特集 新型動力炉

U.D.C. 621.039.524.46:621.039.56.001.2

新型転換炉実証炉プラント制御系の特性評価

Characteristic Evaluation of the Demonstration Heavy Water Moderatory, Light Water Cooled Reactor Plant Control System

新型転換炉実証炉のプラント制御系は,原子炉出力,蒸気ドラム水位などを制御 する重要なシステムである。これらの制御特性を評価・検討し,最適な制御系を確 立するため,解析コードの開発,制御装置の試作などにより,制御機能の確認・検 証を進めてきた。

本稿では、実証炉特有の制御特性をもつ(1)原子炉出力特性、(2)給水制御特性に着 目し、その評価を実施した。特に、日負荷調整運転を考慮した制御系の基本仕様の 明確化を図るとともに、解析コードによるシミュレーションを実施し、機能の確認 を行ない、十分実機に適用できる見通しを得た。

中島一郎*	Ichirô Nakajima
篠原 薫**	Kaoru Shinohara
大橋正久**	Masahisa Ôhashi
川崎剛秀**	Takahide Kawasaki

61

1 緒 言

新型転換炉実証炉は,動力炉・核燃料開発事業団を中心に 日立製作所を含む原子力5グループが参加して開発が進めら れ,現在,建設担当となった電源開発株式会社を主体に,安 全審査に向けての準備段階にある。実証炉の計測制御設備の うち,日立製作所が設備設計を担当しているプラント制御系 は,原子炉出力や蒸気ドラム水位などを制御するもので,プ ラントの運転に重要な役割を果たしている。プラント制御系 の特性を把握し,最適な制御を実現するということは,プラ ント機能の向上に大きく貢献するとともに,安定かつ効率的 な運転の達成につながる。冷却材ボイド率変化による出力変 動が小さいなどの実証炉の特性を最大限に生かし,原型炉「ふ げん」の運転経験及びシステムの共通点も多くある先行BWR (Boiling Water Reactor)プラントの実績をも踏まえながら, プラント制御系の基本仕様の確立を図ってきた。

本稿では、プラント制御系の概要について述べるとともに、 実証炉特有の制御特性をもつ系統に着目し、原子炉の出力制 御特性及び給水制御特性について評価、検討した結果を報告 する。



図 | プラント制御系の概略図 プラント制御系は,原子炉出力,蒸気ドラム水位,蒸気ドラム圧力などの主要なパラメータを制御する。破線は主な制御 信号の流れを示す。

* 動力炉·核燃料開発事業団 ** 日立製作所日立工場

910 日立評論 VOL. 67 No. 11(1985-11)

2 プラント制御系の概要¹⁾

新型転換炉では,通常運転時に起こりうる運転条件の変化, 負荷の変化及び外乱に対し,原子炉の主要なプラント諸量を 適切な運転範囲内に維持できるようにするため,プラント制 御系が設けられている。

プラント制御系は、(1)制御棒の位置を制御することにより 原子炉出力を制御する原子炉出力制御装置、(2)減速材である 重水中のホウ酸の濃度を制御することにより原子炉出力を制 御するホウ酸濃度制御装置、(3)給水調整弁の弁開度を制御す ることにより蒸気ドラム水位を制御する給水制御装置、(4)タ ービンバイパス弁及び蒸気加減弁の弁開度を制御することに より蒸気ドラム圧力を制御するタービン制御装置から構成さ れる。

図1にプラント制御系の概略図を示す。

これらの制御系の中で実証炉特有の制御特性として,出力 制御特性と給水制御特性の二つが挙げられる。以下に,これ らの制御特性について述べる。

3 原子炉出力制御の特性評価²⁾

3.1 出力制御

実証炉の出力制御は、出力平たん化安全停止用制御棒と出 力調整用制御棒の2種類の制御棒、及びホウ酸濃度制御系の 反応度制御設備を用いる。各々の機能分担を表1に示す。10⁻⁴~ 2×10⁻²% 4K/K/min程度のゆっくりとした大きな反応度 変化は、ホウ酸濃度制御系による重水中のホウ酸濃度調節で 制御可能である。出力平たん化安全停止用制御棒は、原子炉 起動時に低温状態で未臨界から約50%出力までの制御と、停 止時に定格出力から高温状態で未臨界までの制御を分担して いる。 表 | 各反応度制御系の機能分担 日負荷調整運転は,ホウ酸濃度制 御系のホウ酸濃度の調整と出力調整用制御棒の位置の制御を組み合わせて実施 する。

機		反応度制御系 能	出力平たん化 安全停止用制 御棒	ホウ酸濃度制 御系	出力調整用制 御棒
起動	低温状態低温状態 (未臨界) (臨界)		0	_	
	低温状態 (臨界) →高温待機		0		
	高温待機→50%出力		0	0	
	50%出力→定格出力		na - Sin Sha - Sha - Sha - Sha	0	0
	出力上昇後のXe反応度補償		-	0	
出力制御	出力レベル微調整		2 <u>990 -</u>	-	0
	領域出力制御			_	0
	燃焼反応度補償		-	0	
	出力変更	日負荷調整運転	-	0	0
		A F C 運 転*		-	0
		ガバナフリー運転*	—	-	0
停	 定格出力→ 高温状態 (未臨界) 高温状態 (未臨界) 低温状態 (未臨界) 		0		
止				0	
	停止後のXe反応度補償			0	-

出力調整用制御棒は,中性子吸収の弱いステンレス鋼管で 作られており,出力レベルの微調整及び原子炉の領域出力を 一定に制御するために使用される。

また,実証炉は3.3で述べる炉心特性をもっており,この炉 心特性を生かした日負荷調整運転及び将来の電力系統の運用 に対応すべく,AFC(Automatic Frequency Control),ガバ ナフリー運転機能の追加が可能となるよう配慮している。

3.2 出力調整用制御棒の駆動制御

出力調整用制御棒の駆動電動機は,速応性及び駆動頻度に 対する耐久性を考慮して,ステッピングモータが選定されて いる。駆動制御装置の仕様は**表2**に示すとおりで,現在試作 を進めている。本装置では,簡易シミュレータを組み込み出 力調整用制御棒位置やホウ酸濃度の変化を模擬して,応答性, 耐久性などの試験を実施する。

3.3 日負荷調整運転の評価検討

62

実証炉は,下記の炉心特性をもっている。

(1) 重水減速材中のホウ酸濃度調整により,出力レベル変更 幅を比較的任意に選択できる。また,炉心全体の反応度を調 整するため変更に伴う出力分布の局所的変動は小さい。

(2) 冷却材と減速材は分離されており、冷却材中のボイド率

注:*印は将来追加が考えられる機能を示す。

略語説明 AFC(Automatic Frequency Control)

表2 試作出力調整用制御棒駆動制御装置の主要仕様 駆動頻度 が多くなることから,駆動用電動機としてステッピングモータを用いる。また, 外乱に対して即応性を高めるために,連続可変速制御方式を採用している。

項	目	仕様		
駆動用	電 動 機	永久磁石型3相ステッピングモータ		
制御	方 式	連続可変速制御		
速度制	御範囲	6.5~65m/s		
応答時間	立上り時間 0→65m/s	Is以内		
	立下り時間 65→0m/s	Is以内		
制御棒速	度制御精度	\pm 5 m/s		
制御棒位	置決め精度	\pm 5 mm		
位置	検出器	シンクロ位置発信器及びリミットスイッチ		

(4) 出力係数が小さいため,日負荷調整運転時の炉心反応度 変化はXe濃度の変動が主要因となる。また負の出力係数とXe 反応度はキャンセルし合うため日負荷調整運転に要する制御 側(ホウ酸,制御棒)の反応度は比較的小さい値で済む。

上記の特性を生かした日負荷調整運転を円滑に行なうため,

が変化しても減速材の密度は変化しないため冷却材ボイド反応 度係数はほぼゼロであり,冷却材ボイド率変化による出力 分布変動が少ない。

(3) 出力調整用制御棒を出力微調整に用いるが,制御棒は燃料から離れた重水減速材中に配置されるとともに,出力調整 用制御棒は反応度価値の小さいステンレス鋼管製であるため, 制御棒駆動による燃料の局所的出力の変動は小さい。 プロセス計算機に下記の機能を設けている。
(1) 日負荷調整運転時,炉心反応度変化予測計算によるホウ酸除去注入量計算機能
日負荷調整運転の出力変更を実施したときのXe動特性及び出力係数などによる反応度変化をあらかじめ予測計算し,所定出力に保つためのホウ酸除去注入量を計算し設定するとともに、ホウ酸濃度制御系へ伝達する。図2に前記計算機能の

911 新型転換炉実証炉プラント制御系の特性評価





日負荷調整運転時ホウ酸除去注入量計算内容 义 2 日負荷調整 運転時には、電気出力変更計画に基づき炉心反応度変化予測計算を実施し、ホ ウ酸の除去注入量を設定する。

数田 50 制御棒反応度実績値 0.0 制御棒反応度計算值 $(\mathcal{N} \sqcup \mathcal{N})$ -1.0反応度 -2.0Xe反応度計算值 -3.030 10 20 40 時 間 (h)

計算内容を示す。

(2) 出力調整用制御棒駆動実績に基づくホウ酸除去注入量修 正計算機能

日負荷調整運転実施中に原子炉出力制御装置から伝達され た出力調整用制御棒の位置信号をもとに,ホウ酸除去注入設 定値を修正し,ホウ酸濃度制御系へ伝達する。

新型転換炉日負荷調整運転を評価検討するため, シミュレ ーション解析コードを開発してきた。図3に、上記開発コー ドによる実証炉の日負荷調整運転シミュレーション解析結果 を示す。同図に示すように、ホウ酸反応度は±0.2% ΔK程度 が炉心に投入されている。これに対し出力調整用制御棒反応 度は±0.01% 4K程度の微小な変動しか示さない。したがって、 日負荷調整運転時の反応度制御は,ほとんどホウ酸濃度調整 だけで実施できることが分かる。また、原型炉「ふげん」で の日負荷調整運転に近い出力変更試験データと,上記開発コ ードの比較評価を実施した。図4に「ふげん」第一サイクル 出力変更試験時の制御棒反応度実績値(実績駆動位置から計

図4 「ふげん」制御棒反応度実績値と計算値の比較 「ふげん」第 日サイクル出力変更試験時の制御棒反応度実績値と計算値の比較を示すもので、 両者は良く一致している。

め,蒸気ドラム水位と蒸気ドラム水位設定値との偏差をゼロ にするように制御する水位制御器,及び給水流量と給水流量 要求値の偏差をゼロにするように制御する給水制御器から構 成する。

カスケード給水制御方式による蒸気ドラム水位制御性の解 析結果例を図6に示す。同図は、原子炉出力設定点を10%下 げたときの蒸気ドラム水位と給水流量の応答を示している。 カスケード制御方式によれば,蒸気ドラムの水位変動を約± 12mmの範囲内に抑制することが可能である。

算した反応度)と上記開発コードによる計算値を示す。同図か ら「ふげん」の制御棒反応度実績値と解析評価値とは、よく 一致していることが分かる。

給水制御特性の評価 4

実証炉では、図5に示すカスケード給水制御方式を採用し ており,蒸気ドラムの水位変動量をできるだけ小さくするた

言 5 結

実証炉の重要な計測制御設備であるプラント制御系につい て、その構成を概説するとともに実証炉のもつ特有の制御系 に対する制御特性を評価し,最適な制御系とするための検討 結果について述べた。

今後とも、実証炉の特徴を最大限に生かせるように、プラ

63

912 日立評論 VOL. 67 No. 11(1985-11)



給水調整弁	

注:略語説明 [2](加算器), [PI](比例積分器)

図5 カスケード給水制御方式の構成 カスケード給水制御方式は, 水位制御器と給水制御器があり、カスケード構成となっている。

参考文献

西村,外:新型転換炉実証炉の開発,日立評論,64,8,615~ 1) 618(昭57-8)

注:---- 給水流量

160

時 間 (s)

- 蒸気ドラム水位

240

原子炉出力設定点をステップ状に

320

大橋,外:新型転換炉日負荷追従運転解析コードの開発,日本 2)原子力学会,昭和60年秋の分科会,D15



半導体製造プロセスの酸化・拡散,熱処 理工程では,反応管内へ挿入されるウェー ハの温度特性を的確に把握し,制御へ反映 することが挿入・引出し時に顕著に現われ るウェーハ面内温度差に基づく熱応力の低 減,及びウェーハ温度で支配的となる酸化 膜厚の均一性を向上する上で重要である。

ウェーハ温度の理論解析はIBMのS.M.Hu により先駆的に行なわれ,同心軸上に並ん だウェーハ列が真空中に置かれた場合を仮 定して, その半径方向のウェーハ面内温度 分布,及び熱応力変形に対する理論解析結 果が示された。Huの解析はウェーハ自己輻 射損失, ウェーハ間輻射及びウェーハ面内 熱拡散だけを考慮し,外部熱源となる管壁 温度を無視している。この点を改善し実用 的なプロセスシミュレータを目指したもの としては、管内での処理時間が十分長く、 管内のウェーハ温度が定常状態になってい る場合を対象とした松葉らによるモデルが 提案されている。

64

管内へのウェーハの挿入・引出し過程で は, 管入口端付近が直接大気と接している ため, 軸方向の管壁温度分布が急しゅんと なっており、この部分をウェーハ列が通過 することによりウェーハ温度は種々の過渡 特性を受ける。特に興味がもたれるのは、 ウェーハ面内に発生する温度差である。超 LSI共同研究所の奥はこの過渡特性解析に ついて、 ウェーハ面内では半径方向の温度 分布だけをもつと仮定し,管壁からの輻射 項をウェーハ温度の実験値を利用した形で 先のS.M.Huのウェーハ温度モデルに追加す ることにより、 ウェーハ挿入・引出し過程 でのウェーハ温度推移を報告している。し かし、このモデル式は、ウェーハを支持す る治具(ボート)の影響を無視している。 本論文では、 ウェーハ温度の周方向依存 性を考慮することの重要性に着目し、 その 数値解析モデルを確立した。ウェーハ列の 下方を支持しているボート治具の熱容量は ウェーハに比べて大きく,ボート温度上昇

がウェーハに比べ時間遅れを起こす。この ため、ボートからの輻射が支配的となるウ ェーハ下部温度がボートの影響がほとんど ないウェーハ上部温度より低くなり, ウェ 一八面内温度差が発生する。この過渡特性 はボート挿入速度, ウェーハ径と管内径と の比、ウェーハ間隔などにより変化する。 そこで,輻射を主体としたウェーハ,及び ボートに対する熱収支を記述した連立偏微 分方程式系で管内ウェーハ温度をモデル化 し, その数値計算結果と実験データとの比 較を行なった。挿入速度2m/minの条件で は,実験データと本モデル共に,挿入終了 時付近で面内最大温度差が230℃発生して おり,本モデルの有効性を確認した。

今後のウェーハの大口径化に伴い、その 温度分布は更に大きくなることが推測され、 その低減化を実現するプロセスパラメータ の最適化が,本モデルにより可能である。