LNG 改質を伴う船用燃料電池システムの性能試験*

村 田 裕 幸** 藤 井 康 義***

Performance Test of Marine Fuel Cell System with LNG Reformer

By Hiroyuki MURATA and Yasuyoshi FUJII

As part of a study to build a marine fuel cell system with reformer, a series of performance tests of a Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC) which generates 1 kilowatt of electricity was carried out. Effects of fuel cell temperature, cell stack inclination and back pressure on power output were investigated. Followability of cell output to load variation was also examined. Prior to the performance tests, a reformer function verification test was conducted. It was confirmed that the reformer worked normally and that the concentration of carbon monoxide in the reformed gas was lower than the allowable value. As for the fuel cell stack, the following results were obtained: (1) Within a temperature range of 60 to 75 degrees Celsius, the temperature level of the cell stack did not affect its power output. (2) At a cell stack inclination of 22.5 degrees to the lamination direction of the cell, the power output was almost the same as that at upright attitude. (3) When back pressure was increased, the electromotive force of the cell stack increased to a value larger than that which can be derived from the Nernst equation. (4) The cell stack can follow rapid temporal and stepwise variations in electrical current.

1. はじめに

地球温暖化に対応するため、各国で温室効果ガス (GHG) 削減や省エネの取り組みが本格化する中、船舶・海運分野においても、その早急な実施が求められている^{1)・4)}。CO₂ 排出削減を目的とした燃費規制 (EEDI 規制) をエンジンの燃費向上で実現することは、すでに高い熱効率を達成している船用ディーゼルエンジンでは容易ではない。このため、燃料を天然ガスに転換することで EEDI 規制をクリアしようとする試みが盛んになっている。

船舶で天然ガスを燃料として用いる場合、ガスエンジンを採用するのが一般的であるが、それ以外にもガスタービンや燃料電池など、天然ガスを利用する動力システムは存在する。このうち燃料電池⁵⁾については、その効率の高さから輸送機関の動力源として期待されながら、コストや燃料である水素の供給・貯蔵方法の問題から広く実用に供されているとはいえないのが現状である。熱効率が従来のエンジンに十分対抗し得る

燃料電池を船舶に適用することは、今後急速に進展すると期待される自動車や陸用の燃料電池における性能向上やコストダウンを活用できる可能性も含めて、検討する価値が高いと考えられる。

また、船舶では近年、①熱機関の運転条件の最適化、②ポッド推進等の高効率推進器の採用、③排熱回収や自然エネルギーの利用等によるエネルギー源の多様化に対応できるシステムとして、電気推進システムの採用が進みつつある。燃料電池は高効率の発電システムであり、熱機関のように機械的な出力を電気に変換する必要がないことから、電気推進システム用の動力源として理想的と言える。

本研究は、高効率であり、可動部分がほとんどないためメンテナンスが容易で、将来の動力システムとして期待される燃料電池システムの船舶への適用・実用化に資するため、コンパクトな改質装置を開発するとともに、天然ガスを利用した燃料電池システムを内航船に搭載可能な形で構築することを目的とする。今回、その一環として固体高分子形燃料電池 (PEFC) プロトタイプ試験装置を試作して性能試験を実施し、燃料電池を船舶に適用する際の課題について検討を行ったので、その結果について報告する。

*原稿受付 平成 28 年 4 月 18 日。

**正会員 海上技術安全研究所 (三鷹市新川 6-38-1)。

*** ヤンマー株式会社 (米原市梅ヶ原 2481 番地)。

2. 実験装置及び実験方法

本試験で使用した燃料電池セルスタック (図 1) は Fuel Cell Power (現 Doosan) 社製, 出力 1kW の PEFC で, 電極面積 133 cm², セル数は 24 である⁶⁾. 本試験では, 燃料として天然ガスの主成分である CH₄ を使用するため, 燃料ガスを H₂ に改質する改質装置が必要となる. また, 試験中はガス流量, 改質装置・セルスタック温度を制御しなければならない. このため, 本試験では熱電工業(株)製の改質・制御装置 (図 2) を使用した. 改質装置の概略を図 3 に示す. PEFC では, 改質ガス中に含まれる CO が電極の Pt 触媒に悪影響を及ぼすため, 燃料の CH₄ は改質器で H₂, CO₂, CO を含むガスに改質された後, CO 変成器, 選択酸化器で改質ガス中の CO 濃度を許容値以下に低減させた上で, セルスタックに供給される.

本試験では, まず改質装置の機能確認のため, セルスタックに①H₂を直接供給する試験, 及び②CH₄を改

図 1 燃料電池セルスタック

図 2 試験装置全景 (改質・制御装置は左側)

図 3 改質装置のフロー

質したガスを供給する試験を実施して両者の電池出力を比較した. その結果, 改質ガスを供給した場合の出力は H₂ を直接供給した場合の出力とほぼ等しく, 改質装置が正常に機能していることを確認した. また, 改質ガス中の CO 濃度を選択酸化器出口で計測し, 許容値以下であることを確認した. なお, 本試験における改質ガス流量は何れのケースも同一で, 燃料電池セルスタックが定格出力を発生するのに十分な流量を供給している.

3. 実験結果及び考察

3. 1 セル温度が及ぼす影響

燃料電池における発電は化学反応であるので, 電池出力はセル温度によって変化する可能性がある. そこで, セル温度が電池出力に及ぼす影響を明らかにするため, セル温度を 60℃~75℃の範囲で 4 段階に変化させ (表 1 参照), そのときの電池出力を比較した. なお, 何れのケースでも加湿器温度はセルスタック温度よりも 5℃低く設定している.

その結果を V-I 特性として図 4 に示す. 図の横軸は電流値を電極面積で除した電流密度であり, 各シンボルの数値はセル温度を示す. また, 併せて示す本セ

表 1 各部の温度条件

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
セル温度	75℃	70℃	65℃	60℃
アノード加湿器温度	70℃	65℃	60℃	55℃
カソード加湿器温度	70℃	65℃	60℃	55℃

図4 セル温度が電池出力に及ぼす影響

ルスタックのカタログ値 Θ は、燃料として H_2 を供給したときの出力である。なお、本試験では電子負荷の性能上、電流密度 $395 [mA/cm^2]$ までしか実施できなかった。図より、セル温度によらずスタック電圧・電力はほぼ同一であり、本試験範囲ではセル温度が電池出力に及ぼす影響は殆ど認められないことが分かる。

3. 2 定傾斜が及ぼす影響

PEFCでは、発電に伴ってカソード側に水が生成されるが、生成水が適切に排出されないとセル内に水が滞留して出力が急低下する（フラッディング）恐れがある。このため、各々のPEFCでは、重力等を利用して生成水が排気用チャンネルから適切に排出できるように、チャンネルの流路構造・形状について様々な工夫がなされている⁷⁾。船舶に搭載されたシステムは定傾斜・横揺れ等の船体運動を受けるため、生成水のチャンネルからの排出に及ぼす船体運動の影響について検討する必要がある。本試験で使用した燃料電池セルス

図5 傾斜角が電池出力に及ぼす影響

タックは本来、陸上の熱電併給用のシステムとして利用されているため、船体運動が生成水の排出に及ぼす影響については検討されていない。

本試験では、セルスタックの傾斜が及ぼす影響を明らかにするため、正立状態、及びセルスタックをセルの積層方向に対して 22.5° 傾斜させた状態における電池出力を比較した。なお、傾斜方向については（本セルスタックの流路構造は明らかではないものの）生成水の排出が困難になると予想される、配管出口が上方になるような傾斜とした（図1参照）。両ケースのスタック電圧・電力を図5に示す。電流密度が小さいときには、傾斜した状態のスタック電圧が正立状態のときの値よりも若干大きいものの、電流密度の増加に伴ってその差は次第に小さくなり、 $250 [mA/cm^2]$ より大きい領域では両者に違いは認められない。これより、本セルスタックでは、 22.5° 以下の傾斜は電池出力に殆ど影響を及ぼさないとと言える。

3. 3 背圧が及ぼす影響

背圧が電池出力に及ぼす影響を明らかにするため、アノード側、カソード側出口配管に制御弁（図1参照）を設置し、背圧を変化させた負荷試験を実施した。このときのアノード側、カソード側の背圧、平均セル電圧、電流値、電池出力の経時変化を図6に示す。表記の都合上、背圧は圧力計の出力電圧を、電流値と電池出力は各々 $50 [A]$ 、 $800 [W]$ で無次元化した値を示す。

図中、 $t = 100 \sim 1200 \text{ s}$ では、アノード側背圧 $p_{b,an}$ 、カソード側背圧 $p_{b,ca}$ を各々 $1.5 [kPa]$ 、 $42 [kPa]$ （ゲージ圧）に維持しながら電流を次第に増加させて電池出力を計測した。このときの電池出力を $V-I$ 特性として図7に示す。図より、背圧が大気圧よりも高いときのスタック電圧、電池出力は背圧が大気圧のときと比べ

図6 背圧、セル電圧、電池出力の経時変化

図7 背圧が電池出力に及ぼす影響

ると大きく、背圧の増加によって電池出力が増大することが分かる。

また、図6の $t=1300$ s 以降では、電流を 50 [A] に維持しながらアノード側背圧をカソード側背圧と一致するまで増加させ、その後はアノード側、カソード側の背圧を交互に増大させて両背圧を 100 [kPa] まで上げている。このとき、背圧の増加に伴って平均セル電圧が僅かに増加するため、電池出力は次第に増大していることが分かる。

系の圧力が P_1 から P_2 へと変化するとき、各セルの起電力の変化 ΔV は以下のネルンストの式で表され⁸⁾、起電力は圧力の増大に伴って増加する。

$$\Delta V = \frac{RT}{4F} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 R は気体定数 ($=8.314[\text{J/K mol}]$)、 F はファラデー定数 ($=96,485[\text{C}]$) である。系圧力を大気圧からゲージ圧の 100 [kPa] まで 2 倍に増加させたとき、起電力の変化は式(1)から 0.005 [V] と計算されるが、図6の $t=1300 \sim 3300$ s で計測された各セルの起電力の増加は 0.031 [V] 以上あり、式(1)の計算値よりもはるかに大きい。このような理論値からの乖離は一般に見られる現象であり、その原因は圧力の増加によって電極の損失、特に陰極の損失が減るため⁸⁾と言われている。

3. 4 負荷追従性

船用の動力システムでは、操船等に伴う急激な負荷変動に対する追従性が要求される。前述のように、本試験で使用した燃料電池セルスタックは陸上の熱電併給用のシステムであり、急激な負荷変動に追従するような使用法は想定されていない。燃料電池を船用動力源として使用する場合、急激な負荷変動に対応するため、二次電池をシステムに組み込む等の方策が採ら

図8(a) 電流の変化に対する追従性 ($T_0=30$) 図8(b) 電流の変化に対する追従性 ($T_0=10$) 図8(c) 電流の変化に対する追従性 ($T_0=1$)

れるが、燃料電池自身の負荷変動に対する応答性を明らかにすることは、燃料電池を船用動力システムとして検討する際に重要である。

図9 ステップ状の電流変化に対する追従性

本試験では、セルスタックに流れる電流 i を次式

$$i = 50 \cdot t / T_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

のように T_0 秒間でゼロから 50 [A] まで直線的に変化させた負荷変動試験を実施し、その時のセル電圧の変化を計測することにより、セルスタックの負荷変動に対する追従性を検証した。本試験ではアノード側、カソード側の背圧をゲージ圧で 100 [kPa] に設定し、 T_0 を 600～1 s の範囲で変化させた。

図 8 に $T_0=30, 10, 1$ s のときの 1, 12, 24 番目のセル電圧の経時変化を示す。何れの場合も電流が流れるとセル電圧は直ちに低下し、電池が電流の変動に追従できることが分かる。他のケースでも、電池は負荷変動に追従できることを確認した。さらに、電流 i をステップ状に増加させたところ (図 9 参照)、同様に電池は電流の変化に追従できることが分かった。

4. まとめ

燃料電池システムを船舶に利用する試みの一つとして、PEFC プロトタイプ試験装置を試作し、改質装置の機能確認を行った上で、①セル温度、②セルスタックの傾斜角、③背圧を変化させた出力試験を行うと共に、負荷を時間的に変化させた負荷変動試験を実施し、以下の結果を得た。

- (1) 本試験範囲 (60℃～75℃) では、セル温度は電池出力に殆ど影響を及ぼさない。
- (2) 本セルスタックでは、セルの積層方向に対して 22.5° 傾斜させても、電池出力は殆ど変化しない。
- (3) アノード側、カソード側背圧を増大させると、電池出力が増加することを確認した。また、起電力の増加量は、ネルンストの式で予測される値よりも大

きい。

- (4) 急激な負荷変動に対する応答性を明らかにするため、電流を直線的に変化させたところ、セル電圧は直ちに低下して、電流の変動に追従できることが分かった。さらに、電流をステップ状に増加させた場合でも、電池は電流の変化に追従できることを確認した。

なお、PEFC の船舶への適用に関連して、海洋及び海岸地域の大気中に含まれる海塩粒子の主成分である塩化物イオンやナトリウムイオンが PEFC に不可逆的な性能低下をもたらすこと^{9)・15)}が知られており、PEFC を船用動力源として利用する際には、カソード側から供給される空気に含まれる塩分を除去するための対策を取る必要がある。

謝 辞

本研究開発は国土交通省の「次世代海洋環境関連技術開発支援事業」及び一般財団法人日本海事協会の共同研究テーマに採択され実施している。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉田公一, IMO における GHG 排出規制の動向, 海技研報告, 9-4 (平22-3), 293-302.
- 2) 日本船舶技術研究協会, 国際海事機関における温室効果ガス排出削減に向けた総合対策, (2010-3), 97-102.
- 3) 上田直樹, 船舶からの温室効果ガス排出規制の動向と削減技術開発への取り組み, 三菱重工技報, 47-1 (2010), 9-14.
- 4) 日本船舶技術研究協会, 三菱総合研究所, 船舶から排出される GHG を削減するための技術に関する調査研究報告書, (平21-4).
- 5) 資源エネルギー庁, 燃料電池の新たな用途について, (平26-3), http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchisuiso_nenryodenchis_wg/pdf/004_01_00.pdf.
- 6) Fuel Cell Power, Inc., FCPRA-S4 Fuel Cell Stack Installation and Operation Manual, TCH700.S.1401.010, (2014).
- 7) 例えば 高園康集, 固体高分子形燃料電池の発電性能向上のためのセパレータ流路構造に関する研究, 九州大学博士論文, (平24-3).
- 8) J. Larminie & A. Dicks, 植屋治紀 訳, 解説 燃料電池システム, (2004), 50, オーム社.
- 9) T. J. Schmidt *et al.*, The oxygen reduction reaction on a Pt/carbon fuel cell catalyst in the presence of chloride anions,

- J. Electroanalytical Chemistry, 508 (2001), 41-47.
- 10) M. S. Mikkola *et al*, The Effect of NaCl in the Cathode Air Stream on PEMFC Performance, Fuel Cells, 7-2 (2007), 153-158.
 - 11) A. P. Yadav *et al*, Effect of halogen ions on platinum dissolution under potential cycling in 0.5 M H₂SO₄ solution, Electrochimica Acta, 52 (2007), 7444-7452.
 - 12) K. Matsuoka *et al*, Degradation of polymer electrolyte fuel cells under the existence of anion species, J. Power Sources, 179 (2008), 560-565.
 - 13) 大野和之, 今村大地, 空気中に含まれる海塩粒子成分が固体高分子形燃料電池性能に及ぼす影響, 自動車研究, 30-7 (2008), 355-358.
 - 14) 大野和之, 今村大地, 空気中に含まれる海塩粒子成分が固体高分子形燃料電池の電解質劣化に及ぼす影響, 自動車研究, 32-7 (2010), 353-358.
 - 15) A. A. Franco, Polymer Electrolyte Fuel Cells: Science, Applications, and Challenges, (2013), 458-459, Pan Stanford Publishing.

著者紹介

姓 名 村田 裕幸

- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
- ・1956 年生
- ・国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所 環境・動力系
- ・最終学歴 京都大学大学院工学研究科機械工学専攻
修士課程
- ・専門分野 伝熱工学
- ・博士 (工学)

姓 名 藤井 康義

- ・1960 年生
- ・ヤンマー株式会社 中央研究所
パワーソース研究部
- ・最終学歴 豊田工業大学大学院工学研究科
修士課程
- ・専門分野 燃料電池