

強制貫流ボイラの負荷応答特性

Control Characteristics of The Once-Through Boiler at Load Change

中野善之* 河竹好一*
Yoshiyuki Nakano Kôichi Kawatake

西村昭** 今野順夫**
Akira Nishimura Norio Imano

内 容 梗 概

わが国最初の大容量強制貫流ボイラプラントとして昭和37年完成した清水共同発電株式会社新清水火力発電所は、その計画に際して経済性、起動停止特性などにも当然十分な考慮がはらわれたが、特に動力源として信頼性が高く、かつ急激な負荷変動にも速く応答できるものとするに非常な努力がなされ適切な制御系が設計された。そのためボイラ制御系の調整に際しても、あらかじめアナログ計算機によってボイラを正確に模擬し、制御特性を慎重に解析し、それを現地調整に適用した。その結果期待どおり良好な応答特性を得ることができ、現地調整を能率的、合理的に進め短期間のうちに完了することができた。

また、アナログ計算機によるプラント模擬回路によって実プラントでは実測の困難な広範囲の周期的負荷変化に対する応答特性を求め、従来明確でなかった強制貫流ボイラの負荷応答特性の一端を明らかにした。

1. 緒 言

近年一段と火主水従の傾向にあるわが国の電力事情では、電力系統の合理的運営の主体は次第に火力に移りつつあり、必然的に火力に課せられる任務は以前にもまして広範囲かつ重大になってきている。したがって最近計画される火力発電所では、いっそうの効率向上のためにさらに高温高压の蒸気を用い、また急速な起動停止および負荷応答を可能とすることに非常な努力が払われている。そのため最近はこの情勢に対処した数々のすぐれた特長を持つ強制貫流ボイラを採用する気運が強い。強制貫流ボイラは多量の缶水を保有する従来のボイラに比較して特に負荷応答特性の点で非常に有利な面を持っているので、適切な制御方法でこの利点を十分に生かせば良好な運転を確保しつつ応答性のよい発電所を実現できるのである。しかし強制貫流ボイラは相互干渉のある多変数のプロセスであるため制御系の設計や調整には特に慎重な検討が必要である。

今回わが国最初の強制貫流ボイラプラントとして1号機が昭和37年9月、2号機が同11月に完成し運転を開始した新清水火力発電所75MWベンソンボイラの制御系調整に際しては、ボイラおよび制御系の特性の定量的な把握によって負荷応答特性をアナログ計算機で解析し最適設定点を求め、これを適用したため良好な特性を得ることができた。

以下本文においてはアナログ計算機による解析について述べるとともに、最近の電力系統運営の情勢にのっとり、ひん繁な負荷変動のある電力系統にはいった場合の強制貫流ボイラプラントの負荷応答特性について論じている。

2. ボイラおよび制御系の概要

2.1 プラント機器概略仕様

新清水火力発電所75MWベンソンボイラプラントは、わが国最初の事業用強制貫流ボイラプラントとして昭和37年1号機9月、2号機11月に完成したものであり、主要機器の仕様は第1表に示すとおりである⁽¹⁾。

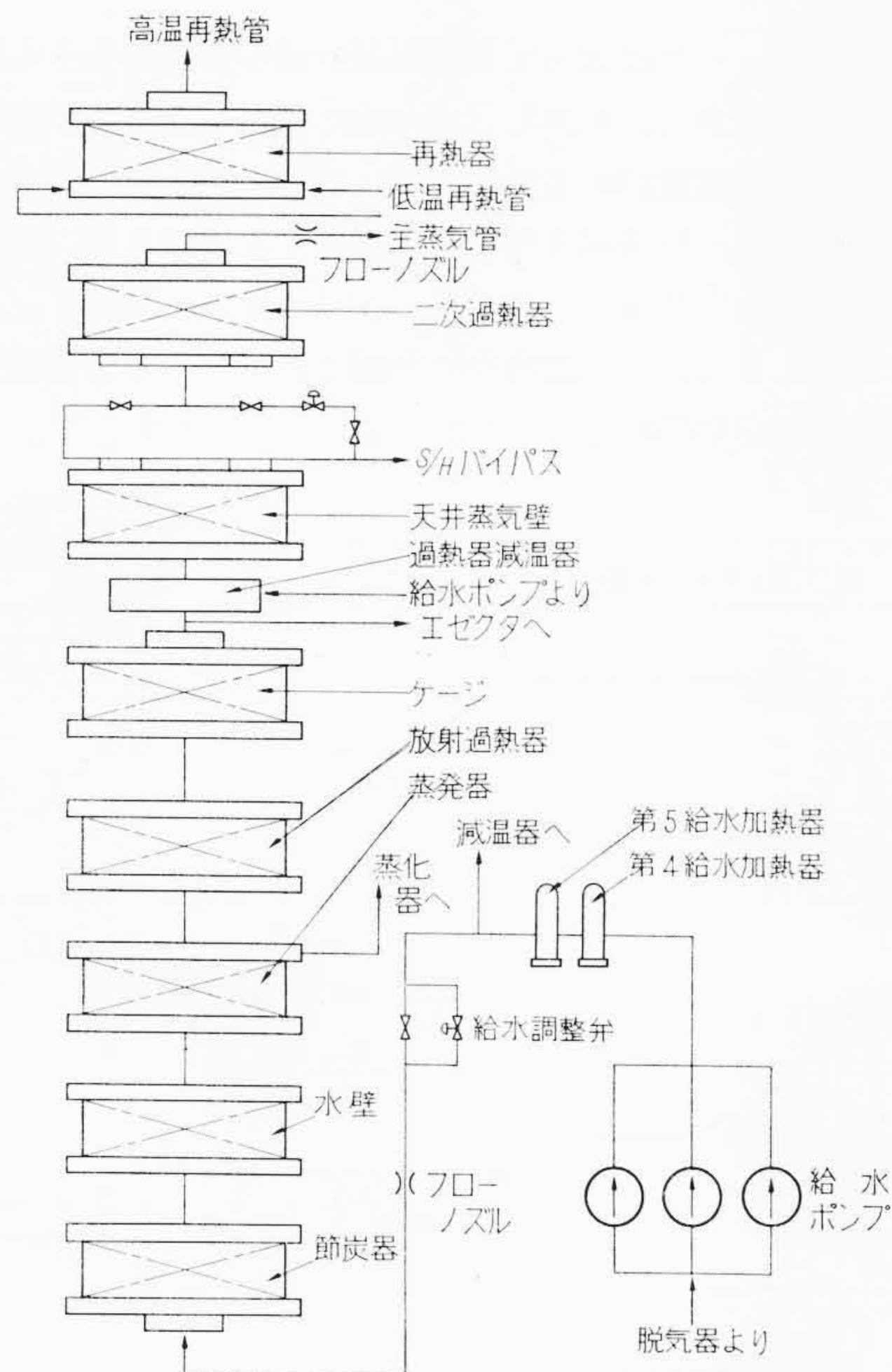
本プラントの特長はボイラにあるので、次にこの260t/hベンソンボイラについて述べる⁽²⁾。第1図および第2図は、ボイラの流動系統および各伝熱面の配置を示すものである。缶水は、給水ポンプ

第1表 主要機器仕様

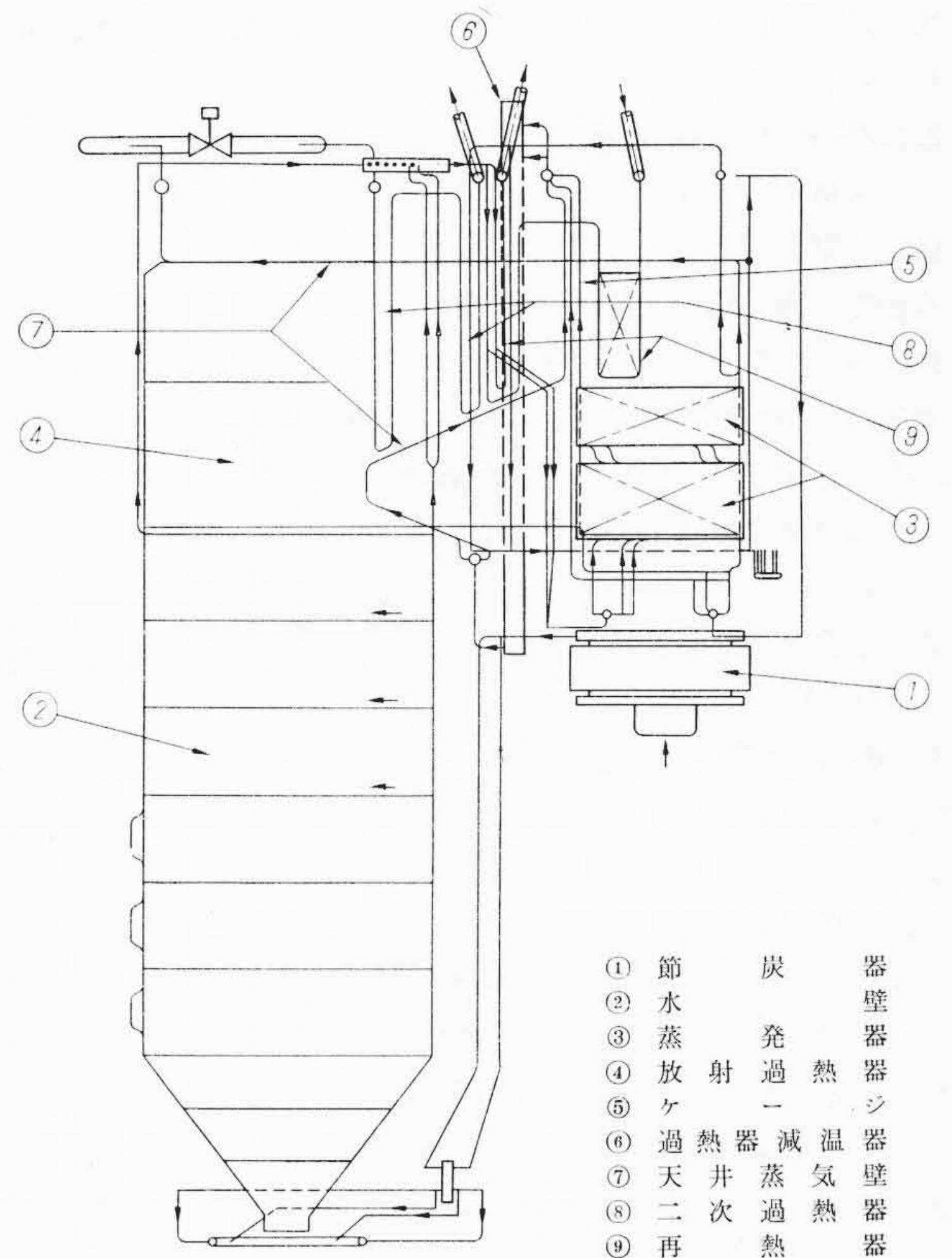
ボイラ関係		強圧通風機	
形 式	B & Wベンソンボイラ	台 数	2台
蒸 発 量(最大連続負荷)	260 t/h	形 式	片吸込翼形ファン
蒸気圧力(過熱器出口)	131k g/cm ² g	風 量	2,830 m ³ /min
“ (再熱器出口)	29.7k g/cm ² g	風 圧(静圧差)	820 mm W.G
蒸気温度(過熱器出口)	541℃	ガス再循環通風機	
“ (再熱器出口)	541℃	台 数	1台
給水温度(節炭器入口)	240℃	形 式	両吸込プレートファン
空 気 温 度	15℃	風 量	2,200 m ³ /min
通 風 方 式	強 圧 通 風	風 圧(静圧差)	125 mm WG
燃 焼 方 式	重 油 専 焼	タ ー ビ ン 関 係	
ボイラ給水ポンプ		形 式	横置くし形再熱式
台 数	3台	出 力	75,000 kW
形 式	横軸パーレル形多段タービンポンプ	主蒸気圧力	127 kg/cm ² g
給水量(1台分)	143 t/h	“ 温度	538℃
吐出圧力	190 kg/cm ² g	再熱蒸気温度	538℃
重油噴燃ポンプ		真 空 度	722 mmHg
台 数	3台	抽 気 数 段	5段
形 式	横置電動機直結ネジポンプ	回 転 数	3,600 rpm
容 量(1台分)	11.5 t/h	発 電 機 関 係	
吐出圧力	22 kg/cm ² g	形 式	円筒回転界磁水素冷却式
重油バーナ		出 力	(水素圧力0.05 kg/cm ² gにおいて)76,727 kVA
数 量	9組	力 率	85%
形 式	B&W, Y ジェットスチームアトマイザ形	回 転 数	3,600 rpm
容 量(1組分)	2,300 kg/h	電 圧	13,800 V
重油圧力	13.0k g/cm ² g	電 流	6,390 A

によって昇圧され高圧給水加熱器を経て一部を注水管へ分岐したのち煙道部にある節炭器にはいる。節炭器で加熱された缶水は水平蛇管(だかん)式の水壁にはいり途中より蒸発を開始する。この水壁管では火炉を取り巻きつつ下部ホッパ部からバーナ部に向かって上昇し、その後煙道部に置かれた蒸発器にはいりここで蒸発を完了する。蒸発器を出た蒸気はやはり水平蛇管式の火炉上部炉壁の放射過熱器へはいりここで過熱される。さらに蒸気はケージ部分、注水過熱温度制御装置に後続する天井蒸気壁および二次過熱器において過熱される。過熱の終わった蒸気は高圧タービンに送られ、ここで約29%の仕事をし、その後再熱器へ送られる。二次過熱器と蒸発器の中間に配置された再熱器で蒸気は再び過熱され、次に低圧タービンへ送られここで残りの仕事を完了する。

* 日立製作所日立研究所
** 日立製作所国分工場



第1図 流動系統図



第2図 伝熱面配置図

2.2 ボイラ制御系 (ABC系)

2.2.1 制御系の基本的な考え方

ボイラは本質的に相互干渉のある多変数の系であり、干渉が正方向（増長方向）のものがある場合はこれをいかにして取り除くかが制御系設計の要点の一つである。特に強制貫流ボイラではこの相互干渉の傾向が著しく、制御量と操作量との適切な関連付けが必要である。一方強制貫流ボイラにはその本来の特性によって制御上有利な点がある。すなわち、ドラムボイラのように缶水循環の制限がないので圧力変動はドラムボイラほど問題にされない。また、過熱伝熱面の範囲が固定されておらず負荷変動の際にはこれが温度変化の小さくなる方向に移動する。

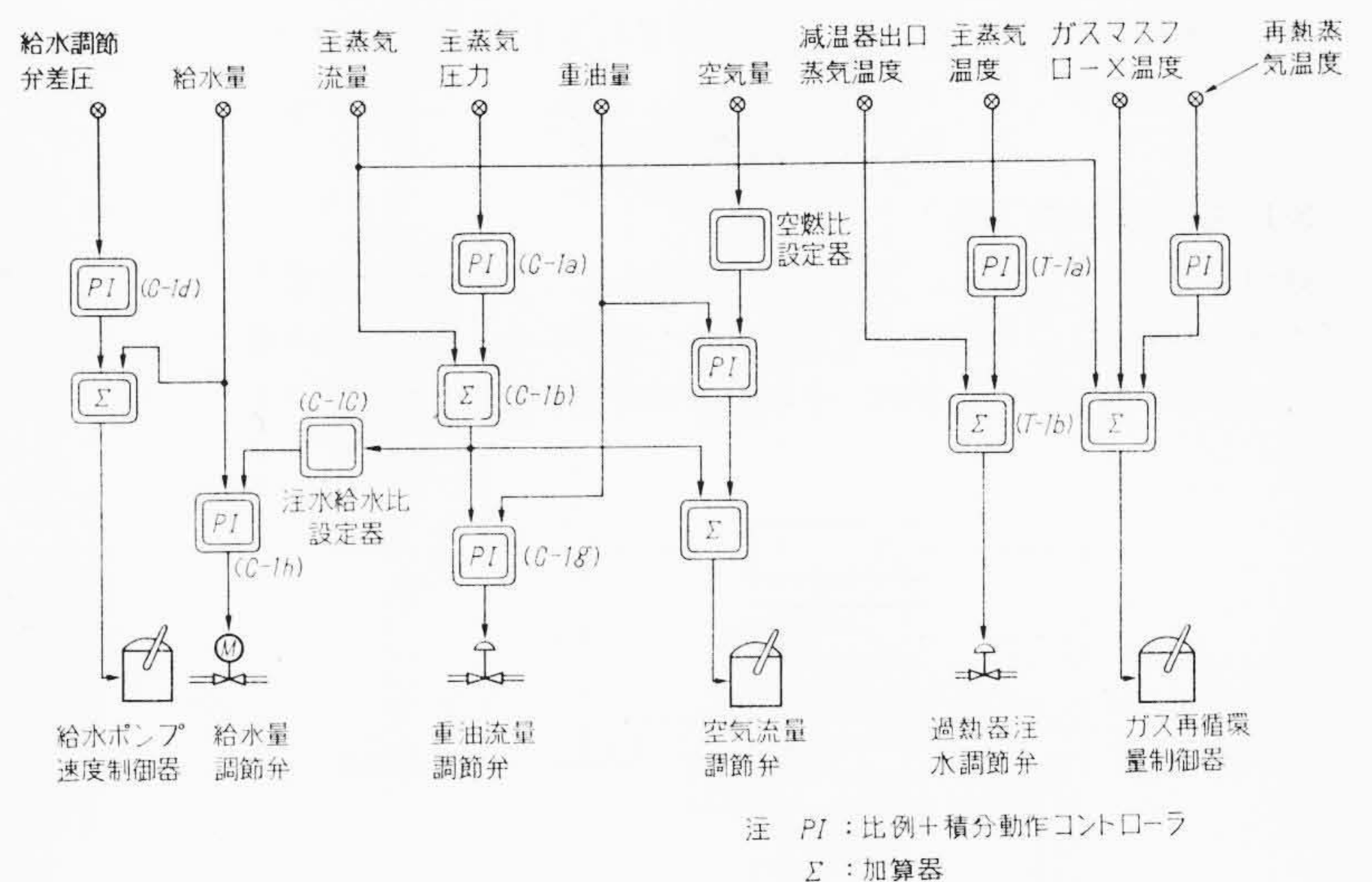
新清水火力発電所のボイラ制御系は、これらの点が考慮されて、第3図のように主蒸気圧力をマスタ制御信号とし、また給水量および燃料量を並行して制御し、蒸気温度の変動を抑えるように構成されている。以下に制御系各部分について述べる。

2.2.2 主蒸気圧力制御系

主蒸気圧力は、マスタ調節計である主蒸気圧力調節計によって給水量および燃料量を同時に操作し制御される。調節計はPI (比例および積分) 調節計であり、圧力の偏差は定常的には零になる。また主蒸気流量の信号を先行値として加えることによって負荷変化時の応答性の向上に効果をあげている。

2.2.3 主蒸気温度制御系

基本的にはマスタ調節計からの信号によって給水量と燃料量を常にバランスさせることによって、制御しているが、さらに過渡的な給水、燃料量アンバランスによる温度偏差を吸収するために、速効的効果のある注水減温による温度制御を併用している。調節計はやはりPI調節計であり、温度の偏差は定常的には零になる。



第3図 制御系統図

2.2.4 再熱蒸気温度制御系

これにはB & W社独特の燃焼ガス再循環による方法が採用されている。すなわち、火炉への熱入力（燃焼ガス流量×燃焼ガス温度）の信号によってガス再循環ファン (GRF) ダンパを操作する。また速い制御のためにさらに主蒸気流量の信号を先行値として加えている。

2.2.5 重油量制御系

マスタ制御信号によって重油量調整弁が制御されるが、操作端の外乱をも吸収し、常にマスタ制御信号に見合った重油量に維持するために、設定値と実際重油量の偏差に対する積分制御をするマイナ制御系を持っている。

2.2.6 空燃比制御系

重油量に追従して押込通風機のベーンまたはダンパが制御され適当な空燃比の空気量が供給される。やはり操作端外乱を補正するために、積分動作を持つ調節計によるマイナ制御系が構成され

ている。さらにマスタ制御信号を先行値として加え、速応性を期している。

2.2.7 給水量制御系

給水量は、重油量と並行してマスタ制御信号によって次の二段構えで制御される。まずマスタ制御信号によってボイラ入口にある動作の速い給水量調整弁が操作され速応的に給水量が制御され、さらに給水ポンプの速度制御によって、調整弁前後の差圧が流量にかかわらず常に一定になるよう制御される。このように二段構えとするねらいは、弁座が高負荷時の大きな差圧に長時間さらされ摩耗するのを防ぐとともに、弁前後差圧を常に最も制御性のよい位置に保つものである。これらの系のさらに外側に、給水量測定値をフィードバックして操作端外乱を吸収する制御系が構成されている。

2.2.8 給水量、燃料量比制御

強制貫流ボイラはその特性上燃料の発熱量変化、ボイラ効率変化などがない限り、給水量と燃料量が正規の比率に保たれておれば定常状態での蒸気温度偏差は生じない。しかしこれだけでは両操作量の蒸気温度に対する効果の過渡時のアンバランスは免れないので、本制御系では、制御性およびボイラ効率への効果を検討し決定した蒸気流量の 5% の水が過熱減温装置へ常時注水されており、蒸気温度に変動があった場合直ちにこの注水量が変化し速効的に温度を制御するよう計画されている。そして定常状態では常に 5% の値を維持するために、マスタ制御信号の給水量制御に対する値は燃料量制御に対する値より常に 5% 小さくなっており、この差分 5% が注水量によって補給されるようになっている。

3. 負荷応答特性の解析

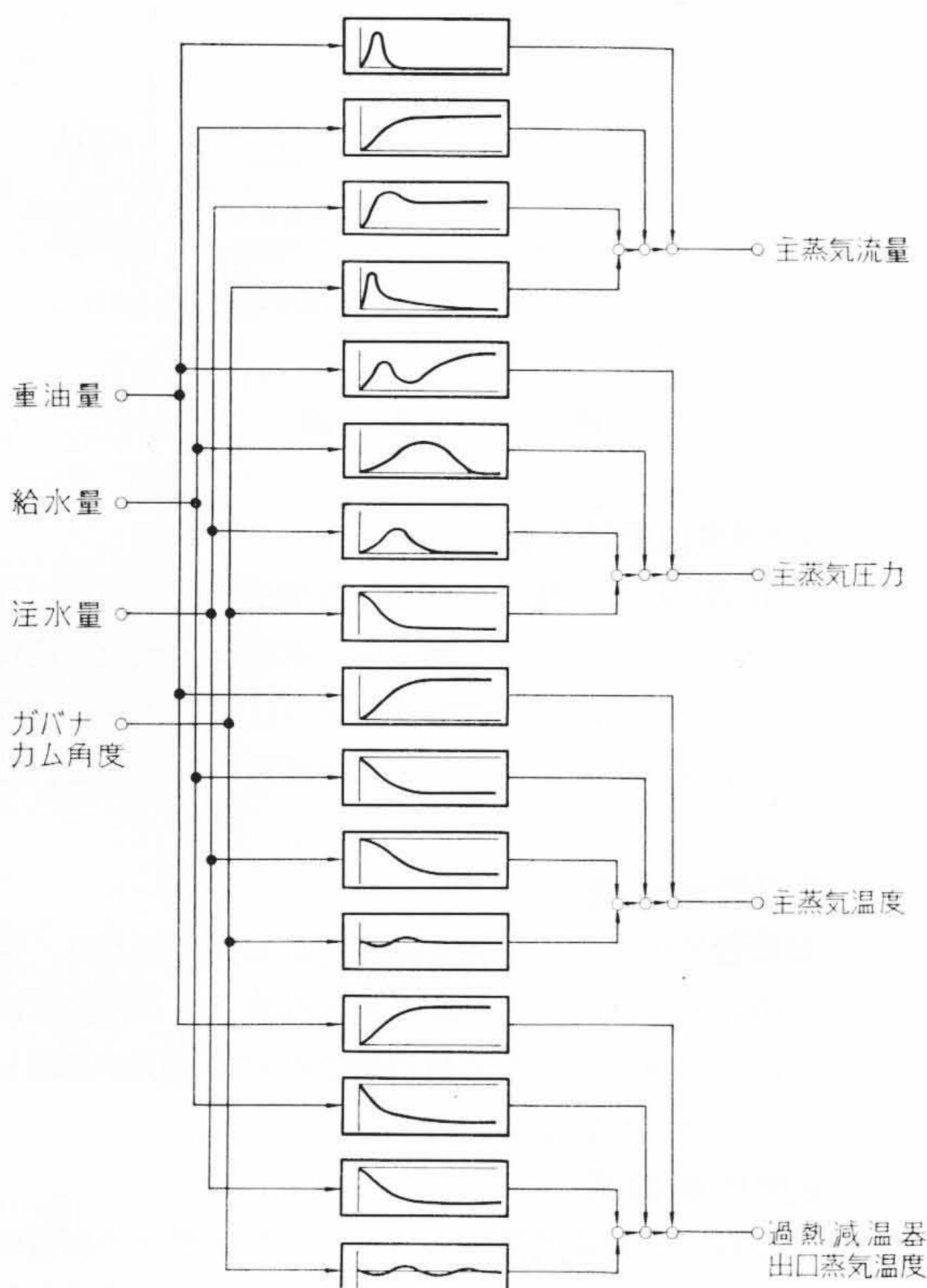
3.1 解析の方法

負荷応答特性の解析は、アナログ計算機によって制御系を含めたボイラを模擬し、この模擬ボイラにおいて制御系中の定数を種々変化した場合の制御特性を求め、その中から最適な特性となるものを

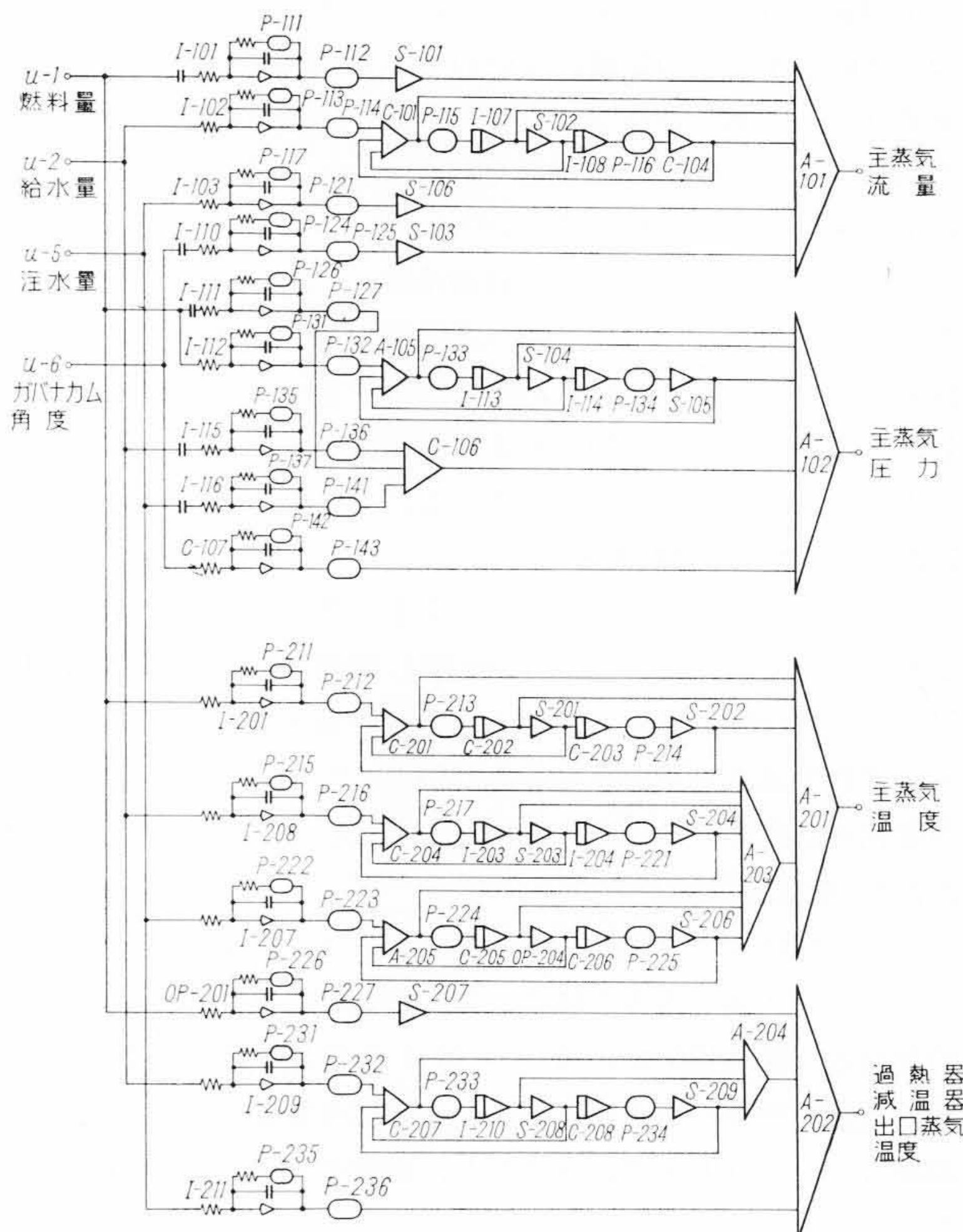
選ぶものである。これによって最適制御特性を短時間のうちに容易に求めることができる。しかしこのためにはボイラおよび制御系の特性があらかじめ定量的に与えられていることが必要である。特性を求める方法には、対象ボイラでの実測による方法あるいは理論的な解析による方法⁽³⁾⁽⁴⁾などがあるが、今回は幸いに実測データが得られたのでこれを用いた。動特性の実測は新清水火力発電所 1 号ユニットの試運転の期間に行なわれた貴重なデータである⁽⁵⁾。

	インディシャル応答	伝達関数
(1)		$\frac{K}{1+Ts}e^{-Ls}$
(2)		$\frac{nKTs}{(1+nTs)(1+Ts)}e^{-Ls}$ $T = \frac{n-1}{n \ln n} t_m$ $K = \frac{n-1}{n \left\{ \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}} - \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right\}} y_m$
(3)		$\frac{K_1}{1+T_1s}e^{-L_1s} + \frac{nK_2T_2s}{(1+nT_2s)(1+T_2s)}e^{-L_2s}$
(4)		$\frac{K_1}{1+T_1s}e^{-L_1s} + \frac{K_2Ts}{(1+T_2s)(1+T_2s)}e^{-L_2s}$

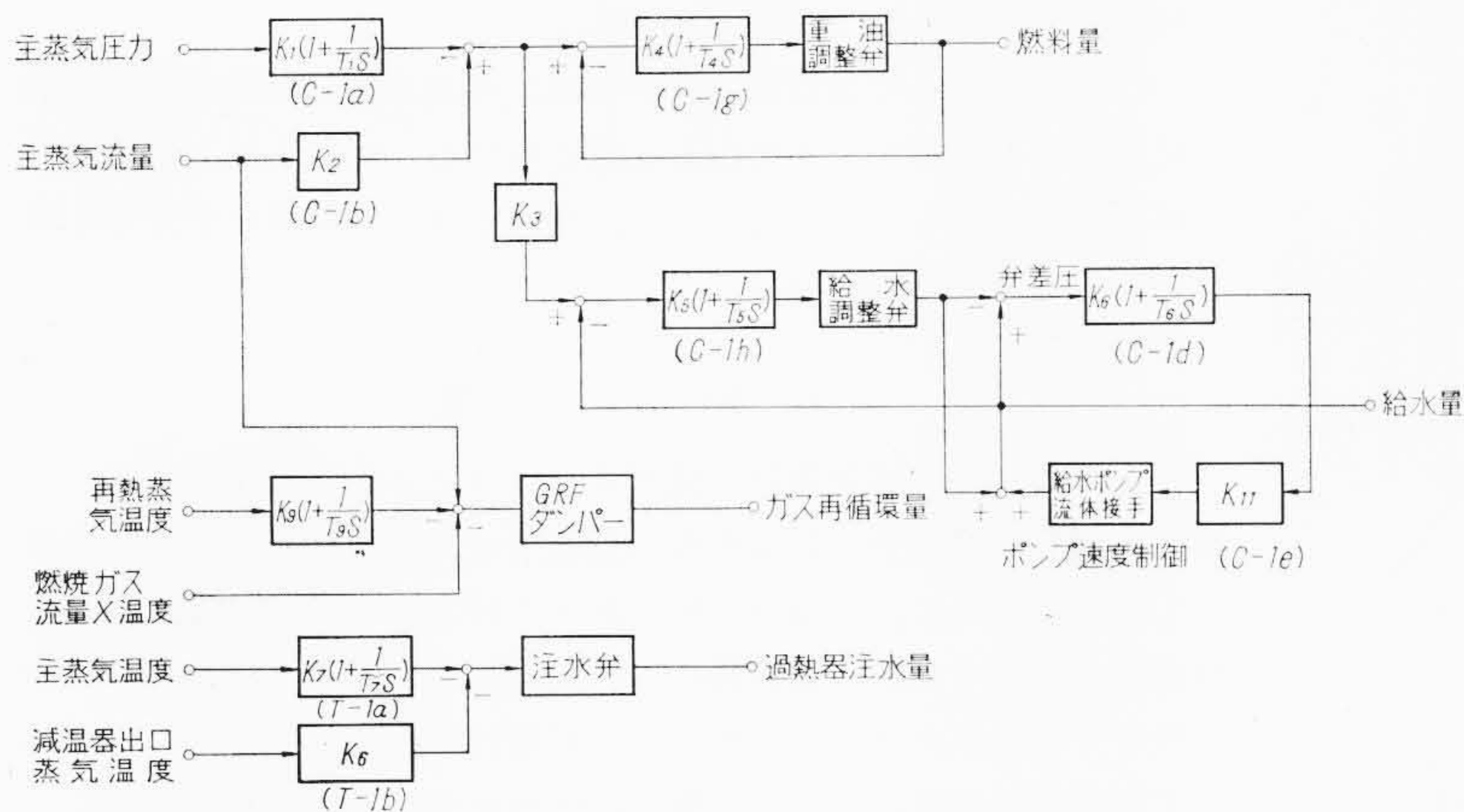
第 5 図 応答特性の伝達関数による表現



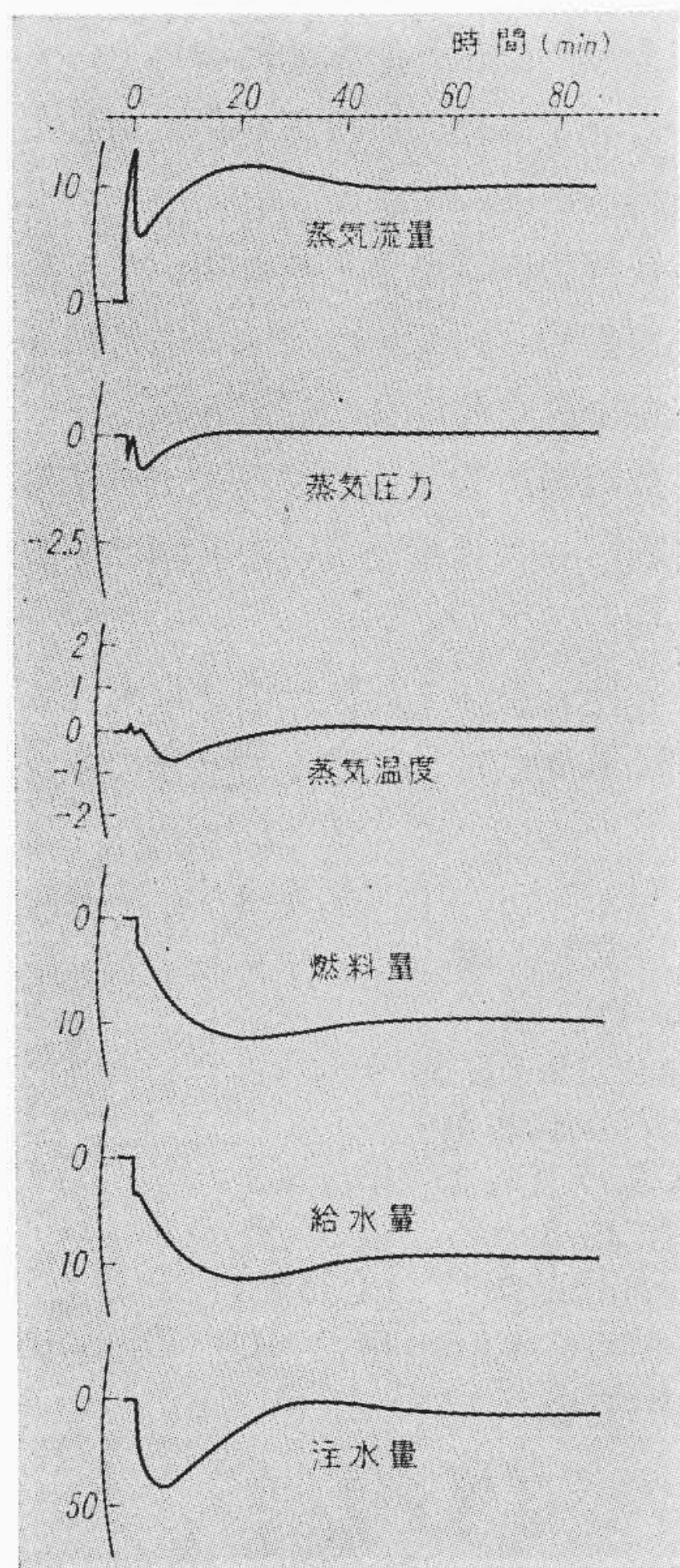
第 4 図 ボイラブロック線図



第 6 図 ボイラ動特性のアナコン模擬回路



第7図 制御系ブロック線図



第8図 最適調整結果（アナコン）タービン加減弁開度ステップ状変化の場合

3.2 ボイラ動特性および制御特性の模擬

ボイラ動特性は、後ほど制御系と関連付けるために各操作変数と制御量の関係としてブロック線図の形で表わすと第4図のようになる。各ブロックの応答特性は、第5図に示す4種の形に分類され、それぞれはアナログ計算機で模擬の容易な右欄の伝達関数で近似表現することができる。

第6図は、このような手法によってボイラ動特性を模擬するためのアナログ計算機回路図である。

一方第3図に示したボイラ制御系統を伝達関数によるブロック線図に書き直すと第7図のようになる。

第4図および第7図を組み合わせることによってボイラおよび制御系の全体の系が完成する。

3.3 制御系の最適調整

多変数制御系の最適調整法については、理論的にもいくつかの手法が提案されているが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、これを実際に応用できるのは変数が精々3個(3入力、3出力)くらいまででそれも伝達特性の単純な場合に限り、ボイラのように多変数でさらにむだ時間もある複雑な伝達特性のものに対しては適用が困難である。このような場合にはアナ

ログ計算機による cut and try の方法が有効な手段である。

第8図は、最適な調整を行なった制御系での、タービン加減弁開度ステップ状変化に対する応答特性である。

4. 実制御系の調整と負荷応答特性の実測

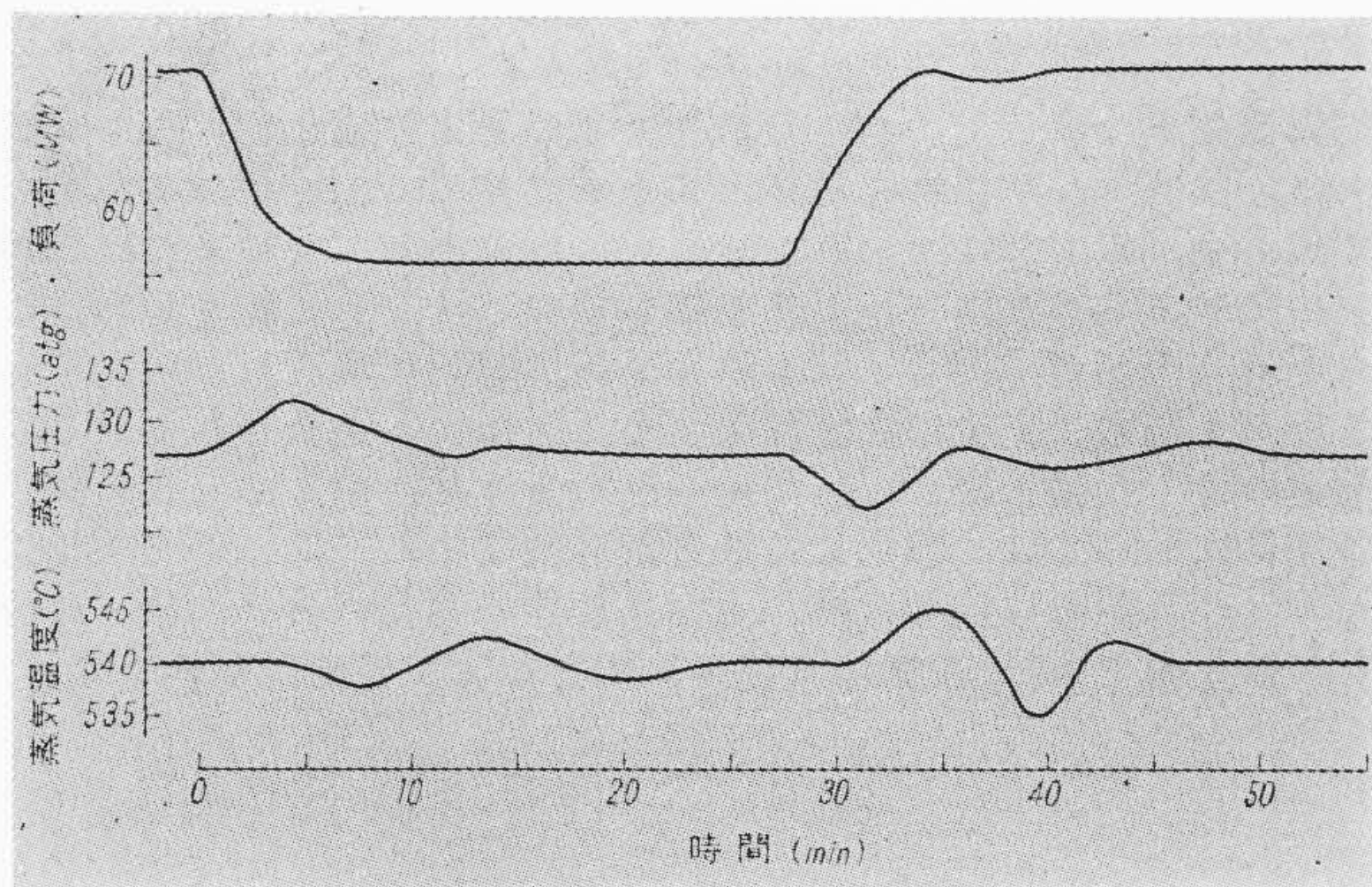
新清水火力発電所ボイラ制御系の調整は、アナログ計算機による制御特性解析により作られた調整指針に従って行なわれた。すなわち各コントローラをまず従来の経験により一応適当と考えられる値に設定し、この値から出発して設定値を変更し系の特性を改善してゆき、最終的には解析により得られた最適設定値にできるだけ近づけて行なった。その後確認のための負荷応答試験を行なったところ、良好な結果を得ることができた。第9図は実測結果である。

5. 周期的負荷変動に対する応答特性

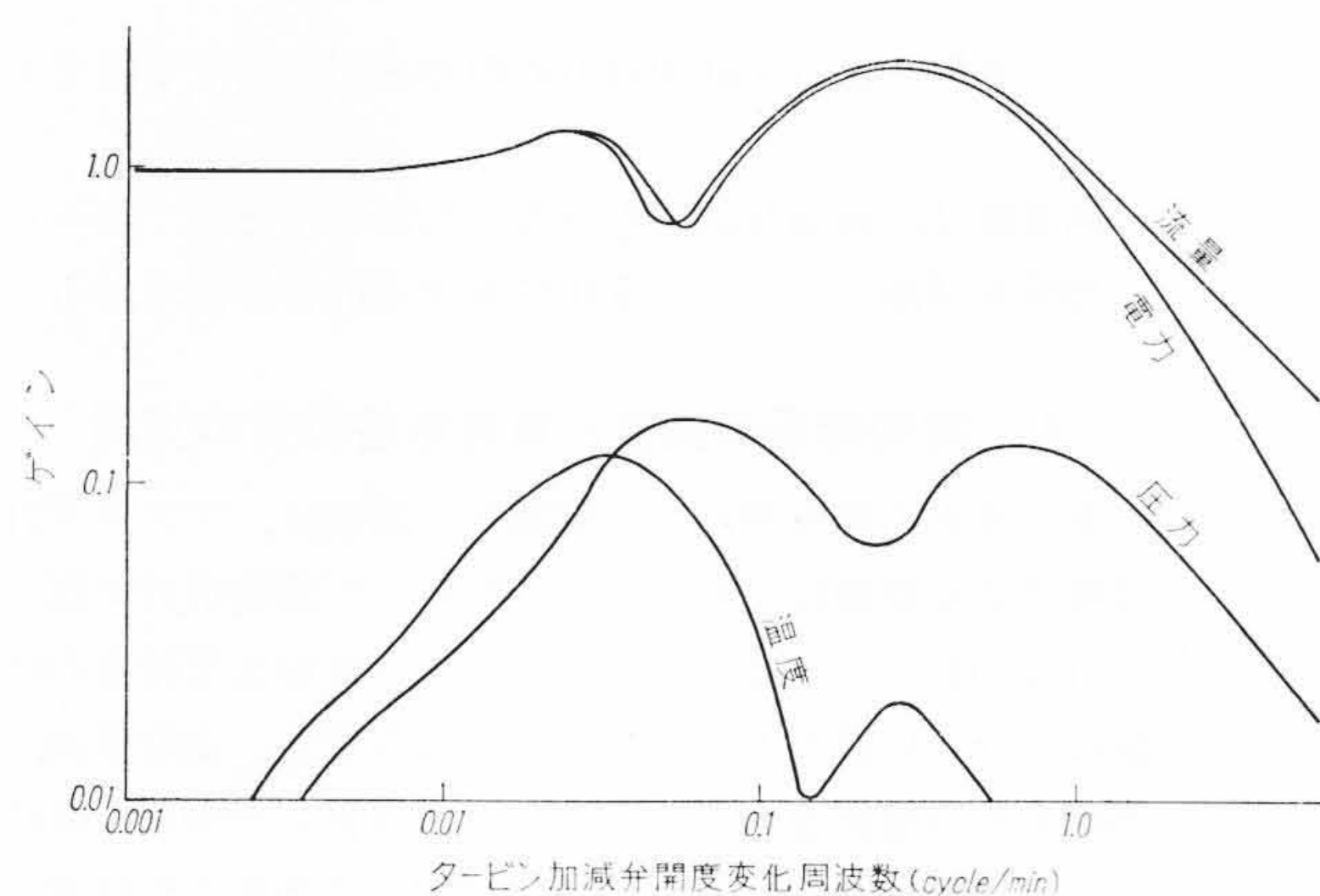
わが国の電力事情は今後ますます火主水従の方向に進むであろうが、このような場合には、火力は基底負荷を持つという従来の考え方は成り立たなくなり、電力系統運営に積極的に参加し変動負荷を火力が主体となって吸収してゆかなければならない。最近の強制貫流ボイラ採用の気運はこの辺にも一つの理由がある。そのため電力系統に現われるひん繁な負荷変動に対して強制貫流ボイラがどの程度の追従性をもつか实际的に確認しておくことが是非とも必要である。しかし営業運転にはいっている実際のプラントにおいて、十分な周波数範囲についてこの特性を実測することは、プラントの安全性および経済性の点から非常な制限をうける。このような場合にアナログ計算機のプラント模擬による方法はきわめて有効な手段である。幸い今回は、実測データによって構成した信頼性の高い強性貫流ボイラのアナログ計算機模擬回路があるので、これを用い周期的負荷変動に対する応答特性を求めることができた。

新清水火力発電所の制御方式で発電所出力を変更する場合は、系統周波数変動に反応して行なわれる場合(ガバナフリー運転)、あるいは負荷制限器やガバナモータの操作によって行なわれる場合いずれもその指令はまずタービン加減弁開度の操作として作用される。その後ボイラ制御系が働き、この開度に見合うまで出力を変更するようになっている(第3図参照)。したがって負荷応答特性としてはタービン加減弁開度変化に対する電気出力、蒸気流量、圧力、温度の応答特性を考えるのが適当である。

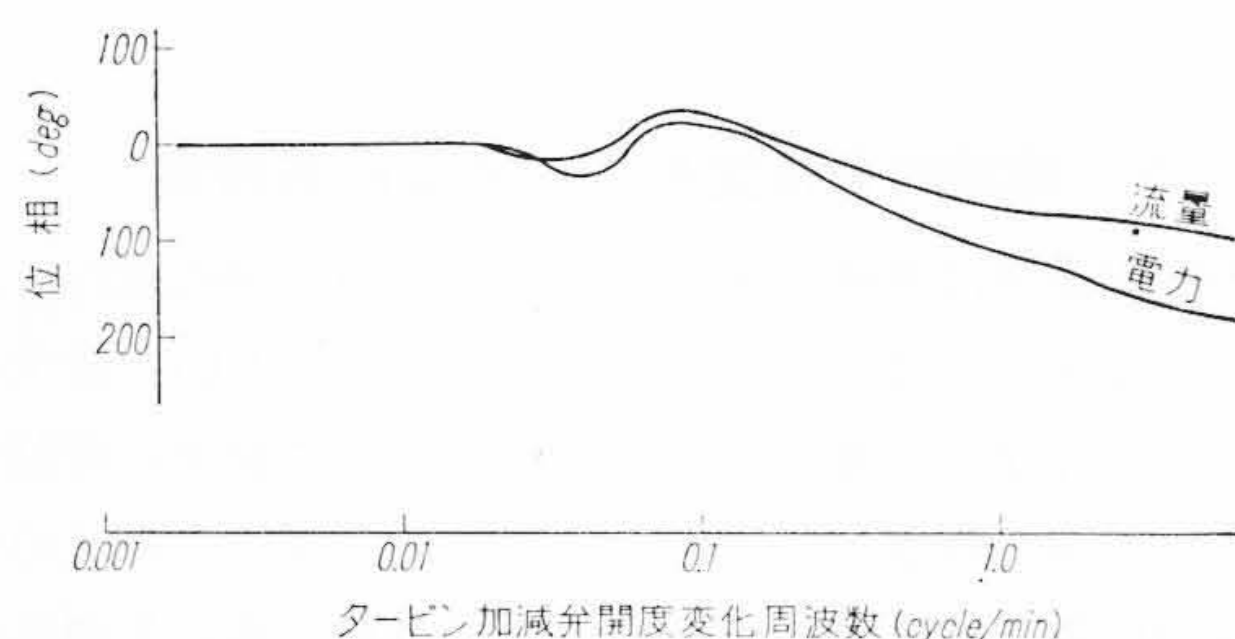
第10図および第11図は、負荷応答特性の解析結果をボード線図によって表わしたものである。蒸気温度および圧力の位相遅れはさして問題となる要素ではないので省略してある。周波数特性として



第9図 負荷応答特性実測結果



第10図 ベンソンボイラの負荷応答特性 (ゲイン特性)



第11図 ベンソンボイラの負荷応答特性 (位相特性)

は、広い周波数範囲において、弁開度変化に対する電気出力および蒸気流量のゲインが十分でしかも位相遅れが小さく、蒸気温度および圧力のゲインができるだけ小さいことが望ましい。

ボード線図によって負荷応答特性を検討すると、次のような結果が得られる。

- (1) 蒸気流量と電気出力のゲイン特性は、周波数 0.025 サイクル/分 (周期 40 分) と 0.3 サイクル/分 (周期約 3 分) に山ができ、0.05 サイクル/分 (周期 20 分) に谷ができるが、約 1 サイクル/分までの負荷変化に対して応答が可能である。
- (2) 電気出力の位相遅れ特性は、0.3 サイクル/分以下では ± 30 度以内、1 サイクル/分以下では $+30$ 度、 -100 度以内である。
- (3) 全周波数範囲にわたり、蒸気温度の変動は 0.13 以内、蒸気

圧力の変動は 0.16 以内である。

(4) したがって強制貫流ボイラは、周期が数分程度の負荷変動に対しても応答が可能であると考えられる。ただし以上は熱応力に関して考慮を払っていないので、実用上はこの制限を十分考えに入れなければならない。

6. 結 言

わが国最初の大容量強制貫流ボイラプラントとして昨年完成した清水共同発電株式会社新清水火力発電所は、強制貫流ボイラの特長として経済性および起動停止特性がすぐれているが、同時に急激な負荷変化に対する速い応答特性に特長があり、ボイラ制御系もこの特性を十分に生かすよう慎重な検討が重ねられ設計された。したがって制御系の調整に際しても所期の性能を十分発揮させるために、あらかじめ、アナログ計算機によってボイラを正確に模擬し最適調整法および負荷応答特性の検討を行ない、その結果を現地での調整に適用した。そのため現地調整を合理的にまた能率的に進めることができ、調整期間を短縮し、しかも非常にきつい負荷変化に対しても期待どおりの良好な応答特性を得ることができた。

さらに、アナログ計算機による模擬強制貫流ボイラを用いて、実ボイラでは実測の困難な広範囲の周期的負荷変化に対する応答特性を求め、かなりの短周期においても十分負荷応答の可能性を確認するなど、従来未知の部分の多かった強制貫流ボイラの制御特性の一端を明らかにし、今後のピーク負荷発電所の計画に一資料を提供した。

終わりに臨み、実測に際し多大の便宜を与えられた中部電力株式会社および清水共同発電株式会社の各位に対し、謹んで感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 柴田：電力 45 740 (昭 36-4)
- (2) 利部，高山：日立評論 43 9, 18 (昭 36-9)
- (3) 寺野：運輸技研報告 7, 207 (昭 32-10)
- (4) 中野，河竹：日立評論 44 9, 7 (昭 37-9)
- (5) 鈴木，内藤，他：日立評論 45 3, 127 (昭 37-3)
- (6) H. Schwarz: Regelungstechnik 9 11, 12, (1961)
- (7) D. S. Mitchell, C. R. Webb: Automatic and Remote Control 142 (1961 Butterworths)



特 許 の 紹 介



特許第309446号 (特公昭37-1881)

大友義郎・江本正之

蛍 光 体 の 製 造 方 法

従来亜鉛またはカドミウムの単独または双方の硫化物、セレン化物あるいは硫セレン化物を母体とする蛍光体は、上記母体に活剤として銀、金、銅またはマンガンを用い、融剤として一種または二種以上のアルカリまたはアルカリ土類金属のハロゲン化物を用い、これらを適当な割合に混合したものを高温において焼成した後、残存する融剤を純水で完全に洗浄除去することにより製造されている。

前述のような製造法によって得られた蛍光体、例えば硫化亜鉛、銀蛍光体においては、添加した活剤銀が焼成中に一部ハロゲン化銀となり、これがその後の水洗、表面処理等の過程において徐々に分解して酸化銀となり、蛍光体着色の原因となって発光効率低下させ、

その安定性をも損っていることをこの発明者らは見出した。

この発明は前述の知見に基づき、前述の母体物質は、活剤としての銀あるいは金の単独または双方を従来の最適値よりも過剰に添加し、融剤としてこれら活剤の添加量に応じて塩化物、臭化物および沃化物の少なくとも一種または二種以上の混合物を選択的に加えて焼成し過剰の活剤をハロゲン化物の形にし、焼成後の操作において過剰のハロゲン化物を特に洗浄除去するものであり、このようにすることにより、蛍光体の着色を減少させると同時に蛍光体の発光効率を向上させ、かつその劣化特性を改善したことを特長とする。

(岩 田)