

ガスタービンの制御装置

Control System of Gas Turbine

岩 尾 稔 直* 草 場 正 伸*
Toshinao Iwao Masanobu Kusaba

要 旨

日立製作所で製作しているガスタービンは、パッケージ形、あるいはベースマウントのヘビーデューティ開放サイクルガスタービンで、小形軽量、冷却水や補機電源の自己補給、急速起動、運転の自動化などを特色としている。特に運転機構には、電気ガバナを含む多くの電気要素を採用し、自動起動および速度、負荷、温度の複雑な運転制御を可能にしている。

本論文は、この電気ガバナを中心とするガスタービンの制御装置の機能と特長を、実績を交えて紹介するものである。

1. 緒 言

ガスタービンの応用分野は近年著しく拡大しつつある。航空用はもちろんのこと、船用、車両用、産業用、事業用の各所に新しい特長を有する原動機として迎えられ、複雑な運転操作に適用されたり、設備の合理化の一端をになったり、またプラントの自動化への推進に役だっている。

これらガスタービンのめざましい進出は、高温耐熱材の開発による効率の向上やボイラなどのプラント機器との結合による熱利用度の向上とともに、すぐれた制御機器が開発されてきたことによるところが大きい。

特に制御機構の開発に基づく、急速起動、自動化、速度、負荷、温度の緻密(ちみつ)な制御の実現は、ますます複雑化し困難なものとなっている昨今の工業用原動機の運転に対する要求を、十分満足するものとなっている。

工業用ガスタービンの制御装置の技術的進歩を、いま一度ふりかえてみると、図1のような進展を示している。これは世界最大のガスタービンメーカーであるアメリカ GE 社の一例であるが、他社においてもほぼ同様の傾向がみられる。

現時点は、電気油圧式制御装置の段階にあるが、ごく近い将来に、全面的な電子式制御も実用化され、ガスタービンの発展にエポックを作るものと期待されている。

日立製作所では、昭和39年に GE 社と共同製作協定を結び、41年に初めて本格的パッケージ形ガスタービンである2軸式6,000 kW ガスタービンを製作し、日本石油化学株式会社に納入したが、その後十数台の1軸15,000 kW 級ガスタービンを受注し、製作を続けている。

これらにはいずれも特色のある電気油圧空気式制御装置が使用されている。制御装置の中心となるものは、電気ガバナを含む燃料制御装置で、これにより主要制御量である速度、負荷、温度の制御を行なっている。

本論文では、日立製作所で標準機種として製作している1軸および2軸式ガスタービンの制御装置の構造や機能、特長を系統的にとらえ、あわせてその運転実績について検討を行なうものである。

2. ガスタービンの制御系統

ガスタービンは、いわば一つの出力プラントであるといえる。したがってその制御量となるものは、多種多様にわたっており、それらの選択によってはいろいろな制御方式が可能となる。このことは、他の面からみるとガスタービンの用途の非常に広いことを示唆して

* 日立製作所日立工場

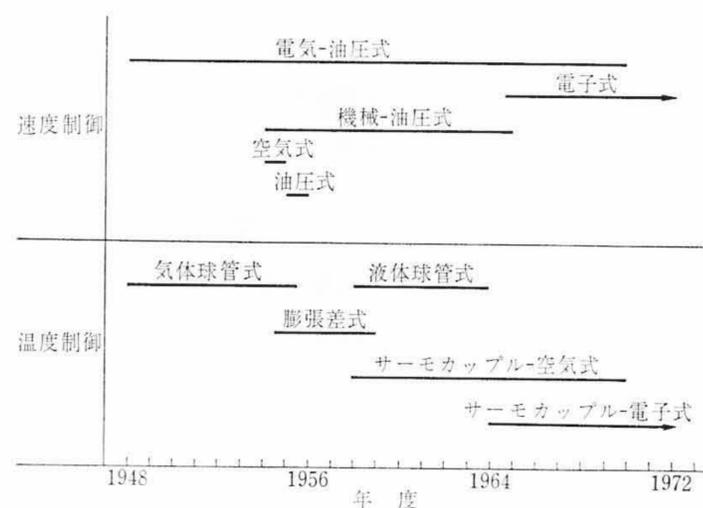


図1 制御装置の変遷

いる。すなわち制御量の選択により特殊な用途への利用も可能となるからである。

ここでは基本的な燃料量を操作量とする1軸発電用ガスタービン、および風量調整も可能とした2軸発電用ガスタービンについて述べる。

1軸、2軸のいずれにしろ、ガスタービンの制御の基本は、負荷に応じて速度およびタービン入口温度を制御することである。これらは直接的には、タービンに流入する燃料流量を調整して行なっている。ただ2軸式の場合には風量も制御できるようになっており、これは第2段ノズルの開度を調整して行なっている。

ガスタービンの制御装置は大きく分けると、次の5つの構成要素に類別できる。

- (1) 起動制御装置
- (2) 燃料制御装置
- (3) ノズル制御装置
- (4) 排気温度制御装置
- (5) 保安装置

図2にこれらの構成要素よりなる発電用1軸ガスタービンの制御系を示す。1軸の制御系は、負荷に関連する速度と排気温度を制御量とし、燃料流量を操作量とする閉ループ系より形成されているが、2軸においては、このほかに風量に関連する圧縮機用タービンの速度を制御量とし、第2段ノズルの開度を操作量とする閉ループ系があり、これら両閉ループ系の合成で形成されている。

ここで注意すべきは、排気温度制御系は排気温度が制限値以上、あるいは温度上昇率が制限値以上になったときにのみ制御操作を行ない、速度制御に優先して燃料流量を制御するが、温度が制限値以内にあるときは制御操作を行なわない。したがってガスタービンにお

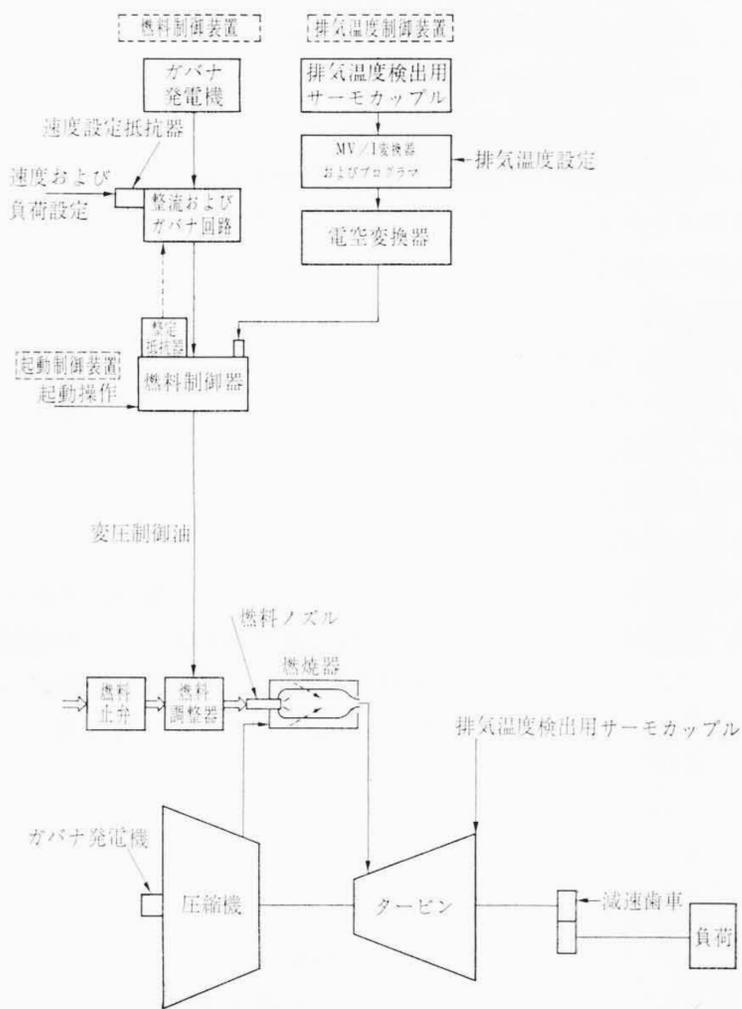


図2 1軸ガスタービン制御系統図

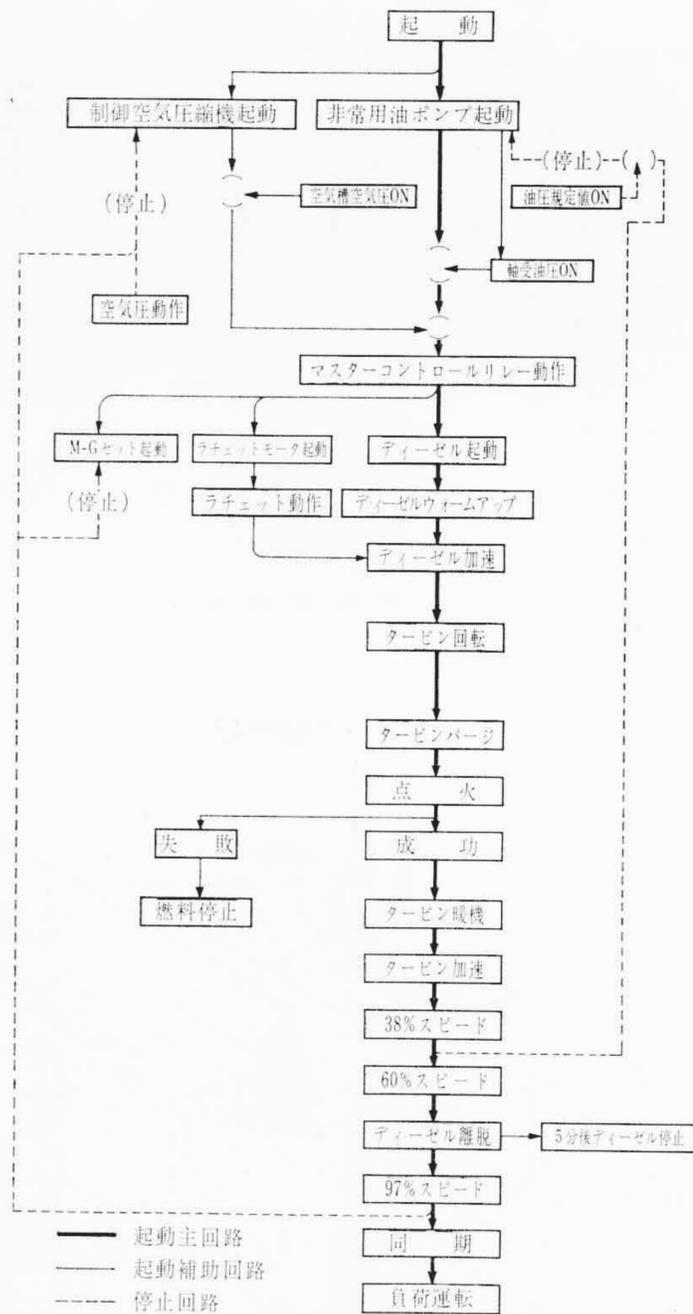


図4 1軸ガスタービン起動ブロック線図

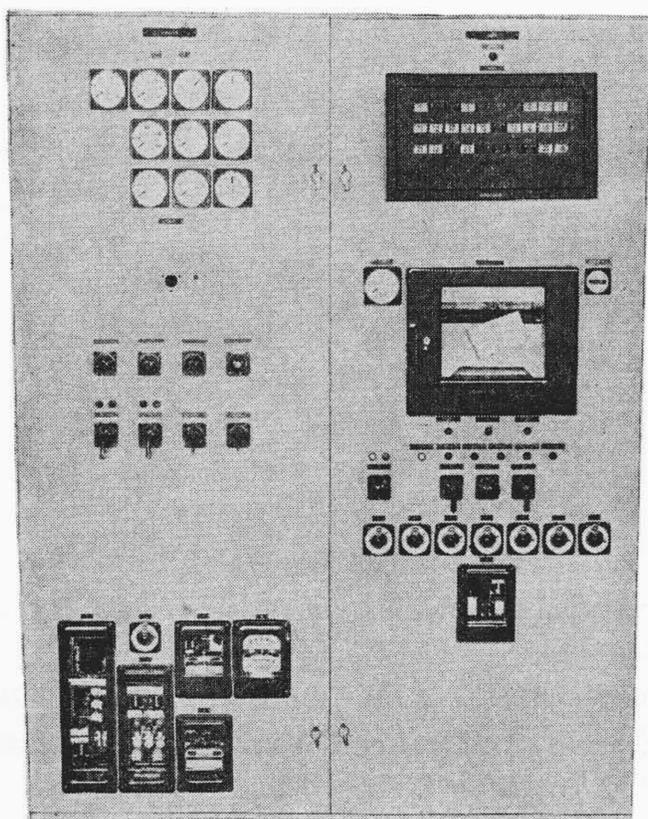


図3 タービン制御盤および発電機制御盤

いては、ノズル制御も含めて速度制御があくまで制御の基本となっているということが出来る。

速度制御の特長とするところは、いわゆる電気ガバナを使用していることである。電気ガバナは、これまでの機械的なガバナとよく比較されるが、主要部品にガバナ発電機、電気回路、抵抗器、ソレノイドなど性能がよく、静止部分の多い電気要素が使用されているため、応答性、安定性、耐久性にすぐれ、さらに広範囲な速度制御や自動化に適しているなどの利点もある。電気ガバナの優秀性については、すでにこれまでの実績によって確認されているが⁽¹⁾⁽²⁾、後述する日立製作所における実機の運転実績によっても明らかである。

2.1 起動制御装置

起動制御装置は、タービンの起動、停止ならびに常時の運転管理を行なう装置で、必要な機器はすべてタービン制御盤、発電機制御盤、モータコントロールセンタに取り付けられている。またタービンや発電機に備えられている各計測接点およびガバナ回路、補機駆動回路はすべて電氣的にこれらの制御盤に接続されている。図3はタービン制御盤および発電機制御盤の正面図である。

起動および停止は、盤上のマスタースイッチにより、シーケンシャルに自動的に行なわれる。図4は1軸機の代表的な起動ブロック線図である。

ガスタービンの特長の一つとして急速起動があげられるが、ガスタービンは、はじめディーゼルなどの起動装置により回転され、その後着火や加速をへて無負荷定格回転に至り、さらに手動あるいは自動的に全負荷に上昇されるが、この間の時間は通常運転では約10分前後である。このほか特殊な急速起動もあり、起動装置の出力増加やガバナモータのスピードアップなどを行ない約6分前後で全負荷に上昇することができる。一方タービンのガバナ側には負荷上昇率を制限する機構があるが、これは排気温度制御装置によって行なわれ、通常瞬時約25%定格負荷上昇を許し、その後は1秒間に約2%定格負荷の割合で上昇するようになっている。この場合も、タービンの寿命や負荷の条件などを十分考慮して、瞬時100%上昇に調整することができる。

このほかガスタービンの起動の特長としては、マルチプルスタートおよびブラックスタートをあげることができる。前者は起動に失

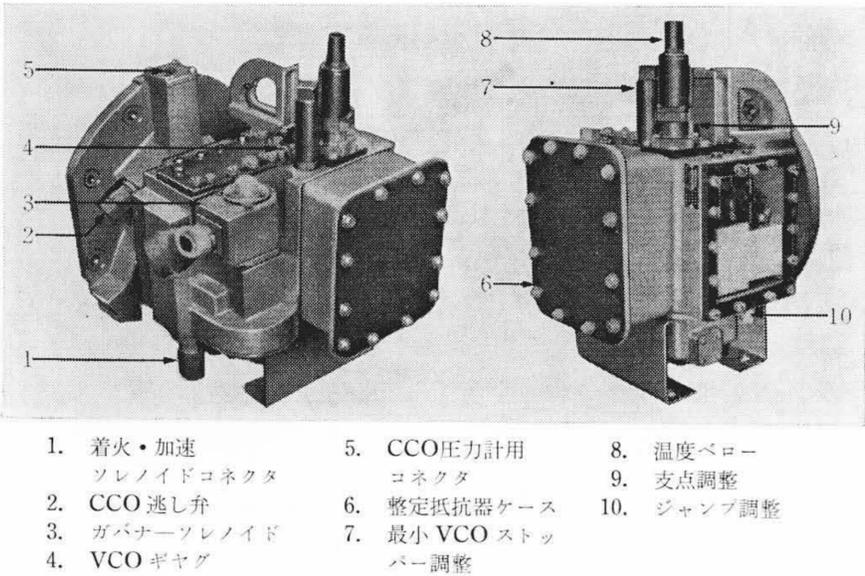


図5 燃料制御器

起動信号や速度、負荷、温度信号を受信し、これらを油圧出力に変換している。油圧出力は変圧制御油(VCO)と呼ばれるもので、液体燃料系においては燃料ポンプのストロークを決定し、ガス体燃料系においては燃料ガス制御弁の開度を決定している。

図5に燃料制御器の外観を、図6に機能図を示す。

制御器はタービンに直結するギヤを介して駆動されているが、これは制御に必要な定圧制御油(CCO)を発生するためで、このCCOは、VCOパイロット弁やVCOピストンを含むレバー機構でVCOに変換される。VCOの油圧はVCOレバーの位置によって決定されるが、VCOパイロット弁を支点として時計方向の回転でVCO圧力は上昇し、反時計方向の回転でVCO圧力は減少する。

制御器の制御動作は次のように行なわれる。

(1) 起動時の制御

内蔵される二つのポジショニングソレノイドがあり、それぞれ着火、加速時にシーケンシャルに励磁され、VCOレバーの位置を決定しVCOを発生する。通常の運転においては両者とも励磁されており、速度および温度制御はVCOレバーの右端部を下からささえる形で行なわれる。

(2) 速度制御

速度制御は、ガバナ発電機、速度設定抵抗器、ソレノイド駆動ガバナパイロット弁のコイルを直列配置した電気回路およびガバナパイロット弁、ガバナピストンを含む油圧サーボ機構からなる電気油圧式速度ガバナで行なわれる。ガバナパイロット弁のソレノイドには整定コイルと制御コイルが並列に組み立てられており、整定コイルの回路でガバナピストンの動きをガバナパイロット弁にフィードバックしている。この回路には調定率設定抵抗器およびガバナピストンによって動かされる整定抵抗器があり、速度ガバナの調定率を定めている。

速度制御はガバナ発電機で速度を検出し、この速度信号を速度設定抵抗器で定められる電気回路に流し、回路に電流偏差が生ずると、これを電気油圧変換機構からなるガバナパイロット弁に伝え、油圧、レバー機構を介してカムによりVCOレバーを操作し、偏差を是正する方向にVCO出力信号を発生するようになっている。

この機構において、速度あるいは負荷はガバナモータ駆動の速度設定抵抗器により決定される。調定率は調定率設定抵抗器により決定される。通常調定率は4~5%とされている。

電気ガバナによる速度制御方式は、原理的には機械的なガバナと変わらない。しかし各要素に応答性がよく、静止部分の多い電気部品や電気回路を使用しているため、高性能で取り扱いの容易な装置となっている。たとえば速度ガバナの感度は0.06%以上となっており、また抵抗器の増減により調定率、速度、負荷の選択が自由に、かつ容易に行なわれる。

(3) 温度制御

温度制御は、サーモカップル、MV/I変換器、電空変換器を含む温度制御装置および燃料制御器内にある温度ペロー、温度パイロット弁、温度ピストン、比率パイロット弁、比率ピストンからなる温度サーボ機構で行なわれる。

温度制御装置は、サーモカップルで検出した排気温度を電圧—電流変換器、電流—空気変換器を介して、空気圧信号として燃料

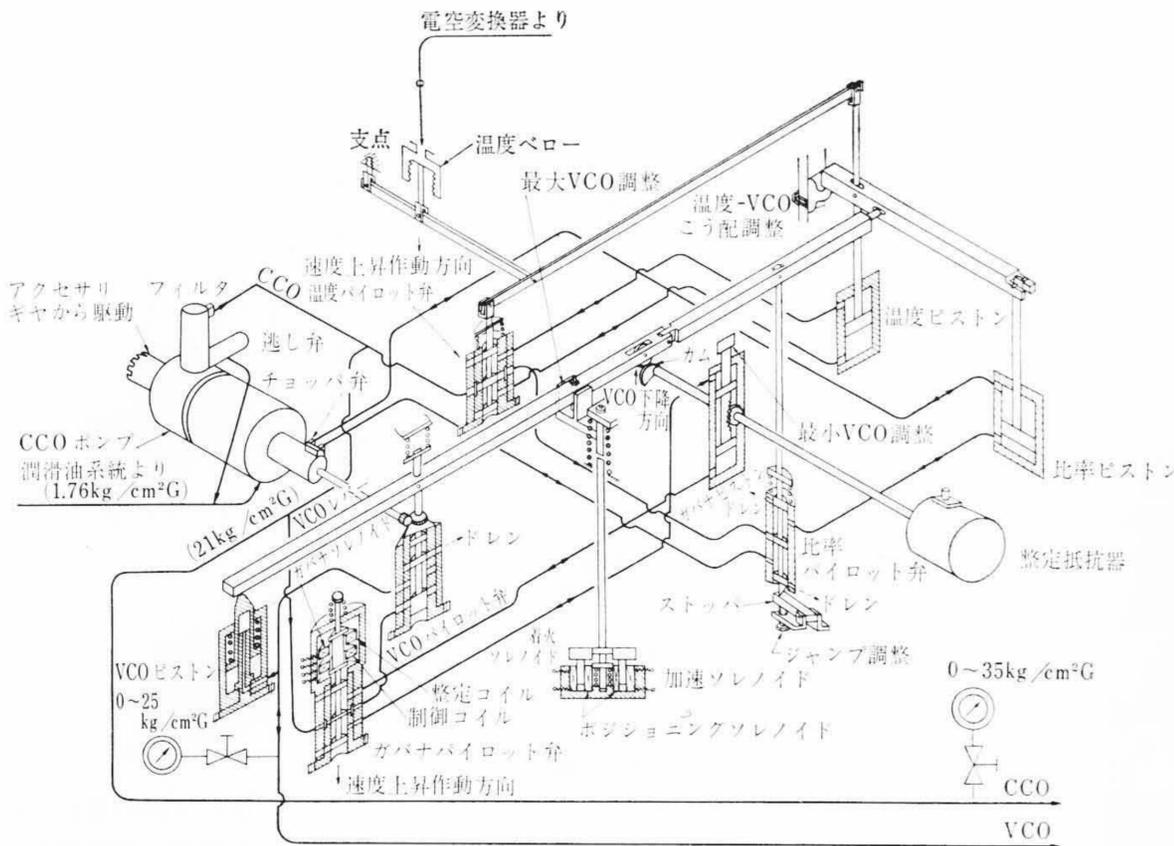


図6 燃料制御器機能図

敗しても、数回再起動を自動的にくり返して成功させることである。また後者はいっさいの外部電源なしでガスタービンを起動することである。

2.2 燃料制御装置

燃料制御装置は、図2に示すような系統に構成されており、次のような制御操作を行なうものである。

- (1) 起動時に必要な燃料の調整
- (2) 負荷タービンの速度に応じた燃料の調整
- (3) 排気温度およびその上昇率が制限内になるような燃料の調整

燃料制御装置は、ガバナ発電機、ガバナ回路、排気温度制御装置、燃料制御器、燃料調整器を主要機器とする電気・油圧・空気式制御装置で、特に燃料制御器がその心臓部にあたる機能を果たしている。

燃料制御器には、ガバナサーボ、起動燃料制限器、温度サーボがあり、それぞれの検出器や回路を介して信号を受け、これらを油圧出力信号に変換して燃料調整器に送りだしている。燃料調整器は油圧信号を受けて、タービンに流入する燃料流量を決定するものである。

2.3 燃料制御器

燃料制御器は、小形精密化された高精度電気油圧式サーボ機構で、

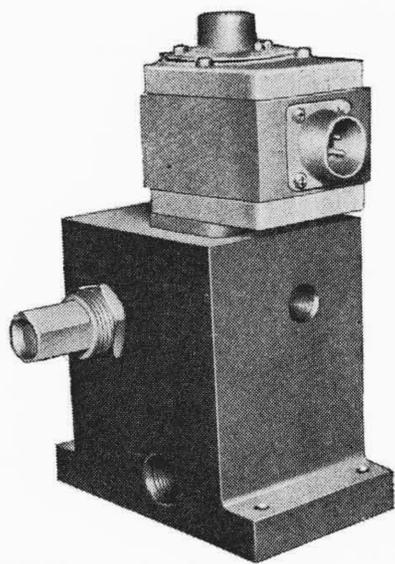


図7 ノズル制御器

制御器に伝えるものであるが、この空気圧に変換された温度信号は、燃料制御器に導入されると、温度サーボ機構を介して温度制限あるいは温度上昇率制限を行なう。

温度制限は、空気圧力に変換された温度信号によりベローが変位し、この変位が温度パイロット弁、温度ピストンを含む油圧、レバー機構により VCO レバーに伝えられ、VCO を制限するものである。温度が制限値を越えると、温度油圧・レバー機構は速度制御に優先して VCO レバーの右端部を持ちあげ、VCO を制限する。ただし温度が制限値以内にあるときは、VCO レバーの位置を制限することはできず、速度制御がそのまま行なわれる。

温度上昇率制限は、温度ピストンと比率ピストンの位置に関連し、VCO レバーの右端部の下降率を制限し、VCO の増加率を制限するものである。速度制御により、カムを通じて急激に多量の VCO 増加が要求されると、VCO レバーの右端部は比率パイロット弁のジャンプ設定に応ずる位置までは瞬時に下がることができるが、その後は温度ピストンと比率ピストンの動きに応ずる速度でしか下がることができない。比率パイロット弁と比率ピストンを結ぶ油圧回路には一定流量でしか油圧を通さないチョッパー弁が設けられており、比率ピストンの上昇速度および下降速度を定めている。ただし比率ピストンは VCO の増加時すなわち比率ピストンの上昇時のみ有効に働き、VCO の減少時にはレバー機構からはずされ、影響を及ぼさないようにされている。

通常温度上昇率は、ジャンプ設定を 25% 定格負荷相当とし、その後の上昇率を 1 秒間に 2% 定格負荷相当としている。

2.4 ノズル制御装置

ノズル制御装置は、2 軸タービン独特のもので、圧縮機用タービンと負荷タービンの間にある第 2 段ノズルの開口面積を変化させ、両タービンのエネルギー分配を調整し、圧縮機用タービンの速度を制御するものである。この速度制御により、圧縮機で発生する風量が調整され、ガスタービンは負荷に関係なく常に適切な風量で運転され、部分負荷時の効率を高めたり、あるいは産業用の利用においては、プロセスで要求される定温度高温排気ガスや定流量高温排気ガスを取り出すことも可能である。

ノズル制御装置は、圧縮機用タービンの速度ガバナに相当するもので、制御方式、構造とも燃料制御器の速度制御系によく似ている。

制御系は圧縮機用ガバナ発電機、速度設定抵抗器、ソレノイド駆動油圧パイロット弁のコイルを直列に配置した電気回路およびソレノイド駆動油圧パイロット弁、油圧ピストンを含む油圧サーボ機構で構成されている。ソレノイド駆動パイロット弁には並列に組まれた整定コイルおよび制御コイルがあり、整定コイルの回路で油圧ピ

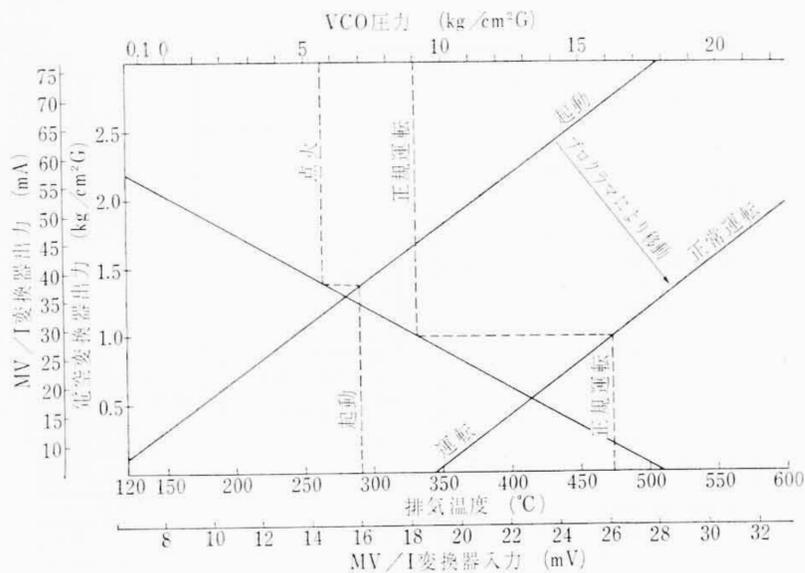


図8 排気温度—VCO 圧力特性

ストンの動きをパイロット弁にフィードバックしている。この回路には、調定率設定抵抗器および油圧ピストンによって動かされる整定抵抗器があり、圧縮機用ガバナの調定率を定めている。通常ノズル制御装置の調定率は 7~8% とされている。

ノズル制御装置のソレノイド駆動油圧パイロット弁は、ノズル制御器と呼ばれるもので、非常に精密な電気油圧変換機構により構成されている。図 7 はノズル制御器の外観である。油圧ピストンはノズル操作器と呼ばれており、ノズル制御器の油圧出力(NCO)を受け、タービン第 2 段ノズルの開度を操作している。

2.5 排気温度制御装置

排気温度制御装置は、タービン高温部を保護するためにタービン入口温度を検出し、これを制限する装置である。しかし入口温度はばらつきが大きく、また高温のため、計測器の精度や寿命にも問題が発生しやすく、直接計することは不可能である。したがって計測が容易で、かつ入口温度の関数として表われる排気温度を代わりに検出し、これにより温度制限を行なっている。

排気温度制御装置は、図 2 に示すような系統に構成されており、サーモカップル、MV/I 変換器、プログラマ、電空変換器、燃料制御器をおもな機器としている。MV/I 変換が特に重要な機能を果たしている。これは半導体電子式増幅器で、mV 入力を mA 電流出力に変換している。この変換は、負帰還増幅器を含むサーボ形式の回路で行なわれ、増幅の範囲は、変換器の出力側に接続されている電動可変抵抗式プログラマにより設定される。

本装置は、原理的には電子式変換器を介する温度—空気圧変換器で、排気温度信号を空気圧として燃料制御器に供給するものである。燃料制御器では、空気圧信号を受け前述温度サーボによる VCO 制限が行なわれ、タービンに流入する燃料流量を制限している。

排気温度制御装置は、正常運転時の温度制限以外に、起動時の運転管理も行なっている。これは起動の初めに温度制限位置を低位置に設定しておき、起動の進行にしたがい計画的に正常位置まで上昇するもので、この操作により起動の進行の位置に応じた温度制限を行なうことができる。この操作は MV/I 変換器の出力側に置かれているプログラマによって行なわれる。

図 8 は排気温度—VCO 圧力特性の一例を示したものである。

2.6 保安装置

保安装置はガスタービンの制御装置の一部として備えられるもので、制御装置が適切な運転を保持できなくなったときに、警報を発したり、タービンを遮断したりするものである。図 9 は 1 軸機の遮断回路の一例を示したものである。

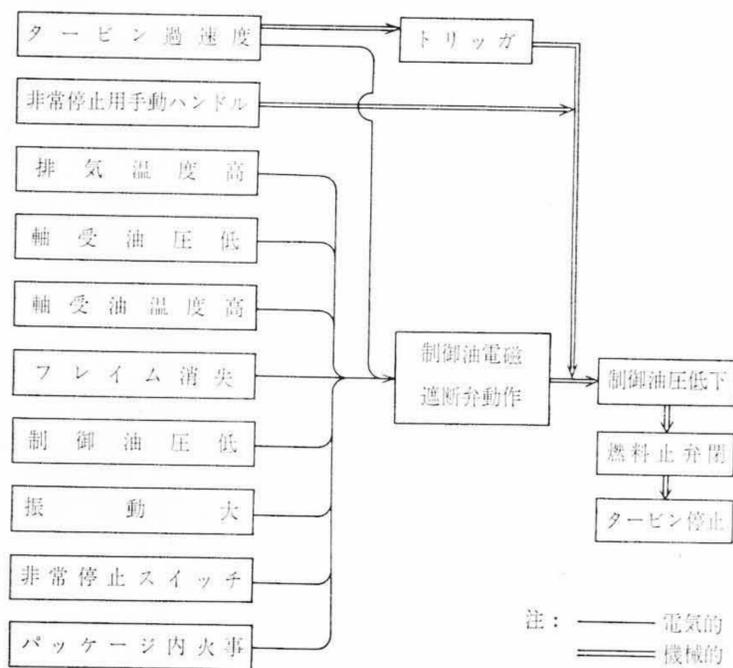


図9 1軸ガスタービン遮断系統ブロック線図

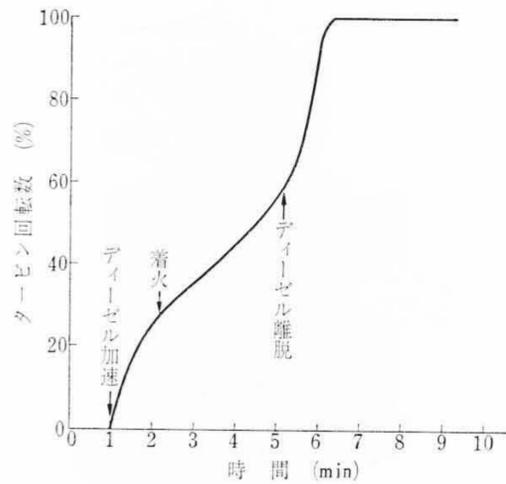


図11 1軸ガスタービン起動特性

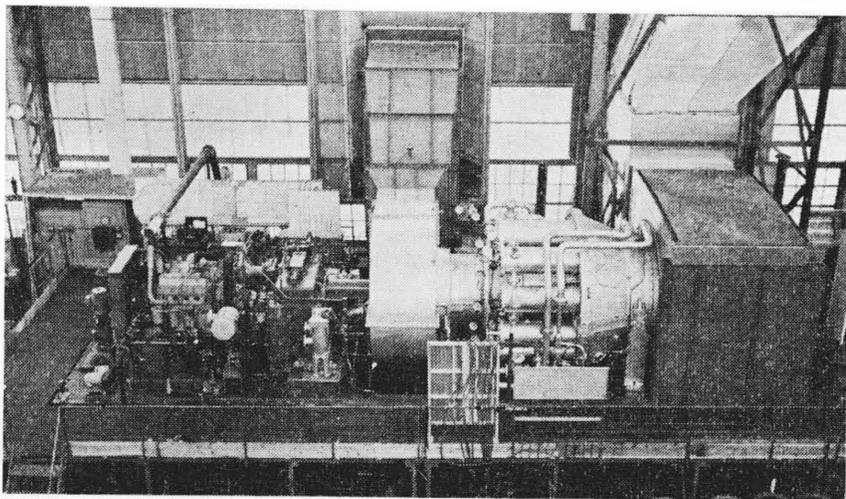


図10 1軸14,000 kW ガスタービン

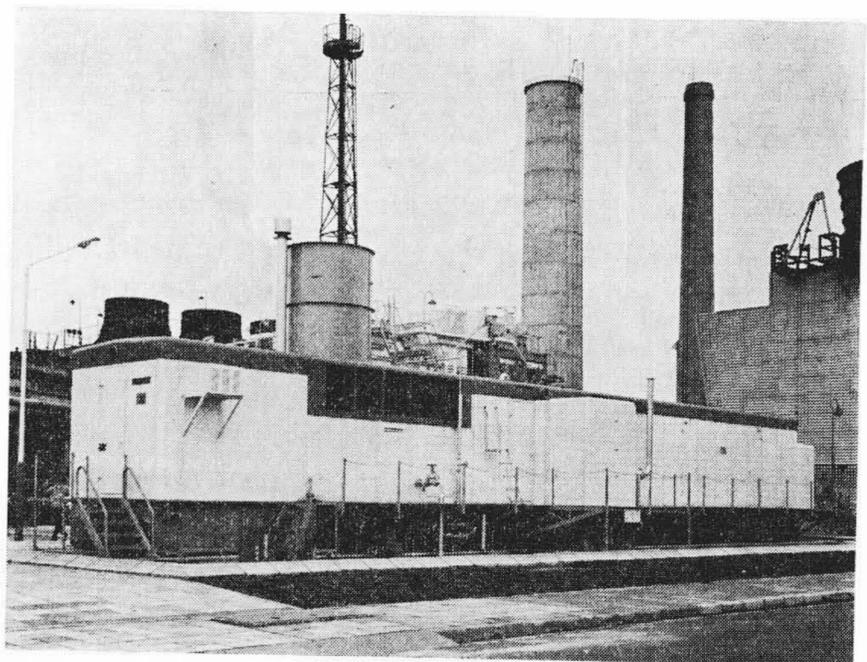


図12 2軸6,000 kW パッケージ形ガスタービン

3. 実施例

3.1 1軸ガスタービン

日立製作所では、昭和42年11月に、クエートのアメリカンインデペンデントオイル会社納14,000 kW ガスタービンを完成したが、そのおもな仕様は下記のようにになっている。

| | |
|--------|----------------------------|
| 形式 | 単サイクル1軸一屋内式 |
| 出力 | 定格14,000 kW (ピーク16,250 kW) |
| 標準外気条件 | 圧力14.17 PSIA 温度80°F |
| 回転数 | 5,100 rpm |
| 減速比 | 3,600/5,100 (60 Hz) |
| 燃料 | 天然ガス |
| 排気ガス温度 | 895°F |

図10は本機の工場試運転時の外観図である。

本機の運転操作は前項までに述べた典型的な1軸機の制御機構によって行なわれる。運転はすべてシーケンシャルに行なわれ、速度、負荷、温度の制御は、電気、油圧、空気式制御装置により安定した機能が得られるようになっている。

本機の起動特性は、図11に示すように計画されているが、工場試運転結果では、計画どおりの良好な特性が得られた。工場試運転では、このほか無負荷運転特性、過速度遮断特性などが行なわれたが、十分満足のできる成績が得られた。

3.2 2軸ガスタービン

わが国における初めての本格的パッケージ形ガスタービンが、41

年6月に完成し、日本石油化学株式会社に納められたが、これは2軸6,000 kW パッケージ形ガスタービンで、非常に特色のある設計とされている⁽³⁾。本機のおもな仕様は下記のようにになっている。

| | |
|--------|--|
| 形式 | 単サイクル2軸一排熱ボイラ付 |
| 出力 | 定格6,000 kW |
| 標準外気温度 | 圧力1,033 kg/cm ² A 温度15°C |
| 排気ガス温度 | 474°C |
| 回転数 | 圧縮機用タービン 6,900 rpm 負荷タービン 6,000 rpm |
| 減速比 | 3,000/6,000 (50 Hz) |
| 燃料 | 石油分解ガス |

本機は営業運転開始以来、すでに2年間に及ぶ運転を続け、予期どおりの好成績を示している。図12はその外観である。

運転制御には、起動停止の自動化および電気、油圧、空気式制御装置による速度および負荷の制御以外に2段ノズルの調整による風量制御も行なわれるようになっている。

図13は現地運転時の起動特性オンシログラムであるが、ディーゼルによる起動から、起動制御装置、温度制限装置による回転数上昇、さらに速度制御装置による回転数制御が非常に良好な特性で示されている。

本機は2軸機のため負荷タービンの時定数が小さく、4/4負荷遮断時に、負荷タービンが過速度点を越す不可避な欠点を有するが、これを先行非常調速機を使用することにより防止している。走行非常調速機は、負荷タービンの約103%速度で作動し、負荷タービンの

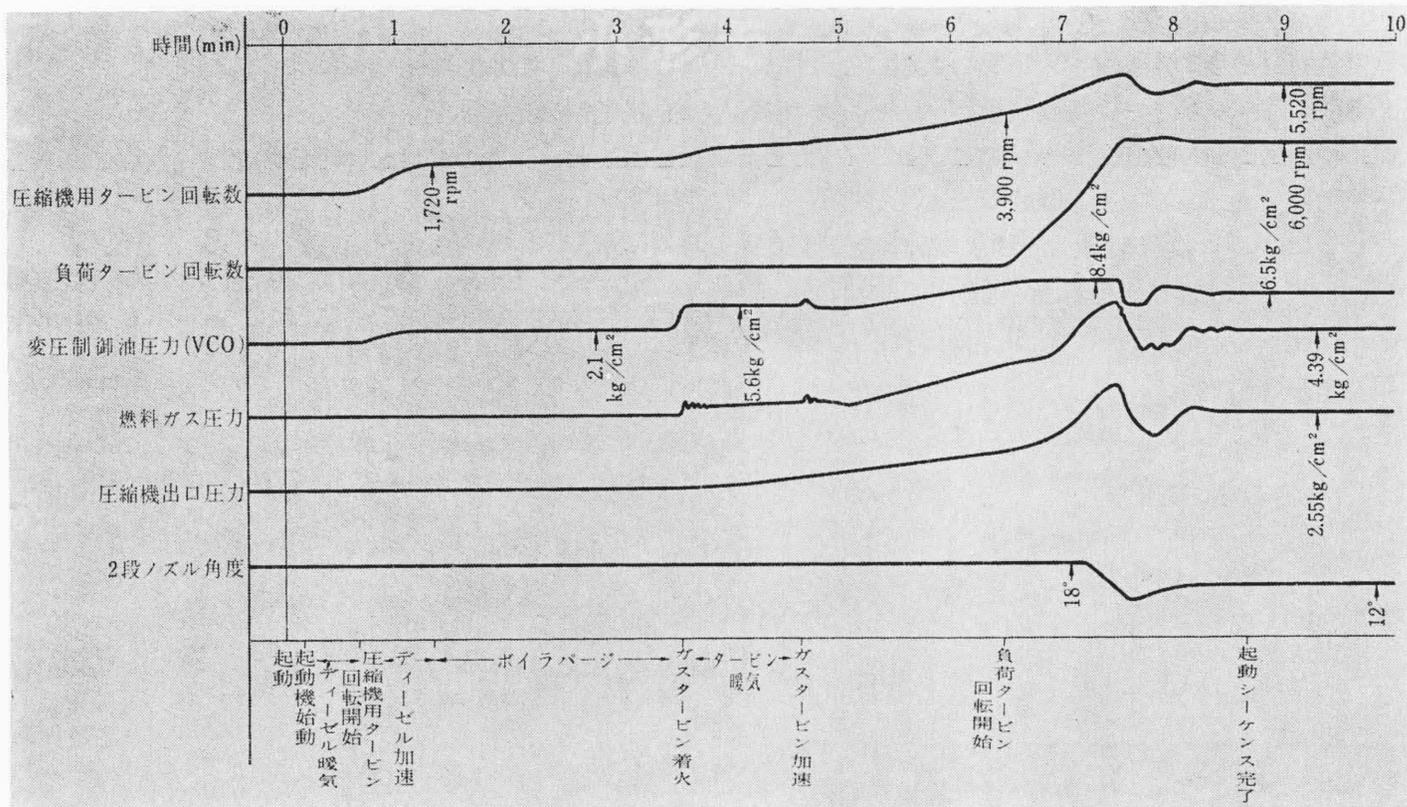


図 13 2軸ガスタービン起動特性

ガバナ回路の速度設定抵抗器を短絡し、急激な燃料減少を図るとともに、圧縮機出口圧の一部を大気に開放し、さらに2段ノズルを全開して、負荷タービンへのエネルギーの流入を減少する。遮断時の圧縮空気放出量は、実験的な確認に基づき約30%としてある。図14は先行非常調速機の作動回路、図15は現地における負荷遮断時のオシログラムである。遮断後の過速度特性は非常に良好で、約8.2%の最大過速度が示されたのち、漸次無負荷整定位置に向かっている。

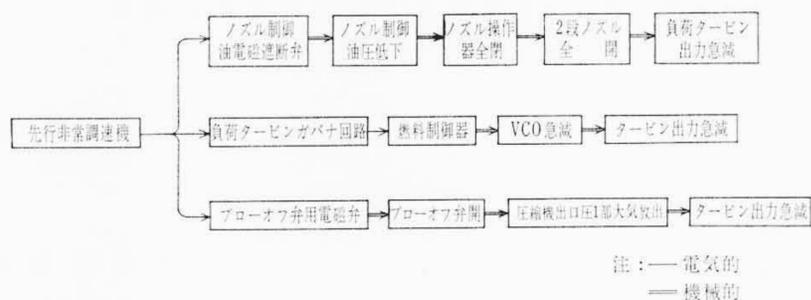


図 14 2軸ガスタービン先行非常調速機系統ブロック線図

本機の燃料には、石油分解ガスが主燃料として使用されているが、エチレンガスも燃焼できるように計画されている。両燃料は同一燃料供給系で使用されるようになっており、そのため燃料供給系には特殊な圧力比率調整装置が設けられている。元来大幅に発熱量の異なるガス燃料体を同一燃料供給系に使用するのは困難なことだとされているが、特殊圧力比率調整装置を設けることによってこの問題を解決した。圧力比率調整装置は、燃料制御弁の流量特性を定める重要な装置で、圧力比率弁およびPI調節器を含む制御装置で、燃料制御弁前の圧力を圧縮機出口圧に比例するように調整するものであるが、本機ではこの圧力比率調整装置の制御装置に特殊な切換装置を設け、運転中に圧力比率を石油分解ガス系と、エチレン系に切り換えるようになっている。さらにこの2系統は、3方切換弁一つで切り換えられるようにされている。また切換はボリュームタンクを含む一次おくれ系を介し、安定した切換特性が得られるように計画されている。図16は本装置による切換試験のオシログラムである。図にみられるように切換特性は計画どおり良好なものである。

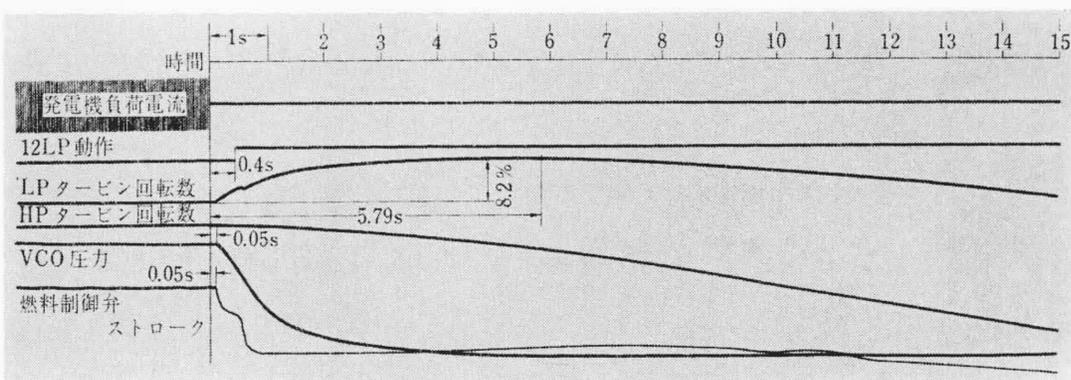


図 15 2軸ガスタービン負荷遮断特性

本特殊燃料供給系の使用により、本機は、使用者側の経済性に沿った自由な燃料選択ができる特異なガスタービンとして利用されている。

4. 結 言

以上がガスタービン制御装置の構造、機能および特長

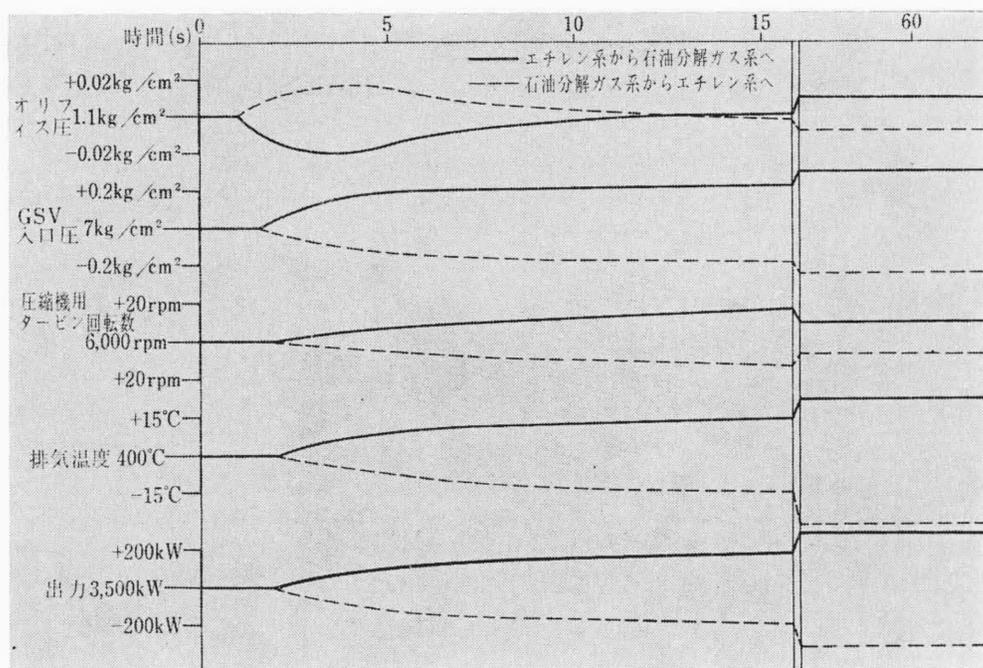


図 16 燃 料 切 換 特 性

について述べたが、これを要約すると次のようになる。

- (1) 制御装置は電気品の多い高精度、長寿命の装置により構成されている。
- (2) 制御装置の中心は電気、油圧、空気式機構よりなる燃料制御器で、速度、負荷および温度制御を行なっている。
- (3) 2軸機の場合には、別に電気油圧式ノズル制御装置があり、圧縮機用タービンの速度制御を行なっている。
- (4) 実機による試験および運転実績の結果、制御装置は計画どおり安定した特性を示した。

われわれは、現在、すでに非常に精密な機構よりなる燃料制御器の国産化に成功しているが、さらに制御系の将来の姿とされている全電子制御化の開発も進めており、今後のガスタービンの進歩に対応する制御装置の高級化に十分対処する所存である。

参 考 文 献

- (1) J. M. Baker: ASME, Paper 64-WA/GTP-9
- (2) N. G. Alvis: Tr. ASME, Journal of Engineering for Power, p. 243~250 (July 1966)
- (3) 加藤, 岸野, 目黒: 日立評論 48, 1392 (昭41-12)

Vol. 29 日立造船技報 No. 2
目 次

■ 論 文

- 高負荷燃焼器における燃焼用空気の供給装置
- 41~60 kg/mm² 級耐候性鋼の溶接施工法
- 水中過渡アーク放電による極性電極消耗について
- スラミングの実船計測について

- 冷凍貨物船の冷風吹出しグレーティングについて
- すぐ歯平歯車の疲れ試験(その1)
一歯の曲げ強さについて
- フィッシュン・エレクトリック・セル
一予備実験

……本誌に関する照会は下記に願います……

日立造船株式会社技術研究所
大阪市此花区桜島北之町 60 郵便番号 554

第30巻 日立 第10号
目 次

- 随想 / 海洋開発と中谷さんの手紙……宇 多 道 隆
- 座談会: 壁掛テレビも夢ではない
- グラフ: チャレンジ! —LTPトランジスタ開発のドラマ—
- 解説: LTP トランジスタ
- MIS時代への招待 —日立のHIMICS戦略—
- モータリゼーションの波とともに

- ルポ: 日本語もなっています
- せり機械化への布石
- 万博シリーズ / 富士グループ館
- 話のロビー / “125日間テレビ受難の旅”を終えて
- High Light / 大空をきれいにする
- COLOR SPOT / あやしく冷たく
- サイエンスジョッキー

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内1丁目4番地
郵便番号100
取次店 株式会社オーム社書店 振替口座 東京71824番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号101
振替口座 東京20018番