U. D. C. 621.438-5

ガスタービンの運転と制御

Gas Turbine Controls and Operation

加藤正敏* 草場正伸* 目黒和利**
Masatoshi Katô Masanobu Kusaba Kazutoshi Meguro

要　旨

ガスタービンの特長の一つとして運転，制御の完全自動化と急速起動があげられる。ここでは日立-GEガスタービンの運転制御方式の機能と特長について述べ，あわせて現在開発中の電子油圧制御の概要を紹介する。

1. 緒　言

ガスタービンには開放形，密閉形，再熱形などいろいろな形式があるが，ここでは現在，もっとも広く一般に用いられている開放形1軸式と2軸式について述べる。

ガスタービンは，一つの独立した動力プラントであり，制御の面からいえば一般火力プラントのボイラーとタービンをあわせて制御しているということができる。このことは蒸気タービン単独の制御に比較してガスタービン制御のむずかしさを示している反面，蒸気タービンとボイラーの分をまとめて制御できるということで制御装置の簡易化および自動化が容易であり，プラント制御の面からいって信頼性の高いものが得られることを意味している。ガスタービンは，負荷あるいは速度に応じて直接燃料を加減し，1,000℃におよぶ高温ガスをエネルギー源としているため制御装置の働きが確実でないと高温部に重大な障害を与えるおそれがあるので，制御装置はじゅうぶんな感度を有し，かつ信頼性の高いものでなければならない。

最近ガスタービンの持つ急速起動特性と自動運転のために非常用，せん頭負荷用電源として需要が急速に増大しているが，これを可能にしたのは豊富な実験研究に基づくガスタービン機能の解析とそれに基づいた制御装置の開発ならびに適切な制御方式の選択によるものである。

現在日立製作所では燃料御制方式として抵抗器，サーボモータ，電磁コイルなどを用いた電気的部分を中枢とし，これに油圧，空気式御制装置を加味したものを採用している。起動停止の自動御制は，電磁リレーを用いたシーケンス御制によって行なわれている。また近い将来空気油圧の機械的部分と電気的可動部分を極力少なくした電子御制に切り換える予定である。

本文では，ガスタービン制御に要求される機能について日立-GEガスタービンの具体的事例を示しながら説明を加え，その特長および運転実績について述べ，あわせて現在計画中の電子制御の概要を紹介するものである。

2. 制御の概要

ガスタービン制御装置は，大きく分けて次の四つの部分から成りたっている。

（1） 燃料制御装置
（2） ノズル制御装置　（2軸式の場合のみ）
（3） 起動停止制御装置
（4） 保安装置

燃料制御装置は，負荷，速度あるいは燃焼ガス温度によって燃料量を制御する装置で，ノズル制御装置は，2軸式の場合にガスタービンの風量を制御する装置である。起動停止制御装置は，ガスタービンの起動停止を自動的に進行させるもので起動装置や補機への始動信号，燃料の着火信号などを司っている。保安装置は，以上の三つの制御装置やガスタービン本体の異常の有無を常時監視する安全保護装置である。これらの制御装置に要求される項目を列挙すると次のようになる。

（1） 起動中着火，暖機，加速時の燃焼温度が制限値を越えないよう制御すること。
（2） 速度，負荷，温度を定められた精度で制御すること。
（3） 定常運転中急激な負荷変動にともなう燃料増加を一定比率に制限し，高温部に熱衝撃を与えないこと。
（4） 定常ならびに過渡状態にあっても安定に制御できること。
（5） 種々の制御機器の設定を容易に行なうことができ，長時間の連続運転にも安定していること。
（6） 機器の万一の誤動差に対しても適当な安全装置が施してあること。

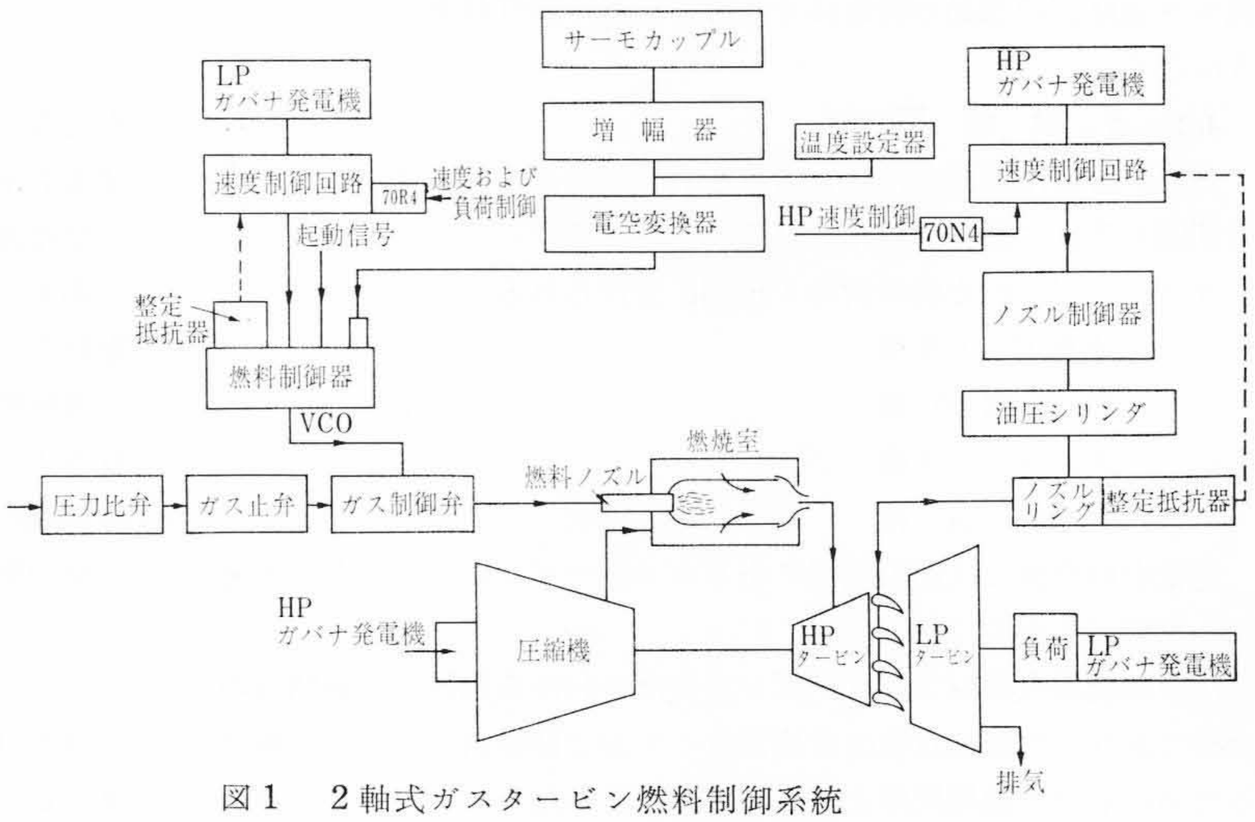

図1　2軸式ガスタービン燃料制御系統

3. 燃料制御装置

通常運転時燃料は，負荷あるいは速度によって制御されているが，負荷の制御は，速度制御装置を併用して行なわれている。タービン高温部の許容温度を越えないように，また過大な熱衝撃を与えないために燃焼ガスの最高温度とその上昇率を制限しており，制限値に達するとその信号によって速度制御に優先して燃料量を制御する。図1は，2軸式ガスタービンの標準燃料制御系統を示したものである。

着火時，加速時，負荷運転時のおのおのについて最高燃料量を規定する装置を設けており，速度，温度制御装置の補助として働かせている。これにより万一制御系に異常が生じてもタービン本体には障害を及ぼさないような配慮がなされている。

*　日立製作所日立工場
**　日立製作所国分工場

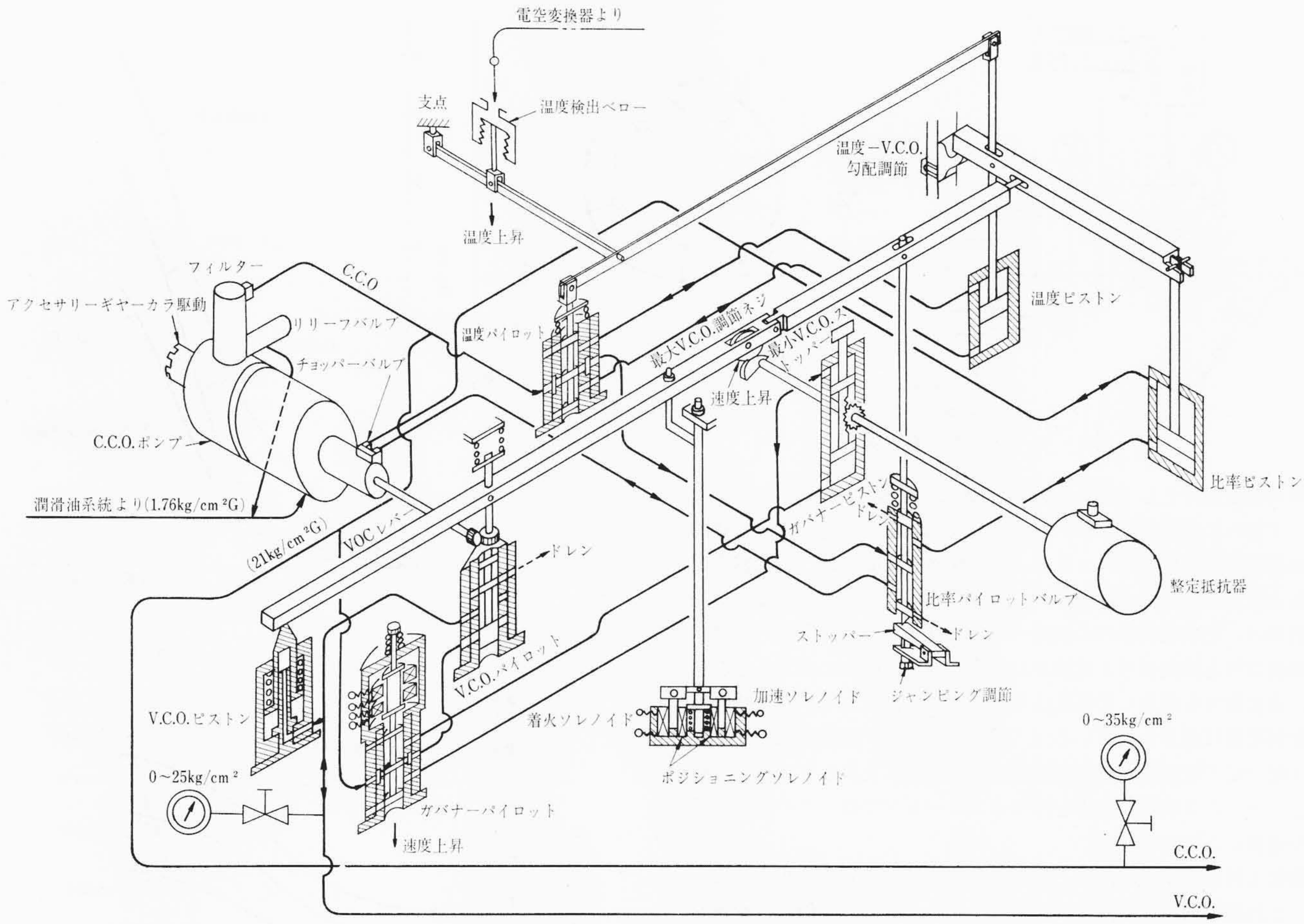

図2　燃　料　制　御　器　機　能　図

日立-GEガスタービン燃料制御装置の心臓部を占めているのは，燃料制御器である。これは小形精密化された高精度電気油圧式サーボ機構で，起動信号や速度，負荷，温度信号を受信し，これを油圧出力に変換している。油圧出力は，変圧制御油 VCO (Variable Control Oil) と呼ばれるもので燃料を直接制御する信号である。

図2は，燃料制御器の機能図である。

3.1　速度および負荷制御

ガスタービン速度は，ガバナ発電機によって検出されるが，これは速度に比例した信号電圧を出す。この電気信号回路内には速度設定抵抗器，燃料制御器内のパイロット弁を操作するガバナソレノイド，フィードバック要素としての整定抵抗器，調定率を定める調定率設定抵抗器などが含まれる。速度が上昇すると回路内の電流値が増大しガバナパイロット弁によって VCO 圧を逃がす。VCO 圧降下量は，燃料量減少を促し，電気的には整定抵抗器によってフィードバックされ，回路内の電流値が元にもどる。速度設定抵抗器は，サーボモータによって速度一定に制御され，燃料量の急激な増大を防止している。速度設定器に自動同期装置，自動負荷調整装置を付けることが可能で，ガスタービン起動から同期投入ならびにあらかじめ選択された負荷までの負荷上昇などすべて自動的に運転することができ，その後の負荷も一定に制御される。負荷上昇速度には急速上昇と平常上昇のいずれかを選択でき，急速上昇の場合は約1分，平常上昇の場合は5分間で無負荷から全負荷に移すことができる。調定率の設定変更は，調定率設定抵抗器によって容易に行なうことができ，その選定幅も非常に広いが，通常4～5% にしている。

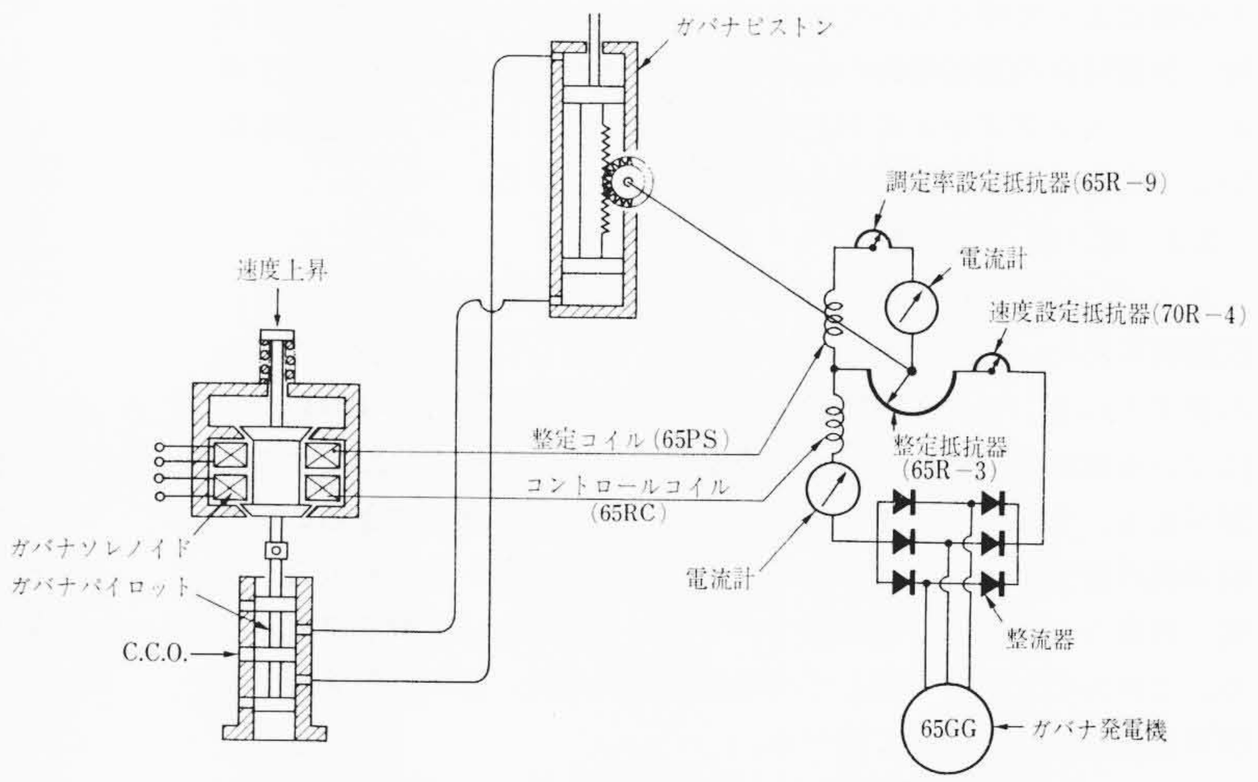

図3　速度および負荷制御系統図

図3は，速度および負荷制御系統を示したものである。

3.2　温　度　制　御

ガスタービンは，高温高圧ガスを取り扱っている関係で温度制御装置は，制御装置の中でも特に信頼性の高いものであることが必要である。温度制御はガスタービン入口温度を検出して制御する方式が良いと考えられるが，高温であり過ぎるため信頼性の高い温度検知器がないこと，適正温度のサンプリングがむずかしいことのため必ずしもよい方法とは考えられない。日立-GEガスタービンでは排気温度を検出して間接的にタービン入口温度を制御している。これによってより安定した信頼性の高い温度制御が行なわれる。排気温度は，12点のサーモカップルによって検出され，平均化した値を

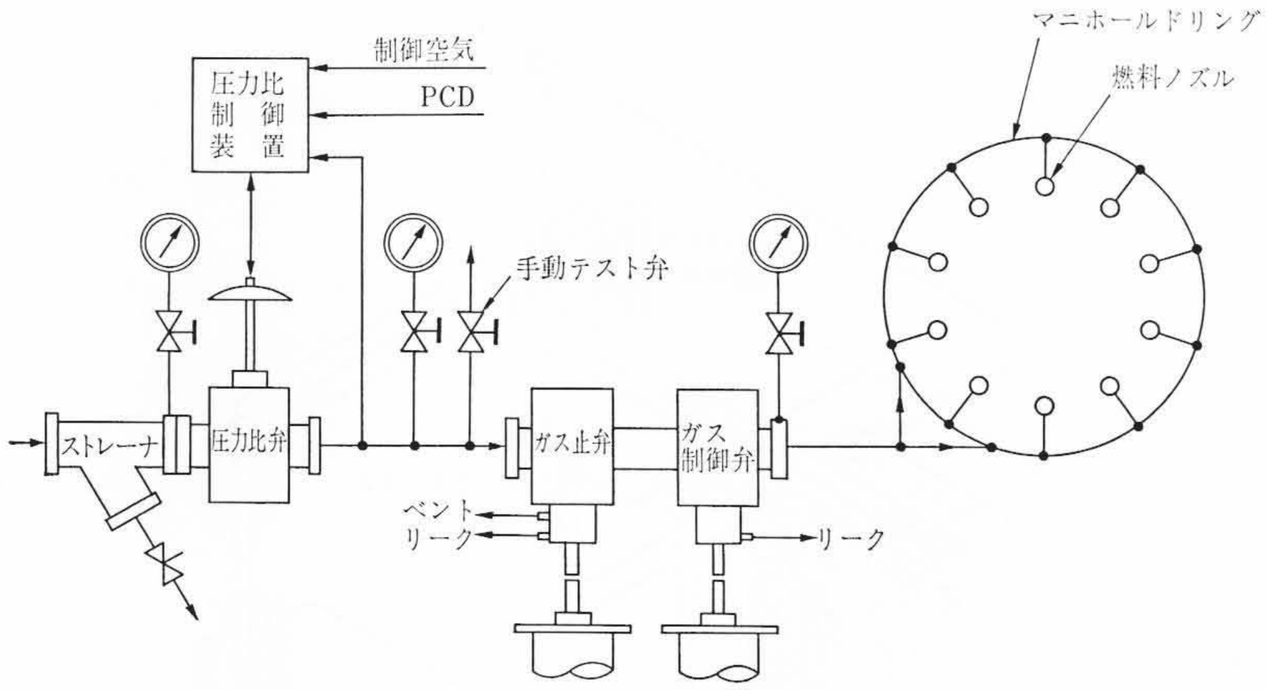

図4　気体燃料系統

制御用温度信号として用いている。12点の温度は,選択スイッチによって個々に確認され，サーモカップル断線事故に対しては自動的に温度制御系統から除外される。平均化された温度は，増幅器を出たあと温度設定信号と比較され，電空変換器に導かれる。この空気圧信号は，燃料制御器内の温度ベローに行く。燃料制御器内では常に速度信号と温度信号が比較されており温度制御点に達すると燃料は，速度信号を優先した温度信号によって制御される。着火時には温度制限値は低くなっているが，暖機を完了し，加速段階になるとこう配一定で定格運転時の制限値まで自動的に上昇して行く。ピークとベースの2種類の定格を持つガスタービンでは，この温度制限値の切換えが行なわれる。

温度上昇率の制限は，ジャンプ量とその後の上昇率を規定している。これは燃料制御器内で行なわれており，その設定値は，ジャンプ量が25%定格負荷相当，上昇率が毎秒5%定格負荷相当である。急激な負荷変動あるいは系統周波数変動に対する負荷上昇は，これらの値によって押えられている。 このほか燃料制御器内には着火時，加速時負荷運転時おのおのについて燃料量の最大値を制限するポジショニングソレノイドと負荷遮断時にガスタービンが遮断しないよう最少の燃料を確保する調整器が付いている。

3.3 燃　料　系　統

ガスタービンの燃料量は,全負荷時には着火時の30倍にもなり，広範囲にわたって精度を下げることなく安定した制御を行なうことが要求される。また多筒形燃焼器を採用している場合にはおのおのにはいる燃料量を均一にして燃焼器間の温度差を極力少なくする必要がある。また最近液体，気体燃料のいずれでも燃焼できる2重燃料系統の需要が増大しているが，同一の制御装置を用いる場合，速度，負荷ならびに温度制御についてうまく釣りあいを取る必要がある。これらのことを考慮して次に気体燃料系統，液体燃料系統および2重燃料系統について述べる。

3.3.1 気体燃料系統

図4は，気体燃料の概略系統である。ガス制御弁は，燃料制御器からのVCO信号によって油圧サーボを操作して弁の開閉を行ない，燃料ガス量を制御する弁である。圧力比弁は，タービン圧縮機の吐出圧によってガス制御弁入口圧力を調節する。ガス止弁は，ガス制御弁と一体に作られておりタービン停止信号によって燃料ガスを遮断する。

この系統で特長とするところは，圧力比弁を採用していることである。図5は，ガスタービン速度に対する風量と吐出圧の関係を示したものである。もし制御弁入口圧力が一定であれば気体燃料量は，圧縮機吐出圧によって大きく影響されることはいうまでもない。これを解決したのが圧力比弁で，ガス制御弁入口圧力をある定められた付加圧力に圧縮機吐出圧に比例した部分を加えた

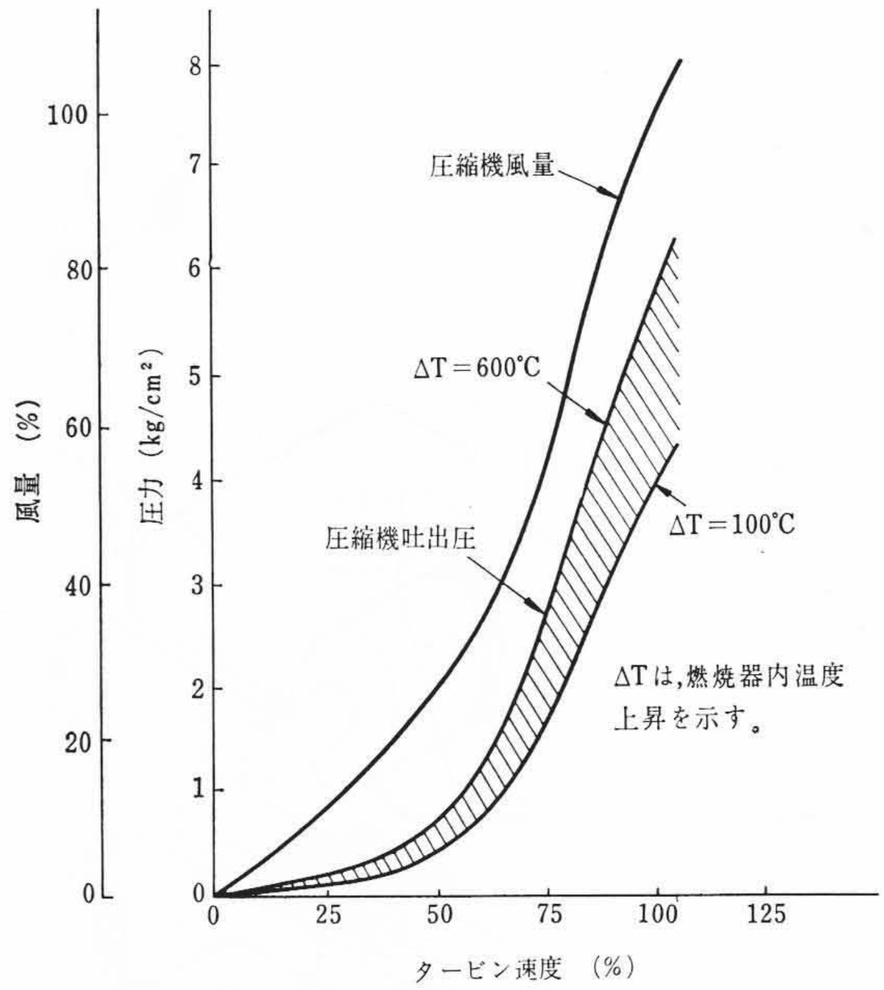

図5　ガスタービン風量と吐出圧

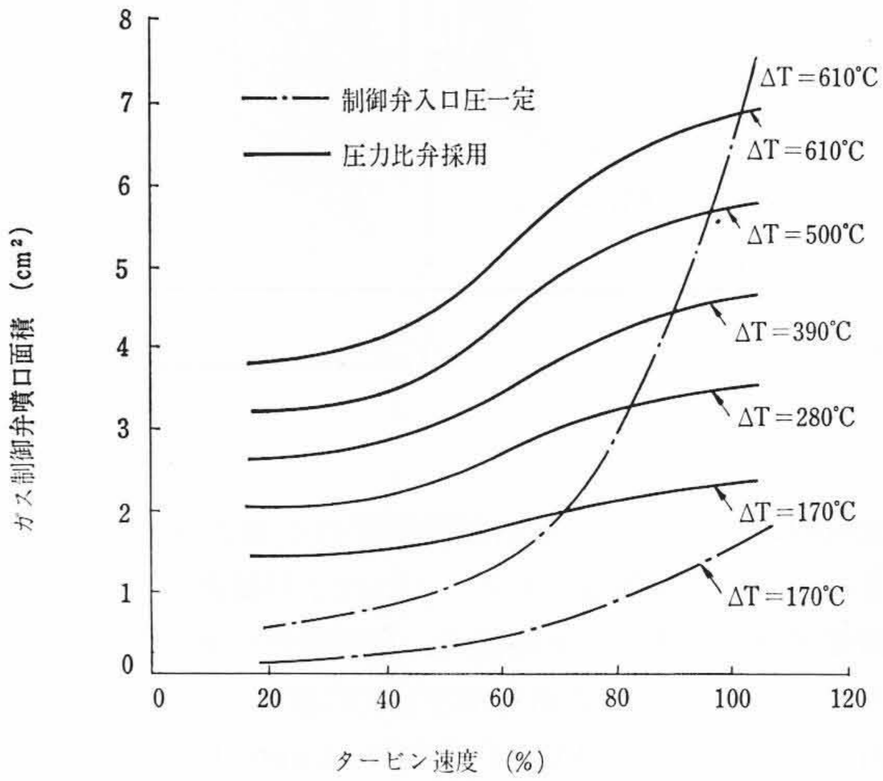

図6　気体燃料系特性

ものになるように制御している。 付加圧力と圧力比の選定は，着火時から加速，負荷運転時までの燃料系統とガスタービン性能に基づいて電算機によって求められている。この方式の特長とするところは，燃料の発熱量が変化しても付加圧力と圧力比の設定を変更するだけで，ほかの制御装置の設定変更は必要とせず，また起動時燃料量が少ないときでもガス制御弁の開度を大きくすることができ，着火から負荷運転までの広範な燃料量変化を安定して精度良く制御できることである。このことを示したのが図6である。

3.3.2 液体燃料系統

液体燃料系統の機能について述べると，まずいかなる運転条件下でも適切な燃料量をガスタービンに供給できること，燃焼器内での噴霧性能を落さない圧力を維持できること，また各燃焼器への燃料量を均一に保持できることなどである。

液体燃料用として採用している系統には，万能形と軽油用の2種類がある。万能形は，重油，軽油，灯油など粘度の高低にかかわらずほとんどすべての液体燃料に使用できるが，軽油用に特に開発しているものより系統が複雑である。図7は，軽油燃料系統を示したものである。燃料ポンプは，可変ストロークラジアルピストン形でガスタービン軸から減速装置を介して駆動され，燃料

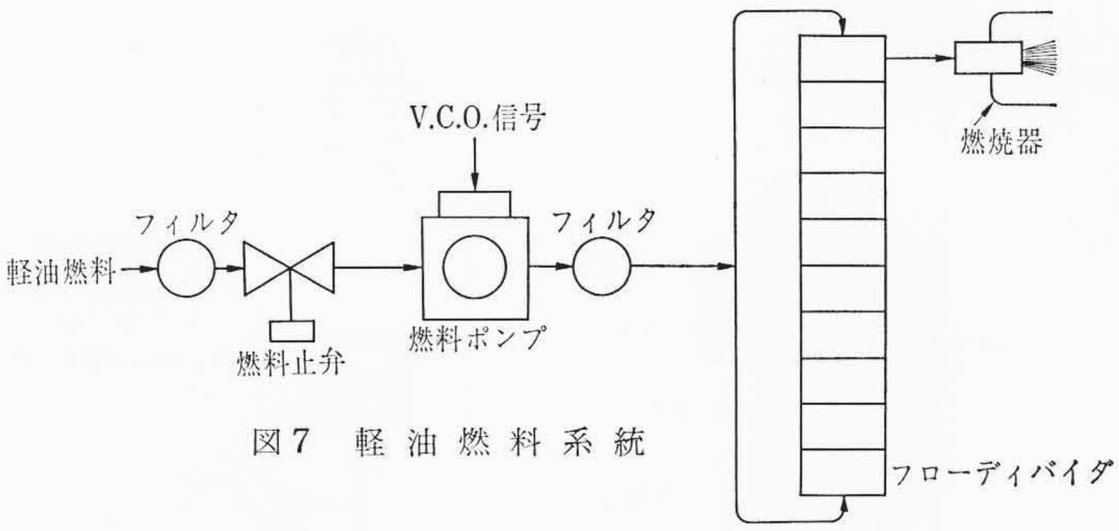

図7　軽油燃料系統

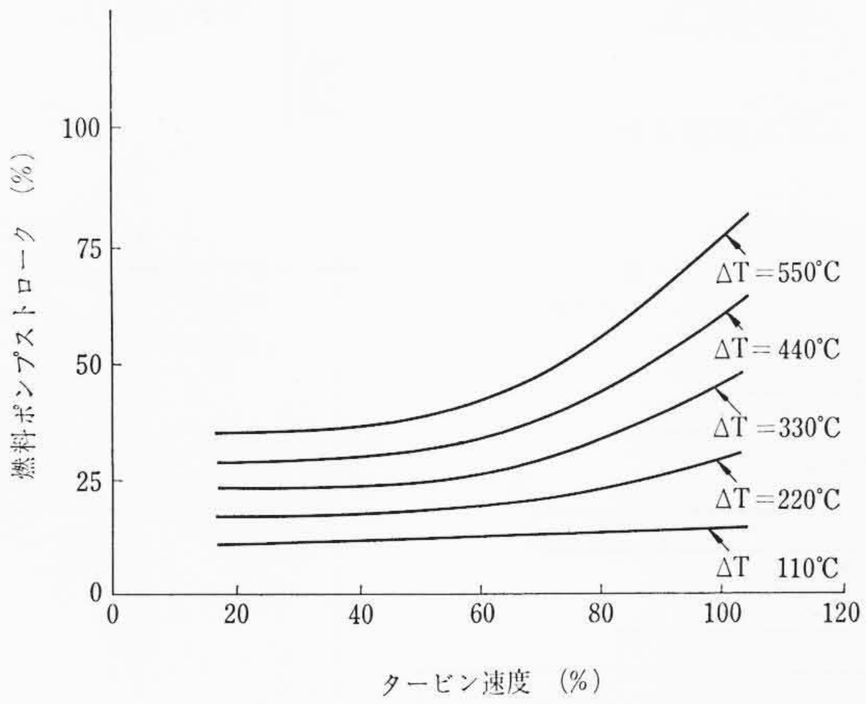

図8　液体燃料系特性

制御器からのVCO信号によってピストンストロークが変化して燃料量を制御している。このポンプで重要な意味を持つのは，その吐出量がVCO信号とタービン軸速度に比例することである。これは，前項で述べた圧力比弁採用による結果と同じ効果を与え，起動時のストロークを大きくすることができるため広範な燃料量変化に対して安定した精度の良い運転ができる。**図8**は，この特性を示すものでタービン速度に対するポンプストロークと燃焼器内温度上昇の関係を示している。温度上昇については，**図5**に示す風量によって割ると燃料量を示すこととなる。フローディバイダは，燃料ポンプからの燃料を各燃料ノズルに等分に分配するもので，一般に使用されているギヤーポンプを燃焼器の個数だけ連結したものと考えてよい。その駆動は，燃料圧によっているため始動時の静トルク分をモータによって補助するだけで，あとは燃料自身の圧力によって自力回転する。燃料ノズルに詰まりなどが生じても各燃焼器の燃料量は，等分に保持され，燃焼器，ノズル，ブレードなどの温度分布が均一になり高温部の寿命が伸びる。また燃料ノズルは，起動時の燃料噴霧性能を増すため2段噴霧式を採用しており起動時の噴霧面積を小さくしている。**図9**は，燃料ノズルの燃料量と圧力の関係を示したものである。

3.3.3　2重燃料系統

燃料として液体と気体，発熱量の大幅に異なる異種ガスなどいずれでも使用できるガスタービンは，使用者側にとって非常に利用度が高いということができる。しかし異種燃料を用いる場合の制御系のマッチング，燃料制御装置の複雑化，さらに一定負荷を取ったうえでの燃料切換，同時燃焼など種々の技術的問題が存在する。日立-GEガスタービンでは次に記すようにこれらの問題を解決し標準の2重燃料系統を開発している。

異種気体燃料の場合には，先に述べた圧力比弁の設定切換によって負荷運転中でも切換え可能で，これは日本石油化学株式会社納ガスタービンに採用されている。この場合の燃料は，カロリーの異なる2種の石油分解ガスである。

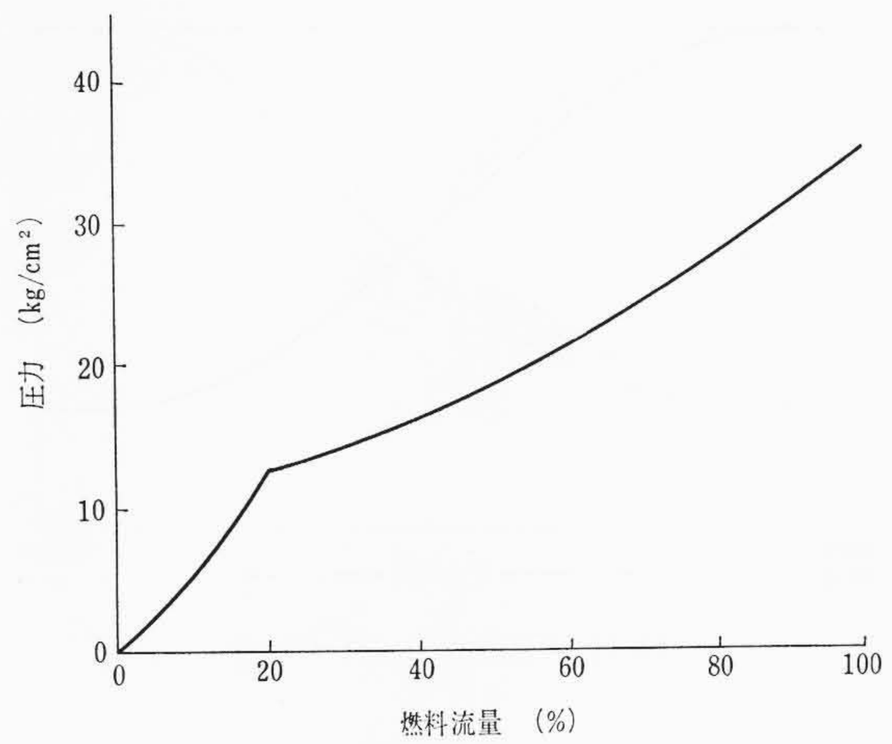

図9　燃料ノズル特性

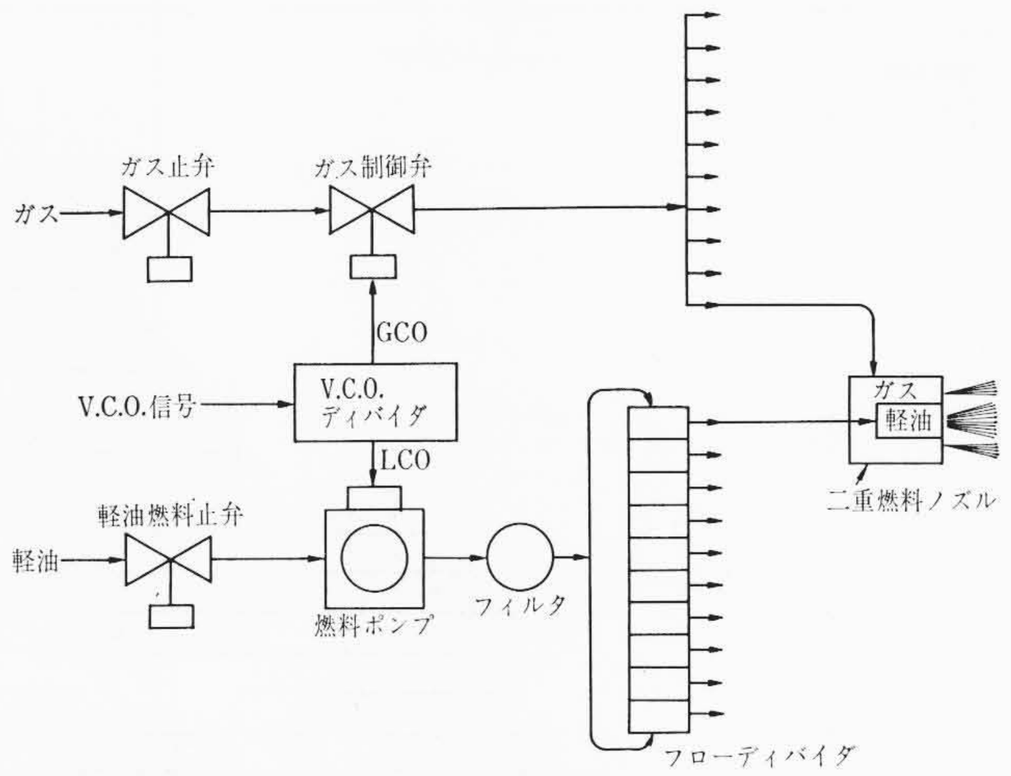

図10　2重燃料系統

図10は，気体燃料と液体燃料を使用し，負荷運転中切換え可能な2重燃料系統を示したものである。主要な役割を果たすのはVCOディバイダで，燃料制御器からのVCO信号をガス燃料信号GCO (Gas Control Oil) と液体燃料信号LCO (Liquid Control Oil) に分割する。気体燃料から液体燃料への切換えは，運転室内の切換スイッチを気体から液体にするだけで，液体燃料止弁が開き，VCOディバイダが作動してGCOの圧力を下げると同時にLCOの圧力を上げる。液体燃料に完全に切り換わるとガス止弁が閉じる。これらはすべて自動的に遂行され，切換中の全カロリー量は，一定に保持されているため負荷変動はない。もちろん切換え途中で停止して混合燃焼運転を継続できる。またいずれの燃料を用いても起動停止を行なうことができる。しかし混合燃焼して起動することはできない。**図11**はVCOディバイダの特性を示したものである。負荷運転中切換えに要する時間は，わずか1分で，このような簡単な装置によって燃料切換を可能にした理由は，圧力比弁と速度比例形燃料ポンプの採用によって両燃料系統の釣りあいをうまく取ることができるためである。

4.　ノズル制御装置

ガスタービン風量調節の目的は，部分負荷時の風量を少なくしてタービン入口温度を許容値まで高め，ガスタービン効率を良くすることと排熱ボイラ付きの場合に負荷に関係なく風量を一定にしてボイラの発生蒸気量を一定にすることである。風量調節の方法としては，1軸式の場合の圧縮機静翼の入口角操作による方式と2軸式の場合のタービンノズル角度変化による方式とがある。ここでは後者

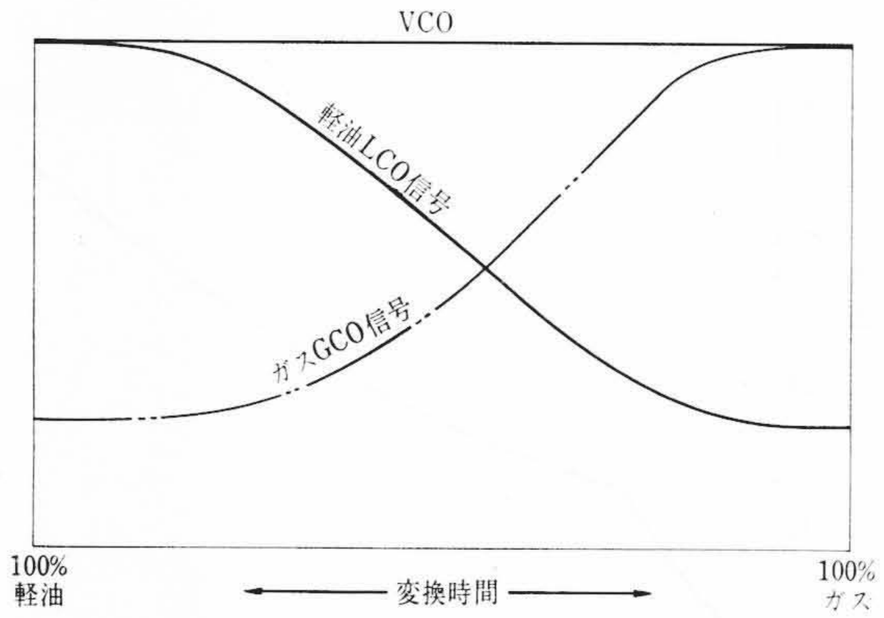

図11　VCO ディバイダ特性

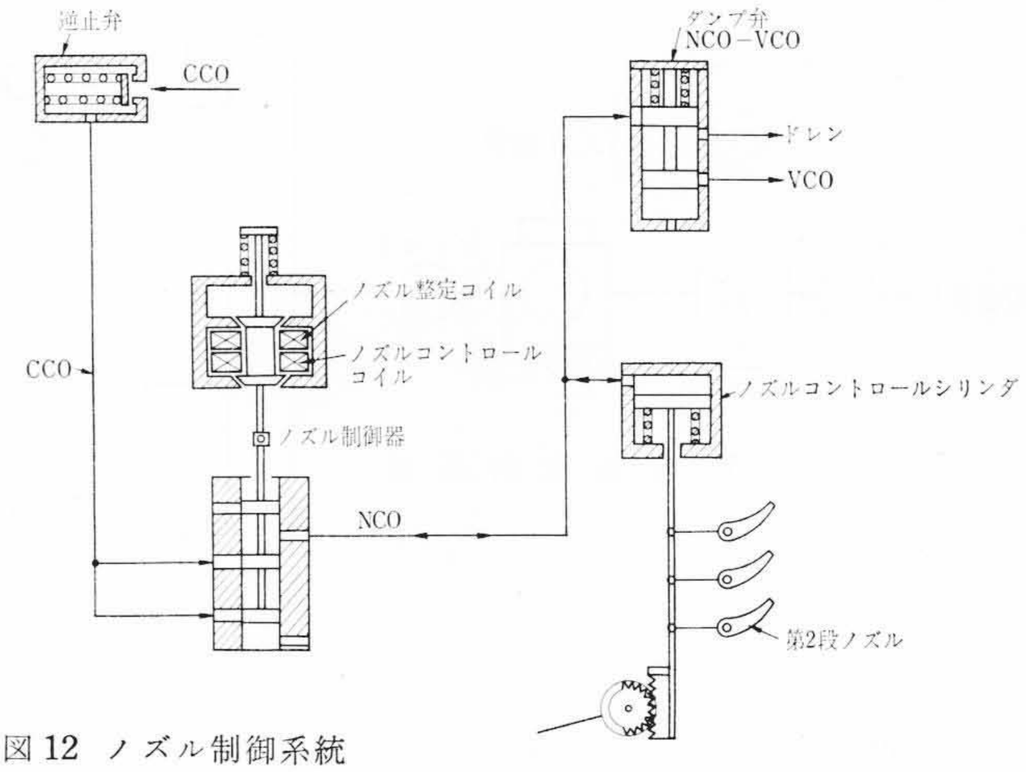

図12　ノズル制御系統

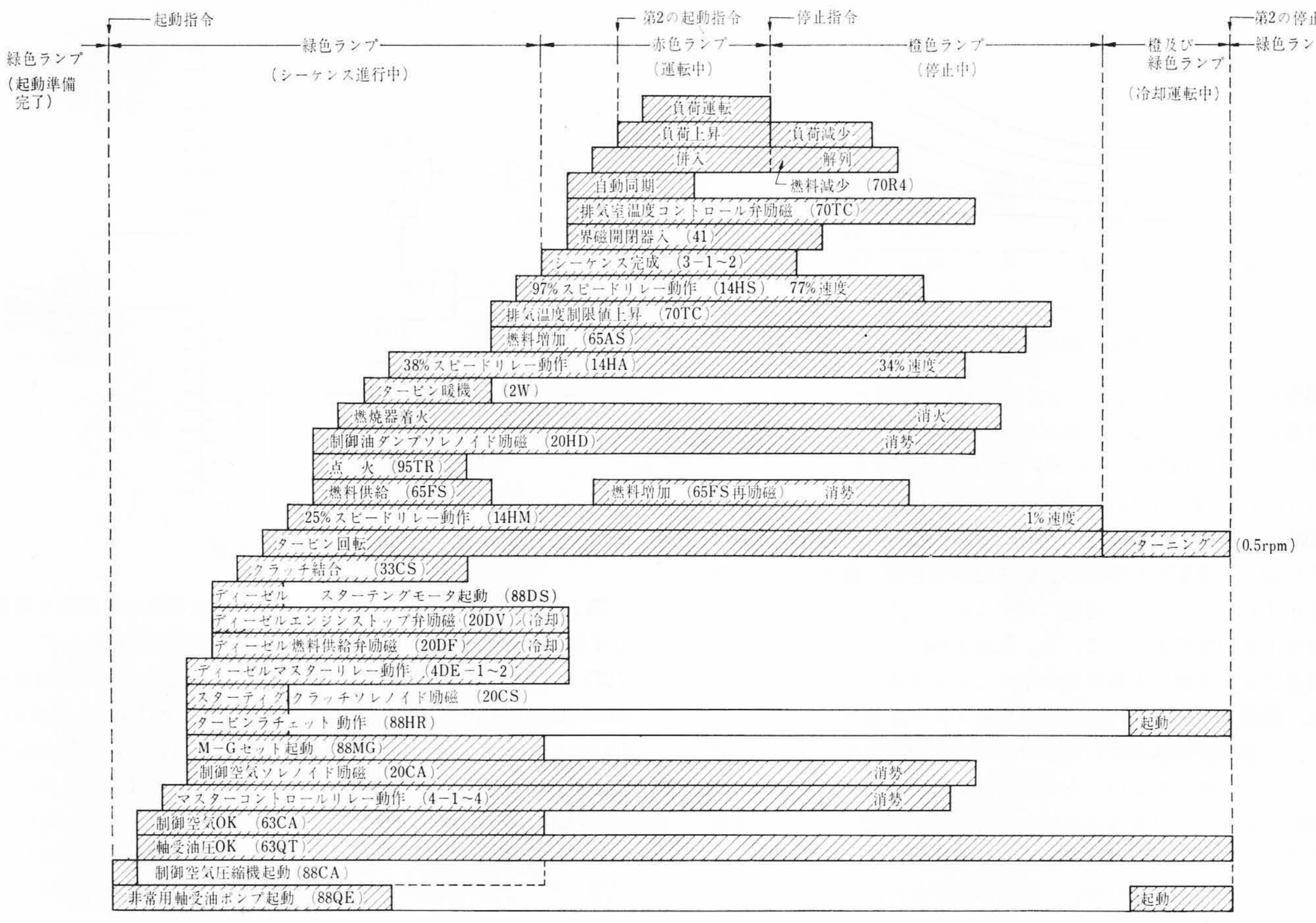

図13　自動起動停止方式説明図　(1軸ブラックスタート)

のノズル制御について述べる。

図12は，ノズル制御系統の概要を示している。日立-GEガスタービンでは高圧タービンは圧縮機を，低圧タービンは発電機などの負荷装置を駆動している。低圧タービン速度は，燃料制御装置によって制御されているが，高圧タービン速度は，ノズル制御装置によって制御されている。ノズル面積を変えているのは，第2段だけで，これを変えると両タービンのエネルギー分配が変わり，高圧タービン速度が変化するのに応じて風量が変化する。

5.　起動停止制御装置

5.1　起動停止方式

起動，停止はコントロールパッケージ内のタービン盤，あるいは遠方制御盤よりすべて自動的に行なわれる（図13参照）。起動指令により各補機が自動起動し，起動トルクを減ずるためタービンのラチエット装置を，起動用ディーゼルと並行して動作させる。25% 速度にて点火し，約1分間の暖機を行なったのち，さらに加速し，同期速度に達すると，自動同期装置が作動し，ガスタービン発電機は系統に併入される。 併入後，瞬時に約1MWの負荷(スピニングリザーブロード) をとり，第2の起動指令により，規定の負荷まで自動的に上昇する。

停止の場合には，停止指令により燃料が自動的に減少し，発電機遮断器は逆電力継電器により遮断され77% 速度に減少した時に，燃料が遮断されタービンは停止する。タービン停止約3分後に，ラチエット装置が自動的に始動し，タービンは約0.5 RPM にてターニングされ，ロータが均等に冷却される。このターニングは停止スイッチを再度，停止操作をすることにより停止する。

図14は，タービン盤，発電機盤の外観を示している。

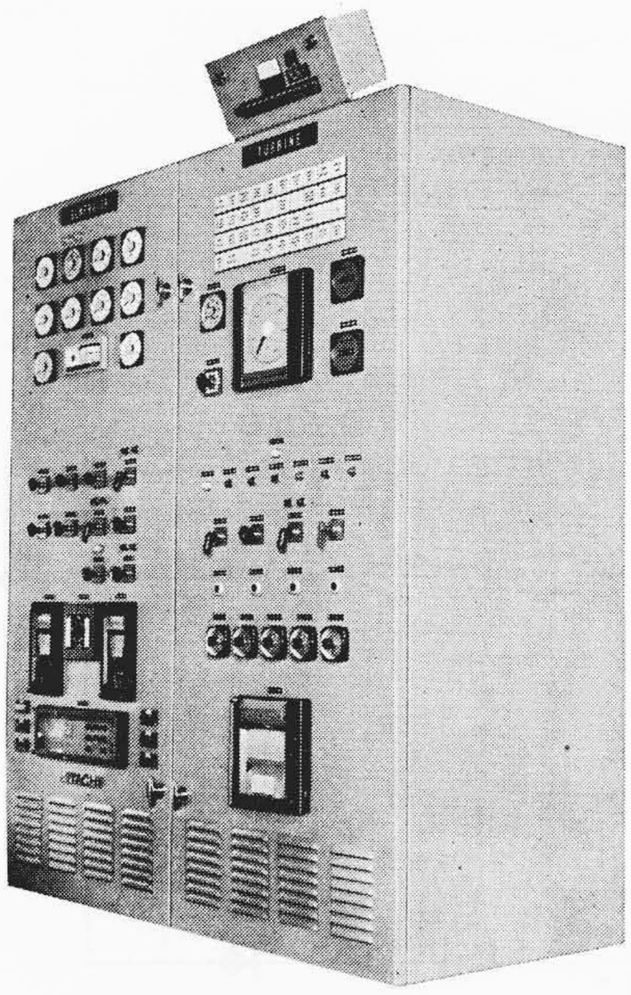

図 14　発電機盤とタービン盤

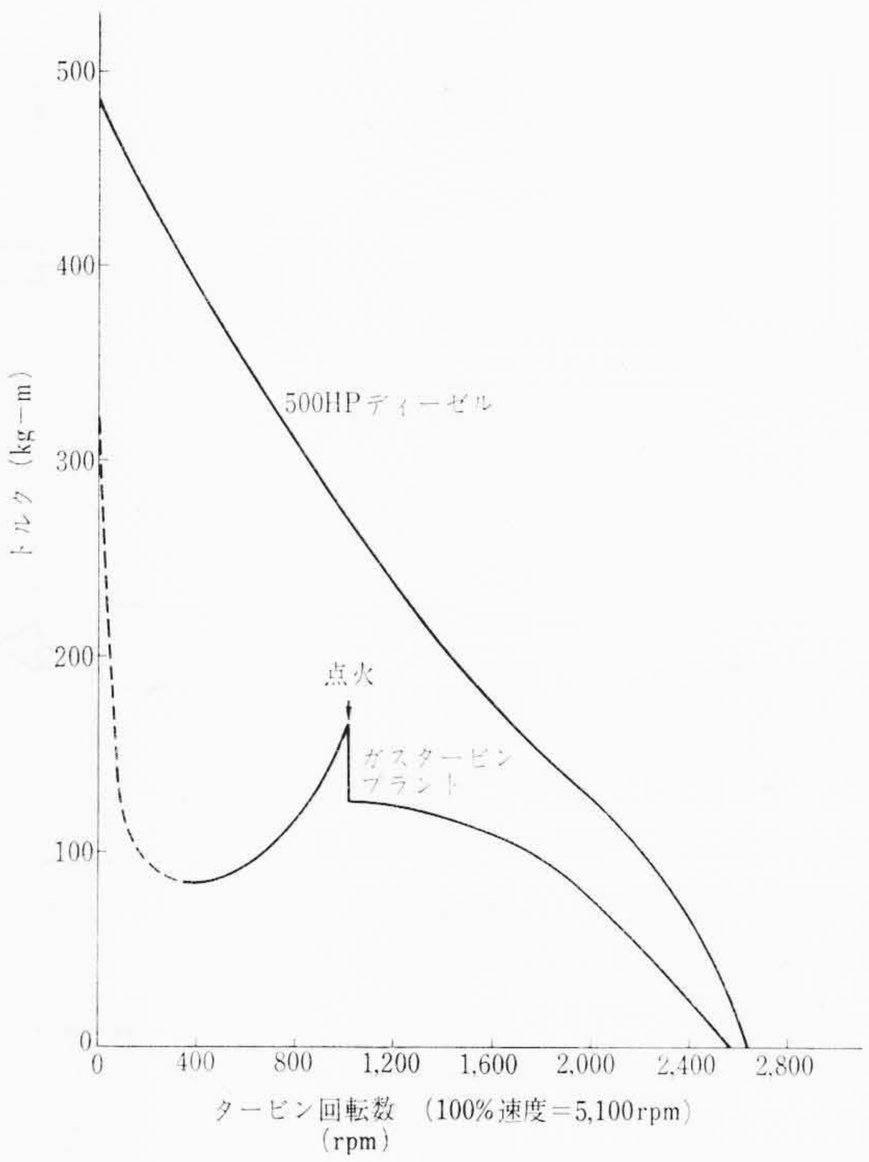

図 15　ガスタービン起動時トルク曲線

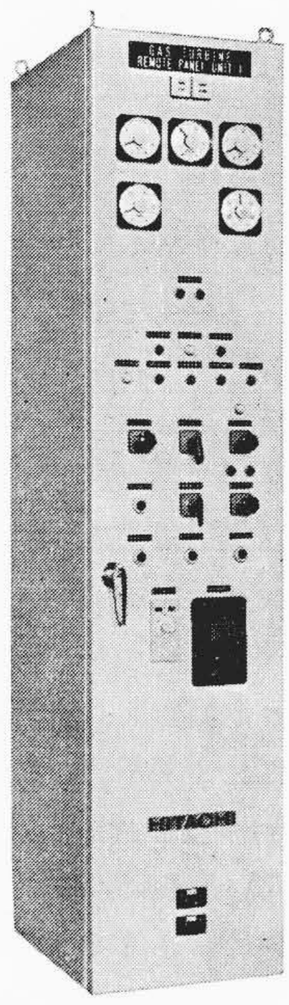

図 18　遠方制御盤

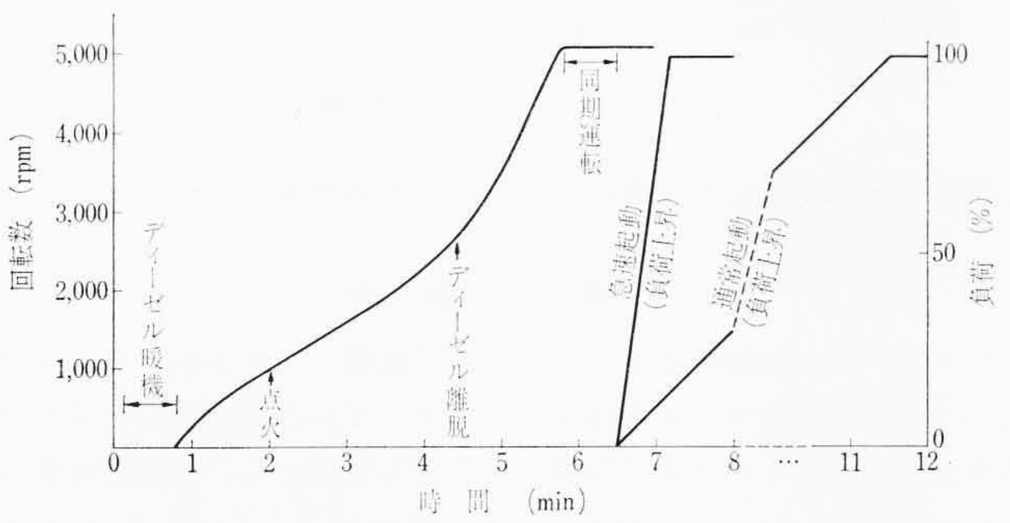

図 16　ガスタービンプラント起動曲線

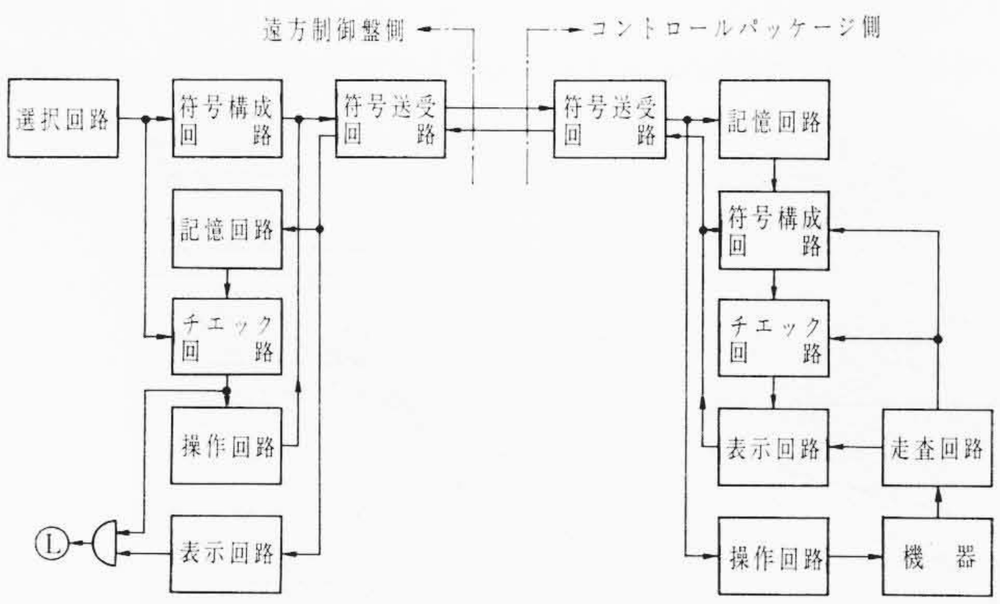

図 17　パルスコード形遠方制御方式ブロックダイヤグラム

5.2　起　動　装　置

ガスタービンの起動装置には，ブラックスタートの可能なディーゼルエンジンのほかに，外部電源のある場合には，モータトルクコンバータを使用するもの，蒸気タービンを起動用として使用し，起動後はブースタ，パワータービンとして，プロセス工業に利用可能なものもある。このほか起動の動力源としてガスを用いたガスエクスパンダ方式などもあるが，いずれを採用するかは，ガスタービンの立地条件，使用条件などを加味して決められる。

ガスタービンを数機，併列制御するパワーブロック方式では，1台は，ブラックスタートを考慮したディーゼルエンジンとして，ほかはモータトルクコンバータ方式とする例などもある。

ガスタービン起動時トルク曲線は図 15 に示すとおりである。

5.3　急速起動方式

ガスタービンが起動指令から定格回転数に達するまでの時間は，約 7 分 50 秒であるが，起動装置として 500ＰＳディーゼルエンジン，あるいは 350ＨＰモータを使用することにより，図 16 に示すように起動時間を 6 分以下に短縮する急速起動方式がある。

併入後の負荷上昇もタービン盤上の急速起動用押しボタンを起動時に押しておけば，ガバナーモータの速度を速やめ，定格出力までの所要時間が通常約 5 分のものを，約 40 秒で全負荷をとらしめることができる。

5.4　遠隔制御方式

コントロールパッケージは，無人化して，遠方より起動，停止することも可能である。パッケージから遠方制御盤までの距離が比較的短い場合には，直接ケーブル方式によるが，その距離が 600 メートル以上にも及ぶとき，またパワーブロック方式などで，遠方からの制御機器が多い場合には，図 17 に示す日立パルスコード形遠方制御装置を採用し，ケーブルに要する費用を節減することも可能である。

図 18 は遠方制御盤の一例を示したものである。

6.　保　安　装　置

保安装置は，以上述べた制御装置およびガスタービン本体の運転状態を常時監視し，異常が生じた場合に警報を発したり，場合によってはガスタービンを停止して機器の安全を図る装置である。

図 19 は，1 軸機の遮断回路を示したものである。タービン過速度については一般に蒸気タービンで使用されているのと同じで，タービン速度が定格の 110% になると軸内に装入された過速度ボルトの遠心力によってトリガーを動かしタービンを遮断する。温度上昇についてはバルブ式温度検出器によって 2 点の排気温度を検出し，高いほうの温度を選択したあと規定温度に達すると警報を発する。さらに温度が上がるとタービンを遮断する。2 点の温度差が規定値以上になっても警報を発する。ガスタービン本体の振動は，速度検知形振動検出器によって監視されている。振動検出器としてはこの

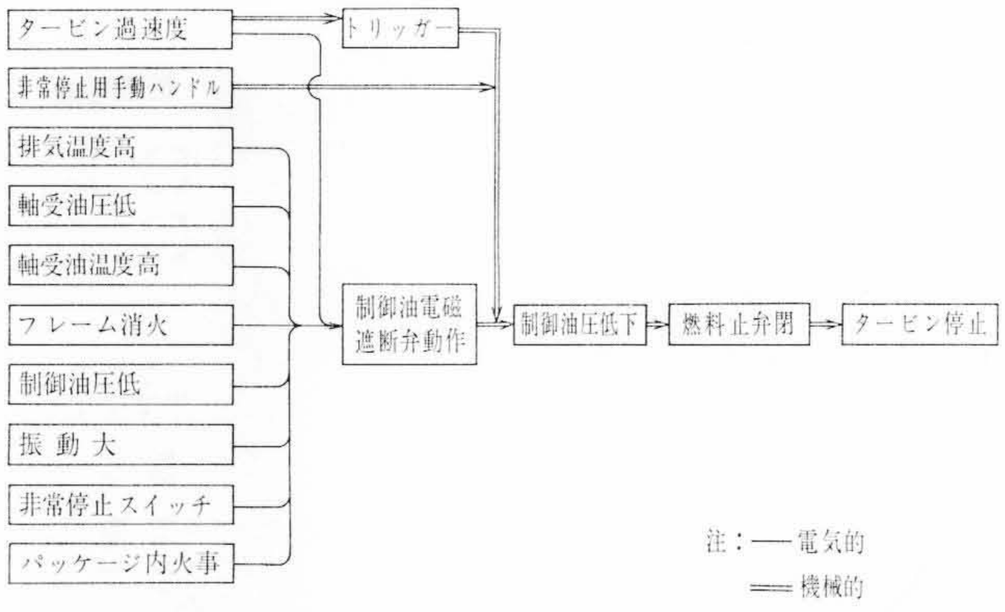

図19　1軸式タービン遮断系統ブロック線図

ほかに振幅形と加速度形があるが，その違いは，振動による変位を問題にするか慣性力を問題にするかである。速度形は，両者の特長を生かした中間形ということができる。燃焼器内の火炎の検知は，通常温度制御に利用されている12本のサーモカップルの電圧降下の検出によって行なわれている。排熱ボイラー付きの場合や排気ダクトが長い場合は，応答速度が速い紫外線検知方式によっており，火炎消失から燃料が完全に遮断されるまでの時間は，1秒以内である。

ガスタービンのような出力プラントでしばしば問題となり重要と思われる点は，保安装置の遮断，警報用の電気接点を開にするか閉にするかという点である。日立製作所で原則として採用しているのは通電あるいは閉のとき警報を発し，無通電あるいは開のとき遮断する方式である。もちろん電気機器や配線は，ショートして異種系統が接合するよりも，断線，開放により電気が通じなくなる場合が起こりやすい。無通電あるいは開のとき遮断する方式では実際の運転上支障のない断線，端末機器の異常でも遮断する場合があり得るが，ガスタービンは，ボイラなどと同じく燃料を直接制御していることを考えると，この方式がガスタービン自身あるいはガスタービンを含めたプラント全体の安全保護につながると考えられる。通電あるいは閉のとき警報する方式を採用している理由は，起動停止を自動的にシーケンシャルに進行させる場合，逆方式に比べて電気接点，リレー類が著しく減少し，その回路が非常に簡単になるということ

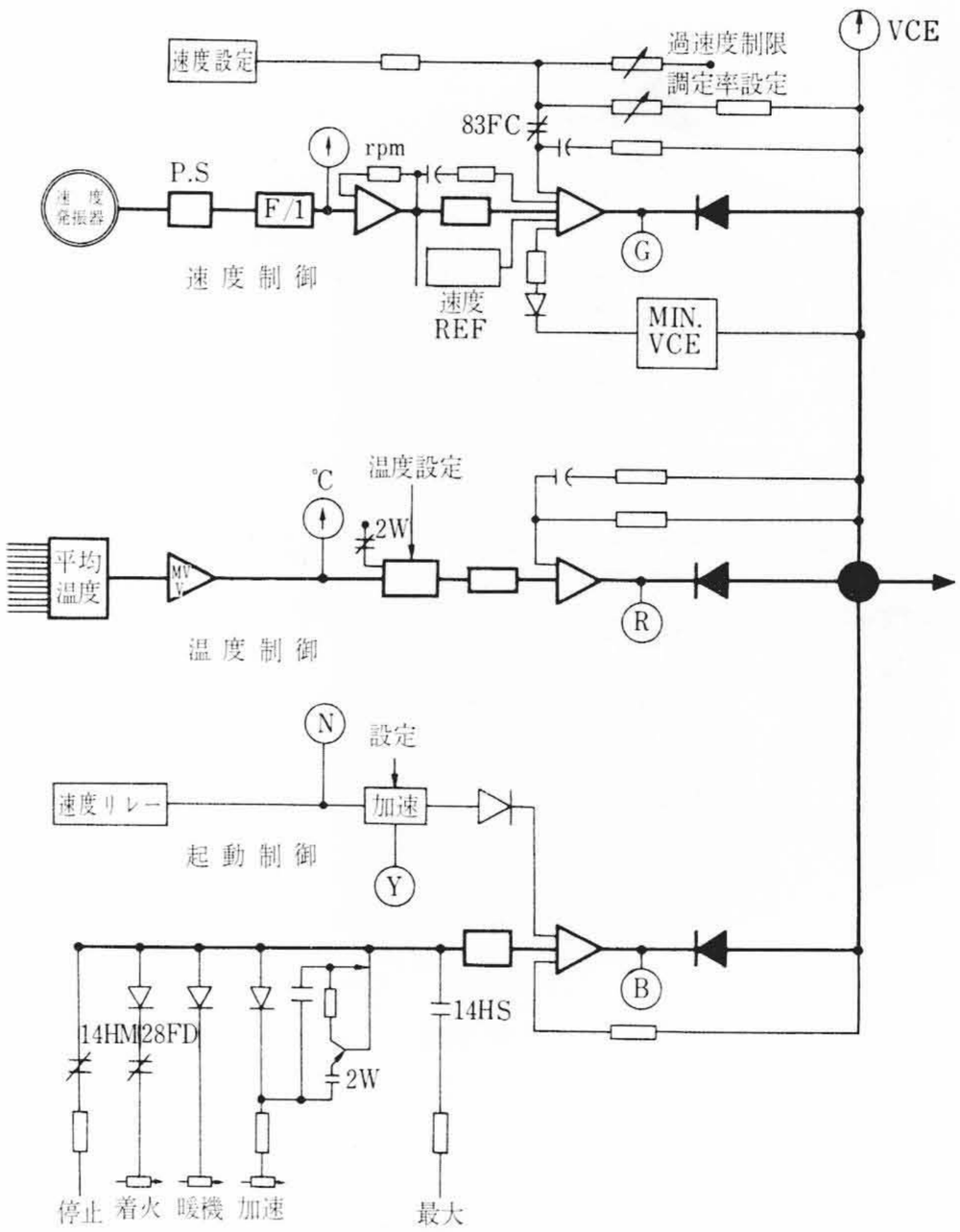

図20　電子制御回路

と遮断系統に比較して重要性が高くないためである。

7. 電子制御

ガスタービン制御装置を一新する電子制御システムが現在開発されつつあり，1970年以降製作するガスタービンの標準として採用する予定である。これは電子制御回路部分を頭脳とし，高圧油を筋肉としてガスタービンを制御する装置で図20に示したのがその主系統図である。入力信号は，速度，温度，起動信号からなり，おのおのの制御回路から出た出力信号が低電圧選択回路を通り，燃料制御の電気信号VCE(Variable Control-Electronics)となる。この電子

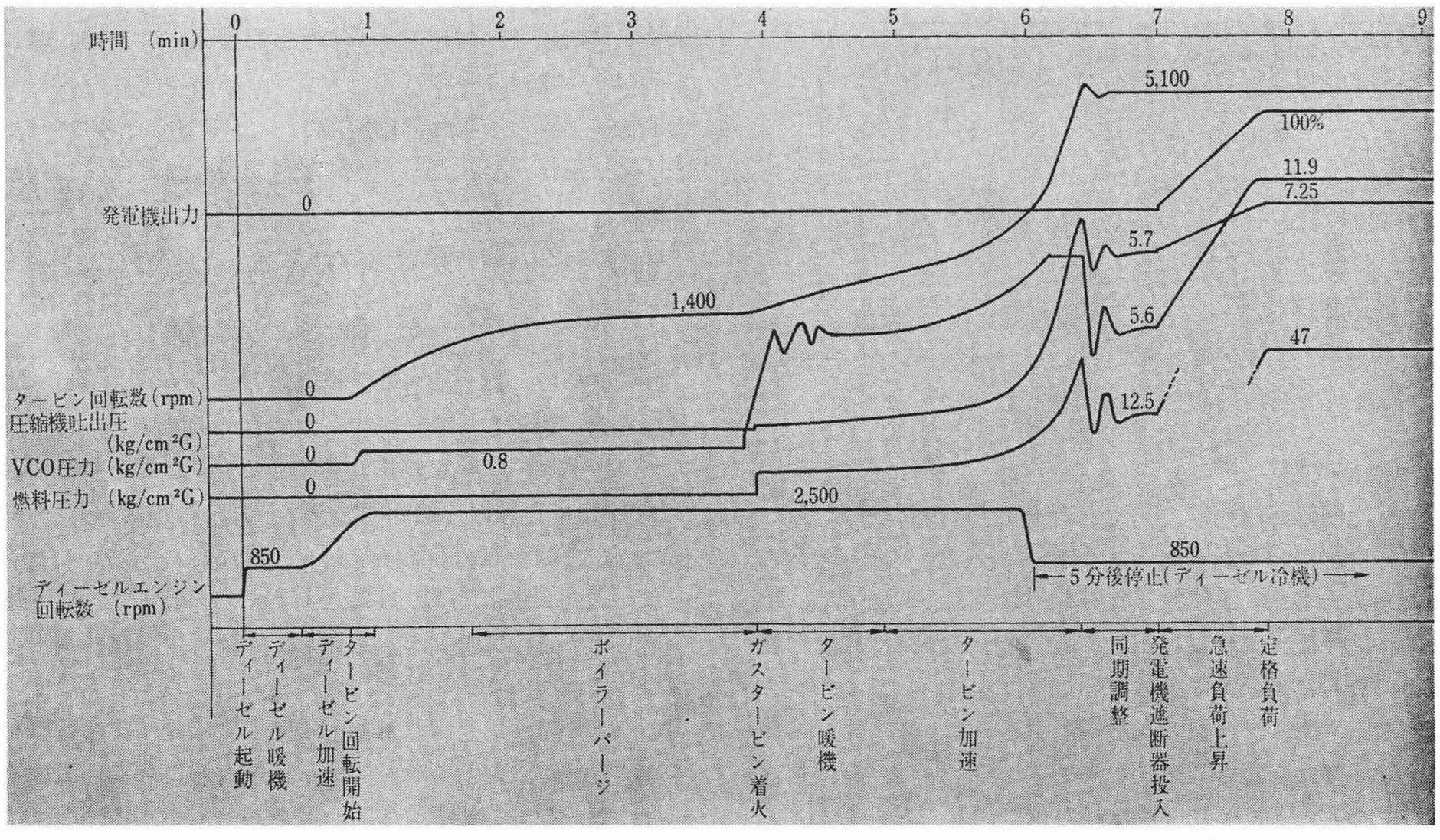

図21　ガスタービン起動オシログラム

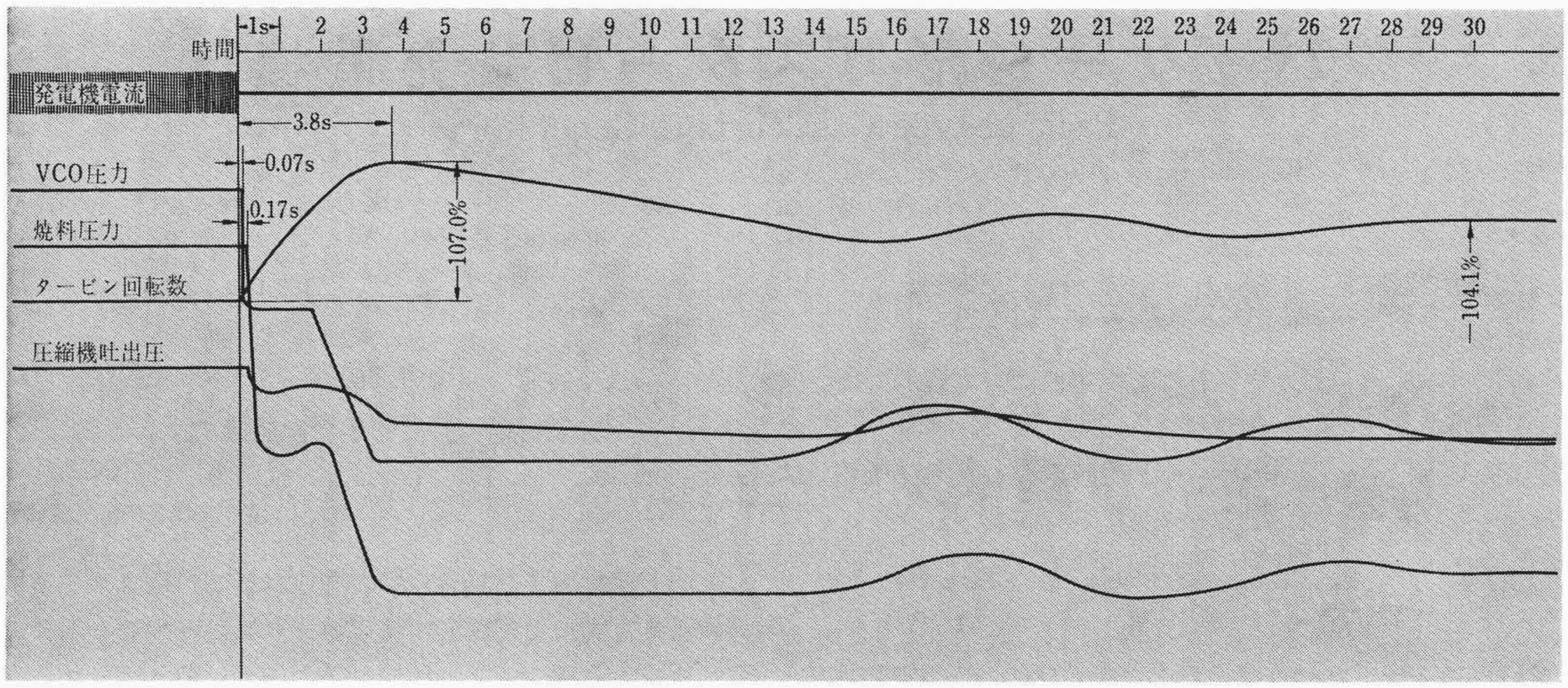

図 22　ガスタービン負荷遮断オシログラム

制御の特長について列挙する。

（1）　信頼性の高い電子制御装置を主系統に採用し，サーボモータ，可変抵抗器などの電気的可動部分を少なくし，また多数の空気，油圧の付属制御装置を取り去ったため保守・運転が容易になり，制御系全体の信頼性が大幅に向上する。 計算上の有効度が99.9%，MTBF が 10,000 時間となっている。

（2）　ガスタービン運転中の速度，負荷，温度制御，保安装置，シーケンス関係などすべての制御用電源は，速度信号検出用として用いている大容量（2kVA）特殊誘導発振器の出力を利用している。これは回転部分に巻線，スリップリング，軸受などを持たない特殊発振器で保守点検なしに半永久的使用に耐え，電子制御の信頼性向上の一翼をになっている。

（3）　電気，機械的可動部分を少なくしたソリッドステートの制御装置と高圧油圧を使用しているため応答速度の速い，精度の高い制御ができる。

8. 運　転　結　果

ここでは日立製作所で多数製作したガスタービンの代表的事例として鶴崎共同動力株式会社納めの1軸式ガスタービンの運転結果について報告する。

このタービンは，起動，同期，停止の自動制御装置ならびに負荷を一定に維持する制御装置を有している。 図 21 は，現地試運転時の起動オシログラムであるが，起動から同期まで7分（ボイラーパージに要した時間2分を差引くと5分），自動同期に要した時間が40秒，負荷上昇に要した時間が約1分とすべて計画値どおりでガスタービンの急速起動特性をよく示している。 図 22 は，負荷遮断時の特性を示すオシログラムである。 遮断後の最高速度が 107.0%，整定速度が 104.1%，また負荷遮断から整定するまでの時間が約 30 秒で，ガスタービン制御装置が正常に働いていること，その制御系の優秀さを示している。

10. 結　　言

以上ガスタービン制御に要求される基本的概念と日立製作所で採用している制御系について述べた。ここでさらに強調したいのは，ガスタービンは，燃料を高圧ふん囲気で燃焼させ，それを直接制御している発電プラントであり，タービン高温部に使用されている材料は，最高温度，温度上昇率それぞれについて許容値があり，それを越える制御は，絶対避けねばならないことである。信頼性の高いガスタービンの自動制御ならびに急速起動は，起動時から全負荷時までの膨大な，しかも詳細なガスタービンの解析と適切な制御系の選択によって可能となる。本稿ではこれらの点を主眼としてガスタービンの運転と制御について述べるとともに現在開発中の電子制御の概要を紹介したものである。