UDC 621.313.12-843.8:621.181.27:658.512.2

論文

61-B24

混合整数計画法によるガスタービン熱併給 発電プラントの最適計画

正員 朴 炳 植 (大 阪 大)

正員 堀 井 仙 松 (大阪電通大)

非会員 伊 東 弘 一 (大 阪 大)

正員 鈴 木 胖 (大 阪 大)

1. はじめに

オン・サイト形エネルギー供給設備の一つであるガスタービン熱併給発電プラントは、下記の種々の理由により最近注目されている。

(1) ガスタービン発電機自体の発電効率はあまり高くないが、発電時に発生する廃熱の積極的利用により、システム全体のエネルギー効率向上がはかれること。

(2) 都市ガス以外に灯油・軽油・石炭ガス等が使用でき、多様な燃料の使用が可能なこと。

(3) 環境安全性が比較的良好なこと。

上記プラントの中でもガスタービン発電・廃熱ボイラ方式は、更に次のような特徴点がある。

(4) プラントが比較的小形・軽量で、冷却水を必要とせず、設置が容易なこと。

(5) プラントの起動・停止が簡単で、維持・保守・管理が比較的容易なこと。

本研究では、ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式熱併給発電プラント、すなわち、ガスタービン発電機とそれに併設される廃熱ボイラ、ならびに補助ボイラを主要構成機器要素とするプラントを考察の対象とする。上述のガスタービンは、蒸気タービンのように個別生産されることはない。従って、ガスタービンの機種および機器容量は、購入可能なものの中から選定す

る必要がある。この際、プラント計画者にとって電力および熱の需要量に基づいて、長期的経済性に優れたプラント機器構成を適切に決定することが重要な課題となる。上記計画問題の考察に際しては、季節的・時間的に変動する電力・熱需要量に対するプラントの運用問題を考慮に入れる必要がある。また、電力会社からの購入電力に関して、最大受電契約電力の決定も、上記プラントの導入計画における重要な検討課題である。

これまでに、各種自家発電プラントに対する運用問題等の検討は、既に幾つかの研究がなされているが⁽¹⁾⁻⁽³⁾、本研究ではガスタービン発電・廃熱ボイラ方式熱併給発電プラントのシステム機器構成を運用問題を同時に考慮しながら最適に決定する計画手法を提案する。このとき、種々の需要量に対する各構成機器の運転・停止条件を考慮する必要が生じるために⁽⁴⁾、0-1変数を導入した混合整数計画法を採用する⁽⁵⁾。プラントの経済性評価は年価法⁽⁶⁾によるものとし、上記手法に基づいて、プラントの機器構成（すなわち、各構成機器の機種と機器容量*1および設置台数）、運用方策ならびに最大受電契約電力を決定する。また、本計画手法の有効性を設計計算例を通じて検証する。

2. 対象プラントの定式化

〈2.1〉 対象プラントの構成 図1は、考察の対象とするガスタービン発電・廃熱ボイラ方式プラントの主要構成要素となる発電ユニットの基本構成を示したものである。この方式は、ガスタービン発電後の高温廃ガスを利用して廃熱ボイラで蒸気あるいは高温水を発生させる方式であり、発電効率自体はあまり高くないが、廃熱利用により高い総合的熱利用効率を達成

Optimal Planning of Gas-Turbine Co-Generation Plants Based on Mixed Integer Programming. By Pyong Sik Pak, Member (Faculty of Engineering, Osaka University), Senmatsu Horii, Member (Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University), Koichi Ito, Non-member (Faculty of Engineering, Osaka University) & Yutaka Suzuki, Member (Faculty of Engineering, Osaka University).

朴 炳 植: 正員, 大阪大学工学部電気工学科

堀井仙松: 正員, 大阪電気通信大学工学部通信工学科

伊東弘一: 非会員, 大阪大学工学部産業機械工学科

鈴木 胖: 正員, 大阪大学工学部電気工学科

*1: 以下では、同一機種でも容量の異なる機器を機種が異なるものとみなすことにする。

図 1 ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式のユニット基本構成

Fig. 1. Unit system of gas turbine and waste heat boiler.

図 2 対象プラントの基本構成

Fig. 2. Fundamental structure of the objective plant.

できる。従って、この方式は熱需要に合わせて発電出力を調整して運転することにより高い省エネルギー性を実現できる。このため、熱需要追従運転が容易にできるよう図 1 のように廃熱ボイラ（以下、WHB で表わす）は、ガスタービン発電機（以下、GTG で表わす）と 1 対 1 で構成されることが多い。

図 2 は上記発電ユニットを基本構成要素とする対象熱併給発電プラントの基本構成を示したものである。図 2 において、AUXB は廃熱ボイラからの発生熱量が不足するときにこれを補うための補助ボイラを表わす。また、破線は燃料、実線は電力、一点鎖線は蒸気あるいは高温水の流れをそれぞれ示す。図 2 における記号および添字の示す意味は以下の通りである。

（主記号）

x : 燃料消費量 (t/h), w_G : 発電電力 (MW)

y : 発生熱量 (Gcal/h)

w_p : 電力会社からの購入電力 (MWh/h)

W_D : 電力需要 (MWh/h), Y_D : 熱需要 (Gcal/h)

（添字）

g : GTG あるいは GTG と WHB のユニットを表わす

A : AUXB を表わす

n : 構成機器として採用された n ユニット目の GTG/WHB を表わす

l : 構成機器として採用された l 台目の AUXB を表わす

N : GTG/WHB の設置ユニット台数

L : AUXB の設置台数

〈2.2〉 各機器の性能特性 GTG/WHB としては種々の機器規模のものが開発されている⁽⁷⁾。図 3 は、幾つかの GTG/WHB ユニットの燃料消費量と発電電力、および発生熱量の性能特性関係を示したものである。これらの機器の出力には、機器規模に応じた上・下限値が存在する。また、性能特性曲線はほぼ線形に近く、一般に下記の一次式で十分精度よく近似できることが知られている^{(8),(9)}。

$$w_{G,n} = \begin{cases} \alpha_{G,n} x_{G,n} + b_{G,n} & : \underline{X}_{G,n} \leq x_{G,n} \leq \bar{X}_{G,n} \\ 0 & : x_{G,n} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{G,n} = \begin{cases} \alpha_{G,n} x_{G,n} + \beta_{G,n} & : \underline{X}_{G,n} \leq x_{G,n} \leq \bar{X}_{G,n} \\ 0 & : x_{G,n} = 0 \end{cases} \quad (1 \leq n \leq N) \dots (2)$$

但し、上式で $\bar{X}_{G,n}$ および $\underline{X}_{G,n}$ はそれぞれ n 台目の GTG/WHB の入力上・下限値を表わし、また、 $\alpha_{G,n}$, $b_{G,n}$, $\alpha_{G,n}$ および $\beta_{G,n}$ は各機器の性能特性により決まる定数である。図 4 は、図 3 の各機器の発電電力に対する発電効率および発生熱効率の関係を示したものである。各機器におけるこれらの効率は、出力の増大に伴

図 3 GTG/WHB の性能特性

Fig. 3. Performance curves of GTG and WHB.

図4 GTG/WHBの発電効率および発生熱効率
Fig. 4. Power and heat generation efficiencies of GTG and WHB.

図5 AUXBの性能特性
Fig. 5. Performance curves of AUXB.

って向上し、定格最大出力で最高となっている。また、定格最大出力での効率は、機器規模の増大に対応して向上している。更に、例えば機種2における定格最大出力点での効率が、機種3の対応する出力点での効率より優れているように、出力の大小に応じて効率の最も良い機種が異ってくる。これらの事実は、種々の機器における規模の特性として広く認識されている⁽¹⁰⁾。

次に、AUXBに関しても、図5に示すように種々の規模のものがある。これらの燃料消費量および発生熱量間の性能特性はほぼ正比例関係にあり、次式で十分精度よく近似することができる。

$$y_{A,l} = \begin{cases} \alpha_{A,l} x_{A,l} : \bar{X}_{A,l} \leq x_{A,l} \leq \bar{X}_{A,l} \\ 0 : x_{A,l} = 0 \end{cases} \quad (1 \leq l \leq L) \dots (3)$$

但し、上式で $\bar{X}_{A,l}$ および $\bar{X}_{A,l}$ はそれぞれ l 台目のAUXBの入力上・下限値を表わし、また、 $\alpha_{A,l}$ は各機器の性能特性により決まる定数である。但し、 $\alpha_{A,l}$

の機器規模の違いによる変化はほとんどなく、顕著な規模特性は認められない。

〈2・3〉 エネルギー・バランス式 図2のプラントにおいて、各機器の燃料消費量ならびに電力と熱に関する次のエネルギー・バランス式が明らかに成立する。

$$x_G = \sum_{n=1}^N x_{G,n} \dots (4), \quad x_A = \sum_{l=1}^L x_{A,l} \dots (5)$$

$$w_G = \sum_{n=1}^N w_{G,n} \dots (6)$$

$$y_G = \sum_{n=1}^N y_{G,n} \dots (7)$$

$$y_A = \sum_{l=1}^L y_{A,l} \dots (8)$$

3. 最適計画問題の構成と解法

〈3・1〉 前提条件 プラントの機器構成に関する最適計画問題を定式化するにあたって前提とした条件は次の通りである。

(1) 年間の電力および熱の需要は既知であり、これらの需要は M 個の需要モードに分類されているものとする。すなわち、需要モードを m で表わすことにすると、モード m における平均電力需要が W_D^m (MWh/h)、平均熱需要が Y_D^m (Gcal/h) となる操業時間の年間総計 (年間相当運転時間) を T_D^m (h) とするとき、エネルギー需要は $m=1$ から $m=M$ の M 個の需要モードで分類されるような需要パターンで与えられているものとする。このため、図2に示した諸変数はすべて時間平均値として定義されている。従って、以下で最適というのはあくまで時間平均値について言えることである。

(2) エネルギーの需給条件は、常に電力需要および熱需要を満たし、発電電力が不足するときは最大受電契約電力の範囲内で電力を購入することができるものとする。但し、売電はできないものとする。

(3) WHBはGTGの規模に応じて設計されるので、これらは一体として構成され、 K 個の機種の異なる機器ユニット群から選択して、プラント全体で機種の重複を許して最大 $\bar{N}$ 台まで設置できるものとする。

(4) AUXBは規模の異なる J 種の機器から少なくとも1台設置し、機種の重複を許して最大 $\bar{L}$ 台まで設置できるものとする。

(5) プラントの経済性は、年価法⁽⁶⁾に基づいて長期的な評価を行なうものとする。

〈3・2〉 問題の構成および解法 本節では、〈3・1〉節の前提条件のもとに、年間の各エネルギー需要モ

ドに対するプラントの運用方策を考慮しながら、長期的経済性に優れたプラント各構成機器の機種と設置台数および最大受電契約電力を最適に決定する問題を考察する。

前述の前提条件より、各構成機器の組合わせの違いによるプラントの代替案の総数は

$$S = \left(\sum_{n=1}^N K H_n \right) \left(\sum_{l=1}^L J H_l \right) \dots\dots\dots (9)$$

となる。但し、上式で例えば $K H_n$ は異なる K 個の GTG/WHB の機種から、重複を許して n 個の機器ユニットを選定する組合わせ数を表わし

$$K H_n = (K+n-1)! / n! (K-1)! \dots\dots\dots (10)$$

である⁽¹¹⁾。ここでは、本質的にこれらのすべての代替プラント案の経済性を比較検討する必要がある。以下では、これらの中で第 s 番目 ($1 \leq s \leq S$) の代替プラント案の経済性評価手法についてまず述べる。

年価法によるプラントの経済性評価には、プラントの年間固定費と年間変動費を算定する必要があるが、ここではまず後者について考察する。年間変動費の主要項目は、プラントの稼動に必要な燃料費と電力会社から購入する電力の経費（購入電力量料金のほか最大受電契約電力に対する基本料金を含む）および人件費より構成される。人件費はプラント構成法によらず一定と考えられるので、年間変動費から除外するものとすれば、年間変動費は各エネルギー需要モードに対するプラントの運用方策を決定すれば、算定できることになる。いま、第 s 番目の代替プラント案における GTG/WHB の設置ユニット台数を N 、AUXB の設置台数を L とする^{*2}。上記各機器の電力・熱の需要モード m ($1 \leq m \leq M$) における運転・停止状態を考慮するために、次の 0-1 変数を導入する⁽⁵⁾。

$$\delta_n^m = \begin{cases} 1: \text{第 } n \text{ 番目 } (1 \leq n \leq N) \text{ の GTG/WHB} \\ \quad \text{が需要モード } m \text{ で運転しているとき} \\ 0: \text{上記条件で停止しているとき} \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

$$\varepsilon_l^m = \begin{cases} 1: \text{第 } l \text{ 番目 } (1 \leq l \leq L) \text{ の AUXB が需} \\ \quad \text{要モード } m \text{ で運転しているとき} \\ 0: \text{上記条件で停止しているとき} \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

上記 0-1 変数を用いると、需要モード m における運転・停止を含めた (1)～(3) 式の性能特性式は、次のように表わすことができる。

$$w_{G,n}^m = a_{G,n} x_{G,n}^m + b_{G,n} \delta_n^m \dots\dots\dots (13)$$

$$y_{G,n}^m = \alpha_{G,n} x_{G,n}^m + \beta_{G,n} \delta_n^m \dots\dots\dots (14)$$

*2: N および L の値は当然 s に依存するが、以下では記述の簡単化のため特に s の添字などを明示しない。

$$X_{G,n} \delta_n^m \leq x_{G,n}^m \leq \bar{X}_{G,n} \delta_n^m, (1 \leq n \leq N) \dots\dots\dots (15)$$

$$y_{A,l}^m = \alpha_{A,l} x_{A,l}^m \dots\dots\dots (16)$$

$$X_{A,l} \varepsilon_l^m \leq x_{A,l}^m \leq \bar{X}_{A,l} \varepsilon_l^m, (1 \leq l \leq L) \dots\dots\dots (17)$$

但し、上式で上添字 m は、需要モード m における各状態量を表わす。

次に、〈3・1〉節の前提条件 (2) より、需要モード m ($1 \leq m \leq M$) に対する電力および熱の需給条件式は次式で与えられる。

$$w_G^m + w_P^m = W_D^m, 0 \leq w_P^m \leq \bar{w}_P \dots\dots\dots (18)$$

$$y_G^m + y_A^m \geq Y_D^m \dots\dots\dots (19)$$

但し、(18) 式における $\bar{w}_P$ (MW) は最大受電契約電力を表わす。需要モード m に対する (6) 式および (13) 式を (18) 式に代入すれば

$$\sum_{n=1}^N (a_{G,n} x_{G,n}^m + b_{G,n} \delta_n^m) + \bar{w}_P \geq W_D^m \dots\dots\dots (20)$$

$$\sum_{n=1}^N (a_{G,n} x_{G,n}^m + b_{G,n} \delta_n^m) \leq W_D^m \dots\dots\dots (21)$$

が得られる。また、需要モード m に対する (7)、(8) 式および (14)、(16) 式を (19) 式に代入すれば

$$\sum_{n=1}^N (\alpha_{G,n} x_{G,n}^m + \beta_{G,n} \delta_n^m) + \sum_{l=1}^L \alpha_{A,l} x_{A,l}^m \geq Y_D^m, (1 \leq m \leq M) \dots\dots\dots (22)$$

となる。

第 s 番目の代替プラントの年間変動費は次式で表わされる。

$$z_r = \sum_{m=1}^M (C_G x_G^m + C_A x_A^m + C_P w_P^m) T_D^m + \bar{C}_P \bar{w}_P$$

$$= \sum_{m=1}^M \left(C_G \sum_{n=1}^N x_{G,n}^m + C_A \sum_{l=1}^L x_{A,l}^m + C_P w_P^m \right) T_D^m + \bar{C}_P \bar{w}_P \dots\dots\dots (23)$$

但し、上式の諸記号の定義を以下に示す。

z_r : 代替プラント s の年間変動費 (千円/年)

C_G : GTG 用主燃料単価 (千円/t)

C_A : AUXB 用補助燃料単価 (千円/t)

$\bar{C}_P$: 購入電力量単価 (千円/MWh)

$\bar{C}_P$: 最大受電契約電力に対する基本料金単価 (千円/MW/年)

T_D^m : 需要モード m の年間相当運転時間 (h/年)

ここで、最適化計算における簡単化のために、(6)、(13)、(18) 式の関係を (23) 式に代入して z_r を次式で表わしておく。

$$z_r = \sum_{m=1}^M \left\{ C_G \sum_{n=1}^N x_{G,n}^m + C_A \sum_{l=1}^L x_{A,l}^m + C_p W_D^m - C_p \sum_{n=1}^N (a_{G,n} x_{G,n}^m + b_{G,n} \delta_n^m) \right\} T_D^m + \bar{C}_p \bar{w}_p \dots \dots \dots (24)$$

次に、代替プラント s の年間固定費を年価法に基づいて次式で算定する。

$$z_f = \sum_{n=1}^N R_G I_{G,n} + \sum_{l=1}^L R_A I_{A,l} + \gamma \left(\sum_{n=1}^N I_{G,n} + \sum_{l=1}^L I_{A,l} \right) \dots \dots \dots (25)$$

但し、上式で

z_f : 代替プラント s の年間固定費 (千円/年)

$I_{G,n}$: 第 n 番の GTG/WHB の初期設備費 (千円)

$I_{A,l}$: 第 l 番目 AUXB の初期設備費 (千円)

R_G, R_A : GTG/WHB および AUXB の資本回収係数

γ : 年間施設補修費の初期設備費に対する比率^{*3}

である。上述の資本回収係数は、例えば GTG/WHB の償却年数を τ_G 、年金利を r 、設備の償却時残存率を ρ とすれば次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$R_G = r \{1 - \rho(1+r)^{-\tau_G}\} / \{1 - (1+r)^{-\tau_G}\} \quad (26)$$

本研究では、代替プラント s に対して (24) 式の年間変動費と (25) 式の年間固定費を合算した次の年間総経費を最小化すべき目的関数として採用する。

$$z = z_r + z_f \dots \dots \dots (27)$$

以上より、代替プラント s ($1 \leq s \leq S$) に対する長期的経済性は、(15)、(17)、(20)、(21) および (22) 式の制約条件の下に、(27) 式の z を最小化する各需要モードに対するプラント構成機器の運用方策や最大受電契約電力等に関する未知数 $x_{G,n}^m, w_{G,n}^m, \delta_n^m$ ($1 \leq n \leq N, 1 \leq m \leq M$)、 $x_{A,l}^m, \varepsilon_l^m$ ($1 \leq l \leq L, 1 \leq m \leq M$)、 $\bar{w}_p, z_f$ および z_r を求めることにより評価されることになる。但し、上述の未知数で δ_n^m および ε_l^m は 0-1 変数である。また、各制約条件式中における需要量や機器特性等に関する W_D^m, Y_D^m, T_D^m ($1 \leq m \leq M$)、 $a_{G,n}, b_{G,n}, a_{G,n}, \beta_{G,n}, \bar{X}_{G,n}, \bar{X}_{G,n}, I_{G,n}$ ($1 \leq n \leq N$)、 $\alpha_{A,l}, \bar{X}_{A,l}, \bar{X}_{A,l}, I_{A,l}$ ($1 \leq l \leq L$)、 $C_G, C_A, C_p, \bar{C}_p, \gamma, N, L, R_G$ および R_A の値は前もって与えられているものとする。

上記最適化問題は、目的関数および制約条件式が未知数に関して線形で、かつ未知数に 0-1 変数という整

数値変数を含む混合整数線形計画問題となっている。上記計画問題に対して、いくつかの最適化計算アルゴリズムが提案されており、最適解を導出することができる⁽⁸⁾。本研究では、次章の数値計算例において、Kuester 等による分枝限定法に基づくアルゴリズムを利用して解を求めたが、詳細は省略する⁽¹³⁾。

上述の最適化問題を解くことにより、(27) 式の目的関数の最小値 $z = z^*$ が代替プラント s に対する年間総経費として算出される。本研究では、すべての代替プラント s ($1 \leq s \leq S$) に対する上述の年間総経費を算出し、これらの中で z^* を最小にする代替プラントを選出し、最終的に求めるべきプラント機器構成および最大受電契約電力として決定する。

4. 数値計算例

本章では、前章で提案したプラント機器構成に関する最適計画手法の有効性を検証するために行なった数値計算例の結果について述べる。

〈4・1〉 入力データ 数値計算例における入力データおよび各種条件の設定を以下に示す。

(1) エネルギー需要量 年間の電力・熱需要パターンとして、表 1 に示すような 2 ケースを設定した。ケース I および II において、モードの総数は $M=5$ とし、各ケースの年間の総電力需要量および総熱需要量はそれぞれ 65,000 MWh/年および 78,000 Gcal/年で同一とした。また、各モードにおける電力および熱需要はそれぞれケース I とケース II で同一で、年間相当運転時間のみが異なるものとした。ケース I の需要パターンでは需要モード $m=2$ における年間相当運転時間が最も長く、ケース II では $m=5$ のモードが最も長い。年間相当運転時間の総計は、ケース I で 6,200 h、ケース II で 4,200 h である。

(2) プラント機器構成および機器特性 各ケースにおいて、GTG/WHB は図 3 に示すような性能特性を持つ規模の異なる 3 機種 ($K=3$) からユニット台数で最大 2 台 ($\bar{N}=2$) まで重複を許して設置できるものとする。最適化計算においては、図 3 に示す特性曲線を (1) および (2) 式の一次関係式で近似したが、両者はほとんど完全に一致するので、後者は図示していない。また、AUXB については図 5 に示す 2 機種 ($J=2$) から一台 ($\bar{L}=L=1$) 設置するものとする。上記各機器の出力上・下限値、および初期設備費を表 2 に示しておく。なお初期設備費は、R. Williams の指数乗則⁽¹⁰⁾に従って設定を行なった。

(3) 燃料および購入電力 GTG および AUXB に対する燃料としては、LNG および A 重油を用いる。

*3: (25) 式右辺第 3 項の補修費は、変動費に算入されることもあるが、ここでは固定費に含ませる⁽¹²⁾。

表 1 電力・熱需要パターン
Table 1. Pattern of power and heat demands.

需要モード m		1	2	3	4	5
ケース I	平均電力需要 (MWh/h)	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0
	平均熱需要 (Gcal/h)	6.0	12.0	18.0	24.0	30.0
	年間相当運転時間 (h/年)	800	4,500	500	300	100
ケース II	平均電力需要 (MWh/h)	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0
	平均熱需要 (Gcal/h)	6.0	12.0	18.0	24.0	30.0
	年間相当運転時間 (h/年)	100	200	500	1,000	1,400

表 2 機器出力上・下限値および初期設備費
Table 2. Maximum and minimum outputs and initial equipment costs of GTG/WHB and AUXB.

機 器 番 号		1	2	3	
GTG/WHB	発電電力 (MW)	上限	7.01	12.02	20.03
		下限	2.80	4.81	9.18
	発生熱量 (Gcal/h)	上限	10.23	16.84	27.09
		下限	4.10	6.74	13.28
	初期設備費 (千万円)		50.3	80.3	125.2
	AUXB	発生熱量 (Gcal/h)	上限	10.0	15.0
下限			1.0	1.5	
初期設備費 (千万円)		4.32	5.60		

上記燃料の単価および低位発熱量は、それぞれ $C_G = 95$ 円/kg, $C_A = 80$ 円/kg および 11,840 kcal/kg, 10,000 kcal/kg である。また購入電力量単価は $C_p = 12$ 円/kWh とし、最大受電契約電力に対する基本料金単価を $\bar{C}_p = 20,400$ 円/kW/年とした。

(4) 経済性評価データ すべての機器設備に対し、償却年数を $\tau_G = \tau_A = 10$ 年、償却時残存率を $\rho = 0.1$ とした。また、年間施設補修費の初期設備費に対する比率を $\gamma = 0.01$ とした。更に年金利は $r = 0.1$ とした。

〈4.2〉 結果および考察 本例における各構成機器の組合わせの違いによるプラントの代替案の総数は、(9)式より $S = 18$ となる。すなわち、最適なプラント構成は、上記回数に等しい混合整数線形計画問題を解くことにより求められることになる*4。

表 3 は、ケース I および II について求めた各 5 位までの最適なプラントの機器構成およびそれらの経済性を示したものである。

表 3 に示すように、プラントの最適機器構成はケー

ス I に対しては GTG/WHB の構成を機種 1 と 2 の組合わせとし、ケース II に対しては機種 3 の 1 台のみを採用し、AUXB については両ケースとも機種 1 を採用するのが最適となっている。また、プラントの電力と熱の需要を満たす機器構成法として、第 5 位の順位までの中でも多様な構成法が存在し、本手法によってその中から最適な機器構成が決定できることがわかる。第 1 位と第 5 位の間で年間総経費の差は、ケース I で 4.9 千円/年、ケース II では 6.6 千円/年である。なお、AUXB の機種選択の相違は初期設備費が小さいこともあって機種選定の経済性にほとんど影響を及ぼしていないこともわかる。

表 3 の第 1 位から第 5 位のプラント構成案における最大受電契約電力の最適値 $w_p = w_p^*$ をみると、直感的にもわかるように固定費が大きい機種構成ではプラント自体の最大発電電力が大きく、従って w_p^* が小さくなる傾向がある。例えば、ケース I では表中第 5 位の機種構成でその w_p^* は 2.99 MW で最小であるが、固定費は最大となっている。一方、固定費の最小は第 4 位の構成で、そのときの w_p^* は 12.98 MW であり最大となっている。但し、この性質が必ずしも成立しないことに注意する必要がある。例えば、ケース II では第 3 位の機種構成の方が、第 1 位の構成に比べ固定費が大きいにもかかわらず w_p^* が大きい。これは前にも述べたように機器に関して規模の経済性が働くためである。すなわち、第 3 位の GTG/WHB が機種 1 と 2 の 2 台のプラント構成案では、最大発電電力が 19.03 MW で初期設備費が 130.6 千円であるのに対し、第 1 位の機種 3 のみのプラント構成案ではそれぞれ 20.03 MW および 125.2 千円となっているからである。

次に、表 3 の各種機器構成の経済性の各項目について分析すると、全体的に固定費に比べ変動費がかなり大きいことがわかる。このことは、機器構成計画問題におけるプラント運用方策の考慮の重要性を示している。

表 4 は、ケース I および II に対して、求められた最適プラントの最適運用方策を示した表である。まず、ケース I に対しては、電力および熱の需要の小さい

*4: 代替案の数は(9)式に示すように、対象機種の数が増えると見掛け上急激に増えるが、制約式を満たさない組合わせについては、最適解を求める必要はないので、この問題はかなり緩和される。また、本方法では混合整数線形計画問題を解く必要があるため、変数の数、特に整数変数の数が大きくなると、急激に CPU 時間が大きくなるという問題もある。しかし、近年の計算機能力の発達や解法アルゴリズムの開発状況をみれば、この問題は大いに軽減されると考えられる。参考のため、本数値例における総所要 CPU 時間を述べると、計算機 FACOM M-360 AP で、ケース I で 71.7 秒、ケース II で 132.5 秒である。

表 3 最適プラントの機器構成と経済性

Table 3. Construction and economy of the optimal plant.

(a) ケース I

順 位	機 器 構 成		最大発電 電力 (MW)	最大受電 契約電力 (MW)	年 間 経 費 (千円/年)					
	GTG/WHB	AUXB			変 動 費				固 定 費	総 経 費
					燃 料 費	購入電力 量料金	受電契約 基本料金	計		
1	1+2*	1	19.03	5.97	131.38	24.62	12.19	168.19	22.46	190.7
2	1+2	2	19.03	5.97	131.30	24.77	12.19	168.26	22.67	190.9
3	1+1	2	14.04	10.98	85.34	67.07	22.41	174.82	17.68	192.5
4	2	2	12.02	12.98	86.74	65.18	26.49	178.41	14.30	192.7
5	1+3	1	27.04	2.99	139.87	19.66	6.10	165.63	29.93	195.6

*: 表 2 に示した機種番号 1 および 2 の GTG/WHB を採用することを意味する。

(b) ケース II

順 位	機 器 構 成		最大発電 電力 (MW)	最大受電 契約電力 (MW)	年 間 経 費 (千万円/年)					
	GTG/WHB	AUXB			変 動 費				固 定 費	総 経 費
					燃 料 費	購入電力 量料金	受電契約 基本料金	計		
1	3	1	20.03	5.00	142.02	13.30	10.20	165.52	21.56	187.1
2	3	2	20.03	5.00	142.02	13.30	10.20	165.52	21.77	187.3
3	1+2	1	19.03	5.97	139.13	16.99	12.19	168.31	22.46	190.8
4	1+2	2	19.03	5.97	139.05	17.14	12.19	168.38	22.67	191.1
5	2	2	12.02	12.98	116.55	36.34	26.49	179.38	14.30	193.7

モード $m=1$ では 2 台とも運転を停止し、電力需要は購入電力のみで、また熱需要は AUXB でのみまかなっている。モード $m=2$ では、GTG/WHB の規模の小さい方の機種 1 のみが最大出力で運転をし、 $m=3$ では逆に規模の大きい方の機種 2 のみが最大出力運転をして、他の機種はそれぞれ運転を停止している。 $m=2$ および 3 における不足電力および不足熱量はそれぞれ購入電力および AUXB でまかなっていることがわかる。 $m=4$ では、GTG/WHB の機種 2 が最大出力運転をするほかに、機種 1 が部分負荷運転を始め、AUXB は運転を停止する。 $m=5$ の需要のピークでは、GTG/WHB は 2 台とも最大出力運転を行ない、それでも不足する電力と熱は、それぞれ購入電力と AUXB でまかなっている。このように、ケース I では GTG/WHB の運転の大部分は効率のよい最大出力で運転され、部分負荷運転をする場合は廃熱利用により熱需要条件が満足され、AUXB の運転が停止されるように運転するのが最適であると決定されていることがわかる。ケース II では、表 4 (b) よりわかるように、 $m=1$ に対してはケース I の場合と同じく購入電力と AUXB により需要をまかない、 $m=2$ で AUXB は運転を停止し、GTG/WHB が部分負荷運転を行なう。このとき、熱需要は 12 Gcal/h に対して発生熱量

表 4 プラントの最適運用方策

Table 4. Optimal operational policy of plant.

(a) ケース I

需要モード m			1	2	3	4	5
機 器 出 力	GTG/WHB (機種 1)	$w_{G,1}^m$ (MW)	運転停止	7.01	運転停止	4.78	7.01
		$y_{G,1}^m$ (Gcal/h)		10.23		7.16	10.23
	GTG/WHB (機種 2)	$w_{G,2}^m$ (MW)	運転停止	運転停止	12.02	12.02	12.02
		$y_{G,2}^m$ (Gcal/h)			16.84	16.84	16.84
	AUXB (機種 1)		6.00	1.77	1.16	運転停止	2.93
	購入電力 w_p^m (MWh/h)			5.00	2.99	2.98	3.20

(b) ケース II

需要モード m			1	2	3	4	5
機器出力	GTG/WHB (機種 3)	$w_{G,1}^m$ (MW)	運転停止	9.18	12.89	17.60	20.03
		$y_{G,1}^m$ (Gcal/h)		13.28	18.00	24.00	27.09
	AUXB (機種 1)	$y_{A,1}^m$ (Gcal/h)	6.00	運転停止	運転停止	運転停止	2.91
購入電力 w_p^m (MWh/h)			5.00	0.82	2.11	2.40	4.97

は 13.28 Gcal/h であり、余分に熱を発生しても運転するのが最適であると計算されており、興味ある結果を示しているといえよう。

$m=3$ および 4 では GTG/WHB は熱需要条件をちょうど満足するよう部分負荷運転し、AUXB は運転停止のままである。 $m=5$ で GTG/WHB は最大出力運転を行ない、不足する電力は購入し、熱は AUXB でまかなうのが最適であると求められていることがわかる。

なお、電力と熱の年間の総需要量をそれぞれケース I と II に対して同一としたにもかかわらず、表 3 からわかるように、最適プラントの変動費、および固定費はケース II の方が I よりも小さくなっている。これはケース I に比べ、ケース II では $m=5$ での電力と熱の需要のピークにおける年間相当運転時間が最も長く、GTG/WHB が規模の最も大きい機種 3 が用いられているためであると考えられる。すなわち、表 4 に示したようにケース II では $m=2\sim 4$ で部分負荷運転をしているものの、 $m=5$ の需要のピークでは最大出力で運転され、このときの効率は機器の規模が大きいため高く、また発電電力もケース I のときよりも大きい。従って、機器の効率が高いだけでなく、最大受電契約基本料金および購入電力量料金が表 3 に示すように、小さくて済むからである。なお、ケース II の固定費が小さいのは、先にも述べたように規模の経済性によるものである。このように、年間の総電力需要量と総熱需要量および電力と熱のピーク需要の大きさが同じでも、その需要パターンが異なる（本例の場合は各モードにおける年間相当運転時間のみ異なっている）とプラントの最適機器構成および最適運用方策が異なることがわかる。

5. む す び

本論文では、電力および熱の需要パターンが与えられた熱併給発電プラントの機器構成を長期的経済性の観点から最適に決定する問題（最適プラント機器構成計画問題）を具体的に設定、定式化するとともに数値例を通じて検討した結果について述べた。

対象とした熱併給発電プラントは、ガスタービン発電機 (GTG) とそれに併設される廃熱ボイラ (WHB)、および補助ボイラ (AUXB) を主要構成機器要素とするガスタービン発電・廃熱ボイラ方式のプラントである。採用した長期的経済性の指標は、プラント導入・運営計画にあたって必要となる主要なファクターが考慮できるよう、年価法に基づいたプラント構成機器の初期設備費を年間あたりのコストに換算した固定費と、エネルギー需要を満たすのに必要な燃料費、購入電力量料金や受電契約基本料金などのプラントの年間運用コスト (変動費) との和によって求められる年間総

経費であり、これを最小化することとした。そして、プラント構成要素となる種々の機器規模や機器特性を持つ GTG/WHB と AUXB の機種を適当に組合わせて、ある 1 つのプラント代替案を構成し、電力と熱のエネルギー需要を満たすという条件のもとで、その年間総経費を最小化する問題を、0-1 変数を利用することにより混合整数計画問題として簡潔に定式化できることを示した。次に、この問題に対する最適解をすべての構成可能なプラント代替案について比較検討することにより、本論文で主題とした最適プラント構成案が容易に決定できることを示した。

本論文では、また数値計算例を通じて本手法の有効性を検討した結果についても示した。その結果より、提案した手法によると、プラントの電力と熱の需要パターンに応じて、GTG/WHB および AUXB の機器特性ならびに規模の経済性や規模による機器効率の相違などを総合的に考慮して、プラントの最適機器構成 (機種とその設置台数) が決定できるだけでなく、プラント構成機器の運転・停止および負荷配分条件、電力会社からの購入電力ならびに最大受電契約電力の最適値が容易に決定できることなどを明らかにした。

以上より、本手法はプラントの最適構成計画問題に十分利用できるものと考えられる。

(昭和 60 年 1 月 29 日受付)

文 献

- (1) 伊藤・小野・国領・島田:「省エネルギーのための電算機システムとその実用例」システムと制御 24, 7, 453(昭 55-7)
- (2) L. F. Giannuzzi, et al.: "Optimization Design Consideration for Cogeneration Plants" ASME/IEEE Joint Power Generation Conf. (1981)
- (3) 高田・加治・浦上・町田:「自家発電エネルギー管理システムにおける経済評価試算」第 3 回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集 (日本シミュレーション学会) 137 (昭 58-6)
- (4) 堀井・朴・鈴木:「混合整数計画法によるガスタービン熱併給発電プラントの最適計画」第 27 回自動制御連合講演会前刷 369 (昭 59-11)
- (5) 今野・鈴木(編):「整数計画法と組合せ最適化」日科技連 9 (昭 57)
- (6) 千住・伏見:「経済性工学の基礎」日本能率協会 135(昭 57)
- (7) "Gas Turbine World Performance Specs 1981" Pequot Pub. Inc. (1981)
- (8) 堀井・朴・鈴木:「マイコンによる熱併給発電システムのシミュレーション」第 3 回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集 (日本シミュレーション学会) 125 (昭 58-6)
- (9) 朴・堀井・伊東・鈴木:「シミュレーションによる地域冷暖房用熱併給発電プラントの評価」シミュレーション 4, 1, 19 (昭 60-3)
- (10) 赤木: エンジニアリングシステム設計工学 89 (昭 57) 共立出版
- (11) 吉田, 他(編): 応用数学便覧 5 (昭 44) 丸善
- (12) 化学工学協会(編): 経済性評価とプラントコスト 76(昭 50) 丸善
- (13) J. L. Kuester, & J. H. Mize: "Optimization Techniques with Fortran" 66 (1973) McGraw-Hill