

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 \square 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も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。

	ケース1供試体	ケース2供試体	ケース3供試体
形状	<p>ロードセル</p> <p>取付治具</p> <p>取付治具</p> <p>接手 駆動軸取り外し軸 位置決めナット 一体型模擬体</p> <p>スパイダ頭部模擬体 (1山目のみ模擬)</p> <p>取付治具</p>	<p>ロードセル</p> <p>取付治具</p> <p>取付治具</p> <p>駆動軸取り外し軸 位置決めナット 一体型模擬体</p> <p>接手模擬体 (1山目のみ模擬)</p> <p>スパイダ頭部模擬体 (1山目のみ模擬)</p> <p>取付治具</p>	<p>ロードセル</p> <p>取付治具</p> <p>取付治具</p> <p>駆動軸取り外し軸 位置決めナット 一体型模擬体</p> <p>接手模擬体 (3山目まで模擬)</p> <p>スパイダ頭部模擬体 (3山目まで模擬)</p> <p>取付治具</p>
荷重	<p>■ kgf^{注1}</p> <p>(駆動軸+工具の水中重量に相当する荷重)</p>	<p>■ kgf^{注2}</p> <p>(ばね力)</p>	<p>■ kgf^{注2}</p> <p>(ばね力)</p>

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

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}		SUS403 (熱処理材)	・面荒れなし ・面荒れあり ^{注1}	
位置決 めナット	SUS304	・面荒れなし	1種類	SUS304 (クロムメッキ)	・面荒れなし	1種類

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ー#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 [] k g f（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 [] k g f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（ [] k g f）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（ [] k g f）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 [] ~ [] k g f）を試験体に作用させる。

(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 [] k g f（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どうかを確認する。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 [] k g f 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 [] k g f 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 [] k g f 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 [] ～ [] k g f 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。

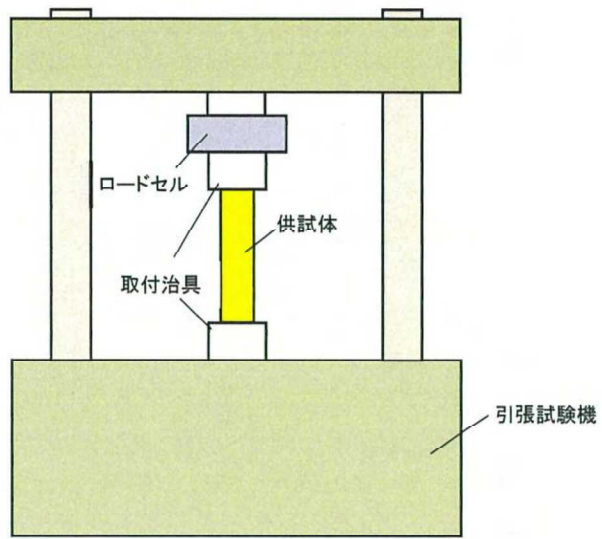


図-2 吊り上がり状態実証試験装置 (概念図)

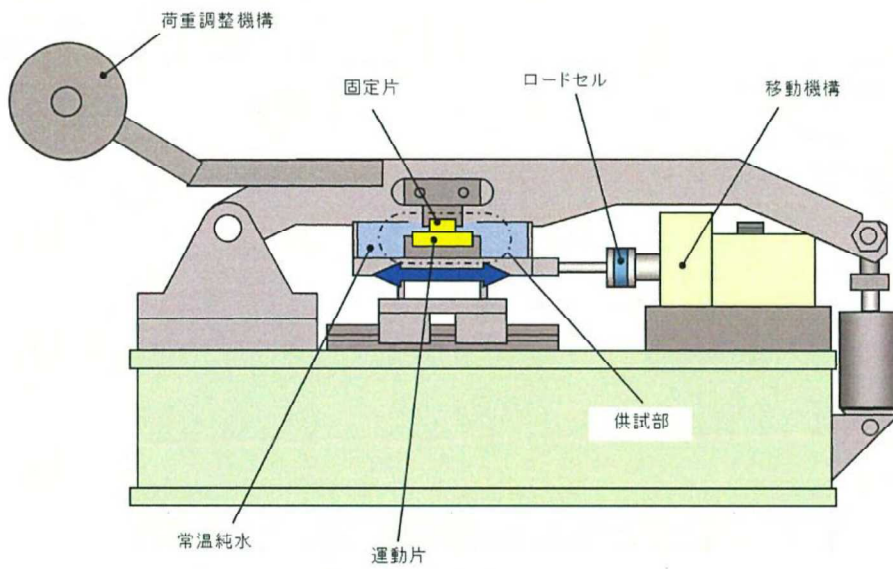


図-3 摩擦係数確認試験 (概念図)

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がりが生じやすい場合）でも、制御棒クラスタ引上荷重は0 kg f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41～61 kg f、面荒れありの状態において、制御棒クラスタ引上荷重が114～147 kg f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1,000 kg f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■■■■ kg f）を大幅に上回る引上荷重が計測されたため、引き上がり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1,000 kg f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を考える。

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、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■■■■～■■■■であり、位置決めナットと接手内面の接触面が■■■■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■■■■～■■■■と■■■■～■■■■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 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	■	0
面荒れあり	面荒れあり	■	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 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	■	41～61
面荒れあり	面荒れあり	面荒れなし	面荒れなし	■	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 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	■	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は制御棒クラスの水中重量に相当する荷重（約 ■ 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 / スパイク頭部：SUS304	常温水中	[Redacted]	[Redacted]
		常温水中		
実機と同材	接手内面 接手：SUS403 / 位置決めナット：SUS304 クロムメッキ	常温水中	[Redacted]	[Redacted]
		常温水中		
供試体と同材	接手外面 接手：炭素鋼 / スパイク頭部：SUS304	常温気中	注1	[Redacted]
		常温気中	注1	
供試体と同材	接手内面 接手：炭素鋼 / 位置決めナット：SUS304	常温気中	[Redacted]	[Redacted]
		常温気中		

注1：実機と同材のケースにおいて、付加荷重 [Redacted] kg f と [Redacted] kg f 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] kg f の条件のみを実施した。

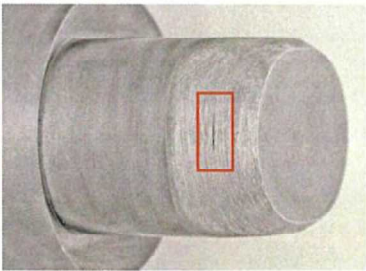
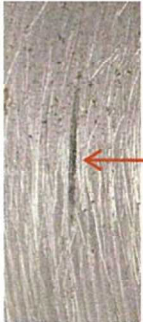
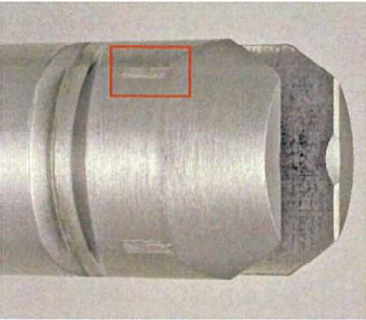
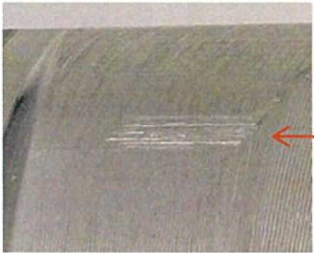
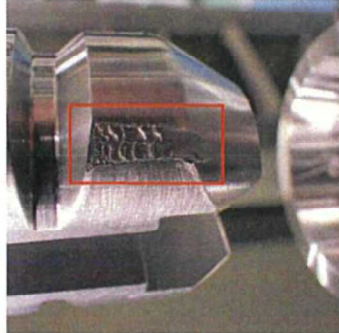
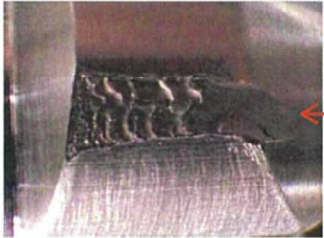

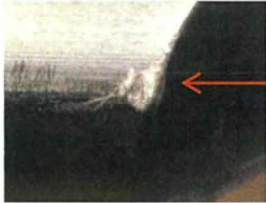
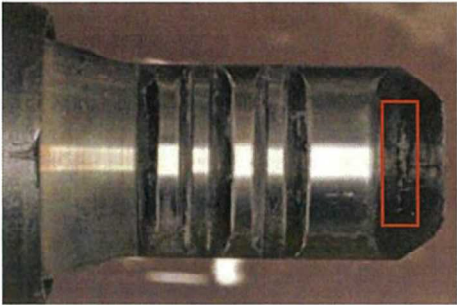

全体	 <p>ケース1 接手2箇所と同様の 接触痕あり</p>	 <p>接触痕拡大</p>
ケース2	 <p>ケース2 接手4箇所と同様の 接触痕あり</p>	 <p>接触痕</p>
ケース3	 <p>ケース3 接手4箇所と同様の 接触痕あり</p>	 <p>接触痕</p>
実機:M-4		 <p>接触痕</p>
実機:M-12		 <p>接触痕</p>

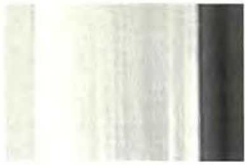


図-4 引き上がり状態実証試験の試験後の試験後の接触面 (写真)

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も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も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███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、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

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れるため、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－ 1 1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■■■■ kg f）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

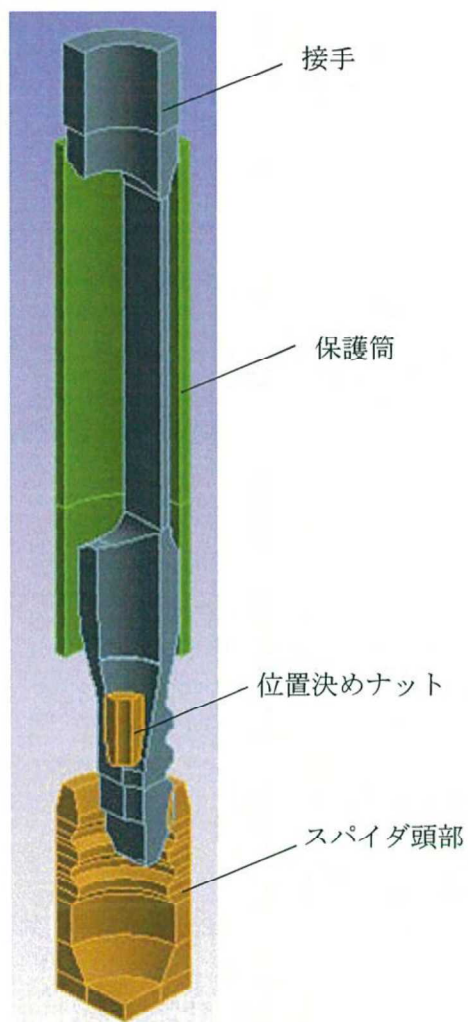
実証試験で用いた供試体は、部分モデルかつ実機と材料が異なるものを用いたため、実機寸法かつ実機材料でのFEMモデルを用い、実証試験と同様の結果が得られるか解析により確認した。なお、解析に用いる静止摩擦係数は、摩擦係数確認試験で得られた接手内面の接触面の静止摩擦係数■■■■～■■■■（面荒れなし／面荒れなし）および接手外面の接触面の静止摩擦係数■■■■～■■■■（面荒れあり／面荒れあり）とする。

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■■■■ kg f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。この反力により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■■■■ kg f）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。



図ー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。

表一1 制御棒クラスト引き上がり事象の再現解析結果 (FEM解析結果 v s 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 k g f (1箇所あたり)	接手外面の 摩擦力 k g f (4箇所合計)	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 k g f	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}			
		56	90	○			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：静止摩擦係数が制御棒クラストの水中重量に相当する荷重 (約 k g f) 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トの水中重量に相当する荷重 (約 k g f) を上回る場合は○、下回る場合は×とする。