

沸騰水型原子力発電所のハフニウム板型制御棒の
ひび等に関する調査報告書

平成18年5月
原子力安全・保安院

目 次

| | |
|--|----|
| 1. 本報告書の位置付け | 3 |
| 2. 本件に係るこれまでの経緯 | 4 |
| 3. ハフニウム板型制御棒の概要及び規制等 | 6 |
| 3.1 ハフニウム板型制御棒の概要 | 6 |
| 3.2 ハフニウム板型制御棒に関する法律上の位置付け | 7 |
| 3.2.1 原子炉設置許可 | 7 |
| 3.2.2 工事計画認可 | 7 |
| 3.2.3 使用前検査 | 7 |
| 3.2.4 保安規定に基づく確認 | 8 |
| 3.2.5 定期事業者検査等 | 8 |
| 3.3 ハフニウム板型制御棒に関する事業者の管理 | 8 |
| 3.4 他のハフニウム制御棒の利用状況 | 9 |
| 4. ひび等の状況とこれまでの対策 | 10 |
| 4.1 これまでの経緯及び対応 | 10 |
| 4.1.1 事業者からの中間報告等の概要 | 10 |
| 4.1.2 事業者からの中間報告等に対する当院の見解 | 10 |
| 4.1.3 中間報告等を踏まえた対応 | 11 |
| 4.1.4 一部制御棒挿入後の炉心の安定性 | 11 |
| 4.2 福島第一原子力発電所3号機におけるひび及び破損の発生状況 | 11 |
| 4.3 現時点におけるハフニウム板型制御棒の点検状況 | 12 |
| 4.4 ひび及び破損の特徴 | 12 |
| 5. 技術的検討 | 14 |
| 5.1 ひび等の発生に関する原因の推定 | 14 |
| 5.1.1 ひび等の発生原因推定に関する東京電力(株)からの報告概要 | 14 |
| 5.1.2 ひび等の発生原因推定に関する中部電力(株)からの報告概要 | 16 |
| 5.1.3 ひび等の発生原因推定に関するJAEAからの報告概要 | 17 |
| 5.1.4 ひび等発生原因の推定(当院の評価) | 17 |
| 5.2 安全性に関する評価 | 19 |
| 5.2.1 東京電力(株)による評価 | 19 |
| 5.2.2 当院の見解 | 19 |
| 5.3 制御棒の不具合に関する国内外の過去事例 | 20 |
| 5.3.1 過去にハフニウム板型制御棒で発生した事例 | 20 |
| 5.3.2 他の型式の制御棒で発生した国内の過去事例 | 21 |
| 5.3.3 制御棒に関する国外事例 | 21 |
| 5.4 欠損部が炉内に残留する場合の技術的検討 | 22 |
| 5.5 品質保証の観点からの検証 | 22 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 6. 今後の取り組み..... | 24 |
| 6.1 短期的取り組み..... | 24 |
| 6.2 中長期的取り組み..... | 24 |
| 6.2.1 ハフニウム板型制御棒の設計変更..... | 24 |
| 6.2.2 技術基準等に関する検討..... | 25 |
| 6.2.3 機器等の照射劣化に関する知見の継続的拡充..... | 25 |
| 7. まとめ..... | 26 |
| 参考資料..... | 28 |

1. 本報告書の位置付け

平成18年1月18、19日に、原子力安全・保安院(以下「当院」という。)は、東京電力(株)から、福島第一原子力発電所6号機(以下「1F6」という。)のハフニウム板型制御棒のひび及び欠損の発生について報告を受けた。

これを受け、当院は、沸騰水型原子力発電所(BWR)を所有する事業者(以下「BWR事業者」という。)に対し、使用中及び使用済みの同型制御棒に係る点検等を行う指示を行った。当院の指示により、BWR事業者において点検を行ったところ、多数のひびの発生が確認される事態となった。

当院は、本件事象を沸騰水型原子力発電所で使用されるハフニウム板型制御棒に共通する重要な問題として捉え、東京電力(株)に本件事象の発生原因等について解明するよう指示を行うとともに、自らも、1F6でひび等の発生したハフニウム板型制御棒の試料を得て、その破面観察等の分析調査を(独)日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」という。)において実施するとともに、国内外における制御棒の不具合事例の調査及び当該制御棒の構造解析等を(独)原子力安全基盤機構(以下「JNES」という。)において実施することとした。

また、本調査の過程において、中部電力(株)浜岡原子力発電所3号機(以下「浜岡3号」という。)の使用済みの同型制御棒13本にも同様のひびが発見されたため、当院は、同社に対し、原因究明等を指示した。

本報告書は、事業者が実施した調査結果、これに対する調査過程の妥当性も含めた検証、さらに、当院がJAEA等に依頼して実施した独自の分析結果を踏まえ、原因究明の結果を示すとともに、事業者による本件事象の解明に係る報告の妥当性を評価し、併せて、今後の取り組み方針について示したものである。また、本原因究明調査に当たっては、計画段階から専門家の意見を聞いて実施した。

2. 本件に係るこれまでの経緯

当院は、東京電力(株)から1F6の定期事業者検査の状況について、平成18年1月18、19日、以下の内容の報告を受けた。

- (1) 1F6の定期事業者検査期間中に制御棒の外観確認を行ったところ、1F6で使用していた全17本のハフニウム板型制御棒のうち、9本に複数のひびが確認された。
- (2) そのうち1本については、欠損部を含む破損があることが確認された。

当院は、上記報告内容が安全上重要な機器である制御棒に係る事象であることにかんがみ、東京電力(株)に対して、電気事業法第106条(報告徴収)の規定に基づき、次の項目について調査を実施し、その結果を速やかに報告するよう指示を行った。

ひび及び破損(以下「ひび等」という。)の状況及び発生原因
ひび等が確認された制御棒の製造及び中性子照射量等を含む運転の履歴
ひび等が確認された制御棒の健全性評価及び技術基準適合性を含む安全性の評価

また、沸騰水型原子力発電所を所有する事業者(東京電力(株)を含む。)に対して、次の項目の調査及び点検等を実施し、その結果を報告するよう指示を行った。

ハフニウム板型制御棒の使用の有無等
ハフニウム板型制御棒を使用している場合にあっては、その健全性確認
・ 現在運転中の原子炉にあっては、ハフニウム板型制御棒について速やかに動作確認を行うこと等により、その機能について確認すること。
・ 現在停止中の原子炉においては、ハフニウム板型制御棒についてひび及び破損の有無について確認すること。

その後、当院は、2月1日、東京電力(株)から、ひび等の形状、製造・運転履歴及び健全性評価の状況並びに本件が原子炉等規制法に基づく報告対象事象に該当するとの報告を受けた。

また、当院が、1月19日付でBWR事業者に対して、同型の制御棒の点検等を実施するよう指示したことについて、2月1日までに、運転中の全プラントで使用しているハフニウム板型制御棒の挿入性に問題がないこと、使用済燃料プールに保管されている使用済みのハフニウム板型制御棒についてひびが確認されたこと等の途中結果報告をBWR事業者から受けた。

2月3日、当院は、東京電力(株)からの報告及びBWR事業者に対して、同型の制御棒の点検等を実施するよう指示した件に対する結果を踏まえ、専門家の意見も聴きつつ、同時点で評価した結果、東京電力(株)を始めとした他の同型の制御棒を使用している事業者に対し、同制御棒の中性子照射量が一定レベル以上のものについては、全挿入位置で使用するよう指示を行った。

また、東京電力(株)による原因究明のための調査並びに各事業者による使用中及び使用済みのハフニウム板型制御棒の点検は、引き続き行われているものの、当院において、

事業者が行う調査等とは別に、専門家の意見を聴き、JNES及びJAEAの協力も得つつ、独自に詳細な原因究明を行うこととした。

その後、当院は、BWR事業者から、使用中及び使用済みの同型制御棒についての点検結果の報告を受け、それらについて、2月28日、3月3日及び28日に公表した。

また、当院は、3月3日、東京電力㈱から、福島第一原子力発電所3号機(以下「1F3」という。)において、使用中の同型制御棒全18本のうち、5本にひび等が確認されたとの報告を受けた。

5月26日、当院は、東京電力㈱及び中部電力㈱から、原因究明等に係る報告書の提出を受けた。

3. ハフニウム板型制御棒の概要及び規制等

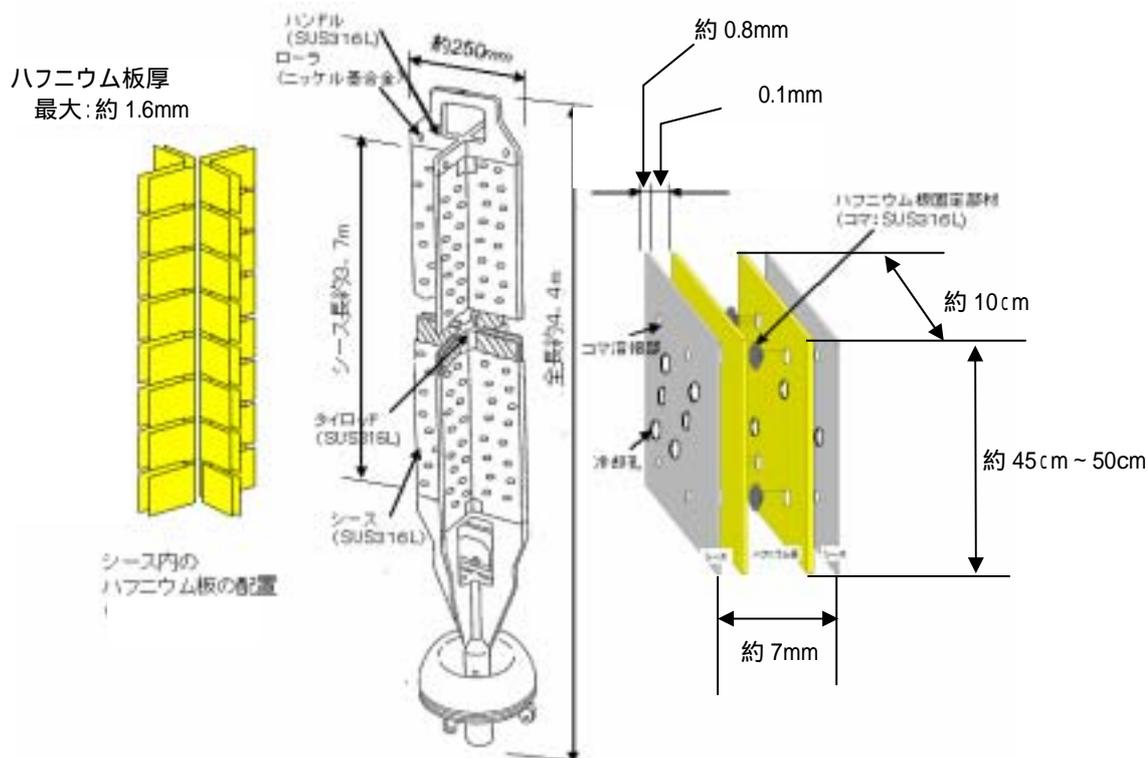
3.1 ハフニウム板型制御棒の概要

沸騰水型原子炉の出力調整は、短期的には原子炉再循環ポンプにより冷却水流量を増減させることにより行い、長期的には制御棒による原子炉内の中性子数を調整して反応度を制御することで行われる。そのため、一部の制御棒は運転中に原子炉内に部分的に挿入されることとなり、このような状態で使用される制御棒については、その寿命が問題となる。

従来のボロン・カーバイト型制御棒(以下「B₄C型制御棒」という。)では、このような使用環境では、核的寿命から1サイクル程度しか使用に耐えない。そのため、取替本数を減らし放射性廃棄物の発生を低減する観点から、長期間の中性子吸収性能を持ち続けるハフニウムを中性子吸収材として用いる制御棒が開発された。これまでに、ハフニウムを用いた制御棒として、ハフニウム板型制御棒、ハフニウム棒型制御棒、ハフニウム・フラットチューブ型制御棒、ハイブリッド型制御棒が開発されている。

ハフニウム板型制御棒は、我が国独自の制御棒で、平成元年から導入が始まり、これまで日本原子力発電(株)、東北電力(株)、東京電力(株)及び中部電力(株)で平成18年1月現在、それぞれ9本、82本、373本及び125本、合計589本の使用実績がある。【参考1】

ハフニウム板型制御棒は、ハフニウム板を、ハフニウム板固定部材(以下「コマ」という。)をシースに溶接することにより固定する構造となっており、ハフニウムの照射成長等を考慮し、ハフニウム板はコマともシースとも溶接されていない。また、シースとタイロッドはスポット溶接により接合されている。



【図1】 ハフニウム板型制御棒の構造

3.2 ハフニウム板型制御棒に関する法律上の位置付け

新しい制御棒を原子力発電所で採用する際には、原子炉設置(変更)許可、工事計画認可、使用前検査を経て使用が開始される。

また、使用開始後においては、制御棒の挿入性として、制御棒が常駆動できること及び原子炉スクラム時に、一定時間内に挿入できることを担保することを目的に、定期事業者検査等において確認しつつ使用されている。

ハフニウム板型制御棒についても、これらの段階を経て使用されているが、いずれの段階においても、今回確認されたシースを水平方向に横断するひび又はタイロッドが破断するようなひびは発生しないことを前提としており、そのようなひびがないことを直接確認することによって制御棒のスクラム時挿入性を担保するような管理はされていなかった。

3.2.1. 原子炉設置許可

ハフニウム板型制御棒の採用に当たっては、原子炉設置(変更)許可の段階で、発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針等で要求される事項(機械設計、核的設計等)への適合性について審査が行われている。

3.2.2. 工事計画認可

工事計画認可の段階では、当該制御棒に係る工事計画書、熱出力計算書、制御能力についての計算書、耐震性についての計算書及び図面等から発電用原子力設備の技術基準を定める省令(以下「技術基準省令」という。)に適合しないものでないことが確認されている。また、前述の原子炉設置(変更)許可時の内容と整合するものであることが確認されている。

3.2.3. 使用前検査

使用前検査の段階では、その工事が、認可を得た工事計画に従って実施されていること及び当該制御棒が技術基準に適合していることを確認するため、工事の工程ごとに次の検査を実施している。

構造、強度又は漏えいに係る検査

ハフニウム板材について、材料検査証明書により組成を確認するとともに、各構成部品の寸法が工事計画どおりであるか確認する。

原子炉が臨界に達する段階に係る検査

全燃料を装荷した状態において、最大価値を有する制御棒を引き抜いた状態で、原子炉が臨界未満であることを確認する。

工事の計画に係るすべての工事が完了した時に係る検査

通常運転状態において、原子炉熱出力、最大線出力密度及び最小限界出力比を確認することにより、制御部が機能することを確認する。

3.2.4. 保安規定に基づく確認

通常運転中は、制御棒が動作可能であることについて、毎月1回、制御棒の位置を1つずつ挿入・引抜させることにより確認を行っている。

3.2.5. 定期事業者検査等

事業者は、通常、13ヶ月ごとに原子炉を停止して実施する定期事業者検査において、制御棒駆動系に係る検査を実施している。各BWR事業者は、定期事業者検査実施計画の中で、制御棒の常駆動確認検査及び緊急挿入検査を行うこととし、一定時間内に挿入できることについて確認しており、当院は、このうち緊急挿入検査について、定期検査として立会い、確認を行っている。

制御棒の外観を直接確認する検査については、同型制御棒の導入の際に、照射実績に応じて点検を実施している時期はあったが、この点検によりひび割れがないことを確認して以降は、外観を直接確認する検査を計画的に実施している事業者はなかった。

3.3 ハフニウム板型制御棒に関する事業者の管理

制御棒については、原子炉設置(変更)許可及び工事計画認可で認められた範囲内で性能が保たれるよう、事業者が適切に管理する必要がある。

制御棒の取替については、通常、機械的寿命と核的寿命のどちらか早い方をその寿命として取替を行っている。B₄C型制御棒については、ボロンが中性子を吸収する際の反応によってヘリウムガスを発生し、これにより被覆管内の圧力が上昇するため、この観点から機械的制限により寿命が定められている。

ハフニウムを用いた制御棒については、ハフニウムの中性子吸収によるガスの発生がなく、それによる制御棒変形の可能性がないと評価されることから、機械的制限による寿命は特段定められていない。

一方、核的寿命については、制御棒価値の劣化が、炉心特性に影響を与えない時点で取り替えることが望ましいとの考え方から、制御棒有効長さを4等分し、いずれかの区間で中性子吸収能力が初期値から10%減少した時を取替の目安としていた。実質的には、ハフニウム板型制御棒は、B₄C型制御棒よりも3倍程度寿命が長いとされている。

ハフニウム板型制御棒の具体的な取替目安としては、メーカーによりその推奨値($9.0 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$)が定められている。東京電力(株)は、炉内におけるステンレス鋼の中性子照射実績に余裕をみて、メーカー推奨値より厳しい熱中性子照射量($6.0 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$)を取替目安として採用していた。

東京電力(株)は、同型制御棒の導入に当たっては、まず代表プラントで導入を開始し、照射実績に応じた制御棒の健全性を確認しつつ、段階的に導入を拡大してきており、取替目安付近に至るまで、制御棒21本(のべ35本)について点検を実施し、ひび等の異常が無いことを確認した上で、全社的に導入を拡大してきた。

3.4 他のハフニウム制御棒の利用状況

現在国内で用いられている、中性子吸収材としてハフニウムを用いた制御棒には、ハフニウム板型その他、ハフニウム棒型、ハフニウム・フラットチューブ型、ハイブリッド型があり、これらについては、それぞれ、平成2年、平成9年、平成2年から使用されてきている。これらの制御棒は、中性子吸収材としてハフニウムを用いたものであるが、その構造は、ハフニウム板型制御棒とは異なるものである。なお、これら制御棒の導入の際にも、ハフニウム板型制御棒の導入の手順と同様に、事業者が代表プラントを定めて段階的に点検を実施し、ひび等の異常のないことを確認しながら、装荷の継続、採用号機の拡大が行われてきている。【参考2】

4. ひび等の状況とこれまでの対策

4.1 これまでの経緯及び対応

4.1.1 事業者からの中間報告等の概要

(1) 東京電力(株)からの中間報告の概要

当院は、2月1日、東京電力(株)から、以下の内容について報告を受けるとともに、本件が原子炉等規制法に基づく報告対象事象に該当するとの報告を受けた。

定期検査中の1F6は、1月9日、制御棒の動作確認の準備作業中、ハフニウム板型制御棒1本の表面にひびらしきものを確認したことから、同型の制御棒(全17本)について外観点検を行い、9本の制御棒のシース部及びタイロッド部にひび(うち1本はめくれ)を確認。めくれについては、運転停止後の制御棒再挿入時に発生したものと推定。

また、使用済燃料プールに保管されている使用済みのハフニウム板型制御棒について、福島第一原子力発電所5号機(以下「1F5」という。)(8本)及び柏崎刈羽原子力発電所2号機(以下「KK2」という。)(2本)でひびがあることを確認。

調査の結果、ひび等は、現在装荷されているハフニウム板型制御棒17本のうち中性子照射量の高い9本で発生。

また、これらひびの発生した制御棒は、寸法安定性に係る技術基準に適合していないと判断されるが、モデルを用いた解析の結果、耐震性、制御能力及び未臨界性について機能は維持されていると評価。今後、原因調査を行い、改めて国に報告する予定。

(2) BWR事業者からの点検結果報告の概要

当院が、1月19日付でBWR事業者に対して、同型の制御棒の点検等を実施するよう指示したことについて、2月3日までに、BWR事業者から受けた報告は以下の通り。

運転中のプラント

同時点で運転中の13基で使用しているハフニウム板型制御棒に対して、挿入確認を行った結果、当該制御棒の挿入性に問題はないことが確認された。

制御棒の点検について

ハフニウム板型制御棒の使用実績のある23プラントにおいて外観点検を実施中であり、これまでに、使用中の制御棒31本のうち9本及び使用済みの制御棒129本のうち26本について、ひびを確認。

4.1.2 事業者からの中間報告等に対する当院の見解

- (1) 東京電力(株)からの中間報告について、当院として、機械工学、材料工学等の専門家の意見を聴きつつ評価した結果、通常、接続されていないハフニウム板とシースが固着(接続)していることは確認されていないので、構造健全性が維持されるとする東京電力(株)の評価の妥当性を確認することは同時点では困難。

- (2) 運転中のプラントのハフニウム板型制御棒の機能については、全挿入試験の結果により、当面問題ないことを確認。また、同時点までのところ、ハフニウム板型制御棒のひび等は、 $4.4 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 以上の熱中性子照射量を受けたものの一部で発生していることを確認。
- (3) ひび等の要因には熱中性子照射量が関係しているとみられるが、同時点では原因究明がなされていない。これを踏まえ、これまで得られた事業者からのデータに基づき保守的に評価した結果、ひび等が発生している制御棒については、スクラム時挿入性等が必ずしも明らかでないことから、熱中性子照射量が $4.0 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ を超えたハフニウム板型制御棒については、制御棒の構造健全性が原子炉の制御に影響を与えない全挿入位置にして運転することが構造健全性も含めた安全確保上必要であると判断。

4.1.3 中間報告等を踏まえた対応

これを踏まえ、2月3日、当院は、本件事象に対する原因究明及び再発防止対策の検討を行い、その結果に基づき、当院が本指示を解除又は別途指示するまでの間、ハフニウム板型制御棒を使用しているBWR事業者(東京電力(株)、東北電力(株)、中部電力(株)、日本原子力発電(株))に対し、以下の指示を行った。

熱中性子照射量が $4.0 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ を超えたハフニウム板型制御棒は、原子炉運転中は全挿入位置とすること。また、運転中に上記照射量を超えるものにあつては、上記照射量に達した時点で全挿入位置とすること

の条件を履行するための計画を速やかに策定の上、措置を実施し、その結果を平成18年2月7日までに報告すること。

4.1.4 一部制御棒挿入後の炉心の安定性

4.1.3の指示に基づき一部制御棒の全挿入を実施したプラントは7基であった。これらプラントに係る制御棒挿入後の炉心の安定性については、各事業者により、制御棒挿入前に炉心安定性及び領域安定性の安定性減幅比が、原子炉設置(変更)許可時の評価基準(限界基準)を満足することが確認されている。当院においても、事業者の評価結果を確認している。

さらに、これら事業者による評価に関し、JNESにおいて、今回の制御棒挿入により設置(変更)許可時に比べ、最も条件が厳しくなるプラントを対象として、事業者が用いたものとは異なる安全性解析コードを用いてクロスチェックを行った結果、限界基準に対して十分余裕があることを確認した。【参考3】

4.2 福島第一原子力発電所3号機におけるひび及び破損の発生状況

2月21日に停止した1F3において、使用中のハフニウム板型制御棒全18本について点検を行った結果、うち1本のタイロッド及びシースにひびが確認されるとともに、シースの一部が破損し欠損部があることが確認された。また、その他4本のシースにひびが確

(2) タイロッドのひび

シースにひびが確認された制御棒のうち、タイロッドにおいてもひびが確認されたものがあった。使用中のものについては10本(1F6の9本、1F3の1本)、使用済みのものについては17本(1F5の5本、浜岡3号の12本)であった。いずれも、シースのひびと同様、制御棒上部1/4程度の部分で発生していた。

(3) シース部のめくれ及び欠損

シースにひびが確認された制御棒のうち、1F6の1本、1F3の1本について、シースの欠損が確認された。欠損部の大きさは、1F6については、幅約8cm×縦約11cm、1F3については、幅約7cm×縦約3cmであった。なお、事業者によれば、1F6の欠損部については、全量回収されているが、1F3については、一部(約0.4cm×約1.0cm、約0.2cm×約1.0cm)回収されていない。

また、浜岡3号において、シースにひびが確認された使用済み制御棒のうち2本について欠損部が確認された。これらは、それぞれ、幅約3.5cm×縦約1cm、幅約3cm×縦約1.5cmであった。なお、事業者によれば、これら欠損部については、これまで回収されていない。

5. 技術的検討

5.1 ひび等の発生に関する原因の推定

5.1.1 ひび等の発生原因推定に関する東京電力㈱からの報告概要

東京電力㈱は、当院が1月19日に行った原因究明等に係る調査及び報告の指示に対し、2月1日に、ひび等の形状等に関する報告を提出しているが、5月26日、当院に対し、以下の内容を含む最終報告書を提出した。

東京電力㈱は、1F6及び1F3で発生したひび等についての原因究明のため、熱中性子量を含む関連パラメータとの相関整理、製造履歴・運転履歴調査、モックアップ試験の実施、プラントのプール内におけるオンサイト試験、ひびが確認された制御棒から切り出した試料を用いた照射後試験施設における調査、ひびの進展解析調査等を実施した。

これらから得られた知見を踏まえ、東京電力㈱においては、ひび等の発生原因について、以下の通り推定している。

(1) タイロッド及びシース部のひびの発生・進展原因

SUS316L材は、高速中性子照射量 $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 程度で照射誘起応力腐食割れ(IASCC) (注)感受性を有するようになること及び、シースとハフニウム板の間のギャップにおいて、腐食生成物が堆積してすき間環境となりやすいことから、シース裏面には粒界腐食が生じやすくなる。この結果、コマ溶接部近傍並びにスポット溶接部近傍については、溶接残留応力により微小なひびが生じる可能性がある。また、すき間部については、ひびの起点となりうる粒界腐食も発生する。

一方、シースとハフニウム板の間のギャップにおいては、冷却材の沸騰による原子炉水の濃縮、並びにシース、ハフニウム板の腐食等により、腐食生成物が蓄積していく。このため、ある程度照射が進むと、ハフニウム板の摺動抵抗(すべり難くする力)が増加する結果、ハフニウム板の照射成長に伴い、シースには制御棒の軸方向に引張応力が生ずる。

この結果、において発生していたコマ溶接部近傍のひびを起点として、IASCCによりシースの水平方向に大きなひび(シースのひび)が進展した。

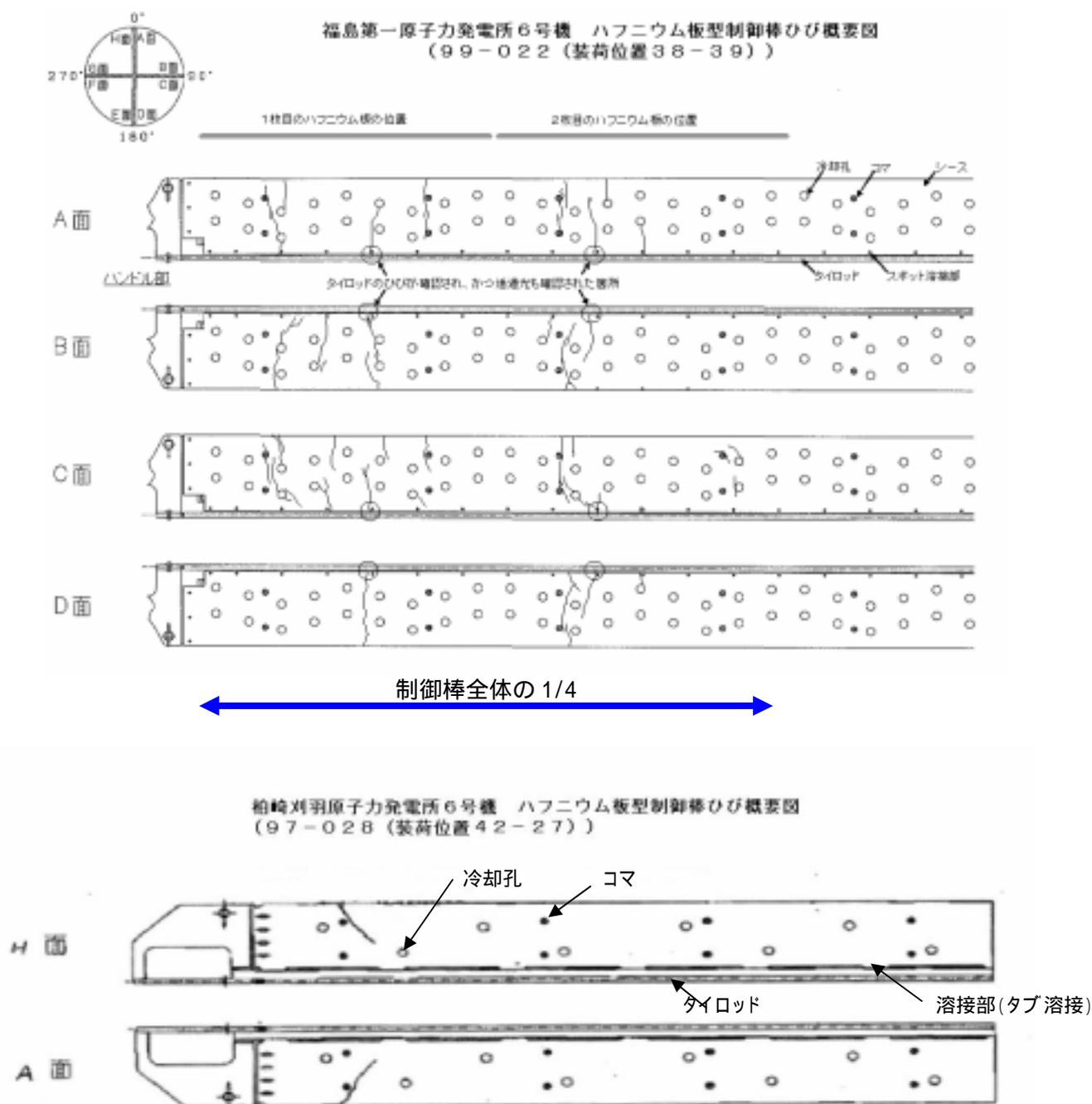
なお、KK6の制御棒については、シースの斜め方向に進展するひびが多く確認されているが、KK6の制御棒は、他の号機の制御棒とシースとハンドル/タイロッドの固定方法等が異なることにより、シースのひびが斜めに進展する可能性もあることを解析により推定した。

(注)照射誘起応力腐食割れ(IASCC)

軽水炉の炉内構造物に用いられているオーステナイト系ステンレス鋼が、特定の腐食環境下において引張応力が共存する状況で、高い積算中性子照射量を受けた場合に割れを発生する現象。

ハフニウム板の照射成長に伴い、シースのひびが大きく進展すると、シースとタイロッドのスポット溶接部を介して、タイロッドに引張応力が働くことになる。このとき、既にタイロッドには、シースとのすき間部にスポット溶接の残留応力に起因したIA SCCによるスポット溶接部近傍のひびあるいは粒界腐食が発生していることから、タイロッドに働いた引張応力により、これを起点としてひびが進展し、タイロッドのひびを生じさせたものと考えられる。

なお、粒界腐食による微小なひびはスポット溶接部と関係なく存在することから、タイロッドに働く引張応力により進展するタイロッドのひびは、1F6及び1F5の制御棒で確認されたようにスポット溶接部近傍で発生する他、1F3及び1F5の制御棒で確認されたようにスポット溶接部近傍以外でも発生し得る。



【図2】 シースのひび状況の例

(2) シース部のめくれ及び欠損の発生原因

めくれが生じた部位において、破面上にディンプル(延性破面)が観察されたことから、めくれは粒界割れによって自然にはく離したのではなく、制御棒の挿入又は引抜き時に周囲の機器と接触して制御棒の軸方向の力が負荷されることにより、シースのひびがめくれて、はく離したと推定される。

なお、1F6におけるシースの破損については、破面に金属光沢が認められており、また停止後の駆動試験において初めて駆動に異常が認められたことから、今回の原子炉停止後の制御棒動作確認において発生した可能性が考えられる。

また、1F3については、破面に金属光沢が認められないことから、明確なシースの破損時期の特定には至らなかったが、当該制御棒は前回定期検査時に制御棒装荷位置を変更しており、今回シースの脱落片は、同検査後に装荷されていた制御棒駆動機構内で回収されたことから、シースの脱落は、前回定期検査時における制御棒駆動試験又は、運転時の制御棒の動作確認試験等で発生した可能性が考えられる。

5.1.2 ひび等の発生原因推定に関する中部電力㈱からの報告概要

中部電力㈱においては、主に、製造履歴・運転履歴調査、プラントのプール内におけるオンサイト試験等を実施した。中部電力㈱から受けた結果のポイントは以下の通り。

ひび割れの特異性調査から、高速中性子照射量が高いところでは腐食生成物の付着が多く、結果として腐食生成物の付着が摺動抵抗に影響していると推定。また、ハフニウム板の伸び率は、高速中性子照射量に依存し、高速中性子照射量が高くなるほど、伸び率も大きくなる傾向を確認。また、ハフニウム板とコマ部は、荷重伝達経路として有効であることを確認。

SUS316L材は、高速中性子照射量 $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 程度でIASCC感受性を有すること及び、シースとハフニウム板の間のギャップにおいて腐食生成物が堆積してすき間環境となりやすいことから、シースの裏面には粒界腐食が生じやすくなる。このような粒界腐食に、溶接残留応力、ハフニウムの照射成長による応力、腐食生成物の体積変化による応力等が作用して、コマ溶接部近傍等にIASCCによるひび割れを生じさせた可能性がある。

一方、ある程度照射が進むと、ハフニウム板の摺動抵抗が増加する結果、ハフニウム板の照射成長に伴い、シースには制御棒の軸方向に引張応力が生じる。

この結果、 において発生したコマ溶接部近傍等のひびを起点として、IASCCにより、シースの水平方向に大きなひび割れが進展したものとする。

また、タイロッドを貫通するひび割れは、タイロッドのスポット溶接部近傍に生じた微小なひび割れが、シースのひび割れ進展に伴い、タイロッドのスポット溶接部を介してタイロッドに引張応力が働いたため、生じたものと考えられる。

5.1.3 ひび等の発生原因推定に関するJAEAからの報告概要

当院は、本事象の原因究明に当たり、東京電力㈱から、1F6で発生したハフニウム板型制御棒のひび部の試料のうち2片の提供を受け、その破面観察等の分析調査をJAEAに依頼して、独自の分析を実施した。

JAEAにおいては、同試料について、外観観察、表面観察、破面観察、断面観察、元素分析、硬さ測定を実施した。また、併せて、当院から、JAEAに対し、東京電力㈱における照射後試験施設における調査作業への立会い、東京電力㈱及び中部電力㈱におけるオンサイト試験における調査作業への立会い、並びに、東京電力㈱の調査作業により得られたデータの分析を依頼した。

東京電力㈱が照射後試験施設において実施した調査作業については、JAEAの専門家により、適切に実施されたことを確認した。

東京電力㈱及び中部電力㈱がオンサイトで実施した試験については、JAEAの専門家及び現地の原子力保安検査官により、その作業が適切に行われたことを確認した。

また、東京電力㈱及び中部電力㈱が実施した調査作業から得られたデータの分析が適切であることを、JAEA及びJNESの専門家が確認した。

JAEAが実施した試料の分析、東京電力㈱の調査作業により得られたデータの分析、制御棒の仕様及び使用履歴、並びにひびの分布状況等の調査情報を踏まえた、ひび等発生の原因に係るJAEAの主要な見解は以下の通り。

当該制御棒のひびは、中性子照射量、破面形態、粒界偏析、照射硬化等の結果から、IASCCにより進展したと考えられる。

ひびの発生に関しては、シースとハフニウム板、及びシースとタイロッド間のすき間での腐食生成物の付着が強く関係し、そこでの粒界腐食が起因となったものと考えられる。また、コマ溶接部及びスポット溶接部における溶接残留応力の存在も、当該部位におけるひびの発生の要因であると考えられる。

5.1.4 ひび等発生原因の推定(当院の評価)

東京電力㈱及び中部電力㈱による原因分析に係る調査結果、当院がJAEAに依頼して実施した独自の分析結果を踏まえ、当院としては、今般、ハフニウム板型制御棒に発生したひび等の原因については、以下のとおり推定する。

ハフニウム板型制御棒については、その使用によって、シースとハフニウム板間、及び、シースとタイロッド間に、冷却材に含まれる鉄分等の不純物が濃縮したものやシースが腐食した腐食生成物が堆積してすき間環境となりやすく、そこでひびの起点となりうる粒界腐食が発生した。また、シース表面のコマ溶接部及びスポット溶接部の残留応力が存在する部分において、中性子照射を受けることにより、IASCCにより微小なひびが発生した。

さらに使用を継続することにより、腐食生成物の堆積が進み、もともと可動を許す設計となっていたシースとハフニウム板の間の摺動抵抗が増加した。他方、中性子照射によりハフニウム板の伸びが発生し、これら摺動抵抗の増加とハフニウム板の照射成長が相まって、シースに長手方向の引張力が生じ、もともと発生していた微小なひびや粒界腐食が、さらにこの引張力を応力源とするIASCCにより、シースを水平方向に横断するひびへと進展した。このひびは、照射を受け続けることにより、1サイクル中にも発生・進展し得る。

このような応力は、1枚のハフニウム板上のシースで発生するものであり、隣接するハフニウム板間に相当する部分のシースには発生しないため、その部分に水平方向に横断するようなひびが生じるとは考えられない。ひびが制御棒上部で多く観察されたのは、当該部の中性子照射量が高いためである。

タイロッドについても、スポット溶接部の残留応力に起因するIASCCによる微小なひびや、シースとのすき間部における腐食生成物の付着に関係する粒界腐食が発生し、ハフニウムの照射成長によりシースのひびが大きく進展することにより、シースとタイロッドのスポット溶接部を介してタイロッドに引張力が発生し、これら微小なひび等がタイロッドが破断するようなひびへと進展した。

シースのめくれ及び欠損については、上記要因によりシースにひびがある状態で、制御棒動作時、周囲の機器との干渉により発生した。

ハフニウム板材の種類の違いにより、照射成長量に差がみられ、ひびの発生程度についても差がみられたが、材料の製造履歴や特性等の観点からはその要因は明確にはなっていない。また、プラントにより、ひびの発生程度等に差があり、運転履歴や水質管理等関連し得るパラメータとの相関を求めたが、その要因については明確にはなっていない。

東京電力(株)及び中部電力(株)による作業は適切に行われたことが確認されていること、事業者からの報告内容について、特段疑義のある点が認められなかったこと、更には、当院がJAEA等に依頼して実施した独自の分析結果を踏まえれば、事業者の原因推定は妥当であると判断する。

これまでの工学的知見により、シースに用いられているSUS316系ステンレス鋼においてIASCC感受性が高まるとされるしきい値は高速中性子量で $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ とされている。また、今回の調査により、ハフニウム板の成長は中性子照射量増加に伴って増加し、特に、高照射領域では大きな増加傾向が見られること、腐食生成物の堆積は照射が高いところでは多いことが判明した。以上のことから、ひびは照射量が増加することにより生じる現象であることが明らかであるが、ひびが発生するしきい値を一義的に決めることは難しい。

しかしながら、今回の原因究明により得られたひび発生メカニズムに係る知見、及び、これまでに442本のハフニウム板型制御棒の外観点検を実施した結果、ひびが認められた同型制御棒の熱中性子照射量が $4.4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 以上である事実を踏まえ、 $4.0 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 以上の熱中性子照射を受けた同型制御棒については、ひび発生の可能性があると判断する。

なお、今回の事象発生の主要なポイントとなるIASC感受性の発現やハフニウムの照射成長などは、いずれも高速中性子によって発生する現象であることが知られているが、BWRにおいては、熱中性子量と高速中性子量が良好な相関を有すること、また、BWRにおいては、通常、熱中性子を管理指標として用いていることから、本報告書の議論においては熱中性子を用いた。

5.2 安全性に関する評価

ひび等が発生した制御棒について、スクラム時挿入性及び全挿入時の耐震性の観点から検討を行った。これらに関しては、技術基準省令に、具体的な適合要求事項が規定されている。【参考6】

5.2.1 東京電力(株)による評価

東京電力(株)が5月26日に当院に提出した報告書において、以下の内容が記載されている。

1F3及び1F6においてひびの認められた制御棒に関し、構造部材であるタイロッドにひびが発生した制御棒については、タイロッドのひびによりシース面に段差を生じさせるようなひびが確認された。このことから、当該制御棒は継続使用不可能な状況にあり、物理的特性として要求されている寸法安定性を保持していないと判断される。

1F3及び1F6においてひびの認められた制御棒14本の点検結果及び、照射後試験施設での調査結果を基に、ひびの状況を保守的に模擬するため、第1ノードの2枚のハフニウム板について、1枚のハフニウム板を固定する2対のコマの間のシース及び、タイロッドが荷重伝達経路として機能しないと仮定し、地震時における構造健全性について評価を実施。

この結果、1F3及び1F6におけるハフニウム板型制御棒は、シース及びタイロッドにひびが存在した状態でもコマ部を介してハフニウム板に荷重が伝達できることから、地震時においても構造健全性が確保できることを確認。

5.2.2 当院の見解

(1) ひび等のある制御棒の挿入性について

ひび等が発生していた1F6の制御棒については、制御棒動作時に周辺の機器と干渉してめくれが発生する程度のひびが発生しており、適切な挿入性が確認できなかったことから、これらの制御棒については、寸法安定性に係る技術基準に適合していなかったと判断される。

同様に、ひび等が発生した制御棒については、スクラム時を含む挿入性が確保できていない可能性があることから、当院は、2月3日、一定以上の照射を受けた制御棒については、全挿入位置で使用することを指示した。

同指示を受け、現在全挿入位置で使用している制御棒(2F3(6本)、浜岡3号(9本))

については、ひびが発生している可能性があるが、これらについては、現在は、全挿入状態にあることから、スクラム時の挿入性を考慮する必要はない。

また、技術基準省令においても、適切な挿入がなされるよう寸法安定性に関する規定があるが、全挿入位置で使用する限りにおいて同規定に対する適合性は要求されない。

(2) 全挿入制御棒の耐震性について

東京電力(株)及び中部電力(株)が、1F6、1F3及び浜岡3号においてひびが確認された制御棒に対して行った評価が、実際に確認されたひびをより厳しく仮定した十分保守的なモデルとした上で、当該地域の最大の地震力を適用して確認する評価になっている。したがって、全挿入で用いる制御棒については、シース及びタイロッドにひびが発生していたとしても、シースとコマを介して接続しているハフニウム板が十分な強度を有し、かつ、1枚のハフニウム板を固定する上下2対のコマに挟まれた領域以外のシースの強度が保たれることから、地震時においても、反応度制御に影響を及ぼすような損壊を起こさないと判断する。

したがって、全挿入で用いられる制御棒については、適合が要求される耐震上の技術基準を満たしているものと評価する。

なお、東京電力(株)が実施したひび制御棒のモデル解析は、JNESがクロスチェックを実施した。

5.3 制御棒の不具合に関する国内外の過去事例

5.3.1 過去にハフニウム板型制御棒で発生した事例

平成15年、東京電力(株)福島第二原子力発電所3号機及び4号機、並びに日本原子力発電(株)敦賀発電所1号機において、各事業者がハフニウム板型制御棒について外観目視点検を行った結果、

ハンドル部ガイドローラ取付部近傍

ハンドル - シース溶接部近傍

シースとハフニウム板のコマ溶接部近傍

においてひびの発生を確認した。【参考7】

いずれも、中性子照射の影響によるIASCCと推定され、これらのひびは一定程度以上の進展性がなく、また、これらのひびがあったとしても制御棒の健全性に影響はないと評価された。なお、上記及びのひびは、B₄C型制御棒でも確認され、同様の評価がなされた。また、これら及びのひびは、その原因から、どの形式の制御棒であっても発生しうるものであり、実際に、これまでに、他の型式の制御棒を含め、複数の事例が確認されている。

コマ溶接部近傍のひび割れ事象は、同溶接部の残留応力を応力要因とするIASCCであり、ハフニウム板とシースとの摺動抵抗の増加及びハフニウム板の照射成長によりひびが進展したと考えられる今回の事象とは異なるものである。

コマ溶接部周辺の残留応力によるIASCCは、平成16年当時、事業者により、一定程度(水平方向の長さとして26mm程度(中心部より片側13mm))以上には成長せず、健全性に問題はないと評価されている。

同事業者の評価については、当院においても確認を行い、妥当なものとしてNISA文書に記載し、他のBWR事業者にも連絡していたところである。しかしながら、今回、同型制御棒に関する調査を進める中で、コマ溶接部周辺のひびが、当時の評価を超えて進展しているものが確認された。

このため、東京電力株は、改めてモックアップ試験等を実施し、その結果、コマ溶接部の残留応力の影響範囲が平成16年の評価時より広く、同応力によるIASCCは、水平方向の長さとして36mm程度(中心部より片側18mm)まで進展する可能性があるとして評価している。

現実的には、コマ周辺部の残留応力の影響範囲には多少ばらつきがあると考えられ、これを応力源とするひびの進展程度についても、一義的に評価できるものではない。したがって、今般のIASCCによる36mmというひびの進展値についても、ひとつの目安値として捉えることが妥当と考える。

上記考え方を踏まえ、平成16年当時、IASCCによるひびの進展が約26mmで停留するとしていたことも、あるコマについて調査をした一事例として捉えるべきものであり、当院として、これを絶対的な評価と判断したことは適切ではなかった。今後は、本事例をも教訓に、技術的評価を行う際には、専門家や専門機関の知見をも活用しつつ、一層慎重に行うこととする。

5.3.2 他の型式の制御棒で発生した国内の過去事例

今回問題になったハフニウム板型制御棒以外の型式の制御棒においても、過去に不具合事例が発生しているが、それぞれ、制御棒の型式や、使用条件、発生した事象や原因等が、今回の事象とは異なるため、今回の事象と関連するとは考えられない。
【参考8】

また、今回、ハフニウム板型制御棒で発生したひび等は、ハフニウム板型制御棒の固有のものであり、他の型の制御棒では同様の事象は発生しないと考えられる。

5.3.3 制御棒に関する国外事例

制御棒の不具合に関する事例は、米国等海外においても複数確認されているが、海外の沸騰水型原子力発電所においては、ハフニウムのみを中性子吸収材とする制御棒は用いておらず、また、今回問題になっているハフニウム板型制御棒は、国内メーカーによる、国内プラント専用のものであることから、海外の事例において、今回の事象の解明に当たり、参考となる事象は見い出されなかった。

海外の加圧水型原子力発電所については、ハフニウムのみを中性子吸収材として用いた制御棒が使用されているが、これらについては、制御棒の構造が沸騰水型のものと大きく異なること、また、原子炉の炉水環境等が異なるものであることから、これらについ

ても、今回の事象の解明に当たり、参考となる事象は見いだされなかった。

なお、海外事例において、ハフニウムの水素化によるスエリング(膨張)事象が複数報告されているが、今回の事象においては、制御棒が使用されていた環境において、水素濃度が十分低く抑えられていたこと、並びに、照射後の資料を確認したところ水素の吸収が十分に低いことが確認されており、原因とは考えられない。

5.4 欠損部が炉内に残留する場合の技術的検討

1F6、1F3及び浜岡3号において確認された欠損部については、いずれも、制御棒を動作させた際に、燃料集合体を覆うチャンネル・ボックス等の周囲の機器との干渉により発生したものと考えられる。したがって、ひびのある制御棒が全挿入状態で用いられることにより、当該状態において、シースに欠損が発生するとは考え難い。

しかしながら、制御棒の操作時に欠損が発生する可能性や、発生した欠損部について回収されていないものがあること等を踏まえ、これら欠損部の存在が、原子炉の運転に与える影響について、検討を行った。

その結果、運転中に制御棒のシースに欠損が発生しても、制御棒の周りの流速及び制御棒と燃料集合体のすき間を破片が浮上し得る最大寸法を考慮すれば、一定程度以上の大きさのものについては落下し、燃料体サポート部若しくは制御棒案内管内にとどまるものと考えられる。他方、一定程度以下のものについては、上昇流にのって炉内に混入する可能性があるが、燃料被覆管への影響、炉内構造物やポンプ等への影響、また、燃料集合体の流路閉塞等、いずれの観点からも、安全上重要な問題を生じることはないと考えられる。

5.5 品質保証の観点からの検証

今回、東京電力(株)が1F6のひび等を確認した時点で、当院へ報告を行ったこと、その後の原因究明について、調査計画段階から、当院(専門家からの意見を含む)からの指摘を適宜反映し、可能な限り、科学的・合理的な原因究明を行おうとした姿勢、さらに、試験実施段階においても、当院が独自に行う試験用サンプルの提供、事業者が行う試験に対する当院の適宜の立会を受け入れたことは、本件原因究明を迅速に行い、試験結果・プロセスについて、客観性を与え、対外的な説得力を持たせる観点から有効であり、評価できる。

他方、本件調査の過程で、1F3の制御棒において欠損部が発見され、東京電力(株)は、当該欠損部に該当する全量の破片が回収されたとしたが、その後、追加の破片が回収され、当初の判断が訂正された。当初、より注意深い対応を実施していれば、誤った判断を防ぎ得たと考えられ、当院から事業者に対し、より慎重な対応を行うよう要請した。

また、平成16年に、ハフニウム板型制御棒及びB₄C型制御棒で発見されたひび等を踏まえ、一層の情報収集等が望ましいとして当院が発出した「沸騰水型原子炉における制御棒ひび発生事象について」(一般参考情報)を踏まえ、事業者において、経年劣化データの継続的蓄積、点検頻度、点検方法の妥当性に係る検証等をより真摯に実施していれば、より早い段階で同型制御棒のひびに関する問題解決に向けて対応が出来ていた

可能性があった。

本件については、当院としても、詳細に事業者の対応を把握しておくべきであったと反省し、今回の事象を踏まえた今後の対応に当たっては、同事例をも教訓にして、定期的に事業者の取組状況を確認する等、より適切な対応をしていくこととする。

また、調査を進める中で、中部電力㈱から、「ハフニウム板型制御棒の導入段階における制御棒の外観点検の結果に関し、過去において水平方向に筋模様が見られるものがあり、その形状は、今回確認されたひび割れの形状とほぼ一致した」旨の報告がなされた。

当該外観点検が実施された平成7年当時は、今回1F6等で確認された水平方向に進展するひびに関する知見もなく、また、品質保証活動についても、現在と異なり、保安規定に基づく義務付けがされていなかった。しかしながら、当時の事業者の点検結果の評価方法については問題があったことを指摘する。

事業者は今後の制御棒の外観点検を、定期事業者検査において実施し、これら過去の教訓をも踏まえて一層の慎重と期すとともに、先入観にとらわれず、絶えず安全を問いかける姿勢をもって対応を実施すべきである。

6. 今後の取り組み

6.1 短期的取り組み

今回の事象は、中性子照射の影響により発生・進展するものであることが判明し、 $4.0 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 以上の照射を受けた同型制御棒については、ひび発生の可能性があると判断した。同時に、このようなひびがあっても、全挿入位置で使用する場合にあっては、反応度制御に影響を及ぼすような損壊は起こさないと判断されることを踏まえ、以下の対応を行う。

当院が本年1月19日に発出した指示（平成18・01・19原院第1号）記2（1）の後段「現在運転中の原子炉にあっては、至近の定期事業者検査において当該制御棒のひび及び破損の有無について確認し、その結果を報告すること。」及び2（2）「現在停止中の原子炉においては、ハフニウム板型制御棒についてひび及び破損の有無について確認し、その結果について報告すること。」（いずれも、これまでに当該指示に係る対応を実施していない場合に限る）、並びに、本年2月3日に発出した指示（平成18・02・03原院第1号）記1「熱中性子照射量が $4.0 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ を超えたハフニウム板型制御棒は、原子炉運転中は全挿入位置とすること。また、運転中に上記照射量を超えるものにあつては、上記照射量に達した時点で全挿入位置とすること。」を引き続き維持する。

また、同型制御棒について、毎定期事業者検査時に全数外観点検することを指示する。

他方、このような制限の下での使用は、中性子吸収能力の高いハフニウムの物性を生かし、放射性廃棄物を減ずる観点をも含めて、長寿命型制御棒として設計した同型制御棒の意義を損なうものであり、そもそも、本来の使用形態と異なるものである。したがって、事業者に対し、出来るだけ早く、このような使用形態を回避するよう努力を求める。

なお、上記の指示については、今後引き続き得られる情報により、追加・変更を行うことがあり得る。

6.2 中長期的取り組み

ハフニウム板型制御棒については、今回確認されたひび等が、同制御棒の構造上から避け難いと考えられることから、今後の取扱いについて6.1の指示をするものである。他方、今回の事象に関する原因究明作業及び規制上の取扱いを議論していく中で、事業者あるいは当院が、今後、検討していくことが必要と認められる課題が見い出された。これらは短期的取り組みと関連するものではあるが、別途、中長期的課題として検討を進めていくべきものとする。これらの諸点について以下に整理する。

6.2.1 ハフニウム板型制御棒の設計変更

今回の原因究明により、問題となったハフニウム板型制御棒については、使用時ににおいてシースとハフニウム板の固着が発生する等、設計時に考慮されていない要因が明らかになった。

事業者においては、今回の事象の再発を防止するため、製造メーカーとも協力し、ハフニウム板型制御棒の設計変更など、より安全性の高い制御棒の設計・製造・調達について検討すべきである。

6.2.2 技術基準等に関する検討

当院においては、制御棒に適用される技術基準、特に構造健全性の観点からの基準について、より明確なものとするべく検討を進める。

6.2.3 機器等の照射劣化に関する知見の継続的拡充

もとより原子炉で用いられる機器の照射劣化に関する継続的な研究を進めるとともに、実機から得られるデータとも組み合わせ、機器の照射劣化に関する知見を継続的に高めることが必要である。特に、今回問題になった制御棒については、その損傷メカニズムを踏まえたハフニウムを含む材料の照射特性の把握、照射下における腐食の進展把握を行うことが必要である。

これまで、当院としては、未解明の劣化事象を解明し、科学的・合理性のある保守管理を行うため必要となる規格・基準の整備等を進めるため、安全研究を推進してきた。このような中、当院としては、大学等の研究機関、事業者等の連携協力により、劣化メカニズムの解明等の研究を推進するため、材料研究分野の拡充を目指す所存である。

また、上記、未解明劣化事象の解明については、実機から得られるデータと、実験により得られる研究成果を合わせて研究を進めることが有効である。今回の調査を進める中で、事業者において、経年劣化データの継続的蓄積、点検頻度、点検方法の妥当性に係る検証等を真摯に実施していなかった事実が確認された。今後、知見を拡充し、制御棒に係るトラブルを未然に防ぐ観点から、事業者は、科学的合理性のある計画を策定し、計画的に外観点検を実施し、産学官連携による研究へのデータ提供を行うとともに、BWR オーナーズグループ等の事業者間協力体制を通じ、知見の共有化を図ることが必要である。

なお、材料劣化等の研究を効率的に進める観点から、産業界及び国において、材料試験炉等の施設の活用、維持、整備等についても検討を進めるべきである。

7.まとめ

1F6等において発生したひび等に関し、原因究明及び再発防止に係る調査等を実施し、当院としてここに報告書を取りまとめた。

今回問題となったハフニウム板型制御棒は、国内BWR全32プラントのうち、23プラントで使用されている制御棒である。現時点までに、同型制御棒442本について調査を行ったところ59本においてひびが確認された。当院は、本トラブルをBWRで使用されるハフニウム板型制御棒に共通する重要な問題として捉え、事業者に対し、本件事象の発生原因等について解明するよう指示を行うとともに、自らも、1F6でひび等の発生したハフニウム板型制御棒の試料を得て、JAEA、JNESの協力を得て原因究明を実施した。

ハフニウム板型制御棒においては、その使用によって、シースとハフニウム板間、及びシースとタイロッド間において腐食生成物が堆積してすき間環境になりやすく、そこでひびの起点となりうる粒界腐食が発生した。また、コマ溶接部及びスポット溶接部の溶接残留応力が存在する部分において微小なひびが発生した。

さらに、これら要因により発生したひびや粒界腐食が、シースとハフニウム間の摺動抵抗の増加と、ハフニウム板の照射成長との複合要因により発生した応力下で、IASCCにより進展したものと推測される。したがって、本トラブルはハフニウム板型制御棒に固有の問題と結論付けられる。

原因究明により得られたひび発生メカニズムに係る知見及びこれまでの調査の結果、ハフニウム板型制御棒のひび等は、 $4.4 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 以上の熱中性子照射量を受けたものの一部で発生している事実を踏まえ、 $4.0 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 以上の熱中性子照射を受けた同型制御棒については、ひび発生の可能性があるかと判断し、全挿入位置とすることを指示するとともに、同型制御棒の定期事業者検査における全数外観点検指示を行った。これらの指示については、今後引き続き得られる制御棒に関する情報により、追加・変更を行うことがあり得る。

ハフニウム板型制御棒については、その構造上、使用の継続により、今回確認されたひび等の発生・進展が避け難い。当面使用する場合には、すでに述べた使用制限等に対する対応を絶えず求められ、事業者においては、出来るだけ早く、このような使用形態を回避するよう努力を求める。同時に、今回の作業を通じ、中長期的に取り組むべき課題も明らかになった。事業者あるいは当院において、これらの課題を着実に対応していくことが必要である。

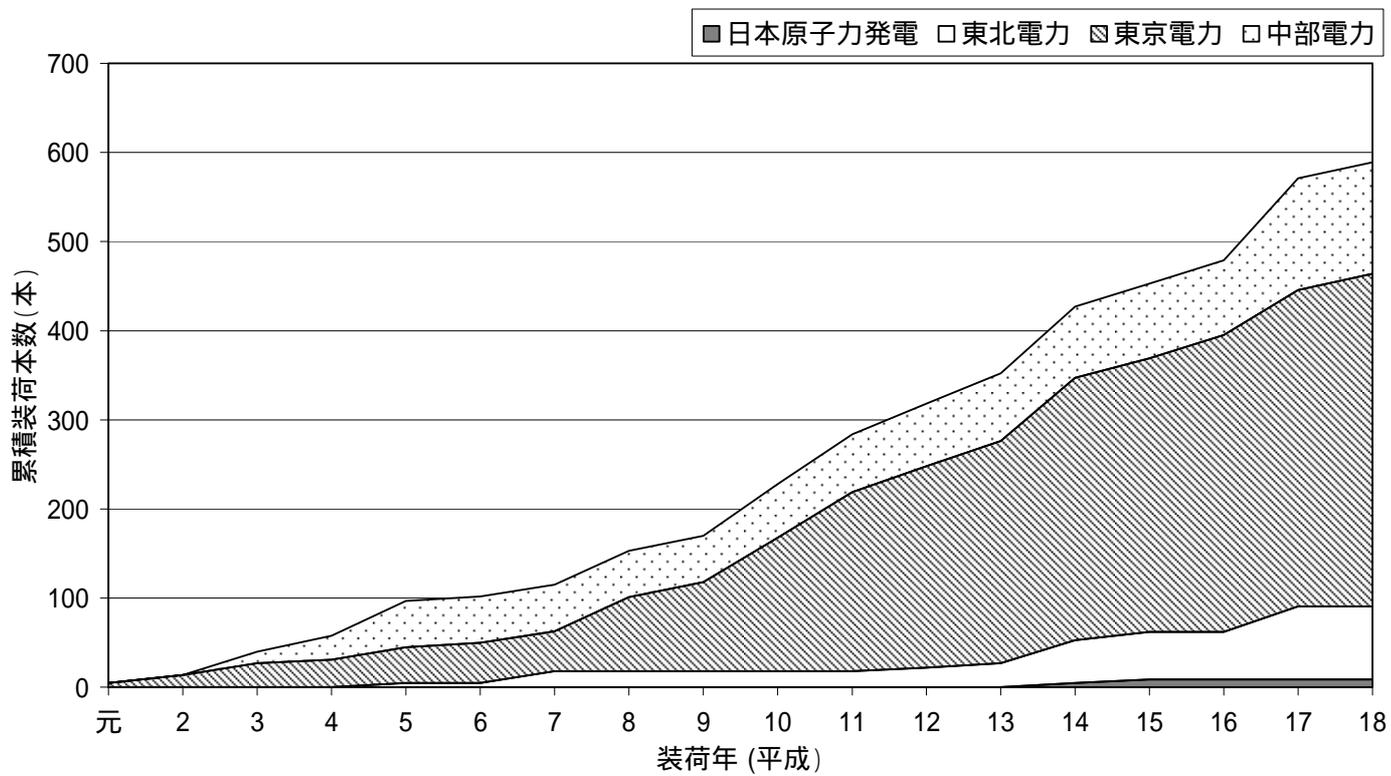
原子力発電施設の安全確保に万全を期すためには、国内外のトラブル情報や検査・点検等最新の知見を常に採り入れ、自らの活動を適切に見直すことが求められる。過去において、今回の問題に向きあうきっかけを生かしていない事例が確認された。全事業者は、ここで明らかにされた課題及び対応策を自社の保守管理・品質保証活動に反映させることが重要である。

また、今回の原因究明を通じて、当院においても、過去の評価が十分でなかった点や、過去の事例に対する事業者の活動の把握が十分でなかった点があり、今後の活動においては、定期的に事業者の取組状況を確認する等、より慎重かつ適切に実施していくこ

とする。

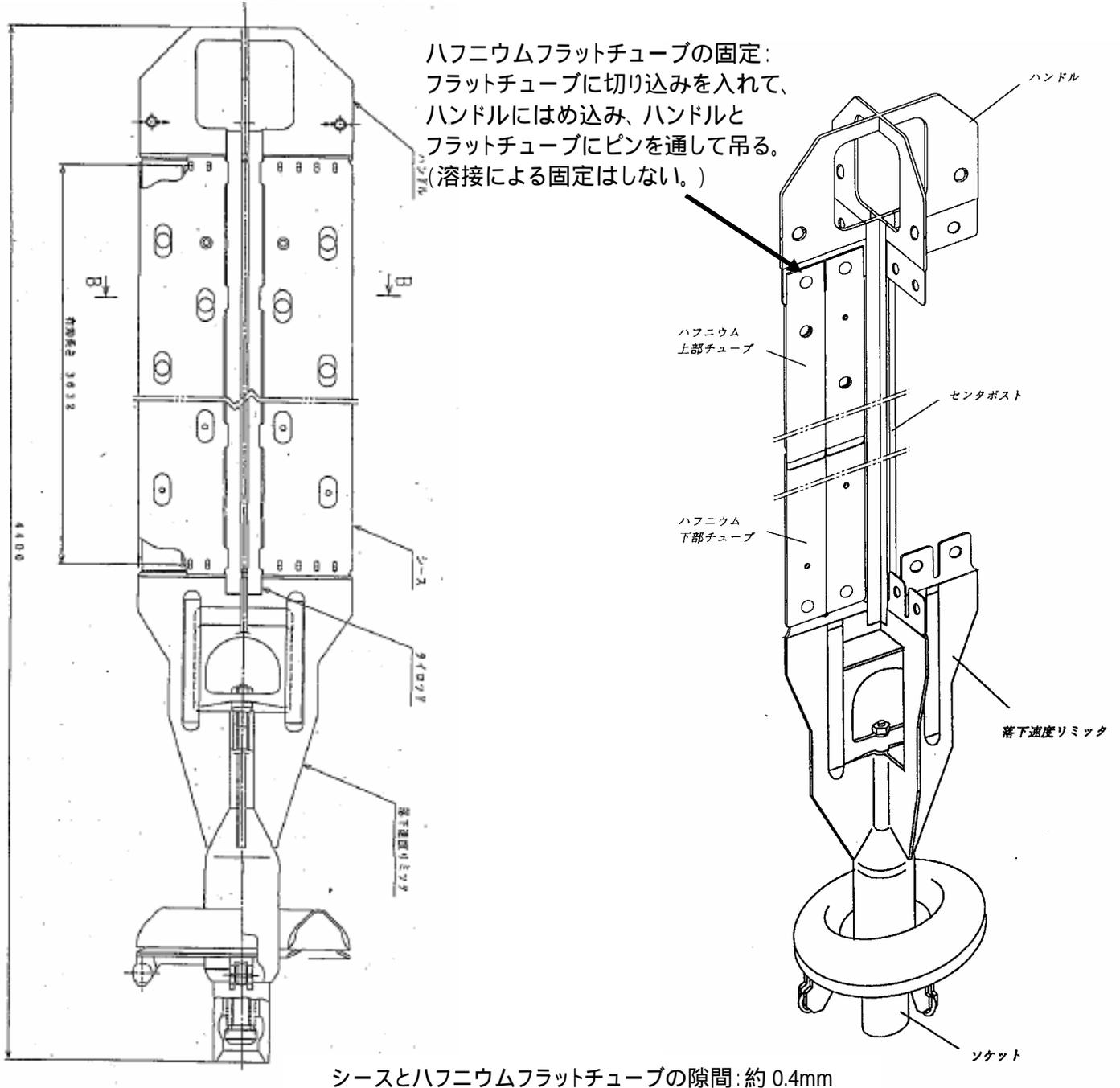
參考資料

参考1 ハフニウム板型制御棒の使用実績



(2) ハフニウム・フラットチューブ型

ハフニウム・フラットチューブ型制御棒は、我が国独自の制御棒で、現在、日本原子力発電(株)、東京電力(株)及び北陸電力(株)のプラント9基で使用している。同制御棒は、各ブレードについて、扁平なハフニウムチューブを上下から各2個ずつ、計4個、ハンドル部及び落下速度リミッタ部にピン留めする構造となっている。なお、ピンはハフニウムともシースとも溶接されていない。

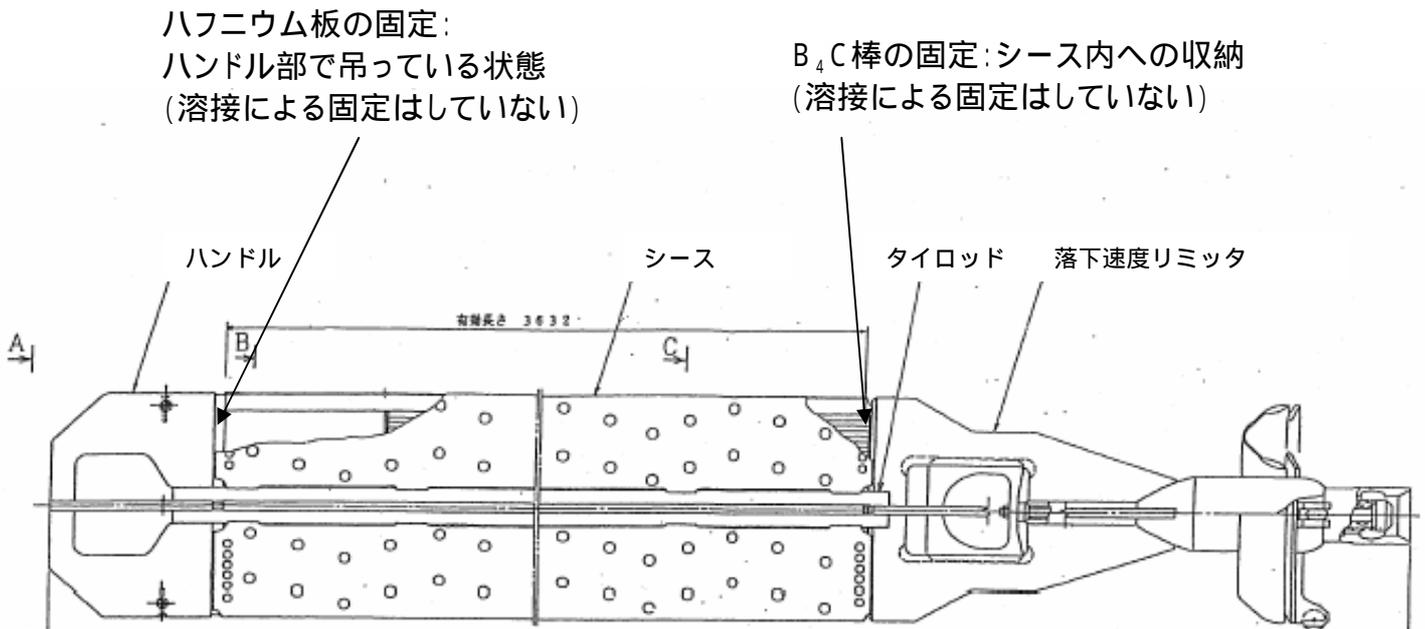


ハフニウムフラットチューブ型制御棒の構造図の例

(3) ハイブリッド型

ハイブリッド型制御棒は、海外メーカーによる制御棒で、現在、東京電力(株)のプラント2基で使用されている。同制御棒は、上部にハフニウム板、下部にボロン・カーバイド粉末充填管を配置した構造となっている。ハフニウム板はハンドル部から吊されている。

なお、平成9年に、ハイブリッド型制御棒において不具合が発生したが、同制御棒は、ハフニウム棒を横方向に複数配置したものであり、現在用いられているハイブリッド型とは構造が異なり、現在は使用されていない。



シースとハフニウム板の隙間:約 0.4mm

ハイブリッド型制御棒の構造図の例

参考3 一部制御棒挿入後の炉心の安定性

(1) 制御棒を挿入したプラント7基については以下のとおり。(括弧内は5月31日現在のプラント状態)

- ・ 東北電力(株)女川原子力発電所2号機 (停止中)
- ・ 東京電力(株)福島第一原子力発電所3号機 (停止中)
- ・ 東京電力(株)福島第二原子力発電所1号機 (停止中)
- ・ 東京電力(株)福島第二原子力発電所3号機 (運転中)
- ・ 東京電力(株)福島第二原子力発電所4号機 (運転中。 制御棒点検・交換済み。)
- ・ 中部電力(株)浜岡原子力発電所3号機 (運転中)
- ・ 中部電力(株)浜岡原子力発電所4号機 (停止中)

(2) JNESにおいて、今回の制御棒挿入により設置(変更)許可時に比べ、最も条件が厳しくなるプラントを対象として、BWR事業者が用いたものとは異なる安全性解析コード(LAPUR-J)を用いてクロスチェックを行った結果は以下のとおり。

事業者によるハフニウム板型制御棒挿入後の運転期間の炉心の安定性の評価

| | 福島第二原子力発電所3号機 | | | 福島第二原子力発電所4号機 | | | 限界基準 |
|--------------|---------------|------|------|---------------|------|------|------|
| | 設置許可 申請時評価 | 今回評価 | | 設置許可 申請時評価 | 今回評価 | | |
| | | 事業者 | JNES | | 事業者 | JNES | |
| 炉心安定性 増幅比 | 0.57 | 0.63 | 0.66 | 0.57 | 0.54 | 0.57 | 1.00 |
| 領域安定性 増幅比 | 0.51 | 0.53 | 0.69 | 0.51 | 0.52 | 0.64 | 1.00 |

参考4 現時点におけるハフニウム板型制御棒の点検状況

H18.5.31現在

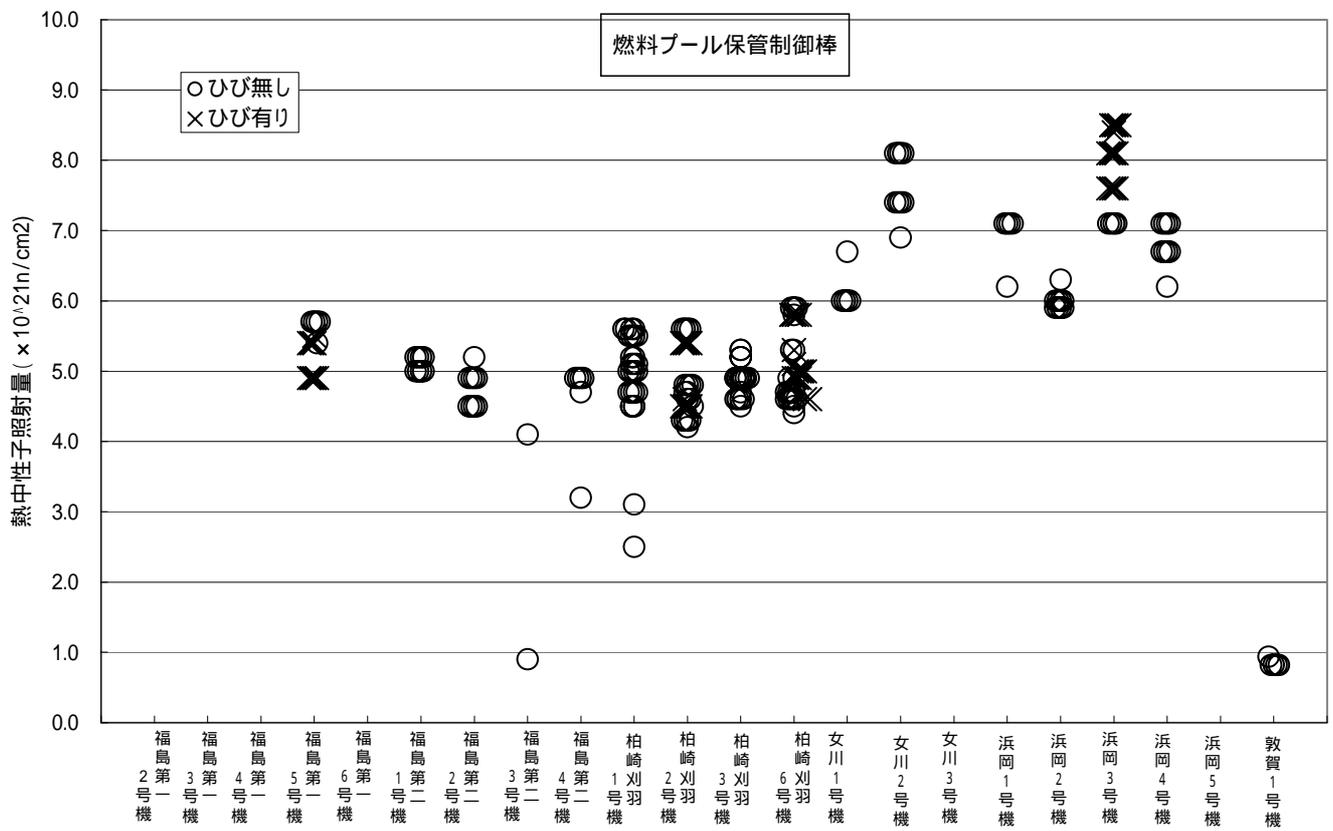
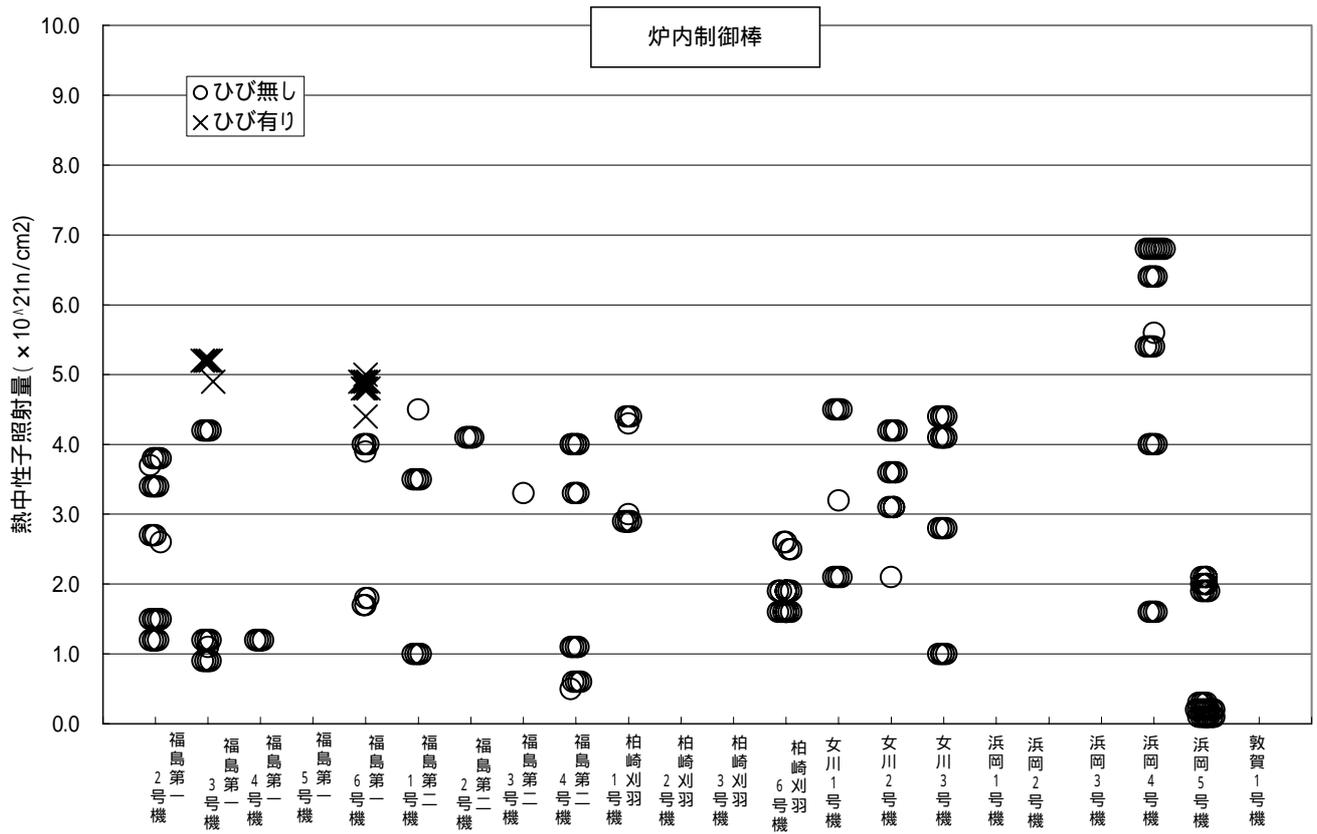
中性子照射量単位 : $10^{21}n/cm^2$

| 会社名 | サイト | 号機 | プラント運転状況 | 使用中のもの | | | | | 使用済みのもの | | | | | | |
|------|------|------------------------|-----------------------|------------|------------|--------------|---------|------------------|---------|------|--------|-------|------------|---------|-----|
| | | | | 装荷本数 *1 | 点検本数 *2 | 中性子照射量 *1 | | ひびのある制御棒本数 *2 | 保管本数 | 点検本数 | 中性子照射量 | | ひびのある制御棒本数 | | |
| | | | | | | 最大照射量 | 最小照射量 | | | | 最大照射量 | 最小照射量 | | | |
| 日本原電 | 東海第二 | 1 | 運転中 | 0 | / | 熱 | / | / | / | 0 | / | 熱 | / | / | / |
| | | | 敦賀 | 1 | 運転中 | 4 | - | 熱 | 0.1 | 0.1 | - | 5 | 5 | 熱 | 0.8 |
| 東北電力 | 東通 | 1 | 運転中 | 29 | - | 熱 | 0.7 | 0.1 | - | 0 | / | 熱 | / | / | / |
| | | | 高速 | | | 0.7 | 0.1 | 高速 | | | | / | / | | |
| | 女川 | 1 | 定期検査停止中 (06.1.18~) | 9 | 9 | 熱 | 4.5 | 2.1 | 0 | 5 | 5 | 熱 | 6.7 | 6.0 | 0 |
| | | | 高速 | | | 5.4 | 2.5 | 高速 | | | | 8.1 | 7.3 | | |
| | | 2 | 停止中 (06.5.11停止) | 13 | 13 | 熱 | 4.2 | 2.1 | 0 | 9 | 9 | 熱 | 8.1 | 6.9 | 0 |
| | | | 高速 | | | 4.4 | 2.2 | 高速 | | | | 8.4 | 7.2 | | |
| 3 | 運転中 | *4 17 | 17 | 熱 | 4.4 | 1.0 | 0 | 0 | / | 熱 | / | / | / | | |
| | | | | 高速 | 4.6 | 1.0 | | | | 高速 | / | / | | | |
| 東京電力 | 福島第一 | 1 | 運転中 | 0 | / | 熱 | / | / | / | 0 | / | 熱 | / | / | / |
| | | | | | | 高速 | / | / | | | | 高速 | / | / | |
| | | 2 | 運転中 | *5 22 | 22 | 熱 | 3.8 | 1.2 | 0 | 0 | / | 熱 | / | / | / |
| | | | | | | 高速 | 4.6 | 1.4 | | | | 高速 | / | / | |
| | | 3 | 停止中 (06.2.22停止) | *5 18 | 18 | 熱 | 5.2 | 0.9 | 5 | 0 | / | 熱 | / | / | / |
| | | | | | | 高速 | 6.3 | 1.1 | | | | 高速 | / | / | |
| | | 4 | 運転中 | *6 4 | 4 | 熱 | 1.2 | 1.2 | 0 | 0 | / | 熱 | / | / | / |
| | | | | | | 高速 | 1.4 | 1.4 | | | | 高速 | / | / | |
| | | 5 | 運転中 | 18 | - | 熱 | 3.3 | 0.2 | - | 13 | 13 | 熱 | 5.7 | 4.9 | 8 |
| | | | | | | 高速 | 4.0 | 0.2 | | | | 高速 | 6.9 | 5.9 | |
| | 6 | 定期検査停止中 (05.12.21~) | *7 17 | 17 | 熱 | 5.0 | 1.7 | 9 | 0 | / | 熱 | / | / | / | |
| | | | | | 高速 | 6.1 | 2.1 | | | | 高速 | / | / | | |
| | 福島第二 | 1 | 定期検査停止中 (06.4.20~) | 17 | 9 | 熱 | 4.5 | 0.8 | 0 | 8 | 8 | 熱 | 5.2 | 5.0 | 0 |
| | | | | | | 高速 | 5.4 | 0.9 | | | | 高速 | 6.3 | 6.1 | |
| 2 | | 運転中 | *8 13 | 13 | 熱 | 4.1 | 0.0 | 0 | 9 | 9 | 熱 | 5.2 | 4.5 | 0 | |
| | | | | | 高速 | 4.8 | 0.0 | | | | 高速 | 6.0 | 5.2 | | |
| 3 | | 運転中 | 19 | - | 熱 | 4.3 | 0.2 | - | 3 | 3 | 熱 | 4.1 | 0.9 | *3 0 | |
| | | | | | 高速 | 4.5 | 0.2 | | | | 高速 | 4.3 | 0.9 | | |
| 4 | 運転中 | *5 17 | 17 | 熱 | 4.0 | 0.5 | *3 0 | 5 | 5 | 熱 | 4.9 | 4.7 | 0 | | |
| | | | | 高速 | 4.7 | 0.6 | | | | 高速 | 5.8 | 5.5 | | | |

中性子照射量単位 : $10^{21}n/cm^2$

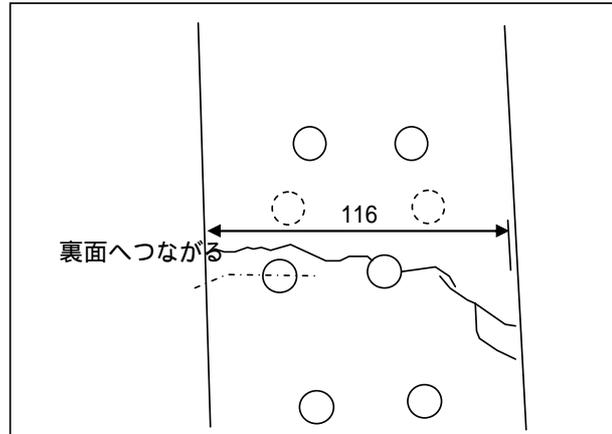
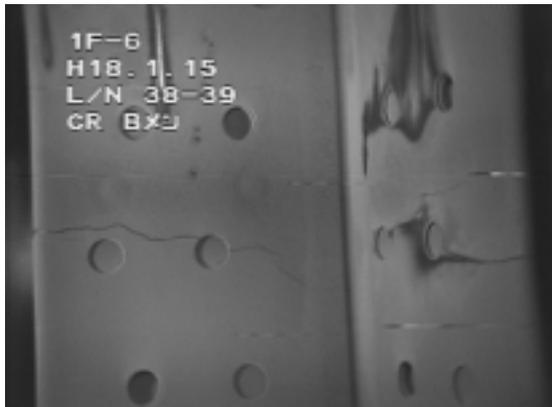
| 会社名 | サイト | 号機 | プラント運転状況 | 使用中のもの | | | | | 使用済みのもの | | | | | | |
|------|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|--------------|-------|------------------|---------|------|--------|-------|------------|-----|----|
| | | | | 装荷本数 *1 | 点検本数 *2 | 中性子照射量 *1 | | ひびのある制御棒本数 *2 | 保管本数 | 点検本数 | 中性子照射量 | | ひびのある制御棒本数 | | |
| | | | | | | 最大照射量 | 最小照射量 | | | | 最大照射量 | 最小照射量 | | | |
| 東京電力 | 柏崎刈羽 | 1 | 運転中 | *9 13 | 13 | 熱 | 4.4 | 0.0 | 0 | 27 | 27 | 熱 | 5.6 | 2.5 | 0 |
| | | | | | | 高速 | 4.5 | 0.0 | | | | 高速 | 5.9 | 2.6 | |
| | | 2 | 運転中 | 21 | - | 熱 | 3.4 | 0.8 | - | 27 | 27 | 熱 | 5.6 | 4.2 | 9 |
| | | | | | | 高速 | 3.5 | 0.8 | | | | 高速 | 5.8 | 4.4 | |
| | | 3 | 定期検査停止中 (06.05.12 ~) | 21 | - | 熱 | 3.8 | 1.0 | - | 22 | 22 | 熱 | 5.3 | 4.5 | 0 |
| | | | | | | 高速 | 4.0 | 1.0 | | | | 高速 | 5.5 | 4.7 | |
| | | 4 | 定期検査停止中 (06.04.09 ~) | 0 | / | 熱 | / | / | / | 0 | / | 熱 | / | / | / |
| | | | | 高速 | / | / | / | | | 高速 | / | / | / | | |
| | 5 | 運転中 | 0 | / | 熱 | / | / | / | 0 | / | 熱 | / | / | / | |
| | | | | 高速 | / | / | / | | | 高速 | / | / | / | | |
| | 6 | 運転中 | *10 25 | 25 | 熱 | 2.6 | 0.0 | 0 | 34 | 34 | 熱 | 5.9 | 4.4 | 15 | |
| | | | | | 高速 | 2.6 | 0.0 | | | | 高速 | 5.9 | 4.4 | | |
| | 7 | 運転中 | 0 | / | 熱 | / | / | / | 0 | / | 熱 | / | / | / | |
| | | | | | 高速 | / | / | / | | | 高速 | / | / | / | |
| 中部電力 | 浜岡 | 1 | 定期検査停止中 (02.4.26 ~) | 5 | - | 熱 | 0.9 | 0.8 | - | 5 | 5 | 熱 | 7.1 | 6.2 | 0 |
| | | | | | | 高速 | 1.1 | 1.0 | | | | 高速 | 8.5 | 7.5 | |
| | | 2 | 定期検査停止中 (04.2.21 ~) | 9 | - | 熱 | 4.5 | 1.0 | - | 9 | 9 | 熱 | 6.3 | 5.9 | 0 |
| | | | | | | 高速 | 5.5 | 1.3 | | | | 高速 | 7.7 | 7.2 | |
| | | 3 | 運転中 | 13 | - | 熱 | 6.8 | 0.1 | - | 17 | 17 | 熱 | 8.5 | 7.1 | 13 |
| | | | | 高速 | 7.0 | 0.1 | | | | 高速 | 8.9 | 7.4 | | | |
| | 4 | 定期検査停止中 (06.3.23 ~) | 25 | 25 | 熱 | 6.8 | 1.6 | 0 | 9 | 9 | 熱 | 7.1 | 6.2 | 0 | |
| | | | | 高速 | 7.1 | 1.6 | | | | 高速 | 7.3 | 6.4 | | | |
| | 5 | 運転中 | 33 | 33 | 熱 | 2.1 | 0.1 | 0 | 0 | / | 熱 | / | / | / | |
| | | | | | 高速 | 2.1 | 0.1 | | | | 高速 | / | / | / | |
| 北陸電力 | 志賀 | 1 | 定期検査停止中 (06.3.5 ~) | 0 | / | 熱 | / | / | / | 0 | / | 熱 | / | / | / |
| | | | | | | 高速 | / | / | / | | | 高速 | / | / | / |
| | 2 | 停止中 | 0 | / | 熱 | / | / | / | 0 | / | 熱 | / | / | / | |
| | | | | | 高速 | / | / | / | | | 高速 | / | / | / | |
| 中国電力 | 島根 | 1 | 運転中 | 0 | / | 熱 | / | / | / | 0 | / | 熱 | / | / | / |
| | | | | | | 高速 | / | / | / | | | 高速 | / | / | / |
| | 2 | 定期検査停止中 (06.2.28 ~) | 0 | / | 熱 | / | / | / | 0 | / | 熱 | / | / | / | |
| | | | | | 高速 | / | / | / | | | 高速 | / | / | / | |
| 合計 | | | | 382 | 235 | | - | - | 14 | 207 | 207 | | - | - | 45 |

*1 : 制御棒装荷本数、中性子照射量は平成18年1月23日時点のデータ
 *2 : " - "は点検未実施
 *3 : 平成15年に確認されたコマ部周辺等のひび割れ(敦賀1号機、福島第二3、4号機)については除外している。
 *4 : 中性子照射量 $4 \times 10^{21}n/cm^2$ 以上の9本についてはB₄C制御棒に交換済み。
 *5 : B₄C制御棒に交換済み。
 *6 : ハフニウム棒型制御棒に交換済み。
 *7 : 8本は新品のハフニウム板型制御棒に、9本はB₄C制御棒に交換済み。
 *8 : 9本はもともと新品のハフニウム板型制御棒。4本はB₄C制御棒に交換済み。
 *9 : 4本はもともと新品のハフニウム板型制御棒。5本は新品のハフニウム板型制御棒に、4本はB₄C制御棒に交換済み。
 *10 : 5本はもともと新品のハフニウム板型制御棒。20本はB₄C制御棒に交換済み。



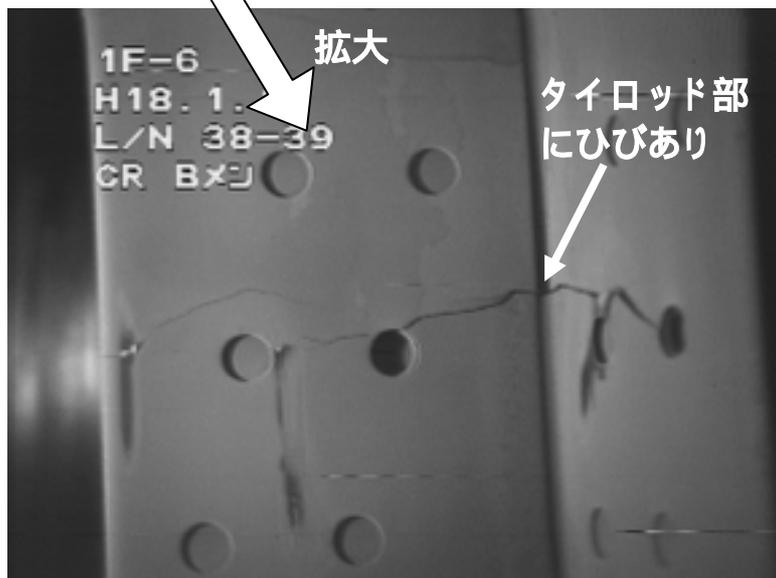
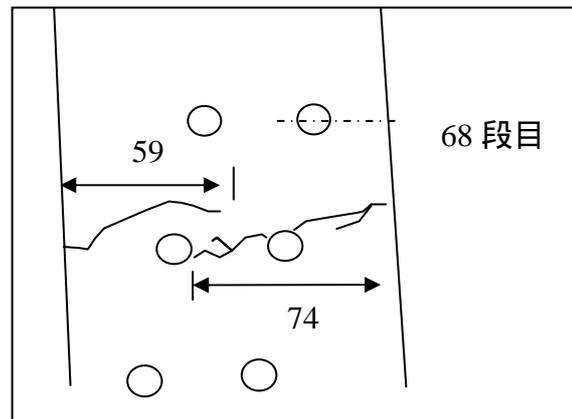
参考5 ハフニウム制御棒で発生したひび等の特徴

(1) シース部を水平方向に横断するひび



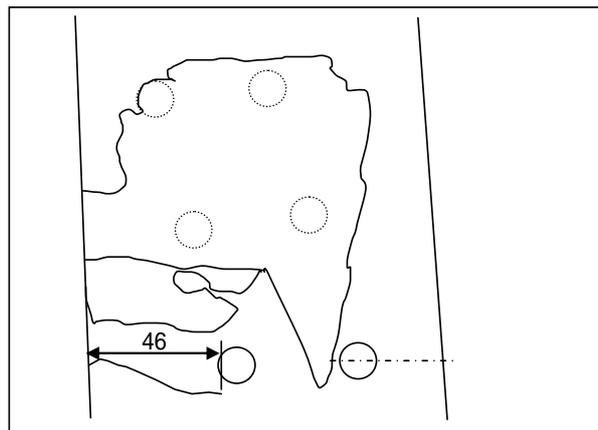
福島第一原子力発電所6号機の例 (制御棒シリアルナンバー99 - 022; 装荷位置38 - 39)
 部位: 制御棒下側から70段目の冷却孔付近(シース下端から3545mm上)

(2) タイロッドのひび



福島第一原子力発電所6号機の例 (制御棒シリアルナンバー99 - 022; 装荷位置38 - 39)
 部位: 制御棒下側から68段目の冷却孔付近(シース下端から3443mm上)

(3) シース部のめくれ・欠損



福島第一原子力発電所6号機の例 (制御棒シリアルナンバー99 - 022; 装荷位置38 - 39)
部位: 制御棒下側から59段目の冷却孔付近(シース下端から2988mm上)

参考6 発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令(抜粋)

(耐震性)

第五条 原子炉施設並びに一次冷却材又は二次冷却材により駆動される蒸気タービン及びその附属設備は、これらに作用する地震力による損壊により公衆に放射線障害を及ぼさないように施設しなければならない。

- 2 前項の地震力は、原子炉施設並びに一次冷却材により駆動される蒸気タービン及びその附属設備の構造並びにこれらが損壊した場合における災害の程度に応じて、基礎地盤の状況、その地方における過去の地震記録に基づく震害の程度、地震活動の状況等を基礎として求めなければならない。

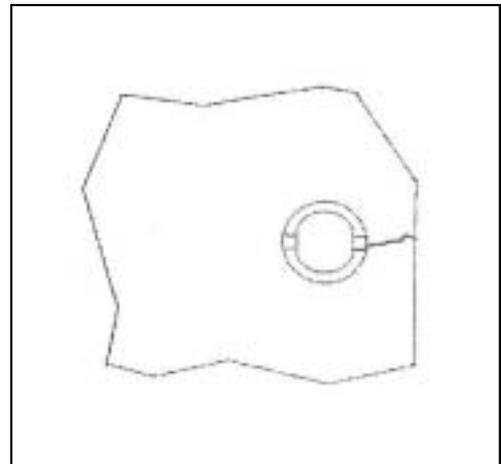
(反応度制御系統及び原子炉停止系統)

第二十三条

- 5 制御棒、液体制御材等は、通常運転時における圧力、温度及び放射線によつて起こる最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。

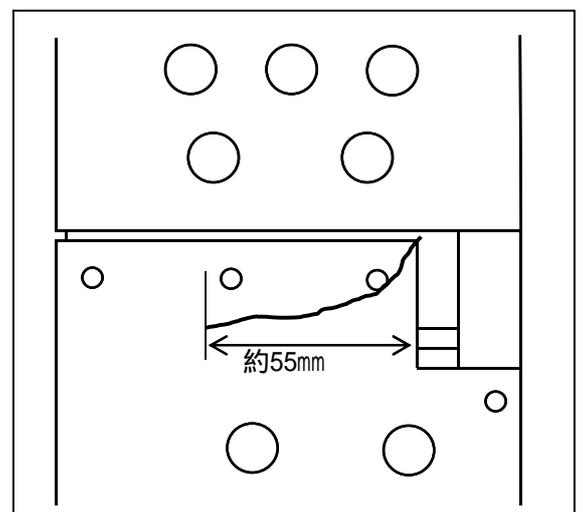
参考7 過去にハフニウム板型制御棒で発生した事例

(1) ハンドル部ガイドローラ取付部近傍



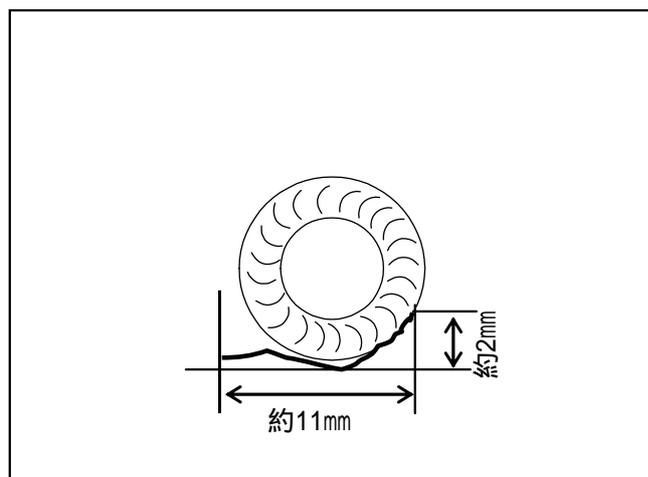
福島第二原子力発電所3号機の例

(2) ハンドル - シース溶接部近傍



福島第二原子力発電所4号機の例

(3) シースとハフニウム板のコマ溶接部近傍

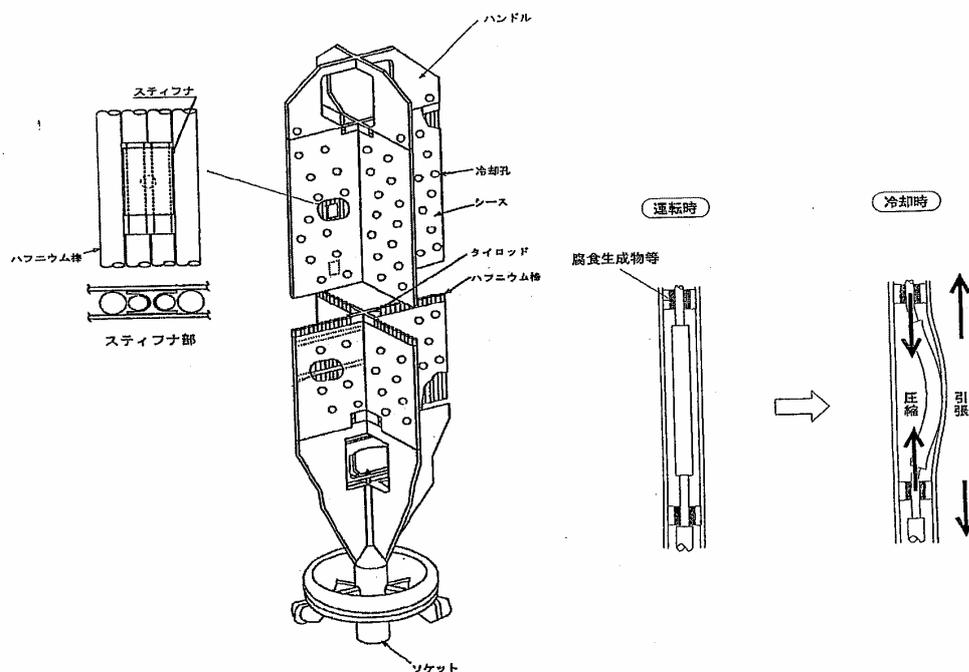


福島第二原子力発電所4号機の例

参考8 他の形式の制御棒で発生した国内の過去事例

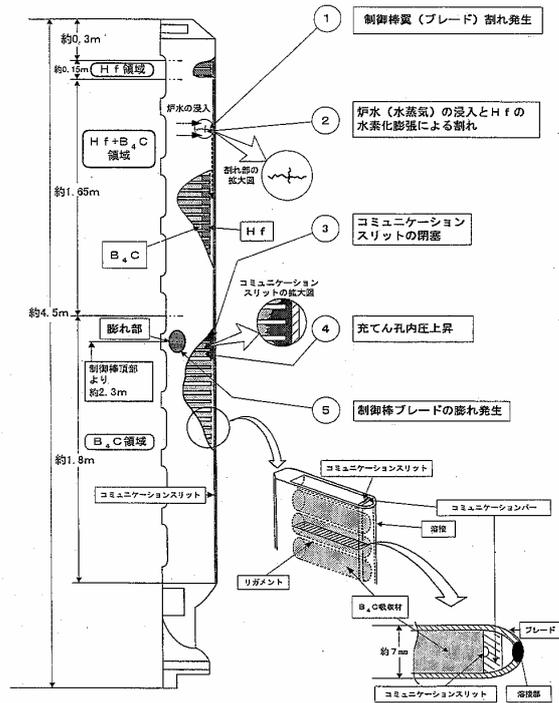
(1) ハフニウム棒型制御棒の事例

平成7年、東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所5号機の定期検査中、同社が、自主点検において制御棒駆動機構の挿入・引抜動作試験を実施したところ、一部のハフニウム棒型制御棒が円滑に動作しない不具合事象が確認された。調査の結果、スティフナー(ハフニウム棒を固定するための部品)とハフニウム棒の間隙部に腐食生成物等が蓄積し、両者が固着された状態であった。このため、原子炉の停止に伴う温度低下の際に、ハフニウムとステンレスの熱収縮差によってハフニウム棒には圧縮力が、シースには引張力が加わって変形し、シースの割れ等が発生し、このため制御棒と燃料集合体が干渉し、制御棒動作に支障が生じたものと推定された。シースは中性子照射(熱中性子照射量約 $4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$)を受け、材料特性の劣化が進行していたと推定された。



(2) ハイブリッド型制御棒の事例

平成9年、日本原子力発電(株)敦賀発電所1号機及び東京電力(株)福島第二原子力発電所2号機において、運転中の制御棒動作時に動作の不調が確認されたため、原子炉を手動停止した。調査の結果、制御棒の製造工程時に、ブレード上端部付近に局所的な加工ひずみが発生し、同ひずみ部で運転中にIASCが発生したものと推定された。同割れ部から炉水が浸入し、水とボロン・カーバイト等の反応により水素が発生し、この水素によりハフニウムの水素化・膨張が起こり、制御棒表面が隆起し、動作不調を招いたものと推定された。



また、本年(平成18年)5月、東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所4号機のハイブリッド型制御棒(上記とは異なり参考2(3)に示した型式のもの)において、ハンドル・シース溶接部近傍のシース側に、水平方向に広がるひびが確認された。

東京電力(株)において調査を実施し、当該部位においては、ハンドル・シース溶接部の残留応力が認められる部位であり、平成15年にハフニウム板型制御棒等に関し評価されたひびと同等のものと類推された。また、念のため、改めて健全性評価を行い、当該ひびが存在しても、制御棒の健全性には影響を及ぼさないことが確認された。

(3) ハフニウム・フラットチューブ型制御棒の事例

本年(平成18年)4月、東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所7号機において、ハフニウム・フラットチューブ型制御棒の点検を実施したところ、ハンドル・シース溶接部近傍のシース側に、水平方向に広がるひびが確認された。

東京電力(株)において調査を実施し、当該部位においては、ハンドル・シース溶接部の残留応力が認められる部位であり、平成15年にハフニウム板型制御棒等に関し評価されたひびと同等のものであることが確認された。また、念のため、改めて健全性評価を行い、当該ひびが存在しても、制御棒の健全性には影響を及ぼさないことが確認された。また、当該制御棒については、ハフニウム板型制御棒とは形式が異なるものであるが、念のため、ハフニウム表面及びシース内面の状況について確認を実施したところ、これらの表面には、ハフニウム板型制御棒で確認されたような、付着物・堆積物は確認されなかった。また、ハフニウムシースとの摺動抵抗の増加は認められなかった。