

中国電力株式会社納め島根原子力発電所 1 号機用アナログ制御装置の特性	39
電話予約用音声応答システム	45
国鉄新幹線電車用連続換気装置の開発	51
建設機械の自動化	57
低周波誘導炉と鑄鉄溶解技術	63
日立フローチャート自動作図システム	69
イオンマイクロアナライザとその応用	75
近赤外偏光干渉計による膜厚測定	81
漏洩同軸ケーブルの布設法と電気特性の関係	87

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

CHICAGO, ILLINOIS 60607

1980

1981

1982

1983

1984

1985

1986

中国電力株式会社納め

島根原子力発電所1号機用アナログ制御装置の特性

Analog Control Systems for Shimane Nuclear P. S.
No.1 of Chugoku Electric Power Co.

本稿は、中国電力株式会社島根原子力発電所納めのアナログ制御装置のうち、原子炉出力制御に関係する再循環流量制御装置、給水流量制御装置及びタービン制御装置の特性について記したものである。これら制御装置の設計に際しては、各制御装置の特性が原子力プラントに及ぼす影響を検討するために、プラント動特性解析コードによって設定値のパラメトリックサーベイを行なった。

この結果、適切な設定値及び設定値の変化によるプラント制御特性の変化に関する情報が得られた。更にプラント試験実測結果と解析結果とを比較することにより、解析コードの有用性をも確認することができた。

日笠 工* *Takumi Higasa*佐藤英之** *Hideyuki Satô*広瀬正雄*** *Masao Hirose*丹治順一**** *Jyunichi Tanji*

1 緒 言

中国電力株式会社納め島根原子力発電所1号機は、国産第1号の沸騰水型軽水炉（以下、BWRと略す）であり、昭和49年3月に運転開始し、目下順調に運転を続けている。本プラントで重要な役割をしているプラント出力制御装置に対しては、先行プラントの実績調査とプラント動特性解析コードによる膨大なパラメトリックサーベイを行なった後設計した。この結果、制御装置の作動状態は良好でありプラントの安定性が確認された。

本稿では原子炉出力制御に関係する各種アナログ制御装置の概要及び設定値のパラメトリックサーベイ結果と現地試験結果とについて説明する。

2 制御装置の概要

BWRは、原子炉内で発生するボイドによる負の反応度効果によって優れた自己制御性がある。各制御装置はプラントが安定に運転でき、なお且つ出力変更要求に対して即応できる構成となっている。

図1は制御系全体の概略構成を示すものである。主要なアナログ制御系は、再循環流量制御系、給水流量制御系及びタービン制御系である。

2.1 再循環流量制御装置

再循環流量制御は、主制御器により、A,B両ループの流量を同時に制御できる。主制御器からの信号は、速度制限器を通りA,B両ループの制御系に入る。この信号は可変周波数発電機（速度フィードバック信号と比較され、偏差信号制限器を通った後に速度制御器に入る。速度制御器出力信号は、すくい管位置と可変周波数発電機回転数の非線形性を補償する関数発生器を通して、すくい管操作器（コントロールドライブ）へ入る。コントロールドライブで、すくい管位置を変化させることによって、流体継手の伝達トルクを変化させ、可変周波数発電機（速度）を変化させる。可変周波数発電機によりポンプ電動機を駆動し、再循環流量を変える。これによって炉心流量が変化し、ボイド率が変化して原子炉出力が変化

する。その他、制御信号喪失、制御電源喪失などの異常状態が発生した場合は、すくい管をその位置にロックし、プラント運転上支障のないよう考慮している。

再循環流量制御装置では、速度制御器の比例ゲイン、積分ゲインが制御特性に影響するので、パラメトリックに変化させ、系の応答特性を検討した。

2.2 給水流量制御装置

給水流量制御系の目的は、プラントの通常運転中に蒸気量と給水量の質量バランスを保ち、原子炉水位を設定値に保持すること及びそれにより、キャリオーバー、キャリアンダー量を極力抑え、主タービン及び原子炉再循環ポンプの安全運転を維持することである。

原子炉出力が低い場合（例えば、30%出力程度）には、原子炉水位信号のみによって給水流量を制御し、それ以上の場合には原子炉水位、給水流量及び主蒸気流量の三つの信号によって給水流量を制御する。それぞれを1要素制御及び3要素制御と称している。原子炉水位に変化が生ずるのは、主蒸気流量と給水流量とに相違が生ずるためであり、このミスマッチ信号は、いわば原子炉水位変化の先行制御信号である。原子炉水位信号は、最終的に水位を整定させるための信号といえる。原子炉水位信号は、全く独立した二つの計測系を有し選択した一方を制御に使用する。原子炉水位は圧力補正を、主蒸気流量は圧力及び断熱膨張補正を、また給水流量は温度補正をそれぞれ行ない検出精度の向上を図っている。水位調節計は比例及び積分要素を持ち、この出力電気信号を電空変換器に送り空気信号によって給水調節弁の開度を制御する。

給水制御系には、「給水ポンプランアウト保護機能」がある。原子炉水位及び圧力が低下した場合に、給水が流れすぎて給水ポンプがトリップしてしまうことのないように、ランアウト保護機能が作動して、給水調節弁の制御は水位制御から流量一定制御へ自動的にバンプレス切換えとなる。給水ポンプランアウト保護機能の動作は、ランアウト条件がなくなり、水位が回復すると、自動的にリセットされ、給水制御系

* 中国電力株式会社島根原子力発電所保修課 計装係長

** 日立製作所大みか工場

*** 日立製作所電力事業本部

**** 日立製作所日立研究所

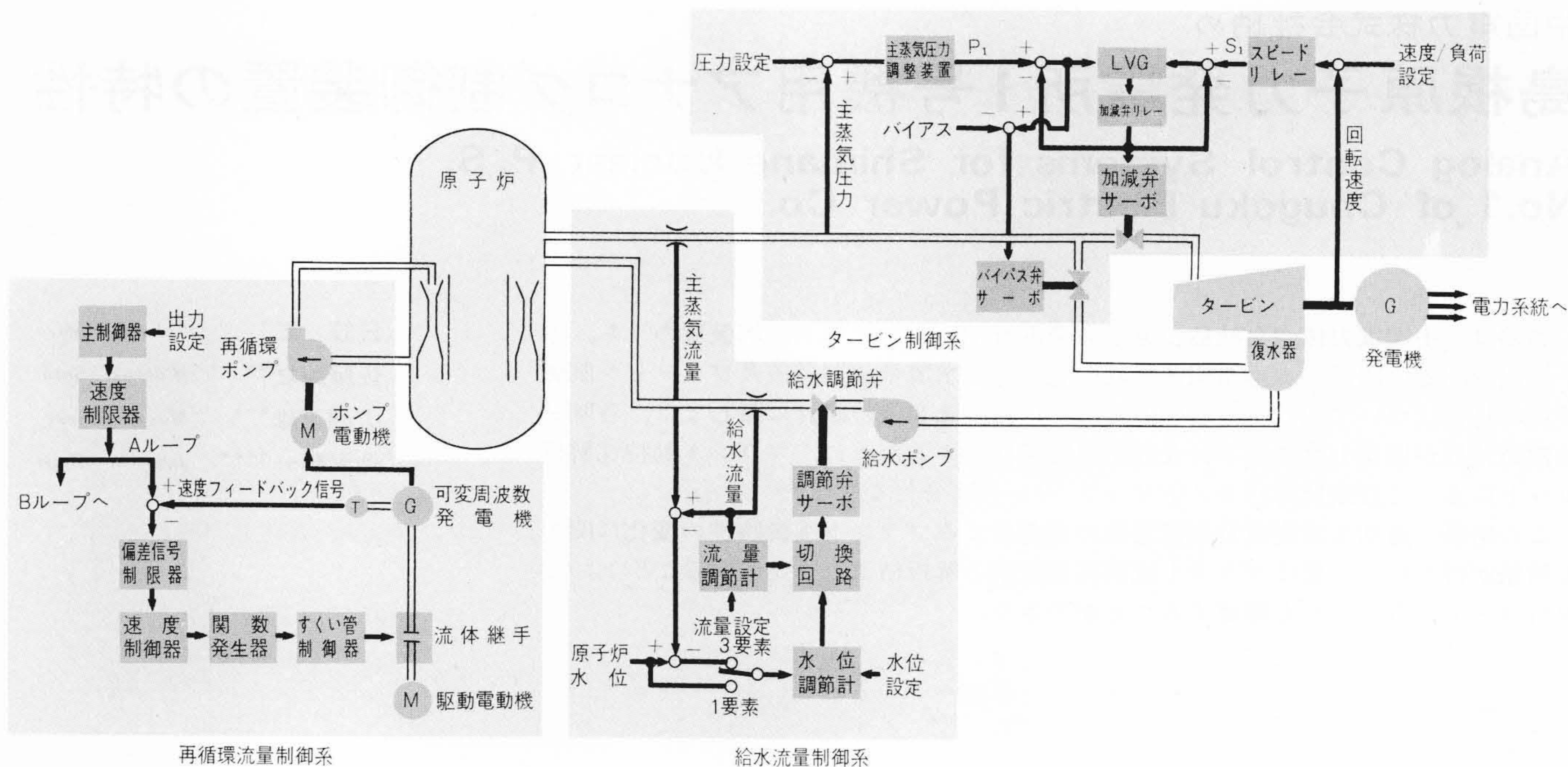


図1 制御系構成 BWRアナログ制御系は、再循環流量制御系、給水流量制御系及びタービン制御系より構成される。

は本来の水位制御に戻る。その他、作動空気喪失、制御信号喪失、制御電源喪失などの異常状態が発生した場合は、給水調節弁はその位置にロックされ、プラント運転上支障のないよう考慮されている。

給水流量制御装置では、水位調節計の比例ゲイン、積分ゲイン mismatch ゲインが、制御特性に影響するので、パラメータサーベイ系の応答特性を検討した。

2.3 タービン制御装置

タービン制御系は、主蒸気圧力とタービン速度をともに制御することを特徴とするもので、通常は圧力制御を優先する。これは、炉心内ボイド反応度係数が負であり、圧力に対して逆応答するので、原子炉圧力を一定に保つことが必要であるためである。タービン速度制御では、速度/負荷設定で4%の速度レギュレーションに設定しているが、負荷にして+10%分のバイアスを欠けているため、定常状態では信号 S_1 は信号 P_1 より10%だけ大きな値となり、Low Value Gate (LVG) により圧力制御を優先する。

主蒸気圧力調整装置には、電気式主蒸気圧力調整装置（以下、EPRと略す）と機械式主蒸気圧力調整装置（以下、MPRと略す）とがある。起動時、原子炉圧力が低い場合はMPRを使用し、原子炉圧力が上昇して通常運転領域に入ると

EPRを主制御器として使用し、MPRはEPRのバックアップとしての役割を果たす。これらの主蒸気圧力調整装置は、進み遅れ補償をしており、これによって最適なタービン加減弁開度調整信号を出す。圧力信号から加減弁リレー出力までのブロックは、図2に示すとおりである。このブロック図の等価伝達関数は、簡単化すると次のように表わすことができる。

$$G_s = \frac{1}{K_{cf}} \frac{1 + T_8 S}{1 + (T_8 + 1/K_e \cdot K_{cf}) S}$$

但し、 $T_4, T_9 \ll 1$

従って、圧力レギュレーション K_{cf} 、進み時間 T_8 及び遅れ時間 $T_8 + 1/K_e \cdot K_{cf}$ が、制御特性に影響するので、パラメトリックに変化させて制御特性を検討した。

3 電子計算機による特性解析

起動試験に先立ち、各制御系の応答状態を推定するため、電子計算機によるパラメトリックサーベイを行なった。

図3は、原子炉出力-炉心流量曲線を示すものである。ここで①から⑮まで示した出力点において起動試験を実施した。通常運転時の範囲は、同図の濃い網目で示した部分である。従ってパラメトリックサーベイについては、この範囲内で代表的な点である原子炉出力及び炉心流量の最小な点⑥(35%出力、65%流量)と、原子炉出力、炉心流量ともに最大な点⑭(100%出力、100%流量)とにつき解析した結果を説明する。

3.1 外乱入力方法

解析においては、制御装置の特性を調べるために、最も厳しい条件である各制御系の設定点をステップ状に変化させる方法をとった。具体的な外乱入力方法は、表1に示したとおりである。

3.2 パラメータサーベイ項目

表2は、サーベイを行なった各制御系の調節器ゲインの値の代表例を示すものである。同表で太い実線で囲んだ数値は、先行炉の運転経験及び予備解析に基づく最適値である。従っ

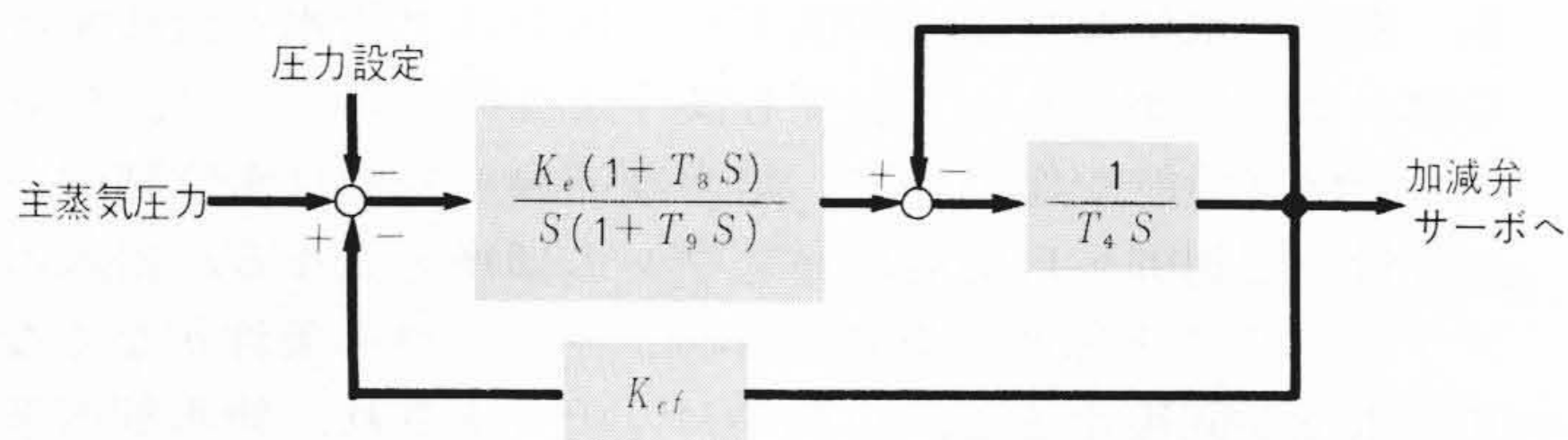


図2 原子炉圧力制御系ブロック図 圧力信号から加減弁リレー出力までのブロック図を示す。

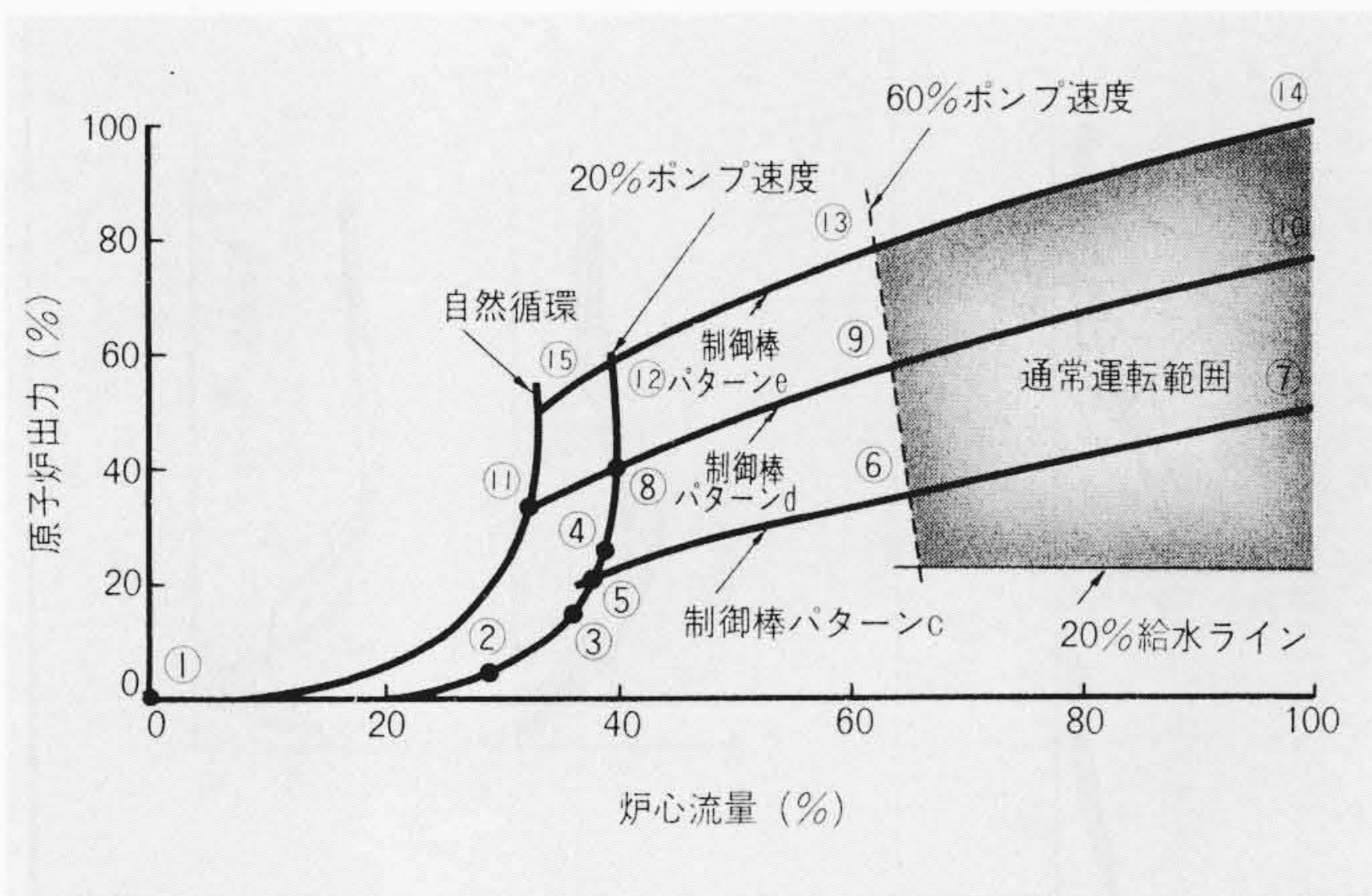


図3 原子炉出力－炉心流量曲線 原子炉出力と炉心流量の関係を示す。⑥と⑭の点が通常運転範囲の代表点であることが分かる。

表1 外乱入力方法 各制御系の調節器の設定点変化を示す。

制 御 系	外 乱 入 力 方 法
再循環流量 制 御 系	主制御器の出力設定点 ステップ状に5%上昇
給 水 流 量 制 御 系	水位調節計の水位設定点 ⑥の点でステップ状に15cm上昇 ⑮の点でステップ状に15cm下降
タービン 制 御 系	EPR設定点をステップ状に 0.7kg/cm ² 上昇

注：EPR＝電気式主蒸気圧力調整装置

表2 調節器ゲイン 各制御系調節器のゲインを示す。太い実線で囲んだ数値が最適値である。

系 統	ケース要素	A	B	C	D	E	F	G
再循環	比例ゲイン	0.125	0.0625	0.25	0.125	0.125		
	積分ゲイン	0.0313	0.0313	0.0313	0.0156	0.0625		
給 水	比例ゲイン	1.25	2.5	0.625	1.25	1.25	1.25	1.25
	積分ゲイン	0.0625	0.0625	0.0625	0.03125	0.125	0.0625	0.0625
	ミスマッチゲイン(in)	12	12	12	12	12	6	24
E P R	圧力レギュレーション(ポンド)	30	20	40	30	30	30	
	進み時間(s)	2	2	2	1	4	2	
	遅れ時間(s)	14	14	14	14	14	7	

て、特定の調節器のパラメータサーベイにおいては、他の調節器のゲインを実線で囲った値に設定した。サーベイにあたっての制御定数の変化は、原則として最適値を中心として2倍又は1/2倍とした。

3.3 制御性能の評価基準

各調節器の設定値の許容範囲を求めるため、制御性能の評価基準を次のように定めた。

3.3.1 再循環流量制御系

- (1) ±10%以下の設定点変化をステップ状に加えた場合、中性子束高によるスクラムに至らないこと。
- (2) 同上の場合に、系が振動的にならないこと。また、原子炉出力20%以上でポンプ速度が60%以上の場合（以下、代表的な運転範囲と略す）、主応答変数（炉心流量、タービン蒸気流量）の減幅比は0.25以下のこと。

3.3.2 給水流量制御系

- (1) ±15cm以下の設定点変化をステップ状に加えた場合、水位変化は高水位タービントリップ点、低水位原子炉スクラム点に至らないこと。

また、給水流量の過渡的な増加によって、中性子束高スクラムに至らないこと。

- (2) 同上の場合に、系が振動的にならないこと。また、代表的な運転範囲では、主応答変数（給水流量、原子炉水位）の減幅比は0.25以下であること。

3.3.3 タービン制御系

- (1) +0.7kg/cm以下の設定点変化をステップ状に加えた場合、系が振動的にならないこと。また、代表的な運転範囲では、主応答変数（原子炉圧力、タービン蒸気流量）の減幅比は0.25以下であること。

4 解析結果及び検討

前述のように、各種のパラメトリックサーベイを行なったがここでは代表例として、⑥、⑭の点（図3参照）で主応答変数の応答状態を図4に示すが、以下これについて説明する。

4.1 再循環流量制御系

ケースA、B、Cを比較すると分かるように、比例ゲインを大きくすると最初の立上りは速くなるが、オーバシュートが大きく振動的となる。特に原子炉出力及び炉心流量が少なくなると、制御性は悪くなる。ゲインを小さくすると、振動は消えるが立上りが遅くなる。積分ゲインを変えた場合、（ケースA、D、E）は、ゲインの増大に伴い立上りが速くなり、且つ設定値にも速く達する。しかしながら、比例ゲインと同じく低出力、低流量では振動的となる。以上により、原子炉出力及び炉心流量が少ない場合にも安定な制御定数としては、ケースAが適当であるといえる。

4.2 給水流量制御系

比例ゲインを変えた場合の応答は（ケースA、B、C）、ゲインの増大で給水流量の変動は大きくなるが、原子炉水位の応答は速くなる。逆にゲインを小さくすると給水流量の変動は小さくなるが、水位の応答が遅くなる。積分ゲインを変化させた場合（ケースA、D、E）は上記と同様な傾向が生ずるが、相互の差異はさほど大きなものとはいえない。ミスマッチゲインを変化させた場合（ケースA、F、G）には、応答特性が大きく変わる。すなわち、ゲインを小さくする（F）と、給水流量の変動が大きくなり給水流量、原子炉水位ともにオーバシュートが生ずる傾向にある。ゲインを大きくする（G）と応答が鈍くなる傾向にある。以上により、ケースAが適当な値であるといえる。

4.3 タービン制御系

圧力レギュレーションを変化させた場合（ケースA、B、C）、大きくなるにつれて加減弁の応答が速くなり、原子炉圧圧とタービン蒸気流量の応答は速くなるとともに振動的となる。進み時間を変化させた場合（ケースA、D、E）には、長くすると原子炉圧力の応答立上りは速くなるが、タービン蒸気流量の最初の変化が大きくなる。逆に進み時間を短くす

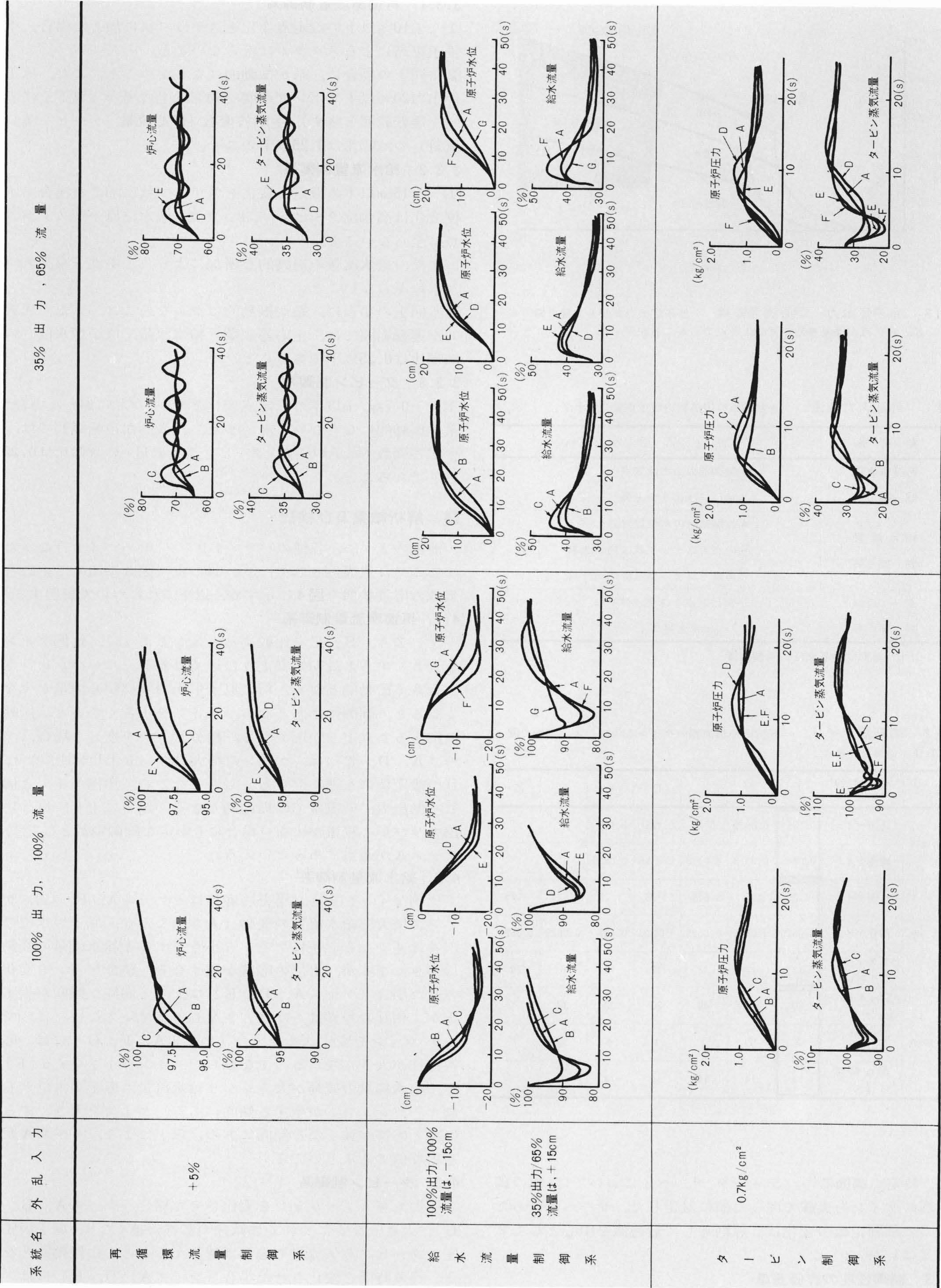


図4 電子計算機解析結果 各制御系をパラメータサーベイしたときの制御系の特性を表わす。

ると、応答は遅く振動的となり、整定時間も長くなる。次に遅れ時間の変化については、ケースFとして短くする方向へ変化させた結果、ケースFとケースEの応答は原子炉圧力及びタービン蒸気流量とも非常によく一致した。すなわち、遅れ時間を短くした場合は、進み時間を長くした場合と同様な変化を示す。以上より、ケースAが適当な値であるといえる。

5 実測結果

前述の解析結果に基づき、各制御装置の調節器ゲインをケースAに設定し、起動試験を実施した。実測結果は各制御系ともすべて判定基準を満足し、良好な制御性のあることが判明した。しかしながら、起動試験では、制御装置の設定点をランプ状に変更したため、この結果を4.の解析結果と直接対比させることはできない。そこで外乱を起動試験と同一条件のランプ状にして解析し、電子計算機による特性解析が制御パラメータの最適設計に有効であるか否かを確認した。

5.1 再循環流量制御系

図5は試験結果を実線で、解析結果を破線で示すものである。試験結果と解析結果とは全体的に良く一致している。中性子束の最初の急激な増加は、炉心流量が増加しているため

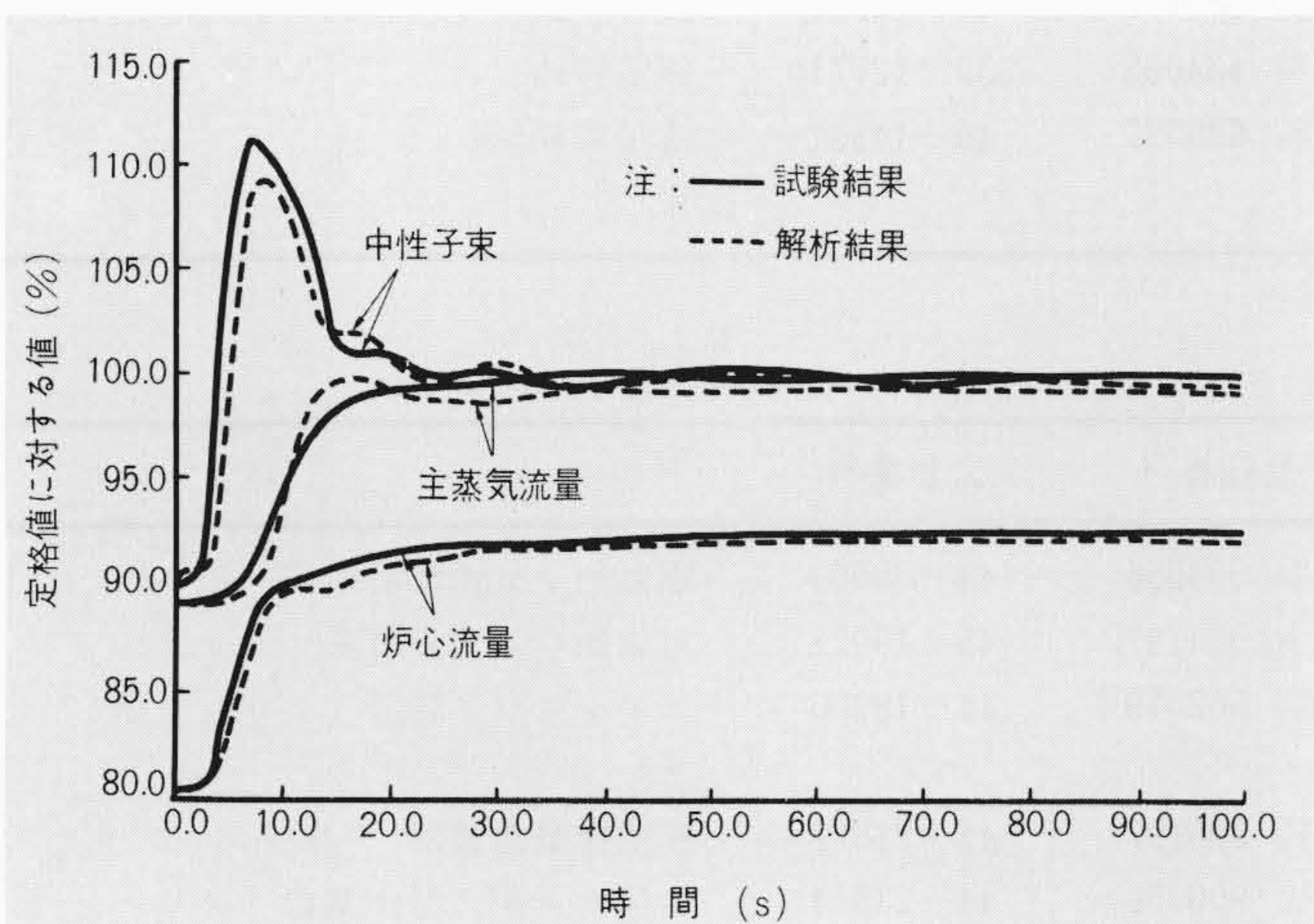


図5 再循環流量制御試験(定格出力) +10%の設定点変更時の中性子束、主蒸気流量及び炉心流量の応答を示す。

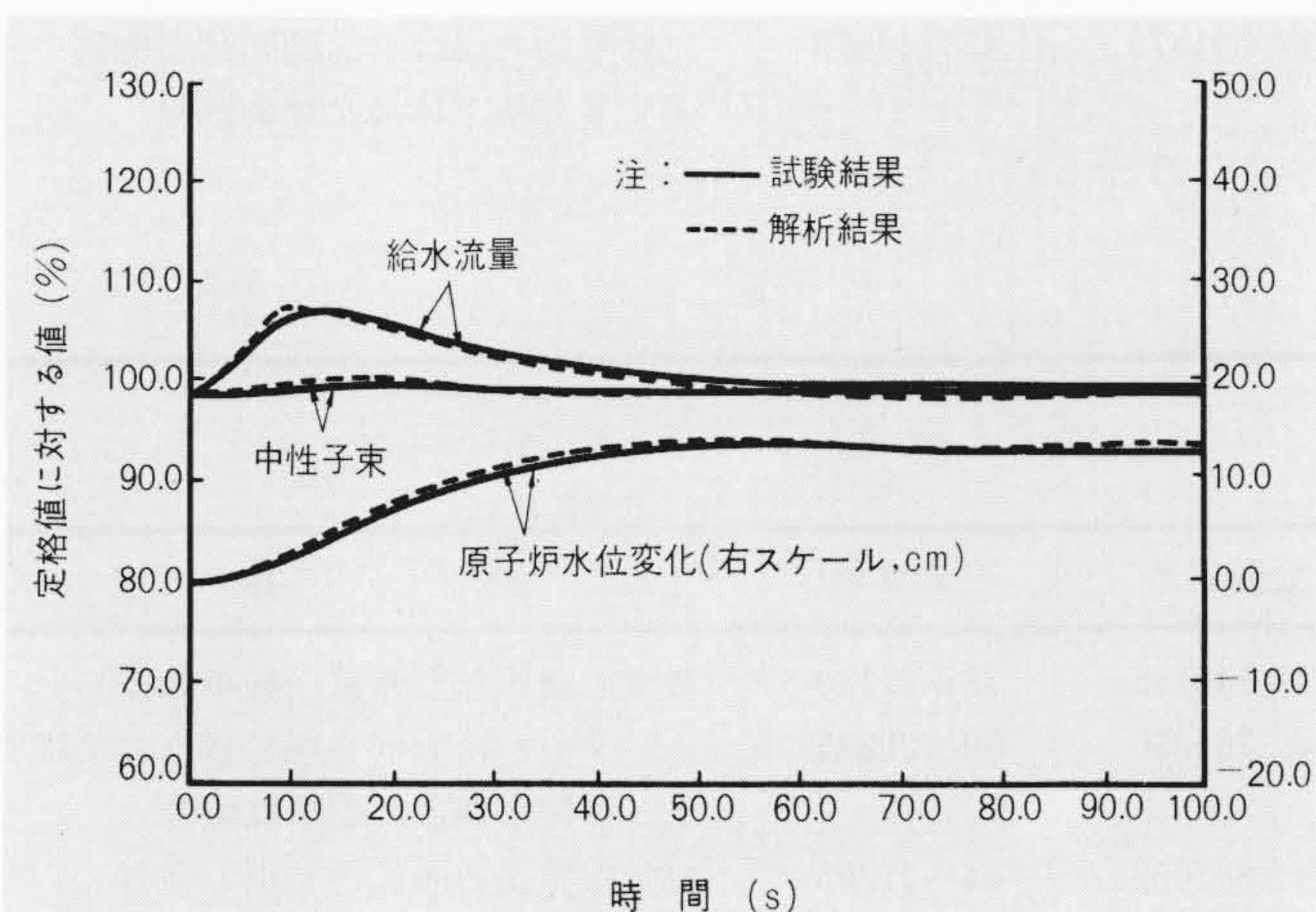


図6 水位設定点変更試験(定格出力) +15cm設定点変更時の中性子束、給水流量及び原子炉水位の応答を示す。

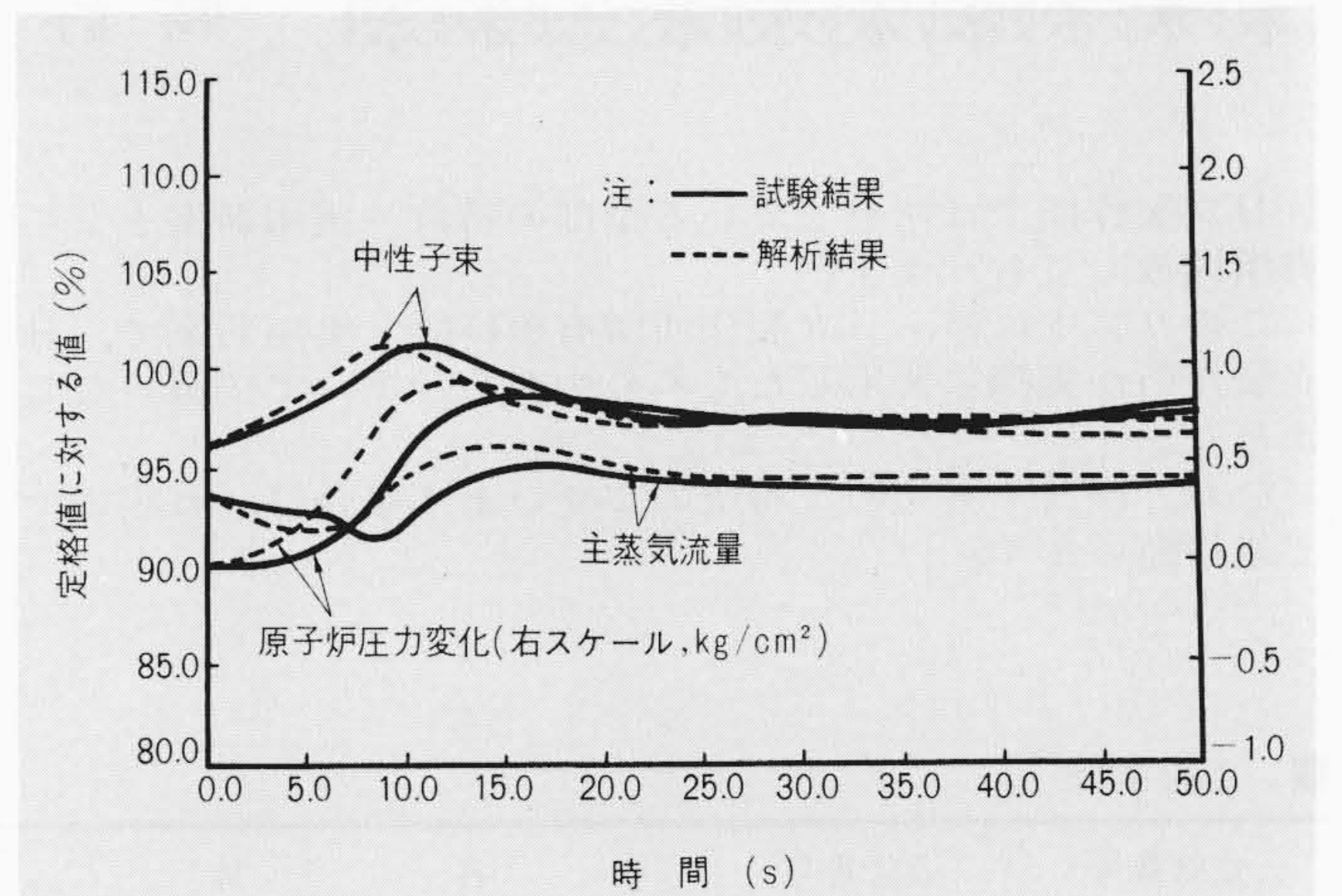


図7 圧力設定点変更試験 +0.7kg/cm² 設定点変更時の中性子束、主蒸気流量及び原子炉圧力の応答を示す。

である。その後は安定に整定している。

5.2 給水流量制御系

図6は、試験結果を実線で、解析結果を破線で示したものである。試験結果と解析結果は良い一致をみている。給水流量の変化量は少ないので、サブクールの変化による原子炉出力の変動はほとんど見られない。

5.3 タービン制御系

図7は、試験結果を実線で、解析結果を破線で示したものである。試験結果では原子炉圧力の応答が解析結果のものより幾分遅れているが、これは解析モデルのタービン加減弁特性などが実機のものとは若干異なっているためと思われる。応答の形は試験結果と解析結果で良い一致を示している。

以上のように、解析結果と試験結果は全体的に良く一致しているので、制御装置のゲインをあらかじめ解析により求め、最適な値に設定できることが判明した。

6 結 言

以上、中国電力株式会社納め島根原子力発電所1号機のアナログ制御装置の概要及び特性について述べた。これらアナログ制御系は、前もって解析した各種制御定数を用いることにより、実際の試験で目標どおり良好な結果を得ることができた。

今後、原子力発電所の制御は、原子力発電所の比重増大とともに、プラントの起動停止の自動化などの要求からますます重要になるものと考えられる。我々はこれらの制御装置の運転実績及び内外先行プラントの運転実績を十分参考にして安全性と信頼性の高いより高度の制御装置の製作にいつその努力を払う所存である。

最後にこれら各種試験に際し終始御指導、御協力をいただいた中国電力株式会社の関係各位に対し深謝する次第である。

参考文献

- (1) 矢内：「制御計装設備」 日立評論 55, 619 (昭48-8)
- (2) 川村, 秋山, 川城「再循環ポンプ用可変周波数電源MGセット」 日立評論 53, 1107 (昭46-11)
- (3) 柏原, 滝「原子力タービンの制御系統の特長」 日立評論 53, 535 (昭46-6)
- (4) 西村：エネルギー 53 (昭44-11)