

メタノール改質型燃料電池コジェネレーションシステムの寒冷地住宅への適用

小原 伸哉*・工藤 一彦**・岩瀬谷正男***・Khairul Anuar Bin Ismail****

Installed in the cold region houses of methanol reforming
fuel cell cogeneration system

Shinya OBARA, Kazuhiko KUDO, Masao IWASEYA and Khairul Anuar Bin Ismail

Abstract

Performance analysis and cost estimation are carried out for a co-generation system of solid high polymer film type fuel cell applied to a residential house. As the fuel, the fuel cell uses hydrogen which is generated by reforming and converting methanol. A removing system of carbon monoxide is incorporated after the reforming system. The system is uniquely designed to raise the fuel efficiency by changing the generated electricity by the cell to heat using electric heater for heat supply and reduces the fuel consumption of backup boiler. This concept shifts the operating point of the fuel cell system from partial-load condition to optimum operating condition, and the effectiveness is shown in the conditions of lower electricity demand and higher heat demand. Comparing the yearly cost of an averaged house in Hokkaido district, the energy cost of this system is shown to be 1.42 times as high as conventional systems in which co-generation system is not installed. This system becomes competitive when the price of methanol is reduced to 2/3 or 1/2.

Key Words : Waste Heat Recovery, Energy Saving, Optimal Control, Fuel Cell, Cogeneration System

1. はじめに

燃料電池及びディーゼルエンジンによる住宅用コジェネレーションシステム（以下CGSと表記する）を検討する。住宅用固体高分子膜型燃料電池（以下PEMFCと表記する）CGSに用いる燃料としては、都市ガスなどに含まれる炭化水素を、改質器で水素に転化して利

用する方法が有力である。これに対して貯蔵が容易で可搬性に優れるメタノール燃料（メタノール水溶液）を水蒸気改質して水素に転化するシステムについても多くのニーズが見込まれる。ただし、メタノールを触媒上で水蒸気改質したガス中には、数%の一酸化炭素が含まれており、これを燃料電池に投入すると電極触媒を被毒して発電を困難とする。そこで改質反応の後過程に変成反応部や一酸化炭素の燃焼反応部を設けて、一酸化炭素の濃度を数ppmにまで低減して燃料電池に投入することが必要となる。

前報⁽¹⁾で著者らは、灯油ディーゼルエンジンによる個別住宅用CGSの運用計画のアルゴリズムについて提案した。本稿では、このアルゴリズムに北海道地方のエネルギー需要パターンを適用し、メタノール水蒸気改質を伴うPEMFCの運転コストを最小化する運転動作について調査する。

2. おもな記号

C : コスト yen

* 機械工学科 助教授

** 北海道大学大学院 教授

*** 技術専門職員

**** 長岡技術科学大学

C_{Boiler} : ボイラ燃料単価 yen/kg

C_{Me} : メタノール燃料単価 yen/kg

E : 電力 kw

ΔE : 電力消費量 kw

H : 熱 kw

t_k : サンプル開始時刻 s

ギリシャ文字

α : 燃料の発熱量 kJs/kg

β : 反応に伴う熱の出入り kJsol

添字

CB : 触媒燃焼器

CGS : コジェネレーションシステム

CO : CO酸化部

DA : DC/ACコンバータ

Eng : 灯油ディーゼルエンジン

FS : 燃料電池スタック

Me : メタノール

Rad : ラジエータ

RE : 改質部

SH : 変成部

St : 蓄槽

VP : 蒸発部

W : 筐体,ダクト及び配管などの放熱要素

3. システムの基本的な構成

3.1 基本構成と動作 図1に個別住宅に導入することを想定した、PEMFCによる小型CGSの構成図を示す。また、図2は灯油エンジンによるCGSの構成図である。両図中の細かい破線は水道水系統、破線は電力系統、そして実線は物質及び熱エネルギー系統を示しており、矢印は物質またはエネルギーの流れ方向を示している。

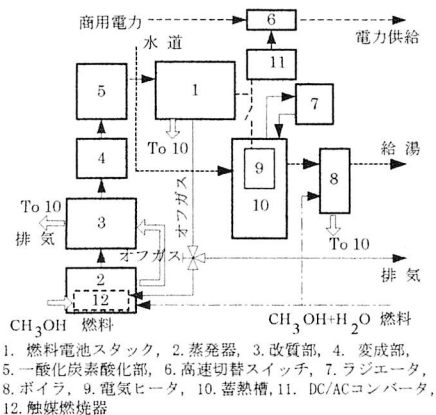


図-1 燃料電池 CGS 概要図

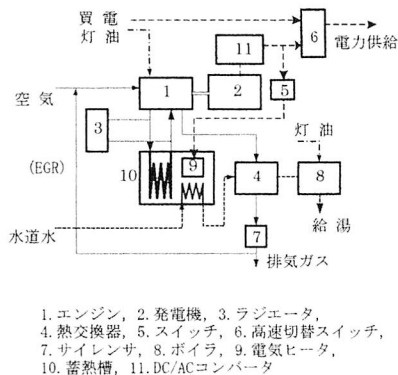


図-2 灯油エンジンCGS概要図

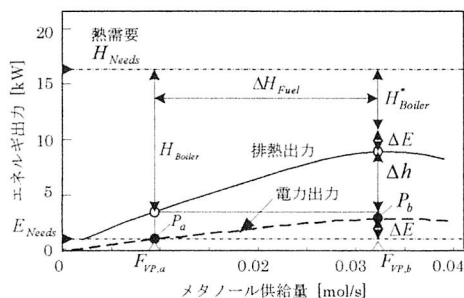


図-3 燃料電池セルスタックの出力特性

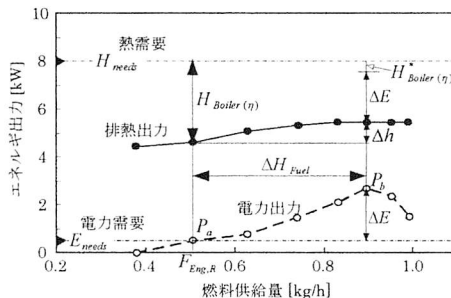


図-4 小型灯油エンジンの出力特性

本稿のシステムは、CGSによる電力系統と、商用電力（ユーティリティ）による系統とを切替器6で高速切替える構成としている。これは、CGSでのエネルギーコストとユーティリティによるコストとを比較して、安価となる側を選択できるようにすることと、システムのメンテナンス時の対応を想定したものである。CGSとユーティリティとの両系統同時の電力供給は行わず、売電については系統連携設備が高価となるために行わないこととする。なお、CGSでの発電容量は想定される最大電力需要量よりも大きく決定する。

図1の、蒸発部2に投入する改質用のメタノール燃料は、水素に改質されて一酸化炭素を除いた後に燃料電池スタック1に供給する。燃料電池ス

タックの改質ガス系統は大気圧よりも若干高くすることとし、オフガスについては触媒燃焼器12で熱に変換してメタノール燃料の気化に用いる。

ユーザー側で利用可能な熱は、触媒燃焼器12の燃焼高温ガスのうちで蒸発部2および改質部3で吸熱されたあとの残りとして、燃料電池スタック1の排熱、そして補助ボイラ8によるものとする。

一方、図2の灯油エンジンによるシステムでユーザーが利用できる熱は、エンジンの排気ガスによる排熱と補助ボイラによるものとする。

両システム共に排熱を蓄熱槽10に集め、熱媒体を介して水道水と熱交換する。ここで暖められた水道水を補助ボイラに送り、希望の温度に調整してからユーザー側に給湯する構成となっている。

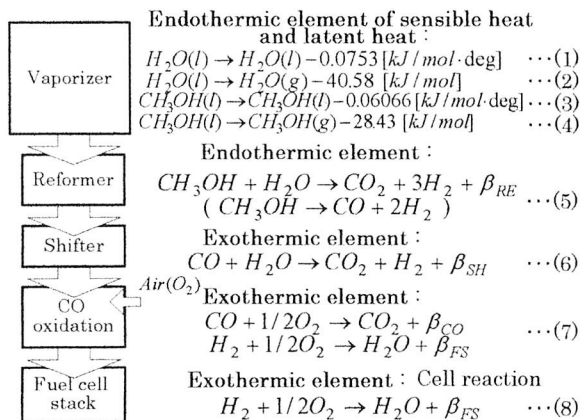


図-5 メタノール燃料改質器とPEMFCの反応系

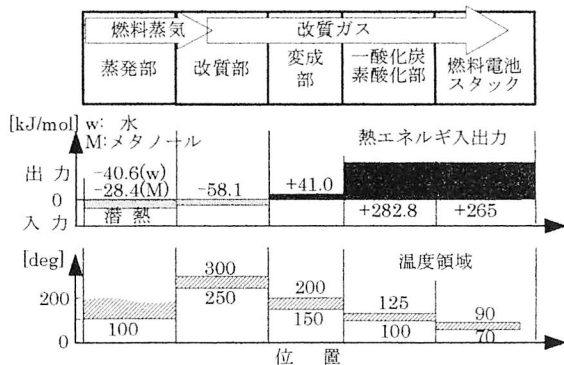


図-6 反応系の目標温度領域

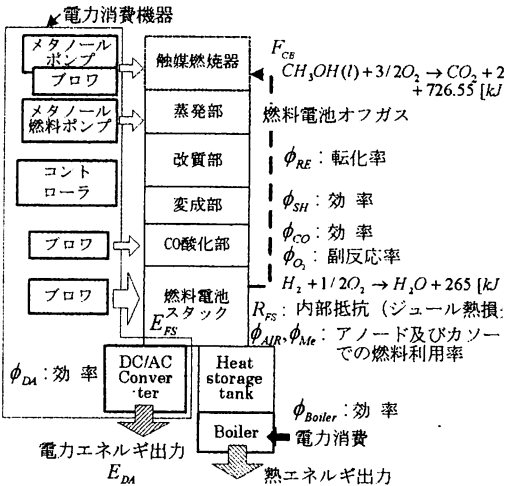


図7 燃料電池CGSのエネルギー及び物質の損失

ある時刻幅での電力及び熱需要についてのCGSの運転コストは、改質器（本稿では、図1の蒸発部2、改質部3、変成部4そしてCO酸化部5をまとめて改質器と称することとする）と補助ボイラの運転で消費するメタノール燃料量から計算する。一方、エンジンシステムの運転コストについては、エンジンおよび補助ボイラの運転で消費する燃料量から計算する。エネルギー供給に関するトータルでのコストは、各々の燃料コストとユーティリティによる供給コストとを加算して求める。

3.2 シミュレーションモデル 図3及び4に、シミュレーションに用いるPEMFCと灯油エンジンの電力及び熱出力のモデルを示す。PEMFCのモデルは、メーカーで開発中の3kW発電用試作機での平均的なデータを使用している。エンジンについては、実測値である。これらのPEMFCとエンジンの主な仕様を、表1及び2に示す。エンジンシCGSの詳細については、文献(1)で述べていることから、以下に、PEMFCを中心に述べることにする。

3.3 システムの損失 図5に、改質器及び燃料電池スタックでの反応式と熱の授受関係について

表-1 燃料電池CGSの主な仕様

燃料電池のタイプ	プロトン固体高分子膜型
燃料	水/メタノール=1.4/1.0(モル比)
改質のタイプ	メタノール水蒸気改質型
電力出力	3kW(セルスタック出力)
熱出力	8.5kW(セルスタック出力)

表-2 CGS用小型灯油エンジンの主な仕様

エンジン形式	垂直縦型4サイクルディーゼル
気筒数	2気筒
排気量	451cc
燃焼室形式	特殊渦室式
圧縮比	24.5
燃料	灯油
サイズ	369×385×485mm
乾燥重量	60kgf

示す。また、図6に、各反応場での目標温度領域と熱の授受関係を示す。蒸発及び改質については吸熱反応であり、その他の変成、CO酸化、および電池は発熱反応である。蒸発部で気化したメタノールと水を300℃近傍迄加熱して改質を行い、その後はカスケード的に各反応要素での目標温度をたどって、燃料電池出口では70~90℃のオフガスとなる。

図7は筐体表面やダクト・配管からの放熱を除いた、各要素でのエネルギー及び物質の損失についてまとめたものである。蒸発部及び改質部での熱供給に関しては、スタート時及び運転中に燃料電池スタックのオフガスを燃焼しただけでは熱量が不足するときに、メタノールを触媒燃焼器に供給(F_{CB})して熱源とする。変成部とCO酸化部での発熱については放熱する。改質部でのメタノールから水素への転化率を ϕ_{RE} とし、ボイラの熱効率を ϕ_{Boiler} とする。電力を消費する要素としては、触媒燃焼、CO酸化そして燃料電池でのカソード反応の酸素を供給する送風機、メタノール燃料ポンプ、触媒燃焼用メタノールポンプ、コントローラ及びボイラである。化学エネルギーが熱エネルギーに変換される損失としてはCO酸化部で生じる水素燃焼(ϕ_{O_2})があり、熱に変換されるものとしてはPEMFCでの電気抵抗(R_{FS})によるジュール損失がある。さらに、電極での濃度過電圧(ϕ_{Air} , ϕ_{Me})やDC/ACコンバータでの電力損失($1-\phi_{DA}$)がある。

CO酸化部では、水素リッチの状態ではCOだけを選択して酸化することが理想的ではあるが、実際には発熱を伴う若干の水素燃焼を生じる。本稿では、燃料電池スタック入口部でのCO濃度は10ppm以下になるように、CO酸化部での温度やSV値は適切に管理されているものとする。

3.4 エネルギー収支式と目的関数 サンプリング時刻 t_k から Δt の間での、図1に示したシステムのエネルギー収支を式(9)及び(10)に示す。電力に関する収支式

$$\begin{aligned} &\alpha_{Me} \cdot F_{VP,t_k} + E_{Utility,t_k} \\ &= E_{FS,t_k} + \Delta E_{Boiler,t_k} + \Delta E_{Controller,t_k} + \Delta E_{DA,t_k} \\ &\quad + \sum_{n=1}^{Pump} \Delta E_{Pump,n,t_k} + \sum_{m=1}^{Blower} \Delta E_{Blower,m,t_k} \end{aligned} \tag{9}$$

熱に関する収支式

$$\begin{aligned} &\alpha_{Me} \cdot F_{CB,t_k} / \phi_{CB} + \alpha_{Me} \cdot F_{Boiler,t_k} / \phi_{Boiler} + H_{St,t_k} \\ &= H_{CB,t_k} + H_{Boiler,t_k} + H_{Rad,t_k} + H_{REFORMER,t_k} + H_{w,loss,t_k} + H_{DA,t_k} \end{aligned} \tag{10}$$

上式(9)及び(10)の左辺は系に入力するエネルギー量で、右辺は系から出力するエネルギー量を表している。

エネルギーコストを最小とするような運用計画について探索を行う場合には、目的関数 J_c を、運転コストを1日間にわたって積算するような式(11)で与える。

$$J_c = \sum_{k=0}^{N-1} C_{CGS,t_k} \tag{11}$$

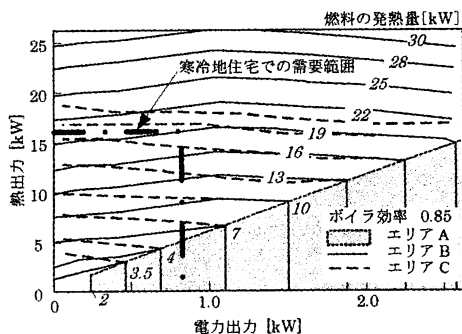


図-8 システムからの熱及び電力の出力

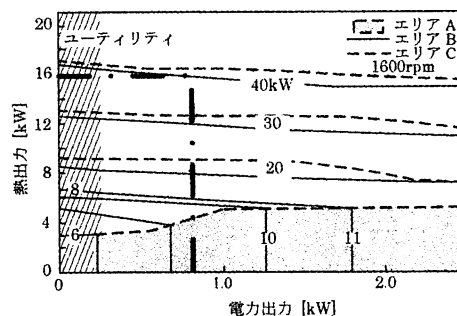


図-9 小型エンジンCGSでの電力及び熱出力

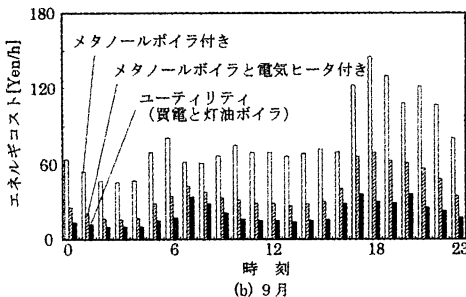
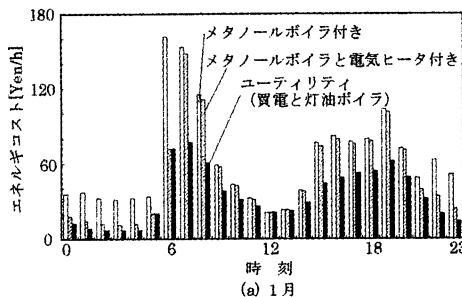


図-10 PEMFCによるCGSの運転コスト

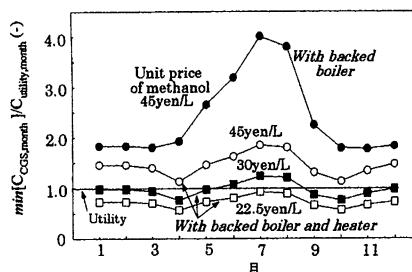


図-11 燃料電池CGSとユーティリティとの運転コスト比較

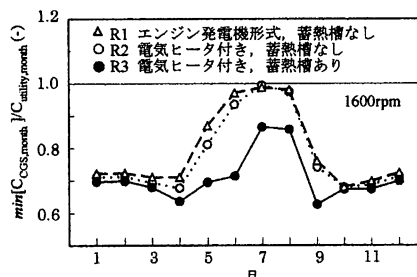


図-12 灯油ディーゼルエンジンCGSとユーティリティとの運転コスト比較

4. シミュレーションの結果

図8及び9は、PEMFCと灯油エンジンCGSでの、燃料消費量から計算した発熱量を変数としたときの、電力及び熱出力の結果である。図中のエリアAとは、燃料電池及びエンジン単独での運転動作で、エリアBとは、Aの動作にボイラによる補助加熱を付加したもの、そしてエリアCとは、Bの動作に、発電した電力の一部を電気ヒータで熱変換する動作を示している。

図10は各月の商用エネルギーによるエネルギーコストと、PEMFCによるCGSのエネルギー供給コストを比較した結果である。図11及び12は、PEMFC及びエンジンによるCGSの運転コストと、従来のエネルギーコストを比較した結果である。燃料電池CGSについては、メタノール単価を変数にしてまとめている。これによると、22.5yen/Lで従来の方式よりも有利となる。

5. 結 言

メタノール水蒸気改質を伴う固体高分子膜型燃料電池システム、及び灯油エンジンによる個別住宅でのCGSに、北海道地方のエネルギー需要パ

ターンを適用してシミュレーションを行い、以下の結果を得た。

- (1) 年間を通じた従来のエネルギー機器による供給コストに対して、PEMFCによるCGSのコスト比は1.4~2.2である。
- (2) メタノール水蒸気改質型燃料電池CGSでは、メタノールの単価が1/2~2/3になると、従来のエネルギー機器とエネルギーコストの点で競争力が生じる。
- (3) 灯油エンジンCGSでは、年間を通じたエネルギーコストの削減率は、従来方式によるエネルギー供給コストに比べて25~30%程度と見込まれる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、株式会社ホクスイ設計コンサルから多大なるご支援をいただきました。記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- (1) 小原伸哉ほか：部分負荷および負荷変動を考慮した住宅用コージェネレーションシステムの検討, 機論, 67-655, B (2001), pp.817~825.

(平成14年11月26日受理)