

マリンハイブリッドシステムに関する研究開発

平田 宏一*, 関口 秀紀*, 仁木 洋一*, 市川 泰久*,
新田 好古*

Research and Development of Marine Hybrid System

by

Koichi HIRATA, Hidenori SEKIGUCHI, Yoichi NIKI, Yasuhisa ICHIKAWA
and Yoshifuru NITTA

Abstract

Ships are considered to be one of the most energy efficient means of transportation. This is because ships have high efficient diesel engines, which use a high thermal efficiency of often more than 50%, as their propulsive power source. However, fuel consumption reduction is required for ships due to present-day social issues such as environmental protection and energy saving. Therefore, ships are using various energy saving technologies, including high efficient propulsive systems, optimized navigation systems and waste heat recovery systems. New technologies such as marine hybrid systems using diesel engines and electric motors, large capacity batteries and alternative fuels are attracting attention to improve ships' energy use efficiency.

This paper outlines the concepts and results of our research and development of marine hybrid systems. A typical hybrid system has a diesel engine, a motor/generator and a large-capacity battery system. The diesel engine in such a hybrid system operates at its maximum efficient point with the use of electric energy. The paper also explores the model hybrid ship that has a fuel cell system and lithium-ion batteries. This model ship was developed to confirm the functions of safety measures for the electric propulsive system and to verify characteristics of the control and monitoring system.

* 環境・動力系

原稿受付 平成30年2月2日

審査日 平成30年3月8日

目 次

1. まえがき	4
2. ディーゼルエンジンと電動モータを組み合わせた船舶ハイブリッド推進システム	4
2.1 ハイブリッド自動車／船舶の特徴	5
2.2 船舶ハイブリッド推進システム	5
2.3 電気推進船のハイブリッド化	6
3. 船舶のハイブリッド化とリチウムイオン電池	7
4. 水素燃料電池とリチウムイオン電池を用いた模型ハイブリッド船	8
4.1 模型ハイブリッド船の基本構成	8
4.2 電力系統の基本構成	10
4.3 模型ハイブリッド船の構成要素と機能	11
4.3.1 燃料電池システム	11
4.3.2 リチウムイオン電池システム	11
4.3.3 負荷分担制御	12
4.3.4 監視システムおよび安全機能	12
4.4 模型ハイブリッド船による動作確認試験	14
4.4.1 リチウムイオン電池の充電試験	14
4.4.2 負荷分担制御の陸上試験	14
4.4.3 水槽試験	15
4.5 水素燃料電池とリチウムイオン電池を用いたハイブリッド船の技術課題	16
5. あとがき	16
謝 辞	17
参考文献	17

1. まえがき

従来から、船舶の主動力源には高い熱効率を有するディーゼルエンジンが用いられており、他の交通・輸送機関と比べて極めてエネルギーの有効利用がなされていると言える。しかし、近年の地球温暖化に代表される環境問題や石油燃料に代表される一次エネルギー資源価格の変動などの社会的背景により、船舶分野においてもエネルギー利用効率向上と燃料消費量削減が強く求められている。そのため、推進効率のさらなる向上、運航上の改善や最適化、あるいはディーゼルエンジンからの排熱回収など、多くの省エネ技術が活用されている。さらに船舶のエネルギー利用効率を向上させるため、ディーゼルエンジンと電動モータを用いた船舶ハイブリッド推進システム、船舶における大容量蓄電池の利用、さらに石油代替燃料の利用などの新しい技術が注目されている。

本報では、著者らが研究・開発を進めてきた船舶用ハイブリッドシステムについて解説する。第2章では、船舶から排出される地球温暖化ガスの削減を目指し、高効率ディーゼルエンジンの特徴を最大限に活かすとともに、電気エネルギーを有効に利用する船舶用ハイブリッドシステムの調査・検討結果を紹介する¹⁾。第3章では船舶のハイブリッド化に必要な不可欠なリチウムイオン電池の安全性に関する調査結果の概略²⁾、そして、第4章では水素燃料電池とリチウムイオン電池を組み合わせた模型ハイブリッド船について述べる³⁾。

2. ディーゼルエンジンと電動モータを組み合わせた船舶ハイブリッド推進システム

ハイブリッドシステムとは、複数の異なる要素を組み合わせ、1つの目的を達成するシステムである。一般

に、ハイブリッド推進システムは、エンジンや蓄電池、電動モータなどの複数の動力源を持ち、それらの特徴を活かすことでエネルギー利用効率の向上、あるいは高機能化・高性能化を実現している。以下、ディーゼルエンジンと電動モータを組み合わせた船舶ハイブリッド推進システムの開発事例並びに著者らが検討した基本コンセプトについて概説する。

2.1 ハイブリッド自動車／船舶の特徴

近年、地球環境問題への意識が高まる中、自動車の分野ではエンジンと電動機を組み合わせたハイブリッド自動車の開発・普及が進められ、街中でも多く見られるようになった。図1はハイブリッド自動車の代表的な基本構成およびその動作イメージを示している⁴⁾。一般に、街中を走行する自動車は、発進と停止を頻繁に繰り返し、また坂道を走行することも多い。このため、ハイブリッド自動車では、ブレーキを掛けて減速・停止するときのエネルギーを発電機によって電力として蓄電池に回収し、発進・加速するときに回収した電力(回生エネルギー)を用いて電動モータを駆動することで高い省エネ効果が得られている。また、エンジンを最大出力付近で運転する頻度は少なく、発進・加速時などの大きいトルクが必要ときにエンジンと電動モータを併用できるため、最大出力が小さいエンジンを搭載することができる。この結果、ハイブリッド自動車はさらなる燃料消費量やCO₂排出の削減に繋がっている。

一方、船舶では航行中のほとんどの時間を一定速度で航行しており、頻繁な発進と停止は極めて少ない。また、定常航行時のエンジンは最大出力付近(実際には最大出力の70~80%程度)で運転することが多い。このため、ハイブリッド自動車のような回生エネルギーの利用やエンジンの小出力化による省エネ効果はほとんど期待できない。したがって、船舶のハイブリッド化においては、高効率ディーゼルエンジンの特徴を最大限に活かすとともに、電動モータを利用するための電力を有効かつ効率的に蓄電/利用できるシステムを検討することが必要となる。

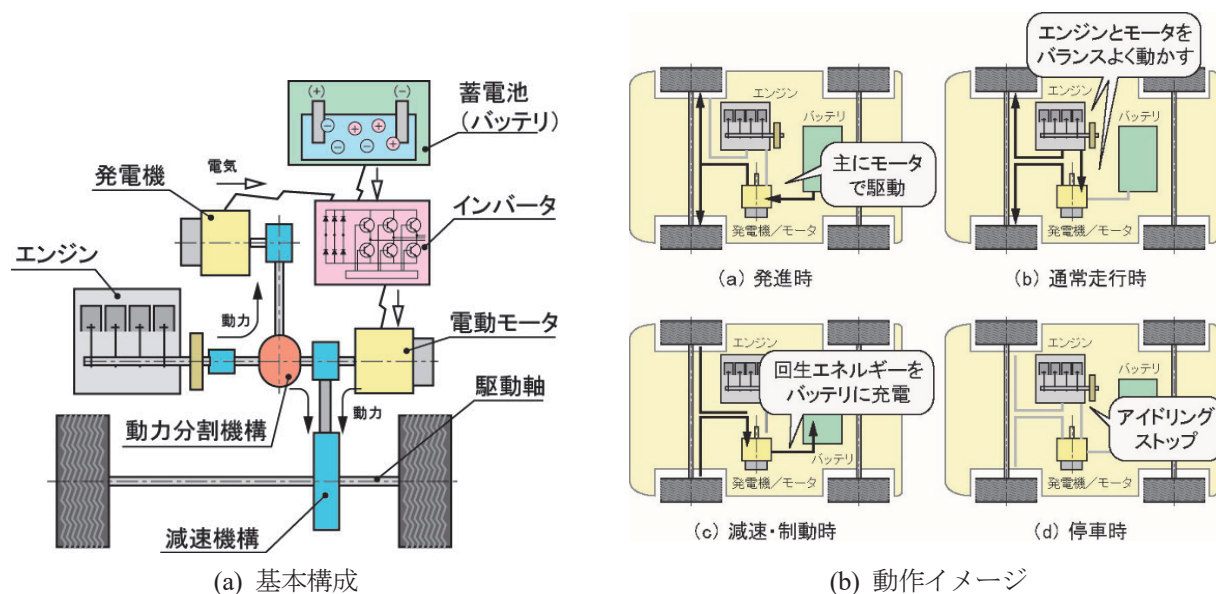


図1 代表的なハイブリッド自動車の基本構成と動作イメージ

2.2 船舶ハイブリッド推進システム

船舶においても推進システムのハイブリッド化の検討・開発が進められており、国内外において既に一部の船舶にはディーゼルエンジンと電動モータを用いたハイブリッド推進システムが搭載されている。図2および図3は国内で開発された代表的なハイブリッド推進システムである。

図2は、ディーゼルエンジンの出力軸に接続されたプロペラと電動モータに接続されたポッド推進器を組み合わせたタンデムCRPシステムと呼ばれる形式である。このシステムは、一部のセメント運搬船や大型フェリーに採用されており、二重反転効果によりプロペラ効率が大幅に向上すること、360°回転可能なポッド推進器により入出港時の操縦性が向上することなどの優れた特徴がある⁵⁾。

図3は、新潟原動機らがタグボート用に開発した、ディーゼルエンジン、電動モータおよびリチウムイオン電池を用いたハイブリッド推進システムである⁶⁾。タグボートのディーゼルエンジンは稼働時間の多くを低負荷で運転している。そのため、低速航行時にリチウムイオン電池を活用することで燃料消費を大幅に削減することができる。

図4は、著者らが検討した船舶ハイブリッド推進システムの構成例である⁷⁾。このシステムでは、ディーゼルエンジンを常に最高効率の条件で運転するため、船舶推進動力の回生とアシストのための発電/電動モータ並びに大容量蓄電システムを搭載している。さらに、高効率な排熱回収装置や自然エネルギーの有効活用、水素エネルギー技術を活用した燃料電池の搭載などについても検討した。

図5は本船舶ハイブリッド推進システムの省エネ効果を模式的に示している。定常航海時に船舶が一定速度を維持して航行する場合、風や海流の方向の違いによりエンジンの出力レベルは変化する。一方、エンジンには最も効率が高い出力レベルがある。そこで、本船舶ハイブリッド推進システムでは、長期的な周期で変動する気象・海象条件に対して、エンジンが常に最高効率で運転する条件を保つように、発電/電動モータを用いて船舶推進動力の回生・アシストを行い、省エネ効果を得る。また、数秒から数十秒周期の波浪による負荷変動に対しても同様の制御を行うことにより、さらなる省エネ効果が得られるものと考えられる。

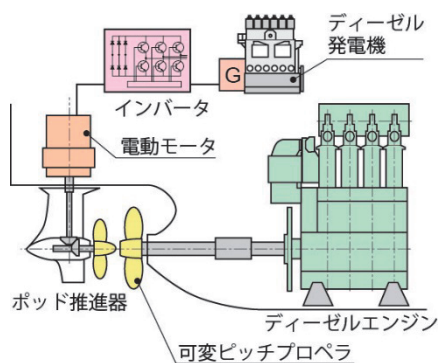


図2 タンデムCRPシステム

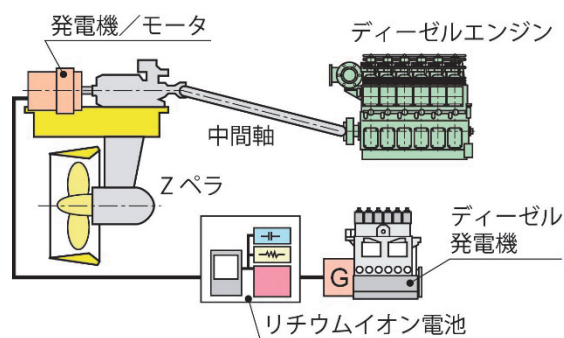


図3 タグボート用ハイブリッド推進システム

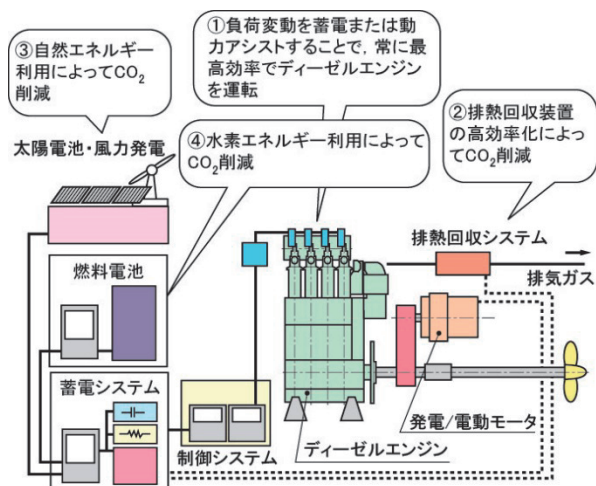
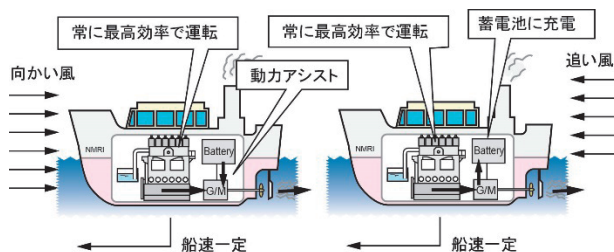


図4 船用ハイブリッド推進システムの構成例



(a) 気象条件などの長周期の変動に対応

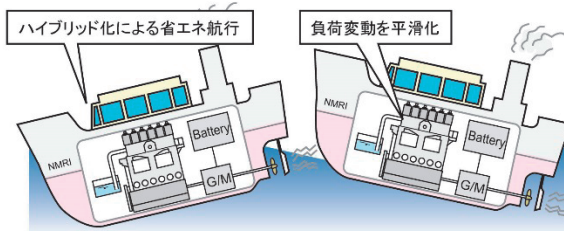


図5 船用ハイブリッド推進システムの省エネ効果

2.3 電気推進船のハイブリッド化

電気推進船は、電動モータを主推進動力源とした船舶である。電気推進船の歴史は古く、20世紀初めには、タービン発電機を搭載した船舶において、軍事目的の艦船をはじめとして大型商船や旅客船にも使用された。その後、操舵・静音性能の観点から、砕氷船や測量船等の特殊な目的を持った船舶に適用されてきた。

近年では、電動モータの回転数制御が可能なインバータおよび高効率プロペラの利用により、さらなる操舵性および推進効率の向上が進み、セメント運搬船やケミカルタンカーなどの内航船の一部にもディーゼルエンジン発電機と電動モータを組み合わせた電気推進システムが用いられている。電気推進船はエンジン発電機の出力からプロペラまでの動力伝達効率は低くなるものの、ディーゼルエンジン発電機の搭載位置を比較的自由に決めることができ、船型設計の自由度が増す。そのため、近年建造された電気推進内航船では、在来船に比べて10～30%の燃費削減が可能との報告もある⁸⁾。

一般に、電気推進船は、複数のディーゼルエンジン発電機を搭載し、運航条件や周囲の状況によって発電機の運転台数と発電電力を制御する。すなわち、海象条件が悪いときなどは負荷変動に対応するために多くの発電機を運転する必要がある、ディーゼルエンジン発電機を低負荷で運転することとなるため、燃費が悪化する。

このような電気推進船の課題に対応する手段として、従来の電気推進システムと大容量蓄電池を組み合わせ、エンジン発電機と蓄電システムの両方から電動モータへ電力を供給可能な電力供給源のハイブリッド化が考えられる。図6のシステムでは、起動するエンジン発電機を常に最高効率付近で運転し、電動モータに対する余剰電力を蓄電池に回収するとともに、アシストが必要な際の電動モータの不足電力を蓄電池から供給することによりエネルギー利用効率を高められる。さらに、すべてのエンジン発電機を停止させて、蓄電池の電力だけを用いて運航することもできる。

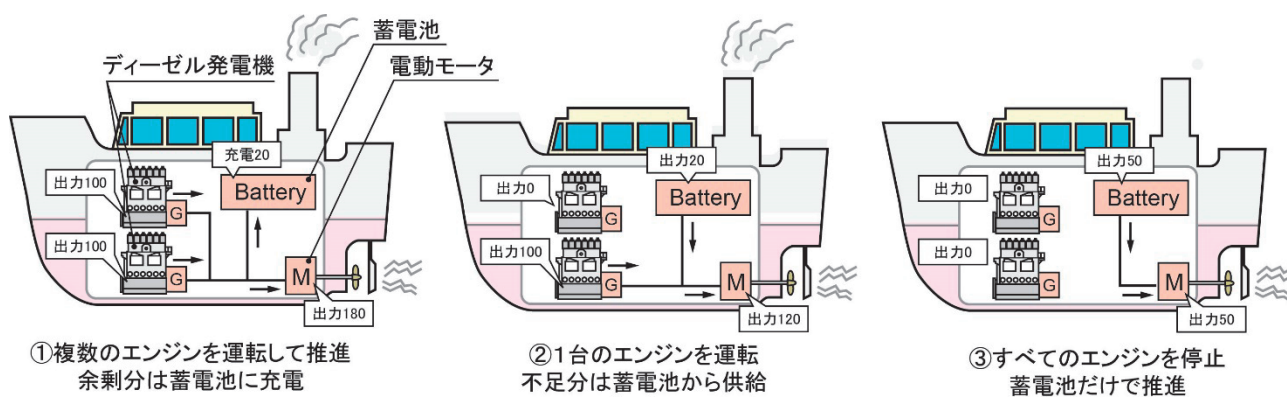


図6 ハイブリッド電気推進船の検討例

3. 船舶のハイブリッド化とリチウムイオン電池

船舶のハイブリッド化を進めるために重要な要素技術の一つとして大容量リチウムイオン電池があげられる。大容量リチウムイオン電池の利用は前章に述べたディーゼルエンジンとの組み合わせに限らず、陸上給電によってリチウムイオン電池を充電してその電力で運航する、いわゆる電池推進船の開発が進められており、国内では小型船舶の一部で既に就航も始まっている⁹⁾。電池推進船の最大の特徴は、エンジン発電機を搭載せず、航行時に地球温暖化ガスをまったく排出しないことである。一方、大容量リチウムイオン電池搭載の電池推進船の普及に関しては、搭載するリチウムイオン電池のコストや安全性の他、電池システムの重量や寸法、さらに航続距離の制限などが課題となる。

開発初期のリチウムイオン電池は発火事故などが生じていたが、最近では適切な品質管理と安全対策がなされており、重大な事故はあまり報告されていない。しかし、陸上輸送機関や航空機に搭載されたもののように、十分に安全回路を設けたシステムであっても使用中に不慮の不具合が生じ、発火に至ることは否定できない。船舶でのリチウムイオン電池の安全利用・選定のための知見を得るためには、安全回路と充放電関連機器の複数の故障など、重大な不具合が生じた際の状況を把握する必要がある。そのため、著者らは約20種類のリチウムイオン電池セルを用いて、JIS C 8715-2「産業用リチウム二次電池の単電池および電池システム - 第2部：安全性要求事項」で規格化されている安全性要求事項を上回る加熱試験並びに過充電試験等の安全性評価試験を行ってきた。図7は過充電試験によって発火した電池セルの一例である。このような発火状況を調べるとともに、電池セルが

破損した際に放出される可燃性ガスの組成や発生量を調べることで、リチウムイオン電池を船舶に搭載する際の安全対策について調査を進めてきた^{2),10)}。その結果、電池セルの種類によって発火時の状況が異なること、すなわち、内部で発生するガスや発火要因が異なること、一連の加熱試験において 130℃の温度に耐えられず発火に至った電池セルは1種類であり、その発火状況には再現性があることなどが確認された。また、発火に至らない電池セルであっても、電池セルが過充電などで破損する際、最大 18 %程度の水素濃度が検出されることなど、有効な知見が得られている。

なお、リチウムイオン電池を船舶に搭載する際の設置場所や安全対策の要件については、2015 年に発行された JIS F 8102「船用電気設備 — リチウム二次電池を用いた蓄電池設備」並びに 2017 年に発行された JIS F 8103「舟艇—電気機器 — リチウム二次電池を用いた蓄電池設備」に記載されている。これらの JIS は、2012 年から 2015 年に実施した（一財）日本船舶技術研究協会からの受託研究「蓄電技術の標準化に関する調査研究」並びに同協会が組織した船用二次電池 JIS 化検討 WG の検討結果に基づき作成されている。



図7 過充電試験によって発火している電池セル

4. 水素燃料電池とリチウムイオン電池を用いた模型ハイブリッド船

次世代の電気推進船として、2014 年後半に発売された水素燃料電池自動車と同様のシステム構成を用いた燃料電池船の研究・開発が進められている。水素燃料電池は水素と酸素の化学反応を用いて発電するため、副産物として生成される物質は水だけである。このため、リチウムイオン電池のみを搭載した電池推進船と同様、航行時に地球温暖化ガスが排出されないことが最大の特徴となる。また、電動モータへの電力供給源の二重化と負荷変動に対する電力供給の安定化を確保するために、水素燃料電池とリチウムイオン電池との併用が期待される。以下、電気推進システムの安全機能および監視・制御システムの特性を評価・検証することを主目的として設計・試作した模型ハイブリッド船について述べる³⁾。

4.1 模型ハイブリッド船の基本構成

図8に設計・試作した模型ハイブリッド船の構造、表1に本模型船および構成機器の主要目を示す。本船の最後部には2基の電気モータを取り付けた電動船外機が取り付けられている。その前方には、電力変換や制御のための各ユニット、その最上部に定格出力 10 W の燃料電池が配置されている。船体中央には本模型船の制御・監視をするための PLC（Programmable Logic Controller）、その上方には水素吸蔵合金タンク（容量 220 NL）が設置されている。そして、船体前方には総電気容量約 26 Wh のリチウムイオン電池が配置されている。本模型船の設計においては、想定される実船の機能をできる限り搭載するように考慮している。例えば、後述するように、燃料電池を密閉区画内に配置していることや燃料電池システムの起動前に通風装置を運転するシーケンス制御を採用していること、区画内にガス検知器を設置して区画内の水素濃度を監視することなどは想定される実船の機能である。

図9に本模型船の操船並びにネットワークシステムの構成を示す。本システムは模型ハイブリッド船本体、操船コンソールおよびタッチディスプレイを取り付けた監視システムから構成されている。模型船本体には無線LAN子機（中継器）が搭載され、ハブを介して無線LAN親機（アクセスポイント）に接続されたタッチディスプレイおよび操船コンソールと無線で通信できる。図10にこれらの外観を示す。

操船コンソールは実際の小型船舶の操船装置を模擬した構成であり、舵輪、テレグラフ（モータ回転速度指示ハンドル）、前後進およびスラストのスイッチなどが配置されている。これらの操船に関連する信号は、操船コンソールに取り付けられたディスプレイ付きの小型PLCに取り込まれた後、ネットワークを介して模型ハイブリッド船本体のPLCと通信し、処理される。

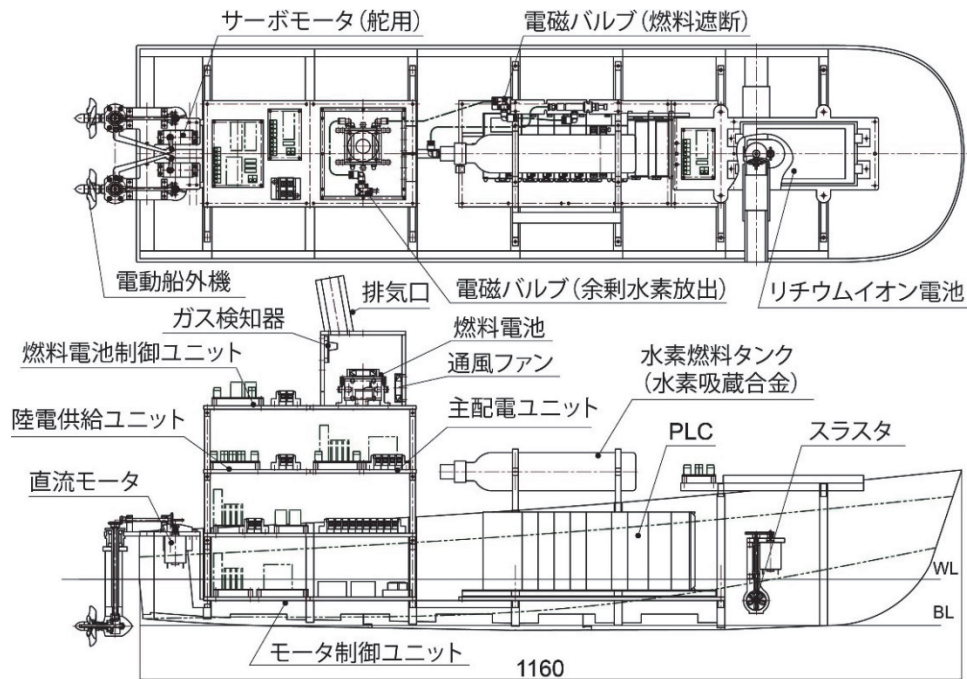


図8 模型ハイブリッド船の構造

表1 模型ハイブリッド船および構成機器の主要目

全 長	1160 mm
全 幅	306 mm
制御装置 (PLC)	Keyence KV-7500
推進用モータ定格出力	9.5 W@10,300 min ⁻¹ (x2)
スラスト用モータ定格出力	9.5 W@10,300 min ⁻¹
燃料電池定格出力	10 W
水素燃料タンク容量	220 NL
リチウムイオン電池容量	13.3 Wh (x2)

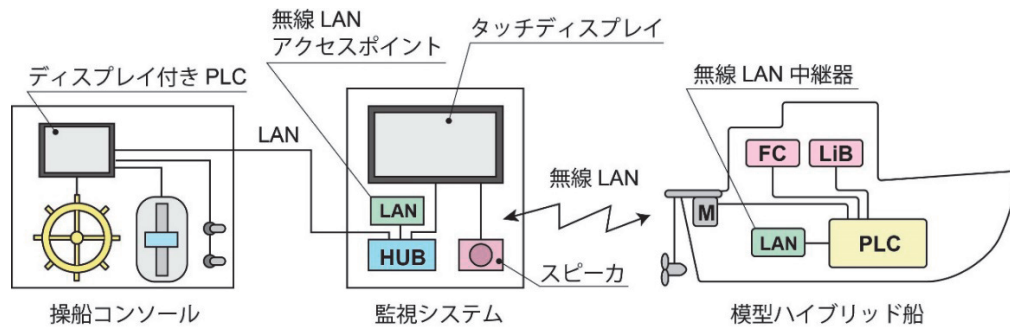


図9 模型ハイブリッド船の操船並びにネットワークシステムの構成



図10 模型ハイブリッド船、タッチディスプレイおよび操船コンソールの外観

4.2 電力系統の基本構成

図11に本模型ハイブリッド船の電力系統を示す。電力源としては、燃料電池、リチウムイオン電池および陸電供給（商用 AC100 V 電力）の3系統があり、いずれも DC/DC 変換器やリレー（遮断器）、ダイオード（整流器）を介して、船内の直流母線（DC12 V）に接続されている。また、船内制御電源としては、主にセンサの電源に使用する DC5 V と PLC の電源に使用する DC24 V があり、どちらも DC12 V の直流母線から DC/DC 変換器を介して接続されている。

推進およびスラスターの電動モータは、DC12 V の直流母線から DC/DC 変換器を介して DC6 V に降圧した後、ラジコン模型用速度コントローラ（ESC）を介して接続されている。なお、ESC は PLC から出力される PWM 信号によって制御される。

それぞれの電源ラインおよびモータラインには、合計6個の電流センサが取り付けられており、各部の電圧とともに PLC によって計測され、処理される。

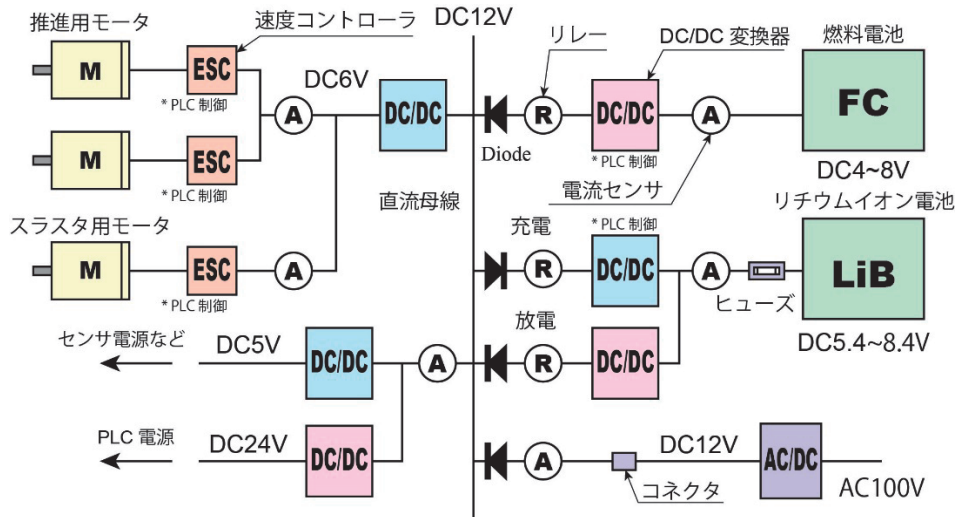


図11 模型ハイブリッド船の電力系統

4.3 模型ハイブリッド船の構成要素と機能

4.3.1 燃料電池システム

図12に燃料電池システムの構成を示す。本模型ハイブリッド船に搭載している燃料電池は、定格出力10Wの固体高分子形燃料電池(PEFC)である。図8に示したように、想定される実船と同様、燃料電池は密閉区画内に配置されている。区画には押し込み式の通風ファンが取り付けられ、燃料電池の運転時には常時通風される。また、区画内には温度計測のためのサーミスタおよび通風出口付近の水素濃度を計測するためのガス検知器が取り付けられ、いずれもPLCによって監視される。

水素吸蔵合金タンク内の水素は、調圧弁およびPLCで制御される燃料遮断バルブ(電磁バルブ)を介して燃料電池に供給される。燃料電池に供給された水素ラインの出口には余剰水素を排出するための電磁バルブを取り付けてあり、PLCの制御によって一定間隔で余剰水素を放出する。なお、余剰水素排出のチューブからは微量ではあるが高濃度の水素が排出される。このチューブはガス検知器の後流側に接続しているため、通風ファンが運転している状態において、ガス検知器は水素排出の影響をほとんど受けない。

また、PLCによる燃料電池システムの起動シーケンスとして、最初に通風ファンを一定時間運転し、その後、水素遮断バルブを開き、区画内の水素濃度を監視しながら、燃料電池の電圧が上昇したことを確認した後、リレーを閉じてDC12Vの直流母線に接続する。このようなシーケンス制御は実機においても概ね同等の機能になると考えられる。

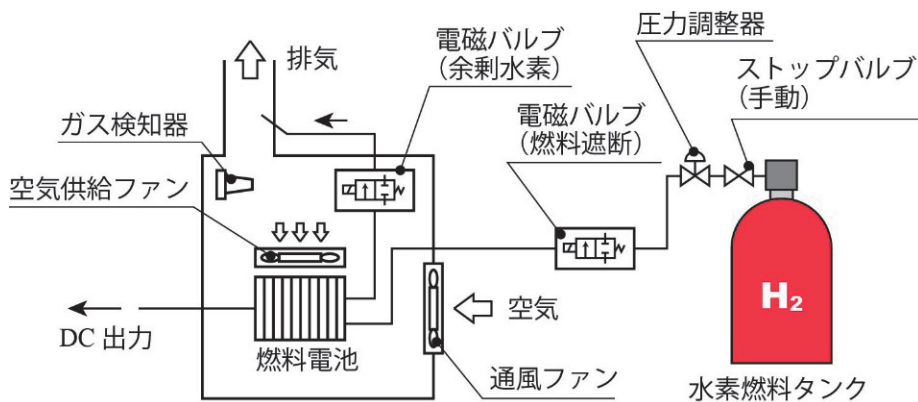


図12 燃料電池システムの構成

4.3.2 リチウムイオン電池システム

本模型ハイブリッド船に搭載したリチウムイオン電池は、ラミネート型のマンガン系リチウムイオン電池であ

り、1セルあたりの電気容量が約 13.3 Wh のセルを 2 直列 1 並列に接続している。図 11 に示したように、リチウムイオン電池には放電用と充電用の回路が接続されており、それぞれに昇圧・降圧の DC/DC 変換器が取り付けられている。

リチウムイオン電池を安全に扱うためには、セル電圧や電流、温度の監視が必要不可欠であり、本模型船のシステムにおいては PLC によってそれらを監視し、適切な運転条件を維持するように制御している。充電時、PLC は、設定した充電電流になるように DC/DC 変換器の出力電圧を制御する。そして、セル電圧が上昇した後はセル電圧が一定になるように電圧制御を行い、満充電の状態に達すると自動で充電を終了させる。

一方、放電時、PLC はセル電圧を監視し、設定した放電末電圧に達すると、過放電を防ぐために、直流母線に接続したリレーを開く制御を行う。なお、放電時に使用する DC/DC 変換器は PLC で制御することなく、あらかじめ決められた電圧で出力する。すなわち、後述するように燃料電池システムの電圧（発電出力）を制御することで、モータおよび船内負荷とのバランスによってリチウムイオン電池の放電出力が決められる。

4.3.3 負荷分担制御

陸電供給が接続されている場合、または空中でプロペラを軽負荷で運転する場合、燃料電池およびリチウムイオン電池の出力には十分な余裕があり、出力制御の課題はほとんど生じない。一方、陸電供給を使わず、燃料電池およびリチウムイオン電池だけから電力を供給し、しかも PLC の電力（約 15 W）を賄いながら本船を水上で運転する場合、燃料電池およびリチウムイオン電池の出力は大きく増加し、燃料電池とリチウムイオン電池の負荷分担制御が重要となる。

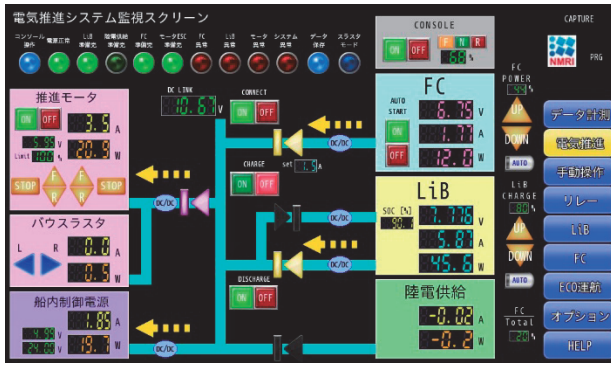
本船の負荷分担制御は、燃料電池システムに接続した DC/DC 変換器の電圧を PLC によって制御することで行う。次節で述べる試験においては、燃料電池の負荷割合（燃料電池出力／全体出力）が、あらかじめ設定した範囲内になるように制御している。なお、リチウムイオン電池を使わず、燃料電池と陸電供給でシステムを運転する場合、上記の負荷分担制御は機能せず、燃料電池の出力はあらかじめ設定した範囲内になるように制御される。

4.3.4 監視システムおよび安全機能

図 13 は、本模型ハイブリッド船の操作や監視に用いられるタッチディスプレイの代表的な画面である。同図(a)は電気推進システムの操作並びに状況を監視するための画面であり、各構成機器の電圧、電流、電力といった情報が表示されている。同図(b)は主に運航時に用いる監視画面であり、モータ出力や水素並びにリチウムイオン電池の残量などが表示されている。同図(c)および(d)はそれぞれ燃料電池システム並びにリチウムイオン電池の状態を詳細に監視するための画面である。タッチディスプレイには音声出力が可能なスピーカが取り付けられており、リチウムイオン電池の残量などを音声で情報提供する他、後述するような可視可聴の警報を発令する。

表 2 に本模型ハイブリッド船の安全機能をまとめている。燃料電池システム関連の主な安全機能としては、水素濃度や周囲温度の上昇、低電圧などがあり、それぞれ PLC とタッチディスプレイを介して警報が発令されるとともに、水素濃度が設定値よりも高くなった場合には電磁バルブの操作により燃料を遮断する機能を有している。リチウムイオン電池の安全機能としては、周囲温度の上昇や電圧・電流の異常があり、同様に PLC とタッチディスプレイを介して警報が発令される。

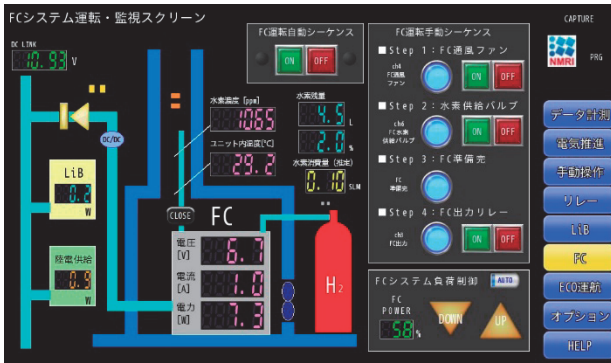
また、水素およびリチウムイオン電池の残量が少なくなると、本船の電力源が喪失し、運転できない状態となる。そのような状況を防ぐため、水素並びにリチウムイオン電池の残量が設定値を下回った場合、推進モータに出力制限を与え、タッチディスプレイに音声情報を発令するなどの安全対策を施している。なお、推進モータは、燃料電池またはリチウムイオン電池の負荷が大きい場合や電源異常時（それぞれの電圧がしきい値からはずれた場合）にも出力制限が与えられる。これにより、不慮の負荷上昇が生じた場合においても船内電力喪失を起こりにくくするシステムとしている。



(a) 電気推進システム監視画面



(b) 運航状況監視画面



(c) 燃料電池監視画面



(d) リチウムイオン電池監視画面

図13 タッチディスプレイの画面

表2 模型ハイブリッド船の安全機能

関連機器	項目	判断	機能
燃料電池システム (FC)	過負荷防止	FC 電圧が設定値以下 FC 電流が設定値以上 FC 出力が設定値以上	・燃料電池の出力を低下させる。 ・電圧低下が続く場合、余剰水素放出用バルブを一定時間だけ開く。電圧が正常値に復帰しない場合は警報を発定する。
	水素漏洩	水素濃度が設定値以上	・警報発令後、水素遮断により FC の運転を停止する。
	温度異常	周囲温度が設定値以上	・警報発令
	水素残量	FC 運転中の水素残量が設定値以下	・警報発令
	過電流防止	FC 電流が設定値以上	・推進用モータの出力を制限する。
リチウムイオン電池	放電末	セル電圧が設定値以下	・LiB 放電停止 (LiB 放電用リレーを開とする。)
	満充電	セル電圧が設定値以上	・LiB 充電終了 (LiB 充電用リレーを開とする。)
	温度異常	セル温度が設定値以上	・警報発令
	過電流防止	LiB 電流が設定値以上	・推進用モータの出力を制限する。
	LiB 残量	LiB 放電中、セル電圧が設定値以下	・電圧低下に伴い、段階的に以下の対策が行われる。 ①警報発令 ②推進用モータの出力制限 ③推進用モータ用 ESC の停止
その他	電源異常	各部の電圧 (DC12 V, 24 V, 5 V) が設定値以上、または設定値以下	・推進用モータの出力を制限し、設定時間だけ待機する。その後、電源異常が解除されていれば復帰、電源異常が継続されていれば推進用モータの ESC を停止する。

※それぞれの設定値はタッチディスプレイで設定できる。

4.4 模型ハイブリッド船による動作確認試験

4.4.1 リチウムイオン電池の充電試験

図 14 は、陸電供給と燃料電池の電力を使って、リチウムイオン電池に充電したときの試験結果である。リチウムイオン電池を約 1.2A の電流 (約 0.3 C) で充電し、約 3 時間で満充電の状態となり、自動で充電を終了している。これより、PLC による定電流一定電圧充電の制御が適切に機能していることがわかる。また、この試験において、燃料電池の出力は 6~9 W の範囲内になるように制御しており、燃料電池は、意図した通り、安定して発電していることがわかる。

4.4.2 負荷分担制御の陸上試験

図 15 は、陸上において、燃料電池とリチウムイオン電池の電力を使って推進用モータおよびスラストモータを運転したときの試験結果である。なお、この試験における PLC への電力は陸電供給としており、燃料電池の負荷割合 (燃料電池出力/PLC への供給電力を除く全体出力) が 30~50 % の範囲内になるように設定している。これより、モータ出力を徐々に増加・減少させた際、燃料電池およびリチウムイオン電池の出力は、適切な負荷割合で制御されていることがわかる。また、推進用モータの運転中にスラストモータを運転し、負荷を急激に変化さ

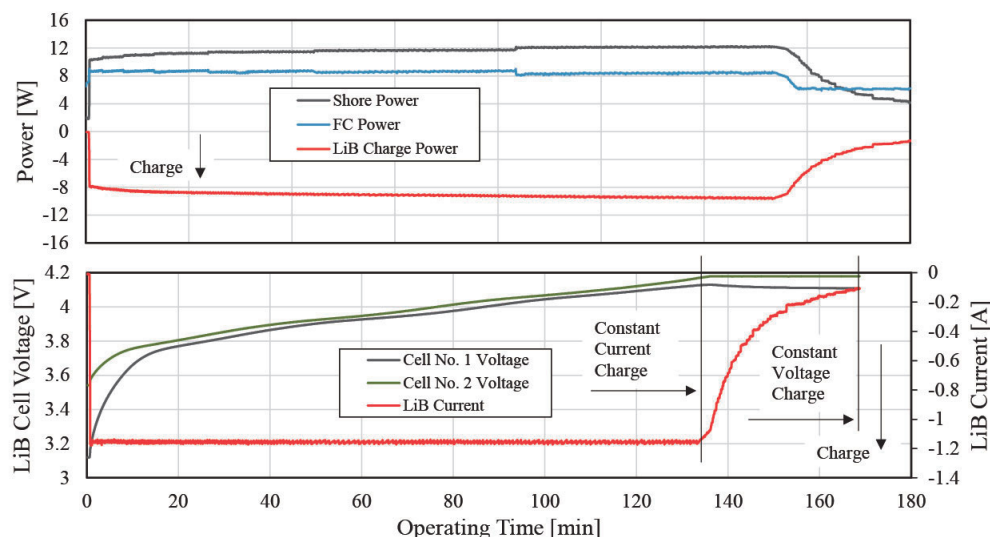


図14 リチウムイオン電池の充電試験

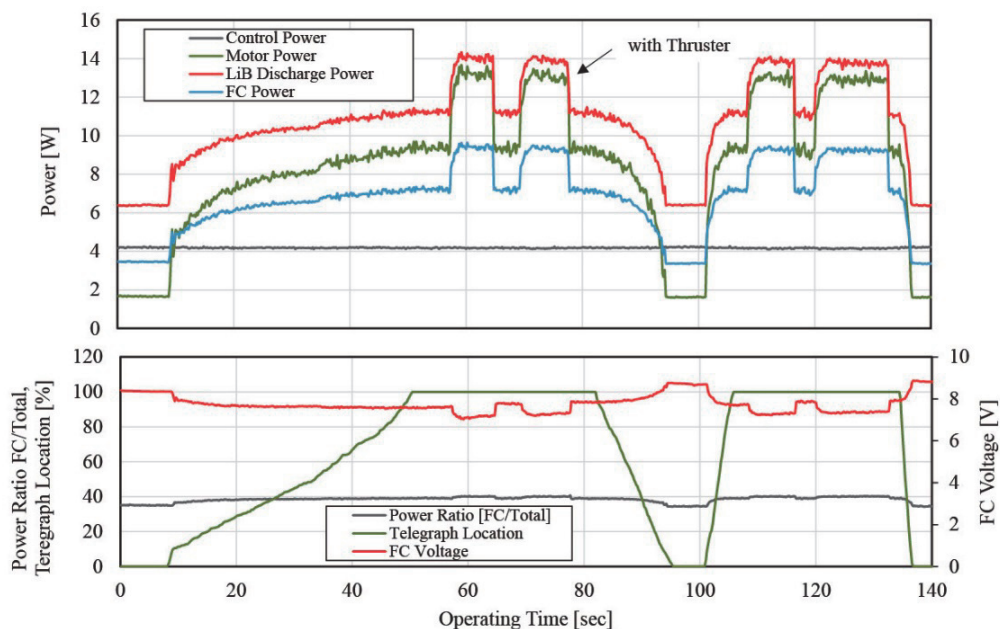


図15 負荷分担制御の陸上試験

せた場合であっても適切な負荷割合が維持されていることがわかる。

なお、長時間使用した燃料電池を使用した場合、負荷の急激な変化によって、燃料電池の出力が低下することがあった。これは、負荷変動時に燃料電池の電圧が設定最低電圧を下回ったため、PLCにより燃料電池の出力を下げる制御が機能したためであり、燃料電池の負荷制御が適切であることが確認された。

4.4.3 水槽試験

図16は、燃料電池とリチウムイオン電池の電力を使って水槽試験を実施した結果の一例である。この試験においては、本船を停止させた状態から加速・減速、あるいは旋回・停止をさせ、そのときの状態を計測している。これより、モータ出力は最大20 W程度、リチウムイオン電池の出力は最大58 W程度に達しているものの、船内電力およびモータ出力の喪失等などの不具合はなく、適切な運転が維持されていることがわかる。また、本水槽試験においては燃料電池の負荷割合は10～25%の範囲内になるように設定しており、モータ出力を変動させた場合でも燃料電池およびリチウムイオン電池の出力は適切な負荷割合で制御されていること、推進モータの急激な加速動作によって負荷が増加した際に推進モータの出力制限が適切に機能していることなどが確認された。

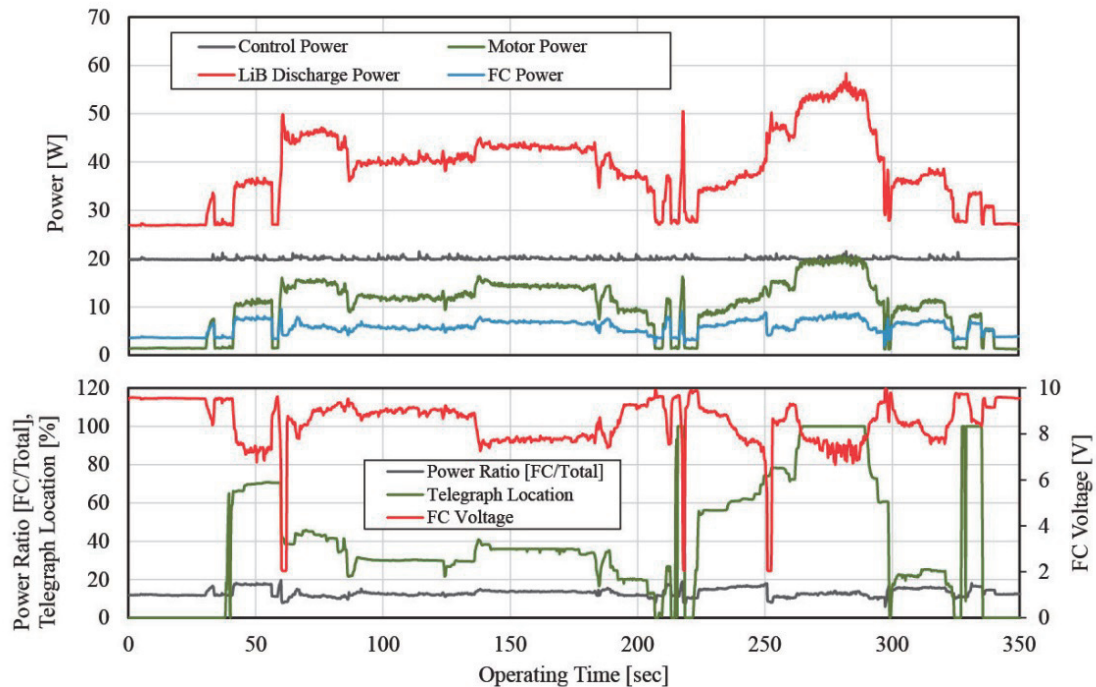


図 16 水槽試験の結果

4.5 水素燃料電池とリチウムイオン電池を用いたハイブリッド船の技術課題

本章では、主に電気推進システムの安全機能を含めた監視・制御システムの特性を評価・検証するために設計・試作した模型ハイブリッド船の構造や制御システムの概要、さらに試作後の試験結果を紹介した。様々な試験を実施した結果、燃料電池やリチウムイオン電池の出力制御や安全機能は概ね意図した通りに機能することを確認できた。

一方、実際の小型船舶の推進出力は数百 kW 程度であり、本章で述べた模型ハイブリッド船の出力レベルとは大きく異なる。また、実船では、燃料電池の燃料貯蔵設備として、高圧水素ガスタンクの搭載が想定されるのに対して、本模型船は水素吸蔵合金タンクを搭載するなど、想定している水素燃料電池船と異なる点が多い。しかし、PLC による燃料電池システムの起動シーケンス制御や安全対策、さらに水素やリチウムイオン電池の残量に応じた推進用モータの出力制御や警報発令など、実船を実用開発する際に役立つ知見は多いと考えている。

5. あとがき

本報では、高効率ディーゼルエンジンの特徴を最大限に活かした船舶用ハイブリッドシステムの調査・検討結果、船舶のハイブリッド化に必要不可欠なリチウムイオン電池の安全性に関する調査結果、そして、水素燃料電池とリチウムイオン電池を組み合わせた模型ハイブリッド船など、船舶から排出される地球温暖化ガスの削減を目指して著者らが研究・開発を進めてきた船舶用ハイブリッドシステムについて解説した。これらの省エネ技術を含めて、これからの船舶に強く求められているエネルギー利用効率向上と高い環境調和性を両立するシステムについては、国内外の多くの造船所や船用機器メーカーによって活発に研究・開発が進められている。また、今後、船舶に使われる燃料は石油ばかりでなく、天然ガスや水素などの多様化が期待されており、それらに対応する技術開発が重要になると考えられる。これらを踏まえて、環境に優しく、かつ安全でリーズナブルな船舶の実現に向けて研究・開発を進めていきたいと考えている。

謝 辞

本報では、第3期中期計画期間（平成23～27年度）に実施した研究課題「マリンハイブリッドシステムの開発に関する研究」および「ハイブリッド制御システム等の安全性評価技術の開発に関する研究」、さらに第4期中期計画期間（平成28年度～）に実施している研究課題「多様なエネルギー源等を用いた新たな動力システムの開発に関する研究」の研究成果の一部を紹介した。これらの研究に関連して、リチウムイオン電池システムの開発については渦潮電機株式会社、燃料電池システムの開発についてはヤンマー株式会社の方々を含めて、所内外の多くの方に協力をいただいている。また、本報で紹介した模型ハイブリッド船の設計にあたっては、国土交通省からの請負研究「水素燃料電池船の安全ガイドライン策定に向けた調査検討（平成27年度）」、「水素燃料電池船の安全性確保のための調査検討（平成28年度）」および「水素燃料電池船の安全ガイドライン策定のための調査検討（平成29年度）」で検討した内容を参考にさせていただいた。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 平田宏一，関口秀紀，次世代船舶推進システムの開発動向，石油学会「PETROTECH」，Vol.38, No.8, p.72-77, 2015.
- 2) 平田宏一，関口秀紀，柳東勲，船用リチウムイオン電池の安全性に関する研究，第14回海上技術安全研究所研究発表会講演集，p.262-263, 2014.
- 3) 平田宏一，宮崎恵子，水素燃料電池とリチウムイオン電池を搭載した模型ハイブリッド船の設計・試作，日本機械学会，第26回交通・物流部門大会（TRANSLOG 2017），2017.
- 4) 御堀直嗣，ハイブリッドカーのしくみがよくわかる本，技術評論社，2009.
- 5) 加納敏幸，今澄敏夫，タンデム型（ハイブリッド型）電気推進船，日本マリンエンジニアリング学会誌，第46巻，第1号，p.38-43, 2011.
- 6) 白石浩一，南俊一，古寺正識，環境配慮型曳船（ハイブリッドタグボート）システムの開発，IHI 技報，Vol.54, No.1, p.68-73, 2014).
- 7) 平田宏一，船舶用ハイブリッドシステムの基礎的検討，日本機械学会関東支部第16期総会講演会講演論文集，pp.399-400, 2010.
- 8) 内航船における環境技術普及への取り組み，独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 平成26年度内航船舶（SES）技術セミナー 講演資料，独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2014.
- 9) 電気推進船「あまのかわ」の実用化について，日本機械学会交通・物流部門ニュースレター，No.46, 2013.
- 10) 川崎裕之，平田宏一，船用環境対応のリチウムイオン組電池モジュールの安全性確保に関する研究開発，日本海事協会，2015 ClassNK 春期技術セミナー，P.87-97, 2015.