

ハイブリッド航空推進機関用固体酸化物形燃料電池の繰り返し 急速昇温・降温試験用発電試験装置開発と発電性能試験

大生産工(院) ○生駒 綾奈 日大生産工(院) 城 秀寿 日大生産工(院) 三ヶ島 康生
日大生産工 野村 浩司 日大生産工 菅沼 祐介

1. まえがき

現在、地球温暖化が深刻化している。IPCC第6次評価報告書でも、世界平均気温の上昇は人間の社会活動の影響であることは疑う余地がないと結論付けられている⁽¹⁾。温暖の原因は温室効果ガスであり、その年間排出量は二酸化炭素が大部分を占めている。そのため、航空業界でも二酸化炭素排出量の削減が急務である。ここで、国際航空運送協会（International Air Transport association: IATA）の予測より、2050年の航空旅客需要は10億人を超える可能性がある現状から、2050年までにネットゼロカーボンを達成することを目標とした⁽²⁾。これを達成するには2050年の産業規模では1.8Gtの炭素削減が必要となる。この社会問題を解決すべく、JAXAでは燃料電池とガスタービンエンジンの複合サイクルを電力源とし、推力を得るハイブリッド推進システムの開発が進められている⁽³⁾。燃料電池には固体酸化物形燃料電池（Solid Oxide Fuel Cell: SOFC）が採用されている。この理由として、SOFCは発電効率が高いこと、作動温度が高く排気のエンタルピーをガスタービンエンジンで利用できることが挙げられる。しかしながら、航空機にSOFCを搭載することに関しては問題点もある。SOFCの燃料極材料であるNiは高温空気雰囲気中で急速に酸化し、また極間電圧がNiとNiOの平衡電圧を下回っても酸化する⁽⁴⁾。その結果、燃料極材料の体積が膨張し、SOFCの破断につながる恐れがある。SOFCはセラミックスの積層構造であるため、急速な温度変化に対しても破損の恐れがある。どのような運転条件でSOFCが破損するかを把握することはSOFCの実用化に向けて必要である。

航空機に搭載するにあたり、SOFCの発電環境は変化する。変化が予想される水素・空気流

入量や温度を変化させ、単一セルでの発電試験を行う。SOFCの破損条件を調べるため、実験

では頻繁にSOFCを交換する必要がある。特に、急速昇温・降温試験を行う際は別の装置を使用してSOFCを繰り返し急速加熱・急速冷却するため、その試験の前後でSOFCの性能試験を実施するたびにSOFCを交換する作業が必要となる。そこで、SOFCの交換作業が容易かつ短時間になるように発電性能試験装置を改良した。

2. 発電試験装置改良

発電試験装置の概略をFig.1に示す。発電試験装置は、コイン型SOFCを設置するSOFC固定用セラミックス(以下セルホルダ)を内部に備えた円筒高圧力容器(SUS304 製)、温度調節器、背圧レギュレータ、精密デジタル圧力計、真空ポンプ、シーケンサ、マスフローコントローラー、制御用PC、エアーコンプレッサ、ポテンショ/ガルバノスタット(VersaSTAT4, アメテック株式会社)などから構成されている。SOFCを電気ヒータで加熱した後、アノード側に水素、カソード側に空気を供給し、ポテンショ/ガルバノスタットでSOFCの極間電圧と電流を計測するシステムである。今回は主にFig.1で黒色の点線で囲った高圧円筒容器内部の開発を行った。Fig.2に改良後の内部モジュールを含んだ圧力円筒容器を示す。内部モジュールはセルホルダ(ホトベール製)、燃料・空気供給管、電気ヒータ、断熱材、SOFC接続用リード線、SOFC雰囲気温度測定用K種熱電対などから構成されている。SOFCは800℃程度の高温で発電させるので、電気ヒータでSOFC周辺を加熱・保温できるようになっている。本報では、内部モジュールとその接続部の改良点を説明する。

Development of a power generation test apparatus for cyclic rapid heating and cooling tests of solid oxide fuel cells for hybrid aircraft propulsion systems and power generation tests

Ayana IKOMA, Hidetoshi JOU, Koki MIKASHIMA, Hiroshi NOMURA, and Yusuke SUGANUMA

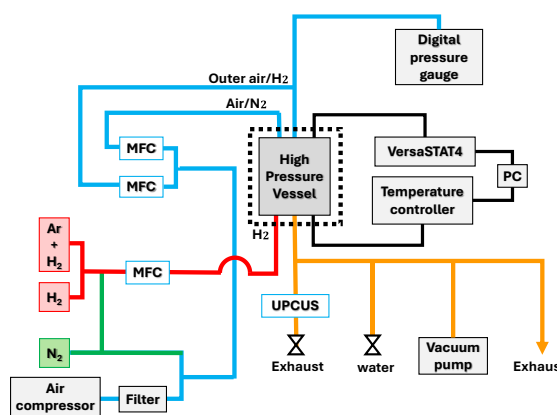


Fig. 1 Power generation test equipment.

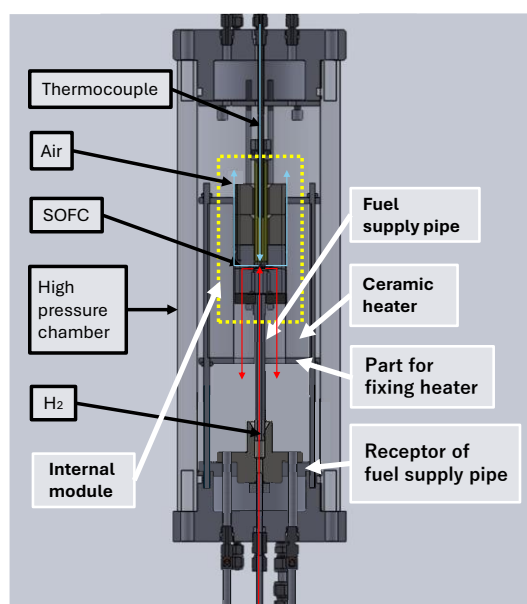


Fig. 2 Improved internal module installed into pressure vessel.

2 - 1. 燃料供給パイプ

従来の燃料供給パイプ全長 90mm から 142mm に延長した。この変更により下フランジに取り付ける水素結合部品の肉厚を削減し、それに伴い質量も軽くし取付負荷を削減しただけでなく、パイプ先端に設置された水素ガス漏れ防止の Oリングをヒータ熱源から離すことができた。

2 - 2. ヒータ

改良した SOFC 設置雰囲気昇温に使用する電気ヒータの概略を Fig.3 に示す。100W のカートリッジヒータ (ミスミ社, MHK6.25-76.2-V120-W100) を 6 本垂直に設置し断熱材 (ニチアス社, ファインフレックス BIO キャスト) で

固定した。従来まで使用していたセラミックファイバーヒータはヒータ素線がむき出しになっておりショートする恐れがあったためである。ヒータ導線は断熱材外部で並列に結線した。ヒータ導線がヒータ固定部品に接地しショートすることを防ぐため、導線を通る電気ヒータ固定部品に十分に大きい穴を開け、面取りを施した。また、ヒータ内径が内部モジュール外径と 1.6mm 程度の隙間しかなく外周空気が正常に流れない可能性があった。断熱材を成形する際に外側面と内面が同心円かつ内面が内部モジュールと両側 2 mm 以上の隙間を確保できるようにした。

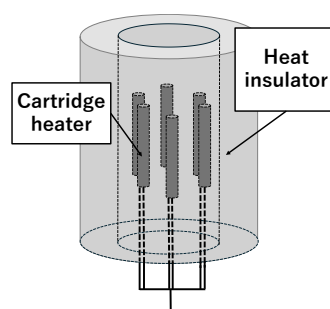


Fig.3 Electric furnace.

2 - 3. 水素管結合部品

以前は約 5.2 kg の質量があり、約 5 kg の下フランジと一体で取り付けられているため、取り外す際には作業者が合計 10 kg の部品を垂直に降ろす必要があり作業負担が大きかった。作業には 2~3 人を要、頻繁に SOFC を交換するには不向きであった。そのため、水素管結合部品の高さを 85 mm から 15 mm に変更し、質量を約 0.84 kg に削減した。加えて、円筒高圧力容器に収める内部モジュールを、後述するように水素管結合部品と電気ヒータ以外は全て上フランジに取り付けたことによって、SOFC を交換するために下フランジを外す必要が無くなった。また、SOFC の発電、および反応しなかった余剰水素が燃焼したことによって発生する水の流れが滞る箇所があったので、溝をつくり外部へとつなぎ排水経路を導くことで長時間発電試験を行っても排水が問題なく行えるように改善した。

2 - 3. 内部モジュール

Fig.2 に、内部モジュールの詳細 (Fig.2 で黄色の点線で囲った部分) を示す。内部モジュールは、ガスケット、耐熱シート、セルホルダ (セラミクス製)、鍾 (SUS304 製) などから構成される。旧型の実験装置では、円筒高圧力容器に設

置されている上下両方のフランジを取り外して SOFC の交換作業を行っていた。その場合、交換時の工程が多く、繰り返し実験を行う上で不便であった。そのため、水素管結合部品と電気ヒータ以外の内部モジュールを上フランジに取り付けることで、円筒高圧力容器外で SOFC の設置作業を全て行うことができるようになり、交換時の作業工程を削減することができた。

装置の改良前は、燃料電池の極間電圧と電流を計測するための白金リード線 (直径: 0.1 mm) とカーレントコレクタ (白金メッシュ) を電気溶接または白金ペーストによる焼結を行っていた。しかしながら、これらの方法では燃料電池の交換作業に 2 日程要していた。そのため、改善後は、白金リード線を白金メッシュに押しつける方法を採用した。その結果、作業時間を大幅に削減することができ、1 時間程度で交換することが可能になった。

発電試験装置開発において、実験装置の電気抵抗低減も合わせて行った。実験装置の抵抗が SOFC の内部抵抗値 (200 mΩ 程度) に比較して十分に小さく無い場合、SOFC の発電電力を計測する際に真の極間電圧より小さい値が計測され、燃料電池の出力を過小評価してしまう。そこで、SOFC と白金メッシュの接触抵抗、白金メッシュとリード線の接触抵抗、およびリード線を含む実験装置抵抗を低減することを試みた。密着性を向上させて接触抵抗を低減させるために、弾力性のある耐熱シートで SOFC とリード線を挟み、空気供給管の重みで上から押さえつけた。SOFC の代わりに銀板を挟んで測定した実験装置抵抗は、室温 (297 K) で 0.6 mΩ であった。ただし、銀板の抵抗は無視して算出した。これは、SOFC 内部抵抗 (200 mΩ 程度) よりも十分に小さい。この燃料電池をおもりで常に押さえつける工夫によって、SOFC 周辺の密がとれ、水素が空気極側に漏れ出すのを防ぐことができた。

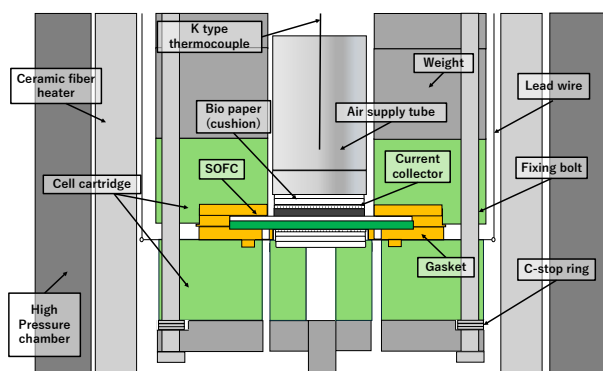


Fig.4 Internal module.

3. OCV値の取得

装置を改良した後に実験を進めていく上で、実験結果が実験環境や熱負荷等によるものであると明らかにするためには、実験装置が正しく改良できていることが必要不可欠である。そのため、開回路電圧 (OCV : Open Circuit Voltage) を取得し、その理論値と比較することで水素シールの健全性を調べる。理論値は以下のネルンストの式から算出される⁵⁾。

$$E = \frac{-\Delta g}{n_e F} + \frac{RT}{n_e F} \ln \left(\frac{C_{H_2} C_{O_2}^{0.5}}{C_{H_2O}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $-\Delta g$ 、 F 、 R 、 T および C はそれぞれのギブスエネルギーの変化量 [J/mol]、反応に現れる電子数、ファラデー定数 (9.648×10^4 [C/mol])、一般ガス定数 [J/(mol/K)]、温度 [K]、およびモル分率である。この式から、800 °C 環境における OCV は約 1.1 V であることが予想される。この理論値と実験値を比較し装置開発の完了とする。

4. 今後の実験計画

SOFC の交換作業を容易かつ短時間に行うことを可能にすることができた。3 人以上必要だった作業者を 2 人に削減することができ、約 2 日必要だった SOFC の交換時間を 1 時間程度に削減することができた。

今後の実験計画は、前述した SOFC の OCV 値を取得して理論値と比較することによりシールの健全性を確認し、その後、急速昇温降溫試験の前後で SOFC の発電性能試験を行って急速な温度変動が SOFC に及ぼす影響を調べる計画である。

参考文献

- 1) IPCC AR6 Synthesis Report: Climate Change2023, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>, (参照 2025-10-14)
- 2) IATA, "Our Commitment to Fly Net Zero by 2050", IATA, <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>, (参照 2025-10-14)
- 3) JAXA, エミッションフリー航空機技術の研究開発, 2021-07-27, <https://www.aero.jaxa.jp/research/frontier/feather/>, (参照 2023-10-10)
- 4) Faes, A., Hessler-Wyser, A., Zryd, A. and Van herle, J., A Review of RedOx Cycling of Solid Oxide Fuel Cells Anode, Membranes, Vol.2 (2012), pp.585-664.
- 5) 大塚利行, 加納健司, ベーシック電気化学, 化学同人(2000), p.34.