

都市開発における地域冷暖房システム

Tendency of DHC Systems for Urban Development

近年、国内各所で導入されている地域冷暖房システムの基本計画に当たっては、一次エネルギーの有効利用、都市環境問題などの観点からとらえた総合的な最適設計を行う必要がある。

本論文では、はじめに経済性、省エネルギー性に主眼を置いた地域冷暖房システムの基本計画法の内容について述べる。今回基本計画用にはん(汎)用ソフトウェアを開発したが、これによって計画段階で精度の高い最適システム構成が立案できるようになった。次に、ガスタービンなどを応用した新しい高効率冷熱源方式と従来方式とをエネルギー効率の角度から対比した。更に、これらの設備を最適に運用するための管理制御システムについて需要予測、運転計画及び設備診断の三つの機能と、これを実現するためのシステム構成について論じる。

坂内 正明* Masaaki Bannai
石川 博章** Hiroaki Ishikawa
畠山 幹雄*** Mikio Hatakeyama
日比野和夫*** Kazuo Hibino
田畑 彰**** Akira Tabata

1 緒 言

東京、大阪など大都市圏の人口高密度化が進むにつれて、種々の環境問題が都市問題として派生してきた。これに対処し、生活向上に貢献する都市開発の一環として地域冷暖房が導入されつつある。

地域冷暖房が果たすべき社会的役割には、熱の安定供給、大気汚染防止、省エネルギー形都市づくり、省人化、スペースの有効利用などが挙げられる(図1)。

本論文では、地域冷暖房システムを計画する上で最も重要な要素となる経済性、省エネルギー及び省人化に焦点を絞り、現在開発中のシステムのうち以下の内容を中心に紹介する。

(1) 経済性と省エネルギー性の追求

設備の最適設計で設備費と省エネルギー性は一般に相反する事象である。冷熱源設備として想定される機械設備と需要家側の年間需要パターンを組み合わせ、Dynamic Programming(動的計画)法を用いて、設備償却と省エネルギーの両面から見て地域冷暖房設備の最適構成を決定する基本計画法が最も重要な点である。

(2) 冷熱源設備

ガスを熱源とした大規模地域冷暖房に適用できる新しい方式として、ターボ冷凍機と吸収式冷凍機を組み合わせたトッピング方式やガスタービン応用などの方式がある。これらを従来方式と対比させた。

(3) 省人化

都市への24時間熱供給を高信頼度で行うために、管理制御システムが果たすべき役割は大きい。このうち特に需要予測、運転計画、及び設備診断機能について考察を加え、これを実

現するための計算機構成と機能について検討した。

2 地域冷暖房の国内における動向

国内の本格的な地域冷暖房は、昭和45年2月に大阪ガス株式会社が冷熱及び温熱供給を開始した千里ニュータウン地区が最初であり、それ以降順次普及してきた。これを段階的にとらえると、昭和49年以前の開発期から昭和50年～56年ごろまでの検討期を経て、現在は新たな発展期を迎えようとしている。

昭和62年3月現在、27事業者が42の地点で地域冷暖房事業を展開しており、プラント数の上では東京地区19地点、大阪地区4地点となり、両地区を合わせると総数の5割以上に達する。都内では年平均7,000から8,000冷凍トンの冷凍機設備が設置されている。

地域冷暖房システムの燃料は、国内42地点のうち大部分は都市ガス、油(灯油、重油)、石炭などの化石燃料が主体であるが、地中送電、ごみ焼却、変電所などの排熱を回収して電動ヒートポンプを用いる方式も一部採用されている。

都市再開発、内需拡大が叫ばれている折から、今後このシステムは大都市とその周辺に設置され、環境対策が容易な都市ガスや電気による駆動方式を主体にして増加していくものと考えられる。

3 地域冷暖房システムの概要

現時点で、国内で最も多く実施されている都市ガス主導の大規模地域冷暖房システムの概略構成を図2に示す。

* 日立製作所システム事業部 ** 日立製作所システム事業部 工学博士
**** 日立製作所大規模プロジェクト営業推進本部

*** 日立製作所機電事業本部

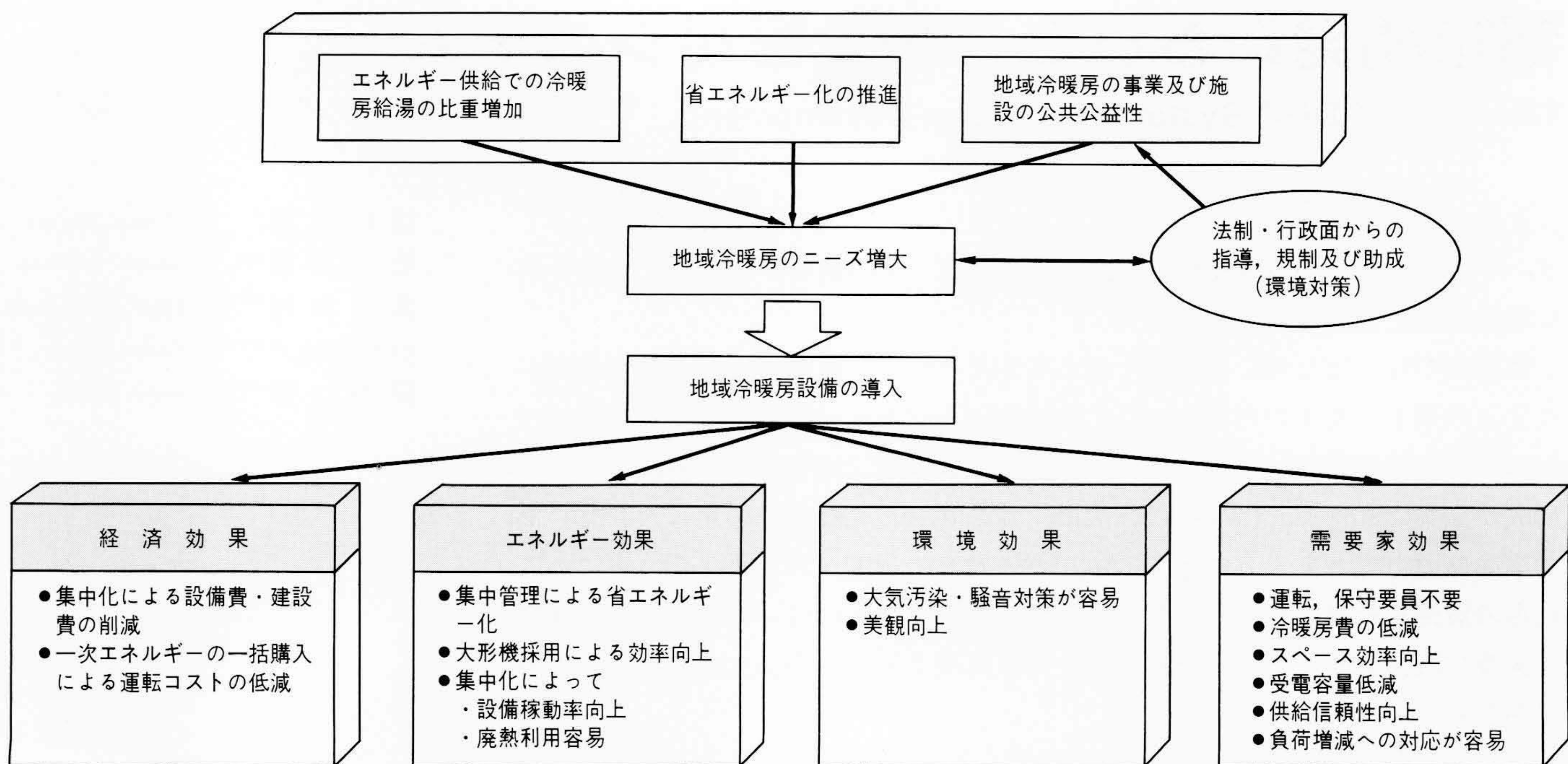


図1 地域冷暖房を取り巻く背景と導入効果 省エネルギー性、環境効果などの観点から、地域冷暖房は東京を中心に、国内各地で積極的に導入されている。

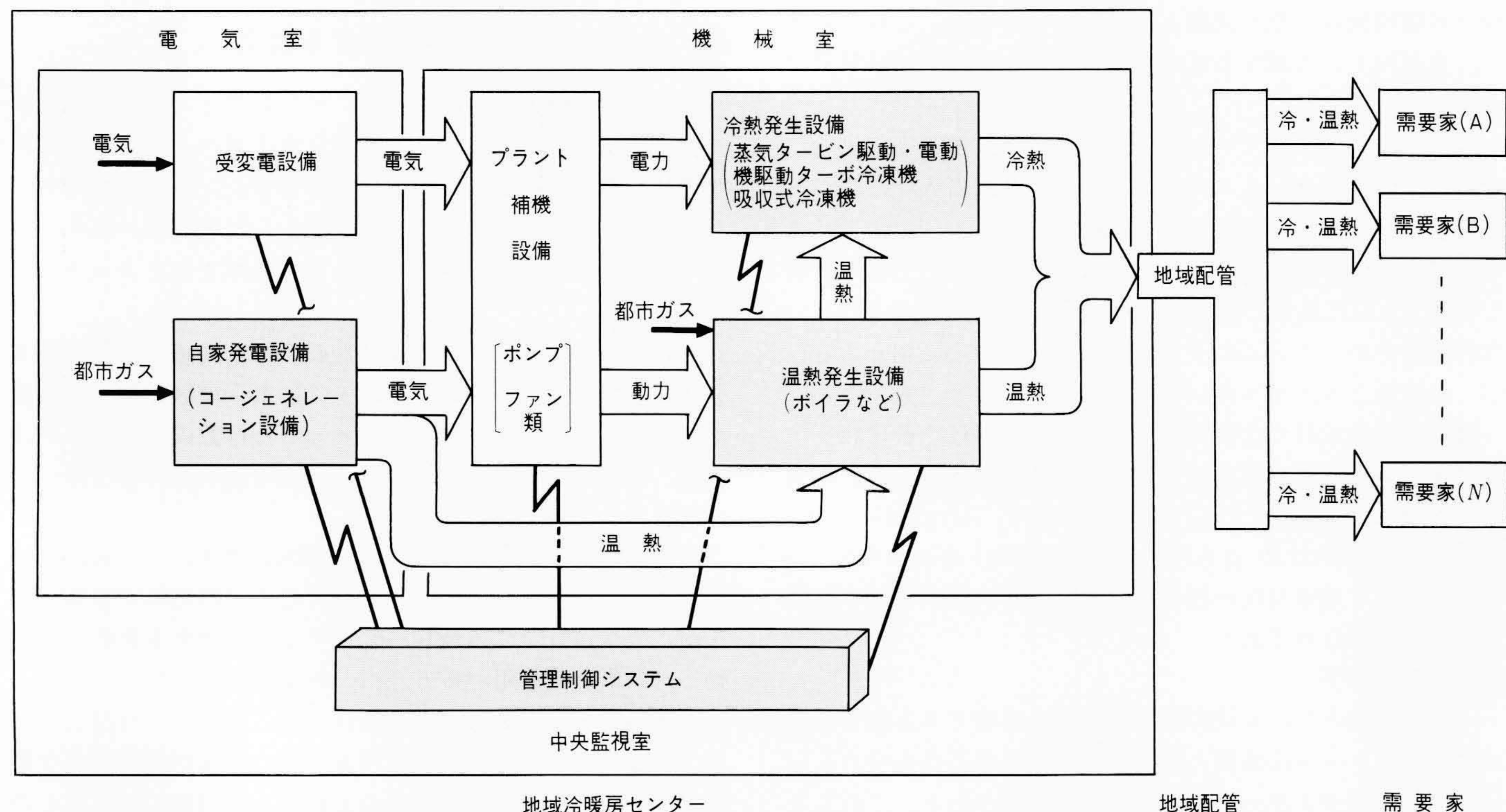


図2 地域冷暖房システムの概略構成 需要家に対し冷・温熱を供給する地域冷暖房センターの、冷・温熱発生設備を中心とするシステムの概略構成を示す。

主要構成機器は以下に述べる三つに分類される。

(1) 冷熱及び温熱発生設備

地域の需要家に送る冷熱及び温熱発生設備であり、前者にはターボ冷凍機、吸収式冷凍機が、後者には蒸気、高温水ボイラがある。

(2) 電気設備

電気設備は冷熱及び温熱発生設備の補機であるポンプ、ファンを駆動するためのものであり、従来は受変電設備だけであったが、近年省エネルギー設備として脚光を浴びているガスタービンやガスエンジン、ディーゼルエンジンなどの原動

機を利用した自家発電設備も徐々に採用されようとしている。この設備は原動機から出てくる廃熱も同時に回収するので、コージェネレーション(熱併給発電)設備と称されている。

(3) 管理制御システム

上記設備の運用を行うために、プラント全体の管理制御を行う設備である。上記(1)、(2)で述べた種々の特性を持つ複合システムを運転員が常に最高の状態で運転することは極めて難しい。そのため本システムには、需要予測、運転計画立案と最適化制御、設備診断などの機能を持たせている。

3.1 システム構成

図3に、冷温熱発生設備と自家発電設備を中心とした地域冷暖房設備の概要を示す。このうち吸収式冷凍機、電動機駆動ターボ冷凍機は、小規模(総容量5,000冷凍トン以下)、中規模(同5,000～1万冷凍トン)用の設備として、復水タービン駆動ターボ冷凍機は、大規模(同1万冷凍トン以上)用として導入された例が多い。

地域冷暖房設備にとって要求される省エネルギー、省スペース機能を実現するため、日立製作所ではターボ冷凍機には

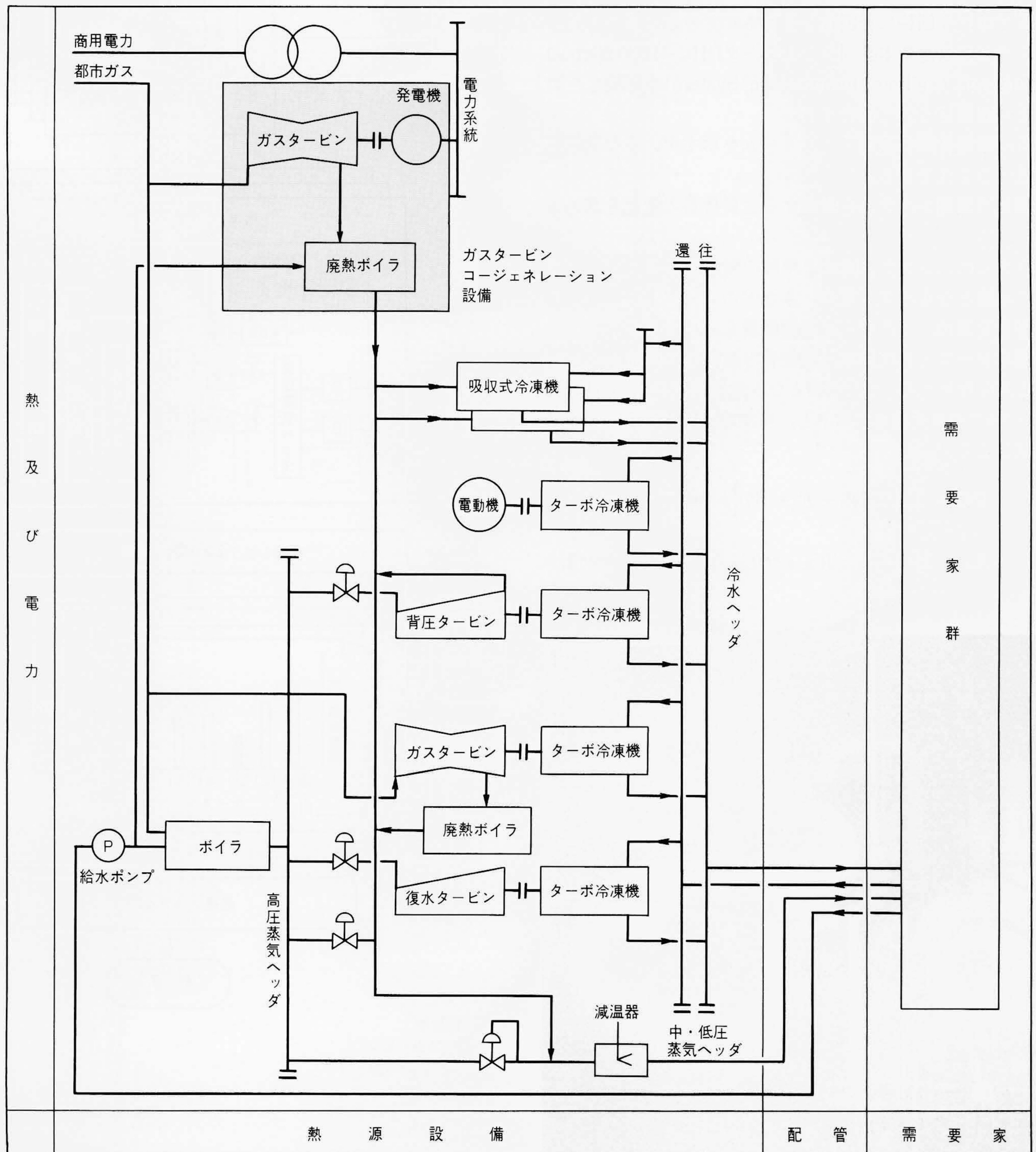


図3 システム構成概要 熱需要特性に対して多様な冷凍機設備が考えられることから、計画時に経年推移を想定した最適な組合せを選定することが重要である。

高性能伝熱管「サーモエクセル」を使用し、吸収式冷凍機には希溶液を高温再生器と低温再生器に別々に圧送するパラレルフロー方式を採用して、両機能を実現させている。図4に日立独自の技術開発による国内最大級の7,000冷凍トン級ターボ冷凍機を示す。

4 地域冷暖房のシステム計画

4.1 最適基本計画

システムの構成を決定するに当たっては、経済性、省エネルギー効果、環境性、省スペース化などのうち、どの要素に重点を置くかによって多種多様のケースが考えられる。日立製作所では、今回特に経済性と省エネルギー性に重点を置いたシステムの最適基本計画シミュレータDHC-OPT (District Heating and Cooling Optimization System)を開発したので、その概要について紹介する。

図5に最適計画の基本アルゴリズムを示すが、主な機能は次に述べる3点である。

- (1) 地域冷暖房システムを構成する主要機器の性能を求める機能。
- (2) 与えられたシステム構成と年間の熱負荷需要から、プラントで必要となるガス、電気、水などのユーティリティの年間消費量を求め、これから年間運転費を求める機能。
- (3) 基本ケースと各代替案を運転費と設備費の両面から比較し、これらのケースのうち最適となる設備構成を求める機能。

ケース k での年間運転コストと、年間固定費相当額はそれぞれ次式による。

$$RC_k = \sum_{j=1}^{12} \left\{ \sum_{i=1}^{24} (F_i + E_i + W_i) \right\} j \cdots \cdots (1)$$

$$IC_k = \sum_{k=1} (IC_{H,k} + IC_{R,k} + IC_{E,k}) \cdots \cdots (2)$$

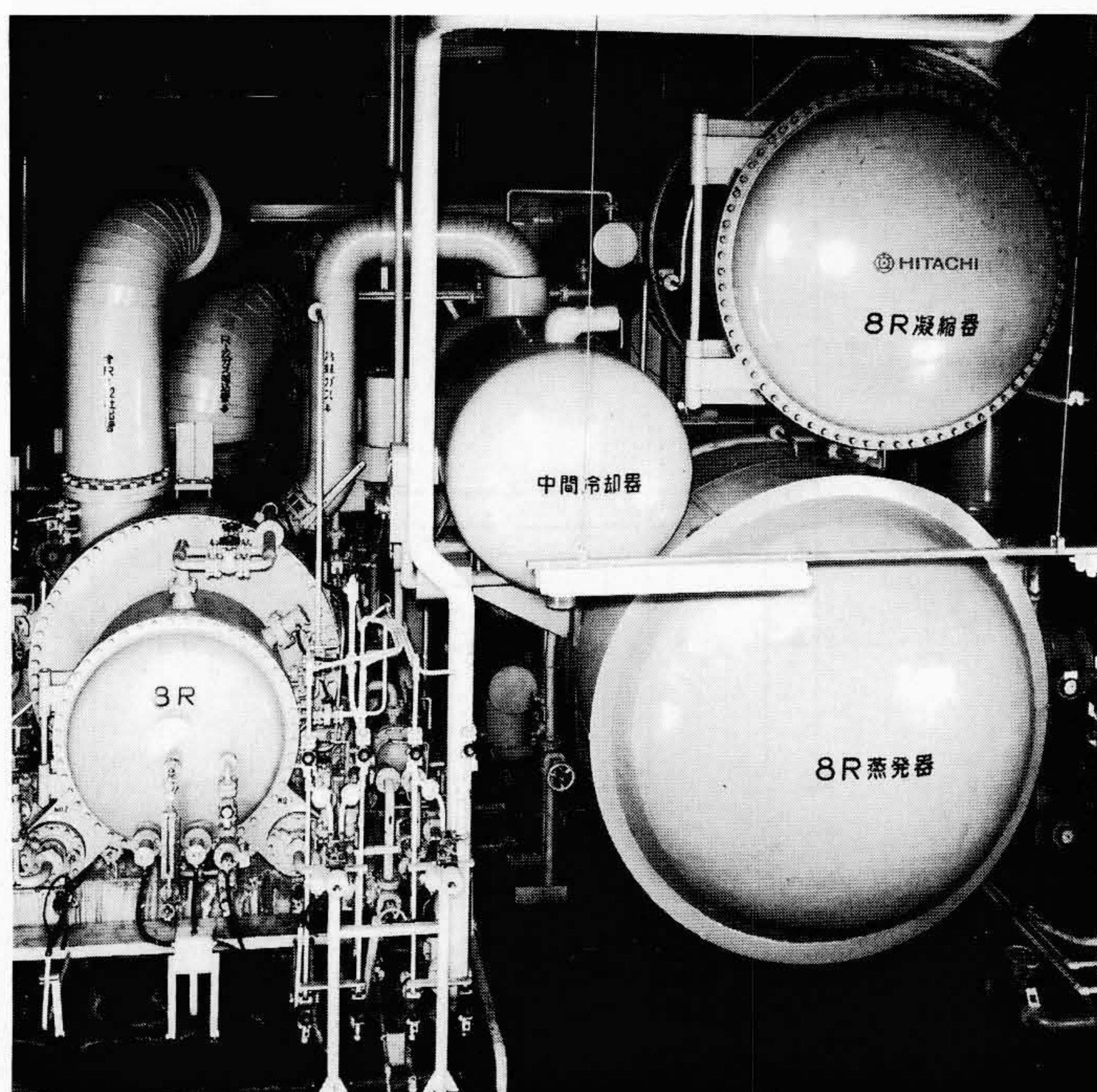
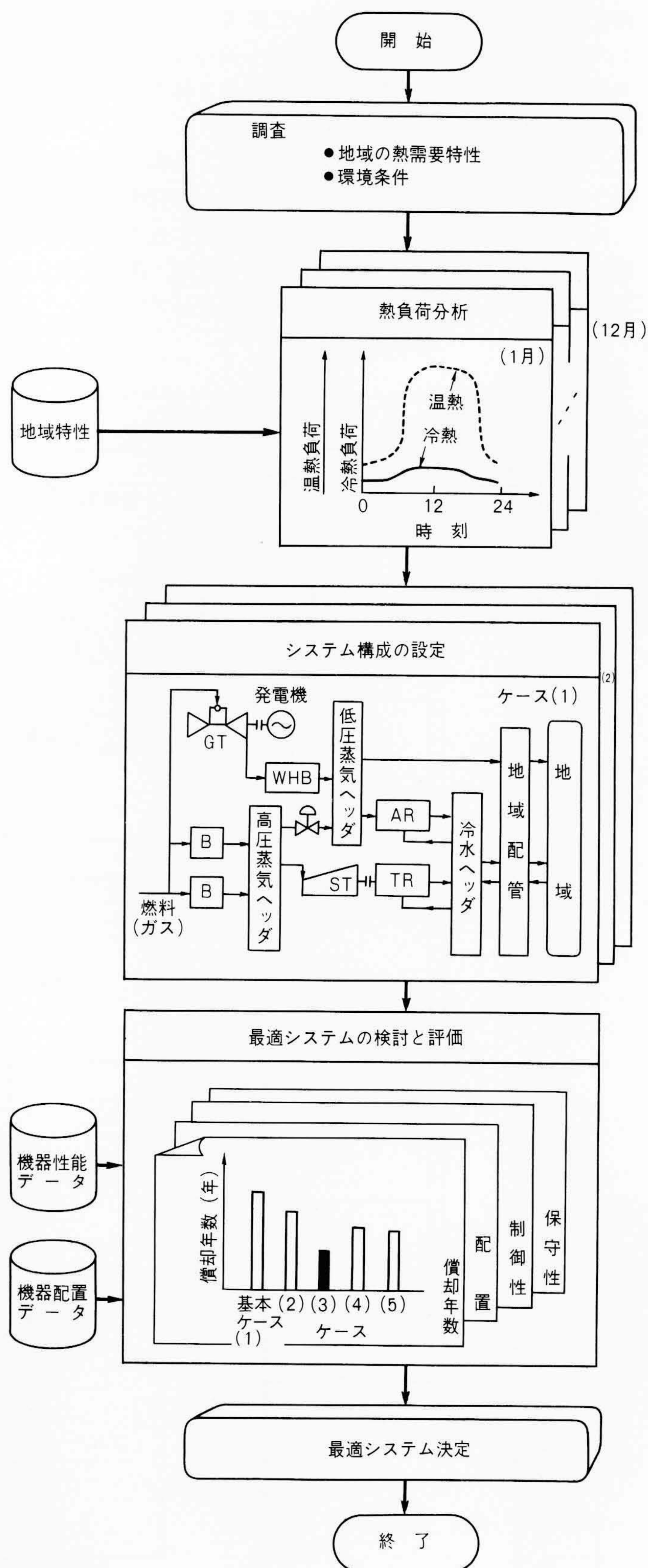


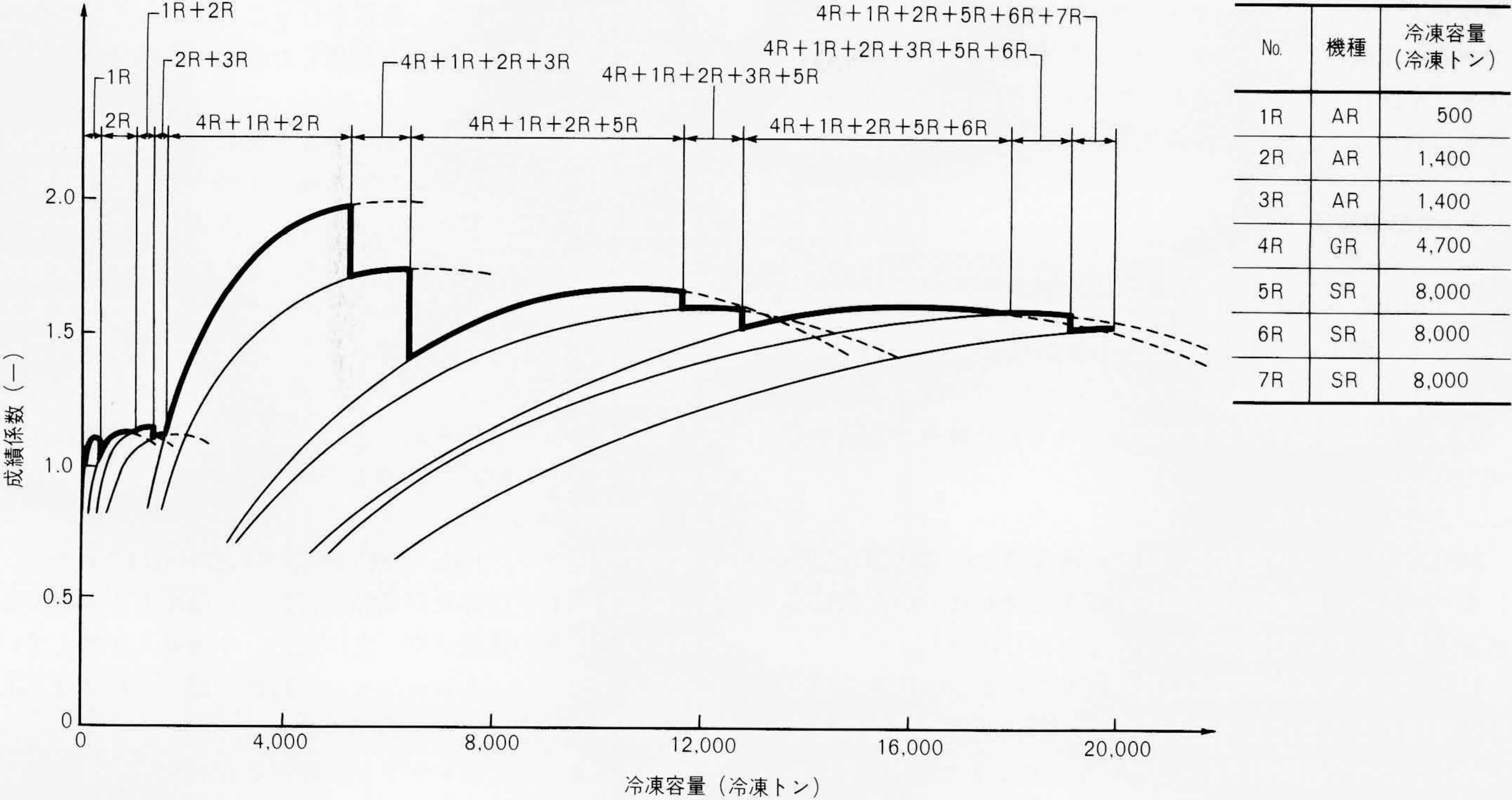
図4 7,000冷凍トン級ターボ冷凍機の外観 国内最大級蒸気タービン駆動ターボ冷凍機の外観を示す。



注：略語説明

- GT (ガスタービン)
- WHB (廃熱回収ボイラ)
- B (ボイラ)
- ST (復水蒸気タービン)
- TR (ターボ冷凍機)
- AR (蒸気吸収式冷凍機)

図5 最適計画基本アルゴリズム 設備償却の面からは、本試算例ではケース(3)が最も優れていることを示す。



注：略語説明
GR(ガスタービン直結ターボ冷凍機), SR(蒸気タービン駆動ターボ冷凍機), 1R~7R(1号~7号冷凍機)

図6 冷凍機の組合せと成績係数 各冷凍機の組合せのうち太線で示す運転方案が最高効率となることを示す。この例では3,000~6,000冷凍トン付近での省エネルギー効率が最大になる。

ここに F_i , E_i 及び W_i は時刻*i*でのガス、電気及び水の使用量を、 RC_k はケース*k*の年間運転コストを、 $IC_{H,k}$, $IC_{R,k}$ 及び $IC_{E,k}$ はそれぞれの年間固定費相当額を、 IC_k はケース*k*の年間固定費相当額を表す。

経済性に主眼を置いた最適化とは、基本ケースに対して償却年数に相当する $(IC_k - IC_{\text{基本}}) / (RC_{\text{基本}} - RC_k)$ を最小化することである。

上記の最適計画法は、以下に述べる特長を持っている。

- (1) 主要機器の部分負荷特性を考慮していること。
冷熱及び温熱源機器、ガスタービンの各部分負荷特性が考慮されているので、特に地域冷暖房システムのように低・中間負荷帯の運転が多い設備の運転費を精度よく算出する場合に有効である。
- (2) モデルにはん(汎)用性があること。

モデルがはん用化されており、ガスや電気を主体とした各種のプラントに適用できる。また機種、台数などのパラメータの修正が容易であるので、これらの設備条件の変更による感度分析や、需要の年次推移に対する経済的な設備増強案の選択などにも有効である。

試算例を次に述べる。

図6に、冷水を6℃で供給する総容量2万冷凍トン級の大規模地域冷暖房プラントの冷凍機の組合せと成績係数を示す。本プラントは合計7台の冷凍機で構成されており、1,800冷凍トン以下の低負荷帯では吸収式冷凍機を1台ないし2台運転するが、それ以上の負荷帯では高効率であるガスタービン直結ターボ冷凍機を運転して、最大限の省エネルギー化を図る。

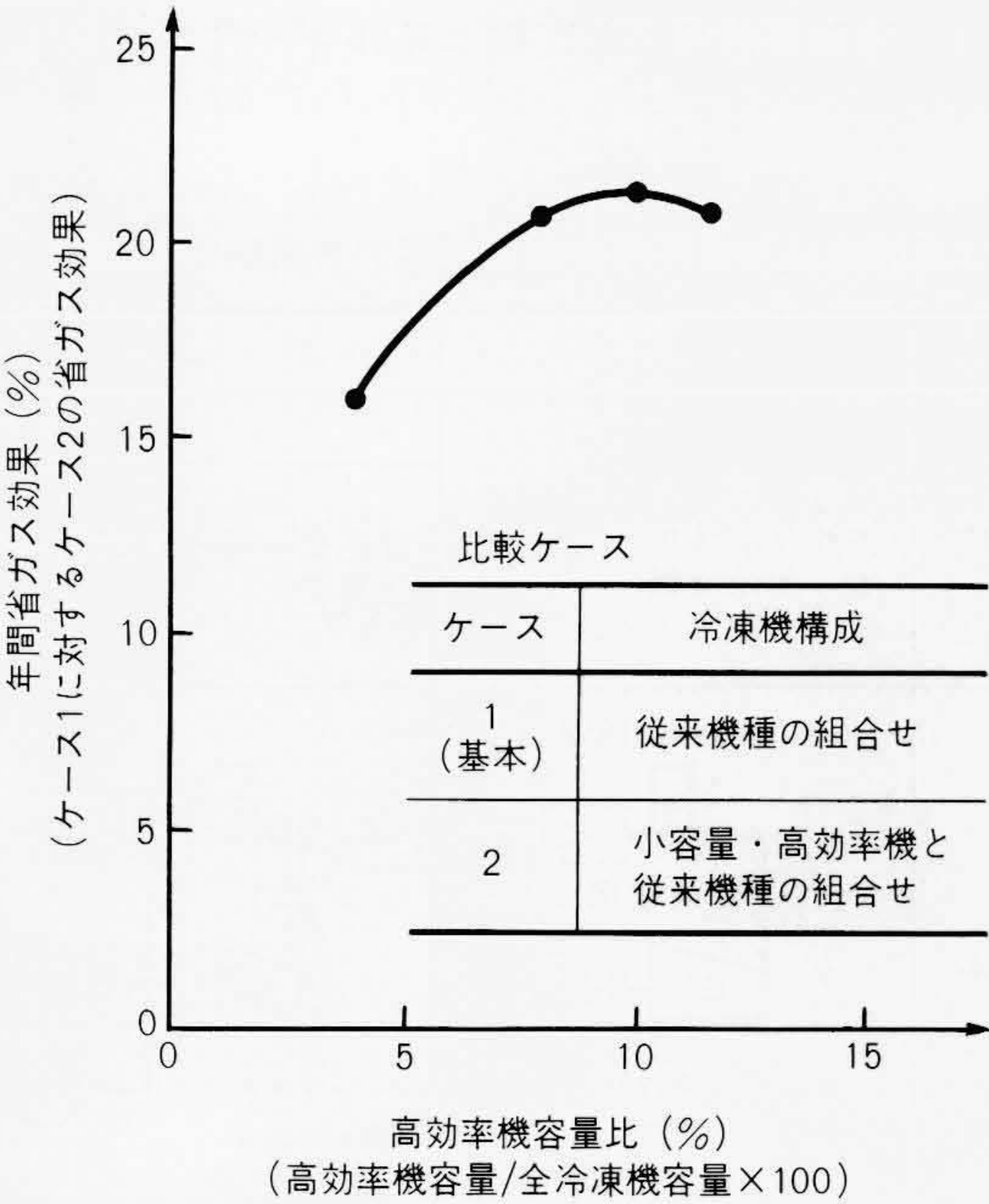


図7 省ガス効果の試算例 冷凍機設備の一部(4~12%)を高効率機にした場合の省ガス効果は、16~22%であることが分かる。

更に冷凍負荷が増加し6,500冷凍トンに到達すれば、大容量の蒸気タービン駆動ターボ冷凍機を起動し、高負荷に追従した運転を行う。

以上述べた運転方案に基づいて、冷凍設備を運転したときの年間ガス使用量の比較結果を図7に示す。同図は小容量高

効率機を1台組み込んだケース2のシステムが、基本ケースである従来機種組合せシステムに対して、どれだけ省エネルギーを図れるかを示したものである。同図から年間の冷熱需要に対するケース2の省ガス効果は、基本ケースの22%に達することが分かる。

4.2 冷熱源設備

地域冷暖房システムの心臓部である冷熱源設備には、多様な方式がある。ガス主導の大規模地域冷暖房用熱源設備に的を絞ると、表1に示すように三つの方式に大別される。

- (1) 従来方式(ボイラ、復水タービン・ターボ冷凍機)
従来、大規模なプラントで実施されてきた最も一般的な方式である。
- (2) トッピング方式
従来のトッピング方式は、吸収式冷凍機に一重効用を使用していたため、部分負荷効率が現在多く使われている二重効用より悪かったので使用されなくなった(No.3)。
しかし、本方式も吸収式に近年開発された低圧蒸気二重効用を採用することによって、全負荷効率、部分負荷効率ともに向上したので再検討されるようになった。また、No.2に示す地域温熱用を送る蒸気の圧力エネルギーを有効利用すると、更に効率が向上し、大幅な省エネルギーが実現できる。
- (3) ガスタービン応用方式
ガスタービンを応用した冷熱源設備は、No.4、5に示すように、ターボ冷凍機直結駆動(メカニカルドライブ)方式と、コージェネレーション方式の二つが考えられる。
前者は、冷熱源設備として省エネルギー性を究極まで追求

した設備であり、後者は、発電を行うことによって省エネルギー性とともに使い勝手をも配慮した設備であるといことができる。

高効率冷熱源設備の投資効果を最大限に向上させるためには、冷凍機全設備容量に対する高効率機の設備を、適切な容量に設定することである。トッピング方式やガスタービンなどの高効率機は、当面スケールメリットの出やすい大規模システムに導入が図られていくであろう。これに応じて日立製作所では、DHC-OPTを用いることによって、上述の三つの方式はもちろんのこと、経済性、省エネルギー性、環境性、省人化などあらゆる観点から見て最適な冷熱及び温熱設備の組合せシステムを検討できるようになった。

4.3 管理制御システム

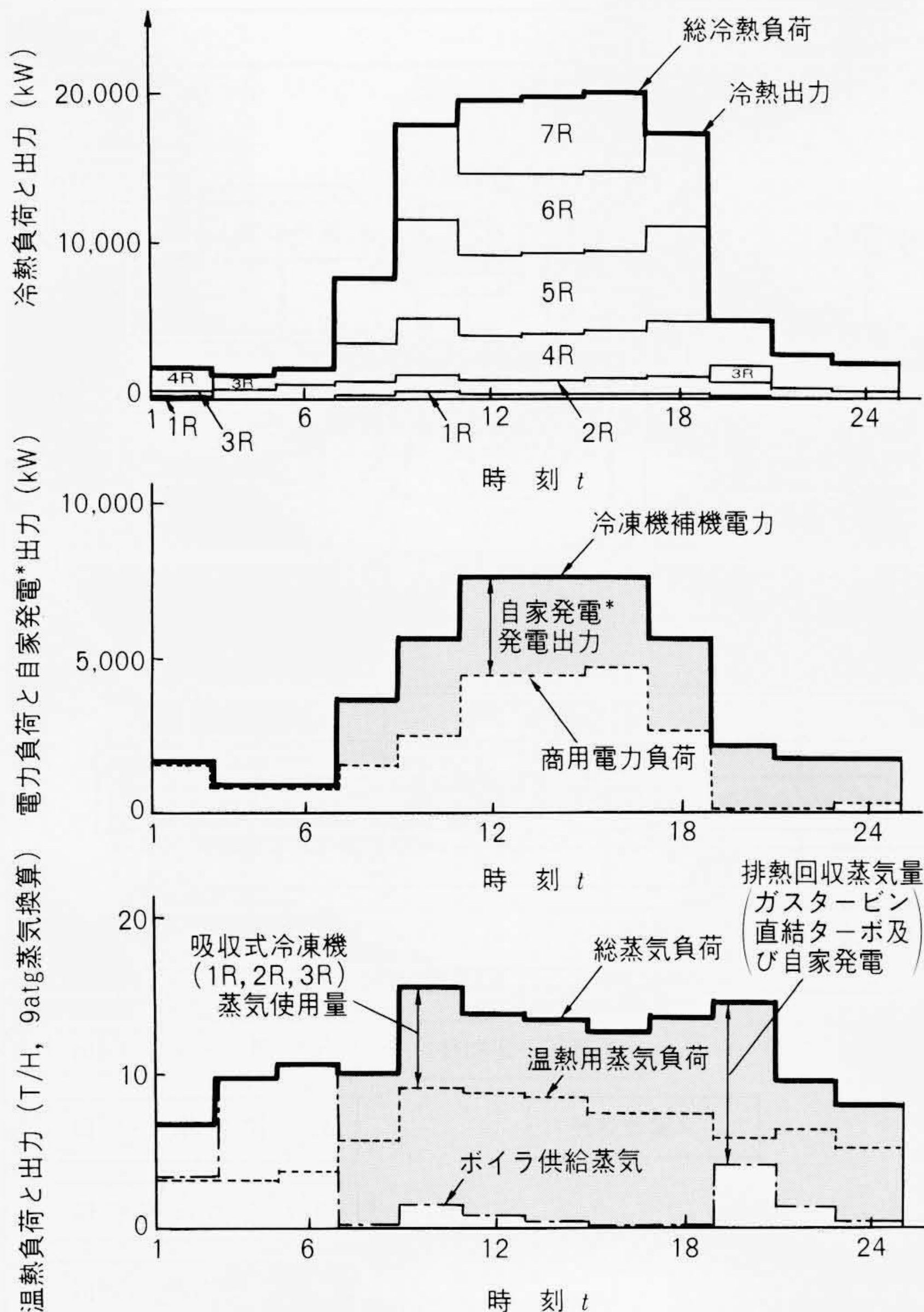
地域冷暖房プラントは、24時間運転されなければならない。特に昼夜を問わず冷熱及び温熱を安定かつ効率よく供給するためには、従来の運転ノウハウに加え、今後導入が増えていくであろうコージェネレーションの特性を踏まえたプラントの運転制御方式の確立が急務である。

図8に、コージェネレーション設備を含む2万冷凍トン級の大規模地域冷暖房プラントの冷熱がピークとなる8月の電力・熱の需給の一例を示す。冷凍負荷は11時から17時までピークが継続しており、ピーク時には3号冷凍機を除く1号から7号の冷凍機が稼働している。これに対し、蒸気負荷は地域温熱用と蒸気二重効用冷凍機が使用する量の和となり、ボイラとガスタービン排ガスの熱回収装置の両者から供給されている。同様に電力負荷である冷凍機補機電力は、ガスター

表1 大規模地域冷暖房用冷熱源設備の方式別特徴比較 それぞれの方式の特長を生かした組合せにすることが重要である。

No.	1	2	3	4	5
方 式	従 来 方 式 (ボイラ、復水タービン・ターボ冷凍機)	トッピング方式		ガスタービン応用方式	
		背圧ターボ+蒸気吸収式組合せ	背圧ターボ+蒸気吸収式組合せ	ターボ直結方式 ターボ冷凍機+排ガス吸収式組合せ	コージェネレーション方式 発電機、電動ターボ+廃ガスボイラ組合せ
システム					
成績係数*	100(基準)	150~180	110~115	170~180	150
特 徴	1. 現状多く行われている方式 2. 復水器への放熱損失が大きいので、成績係数が低い。	1. 高圧-低圧蒸気への圧力エネルギーを回収するため、低圧の蒸気需要が常時ある場合、省エネルギー効果大。 2. 冷熱及び温熱負荷が同時にある場合に有利。	1. 従来方式の復水器への放熱損失がなくなるので、成績係数が向上する。 2. 部分負荷効率が低い。	1. 省エネルギー効果が最も高い。 2. ガスタービンの機種によって容量選定の自由度が少。	1. 電気事業法が適用される。 2. ガスタービン点検時、買電に切り換えてターボ冷凍機の運転が可。

注：略語説明ほか * 成績係数は、冷水出力エネルギー/入力一次エネルギーで定義されるが、ここでは、従来方式を基準にした比率で示す。
C(復水器), BT(背圧蒸気タービン), G(発電機), M(電動機), WB(熱回収ボイラ), NOx(窒素酸化物)



注：* ここでいう自家発電は、コージェネレーション設備を示す。

図8 電力・熱の需給例 午前9時に冷熱負荷が急激に立ち上がるので、冷凍機、自家発電コージェネレーションも起動する。ガスタービン直結ターボ冷凍機やコージェネレーション設備は、冷熱負荷、温熱負荷と協調をとりながら運用する必要がある。

ビンコージェネレーションの発電機から供給され、不足分を商用電力でまかなっている。

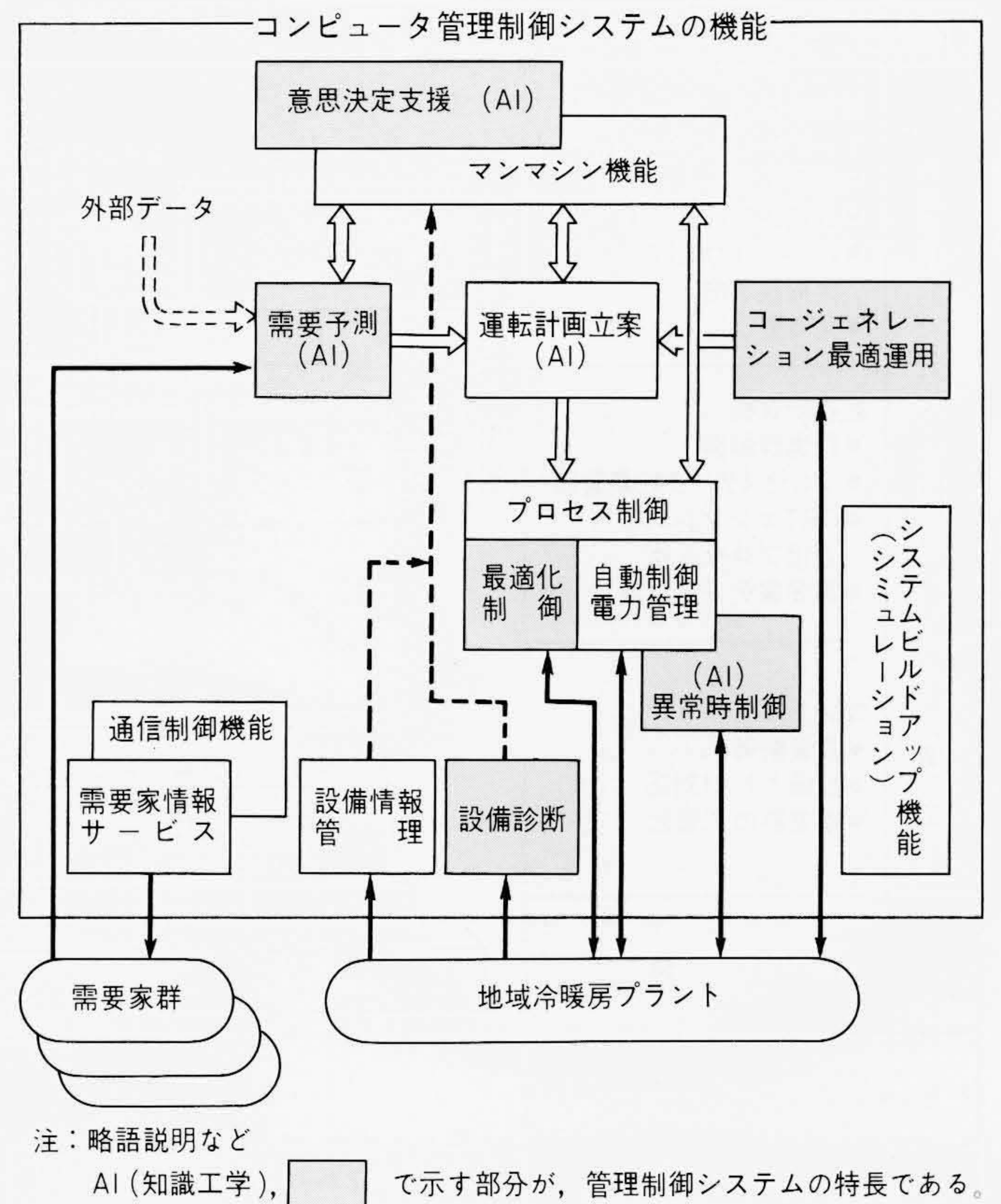
このように複雑な特性を持つ地域冷暖房プラントを運用していく上で必要となる基本機能を図9に示すとともに、これをコンピュータ管理制御システムで実現する場合の日立製作所のシステムの特徴を以下に述べる。

(1) 需要予測

形態、用途の異なるビル群の季節、曜日などによる多様な需要特性を分析し、最適運転パターンを作り出すために必要な冷熱、温熱の予測を行う。予測には実績値の寄与度をウェイト付けした回帰モデルを用い、これを外気条件と人為的条件で補正するインクリメント方式を用いる。

(2) 運転計画立案と最適化制御

冷熱及び温熱発生設備、電気設備、コージェネレーション設備などの複合プラントの部分負荷や起動・停止特性を加味し、前記(1)で述べた需要家側の冷熱及び温熱負荷とマッチさせた運用を図る機能を持つ。冷凍機はベースロード機、中間負荷帯機、ピークロード機に機能分担させ、プラントとしての最高効率運転を実現する。特にコージェネレーションを導



注：略語説明など
AI(知識工学), で示す部分が、管理制御システムの特長である。

図9 地域冷暖房管理制御システムの基本機能 需要予測に基づいて運転計画を立案し、意思決定支援機能に基づいた地域冷暖房プラント設備の最適化制御を行う。

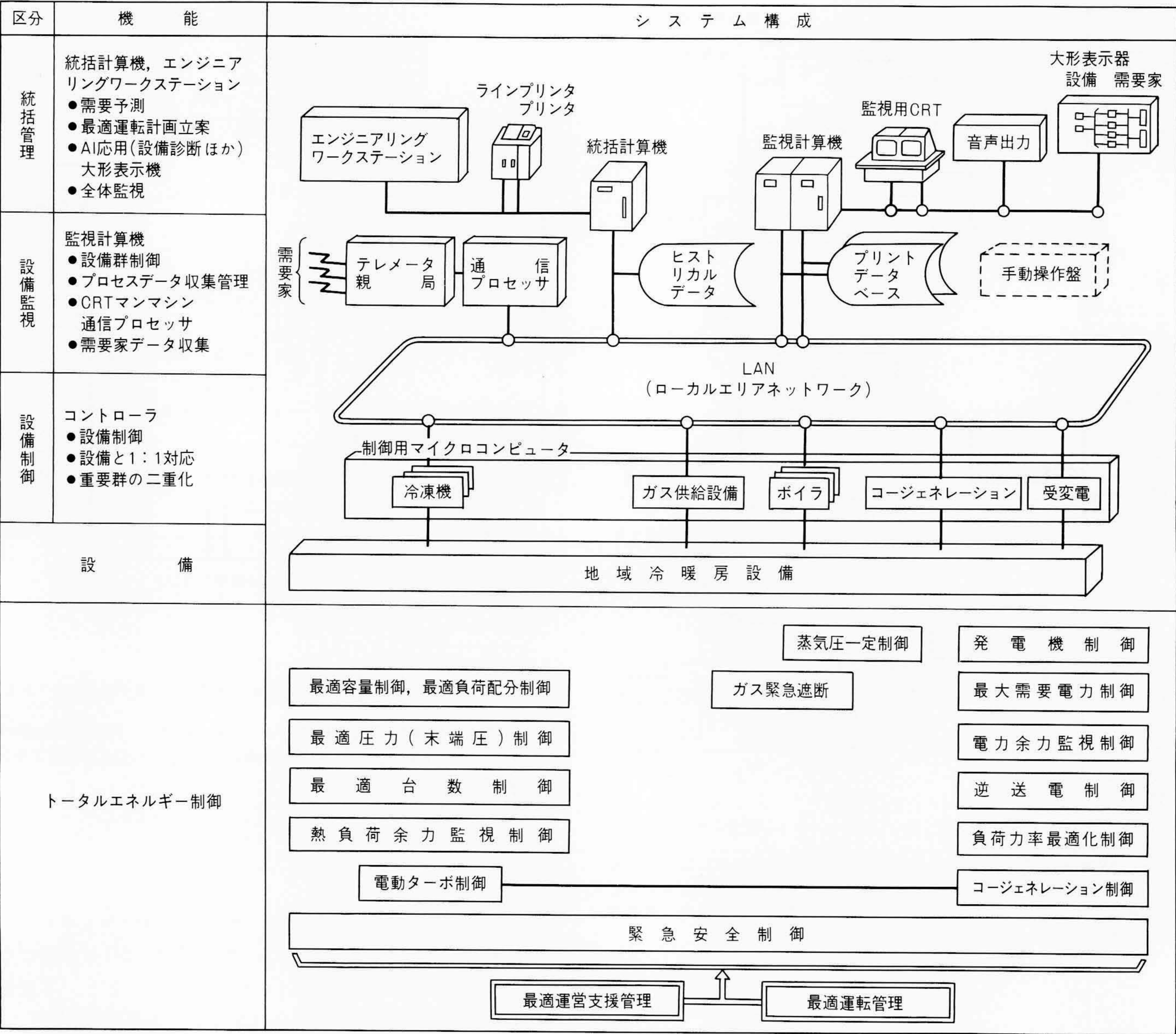
入した場合には、設備が冷凍機、ボイラ、コージェネレーション、補機(冷水・冷却水ポンプ、冷却塔ファン)と多様になる。このとき、ユーティリティの使用量、コストと、各設備の起動・停止時の損失を突き合わせてコストを比較評価し、1週間あるいは1箇月間にわたる中期的期間内の運転コストが最小となるような最適運転方案を見いだす方式を確立した。

(3) 設備診断

冷凍機、原動機メーカーとして培ってきたハードウェアの知見を生かし、回転機器の設備診断、吸収式冷凍機の溶液の濃度管理を実施し、故障予知を行う。また、冷凍機の特性を加味した熱交換器の汚れ係数演算、設備性能のトレンド分析を行い、従来、定期的あるいは運転時間単位で行われていた保守を、ハードウェアにいつそう密着したものとする事ができる。

以上述べた機能によって、プラントの運用機能の大部分をコンピュータに持たせることが可能となる。

本システムを適用する場合の機能ブロックを図10に示す。システムは上位、中位、下位の階層構成となるが、上位の統括計算機は上述の需要予測を行い、最適運転計画を立案する。下位のマイクロコンピュータは機械設備の起動・停止、負荷制御を行う。中位には運転員のためのマンマシン機能をつかさどる監視計算機が設置され、収集したプロセスデータの表示を行う。



注：略語説明 CRT(Cathode Ray Tube)

図10 全体機能ブロック 統括計算機は需要予測，最適運転計画を立案し，設備と運転員のマンマシン機能は監視計算機が持っている。

5 結 言

近年増大しつつある地域冷暖房プラント設備の計画を行うのに際し，需要家側の形態が多種多様となりつつある現在，その初期段階でのシステム計画の位置づけは更に重要性を増している。日立製作所はこれにかんがみ，想定される熱負荷に対する最適システムの計画手法を開発した。本手法は主要機器の特性を考慮したはん用ソフトウェアであり，小規模から大規模に至るまでの種々のシステム計画に適用できる。また，実際のプラントの運用に当たり，設備の管理制御をつかさどる計算機システムが持つべき機能のうち，特に需要予測，運転計画及び設備診断の各機能について述べた。計算機システムの導入によって運用の大半を普遍化できるので，プラントの運用の省人化が図れ，同時に運転員の技術に依存しない運転が行えるようになる。

我が国でも今後，地域冷暖房システムが公共インフラストラクチャとして認められ確立していくにつれ，解決すべき新たな課題も出てくると思われるが，本稿で述べた内容がそれらの課題を解決していく上で参考になると考えている。

参考文献

- 1) 尾島：地域冷暖房とその将来，エネルギー・資源，7，5，22～27(昭61-5)
- 2) 成田，外：地域冷暖房の技術動向，電気学会雑誌，105，1，35～40(昭60-1)
- 3) 上原：都市計画と都市ガス事業の役割，新都市開発，24，11，10～13(昭61-増刊)
- 4) 杉本，外：新相鉄ビルディングの空調設備，日立評論，56，5，491～495(昭49-5)
- 5) 石黒，外：地域冷暖房の熱源設備，日立評論，59，6，459～462(昭52-6)