学位論文題名

Subcritical Rod Worth Analysis of Pressurized Water Reactors by the Modified Neutron Source Multiplication Method with Extraction of Fundamental Mode

（基本モード抽出による修正中性子源増倍法を用いた
加圧水型原子炉の未臨界制御棒価値解析に関する研究）

学位論文内容の要旨

加圧水型軽水炉（PWR）では、燃料取替え後の起動試験において炉物理試験が行われる。制御棒価値測定もこのうちのひとつである。制御棒価値測定は我国でPWRの運転が始まって以来ホウ素希釈による手法が採用されてきた。この方法では、ホウ素濃度を連続的に希釈し、それにより添加される正の反応度を、適宜制御棒を挿入することにより、負の反応度を加え、原子炉を臨界近辺に保ちつつ制御棒を挿入し、制御棒による反応度添加量を反応度計により測定する。制御棒挿入による出力分布変化が、反応度測定に影響を及ぼさないためには制御棒の挿入の時間間隔をあまり短くできないことから、ホウ素の希釈率に制限が必要である。このため、1グループの制御棒価値を測定するためには2時間前後を要する。さらに、ホウ素希釈を行うために、1次冷却材中に純水を注入し、同時に同じ量の冷却材を抽出する。このため、希釈に伴い抽出水が増える。抽出水は、処理し、再利用されるが、そのためのエネルギーが必要になる。このようなことから、ホウ素希釈による制御棒価値測定は、時間と費用がかかる。一方、電力の供給面から見れば、できる限り効率的に試験を完了し、不要なエネルギーを使うことなく、正常運転に復帰する必要がある。この観点から、制御棒価値測定法の改善が望まれていた。最近この問題を解決する手法として、動的制御棒価値測定法(Dynamic Rod Worth Measurement; DRWM)が実用化された。この手法は原子炉を臨界にした後、測定条件を整えて、制御棒を一気に全引き抜き状態から全挿入状態まで一定速度で挿入し、この際の中性子束の変化から制御棒価値を評価する方法である。このため、所要時間は測定条件作成も含めて1グループあたり15分程度になり、余分なホウ素希釈も不要となる。

一方、PWRの臨界近接は制御棒を順次引き抜き、最後に引き抜かれる制御棒をわずかに残すところで引抜をやめる。その後ホウ素希釈により、十分臨界に近づけ、最後に制御棒操作により臨界を達成する。この一連の制御棒引き抜き時に未臨界度を精度良く測定できれば、このときのデータから制御棒価値の測定が可能になる。これによって、臨界後に行われている試験を省略し、さらに効率的な試験の実施が可能になる。

本研究は、従来から未臨界度の評価に使われていた中性子源増倍法の改良手法を適用し、PWRのような複雑な炉心に対しても精度良く未臨界度を測定できることを確認し、実用的な測定手法の検討を行うものである。

本論分は6章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章の序論において、本研究の背景となるPWRの炉物理試験についてその目的、試験方法について述べるとともに、本研究の課題を明示した。

第2章では、従来から採用されている原子炉の未臨界度測定法について比較し、特に原理が簡明な中性子源増倍法の長短を述べ、実機への対応の上で必要な改良についてその理由を述べている。

第3章では、この改良法の原理について詳細に論じている。すなわち、従来の中性子源増倍法は1点近似動特性方程式に基づいているため、中性子束分布は未臨界度により変化しないことが前提とされている。しかし実際の炉心では中性子源の分布が局所的であり、中性子束分布も制御棒の移動により大幅に変化する。この効果を前もって解析により求めた補正係数を用いて補正することにより、正しい未臨界度を評価する。この手法で必要とされる各種補正係数の評価に際しては、対象とする炉心の固有値問題並びに中性子源固定問題として定義される定常3次元中性子拡散方程式をそれぞれに解く。

第4章では、この手法をPWRに適用するに当たり、炉心内の中性子源分布の評価精度に対する感度解析を行った。その前提として、制御棒挿入によって未臨界度が異なっているにもかかわらず、中性子計測データに差が無い場合であっても、補正係数を考慮することにより、未臨界度の差異を明確に算出できることを示しており、この改良手法が大型PWRにも適用できることを検証している。検討の結果、通常PWRに存在する2種の中性子源、すなわち、燃焼中の核燃料を起源とするきわめて弱い強度であるが炉心に広く分布する中性子源と、前サイクルの照射による局所的に強力な2次中性子源の双方を考慮する必要があることを明らかにした。燃料体内に局所的に配置されている2次中性子源の分布については当該燃料集合体平均で近似しても十分な精度の未臨界度を与えることができることから、補正係数評価には近代ノード法を適用できることを明らかにした。

第5章では、この手法を応用し、実機における制御棒値測定について評価法の検証を行った。実機ではまだこの手法に対応したデータが採取されていないが、原子炉を臨界にする際の測定データを解析することにより、その妥当性を確認することを目的として、泊発電所第2号機の実測データを解析した。対象とした炉心は第7サイクル、8サイクルである。

まず、未臨界状態での中性子束計測データは定常状態においても大きな統計的な変動があるため、その平均化について検討している。この際、制御棒の引き抜きが完了した後の定常状態に到達する時間についても検討している。これらの前準備の後、対象となる炉心で解析を行い、所要の補正係数を得た。この情報を用い、臨界近接中の炉心状態における未臨界度を評価した。さらに、評価された未臨界度と設計計算により得られている未臨界度との差の傾向から、実測データは γ 線により劣化していることを明らかにしている。この劣化分についての補正を行うことにより精度良く未臨界度、さらには制御棒値を評価できることを示している。

第6章では結論であり、これらの結果を総括し、この新しい手法を実際のPWRに適用するに当たり指針を示している。また、この指針を具体的に適用する場合の試験要領を提案している。

以上、本論文で述べた研究により、大型PWRにおいて、中性子源分布を的確に取り扱った解析により補正係数を求め、未臨界状態での中性子計数率データを処理することにより、高精度で未臨界度並びに制御棒値測定が可能であることが明らかになった。中性子計数率データ採取に当っては γ 線によるノイズに配慮が必要であることの重要性も明らかになった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 島 津 洋 一 郎
副 査 教 授 澤 村 晃 子
副 査 教 授 佐 藤 正 知
副 査 教 授 杉 山 憲 一 郎

学 位 論 文 題 名

Subcritical Rod Worth Analysis of Pressurized Water Reactors by the Modified Neutron Source Multiplication Method with Extraction of Fundamental Mode

(基本モード抽出による修正中性子源増倍法を用いた
加圧水型原子炉の未臨界制御棒価値解析に関する研究)

加圧水型軽水炉 (PWR) では、燃料取替え後の起動試験において炉物理試験が行われる。制御棒価値測定もこのうちのひとつである。制御棒価値測定は我国でPWRの運転が始まって以来ホウ素希釈による手法が採用されて来た。この方法では、ホウ素濃度を連続的に希釈し、それにより添加される正の反応度を、適宜制御棒を挿入することにより、負の反応度を加え、原子炉を臨界近辺に保ちつつ制御棒を挿入し、制御棒による反応度添加量を反応度計により測定する。制御棒挿入による出力分布変化が、反応度測定に影響を及ぼさないためには制御棒の挿入の時間間隔をあまり短くできないことから、ホウ素の希釈率に制限が必要である。このため、1グループの制御棒価値を測定するためには2時間前後を要する。さらに、ホウ素希釈を行うために、1次冷却材中に純水を注入し、同時に同じ量の冷却材を抽出する。このため、希釈に伴い抽出水が増える。これはまた、処理し、再利用されるが、そのためのエネルギーが必要になる。このようなことから、ホウ素希釈による制御棒価値測定は、時間と費用がかかる。一方、電力の供給面から見れば、できる限り効率的に試験を完了し、不要なエネルギーを使うことなく、発電をする必要がある。この観点から、制御棒価値測定法の改善が望まれていた。最近この問題を解決する手法として、動的制御棒価値測定法(Dynamic Rod Worth Measurement; DRWM)が実用化された。この手法は原子炉を臨界にした後、条件を整えて、制御棒を一気に全引き抜き状態から全挿入状態まで挿入し、この際の中性子束の変化から制御棒価値を評価する方法である。このため、所要時間は条件作成も含めて1グループあたり15分程度になり、余分なホウ素希釈も不要となる。

一方、PWRの臨界近接は制御棒を順次引き抜き、最後に引き抜かれる制御棒をわずか残すところで引き抜きをやめる。その後ホウ素希釈により、十分臨界に近づけ、最後に制御棒操作により臨界を達成する。この一連の制御棒引き抜き時に未臨界度を精度良く測定できれば、このときのデータから制御棒価値の測定が可能になる。また、臨界後に行われている試験を省略し、さらに

効率的な試験の実施が可能になる。

本論文ではこの観点から、PWRの炉物理試験、特に制御棒価値測定法の変遷について調査し、現在実用化されている手法についてさらに改良が可能であることを明らかにした。未臨界度測定法として、従来から使われていた単純な中性子源増倍法に基本モード抽出や各種の空間補正などを組み込んだ改良手法に着目した。しかし、この手法は小型臨界集合体で適用が検証されたのみであり、大型PWRのような複雑な炉心に適用することの妥当性を示すことが必要である。

そのためにまず、上記の改良手法が大型PWRに適用可能であるかを検討し、未臨界度評価精度の確認を通して、その可能性を初めて検証した。次にこの改良法を大型PWRに適用するに当たり、この手法で必要とされる補正係数の評価には多数の詳細炉心解析が必要とされることから、実用化のためには効率的な解析手法の開発も視野に入れておく必要がある。このため解析に用いる炉心内の中性子源分布の設定に際して、実際の中性子源に関して近似的取り扱いの種々の組み合わせについてその影響を解析し、未臨界度評価精度に対する感度解析を行った。その結果、PWRに存在する2種の中性子源、すなわち、燃焼中の核燃料からのきわめて弱い中性子源と、前サイクルの照射による局所的に強力な中性子源の双方を考慮する必要があること、またそれらの分布評価については従来手法で十分であることを明らかにした。また、各種補正係数算出のための詳細炉心解析には標準的なノーダル計算手法で十分であることも明らかにした。

次に、この手法を応用し、実機における制御棒価値測定について評価法の検証を行った。実機ではまだこの手法に対応したデータが採取されていないが、泊原子力発電所第2号機(北海道電力(株))において原子炉を臨界にする際の測定データを解析した。解析対象は第7サイクル炉心、並びに第8サイクル炉心である。本手法により各制御棒挿入状態における未臨界度を評価し、設計解析結果との比較から、データ採取並びにデータ処理を的確に行うことにより高精度で未臨界度を評価できることを示した。これは世界でも初めてのことである。本研究により、実機データを解析する際に留意すべき点を指針としてまとめた。すなわち①中性子計数率の統計的な変動を考慮すること、②制御棒引き抜き完了後に、遅発中性子の効果が十分なくなる状態でデータ採取を行うこと、③中性子計数率に混入する γ 線ノイズの低減に配慮することなどを明らかにした。

この結果に基づき、本手法を実機に適用する際の試験要領を提案している。

これを要するに、著者は、大型PWRにおける制御棒価値測定法の効率化のために、制御棒引き抜きによる原子炉の臨界近接時の中性子束計数率データに基づき、その基本モード成分を抽出することにより、精度良く未臨界度を評価する手法を提案し、実機データによりその妥当性を確認したものであり、原子炉工学、原子炉物理に対して適用範囲拡大に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。