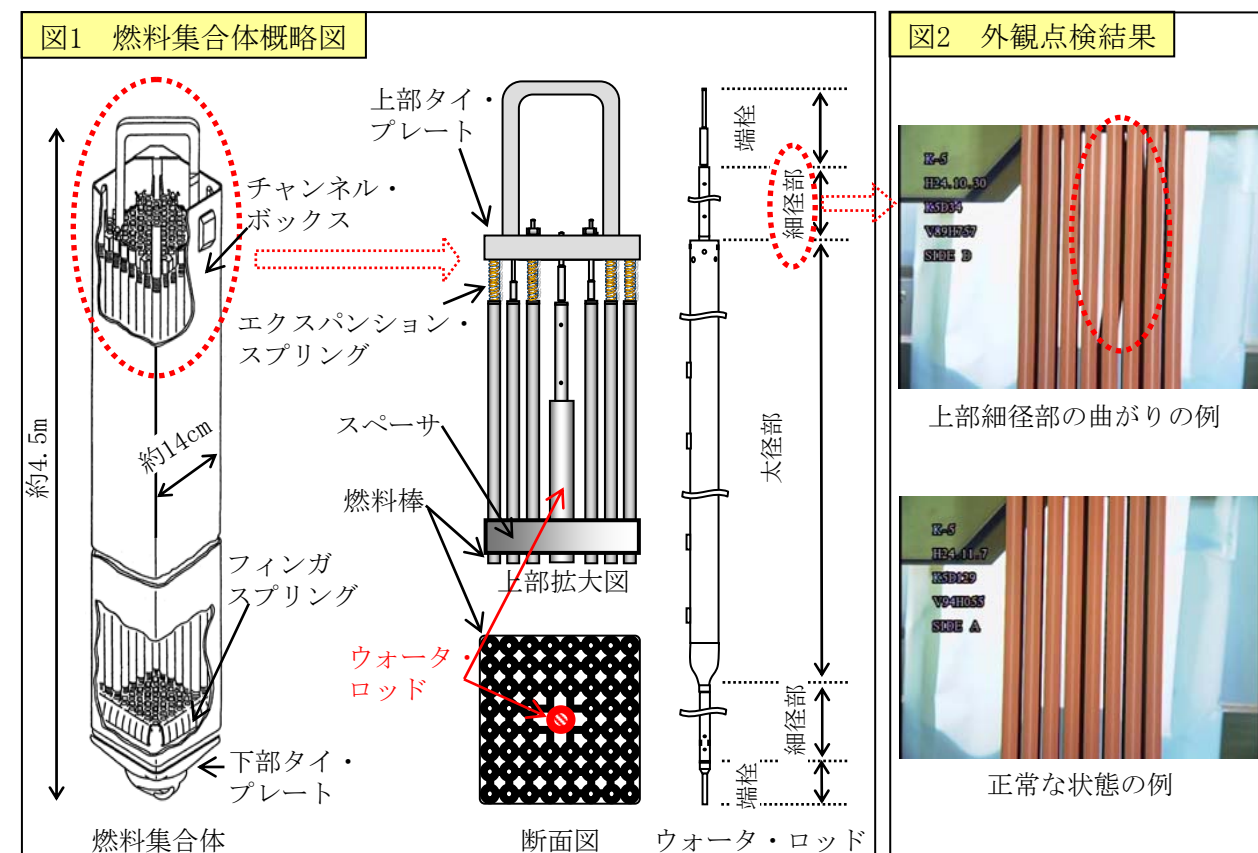


当社原子力発電所における燃料集合体ウォータ・ロッドの曲がりに係る原因調査結果について（中間報告）（概要）

1. はじめに

- ▶平成24年10月16日、定期検査中の柏崎刈羽原子力発電所5号機において、他電力において発生した不具合に関連して燃料集合体（図1）の点検を実施していた際に、使用済の高燃焼度8×8燃料2体でウォータ・ロッド（以下WR）の一部に曲がり（図2）があることを確認。
 - ▶平成24年12月末までに同発電所2号機において60体、5号機において65体の合計125体の外観点検を実施し、2号機において2体、5号機において18体の合計20体にWRの曲がりを確認。
 - ▶WRの曲がりを確認した燃料集合体は、平成6年から平成15年までに使用していたもので、いずれも使用済の燃料集合体であり、新燃料時に水中でチャンネルボックス（以下CB）を装着した履歴があることを確認。
 - ▶WRの曲がり大きい代表的な燃料集合体2体について、ファイバースコープによる点検を実施した結果、WRの下部にある一部の通水孔付近の変形（ただし、通水機能は維持）や、WRの曲がりに伴い隣接する燃料棒同士が接触している状況等を確認。
 - ▶WRの曲がりに関する調査として、WRの細径部を部分的に模擬した単体モックアップ試験を実施した結果、平成10年^{※1}以前のCB装着作業時に発生する荷重によって、WRが曲がる可能性があることを確認。
- ※1：平成10年に柏崎刈羽原子力発電所1号機において、照射燃料に対する水中でのCB脱着作業に関連し、スペーサを構成する部材（架橋板）を破損させる事象が発生。この事象を受け、それ以降、燃料に過大な荷重を与えないような標準的な手順を整備。
- ▶WRの曲がりによる影響について解析による評価を実施した結果、炉心特性等に大きな影響を与えるものではないことを確認。
- （平成25年1月7日までに報告済み）
- ▶今回、原因調査結果及び安全性への影響評価結果等が取り纏まったことから、原子力規制委員会にその内容を報告。概要は以下のとおり。

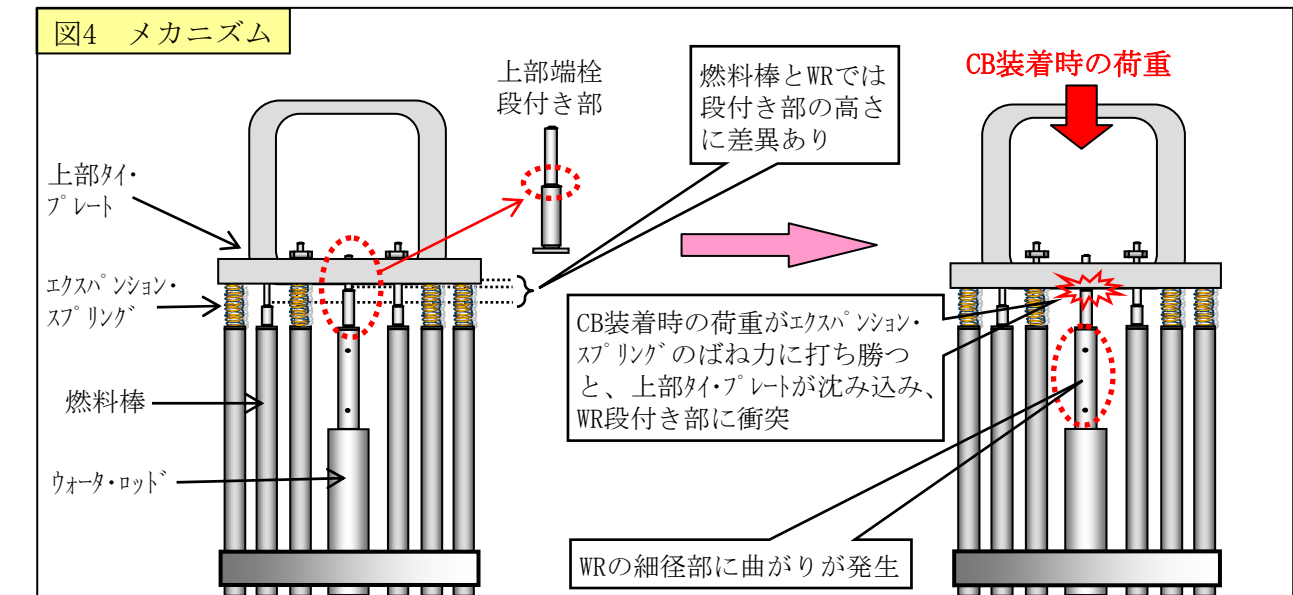
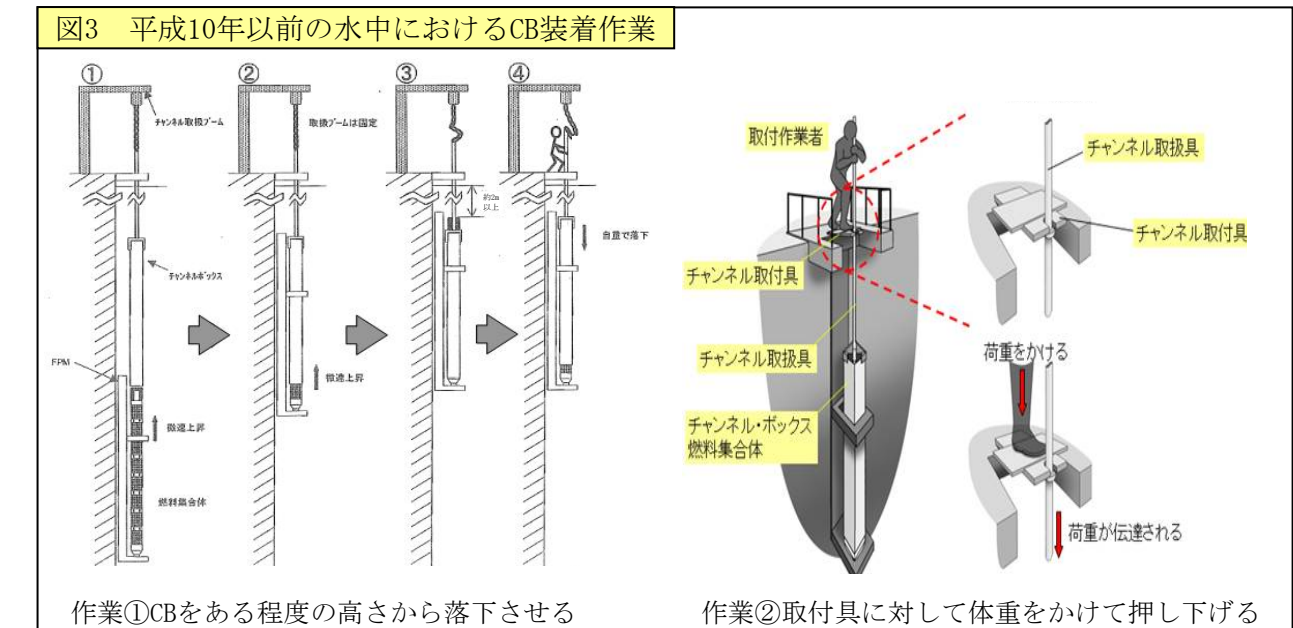


2. 原因

- ▶調査の結果、柏崎刈羽原子力発電所1、2、5号機において確認されたWRの曲がりは、平成10年以前の作業手順によって、新燃料時に水中でCBを装着した際に、過大な荷重が上部タイ・プレートを通じてWRに加わり、その荷重がWRに曲がりが発生する荷重を上回ったことによって発生したものと推定。

(1) CB装着作業によりWRの曲がりが発生するメカニズム

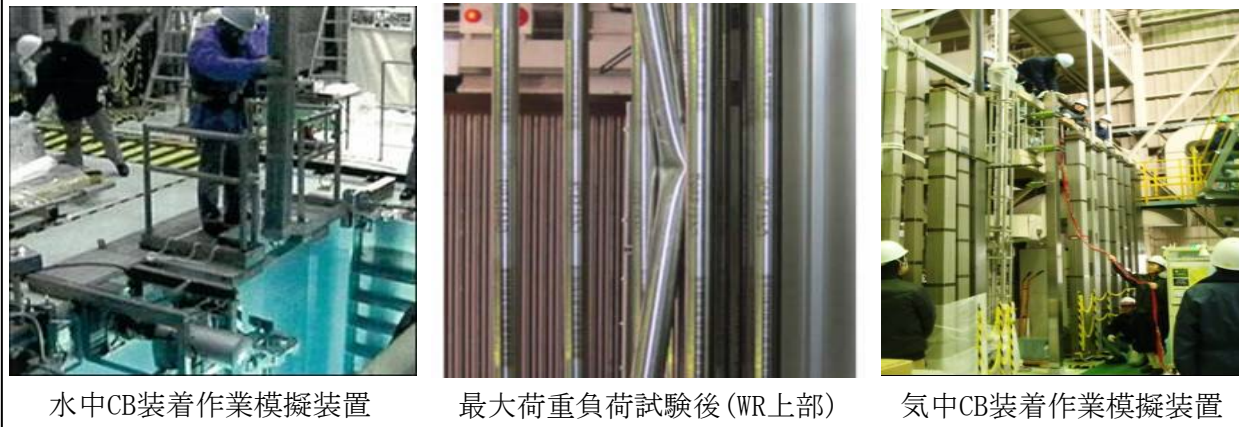
- ▶平成10年以前の水中におけるCB装着時には、CB装着状態の確認を水中カメラを用いて行っておらず、フィンガスプリング付き燃料については、CB下端がフィンガスプリング部を通過する際に発生する摩擦に打ち勝つ必要があり、確実に取り付けるために、CBを引き上げて落とし込んで取り付けることや、CBを取り付けるための治具（チャンネル取付具）に体重をかける等の過大な荷重がかかる作業を実施していたことを確認（図3）。
- ▶CB装着時に過大な荷重が加わると、エクспанション・スプリングを縮めて上部タイ・プレートが沈みこみ、WRの段付き部に衝突し、太径部よりも相対的に強度が低い細径部においてWRの曲がりが発生する可能性があることを確認（図4）。



(2) モックアップ試験 (定量評価)

- ▶平成10年以前の水中でのCB装着作業を模擬 (図5) した結果、WRに伝達される荷重 (15kN) が、WRの曲がりが生じる荷重 (8kN)を上回り、メカニズムが妥当であることを確認。
- ▶構造上かかりうる最大荷重負荷試験を実施した結果、WR上部は曲がりの程度が実機の外観点検の観察結果よりも大きかったが、それ以外の部材については、実機の観察結果を超えるものはないことを確認。(今回の要因が他の部材へ影響を及ぼしていないことの確認)
- ▶気中及び平成10年以降の水中でのCB装着作業を模擬した結果、WRに伝達される荷重は1kN未満であり、現行の手順ではWRの曲がり発生しないことを確認。

図5 モックアップ試験



(3) CB装着履歴に着目した燃料集合体の外観点検結果

- ▶平成25年4月末までに合計419体の燃料集合体の外観点検を実施。
- ▶柏崎刈羽原子力発電所2号機における2体及び5号機における18体 (平成25年1月7日報告済み)に加え、1号機において6体の合計26体にWRの曲がりを確認。WRの曲がり、新燃料時に水中で平成10年の作業方法見直し前にCBを装着した燃料にのみ発生していることを確認。

新燃料時の装着方法	照射燃料時の水中脱着※2の有無	装着 (脱着) 作業実施時期	外観点検実施数 / 外観点検予定数※3	曲がり確認
水中	—	見直し前	63体 / 71体	26体
		見直し後	53体 / 90体	0体
気中	あり	見直し前	37体 / 89体※4	0体
		見直し後	150体 / 246体	0体
	なし	—	116体 / 125体	0体

※2: 水中でのCB装着は、新燃料時の他に、照射燃料 (原子炉内での使用中又は使用済の燃料) に対して定期検査時に実施する燃料集合体外観検査等に伴い、一度CBを取り外し、検査等の実施後に再度CBを装着する作業がある。
 ※3: 予定数は今後のCB一部欠損事象の調査の結果により変更する可能性がある。
 ※4: 柏崎刈羽原子力発電所6号機において、原子炉内での短期間の使用後にCB脱着を実施した照射燃料5体について、知見拡充を目的に今後5体全数を点検する。

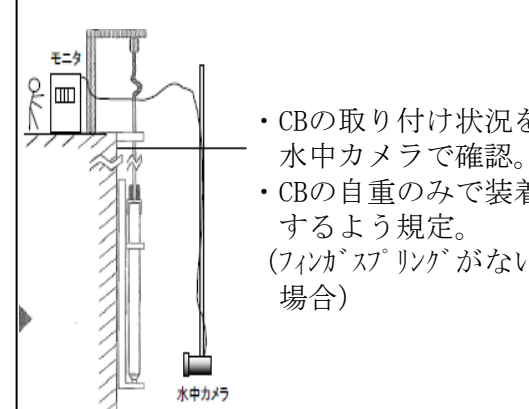
(4) 他の燃料についての考察

- ▶照射燃料の部材は照射硬化によって降伏応力が増大するため、照射燃料体検査等で照射燃料に対してCBを装着した燃料については、WRの曲がりが発生する可能性は低い。なお、原子炉内における使用期間がごく短い照射燃料については、新燃料に近い特性を有する可能性がある。
- ▶WRの曲がりを確認した高燃焼度8×8燃料以外の燃料タイプは、上部タイ・プレートが沈み込んだ場合、WR2本またはWRと燃料棒で荷重を分散して支持する構造であり、高燃焼度8×8燃料のようにWR1本で集中して荷重を支持する構造ではないこと等から、WRの曲がりが発生する可能性は低い。

3. 対策

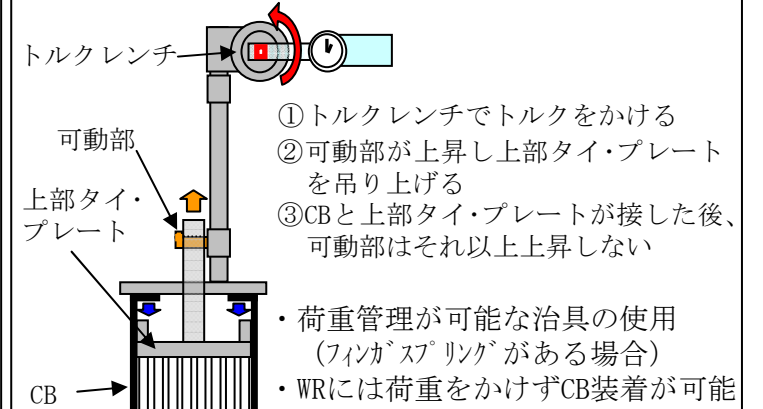
- ▶燃料集合体に水中でCBを装着する作業に関しては、平成10年に確認した燃料集合体 (スペーサ) の不具合の対策として以下を実施するとともに、作業者及び当社監理員に対して、燃料取扱に関する再教育を実施 (図6、図7)。
- ①燃料集合体に過大な荷重をかけないような標準的な手順を規定。(荷重管理が可能な治具の使用やCBの自重のみで装着する等)
- ②水中カメラを使用して装着状態を確認しながらCB装着作業を実施することを規定。
- ▶今回実施したモックアップ試験によって平成10年以降の作業の妥当性を確認。4月末までに、対策後に作業を実施した燃料集合体203体を点検しているが、WRの曲がり発生していない。

図6 平成10年以降の手順



- ・CBの取り付け状況を水中カメラで確認。
- ・CBの自重のみで装着するよう規定。(フィンガスプリングがない場合)

図7 荷重管理が可能な治具



- ①トルクレンチでトルクをかける
 - ②可動部が上昇し上部タイ・プレートを吊り上げる
 - ③CBと上部タイ・プレートが接した後、可動部はそれ以上上昇しない
- ・荷重管理が可能な治具の使用 (フィンガスプリングがある場合)
 - ・WRには荷重をかけずCB装着が可能

4. 影響評価

(1) 炉心特性等への影響

- ▶WR及び燃料棒の位置がずれることによる燃料集合体の局所の核特性及び除熱性能への影響を解析コードを用いて評価した結果、無限増倍率、局所出力ピーキング係数、炉心特性への影響はいずれも小さいことを確認。

(2) 安全解析等への影響

- ▶ボイド履歴の相違による燃料集合体格子計算ベースでの感度評価を実施。運転時の評価例は下表のとおりであり、減速材ボイド係数が小さくなる影響があるものの、その他のパラメータについては影響は小さいことを確認。

評価パラメータ	サイクル初期相当※4	サイクル末期相当※4
無限増倍率(%)	+0.009	+0.003
局所出力ピーキング係数(%)	燃料寿命を通じて0.01%未満の増加	
減速材ボイド係数(%)	-0.22	-0.28
ドブプラ係数(%)	-0.07	-0.07
制御棒価値(%)	-0.07	-0.07

※4: 相対値 (WR部分閉塞燃料 / 正常燃料 - 1) [%]

- ▶WRの曲がりによる減速材ボイド係数等への影響を踏まえ、安全解析等への影響について以下の項目について評価した結果、いずれも影響は小さいことを確認。

機械設計	燃料被覆管応力設計比、燃料被覆管疲労評価
炉心特性、反応度係数	炉心特性、反応度係数、スクラム反応度、熱水力上の燃料の許容設計限界
動特性	核熱水力学安定性、プラント安定性、キセノン安定性
運転時の異常な過渡変化	起動時における制御棒引抜き、出力運転中の制御棒引抜き、プラント過渡
事故解析	再循環ポンプ軸固着事故、原子炉冷却材喪失、主蒸気管破断、制御棒落下

5. WRの曲がりが発生しこれまで発見に至らなかった経緯

(1) これまで発見に至らなかった経緯

- ▶平成10年に発生したスパーサずれは、WRの曲がりと発生するメカニズムが異なり（【参考】参照）、照射燃料に対する水中CB装着作業に起因することが当時の調査で判明。そのため、新燃料時に水中でCBを装着した燃料は点検対象に含まれず、WRの曲がりの発見には至らなかった。
- ▶WRの曲がりを確認した燃料集合体は、原子炉内で使用中に放射性物質の漏えい等の徴候はなく、漏えい燃料に対する点検等を実施していないため、WRの曲がりを確認できなかった。
- ▶定期検査時の照射燃料に対する燃料集合体外観検査では、外観に異常がなかったため、透過光による点検を実施しておらず、燃料集合体内部のWRの曲がりを確認できなかった。

(2) 過大な荷重がかかる作業を実施していた経緯

- フィンガスプリング付き燃料に対する、水中でCBを装着する際に過大な荷重がかかる作業は、従前から実施されており、平成10年までは不具合が顕在化せず、燃料に悪影響を及ぼす作業であるという認識がなかったため、従前からの作業方法を踏襲していた。このような作業方法を実施していた背後要因として、以下の内容を確認した。
- ▶CB装着作業を担当したメーカーの作業部門は、燃料タイプ毎の差異を把握していない場合があり、作業が燃料集合体にどのような影響を及ぼすか認識していなかった。
 - ▶当社監理員が現場に立ち会っていたが、CBをしっかり装着することが念頭にあり、メーカーも含めて、燃料集合体を損傷させる可能性があることは認識していなかった。
 - ▶燃料設計が変更になった際も、CB装着作業方法を改めて検討することはなく、高燃焼度8×8燃料より前の燃料タイプはWR2本またはWRと燃料棒合計64本で荷重を支持する構造であったこと等から不具合が顕在化しなかったが、高燃焼度8×8燃料でWRが1本になったことにより、WRの曲がりが発生したものと考えられる。

6. 今後の改善点

燃料集合体に水中でCBを装着する作業については、「3. 対策」のとおり、平成10年以降荷重を管理できる治具の使用やCBの自重のみで装着する等、燃料集合体に過大な荷重をかけないような標準的な手順を規定するとともに、作業員及び当社監理員に対して燃料取扱に関する再教育を行っており、モックアップ試験及び外観点検結果で対策の有効性を確認している。以下では、WRの曲がりが発生しこれまで発見に至らなかった経緯を踏まえ、今後の改善点を記載する。

- ▶燃料設計変更時には、燃料設計に対する燃料作業部門のレビュー及び現場の作業方法に対する燃料設計部門のレビューを行い、燃料集合体の各部材に作業に起因する損傷・変形が生じないように適切に配慮する。
- ▶万が一燃料集合体内部に異常があった場合でも、可能な限り早期に発見する観点から、燃料集合体の外観点検を実施する際には透過光による点検を合わせて実施する。

なお、今後とも燃料集合体にCBを装着する作業等を実施する際には、作業の事前打ち合わせ等を通じて、作業員へスパーサずれ事象やWRの曲がり事象を例に、燃料取扱作業の重要性の教育を継続していくものとする。

7. まとめ

原因	▶WRの曲がりは、平成10年以前の作業手順によって、新燃料時に水中でCBを装着した際に、過大な荷重が加わったことによって発生。
対策	▶水中におけるCB装着作業は、平成10年に対策済み（作業手順の見直し）。 ▶今回、モックアップ試験等から平成10年以降の作業の妥当性を確認。
影響評価	▶炉心特性及び安全解析等への影響はいずれも小さいことを確認。
改善点	▶燃料設計変更時には燃料設計部門と燃料作業部門の相互レビューを実施。 ▶燃料集合体の外観点検を実施する際には透過光による点検を合わせて実施。
今後の予定	▶燃料集合体の外観点検を引き続き実施。 (水中CB装着履歴のある原子炉内継続使用予定燃料については、全て平成10年以降に作業を実施したものであるため、WRの曲がりが発生している可能性はないと考えているが、予断を持たずに全数点検を実施) ▶今後実施する点検において、WRの曲がりの可能性がある燃料は、3号機で4体、4号機で4体、6号機で5体のいずれも使用済燃料。点検終了は平成25年6月の見込み。

【参考】 平成10年に発生したスパーサずれ

- ▶平成10年に柏崎刈羽原子力発電所1号機において発生したスパーサずれは、照射燃料に対する水中でのCB装着作業に起因して発生。
- ▶新燃料時と照射燃料時で燃料集合体の状態は下表のとおり違いがあるため、水中でのCB装着時の過大な荷重によって、新燃料時はWRの曲がり、照射燃料時はスパーサずれが発生（図8）。

	新燃料	照射燃料
スパーサとWRのタブの位置関係	スパーサはWRの下側のタブ近傍に位置。	原子炉内での使用に伴い、燃料棒とWRの照射成長や水の流れの影響によって、スパーサはWRの上側のタブ近傍に位置。
WRの浮き上がり	WRの浮き上がりなし。（WRは下部タイ・プレートに着座。）	WRの浮き上がりあり。（WRは下部タイ・プレートに不着座している。）
上部タイ・プレートが沈み込みWRに衝突した場合	WRが下部タイ・プレートに不着座しているため、上方からの荷重は、WRが変形することで吸収。	WRが下部タイ・プレートに不着座しているが、WRの上側のタブがスパーサの架橋板という部材と接しており、上方からの荷重は、架橋板が破損することで吸収。架橋板が破損したスパーサは、水の流れの影響で上方のスパーサ近傍へずれる。

