

■ 研究論文 ■

コージェネレーション・システムの 設備容量計画における多目的最適化

Multiojective Optimization in Unit Sizing of Cogeneration Systems

横山良平*・伊東弘一**

Ryohei Yokoyama Koichi Ito

(1994年1月11日 原稿受理)

Abstract

A multiobjective optimization approach to the unit sizing of cogeneration systems is presented. Equipment capacities and utility maximum demands are determined so as to minimize both the annual total cost and annual primary energy consumption from the economic and energy saving viewpoints, respectively. Operational strategies for seasonal and hourly variations of energy demands are considered simultaneously. A numerical study is carried out on a cogeneration system with a fuel cell or gas engine as prime mover for installation in a hotel or office building. The trade-off relationship between the above two objectives are clarified in relation to the characteristics of prime movers and energy demands.

1. 緒言

小規模・分散型エネルギー供給システムとして、コージェネレーション・システム (CGS) が民生用各種建物に積極的に導入されている¹⁾。著者らは、民生用CGSに対して、季節的・時間的に変動するエネルギー需要をバランスよく満足するように運用方策を考慮しながら、システム構成機器の容量を電力や都市ガスなどのユーティリティ最大契約量とともに最適決定するための手法を開発した²⁾。また、この手法の各種事例への適用によって、CGSの設備容量計画に関するいくつかの知見を得た^{3), 4)}。

上述の検討においては、設備容量計画の目的関数としてコージェネレーション事業者の長期的経済性のみ観点からシステムの年間総経費を採用し、それを最小化するように機器容量および機器運用方策を決定した。しかしながら、このような目的関数を採用した場

合、省エネルギー性など他の評価指標については最適性が保証されないために、コージェネレーションを導入しない従来のエネルギー供給システムに比較して、十分に向上しない場合や逆に低下してしまう場合も生じ得る。近年クローズアップされている地球規模のエネルギー・環境問題の解決に寄与するためには、コージェネレーション事業者のみの観点からではなく、よりグローバルな観点から省エネルギー性や環境適合性なども積極的に計画目的として考慮しながら機器容量と運用方策を決定する必要がある。

本研究では、上記のように複数の目的関数を考慮したCGSの設備容量計画法を、多目的最適化の考え方⁵⁾を導入して構築する。具体的には、経済性と省エネルギー性の向上という2つの計画目的を考慮しながら、重み付け法に基づく数値計算によって離散的にパレート最適集合解を導出する。また、ガスエンジンおよび燃料電池を主機とするCGSに対する数値的検討によって、上記の2つの計画目的間のトレードオフ関係を明らかにする。さらに、トレードオフ関係に対する主機特性やエネルギー需要特性の影響について検討を加える。

*大阪府立大学工学部エネルギー機械工学科助教授

** " " " " 教授

〒593 大阪府堺市学園町1-1

2. 設備容量計画における多目的最適化

2.1 最適計画問題の概要

CGSの機器構成が予め与えられている場合に、季節的・時間的に変動するエネルギー需要をバランスよく満足するように機器運用方を考慮しながら、機器容量とユーティリティ最大契約量を決定するという計画問題を考える。

ここでは、一年間に D 個の負荷代表日を設定し、さらに各代表日を H 個のサンプリング時間に分割することによって、一年間の運用時間を離散化する。 d 番目の代表日における h 番目のサンプリング時間の年間相当時間を T_{dh} によって表す。エネルギー需要量は上記の各代表日における各サンプリング時間について推定し、それに対応して機器運用方を決定するものとする。このとき、平均負荷代表日に加え、夏期と冬期におけるピーク負荷代表日も適宜設定する必要がある。

上述のように、計画目的として経済性の観点から年間総経費の最小化、ならびに省エネルギー性の観点から年間一次エネルギー消費量の最小化を考える。年間総経費は年価法によって年間設備費と年間運用費の和として求められる。ここでは、各構成機器の設備費を容量の関数として表し、年間設備費を評価する。一方、年間運用費をユーティリティの基本料金と従量料金の和として算定する。基本料金は各ユーティリティの最大契約量の関数として表す。また従量料金は、年間の機器運用方に基づいて決定されるユーティリティ消費量から算定する。さらに、年間一次エネルギー消費量もユーティリティ消費量から算定する。

以上より、第1の目的関数である年間総経費 J_1 は次式で与えられる。

$$J_1 = F(x) + \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^H V_{dh}(x, y_{dh}, z_{dh}) T_{dh} \dots\dots (1)$$

ここで、 F は年間設備費と年間基本料金の和であり、機器容量およびユーティリティ最大契約量から成るベクトル x の関数として表される。関数 V_{dh} は単位時間当りのユーティリティ従量料金を表す。同様に、第2の目的関数である年間一次エネルギー消費量 J_2 は次式で与えられる。

$$J_2 = \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^H P_{dh}(x, y_{dh}, z_{dh}) T_{dh} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 P_{dh} は単位時間当りの一次エネルギー消費量を表す関数である。なお、 V_{dh} および P_{dh} は直接的に

はユーティリティ消費量のみの関数であるが、後述の制約条件によって x 、エネルギー流量を表す連続変数ベクトル y_{dh} および機器の運転・停止を表す0-1整数変数ベクトル z_{dh} の関数となる。

制約条件としては、各代表日の各サンプリング時間において、機器性能特性、ならびにエネルギー・バランスおよび需給関係を考慮する必要がある。ここでは、機器の性能特性は容量によって変化するので、その関数として考慮する。これらの制約条件式をまとめて次式で表す。

$$C_{dh}(x, y_{dh}, z_{dh}) = 0, \quad (d=1, \dots, D; h=1, \dots, H) \dots\dots (3)$$

ここで、 C_{dh} は制約条件式を表す関数から成るベクトルである。

決定変数は、機器容量およびユーティリティ最大契約量から成るベクトル x 、ならびに機器運用方を表すベクトル y_{dh} および z_{dh} である。実際の計画では各構成機器の容量は離散値の集合から選択されるが、本研究では x を連続変数として扱う。

2.2 階層的最適化手法

上記の最適化問題は各代表日の各サンプリング時間に対応する変数を含む大規模な混合整数計画問題となる。本研究では、この最適化問題を効率よく解くために階層的最適化手法を採用する²⁾。この方法は単一目的の最適計画のために提案されたものであるが、ここで検討する多目的最適計画に対しても拡張可能である。階層的最適化手法による基本的計算過程を図-1に示す。

(1) 機器容量計画

上位レベルでは、機器容量計画問題を一つの非線形計画問題として定式化し、年間総経費 J_1 および年間一次エネルギー消費量 J_2 を最小化するように、機器容量およびユーティリティ最大契約量から成るベクトル x の最適値を探索する。この場合、式(3)の制約条件を陽表的には考慮せず、これに等価なものとして仮想的エネルギーの流れを生じさせないための制約条件を考慮する²⁾。また、多目的最適化問題の解法として重み付け法を採用し、2つの目的関数 J_1 、 J_2 を次式によって単一の目的関数 J_s に変換する。

$$J_s = w_1 \frac{J_1}{J_1^0} + w_2 \frac{J_2}{J_2^0}, \quad (w_1 + w_2 = 1) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 J_1 および J_2 を、それぞれコージエネレーションを導入しない従来のエネルギー供給システムの値 J_1^0 および J_2^0 によって無次元化している。重み w_1

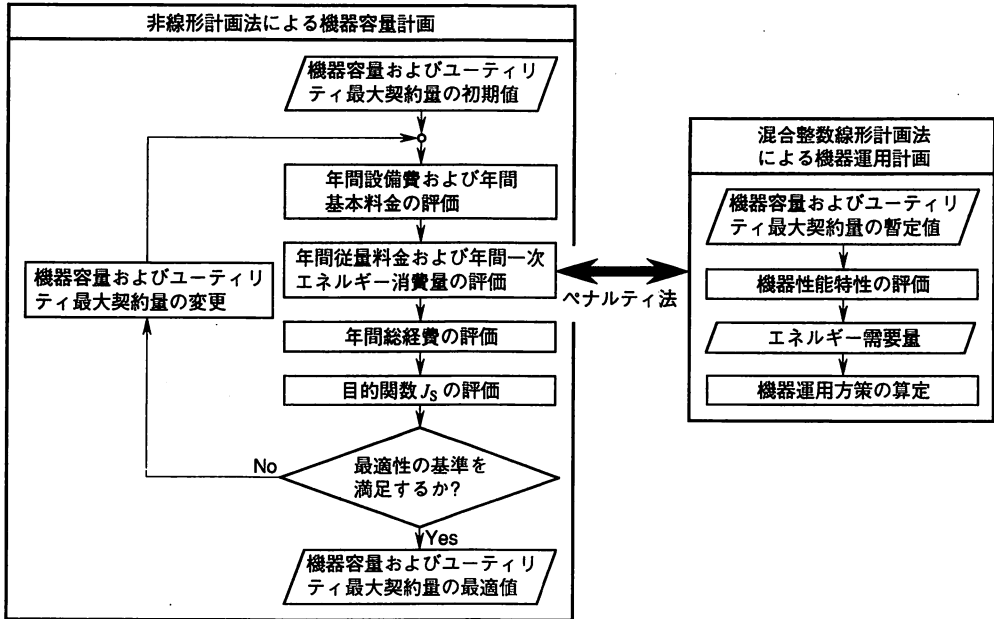


図-1 機器容量および機器運用方策の階層的決定法

および w_2 は、それぞれ対応する目的関数 J_1 および J_2 の重要度を表す係数である。単一化された目的関数 J_S を重み w_1 および w_2 の値を変化させながら最小化し、パレート最適集合解を離散的に導出する。なお、非線形計画問題の解法として逐次線形計画法を採用する。

(2) 機器運用計画

下位レベルにおいては、上位レベルの探索過程の途中で暫定的に与えられた機器容量およびユーティリティ最大契約量 x を持つシステムに対して、機器運用方策 y_{dh}, z_{dh} を算定し、目的関数に含まれる年間従量料金および年間一次エネルギー消費量を評価する。

この段階では式(3)の制約条件を陽表的に考慮する。また、システムの実在するエネルギーの流れの他に仮想的エネルギーの流れを加え、上位レベルの探索過程の途中のいかなるシステムもエネルギー需要を仮想的に満足するようにさせる。ただし、仮想的エネルギーの流れが生じる場合にはユーティリティ従量料金に大きなペナルティを課し、できる限り発生しないようにさせる。また、仮想的エネルギーの流れが発生しようとする上位レベルの非線形計画問題の制約条件にその情報を伝達し、仮想的エネルギーの流れが発生しないように、すなわちエネルギー需要を満足するように機器容量およびユーティリティ最大契約量 x を変化させる。

なお、仮想的エネルギーは、上述のように実在の機器をいかに運転してもエネルギー需要が満たされない場合に発生し、その量によってエネルギー供給不足量を知ることができる。したがって、仮想的エネルギー量を表す変数は、数理計画法における実行不可能性の程度を表す人為変数のようなものと考えてよい。

年間総経費のみを目的関数として採用した単一目的の最適計画においては、機器運用計画の目的関数として単位時間当りのユーティリティ従量料金を採用した²⁾。この目的関数の最小化は機器容量計画の目的関数の最小化に首尾一貫したものであり、結果として得られる機器運用方策は年間総経費の最小化に最大限に寄与するものである。同様に、本研究で検討している多目的最適計画の場合においても、式(4)の機器容量計画の目的関数の最小化に最大限に寄与するように機器運用計画の目的関数を設定すべきである。そのためには、最小化すべき目的関数として

$$J_{\text{obj}} = w_1 \frac{V_{dh}}{J_1^0/8760} + w_2 \frac{P_{dh}}{J_2^0/8760},$$

$$(d=1, \dots, D; h=1, \dots, H) \dots\dots (5)$$

を採用すればよい。

ここでは、最適運用計画問題を一つの混合整数線形計画問題として定式化し、分枝限定法と双対シンプレックス法を用いたアルゴリズムによって解く⁶⁾。

3. 検討事例

3.1 検討条件

CGSの設置対象施設として、電力最大需要量が約1000kWのホテルと事務所ビルを取り上げる。各施設について、年間12日の平均負荷代表日における24時間の電力、冷房、暖房、および給湯需要量を推定した。また、冬期および夏期のピーク負荷代表日のエネルギー需要量を、それぞれ1月および8月平均負荷代表日のエネルギー需要量を1.2倍することによって推定し、少なくともこのピーク需要量を供給できるようにシステムの機器容量およびユーティリティ最大契約量を決

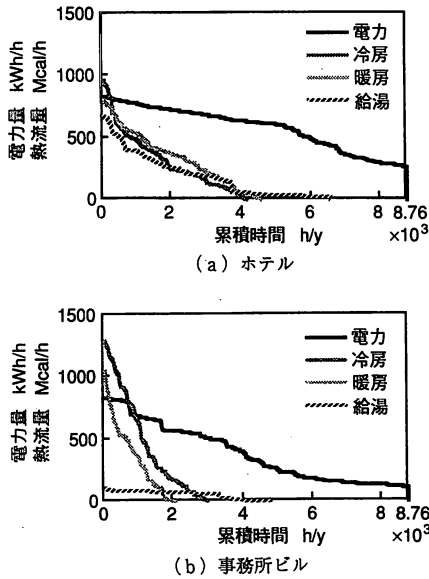


図-2 累積曲線によるエネルギー需要特性

定する。図-2は、各施設の年間エネルギー需要量を累積曲線によって示したものである。

また、CGSとして図-3に示す標準的な機器構成のシステムを取り上げる。コージェネレーション・ユニットとしては、ガスエンジン発電機あるいは燃料電池を採用する。これらユニットの代表的(200kW)な性能特性を図-4に示す。

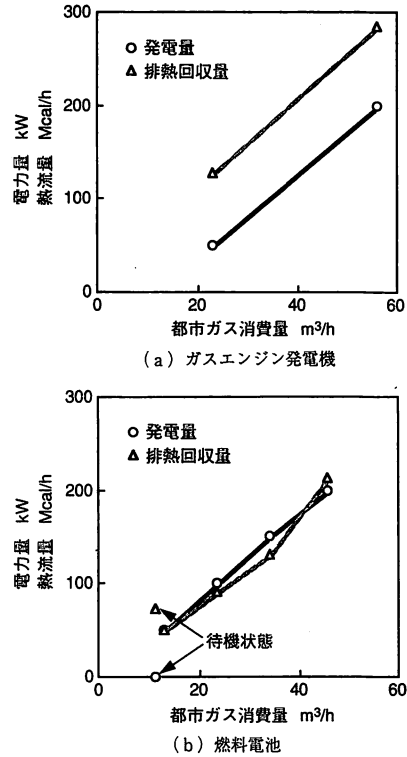


図-4 コージェネレーション・ユニットの性能特性 (200kW)

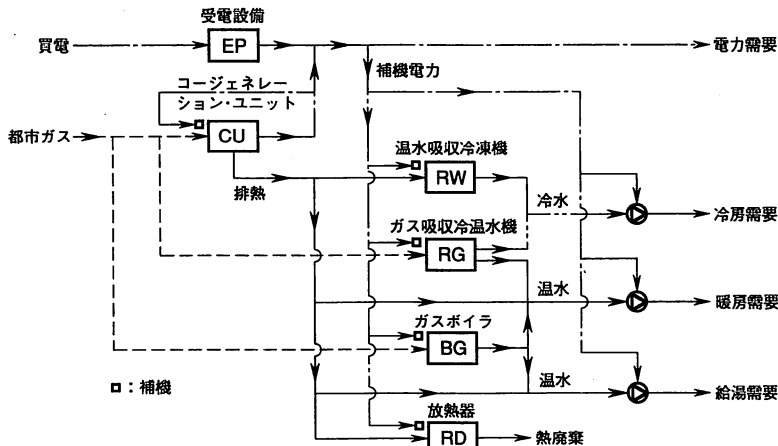


図-3 コージェネレーション・システムの機器構成

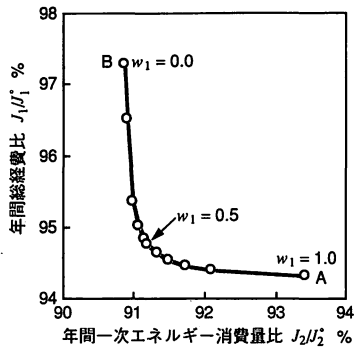
ユーティリティの料金体系として、電力に関しては業務用電力(6000V)を、都市ガスに関しては空調用夏期第3種および一般料金を採用する。また、年間総経費の評価には年価法を採用し、機器耐用年数を15年、機器残存価値を零、年間利率を10%とする。コージェネレーション・ユニットの設備費単価は25万円/kWとする。さらに、一次エネルギー消費量の評価に関しては、買電の効率を38.8%とする。

3.2 検討結果および考察

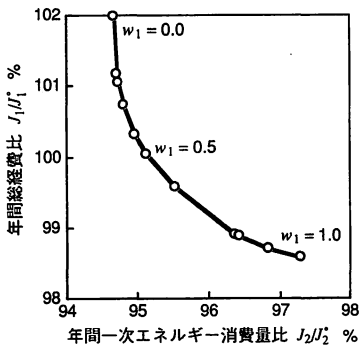
(1) ガスエンジン発電機の場合

図-5は、最適化計算によって得られたパレート最適集合解における2つの目的関数間のトレードオフ関係を示したものである。トレードオフ曲線の右上の領域が実行可能解に対応している。

図-5(a)に示すホテルの場合、目的関数間に明瞭な競合関係が存在し、重み w_1 の変化によって両方の目的関数の値が約3%変化している。また、トレードオフ曲線の勾配が急激に変化しているため、重みを適切に選ぶことによって、従来システムと比較して2つの目的関数の値を同時に大幅に減少させることが可能である。すなわち、 $w_1 = 1.0$ や $w_1 = 0.0$ とおきそ



(a) ホテル

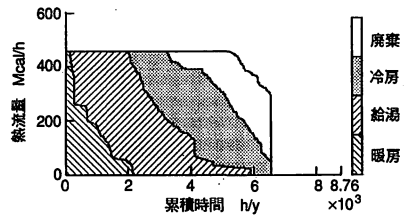
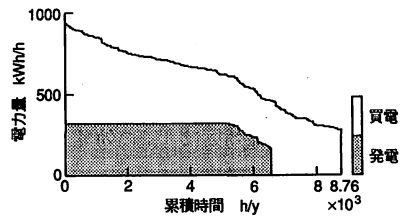


(b) 事務所ビル

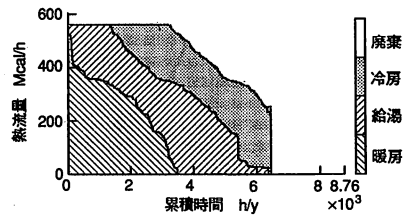
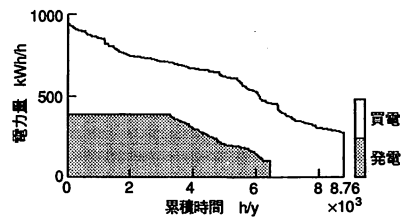
図-5 目的関数間のトレードオフ関係 (ガスエンジン発電機)

れぞれ年間総経費や年間一次エネルギー消費量のみを最小化する代りに、例えば $w_1 = 0.5$ とおき両目的関数を同時に考慮することによって、一方の目的関数のわずかな増大を犠牲にしなければならないが、他方の目的関数を大幅に減少させることができる。

図-6(a)および(b)は、それぞれ図-5(a)の点AおよびBの各最適解における電力供給量および排熱利用量の累積曲線を示したものである。図-6(a)に示すように、年間総経費のみを目的関数として採用した場合、ガスエンジン発電機は稼働時間中ほぼ定格負荷運転され、その結果排熱が多く廃棄される結果となっている。これは、多少の熱廃棄を許容してでも、発電効率の高い定格負荷状態でガスエンジン発電機を



(a) 最適解A ($w_1 = 1.0$)

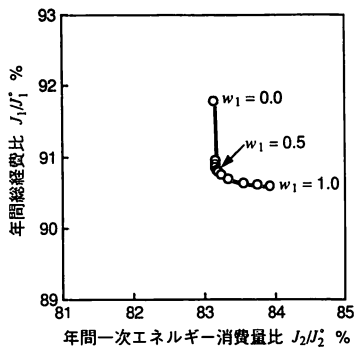


(b) 最適解B ($w_1 = 0.0$)

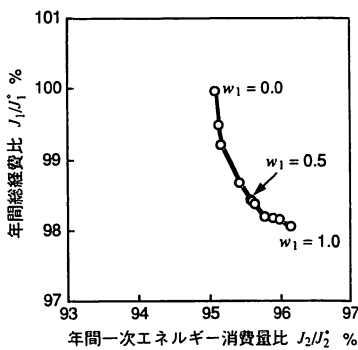
図-6 電力供給量と排熱利用量の累積曲線 (ガスエンジン発電機, ホテル)

運転した方が、経済的に有利となるためである。しかしながら、図-6 (b) に示すように、年間一次エネルギー消費量のみを目的関数として採用すると、ガスエンジン発電機は部分負荷状態での稼働時間が長くなり、排熱廃棄量がほとんど零になる。その結果、省エネルギー性が向上する結果となっている。

一方、図-5 (b) に示す事務所ビルの場合、目的関数間の競合関係が広い範囲にわたって現れているが、トレードオフ曲線の勾配は緩やかに変化している。したがって、一方の目的関数のわずかな増大を犠牲にすることによって、他方の目的関数を大幅に減少させることはできない。また、一般的に言われているように、事務所ビルの場合ホテルと比較してCGSの導入効果が小さい。この検討事例では、年間総経費のみを目的関数として採用した場合、従来システムと比較してわずか1.5%しか年間総経費が削減されない結果となっている。一方、年間一次エネルギー消費量の削減を重視した場合、その削減効果は上記の効果よりは大きくなるが、年間総経費が従来システムよりも増大するために、コージェネレーション事業者にとって経済的に不利な結果となっている。



(a) ホテル



(b) 事務所ビル

図-7 目的関数間のトレードオフ関係 (燃料電池)

(2) 燃料電池の場合

パレート最適集合解における2つの目的関数間のトレードオフ関係を図-7に示す。ガスエンジン発電機の場合と同様に目的関数間に競合関係が見られるが、その変化範囲が小さいことが燃料電池の特徴となっている。

図-7 (a) に示すホテルの場合、一方の目的関数の最小化によって、他方の目的関数の値も従来システムと比較して十分に減少することが分る。また、目的関数の値はガスエンジン発電機の場合と比較して大幅に減少している。このようにガスエンジン発電機の結果と差異が生じた理由としては、図-4に示すように燃料電池はガスエンジン発電機と比較して発電効率が高い反面排熱回収効率が低く、年間総経費のみを目的関数として計画を行っても、排熱を有効に利用できるためと考えられる。また、部分負荷状態における発電効率が定格負荷状態と比較してあまり低下しないという燃料電池の特性も、有利に働くものと考えられる。一例として、年間総経費のみを目的関数として採用した場合の電力供給量と排熱利用量の累積曲線を、図-8に示す。この図は上記の理由をよく表しており、燃料電池の容量は図-6 (a) に示すガスエンジン発電機の容量と比較して大幅に増大しているが、廃棄熱量は同程度である。また、部分負荷状態での稼働時間も増大している。

一方、図-7 (b) に示す事務所ビルの場合、ガスエンジン発電機の結果との差異はホテルの場合ほど顕著には現れていない。これは、事務所ビルの場合夜間に

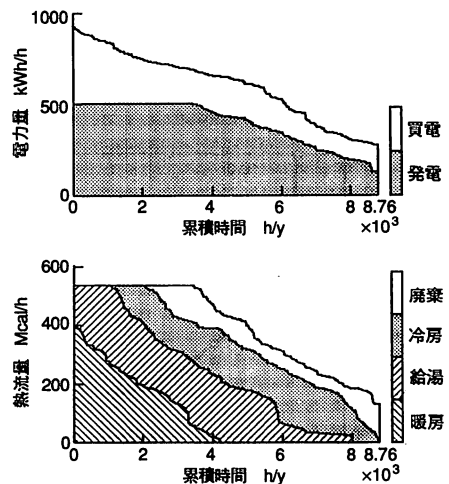


図-8 電力供給量と排熱利用量の累積曲線 (燃料電池, ホテル, $w_1 = 1.0$)

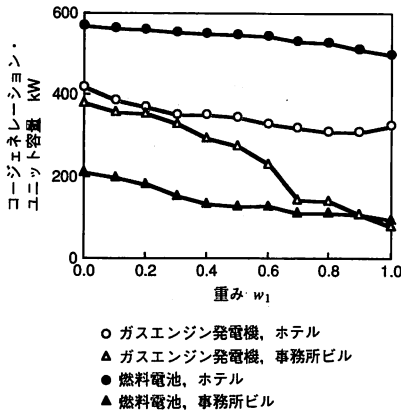


図-9 コージェネレーション・ユニットの最適容量と目的関数の重みとの関係

電力および熱需要が大幅に減少するにもかかわらず、燃料電池を待機状態に保持するために都市ガスを消費しなければならず、これによって上述の燃料電池の効率特性が相殺されたためと考えられる。

(3) 機器容量の変化

図-9は、機器の一例として、コージェネレーション・ユニットの最適容量と目的関数の重み w_1 との関係を示したものである。これによれば、すべてのケースにおいて、年間一次エネルギー消費量の削減を計画目的として重視するにつれて、最適容量が増大することが分る。これは、機器設備費を考慮する度合いが低くなるにつれて、大容量の機器を導入し、エネルギー需要量の変動に従って適材適所的に機器を運転するようになるためである。ただし、機器容量が大きすぎると、効率の低い部分負荷状態で運転する時間が長くなるので、年間一次エネルギー消費量の削減のみを計画目的として採用した場合にも適切な機器容量が存在する。また、(2) 項で述べた理由を反映して、ホテルでは燃料電池の方が、事務所ビルではガスエンジン発電機の方が容量が大きくなっている。

4. 結 言

コージェネレーション・システムの設備容量を経済性と省エネルギー性の両観点から最適に計画するための方法を、多目的最適化手法を用いて構築した。また、種々の数値的検討を通じて、目的関数として採用した年間総経費と年間一次エネルギー消費量の間のトレードオフ関係を明らかにした。さらに、コージェネレーション・ユニットの性能特性およびエネルギー需要特性が、上記トレードオフ関係に及ぼす影響を明らかに

した。

得られた結果によれば、コージェネレーション・ユニットの熱電比に関する特性が、年間総経費と年間一次エネルギー消費量の間のトレードオフ関係に重要な影響を及ぼすことが判った。例えば、本検討事例では、設備費の低減化が可能になれば、発電効率の高い燃料電池の方が、ガスエンジン発電機よりも両目的を同時にバランスよく向上させることが判った。今後、コージェネレーション・ユニットの熱電比に関する特性改善を行う場合には、単に発電効率の向上のみを過度に目指すのではなく、本研究で採用したような評価指標に基づき、より総合的な観点からバランスのとれた改善を行うべきであろう。

なお、本研究ではコージェネレーション・システムの計画目的として経済性と省エネルギー性の向上を取り上げたが、その他にも CO_2 や NO_x の排出量に代表される環境適合性などの重要な評価指標も残されている。今後より幅広い検討が必要であろう。このような検討を重ねることによって、本研究で提示した多目的最適化を適用した計画手法は、最近しばしば言及される三位一体⁷⁾の考え方の中でエネルギー・システム計画という一局面においてより有効になるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) コージェネレーションシステム導入実績表 (1993年版), (1993), 日本コージェネレーション研究会.
- 2) 横山良平, 伊東弘一, 赤木新介; コージェネレーション・システムの機器規模最適計画法 (第1報, 手法の提案と最適化の効果の検討), 日本機械学会論文集 (C編), 56巻, 522号 (1990), 519~526.
- 3) 横山良平, 伊東弘一, 松本芳一; コージェネレーション・システムの機器規模最適計画法 (第2報, 機器規模計画への運用方策の影響), 日本機械学会論文集 (C編), 58巻, 548号 (1992), 1092~1098.
- 4) 伊東弘一, 横山良平, 松本芳一; 燃料電池コージェネレーション・システムの最適設備容量計画, エネルギー・資源学会第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, (1992), 31~36.
- 5) Cohon, J. L.; Multiobjective Programming and Planning, (1978), Academic Press.
- 6) 伊東弘一, 横山良平; コージェネレーションの最適計画, (1990), 産業図書.
- 7) 深海博明; 持続可能な発展とエネルギー問題, エネルギー・資源学会第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (特別講演), (1993), 255~258.