

## 【研究報告】

C-2

バイオ合成ガスを用いる SOFC—マイクロガスタービン  
ハイブリッドシステムのシミュレーションとエクセルギー解析

Suranat WONGCHANAPAI, 岩井 裕, 齋藤 元浩, \*吉田 英生 (京都大学)

Simulation and Exergy Analysis of Solid Oxide Fuel Cell-Micro Gas Turbine  
Hybrid System Utilizing Biosyngas

Suranat WONGCHANAPAI, Hiroshi IWAI, Motohiro SAITO and \*Hideo YOSHIDA (Kyoto Univ.)

## ABSTRACT

In pursuing of green power energy generation, fuel cell energy generation systems are one of the most promising applications for biomass utilization. In particular, the capability of utilizing a wide spectrum of fuels (natural gas, coal gas, landfill gas and biosyngas), makes high temperature solid oxide fuel cells (SOFC) the most suitable candidate for utilizing biomass as energy source. This paper presents a mathematical model developed in order to simulate 300kW-class biosyngas based SOFC-MGT (micro gas turbine) hybrid system. This study consists of two parts. The first part focuses on the development of one-dimensional simulation model for the co-flow and counter-flow types of direct internal reforming planar SOFC. In the second part, the developed one-dimensional model is applied to a SOFC-MGT hybrid system fuelled by biosyngas. Energy and exergy analysis of SOFC-MGT hybrid system are performed based on three typical biosyngas compositions: air-, oxygen- and steam-blown gasification processes.

**Key words:** Micro gas turbine, Solid oxide fuel cell, Hybrid system, Biosyngas, Exergy analysis

## 1. はじめに

発電出力が 10~100kW クラスで高温作動の固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell : SOFC) はマイクロガスタービン (Micro Gas Turbine : MGT) との相性がよくハイブリッドシステムとして分散電源への用途が期待されている<sup>1)</sup>。SOFC の長所の一つは、水素以外に一酸化炭素なども発電に利用できるため多様な燃料が利用できることで、そのような燃料の一つとしてバイオ合成ガス燃料を用いるシステムが考えられる<sup>2~4)</sup>。本研究ではシステムのエクセルギー解析を精度よく行うことを目的として、SOFC における流れ方向分布を考慮した 1 次元モデルを用いたシミュレーションを行った。

## 2. シミュレーションモデル

## 2.1 SOFC の 1 次元モデル

高温作動の SOFC では、改質器を特に設けなくてもセル内部の燃料極上で炭化水素を直接的に改質する、いわゆる直接内部改質 (Direct Internal Reforming : DIR) が可能である。そこで本研究では図 1 に示すような流路で構成される SOFC を対象とし、空気極での流れ方向の組み合わせとして、並流式と向流式の二つの場合を考える。

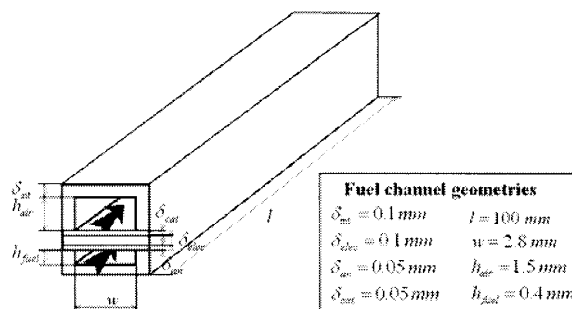
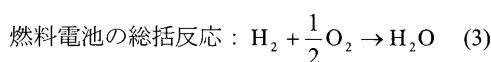
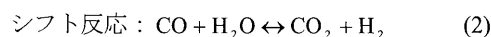
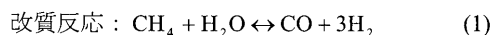


Fig. 1 One-dimensional SOFC Model

まず、反応としては以下を考える。



Nernst の開回路電圧は次式で与えられる。

$$E_{H_2} = \frac{\Delta G^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \cdot \ln \left( \frac{\left( \frac{P_{H_2O}}{P_0} \right) \cdot \left( \frac{P_{O_2}}{P_0} \right)^{1/2}}{\left( \frac{P_{H_2}}{P_0} \right)} \right) \quad (4)$$

系全体の温度分布を求めるために、以下のエネルギー式を考える。

空気流路におけるエネルギー（添字  $a$ ）

$$0 = \rho_a C_{pa} Vol_a u_a \frac{\partial T_a}{\partial x} - h_a A_{s,air} (T_s - T_a) \quad (5)$$

固体（セル）部分におけるエネルギー式（添字  $s$ ）

$$Q_{source,s} = \lambda_s Vol_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + h_a A_{s,an} (T_s - T_a) + h_a A_{s,cat} (T_s - T_f) \quad (6)$$

燃料流路におけるエネルギー式（添字  $f$ ）

$$0 = \rho_f C_{pf} u_f Vol_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - h_f A_{s,fuel} (T_s - T_f) + Q_{source,f} \quad (7)$$

### 2.2 SOFC-MGT ハイブリッドシステム

対象とするハイブリッドシステムを図2に示す。SOFCは1次元モデルを採用したが、MGTの方は単段の半径流タービンを想定しているので、簡略化した扱いをする。圧縮機で加圧された空気と燃料はまず SOFC に導き、SOFCでの未燃分と追加燃料を燃焼器で燃焼させてMGTで膨張、排気は再生熱交換器で圧縮空気の予熱に用いる。

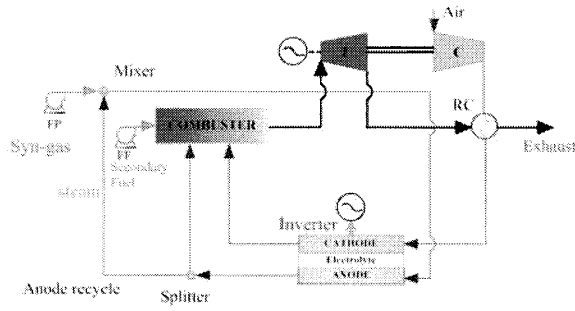


Fig. 2 SOFC-MGT Hybrid System

### 2.3 エクセルギーと効率の定義

物理エクセルギーはモル流量  $n_i$ 、モル分率  $y_i$  を用いて式(8)、(9)で表される

$$Ex_{ph} = \sum_i n_i [(h - h_0) - T_0 (s - s_0)]_i \quad (8)$$

$$Ex_{ch} = \left( \sum_i n_i \right) (\mu_{i,0} - \mu_{i,\infty}) \quad (9)$$

$$= \left( \sum_i n_i \right) \left( \sum_i y_i \cdot ex_{ch,i} + RT_0 \sum_i y_i \ln(y_i) \right)$$

エネルギー効率は SOFC 部分とシステム全体に対して次式のように定義される<sup>5)</sup>。

$$\eta_{i,SOFC} = \frac{P_{SOFC}}{\sum_{CH_4,CO,H_2} (m_{fuel} \times LHV)_{in}} \quad (10)$$

$$\eta_{i,SYS} = \frac{P_{SOFC} + P_{GT}}{\sum_{CH_4,CO,H_2} (m_{fuel} \times LHV)_{in}} \quad (11)$$

同様に、エクセルギー効率は SOFC 部分とシステム全体

に対して次式のように定義される。

$$\eta_{ii,SOFC} = \frac{P_{SOFC}}{\sum_{CH_4,CO,H_2} (Ex_{ch,fuel})_{in}} \quad (12)$$

$$\eta_{ii,SYS} = \frac{P_{SOFC} + P_{GT}}{\sum_{CH_4,CO,H_2} (Ex_{ch,fuel})_{in}} \quad (13)$$

エクセルギー比として、系に流入するエクセルギーに対する発電量の割合を次式で定義する<sup>6)</sup>。

$$\psi_{SOFC} = \frac{P_{SOFC}}{\sum (Ex_{fuel} + Ex_{air})_{in} - \sum (Ex_{fuel} + Ex_{air})_{out}} \quad (14)$$

$$\psi_{SYS} = \frac{P_{SOFC} + P_{GT}}{\sum (Ex_{fuel})_{in} - \sum (Ex_{fuel} + Ex_{air})_{out}} \quad (15)$$

## 3. 結果と考察

### 3.1 SOFCにおける1次元シミュレーション

計算条件を表1と表2に示す。バイオ合成ガスは蒸気吹きで水素・一酸化炭素・二酸化炭素・メタンを含む。

図3に空気・固体・燃料の温度を二つの流れに対して示す。左側の燃料入口付近にピークをもつ温度分布が向流式、右側の燃料出口に向けて概ね単調増加する温度分布が並流式で、顕著に異なる分布となる。(なお燃料と固体温度はほとんど重なっている。)いずれの場合も、燃料入口付近で燃料の温度が落ち込むのは、直接内部改質が吸熱反応であるためであり、この熱は局所的には相対的に高温の空気側から与えられている。一方、一旦水素が生成されて発電が進み出すと燃料側の発熱反応のため燃料側が相対的に高温になる。全体的には並流式の方が平坦な分布となっている。

図4に電流分布を示す。向流式の場合の燃料入口付近の大きな電流は高温かつ水素の高濃度の結果である。並流式の場合は、電流の分布も平坦である。

Table 1 Inlet Molar Fraction of Biosyngas and Air

Species	Fuel (Steam-blown)	Air
CH <sub>4</sub>	0.10	0
CO	0.25	0
CO <sub>2</sub>	0.20	0
H <sub>2</sub>	0.40	0
O <sub>2</sub>	0	0.21
N <sub>2</sub>	0.05	0.79
LHV (kJ/kg)	12624	

Table 2 Inlet Condition of SOFC

Fuel inlet pressure	5 bar
Air inlet pressure	5 bar
Fuel inlet temperature	1073 K
Air inlet temperature	1073 K
Fuel utilization rate	0.8
S/C	2.5

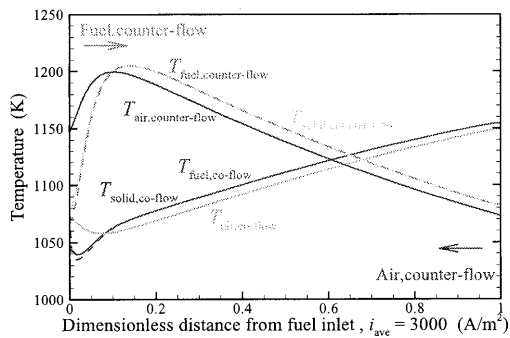


Fig. 3 Temperature distributions in SOFC

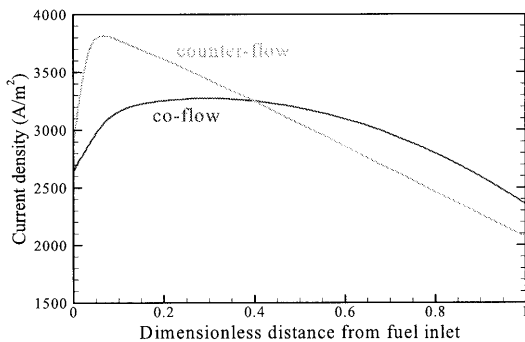


Fig. 4 Current Density distribution in SOFC

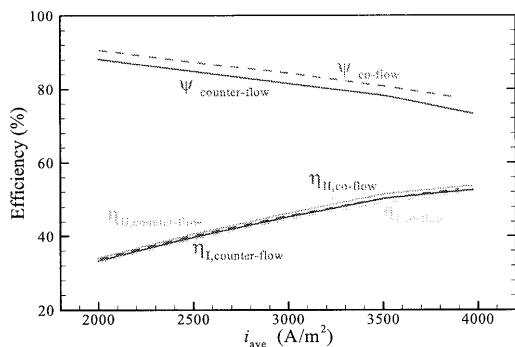


Fig. 5 Comparison of energetic, exergetic and rational efficiencies vs current density in SOFC

図5にエネルギー効率  $\eta_{I,SOFC}$  (式(10))・エクセルギー効率  $\eta_{II,SOFC}$  (式(12)), エクセルギー比  $\psi_{SOFC}$  (式(14))を示す。流入したエネルギーあるいはエクセルギーを分母とする効率(式(10)(12))では並流式の方が1%程度高いが、流出するエクセルギーも考慮したエクセルギー比(式(14))では並流式の方が2.5%程度大きく、いずれにせよ並流式にメリットがあることがわかる。

### 3.2 SOFC-MGT ハイブリッドシステムの性能解析

前節の結果から、本節では並流式SOFCを対象としてMGTとのハイブリッドシステムを考える。表3に運転条件をまとめて示す。性能を最適化するとSOFCとMGTの出力内訳は図6のようになる。MGTの発電量は二次的

Table3 Operating Parameter for SOFC-MGT Hybrid System

Electrical output (kW)	300-350
Biosyngas pressure available(bar)	3
Air inlet temperature (K)	298
Steam carbon ratio (-)	2.-2.5
Anode gas recycle ratio (-)	0.7-0.9
Turbine inlet temperature (K)	1273-1473
Fuel pre-heater temperature effectiveness (%)	10~30
Recuperator temperature effectiveness (%)	75
Compressor adiabatic efficiency (%)	75
Turbine adiabatic efficiency (%)	80
Turbine mechanical efficiency (%)	90
Fuel feeder adiabatic efficiency (%)	75
Fuel pump adiabatic efficiency (%)	75
SOFC pressure drop (Air side) (%)	2
SOFC pressure drop (Fuel side) (%)	2
Recuperator pressure drop (Air side) (%)	4
Recuperator pressure drop (Gas side) (%)	2
Combustor pressure drop (Air side) (%)	2
Mixer pressure drop (%)	2
Separator pressure drop (%)	2
Inverter efficiency (%)	95
Generator efficiency (%)	95

Table 4 BioSyngas Compositions

Composition (mole frac.)	B1 (Steam-blown)	B2 (Oxygen-blown)	B3 (Air-blown)
CH <sub>4</sub>	10	10	5
H <sub>2</sub>	40	40	20
CO	25	10	20
CO <sub>2</sub>	20	35	5
N <sub>2</sub>	5	5	50
LHV [kJ/kg]	12624	9329	2200

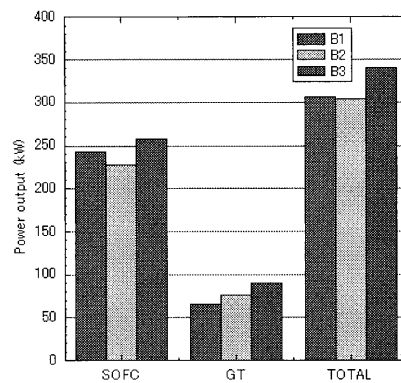


Fig.6 Power Output by SOFC and MGT

なものとなるが、SOFCの下流には必ず使い切れなかった燃料成分が残ることもありMGTは効果的に利用できている。また圧縮機によりSOFCの作動圧力が増加することもプラス要因である。

表4にバイオ合成ガスの成分を示す。蒸気吹き、酸素吹き、空気吹きに対して3ケースを考え、これらの順に

発熱量は減少する。

図7にシステム中の要素別にエクセルギー損失を示す。まず一般的にGTでの損失は小さいが、これはシステム全体に占めるGTの割合が小さいことが主因である。システムの中では、言うまでもなくSOFCと燃焼器でエクセルギー損失が大きい。さらに細かく見ると、発熱量が低い空気吹き燃料ではSOFCでのエクセルギー損失が大きい。また発熱量が高い燃料ほど燃焼器での損失が小さくなるのは、前段のSOFCでの反応が進むためではないかと考えられる。

図8にシステム全体のエネルギー効率、エクセルギー効率、エクセルギー比を示す。発熱量が高いほど、これらの値も高いことは当然であるが、いちばん発熱量が小さい空気吹きの場合でも40%前後の値になっていることは本ハイブリッドシステムの高性能を示すものである。

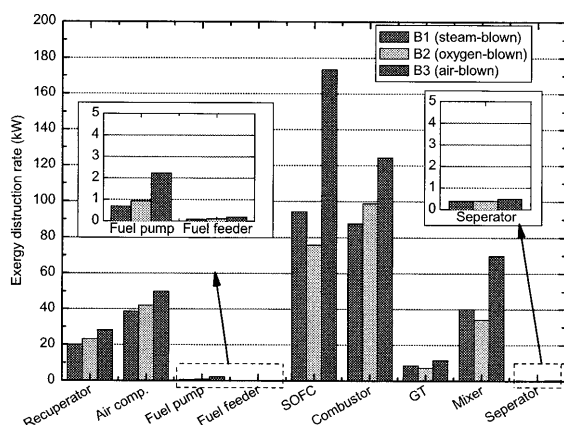


Fig 7 Local Exergy Destruction Rates

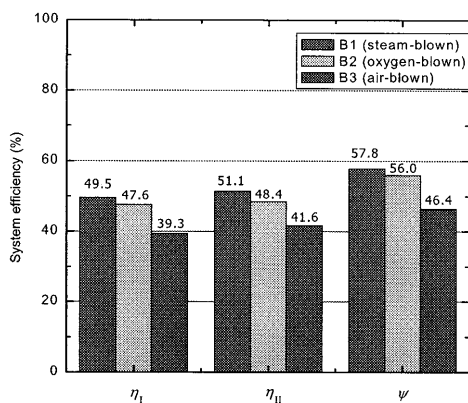


Fig. 8 System efficiencies

#### 4. むすび

SOFC-MGT ハイブリッドシステムにバイオ合成燃料を用いた場合を対象として、SOFC1 次元モデルを考慮したエクセルギー解析を行った。SOFC と組み合わせると、MGT の発電量は二次的なものとなるが、MGT は不可欠の要素として位置づけられるものである。その結果、

空気吹きの LHV = 2200 kJ/kg の発熱量の燃料でも 40% 程度のエクセルギー効率となることが明らかとなった。

#### 記号表

$A$	面積 [m <sup>2</sup> ]
$C_P$	定圧比熱 [kJ/kg·K]
$E$	活性化エネルギー [kJ/kmol]
$E$	電圧 [V]
$Ex$	エクセルギー流束 [kW]
$F$	ファラデー定数
$h$	熱伝達率 [kW/m <sup>2</sup> ·K]
$h$	エンタルピー (モル当たり) [kJ/kmol]
$m$	質量流量 [kg/s]
$Nu$	ヌセルト数
$n$	モル流量 [kmol/s]
$P$	電力 [kW]
$p$	分圧 [Pa あるいは bar]
$Q$	熱流量 [kW]
$R$	ガス定数 [kJ/(kg·K)]
$s$	エントロピー (モル当たり) [kJ/(K·kmol)]
$T$	温度 [K]
$u$	流速 [m/s]
$Vol$	体積 [m <sup>3</sup> ]
$y$	モル分率
$\lambda$	熱伝導率 [kW/(m·K)]
$\eta_I$	エネルギー効率
$\eta_{II}$	エクセルギー効率
$\psi$	エクセルギー比
$\mu$	化学ポテンシャル [kJ/kmol]
$\rho$	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]

#### 参考文献

- 1) Saito, M., Yoshida, H., Iwamoto, Y., Ueda, A.: An Analysis of a Micro Cogeneration System Composed of Solid Oxide Fuel Cell, Microturbine, and H<sub>2</sub>O/LiBr Absorption Refrigerator, J. of Thermal Science and Technology, Vol.2 No.2 (2007) pp.168-179.
- 2) Sucipta, M., Kimijima, S., Suzuki, K.: Performance Analysis of the SOFC-MGT Hybrid System with Gasified Biomass Fuel, J. of Power Sources, Vol.174, No.1 (2007), 124-135.
- 3) Sucipta, M., Kimijima, K., Suzuki, K.: Solid Oxide Fuel Cell-Micro Gas Turbine Hybrid System Using Natural Gas Mixed with Biomass Gasified Fuel, J. Electrochem. Soc., Vol.155, No.3 (2008) pp. B258-B263.
- 4) Sucipta, M., Kimijima, S., Song, T.W., Suzuki, K.: Biomass Solid Oxide Fuel Cell-Microgas Turbine Hybrid System: Effect of Fuel Composition, J. Fuel Cell Sci. Technol., Vol.5, No.4, (2008) 041006.
- 5) Shukuya M.: Introduction to the Concept of Exergy -for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems, IEA ANNEX37, (2002).
- 6) Kotas, T.J.: The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, 2-nd edition, Krieger Publishing Company, USA (1995).