燃料電池の外航船舶への導入に関する基礎検討*

角 和 芳**

Basic Study on Application of Fuel Cells to Ocean Going Vessels

By kazuyoshi Sumi

While IMO (International Marine Organization) regulates CO₂ emissions from ocean going vessels to protect the marine environment, efforts are underway to design and develop various systems to reduce such emissions. As part of these efforts, the author carried out a simulation by applying PAFCs (phosphoric acid fuel cells) that do not release air pollution gases to the electric power system of an ocean going vessel model. At first, the author developed a vessel model in consideration of routes, speed, sailing schedules, diesel engine generator capacity and electric power consumption etc. Then the author designed the electric power system with PAFCs based on the model. Finally, the simulation designed to supply electric power from the diesel engine generator and PAFCs was carry out. From the results of the simulation, the author calculated the degree of reductions in fuel consumption and greenhouse gas emissions and concluded that the use of the PAFCs was an effective method to protect the marine environment.

1. はじめに

国際海事機関 (International maritime organization: IMO) において、船舶のディーゼル機関から排出される温室効果ガスである CO₂ や、NO_x などの大気汚染物質の排出量規制が段階的に強化されている状況下において、船社、機器メーカー等がそれらの排出量規制に対して種々の対策技術を検討している中、筆者はこれまで、国内を航行し、比較的小型の海技教育機構 海技大学校練習船 (総トン数 157t, ディーゼル発電機容量: 120kW) を対象として、作動中に温室効果ガスや大気汚染物質を排出しない燃料電池の導入について検討を行ってきた¹⁾。

本研究では、将来的に、普及すると考えられる、大型の外航船の燃料電池の導入について検討を行った²⁾。

本研究では、まず、大型の外航船の航路、速力、スケジュール、ディーゼル発電機容量、負荷電力等を資料やデータからモデル化した。次に、そのモデル化した船舶を対象としてりん酸形燃料電池を導入した電源システムの構成を行い、対象船舶が一定期間の航海を

行った場合のディーゼル発電機とりん酸形燃料電池の燃料消費量を比較し、燃料電池の導入による燃料消費量の削減効果について検証を行った。さらに、本研究では、りん酸形燃料電池の排熱を利用し蒸気を発生させた場合のボイラの燃料消費量の削減効果について検証を行い、最後に燃料電池の船舶への導入に関する今後の展望について述べた。

2. 燃料電池を導入した電源システムの検討

2.1 シミュレーションのモデル船舶

2.1.1 概要

本研究のシミュレーションのモデルとした、大形外航船は神戸港と香港港を往復航海する数万トンの大きさの航船 (以下、本船とする。) であり、負荷電力データを引用した文献 (3) に掲載されている電力調査表からコンテナや一般貨物を輸送する貨物船を想定した。

航海スケジュールは下記の様に、神戸港と香港港を往復航海するとする。航海距離と時間は Vessel tracker 社が提供している距離計算ツール (<https://www.vesseltracker.com/jp/static/Company.html>, 2018/6/29 閲覧) によって神戸港 (北緯 34.7°,

*原稿受付 令和 2 年 12 月 16 日。

**正会員 海技教育機構 海技大学校
(兵庫県芦屋市西蔵町 12 番 24 号)。

東経 135.2°) から香港港 (北緯 22.3°, 東経 114.1°) まで, 15 ノット (27.8km/h) の速力で航海すると, 95 時間かかる計算になる。ここで, 出港後は増速し 15 ノットになるまで 1 時間, また, 入港時は 1 時間前から減速し各港へ着岸するとした。したがって, 航海時間は 94 時間になる。

次に, 着岸後はすぐに荷役を行い, 荷役時間は 20 時間, その後, 4 時間は停泊し, 出港するとした。表 1 に想定した本船の運行状況と時間を示す。

表 1 想定した本船の運行状況と時間

運行状況	時間 [h]
神戸港出港後増速 (出港)	1
航海 (15 ノット)	94
減速し香港港着 (入港)	1
荷役 (香港港)	20
停泊 (香港港)	4
香港港発増速 (出港)	1
航海 (15 ノット)	94
減速し神戸港着 (入港)	1
荷役 (神戸港)	20
停泊 (神戸港)	4
計	240

2.1.2 電源システムと負荷電力

想定した本船の負荷電力は, 上述の電力調査表のデータを使用した。ここで, 電力調査表は, 船舶の設計時, 発電機の容量や台数を検討する時に用いられ, 船内において運転される各ポンプ用のモータ, 照明, 航海装置など, 負荷の名称と負荷電力, 及び船舶が停泊時, 荷役時, 出入港時, 航海時など運航状況別の合計負荷電力が示されている。表 2 に電力調査表に記載されている運航状況別の負荷電力を示す。

表 2 運航状況別の負荷電力

運行状況	負荷電力 [kW]
出港時 (神戸港, 香港港)	353
航海中 (神戸港から香港港)	308
入港時 (神戸港, 香港港)	353
荷役中 (神戸港, 香港港)	314
停泊中 (神戸港, 香港港)	111

次に, 電力調査表から本船は容量 360kW のディーゼル発電機が 2 機搭載され, 船内に電力が供給される。ここで, 航海中, 荷役中, 及び停泊中はディーゼル発電機, 1 機によって電力が供給され, 負荷率が 90% 以上になる出港及び入港時はディーゼル発電機 2 台によって電力が供給されるとする。

また, 電力調査表から負荷は交流 440V (各ポンプ等のモータ用), 交流 100V (照明用), 及び直流 24V (火

災警報装置等) に分けられる。電力調査表及び文献 (4) を基にディーゼル発電機によって電力供給される場合の電力供給システムを作成した。図 1 に本船がディーゼル発電機によって電力を供給する電力供給システムの概略図を示す。

図 1 電力供給システムの概略図

2.2 燃料電池と燃料の選択

燃料電池の選択について, 燃料電池には, 作動温度の違いから高温作動形と低温作動形ある。船上における運転や保守等を考慮に入れ, 低温形を選択し, 低温形の中でも, 固体高分子形燃料電池 (PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell) よりも容量が大きく, 分散型電源, 自家発電用として実用化段階であるりん酸形燃料電池 (PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell) を採用した⁵⁾⁶⁾。

また, 燃料電池の燃料の選択について, 現在, りん酸形燃料電池の燃料は天然ガス (メタン) やメタノール (主に天然ガスから製造される) 等の炭化水素が使用され, それらの燃料は, 燃料電池に供給される前に改質されて, 燃料中の水素のみが供給される。船上における貯蔵や取り扱いを考慮すると, 天然ガス等の気体燃料より液体燃料の方が有利であると考え, 船用燃料油である A 重油も視野に入れて検討を行った結果, 燃料電池の燃料として日本では 2009 年に規格化された低硫黄灯油 (硫黄分 0.001 質量分 [%10ppm], 平均組成: $C_{12}H_{26}$) を使用することとした⁷⁾。

2.3 燃料電池を導入した電源システム

図 2 に運転シミュレーション用に考案した燃料電池を導入した電源システムを示す⁵⁾⁶⁾。

燃料タンクに蓄積されている灯油は, 供給ポンプによって脱硫器に送られ硫黄分が除去され, 気化器に送

られ気化された後、改質装置に送られる。ここで、脱硫器及び気化器は電気ヒータによって加熱され、また、船内の負荷が変動した時は、供給ポンプの回転数が調整され、燃料の供給量が制御されるとする。

改質装置に送られる灯油は、水蒸気と混合された後、改質器において、バーナ（燃焼器）によって加熱され、水素（ H_2 ）と一酸化炭素（ CO ）に分離される。その後、 CO 変成器及び CO 除去器において CO の濃度が下げられ、スタック（燃料電池本体）の燃料極（アノード）に供給される。ここで、水蒸気は本船のボイラから供給することとした。

次に、スタックにおいて燃料と空気極（カソード）に送られた空気中の酸素の反応によって電力が発生する。発生した電力は、インバータによって交流に変換され、変圧器によって昇圧され、船内各電力系統に供給される。ここで、インバータ効率は 0.96、変圧器の効率を 0.98 とした。また、スタックの空気極及び改質装置のバーナにはブロワから空気を送ることとし、バーナには燃料極の残留水素を含む排気を送ることとした。

図2 燃料電池を導入した電源システム

3. 運転シミュレーション

3.1 運転シミュレーションの概要と負荷電力

本船が表1に示した運航スケジュールにしたがって、

神戸港を出港し航海を行い、香港港に到着、荷役、停泊し、香港港を出港、航海を行い、神戸港に到着、その後、荷役、停泊し、再び神戸港を出港するまでの240時間について、ディーゼル発電機を使用する場合と、燃料電池を使用する場合の燃料消費量の比較を行った。

ディーゼル発電機を使用する場合の本船の運航状況別の負荷電力は表2に示す通りである。また、燃料電池を使用する場合の負荷電力は、図2に示す燃料供給ポンプ、ブロワ等の負荷電力を10kWと仮定し、表2に示す運航状況別の負荷電力にそれぞれ、10kW加算することとした。

3.2 ディーゼル発電機の燃料消費量計算

ディーゼル発電機を使用する場合の燃料消費量は発電機用のディーゼル機関メーカーの協力を得て、容量が360kWの発電機用のディーゼル機関の出力[kW]と燃料消費率[kg/kWh]の関係を示す性能曲線⁹⁾を入手し、本船の運航状況別にディーゼル発電機の燃料消費量を求めた。

3.3 燃料電池の燃料消費量計算

燃料電池を使用する場合の燃料消費量は本船の運航状況別に次の手順により求めた⁹⁾。

まず、燃料電池の送電端出力（変圧器出口）を P_{FC} とて、スタックの出力 P_s を次式によって求めた。

$$P_s = \frac{P_{FC}}{\eta_{INV} \cdot \eta_T} \quad (1)$$

ここで、 P_s ：スタックの出力[kW]

P_{FC} ：燃料電池の送電端出力[kW]

η_{INV} ：インバータ効率、本研究では

0.96 とした。

η_T ：変圧器の効率、本研究では

0.98 とした。

次に、単セルあたりの電圧 V_c を次の様に求めた。スタックの電圧 V_s を 205V とし、スタックの電流 I_s を次式によって求めた。

$$I_s = \frac{P_s \times 1000}{V_s} \quad (2)$$

ここで、 I_s ：スタックの電流[A]

P_s ：スタックの出力[kW]

V_s ：スタックの電圧[V]、

本研究では 205V とした。

スタックの電流 I_s と単セルの有効電極面積 A_c から電流密度 i_D を次式によって求めた。

$$i_D = \frac{I_s \times 1000}{A_c} \quad (3)$$

ここで、 i_D ：電流密度[mA/cm²]

I_s : スタックの電流[A]

A_c : 有効電極面積[cm²], 本研究では 6400cm² (80cm 平方) とした.

燃料電池の電流密度 i_d と単セルあたりの電圧 V_c の関係を示す電圧・電流特性を文献(6)を参考として作成し, 単セルあたりの電圧 V_c を求めた. 図 3 に電圧・電流特性を示す.

また, 単セルの積層数 N_c を次式によって求めた.

$$N_c = \frac{V_s}{V_c} \quad (4)$$

ここで, N_c : 単セルの積層数

V_c : 単セルあたりの電圧[V]

V_s : スタックの電圧[V]

以上より, スタックにおける発電反応に必要な水素量 Q_H を次式によって求めた.

$$Q_H = \frac{I_s \cdot N_c}{2391.5} \quad (5)$$

ここで, Q_H : 発電反応に必要な水素量[Nm³/h]

I_s : スタックの電流[A]

N_c : 単セルの積層数

そして, 改質器に供給する燃料の量 Q_F を次式によって求めた.

$$Q_F = \frac{Q_H}{U_F \cdot U_R \times 37} \quad (6)$$

ここで, Q_F : 改質器に供給する燃料の量[Nm³/h]

Q_H : 発電反応に必要な水素量[Nm³/h]

U_F : 燃料利用率, 本研究では 0.80 とした.

U_R : 改質率, 本研究では 0.95 とした.

図 3 電圧・電流特性

尚, スタックに供給する空気量 Q_A は空気中の酸素の容量割合を 20.8% とし, 次式によって求めることができる.

$$Q_A = \frac{Q_H}{U_o \times 0.208 \times 2} \quad (7)$$

ここで, Q_A : スタックに供給する空気量[Nm³/h]

Q_H : 発電反応に必要な水素量[Nm³/h]

U_o : 酸素利用率, 本研究では 0.50 とした.

4. 運転シミュレーション結果

4.1 燃料消費量

本船がディーゼル発電機を使用する場合の燃料消費量を 3.2 節で述べた様に容量が 360kW の発電機用のディーゼル機関の出力と燃料消費率の関係を示す性能曲線によって, 本船の運航状況別に求めた. 次に, 本船が燃料電池を使用する場合の燃料消費量を 3.3 節で述べた手順によって, 本船の運航状況別に求めた. 表 3 に本船の運航状況別のディーゼル発電機と燃料電池の燃料消費量を示す. 表 3 から燃料電池を用いることによって, 燃料消費量を削減することができ, 削減率は, 航海中と停泊中は 17%, 出入港時は 19%, 荷役時は 16% になった.

表 3 ディーゼル発電機と燃料電池の燃料消費量
(運航状況別)

運航状況	ディーゼル発電機 [kg/h]	燃料電池 [kg/h]
航海中	65.6	54.7
出入港時	78.2	63.6
荷役時	66.9	55.9
停泊中	66.2	55.3

また, 本船が表 1 に示す運行のスケジュールによって, 神戸港から香港港まで往復航海 (240h) を行った場合のディーゼル発電機と燃料電池の燃料消費量燃料消費量を表 4 に示す. 燃料電池を用いることによって, 往復航海全体で 2647.9kg, 1 時間あたり平均 11.0kg の燃料消費量の削減が期待される.

表 4 ディーゼル発電機と燃料電池の燃料消費量
(往復航海を行った場合)

	ディーゼル発電機 [kg/h]	燃料電池 [kg/h]
往復航海全体	15920.2	13272.3
1 時間あたり平均	66.1	55.1

4.2 CO₂排出量

燃料電池を用いることによって、CO₂排出量がどのくらい削減されるか検証を行った。

ディーゼル発電機の CO₂ 排出量は文献 (9) に示されている、本船のディーゼル発電機の燃料と同種である船用 A 重油の CO₂ 換算係数を基にした次式によって求めた。

$$Q_{CO_2} = 3.206 \cdot F_{DE} \quad (8)$$

ここで、 Q_{CO_2} : ディーゼル発電機の CO₂ 排出量[kg]

F_{DE} : ディーゼル発電機の燃料消費量[kg]

その結果、本船が表 1 に示す運行のスケジュールによって、神戸港から香港港まで往復航海 (240h) を行った場合、往復航海全体で、51040.2kg の CO₂ 排出量の削減が期待される。

5. 燃料電池の排熱利用について

5.1 概要とボイラの燃料消費量計算

本章では、図 2 に示すスタックの冷却水の排熱を利用し熱交換器によって蒸気を発生させ、船内において利用 (主機の燃料タンクや燃料配管加熱用蒸気、生活用蒸気等) した場合の、本船のボイラの燃料消費量の削減効果について検証した。

燃料電池の仕様例から燃料電池の排熱の利用による本船のボイラの燃料の削減量を次の手順により求めた¹⁰⁾。

まず、燃料電池の仕様例⁷⁾を基に高温排出出力の割合を求め、本船の運航状況別に燃料電池からの熱出力を求めた。次に、次式によってボイラの燃料消費量を求めた¹¹⁾。

$$F_b = \frac{P_{fc} \times \rho_{pf} \times 3600}{H_l \times \eta_b \times 1000} \quad (9)$$

ここで、 F_b : ボイラの燃料消費量 [kg/h]

P_{fc} : 燃料電池の熱出力 [kW]

ρ_{pf} : ボイラの燃料の密度 [g/cm³] , 本研究では船用 C 重油を使用するとして、0.96 とした。

H_l : ボイラの燃料の低位発熱量 [MJ/l] , 本研究では船用 C 重油を使用するとして、39.4 とした。

η_b : ボイラ効率, 本研究では、0.80 とした。

5.2 排熱利用によるボイラの燃料消費量の削減量

燃料電池の排熱の利用による本船のボイラの燃料の削減量を本船の運航状況別に求めた。表 5 に本船の運航状況別のボイラの燃料消費量の削減量を示す。

また、本船が表 1 に示す運行のスケジュールによっ

て、神戸港から香港港まで往復航海 (240h) を行った場合、往復航海全体で 3258.4kg、1 時間あたり平均 13.6kg の燃料消費量の削減が期待される。

表 5 ボイラの燃料消費量の削減量 (運航状況別)

運航状況	燃料消費量の削減量 [kg/h]
航海中	13.6
出入港時	15.5
荷役時	13.9
停泊中	7.0

6. 燃料電池の船舶への導入に関する展望

本研究では、りん酸形燃料電池の大型船舶の電源システムについて検討を行ったが、文献 (12) に示されているように、国際海事機関 (IMO) において、2018 年 4 月に「GHG 戦略」が打ち出され、海運全体の GHG 排出量を 2050 年までに 2008 年比で 50%削減、今世紀中の可能な限り早期にゼロエミッションを目指すこととされている。そのため、世界的に船舶のゼロエミッション化技術の検討が進められている。

船舶のゼロエミッション化技術の検討として、欧州や米国などにおいて、水素を燃料とした燃料電池の船舶への導入に関して実証研究が進められ、将来的に、水素などを燃料とした燃料電池を搭載した船舶は普及していくと考えられる。

7. まとめ

本研究では、将来的に、普及すると考えられる、大型の外航船への燃料電池の導入について検討を行った。

大型の外航船の航路、速力、スケジュール、ディーゼル発電機容量、負荷電力等を資料やデータからモデル化し、そのモデル化した船舶を対象として燃料電池を導入した電源システムの構成を行い、対象船舶が一定期間の航海を行った場合のディーゼル発電機と燃料電池の燃料消費量を比較し、燃料電池の導入による燃料消費量、及び温室効果ガスの削減効果について運転シミュレーションを行った。さらに、本研究では、りん酸形燃料電池の排熱を利用し蒸気を発生させた場合のボイラの燃料消費量の削減効果について検証を行った。

運転シミュレーションを行った結果、燃料電池を用いることによって、燃料消費量を削減することができ、削減率は、航海中と停泊中は 17%、出入港時は 19%、荷役時は 16%になった。また、燃料電池を用いることによって、神戸港から香港港まで往復航海 (240h) を行った場合、往復航海全体で、51040.2kg の CO₂ 排出

量の削減が期待される。

本研究では、モデル化した船舶を対象として燃料電池の検討を行ったが、実際に航行する船舶の運航スケジュールや負荷電力などを入手し、本研究に示すディーゼル発電機及び燃料電池の燃料消費量等の計算手法を用いることによって、実際に航行する船舶に燃料電池を用いた場合の燃料消費量、及び温室効果ガスの削減効果を検証することは可能であると考ええる。

参考文献

- 1) Kazuyoshi Sumi, 「Basic study on the application of the fuel cell system operated by kerosene to vessel」, ABSTRACT LIST-WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS 13, 82, (2014)
- 2) 日本船舶輸出組合, ジャパンシップセンター, 日本船舶技術研究協会, 「欧州における水素燃料電池船に関する調査」, (2015)
- 3) 日本船舶電装協会, 「船舶電気装備技術講座〔電気機装設計編〕(中級)」, 日本財団, (2005)
- 4) 「電気工学」, 264, 実教出版, (2005)
- 5) 総務省消防庁, 「定置用燃料電池の概要」, http://www.fdma.go.jp/html/new/pdf/0403denchi_houkoku_2.pdf (2018/6/29 閲覧)
- 6) 上松宏吉, 「燃料電池発電システムと熱計算」, 18-20-60, 93-102 (2000), オーム社
- 7) 経済産業省産業技術安全局, 「燃料電池用灯油を JIS 化 - 灯油燃料電池の普及に向けて -」, (2009)
- 8) 性能曲線(6N165L, 900min⁻¹), ヤンマー株式会社
- 9) 柴田他, 「機関部における GHG 低減技術の紹介」, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.45, No.6, 30-35, (2010)
- 10) 池田宏之助, 「燃料電池のすべて」, 110, (2003), 日本実業出版社
- 11) 日本産業機械工業会ボイラ・原動機部会, 「蒸気ボイラ性能ガイドライン」, (2007)
- 12) 丸田昭輝, 「世界の水素プロジェクトー船舶関係プロジェクトを中心に」, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.54, No.5, 6-13, (2019)
- 13) 角和芳, 「燃料電池の大型船舶への導入に関する基礎検討」, 平成 30 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会, (2018)
- 14) 角和芳, 「燃料電池の大型船舶への導入に関する基礎検討ー燃料電池の排熱利用の検討ー」, 令和元年度日本太陽エネルギー学会研究発表会, (2019)

著者紹介

角 和芳

- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
- ・1967 年生.
- ・海技教育機構 海技大学校 機関科
- ・神戸商船大学大学院 博士後期
- ・船用電気工学, 電子工学