

3号機ハンドル変形燃料の吊上げについて

2020年4月24日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

I 3号機SFP内燃料のハンドル状況の確認について

II ハンドル変形燃料の吊上げについて（概要）

III 変形ハンドルの引張試験

IV-1 ガレキ衝突解析

IV-2 ハンドル変形燃料の吊上げ解析

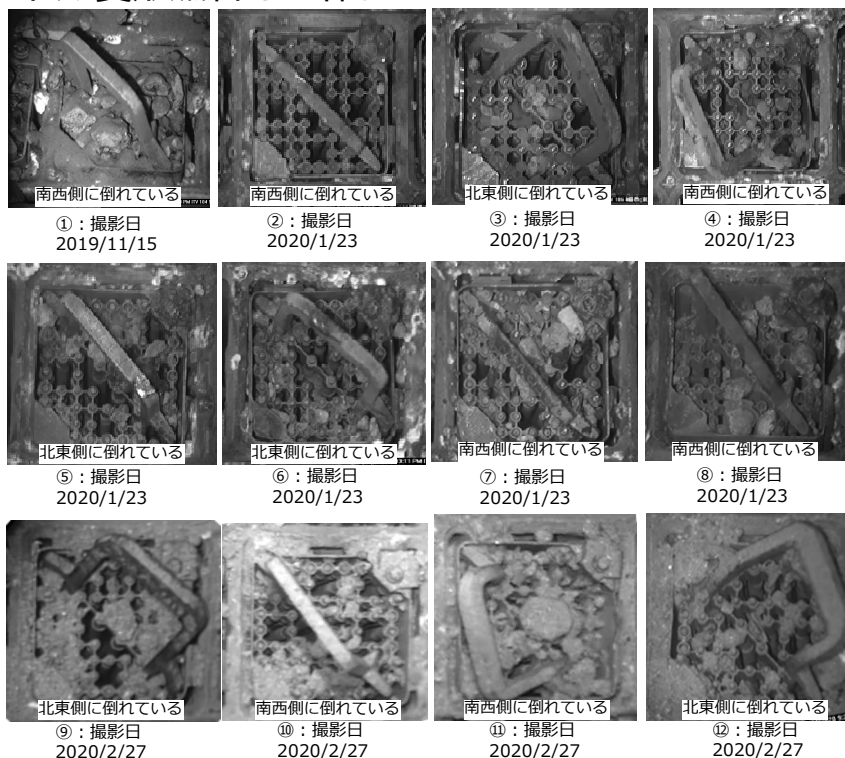
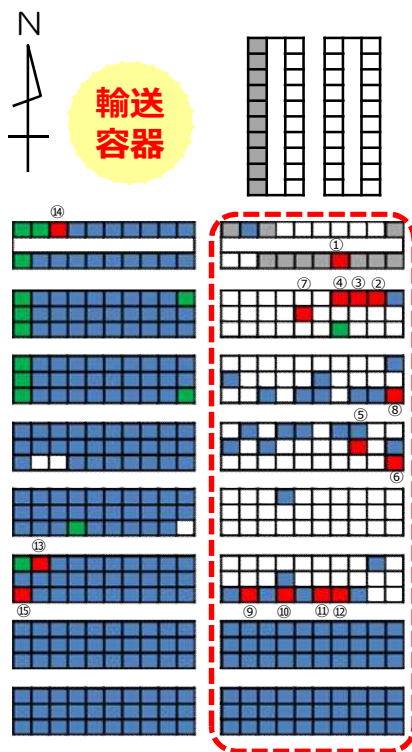
V 今後のスケジュールについて

参考

I 3号機SFP内燃料のハンドル状況の確認について

- ハンドル変形の目視確認は全燃料について完了。目視確認が難しい軽微な変形の有無は治具により最終判断するため、ガレキを撤去し、治具での判断後にガレキ撤去完了となる。
- 3月27日時点でハンドル変形を確認した燃料は15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。

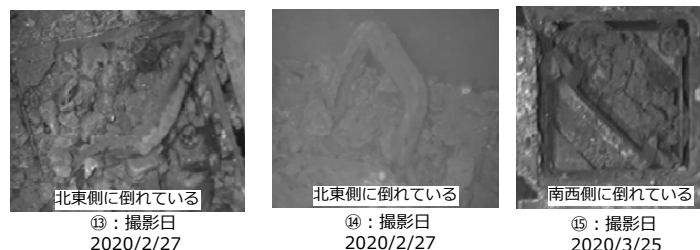
ハンドル変形燃料取扱い区分 (検討中)



| No. | 型式 | ITVによる推定曲がり角度 | 取扱い区分* |
|-----|-------|---------------|--------|
| ① | STEP2 | 約10° | A or B |
| ② | 9×9A | 約10° | A |
| ③ | 9×9A | 約40° | C |
| ④ | 9×9A | 約40° | B |
| ⑤ | 9×9A | <10° | A |
| ⑥ | 9×9A | 約10° | A |
| ⑦ | 9×9A | 約10° | A |
| ⑧ | 9×9A | 約20° | A or B |
| ⑨ | 9×9A | 約40° | C |
| ⑩ | 9×9A | 約10° | A or B |
| ⑪ | 9×9A | 約60° | B |
| ⑫ | 9×9A | 約60° | C |
| ⑬ | 9×9A | 約40° | C |
| ⑭ | 9×9A | 約20° | B |
| ⑮ | STEP2 | <10° | A |

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。

| ※取扱い区分 | A | B | C |
|--------|----|---|------|
| 収納缶 | 小 | 大 | |
| 掴み具 | 既存 | | 大変形用 |

II ハンドル変形燃料の吊上げについて（概要）

- 燃料吊上げ時は、燃料ハンドルと結合燃料棒*1の二つの部材が荷重を負担する。
- ガレキ衝突によるこれら部材への影響について、実機ハンドル変形燃料よりも厳しい角度まで曲げた条件で、試験、解析評価等を行った結果、吊上げ時の荷重（700kg程度）を制限することで問題なく吊上げられることを確認している*2。

燃料吊上げ時の荷重負担部材

| 燃料ハンドル | 燃料棒（結合燃料棒*1） | | | | | | | | | | |
|---|--|-------------|----------------------|-----|------|-----|------|-----|------|------|------|
| <ul style="list-style-type: none"> • 模擬ハンドルを用いた曲げ試験では80°以上の変形を付与した結果、ハンドルに有意なき裂は発生しないことを確認した。 • 変形を付与した模擬ハンドルを900kg以上の荷重で引張り試験を行った結果、ハンドルに有意なき裂は発生しないことを確認した。 <div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;">スライドⅢ参照</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>ハンドル変形付与の様子</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>引張り試験後のハンドル変形箇所の様子</p> </div> </div> | <ul style="list-style-type: none"> • ガレキ衝突解析を行い、ハンドルが90°程度変形した場合の結合燃料棒への影響評価の結果、燃料自重を支える結合燃料棒は2本以上は健全であることを確認した。 • 当該結果を考慮した吊上げ評価を行い、700kg程度であれば問題なく吊上げられることを確認した。 <div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;">スライドⅣ-1、Ⅳ-2参照</div> <div style="text-align: center;"> <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <caption>結合燃料棒に発生する応力の評価結果</caption> <thead> <tr> <th>吊上げ荷重 [kgf]</th> <th>結合燃料棒に発生する応力 [N/mm²]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>266</td> <td>~180</td> </tr> <tr> <td>459</td> <td>~250</td> </tr> <tr> <td>714</td> <td>~320</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>~400</td> </tr> </tbody> </table> <p>ハンドルの変形燃料吊上げ時に結合燃料棒に発生する応力の評価結果 (8本ある結合燃料棒のうち、保守的に2本のみとして吊上げた場合の評価)</p> </div> | 吊上げ荷重 [kgf] | 結合燃料棒に発生する応力 [N/mm²] | 266 | ~180 | 459 | ~250 | 714 | ~320 | 1000 | ~400 |
| 吊上げ荷重 [kgf] | 結合燃料棒に発生する応力 [N/mm²] | | | | | | | | | | |
| 266 | ~180 | | | | | | | | | | |
| 459 | ~250 | | | | | | | | | | |
| 714 | ~320 | | | | | | | | | | |
| 1000 | ~400 | | | | | | | | | | |

*1 結合燃料棒：燃料集合体上下のタイプレートを結びつけ保持する8本の燃料棒のこと。

*2 ハンドル変形燃料15体のうち14体について確認済み。残り1体は評価中。

Ⅲ 変形ハンドルの引張試験 ～試験目的、試験概要～

<試験の目的>

- ハンドル変形燃料に吊上げ荷重を負荷した場合でも、有意なき裂の発生・進展が無いことを確認する。

<試験の概要>

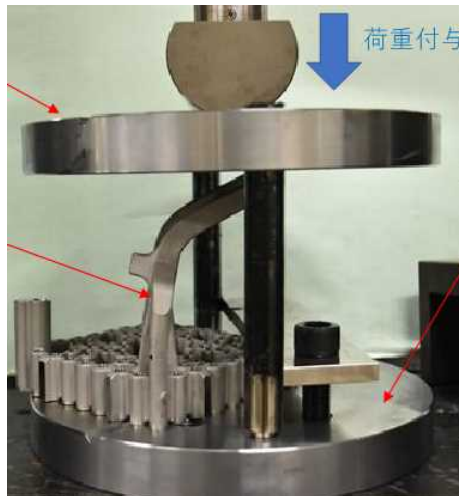
(試験対象)

- 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3種類の燃料ハンドル部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。

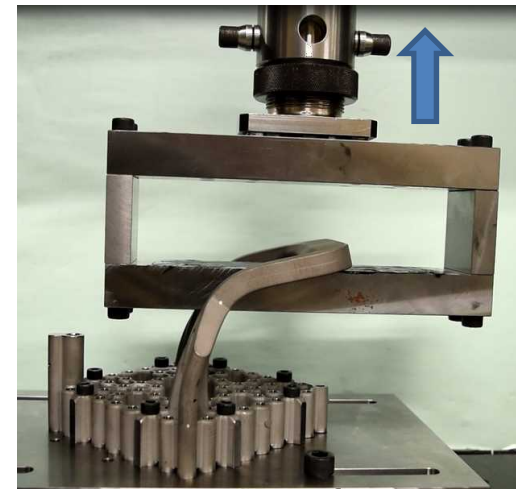
| 試験条件 | | 条件設定の考え方 |
|--------|-------|---|
| 初期変形角度 | 80°以上 | • 3号機SFP内のハンドル変形燃料のうち、最も変形が大きいもの(60°)に対して余裕のある角度を設定した。 |
| 引張荷重 | 928kg | • 実機で想定されるハンドル変形燃料の最大吊上げ荷重700kgに対して、荷重計の誤差等を考慮して保守的に設定した。 |
| 引張回数 | 10回 | • 実機で想定される吊上げ回数から、保守的に10回と設定した。 |



変形付与装置の外観



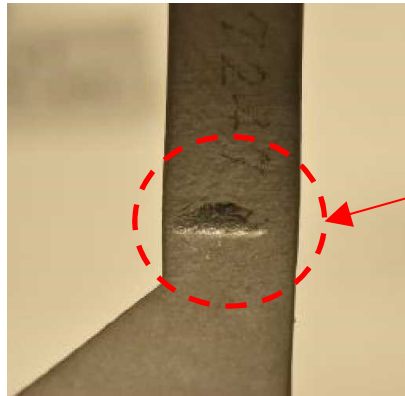
初期変形付与後の上部タイププレート外観



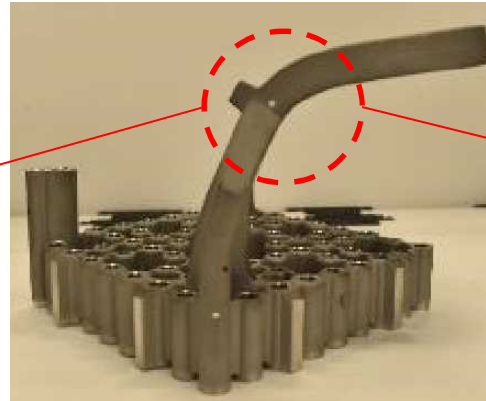
引張試験装置の外観

Ⅲ 変形ハンドルの引張試験 ～試験結果～

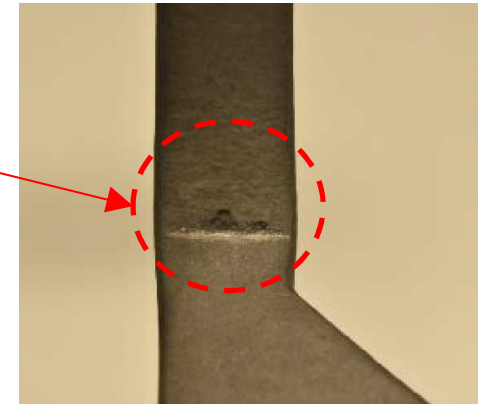
- 変形ハンドル（初期変形角度：83°～89°）の引張試験を実施した結果、いずれの型式の試験体においても、有意なき裂は発生しなかった。（なお、き裂の有無は外観及び浸透探傷試験より確認した。）
- このため、実機で想定されるハンドル変形燃料の最大吊上げ荷重700kgを負荷した場合であっても、燃料ハンドル部の健全性には問題無いものとする。



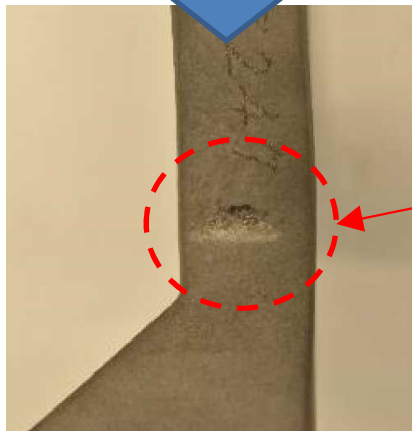
引張試験前（ハンドルポスト左側）



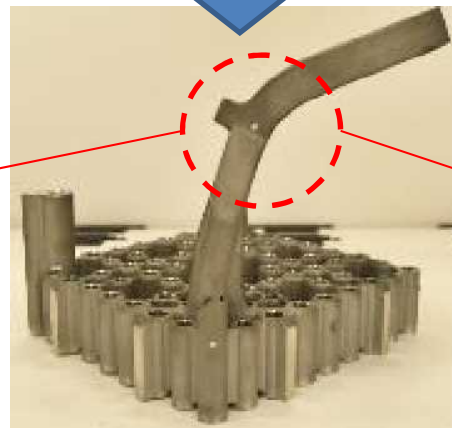
引張試験前（9 x 9 燃料（A型））



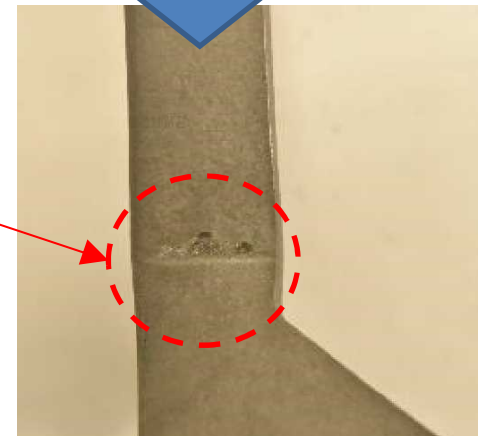
引張試験前（ハンドルポスト右側）



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）

IV-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、斜め衝突のケースで衝突解析を行い、評価条件を調整し、保守的にハンドルが90°近く変形した場合の燃料棒の塑性歪分布の傾向を確認する。
(念のため、評価条件を変えた場合の塑性歪分布の傾向についても確認する。)

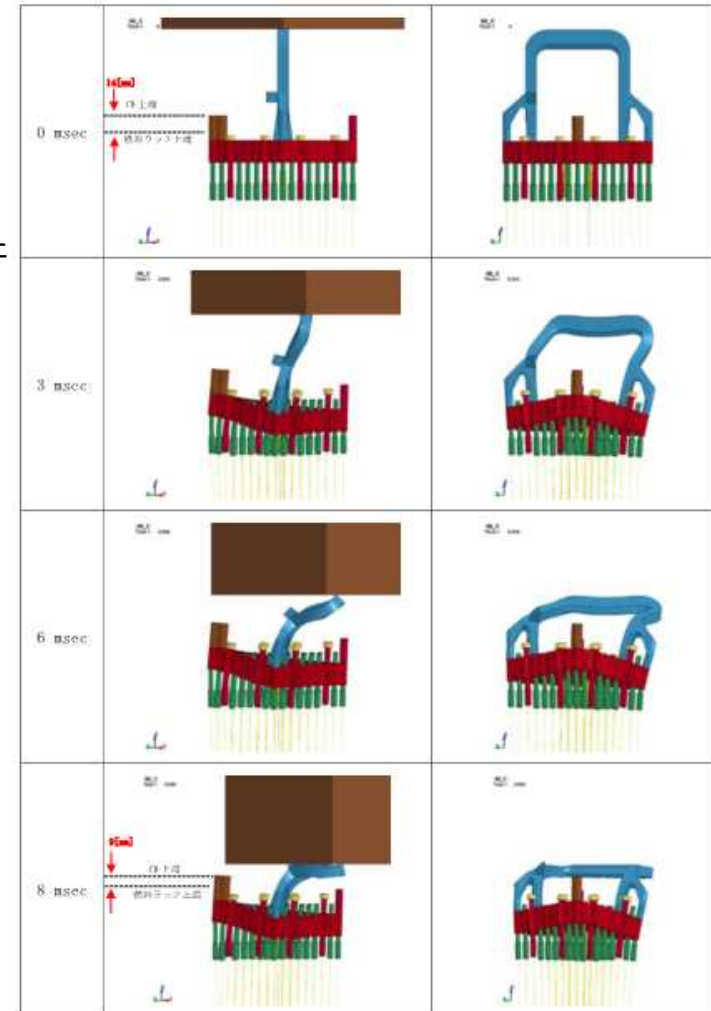
| | ガレキ重量 | ガレキ衝突速度 | ガレキの衝突角度 | 燃料型式 |
|-----|---------|---------|----------|------------|
| 条件① | 1 ton | 21 m/s | 斜め45° | 9x9燃料 (A型) |
| 条件② | 1 ton | 21 m/s | 垂直 | 9x9燃料 (A型) |
| 条件③ | 4.5 ton | 12 m/s | 垂直 | 9x9燃料 (A型) |
| 条件④ | 1 ton | 21 m/s | 垂直 | 8x8BJ燃料 |

(評価基準)

- ・ 塑性歪が1%*を超過しないこと
(*燃料被覆管の健全性が保たれる一般的な指標)

(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)

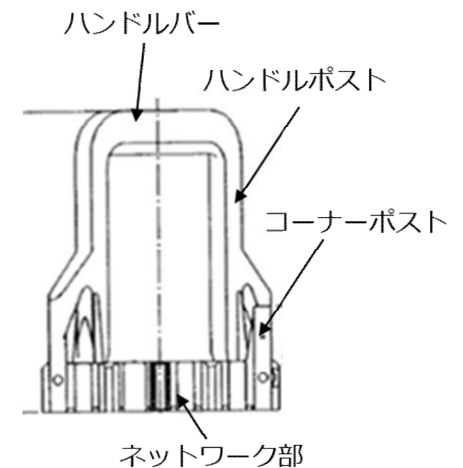
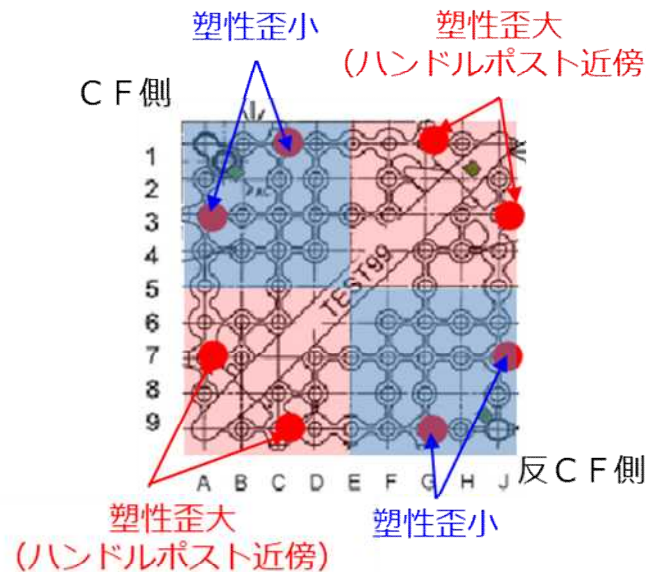
IV-1 ガレキ衝突解析 ～解析結果～

- 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。
- また上部端栓部の塑性歪分布はCF側、反CF側が比較的小さい値となった。
(反CF側の結合燃料棒2本の上部端栓部の塑性歪はいずれも1%を下回る結果となった。)
- このような塑性歪分布となる理由として以下が考えられる。
 - ハンドルポスト近傍の結合燃料棒は、ガレキ衝突の影響を受けやすく、他の結合燃料棒と比較して大きな塑性歪が発生し易い。
 - 一方、ハンドルポストから遠い位置にあるCF側、反CF側の結合燃料棒は比較的塑性歪は小さくなる。

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 | 1.4 |
| 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 |

上部端栓の塑性歪分布 (条件②)
■ : 結合燃料棒



● : 結合燃料棒

反CF側

<解析の目的>

- ハンドル変形燃料に負荷可能な吊上げ荷重を確認するため、ガレキ衝突解析の結果から、吊上げに寄与する結合燃料棒を保守的に反CF側の2本のみとして評価を行った。

<解析条件>

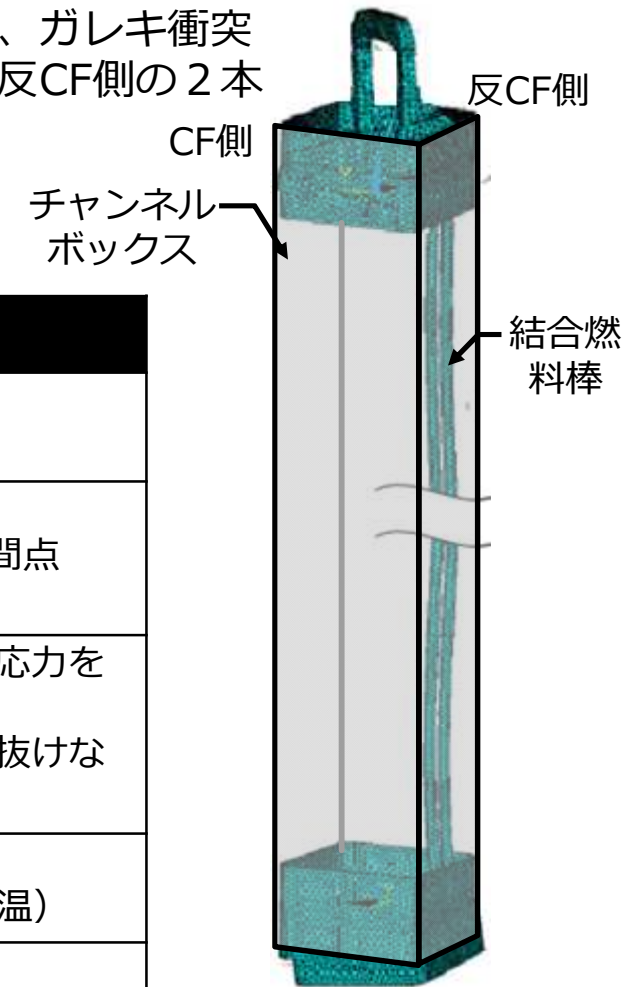
- 下記表に示す条件にて吊上げ解析を行った。

| 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プレートから抜けかないこと。*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、室温) 被覆管、下部端栓 : 760 N/mm² (照射材、室温) |
| 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。

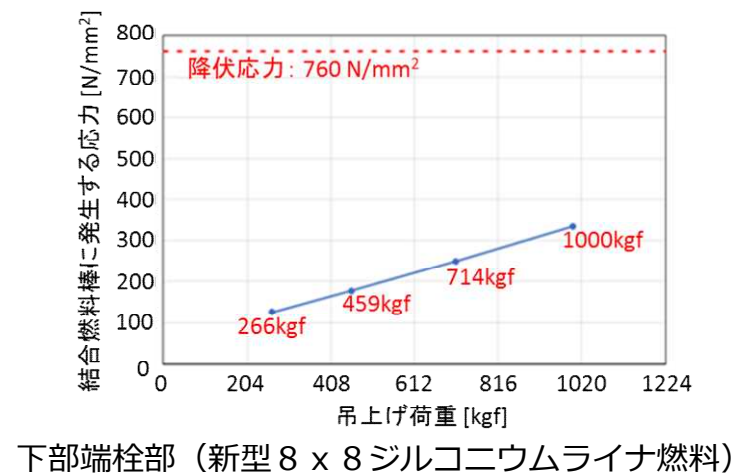
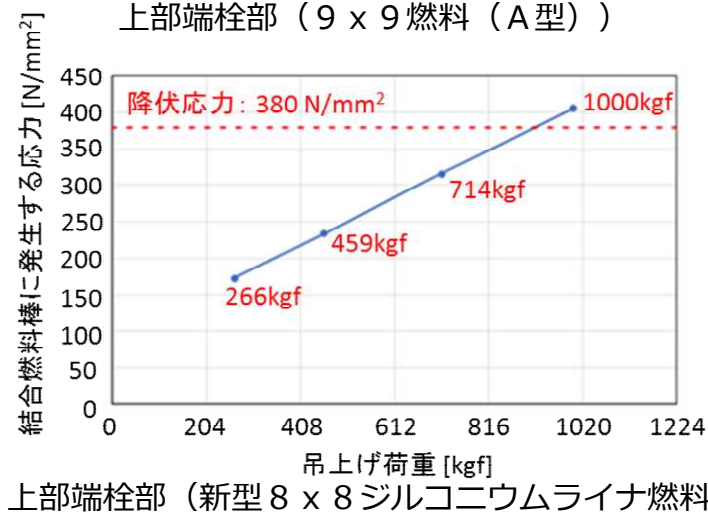
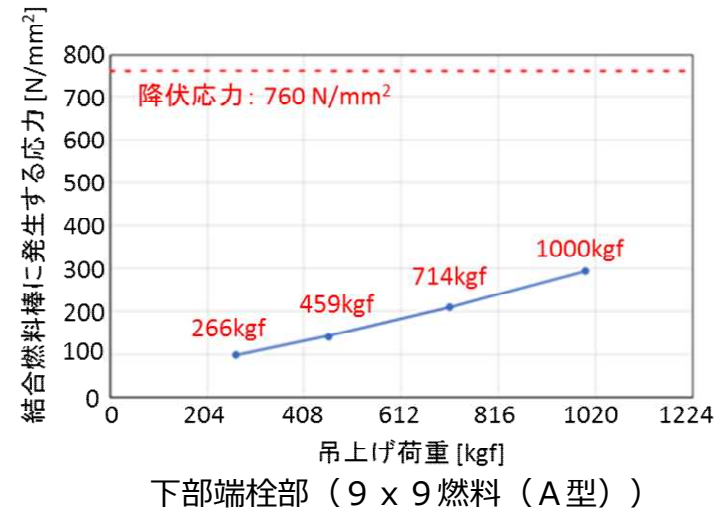
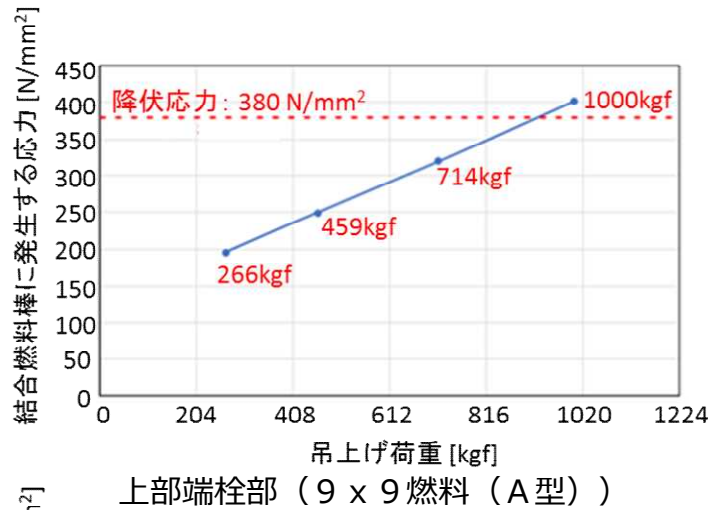
*3 上部端栓部は、同部材よりも下側の被覆管部、下部端栓部と比較して照射量が少ないため、保守的に未照射材の降伏応力を使用した。



反CF側の結合燃料棒2本での吊上げイメージ図

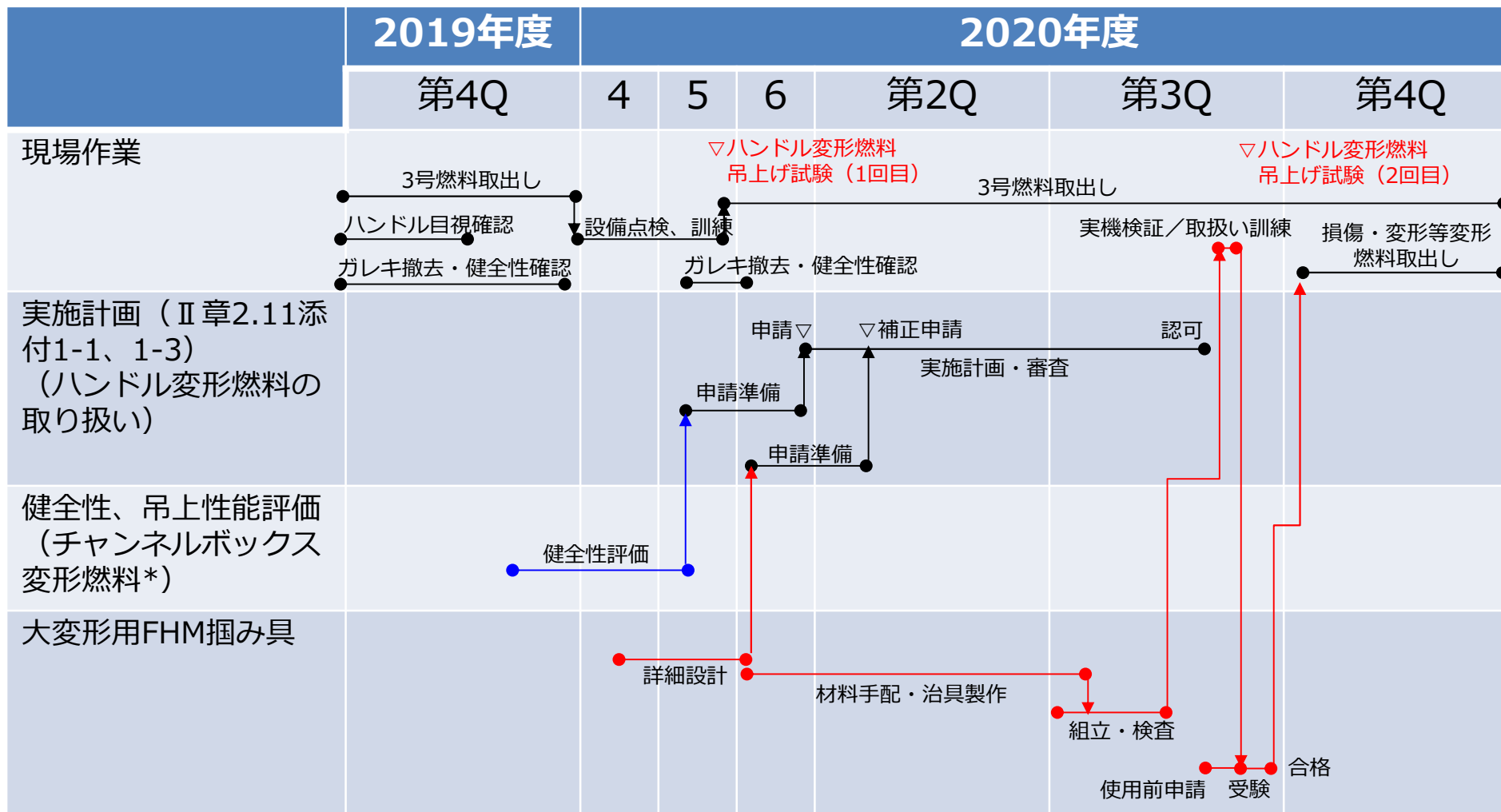
IV-2 ハンドル変形燃料の吊上げ解析 ～解析結果～

- 吊上げ解析の結果、吊上げ荷重の増加に伴い、結合燃料棒の上部端栓、下部端栓に発生する応力が增大することが分かった。このうち、上部端栓に発生する応力は1tonを負荷した場合、降伏応力を超過する結果となった。
- 本結果から、ハンドル変形燃料は、吊上げ時の最大荷重を700kg程度に制限することで結合燃料棒の健全性上、問題なく吊上げられるものと考えられる。



V 今後のスケジュールについて

- ハンドル変形燃料吊上げ試験は2020年度5月、第3Qでの実施を検討している。

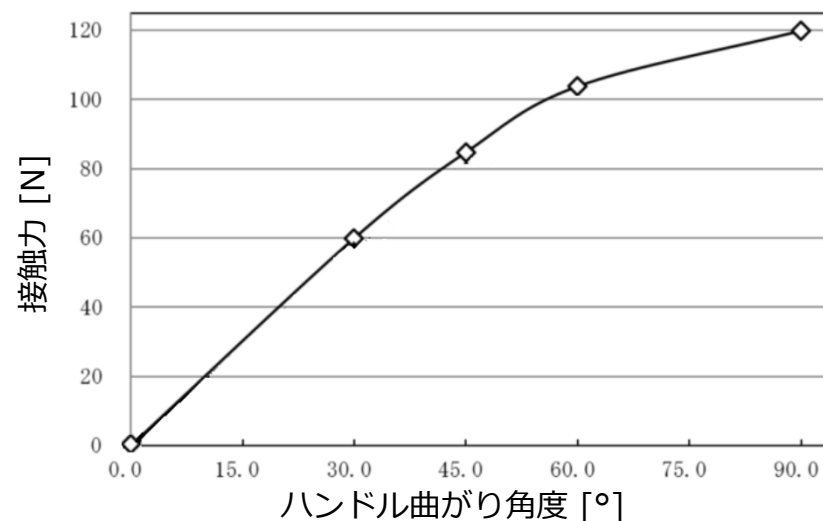
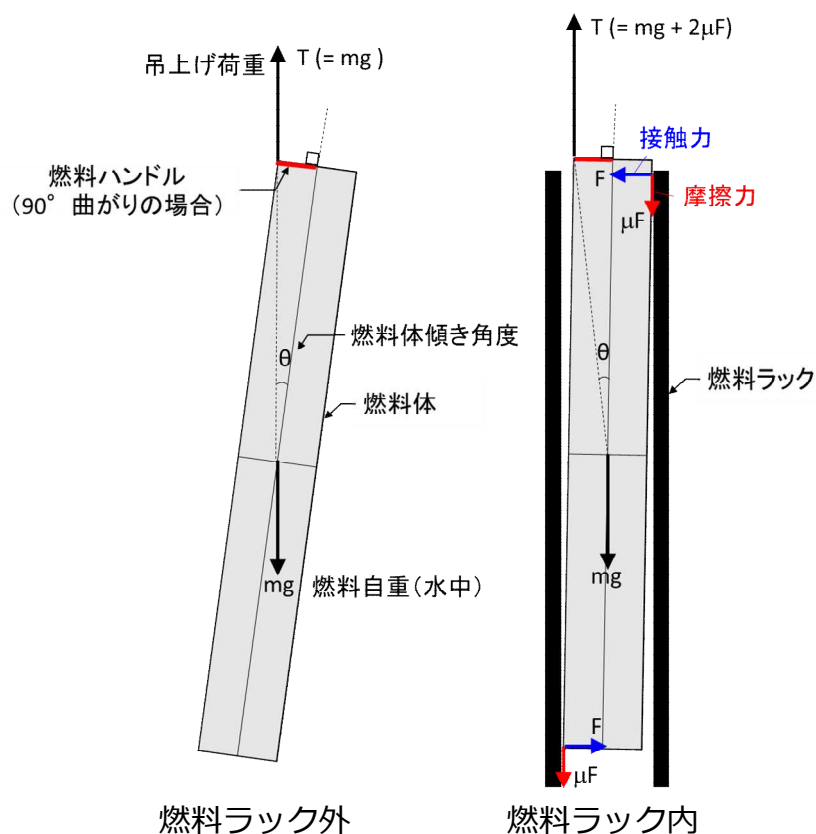


* チャンネルボックス変形燃料：ハンドル以外にチャンネルボックス、チャンネルファスナが変形している燃料

以下、参考資料

【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

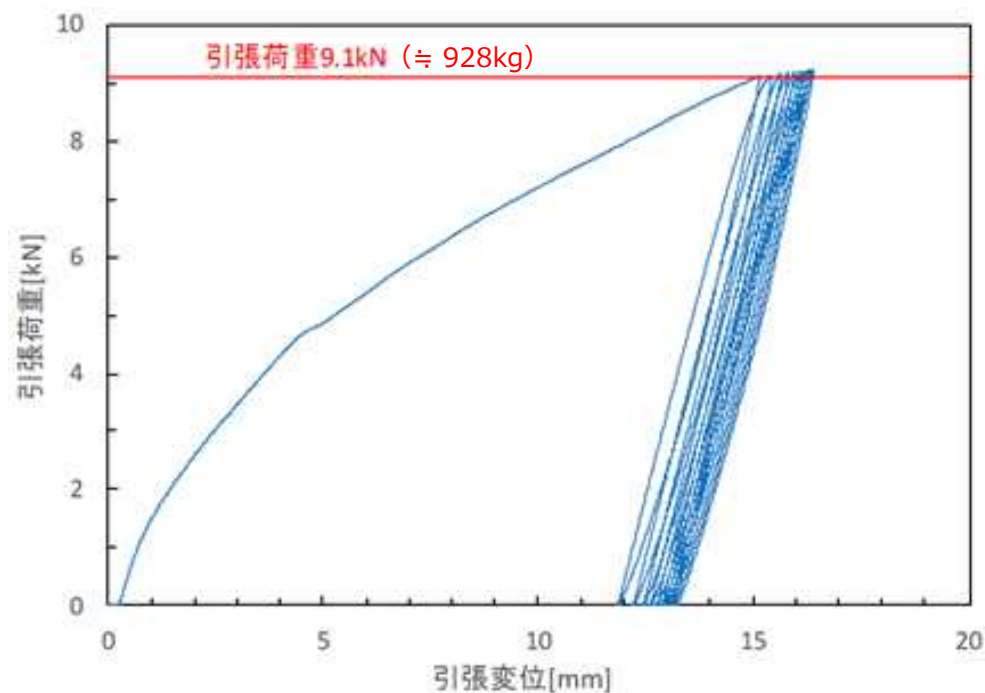
<補足>

- 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。

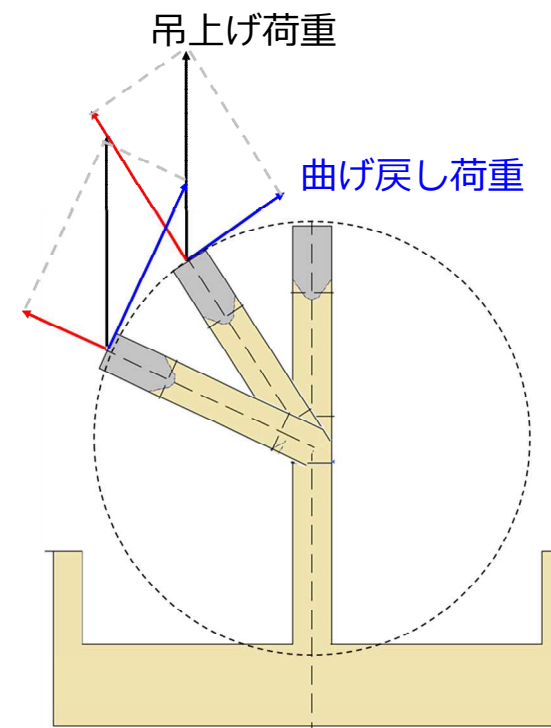
ハンドル曲がりに伴う吊上げ時の摩擦力について

【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

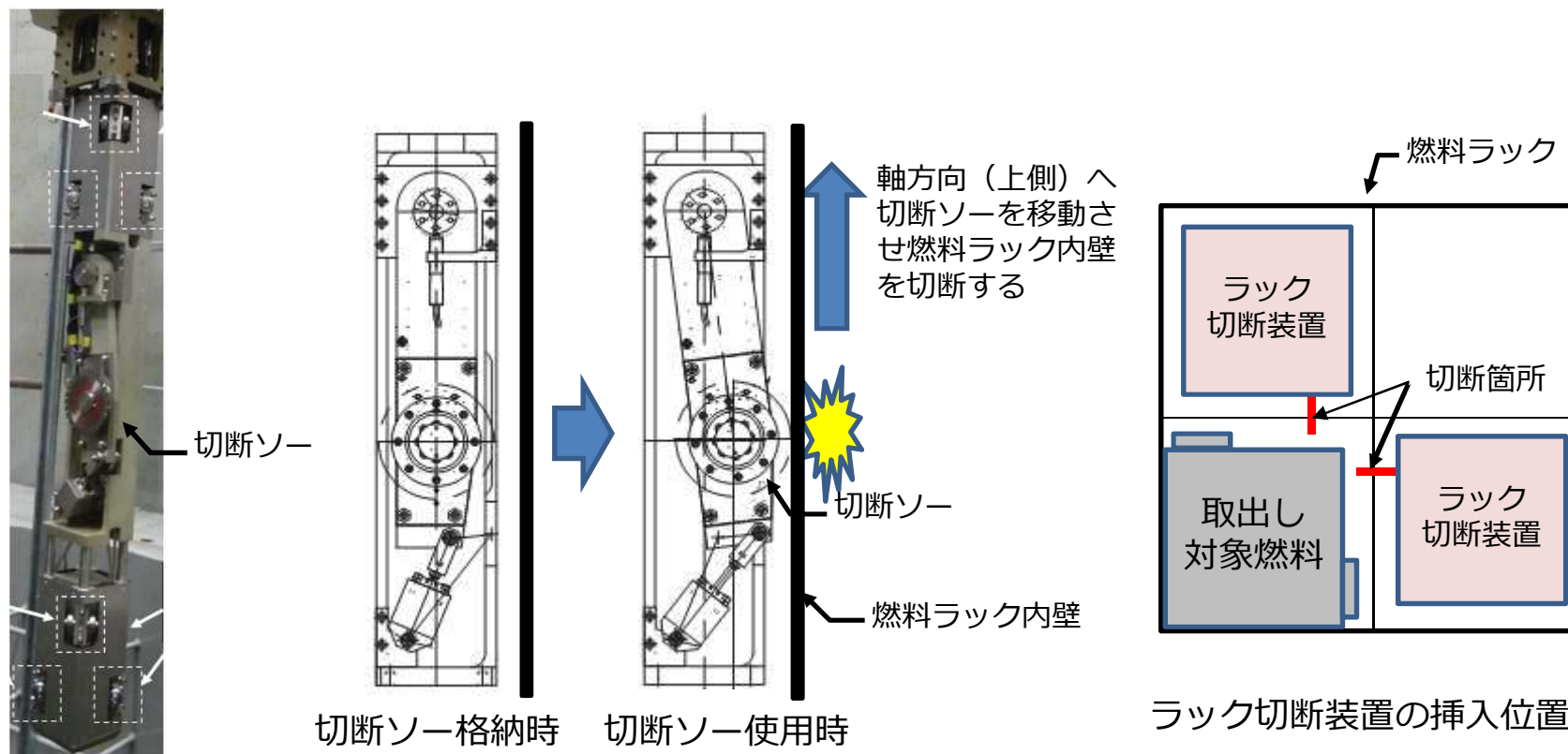
【参考】大変形用FHM掴み具について

- 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 data-bbox="1243 683 1765 719">【フック部の形状及び材質変更】</p> <ul data-bbox="1272 730 1989 901" 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