

コージェネレーション

——エネルギー有効利用促進の1つの鍵——

伊東 弘一

1. はじめに

地球環境および資源枯渇の観点から、現在ほどエネルギー有効利用化促進の重要性が強く認識された時代はかつてない。数億年という気の遠くなるような年月をかけて造り出された石油資源の現時点での確認埋蔵量は、富士山をマスとして計れば約1/5杯弱といわれている。この再生不能で貴重な資源を、現代文明は今後46年間というすさまじい勢いで使い切ろうとしていることを例示すれば、上記の重要性は明白であろう。太陽や風力をはじめとして、各種新および代替エネルギーに関する技術開発も積極的にすすめられている。しかしながら、現時点で地球にやさしく、経済的かつ安全な理想的エネルギー供給技術のスーパー・スターを、われわれが手にしているわけではない。

このような状況の中で、現実に実行可能なエネルギー有効利用技術の代表例として、コージェネレーション・システム(CGS)が最近世界的に注目を集めている。CGSは熱電併給システムと訳されているように、ガスエンジンやガスタービン等の熱機関の軸出力で発電機を駆動して発電を行なうとともに、その際発生する排熱を冷暖房・給湯・蒸気等の熱供給にカスケード的に積極的に有効利用する技術である。上記熱機関の他に、ディーゼルエンジンや燃料電池等でシステムを構成することもできるが、スイスでは原子力プラントの排熱を産業用利用するシステムも現実に稼働している。大型の火力発電プラントにおける熱効率も現在高々40%程度であり、60%の熱が廃熱として自然界に無駄に放出されている。CGSは、無駄に捨てられた熱を有効利用してこうとするきわめて自然の理にかなった考え方に立ち、システムをうまく構成すると総合熱効率を60~80%まで飛躍的に高めることが可能となる。

このように、CGSは既存の要素技術をうまく結合し

てシステム全体としてエネルギーの有効利用化をはかっていこうとする技術であり、システム技術の果たす役割が特に重要となっている。しかしながら、実際のシステムの設計や運用計画段階においては、後述するようにきわめて複雑な多数の因子を総合的に考察していく必要がある。必ずしも十分なエネルギー有効利用化が達成されているわけではなく、重要な研究課題となっている。このような複雑なシステムの設計および運用計画問題に対し、合理的かつ一般性に富む方法論を構築していくうえで、OR学会にも深い関連性をもつシステム工学的アプローチの重要性が浮かびあがってくる。

以下では経済性と省エネルギー性に富むCGSをいかに構築し、運用を行なっていくかという問題に対し、最適化手法にもとづくアプローチを紹介しよう。

2. 最適計画法

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や経済性の評価を行ないながらシステム構成等の計画立案を行なっていく必要がある。上記設計計画問題に対し、筆者らは非線形計画法、混合整数計画法、ペナルティ法を有機的に統合した最適化法を提案し、求解のためのアルゴリズムを開発し

伊とう こういち 大阪府立大学 工学部 機械工学科
〒593 堺市学園町1-1

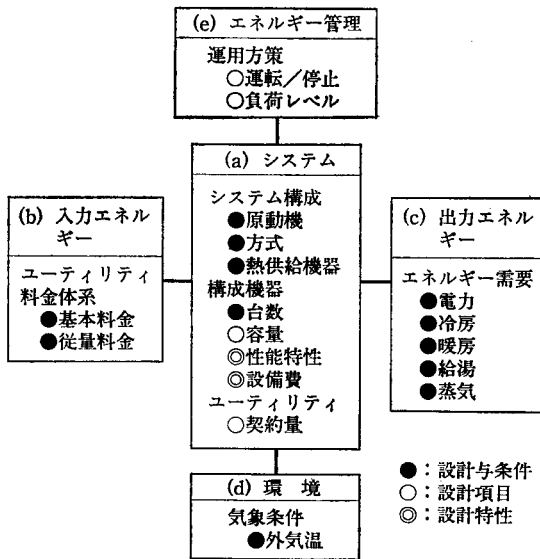


図1 コージェネレーション・システムの経済性への影響因子

た[1~3]. その結果, 省エネルギー性や経済性に優れたシステム計画を合理的に行なうことが可能になった. 以下では, その手法の概略と, ガスエンジン・システムに対する検討事例を通じて, 最適化の効果および手法の有効性について簡単に述べよう.

2.2 設計計画に対する影響因子

CGSの設計計画における評価指標としての経済性や省エネルギー性は, 前述のように多くの因子によって影響を受ける. 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, ●印をつけた因子を設計と条件として, ○印をつけたものを決定すべき設計項目として, また◎印をつ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, 機器運用方策を考慮しながら, 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.

2.3 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わし, 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もと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わす入出力関係, 各エネルギー・フローについてエネルギー・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わす変数である. 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わす.

2.4 ペナルティ法による階層的決定法

2.2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. そこで本研究ではペナルティ法を導入し, 機器規模と機器運用方策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, 2.3節で述べた制約条件を陽表的に考慮せず, 機器規模を表わす設計変数の上・下制限約と, 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もとづき機器運用方策を決定し, 従量料金を評価する. このとき, システムの存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, できるかぎ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. ここでは, 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

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	—
	ガス吸収冷温水機 (冷房時)	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 ³ /h	192	250	250	98

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1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

3.3 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%として仮定したのに対し、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

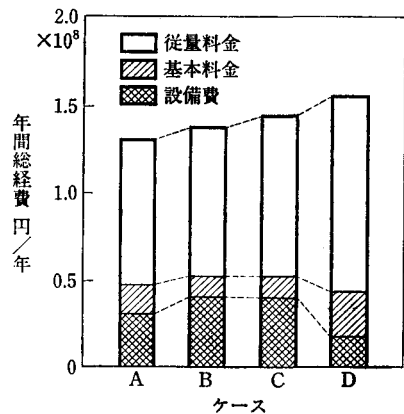


図 4 年間総経費およびその内訳の比較

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3.2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、本手法にもと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せることがわかる。

4. むすび

日本コージェネレーション研究会の調査によれば、平成4年3月末時点におけるわが国のコージェネレーション・システムの総発電容量は225万kWに至っており、今後も民生用および産業用に積極的に導入されていくことが予想されている。このような状況下で、ここで述べた方法論にもとづくシステム設計計画の立案および実プラントの運用事例も漸増しており、省エネルギー性や経済

性向上に1つの指針を与えることを期待したい。設計計画段階における本手法にもとづく具体例として、地域冷暖房システムをはじめとしていくつかの検討事例をあげることができる。また、実プラントの運用段階では、東京都心地区の大規模地域冷暖房システムにおける最適運転支援システムの構築や、ホテルにおける燃料電池システム等の民生用プラントにおける実証試験をはじめ、ガスタービン2基を導入した化学プラント工場、最新鋭ビール醸造工場を含む産業用プラント等をあげることができる。さらに、ワークステーション・レベルでの汎用計画支援システムの開発も進展しており、今後本手法にもとづいた種々のエネルギー有効利用に向けての波及効果が長期的に期待される。

研究論文・著書

- [1] 伊東弘一, 横山良平, 赤木新介: コージェネレーションの最適計画; 産業図書(1990)
- [2] Yokoyama, R., Ito, K. and Matsumoto, Y.: Optimal Sizing of a Gas Turbine Cogeneration Plant in Consideration of its Operational Strategy. Proc. of ASME Cogen-Turbo V, IG TI, Vol. 6(1990), 363~370.
- [3] 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. 日本機械学会論文集(C編), 56巻, 522号(1990), 519-526

UNIXワークステーションによる

科学技術計算 ハンドブック 基礎篇・C言語版

戸川隼人著・A5判・定価9800円(税込)

本書は、近年のコンピュータ技術の進歩により生み出された低価格・高性能のWSを、十分に活用するため

- 普通の参考書の2倍以上の頁数を使って、
- 最新技術をすぐに役に立つ形で詳説し、
- C言語によるプログラム例を80本収録、
- そのフロッピー・ディスクを標準添付した、

理工系研究者、技術者、院生に必携の書。

主要目次 ワークステーション UNIXの操作法の要点 C言語の要点 基礎知識 線形計算 非線形方程式 行列の固有値問題 補間・近似・数値積分 常微分方程式

数理科学30年 特別別冊号 定価2000円

数理科学の展望 21世紀の基礎科学の課題

【数理科学】の30年

数学の統一化と変貌

力学系の理論と非線形解析

無限次元解析とは何か?

物理学の展望 統計物理学を中心に

素粒子論の方向

ビッグバン・インフレーション宇宙論の課題

新しい宇宙像

数理化学への期待

分子科学の中の物質科学

工学と数理科学

知的技術としての統計学

数理生物学の展望

経済の非線形動学

【数理科学】の課題

彌永昌吉

浪川幸彦

俣野博

井上淳

鈴木増雄

牧二郎

佐藤勝彦

海部宣男

細矢治夫

井口洋夫

西澤潤一

広津千尋

巖佐庸

西村和雄

江沢洋

月刊誌

数理科学

11月号/発売中/定価980円

遺伝的アルゴリズムと免疫システム論

サイエンス社

東京都千代田区神田須田町2-4 安部徳ビル

☎03(3256)1093 振替 東京7-2387