

燃料電池／ガスタービンハイブリッド推進機用燃料インジェクタの開発と水素燃焼試験

日大生産工(院) ○ 鍛田 翔 日大生産工(院) 久保 諒 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

現在,世界的に航空機の電動化についての研究が進められている. 航空機の需要増加による燃料消費量の増大によって, CO_2 や NO_x などの有害排出物の排出量が増加することが懸念されているためである. こうした状況の中, ICAO や IATA は CO_2 などの排出量削減目標を決定し, 有害排出物の抑制を目指している^{1, 2)}. 現在宇宙航空研究開発機構(JAXA)では, 将来型の航空機として図1のような形態の航空機を想定し, 様々な検討が行われている. この形態の航空機の特徴は, 高効率の発電用エンジンを搭載し, 推進は分散配置された電動ファンで行うことである³⁾. 推進用のファンを電動化することで, 一つのエンジンで複数のファンを駆動させることができるため, 推進効率の向上と熱効率の向上を図ることができる.

このような航空機の推進システムにおいて重用になるのが, 高効率の発電用エンジンシステムである. そこで着目されているのが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エンジンシステムである. SOFCは高温環境で作動する燃料電池であり, ガスタービン(GT)と組み合わせることで高効率な発電システムになる. 図2は, 航空機適応にあたって現在考えられているSOFC/GTハイブリッドシステムの概念図である. このシステムでは, SOFCとGTを組み合わせたサブシステムを, メインのガスタービンに組み込む形になっている. メインシステムの燃料にはケロシンを, サブシステムの燃料には水素を用いることが考えられている. サブシステムには独立したコンプレッサを設けることで, 温度や圧力といったSOFCの発電環境を安定させることができる. また, SOFCが使用しなかった余剰燃料は, SOFC下流にリアクタを設けそこで燃焼させタービンを駆動する. このサブシステムのタービンは, サブシステムのコンプレッサを駆動する. コンプレッサの駆動に不足する動力は電動機で補助することが想定されている. タービ

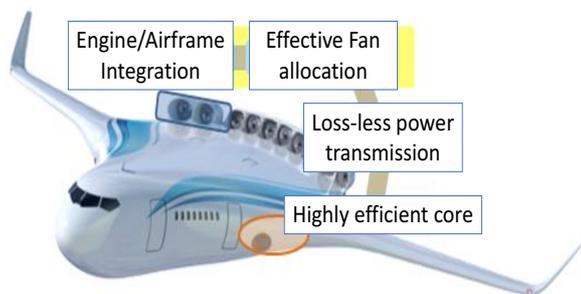


Fig.1 Image of an aircraft equipped with SOFC/GT core and separated electric fan³⁾.

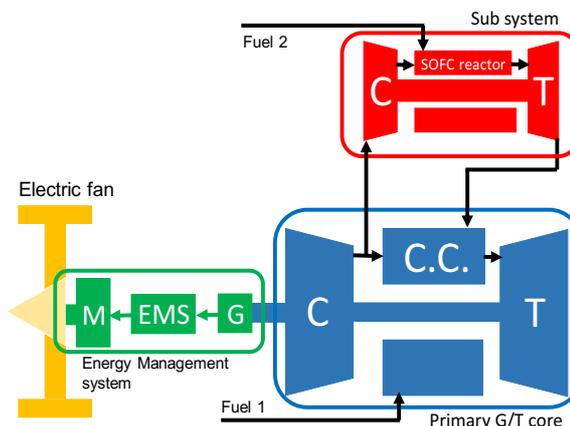


Fig.2 Configuration diagram of SOFC/gas-turbine hybrid propulsion system.

ンを通じた燃焼ガスはメインシステムに戻される.

航空機用のシステムとしてシステム全体は小型, 軽量であることが望ましい. SOFCとGTを組み合わせたシステムについては, 内側が燃料極となる円筒型のSOFCを, リアクタに余剰燃料を導入する燃料インジェクタとして用いる形式が考えられている. SOFCとリアクタを一体化させることで, システムの小型化を図ることができる. また燃料電池は通常スタックに

Development of Fuel Injector for Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Propulsion and Hydrogen Combustion Experiment

Kakeru KUWATA, Makoto KUBO, Hiroshi NOMURA, Yusuke SUGANUMA,
Keiichi OKAI, Takeshi TAGASHIRA and Akira NISHIZAWA

して用いることから、図3のように円筒形のSOFCを複数並べてリアクタ内に配置することが考えられている。

SOFCからの余剰燃料は高温の空気と混じり合いながら自発点火するため、巨視的な観点からは拡散燃焼の形態となる。燃料インジェクタは様々な余剰燃料流量で保炎が可能だが、SOFCの構成材料はセラミックスであるために熱衝撃や熱応力に弱く、火炎がインジェクタ先端に付着するような燃焼状態は燃料インジェクタの破損を招く恐れがあるため望ましくない。またSOFCが高温の状態では空気SOFC内に逆流すると、発電性能が悪化するばかりでなく、燃料極が酸化して破損してしまう。他にも、安定した燃焼とSOFCの発電が両立できる流量条件の把握や、燃料電池の発電に伴い発生する水が燃焼やリアクタ下流に設置されるタービンに及ぼす影響、密接して配置したSOFCの相互干渉が発電・燃焼に及ぼす影響など、検討しなければならない問題は非常に多岐にわたる。そこで我々はSOFCを組み込んだリアクタを模擬したラボスケールの実験装置を開発した。本報では開発した装置について、水素を用いた余剰燃料の燃焼試験を行った結果について報告する。

2 実験装置

実験装置の概略を図4に示す。実験装置は燃焼器、SOFC燃料インジェクタ、電気ヒータ、空気供給系、燃料供給系、水供給系などからなる。図5に燃焼器周辺の概略を示す。燃焼器には、火炎の観察を行うため、内径17.5 mm、長さ125 mmの石英ガラスを用いる。SOFC燃料インジェクタは、外径8 mm、内径5 mmのイトリア安定化ジルコニア(YSZ)製のセラミックチューブ(ニッカトール ZR-8Y)であり、SOFCを電解質材料のみで模擬した。模擬SOFCは発電効率が非常に低い、発電環境をモニタリングするために計測する開回路電圧(OCV: Open Circuit Voltage)はSOFCと同じ値が得られる。SOFC燃料インジェクタの内壁と外壁には図5のように先端露出型K種熱電対を挿入して测温接点を接触させることができるようになっており、これをリード線として用いることでOCVを測定する。燃焼実験中はOCVを測定することで、セラミックチューブがSOFCとして正常に動作する環境条件かどうかの判断を行う。実験時には装置全体をSOFCの作動環境温度まで昇温する必要があるため、燃焼器上流全体をセラミックファイバーヒータ(WATLOW VC404A06 A)で覆う。

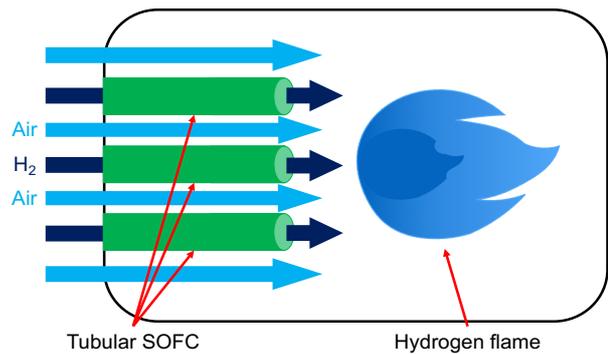


Fig.3 Schematic diagram of SOFC reactor.

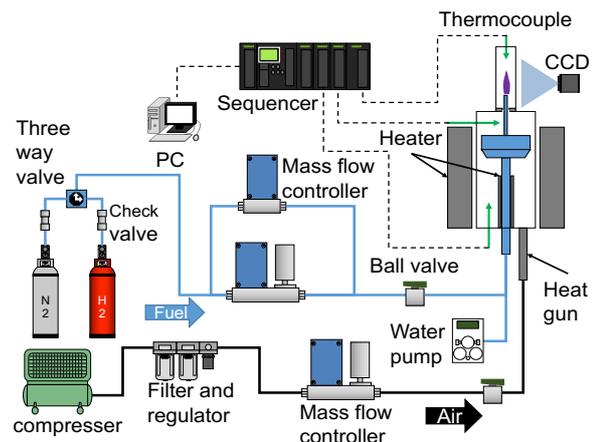


Fig.4 Experimental apparatus.

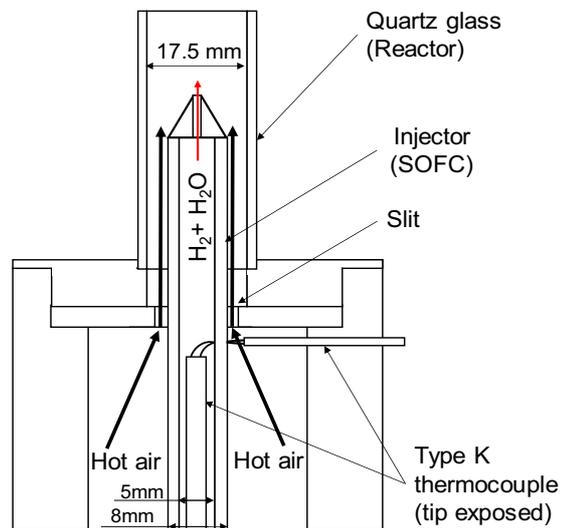


Fig.5 Experimental SOFC reactor.

SOFC 燃料インジェクタの先端は、SOFC 内への空気の流入を防ぐため接着剤(東亜合成 アロンセラミック D)で円錐状に塞ぎ、頂点に穴を開けることで燃料噴出孔とした。SOFC 燃料インジ

エクタは、円柱状のセラミックスマニホールドに支持されている。前述したように SOFC をスタックにして用いることを考慮すると、今後 SOFC 燃料インジェクタを複数配置して実験を行う必要があると考えられる。その場合は、マニホールドの部品を交換することで SOFC インジェクタを増やし、燃焼器部分を交換することで実験が可能である。

燃料供給系には少流量用(KOFLOC FCC-3000-G2-H2)と大流量用(Azbil MQV0050)のマスフローコントローラを設置し、少流量用は主に燃料ラインの窒素パージなどに用いる。SOFCが発電時に発生させる水は、燃料供給系に接続された水供給系より燃料に水蒸気を混合することで模擬した。空気はコンプレッサ(HITACHI BEBICON)から供給し、マスフローコントローラ(Azbil MQV0200)で流量制御を行う。空気は最大で65 NL/minを供給できる。装置本体内部に挿入された燃料供給管には燃料および水加熱用のシースヒータ(坂口電熱 1M-2-700)が巻かれており、また装置本体空気導入口にはヒートガン(ヒートテック ABH200V-650W)が取り付けられている。これらのヒータによって燃料と空気を加熱し燃焼器に供給する。

加熱された空気は SOFC 燃料インジェクタの周りに設けられたスリット部を通過して燃焼器に流入する。スリット部を設けることで空気は燃料電池近傍を高流速で通過するため、SOFC 燃料インジェクタ外側の空気極へ空気の供給を促進させるねらいがある。また空気流速を増大させることで、火炎を浮き上がらせる効果が期待できる。

3 実験方法

まず燃料ラインに窒素を少量流しながら実験装置全体が500℃程度になるまで昇温する。水素の自発点火温度以上である600℃を超えた段階で窒素を水素に切り替え、700℃程度までさらに昇温し、燃料流量、水流量および空気流量を実験条件に合わせて保炎実験を開始する。今回開発した装置はいわゆる同軸噴流バーナの形になっている。したがってスリット部流速 V_s 、インジェクタ出口流速 V_f 、燃焼器平均流速 V_c 等が重要なパラメータになる。各部の流速は、該当部分を通る流体の温度を測定し該当部分の断面積で除することで求めた。

実験中は火炎の状態をUV用CCDカメラ(SONY XC-EU50)およびデジタルカメラで観察するとともに、燃焼器出口での燃焼ガス温度およびOCVを測定する。想定されるシステムでは、燃焼器下流にタービンが設けられることから、燃焼ガス温度は重要な基礎データの一つ

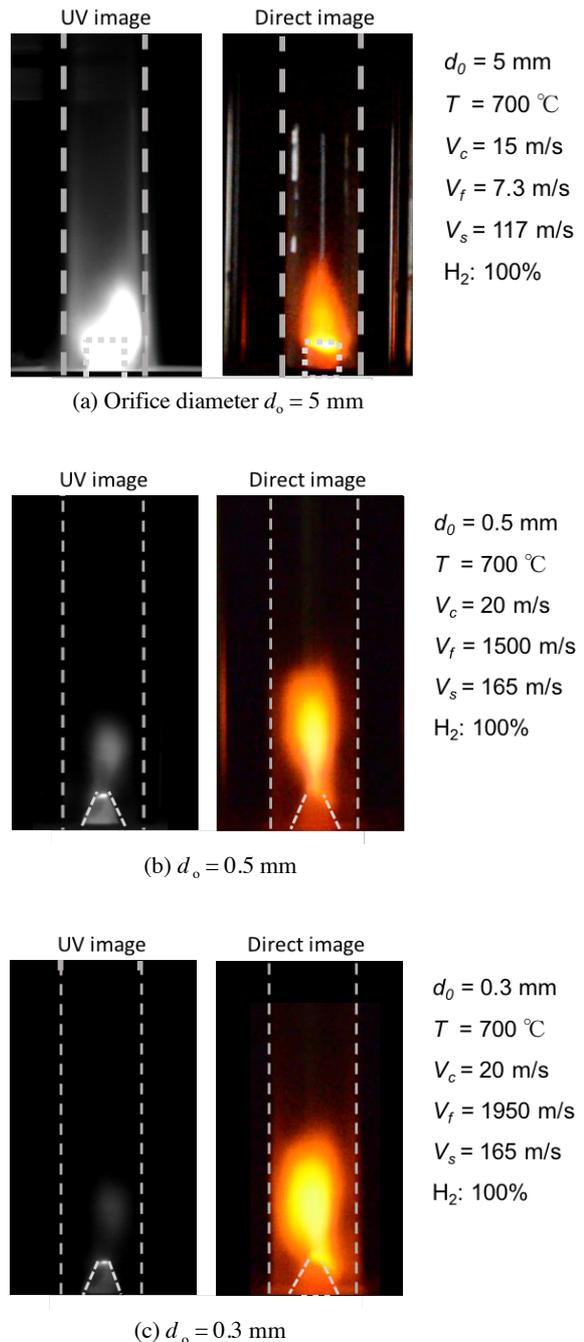


Fig.6 Images of flame stabilized at the SOFC injector tip (fuel: hydrogen).

と考えられる。また、実験中OCVを監視することで、その流量条件下でSOFCが正常に作動するかどうかを確認することができると考えられる。

4 実験結果および考察

完成した装置で水素を用いて燃焼試験を行った。点火直後の火炎の様子を図6に示す。インジェクタ先端に加工を施していない図6 (a)

では燃料インジェクタ先端に火炎が付着し、インジェクタの先端が赤熱している様子が見られる。試験後にインジェクタを取り出したところ、インジェクタ先端の破損がみられた。火炎が付着したことによる熱歪みが原因と考えられる。

火炎の付着によるインジェクタ先端部の破損を回避するには、火炎からインジェクタへの熱負荷を低減させる必要がある。対策の一つとしては、火炎を浮き上がらせることが考えられる。拡散燃焼の場合、燃料の噴出速度を十分大きくすることで火炎は浮き上がり、インジェクタの先端から離れる⁴⁾。そこで燃料噴出孔を小さくすることで燃料流速を増大させ、火炎を浮き上がらせることを狙った。燃料噴出孔の直径 d_0 を0.5 mmに狭め、先端を円錐型に加工した場合、火炎は図6(b)に示すようにくびれをもった形になった。インジェクタ先端の赤熱は図6(a)に比べ少なくなっているが、依然として火炎の熱負荷によるインジェクタ先端の破損がみられた。燃料噴出孔の直径を0.3 mmまで狭め、インジェクタ出口流速をさらに増大させた場合の火炎の様子を図6(c)に示す。この場合も火炎の付着がみられた。

SOFCが発電している状況を模擬するため燃料に水を混合した場合の燃焼試験を行った。燃料に水を混合した場合でも装置は正常に作動した。火炎の様子を図7に示す。水を混合させた場合、水を混合させなかった場合に比べ火炎の発光が弱く、観察が困難になった。またインジェクタ先端の赤熱は見られたため火炎が付着していることがわかった。今回の試験では、火炎が浮き上がり火炎となる実験条件を得ることはできなかった。

燃料インジェクタの形状については、インジェクタ先端の形状、スリット部の幅やスリット部とインジェクタ先端の燃料噴出孔との距離等検討すべき形状のパラメータが存在する。また燃料インジェクタの本数を増やす場合は、インジェクタ同士の間隔やその並べ方等も検討する必要がある。

また今回の燃焼試験において、燃料インジェクタ周辺の空気および燃料の温度は700 °Cと非常に高温の状態にある。SOFCの作動温度は、YSZを電解質に用いたものでは700~1000 °C程度であり、水素の自発点火温度を上回っている⁵⁾。このような高温環境での水素燃料の燃焼に関しては知見が少なく、基礎的な調査が必要であると考えられる。今後は燃料インジェクタの破損がない空気流速、燃料流速、水蒸気濃度の

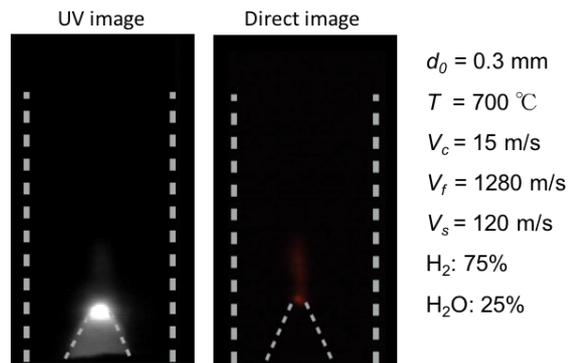


Fig.7 Images of flame stabilized at the SOFC injector tip (fuel: hydrogen/water).

条件を調査するとともに、燃料インジェクタの発電試験を行い、OCVの取得を行う。

5 結言

SOFCを燃料インジェクタに用いるガスタービン燃焼器を模擬したラボスケール実験装置を開発し燃焼試験を行った。以下に得られた知見を述べる。

- 1) 開発した実験装置は正常に作動した。
- 2) 空気および燃料の温度を700 °Cに設定し燃焼試験を行ったところ燃料インジェクタの破損が多発した。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP15K06608 の助成を受けて行った。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) ICAO ENVIRONMENTAL REPORT 2016, <http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202016.pdf>.
- 2) IATA Technology Roadmap 2013, <http://www.iata.org/whatwedo/environment/Documents/technology-roadmap-2013.pdf>.
- 3) Okai, K., Himeno, T., Watanabe, T., Nomura, H., Tagashira, T., Nishizawa, A. "Potential of Aircraft Electric Propulsion with SOFC/GT Hybrid Core", 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference Salt Lake City, UT (AIAA 2016-4713)
- 4) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一, 燃焼現象の基礎, オーム社(2011), p.95-114.
- 5) 田川博章, 固体酸化物燃料電池と地球環境, アグネ承風社, (2010), p.129-131.