

天然ガスパイプラインの動向とシステム計画

Development Tendency and Systems Planning of Natural Gas Pipeline

最近天然ガスパイプラインの建設が多く行なわれており、このなかにはガスタービン、圧縮機、通信制御装置などが多数組み入れられている。この市場の新しいニーズは、機器単品としての提供では不十分で、例えばガス圧送ステーション一式をシステムとして取りまとめて応ずることが必要となってきた。

そのためには、パイプライン全系に関するシステム計画が必要で、すなわち、(1)設備計画・容量設定、(2)パイプライン全系の運用・運転計画、(3)ガス圧送ステーション内運転制御から成る。(1)では建設、運転及び保守のコスト最小を目指した計画法を、(2)では運転動力費最小の運用計画法を、(3)では流体過渡現象を把握するシミュレータを用いた最適運転手法の選定法について述べ、システム受注に十分応じられることを述べた。

油井 兄朝* Yui Shigetomo

小島 秀夫** Kojima Hideo

藤井 正大*** Fujii Masahiro

1 緒 言

最近クリーンエネルギー確保の世界的ニーズを反映して、天然ガスパイプラインの建設が数多く行なわれている。

パイプラインの構成は、長大なパイプやガス圧送ステーション、全系の通信制御装置などから成り、その建設の幾つかに我が国からもパイプや機器の供給がなされてきた。

しかし、最近の市場ニーズの動向は、その規模が大きいかつ複雑になるに従って単品としての買付けは少なくなり、例えば、ガス圧送ステーションや通信設備を一式まとめて発注するといった、システムとしての提供が求められるようになってきた。

このようなニーズに応ずるには、パイプライン全系に関するシステム計画の技術を身に付ける必要がある。すなわち、所定のガス量を目的地まで輸送するための建設、運用コスト最小の設備計画、安定かつ安全で保守の容易な運用・運転方式の設定、及び取りまとめエンジニアリングの技術が極めて重要になる。

日立製作所では、既に保有しているガスタービン、圧縮機、通信制御などの技術に上記システム計画の技術を加えて、パ

イプラインをシステムとして提供できる技術蓄積が得られたので、ここにその概要を取りまとめて述べる。

2 天然ガス関連システムの概要とパイプラインの位置づけ

図1に、天然ガスの産出地から消費地までの一般的経路を示す。すなわち、ガスの採取端では、生産井から噴出するガスを分離装置により油分、水分などを除去し、集ガス圧送ステーションで昇圧して集ガスパイプラインへ送り出す。多数の集ガスパイプラインにより集められたガスは、ガス処理装置でガス中に含まれている天然ガソリン(NGL)や、エタン、プロパンなどの重質ガスを分離し、高純度のメタンに精製される。そして、幹線用圧送ステーションにより昇圧されたガスは、幹線パイプラインへ送り込まれ長距離輸送されて天然ガス液化設備に至り、ここで液化天然ガス(LNG)となって船積みされ、最終消費地まで輸送される。

図1から明らかなように、ガスパイプラインは集ガス部と幹線部とにあって、それぞれには一般に数箇所のガス圧送ス

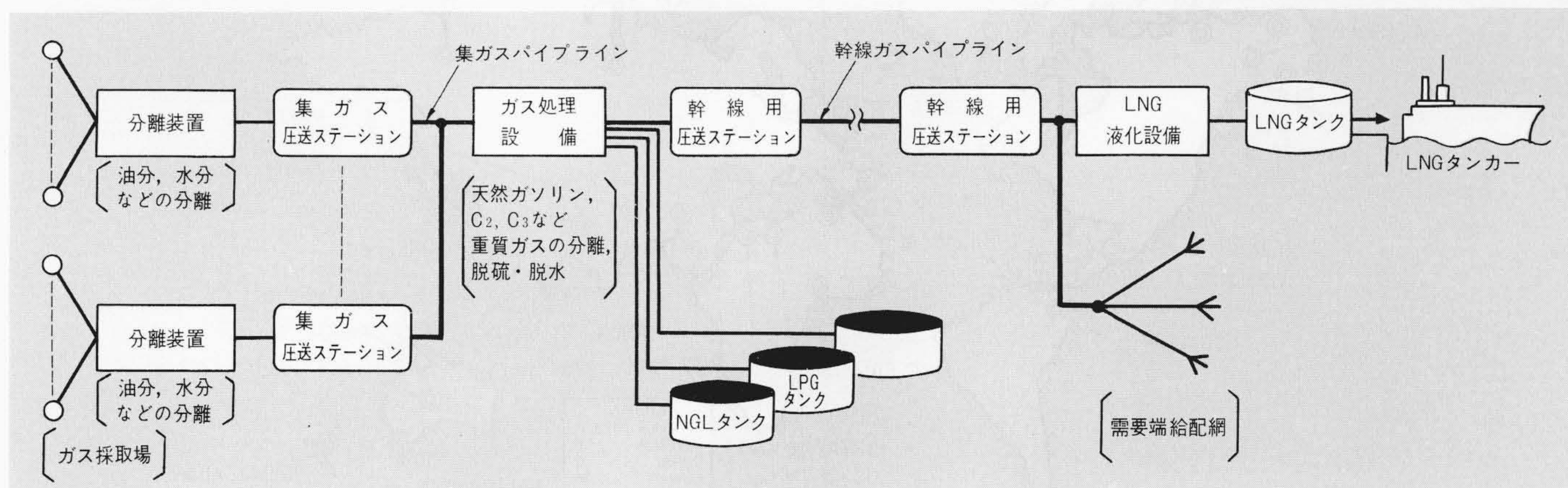


図1 天然ガスの採取端から消費地までのフロー 天然ガス関連産業は極めて広域に及び、その中でパイプラインの位置づけを示す。

* 日立製作所システム事業部

** 日立製作所電力事業本部

*** 日立製作所土浦工場

テーションが設けられている。このように、ガスパイプラインはガスの採取、処理、輸送、液化といった一連の流れの中に位置づけられており、そのシステム計画に当たっては、周辺の設備との有機的な結合を十分考慮して進めていくことが重要である。

3 ガスパイプライン建設の近況

1976年度でのパイプライン関連全投資額は約2兆円¹⁾といわれており、パイプラインの総延長は約2万kmに及ぶと推定される。このうちガスパイプラインは、ほぼその45%に相当する。

また、1976年8月現在で建設中、計画中、申請中などの案件をすべてまとめると、全世界でのパイプライン計画の総延長は85,000miles(137,000km)に達し、その内訳は表1¹⁾に示すとおりである。

表1 世界におけるパイプライン建設の近況¹⁾ 1976年8月現在の世界における建設中、計画中及び申請中のものを含めたパイプラインの総延長距離を示す。

パイプライン種類 地域	ガ ス (miles)	原 油 (miles)	精製油 (miles)	スラリー (miles)	計 (miles)
ヨーロッパ	3,558	1,619	3,627	—	8,804
アフリカ	2,481	2,275	4,985	—	9,741
中近東	6,095	7,602	3,454	—	17,151
東南アジア	1,197	2,529	1,375	165	5,266
オーストラリア	2,626	180	741	480	4,027
カナダ	8,979	4,040	3,293	1,782	18,094
メキシコ	600	436	884	—	1,920
南米	4,894	2,075	1,760	270	8,999
東欧	930	565	263	—	1,758
ソ連	7,184	625	1,485	—	9,294
計	38,544	21,946	21,867	2,697	85,054

表1 から明らかなように、このうちガスパイプラインが最も多く、地域的にはカナダ、ソ連、中近東が多い。特にソ連は大規模なガスパイプラインの建設^{2),3)}を長期にわたって続けており、1985年にはその総延長は17万kmに達するとされている。

以上を総合すると、ガスパイプラインの建設は、毎年ほぼ1万kmのペースで進められているものと予想される。

なおパイプライン建設費の内訳は、パイプが30%、関連機器類が35%、残りの35%が施工工事その他と考えられている。

また、LNG輸出の可能性をもつ天然ガス埋蔵地域の分布を図2⁴⁾に示す。同図中のALASKA、BRUNEIなどは既に我が国に輸入されており、これら産出地の開発は今後ますます急ピッチで進められよう。そして、天然ガス関連産業はますます大きな市場として発展するものと予想される。

4 ガスパイプラインシステムの構成

図1 に示すなかで、特に幹線パイプラインを主体に言及し、この中の主なシステムの構成要素について述べる。

4.1 ガス圧送ステーション

大規模幹線用圧送ステーションの基本構成と、主な機器の名称を図3 に示す。同図は圧縮機が複数台並列に結合されたものを示しており、ガスは左下の入口弁を経て吸込ラインに入り、塵取装置を経て圧縮機入口に至る。そして、ガスタービンにより駆動される圧縮機で昇圧された後、吐出しラインに入り、ガスクーラで冷却され出口弁を経てガスパイプラインへ送り出される。

ほかに、圧縮機の起動時、停止時などに生ずるサージ現象を防ぐため、リサイクルラインが設けられ、必要に応じてこのラインをガスが循環する。

駆動用ガスタービンの燃料は、一般に送ガスそのものを使用し、圧送ステーション内に設けられたガス処理装置を経て、ガスタービンに供給される。

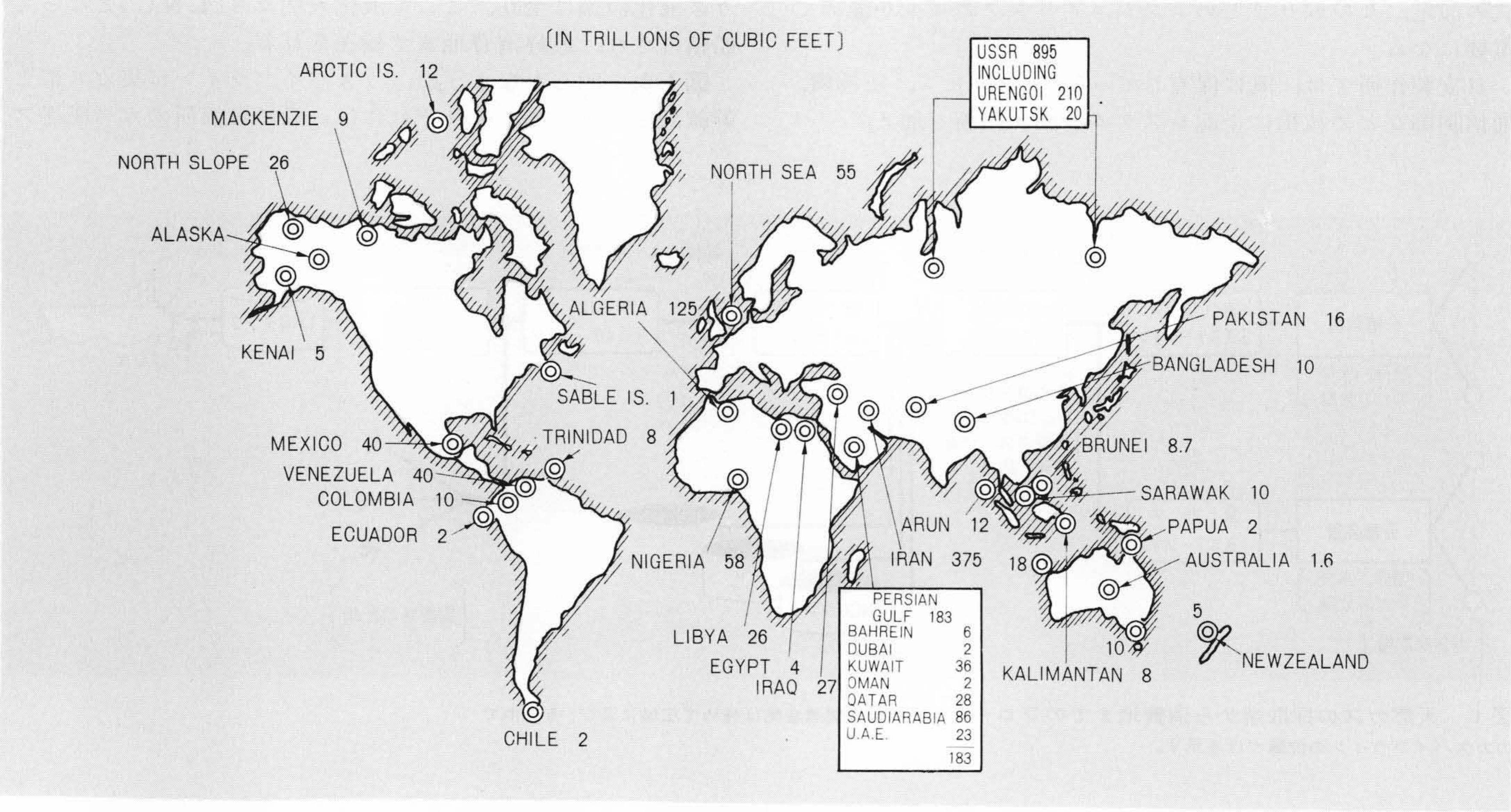


図2 LNG輸出の可能性をもつ天然ガス埋蔵地域⁴⁾ この図はLNG輸出の可能性をもつ地域に限られているが、その量は巨大なものである。

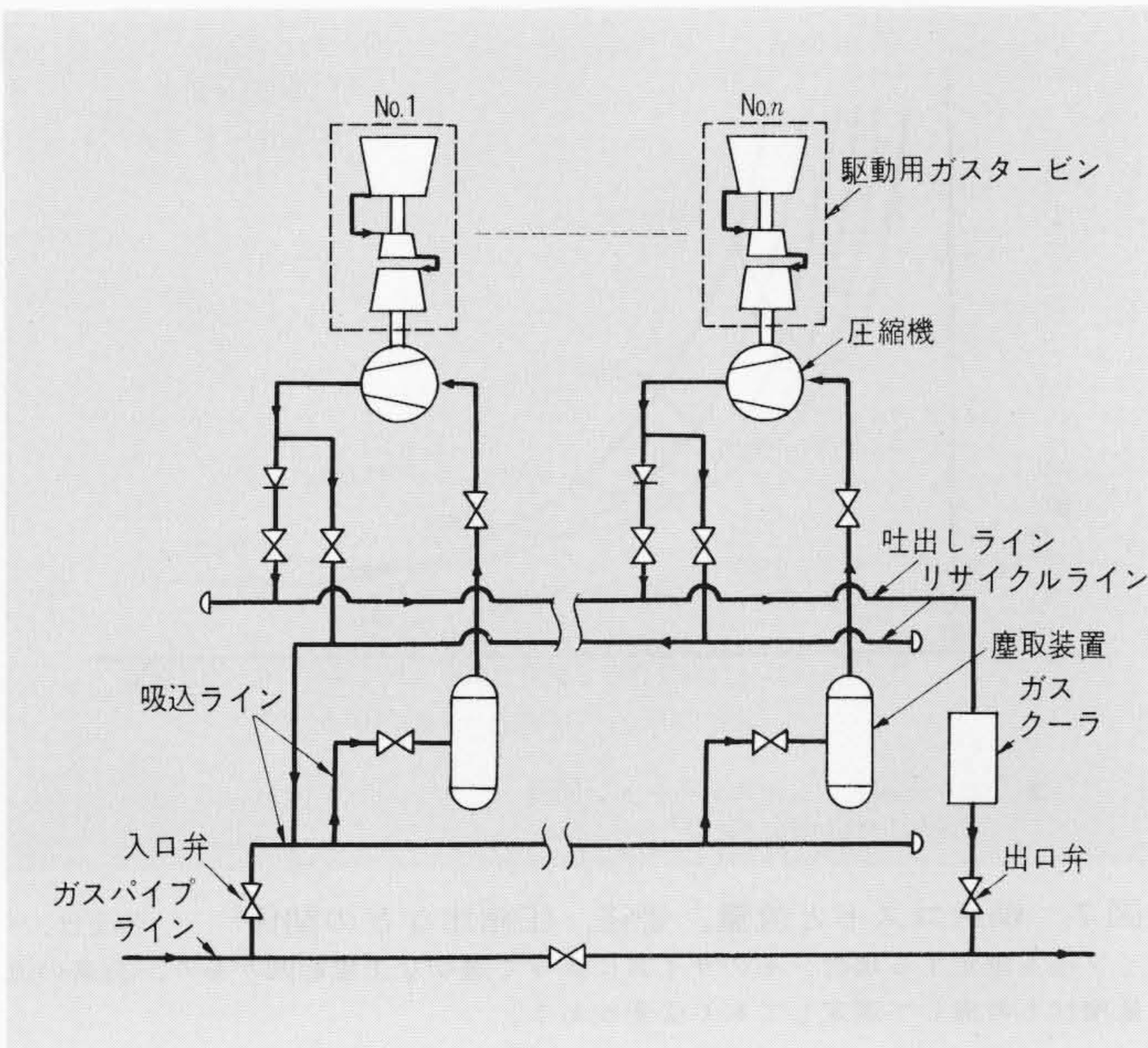


図3 ガス圧送ステーションの基本構成 ガス圧送ステーション内の主機、付帯設備、及び配管システムの一般的構成を示す。

4.2 ガスタービン及び圧縮機

駆動用ガスタービン及び圧縮機の構造を図4に示す。同図の左側は日立-GE形ガスタービンMS5002 2軸形ガスタービン⁵⁾で、発電用などの定回転数運転に適する1軸形と異なり、出力軸回転数を広範囲に変化させて使用できる。ガスパイプラインは需要端の要求に応じて送ガス量を大幅に変える必要があるため、このような出力軸の回転数を変えて運転できる

2軸形の採用が適切である。

図4の左側が高圧タービンを、中央のタービンセクション部は低圧タービンを示し、この部分の軸は機械的に独立となっている。なお、右側のロードタービンの軸端にガス昇圧用の圧縮機が接続されている。

ガスパイプライン用圧縮機は通常遠心式⁶⁾が採用されており、同図は日立-PIGNONE PCL形2段式遠心圧縮機を示すものである。

遠心式は回転数を変えることにより流量を大きく変化させるので、ガスパイプラインの基本的要望である流量変化に十分対応することができる。

4.3 通信制御システム

長大なパイプライン全系の状況を常に把握し、安全かつ確実な運転を行なうには、図5に示すパイプライン全系監視制御システムが必要となる。すなわち、

- (1) パイプライン全系を対象とした中央監視制御システム
- (2) ステーション制御システム
- (3) ユニット制御システム

の3段階から成り、制御用計算機システム、テレメータ、通信設備などによって構成される。

各々の監視制御システムの内容については5.2の運用と運転制御で述べる。

5 ガスパイプラインのシステム計画

システム計画とは、顧客からシステムの基本的要求、例えば年間送ガス量や輸送距離などが与えられたとき、それを実現するための基本設計や仕様の決定、及び経済的検討などを行ない、最適な計画を求めるまでの段階を指す。

パイプラインのシステム計画は、次の3項に大別すること

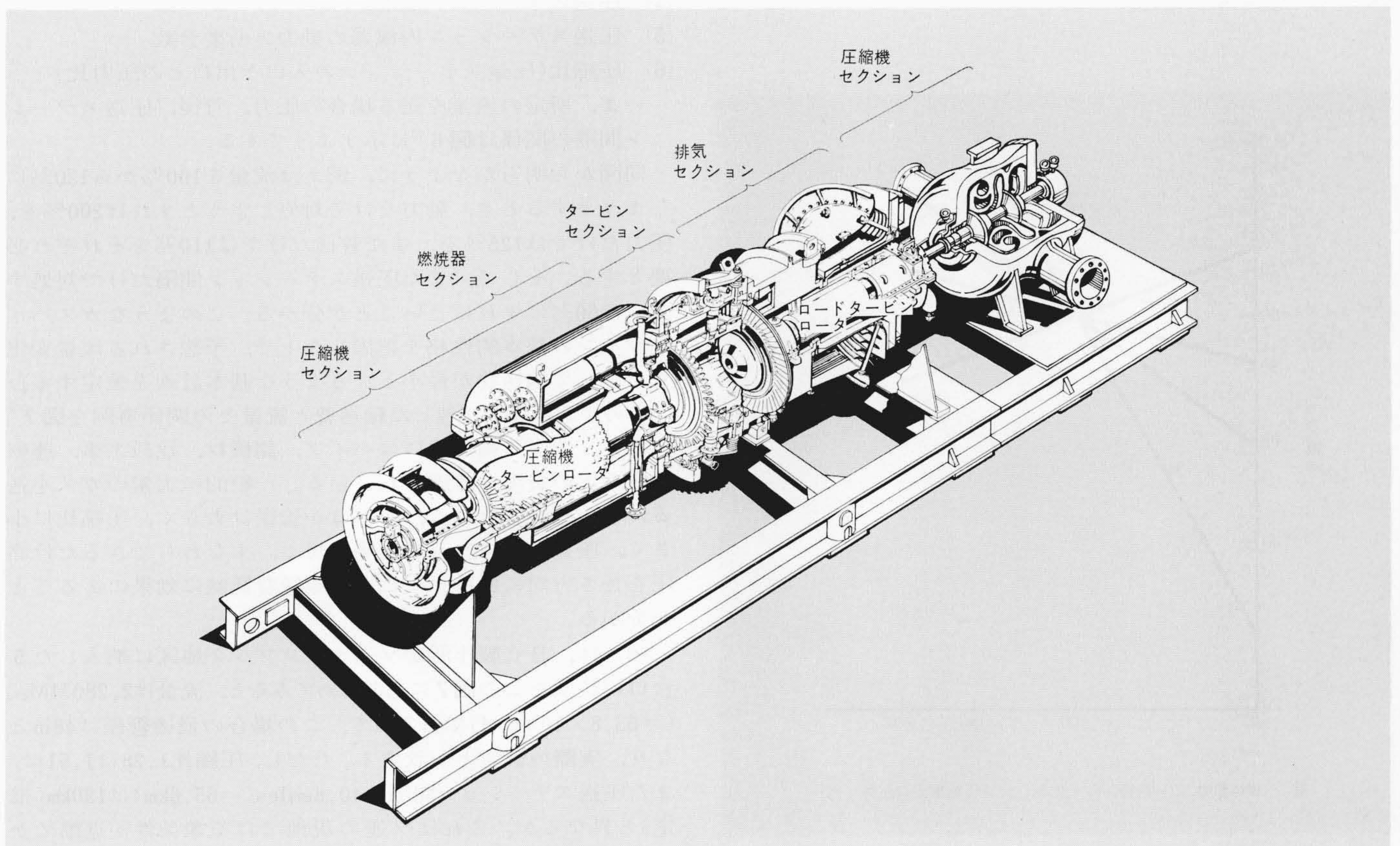


図4 ガスタービン及び圧縮機の構造 ガスパイプラインの圧送ステーション用に構成された1ユニットを示す。

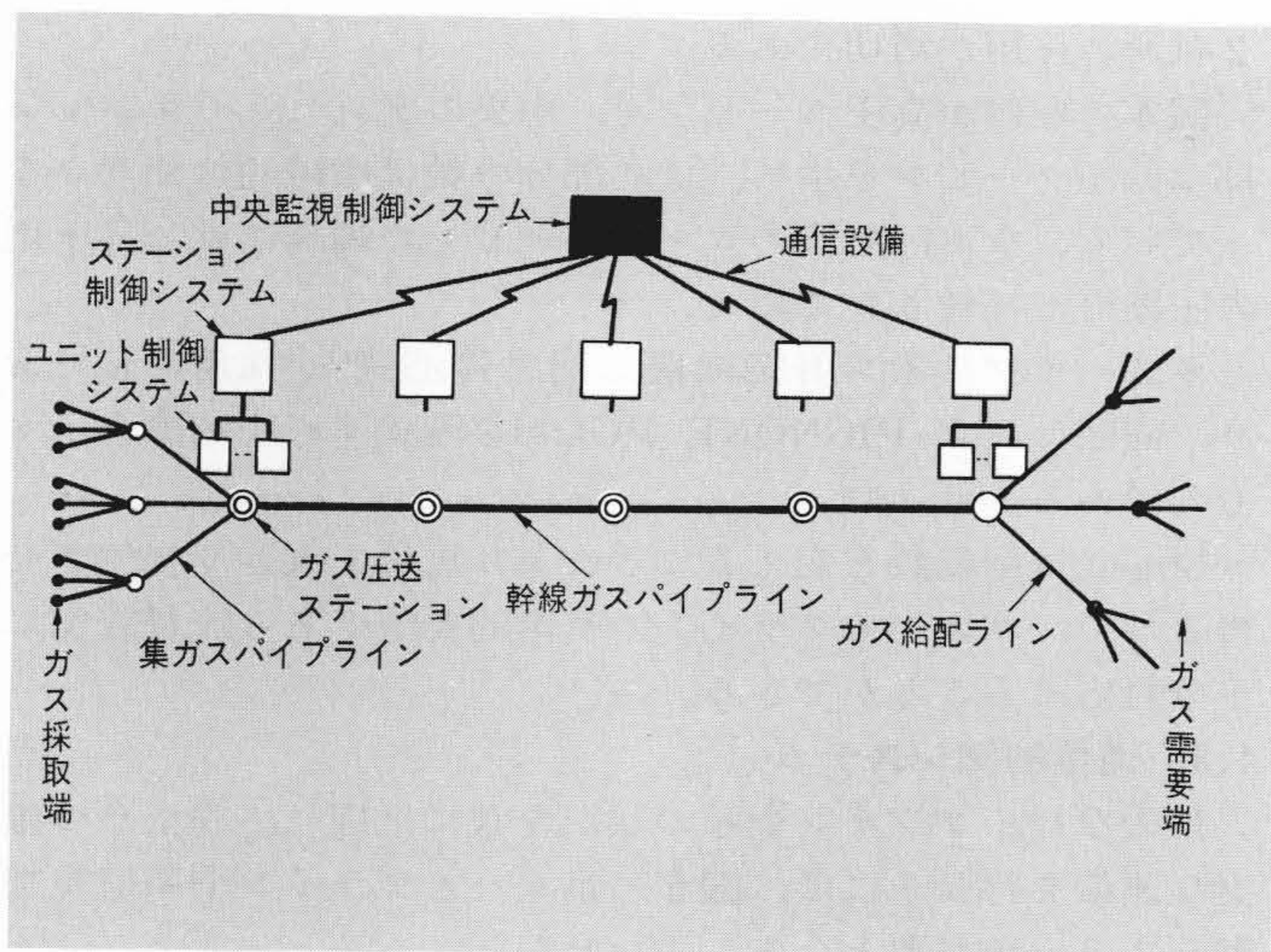


図5 パイプライン全系監視制御システム 長大なパイプラインの全系にわたる監視制御システムの一般的構成を示す。

ができる。

- (1) 設備計画・容量設定
- (2) 運用及び運転制御
- (3) 取りまとめに関するエンジニアリング

本稿では、このうち(1)、(2)について述べる。

5.1 設備計画・容量設定

まず計画当初に与えられる諸要素として、一般に次の項目が考えられる。

- (1) ガス源の発生量(=輸送ガス量)
- (2) 輸送距離
- (3) 輸送量の伸び率(年次変化)
- (4) ガスの性状

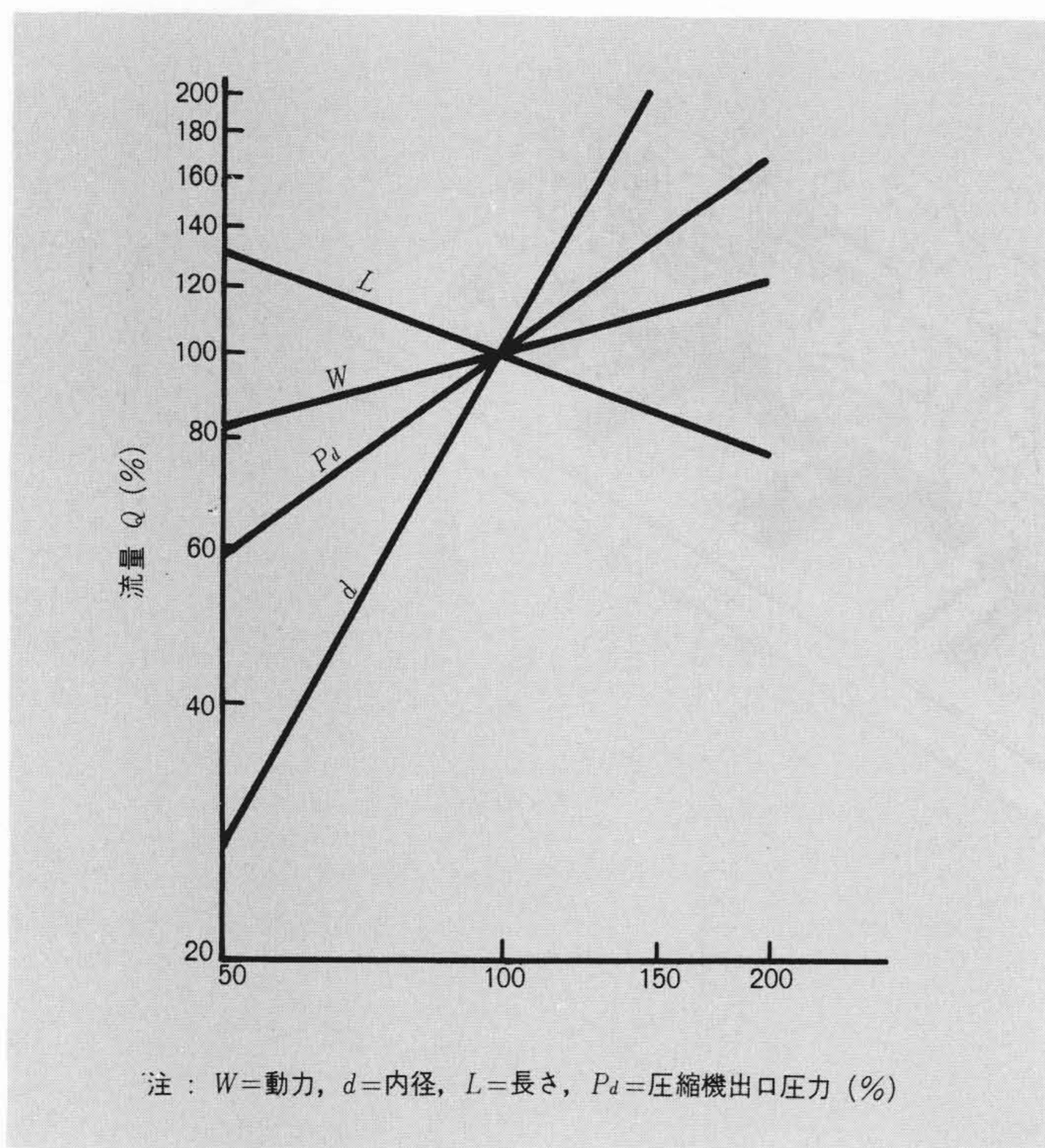


図6 流量と圧力、管径、動力などの関係⁷⁾ ガスパイプラインを計画する場合、流量が与えられて他の諸元を選定する際の基本的な関係を表わす。

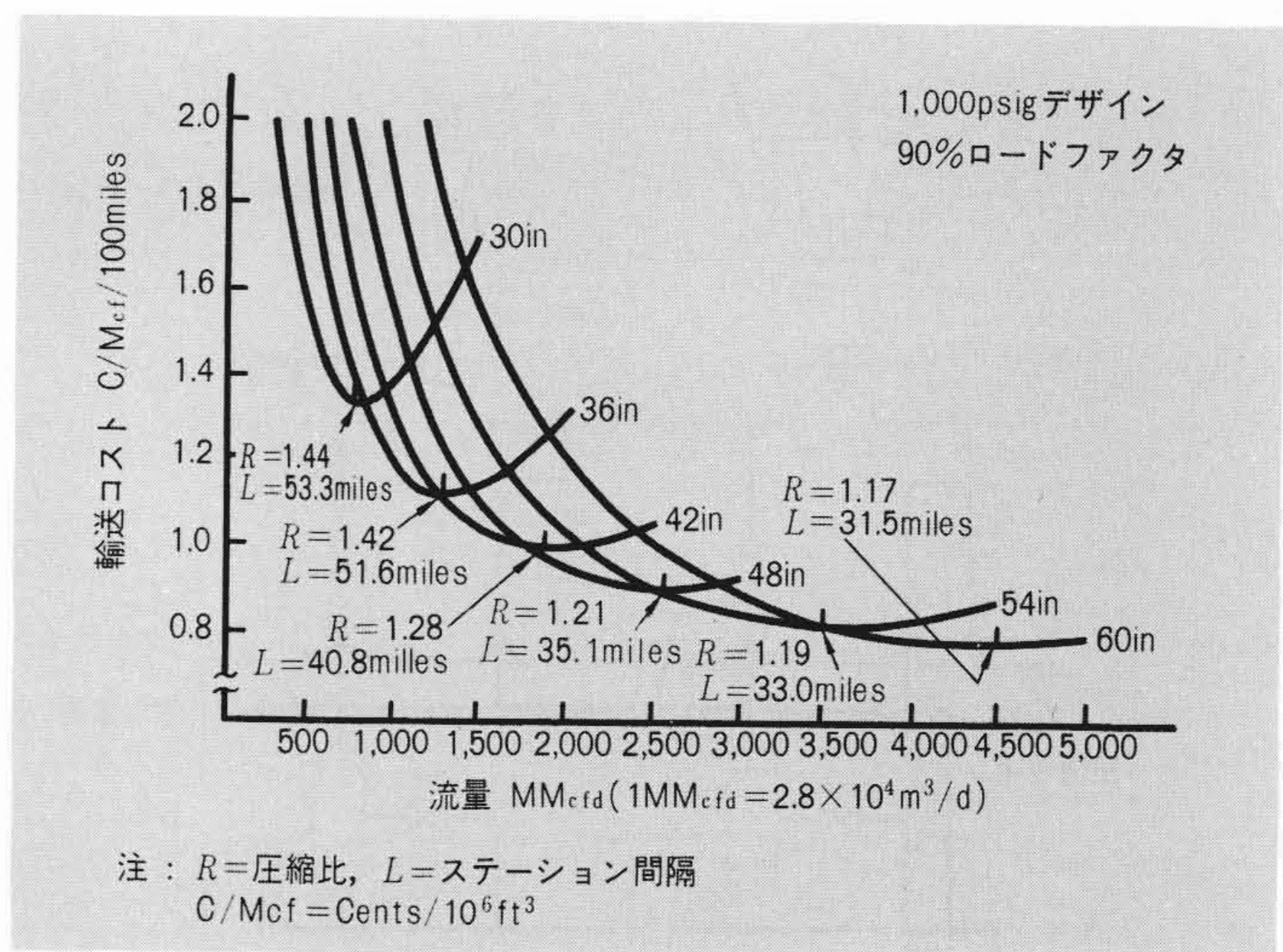


図7 輸送コストと流量、管径、圧縮比などの関係⁸⁾ 例えば、パイプ径を選定する場合、そのサイズによって適切な流量範囲があり、将来の流量増加も考慮して選定しておく必要がある。

- (5) ガス源の圧力と需要端の圧力
- (6) 周辺の温度条件・地形(高低差など)

そのほか、ガス源の寿命や需要量の変動などが考慮の対象となる。

上述の諸要素をもとに、圧送ステーションやパイプなどの設備費、建設費、運転・保守費などを考慮し、次の基本仕様を求める。

- (1) パイプ径
- (2) 設計圧力
- (3) 圧送ステーションの動力
- (4) 圧送ステーション間隔
- (5) 圧送ステーション内機器の動力と所要台数
- (6) 圧縮比(圧送ステーションの入口と出口との圧力比)

いま、所定の流量を送る場合の圧力、管径、圧送ステーション間隔の関係は図6⁷⁾に示すようである。

同図から明らかなように、例えば流量を100%から120%にしようとするとき、動力だけで対処しようとするれば200%を、圧力だけでは125%を、また管径だけでは110%をそれぞれ必要とする。そして、また圧送ステーション間隔だけで対処するには60%にすればよいことが分かる。このようなガスパイプラインの基本的性格を把握した上で、予想される流量変化を考慮して輸送費が最小となるような基本計画を策定する。

このようにして整理した輸送費と流量との関係事例を図7⁸⁾に示す。同図の輸送費にはパイプ、諸機材、建設工事、運転保守などの費用も考慮されている。一般的に大量のガスを送るほうが建設費は安く、そのほか管径は大きく、圧縮比は小さく、圧送ステーション間隔は短く、すなわちできるだけ高圧を長さ方向に維持することが輸送費低減に効果のあることが分かる。

例えば、日立製作所がソ連オレンブルグ地区に納入した5台口の数値をこの図7に当てはめてみると、流量は2,280MMcfd(=63.8×10⁶m³/d)であるので、この場合の最適管径は48inとなり、実際の数値と一致する。ただし、圧縮比1.28は1.51に、また圧送ステーション間隔は40.8miles(=65.6km)は120km(推定)と異なるが、これはソ連の現地では気象条件が過酷でかつ過疎地域であるため、なるべく圧送ステーションを集約して建設するため圧送ステーション間隔も伸びており、したが

って、圧縮比も大きな値となっている。

このように、実際の計画に当たっては上記要素以外に種々の制約や条件も考慮し、最適な設備計画を求めていくことが重要で、日立製作所ではこのようなソフトウェア技術を蓄積することができた。

5.2 運用と運転制御

5.2.1 パイプライン全系に関する運用と運転制御

パイプライン全系を対象とした運用と運転制御に関する内容を整理すると、次に述べるようである。

- (1) 燃料費最小を目的に、需要端の送ガス要求量に見合った各ステーションへの動力割付け、及び圧力指示
- (2) パイプライン全系の圧力、流量及び温度の監視、制御
- (3) パイプライン全系の起動・停止指示及び制御
- (4) 異常時の対応指示

いま(1)について、より詳細に述べてみると、図6で述べたように輸送費低減のためには、できるだけ高圧をパイプの長さ方向に維持することが望ましく、各圧送ステーションでは吐出し圧最大となるよう運転を行なっている。

しかし、流量が変わった場合には、圧縮機の最高効率点から外れてくるので、各圧送ステーションとも吐出し圧最高で運転することが適切とは限らなくなる。

そこで、パイプ内での圧力損失と、圧縮機の効率低下による動力損失との和を最小化する条件より、動的計画法を用いて動力最小化運用方式⁹⁾を求めた。

いま流量60%の場合の試算事例を図8に示すと、吐出し圧最大化方式は同図中の鎖線のようにNo.0～6までの全圧送ステーションが稼働している。しかし、実線で示す動力最小化方式はNo.2, 5, 7は休止し、No.0, 3, 6は最高圧力以下で運転しており、この方式の採用により15%の動力費低減効果が期待できる。

5.2.2 ステーション内の運転制御

ステーション内の運転制御の内容を整理すると次のようである。

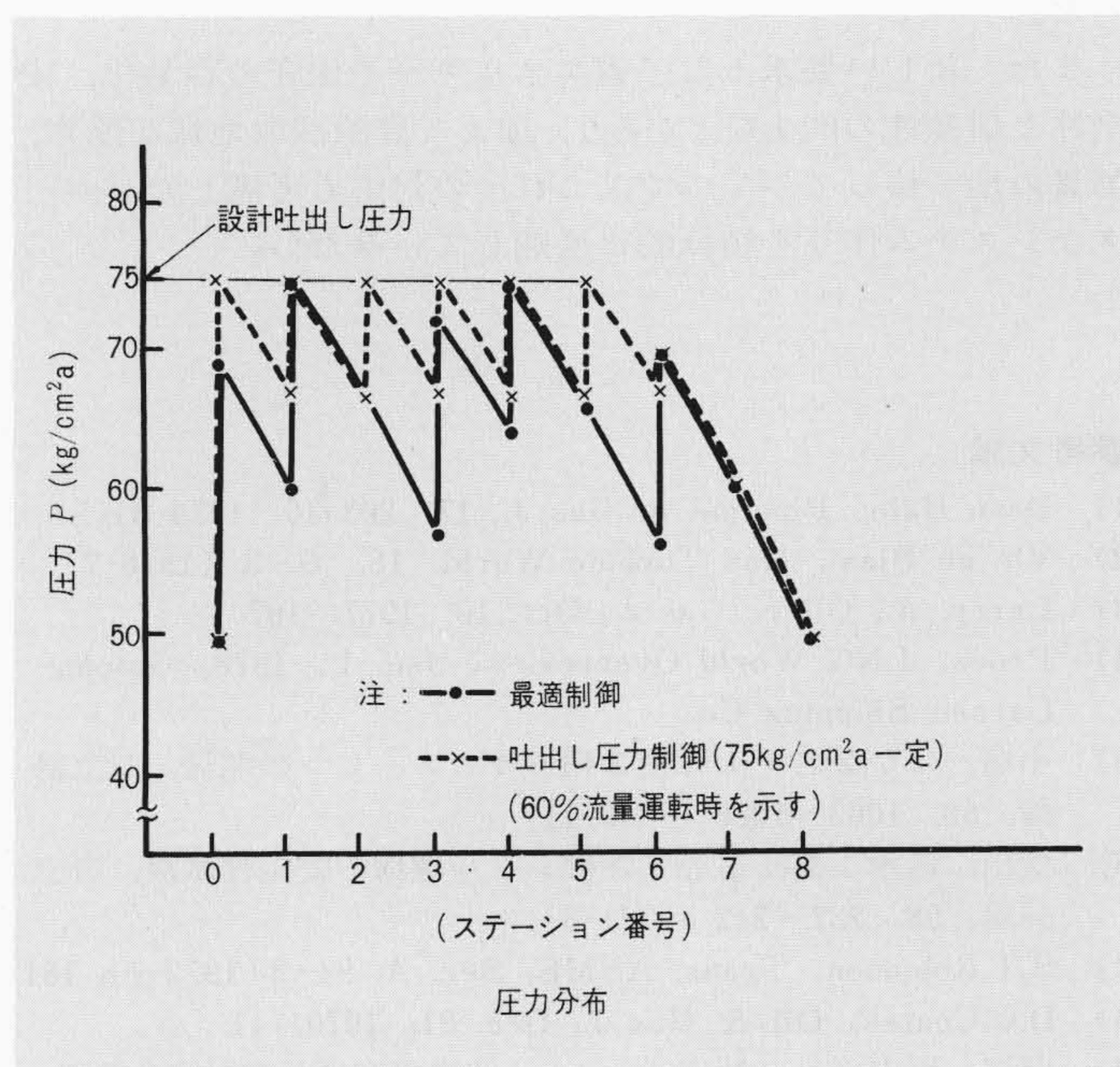


図8 吐出し圧最大運用と動力最小化運用との比較 ガスパイプラインは部分流量で運転されることが多いので、運転動力最小を目指すには、管内抵抗以外に圧縮機の効率をも加えた総合的な検討を必要とする。この図は60%流量時の動力最小の運用状況を示す。

- (1) 中央から指示された圧力、流量を満足するための圧縮機運転台数と回転数の決定
- (2) 通常運転時の圧力・流量制御
- (3) ステーションの起動・停止制御
- (4) 稼働中のステーションでの圧縮機追加起動、及び部分停止制御
- (5) 各種バルブの操作シーケンス
- (6) 異常時対応制御

このような制御の具体的計画を行なうには、ライン全系やステーション内での圧力、流量、温度などの動的变化を十分把握し、安定かつ安全で信頼度の高い方式を設定することが肝要である。そのための一つの手段として、管路内の流体過渡現象を解析により求め、コンピュータシミュレーションにより詳細な運転方式を得る方法を次に述べる。

(1) ガスパイプラインダイナミックシミュレータ

ダイナミックシミュレーションを行なうには、管路内の流体過渡現象を解析的に求めればよく、^{10)~12)}管路内のガスの非定常流れの式を求め、管路端の境界条件を満足させながら解けばよい。

日立製作所は、このような方法でダイナミックシミュレータを完成したので、以下にそのケーススタディ結果を紹介する。

(2) ケーススタディの結果

いまパイプライン上に四つの圧送ステーションをもち、各圧送ステーションにはガスタービン、圧縮機がそれぞれ4台ずつ設置されたガスパイプラインを考える。ガスパイプラインや主機の仕様は、表2に示すものを用いる。

いま流量を70%から100%に増そうとする場合、停止中の圧送ステーションを起動させる必要があり、その場合の圧送ステーション内圧力、流量、圧縮機速度などの変化状況を求めてみると図9に示すようである。

図9(a)は圧力変化、流量変化を示し、まず4台中の2台を起動させ、回転数を90%まで上げる。次いで300秒後に3台目を、2,000秒後に4台目を起動させ、3,500秒で全台数の回転数を100%に上げる。このようにすると、100%流量設計値に対してピーク流量も15%程度に収まり、起動完了も1時間以内となる。

図9(b)は圧縮機動作点の時間的推移を表わすもので、その軌跡はアンチサージラインや回転数、及び動力の限界線にも抵触せず、良好な状況を示している。

この事例は速度制御の場合を示したが、他に圧力制御、流量制御などがあり、また圧送ステーション内部分起動、停止

表2 ガスパイプライン及び主機の基本仕様 ガスパイプラインダイナミックシミュレータのケーススタディを行なう際の基本仕様を示す。

項	目	基本仕様
流	量	739Nm ³ /s(63.8×10 ⁶ m ³ /d)
管	径	1,168mm(46in, 外径48in)
ステーション間隔		120km
ステーション動力		9,690kW×4
圧縮機吸込圧力		49.7kg/cm ²
圧縮機吐出し圧力		75.2kg/cm ²
圧縮比		1.51
ガスタービン、圧縮機の定格回転数		6,200rpm

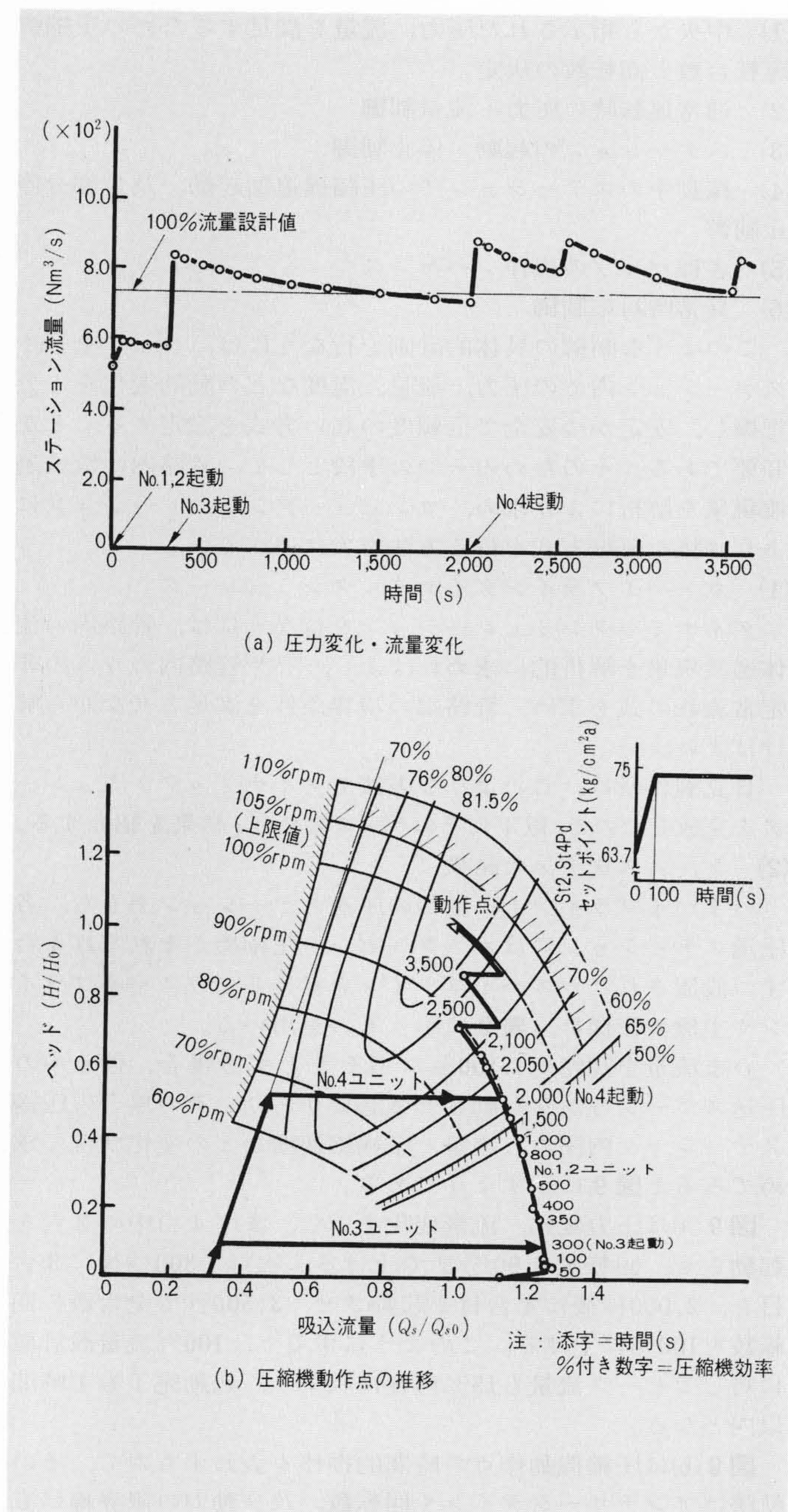


図9 圧送ステーション起動時の圧力変化・流量変化と圧縮機動作点の推移 70%流量で運転中のパイプラインを100%流量にする際、休止中の圧送ステーションを起動させたときの圧力、流量、速度などの動的変化を示す。なお、この図はコンピュータシミュレーションの結果である。

及び部分停止といった各ケースをシミュレーションにより求める。更に、ガスの温度変化も求め、バルブ開閉タイミングをも含めて安定かつ安全で信頼度が高く、短時間な最適運転方法を設定することができる。

5.3 運転制御システムの構成

以上の方法により求めた制御を、具体化するためのシステム構成を図10に示す。

まず、中央監視制御システムは、各圧送ステーションでの機器の作動状態や管内の圧力、流量、温度などを通信設備を通じて常に集約、監視し、また需要端の要求に応じて各ステーションへの起動、停止、吐出し圧セット値などを指令する。

圧送ステーション制御システムやユニット制御システムは、それぞれ図9に示す内容の制御を行なうことにより、ガスパイプライン全系の円滑な運転を実現することができる。

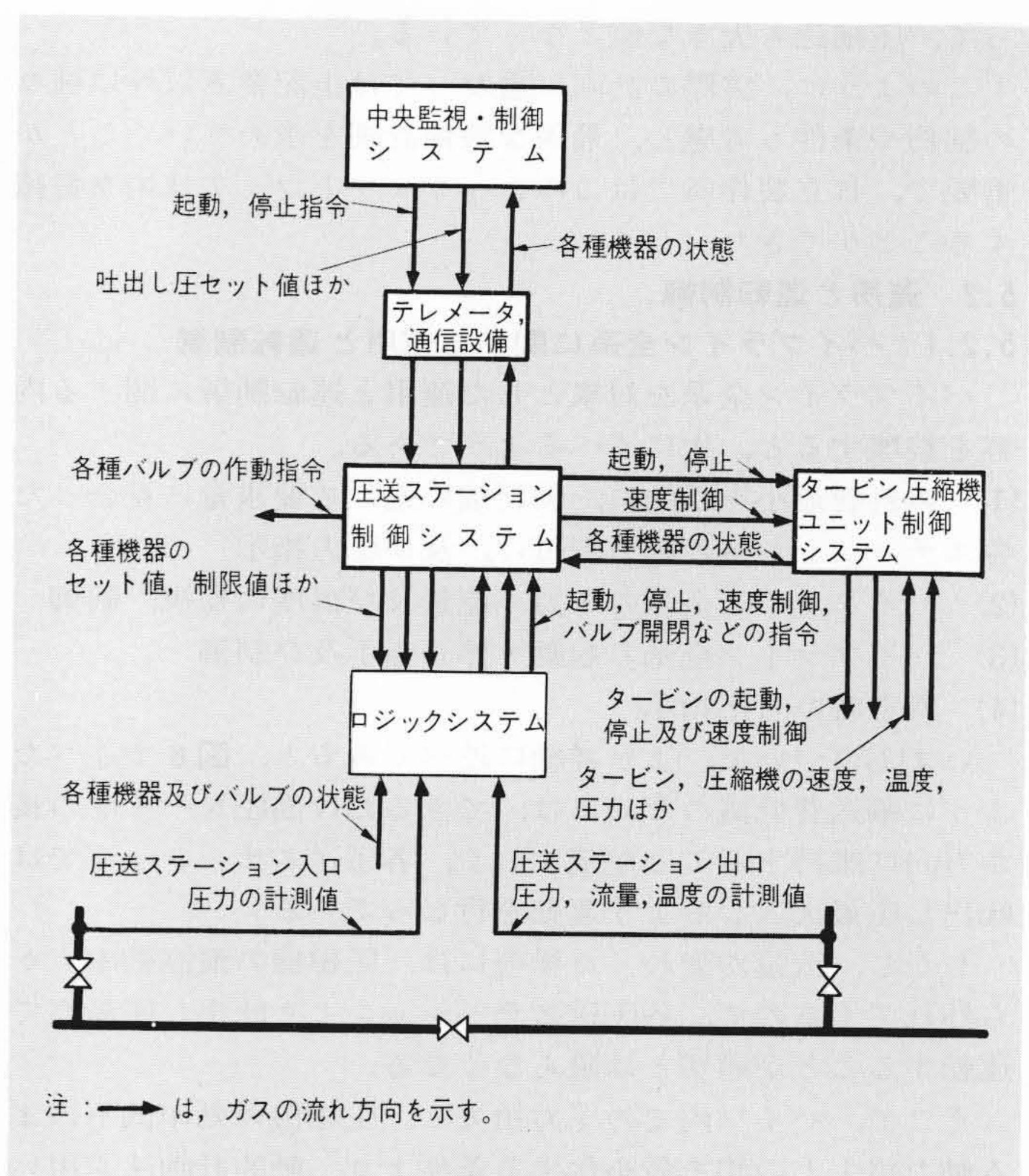


図10 ガスパイプライン制御システムの基本構成 ガスパイプライン制御システムの基本構成とそれぞれの機能を示す。

6 結 言

以上天然ガスパイプラインの動向とシステム計画について述べたが、ガスパイプライン市場の要求を満たすためには、このようなシステムとしての対応が不可欠となってきた。

日立製作所としては、これら技術に関して一応の蓄積をみたので、システム取りまとめに応ずることができるようになった。

また、新しい要求として省エネルギーや保守の容易化、安全性と信頼性の向上などがあり、加えて資源採取地域が酷寒、酷暑の地へ移っていくので、これへの対応も考慮したユニークなシステム作りを積極的に展開していきたい。

参考文献

- 1) Dean Hale, Pipeline & Gas J., 17, 203-10 (1976-8)
- 2) Vic de Biasi, Gas Turbine World, 18, 6-3 (1976-7)
- 3) Larry, A., Oil & Gas J., Oct. 10, 1977, 107
- 4) Proes, LNG World Overview, Jan. 1, 1978, Gotoas-Larsen Shipping Co.
- 5) 小島, ほか2名: 大容量2軸形ガスタービンの開発, 日立評論, 56, 1063-1068 (昭49-11)
- 6) 横山, 鈴木: 高圧遠心圧縮機シール機構の安定性試験, 日立評論, 58, 237-242 (昭51-3)
- 7) S.T.Robinson, Trans. ASME, Ser. A, 94-3 (1972-7), 181
- 8) D.C.Coates, Oil & Gas J., Dec. 21, 1970, 41
- 9) 田畑, 坂内: 日立製作所システム開発研究所研究討論会資料, 発表番号4, 52-11-17
- 10) 宮代: 機械の研究, 23-1 (昭46-1), 112
- 11) 油井, ほか2名: 機誌, 80-708, (昭52-11), 19
- 12) W.Yow, Trans. ASME, Ser D, 94-2 (1972-6), 68