

# 上下水道システムの省エネルギー

## Energy Saving in Water and Wastewater Systems

エネルギー価格の高騰は、建設費及び維持管理費の上昇という形で、上下水道システムに対する大きな制約となっている。省エネルギーは、これを解決する突破口であるが、このためには個々の検討の有機的関連、換言すれば、上下水道システムでのエネルギー利用のシステム化が重要である。日立製作所は、この観点から最適設備計画、運用計画による適正機器容量及び台数の選定、高効率化、運転制御の最適化によるエネルギー節減、廃熱回収又は発電、消化ガス発電などのエネルギー品質改善及び回収を、具体的有効手段として総合的に検討し成果を収めてきた。本論文では、その一部について論述する。

大音 透\* *Tōru Ōto*  
 西橋 淳一\* *Jun'ichi Nishihashi*  
 小松 健彦\*\* *Takehiko Komatsu*  
 山田 栄\*\*\* *Sakae Yamada*  
 小笠原 均\*\*\*\* *Hitoshi Ogasawara*  
 角田 章\*\*\*\*\* *Akira Kakuta*  
 福島 幹治\*\*\*\*\* *Kanji Fukushima*

### 1 緒言

上下水道システムは普及率の上昇に伴い、維持管理の重要性が高まっている。特に、第二次オイルショックによる原油価格の高騰のために、維持管理費の中のエネルギー価格が大幅に上昇し、地方自治体の財政を圧迫している。最適設備、運用計画による適正機器容量及び台数の選定、高効率化、運転制御の最適化、廃熱回収又は発電、消化ガス発電など、エネルギー消費節減と品質改善、回収による省エネルギーが積極的に推進されている。

上下水道システム内部でのエネルギー利用をシステム化し、有効仕事を極力少ないエネルギーで行なえるよう利用度を高めることが課題である。

### 2 エネルギー利用システム<sup>1)~5)</sup>

上下水道をエネルギーの面から眺めると、エネルギーを利用するシステムであるということが言える。省エネルギーとは、有効仕事を極力少ないエネルギーで行なうように、エネルギーの利用度を高めることである。この観点から、

- (1) 上下水道に最適で使いやすいエネルギー形態
- (2) 上下水道の有効仕事に必要なエネルギー値
- (3) エネルギー品質の改善、回収
- (4) エネルギー利用のシステム化

について検討し、エネルギー利用システムを体系化する必要がある。

#### 2.1 最適かつ使いやすいエネルギー形態

電力及び機械エネルギーは、そのエネルギーシステム内部での変換が高い効率で行なわれ、取扱いが容易であるのに比べ、熱エネルギーは熱力学第二法則のとおり、不可逆過程にあって品質が低く取扱いが難しい。上水道ではポンプがエネルギー利用の大部分を占める。遠心形ポンプを高圧誘導電動機で駆動するものがほとんどで、またクレーマ、セルビウスセットで速度制御し、ポンプ効率向上、電動機二次滑り電力の回収を図るものも多く、エネルギー利用形態は既に高度化している。更に、GTO (Gate Turn Off)サイリスタ、又はトランジスタインバータによるかご形誘導電動機一次電圧、周波数制御により更に高効率化され、エネルギー利用度は上昇し、ハードウェアは小形、高信頼化された。

#### 2.2 有効仕事のためのエネルギー値

下水道でのエネルギー利用形態は嫌気性消化-脱水の場合、電力83%、重油17%、直接脱水-焼却の場合、電力60%、重油40%である。また電力の利用形態は図1に示すとおりである。約45%を占めるブロワは遠心形で、高圧誘導電動機で駆動されるものが大部分であるが、下水道は長期にわたって建設され成長するシステムであり、建設各期で水量に比べてブロワ容量及び台数が過大で風量を調節しきれず、大気放風を余儀なくされ、有効仕事以上のエネルギーを供給している例が多い。図2に曝気槽の溶存酸素濃度/送風量制御結果を示す。この制御により、曝気槽送風要求量は大幅に低減できることが分かる。ブロワ最適設備計画と曝気槽制御との関係により、従来に比べ約20%程度のエネルギー節減が可能である。

#### 2.3 エネルギー品質の改善

上水道では熱及びガスの形態でのエネルギー利用は少ない。下水道では熱処理、焼却炉及び嫌気性消化プロセスでの熱及

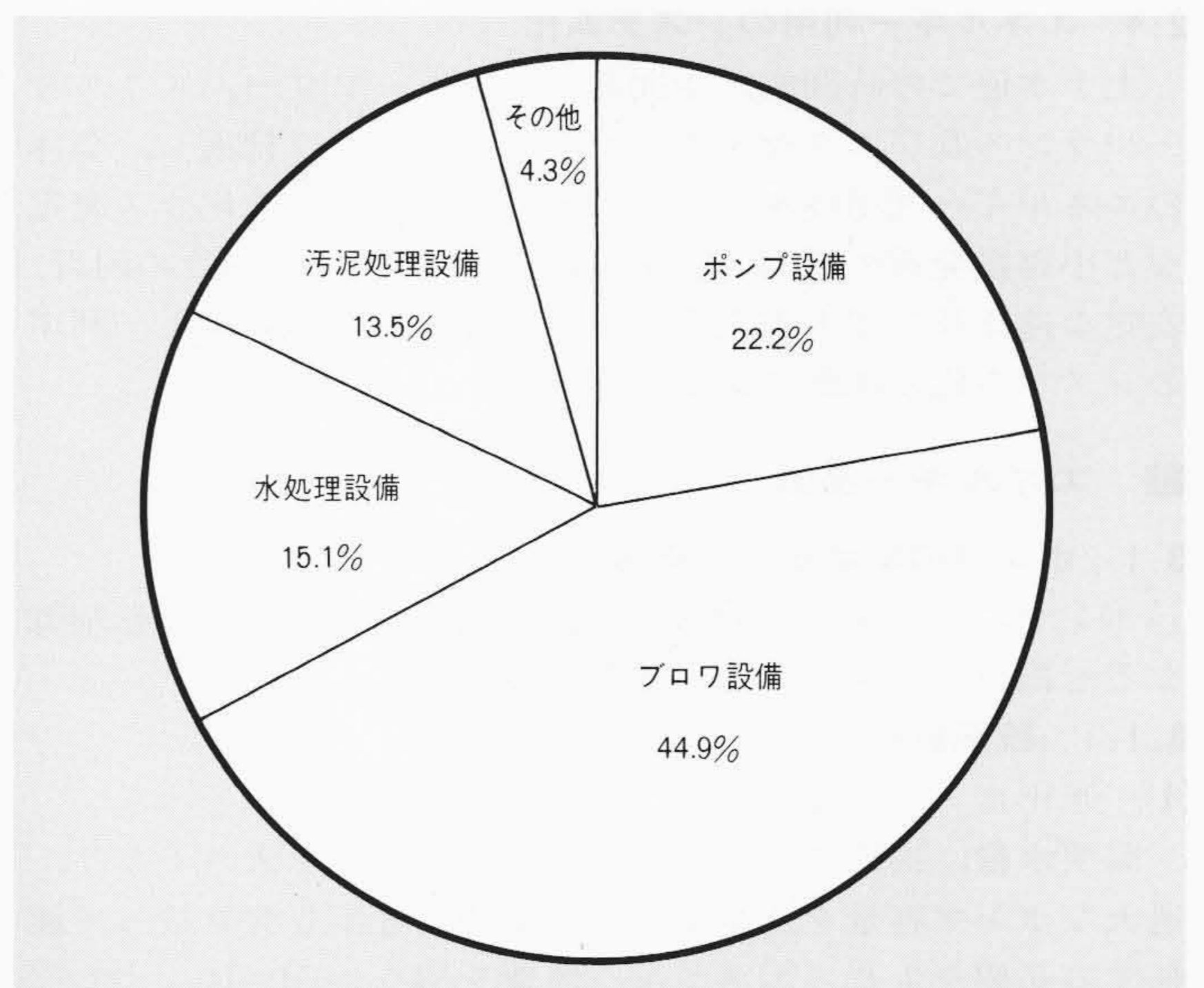


図1 下水道システム消費電力構成 処理規模 3万m<sup>3</sup>/d~30万m<sup>3</sup>/dの6箇所処理場での消費電力の平均値である。

\* 日立製作所機電事業本部 \*\* 日立製作所土浦工場 \*\*\* 日立製作所土浦工場 工学博士 \*\*\*\* 日立製作所大みか工場 \*\*\*\*\* 日立製作所習志野工場 \*\*\*\*\* 日立エンジニアリング株式会社

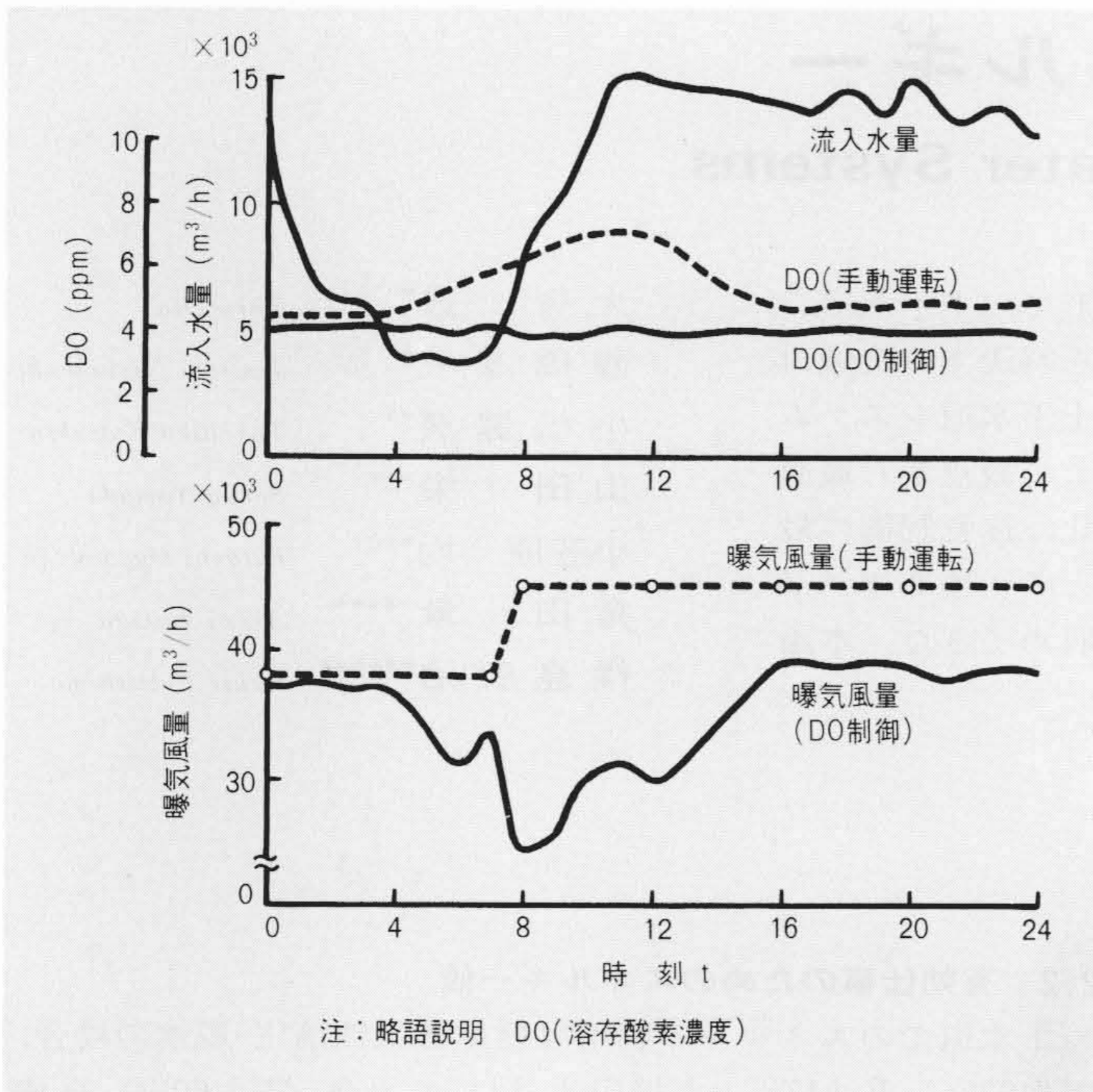


図2 曝気槽溶存酸素濃度/送風量制御による曝気槽要求風量の低減 DO(溶存酸素濃度)制御により、曝気風量は17%低減され、ブロウの台数制御及びベーン制御を行なうと、電力量は15~20%低減が可能である。

びガスエネルギー利用の合理化が重要である。熱エネルギーはそのプロセス内部で、直列、多段階、カスケードな熱回収システムを設けるほか、利用しやすい高品質エネルギー、例えば電力への変換が重要である。熱処理、焼却炉などの廃熱温度は比較的低いので、電力への変換とカスケード形熱回収システムとの合理的配分を図る必要がある。嫌気性消化槽から発生するメタンガスを燃料とする発電、いわゆる消化ガス発電システムも、汚泥処理プロセスの一部として、嫌気性消化槽の安定運転、消化ガスの組成の改善及びガスカロリー、収量の向上を併せて検討する必要がある。

2.4 エネルギー利用のシステム化

上下水道での時間的、空間的エネルギーフロー、エネルギーバランス及びエクセルギーバランスを的確に把握し、全体のエネルギー利用度を高めること、廃熱発電、消化ガス発電など小容量発電の電力の質を高めること、買電系統との円滑、安定な連係及び電力安定供給が上下水道でのエネルギー利用のシステム化の課題である。

3 エネルギー節減

3.1 ポンプのエネルギー節減

ポンプのエネルギー節減は設備計画、運用計画、運転制御などを総合的に検討することが重要である。

3.1.1 設備計画

(1) 適正ポンプ容量の選定

需要水量、揚程の経年変化に対する安全率を大きくとり、過大なポンプ容量を選定すると、常時、吐出し弁を絞って運転する必要を生じ、エネルギー浪費を招く。

(2) 適正なポンプ台数の選定

ポンプ台数を適正に選定し、需要水量の変動に応じて運転台数を増減し、吐出し弁を絞ることを避ける。

(3) 高効率ポンプの採用

需要水量、揚程の時間的変動により、最高効率点以外で運転する必要も多い。部分流量範囲でも効率の高いポンプを採

用する。

3.1.2 運用計画

(1) 貯水池調整能力の最適利用

貯水池調整能力を最適利用した送水計画によって、ポンプは高効率範囲で運転を図る。

(2) 中継増圧ポンプの利用

給水区域に丘陵を含む場合、これを対象とする中継増圧ポンプを設け、ベースポンプの高揚程化を防ぐ。

3.1.3 運転制御

(1) 最適目標値の設定

流量、水位、圧力(末端、吐出し圧)などの目標値が選定されるが、最適値の設定が重要である。広域上水道で計算機の需要流量予測などに基づき最適給水圧力を与えることはその例である。

(2) 最適流量調整端の選定

ポンプの種類にもよるが、一般に流量調整端は吐出し弁、速度、翼角及び台数制御が組み合わせて用いられる。エネルギー節減効果の面では、速度制御が合理的である。図3に速

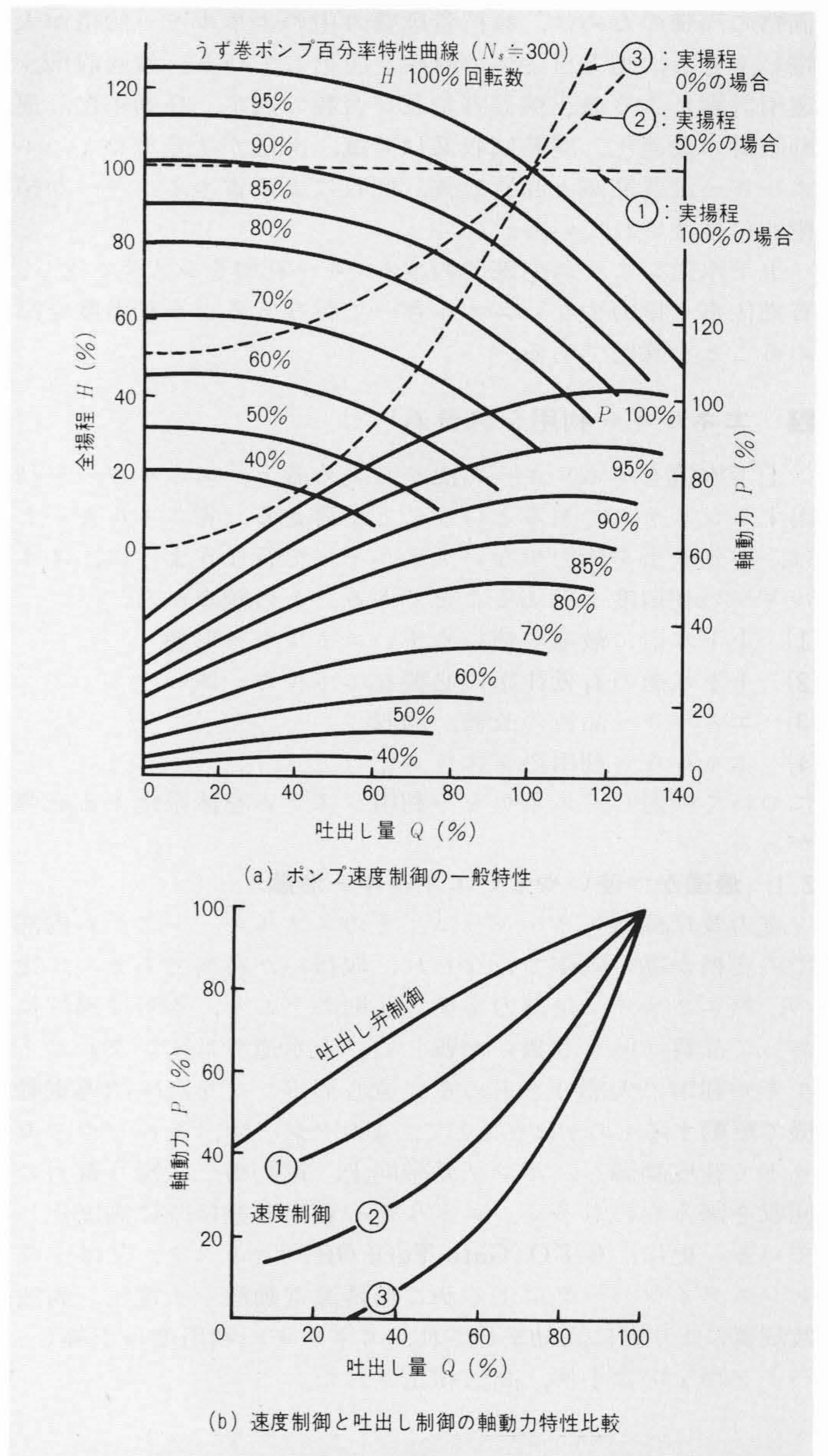


図3 ポンプ速度制御と吐出し弁制御の軸動力特性比較 速度制御時は、吐出し弁制御時に比べて軸動力は大幅に低減される。

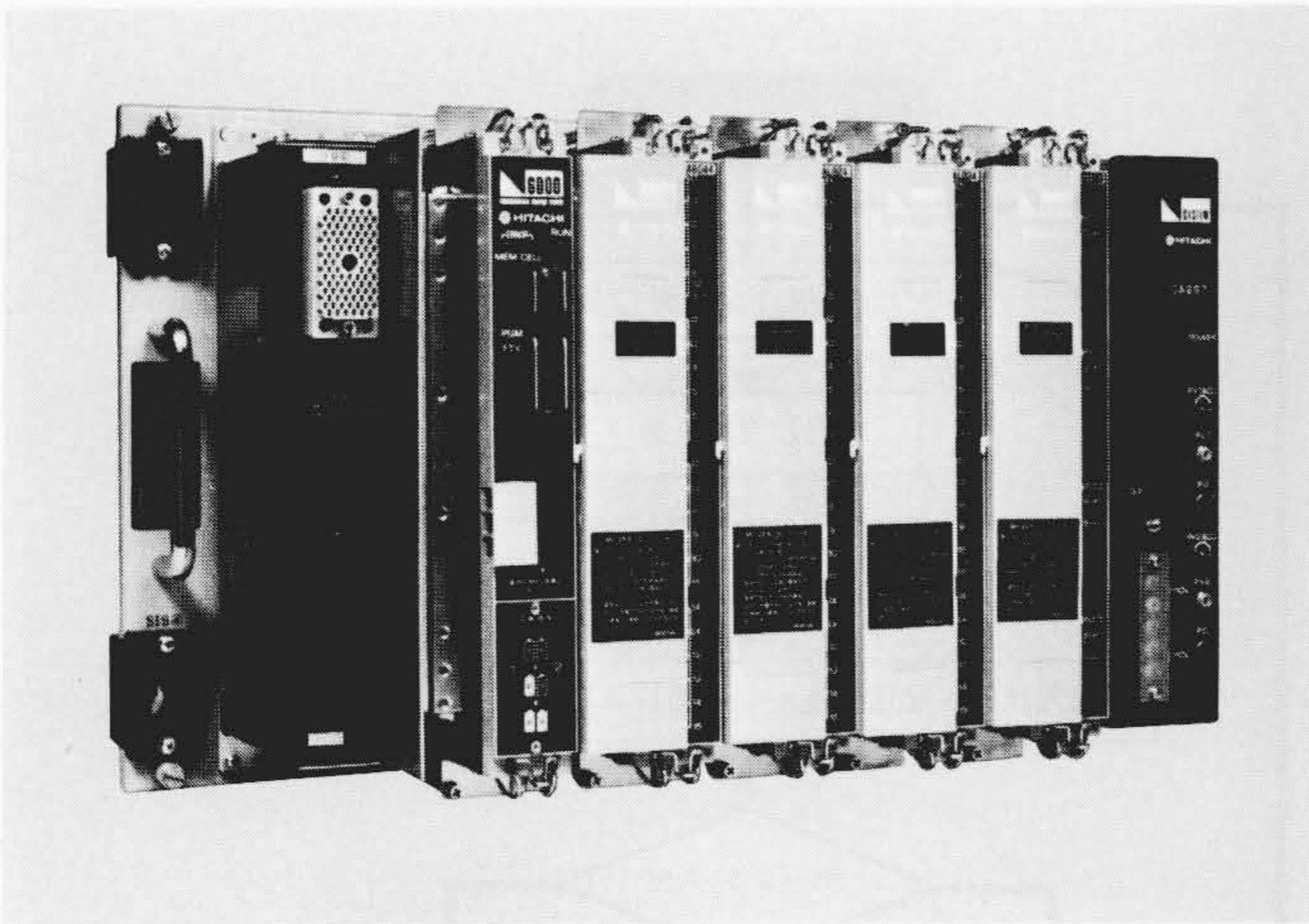


図4 ポンプ制御用Nシリーズマイクロコンピュータ 現場サイトに設けるマイクロコンピュータの一例を示す。入出力点数64点で、ポンプの速度制御に適している。

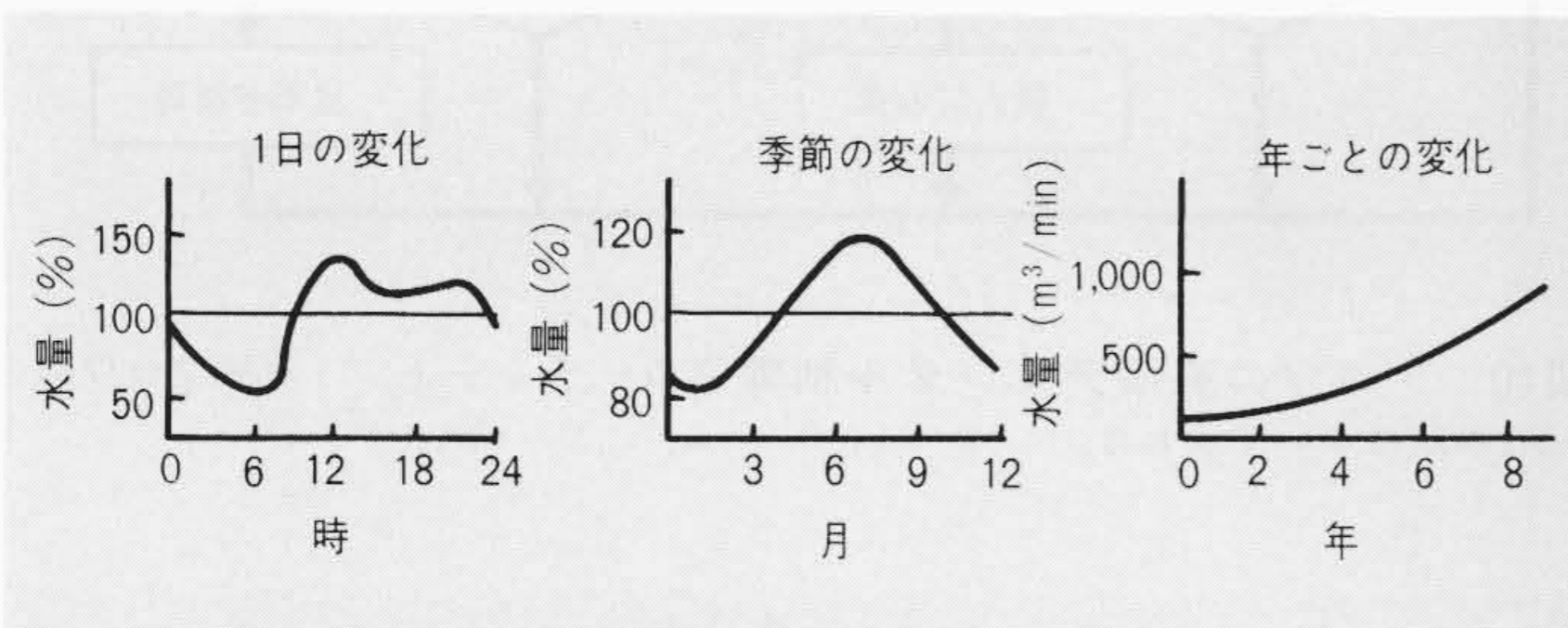


図5 処理場流入汚水量の1日、季節、長期の変化パターン 汚水処理プロセスは、この水量変化を吸収して放流水質を水質基準内に保つことが重要であり、ブロワはこの水量変化に見合った必要風量を供給することが重要である。

度制御と吐出し弁制御のエネルギー節減効果の比較を示す。台数、速度制御とも、サイトに設けたマイクロコンピュータにより、DDC(直接デジタル制御)する例が増加している。

図4にNシリーズポンプ制御用マイクロコンピュータの例を示す。

### 3.2 曝気ブロワのエネルギー節減

#### 3.2.1 設備計画

曝気槽溶存酸素/送風量制御により、曝気槽要求風量は大幅に低減できるが、実際には計画水量の3~7倍の送風量のブロワ容量が選定され、長い建設期間中、ブロワ容量が過大となり送風量を調整しきれず、大気放風を余儀なくされ、エネルギー節減の機会を逃がしている例が多い。図5に示すように、計画の進展に伴う処理人口の増加、水量の時間的増大、季節及び生活サイクルによる昼夜の流量変化、合流式下水道では雨水量に基づく流入下水水量の変動幅からブロワ容量及び台数を選定するが、許容床面積、ブロワ種類、建設段階数、時期などの制限条件を考慮し、建設費と運転費の合計が最小となるよう設備計画を行なう、図6にブロワの段階的設備計画計算プログラムの構成を、図7に300m<sup>3</sup>/min、及び100m<sup>3</sup>/min機によるComputer Aided Planning例を示す。

#### 3.2.2 運転制御

ブロワ容量調整端は速度、吸入弁、吸入ベーン、吐出し弁などがあり、速度制御が最も効率がよいが吐出し圧力は速度の二乗に比例して低下するから、曝気槽水深がほぼ一定で、一定吐出し圧力を要する曝気ブロワには不利である。吸入ベーン、吸入弁の実例が多い。図8に風量・動力特性の例を示す。A~C間は吸入弁制御、C~D間はサージング防止のため

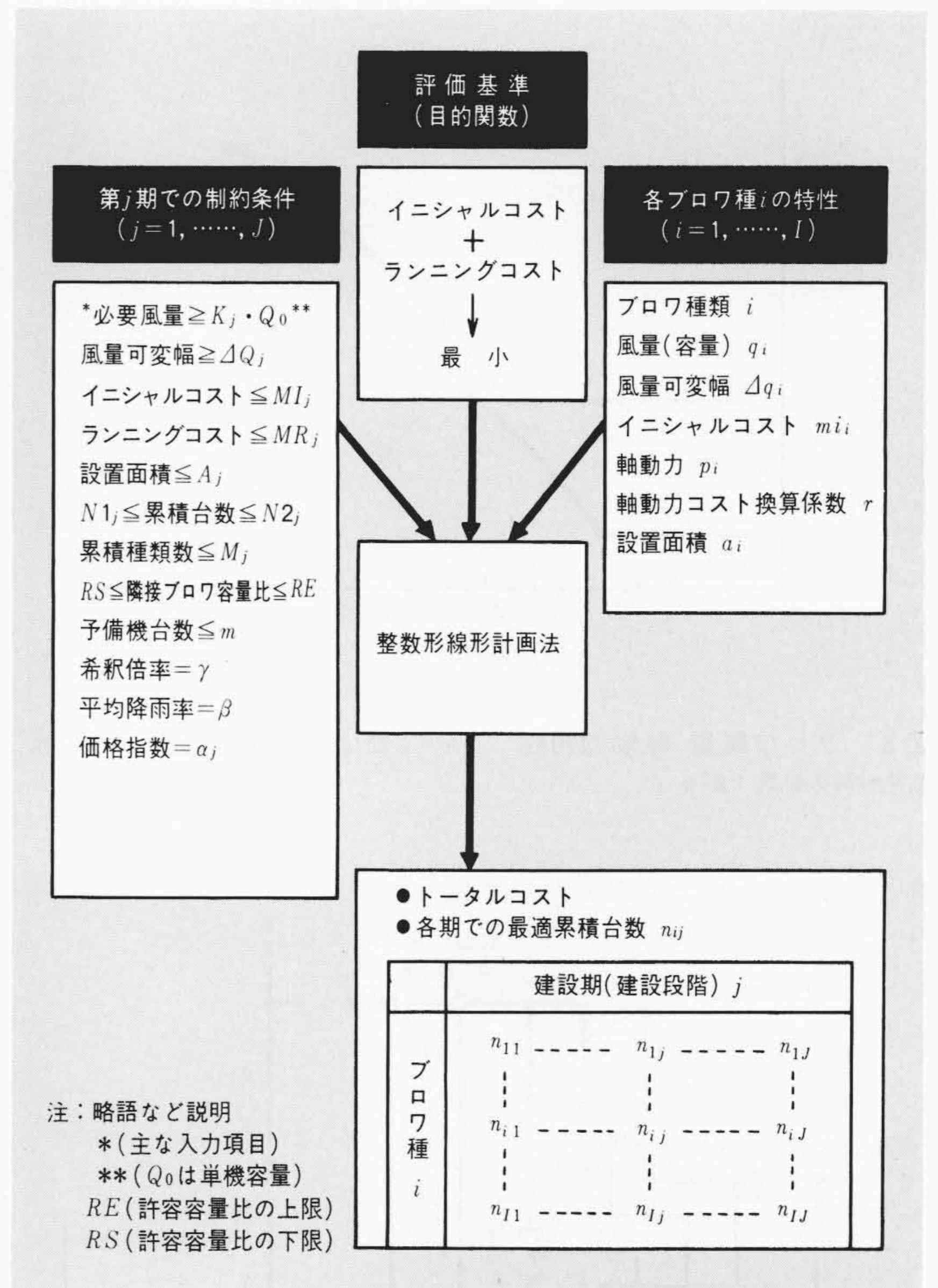


図6 ブロワの段階的設備計画計算プログラム 流入生下水水量の変動に対し、建設段階、時期別に、建設費と運転費の合計が最小となるように設備計画を行なう。

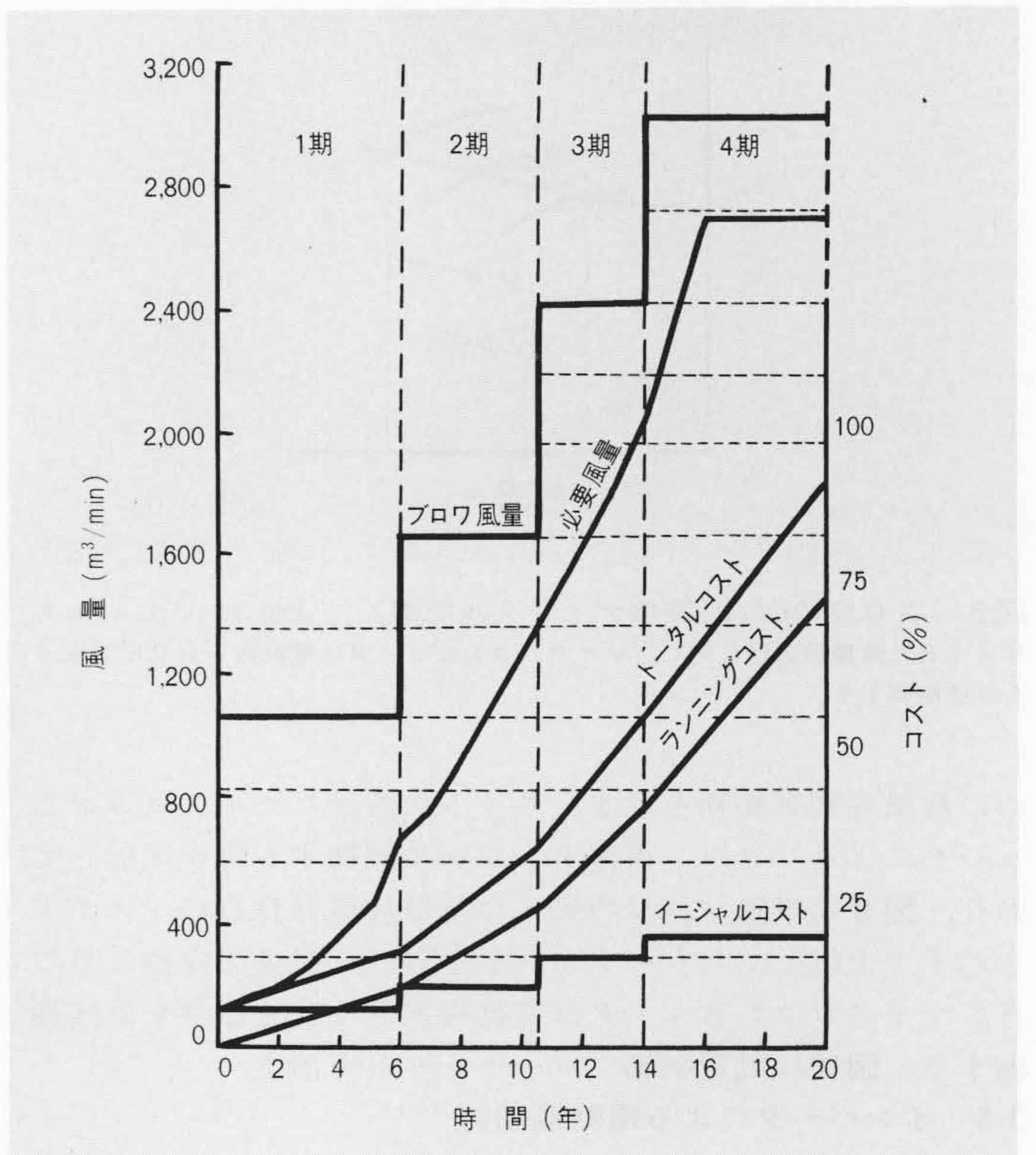


図7 ブロワの段階的最適設備計画例 300m<sup>3</sup>/min及び100m<sup>3</sup>/min機によるComputer Aided Planning例を示す。

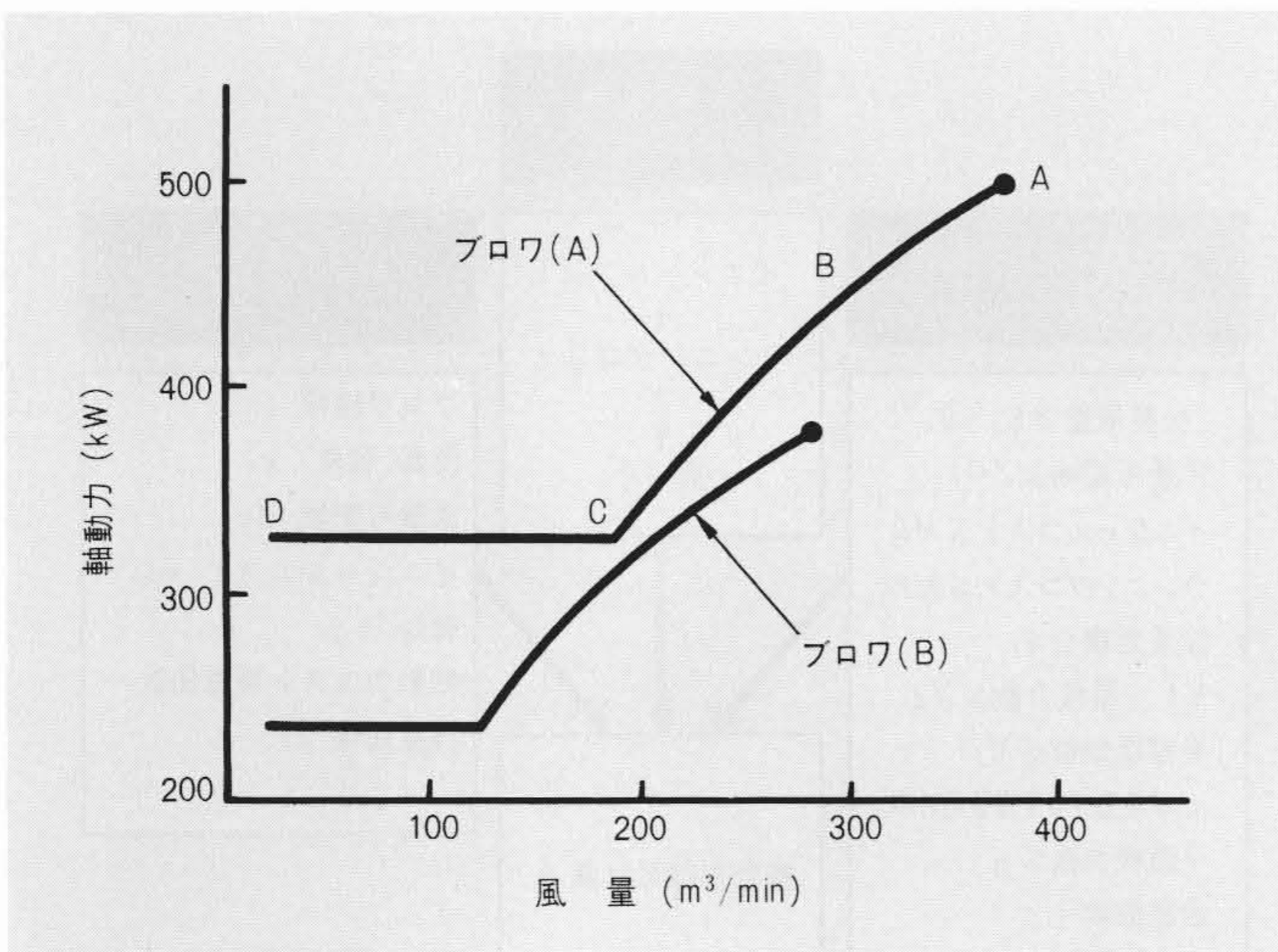


図8 ブロー風量-軸動力特性 A~C間は吸入弁制御, C~D間は放風弁制御の範囲である。

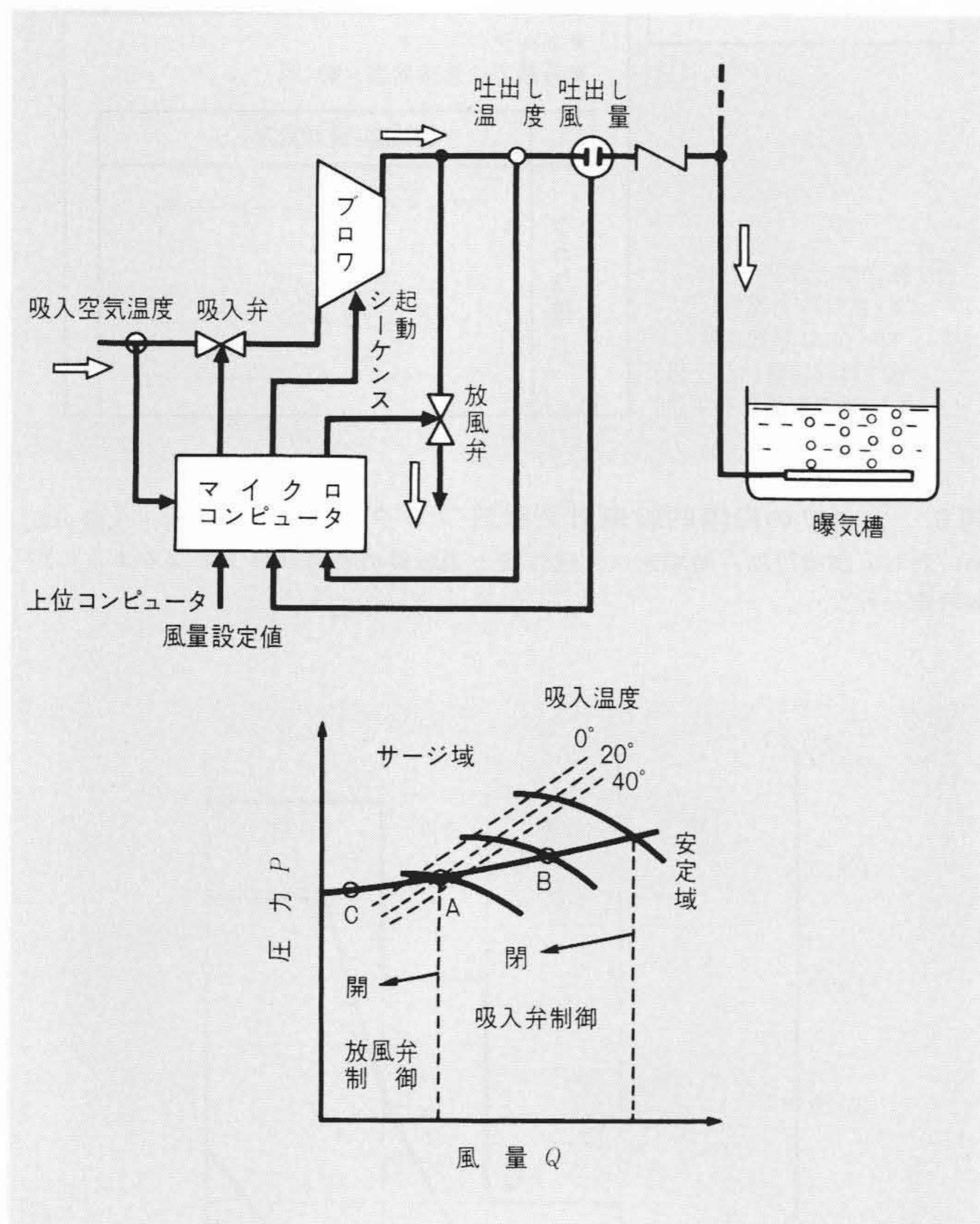


図9 ブローのDDC(直接デジタル制御) 上位コンピュータから与えられた風量設定値に対し, マイクロコンピュータは電動吸入弁及び放風弁を直接制御する。

めの放風弁制御範囲を示す。サイトに設けたマイクロコンピュータによりブローを直接デジタル制御する例が増加しており, 図9に単独ブローの吸入弁及び放風弁DDCシステムを示す。上位コンピュータから与えられる風量設定値に基づき, マイクロコンピュータは電動吸入弁及び放風弁を直接制御する。図10に風量制御フローチャートを示す。

### 3.3 インバータによる電動機制御<sup>6),7)</sup>

ポンプ速度制御には巻線形誘導電動機のクレーマ, あるいはセルビウス制御の実績が多い。最近, かご形誘導電動機的一次電圧, 周波数制御(AVAF: Adjustable Voltage Adjustable

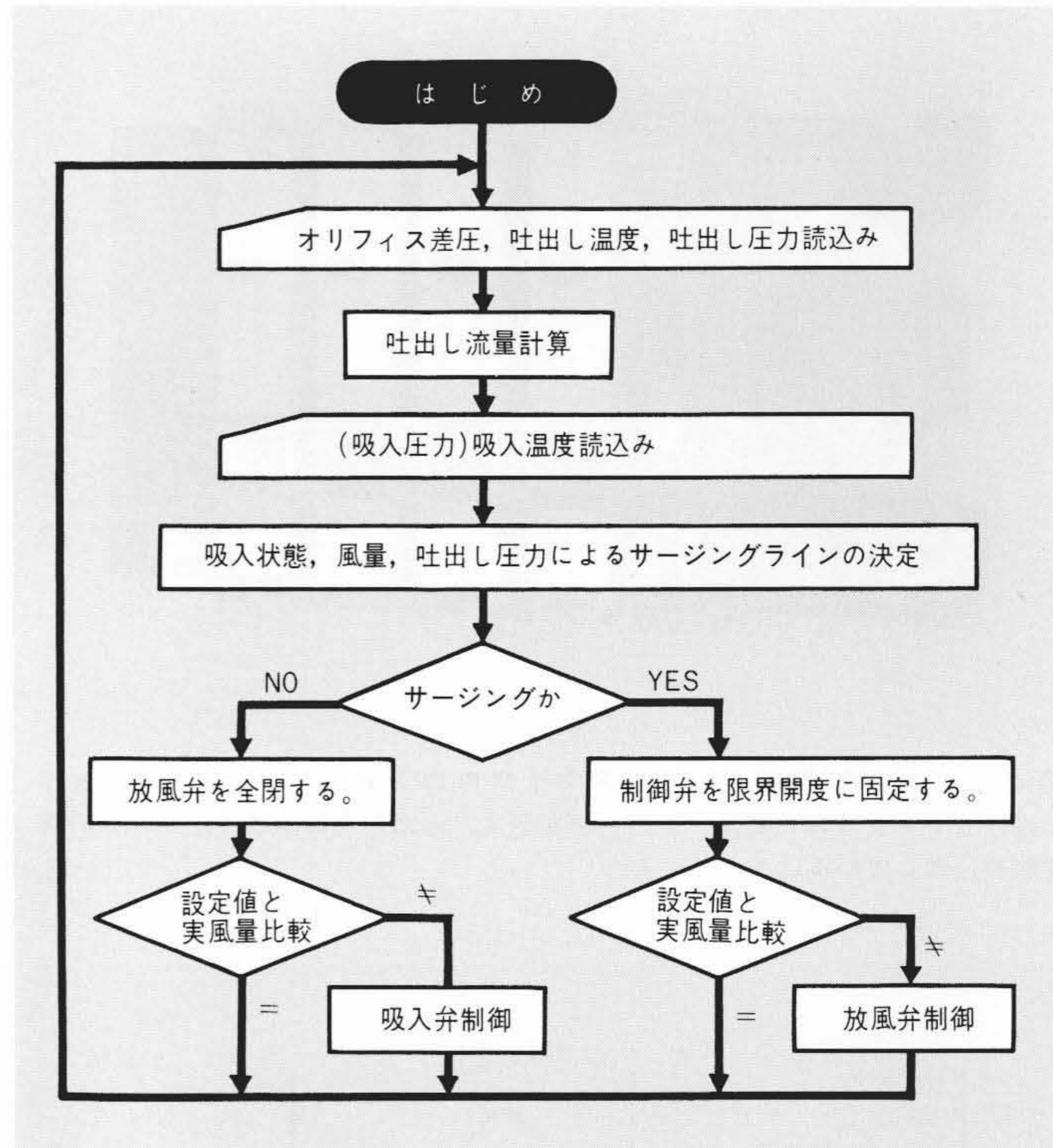


図10 ブローの直接デジタル制御フローチャート 単独ブローのDDC手順について示した。

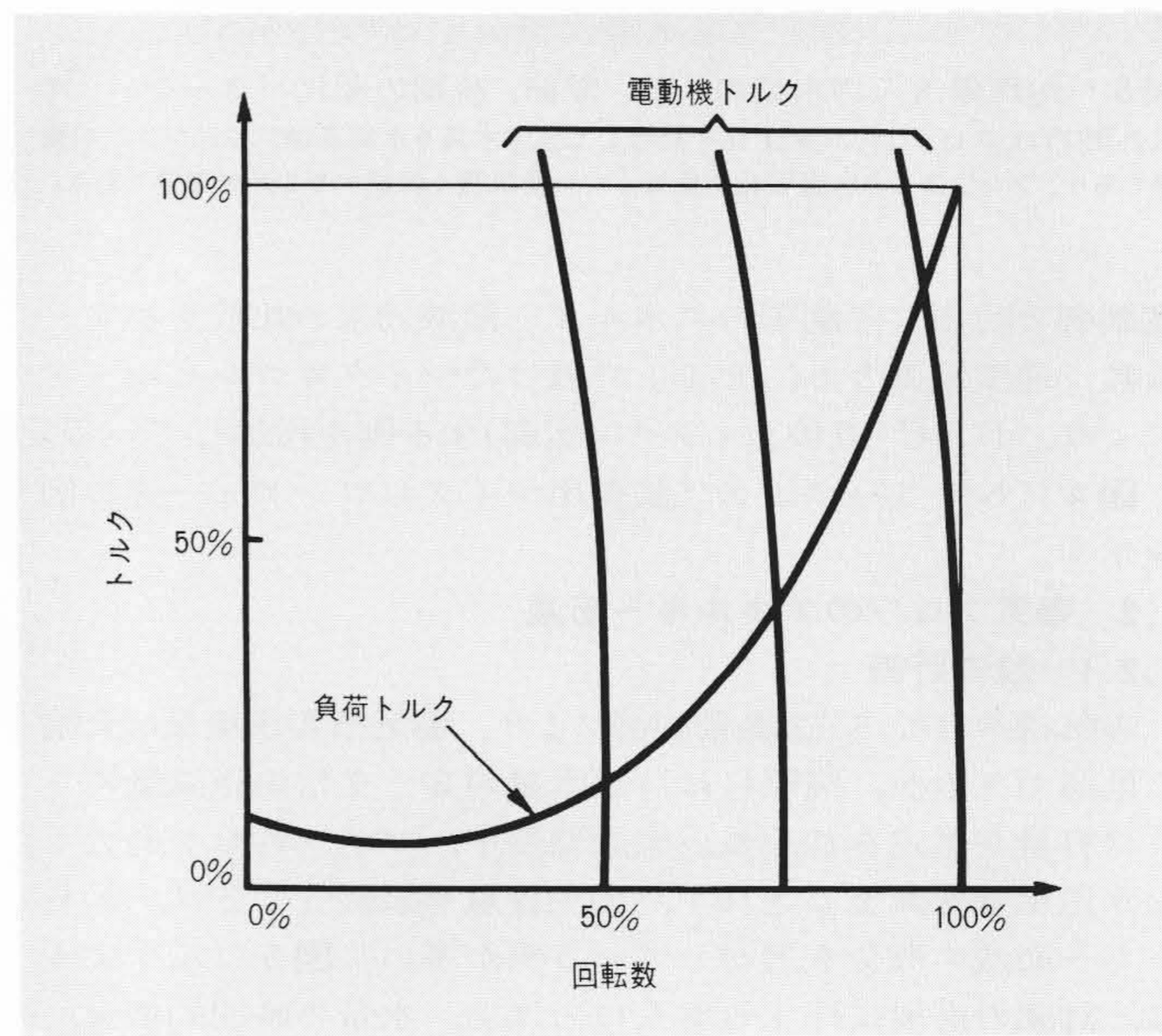


図11 AVAF制御におけるトルク特性の例 インバータにより電動機の端子電圧対周波数比を変化させることにより, 電動機のトルク特性が変化する様子を示す。

Frequency)が増加しつつある。数千キロワットまで実用化され, がんじょうな構造と簡単な保守による高信頼性が実証されている。

インバータの周波数を変えると, ほぼ比例して電動機回転数が変化するが, 磁束密度を一定以下に保つ必要があるから, 電圧と周波数を比例して変化させる。図11はAVAF制御時の電動機トルク特性を示す。

AVAFインバータはGTOサイリスタ方式又はトランジスタ方式によって性能の向上と同時に, 小形・軽量化された。特に, GTOサイリスタ方式はトランジスタ方式と同様に自己

表1 AVAFインバータの特徴比較

大容量機にはPWM制御GTOインバータが優れていることが分かる。

インバータ方式 項目	PWM制御 GTOインバータ	PWM制御 サイリスタ インバータ	電流形 サイリスタ インバータ	PWM制御 トランジスタ インバータ
構成				
効率	92%(at 500Hz)	82%(at 500Hz)	90%(at 50, 60Hz)	95%(at 120Hz)
力率	0.95	0.95	0.1~0.85	0.95
制御応答	速い	やや速い	遅い	速い
体積	小	やや小	大	小
騒音	小	大	小	小
適用	中容量	大容量	大容量	小容量

注：略語説明 PWM(Pulse Width Modulation)  
GTO(Gate Turn Off)

消弧が可能で、ゲート電流制御により、アノード電流をいつでもスイッチングできる。高変換効率を得られ、スイッチング速度が高いからPWM(Pulse Width Modulation)制御のインバータが可能である。表1にPWM制御と通常のサイリスタインバータの比較を示す。GTOインバータは、主回路転流コンデンサとリアクトルが不要となり効率が向上し、容積、重量が低減されているとともに、騒音も低下している低負荷電流範囲でも電源側力率はほぼ一定であり、全負荷時の力率も上昇し、電源側力率改善コンデンサは省略できる。制御回路のデジタル化により、高度の制御も容易となった。図12に、標準GTOサイリスタユニット及びゲートユニットによる多重インバータを示す。転流用コンデンサ及びリアクトルはすべて省略されている。また、図13にPWM制御トランジスタインバータを示す。

#### 4 エネルギー品質の改善

##### 4.1 消化ガス発電

消化ガス発電は、嫌気性消化槽から発生するメタンガスを燃料としてガス機関を駆動し、発電機で電力として回収するもので、図14にシステム構成を示す。同図はデュアルフェール機関を用いる場合を示すが、ガス運転時にはパイロット油、液体燃料運転時には燃料タンクがそれぞれ必要である。図15に発生消化ガス量と発電機出力の関係を示す。連続発電の場合の1日当たり発生ガス量に対する概略出力を示している。消化ガス組成により、出力は多少変化するが、図15は6,000 kcal/Nm<sup>3</sup>の場合について示した。発電機によりガス機関入力の約32%を回収できるが、冷却水及び排ガス熱損失をカスケード回収すれば、総合熱効率は約75%まで上昇が可能である。また、排ガスは汚泥乾燥熱源として利用することもできる。消化ガス機関の比較を表2に示す。ガスタービンはガス供給圧力8 kg/cm<sup>2</sup>以上を必要とするので、コンプレッサ容量が大となる。ガス専焼及びデュアルフェール機関は、着火方式以外ほぼ類似である。ガス専焼機関は点火プラグによる電気着火、デュアルフェール機関はパイロット油圧縮着火し、消化ガス混合気を燃焼させ、液体燃料の場合にはディーゼル機関として運転する。

発電方式は誘導発電機を用いる場合と同期発電機を用いる

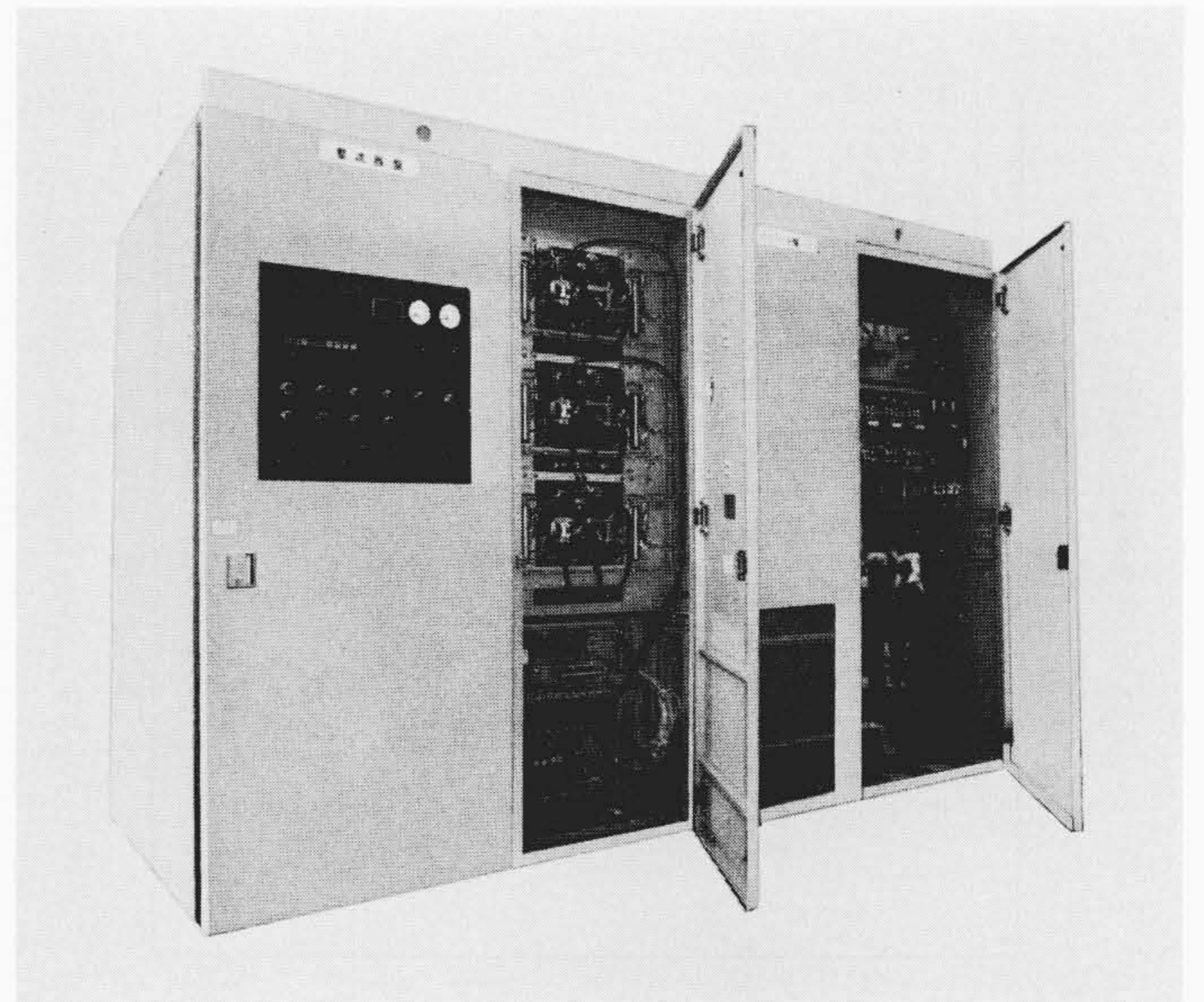


図12 GTOサイリスタ使用AVAFインバータ 各相をユニット化した多重インバータである。

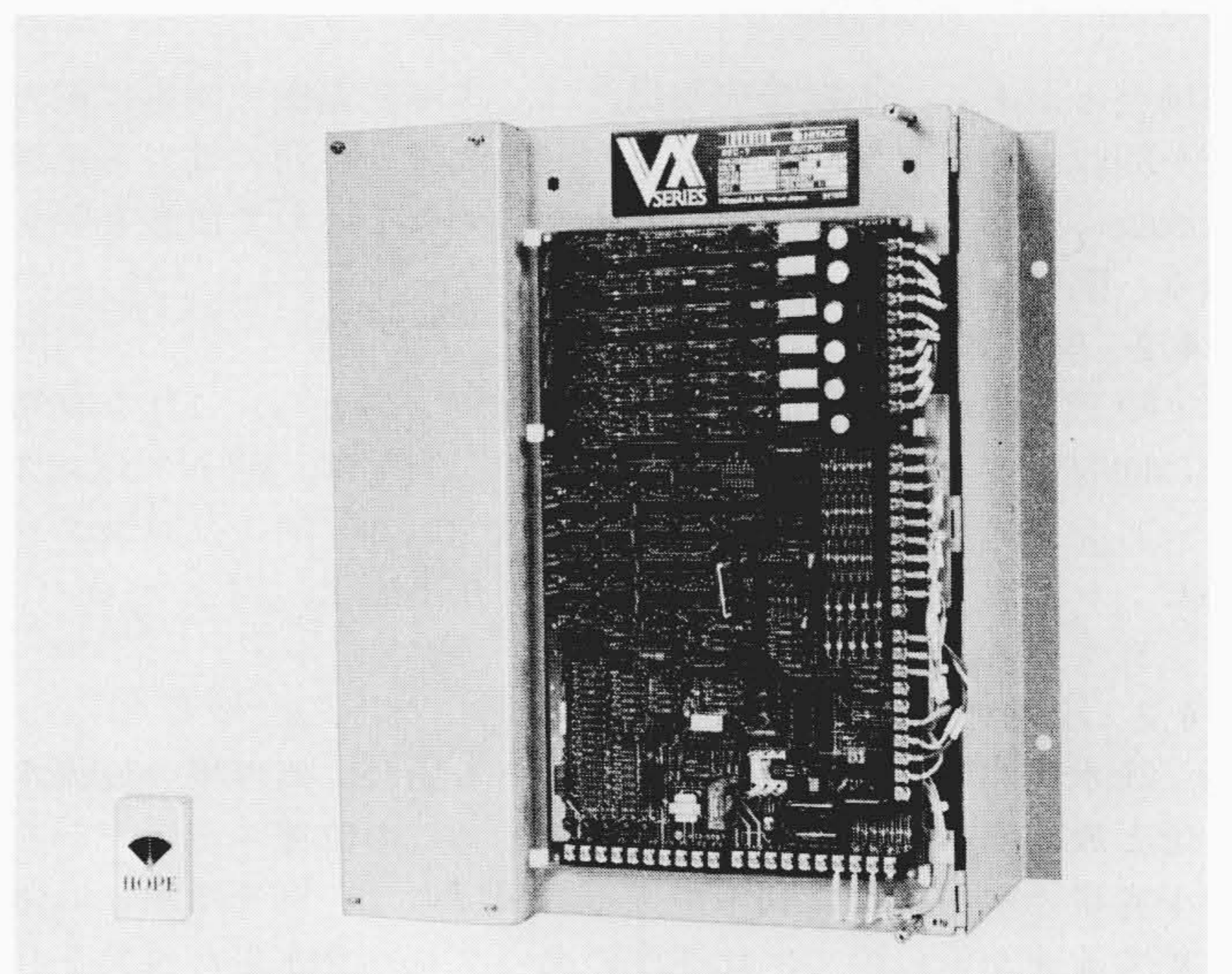


図13 PWM制御トランジスタインバータ インバータ出力は三相200V級5kVA、周波数可変範囲1:10である。

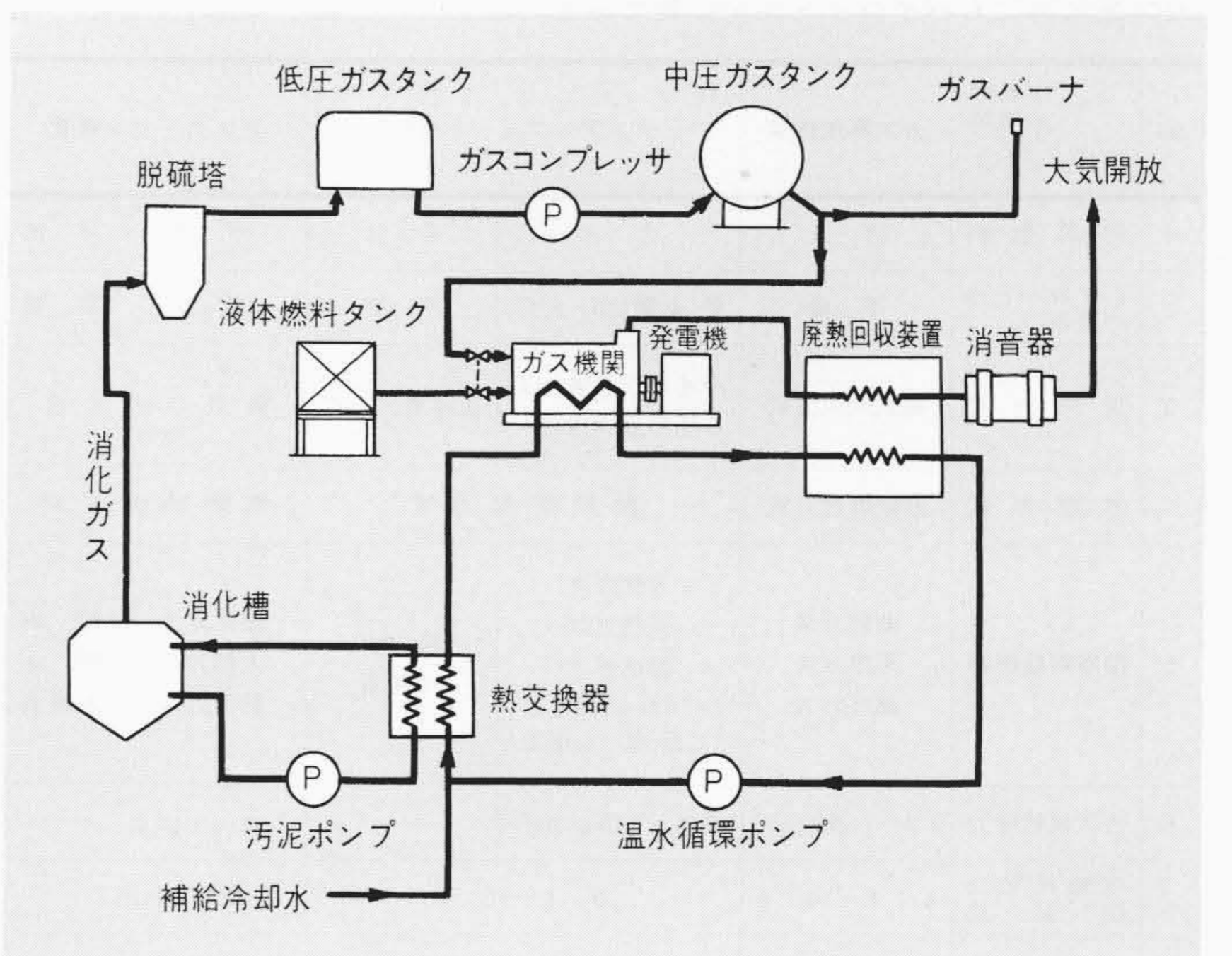


図14 デュアルフェール機関を用いた消化ガス発電システム  
ガス専焼機関使用時は、液体燃料タンクは不要である。

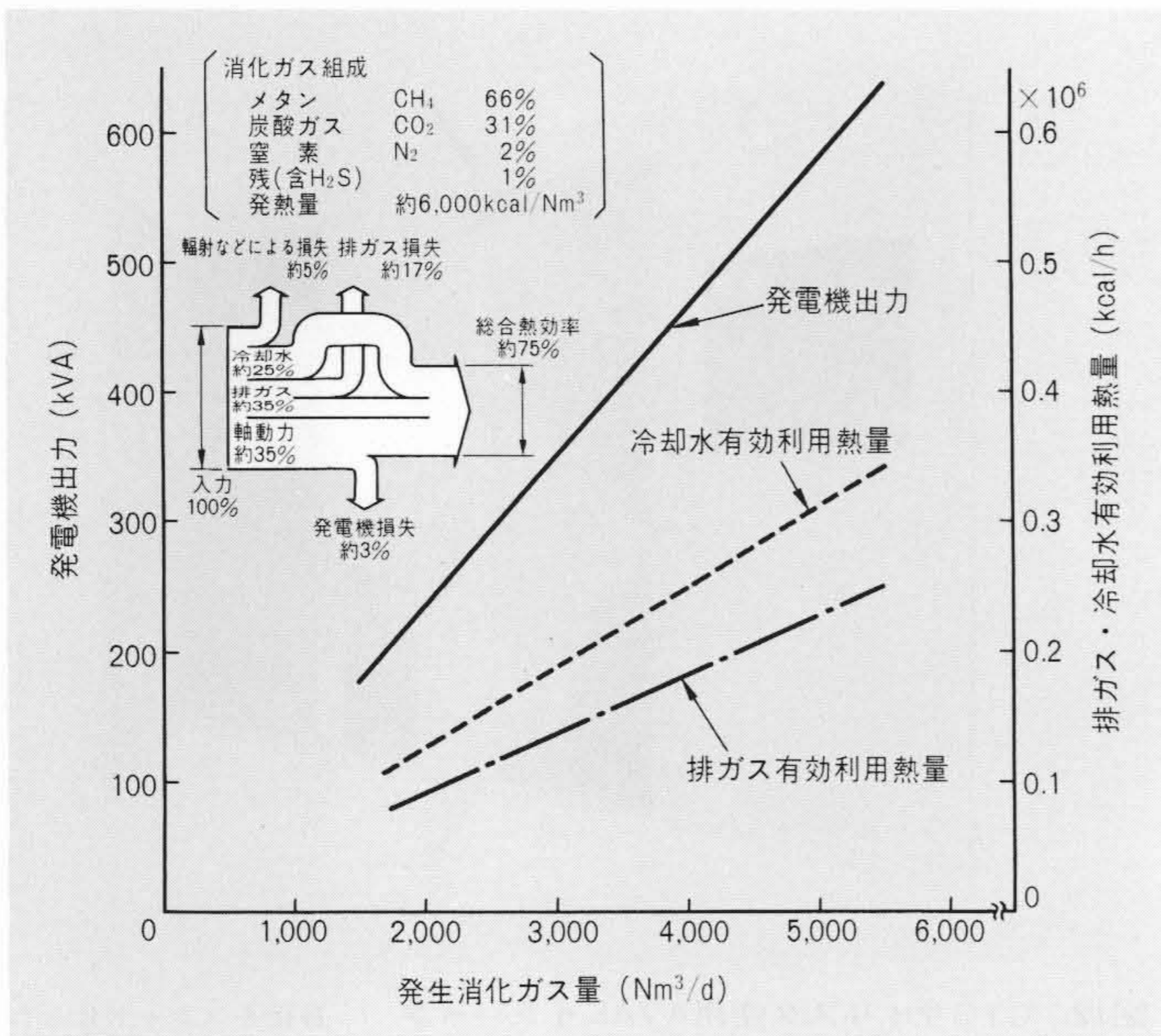


図15 消化ガス量-発電機出力 消化ガスの発熱量及び機関の機種により、出力は多少変化する。

場合とがある。小容量機の場合は、誘導発電機で簡単に電力を回収することが有利であるが、周波数は並列の電力系統周波数に依存し、単独では電力を供給できないので注意を要する。図16は200kVAの実例を示す。

#### 4.2 廃ガス発電

縦形多段炉廃ガスは300℃以下程度であるから、これを有効に回収することは相当困難であるが、例えば、油・フロンタービンシステムはその有効な解決策である。油・フロンタービンシステムは直接式熱交換器により小形化、パッケージ化されている。

#### 4.3 小水力発電

浄水場間に利用できる水位差がある場合、処理場の放流水位と放流面に水位差がある場合など、この位置エネルギーを小容量の水力発電に利用できる。図17にこの例を示す。低落差で流速が低いので、比速度の高いプロペラ水車が推奨される。発電機は容量にもよるが、一般に誘導発電機が多い。

表2 消化ガス発電システム機関比較表 デュアル燃料機関は、ガス運転時にもパイロット油が必要である。

No.	項目	原動機の種類		ガスタービン機関	
		ガス専焼機関	デュアル燃料機関	ガス	液体
1	使用燃料	ガス	ガス	ガス	液体
2	パイロット油の要否	不要	要(熱量比5~8%)	不要	不要
3	着火方式	電気点火方式	パイロット油による圧縮着火方式	電気点火方式	電気点火方式
4	燃焼方式	断続燃焼方式	断続燃焼方式	連続燃焼方式	連続燃焼方式
5	使用可能燃料	消化ガス 天然ガス 都市ガス	消化ガス 天然ガス 都市ガス (パイロット油として軽油、A重油)	消化ガス 天然ガス 都市ガス	灯油 軽油 A重油
6	ガス供給圧力	0.4~1.2kg/cm <sup>2</sup>	0.8~3.0kg/cm <sup>2</sup>	8kg/cm <sup>2</sup> 以上	—
7	圧縮比又は圧力比	6:1~10:1	10:1~15:1	4:1~10:1	—
8	熱効率	30~36%	30~36%	15~20%	—
9	冷却水	要	要	不要	—

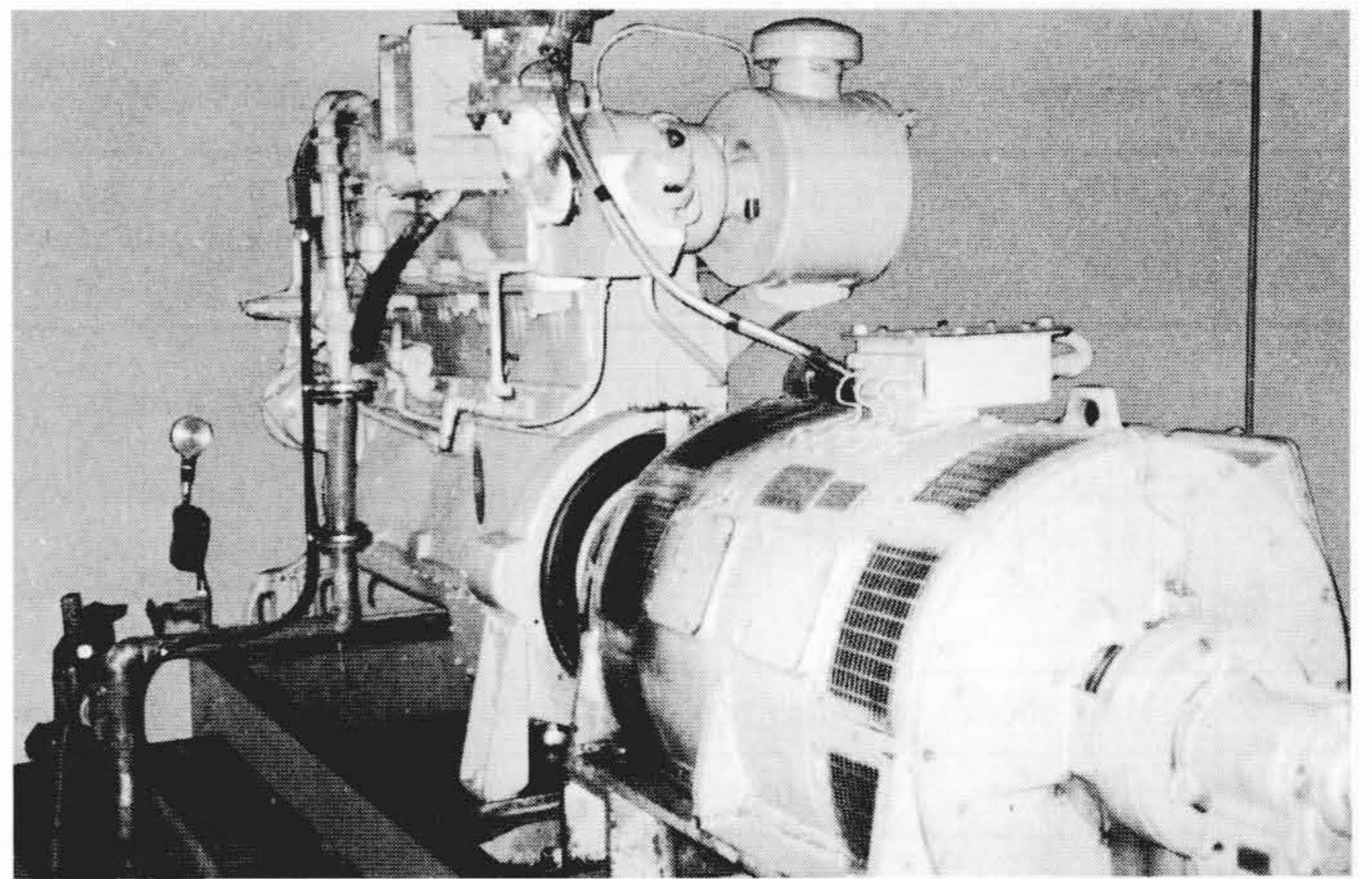


図16 ガス発電システムの実例 発電機出力は200kVA, 160kW, 三相3,300V, 50Hz, 1,000rpmである。

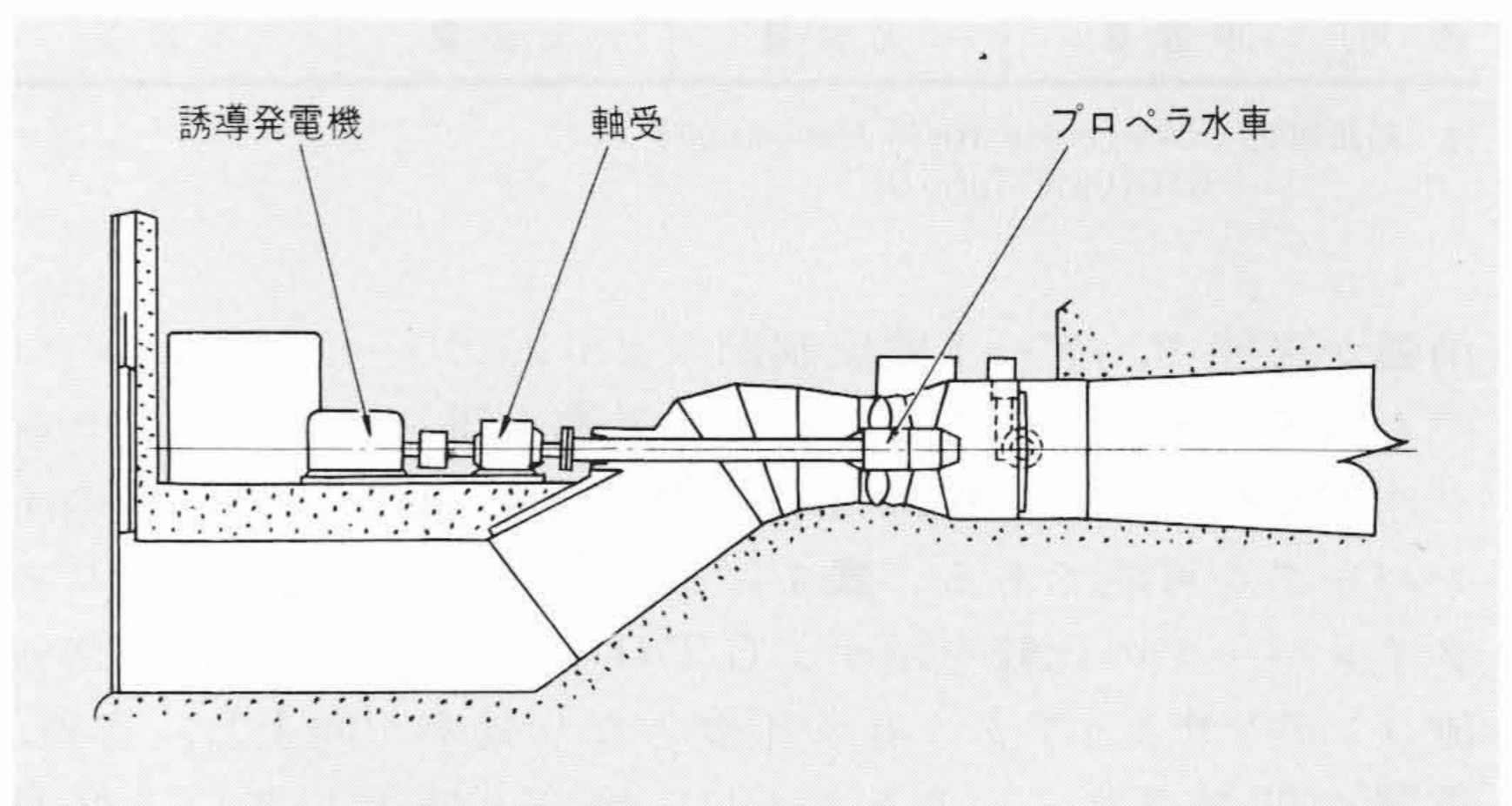


図17 小水力発電システム プロペラ水車が一般的に使用される。

### 5 結 言

エネルギー価格の高騰は、建設費及び維持管理費の上昇の形で、上下水道システム運営の大きい制約となっている。省エネルギーはこの突破口となるものであるが、このためにはエネルギー利用をシステム化し、体系的に検討する必要がある。最適設備及び運用計画による適正機器容量、及び台数の選定、機器の高効率化、運転制御の最適化によるエネルギー節減、並びに廃熱回収又は発電、消化ガス発電などのエネルギー品質改善及び回収が具体的有効手段である。

本論文では、日立製作所の上下水道システムの省エネルギー成果の一部について紹介した。読者各位の御参考になれば幸いである。終わりに、御指導をいただいた関係各位に対し、厚く御礼申し上げる。

#### 参考文献

- 1) エネルギー変換懇話会, エネルギー工学総論, オーム社, 58 (1979)
- 2) 栗林: 下水処理における省エネルギー, 環境技術, 3, 255 (1980)
- 3) 須賀: 大阪市における下水道施設と電気料金, 28 (1979)
- 4) 橋本: 省エネルギー時代の環境把握と下水処理技術, 第17回下水道研究発表会特別講演予稿 (1980-4)
- 5) 科学技術庁, 一般廃棄物, 下水汚泥からのエネルギー回収, 利用に関する調査報告, 科学技術庁資源調査会報告, 第83号 (1980-1)
- 6) 地福, 外: サイリスタインバータ技術の展望, 日立評論, 60, 399~402 (昭53-6)
- 7) 松田, 外, ゲートターンオフサイリスタを用いたインバータとその応用, 日立評論, 60, 427~432 (昭53-6)