## 沸騰水型原子力発電所の日間負荷追従運転法の研究

# Improvement of Daily Load Following Operation for Boiling Water Reactors

近年,電力系統の総発電量に占める原子力発電の割合が増加するとともに,原子力発電所に対する日間負荷追従運転のニーズが高まりつつあるため,BWRを対象に日間負荷追従運転法の研究を実施してきた。この研究では,運転操作の容易な炉心冷却材流量制御と制御棒操作を併用することにより,昼間100%出力,夜間50%出力の日間負荷追従性能をもつBWRシステムを開発の目標としている。このため,負荷追従中の炉心特性の変化を解析的に把握し,負荷変化幅を検討するとともに,運転制御・監視装置開発の第一段階として,炉心冷却材流量制御により自動的に発電機出力を目標の負荷変化パターンに追従させる原子炉出力調整装置,及びオンラインで炉心性能を監視する装置の開発を行なった。

木口高志\* Takashi Kiguchi 栗原国寿\*\* Kunitoshi Kurihara 桜井三紀夫\*\*\* Mikio Sakurai 上下利男\*\*\* Toshio Jôge 浅見一夫\*\*\*\* Kazuo Asami

#### □ 緒 言

現在,我が国の原子力発電所は一定負荷運転を行なっており,昭和53年度の原子力発電実績は,総発電電力量の12.8%を占めている<sup>1)</sup>。今後予想される原子力発電規模の増大と,それに伴う原子力発電の総発電電力量に占める割合の増加に従って,原子力発電所の負荷追従運転の必要性は確実に増すものと予想される。

一般に、負荷追従運転は、次の3種類に分類できる。

- (1) 経済運用による給電調整,特に日間負荷追従運転
- (2) 系統制御, 特に自動周波数制御
- (3) ガバナフリー運転

本稿では、原子力発電に対して近い将来ニーズが大きくなると考えられる日間負荷追従運転について、特にBWR(沸騰水型原子力発電所)を対象に実施した日立製作所の研究開発の状況について述べる。

### 2 現行BWRでの日間負荷追従運転法の分析

BWRの出力レベルは、制御棒の挿入、引抜操作及び炉心冷却材流量(以下、炉心流量と略す。)の増減により制御できる。特に、後者はBWR特有の方法で流量変化に伴う冷却材蒸気体積率(以下、ボイド率という。)の増減による反応度変化で出力レベルを制御する方法であり、図1に示すように、出力レベル約60%から100%(定格出力)までの範囲の制御が可能である。炉心流量の調節による出力レベルの制御では、炉心内の出力がほぼ一様に変化するので、制御操作が単純であり、かつ炉心監視が容易である。したがって、BWRの日間負荷追從運転では、炉心流量調節が、重要な炉出力制御手段となる。

現在,我が国で稼動中又は建設中のBWRでは,M-Gセット(電動発電機セット)の流体継手の調節によって再循環ポンプ回転数を制御するか,又は再循環流量制御バルブの開度調節によって再循環流量を変化させることにより,炉心流量を

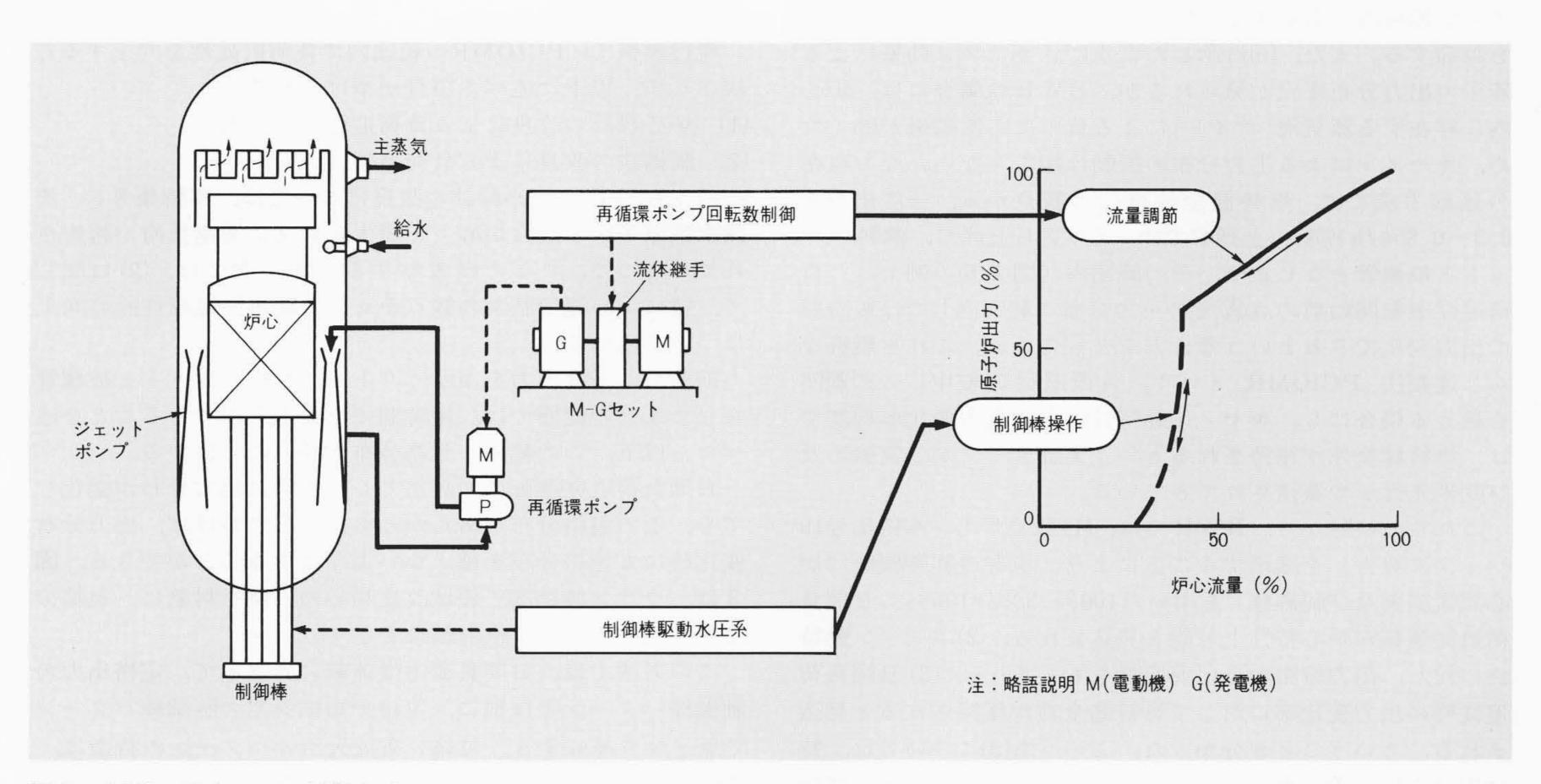
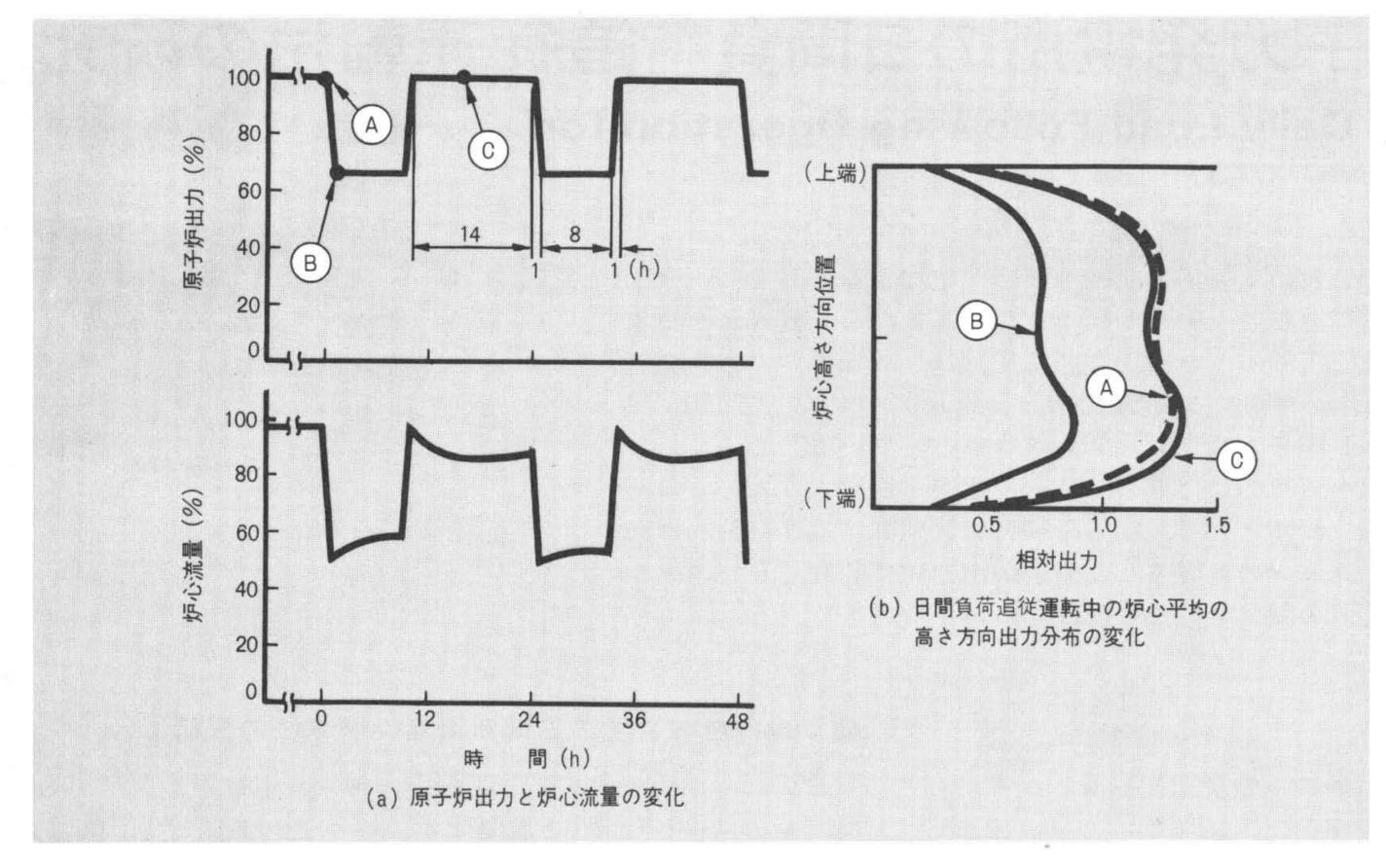


図 I BWRの出力レベル制御方式 BWRでは、炉心冷却材流量の調節及び制御棒の挿入・引抜き操作により、出力レベルを制御する。

<sup>\*</sup> 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 \*\* 日立製作所エネルギー研究所 \*\*\* 日立製作所電力事業本部 \*\*\*\* 日立製作所大みか工場



日間負荷追従運転の例 出力分布は負荷変化でほとんど変 わらないが、キセノン濃度変化の ため若干変化することが分かる。

制御している。図1に、特にM-Gセットを用いた場合につい てのシステム構成を示す。炉心流量変化による出力レベル制 御の出力変化率は、制御能力上は最大30%/minまで可能であ る。図2に、現行BWRで典型的な負荷変化パターンで日間 負荷追従運転した場合の, 炉心流量及び炉心高さ方向出力分 布の解析結果を示す。ここでは, 負荷変化パターンの高出力 側レベルは100%(定格値), 低出力側レベルは65%, 時間配 分は高出力14時間,低出力8時間,出力変化各々1時間とし ている。図2は、炉心流量調節だけで負荷変化を行なった場 合であり、(a)に炉心流量の変化を示す。低出力から高出力へ の復帰時には, 低出力運転中に中性子強吸収物質であるキセ ノンが燃料内に蓄積するので、キセノン量に応じて炉心流量 を調節する。また、(b)に示したように、キセノン効果による 若干の出力分布変化が見られるが、BWRの場合には、炉心 内に存在する蒸気泡(ボイド)による負の反応度効果が働くた め、キセノンによる出力分布の振動は起こらない。なお現在 の運転手法では、燃料健全性維持の観点から、一度出力を 0.3~0.8%/h程度の上昇率でゆっくり立ち上げて、燃料ペレ ットと被覆管をなじませ、その範囲内〔図2(b)の例では、負 荷追従運転開始前の点径での出力分布の範囲内〕では短時間 で出力変化できるという考え方をとっている。これを燃料な らし運転法(PCIOMR)という。負荷追従運転中にこの範囲 を越える場合にも, キセノン動特性による出力変化率程度で は、燃料健全性が維持されるという実証データが、実験炉及 び欧米先行炉で蓄積されてきている。

これらの検討から、BWRでは、(1)改良炉心(本特集号19 ページに報告)を適用することにより、現有の制御機能(炉 心流量制御及び制御棒)を用いた100%-50%-100%の日間負 荷追従運転が炉心特性上可能と見込まれる,(2)キセノン動特 性に対し、出力分布の自己安定性をもっている、(3)日間負荷 追従時の出力変化率に対して燃料健全性が維持されると見込 まれる、ということが分かった。このうち(3)については、特 に実証を積み重ねながら段階的に負荷変化の幅を拡大してい くとともに, 高出力, 高燃焼度でも運転上の制約条件のない 燃料の開発が重要と考えられる。次章に負荷追従運転性能検 討の一端について述べる。

#### 負荷追従運転性能向上の検討

燃料健全性を維持しながら, 日間負荷追従の幅を拡大して いくステップとして、(1)現行燃料で前述のPCIOMRの範囲内 で負荷変化幅を拡大する方法を検討すること, (2) 実験炉試験 などにより現行燃料でPCIOMRの範囲を越える実証データを 蓄積し、これを日間負荷追従運転に適用すること、(3)改良燃 料により, 更に自由度の高い負荷追従を実現すること, が挙 げられる。ここでは(1)の考え方に基づく、100%-50%-100% 負荷追従運転の可能性について述べる。(2)については前述の とおり実証データが得られてきており、(3)については国際的 に研究が進められている。

現行燃料で、PCIOMRの範囲内で負荷追従性を向上する方 法として,以下に述べる項目が挙げられる。

- (1) 炉心設計の改良による負荷追従性の向上
- (2) 制御法の改良による負荷追従性の向上

このうち、(1)の炉心設計の改良については、本特集号の「沸 騰水型原子炉の改良炉心」と題する論文に関連技術が報告さ れているので、ここでは省略する。本論文では、(2)に関し て,特に炉心運用制御の観点から,負荷追従運転性能の向上 について述べる。

前章で、一度出力をゆっくり上げて燃料ペレットと被覆管 をなじませた範囲では、短時間で出力上昇ができることを述 べた。以下, この範囲を包絡分布と呼ぶことにする。

日間負荷追従運転で, 高出力レベル時に出力分布が変化し ても,この包絡分布をあらかじめ拡大しておけば,出力分布 変化時にも包絡分布を越えないようにすることができる。図 3は、ウラン濃縮度二領域改良炉心の一例を対象に、包絡分 布を拡大する方法の検討結果を示す。

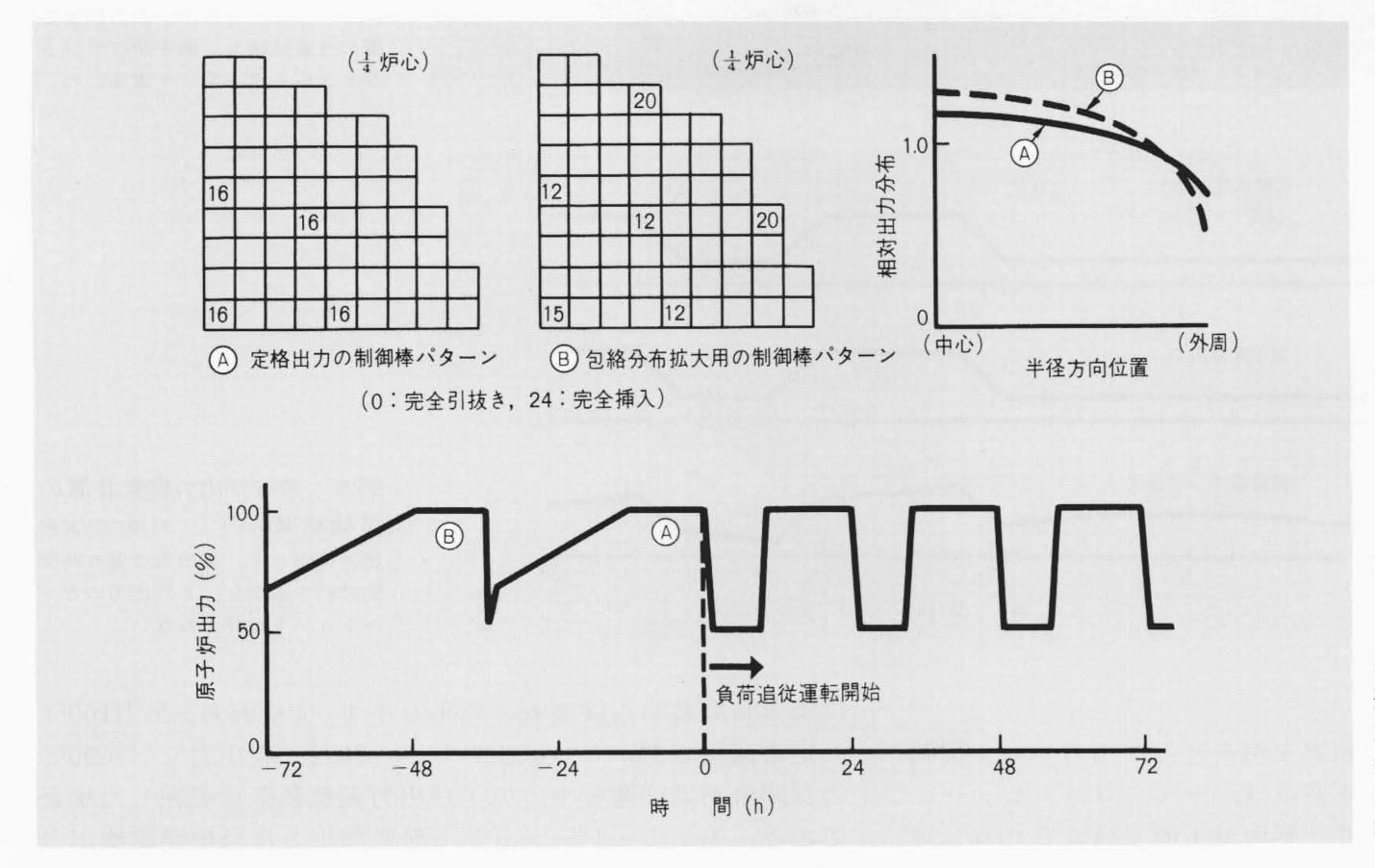
この方法では、日間負荷追従運転に先立って、定格出力の 制御棒パターンとは別に、包絡分布拡大用の制御棒パターン で原子炉を運転する。包絡分布拡大用のパターンの特徴は, 定格出力のパターンでは完全に引き抜かれている炉心最外周 の制御棒を深く挿入し、その反応度効果に見合った量だけ炉 心中央部の制御棒を引き抜くことによって, 炉心中央部の出 力を高めることである。この結果, 負荷追従運転時に出力分 布が包絡分布を越える可能性のある炉心中央部で, 包絡分布 があらかじめ有効に拡大される。

図3に、この結果実現できる出力変化パターンを示す。こ の例では、 炉心流量制御と制御棒操作を併用し、 低出力レベ ルを50%に下げられることを示している。

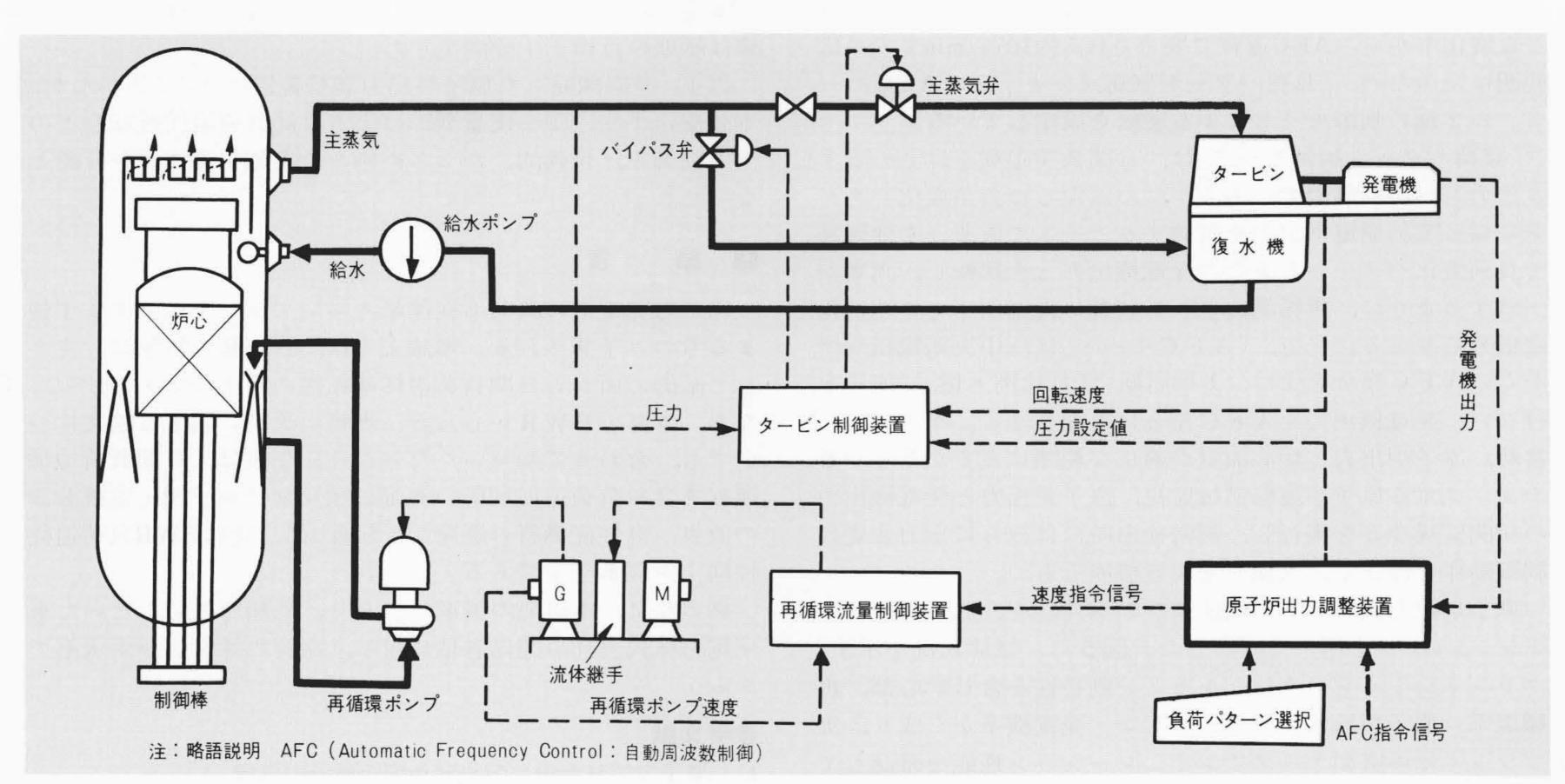
以上述べたように, ウラン濃縮度二領域改良炉心では, 炉 心制御法の工夫により、PCIOMRの範囲でも高出力レベル 100%, 低出力レベル50%の日間負荷追従運転の能力をもって いるとの見通しが得られた。このような見通しに基づいて日 間負荷追従運転を実用化していくに当たっては, 炉心性能監 視装置,計測予測装置及び制御装置の改良開発を更に進める とともに、段階的に実証を行なっていく必要がある。また、 PCIOMRの制約のない自由度の高い負荷追従運転のための高 性能燃料の開発も進められている。

### 4 原子炉出力調整装置2)

2章で述べたように、BWRの出力レベル制御は、制御棒 操作及び炉心流量調節の2種の方法を併用して行なわれるが, 操作の容易さの観点から、後者の制御法が重要となる。この 制御法を実用化する目的で, APC(原子炉出力調整装置)を 開発した。本装置は再循環流量制御装置の上位演算制御装置 として, 炉心流量を変化させ, 発電機出力を自動的に目標値 に追従させる機能をもつ。またこの装置は, 日間負荷追従運 転のほか、プラント起動・停止や制御棒パターン交換時など の出力レベル制御, 更にAFC(自動周波数制御)運転にも適 用できる。ここでは、特に日間負荷追従運転を適用する場合



改良炉心での日間負荷 追従運転の例 ウラン濃縮度 二領域改良炉心では, 炉心運用・ 制御の工夫により, 高出力レベル 100%, 低出力レベル50%の日間負 荷追従運転が可能となる。



原子炉出力調整装置を含む出力レベル制御系統のブロック図 原子炉出力調整装置は、与えられた負荷変化パターン、又はAFC(自動周波数 制御)指令信号に従って発電機出力を自動的に制御する。

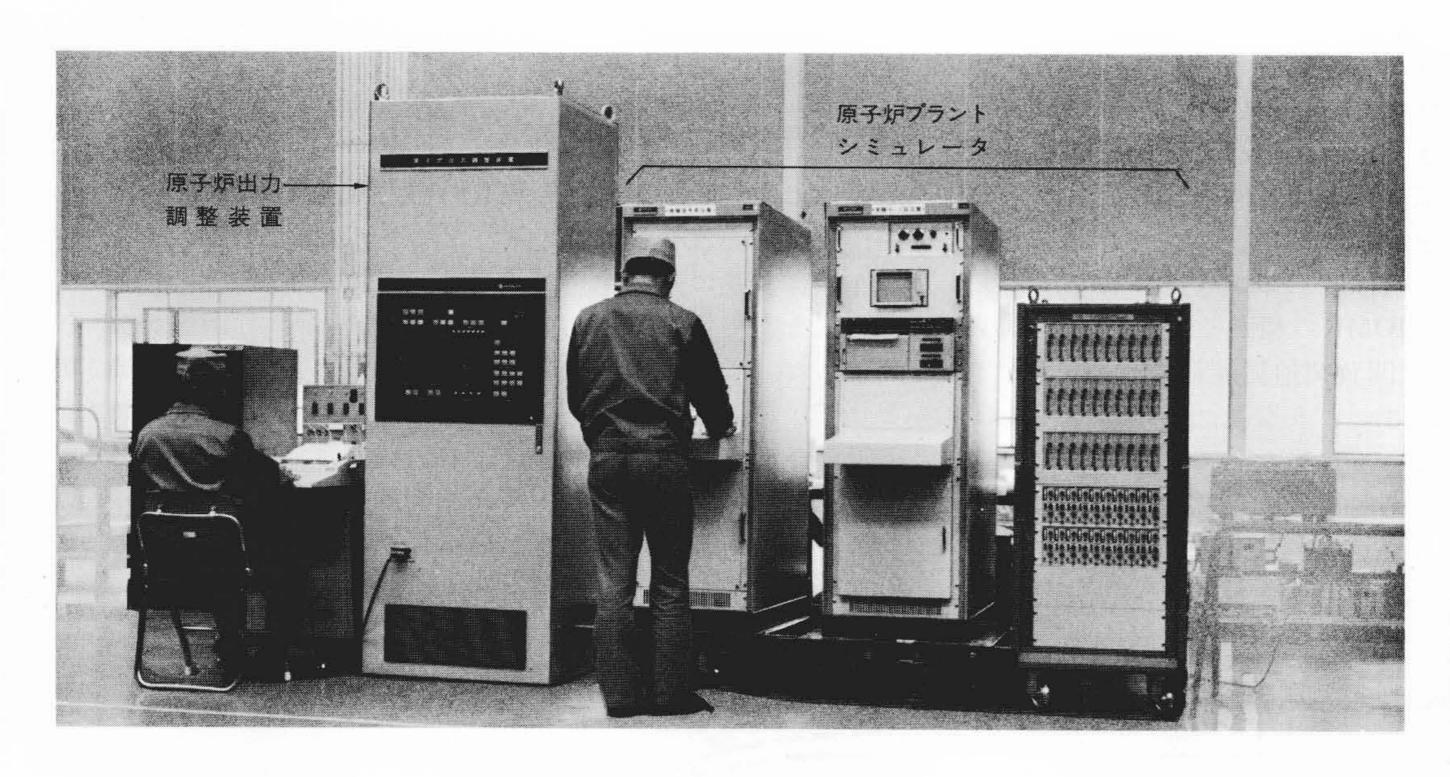


図 5 原子炉出力調整装置の 試験状況 原子炉出力調整装 置の性能試験を,原子炉プラント シミュレータを用いて実施した。

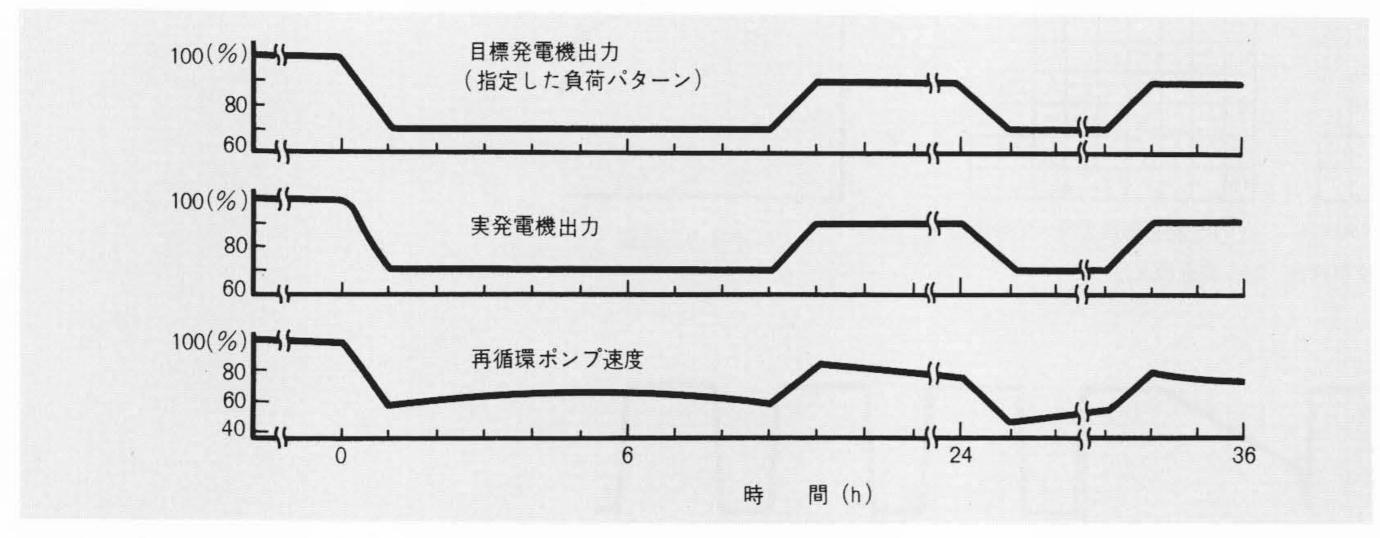


図 6 原子炉出力調整装置の 試験結果の例 目標の発電機 出力に対して、実出力は遅れ時間 約20秒で追従し、また出力のオー バシュートは見られない。

を中心に説明する。

図4に、原子炉出力調整装置を組み込んだ出力レベル制御系統のブロック図を示す。本装置は、マイクロコンピュータを中核とする演算制御装置で、制御盤1面で構成される。対象とする出力変化率は、0.3~0.8%/h程度の極めてゆっくりした変化率から、AFC運転で要求される約10%/minまでの広範囲に及ぶため、「負荷パターン制御モード」と「AFCモード」の2種の制御モードによる運転を設定している。

「負荷パターン制御モード」は、日間負荷追従をはじめとする出力レベル制御用で、あらかじめ設定した負荷変化パターンに従って、発電機出力を制御するモードである。1分周期で負荷変化パターンと実際の発電機出力とを比較し、両者が一致するように、再循環流量制御装置に再循環ポンプ速度指令信号を与える。一方、「AFCモード」は、中央給電指令所からのAFC指令を受け、1秒周期でPI(比例・積分)演算を行ない、発電機出力をAFC指令に追従させる。本装置は、常時、原子炉出力と炉心流量が適正な範囲にあるかどうかをチェックする原子炉運転領域監視、原子炉出力と発電機出力の相関監視などを実行し、異常検出時には直ちに出力変更の制御動作を停止し、警報を発する機能をもつ。

原子炉出力調整装置の機能及び制御性能を、原子炉プラントシミュレータを用いて確認した。図5に、試験状況を示す。プラントシミュレータは、キセノン動特性を含む炉心部、再循環系、原子炉給水系及びタービン・発電機系から成り、実プラントでの実測データでシミュレーション性能を確認している。

図6に、試験結果の一例として、負荷パターン制御モード

による日間負荷追従運転の結果を示す。すなわち、出力100%の定常運転状態から、低出力レベル70%、高出力レベル90%の日間負荷追従運転を、原子炉出力調整装置で実施した場合である。本シミュレーションで発電機出力は目標発電機出力に安定に、かつ高精度で追従しており、APCの機能・性能試験は所期の目標を十分満足した。

以上,今回開発した原子炉出力調整装置について述べたが,本装置により,炉心流量調節による日間負荷追従運転などの出力制御を,自動的,かつきめ細かく実施することが可能となった。

#### 5 結 言

原子力発電所の負荷追従運転のニーズは、今後ますます強まるものと予想される。本論文では、BWRを対象に、主として制御の面から日間負荷追従運転性の向上について述べた。なお、本誌のBWR炉心設計、燃料の改良に関する論文についても、合わせて参照いただきたい。今後は、日間負荷追従運転を含む負荷追従制御の実証試験及び計画予測・監視装置の改良、高性能燃料の開発などを通じて、更にBWR負荷追従性向上を図る予定である。

終わりに、本研究の推進に当たり、御指導をいただいた東京電力株式会社の関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

#### 参考文献

- 1) 原子力委員会編:昭和54年度版原子力白書
- 2) 上下,外:BWR原子力発電所用原子炉出力調整装置の開発, 日本原子力学会,昭和55年年会B15