

太陽電池，燃料電池，及びガスタービン発電機の停泊中の船舶への利用に関する基礎研究 - 太陽電池・鉛蓄電池システムの利用との比較 -

Basic Study on the Application of a System Consisting of Photovoltaic Power, Fuel Cell, and Gas Turbine Generation to Vessels on the Berth

-Comparison the system consisting of the photovoltaic power generation, the solid oxide fuel cell, the gas turbine generator with the system consisting of the photovoltaic power generation, and lead storage battery-

角 和芳^{*1}
Kazuyoshi SUMI

引間 俊雄^{*2}
Toshio HIKIMA

ABSTRACT

For improving the environment in harbors, this paper proposed the application of the system consisting of the photovoltaic power generation, the solid oxide fuel cell that moves under the high temperature, and the gas turbine generator powered by the exhaust gas from the solid oxide fuel cell to the vessel anchored on the berth. The author considered the operation method of the system, designed the new system, and carried out the simulation of operation by using a real training vessel. The author calculated the reduction of fuel consumption, NO_x, and SO_x emission from the diesel engine generator of the vessel, and compared the system with the system consisting of the photovoltaic power generation, and lead storage battery. As a result of comparison, the system proved that the setting space for storing the electric energy could be reduced by about 95%.

キーワード：太陽光発電，固体酸化物形燃料電池，停泊船舶，大気汚染ガス

Key Words: Photovoltaic Power Generation, Solid Oxide Fuel Cell, Vessel Anchoring on Berth, Air Pollution Gases

1. はじめに

港湾の環境を守るため，停泊中のコンテナ船，客船など，大型船舶のディーゼル発電機を停止し，陸上の給電設備からその船舶に電力を供給し，船側から排出される大気汚染物質を減少させるシステムの運用や試験が，北米，欧州，及び日本国内の港湾において行われている⁽¹⁾⁽²⁾。

これまでに，筆者らは，本論文の対象船舶である練習船“海技丸（総トン数：157t，以下：本船）”が航海中，太陽電池出力の蓄電を行い，停泊中，本船への電力供給用に鉛蓄電池を用いた場合（以下，PV/Battery システム）について，太陽電池出力，太陽電池の変換効率，負荷電力モデル等，本論文と同条件で運転シミュレーションを行った⁽³⁾。その結果，448kWh の電力量を蓄電する大容量の鉛蓄電池が必要となることが課題となった。本論文では，その代案として，停泊中の船舶に，大気汚染物質を排出しない太陽電池，高温にて作動する固体酸化物形燃料電池，及び燃料電池の排気によって作動するガスタービン発電機を組み合わせた陸上給電システムの利用を提案する。

本論文では，まず，太陽電池，固体酸化物形燃料電池（以下，燃料電池），及びガスタービン発電機を組み合わせた陸上給電システム（以下，PV/FC/GTG システム）の構成に関して，検討を行った。検討に当たっては，太陽電池と燃料電池を複合した住宅用システムにおける，集合型・分散型の運転シミュレーションに関する文献⁽⁴⁾を参考とした。

次に，PV/FC/GTG システムの運転方法を本船の運航スケジュールを基に検討した。そして，2007 年の 1 年間，気象庁が観測した日射量データ，運航スケジュール，及び電源システムを基に，着岸場所へ PV/FC/GTG システムの設置を仮定し，停泊中の本船に想定したシステムを用いて電力を供給する運転シミュレーションを行い，本船のディーゼル発電機の燃料消費量，NO_x 排出量，及び SO_x 排出量の削減効果，並びにその蓄電用スペースについて PV/Battery システムを用いた場合との比較検証を行った。

2. シミュレーションの条件

2.1 太陽電池及びインバータ

図 1 にシミュレーション用に考案し，本船の着岸場所（神戸港）に設置を仮定した PV/FC/GTG システムを示す。PV/FC/GTG システムは，太陽電池，水素モジュール，及びガスタービン発電機等によって構成され，系統 A，系統 B，及び系統 C に分かれている。

太陽電池は広く市販されている多結晶シリコン型を採用した。設置面積は着岸場所の状況を考慮に入れて 100m² とし，

*1 海技大専攻機関科准教授

(〒659-0026 兵庫県芦屋市西蔵町 12 番 24 号)

e-mail: k-sumi@mail.mtc.ac.jp

*2 海技教育機構教育企画部長

(原稿受付：2012 年 7 月 26 日)

変換効率 0.12⁽⁵⁾、出力 12kW の太陽電池を水平に設置した。
 また、系統 A と系統 B には太陽電池及び水素モジュールの直流電力を交流電力に変換するインバータがある。ここで、インバータの変換効率を 0.96 とした⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

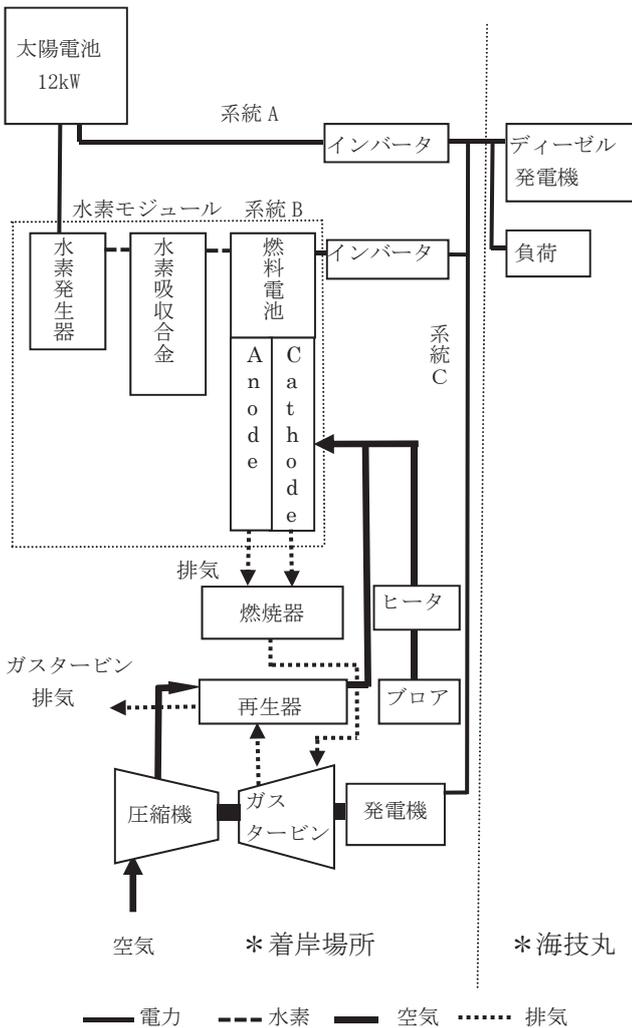


Fig.1 Construction of PV/SOFC/GTG system

図 1 PV/FC/GTG システムの構成

2.2 水素モジュール

系統 B には水素モジュールがある。水素モジュールは、本船が出港し航海を行う間に着岸場所が発電した太陽電池出力を、水素発生器によって、海水を電気分解させて水素に変換し、水素吸収合金に蓄積する。そして、停泊中は、水素吸収合金に蓄積した水素を燃料電池に送り、発電電力を負荷に供給する。

次に、構成機器の仕様等について述べる。水素発生器（水素発生容量：120mol/h）は、電解液に海水を、電解質に固体高分子膜を使用する固体高分子型を採用し、変換効率を 0.90 とした⁽⁴⁾⁽⁸⁾。ここで、海水は水素モジュールに備え付けた海水ポンプから供給することにした。

水素を蓄積する水素吸収合金（容積水素含有率⁽⁹⁾：30.0kgH₂/m³）は、La（ランタン）と Ni（ニッケル）の合金である、LaNi₅を採用した。水素吸収合金は、吸収時に発熱し、放出時に吸熱する。そこで、吸収時は水素モジュールに備え付けた海水ポンプからの海水によって冷却し、放出時は燃料電池の排熱の一部を利用した温水によって加熱することにした。ただし、燃料電池始動時は排熱が利用できない

ため、温水はヒータによって加熱することにした。ここで、水素吸収合金の変換効率を 0.98 とした⁽⁴⁾。

燃料電池は固体酸化物形を採用した。固体酸化物形燃料電池は、高温にて作動し、その排気を利用したガスタービンや蒸気発電機との併用が検討されている。ここで、その作動温度を 700℃、容量 18.8kW、発電効率を 0.50 とした⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

2.3 ガスタービン発電機

PV/FC/GTG システムでは、燃料電池が作動中、その排気を利用しガスタービン発電機を駆動する。ガスタービン発電機は、燃料電池の排気が少ない場合があることを考慮して、家庭・小規模事業用として開発され、普及が期待されている、マイクロガスタービン（容量：2.2kW）を採用した⁽¹¹⁾。

燃料電池とガスタービン発電機を組み合わせたシステムでは、図 1 に示す様に、圧縮機によって圧縮された空気は、再生器においてガスタービンの排気によって予熱され、燃料電池のカソード（正極、空気極）に供給される⁽¹⁰⁾。次に、カソードの排気とアノード（負極、水素極）の排気は、燃焼器に送られ、アノード排気中の残留水素が燃焼し、燃焼ガスはガスタービンに送られる。また、燃料電池の始動時や、ガスタービン発電機の出力の低下時は、ブローからの空気をヒータによって加熱し燃料電池のカソードへ供給することにした。ここで、ガスタービン発電機の総合効率を 0.26 とした⁽¹¹⁾。

尚、PV/FC/GTG システムからの供給電力の不足分は、本船のディーゼル発電機（容量：120kW）から供給することにした。

2.4 PV/FC/GTG システムの運転方法

本研究では、PV/FC/GTG システムは、本船の運航方法の違いによって、以下の 4 種類の運転方法の組み合わせにより運転されるものとした。

(1) 運転方法 1（24 時間停泊モデル）

本船が 24 時間停泊する場合の運転方法である。日出から日没まで、太陽電池の出力を系統 A によって負荷に供給し、不足電力は、ディーゼル発電機から供給する。尚、当該日の前日まで停泊し、PV/FC/GTG システムから電力を供給したが、当該日の 0 時に水素に残量がある場合は、燃料電池とガスタービン発電機から電力を供給する。

(2) 運転方法 2（出入港モデル）

本船が当該日に、出港し入港する場合の運転方法である。出港時間までは、太陽電池の出力を系統 A によって負荷に供給し、不足電力は、ディーゼル発電機から供給する。出港後から入港までは、太陽電池の出力を、水素に変換した後、水素吸収合金に蓄積する。そして、入港後は、太陽電池、燃料電池、及びガスタービン発電機によって電力を供給し、不足電力は、ディーゼル発電機から供給する。

(3) 運転方法 3（出港・航海モデル）

本船が午前または午後に出港し、航海を行う場合の運転方法である。出港時間までは、太陽電池の出力を系統 A によって負荷に供給し、不足電力は、ディーゼル発電機から供給する。出港後は、太陽電池の出力を水素に変換し、水素吸収合金に蓄積する。また、航海や入渠のため着岸場所を 0 時から 24 時まで離れる日は、日出から日没まで太陽電池の出力を水素に変換し、水素吸収合金に蓄積する。

(4) 運転方法 4（入港・停泊モデル）

本船が午前または午後に入港し、停泊を行う場合の運転方法である。入港時間までは、太陽電池の出力を水素に変換し、水素吸収合金に蓄積する。入港後は、太陽電池、燃料電池、及びガスタービン発電機によって電力を供給し、不足電力は、ディーゼル発電機から供給する。

2.5 負荷電力モデル

運転シミュレーションに用いる負荷電力モデルを作成するために、まず、電気機器類の図面から停泊中に運転される電気機器類の定格電力を調査した。次に、電気機器は定格電力で運転されないため、定格電力に、定格電力に対する需要電力の割合である需要率を掛け合わせ、その電気機器の負荷電力を求めた⁽¹²⁾。そして、連続運転する負荷の合計負荷電力に、断続運転する負荷の運転時間帯を仮定し、負荷電力を増減させ、1日の負荷電力モデルを作成した。

図2に作成した負荷電力モデルを示す。1日の総負荷電力量は470.0kWh、1時間平均の負荷電力量は19.6kWhである。ここで、運転方法1の日は24時間停泊するため、負荷電力量は470.0kWhであるが、運転方法2, 3, 及び4の日については、消費電力が出港時間または入港時間に負荷電力モデルに変化するとして負荷電力量を計算した。

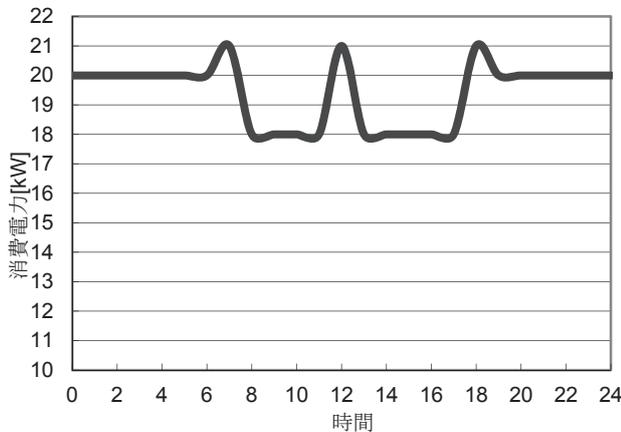


Fig.2 Load power model

図2 負荷電力モデル

2.6 発電電力量

(1) 太陽電池の発電電力量

太陽電池の発電電力量を次式によって求めた⁽¹³⁾。

$$E_A = H_A \cdot K \cdot A \cdot \eta_s \cdot \eta_{INV} \quad (1)$$

ここで、 E_A : 発電電力量[kWh]
 H_A : 日射量[kWh/m²]
 K : 太陽電池出力補正係数
 A : 太陽電池面積[m²]、本論文では100m²とした。
 η_s : 太陽電池の変換効率、
 本論文では0.12とした。
 η_{INV} : インバータ効率、本論文では、0.96とした。

また、太陽電池出力補正係数は、次式によって月ごとに求めた⁽¹⁴⁾。

$$K = K_D \cdot K_A \cdot K_M \cdot K_T \quad (2)$$

ここで、 K : 太陽電池出力補正係数
 K_D : 経時変化補正係数、本論文では、
 0.99とした。
 K_A : アレイ回路補正係数、本論文では、
 0.98とした。
 K_M : アレイ負荷整合補正係数、本論文では、

0.90とした。

K_T : 温度補正係数

次に、温度補正係数 K_T は、次式によって求めた。

$$K_T = 1 - \alpha_{P_{max}} \cdot (T_{cm} - T_s) \quad (3)$$

ここで、 K_T : 温度補正係数

$\alpha_{P_{max}}$: 最大出力の温度補正係数、本論文では、
 多結晶シリコン型であるため、0.0044とした。

T_{cm} : 月平均セル温度 (月平均気温+15°C) [°C]

T_s : 標準状態のセル温度[°C]、本論文では、25°Cとした。

表1に、計算の結果得られた太陽電池出力補正係数を示す。ここで、(1)式の日射量は、着岸場所(北緯34.7°、東経135.3°)のデータが入手できないため、着岸場所に最も近い、気象庁が観測した大阪(北緯34.7°、東経135.5°)のデータを用いた。

本論文では、運転方法の違いによって系統Aの発電電力量が異なるため、出港時間、及び入港時間を基に日射量を求め、電力量を計算した。運転方法1の場合は、日出から日没までの日射量を求め、(1)式によって電力量を計算し、運転方法2の場合は、日出から出港時間、及び入港時間から日没までの日射量を求め、(1)式によって電力量を計算した。運転方法3の場合は、日出から出港時間まで、及び運転方法4の場合は、入港時間から日没までの日射量を求め、(1)式によって電力量を計算した。

Table 1. Revising coefficient of the output of the PV array

表1 太陽電池出力補正係数

1月	0.89	7月	0.83
2月	0.89	8月	0.81
3月	0.88	9月	0.82
4月	0.86	10月	0.84
5月	0.84	11月	0.86
6月	0.84	12月	0.88

(2) 燃料電池(系統B)の発電電力量

水素発生器における水の電気分解は次の化学反応式によって示される。



ここで、反応を進めるための電圧は1.23V(理論電解電圧)とする。すなわち、1mol(2g)の水素を発生させるためには1.23Vの電圧が必要になる。ファラデー定数から1gの水素を発生させるために必要な電荷は96500Cであるため、1molの水素を発生させるために必要な電力量は

$$2 \times 96500 \times 1.23 = 237390J = 65.9Wh \quad (5)$$

になる⁽⁴⁾。よって、水素発生器の変換効率 η_{HG} を考慮すると、1Whの太陽光発電電力量から水素が $\eta_{HG}/65.9mol$ 発生する。したがって、水素吸収合金の変換効率を η_{MH} とすると水素発生器から水素吸収合金に蓄積されたあと、燃料電池に送られる水素量は次式によって示される。

$$Q_{FC} = H_A \cdot K \cdot A \cdot \eta_s \cdot \frac{\eta}{65.9} \cdot \eta_{MH} \quad (6)$$

ここで、 Q_{FC} ：水素量[mol]

H_A ：日射量[kWh/m²]

K ：太陽電池出力補正係数

A ：太陽電池面積[m²]，本論文では100m²とした。

η_S ：太陽電池の変換効率

η_{HG} ：水素発生器の変換効率，本論文では，0.90とした。

η_{MH} ：水素吸収合金の変換効率，本論文では，0.98とした。

燃料電池の発電は，電池内部の物質の反応に伴う化学エネルギーの変化量を電気エネルギーに変換しており，次式によって示される⁹⁾。

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (7)$$

ここで， ΔH ：エンタルピー変化量[kJ/mol]

ΔG ：自由エネルギー変化量[kJ/mol]

T ：温度[K]

ΔS ：エントロピー変化量[kJ/mol・K]

また， ΔH は燃料電池の発電時の反応熱， $T\Delta S$ は発電反応における発熱量であり，理論的には ΔG が電気エネルギーに変換される。したがって，理論発電効率は $\Delta G/\Delta H$ になるが，実際は，反応による電圧降下によって低下する。

本論文では，燃料電池（系統B）の発電電力量を，まず， ΔH を文献(10)の作動温度を関数とした式から計算し，次式によって求めた。

$$E_B = 3600 \cdot \Delta H \cdot Q_{FC} \cdot \eta_{FC} \cdot \eta_{INV} \quad (8)$$

ここで， E_B ：発電電力量[kWh]

ΔH ：エンタルピー変化量[kJ/mol]

Q_{FC} ：水素量[mol]

η_{FC} ：燃料電池の発電効率，本論文では，0.50とした。

η_{INV} ：インバータ効率，本論文では，0.96とした。

次に，燃料電池（系統B）の発電電力量は系統Aの発電電力量と同様に，運転方法の違いによって異なるため，次の様に求めた。運転方法2の場合は，出港時間から入港時間までの日射量を求め，(6)式によって蓄積水素量を計算し，(8)式によって電力量を計算した。運転方法3の場合は，出港時間から日没まで，及び運転方法4の場合は，日出から入港時間までの日射量を求め，(6)式によって蓄積水素量を計算し，(8)式によって電力量を計算した。

(3) ガスタービン発電機（系統C）の発電電力量

(7)式における $T\Delta S$ は，発電反応による発熱量であり，カソード及びアノード排気として放出される。PV/FC/GTGシステムでは，前述の様に，それらの排気を燃焼器において燃焼させ，ガスタービン発電機を作動させる。したがって，まず， ΔG を文献(10)の作動温度を関数とした式から求め，(7)式を用いて $T\Delta S$ を計算し，次式によってガスタービン発電機（系統C）の発電電力量を求めた。ここで，アノード排気中の残留水素量から発電電力量を求める方法もあると考えるが，燃料電池の排気を持つ熱量が燃焼器に伝わり，ガスタービンへの入熱量になるため，(9)式によってガスタービン発電機の発電電力量を求めた。

$$E_C = 3600 \cdot T \cdot \Delta S \cdot Q_{FC} \cdot \eta_{GTG} \quad (9)$$

ここで， E_C ：発電電力量[kWh]

T ：温度[K]

ΔS ：エントロピー変化量[kJ/mol・K]

Q_{FC} ：水素量[mol]

η_{GTG} ：ガスタービン発電機の総合効率，本論文では，0.26とした。

3. シミュレーション結果

図3に運転シミュレーションを行った2007年の1月1日から12月31日までの1年間における日射量を示す。図4に本船の航海時間（神戸港を離れた時間）を示す。また，図5にPV/FC/GTGシステムの運転方法を示す。尚，運転方法の切り替えは，入港時間及び出港時間に行うと仮定する。

(1) 運転方法1

運転方法1を用いた日数は287日間であり，合計の電力供給時間は6888hであった。PV/FC/GTGシステムの供給電力量は，最大で9月15日の135.3kWh，最少で12月22日の2.6kWh，平均38.8kWhになった。そして，運転日の総負荷電力量は470.0kWhであった。また，PV/FC/GTGシステムの電力供給比率は，最大で9月15日の28.8%，最少で12月22日の0.5%，平均8.3%になった。

そのうち，9月15日は前日までの航海によって，水素が蓄積され，前日の入港後は，PV/FC/GTGシステムだけによって電力が供給され，0時の水素量は2962.1molになった。よって，0時から5時まで水素を利用し，燃料電池とガスタービン発電機によって100kWhの電力を供給しディーゼル発電機を停止できることが分かった。また，9月15日は，天候が午前中，晴れであったが，午後から雨の後，曇りになり，天候は良好でなく，太陽電池の供給電力量は35.3kWhになり，最大である6月16日の44.1%であるが，停泊中に蓄積した水素を利用し，燃料電池とガスタービン発電機によって電力を供給したため，電力供給比率が最大になり，本システムを有効に利用できたことが分かった。

(2) 運転方法2

運転方法2を用いた日数は8日間であり，9時から13時の間に12時30分から16時の間に入港し，航海時間は2.5時間から6.5時間であり，合計の電力供給時間は155hであった。出港から入港まで，太陽電池の出力を，水素に変換した後，水素吸収合金に蓄積し，蓄積水素量は最大で3月23日（天候：快晴）の603.7mol，最少で1月17日（天候：雨後曇）の89.0mol，平均301.4molになった。

PV/FC/GTGシステムの供給電力量は，最大で7月23日の39.1kWh，最少で1月17日の4.4kWh，平均28.0kWhになった。そして，運転日の平均負荷電力量は383.0kWhであった。また，PV/FC/GTGシステムの電力供給比率は，最大で5月17日の9.8%，最少で1月17日の1.3%，平均7.2%になった。

(3) 運転方法3

運転方法3を用いた日数は49日間であった。9時から14時の間に12時30分の日には航海を行い，合計の電力供給時間は221.5hであった。日出から出港時間まで，太陽電池から電力を供給し，供給電力量は，最大で2月22日の28.3kWh，最少で2月14日の0.2kWh，平均9.0kWhになった。そして，運転日の平均負荷電力量は207.4kWhであった。また，PV/FC/GTGシステムの電力供給比率は，最大で2月22日の10.4%，最少で2月14日の0.1%，平均4.1%になった。出港時間から24時まで蓄積された水素量は，最大で5月28日（天候：晴後薄曇）と6月7日（天候：晴）の835.9mol，最少で11月29日（天候：曇）の38.7mol，平均469.0molになった。

(4) 運転方法4

運転方法4を用いた日数は21日間であった。9時30分から16時30分の間に12時30分の日には航海を行い，合計の電力供給時間は195.0hであった。入港時間までの水素吸収合金の蓄積水素量は，最大で9月14日の7132.4mol，最少で11月30日の201.2mol，平均1565.9molになった。

入港後のPV/FC/GTGシステムの供給電力量は，最大で9月14日の266.3kWh，最少で1月19日の16.5kWh，平均

68.0kWh になった。そして、運転日の平均負荷電力量は 184.6kWh であった。また、PV/FC/GTG システムの電力供給比率は、最大で 9 月 14 日の 100%，最少で 1 月 19 日の 10.3%，平均 34.9% になった。そのうち、9 月 14 日は、9 月 3 日の出港後、当該日の 16 時の入港まで水素が蓄積され、水素吸収合金の蓄積水素量は 7132.4mol になった。入港後は、PV/FC/GTG システムだけによって電力が供給され、24 時の水素量は 2962.1mol になった。したがって、入港時間までの水素の蓄積によって、入港後、PV/FC/GTG システムだけによって電力が供給され、ディーゼル発電機を停止することができ、本システムを有効に利用できたことが分かった。

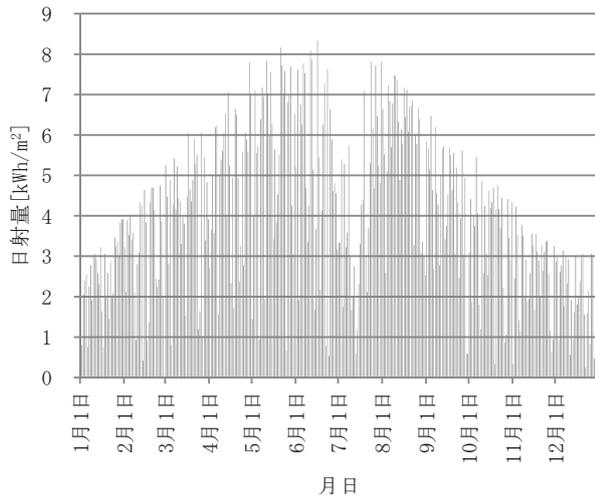


Fig.3 Solar radiation data

図 3 気象庁が観測した日射量

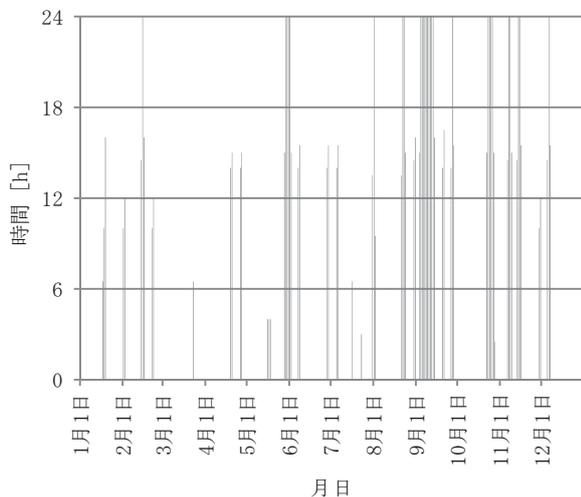


Fig.4 Navigation time of "Kaigi Maru"

図 4 本船の航海時間

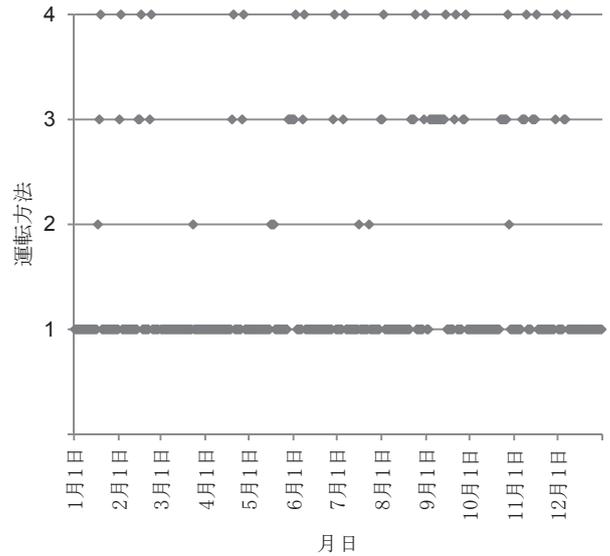


Fig.5 Operation method of PV/FC/GTG system

図 5 PV/FC/GTG システムの運転方法

4. 燃料消費量、NO_x 排出量、及び SO_x 排出量

本船のディーゼル発電機の燃料消費量、NO_x 排出量、及び SO_x 排出量の計算方法を以下に示す。燃料消費量は、ディーゼル発電機の原動機出力と燃料消費量は比例関係にあるため⁽¹⁵⁾、原動機メーカーが作成した負荷試験成績表から原動機出力と燃料消費量の関係式を求めて、計算した。NO_x 排出量は、原動機の負荷率を考慮した次式によって求めた⁽¹⁶⁾。

$$N_{NO} = \{2.11 - 1.92(1-z)\} P_D^{1.14} \times 10^{-3} \times 46 / 22.4 \quad (10)$$

ここで、N_{NO} : NO_x 排出量 [kg/h]

z : 機関負荷率

P_D : 原動機出力 [kW]

また、SO_x 排出量は、燃料消費量と硫黄含有量から次式によって求めた⁽¹⁶⁾。

$$N_{SO} = F \cdot C_s \quad (11)$$

ここで、N_{SO} : SO_x 排出量 [kg/h]

F : 燃料消費量 [kg/h]

C_s : 硫黄含有量 [wt%]

表 2 にディーゼル発電機の燃料消費量・削減量、NO_x 排出量並びに SO_x 排出量の削減量を示す。運転方法 3 及び 4 は、運転時間 1 及び 2 と比較して、負荷電力量が少ないため、運転日平均の燃料消費量は少ない結果となった。また、運転方法 1 及び 4 は、航海中に蓄積した水素を利用し、入港後、太陽電池、燃料電池、及びガスタービン発電機によって電力を供給し、ディーゼル発電機を停止する日があったため、運転日平均の燃料削減量について運転方法 2 及び 3 より効果が得られた。

また、表 3 に燃料消費量、NO_x 排出量、並びに SO_x 排出量の削減率を示す。運転方法 4 は 12 日間のうち、6 月 2 日は PV/FC/GTG システムから 94.2% の電力を供給し、また、前述の様に 9 月 14 日は PV/FC/GTG システムからすべて電力を供給した。その 2 日間の影響によって他の運転方法より削減率が大きくなった。

Table 2. Consumption and reduction of the fuel, the reduction of the NO_x emission and the SO_x emission

表2 燃料消費量・削減量, NO_x排出量並びに SO_x排出量の削減量

	総電力供給時間[h]	運転日平均燃料消費量[kg]		PV/FC	PV/FC	PV/FC	PV/FC
		PV/FC/GTGシステム無し	PV/FC/GTGシステム有り	TGシステム有り時の平均燃料削減量[kg]	TGシステム有り時の総燃料削減量[kg]	FCシステム有り時の総NO _x 削減量[kg]	FCシステム有り時の総SO _x 削減量[kg]
運転方法1	6888.0	164.3	153.8	10.5	3005.3	49.9	6.0
運転方法2	155.0	140.8	133.3	7.5	60.4	0.9	0.1
運転方法3	221.5	93.4	91.0	2.4	51.1	0.3	0.1
運転方法4	195.0	87.2	75.7	11.5	393.7	2.3	0.8
合計	-	-	-	-	3510.5	53.4	7.0

Table 3. Reduction ratio of the fuel consumption, the NO_x emission, and the SO_x emission

表3 燃料消費量, NO_x排出量, 及び SO_x排出量の削減率

	燃料消費量 [%]	NO _x 排出量 [%]	SO _x 排出量 [%]
運転方法1	6.4	14.2	6.4
運転方法2	5.3	12.6	5.4
運転方法3	2.6	4.3	2.6
運転方法4	13.2	43.7	21.5

次に、本論文において採用した水素モジュールの代わりに鉛蓄電池を用いた場合 (PV/Battery システム) のシミュレーション結果⁽³⁾との比較を行った。

PV/Battery システムの鉛蓄電池容量は、次式によって計算した⁽¹⁴⁾⁽¹⁷⁾。

$$B_{Ah} = \frac{E_{BA} \cdot 1000}{L \cdot V_B \cdot D} \quad (12)$$

- ここで、B_{Ah}：蓄電池の容量[Ah]
- E_{BA}：蓄電池の蓄電電力量[kWh]
- L：保存率 (寿命末期における容量減少率)、本論文では、0.80 とした。
- V_B：蓄電池の回路公称電圧[V]、本論文では、12V とした。
- D：放電深度、本論文では、0.65 とした。

計算の結果、鉛蓄電池の容量は 71794.9Ah になった。鉛蓄電池は制御弁式鉛蓄電池⁽¹⁷⁾を採用するとし、蓄電池メーカーの仕様書⁽¹⁸⁾から、公称電圧 12V、容量 65Ah、容積 0.01 m³の蓄電池を用いた場合、約 1105 個の鉛蓄電池を並列に接続し、蓄電用スペースは約 11m³ 必要になることが分かった。これに対し、水素モジュールを用いた場合、蓄積水素量の最大値 (7132.4mol、9月14日、運転方法4) から、10%の余裕を見込んで、容量を 7925mol とし、容積水素含有率 (30kgH₂/m³) から水素吸収合金の容積を求めると 0.52m³ になり、鉛蓄電池を用いる場合に比べ蓄電用スペースを 20 分の 1 以下にできることが分かった。

表 4 にディーゼル発電機に太陽電池と鉛蓄電池を組み合わせたシステムにおける、燃料消費量・削減量, NO_x排出量

並びに SO_x 排出量の削減量を示す⁽³⁾。表 4 と表 2 を比較すると、運転方法 3 では削減量は等しいが、その他の運転方法では PV/Battery システムの結果の方が削減量は少し多くなっている。これは、PV/Battery システムの場合、太陽電池出力を蓄電できることから、放電時の電力損失が、本論文の水素モジュールを用いたシステムより少ないためである。

したがって、本論文で検討した PV/FC/GTG システムは、燃料消費量, NO_x 排出量, 並びに SO_x 排出量の削減効果について、PV/Battery システムとほぼ同等の性能となることが分かった。

Table 4. Consumption and reduction of the fuel, the reduction of the NO_x emission and the SO_x emission (Result of reference[3])

表4 燃料消費量・削減量, NO_x排出量並びに SO_x排出量の削減量 (文献[3]の結果)

	運転日平均燃料消費量[kg]		PV/Battery	PV/Battery	PV/Battery	PV/Battery
	PV/Batteryシステム無し	PV/Batteryシステム有り	有り時の平均燃料削減量[kg]	有り時の総燃料削減量[kg]	有り時の総NO _x 削減量[kg]	有り時の総SO _x 削減量[kg]
運転方法1	164.3	153.6	10.7	3083.6	50.8	6.2
運転方法2	140.8	131.1	9.7	77.8	1.1	0.2
運転方法3	93.4	91.0	2.4	51.1	0.3	0.1
運転方法4	87.2	65.4	21.8	589.9	3.2	1.2
合計	-	-	-	3802.4	55.4	7.7

5. まとめ

本論文では、停泊中の船舶に、太陽電池、固体酸化物形燃料電池、及びガスタービン発電機を組み合わせた陸上給電システムの利用を検討し、想定したシステムを用いて停泊中の本船に電力を供給する運転シミュレーションを行い、本船のディーゼル発電機の燃料消費量, NO_x 排出量, 並びに SO_x 排出量の削減効果について PV/Battery システムの結果と比較し検証を行った。

その結果、以下の事柄が明らかになった。

- ・本論文で検討した PV/FC/GTG システムにより、燃料消費量, NO_x 排出量, 並びに SO_x 排出量の削減効果について PV/Battery システムとほぼ同等の性能を得ることが可能である。

- ・本論文で検討した PV/FC/GTG システムでは、PV/Battery システムを用いる場合に比べ、蓄電用スペースを 20 分の 1 以下にすることが可能である。

本論文では、本校練習船を対象とし運転シミュレーションを行い PV/FC/GTG システムの検証を行ったが、今後は、一般商船への利用を目標として、本論文のシミュレーション条件より負荷電力が多く、停泊時間が短い、旅客船が停泊を行う旅客船ターミナルやコンテナ船が停泊を行うコンテナターミナルへの PV/FC/GTG システムの導入の検討を行う。

参考文献

- (1) 須藤, 「2008 年度におけるマリンエンジニアリング技術の進歩 (電気・電子・自動化システム)」, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 44, No. 4, 32-33, (2009)
- (2) 日本海事新聞, (2009, 5, 20)
- (3) 角・引間, 「太陽光発電の停泊中の船舶への利用に関する基礎研究」, 第78回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, 47-49, (2008)
- (4) 沖村・鮎澤・田子・中村・原山・平田・谷, 「太陽電池・燃料電池複合システムに関する研究」, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol. 33, No. 4, 57-62, (2007)
- (5) 新太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会, 「新太陽エネルギー利用ハンドブック」, 165-166, 日本新太陽エネルギー学会, (2000)
- (6) 車・藤澤・稲葉・谷, 「新しい地域連系型太陽光発電システムの導入効果」, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol. 30, No. 6, 41-46, (2004)
- (7) 西川, 「ニッケル水素蓄電池の住宅用 PV システムへの適用に関する基礎検討」, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol. 33, No. 4, 41-47, (2007)
- (8) 四国総合研究所ホームページ, (2009)
- (9) 津久井, 「燃料電池」, 11-20, 68-72, 83-86, パワー社, (2006)
- (10) 上松, 「燃料電池発電システムと熱計算」, 19-20, 46-50, 170-172, オーム社, (2000)
- (11) 石井, 「マイクロガスタービンシステム」, 22-26, 36-41, オーム社, (2003)
- (12) 日本船舶機関学会, 「船舶電気・電子工学便覧」, 50-52, 海文堂, (1981)
- (13) 太陽光発電懇話会, 「太陽光発電システムの設計と施工-改訂 2 版」, 78-79, オーム社, (2004)
- (14) 黒川・若松, 「太陽光発電システム設計ガイドブック」, 81-84, 90-92, オーム社, (1995)
- (15) 長谷川, 「船用ディーゼル機関教範」, 90-92, 成山堂, (1999)
- (16) 西川・財田, 「大阪湾を航行する船舶からの大気汚染物質排出量の推定」, 日本船舶機関学会誌, Vol. 29, No. 6, 412-421, (1994)
- (17) 太陽光発電懇話会, 「太陽光発電システムの設計と施工-改訂 3 版」, 55-63, オーム社, (2010)
- (18) 制御弁式鉛蓄電池 (LC-P1265CJ) 仕様書, パナソニックストレージバッテリー株式会社