

3号機ハンドル変形燃料吊り上げ試験について

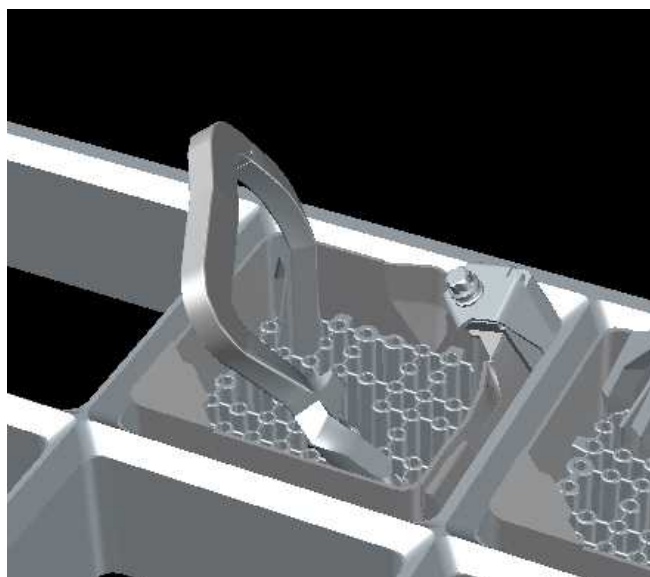
2020年5月14日

TEPCO

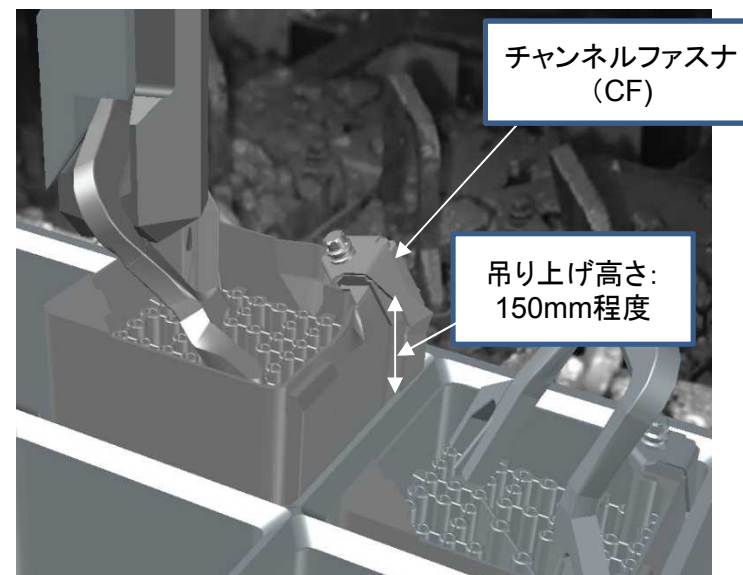
東京電力ホールディングス株式会社

1. ハンドル変形燃料の吊り上げ試験について

概要
<ul style="list-style-type: none">■ 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15体存在する（2020.5.14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）■ 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。



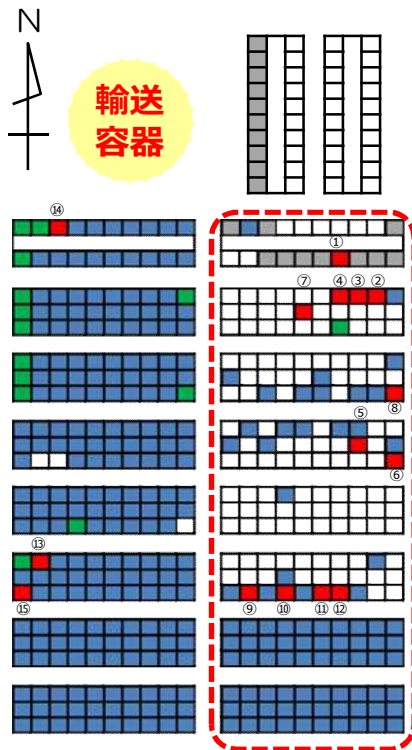
吊り上げ前



吊り上げ試験概念図

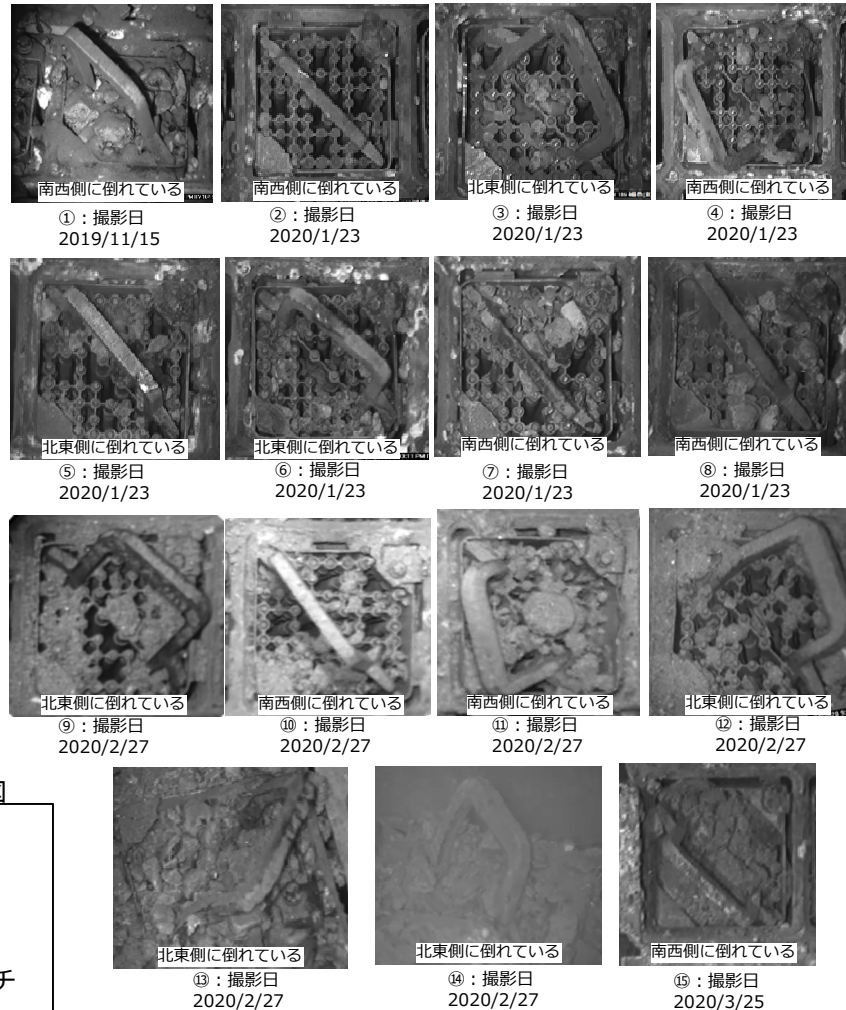
2. 吊り上げ試験対象燃料について

- ハンドルがCF側に大きく倒れていると現状のFHM掴み具とCFが干渉する。
- そのため、5月に実施する吊り上げ試験では、**全15体のハンドル変形燃料のうち、現状のFHM掴み具で把持可能な11体について実施する。**
- 残りの4体については大変形用のFHM掴み具が現地納入次第実施（12月予定）。



3号機使用済燃料プール内西側拡大図

- : ガレキ撤去完了
- : 燃料ハンドル目視確認完了
- : ハンドル変形を確認【15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



ハンドル変形燃料一覧 (■: 5月吊り上げ試験対象)

No.	型式	ITVによる推定曲がり角度	変形方向※	5月吊り上げ試験
①	STEP2	約10°	反CF側	○
②	9×9A	約10°	反CF側	○
③	9×9A	約40°	CF側	-
④	9×9A	約40°	反CF側	○
⑤	9×9A	<10°	CF側	○
⑥	9×9A	約10°	CF側	○
⑦	9×9A	約10°	反CF側	○
⑧	9×9A	約20°	反CF側	○
⑨	9×9A	約40°	CF側	-
⑩	9×9A	約10°	反CF側	○
⑪	9×9A	約60°	反CF側	○
⑫	9×9A	約60°	CF側	-
⑬	9×9A	約40°	CF側	-
⑭	9×9A	約20°	CF側	○
⑮	STEP2	<10°	反CF側	○

※ハンドルが北東側に倒れている場合は、CFが掴み具と干渉するため、把持可能な角度が小さい。

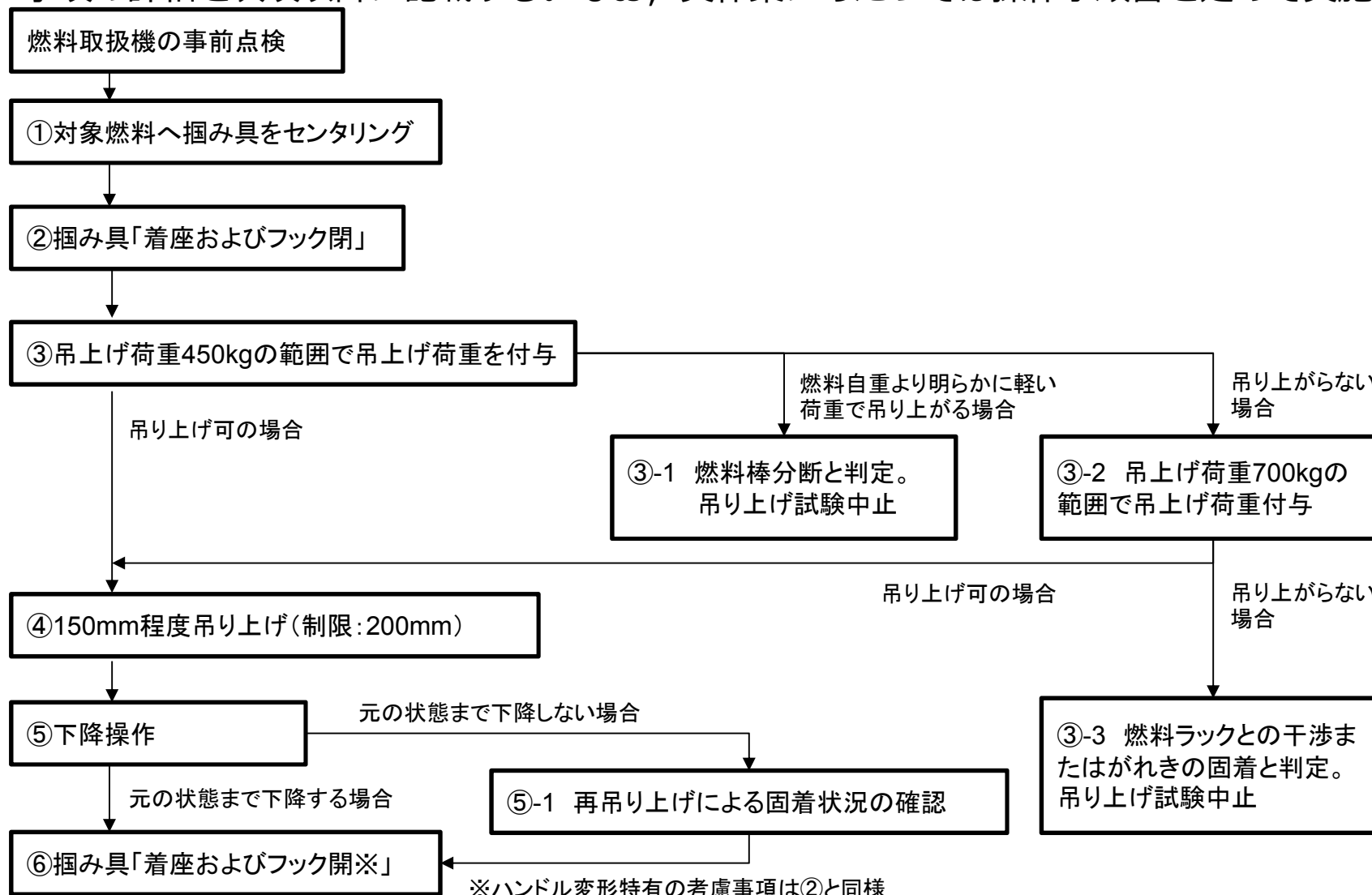
3. スケジュール

- 5/21（木）～5/22（金）の2日間で吊り上げ試験を実施する
- 5/19（火）～5/20（水）にて、模擬燃料（ハンドル変形）を用いて吊り上げ試験の事前訓練を実施する
- なお、試験前後にプール水のサンプリングを行い、ハンドル変形燃料の吊り上げによる水質影響が無い事を念のため確認する

2020年 5月	19(火)	20(水)	21(木)	22(金)
	模擬燃料による事前訓練			
			ハンドル変形燃料吊り上げ試験	

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^{*}。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)

^{*}: 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。

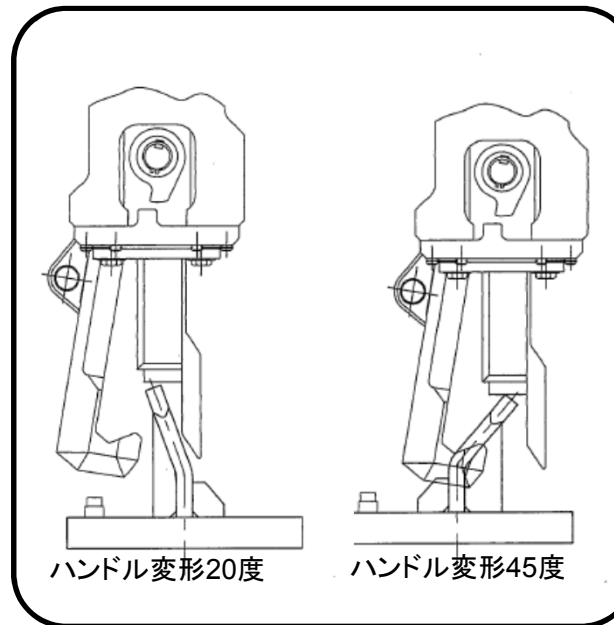
5-2. ②⑥ 掴み具「着座およびフック閉, 開」

- 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。

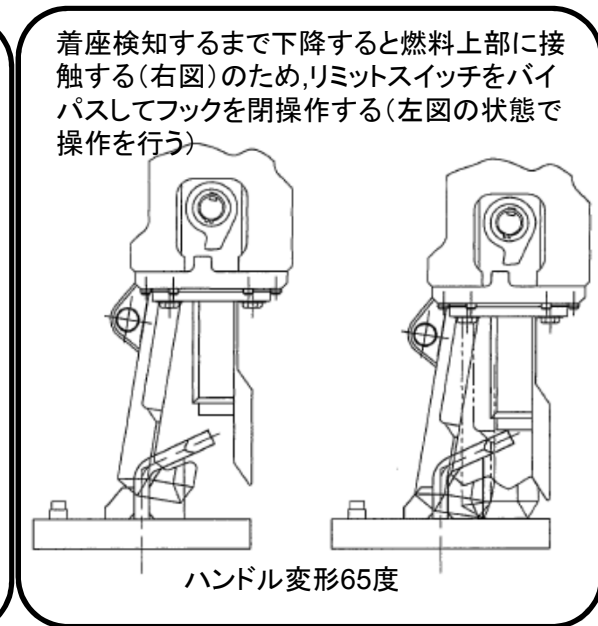


着座検知リミットスイッチ

リミットスイッチによる
着座検知可能の状態の例



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

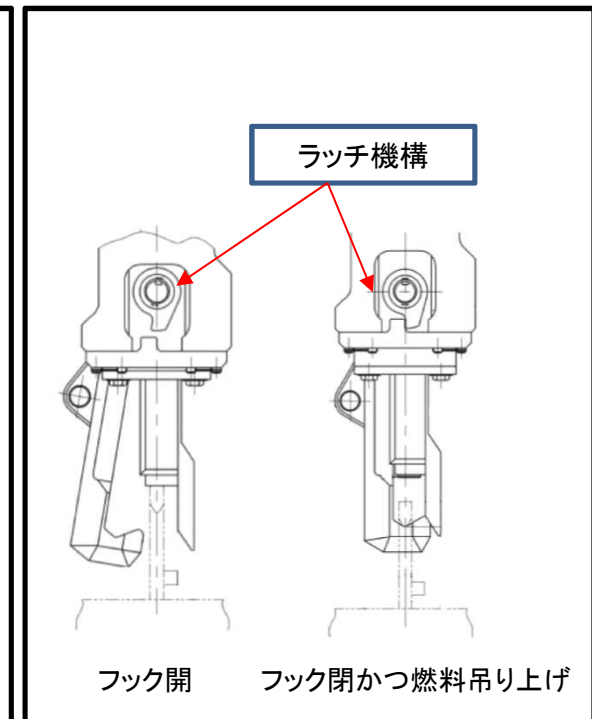
走行・横行禁止

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

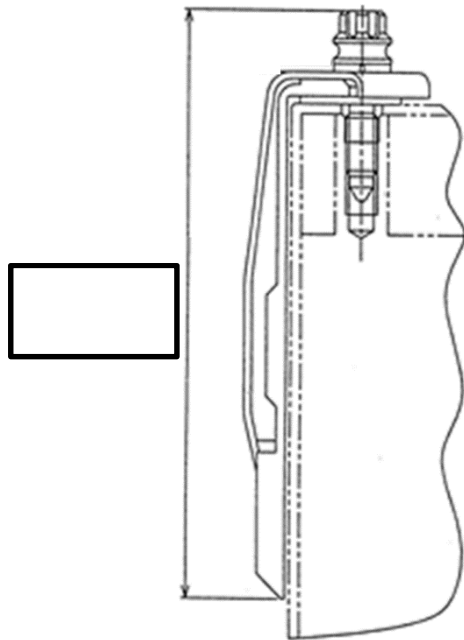
リミットスイッチバイパスのための座標変更



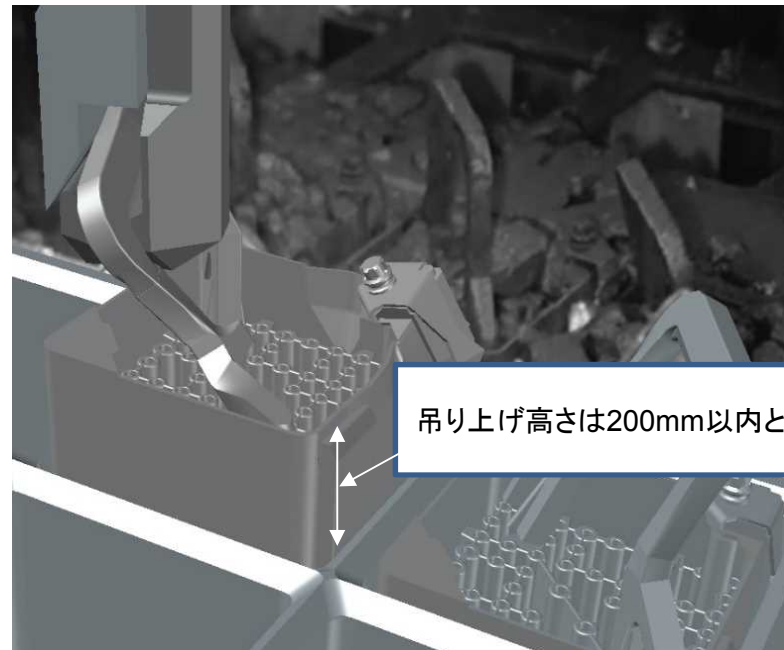
ラッチ機構による燃料吊り上げ状態でのフック開防止

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)燃料とラックの隙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 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。



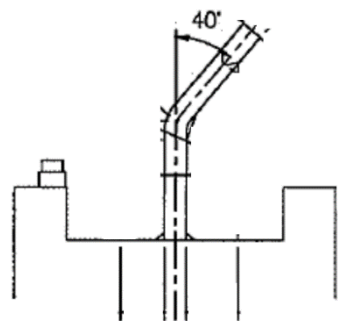
CF構造図



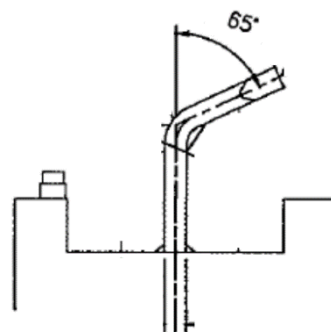
吊り上げ試験概念図

6. 事前訓練について

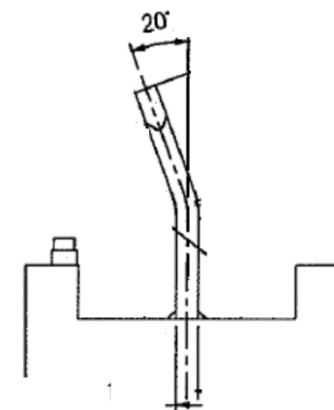
- ハンドル変形模擬燃料を, ハンドルの変形角度および変形方向を考慮し3体用意している
- 事前訓練ではこれら3体の模擬燃料について,吊り上げ試験の手順を実際に確認する



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)

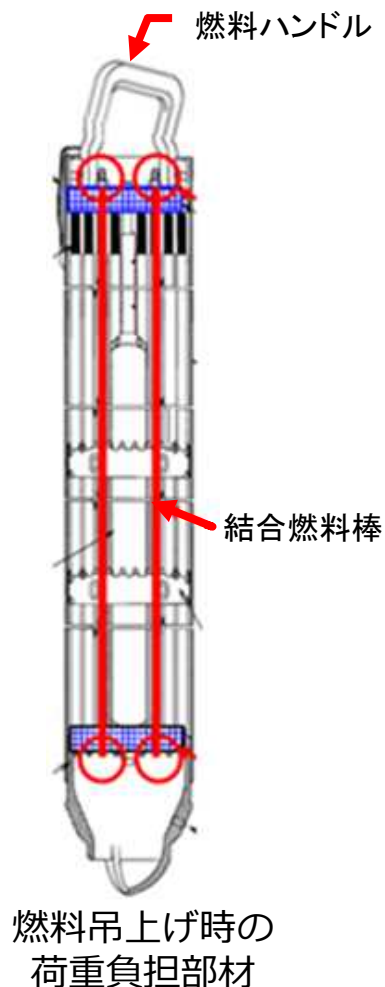
吊り上げ試験における吊り上げ荷重の設定について

I ハンドル変形燃料の吊上げ荷重について（概要）

- 燃料吊上げ時は、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1t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（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近傍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点以上での吊上げになることから、結合燃料棒全体では3ton以上の耐荷重を有するものとする。



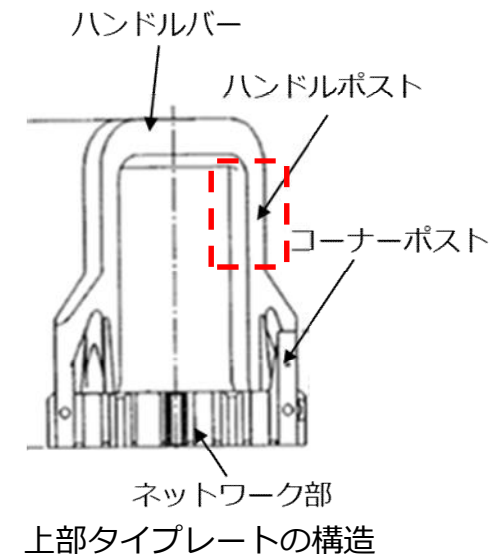
I ハンドル変形燃料の吊上げ荷重について（概要）

<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1本に衝撃荷重を加え初期変形を与え、引っ張り方向に荷重を928kg*²まで加えたところ、変形部に有意な亀裂は無かった。
- ③ 実際のハンドルは2本のハンドルポストで荷重を受けるため、吊上げ荷重が両ハンドルポストに均等に負荷される場合は、約2倍の耐荷重以上はありと考えられる。
- ④ 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を928kg*²まで加えても、同様に変形部に有意な亀裂は無かった。
- ⑤ 以上より、実機の変形ハンドルはハンドルの変形形状に応じて、最大で引張試験で確認した吊上げ荷重（780kgf*¹）の2倍以上の耐荷重を有するものとする。

*1 後述するハンドル変形燃料の吊上げ解析において、実態よりも保守的に条件設定した場合でも、結合燃料棒全体で負担可能な吊上げ荷重は約780kgfであることを確認した。

*2 上記荷重(780kgf)に引張り試験機の荷重計誤差、温度条件を考慮して設定した引張荷重



<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1t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。

ただし、今回の吊り上げ試験においては、より慎重を期すため、ハンドルが約90度変形するような実機で見られた以上の変形が進行した解析結果の条件に基づき、歪み量の少ない結合燃料棒のみで吊り上げた場合の耐荷重に基づき吊り上げ荷重の上限（約780kgに対し、実機FHMの荷重計誤差（最大±75kg）を考慮し荷重計表示で700kg）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-1 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>

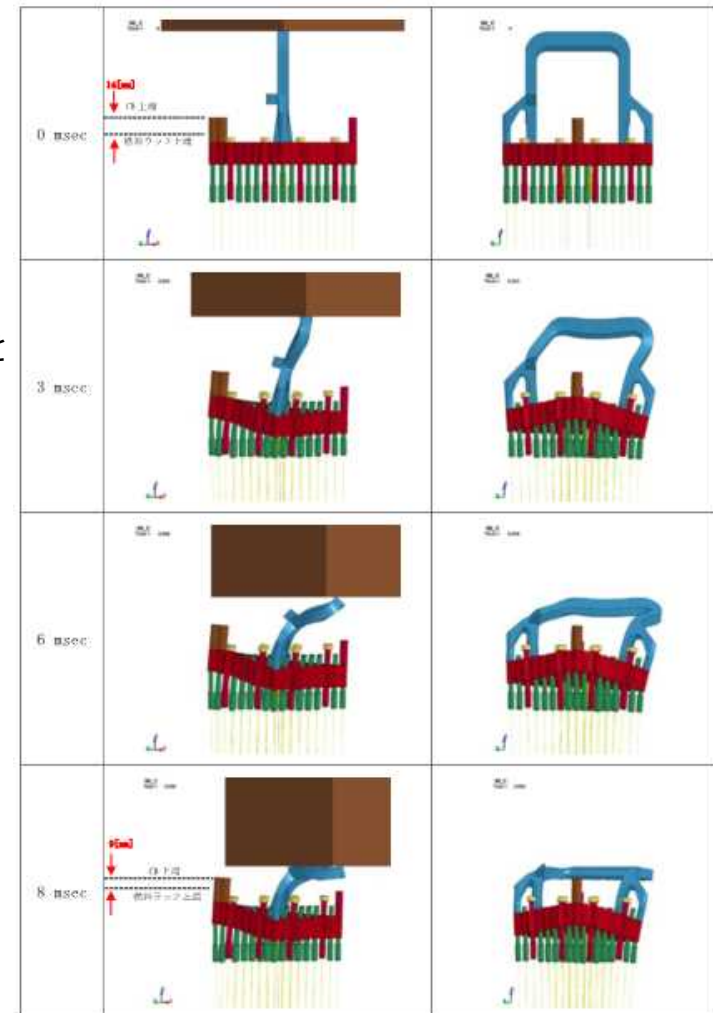
(評価手順・条件)

- ・ 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)

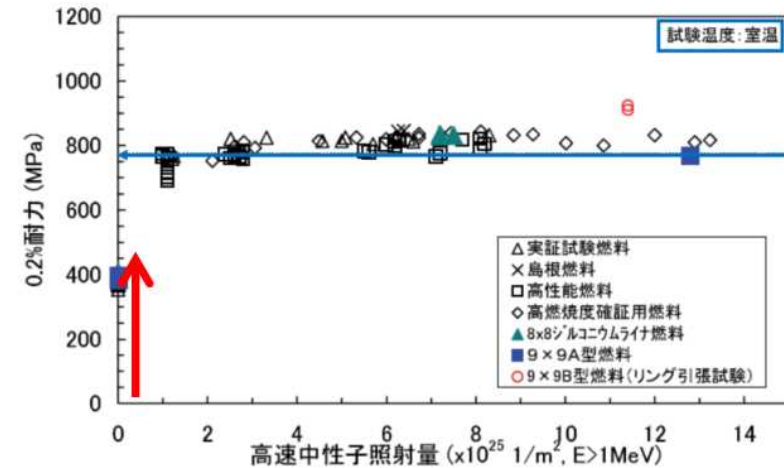
II-1 ガレキ衝突解析 ～解析条件～

＜解析条件（続き）＞ （物性値）

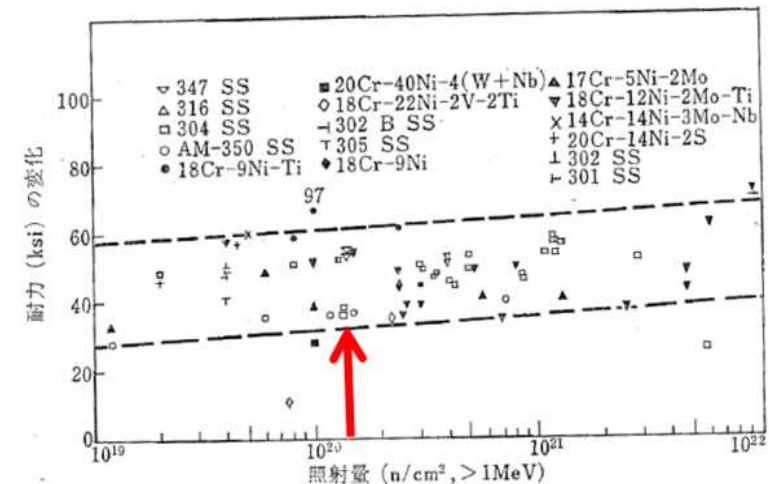
- 燃料集合体を構成する部材の大部分にジルカロイまたはステンレスが使用されており、いずれも中性子照射により強度が増大する。
- 原子炉内における5サイクル分の中性子照射量を評価した結果、燃料棒の上部端栓（ジルカロイ）は $0.2E+25n/m^2$ 、上部タイプレート（ステンレス）は $1.3E+20n/cm^2$ ($0.1E+25n/m^2$) となり、いずれも未照射材に近い照射量であることを確認した。
- 未照射材は照射材と比較して降伏応力は低く、また、より大きな歪み量で破断に至る。
- 今回、ガレキ衝突解析では、ガレキ重量・衝突速度を解析ケース毎に固定した評価のため同じ衝突エネルギーで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

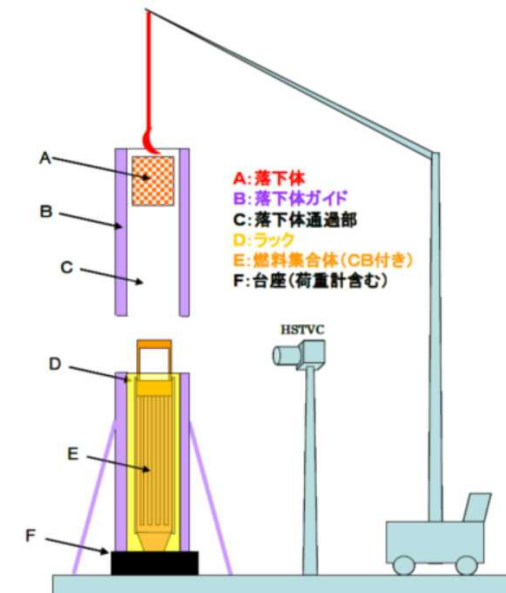
II-1 ガレキ衝突解析 ～試験結果の再現性～

<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。



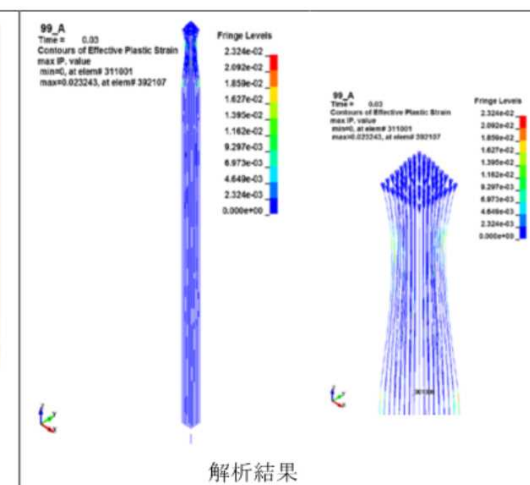
がれき落下試験イメージ図

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-1 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% *1未満であることから、実力的には吊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点以上での吊上げのため、結合燃料棒全体では3ton以上負荷できる*2ものとする。
- 但し、II-2に示す吊上げ解析では、保守的により塑性歪の小さい反CF側の結合燃料棒のみが吊上げ時の荷重を負担することを前提条件に評価を実施した。

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)
(1ton, 21m/s, 斜め45°, 9x9A)

■ : 結合燃料棒

上部端栓の塑性歪分布(条件②)
(1ton, 21m/s, 垂直, 9x9A)

■ : 結合燃料棒

上部端栓の塑性歪分布(条件③)
(4.5ton, 12m/s, 垂直, 9x9A)

■ : 結合燃料棒

上部端栓の塑性歪分布(条件④)
(1ton, 21m/s, 垂直, 8x8BJ)

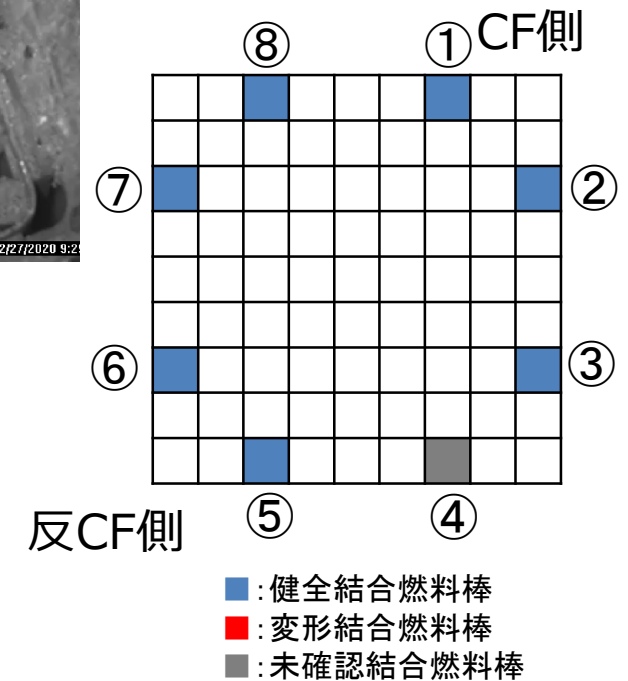
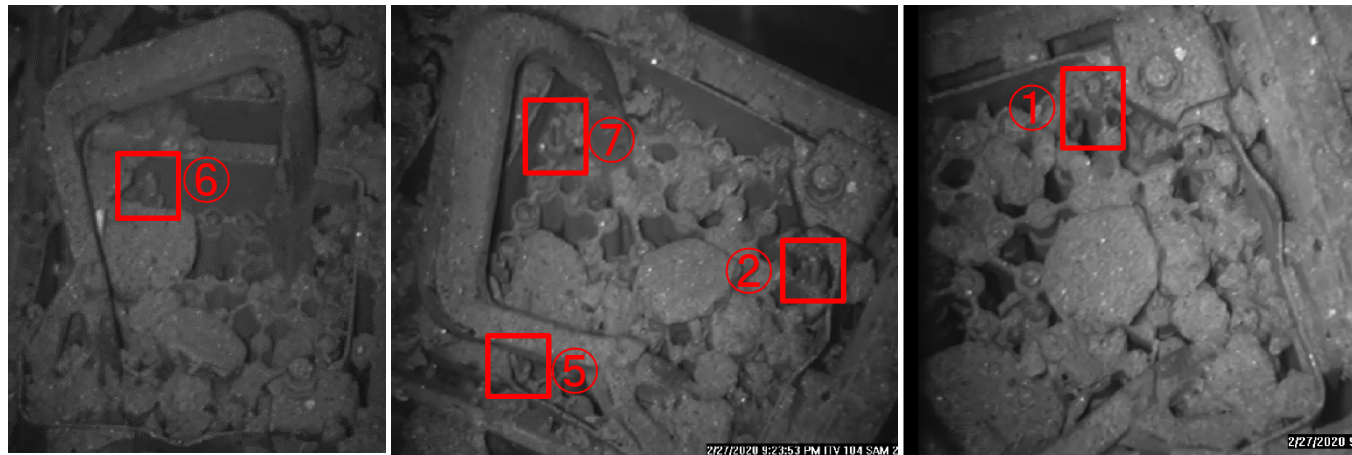
■ : 結合燃料棒

*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1ton以上。

II-1 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上げ上問題ないと考える。
- 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-1 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(×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(×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	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(×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認試験に関する試験最終成果報告書)」、平成19年3

II-1 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^{*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>

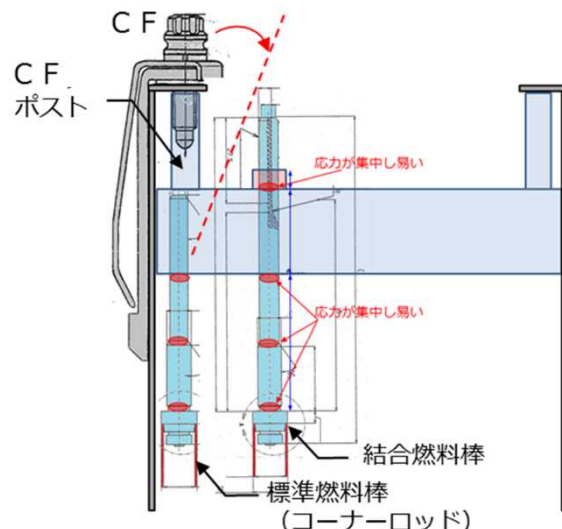
CFポスト傾倒角度：30°、評価温度：70℃^{*2}、物性値：ジルカロイ（未照射材）

<評価モデル>

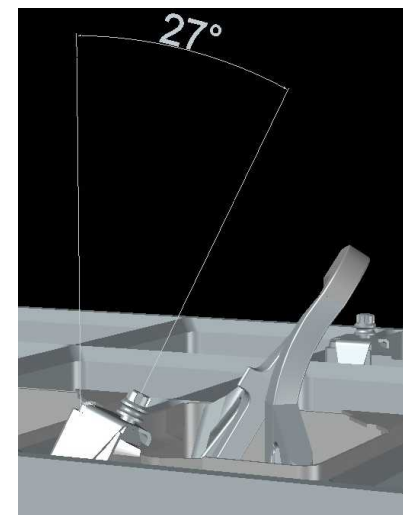
^{*2} 震災後の3号機SFP内温度の最高値（評価値）

- 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。



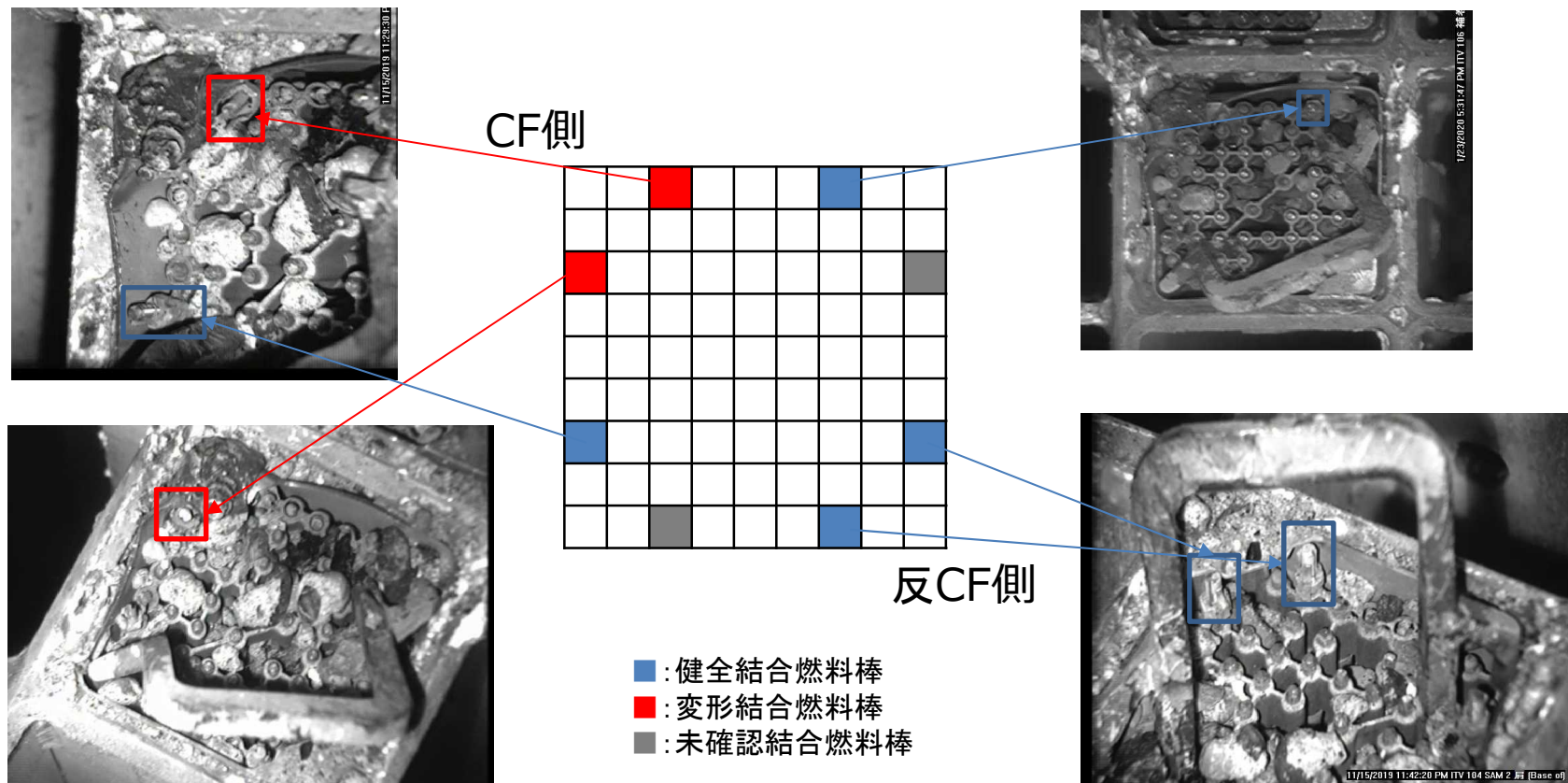
CB変形燃料のCF傾倒イメージ



ITV画像を基に作成した3D-CAD図

II-1 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点以上での吊上げのため、結合燃料棒全体では3ton以上負荷できるものとする。



* 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1ton以上。

Ⅱ-1 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点以上での吊上げになることから、結合燃料棒全体では3ton以上の耐荷重を有するものとする。

- 一方で、万一の場合にも吊上げ時に燃料を破損することが無いよう、実態よりも保守的な条件を仮定して吊上げ解析を行い、結合燃料棒への影響を確認した。
- また、加えて、模擬ハンドルを用いた引張試験を行い、吊上げ解析で確認した荷重を負荷した際の影響を確認した。
- 次頁以降に、上記解析評価結果、試験結果を示す。

II-2 ハンドル変形燃料の吊上げ解析 ～解析目的、解析条件～

<解析の目的>

- ガレキ衝突解析で確認した最も歪み量が少ない結合燃料棒（反CF側）2本で吊上げた場合の影響を評価するため。

<解析条件>

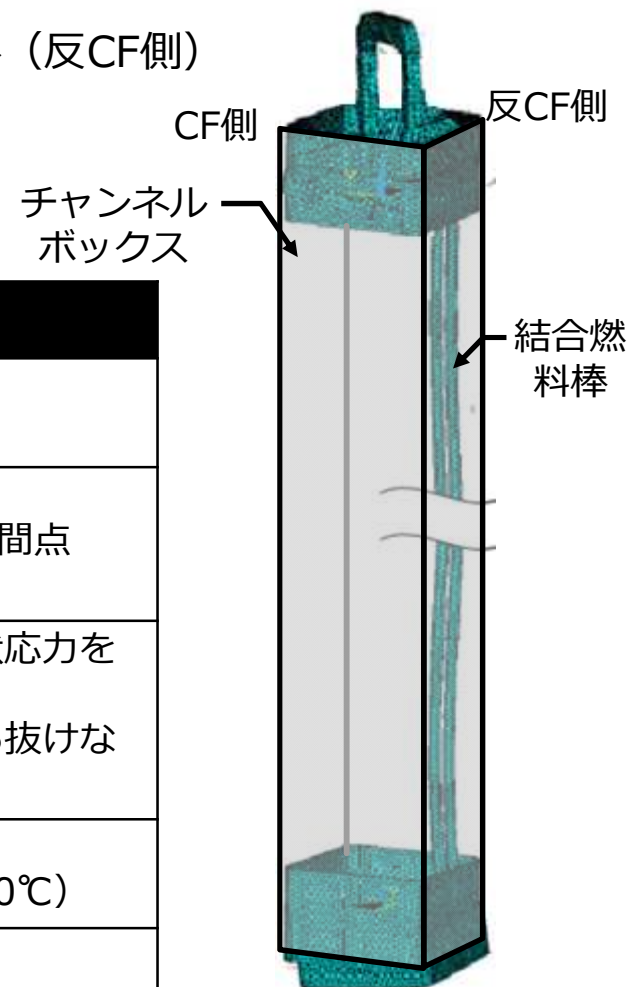
- 下記表に示す条件にて吊上げ解析を行った。

項目	内容
燃料型式	<ul style="list-style-type: none"> • 9 x 9 燃料（A型） • 新型 8 x 8 ジルコニウムライナ燃料*1
解析点	<ul style="list-style-type: none"> • 266kgf：燃料集合体の水中自重相当 • 459kgf、714kgf：266kgfと1,000kgfとの中間点 • 1,000kgf：3号FHM最大吊上荷重
判定基準	<ul style="list-style-type: none"> • 吊上げ時に結合燃料棒に発生する応力が、降伏応力を超えないこと。 • 標準燃料棒の上部端栓が上部タイプレートから抜けにくいこと。*2
物性値 （降伏応力）	<ul style="list-style-type: none"> • 上部端栓：380N/mm²（未照射材*3、20℃） • 被覆管、下部端栓：760 N/mm²（照射材、20℃）
解析コード	• ANSYS（汎用有限要素解析コード）

*1 3号機には他に高燃焼度 8 x 8 燃料、8 x 8 燃料があるが、幾何形状の差異から保守的に新型 8 x 8 ジルコニウムライナ燃料で代表した。

*2 標準燃料棒の一部に吊上げ時の上部タイプレートの回転を抑止する効果を見込んでいるため。

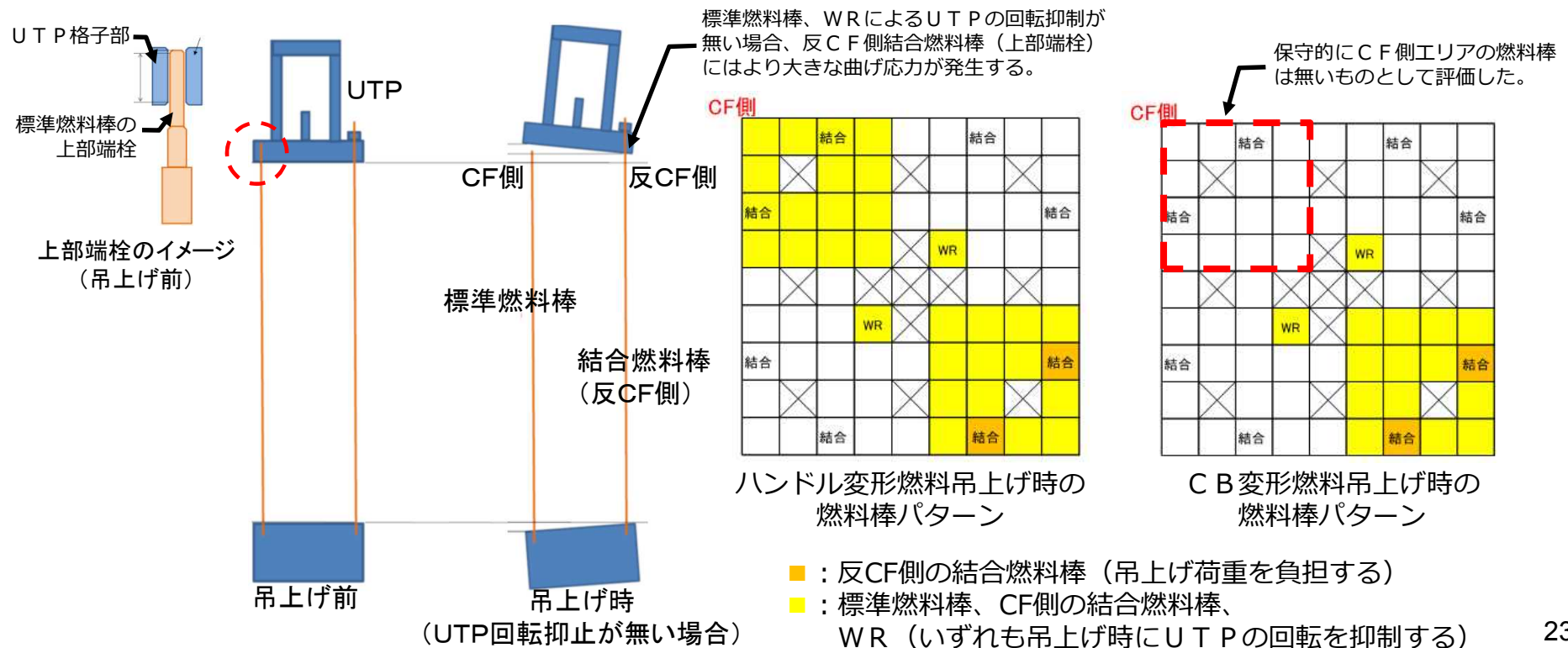
*3 上部端栓部は、同部材よりも下側の被覆管部、下部端栓部と比較して照射量が少ないため、保守的に未照射材の降伏応力を使用した。



反CF側の結合燃料棒2本での吊上げイメージ図

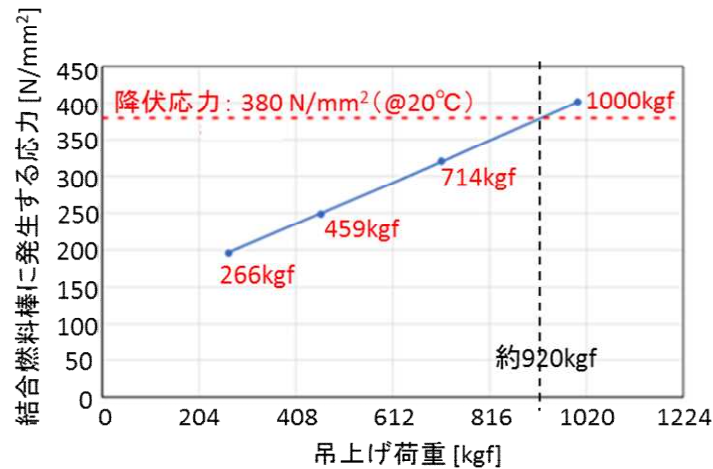
II-2 ハンドル変形燃料の吊上げ解析 ～解析条件～

- 反CF側の結合燃料棒 2 本のみで吊上げた場合、重心ずれにより上部タイププレート（UTP）が回転するため、結合燃料棒（上部端栓）にはUTP回転角度、吊上げ荷重に応じて曲げ応力が発生する。
- しかし、実際には反CF側の結合燃料棒以外の燃料棒、WRはガレキ衝突の影響で仮に破断歪を超過していた場合でも上部タイププレートに挿入された状態であることから、吊上げ時のUTPの回転をある程度抑止する効果を期待できると考える。
- このため、吊上げ解析では、ハンドル変形燃料については、保守的にガレキ衝突の影響が比較的に小さいエリアであるCF側と反CF側の標準燃料棒及びWRを、CB変形燃料については、反CF側の標準燃料棒、WRのみが回転抑止に寄与するものとして評価を行った。
 （なお、UTPの回転抑止効果を期待する条件として、吊上げ解析において標準燃料棒の上部端栓のUTPからの離脱量を評価し、UTPから離脱しないことを確認することとした。）

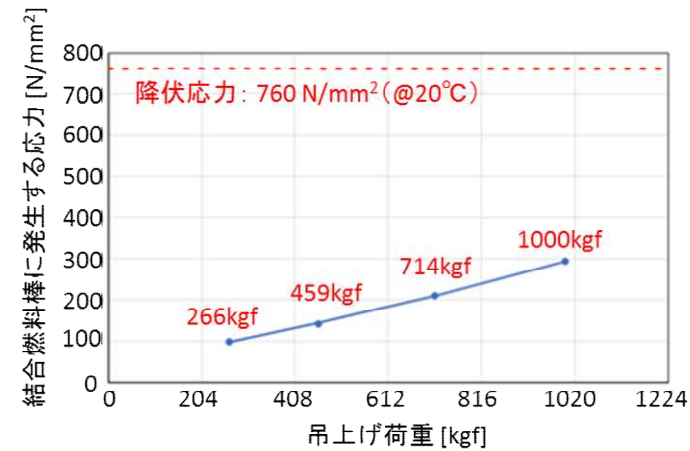


II-2 ハンドル変形燃料の吊上げ解析 ～解析結果～

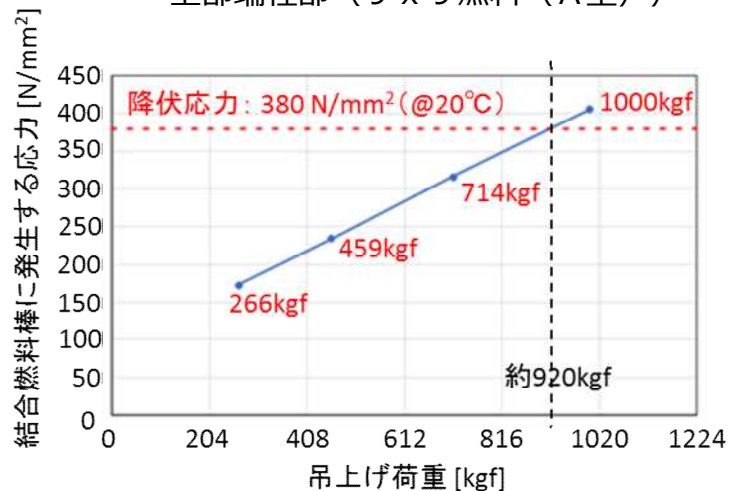
- 吊上げ解析の結果、いずれの燃料型式においてもハンドル変形燃料の結合燃料棒（上部端栓部）に発生する応力は、吊上げ荷重が約920kgfで降伏応力（ 380N/mm^2 , @ 20°C ）に達することを確認した。なお、いずれの解析点においても標準燃料棒、WRはUTPから離脱することなく、UTPの回転抑止効果は維持された。



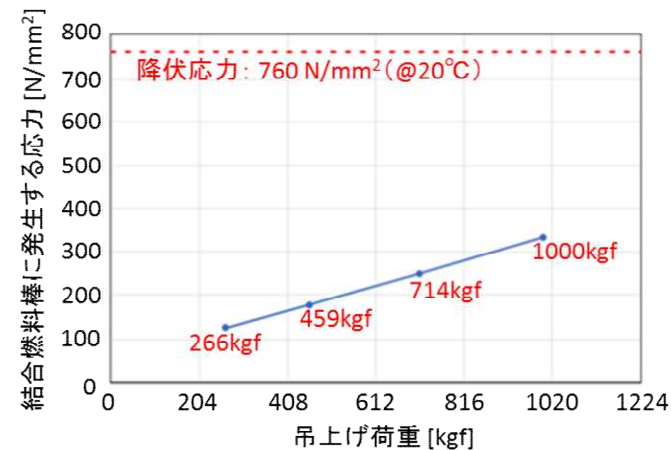
上部端栓部（9 x 9 燃料（A型））



下部端栓部（9 x 9 燃料（A型））



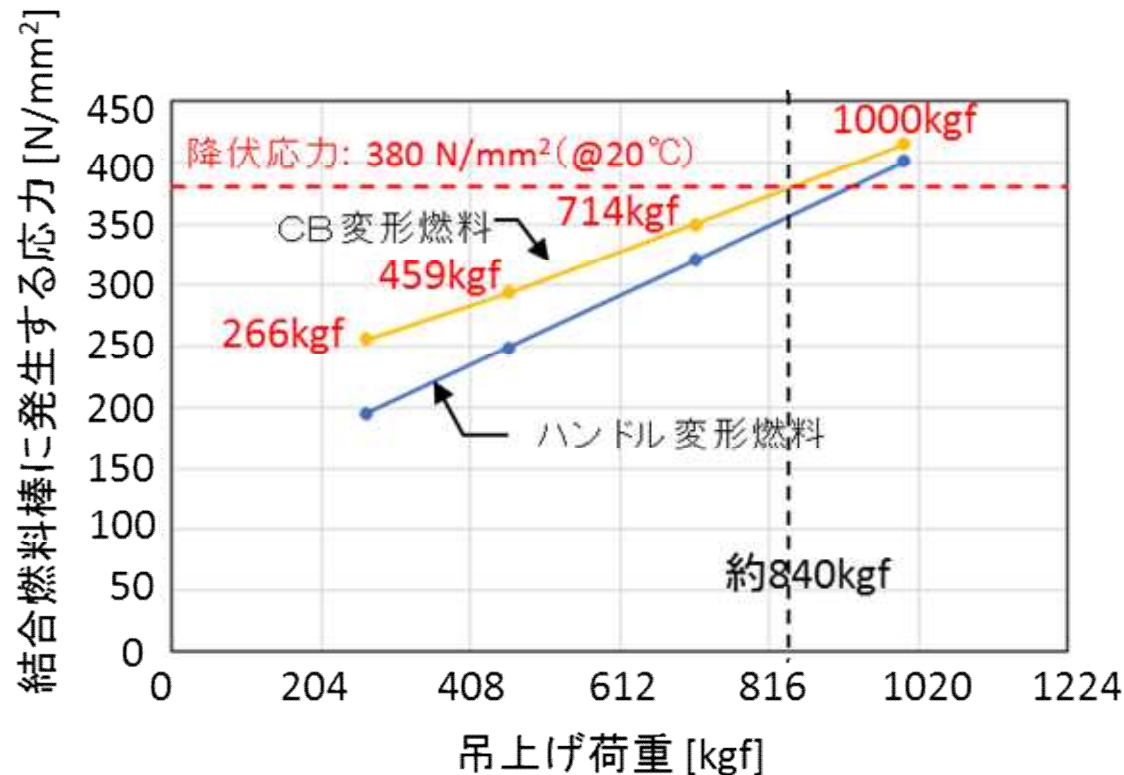
上部端栓部（新型 8 x 8 ジルコニウムライナ燃料）



下部端栓部（新型 8 x 8 ジルコニウムライナ燃料）

II-2 CB変形燃料の吊上げ解析 ～解析結果～

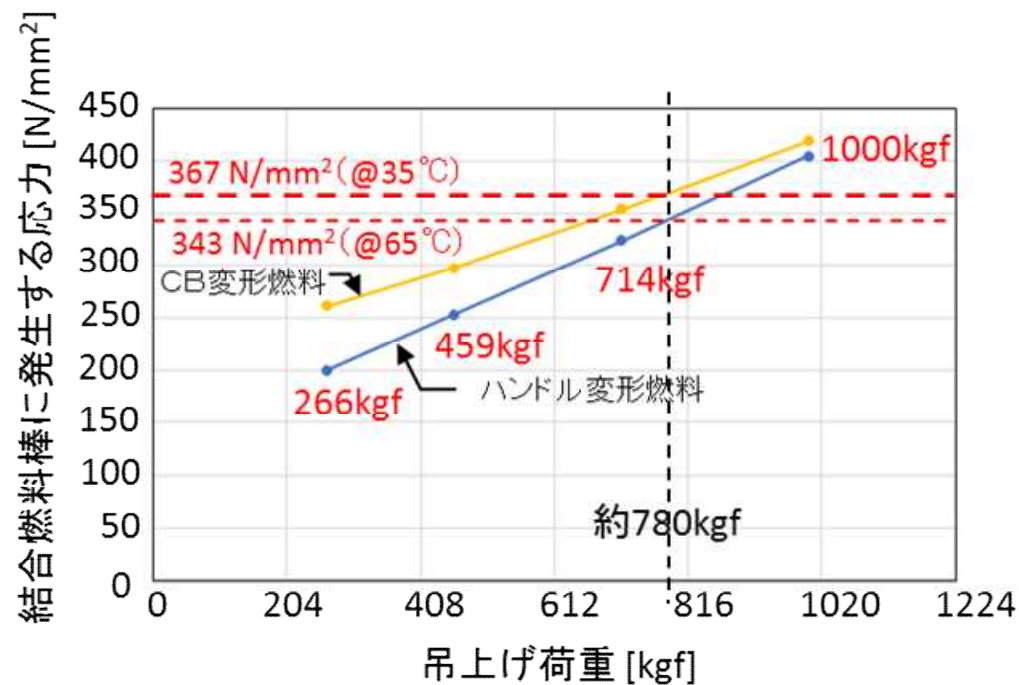
- CB変形燃料の吊上げ解析の結果、CB変形燃料の結合燃料棒（上部端栓部）に発生する応力は、吊上げ荷重が約840kgfで降伏応力（ 380N/mm^2 , @ 20°C ）に達することを確認した。なお、いずれの解析点においても標準燃料棒、WRはUTPから離脱することはなく、UTPの回転抑止効果は維持された。



結合燃料棒・上部端栓部（9 x 9燃料（A型））
に発生する応力

II-2 SFP温度の影響について

- 前頁までのハンドル変形燃料、CB変形燃料の吊上げ解析はSFP温度20℃の条件で実施した。
- しかし、結合燃料棒の材質であるジルカロイは温度が高くなるほど降伏応力は低下するため、SFP温度が高くなるにつれて吊上げ時に負荷できる荷重上限は低下する。（厳しくなる）
- このため、保守的に3号機SFP温度の保安規定上の制限である65℃で評価した結果、ハンドル変形燃料は約780kgfで、CB変形燃料は約660kgfで降伏応力に達する結果となった。なお、SFP温度35℃では、CB変形燃料も約780kgfで降伏応力に達する結果となった。
- 以上から、3号機の年間のSFP温度履歴を考慮してもハンドル変形燃料に700kgfの吊上げ荷重を負荷することは問題無いと考える。



結合燃料棒・上部端栓部(9x9燃料(A型))
に発生する応力

Ⅲ 変形ハンドルの引張試験 ～試験目的、試験概要～

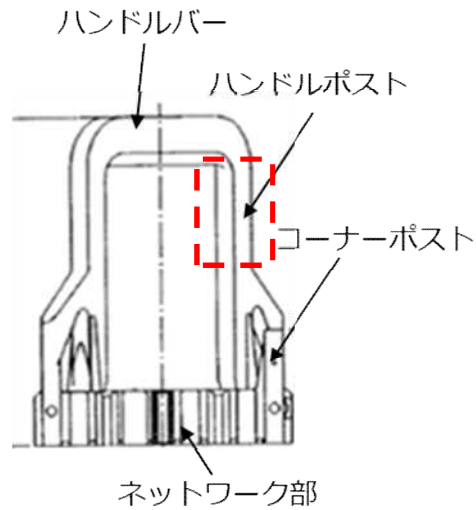
(試験対象)

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

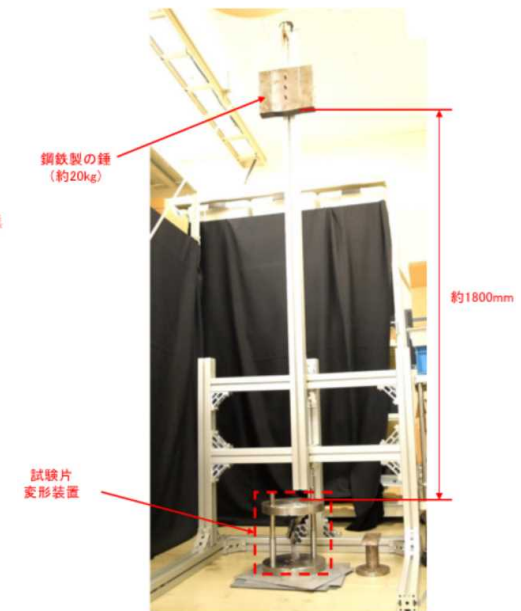
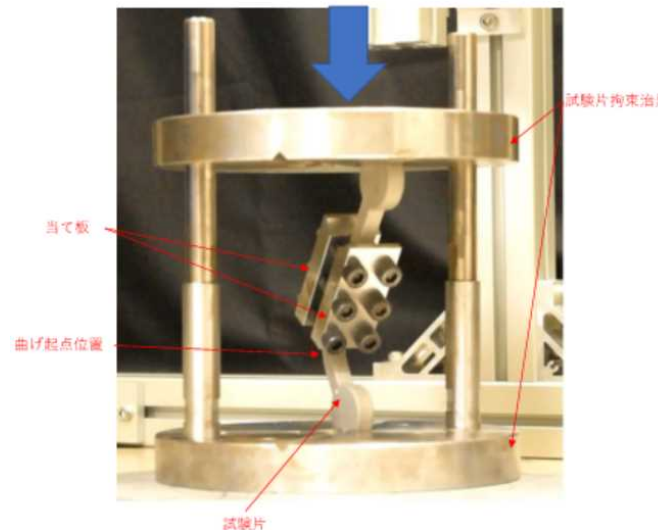
(試験条件)

- 実機でのハンドル変形燃料の取扱いを考慮して下記のとおり設定した。

試験条件		条件設定の考え方
初期変形角度	70°, 90°	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。
引張荷重	928kgf	ハンドル変形燃料の結合燃料棒に負荷可能な吊上げ荷重 (約780kgf) に対して、引張試験装置の荷重計の誤差、温度条件等を考慮して保守的に設定した。
引張回数	10回	実機で想定される吊上げ回数から、保守的に10回と設定した。



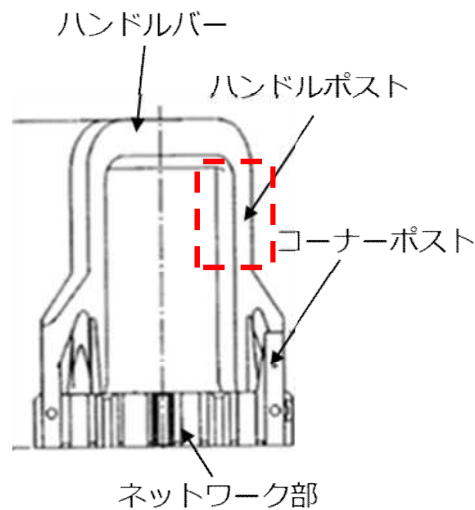
上部タイプレート (U T P) の構造



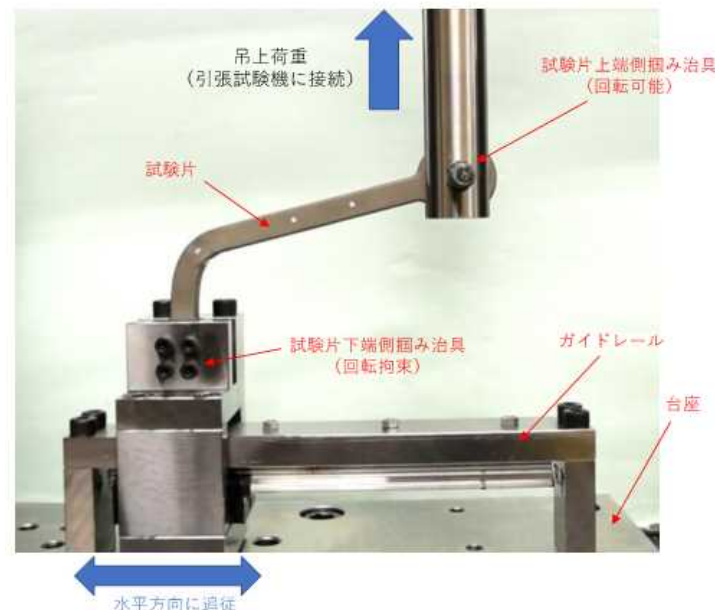
動的変形付与装置の外観

Ⅲ 変形ハンドルの引張試験 ～試験結果～

- 試験の結果、いずれのハンドルポスト模擬試験片においても、有意なき裂は発生しなかった。（なお、き裂の有無は外観及び浸透探傷試験より確認した。）
- このため、実際の上部タイププレートはハンドルポスト2本で荷重を負担することから、吊上げ荷重が両ハンドルポストに均等に負荷される場合は、本試験で確認した吊上げ荷重（最大780kgf）の2倍程度の荷重を負荷できるものと考えられる。



上部タイププレートの構造



ハンドルポストの引張試験装置の外観



浸透探傷試験結果*

*上部タイププレート本体、ハンドルポスト単体全ての試験体で実施して問題ないことを確認した。

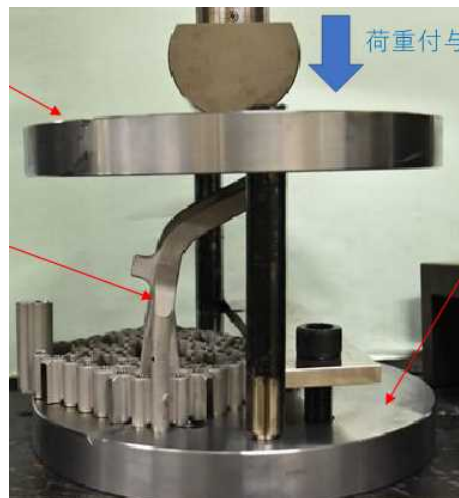
Ⅲ 変形ハンドルの引張試験 ～試験目的、試験概要～

- 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（928kg、10回）で引張試験を行った。
- なお、試験体は3号機ハンドル変形燃料と同型式のもの*を含む、9 x 9 燃料（A型）*、高燃焼度8 x 8 燃料*、新型8 x 8 ジルコニウムライナ燃料の上部タイプレートを用意した。

（試験条件）

- 実機でのハンドル変形燃料の取扱いを考慮して下記のとおり設定した。

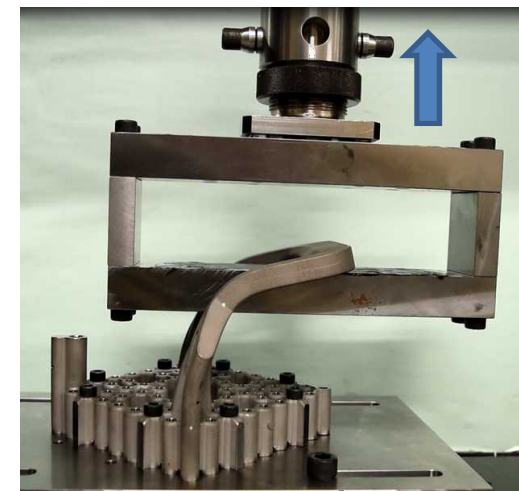
試験条件		条件設定の考え方
初期変形角度	80°以上	・ 3号機SFP内のハンドル変形燃料のうち、最も変形が大きいもの（60°）に対して余裕のある角度を設定した。
引張荷重	928kgf	・ ハンドル変形燃料の結合燃料棒に負荷可能な吊上げ荷重（約780kgf）に対して、引張試験装置の荷重計の誤差、温度条件等を考慮して保守的に設定した。
引張回数	10回	・ 実機で想定される吊上げ回数から、保守的に10回と設定した。



変形付与装置の外観



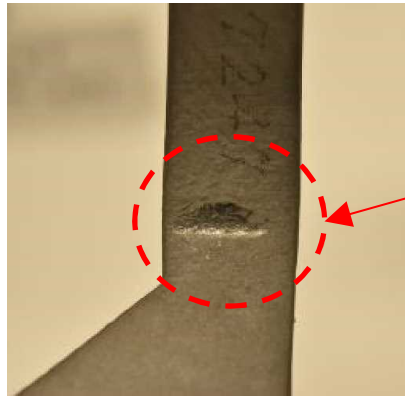
初期変形付与後の上部タイプレート外観



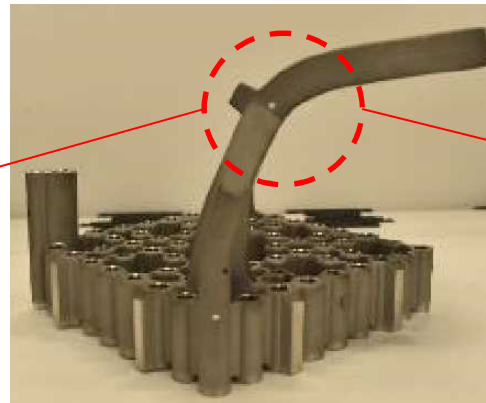
引張試験装置の外観

Ⅲ 変形ハンドルの引張試験 ～試験結果～

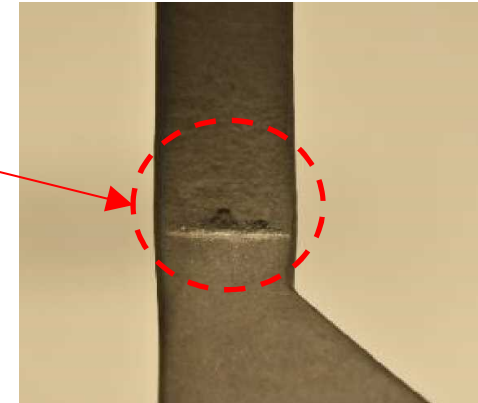
- 変形ハンドル（初期変形角度：83°～89°）の引張試験を実施した結果、いずれの型式の試験体においても、有意なき裂は発生しなかった。（なお、き裂の有無は外観及び浸透探傷試験より確認した。）
- このため、変形した燃料ハンドル部についても、最大780kgfの吊上げ荷重が負荷されたとしても健全性には問題無いものと考える。



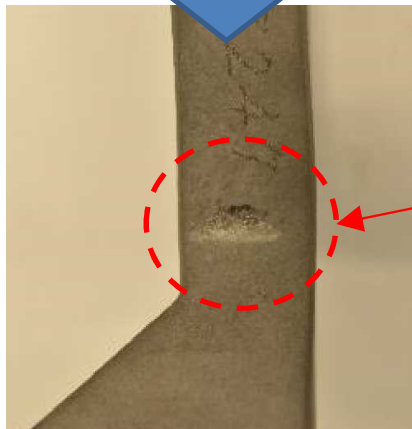
引張試験前（ハンドルポスト左側）



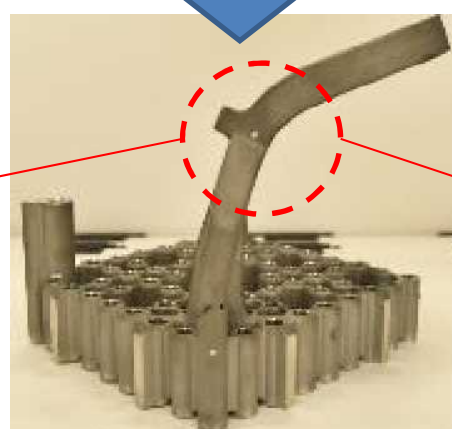
引張試験前（9 x 9 燃料（A型））



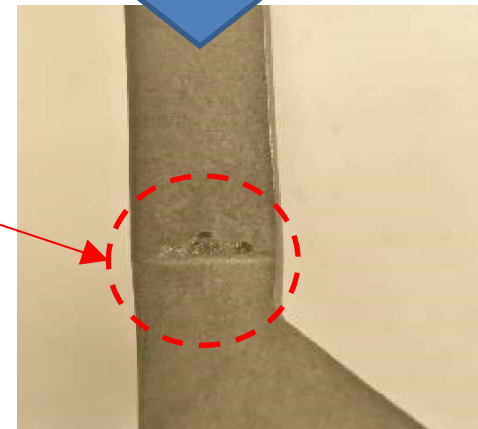
引張試験前（ハンドルポスト右側）



引張試験後（ハンドルポスト左側）



引張試験後（9 x 9 燃料（A型））

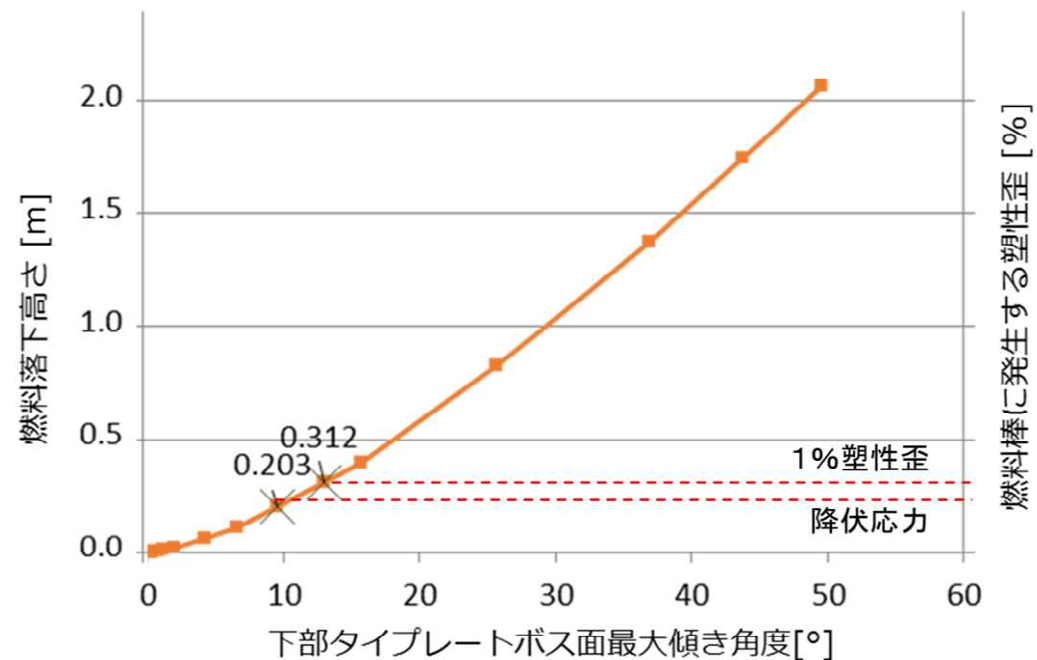
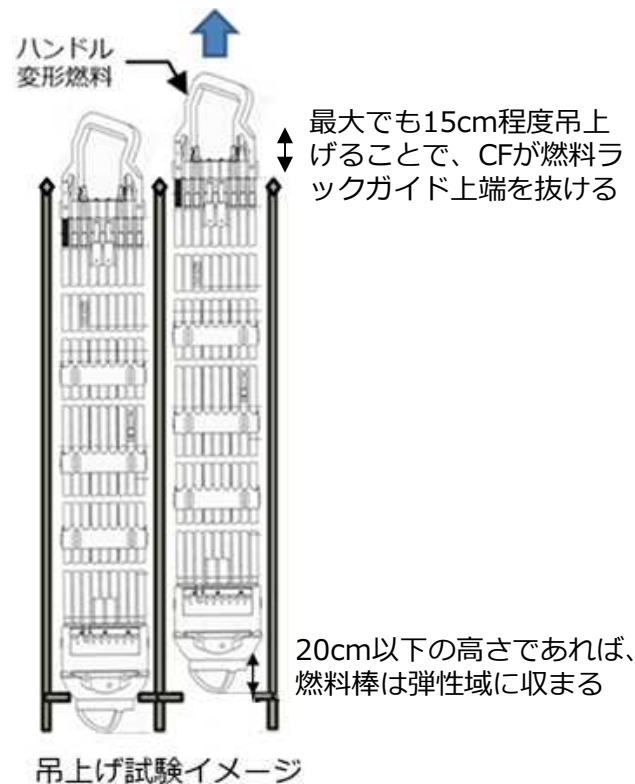


引張試験後（ハンドルポスト右側）

以下、参考資料

【参考】最大吊上げ高さ評価結果

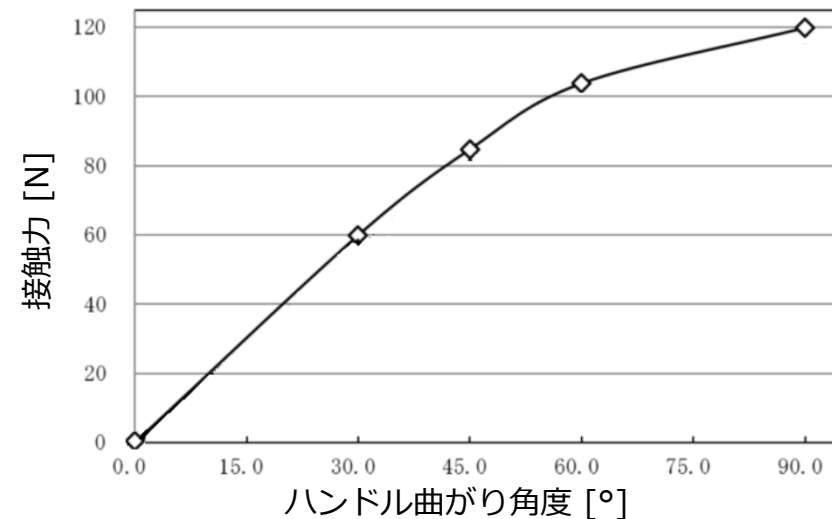
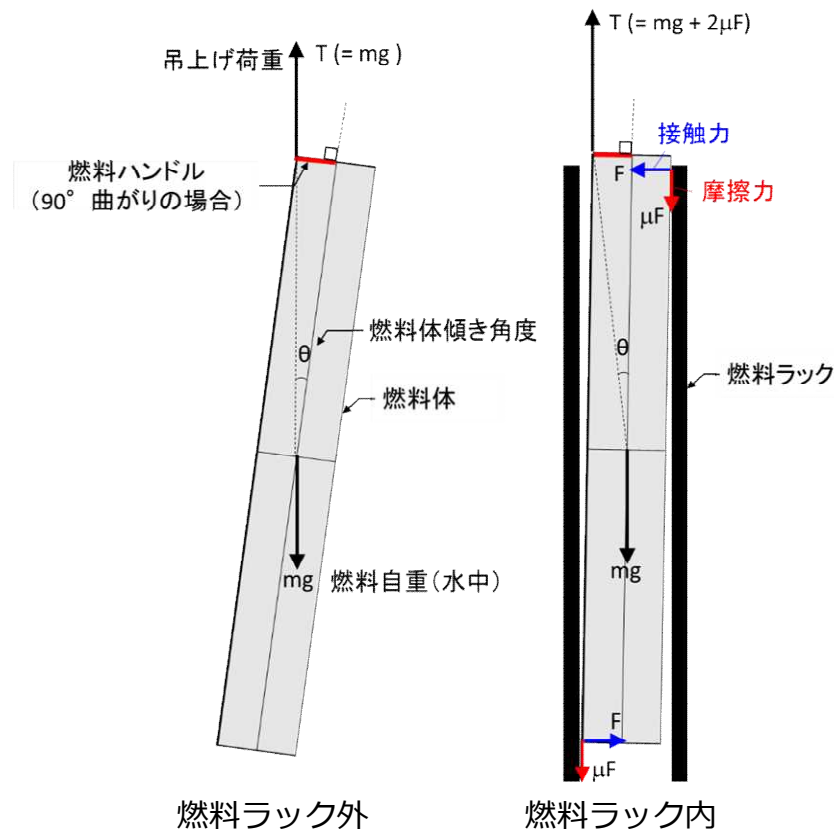
- 吊上げ試験時の最大吊上げ高さを設定するため、万一燃料を落下させた場合でも燃料棒が破損しない落下高さを評価した。落下高さ評価は下記2段階に分けて実施した。
 - ① 落下高さをパラメータとして、落下時の衝撃で変形する燃料下部タイプレートのボス面（燃料棒が挿入されている面）の最大傾き角度を評価する。
 - ② 燃料下部タイプレートのボス面の最大傾き角度をパラメータとして、燃料棒に発生する歪を評価する。
- 評価の結果、落下高さ20cm以下であれば弾性域に収まる（降伏応力に達しない）ことを確認した。なお、吊上げ試験ではチャンネルファスナが燃料ラックガイドの上端を抜ける高さ（最大でも15cm程度）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

- ハンドル変形燃料は吊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上げ荷重（700kgf程度）と比較して十分に小さいことから、吊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

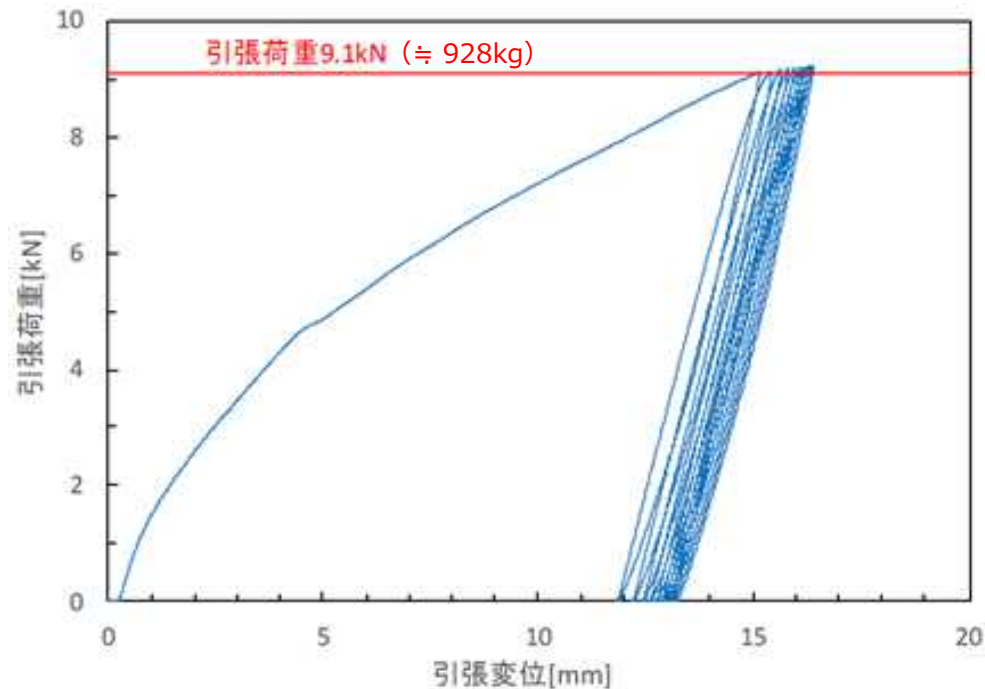
<補足>

- 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。

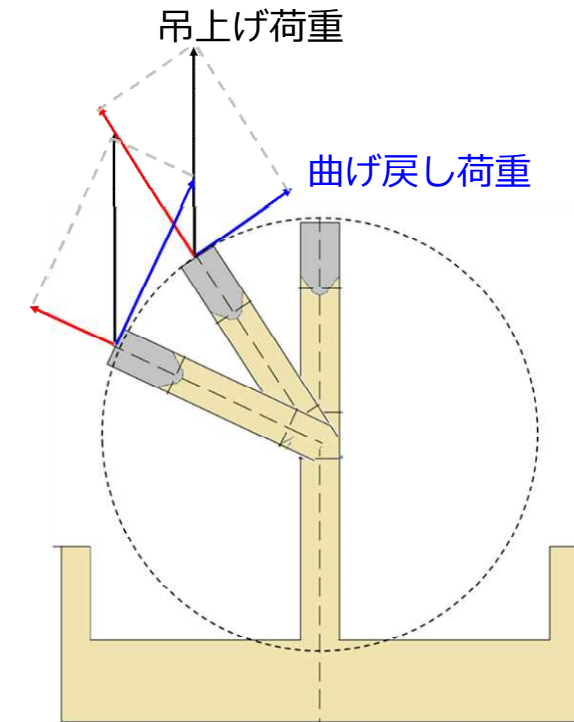
ハンドル曲がりに伴う吊上げ時の摩擦力について

【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、二回目以降の荷重・除荷では曲げ戻しの進展は無かった。
(参考：9x9燃料（A型）83°⇒69°、高燃焼度8x8燃料：89°⇒66°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°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



変形ハンドルへの吊上げ荷重負荷時の曲げ戻し荷重のイメージ

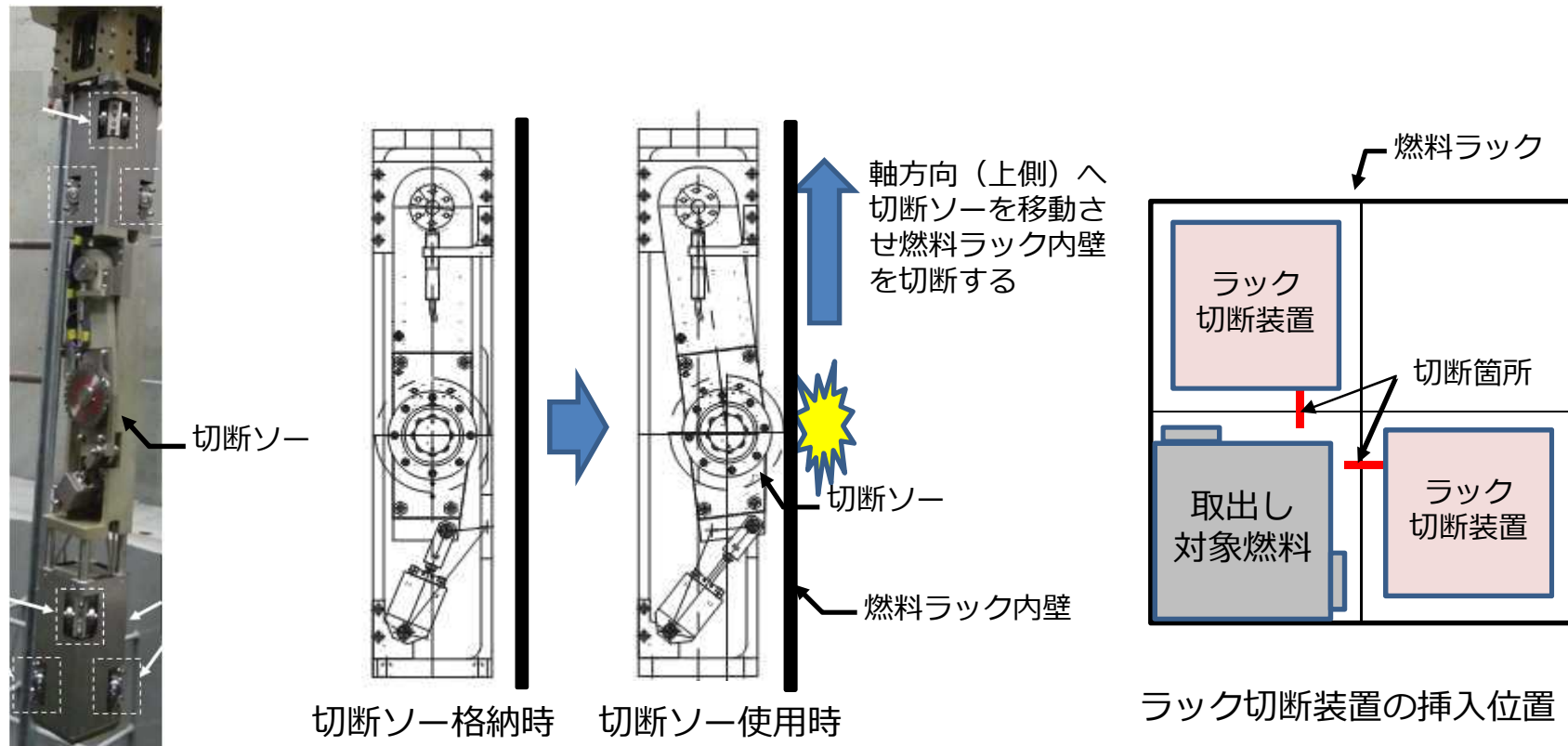
【参考】大変形用FHM掴み具について

- 既存FHM掴み具の設計を基本的に踏襲し、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、最大吊上げ荷重は変更しない。

対象	既存FHM掴み具	大変形用FHM掴み具（主な設計変更点）
形状		<p>【フック部の形状及び材質変更】</p> <ul style="list-style-type: none"> • フック形状を変更し、より変形の大きい燃料を把持できる構造とする。 • フック断面寸法が小さくなるため、材質を変更して強度を担保する。

【参考】 ラック切断装置について

- 燃料と燃料ラック干渉時の燃料取出し手段の一つとしてラック切断装置を用いる。
- ラック切断装置は、取出し対象燃料の隣接セルに挿入し、切断ソーをラック内壁に押付け貫通後、軸方向（上側）に移動させラック内壁を切断する。
- ラック内壁切断後、必要に応じてラック押し広げ治具を同じセルに挿入し、切断箇所を中心にラック内壁を外側に押し広げ、燃料－燃料ラック間のクリアランスを確保し燃料を取出す。
- なお、同装置はメーカー工場での取り扱い訓練を実施済み。



ラック切断装置外観

ラック切断装置使用時のイメージ