81. BWR 出力分布予測計算システムの実機試験

榎本 聡明*, 田中 治邦**, 堤 良介**, 西沢 靖雄***,
土居 一順**, 木口 高志**, 小林 節雄**, 他 実機試験推進グループ***

(1980年 3月3日 受理)

(1980年 9月2日 再受理)

On-Line Test of Power Distribution Prediction System for BWR

By Toshiaki ENOMOTO, Harukuni TANAKA, Ryosuke TSUTSUMI,
Yasuo NISHIZAWA, Kazuyori DOI, Takashi KIGUCHI,
Setsuo KOBAYASHI and On-Line Test Support Group

To assure the on-line performance of power distribution prediction system for BWRs, trial core performance monitoring equipment has been produced and its on-line test has been proceeded at an operating 784 MWe BWR. This equipment is a man-machine communication system to predict power distribution in advance of actual operating manipulation such as control rod operation or core flow rate change. It is composed of a process computer (HIDIC-80), an operator's console with a color CRT and plant data inputting devices. Main functions of the system are present power distribution monitoring, power distribution prediction and power-up trajectory prediction. As reported in the preceeding papers, simplified nuclear thermal hydraulic calculation models and model identification techniques are adopted in the calculation method. In this report, presented are the summary of the on-line test equipment and its on-line test results.

KEYWORDS: BWR type reactors, core performance monitoring equipment, on line performance test, control rod operation, core flow rate change, man-machine communication, operator's console, nuclear thermal hydraulic calculation, model identification, power distribution, computer calculations, mathematical models

I. 緒 言

沸騰水型原子炉(BWR)の運転に際しては、オンライン計算機で現在の出力分布を正確に把握し、また制御棒引抜きや炉心流量増加に先立って操作後の出力分布を短時間に、精度よく予測する機能の開発が、原子炉をより安全に、かつ効率よく運転する上で望まれる。

一般に、炉心設計、炉心運転計画作成では、炉内出力分布を求めるのに3次元の核熱水力特性計算が用いられている。しかし、この方法は計算時間が長く、また大容量の計算機メモリーを必要とすることから、オンライン計算機で使用することは現実的でない。このため、BWR 3次元シミュレータで用いられている核熱水力特性計算モデル¹⁾を簡略化し、実測値を用いたモデル同定手法を併用して、少ないコアメモリーで短時間に、精度よく出力分布を推定・予測する計算システ

ムを開発し、オフライン解析の結果とともに既報⁽²⁾⁻⁽⁵⁾で報告した。

炉心性能監視装置は、この出力分布予測計算システムを実際にオンライン化したものである。この装置の性能を確認するため実プラントで試験を行い、予測精

* 東京電力(株)原子力建設部(Tokyo Elec. Power Co., Ltd.)

** 東京電力(株)原子力管理部(Tokyo Elec. Power Co., Ltd.)

*** 東京電力(株)福島第一原子力発電所(Fukushima Daiichi Nucl. Power Station, Tokyo Elec. Power Co., Ltd.)

** (株)日立製作所エネルギー研究所(Energy Res. Lab., Hitachi Ltd.)

*** 宅間 正夫, 露木 孝, 小泉 幹男, 青木 四郎, 蛭田 実, 仙石 英典, 北山 一美, 種岡 成一(以上東京電力)

清川 和宏, 長岡 幸夫, 福岡 孝治, 岸 勝一, 太組 健児, 水野 雄弘, 横見 迪郎, 平沼 博志, 飯田 宏(以上日立製作所)

度と計算時間を評価した。

Ⅱ. 出力上昇過程におけるBWR炉心監視

現在稼動中のBWRでは、高出力状態での出力密度の急激な変動を避けるため、約50%程度以上の出力では流量制御でゆっくりと出力を上昇させ、原則として制御棒操作は最小流量で行なっている。第1図に、原子炉起動時の出力変化の1例を示す。この例では、制御棒引抜きと炉心流量変更による出力上昇を繰り返している。この方法は起動時および制御棒パターン交換時の標準的な運転法である。

第1図 出力上昇過程における炉心監視・予測機能使用時期

ここで開発したシステムでは、出力上昇過程における炉心状態を監視するための基本的な機能として、①現状出力分布監視、②出力分布予測、③炉心流量、炉心熱出力を予測する出力上昇経路予測、の3点を取り上げた。第1図には、これらの機能が主として使用される時期を示した。以下に、これらの監視・予測機能がどのように用いられるかを述べる。

1. 現状出力分布監視

現状出力分布が制限条件に違反していないかどうかを確認する時に使用する。この機能は出力上昇の全過程(A~M)で使用されるが、出力分布変化の激しい制御棒引抜き過程(A~B, F~G, K~L)で特に有効である。

2. 出力分布予測

(1) 制御棒を操作する(A~B, F~G, K~L)前に、制御棒操作後の出力分布が制限条件を満足するかどうかの予測に使用する。

(2) 炉心流量変更により出力分布を変更する場合(B~C, G~H, L~M)に、流量変更後の出力分布が制限条件を満足するかどうかの予測などに使用する。

3. 出力上昇経路予測

目標制御棒パターンまで制御棒を引き抜き(A~B, F~G, K~L)、炉心流量を計画値まで増加させた時(B~C, G~H, L~M)に目標出力を達成しうるかどうかの予測に使用する。また炉心流量変更によって出力を低下させ、その後制御棒を引き抜く場合(D~G, I~L)には、中性子吸収物質Xe濃度の変化が大きいため、出力上昇経路の予測は一般に難しい。この時期にこの機能を使用することの効果特に大きい。以下、上記した3機能について計算方式の概要を示す。

Ⅲ. 計算方式の概要

炉内出力分布は3次元の核熱水力のバランスによって定まる。しかし、一般に設計等で使用される3次元シミュレータはプログラム容量が大きく、計算時間も長い。したがって、3次元核熱水力特性計算のモデルをオンライン計算機で直接使用することは現実的でなく、次元数を減らす、計算体系を炉心の一部に限定するなどの簡略化が必要である。本報で述べる出力分布予測計算システムでは、核熱水力特性計算に修正1群方式の“FLARE”モデルを採用し、これを1次元または炉心内の狭い領域内で3次元的に使用できるよう修正した(2)~(5)。

また、計算モデルによる計算誤差、および上記の簡略化に基づく計算誤差を極力減少させるため、実測データを用いて計算モデルに含まれるパラメータを修正する手法を用いた。これは、オンライン計算の場合には局所中性子検出器LPRM(Local Power Range Monitor)等の実測値がプロセス入力として与えられる利点を活用したものである。第2図に、炉内中性子検出器、燃料集合体、制御棒の相対配置を示す。また出力分布をたんにTIP (Traversing Incore Probe)指示値*の形で計算

第2図 炉内中性子検出器の配置

* TIPは必要に応じて炉心内に挿入される可動型の中性子検出器で、第2図に示す監視ストリング内の軸方向(高さ方向)の中性子束分布を測定する。

し、その後個々の燃料集合体出力に振り分ける方法をとったことも計算方式の特徴である。この方法を用いたことにより、水平方向には核熱水力特性計算の単位(ノード)を、TIP スtringを囲む4燃料集合体からなる1監視セルにとることができ、通常用いられている(1ノード/1燃料集合体)の方式に比べて約1/4の計算時間で出力分布を求めることができる。また予測対象をTIP 指示値としたことによって計算結果と実測値との比較が容易になり、使用経験を積むに従って実測データを計算モデルの改良に役立てられるという利点がある。具体的な計算法は既報^{(2)~(5)}にて報告済みであるので、概要のみ簡単に述べる。

1. 現状出力分布監視

指定した監視セル(監視Stringを囲む4燃料集合体)のみに関する軸方向(高さ方向)1次元核熱水力特性計算⁽⁶⁾を用いて、走行型中性子束検出器 TIP の指示値を推定し、これを周囲の4燃料集合体の出力分布に振り分ける。軸方向1次元計算では、周囲領域との中性子の流入、流出のバランス、すなわち水平方向境界条件の扱いが重要である。この計算方式では、計算された TIP 指示値が局所中性子検出器 LPRM の位置で実測の LPRM 指示値と一致するように水平方向境界条件を調節する方法を用いた。第3図に計算の概略フローを示す。TIP 指示値から燃料集合体出力分布への振分けには、制御棒パターン、燃焼度、ボイド率等を考慮した経験的な換算式を用いる。

$J\lambda = |\lambda - \lambda_c|$ (λ : 固有値計算結果, λ_c : 目標固有値)
 P_{th} : 炉心熱出力, t : 時間, T : 予測時間

第5図 臨界探索(炉心熱出力予測)計算フロー

第6図 出力分布予測プログラムの構成

タ・コンソールおよびプラント・データを一括して計算機に取り込むための信号中継端子盤より成る。

実証試験では、予測演算装置としてコアメモリー64K語(16ビット/語)の制御用計算機HIDIC-80を使用した。補助記憶装置は768K語の磁気ドラムである。出力分布予測計算プログラムはデータ処理、デマンド処理、CRT表示などの入出力プログラムとともにこの予測演算装置に組み込まれている。

オペレータ・コンソールはマン・マシン対話装置で、入力部である操作パネルと、出力部であるカラーCRTおよびCRTと接続されたハードコピー装置とより成る。オペレータの要求はすべてこの操作パネルから入力され、出力分布予測結果等はすべてCRT上にカラー表示される。

本装置が取り込むプラント・データは、制御棒位置、LPRM指示値、TIP指示値および原子炉圧力、給水流

第7図 実験用炉心性能監視装置の構成

量等の熱精算データである。

出力分布予測計算システムは本来、炉心性能計算システムとともにプロセス計算機に組み込んで炉心監視の能率向上に役立てるものである。しかし、今回は実験を目的としたため、演算には専用の計算機を使用した。また、すでに炉心性能計算用プロセス計算機が設置済みのプラ

ントでは、第7図に示したような構成で、出力分布予測機能を導入することもできる。

2. 機能

炉心性能監視装置の主要機能は、①現状出力分布監視、②出力分布予測、③出力上昇経路予測の3種類である。このほか補助的な機能として、炉心の出力分布を直観的に把握するためのホットスポット探索機能、運転実績に基づいてXe濃度分布を追跡する周期的計算機能を備えている。

3. マン・マシン対話方式の概要

オペレータ・コンソールは、炉心性能監視装置のマン・マシン対話装置である。オペレータは操作パネル上に設置された押ボタン式ランプスイッチ、テンキー等により、予測機能の選択、入力パラメータの設定および計算結果のCRTへの表示要求を行う。入力パラメータの設定では、ガイダンス画面が用意され、オペレータが容易に必要なパラメータを入力できるよう配慮されている。写真1はその1例で、制御棒操作後の出力分布予測に用いるガイダンス画面である。

予測結果の主な表示画面は、線出力密度分布、TIP指示値など出力分布に関する画面、出力・流量マップ、炉心熱出力、炉心流量の実績と予測結果を示すトレンド表示画面などである。これらの画面は、計算終了後、自由に選択して表示することができる。写真2は、制御棒操作後の出力分布予測結果の1例で、操作された制御棒に隣接する燃料集合体内の線出力密度の現在値(緑)、予測値(黄)を制限値(赤)とともに示す。引抜き前後の制御棒位置、燃料集合体と制御棒、監視ストリングの相対位置は画面の左側に表示されている。

V. 実機試験結果

1. 試験の概要

以上述べた炉心性能監視装置の実機試験を、稼動中のBWRプラントで行なった。試験は1978年3月から8月にかけて、原子炉起

写真 1 入力データ設定ガイダンス画面の 1 例

写真 2 出力分布予測結果の表示例

動時と制御棒パターン交換時に実施した。炉心の燃料配置を第8図に示す。図に示すように、この炉心は(7×7)および(8×8)の新燃料が、照射燃料の間に、1燃料集合体間隔で配置された非均質性の強い炉心である。

以下、本装置の主要機能について、それぞれの試験結果を説明する。計算時間は使用コアエリアを20K語(16ビット/語)とした時の値である。

なお計算精度に関しては、オフライン計算により電気出力460 MWのBWR初装荷炉心での実測データを用いて評価した結果についても述べる。

2. 試験結果

(1) 現状出力分布監視

現状 TIP 指示値を LPRM 指示値より推定した結果を第9図(a), (b)に示す。いずれも炉心熱出力93%, 炉心流量81%のXe平衡状態での推定結果である。制御棒パターン、監視ストリングの位置を図右上に示す。第9図(a)は炉心中央部の例で、隣接する制御棒が深く挿入されている場合、第9図(b)は炉心周辺部の例で、隣接する制御棒が浅く挿入されている場合の例である。

破線、実線はそれぞれTIP指示値の推定値、実測値を表わす。また○印は先に述べた境界条件の調節に使用したLPRM指示値を示す。推定値は

第8図 燃料配置

(a) 炉心中央部の例

(b) 炉心周辺部の例

第9図 現状TIP指示値推定結果

LPRM位置では実測値と一致し、LPRMの中間位置で最大約5%の差が生じている。他の例も含めて、現状TIP指示値推定結果は平均自乗誤差4%で実測値と一致する。計算時間は1監視ストリングにつき2sである。また、460 MWの初装荷炉心での実測データを用いたオフラインの精度評価では平均自乗誤差は3.5~4%であった。

(2) 出力分布予測

制御棒操作後のTIP指示値予測結果を第10図(a), (b)に示す。第10図(a)は、制御棒引き抜き手順に従って図右上の初期制御棒パターンから予測制御棒パターンまで、制御棒を引き抜いたときの例である。図中の1点鎖線が制御棒引き抜き前に測定したTIPの実測値である。これを初期値として、制御棒操作後のTIP指示値を予測した結果を破線で示す。実線は制御棒操作後にTIPを走行して測定した実測値を示す。この例では、予測値と実測値との差は最大約5%である。第10図(b)は、炉心中央部の浅く挿入された制御棒1本を完全に

第10図 制御棒操作後 TIP 指示値予測結果

引き抜いた時の予測結果を示す。炉心下部の制御棒が引き抜かれた高さで、予測値と実測値との差は最大約10%であり、第10図(a)に示した深く挿入された制御棒を操作した場合の例に比べて差が大きい。他の例も含めて、予測結果の平均自乗誤差は約5%、計算時間は制御棒操作1回につき1.5minである。また、前記のオフライン評価の平均自乗誤差は約4%である。なお、予測計算の初期値としてTIP実測値を使用したのは、予測計算の精度を現状出力分布監視の精度と分離して単独に評価するためである。次に例を示す、炉心流量変更後出力分布予測の場合も同様である。

炉心流量変更後のTIP指示値予測結果を第11図に示す。図右上の出力-流量マップ上に予測経路の概要を示す。本例は、炉心流量41%、炉心熱出力67%の初期状態から、出力上昇率を与えて70h後

に90%出力に到達させた時TIPの指示値を予測したものである。初期値は流量増加前に測定した実測値(1点鎖線)である。予測結果の平均自乗誤差は約6%である。本例では、Xeの濃度分布を0.5h刻みで追跡し、臨界探索は10hごとに行なった。1臨界探索ステップ当りの計算時間は55sである。また、オフライン評価でも平均自乗誤差は約6%である。

(3) 出力上昇経路予測

出力上昇経路の予測結果を第12図に示す。本例は、熱出力約75%のXe平衡状態から炉心流量を約40%まで減少させ、以後炉心流量を一定に保ちながら制御棒を75%出力パターンから100%出力パターンまで約2日間で引き抜いた時の炉心熱出力の変化を予測したものである。破線が予測値、実線が実測値を示す。炉心流量変更による出力低下直後の低出力状態で、予測値と実測値に約3%の差が見られるが、高出力状態ではこの差は2%に減少している。予測結果の平均自乗誤差は約2%、また計算時間は臨界探索1ステップにつき50sである。なお本例では、Xe濃度分布、臨界探索の時間刻みをそれぞれ0.5、1hとした。また、前記のオフライン評価でも、炉心熱出力45%の初期状態

から炉心流量変更で75%まで出力をランプ上昇した予測例について、出力の平均自乗誤差は約2%であった。

V. 結 言

出力分布予測計算システムの性能を評価するため、

第11図 炉心流量変更後 TIP 指示値予測結果

第12図 出力上昇経路予測結果

炉心性能監視装置を試作し、稼動中のBWRでオンライン試験を行なった。本装置は制御棒操作や炉心流量変更等に先立って、操作後の出力分布や出力上昇経路を予測するマン・マシン対話装置で、予測演算装置、カラーCRTを用いたオペレータ・コンソールを中心に構成される。出力分布予測計算システムはオンライン計算機で短時間に、かつ精度よく出力分布を計算するため、以下に示す方法を用いた。

- (1) BWR 3次元シミュレータ“FLARE”⁽¹⁾の核熱水力特性計算モデルを使用し、全炉心平均の軸方向1次元計算と炉心内の局所的な領域での1次元または3次元体系に適用できるように修正した^{(2)~(5)}。
- (2) 計算モデルに基づく誤差を小さくするため、モデルに含まれるパラメータを実測値を用いて調節する方法を用いた。
- (3) 現状出力分布監視および出力分布予測では、核熱水力特性計算によりTIP指示値を求めた後、これをあらかじめ定めた経験式により周囲の4燃料集合体出力分布に振り分ける方法を用いた。
- (4) 出力上昇経路予測には、全炉心平均の軸方向1次元核熱水力特性に基づく臨界探索法を使用した。

実機試験は原子炉の起動時と制御棒パターン交換時に行い、予測精度と計算時間を評価した。

以下、本装置の主要機能である現状出力分布監視、出力分布予測、出力上昇経路予測のそれぞれについて試験結果をまとめる。

- (1) 現状出力分布監視：現状TIP指示値推定結果は、平均自乗誤差4%で実測値と一致する(TIP実測値に対する相対値、以下同様)。計算時間は

1ストリングにつき2sである。

- (2) 出力分布予測：制御棒操作後、炉心流量変更後のTIP指示値予測結果はそれぞれ平均自乗誤差5, 6%で実測値と一致する。計算時間は制御棒1本操作または対称位置4本または2本操作の1ステップにつき1.5min、また炉心流量変更の場合には臨界探索の1ステップにつき55sである。
- (3) 出力上昇経路予測：炉心熱出力予測結果は平均自乗誤差2%の範囲内で、炉心の熱精算より求めた炉心熱出力と一致する(定格炉心熱出力に対する相対値)。計算時間は臨界探索の1ステップにつき50sである。

以上の監視・予測計算で使用したコア容量は20K語(16ビット/語)である。なお、電気出力460MWのBWR初装荷炉心で得られた実測データを用いたオフライン精度評価でも、実機試験とはほぼ同じ精度であることを確認した。本装置の使用により、運転制限条件に対する余裕の監視・予測、実機データに基づく発電所サイトでの運転手順の見直し等が短時間に、かつ容易になり、稼働率の向上等に効果を発揮するものと期待している。また、本装置で用いた監視、予測手法は、今後一般化すると予想される負荷変動運転時の炉心監視にも応用可能である。

本研究の遂行にあたって、東京電力横浜第一原子力発電所 伏谷 潔所長、後藤 二 技術部長を初め幹部の皆様からシステムの所要機能、マン・マシン対話性等に関するご助言を頂いた。ここに謝意を表します。また、実験装置の構成、CRT画面の表示方法等についてコメント頂いた(株)日立製作所エネルギー研究所 谷口 薫所長ならびに山田周治副所長に感謝いたします。

— 参考文献 —

- (1) DELP, D.L., et al.: GEAP-4598, (1964).
- (2) 西沢増雄, 木口高志: 原子力学会昭51年会要旨集, D37, (1976).
- (3) NISHIZAWA, Y., KIGUCHI, T., MOTODA, H.: *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, **22**, 242~243 (1975).
- (4) *idem*: *Nucl. Sci. Eng.*, **60**, 189~192 (1976).
- (5) KIGUCHI, T., et al.: IAEA-SM-226/30, p.449 (1978).
- (6) 福岡孝治, 木口高志, 榎本聡明: 原子力学会昭52秋の分科会予稿集, F41, (1977).
- (7) KIGUCHI, T., et al.: *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, **27**, 728~729 (1977).
- (8) 西沢増雄, 他: 原子力学会昭53年会要旨集, C52, (1978).
- (9) 土居一順, 他: 同昭53年会要旨集, C53, (1978).
- (10) 榎本聡明, 他: 同昭53秋の分科会予稿集, C53, (1978).
- (11) ENOMOTO, T., et al.: *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, **30**, 650~651 (1978).