

## 3 . 4 燃料管理

燃料管理とは、燃料の設計、燃料の取替計画の策定、炉心管理、計量管理、燃料検査（新燃料体および照射燃料体）、設計改良項目の燃料設計への反映等の一連の燃料・炉心に係る業務をいう。

燃料管理の主目的は、燃料の健全性を確保することであり、そのため運転上の制限値、臨界に達しないための措置、取扱い方法等を原子炉施設保安規定に定め、これを遵守するとともに、これまで沸騰水型原子炉の発電所を有する事業者が共同で種々の燃料設計の改良、運転経験の反映等を行ってきており、燃料の信頼性向上に努めている。

また、使用済燃料の発生量低減およびウラン資源の有効利用のため、適切な炉心設計を行うとともに高燃焼度燃料の導入を図っている。

## 3.4-1 燃料管理における現在の保安活動の仕組みについて

燃料管理の目的を達成するために実施している、現在の保安活動の仕組みについて、その概要を説明する。

島根原子力発電所の燃料管理における保安活動は、燃料管理業務の中で実施している。燃料管理業務は、燃料の発電所への受入れから払出しまでの間に、燃料体管理、計量管理、炉心管理の業務を行っている（業務の概要については別添資料3.4-1「燃料管理の業務フロー（概要）」参照）。

## 燃料体管理

燃料体管理の目的は、燃料の検査、移動、貯蔵、運搬を適切に行うことである。

## (1) 新燃料の受入れおよび貯蔵

新燃料を燃料製造工場から発電所に運搬し、受入れた新燃料の外観・寸法検査を行っている。また、新燃料は新燃料貯蔵庫または使用済燃料プールに貯蔵している。なお、新燃料貯蔵時の異物混入対策として、新燃料貯蔵庫内の新燃料はビニール袋に入れて貯蔵し、新燃料貯蔵庫の蓋を常時閉めて管理している。

また、使用済燃料プールでは作業の都度、プール周りに異物混入防止エリアを設け、当該エリア内作業を行う場合は物品持込管理を実施し、異物による燃料破損（燃料からの放射性物質の漏えい）の発生防止を図っている。

## (2) 燃料の検査

原子炉で使用した燃料の中から検査対象を選定し、外観検査を行って燃料の健全性を確認している。

燃料の取替えを行った場合は、水中テレビカメラにより燃料集合体番号を確認し、燃料取替実施計画に定められた燃料配置となっていることを確認している。

また、原子炉の冷却材中に含まれるよう素<sup>131</sup>Iの増加量の測定結果等から、 SHIPPING 検査の可否を判断し、SHIPPING 検査が必要な場合はSHIPPING 検査を行い、燃料の使用の可否を判断する手順としている。

なお、島根原子力発電所においては、運転開始以来、燃料破損は発生していない。

### (3) 燃料の移動

燃料を移動する場合は、燃料取扱設備を用いている。

原子炉から使用済燃料プールへ燃料を取り出す場合は、制御棒を引抜くセルについて燃料をすべて取り出す等あらかじめ定めた手順により、1体毎移動している。

また、使用済燃料プールから原子炉へ燃料を装荷する場合は、燃料を装荷するセルについて制御棒を全挿入しておく等あらかじめ定めた手順により1体毎移動し、移動の都度、臨界未満であることを確認している。

### (4) 使用済燃料の貯蔵

使用済燃料を貯蔵する場合は、使用済燃料プールに貯蔵している。

なお、使用済燃料プールは、燃料貯蔵時の異物混入防止対策として、プール周りに異物混入防止エリアを設ける等の対策を行うことにより、貯蔵中の燃料に異物が入ることによる不具合の発生防止を図っている。

### (5) 使用済燃料の運搬・払出し

使用済燃料を運搬する場合は、使用済燃料輸送容器に入れて運搬を行っている。

発電所施設にて十分冷却された使用済燃料は、現在、青森県六ヶ所村に設置されている再処理施設に払出すこととしている。

## ・計量管理

計量管理の目的は、我が国と国際原子力機関（以下、「IAEA」という）との間で締結されている保障措置協定に基づき、燃料の在庫変動管理を適切に行うことならびに国およびIAEAの査察の対応を行うことである。

### (1) 在庫管理

燃料の受払いに関する計画を作成し、新燃料の受入れ、燃料取替、払出しの都度、燃料の在庫変動等の記録を作成し、官庁に提出している。

### (2) 査察対応

国際約束として、核燃料物質が平和目的で利用されている（核兵器等へ転用されていない）ことを、国の立会いのもとにIAEAの査察により確認している。この査察対応として、核燃料物質の保管場所における保管状況や運転記録等を用意し、国およびIAEAに確認を受けている。

### ・炉心管理

炉心管理の目的は、燃料を安全かつ効率的に燃焼させることである。燃料を安全に燃焼させることとは、燃料の健全性確保のため、運転上の燃料・炉心に関する制限値や目標値を定め、これらの指標を遵守するように運転することである。さらに、燃料破損発生の可能性がある場合、破損の拡大を低減する運転も実施する。一方、燃料を効率的に燃焼させることとは、燃料を安全に燃焼させることを前提としつつ、使用済燃料の発生量低減、燃料サイクルコストの低減を図るものである。具体的には別添資料3.4-1「燃料管理の業務フロー（概要）」に示す以下の業務に相当する。

#### （1）燃料取替実施計画

運転計画等に基づいて、炉心設計コードを使用した、取替炉心の安全性確認項目（原子炉停止余裕、最小限界出力比、燃料棒最大線出力密度、燃料集合体最高燃焼度）の解析結果が、計画されている運転期間において、制限値または設計目標値を満足することを確認した上で、炉内の燃料配置や燃料取替体制を定めた燃料取替実施計画を作成している。

#### （2）原子炉停止余裕検査

サイクルを通して原子炉停止余裕が確保されていることを確認するため、最大価値を有する制御棒を全引抜きし、さらにその対角方向に隣接する制御棒を必要な反応度補正位置まで引抜き、この状態で原子炉が臨界未満であることを確認している。

#### （3）炉心性能管理

原子炉起動時および運転中の制御棒パターン調整時等において、熱的制限値（最小限界出力比、燃料棒最大線出力密度）、燃料のならし運転等を遵守した出力上昇計画（制御棒操作手順を含む）を作成するほか、原子炉熱出力や炉心流量の監視、熱的制限値の監視を行い、燃料の健全性を確認している。

## 3.4-2 燃料管理における保安活動の評価結果

本節においては、評価対象期間中の燃料管理に係る以下の事項について評価した結果を示す。

- ・ 自主的改善事項の継続性
- ・ 不適合事象、指摘事項等の改善措置の実施状況、再発の有無
- ・ 運転実績指標のトレンド

## ・ 燃料管理の仕組みの改善状況

## (1) 組織・体制

## 燃料管理に係る組織・体制の改善状況

組織・体制に係る自主改善活動を行っており、主な1件について現在も継続して取り組まれていることを確認した。

また、不適合事象、指摘事項等における改善状況のうち、組織・体制に係るものはなかった。

## [ 保安活動における自主的改善事項の活動状況 ]

これまで実施してきた主な自主的改善事項を以下に示す。

## a. 業務分担について

原子力を取り巻く諸情勢に対する確に対応していくため、平成21年2月に当時の技術課内にある3担当の業務所掌の見直しを行った。合わせて、炉心燃料担当（当時の炉心・技術担当）と燃料管理担当（当時の燃料担当）との間で体制を構築した。

この結果、新燃料輸送時の現場対応など過渡的に発生する業務に対し機能的に対応できるようになった。

## 燃料管理に係る組織・体制の評価結果

組織・体制に係る自主的改善活動を行っており、現在も継続されていることを確認した。

組織・体制については、自主的改善事項の活動状況に示したように、現場対応などの過渡的に発生する業務に対し機能的に対応できる体制を構築していることから、適切な燃料管理が確実にでき、継続的な改善を図ることができる組織・体制であると判断した。

## (2) 社内マニュアル

燃料管理に係る社内マニュアルの改善状況

社内マニュアルに係る自主的改善活動を行っており、主な1件について現在も継続して取り組まれていることを確認した。

また、不適合事象、指摘事項等における改善状況のうち、社内マニュアルに係るものはなかった。

なお、マニュアル類の改正状況についてはQMS高度化（平成20年2月）以降について調査した。

### [ 保安活動における自主的改善事項の活動状況 ]

これまで実施してきた主な自主的改善事項を以下に示す。

#### a. 水素脆化割れによる燃料破損防止の対応について

制御棒パターン調整/変更時の制御棒引抜きの際、ペレットと被覆管の相互作用（以下、「PCI」という）により燃料が破損しないよう引抜制御棒周辺の燃料被覆管の円周方向応力を評価し、管理してきた。

しかし、「平成13年度 高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書（BWR高燃焼度燃料 総合評価編）」（(財)原子力発電技術機構、平成14年3月）における出力急昇試験等の知見から燃焼が進んだ燃料においては、従来のPCIによる燃料破損ではなく、水素脆化割れによる燃料破損が生じることが分かった。

この対策として、従来のPCIによる燃料破損防止の管理に加え、燃焼が進んだ領域については、新たに水素脆化割れにより燃料が破損しないように燃料被覆管の円周方向応力の管理を追加し、あわせてそれらの管理方法を「炉心管理手順書」に記載した。

この対策により、燃料破損のリスクを低減することで原子力発電所の安全運転を図っている。

なお、島根原子力発電所においては、運転開始以来、燃料破損は発生していない。

燃料管理に係る社内マニュアルの評価結果

社内マニュアルに係る自主的改善活動を行っており、現在も継続されていることを確認した。

社内マニュアルについては、燃料管理を実施する上で具体的な要領および手順を定めており、それらを遵守することにより、燃料破損のような原子力発電所の安全運転を損なう事象は発生していないことならびに自主的改善事項の活動状況として示した「水素脆化割れによる燃料破損防止の対応につ

いて」のように社内マニュアルの改正を順次行っていることから、適切にマニュアルが整備され、改善が図られていると判断した。

### (3) 教育・訓練

#### 燃料管理に係る教育・訓練の改善状況

教育・訓練に係る自主的改善活動を行っており、主な1件について現在も継続して取り組まれていることを確認した。

また、不適合事象、指摘事項等における改善状況のうち、教育・訓練に係るものはなかった。

#### [ 保安活動における自主的改善事項の活動状況 ]

これまで実施してきた主な自主的改善事項を以下に示す。

##### a. 燃料装荷時の燃料集合体着座位置の管理について

平成19年11月に柏崎刈羽原子力発電所5号機において、原子炉内の点検のため、原子炉から燃料プールへ燃料の移動作業を実施していたところ、燃料取替機の荷重が大きくなったことを示す警報が発報し、燃料取替機が自動運転を停止した。水中カメラを使用して当該燃料の外観を点検したところ、燃料が正しい装荷位置である燃料支持金具から外れていることが確認された。

原因は、原子炉への燃料装荷の際、燃料下部が燃料支持金具内に着座しない状態であったため、その後の地震により正規の着座位置から外れたものと推定されている。

この対策として、原子炉への燃料装荷時の「燃料移動手順」に燃料着座位置の目標値の記載および目標値を外れた場合の対応を記載し、その内容について定期検査毎に燃料取替業務に関わる者への教育を実施している。同事象は島根原子力発電所の運転開始以来、発生していないが、この対策により更なる改善が図られていると判断した。

#### 燃料管理に係る教育・訓練の評価結果

教育・訓練に係る自主的改善活動を行っており、現在も継続されていることを確認した。

教育・訓練については、自主的改善事項の活動状況として示した「燃料装荷時の燃料集合体着座位置の管理について」のように、手順書の反映、教育等を行っていることから、改善が図られていると判断した。

## ・設備の改善状況

## (1) 燃料管理に係る設備の改善状況

設備に係る自主的改善活動を行っており、主な3件について現在も継続して取り組まれていることを確認した。

また、不適合事象、指摘事項等における改善状況のうち、設備に係るものはなかった。

## [ 保安活動における自主的改善事項の活動状況 ]

これまで実施してきた主な自主的改善事項を以下に示す。

## 燃料破損発生時の対応について

島根原子力発電所1号機において、燃料破損の監視は、原子炉冷却材および排ガス系の放射性物質濃度の測定と排ガス系の放射線の測定（以下、「排ガス放射線モニタ」という）により実施している。しかし、原子炉冷却材および排ガス系の放射性物質濃度の測定は、1週間に1回の手分析で行っており、連続的な測定ではなく、また、排ガス放射線モニタは連続測定しているが、微小な燃料破損による指示の変化が顕著に現れない。このため、燃料破損の早期発見が難しく、外部へ放射性物質が放出されるレベルまで検知されないリスクおよび燃料破損が拡大するリスクがあることから、以下の対策を講じることとした。

- ・従来の排ガス放射線モニタに加え、微小な燃料破損を発見できる「高感度オフガス放射線モニタ」を設置した。
- ・燃料破損が発生した場合に、燃料破損の位置を特定し、破損した燃料の出力を抑制することにより、燃料破損の拡大を防止する手順を作成した。

これらの対策により、燃料破損が発生した場合に早期発見および燃料破損の拡大を防止することで原子力発電所の安全運転を図っている。

なお、島根原子力発電所においては、運転開始以来、燃料破損は発生していない。

## 制御棒外観点検の実施について

平成18年1月に福島第一原子力発電所において、ハフニウム板型制御棒の外観点検を実施していたところ、タイロッドおよびシースにひびが確認された。島根原子力発電所1号機で使用している制御棒は、ボロンカーバイド粉末型制御棒とハフニウム棒型制御棒であり、型式が異なり直接関係はないが、旧原子力安全・保安院からの通知文書「沸騰水型原子炉におけ



る制御棒ひび発生事象について」(平成16・06・30原院第4号)に「適宜制御棒の点検を実施することにより、ひびの発生に関する情報を収集・共有し、制御棒の品質向上につなげることは原子力の品質保証活動の一環として望ましいことと考える」と記載されていることおよび旧原子力安全・保安院からの通知文書「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について」(平成18・05・31原院第2号)に「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」と記載されていることに鑑み、島根原子力発電所1号機においても定期検査時に原子炉から取り出した制御棒の外観点検を定期的実施することとした。

定期的な外観点検を実施することとした第27回定期検査以降、これまでにボロンカーバイド粉末型制御棒6本、ハフニウム棒型制御棒5本の外観点検を実施し、タイロッドおよびシースにひびが無いことを確認した。

なお、第27回定期検査において、ハフニウム棒型制御棒1本について、ハンドルガイドローラ部にひびを確認したが、制御棒の健全性が損なわれることはなく、ひびのある状態で継続使用したとしても原子炉の安全性に影響を与えるものではなかった。

#### チャンネルボックス取外し・取付け時の荷重管理について

平成15年10月、第24回定期検査における燃料集合体外観検査中に、燃料集合体1体のスペーサ7個のうち5個が正規の位置からずれていることを確認した。また、原因調査の一環とした当該燃料集合体と同時期に原子炉へ装荷した別の燃料集合体1体の作業中に3個のスペーサがずれた。

原因は、当該燃料集合体を7サイクル使用したことによるスペーサの膨張に加え、出力の低い炉心周辺部に長期間装荷したことによりチャンネルボックス下端部の膨れが比較的小さかったため、チャンネルボックス下端部とスペーサ間の間隙が狭まったことによるものである。これにより、チャンネルボックスの取外し・取付け時に、チャンネルボックス下端部とスペーサ間に強い摩擦力が生じ、架橋板が脱落した結果、スペーサの位置ずれが生じた。

再発防止対策として、チャンネルボックス取外し・取付け時には荷重計を用いて荷重管理を実施することとした。また、スペーサとチャンネルボックスの初期間隙を確保するため、製造時に許容する誤差を小さくするなどの設計・製造面の対策を実施するとともに、当面の間、7サイクル目の燃料は使用しない運用とした。

## (2) 燃料管理に係る設備の評価結果

設備に係る自主的改善活動を行っており、現在も継続されていることを確認した。

設備については、自主的改善事項の活動状況として示した「燃料破損発生時の対応について」、「制御棒外観点検の実施について」および「チャンネルボックス取外し・取付け時の荷重管理について」のように、燃料破損が発生した場合の早期発見および燃料破損の拡大防止対策、制御棒のひび、チャンネルボックスの取扱い等の運転経験の反映による信頼性、安全性の向上を行っており、改善が図られていると判断した。

### ・運転実績指標のトレンド

#### (1) 冷却材中のよう素<sup>131</sup>濃度の推移

(資料3.4-1「サイクル毎の炉水よう素濃度(平均値)の推移」参照)

通常の運転における炉水中のよう素発生源の大部分は、被覆材に微量に付着したウランの核分裂によるものであるが、燃料被覆管の健全性が損なわれた場合は、燃料棒内の核分裂生成物が漏えいしてくる。

サイクル毎の炉水よう素濃度を見ると、燃料破損は発生しておらず、保安規定に定める運転上の制限よりも低い値であり、かつ推移に著しい変化はなかった。

### ・総合評価

#### (1) 改善活動の評価

燃料管理における保安活動の仕組み(組織・体制、社内マニュアル、教育・訓練)および燃料管理に係る設備について、保安活動における自主的改善活動を適切に実施してきており、改善する仕組みが機能していることを確認した。

#### (2) 運転実績指標のトレンド

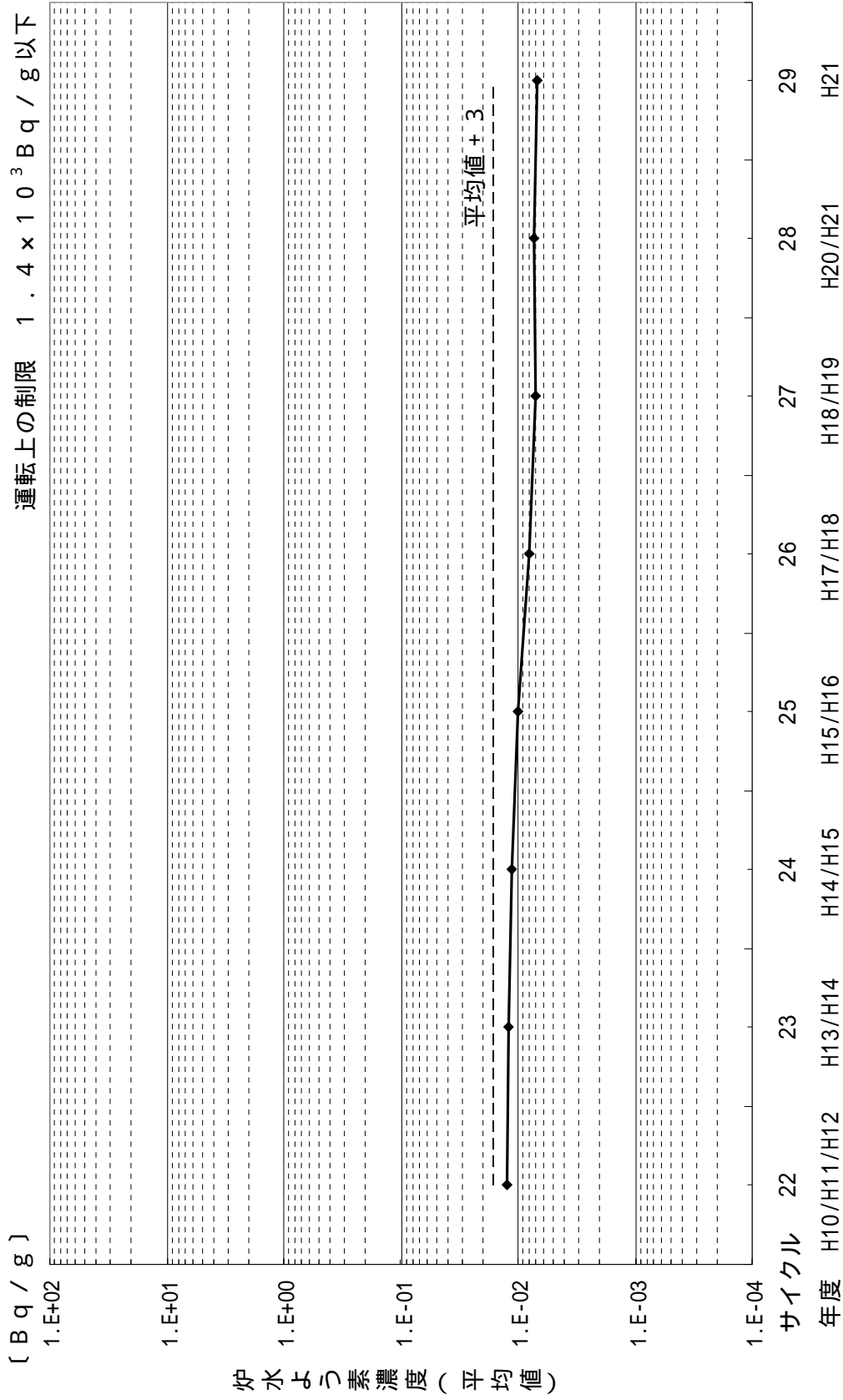
燃料管理に係る運転実績指標のトレンドについて、運転上の制限を遵守していることおよび推移に著しい変化がなかったことを確認した。

以上のことから、組織・体制、社内マニュアル、教育・訓練および設備に対する改善は、業務フローに従い確実に行われていることから、現在の燃料管理の仕組みが妥当であると判断した。

・今後の取り組み

燃料管理について、今後とも安全管理上重要な運転制限値の遵守および燃料の信頼性を確保するように業務を実施し、次の2項目についても継続していく。

- (1) 使用済燃料発生量の低減、ウラン資源の有効利用を目的として、これまでの燃料の信頼性向上の実績を基に、燃料の更なる高燃焼度化の検討ならびに適切な炉心設計および燃料管理を実施する。
- (2) 新設計燃料や新技術の導入に当たっては、より一層の品質管理と燃料の健全性・信頼性を確保するように業務を実施する。



資料 3.4-1 サイクル毎の炉水よう素濃度 (平均値) の推移

## 別添 3.4 燃料管理

## ・燃料の信頼性向上対策

BWR 燃料は、長年の使用実績、不具合経験、使用条件の変更等、様々な経験を経て改良され、信頼性の高い燃料になってきている。

最近では、信頼性向上はもちろん経済性向上や使用済燃料の発生量低減を目指した高性能・高燃焼度燃料の開発を進めている。

別添資料 3.4 - 2「燃料の変遷」に島根原子力発電所 1 号機における燃料の変遷を示す。

また、別添資料 3.4 - 3「BWR 燃料の改良の経緯」に、BWR 燃料の変遷および島根原子力発電所 1 号機の使用実績を示す。

## (1) 燃料信頼性を向上させるための運転管理、燃料設計の改良

これまでの定期安全レビュー報告(第 1 回: 営業運転開始から平成 7 年 3 月, 第 2 回: 平成 7 年 4 月から平成 15 年 3 月まで)で調査した燃料信頼性向上対策の概要を以下に示す。

燃料破損を発生させないための運転管理面での改善

燃料破損を発生させないための運転管理面での対策として、昭和 49 年(第 1 サイクル)から、ならし運転を取り入れた。

燃料破損を発生させないための燃料の設計変更

(別添資料 3.4 - 2「燃料の変遷」参照)

< 7 × 7 改良型燃料・・・昭和 50 年(第 2 サイクル)から採用 >

・PCI による燃料漏えいの発生を防止するため、燃料被覆材を応力除去焼鈍材に替え、延性に優れた再結晶化焼鈍材を採用した。

・ペレットの長さ対直径比を 1.8 程度から 1.0 程度にするとともに、ペレットの両端に面取りを施した短尺チャンファペレットを採用し、製造時にペレットの均一性を向上させること、面取りにより燃料被覆管との接触による応力緩和を図った。

・ペレットの表面に付着している微量の水分がジルカロイ被覆管と反応して発生する局所的な水素化物による漏えいを防止するため、燃料棒内のブレンナム部に水分ゲッタを配した。

・中性子吸収物質であるガドリニアを二酸化ウランに添加して使用し、反応度の抑制と出力分布の調整を図った。

< 8 × 8 燃料・・・昭和 52 年(第 4 サイクル)から採用 >

・燃料を 8 行 8 列に配置し、燃料棒本数を増加することにより、燃料棒の

熱負荷（燃料棒最大線出力密度）を低減した。

- ・燃料集合体の中心部に燃料棒と同じ直径のウォータロッド1本を配して、出力分布の調整を図った。

< 新型 8 × 8 燃料・・・昭和 59 年（第 11 サイクル）から採用 >

- ・燃料棒内に 0.3MPa 程度のヘリウムガスを封入することにより、ペレットと燃料被覆管の熱伝達を良くし、その結果ペレットの温度を下げ P C I および核分裂生成ガス放出を低減した。

- ・ウォータロッドの本数を従来の 1 本から 2 本に増やし、太さも太くした。これにより濃縮度増加による影響の改善、出力分布の調整を図った。

< 新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料

・・・昭和 63 年（第 14 サイクル）から採用 >

- ・燃料被覆管にジルコニウムの内張りを施して P C I による応力を緩和するジルコニウムライナ被覆管を採用した。

< 地震対策用のチャンネルファスナの採用 >

- ・燃料集合体のチャンネルファスナのバネ押付け力の増加により、地震発生時の燃料集合体の間隔変化に伴う中性子束高スクラム発生頻度を低減する地震対策用のチャンネルファスナを 9 × 9 燃料（A 型，B 型）の採用に合わせ導入した。

## （2）燃料の高燃焼度化に伴う燃料の設計変更

これまでの定期安全レビュー報告において調査した燃料の高燃焼度化に伴う設計変更の概要を以下に示す。

< 高燃焼度 8 × 8 燃料・・・平成 5 年（第 18 サイクル）から採用 >

- ・新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料の設計を基本に、技術的に安全性、信頼性が確認されている範囲内で燃焼度を伸長させ、なおかつ、従来燃料と同程度の余裕を確保するため、太径ウォータロッドの採用、丸セル型スペーサの採用、ヘリウム加圧量の増加を行った燃料を採用している。

< 9 × 9 燃料（A 型，B 型）・・・平成 13 年（第 23 サイクル）から採用 >

- ・9 × 9 燃料には、A 型，B 型の 2 つの異なる設計があり、高燃焼度化に対応した設計改良を行っているが、燃料被覆管、ペレット等の基本構成は高燃焼度 8 × 8 燃料と同じ材料を採用している。

- ・燃料棒を 9 行 9 列に配列することにより、燃料棒の熱負荷（線出力密度）を軽減させる設計とし、A 型では 74 本（部分長燃料棒 8 本含む）、B 型では 72 本としている。

- ・A 型，B 型共に燃焼に伴う燃料棒内圧上昇を緩和させるために、燃料棒内のヘリウム加圧量を 1.0MPa 程度に増加している。

・ A型では太径ウォータロッド 2本(燃料棒 7本相当)を, B型では角管のウォータチャンネル 1本(燃料棒 9本相当)を採用し,濃縮度増加による影響に対する改善を行っている。

#### ・ 運転経験の反映

これまでの定期安全レビュー報告において調査した内容を以下に示す(別添資料 3.4-4「運転経験の反映状況」参照)。

- ・ スウェーデン オスカーシャム発電所 2号機チャンネルボックス曲がり事象
- ・ 米国 ラサール発電所 2号機中性子束振動事象
- ・ 浜岡原子力発電所 1号機燃料棒損傷事象

なお,今回の評価期間(平成 15年 4月から平成 24年 3月まで)に関しては,反映すべき事例は無かったが,国内外のトラブルや運転経験の反映の要否に関する検討は,適宜実施している。

### 3.用語について

#### (1) 最小限界出力比

運転時の異常な過渡変化においても,沸騰遷移による過熱が生じて燃料被覆管が損傷しないよう,通常運転時の制限として設けられているものである。

管群体系を用いた熱水力実験データをベストフィットし,さらにデータのばらつきを統計的に処理することにより,沸騰遷移発生を判断する手法が G E社において開発された。本評価により得られる熱的余裕を最小限界出力比(沸騰遷移を生じる燃料集合体の限界出力と実際の燃料集合体の出力の比の炉心内における最小値)という。最小限界出力比の限界値は炉心内の燃料棒の 99.9%以上が沸騰遷移を起こさないという基準を満足するように定められ,島根原子力発電所 1号機の場合は 1.06 である。この評価手法は国内における検討(「沸騰水型原子炉の炉心熱設計手法および熱的運転制限値決定手法について」,昭和 51年 2月 16日,原子炉安全専門審査会)を経て,国内 BWR で採用され,島根原子力発電所 1号機においても第 4 サイクル(昭和 52年度)から採用している。

最小限界出力比の運転制限値は,過渡変化時の最小限界出力比の変化分を限界値に加えることで定められるが,この運転制限値は燃料タイプにより異なるため,新しい燃料タイプが装荷される毎に,それに対応した値を定めている。

## (2) 燃料棒最大線出力密度

運転時の異常な過渡変化においても、燃料被覆管とペレットの相対的膨張差により燃料被覆管に歪みが生じて燃料被覆管が損傷しないよう、通常運転時の制限として設けられているもので、燃料棒の単位長さ当たりの発生出力 (kW/m) の炉心内における最大値である。

島根原子力発電所 1 号機の燃料は、昭和 49 年 (営業運転開始) 当初は 7 × 7 燃料であり、その燃料棒最大線出力密度の制限値は 57.4kW/m であったが、第 4 サイクル (昭和 52 年度) から 8 × 8 燃料を採用し、以降、燃料棒最大線出力密度の制限値は新しい燃料タイプが装荷される毎に、それに対応した値を定めているが、いずれの燃料タイプも 44.0kW/m である。

## (3) 原子炉停止余裕

最大価値を有する制御棒が 1 本完全に引抜かれた状態であっても、炉心を臨界未満にできることとしている。

設計計算では、余裕を見込んで最大価値制御棒 1 本が完全に引き抜かれたときの実効増倍率を 0.99 未満とすることを設計目標としている。

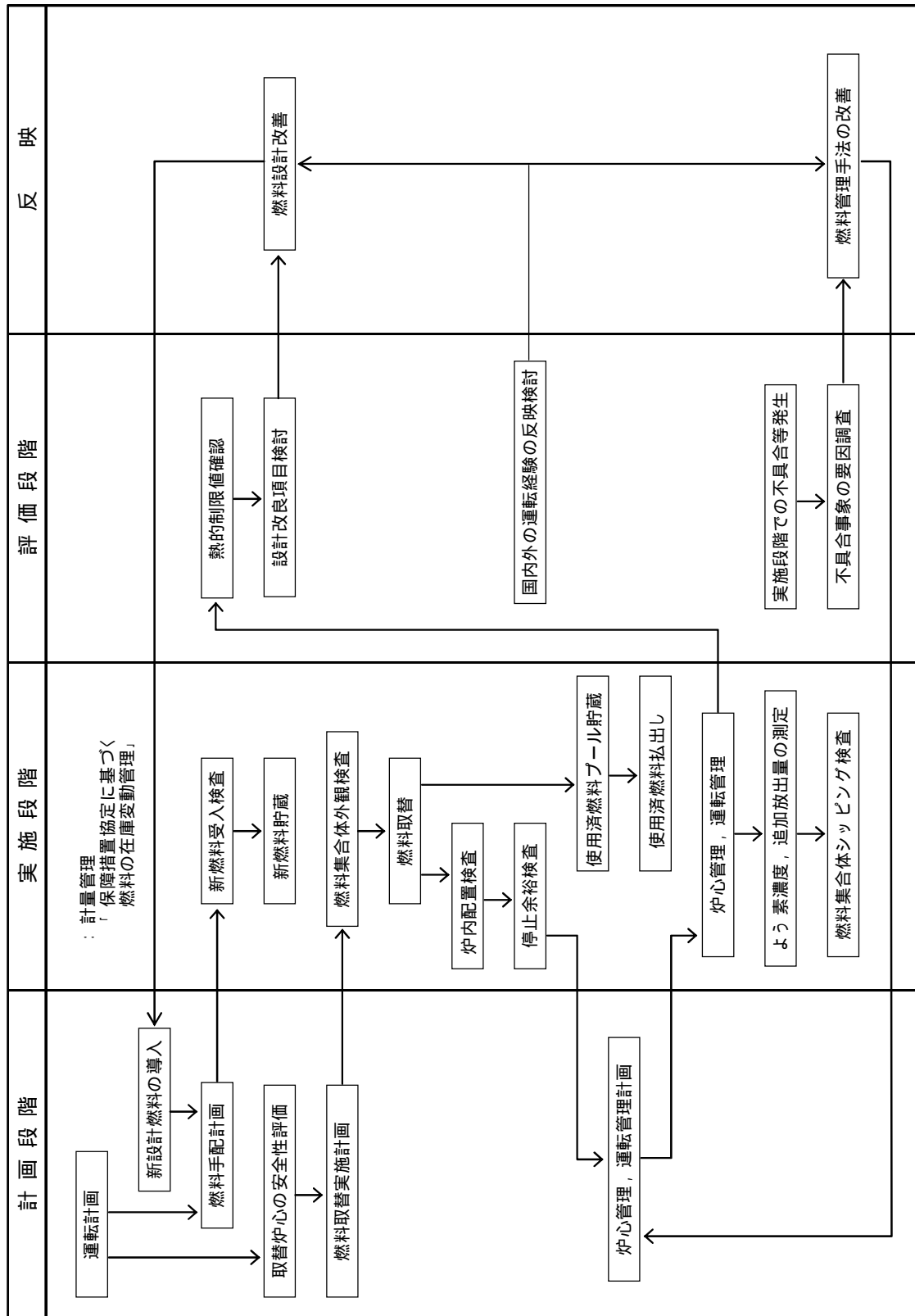
## (4) 燃料集合体最高燃焼度

燃焼度とは、原子炉に装荷される燃料の初期単位重金属重量あたりの発熱量 (MWd/t) をいう。

燃料集合体最高燃焼度は、燃料の使用範囲の制限として定められるが、この制限値は燃料タイプにより異なるため、新しい燃料タイプが装荷される毎に、それに対応した値を定めている。



別添資料 3.4-1 燃料管理の業務フロー（概要）



別添資料 3.4-2 燃料の変遷

燃料タイプ	年																								平均濃縮度 (wt%)	設計改良のねらい	主な設計仕様											
	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	元	2	3	4	5	6	7	8	9			10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
7 × 7																									約2.1	-	被覆管 L/D=1.8	水分ケツク なし	He 封入圧 約0.1MPa	0本								
7 × 7 改良型																									約2.5	P C I 低減 水素化防止	再結晶化 焼鈍材 L/D=1.0 ケソツク	あり	約0.1MPa	0本								
8 × 8																									約2.6	線出力密度低減 核特性改善	再結晶化 焼鈍材 L/D=1.0 ケソツク	あり	約0.1MPa	1本								
新型 8 × 8																									約2.9	機構的健全性向上 核特性改善	再結晶化 焼鈍材 L/D=1.0 ケソツク	あり	約0.3MPa	2本								
新型 8 × 8 シロエツク付																									約3.0	耐 P C I 性能向上	再結晶化 焼鈍材 ライナツク 高耐食性 L/D=1.0 ケソツク	あり	約0.3MPa	2本								
高燃焼度 8 × 8																									約3.4	高燃焼度化	再結晶化 焼鈍材 L/D=1.0 ケソツク	あり	約0.5MPa (太径)	1本								
9 × 9 (A型)																									約3.6	高燃焼度化 線出力密度低減	再結晶化 焼鈍材 ライナツク 高耐食性 L/D=1.1 ケソツク	なし	約1.0MPa (太径)	2本								
9 × 9 (B型)																									約3.6	高燃焼度化 線出力密度低減	再結晶化 焼鈍材 ライナツク 高耐食性 L/D=1.1 ケソツク	なし	約1.0MPa (角管)	1本								

別添資料 3.4-3 BWR 燃料の改良の経緯

		昭和40年		昭和50年		昭和60年		平成元年		平成10年		平成20年	
区分	(開発期)	初期の性能向上	信頼性向上	利用率向上	高性能化 / 高燃焼度化								
	主な改良技術	6 x 6 型実証 国産燃料の性能実証 7 x 7 型の開発 (高熱出力密度・長尺型の開発)	水分管理強化 7 x 7 改良型燃料 ならし運転方法 8 x 8 型燃料	ならし運転方法の再評価 ヘリウム加圧燃料 上下2領域燃料 コントロールセルコア ジルコニウムライナ燃料 ならし運転方法の緩和 高燃焼度燃料									
燃料型式		6 x 6 , 7 x 7 原型	7 x 7 改良型	8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	9 x 9
			・ 線出力密度の低減 ・ ウォーターカットの採用	・ 上下2領域燃料 ・ ウォーターカット2本 ・ ウォーターカットの採用 ・ コントロールセルコア	・ 線出力密度の低減 ・ ウォーターカットの採用	・ シロコライパイプの採用 ・ ならし運転方法の緩和 ・ 省ウラン技術	・ 高燃焼度化 ・ 線出力密度の低減 ・ 大径ウォーターカット2本(A型) ・ ウォーターカット1本(B型) ・ 部分長燃料棒(A型)	・ 高燃焼度化 ・ ウォーターカット2本(約1.0MPa) ・ 線出力密度の低減 ・ 大径ウォーターカット2本(A型) ・ ウォーターカット1本(B型) ・ 部分長燃料棒(A型)					
島根1号機 使用実績													
			7 x 7 7 x 7 改良型	8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	新型 8 x 8	9 x 9 (A型) 9 x 9 (B型)

## 別添資料 3.4-4 運転経験の反映状況

件名	事象・原因・対策等
チャンネルボックス 曲がり事象 (昭和 62 年 12 月) オスカーシャム 発電所 2 号機 (スウェーデン)	<p>再使用チャンネルボックスの曲がり为主要原因と考えられる燃料破損が発生した。この燃料は日本で使用している燃料とは設計が異なる S V E A 燃料であった。調査の結果、隣接の燃料に装着されていたチャンネルボックスが再使用中で、過度の曲がりが生じており、このチャンネルボックスの曲がりにより熱的余裕の減少が生じ、定常運転中ドライアウトになり燃料破損に至ったものと結論付けられている。</p> <p>島根原子力発電所 1 号機では、昭和 58 年度 (第 9 回定検) で装荷したチャンネルボックスの一部を昭和 63 年度 (第 14 サイクル) から平成 3 年度 (第 16 サイクル) にかけて再使用した。再使用にあたっては、曲がりをはじめとした変形等について、再使用期間中の健全性評価を行い問題ないことを確認しているが、前述のオスカーシャムでの事例を踏まえ、平成 4 年度 (第 17 サイクル) 以降、チャンネルボックスの再使用はしていない。</p> <p>なお、島根原子力発電所 1 号機の営業運転開始以降、燃料破損は発生していない。</p> <p>また、平成 15 年度 (第 25 サイクル) 以降にチャンネルボックスの曲がりを考慮した R 因子を設定することにより、チャンネルボックスの曲がりを考慮した熱的制限値を評価し、監視を行っている。</p>
中性子束振動事象 (昭和 63 年 3 月) ラサール発電所 2 号機 (米国)	<p>炉心出力振動の経験を反映して、安定性の余裕を確保する観点から、島根原子力発電所 1 号機では以下の対策を講じた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・昭和 63 年 11 月、原子炉再循環ポンプトリップ時、制御棒を挿入して出力抑制を図ることを運転マニュアルに記載した。</li> <li>・平成 2 年 8 月以降、万一の原子炉再循環ポンプトリップ後、不安定事象を確認した場合、原子炉をスクラムさせる手順を取ることとした。</li> <li>・平成 5 年度 (第 17 回定検)、原子炉再循環ポンプが 1 台以上トリップしたときに数本の制御棒を挿入して出力を低下させるため、選択制御棒挿入機能 (S R I) の改造を実施した。</li> <li>・平成 6 年度 (第 18 サイクル) 以降、炉心の不安定領域に入ることのないように運転上の制限 (安定性制限曲線) を設け、運転管理面における強化を図った。</li> </ul>
燃料棒損傷事象 (平成 2 年 6 月) 浜岡原子力発電所 1 号機	<p>定期検査において、燃料集合体 5 体に漏えいが確認された。調査の結果、特異性のある水質環境 (ナトリウムイオン (Na<sup>+</sup>) 濃度が高い等) により、腐食感受性の相対的に高い燃料被覆材に異常な酸化が発生し、一部の燃料棒ではく離さらには漏えいに至ったものである。</p> <p>本事象の対応として、島根原子力発電所 1 号機では水質の監視を強化するとともに、新燃料の燃料被覆管は腐食感受性の低い材料を使用すること、さらに燃料被覆管表面のはく離を検知する観点から照射燃料外観検査の充実を図った。検査の結果、腐食感受性の高い燃料被覆材においてもはく離は認められなかった。</p> <p>島根原子力発電所 1 号機では平成 8 年度 (第 19 回定検) で腐食感受性の高い燃料被覆管を用いた燃料は全て取り出されている。</p>