

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

日本航空機開発協会は、世界の航空旅客輸送量が1995年から2015年までに2.6倍に増大し、年間6兆5282億人・kmになったと報告している。さらに、2015年から2035年の20年で2.5倍に増大すると予想している⁽¹⁾。一方で、ICAOは2050年まで燃料効率を年率2%改善し、2020年以降はCO₂ 排出量を増加させないという削減目標を掲げている⁽²⁾。このような背景から、航空機のさらなる環境適合性向上が要求されており、その方法として、推進系の電動化が検討されている。図1はJAXAで検討されている推進系が電動化された航空機の例である。推進系の電動化において、避けられないのは、電動推進機に供給する電源の確保である。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ジェット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、現在JAXAで考えられている航空用SOFC/GTハイブリッドエンジンシステムである。SOFCは、その特性上、発電に使用されない余剰燃料を生ずる。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自体の排熱を、GTでエネルギー回収をし、効率の向上を図るという構想である。

航空用の推進システムでは、出力重量比が大きいことが非常に重要である。SOFCを組み込んだ燃焼器については、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、SOFCリアクタとする組み合わせが考えられている。SOFCを燃料インジェクタとする場合、SOFCの先端あるいはその付近で燃焼が起こることとなり、火炎とSOFCが相互に影響することが考えられる。一例としては、火炎の熱負荷

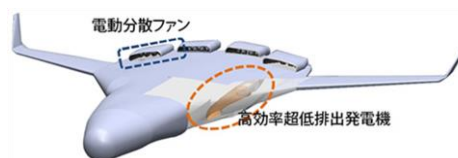


Fig 1. Concept of electric airplane by JAXA⁽³⁾.

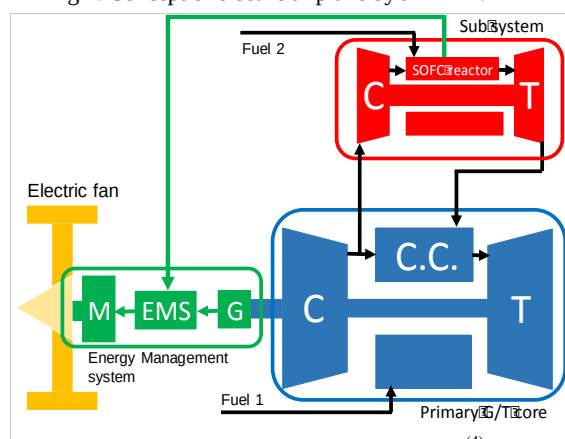


Fig 2. Configuration diagram of SOFC/GT⁽⁴⁾ hybrid propulsion system.

により、インジェクタが破損する条件があることがわかっている⁽⁴⁾。火炎の熱によるインジェクタの破損に対し、SOFCの余剰燃料噴出孔にアルミナ細管を設置することでSOFCの破損を防止できたが、保炎の確認ができなかった⁽⁴⁾。SOFCの余剰燃料は高濃度の水蒸気が含まれている。安定燃焼のために保炎用の燃料を追加投入する例⁽⁵⁾もあるが、効率の面から望ましくない。

本研究ではSOFCリアクタのラボスケール実験装置を用い、発電時の余剰燃料を模した水素／水蒸気混合ガス（模擬余剰燃料）を用いてSOFCの発電によって生ずる水蒸気が燃焼に与える影響を調べた。

Development of Fuel Injector for
 Reactor of Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Propulsion
 Shoichi ABE, Hiroshi NOMURA, Yusuke SUGANUMA,
 Keiichi OKAI, Takeshi TAGASHIRA and Akira NISHIZAWA

2. 実験装置

実験装置の概略を図3および4に示す。実験装置は、SOFCリアクタ、7本の円筒SOFCあるいは模擬円筒SOFC、円筒ヒータ、リアクタ加熱用ヒートガン、リアクタへの空気供給用のヒートガン、燃料ヒータなどから成る。実験装置の主要部分は、外径60.5 mmのSUS304管の中に組み込まれており、その周りに円筒ヒータを配置している。SOFCの動作温度は高温であるため、SOFCリアクタ内を800℃以上に加熱する能力がある。火炎の観察を行うため、リアクタ上部には外径50 mm、内径47 mmの石英管を用いた。また、リアクタ上部を加熱・保温するため、外径90 mm、内径85 mmの石英管により二重管とし、内側と外側の石英管の間に、リアクタ加熱用ヒートガンから熱風を流した。

SOFCは外径8 mm、内径5 mmの円筒型であり、内側から燃料極、電解質膜、空気極の順に積層されている。開回路電圧（OCV: Open Circuit Voltage）だけを計測する実験においては、SOFCの電解質材料であり、比較的安価で機械的特性がSOFCに近い外径8 mm、内径5 mmのイットリア安定化ジルコニア(YSZ)管(ニッカトール ZR-8Y)を模擬SOFCとして用いる。模擬SOFCを用いる場合、発電がほぼ起こらないので、余剰燃料に水蒸気が含まれない。そこで、発電時に生成される水蒸気をあらかじめ水素燃料に添加した模擬余剰燃料を供給して燃焼実験を行う。本来、発電しているSOFC周辺を通った空気は酸素濃度が低下するが、本報ではその影響は少ないとして無視する。

余剰燃料噴出孔に設置したアルミナ細管(余剰燃料噴出細管)は、外径が0.4 mm、内径が0.2 mmである。余剰燃料噴出細管は、SUS303製円板に7つ開けられた内径3 mmの空気噴出孔のそれぞれに、同軸に設置される。余剰燃料噴出細管先端は、空気噴出部より10 mm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。本実験装置は、計7本のSOFCまたは模擬SOFCを組み込むことが可能であり、SOFCスタックを想定した実験が可能である。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インジェクタと呼称する。

燃料である水素は高圧ボンベからマスフローコントローラを介して供給する。燃料への水蒸気の添加には、プランジヤーポンプを用いて実験条件の水蒸気量に相当する液体の純水を供給する。安定した水蒸気供給のため、180℃に温度制御されたカートリッジヒータを用いた燃料ヒータで水を水素とともに加熱する。リ

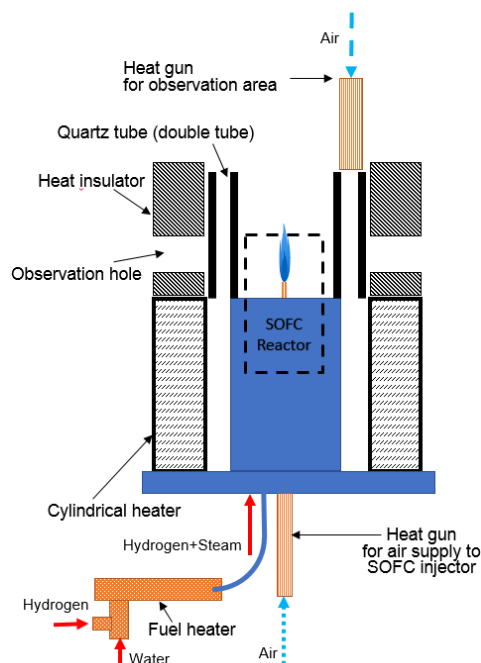


Fig. 3 Experimental apparatus.

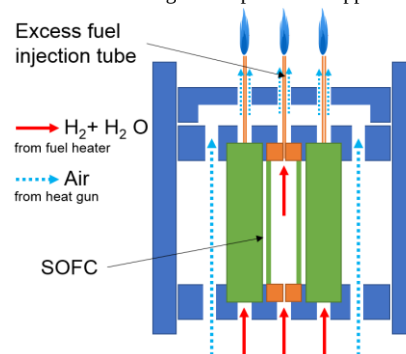


Fig. 4 Experimental SOFC Reactor.

アクタに供給する空気は、オイルフリーのコンプレッサにより供給し、フィルタユニットで水と異物を取り除いた後にマスフローコントローラで流量を制御した。水素の自発点火温度は500℃程度であるから、リアクタ内の高温空気によって点火する。

3. 実験方法

本実験では、円筒SOFCスタックの実験に先立ち、模擬SOFCインジェクタ1本での実験を行った。OCVの測定も行わず、余剰燃料噴出細管に保炎される余剰燃料の火炎のみを観察した。余剰燃料噴出細管から上方5 mmの位置にシース径1 mmのK熱電対先端を設置し、リアクタ内温度の計測を行った。燃焼実験時は熱電対を退避させた。

燃料供給配管に窒素を少量流しながら、リアクタが700℃になるまで、円筒ヒータおよび装置加熱用ヒートガンで昇温する。リアクタ内温

度が300℃を超えた段階で燃料ヒータを180℃に向けて昇温開始する。リアクタ内の温度が安定したことを確認した後、窒素を水素に切り替えた。水蒸気流量および空気流量を実験条件に合わせた後、水素流量を変化させ、保炎の成否を調べた。保炎は、余剰燃料噴出細管の明らかな赤熱が目視で確認できた場合を成功とした。よって、浮き上がり火炎が保炎されたとしても、本報では保炎失敗と判断している。火炎の観察は、目視およびデジタルカメラ(Panasonic GH-1)で行った。

実験パラメータは、水素流量、空気流量、模擬余剰燃料中の水蒸気濃度、およびリアクタ内温度である。リアクタ内温度は700℃に固定した。リアクタ内平均空気流速 V_{air} および余剰燃料/水蒸気混合気流速 $V_{f/w}$ は、理想気体を仮定し、温度を考慮した流量をそれぞれリアクタ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。

まず、水蒸気を添加せず水素のみを供給して実験を行った。空気平均流速を0.041 m/sで一定とし、水素流量を徐々に増加させた。

次に、SOFCの発電を模擬する模擬余剰燃料を使用した実験を行った。空気極面積(おおよそ円筒外表面積)が14.13 cm²である円筒SOFCが、電流密度0.125, 0.28, 0.50, および0.75 A/cm²で発電した場合を想定し、それぞれ、73.80, 49.20, 27.55, および12.30 NmL/minの流量で水蒸気を添加した。

SOFCインジェクタに供給する水素流量については、燃料過剰率1.25, 1.5, 1.75, および2の場合を検討した。燃料過剰率とは、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。

SOFCインジェクタに供給する空気流量については、空気過剰率2.1, 4.2, 6.3, 8.4, および10.5の場合を検討した。空気過剰率とは、発電に必要な酸素を含む空気の量を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。本実験で使用するSOFC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、複数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。

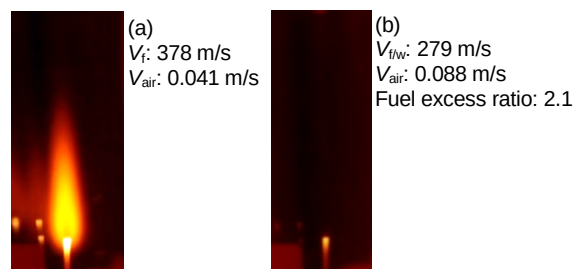


Fig.5 Images of flame on SOFC injector.

4. 実験結果および考察

空気平均流速を0.041 m/sで一定とし、水素のみを供給した実験では、水素噴出流速284 m/s程度まで水素流速を増大させると自発点火が観察され、余剰燃料噴出細管に水素火炎が定在した。水素噴出流速を387 m/sまで増大させたが(図5(a)参照)、アルミナ余剰燃料噴出細管に破損や溶損は観られなかった。図5-(b)は模擬余剰燃料を用いた実験での余剰燃料噴出細管付近の画像である。目視およびデジタルカメラのいずれでも、火炎を観察することはできなかったが、余剰燃料噴出細管の噴出孔付近が赤熱していることから、保炎に成功していることがわかる。

模擬余剰燃料を用いた実験で得られた保炎マップを図6に示す。縦軸は模擬余剰燃料の余剰燃料噴出細管出口流速、横軸は燃料過剰率である。図6(c)の▽のプロットは、模擬余剰燃料流速を増大させる過程では保炎しなかったが、保炎した状態から模擬余剰燃料流速を減少させる過程では保炎した条件である。保炎特性にヒステリシスがあることがわかった。燃料過剰率が1.25の場合、全ての条件で保炎を確認できなかった。図6(a)から(c)へと空気過剰率が增大するに伴い、保炎領域は燃料過剰率が大きい方へ移動した。模擬余剰燃料の流量が多い条件、即ち想定発電量が多い条件の方が、燃料過剰率が低い領域まで保炎した。模擬余剰燃料の流量が多い条件で保炎領域が広がった要因として、火炎の発熱量が保炎に対して支配的と考えられる。空気流量が多い条件で保炎領域が狭まったのも、空気流速の増大によって火炎基部に火炎からの熱が伝わりにくくなったことが原因と考えられる。

実機で想定されているSOFCリアクタの燃料過剰率および空気過剰率には一定の制限がある。燃料過剰率が過小な場合SOFCが破損する⁶⁾。燃料過剰率が過大であるのも効率の面から好ましくない。SOFC発電時の発熱を利用して動作温度を保つ自己加熱も検討されており、空気過剰率は一定値以下に抑えたい⁷⁾。実験結果から、余剰燃料噴出細管噴出孔面積を一定とす

るならば、1本のSOFCインジェクタあたりの発電量を増やすことで、低燃料過剰率での保炎が可能になることがわかった。今後リアクタのエネルギー変換効率を議論するためには、円筒SOFCにおける燃料過剰率と発電効率の関係を知る必要がある。

5. 結言

本研究では、模擬余剰燃料を用い、SOFCの発電によって生ずる水蒸気がSOFCの余剰燃料噴出孔における保炎に及ぼす影響について調べた。以下に得られた知見を記述する。

- 1) 空気過剰率が增大すると、保炎が可能な燃料過剰率の最小値が増大し、保炎領域が狭まった。
- 2) SOFCインジェクタ1本あたりの発電量を増大させることにより、保炎が可能な燃料過剰率の最小値が減少し、保炎領域が広がることがわかった。

謝辞

実験装置開発および実験方法について助言を賜った、JAXA 山田秀志氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本航空機開発協会，民間航空機に関する市場予測 2017-2036，(2017)，pp.11-12，p.26，(<http://www.jadc.jp/data/forecast/>より 2018-03-03 取得)。
- 2) ICAO, ICAO Environmental Report 2016, (2016), p.97, (<https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/env2016.aspx> より 2018-03-03 取得)。
- 3) 航空機用電動推進システム_ハイブリッド推進システム 航空新分野創造プログラム (Sky Frontier) JAXA 航空技術部門, <http://www.aero.jaxa.jp/research/frontier/feather/>, (2018-02-28 アクセス)。
- 4) 久保諒 燃料電池/ガスタービンハイブリッドエンジン用燃料インジェクタの開発 日本大学生産工学研究科機械工学専攻修士論文 (2017), p.10, p.78。
- 5) 河野雅人, 新井啓介, 安井芳則, 250kW 級 SOFC-MGT ハイブリッドシステム向けマイクロガスタービンの開発, 第 44 回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集 C-10, (2016)。
- 6) 清水涼矢 静電噴霧堆積法による平板固体酸化物形燃料電池空気極製作と発電環

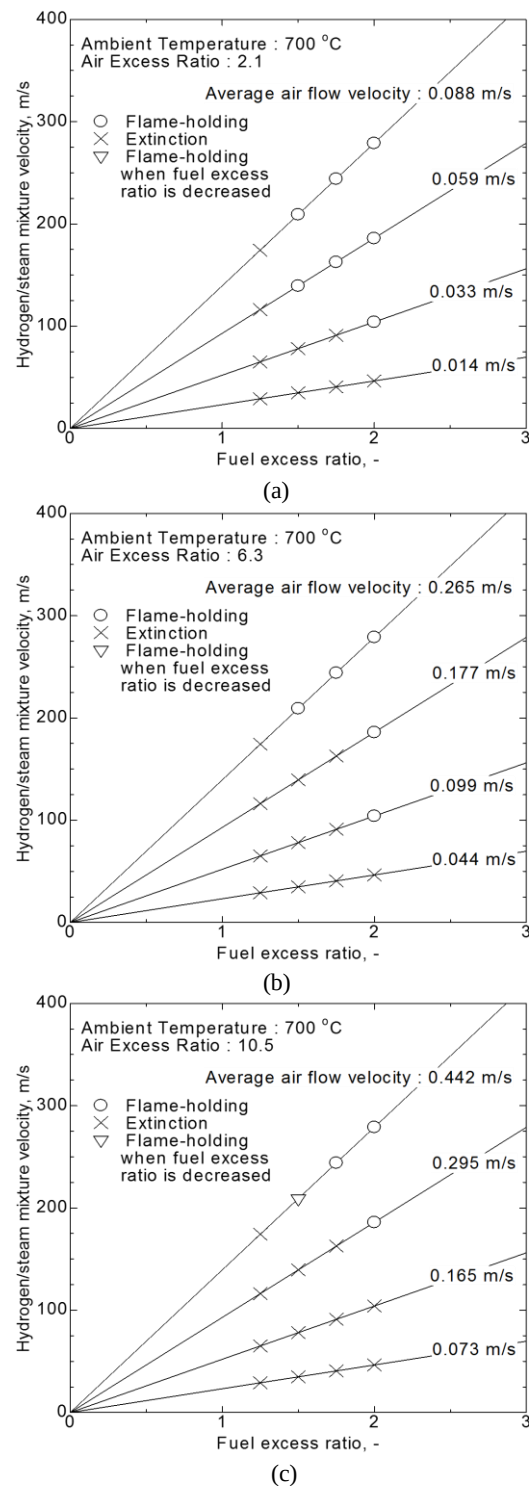


Fig.6 Flame-holding map

- 境変動耐性試験 日本大学生産工学研究科機械工学専攻修士論文 (2017), p.56。
- 7) 岡井敬一, 清水涼矢, 菅沼祐介, 野村浩司, 田頭剛, 航空機電動化に向けた負荷・入口条件変動下での固体酸化物型燃料電池特性に関する実験・解析評価, 第55回飛行機シンポジウム講演集, 1B03-JSASS-2017-5011, (2017)。