

# 3号機ハンドル変形燃料吊り上げ試験について

2020年8月26日

**TEPCO**

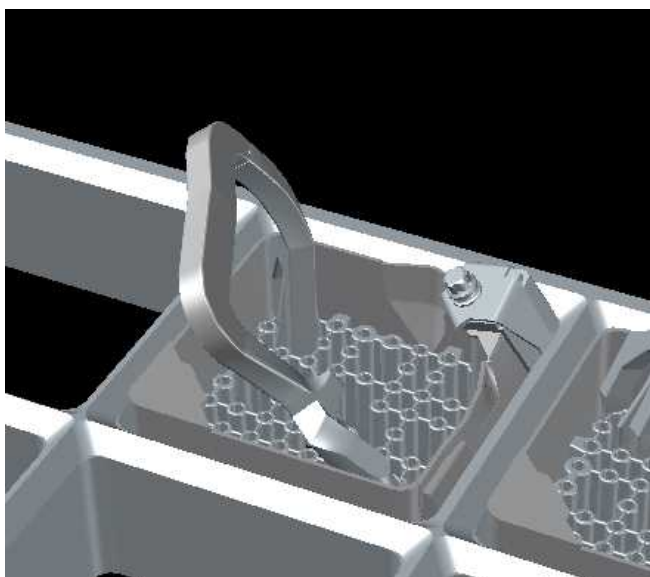
---

東京電力ホールディングス株式会社

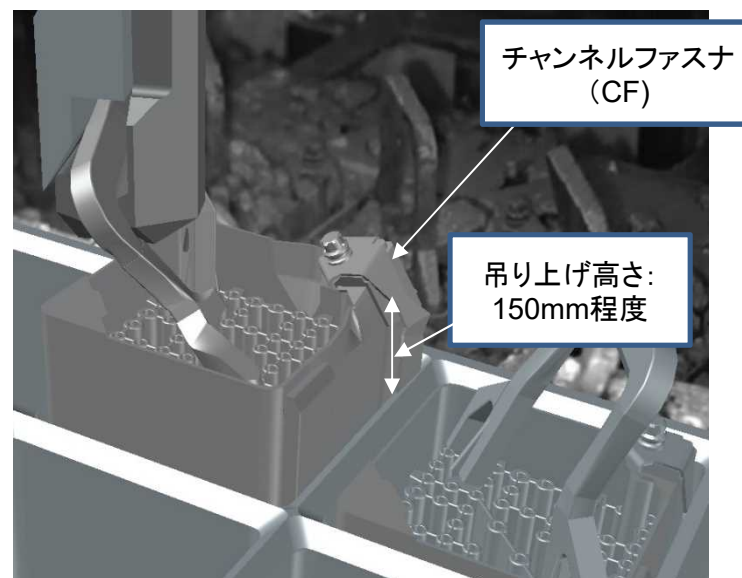
# 1. ハンドル変形燃料の吊り上げ試験について

## 概要

- 3号機SFPにはがれきの衝突によりハンドルが変形した燃料が16体存在する（2020.8.26時点）  
（うち1体はチャンネルファスナ（CF）にもがれきが衝突し変形している）
- がれき撤去中で変形リスクのある燃料は残り9体ある。但し、外観上は大きな変形はない（2020.8.26時点）
- ハンドルが変形した燃料の取出しが確実に実施できることを、実際の取出し前に早期に実施することで燃料取出し工程の遅延リスクを抑えるため、吊り上げ試験を行う
- CFが燃料ラック上端から抜けきる状態になると、がれきとの固着や燃料ラックとの干渉が無くなる。
- そのため、吊り上げ試験の内容は、CFが燃料ラックから抜けきる高さ（150mm程度）まで吊り上げ、荷重を確認することである。
- 操作は全て遠隔操作室から遠隔操作で行う。3号オペフロへの作業員の立ち入りは無い。



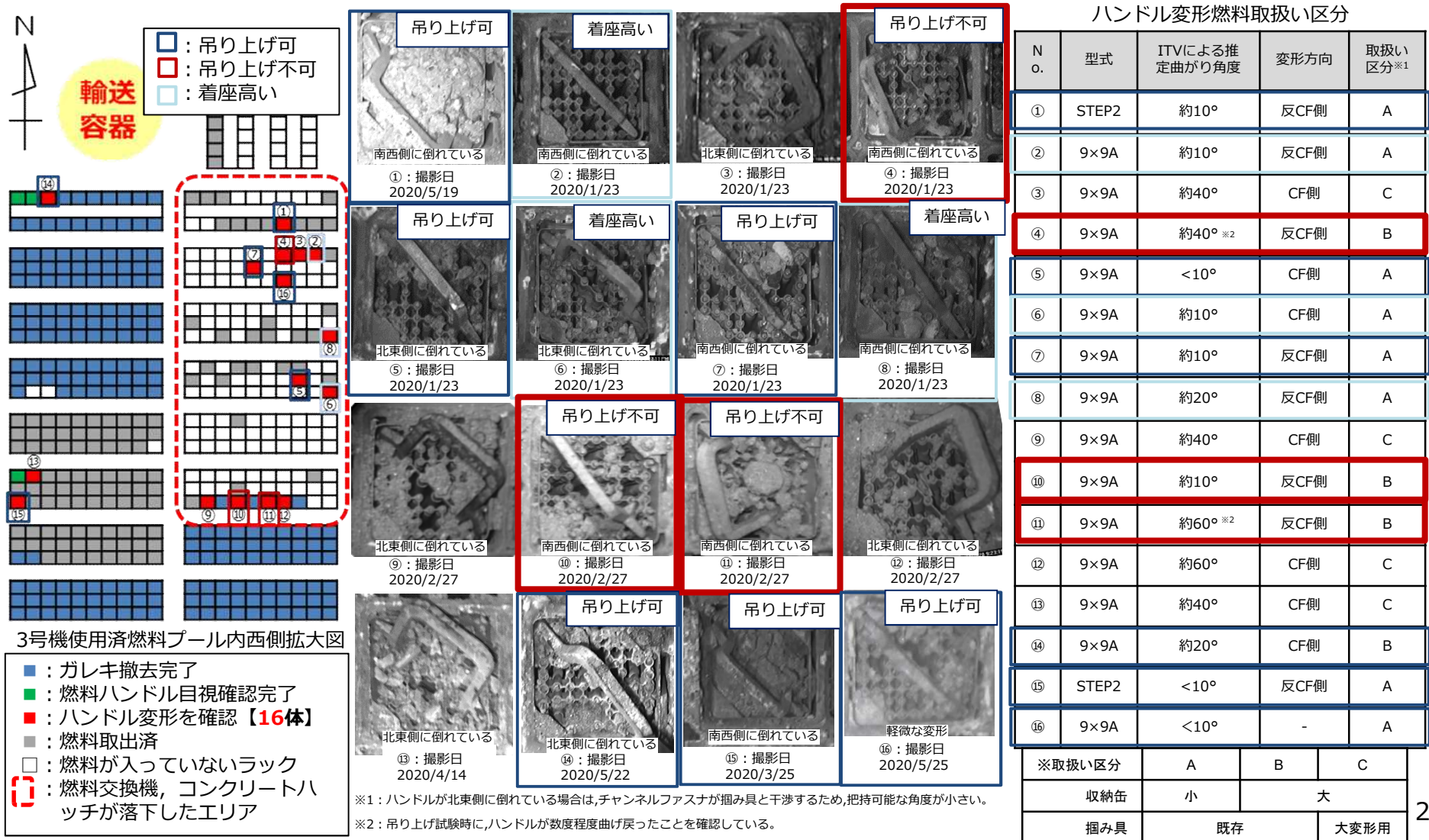
吊り上げ前



吊り上げ試験概念図

## 2. 吊り上げ試験対象燃料について

- 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。
- 5/21-22及び8/24吊り上げ試験を実施，現時点で吊り上げ出来ない燃料は3体。



## 3-1. ハンドル変形燃料の吊り上げ試験結果について

### 1. 第1回吊り上げ試験 (①②④⑤⑥⑦⑧⑩⑪⑮)※

※: ハンドル変形燃料の通し番号。(P2参照)

- ✓ 2020年5月21-22日, 3号機FHM掴み具で把持可能なハンドル変形燃料10体の吊り上げ試験を実施した。
- ✓ 10体中,7体のハンドル変形燃料は問題なく吊り上げ可能であることを確認した。
- **7体について予定した高さである約10cmまで吊り上げられることを確認 (①②⑤⑥⑦⑧⑮)※**
  - ✓ 7体中3体については試験前より約20~70mm高い位置で着座。通常の重量荷重で再吊り上げ可能であることを確認済み。今回の吊り上げによりガレキが燃料の下部に混入したと推定。想定事象でリスクが無いため燃料取り出しまで現状維持。
- **3体が制限荷重(700kgf)内で吊り上がらないことを確認 (④⑩⑪)※**
  - ✓ チャンネルボックス変形による燃料ラックとの干渉または,ガレキによるかじり・固着していると推定。

### 2. 第2回吊り上げ試験 (⑭⑯)※

- ✓ 2020年8月24日 ⑭⑯の燃料が, 吊り上げ荷重700kgf以内で吊り上げ可能であることを確認した。
- ✓ マニピュレータの補助によりマストの偏心を解消する必要のある燃料 (⑭) が吊り上げ可能であることを確認。

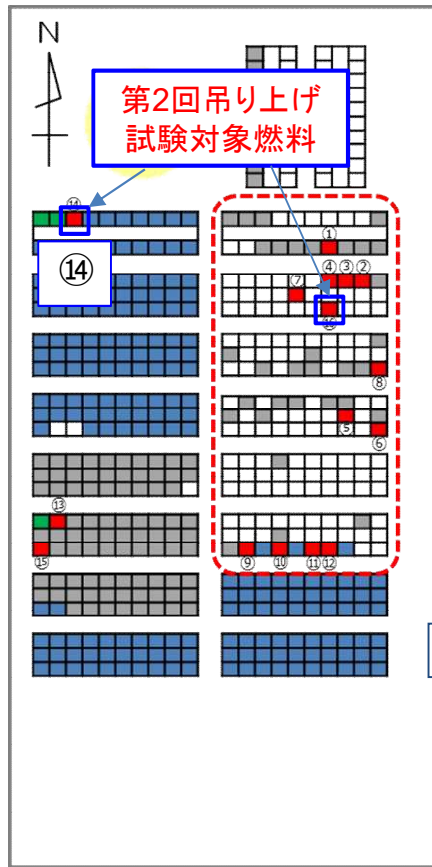
### 3. 今後の予定

- ✓ 2020/9下旬~10月上旬 3体: ④⑩⑪ (2020/5に吊り上げ不可だった燃料)
  - 先端が細い形状のツールを使用し,燃料とラックの隙間のガレキを更に除去
  - 吊り上げ荷重に関する評価を追加実施し,吊り上げ荷重を1000kgfに引き上げる予定
- ✓ 2020年12月頃 4体: ③⑨⑫⑬ (既存FHM掴み具で把持できない燃料)

# 【参考】 輸送容器洗浄配管近傍のハンドル変形燃料の吊り上げ試験

- 第2回吊り上げ試験にて、マニピュレータの補助によりマストの偏心を解消する必要のある燃料（⑭※）を制限荷重（700kgf）以内にて吊り上げ可能であることを確認した。

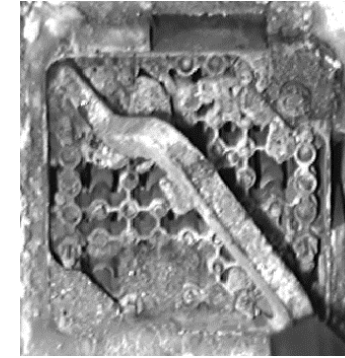
※：ハンドル変形燃料の通し番号。（P2参照）



3号機使用済燃料プール内西側



マニピュレータによるマストの補助  
撮影日 2020/8/24



⑭：撮影日 2020/5/22



⑭吊り上げ試験：撮影日 2020/8/24

### 3-2. 吊り上げ試験結果を踏まえた今後の対応

- ガレキ撤去前は、ガレキの堆積によりハンドル変形燃料の状況を確認できていなかったため、保守的な条件をもとにした解析結果に基づき、ハンドル変形燃料の吊り上げ荷重を最大700kgfとした。
- ガレキ撤去の進捗により、ハンドル変形燃料の状況を確認できたため、荷重分担材（ハンドル+結合燃料棒）のうち結合燃料棒に関しては、吊り上げ荷重を健全燃料と同様の1000kgfとしても問題ないことを第一回吊り上げ試験（5月21－22日）前に確認できていた。

→「Ⅱ ガレキ衝突解析」参照

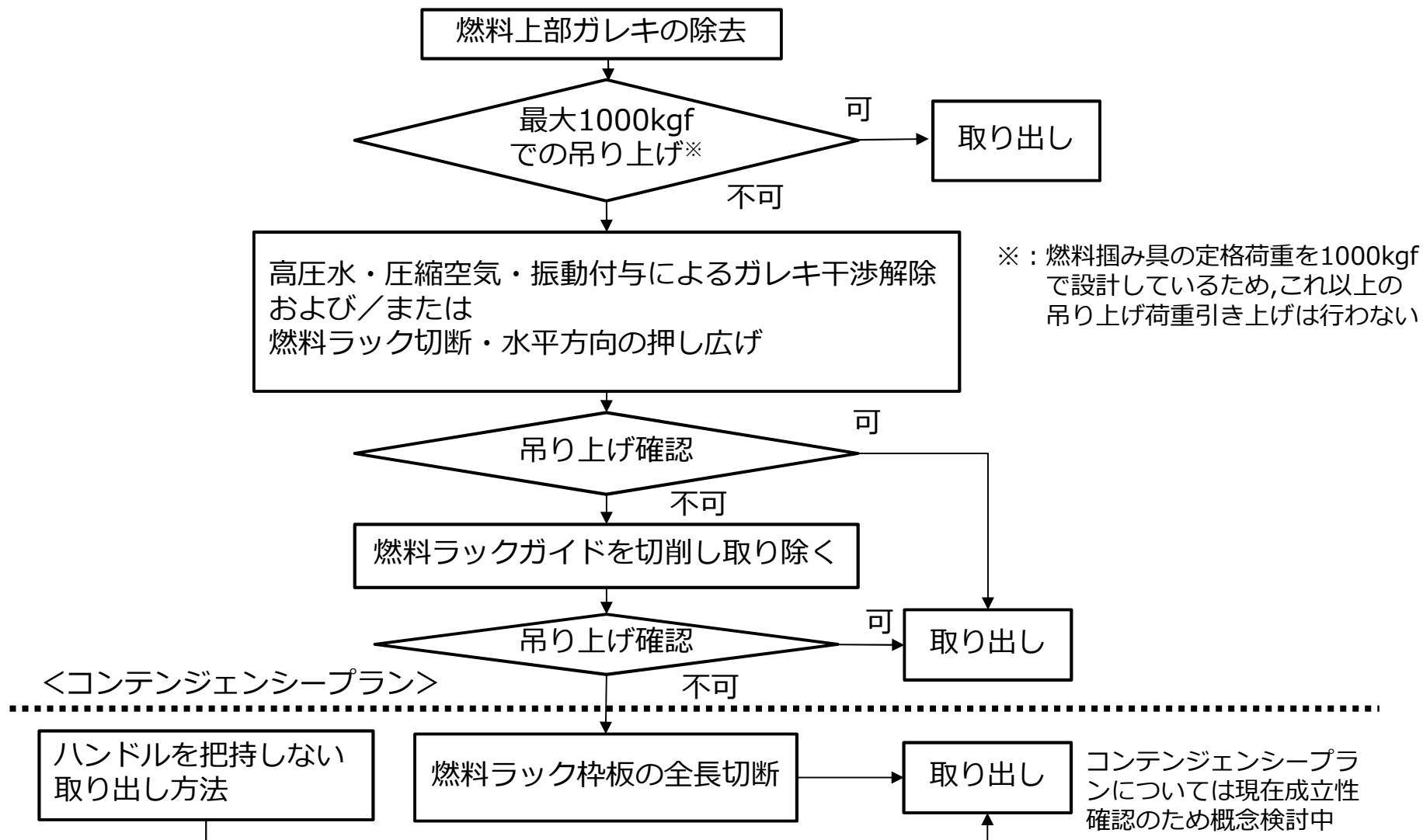
変形ハンドルに関しては、荷重700kgfの条件で評価をしていた。

- 第1回吊り上げ試験（5月21－22日）では、吊り上げ荷重を最大700kgfに制限して実施し、3体のハンドル変形燃料が吊り上がらなかった。
- このため、変形のない燃料と同様の吊り上げ荷重に見直すため、吊り上げ荷重1000kgfに対して、変形した燃料ハンドルが十分な強度を有することを確認する試験を追加で実施した。

→「Ⅲ 変形ハンドルの引張試験」参照

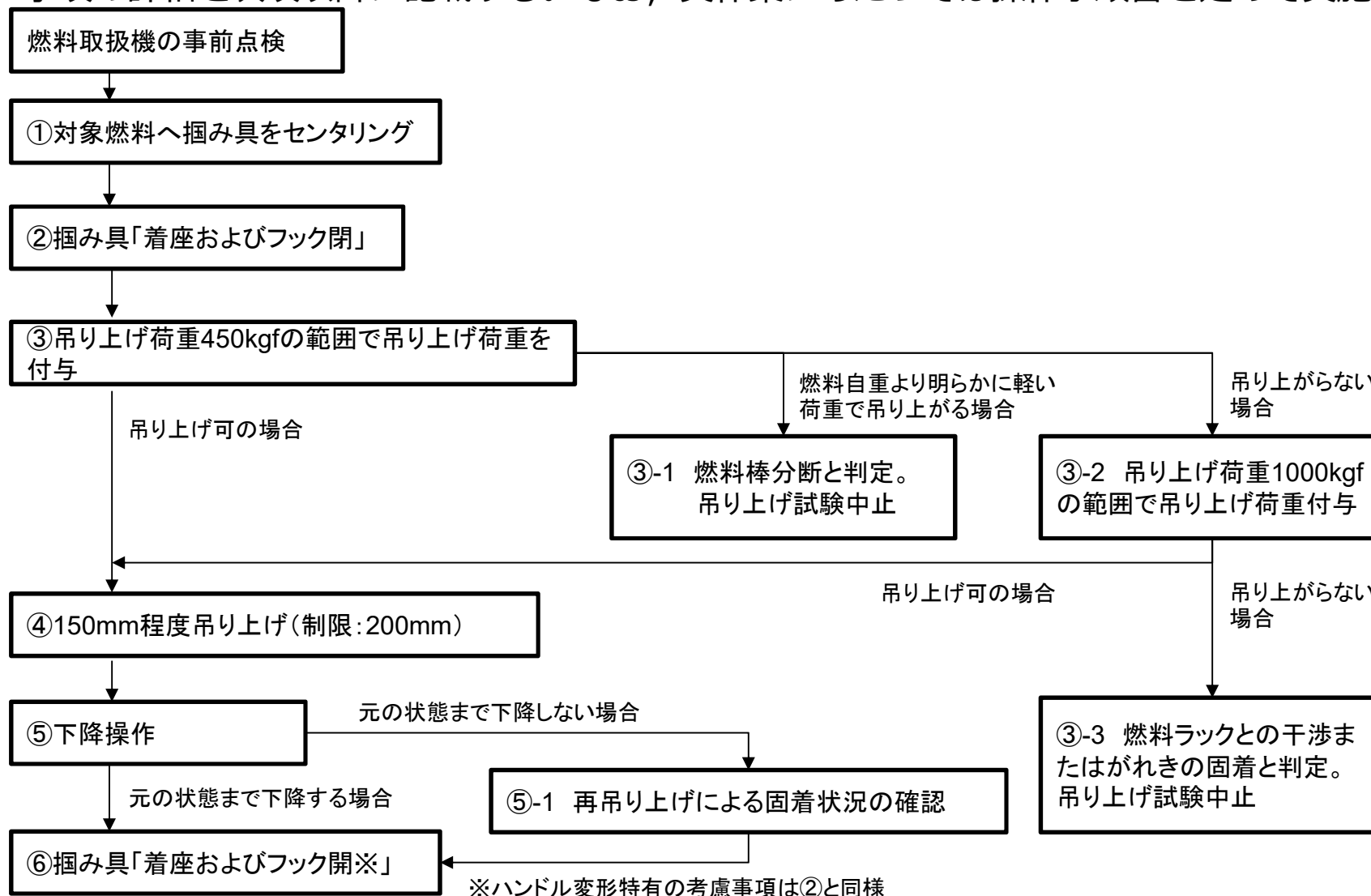
- 追加試験の結果、吊り上げ荷重1000kgfに対して十分な強度をもつことを確認できたため、今後変形燃料の吊り上げ荷重は最大1000kgfとする。
- 1000kgfで吊り上げられない燃料に対しては、次ページのフローに従い、燃料とラック・ガレキとの干渉解除等の対応を実施することとしている。

# 【参考】燃料とラック・ガレキとの干渉解除について



## 4. 吊り上げ試験手順について

- 吊り上げ試験の手順をフロー図で下記に記載
- フロー図のうち、ハンドル変形燃料特有の事象（通常は考慮不要の事項）、試験特有の考慮事項の詳細を次項以降に記載する。なお、実作業にあたっては操作手順書を定めて実施する





## 5-1. ①対象燃料への掴み具のセンタリング

- 通常の燃料では、掴み具の中心がハンドルの中心に位置するようにセンタリングする
- ハンドル変形燃料では、掴み具中心が変形したハンドルの上部に来るようにITVで細かく位置調整をしながらセンタリングを行う。
- また、フックの開方向は通常の燃料ではCF側に開くようにしているが、ハンドル変形燃料では燃料中心側に開くようにする<sup>\*</sup>。このため、CF側に変形している場合はFHMのマストを通常より180度回転してセンタリングする。



通常の掴み具センタリング



ハンドル変形燃料に対する掴み具センタリング(反CF側に変形している場合の例)

<sup>\*</sup>: 収納缶に燃料を収納する際の収納缶と燃料掴み具とのクリアランスを確保するため。今回の吊り上げ試験で必須事項ではない。

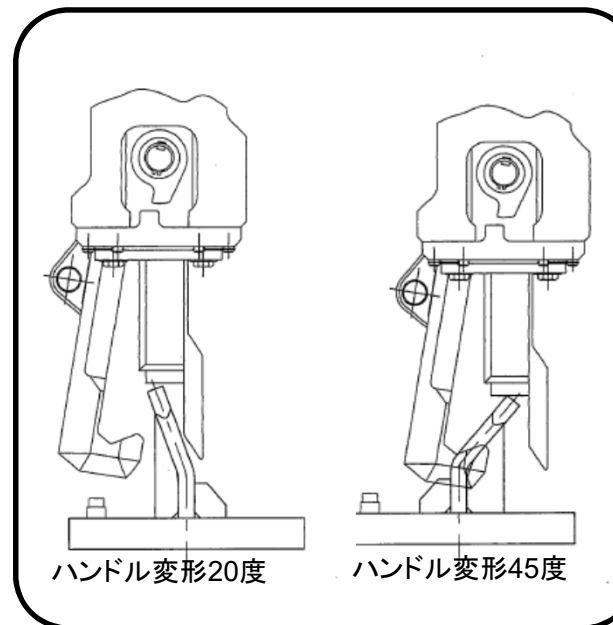
## 5-2. ②⑥ 掴み具「着座およびフック閉, 開」

- 通常の燃料では、ハンドル上部が燃料掴み具の着座検知用のリミットスイッチに接触することにより燃料掴み具の着座を検知する。着座状態でのみ掴み具の開閉操作が可能。
- ハンドル変形燃料では、大きく変形している場合着座検知ができない場合があるため、ITVでハンドルを把持可能な状態になっていることを確認後、着座検知のリミットスイッチをバイパスして掴み具の開閉操作を行う（着座後の開操作も同様）。
- リミットスイッチのバイパスは、掴み具の開閉操作実施後に復旧する。
- なお、吊り上げ試験実施後、下降時の燃料着座の検知はまず荷重を確認して燃料ラックに着座したことを判別する。その後フック開操作までの下降量は、吊り上げ前のフック閉操作時の高さ座標を事前に記録し、下降時の開操作を行う座標がわかるようにする。

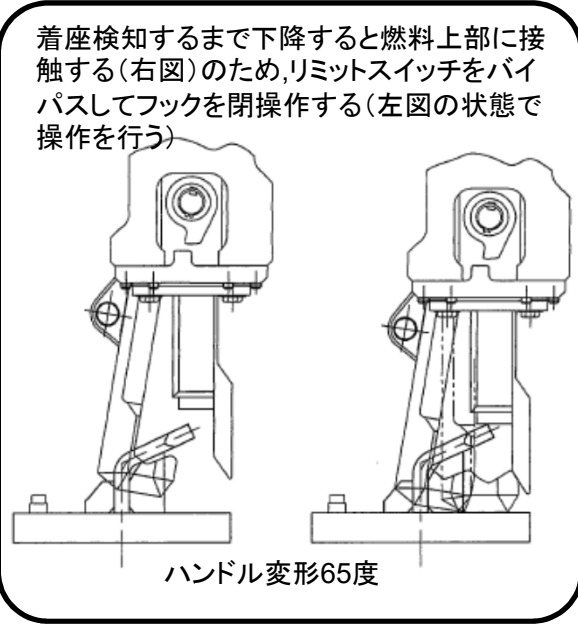


着座検知リミットスイッチ

リミットスイッチによる  
着座検知可能な状態の例



リミットスイッチによる  
着座検知不可能の状態の例



# (参考) 着座リミットスイッチのバイパスについて

- 燃料掴み具は、気中にある場合はリミットスイッチによる着座検知をせず開閉操作可能。
- 水中にある場合は、着座検知状態でなければ開閉操作ができない。
- このため、燃料掴み具の気中/水中を判別する座標設定値を一時的に変更し、気中にある状態（実際は水中）とすることで着座検知をバイパスして開閉操作が可能となる。
- なお、燃料吊り上げ状態では掴み具によるラッチ機構によりフックの開は防止されているが、バイパスを復旧しないと開操作を受け付ける状態のままとなるため、バイパスは掴み具の開閉操作実施後に復旧する。

**設定値画面**

燃料つかみ具		
燃料掴み具最低圧力[bar]	200	適用
燃料掴み具_荷重下限[kg]	-30	適用
空荷_荷重上限[kg]	30	適用
燃料掴み具水面位置[mm]	43500	適用
燃料把持_水中上限[mm]	41000	適用
燃料把持_水中下限[mm]	40000	適用

ハンドル高さより下部に設定し、気中状態を模擬する

**操作画面**

マスト

燃料つかみ具

圧力 ON 気中

インターロック開 インターロック閉

開 閉

圧力: 0.3 bar

リミットスイッチ

着座

フック開

フック閉

減圧中 減圧

下降

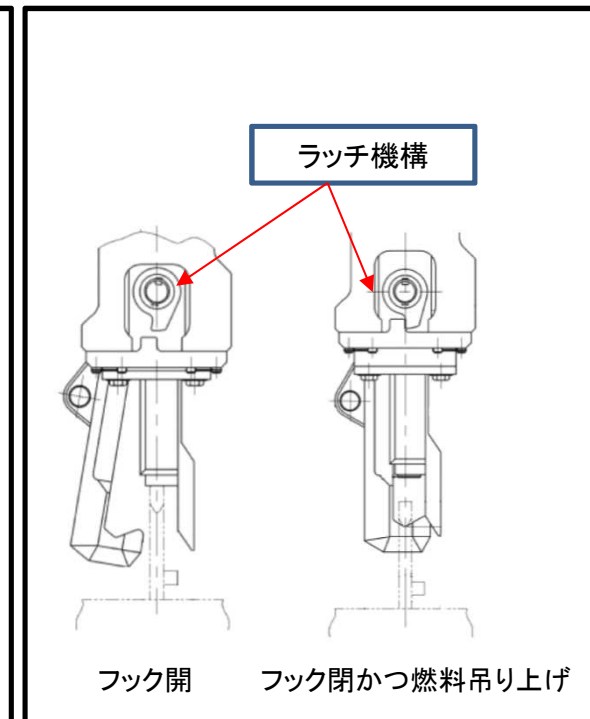
走行・横行禁止

気中状態の判定

着座リミットスイッチの判定

気中状態であれば、着座ランプが点灯しなくてもフック開閉操作が可能

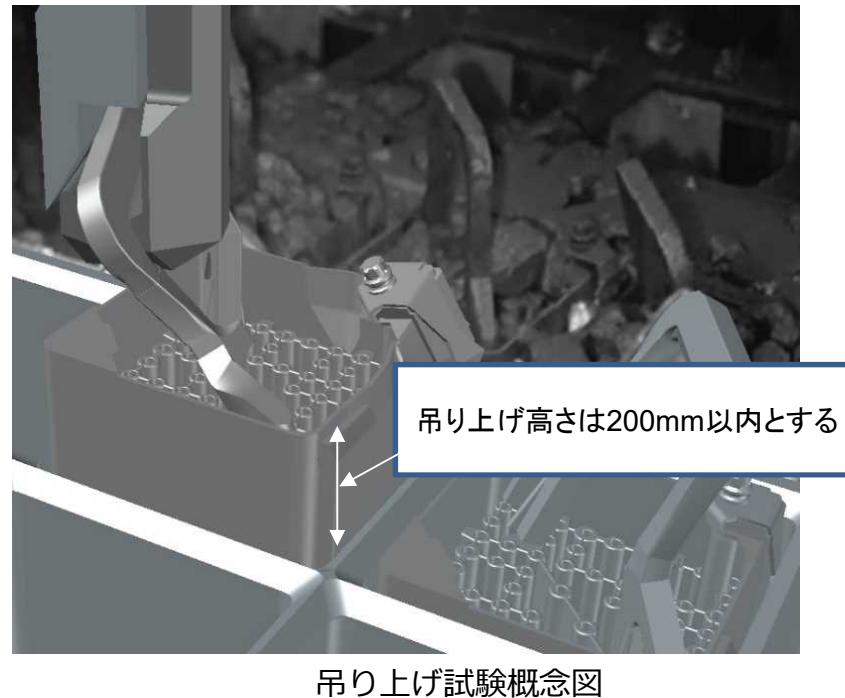
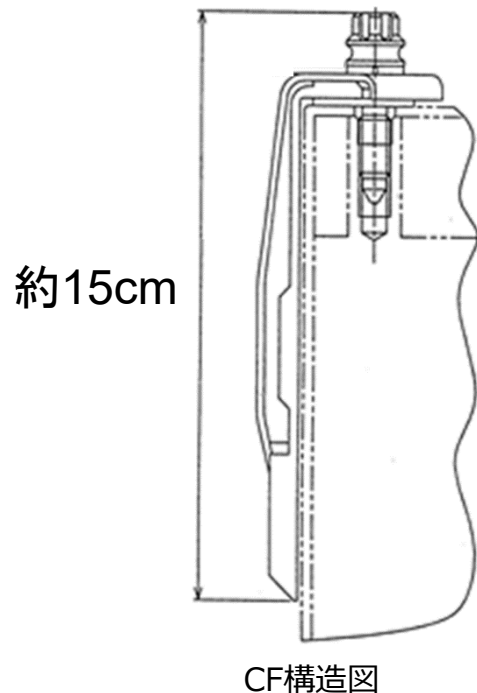
リミットスイッチバイパスのための座標変更



ラッチ機構による燃料吊り上げ状態でのフック開防止

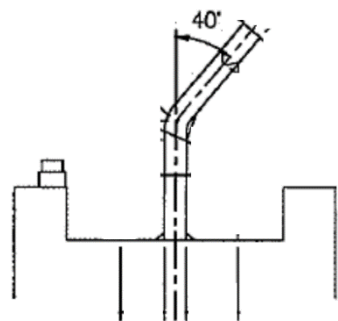
## 5-4. ④吊り上げ高さおよび⑤下降操作について

- ハンドル変形燃料を吊り上げ後、(a)がれきとの引っ掛かり、または(b)燃料とラックの間のがれきがラック底部に落ちることにより燃料が元の位置まで下降しない可能性がある。
- 前者(a)の場合、試験後に引っ掛かりが地震等により自然解消し燃料がラック底部に落下する可能性があるため、落下による燃料への影響の無い高さを考慮し、試験時の最大吊り上げ高さは200mmに制限する（燃料掴み具に荷重が掛かった高さを記録し、その値から200mm）
- 燃料が元の位置まで下降しない場合は再度燃料を吊り上げて(a)(b)どちらかを判別する。
- CFの全長は約15cmであり、またCF上端はラック上端より高いため、200mm以上試験時に吊り上げる事は無い。

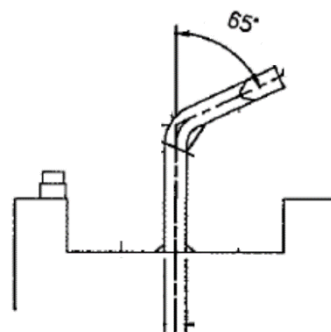


## 6. 事前訓練について

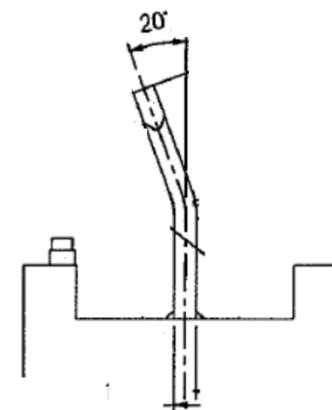
- ハンドル変形模擬燃料を, ハンドルの変形角度および変形方向を考慮し3体用意している
- 事前訓練ではこれら3体の模擬燃料について,吊り上げ試験の手順を実際に確認済み



ハンドル曲がり角度：40°  
(チャンネルファスナと  
逆方向に曲げ)



ハンドル曲がり角度：65°  
(チャンネルファスナと  
逆方向に曲げ)



ハンドル曲がり角度：20°  
(チャンネルファスナ側に曲げ)

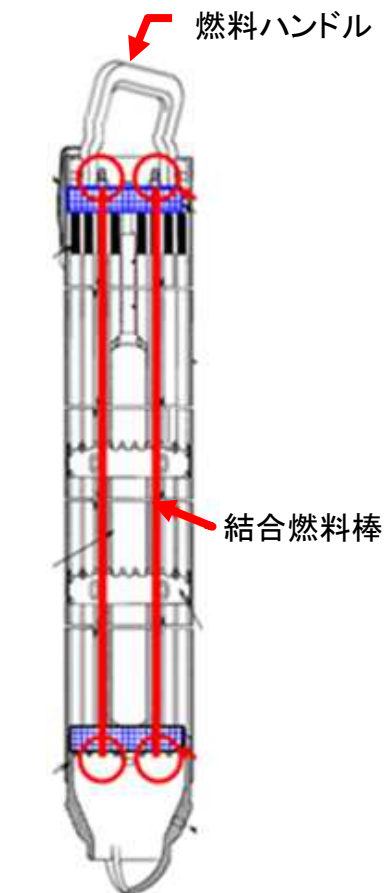
## 吊り上げ試験における吊り上げ荷重の設定について

## I 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＞

- ① 結合燃料棒は1本あたり1000kgf以上の強度を有することを引っ張り試験結果から確認している。
- 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っ張り試験データに基づき塑性歪み量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およびその近隣のチャンネルボックスが変形している燃料（p2の写真④が該当。以下、CB変形燃料という）が1体存在する。当該燃料については、評価の結果、CF近隣の結合燃料棒の変形が大きい可能性がある。ただし、実機写真を確認した結果、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1000kgfは問題なく吊り上げられるものと考えられる。

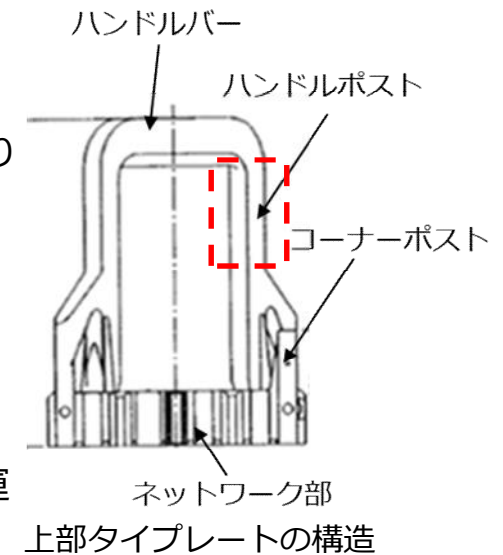


燃料吊り上げ時の荷重負担部材

## I 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>

- 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、引っ張り方向に荷重（13kN≒1326kgf, 26kN≒2651kgf）※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、引っ張り方向に荷重（13kN≒1326kgf, 26kN≒2651kgf）※を加えても、同様に変形部に有意な亀裂は無かった。



以上より、吊り上げ荷重を健全燃料と同等の1000kgf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1000kgfに対して最大+300kgf程度。

### <まとめ>

結合燃料棒とハンドル部の強度評価は、これまで3号機燃料取出しで荷重の制限としている1000kgfを下回るような耐荷重の大きな低下は無いと考えられる。

吊り上げ試験は、健全燃料と同様に荷重計表示で1000kgfを設定して試験を行うこととする。

上述の通り、この制限値は評価、試験および実機観察の結果から燃料破損のリスクに対し十分裕度のある設定値である。



## II ガレキ衝突解析 ～解析目的, 解析条件～

### <解析の目的>

- 燃料ハンドル部へのガレキ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>

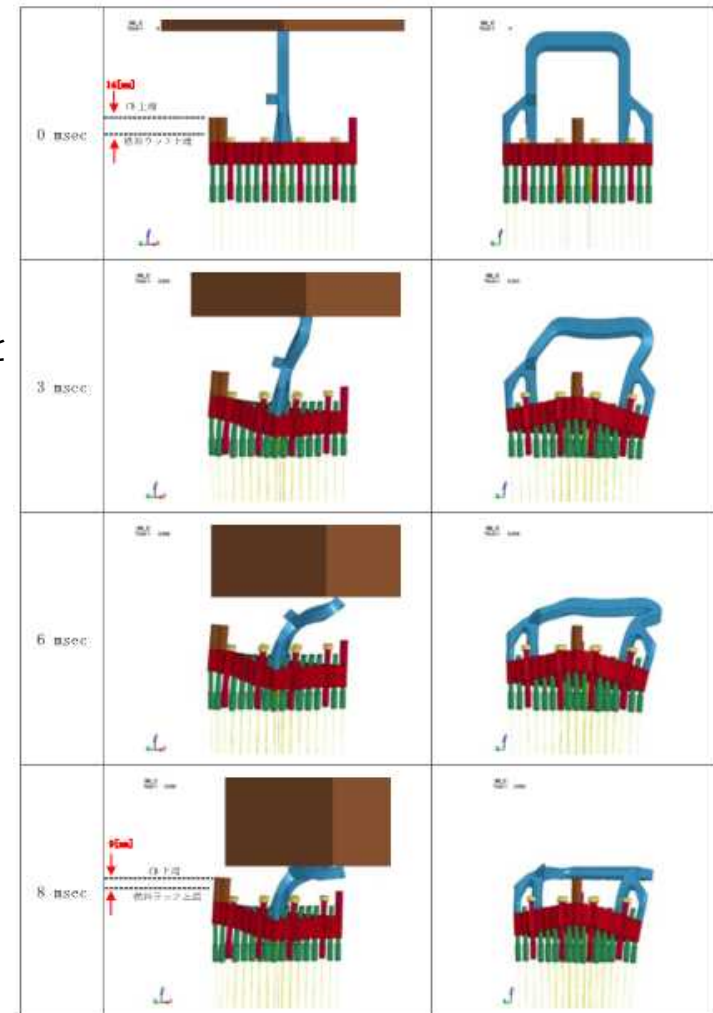
(評価手順・条件)

- ・ 3号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、ガレキ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。)

	ガレキ重量	ガレキ衝突速度	ガレキの衝突角度	燃料型式
条件①	1 ton	21 m/s	斜め45°	9x9燃料 (A型)
条件②	1 ton	21 m/s	垂直	9x9燃料 (A型)
条件③	4.5 ton	12 m/s	垂直	9x9燃料 (A型)
条件④	1 ton	21 m/s	垂直	8x8BJ燃料

(解析コード)

- ・ LS-DYNA (3次元非線形衝撃応答解析コード)



ガレキ衝突時の時刻歴解析結果 (条件①)

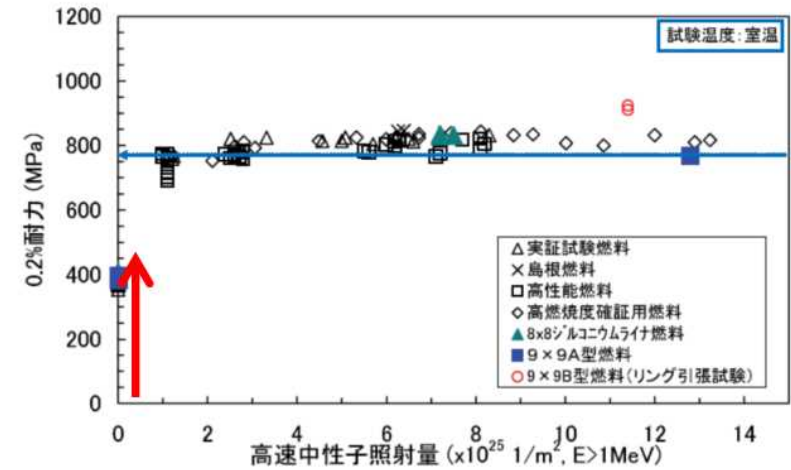
## II ガレキ衝突解析 ～解析条件～

### <解析条件（続き）> (物性値)

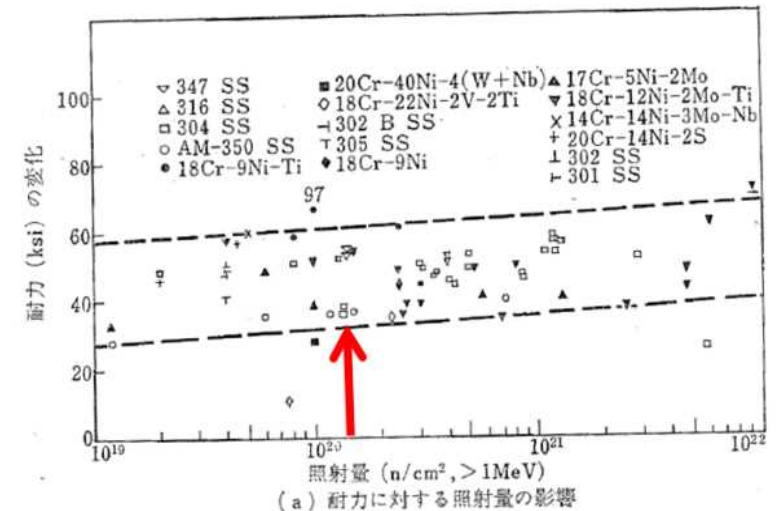
- 燃料集合体を構成する部材の大部分にジルカロイまたはステンレスが使用されており、いずれも中性子照射により強度が増大する。
- 原子炉内における5サイクル分の中性子照射量を評価した結果、燃料棒の上部端栓（ジルカロイ）は  $0.2E+25n/m^2$ 、上部タイププレート（ステンレス）は  $1.3E+20n/cm^2$  ( $0.1E+25n/m^2$ ) となり、いずれも未照射材に近い照射量であることを確認した。
- 未照射材は照射材と比較して降伏応力は低く、また、より大きな歪み量で破断に至る。
- 今回、ガレキ衝突解析では、ガレキ重量・衝突速度を解析ケース毎に固定した評価のため同じ衝突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

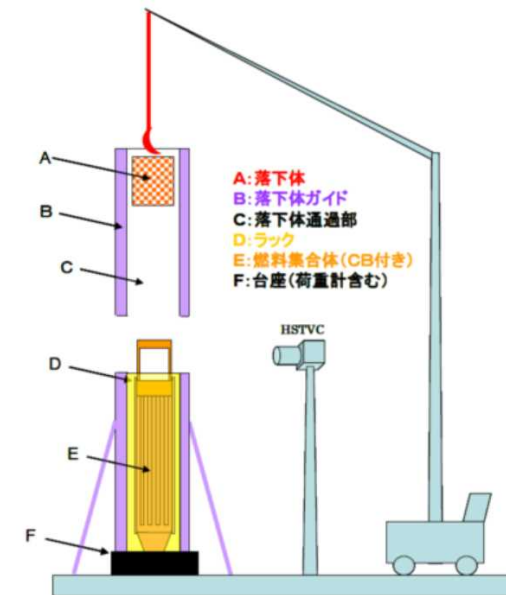
## II ガレキ衝突解析 ～試験結果の再現性～

### ＜ガレキ落下衝撃試験＞

- ラック内に貯蔵された燃料へのガレキ落下影響を解析評価するために、模擬燃料体を用いたガレキ落下試験を下記条件で実施した。  
(燃料型式：9x9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。

### ＜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ガレキ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。



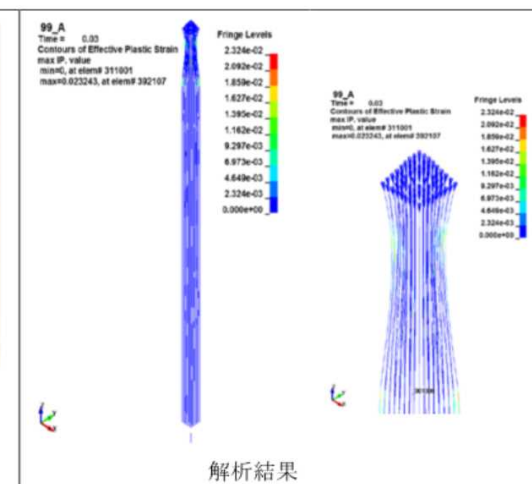
がれき落下試験イメージ図

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

ガレキ落下試験結果と解析の比較

## II ガレキ衝突解析 ～解析結果～

- ガレキ衝突解析の結果、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% \*<sup>1</sup>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1000kgfは問題なく吊り上げられる\*<sup>2</sup>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

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

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

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①) 上部端栓の塑性歪分布(条件②)  
(1000kgf, 21m/s, 斜め45°, 9x9A) (1000kgf, 21m/s, 垂直, 9x9A)

■ : 結合燃料棒

■ : 結合燃料棒

上部端栓の塑性歪分布(条件③) 上部端栓の塑性歪分布(条件④)  
(4500kgf, 12m/s, 垂直, 9x9A) (1000kgf, 21m/s, 垂直, 8x8BJ)

■ : 結合燃料棒

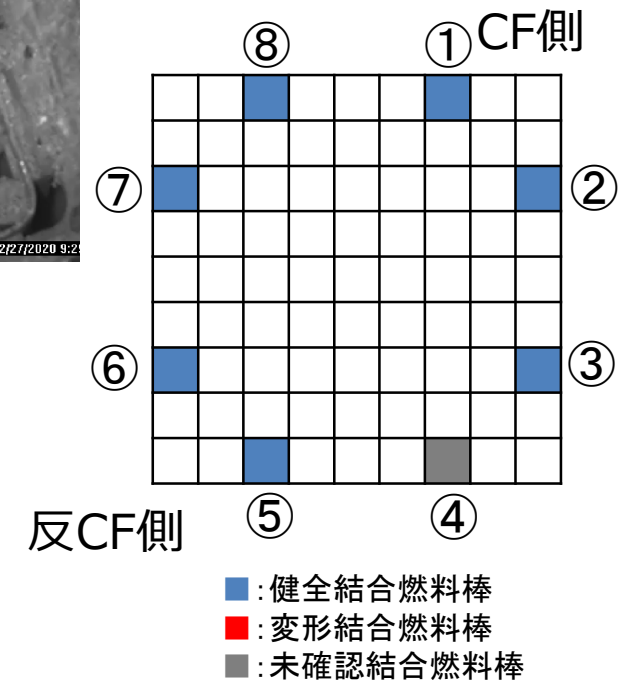
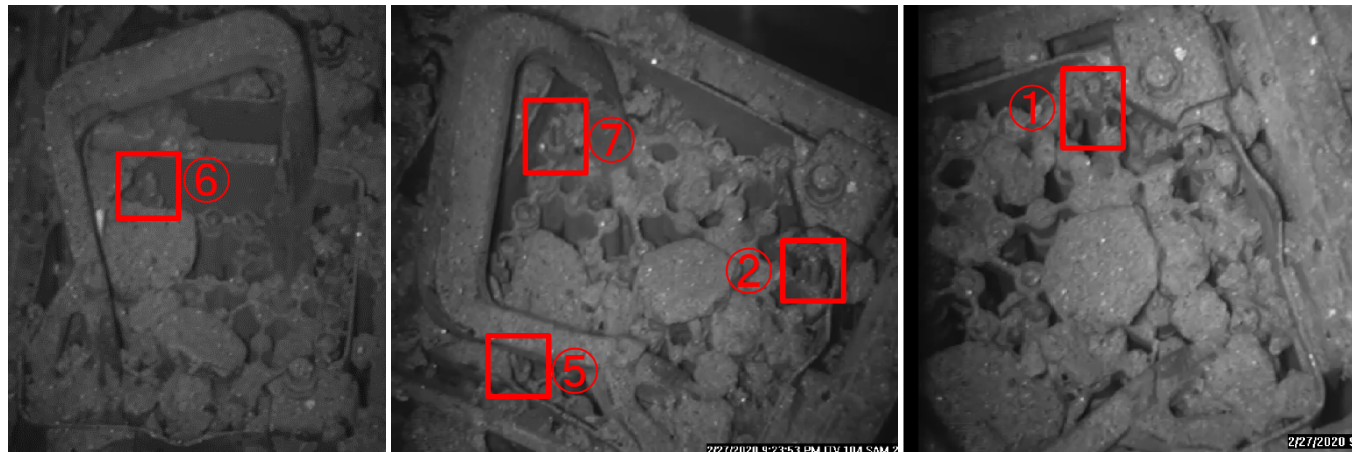
■ : 結合燃料棒

\*1 これまでに実施された燃料被覆管（未照射材，照射材）の軸方向の引張り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 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1000kgf以上。

## II 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の写真⑪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）



## II 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、ガレキ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 <sup>2</sup> 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 <sup>2</sup> 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	6.6	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 <sup>2</sup> 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認試験に関する試験最終成果報告書)」, 平成19年3

## II CB変形燃料のガレキ衝突の影響について

- 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\*<sup>1</sup>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。（\*<sup>1</sup> ITV画像からCFポストの傾倒角度は約27°と推定。）

### <評価条件>

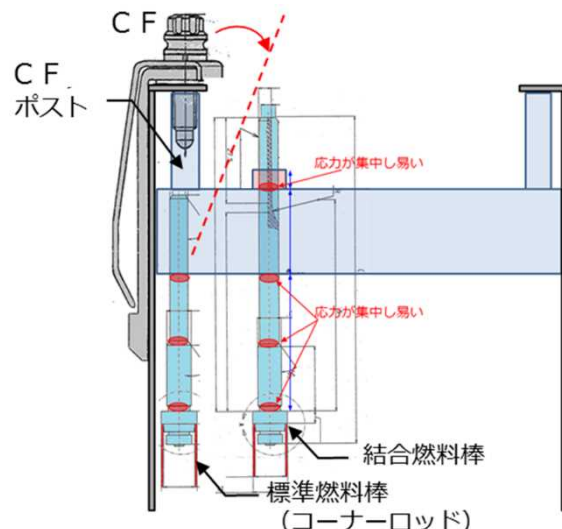
CFポスト傾倒角度：30°，評価温度：70℃\*<sup>2</sup>，物性値：ジルカロイ（未照射材）

### <評価モデル>

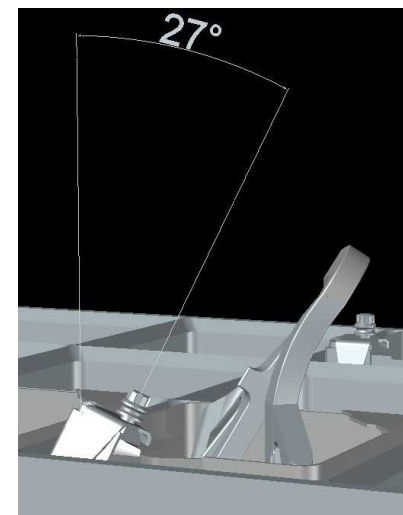
\*<sup>2</sup> 震災後の3号機SFP内温度の最高値（評価値）

- ・ 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。



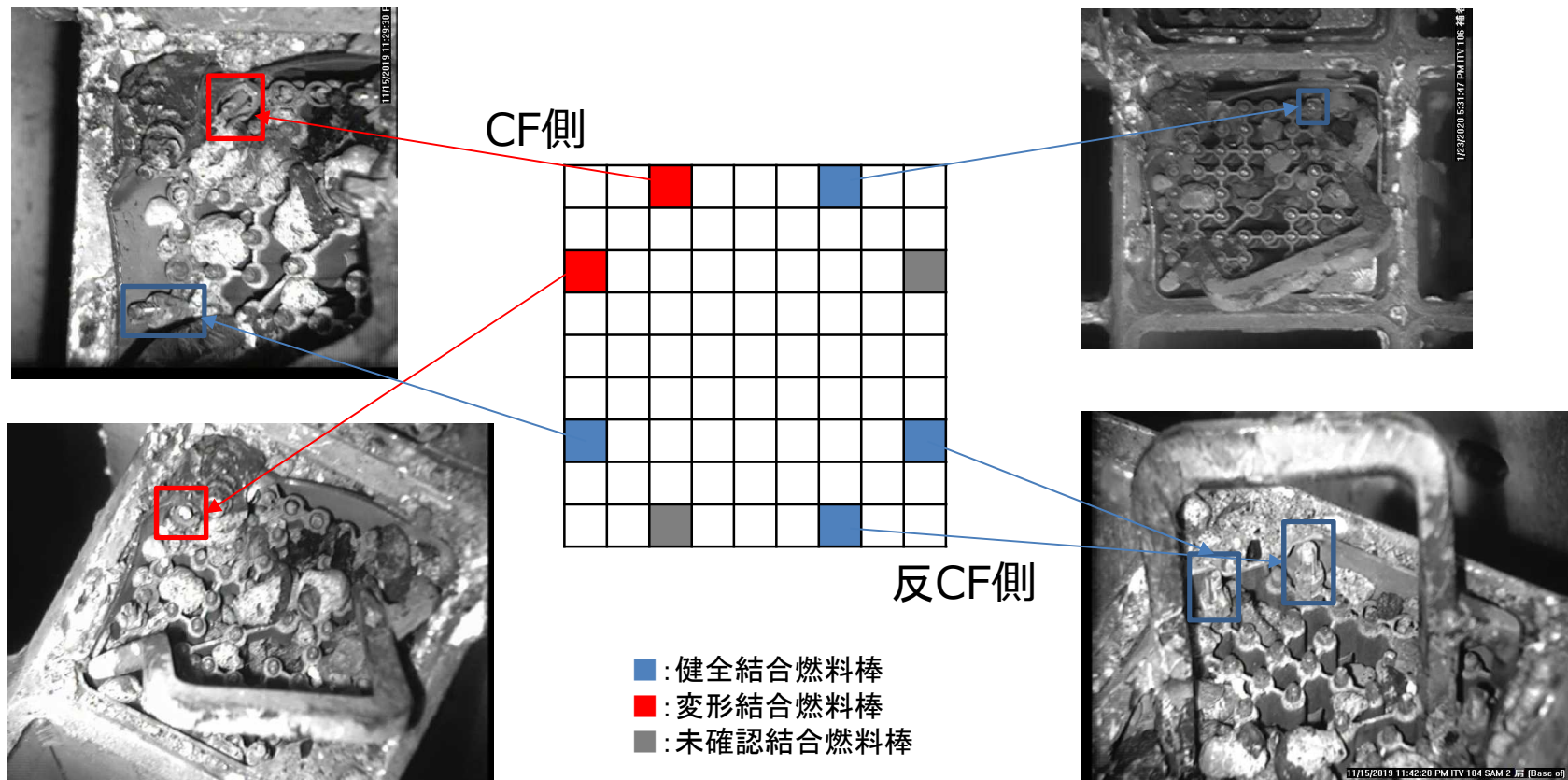
CB変形燃料のCF傾倒イメージ



ITV画像を基に作成した3D-CAD図

## II CB変形燃料の変形状況について

- CB変形燃料は、実機ITVによる画像から少なくとも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1000kgf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1000kgf以上。



## Ⅱ まとめ

---

- ハンドル変形燃料については、ガレキ衝突解析結果および I T V 画像による確認結果から、少なくとも 4 本の結合燃料棒が吊り上げに寄与できるものとする。また、同様に、C B 変形燃料についても、I T V 画像による確認結果から、少なくとも 4 本の結合燃料棒が吊り上げに寄与できるものとする。
- 以上より、ハンドル変形燃料及び C B 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 1000kgf は問題なく吊り上げられるものとする。

### Ⅲ 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 A型燃料であることから、追加試験は 9×9 燃料(A型) を対象とする。

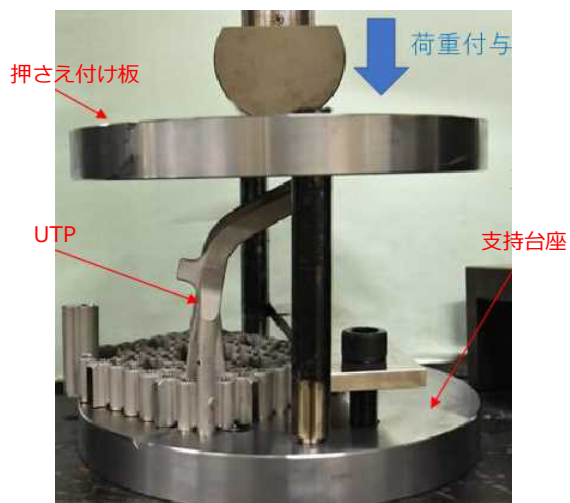
		模擬試験体	
UTP模擬試験	(変形前)		(変形後)
ハンドルポスト模擬試験			<ul style="list-style-type: none"> <li>• 試験片の曲げ起点から把持部根元までの断面形状模擬部分の長さ (寸法A) は、UTPの曲げ起点 (コーナポストの分岐点) からハンドルバー下端までの長さ (寸法C) と同等とした。</li> <li>• 試験片の曲げ起点位置から力点までの長さ (寸法B) は、UTPの曲げ起点から力点までの長さ (寸法D) よりやや長くなるようにした。これにより、曲げ起点位置に作用するモーメントが大きくなり、より保守側の条件となる。</li> </ul>

# 【参考】変形ハンドルの引張試験 ～試験ケース～

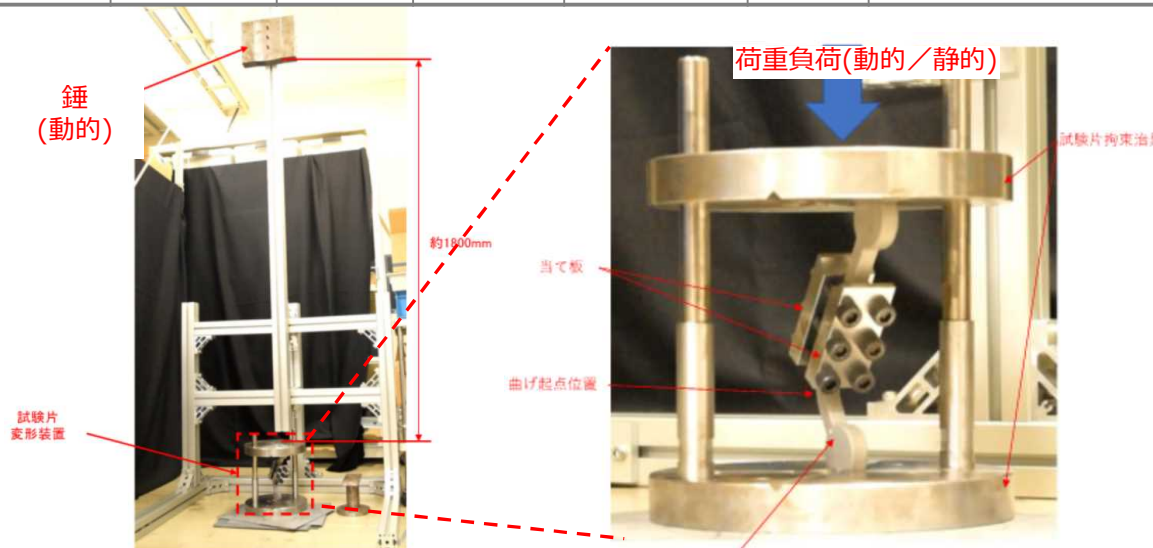
■ 引張試験の試験ケースを下記に示す。試験条件は次頁を参照。

○：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 (A) (Step3)	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	Step2, Step3	91°	06	○	○	○	○	700kgで吊り上げ出来なかった燃料と同型
		8×8BJ	92°	14	○	○	○	○	曲げ角度90°の予備として実施
	静的	Step2, Step3	90°	32	○	○	○	○	700kgで吊り上げ出来なかった燃料と同型
		8×8BJ	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)

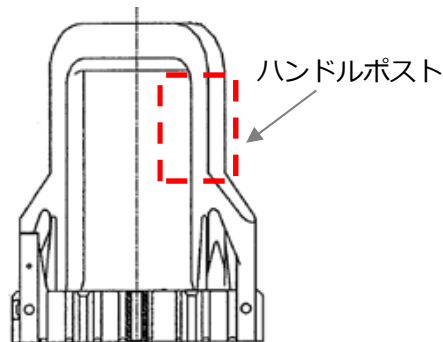
### Ⅲ 変形ハンドルの引張試験(その1：ハンドルポスト)

(試験対象)

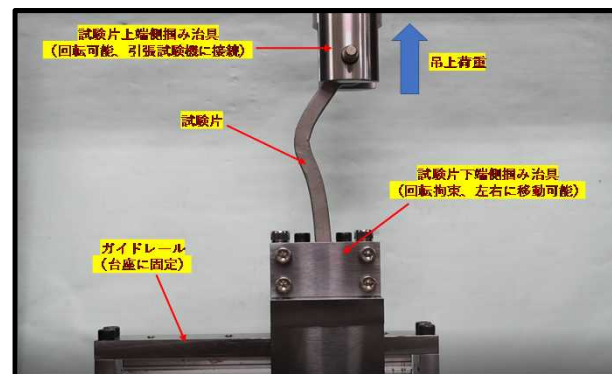
- 3号機ハンドル変形燃料と同型式のものを含む，9×9燃料（A型），高燃焼度8×8燃料，新型8×8ジルコニウムライナ燃料のUTPのハンドルポスト模擬試験片に対して試験を行った。

(試験条件)

初期変形角度	90°	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>		
引張試験	引張荷重	9.1kN (≒928kgf)	2:動的荷重 2:静的荷重	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
		13kN (≒1326kgf)	2:動的荷重 2:静的荷重	<ul style="list-style-type: none"> <li>吊り上げ荷重（約1000kgf）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</li> </ul>
		26kN (≒2651kgf)	2:動的荷重 2:静的荷重	<ul style="list-style-type: none"> <li>上記荷重の2倍を設定した</li> </ul>
	引張回数	10回		<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
破断試験	—	13kNと同じ		<ul style="list-style-type: none"> <li>試験片が破断するまで荷重を付与した</li> </ul>



上部タイププレート（UTP）の構造



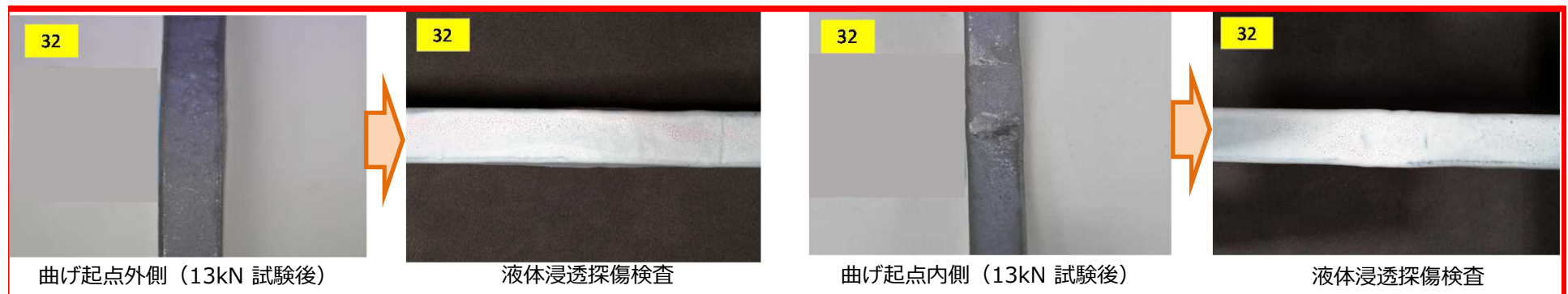
引張試験装置



引張試験装置（破断試験）

### Ⅲ 変形ハンドルの引張試験 ～試験結果（その1）～

- 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 x 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。



### Ⅲ 変形ハンドルの引張試験 ～試験結果（その1）～

- 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83.4kN～91.5kNの範囲となり、実機で想定している吊り上げ荷重（1000kgf）に対して十分な余裕があることを確認した。

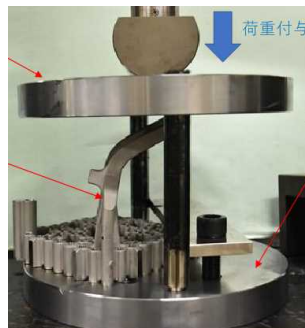
試験片ID	初期変形時に荷重付与方法	燃料型式	破断に至るまでの最大荷重 [kN]
06	動的	Step2, Step3	91.5
14		8×8BJ	89.7
32	静的	Step2, Step3	91.1
12		8×8BJ	83.4

### Ⅲ 変形ハンドルの引張試験（その2；上部タイププレート）

- 変形ハンドルの引張試験は，ハンドルポスト模擬試験片だけでなく，上部タイププレート本体に対しても，最大で曲がり角度80°以上の初期変形を付与した後，ハンドルポスト模擬試験片と同じ条件（9.1kN，10回），および（13kN，10回），（26kN，10回）で引張試験を行った。
- 試験体は3号機ハンドル変形燃料と同型式のものとして9 x 9燃料（A型）の上部タイププレートを用意した。

（試験条件）

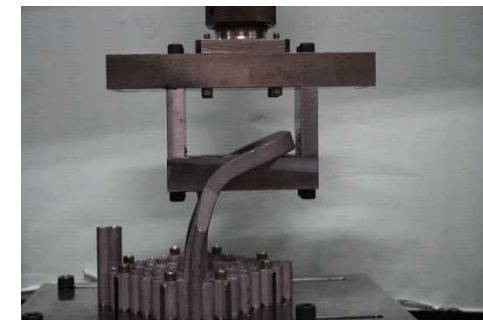
初期変形角度	80°以上		<ul style="list-style-type: none"> <li>3号機SFP内のハンドル変形燃料のうち，最も変形が大きいもの（60°）に対して余裕のある角度を設定した。</li> </ul>
引張荷重	9.1kN (≒928kgf)	1:9 x 9 (A型)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハンドル変形燃料の結合燃料棒に負荷可能な吊り上げ荷重（約700kgf）に対して，FHM荷重計の誤差，温度条件等を考慮して保守的に設定した。</li> </ul>
	13kN (≒1326kgf)	1:9 x 9 (A型)	<ul style="list-style-type: none"> <li>吊り上げ荷重（約1000kg）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</li> </ul>
	26kN (≒2651kgf)	1:9 x 9 (A型)	<ul style="list-style-type: none"> <li>上記荷重の2倍（吊り上げ装置の上限）を設定した</li> </ul>
引張回数	10回		<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>



変形付与装置の外観



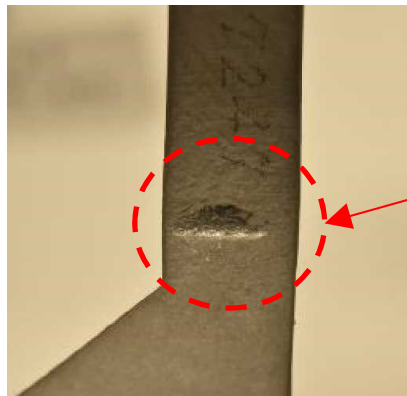
初期変形付与後の上部タイププレート外観



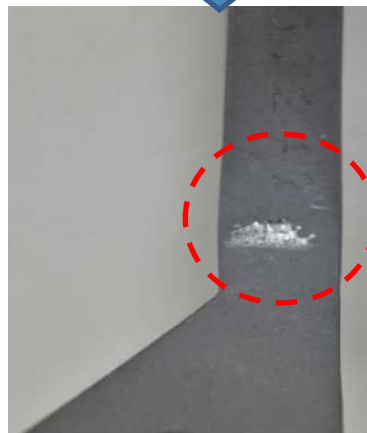
引張試験装置の外観

### Ⅲ 変形ハンドルの引張試験 ～試験結果（その2）～

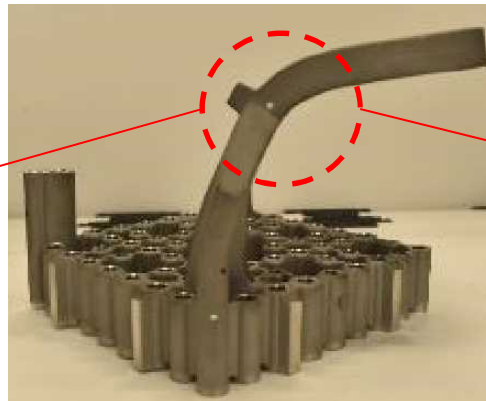
- 引張荷重13kNの試験結果，いずれの型式の試験体においても，有意なき裂は発生しなかった。（外観確認）



引張試験前（ハンドルポスト左側）



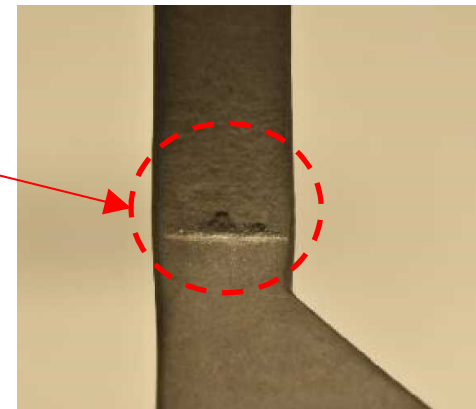
引張試験後（ハンドルポスト左側）



引張試験前（9 x 9 燃料（A型））



引張試験後（9 x 9 燃料（A型））



引張試験前（ハンドルポスト右側）

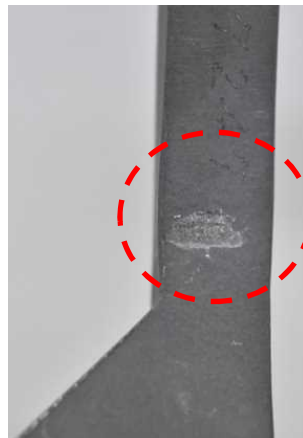


引張試験後（ハンドルポスト右側）

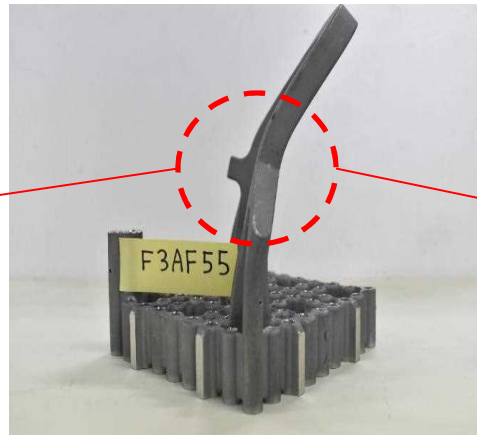


### Ⅲ 変形ハンドルの引張試験 ～試験結果（その2）～

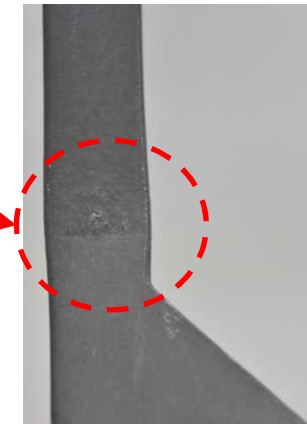
- 引張荷重26kNの試験結果，いずれの型式の試験体においても，有意なき裂は発生しなかった。（外観認）



引張試験後（ハンドルポスト左側）

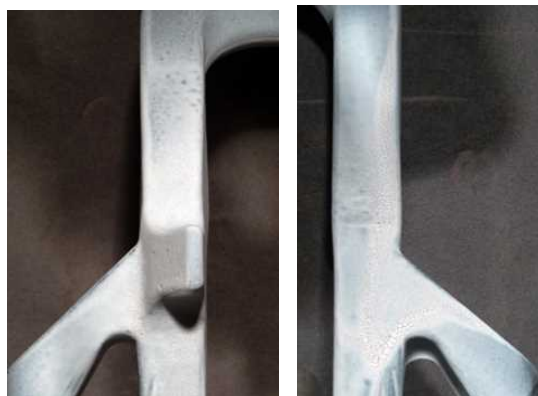


引張試験後（9 × 9 燃料（A型））

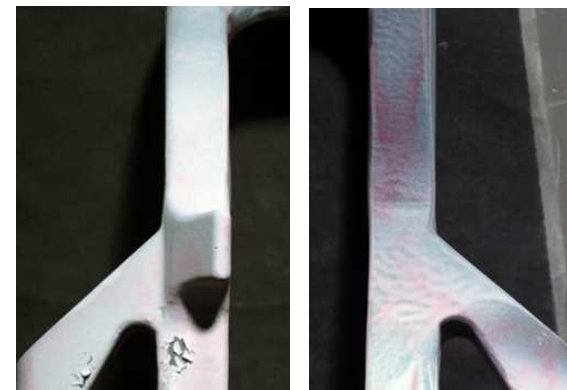


引張試験後（ハンドルポスト右側）

- 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）

#### 1. ハンドルポスト試験

- 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。
- 破断試験の結果, 破断に至るまでの最大荷重は83.4kN~91.5kNの範囲となり, 実機で想定している吊り上げ荷重 (1000kgf) に対して十分な余裕があることを確認した。

#### 2. 上部タイプレート

- 引張荷重13kN, 26kNの試験結果, ハンドル部は破断せず, き裂も発生しなかった。

#### 3. まとめ

新たに変形したハンドルを模擬した引張試験を実施し, 1000kgfに余裕を見て約2000kgfまで増加させた場合でもハンドルの強度に問題の無い事を確認した。

## 【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)

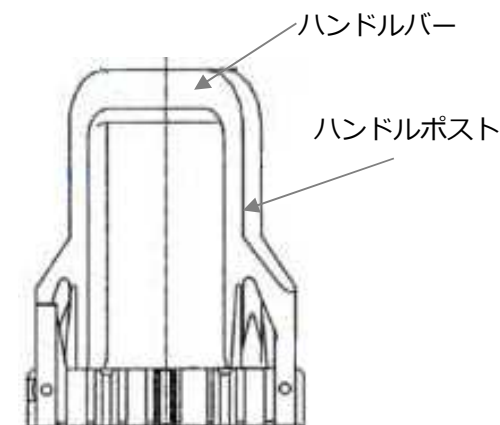
- 実機のハンドル変形燃料は、右図のようにハンドルが約60° 変形した燃料が存在する。
- このため、今回実施した試験では、上部タイプレートを60° を超えて曲げて引っ張った試験を実施している。
- また、実機ではハンドルポスト（ハンドルの片側）の倒れ角度は2本が並行でない場合もあり、吊り上げ時にハンドルポストの片側に荷重が大きくかかる可能性がある。このため、ハンドルポスト片側を模擬した試験についても実施している。
- なお、ハンドルバーは下部側は2重の構造になっており断面積が大きく強度が高いため、断面積の小さいハンドルポスト上部を試験片では模擬している。



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：16ページ参照)
- 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。

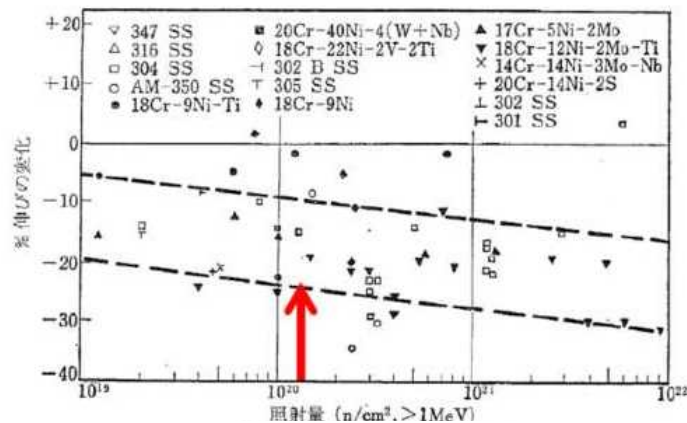


図1 オーステナイト系ステンレス鋼の高速中性子照射による伸びへの影響  
(赤矢印はUTPハンドル部の照射量を示す)

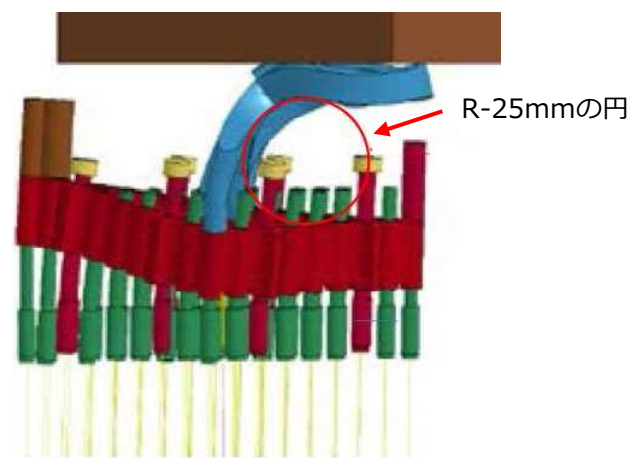


図2 UTP変形状態の評価結果

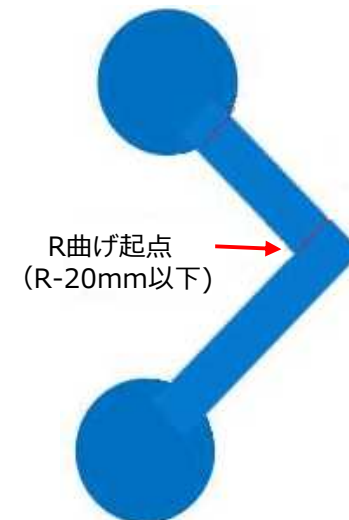
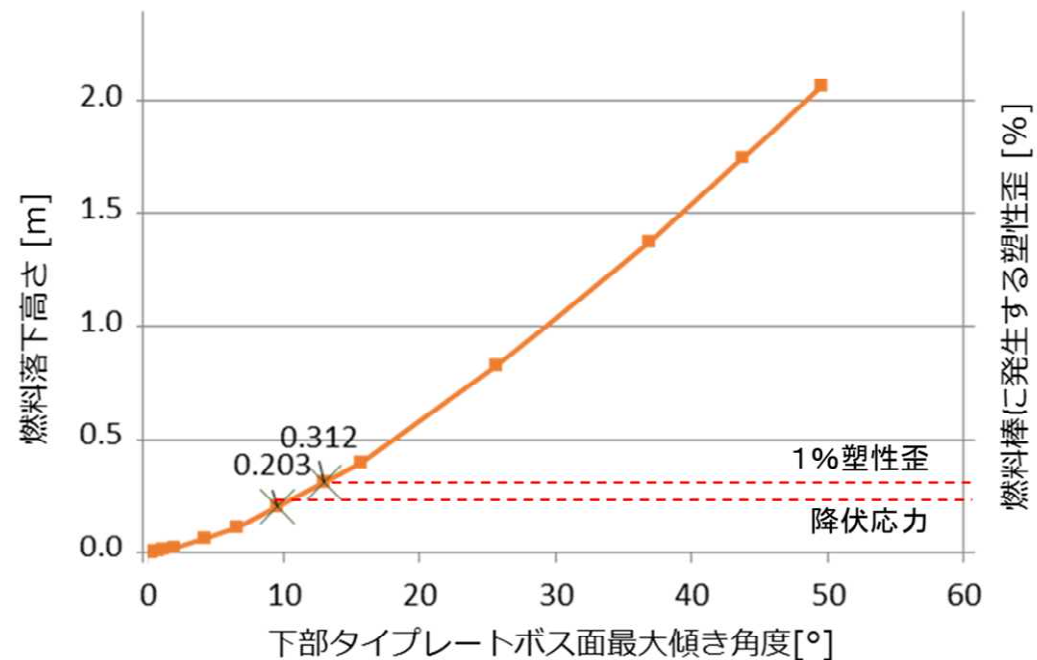
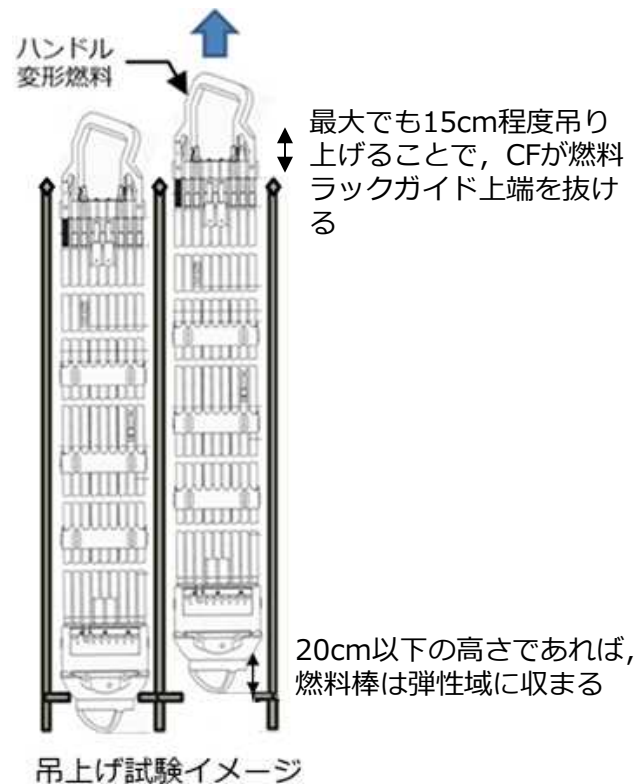


図3 試験片の初期変形状態

以下，参考資料

## 【参考】最大吊り上げ高さ評価結果

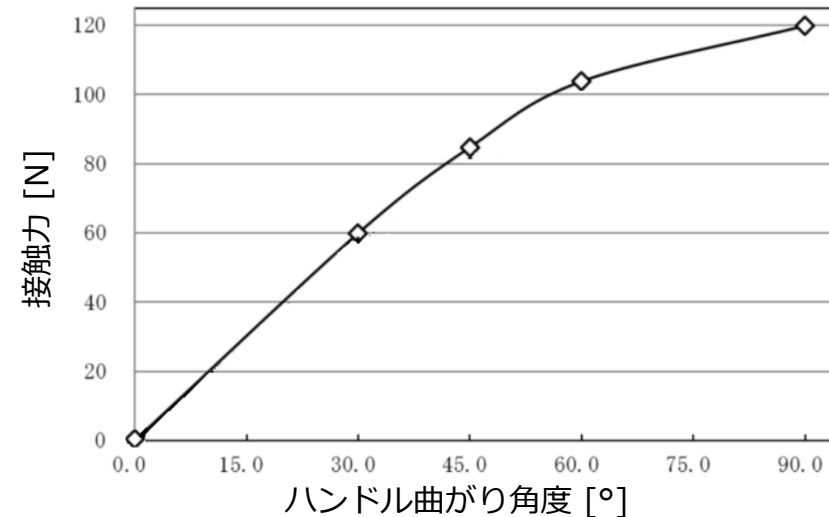
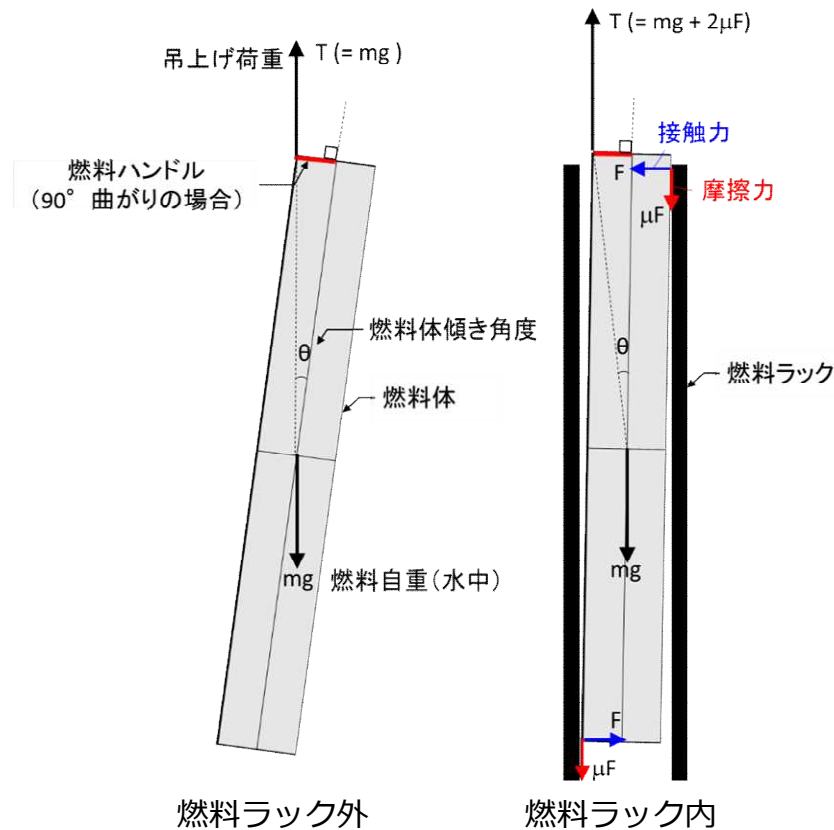
- 吊り上げ試験時の最大吊り上げ高さを設定するため、万一燃料を落下させた場合でも燃料棒が破損しない落下高さを評価した。落下高さ評価は下記2段階に分けて実施した。
  - ① 落下高さをパラメータとして、落下時の衝撃で変形する燃料下部タイプレートのボス面（燃料棒が挿入されている面）の最大傾き角度を評価する。
  - ② 燃料下部タイプレートのボス面の最大傾き角度をパラメータとして、燃料棒に発生する歪を評価する。
- 評価の結果、落下高さ20cm以下であれば弾性域に収まる（降伏応力に達しない）ことを確認した。なお、吊り上げ試験ではチャンネルファスナが燃料ラックガイドの上端を抜ける高さ（最大でも15cm程度）まで吊り上げることで試験目的である吊り上げに係る不具合の有無を確認できる。



9 x 9 燃料 (A型) の落下高さ評価結果

## 【参考】 ハンドル曲がりによる吊り上げ時の摩擦力について

- ハンドル変形燃料は吊り上げ時にハンドル曲がり角度に応じて燃料全体に傾きが生じる。
- 但し、燃料ラック内から燃料を取出すまでは燃料ラック内壁により燃料全体の傾きが抑えられる。これは燃料ラック内壁から傾きを抑える接触力が燃料体に働くためであり、吊り上げ時は軸方向に接触力の大きさに応じた摩擦力が生じる。
- 吊り上げ時の摩擦力を評価した結果、ハンドル曲がり角度90°の場合でも燃料体に生じる摩擦力の合計は約26kgfであり、ハンドル変形燃料に負荷できる最大吊り上げ荷重（1000kgf程度）と比較して十分に小さいことから、吊り上げ上の問題はないと考える。



ハンドル曲がり角度に応じた燃料ラックとの接触力について

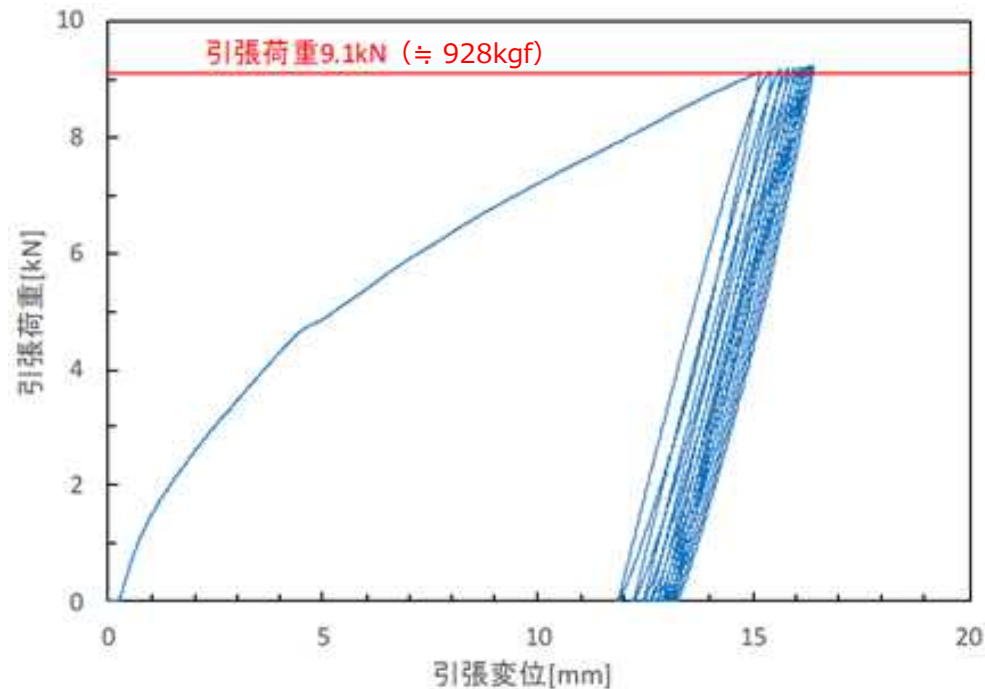
<補足>

- ハンドル曲がり角度が90°のとき、接触力は約120[N]（≒約13kgf）となる。保守的に摩擦係数を1.0とすると、軸方向に働く摩擦力は約13kgfとなる。
- ラックとは燃料上部と下部の2ヶ所で接するため、摩擦力の合計は約26kgfとなる。

ハンドル曲がりに伴う吊り上げ時の摩擦力について

## 【参考】ハンドル変形燃料の曲げ戻しについて

- 引張試験の結果，下記グラフに示すとおり一回目の荷重負荷では変形ハンドルに曲げ戻しが発生するものの，二回目以降の負荷・除荷では曲げ戻しの進展は無かった。  
（参考：9x9燃料（A型） $83^{\circ} \Rightarrow 69^{\circ}$ ，高燃焼度8x8燃料： $89^{\circ} \Rightarrow 66^{\circ}$ の曲げ戻しがあった）
- また，下記図に示すとおり，垂直に負荷する荷重（黒色のベクトル）が同じ場合，ハンドルの傾きが大きいほどハンドルの曲げ戻しに寄与する力（青色のベクトル）は大きくなる。
- そのため，実機ハンドル変形燃料は，最大でも $60^{\circ}$ 程度であることから，曲げ戻しの大きさは本試験結果よりも小さくなるものと考えられる。



引張試験における引張荷重－引張変位グラフ

