

低温型と高温型 SOFC を直列配置したマルチステージ SOFC の発電効率計算 (2)

大庭 貴弘¹ 荒木 拓人¹ 恩田 和夫¹ 榊 嘉範²

¹ 豊橋技術科学大学 電気電子工学系

² 中部電力株式会社 電力技術研究所

System analysis of multi-stage SOFC power generation by series connection of low and high temperature SOFCs

Takahiro Ohba¹, Takuto Araki¹, Kazuo Onda¹, Yoshinori Sakaki²

¹ Dept. Electrical & Electronic Engi., Toyohashi University of Technology

² Electric Power Research & Development Center, Chubu Electric Power Co. Inc.

System analysis of the multi-stage SOFC power generation was performed connecting in series the low-temperature SOFC of lanthanum gallate with the high-temperature SOFC of Y₂O₃ stabilized ZrO₂. Physical properties of low-temperature SOFC were based on recent data which have been published. The power generation efficiency for the series connected SOFCs was calculated changing average cell temperature, average current density, cell pressure, total fuel utilization ratio, total air utilization ratio, fuel recirculation and air recirculation ratio.

序論

固体酸化燃料電池 (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、サイクル全体として高い総合発電効率を得られる。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ており、SOFC の温度範囲が拡大している。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、システム発電効率がより一層増加すると期待される。最近、米国 DOE より燃料電池を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ている⁽¹⁾。そこで、我々は、低温型と高温型の SOFC を直列配置したマルチステージ SOFC を考え、現在手に入るデータを基に 2 段システムの発電効率計算をした。今回、前報⁽²⁾に引き続き、システムとして空気や燃料の再循環を行い、システム発電効率を更に詳細に求めた。

2. マルチステージ SOFC 解析方法

1 セル構成

本解析では、前報⁽²⁾と同じセルの大きさを持った平板型 SOFC 単セルを考え、低温型の物性値や過電圧はランタンガレート系電解質を用いた SOFC の論文^{(3),(4),(5),(6)}を参照し、高温型は既報⁽⁷⁾の物性値や過電圧を用いた。低温型と高温型の反応過電圧式を表 1 に示す。今回、計算を単純化するために、燃料は外部改質器で 100% 改質されるとした。また、シフト反応は早い外部改質器、セル内で熱平衡を仮定した。

Table.1 Activation overvoltage equation

SOFC type	Activation overvoltage
Low temperature type	$V_{act} = \frac{2.5 * 10^{-5}}{w * dx} * I_e$
High temperature type	$i_e = i_0 \left\{ \exp\left(\frac{2FV_{act}}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-2FV_{act}}{RT}\right) \right\}$

ここで、w はセル幅、dx は CV 長さ、i_e は電解質電流、R は気体定数、T は温度、F はファラデー定数である。

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、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、SOFC に供給され、一段目 SOFC の出口ガスがそのまま供給ガスとして二段目 SOFC に供給される。

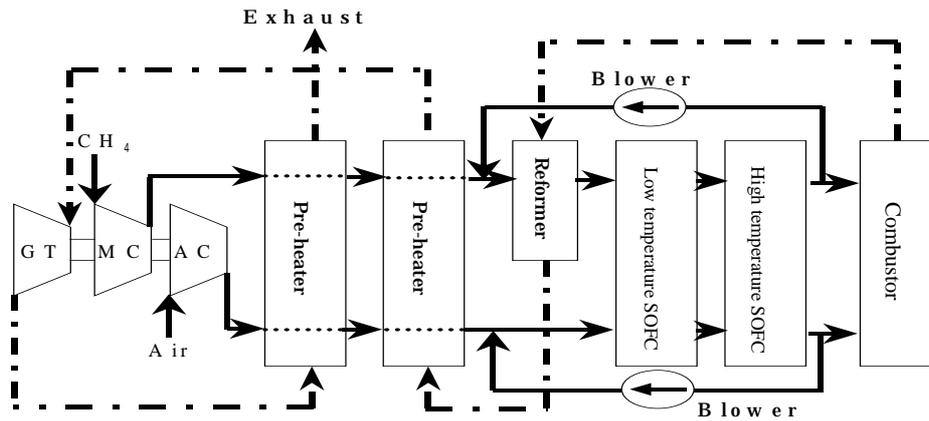


Fig.1 Multi-stage SOFC system

2.2 基準運転条件及び計算方法

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%、総合空気利用率 30%、平均電流密度 0.3A/cm²、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。計算は、まず、低温型と高温型の燃料利用率をそれぞれ 42.5% (全体で 85%)、空気利用率をそれぞれ 15% (全体で 30%) と設定し、低温型 SOFC の入口ガス温度、電解質平均温度は適当な初期値を与える。総合燃料利用率より燃料であるメタンの流量を決定し、外部改質器に供給する。外部改質器では 100% 改質として水素流量を決定した。低温型 SOFC の計算終了後、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 の計算を行い、その後システム全体の計算を行った。

3. 計算結果

図 2 に低温型 SOFC の基準条件におけるガス流れ方向のセル電圧・電流分布、図 3 に高温型 SOFC の基準条件におけるガス流れ方向のセル電圧・電流分布を示す。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。

3.1 低温型 SOFC 温度による効率変化

図 4 に低温型 SOFC 平均温度による発電効率の変化を示す。低温型 SOFC 平均温度を増加させていくと、電解質抵抗が減少していくので、発電効率は増加していく。しかし、低温型 SOFC 平均温度を余り高くし過ぎると、低温型 SOFC の出口温度が約 880 程度と上昇し、材料の耐熱性に問題が生じると考えられる。また、低温型 SOFC セル平均温度を増加させる程 SOFC 出力が増加するため、ガスタービン入口温度が低下し、ガスタービン出力は減少する。

3.2 電流密度による効率変化

図 5 に電流密度による発電効率の変化を示す。電流密度を高くする程ジュール熱により SOFC の内部損失が増え、発電効率は直線的に減少する。また、電流密度を高くするほど SOFC の出力は減少するため、ガス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、SOFC の発電効率の減少が大きいため、総合効率は減少する。

3.3 セル運転圧力による効率変化

図 6 にセル運転圧力による発電効率の変化を示す。セル運転圧力を高くすると、Nernst 起電力が圧力の対数に比例して増加し、更に、高温型 SOFC では酸素分圧が増加することにより分極導電率が増加し、活性化過電圧が減少するので、発電効率が增加する。また、運転圧力が増加するとセル出口温度は多少減少するが、圧縮機出口温度が増加するため、余熱器交換熱量が減りガスタービン入口温度が増加し、ガスタービン出力は増加する。やがて空気圧縮器動力の増大のため総合効率は飽和する。

3.4 総合燃料利用率による効率変化

図 7 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

減少したが、供給燃料が減るため発電効率は増加する。また、燃料利用率を増加させると SOFC で使用されるエネルギーが増加するため、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。しかし、SOFC の発電効率増加が大きいいため総合効率は増加する。

3.5 空気利用率による効率変化

図 8 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りセル平均温度が増加し、電解質抵抗や活性化過電圧が大きく減少するため、セル電圧が増加し、発電効率は増加した。空気利用率 0.1 では、空気圧縮器動力が大きくなるため、サイクル発電効率が大きく低下した。また、空気利用率を増加させると供給空気量が減少し、その予熱量が減るので、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。

3.6 燃料再循環率による効率変化

図 9 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のために必要な水流量や、システム構成上の律則条件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、燃料濃度が減少するため、SOFC 発電効率は若干減少し、SOFC 出力が減少する分、ガスタービン出力は若干増加するが、総合効率は減少した。

3.7 空気再循環率による効率変化

図 10 に空気再循環率による発電効率の変化を示す。空気再循環率を増加させると、低温型 SOFC では温度分布が一様になり、若干効率は増加したが、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減少する。また、空気再循環率を増加させると、SOFC 出口温度が低下するため、ガスタービン入口温度が減少し、ガスタービン出力は減少した。

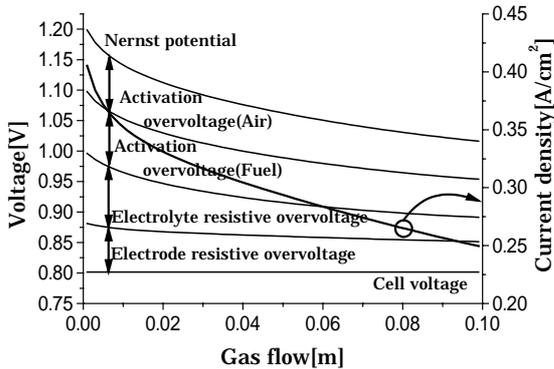


Fig.2 Voltage distribution
(Low temperature SOFC)

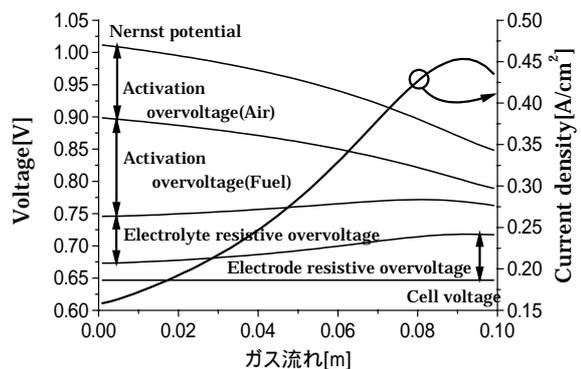


Fig.3 Voltage distribution
(High temperature SOFC)

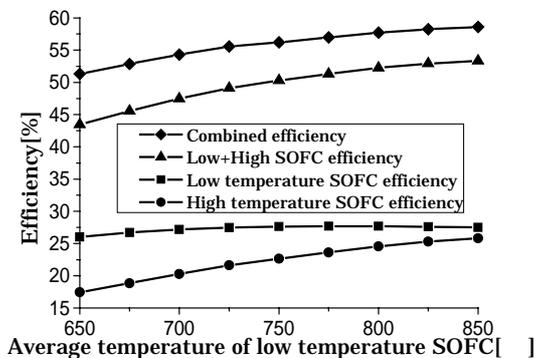


Fig.4 Effect of average temperature of low temperature SOFC on efficiency

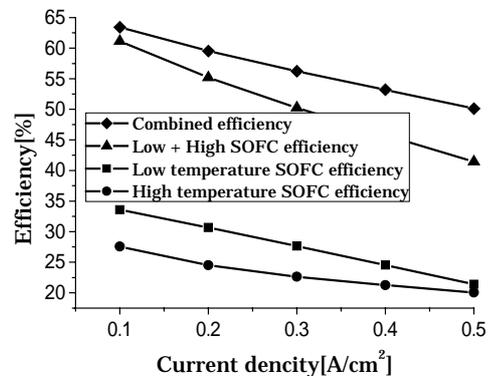


Fig.5 Effect of average current density on efficiency

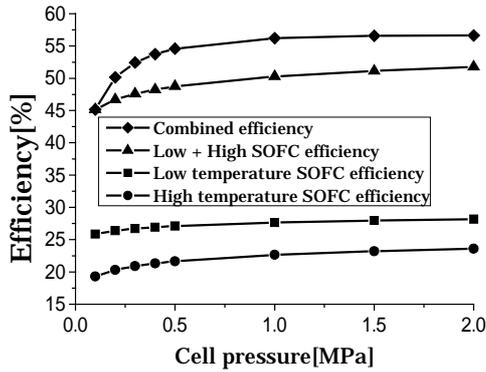


Fig.6 Effect of operating pressure on efficiency

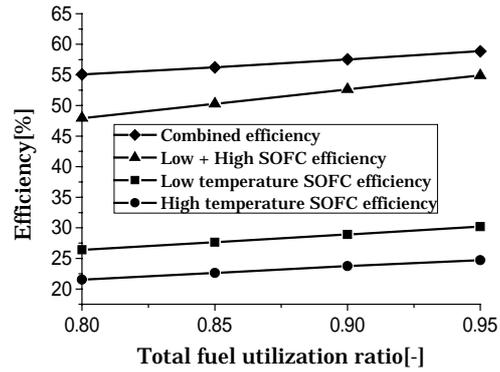


Fig.7 Effect of total fuel utilization ratio on efficiency

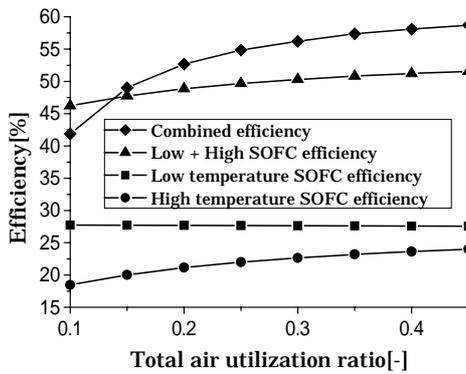


Fig.8 Effect of total air utilization ratio on efficiency

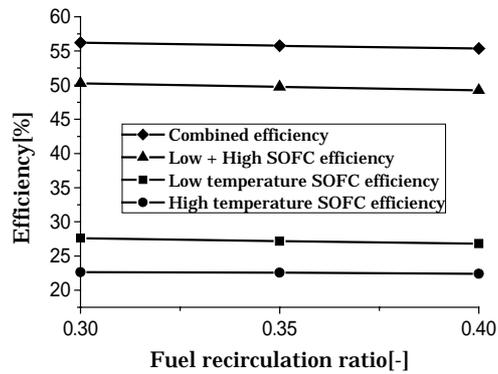


Fig.9 Effect of fuel recirculation ratio on efficiency

4. まとめ

低温型 SOFC は高温型 SOFC より性能が良く、基準条件でシステム発電効率が約 56% という結果を得ることができた。また、マルチステージ SOFC を、高温型 SOFC だけのサイクルと比較すると総合効率は若干低かった。これは、低温型 SOFC の動作温度が低いため、高温型 SOFC 入口ガス温度が低く高温型 SOFC の平均温度が低くなってしまいうためである。しかし、低温型と高温型の SOFC を直列配置したマルチステージ SOFC は SOFC の動作温度範囲を拡大できる利点がある

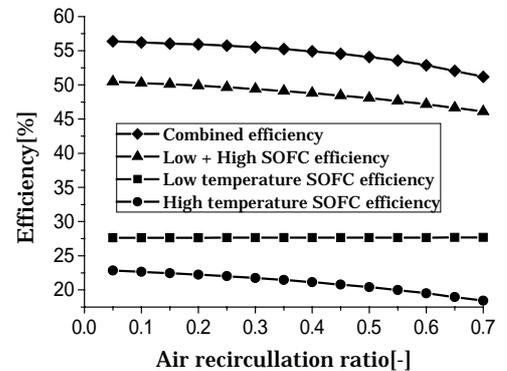


Fig.10 Effect of air recirculation ratio on efficiency

参考文献

- (1) Tom J.George,K.Kavid Lyons,Robert James , Fuel Cell Seminar(1998)
- (2) 大庭貴弘、砂川大輔、恩田和夫、榊嘉範、第 12 回 SOFC 研究発表会、112B、50-53 (2004)
- (3) 門馬昭彦、嘉藤徹、野崎健、他 11 名、第 11 回 SOFC 研究発表会、104A、13-16 (2002)
- (4) Tohru Kato,Ken Nozaki,et al.,Journal of Electrochemical Society
- (5) Kiyoshi Kuroda,Ikiko Hashimoto,et al.,Solid State Ionics,132,199-208(2000)
- (6) A.Momma、T.Kato,et al.,Electrochemical Society Proceedings,Vol7,1186-1199(2003)
- (7) 岩成亨、恩田和夫、榊嘉範、他 5 名、第 10 回 SOFC 研究発表会、206B、97-100 (2001)