低温型と高温型を直列配置した平板型 SOFC 発電のサイクル解析

学生員 大庭 貴弘* 学生員 竹澤 伸也*
 正 員 荒木 拓人* 正 員 恩田 和夫*
 非会員 榊 嘉範**

Cycle Analysis of Two-stage Planar SOFC Power Generation by Series Connection of Low and High Temperature SOFCs

Takahiro Ohba*, Student Member, Shinya Takezawa*, Student Member, Takuto Araki*, Member, Kazuo Onda*, Member,
Yoshinori Sakaki**, Non-member

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) can be composed by solid components, and high power generation efficiency of a whole cycle is obtained by using high temperature exhaust heat for fuel reforming and bottoming power generation. Recently, the low temperature SOFC, which runs in the temperature range of around 600°C or above, has been developed with the high efficiency of power generation. On the other hand, multi-stage power generation system has been proposed by the United States DOE. In this study, a power generation system of two-stage SOFC by series connection of low and high temperature SOFCs has been studied. Overpotential data for low-temperature SOFC used in this study are based on recent published data, and those for high temperature SOFC are based on our previous study. The analytical results show the two-stage SOFC power generation efficiency of 50.3% and the total power generation efficiency of 56.1% under a standard operating condition.

キーワード：2 段直列 SOFC，低温型 SOFC，ランタンガレート，高温型 SOFC，サイクル計算

Keywords: two-stage SOFC, low temperature SOFC, lanthanum gallate, high temperature SOFC, cycle analysis

1. まえがき

固体酸化物燃料電池（SOFC）は電池全体を固体で構成することができ、発電と同時に得られる高温排熱を燃料改質やボトムング発電、燃料や空気の再生過熱等に利用でき、サイクル全体として高い総合発電効率が得られる。これまでの Y_2O_3 安定化 ZrO_2 を電解質とする高温形 SOFC 以外に、最近、約 600°C から運転できるランタンガレート系などを電解質とする低温型 SOFC が優れた発電特性を示し⁽¹⁾、SOFC の温度範囲が拡大している。SOFC-ガスタービン複合発電でボトムング発電に使われるガスタービンより燃料電池の方が発電効率は高いので、SOFC 運転温度範囲が拡大すると、システム発電効率も向上すると期待される。米

国エネルギー省は燃料や空気の再生加熱の手間を減らし、電池の運転温度範囲を広げるため、燃料電池を 5 段直列配置したマルチステージ発電システムを提案し、システム解析の結果 80% 近い発電効率が得られると報告している⁽²⁾。一方、筆者らはこれまで高温型 SOFC とガスタービンを複合した複合サイクルを、過電圧などの損失を考慮して検討してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。そこで、本研究では、低温型と高温型の SOFC を 2 段直列配置する平板型 SOFC を提案すると共に、現在手に入る低温型 SOFC の過電圧などのデータ⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾を調べ、2 段 SOFC とガスタービンを組み合わせた数百 kW 級複合発電が実際にどの程度、サイクル発電効率を改善できるか推定した。

2. 低温と高温用の平板型 SOFC

2・1 セル構成 図 1 に本研究で検討した平行平板型の単セル構成を示す。低温型と高温型共に単セルは図 1 のような平行平板型で類似したサイズを仮定した。低温型と高温型それぞれの電極・電解質の材料と厚さを表 1 に示す。低温型のインタコネクタは SUS，高温型のインタコネクタは $La_{1-x}Sr_xCrO_3$ とした。低温型 SOFC の物性値はランタンガレート系電解質を用いた SOFC の研究⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾を参考に、

* 豊橋技術科学大学 電気電子工学系
〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
Electrical and electronic Eng., Toyohashi University of Technology
1-1, Hibarigaoka, Tenpaku, Toyohashi 441-8580

** 中部電力（株）電力技術研究所
〒459-8522 名古屋市緑区大高町北関山 20-1
Electric Power Research & Development Center, Chubu Electric Power Co. Inc.
20-1, Kitasekiyama, Ohdaka, Midori-ku, Nagoya 459-8522

高温型は既報⁽³⁾⁽⁴⁾の値を用いた。表2、表3にそれぞれの物性値を示す。ただし、温度を T_e として低・高温の電解質の抵抗率 ρ_{e_low} ⁽⁸⁾ [$\Omega \cdot m$]と ρ_{e_high} ⁽⁹⁾ [$\Omega \cdot m$]は(1)式と(2)式とし、低温型で公表されていない物性値については高温型と同じと仮定して計算した。

$$\rho_{e_low} = 0.03997 + 0.58731 * \exp\left(-\frac{T_e - 823.15}{86.47858}\right) \dots\dots\dots(1)$$

$$\rho_{e_high} = 3.61 * 10^{-5} * \exp\left(\frac{10092}{T_e}\right) \dots\dots\dots(2)$$

2・2 セルの性能計算 低温型・高温型共に電荷、質量、エネルギーの保存式を電池の等価回路と共にガス流れ方向に差分化し、それぞれコントロールボリューム法により濃度、電流密度、電圧などのセル分布を数値解析した⁽³⁾⁽⁴⁾。計算は、低温・高温型共にセルサイズ、平均電流密度、総合

燃料・空気利用率などの運転条件を決め、低温型入口ガス組成を決める。次に低温側セルの平均温度（流れ方向に電解質温度を平均した温度）をパラメータとし、まず低温側から計算を開始し、電流と温度を収束させる。得られた低温型出口のガス組成と温度を入口条件として、高温型の計算を低温型と同様に行う。従って、高温型のセル平均温度は低温型セル平均温度と運転条件によって決まる。低温型の活性化過電圧 V_{act_low} は、温度効果やアノードとカソードを分離した形で整理されていないため、両者の合計を公表データ⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾より過電圧抵抗一定とする(3)式で、高温型の V_{act_high} は既報⁽³⁾⁽⁴⁾より(4)式で求めた。

$$V_{act_low} = \frac{5.0 * 10^{-5}}{w * dx} * I_e \dots\dots\dots(3)$$

$$i_e = i_0 \left\{ \exp\left(\frac{2FV_{act_high}}{RT_e}\right) - \exp\left(\frac{-(2or1)FV_{act_high}}{RT_e}\right) \right\} \dots\dots\dots(4)$$

図1 単セル構成

Fig. 1. Configuration of a unit cell.

ここで w はセル幅、 dx は分割流れ方向長さ、 F はファラデー定数、 R は気体定数、 T_e は電解質温度、 I_e は電解質を流れる電流、 i_e は電解質を流れる電流密度、 i_0 は交換電流密度であり酸素分圧の関数である。既報⁽³⁾では高温型SOFCの温度上昇を抑えるためセル中で内部改質を行ったが、本報ではサイクル構成が複雑となるため、外部改質器でメタンを総て改質し、セルに改質ガスを供給した。また、変成反応は早いとされているので、計算では変成平衡を仮定した。

2・3 基準条件と代表的な電圧、電流、温度密度分布
基準的なサイクル運転条件として、低温型セル平均温度（セル電解質の平均温度⁽³⁾）750℃、平均電流密度0.3 A/cm²、セル圧力1.0 MPa、総合燃料利用率85%（メタンベース、低

表1 低・高温 SOFC の電解質と電極の構成

Table 1. Compositions of electrolyte and electrode for low and high temperature SOFC.

SOFC Type	Electrolyte (thickness : mm)	Fuel electrode (thickness : mm)	Air electrode (thickness : mm)	Interconnector
Low temperature	La _{0.8} Sr _{0.2} Ga _{0.8} Mg _{0.15} Co _{0.05} O _{3-δ} (200×10 ⁻³)	Ni/Ce _{0.8} Sm _{0.2} O ₂ (1)	Sm _{0.5} Sr _{0.5} CoO ₃ (1)	SUS
High temperature	YSZ (100×10 ⁻³)	Ni-YSZ (70×10 ⁻³)	LaSrMnO ₃ (70×10 ⁻³)	La _{1-x} Sr _x CrO ₃

表2 低温型 SOFC 物性値

Table 2. Physical properties of low temperature SOFC.

Element	Electrolyte	Fuel electrode	Air electrode	Fuel Side Interconnector	Air side Interconnector
Thermal Conductivity [W/m/K]	2.7	11	2.2	16.3	16.3
Resistivity [$\Omega \cdot m$]	eq. (1)	1.0×10 ⁻⁵	1.3×10 ⁻⁴	7.4×10 ⁻⁷	7.4×10 ⁻⁷

表3 高温型 SOFC 物性値

Table 3. Physical properties of high temperature SOFC.

Element	Electrolyte	Fuel Electrode	Air Electrode	Fuel Side Interconnector	Air side Interconnector
Thermal Conductivity [W/m/K]	2.7	11	2.2	2.34	2.34
Resistivity [$\Omega \cdot m$]	eq. (2)	1.0×10 ⁻⁵	1.3×10 ⁻⁴	3.2×10 ⁻³	1.6×10 ⁻³

温型で 42.5%, 高温型で 42.5%), 総合空気利用率 30% (低温型で 15%, 高温型で 15%), 燃料再循環率 30%, 空気再循環率 10% とし, まず, 低温と高温の SOFC の発電性能を

図 2 低温型 SOFC の電圧分布

Fig. 2. Voltage distribution of low temperature SOFC.

図 3 低温型 SOFC の温度と電流密度の分布

Fig. 3. Temperature and current density distributions of low temperature SOFC.

図 4 高温型 SOFC の電圧分布

Fig. 4. Voltage distribution of high temperature SOFC.

図 5 高温型 SOFC の温度と電流密度の分布

Fig. 5. Temperature and current density distributions of high temperature SOFC.

詳細計算し, 続いてサイクルの全体性能を計算した。続いて, これらのパラメータのうち 1 つを変えてサイクル全体の解析を行った。

この基準条件における低温型の電圧分布と, 温度・電流密度分布を図 2, 図 3 にそれぞれ示す。高温型の電圧分布と, 温度・電流密度分布を図 4 と図 5 にそれぞれ示す。図に示すように, 低温型は高温型より過電圧が低いのでセル電圧が高い。また, 低温型は電解質抵抗以外の過電圧に温度変化を取り入れていないため, 電流密度分布は Nernst 起電力にほぼ比例した分布となり, インタコネクタに熱伝導率の高い SUS を用いているため, 温度分布は小さくなった。高温型はセルの後半で過電圧発熱などが多く, 温度上昇が大きくなるため活性化過電圧や電解質抵抗が小さくなり, セル後半で電流密度は大きく, 温度分布も低温型に比べて大きくなった。

3. SOFC・ガスタービン複合発電システムの構成

3.1 サイクルの構成 図 6 に低温型と高温型 SOFC を直列配置した 2 段 SOFC をトッパーとし, ガスタービンをボトマーとする複合発電システムのサイクル構成図を示す。燃料であるメタンは外部改質器で 100% 改質され, 低温型 SOFC に供給され, 低温型の出口ガスはそのまま高温型 SOFC に供給される。これ以外の構成は基本的に既報⁽³⁾と同じである。高温型 SOFC から排出される排燃料と排空気の一部は, セルの温度分布をより均一化して熱応力を緩和し, かつ改質用水蒸気を自給するため, ブローアで再循環する。再循環しない排燃料と排空気は燃焼器で燃焼し, まず外部改質の高温熱源となり, 次に予熱器①の熱源として空気や燃料を再生加熱し, ガスタービン (GT) で動力を発生し, 空気圧縮機 (AC) とメタン圧縮機 (MC) を駆動した後, 予熱器②で更に燃料や空気を再生加熱する。

3.2 サイクルの計算条件 サイクル計算で個々の構成機器の熱収支は既報と同じように, 機器出入口でのエンタルピー収支で求め, タービン出力や圧縮動力などは適当な断熱効率を用いて推定した⁽³⁾。計算はまず運転条件を決め, 低温・高温型 SOFC の計算を収束させた後, サイクル

図 6 低・高温 2 段配置 SOFC システム

Fig. 6. Two-stage SOFC system.

表 4 サイクルの計算式と各種効率

Table 4. Calculation equations and various efficiencies for cycle analyses.

Enthalpy income and expenditure	$\sum_i M_i \left(\int_{T_0}^{T_{in}} C_{p,i} dT + \Delta H_i(T_0) \right) \pm Q = \sum_j M_j \left(\int_{T_0}^{T_{out}} C_{p,j} dT + \Delta H_j(T_0) \right)$
Gas-turbine output	$W_{GasTurbine} = \sum_i \left\{ M_i \cdot C_{p,i} \cdot T_{in} \cdot \left(1 - \phi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right) \cdot \eta_{GT} \right\}$
Compressor and blower power	$W_{Compressor, Blower} = \sum_i \left\{ M_i \cdot C_{p,i} \cdot T_{in} \cdot \left(\phi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) / \eta_{Comp, Blow} \right\}$
Heat loss to heat input at SOFC	1%
Heating ratio of air and fuel at pre-heater①	90%
Heating ratio of air and fuel at pre-heater②	10%
Adiabatic efficiency of gas turbine	87%
Adiabatic efficiency of compressor and blower	77%
Inverter efficiency	95%
Pressure ratio of high temperature blower	1.05
Heat loss to exchanging heat at pre-heater① etc.	3%

計算を開始した。表 4 にサイクル計算に用いた式や各種効率などの計算条件をまとめて示す。ここで、 M はガスのモル流量、 C_p は定圧モル比熱、 $\Delta H(T_0)$ は基準温度でのエンタルピー、 T_{in} は入口温度、添え字 i, j はガス種、 Q は交換熱量、 ϕ は圧力比、 κ は比熱比、 η_{GT} はガスタービンの断熱効率、 $\eta_{Comp, Blow}$ は圧縮機とブロアの断熱効率である。

4. 計算結果

基準条件を中心に、一つのパラメータのみを以下のように変え、各種パラメータの効果を抽出した。以下の解析結果において、印は高温型 SOFC の発電効率(高温型 SOFC 送電端出力/HHV 基準熱入力)、印は低温型 SOFC の発電効率、印は低温型+高温型 SOFC の発電効率、印は SOFC/GT の総合発電効率である。なお、基準条件における主要な計算結果を図 6 に示した。

4.1 低温型 SOFC の平均温度による効率変化 図 7 に低温型セルの平均温度を変えたときの発電効率変化を示す。本システムの低温型 SOFC は過電圧が高温型より低いいため、高い効率を示した。低温型 SOFC の平均温度を上昇させると、低温型と高温型共に電解質抵抗が減少するため、発電効率は増加した。高温型では低温型セル平均温度が上昇する程、高温型セル平均温度も上昇するため、活性化過電圧が減少し、低温型より一層発電効率は増加した。ネルンスト起電力は温度と共に低下し、低温型 SOFC の過電圧は温度と共にそれ程減らないので、低温型 SOFC の発電効率は飽和傾向にある。低温と高温の両方の SOFC で発電効率を最大にするには、低温型 SOFC の許容温度で決められることになる。後段のガスタービン発電では、低温型 SOFC セル平均温度を上昇させると SOFC 入口温度が増える分予熱量も増え、タービン入口温度が低下し、タービン出力は減少した。しかし、サイクル全体として SOFC による発電効率の増加が大きいため、総合効率は上昇した。

4.2 セル圧力による効率変化 図 8 にセル圧力による発電効率の変化を示す。セル圧力を増加させると、ネ

図 7 低温型 SOFC のセル平均温度による発電効率変化

Fig. 7. Change of power generation efficiency by average cell temperature of low temperature SOFC.

図 8 セル圧力による発電効率変化

Fig. 8. Change of power generation efficiency by cell pressure.

ルンスト起電力が増加し、更に高温型 SOFC では酸素分圧が上がると空気極の活性化過電圧が下がるため⁽³⁾⁽⁴⁾、発電効率は増加した。しかし、セル圧力による効率改善は 1 MPa 付近で飽和した。後段のガスタービン発電では、運転圧力を増加させるとセル出口温度は多少低下するが、圧縮機出口温度が増加するため、予熱量が減少した分タービン入口温度が増加し、ガスタービン出力は増加した。しかし、圧力増加と共に圧縮機動力も増えるため、圧力が高過ぎるとタービン出力は減少し、総合効率の上昇は飽和した。

4.3 平均電流密度による効率変化 図 9 に平均電流密度による発電効率の変化を示す。電流密度を増加させる

図 9 電流密度による発電効率変化

Fig. 9. Change of power generation efficiency by current density.

図 10 総合燃料利用率による発電効率変化

Fig. 10. Change of power generation efficiency by total fuel utilization ratio.

と、過電圧の上昇により SOFC 内部損失が増加するため、発電効率は直線的に低下した。ただし、高温型は電流密度増加による温度上昇が大きいため、活性化過電圧と電解質抵抗が大きく減少し、出力の減少割合が小さくなった。後段のガスタービン発電では、電流密度を高くする程 SOFC 出口温度が上昇するため、タービン入口温度が上昇し、タービン出力は増加した。しかし、SOFC 発電効率の低下がより大きいため、サイクル全体の総合効率は低下した。

4・4 総合燃料利用率による効率変化 図 10 に総合燃料利用率(低温型と高温型で等分)による発電効率の変化を示す。燃料利用率を増やすとセル電圧は低下するが、燃料利用率の向上による効率改善が大きく、発電効率は上昇した。後段のガスタービン発電では、燃料利用率が増えたと SOFC で使われるエネルギーが増え、タービンへの熱入力が減るため、タービン入口温度は低下し、タービン出力は減少した。しかし、SOFC による発電効率の増加が大きいため、総合効率は増加した。

4・5 総合空気利用率による効率変化 図 11 に総合空気利用率(低温型と高温型で等分)による発電効率の変化を示す。空気利用率を高くすると、低温型ではセル電圧が僅かに減少するため発電効率は減少するが、高温型では供給空気が少なくなるとセル平均温度が増加し、電解質抵抗や活性化過電圧が減少するためセル電圧は増え、発電効率は増加した。後段のガスタービン発電では、空気利用率が増えたと供給空気が減り、その予熱量が減るので、ガスタービン入口温度は上昇し、タービン出力は増えた。ただ

図 11 総合空気利用率による発電効率変化

Fig. 11. Change of power generation efficiency by total air utilization ratio.

図 12 燃料再循環率による発電効率変化

Fig. 12. Change of power generation efficiency by fuel recirculation ratio.

し、総合空気利用率 0.1 では、空気圧縮機動力がタービン本体出力よりも大きく、総合効率が低温型と高温型 SOFC の発電効率よりも低くなった。一方、総合空気利用率 0.5 では、高温型 SOFC の温度上昇は 289°C で、出口温度は 1094°C となるので、発電効率は高温型 SOFC の許容温度で制限される。

4・6 燃料再循環率による効率変化 図 12 に燃料再循環率による発電効率の変化を示す。燃料再循環率は改質に必要な水流量や、システム構成上の律則により可変範囲が限定された。燃料再循環率を増加させると、燃料濃度が低下するため、低温型・高温型 SOFC 発電効率は若干低下した。後段のガスタービン発電では、燃料再循環率が増えたと改質器に新たに供給される燃料温度が下がり、燃料を予熱する熱量が減るため、タービン入口温度が上昇し、タービン出力が若干増加する。しかし、SOFC 発電効率の低下がやや大きいため総合効率は低下した。炭素を析出しないスチーム/カーボン比の下限は改質器の性能によるので、再循環率は改質器の性能と整合させる必要がある。

4・7 空気再循環率による効率変化 図 13 に空気再循環率による発電効率の変化を示す。空気再循環率を増やすと、平均セル温度を固定している低温型 SOFC では温度分布が一様になり、若干効率は上昇したが、高温型 SOFC はセル平均温度が低下し、過電圧が大きくなり発電効率は低下した。後段のガスタービン発電では、空気再循環率を増やすと、SOFC 出口温度が低下するため、タービン入口温度が下がり、タービン出力も低下した。

図 13 空気再循環率による発電効率変化

Fig. 13. Change of power generation efficiency by air recirculation ratio.

表 5 利用率配分

Table 5. Allocation of utilization ratio.

SOFC type	Allocation of utilization ratio [%]				
Low temperature SOFC	30	40	50	60	70
High temperature SOFC	70	60	50	40	30

図 14 低温型 SOFC の利用率配分による発電効率の変化

Fig. 14. Change of power generation efficiency by allocation of low-temperature SOFC utilization ratio.

4.8 利用率の分配による効率変化 以上の解析では利用率を低温型と高温型で半分ずつに分けた。ここでこの利用率の配分を表 5 のように燃料と空気共に同じ比率で変更して計算した。なお、総合燃料利用率は 85%，総合空気利用率は 30% に固定してある。

図 14 に利用率配分による発電効率の変化を示す。低温型 SOFC の利用率配分（つまり発電出力）を多くすると、低温型・高温型共に発電効率は低下した。長さを利用率に比例させたため、低温型 SOFC の利用率配分が多くなると低温型のセルは長くなり、低温型のセル電圧は低下した。これは低温型 SOFC の活性化過電圧は温度変化しないため、図 2 に示すように電圧分布はネルンスト起電力と共にすべて右下がりとなり、セルが長くなるほどセル電圧が下がるためである。また、本サイクルでは低温型の過電圧が小さいので、低温型 SOFC の利用率配分が大きいほど、発電効率の高い低温型で熱になるエネルギーが高温型で熱になる場合と比べ減るため、高温型セルの平均温度が低下し、活性化過電圧や抵抗過電圧が大きくなり、高温型 SOFC のセ

ル電圧も低下した。

以上の計算から、低温型 SOFC の平均温度 750℃ をもう少し上げると、図 7 から分かるように、高温型 SOFC がもう少し高い効率で運転できる領域があると推定される。今後、低温型と高温型 SOFC の耐熱温度の上限を明らかにした上で、実際に 2 段直列配置する SOFC の最適な運転条件を決める必要がある。

4.9 高温型 SOFC 単独サイクルとの比較 本研究の 2 段 SOFC サイクルとこれまでの筆者らの高温型 SOFC 単独サイクルを最後に比較した。比較する高温型単段 SOFC サイクルの運転条件はセル平均温度 900℃、燃料利用率 85%，空気利用率 30%，電流密度 0.3 A/cm²、セル圧力 1.0 MPa、燃料・空気再循環率 50%，外部改質率 50% とした。この高温型 SOFC 単独サイクルは SOFC 発電効率 45.1%，サイクル総合効率 54.7% を示す。これに対し、本研究の 2 段 SOFC サイクル（低温セル平均温度 750℃、高温セル平均温度 884℃）は基準条件で SOFC 発電効率 50.3%，サイクル総合効率 56.1% を示した。本研究の 2 段 SOFC サイクルの方が SOFC 発電効率、総合効率共に高い。これは、SOFC の運転温度範囲が広がり、入口側の予熱量が減ったため、ガスタービンにまわす熱が増えたことや、高温 SOFC 単段サイクルにおいて過電圧が大きい入口付近の温度が低い領域を低温型 SOFC で代替したことによる。2 段 SOFC サイクルの総合効率が単段 SOFC サイクルより 5% しか上がらないのは、2 段 SOFC サイクルでは 100% 外部改質しており、外部改質に必要な熱量が多くなるため、ガスタービン入口温度が単段 SOFC サイクルに比べると低くなるためである。

5. まとめ

現在手に入るデータを基に、低温型平板 SOFC の発電特性解析プログラムを作成し、低温型と高温型を直列配置した SOFC とガスタービンの複合発電サイクルを解析し、低温型セル平均温度 750℃、平均電流密度 0.3 A/cm²、セル圧力 1.0 MPa、総合燃料利用率 85%，総合空気利用率 30%，燃料再循環率 30%，空気再循環率 10%，外部改質率 100% の運転条件で、SOFC 発電効率 50.3%，サイクル総合発電効率 56.1% を得ることができた。また、運転パラメーターである低温型セル平均温度、セル圧力、平均電流密度、総合燃料利用率、総合空気利用率、燃料再循環率、空気再循環率、低温型と高温型の利用率配分を変更し、低温型と高温型 SOFC の発電効率や総合発電効率に与える効果を求めた。高温型 SOFC 単独サイクルをセル平均温度 900℃、燃料と空気再循環率 50%，外部改質率 50%，他の運転条件は直列配置と同じ運転条件の基に比較すると、SOFC 発電効率は 45.1%，サイクル総合効率は 54.7% となり、2 段 SOFC サイクルの SOFC 発電効率とサイクル総合効率の方が共に高く、低温型 SOFC の直列配置により効率が改善できることが分かった。

（平成 17 年 2 月 22 日受付，平成 17 年 6 月 7 日再受付）

文 献

- (1) T. Ishihara, H. Matsuda, and Y. Takita: "Doped LaGaO₃ Perovskite type oxide as a new oxide ionic conductor", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol.116, pp.3801-3803 (1994)
- (2) T.J. George, K.D. Lyons, and R. James: "Multi-stage fuel cell power plants targeting 80% LHV efficiency", Fuel Cell Seminar (1998)
- (3) K. Onda, T. Iwanari, N. Miyauchi, A. Ito, K. Ito, T. Ohba, Y. Sakaki, and S. Nagata: "Cycle analysis of combined power generation by planar SOFC and gas turbine considering cell temperature and current density distributions", *J. Electrochem. Soc.*, Vol.150, pp.A1569-1576 (2003)
- (4) M. Iwata, T. Hikosaka, M. Morita, T. Iwanari, K. Ito, K. Onda, Y. Esaki, Y. Sakaki, and S. Nagata: "Performance analysis of planar-type unit SOFC considering current and temperature distributions", *Solid State Ionics*, Vol.132, pp.297-303(2000)
- (5) A. Monma, T. Kato, K. Nozaki, A. Negishi, K. Kato, Y. Kaga, A. Nagata, K. Takano, T. Inagaki, H. Yoshida, K. Hosoi, K. Hoshino, T. Akbay, and J. Akikusa: "Impedance analysis of disk type SOFC", The 11th Symposium on Solid Oxide Fuel Cells in Japan, pp.13-16 (2002) (in Japanese)
門馬昭彦・嘉藤 徹・野崎 健・根岸 明・加藤 健・加賀保男・永田 進・高野清南・稲垣 亨・吉田洋之・細井 敬・星野孝二・ターナー アクベイ・秋草 順:「ディスク型 SOFC のインピーダンス」, 第 11 回 SOFC 研究発表会講演要旨集, pp.13-16 (2002)
- (6) T. Kato, K. Nozaki, A. Negishi, K. Kato, A. Monma, Y. Kaga, S. Nagata, K. Takano, T. Inagaki, H. Yoshida, K. Hosoi, K. Hoshino, T. Akbay, and J. Akikusa: "Impedance analysis of a disk-type SOFC using doped lanthanum gallate under power generation", *J. Power Sources*, Vol.133, pp.169-174 (2004)
- (7) A. Momma, T. Kato, K. Nozaki, A. Negishi, K. Kato, Y. Kaga, S. Nagata, K. Takano, T. Inagaki, H. Yoshida, K. Hosoi, K. Hoshino, T. Akbay, and J. Akikusa: "Impedance measurement and simulation on a disc-type SOFC under power generation", *Electrochemical Society Proceedings*, Vol.2003-07, pp.1186-1199 (2003)
- (8) K. Kuroda, I. Hashimoto, K. Adachi, J. Akikusa, Y. Tamou, N. Komada, T. Ishihara, and Y. Takita: "Characterization of solid oxide fuel cell doped lanthanum gallate", *Solid State Ionics*, Vol.132, pp.199-208 (2000)
- (9) S. Nagata, A. Momma, T. Kato, and Y. Kasuga: "Numerical analysis of output characteristics of Tubular SOFC with internal reformer", *J. Power Sources*, Vol.101, pp.60-71 (2001)

大 庭 貴 弘 (学生員) 1980 年 9 月 19 日生。2003 年 3 月豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学課程卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻修士課程に入学,現在に至る。主として,固体高分子膜を用いたオゾン水生成に関する研究に従事。

竹 澤 伸 也 (学生員) 1981 年 12 月 12 日生。2004 年 3 月鈴鹿工業高等専門学校専攻科電子機械工学専攻修了。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻修士課程に入学,現在に至る。主として,燃料電池の非定常解析に関する研究に従事。

荒 木 拓 人 (正員) 1975 年 5 月 2 日生。2003 年 3 月京都大学大学院工学研究科博士課程修了。2004 年 1 月豊橋技術科学大学電気電子工学専攻助手。主として,燃料電池,水電解,二次電池の研究に従事。電気化学会,機械学会,伝熱学会会員。工学博士。

恩 田 和 夫 (正員) 1941 年 6 月 20 日生。1966 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年 10 月電子技術総合研究所入所。1995 年 9 月豊橋技術科学大学教授(電気電子工学系)。主として,燃料電池,水電解,二次電池,放電脱硝の研究に従事。電気化学会,応用物理学会,日本機械学会,エネルギー・資源学会会員。工学博士。

榊 嘉 範 (非会員) 1968 年 11 月 17 日生。1993 年 3 月三重大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月中部電力(株)入社。主として,固体酸化物燃料電池に関する研究に従事。