

[原因と対策の報告の公表文 (様式 2)]

伊方発電所から通報連絡のあった異常に係る原因と対策の報告
について(9月15日分)

19.10.1
原子力安全対策推進監
(内線2352)

1 四国電力(株)から、伊方発電所で平成19年9月15日に発生した伊方3号機燃料集合体グリッドの欠損について原因と対策の報告がありましたので、お知らせします。

[報告書の概要]

県の公表区分	異常事項	発生年月日	推定原因等	対 策
B	燃料集合体グリッドの欠損(3号機)	19.9.15	<p>当該燃料は、第8回定期検査の燃料取出時に支持格子同士のかみ込みによるわずかな変形が生じたこと、また、再使用にあたって、装荷状態、運転状態における燃料健全性については検討されていたが、燃料取出・装荷時の燃料取扱いに対する検討が行われていなかったことから、次の経緯により支持格子の損傷に至ったものと推定される。</p> <p>第8回定期検査の燃料取出時 当該燃料が上昇中に、隣接していた燃料(J46)と干渉して支持格子同士がかみ込み、荷重変動トリップが発生した。その対応として当該燃料の下降操作をした際に、当該燃料が水平方向に移動したことから、当該ガイドベーン部に過大な応力がかかり外側に約2.6mm変形した。</p> <p>第9回定期検査の燃料装荷 当該燃料が下降中に、隣接する燃料との干渉により変形部がパッフル板に押しつけられて荷重変動トリップが発生するとともに、変形部が燃料棒側に押し戻されることにより、変形部の基部に過大な応力がかかり、左端の長さ約2mmを残して外側から亀裂が発生したが、内側に幅約0.1mmの未破断部が残った。</p> <p>第10回定期検査の燃料取出時 当該燃料が上昇中に、変形部がパッフル板と干渉し、内側に残っていた厚さ約0.1mmの未破断部が破断し、左側に一部を残すのみとなった。</p> <p>燃料コンテナに当該燃料を挿入後、燃料コンテナを横倒しする際に、損傷部分の先端が燃料コンテナ壁面と干渉して支持格子から脱落し、燃料コンテナ底面の第3支持格子付近に落下した。</p> <p>燃料コンテナを使用済燃料ピット側へ移送した後、立起こす際、損傷部分がコンテナ底面に沿って落下し、第1支持格子D面の左端にひっかかった。</p>	<p>燃料装荷・取出作業において隣接する燃料との支持格子同士のかみ込みの可能性がある場合には、かみ込みが発生しないように次のとおり運用することを作業要領書に明記する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・取り扱う燃料の周囲4面のうち、1面または2面が燃料と接する場合は、隣接する燃料と干渉しないように離れた位置で燃料を取り扱うこととする。 なお、燃料装荷時に炉心底近くまで燃料を下降させた後、隣接する燃料に接するように燃料を移動(横ずらし)した時には、隣接燃料との位置関係を水中カメラ等で水平方向のズレやねじれがないことを確認したうえで、燃料を取り扱うこととする。 ・1面または2面が燃料と接する状態で横ずらしができない場合は、水平方向の燃料のねじれやズレが生じないように、ガイドアセンブリー等を使用して3面以上が接する配置としたうえで、燃料を取り扱うこととする。 <p>なお、万一支持格子に変形が認められた場合には、燃料取出・装荷時の燃料取扱いに対する検討を行い、総合的に評価したうえで再使用可否の判断を行うこととする。ただし、支持格子のガイドベーンに設計上の最大隙間である2mm以上の変形が認められる場合は、再使用しないこととする。</p> <p>また、当該燃料(燃料番号H06)は、一部損傷していることから再使用しないこととする。</p>

2 県としては、伊方発電所に職員を派遣し、四国電力の報告内容等について確認しています。

原子力発第07139号
平成19年10月 1日

愛媛県知事
加戸守行 殿

四国電力株式会社
取締役社長 常盤 百樹

伊方発電所第3号機 燃料集合体支持格子の一部損傷に係る
報告書の提出について

平成19年9月15日に発生しました伊方発電所第3号機燃料集合体支持格子の一部損傷につきまして、その後の調査結果がまとまりましたので、安全協定第11条第2項に基づき、別添のとおり報告いたします。

今後とも伊方発電所の安全・安定運転に取り組んでまいりますので、ご指導賜りますようお願い申し上げます。

以 上

伊方発電所第3号機

燃料集合体支持格子の一部損傷について

平成19年10月

四国電力株式会社

1. 件名

伊方発電所第3号機 燃料集合体支持格子の一部損傷について

2. 事象発生の日時

平成19年9月15日 18時55分頃（確認）

3. 事象発生の設備

原子炉本体 燃料集合体

4. 事象発生時の運転状況

3号機第10回定期検査中

5. 事象発生の状況

伊方発電所第3号機(定格電気出力890MW)は、第10回定期検査（以下、定検という）において燃料取り出し中のところ、9月15日18時55分頃、原子炉から取り出した燃料集合体（以下、燃料という）1体において、燃料棒を束ねている9段の支持格子のうち下から3段目の一部が欠けていることを確認した。

なお、本事象による周辺環境への放射能の影響はなかった。

(添付資料-1)

6. 事象の時系列

9月14日

6時41分 燃料取出作業開始

9月15日

15時13分頃 当該燃料（燃料番号H06）の原子炉容器からの取出し

15時33分頃 当該燃料の画像データの採取を開始

18時55分頃 画像データにより当該燃料支持格子の一部損傷を発電グループリーダーが確認

7. 状況調査

(1) 外観点検

支持格子の一部に損傷が確認された燃料（以下、当該燃料という）について、水中カメラによる外観点検等により状況を調査した。

その結果、下から3段目の支持格子（以下、第3支持格子という）A面において、左端のガイドベーン部が損傷していることを確認した。

当該燃料の第1支持格子D面左端にひっかかっていた損傷部品を回収して観察したところ、底辺が約15mm、高さが約13mmの三角形状であり、左端の約2mmの部分が支持格子外側の方向に湾曲していた。また、損傷部品の寸法・形状の照合を行った結果、第3支持格子の欠損部と寸法・形状が一致することから、他に欠落した部材はないことを確認した。

なお、当該燃料のその他の部位については、損傷または変形のないことを確認した。

また、今回の定検で取り出された燃料157体の外観を確認して当該燃料以外に支持格子の損傷または変形のないことを確認した。

(添付資料－1, 2)

(2) 取り扱い状況

当該燃料は、第10回定検の燃料取出作業において以下の手順で取り扱われた。

(添付資料－3)

①A面がバッフル板に面する位置（E－2）に装荷されていた当該燃料を燃料取替クレーンを用いて、原子炉容器内から取り出し。

(荷重変動トリップなし)

②原子炉キャビティー内を燃料コンテナまで移動し、当該燃料を燃料コンテナ内に挿入。(荷重変動トリップなし)

③燃料コンテナを横倒しし、燃料移送管を通じて使用済燃料ピット側へ移送。

④使用済燃料ピット側へ燃料コンテナが到着後、燃料コンテナを立て起こし。

⑤燃料コンテナ内の当該燃料を使用済燃料ピットクレーンで吊り上げ。

⑥当該燃料を燃料検査ピットにある燃料外観検査装置にセットし、水中カメラで画像データを採取。(支持格子損傷を確認)

⑦画像データ採取終了後、当該燃料を使用済燃料ピットクレーンで吊り上げ、使用済燃料ピットの所定の使用済燃料ラックへ移動。

⑧使用済燃料ラックへ当該燃料を挿入し、保管。

8. 詳細調査

燃料の支持格子が損傷した原因を究明するため、詳細調査を要因分析図に従い実施した。

(添付資料－4)

(1) 製造履歴調査

当該燃料について、支持格子の製造履歴を製造時記録および工場立会検査報告書により確認した結果、異常は認められなかった。

また、支持格子の材料について、材料証明書を確認した結果、所定の材料が使用されていること、および仕様値を満足しており問題のないことを確認した。

(添付資料－5)

(2) 運転履歴調査

当該燃料が装荷されていた第7、第8、第10サイクル運転中の出力履歴および1次冷却材水質について確認した結果、異常は認められなかった。

(添付資料－5)

(3) 燃料取扱装置、設備調査

燃料の取扱いおよび貯蔵に係る下記の装置・設備について調査を行った結果、健全な支持格子は干渉する可能性のないことを確認した。

- ・使用済燃料ラック
- ・燃料コンテナ
- ・燃料取替クレーン

(添付資料－6)

(4) 取扱履歴調査

当該燃料について、発電所受入後の取扱状況を新燃料受入検査記録、および燃料装荷・取出時の荷重チャートにより確認した結果、

- ・第8回定検の燃料取出作業において、荷重変動トリップが1回発生
- ・第9回定検の燃料装荷作業において、荷重変動トリップが2回発生
- ・その他の取扱作業での荷重変動トリップはない

ことを確認した。

(添付資料－7、8、9、10)

(5) 炉内構造物調査

当該燃料のA面に面していたバップル板を水中カメラで点検した結果、第3支持格子の損傷部位に相当する位置から上方に、こすれた跡と見られる連続した筋がバップル板の最上部まで続いていることが認められた。なお、水中カメラでの点検の結果、連続した筋は深い傷とは認められないこと、バップル板は十分な板厚（約20mm）があることから、バップル板の構造・健全性に問題はない。

（添付資料－11）

(6) 過去の外観点検調査

当該燃料をこれまでに装荷した後の第7、第8回定検時の外観点検について確認した結果、異常は認められなかった。なお、第8回定検時の外観点検において、当該部位にわずかな変形（外側に約2.6mm）が認められたが、亀裂は認められなかった。

（添付資料－12）

なお、第8回定検の燃料取出時に当該燃料と隣接していた燃料（J46）の第6支持格子C面の右端部のタブに、こすれた跡（クラッドはがれ）が認められたが、損傷または変形は認められなかった。また、その他の部位についても損傷または変形は認められず、燃料の健全性に問題のないことを確認した。

（添付資料－13）

a. 隣接する燃料とのかみ込みの可能性について

第8回定検燃料取出時に隣接していた燃料（J46）とのかみ込みの可能性を調査した結果、極めて稀であるが、水平方向の燃料のねじれが約3°あり、なおかつ水平方向のズレが約7.5mmある場合にのみ、支持格子同士が干渉するとガイドベーンとタブがかみ込む可能性があることが確認された。

また、かみ込んだ箇所のうち、変形が生じたガイドベーンに300Nの水平加重を加えた場合に、第8回定検で生じた変形をよく再現できることがわかった。

（添付資料－14）

b. 第8回定検で生じたわずかな変形に対する評価について

当該変形は、支持格子のばね特性や機械的強度に影響を与えるほどの大きさではなく、鋭利なめくれもないことから、支持格子の機能は維持しており、次サイクル以降での再使用に問題はないと判断した。

また、再使用にあたっては、装荷状態、運転状態における燃料健全性については検討されていたが、燃料取出・装荷時の燃料取扱いに対する検討が行われていなかった。

(7) 破面調査

損傷部品の破面調査を実施した。

a. 外観観察

- ・破面は、湾曲部を除き茶色に変色していることが認められた。
- ・湾曲部の破面は、ほとんど銀色であることが認められた。

(添付資料－15)

b. 破面マクロ観察

- ・比較的平坦な粒状破面であり、内側の表面側破面に幅約0.1mmの連続した銀色の領域があることが認められた。

(添付資料－15)

c. 破面SEM観察

- ・外側から内側へ向かって金属組織の流れ（ひび割れの方角に対応）が認められた。
- ・破面の中央付近、左右端ともに、へき開破面を含む強制破壊の様相を呈していることが認められた。
- ・外側および内側表面において材料に欠陥、腐食ピット等は認められなかった。

(添付資料－16)

以上の破面調査より考察できる事項は、以下のとおりである。

- ・外側から内側へ向かって金属組織の流れが認められることから、外側から亀裂が発生したと推定される。
- ・破面はへき開破面を含む強制破壊の様相を呈していることから、過大な応力により亀裂が発生したと推定される。
- ・湾曲部を除いた部分は茶色に変色していることから、この部分の破面は発生してから長期間経過していると推定される。
- ・湾曲部はほとんど銀色の領域であることから、この部分が最終破断面であると推定される。

(8) 支持格子の変形部に働く応力評価

第8回定検時に隣接する燃料との干渉により外側に約2.6mm変形したガイドベーン部が燃料棒側へ押し戻された場合に発生する応力を評価した。

その結果、引張強さ（約1500N/mm²）を上回る応力（約3400N/mm²）が変形部の基部に働くことが分かった。

(添付資料－17)

9. 推定原因

当該燃料は、第8回定検の燃料取出時に支持格子同士のかみ込みによるわずかな変形が生じたこと、また、再使用にあたって、装荷状態、運転状態における燃料健全性については検討されていたが、燃料取出・装荷時の燃料取扱いに対する検討が行われていなかったことから、以下の経緯により支持格子の損傷に至ったものと推定される。

(添付資料－18)

①第8回定検の燃料取出時

当該燃料が上昇中に、隣接していた燃料(J46)と干渉して支持格子同士がかみ込み、荷重変動トリップが発生した。その対応として当該燃料の下降操作をした際に、当該燃料が水平方向に移動したことから、当該ガイドベーン部に過大な応力がかかり、外側に約2.6mm変形(以下、変形部という)した。

②第9回定検の燃料装荷

当該燃料が下降中に、隣接する燃料との干渉により変形部がバッフル板に押しつけられて荷重変動トリップが発生するとともに、変形部が燃料棒側に押し戻されることにより、変形部の基部に過大な応力がかかり、左端の長さ約2mm(湾曲部に相当)を残して外側から亀裂が発生したが、内側に幅約0.1mmの未破断部が残った。

③第10回定検の燃料取出時

当該燃料が上昇中に、変形部がバッフル板と干渉し、内側に残っていた厚さ約0.1mmの未破断部が破断し、左側に一部(湾曲部に相当)を残すのみとなった。

④燃料コンテナに当該燃料を挿入後、燃料コンテナを横倒しする際に、損傷部分の先端が燃料コンテナ壁面と干渉して支持格子から脱落し、燃料コンテナ底面の第3支持格子付近に落下した。

⑤燃料コンテナを使用済燃料ピット側へ移送した後、立起こす際、損傷部分がコンテナ底面に沿って落下し、第1支持格子D面の左端にひっかかった。

10. 対策

燃料装荷・取出作業において隣接する燃料との支持格子同士のかみ込みの可能性がある場合には、かみ込みが発生しないように以下のとおり運用することを作業要領書に明記する。

(添付資料－19)

- ・ 取扱う燃料の周囲4面のうち、1面または2面が燃料と接する場合は、隣接する燃料と干渉しないように離れた位置で燃料を取り扱うこととする。
なお、燃料装荷時に炉心底近くまで燃料を下降させた後、隣接する燃料に接するように燃料を移動（横ずらし）した時には、隣接燃料との位置関係を水中カメラ等で水平方向のズレやねじれがないことを確認したうえで、燃料を取り扱うこととする。
- ・ 1面または2面が燃料と接する状態で横ずらしができない場合は、水平方向の燃料のねじれやズレが生じないように、ガイドアセンブリー等を使用して3面以上が接する配置としたうえで、燃料を取り扱うこととする。

なお、万一支持格子に変形が認められた場合には、燃料取出・装荷時の燃料取扱いに対する検討を行い、総合的に評価したうえで再使用可否の判断を行うこととする。ただし、支持格子のガイドベーンに設計上の最大隙間である2mm以上の変形が認められる場合は、再使用しないこととする。

また、当該燃料（燃料番号H06）は、一部損傷していることから再使用しないこととする。

以 上

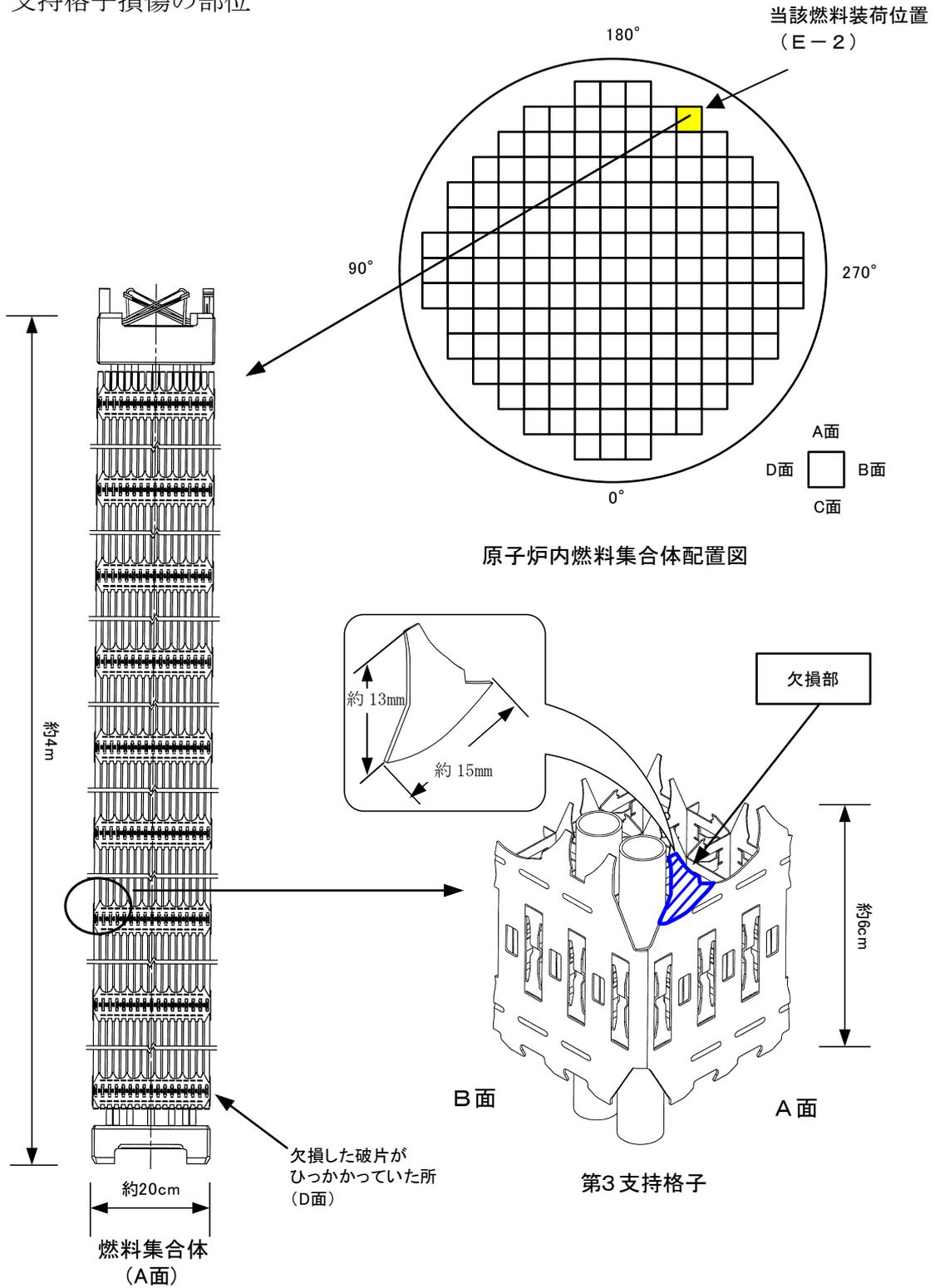
添 付 資 料

- 添付資料－ 1 支持格子の一部が損傷した燃料の概要
- 添付資料－ 2 ガイドベーン欠損部の回収結果について
- 添付資料－ 3 当該燃料の移動経路
- 添付資料－ 4 支持格子損傷に係る要因分析図
- 添付資料－ 5 製造・運転履歴調査結果
- 添付資料－ 6 燃料取扱装置・設備の構造調査結果
- 添付資料－ 7 当該燃料の取扱履歴調査結果
- 添付資料－ 8 第 8 回定検燃料取出時の燃料取替クレーン荷重チャート
- 添付資料－ 9 第 9 回定検燃料装荷時の燃料取替クレーン荷重チャート
- 添付資料－ 1 0 第 1 0 回定検燃料取出時の燃料取替クレーン荷重チャート
- 添付資料－ 1 1 バッフル板の外観調査結果
- 添付資料－ 1 2 第 8 回定検時における当該燃料の支持格子変形状況
- 添付資料－ 1 3 第 8 回定検時における J 4 6 燃料の支持格子状況
- 添付資料－ 1 4 隣接する燃料との干渉の可能性について
- 添付資料－ 1 5 破面外観・マクロ観察結果
- 添付資料－ 1 6 破面 S E M 観察結果
- 添付資料－ 1 7 支持格子の変形部にかかる応力評価
- 添付資料－ 1 8 事象発生 の 推定メカニズム
- 添付資料－ 1 9 再発防止対策について

- 参考資料 用語説明

支持格子の一部が損傷した燃料の概要

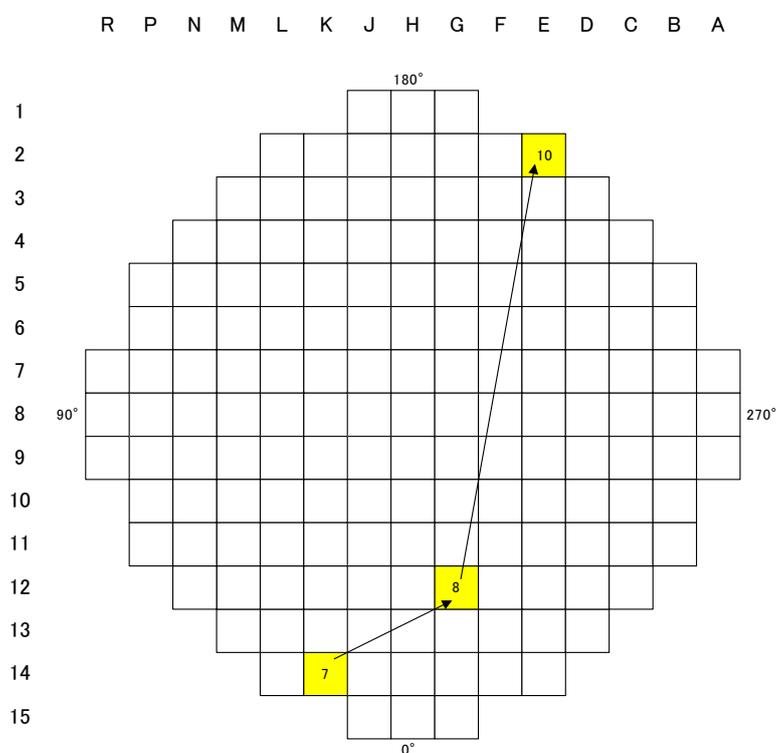
1. 支持格子損傷の部位



2. 燃料の概要

燃料タイプ	17×17型 (ステップ1 高燃焼度燃料)	
全長	約 4m	
全幅	約 20cm	
初期濃縮度	約 4.1wt%	
支持格子	個数	9 個
	材質	ニッケル基合金
	外形	約 20cm×約 20cm
	幅	約 6cm
製造時期	平成 12 年 7 月	
装荷時期	平成 14 年 7 月～平成 19 年 9 月 (平成 17 年 3 月～平成 18 年 5 月を除く)	
燃料集合体燃焼度	約 40,000Mwd/t	

3. 各サイクルの炉心装荷位置



図中の数字は運転サイクルを示す。

ガイドベーン欠損部の回収結果について

当該燃料の第3支持格子A面左のコーナー部にあるガイドベーンが欠損したが、その欠損片を回収し、取得した画像データより確認を行った結果、その欠損片が支持格子欠損部と一致し、かつ欠損片各部に欠落した部材はないことを確認することができた。

1. 欠損部（輪郭）の重ねあわせによる形状の照合写真

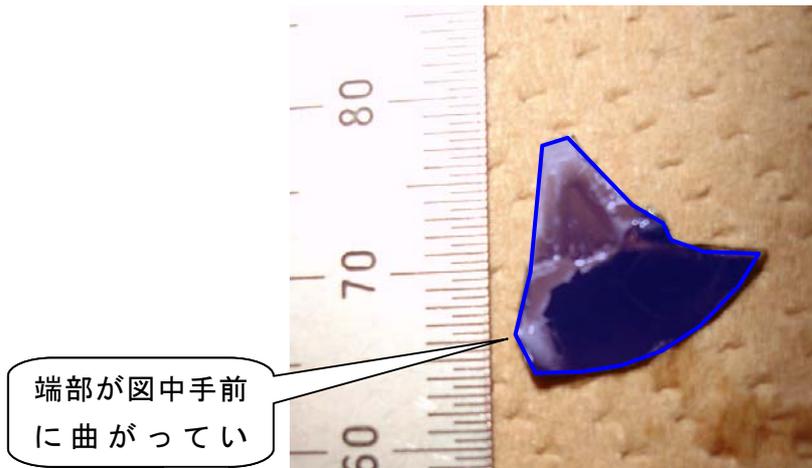


図1 第3支持格子ガイドベーン欠損片

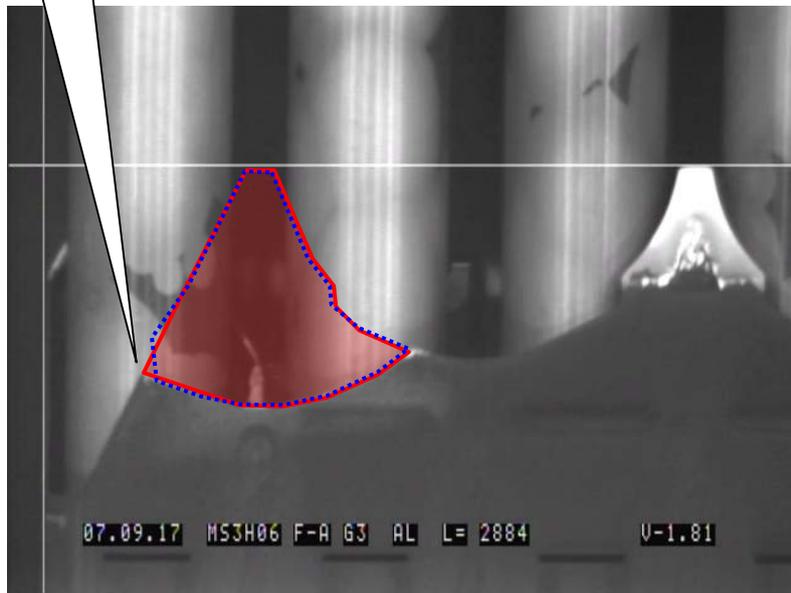


図2 第3支持格子ガイドベーン欠損部（B面左コーナー部）

青線：欠損片の写真からの輪郭

赤線：健全支持格子の当該部写真からの輪郭

2. 欠損部（輪郭）の端部寸法測定による照合

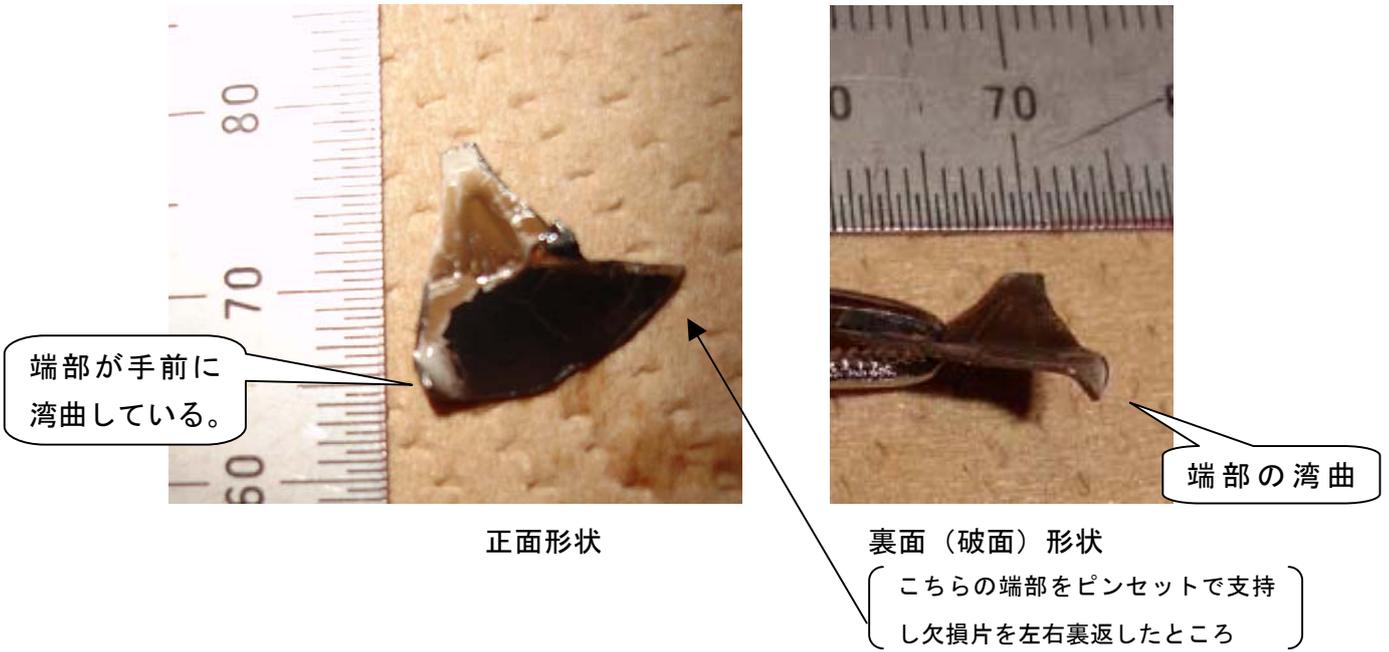
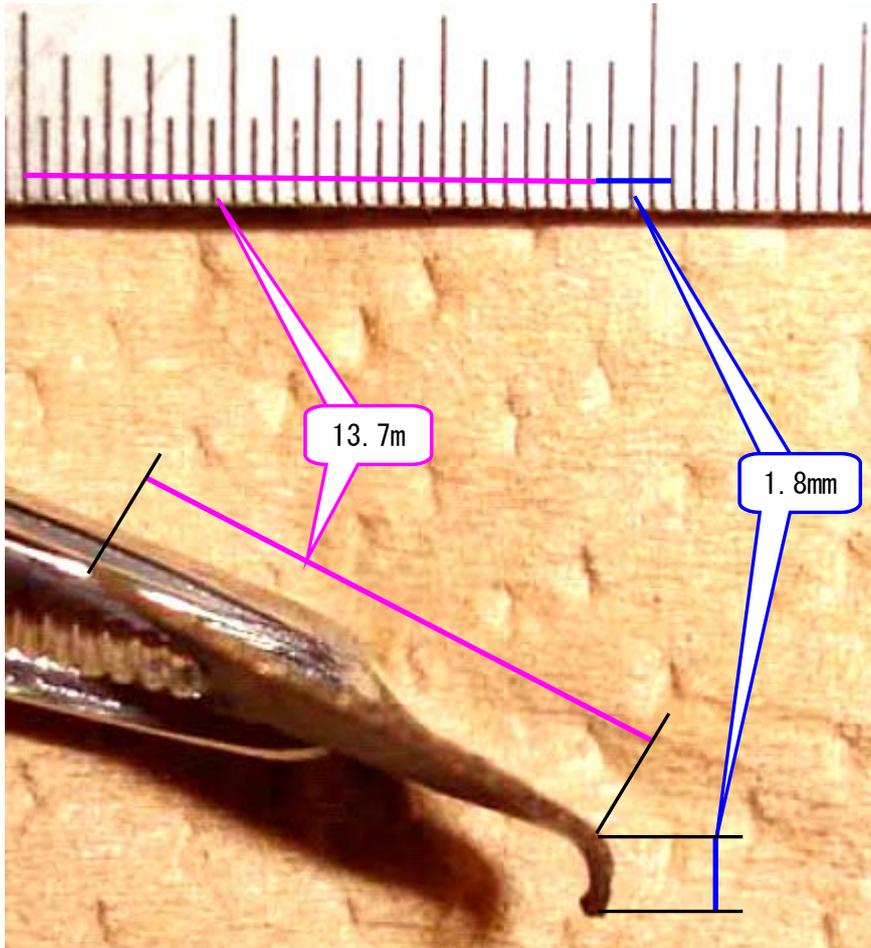


図3 第3支持格子ガイドペーン欠損片形状



$13.7\text{mm} + 1.8\text{mm} = 15.5\text{mm}$

図4 欠損片の破断面寸法評価 [欠損片を裏返した状態で破断面の長さを測定]

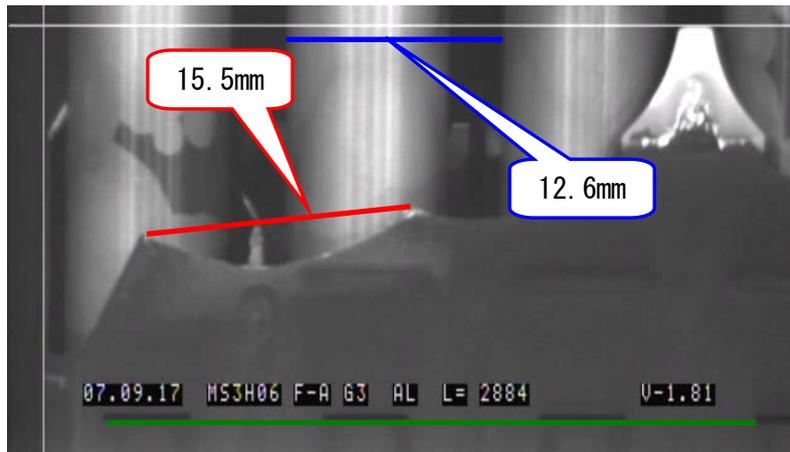


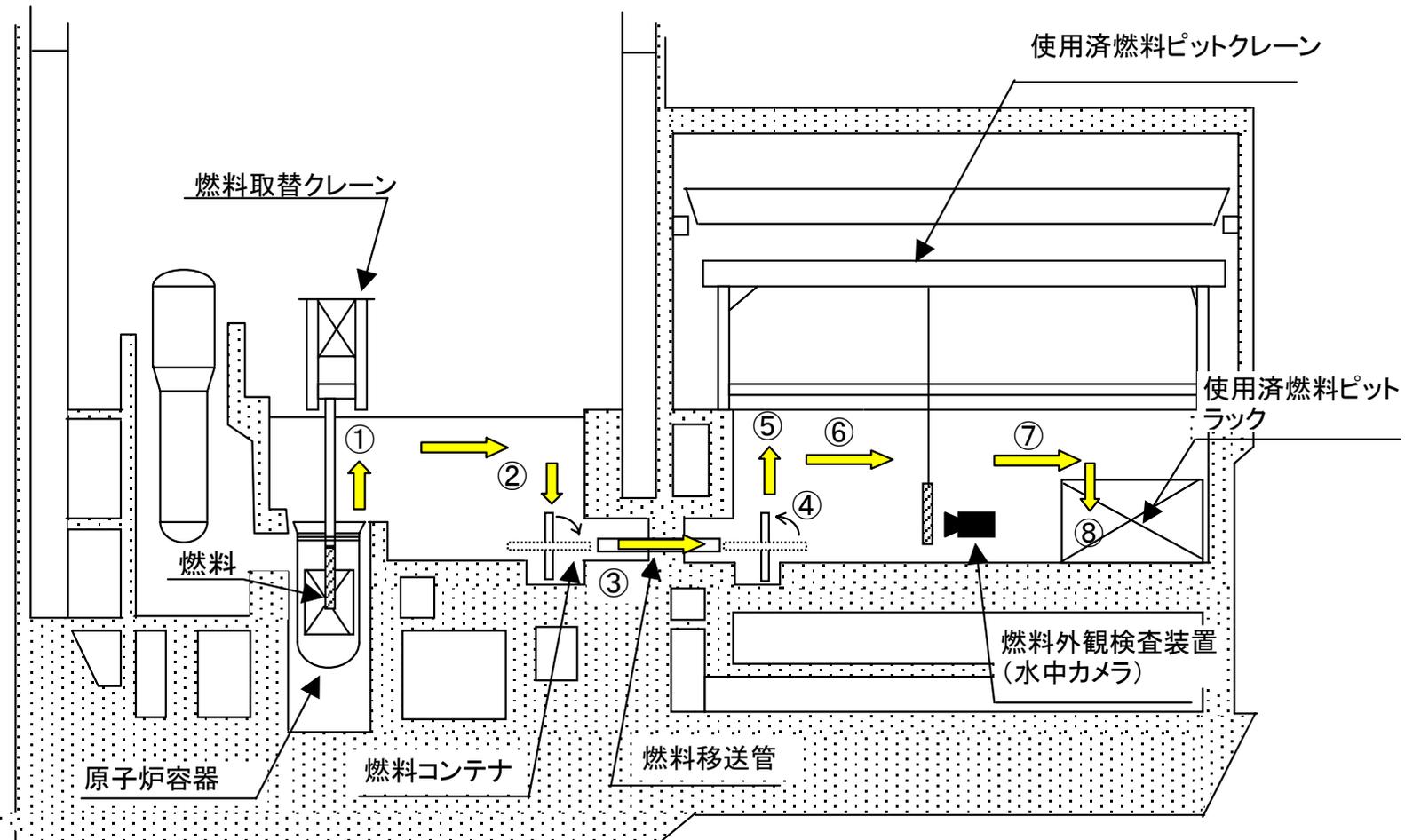
図 5 支持格子欠損部の寸法

以上の寸法測定の結果、欠損片の破面の長さ（直線距離）は、湾曲部分の寸法を曲げ戻した場合、約 15.5mm と推定される。

一方、支持格子側の欠損長さは約 15.5mm と推定され、相互の破面が寸法的に一致することが確認できた。

当該燃料の移動経路

第10回定検の燃料取り出し時における当該燃料の移動経路は以下のとおりであった。



支持格子損傷に係る要因分析図

[備考]

△：可能性あり

×：可能性なし

事象	要因	因子	調査内容	調査方法・結果	評価	添付資料	
支持格子損傷	製造時の欠陥	製造時の欠陥	製造履歴調査	・支持格子の製造時記録および工場立会検査報告書により、製造時に異常のないことを確認した。	×	5	
			材料調査	・材料証明書により規定の材料が使用されていることを確認した。	×	5	
	運転中の損傷	輸送時の取扱い	過大応力	新燃料受入状況調査	・新燃料受入検査記録により、外観等に異常のないことを確認した。	×	7
				延性割れ	過大応力	運転履歴調査	・第7, 8, 10サイクルにおいて、パラメータの急激な変化のないことを確認した。(熱流束熱水路係数、核的エンタルピ上昇熱水路係数)
		破面調査	・破面外観・マクロ観察の結果、比較的平坦な粒状破面であり、湾曲部を除き茶色に変色していることが認められた。また、湾曲部はほとんど銀色であることが認められた。 ・破面SEM観察の結果、破面はへき開破面を含む強制破壊の様相を呈していた。			×	14, 15
		疲労割れ	振動	破面調査	・破面外観・マクロ観察の結果、比較的平坦な粒状破面であり、湾曲部を除き茶色に変色していることが認められた。また、湾曲部はほとんど銀色であることが認められた。 ・破面SEM観察の結果、破面はへき開破面を含む強制破壊の様相を呈していた。	×	14, 15
				パッフル板隙間による異常振動の有無	・パッフル板隙間による異常振動が起らない構造となっていることを確認した。	×	—
				疲労評価	・冷却材の流れによる燃料集合体の振動振幅は5 μm程度であり、疲労破壊の可能性は考えられない。	×	—
				温度・圧力変化	運転履歴調査	・第7, 8, 10サイクルの運転パラメータに、急激な変化のないことを確認した。(熱流束熱水路係数、核的エンタルピ上昇熱水路係数)	×
		応力腐食割れ	材料環境応力	運転履歴調査	・第7, 8, 10サイクルの水質が規定どおり管理されていたことを確認した。(pH、塩素イオン、溶存酸素)	×	5
				材料調査	・材料証明書により規定の材料が使用されていることを確認した。	×	5
				破面調査	・破面外観・マクロ観察の結果、比較的平坦な粒状破面であり、湾曲部を除き茶色に変色していることが認められた。また、湾曲部はほとんど銀色であることが認められた。 ・破面SEM観察の結果、破面はへき開破面を含む強制破壊の様相を呈していた。	×	14, 15
水素吸収、脆化	材料調査	・材料証明書により規定の材料が使用されていることを確認した。	×	5			

事象	要因	因子	調査内容	調査方法・結果	[備考]		
					評価	添付資料	
取扱時の損傷	隣接燃料との干渉	構造	設計資料等の調査	・支持格子のガイドベーンとタブが極めて稀であるが、干渉した場合にかみ込みが発生する可能性があることが分かった。	△	13	
			過大応力	取扱履歴調査	・第7回定検取出時の外観を確認した結果、異常は認められなかった。 ・第8回定検取出時の外観を確認した結果、当該部位にわずかな変形が認められた。	△	7, 8, 9, 10
		過大応力	破面調査	・破面外観・マクロ観察の結果、比較的平坦な粒状破面であり、湾曲部を除き茶色に変色していることが認められた。また、湾曲部はほとんど銀色であることが認められた。 ・破面SEM観察の結果、破面はへき開破面を含む強制破壊の様相を呈していた。	△	14, 15	
		炉内構造物との干渉	構造	設計資料等の調査	・当該燃料の損傷部位は、バップル板の上下方向全長にわたってバップルフォーマーボルト穴等と干渉しない構造であることを確認した。	×	—
				過大応力	取扱履歴調査	・バップル板に接する位置に装荷した第9回定検燃料装荷時において、荷重変動トリップが2回発生していたことを確認した。 ・第10回定検燃料取出時は、荷重変動トリップが発生していないことを確認した。	△
			過大応力	炉内構造物外観調査	・バップル板の損傷部位が対応する箇所から上方向に連続したこすれ跡のような筋が認められた。	△	9
	過大応力	破面調査	・破面外観・マクロ観察の結果、比較的平坦な粒状破面であり、湾曲部を除き茶色に変色していることが認められた。また、湾曲部はほとんど銀色であることが認められた。 ・破面SEM観察の結果、破面はへき開破面を含む強制破壊の様相を呈していた。	△	12, 13		
	過大応力	応力評価	・変形したガイドベーン部が約2.6mm押し戻された場合に働く応力は、耐力を十分上回ることを確認した。	△	14		
	燃料取扱装置・設備との干渉	構造	設計資料等の調査	・燃料取扱装置、設備について調査した結果、健全な支持格子は干渉する可能性のないことを確認した。	×	—	
			過大応力	取扱履歴調査	・取扱時に荷重変動トリップが発生していないことを確認した。	×	—
		過大応力	破面調査	・破面外観・マクロ観察の結果、比較的平坦な粒状破面であり、湾曲部を除き茶色に変色していることが認められた。また、湾曲部はほとんど銀色であることが認められた。 ・破面SEM観察の結果、破面はへき開破面を含む強制破壊の様相を呈していた。	△	12, 13	

製造・運転履歴調査結果

1. 製造履歴調査結果

○材料調査

材料証明書により、化学成分、機械的強度が仕様値を満足していることを確認した。

○外観、寸法調査

支持格子組立体に対する寸法、外観検査結果を確認した結果、仕様どおりに組み立てられており、外観にも異常は認められなかった。

2. 運転履歴調査結果

○出力履歴（定格出力運転中の最大値）

項目	制限値	7 サイクル	8 サイクル	10 サイクル
熱流束熱水路係数	≤ 2.32	1.889	1.854	1.966
核的エンタルピー上昇熱水路係数	≤ 1.60 または 1.64 [※]	1.494	1.456	1.546

※ ステップ 2 高燃焼度燃料導入前は 1.60、導入後(9 サイクル以降)は 1.64

○1 次冷却材水質

項目	基準値	7 サイクル	8 サイクル	10 サイクル
p H	4～11 (温度 25℃)	6.0～8.6	6.2～8.2	6.2～8.3
塩素イオン	$\leq 0.15\text{ppm}$	<0.05	<0.05	<0.05
溶存酸素	$\leq 0.1\text{ppm}$	<0.005	<0.005	<0.005

燃料取扱装置・設備の構造調査結果

1. 調査結果

燃料取扱時に使用する燃料取扱装置・設備と健全な支持格子の当該部位が干渉する可能性について、図面寸法等により以下のとおり確認した。

(1) 使用済燃料ピットラック

燃料との隙間が約14mmあること、また支持格子の当該部位が接触する面に凹凸はないことから、干渉することはない。

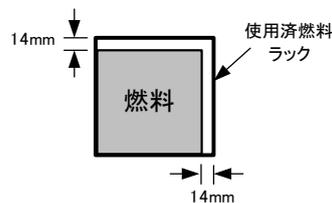


図1 使用済燃料ラック断面図（概要）

(2) 燃料コンテナ

燃料との隙間が約7mmあること、また支持格子の当該部位が接触する面に凹凸はないことから、干渉することはない。

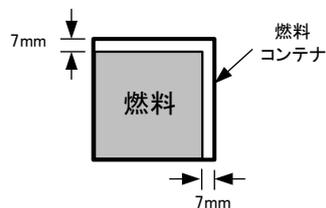


図2 燃料コンテナ断面図（概要）

(3) 燃料取替クレーン

燃料取替クレーンのマストチューブ内では、燃料ガイドバーと支持格子のコーナー部が接触する可能性があるが、燃料ガイドバーに接触したとしても支持格子の当該部位が干渉することはない。

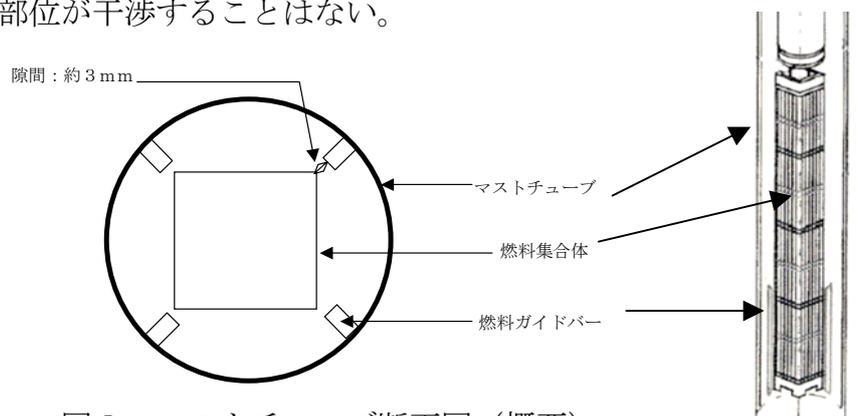


図3 マストチューブ断面図（概要）

当該燃料の取扱履歴調査結果

1. 新燃料受入時

当該燃料を伊方発電所に受け入れたときの新燃料集合体受入検査記録を確認した結果、異常は認められなかった。

2. 取扱履歴

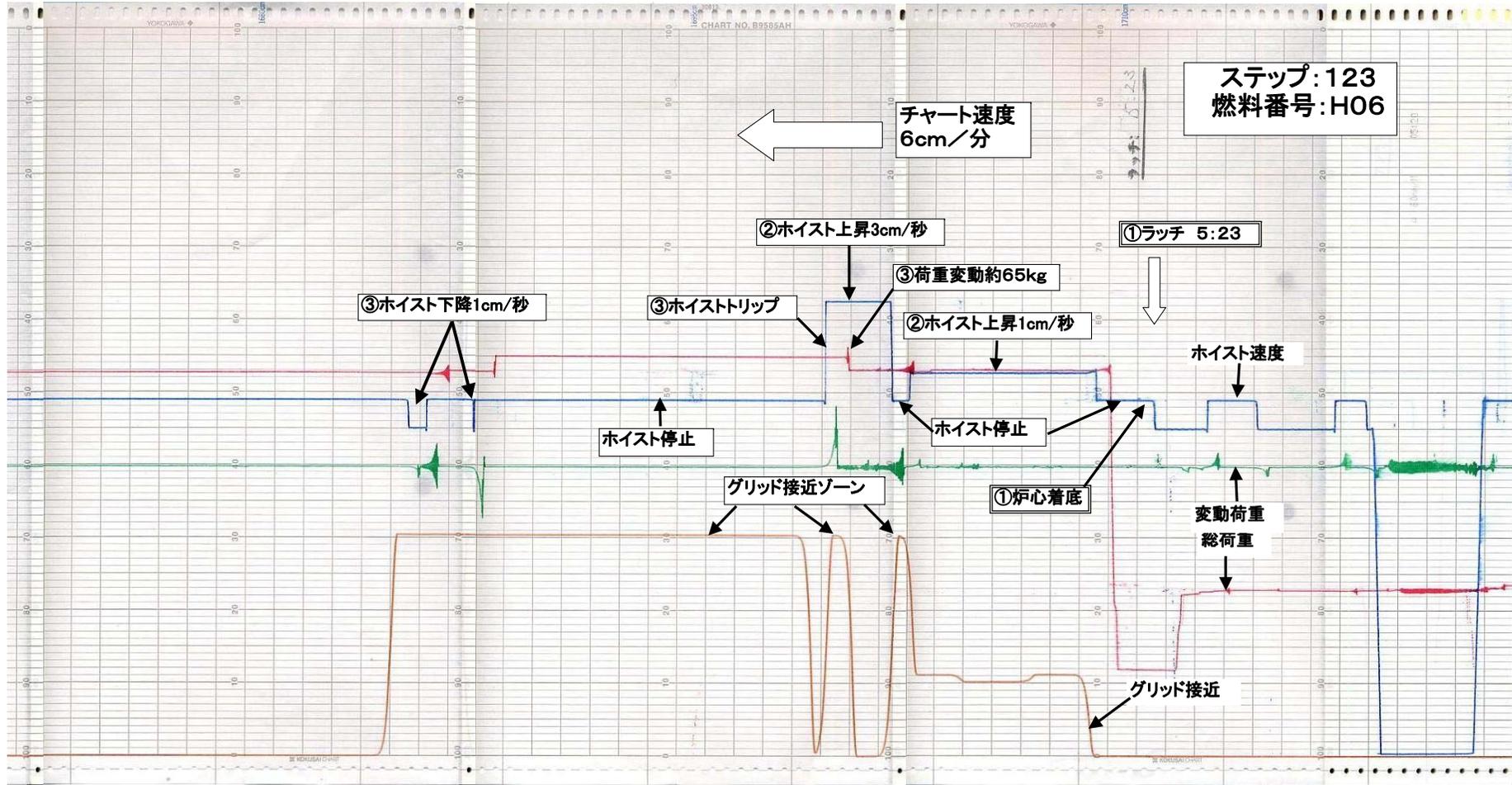
当該燃料の取扱い履歴を調査した結果、第8回定検の燃料取出および第9回定検の燃料装荷においては荷重変動トリップが発生しているが、その他の取扱い時には荷重変動トリップが発生していないことを荷重チャートにより確認した。

定 検	燃料取扱履歴	荷重変動トリップ※の有無	荷重チャート
第 6 回定検	燃料装荷	なし	
第 7 回定検	燃料取出	なし	
	燃料装荷	なし	
第 8 回定検	燃料取出	1 回 (約 6 5 k g)	添付資料－ 8
第 9 回定検	燃料装荷	2 回 (約 5 0 k g)	添付資料－ 9
第 1 0 回定検	燃料取出	なし	添付資料－ 1 0

※ 荷重変動トリップは、燃料保護を目的として設けている。

軸方向の荷重を監視し、荷重の変動量が設定値 (5 0 k g) を越えた場合に燃料取替クレーンの昇降装置を停止する。

第8回定検燃料取出時の燃料取替クレーン荷重チャート(1/2)



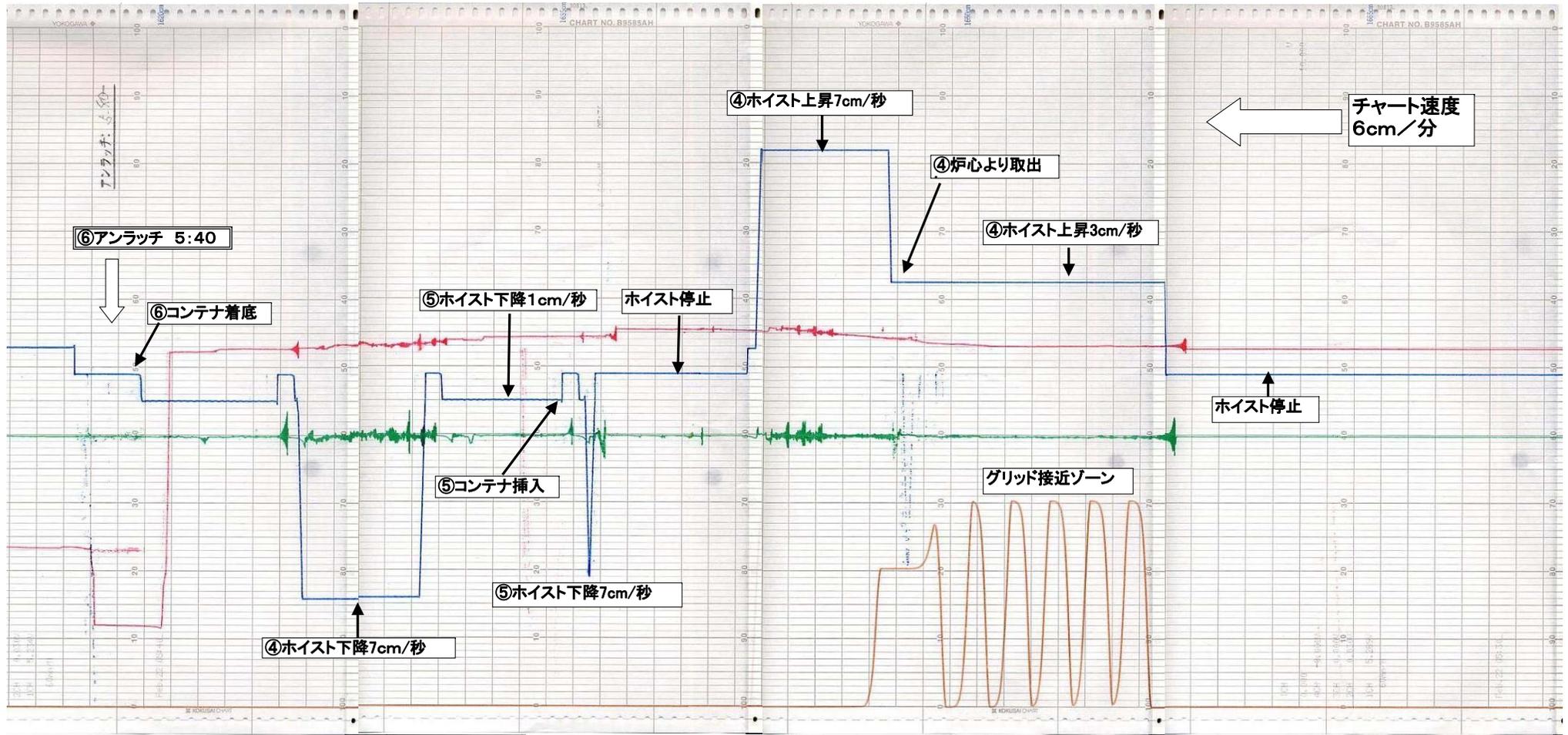
③ 荷重変動トリップ

② 炉心から燃料を引抜

① 燃料取出開始

操作手順

第8回定検燃料取出時の燃料取替クレーン荷重チャート(2/2)

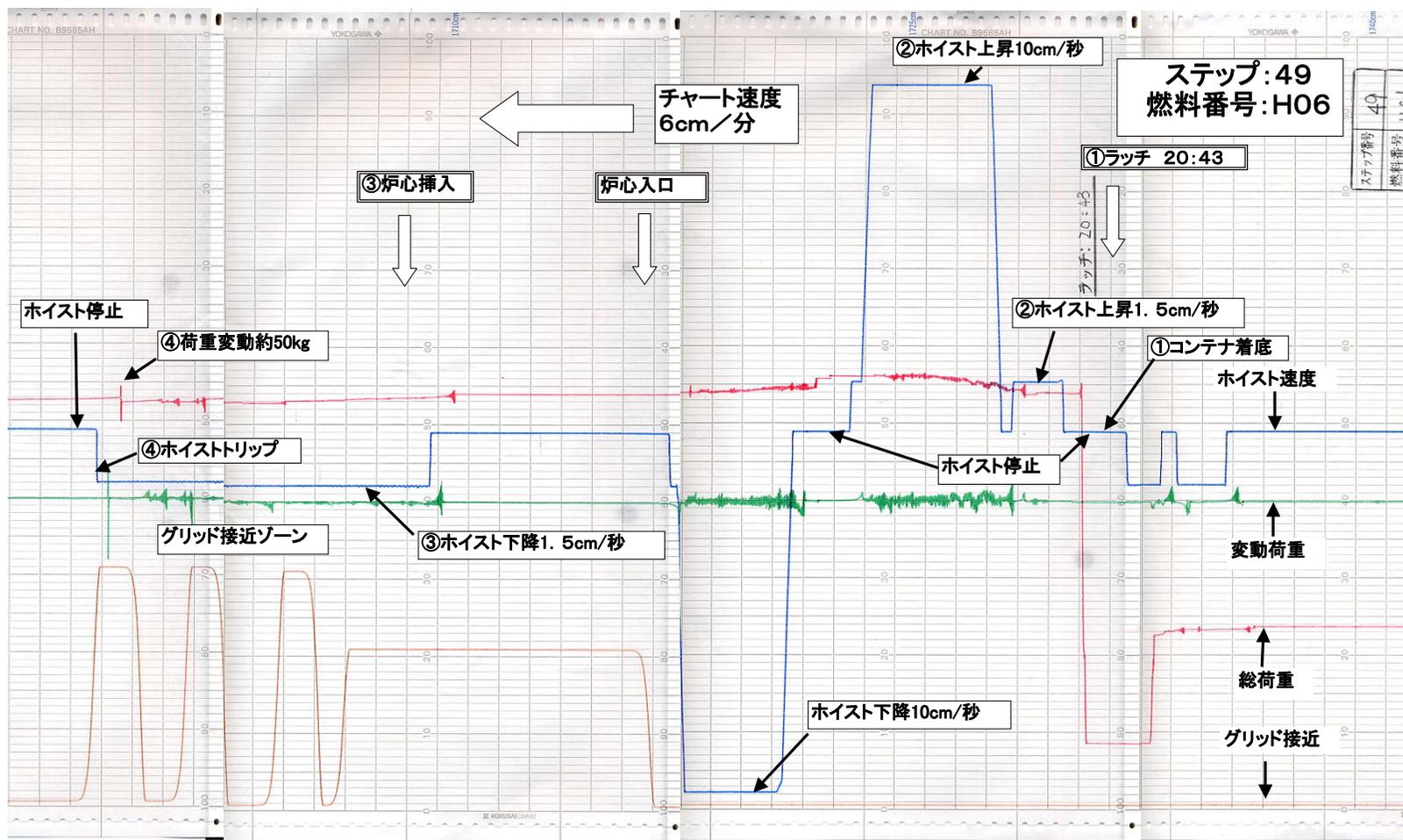


⑥ 燃料取出終了

⑤ コンテナへ燃料を挿入操作

④ 炉心から燃料を引抜操作

第9回定検燃料装荷時の燃料取替クレーン荷重チャート(1/2)



④
リ
ップ
1
回
目
の
荷
重
変
動
ト

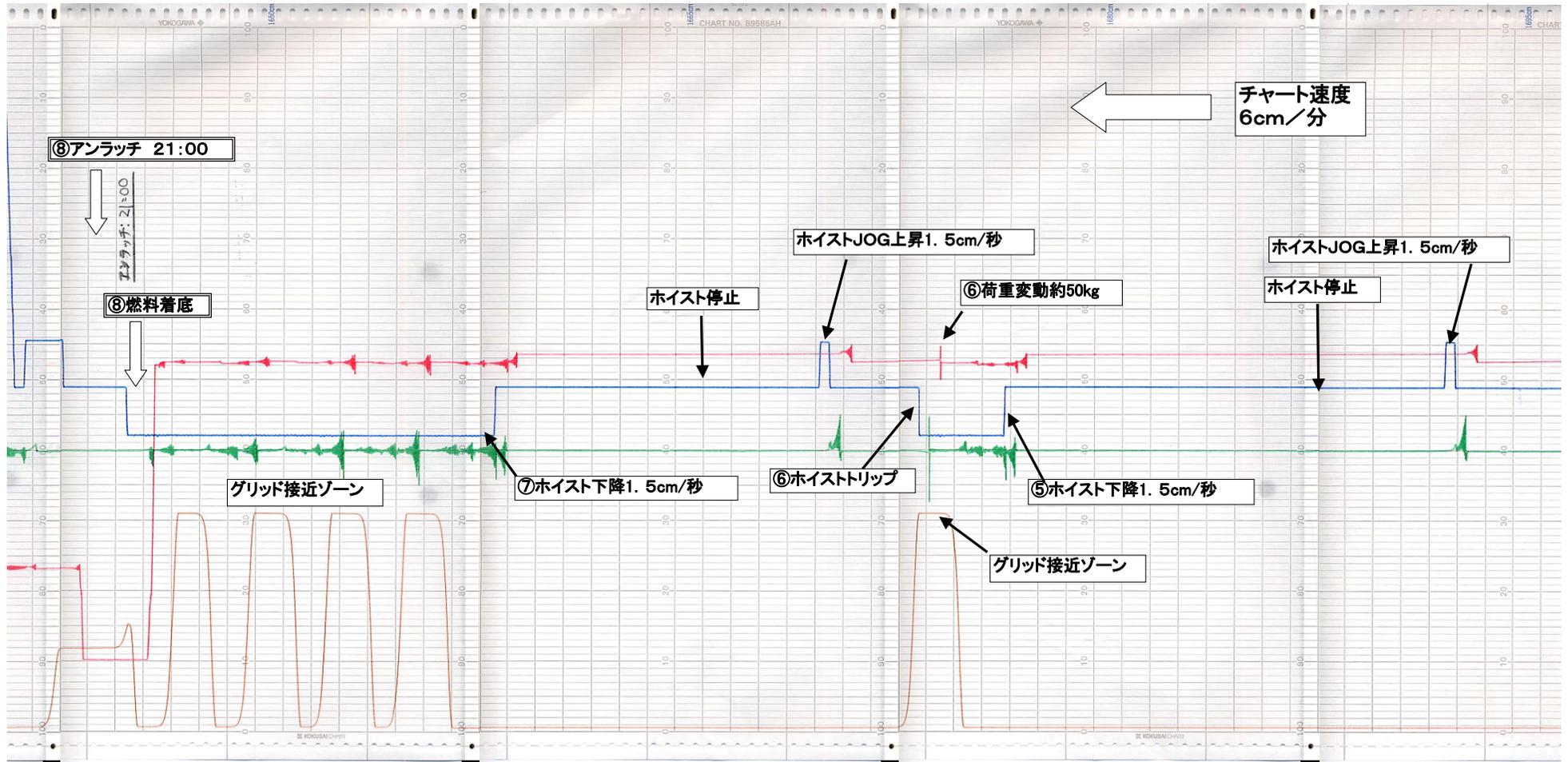
③
炉
心
に
燃
料
挿
入
開
始

②
コ
ン
テ
ナ
か
ら
燃
料
引
抜
き

①
燃
料
装
荷
開
始

操
作
手
順

第9回定検燃料装荷時の燃料取替クレーン荷重チャート(2/2)



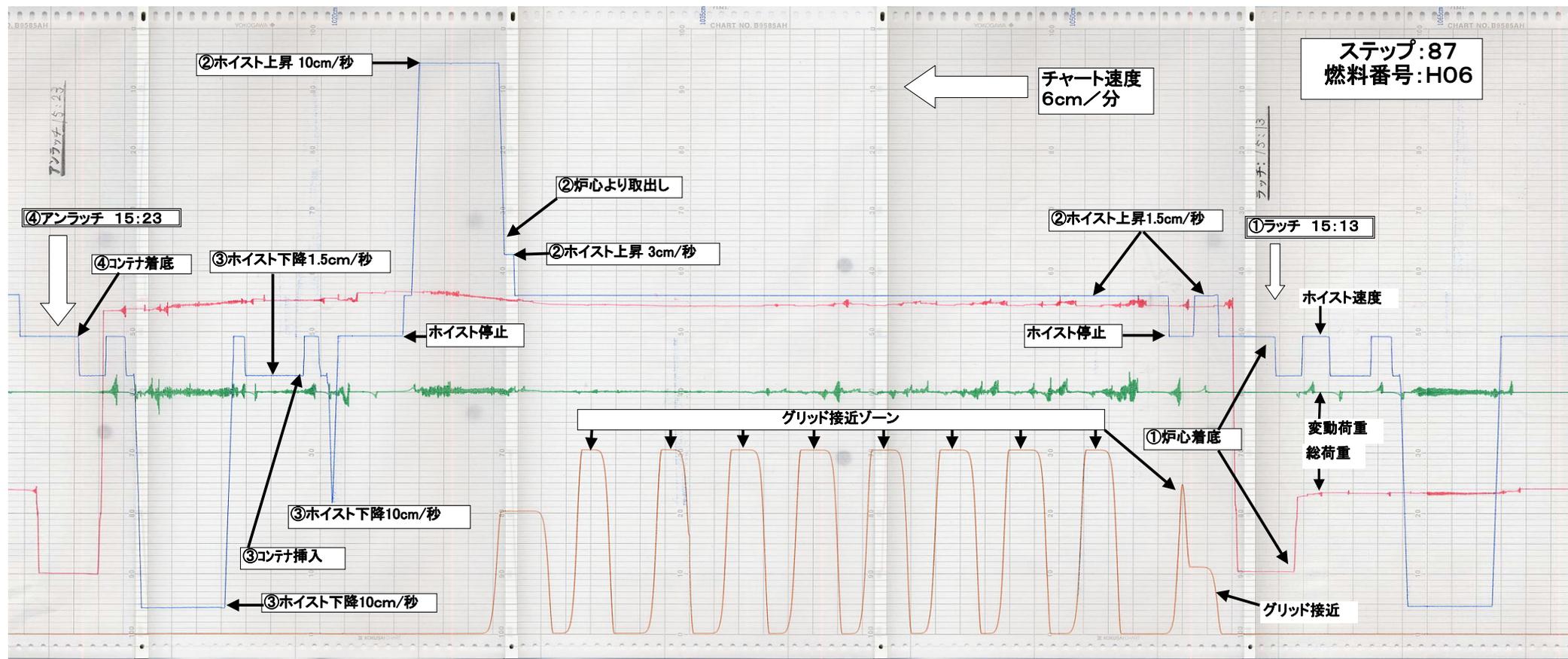
⑧ 燃料装荷完了

⑦ 再々度、挿入開始。

⑥ 再度、挿入開始
リップ
2回目の荷重変動

⑤ 再度、挿入開始

第10回定検燃料取出時の燃料取替クレーン荷重チャート



④ 燃料取出終了

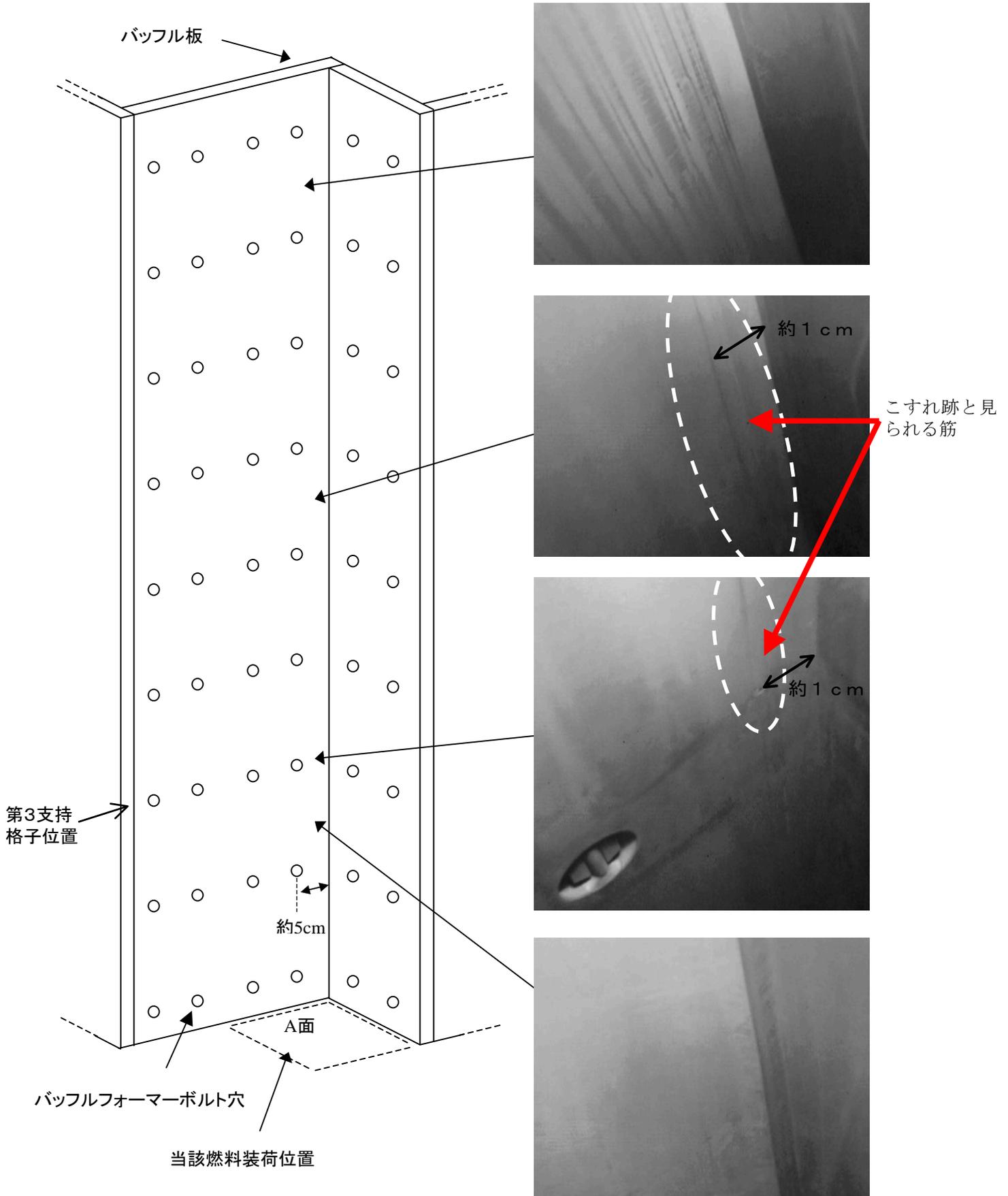
③ コンテナへ燃料を挿入操作

② 炉心から燃料を引抜操作

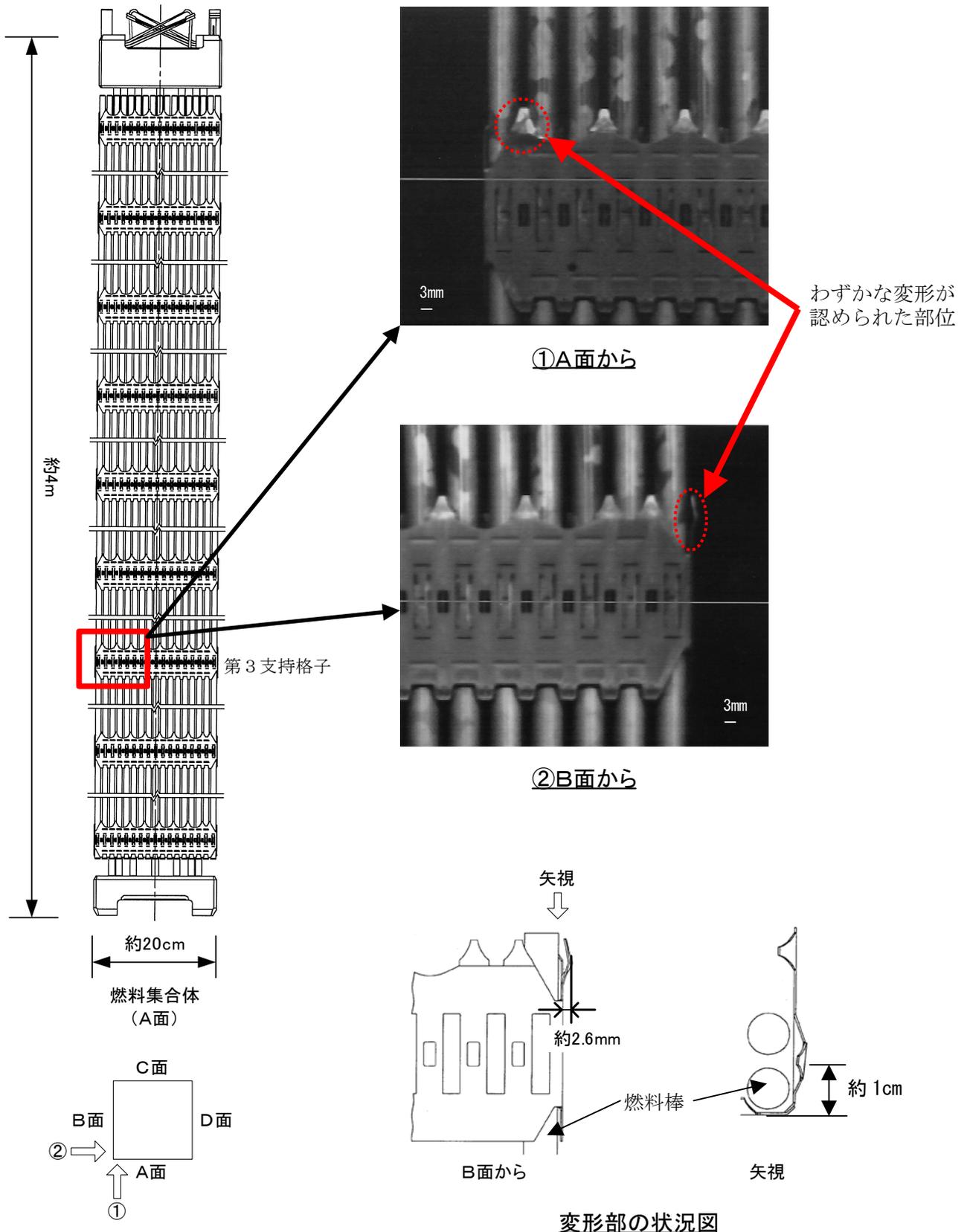
① 燃料取出開始

操作手順

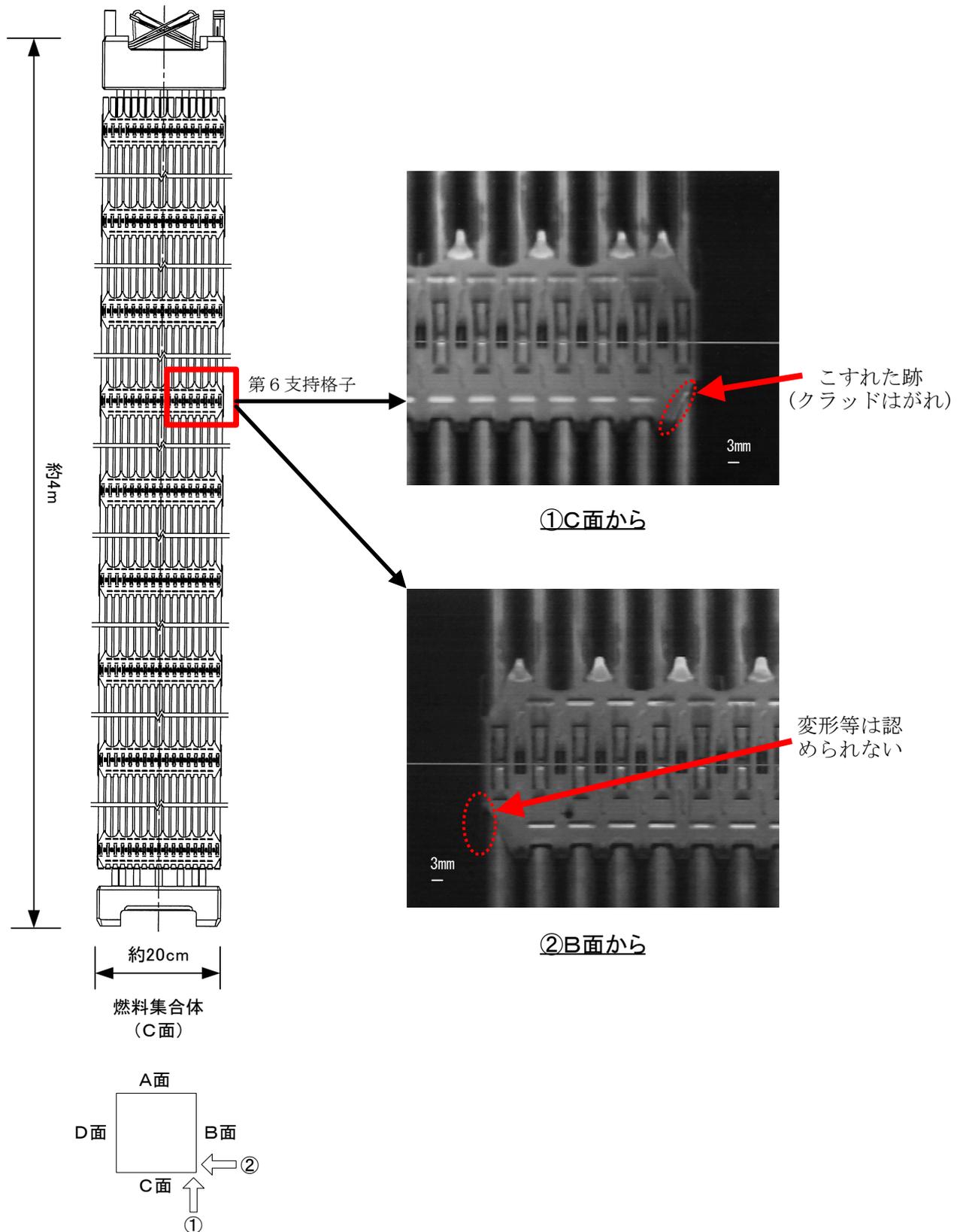
バブル板の外観調査結果



第 8 回定検時における当該燃料の支持格子変形状況



第 8 回定検時における J 4 6 燃料の支持格子状況



隣接する燃料との干渉の可能性について

1. 第8回定検燃料取り出し状況

当該燃料を取り出す際の、炉内の燃料配置状況は下図のとおりであり、支持格子が損傷していたA面と接する燃料は、J46であった。

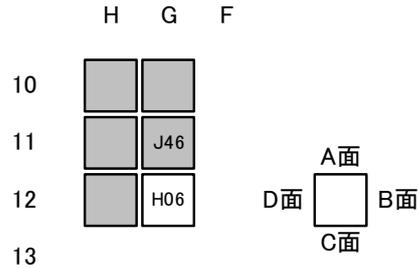


図1 炉内配置状況

2. 隣接する燃料との干渉の可能性

隣接していた燃料との干渉の可能性を調査した結果、極めて稀であるが、水平方向の燃料同士のズレ（約7.5mm）があり、なおかつ、ねじれ（約3°）た場合にのみ、支持格子同士が干渉すると下図に示すようにH06のガイドベーンとJ46のタブがかみ込む可能性があることが確認された。

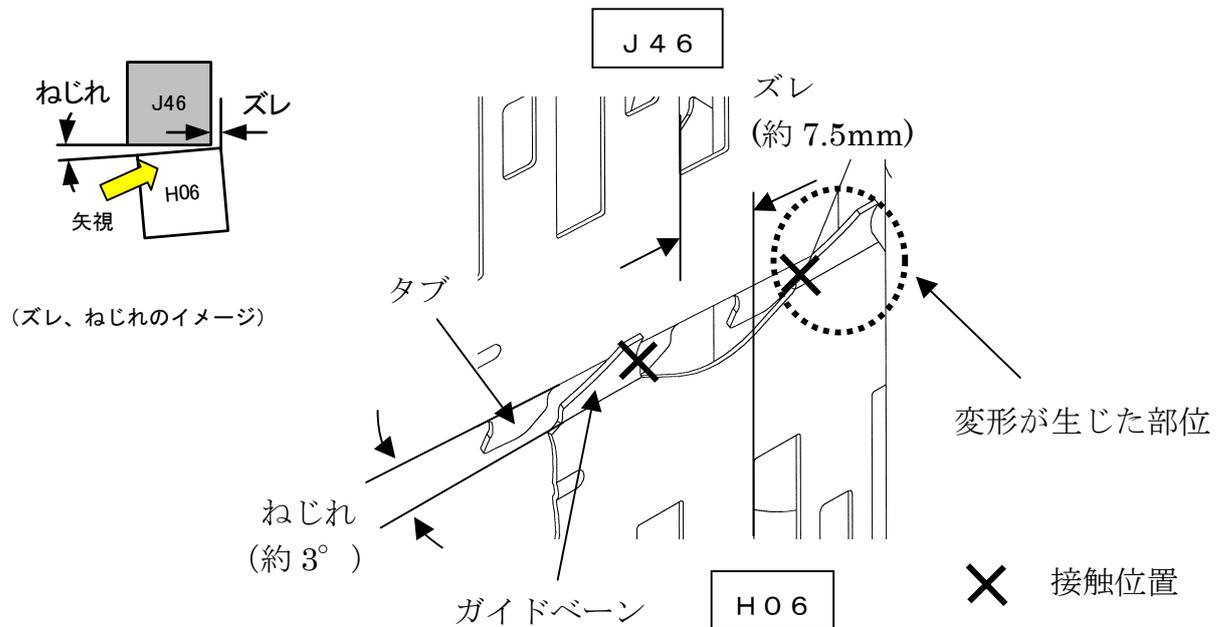


図2 接触状況

3. 解析による変形の再現

かみ込む可能性のある位置が判明したことから、有限要素法（FEM）により当該部に荷重を負荷して変形を再現した結果、水平荷重のみ300N[※]負荷した場合に変形量が第8回定検で生じた変形をよく再現できることがわかった。

※ 30kg 相当。燃料の吊り荷重は約 600kg。

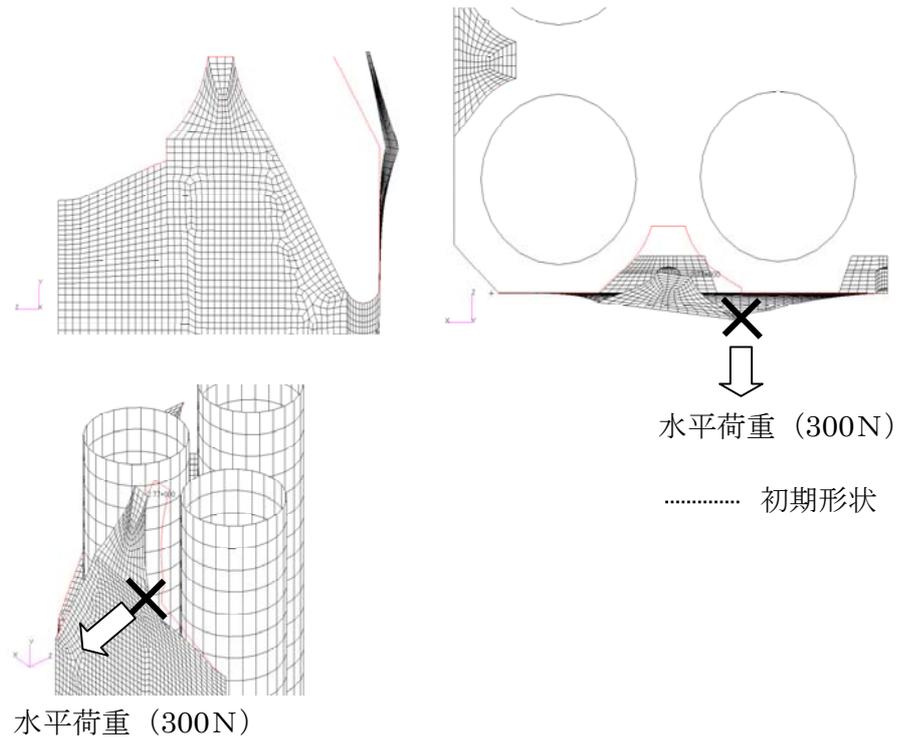
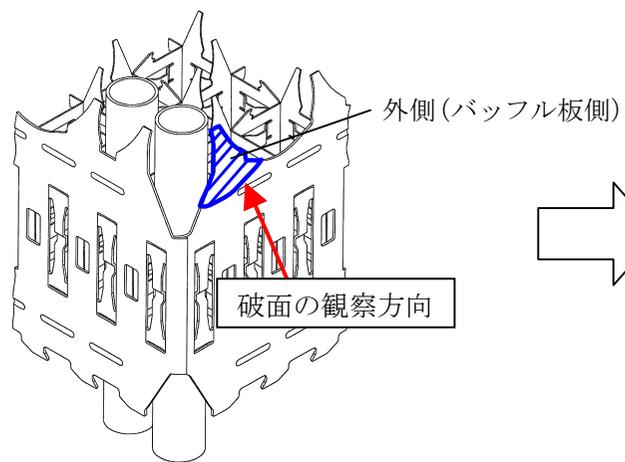
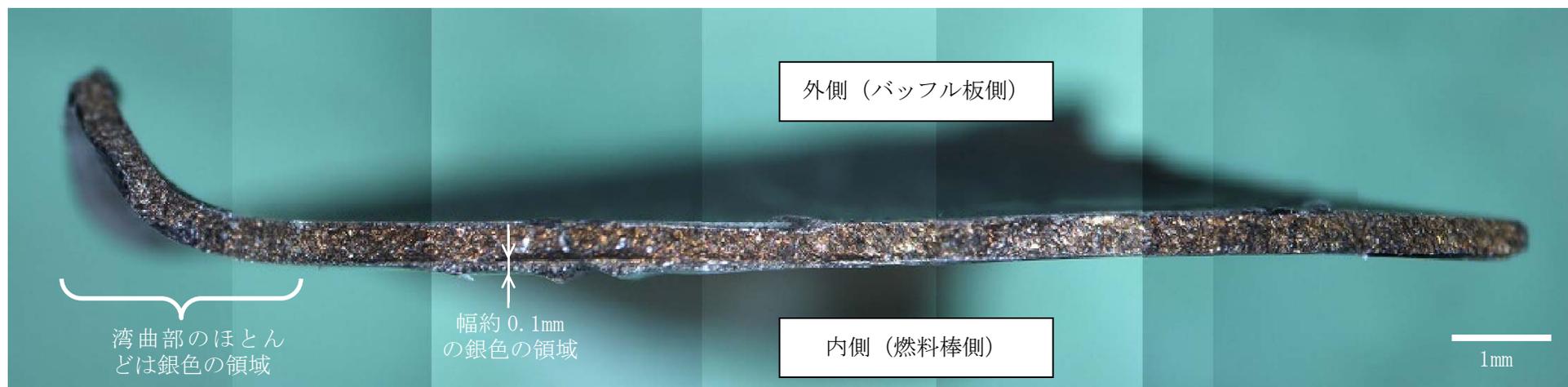
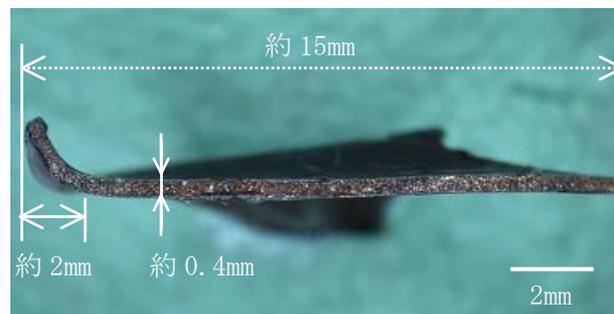


図3 FEMによる解析結果（変形量）

破面外観・マクロ観察結果



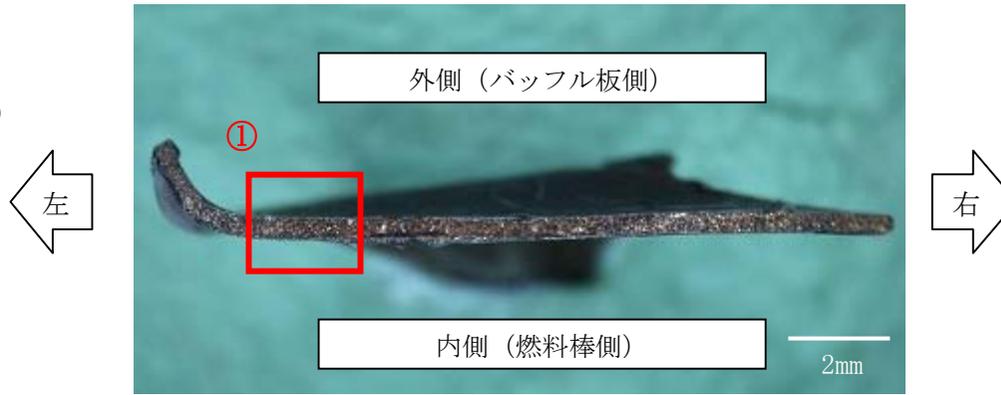
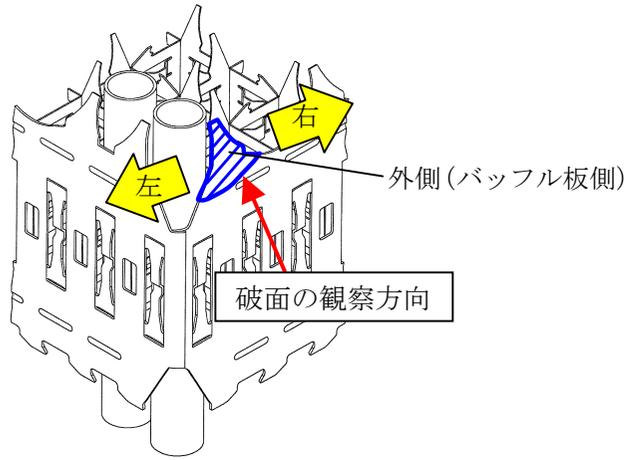
第3支持格子



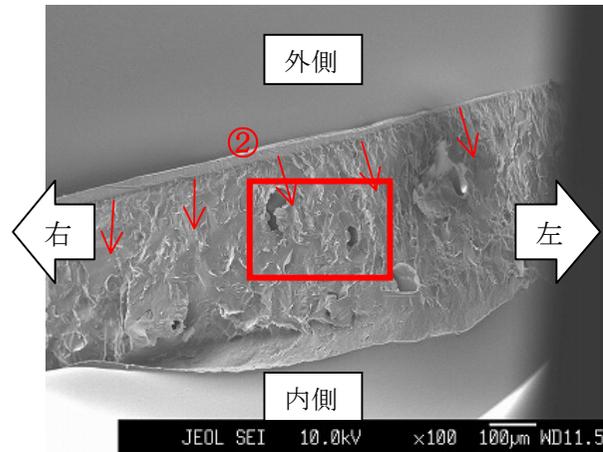
[観察結果]

- 比較的平坦な粒状破面である。
- 湾曲部以外の破面の全体にわたり、茶色を呈している。
- 破面の湾曲部のほとんどに銀色の領域が認められる。
- 内側の表面側破面に幅約 0.1mm の連続した銀色の領域が認められる。

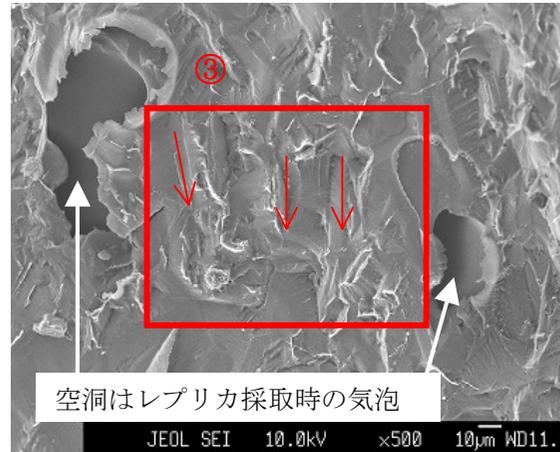
破面SEM観察結果



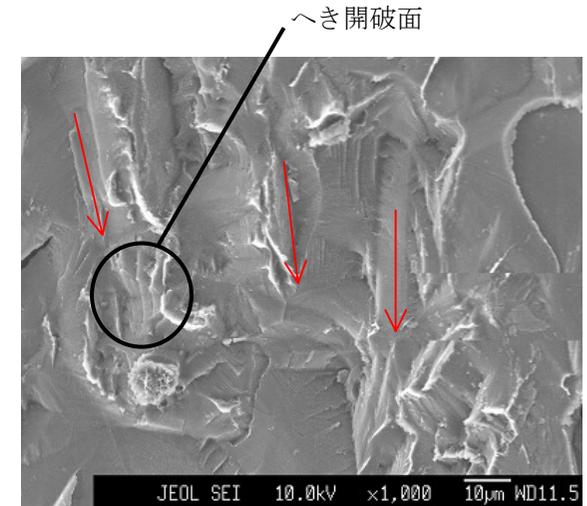
← : ひび割れの方を示す



①部拡大



②部拡大

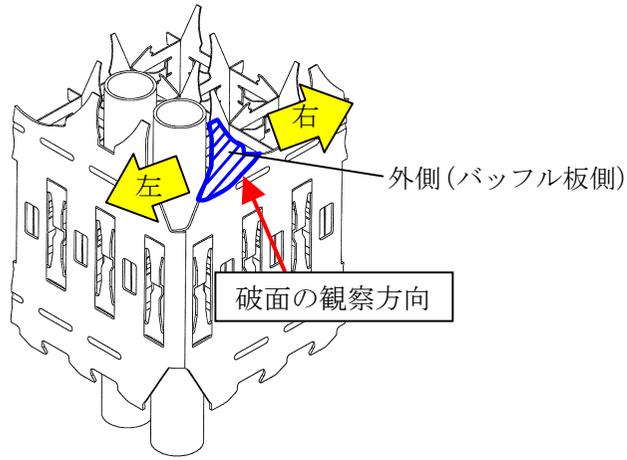


③部拡大

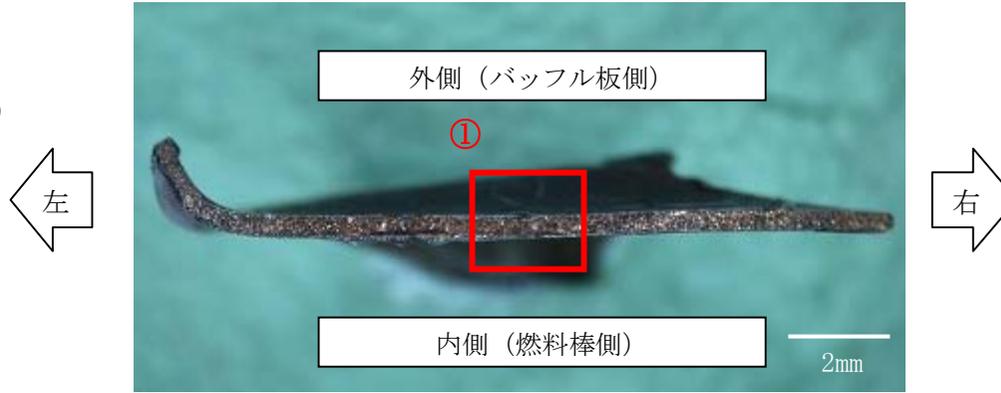
[観察結果]

- ・外側から内側に向かって金属組織の流れ (ひび割れの方に対応) が認められる。
- ・破面は、へき開破面を含む強制破壊の様相を呈している。
- ・外側および内側表面において、材料に欠陥、腐食ピット等は認められない。

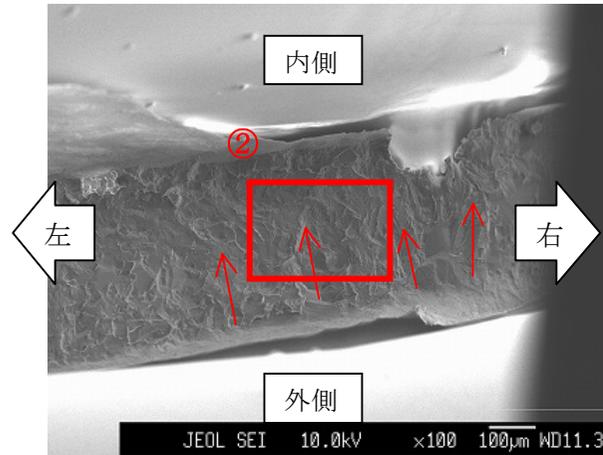
破面SEM観察結果



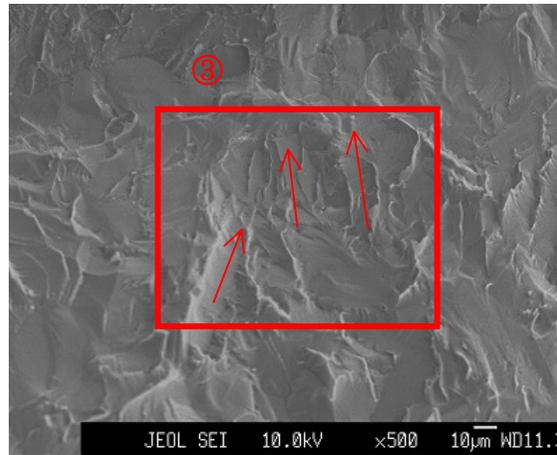
第3支持格子



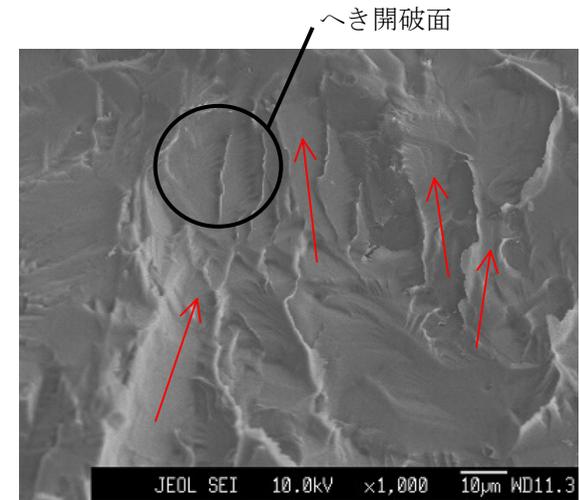
← : ひび割れの方を示す



①部拡大



②部拡大

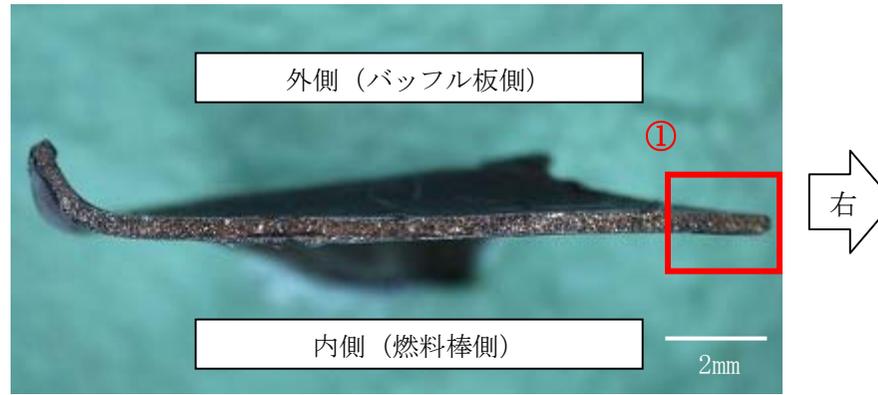
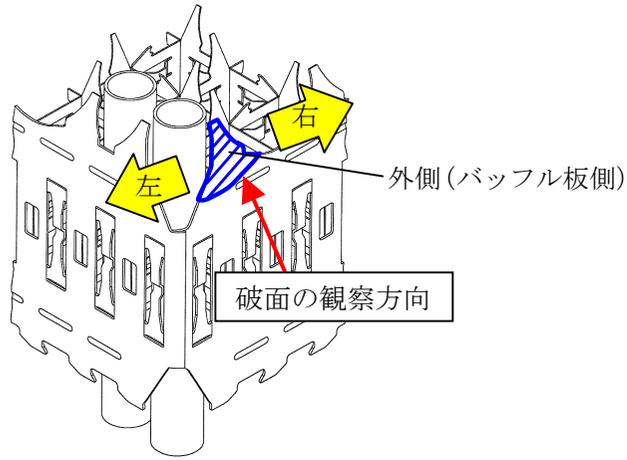


③部拡大

[観察結果]

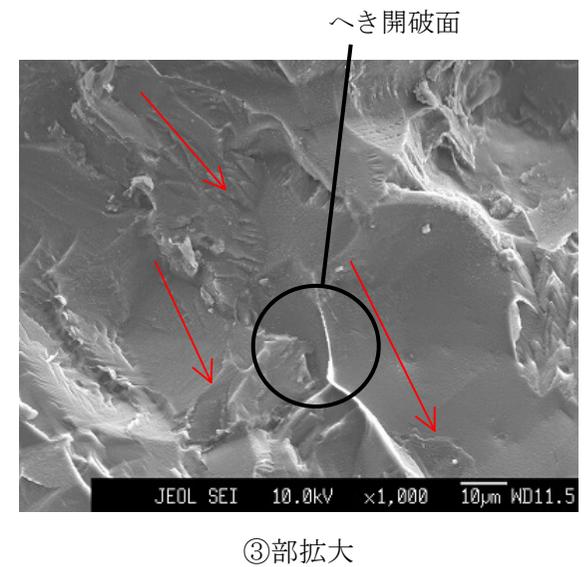
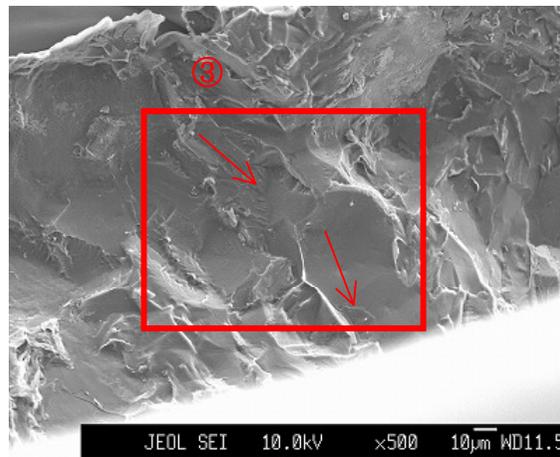
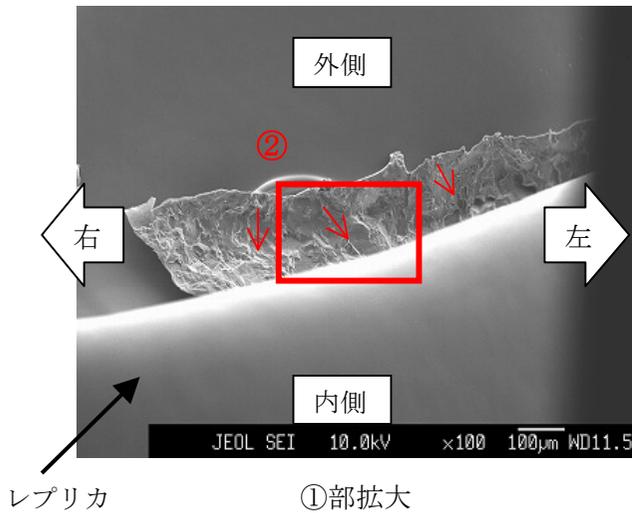
- 外側から内側に向かって金属組織の流れ（ひび割れの方に対応）が認められる。
- 破面は、へき開破面を含む強制破壊の様相を呈している。
- 外側および内側表面において、材料に欠陥、腐食ピット等は認められない。

破面SEM観察結果



第3支持格子

← : ひび割れの方を示す



[観察結果]

- ・外側から内側に向かって金属組織の流れ（ひび割れの方に対応）が認められる。
- ・破面は、へき開破面を含む強制破壊の様相を呈している。
- ・外側および内側表面において、材料に欠陥、腐食ピット等は認められない。

支持格子の変形部にかかる応力評価

1. 目的

第8回定検時に隣接する燃料とのかみ込みにより外側へ約2.6mm変形したガイドベーン部(図1)が燃料側へ押し戻された場合に発生する応力を評価する。

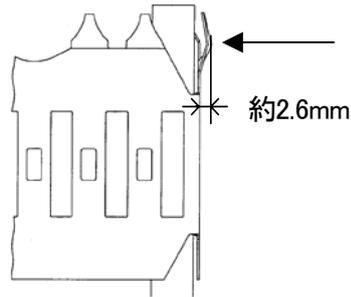


図1 ガイドベーンの変形状況

2. 評価結果

ガイドベーン部の破損箇所を、図2のように簡易的に10mm×10mmの長方形とみなし、図3のように片持ち梁のたわみ式を用いて、変形したガイドベーン部(約2.6mm)が押し戻されることを想定する。

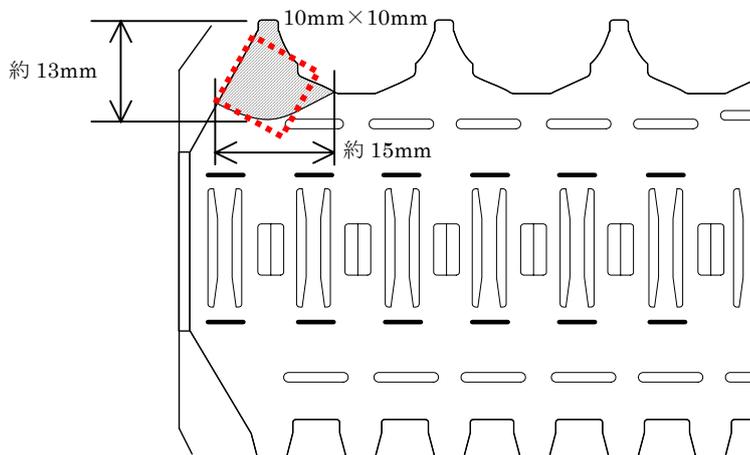


図2 損傷部状況図

板厚 $h=0.432(\text{mm})$ ヤング率 $E = 2 \times 10^5(\text{MPa})$

板幅 $b=10(\text{mm})$ 板長さ $L = 10(\text{mm})$

断面二次モーメント $I = bh^3/12 = 0.067(\text{mm}^4)$

断面係数 $Z = 2I/h = 0.311$

押し戻し量 $\delta = 2.6\text{mm}$

曲げモーメント $M = \frac{3\delta EI}{L^3} \cdot L$

最大応力 $\sigma_{\max} = \frac{M}{Z} = 3400(\text{N}/\text{mm}^2)$

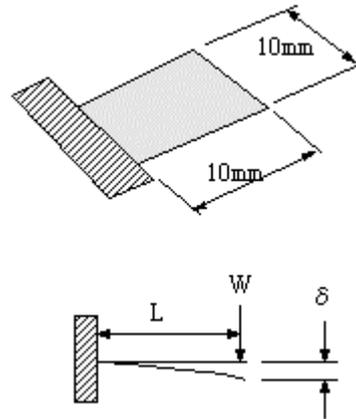


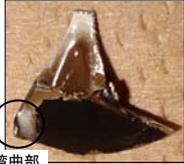
図3 片持ち梁のたわみ式に基づく応力算出

この結果、変形したガイドベーン部の基部には引張強さ（ $1500\text{N}/\text{mm}^2$ ）を十分上回る応力（ $3400\text{N}/\text{mm}^2$ ）が働くことが分かった。

事象発生 の 推定メカニズム

時系列	事 象	推 定 メ カ ニ ズ ム
第 7 回 定 検	燃料 装荷 <ul style="list-style-type: none"> 燃料取出時の点検で健全であることを確認。 当該燃料（H06）、隣接する燃料（J46）ともに装荷中に荷重変動トリップなし。 	—
第 8 回 定 検	燃料 取出 <ul style="list-style-type: none"> H06の取出時に荷重変動トリップが発生した。 燃料 外観 <ul style="list-style-type: none"> H06の第3支持格子A面左端のガイドベーンにわずかな変形（外側に約2.6mm）が認められたが、亀裂は認められなかった。 J46の第6支持格子C面右端のタブにこすれ傷が認められた。 	<ul style="list-style-type: none"> J46との水平方向のズレとねじれが重畳し、支持格子同士のかみ込みが生じて、荷重変動トリップが発生した。 <p>【炉内配置状況】</p> <p>【燃料取出状況】</p> <ul style="list-style-type: none"> 荷重変動トリップ後、干渉を解消するために燃料取替クレーンを若干下降させた際、H06が水平方向に若干移動することにより、ガイドベーンにわずかな変形が生じた。
第 9 回 定 検	燃料 装荷 <ul style="list-style-type: none"> 第8回定検で生じたわずかな変形がバッフル板に向かい合う位置（E-2）に装荷した。 H06装荷時に荷重変動トリップが2回発生した。 	<ul style="list-style-type: none"> H06は4面が囲われた状態で装荷することとしたことから、横方向の移動が拘束されており、バッフル板との隙間は最大でも2mmである。 H06の当該ガイドベーンはバッフル板側に約2.6mm変形しているため、変形部がバッフル板と干渉しながら装荷することとなる。 特に、隣接燃料のグリッド位置を通過するとき、燃料同士が干渉することで、変形部がバッフル板に押しつけられる。 上記変形部の押しつけによる摩擦力により、荷重変動トリップが発生するとともに、変形していたガイドベーンが燃料側へ押し戻されることにより、変形部の基部に引張強さ(約1500N/mm²)を上回る過大な応力(約3400N/mm²)がかかった。 このため、外観写真(2/2参照)の湾曲部を除いた部分に外側から亀裂が発生し、残り約0.1mmまで亀裂が生じた。 <p>【炉内配置状況】</p> <p>【燃料装荷状況】</p> <p>【干渉の状況】</p>

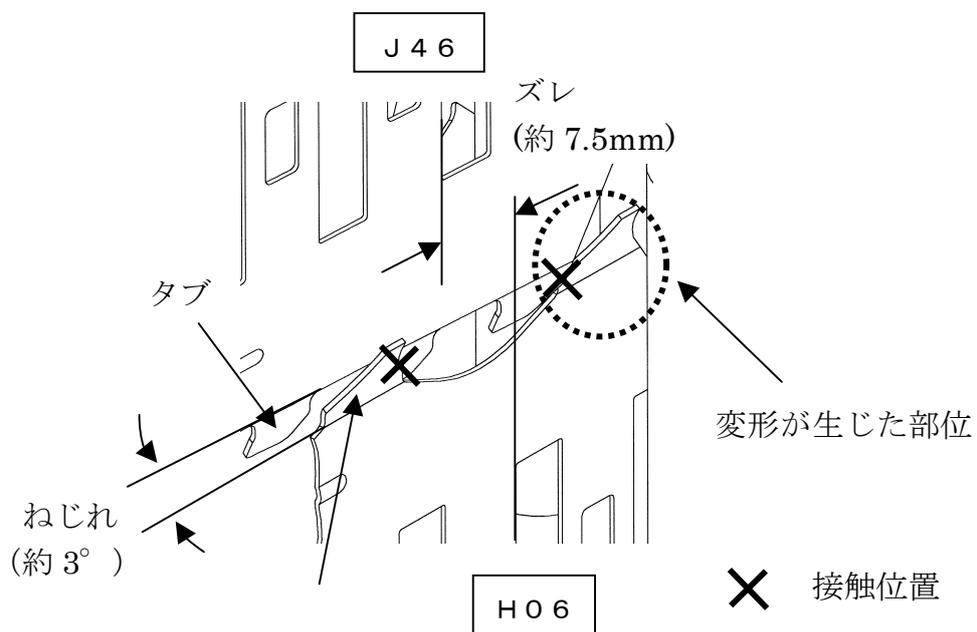
事象発生 の 推定メカニズム

時系列	事 象	推 定 メ カ ニ ズ ム
第10 サイクル	運転中 ・ 運転履歴に異常なし。	・ 亀裂の進展はなかった。
第10回 定 検	燃料 取出 ・ 荷重変動トリップなし。	<ul style="list-style-type: none"> 変形部のパッフル板との干渉による摩擦力で、変形部が下側に引っ張られ、内側に残っていた未破断部が破断し、左外観写真の湾曲部一点で残った形となった。 燃料コンテナに挿入後、燃料コンテナを横倒しする際に、損傷部分の先端になんらかの力が作用し、支持格子からちぎれて欠落し、燃料コンテナ底面（横倒しした状態でD面）に落下した。 燃料コンテナを使用済燃料ピット側へ移送した後、立て起こす際、損傷部品がコンテナ底面に沿って落下し、第1支持格子D面の左端にひっかかった。
	燃料 外観 ・ H06の第3支持格子A面左端の当該ガイドベーン部分の損傷（欠落）が認められた。 ・ 欠落した部分は、H06の第1支持格子D面の左端にひっかかっていた。 (欠落した部分の外観) 	

再発防止対策について

1. 第8回定検燃料取出時に発生したH06支持格子変形について

当該事象は、水平方向の燃料のねじれが約 3° あり、なおかつ水平方向のズレが約7.5mmある場合にのみ、支持格子同士が干渉するとガイドベーンとタブがかみ込む可能性があることから、これらのズレ、ねじれを生じないようにすることが、同様な事象の再発防止に有効である。



2. 再発防止対策の評価

(1) 横ずらし

- a. 下部炉心板から約9cmの位置までは、隣接する燃料から離れた位置で取り扱うため、隣接する燃料支持格子との干渉は生じない。
- b. 燃料装荷時に炉心底近く（約9cm上）まで燃料を下降させた後、隣接する燃料に接するように燃料を移動（横ずらし）した時には、隣接燃料との位置関係を水中カメラ等で水平方向のズレやねじれがないことを確認したうえで燃料を取り扱うことにより、支持格子同士のかみ込みは発生しない。

なお、燃料取出の際は逆の手順となるが、支持格子同士が面で接触した状態から燃料を上昇させることから、支持格子同士のかみ込みは発生しない。

(図1参照)

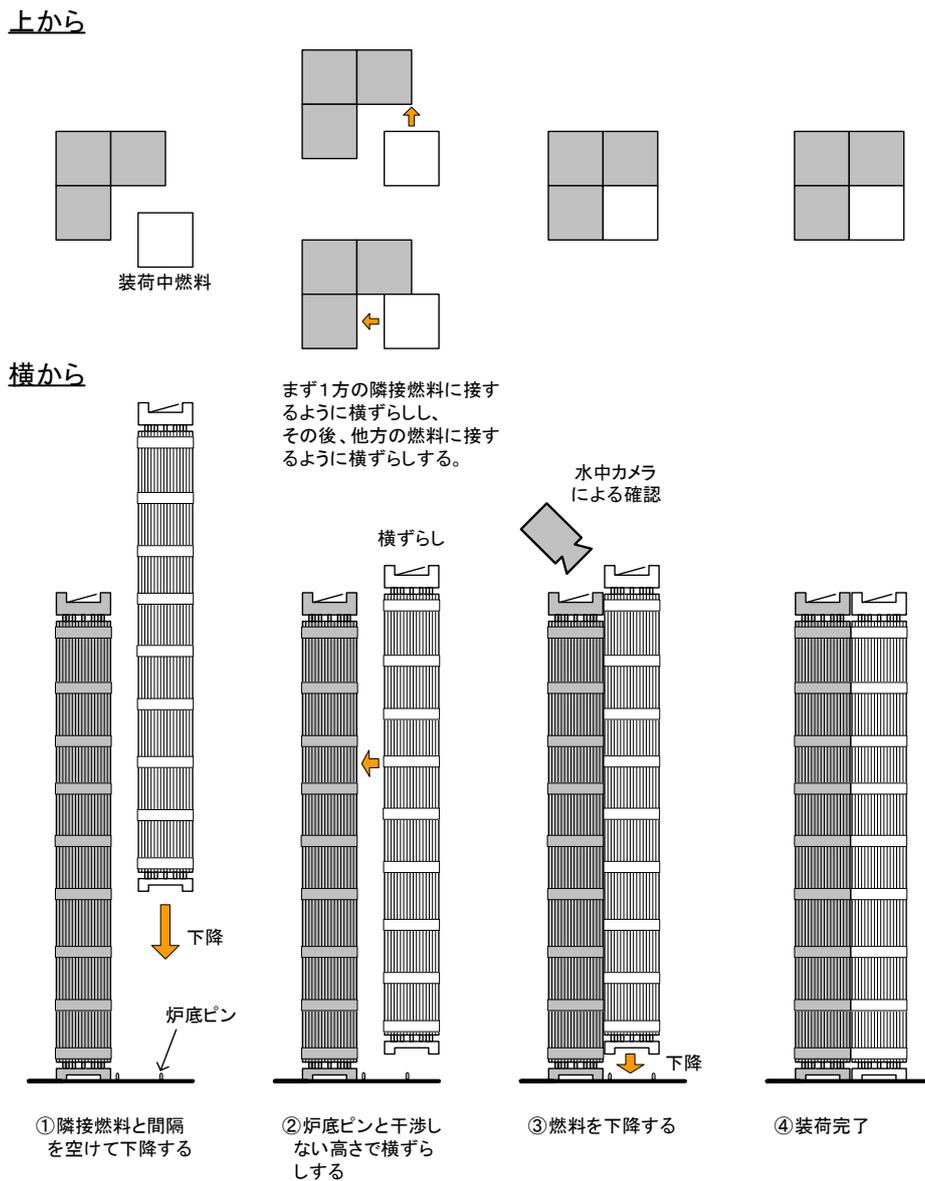


図1 横ずらし装荷の概要 (取出は逆の手順)

(2) 1面または2面が燃料と接する状態で横ずらしができない場合

図2のようにバッフル板のコーナー部等、1面または2面が燃料と接する状態で横ずらしができない場合は、水平方向の燃料のねじれやズレが生じないように、ガイドアセンブリ等を使用して3面以上が接する配置としたうえで、燃料を取り扱うこととする。

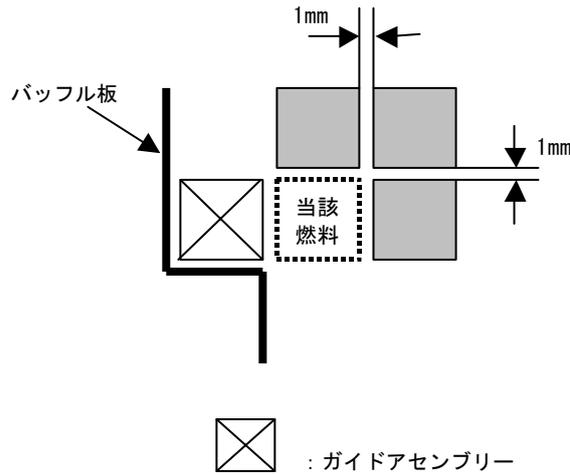


図2 バッフル板コーナー部の状況

(3) 3面囲い

- a. 図3の①－③方向は、①、③の燃料により水平方向の移動が制限されることから②の燃料に対する水平方向のズレは最大でも2mmとなり、②の燃料に対する支持格子同士のかみ込みは発生しない。
- b. 図3の②－④方向は、④の方向が拘束されていない状態となるが、
- ・燃料上部を水中カメラで監視しており、装荷位置にズレがないかどうかを確認する
 - ・①－③方向の隙間は最大2mmであるため、当該燃料の水平方向のねじれは約0.5°に制限される
- ことにより、①、③の燃料に対する支持格子同士のかみ込みは発生しない。

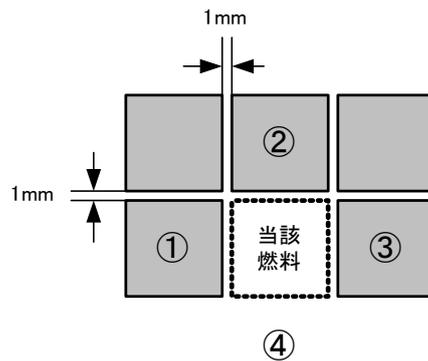


図3 3面囲いの状況

(4) 4面囲い

図4のとおり4方向全てに対して水平方向の移動は制限されることから、隣接する燃料との水平方向のズレは最大でも2mmとなり、支持格子同士のかみ込みは発生しない。

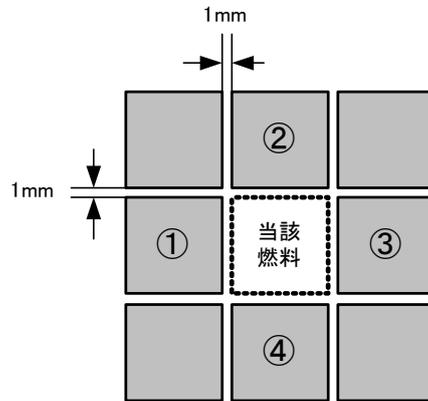


図4 4面囲いの状況

用語説明

1. 燃料集合体支持格子
2. 水中カメラ
3. 要因分析図
4. 新燃料貯蔵ラック
5. 新燃料エレベータ
6. 使用済燃料ラック
7. 原子炉キャビティ
8. 燃料コンテナ
9. 燃料移送管
10. 燃料取替クレーン
11. ホイスト
12. マストチューブ
13. 燃料ガイドバー
14. 荷重チャート
15. 荷重変動トリップ
16. バッフル板
17. バッフルフォーマボルト
18. クラッド
19. 炉内構造物
20. ガイドアセンブリー
21. 熱流束熱水路係数
22. 核的エンタルピー上昇熱水路係数
23. FEM (Finite Element Method)
24. ヤング率
25. 断面二次モーメント
26. 断面係数
27. ガイドベーン
28. タブ
29. 引張強さ
30. 破面マクロ観察
31. 破面SEM観察
32. レプリカ法
33. へき開破面
34. 延性割れ
35. 疲労割れ
36. 応力腐食割れ
37. 腐食ピット

1. 燃料集合体支持格子
燃料棒を束ねて保持するための格子状のものであり、燃料棒を板ばねと突起状の板にて挟んで保持している。
2. 水中カメラ
燃料集合体外観検査に使用する水中カメラ。
3. 要因分析図
事象の原因を特定するために、考えられる要因を抽出し評価を行うための図。
4. 新燃料貯蔵ラック
新燃料貯蔵庫に設置している新燃料集合体1体を貯蔵するための容器。
5. 新燃料エレベータ
新燃料を新燃料貯蔵庫から使用済燃料ピットに移動する時に使用する設備。
6. 使用済燃料ラック
使用済燃料ピットに設置している燃料集合体1体を保管する容器。
7. 原子炉キャビティ
燃料を取替える際にほう酸水を張る、格納容器内のスペース。
8. 燃料コンテナ
原子炉格納容器と使用済燃料ピット間を燃料移送管を通して燃料集合体を移送する際に燃料集合体1体を収納する容器。
9. 燃料移送管
燃料集合体を燃料コンテナに入れて、原子炉キャビティと使用済燃料ピットの間で移送するための管。
10. 燃料取替クレーン
原子炉格納容器内にて燃料集合体を取り扱う際に用いるクレーン。
11. ホイスト
物品（ここでは燃料集合体）を上昇・下降する装置。
12. マストチューブ
燃料取替クレーンにおいて、燃料集合体を収納するもの。
13. 燃料ガイドバー
マストチューブ内において、燃料集合体をガイドするもの。
14. 荷重チャート
燃料装荷および取出時の燃料取替クレーンにかかる荷重変動等の連続的な記録。荷重変動や、昇降装置（ホイスト）のスピード等を記録している。

1 5. 荷重変動トリップ

燃料集合体を保護するため、燃料取替クレーンの昇降装置（ホイスト）に荷重監視装置を設置している。この荷重の変動点を超えた場合、昇降を自動停止するようにしている。

1 6. バッフル板

炉心内の水の流路を形成するため炉心の周囲に設置された金属の囲い。

1 7. バッフルフォーマボルト

バッフル板を固定するためのボルト

1 8. クラッド

原子炉冷却中において、金属材料の腐食によって生ずる腐食生成物のうち、水に溶けない金属酸化物。

1 9. 炉内構造物

原子炉容器内部の構造物。炉心槽、上部炉心板等がある。

2 0. ガイドアセンブリー

表面が平滑な燃料集合体と同じ大きさのもので、燃料集合体の原子炉内での取扱い性を良くするためのもの。

2 1. 熱流束熱水路係数

局所的な最大燃料棒線出力密度と平均線出力密度との比。

2 2. 核的エンタルピー上昇熱水路係数

最大の燃料棒出力と平均燃料棒出力の比。

2 3. FEM (Finite Element Method)

有限要素法のこと、数値解析法のひとつ。

解析対象の有限要素と呼ばれる小さな領域に分割して、近似的に解析を行う手法。構造力学などの分野において広く用いられている。

2 4. ヤング率

弾性範囲で応力に対するひずみの値をきめる定数。

2 5. 断面二次モーメント

曲げに対する強さを表すパラメータ。断面の形状（性質）による。

2 6. 断面係数

断面二次モーメントを中立軸からの距離で割った係数。

2 7. ガイドベーン

燃料装荷・取出時の隣接燃料集合体との干渉を防ぎ装荷・取出性能を良くするためのもの。（支持格子の最外周の上側に形成されている。）

28. タブ

燃料装荷・取出時の隣接燃料集合体との干渉を防ぎ装荷・取出性能を良くするためのもの。(支持格子の最外周の下側に形成されている。)

29. 引張強さ

材料を引張り応力(荷重/断面積)を与えていくと、材料は破断する。その破断するときの応力。

30. 破面マクロ観察

材料の破断面を調べることにより、破断原因に関する情報を得るため、破断面の表面状態、模様等を観察すること。

31. 破面SEM観察

損傷部位の破面を走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)にて観察することにより、割れがどのような応力下で生じたかを調べる調査(破面形状、割れ先端形状の確認)。

32. レプリカ法

試験片の表面を直接観察できない場合、間接的に観察する方法である。

極めて追従性が良く、かつ、はく離性の良い有機材料(アセチルセルロース)を検査表面に貼付けし、表面の凹凸を忠実に転写した「レプリカ」を作成し、試験片表面を間接的に観察する方法。

33. へき開破面

金属のある特定の結晶面に沿った割れによる破壊を生じた破面をいう。

この破壊は塑性変形を伴わないので、脆性破壊となる。

34. 延性割れ

延性のある金属が伸びきって引きちぎられるように破壊すること。

35. 疲労割れ

振動等により応力が繰り返し加えられることにより発生するひび割れ。

36. 応力腐食割れ

特定の腐食環境中におかれた金属材料が、持続的な引張応力のもとで時間依存型の脆性的破壊を起こす現象をいう。

一般に合金は割れやすいが、純金属では極めて割れにくい。応力と腐食作用が同時に働くことが必要条件で、応力のみ、あるいは弱い腐食環境中でも割れが発生する。発生原因は、材料、環境、応力の3つの要因が重複した場合である。

37. 腐食ピット

腐食でできたくぼみ。