

6号機 新燃料曲がり事象に対する今後の復旧計画

2020年3月27日

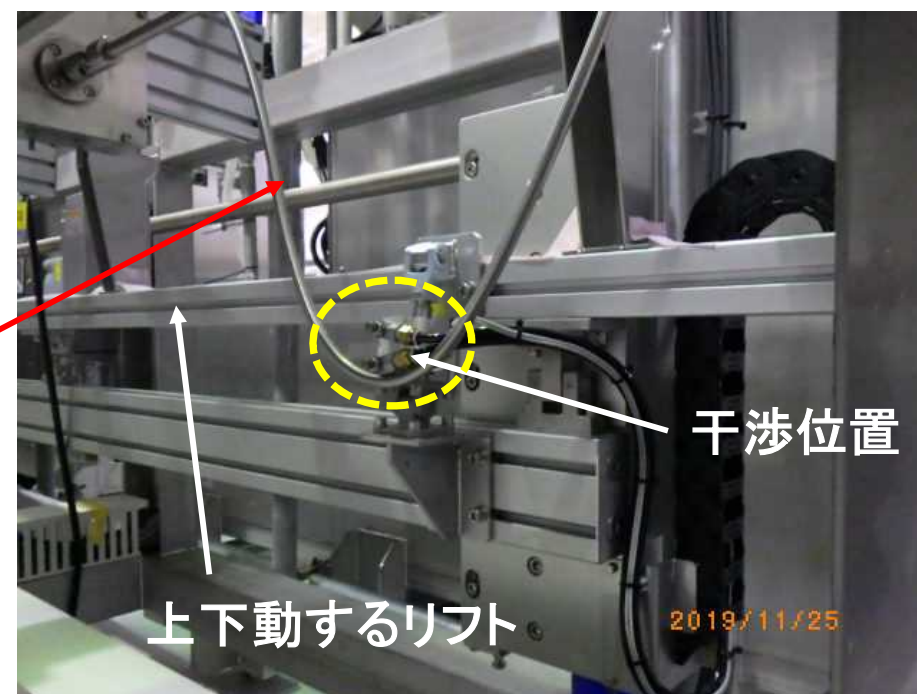
TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

1	燃料棒曲がり事象について	2
2	健全燃料棒の燃料集合体への復旧	3
3	曲がり燃料棒対応	
3-1	曲がり燃料棒のプロファイルとその問題点	5
3-2	曲げ戻し作業の成立性の確認	6
3-3	曲がり燃料棒の曲げ戻しスキーム	7
4	今後の工程について	8
参考	曲がり燃料棒の仮置き、曲げ戻し評価、 作業の安全対策	9-15

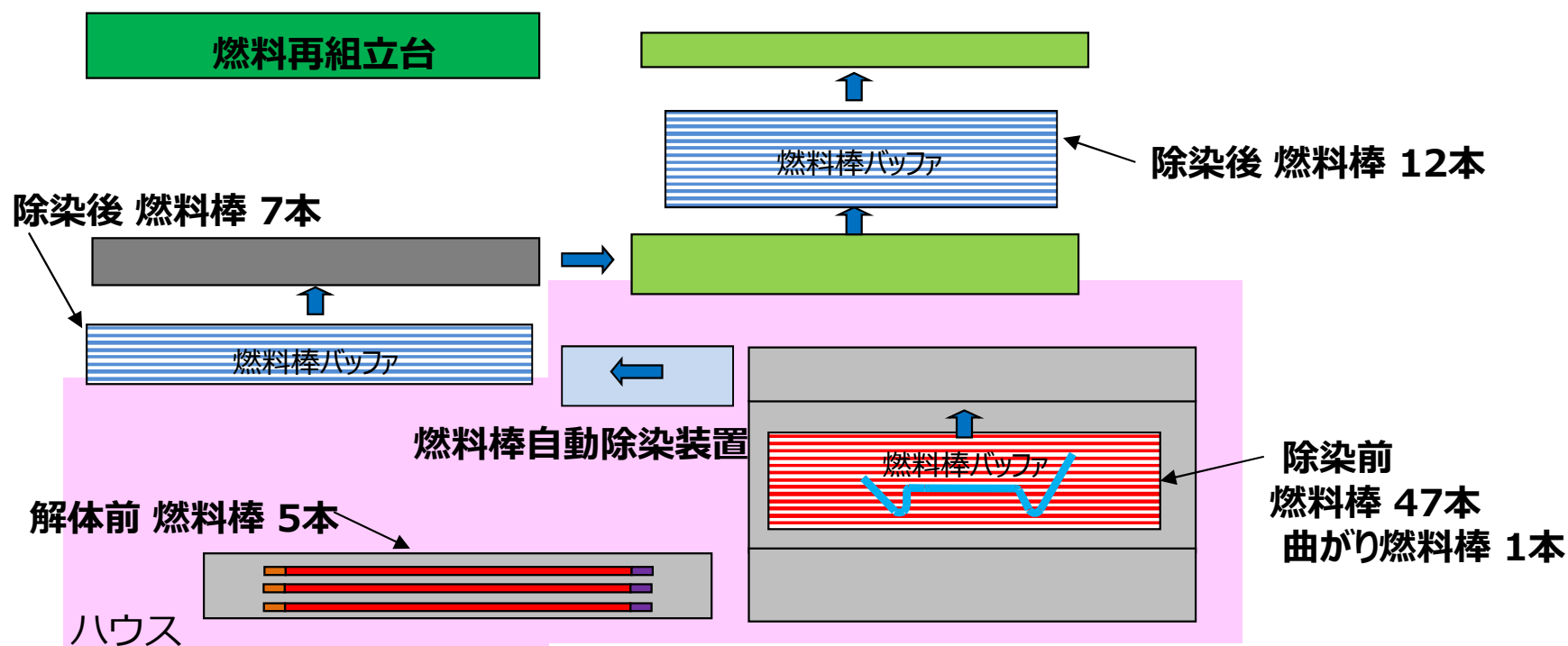
1 燃料棒曲がり事象について

- 6号機原子炉建屋に保管している新燃料については、製造メーカーの工場にて解体するために順次搬出を実施しているところであり、この事前作業として燃料の除染を実施していた。
- 2029年11月25日 午前10時50分頃、6号機オペレーションフロアにて新燃料の除染作業を実施していたところ、人的過誤により、燃料棒を除染装置へ運ぶためのリフター下降中に燃料棒を払出し、リフター下側に新燃料棒 1 本がはさまり燃料棒が変形するトラブルが発生した。
- 当該の燃料棒は変形しているものの被覆管に損傷は確認されておらず、外部環境に影響を与える状況ではなかった。
- 2019年12月25日に自動除染装置リフターに挟まれて曲げた燃料棒を取り外し、詳細な外観検査及び表面汚染密度の測定した結果、再度損傷のないことを確認した。



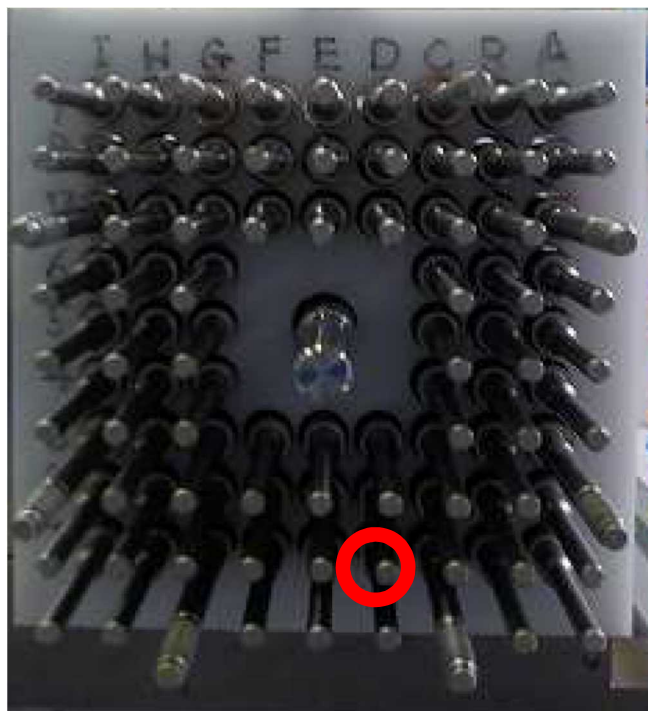
2 健全燃料棒の燃料集合体への復旧（1/2）

- 当該燃料集合体は、除染／再組立作業の中断により、燃料棒72本がバラバラの状態でおペフロに仮置状態である。
- 曲がり燃料棒1本以外の健全燃料棒71本を除染／再組立を実施し、燃料集合体形状で新燃料貯蔵庫への収納予定。



2 健全燃料棒の燃料集合体への復旧（2/2）

- 曲がり燃料棒1本が抜けた燃料集合体となるが、現状の燃料取扱設備による取扱い、燃料貯蔵設備（新燃料貯蔵庫）による貯蔵は可能。



写真中、赤丸の位置

項目	影響の有無
燃料集合体取扱い性	曲がり燃料棒はタイロッド* ¹ ではないことから、取扱いに影響はない。
貯蔵時耐震性	曲がり燃料棒が抜けることによる重量減少はわずかであり、地震応答への影響は軽微。（約256kg→253kgで1体当たりで約1%の変化、NFV* ² 全体重量からみると、さらに小さい）
貯蔵時未臨界性	・未燃焼状態で燃料棒が1本抜けても無限増倍率が1.3を超えることはなく、NFVの収納条件（臨界評価条件）の範囲内で臨界にならない

*1 タイロッド：取扱い時に荷重がかかる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

*2 NFV：新燃料貯蔵庫

- 曲がりに対する再発防止策は実施済。
- 健全燃料棒（71本）の除染／再組立作業を再開し、燃料集合体形状で新燃料貯蔵庫へ貯蔵予定。

3 曲がり燃料棒対応

3-1 曲がり燃料棒のプロファイルとその問題点



● 燃料集合体除染/解体状態の長期化解消
発電所として、早期に燃料集合体を本来収納すべきNFV/SFPに収納することが肝要

項 目	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
曲げ戻しの有無	曲げ戻す			曲げ戻さない
一時収納先	NFV		SFP破損燃料ラック	仮置き継続
一時収納時期	早期		数か月程度	不可
搬出形態	燃料集合体	燃料棒		
輸送容器	既設輸送容器	既設輸送容器 収納管		新規設計製作 新容器の申請 (長期化)

- 現状の曲がり燃料棒の寸法では、正規の貯蔵設備（NFV・SFP*）に収納できず、人による24時間監視体制のもと仮置状態が長期継続している。
- また、将来の所外運搬において、曲がり燃料棒に対応した輸送容器は存在せず、新たな輸送容器の設計開発、許認可が必要となり、仮置がさらに長期化。

⇒ 曲げ戻し作業を行い**正規の貯蔵設備での管理状態**に復旧するための検討を実施。
(表のケース1～3)

* SFP：使用済み燃料プール

3-2 曲げ戻し作業の成立性の確認

要求事項：曲げ戻しで燃料棒被覆管の密封性（閉じ込め機能）が維持されること*

肉厚評価

- 要求事項：曲げ戻し後の肉厚が燃料設計解析評価の最小肉厚が担保されること
- 実施内容：モックアップ試験と解析評価にて確認

脆性評価

- 要求事項：加工硬化により脆性が進展した場合でも破断に至らないこと
- 実施内容：モックアップ試験片と引張により破断した試験片のビッカース硬さの比較評価により延性が確保されていることを確認

疲労評価

- 要求事項：曲げ戻しにより疲労破壊に至らないこと
- 実施内容1：モックアップ試験とPTにより亀裂発生がないことを確認
- 実施内容2：疲労負荷を制約する作業手順を確立

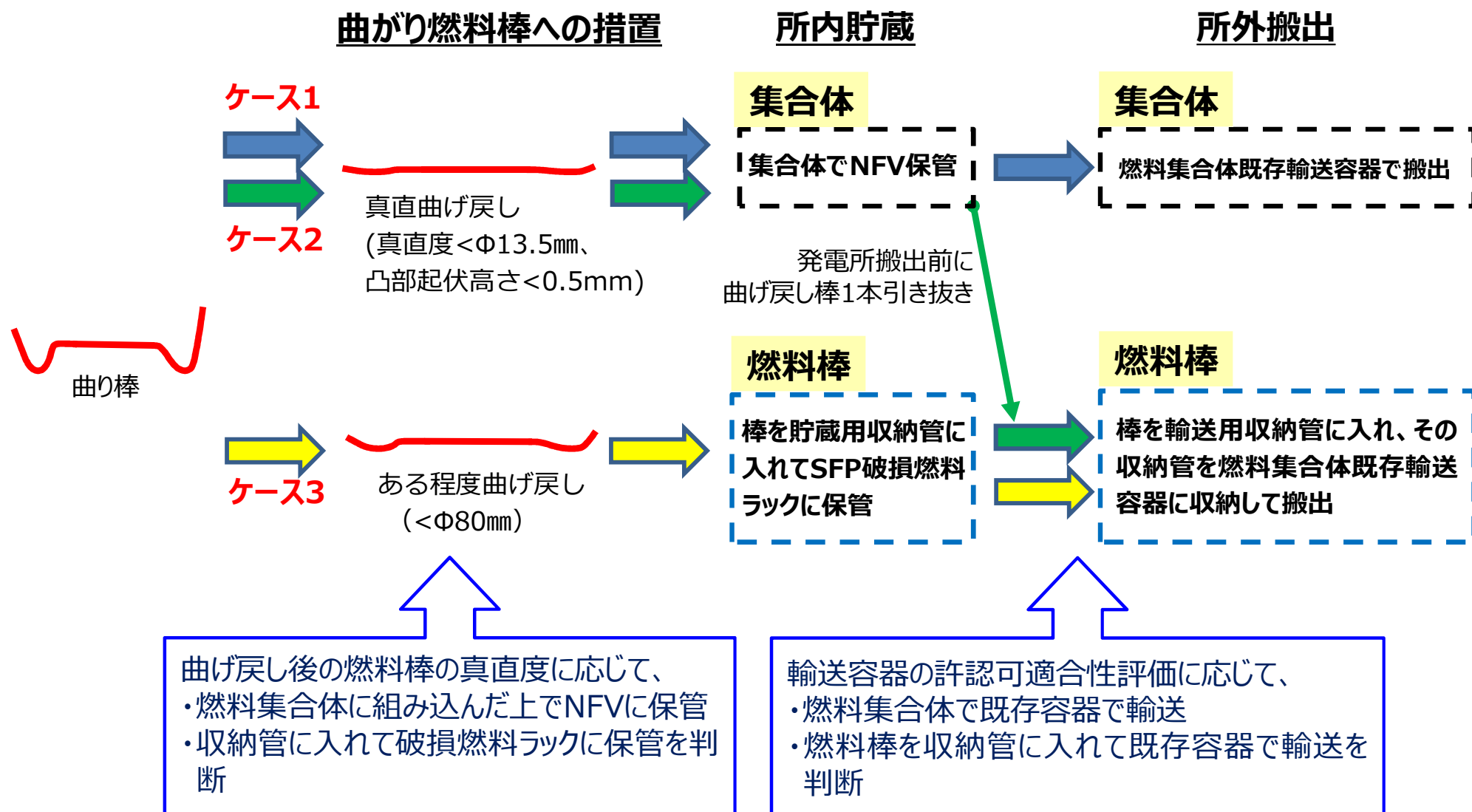
局所応力評価

- 要求事項：曲げ戻し局所変形部に外力（地震加速度）が加わってもNFV内で損傷に至らないこと
- 実施内容：地震加速度により燃料棒たわみが生じた際に曲げ戻し局所変形部に生じる応力を解析評価

燃料棒曲げ戻し作業の成立性を確認した。

* 当該燃料棒は、所外搬出後解体する予定であり被覆管は再使用しない。よって、ここで言う密封性とは所外搬出までの間、維持されることである。

3-3 曲がり燃料棒の曲げ戻しスキーム



燃料棒の曲げ戻し作業を実施し、曲げ戻し後の状態に応じてケース1～3（NFVでの保管か、破損燃料ラックでの保管か）を選択するフローにて作業手順*を作成する。

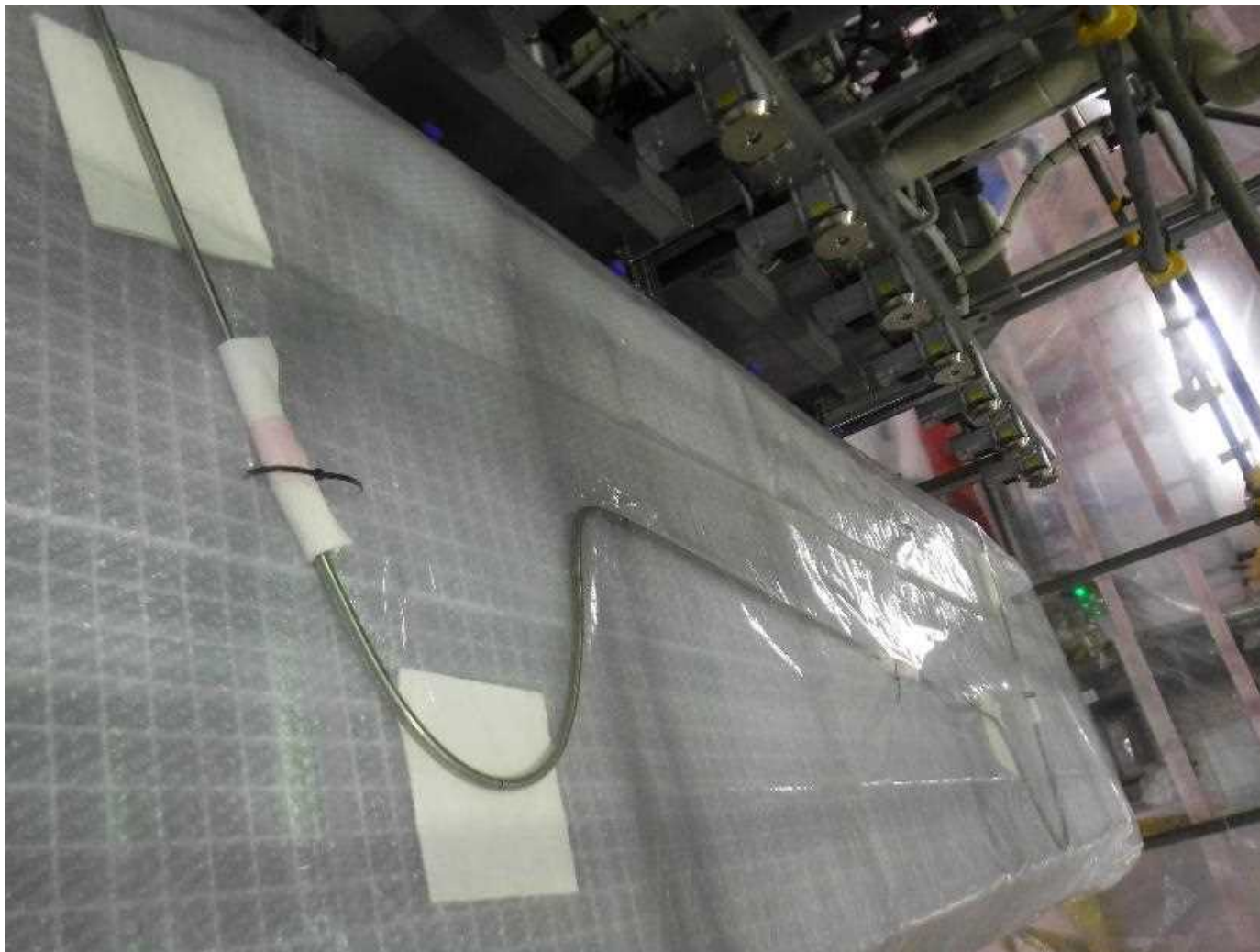
* 被覆管の亀裂を想定した場合でも安全に作業できるようハウス内でビニールチューブを用いて曲げ戻し作業を実施する。また、SFP破損燃料ラックに保管する際は、密閉機能をもつ収納管を使用する。

4 今後の工程について

- ・71本の燃料は作業上の安全確認など準備が整い次第、NFVに収納予定。
- ・71本の燃料の収納後に、曲がり燃料棒の取扱について判断し、準備が整い次第対応予定
- ・曲がり燃料棒対応後に残りの燃料集合体の除染・再組立を再開予定。

項 目	19年度 2月	3月	20年度 4月	5月	6月
① 除染・再組立後、健全燃料棒71本をNFV収納					
	 作業要領書改訂、教育				
	 ハードウェア改造				
			 健全燃料棒71本をNFVに収納予定		

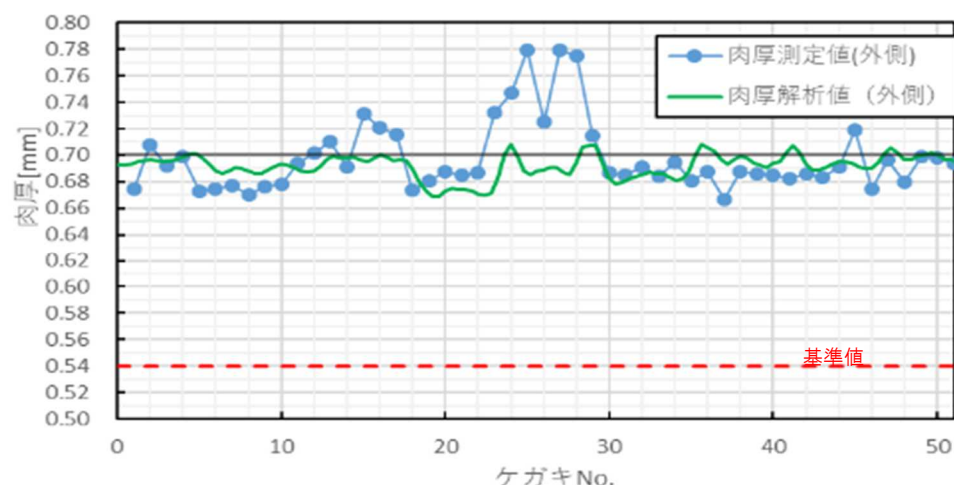
2019年12月25日 曲がり燃料棒を除染装置から取り外しハウス内に仮置きした。



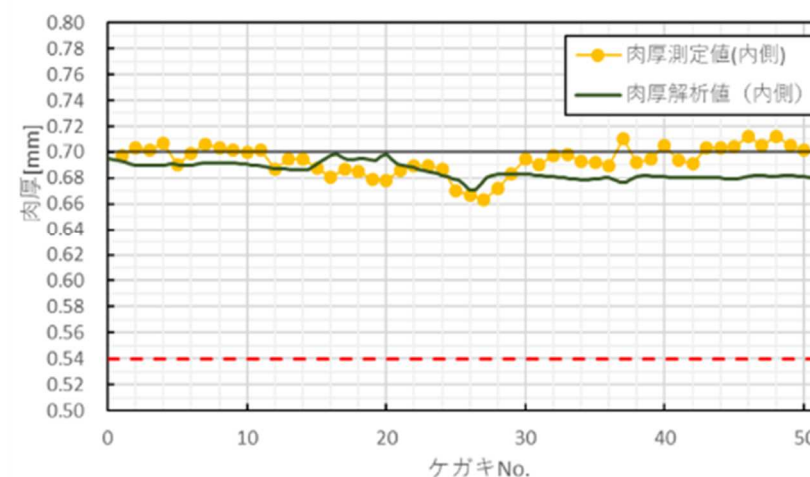
- 要求事項： 曲げ戻し後の肉厚が燃料設計解析評価の最小肉厚が担保されること

1回曲げ戻しにおける残留肉厚確認

保守的な条件での試験と解析から、曲げ戻し後に生じる被覆管の減肉は最大で $40\mu\text{m}$ であり、肉厚が基準値に至るまでの減肉（ $160\mu\text{m}$ ）の25%程度であることから、被覆管の肉厚は十分維持されることを確認。



模擬棒（曲率外側）曲げ戻し後の被覆管肉厚

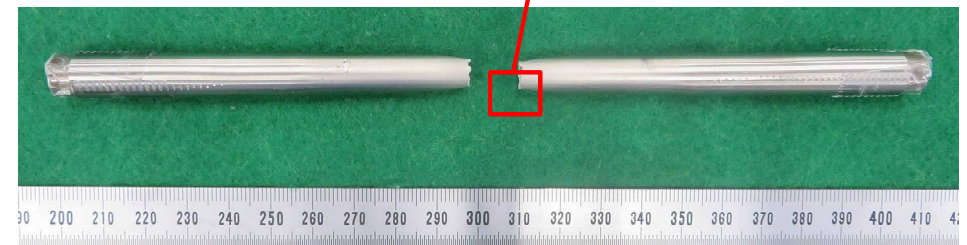
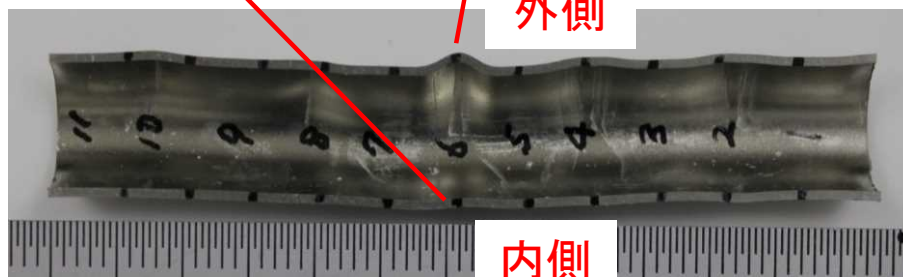
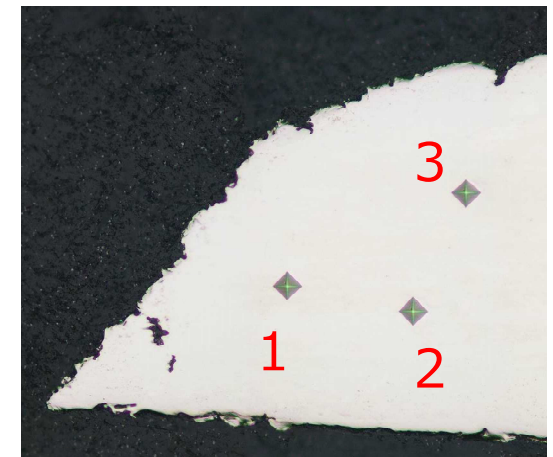
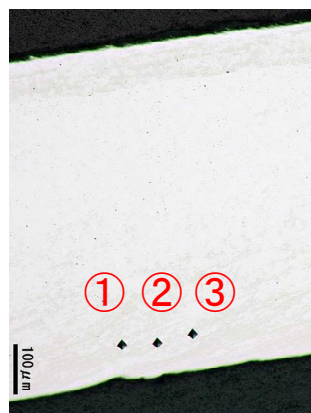


模擬棒（曲率内側）曲げ戻し後の被覆管肉厚

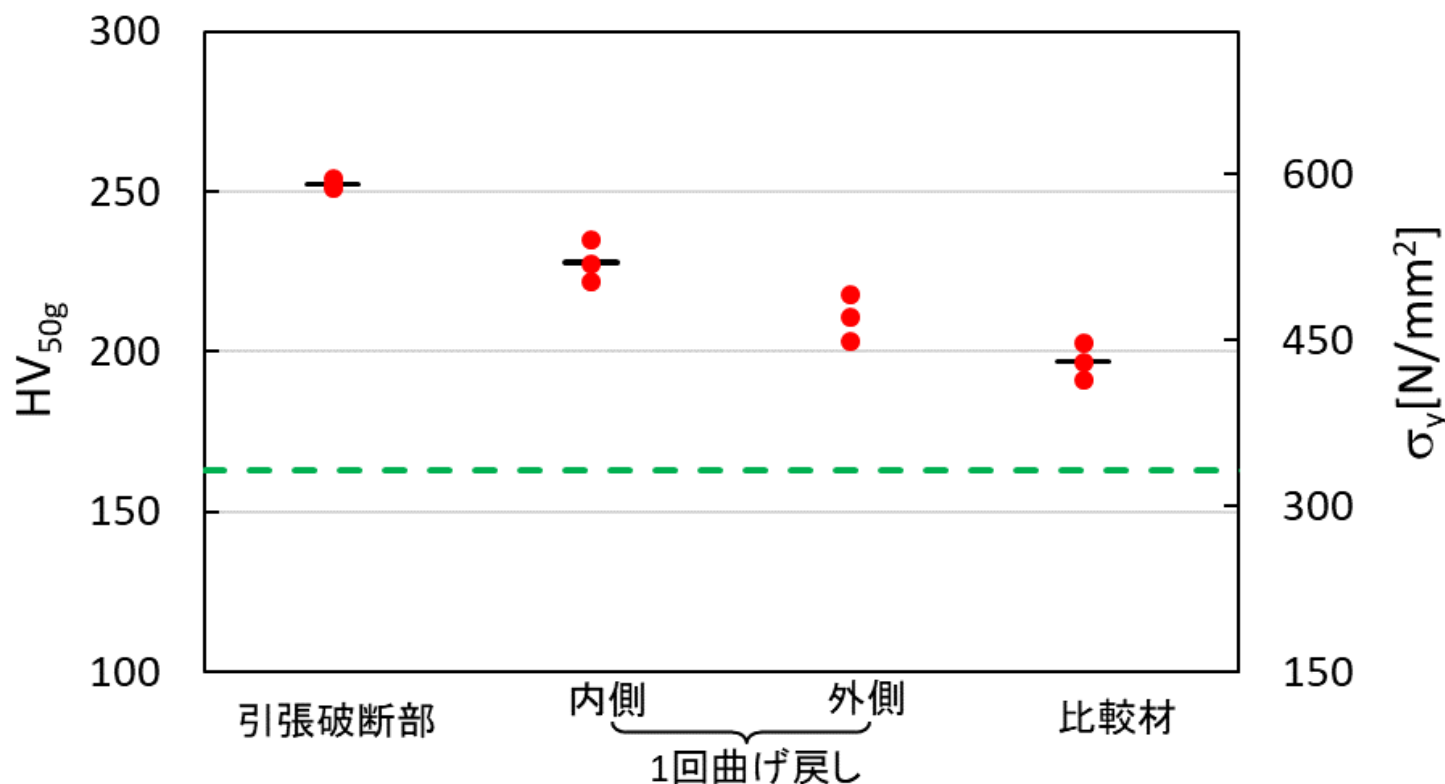
【参考】 脆性評価 (1/2)

要求事項 : 加工硬化により脆性が進展した場合でも破断に至らないこと

- 曲げ戻し後の被覆管強度をビッカース硬度(Hv)の測定により評価
- Hvを文献により、耐力(σ_y)に換算
- 短尺模擬棒と同一ロットの被覆管を引張試験により破断
- 破断部の先端でビッカース硬さを測定 ⇒破断の極限における硬度を評価



要求事項： 加工硬化により脆性が進展した場合でも破断に至らないこと



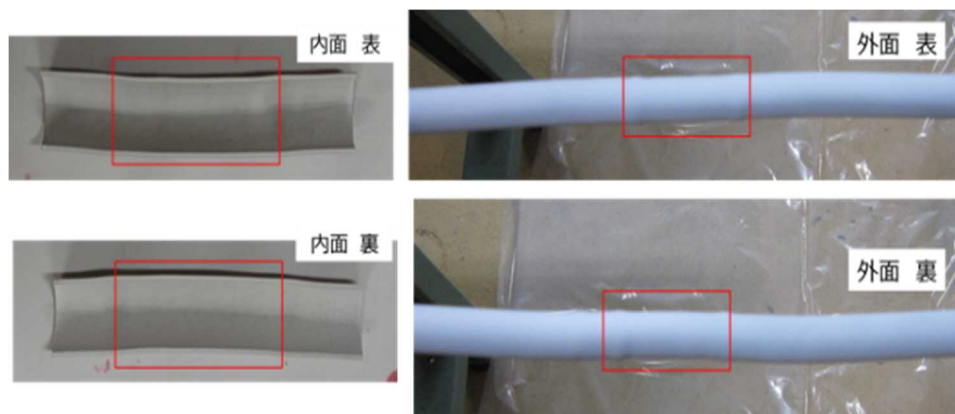
- 製造時の被覆管（Hv197）と比較して、1回曲げ戻しを経験した被覆管はHvが31、破断部ではHvが55増加する(硬化する)。
- 1回曲げ戻した被覆管は、破断に至るまで45%の余裕が確保されており、曲げ戻し量を管理して作業すれば破断しない。

【参考】 疲労評価

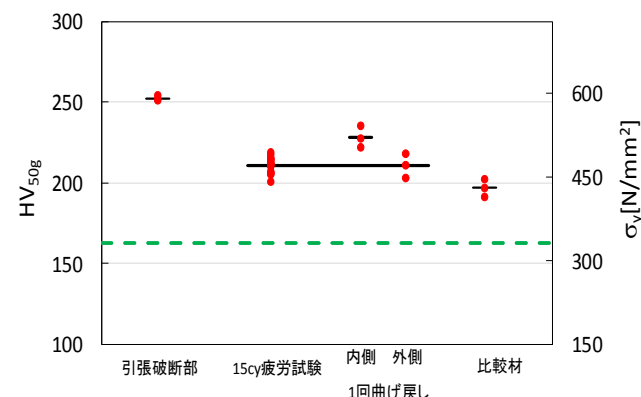
要求事項 : 曲げ戻しにより疲労破壊に至らないこと

同一箇所の多数回の曲げ戻しを想定した疲労評価

- ① 曲げ戻した棒、更に疲労試験を行った燃料棒の硬度評価から、破断に至る材料硬度に対して45%の余裕がある。
- ② 疲労試験の 被覆管には、PT試験の結果内外面とも疲労に伴う損傷（クラック）は認められない。



曲げ戻し疲労試験後の被覆管内外面PT試験結果



曲げ戻しおよび疲労試験後の被覆管硬度測定結果

燃料棒曲げ戻し手順

- ① 専用曲げ戻し治具を設計し、モックアップを実施
- ② 各曲げ部分のRに応じた曲げ戻し手順を策定⇒曲げ戻し作業者の勘・スキルによらない手順
- ③ φID13.5mmの真直度確認管による検査で集合体挿入判断
- ④ 想定外事象対策としてビニールチューブを被せて曲げ戻し



専用治具による曲げ戻しモックアップ
(棒の全長をビニールチューブで覆う)



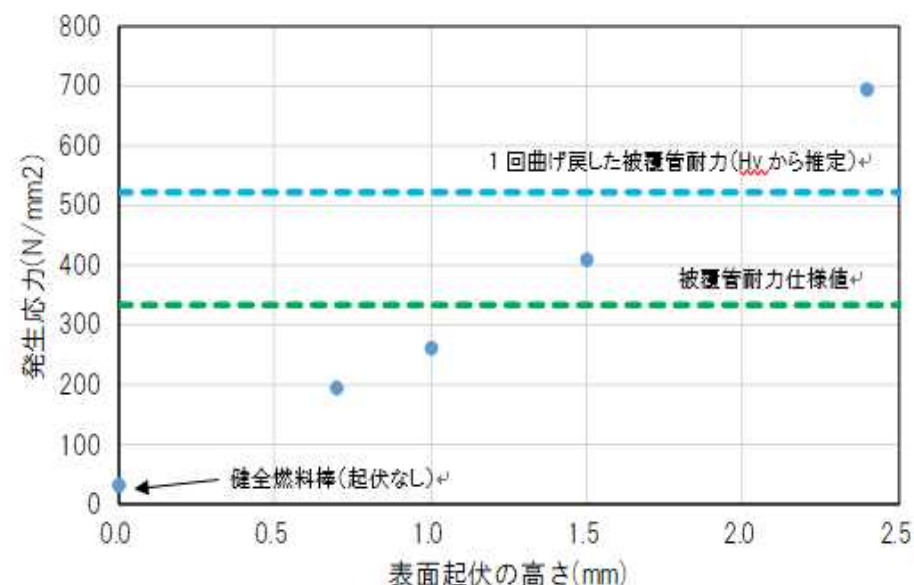
真直度確認のモックアップ

要求事項 : 曲げ戻し局所変形部に外力（地震加速度）が加わってもNFV内で損傷に至らないこと

- ① 曲げ戻し後の燃料棒の凸部起伏高さが1mm以下であれば、NFV内で地震による応答加速度8Gが生じた場合でも、被覆管の発生応力は耐力以下である。
- ② 曲げ戻し作業では保守的に起伏高さ0.5mm以下で外形プロファイルを管理する。



曲げ戻し後の被覆管断面と外径プロファイル



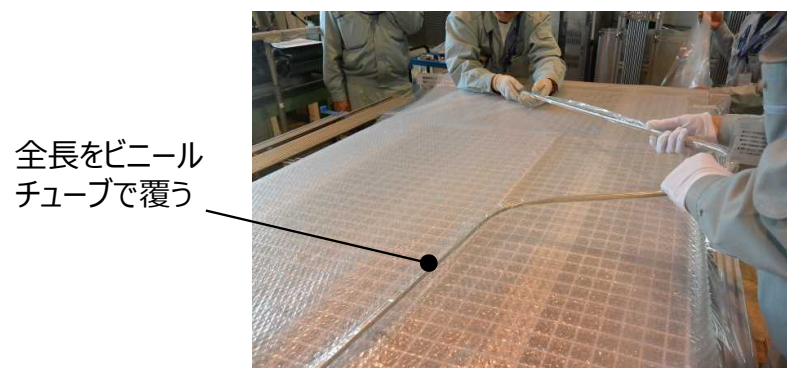
曲げ戻し後の被覆管表面起伏高さと地震時発生応力

ハウス内作業

曲げ戻し作業は、局所排風機、α線連続モニタを設置したハウス内で、適切な防護衣、マスクを装着して行うこととしている。また、安全評価レビューにより確立した作業手順に基づき実施する。

飛散防止用ビニールチューブ

被覆管破断時におけるウラン飛散防止として、ビニールチューブを燃料棒全長にわたり装着したまま曲げ戻しが可能であることを検証。手順に反映済。



収納管の準備

- ① 何らかの事態により、曲げ戻した燃料棒が集合体に組み立てられなかった場合の対策として、収納管を製作済⇒曲げ戻し作業着手前に搬入する
- ② 同収納管はSFP（プール）に保管する前に気密試験を実施する
- ③ 燃料棒1本分のペレット（約350個）の全てが収納管内底部に落下し、プール水が浸入、満水になったとしても臨界に達することはない

