

【補足説明資料】

3号機ハンドル変形燃料及び使用済燃料収納缶取り扱いに係る実施計画Ⅱ章の変更について

2020年11月25日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

今回の変更申請範囲



■ 燃料の分類と実施計画の対応は以下のとおり。

状態	燃料の状態	実施計画			
		2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備			2.12 使用済燃料共用プール設備 (添付資料-9,10)
		燃料の落下防止, 臨界防止に関する説明書 (添付資料-1-1)	燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書 (添付資料-1-3)	破損燃料用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書 (添付資料-2-2)	
健全燃料	被覆管は健全	既認可の範囲	既認可の範囲	既認可の範囲	既認可の範囲 (通常ラック)
スパーサ部損傷燃料 (CB有り)	スパーサに損傷はあるが燃料被覆管は健全				
スパーサずれ燃料 (CB有り)					
スパーサ部損傷燃料 (CB無し)	CB未装着のため, がれきの影響で被覆管に影響を与える可能性を懸念			変更申請審査中 (破損燃料用輸送容器 (7体))	既認可の範囲 (49体ラック)
漏えい燃料	SHIPPING検査により漏えいを確認済				
ハンドル部の変形が認められる燃料※ 1	小	これまでのSFP調査および今後のがれき撤去後に発見されるハンドルが変形した燃料	今回の変更申請範囲	変更申請審査中 (破損燃料用輸送容器 (2体))	今回の変更申請範囲 (使用済燃料収納缶の取り扱い)
	大	今回の変更申請範囲			

※ 1 : ハンドル部の変形量を水中カメラで確認し, 幾何学的に使用済燃料収納缶 (小) に収納可能な燃料を「小」, 収納できない燃料を「大」として取り扱う。なお, 判定しにくい燃料の場合は「大」とする。

※ : 上記以外の燃料が確認された場合は状況に応じて適切に対応する

変更箇所及び変更理由

- 3号機SFPハンドル変形燃料に関する取り扱い及び使用済燃料収納缶の取り扱いについて、下記の通り変更を行う。

- 主な変更箇所及び変更理由

II. 特定原子力施設の設計, 設備

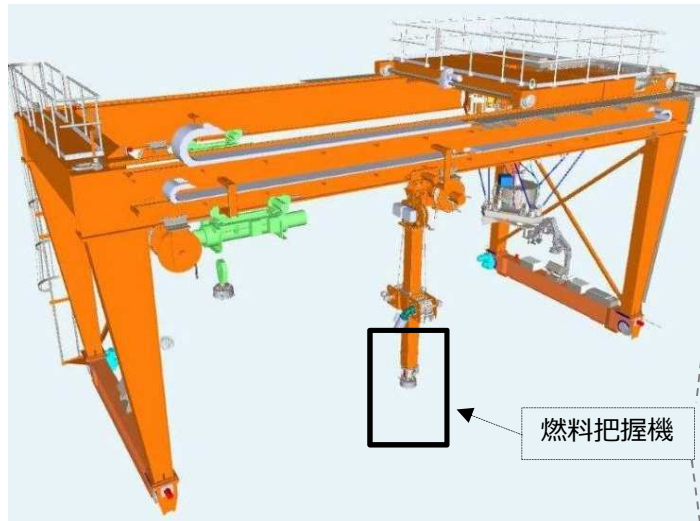
2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備

- ・ 添付資料－1－1
燃料の落下防止, 臨界防止に関する説明書（3号機）
 - 大変形用掴み具の導入に伴う記載の追加及び構造図の追加
- ・ 添付資料－1－3
燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書（3号機）
 - 3号機ハンドル変形燃料に関して記載の追加

2.12 使用済燃料共用プール設備

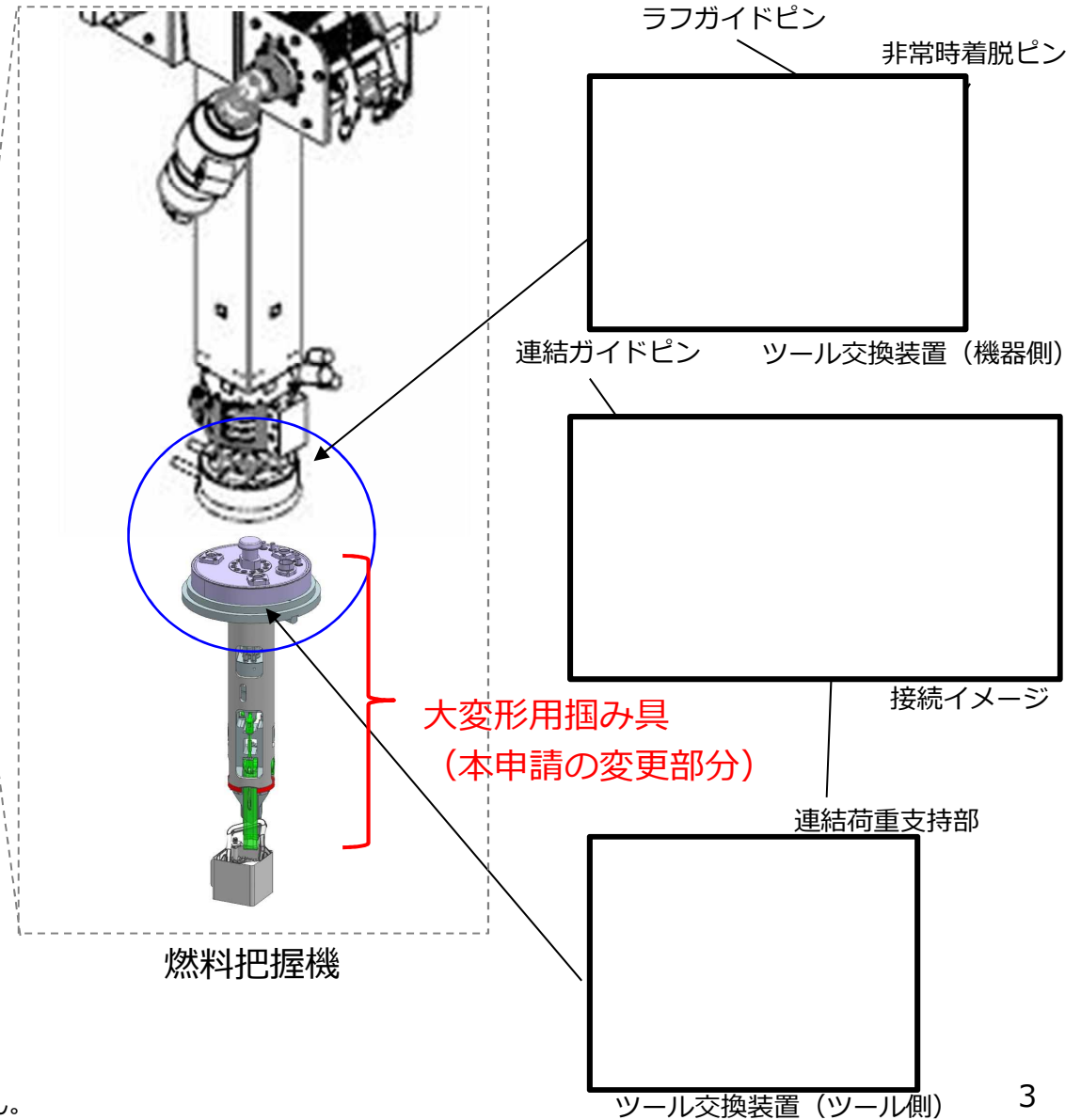
- ・ 添付資料－9－1 別添5
使用済燃料収納缶（小）についての説明書
 - 使用済燃料収納缶（小）取り扱い概念図の追加
- ・ 添付資料－9－2 別添6
使用済燃料収納缶（大）についての説明書
 - 使用済燃料収納缶（大）の落下防止機能及び落下防止措置について記載の追加
 - 使用済燃料収納缶（大）取り扱い概念図の追加
- ・ 添付資料－10
使用済燃料共用プール設備に係る確認事項について
 - 使用済燃料収納缶（大）吊具の確認事項について記載の追加

- 3号機の燃料取扱機のうち燃料把握機は、ツール交換装置で大変形用掴み具と接続する。



燃料取扱機

燃料把握機



- ツール交換装置
 - 各ツールと機器（燃料取扱機）側の取り合いのカップリング部分
 - 形を統一することで遠隔での交換を可能
 - 落下防止：機械的（着脱クサビ）と電気的（動作インターロック2重）の2種類

☐ : 黒枠の内容は商業機密に属しますので公開できません。

現状の燃料掴み具からの変更点（1 / 2）

- ハンドルがチャンネルファスナ側に大きく倒れている燃料の取り出しに対応するため、先端形状を変更。
- 現状の燃料掴み具の設計を踏襲し、ツール交換装置接続、ラッチ機構による落下防止、駆動源（水圧）、電気的な制御、最大吊り上げ荷重（1t）は変更しない。
- ハンドル変形燃料の3DCADデータをもとに模擬した変形ハンドルに対して試験を実施し、把持できることを確認。

現状の燃料掴み具	大変形用掴み具
	<ul style="list-style-type: none"> ・ チャンネルファスナとフックの干渉を回避する構造 ・ ハンドル変形に対応しフックの間口を広くする構造

現状の燃料掴み具からの変更点 (2 / 2)

<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">既設の掴み具</p>	<p>② フック内側までの寸法を既設と同じにしたことから、遮へい水深評価に変更なし</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">大変形用掴み具</p>	<p>④ ガイド ・ 形状変更；ハンドル変形燃料を輸送容器の収納缶に収納する際に、ガイド部分と収納缶が干渉しないよう根元部をテーパ形状にした</p> <p>① フック部 ・ 小型化 ・ 強度を高めるため材質をSUS304からSUS304N2に変更</p>

■ 落下防止

- フックは水圧作動式であり、燃料集合体をつかんだ状態で水圧源が喪失しても、フックが開とならないようにする機械的機構を有する。

■ 臨界防止

- 燃料集合体を1体ずつ取り扱う構造。

■ 遮へい

- 遮へい水深を確保した状態で取り扱う。

ハンドル変形による遮へい水深への影響

- 現状の線量評価（面談資料，2019年2月22日説明）
 - ・ ガータ上の高さで2.2mSv/h，トロリ上では1mSv/h未満
 - ・ ガータ上線量評価は，遮へい水深350mmであるが，評価の条件としてプール冷却系の停止や操作卓高さ表示の要求仕様（計器誤差）を考慮して250mmで評価を実施
- ハンドルが変形することへの影響
 - ・ ハンドル変形燃料を水中カメラで確認すると，約30mm短くなるが，線量評価の条件（-100mm）以内の変形量であることから，現状の線量評価を変更する必要はないと考える。
 - ・ なお，現状評価条件から遮へい水深を約30mm浅くした場合の線量は，ガータ上の高さで0.2mSv/h増加し，トロリ上では1mSv/h未満となる。
 - ・ トラブル発生時の復旧作業についても，計画線量（1mSv/日未満を目標）で作業ができる見込みである。

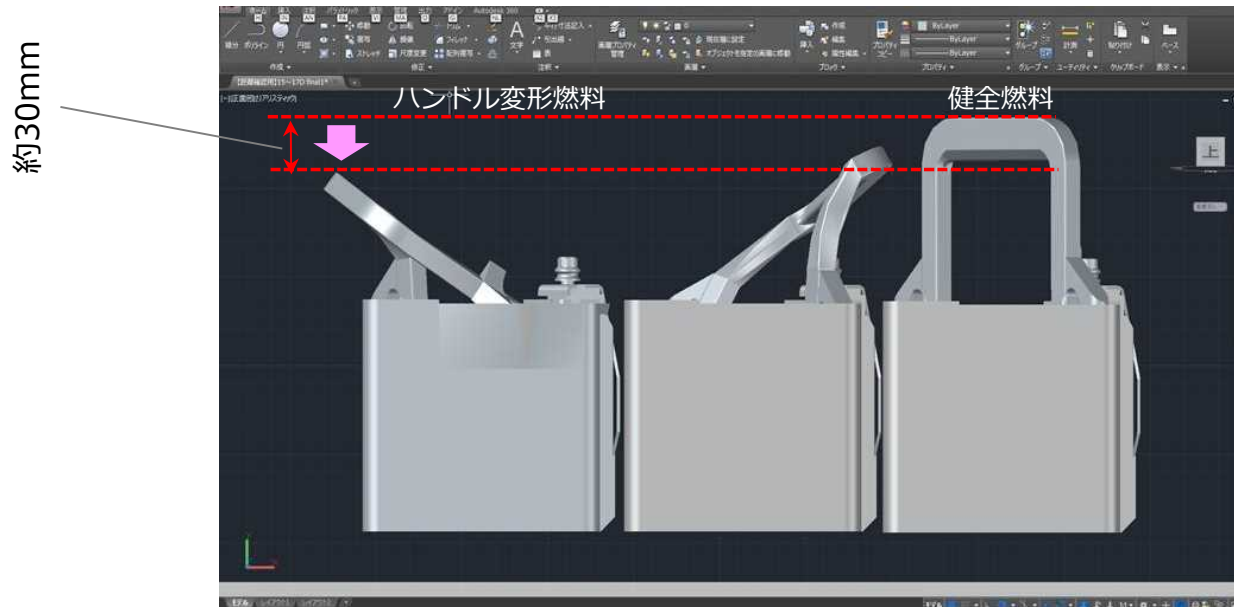


図 がれきによるハンドルの変形

大変形用掴み具の強度評価（1 / 3）

■ 評価対象部位

大変形用掴み具にかかる荷重を考慮し、評価対象部位を選定した。（図1参照）

■ 評価荷重

➤ クレーン構造規格第11条により、設計荷重は以下の通り。

$$\begin{aligned} \text{設計荷重 (FL')} &= \text{定格荷重 (1000kg)} \times \text{衝撃係数 (1.10)} \times \text{作業係数 (1.00)} \\ &= 1100\text{kg} \end{aligned}$$

また、過荷重試験※の荷重は、定格荷重の1.5倍であることから、

$$\text{荷重試験の計算荷重 (FL)} = \text{定格荷重 (1000kg)} \times 1.5 = 1500\text{kg}$$

FL > FL'より、発生応力を求める際に使用する計算荷重をFLとする。

※：過荷重試験は、クレーン構造規格では要求されないが社内検査にて実施し、既設と同様に定格荷重の1.5倍を試験荷重としている。なお、掴み具の使用状態において、衝撃荷重は発生しない。

■ 許容応力

➤ 材料の許容応力は、クレーン構造規格第3条に定める式を用いる。

- | | |
|------------------------------------|--|
| (a) 許容引張応力 (σ_{ta}) | : $\sigma_{ta} = \sigma_e / 1.5$ 又は $\sigma_t / 1.8$ のいずれか小さい値 |
| (b) 許容圧縮応力 (σ_{ca}) | : $\sigma_{ca} = \sigma_{ta} / 1.15$ |
| (c) 許容曲げ応力（引張側） (σ_{bat}) | : $\sigma_{bat} = \sigma_{ta}$ |
| (d) 許容曲げ応力（圧縮側） (σ_{bac}) | : $\sigma_{bac} = \sigma_{ta} / 1.15$ |
| (e) 許容せん断応力 (τ) | : $\tau = \sigma_{ta} / \sqrt{3}$ |

大変形用掴み具の強度評価（2 / 3）

- 強度計算結果を下表に示す。評価対象部位は、許容応力以下となることを確認した。

評価部位	規格材料	応力分類	応力値 [N/mm ²]	許容値 [N/mm ²]
フック根元 1	JIS G 4303 SUS304N2	曲げ応力	42.5	200
		せん断応力	14.7	132
		組合せ応力	49.5	230
フック根元 2		引張応力	14.5	230
		曲げ応力	79.6	200
		組合せ応力	94.1	230
フック用シャフト	JIS G 4303 SUS630	せん断応力	12	320
ストッパ	JIS G 4303 SUS630	せん断応力	4.2	320
取付ボルト	JIS G 4303 SUS304	引張応力	24.8	136

- 荷重伝達のロードパスより、評価対象部位を選定した。

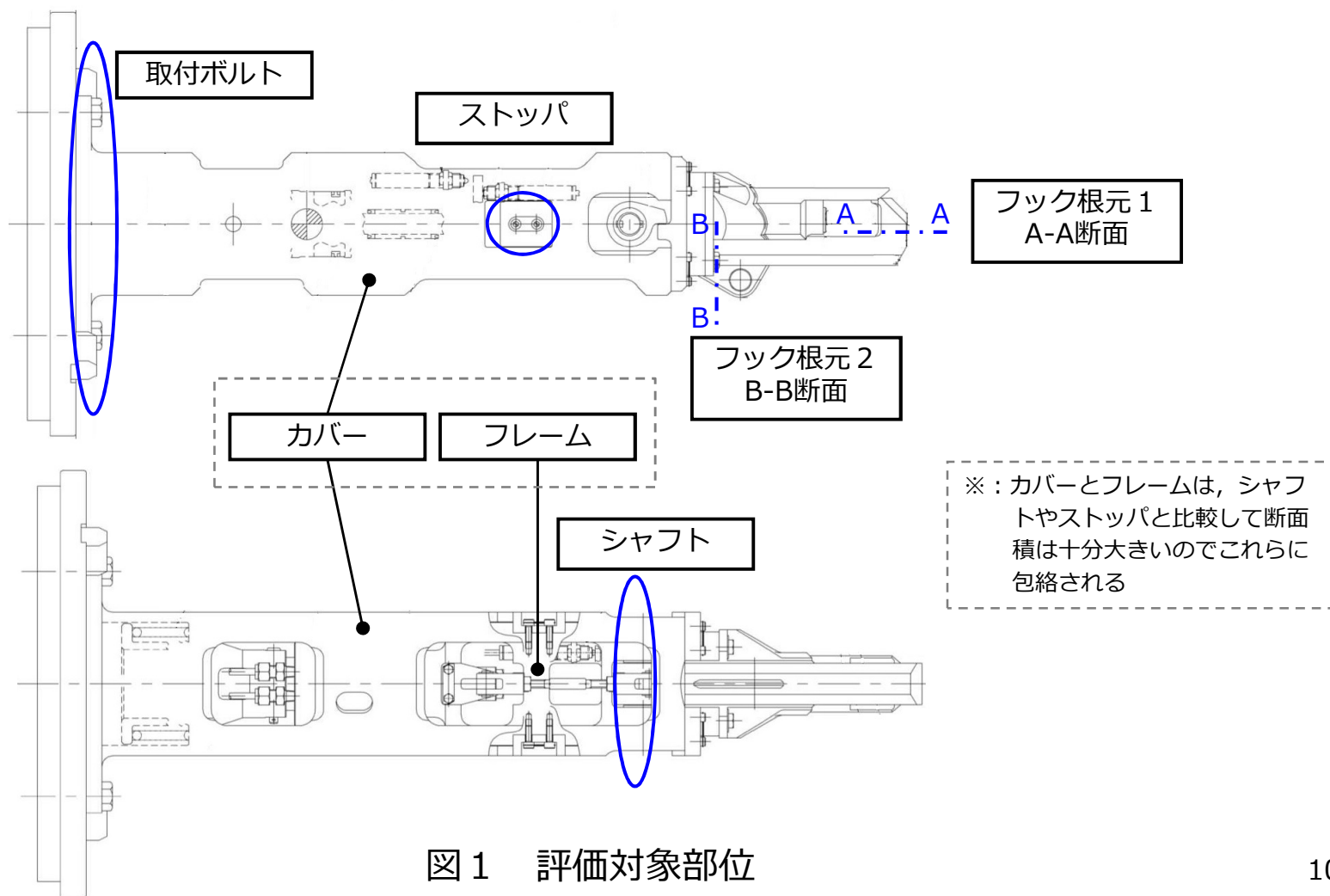
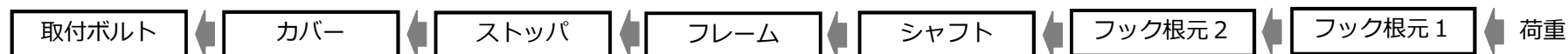


図1 評価対象部位

- フック根元 1
 - ① せん断応力： $\tau_1 = FL \times g / s_1$
 - ② 曲げ応力： $\sigma_{1b} = M_1 / Z_1$
 - ③ 組合せ応力： $\sigma_1 = \sqrt{(\sigma_{1b})^2 + 3\tau_1^2}$
 ここで、
 曲げモーメント： $M_1 = FL \times g \times L_1$ (1.77×10^5 N-mm)
 断面積： s_1 (1000mm^2)
 断面係数： Z_1 (4166.7mm^3)

- フック根元 2
 - ① 引張応力： $\sigma_{2t} = F_2 / S_2$
 - ② 曲げ応力： $\sigma_{2b} = M_2 / Z_2$
 - ③ 組合せ応力： $\sigma_2 = \sigma_{2t} + \sigma_{2b}$
 ここで、
 引張応力： $F_2 = FL \times g$ (1.48×10^4 N)
 断面積： s_2 (1020mm^2)
 断面係数： Z_2 (4625mm^3)
 曲げモーメント： $M_2 = FL \times g \times L_2$ (3.68×10^5 N-mm)

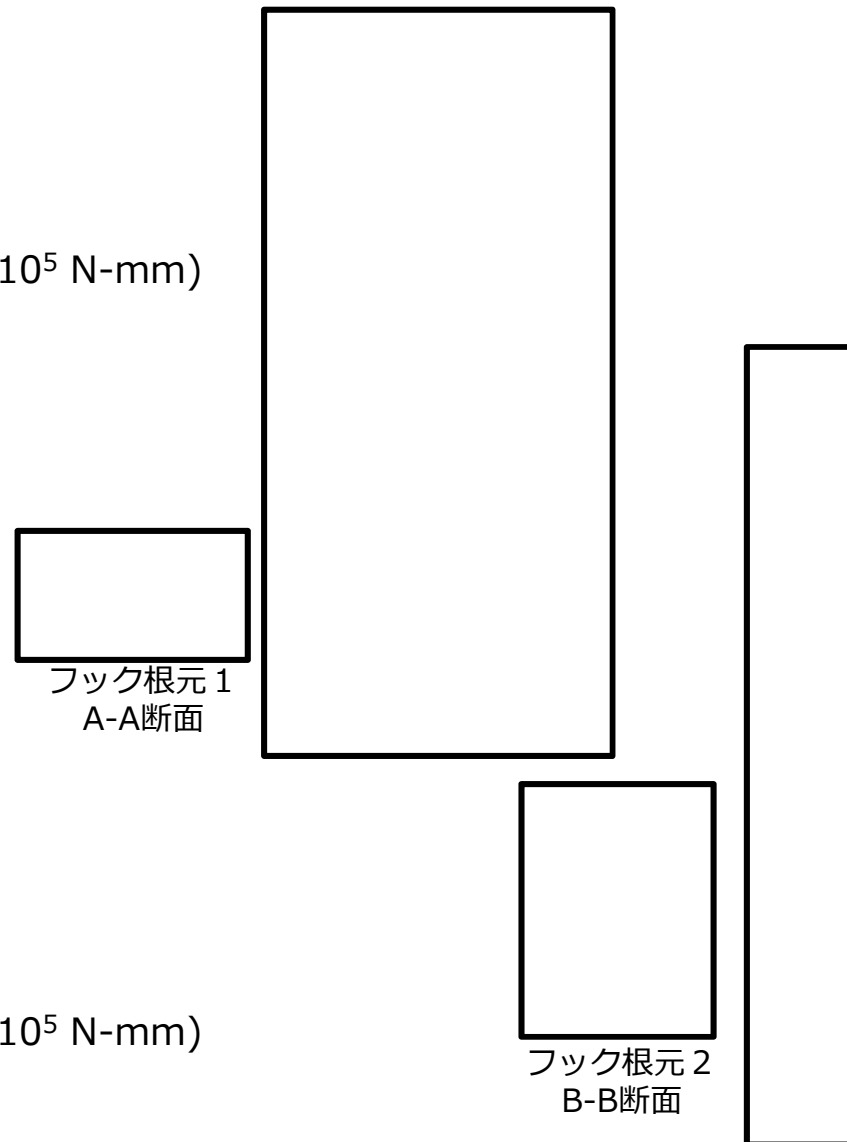


図1 フック評価断面位置

: 黒枠の内容は商業機密に属しますので公開できません。

大変形用掴み具の強度計算（2 / 2）

○ フック用シャフト

① せん断応力： $\tau_3 = FL \times g / (2 \times s_3)$

ここで、

断面積： s_3 (615.7mm²)

○ ストツパ

① せん断応力： $\tau_4 = FL \times g / (2 \times s_4)$

ここで、

断面積： s_4 (1766mm²)

○ 取付ボルト

① 引張応力： $\sigma_{5t} = W_5 / (n_5 \times S_5)$

ここで、

垂直荷重： $W_5 = FL \times g + \text{掴み具質量}$ (1.56 × 10⁴ N)

ボルト本数： n_5 (4本)

ねじ部有効断面積： S_5 (157mm²)



図2 フック用シャフト評価断面

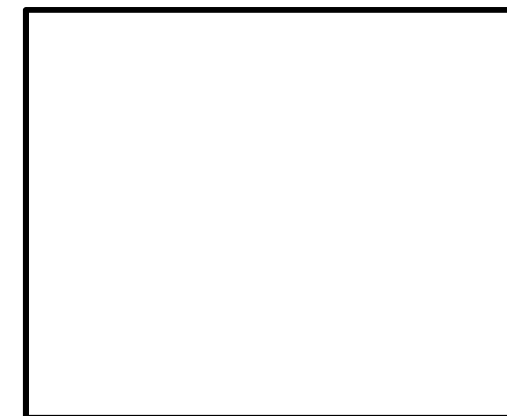


図3 ストツパ評価用断面積

大変形用掴み具の強度計算－パラメータサーベイ結果

- ハンドル変形燃料は、右図に示す方向から大変形用掴み具を入れ、フック（下記図の緑色の部分）で把持する。また燃料のハンドル断面は右図に示す形状であるため、大変形用掴み具のフックとハンドルの接触位置は、フックの根元に近い位置となる。
- ハンドル変形の考慮および計算荷重の設定を変更した場合の評価を実施を実施し、強度評価への影響を確認した。計算条件の変更および計算結果を下記に示す。

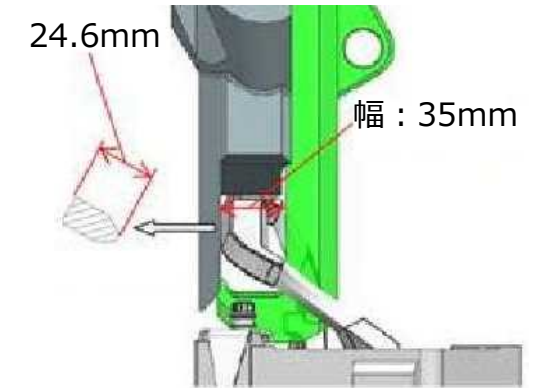


図 ハンドル燃料の把持

パラメータサーベイの結果、許容応力以下となり、ハンドル変形および計算荷重を変更しても許容荷重を満足することを確認した。

【計算条件の変更】

- ・ ケース1：ハンドル変形の考慮

条件変更； L_1 ：, L_2 ：

- ・ ケース2：計算荷重の変更（+ケース1）

条件変更；FL:1500→1650, L_1 ：, L_2 ：

【パラメータサーベイ結果】

評価部位	応力分類	応力値 [N/mm ²]	ケース1	ケース2	許容値 [N/mm ²]
フック根元1	曲げ応力	42.5	113.1	124.4	200
	せん断応力	14.7	14.7	16.2	132
	組合せ応力	49.5	116.0	127.6	230
フック根元2	引張応力	14.5	14.5	15.9	230
	曲げ応力	79.6	143.2	157.7	200
	組合せ応力	94.1	157.7	173.6	230

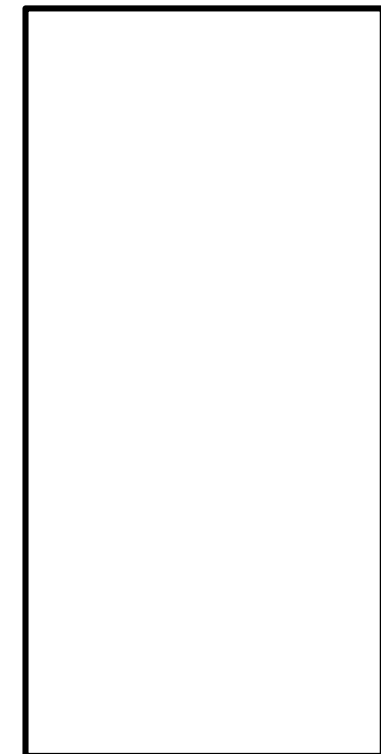


図 フック評価寸法¹³

：黒枠の内容は商業機密に属しますので公開できません。

大変形用掴み具の使用前検査項目

- 安全機能上、重要な機能として下表の検査を実施する。

現地検査

検査事項	検査項目		検査内容	判定基準
構造強度・耐震性	構造確認	外観確認	組み立てた状態における外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。
落下防止	機能確認		単一故障において燃料集合体を落下させないことを確認する。	駆動水圧喪失時にフックが開かない構造であること。
				動力源が喪失した場合においても燃料集合体を保持し続ける構造であること。

工場検査

試験・検査項目		試験・検査内容／判定基準
材料検査		外形構造図または強度計算書に記載されている主要部材が相違ない材料であること及びJIS等に規定された値を満足することをミルシートにて確認する。
外観検査		外形構造図と相違ないこと、使用上有害な変形・損傷・汚れがないこと及びボルト・ナット類の締結部に緩みがないことを目視にて確認する。
寸法検査		外形構造図に記載されている主要寸法が規定値内にあることを確認する。
重量検査		重量を測定し規定値内にあることを確認する。
過荷重試験		設計荷重の1.5倍（1500kg）の荷重を負荷し、損傷がないことを確認する。
電気試験	導通試験	ツール交換装置のコネクタ部よりリミットスイッチ回路が取扱説明書通りの配線であることを目視及びテスターにて確認する。
	絶縁抵抗試験	ツール交換装置のコネクタにて、リミットスイッチ全回路一括と対地間の絶縁抵抗値を測定し、絶縁性能に問題がないことを確認する。
	耐電圧試験	ツール交換装置のコネクタにて、リミットスイッチ全回路一括と対地間に電圧を印加し、絶縁破壊等の異常がないことを確認する。
漏えい試験		大変形用掴み具とツール交換装置を組み合わせた状態で、水グリコールを用いてハイドロ系統を加圧・保持し、大変形用掴み具のハイドロ系統が試験圧力に耐え、各継手から漏えいがないことを確認する。

工場検査

試験・検査項目		試験・検査内容／判定基準
単体機能試験	フック動作確認	大変形用掴み具とツール交換装置を組み合わせた状態で、ハイドロ系統に水グリコールを用いて動作圧力まで加圧し、掴み／放し動作を行い、フックの動作が滑らかであることを確認する。
	リミットスイッチ動作確認	大変形用掴み具とツール交換装置を組み合わせた状態で、ハイドロ系統に水グリコールを用いて動作圧力まで加圧し、操作盤及びクレーン操作にてリミットスイッチが動作することを確認する。
	メカニカルロックの機能確認	大変形用掴み具とツール交換装置を組み合わせた状態で、フックに荷重を加えた時に、操作盤にて放しを指示しても、フックが開かないことを確認する。
把持確認試験		大変形用掴み具とツール交換装置を組み合わせた状態で、模擬変形ハンドルを吊り上げられることを確認する。

現地検査

試験・検査項目		試験・検査内容／判定基準
外観検査		外形構造図と相違ないこと、使用上有害な変形・損傷・汚れがないこと及びボルト・ナット類の締結部に緩みがないことを目視にて確認する。
落下防止試験	機能確認	単一故障において燃料集合体を落下させないことを確認する。 <ul style="list-style-type: none"> ・駆動水圧喪失時にフックが開かない構造であること。 ・動力源が喪失した場合においても燃料集合体を保持し続ける構造であること。
組合せ試験		大変形用掴み具を燃料取扱機に据え付けた後、使用済燃料プール内で模擬燃料を取扱えることを確認する。

■ 3号機ハンドル変形燃料に関して記載の追加

<主な変更箇所>

5.3. 3号機におけるハンドル変形燃料の吊り上げに関する評価

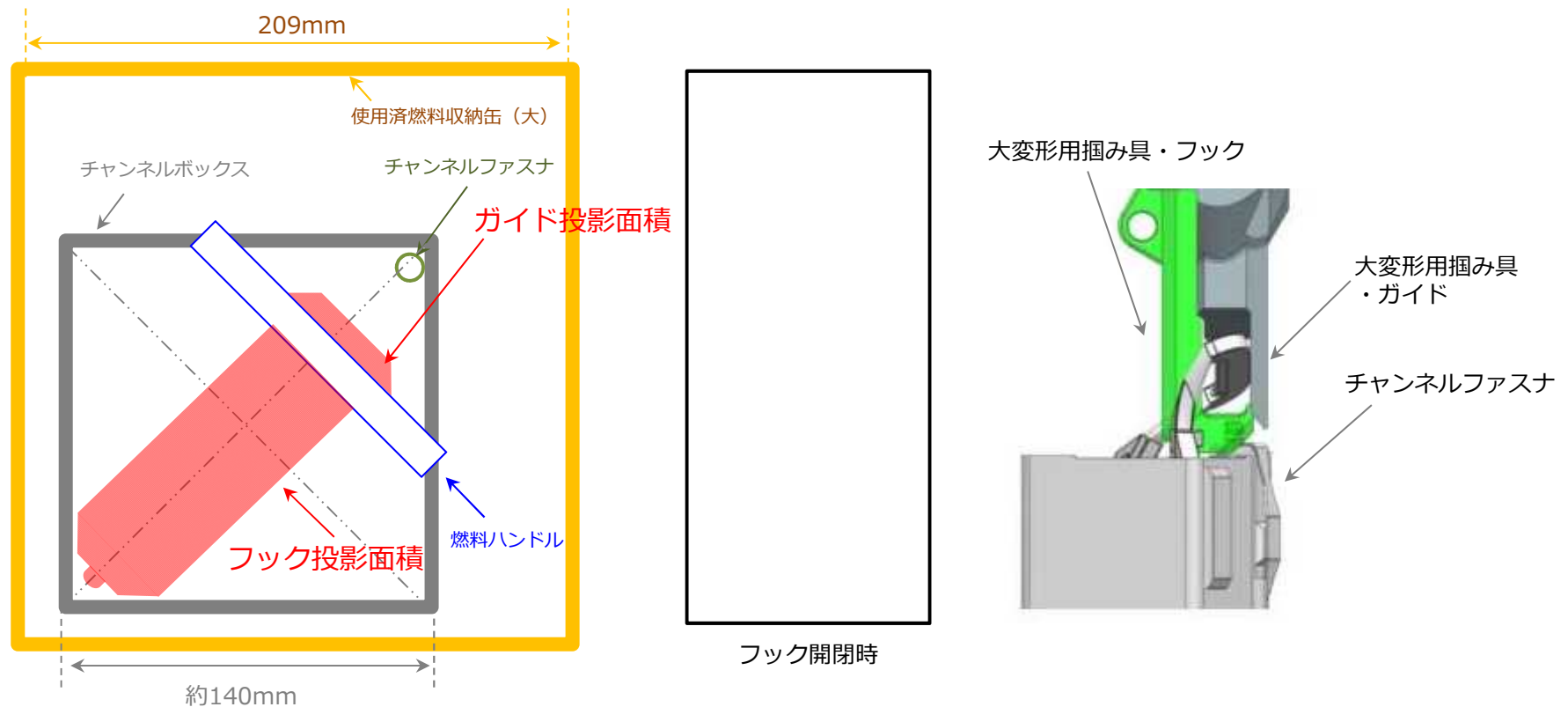
- ハンドル変形燃料の機械的強度に影響を与えない吊り上げ荷重の記載

6.2. 3号機における燃料の取り扱い

- ハンドル変形燃料を燃料取扱機を用いて取り出しを行うことを記載
- ハンドルの著しい変形等により現状の掴み具または大変形用掴み具で把持できないものは対象外であることを明記
- 事前にハンドル変形燃料の吊り上げ試験を実施し燃料とラックの干渉が解除された状態にして取り出すことを記載
- 吊り上げ荷重はハンドル変形の無い燃料と同様1tとすることを記載

ハンドル変形燃料の使用済燃料収納缶（大）への収納イメージ

- 3号機の大変形用掴み具を用いるハンドル変形燃料は、チャンネルファスナ側に倒れており、吊り上げ時に反ファスナ側からフックを開き燃料ハンドルを掴む。これにより、収納缶に収納後、燃料ハンドルを放す場合においてフックが開くスペースが確保される。
- 下図に収納缶に燃料を収納したイメージを示す。フックを開閉するには十分広いスペースがあるため、燃料が収納缶内で多少傾いた状態でも燃料ハンドルを放す際にフックの開閉に支障はない。



: 黒枠の内容は商業機密に属しますので公開できません。


- 共用プールにおいて、収納缶は以下の方法で取り扱う
 使用済燃料収納缶（小） FHMにて収納缶を把持する
 使用済燃料収納缶（大） 天井クレーン主巻にチェーンブロックを取り付けて把持する
- 収納缶取扱い時の安全対策は下表の通り行う。使用済燃料収納缶（大）の安全対策は、4号機に存在した変形燃料※の天井クレーンでの取扱いと同様

※：震災以前、取り扱い中にハンドルおよびチャンネルボックスが変形した燃料。4号機から取り出し、共用プールで保管中

安全対策項目	使用済燃料収納缶（小）	使用済燃料収納缶（大）
動力源喪失時の保持機能	巻上装置はFHMマストとする マストは電源断時においても保持する構造	巻上装置は手動チェーンブロックとする 天井クレーン主巻フックは電源断時においても保持する構造
吊具の二重化	FHMに準じる	主巻フックは二重のワイヤロープで燃料を保持する構造 主巻フックと吊具を取り付けるワイヤロープを二重化する
外れ防止		主巻フックは外れ止め装置を有する構造
過荷重防止		荷重計による荷重監視 巻き上げは手動とし、荷重を監視しながら実施
臨界防止		収納缶を1体ずつ取り扱う
遮へい		吊り上げ時に上限以上の吊り上げを阻止するためワイヤロープの長さを調節する

使用済燃料収納缶（大）吊具の動作機構

- 吊具のハンドル部（燃料ハンドルと同様の形状）と天井クレーンの主巻フックをワイヤロープ等により取り付ける。
- 手動チェーンブロックにより吊具を巻き下げ、ガイドブロックが収納缶上に着座すると、接続部に爪が適切に入る位置に調整される。
- 燃料取扱装置から供給されたエアにより、エアシリンダが作動し、シャフトが上下する。シャフトが下がることにより爪（4本）が外側に押し出され、また、シャフトが上がることにより爪が内側に戻る。
- 押し出された爪が接続部（4箇所）にはまり、吊具を吊り上げると、収納缶も同時に吊り上げられる。

 : 黒枠の内容は商業機密に属しますので公開できません。

■ 落下防止

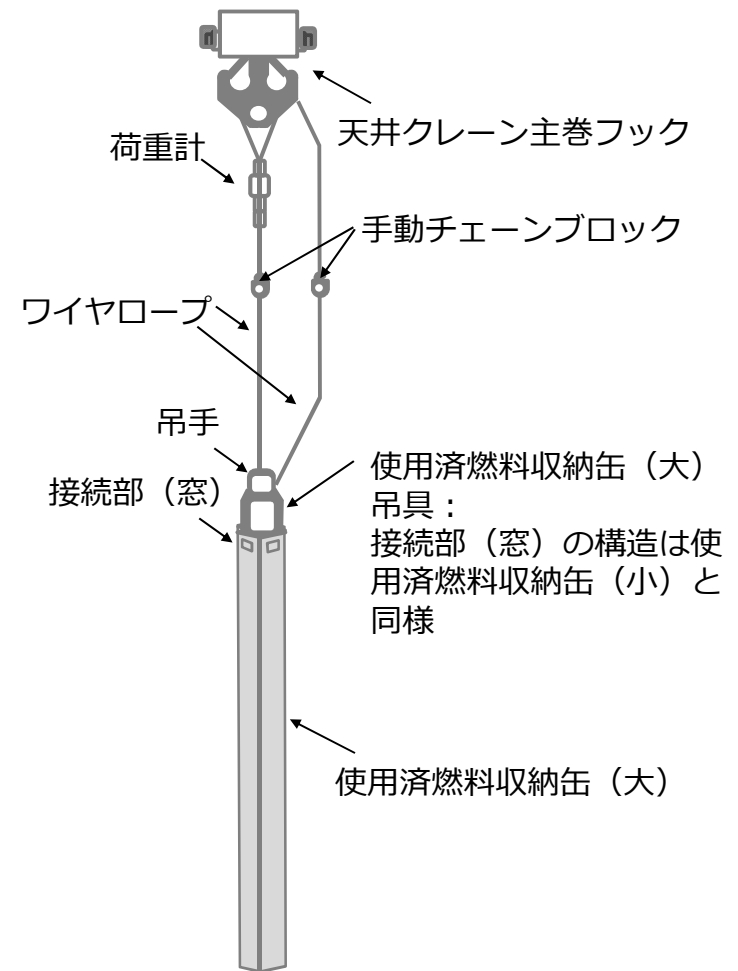
- 天井クレーン主巻フックと使用済燃料収納缶（大）吊具は、二重化されたワイヤロープ等で接続する。
- 吊具は、エアシリンダにエアを供給しない限り爪は作動しない構造のため、エア喪失時でもラッチ状態を維持し、荷重を保持することができる。
- また、エア喪失時に何らかの原因で爪が動いた場合に、爪が抜けないように爪先端に突起を設けてある。
- インジケータ及び水中カメラ映像により、確実にラッチ状態であることを確認し巻き上げ操作を行う。（爪の出し入れに連動してインジケータが上下）
- なお、幾何学的に4本すべての爪が接続部に挿入されない限りラッチ状態にならない構造。（吊具が傾くななどし、爪が1本でも挿入できなければ残りの爪も挿入されず、インジケータも下がりきらない（アンラッチ状態））

■ 臨界防止

- 収納缶を1本ずつ取り扱う構造。

■ 遮へい

- 遮へい水深1200mm以上を確保した状態で取り扱う。



使用済燃料収納缶（大）取扱い概念図

■ 評価対象部位

荷重伝達のロードパスを考慮し、主要な部位について評価。評価対象部位を図1に示す。

■ 評価荷重

➤ 設計荷重は以下の通り。

設計荷重 (F) = 質量 × Z方向の加速度（クレーン構造規格第11条により算出）

■ 許容応力

材料の許容応力は、クレーン構造規格第3条を準用して算出する。但し、「降伏点又は耐力」及び「引張強さ」は、「設計建設規格（JSME S NC-1-2005/2007）の付録材料図表に記載されている値から算出した（設計温度66℃における値を用いた）。

- (a) 許容引張応力 (σ_{ta}) : $\sigma_{ta} = \sigma_e / 1.5$ 又は $\sigma_t / 1.8$ のいずれか小さい値
- (b) 許容圧縮応力 (σ_{ca}) : $\sigma_{ca} = \sigma_{ta} / 1.15$
- (c) 許容曲げ応力（引張側） (σ_{bat}) : $\sigma_{bat} = \sigma_{ta}$
- (d) 許容曲げ応力（圧縮側） (σ_{bac}) : $\sigma_{bac} = \sigma_{ta} / 1.15$
- (e) 許容せん断応力 (τ) : $\tau = \sigma_{ta} / \sqrt{3}$

使用済燃料収納缶（大）吊具の強度評価（2 / 3）

- 強度計算結果を下表に示す。評価対象部位は、許容応力以下となることを確認した。

評価部位	規格材料	応力分類	応力値 [MPa]	許容値 [MPa]
①吊手	JIS G 4304 SUS304	引張応力	26.1	125
		せん断応力	52.2	72
②爪	JIS G 4304 SUS304	曲げ応力	58.4	108
		せん断応力	16.2	72

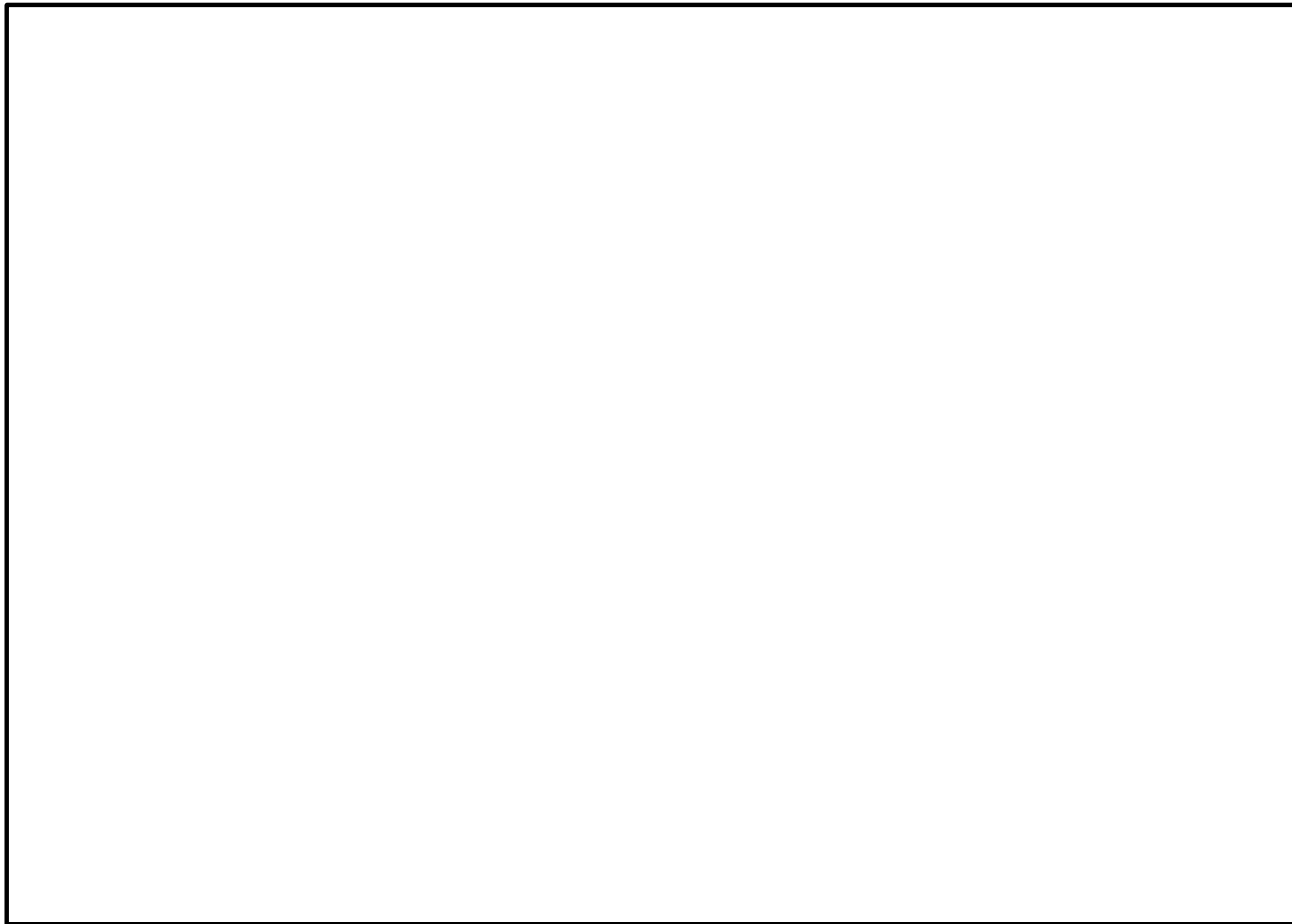



図1 使用済燃料収納缶（大）吊具の応力評価部位

 : 黒枠の内容は商業機密に属しますので公開できません。

使用済燃料収納缶（大）吊具の強度計算

○ 評価点①：吊手

① 引張応力： $\sigma_{1t}=F/A_{1t}$

② せん断応力： $\tau_1=F/A_{1s}$

ここで、

収納缶吊具に作用する荷重：F [N]

$$F=(m_{\text{can}}+m_{\text{fuel}}+m_w+m_j)\times G_z$$

m_{can} ：収納缶1体の質量（）, m_{fuel} ：燃料体1体の質量（）,

m_w ：収納缶1体に含まれる内部水の質量（）,

m_j ：収納缶吊具の質量（）,

G_z ：Z方向の加速度（衝撃係数1.6×作業係数1.2；1.92G=18.83m/s²）

評価点①の引張荷重支持面積： A_{1t} （）

評価点①のせん断荷重支持面積： A_{1s} （）

○ 評価点②：爪

① 曲げ応力： $\sigma_{2b}=M_2/Z_2$

曲げモーメント： $M_2=F\times l_2/4$

② せん断応力： $\tau_2=F/A_{2s}$

ここで、

収納缶吊具に作用する荷重：F [N]

評価点②に作用する曲げモーメント： M_2 [N・mm]

評価点②の断面係数： Z_2 （）

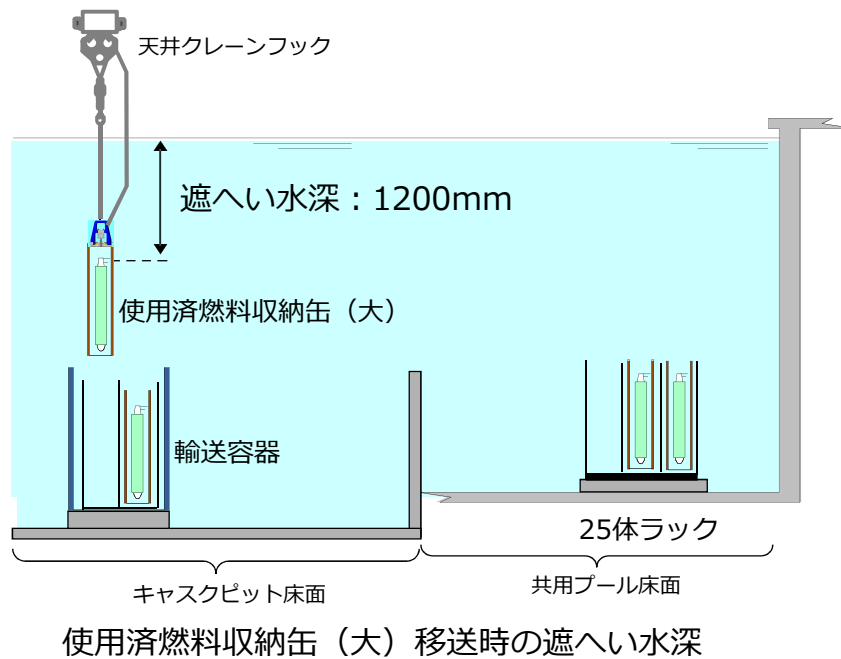
爪支持部と収納缶内面との距離（）

評価点②のせん断荷重支持面積： A_{2s} （）

使用済燃料収納缶（大）取扱い時の遮へい水深について

- 右図のように、ワイヤロープ等により使用済燃料収納缶（大）吊具と天井クレーンの主巻フックを取り付ける。
- 天井クレーン主巻は常用上限位置で固定し、チェーンブロックで高さ調整を行う。
- チェーンブロックは最大巻き上げ時でも遮へい水深※ 1200mm以上が確保されるよう調整し、収納缶移送時の線量評価より作業員への被ばく管理上問題ないことを確認している。
- 設計通り遮へい水深が確保されることを社内検査にて確認する。

※：プール水面から燃料ハンドル下面までの距離と定義



天井クレーンと使用済燃料収納缶（大）の取付け概念図

使用済燃料収納缶（大）移送時の線量評価

- 放射線業務従事者等の立入る可能性のある区域の線量率については、表－1 の設計基準が達成されるように遮へい設計を実施している。
- 使用済燃料の線源強度を表－2 に示す。
- 収納缶移送時の計算モデルを図1 に示す。線源は使用済燃料1 体とし、線源形状は燃料有効長より算出した直方体モデルとする。評価点は、燃料取扱装置における作業員の立ち位置であり、遮へい水深は1200mm に設定する。
- 収納缶移送時の線量率を表－3 に示す。評価点における線量率は、当該区分に対する基準線量を満足する。また、現状予定している移送は8 体であることから作業員への被ばくは小さく、被ばく管理上問題ない。

表－1 基準線量率

区分		設計基準線量率
非管理区域	A	0.006mSv/h以下
管理区域	B	0.01mSv/h以下
	C	0.06mSv/h以下
	D	0.12mSv/h以下
	E	0.5mSv/h以下
	F	0.5mSv/hより大

表－2 使用済燃料の線源強度

ガンマ線エネルギー (MeV)	線源強度 (MeV/(W・s))
1.0	1.2×10^9
2.0	3.6×10^6
3.0	6.4×10^6

表－3 収納缶移送時の線量率

評価点	区分	線量率(mSv/h)
燃料取扱装置 作業員立ち位置	F	9.0E-02

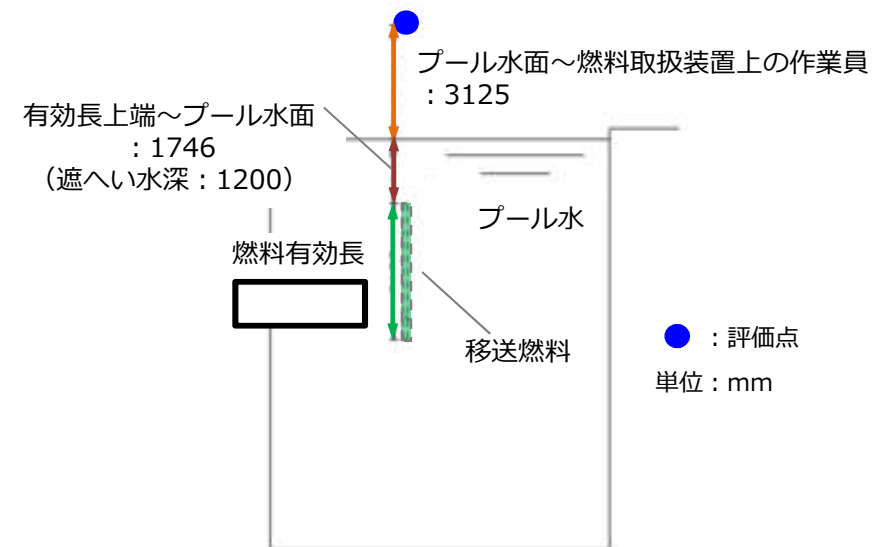
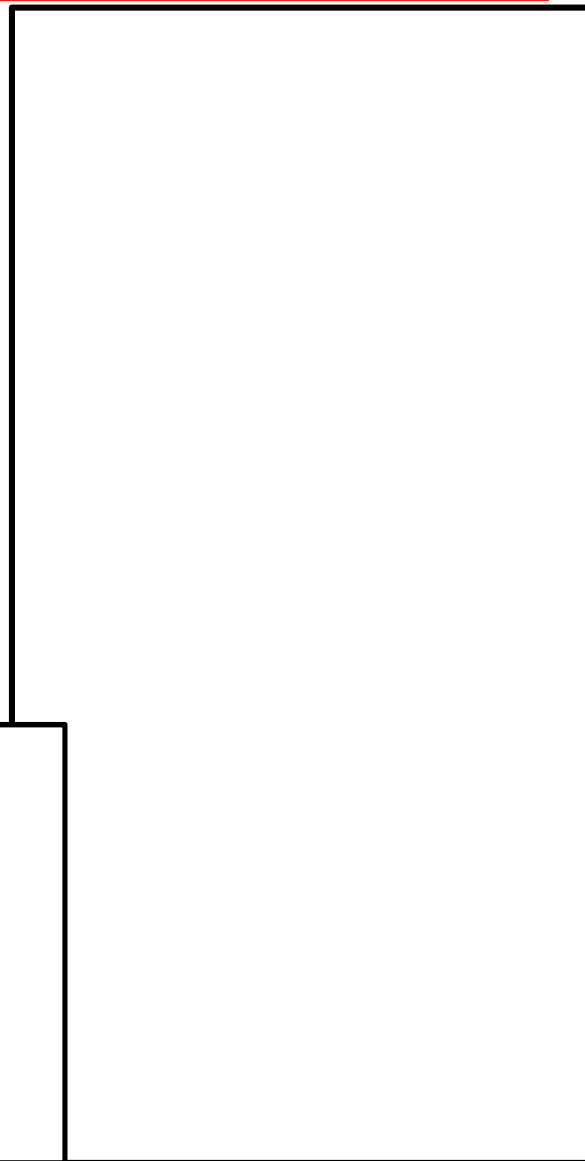


図1 計算モデル

使用済燃料収納缶（大）移送作業について（1 / 2）

【作業前準備】


- 使用済燃料収納缶（大）吊具の準備
 - 吊具にエアホースを取付ける。
 - 吊具の操作盤にて「アンラッチ」及び「ラッチ」を操作し、動作に異常がないことを確認する。
- 取付け冶具の準備
 - 吊具と天井クレーンフックにチェンブロック等の機器を取付ける。
- 荷重計の準備
 - 荷重計に何も吊っていない状態で、ゼロ調整を行う。



収納缶吊具（アンラッチ）

収納缶吊具（ラッチ）

天井クレーンと使用済燃料収納缶（大）の取付け概念図 28

 : 黒枠の内容は商業機密に属しますので公開できません。

使用済燃料収納缶（大）移送作業について（2 / 2）

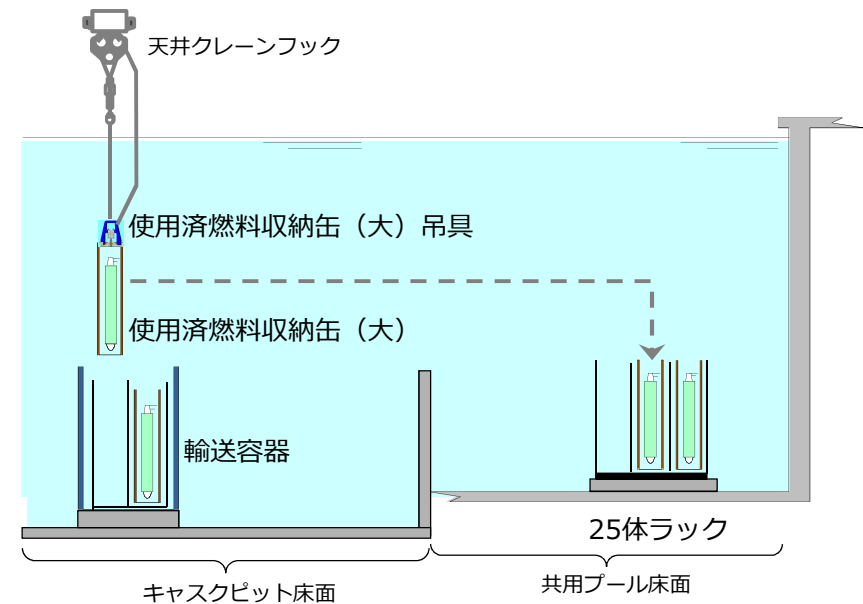
【 収納缶移送 】

■ 収納缶の吊上げ

- 天井クレーンで使用済燃料収納缶（大）吊具を収納缶の直上に移動する。
- チェーンブロックを巻き下げ、吊具を収納缶に挿入する。なお、操作は水中カメラで監視しながら行う。
- 吊具が着座したことをワイヤロープのたるみ、水中カメラで確認する。
- 吊具の着座を確認後、収納缶をラッチする。ラッチは、インジケータの状態にて確認する。
- 収納缶のラッチを確認後、チェーンブロックを巻き上げ、収納缶を吊り上げる。チェーンブロックの巻き上げ中は荷重計の荷重を常時監視し、過大な荷重が発生していないことを確認する。

■ 収納缶を25体ラックへ移動

- チェーンブロックを完全に巻き上げる。
- 天井クレーンで収納缶を25体ラックの所定の位置に移動する。
- チェーンブロックを巻き下げ、収納缶を着座させる。着座したことをワイヤロープのたるみ、水中カメラで確認する。
- 収納缶の着座を確認後、吊具をアンラッチし、吊具を収納缶から引き抜く。アンラッチは、インジケータの位置で確認する。



使用済燃料収納缶（大）移送作業

- 使用済燃料収納缶（大）吊具の使用前検査項目
安全機能上、重要な機能として下表の検査を実施する。

現地検査

検査項目		検査内容	判定基準
構造確認	外観確認	各部の外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。
	据付確認	組み立てた状態における据付状態を確認する。	ワイヤーロープ等により吊具と天井クレーンの主巻フックが取り付けられていること。
機能確認	取扱確認	単一故障において使用済燃料収納缶（大）を落下させないことを確認する。	動力源（空気）が喪失した場合においても使用済燃料収納缶（大）を保持し続けること。

工場試験・検査

試験・検査項目		試験・検査内容／判定基準
材料検査		使用材料が要求仕様と相違ない材料であることをミルシートにより確認する。
構造検査	寸法検査	各部の寸法が要求仕様を満たすことを確認する。
	外観検査	肉眼による外観検査の結果、機能・性能に影響を及ぼす恐れのある欠陥がないこと（錆・亀裂等）。
吊上げ荷重検査		収納缶の吊上げ時質量の2倍以上に相当する荷重を吊具に負荷し、吊具に変形等の異常がないことを確認する。
取扱確認試験		<p>収納缶を立て起こし、起立状態にした収納缶の吊上げ作業を実施。左記動作中に以下項目を確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・吊具の爪の出し入れがエア駆動及び手動駆動にて容易にできること。 ・収納缶上部の接続部に吊具の爪が挿入でき、ラッチできること。 ・吊具が収納缶に取り付いたことを目視で確認できること。 ・吊具を使用して収納缶の立て起こし、吊上げ作業が可能であること。 ・エア供給停止状態でも収納缶が吊具により保持されていること。

現地試験・検査

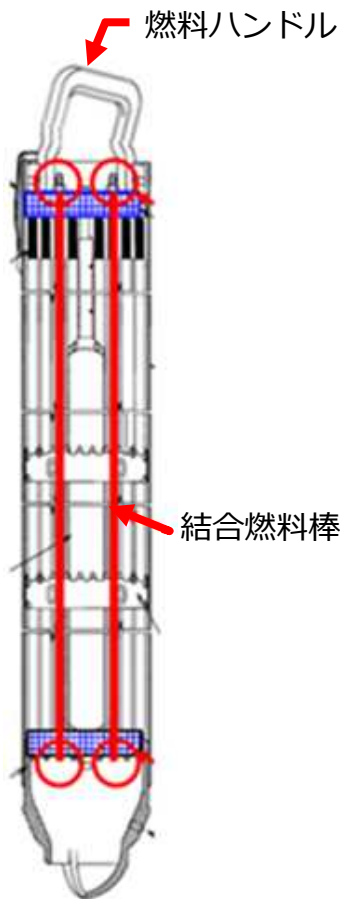
試験・検査項目		試験・検査内容／判定基準
構造検査	外観確認	肉眼による外観検査の結果，機能・性能に影響を及ぼす恐れのある欠陥がないこと（錆・亀裂等）。
取扱確認試験		<ul style="list-style-type: none"> ・ 収納缶の接続部にラッチでき，収納缶を吊上げられること。 ・ エア喪失時に収納缶を保持できること。
機能検査	収納缶挿入検査	収納缶の代表 1 本を破損燃料用輸送容器（2体）及び使用済燃料貯蔵ラック（25体）内に挿入し，異常の無いことを確認する。
	遮へい水深確認検査	遮へい水深を確保した状態で収納缶を取り扱えることを確認する。

【参考】 実施計画Ⅱ.2.11 添付資料-1-3の記載内容
(8/26 ハンドル変形燃料吊り上げ試験
に係る面談資料をまとめ直したもの)

ハンドル変形燃料の吊り上げ荷重について（概要）

- 燃料吊り上げ時は、結合燃料棒と燃料ハンドルの二つの部材が荷重を負担する。
- ハンドル変形燃料について、上記二つの部材が負担できる荷重を下記のとおり確認した。

＜結合燃料棒＞（→がれき衝突解析）



燃料吊り上げ時の荷重負担部材

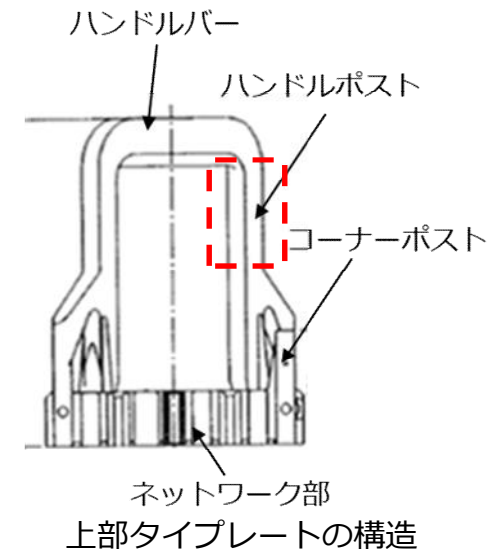
- ① 結合燃料棒は1本あたり1t以上の強度を有することを浸漬試験後の引張試験から確認している。
- ② 燃料吊り上げ時のバランスを考慮すると、3本以上の結合燃料棒でバランスを保つ状態であれば、結合燃料棒上部に大きな曲げモーメントが作用せずに吊り上げ可能である。
- ③ がれき衝突解析の結果、ハンドル部に衝撃を受けた燃料は90度のハンドル変形を考慮しても、4本の結合燃料棒が破損せずに吊り上げ荷重を負担できると判断できる。（なお、結合燃料棒の健全性判断基準は、9×9燃料導入時における被覆管（照射材）の照射後試験施設での引張試験データに基づき塑性歪2.8%以下と設定。）
- ④ また、実機における外観観察より、ハンドル変形燃料の倒れ角度は最大で60度であり、90度まで変形しているものはないため、結合燃料棒のうち少なくとも4本は吊り上げ荷重を負担できると考える。
- ⑤ ハンドル部だけでなくチャンネルファスナ（CF）にがれきが衝突してCFおよびその近傍のチャンネルボックスが変形している燃料（CB変形燃料）が1体存在する。当該燃料については、評価の結果、CF近傍の結合燃料棒の変形が大きい可能性がある。ただし、水中カメラ映像を確認した結果、4本以上の結合燃料棒で吊り上げ可能な状態である。
- ⑥ 以上より、ハンドル変形燃料及びCB変形燃料は4本の結合燃料棒が破損せずに吊り上げ荷重を負担できるため、保守的に中性子照射による結合燃料棒の伸びのバラツキを考慮したとしても、少なくとも3点以上での吊り上げになることから、結合燃料棒全体では1tは問題なく吊り上げられるものとする。

ハンドル変形燃料の吊り上げ荷重について（概要）

＜燃料ハンドル部＞（→引張試験）

- ① ハンドル部は2本のハンドルポストで荷重を支える構造である。
- ② ハンドルポストの断面形状を模擬した試験片1本に初期変形を与え、引張方向に荷重（ $13\text{kN}\approx 1326\text{kgf}$ 、 $26\text{kN}\approx 2651\text{kgf}$ ）※を加えたところ、変形部に有意な亀裂は無かった。
- ③ また、実機形状のハンドル部で同様に初期変形を与え、引張方向に荷重（ $13\text{kN}\approx 1326\text{kgf}$ 、 $26\text{kN}\approx 2651\text{kgf}$ ）※を加えても、同様に変形部に有意な亀裂は無かった。
- ④ 以上より、吊り上げ荷重を健全燃料と同等の1tの制限値とした場合、実機運用時の誤差等※を考慮に入れてもハンドル部の耐荷重に2倍以上の余裕がある。

※：FHM荷重計の誤差，温度条件等を考慮。荷重1tに対して最大+0.3t程度。



がれき衝突解析 ～解析目的, 解析条件～

<解析の目的>

- 燃料ハンドル部へのがれき衝突を模擬した解析を行い、ハンドル変形燃料の吊り上げに寄与する燃料棒への影響を確認する。

<解析条件>

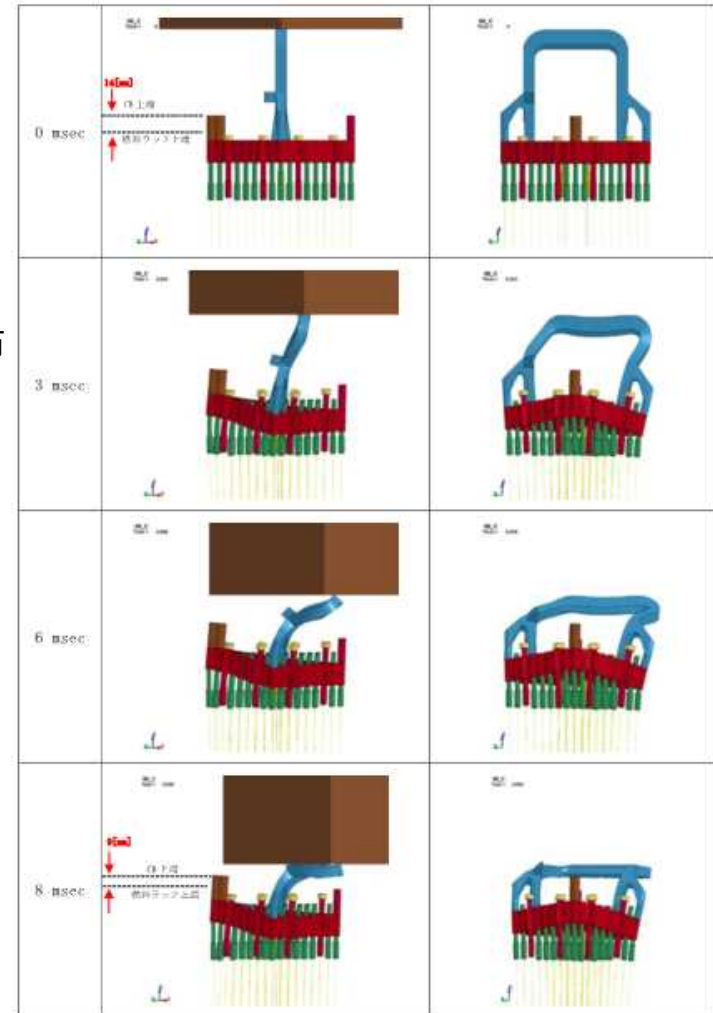
(評価手順・条件)

- ・ ハンドル変形燃料はCF側又は反CF側にハンドルが変形しており、がれきが斜めに衝突したと考えられる。
- ・ そのため、斜め衝突のケース（斜め45°）で衝突解析を主として行い、保守的にハンドルが90°近くまで変形するよう重量・速度条件を調整したうえで、燃料棒の塑性歪分布の傾向を確認する。
(念のため、斜め衝突以外の評価条件においても塑性歪分布の傾向を確認する。)

	がれき重量(t)	がれき衝突速度(m/s)	がれき衝突角度	燃料型式
条件①	1	21	斜め45°	9×9燃料 (A型)
条件②	1	21	垂直	9×9燃料 (A型)
条件③	4.5	12	垂直	9×9燃料 (A型)
条件④	1	21	垂直	新型8×8ジルコニウムライナ燃料

(解析コード)

- ・ LS-DYNA (3次元非線形衝撃応答解析コード)



がれき衝突時の時刻歴解析結果 (条件①)

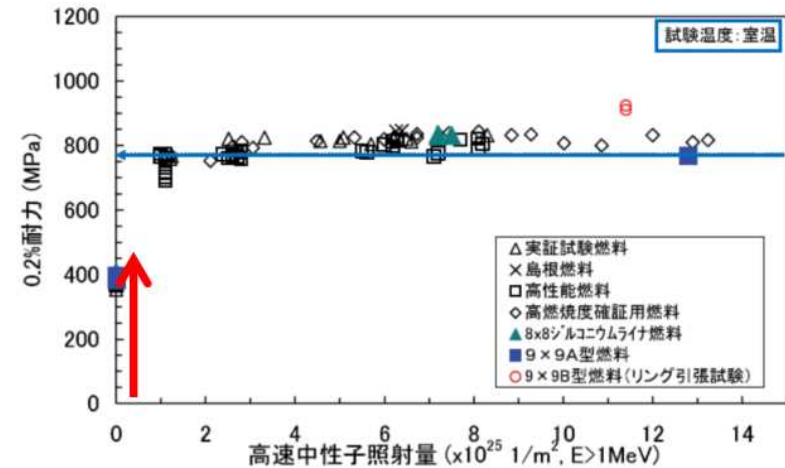
がれき衝突解析 ～解析条件～

<解析条件（続き）> (物性値)

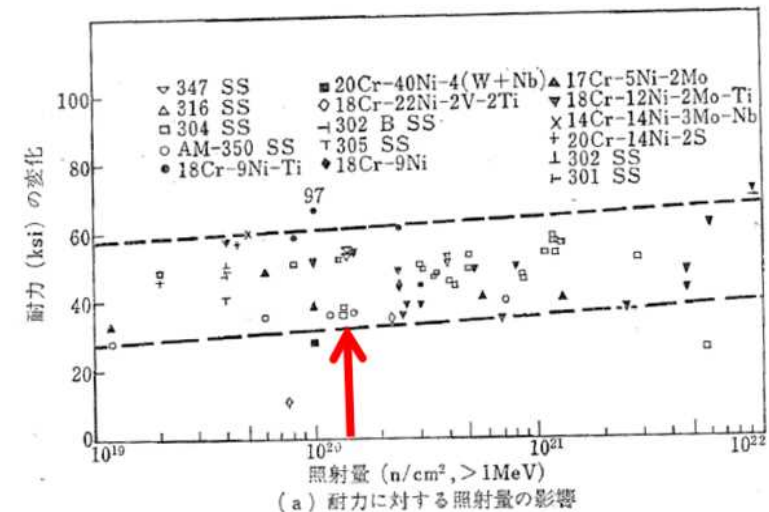
- 燃料集合体を構成する部材の大部分にジルカロイまたはステンレスが使用されており、いずれも中性子照射により強度が増大する。
- 原子炉内における5サイクル分の中性子照射量を評価した結果、燃料棒の上部端栓（ジルカロイ）は $0.2E+25n/m^2$ 、上部タイプレート（ステンレス）は $1.3E+20n/cm^2$ ($0.1E+25n/m^2$) となり、いずれも未照射材に近い照射量であることを確認した。
- 未照射材は照射材と比較して降伏応力は低く、また、より大きな歪み量で破断に至る。
- 今回、がれき衝突解析では、がれき重量・衝突速度を解析ケース毎に固定した評価のため同じ衝突エネルギーであれば未照射材の降伏応力を用いた方がより歪み量が多くなる。そのため、上部端栓と上部タイプレートは保守的に未照射材の降伏応力で評価した。
- 一方、破断歪は照射材の方がより少ない歪み量で破断に至るため照射材の物性値（破断歪）で評価した。

燃料集合体の各部材の基本物性モデル

部材	基本物性モデル
上部タイプレート	ステンレス(未照射材)
上部端栓	ジルカロイ(未照射材)
被覆管	ジルカロイ(照射材)
下部端栓	ジルカロイ(照射材)
下部タイプレート	ステンレス(照射材)
チャンネルボックス	ジルカロイ(照射材)



ジルカロイ強度の照射量依存性

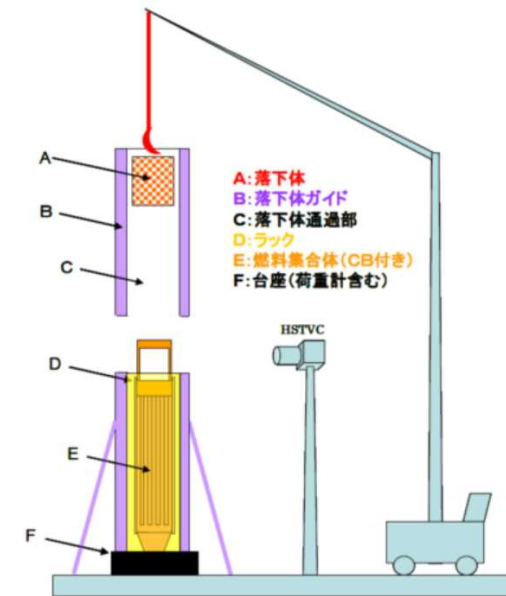


ステンレス強度の照射量依存性

がれき衝突解析 ～試験結果の再現性～

<がれき落下衝撃試験>

- ラック内に貯蔵された燃料へのがれき落下影響を解析評価するために、模擬燃料体を用いたがれき落下試験を下記条件で実施した。
(燃料型式：9×9燃料（A型），落下体質量：約100kg，落下高さ：5m)
- 試験の結果，下記写真に示す通り燃料ハンドルが大きく変形し，燃料集合体の第8スパンの燃料棒にたわみが発生したものの，ヘリウムリーク試験により被覆管には破損が無いことを確認した。



がれき落下衝撃試験イメージ図

<再現解析結果>

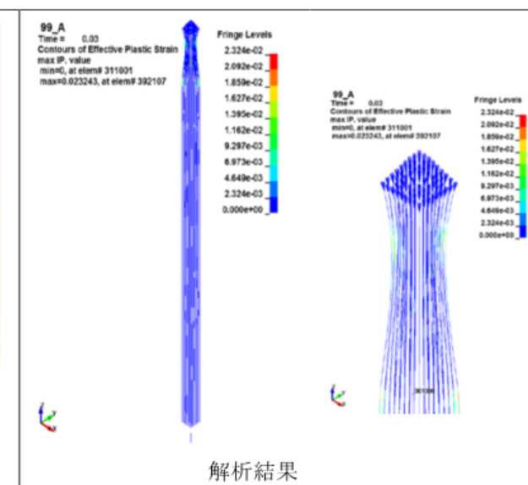
- LS-DYNAを用いた解析では，燃料集合体の各部材を下記要素タイプにモデル化したうえでがれき落下試験と同じ条件で再現解析を行った。
- その結果，試験結果と燃料ハンドル，燃料集合体上部（第8スパン）の燃料棒のたわみ等，変形傾向はほぼ一致していることを確認した。

燃料集合体の各部材の要素タイプ

対象部位	要素タイプ
上部タイプレート (ハンドル、ネットワーク、ファスナボ スト、コーナーポスト)	ソリッド要素
上部タイプレート (上記以外)	シェル要素
上部端栓	ソリッド要素
通常燃料棒	はり要素
部分長燃料	はり要素
ウォータロッド	はり要素
LTP (ネットワーク)	ソリッド要素
LTP (ネットワーク以外)	シェル要素
チャンネルボックス	シェル要素



試験結果



解析結果

試験結果と解析の比較

がれき衝突解析 ～解析結果～

- がれき衝突解析の結果、いずれの条件においても燃料棒の上部端栓部にのみ塑性歪が発生し、被覆管部、下部端栓部に塑性歪は見られなかった。
- CF側と反CF側の結合燃料棒（上部端栓部）4本の塑性歪はいずれも2.8% *1未満であることから、実力的には吊り上げ時に荷重を負担できるものとする。この場合、中性子照射による結合燃料棒の伸びのバラツキを考慮したとしても、少なくとも3点以上での吊り上げのため、結合燃料棒全体では1tは問題なく吊り上げられる*2ものとする。

CF側
(単位%)

位置	A	B	C	D	E	F	G	H	J	
1	1.9	1.2	1.7	1.5	1.6	1.4	1.6	1.7	1.9	
2	1.4		1.3	1.2		1.5	1.7		1.9	
3	2.0	1.6	1.3	1.1	1.2	1.3	1.7	1.7	1.4	
4	3.2	1.9	1.4	0.9		WR 1.1	1.7	1.8	1.8	
5	3.2		1.8				1.5		1.3	
6	4.2	4.2	2.3			WR 1.9	1.5	1.4	1.0	0.8
7	4.5	4.7	4.6	3.6	2.2	1.6	1.3	0.7	0.3	
8	5.3		4.6	4.4		1.7	1.0		0.4	
9	5.5	4.9	3.9	4.4	3.4	1.5	0.5	0.5	0.3	

反CF側

上部端栓の塑性歪分布 (条件①)
(1t, 21m/s, 斜め45°, 9x9A)
■ : 結合燃料棒

CF側
(単位%)

位置	A	B	C	D	E	F	G	H	J	
1	1.5	1.8	2.6	3.5	4.0	4.7	5.0	5.6	5.7	
2	1.8		1.8	2.1		4.5	5.5		5.1	
3	2.5	1.8	1.8	1.8	2.4	2.6	4.7	4.8	13.9	
4	3.4	2.1	1.8	1.3		WR 2.9	3.9	4.4	4.9	
5	4.0		2.4				2.5		3.7	
6	4.3	4.5	2.5			WR 2.9	1.9	1.7	1.6	1.4
7	4.9	5.3	4.7	3.9	2.5	1.7	1.4	0.9	0.3	
8	5.6		4.8	4.4		1.6	0.9		0.3	
9	5.6	5.2	14.2	4.8	3.7	1.4	0.3	0.3	0.1	

反CF側

上部端栓の塑性歪分布 (条件②)
(1t, 21m/s, 垂直, 9x9A)
■ : 結合燃料棒

CF側
(単位%)

位置	A	B	C	D	E	F	G	H	J	
1	1.7	1.3	2.1	2.8	3.6	4.1	4.0	4.7	5.2	
2	1.3		1.3	1.4		4.3	4.5		4.4	
3	2.1	1.3	1.3	1.1	1.6	1.8	4.4	4.0	13.5	
4	2.8	1.4	1.2	0.8		WR 1.9	3.2	3.9	4.0	
5	3.5		1.5				1.6		2.8	
6	3.9	4.1	1.8			WR 1.9	1.1	1.0	0.9	0.8
7	3.8	4.3	4.2	3.1	1.6	1.0	0.8	0.5	0.2	
8	4.7		4.0	3.7		0.9	0.5		0.3	
9	5.2	4.3	14.5	3.9	2.7	0.8	0.3	0.3	0.2	

反CF側

上部端栓の塑性歪分布 (条件③)
(4.5t, 12m/s, 垂直, 9x9A)
■ : 結合燃料棒

CF側
(単位%)

位置	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0.1	0.2	0.1	0.7	1.3	3.4	4.4	6.9
2	0.2	1.2	0.3	0.7	1.0	1.9	1.7	2.1
3	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	2.1	0.5	2.5
4	0.7	0.9	0.4	0.1	2.8	0.2	3.7	0.1
5	1.7	1.5	0.6	3.3	0.0	0.1	0.2	1.6
6	4.1	2.6	2.1	0.1	0.1	0.2	0.2	1.0
7	5.5	2.2	1.3	3.8	1.7	0.2	0.3	0.2
8	9.9	4.0	4.4	1.5	2.9	0.3	0.2	0.2

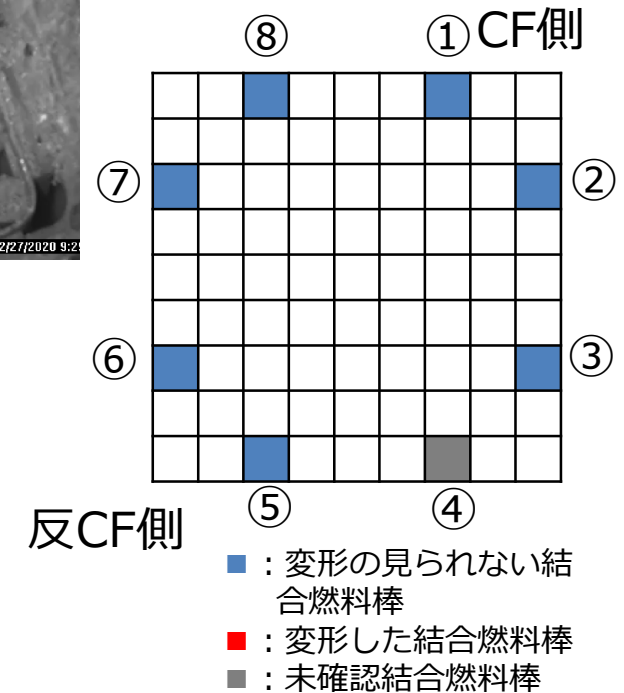
反CF側

上部端栓の塑性歪分布 (条件④)
(1t, 21m/s, 垂直, 8x8BJ)
■ : 結合燃料棒

*1 これまでに実施された燃料被覆管（未照射材，照射材）の軸方向の引張試験に係る知見のうち破断に至った塑性歪の最小値。そのため、この値に達した場合でも必ずしも破断するわけではない。
*2 浸漬試験後引張試験の結果より結合燃料棒の垂直方向の引張強度は未照射材，照射材ともに1本あたり1t以上。

【参考】実機ハンドル変形燃料の結合燃料棒について

- 3号機SFP内のハンドル変形燃料のうち、最も変形が大きな燃料（約60度、P2の⑪燃料が該当）のITVによる結合燃料棒（上部端栓）の様子は下記のとおり。
- 画像で確認できた結合燃料棒はいずれも有意な変形は無く吊り上げ上問題ないとする。
- その他のハンドル変形燃料についても同様に画像で確認できた範囲では結合燃料棒にいずれも有意な変形は無かった。（但し、CB変形燃料除く）



【参考】燃料被覆管の破断歪について

- これまでに9×9燃料（A型）LUA*、9×9燃料（B型）LUA*、高燃焼度8×8燃料の照射燃料被覆管に対して実施された軸方向引張試験の結果は下記表のとおり。
- 未照射材と比較して、照射材の方が小さな破断歪（2.8～12.8%の範囲）で破損する結果であることを確認した。今回、がれき衝突では燃料棒に対して、軸方向の応力が付与されることから、本軸方向引張試験結果の最小値である2.8%の破断歪を基準とすることは保守的な設定である。

9×9燃料（A型）LUAデータ（軸方向単軸） [1], [2]

集合体	燃焼サイクル数	燃焼度(GWd/t)	照射量($\times 10^{25}$ 1/m ² E>1MeV)	燃料状態	水素濃度(ppm)	ひずみ速度(1/s)	破断伸び(%)	試験方法
未照射材	-	-	-	製造まま材	-	0.005	29.1	短冊引張
未照射材	-	-	-	製造まま材	-	0.005	32.2	短冊引張
未照射材	-	-	-	製造まま材	-	5	25.2	短冊引張
未照射材	-	-	-	製造まま材	-	5	22.7	短冊引張
未照射材	-	-	-	製造まま材	-	204	20.5	短冊引張
未照射材	-	-	-	製造まま材	-	215	24.2	短冊引張
2F1Z2(9×9A型)	5	65.4	12.7	照射まま材	142	0.005	11.0	短冊引張
2F1Z2(9×9A型)	5	65.4	12.7	照射まま材	142	0.005	10.1	短冊引張
2F1Z2(9×9A型)	5	65.4	12.7	照射まま材	142	5	7.7	短冊引張
2F1Z2(9×9A型)	5	66.2	12.0	照射まま材	98	5	7.1	短冊引張
2F1Z2(9×9A型)	5	65.7	12.8	照射まま材	142	237	6.8	短冊引張
2F1Z2(9×9A型)	5	65.7	12.8	照射まま材	142	205	8.9	短冊引張
2F1Z2(9×9A型)	5	-	12.8	照射まま材	113	8.3E-05	12.8	管引張

高燃焼度8×8型燃料LUAデータ（軸方向単軸） [3]

集合体	燃焼サイクル数	燃焼度(GWd/t)	照射量($\times 10^{25}$ 1/m ² E>1MeV)	燃料状態	水素濃度(ppm)	ひずみ速度(1/s)	破断伸び(%)	試験方法
未照射材	-	-	-	製造まま材	12	8.3E-05	36.0	管引張
未照射材	-	-	-	製造まま材	9	8.3E-05	37.2	管引張
2F2D8(高燃焼度8×8型)	5	59.8	12.9	照射まま材	121	8.3E-05	6.5	管引張
2F2D8(高燃焼度8×8型)	5	56.7	10.0	照射まま材	-	8.3E-05	6.4	管引張
2F2D8(高燃焼度8×8型)	5	50.2	13.2	照射まま材	64	8.3E-05	6.3	管引張
2F2D8(高燃焼度8×8型)	5	49.6	10.9	照射まま材	-	8.3E-05	8.6	管引張

9×9燃料（B型）LUAデータ（軸方向単軸） [4]

集合体	燃焼サイクル数	燃焼度(GWd/t)	照射量($\times 10^{25}$ 1/m ² E>1MeV)	燃料状態	水素濃度(ppm)	ひずみ速度(1/s)	破断伸び(%)	試験方法
2F1ZN3(9×9B型)	5	64.4	10.9	照射まま材	166	8.3E-05	3.4	短冊引張
2F1ZN3(9×9B型)	5	63.7	10.9	照射まま材	166	1.1	2.8	短冊引張

*LUA（Lead Use Assembly：先行照射燃料集合体）。新設計燃料の商用炉での本格利用に先だって少数の燃料体を装荷して照射試験を行う。

- [1] 独立行政法人 原子力安全基盤機構、「平成22年度中間貯蔵施設基準体系整備事業（燃料健全性に関する調査報告書）」、平成24年12月
- [2] 独立行政法人 原子力安全基盤機構、「平成18年度高燃焼度9×9型燃料信頼性実証成果報告書付録1（9×9A型燃料照射後試験結果）」、平成19年12月
- [3] 財団法人 原子力発電技術機構、「平成13年度高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書（BWR高燃焼度燃料 総合評価編）」、平成14年3月
- [4] 独立行政法人 原子力安全基盤機構、「平成18年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書）」、平成19年3

変形ハンドルの引張試験 ～模擬試験体～

- 変形ハンドルの引張試験を実機と同じ上部タイププレート (UTP)とUTPと同じ材料・断面形状を模擬したハンドルポストの試験片を用いて実施した。なお、ハンドルポスト試験装置はUTP試験より大きな荷重負荷が可能であり、破断試験を実施した。
- 5月の吊り上げ試験の結果、吊り上げ出来なかった燃料はいずれも9×9燃料 (A型) であることから、9×9燃料 (A型) を試験対象とする。

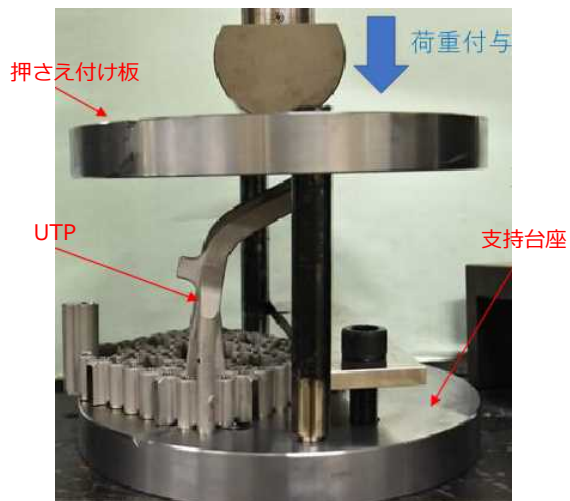
		模擬試験体	
UTP模擬試験	(変形前)		(変形後)
ハンドルポスト模擬試験			<ul style="list-style-type: none"> • 試験片の曲げ起点から把持部根元までの断面形状模擬部分の長さ (寸法A) は、UTPの曲げ起点 (コーナポストの分岐点) からハンドルバー下端までの長さ (寸法C) と同等とした。 • 試験片の曲げ起点位置から力点までの長さ (寸法B) は、UTPの曲げ起点から力点までの長さ (寸法D) よりやや長くなるようにした。これにより、曲げ起点位置に作用するモーメントが大きくなり、より保守側の条件となる。

変形ハンドルの引張試験 ～試験ケース～

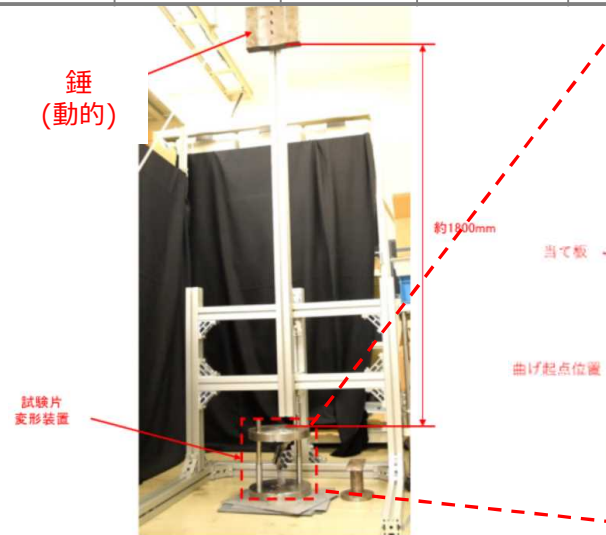
■ 引張試験の試験ケースを下記に示す。試験条件は次頁を参照。

○：試験を実施

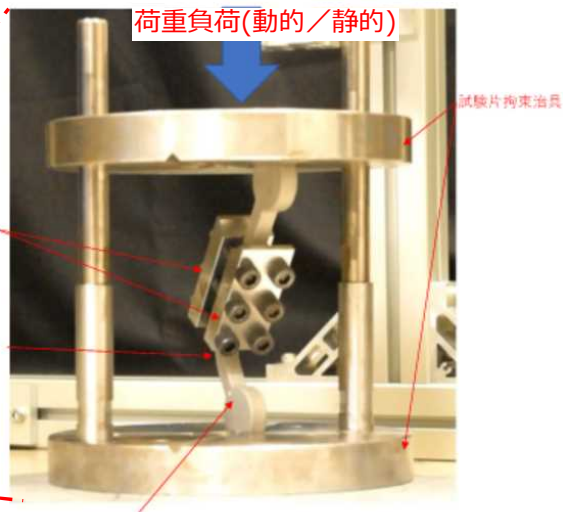
試験体	初期変形時の荷重付与方法	燃料型式	初期変形時の曲げ角度	試験体ID	9.1kN試験	13kN試験	26kN試験	破断試験	備考
UTP	静的	9×9燃料 (A型)	83°	F3AF55	○	○	○		700kgで吊り上げ出来なかった燃料と同型
ハンドルポスト	動的	高燃焼度8×8燃料, 9×9燃料 (A型)	91°	06	○	○	○	○	700kgで吊り上げ出来なかった燃料と同型
		新型8×8ジルコニウムライナ燃料	92°	14	○	○	○	○	曲げ角度90°の予備として実施
	静的	高燃焼度8×8燃料, 9×9燃料 (A型)	90°	32	○	○	○	○	700kgで吊り上げ出来なかった燃料と同型
		新型8×8ジルコニウムライナ燃料	90°	12	○	○	○	○	曲げ角度90°の予備として実施



UTP変形付与装置の外観 (静的荷重付与)



ハンドルポスト変形付与装置の外観 (動的荷重付与)



ハンドルポスト変形付与装置の外観 (静的/動的荷重付与)

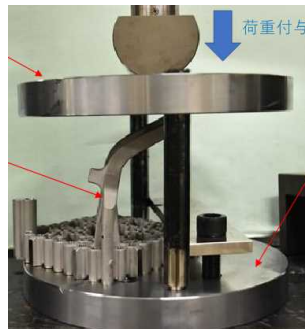
変形ハンドルの引張試験（その1：上部タイププレート）

(試験対象)

- ハンドル変形燃料と同型式のものとして9×9燃料（A型）の上部タイププレートに対して試験を行った。

(試験条件)

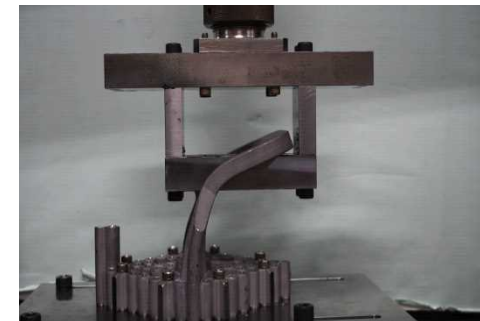
(試験条件)		条件設定の考え方	
初期変形角度	80°以上	<ul style="list-style-type: none"> • 3号機SFP内のハンドル変形燃料のうち、最も変形が大きいもの（60°）に対して余裕のある角度を設定した。 	
引張荷重 ／初期変形時に 荷重付与方法	9.1kN (≒928kgf)	静的荷重	<ul style="list-style-type: none"> • ハンドル変形燃料の結合燃料棒に負荷可能な吊り上げ荷重（約700kgf）に対して、FHM荷重計の誤差、温度条件等を考慮して保守的に設定した。
	13kN (≒1326kgf)	静的荷重	<ul style="list-style-type: none"> • 吊り上げ荷重（1t）に対して、FHM荷重計の誤差、温度条件等を考慮して保守的に設定した
	26kN (≒2651kgf)	静的荷重	<ul style="list-style-type: none"> • 上記荷重の2倍（吊り上げ装置の上限）を設定した
引張回数	10回	<ul style="list-style-type: none"> • 実機で想定される吊り上げ回数から、保守的に10回と設定した。 	



変形付与装置の外観



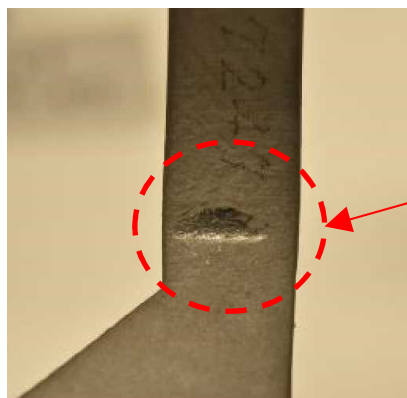
初期変形付与後の上部タイププレート外観



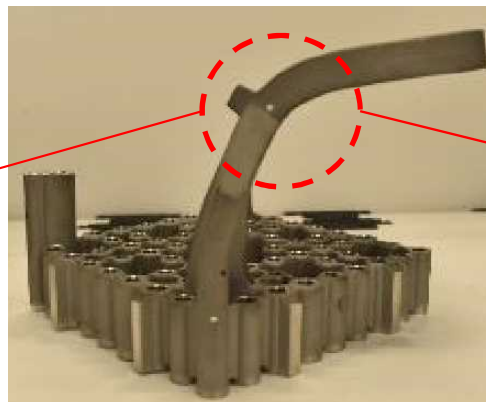
引張試験装置の外観

変形ハンドルの引張試験 ～試験結果（その1）～

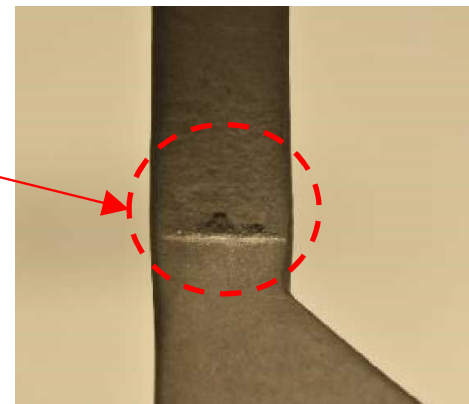
○ 引張荷重13kNの試験結果，有意なき裂は発生しなかった。（外観確認）



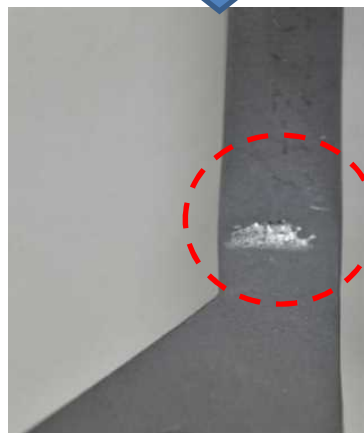
引張試験前（ハンドルポスト左側）



引張試験前（9×9燃料（A型））



引張試験前（ハンドルポスト右側）



引張試験後（ハンドルポスト左側）



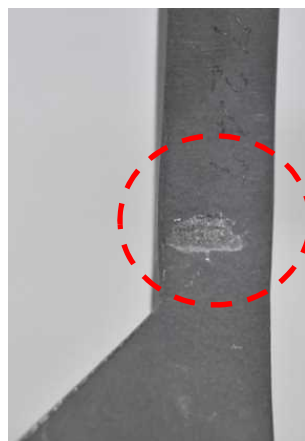
引張試験後（9×9燃料（A型））



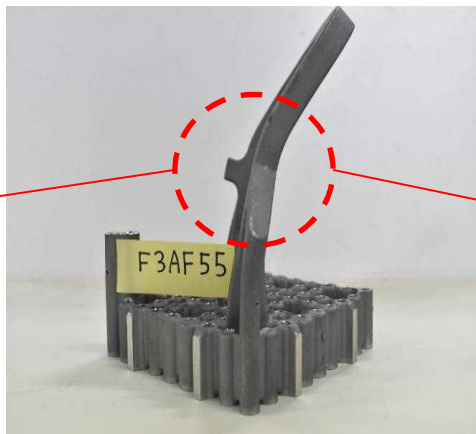
引張試験後（ハンドルポスト右側）

変形ハンドルの引張試験 ～試験結果（その1）～

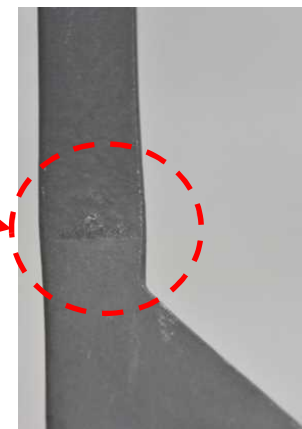
- 引張荷重26kNの試験結果，有意なき裂は発生しなかった。（外観認）



引張試験後（ハンドルポスト左側）

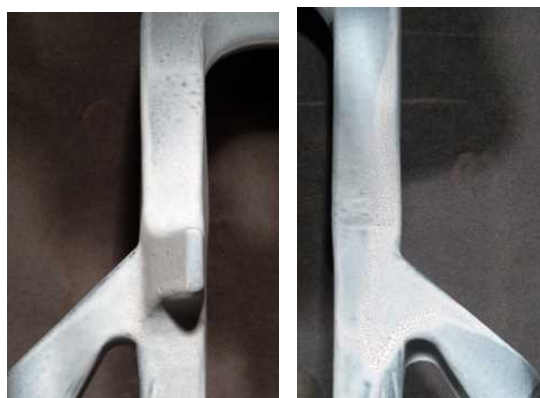


引張試験後（9×9燃料（A型））



引張試験後（ハンドルポスト右側）

- 引張試験後のハンドル部に対して液体浸透探傷検査を実施し，き裂を示す線状指示は確認されなかった。



ハンドル引張試験後の浸透探傷試験結果
（9×9燃料（A型），荷重13kN）



ハンドル引張試験後の浸透探傷試験結果
（9×9燃料（A型），荷重26kN）

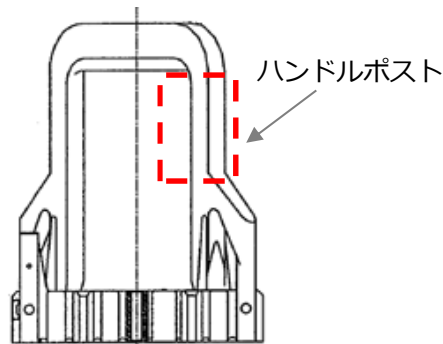
変形ハンドルの引張試験（その2：ハンドルポスト）

（試験対象）

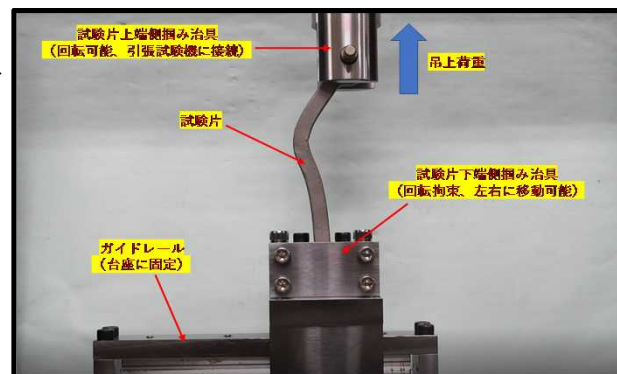
- ハンドル変形燃料と同型式のものを含む，9×9燃料（A型），高燃焼度8×8燃料，新型8×8ジルコニウムライナ燃料のUTPのハンドルポスト模擬試験片に対して試験を行った。

（試験条件）

		条件設定の考え方		
初期変形角度	90°	<ul style="list-style-type: none"> • 3号機SFP内のハンドル変形燃料のうち，最も変形が大きいもの（60°）に対して余裕のある角度を設定した。変形付与は動的・静的の2つの方法で実施した。 		
引張試験	引張荷重 ／初期変形時に 荷重付与方法	9.1kN (≒928kgf)	動的荷重 静的荷重	<ul style="list-style-type: none"> • ハンドル変形燃料の結合燃料棒に負荷可能な吊り上げ荷重（約700kgf）に対して，FHM荷重計の誤差，温度条件等を考慮して保守的に設定した。
		13kN (≒1326kgf)	動的荷重 静的荷重	<ul style="list-style-type: none"> • 吊り上げ荷重（1t）に対して，FHM荷重計の誤差，温度条件等を考慮して保守的に設定した
		26kN (≒2651kgf)	動的荷重 静的荷重	<ul style="list-style-type: none"> • 上記荷重の2倍を設定した
引張回数	10回	<ul style="list-style-type: none"> • 実機で想定される吊り上げ回数から，保守的に10回と設定した。 		
破断試験	—	<ul style="list-style-type: none"> • 試験片が破断するまで荷重を付与した 		



UTPの構造



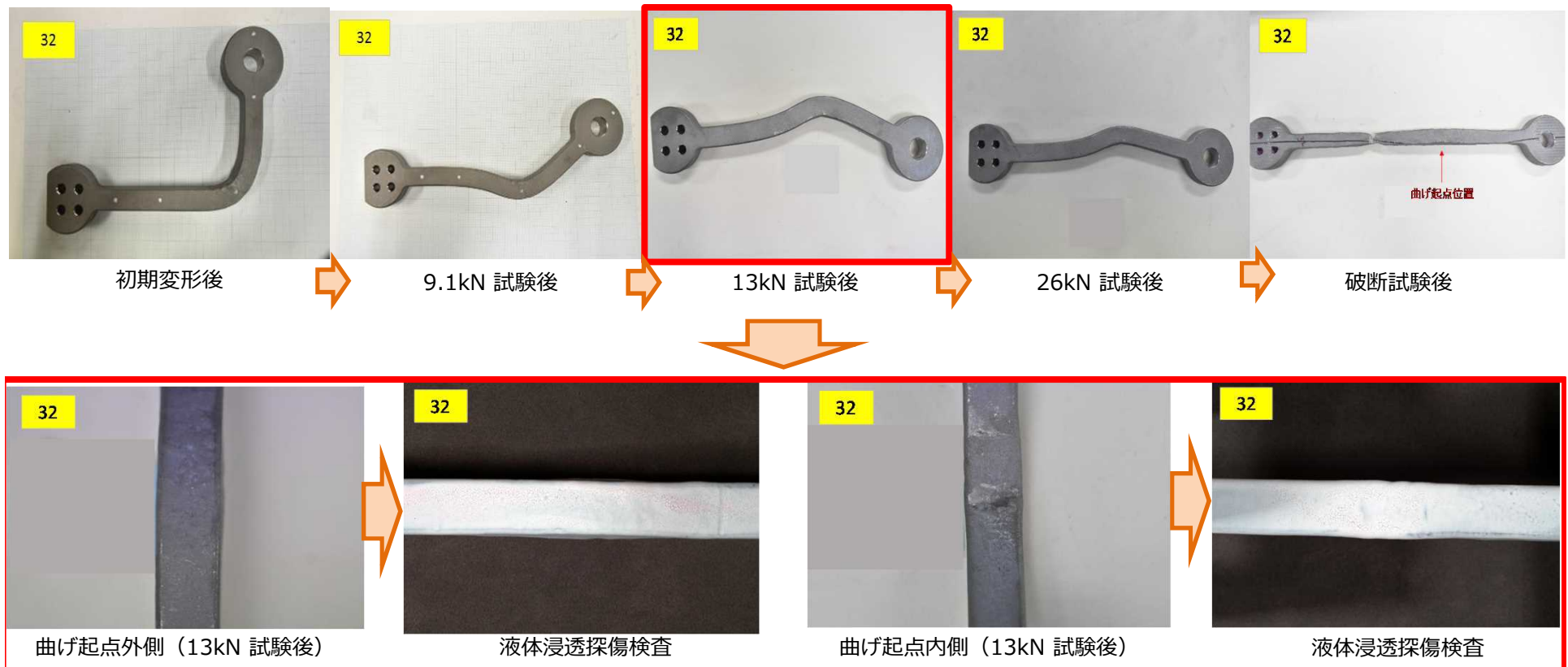
引張試験装置



引張試験装置（破断試験）

変形ハンドルの引張試験 ～試験結果（その2）～

- 引張荷重13kN, 26kNの試験結果, いずれのハンドルポスト模擬試験片においても, 破断せず, き裂も発生しなかった。(なお, き裂の有無は外観及び浸透探傷試験より確認した。)
- 試験結果の一例として, 9×9燃料 (A型) に静的荷重付与した試験片 (試験片ID: 32) を下図に示す。



変形ハンドルの引張試験 ～試験結果（その2）～

- 破断試験の結果を下表に示す。破断に至るまでの最大荷重は約8.5t～9.3tの範囲となり、実機で想定している吊り上げ荷重（1t）に対して十分な余裕があることを確認した。

試験片ID	初期変形時に荷重付与方法	燃料型式	破断に至るまでの最大荷重
06	動的荷重	高燃焼度8×8燃料, 9×9燃料（A型）	91.5kN（9.33t）
14		新型8×8ジルコニウムライナ燃料	89.7 kN（9.15t）
32	静的荷重	高燃焼度8×8燃料, 9×9燃料（A型）	91.1 kN（9.29t）
12		新型8×8ジルコニウムライナ燃料	83.4 kN（8.50t）

【参考】変形ハンドルの引張試験 ～実機模擬性～

(実機模擬について)

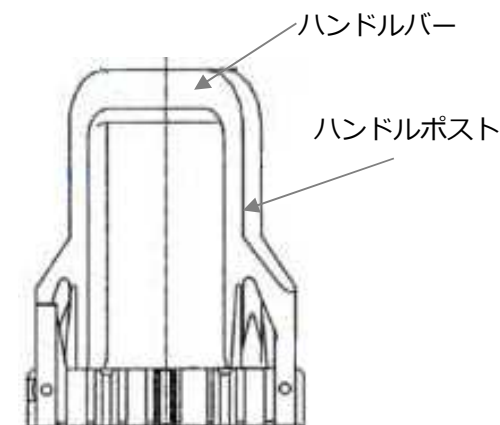
- 実機のハンドル変形燃料は、右図のようにハンドルが約60°変形した燃料が存在する。
- このため、今回実施した試験では、上部タイプレートを60°を超えて曲げて引っ張った試験を実施している。
- また、実機ではハンドルポスト（ハンドルの片側）の倒れ角度は2本が並行でない場合もあり、吊り上げ時にハンドルポストの片側に荷重が大きくかかる可能性がある。このため、ハンドルポスト片側を模擬した試験についても実施している。
- なお、ハンドルバーは下部側は2重の構造になっており断面積が大きく強度が高いため、断面積の小さいハンドルポスト上部を試験片では模擬している。



ハンドル変形燃料①

(照射影響について)

- ステンレス鋼は照射により耐力及び引張強度が増加する。本試験では未照射材を用いており、耐力及び引張強度の観点からは保守側の条件である。
(耐力の増加：P12参照)
- 一方で、照射材は未照射材に比べて破断伸びが低下（より小さな歪で亀裂が発生しやすくなる）する傾向があり、未照射材での試験は初期変形時の亀裂の発生有無の観点から非保守側である。そのため、ハンドルポスト模擬試験片の初期変形時において実機ハンドルより曲率半径が小さくなるように変形させた。これにより初期変形時の歪がより大きくなり、照射による破断伸び低下の影響をカバーした。



上部タイプレートの構造

【参考】試験体への照射影響の考慮

(照射影響の考慮)

- ハンドル部における高速中性子照射量を考慮すると、ハンドル材料は未照射材に比べて破断伸びが約15%低下するデータが得られており（図1）、照射材は未照射材に比べて小さい歪で亀裂が発生する。そのため、初期変形を与えた際の亀裂発生有無の観点からは照射材の方が厳しい条件となる。
- 本試験では未照射材を使用するが、上記の非保守性をカバーするため初期変形時の歪が大きくなるようにハンドルポスト模擬試験片を変形させた。具体的には実機のハンドルに比べて初期変形後の歪が1.18倍(=100/(100-15))以上になるように曲げ起点部の曲率半径を小さくなるよう変形させた。
- 瓦礫衝突解析におけるハンドル部の変形状態の評価結果において、ハンドル部が90°まで変形した場合には曲げ起点部の内側の曲率半径は約25mmと推定され（図2）、歪が1.18倍になる曲率半径を算出すると約20mmとなる。そのため、ハンドルポスト模擬試験片の初期変形においては曲率半径を20mm以下とすることを目標とした（図3）。
- なお、本試験で使用したハンドルポスト模擬試験片の初期変形後の曲率半径は12~15mmの範囲となっており、初期変形時の歪に関して十分に保守的な条件が模擬できている。

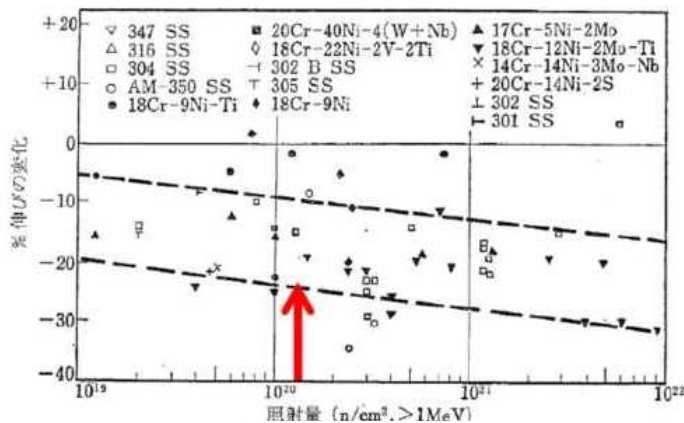


図1 オーステナイト系ステンレス鋼の高速中性子照射による伸びへの影響
(赤矢印はUTPハンドル部の照射量を示す)

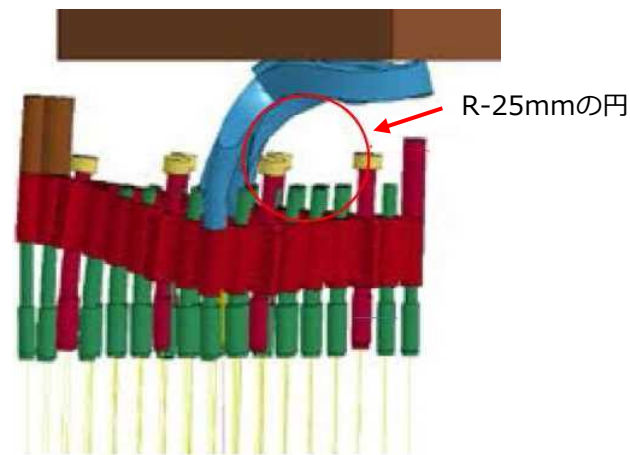


図2 UTP変形状態の評価結果



図3 試験片の初期変形状

CB変形燃料について

- CB変形燃料はハンドルだけでなく、CF・CFポストがハンドル側に傾倒^{*1}するように変形しており、CFポスト近傍の標準燃料棒、結合燃料棒は、上部タイプレートを通じて曲げ応力が発生している可能性がある。そのため、CFポスト近傍の燃料棒に発生する塑性歪の有無を有限要素法コードANSYSを用いて評価した。（*1 ITV画像からCFポストの傾倒角度は約27°と推定。）

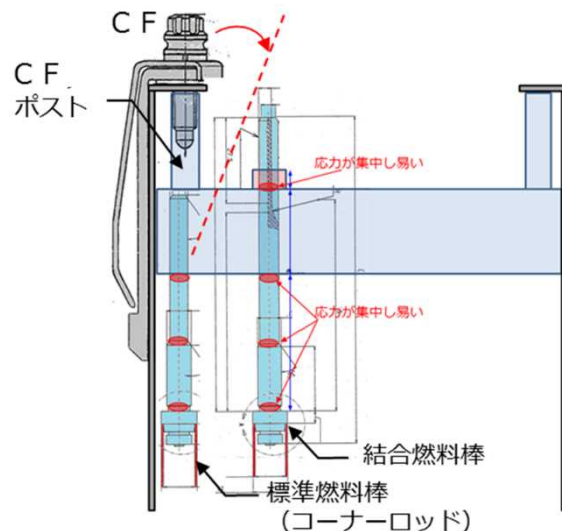
<評価条件>

CFポスト傾倒角度：30°，評価温度：70℃^{*2}，物性値：ジルカロイ（未照射材）

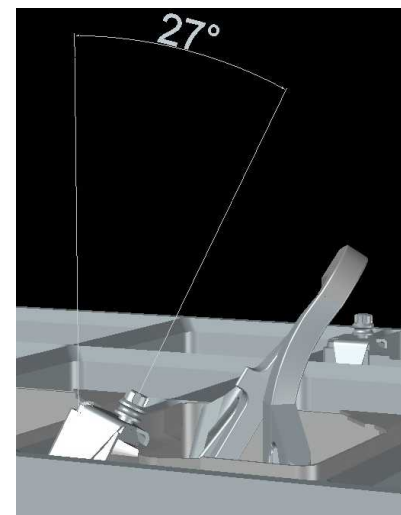
^{*2} 震災後の3号機SFP内温度の最高値（評価値）

<評価モデル>

- 燃料棒（第7スペーサより上側），UTP（燃料棒との嵌合部），CBのモデルを作成。（なお，UTPとの嵌合部は，保守的に燃料棒（上部端栓）との間隙を考慮しない形状とした。）
- 評価の結果，CFポスト近傍の標準燃料棒，結合燃料棒は，いずれも上部端栓部については細径部において歪が大きくなり，曲げ角度30°では塑性歪2.8%を超過した。一方，被覆管部においては塑性歪は発生しなかった。したがって，いずれも上部端栓部は破損している可能性はあるものの，被覆管部に破損はないため，燃料棒からのFPガスのリークやペレット脱落リスクは無いと考える。

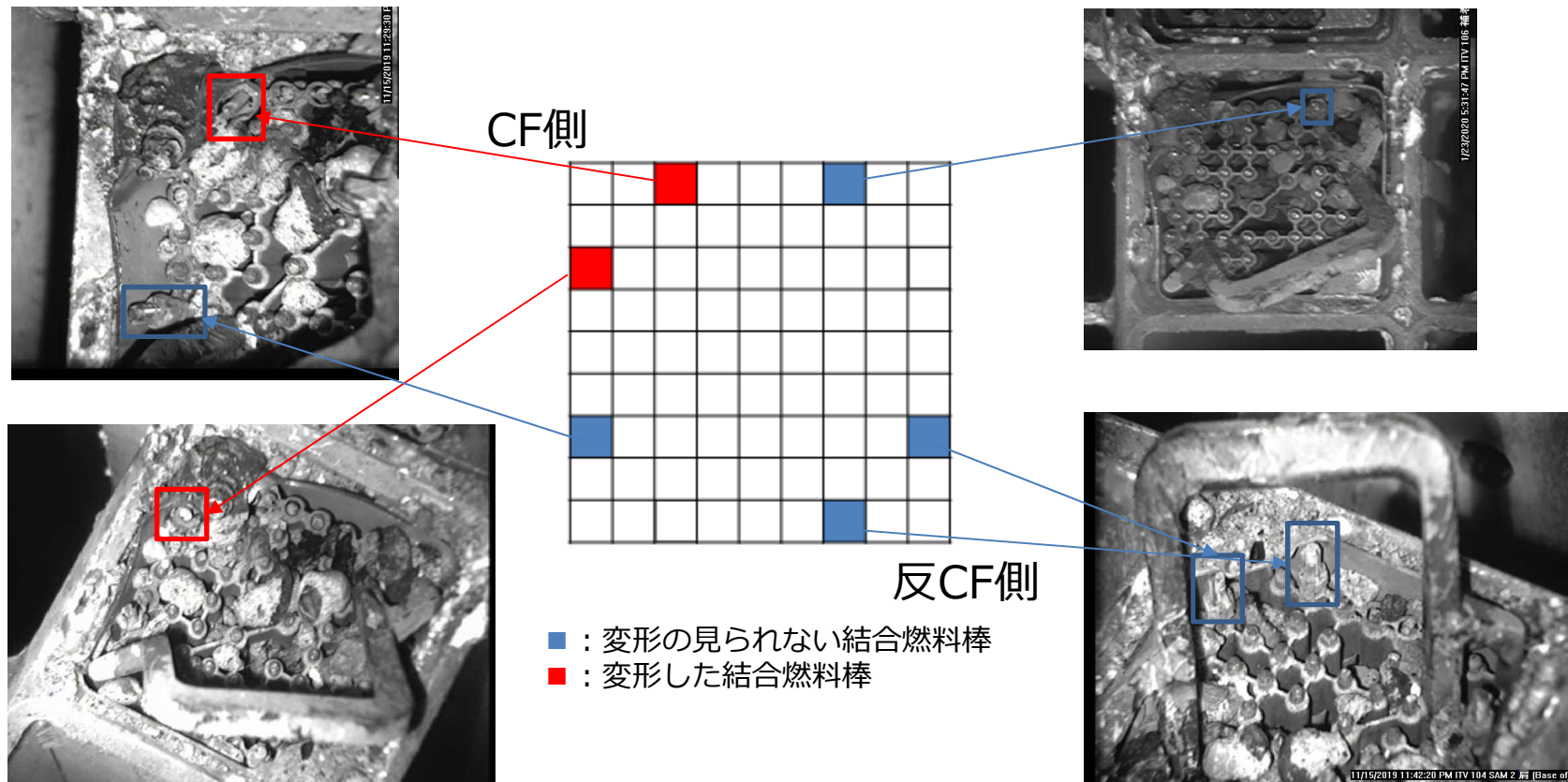


CB変形燃料のCF傾倒イメージ



ITV画像を基に作成した3D-CAD図

- CB変形燃料は、水中カメラ映像から少なくとも4本の結合燃料棒は有意な変形のない状況であり、実力的には吊り上げ時に荷重を負担できるものとする。
- この場合、中性子照射による結合燃料棒の伸びのバラツキを考慮したとしても少なくとも3点以上での吊り上げのため、結合燃料棒全体では1tは問題なく吊り上げられる*ものとする。



* 結合燃料棒の垂直方向の引張強度は未照射材，照射材ともに1本あたり1t以上。