確認した。なお、ケース３については、面荒れなしのケースで制御棒クラスタの水中重量に相当する荷重（約[redacted]ｋｇｆ）を大幅に上回る引上荷重が計測されたため、引き上がりがより生じやすい面荒れありの状態での試験は省略することとした。

ここで、今回の事象において、引き上がり後、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、引き上がり後に容易に切り離される程度の不完全結合であったと類推されるため、ケース３の制御棒クラスタ引上荷重１，０００ｋｇｆ以上は容易に切り離される荷重とは言い難く、今回の事象とは異なると考える。

また、ケース１，２，３の試験後の接触面の写真を図－４に示す。ケース１の写真から、実機接手外面のテーパ部の接触痕およびスパイダ頭部の円筒部内面の傷とよく似た接触痕が部分的に確認された。ケース２の写真から、実機引き上がり事象の発生した駆動軸（Ｍ－４）接手外面の局所的な接触痕とよく似た接触痕が確認された。一方、ケース３の写真から、実機引き上がり事象の発生した駆動軸（Ｍ－４）接手外面の局所的な接触痕とは大きく様相の異なる接触痕が確認された。このことからも、ケース３は今回の事象を再現しているとは言い難い。

② 摩擦係数確認試験

摩擦係数確認試験の結果を表－７に示す。供試体の静止摩擦係数は、接手とスパイダ頭部との接触面が[redacted]～[redacted]であり、位置決めナットと接手内面の接触面が[redacted]であった。また、実機と同材かつ水中環境の静止摩擦係数がそれぞれ[redacted]～[redacted]と[redacted]～[redacted]であり、供試体の静止摩擦係数と概ね一致しており、今回の吊り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ると考える。

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。

表－４　引き上がり状態実証試験結果（ケース１）

供試体の表面性状		付加荷重	制御棒ｸﾗｽﾀ引上荷重 (kgf)
一体型模擬体[注1]	スパイダ頭部の模擬体	押付荷重（kgf）	
面荒れなし	面荒れなし	[redacted]	0
面荒れあり	面荒れあり	[redacted]	0

注１：接手、駆動軸取り外し軸および位置決めナットを一体で模擬した供試体

表－５　引き上がり状態実証試験結果（ケース２）

供試体の表面性状				付加荷重	制御棒ｸﾗｽﾀ引上荷重 (kgf)
接手外面の接触面		接手内面の接触面		バネ力 (kgf)	
接手模擬体	スパイダ頭部の模擬体	接手模擬体	一体型模擬体[注1]		
面荒れなし	面荒れなし	面荒れなし	面荒れなし	[redacted]	41～61
面荒れあり	面荒れあり	面荒れなし	面荒れなし	[redacted]	114～147

注１：駆動軸取り外し軸および位置決めナットを一体で模擬した供試体

表－６　引き上がり状態実証試験結果（ケース３）

供試体の表面性状				付加荷重	制御棒ｸﾗｽﾀ引上荷重 (kgf)
接手外面の接触面		接手内面の接触面		バネ力 (kgf)	
接手模擬体	スパイダ頭部の模擬体	接手模擬体	一体型模擬体[注1]		
面荒れなし	面荒れなし	面荒れなし	面荒れなし	[redacted]	1,000 以上
面荒れあり	面荒れあり	面荒れなし	面荒れなし	—[注2]	—[注2]

注１：駆動軸取り外し軸および位置決めナットを一体で模擬した供試体

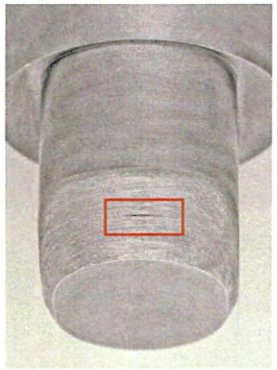
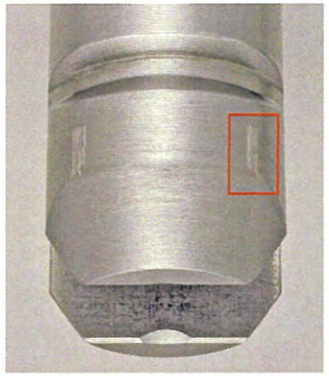
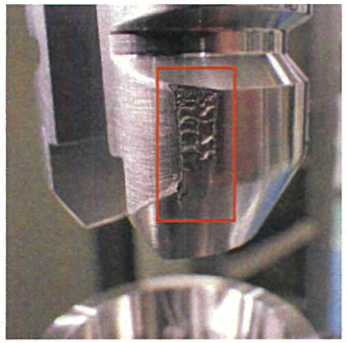
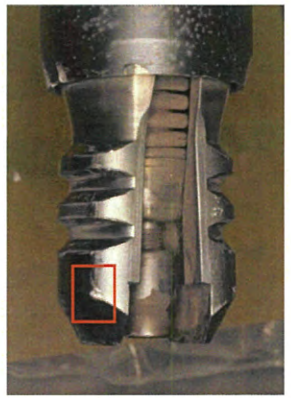
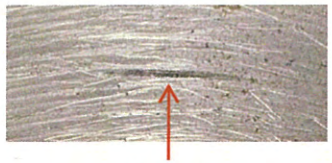
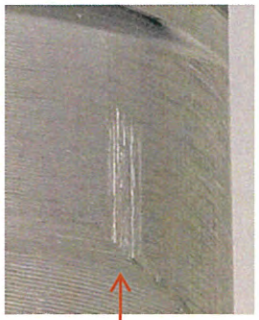
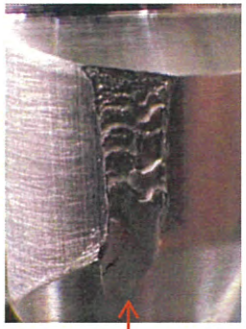
注２：面荒れなしの状態で制御棒クラスタの水中重量に相当する荷重（約[redacted]ｋｇｆ）を大幅に上回る引上荷重が計測されたため、面荒れありの状態については試験を省略した。

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。

表－７　摩擦係数確認試験結果

接触面		表面状態	環境条件	付加荷重（kgf）	静止摩擦係数
実機と同材	接手外面 （接手：SUS403 / ｽﾊﾟｲﾀﾞ頭部：SUS304）	面荒れなし/面荒れなし	常温水中	[redacted]	[redacted]
		面荒れあり/面荒れあり	常温水中		
	接手内面 （接手：SUS403 / 位置決めﾅｯﾄ：SUS304 ｸﾛﾑﾒｯｷ）	面荒れなし/面荒れなし	常温水中	[redacted]	[redacted]
供試体と同材	接手外面 （接手：炭素鋼 / ｽﾊﾟｲﾀﾞ頭部：SUS304）	面荒れなし/面荒れなし	常温気中	[redacted] 注１	[redacted]
		面荒れあり/面荒れあり	常温気中	注１	
	接手内面 （接手：炭素鋼 / 位置決めﾅｯﾄ：SUS304）	面荒れなし/面荒れなし	常温気中	[redacted]	[redacted]

注１：実機と同材のケースにおいて、付加荷重[redacted]ｋｇｆと[redacted]ｋｇｆの条件で静止摩擦係数に有意な差がないことが確認されたため、供試体と同材のケースについては、付加荷重[redacted]ｋｇｆの条件のみを実施した。

	ケース1	ケース2	ケース3	実機:M－4	実機:M－12
全体	 接手2箇所に同様の 接触痕あり	 接手4箇所に同様の 接触痕あり	 接手4箇所に同様の 接触痕あり		
接触痕拡大	 接触痕	 接触痕	 接触痕	 接触痕	 接触痕

図－４　引き上がり状態実証試験の試験後の接触面（写真）

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。

4．供試体の表面性状に関する考察

実証試験で用いた接触面における表面性状は、面荒れなしの状態と面荒れありの状態の２種類としたため、面荒れなしの状態、面荒れありの状態および実機駆動軸（Ｍ－１２）の接手外面の表面性状を比較することで、今回の吊り上がり状態実証試験で用いた表面状態について、考察を行う。

添付資料－８－５ 駆動軸の調査結果において、当該駆動軸（Ｍ－４）と同じく１５サイクル使用した駆動軸（Ｍ－１２）の接手外面は、図－５に示す様に１５サイクルの使用に伴い比較的面荒れのある表面性状になっているが、外観上の表面粗度は面荒れありの状態に比べて軽微であることから、静止摩擦係数は面荒れなしの状態と面荒れありの状態の中間の値になると考えられる。

よって、ケース１においては、実機よりも静止摩擦係数が大きいと思われる面荒れありの状態においても制御棒クラスタ引上荷重が発生しなかったことから、実機の表面性状では制御棒クラスタの引き上がりは生じないと考えられる。一方、ケース２においては、実機の表面性状よりも静止摩擦係数が小さい面荒れなしの状態で制御棒クラスタ引上荷重が４１～６１ｋｇｆ、実機の表面性状よりも静止摩擦係数が大きい面荒れありの状態で制御棒クラスタ引上荷重が１１４～１４７ｋｇｆであるため、面荒れなしの表面性状よりも静止摩擦係数が大きい実機の表面性状で制御棒クラスタ引上荷重が約[redacted]ｋｇｆ以上となる可能性は十分考えられ、制御棒クラスタの引き上がりが生じる可能性は高い。なお、ケース３については、実機の表面性状よりも静止摩擦係数が小さい面荒れなしの状態でも制御棒クラスタ引上荷重１，０００ｋｇｆ以上となったため、実機の表面性状ではもっと大きい引上荷重となる可能性がある。

	面荒れなし[注1]	実機：Ｍ－12	面荒れあり[注1]
表面性状			
	静止摩擦係数：小	静止摩擦係数：中	静止摩擦係数：大

注1：摩擦係数確認試験で使用した供試体の表面性状

図－５　表面性状の比較

５．まとめ

以上から、今回の制御棒クラスタの吊り上がり事象に対して、部分モデルによる吊り上がり状態実証試験を実施し、

・ケース１の状態において、実機表面性状よりも静止摩擦係数が大きい状態で試験を実施したが、吊り上がることはなかった
・ケース２の状態において、実機表面性状よりも静止摩擦係数が小さい状態で引上荷重４１～６１ｋｇｆ、実機表面性状よりも静止摩擦係数が大きい状態で引上荷重１１４～１４７ｋｇｆを確認したことから、実機においても吊り上がる可能性が高いことを確認した
・ケース３の状態において、ケース２と同様に吊り上がる可能性は高いが、引上荷重が１，０００ｋｇｆ以上と非常に大きく、吊り上がり後に容易に切り離されていた当該事象とは異なる結果となった

ことから、ケース２の状態において、当該事象が発生し得ることを確認した。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ることからも、ケース２の状態で実機の吊り上がり事象が発生した可能性が高い。

以上

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。

添付資料－１１
別添

引き上がり状態実証試験の妥当性について

１．はじめに

引き上がり状態実証試験で今回の事象を再現したと考えるケース２について、実機と実証試験との差異が試験結果に与える影響を考察し、実証試験の妥当性について検討した。

２．検討結果

（１）実機と試験条件の差異に関する考察

実機の水中環境とは異なる気中試験を行ったことで、実機条件との差異が生じる部分は、供試体の接触面の摩擦力と浮力の影響と考えらえるため、この２つの観点から今回の実証試験に与える影響について、次のとおり考察する。

接触面の摩擦力については、添付資料－１１の表－７に示すとおり、供試体各部材の常温気中条件における静止摩擦係数が、実機の常温水中環境下の静止摩擦係数と同等であるため、今回の実証試験に対して問題はない。

また、浮力の影響については、引上荷重の判定基準を、制御棒クラスタの水中重量に相当する荷重（約[redacted]ｋｇｆ）として模擬していることから、今回の実証試験に対して問題はない。

よって、気中条件で実証試験を実施することは妥当である。

（２）実機と供試体の差異に関する考察

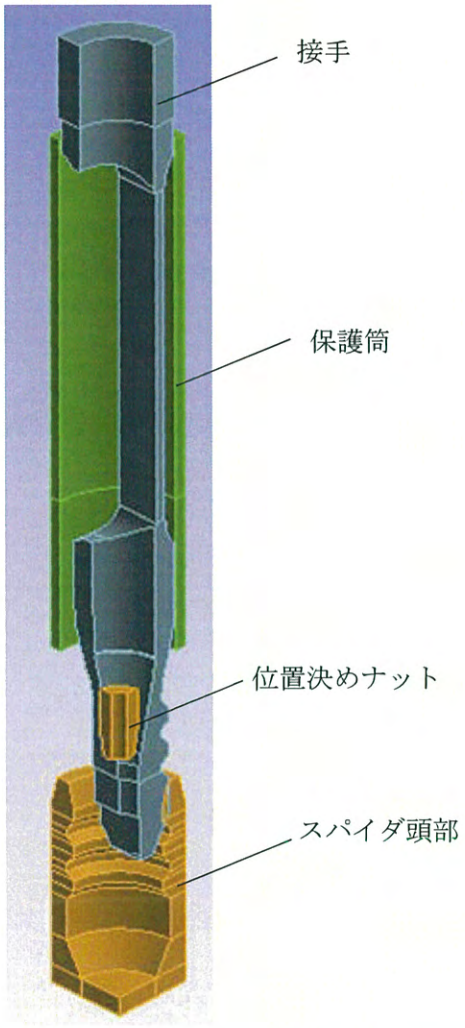
実証試験で用いた供試体は、部分モデルかつ実機と材料が異なるものを用いたため、実機寸法かつ実機材料でのＦＥＭモデルを用い、実証試験と同様の結果が得られるか解析により確認した。なお、解析に用いる静止摩擦係数は、摩擦係数確認試験で得られた接手内面の接触面の静止摩擦係数[redacted]～[redacted]（面荒れなし／面荒れなし）および接手外面の接触面の静止摩擦係数[redacted]～[redacted]（面荒れあり／面荒れあり）とする。

ここで、ＦＥＭの解析モデルを図－１に示す。同図に示すとおり、接手、位置決めナット、保護筒、スパイダ頭部を実機寸法どおりモデル化した。解析コードは、有限要素法の汎用コードであるＡＮＳＹＳを使用した。

ＦＥＭ解析では、位置決めナットを接手内面に[redacted]ｋｇｆの荷重で接触させ、この荷重により接手外面とスパイダ頭部内面に作用する反力を計算する。この反力に接手外面とスパイダ頭部の円筒部内面の接触面における静止摩擦係数を乗じることで、当該接触面における摩擦力を計算し、制御棒クラスタの水中重量に相当する荷重（約[redacted]ｋｇｆ）以上の摩擦力が生じるか否かを確認する。

表－１のＦＥＭ解析結果に示すとおり、実証試験と同様に、実機寸法かつ実機材

料でのＦＥＭモデルにおいても、ケース２（接手外面の接触面：面荒れ／面荒れ）の条件において制御棒クラスタ引き上がり事象が発生し得ることが確認されたため、部分モデルの供試体で実証試験を実施することは妥当である。



図－１　引き上がり事象の再現解析モデル（ケース２）

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。

表－１　制御棒クラスタ引き上がり事象の再現解析結果（ＦＥＭ解析結果ｖｓ実証試験結果）

ＦＥＭ解析結果					実証試験結果			
静止摩擦係数[注1]		接手外面の接触反力ｋｇｆ（1箇所あたり）	接手外面の摩擦力ｋｇｆ（4箇所の合計）	引き上がり事象の成立性[注3]	静止摩擦係数[注4]		引上荷重ｋｇｆ	引き上がり事象の成立性[注6]
接手内面	接手外面[注2]				接手内面	接手外面[注5]		
[redacted]	[redacted]	５６	９０	○	[redacted]	[redacted]	１１４～１４７	○
		５６	１１２	○				
		５０	７９	○				
		５０	９９	○				

注１：実機と同材を用いた摩擦係数確認試験結果で取得した静止摩擦係数。

注２：表面状態は、面荒れあり／面荒れありの結果。

注３：静止摩擦力が制御棒クラスタの水中重量に相当する荷重（約[redacted]ｋｇｆ）を上回る場合は○、下回る場合は×とする。

注４：供試体と同材を用いた摩擦係数確認試験結果で取得した静止摩擦係数。

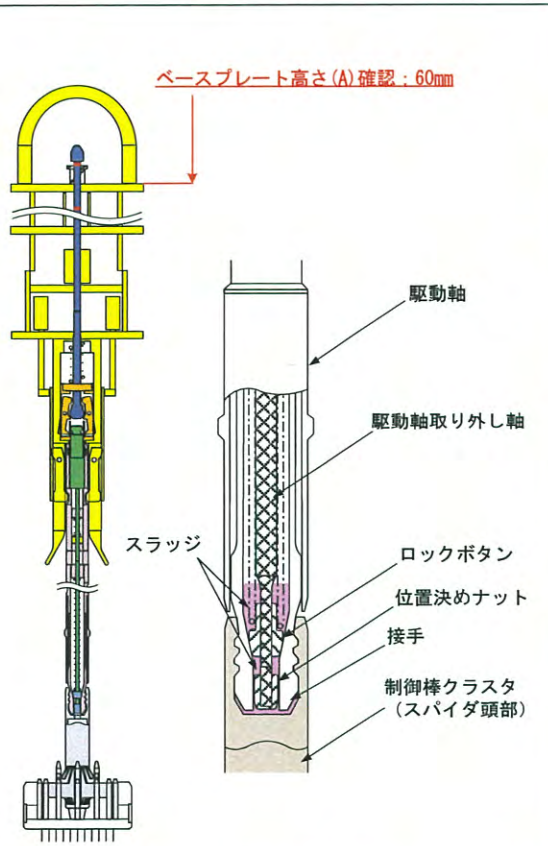
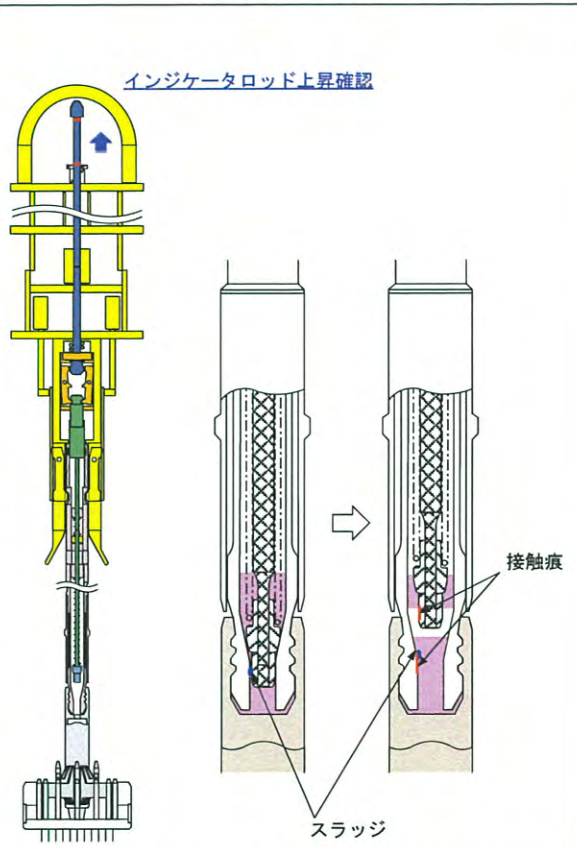
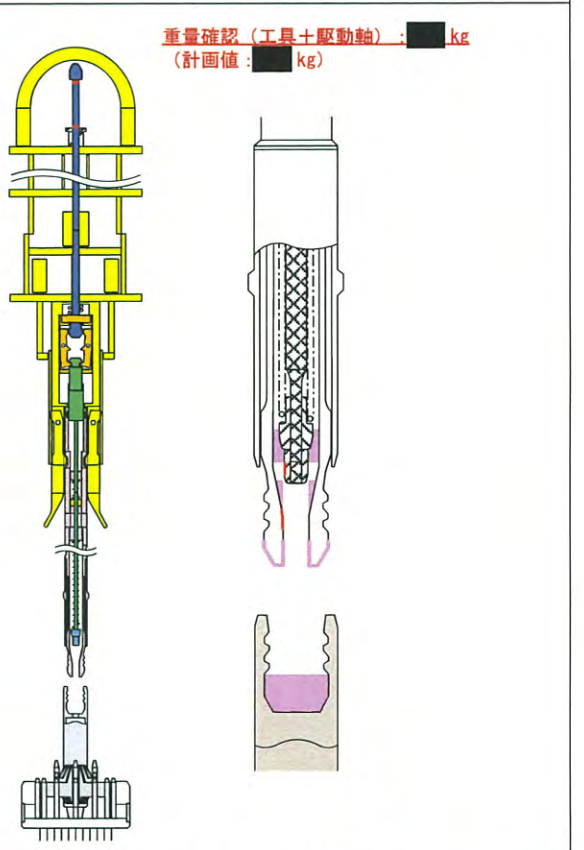
注５：表面状態は、面荒れあり／面荒れありの結果。

注６：引上荷重が制御棒クラスタの水中重量に相当する荷重（約[redacted]ｋｇｆ）を上回る場合は○、下回る場合は×とする。

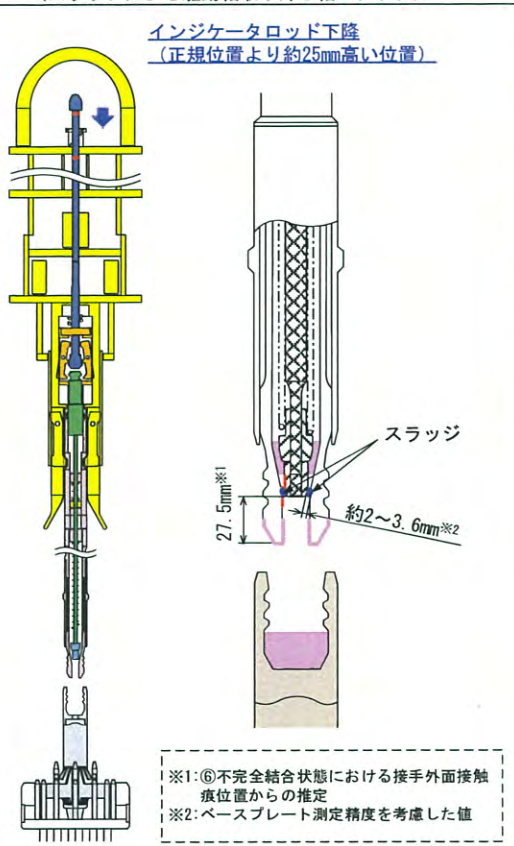
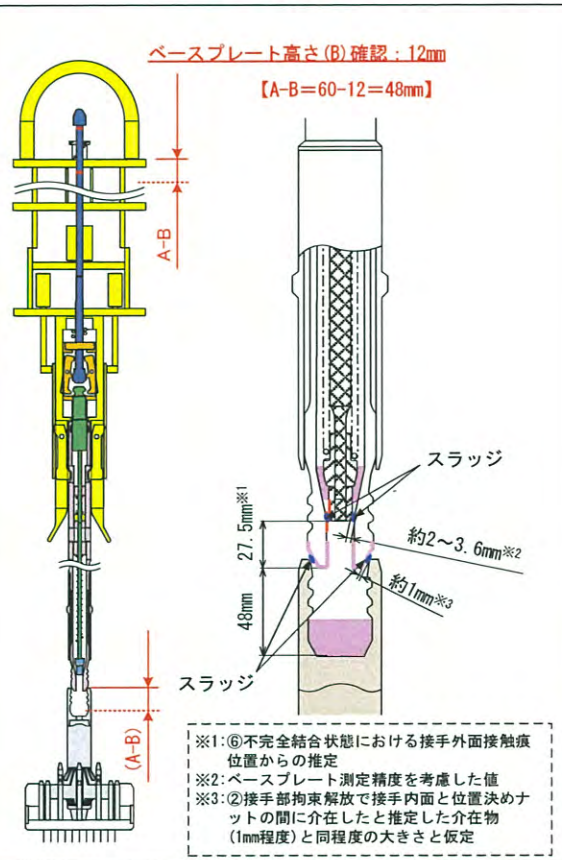
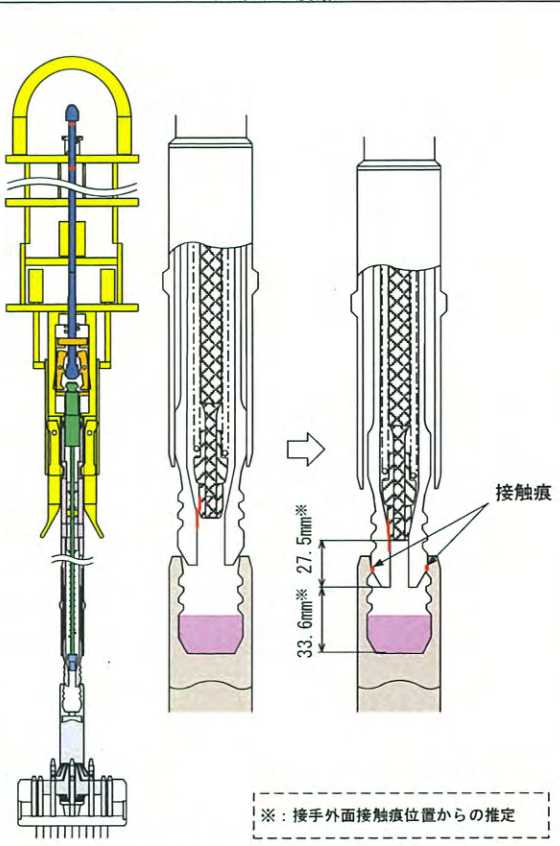
以上から、実機と実証試験（ケース２）との差異が試験結果に与える影響は軽微であり、実証試験は妥当であると考える。

以上

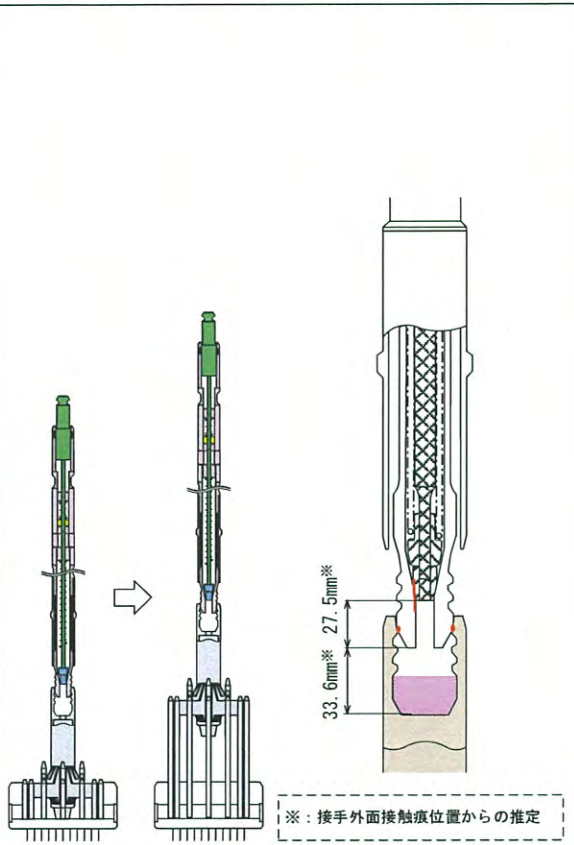
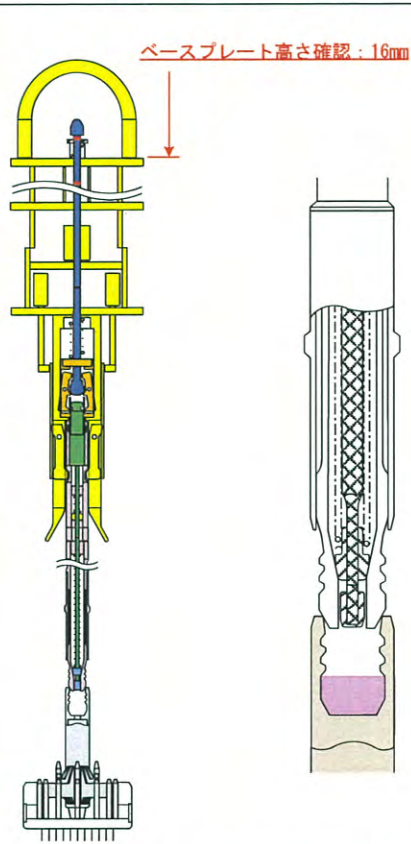
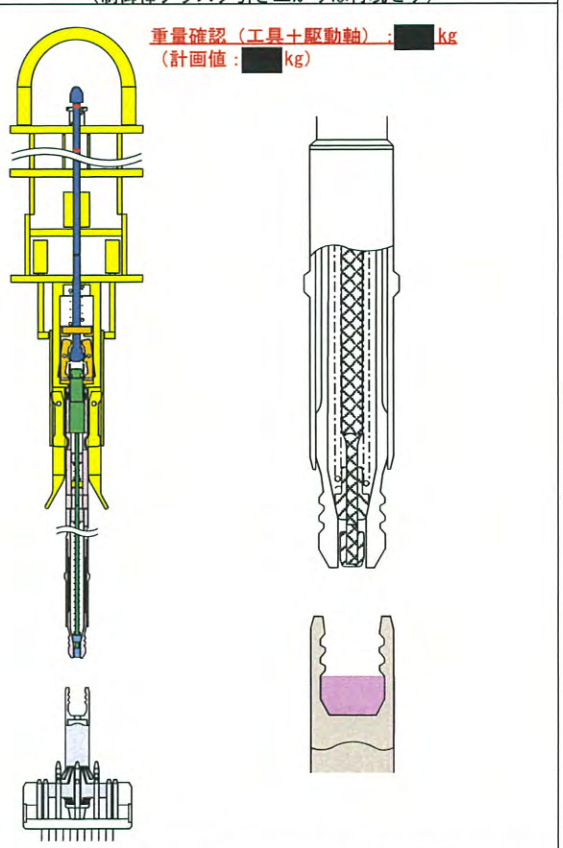
推定メカニズム

	① 駆動軸結合状態	② 接手部拘束解放	③ 駆動軸切り離し
概要図			
観察事実	・制御棒クラスタと駆動軸が結合状態でのベースプレート高さ60㎜を確認 ・制御棒クラスタのスパイダ頭部内にスラッジが堆積	・インジケータロッドの上昇を確認（駆動軸取り外し軸上昇） ・接手内面直線部と位置決めナット直線部に接触痕を確認。両者の位置は駆動軸取り外し軸の動作により摺動する箇所に相当	・工具を吊り上げ、重量が工具と駆動軸の合計重量（[redacted]kg）となっていることを確認（制御棒クラスタが切り離されていることを確認）
推定メカニズム	・スラッジは１次冷却系統内（駆動軸内面含む）で生じたものと考えられ、スパイダ頭部内およびロックボタン廻りに堆積	・ロックボタン廻りのスラッジは堆積したまま駆動軸取り外し軸が上昇 ・接手と位置決めナットの間にスラッジが堆積していた状態で取り外し軸が上昇したことにより、スラッジ（1㎜程度）を介して両者が摺動し、接手内面直線部と位置決めナット直線部に接触痕が発生	・ロックボタン廻りのスラッジは堆積したまま駆動軸が上昇 ・接手部は磁性体（マルテンサイト系ステンレス鋼）であることから、接手内面テーパー部および接手先端部にもスラッジが付着した状態で駆動軸が上昇
関連資料			・別添１ 駆動軸（接手）へのスラッジの付着

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。

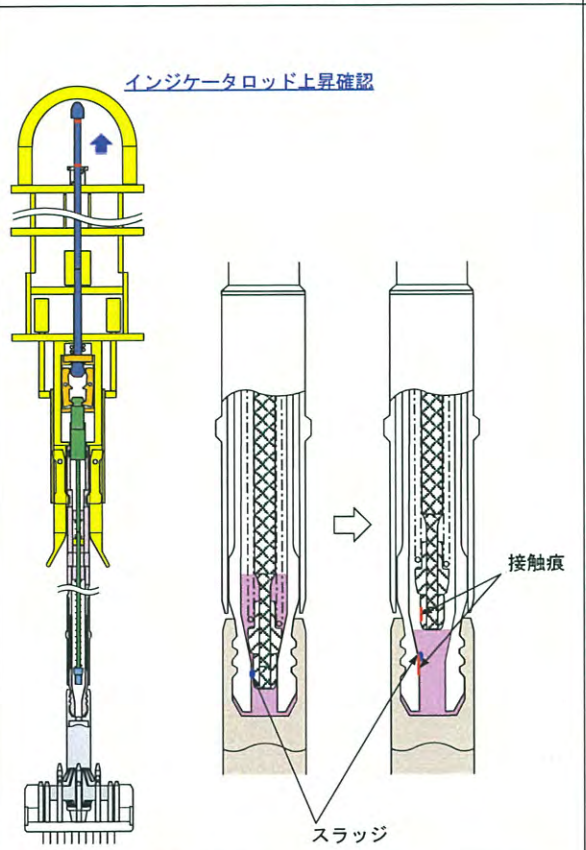
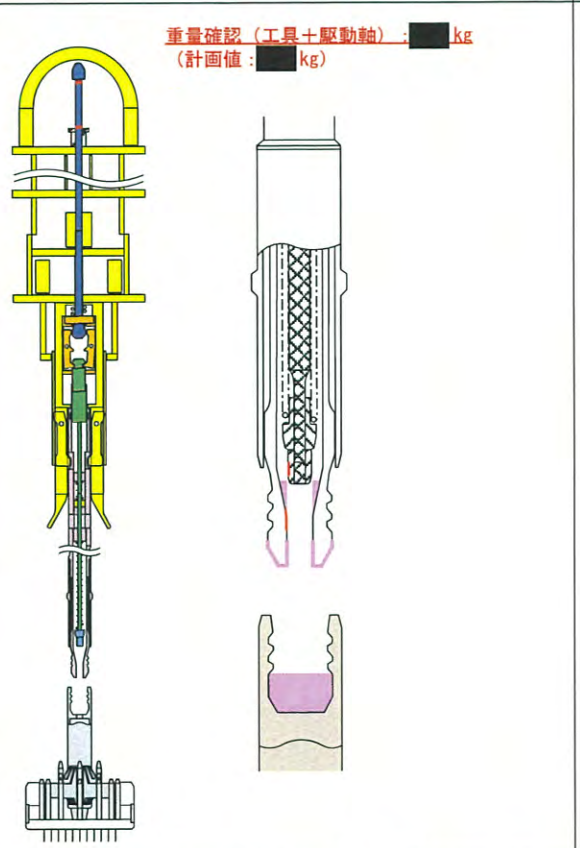
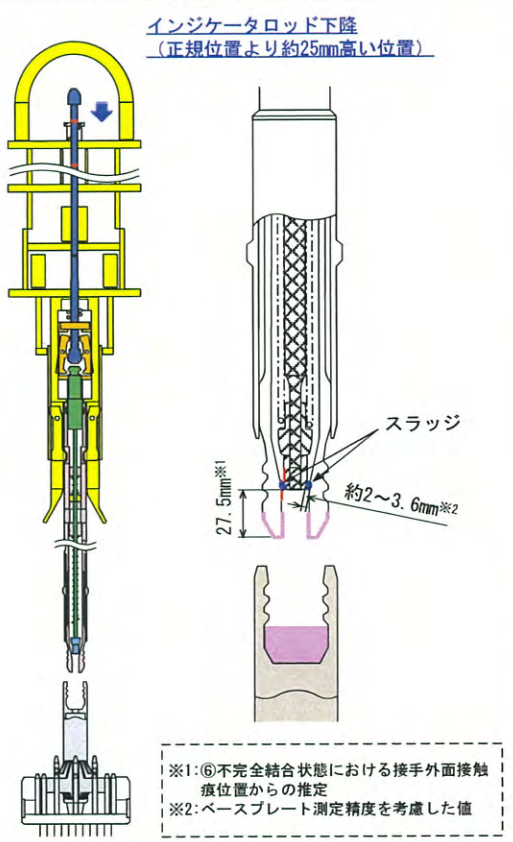
	④ 駆動軸接手部拘束 （スラッジによる駆動軸取り外し軸スタック）	⑤ 駆動軸着座	⑥ 制御棒クラスタと駆動軸が不完全結合 （スラッジ脱落）
概要図			
観察事実	【工具吊り下ろし前にインジケータロッド下降位置を確認する手順無し】	・駆動軸着座（制御棒クラスタ切離し）状態でのベースプレート高さ12㎜を確認 ・ベースプレート高さの差（A-B）が48㎜で、管理値内（[redacted]㎜）であることを確認	・接手外面直線部に局所的な接触痕を確認。
推定メカニズム	・駆動軸取り外し軸下降時、ロックボタン廻りのスラッジおよび接手内面テーパー部のスラッジが位置決めナットと接手の間に挟まり、駆動軸取り外し軸が下降途中でスタック ・駆動軸取り外し軸が途中でスタックしたことにより、インジケーターロッドの下降位置も正規の位置より高い位置で停止	・接手先端のスラッジがスパイダ頭部との間に挟まり、スラッジを介した不安定な支持状態で制御棒クラスタに駆動軸が着座	・工具切り離しに伴う振動が駆動軸に伝わることにより、不安定な支持状態であった位置決めナットと接手の間および接手先端とスパイダ頭部の間のスラッジが脱落し、駆動軸がスパイダ頭部に沈み込む ・スパイダ頭部の１段目と接手外面直線部が接触し、制御棒クラスタと駆動軸が不完全に結合し、接手外面直線部の接触箇所に接触痕が発生
関連資料	・別添２ 不完全結合状態の幾何学的検討	・別添２ 不完全結合状態の幾何学的検討	・別添２ 不完全結合状態の幾何学的検討 ・別添３ スラッジ脱落時の駆動軸の挙動

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。

	⑦ 事象発生（制御棒クラスタ引き上がり）	⑧ 制御棒クラスタと駆動軸が不完全結合解除	⑨ 事象発生後の駆動軸吊り上げ （制御棒クラスタ引き上がりは再現せず）
概要図			
観察事実	・上部炉心構造物吊り上げ時に制御棒クラスタも引き上がっていることを確認	・上部炉心構造物吊り込み時、目視確認可能な上部炉心板が原子炉容器フランジ面以下に下降するまでの間は、制御棒クラスタが引き上がっていることを確認 ・上部炉心構造物吊り込み後、駆動軸取り外し工具を吊り下ろした際のベースプレート高さは16mmであることを確認	・事象発生後、駆動軸取り外し工具で駆動軸を吊り上げ、重量が工具と駆動軸の合計重量（[redacted]kg）となっていることを確認（制御棒クラスタは引き上がらず）
推定メカニズム	・上部炉心構造物とともに駆動軸が引き上げられる際に、不完全結合している制御棒クラスタも引き上がり	・上部炉心構造物吊り込み時の振動や着底時の衝撃等により、制御棒クラスタと駆動軸の不完全結合が解除 ・駆動軸取り外し軸が正規の位置まで下降し、駆動軸がスパイダ頭部に着座	・正規の位置で駆動軸がスパイダ頭部に着座した状態から駆動軸を吊り上げたため、制御棒クラスタは引き上がらず
関連資料	・添付資料－１１ 部分モデルによる引き上がり状態実証試験 ・別添２ 不完全結合状態の幾何学的検討		

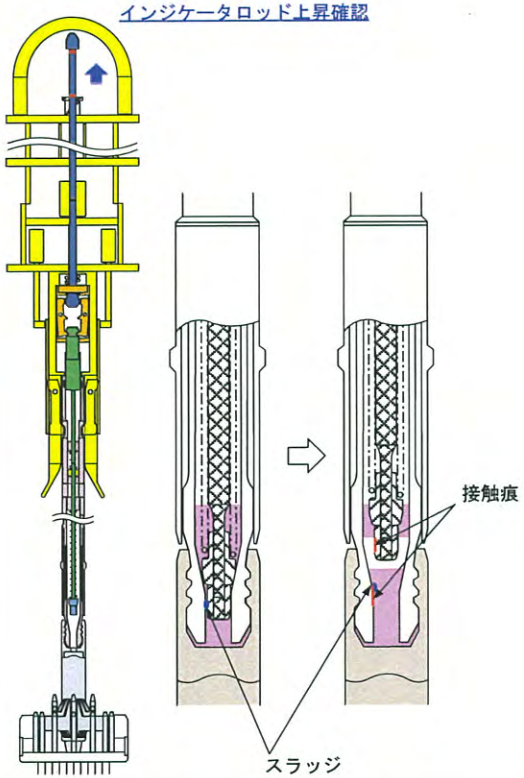
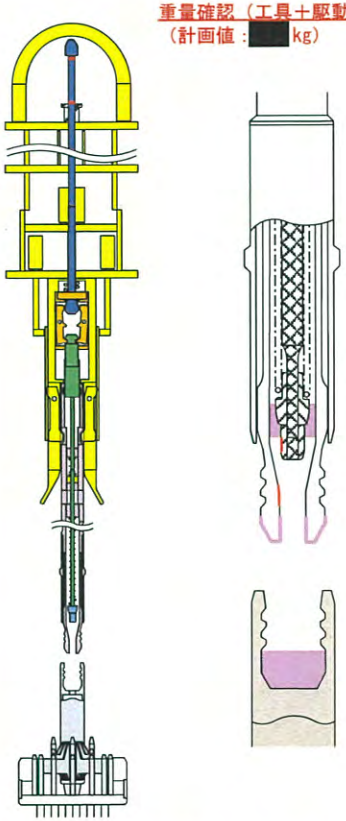
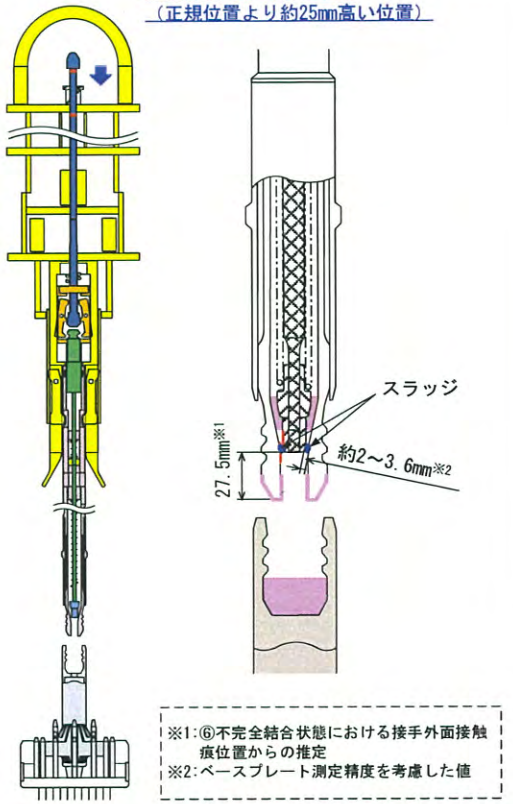
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【参考】ステップ②③④でスラッジの付着形態が異なるケース　その１

	②-1　接手部拘束解放	③-1　駆動軸切り離し	④-1　駆動軸接手部拘束 （スラッジによる駆動軸取り外し軸スタック）
概要図			
観察事実	・インジケータロッドの上昇を確認（駆動軸取り外し軸上昇） ・接手内面直線部と位置決めナット直線部に接触痕を確認。両者の位置は駆動軸取り外し軸の動作により摺動する箇所に相当	・工具を吊り上げ、重量が工具と駆動軸の合計重量（[redacted]kg）となっていることを確認（制御棒クラスタが切り離されていることを確認）	【工具吊り下ろし前にインジケータロッド下降位置を確認する手順無し】
推定メカニズム	・ロックボタン廻りのスラッジは駆動軸取り外し軸上昇時にスパイダ頭部内に脱落 ・接手と位置決めナットの間にスラッジが堆積していた状態で取り外し軸が上昇したことにより、スラッジ（1mm程度）を介して両者が摺動し、接手内面直線部と位置決めナット直線部に接触痕が発生	・接手部は磁性体（マルテンサイト系ステンレス鋼）であることから、接手内面テーパー部および接手先端部にもスラッジが付着した状態で駆動軸が上昇	・駆動軸取り外し軸下降時、接手内面テーパー部の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下降途中でスタック ・駆動軸取り外し軸が途中でスタックしたことにより、インジケーターロッドの下降位置も正規の位置より高い位置で停止
関連資料		・別添１　駆動軸（接手）へのスラッジの付着	・別添２　不完全結合状態の幾何学的検討

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。

【参考】ステップ②③④でスラッジの付着形態が異なるケース　その２

	②-2　接手部拘束解放	③-2　駆動軸切り離し	④-2　駆動軸接手部拘束 （スラッジによる駆動軸取り外し軸スタック）
概要図			
観察事実	・インジケータロッドの上昇を確認（駆動軸取り外し軸上昇） ・接手内面直線部と位置決めナット直線部に接触痕を確認。両者の位置は駆動軸取り外し軸の動作により摺動する箇所に相当	・工具を吊り上げ、重量が工具と駆動軸の合計重量（[redacted]kg）となっていることを確認（制御棒クラスタが切り離されていることを確認）	【工具吊り下ろし前にインジケータロッド下降位置を確認する手順無し】
推定メカニズム	・ロックボタン廻りのスラッジは堆積したまま駆動軸取り外し軸が上昇 ・接手と位置決めナットの間にスラッジが堆積していた状態で取り外し軸が上昇したことにより、スラッジ（1mm程度）を介して両者が摺動し、接手内面直線部と位置決めナット直線部に接触痕が発生	・ロックボタン廻りのスラッジは堆積したまま駆動軸が上昇 ・接手部は磁性体（マルテンサイト系ステンレス鋼）であることから、接手先端部にもスラッジが付着した状態で駆動軸が上昇	・駆動軸取り外し軸下降時、ロックボタン廻りの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下降途中でスタック ・駆動軸取り外し軸が途中でスタックしたことにより、インジケーターロッドの下降位置も正規の位置より高い位置で停止
関連資料		・別添１　駆動軸（接手）へのスラッジの付着	・別添２　不完全結合状態の幾何学的検討

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。

駆動軸（接手）へのスラッジの付着

推定メカニズムのステップ③の駆動軸切り離し時に、駆動軸の接手にスラッジが付着する可能性について以下に説明する。

制御棒クラスタ駆動装置は、圧力ハウジング外側に配置した３組の駆動コイルへ供給する電流をＯＮ／ＯＦＦすることで、圧力ハウジング内に設置したラッチアセンブリを駆動する方式となっている。

駆動コイルに通電し磁界が発生すると、磁性材料であるマルテンサイト系ステンレス鋼製の駆動軸（接手：SUS403、駆動軸および取り外しボタン：SUS410）も励磁されることになり、磁化された状態となる。また、駆動コイルへの通電が遮断された後であっても、残留磁気により磁化された状態は維持される。

今回の調査において、制御棒クラスタのスパイダ頭部内に堆積していたスラッジの主成分は、Fe（鉄）と０（酸素）であることが確認されており、駆動軸の調査の際にも、図２に示すようにスラッジと思われる付着物が接手先端に付着していることが確認されている。

また、実機模擬の接手を磁石で磁化させマグネタイトを付着させ、磁石を取外し後でも残留磁気でマグネタイトが付着した状態を図３に示す。この様子からスラッジ量が多ければ接手溝山部を含む先端部周辺ににスラッジが付着すると考えられる。なお、水と空気の透磁率は同等であり、気中での確認であっても水中での状態と同様である。

以上のことから、推定メカニズムのステップ③において、磁化した接手に、スパイダ内に堆積していたスラッジが付着していた可能性は十分考えられる。

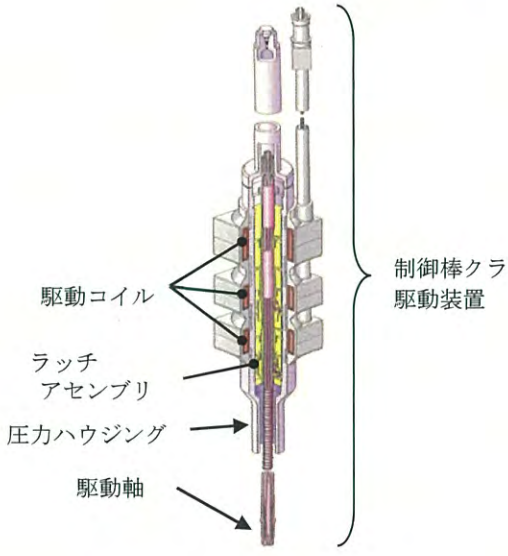


図１　制御棒クラスタ駆動装置 概要図



図２　Ｍ－４駆動軸接手部に確認された付着物
（１月２５日）



図３　残留磁気による実機模擬接手部への
マグネタイト付着の様子

添付資料－１２
別添－２

不完全結合状態の幾何学的検討

推定メカニズムのステップ⑥の制御棒クラスタと駆動軸が不完全結合状態における位置決めナットと接手の位置関係、並びに、ステップ⑤の駆動軸着座時における接手先端位置と位置決めナットと接手の間に挟まるスラッジ厚さの関係について、以下に説明する。

１．不完全結合状態における位置決めナットと接手の位置関係

通常、位置決めナットが下端まで降下している場合には、接手が開いた状態で拘束され、図１に示すように接手先端テーパ部とスパイダ頭部テーパ部が線状の接触をしている。また、今回の調査においても当該接触箇所に相当する位置に、図２に示す 0.02mm 以下（測定下限以下）の接触痕が確認されている。

一方、M－４駆動軸の接手外面直線部には、図４に示すように通常の着座位置よりも高い位置に４点の局所的接触痕が確認されており、図３に示すように通常よりも低い位置（接手がスパイダ頭部に挿入された状態）で駆動軸が着座していたと考えられる。また、この状態で着座するためには、幾何学的な関係より、位置決めナットが接手先端から 27.5mm 高い位置で接手内面と接している状態となる。なお、この時の接手の浮き上がり量は、通常着座状態を 48mm とした場合、33.6mm となる。これらの位置関係を図５に示す。

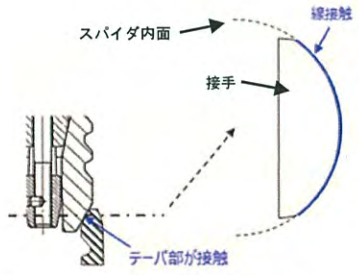


図１　通常の駆動軸着座状態



図２　接手外面テーパ部の接触痕

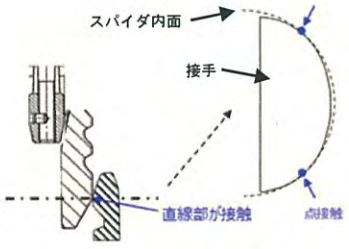


図３　通常よりも低い位置での駆動軸着座状態



図４　接手外面円筒部の局所的接触痕

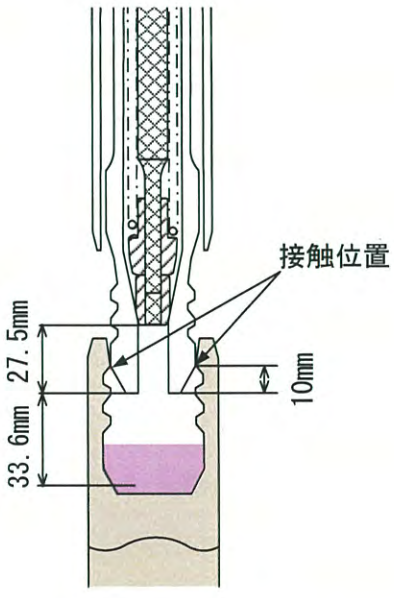


図５　不完全結合時の位置関係

2．駆動軸着座時における接手先端位置および位置決めナットと接手の間に挟まるスラッジ厚さの関係

駆動軸着座時における接手浮き上がり量は作業記録から 48㎜ となっているが、１．項の検討結果より、位置決めナットが接手先端から 27.5㎜ に位置している場合は、接手が拘束されていない状態になることから、この時、接手先端とスパイダ頭部および位置決めナットと接手の間にはスラッジが挟まり、不安定な支持状態となっていたと推定している。ここで、ベースプレート高さの差から求められる接手の浮き上がり量は、最小目盛り 2㎜ のスケールで計測しており、ステップ①とステップ⑤の差から算出していることを踏まえると、±2㎜ 程度の計測誤差が考えられる。以上のことから、下記の前提条件の下、浮き上がり量（A）を計測誤差の範囲で変化させた場合の、位置決めナットと接手の間に挟まるスラッジ厚さ（B）についてケース検討を行った。

＜前提条件＞

・１．項の検討結果から、接手先端から位置決めナットまでの距離は 27.5㎜ とする。

・接手内面と位置決めナットの接触痕から推定される介在物（1㎜ 程度）から、接手先端のスラッジ厚さは 1㎜ とする。

検討の結果、位置決めナットと接手の間に挟まるスラッジの厚さは 2.0㎜ から 3.6㎜ となった。なお、接手先端のスラッジ厚さを 0㎜ から 2.5㎜ の範囲で変化させた場合の位置決めナットと接手の間に挟まるスラッジの厚さは 0.4㎜ から 4.2㎜ となる。

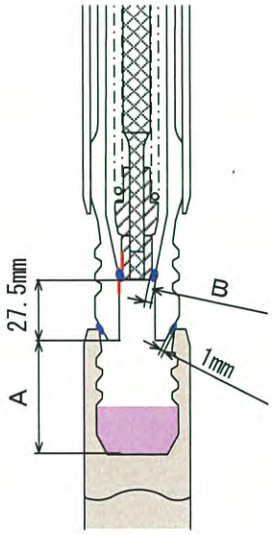


図６　駆動軸着座時の位置関係

表１　スラッジ厚さのケース検討結果

計測誤差	A	位置決めナット高さ	接手先端のスラッジ厚さ	B
2	50	27.5	1	3.6
1	49	27.5	1	3.4
0	48	27.5	1	3.0
−1	47	27.5	1	2.5
−2	46	27.5	1	2.0

スラッジ脱落時の駆動軸の挙動

１．目的

推定メカニズムのステップ⑥の駆動軸着座状態（図１－１①）から位置決めナットと接手の間のスラッジが脱落することにより、位置決めナットと接手が沈み込み、不完全結合状態（図１－１②）に至る際の駆動軸の挙動について、機構解析により確認する。

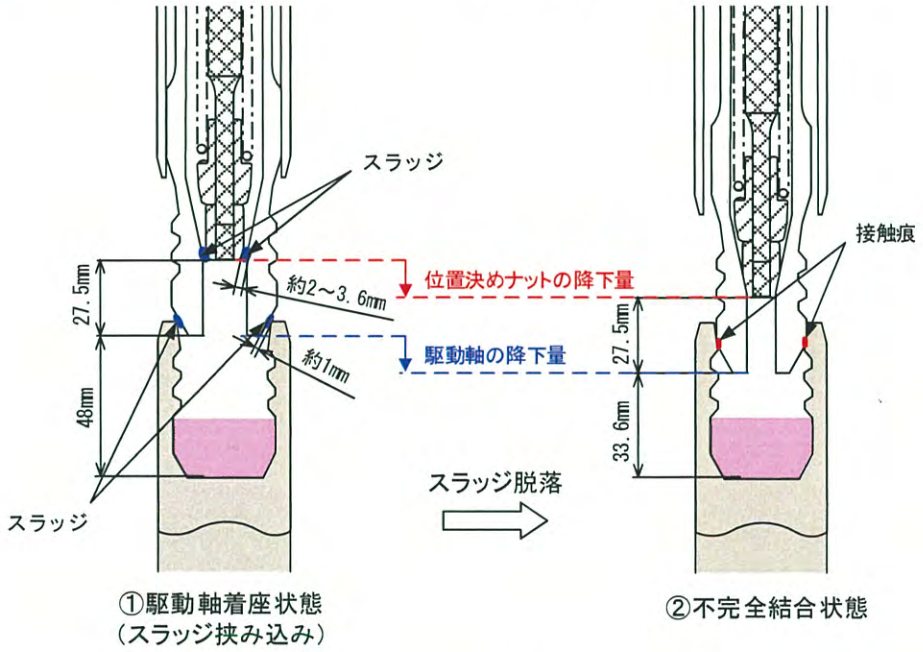


図１－１　不完全結合状態に至るまでの推定挙動

２．解析内容

（１）　駆動軸の動作確認試験の再現解析（気中）

現地調査の一環として実施した駆動軸の動作確認試験におけるボタンダウン操作時の位置決めナットの気中挙動（図２－１）を再現できる機構解析モデルを構築する。機構解析モデルを図２－２に示す。

接手と位置決めナットの間には接触条件（摩擦係数：[redacted]）を適用し、ロックばね・軸用ばねには実機と同じばね定数を設定する。

位置決めナット降下中に想定される抵抗力（ばねと駆動軸内面および取り外し軸とばね受けとの摩擦力ならびに駆動軸と駆動軸取り外し工具の取り合いで発生する抵抗力など）については推定が困難なため、駆動軸の動作確認試験の結果に合うようにモデル化する。

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。

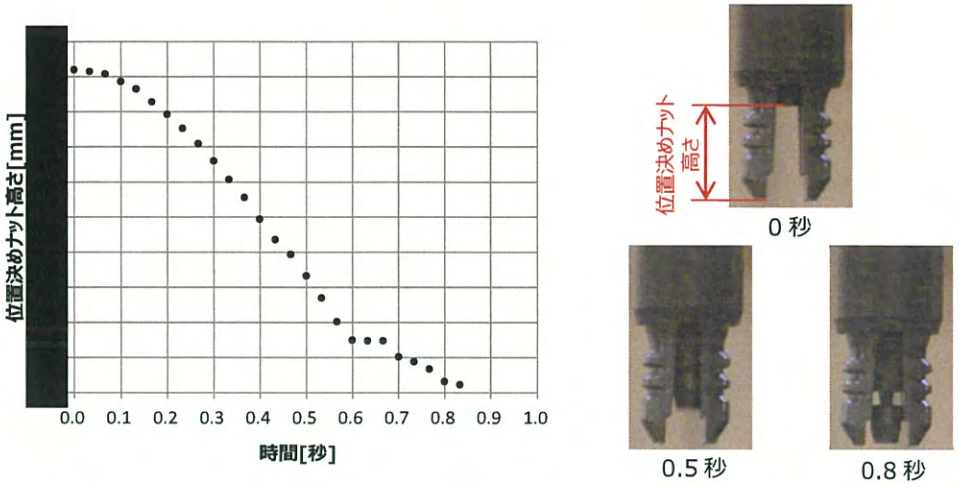


図２－１　駆動軸の動作確認試験結果（アドレス：Ｍ４）

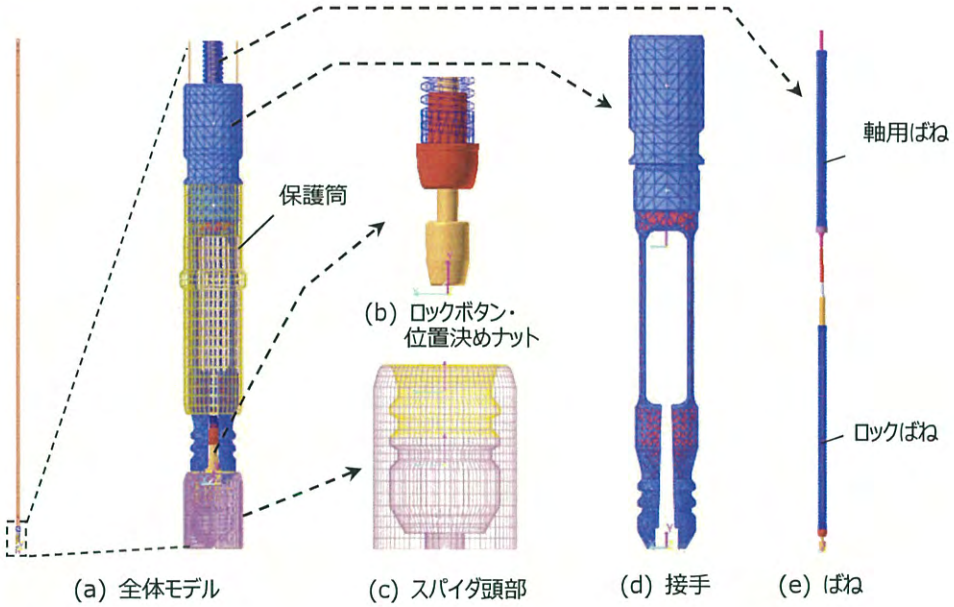


図２－２　機構解析モデル

（２）駆動軸仮置き状態から不完全結合状態に至る動作の再現解析（水中）

（１）で設定する抵抗力を用いて駆動軸仮置き状態から不完全結合状態に至る動作の再現解析を実施する。

解析では水中での動作を再現するため、流体抵抗を設定する。また、駆動軸の自重に加え、工具の水中重量（合計約[redacted]ｋｇ）を設定する。初期ナット高さは約２７．５ｍｍとし、摩擦係数は次のとおり設定した。

・接手外面と制御棒クラスタの摩擦係数：[redacted]

・接手内面と位置決めナットの摩擦係数：

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．解析結果

（1） 駆動軸の動作確認試験の再現解析（気中）

気中におけるボタンダウン動作を模擬した機構解析の結果を図３－１に示す。本図より、機構解析結果（赤線）は動作確認試験の結果をよく再現できていることが分かる。

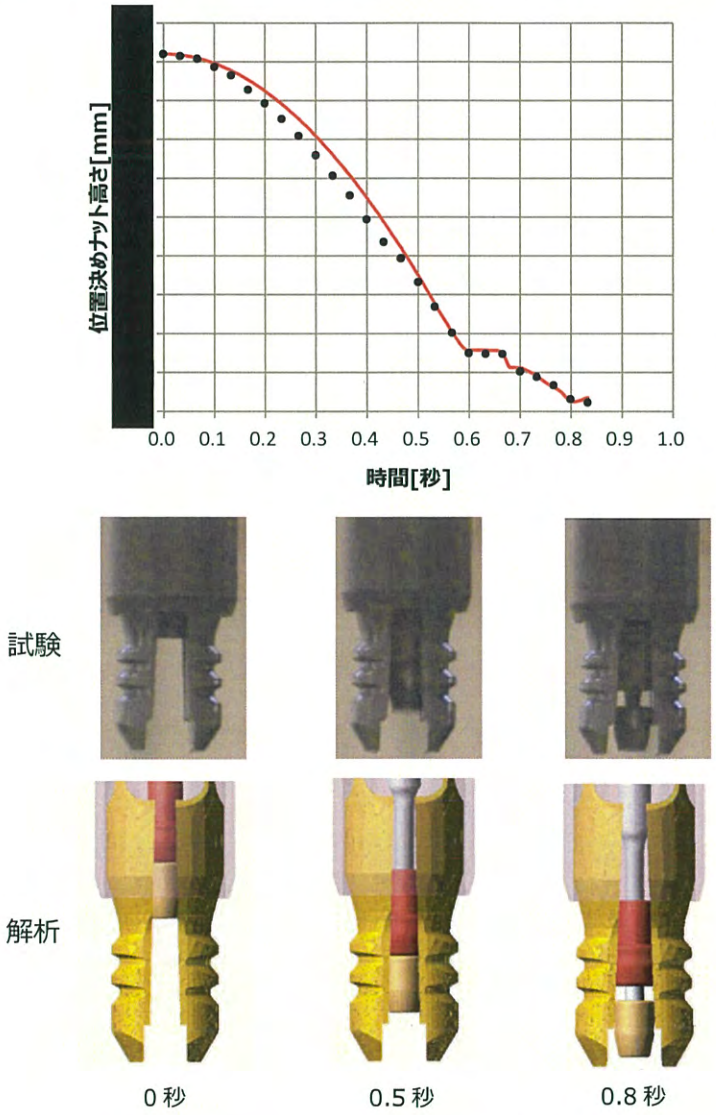


図３－１　動作確認試験の再現解析結果

（2）駆動軸仮置きから不完全結合状態に至る動作の再現解析（水中）

推定メカニズム⑥でスラッジが脱落した際の挙動を模擬した機構解析の結果を図３－２に示す。本図より、駆動軸仮置き状態（図３－２①）における位置決めナットと接手の相対高さをほぼ維持したまま、不完全結合状態（図３－２②）に至ることを確認した。

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。

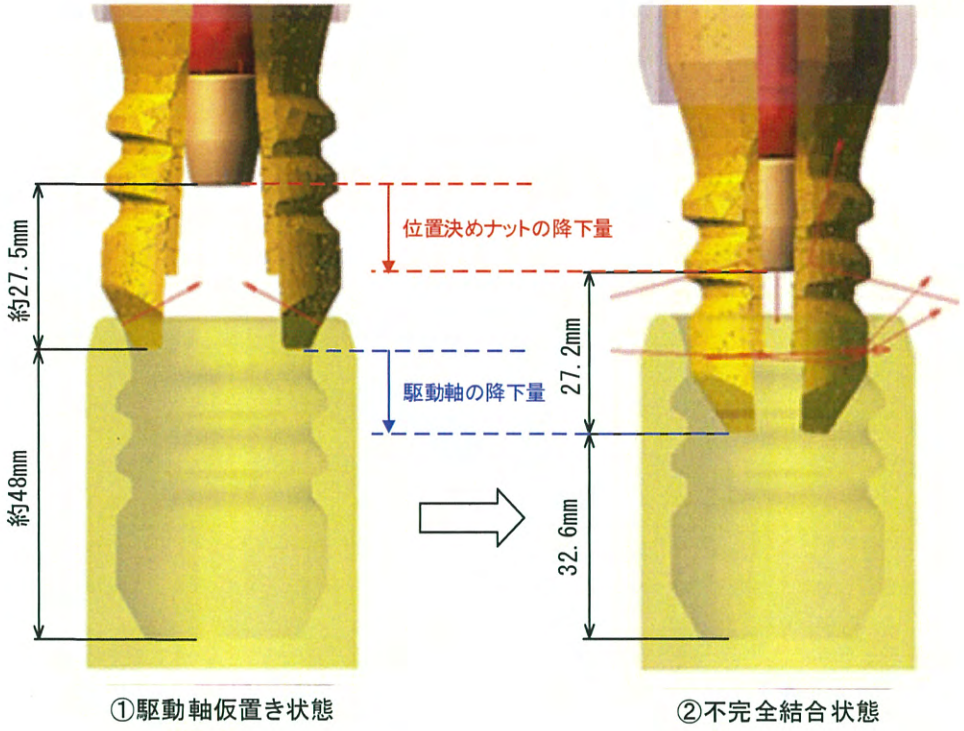


図３－２　駆動軸仮置き状態から不完全結合状態に至る動作の再現解析結果

４．まとめ

駆動軸の接手および位置決めナットの挙動を機構解析により模擬した結果、位置決めナットと接手の相対高さをほぼ維持したまま、不完全結合状態に至ることを確認できた。

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。

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

制御棒クラスタは、通常の上部炉心構造物の吊り上げ時には燃料集合体に挿入された状態となっているが、本事象では、上部炉心構造物の吊り上げの際に、制御棒クラスタが通常状態とは異なる管理状態で引き抜き、挿入されたことから、本事象に伴う燃料集合体への影響を評価し、燃料集合体の健全性に問題ないことを確認する。

１．本事象に伴い考えられる燃料集合体への影響

本事象に伴い、制御棒クラスタが燃料集合体に与えた可能性のある影響は以下のとおり。

（１）制御棒クラスタと燃料集合体の水平方向の軸ずれに伴う干渉

制御棒は横方向の変位に対してしなやかに曲がる特性を有しているが、制御棒クラスタが燃料集合体に対して水平方向に軸ずれした状態で挿入された場合、制御棒が曲がった状態で燃料集合体の制御棒案内シンブルに挿入されることから、制御棒と制御棒案内シンブルが干渉する。（図１参照）

（２）制御棒クラスタの着底、落下に伴う燃料集合体への鉛直方向への荷重発生

制御棒クラスタが燃料集合体に着底した時点で、燃料集合体に鉛直方向の荷重が発生する。特に、上部炉心構造物吊り下げ作業中に制御棒クラスタと駆動軸の結合が解消され燃料集合体上部ノズル上に落下したと仮定した場合の荷重が最も大きくなる。（図２参照）

２．燃料集合体への影響評価

１.（１）（２）で示した影響に対し、以下のとおり燃料集合体への影響を評価した。

（１）水平方向の軸ずれに伴う影響評価

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、上部炉心構造物とガイドスタッドの隙間は[redacted]と小さいことから、当該制御棒クラスタと燃料集合体の水平方向の軸ずれ量は制限された状態が維持されていた。このことから、当該制御棒クラスタの降下中、制御棒クラスタが燃料集合体に対して大きく軸ずれしていたとは考えにくい。

仮に制御棒クラスタが燃料集合体に対して水平方向に大きく軸ずれしていた場合、制御棒と制御棒案内シンブルとの接触による摩擦により、制御棒の挿入抗力が大きくなるが、

・寸法上、上部炉心構造物と制御棒クラスタおよび駆動軸が干渉することはなく当該制御棒クラスタと駆動軸は上部方向への移動は拘束されていないこと、

・上部炉心構造物の吊り下ろし作業中、当該駆動軸上端部の浮き上がり（他の駆動軸上端部の高さより相対的に高くなる）は確認されておらず、当該駆動軸は

上部炉心構造物と同じように下降していたこと（図３参照）、
から、上部炉心構造物の吊り下ろし中の制御棒クラスタと燃料集合体との水平方向の軸ずれに伴う摩擦力による挿入抗力は、制御棒クラスタおよび駆動軸の重量を超えない程度で軽微である。

従って、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干渉の程度は、原子炉緊急停止時に制御棒クラスタおよび駆動軸が落下した際と同程度と軽微であることから、燃料集合体の健全性への影響はない。

（２）鉛直方向の荷重発生に伴う影響評価

燃料集合体は、原子炉緊急停止時に、制御棒クラスタおよび駆動軸が制御棒全引き抜き状態から燃料集合体上に落下した際の荷重に対し、燃料集合体に変形等が生じることがなく燃料集合体の健全性に影響のないことを確認している。

上部炉心構造物の吊り下げ作業時に制御棒クラスタと駆動軸の結合が解消され、制御棒クラスタが落下するとした場合、落下高さおよび落下重量ともに上記の条件の方が厳しいことから、本想定で発生する荷重による燃料集合体の健全性への影響はない。

３．外観確認結果

２．のとおり、本事象に伴う燃料集合体の健全性への影響はないと考えるが、制御棒クラスタと干渉する可能性のある燃料集合体の部位（上部ノズル上面および制御棒案内シンブル入口）を対象に、水中テレビカメラにて、外観確認を実施し、有意な傷や損傷等がないことを確認した。（表１参照）

また、同様に、燃料集合体と干渉する可能性のある制御棒クラスタの部位（スパイダおよび制御棒）についても、水中テレビカメラにて、外観確認を実施し、有意な傷や損傷等がないことを確認した。（表２参照）

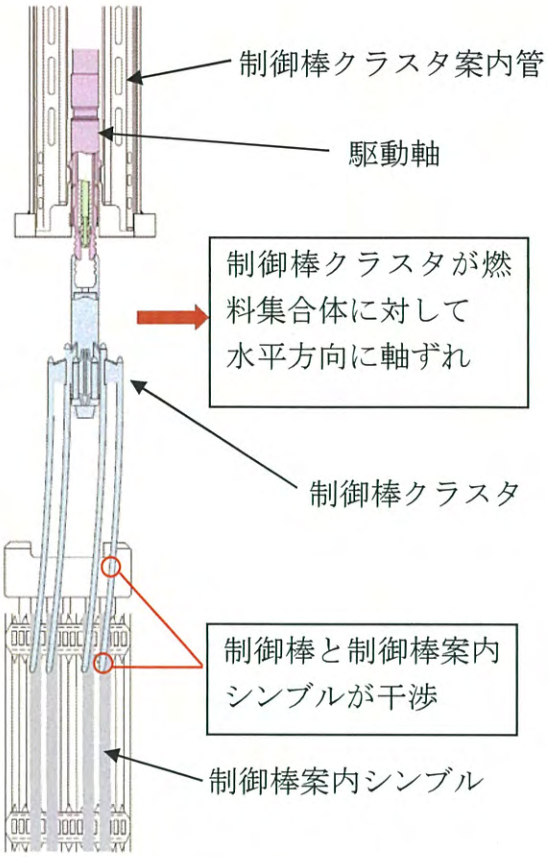


図１：水平方向の軸ずれによる干渉

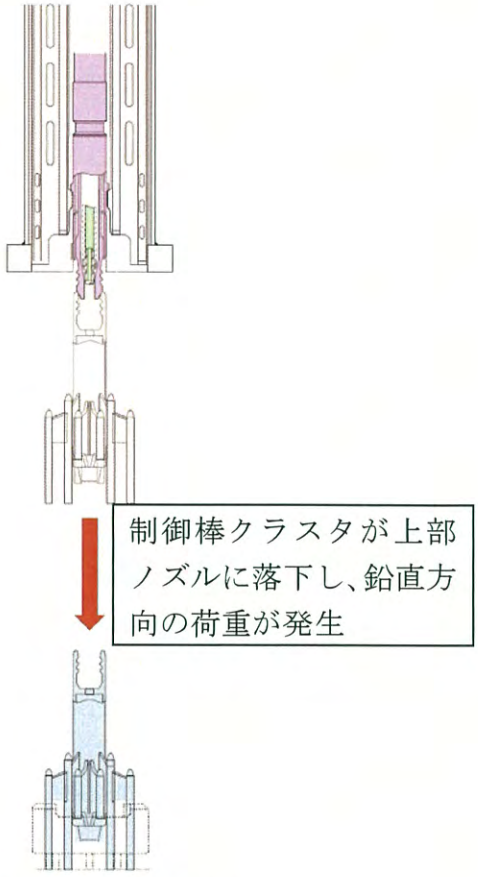


図２：鉛直方向の荷重発生

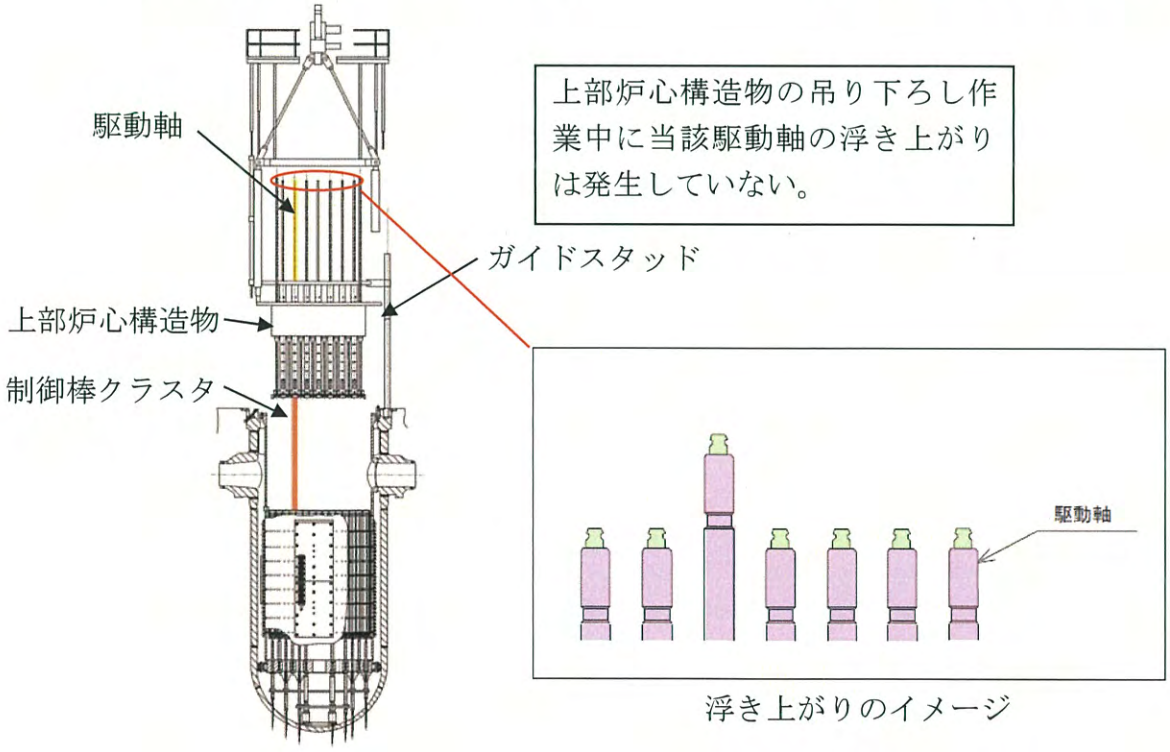
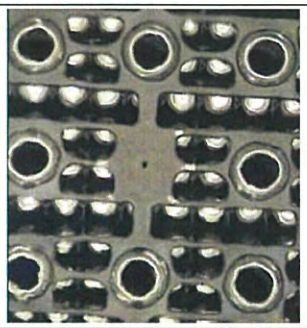
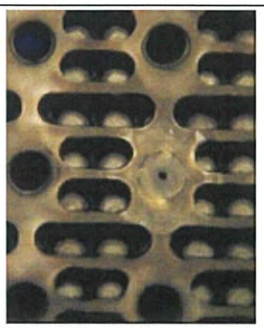
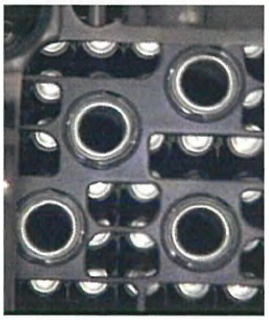
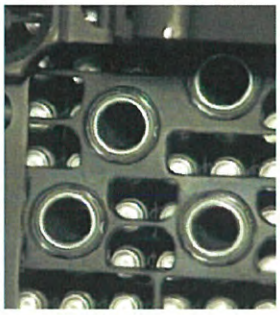
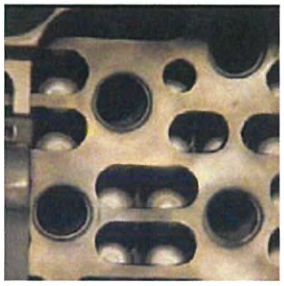


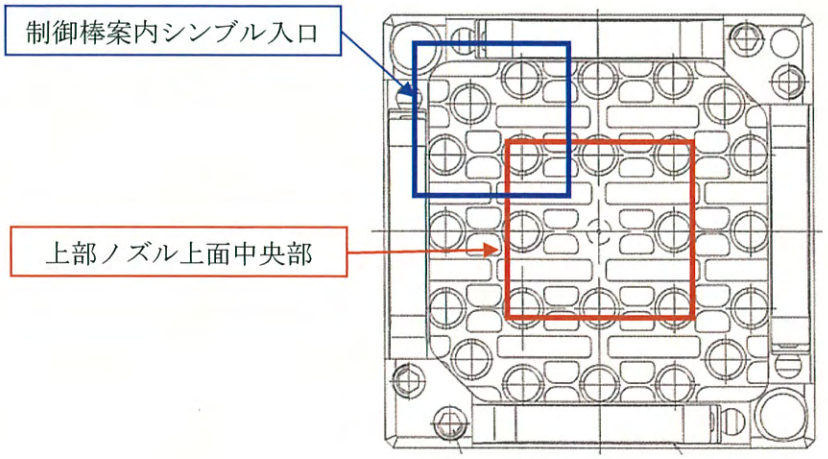
図３：上部炉心構造物の吊り下ろし作業

表１　燃料集合体外観確認結果

燃料番号	炉心位置	装荷サイクル数	燃焼度(MWd/t)
ＮＳ３Ｎ７４ （当該燃料集合体）	Ｍ－４	２サイクル	29,844
ＮＳ３Ｎ７３	Ｍ－１２	２サイクル	29,833
ＭＳ３Ｏ３４	Ｊ－７	３サイクル	48,777

	ＮＳ３Ｎ７４	ＮＳ３Ｎ７３	ＭＳ３Ｏ３４ （参考※）
上部ノズル上面中央部			
制御棒案内シンブル入口			

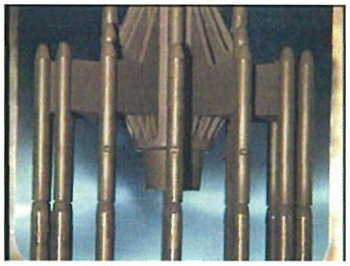
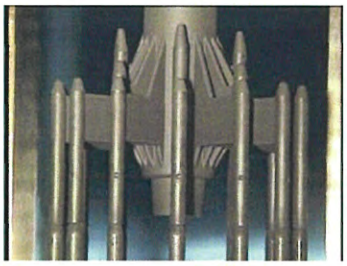
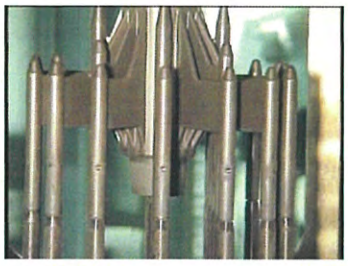
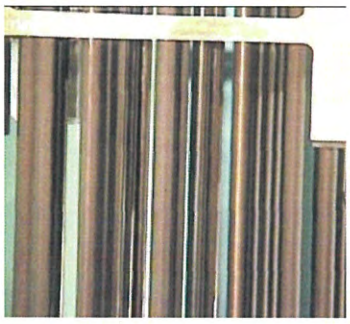
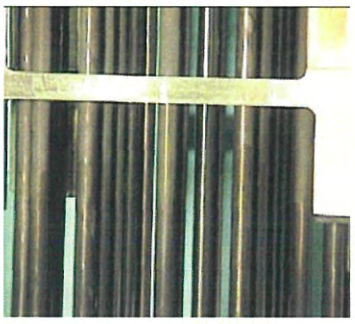
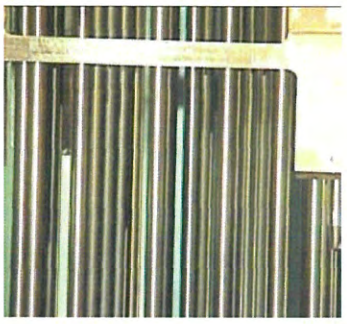
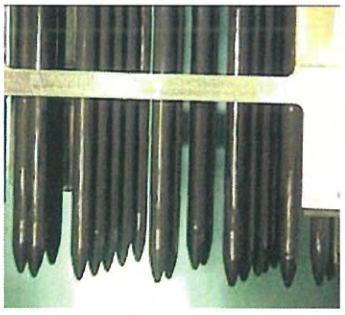
※Ｏ３４は、当該燃料Ｎ７４（Ｂ型燃料）とは異なる設計（Ａ型燃料）のため参考

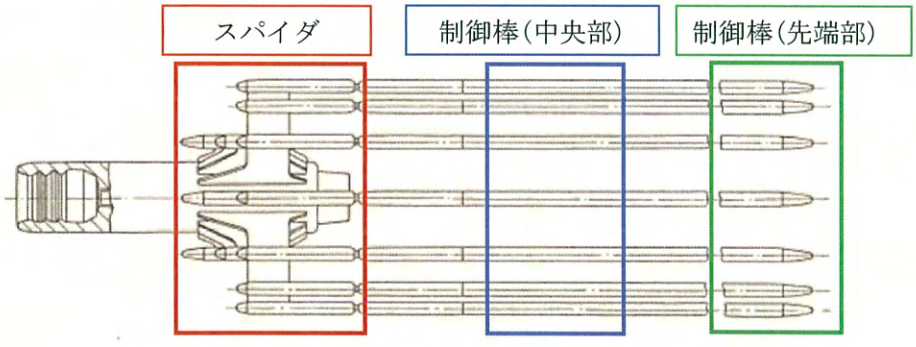


上部ノズル（上部から見た図）

表２　制御棒クラスタ外観確認結果

制御棒番号	炉心位置	装荷サイクル数
Ｒ４５ （当該制御棒ｸﾗｽﾀ）	Ｍ－４	１５サイクル
Ｒ４７	Ｍ－１２	１５サイクル
Ｒ６６	Ｊ－７	１サイクル

	Ｒ４５	Ｒ４７	Ｒ６６
スパイダ			
制御棒（中央部）			
制御棒（先端部）			



制御棒クラスタ全体図

再発防止対策

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を防止するために、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。

１．作業手順の見直し

・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。これにより、駆動軸取り外し軸のスタック要因に関わらず、スタックを起因とした事象の再発防止は可能となる。

・上記手順により、今回の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。

（図－１、表－１、表－２参照）

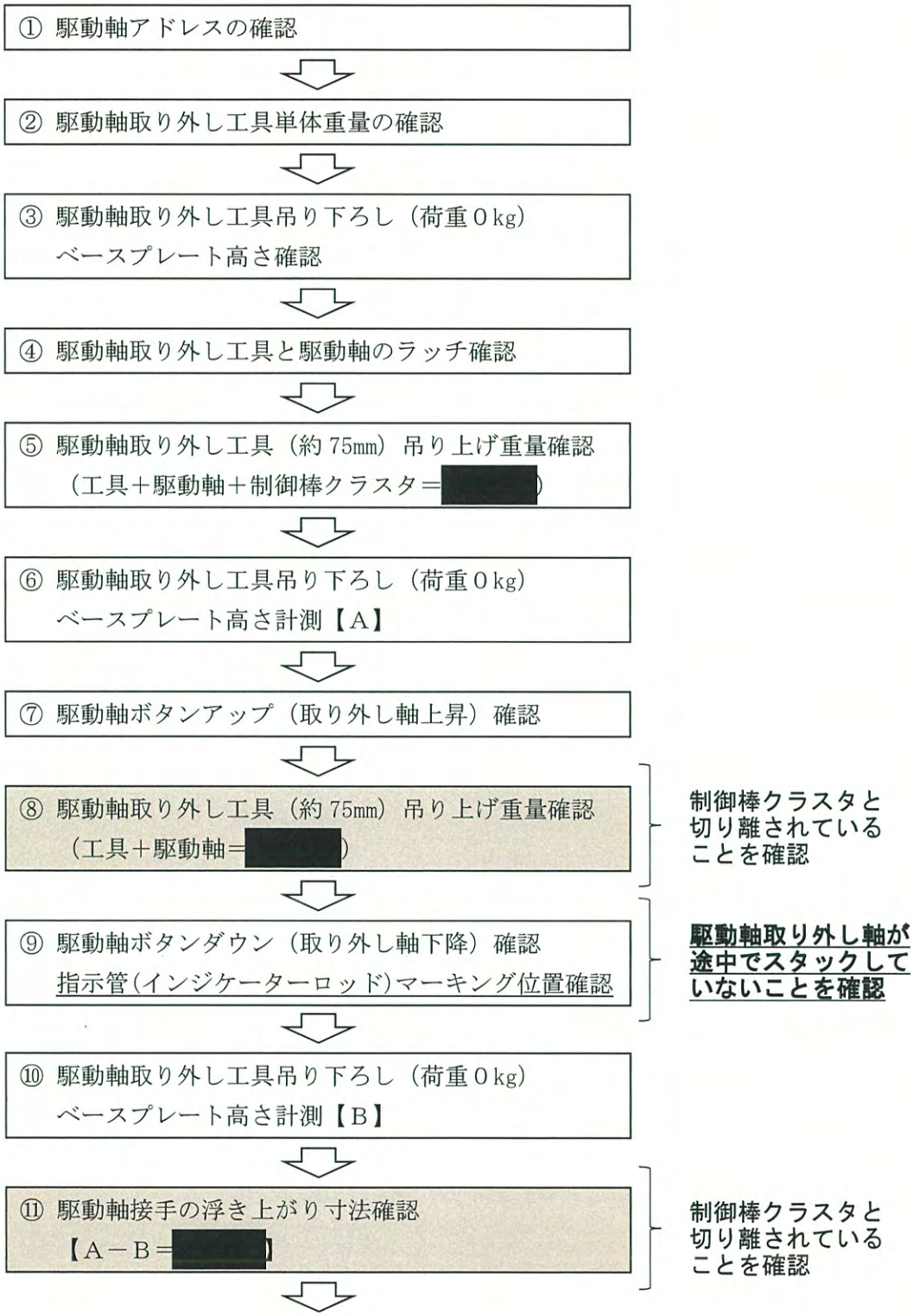
２．堆積物の除去

・前項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。

（図－２参照）

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。

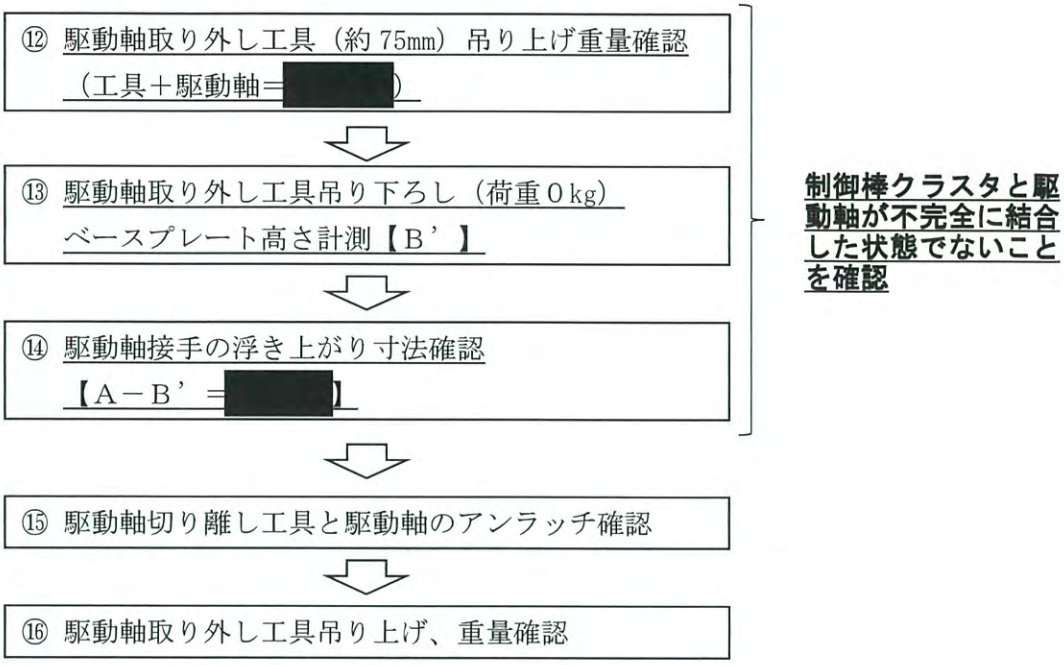
下線部：見直し箇所



図－１　作業手順の見直し箇所（１／２）

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。

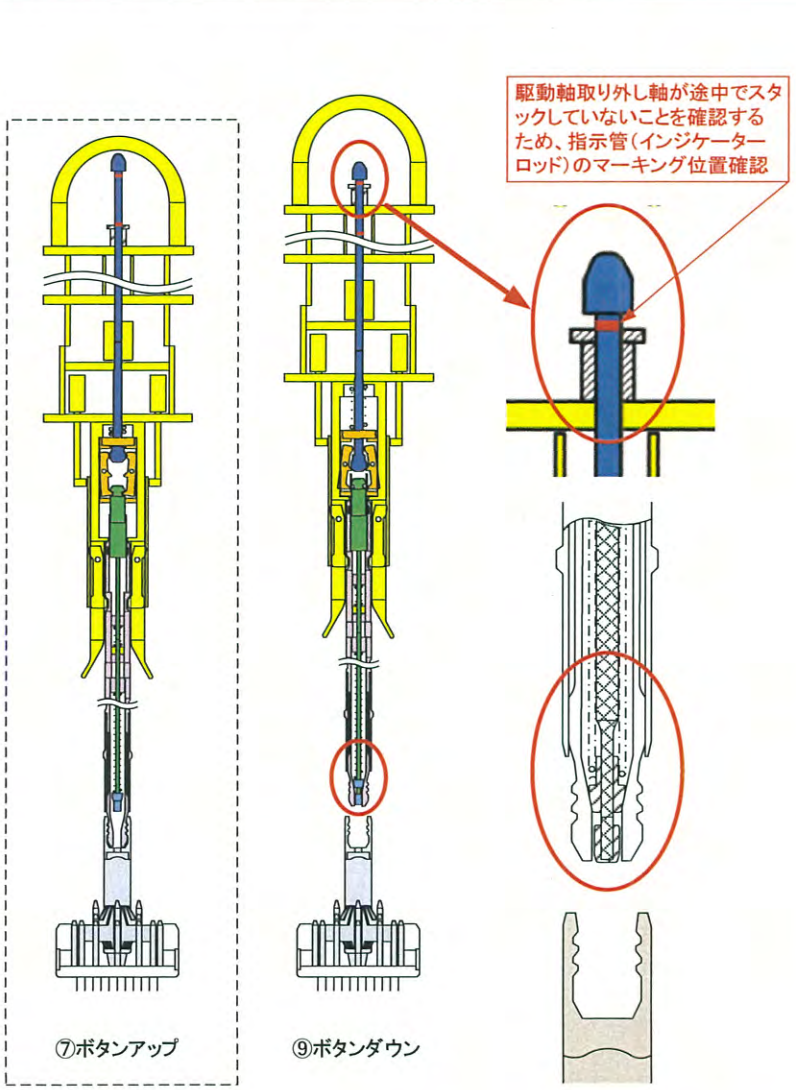
下線部：見直し箇所

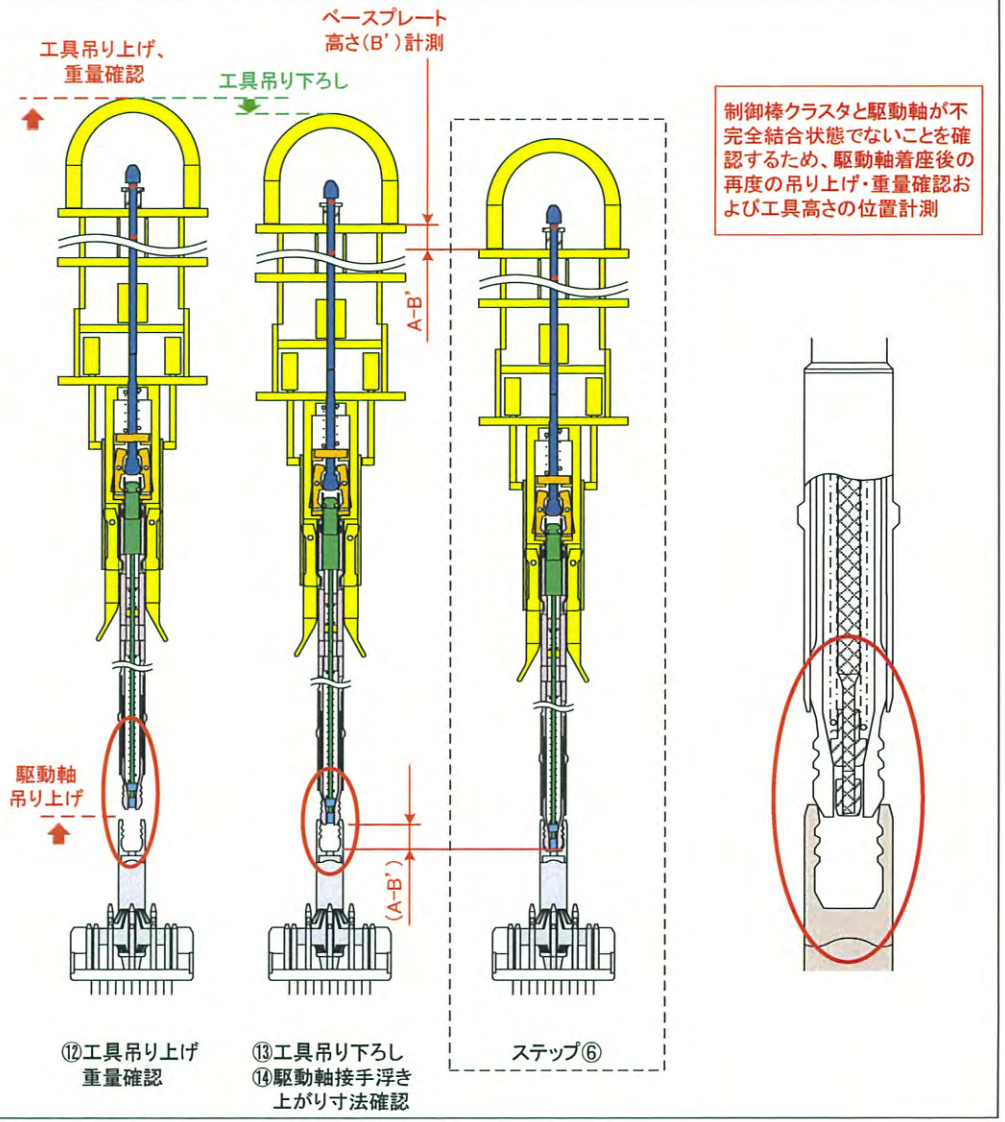


図－１　作業手順の見直し箇所（２／２）

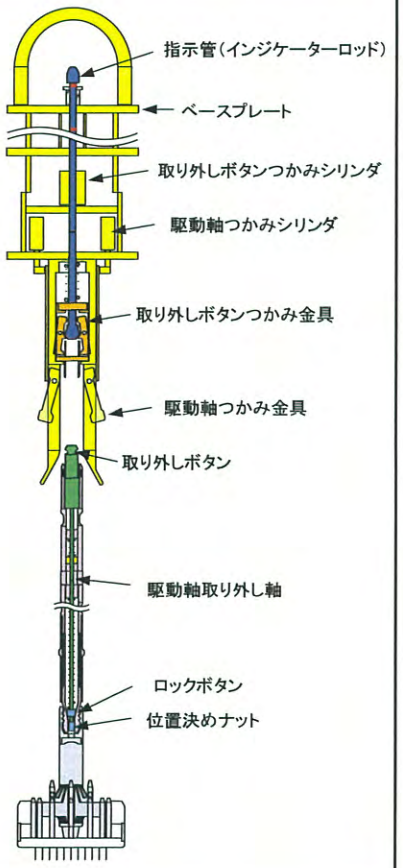
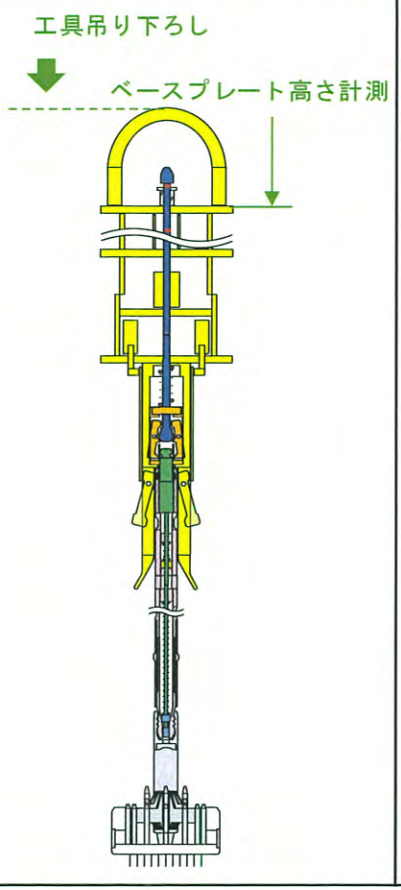
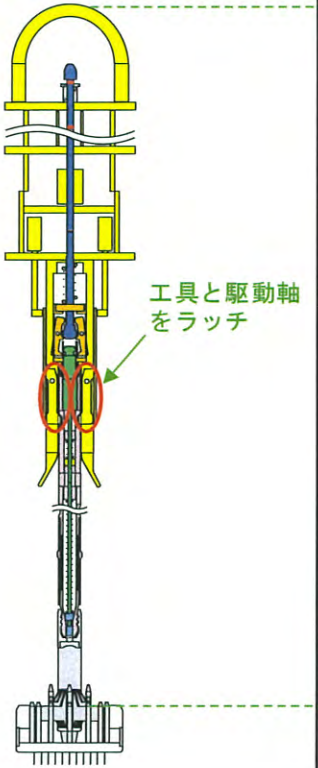
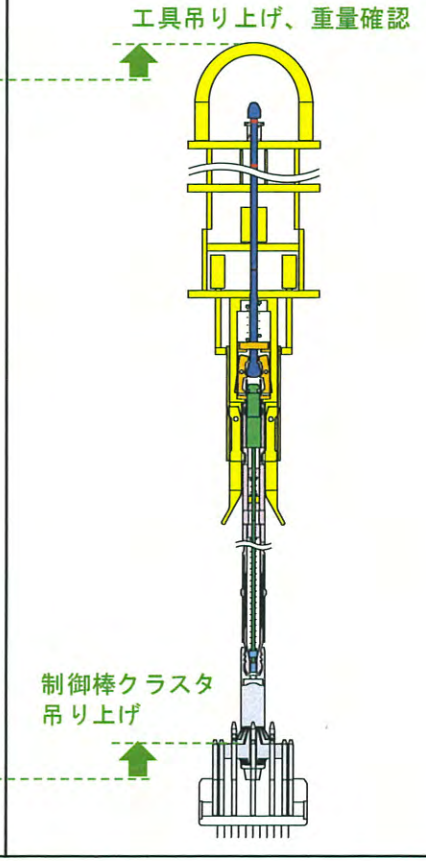
表－１　作業手順の見直し箇所概要

駆動軸取り外し工具の指示管（インジケーターロッド）のマーキング位置確認【ステップ⑨】	駆動軸着座後の再度の重量確認および位置計測【ステップ⑫～⑭】





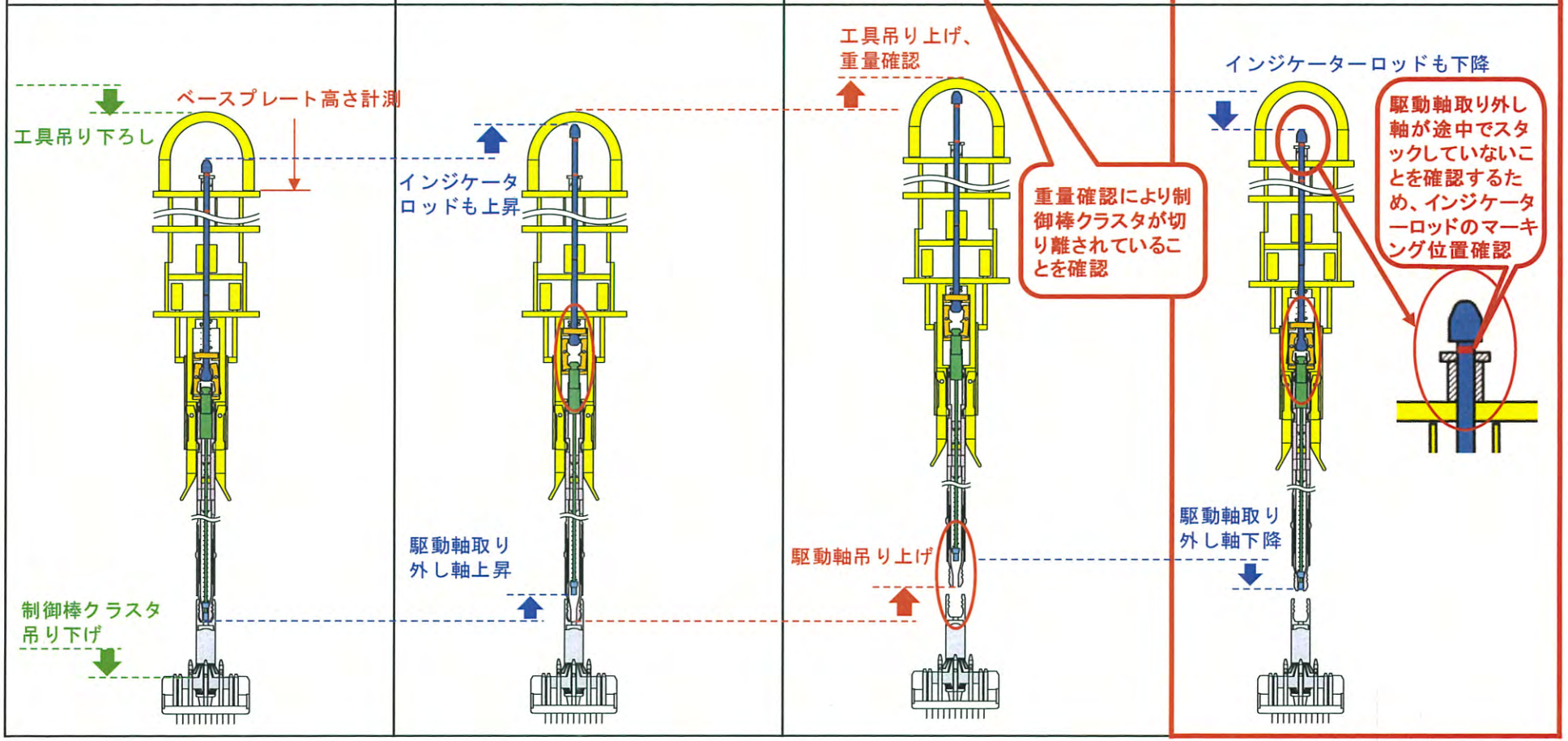
表－２　制御棒クラスタと駆動軸との切り離し作業（対策後）（１／４）

① 駆動軸アドレスの確認 ② 駆動軸取り外し工具単体重量の確認	③ 駆動軸取り外し工具吊り下ろし	④ 工具と駆動軸のラッチ確認	⑤ 駆動軸取り外し工具吊り上げ （重量確認）
・工具単体重量約[redacted] kg	・荷重計の指示が0kgになれば停止 ・工具のベースプレート高さを計測	・工具と駆動軸をラッチ	・工具を約75mm吊り上げ、重量を確認 （工具+駆動軸+制御棒クラスタ =約[redacted] kg）
			

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。

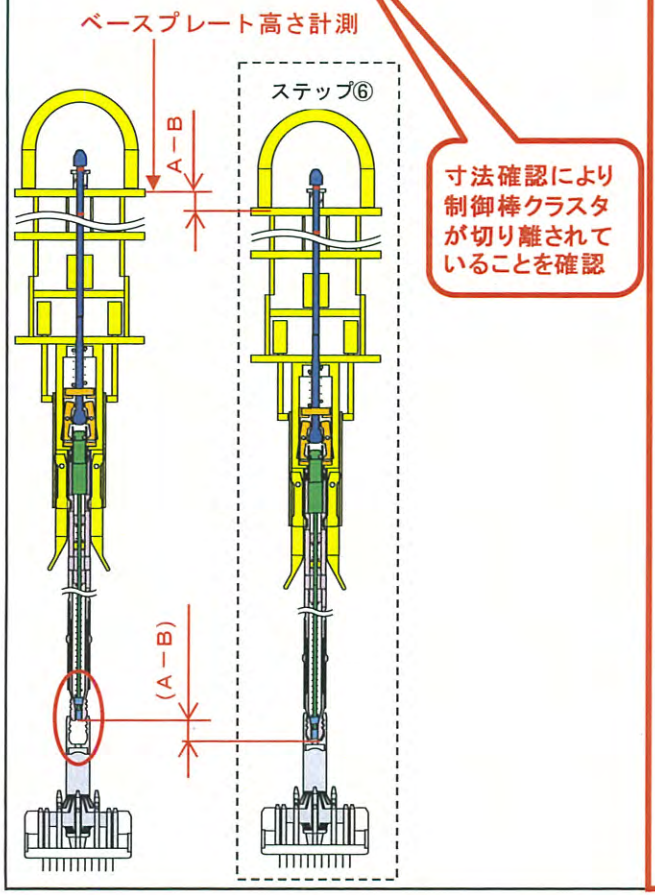
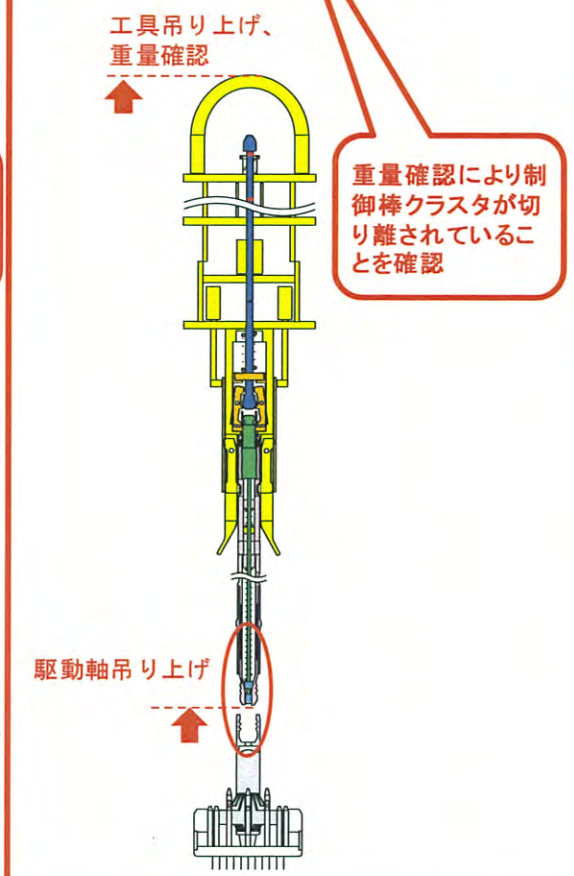
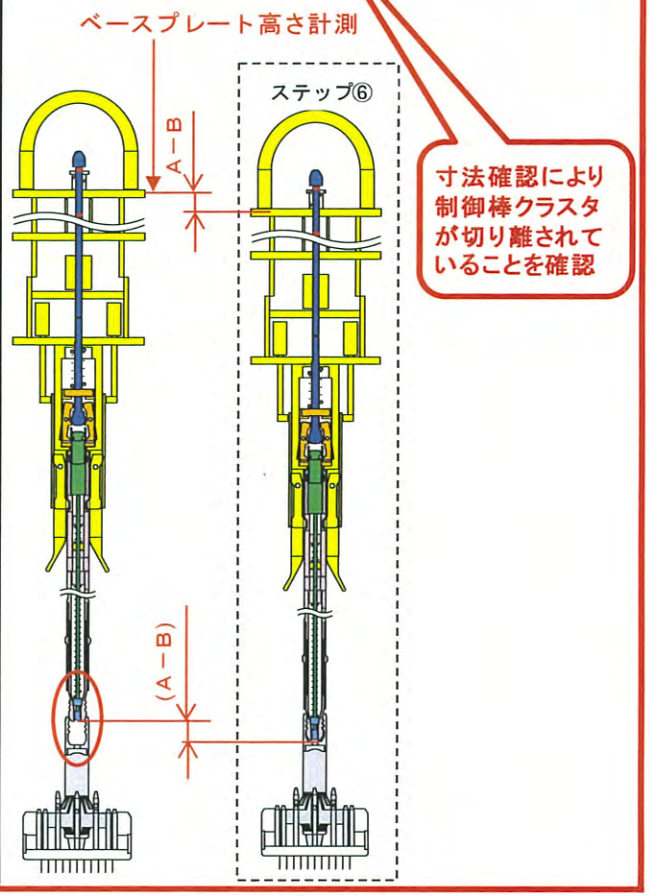
表－２　制御棒クラスタと駆動軸との切り離し作業（対策後）（２／４）

⑥ 駆動軸取り外し工具吊り下ろし	⑦ 駆動軸ボタンアップ確認	⑧ 駆動軸取り外し工具吊り上げ（重量確認）	⑨ 駆動軸ボタンダウン確認【変更】
・荷重計の指示が0kgになれば停止 ・工具のベースプレート高さ（A）を計測	・駆動軸取り外し軸を上昇させる ・インジケータロッドも上昇	・工具を約75mm吊り上げ、重量を確認 （工具+駆動軸=約[redacted]kg）	・駆動軸取り外し軸を下降させる ・インジケータロッドも下降



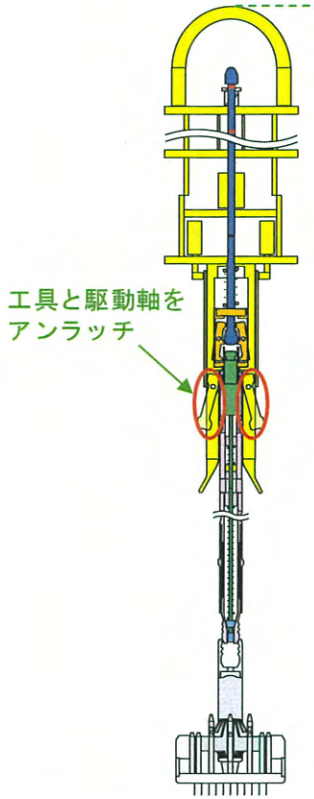
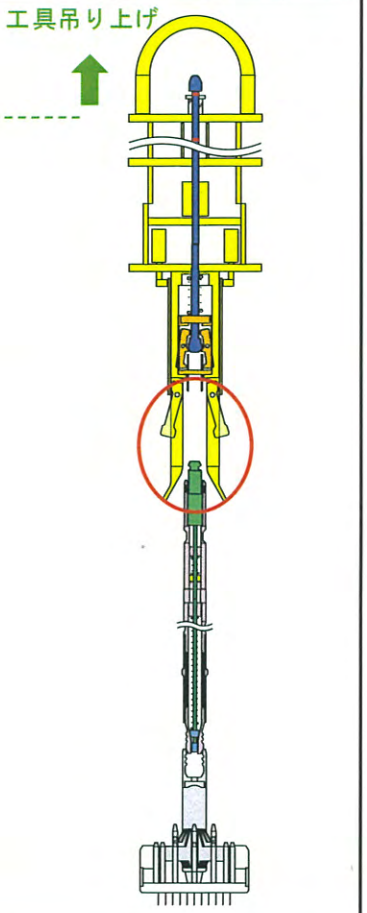
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表－２　制御棒クラスタと駆動軸との切り離し作業（対策後）（３／４）

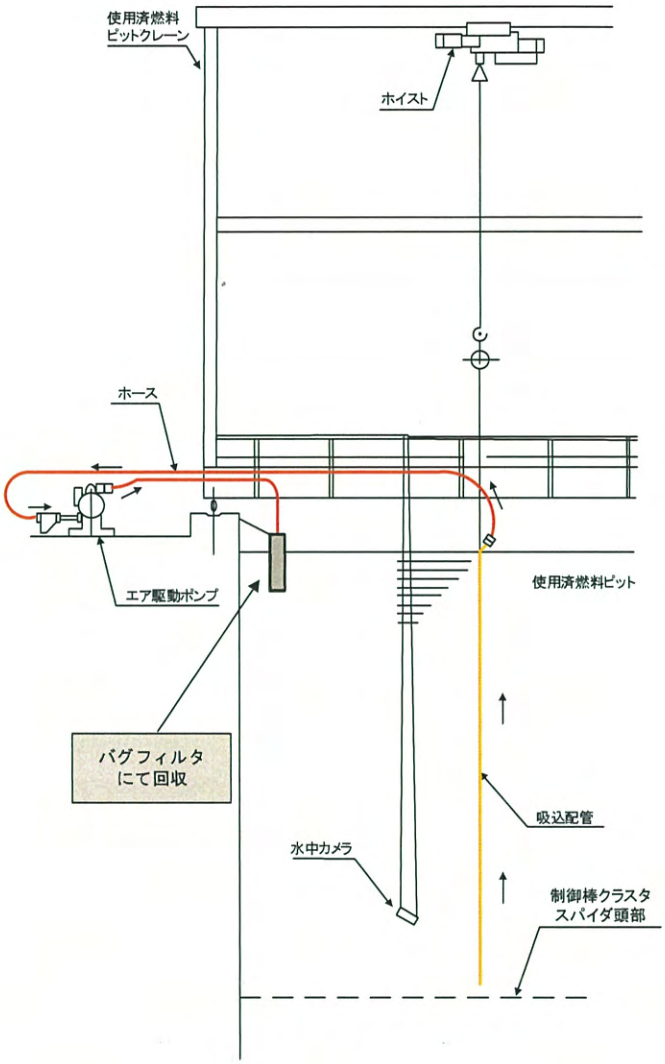
⑩ 駆動軸取り外し工具吊り下ろし ⑪ 駆動軸接手浮き上がり寸法確認	⑫ 駆動軸取り外し工具吊り上げ【追加】 （重量確認）	⑬ 駆動軸取り外し工具吊り下ろし【追加】 ⑭ 駆動軸接手浮き上がり寸法確認【追加】
・荷重計の指示が0kgになれば停止 ・工具のベースプレート高さ（B）を計測 ・駆動軸浮き上がり寸法を確認 （A－B＝[redacted]mm）	・工具を約75mm吊り上げ、重量を確認 （工具+駆動軸=約[redacted]kg）	・荷重計の指示が0kgになれば停止 ・工具のベースプレート高さ（B）を計測 ・駆動軸浮き上がり寸法を確認 （A－B＝[redacted]mm）
		

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。

表－２　制御棒クラスタと駆動軸との切り離し作業（対策後）（４／４）

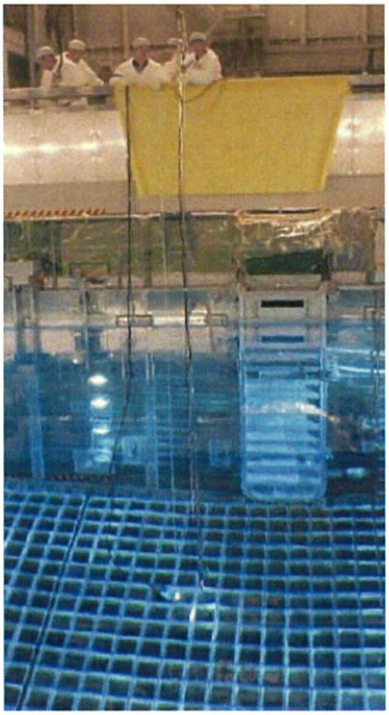
⑮ 工具と駆動軸のアンラッチ確認	⑯ 駆動軸取り外し工具吊り上げ（重量確認）
・工具と駆動軸をアンラッチ	・工具単体重量約[redacted]kg
	

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。



対象：制御棒クラスタ
（次サイクルで使用するもの）
頻度：定期検査毎
場所：使用済燃料ピット内

【状況写真】



図－２　制御棒クラスタのスパイダ頭部内堆積物除去の概要図

用 語 解 説

No.	索引	用語	解説
1	あ	アライメントずれ	設計上考え得る製作・組立公差による位置ずれのこと。
2		位置決めナット	駆動軸取り外し軸の先端（下部）にあり、通常運転時（ボタンダウン時）には、ロックボタンと相まって、接手が狭まらないようにすることで、切り離されることを防止している。
3		１次冷却材ほう素濃度	加圧水型原子炉では、中性子を吸収しやすい物質であるほう酸を１次冷却材中に溶解させ、その濃度を増減させることにより核分裂連鎖反応を制御しているが、その濃度のこと。
4		運転上の制限	原子炉の安全機能を確保するため動作可能な機器の必要台数等を定めているもの。一時的に満足しない状態が発生すると、運転上の制限からの逸脱を宣言し、必要な処置を行う。
5		エリアモニタ	建屋内、室内等の放射線量当量率の監視を行い、設定値に達した時は、警報を発信する。
6		おもり（ウェイト）による動作確認	荷重計（ロードセル）の動作確認のため、重量が既知のおもり（ウェイト）を用いて荷重計測を行った。
7	か	ガイドスタッド	原子炉容器上蓋、上部炉心構造物および下部炉心構造物の吊り上げおよび吊り下げ時に、原子炉容器に対する位置決めのために設置するピンのこと。上部炉心構造物はピンにより水平方向の位置が拘束される。
8		荷重計（ロードセル）	クレーン（ホイスト）と駆動軸取り外し工具の間に荷重を計測する計器を取り付け、駆動軸と制御棒クラスタの結合、切り離し状況を重量により確認している。
9		硬さ（ＨＢ）	硬さを表す単位の一つであるブリネル硬さのこと。ある直径の球形の金属球を試験面にある力で一定時間押し当てた後、荷重を除いたあとに残ったくぼみの面積を測定することで算出される。
10		型取り観察	接触痕の形状確認のため、シリコンにより傷形状を採取し、大きさや深さを観察した。
11		仮置き（駆動軸着座）状態	切り離し作業が完了し、駆動軸取り外し軸が降下した状態で、駆動軸を制御棒クラスタの上部に乗せている状態。
12		嵌合性試験	ラッチ、アンラッチが可能な構造のハンドタイプの治具で、取り外し軸を上下させ、結合時に治具が抜けないこと、切り離し時に治具が外せることを確認している。
13		キャビティ	原子炉容器上部のピット部のこと。上部炉心構造物吊り上げ前に水張（ホウ酸水）を行い、原子炉容器、燃料はホウ酸水に満たされたキャビティに入っており、安全上問題はない。
14		キャビティ水張	原子炉容器上蓋の吊り出しに備えて、原子炉容器上部のキャビティにほう酸水を水張する。原子炉容器上蓋等の吊り出しは水中にて行う。
15		くさび効果	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。
16		駆動軸	制御棒クラスタと結合し、制御棒駆動装置（CRDM）により上下動される。
17		駆動軸つかみ部	駆動軸の上部にある凹み部。駆動軸取り外し工具の駆動軸つかみ金具と噛み合う。
18		駆動軸取り外し工具	定検時、駆動軸と制御棒クラスタの結合・切り離しのため、駆動軸を操作するための工具。
19		駆動軸取り外し工具の指示管	駆動軸取り外し工具の軸で、取り外しボタンつかみ金具にて、駆動軸の取り外しボタンをつかみ、駆動軸取り外し工具の指示管を上昇／下降させることにより、駆動軸取り外し軸（位置決めナット含む）を上昇／下降させる。インジケーターロッドともいう。
20		クロムメッキ	クロム化合物により金属表面に皮膜を作り処理をすること（めっき処理）。非常に硬いため、表面が荒れることは無い。
21		結合・切り離し作業	制御棒駆動軸と制御棒クラスタは、通常運転中には結合した状態である。点検時に上部炉心構造物を吊り上げる前に切り離しを行うことにより、制御棒クラスタを原子炉容器（燃料集合体）内に残したまま上部炉心構造物の吊り上げを行うことができる。
22		管理区域標準装備（管理服、綿手袋、靴下）	汚染防止のため、管理区域に入域する際には、専用の管理服（つなぎ）、綿手袋および靴下に着替えている。
23		金属光沢	接触痕において確認された光沢のこと。金属は酸化等により光沢が失われるため、金属光沢を有していることは、今回の定検作業等、至近に接触があったと推定される。
24		駆動軸接手の浮き上がり	駆動軸と制御棒クラスタの結合状態から切り離し後仮置きしている状態になった際の駆動軸の位置変化（上昇量）。
25		原子力施設情報公開ライブラリー（ニューシア）	原子力安全推進協会により運営されている、国内原子力発電所や原子燃料サイクル施設の運転に関する情報を広く共有化するためのウェブサイト。

No.	索引	用語	解説
26	か	原子炉運転モード	原子炉の出力や温度等の条件に基づき分類されている運転状態。運転モードは保安規定に定義されており、各運転モードごとに動作可能な機器等の要求が異なる。
27		原子炉運転モード６	保安規定により定められている運転モードの一つ。定検開始時、原子炉容器上蓋の開放作業で、スタッドボルトが１本以上緩められると、運転モード５から運転モード６に移行する。
28		原子炉格納容器内封機能	格納容器内から放射性物質が放出されないように、放出を防止または、抑制する機能。
29		原子炉容器上蓋開放（スタッドボルト緩め）	原子炉容器上蓋の開放作業で、スタッドボルトが１本以上緩められると、運転モード５から運転モード６に移行する。
30		原子炉容器内点検	上部炉心構造物取り出し後、燃料取り出し前に実施している点検のこと。水中カメラにて、 ・原子炉容器の胴シート面およびフランジ面上 ・燃料トップノズル部 の異物点検を実施している。
31		高温停止	１次冷却材温度約２８０℃で、所定の未臨界度を維持して原子炉を停止させた状態。
32		拘束力試験	制御棒クラスタ案内管に模擬制御棒クラスタを挿入し、挿入及び引抜時の拘束力を確認する試験。（制御棒クラスタ案内管と制御棒クラスタとのインターフェースに問題ないことを確認するための試験）
33		固体廃棄物処理設備	ベイラ、雑固体焼却設備、固体廃棄物貯蔵庫等、伊方発電所で発生する廃棄物を処理・貯蔵保管するための設備全般を指す。冷却材フィルタ等の液体用フィルタは現在、固体廃棄物貯蔵庫にて保管しているが、今後、必要に応じて焼却や圧縮等の処理を行う。
34	さ	最小停止ほう素濃度	原子炉停止中の各状態において、要求される必要な未臨界度を維持するために必要な１次冷却材ほう素濃度の最小値。
35		残留磁気	磁界を取り除いた後でも磁性材料内部に磁力が残ること。
36		磁化	磁力を持つこと。
37		実体顕微鏡	対物レンズと接眼レンズで拡大して観察する光学顕微鏡のことで、立体的に観察できる。
38		上部炉心構造物	原子炉容器内の構造物のうち上部を構成する一体化構造物であり、上部炉心支持板、上部炉心板、上部炉心支持柱、制御棒クラスタ案内管等から構成される。
39		所内用空気	発電所には作業等に用いるための圧縮空気として、所内用空気が供給されている。駆動軸取り外し工具にはエアシリンダがあり、所内用空気を駆動源として用いている。
40		水質分析用フィルタ	分析に際し、液体中の微粒子成分を採取又は除去するために使用されるフィルタ【メンブレンフィルタ】
41		ステッピング試験	駆動軸、ラッチ機構等の各部品を組み立て、水中にて制御棒駆動装置（CRDM）を作動させて計画通りの性能が得られることを確認する試験。
42		スパイダ頭部	制御棒クラスタは、中性子を吸収しやすい材質であり燃料集合体内部に挿入される制御棒（24本）と、24本の制御棒の上端を束ねるスパイダと呼ばれる部分で構成される。制御棒クラスタと駆動軸は、スパイダの頭部と結合する構造となっている。
43		スラッジ	一般的には、滓（かす）、残渣などのことを指すが、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。
44		制御材	原子炉の出力（核分裂）を制御するための設備の総称であり、制御棒クラスタおよび１次冷却水中に溶解したほう素が該当する。
45		制御バンク	原子炉内には48体の制御棒クラスタが設置されており、バンクと呼ばれる８体ごとのグループ単位で挿入、引き抜きされる。バンクには制御バンク（４バンク）と停止バンク（２バンク）があり、制御バンクは主に運転中の出力制御や出力分布制御等に用いられる。
46		制御棒案内シンブル	制御棒クラスタの24本の制御棒が燃料集合体に挿入されるために燃料集合体に設けられている金属管。
47		制御棒位置指示装置	制御棒の動作に伴って、制御棒駆動軸が動くことにより検出される位置を表示する装置。Ａ，Ｂ２系統で６ステップ毎に表示可能。
48		制御棒駆動装置圧力ハウジング	ラッチハウジングと駆動軸ハウジングから構成され、原子炉冷却材圧力バウンダリの一部を構成する耐圧部のこと。
49		制御棒クラスタ	原子炉の出力を制御するための棒状の装置。中性子を吸収しやすい材質（銀-インジウム-カドミウム合金）からなる制御棒24本を一体として動作させるため一まとめ（クラスタ）とした形状をしており、燃料集合体の制御棒案内シンブルに挿入できる構造。原子炉の起動、出力調整、停止などの運転操作にあたり、制御棒クラスタ駆動装置を用いて炉心内を上下させることにより原子炉内の中性子量を調節し、核分裂連鎖反応を制御する。
50		制御棒クラスタ案内管	制御棒クラスタが通過する管で、上部炉心構造物に設置されている。

No.	索引	用語	解説
51	さ	制御棒クラスタ駆動装置	制御棒クラスタと機械的に結合された駆動軸をラッチ機構により上・下方向に駆動させることにより、制御棒クラスタの引き抜き、保持、挿入を行うもの。 運転中は、中央制御室に現在のステップ数が表示されている。
52		制御棒クラスタ制御信号	制御棒に挿入、引き抜きの動作が起こった時に、制御棒があるべき位置を示す信号。１ステップ毎に表示可能。
53		制御棒クラスタの保持機能	駆動軸と制御棒クラスタの結合維持機能のこと。
54		制御棒動作試験サーベランス	添付資料－９－３のとおり、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、各制御棒位置を変化させ、制御棒が固着していないことを確認することで、制御棒動作機能の健全性確認を行っている。
55		制御棒の挿入抗力	制御棒の挿入方向に対して逆方向に働く、制御棒を挿入しにくくさせる力。
56		製作・組立公差	製品の製作時や組み立て時において、設計上、公式に許容されている差（ズレ）のこと。
57		接手	駆動軸先端にある二股に分かれた部品。制御棒クラスタスパイダ部に挿入され結合する箇所。
58		接手部拘束	駆動軸取り外し軸が下降し、接手が開いた状態で拘束されること。添付資料－６の図を参照。
59		線源領域(SR)	原子炉は、起動から全出力運転において中性子束の変化が大きいことから、線源領域、中間領域および出力領域の３種類の領域に分けて測定している。事象発生時は停止中であり、中性子束が小さいことから、線源領域を監視していた。
60		全面マスク	空気中に漂う放射性物質の吸入により内部被ばくの恐れがある場合、マスクを着用する。口を覆うため声が聞こえづらくなることがあるが、本作業時は着用が不要であった。
61		組成分析	電子線プローブマイクロアナライザ（ＥＰＭＡ）から得られた構成元素をもとに、対象がどのような物質なのかを分析・特定すること。
62		走査電子顕微鏡（ＳＥＭ）	Scannin Electron Microscopeの略。電子線を試料に当てて表面を観察する装置であり、通常の光学顕微鏡よりも高い分解能を有する。
63	た	脱ガス運転	定期検査など原子炉や一次冷却材系統その他の開放を伴う作業のため停止する時には、作業員の被曝低減のため１次冷却材中に含まれる放射性ガスを取除くための運転操作のこと。
64		脱塩塔入口フィルタ	浄化装置（脱塩塔）に不純物が持ち込まれないようにするために前段に備え付けられているフィルタ。
65		中性子照射量の制限	制御棒クラスタの健全性の観点から、取替基準として中性子の照射量を定めている。
66		長期停止	東日本大震災の際の福島第一原子力発電所での事故の後、再稼働までの伊方発電所３号機の停止期間。
67		つかみ金具ハウジング	駆動軸取り外し工具のボタンつかみ金具を動作（ラッチ、アンラッチ）させるための部品。
68		低温停止	１次冷却材温度約９５℃以下で、所定の未臨界度を維持して原子炉を停止させた状態。
69		定期事業者検査（制御棒クラスタ検査）	次サイクルに使用予定の制御棒クラスタ等の燃料内挿物が健全であることを確認するために行う検査。
70		停止バンク	原子炉内には48体の制御棒クラスタが設置されており、バンクと呼ばれる８体ごとのグループ単位で挿入、引き抜きされる。バンクには制御バンク（４バンク）と停止バンク（２バンク）があり、停止バンクは原子炉の起動時および停止時に引抜、挿入される運用としている。
71		鉄酸化物	高溶存酸素・高温環境において、一次冷却水中の鉄イオンが酸素と反応することで酸化し、鉄酸化物となる。
72		電子線プローブマイクロアナライザ（ＥＰＭＡ）	Electron Probe Micro Analyzerの略。電子線を試料に当てて照射し、発生する特性X線から構成元素を分析する装置。
73		透磁率	水や空気などの物体の内部における磁力の伝わりやすさ。
74		取り外しボタン	駆動軸取り外し軸上部にある接続部のこと。駆動軸取り外し工具の取り外しボタンつかみ金具と接続する。
75	な	熱処理	接手は硬さおよび靭性を高めることを目的として、焼入れおよび焼戻しの熱処理を行っている。
76		燃料移送中の制御棒クラスタの横倒し	燃料集合体を原子炉容器から使用済燃料ピットへ輸送する際、燃料移送管と呼ばれる管を通し燃料を輸送するが、その際に一度燃料を横倒しにして通す必要があり、燃料に挿入されている制御棒クラスタも同時に横倒しになるため、制御棒クラスタ頭部に堆積した堆積物が一方向に偏る。

No.	索引	用語	解説
77	な	燃料集合体上部ノズル	燃料集合体上部の部品であり、燃料集合体の原子炉内での位置決め、燃料集合体を冷却した１次冷却材の流路等の機能を有する。
78		燃料取出作業	運転中に原子炉容器内に入っている燃料集合体は、定期検査時に原子炉容器から取り出し、使用済燃料ピットへ移送して保管する。
79		燃料取替クレーン	原子炉キャビティ上部に設置しているクレーン。
80		燃料取替クレーン歩廊	燃料取替クレーンが取り付けられている架台には、人が歩くことができる歩廊が設けられており、その歩廊上にて駆動軸取り外し工具の操作やベースプレート高さの測定等を行っている。
81	は	バグフィルタ	堆積物回収のための不織布（ポリエステル）のフィルタ。
82		フレッティング	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、燃料棒に微少孔（ピンホール）が発生する現象。
83		プロセスモニタ	各系統の放射線量当量率の監視を行い、設定値に達した時は、警報を発信する。
84		プロファイル	型取りにより取得した傷形状の輪郭。
85		不完全な結合状態	切り離し作業が完了した後に、通常と異なる状態で結合していたと考えられることから、”不完全な結合状態”としている。
86		平板摺動試験装置	添付資料－１１図－３に概念図を示している通り、押し付け荷重を作用させ、その時の摺動方向（摩擦する方向）に荷重をかけ、運動片が動き出す直前の荷重を測定することで静止摩擦係数を測定する試験装置。
87		防護服	汚染区域で作業する際、管理区域標準装備の上から、不織布でできた防護服を着用する。
88		ボタンアップ／ボタンダウン	駆動軸取り外し工具の取り外しボタンつかみ金具にて、駆動軸の取り外しボタンをつかみ、駆動軸取り外し工具の指示管（インジケータロッド）を上昇（ボタンアップ）／下降（ボタンダウン）させることにより、駆動軸取り外し軸（位置決めナット含む）を上昇（ボタンアップ）／下降（ボタンダウン）させる動作のこと。
89	ま	マーキング位置	駆動軸取り外し工具の指示管（インジケータロッド）には、取り外し軸が上がりきった箇所と下がりきった箇所を示すマークがあり、この位置を確認することにより、取り外し軸が動作途中でスタックしていないことを確認することができる。
90		マグネタイト（Fe_3O_4）	プラント構成材に含まれる鉄(Fe)の腐食により生成される酸化物。金属光沢を持つ黒色の鉱物で、強い磁性を持つ。
91		マグネタイトへの変態	Feは、酸化されてオキシ水酸化鉄（FeOOH）になった後、脱水によりヘマタイト（α-Fe_2O_3）となり、さらに還元されマグネタイト（Fe_3O_4）となる。
92		摩擦係数確認試験	接触面の静止摩擦係数を取得するために実施した試験。供試体は実機と材料および環境（気中／水中）が異なるため、実機材料および水中環境での静止摩擦係数を測定し比較した。
93		マルテンサイト系ステンレス鋼	内部マルテンサイトという組織で出来ているステンレス鋼。磁性を有し硬い。
94		未臨界性	核分裂連鎖反応が継続する状態である臨界に達していない状態のことで、時間とともに核分裂の数が減り、連鎖反応が収束に向かう状態。
95		面荒れあり	これまでの使用に伴い生じた、わずかな摩耗のこと。実証試験用に製作した供試体は、機械加工により表面に摩耗は生じていないため、実機を模擬するため、サンドペーパにより摩耗を模擬した。
96		面荒れなし	実証試験用に製作した供試体で、機械加工ままの状態。実機に生じている表面摩耗は模擬していない。
97		模擬駆動軸	駆動軸取り外し工具の引き上げ荷重を計測するため、駆動軸の頭部を模擬した軸を使用した。また、製造時においても模擬駆動軸を使用し、試験を実施している。
98	や	野外モニタ	伊方ビジターズハウス東隣に設置しているモニタリングステーションにおいて、空間放射線量率、空間放射性じんあい濃度、空間放射性よう素濃度を測定している。 また、伊方発電所の周辺監視区域境界付近（4箇所）に設置しているモニタリングポストにおいて、空間放射線量率を測定している。
99		余熱除去冷却器入口・出口温度	停止中は余熱除去系統の熱交換器である余熱除去冷却器で除熱している。事象発生時に有意な温度変化はなかった。
100		溶存酸素	空気中や水中に含まれる酸素。プラント起動時に水張をする際には、空気を抜くベンティング操作を実施するが、一部抜けきらない箇所が生じ、一次冷却水の圧力が高くなることで空気が圧縮され、酸素濃度が高い状態となる。

No.	索引	用語	解説
101	ら	ラッチ／アンラッチ	駆動軸取り外し工具の駆動軸つかみ金具により、駆動軸を挟み結合（ラッチ）／開放（アンラッチ）すること。
102		冷却材フィルタ	化学体積制御系統に設置されたフィルターで、不純物を回収している。
103		励磁	磁力を持っていない磁性材料が磁界により磁力を持つこと。
104		ロックボタン	駆動軸下端部にある部品で、通常運転中、ロックばねにより下向きに押され接手内側と接触することで、位置決めナットが接手内部に位置する状態を維持している。
105	A	ANSYS	有限要素法を主体とした解析ソフトウェアの名称。今回は、コンピュータ上で表現した駆動軸やRCCスパイダに生じる力やを計算するために用いた。
106	F	FEM	Finite Element Method（有限要素法）の略。駆動軸やRCCスパイダ等を数学モデル（数式）としてコンピュータ上で表現する手法。
107	X	X線回折	X線を試料に照射した際、試料の電子により、X線が散乱・干渉すること。未知の試料から得られたX線回折パターンと既知のパターンを比較することにより、未知の試料が何なのかをみなす（同定する）ことができる。