

【補足説明資料】

3号機ハンドルの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9月29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。

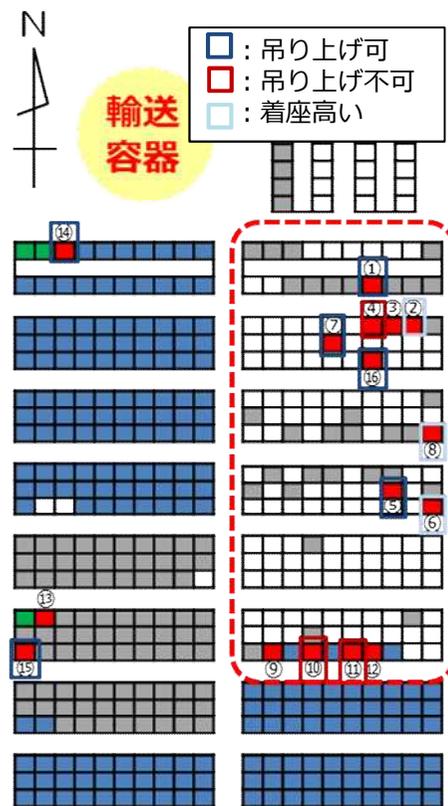
状態	燃料の状態	実施計画			
		2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備			2.12 使用済燃料共用プール設備 (添付資料-9,10)
		燃料の落下防止, 臨界防止に関する説明書 (添付資料-1-1)	燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書 (添付資料-1-3)	破損燃料用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書 (添付資料-2-2)	
健全燃料	被覆管は健全	既認可の範囲	既認可の範囲	既認可の範囲	既認可の範囲 (通常ラック)
スパーサ部損傷燃料 (CB有り)	スパーサに損傷はあるが燃料被覆管は健全				
スパーサずれ燃料 (CB有り)					
スパーサ部損傷燃料 (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	今回の変更申請範囲	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				

※ 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。

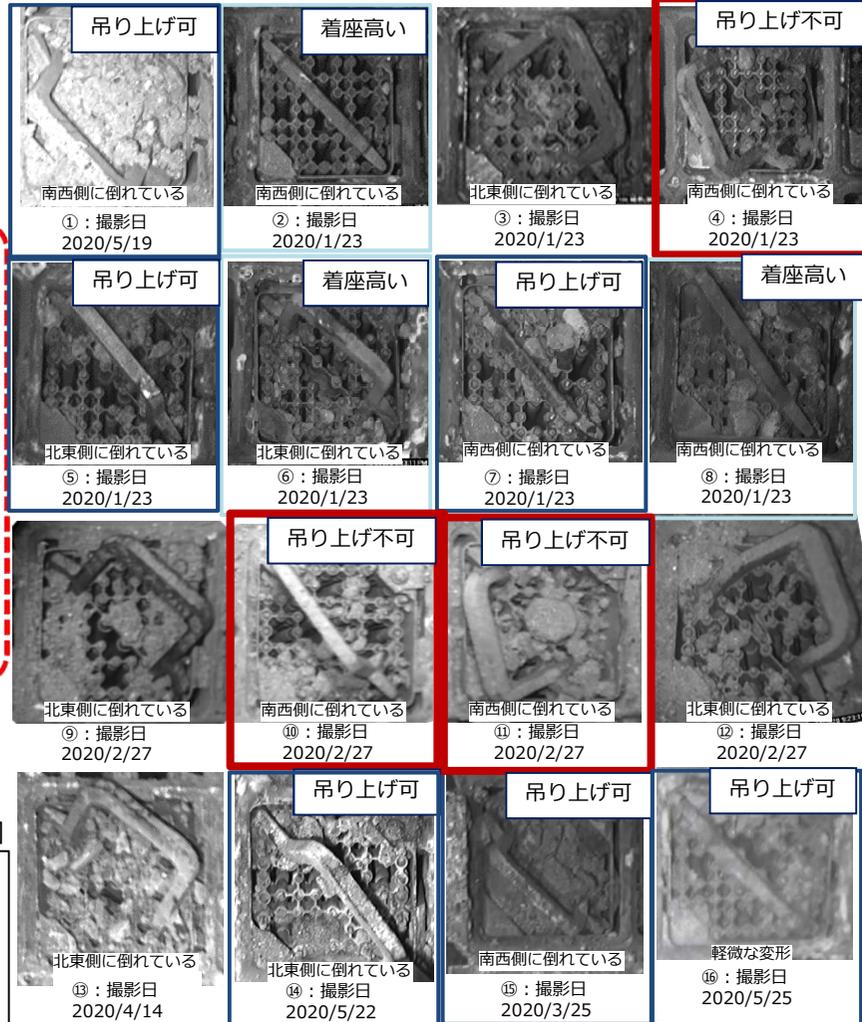
※ : 上記以外の燃料が確認された場合は状況に応じて適切に対応する

【参考】 3号機 S F P 内燃料のハンドル状況の確認について

- 5/28時点でハンドル変形を確認した燃料は16体。このうち既存FHM掴み具で把持角度を超過している可能性のあるハンドル変形燃料は4体（区分C分）。2020年12月頃に吊り上げ試験を実施予定。
- 8月24日に、ハンドル変形燃料2体分（⑭および⑯燃料）が吊り上げ可能であることを確認。現時点で吊り上げ可能が確認できたハンドル変形燃料は、16体中9体。



□ : 吊り上げ可
□ : 吊り上げ不可
□ : 着座高い



ハンドル変形燃料取扱い区分

N o.	型式	ITVによる推定曲がり角度	変形方向	取扱い区分※1
①	STEP2	約10°	反CF側	A
②	9×9A	約10°	反CF側	A
③	9×9A	約40°	CF側	C
④	9×9A	約40°※2	反CF側	B
⑤	9×9A	<10°	CF側	A
⑥	9×9A	約10°	CF側	A
⑦	9×9A	約10°	反CF側	A
⑧	9×9A	約20°	反CF側	A
⑨	9×9A	約40°	CF側	C
⑩	9×9A	約10°	反CF側	B
⑪	9×9A	約60°※2	反CF側	B
⑫	9×9A	約60°	CF側	C
⑬	9×9A	約40°	CF側	C
⑭	9×9A	約20°	CF側	B
⑮	STEP2	<10°	反CF側	A
⑯	9×9A	<10°	-	A

3号機使用済燃料プール内西側拡大図

- : がれき撤去完了
- : 燃料ハンドル目視確認完了
- : ハンドル変形を確認【16体】
- : 燃料取出済
- : 燃料が入っていないラック
- : 燃料交換機、コンクリートハッチが落下したエリア

※1 : ハンドルが北東側に倒れている場合は、チャンネルファスナが掴み具と干渉するため、把持可能な角度が小さい。
 ※2 : 吊り上げ試験時に、ハンドルが数度程度曲がり戻ったことを確認している。

※取扱い区分	A	B	C
収納缶	小	大	
掴み具	既存		大変形用

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

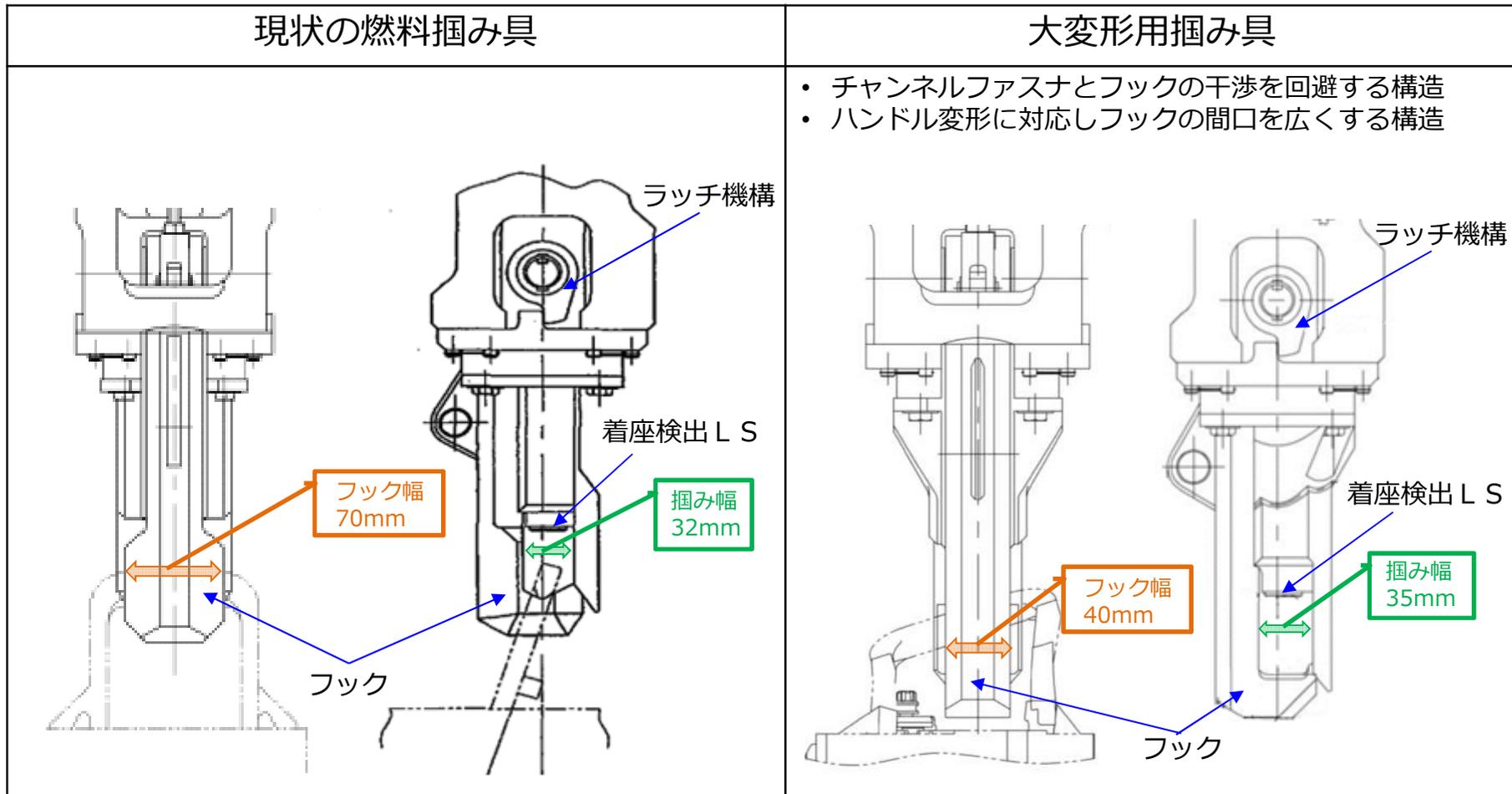
2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備

- ・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

- 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、専用の大変形用掴み具を追加
- 大変形用掴み具は現状の掴み具から先端形状のみを変化させたものであり、落下防止等の安全機能に変更は無い



■ 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

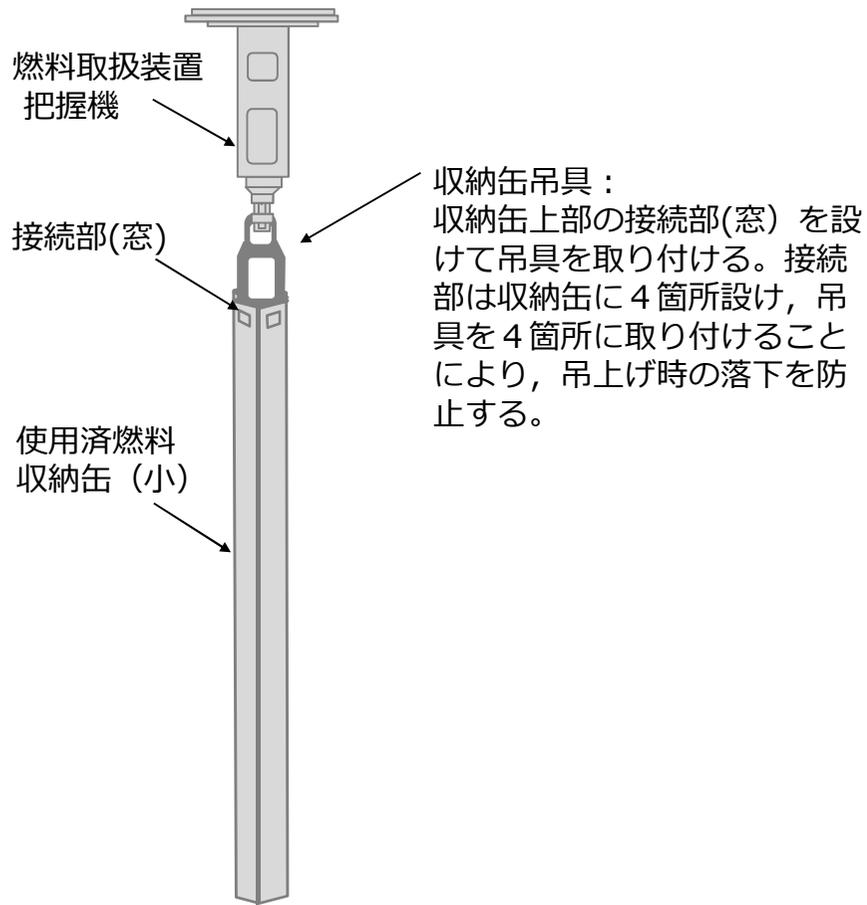
- ハンドル変形燃料を燃料取扱機を用いて取り出しを行うことを記載
- ハンドルの著しい変形等により現状の掴み具または大変形用掴み具で把持できないものは対象外であることを明記
- 事前にハンドル変形燃料の吊り上げ試験を実施し燃料とラックの干渉が解除された状態にして取り出すことを記載
- 吊り上げ荷重はハンドル変形の無い燃料と同様1tとすることを記載

- 共用プールにおいて、収納缶は以下の方法で取り扱う
 - 収納缶（小） FHMにて収納缶を把持する
 - 収納缶（大） 天井クレーン主巻にチェンブロックを取り付けて把持する
- 収納缶の安全対策は下表の通り行う。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り扱いと同様

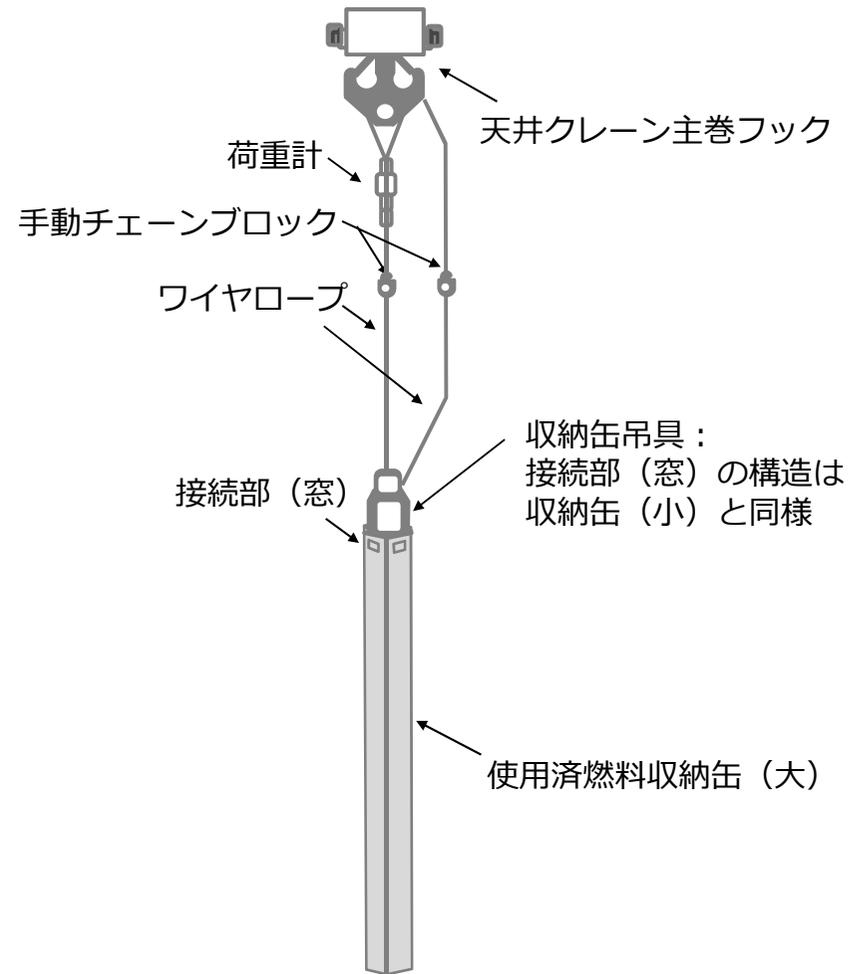
※：震災以前、取り扱い中にハンドルおよびチャンネルボックスが変形した燃料。4号機から取り出し、共用プールで保管中

安全対策項目	収納缶（小）	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(小)



使用済燃料収納缶(大)

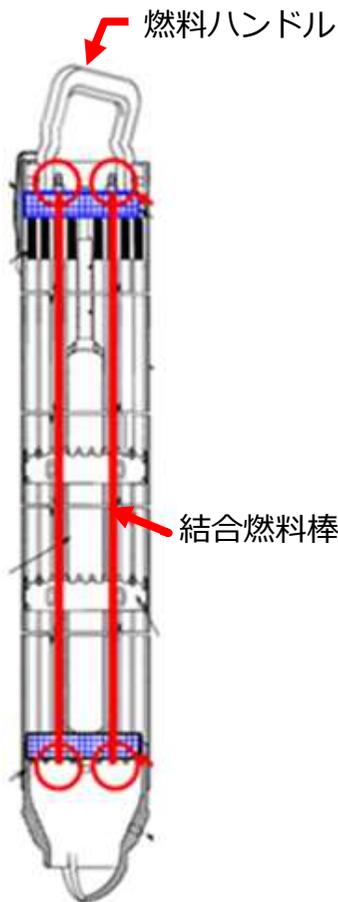


【参考】 実施計画Ⅱ.2.11 添付資料-1-3の記載内容
(8/26 ハンドル変形燃料吊り上げ試験
に係る面談資料をまとめ直したもの)

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

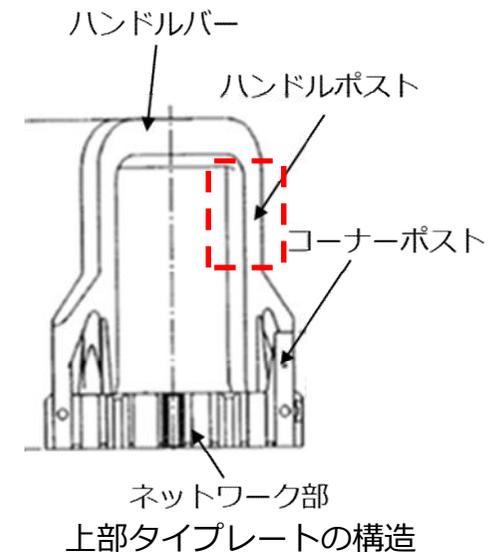
- ① 結合燃料棒は1本あたり1t以上の強度を有することを浸漬試験後の引張試験から確認している。
- ② 燃料吊り上げ時のバランスを考慮すると、3本以上の結合燃料棒でバランスを保つ状態であれば、結合燃料棒上部に大きな曲げモーメントが作用せずに吊り上げ可能である。
- ③ がれき衝突解析の結果、ハンドル部に衝撃を受けた燃料は90度のハンドル変形を考慮しても、4本の結合燃料棒が破損せずに吊り上げ荷重を負担できると判断できる。（なお、結合燃料棒の健全性判断基準は、9×9燃料導入時における被覆管（照射材）の照射後試験施設での引張試験データに基づき塑性歪2.8%以下と設定。）
- ④ また、実機における外観観察より、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>

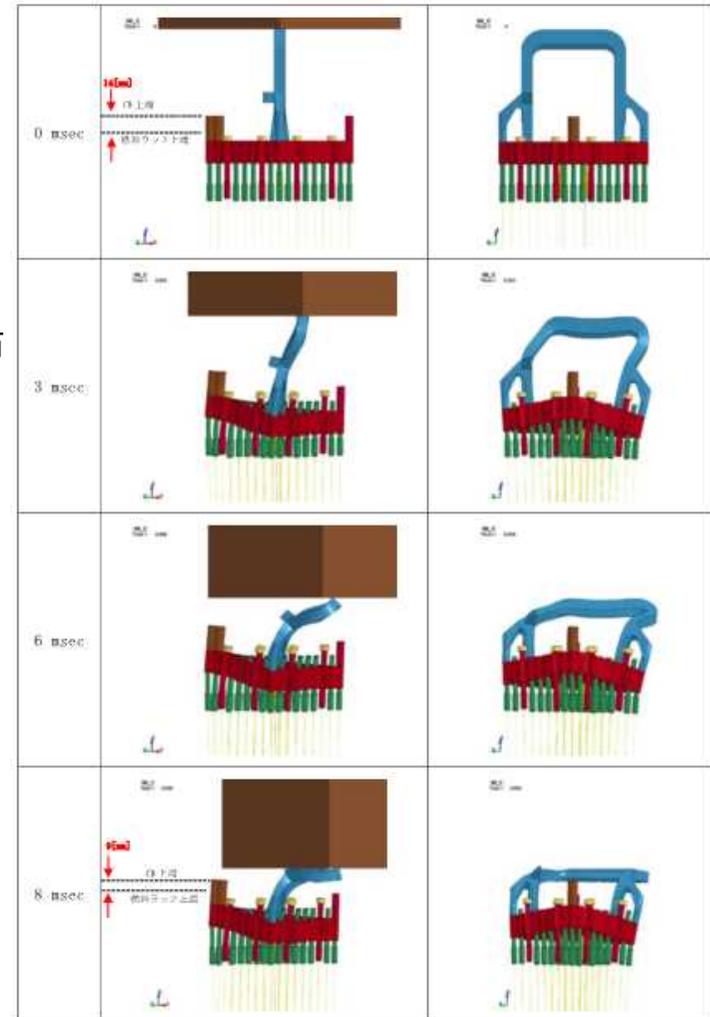
(評価手順・条件)

- ・ 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)

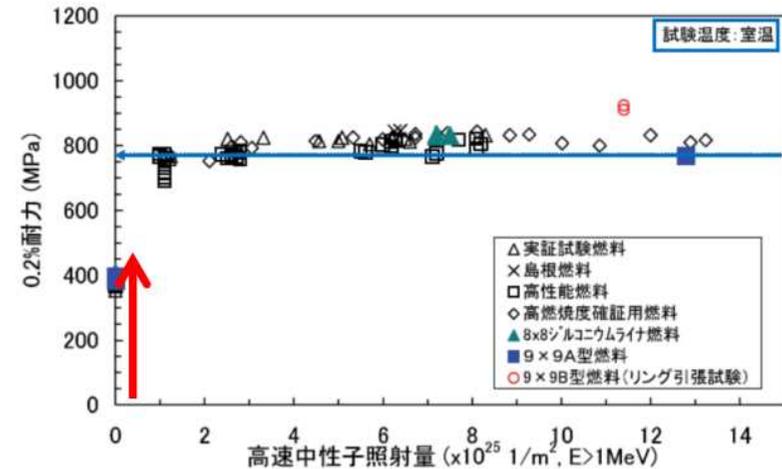
がれき衝突解析 ～解析条件～

＜解析条件（続き）＞ （物性値）

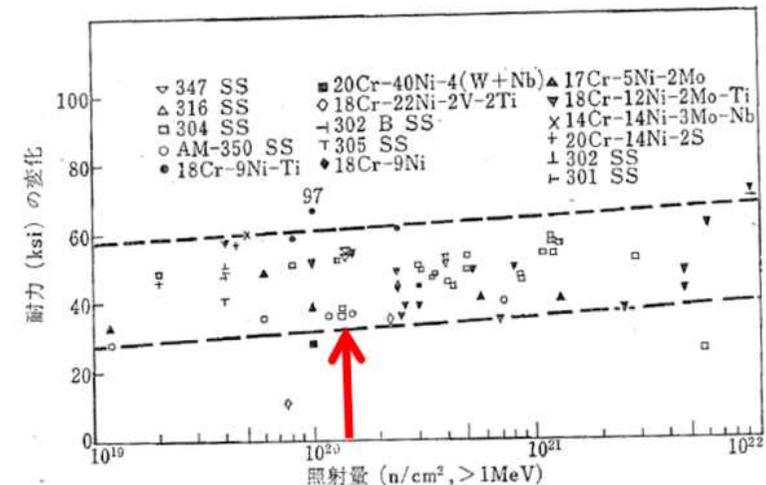
- 燃料集合体を構成する部材の大部分にジルカロイまたはステンレスが使用されており、いずれも中性子照射により強度が増大する。
- 原子炉内における5サイクル分の中性子照射量を評価した結果、燃料棒の上部端栓（ジルカロイ）は $0.2E+25n/m^2$ 、上部タイプレート（ステンレス）は $1.3E+20n/cm^2$ ($0.1E+25n/m^2$) となり、いずれも未照射材に近い照射量であることを確認した。
- 未照射材は照射材と比較して降伏応力は低く、また、より大きな歪み量で破断に至る。
- 今回、がれき衝突解析では、がれき重量・衝突速度を解析ケース毎に固定した評価のため同じ衝突エネルギーで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

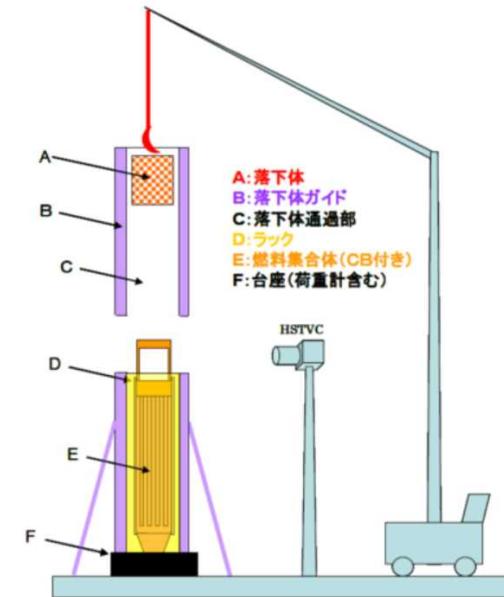


ステンレス強度の照射量依存性

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〉

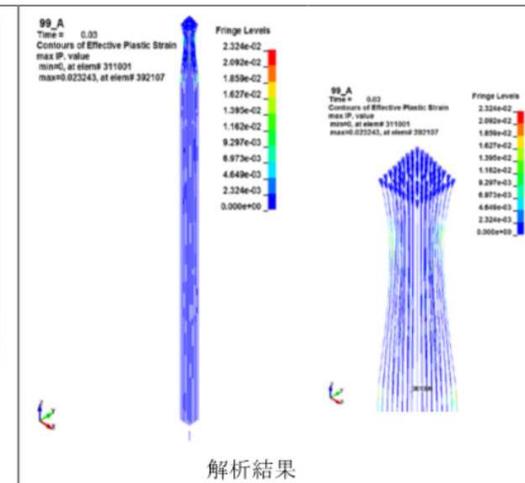
- LS-DYNAを用いた解析では，燃料集合体の各部材を下記要素タイプにモデル化したうえでがれき落下試験と同じ条件で再現解析を行った。
- その結果，試験結果と燃料ハンドル，燃料集合体上部（第8スパン）の燃料棒のたわみ等，変形傾向はほぼ一致していることを確認した。

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

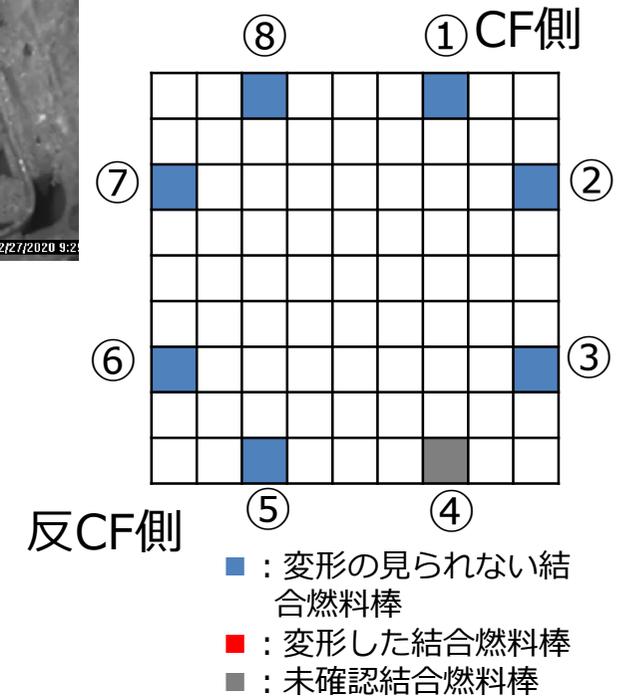
反CF側

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。

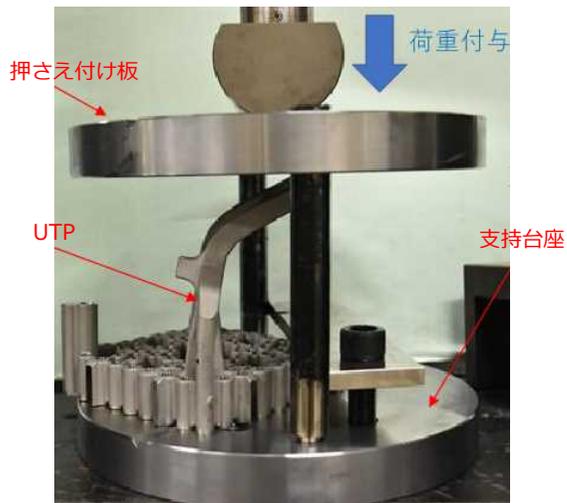
		模擬試験体	
UTP模擬試験	(変形前)		(変形後)
ハンドルポスト模擬試験			<ul style="list-style-type: none"> • 試験片の曲げ起点から把持部根元までの断面形状模擬部分の長さ (寸法A) は、UTPの曲げ起点 (コーナポストの分岐点) からハンドルバー下端までの長さ (寸法C) と同等とした。 • 試験片の曲げ起点位置から力点までの長さ (寸法B) は、UTPの曲げ起点から力点までの長さ (寸法D) よりやや長くなるようにした。これにより、曲げ起点位置に作用するモーメントが大きくなり、より保守側の条件となる。

変形ハンドルの引張試験 ～試験ケース～

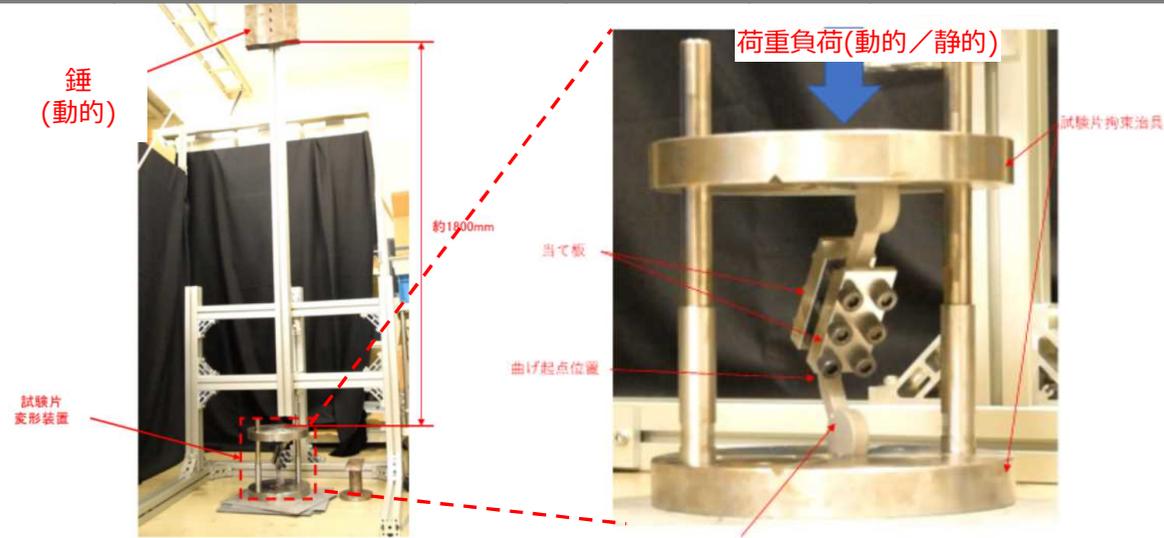
■ 引張試験の試験ケースを下記に示す。試験条件は次頁を参照。

○：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)

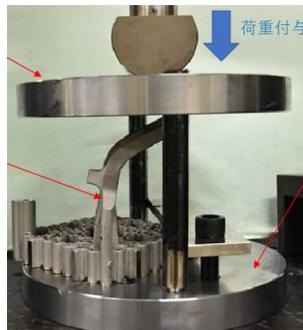
変形ハンドルの引張試験（その1：上部タイププレート）

(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)

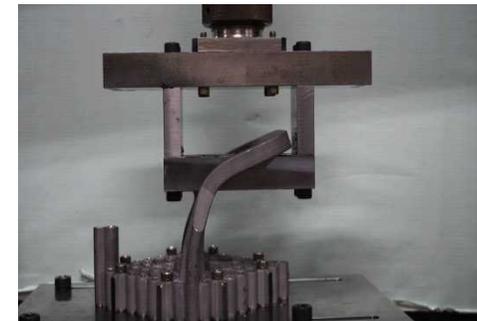
(試験条件)		条件設定の考え方
初期変形角度	80°以上	<ul style="list-style-type: none"> • 3号機SFP内のハンドル変形燃料のうち、最も変形が大きいもの（60°）に対して余裕のある角度を設定した。
引張荷重 ／初期変形時に 荷重付与方法	9.1kN (≒928kgf)	静的荷重 <ul style="list-style-type: none"> • ハンドル変形燃料の結合燃料棒に負荷可能な吊り上げ荷重（約700kgf）に対して、FHM荷重計の誤差、温度条件等を考慮して保守的に設定した。
	13kN (≒1326kgf)	静的荷重 <ul style="list-style-type: 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



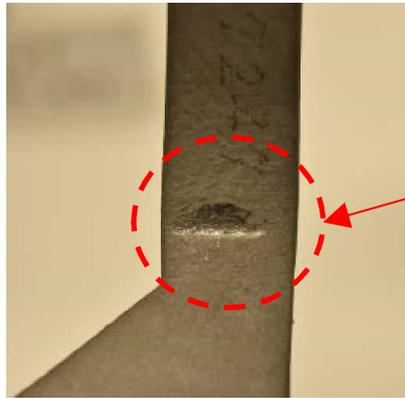
初期変形付与後の上部タイププレート外観



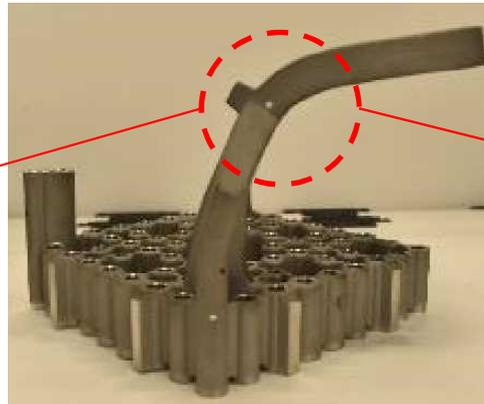
引張試験装置の外観

変形ハンドルの引張試験 ～試験結果（その1）～

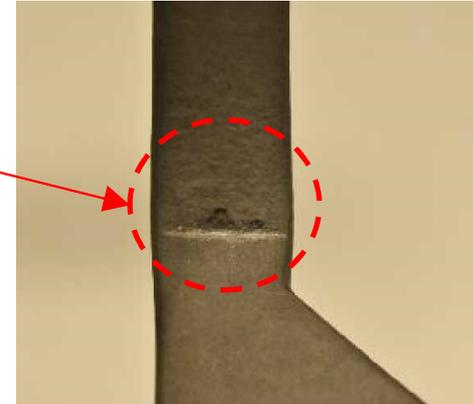
○ 引張荷重13kNの試験結果，有意なき裂は発生しなかった。（外観確認）



引張試験前（ハンドルポスト左側）



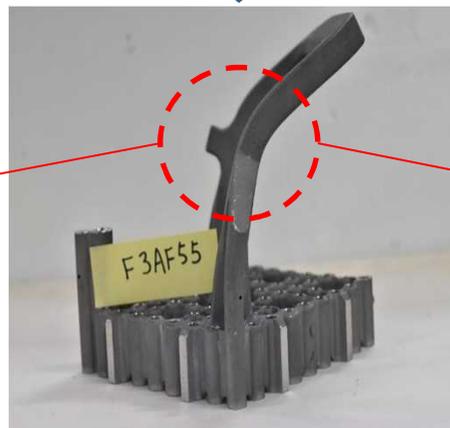
引張試験前（9×9燃料（A型））



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）



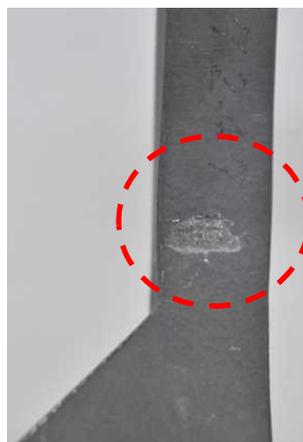
引張試験後（9×9燃料（A型））



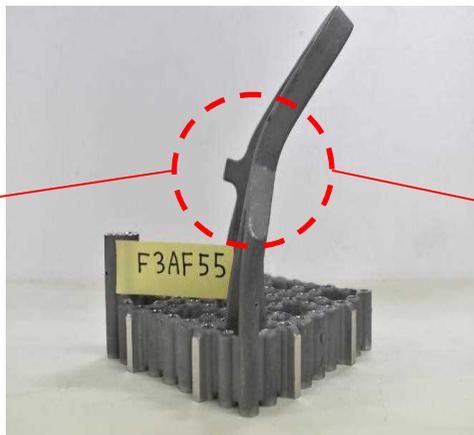
引張試験後（ハンドルポスト右側）

変形ハンドルの引張試験 ～試験結果（その1）～

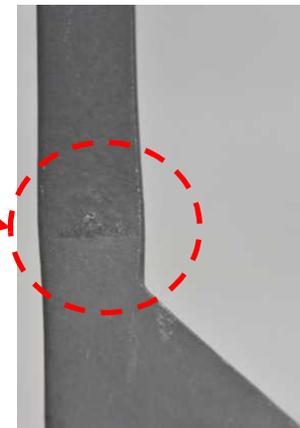
- 引張荷重26kNの試験結果，有意なき裂は発生しなかった。（外観認）



引張試験後（ハンドルポスト左側）

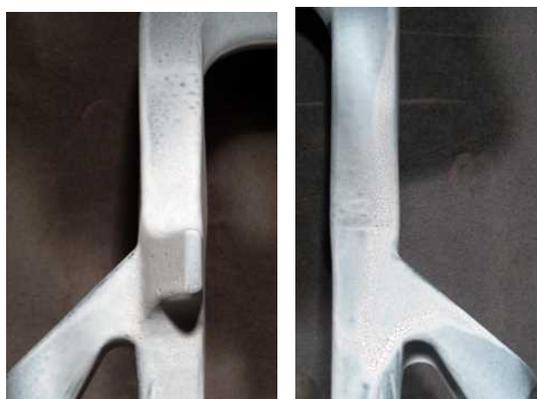


引張試験後（9×9燃料（A型））



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）

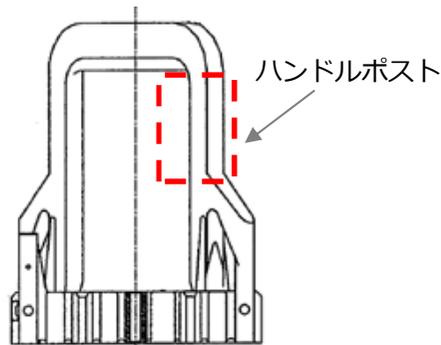
変形ハンドルの引張試験（その2：ハンドルポスト）

（試験対象）

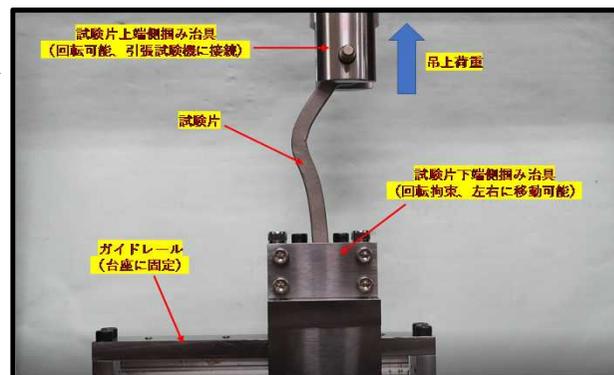
- ハンドル変形燃料と同型式のものを含む，9×9燃料（A型），高燃焼度8×8燃料，新型8×8ジルコニウムライナ燃料のUTPのハンドルポスト模擬試験片に対して試験を行った。

（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



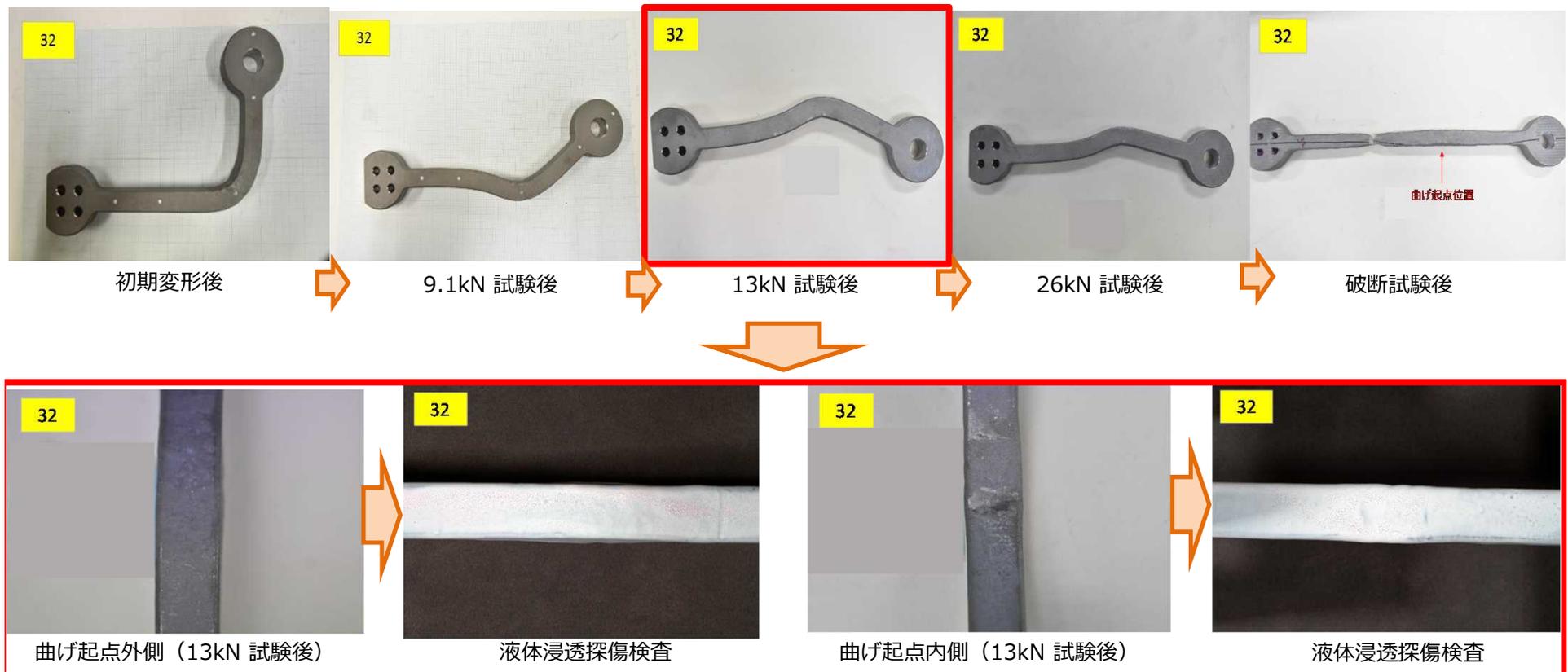
引張試験装置



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)

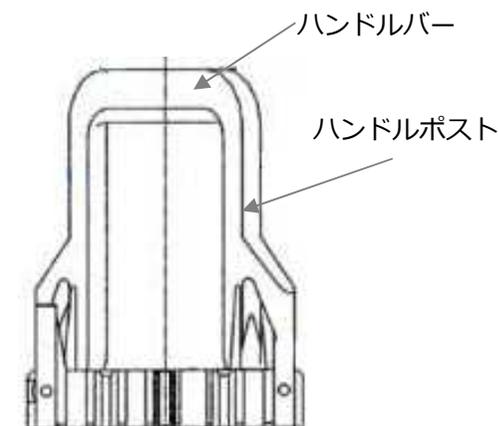
- 実機のハンドル変形燃料は、右図のようにハンドルが約60°変形した燃料が存在する。
- このため、今回実施した試験では、上部タイプレートを60°を超えて曲げて引っ張った試験を実施している。
- また、実機ではハンドルポスト（ハンドルの片側）の倒れ角度は2本が並行でない場合もあり、吊り上げ時にハンドルポストの片側に荷重が大きくかかる可能性がある。このため、ハンドルポスト片側を模擬した試験についても実施している。
- なお、ハンドルバーは下部側は2重の構造になっており断面積が大きく強度が高いため、断面積の小さいハンドルポスト上部を試験片では模擬している。



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。

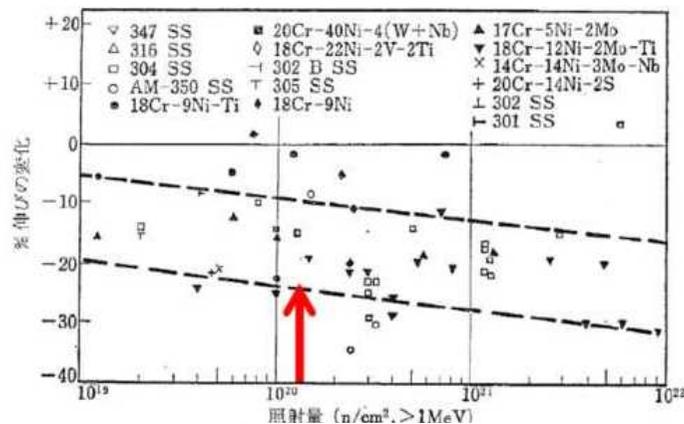


図1 オーステナイト系ステンレス鋼の高速中性子照射による伸びへの影響
(赤矢印はUTPハンドル部の照射量を示す)

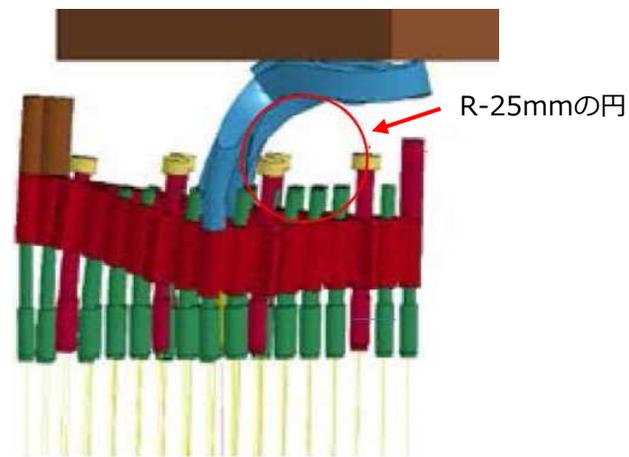


図2 UTP変形状態の評価結果



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介し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。）

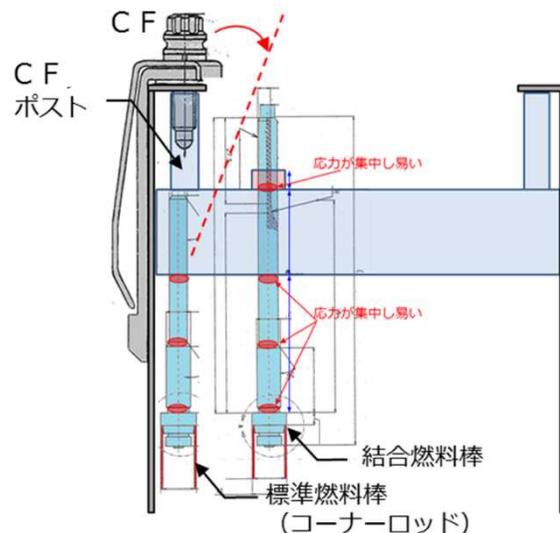
<評価条件>

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）

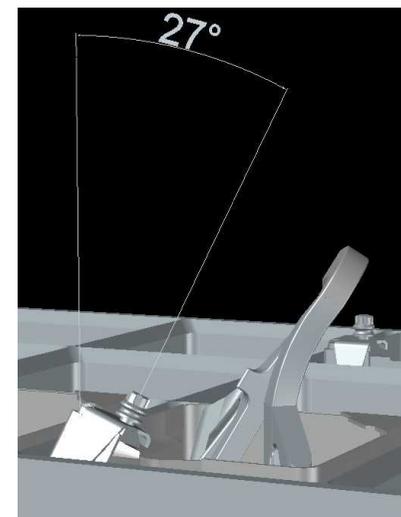
^{*2} 震災後の3号機SFP内温度の最高値（評価値）

<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。



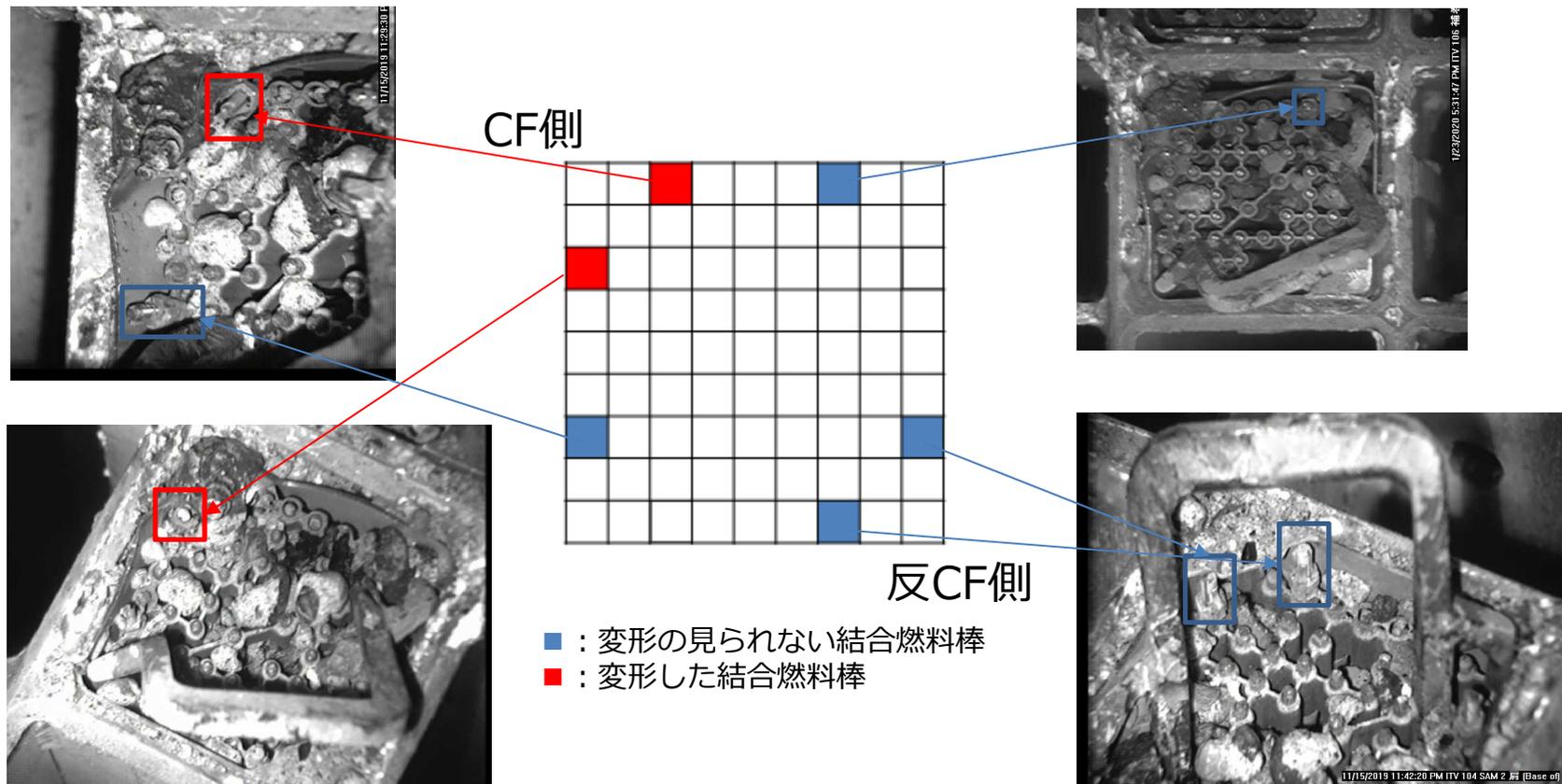
CB変形燃料のCF傾倒イメージ



ITV画像を基に作成した3D-CAD図

CB変形燃料について

- 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。