

大容量コンバインド プラントの制御方式

Control Method for Hitachi Large Capacity Combined Plant

大容量コンバインド プラントは、現下のエネルギー情勢に適合した、高効率かつ良好な負荷運用特性を持つ、ガス タービン/蒸気タービン コンバインド プラントである。

本プラントに対して、プラント動特性を模擬したシミュレータを利用して、その負荷応答特性及び起動・停止特性を解析するとともに、プラント制御系の性能を確認した。

松村重兵衛* *Matsumura Jûbê*
目黒 和利** *Meguro Kazutoshi*
中野 善之*** *Nakano Yoshiyuki*
内山 好弘*** *Uchiyama Yoshihiro*

1 緒 言

最近のエネルギー情勢の推移に伴い、ミドル火力としての負荷応答性及び起動・停止速応性を保有しながら、大容量かつ高効率のベース ロード火力の特性を兼ね備えた発電プラントが待望されるようになってきた。

大容量コンバインド プラントは蒸気タービンとガス タービンのコンバインド プラントで、まさに上記要求に合致した特性を備えた新形発電プラントである。

本稿は大容量コンバインド プラントを制御特性の面からとらえ、その制御方式の概要、負荷応答特性及び起動・停止特性について紹介する。

2 大容量コンバインド プラントの概要

本プラントは数セットのガス タービン/排熱回収ボイラと1台の蒸気タービンを組み合わせたもので、急速起動が可能で、しかも大容量火力に匹敵する高効率の発電プラントであ

る。図1に大容量コンバインド プラント サイクルの一例を示す。

プラント合計出力によって、ガス タービン/排熱回収ボイラのセット数が選定されるが、システムとしての基本的な考え方は同一である。

ガス タービンよりの排出ガスは排熱回収ボイラに導入され、その発生蒸気を蒸気タービンに利用する。したがって、同一のガス タービン燃料量により、蒸気タービン分の出力を余分に得ることができ、ガス タービンの高効率化と相まって本コンバインド プラントは最近の大容量火力プラントに匹敵する熱効率を得ることができる。

各排熱回収ボイラの煙道に助燃バーナを設置しボイラ蒸発量を増加させた場合には、同数のガス タービン/排熱回収ボイラ セットにおいて非助燃の場合より更に大きなプラント総合出力を得ることができる。

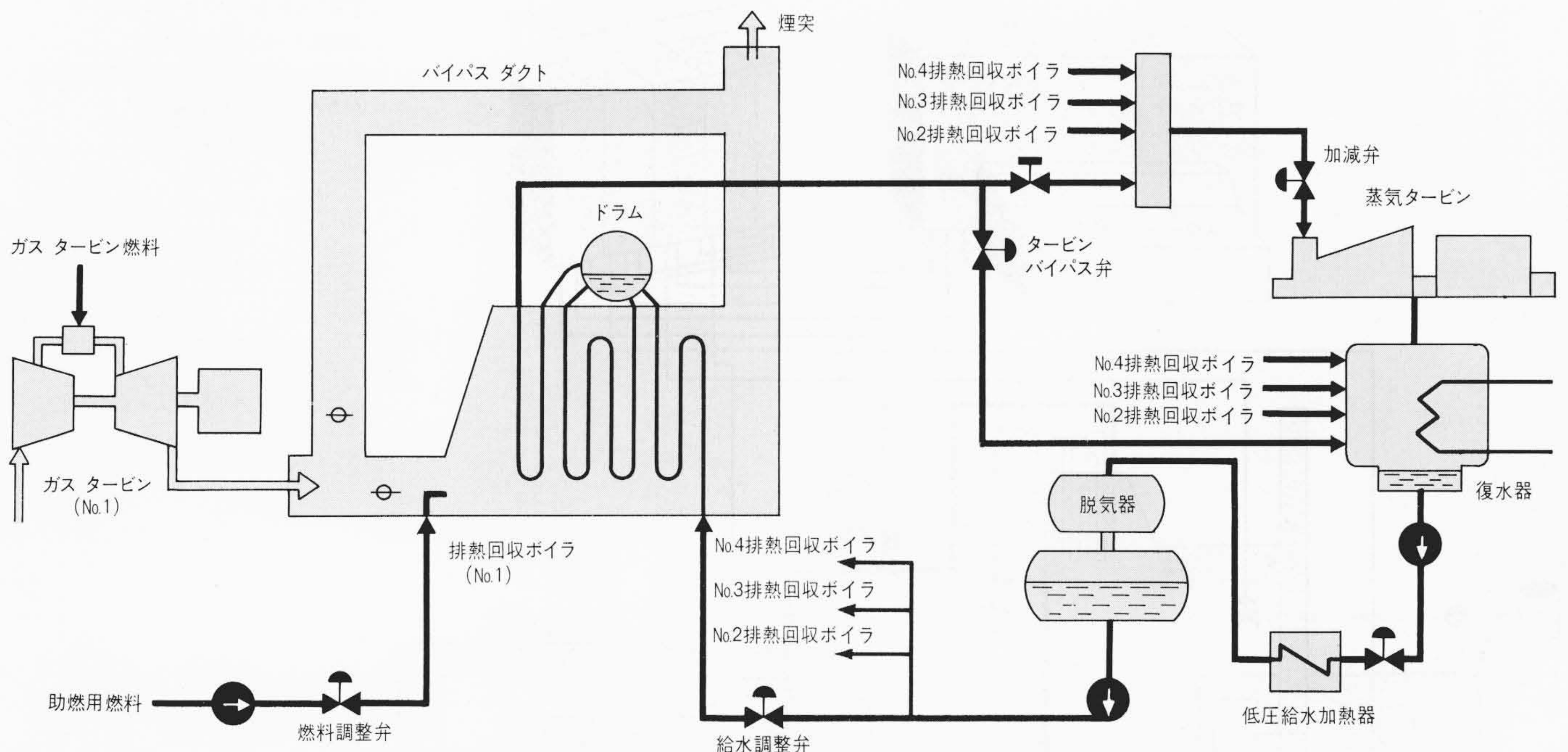


図1 大容量コンバインド プラント サイクル 大容量コンバインド プラント サイクルは複数台のガス タービン/排熱回収ボイラ セットと1台の蒸気タービン プラントで構成されている。

* 日立製作所電力事業本部 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所日立研究所

表1 大容量コンバインド プラントの標準形式と出力 日立製作所の大容量コンバインド プラントは、60Hz用及び50Hz用それぞれ八つの標準モデルを持っている。

1. 60Hz用

モデルNo.	ガス タービン			蒸気タービン			合計出力 (MW)
	形 式	台数	出力(MW)	形 式	台数	出力(MW)	
シリーズ207E(助燃付)	MS7001E	2	137	TCDF-23N	1	107	244
シリーズ207E(非助燃)	"	"	"	TCDF-20N	"	59	196
シリーズ307E(助燃付)	MS7001E	3	206	TCDF-26N	1	161	367
シリーズ307E(非助燃)	"	"	"	TCDF-23N	"	88	294
シリーズ407E(助燃付)	MS7001E	4	275	TC4F-23K	1	215	490
シリーズ407E(非助燃)	"	"	"	TCDF-26N	"	118	393
シリーズ507E(助燃付)	MS7001E	5	343	TC4F-26	1	268	611
シリーズ507E(非助燃)	"	"	"	TC4F-20K	"	147	490

2. 50Hz用

モデルNo.	ガス タービン			蒸気タービン			合計出力 (MW)
	形 式	台数	出力(MW)	形 式	台数	出力(MW)	
シリーズ109B(助燃付)	MS9001B	1	80	SF-23	1	71	151
シリーズ109B(非助燃)	"	"	"	SF-20	"	36	116
シリーズ209B(助燃付)	MS9001B	2	159	TCDF-23N	1	142	301
シリーズ209B(非助燃)	"	"	"	TCDF-20N	"	72	231
シリーズ309B(助燃付)	MS9001B	3	239	TC4F-20K	1	213	452
シリーズ309B(非助燃)	"	"	"	TCDF-23N	"	108	347
シリーズ409B(助燃付)	MS9001B	4	319	TC4F-23N	1	284	603
シリーズ409B(非助燃)	"	"	"	TCDF-26N	"	144	463

注：ガス タービン負荷；ベース負荷 大気圧；1,033ata
大気温度；15℃ 復水器真空；722mmHg

表2 シリーズ407E主要仕様 シリーズ407Eモデルの主要仕様を示す。

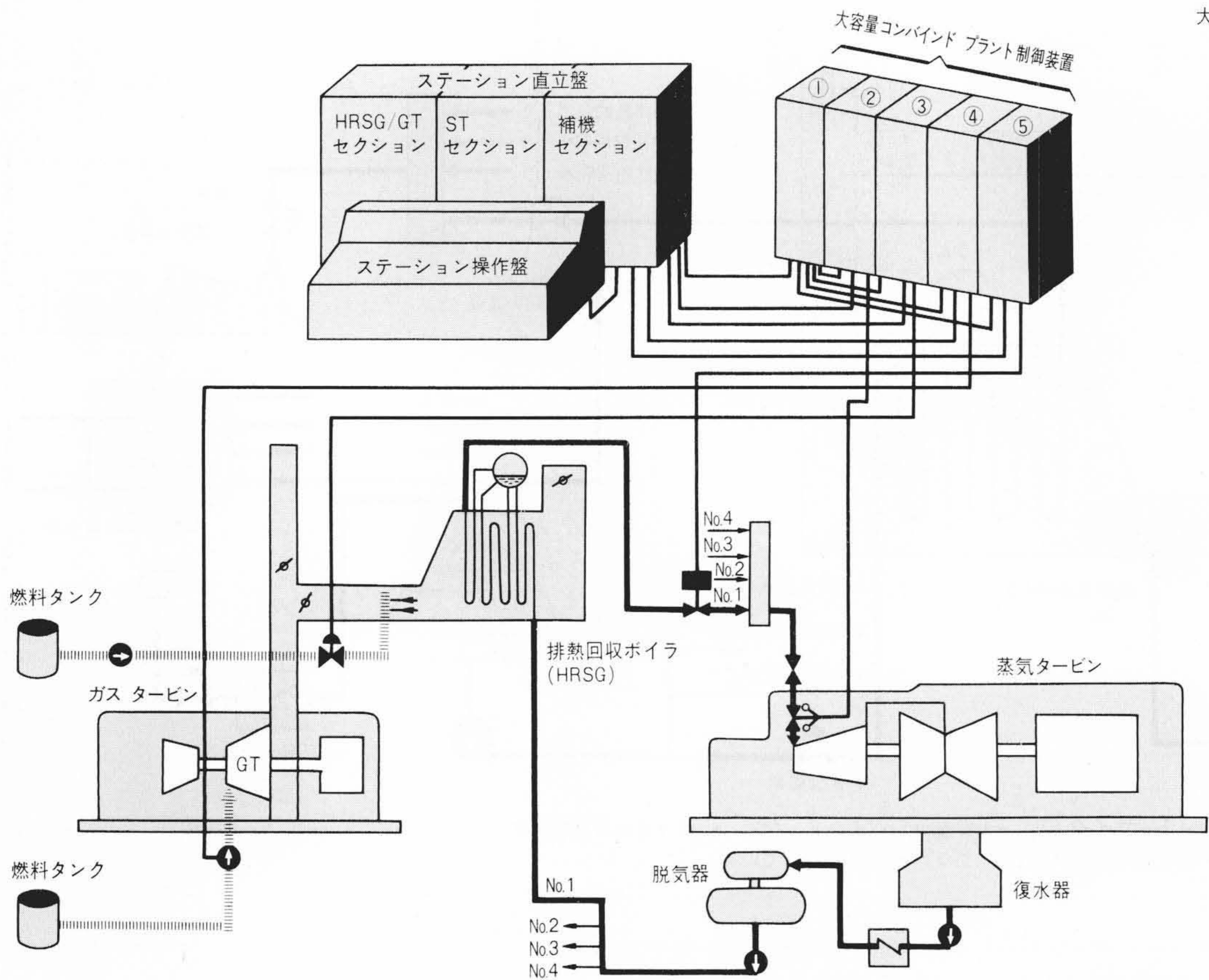
項 目		単 位	助 燃 条 件	
			助 燃 付	非 助 燃
1. 端出力機	ガスタービン(全台数分)	kW	274,760	274,760
	蒸気タービン	kW	214,700	117,700
	プラント総合	kW	489,460	392,460
2. ガスタービンス	台 数	台	4	4
	形 式	—	MS-7001E	MS-7001E
	燃 料	—	軽 油	軽 油
	出 力(1台当り)	kW	68,690	68,690
3. 収排熱回 ボイラ	台 数	台	4	4
	形 式	—	自然循環形	自然循環形
	蒸 発 量(1台当り)	T/H	181.0	107.5
4. 蒸気タービン	台 数	台	1	1
	形 式	—	TC4F-23K	TCDF-26N
	主 蒸 気圧力	kg/cm ² G	88	56
	主 蒸 気温度	℃	510	455
	復水器真空	mm Hg	722	722

各排熱回収ボイラはガスのバイパス ダクトを備えており、ガス タービンの単独運転を可能とするよう計画されている。

表1に日立製作所の大容量コンバインド プラント標準形式と出力を示す。

このように大容量コンバインド プラントの標準モデルとして、多数のモデルが用意されているが、その中で最も代表的なシリーズ407Eモデルを例にとり次に説明する。

表2にシリーズ407Eモデルの主要仕様を示す。



- 大容量コンバインドプラント制御装置
- ① ユニット シーケンス コントローラ
 - ② 蒸気タービン制御装置
 - ③ プラント及び排熱回収ボイラ制御装置
 - ④ ガス タービン制御装置
 - ⑤ インターロック リレー盤

図2 制御系の全体構成 本図は大容量コンバインド プラントの制御などの全体構成を示すものである。

3 大容量コンバインド プラントの制御系

3.1 制御系の特長

本プラント制御系は次の特長を持っている。

- (1) 少数の運転員でプラント全体の運転が可能である。
- (2) プラントの起動・停止はユニット シーケンス コントローラにより自動化されている。
- (3) 自動給電負荷指令に追従した急速負荷変化が可能である。
- (4) 起動時間が短い(ホット スタート時約50分)。
- (5) ユニット シーケンス コントローラとして制御用電子計算機を使用しているため、融通性に富んだプログラムの作成が可能である。
- (6) 実績のある信頼度の高い制御コンポーネントの使用
- (7) 制御系は適材を適所に組み合わせた構成になっており、総合的な信頼度が高い。

3.2 制御系の構成

図2に本プラント制御系の全体構成を示す。

大容量コンバインド プラント制御装置はハードウェアとしては制御用電子計算機、電子式アナログ制御装置及びインターロック用リレーの組合せから構成されており、機能的には次の装置が含まれている。

(1) ユニット シーケンス コントローラ

自動起動・停止制御を統括する制御装置で、プラント状態を監視して適切なタイミングに各制御ループ、又は操作端に操作指令を与える。

(2) 蒸気タービン制御装置

蒸気タービンをターニング状態から定格回転数まで、所定の昇速率で昇速させる昇速制御ループ、タービン回転数を系

統周波数と同期させ、電圧をそろえたうえで系統に同期投入する自動同期ループ及び蒸気タービン負荷を所定の変化率で増減させる負荷制御ループを有している。

更に、ボイラからの主蒸気圧力によって蒸気タービン負荷を制御し、ガバナによる負荷制御との切換機能を含む、初圧制御ループを持っている。

(3) プラント及び排熱回収ボイラ制御装置

本装置はプラント全体の負荷運用をつかさどるもので、ガス タービン出力と蒸気タービン出力とを総合したプラント総合出力が、中央給電所指令又は手動設定によって与えられた負荷デマンドに合致するようにガス タービン燃料量を調整する。助燃付の場合にはプラント負荷制御ループと協調して助燃量を調整する助燃量制御ループが備えられている。

更に、3要素制御によるドラム レベル制御ループ及びボイラ起動・停止時の余剰蒸気を復水器に逃がすタービン バイパス制御ループを持っている。

(4) ガス タービン制御装置

ガス タービン制御装置はスピードトロニックと称され、速度制御、温度制御及び起動制御の三つのループによって、ガス タービンの負荷制御及び起動・停止を行なう。

(5) インターロック リレー盤

本盤はプラント中の各主機及び補機のインターロック用リレーを収納した制御盤である。

3.3 プラント負荷制御

図3にプラント全体の負荷制御の基本的な概念を示す。

コンベンショナルな蒸気プラントの場合には、負荷偏差によってまず蒸気タービンのガバナ位置が制御され、これによって起こる蒸気流量及び圧力をとらえてボイラ燃焼量が制御

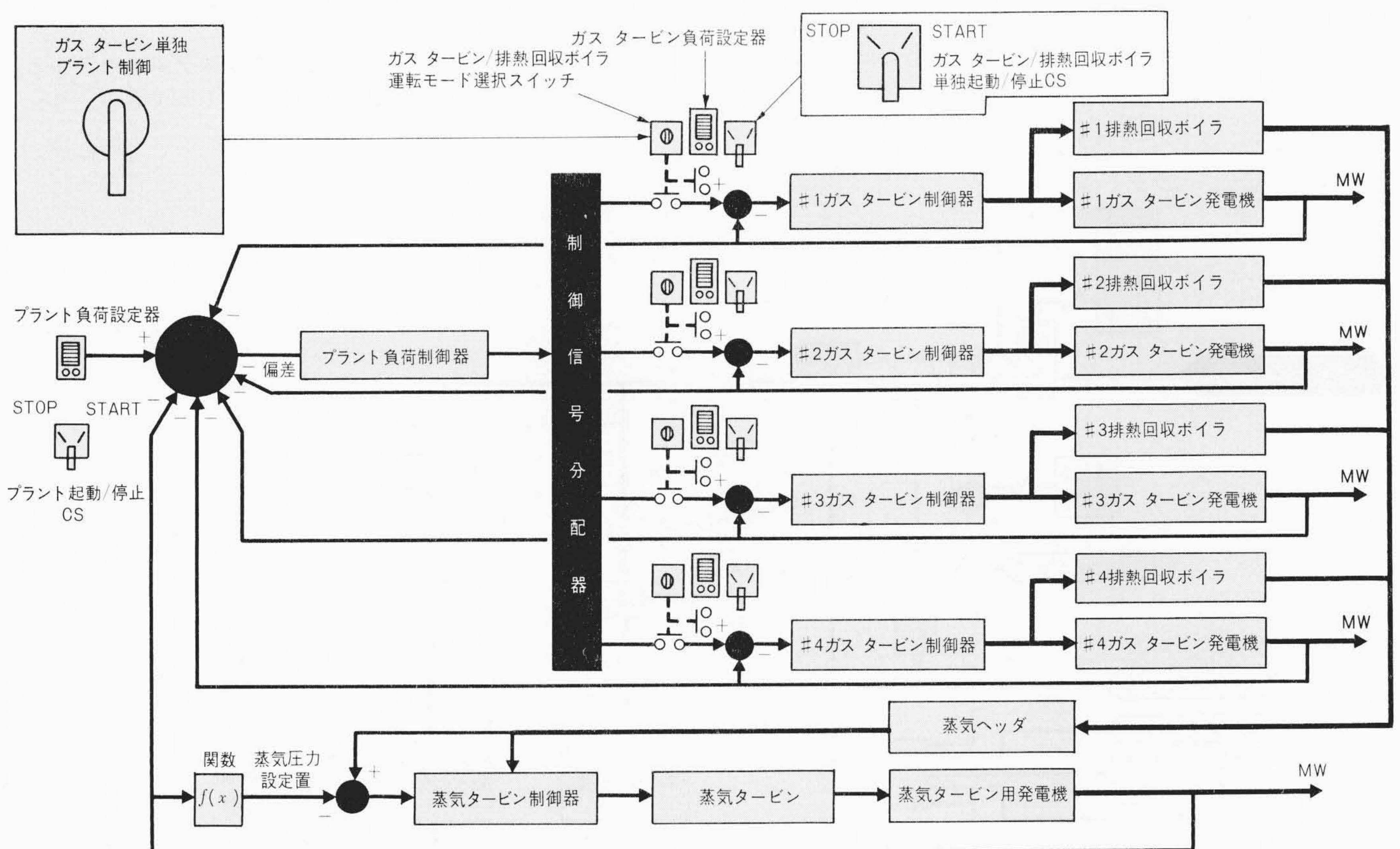


図3 プラント負荷制御の基本概念 プラント負荷はガス タービン燃料量を制御することによって定められる。

される、いわゆるボイラ追従方式が採用されているが、大容量コンバインドプラントの場合にはガスタービンの排熱を最大限に有効利用するため、タービン追従方式が採用されている。

負荷デマンドと実際プラント負荷との間の負荷偏差は、ガスタービン制御系に与えられ、この偏差を零とするようにガスタービン燃料量が増減される。ガスタービン燃料量が増減により直ちにガスタービン出力が増減され、次いで排気ガス温度の変化によって回収ボイラの発生蒸気量が増減し、主蒸気圧力の変化を通じて最終的に蒸気タービン出力が増減されて、負荷デマンドに合致したプラント総合出力が得られる。

4台のガスタービンに対する制御信号の配分に関しては、次のような考慮が払われている。

図4に部分負荷でのプラント総合熱消費率の変化を示す。同図に示すように、低負荷域ではガスタービン/排熱回収ボイラ運転台数を減じたほうが熱消費率が小さく、経済的な運転となる。

一方、負荷変化速度の点からは、全台のガスタービン/排熱回収ボイラをいっせいに制御する場合が最も速い。

以上の2点を勘案して次の方式を採用した。

- (1) ガスタービン/排熱回収ボイラの運転台数は、運転員が負荷スケジュールから見て最適と考えられるものを選択する。
- (2) 運転選択されたガスタービン/排熱回収ボイラセットへは同一の制御信号を送る。

図5は実際のプラント負荷制御系のスキマチックを示すもので、プラントへの負荷デマンド信号は中央給電所よりの自動給電指令、又は運転員による手動設定値のいずれかを選択できる。

蒸気タービンに対する最低蒸気温度の点より、最低負荷を制限するリミッタ回路が設けられており、ガスタービン/排熱回収ボイラセットの運転台数によって変更されるようになっている。各ガスタービンに対する制御指令は、ガスタービンセレクトによりプラント負荷制御、又は単独設定のい

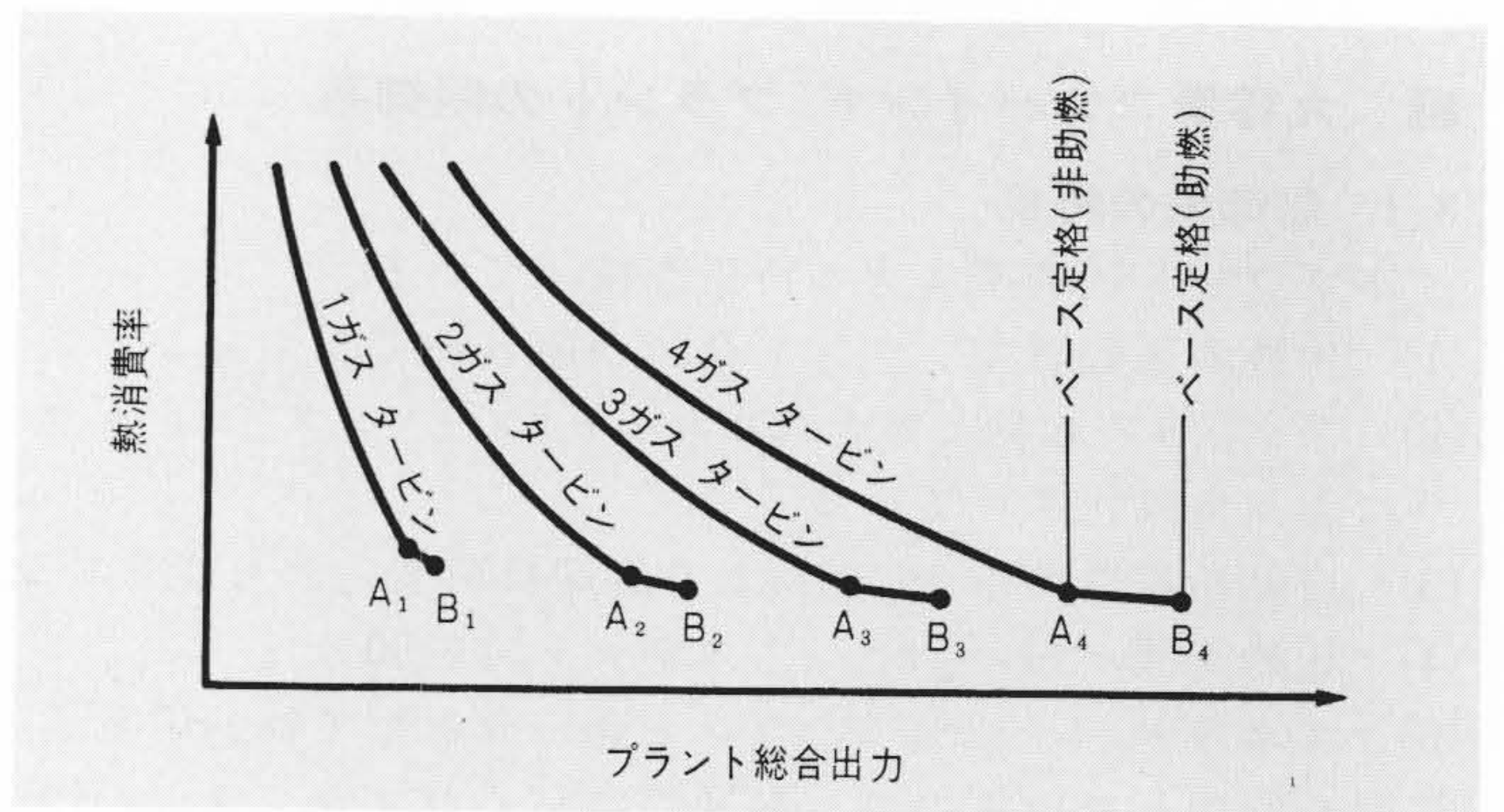


図4 部分負荷時の熱消費率変化 部分負荷になると熱消費率は増加するが、その割合は運転されるガスタービン台数によって異なる。

れかを選択できる。助燃が使用されている場合には、負荷制御指令は助燃量制御ループへも与えられる。

4 シミュレーションによる特性解析

4.1 シミュレータの構成

過渡特性の異なるガスタービン、排熱回収ボイラ及び蒸気タービンの協調を取り、大容量コンバインドプラントの特長である急速起動・停止特性及び高速負荷応答特性を十分発揮させるためには、事前にプラント動特性を十分に把握し、適切な運転操作手順及び制御方式を確立するとともに、シミュレーションにより計画した制御装置の妥当性を確認しておくことが不可欠である。この目的を達成するために、次のような機能を持つシミュレータを開発した。

- (1) 起動から定格負荷までの全運転行程にわたり、実プラント運転と同等な運転特性の解析を、実時間で連続的に行なうことができる。
- (2) 同じく電子計算機で模擬した制御システムのモデルと結合し、最適な制御方式の計画を行なうことができる。

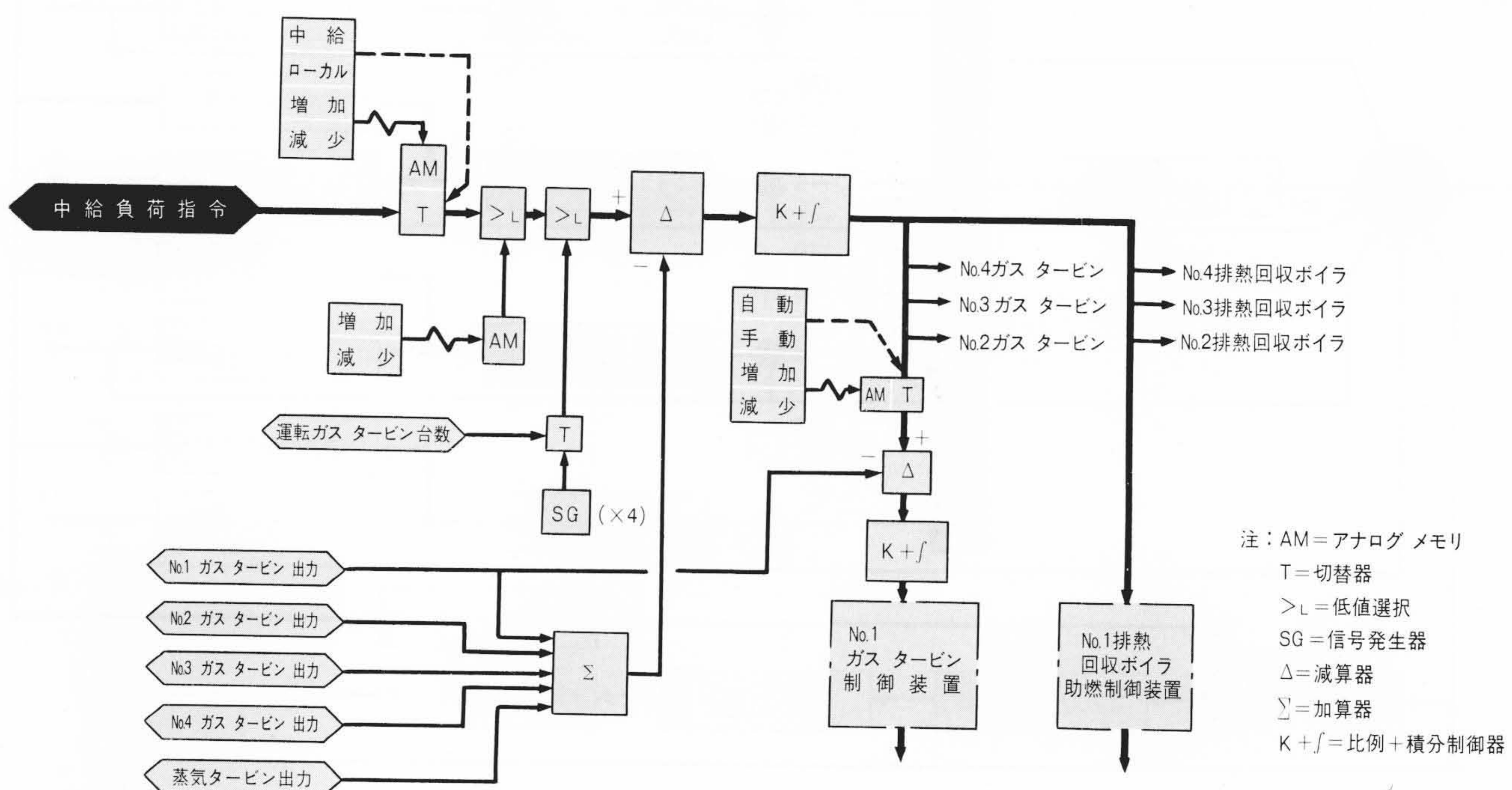


図5 プラント負荷制御系スキマチック 実際のプラント負荷制御系の概要を示す。

- (3) 負荷によって運転ガス タービン/排熱回収ボイラ セットの台数を切り換えることができる。
- (4) 主機又は補機のトリップなどによる危急状態を把握することができる。
- (5) 開発した実制御システムと結合し、実制御運転と同等の運転制御を行なうことができる。

以上の機能を満足させるため、シミュレーションの対象とした機器は、ガス タービン/排熱回収ボイラ セット各2台分、蒸気タービン1台分及びそれらの補機を含み、蒸気圧力回転数など応答の速いものはアナログ計算機で、蒸気・ガスの物性、熱特性、伝達量、温度などは非線形性を考慮してデジタル計算機で模擬するハイブリッド方式を採用している。

モデルで取り扱える操作量及び制御量は、運転操作に必要なものをほとんどすべて網羅している。

4.2 プラント動特性

製作したシミュレータを用いて、プラントの起動・停止及び負荷運転に伴う主要操作量変化に対する過渡応答を解析した。次にその主要なものについて述べる。

(1) ガス タービン燃料変化に対する過渡応答

図6は定格負荷近傍での定常状態から、ガス タービン燃料量をステップ状に変化させた場合のプラント状態量の変化を示したものである。燃料変化に対しガス タービン出力は、ほとんど瞬時に応答しているが、蒸気タービン出力は、排熱回収ボイラの熱容量の影響を受け、約6分の時定数を持った一次遅れ応答となっている。この応答性の相違は負荷指令に対して、蒸気タービン出力が発生するまでの間、ガス タービン出力が一時的にオーバシュートする可能性があることを示している。

(2) 蒸気タービン加減弁開度変化に対する過渡応答

図7は定格負荷運転状態から蒸気タービンの加減弁を閉方向及び開方向にステップ状に急変させた場合の蒸気圧力、流量及び蒸気タービン出力の応答を示したものである。加減弁

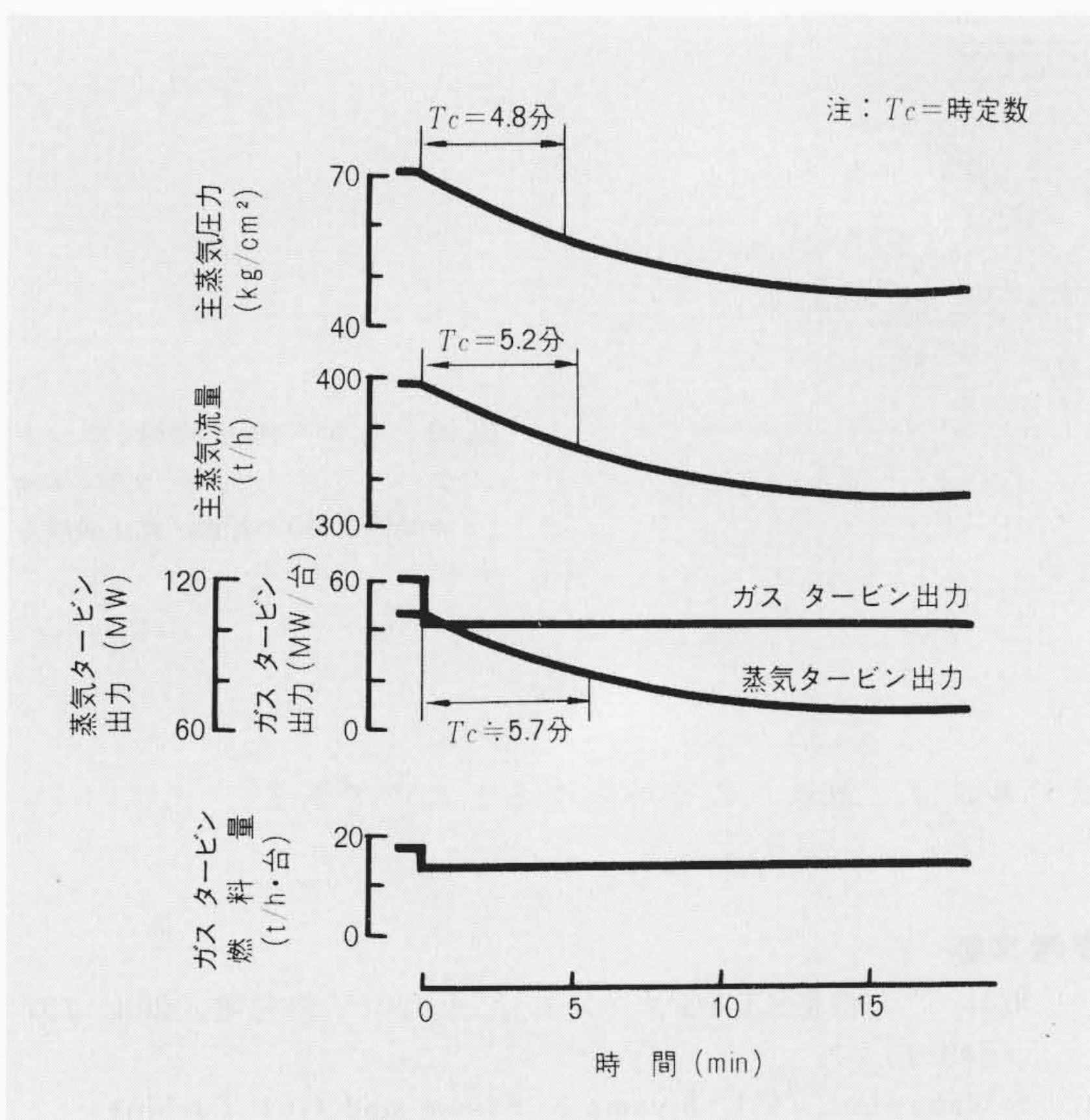


図6 ガス タービン燃料量変化に対する過渡応答 燃料変化に対し、ガス タービン出力は瞬時に応答するが、蒸気タービン出力は時定数約6分の遅い応答となる。

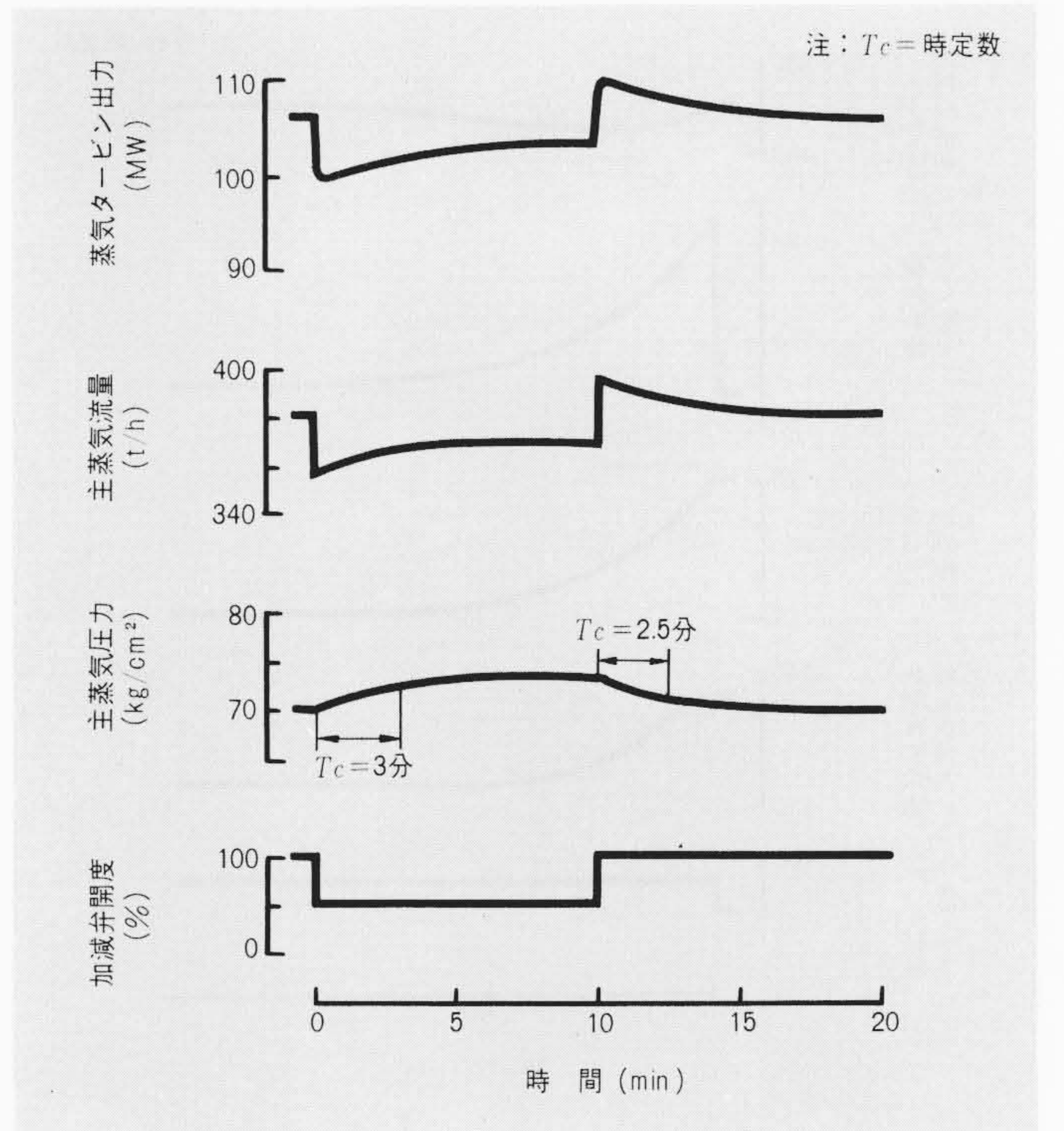


図7 加減弁開度変化に対する過渡応答 加減弁を急閉すると蒸気流量は瞬時減少するが、ボイラの蒸気圧力の上昇により漸次回復し、やや低い値で整定する。

開度急閉に伴い、主蒸気流量は瞬時減少するが、ボイラのドラムでの発生蒸気量とタービンへの流入蒸気量との過渡的なアンバランス及び加減弁の流動抵抗増加のため、主蒸気圧力は約3分の時定数で上昇し、これに伴いいったん低下した主蒸気流量及び蒸気タービン出力は、緩やかに上昇する。整定後の主蒸気流量、出力が初期値より低下するのは、ボイラの圧力・温度の上昇に伴い、燃焼ガスからの伝熱量が減少するためである。加減弁を用いた場合の応答はこれと全く逆である。

(3) タービン バイパス弁開度変化に対する応答

起動の過程で使用されるタービン バイパス弁のステップ変化に対する排熱回収ボイラの応答を、図8に示す。タービンバイパス弁をステップ状に開くことにより、バイパス系統を流れて復水器へ捨てられる蒸気流量は急増するが、主蒸気圧力の減少に伴い漸次減少して初期値よりやや高い値で整定する。ボイラ過熱器を流れる蒸気流量が増加するため、主蒸気温度は過渡的に低下する。ボイラ圧力低下に伴う伝熱量の増加及び蒸発量の増加により、ボイラ出口の排ガス温度は低い値で整定する。

4.3 負荷応答特性

図9にプラント全体の負荷応答特性を示す。比較的大きな出力割合を持つガス タービンの応答性が良好であるため、プラント全体として約1.5分の遅れで追従している。前述したように、ガス タービンと蒸気タービンの応答性の相違により、ガス タービン出力は一時的にオーバシュートするが、蒸気タービンの出力上昇とともに緩やかに復帰しており、制御上特に問題になるものではない。

4.4 起動・停止特性

図10に本シミュレータによるホット スタート(8時間停止)時の停止及び起動曲線を示す。ガス タービン起動開始から定

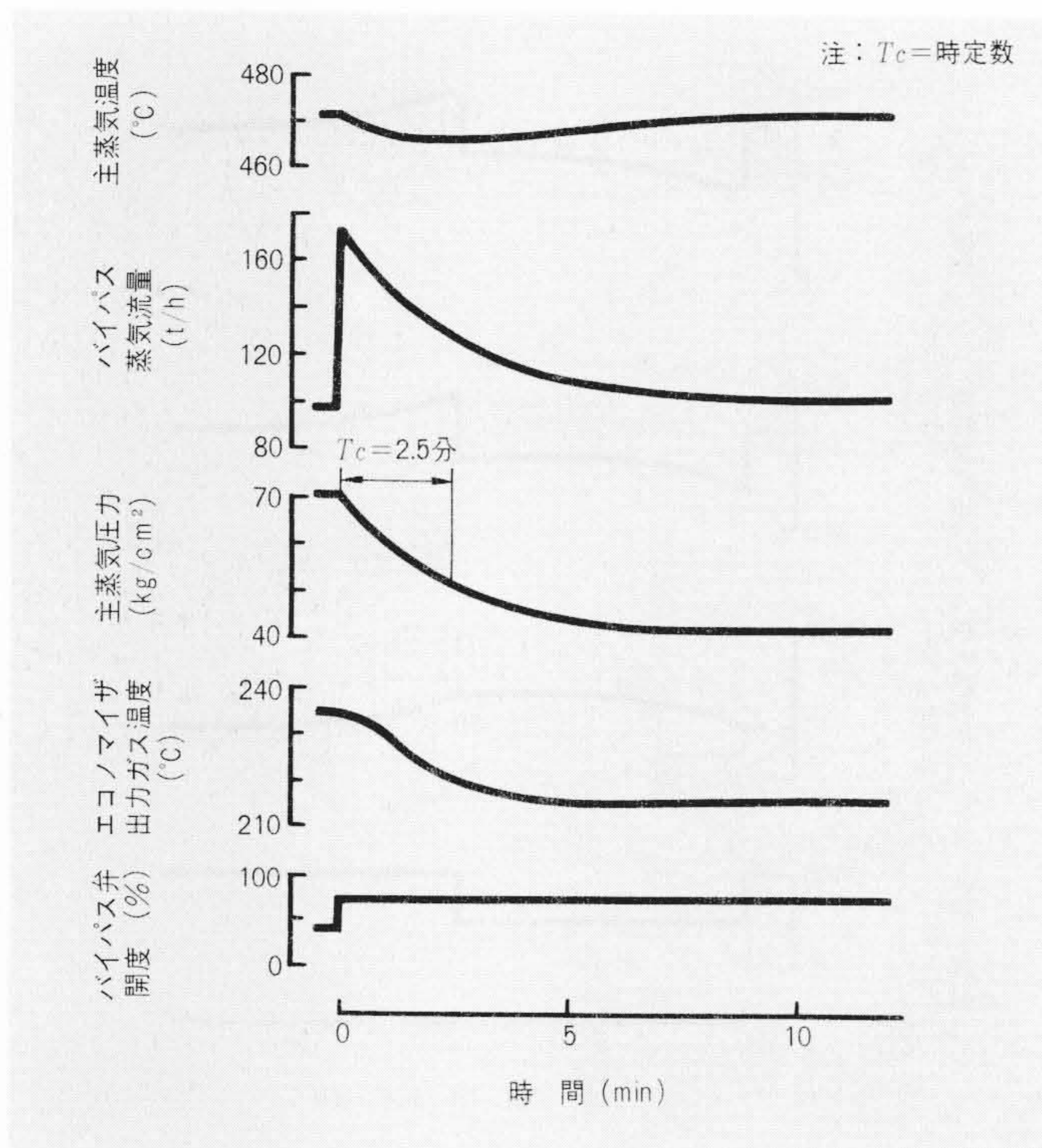


図8 バイパス弁開度変化に対する過渡応答 バイパス弁は、ボイラ及び蒸気タービンの起動過程で蒸気を復水器へ流すことにより、蒸気圧力を一定に保つ役目をする。

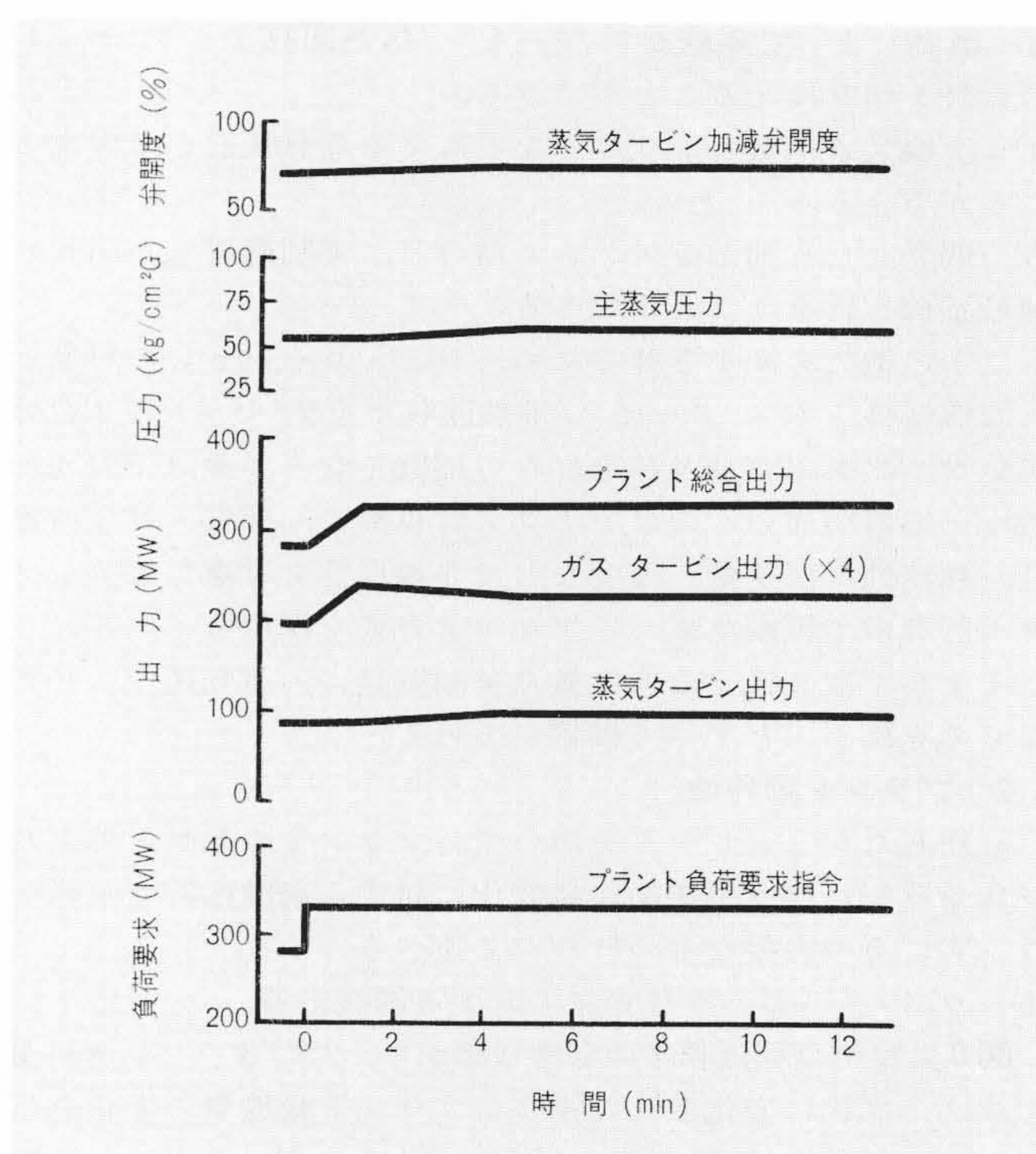


図9 負荷応答特性 プラントと制御系を組み合わせた場合の応答特性を示す。

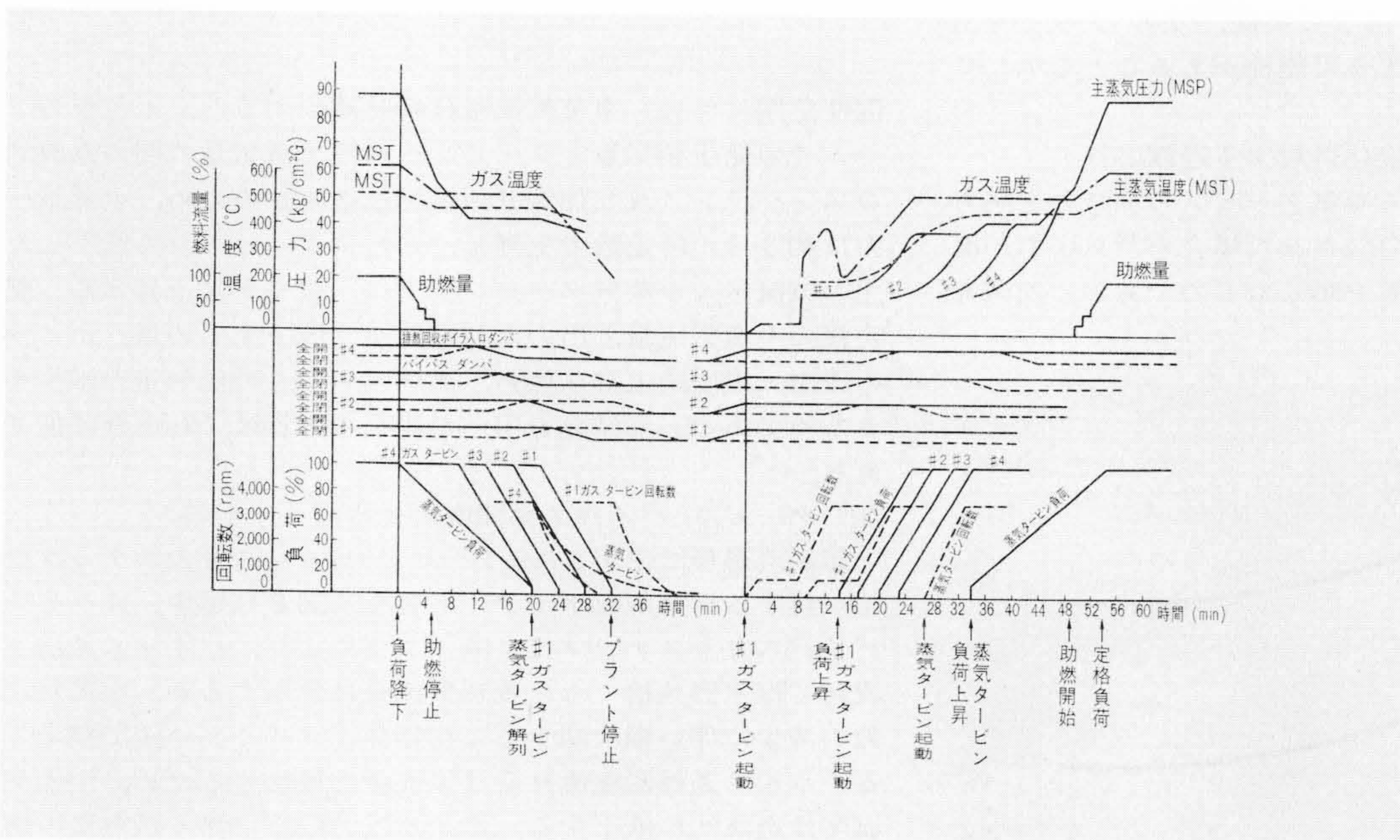


図10 起動・停止曲線(ホットスタート) ホットスタート時(8時間停止時)の起動・停止曲線を示す。

格負荷達成までの所要時間は、非助燃の場合で49分、助燃付の場合で54分となっている。

5 結 言

以上述べたとおり、新しい大容量コンバインド プラントに対して、プラント動特性を模擬したシミュレータを利用して、その負荷応答特性及び起動・停止特性を解析し、真にプラント特性に適合した制御系を開発した。また、このシステムは自動化によって大幅な省力化を図れるものとなっている。終わりに、本システムが、我が国の電力供給にいささかでも貢

献できれば、筆者らの幸いとするところである。

参考文献

- 1) 坂井：「大容量STAGプラント」，火力原子力発電，208，73 (昭49-1)
- 2) S.Nakamura, Y.Uchiyama："Steam and Gas Turbine Combined Cycle Plant, Thermodynamics and Computer Simulation Study for Control", 1975 Joint IEEE/ASCE Power Generation Technical Conference, September 1975, Preprint Number PG-75-646-0.