加圧式リン酸型燃料電池熱電併給システムの多目的最適容量計画*

伊 東 弘 一^{*1}, 横 山 良 平^{*1}
蒲 生 恵 司^{*1}, 松 本 芳 一^{*2}Multiobjective Optimal Unit Sizing of Cogeneration Systems with
Pressurized Phosphoric Acid Fuel CellKoichi ITO, Ryohei YOKOYAMA,
Satoshi GAMOU and Yoshikazu MATSUMOTO

We investigated how cogeneration systems with a pressurized phosphoric acid fuel cell should be installed into urban areas from viewpoints of economic, energy saving and environmental protection properties. An optimization approach is adopted to evaluate the planning of installations efficiently. Equipment capacities and maximum utility demands are determined so as to minimize both the annual total cost, the annual primary energy consumption and the annual amounts of CO₂ and NO_x emissions in consideration of operational strategies for energy demand requirements. This problem is considered a multiobjective optimization one, and discrete sets of Pareto optimal solutions are derived numerically by a weighting method. Through numerical studies on the cogeneration systems installed into an office or apartment-house area, trade-off relationships among the economic, energy saving and environmental protection properties are clarified, and the results show that capacities of fuel cells to be installed become large when considering energy-saving and environmental protection properties as the criteria for evaluation.

Key Words: Systems Engineering, Fuel Cell, Energy Saving, Cogeneration, Unit Sizing, Multiobjective Optimization, Environmental Protection, Economy, Pressurized Phosphoric Acid Fuel Cell

1. 緒 言

燃料電池は発電効率がよく、騒音・振動が少なく、NO_x、SO_xの排出がほとんどないという特長を持っており、需要地に近接して設置できる分散型電源の一つとして注目されている。また、発電に加えて排熱回収が可能であるため、熱電併給システム（コージェネレーション・システム(CGS)）の主機としても期待されている。このような理由から、燃料電池やその周辺機器の開発に加え、CGSの主機としての実用化のための多くの実証試験が実施されている^{(1)~(3)}。最近では、実用化の最も近いといわれるリン酸型燃料電池に対して、電池本体の動作圧力を高めることによりさらに発電効率の向上を図った加圧式リン酸型燃料電池が開発され、都市部への地域供給用としてその導入が検討されている。

しかしながら、現時点では燃料電池の初期設備費が高価であることなどがCGSとしての普及の妨げとなっている。したがって、燃料電池の普及は設備費低減に大きく依存しており、経済性の観点からCGSへの

適用を検討することは極めて重要である。また、近年のエネルギー・環境問題に対する関心の高まりの中、経済性の観点ばかりでなく、省エネルギー性および環境保全性の観点も含めて総合的に評価することが重要となってきた。特に前述の加圧式リン酸型燃料電池に対しては、今後円滑な導入を図っていくためには上記三者の視点に立つ総合的な評価が不可欠である。

著者らは、燃料電池のCGSへの適用に対して、工学的・経済的観点からの研究⁽⁴⁾や省エネルギー性も含めた観点からの研究⁽⁵⁾を行ってきたが、これらの検討においては燃料電池の特徴の一つである高い環境保全性に対する評価はいまだ行っていない。

本研究では、加圧式リン酸型燃料電池の都市部におけるCGSへの適用に対して、多目的最適化の考え方を取り入れた計画手法⁽⁵⁾に基づいて経済性、省エネルギー性および環境保全性の観点から検討を行う。以下では、まず導入対象とするシステムについて説明し、そのシステムの各機器容量や運用方策などを上記三者の観点から合理的に決定する多目的最適容量計画について説明する。また、数値計算事例において経済性ととも省エネルギー性および環境保全性を評価指標として考慮した場合の燃料電池と他の機器の導入容量や評価指標間のトレードオフ関係などを、ガスタービンCGSの場合と比較しながら明らかにする。

* 原稿受付 平成6年6月15日。

^{*1} 正員、大阪府立大学工学部 (〒593 堺市学園町1-1)。^{*2} 正員、関西電力(株)総合技術研究所 (〒661 尼崎市若王寺3-11-20)。

2. 対象システム

具体的な検討対象として、図1に示す加圧式リン酸型燃料電池CGSを取り上げる。エネルギー需要量としては電力、冷熱および温熱の3種類を想定する。図中の機器記号は、FC：加圧式リン酸型燃料電池熱電併給ユニット（以下、単に燃料電池ユニットと略す）、RE：電動ターボ冷凍機、RS：蒸気吸収冷凍機、RW：温水吸収冷凍機、RG：ガス吸収冷凍機、BG：ガスボイラ、RD：放熱器、EP：受電設備をそれぞれ表す。また、一点鎖線は電力、破線は都市ガス、二点鎖線は蒸気、実線は温水、点線は冷水の流れをそれぞれ表す。

このシステムでは、燃料電池ユニットによる発電と買電によって電力が供給され、その電力は地域の電力需要ならびにシステム内で消費される各種補機用などの電力に消費される。燃料電池ユニットが稼働している際に発生する排熱は、蒸気(324℃, 8 atg)、中温水(92℃)および低温水(48℃)として回収される。このうち、蒸気排熱の利用方法には次の二つのモードがある。一つは蒸気を改質器の高温排ガスとともに排ガスタービン発電機へ送り動力源として使用するモード(冬モード)であり、もう一つは蒸気を蒸気吸収冷凍機等により冷熱用に直接使用するモード(夏モード)である。中温水排熱は各需要の必要に応じて冷熱および温熱用に、低温水排熱は温熱用のみにそれぞれ利用される。燃料電池ユニットからの排熱が余剰となる場合には放熱器により廃棄される。また、冷熱需要は燃料電池ユニットからの排熱を利用する蒸気吸収冷凍機(夏モードの場合)と温水吸収冷凍機、さらに電動ターボ

冷凍機およびガス吸収冷凍機によって、温熱需要は排熱およびガスボイラによってそれぞれ賄われる。

なお、比較対象として取り上げるガスタービンCGSの機器構成は、図1における燃料電池ユニットをガスタービン熱電併給ユニット(以下、ガスタービン・ユニット)に置き換えたものである。ただし、ガスタービン・ユニットから回収される排熱は蒸気の形のみとする。したがって図中の燃料電池ユニットから出ている二本の温水の流れは存在しない。また、ガスタービンCGSの場合のみ、蒸気は熱交換器を介して温熱需要にも供給できるものとする。

3. 多目的最適計画問題

上記のようなシステムの導入計画に対して、経済性、省エネルギー性および環境保全性の複数の観点から合理的な設計案の決定を行うために、本研究では方法論として多目的最適化の考え方を導入した計画手法⁽⁵⁾を採用する。以下にこの手法に基づいた多目的最適容量計画問題について簡単に説明する。

3・1 多目的最適計画問題の定式化 未知変数は図1に示す各構成機器の容量や電力および都市ガスなどのユーティリティ最大契約量を表す設計変数ベクトル x と、各時間のエネルギー需要量に対応する機器運用方策に関連する制御変数ベクトル y_t, z_t とする。ここで、下付添字 t は離散化した各時間を表す。また、 y はエネルギー流量を表す連続変数ベクトルで、 z は運転・停止条件に対応する0-1整数変数ベクトルである。

最小化すべき目的関数として、経済性、省エネルギ

図1 加圧式リン酸型燃料電池CGSの機器構成

一性および環境保全性の観点から次の四つを取り上げる。すなわち、年間総経費、年間一次エネルギー消費量、年間NOx排出量および年間CO₂排出量である。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その従量料金の和として算定する。基本料金はユーティリティ最大契約量の関数として表すものとする。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から算定される。以上より第1の目的関数である年間総経費 J_1 は次式で表せる。

$$J_1 = F(\mathbf{x}) + \sum_t V_t(\mathbf{x}, \mathbf{y}_t, \mathbf{z}_t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F は年間設備費と年間基本料金との和であり、設計変数ベクトル $\mathbf{x}$ の関数として表される。関数 V_t は各時間あたりのユーティリティ従量料金を表す。 V_t 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、 $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}_t$, $\mathbf{z}_t$ の関数となる。なお、 $\sum_t$ は各時間についての総和を表す。

同様に第2、第3および第4の目的関数である年間一次エネルギー消費量 J_2 、年間NOx排出量 J_3 および年間CO₂排出量 J_4 はそれぞれ次のように求められる。

$$J_2 = \sum_t P_t(\mathbf{x}, \mathbf{y}_t, \mathbf{z}_t) \dots\dots\dots (2)$$

$$J_3 = \sum_t NO_t(\mathbf{x}, \mathbf{y}_t, \mathbf{z}_t) \dots\dots\dots (3)$$

$$J_4 = \sum_t CO_t(\mathbf{x}, \mathbf{y}_t, \mathbf{z}_t) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 P , NO および CO はそれぞれ各時間あたりの一次エネルギー消費量、NOx排出量およびCO₂排出量を表す。

制約条件としては、各エネルギー需要量に対して各機器の性能特性を表すエネルギーの入出力関係、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。ここで、各機器の入出力関係に関する性能特性値は容量の関数として表す。これらの制約条件式は各時間 t について、

$$C_t(\mathbf{x}, \mathbf{y}_t, \mathbf{z}_t) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

と表される。ここで、 C_t は制約条件式を表す関数からなるベクトルである。

3.2 多目的最適計画問題の解法 上記の四つの目的関数を含む多目的最適化問題を、ここでは重み付け法を用いて単一目的の最適化問題に変換し、重みを変化させながら最適化問題を解くことによって離散的にバレート最適集合解を求める。目的関数 J として次

の式を設定する。

$$J = w_1 \frac{J_1}{J_1^c} + w_2 \frac{J_2}{J_2^c} + w_3 \frac{J_3}{J_3^c} + w_4 \frac{J_4}{J_4^c} \left. \begin{array}{l} \dots\dots\dots (6) \\ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \end{array} \right\}$$

ここで、 $w_1 \sim w_4$ は年間総経費、年間一次エネルギー消費量、年間NOx排出量および年間CO₂排出量に対する各目的関数の重みをそれぞれ表す。また、 $J_1^c \sim J_4^c$ は燃料電池ユニットを含まない従来型のエネルギー供給システム(以下、従来システム)に対して、年間総経費の最小化のみを目的として最適化を行った場合の各目的関数の値をそれぞれ表す。式(6)のような無次元化を行うことにより、各目的関数の重みを単一の目的関数に十分に反映できる。

また、この最適化問題は、運用計画まで含んだ複雑かつ大規模な問題となるので、ここではその解法として機器規模最適計画法⁽⁶⁾を用いる。この解法では上位レベルの機器規模決定問題と下位レベルの機器運用方策決定問題の二つに分離し、両者の整合性をペナルティ法⁽⁶⁾によって有機的に保ちながら効率よく最適解を求める。上位レベルでは、供給すべきエネルギー需要量を満足するという式(5)に等価な制約条件の下で、式(6)の目的関数 J を最小化するように設計変数ベクトル $\mathbf{x}$ の最適値を探索する。この問題を一つの非線形計画問題として定式化し、その解法として逐次線形計画法を用いる。下位レベルでは探索の各段階で暫定的に与えられた設計変数ベクトル $\mathbf{x}$ を持つシステムに対して、式(5)の制約条件の下で式(6)の目的関数の最小化に最大限に寄与できるように、各時間ごとに運用方策に関連する制御変数ベクトル $\mathbf{y}_t$, $\mathbf{z}_t$ を算定する。この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⁽⁷⁾。

4. 計算事例

4.1 計算条件 燃料電池ユニットの導入地域として、熱需要密度が高いと思われる都市部の事務所ビル中心地域(以下、地点A)と集合住宅中心地域(以下、地点B)を取り上げる。各エネルギー需要量は、冬期、夏期および中間期の代表日と冬期ピーク日、夏期ピーク日の計5代表日に対して、1代表日につき12分割したものを推定した。図2に地点AおよびBの時間あたりのエネルギー需要量の変化を示す負荷累積曲線を示す。

電力および都市ガスの料金体系は表1に示すものをそれぞれ適用する。また、表2に各機器の代表的な性能特性値と初期設備費単価を示す。燃料電池ユニット

の初期設備費単価はパラメータとし、 α と表現する。なお、代表的な燃料電池ユニットおよびガスタービン・ユニットの性能特性を図3に示す。

年価法に基づく年間総経費の評価において、燃料電池セル部の機器耐用年数および残存価値率をそれぞれ

5年および0%，燃料電池周辺機器とその他の機器の耐用年数および残存価値率をそれぞれ15年および10%とし、年間利率はいずれも6%とする。また、年間一次エネルギー消費量の算出において、系統電源の効率は38.6%（低位発熱量換算）としている。年間CO₂排出量および年間NO_x排出量は表3に示す排出原単位にしたがうものとする。表3のNO_x排出原単位は、燃料電池ユニット、ガスタービン・ユニットおよびボイラーに対して、10ppm(O₂:7%), 70ppm(O₂:16%)および50ppm(O₂:0%)よりそれぞれ算出した。

図2 エネルギー需要量の負荷累積曲線

図3 代表的な燃料電池およびガスタービン・ユニットの性能特性

表1 電力および都市ガスの料金体系

Utility	Unit cost		
	Customer charge	Demand charge	Energy charge
Purchased electricity	—	1 780 yen/(kW・month)	11 yen/kWh
Town gas	226 000 yen/month	1 070 yen/(Nm ³ /h・month)	33 yen/Nm ³

表2 構成機器の代表的な性能特性値および初期設備費単価^{(8), (9)}

Equipment	Performance characteristic value		Capital unit cost
Pressurized phosphoric acid fuel cell cogeneration unit	Rated load(Summer mode)		α yen/kW
	Electrical generating efficiency	0.45*	
	Exhaust heat recovery efficiency (Steam)	0.09*	
	(High temperature hot water)	0.04*	
	(Low temperature hot water)	0.17*	
Gas turbine cogeneration unit	Rated load (when unit capacity is 3.9 MW)		200.0×10 ³ yen/kW
	Electrical generating efficiency	0.26*	
	Exhaust heat recovery efficiency	0.62*(Steam)	
Electric compression refrigerator	Coefficient of performance	5.00	33.1×10 ³ yen/(Mcal/h)
Steam absorption refrigerator	Coefficient of performance	1.20	33.1×10 ³ yen/(Mcal/h)
Single-stage absorption refrigerator	Coefficient of performance	0.70	49.6×10 ³ yen/(Mcal/h)
Gas-fired absorption refrigerator	Coefficient of performance	1.20	50.6×10 ³ yen/(Mcal/h)
Gas-fired boiler	Thermal efficiency	0.90	12.2×10 ³ yen/(Mcal/h)
Radiator	Electricity consumption rate	0.011 kW/(Mcal/h)	14.9×10 ³ yen/(Mcal/h)
Receiving device	—		50.2×10 ³ yen/kW

* LHV efficiency

表3 NO_xおよびCO₂排出原単位

Emission matter	Emission factor					
	Fuel cell unit		Gas turbine unit		Gas-fired boiler and absorption refrigerator (g/Mcal-fuel)	Purchased electricity (Thermal power) (g/kWh)
	Input base (g/Mcal-fuel)	Output base (g/kWh)	Input base (g/Mcal-fuel)	Output base (g/kWh)		
NO _x	0.035	0.067	0.60	1.97	0.091	0.46
CO ₂	236	444	236	778	236	550

4・2 パレート最適集合解の検討ケース 各目的関数間のトレードオフ関係を具体的に数値計算を行うことにより明かにする。ここでは、四つの目的関数の間のすべてのトレードオフ関係を求めるのではなく、経済性からの評価を中心とする以下の三つのケースについて検討する。

ケースP：年間総経費と年間一次エネルギー消費量の関係 ($0 \leq w_1 \leq 1; 0 \leq w_2 \leq 1; w_3 = w_4 = 0$)

ケースN：年間総経費と年間NO_x排出量の関係 ($0 \leq w_1 \leq 1; 0 \leq w_3 \leq 1; w_2 = w_4 = 0$)

ケースC：年間総経費と年間CO₂排出量の関係 ($0 \leq w_1 \leq 1; 0 \leq w_4 \leq 1; w_2 = w_3 = 0$)

各ケースにおいて年間総経費の重み w_1 を0から1まで0.2ごとに変化させることによって、トレードオフ関係を離散的パレート最適集合解として求める。なお、各ケースの計算では燃料電池ユニット初期設備費単価 α の今後の価格低減を予測して、25および50万円/kWとして検討する。

4・3 計算結果および考察

4・3・1 機器容量の変化 図4, 5に α が25万円/kWの場合の年間総経費の重み w_1 に対する各ケースの各機器最適容量の変化を地点A, Bについてそれぞれ示す。まず、図4の燃料電池ユニットに着目すると、その最適容量はケースPとCでは w_1 の値が約0.5を境に変化している。 w_1 の値を0.5より小さくする、すなわち計画目的として年間総経費の削減よりも年間一次エネルギー消費量や年間CO₂排出量の削減の方を重視すると、燃料電池ユニットの導入容量を大きくすることが最適であるという結果になっている。これに対してケースNでは、 w_1 の値を1より少し小さくする、すなわち年間NO_x排出量の削減を計画目的として少しでも考慮すれば、受電設備の容量を小さくして燃料電池ユニットの容量を大きくする結果となる。

以上より、省エネルギー性および環境安全性を考慮すると燃料電池ユニットの導入は促進されることがわかる。このことは特に年間NO_x排出量削減を計画目的として考慮に入れるケースNに顕著に現れている。

また、冷凍機の最適容量に着目すると、ケースPとCでは電動ターボ冷凍機とガス吸収冷凍機の大きさの

関係が w_1 の値が約0.5を境に入れ替わっている。すなわち、年間一次エネルギー消費量や年間CO₂排出量の削減を重視すると、電動ターボ冷凍機の導入容量が大きくなる結果となっている。これは、燃料電池ユニット容量の拡大と電動ターボ冷凍機の効率の高さに起因している。一方、ケースNではガス吸収冷凍機の最適容量は w_1 の値によってあまり変化しないが、電動ターボ冷凍機については w_1 の値が小さくなるにつれてその容量が大きくなっている。この結果は、 w_1 の値を小さくするにしたがって冷凍機の二重投資となることを意味するが、逆に言えば年間NO_x排出量を少なくするためには、冷熱供給において冷凍機の二重投資をして適材適所に使うことが必要であるということも示している。例えば、電力需要が少なく燃料電池ユニットからの電力を冷熱供給に利用できる場合には電動ターボ冷凍機を、そうでない場合にはガス吸収冷凍機を運転させるという運用方策を行うことによって年間NO_x排出量を削減することが可能となる。

図5の地点Bの場合でも基本的に同様の考察が成り立つ。ただし、 α が25万円/kWのときには、燃料電池ユニットは w_1 の値が1のときでも十分大きな容量が導入されているため、ケースPとCでは w_1 の値の減少による最適容量の変化はほとんどみられない。また、ケースPとCのガス吸収冷凍機の容量の変化については、少し異なる傾向を示している。なお、地点Bの需要の特徴から冷凍機よりもボイラの容量の方が大きくなっている。

次に α を変えた場合の各ケースにおける年間総経費の重み w_1 に対する燃料電池ユニットの最適容量の変化およびガスタービン・ユニットの最適容量の変化を地点A, Bについてそれぞれ図6, 7に示す。燃料電池ユニット最適容量の w_1 に対する変化は図4, 5と比較して α が50万円/kWとなった場合も基本的にはほぼ同様の傾向を示している。しかしながら、燃料電池ユニットの設備費が高いため w_1 が1のときに最適容量が小さくなっており、 α が25万円/kWの場合よりも w_1 の値が十分小さくならない限り最適容量は大きくならない。ガスタービン・ユニットの場合、各ケースとも w_1 の値を小さくするにつれて燃料電池ユニッ

図4 各機器最適容量の変化
(地点A, $\alpha = 250 \times 10^3$ yen/kW)

トの場合とは逆にその容量は減少している。これは、ガスタービン・ユニットは排熱量が多いため、大容量にした場合に廃棄してしまう熱が多くなるからである。また、NOx排出量も多いためケースNでは w_1 の値が1より小さい場合にはガスタービン・ユニットを導入しないという結果になっている。以上のように省エネルギー性および環境保全性を計画目的として考慮した場合には、ガスタービン・ユニットよりも燃料電池ユニットの方が有効であるということがわかる。

4.3.2 トレードオフ関係 最後に各目的関数間のトレードオフ関係について考察する。図8, 9はそれぞれ地点A, Bについて燃料電池CGSとガスタービンCGSの各ケースのトレードオフ関係を離散的パ

図5 各機器最適容量の変化
(地点B, $\alpha = 250 \times 10^3$ yen/kW)

レート最適集合解で表したものである。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。縦軸と横軸は従来システムに対する各目的関数の比率を表している。図中の数字は、 w_1 の値を表している。なお、ケースNのガスタービンCGSの場合、 w_1 の値が1のときにNOx排出量は地点AでもBでも従来システムの200%以上であるため省略している。

両図の各ケースにおいて対象としている二つの目的関数の間に互いに明瞭な競合関係が成り立っていることがわかる。まず、燃料電池CGSに対して α の値によってその競合関係がどのように変化しているのかについて考察する。両図において各ケースとも α が50万円/kWの場合よりも25万円/kWの場合の方が w_1 の

図6 燃料電池ユニットとガスタービン・ユニットの最適容量 (地点A)

図7 燃料電池ユニットとガスタービン・ユニットの最適容量 (地点B)

値による各目的関数比率の変化の範囲が小さくなっており、 α が小さいほど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十分減少させることができることがわかる。燃料電池は省エネルギー性および環境保全性に優れているため、 α の減少につれて燃料電池ユニットの導入される容量が大きくなると、経済性と同時に省エネルギー性および環境保全性も向上させることができるからである。この傾向は図9の地点Bの方で強く現れている。これは、図7をみてもわかるように、地点Bでは α が25万円/kWで w_1 の値が1のときにも十分大きな容量が導入されるからである。また、 α が25万円/kWの場合には、各ケースとも年間総経費が従来システムの値を越えることはほとんどな

く、省エネルギー性および環境保全性を考慮することは有効である。一方、 α が50万円/kWの場合には年間総経費の増大が著しく、省エネルギー性および環境保全性を重視する効果はほとんどない。

次に、ガスタービンCGSと比較すると、全体的に燃料電池CGSの方が省エネルギー性および環境保全性の面では優れていることがわかる。ケースPの場合、ガスタービンCGSでは従来システムに比較して約10%の削減であるのに対して、燃料電池CGSでは約20%削減できている。他のケースの場合でも燃料電池CGSの方が省エネルギー性および環境保全性を大幅に向上させることが可能である。さらに α が25万円/kWになると、燃料電池CGSは経済性でもガスター

図8 年間総経費と他の目的関数との間のトレードオフ関係 (地点A)

図9 年間総経費と他の目的関数との間のトレードオフ関係 (地点B)

ビンCGSよりも優る結果となる。以上のことは地点A、Bどちらの場合についても成り立っている。

5. 結 言

本研究では、加圧式リン酸型燃料電池の都市部におけるCGSへの適用に対して、多目的最適化の考え方を導入した最適容量計画手法にしたがって経済性、省エネルギー性および環境保全性の観点から検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 経済性、省エネルギー性および環境保全性の向上を計画目的として考慮した場合の最適な機器容量に対する知見を得た。例えば、省エネルギー性および環境保全性を計画目的として重視するにしたがって、燃料電池ユニットの最適容量は大きくなる、ガスタービン・ユニットの場合は逆に小さくした方がよいことなどがわかった。
- (2) 経済性と省エネルギー性および環境保全性の間のトレードオフ関係を明かにし、燃料電池CGSとガ

スタービンCGSについて比較することができた。本論文で採用した条件の下で経済性その他の評価指標との間には明瞭なトレードオフ関係が成立することが確認できた。

文 献

- (1) 燃料電池発電システム編集委員会編、燃料電池発電システム、(1992)、オーム社。
- (2) 福留・他、クリーンエネルギー、1-4(1992)、20。
- (3) Appleby, A. J., *Fuel Cell Handbook*, (1989) Hemisphere Publishing.
- (4) Matsumoto, Y., Yokoyama, R. and Ito, K., *Trans. ASME, J. Eng. for Gas Turbines and Power*, 116-1(1994), 8.
- (5) 横山・伊東、エネルギー・資源、15-3(1994)、73。
- (6) 横山・伊東・赤木、機論、56-522, C(1990)、519。
- (7) 伊東・横山、コージェネレーションの最適計画、(1990) 産業図書。
- (8) 日本ガス協会編、ガスエンジン(ガスタービン)トータルエネルギーシステム技術研究報告書、(1986)。
- (9) リン酸型燃料電池発電技術組合編、平成4年度都市エネルギーセンター等燃料電池技術開発最適導入調査共同研究成果報告書、(1993)。