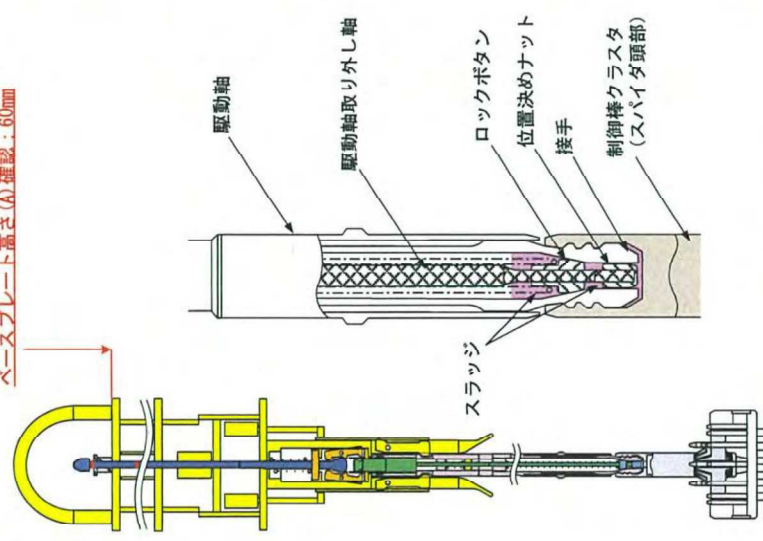
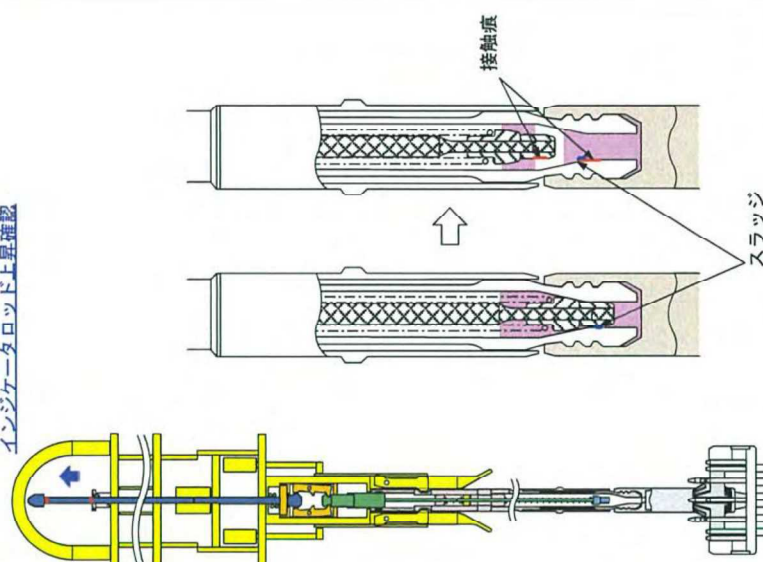
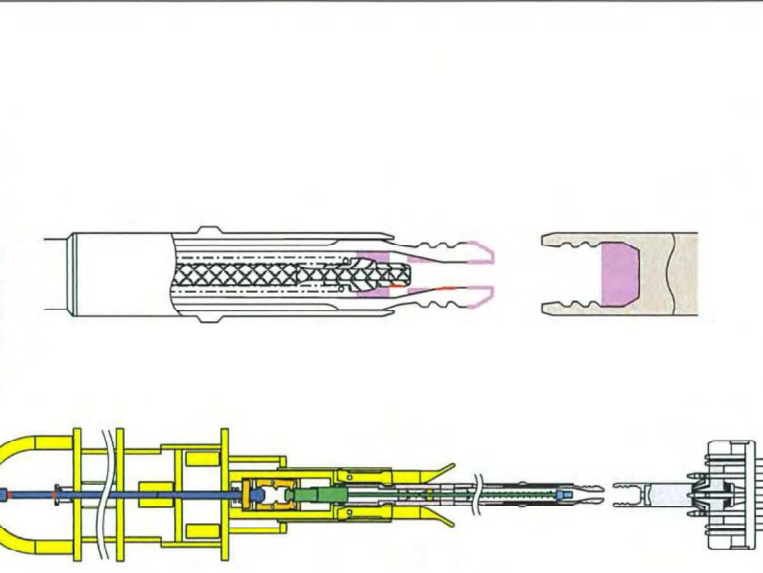


以上から、実機と実証試験（ケース2）との差異が試験結果に与える影響は軽微であり、実証試験は妥当であると考ええる。

以上

推定メカニズム

| | | | |
|----------------|--|--|---|
| | <p>① 駆動軸結合状態</p>  | <p>② 接手部拘束解放</p>  | <p>③ 駆動軸切り離し</p>  |
| <p>概要図</p> | | | |
| <p>観察事実</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・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60mmを確認 ・制御棒クラスタのスバイダ頭部にスラッジが堆積 | | |
| <p>推定メカニズム</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・スラッジは1次冷却系管内(駆動軸内面含む)で生じたものと考えられ、スバイダ頭部内およびロックボタン廻りに堆積 ・インジェクターの上昇を確認(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揺動する箇所に対応 ・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)を介して両者が揺動し、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 | | |
| <p>関連資料</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・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。

| | | | |
|---------|--|---|---|
| | <p>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)</p> <p>インジケータロッド下隆 (正規位置より約45mm高い位置)</p> <p>※1: ⑥不完全結合状態における接手外面接触痕位置からの推定 ※2: ベースプレート測定精度を考慮した値</p> | <p>⑤ 駆動軸着座</p> <p>ベースプレート高さ(B)確認: 12mm [A-B=60-12=48mm]</p> <p>※1: ⑥不完全結合状態における接手外面接触痕位置からの推定 ※2: ベースプレート測定精度を考慮した値 ※3: ②接手部拘束解放で接手内面と位置決めナットの間に介在したと推定した介在物(1mm程度)と同程度の大きさと仮定</p> | <p>⑥ 制御棒クラスタと駆動軸が不完全結合 (スラッジ脱落)</p> <p>※: 接手外面接触痕位置からの推定</p> |
| 概要図 | | | |
| 観察事実 | <p>【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】</p> <ul style="list-style-type: none"> 駆動軸取り外し軸下降時、ロックボタンのスラッジおよび接手内面テーパの一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、インジケータロッドの下降位置も正規の位置より高い位置で停止 <p>※ 別添 2 不完全結合状態の幾何学的検討</p> | <ul style="list-style-type: none"> 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12mmを確認 ベースプレート高さの差 (A-B) が48mmで、管理値内 () mm) であること 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12mmを確認 ベースプレート高さの差 (A-B) が48mmで、管理値内 () mm) であること 接手先端のスラッジがスパイダヘッドとの間に挟まり、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 <p>※ 別添 2 不完全結合状態の幾何学的検討</p> | <ul style="list-style-type: none"> 接手外面直線部に局所的な接触痕を確認。 工具切り難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ヘッド間のスラッジが脱落し、駆動軸がスパイダヘッド部に沈み込む スパイダヘッドの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 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 |
| 推定メカニズム | | | |
| 関連資料 | | | |

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。

| | | | |
|----------------|--|--|--|
| | <p>⑦ 事象発生 (制御棒クラスタ引き上がり)</p> | <p>⑧ 制御棒クラスタと駆動軸が不完全結合解除</p> | <p>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)</p> |
| <p>概要図</p> | | <p>ベースプレート高さ確認: 16mm</p> | <p>重量確認 (工具+駆動軸) : [] kg (計画値: [] kg)</p> |
| <p>観察事実</p> | <ul style="list-style-type: none"> 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りしていることを確認 | <ul style="list-style-type: none"> 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りしていることを確認 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 | <ul style="list-style-type: none"> 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 ([] kg) となっていることを確認 (制御棒クラスタは引き上がりせず) |
| <p>推定メカニズム</p> | <ul style="list-style-type: none"> 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 | <ul style="list-style-type: none"> 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 駆動軸取り外し輪が正視の位置まで下降し、駆動軸がスバイダ頭部に着座 | <ul style="list-style-type: none"> 正視の位置で駆動軸がスバ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りせず |
| <p>関連資料</p> | <ul style="list-style-type: none"> 添付資料-1.1 部分モデルによる引き上がり状態検証試験 別添2 不完全結合状態の幾何学的検討 | | |

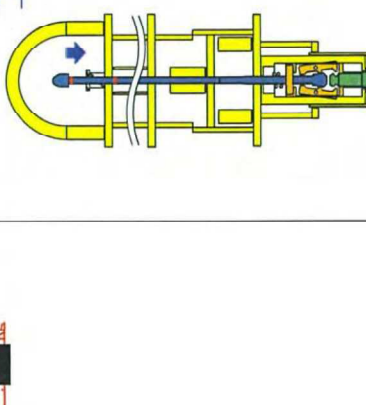
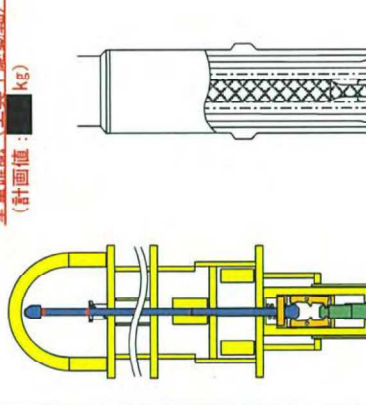
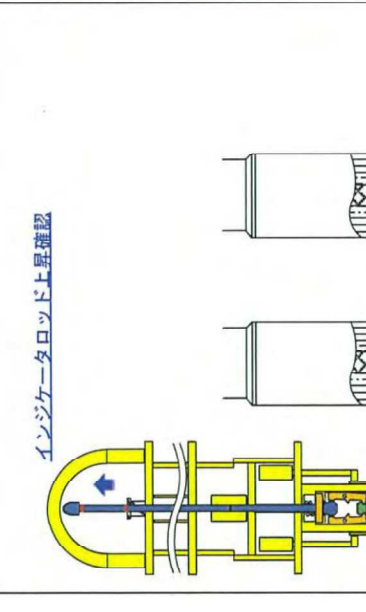
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはありません。

【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

| | | | |
|----------------|--|--|---|
| <p>概要図</p> | <p>②-1 接手部拘束解放</p> | <p>③-1 駆動軸切り離し</p> | <p>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)</p> |
| <p>観察事実</p> | <ul style="list-style-type: none"> 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痕痕を確認。両者の位置は駆動軸取り外し軸の動作により揺動する箇所に対応 | <ul style="list-style-type: none"> 工具を吊り上げ、重量が工具と駆動軸の合計重量 (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) 接手部は磁性体 (マルチサイト系ステンレス鋼) であることから、接手内面テーパ一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 | <ul style="list-style-type: none"> [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] |
| <p>推定メカニズム</p> | <ul style="list-style-type: none"> 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ライダ頭部内に脱落 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) を介して両者が揺動し、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 | <p>※1: ⑥不完全結合状態における接手外面接触痕位置からの推定 ※2: ベースプレート測定精度を考慮した値</p> | <ul style="list-style-type: none"> 駆動軸取り外し軸下降時、接手内面テーパ一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、インジケータロッドの下降位置も正規の位置より高い位置で停止 |
| <p>関連資料</p> | <ul style="list-style-type: none"> 別添 1 駆動軸 (接手) へのスラッジの付着 | <ul style="list-style-type: none"> 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

| | | | |
|----------------|---|--|--|
| <p>概要図</p> | <p>②-2 接手部拘束解放</p>  | <p>③-2 駆動軸切り離し</p> <p>重量確認 (工具+駆動軸) : ■■■■ kg (計画値 : ■■■■ kg)</p>  | <p>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)</p> <p>インジケータロッド下降 (正規位置より約25mm高い位置)</p>  <p>スラッジ 約2~3.6mm※2 27.5mm</p> <p>※1: ⑥不完全結合状態における接手外面接触痕位置からの推定 ※2: ベースプレート測定精度を考慮した値</p> |
| <p>観察事実</p> | <p>・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揺動する箇所に相当</p> | <p>・工具を吊り上げ、重量が工具と駆動軸の合計重量 (■■■■ 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)</p> | <p>【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】</p> |
| <p>推定メカニズム</p> | <p>・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) を介して両者が揺動し、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</p> | <p>・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 (マルチ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</p> | <p>・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、インジケータロッドの下降位置も正規の位置より高い位置で停止</p> |
| <p>関連資料</p> | <p>・別添1 駆動軸 (接手) へのスラッジの付着</p> | <p>・別添2 不完全結合状態の幾何学的検討</p> | |

枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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O（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、磁石を取外し後も残留磁気でも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。

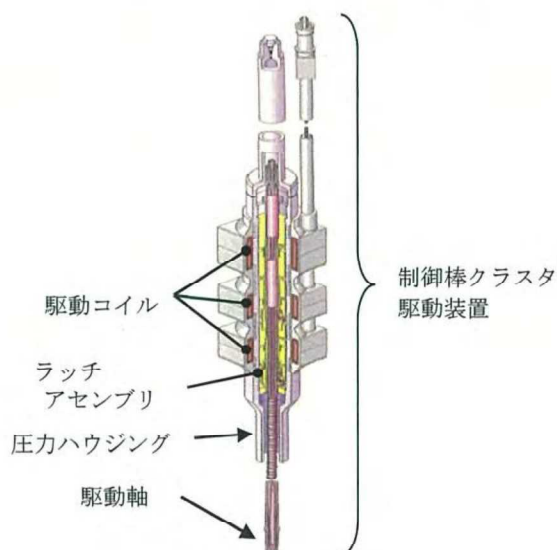


図1 制御棒クラスタ駆動装置 概要図



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

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。

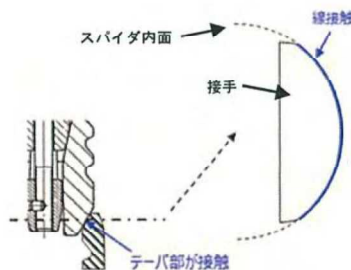


図 1 通常の駆動軸着座状態



図 2 接手外面テーパ部の接触痕

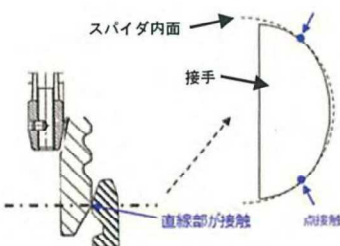


図 3 通常よりも低い位置での駆動軸着座状態



図 4 接手外面円筒部の局所的接触痕

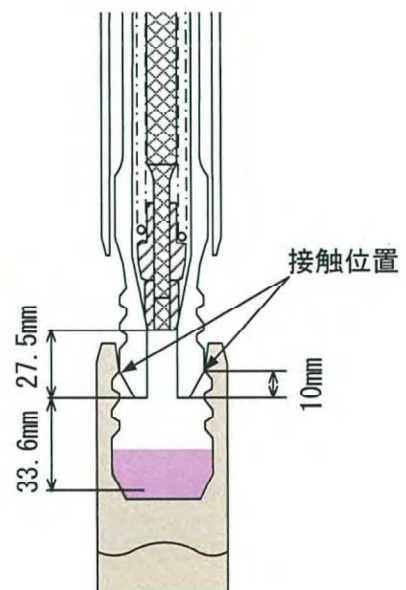


図 5 不完全結合時の位置関係

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 48mm 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 27.5mm 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 2mm 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、±2mm 程度の計測誤差が考えられる。以上のことから、下記的前提条件の下、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 27.5mm 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 (1mm 程度) から、接手先端のスラッジ厚さは 1mm 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 2.0mm から 3.6mm となった。なお、接手先端のスラッジ厚さを 0mm から 2.5mm 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 0.4mm から 4.2mm となる。

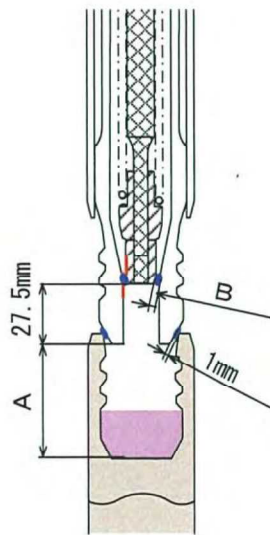


図6 駆動軸着座時の位置関係

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 1-1 ①) 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 1-1 ②) 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。

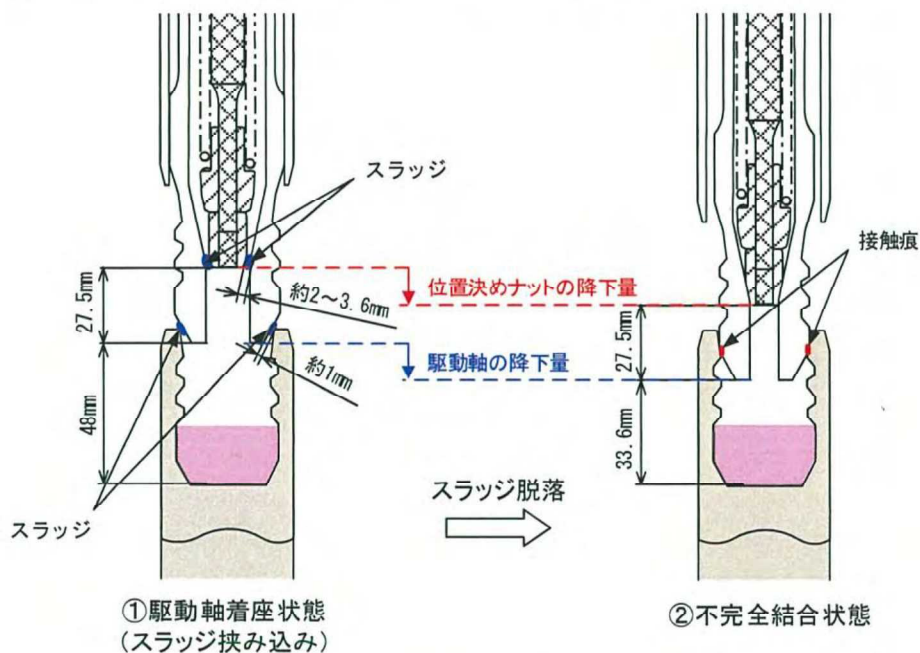


図 1-1 不完全結合状態に至るまでの推定挙動

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: XXXXXXXXXX) 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。

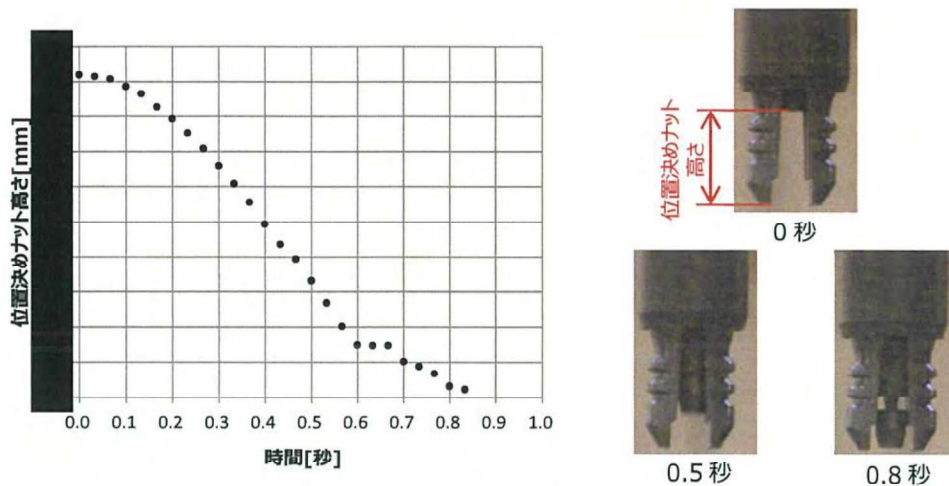


図 2-1 駆動軸の動作確認試験結果 (アドレス : M4)

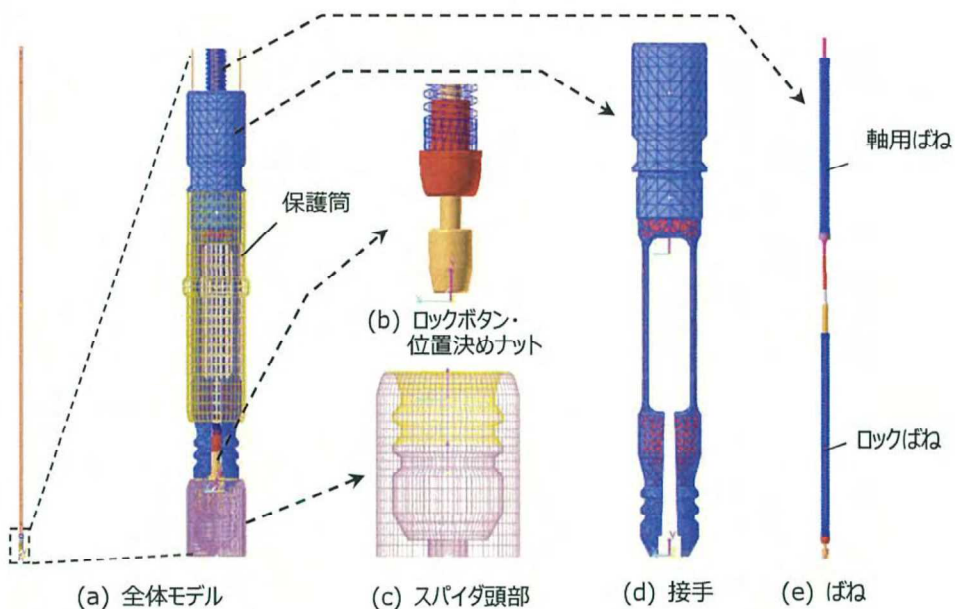


図 2-2 機構解析モデル

(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 k g) を設定する。初期ナット高さは約 27.5 mm 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 :
- ・ 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。

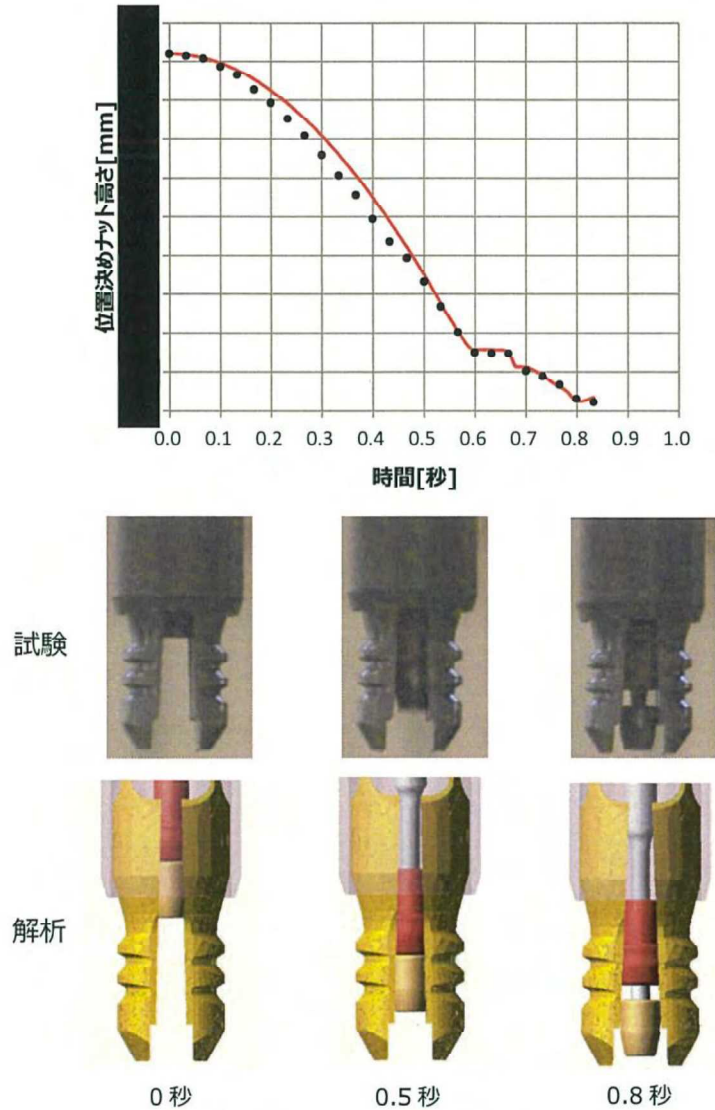


図3-1 動作確認試験の再現解析結果

(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。

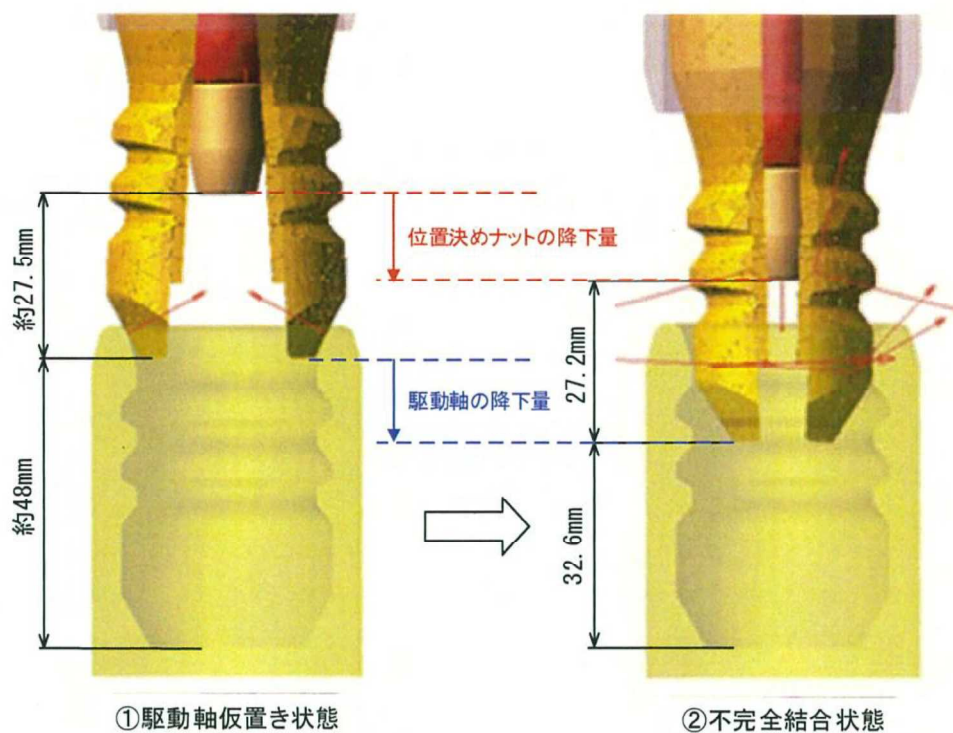


図3-2 駆動軸仮置き状態から不完全結合状態に至る動作の再現解析結果

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。

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ムルに挿入されることから、制御棒と制御棒案内シムルが干渉する。(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[]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ム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プル入口）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）