

## 航空用 SOFC/ガスタービンハイブリッドエンジン用

## SOFC リアクタにおける余剰燃料ノズル形状が保炎に及ぼす影響

日大生産工(院) ○阿部 翔一 日大生産工 野村 浩司  
 日大生産工 菅沼 祐介 宇宙航空研究開発機構 岡井 敬一  
 宇宙航空研究開発機構 田頭 剛 宇宙航空研究開発機構 西沢 啓

## 1. 緒言

環境問題を背景に、航空機のさらなる環境適合性向上が要求されている。そこで着目されているのが高温で動作する固体酸化物型燃料電池(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell)を組み込んだハイブリッドジェットエンジンシステムである。図1は、現在 JAXA で検討されている航空用 SOFC/ガスタービン(GT)ハイブリッドエンジンシステム<sup>(1)</sup>の一例である。

SOFC は、その特性上、未使用の燃料と生成された水蒸気からなる余剰燃料を生ずる。SOFC/GT ハイブリッドエンジンシステムは、その余剰燃料を燃焼させ、燃焼熱および SOFC 自体の発熱を GT でエネルギー回収し、効率の向上を図るという構想である。そのため、システム効率の向上には SOFC の効率的な発電と余剰燃料の確実な保炎の両立が重要である。

航空適用を想定するにあたり、システムの軽量化と簡略化のため、内側が燃料極となる円筒型の SOFC を燃料インジェクタとして用い、発電と余剰燃料の燃焼を行う SOFC リアクタに組み込むことが考えられる。本研究では SOFC の破損<sup>(2)</sup>防止のため、インジェクタはアルミナ細管を余剰燃料噴出孔とし、ここで燃焼させる形式とした。

本報では、余剰燃料噴出孔となるアルミナ細管(余剰燃料噴出細管)の直径を変化させ、保炎性の変化と SOFC の発電への影響について調べたので報告する。

## 2. 実験装置

SOFC の動作温度は高温であるため、実験装置は SOFC リアクタ内を 800℃ 以上に加熱する能力がある。図2に実験に使用したラボスケールリアクタの概略を示す。燃焼場であるリアクタ上部は火炎の観察を行うため石英管を用いた。リアクタ内には1本または7本の円筒 SOFC あるいは YSZ 管を用いた模擬円筒 SOFC が組み込まれ、同一の実験装置にて燃焼、発電の双方の評価が可能である。

実験においては模擬 SOFC として SOFC の電解質材料であり、比較的安価で機械的特性が SOFC に近いイット

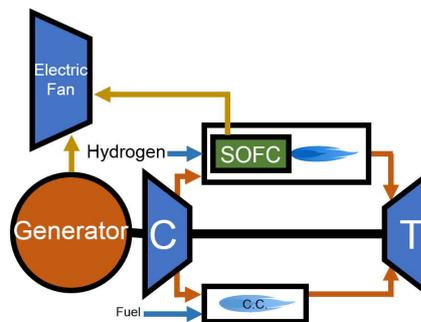


Fig 1. Configuration diagram of SOFC/GT hybrid propulsion system.

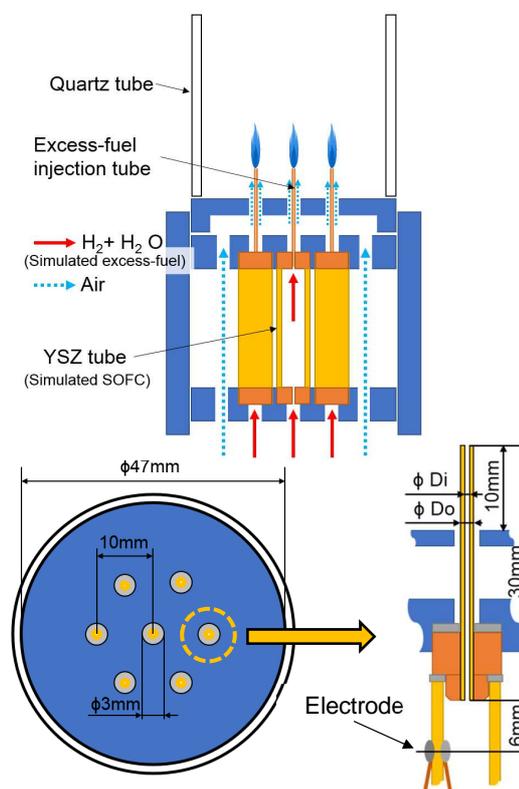


Fig. 2 SOFC Reactor.

リア安定化ジルコニア(YSZ: Ytria Stabilized Zirconia)製の管(ニッケトー, ZR-8Y, 長さ 40 mm, 外直径 8 mm, 内直径 5 mm)を用いた。以下、YSZ 管と称することにする。また発電実験は、YSZ 管に燃料極および空気極として白金線を貼り付け、微弱ながら発電できるようにしたもの

Effect of Fuel Injector Shape on Flame Holding  
 in Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Engine for Aviation.  
 Shoichi ABE, Hiroshi NOMURA, Yusuke SUGANUMA,  
 Keiichi OKAI, Takeshi TAGASHIRA and Akira NISHIZAWA

を使用した<sup>3)</sup>。燃料極及び空気極は、細管入り口から6mm上流に設置した。

余剰燃料噴出細管は、直径3mm孔の空気噴出部より10mm突出させた同軸噴流バーナの形式であり、余剰燃料噴出細管に拡散火炎が形成される。以降、円筒SOFCと余剰燃料噴出細管を組み合わせたものをSOFCインジェクタ、YSZ管と組み合わせたものをYSZインジェクタと呼称する。インジェクタを通して燃焼場に噴出された水素は、自発点火温度が500℃程度なので、リアクタ内の高温空気によって自発点火する。本実験ではYSZインジェクタ1本のみを設置し、余剰燃料噴出細管の直径の違いによる保炎性の変化とSOFCの発電への影響を検討した。

### 3. 実験方法

SOFCの動作温度維持にあたり、発電中のSOFCの発熱を利用し、自己加熱条件で運転することで予熱器等が不要となり、システムの軽量化と簡略化を図ることができる。実験条件は自己加熱可能かつSOFCの破損を招かない条件<sup>3)</sup>を参考に決めた。

リアクタの運転条件はリアクタ温度、SOFCの発電量、燃料過剰率、空気過剰率によって決まる。保炎性の評価にあたりリアクタ温度は700℃とし、発電量、燃料過剰率、空気過剰率を変化させ、保炎の成否を確認した。燃料過剰率は、発電に必要な燃料の量に対し、何倍の燃料を供給したかを表す値であり、燃料利用率の逆数に相当する。YSZ管は、ほとんど発電しないため、燃料に純水素を用いると余剰燃料に水蒸気が含まれない。そこで、想定する発電量で生成される水蒸気をあらかじめ水素燃料に混合した模擬余剰燃料を供給して燃焼実験を行った。燃料過剰率は、水蒸気流量を一定にし、そこに加える水素の流量によって変化させた。空気過剰率とは、発電に必要な酸素を含む空気量を1とし、その何倍の空気を供給したかを表す値である。なお、空気の酸素濃度は21%とした。本実験で使用したインジェクタは1本であるが、リアクタには空気噴出孔が7噴孔ある。そのため、今後行う複数のSOFCインジェクタでの実験との比較を行うため、リアクタ内の平均空気流速をSOFCインジェクタ1本の場合と7本の場合で同一にすることとした。即ち、リアクタに供給した空気流量の7分の1が、1本のSOFCインジェクタに供給された空気流量であるとして空気過剰率を計算した。SOFCの発電による酸素濃度の低下は本実験では影響は少ないとして無視している。なお、保炎の成否の確認は、模擬余剰燃料に混合する水に2wt%の割合でエタノールを混合して着色、可視化し、目視にて行った。

表1に余剰燃料噴出細管の直径を示す。燃料流量および空気流量を同一条件にし、新たに製作した細管Bを組

Table 1 Diameter of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> capillary for excess-fuel injection.

	Do, mm	Di, mm
Capillary A	0.4	0.21
Capillary B	1.0	0.5

み込んだインジェクタの保炎特性を調査して既報の細管Aを組み込んだインジェクタの保炎特性<sup>3)</sup>と比較検討した。

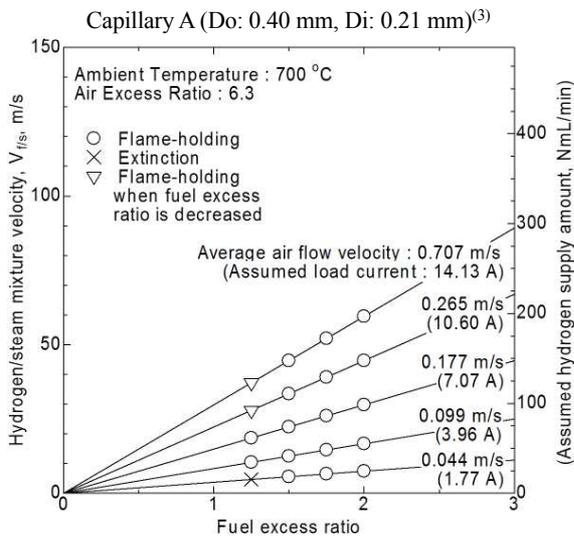
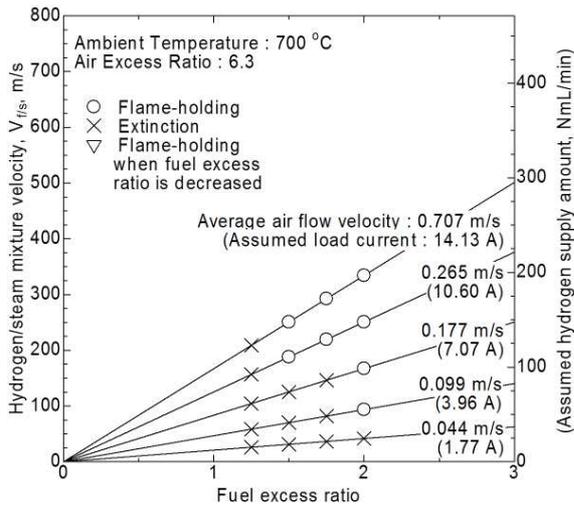
燃料噴出細管の違いによるSOFCの発電への影響を検討するため、空気を1.2NL/min、水素を100NmL/min供給し、細管Bを組み込んだインジェクタについて、リアクタ温度を常温から昇温ののち700℃で安定するまでの開回路電圧(OCV)の測定をし、こちらも既報の細管Aを組み込んだインジェクタと比較した。なお、水素の充満による事故を防止するため、常温の状態からブタン炎トーチでインジェクタに点火して実験を行った。

高温下のSOFCは燃料極に空気が触れると再酸化現象により破損する<sup>4)</sup>。余剰燃料噴出細管は、燃料瞬断時などにインジェクタ出口からのSOFC燃料極側への空気の侵入を抑制する効果が期待される。空気の侵入によりSOFC両極の酸素濃度差が小さくなるとOCVは低下し、両極とも完全に空気雰囲気になると0Vになる<sup>5)</sup>。これを利用して発電中のYSZ管の燃料を遮断した際のOCVの変化を測定する燃料遮断試験を細管AおよびBについて測定し、燃料極への空気の逆流に対する耐性を評価した。評価にあたり、細管Aを組み込んだインジェクタに対し、空気を1.2NL/min、燃料の代わりに水蒸気のみを100NmL/min供給した場合のOCVも計測し、この値より低い場合に空気が逆流を起しているかと判断した。

### 4. 実験結果および考察

図3に細管Aのインジェクタと細管Bのインジェクタの保炎マップを示す。燃焼場内平均空気流速 $V_{air}$ および模擬余剰燃料である余剰燃料/水蒸気混合気流速 $V_{fs}$ は、理想気体を仮定し、温度を考慮した体積流量をそれぞれ燃焼場断面積、および余剰燃料噴出細管出口面積で除して求めた。

細管Aに比較して細管Bのインジェクタの方が、保炎領域が広いことがわかる。これは、細管内径が広がったことで燃焼場内に噴出される模擬余剰燃料の流速が低下したこと、および噴出孔直径の拡大により火炎の比表面積が減少したことが要因と考えられる。余剰燃料の流速が同等な、細管Aの想定発電電流1.77Aの条件と細管Bの想定発電電流10.6および7.07Aの結果を比較しても、細管Bの保炎性が優れているため、流速の影響よりも火



Capillary B (Do: 1.0 mm, Di: 0.5 mm)

Fig.3 Flame-holding map.

炎の比表面積減少の影響が大きいと考えられる。細管 A の保炎マップでは、燃料過剰率 1.25 以下や想定発電電流 1.77 A 以下の領域では保炎していないのに対し、細管 B の保炎マップではこれらの条件で保炎する条件があった。

細管 B について、想定負荷電流を更に増大させて実験を行ったところ、想定負荷電流 42.4 A 以上、燃料過剰率 1.25 の条件で浮き上り火炎が観察された。図 4 にその際に観察された浮き上り火炎の画像を示す。このうち想定発電電流 42.4 A の条件では、燃料過剰率を 1.5 に増大させると細管に火炎が付着し、再度 1.25 へ減少させると再度浮き上がった。模擬余剰燃料の流速が高い条件であり、なおかつ、水蒸気分率が高い条件であることから、水蒸気希釈による燃焼速度の低下と流速の増大により火炎が浮き上がったと考えられる。本実験では燃料過剰率 1.25 がその最小値だが、より低い燃料過剰率であれば更に燃焼速度が低下し、より低い余剰燃料流速、より低い発電電流の条件でも浮き上り火炎が発生する可能性がある。付着火炎の場合、細管に火炎が接していることから、火

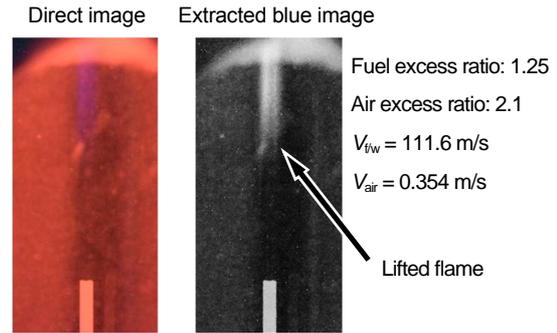


Fig.4 Images of lifted flame above capillary.  
(Colored by ethanol)

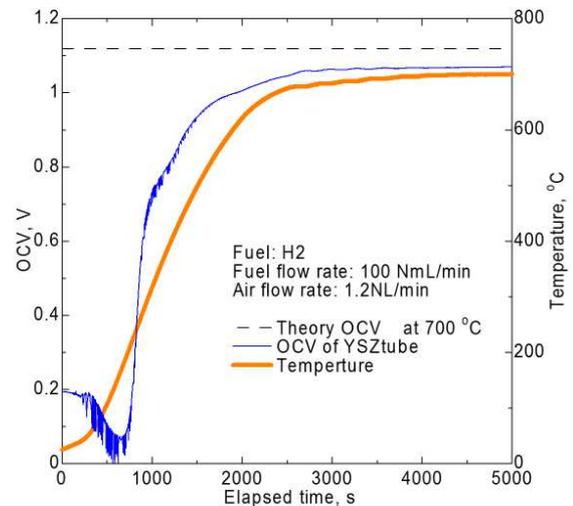


Fig.5 Results of OCV measurement of a YSZ tube with Capillary B (Do: 1.0 mm, Di: 0.5 mm).

炎の熱を受けた細管が赤熱する。一方浮き上り火炎の場合、細管と火炎が離れているため、細管が赤熱しない。細管 A を用いた実験では、保炎の成否を細管先端の赤熱で判断していた。よって、図 3 で保炎失敗となっている条件においても浮き上り火炎が存在していた可能性がある。今回、浮き上り火炎が発生する条件があることが確認できたので、保炎の成否の判断には火炎そのものを観察する必要があることがわかった。よって、今後の実験では、エタノールによる着色を行い、保炎の判断を行う。

図 5 に、細管 B を組み込んだインジェクタの、昇温中の OCV の時間変化を示す。また、表 2 に既報の細管 A を組み込んだインジェクタと細管 B を組み込んだインジェクタのリアクタ温度 700 °C における OCV の測定結果を示す。細管 B の OCV 測定においても、細管 A と同様に、

Table 2 OCV of injector and ratio from theoretical.

Injector type	OCV, V	%
Capillary A + SOFC <sup>(3)</sup>	1.065	95
Capillary A + YSZ tube <sup>(3)</sup>	1.068	95
Capillary B + YSZ tube	1.078	96
Theoretical at 700°C	1.12	100

リアクタ温度 300°C程度から OCV が上昇することが確認でき、温度が 700 °C の理論値 OCV に漸近した。インジェクタに細管 B を用いたリアクタも細管 A と同様 SOFC の発電に適した環境を満たしていることが確認できた。図 6 に燃料遮断試験時の OCV の時間変化を示す。2つを比較すると、細管 A の方が B よりも OCV の低下の速度が穏やかである。よって空気の逆流に対する耐性は細管 A の方が高く、余剰燃料噴出細管の直径が逆流への耐性に影響を及ぼすことがわかった。供給する燃料を水蒸気のみ置き換えた場合の OCV は 780 mV だった。ここから、SOFC インジェクタの再酸化耐性を燃料遮断から OCV が 0.8 V 以下に達するまでの時間で評価すると、細管 A は 86 秒、細管 B は 16 秒だった。OCV 計測中と発電中の SOFC では、燃料極での水素の消費速度が異なることを考慮する必要があるが、細管 A を採用することで、80 秒程度の燃料遮断に耐えられることがわかった。

## 5. 結言

SOFC の発電によって生ずる水蒸気を考慮した模擬余剰燃料を用い、余剰燃料噴出細管の直径が、その噴出孔での保炎に及ぼす影響を調べた。また、模擬 SOFC の YSZ 管の OCV 計測を定常時と燃料遮断時で行い、余剰燃料噴出細管の直径が、SOFC の発電に適した環境かどうかを調べた。以下に得られた知見を示す。

- 1) 余剰燃料噴出細管として、細管 A (外直径 0.40 mm, 内直径 0.21 mm) を組み込んだインジェクタと細管 B (外直径 1.0 mm, 内直径 0.5 mm) を組み込んだインジェクタを比較したところ、細管 B を組み込んだインジェクタの方が、保炎領域が広いことがわかった。
- 2) 細管 A と細管 B の保炎性の違いは、流速の影響よりも火炎の比表面積の影響が大きいと考えられる。
- 3) 低燃料過剰率かつ高流速の条件で浮き上り火炎が発生することがわかった。
- 4) 細管 B を用いたインジェクタの OCV も細管 A 同様、理論値に近い値であったことから、細管 B を用いたリアクタ内も SOFC の発電に適した環境であることがわかった。
- 5) 燃料遮断時の OCV の推移は、細管 B よりも細管 A の方が低下の速度が穏やかであり、細管 A の方が燃料瞬断時の空気の逆流に対する耐性が高いことがわかった。

## 参考文献

- 1) 岡井敬一, 渡辺紀徳, 航空機エンジン電動化の最新研究状況, 日本ガスタービン学会誌 No. 43 Vol. 3: 50-55, (2015).

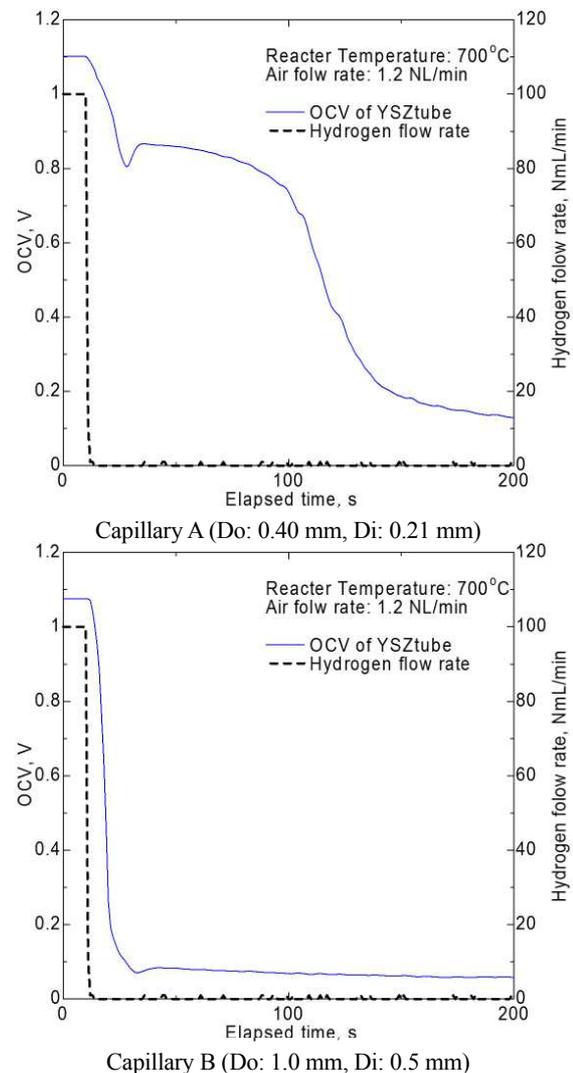


Fig.6 Results of OCV measurement of a YSZ tube at fuel shutoff experiment.

- 2) 阿部翔一, 野村浩司, 菅沼祐介, 岡井敬一, 田頭剛, 西沢敬, 燃料電池/ガスタービンハイブリッド推進機用リアクタの燃料インジェクタの開発, 日本大学生産工学部第 51 回学術講演会講演概要, pp.941-958, (2018).
- 3) 阿部翔一, 野村浩司, 菅沼祐介, 岡井敬一, 田頭剛, SOFC/ガスタービンハイブリッド推進機用リアクタにおける水素火炎の保炎, 第 59 回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, 2C08, (2017).
- 4) SOFC動作環境中における燃料極Ni-YSZサーメットの機械特性評価, 日本機械学会論文集 (A編) 78 巻787号, pp.349-360, (2012)
- 5) 株式会社 エムシステム技研, 計装豆知識 | ジルコニア式酸素濃度計の話, (1994), [https://www.m-system.co.jp/mstoday/plan/mame/b\\_sensor/9407/index.html](https://www.m-system.co.jp/mstoday/plan/mame/b_sensor/9407/index.html), (参照2019-10-19).