

学 位 論 文 題 名

運転・保守データを活用した BWR プラントの
信頼性の向上に関する研究

学位論文内容の要旨

我が国の軽水炉である BWR、PWR は、日本の総発電電力量の約 3 割を占め、重要な電源の役目をなしている。このため、最近の石油の不安定な価格や地球環境問題の観点から、資源の乏しい我が国にとり「軽水炉の信頼性を向上させ、安全に運転・保守管理すること」が、重要でかつ喫緊の課題である。一方、我が国の軽水炉は、米国より導入され、約 35 年以上の運転・保守管理経験を経てきているが、現在、設備利用率が、低く、米国等の運転・保守管理技術に比べると改善する必要がある。すでに、米国等では、航空機産業等原子力以外の産業において実績のある信頼性重視保全 (RCM: Reliability Centered Maintenance)、信頼性解析 (RA: Reliability Analysis)、確率論的安全解析 (PSA: Probabilistic Safety Analysis) の技術を運転・保守管理に導入した保全プログラムを作成し、これに基づき設備の維持・改善を図り良好な運転実績を上げている。これらの技術は、各国とも、これまで蓄積された原子力プラントの系統、機器の運転・保守データを活用して、科学的、合理的な知見を基に、原子力プラントの信頼性の向上を図っている。

このように我が国の軽水炉が、直面している重要でかつ喫緊のこの課題を解決するため、本研究は我が国のこれまでに蓄積された運転・保守データを使い、ハード面としては、設備の改善を、ソフト面では、これまでの頻度論に変え、新たにベイズ統計を用いて、保全プログラムの基本となる個別プラントの評価方法と機器の分解点検間隔の最適化を行う評価方法を提案し、BWR プラントの信頼性の向上を図ることを目的とする。

最初に、運転・保守管理経験とデータに基づき、設備改善を行った BWR 原子炉再循環ポンプの熱疲労割れ対策の研究について述べる。特徴としては、この熱疲労割れは BWR 導入当初、ポンプの軸封部について、原設計から変更改善を行ったことにより発生した不具合であり、ある変更改善を行うとその後、2 次的影響が発生するという教訓事例でもある。対策の検討に当たっては、運転と保全計画を行う電気事業者と機器の製造と保守作業を行うメーカーとの共同研究として長期的開発計画を立案し実施した。事前準備として、現場でのポンプの運転・保守管理の状況や実績、世界における同種の問題の分析を行った。これらのデータを基に各種試験を実施し、根本原因を徹底的に追究し、得られたデータを基に対策を立案した。対策は多くの対策案の中から既設ポンプおよび新設ポンプにも共通に使い、信頼性が高く、コンパクトな設計とした。実機の採用に当たっては、原子炉再循環系を模擬した試験ループにおいて、対策の実証試験を行った。更に、現場に取り付け、約 10 年の運転経験後、対策の実証性を再確認するプログラムを作り、所定の機能を有していることの確認や 2 次的影響のないことを確認し、保全プログラムを作成した。

この結果、この対策は根本原因を究明して立案されたもので、確証、実証試験や実機運転経験に裏付けられたものであること並びにこの熱疲労割れは、世界の BWR 共通課題であるため、日本の全ての BWR に採用されるとともに、米国を中心に輸出され、BWR プラントの信頼性の向上に役立っている。更に、その評価方法は、狭隘部で発生する温度変動と熱応力との関係の評価するものであり、その後、ABWR プラントのインターナルポンプや制御棒駆動機構の狭隘部での温度変動の評価に適用された。

次に、我が国でも PSA データとして、1982 年より運転・保守データが原子力施設情報公開ライブラリー (NUCIA: NUClear Information Archives) に蓄積されている。一般に、海外の運転・保守データに比べ、我が国の機器の故障率は、比較的小さく、信頼性が高いといわれている。このため、系統、機器の故障 (起動失敗、不具合事象発生等) の件数が、0 または少なく、これまでの頻度論では評価できなく、運転・保守データの活用は限定されていた。最近、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法: Markov Chain Monte Carlo Method) の開発により、故障の件数が、0 または少なく、多次元のパラメータを含むモデルを評価できるベイズ統計が、各分野で使われはじめた。特に、医学、生物、遺伝、経済等の分野での研究や利用が広く行われている。原子力分野では、米国はじめ、海外において研究が行われているが、我が国では運転・保守技術に適用した研究はない。

そこで、我が国の運転・保守データの特徴をベイズ統計により分析し、保全プログラムに役立て、プラントの信頼性の向上を図るため、保全プログラムの基本となる定期的に行われる試験と機器の分解点検間隔に着目して検討した。具体的には、我が国の運転・保守データに基づき BWR 個別プラントの評価方法を提案し、実例として原子炉隔離時冷却系のデマンド故障確率について分析を行った。続いて、機器の時間依存性の有る不具合事象発生率をベイズ統計により分析し、そのデータを基に、機器のアンアベラビリティを評価し、分解点検の最適な間隔を定量的に決める評価方法を提案し、実例として、安全系電動弁を解析した。この結果、次のことがいえる。

(1) ベイズ統計は我が国のように故障（起動失敗、不具合事象発生等）の件数が、0 または少ない事象の解析に適し、今後、BWR プラントに使われている系統、機器のデマンド故障確率、不具合事象発生率等の評価に利用できることを示すことができた。

(2) これまで、頻度論では、系統、機器の故障について個別プラントの評価ができなかったが、ベイズ統計により個別プラントの評価が可能となり、個別プラントの特徴を定量的に示すことができる。今後、この方法により機器や系統を評価すれば、保全プログラムにその成果を反映できることや個別プラントの PSA 評価にも役立つ。次に、実例として BWR 原子炉隔離時冷却系の評価を行った結果、定例試験時のデマンド故障率と定期検査の試験時のデマンド故障率が違うことがわかった。特に、定期検査の試験時のデマンド故障率は、米国と比較しても高く、その原因は機器の分解点検によるものであることがわかった。この結果、電気事業者は、個々のプラントの特性を把握でき、分解点検の方法等を改善した保全プログラムを作成して、BWR プラントの信頼性の向上を図ることができる。

(3) ベイズ統計により機器の時間依存性の有る不具合事象発生率が、分析でき、これとアンアベラビリティとを、組み合わせると機器の定例試験と分解点検間隔とのあり方や分解点検間隔の最適化を行うことができる。これまで、経験により機器の分解点検間隔を決めていたが、運転・保守データに基づき、最適な分解点検間隔を定量的に示すことができ、その結果を保全プログラムに反映できる。本研究では、実例として、BWR 安全系電動弁を評価し、実用性を示したが、BWR プラントを構成する他の機器にも適用可能である。更に、個々のプラントには、個別の運転・保守データがあるので、この評価方法を適用すれば、各機器の最適な分解点検間隔が決められ、これを基に個別プラントの保全プログラムが作成できる。

(4) 今回、BWR の原子炉隔離時冷却系と安全系電動弁を実例として、ベイズ統計を基本とした評価方法について述べているが、これらの評価方法は PWR の各系統、機器にも適用化可能であり、今後、広範囲に活用されることを期待できる。

なお、我が国の軽水炉が直面している「軽水炉の信頼性を向上させ、安全に運転・保守管理すること」という重要でかつ喫緊の課題に対して、現在、我が国の規制当局も新たな規制や検査の基本方針を示し、電気事業者もこの方針に向け、対応を開始したところであり、本研究が、この取り組みに役立つものとする。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	奈良林	直
副 査	教 授	島 津	洋一郎
副 査	教 授	杉 山	憲一郎
副 査	教 授	中 村	孝

学 位 論 文 題 名

運転・保守データを活用した BWR プラントの 信頼性の向上に関する研究

我が国の軽水炉である沸騰水型原子炉 (BWR) および加圧水型原子炉 (PWR) は、日本の総発電電力量の約 3 割を占め、重要な電源の役目をなしているが、様々な故障や不適合事象に起因する長期停止が発生しており、検査制度や保全プログラムの違いもあって設備利用率が欧米に比べて低い。最近の石油の不安定な価格や地球環境問題の観点から、資源の乏しい我が国にとって軽水炉の信頼性と設備利用率を向上させることが、重要かつ喫緊の課題である。すでに、米国等では、航空機産業等原子力以外の産業において実績のある信頼性重視保全 (RCM: Reliability Centered Maintenance)、信頼性解析 (RA: Reliability Analysis)、確率論的安全解析 (PSA: Probabilistic Safety Analysis) の技術を運転・保守管理に導入した保全プログラムを作成し、これに基づき設備の維持・改善を図り良好な運転実績を上げているが、我が国の原子力プラントの特徴を活かした手法を開発する必要がある。そこで本研究では、これまでに蓄積された運転・保守データを使い、ハード面としては、機器設備の改善を、ソフト面では、これまでの頻度論に代え、最新の統計理論を適用して、保全プログラムの基本となる個別プラントの評価手法と機器の分解点検間隔の最適化を行う手法を新たに開発し、BWR プラントの信頼性の向上に寄与することを研究目的とした。ちなみに故障データからベイズ統計理論を用いて原子力発電所の個別評価を行った例は極めて少ない。

原子力発電所のシステムや機器の信頼性を向上する手段としてまず第 1 に、(1) システムを構成する機器の抜本的改良である恒久対策を取る。恒久対策が取られてもランダムな故障は残るので、故障が多いシステムを抽出し、(2) システムを構成する系統機器点検の重点化を図り、さらに (3) 機器設備の分解点検間隔の最適化を推進することで、原子力発電所の信頼性を確保することとした。(1) 恒久対策に関しては、BWR の心臓部である原子炉再循環ポンプの熱疲労割れ対策を取り上げた。対策の検討に当たっては、現場でのポンプの運転・保守管理の状況や実績、世界における同種の問題の分析を行った。これらのデータを基に各種試験や流動解析を実施し、根本原因を徹底的に追究し、得られたデータを基に対策を立案した。実機の採用に当たっては、対策の有効性を確認する実証試験を行い、更に約 10 年の運転経験後、所定の機能を有していることの確認や 2 次的影響のないことを確認し、保全プログラムを作成した。この結果、恒久対策の有効性が確認でき、我が

国の全ての BWR に採用されるとともに、欧米を中心に海外にも輸出され、世界の BWR プラントの信頼性の向上に役立っている。

(2) 系統機器点検の重点化に関しては、我が国の PSA データとして 1982 年より運転・保守データが原子力施設情報公開ライブラリー (NUCIA : NUClear Information Archives) に蓄積されており、その活用を図った。一般に、海外の運転・保守データに比べ、我が国の機器の故障率は比較的小さく、信頼性が高いため、系統や機器の故障 (起動失敗、不具合事象発生等) の件数が、0 または少なく、これまでの頻度論では定量的評価ができず、運転・保守データの活用は限定されていた。最近、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法:Markov Chain Monte Carlo Method) の開発により、多次元のパラメータを含むモデルを評価できるベイズ統計が各分野で使われはじめたので、本研究では NUCIA の運転・保守データを基に最新のベイズ理論を取り入れて統計処理できる手法を新たに開発した。この手法を用いて BWR で最も故障が多い原子炉隔離時冷却系の評価を行った。その結果、定例試験時のデマンド故障率と定期検査の試験時のデマンド故障率が違うことが判明した。特に、定期検査の試験時のデマンド故障率は、米国と比較しても高く、その原因は機器の分解点検に起因するものであることを明らかにした。

(3) 分解点検間隔の最適化については、実例として BWR 安全系電動弁をベイズ統計により評価し、機器の時間依存性の有る不具合事象発生率が分析できることを明らかにした。これとアンアベラビリティとを、組み合わせると機器の定例試験と分解点検間隔とのあり方や分解点検間隔の最適化を行うことができることを明らかにした。

現在、我が国の規制も新しい検査制度の導入に向け検査の基本方針を示し、電気事業者も対応を開始したところであり、本研究が、この取り組みに大きく貢献することが期待できる。これらの新知見は、原子力工学の発展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があると認める。