

パッケージ形ガスタービンとその応用

Package Type Gas Turbine and its Application

加 藤 正 敏*
Masatoshi Katô

内 容 梗 概

近年ガスタービンの需要は世界的規模で急速に伸展しつつある。日立製作所は昨年、世界最大のガスタービンメーカーであるアメリカGE社と共同製作協定を結び、ガスタービンの製作体制を確立した。

新しくGE社で開発されたパッケージ形ガスタービンは、従来のこの種の原動機に対する概念を全く一新する画期的設計になるもので、今後わが国においても、その需要増大が予測せられているものである。

本文は、このパッケージ形ガスタービンの概要を紹介し、あわせて二、三の応用例について述べたものである。

1. 緒 言

電力の需要形態の近代化に対処して、あるいは一般産業の設備合理化の一環として、新しい原動機としてのガスタービンの特長を生かした利用方法が各所で検討され、需要増加が見込まれている。一般産業にあってはベースロードあるいは非常用電力として、またポンプ、コンプレッサなどの駆動機として、その特長が生かされる。電力会社においてはピークロード用、へき地発電用、非常用、さらにまたコンバインドサイクル用としてガスタービンの応用範囲は広い。

日立製作所は、これまで多年にわたるガスタービンに関する種々の基礎研究の成果をもとに、昭和39年、世界最大のガスタービンメーカーであるアメリカGE社と共同製作協定を締結し、確固たる製作体制を整えた。この協定はいわば国際分業的性格を有するもので、ガスタービンの回転部分はGE社で製作し、その他の部分を日立製作所が製作し全体の取りまとめを行なうものである。

この協定によって二重投資の回避による生産費の低減と同時に、日立製作所で納入する機器もGE社で大量に生産される機器も、全く同じ信頼性と性能とを備えることになる。

2. 実績と特長

GE社では5万基をこえる航空用ジェットエンジンの製作経験と技術をもとに、陸用ヘビーデューティ開放サイクル形ガスタービンの開発を行ない、1949年に第一号機として3,500 kW ガスタービンを Belle Isle 発電所に納入以来、1964年までに出力1,000 HP 以上のガスタービン約400台を納入している。これは世界中のガスタービン台数の1/4に相当し、世界最大の実績を示すものである。

第1表は1964年までの用途別納入内訳である。

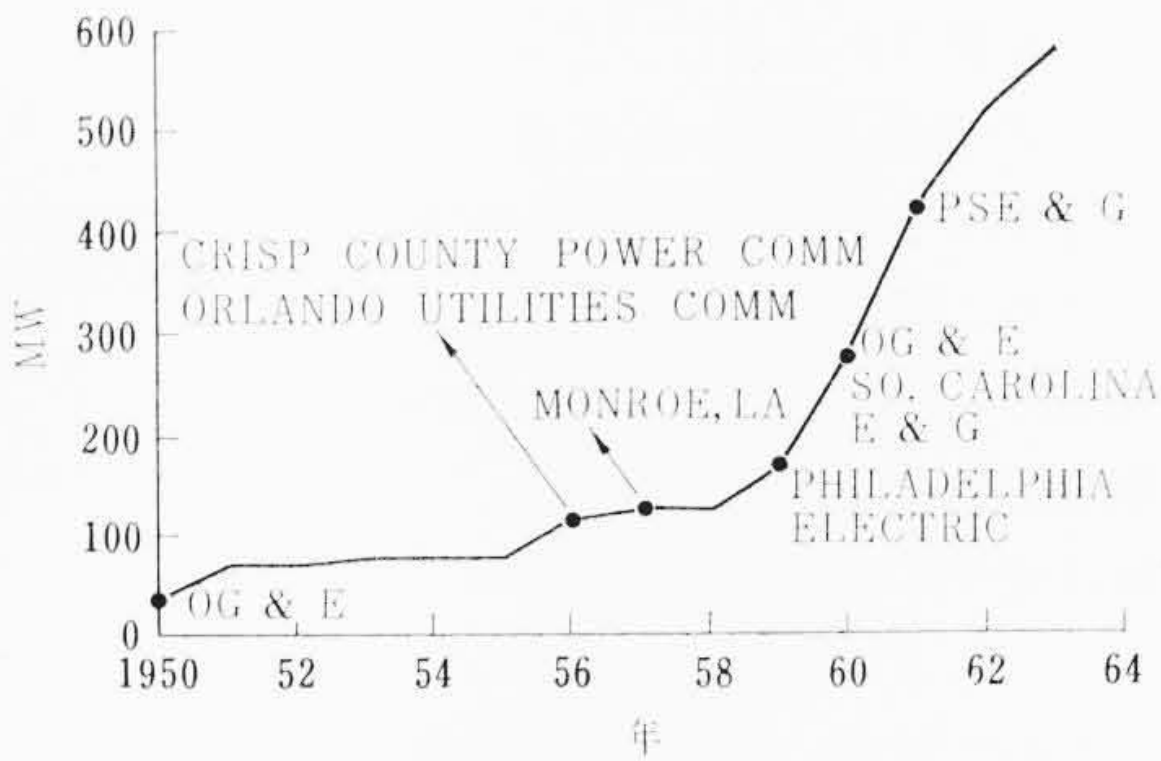
次に、これらのガスタービンの延運転時間についてみるとすでに8万時間以上運転しているものが20台を越え、5万時間以上運転しているものが約200台に達し、その信頼度は99.5%とときわめて高い値を示している。

第1図はアメリカ内の電力会社用ガスタービンの受注実績を年度

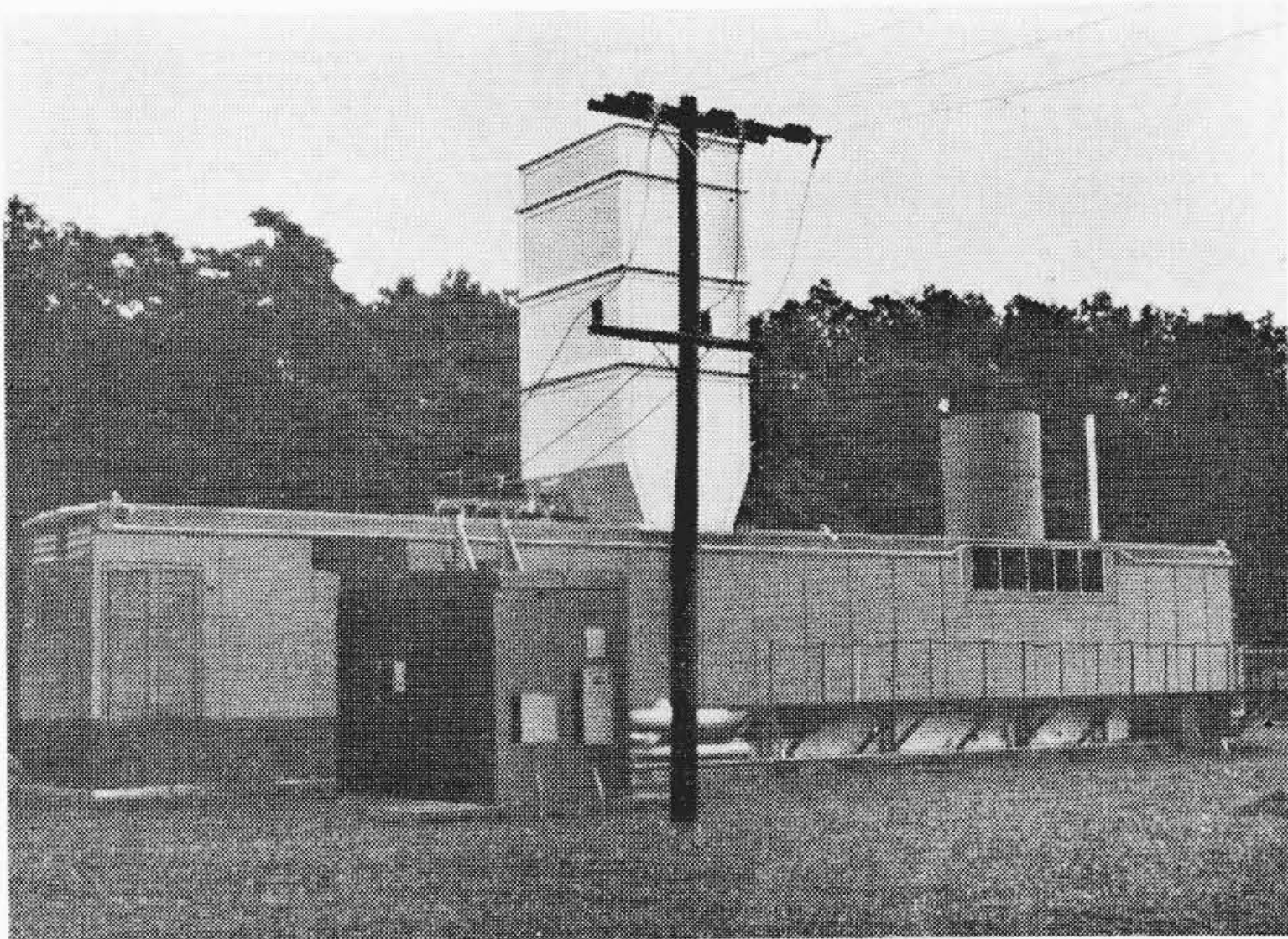
第1表 用途別納入実績

応 用	台 数	kW	HP	総運転時間
機 関 車 用	58	—	394,990	1,472,655
電 力 会 社 用	123	1,331,400	—	521,592
産 業 用—発 電	46	452,850	—	660,112
産業用—圧縮機駆動	52	—	520,050	1,486,518
ガスおよび油圧送用	124	—	819,700	5,098,179
船 用	1	—	6,600	9,690
合 計	404	1,784,250	1,741,340	9,249,106

* 日立製作所日立工場



第1図 アメリカ電力会社用ガスタービン受注実績



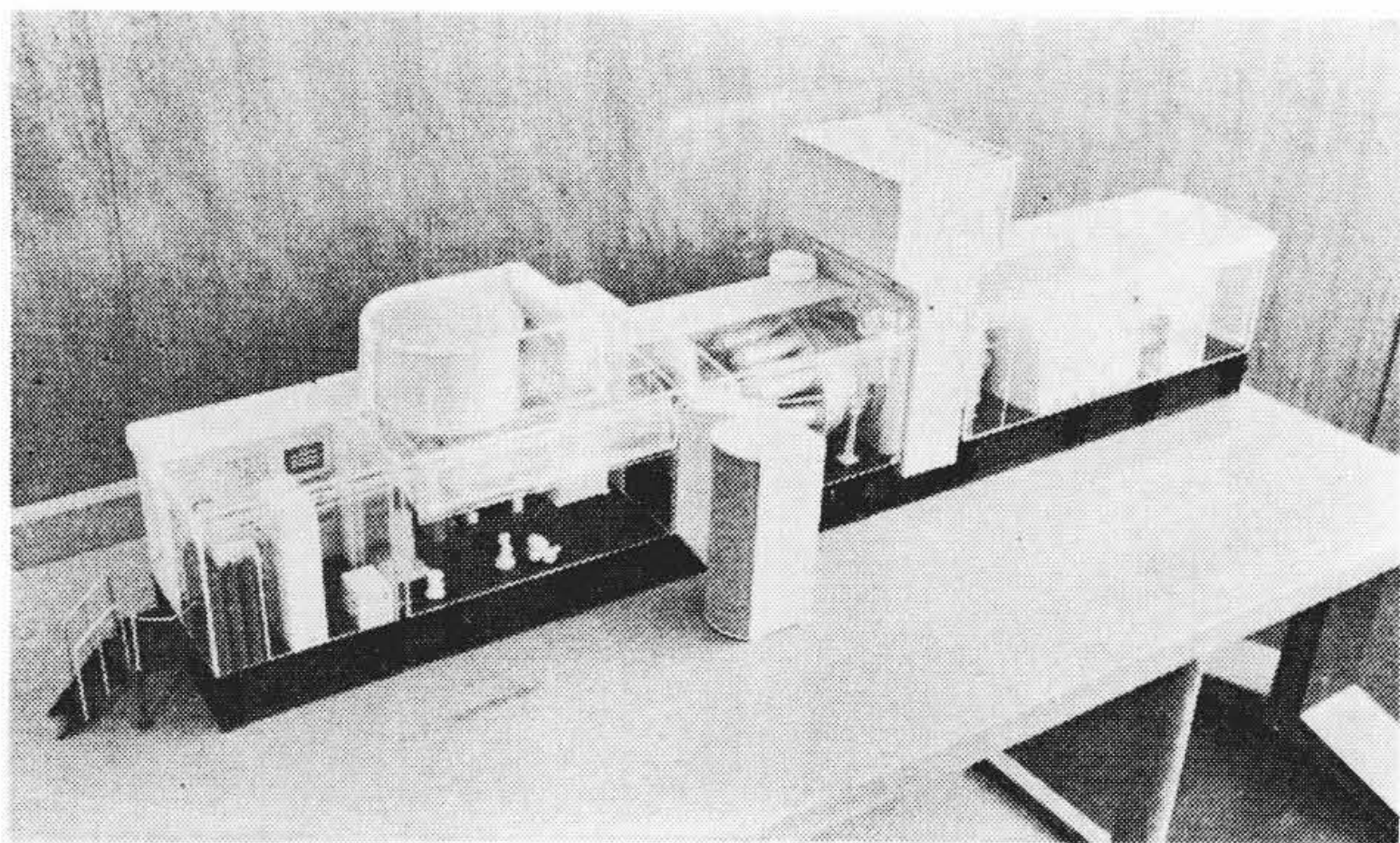
第2図 14,000 kW パッケージ形ガスタービンプラント

別に示したものである。この表からわかることは1959年を境としてGE社のガスタービンは飛躍的に受注量が増大していることである。これは後に述べる画期的な設計になるパッケージ形ガスタービンの開発に負うところが大きく、完全に標準化されたこのパッケージ形ガスタービンの需要は現在、世界的な規模で増大している。

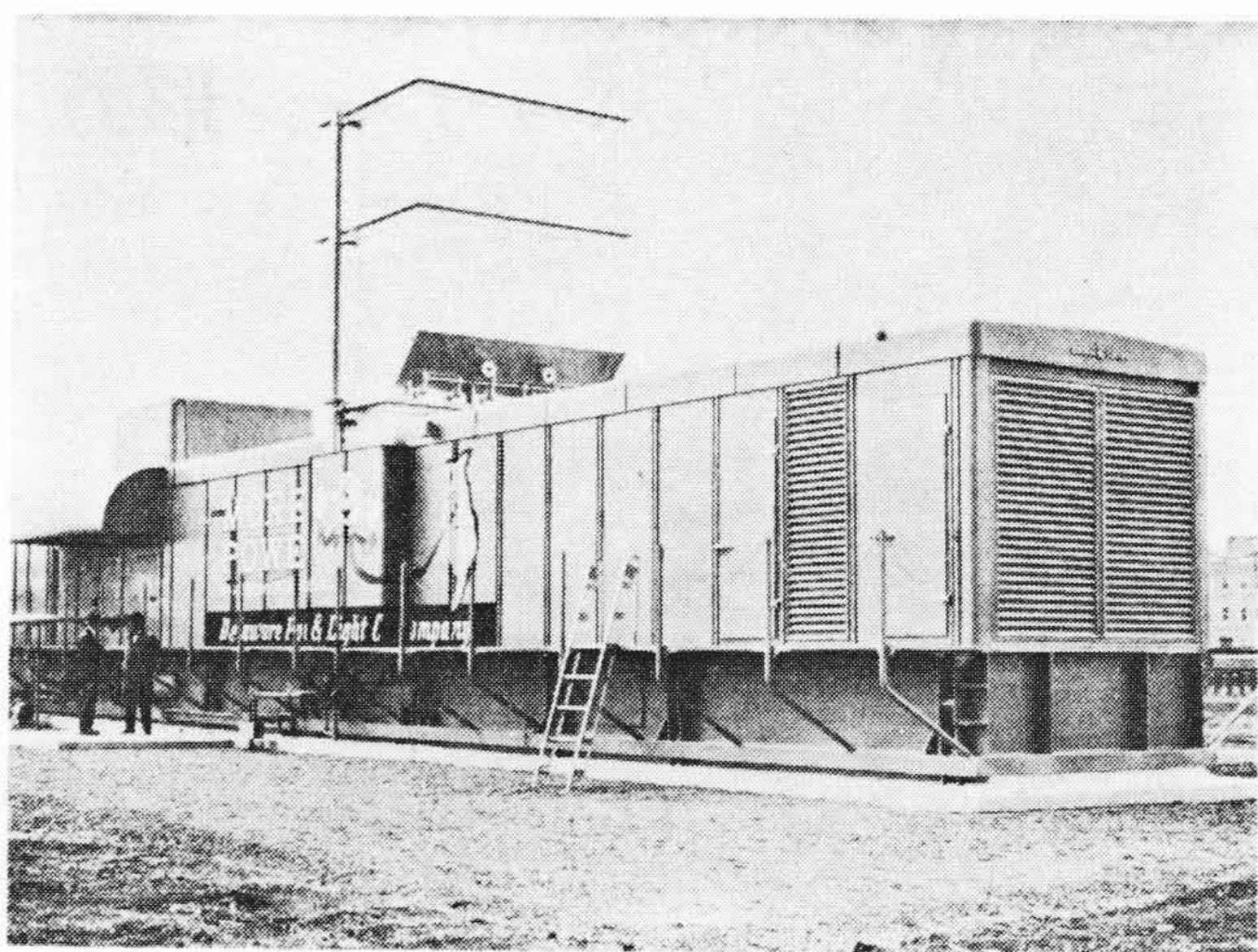
第2図はニューヨーク市郊外約100マイルのGreenportにあるLong Island電力会社に所属する最新の14,000 kW パッケージ形ガスタービンの外観である。この発電所の特長は完全自動化され、常時無人で系統負荷が増大して周波数がある値以下に低下した場合に自動起動し、系統電力を確保するものである。このほか、本社(約100マイル離れたHicksvilleにある)からの遠隔操作によっても起動停止ならびに負荷の制御が可能である。

パッケージ形ガスタービンの特長を要約すると次のとおりである。

(a) 発電に必要ないっさいの機器がパッケージの中におさめら

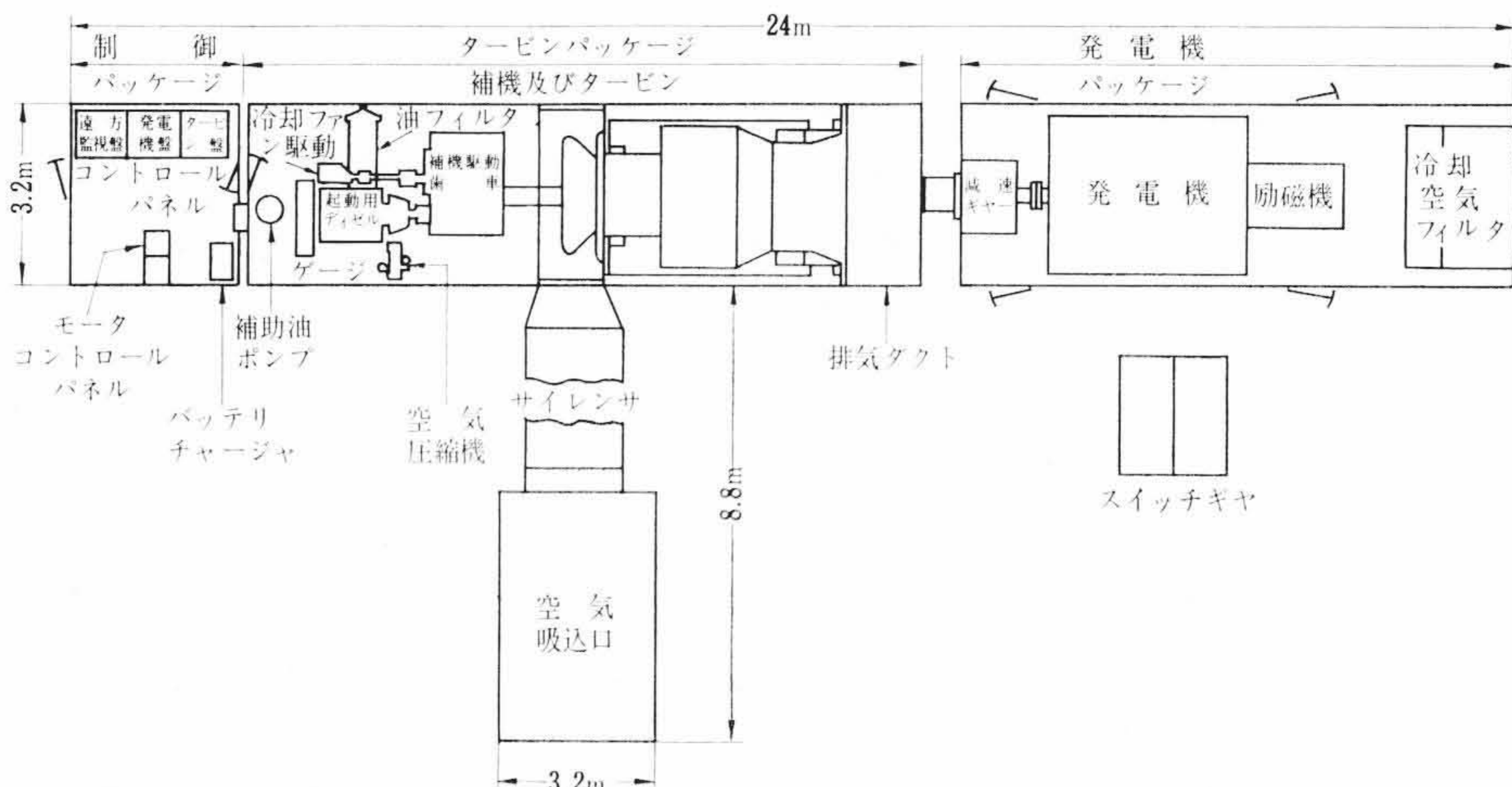


第3図 パッケージ形ガスタービン模型



第5図 11,250 kW パッケージ形ガスタービン

- れており、冷却水、補機用電源などの外部からの供給はまったく不要である。
- (b) わずかの敷地面積しか必要とせず、建屋は不要であり移設も容易にできる。同容量の発電所であれば従来の蒸気プラントの約 1/10 の敷地があれば十分である。
 - (c) 運転は完全に自動化されており、ワンマンあるいはノーマンコントロールができる。また、極端な急速起動、あるいは負荷変動に耐える。
 - (d) 製作工場で完全な組立、試運転を行ない、そのままの姿で現地輸送されるので据付期間を著しく短縮できる。



第4図 パッケージ形ガスタービンプラントの配置

3. パッケージ形ガスタービン

第3図はパッケージ形ガスタービンの模型を、また第4図はその配置を示したものである。これは制御パッケージ、タービンパッケージおよび発電機パッケージよりなり、さらに標準付属機器として吸排気ダクト、消音装置ならびに屋外式メタルクラッドスイッチギヤが含まれている。

現在もっとも需要の多い14,000kWユニットのパッケージ概略寸法は長さ24m、幅3.2m、高さ3.8mである。

3.1 制御パッケージ

制御パッケージには運転に必要ないっさいの制御および指示装置が納められている。このプラントは遠隔無人運転を主眼に設計されたものであるが、現場の制御室でも運転することができ、そのために必要な装置および計器を備えている。制御パッケージは通常タービンパッケージと一列に並べて配置されるが、ベースは分かれており、別の位置に置くこともできる。

制御パッケージのなかには一般にタービン盤、発電機盤、監視装置のほか電動機制御装置、蓄電池および充電器などを備えている。

3.2 タービンパッケージ

タービンパッケージはタービンおよび補機の二つのコンパートメントに分かれているが、これらは共通のベース上に装備されている。補機コンパートメントには補機類駆動用歯車、起動用ディーゼル、制御空気装置、冷却水装置、潤滑油装置、燃料装置および制御装置などが設けられている。タービンコンパートメントにはガスタービン本体が設けられ、負荷は排気室側に接続される。作動空気は消音装置を通った後、補機およびタービンコンパートメントの中間に

ある空気取入室に導かれる。このコンパートメントの換気はエダクタによって行なわれ、タービン運転中、室内が適当な温度に保たれるようになっている。また、タービンおよび補機コンパートメントには火災報知器および消火装置を備え、万一の場合に対処している。

3.3 発電機パッケージ

発電機パッケージには減速装置、発電機、励磁機、界磁遮断器、抵抗器および冷却空気フィルタが設けられている。発電機とメタルクラッドスイッチギヤの間は一体のブスダクトでつながれている。

これらの制御、タービンおよび発電機パッケージの建屋は鉄骨構造で作られており、これによって組立式の屋根がささえられている。なお、保守にクレーンを使用するために屋根は容易に取りはずせる構造になっている。

第5図は Delaware Power and Light Company の Wilmington 発電所 11,250 kW パッケージ形ガスタービンを示したものである。

4. タービン本体

ガスタービン本体は、従来の蒸気タービンとは違ったガスタービンのみが有する特長を十分に生かした構造としてある。

第6図はフレームサイズ3、再生式ガスタービンの断面図を示す。フレームサイズとはモデル形式を示すものでフレームサイズ3は大略6,000kW前後の容量のものである。この形には一軸機および二軸機があり、二軸機には単サイクルならびに再生サイクル機がある。

第7図はフレームサイズ5、ガスタービンの断面図を示す。この形は容量10,000kWから16,000kWの間をカバーするものでパッケー

ジ形ガスタービンの標準機種として現在もっとも需要が多く、今後も主力機種として推奨されるものである。タービンは圧縮機、燃焼器、タービンおよび付属機器よりなり、共通ベース上に据付けられている。

次に第8図はフレームサイズ8, ガスタービンの断面図を示す。この形は連続定格 34,000 kW で単機容量としては最大のものである。このフレームサイズ8は二軸機で第1段タービンで圧縮機を駆動し、第2段タービンで負荷を駆動するようになっている。なお第2段のノズルは負荷によって角度および面積が変えられるようになっている。

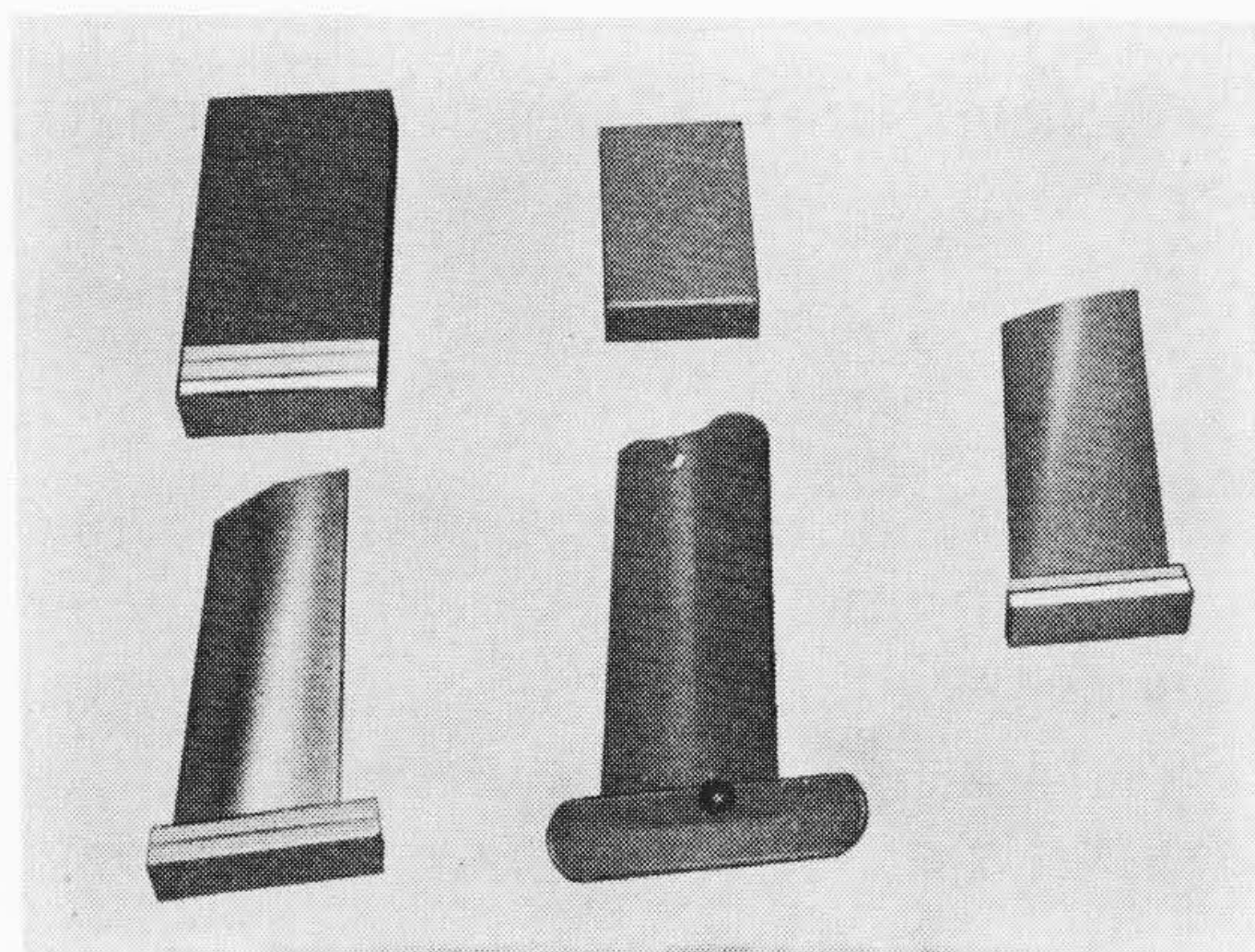
4.1 圧 縮 機

高効率、多段軸流高負荷の圧縮機は空気力学的に失速やサージングを極力押えるよう広範囲で運転できるようになっている。

ロータは1段ごとに仕上げられたディスクを通しボルトで締め付けて組み立てる構造である。このボルトはおおのこのディスクのボルトフランジ面の摩擦によってトルクの伝達を行なうのに十分な力で締め付けが行なわれる。また、各ディスクの心出しは中心部のはめ合いによって確実に行なわれる。これはロータのバランスのためばかりでなく、圧縮機が高効率を発揮するために翼頂の間げきの適正值を保持するうえにもきわめて重要なものである。

各ディスクは組立てられる前に静的バランスがとられ、組立後のアンバランス量を最小に押えておく。組立後は精密バランス装置によって完全な動的バランスがとられている。

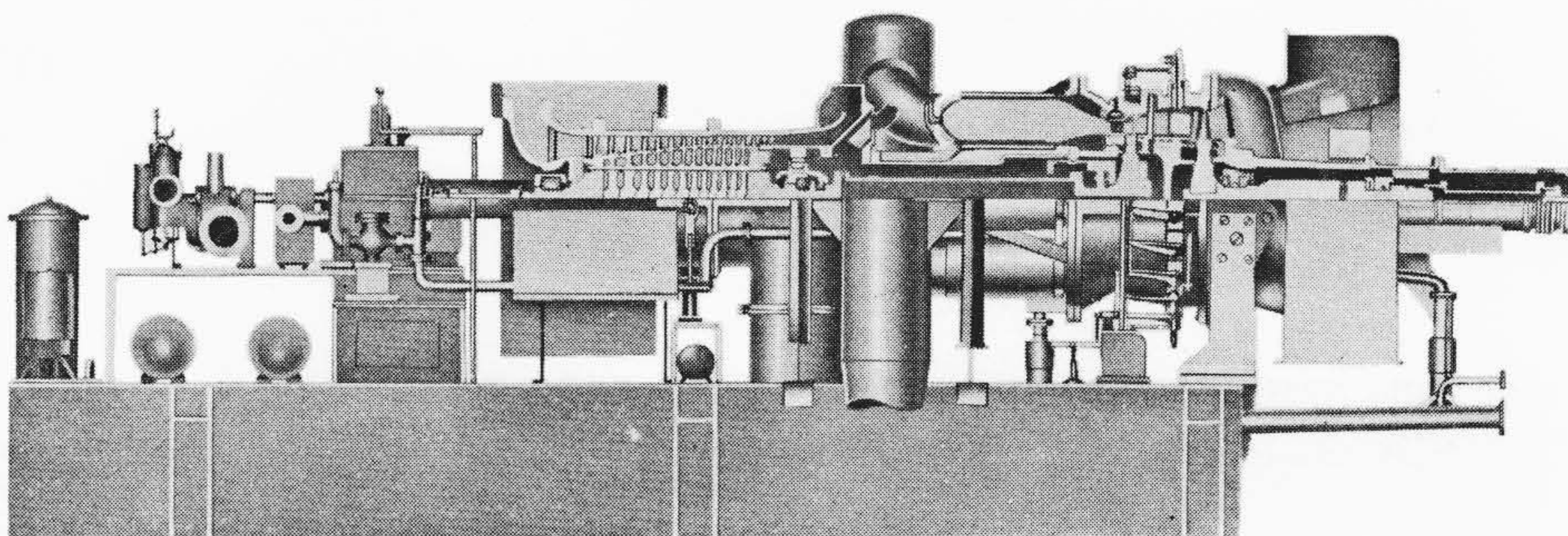
圧縮機翼は、軸方向ダブルテールでディスクに固定される。この翼は extrusion 法と呼ばれる特殊鍛造法で製造され、現在、静翼のすべてが、また動翼も従来のミーリング法からこの extrusion 法に急速に置き換えられている。この方法を採用することによって従来よりも、より機械的強度の高い翼材を得ることが可能であり、同時に翼素材を節減することが可能となっている。第9図はミーリング法と extrusion 法による翼製造過程の比較を示したものである。



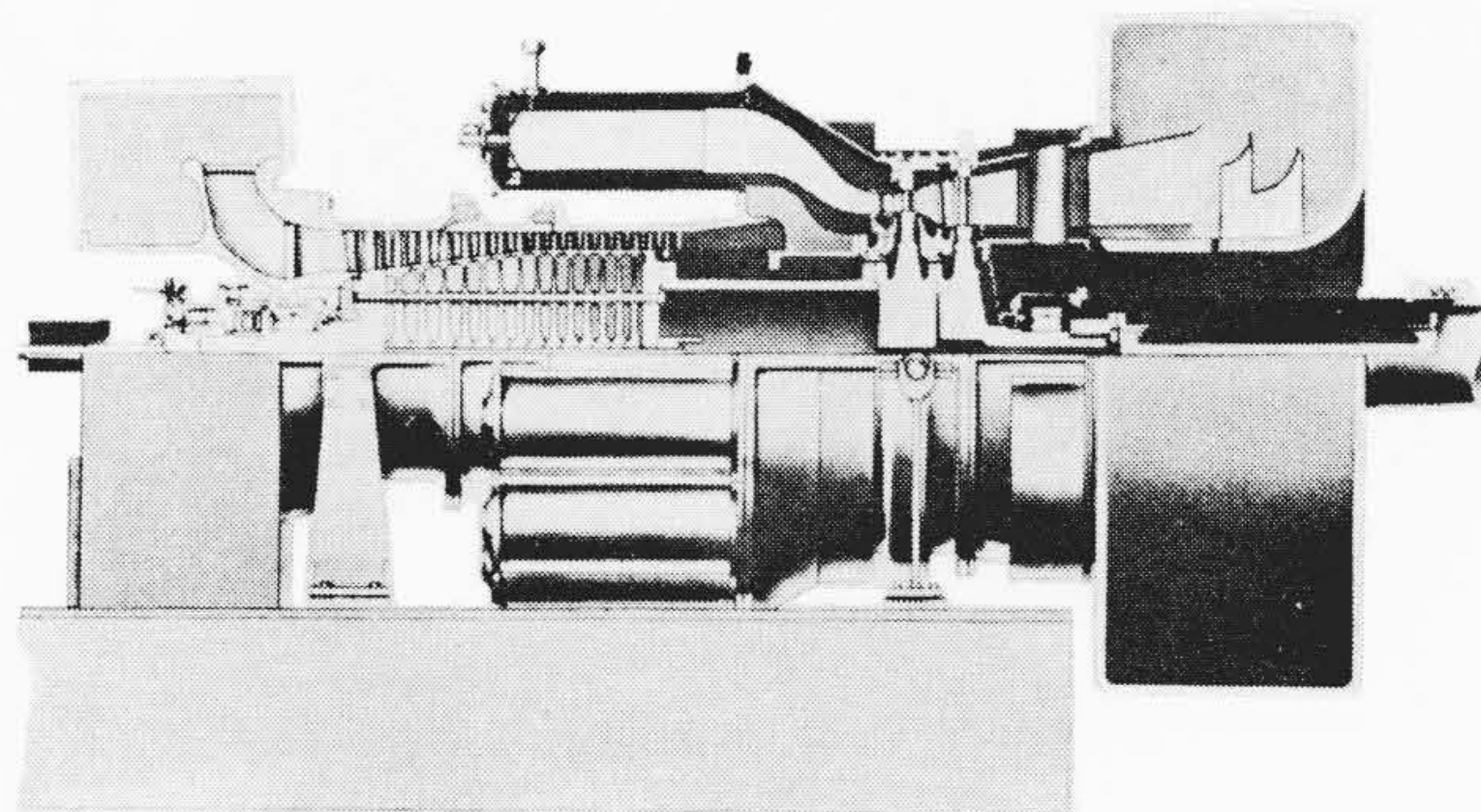
第9図 圧縮機翼製造過程

圧縮機車室は円筒形で水平に分割されるようになっており、静翼はセグメントになったブレードリングに植込まれ、これらのブレードリングは車室内面円周のみぞにはめこまれている。これらのリングは車室からまわして、容易に取り出すことができる。

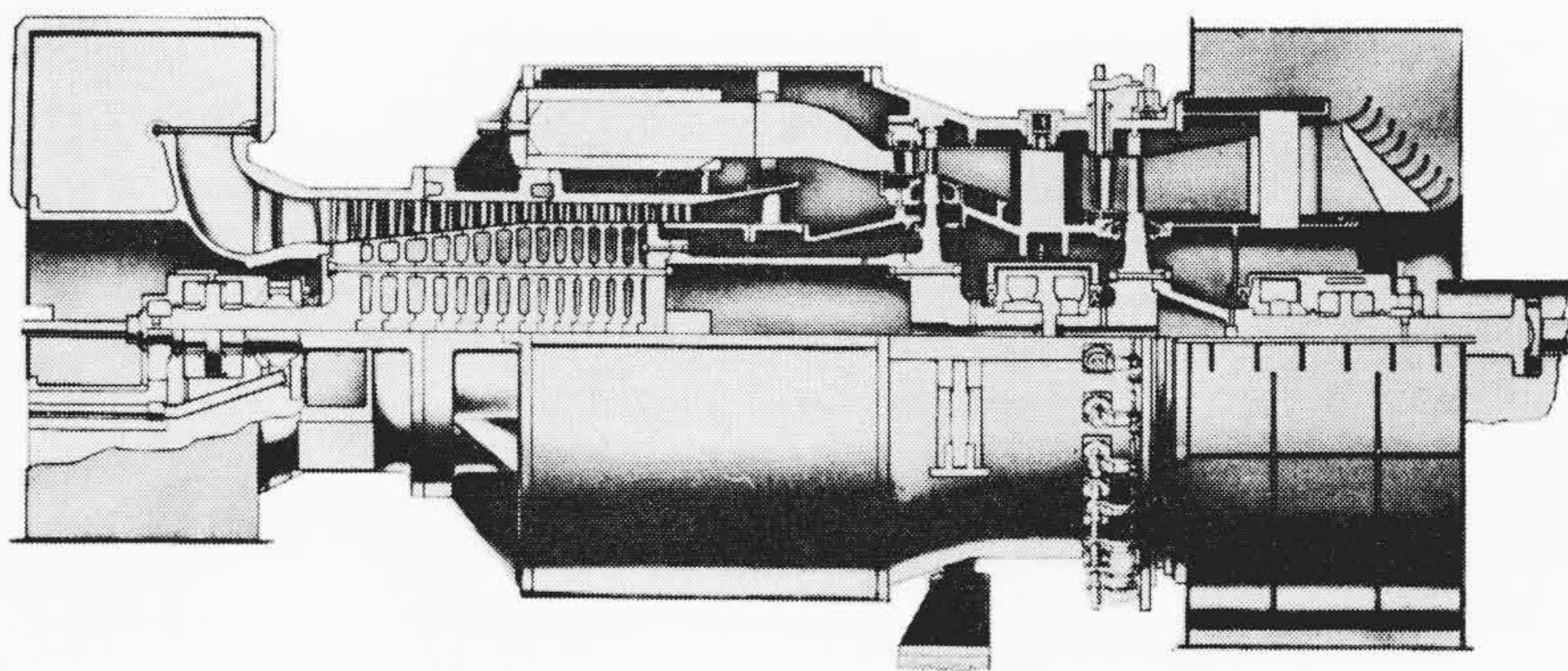
圧縮される空気の一部は圧縮機の中段落より抽気されノズルやタービンディスクの冷却とラビリンス部のシーリング用として用いられる。第10図は空気によるタービン冷却系統を示す。



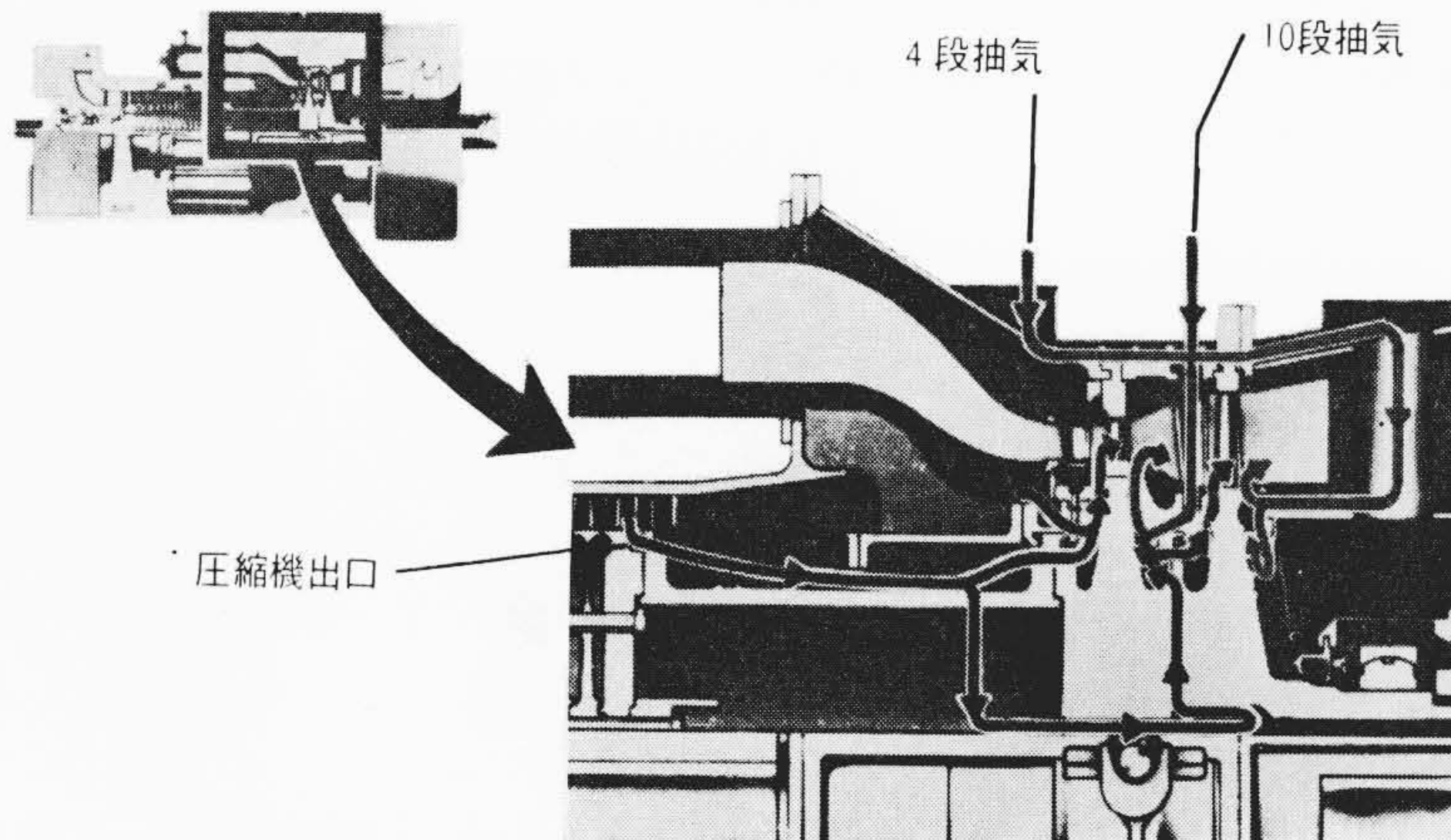
第6図 フレームサイズ3再生式ガスタービン



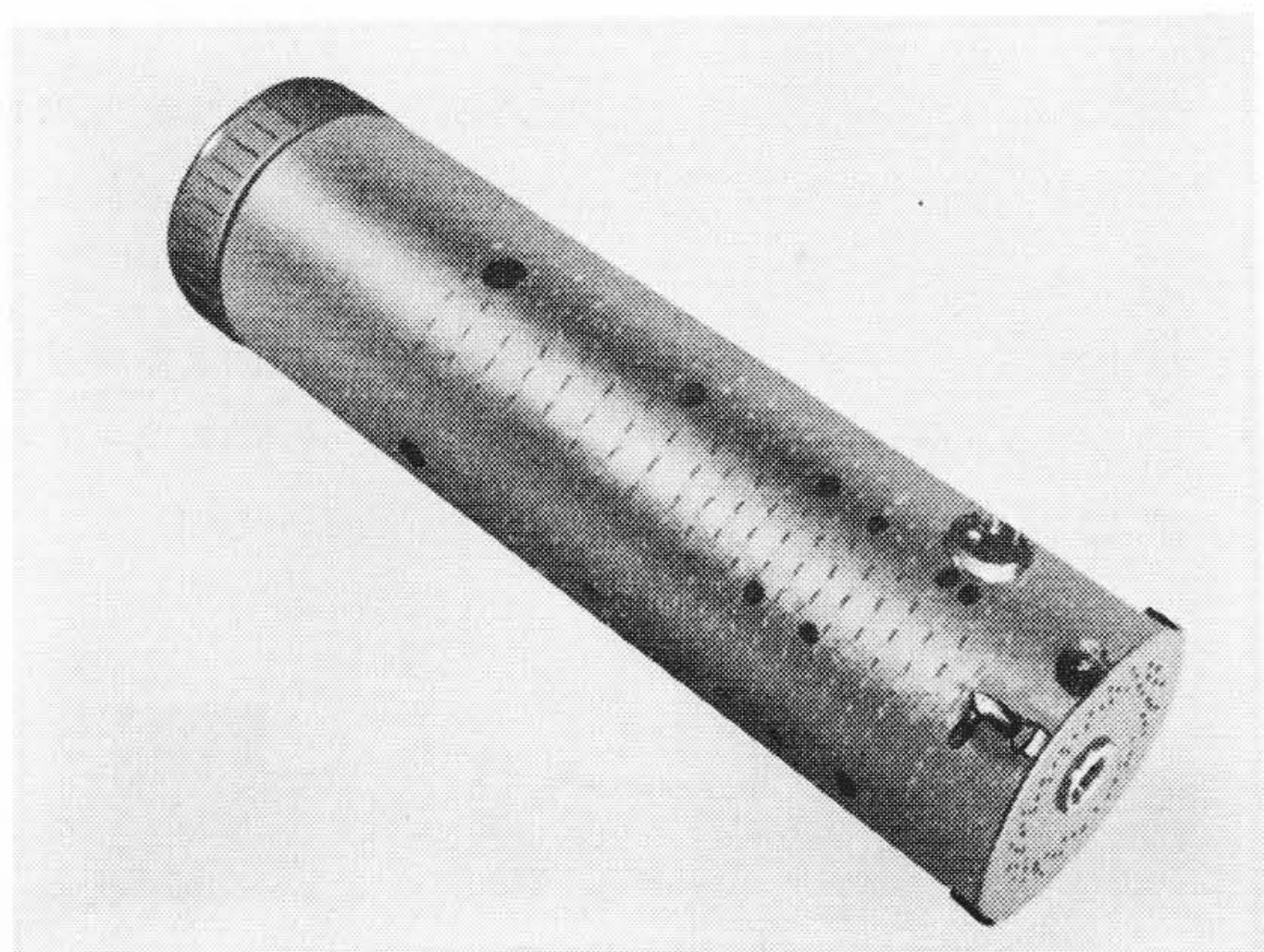
第7図 フレームサイズ5ガスタービン



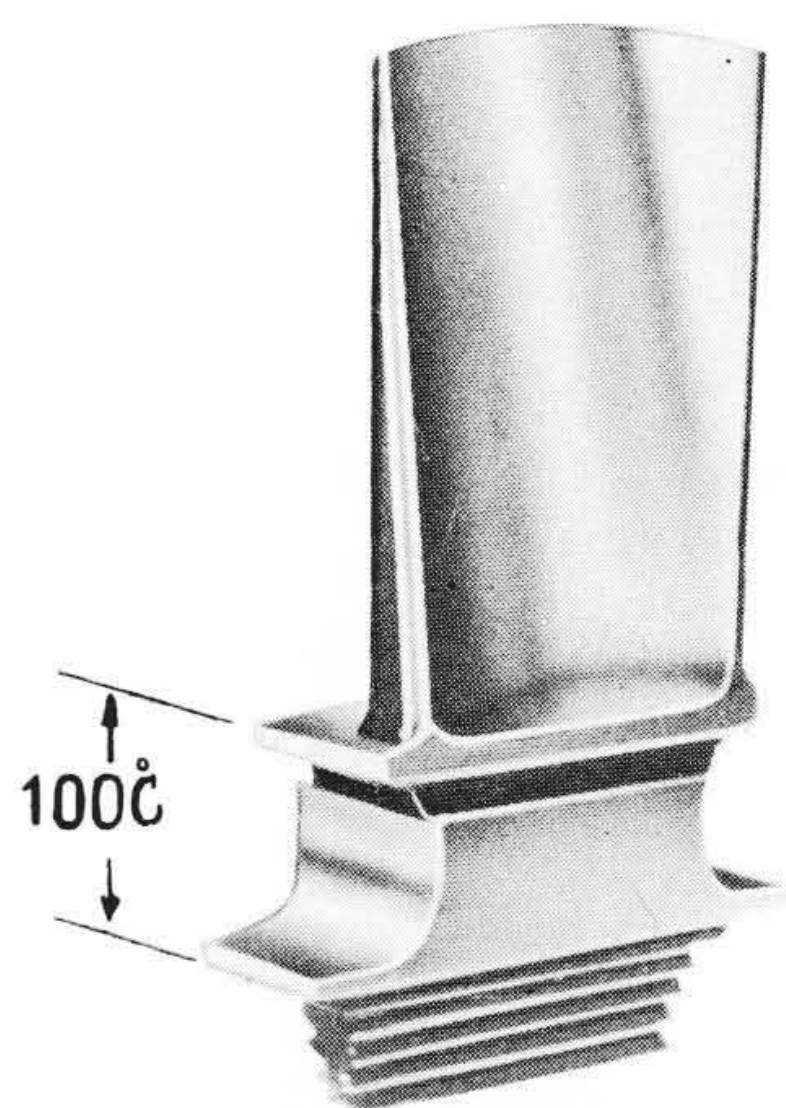
第8図 フレームサイズ8ガスタービン



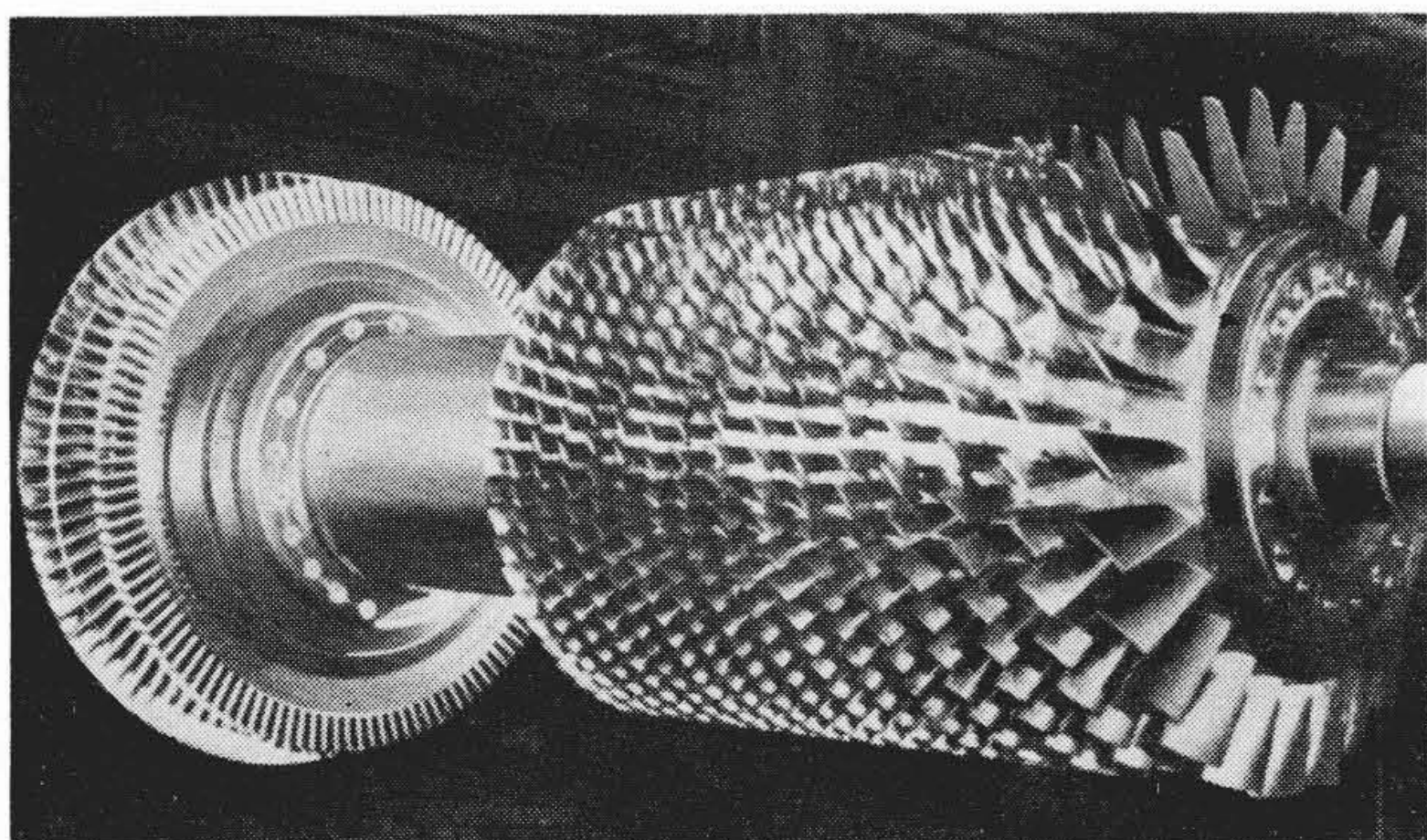
第10図 タービン冷却系統



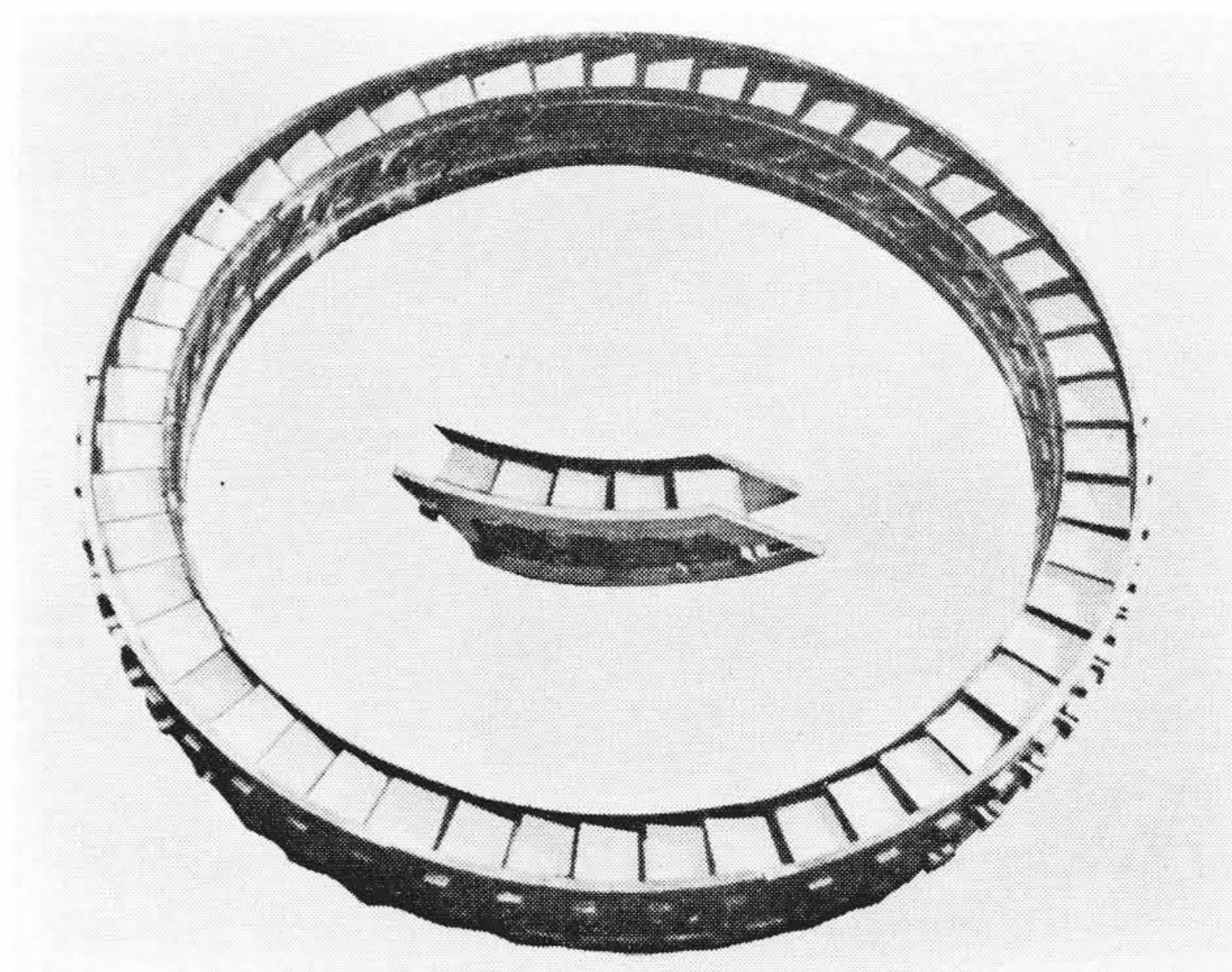
第11図 燃焼器内筒



第13図 タービン第1段動翼



第12図 タービンおよび圧縮機ロータ



第14図 タービン第1段ノズル

4.2 燃焼器系統

ガスタービンの作動流体である空気は燃焼器で燃料を燃焼させることにより加熱される。燃料は、燃料ノズルにより各燃焼器内に噴射され一部の空気と混合して燃焼する。残りの空気は、各燃焼器の燃焼ガス流路方向に沿って順次流入し、冷却の作用を行なう。このため燃焼ガスはタービンノズル前で適当な温度となるよう調整される。

起動時の点火は2個あるいは、それ以上の燃焼器で高圧点火用変圧器で昇圧された電源により点火せんを用いて電気的に行なわれる。火炎は燃焼器連絡管により他の燃焼器に伝わる。着火後は、燃焼はそれ自身で継続し、点火せんは自動的に引き込まれる。

火炎検出器は着火が確実に進行し、燃焼が継続して行なわれていることの検出に用いられる。この指示は起動回路、遮断および信号灯に導かれている。

燃焼器は多缶形でフレームサイズ3は6缶、5は10缶、フレームサイズ8は外筒環状内筒多缶形で12缶よりなっている。内筒には耐熱耐食性の高い309S (25Cr-12Ni) ステンレス鋼が一般に用いられ、特に高温用としてはRA333あるいはHastelloy Xが用いられる。

第11図は燃焼器内筒を示す。

4.3 タービン

タービンは高エネルギー形に属するもので全熱落差を2段落で消化するようになっている。このため、ノズルで大きな温度降下を得られ動翼を含むロータの温度レベルを低く保つことが可能である。このことは逆にいえば第一段動翼の許容温度が定められている場合、タービン入口、すなわちノズル前の温度を高くとることができ、タービン効率を上昇させるのに有効である。

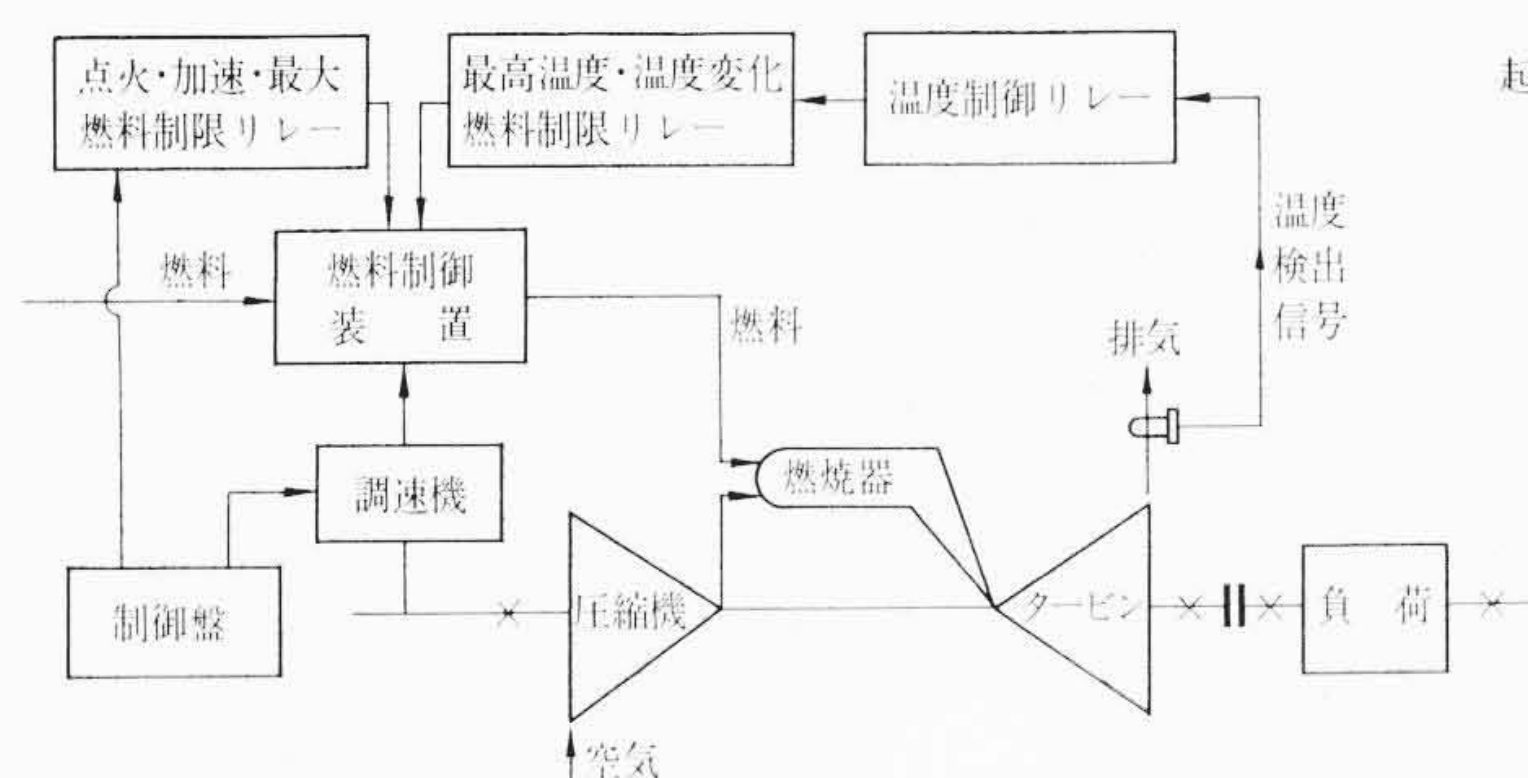
ディスクはCr-Mo-V鋼あるいはフェライト系鍛鋼にTimkenのリムを溶接したものよりなり、圧縮機ロータと同じく1段ごとに鍛

造し仕上げられたものをボルトによって結合されたものである。このような構造とすることによりディスクの中心部まで質の良い均一な組織の材料とすることができる。またタービンロータはきわめて過酷な使用条件にも十分耐え得るよう種々の非破壊検査が実施されるほか、高温炉内での過速試験ならびに遷移温度以下の低温状態での過速試験を実施して、材料に欠陥のないことを確認し、同時にディスクの中心孔部を一部降伏させることにより、実際にきわめて高い切線応力や熱疲労に耐え得るようになっている。

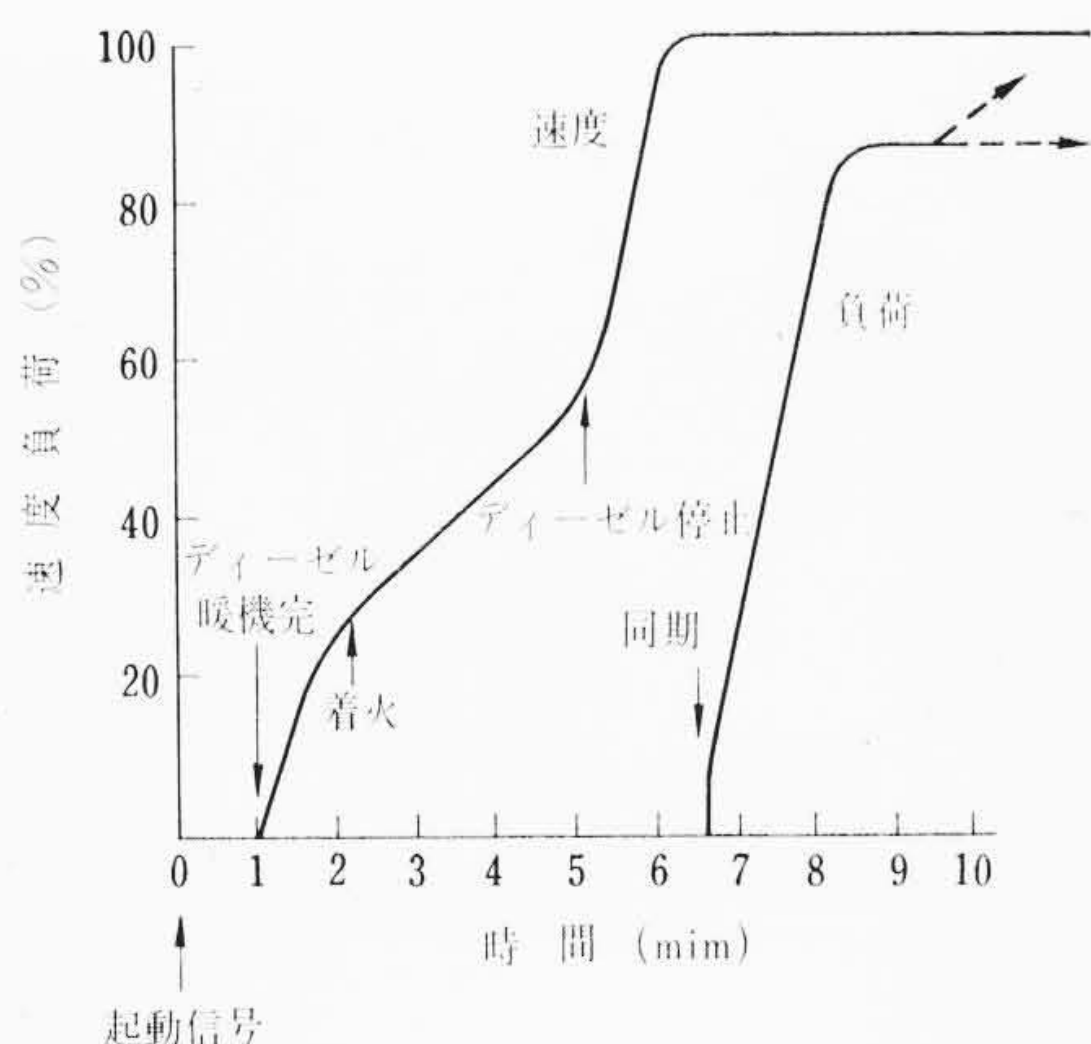
第12図はロータを、第13図はフレームサイズ5に用いられる第1段翼を示す。これは通常M-252 (54Ni-19Cr-10Mo-10Co)あるいはUdimet 500の精密鋳造により造られる。翼はロングシャンクと呼ばれるものでガスにふれるプロヒル部分とディスクにはめ込まれるダブテール部分との間に温度低減のための柄の部分の設け、この部分を空気で冷却することによりダブテール部の温度レベルを下げ、したがって許容応力を高めている。実測によるとプロヒル底部とダブテール頂部との間には約100°Cの温度降下が認められている。またプロヒルの頂部は中空としてダブテール部に作用する遠心力を減じ同時に翼頂間げきのガスの漏えいを抑制する効果をもたせている。

次に第1段ノズルには耐熱、耐酸化性のほか、耐熱疲労の大きいX-40 (55Co-25Cr-10Ni-7.5W)あるいはX-45が用いられ、ノズルリングは全周10個の精密鋳造されたセグメントより組み立てられている。各ノズルは中空でなかを冷却空気が流れる構造となっている。このような構造とすることにより第1段ノズルの保守、点検、交換はきわめて容易に行なわれる。

第14図は第1段ノズルを示す。



第15図 タービン制御系統図



第16図 速度および負荷の起動時間との関係

4.4 制 御 系 統

第15図はタービン制御系統図である。タービン速度あるいは負荷の制御は電気油圧式調速機により制御される燃料制御弁の調整によって行なわれる。この制御弁はタービン排気温度がある値以上になった場合、あるいは排気温度の変化がある定められた割合以上になった場合にも燃料量を制限するようになっている。

調速機は電気油圧式であり、3相6極の調速機発電機により速度信号を出し、この交流の信号は全波整流されガスタービン速度に比例した直流電圧に変換される。排気ガス温度制御は排気ダクトに取り付けられた12個の熱電対により信号が与えられる。この12点の信号を平均し、増幅して位置の信号に変換する。

なお、保安装置として下記に対応する装置を備えている。

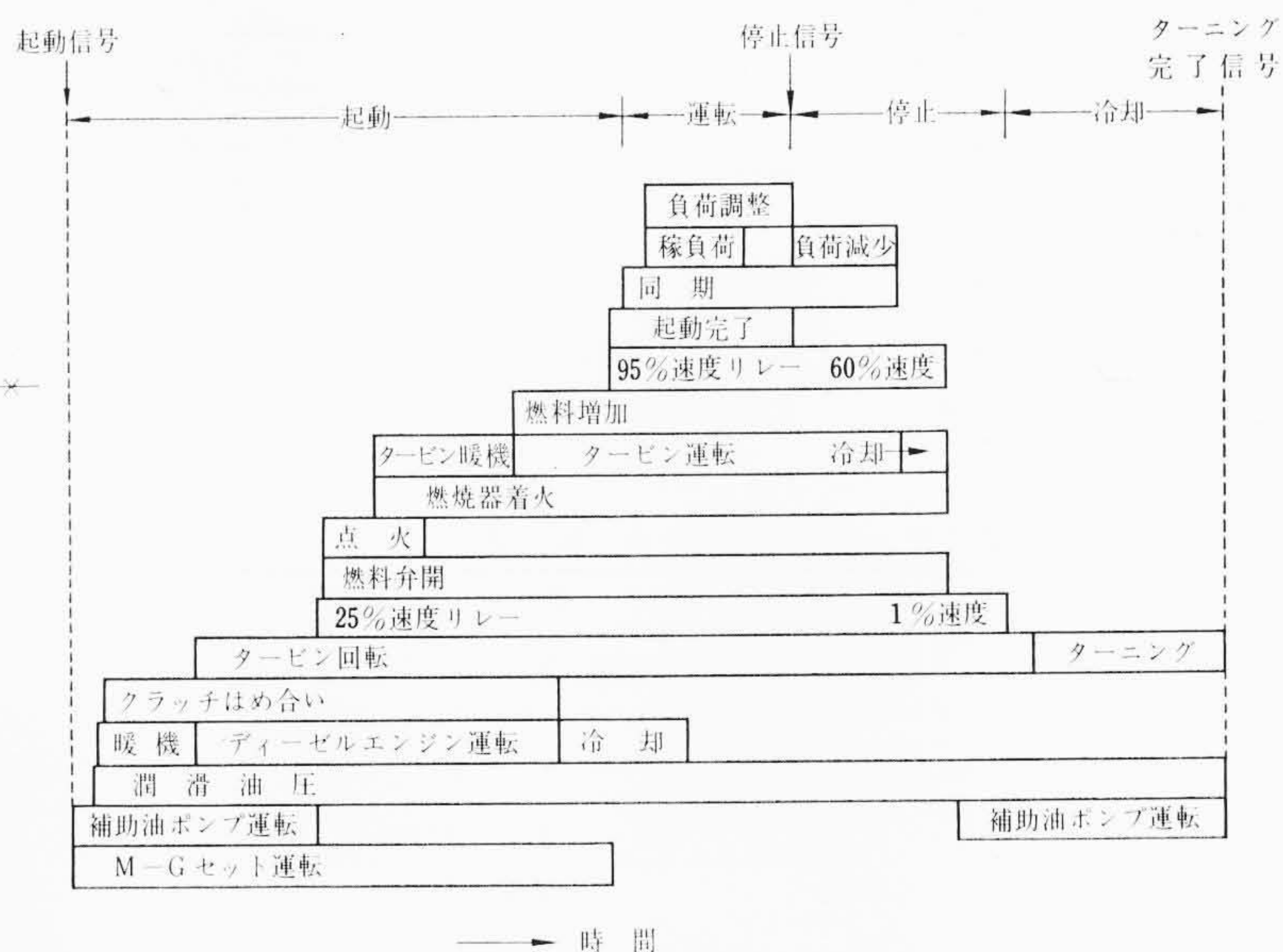
過 速 度
排ガス温度異常上昇
振 動 過 多
潤滑油圧低下
潤滑油温度上昇
炎 消 滅
火 災 報 知

5. 自動起動および停止方式

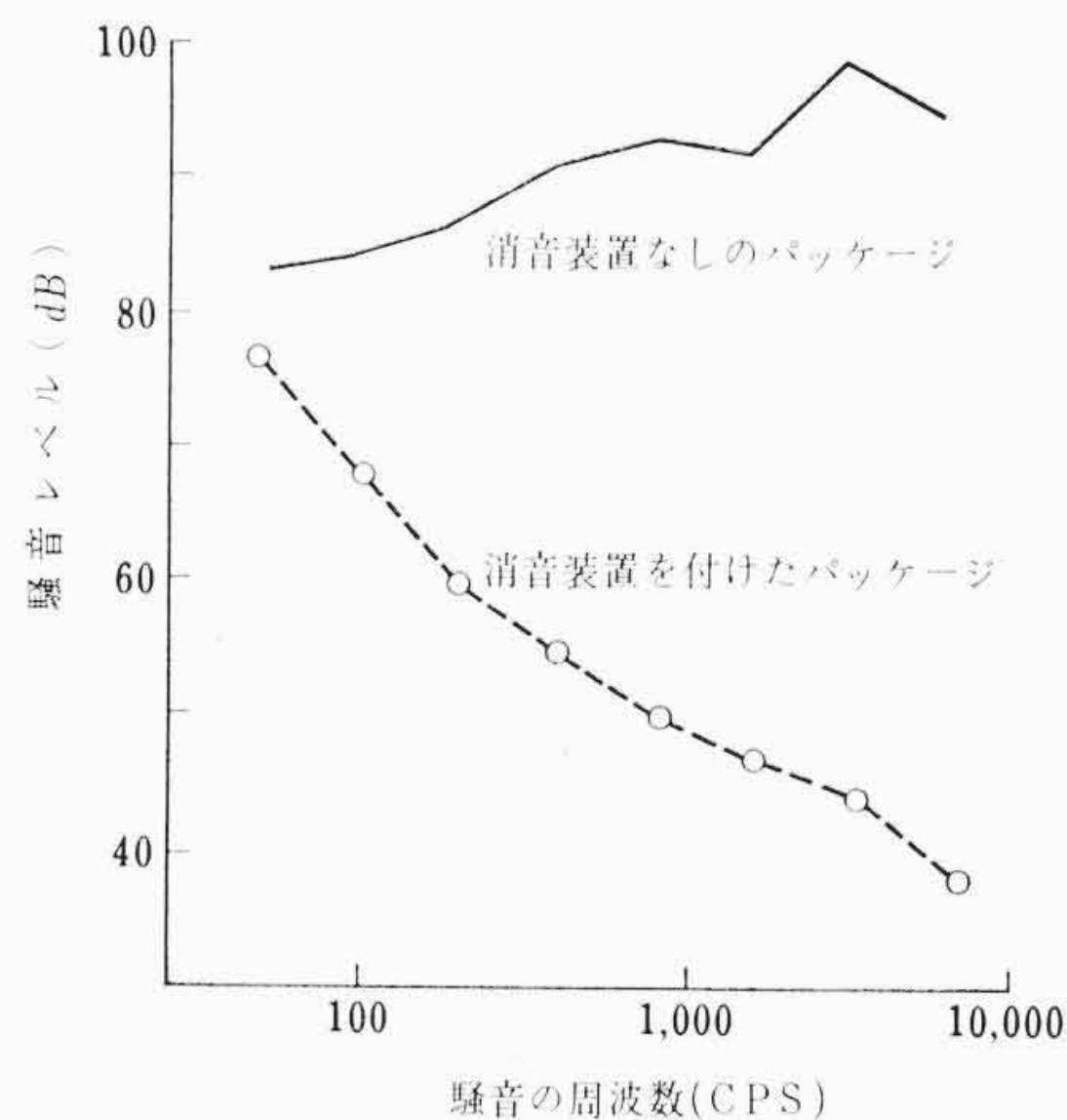
パッケージ形ガスタービンの特長の一つは起動時間が著しく短い（通常10分以内）こと、ならびにこの起動操作および停止操作が完全に自動化せられていることである。人間が行なうのは起動ボタンを押すだけで、このボタンも現地盤あるいは遠隔からの操作が可能であり、それ以降の操作はすべて自動的に順次に行なわれる。

第16図は起動曲線の代表例を示す。

自動運転はスピードリレーと時限継電器の組合せで行なわれる。これによりタービン制御装置の燃料制限器と温度制御器の機能が生かされている。第17図はこの自動起動および停止の手順を説明し



第17図 起動および停止の制御方式説明図



第18図 60 m 離れた位置における騒音レベル

たものである。

停止する場合も停止信号を入れると負荷の減少、発電機の回路開、燃料流量減少および遮断、補助油ポンプ、ターニング装置の起動などがすべて自動的に実行される。

6. 音 について

ガスタービンは一般に音が大きいと考えられているが、日立-GEパッケージ形ガスタービンは音に対して特に注意深い考慮が払われており、パッケージの外壁そのものが防音壁になっている。さらに吸排気ダクトに消音装置を取り付けることにより著しく音を軽減している。

計画にあたっては実際にガスタービンを設置する場所に応じて消音装置の数を増減している。

第18図はパッケージ形ガスタービンプラントから約60 m離れた場所での音の実測値である。

7. 燃 料

このガスタービンは気体燃料あるいは液体燃料が使用可能である。気体燃料としては天然ガス、コークス炉ガス、水性ガス、発生炉ガス、分解ガス、坑内ガスなどが使用できる。また、液体燃料としては軽油、灯油、ナフサ、重油あるいは原油などを用いることができる。いずれの場合にも燃料中の灰分による腐食あるいは付着を

第 2 表 燃 料 ガ ス の 規 格			
不 純 物	固 形 物	<30 ppm	
	最 高 沈 降 速 度	35 cm/min 以上	<1.0 %
		60 cm/min 以上	<0.1 %
	飽 和 点 以 上 の 水	<0.25 %	
	ガ ソ リ ン 蒸 気	<15 cc/Nm ³	
物	ナフタリンガス水化物	15℃ 降下で凝縮しない	
	発 熱 量	2,700~45,000 kcal/Nm ³	

第 3 表 燃 料 油 の 規 格		
成 分	制 限 条 件	
Na	V が 30 ppm 以上 : <10 ppm (希望 <5 ppm)	
	V が 30 ppm 以下 : Na/V <0.3 (Na<5 ppm なら不要)	
Mg	3.5>Mg/V >3.0	(V<2 ppm なら不要)
Ca	<10 ppm	(希望 <5 ppm)
Pb	<5 ppm	(希望 <2 ppm)
S	<5 %	
総灰分含有量	<10,000 ppm	

防止しガスタービンの運転保守に支障をきたさないよう燃料に対する規格を設けている。

第 2 表は日立-GE ガスタービン用燃料ガス、第 3 表は燃料油に対する規格を抜粋して示したものである。

8. ガスタービンの応用

これまで述べてきたようにガスタービンは蒸気タービンとはまた異なった種々の特長を持っており、これらの特長を巧みに利用した種々の応用例がある。

まず、電力会社用としては、ピーク発電用、へき地発電用、非常用および蒸気タービンプラントとの併合サイクル用などである。このほか同期調相機とピーク処理とを兼ね合わせたガスタービン駆動発電機が最近注目されている。また産業用としてはベース負荷用、非常用などであり、特に電力と同時にプロセス蒸気を必要とする場合は廃熱ボイラと組み合わせることによって、きわめて経済性の高いプラントとすることができる。

以下二、三の応用例について述べる。

8.1 廃熱ボイラによる熱回収

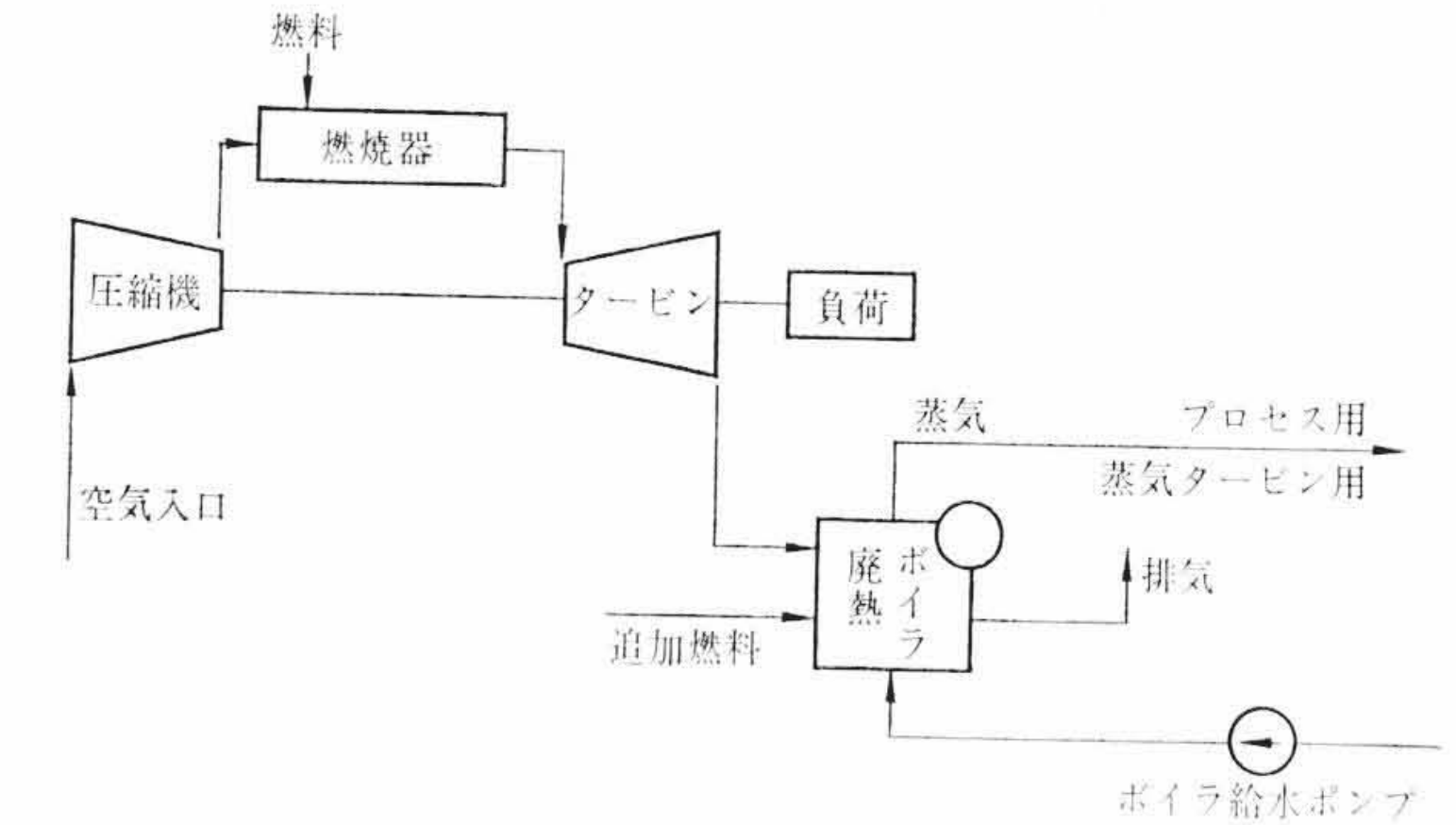
ガスタービンの排気は 400~450℃ と高温であるので、ガスタービンをピーク負荷用あるいは非常用などの利用率の低い所に用いる場合以外は、なんらかの方法で廃熱の回収を図ることが望ましい。

廃熱回収の方法としては

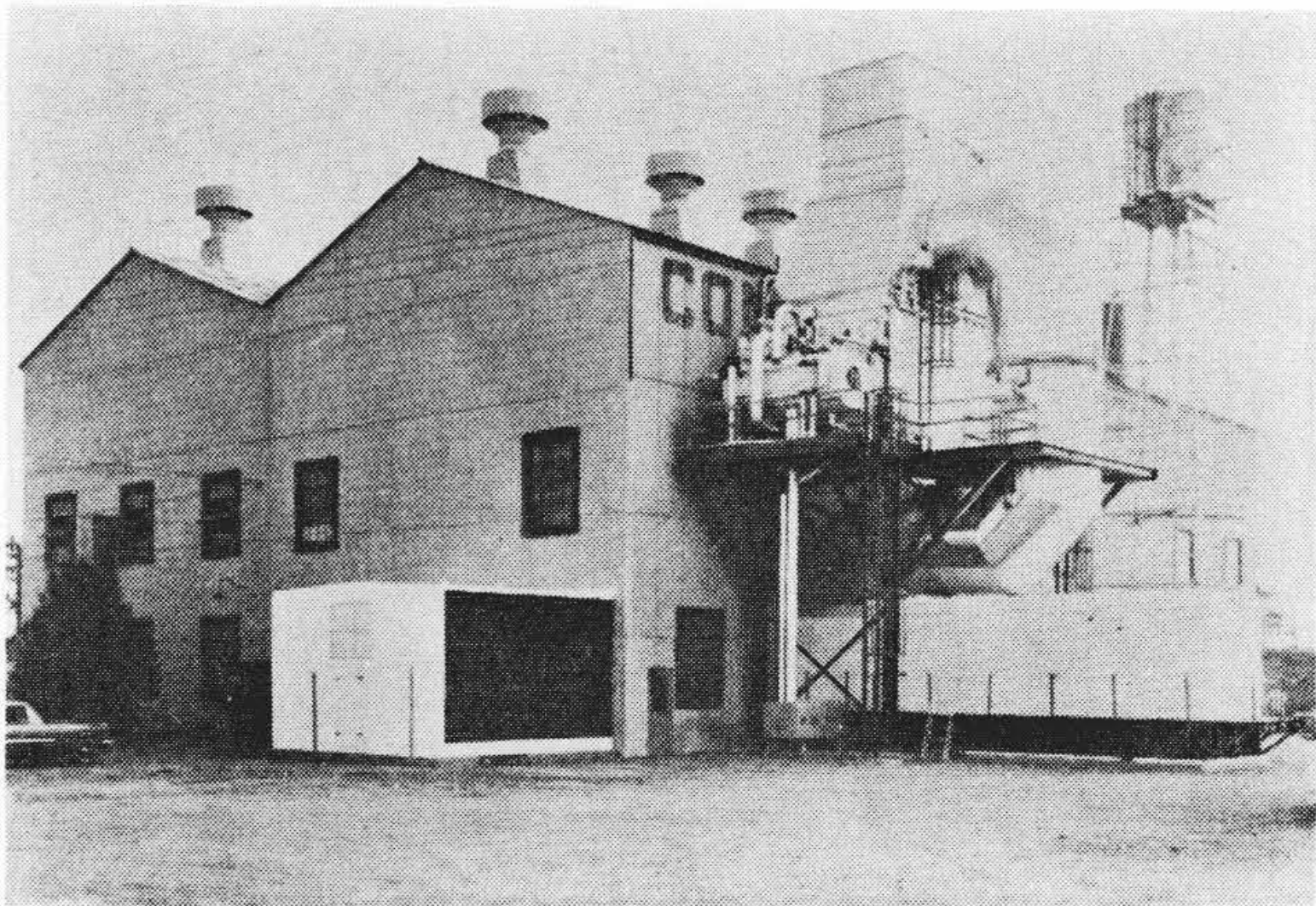
- 再生サイクル
 - 廃 熱 ボ イ ラ
 - 直 接 利 用
- などがあり、ここでは自家用火力などで最も応用度の高いと思われる廃熱ボイラによる熱回収について述べる。

第 19 図に示すように廃熱ボイラで熱回収を行ない蒸気を発生するもので、この蒸気をプロセス用あるいは蒸気タービン駆動用として使用するものである。

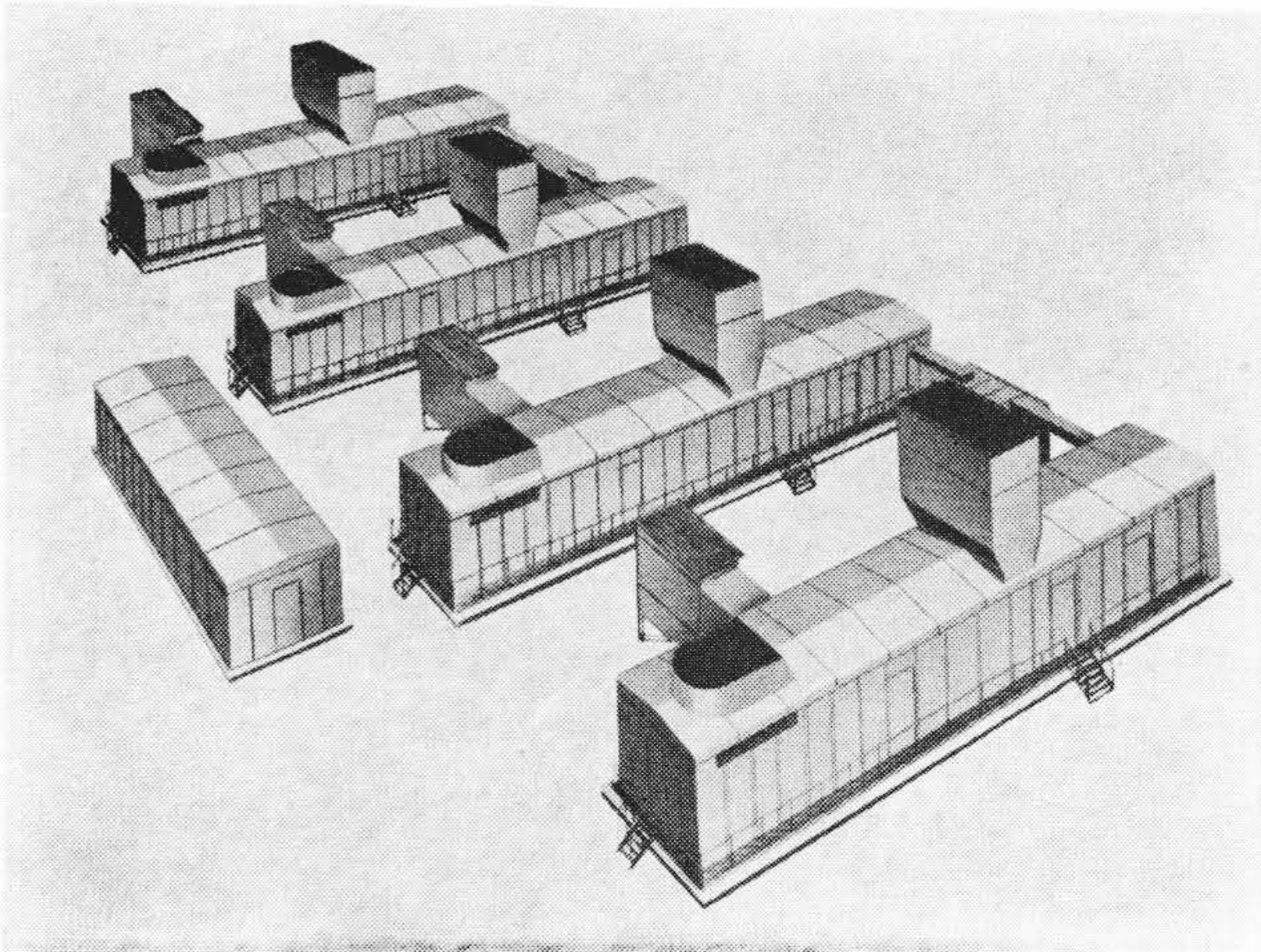
たとえば 10 MW 級のガスタービンでは、発生蒸気量は 30~35 t/h となり熱効率は約 60% 前後になる。プロセス蒸気が不要の場合には、廃熱ボイラで発生した 30~35 t/h の蒸気を復水タービンに導き、約 4,000 kW の発電を行なうこともできる。また、廃熱ボイラに追加燃料を入れて、発生蒸気量に伸縮性を持たせることも可能である。



第 19 図 廃熱ボイラによる熱回収



第 20 図 廃熱ボイラ付パッケージ形ガスタービン



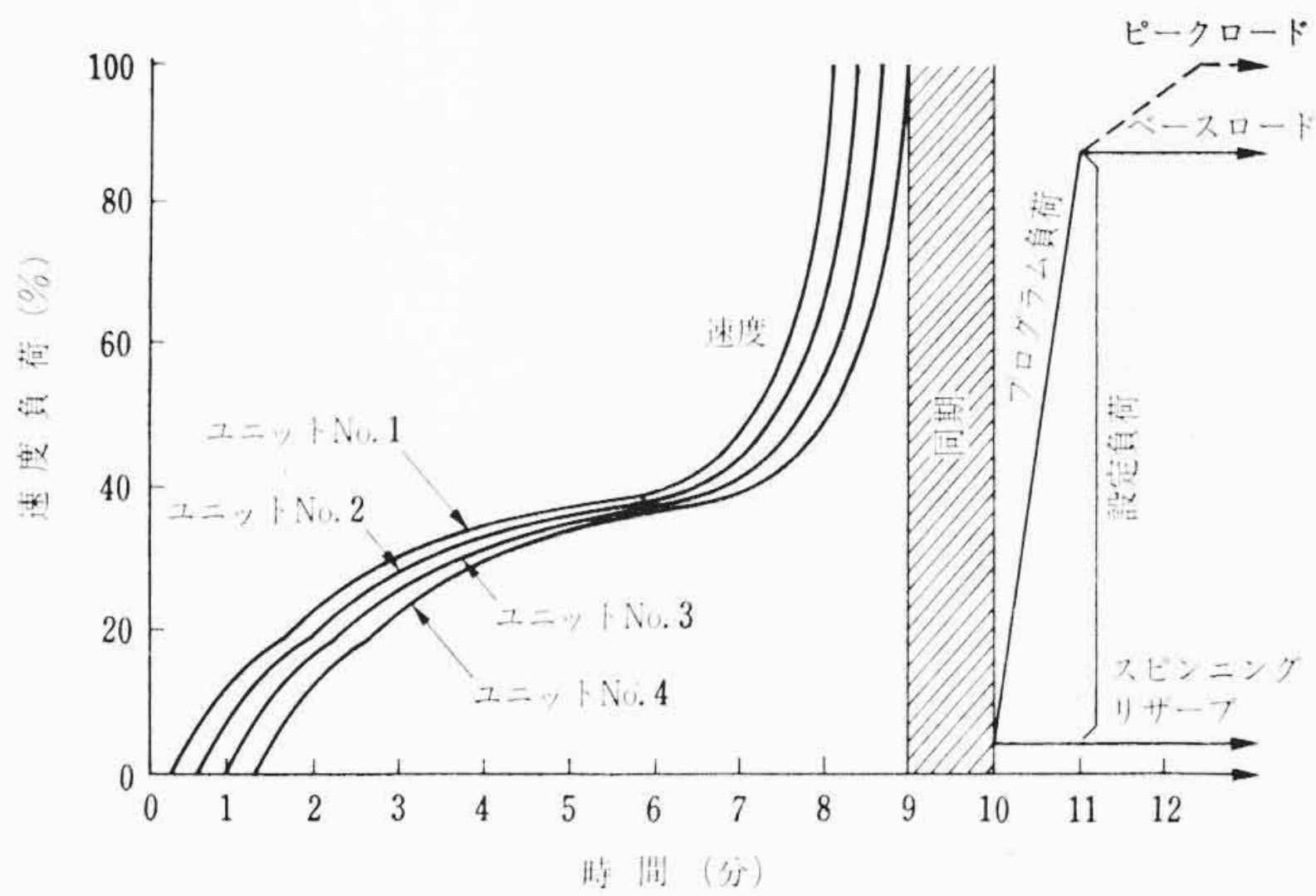
第 21 図 パワーブロック

第 20 図はパッケージ形ガスタービンと廃熱ボイラとを組み合わせた実施例である。

8.2 パワーブロック

パッケージ形ガスタービンのピーク負荷用に対する有利性に着目し、系統容量が大きい場合のピーク処理用として開発されたものがパワーブロックである。パワーブロックは第 21 図に示すように標準化されたパッケージプラントを複数個設置し、あたかもクロスコンパウンド形タービンと同じように一つのユニットとして運転制御を行なうものである。

パワーブロックの構成ユニットの送電端出力は、大気温度 15℃、大気圧力 1.033 kg/cm² abs、時 15,600 kW であり、4 台とした場合の合計出力は 62,400 kW となる。このパワーブロックは運転制御の面で、他の大容量発電設備に見られない柔軟性をもっている。たとえば起動後 10 分間で同期投入ができること、運転が現場でも遠隔



第22図 パワーブロックの起動曲線

でも行なえること、無負荷連続運転が可能であり、しかも100%負荷に上昇させるのに通常2分間でよく、運転中の負荷を自動的にプログラム制御できることなどである。

第22図はパワーブロックの起動特性を示すものである。

8.3 コンバインドサイクル

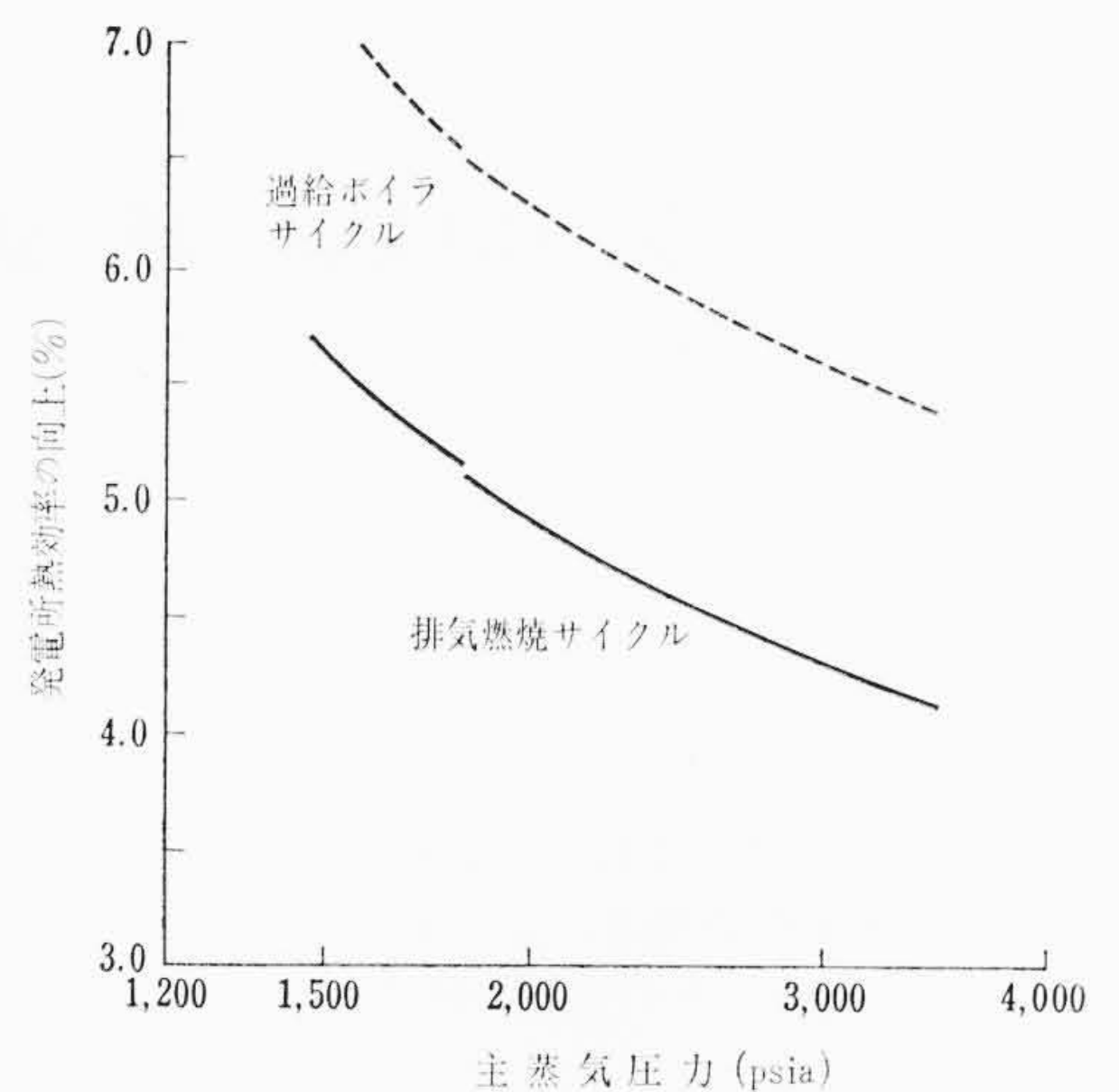
ガスタービンを蒸気タービンプラントに組み合わせて使用する、併用プラントは高温部をガスタービンに低温部を蒸気タービンに受持たせて、おのおのの特長を生かし、プラントとして蒸気タービンで可能な限界をこえて一段と熱効率を増大させるものである。

この併用プラントは大別して

- 廃熱回収サイクル
- 排気燃焼サイクル
- 過給ボイラサイクル

の三通りあり、併用によって得られる効率の向上率は第23図に示すとおりである。

今日、もっとも実用性のあるものは、排気燃焼サイクルで、このプラントは蒸気タービンの出力の約 $\frac{1}{6}$ ～ $\frac{1}{8}$ 程度の出力のガスター



第23図 コンバインドサイクルによる効率の向上

ビンを使用して、ガスタービンの排気をボイラの燃焼用空気として使用する。

この併用の効果は、蒸気タービンプラントにたとえると、新鋭再熱火力プラントを超臨界圧力プラントにしたときに生ずる差に相当する利益がある。

9. 結 言

以上、日立-GEパッケージ形ガスタービンの紹介と、その二、三の応用例について述べた。

ガスタービンはこれからの新しい原動機として、今後、わが国にあっても各方面に応用されてゆくものと予測されている。特に燃料、電力、プロセス蒸気などの条件からガスタービンを設置することが望ましいと思われるプラントは数多くあると考えられ、これらのおのおの場合についてさらに需要家と細部にわたる検討を加えてゆきたいと考えている。



新 案 の 紹 介



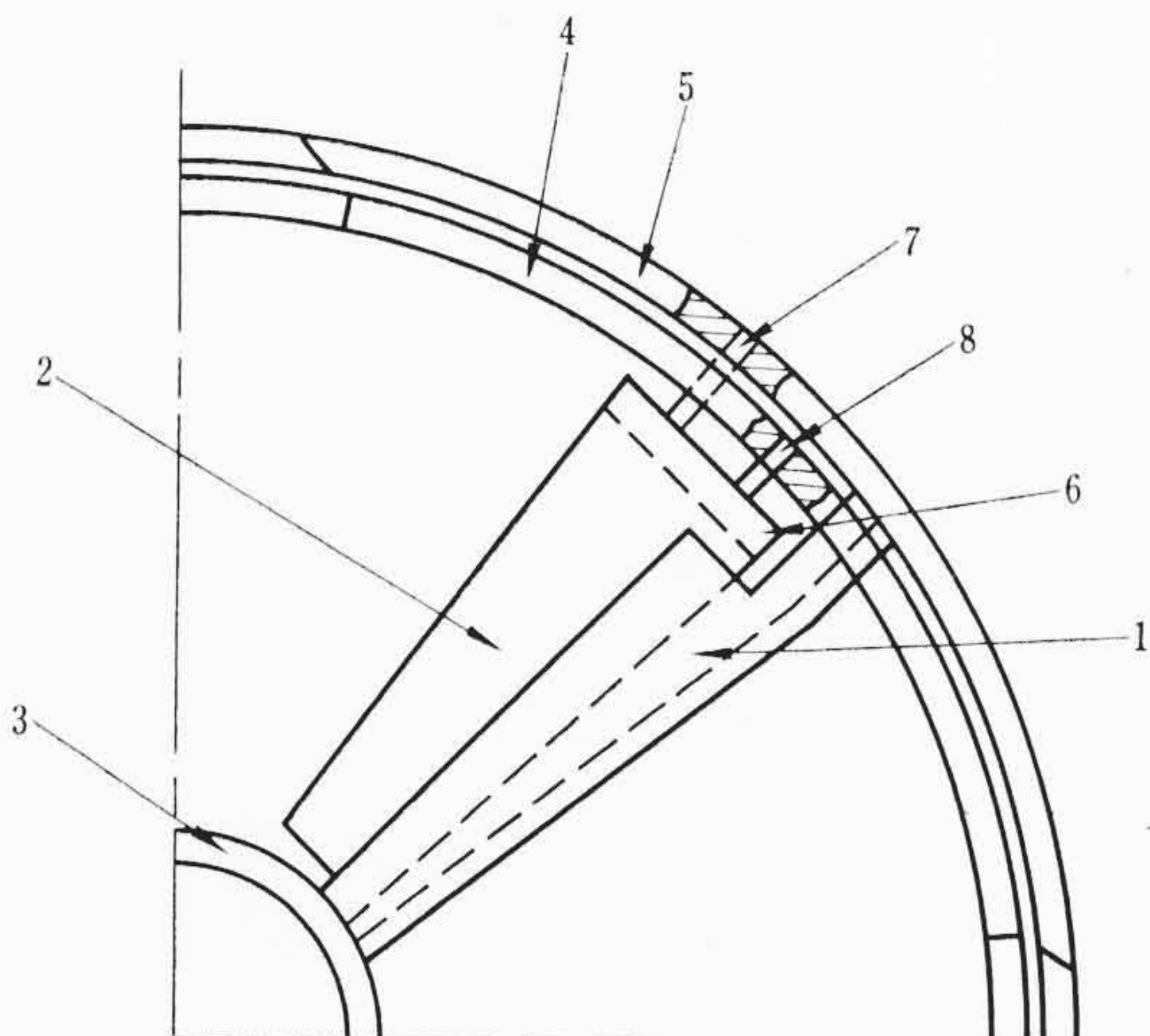
登録新案 第741237号

大 谷 巖

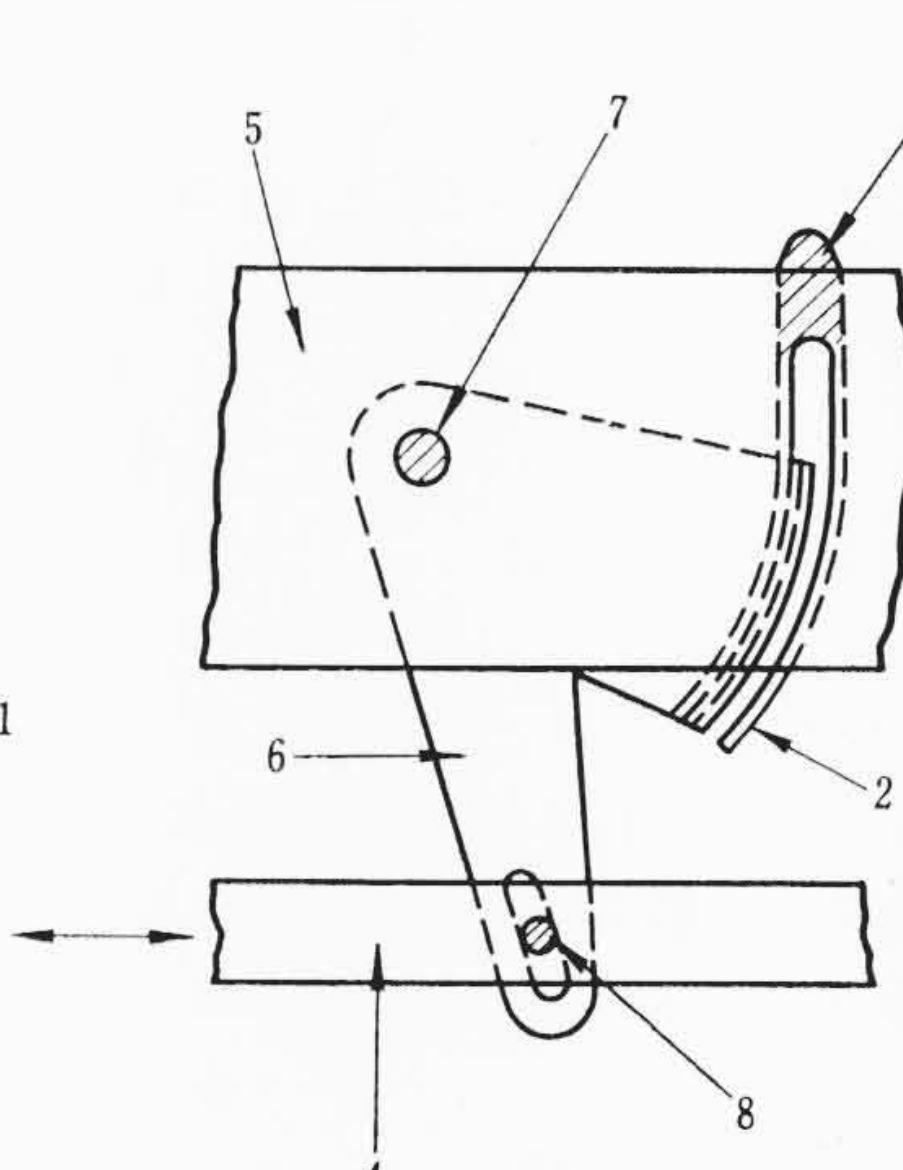
風 量 調 整 用 案 内 羽 根

この考案は、図示のごとく調節リンク4を軸方向に移動したとき、ピン8によって係合された操作腕6が軸7を中心にして回転し、その端部に取り付けられた可動案内羽根2を、ケーシング5の内側に固定された固定案内羽根1の円錐部にそって移動させるようにしている。こうして、この考案は取り扱う風量が多い場合には、第2図に示すように、可動案内羽根2を固定案内羽根1の円錐部にそって

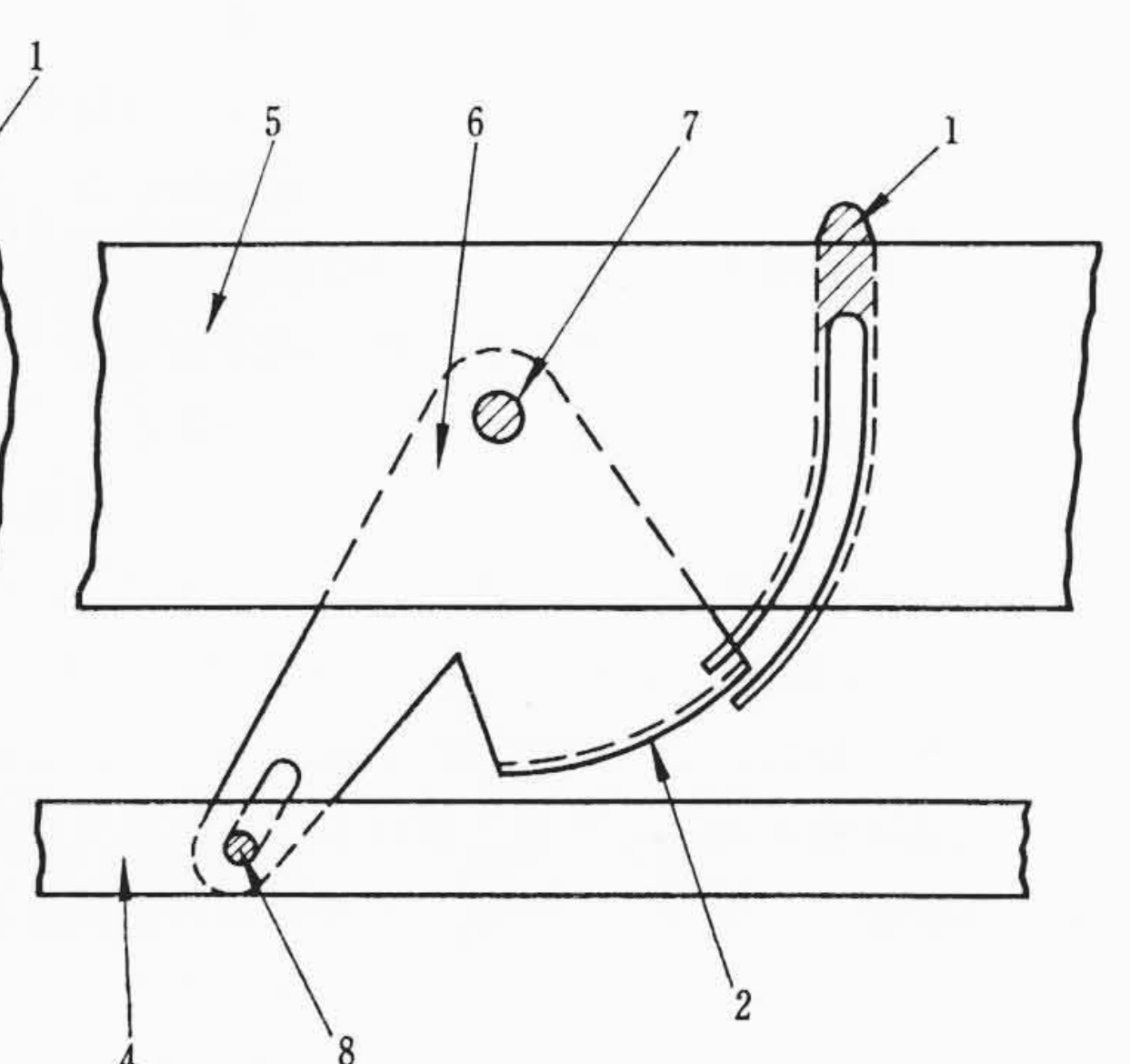
固定案内羽根1に入り込ませ、風量が小さい場合には、第3図に示すように、可動案内羽根2を固定案内羽根1の円錐部から繰り出し、旋回角度 α を大にする。したがってこの考案によれば、案内羽根が直線部と、円弧部との連続性を保持しながら、ファン羽根への流入角を調整することができるので、風量調整のさいに、渦流損が増加するのを防止することができる。(木口)



第1図



第2図



第3図