

# ガスパイプライン圧送ステーション — 制御とシミュレーション解析 —

## Pipeline Station Control and Simulation Analysis

天然ガスを遠隔地に輸送するガスパイプラインには、途中の配管内圧力損失を償い、目的地まで効率良く圧送するために、所定の間隔にガス圧送ステーションが設置される。このガス圧送ステーションには、ガスタービンで駆動されるガス圧縮機が使用されており、圧送ガスの流量変化に伴ってガスタービン・ガス圧縮機ユニットの回転数や台数が自動制御される。その制御装置の設計に当たっては、ガス圧送ステーション内機器の特性はもとより、パイプライン全系の挙動についても熟知する必要がある。

日立製作所は、最近ガス圧送ステーション一式を受注・納入したが、シミュレーション技法によりパイプライン全系及びガス圧送ステーションの特性を解析してその適合性を確認した。

本稿は、その制御装置の概要とシミュレーション解析による検討結果について紹介する。

松村重兵衛\*

Matsumura Jûbei

目黒和利\*\*

Meguro Kazutoshi

小川正之\*\*\*

Ogawa Masayuki

内山好弘\*\*\*\*

Uchiyama Yoshihiro

### 1 緒 言

最近、世界各地で天然ガスパイプラインの建設が盛んに行なわれているが、そのパイプライン上には所定の間隔でガス圧送ステーションを設置して、圧力損失により低下したガス圧力を再び高め、後流に圧送する必要がある。

昇圧用ガス圧縮機の駆動機としては、圧送ガス自身を燃料として用いることのできるガスタービンが一般に用いられる。ガス圧送ステーションは辺地に設置される場合が多く、通常の運転時にはごく少数の監視員がいるに過ぎず、全く無人のガス圧送ステーションの場合もある。

したがって、ガス流量の変化などに伴うガスタービン・ガス圧縮機ユニットの回転数制御、運転ユニット台数の変更などの操作は自動で行なわれ、それらの制御装置には幅広い機能と高い信頼性が要求される。

また、ガス圧送ステーション内の制御はパイプライン全系特性と深いかわりをもっており、全体との協調がとれたシステムとする必要がある。このために、パイプライン全系を取り扱うことができるものと、ガス圧送ステーション内機器の詳細諸特性を取り扱うことができるものとの2種のシミュレータを作成し、特性検討を行なった。本稿は、日立製作所が最近受注・納入したガス圧送ステーションについて、その制御装置の概要を紹介するとともに、シミュレーションによる特性検討の一端についても触れる。

### 2 パイプラインガス圧送ステーションの系統構成 と制御方法

パイプラインガス圧送ステーションの系統構成の一例を図1に示す。この例では、ガス圧縮機5台で1ガス圧送ステーションを構成しており、ガスタービンとそれによって駆動されるガス圧縮機の主機に加え、各種のバルブ、ガスクラバ、制御装置及び電源装置などの補機から構成されている。5台のガスタービン・ガス圧縮機ユニットのうち4台が常用機で他の1台は予備機となっている。表1にガスタービン及びガ

ス圧縮機的主要仕様を示す。図2はこのガス圧送ステーションの制御方式の概要を示すもので、一つのガス圧送ステーション全体を制御するガス圧送ステーション制御盤と各ユニットを制御するユニット制御盤とを備えている。

ガス圧送ステーション制御盤は、常時ガス圧送ステーション出口圧力又はガス圧送ステーション流量を制御するプロセス制御部と、ガス圧送ステーション起動・停止時にその出入口弁及びバイパス弁を開閉するシーケンス制御部から構成される。ガス圧送ステーション流量は、常時はガス圧送ステーション出口圧力を一定に保つようにガスタービン・ガス圧縮機回転数を調整することにより制御されるが、流量しゃ断、配管破断などの異常発生時の保護として、直接測定されたガス圧送ステーション出口流量、ガス圧送ステーション出口温度及びガス圧送ステーション入口圧力によるオーバライド制御が用いられている。

ユニット制御盤は、ガス圧送ステーション制御盤からの指令により、ガスタービン・ガス圧縮機を制御する。このユニット制御盤は、ガスタービンの起動・停止制御、ユニットの出入口弁の制御及びガス圧縮機のサージ防止制御の各機能をもっている。

### 3 制御盤及び制御装置の構成

実際の制御盤及び制御装置の構成は、次に述べるとおりである。

#### (1) ガス圧送ステーション制御盤

ガス圧送ステーションのバルブ操作及びユニットの起動・停止をシーケンシャルに行ない、ガス圧送ステーションの出口圧力、出口流量、出口温度及び入口圧力により、各ユニットの速度を制御する。

#### (2) ユニット制御盤

この制御盤は、ユニットのバルブ操作機能及び監視計器をもつガス圧縮機制御盤並びにガスタービンを制御する日立-GE

\* 日立製作所電力事業本部 \*\* 日立製作所大みか工場 \*\*\* 日立製作所システム事業部 \*\*\*\* 日立製作所日立研究所



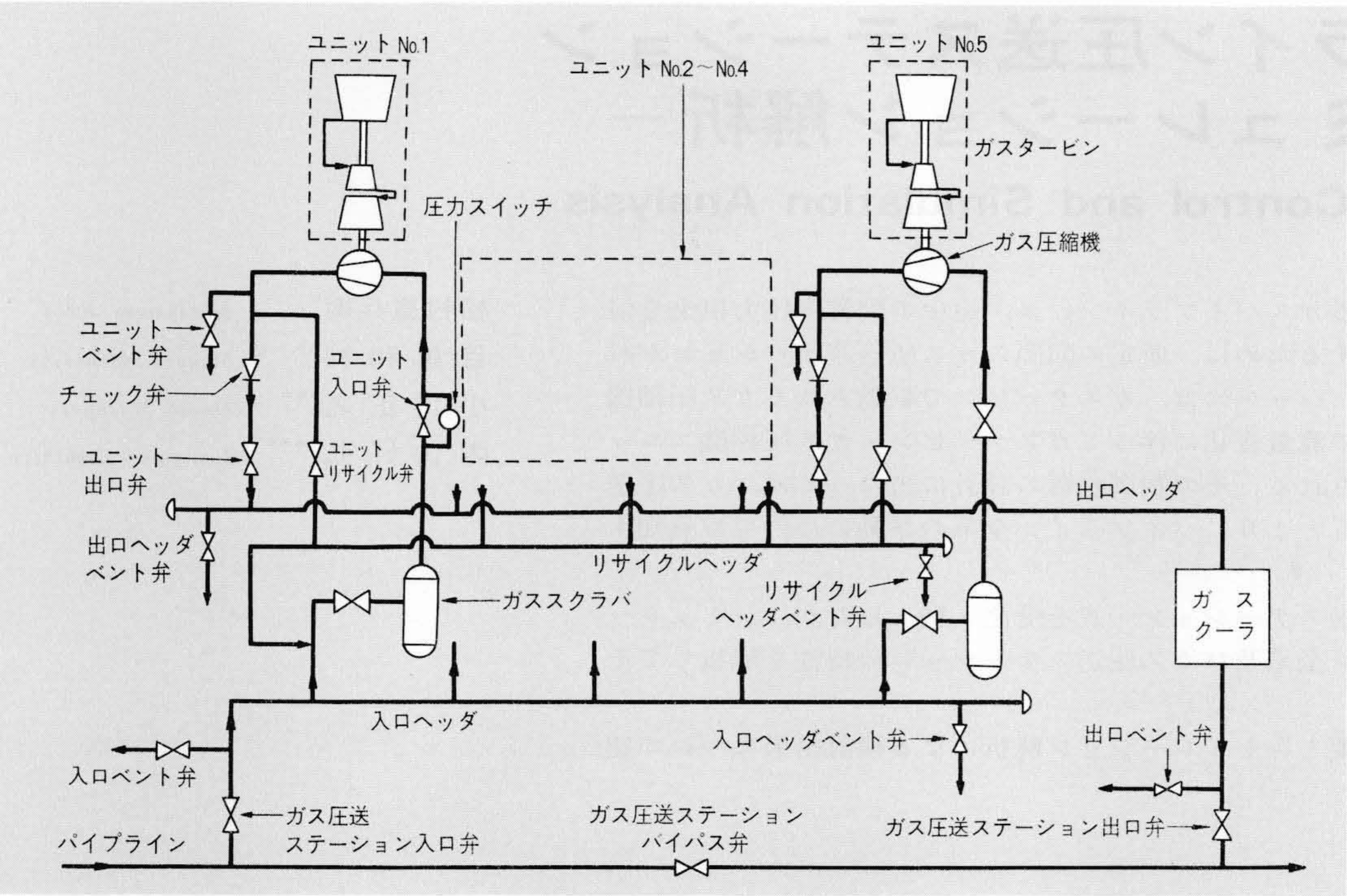


図1 パイプライン圧送ステーションの系統構成  
パイプライン圧送ステーションの系統構成は、数台のガスタービン、ガス圧縮機ユニットを併列に接続し、ガスクラバ、ガスクーラなどの補助設備とそれを連絡する配管弁類から成っている。

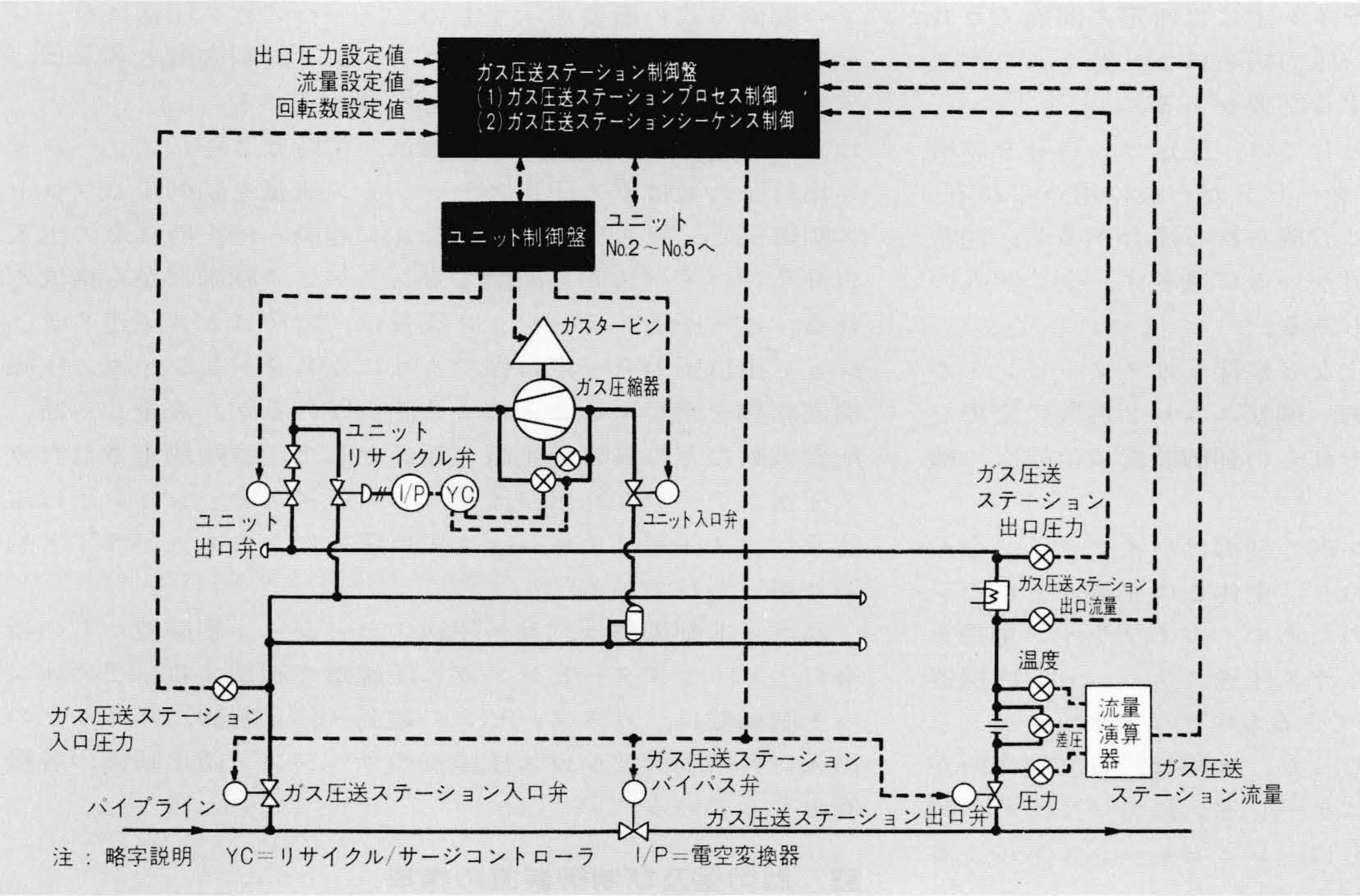


図2 ステーション制御の概要  
ステーション制御は、ステーション全体制御を行なうステーション制御盤と各ユニットの制御を行なうユニット制御盤から成る。

表1 ガスタービン及びガス圧縮機仕様  
ガスタービン及びガス圧縮機は5台で、そのうち1台は予備機である。

| ガスタービン        |            | ガス圧縮機         |                                    |
|---------------|------------|---------------|------------------------------------|
| 形 式           | M3142      | 形 式           | PCL 802/24                         |
| ガス圧送ステーション内台数 | 5台(うち1台予備) | ガス圧送ステーション内台数 | 5台(うち1台予備)                         |
| 定格出力          | 9,690 kW   | 流 量           | 184.6Nm <sup>3</sup> /s at Ts=15°C |
| 定格速度          | 6,200rpm   | 入口圧力          | 49.7kg/cm <sup>2</sup> a           |
| 最大速度          | 6,825rpm   | 出口圧力          | 75.2kg/cm <sup>2</sup> a           |
|               |            | 圧 縮 比         | 1.513                              |
|               |            | 定格速度          | 6,200rpm                           |

ガスタービン制御装置“SPEED TRONIC MK-II”から構成される。図3は2軸ガスタービン制御系統図を示したものであり、この制御装置は、ガスタービンの起動制御、排気温度制御、速度制御ループから成り、ガスタービンの燃料量を決定する電圧信号VCE(Variable Control Voltage)を算出する。この装置の特長は、ソリッド化した多数のプリント板を使用することにより、信頼性、耐久性を向上させるとともに、制御精度を高め応答性を敏速化していることにあり、多くの実績をもっている。

これらの制御盤は、空調設備をもつ制御室に収納される。また特にソ連などのような極寒地向けなどの場合には、輸送



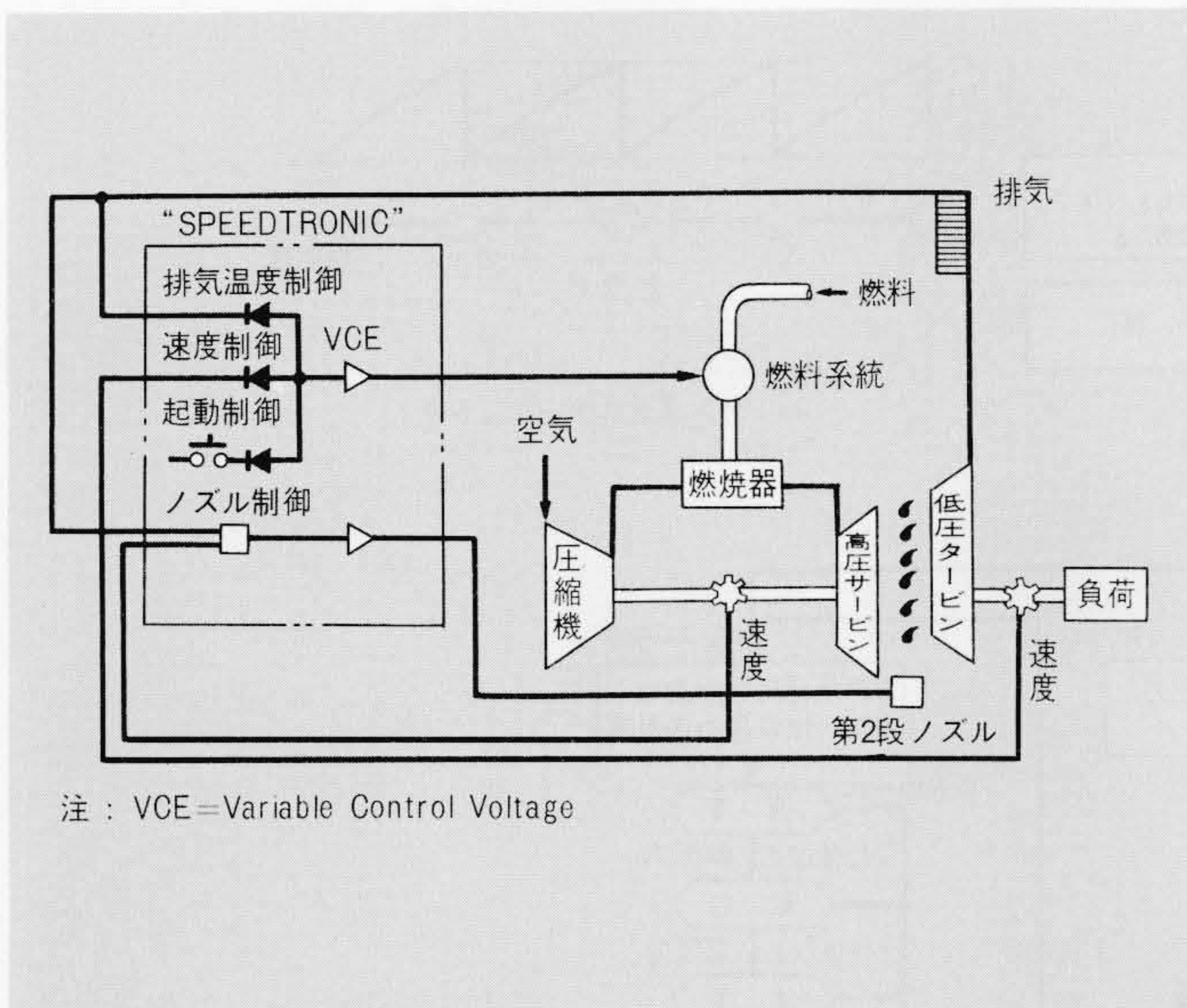


図3 2軸ガスタービン制御系統図 2軸ガスタービンの制御は、燃料制御と第2段ノズル制御によって行なわれる。

保管時の極低温を考慮し、使用部品は低温室での動作試験などにより耐寒性の確認がなされる。

図4に完成したガス圧送ステーション制御盤を示す。

#### 4 シミュレーションによる特性確認

全体のパイプラインシステムは、上述したようなガス圧送ステーションと長大なパイプラインが鎖状に連続して構成されている。ガス圧送ステーションの制御装置の設計及び運転方式の設定に当たっては、ガス圧送ステーション内の機器の特性はもとより、ガス圧送ステーションの負荷となるパイプラインの特性把握が重要なポイントとなる。

ガス圧送ステーション内機器の動作とパイプライン全系の動作は互いに関連をもつものではあるが、特性的には異なっており、プログラムの取り扱いも考慮して、パイプライン全系を取り扱うパイプラインシミュレータと、ステーション内機器を取り扱うガス圧送ステーションシミュレータの二つに分けて、それぞれのプログラムを開発した。

##### 4.1 パイプライン全系シミュレータ

###### (1) シミュレータのモデル

パイプライン全系シミュレータは、ガスパイプライン内を流れるガスの流体過渡現象に関するパイプラインモデルと、

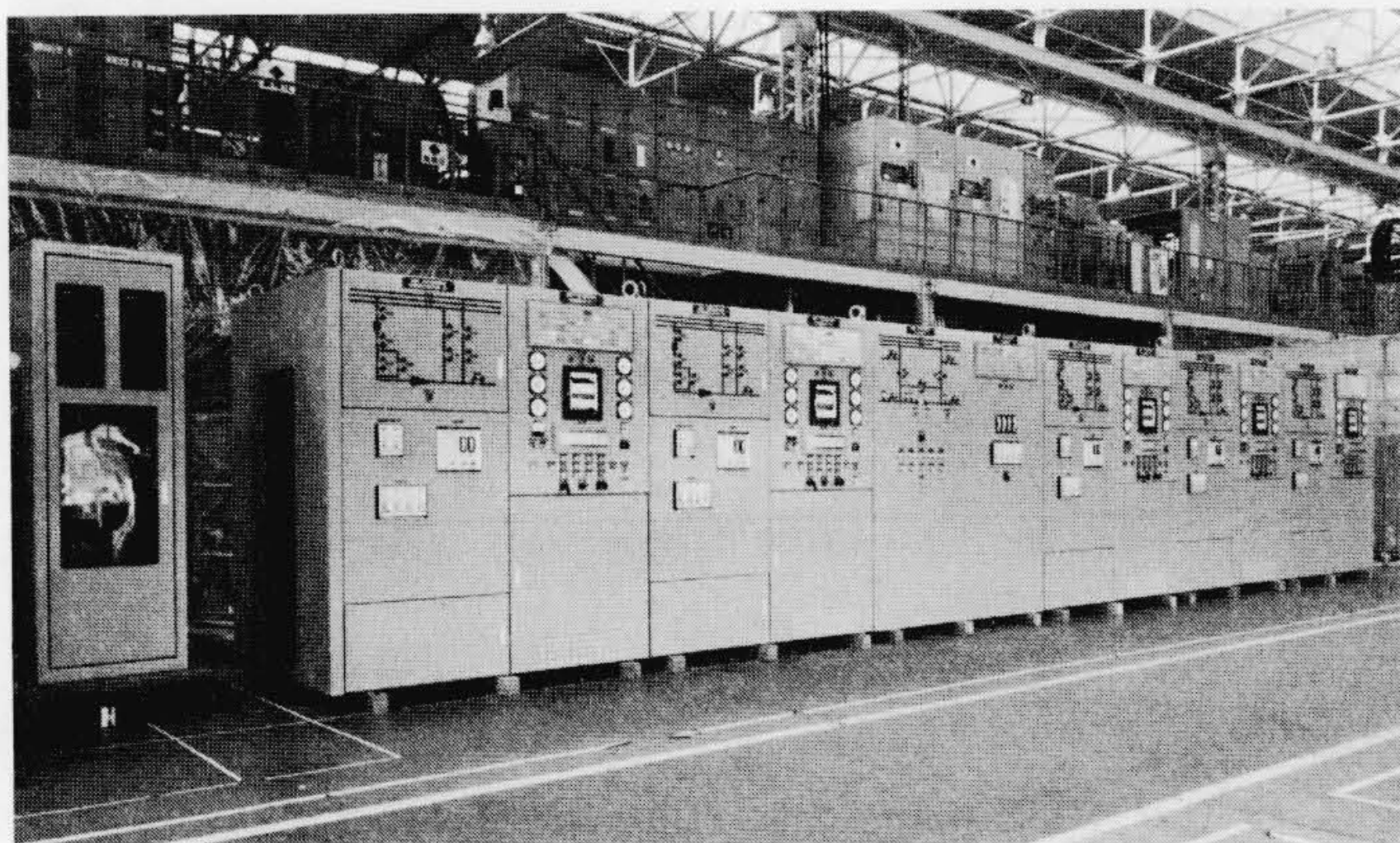


図4 ガス圧送ステーション制御盤 最近納入したガス圧送ステーション制御盤の外観を示す。

ガス圧送ステーション内の圧力・流量変化を特性づける簡易化されたガス圧送ステーションモデルを中心に構成されている。

###### (a) パイプライン

パイプライン内の圧縮性流体について、次の連続の式及び運動の式を用いた。

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{a^2}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{f}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fa^2}{2DA^2P} Q|Q| = 0$$

ここに  $P$  : 管路内の圧力 (kgf/m<sup>2</sup>)  
 $a$  : 管路内圧力波の伝搬速度 (m/s)  
 $Q$  : 管路内の質量流量 (kg/s)  
 $f$  : 管摩擦係数  
 $t$  : 時間 (s)  
 $A$  : 管路の断面積 (m<sup>2</sup>)  
 $x$  : 管路に沿った距離 (m)  
 $D$  : 管の内径 (m)

このパイプラインモデルでは、解法として特性曲線法を用い、計算時間を短縮するために慣性増幅係数<sup>1)</sup>を導入した。

###### (b) ガス圧送ステーション

ガス圧送ステーションモデルは、全体特性に関連する部分を主眼としてガス圧縮機の流量-ヘッド特性 ( $Q-H$  特性) 及び制御ループから成る。

ガス圧縮機の  $Q-H$  特性は、定格回転速度での吸込流量とヘッドの関係をグラフにより与え、相似則を用いて任意回転速度での特性を求める。また、ガス圧縮機は速度制御ループとしては、ガス圧送ステーション吐出し圧力制御、吐出し流量制御及び回転速度一定制御がある。

###### (c) その他

今回開発したシミュレータには、パイプライン、ガス圧送ステーションだけでなく、汎用性をもたせるためにホルダ(ガスタンク)、しゃ断弁、パイプの分岐、合流などが組み込まれており、都市ガス配給網、一般の気体管路も解析が可能となっている。

###### (2) パイプラインシミュレータの構成

シミュレータは、上記のモデルを中心に構成され、その計算の流れを図5に示す。入力データとして、次のデータを与える。すなわち、(i)パイプラインの構成を示すガス圧送ステーション数、パイプラインの数及び各々の接続状況。(ii)パイプラインの特性を示す長さ、口径、摩擦係数及びガス圧送ステーション内機器であるガス圧縮機の特性。(iii)駆動機であるガスタービンの特性、制御方式などである。

シミュレータの出力としては、パイプラインに沿った地点の圧力、流量の時間的变化、各ステーションでの吐出し圧力、流量、吸込圧力及びガス圧縮機の作動状況を示す回転速度、所要動力が得られる。

###### (3) 計算例

パイプラインシステムのシミュレーションの一例として、運転中のガス圧送ステーションが非常停止した場合について述べる。

計算条件は図6に示すとおりで、パイプライン中に4個のガス圧送ステーションがある場合を取り扱っている。

No.1~4の全ガス圧送ステーションが運転しており、定格値のガス流量が流れている状態で、突然No.3ガス圧送ステーションが非常停止した場合の各ガス圧送ステーション出入口圧力及び流量の変化を図7に示す。No.3ガス圧送ステーションの出口圧力及び入口圧力は急激に変化して、約700秒でバラ



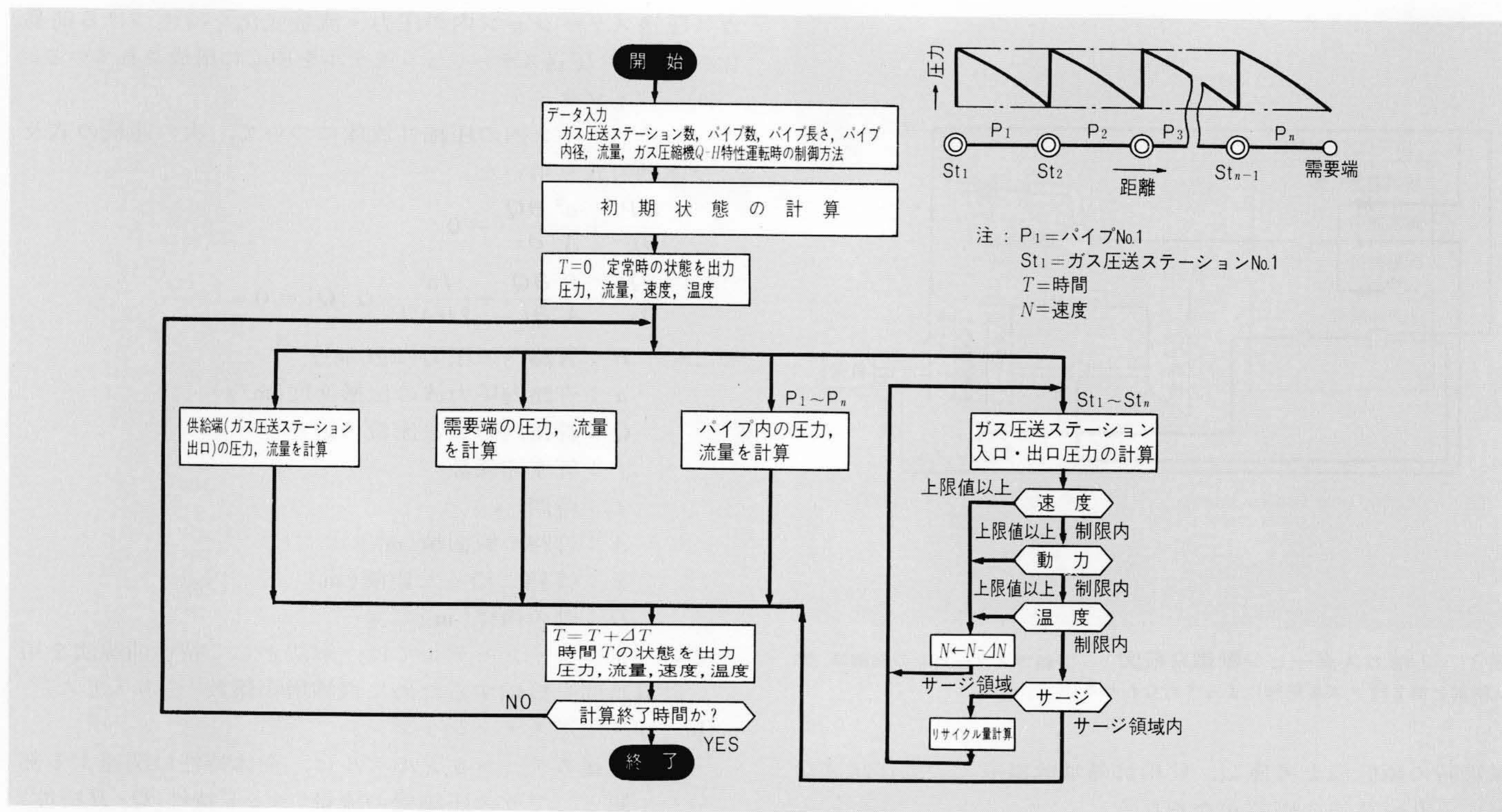


図5 パイプラインシミュレータ計算の流れ デジタル計算機により作成し、長大なパイプラインは分布常数系として取り扱う。

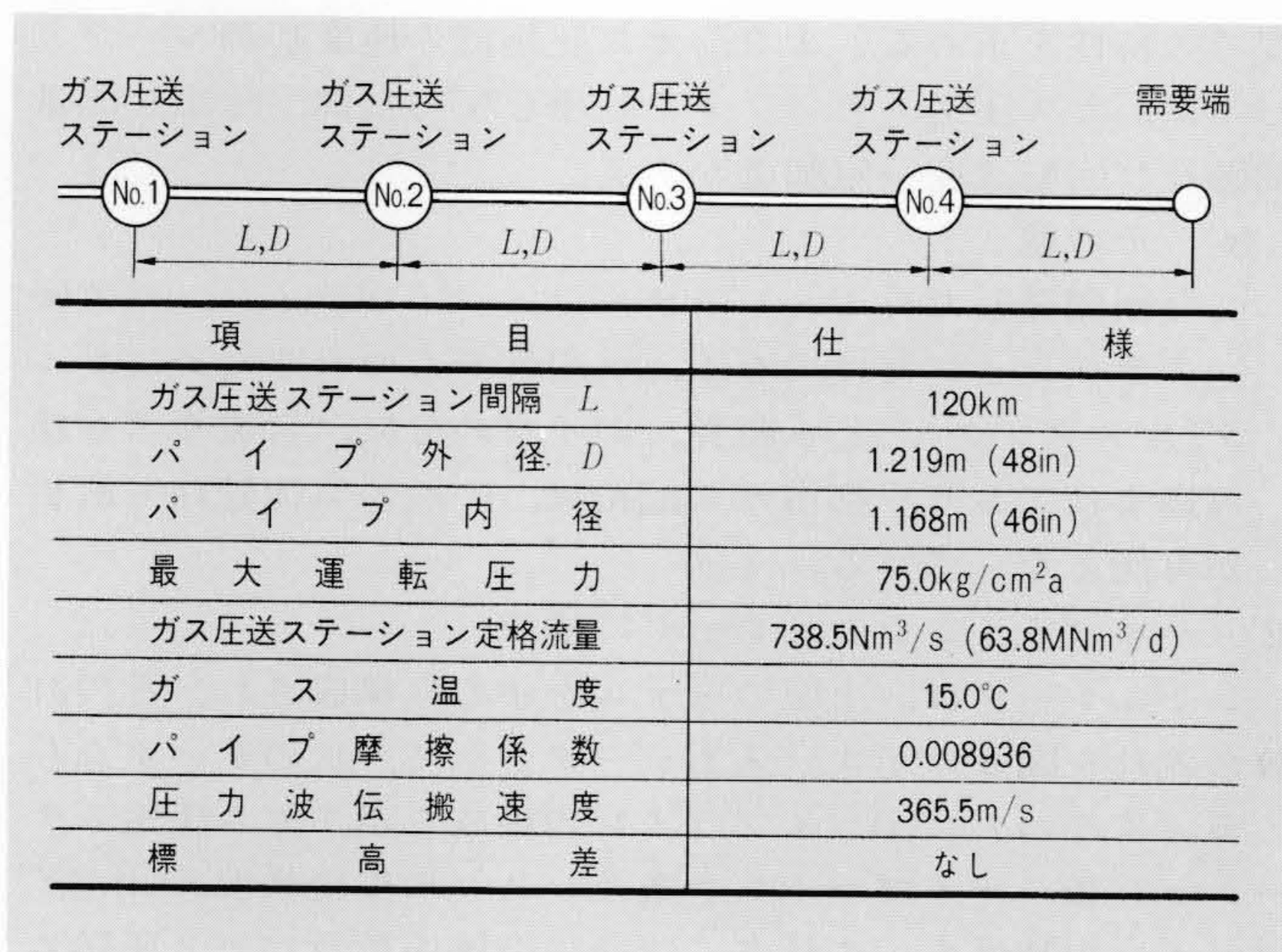


図6 パイプライン仕様及び計算条件 パイプライン仕様及び計算条件の一例を示す。

ンスするが、No. 2 及び No. 4 ガス圧送ステーションへの影響は長大なパイプラインの容量効果のために緩やかなものとなっている。No. 3 ガス圧送ステーションの出入口圧力がバランスした後バイパス弁が開かれるので、No. 3 ガス圧送ステーションの流量は回復するが、全体の損失に対する圧送力の不足により最終ガス量は約70%に低下する。

#### 4.2 ガス圧送ステーションシミュレータ

##### (1) シミュレータの構成と特徴

前項では、ガス圧送ステーションの運転特性がパイプライン全系に与える影響を明らかにした全系シミュレーションについて述べた。

ここではその結果を踏まえ、系全体特性の中でガス圧送ステーション内の機器をどのように運転すべきかを明らかにす

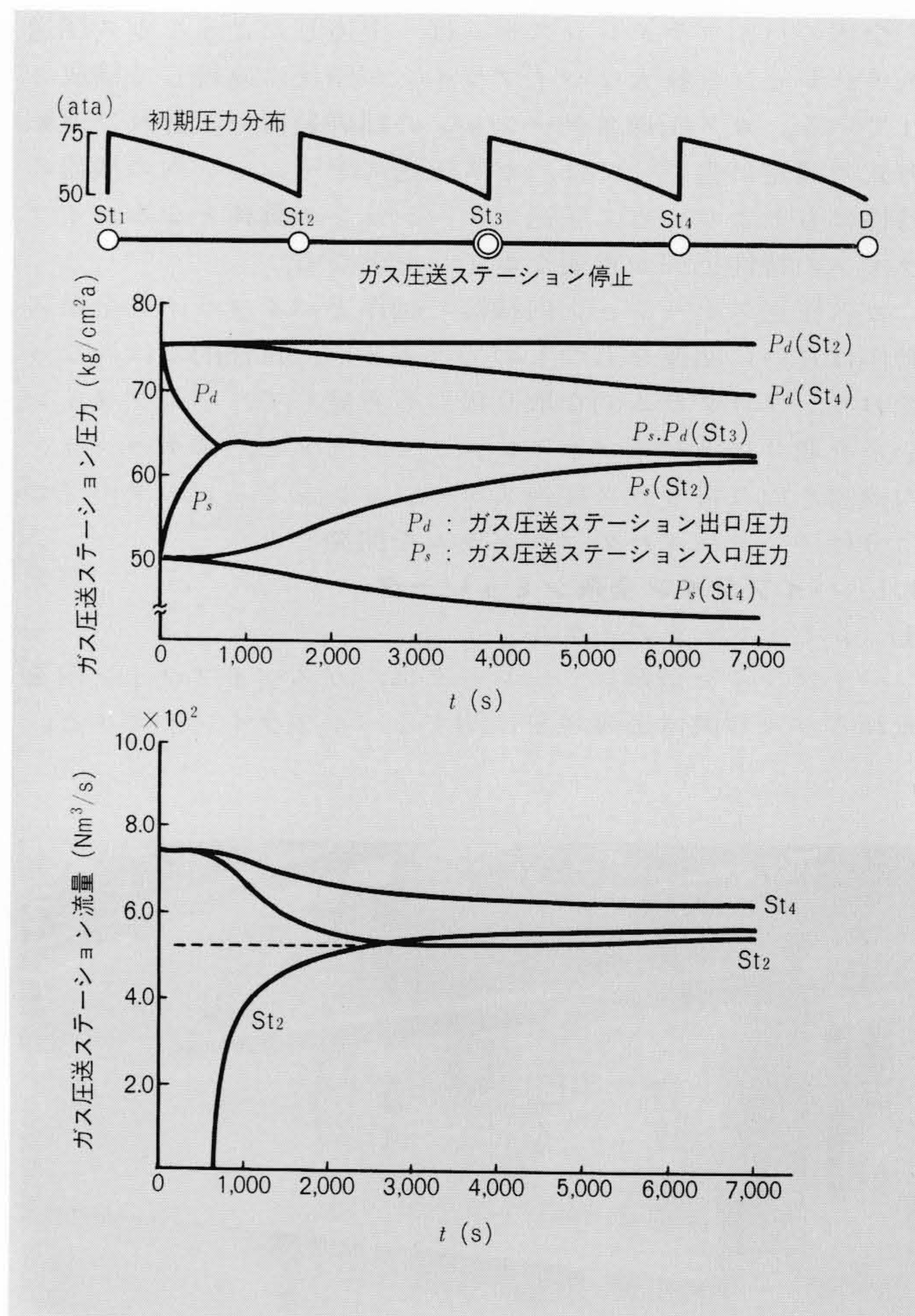


図7 全系ガス圧送ステーション圧力と流量の過渡変動 一つのガス圧送ステーションが非常停止した場合、そのガス圧送ステーションの出入口圧力は比較的早くバランスするが、隣のガス圧送ステーションへの影響は時間がかかる。



るため開発したガス圧送ステーション特性シミュレータについて述べる。

隣接するガス圧送ステーションとの関連を考慮しながら、対象ガス圧送ステーションを良好な状態で運転制御するため、明らかにすべき主要な問題点として次のものが挙げられる。

(a) ガス圧送ステーション起動法

停止中のガス圧送ステーションを起動するためのガス圧送ステーション内各主要弁開閉の手順、タイミング、起動ユニット数の決定、あるいは昇速過程の制御対象として、圧力、流量あるいはガス圧縮機速度のうち何を選択するかなどの決定。

(b) 通常負荷制御法

通常の負荷流量変動時のガス圧送ステーション制御法、あるいは隣接するガス圧送ステーションが非常停止した場合のような大幅な負荷変動に対応した運転ユニット数切替法の確立、及び制御盤最適調整値の解明。

(c) ガス圧送ステーション停止法

運転中のガス圧送ステーションの停止制御法の確立

(d) ガス圧送ステーション非常停止法

異常発生に伴う機器の非常停止手順、機器保護方法の確立。

これらの問題点を定量的に明らかにし、的確な運転及び制御方法を計画するため、ガス圧送ステーション内の主要機器を、起動から停止までの広い範囲の特性を正確に模擬できるシミュレーションモデルを開発した。

図8に、開発したガス圧送ステーションシミュレータのブロック線図を示す。

このシミュレータは、ガス圧送ステーション入口母管から出口母管までの主配管、ガスヘッダ、リサイクル弁、バイパス弁などの主要弁、及びガスタービン、ガス圧縮機などの主要機器の特性をすべて含み、かつこれに対応したガス圧送ステーション制御装置、リサイクル制御装置などが模擬されている。

このシミュレータは、パイプライン全系シミュレータの場合と異なり、ガス圧送ステーション内の比較的短い配管を対象にしているため、機器、配管などの要素を集中定数系として模擬している。模擬した各機器、配管要素はサブルーチン化されており、機器の配列、構成が変更されても容易にこれに対応できるよう考慮されている。

(2) シミュレーション結果

開発したシミュレータを用いて、このガス圧送ステーションの運転及び制御方法が妥当なものであるかどうかを解析し

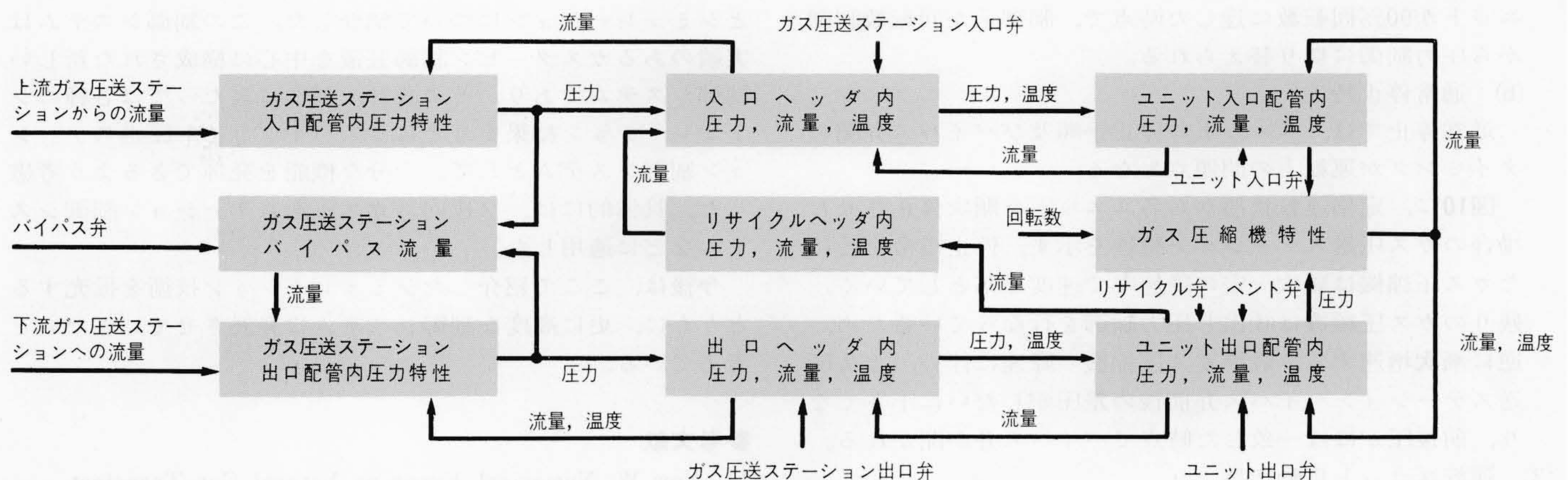


図8 ガス圧送ステーションシミュレータ構成 デジタル計算機により作成し、各機器の特性計算はサブルーチン化されているため、機器構成の変更は容易である。

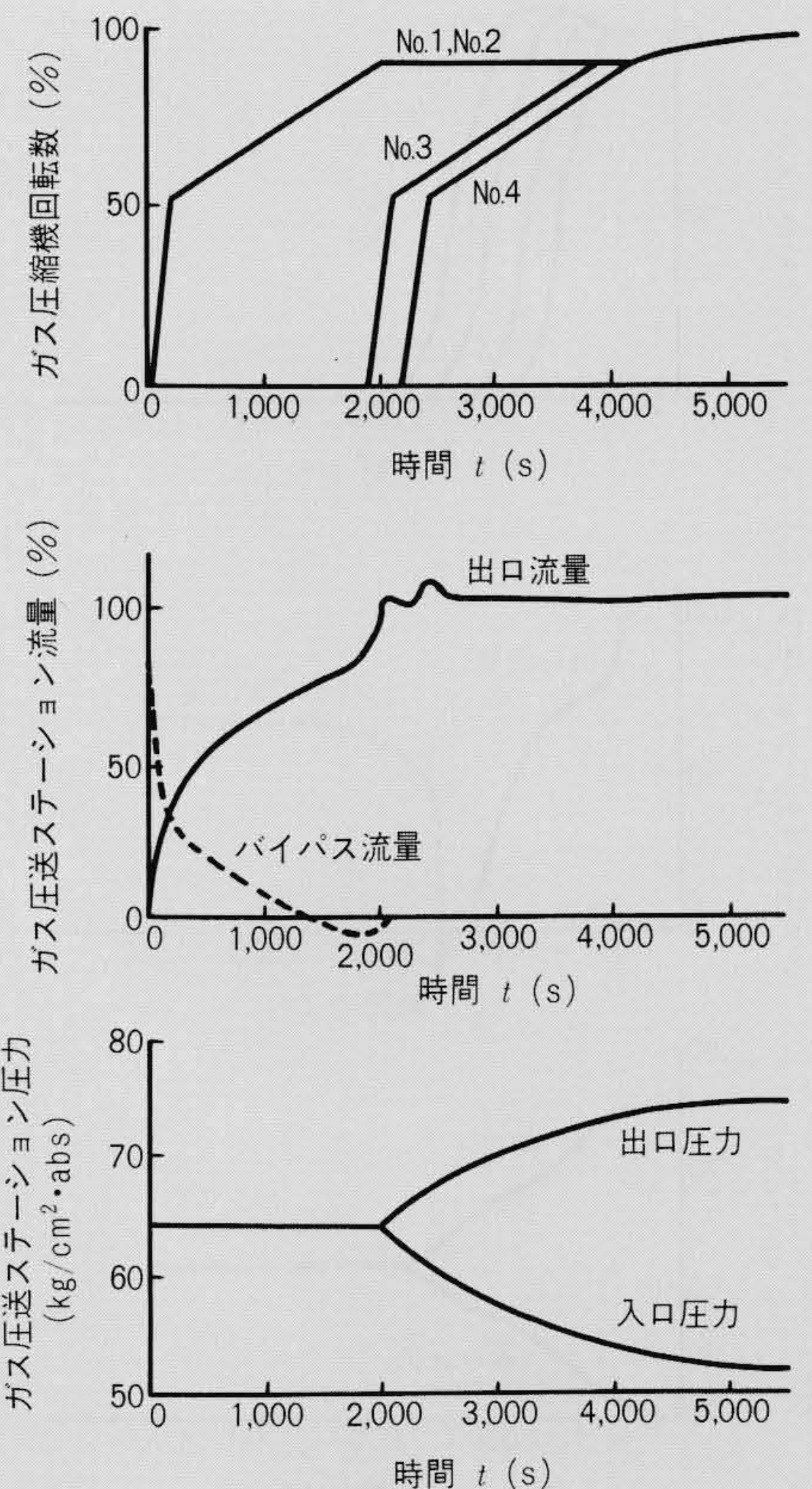


図9 ガス圧送ステーション起動特性 ユニット起動により出口流量は増加し、バイパス流量は減少する。バイパス弁閉後に出口圧力は上昇する。

た。次にその主要な解析結果について述べる。

(a) 起動特性

ガス圧送ステーションの起動の際に何を制御してガス圧縮機の昇速を行なわせるかは大きな問題点の一つである。昇速過程の制御方法として、出口圧力制御、出口流量制御あるいは直接回転数を制御する方法などにつき解析検討した。いずれの方法であっても、ガス圧送ステーションの起動はスムーズに行なうことができ、特に問題はないが、直接に回転数を制御する方法が最も確実であり、かつ安定している。

図9に、回転数制御によるガス圧送ステーション起動の



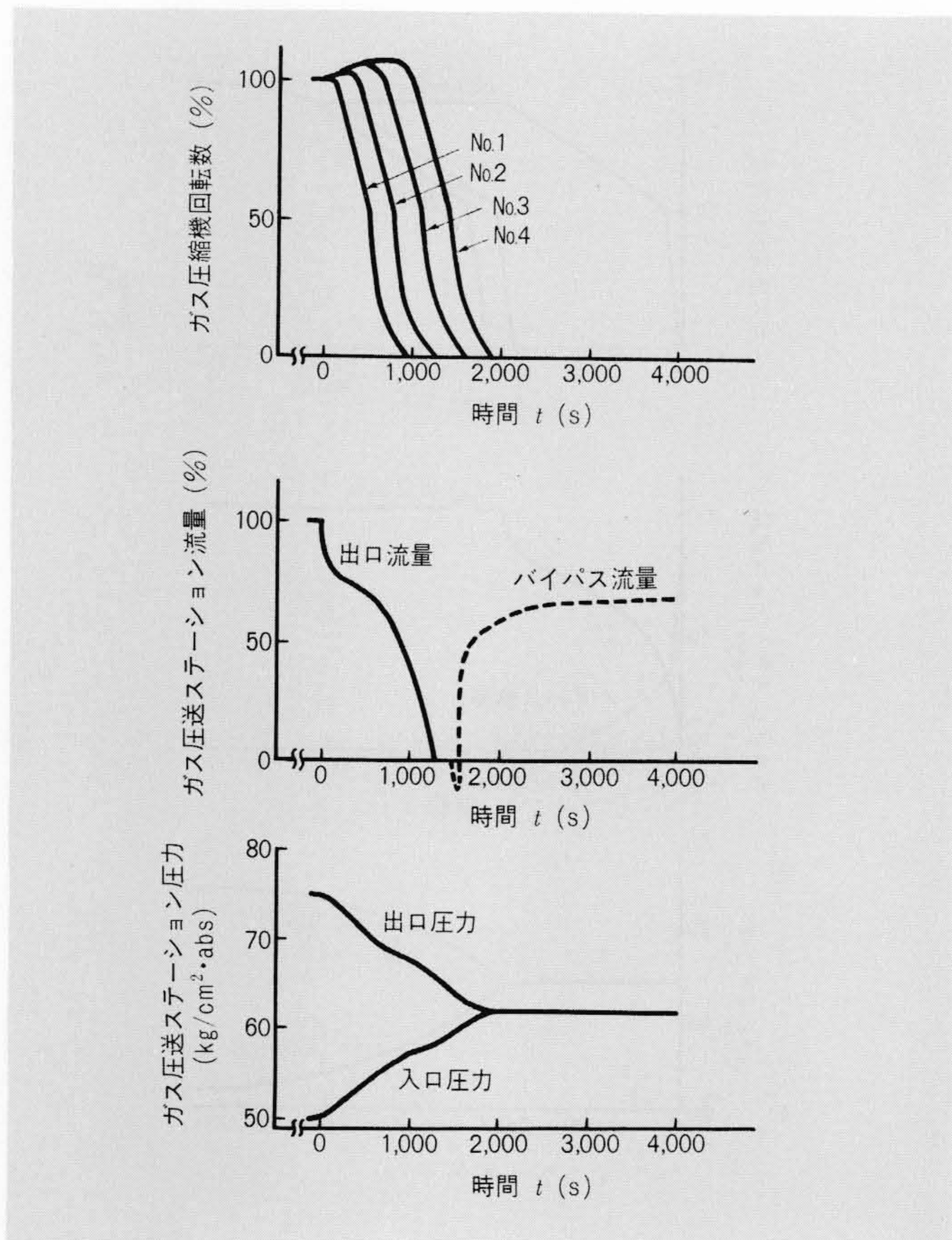


図10 ガス圧送ステーション停止特性 各ガス圧縮機の停止に伴いガス圧送ステーション出口流量、圧力とも減少し、バイパス弁開後にバイパスがガスが流れる。

状況を示す。両隣りのガス圧送ステーションが吐出し圧力一定で70%流量の運転を行なっている状態から対象ガス圧送ステーションを起動し、最終的に全体流量を100%流量の状態にしたものである。

No. 1 ユニット、No. 2 のユニットが同時に起動されるとともに、ガス圧送ステーション吐出し流量が増加し、これにつれてバイパス流量は漸次減少する。昇速の過程でバイパス弁を通してガス圧送ステーション入口側から出口側へガスがわずかに逆流するが、No. 1 ユニット、No. 2 ユニットが定格の90%回転数に達した時点でバイパス弁は閉じられる。バイパス弁閉に伴い、ガス圧送ステーション出口圧力は上昇を開始し、追加起動したNo. 3 ユニット、No. 4 ユニットが90%回転数に達した時点で、制御系が回転数制御から圧力制御に切り替えられる。

#### (b) 通常停止特性

通常停止では、ユニットの停止手順及びバイパス弁開のタイミングが運転上の問題点となる。

図10に、定格運転状態から各ユニットを順次停止させた場合のガス圧送ステーション特性を示す。停止指令を受けたガス圧縮機は順次一定の降速率で速度を落としていく。残りのガス圧縮機は吐出し圧力制御を行なっているため、逆に漸次増速する。最終ガス圧縮機の降速に伴い、ガス圧送ステーションバイパス弁前後の差圧がしだいに小さくなり、前後圧がほぼ一致した時点でバイパス弁が開かれる。

#### (3) 運転ユニット自動切替

図11に3ユニット (No. 1～3) が運転中、1ユニット (No. 3) が非常停止し、これに伴って予備ユニット (No. 4) が自動起動

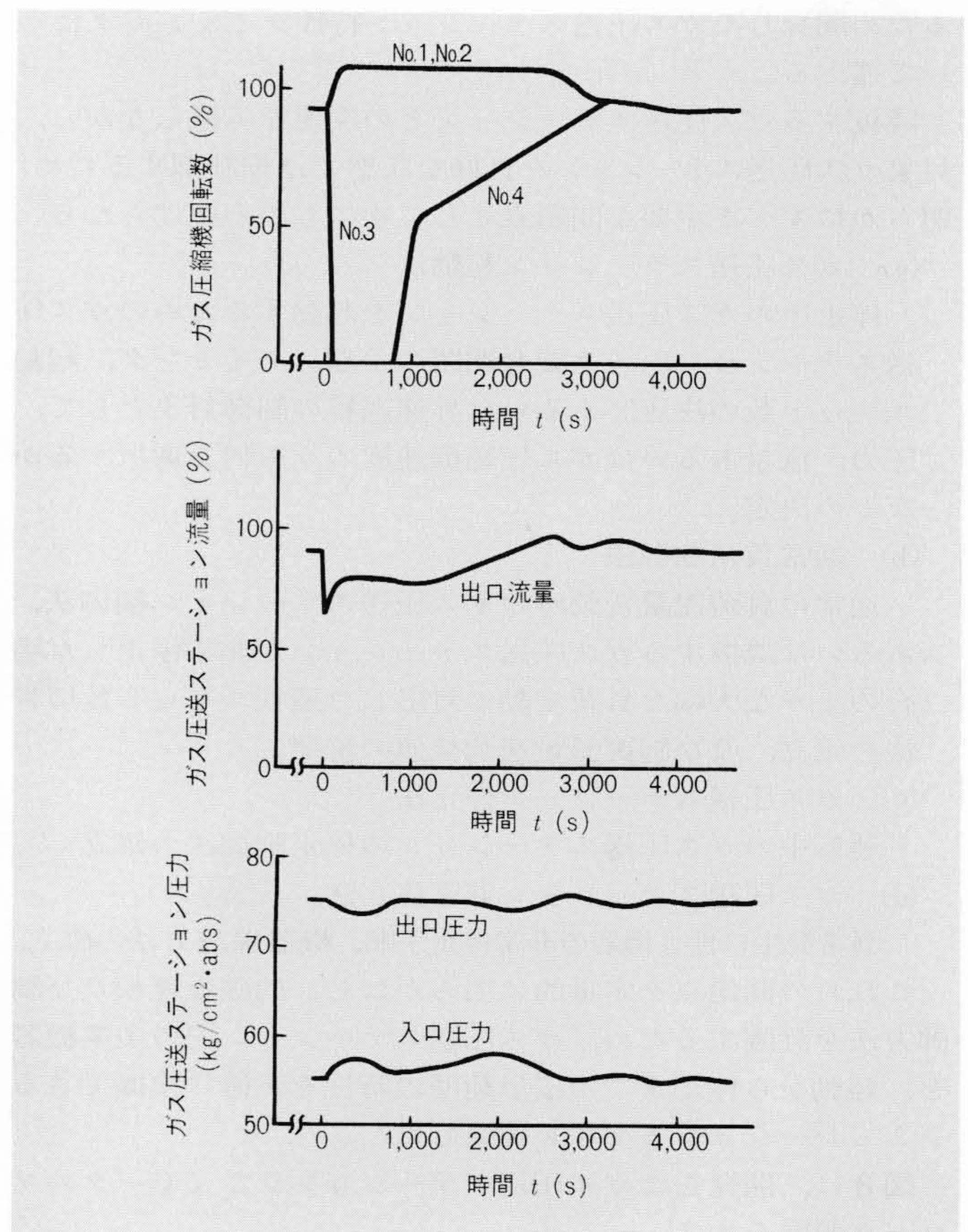


図11 運転ユニット自動切替特性 No. 3 ユニットの非常停止により、No. 1 ユニット、No. 2 ユニットのガス圧縮機回転数は上昇し、No. 4 ユニットが自動起動される。

した場合の特性を示す。No. 3 ユニットの停止は吐出し圧低となって表われるが、No. 1 ユニット、No. 2 ユニットが速度を上げこれを補う。No. 1 ユニット、No. 2 ユニットが最高速度に達し、これを一定時間保持したことを検知して、No. 4 ユニットが自動起動されるように配慮している。

ここに述べた以外にも、リサイクル運転時の温度上昇の問題やガス圧送ステーション全体の起動・停止時の各種弁開閉タイミングの検討など、種々の運転制御上の問題に対して二つのシミュレータを有効に活用することができた。

## 5 結 言

以上、ガスパイプライン圧送ステーションの制御システムとシミュレーションについて紹介した。この制御システムは実績のあるガスタービン制御装置を中心に構成された新しい制御システムであり、その設計、製作に当たっては各種のシミュレーション結果をもとにガスパイプライン圧送ステーション制御システムとして、十分な機能を発揮できるよう考慮した。具体的には、ソ連向けガス圧送ステーション制御システムなどに適用した。

今後は、ここで紹介したシミュレーション技術を拡充するとともに、更に高度な制御システムに発展させていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Yow, W., Numerical Error on Natural Gas Transient Calculations, Trans. ASME, J. Basic Engineering, June 1972, pp.422～428