

電気推進実験船による 移動型水素燃料電池システムの運転試験

Development of Mobile Hydrogen Fuel Cell System for Marine Vessels to Eliminate Need for Fossil Fuels

下道 剛 SHIMOMICHI Tsuyoshi 山下 恭平 YAMASHITA Kyohei 大塚 尚登 OTSUKA Naoto 干鯛 将一 HIDAI Shoichi

近年、船舶からの温室効果ガスの排出量削減が喫緊の課題となっており、化石燃料を使用しない推進技術の開発が求められている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、国立大学法人 東京海洋大学(以下、東京海洋大学と略記)及びNREG東芝不動産(株)と共同で、水素社会実現に向けた燃料電池船の実用化を目指している。洋上での燃料電池の運転試験及び船舶の安全設計検証を目的として、電気推進実験船“らいちょうN”に当社製定置用燃料電池システムH2Rex™ 3.5 kW機を2台搭載して、洋上での運転試験を2016年10月から2年間実施した。実船試験を問題なく終了後、H2Rex™を解体調査した結果、船舶の振動や、温湿度、塩分による影響などは認められず、十分な耐久性を確認できた。発電性能の低下もなく、水素燃料電池システムの洋上運用が可能なのが検証できた。この結果を基に、小型化した30 kWモジュールの移動型水素燃料電池システムを開発し、実証試験を実施している。

In response to the increased emissions of greenhouse gases by marine vessels in recent years, demand has arisen for the development of propulsion technologies that do not use fossil fuels.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation, in cooperation with the Tokyo University of Marine Science and Technology and NREG Toshiba Building Co., Ltd., is making efforts to contribute to the realization of a hydrogen society through the practical realization of a fuel cell ship. In order to verify the performance durability of fuel cells in the marine environment, we installed two stationary H2Rex™ hydrogen fuel cell systems, each with a capacity of 3.5 kW, on the *Raicho N* electrically powered ship and conducted demonstration tests over a period of two years from October 2016. After the successful conclusion of these tests, the H2Rex™ systems were disassembled and inspected. The results showed that no deterioration in performance associated with the conditions of use in the marine environment, such as hull vibration, temperature and humidity, seawater salinity, and so on, had occurred. As the next step, we are now conducting validation experiments on a newly developed mobile hydrogen fuel cell system achieving greater compactness that has been installed on the *Raicho N*.

1. まえがき

東芝エネルギーシステムズ(株)は、これまで定置用の水素燃料電池システムを開発してきたが、今後、水素社会の実現に向けてその用途は、定置用やFCV(燃料電池自動車)だけでなく、その他の移動体にも広がるのが予想される。特に、国際海事機関(IMO)は、新規に建造する船舶に対し、2020年からは20%のCO₂(二酸化炭素)削減、2030年からは30%の削減を義務化している。水素燃料電池は、CO₂を排出しないことから、有力な代替エネルギーの候補である。

自動車や鉄道は、加速時にピークパワーを必要とするが、惰性走行時には大きな出力を必要としない。一方、船舶の場合は、船速の3乗に比例する推進力が必要となるため、加速時だけでなく、巡行時にも比較的大きな一定出力が必要になる。したがって、連続定格出力が可能、かつ長寿命

という当社の定置用システムの特長は、船舶の推進システムとの親和性が高いと考えられている。

当社は、野村不動産グループのNREG東芝不動産(株)及び東京海洋大学とともに、燃料電池船の実用化に向けた共同研究を実施している。技術面での開発だけでなく、水素船舶の安全設計及びその実証も目的としている。当社製の燃料電池システムを東京海洋大学の船舶に搭載し、海洋での燃料電池の運転試験を実施した。ここでは、2年間の運転試験が終了した燃料電池システムの解体調査や健全性検証について述べる。

2. 搭載した燃料電池システムの概要

燃料電池船の実用化に向けた第1ステップとして、洋上で燃料電池システムの運転を実証することを目的とし、東京海洋大学のバッテリーによる電気推進実験船であるらいちょうN(図1)の船尾甲板上に、当社製の定置用純水素燃料

電池システムH2Rex™ 3.5 kWを、右舷側と左舷側に1台ずつ設置した。

船上に設置するため、H2Rex™ 3.5 kWの標準機とは異なる構成とし、パワーコンディショナー（PCS）及び制御盤



項目	仕様
船名	らいちょうN
船質	軽合金(アルミニウム製)
総質量	9.1 t
全長	14 m
最大速度	11 kn (=20.372 km/h)
推進用電動機	90 kW (45 kW×2基)
燃料電池	7 kW (3.5 kW×2台)
二次電池	東芝製 SCiB 145 kWh (13.2 kWh×11パック)
実船試験水域	東京海洋大学(東京都江東区)から半径10海里以内

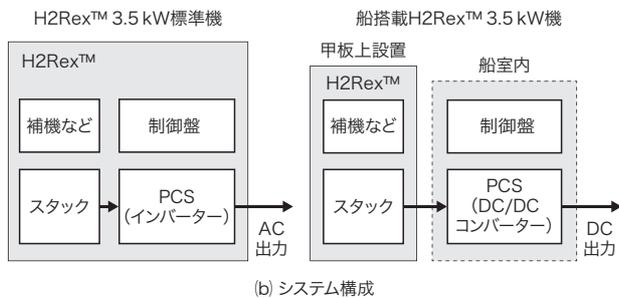
図1. らいちょうNと主な仕様

東京海洋大学の電気推進実験船らいちょうNの船尾甲板に、2台の燃料電池システムを搭載した。

Raicho N and its main specifications



(a) 搭載状況



(b) システム構成

図2. らいちょうNに搭載した定置用H2Rex™

標準機は、一つのパッケージに全ての構成部品が納められているが、船舶用は、安全基準に準拠するため、制御盤とPCSを別室に設置した。

Stationary H2Rex™ system installed on Raicho N

を、H2Rex™本体とは別のユニットとした(図2)。これは、可燃ガスである水素を扱う燃料電池設置区画と電気システムを別とする水素燃料電池船の安全ガイドライン案に準拠するためである。PCSと制御盤を別ユニットにし、内部のレイアウトを変更することで、パッケージ高さを約550 mm低くした。また、バッテリーの直流系統へ接続するため、PCSはDC/AC(直流交流)インバーターからDC/DCコンバーターに変更してDC出力とした。

3. 洋上運転試験の概要

2016年10月から約2年間、東京海洋大学において運転試験が実施された。大学から半径10海里(=半径18.52 km)以内の試験水域で試験航行を行い、船舶の揺れによる燃料電池システムへの影響などが調べられたが、発電状態に大きな影響はなく、安定した発電が確認された。

搭載されたH2Rex™ 3.5 kW機は、右舷側がTH2SP008、左舷側がTH2SP009(以下、#008、#009と略記)である。塩害による影響を調査するため、#008には燃料電池ユニットの吸気口に塩害フィルターを設置し、#009は標準フィルターだけとした。

運転試験終了時の積算通電時間、起動停止回数、発電時間を表1に示す。2年間の試験期間中、らいちょうNは東京海洋大学のポンドに係留されていた。そこで、運転だけでなく保管の期間までを含め、海洋環境における燃料電池システムの健全性を検証する目的で、運転試験終了後の燃料電池システムを解体調査した。

4. パッケージ調査

分解調査の内容は、船舶上での運用という点を考慮し、揺動・振動による影響と、温度・湿度・塩分による影響を検証した。

- (1) 揺動・振動による影響 船舶の揺れ及び衝撃に対し、パッケージの強度が維持されているか検証することを目的として、パッケージ寸法の測定、ねじ・配管の緩みの確認を行った。

パッケージ寸法の検査は、図3に示す12か所で実施

表1. 試験条件

Demonstration test conditions

項目	#008	#009
通電時間 (h)	691.2	698.3
起動停止回数 (回)	555	537
発電時間 (h)	323.0	347.6
塩害フィルター	あり	なし

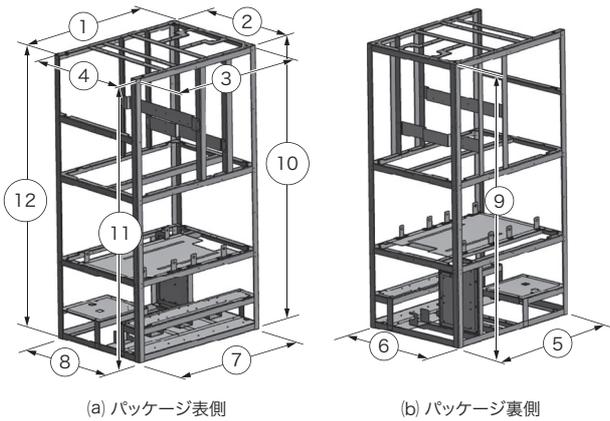


図3. 寸法測定箇所

振動による影響を検証するため、パッケージの12か所の寸法変化を検査した結果、全ての箇所設計規格値内であった。

External dimension measurement positions

表2. 気密試験結果

Results of leak tests on starboard side H2Rex™

(a) 検査条件

検査区間	検査圧力	検査基準
燃料	15 ₀ ^{+1.0} kPa	圧力降下 0.1 kPa 以内 保持時間 5分間
空気	15 ₀ ^{+1.0} kPa	圧力降下 0.2 kPa 以内 保持時間 6分間
廃熱回収膨張タンク入り口側	405 _{3.0} ^{+1.0} kPa	圧力降下 4.6 kPa 以内 保持時間 5分間
廃熱回収膨張タンク出口側	405 _{3.0} ^{+1.0} kPa	圧力降下 4.6 kPa 以内 保持時間 5分間

(b) 検査結果

検査区間	#008		#009	
	結果 (kPa)	判定	結果 (kPa)	判定
燃料	0.02	合格	0.00	合格
空気	0.05	合格	0.16	合格
廃熱回収膨張タンク入り口側	0.69	合格	0.41	合格
廃熱回収膨張タンク出口側	0.48	合格	0.34	合格

した結果、全ての箇所設計規格値内の寸法で、外観上の変形や亀裂は見られなかった。次に、配管の緩みを検討するため、気密検査を実施した。その結果、全ての検査区間で出荷規格を満足していることが確認でき、配管の緩みはないと判断した(表2)。

(2) 温度・湿度・塩分による影響 洋上での影響を評価するため、樹脂部品の劣化や金属部品の発錆(はっせい)の有無を目視確認した。

(a) 樹脂部品の劣化 樹脂部品や樹脂チューブの割れは、見られなかった。

(b) 電気端子台の腐食 配線端子部や固定ねじに、発錆は見られなかった。



図4. パッケージ内部の目視検査結果

パッケージ内の発錆状況を確認するため目視検査を実施した結果、塩害フィルターの効果が確認できた。

Results of visual inspection of package interiors

(c) 構造材の腐食 #008は、船側のカバー以外に簡易パネルで囲い、塩害フィルターを装備していたため、#009に比較して発錆が少なかった(図4)。

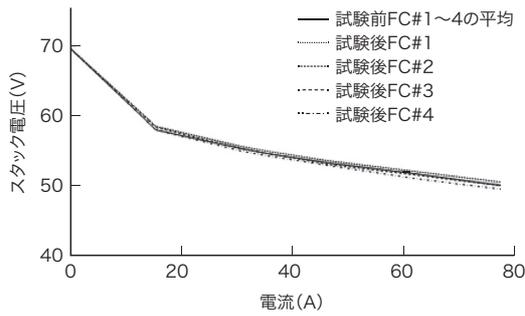
パッケージ解体調査の結果、構造強度は十分であることを確認した。また、温度・湿度・塩分に関しては、内装・外装パネルによる2重パッケージ構造と塩害フィルターによる塩害対策に効果があることを確認した。塩害による影響が大きい外洋での運用では、塩害フィルターによる対策が必要である。

5. 燃料電池スタック単体の発電性能

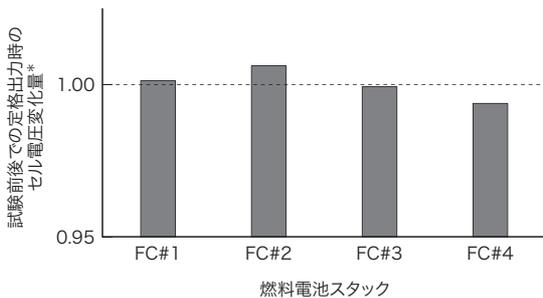
洋上運転試験後の燃料電池システムから燃料電池スタック単体を取り出し、発電性能を調査した。この燃料電池システムには、燃料電池スタックが4台搭載されており、#008にはFC#1とFC#2が、#009にはFC#3とFC#4が搭載されていた。

燃料電池スタックは、セパレーターとガスケットを用いて、燃料、空気、及び冷却水が互いに混合しないようにシールされている。洋上での不規則かつ大きな揺れによって、燃料電池スタックのシールが緩んでいないことを確認するため、ガスリーク試験を行った。試験の結果、4台全てのスタックでリーク量が工場出荷時から増加していないことを確認した。

次に、発電性能の調査を行った。3章で述べたとおり、システムとしての燃料電池スタックの発電に問題ないことは確認したが、燃料電池スタック単体でも洋上運転試験前後の発電性能の違いを調査した。洋上運転では、空気中の塩分が電池スタック内に入り込み、電極やセパレーターに吸着することで、発電性能に悪影響を与えるおそれが懸念されていた。



(a) I-V特性



(b) 電圧変化量

*試験前を1で規格化

図5. 洋上運転試験前後の発電性能比較

2年間の洋上運転試験前後で、ほとんど性能低下がないことが確認できた。

Comparison of power generation performance before and after demonstration tests

洋上運転試験前のFC#1～4の平均I（電流）-V（電圧）曲線と、運転試験後のFC#1～4それぞれのI-V曲線を図5(a)に示す。また、定格出力での運転試験前のFC#1～4の電圧平均値に対する運転試験後の電圧変化量を図5(b)に示す。洋上運転試験前後で、I-V曲線はほとんど変化しておらず、また、定格出力での電圧変化もなく、塩害による発電性能の低下は見られなかった。

この燃料電池システムには、空気の吸気口に塩害フィルターが取り付けられており、このフィルターの有用性も確認できた。

6. あとがき

洋上運転試験後の解体調査の結果、海洋環境での運用による燃料電池の性能低下はないことが確認でき、塩害に対するパッケージへの影響も評価できた。また、揺れや振動による発電状態への影響もなく、安定した発電が可能であることも確認できた。

燃料電池船の実用化に向けた次のステップとして、2019年10月に定格出力30 kWのH2Rex™ movをらいちょうNに搭載し、商業運航を見据えた実験船での実証試験を開始した（図6）。H2Rex™ movは、船舶や鉄道などの移動



図6. 30 kW移動型水素燃料電池システムを搭載したらいちょうN

燃料電池船の実用化に向けた次のステップとして、船舶や鉄道などの移動体向けに開発した定格出力30 kWの水素燃料電池システムを、らいちょうNに搭載した。

Newly developed 30 kW mobile hydrogen fuel cell system installed on Raicho N

体向けとして開発した発電モジュールであり、従来の定置用システムと比較して、大幅な軽量・コンパクト化を達成したのに加え、負荷応答性も向上させている。今後も引き続き、水素燃料電池船の実用化に向け、必要な検証を実施していく。



下道 剛 SHIMOMICHI Tsuyoshi
東芝エネルギーシステムズ(株)
水素エネルギー事業統括部 システム設計部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



山下 恭平 YAMASHITA Kyohei, Ph.D.
東芝エネルギーシステムズ(株)
水素エネルギー事業統括部 システム設計部
博士(環境学)
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



大塚 尚登 OTSUKA Naoto
東芝エネルギーシステムズ(株)
水素エネルギー事業統括部 燃料電池設計部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



干鯛 将一 HIDAI Shoichi, Ph.D.
東芝エネルギーシステムズ(株)
水素エネルギー事業統括部 燃料電池設計部
博士(工学)
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.