

# 都市型コージェネレーションの最適計画

## Optimal Planning of Cogeneration Systems

伊 東 弘 一\*

Koichi Ito

### 1. はじめに

社会経済活動の集積した都市域では、当然のことながら各種エネルギー需要量が高密となっている。その結果ヒートアイランド化が進展し、冷房需要とそれに伴う電力ピーク需要量の増大という好ましくない現象を引き起こしている。各種工場群の地方分散化とは逆に、業務商業を中心とする民生部門の都市域への集積化が進展し、エネルギー需要構造も微妙に変化しつつある。このような状況下で、発電時排熱の冷暖房・給湯等への積極的利用によりエネルギー有効利用化を目指すコージェネレーション（熱電併給）・システム（Cogeneration System, 以下CGSと略記する）が、都市域の地域冷暖房やホテル・事務所ビル・病院等の諸施設に積極的に導入されている。従来無駄に自然界に放出されてきた排熱の有効利用化を目指すCGSの考え方は、基本的に正しい。しかしながら、問題は決してそれ程単純ではない。まず、電力および冷暖房・給湯等の熱需要量は、年間を通じて時々刻々多様に変動する。しかしながら、システムの主要構成機器からの電力および熱の出力比（熱電比）は、一般にあまり大幅に変えることができない運用上の問題点がある。また、システムの構成上の問題においても、どのような規模の各種機器を、どのように組み合わせてシステムを構成すれば、コージェネレーションの特長を活かしながら省エネルギー性と経済性の向上を計ることができるかという難問がある。例えば、あまり大規模なガスタービンを導入すれば、排熱の放棄による省エネルギー性の劣下や、設備費増大による経済性悪化を招くだろう。一方、小規模なガスタービンではCGS本来の特長をあまり発揮できないことになる。

上述の問題に対する一つの合理性に富む解決策は、最適化法に基づく計画立案である<sup>1)</sup>。以下では、一つ

の最適計画法の紹介とともに、CGSに対する検討結果の一例を解説しよう。

### 2. 最適計画法<sup>2)</sup>

#### 2.1 計画問題の概要

CGSは、基本的に多入力・多出力系である。入力としては一般商用電力・都市ガス・石油等であるが、前二者のユーティリティ料金体系は複雑で、季節および時刻により変動する従量料金と基本料金を考慮する必要がある。出力は電力・冷房・暖房・給湯・蒸気等であるが、これらの需要量は年間を通じて時々刻々複雑に変動するものであり、システムとしてフレキシブルな対応が要求される。また、入出力間のエネルギー変換プロセスにおいては、変換効率の非線形性、機器規模による特性変化、ガスタービン等の外気温の影響による効率変化、ならびに構成機器の運転に伴う補機動力の発生をはじめとする電気と熱の間の非常に複雑な関連性等を考慮していく必要がある。システムの設計計画においては、上述の諸因子を考慮した短期的なシステムの運用方策とともに長期的な観点から省エネルギー性と経済性の評価を行いながらシステム構成等の

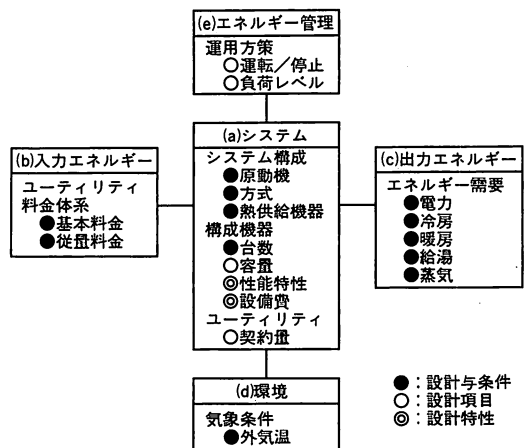


図-1 CGSの経済性への影響因子

\* 大阪府立大学工学部エネルギー機械工学科教授  
〒593 堺市学園町1-1

計画立案を行っていく必要がある。

図-1は、(a)システム、(b)入力エネルギー、(c)出力エネルギー、(d)エネルギー管理、(e)環境に大別して影響因子を示したものである。ここでは、●印を付けた因子を設計と条件として、○印を付けたものを決定すべき設計項目として、また◎印を付けたものを設計項目から付随的に決定される設計特性としてそれぞれ考慮し、設計計画問題を考察する。すなわち、与えられた機器構成、ユーティリティ料金体系（燃料単価）、およびエネルギー需要に対して、機器運用方を考慮しながら機器容量およびユーティリティ最大契約量を最適に決定する問題について考察する。以下では、機器容量およびユーティリティ最大契約量を総称して、一般的に機器規模と呼ぶことにする。

2.2 最適計画問題の構成

長期的経済性の観点から年間総経費の最小化を設計目的とする。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、各構成機器の初期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基本料金とユーティリティ従量料金（燃料費）の和として算定する。また従量料金は、年間の機器運用方策に基づいて決定されるユーティリティ消費量（燃料消費量）から算定される。

制約条件としては、運用計画と同様に、年間に何日

か設定された代表日における各時間のエネルギー需要に対して、各構成機器の性能特性を表す入出力関係、各エネルギー・フローについてのエネルギー・バランスおよび需給関係を考慮する必要がある。

設計変数は、機器規模および各代表日における各時間の機器運用方策を表す変数である。機器運用方策は、運転・停止条件に対応する0-1整数変数と負荷レベルに対応する連続変数によって表す。

2.3 ペナルティ法による階層的決定法

2.1節で述べたように、設計計画問題は運用計画を含めて検討する必要がある、複雑かつ大規模な問題となる。特にエネルギー需要の季節的・時間的変動を考慮すれば設計変数や制約条件の数が莫大なものになり、実用的な計算時間で最適解を導出することがきわめて難しくなる。そこで本手法ではペナルティ法を導入し、機器規模と機器運用方を階層的に決定する。

図-2は最適化計算の流れを示したものである。上位レベルにある機器規模の決定に関しては、前節で述べた制約条件を陽表的に考慮せず、機器規模を表す設計変数の上・下限制約と、下記の仮想的エネルギーを発生させないための制約条件のみをもつ非線形計画問題として考慮し、目的関数である年間総経費を最小化するように設計変数の最適値を探索する。下位レベルでは、探索の各段階で与えられた機器規模のシステムに対して最適運用計画法に基づき機器運用方を決定し、

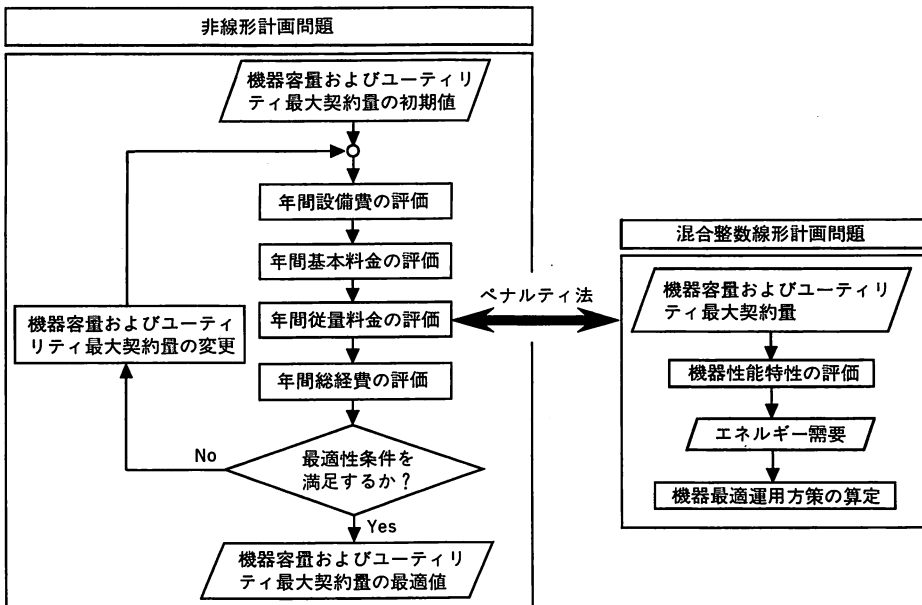


図-2 ペナルティ法による機器規模および機器運用方策の階層的決定法

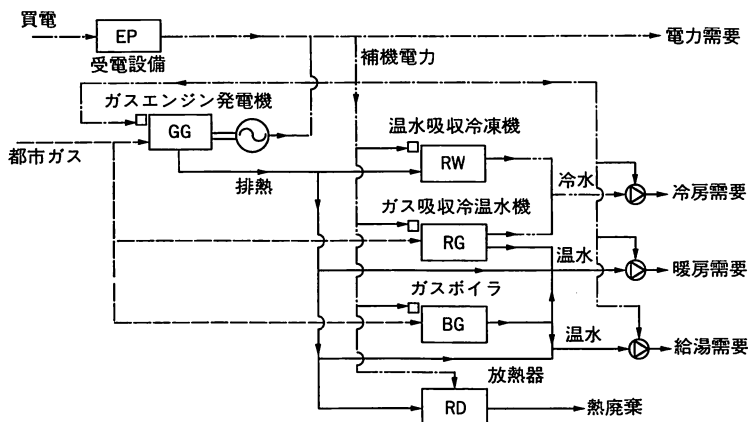


図-3 ガスエンジンCGSの機器構成

従量料金を評価する。このとき、システムの実在するエネルギーの流れのほかに仮想的エネルギーの流れを加え、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、仮想的エネルギーが発生する場合には従量料金にペナルティを課し、できる限り発生しないようにする。

ペナルティ法の導入により、同時に考慮すべき設計変数や制約条件の数はきわめて少なくなり、機器規模および機器運用方策を効率よく決定できる。本手法では、上位レベルの非線形計画問題の解法として逐次線形計画法などを適用する。また下位レベルの運用計画問題を混合整数線形計画問題として定式化し、その解法として分枝限定法を採用する。

### 3. ガスエンジンCGSに対する検討事例

都市型CGSの一例として、あるホテルへのガスエンジンCGSの導入を検討した結果について概略を述べる。

#### 3.1 対象システムと検討条件

図-3に示すガスエンジンを原動機とするCGSを、検討事例における設計計画の対象とする。図-3において、機器記号はBG：ガスボイラ、EP：受電設備、GG：ガスエンジン発電機、RD：放熱器、RG：ガス吸収冷温水機、RW：温水吸収冷凍機をそれぞれ表す。実線は温水、一点鎖線は電力、二点鎖線は冷水、破線は都市ガスの流れをそれぞれ表す。また太い矢印は仮想的エネルギーの流れである。

ここでは、ガスエンジン発電機、温水吸収冷凍機、ガス吸収冷温水機、ガスボイラ、および放熱器の各機器の容量と、電力および都市ガスの最大契約量を設計

計画における設計変数として考慮する。

検討対象とした延床面積20,000m<sup>2</sup>のホテルに対して各月に一代表日を設定し、各代表日について一時間ごとに24時間のエネルギー需要を推定する。それらの前提条件の下に、CGSの経済的メリットを、(ア)CGSの導入、(イ)機器運用方策の最適化、(ウ)機器規模の最適化による各メリットに区別して評価するために、次の4ケースについて数値計算を実行した。ただし、各種機器の設置台数をすべて一台とする。

- ケースA：機器規模および機器運用方策を最適化するCGS
- ケースB：機器運用方策のみを最適化する非最適規模のCGS
- ケースC：機器運用方策として電力追従方式を採用する非最適規模のCGS
- ケースD：ガス吸収冷温水機およびガスボイラから構成される従来システム

#### 3.2 結果および考察

表1は、ケースAについて最適決定された機器容量とユーティリティ最大契約量を、また、ケースB～Dについて仮定されたそれらの値を示したものである。ケースB、Cではガスエンジン発電機の容量を電力最大需要量の70%と仮定したのに対し、ケースAでは45%に最適決定されている。すなわち、ケースB、Cではガスエンジン発電機の容量が過大となっている。

図-4は、各ケースについて目的関数である年間総経費とその内訳を示したものである。ケースDは従来システムのため設備費が小さいが、電力最大契約量が大きくユーティリティ基本料金も大きい。またユーティリティ従量料金もかなり大きくなる。ケースCはCGS

表1 各検討ケースにおける機器容量およびユーティリティ最大契約量

ケース		A	B	C	D
システム		コージェネレーション・システム			従来システム
規模		最適	非最適		
運用方策		最適	最適	電力追従	
機器容量	ガスエンジン発電機 kW	478	750	750	—
	温水吸収冷凍機 Mcal/h	308	697	697	—
	ガス吸収冷温水器 Mcal/h	824	435	435	1,134
	ガスボイラ Mcal/h	484	922	922	922
	放熱器 Mcal/h	344	996	996	—
ユーティリティ最大契約量	電力 kW	708	455	455	1,176
	都市ガス Nm <sup>3</sup> /h	192	250	250	98

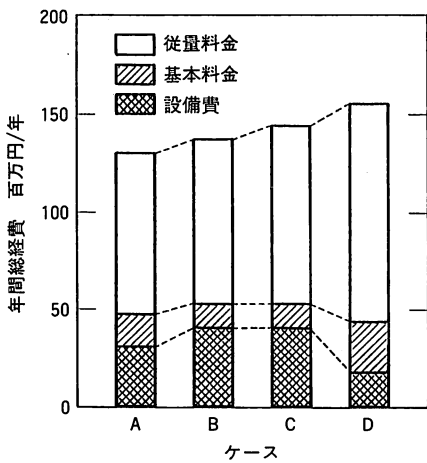


図-4 年間総経費およびその内訳の比較

の導入により電力最大契約量を小さくできるが、大きな設備投資が必要である。またエネルギー有効利用によって、従量料金はケースDに比較してかなり減少する。ケースBに関しては、設備費および基本料金はケー

スCと同様であるが、運用方策の柔軟性のために従量料金はさらに減少する。ケースAは適切な規模のCGSの導入によって、設備費がケースB、Cに比較して小さく、また従量料金もケースBとほぼ同程度となっており、年間総経費がさらに減少する。ケースCとD、BとC、およびAとBの差は、それぞれ前節で述べた(ア)~(ウ)の経済的メリットによるものである。これから、単にCGSの導入だけではなく、本手法に基づく合理的な設計計画および運用計画によって経済的メリットをさらに引き出すことが判る。

#### 4. 燃料電池CGSに対する検討事例

燃料電池は、発電効率の高さと排気ガスや騒音面における低公害性の点から、将来有望なCGS用機器として考えられている。ただし、現段階では電池本体の設備費が高価なため、他の代替機器に対して経済性の観点から競争力が劣っている。しかしながら、将来どの程度迄機器設備費が低減すれば他の代替機器と経済

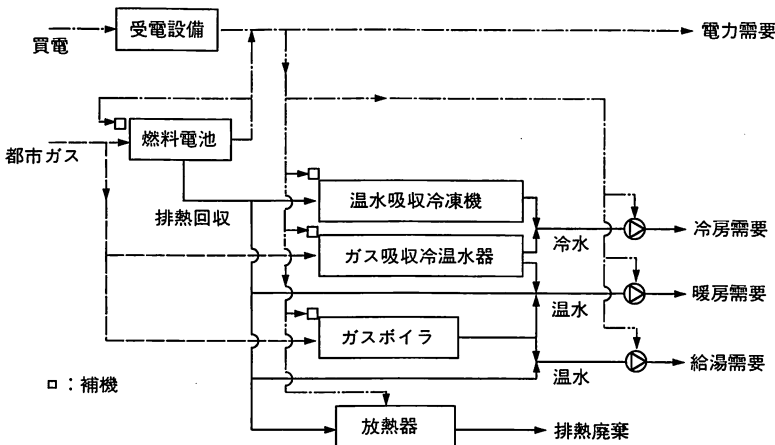
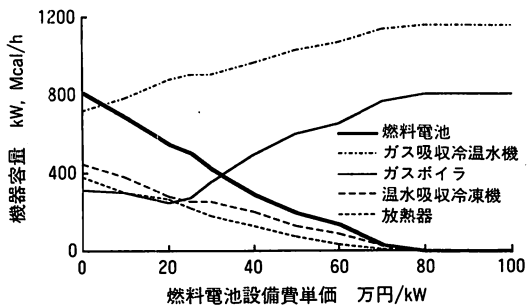
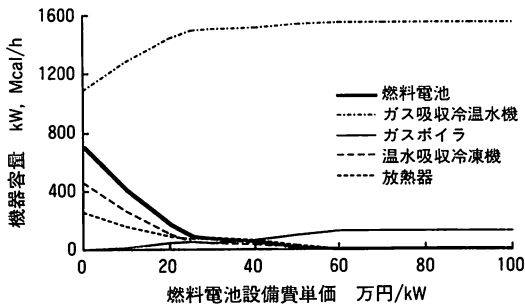


図-5 燃料電池CGS機器構成



(a) ホテル



(b) 事務所ビル

図-6 機器容量の変化 (燃料電池kW, その他機器Mcal/h)

的に競合関係が生じ、また省エネルギー性の効果が発揮されるかは興味深い。以上では、上記問題に前述の最適計画法を適用して行った検討結果を紹介する<sup>4)</sup>。

図-5は、考察の対象とした燃料電池CGSである。ここでは一つの検討事例として、最大電力需要量が約1,000kWのホテルと事務所ビルを取り上げる。それぞれの年間12代表日・1時間毎の電力・冷房・暖房および給湯の各エネルギー需要量を推定する。また、冬季および夏季ピーク需要量を設定し、少なくともこれらの需要量をまかなえるようにシステム構成機器の規模を決定する。買電電力料金体系は高圧業務用料金を、

また都市ガスについては燃料電池とガス吸収冷温水器の4~10月においては空調用夏期第3種を、その他については一般料金体系を採用する。なお、最適化における目的関数として、システムの年間総経費の最小化を考える。

図-6は、燃料電池設備費単価に対するCGS主要構成機器の最適設備容量の変化を示したものである。ホテルに関しては、70万円/kW以上の設備費単価では、燃料電池を導入するメリットがほとんど無い。これは、図-7に示すシステム年間総経費の結果からも明らかである。設備費単価がさらに低減した段階で、燃料電池の最適容量も漸次増大するが、一方事務所ビルに関しては20万円/kW程度に単価が低減した段階でも、最適容量はあまり大きくならない。これは、事務所ビルにおける年間を通じての熱需要量の低さに起因する。比較の意味で、図-5のシステムの燃料電池をガスエンジン発電機で置換したCGSについて検討する。kW当りの両主機の設備費単価が25万円/kWと仮定した場合の両システムの年間総経費の比較を図-7に示す。このレベル迄燃料電池の単価が低減すれば、事務所ビルに対してはガスエンジンCGSと経済面で競合でき、またホテルに対しては燃料電池CGSの方が有利になることが判る。

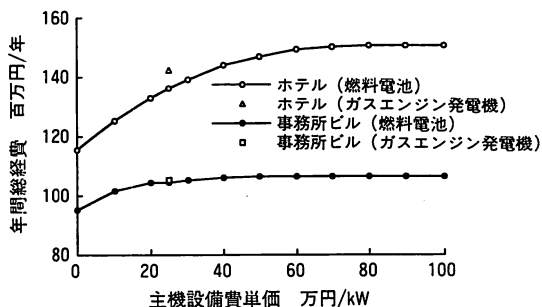


図-7 システム年間総経費

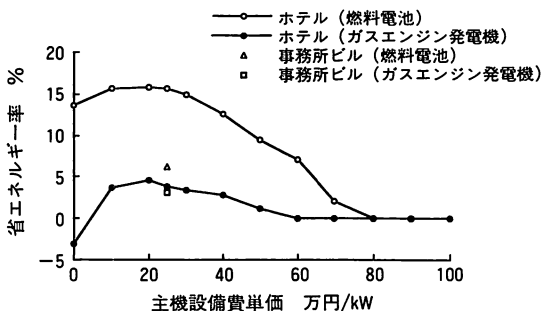


図-8 省エネルギー率

図-8は、従来システムに対する燃料電池CGSの年間省エネルギー率を示したものである。主機設備費単価の低減に伴って省エネルギー率は上昇しているが、20万円/kW以下になると逆に低下している。これは燃料電池の設備費があまり安くなると大容量の機器を導入することになり、排熱廃棄が増加する結果となるためである。また事務所ビルより熱需要量の多いホテルの方が、省エネルギー率は高い。

## 5. おわりに

本稿では、CGSの機器規模を運用を考慮しながら最適に計画立案するための一手法を紹介し、ガスエンジンや燃料電池システムの設計計画への適用を通じて、最適化の効果および手法の有効性を示してきた。

その他のCGSの計画問題として、地域冷暖房用CGSのように計画が時期的に多段階にわたるシステムの計画問題、蓄熱槽を含んだCGS計画問題、エネルギー料金体系のCGSへの影響分析、系統連系や逆送を認めた場合のCGS計画問題など、多種多様な検討が最適化法に基づいて可能である。最適化の考え方は、システムズ・アプローチの一つの切り口ではあるが、これらの諸問題に対して一つの合理性に富む知見を与え

てくれるものと期待できよう。

## 引用文献

- 1) 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.
- 2) Yokoyama, R., Ito, K., Matsumoto, Y.; Optimal Sizing of a Cogeneration Plant in Consideration of its Operational Strategy, 1991 ASME Cogen-Turbo, IGTI-6 (1991), 363~370.
- 3) 横山良平, 伊東弘一; 最適化手法に基づくコージェネレーション・システムの機器規模計画, コージェネレーション, 4巻, 2号 (1989), 437~445.
- 4) 伊東弘一, 横山良平, 松本芳一; 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).

