

世界初ゼロエミッションバッテリー推進タンカーと 今後の展望について

平松 雄樹*, 小野寺 達也*

1. はじめに

地球温暖化対策として、温室効果ガス（GHG）の排出削減は喫緊の課題である。船舶においても目標達成に向けてさらにGHGを削減していくためには、船体形状やエンジン、プロペラ等の単体の効率改善だけでなく、船内も含めた船全体での使用エネルギーに対する考えを変えていく必要がある。その一つが、自動車での適用事例が広がっているハイブリッド推進システムや、バッテリー推進システムである。

川崎重工業株式会社（以下、川崎重工業）は、旭タンカー株式会社（以下船主という）が発注し、2022年3月末に竣工した世界初のゼロエミッションバッテリー推進タンカー「あさひ」（図1参照）向けに、内航船向け大容量バッテリー推進システムを納入した。本船は興亜産業株式会社（以下造船所という）にて建造され、東京湾内を運航する船用燃料供給船として運用される。本稿では、バッテリー推進システムの開発の背景、概要、特徴、今後の展望などについて紹介する。



図1 バッテリー推進タンカー「あさひ」

2. 開発の背景

2.1 開発の背景

2018年4月、IMO（国際海事機関）は国際海運におけるGHG削減戦略を採択し、2050年までに2008年比でGHG排出量を50%削減、さらに今世紀中の

なるべく早期にGHGゼロ排出とする目標を掲げている。さらに2021年11月に英国で開催されたCOP26では、各国が2050年に国際海運のカーボンニュートラルを目指すことを表明している。このように船舶におけるGHG削減への機運は世界的に加速している。

国内では、菅前首相がGHG排出を2050年に実質ゼロとすること、及び2030年までに2013年比で46%削減する目標を掲げている。これを受けて、2021年8月に国土交通省は内航海運の2030年度のCO₂削減目標を2013年度比15%減から17%減に引き上げた。

また、内航船の省エネ・省CO₂排出を促進するため、船舶の省エネ・省CO₂排出性能を評価する内航船省エネルギー格付制度を設置、2020年3月から本格運用が開始されている*1。このように内航海運でもGHG削減の機運は高まっている。

2.2 船舶におけるエネルギー使用

船舶で使用されるエネルギーは、推進動力とポンプや照明、制御用などの船内電力の2つに分けられる。推進動力は主機エンジンにより供給され、船内電力は発電機により供給され、図2に示すように、この2つは完全に分離されて使用されることが一般的である。船の用途やサイズにもよるが、主機単体は発電機単体比べて格段に大きく、効率も高いことが多い。

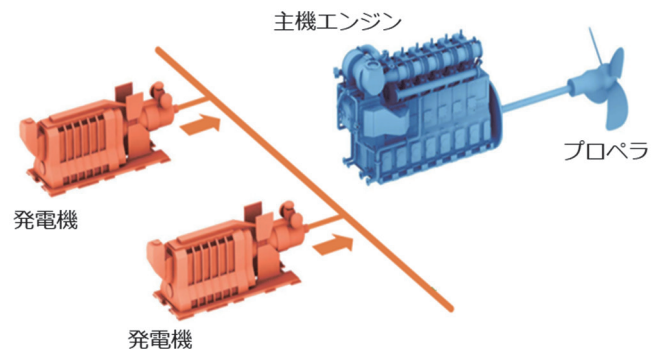


図2 一般的な船舶のエネルギー系統

船舶の運航において、主機及び発電機で消費される燃料代は、運航費用の大きな部分を占めるため、

* 川崎重工業株式会社

*1 国土交通省 内航船省エネルギー格付制度について https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk7_000021.html

その削減に関しては常に大きな関心を集めてきた。船舶の推進性能に関わる、推進抵抗を小さくする船体形状、主機やプロペラの性能・効率向上、あるいはこれらを促進するための付加物など、継続的に研究開発が行われてきている。しかし、船体は造船所、主機は主機メーカー、プロペラはプロペラメーカーと担当する企業が別であることもあり、これらの改善活動は、あくまでも“単体”について行われるのが一般的であった。

2.3 船舶におけるエネルギー使用

そのような中、1997年の京都議定書に基づく環境意識の高まり、2005年頃より始まった原油価格の高騰・高止まりなどを背景に、機器単体ではなく、船全体での燃費削減、省エネ化が図られるようになってきた。推進用の主機と船内電力用の発電機の両エネルギー源を電氣的に結合し、船全体での必要パワーを考慮した主機/発電機の運転を最適化しようとする試みである。推進力を主機、発電機の2つのエネルギー源で供給することから、ハイブリッド推進システムと呼ばれている（図3参照）。

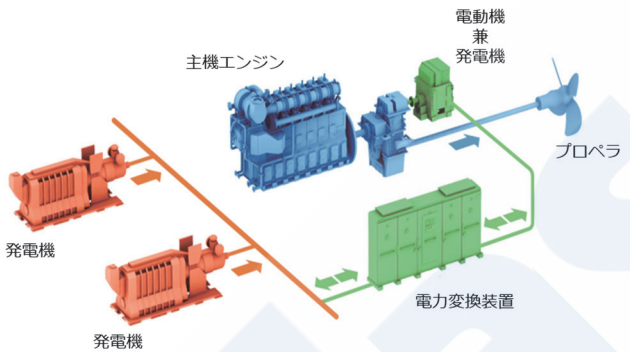


図3 ハイブリッド推進システム

2.4 バッテリーを取り入れた環境対応システムへの流れ

上述したハイブリッド推進システムに加え、一般産業用や自動車用として普及が進み、高エネルギー密度化が進んでいたリチウムイオンバッテリーが船用として登場した。これを組み合わせたものがバッテリーハイブリッド推進システムである

バッテリーからエネルギーを供給して運航している間、船舶からの排出ガスはゼロとなり、港湾内などの局所的なゼロエミッション航行が可能となる（図4参照）。

さらに、図4の構成から主機、主発電機を取り除いたものがバッテリー推進システム（図5）である。内燃機関を使用しないため、全ての運行においてゼロエミッションが実現可能となる、非常に環境にやさしいシステムである。

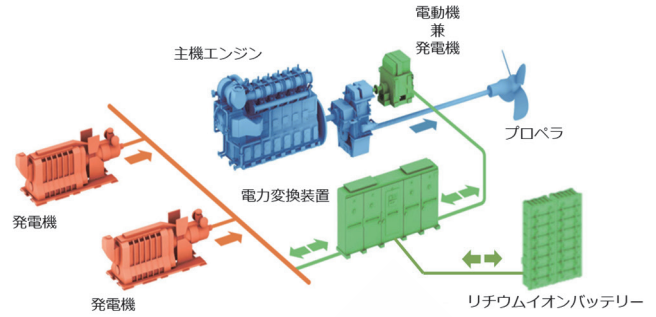


図4 バッテリーハイブリッド推進システム

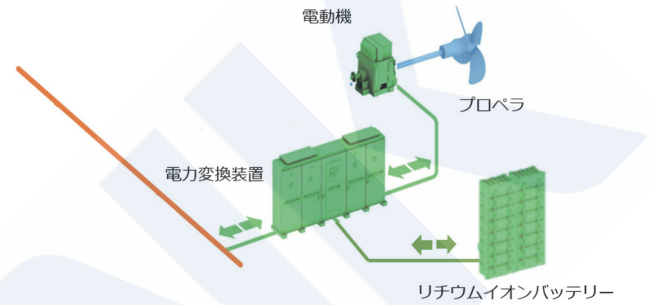


図5 バッテリー推進システム

2.5 川崎重工業の取り組み

川崎重工業では、主機用/発電機用エンジン、可変ピッチプロペラ、360°任意の方向に推力を発生できる旋回式スラスト・川崎レックスペラ®などの船用推進機器の設計・製造を行ってきた。それらの性能向上、改善により船舶の省エネ・省CO2排出に貢献してきたが、さらに、2014年よりハイブリッド推進システムの開発を行い、製品化している。主機、発電機、バッテリーなど複数のエネルギー源を最適に制御するパワーマネジメント技術と、現時点でゼロエミッション航行に欠かせないバッテリーマネジメント技術に重点を置いた開発を行い、必要な動力、電源品質を確保しつつ、経済効果と排気ガス低減を達成するシステムパッケージの提案を行っている。

環境対応推進システムは、上述のように複数のパターンがあり、船舶の大きさや運用によって適したシステムは異なる。本船の役割や運用、得たい効果など船全体を俯瞰することが重要であり、川崎重工業では船主と十分なコミュニケーションを取り、構想の早い段階で最適化を図っている。

3. ゼロエミッションバッテリー推進タンカー「あさひ」の概要と特徴

3.1 バッテリー推進システムの特徴

バッテリー推進システムのメリットとしては、二酸化炭素 (CO₂)、窒素化合物 (NO_x)、硫黄化合物

(SOx)、煤煙などの排出を大幅に削減できることが挙げられる。さらに、主機が無いことによる騒音・振動の低減により、乗組員の居住環境や、港湾周辺地域環境の改善が図れる点も、バッテリー推進システムのメリットである。

一方、バッテリー推進システムに用いられるバッテリーは、一般的な船舶用燃料として使用されている重油と比べてエネルギー密度が大幅に小さいため、航続距離に課題がある。システム構成的には簡単に見えるが、実運用上はチャレンジングな試みであり、バッテリーのみで船舶運航の全エネルギーを供給するシステム構成が採用されているのは、定期航路の短距離フェリーなど一部の限られた船種のみである。

3.2 「あさひ」の仕様検討

船用燃料供給船には、大きく①荷役作業（本船への燃料油積込み、他船への燃料油供給）、②荷役場所への航海（航行）、③出入港、離着岸、燃料供給対象船への離接舷、④停泊（運航中待機、係船地）の4つのオペレーションがあり、それぞれのオペレーションにおける主要使用機器は次の通りである。

表1 各オペレーションにおける主要使用機器

①荷役	カーゴポンプ（他船への燃料供給時）、制御機器等船内機器
②航行	推進動力（プロペラ）、船内機器
③出入港、離着岸、離接舷	推進動力（プロペラ）、サイドスラスト、甲板機
④停泊	（待機時）ポンプ等船内機器、（係船地）調理器等生活用機器

バッテリー推進システムにおいて一番大きなファクターであるバッテリー容量は、エネルギー使用のシミュレーションを実施し決定した。バッテリー容量に関わる要因として、各オペレーションの運転時間、オペレーションのエネルギー消費量がある。荷役作業場所は東京湾内に分布しており、かつ1日の荷役回数が異なるため、様々なオペレーションパターンでの考慮が必要である。そこで、船主より現行船の運航データや航行距離等を受領し、本船仕様カスタマイズしてシミュレーションのインプットデータとして利用した。また、推進性能やバッテリーへの知見もバッテリー容量を決定する上で重要な要素となる。推進性能はこれまで多数のプロペラを納めてきた船用部門の経験を、バッテリー技術は

技術開発部門のバッテリーチームの知見を生かしてシミュレーションを実施し、総合重工としての強みを生かして取り組んだ。これらの情報を基にエネルギー使用のシミュレーションを実施し、本船の運航に必要なバッテリー容量を決定した。また、算出されたバッテリー容量で実際の運航が可能であるかの確認作業も行っている。

バッテリーへの充電は陸上電力を使用する、プラグイン型システムを採用している。本船の運用では、1日の運航を終えて帰港した後、夜間の停泊中にバッテリーを充電し、翌朝また出港することとなる。川崎重工業は陸上設備会社と協力して、充電の要領や夜間停泊中に充電を完了するための給電容量について検討を行っている。

こうして決定したバッテリー容量を踏まえ、船主、造船所と協議を行って船内の配置検討を行った。バッテリー推進の配置のフレキシブル性を生かしてバッテリーは船首側に2層に分けて配置し、乗組員の居住エリアを大きく確保しながら、必要な供給用燃料の積載量を確保できる船内配置を実現した。

船用燃料供給船は出入港、離着岸、燃料供給対象船への離接舷を頻繁に行うため、高い操船性が要求される。そこで推進装置としてアジマススラストx2基、サイドスラストx2基の構成を提案した。推進装置の出力は必要な速力を確保しつつ、総トン数499トンの船体への配置を考慮して決定した。

上述の検討を基に、次の本船仕様とした。

表2 「あさひ」の仕様

寸法	全長62m／全幅10.3m／喫水4.15m
速力	約10ノット
タンク容量	1,277m ³
推進装置	アジマススラスト 300kW x 2基 サイドスラスト 68kW x 2基
バッテリー容量	3,480kWh

3.3 大容量バッテリー推進システム

川崎重工業が担当する大容量バッテリー推進システムは、大容量リチウムイオンバッテリー、配電盤、電力管理装置、電力変換器盤、主電動機、アジマススラスト（川崎レックスペラ®）、推進制御装置、サイドスラストなどから構成されている（図6参照）。

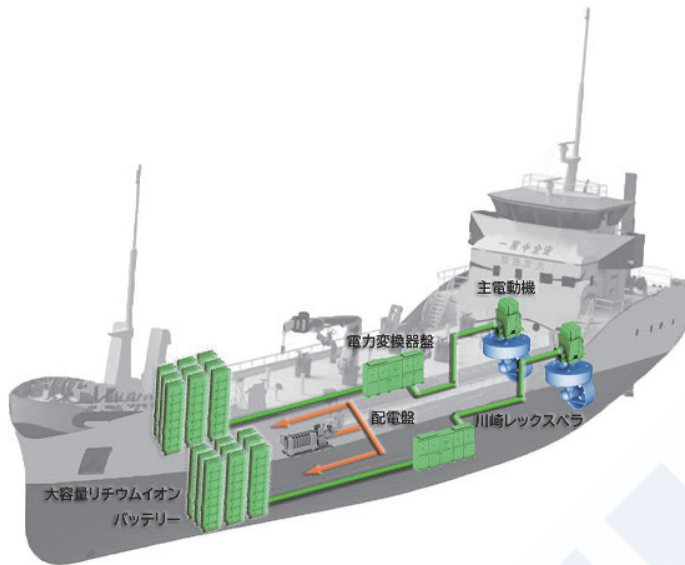


図6 大容量バッテリー推進システム

図6に示すように、リチウムイオンバッテリーは電力変換器盤に結合されている。バッテリーの電力は、電力変換器盤で主電動機、配電盤に配分され、それぞれ推進動力、船内電力として使用される。3.2節に示したように、本船には①荷役、②航行、③出入港等、④停泊の4つのオペレーションがあり、これら4つのオペレーションに対して次のモード設定を行った。

表3 運転モードの定義

荷役モード	カーゴポンプを使用し、燃料供給対象船へ燃料を供給するモード
航行モード	アジマススラストを使用し、航行を行うモード
出入港モード	アジマススラスト、サイドスラストを使用し出入港、離着岸、燃料供給対象船への離接舷を行うモード
停泊モード	アジマススラスト、サイドスラストを停止し、停泊するモード

これらをスムーズに使い分けることは本船運用効率面から非常に重要である。また、荷役作業中に推進機器が誤って作動することの無いよう安全面も考慮する必要がある。運用と安全の両面を考慮し、推進機器を使用する航行モード、出入港モードと、荷役モードの切り換えには一旦停泊モードを経由するモード切り換えを設定している。

4つのオペレーションモードでは使用する機器が異なり、航行モードでは推進動力が大きく、荷役モード、出入港モードでは船内電力が大きく必要と

なる。そのため、オペレーションモードに基づいて、必要な推進動力、船内電力をシームレスに切り替えることが重要である。これを意識した作動機器の切り換え、電力配分変更は操船者の負担となるため、本船用システムでは、オペレーションモードを自動判別し、自動でエネルギー配分を切り換える機能を搭載している。この機能は推進制御装置においてエネルギー／パワーフローを最適に管理することで実現している。なお、係船地での停泊モードでは、陸上電源設備から電力供給を受け、バッテリーに充電を行う。

またオペレーションモード切り換えや推進動力、船内電力の管理の他に、バッテリーの充放電管理も、推進制御装置が統合的制御を行っている。

3.4 システムの安全性

現在、バッテリー推進システムに関するNK船級規則は策定されておらず、バッテリー室やバッテリーそのものに関する設計は、NKが発行している大容量蓄電池ガイドラインに基づき実施した。安全性に関しては、本ガイドラインの第4章9項でリスク評価の実施が要求されており、HAZID (Hazard Identification) を用いてシステムの安全性の確認を行っている。HAZIDとは、対象となるシステムが人命や環境にどのような影響を与えるか、想定される事象(ハザード)を洗い出し、発生頻度や影響度と合わせてシステムの安全性を検討する評価手法の一つで、通常時及び火災などの異常時の運航状態におけるリスクを検証し、安全対策の検討を行っている。本船のHAZIDは、船主、基本設計会社、川崎重工業が参加してリスクアセスメントを実施したが、第三者の視点での安全性評価するため、NK及びリスクアセスメントのファシリテータも兼ねて株式会社

ClassNKコンサルティングサービスに参加していただいている。

HAZIDでは、本船に関するハザードをリチウムイオン蓄電池システム、電氣的、熱的などハザードの起因ごとに洗い出している。以下に代表的なハザードの例を示す。

- ①バッテリーの過充電
- ②バッテリーの熱暴走*2
- ③制御装置の異常

これらのハザードに対して、HAZID前の段階での設計の妥当性を評価し、追加安全対策の要否について協議を行った。その結果、HAZID時の設計、及び追加の安全対策を実施することで、全てのハザードのリスクが許容される範囲に抑えられていることを確認し、これら安全確認した設計を本船に実装している。

3.5 バッテリーの取扱い及び注意点

携帯電話など身近な電子機器でもバッテリーは使用と共に劣化してその性能が徐々に落ち、有寿命であることが知られている。また、最近は少なくなったが、過去にはモバイルバッテリーが爆発する事故例がテレビなどで報道されていた。船舶で大容量バッテリーを使用するにあたっての注意点として、以下が挙げられる。

①温度管理

バッテリーを使用するための周囲環境の温度管理を適切に行うことが重要である。適切な温度管理ができていないと、バッテリーの劣化が早まる可能性があり、バッテリーを主電力源とするバッテリー推進システムにとっては致命的となる。そこで、造船所、エアコンメーカー等と協議を行い、バッテリーからの発熱やバッテリー室への外部入熱を加味してエ

アコン選定を行っている。

②消防法の適用

リチウムイオンバッテリーには、第四類第二石油類に該当する可燃性の液体が電解液として含まれている。保管や造船所での艀装工事においても、消防法又は、各自治体の条例に従った適切な取り扱いに留意する必要がある。

③バッテリー室の消火装置

バッテリー室の消火装置はCO2消火装置を採用している。火災発生時に確実に消火を行えるよう、制御場所や消火剤の格納場所についても、HAZIDにて協議を行っている。

3.6 「あさひ」の特徴

本船では、複数の操船要素を統括して操縦することができる統括操縦装置 KICS (Kawasaki Integrated Control System) を採用している。操船性を向上させ、離着岸などにかかる時間を短縮することは、船舶運航に必要なエネルギーを減少させ、バッテリー推進システムにおいてはバッテリー容量の低減につながる。通常の操船で、操船者が船体を意図する方向に移動させるためには、複数の推進機を同時に操作する必要がある。KICSは、ジョイスティックとダイヤルを操作することで、ジョイスティックを倒した方向に船体を移動させ、ダイヤルを回した方向に船体を回頭（旋回）させる装置である（図7参照）。操船者のジョイスティック、ダイヤル操作に応じて複数の推進機が出すべき力の大きさ、向きを計算し、各推進機に指令を出すことができる。これにより離着岸など難しく気を遣う作業においても、直感的な操作のみで操船を行うことが可能となる。

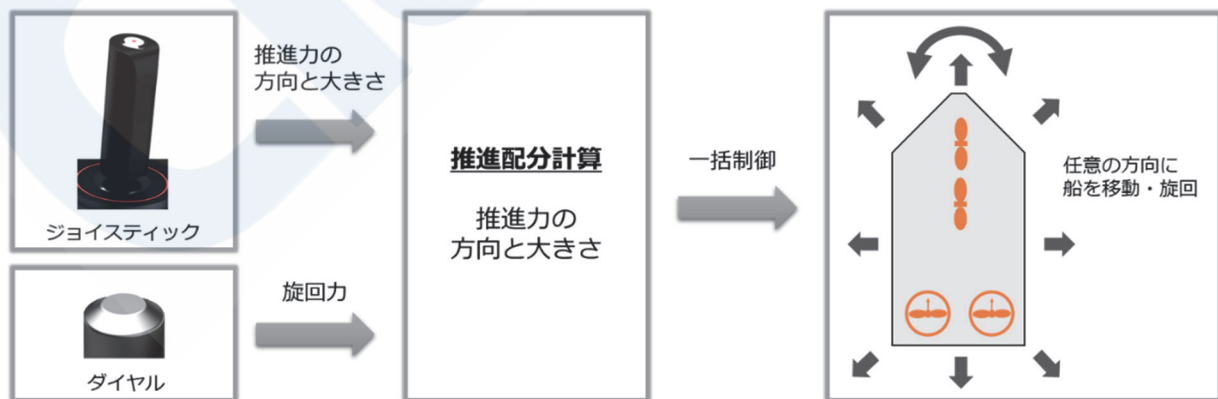


図7 KICSの概要

*2 何らかの要因でバッテリー内部の特定部材が発熱、その発熱がさらに他の部材の発熱を引き起こし、バッテリー温度の上昇が続くことである。主な要因としては、内部短絡や外部短絡、過充電、外部からの加熱などがある。

もう一つの特筆すべき特徴に、船主、株式会社e5ラボのアイデアによる、大規模自然災害時の緊急電源としての利用がある。船内のバッテリーに蓄えた電気を非常用電源として陸上で活用することで、地域社会のBCP（事業継続計画）やLCP（生活継続計画）への貢献が可能である。また船舶ということで、渋滞や道路の遮断等により陸上の交通網が機能しない状況であっても、海上から電力を必要とする地点へアクセスができるため、緊急事態対応の可能性を広げることになる。

4. 今後の展望

4.1 船舶に応じた最適システム構成

バッテリーは技術革新によって高エネルギー密度化が進んできたとはいえ、船舶用燃料として使用されている重油と比べるとエネルギー密度が大幅に小さい。このため、船のスペースとの兼ね合いからバッテリーのみでの航続距離には限界がある。比較的航続距離が長い船や大きな船は出入港のみバッテリー推進とするなど、内燃機関とのハイブリッド推進が現実的となる。船内スペースや航続距離に加え、充電ポイント（充電間隔）、充電に取れる時間なども考慮すべき要素となるほか、船の配置面、運用面だけでなく、陸側充電設備を含めた全体でのソリューションを検討する必要もある。

また、荷役や洋上作業など、船種によってオペレーションは様々であり、それぞれ最適な主機や発電機の大きさ、バッテリー容量、システム構成は異なる。川崎重工業はそれぞれの船のオペレーションや船主のご要望に応じて、あらゆるサイズ、船種の船舶に対して最適なシステム構成を提案する。

さらに、バッテリーハイブリッド／バッテリー推進システムは近年低環境負荷燃料として採用が進むLNGエンジンや、将来の脱炭素燃料として期待される水素、アンモニアといった将来燃料を使用したエンジン、燃料電池などの動力源との親和性も高い。本システムとの組み合わせによって将来も含めたGHG削減オプションとしても提供可能である。

4.2 ガス専焼エンジン+バッテリーハイブリッド推進システム

川崎重工業は船用ガス専焼エンジン（図8参照）と大容量リチウムイオンバッテリーを組み合わせたハイブリッド推進システムを開発・初受注した。ハイブリッド推進システムの基本構成はガス専焼エンジンと大容量リチウムイオンバッテリーであるが、川崎重工業はシステムインテグレータとしてガス燃料供給システム、可変ピッチプロペラやサイドスラ

スタ等の推進機、電力変換装置、推進用制御装置等といった機器を併せて所掌する。航海状況に応じこれらの機器を適切に制御し、必要な推進力を維持しつつCO2削減に最適な運転を実現する。

航行時には減速機を介したガス専焼エンジンによる推進を行うと同時に、軸発電機にて発電した電力を船内電力の供給とバッテリーへの充電に用いる。ガス専焼エンジンは熱効率を高く維持できる高負荷領域で継続運転することができ、従来船の様に船内電力供給のために発電機を別途運転する必要もない。また、悪海象時には推進力と発電量のバランスを適切に制御することで、ガス専焼エンジンは高負荷での運転を継続できる。入出港時や停泊時はガス専焼エンジンを停止し、航行時に充電したバッテリーにて電気推進と船内電力の供給を行う。これによってゼロエミッション運転を実現する。



図8 船用ガス専焼エンジン

4.3 船用リチウムイオンキャパシタ

バッテリーハイブリッド／バッテリー推進システムにおいて、バッテリーなどの電力貯蔵システムの役割は、推進動力、船内電力にかかるエネルギーを供給又は貯蔵することであるが、その他の役割として、主機及び主発電機の負荷変動を吸収することも可能である。すなわち、急加速など、推進力急増時の主機負荷変動アシストや、荒天時などの推進出力変動補償を行うことで、燃費改善を行う。

上述したLNGや、水素、アンモニアといった将来燃料を用いたエンジンは、一般的に重油燃焼のディーゼルエンジンに比べて安定燃焼領域が狭く、負荷変動による失火、ノッキングが起きやすいと言われている。このため、バッテリーなどの電力貯蔵システムと組み合わせることでエンジンの負荷を安定させる

表4 LiBとLiCの比較

項目	LiB	LiC	備考
使用環境温度	15～25℃	5～45℃	
サイクル寿命	1万回以下	50万回以上	試験条件は異なる
浮遊寿命	約10年	20年以上	25℃において
充放電レート	約3C	100C	1C：1時間で全電力を放電

ことで、これらの新燃料エンジンへの適用範囲，運転可能領域の拡大に寄与できる。

川崎重工業はこのような電力貯蔵システムの負荷変動吸収用途にいち早く着目し，船用リチウムイオンキャパシタ（LiC）（図9参照）を用いた電力貯蔵システムの開発を進めてきた。

LiCは出力密度が高く（瞬時に大電力を充放電できる），繰り返し充放電に対する寿命が非常に長い蓄電デバイスである。同じ蓄電デバイスであるリチウムイオンバッテリー（LiB）の代表的な仕様との比較を表4に示す。LiBは高いエネルギー密度を有し，長時間のエネルギー供給に適しているが，充放電の繰り返しによる劣化が大きく，出力密度が低い。一方，LiCはエネルギー密度が低く，長時間のエネルギー供給には向いていないが，出力密度が高く，繰り返し充放電に対する寿命が非常に長いといったメリットがある。このため，LiC単独で船舶の推進，給電用途には使えないが，負荷変動吸収用途に限定することで大幅な小型化，低コスト化，長寿命化が期待できる。



図9 船用リチウムイオンキャパシタ

5. まとめ

IMOによる各種排ガス規制強化が進む中，海運業界では一般的に利用されてきた重油に代わるク

リーンな動力源の利用に大きな期待と注目が集まっており，運航時における二酸化炭素（CO₂），窒素酸化物（NO_x），硫黄酸化物（SO_x），粒子状物質（PM）の排出量を大幅に削減できるバッテリー推進システムはその一つである。また船ごとに異なる最適なシステム構成を提供し，本稿に示したシステムが広く普及することが，地球環境改善へ貢献することとなり，川崎重工業もその一端を担っていきたいと考えている。

川崎重工業は今後も，お客様の要望に沿った環境性，経済性に優れ，オペレーションに最適化されたシステムの供給に注力していく。

参考文献

- 1) 旭タンカー株式会社，次世代内航電気推進タンカー船「あさひ」竣工について
<https://www.asahi-tanker.com/news-release/2022/647/>（参照日 2022年8月1日）
- 2) 前川真吾，船舶からの排ガス削減に向けて一船用推進システムの電動化・ハイブリッド化 日本マリンエンジニアリング学会誌 第57巻 第2号（2022）P20-24