

空気再循環を行うガスタービン・固体酸化物形燃料電池ハイブリッドシステムの基本特性

Basic Characteristics of Gas Turbine-Solid Oxide Fuel Cell Hybrid System with Air Recirculation

○准 大川大輔 (三菱重工) 正 鹿園直毅 (東大)
正 笠木伸英 (東大)

Daisuke OKAWA, Mitsubishi Heavy Industries,
Naoki SHIKAZONO, Nobuhide KASAGI, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

A hybrid system composed of solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) is expected to achieve very high efficiency over 60 – 70 % LHV. However, in order to operate the system at high efficiency and high power density which leads to cost reduction, it is important to manage the whole SOFC temperature as uniform as possible. Cathode air recirculation is one of the simplest approaches to improve the temperature distribution of the cell. In the present study, numerical simulation of the air recirculation hybrid system was carried out. All the system components are modeled, and the effects of recirculation ratio on the total system performance are evaluated. Furthermore, comparison between the ejector system and the blower system, evaluation of partial load performance are investigated.

Key Words : Gas turbine, Solid Oxide Fuel Cell, Hybrid System, Cycle analysis, Simulation, Ejector

1. 緒言

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) とガスタービン (GT) を組合せたハイブリッドシステムは、60~70%LHV 以上の高い発電効率の達成が可能である。一方、普及に当っては更なる導入コストの低減が課題であり、出力密度の向上により SOFC 発電面積の低減を図る必要がある。SOFC の出力特性は作動温度に大きく依存する。本研究では、空気極に供給される空気に、空気極出口の高温空気を混合させる空気再循環方式⁽¹⁾⁽²⁾ を評価する。空気再循環システムでは、エジェクタを用いる場合にはタービン出力の低下、ブロワを用いる場合には補機動力が増加といった課題が生じる。

本研究では、SOFC, GT, エジェクタ, 再生器などの要素機器をモデル化し連成させたシステムシミュレータを構築し、定格点および部分負荷特性の評価を行う。空気再循環方式のシステム効率と出力密度に及ぼす影響を明らかにするとともに、エジェクタを用いた場合とブロワを用いた場合の比較を行う。

2. 解析モデル

図 1 に、エジェクタを用いた場合の空気再循環システムを示す。空気再循環にブロワを用いる場合は、燃料極側と同様のブロワ配置とする。圧力比は 4.0, 燃料利用率は 0.85, タービン入口温度, 燃料電池最高温度は 900 °C とした。燃料にはメタンを用い、水蒸気とメタンの比が 2.5 となるように燃料極ガスを再循環し、供給した。

図 2 に示すような並行流型の燃料極支持型 SOFC を対象とする。温度分布は流れ方向のみの一次元を仮定し、熱伝導と対流によるエンタルピー収支から局所温度を求めた。物質収支は、電極における電気化学反応は電解質と電極との界面で生じるとモデル化し、酸素極と燃料極の多孔質内において、それぞれ O₂、及び CH₄, H₂, H₂O, CO, CO₂ の拡散による断面内分布を考慮した。空気や燃料ガス流路での濃度は、流路断面内での濃度を一定と近似し、温度と同様に流れ方向の一次元分布を解いた。断面内分布の計算、出力電圧の予測は Suzuki et al.⁽³⁾の方法を用いた。

圧縮機とタービンの部分負荷特性は、Campanari et al.⁽⁴⁾を参考に実機の無次元特性曲線を用いた。定格点断熱効率は、

それぞれ、0.73, 0.80 とした。再生器は対向流型とし、定格流量における温度効率が $\epsilon=0.90$ となるように KA 値を与え、 ϵ -NTU 法を用いて算出した。要素機器の効率は Kimijima et al.

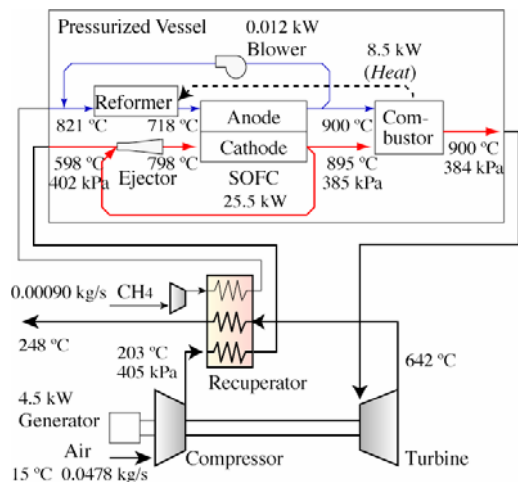


Fig. 1 Arrangement of hybrid system with air recirculation

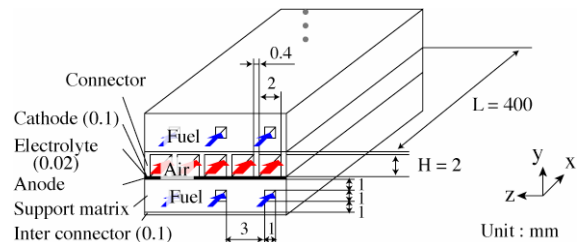


Fig. 2 SOFC model

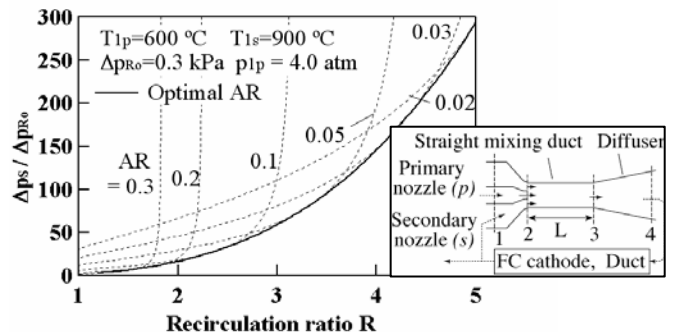


Fig. 3 Ejector design

(5)を参考にした。エジェクタは、Fluent 6.2 を用いて予備的な数値解析を行い、定数を決定した。図3に、再循環比 $R=(m_{1s}+m_{1p})/m_{1p}$ に対して最適なノズル断面積比 $AR=A_{2p}/A_3$ 、混合部長さ L を用いた場合のシステム圧力損失 $\Delta p_s=p_{1s}-p_{1p}$ を示す。ここで、 $\Delta p_R=p_4-p_{1p}$ は流路圧力損失であり、 Δp_{Ro} は再循環を行わない場合の値である。

3. 定格点での評価結果

図4に、ハイブリッドシステムにおいて空気再循環比 R を変化させたときの発電効率を示す。エジェクタシステム、ブロウシステムともに再循環を行うことで発電効率が向上する。これは、本研究においてSOFC最高温度を900℃としているため、再循環比の増大に伴ってSOFCの温度分布が改善し、出力電圧が向上するためである。一方、再循環比の増大に伴いガスタービン効率が低下するため、発電効率を最大とする再循環比が存在する。ブロウシステムの方がエジェクタシステムと比較して再循環比増大に伴う発電効率の低下が小さい。

図5に、電流密度と再循環流路圧力損失をパラメータとし、発電効率が最大となる最適再循環比を示す。いずれのシステムも最適再循環比は電流密度に伴って増加し、圧力損失の増加とともに減少する。最適再循環比はブロウシステムの方が大きい。最適再循環比では、SOFC発電面積も最小となる。

図6に最適再循環比における発電効率とSOFC発電面積の関係を示す。同一発電効率60%でのSOFC発電面積 A は、均一温度で作動した場合の理想的なSOFC面積 A_{ideal} に対して、 $\Delta p_{Ro}=0.3$ kPaの条件でエジェクタシステムでは1.34倍、ブロウシステムでは1.23倍となる。また、 $\Delta p_{Ro}=0.03$ kPaの条件では、それぞれ1.16倍および1.09倍となる。流路圧力損失 Δp_{Ro} が小さい場合は、必要な発電面積を均一温度条件に近い量まで低減することができる。

4. 部分負荷運転

図1に示したエジェクタ空気再循環システムの部分負荷特性の評価を行った。定格点における電流密度は5000 A/m²、再循環流路圧力損失 $\Delta p_{Ro}=0.3$ kPa、再循環比は3.0とした。ガスタービンの運転方法は、回転数可変方式とし(5)、SOFCの燃料利用率と最高温度、タービン入口温度が一定になるように制御を行った。図7(a)に発電効率の変化を示す。部分負荷率40%程度で発電効率は最大となる。これは、電流密度が減少すること、空気入口温度の増加によりSOFCの作動温度が高温に保たれることによる。また、図7(b)に示すように、圧縮機が適正動作範囲内で運転されていることを確認した。

5. 結言

空気再循環ハイブリッドシステムのシミュレータを構築し、以下の知見を得た。

- (1) エジェクタシステムとブロウシステムともに再循環を行うことで発電効率が向上する。最適循環比はブロウシステムの方が大きい。
- (2) エジェクタシステムでは、再循環比の増大に伴ってガスタービン効率が低下し、最大システム効率を与える最適な再循環比が存在する。
- (3) 部分負荷運転において、負荷率40%程度で発電効率は極大値を示した。また、ガスタービンの圧縮機が適正動作範囲内で運転されていることを確認した。

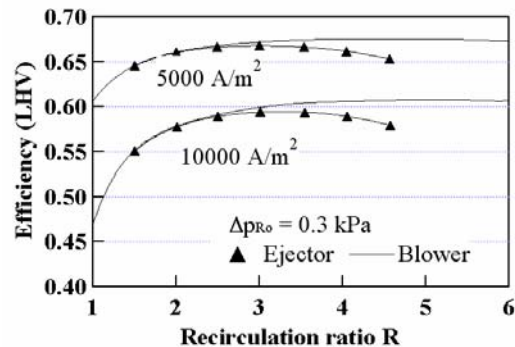
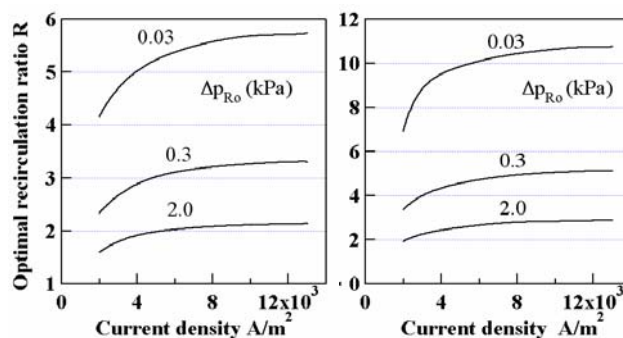
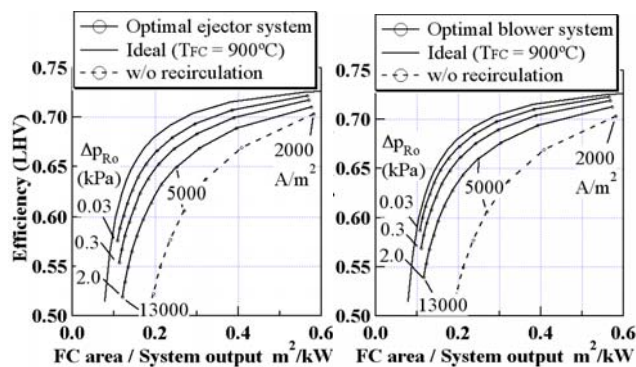


Fig. 4 System efficiency



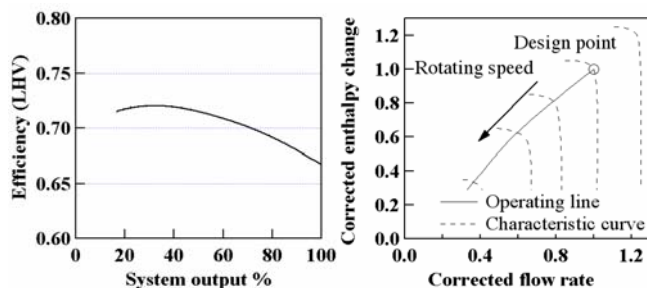
(a) Ejector system (b) Blower system

Fig. 5 Optimal recirculation ratio



(a) Ejector system (b) Blower system

Fig. 6 FC area and efficiency



(a) System efficiency (b) Compressor operating line

Fig. 7 Partial load performance

参考文献

- (1) Iwata, M. et al., Solid State Ionics 132 (2000), 297-308.
- (2) Agnew, G. D. et al., ASME Paper, 2005-GT-69122.
- (3) Suzuki, M. et al., ASME Paper, 2006-FC-97112.
- (4) Campanari, S., ASME J. Eng. Gas Turbine and Power, 122 (2000), 239-246.
- (5) Kimijima, S. and Kasagi, N., ASME Paper, 2002-GT-30111.