

# 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

## Cycle analysis of two-stage planar SOFC power generation by series connection of low and high temperature SOFCs

正 荒木 拓人 (豊橋技科大)      無 竹澤 伸也 (豊橋技科大)      正 恩田 和夫 (豊橋技科大)

Takuto ARAKI, Toyohashi Univ. Tech      Shinya TAKEZAWA, Toyohashi Univ. Tech      Kazuo ONDA, Toyohashi Univ. Tech

*Key Words:* two-stage SOFC, gas turbine combined cycle, low-temperature SOFC, cycle analysis

In this study, two-stage SOFC cycle by series connection of low- and high-temperature SOFCs (Lanthanum gallate and YSZ electrolyte, respectively) and a gas turbine has been studied. This cycle can extend the operating temperature range of SOFC and may increase a total power generation efficiency. This report has estimated system efficiency by cycle analysis of two-stage SOFC power generation with gas turbine. Fuel and air recirculation and external reforming have been adopted in this calculation. Physical properties and activation overpotential of low-temperature SOFC were based on recent published data and they are relatively superior to those of high-temperature SOFC. The analysis result shows the SOFC power generation efficiency of 50.3% and total power generation efficiency of 56.1% under a standard condition (low-temperature FC average temperature: 1023K, current density: 0.3A/cm<sup>2</sup>, cell pressure: 1.0MPa, total fuel utilization ratio at FCs: 85%). The total power generating efficiency increases with increases of low-temperature SOFC average temperature and fuel and air utilization ratios, respectively. It also shows a positive cell pressure dependence, but peaks out around 1.0MPa.

### 1. はじめに

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、燃料や空気の再生過熱等に利用することができるため、サイクル全体として高い発電効率が得られる。最近、600 程度から運転できる低温型 SOFC が優れた発電特性を示し、SOFC 運転温度の低温化が進んでいる。ポトミング発電に使われるガスタービンより燃料電池の発電効率は高く、SOFC 運転温度範囲が拡大すると、システム発電効率がより増加すると期待される。また、米国 DOE より燃料電池を五段直列配置したマルチステージ FC 発電システムが提案され高い発電効率を示している<sup>(1)</sup>。そこで、我々は現在開発されている低温型と高温型の SOFC を直列配置したマルチステージ (ここでは 2 段) SOFC を考え、現在手に入る過電圧などのデータを基に 2 段 SOFC システムの発電効率計算をした。

### 2. マルチステージ SOFC 解析法

2-1 セル構成 本解析では平板型 SOFC を考え<sup>(2)</sup>、低温型 SOFC はランタンガレート系電解質を用いた SOFC<sup>(3-6)</sup>を参考に、過電圧や熱物性などの値を決めた。高温型は YSZ 電解質の既報<sup>(7)</sup>の物性値を用いた。

2-2 システム構成 図 1 に検討したマルチステージ SOFC のシステム構成を示す。一段目に低温型 SOFC を、二段目に高温型 SOFC を配置した。燃料のメタンは外部改質器で 100% 改質されるとした。また、一段目 SOFC の出口ガスがそのまま二段目 SOFC に供給される。二段目 SOFC 出口ガスは燃焼器で燃焼され、その排熱は改質器、予熱器 で回収した後、ガスタービン発電に用いられる。

2-3 基準条件及び計算方法 基本的な運転条件は、低温型

SOFC セル平均温度 750 , 総合燃料利用率 85% (低温型 42.5%, 高温型 42.5%), 総合空気利用率 30% (低温型 15%, 高温型 15%), 平均電流密度 0.3A/cm<sup>2</sup>, セル運転圧力 1.0MPa, 燃料再循環率 30%, 空気再循環率 10%とした。計算手順としては、まず、低温型 SOFC の入口ガス温度と電解質平均温度に適当な初期値を与え、総合燃料利用率より燃料であるメタンの流量を決定し、外部改質器入口条件を決め、100%改質として水素流量を求めた。低温型 SOFC の計算を収束させた後、低温型 SOFC の出口ガス組成、ガス温度を高温型 SOFC の入力として二段目 SOFC を計算し、その後システム全体を計算した。

### 3. 計算結果

3-1 基準条件による電圧電流分布 図 2 と図 3 にそれぞれ低温型と高温型 SOFC の基準条件におけるガス流れ方向のセル電圧と電流の分布を示す。図から高温型 SOFC より低温型 SOFC の方がセル電圧が高く、発電特性に優れることが分かる。これは低温型の過電圧が低い為である。

3-2 低温型 SOFC の平均温度に対する発電効率変化 図 4 に低温型 SOFC の平均温度に対する発電効率の変化を示す。低温型 SOFC 平均温度を増加させると、電解質抵抗が減少するので、発電効率は増加し、更に、高温型では温度上昇により反応過電圧が減少し、低温型より発電効率がより増加する。一方、低温型 SOFC セル平均温度を増加させる程低温型 SOFC 入口温度が上がり、余熱量が増加し、ガスタービン入口温度が低下することによって、ガスタービン出力は減少する。しかし、全体の発熱効率に対しては SOFC の効果が大きく、平均温度と共に上昇する。

3-3 総合燃料利用率による発電効率変化 図 5 に総合燃料利用率による発電効率の変化を示す。総合燃料利用率を高くすると、セル電圧は減少するが、燃料利用率増加による効率改善が大きく、発電効率は増加する。また、燃料利用率を増加させると供給燃料量が減少するため、タービンへの入力が減り、ガスタービン入口温度は低下し、ガスタービン出力は減少する。

3-4 総合空気利用率による発電効率変化 図 6 に総合空気利用率による発電効率の変化を示す。空気利用率を高くすると、低温型の効率変化は小さいが、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、電解質抵抗や反応過電圧

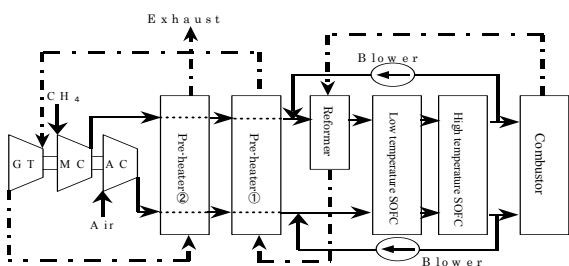


Fig.1 System diagram of two stage SOFC cycle

が減少し、発電効率は増加した。また、空気利用率を増加させると供給空気量が減少し、予熱量が減るので、ガスタービン入口温度は増加し、ガスタービン出力は増加した。ただし、空気利用率 0.1 では、空気流量増大に伴い空気圧縮器動力が大きくなり、サイクル発電効率は大きく低下した。

3-5 高温型 SOFC 単独サイクルとの比較 本研究の 2 段 SOFC サイクルと我々の従来の高温型 SOFC 単独サイクルを最後に比較する。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 0.3A/cm<sup>2</sup>、セル圧力 1.0MPa、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%、サイクル総合発電 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、2 段 SOFC サイクルでは低温型 SOFC の発電効率が高温型 SOFC より約 5%優れるため、単段サイクル SOFC 発電効率 45.1%が 2 段 SOFC 発電効率 50.3%になるためである。2 段 SOFC サイクルの総合効率が単段 SOFC サイクルより 5%上がらないのは、100%外部改質方式の 2 段 SOFC サイクルは外部改質に必要な熱量が多くなるので、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。また、一般的に SOFC の過電圧は動作温度が高いほど小さくなるため、計算上では動作温度を上げれば効率は高くなるが、耐久性などの観点からは動作温度は低い方が望ましい。その観点からすると、本解析では高温型 SOFC の平均温度を 900 から 884 まで下げながらも高い効率を実現しており、実用上望ましいサイクルと言える。

#### 4. まとめ

低温型と高温型 SOFC を直列配置したマルチステージ二段 SOFC サイクルを解析した。低温型は高温型より発電性能が良く、システム全体で 56.1%の発電効率が計算された。低温型と高温型 SOFC を直列に配置したマルチステージ SOFC は、単段の SOFC と同等の発電効率を維持して電池運転温度を拡大でき、高温型 SOFC の動作温度を低下させることが可能である。

#### 参考文献

- (1) T.J.George, K.D.Lyons,R.James III, Fuel Cell Seminar(1998)
- (2) 大庭貴弘ら, 第 12 回 SOFC 研究発表会, 112B, pp50-53 (2003)
- (3) 門馬昭彦ら, 第 11 回 SOFC 研究発表会, 104A, pp13-16 (2002)
- (4) T.Kato, et al., Journal of Electrochemical Society
- (5) K.Kuroda et al., Solid State Ionics, 132, pp199-208 (2000)
- (6) A.Momma et al., Electrochemical Society Proceedings, Vol7, pp.1186-1199 (2003)
- (7) 岩成亨ら, 第 10 回 SOFC 研究発表会, 206B, 97-100(2001)

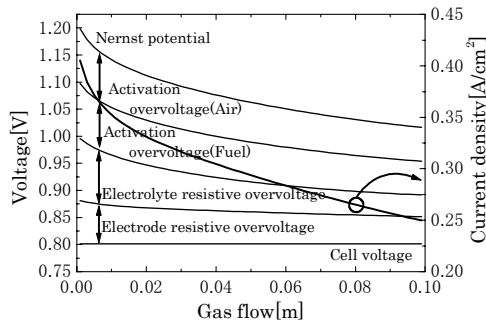


Fig.2 Voltage and current density distribution (Low temperature SOFC)

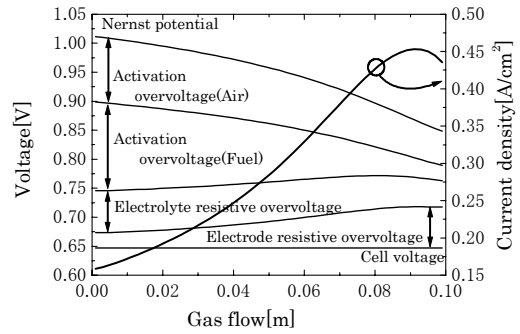


Fig.3 Voltage and current density distribution (High temperature SOFC)

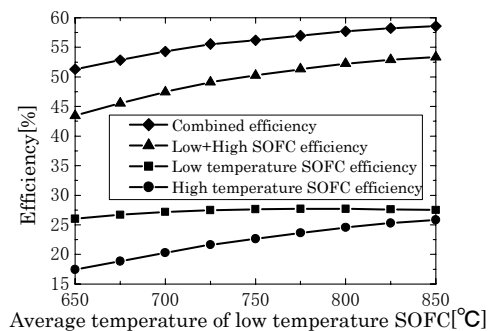


Fig.4 Change of power generation efficiency by SOFC average temperature

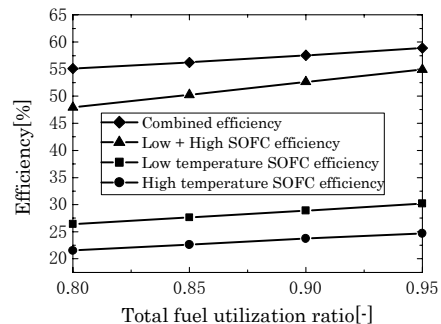


Fig.5 Change of power generation efficiency by total fuel utilization ratio

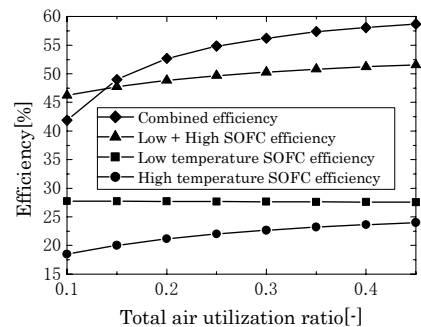


Fig.6 Change of power generation efficiency by total air utilization ratio