

起動試験の総合評価

Evaluation of Start-up Test Results for Fukushima Dai-Ni Nuclear Power Station No.2 Unit

日立製作所の改良標準化ベースプラント第1号の最新鋭原子力発電所として、建設を進めてきた東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機は、このたび試運転の最終段階である起動試験を無事終了し、昭和59年2月3日に営業運転を開始した。本設備は、今までのプラントの建設・保守経験に基づき、信頼性、保守作業性、放射線被ばく面及び運転保守面で大幅に改良が加えられている。

今回の起動試験では、日立製作所の開発した「起動試験データ評価システム」を活用し、より詳細にプラント特性を評価するとともに、トラブル防止の努力によって計画外プラント停止皆無の記録を達成することができた。

本稿では、プラント特性及び設備性能の特徴並びに起動試験の総合評価について紹介する。

渡辺雅明* *Masaaki Watanabe*
 清川和宏** *Kazuhiro Kiyokawa*
 有馬省一** *Shōichi Arima*
 戸来 実* *Minoru Herai*

1 緒言

BWR(沸騰水型原子力発電所)の改良標準化ベースプラントとして、日立製作所が昭和54年2月の着工以来鋭意建設を進めてきた東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機(以下、福島第二・2号機と略称する。)は、昭和58年4月から建設の最終段階である「起動試験」を開始し、大気圧・核加熱・出力上昇の各段階での各種試験を順調に消化し、定格出力での通商産業省による最終検査を経て、昭和59年2月3日に営業運転を開始した。

今回の起動試験では、特に次に述べるような成果を得ることができた。

- (1) プラントは、計画された設備能力を上回る良好な性能をもっていることが確認された。
- (2) 信頼性にかかわる過渡特性については、予想どおりの性能であることが確認できた。
- (3) 各試験段階で、起動試験を通しての適切な各種調整などにより、プラント運転管理上の信頼性をいっそう高めることができた。
- (4) 日立製作所が開発した「起動試験データ評価システム NUSTARS(Nuclear power plant Start-up Test data Analysis and Record System)」により、プラント特性をより詳細に評価することができた。
- (5) 東京電力株式会社の指導及び日立製作所の運転信頼性向上に対する各種方策により、起動試験中の計画外プラント停止皆無という記録を作ることができた。

本稿では、プラントの各種特性、設備性能の特徴及び起動試験の総合的評価について述べる。

2 起動試験の実績

福島第二・2号機の試運転は、昭和58年3月、通商産業省の総合設備検査をもって「系統試験」を終了し、同年4月初めから「起動試験」の最初の項目である燃料装荷を開始した(図1に燃料装荷中の炉心上部の状況を示す)。それ以降、起動試験の実績工程は図2に示すとおりで、計画工程どおり各試験を消化することができた。

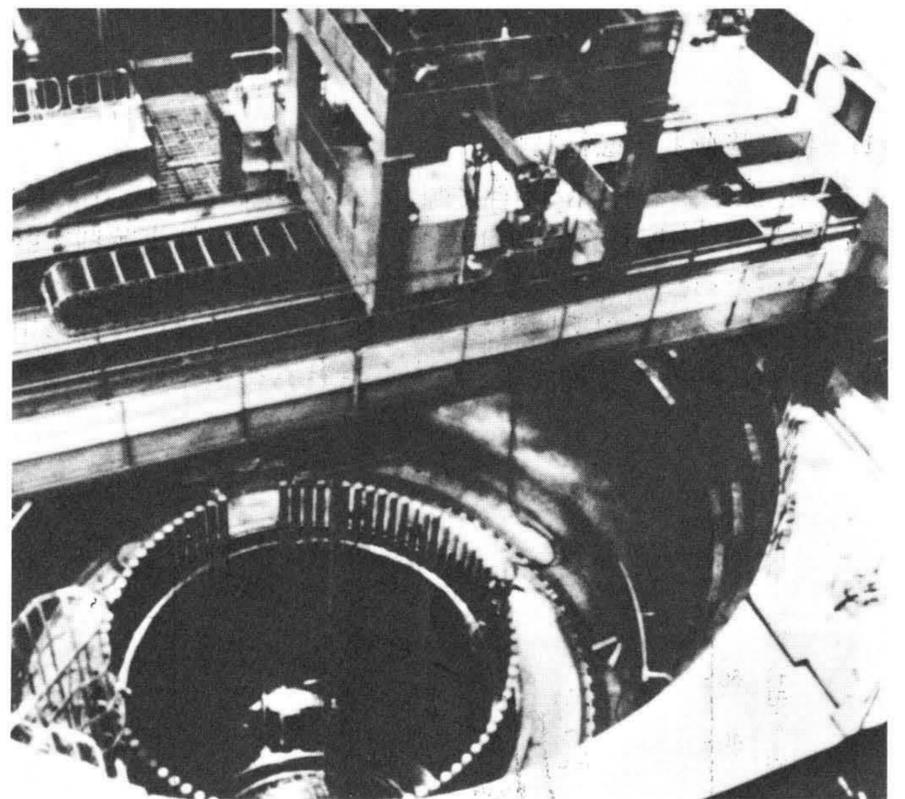


図1 燃料装荷の状況 燃料装荷は、臨界安全性を確認しながら炉心規模を拡大する方式により行ない、2週間で完了した。

今回の起動試験では、従来行なわれていた試験項目に加えて、設計改良項目を中心としたプラント特性を多岐にわたりにきめ細かく検討することも加え、図3に示すとおり合計241項目の試験を計画し実施した。

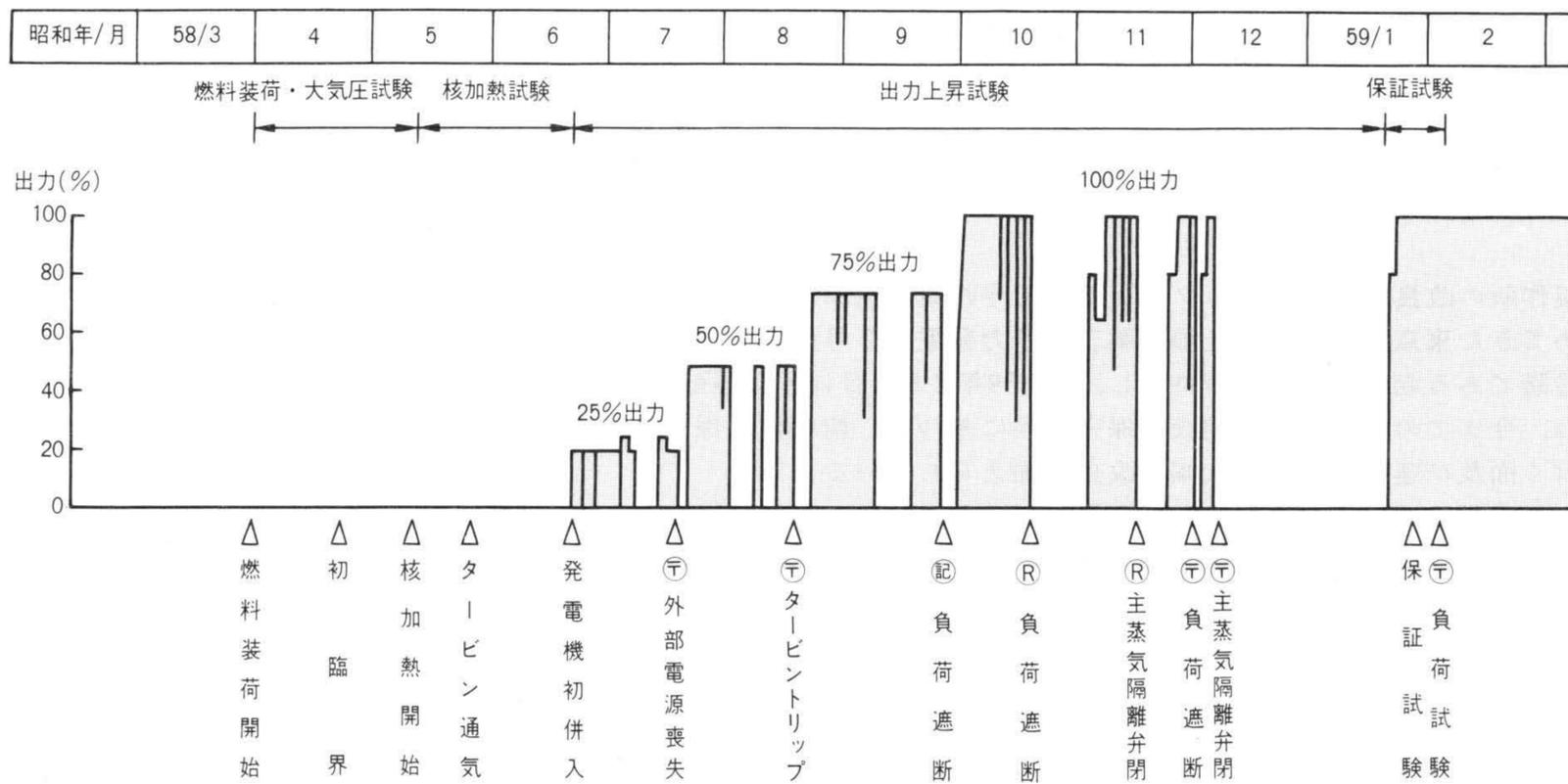
3 プラント特性評価及び設備性能の特徴

福島第二・2号機の特徴的なプラント特性を以下に述べる。

3.1 静特性

国内BWRで初めて新型中性子源を採用し、原子炉初期起動工程の裕度を向上させるとともに、上下2領域燃料、グレーノーズ制御棒などによる炉心改良により、炉心特性を飛躍的に向上させている。

* 日立製作所日立工場 ** 日立サービスエンジニアリング株式会社



注：⊖(通商産業省による使用前検査立会), Ⓜ(通商産業省による使用前検査立会記録採取), Ⓜ(通商産業省による使用前検査立会リハーサル)

図2 起動試験実績工程 上段に原子炉出力, 下段に主要イベントを示す。不具合によるプラント停止が発生せず試験を順調に消化することができた。

(1) 燃料装荷と冷態核特性

従来、原子炉起動用の中性子源として、初期起動用にAm-Beを、運転用にSb-Beを使用してきたが、Sb-Beは半減期が60日と短いので、原子炉運転時期に合わせて運転用中性子源をあらかじめ別の原子炉で照射し、炉内に装着されている起動用中性子源と交換する必要があった。これらの煩雑性を解消さ

せるため、今回新たに起動用と運転用の両方の機能を併せもったCf-Sb-Be中性子源を採用した。これにより、大気圧試験工程を従来に比較し2日程度短縮することができた。

燃料装荷は、炉停止余裕など炉心の特性を順次確認しながら行なうものであるが、計算機制御による自動燃料取替機の順調な稼働により、平均58体/日(最高73体/日)の速度で短期間に燃料を装荷することができた。

一方、冷温状態での核特性は、各種炉物理試験の結果により、濃縮度上下2領域燃料^{※1)}を使用した炉心特性は設計解析値とよく一致することが確認された。

(2) 炉心性能

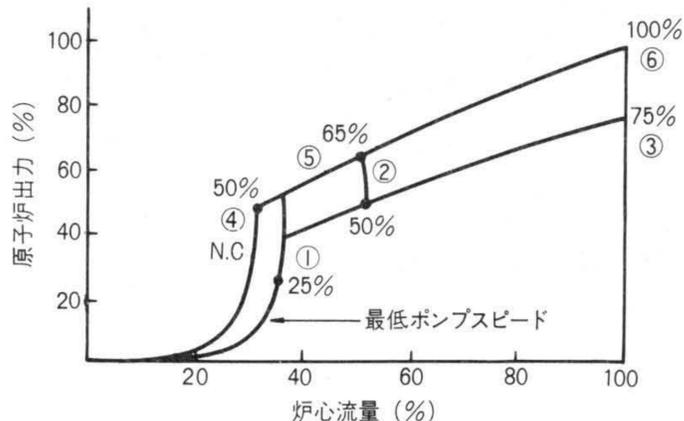
炉心の熱的余裕の増大による信頼性、運転性、経済性の向上を目指した上下2領域燃料^{1),2)}を初装荷燃料として初めて全炉心に装荷したが、図4に定格出力状態での炉心軸方向出力分布の実績を示す。出力分布は部分出力でも十分平坦化されている。定格出力での最大線出力密度は約10kW/ftであり、試運転中、従来の暫定運転管理法^{※2)}(いわゆるPCIOMR)による運転制約を全く受けることなく出力上昇を行なうことができた。

一方、制御棒先端部分の中性子吸収の割合を、段階的に変化させたグレーノーズ制御棒を採用したことにより、制御棒移動時の隣接燃料の急激な出力分布変化を緩和させ、燃料体の信頼性をいっそう向上させることができた。

これらにより、プラント利用率の向上、原子炉の運転性の向上などの目的を達成できる見通しを得た。

(3) プロセス計算機の性能

運転監視用としての計算機適用の拡大に伴い³⁾, 計算機シス



注：略語説明 N.C.(自然循環)

試験段階	試験種別	大気圧	核加熱	出力試験						保証
				① 20%	② 50%	③ 75%	100%段階			
							④ 50%	⑤ 65%	⑥ 100%	
通商産業省使用前検査		8	7	2	3	1	0	4	8	1
主試験	静特性	3	6	7	6	5	1	1	6	4
	動特性	0	5	7	8	7	3	7	10	0
	その他	5	9	8	9	7	0	0	8	2
タービン・発電機系試験		3	1	2	1	1	0	0	1	1
プラント機能・特性試験		2	4	12	13	12	1	1	18	0
合計		21	32	38	40	33	5	13	51	8

図3 起動試験実施項目 図に示す原子炉出力と炉心流量の関係で定められる原子炉の状態ごとに実施した試験項目数を表に示す。全実施項目は241項目にのぼる。

※1) ウラン濃縮度軸方向上下2領域を設計ベースとし、ガドリニア(可燃性中性子吸収材)も軸方向2領域とした燃料である。

※2) 燃料の健全性を維持するための運転法であり、燃料ノード平均燃焼度4,900MWd/t未満では、最大線出力密度11kW/ft以上の領域で出力上昇率を制約している。

テムの信頼性向上が要求され、福島第二・2号機では、この要求にこたえるため「負荷分散型マルチ計算機システム」が導入されている。これは、CPU(中央演算処理装置)を4台備え分担処理されており、1台のCPU故障時にはその機能を他のCPUが補てんするものである。幸い試運転期間中にはこれが機能するような事態は一度もなかった。

このほかに、運転計画支援システムとして「オンライン炉

心性能予測システム」を採用している。これは、炉心運用面で画期的なものであり、これまで複雑な計算をオフラインによる大形計算機によって求めていた炉心の出力分布、燃料体の熱的余裕などが、短期間の予測であれば現場で簡単に把握できるようになった。図5に制御棒操作後の出力分布予測を行なったときの、予測値と実績値を比較したCRT(Cathode Ray Tube)表示例を示す。

(4) プラント性能

プラントが安定かつ連続して運転でき、所定の性能を満足することを確認するため、 $\frac{1}{4}$ 負荷ごとに静的な特性を評価した。この結果、定格時の熱消費率は2,520kcal/kWhで設計値を上回る良好な性能で連続運転が可能であることが確認された。

3.2 動特性

原子炉及びタービン設備の各制御系は良好な制御特性をもち、特に電気出力1,100MW用の大型再循環M-Gセットは国産化して信頼性向上を図り⁴⁾、流体継手は全運転範囲にわたって良好な特性が得られた。

(1) 制御系調整

原子炉圧力は蒸気加減弁、タービンバイパス弁の開度を操作量として一定に制御している。その制御系について、線形性、設定点変更、後備機器切換などの調整試験を行なった。図6の定格出力状態での設定点変更試験時の応答結果に示すとおり、安定性、速応性とも優れた応答特性であることが確認された。

原子炉の出力を炉心流量で制御する原子炉再循環流量制御系については、今回日立製作所で開発した流体継手を採用したことにより、全運転範囲で安定であった。

そのほか、原子炉給水制御系についても、制御定数の適切な調整により、良好な応答特性を得ることができた。

(2) 主要弁類開閉時の特性

主要弁類は、プラント運転中に定期的に機能を確認するため開閉操作を行なった。この場合のAPRM(平均出力領域モニタ)や原子炉圧力に対する影響を図7に示す。主要弁類の

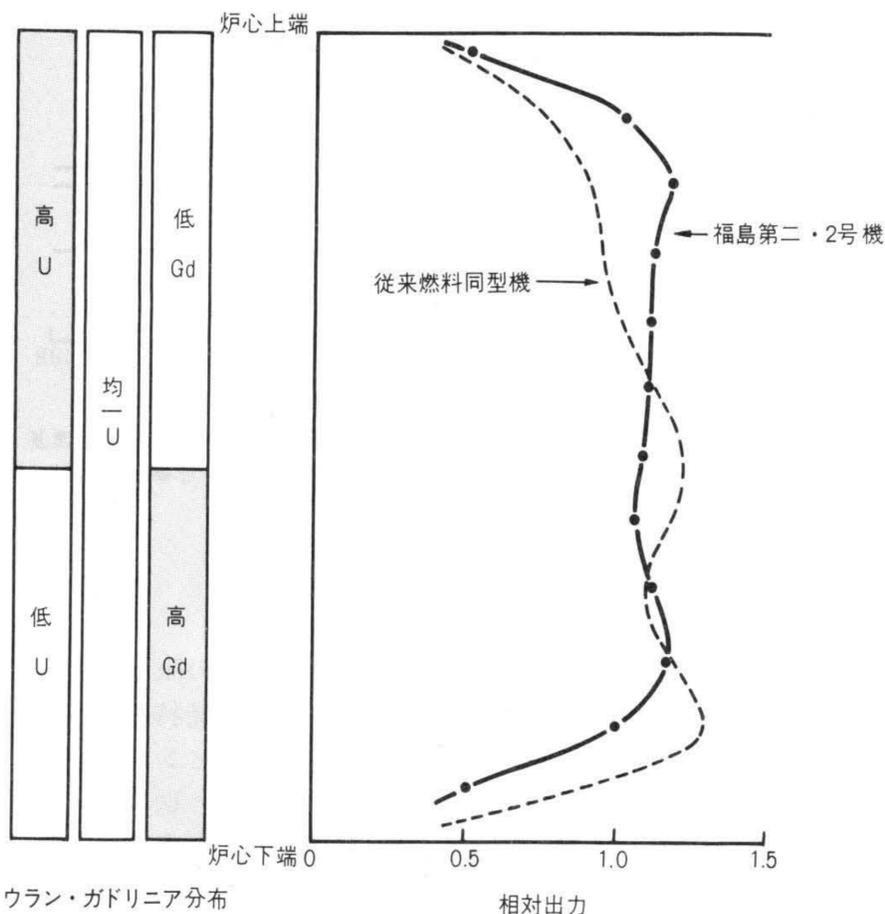


図4 炉心軸方向出力分布 左部分に示す2領域分布燃料体の装荷によって、右部分に示すような平たんな炉心平均出力分布を得ることができた。

615 POWER PREDICTION

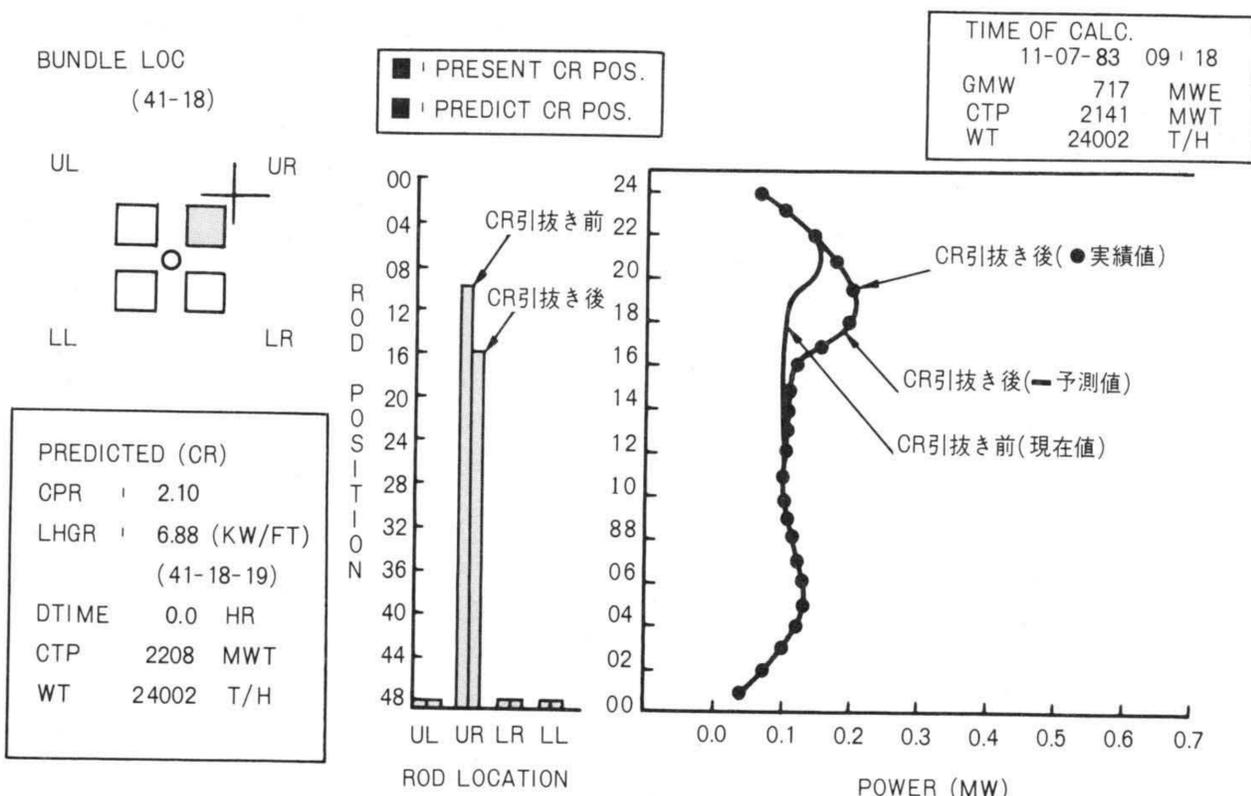


図5 プロセス計算機による性能予測と実績の比較 炉心性能予測のCRT表示例を示す。制御棒引抜き後の出力分布予測値は実績値とよく一致した。

注：略語説明 CR(制御棒)

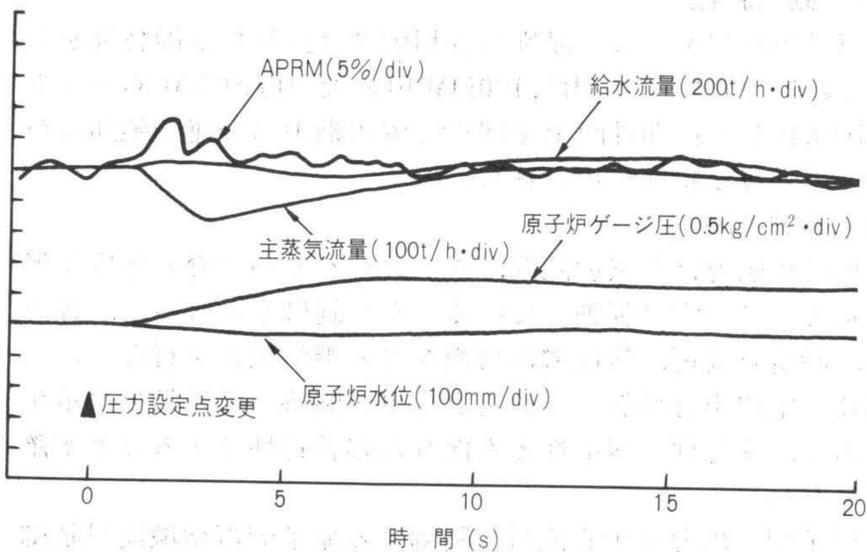
83/11/07 09:44 2F2

試験可能最高出力レベルは、十分基準を満たす結果を示した。また、同様にタービンバイパス弁は、定格蒸気量に対し29%の蒸気を復水器にバイパスする能力があり、設計値(25%)を容量的に十分満足させている。

一方、原子炉圧力の上昇を抑制する逃し安全弁については、手動、自動の作動を合わせ計118回の開閉動作をさせたが、すべてのケースについて良好な結果を得た。

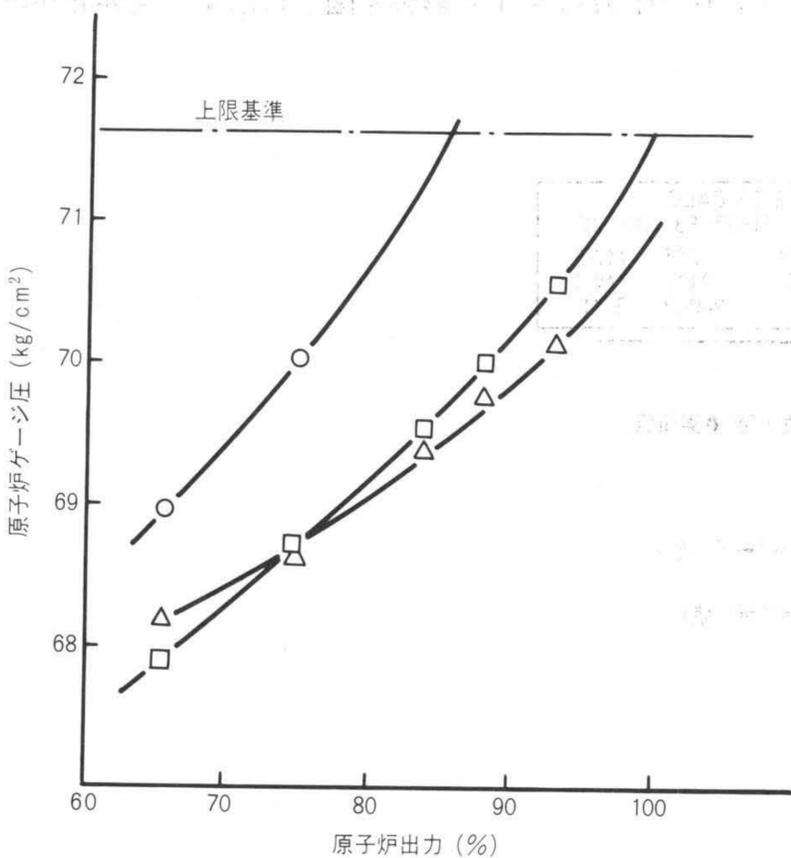
(3) プラント過渡応答

運転中に異常な過渡変化が生じた場合にプラントの保護動作が適切に行なわれることを検証するため、原子炉再循環ポンプトリップ、原子炉給水ポンプトリップ、原子炉隔離、発電機負荷遮断、タービントリップなどの各種試験を実施した。



注：略語説明 APRM(平均出力領域中性子モニタ)

図6 原子炉圧力設定点変更時のプラント応答特性 APRM, 原子炉圧力, 主蒸気流量などの主要応答変数の減幅比は0.25以下であり, 安定に回答している。



注：○(主蒸気隔離弁), □(主さい止弁), △(蒸気加減弁)

図7 主要弁類の開閉応答特性 原子炉各出力状態での弁開閉時の原子炉圧力ピーク値の応答を示しており, 計画どおりの結果が得られた。この結果は弁のサーベイランス計画に反映される。

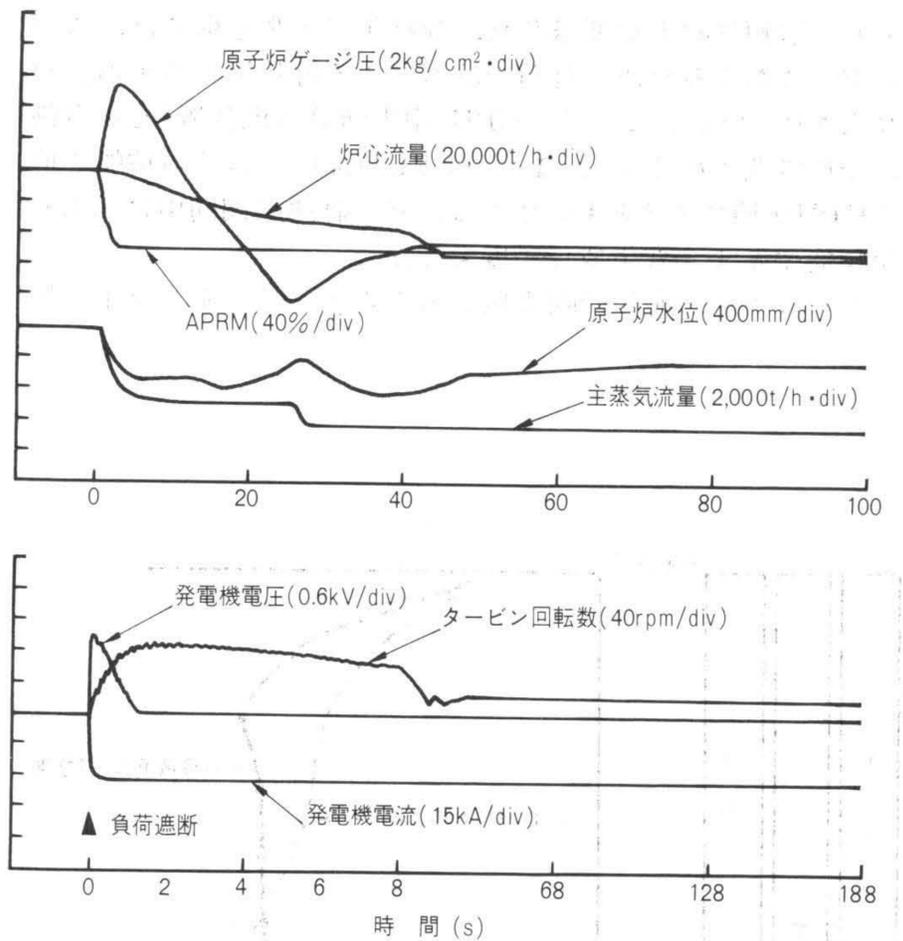


図8 定格出力発電機負荷遮断時の過渡応答 原子炉圧力は過渡基準値を十分下回る良好な応答であり, タービン・発電機も良好な挙動を示している。

いずれの過渡応答も主要応答変数である原子炉の圧力上昇, 燃料体の熱的余裕などは, あらかじめ実施した動特性解析結果と一致し良好な特性を示した。中でも, タービン駆動原子炉給水ポンプトリップによる後備電動機駆動への切換作動については, 炉水位の変動は見られず, 極めて良好な切換動作を示すことが実証された。

図8に定格出力時発電機負荷遮断でのプラント主要パラメータの挙動を示す。発電機負荷遮断, タービントリップのような燃料の熱的余裕上最も厳しい過渡変化に対しては, 平衡炉心末期でのスクラム反応度特性劣化時の出力変化を緩和する目的で, RPT(原子炉再循環ポンプトリップ)機能が新たに設けられたが, 本試験結果でもその特性が確認された。

3.3 主タービン・発電機

起動試験の全期間を通じ, 主タービン・発電機に起因する出力制限, その他のトラブルがなく良好な結果を得た。特に軸振動については, 初通気以降合計28回の起動・停止を実施した過程のクリティカル速度振動, 更に負荷状態での再循環ポンプ2台トリップ, 原子炉給水ポンプトリップによる負荷ランバック, 負荷遮断試験などの大きい出力変化時でも, 主タービンのラッキングによる振動増加兆候はなく極めて安定している。これはパッキン間隙の適正化及び据付時でのロータたわみ量の適正管理(ロータ単独及び直結時のたわみ量を各実測し, 運転状態での間隙が設計値を確保できるように配慮した。)によるものである。

(1) 主タービン補機系

1,100MWタービン補機系では, 主タービントーニング装置の円滑動作, 復水器逆洗時のローカル制御系への外乱などが注目されるものであるが, 前者については, 日立製作所が開発したクッションスタータの採用, それらの適正な調整によって, ターニングギヤ結合時の衝撃やロータ慣性によるギヤ結合の失敗などもなく良好な結果を得た。一方, 復水器逆洗

では冷却水流量の一時的低下が真空を低下させ、更にホットウェル水位変動を誘発して復水制御系の外乱を招く現象を改良するため、冷却水系の弁構成を6弁方式にし、また、弁の開閉を適切なタイミングに調整したことによって、真空変化量が2～3mmHgと極めて少なく、タービンローカル制御系に及ぼす影響もなく安定した自動逆洗を実施できることが確認された。

(2) 発電機及び補機系

主発電機は、機内水素圧力が5.3kg/cm²と高い上に軸のジャーナル径も大きいことから、設計上、軸密封油装置、水素ガス冷却系などの補機を含め高機内圧に対しては種々の考慮がなされている。28回のタービン起動、停止による軸受密封部の追従性及び定格運転状態での軸受系の機能も良好であり、大容量機としては機内水素ガス消費量が17m³/d以下という満足すべき結果を得ることができた。負荷運転による発電機性能確認では、工場での等価試験を検証できるデータを得ており、諸特性及び各部温度なども計画値を十分満足する良好な結果を得た。

3.4 設備改良に関する特性試験

前節までに示した各種試験に加え、原子炉運転経験による改良設計部分の特性確認、プラント特性データ蓄積などのため、合計23項目の試験を実施し貴重なデータを得ることができ、いずれも良好な結果であった。

主要な項目は次のようなものである。

- (1) 大形炉心の局所反応度の測定
- (2) 制御棒引抜き時の出力分布変化特性の確認

図9にその結果を示す。

- (3) ジェットポンプのキャビテーション防止のための再循環ポンプランバック機能特性の測定
- (4) 低圧復水ポンプ1台トリップ時の給復水系過渡応答特性
- (5) 循環水ポンプ1台トリップ時の復水器真空度への影響

3.5 水質管理

図10に原子炉再循環配管の表面線量率と鉄クラッド濃度の各出力ごとの推移を示す。被ばく低減のためには一次系水質を適正なレベルに維持することが重要であり、本プラントでは改良標準化に取り上げられた改善対策の採用により、非常に良好な水質を保つことができた。

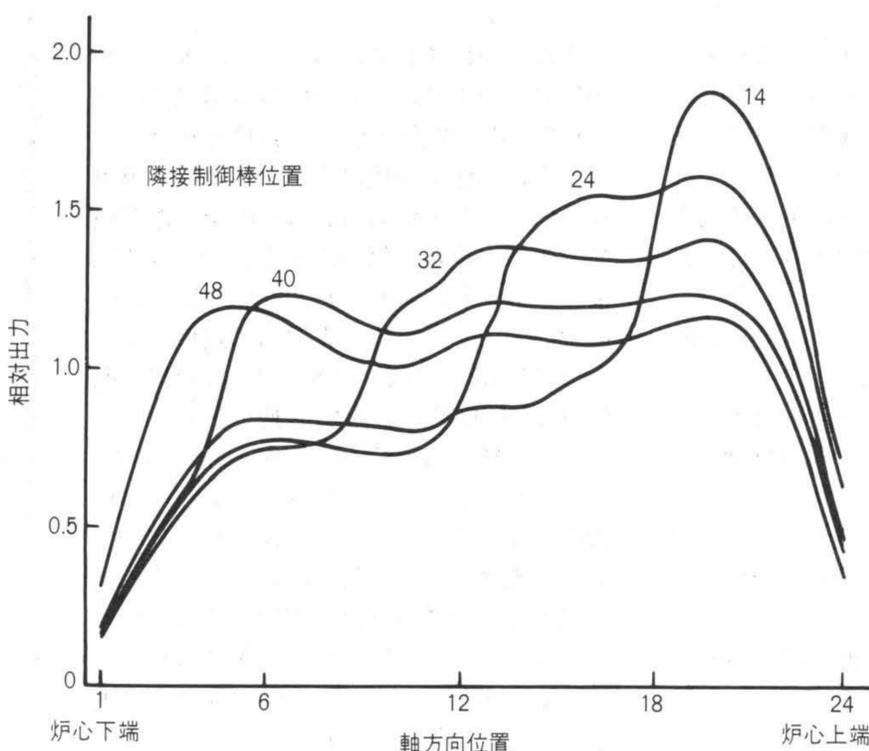


図9 制御棒移動時の出力分布変化 炉心中心の制御棒を、順次挿入したときの隣接燃料の出力変化は、解析値とよく一致した。

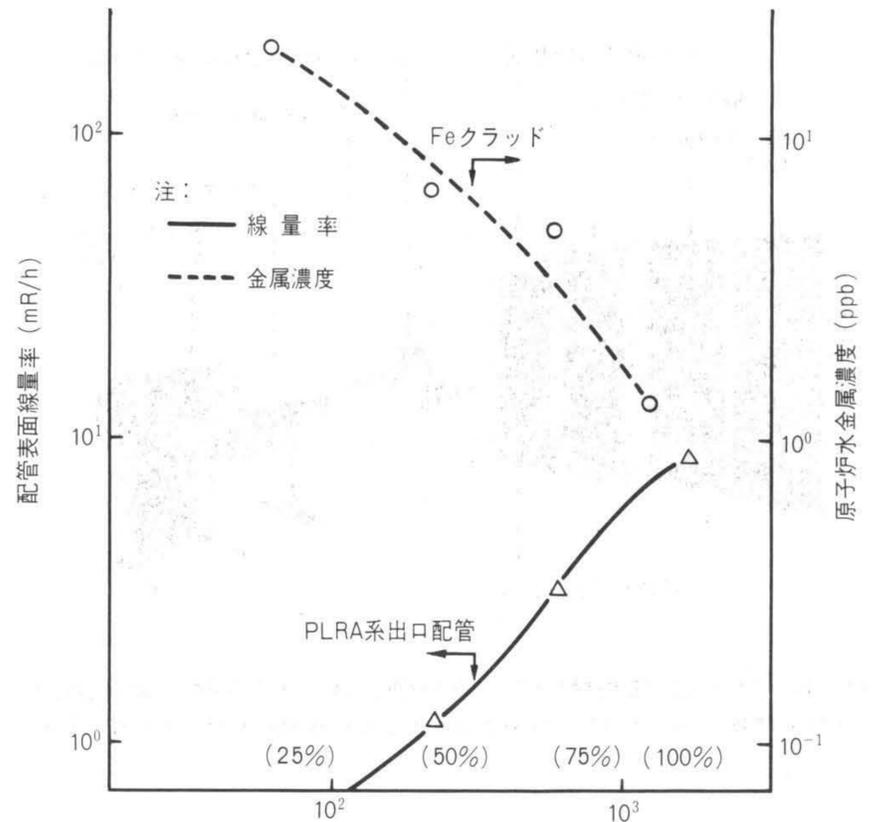


図10 線量率及び金属濃度の推移 線量率は100%出力時から飽和傾向にあり、鉄クラッドは各出力ごとに減少している。

復水中鉄クラッドは100%出力安定時4ppb程度と少なく、他の元素もppb以下で、従来のプラント測定値に比較して極めて低い。これは抽気系、給水加熱器、ヒータドレン系、復水器などでの材質の改善に負うところが大きい。更に給水中の鉄クラッドは、二重式の復水脱塩系により復水中の98%以上が除去され、給水中で0.1ppb以下になっている。炉水鉄濃度に関しては、出力上昇とともに低減する傾向にある。これは、建設中に機器配管内に微量残留した鉄クラッドが試運転中に除去されてきたものと考えられる。

4 計画外停止防止策

原子力発電所は、試運転調整段階でも営業運転開始以降と同様に、計画外停止を少なくすることが望ましい。

日立製作所としても、試運転を含めた運転中の計画外停止を防止すべく、機器及び人的不具合発生防止のための各種方策を採用してきた。福島第二・2号機では幸い試運転中の計画外プラント停止「皆無」という記録を作ることができたが、以下に前述の防止策について述べる。

設計、製造、検査にわたる従来のQA活動に加え、特に試運転開始後のトラブル皆無を目指して、「福島第二・2号機ノートラブル委員会」を設け、設計・製造・据付の総点検、試験計画レビュー、試運転支援方法など多岐にわたる活動を起動試験期間中を含め実施した。総点検については特に東京電力株式会社と一体となり細部にわたり検討し、現場の総点検も実施した。また、試験計画レビューでは動特性解析に基づき制御系特性を中心に試験要領の検討を行なった。

前記活動に加え、起動試験の実施に当たっては、下記に述べる各種の対策を行なった。

- (1) 作業及び運転管理の集約化による指示の一元化
- (2) 試験・作業許可制度のきめ細かな運用による人的ミス、作業干渉の防止
- (3) 「起動試験データ評価システム」などを用いた出力運転中の状況把握、特異事象の解明とその対応処置の円滑化
- (4) 各出力段階ごとの総点検の実施と計画停止時作業のQAの徹底

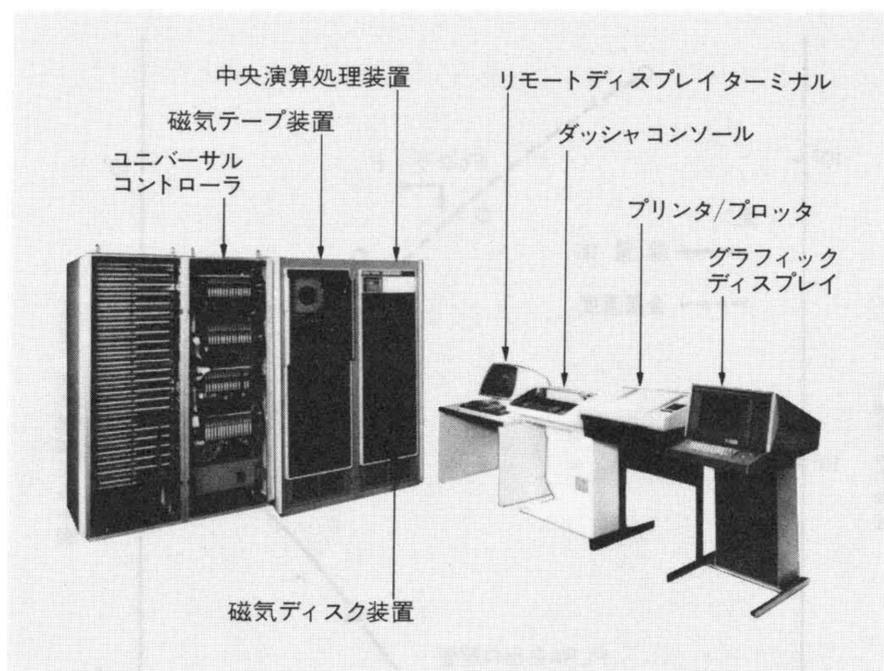


図11 NUSTARS(起動試験データ評価システム)外観 過渡応答試験での信号調整、データ採取から図表作成までを計算機化したシステムである。

5 NUSTARS(起動試験データ評価システム)

NUSTARSは、過渡応答試験での信号調整、データ採取から図表作成までを計算機化したシステムで、試験データ評価精度の向上、効率的試験の推進を目的として日立製作所が開発し、今回初めて適用したものである。図11にNUSTARSの外観を示す。プラント信号は384点を高速で取込み可能となっている。本システムは過渡応答を即時処理するほか、オンラインデータの各種計算処理、プラントデータ監視により特性

急変時のデータ収録処理などの各種機能をもっている。起動試験では動特性試験のほかに静特性試験の一部にも適用し、また、各出力運転時の各種試験の効率的な消化にも威力を発揮した。

起動試験では前記の計算機システムのほか、試験工程及び実績管理システム、図書管理システム、計測器管理システム、電源管理システムなどによる試験管理推進面の計算機化を行った。

6 結 言

以上、福島第二・2号機の性能の特徴及び起動試験の総合的評価について述べた。

原子力発電所は今後も積極的な建設が計画されており、今回得られた技術的知見を、既設及び今後建設するプラントに生かすとともに、プラント特性評価技術を更に向上させ、合理的な試験方法の確立に努力していく考えである。

最後に、福島第二・2号機試運転を無事終了できたことは、東京電力株式会社関係各位の熱心な御指導によるもので、ここに深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 榎本：BWR炉心燃料設計の現状と将来展望，日本原子力学会誌，26-2，109～116(昭59-2)
- 2) 山下，外：最近の炉心及び燃料の技術展開，日立評論，64，8，553～558(昭57-8)
- 3) 中村，外：原子力発電所における計算機適用の拡大，日立評論，64，6，411～415(昭57-6)
- 4) 小林，外：原子炉冷却材再循環系機器の国産化と信頼性向上，日立評論，64，8，567～572(昭57-8)

論文抄録

原子力発電プラント用ロボットの開発

日立製作所 尾崎典彦

日本機械学会誌 86-774, 535～541 (昭58-5)

原子力の利用と放射線環境とは切り離せない問題であり、したがって原子力開発の初期の段階から放射線環境下での各種作業を遠隔化・自動化しようとする研究開発が強力に進められてきた。原子力発電プラントを中心とする関連施設内での各種作業のうちの幾つかは放射線環境下での作業であり、作業員の放射線被ばく量の低減を目的とした作業の自動化・遠隔化が必要である。また、定期検査時の各種作業の工程短縮と信頼性の向上もロボット化の大きな動機となっている。

原子力用ロボットは産業用ロボットによる生産の自動化とは異なり、幾つかの特徴がある。既設プラント設備へ適用させるように開発せざるを得ない点、放射線環境下での作業ロボットであるため高度の信頼性を要求されること、作業内容の多様さ、などである。これらの要求に基づいて現在開発されている原子力用ロボットには、移動機能をもっているものや、視覚、聴覚、触

覚を利用した点検機能をもっているもの、マニプレータによる作業機能をもっているものなどがある。

現在、原子力発電所で利用されているロボットには次のようなものがある。

- (1) 溶接ロボット……放射線環境下での配管溶接の遠隔自動化を図ったもの
- (2) 燃料交換ロボット……炉心部に装荷されている燃料の取替え及び位置変更を自動的に実施するもの
- (3) 制御棒駆動機構交換ロボット……駆動機構の炉外取出しを自動化したもの
- (4) 超音波探傷ロボット……圧力容器及び配管類の健全性確認のための遠隔自動検査装置
- (5) 蒸気発生器の検査保守ロボット……伝熱管の健全性確認検査及び予防保全作業を遠隔自動化したもの
- (6) 除染作業ロボット……使用済み燃料の運搬用キャスク表面を高圧水ジェットで除染する作業を遠隔自動化したもの

- (7) 多関節マニプレータ……廃棄物処理研究施設で利用されているマスタ スレーブマニプレータ

まだ実用化されていないが、国内外で各種原子力用ロボットの開発が活発に進められている。傾向としては(1)検査ロボットのように、作業環境に応じてますます専用ロボット化するもの、(2)移動機能と作業機能を持ち、複雑な保守作業を実行できる汎用ロボットのもの、の二つに分けられる。前者の例としては格納容器内外点検ロボット、自動超音波探傷ロボット(直管用、曲管用)、制御棒駆動機構自動分解点検ロボット、燃料棒自動検査ロボットなどがある。後者の例としては移動形マニプレータが代表的なものであり、移動機構とマニプレーション機構の高機能化が図られている。

原子力施設での点検保守作業では、放射線被ばくは避けて通れない問題であり、ロボットの果たす役割は大きい。今後の着実な開発と実用化が望まれている。