解説

新検査制度導入と炉心設計 運転期間延長に伴う炉心設計上の課題と対応

中部電力(株) 原田 健一, 三菱重工業(株) 浅野 耕司,
(株)グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン 山中 章広

2009年1月から施行された新検査制度により、定期検査間隔を18ヶ月または24ヶ月まで延長することができるようになり、それに伴って運転期間もそれぞれの定期検査間隔を上限とする期間まで延長することが可能になった。運転期間を延長する場合には炉心の反応度を高める必要があり、燃料の濃縮度を増加して対応する方法と、濃縮度は増加せず新燃料取替体数の増加のみで対応する方法がある。今回、至近の対応となる後者を想定して、PWR および BWR において、種々の工夫により現行許認可上の制限値等を満足する炉心設計を行ったので紹介する。

I. はじめに

1. 原子力発電の設備利用率向上

国内の電力会社ではこれまで、原子力発電所の設備利用率向上を目指して、海外の原子力発電所で実績のある「定格熱出力運転」、「原子炉出力の増加」および「24ヶ月運転を目指した運転期間の延長」を国に要望してきた。以下、その現状について概観する。

(1) 定格熱出力運転

従来は定格電気出力運転を行っていたが、定格熱出力運転とすることにより、海水温度の低い冬場においてタービンの効率が増加するため、定格出力以上に電気出力を増加できるメリットがある。定格熱出力運転は、2000年末に導入手続きが国で制定され、2002年から国内の原子力発電所で導入されてきた。現在では原子力発電所約1基に相当する電気出力が創出されている。

(2) 原子炉出力の増加

欧米では燃料の熱的制限値に対する運転裕度を確保して数%の出力増加を行っており、発電機等の設備改造を伴うものでは約20%の出力増加を行っている発電所も存在している。

国内においては、具体的な計画の検討が進められている約5%の出力増加を対象として、原子炉の安全性、設備の健全性、保守・運転管理への影響などを検討評価するために、2009年1月に総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会原子炉安全小委員会に原子炉熱出力向

上ワーキンググループが設置された。

(3) 24ヶ月運転を目指した運転期間の延長

米国では当初、日本と同じ約1年間の運転期間であったが、1990年代から、19ヶ月、24ヶ月と運転期間を延長してきており、設備利用率の向上に大きく寄与している。

国内においては、原子力安全・保安院から示された「保全プログラムを基礎とする検査の導入について(新検査制度)」(2008年6月)の考え方に基づいて、原子炉の運転期間を延長する場合の導入手続きとして、関係する経済産業省令が2008年8月に改正され、2009年1月から施行された。この改正により、段階的な運用になるが、定期検査間隔を18ヶ月または24ヶ月まで延長することができるようになり、それに伴って運転期間もそれぞれの定期検査間隔を上限とする期間まで延長することが可能となった。

以下では、新検査制度の導入に伴い可能となった運転期間の延長のための炉心設計について解説する。

2. 新検査制度と運転期間延長

新検査制度の概要を第1図に示す。今回の見直しでは、科学的・合理的判断に基づいて検査制度を充実することを目的に、新たな取組みが追加されている¹⁾。

「保全計画の届出と国による事前確認」では、事業者が現状の機器の状態と現状保全の妥当性評価結果に基づいて保全計画を作成して国に事前に届け出て、国が保全計画を確認し、事業者の保全活動が継続的に改善されていることを確認する。「設備の傷み具合のデータ収集と点検への反映を義務づけ」では、事業者が経年劣化状況や過去のトラブルを踏まえて、保全活動の評価・改善を繰

Implementation of New Inspection System and Core Design for Extended Cycle Operation: Kenichi HARADA, Koji ASANO, Akihiro YAMANAKA

(2010年 2月4日 受理)

科学的・合理的判断に基づく検査制度の充実

⇒ 新たな取り組みの追加

- 保全計画の届出と国による事前確認
- 設備の傷み具合のデータ収集と点検への反映を義務づけ
- 新しい技術を用いた運転中の機器の状態監視を充実

技術的根拠のある運転期間の設定が可能

第1図 新検査制度の概要

り返すことを義務付けている。「新しい技術を用いた運転中の機器の状態監視を充実」では、振動診断、潤滑油診断、赤外線サーモグラフィ診断等の技術の活用により、分解点検を行うことなく機器の異常の兆候をいち早く把握できることを目的としている。

これらの新たな取り組みの追加により、従来は法律により一律13ヶ月としていた運転期間に対し、プラントごとに技術的根拠のある運転期間の設定が可能となった。

実際に運転期間を延長する場合、その運転期間に対し定格出力が維持できるように炉心の反応度を高める必要があり、基本設計である燃料の濃縮度を増加して新燃料取替体数を増加して対応する方法と、基本設計を変更せずに新燃料取替体数の増加のみで対応する方法がある。前者では原子炉設置変更許可の申請が必要であり、後者では現行の原子炉設置許可の基本設計である制限値等を満足させる必要がある。

至近の対応としては基本設計を変更しない後者の方法となるが、新燃料取替体数の増加を含め、運転期間延長が炉心特性に種々の影響を及ぼす。その評価のための基本的な考え方の取りまとめを目的として、2009年1月に、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会原子炉安全小委員会に安全評価ワーキンググループ(長期サイクル炉心評価)が設置され、代表的なPWRおよびBWRを対象として運転期間延長が炉心特性、安全評価等に及ぼす影響について検討された。

本稿では、運転期間を延長したPWRおよびBWRにおいて、現行の原子炉設置許可の制限値等を満足する炉心を設計したので、その主要特性とともに紹介する。

Ⅱ. PWRの炉心設計

1. まえがき

燃料仕様(濃縮度やガドリニア濃度など)を現状の設置許可条件のまま運転期間を延長するには、炉心の余剰反応度を増加させるために原子炉に装荷する新燃料の取替体数を増加させる必要がある。この場合においても、炉心の特性が原子炉設置許可申請書本文に適合したものであることを確認する必要がある。本章では、基本設計な

いし基本的設計方針に則した運転が可能である運転期間として、16ヶ月(原子炉起動から停止までの期間)まで延長した場合の、代表プラントにおける炉心特性への影響評価の結果を紹介する。

2. 運転期間の延長

現行の燃料仕様での運転期間と新燃料取替体数の関係は、代表プラント^{a)}において運転期間を13ヶ月、16ヶ月とした場合、それぞれ60体、72体程度となる。このように、16ヶ月運転では大半の燃料が3サイクル使用され、現行炉心と同等の燃料運用効率を維持することができる。さらに、16ヶ月程度までの運転期間の延長であれば、それによる炉心特性の変動分が、現在の各安全解析使用値に見込んでいる炉心の変動の範囲内となり、従来の取替炉心設計の延長線上での対応が可能になると想定される。

3. 炉心特性への影響

一般に、運転期間延長のための新燃料取替体数増加やサイクル燃焼度増加により、

- サイクル初期の余剰反応度の増加
- 炉心内出力分担の変化
- 反応度特性の変化

等の現象が炉心特性に影響を与えることが考えられる。比較的短い運転期間の延長であればこれらの影響は小さく、従来の取替炉心の設計手法を適用できると想定されるため、今回は運転期間を16ヶ月とした代表プラントにおいて各現象による影響を評価した。

(1) サイクル初期の余剰反応度の増加

新燃料取替体数が増加するとサイクル初期の余剰反応度は増加する。PWRにおいては、余剰反応度は1次冷却材中のホウ素により制御するため、ホウ素濃度は増加することとなる(第2図)。そのため、原子炉設置許可申請書に記載されているホウ素濃度に関連するパラメータへの影響を評価し、その結果、現行記載値の範囲内で取替炉心を構築できることを確認した。

(2) 炉心内出力分担の変化

新燃料取替体数の増加により、反応度の高い新燃料が隣り合って炉心に装荷され、出力ピーキングは若干大きくなる可能性がある。代表プラントにおいては、燃料配置の工夫により、出力ピーキングは現行安全解析使用値の範囲内となることを確認した。16ヶ月炉心の燃料配置例を第3図に示す。実機取替炉心では、出力ピーキングは、従来から取替炉心の安全性確認項目の一つとして取替炉心設計のつど確認しており、運転期間を延長した16ヶ月炉心においても同様に評価することで核設計上開

^{a)}燃料集合体体数193体(燃料集合体最高燃焼度を55 GWd/tとした17×17型燃料集合体を装荷)、定格電気出力約120万kWの4ループプラントを対象としている。

第2図 燃焼に伴うホウ素濃度の推移

題ないことを確認することになる。

(3) 反応度特性の変化

反応度特性についても、出力ピーキングと同様に、従来から取替炉心ごとに核設計上問題ないことを確認している。反応度係数の一つである減速材温度係数は、減速材温度が変化することによる反応度効果であり、減速材温度が上昇した場合には、減速材密度の減少による減速能低下に起因する負の反応度効果と、冷却材中のホウ素原子数の減少による正の反応度効果から決定されるものであり(第4図)、出力運転中は常に負でなければならない。この減速材温度係数は、サイクル初期のホウ素濃度が高くなることにより、若干、正側(負値であるが絶対値が小さい方向)になる傾向が認められるが、ガドリニア入り燃料の装荷体数や装荷位置を工夫することで、サイクル初期のホウ素濃度を低下させ、減速材温度係数が出力運転状態で負になるよう設計することができる。以上から、反応度特性についても、現行安全解析使用値の範囲内で取替炉心を構築することが可能である。

第4図 減速材温度係数

4. 結論

16ヶ月程度への運転期間の延長では、炉心特性に大きな影響が生じないため、現行炉心と同様の基本設計ないし基本的設計方針に則した取替炉心を構成することができるとの結論に至った。

Ⅲ. BWR の炉心設計

1. まえがき

基本設計を変更しない範囲で運転期間の延長を行う場合、より長期間にわたって原子炉の特性が種々の運転制限値等を満足するように、燃料配置・制御棒パターンの工夫およびガドリニア設計の最適化が必要となる。本章では代表プラント^{b)}において、運転期間を19ヶ月に延長した場合の炉心設計を実施した結果を紹介する。13ヶ月運転に比べて、新燃料取替体数は全炉心の約1/4程度から約1/3程度に増加する。

2. BWR 炉心設計の概要

燃料核設計においては、基本設計としての濃縮度を決定するとともに、設計条件の運転期間中に平坦な余剰反応度特性を有し、サイクル末期においてガドリニアが燃え尽きるようにガドリニアの濃度と本数を調整する。

燃料配置としては、現行の13ヶ月運転では、コントロー

^{b)}燃料集合体体数764体(燃料集合体最高燃焼度を55 GWd/t とした9×9型燃料集合体を装荷)、定格電気出力約110万kWのプラントを対象としている。

第3図 装荷パターンの工夫例

ルセル炉心が多く採用されている。これは、運転中の反応度補償に用いる制御棒の周囲4体に燃焼が進んで反応度が小さくなった燃料集合体を配置(「コントロールセル」という)する炉心設計であり、制御棒引抜き時に当該制御棒周辺の出力上昇を小さくできることから、制御棒引抜き時の負荷損失が小さくなり運転中の設備利用率を向上させることが可能である。

上記の燃料核設計、燃料配置および制御棒計画は、最大線出力密度、最小限界出力比、炉停止余裕などの炉心特性が運転制限値を満たすように決定される。さらに、プラント過渡事象に及ぼす影響の指標として、主要な反応度係数も重要である。

3. 19ヶ月運転炉心設計

13ヶ月運転用に設計された燃料をそのまま用いて19ヶ月程度の運転を行う場合には、サイクル期間中でのガドリニア燃焼特性が最適化されておらず、余剰反応度が高くなる傾向となる。一方、運転期間に応じてガドリニア設計を最適化すれば、平坦な余剰反応度を得ることができる。余剰反応度の例を第5図に示す。

本節では、ガドリニア設計を変更しない場合と最適化した場合のおおのについて、運転制限値を満足する炉心を設計した結果を紹介する。燃料配置と制御棒挿入位置を第6図に示す。新燃料は、13ヶ月運転の場合と同様、炉心最外周を除く位置に、隣接させずほぼ均等に配置している。

(1) 燃料配置・制御棒パターンの工夫

ガドリニア設計を変更しない炉心の燃料配置としては、コントロールセルを構成しないコンベンショナル炉心を採用した(第6図左)。

コントロールセル炉心では、コントロールセル以外の場所に新燃料または燃焼の進んでいない反応度の大きい燃料が集まりやすい傾向となる。特に、運転期間の延長を行った場合には、新燃料取替体数が増加し、反応度が大きい燃料が多くなること、および挿入される制御棒の数が増加するため、必要な数のコントロールセルを作成

第5図 余剰反応度の例(①②は19ヶ月運転)
①はガドリニア設計を変更しない場合、
②はガドリニア設計を最適化した場合

第6図 燃料配置(1/4炉心)と制御棒挿入位置

することが困難になる可能性がある。

これに対してコンベンショナル炉心では、運転期間の延長を行った場合でも、反応度の大きい燃料と小さい燃料を比較的均等に配置できるため、炉心設計上の制約を少なくできる。海外ではすでに24ヶ月程度の運転を行っている例があるが、コントロールセルを配置しない炉心とすることが多い。なおコンベンショナル炉心では、炉心全体を均一に燃焼させるため、制御棒の挿入位置を数ヶ月ごとに変更する運用が一般的である(第7図)。

(2) ガドリニア設計の最適化

余剰反応度の増加への対策として、運転サイクル長さに適したガドリニア濃度に増加させるとともに、サイクル初期の余剰反応度を調整するためにガドリニア入り燃料棒の本数を変更した設計を採用し、19ヶ月程度の運転に適した余剰反応度特性が得られるようにすることができる。なお、ガドリニア設計の変更は、運転中の余剰反応度特性を改善する目的で、これまでにも基本設計の範囲内での実績を有している。

ガドリニア設計を最適化することによって、余剰反応

第7図 コンベンショナル炉心の制御棒パターン
(サイクル初期のP1からサイクル末期のP12に向
かって挿入制御棒位置■を変更させている)

度が適切に設定されているため、コントロールセル炉心を採用することができる(第6図右)。コントロールセルの数も現行炉心程度であり、反応度の大きい燃料と小さい燃料とを比較的均等に配置することができる。また、運転期間を通じて余剰反応度が平坦であるため、制御棒パターンの変更も少ない。なお第6図右では、一部のコントロールセルに新燃料が配置されているが、当該制御棒は運転サイクル後半でのみ挿入される。

(3) 反応度係数への影響

プラント過渡事象に影響を及ぼす重要なパラメータとして、減速材ボイド係数およびドップラー係数の変化について評価した。その結果、いずれの炉心においても、13ヶ月炉心と同等の特性であることが確認できた。

4. 結論

以上の通り、19ヶ月程度への運転期間の延長であれば、燃料配置・制御棒パターンの工夫あるいはガドリニア設計の最適化によって、基本設計を変更することなく、運転制限値を満足する炉心を設計することができた。

IV. おわりに

2009年10月に、安全評価ワーキンググループ(長期サイクル炉心評価)の成果が、パブリックコメントを経て、報告書「原子炉運転期間の設定の妥当性確認に関する評価の基本的考え方」にまとめられた²⁾。これにより、運転期間延長に必要な評価が具体化され、今後の運転サイクルにおける運転期間延長がいよいよ現実のものとなった。各電力会社においては、着々とその準備を整えているところである。

さらに、より一層の運転期間延長と効率的な燃料の運

用を目指して、基本設計である燃料の濃縮度を増加する方法についても検討が進められている。これらを通じて、また原子炉出力の増加も併せ、既存の原子力発電所の利用率向上を推進していく。

—参考資料—

- 1) 経済産業省原子力安全・保安院パンフレット「検査制度見直しのご案内」。
- 2) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会原子炉安全小委員会安全評価ワーキンググループ(長期サイクル炉心評価)報告書「原子炉運転期間の設定の妥当性確認に関する評価の基本的考え方」(2009年10月26日)。

著者紹介

原田健一(はらだ・けんいち)

中部電力㈱
(専門分野/関心分野)BWR 燃料設計, BWR 炉心設計

浅野耕司(あさの・こうじ)

三菱重工業㈱
(専門分野/関心分野)原子炉物理学, PWR 炉心設計

山中章広(やまなか・あきひろ)

(株)グローバル・ニュークリア・フュエル・
ジャパン
(専門分野/関心分野)BWR 炉心設計