

天然ガスパイプラインブースタステーション

Natural Gas Pipeline Booster Station

近年、エネルギー多様化の社会的要請により、天然ガスパイプラインの建設が相次いで行なわれている。

日立製作所では、ソ連ガス工業省向け10MWパイプライン圧縮機、及び駆動用ガスタービン各々5台で構成されるブースタステーションを昭和52年10月に完成させた。

圧縮機は、パイプライン専用でPCLと呼ばれるターボ形であり、二軸式ガスタービンの標準モデルに合わせた設計が行なわれている。二軸式ガスタービンは、回転数の制御範囲が定格の50～105%と広くとれるため、パイプライン用に最も適した原動機である。日立製作所は、これら主機及びブースタステーションの各種補機制御装置をも一社で責任をもって製作できる数少ないメーカーの一つである。

久保田道雄* Kubota Michio

山本 佑** Yamamoto Yû

1 緒 言

昭和52年9月14日、日立製作所で行なった我が国最初のソ連ガス工業省向け10MW大容量天然ガスパイプライン圧縮機、及び二軸ガスタービンを中心とした天然ガスパイプラインブースタステーション構成機器の展示会には150名を超える国内外の関係者が参加し、その関心の深さがうかがわれた(図1)。

石油危機以降、エネルギーの多様化とクリーン化の要請に応じて、天然ガスの開発及びその利用は各国で積極的に行なわれ、ガス田より需要地に至る大規模パイプラインの建設が相次いで行なわれている。例えば、ソ連では昭和49年以来52年までの間に外国から303台、3,320MWを購入し、ブースタステーションを建設しつつある。

日立製作所では、パイプライン圧縮機、ガスタービン、制御装置などの主機はもちろんのこと、スクラバー、熱交換器、配管弁類のスキッド、所内電源設備などステーションを構成

するほとんどすべての機器を製作することができるため、計画、設計、製作、運転に至るまで一貫した責任体制をとることができるという大きな特長をもっている。

本稿では、主機であるパイプライン圧縮機と二軸形ガスタービンについて、計画上参考となる点に主眼をおき紹介する。

2 パイプライン圧縮機と駆動ガスタービンの標準モデル

日立製作所は、パイプライン圧縮機とガスタービンを一社で製作しているため、パイプライン圧縮機はすべてガスタービンの諸元に合わせ、最も適した組み合わせとなるよう標準モデル化されている。この組み合わせを表1に、また寸法及び重量を図2に示す。このため、これらの主機は次のような特長をもっている。

(1) パイプライン圧縮機の各モデルの定格回転数は、ガスター

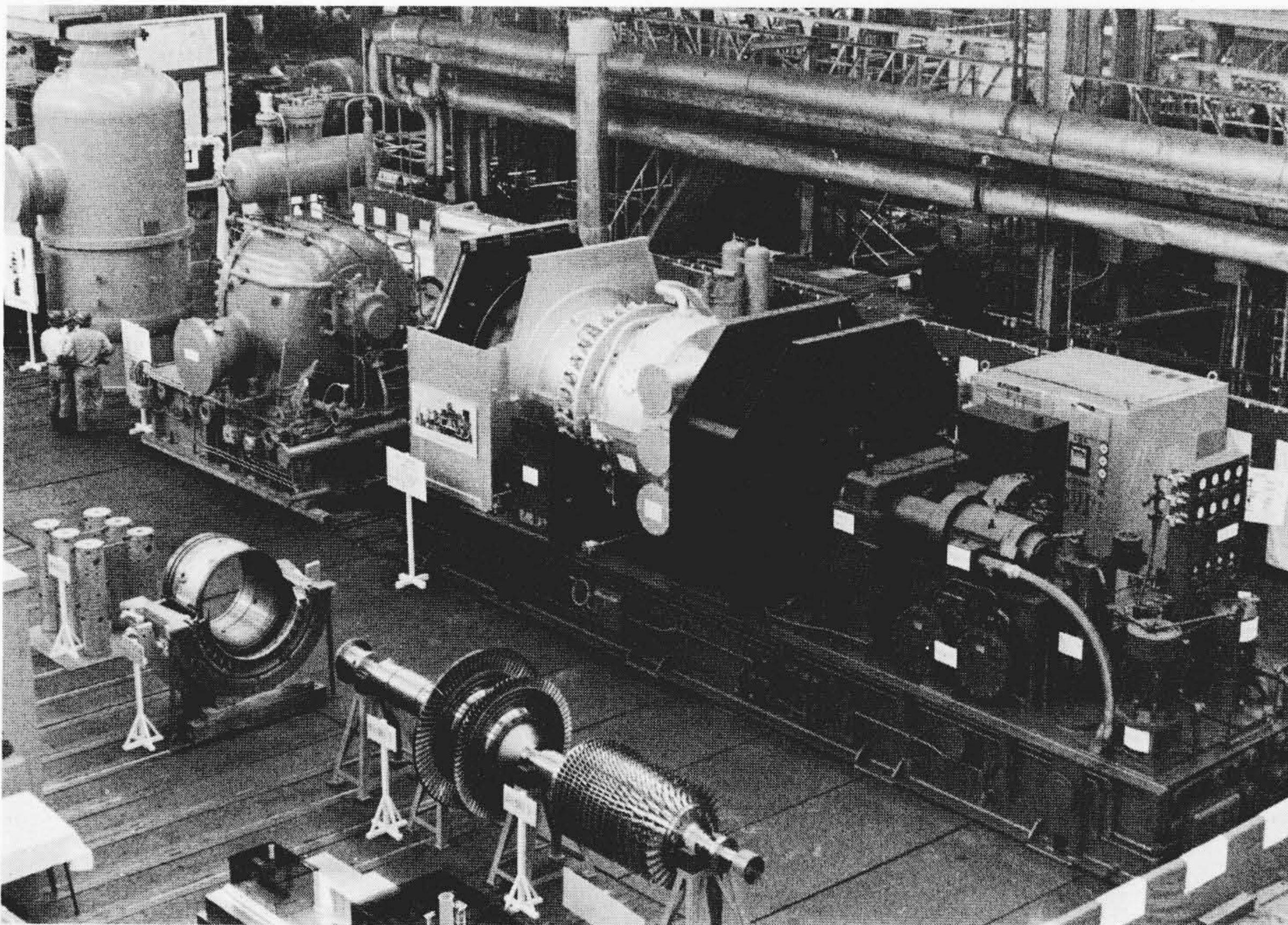


図1 天然ガスパイプラインブースタステーション構成機器の展示会 右から10MWガスタービン、パイプライン圧縮機、及びスクラバーを、手前はガスタービン用ロータを示す。

* 日立製作所電力事業本部 ** 日立製作所機電事業本部

- ピンの対応するモデルの定格回転数に一致させ、増速ギヤなどは不要の設計となっている。なお、ガスタービンは二軸形であるため、回転数は定格回転数の105～50%の極めて広範囲で、かつ安全に運転ができる。
- (2) 各対応する標準モデルに対し、軸系の縦振動、ねじり振動などにつき十分安全な設計が実機の長期間の運転により実証されている。
- (3) パイプライン圧縮機は、流量に応じた3種類のインペラ径が標準化され、縦分割されたバーレル形ケーシング内に1～4段が圧縮比に応じて設置されるが、それぞれ対応するガスタービンの出力にマッチするよう選定されている。
- (4) 圧縮機の潤滑油及びシールオイルは、すべてガスタービン側から供給される。
- (5) 統一のとれたパッケージ化が行なわれており、配置計画はもちろんのこと輸送、据付も容易である。

表1 パイプライン圧縮機と二軸ガスタービンの標準モデル 圧縮機の回転数は、ガスタービンの回転数に合わせてある。

圧縮機モデル	インペラ段数	インペラ径(mm) 最小-最大	ガ ス タ ー ビ ン		
			モ デ ル	出 力 (HP)	定格回転 数 (rpm)
PCL 500	1, 2, 3, 4	450-600	MS1502B	5,050	10,290
PCL 800	1, 2, 3	700-950	MS3142	14,600	6,500
PCL 1000	1, 2	980-1150	MS5332B	33,550	4,670
			MS7652	65,400	3,020

- (6) 日立製作所は、顧客から要求のあった場合には、圧縮機とガスタービンとを組み合わせる規定回転数で試験(ストリングテスト)を行なうことができる。

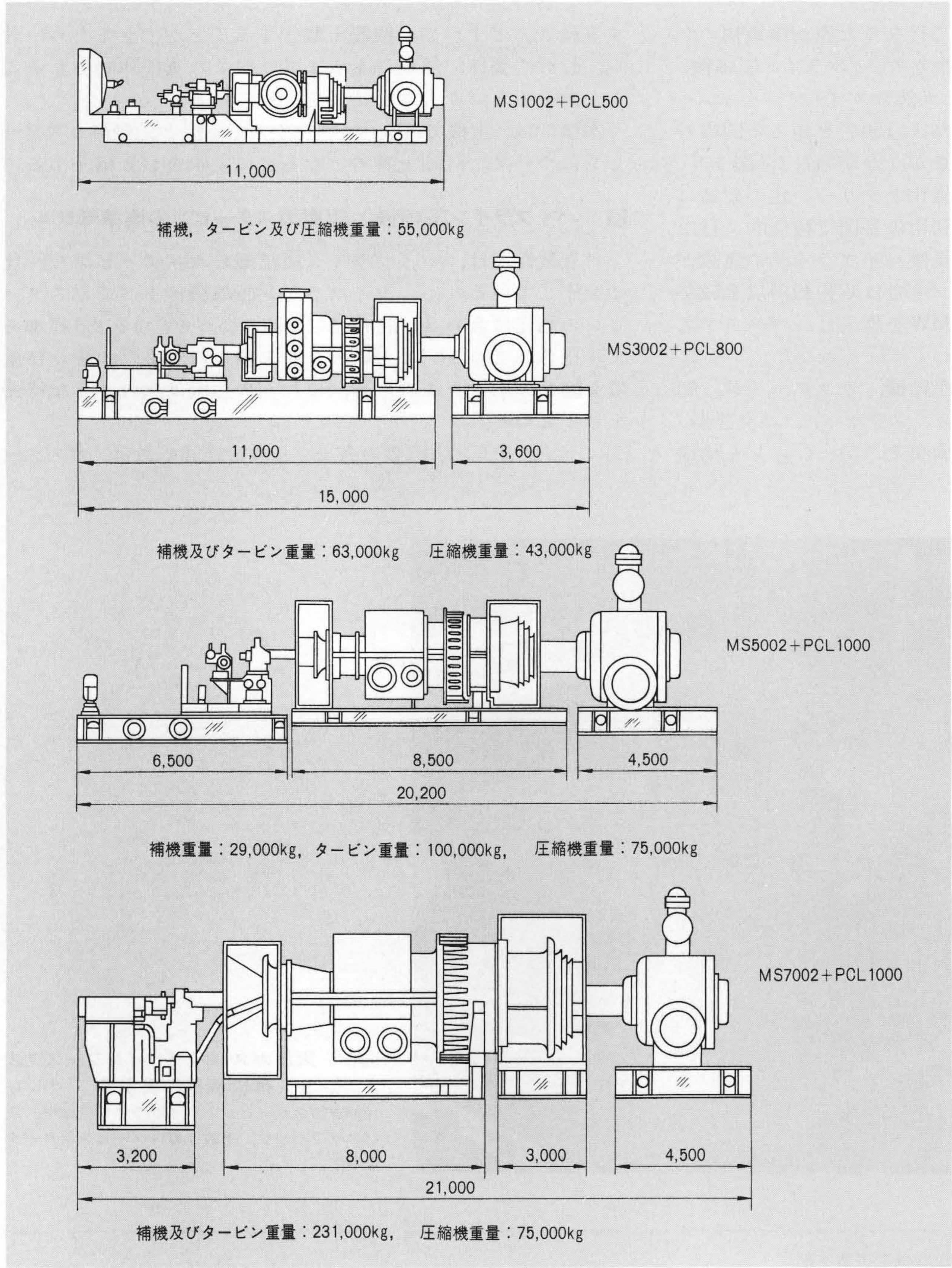


図2 パイプライン圧縮機と二軸ガスタービンの寸法及び重量
ガスタービンは圧縮機との組み合わせが標準化されている。

パイプライン圧縮機は、パイプラインを流れる流量が年とともに増加していく場合、パイプ内の圧力損失が流量の二乗に比例するため、圧縮比を大きくする必要が生ずることが多いが、同一のケーシング内に表1に示すように、インペラだけを1～4段まで増加して圧縮比の上昇に対応させることができる。図3に1～3段まで入れた圧縮機モデルPCL800を示す。

ガスタービンの定格出力は、ISO条件(外気温度15℃、大気圧力1.0atm)で一般に表示されるが、出力は外気温度によって図4に示すように変化する。

また、パイプラインの流量も季節によって変化するのが一般的であり、設計点を選ぶ際には例えば冬季のガス流量増加要求に対しては、ガスタービンの大気温度低下に伴う出力増加傾向のメリットを考慮するなど、むだのない計画を行なう必要がある。パイプライン圧縮機を駆動する二軸ガスタービンは、発電用に用いられる一軸ガスタービンとは異なり、回転数の制御範囲は50～105%と大幅に変化が可能で、冬季には回転数を上げて流量、圧縮比を増加させ、この所要動力の増加は大気温度の低下による出力増加により調達ができるなどである。

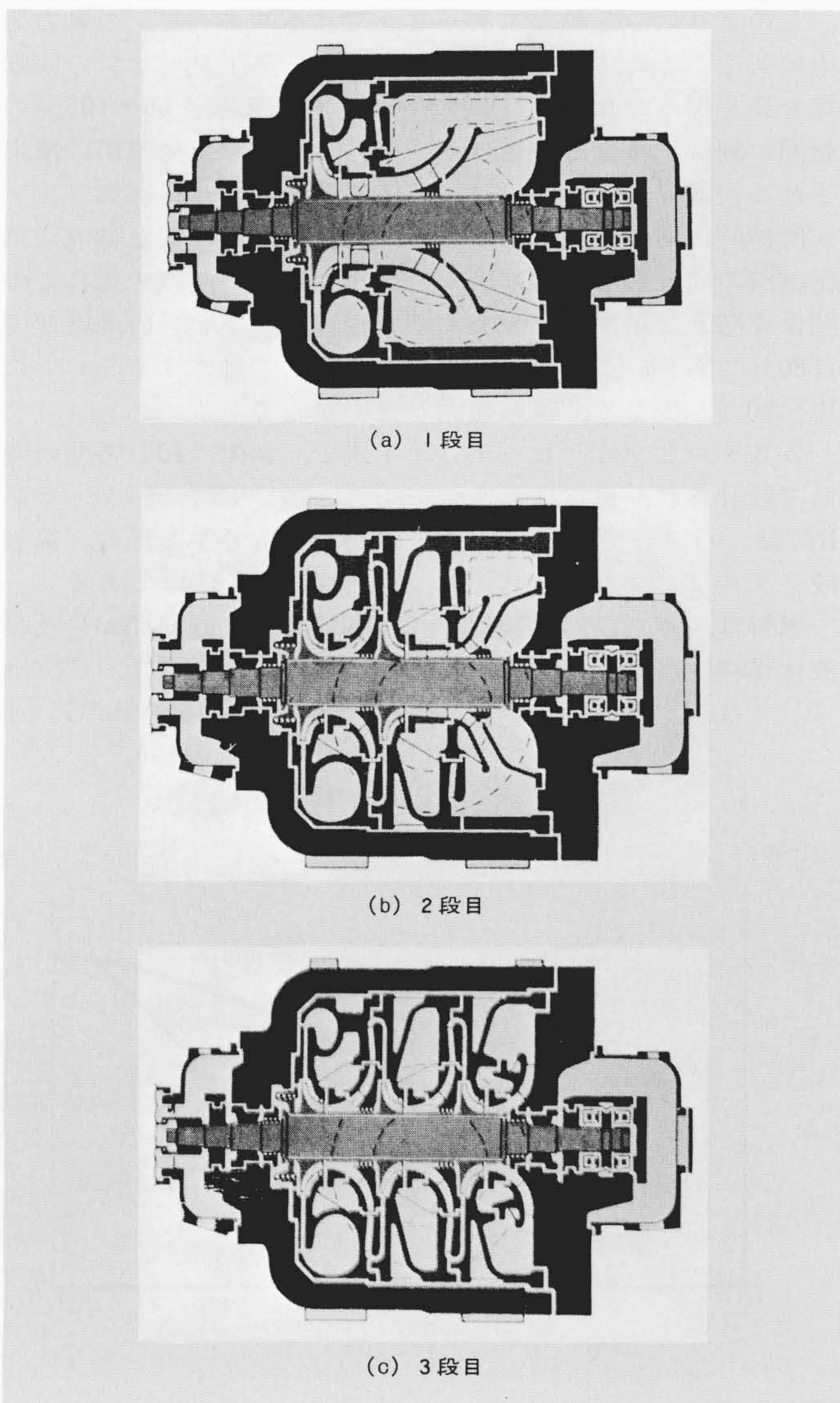


図3 1段—2段—3段機断面図 将来の送ガス量の増加に伴う圧縮比の上昇に対し、ケーシングはそのままにして段数を増加させることができる。

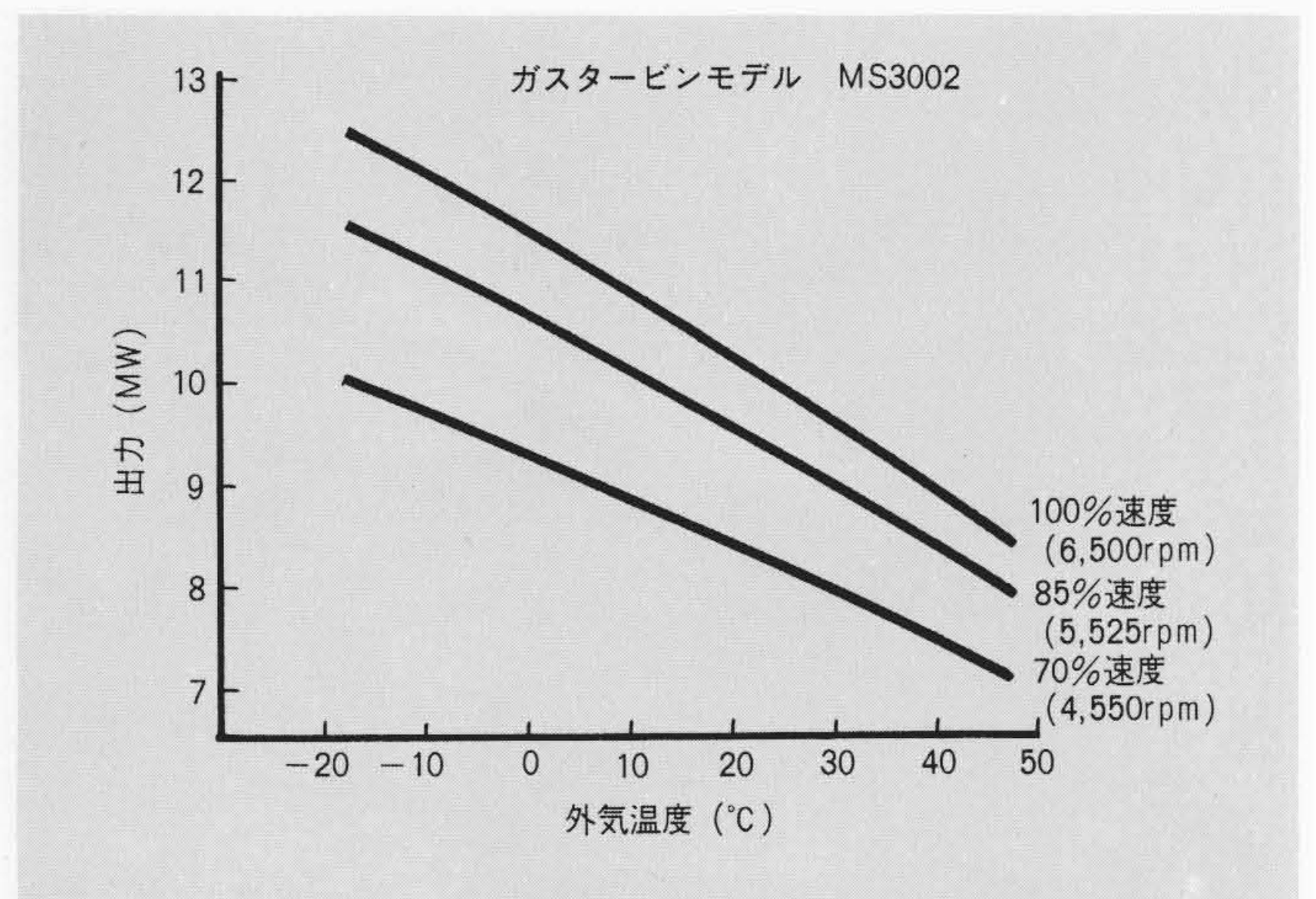


図4 ガスタービンの出力と外気温度、回転数の関係 ガスタービンは、外気温度の低下に伴い出力が増加するので、冬季の送ガス量の増加に対応できる。

最近の大容量パイプライン圧縮比は、大体1.3～1.5ぐらいが多く、また、吸込圧力は50kg/cm²、吐出し圧力は75kg/cm²で計画されている。一方、NP形パイプライン圧縮機の標準設計では、最高圧力100kg/cm²まで可能である。

一般にブースタステーションの距離は、100～150km間隔に設置される。ブースタステーションで使用される動力に必要な燃料天然ガスの量は、主パイプ流量の約0.5%程度(ガスタービン効率：26%、単純サイクルとして)である。

輸送すべきガス量と輸送距離が与えられたとき、最も経済的なパイプライン系の設計を行なうため、幾つかの代案をコンピュータにより評価するプログラムを作成した。

3 日立-NP形パイプライン圧縮機の構造

パイプライン圧縮機はPCL形と呼ばれ、吸込、吐出しフランジは水平、左右対称に配置して応力を均一化し、しかもラインの組み込みが容易である(図5)。

鍛鋼製のケーシングは、縦分割のバーレル形で軸受部が一体となっている。また、ヘッドフランジも鍛鋼製でケーシングにボルト締めされる。

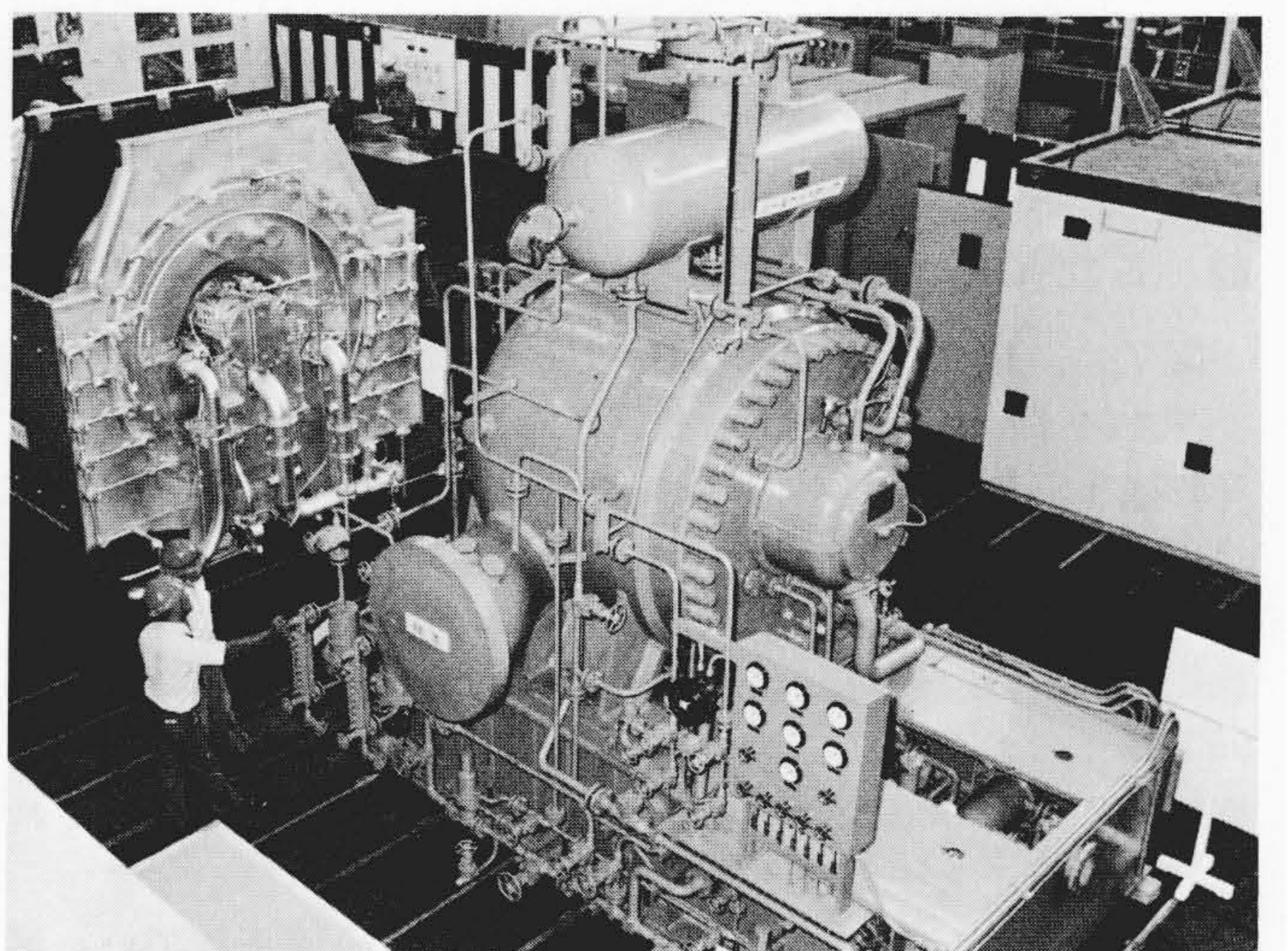


図5 PCL8002パイプライン圧縮機 手前の吐出しフランジは、水平方向に付くので配管が容易である。上部のタンクは、シールヘッドタンクである。

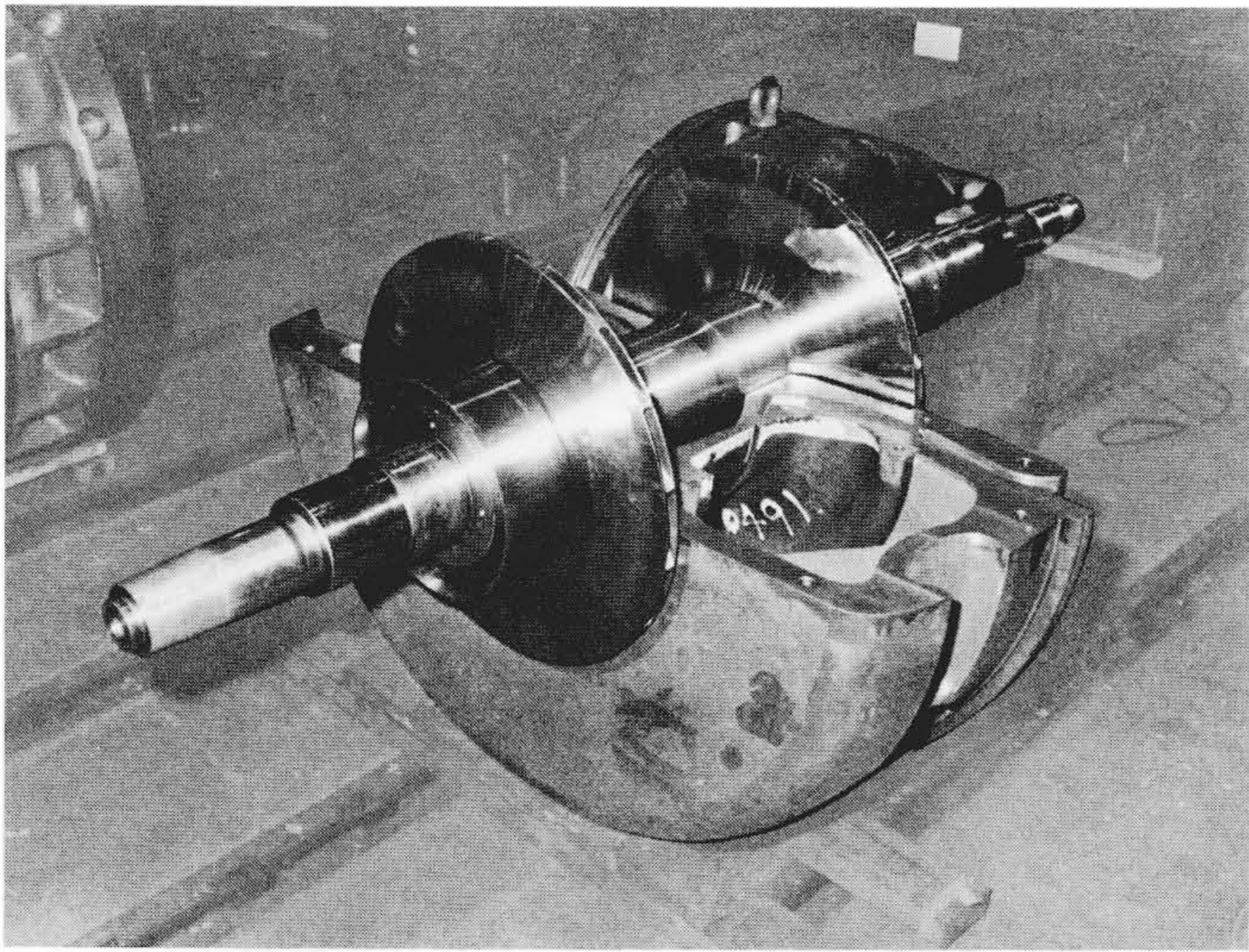


図6 パイプライン圧縮機のダイヤフラムとロータ 特殊工具によりケーシングに組み込む。将来3段に変更するときは、これをそのまま取り替えることができる。

図6にダイヤフラムとロータ(2段)を示す。鍛鋼製の溶接インペラを鍛鋼シャフトに焼ばめしたロータを、鋳鉄製のダイヤフラムに組み込みバンドルとする。このバンドルは、特殊工具により、ケーシングに軸方向から組み付ける。軸受は、ケーシングとヘッドフランジに直付の構造で十分な剛性をもたせてある。

スラストベアリングは「ダブルアクティング-キングスベリ-タイプ」を採用している。軸受の潤滑油は、ガスタービンの給油装置から分岐して供給する。ガスタービンからの潤滑油をシールポンプにより昇圧し、バイパスと絞りの制御弁により適正圧力に制御してシール部へ給油する。シール給油のほとんどは大気側へ流れて、潤滑油と一緒に排油管を経てタービンのタンクへ戻る。一部の接ガス油は、ドレーナにより自動排出された後、デガスタンク内で加熱ガス抜きの後タンクへ戻る。このシール装置には、故障時のバックアップのためにヘッドタンクを設けており、トリップ後、機内のガス放出が完了するまでのシール給油を行なっている。

一般にパイプライン圧縮機の制御は、吐出し圧力一定の制御を行なう。すなわち、圧力調節器の信号により、ガスタービンの回転数を自動制御する方法である。サージング防止装置は、流量検出は入口フランジからインペラ入口までの圧力損失を流量項として、入口-出口の圧力差を圧力項として演算し、規定の流量より小流量のサージング領域に入る前に、バイパス弁を開いてサージング運転を防止する。

4 日立-GE二軸形ガスタービン

図7に、組立中の日立-GEヘビーデューティ形二軸メカドライブガスタービンを示す。右側から高效率軸流圧縮とそれを駆動する高圧タービン(1段)、負荷を駆動するパワータービン(1段)である。ケーシングは水平に2分割され、保守が容易な構造となっている。空気はいちばん右のベルマウスから軸流圧縮機に入り圧縮され、燃焼器に導かれて高温ガス(900~950℃)となり、高圧タービンで軸流圧縮機を駆動し、次いで機械的に全く独立したパワータービンに流れ左側に接続されるパイプライン圧縮機を駆動後、排気される。

高圧タービンとパワータービンとの間に設置されている第2段ノズルは可変式となっており、パイプライン圧縮機の回転数を上昇させたいときはノズルを若干閉じることにより高圧

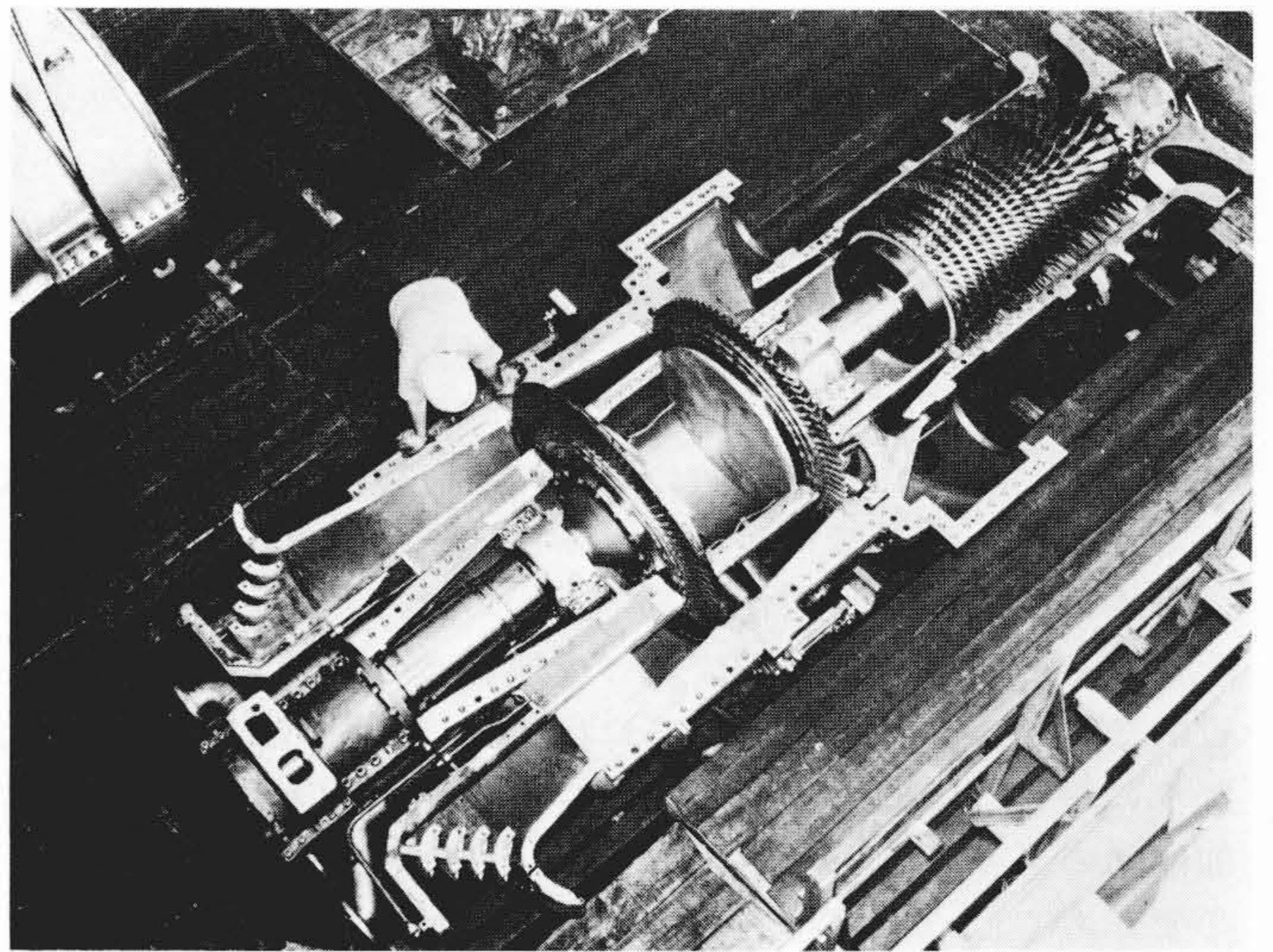


図7 組立中の10MW日立-GE二軸ガスタービン ケーシングは水平に2分割され、右から空気圧縮機、高圧タービン及びパワータービンがみられる。

タービン出口(第2段ノズル入口)の圧力を高めることにより、第2段ノズル及びパワータービンで吸収される熱落差を大きくし回転数を上昇させる。

このように、二軸ガスタービンではガスタービンの動力発生に欠くことのできぬ軸流空気圧縮機と高圧タービンの回転数を高く保ったまま、パワータービンの回転数を50~105%の範囲に制御することができる。一方、主として発電用に使用される一軸ガスタービンは、高圧タービンとパワータービンが機械的に結合されているため、回転数を下げると軸流空気圧縮機の回転数も同時に下がり、発生動力が激減する。この関係を図8に示す。すなわち、一軸ガスタービンの最低速度は80%であり、この点での動力の余裕は二軸ガスタービンに比べ30%も少なく、運転範囲が狭くなっている。

ガスタービンはヘビーデューティ式で、動翼は10万時間の寿命で設計され、材質はニッケルベースの耐熱鋼(高圧タービンIN738、パワータービンU500)で精密鍛造で作られる。第一段ノズルは、コバルトベースの耐熱鋼(FSX414)である。

燃料は、ガス燃料(発熱量:2,700~45,000kcal/Nm³)及び液体燃料(軽灯油、重質油)も使用できる。天然ガスパイプラインでは、主パイプラインのガスを減圧(12~15kg/cm²G)し、

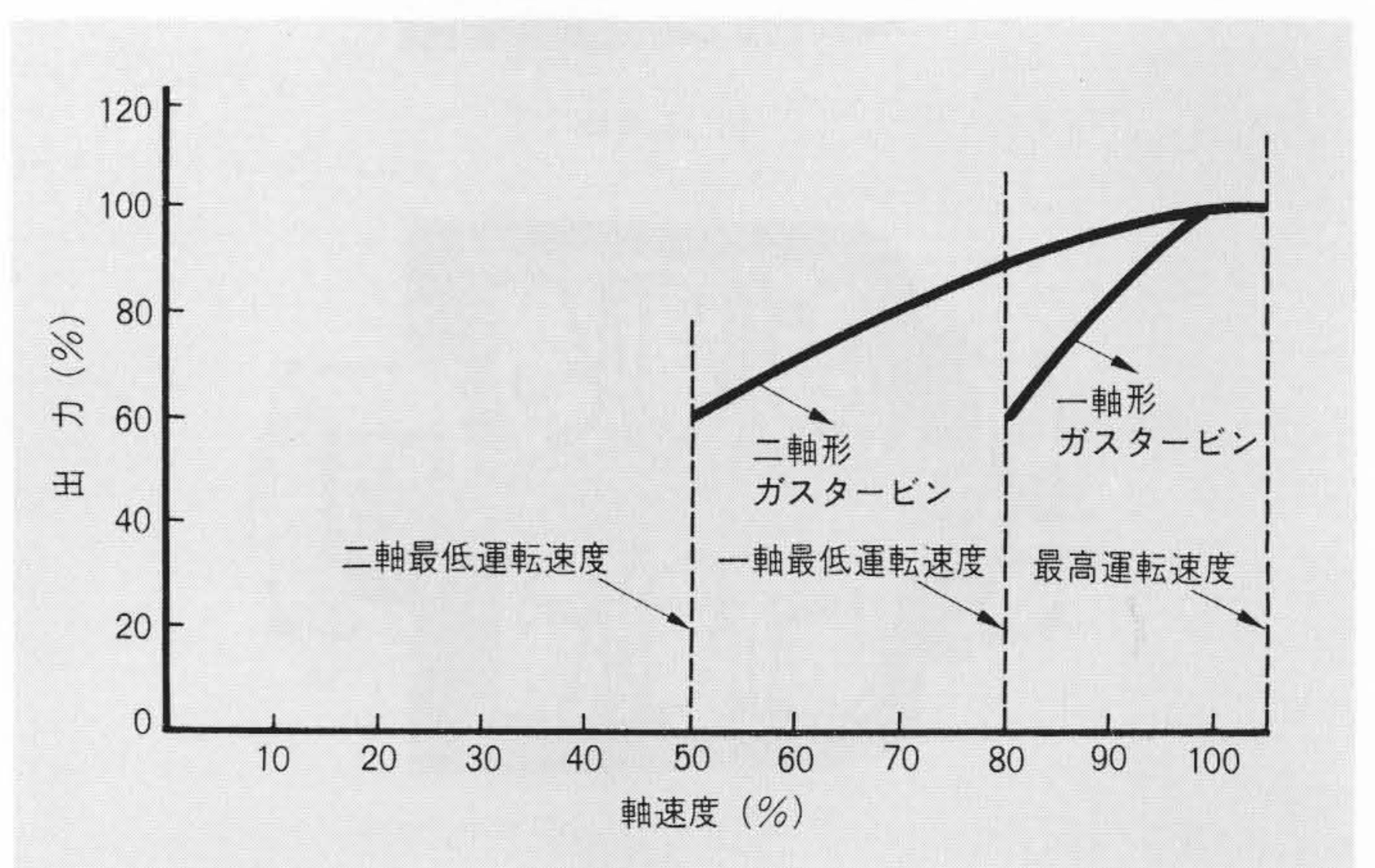


図8 二軸ガスタービンと一軸ガスタービンにおける軸速度と出力の関係 二軸ガスタービンは、一軸ガスタービンに比べて回転数の制御範囲が広い。

必要に応じ除塵、除湿、加熱してガスタービンに給供する。
天然ガスはクリーンな燃料であり、ガスタービンの保守も容易で、天然ガスパイプラインにガスタービンは最もよく適した原動機といえる。

5 ソ連向けブースタステーション

昭和51年10月、ソ連向けガスパースタステーションをパイプライン圧縮機(PCL 802)とその駆動用10MW ガスタービン(MS 3142)をはじめとして、ステーション内配管、燃料処理装置、圧縮機ユニット及びステーション全体の制御システム、弁、その他ステーションに必要な機器の全体をシステムとしてパッケージで受注し、昭和52年11月に完成のうえ輸出した。このステーションは、ソ連オーレンブルグから国境近くのカルコフまでの1,400km を径48inのパイプラインで構成する14ステーションのうちの一つで、ボルゴグラート市の近くのパラソフカに設置されることになっている¹⁾。
このステーションの大きな技術的課題の一つとして、過酷な現地の立地条件の克服があげられる。すなわち、冬季は零下45℃夏季は40℃と夏冬の温度差は85℃にも達し、弁などの機器は屋外に設置され風雪に曝されるものが多い。これらのすべての機器は、取り扱う物体が可燃ガスであることからその作動には十分な信頼性と安全性が要求される。この絶対条件に対し多角的な技術検討が続けられ、低温用材料の選定、凍結対策、機器の実温下での作動確認試験など、低温対策か

表2 ブースタステーションの基本仕様 ソ連向けブースタステーション設計の基本となる仕様を示す。

項 目	仕 様
天 然 ガ ス 流 量	68.48Sm ³ /d
ステーション入口ガス圧力	50atm
ステーション出口ガス圧力	75atm
圧 縮 比	1.5
天 然 ガ ス 成 分	99.3% メタン
天 然 ガ ス 温 度	-15~40℃
外 気 温 度	-45~43℃
パイプライン圧縮機台数	5台(内1台は予備)
パイプライン圧縮機動力	9,580kW
運 転 方 式	全自動運転(無人運転を可能とする)
最 大 輸 送 重 量	60t

ら腐食対策、防爆対策に至るまで、機器の一つ一つに最適な施策が施された。
表2にこのブースタステーションの基本仕様を、図9に配置図を示す。
天然ガスパースタステーションの運転は完全に自動化され、

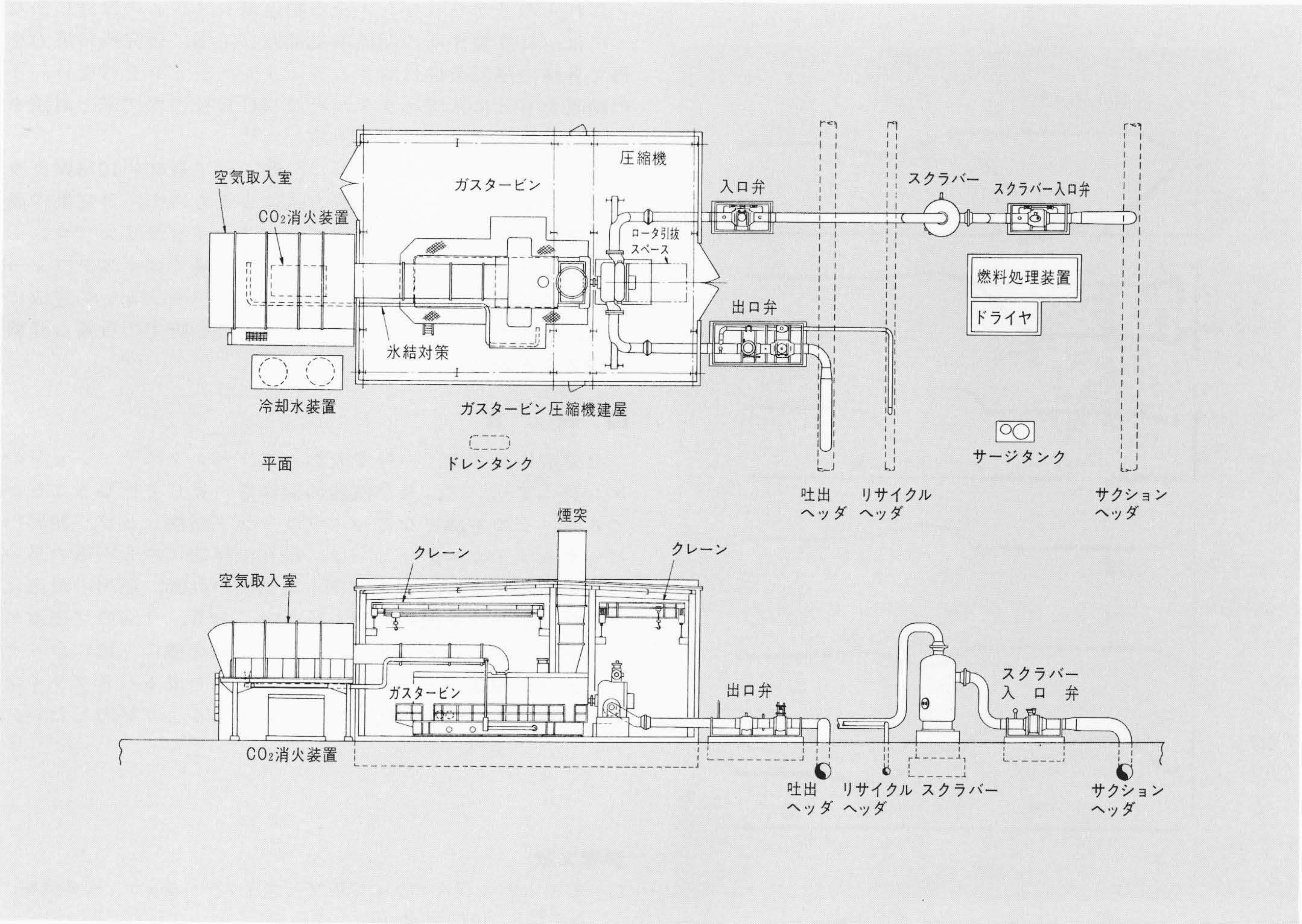


図9 ブースタステーションの配置 ブースタステーション1台分の配置(このようなユニット5台分で構成されている)を示す。

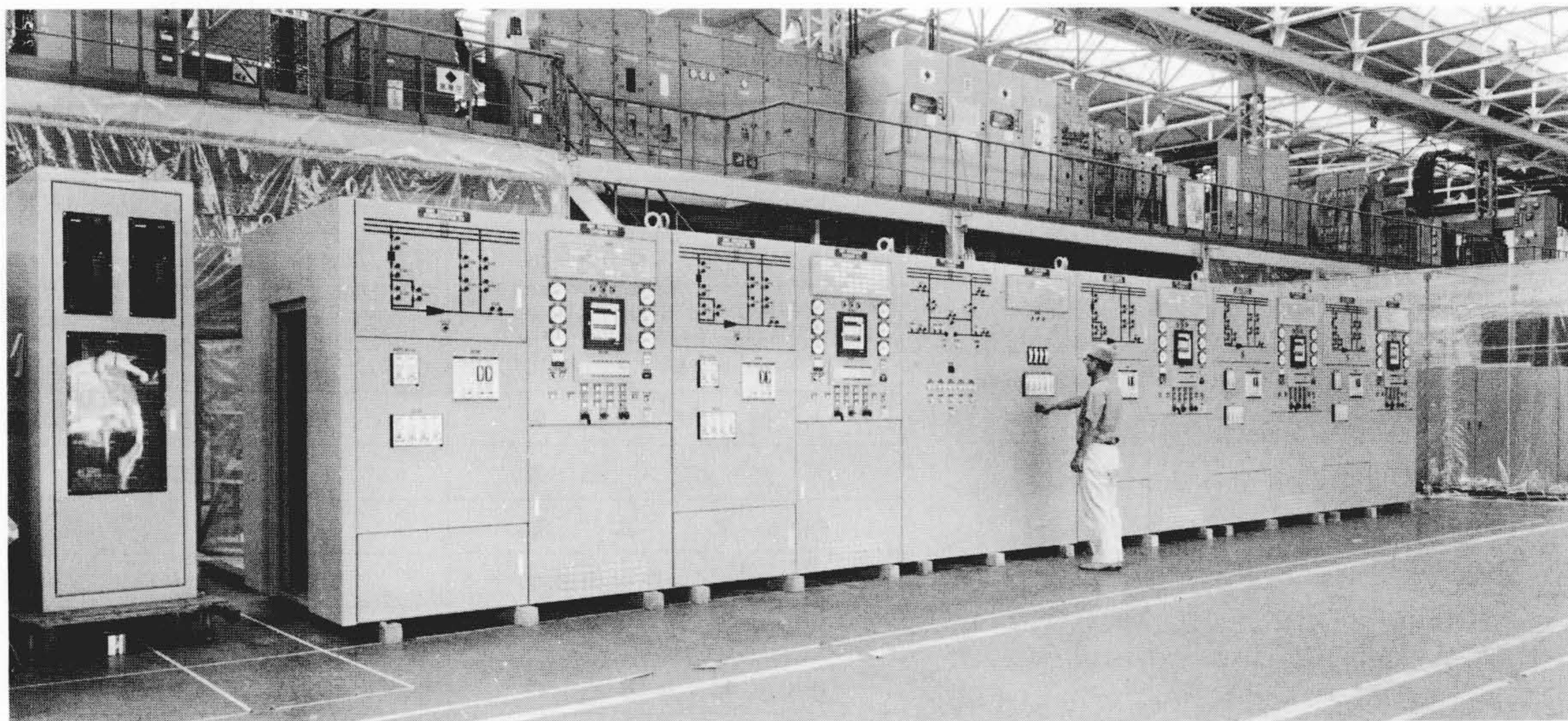


図10 ブースステーション中央盤
ユニット及びステー
ション制御盤 中
央のステーション制御
盤(2面)の指令により、
5台分のユニット制御
盤(左2面、右3面)が各
ユニットを制御する。

中央監視所からのテレメータにより吐出し圧力、ガス流量など基本パラメータのセット値がステーション制御システムに指示されると、ステーション制御システムで運転すべきユニットの台数、運転条件を決定し、ユニット制御装置に指令する。

図10にユニット制御盤及びステーション制御盤を示す。ユニット制御盤は、ガスタービン制御盤1面と圧縮機制御盤1

面から構成され、図10では右に3ユニット分、左に2ユニット分配置され、その中央にステーション制御盤が配置されている。

ステーション機器は、すべて完全自動起動、停止が行われる。これらに必要なバルブ類の開閉のため、ロジックシステムがステーション制御盤内に収納され安全確実な運転を保証している。図11にステーション特性のシミュレーション結果の一例を示す。

これらのステーションの全自動運転システムの設計に当たっては、日立製作所の関係事業部及び工場、研究所の協力を得て各種の運転条件に対するシミュレーションを行ない、その結果をもとに米国ベクテル社及びGE社の専門家と討論を行ない最終的に日立方式を決定した²⁾。

このブースステーションは、我が国で最初の10MWクラスの大容量ガスタービン駆動方式によるもので、日立製作所では関係事業本部の協力を得て、ガスパイプラインプロジェクト・グループを結成するとともに、各工場ではタスクフォースを組んで技術開発を行なった。このステーションの完成により、天然ガスブースステーションの分野での貴重な経験を得ることができた。

6 結 言

日立製作所では、一社で天然ガスブースステーションのエンジニアリング、及び機器の製作を一貫して行なうことができる。その主機となるパイプライン圧縮機、及び二軸形ヘビーデューティガスタービンは、現在世界的に最も実績の多い形式である。更に、パイプライン全系の計画、運用の最適化計画など、ソフト面の開発も行なっており、今回のソ連ガス工業省向けブースステーションの完成を機に、更にいっそう広範囲な複数ブースステーションから成るパイプライン全系に対するシステム化の面で実績を作るよう努力したい。

参考文献

- 1) 安田：ガスパイプライン用ブースステーション，産業機械，No. 325，107(昭52-10)
- 2) 油井ほか2名：ガスパイプラインシステムの計画と制御，日本機械学会誌，80，第708号，1133(昭52-11)

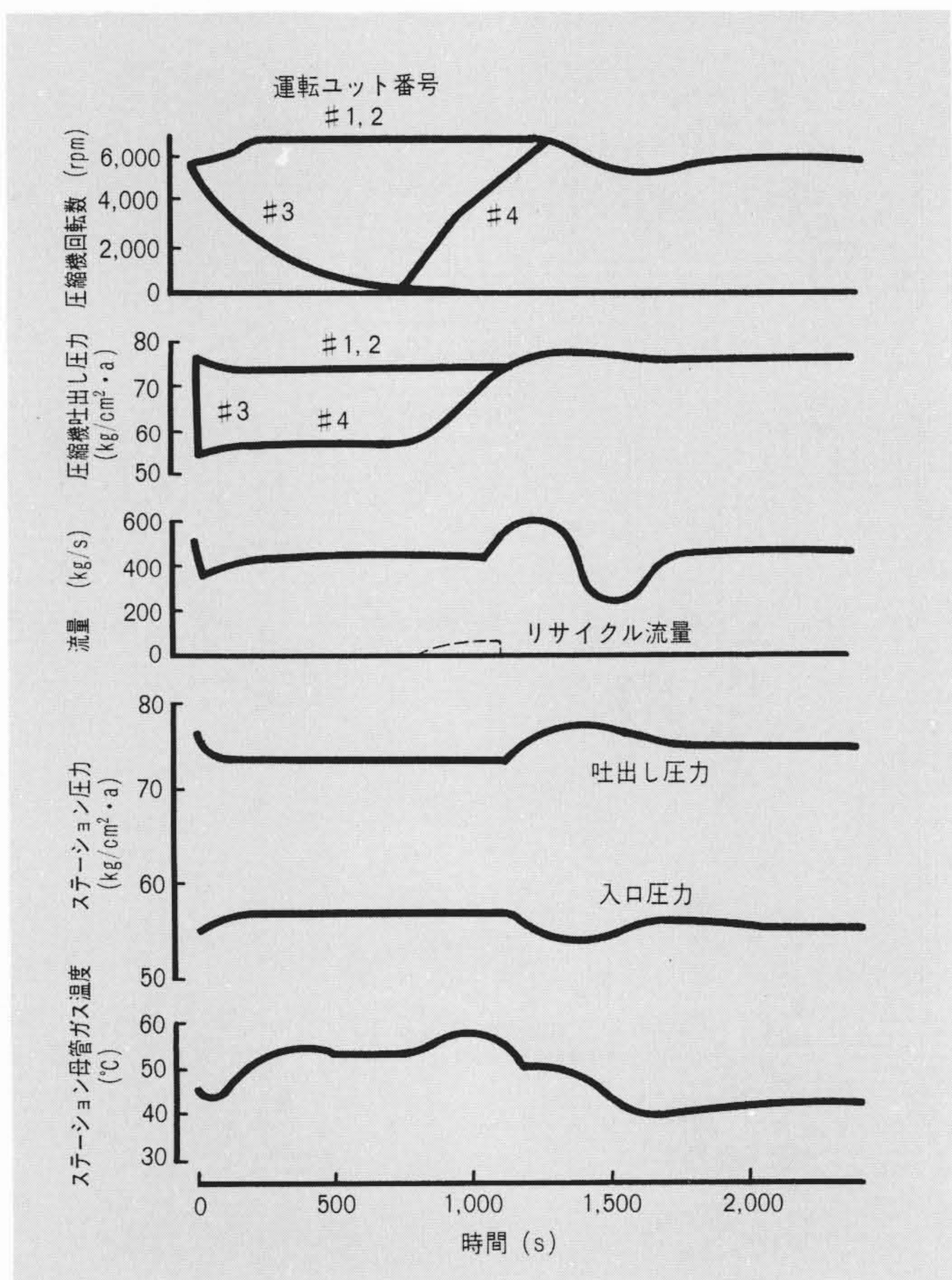


図11 ステーション特性のシミュレーション結果の一例 3台運転中、1台が事故停止時に予備機が1台自動起動したときのステーション特性のシミュレーション結果を示す。