

船舶の発電機における燃料消費量節減を目的とした 電池システムのシミュレーション

永山 紀周* 木船 弘康（東京海洋大学）

Norichika Nagayama*, Hiroyasu Kifune, (Tokyo University of Marine Science and Technology)

Simulation of battery system to reduce fuel consumption in shipboard generators

In this study, we simulated the use of a battery system to control the load factor of a generator for the purpose of fuel consumption savings. The battery system operates by charging and discharging to reach the load factor close to that at which enables the generator to operate at high efficiency. As a result of the simulation, it was found that the load factor control by the battery system allowed the generator to operate at a high load factor for a longer time, leading to a certain amount of fuel consumption savings. It was also found that increasing the capacity of the battery in the battery system improves its fuel consumption savings.

キーワード： 船内発電機，電力貯蔵装置，燃料節減
(Onboard diesel generator, Energy storage system, Fuel saving)

1. はじめに

船舶においては一般的に船内への電力供給のため、発電機が複数台搭載され、電力需要に応じて、運転台数を増減させる運用が行われている⁽¹⁾。電気推進船である東京海洋大学の練習船神鷹丸においても、航海速力や機器の使用による電力需要の変化に対応して、発電機の運転台数を増減させている。一般的に、発電機の原動機は負荷率によってその熱効率が変化することが知られている。特に、高負荷率ほど高い熱効率を維持できる。中でも、負荷率が80%付近で最高効率を示すことが多い（図1参照）。陸上のシステムのように非常に多くの数の発電機が並列で電力供給している状況においては、システム全体の負荷ボリュームに対する発電機1台当たりの定格出力は十分に小さい。このため、発電機が1台追加投入あるいは解列しても、他の運転中の発電機にとって負荷率が大きく変化する要因にはならない。一方、船舶では、船種にもよるが、通常は1～2台で電力供給を行うため、発電機の投入・解列は他の運転中の発電機の負荷率に多大な影響を与えることとなる⁽²⁾。

ところで、発電機が複数台並列運転している状況では電力需要が低下した場合、一台あたりの負荷率は低くなり、熱効率が低下する。当然、運転台数の制御を行うこととなるが、発電機の解列あるいは同期投入は比較的容易であるの

に対し、原動機側の発停には相応の時間を要する。このため、実際の現場では低負荷運転状態のまま複数台の発電機が並列運転する場合があります。電源システム全体としての燃料消費悪化を招く一要因となっている。こうした課題に対し、本研究では、電池システムを用いて発電機の低負荷運転を削減し、全体としての効率改善を企図している⁽³⁾。発電機の負荷率が低いときは電池の充電動作により負荷率を一時的に高くする。

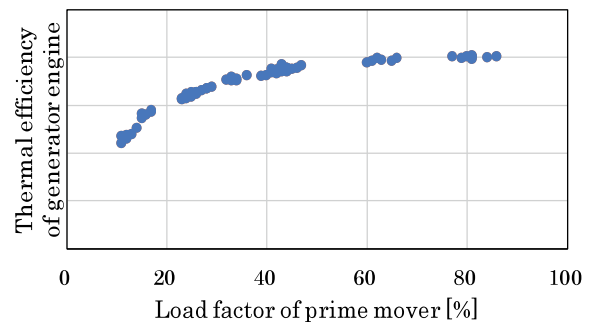


図1 発電機原動機の負荷率と効率の関係例

Fig. 1 Sample of relation between load factor of prime mover and its thermal efficiency

一方で、一定値以上に負荷率が高くなる場合は、電池からも一時的に電力供給（放電）することで、発電機の追加投入を未然に防ぎ、運転中の発電機を高負荷率で運転させる。こうした運用は発電機原動機の効率改善につながると期待される。一方、必然的に電力変換器や電池での電力損失も発生する。このため、電池システムの接続・運用によって、燃料消費量節減効果がどの程度期待できるか把握することを目的として燃料消費に関するシミュレーションを行った。

2. 想定する電池システムの導入と仕様

本研究では、東京海洋大学の練習船神鷹丸の交流電源系統に電池システムを接続したと仮定して解析を行った。神鷹丸には図 2 に示すように定格出力 750kW の発電機が 3 台搭載されている。表 1 に神鷹丸に搭載されている発電機の仕様を示す。

図 2 に示すように、本研究で仮定する電池システムは、発電機が 3 台接続されている交流母線に対して、並列に接続する。主たる電力はディーゼル発電機から供給するため、本電池システムは補助電源として扱うこととし、船内発電機としての規則適用を受けないという前提で、各種ハードウェア並びに制御設計を行った。

図 3 に電池システムの回路図を示す。

AFE(Active Front End)コンバータでは 450[V]の三相交流電源系統と 690[V]の直流リンク電圧 E との相互電力変換を担うものとして想定した。チョップパについては電池に充電をする際は降圧させ、放電する場合は昇圧させることとし、690[V]の直流リンク電圧と SOC によって変化するバッテリーの端子間電圧 V_b の相互間で電力変換する。なお、AFE コンバータ及びチョップパの定格出力をそれぞれ 100[kW]とした。バッテリーは、公称電圧 3.5[V]のセルを直列に 160 個、並列方向に N_p [個]接続したもので構成される。この並列数

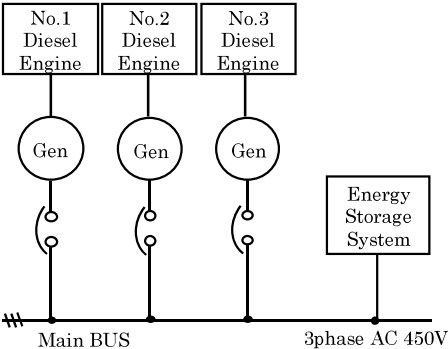


図 2 電池システムを導入した場合の船内電気系統の概略図
Fig. 2 Assumed onboard electric system with ESS

N_p を解析時のパラメータの 1 つとした。バッテリーはリチウムイオン電池を想定し、表 2 に示す特性を持つものと仮定した。端子間電圧については、SOC によって決まる開放電圧の値を基準として充放電電流の大きさと内部インピーダンスによって変化するものとして扱った。図 4 に SOC と端子間電圧、充放電電圧の関係を示す。内部インピーダンスは抵抗成分のみ、C レートは 2 以下となるよう制御して、電池での充電・放電時の電力損失を計算した。なお、バッテリー全体電圧 V_b の最高電圧は 672[V]、最低電圧は 448[V]である。

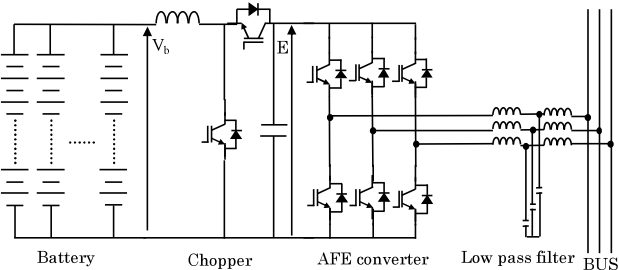


図 3 電池システムの回路図
Fig. 3 Circuit diagram of energy storage system

表 1 神鷹丸の発電機仕様

Table 1. Generator specifications of Shinyo Maru

交流発電機定格出力	750kW
力率	0.8
極数	8 極
発電機原動機定格出力	810kW
発電機原動機回転数	900min ⁻¹

表 2 バッテリーの仕様

Table 2. Battery system specifications

充電終止電圧[V/cell]	4.2
公称電圧[V/cell]	3.5
放電終止電圧[V/cell]	2.8
電流容量[Ah/cell]	10
内部インピーダンス[Ω/cell]	0.01
バッテリーセルの直列数[個]	160

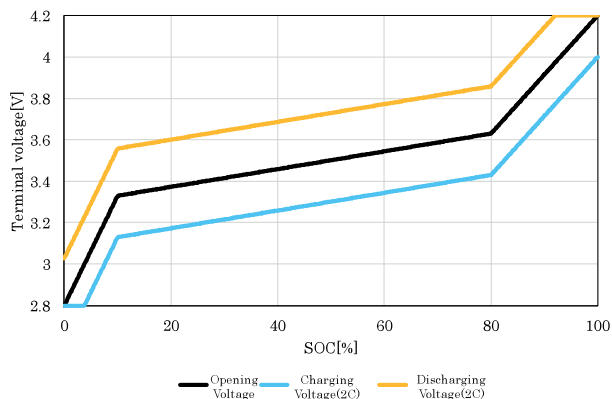


図 4 仮定するバッテリーの特性

Fig.4 Assumed characteristics of lithium-ion battery

AFE コンバータとチョッパの電力損失は、IGBT 並びにインダクタで生じるものを計算に含めた。IGBT での電力損失の大きさは、三菱電機株式会社が提供する損失解析ソフト Melcosim Ver.5 を用いて算出を行った。チョッパについてはインダクタでの損失も加味し、充電時の降圧動作、放電時の昇圧動作のそれぞれについて効率の計算を行った。インバータ及びチョッパの動作条件を表 3 及び表 4 に示す。制御用回路及び冷却動力等も損失として計上した。これらすべての電力損失を合計し、入出力する電圧、電流の大きさによって、それら効率データをテーブル化した。図 5、図 6 にインバータ、チョッパでの昇降圧動作の効率データを示す。なお、チョッパの昇圧動作（放電時）については、降圧動作（充電時）と概ね同様の効率データを得た。

表 3 チョッパの仕様及び動作条件

Table 3. Specifications of chopper circuit and its operating conditions

IGBT 名	CM200DU-34F
直流リンク部電圧 E[V]	690
スイッチング周波数[kHz]	5
ゲート抵抗[Ω]	1.6
インダクタの等価直列抵抗[Ω]	0.05

表 4 AFE コンバータの仕様及び動作条件

Table 4. Specifications of AFE converter and its operating conditions

IGBT 名	CM200DU-24F
直流リンク部電圧 E[V]	690
スイッチング周波数[kHz]	3.6
三相交流側周波数[Hz]	60
ゲート抵抗[Ω]	2.4

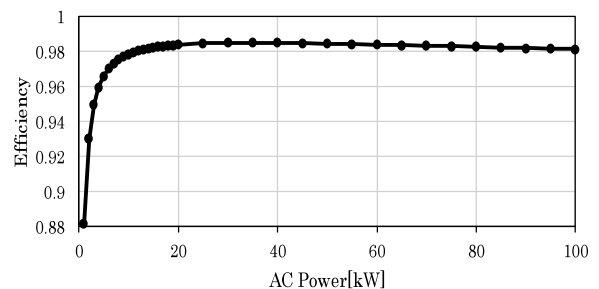


図 5 AFE コンバータの電力変換効率の推定例

Fig. 5 Power conversion efficiency of AFE converter

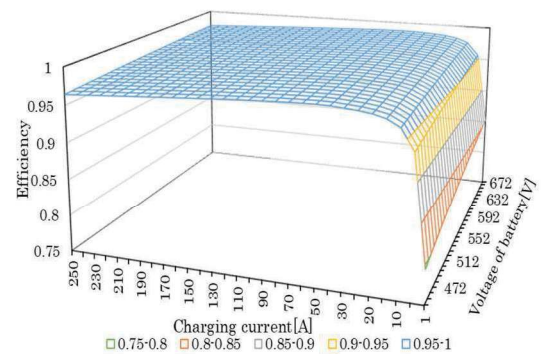


図 6 チョッパの電力変換効率（充電時、降圧）

Fig. 6 Power conversion efficiency of chopper when it operates in buck mode

3. 燃料消費のシミュレーション方法

本研究のアイデアが燃料消費削減に対してどの程度有効性を持ちうるか評価するため、シミュレーションを行った。ディーゼル発電機の燃料は A 重油（低位発熱量：42,300[kJ/kg]）とした。発電機エンジンの効率モデルを構築する上でメーカーのショッptestデータを利用するのが最も簡便ではある。しかし、艀装する上で不可避な排ガス流路がもたらすディーゼルエンジンの熱効率への影響を加味する必要がある。そこでメーカーのショッptestデータは使わず、実船で観測された各種数値をもとに効率モデルを作成した。ただし、出力電力と燃料消費との関係性については定常に近い状態のデータのみを採用している。このため、急激かつ大きな負荷変動がもたらすガバナの反応遅れ、過給機回転数の追従遅れによる熱効率への影響は考慮されていない。本研究で、2017 年 1 月 26 日から 2017 年 1 月 29 日の 4 日間に神鷹丸で実測された電力需要データをシナリオとして利用した。図 7 に 4 日間の電力需要のトレンドを示す。陸上の電力需要トレンドと異なり、1 日のサイクルで似たような変化を示すことはなく、調査航海スケジ

ユーロ並びに気象海象状況に影響を受ける。なお、電力需要が 200[kW]前後の場合には錨泊していると考えられる。この電力需要の大きさ、運転中の発電機台数並びに電池の SOC を考慮し、ESS の動作状態（充電/放電/アイドリング）を決定した。先述の通り、電力変換器の効率はテーブル化しており、入出力の電圧、電流の大きさによって損失計算を行った。なお、発電機の自動発停指令を決定する上で、組むロジック及び閾値は船舶発電システムとして一般的な値を採用している。

構築した発電機モデルを組み込んだ発電システムの燃料消費シミュレーションの妥当性を評価するため、図 7 のシナリオを用い、燃料消費計算を行った。このときの計算条件として、電池システムの機能を無効とし、燃料消費量を計算させたところ、実際の運航において実測された燃料消費量との差が 1.0%程度であった。これは流量計の確度保障範囲内であり、一定の妥当性があることが確認できた。

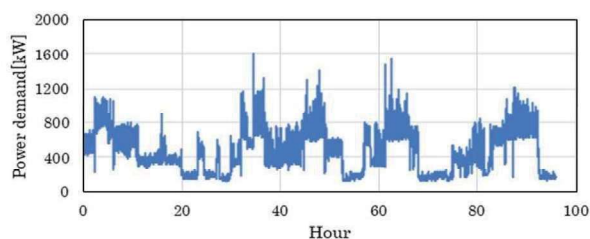


図 7 2017 年 1 月 26 日から 2017 年 1 月 29 日に
神鷹丸で実測された電力需要

Fig.7 Observed demand on Shinyo-Maru 26-29th. Jan. 2017

4. 電池システム及び発電機の運用方法

作成したシミュレーションでは、運転中の発電機 1 台あたりの負荷率が 78~82%に近づくよう電池システムによって充電及び放電動作を行わせた。この範囲より負荷率が低い場合は充電させ、一時的に負荷率を引き上げる。逆の場合は、電池システムを放電動作させ、発電機負荷率を一時的に下げるよう制御した。なお、78~82%の負荷率にあるときに電池システムを動作させると、低電力の充放電による電力変換損失が目立つリスクがあるため、電池システムはアイドリングさせることとした。

バッテリーについては、上記のように基本的に発電機の負荷率に伴って充放電を行っていくが、電池システムへの利用を想定しているリチウムイオン電池は低い SOC では劣化が早まる恐れが考えられる。そこで本研究においては、SOC が 15%以下となれば、強制的に充電をする運用モードを追加した。この運用モードでは SOC が 15[%]以下となった段階で、発電機の負荷率の値に関わらず、バッテリーを充電する（強制充電モード）。本モードにより充電をスタートした場合、充電・放電どちらの動作にも余裕をもって対応できるよ

う、SOC15[%]と SOC100[%]の間である 57.5[%]まで SOC を回復させる運用とした。なお、シミュレーション開始時のバッテリーの SOC についても、充放電を十分にできる余裕を持たせるため、57.5[%]と定めた。同時に、電池システムの効果を適切に評価するために、シミュレーション結果の解析評価対象とした範囲は 1/26 0:00 から 1/29 23:59:59 に近く、最後に SOC が 57.5[%]に達した瞬間までとした。

発電機は、電池システムによって、負荷率が 80[%]程度に近づけるように運転されている。しかし、電力需要が大きくなり、電池システムからも電力供給しているものの、発電機の負荷率が上昇してしまう状況も考えられる。そこで、発電機 1 台あたりの負荷率が 85[%]を上回り、それが 5 秒間継続した際は、並列運転に向けた制御シーケンスがスタートする仕組みとした。逆に、発電機を自動的に解列する手順と条件の概要は次のとおりである。①発電機を 1 台解列した後の継続運転中の発電機が 1 台あたり 80[%]以下の負荷率であること。②同条件が 10 秒間継続すること。発電機の同期投入、解列に伴う負荷移行については発電機定格出力の 10[%]にあたる 75[kW]を 1 秒間に移行できるものとした。さらに、同期投入前には原動機始動後から電圧、周波数、位相の静定のための時間を要する。その時間として 30 秒のアイドリング時間を加味した。また、解列後には、発電機原動機を緩やかに冷機するためアイドリング時間を 300 秒要するものとした。アイドリング中も発電機原動機は運転しているため、負荷率 0[%]での燃料消費量を計算に含めている。

5. シミュレーション結果と考察

〈5・1〉 バッテリセルの並列数による影響

電池システムを導入したことで消費する燃料をどの程度削減できるかを示す。シミュレーション結果が図 8 である。バッテリーセルの並列数によらず、4 日間で燃料消費量を 100[L]以上削減できるという結果を得た。特に、並列数が多いほど（電池容量が大きいほど）その効果が高くなる傾向がみられる。この要因を分析するため、発電機の並列運転時間に着目した。

図 9 に実際の運航時における発電機の並列運転時間に対して、電池システムの導入によって削減できる発電機の並列運転時間を示す。電池容量が大きいと、従前 3 台で運転していたところを 2 台に、2 台運転していたところを 1 台へと並列運転の台数削減に成功した時間数の積算値が増えることが明らかとなった。これらのことから、燃料消費量を削減できた要因として、発電機の並列運転の時間を削減し、1 台あたりの負荷率を高くして運転できる時間を増やすことができた点が挙げられる。

電池容量を大きくすると、発電機の並列運転時間をより

削減できる要因として、以下のことが挙げられる。バッテリーセルの並列数を増やし、電池容量が大きくなったことで、電池システムから充放電できる時間を長くすることが可能になる。これにより、発電機 1 台と電池からの電力供給によって、従前の運用においては発電機の追加始動が必要となる電力需要においても、十分な電力供給ができる時間が長くなる。すなわち、バッテリーセルの並列数を大きくしたことで、発電機の並列運転時間をさらに削減でき、燃料消費量の節減につながったと考えられる。

図 10 の a に実際の運用による 4 日間での発電機の運転台数の変化を示す。この 4 日間においては、およそ 47 時間程度、複数台の発電機から電力供給をしている発電機の並列運転時間が存在した。図 10 の b にバッテリーセルの並列数が 30 のときの発電機の運転台数の変化を示す。図 10 の a と比較して 3 台で運転したところを 2 台で運転できている時間があり、運転台数の増加をある程度抑制できていた。

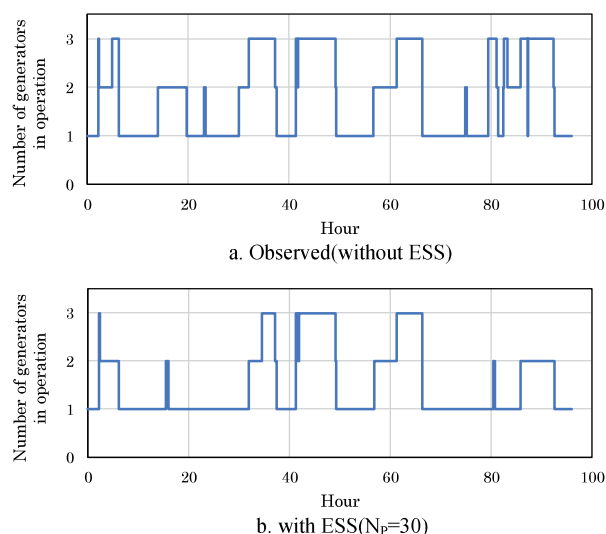


図 10 発電機の運転台数

Fig.10 Number of generator operating in parallel

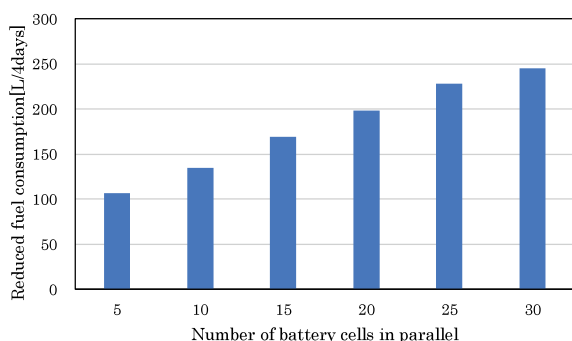


図 8 電池システムの導入により削減した燃料消費量

Fig.8 Reduced fuel consumption with ESS

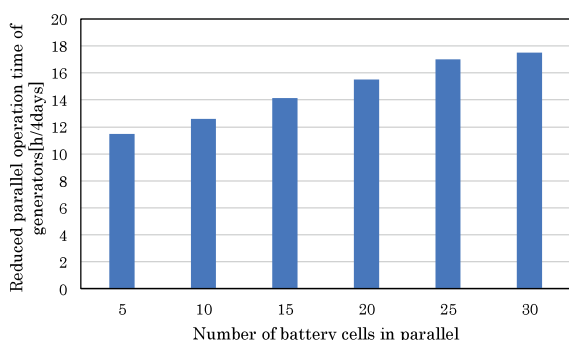


図 9 電池システムの導入により削減した発電機の並列運転時間

Fig.9 Reduced time of parallel operation with ESS

〈5・2〉 電池システムがもたらす損失

ここで電池システム使用時の電池システムによって生じた損失に着目する。本研究では先述のとおり、AFE コンバータ、チョップで構成される電力変換器での損失とバッテリーセルの内部インピーダンスによる損失を計算に含めて燃料消費量の計算を行っている。電池システム導入により新たに生じる電力損失が燃料消費節減効果に対してどの程度のネガティブインパクトを持つか評価を行った。図 11 はこれらの電力損失量のみを燃料消費量に換算した結果である。電池の並列数により若干の違いはあるものの、本研究で与えた計算条件下では 4 日間あたりで 6～10[L]程度の燃料消費増をもたらすことが示された。図 8 に示した電池システムの導入により削減できる燃料消費量に比べ十分小さく、5%程度の影響しかみられなかった。このことから、電池システムの導入により、電池システム自体での損失は発生するものの、発電機運転の運用を改善することによる燃料消費の節減効果のほうが大きいといえる。

図 11 について、バッテリーセルの並列数に着目すると、電池システム全体での損失は並列数を増やすほど大きくなる傾向にあるといえる。電力変換器での損失についても同様に、バッテリーセルの並列数を増やすことで、損失が大きくなっている。この要因としては、バッテリーセルの並列数が増えたことで電池システムの稼働時間が長くなったことが挙げられる。図 12 に電池システムが充放電をしていた時間（稼働時間）を示す。バッテリーセルの並列数が大きくなるほど稼働時間は長くなっていることがわかる。

バッテリーでの損失については、バッテリーセルの並列数が大きくなることで若干の減少傾向にある。バッテリーの内部

インピーダンスは抵抗成分のみを考慮しているため、並列数を増やすと抵抗成分は小さくなる。しかし、図 12 で示したとおり、バッテリーセルの並列数を増やしたことで稼働時間が長くなっている。そのため、抵抗成分は小さいものの、損失を生み出す時間が長いことから、並列数による差は小さく若干の減少傾向に留まっていると考えられる。

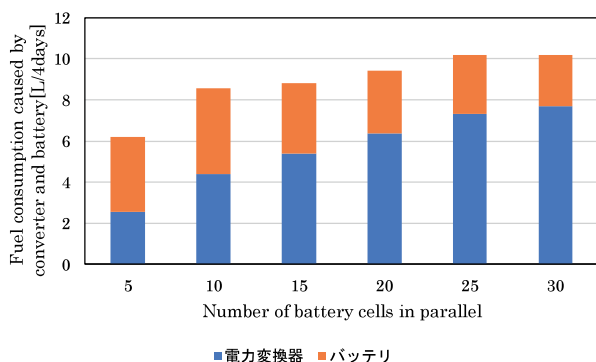


図 11 電池システムの導入により生じた燃料消費量

Fig.11 Fuel consumption generated by the installation of ESS

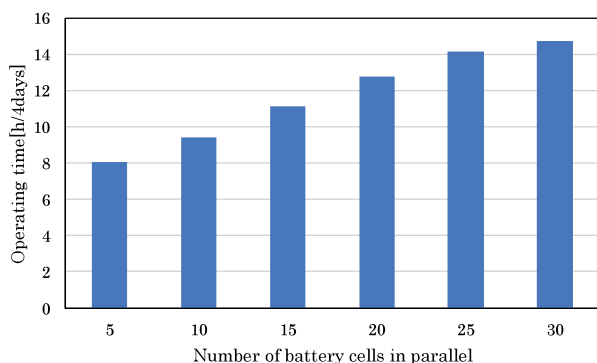


図 12 電池システムの稼働時間

Fig.12 Operating time of ESS

文 献

- (1) 大塚貴夫：「発電機の技術解説 -同期発電機、軸発電装置」，日本マリンエンジニアリング学会誌 第 52 巻 第 1 号，pp.45-50 (2017)
- (2) 海野幸貞、山中直樹、根岸道明：「船内電源システムの合理化設計」，日本船用機関学会誌第 12 巻第 8 号，pp.578-584 (1977)
- (3) 永山紀周、米田昇平、木船弘康：「電池システムを船内 AC 電源系統に利用した場合の発電機の燃料消費量に与える影響」，第 91 回（令和 3 年）マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集，pp.205-206 (2021)