

1 低・脱炭素燃料に対応する船用動力システムに関する研究

環境・動力系 * 平田 宏一

1. はじめに

国際海事機関(IMO, International Maritime Organization)における硫黄酸化物(SOx)規制への対応及び温室効果ガス(GHG)削減対策として、船用動力システムで使用する燃料を従来の重油からLNG(液化天然ガス)や水素、バイオ燃料等の低・脱炭素燃料に転換することが注目されている。また、2014年4月策定のエネルギー基本計画では「多様なエネルギー源を選択できる環境整備の促進」として、従来の石油製品ばかりでなく、バイオ燃料、天然ガス、LPG(液化石油ガス)、さらに水素をエネルギー源として利用することが求められている。そして、2018年4月には、IMOによりGHG削減戦略が採択され、大幅なGHG排出削減や今世紀中のできる限り早い時期に国際海運からのGHG排出をゼロにするなどの高い目標が定められた。

このような背景のもと、海上技術安全研究所(以下、当所という)では、船舶分野における多様なエネルギー源を選択できる環境整備の促進並びに船舶分野における多様なエネルギーの利用技術の確立を目指し、低・脱炭素燃料に対応する船用動力システムに関する研究を進めている。

2. IMO GHG削減戦略と海技研の長期ビジョン

IMOにより採択されたGHG削減戦略では、2030年までに国際海運全体の燃費効率を40%改善(2008年比)、そして2050年までには燃費効率を70%改善するとともに海運全体のGHG排出量を50%削減、さらに今世紀中のできる限り早い時期に国際海運からのGHG排出をゼロとするといった高い目標を掲げている。

当所では、GHG削減戦略を実現するための長期ビジョンを策定し、本報で主対象としている船用動力システムの分野だけでなく、流体分野や構造分野とも連携して、様々な課題解決の取り組みを計画している。図1は、IMO GHG削減戦略とそれに対する当所の長期ビジョンをまとめたものである。2030年の目標を達成するための対策としては、LNGの利用促進、バイオ燃料や水素の混焼、自然エネルギー有効利用などが考えられる。2050年の目標を達成するための対策としては水素やアンモニアなどのカーボンフリー燃料の本格導入、さらにGHG排出をゼロとするためには燃料電池船、オール電化船、ゼロ炭素燃料焚き船、自然エネルギー推進船など、次世代船舶の開発が必要となり得る。いずれの技術開発においても、実用化・普及に至るまでには、多くのブレークスルー技術が必要になると考えられる。

3. 低・脱炭素燃料利用技術に関する研究

船用動力システムに使われる可能性がある低・脱炭素燃料

及びエネルギー源としては、バイオディーゼルやバイオエタノールなどのバイオ燃料、水素、アンモニア、LNG、蓄電池、自然エネルギーなどがある。中でも、水素は将来の二次エネルギーの中心的役割を担うものとして有望視され、国内外で水素を燃料としたエンジンや燃料電池の開発が活発に進められている。また、体積あたりの水素貯蔵量が大きいアンモニアは、水素エネルギーキャリアとしての適用ばかりでなく、直接燃焼させる燃料としての使用も期待されている。以下、当所が進めている低・脱炭素燃料利用技術に関する研究の一部を紹介する。

3.1 水素混焼ガスエンジン

水素は最高燃焼速度が高いため、水素を燃料とするエンジンでは、最高燃焼圧力の上昇やNOx(窒素酸化物)排出率の増大、ノッキングの発生が懸念される。また、水素は最小点火エネルギーが小さく、着火温度が低いため、過早着火の発生が懸念される。それらの状況を確認するため、当所では、都市ガス13Aを主燃料とした定格出力400kWのガスエンジンの給気に水素を混合した際のCO₂排出削減効果並びに燃焼特性を調べる試験を進めている¹⁾。図2にガスエンジンの外観、図3に試験結果の一例を示す。図3に示すように、ガスエンジンを都市ガスにより運転することでディーゼルエンジンの基準性能(同出力のディーゼルエンジンのCO₂排出量)に対するCO₂排出量を約20%削減、水素混焼ガスエンジンの運転で最大50~60%の削減を実証している。また、これらの実機試験により、筒内最高燃焼圧力が水素混焼によって大きく増加することなど、水素混焼運転時の注意点や課題が明らかにされつつある。また、水素混焼ガスエンジンの安全対策の確立も水素を燃料としたエンジンを実用化・普及するための技術課題の一つであると考えている。

3.2 水素燃料電池

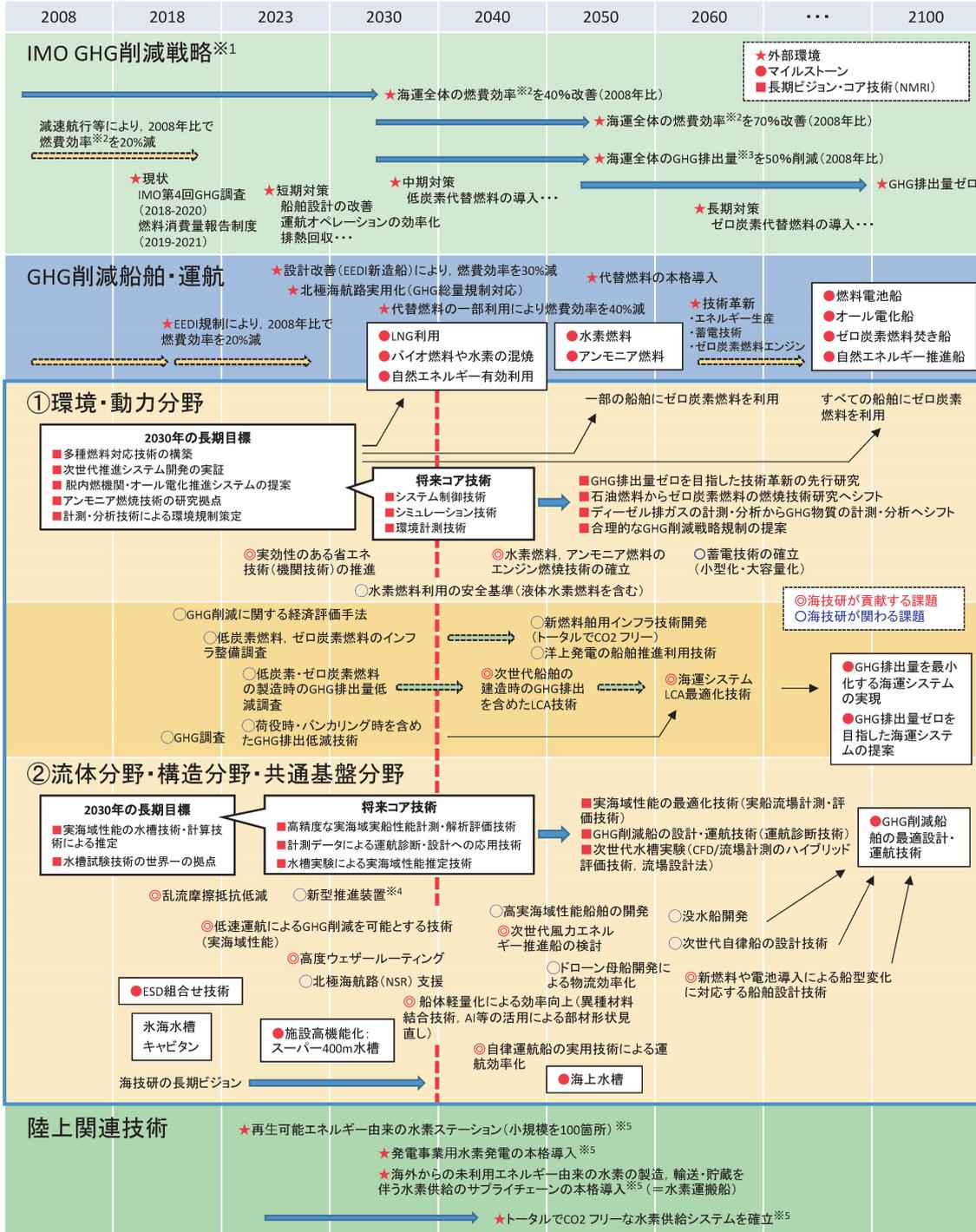
水素燃料電池にはいくつかの種類があるが、現在、陸用コジェネシステムや自動車で使用されているのは、常温付近で使用でき、起動時間が短い固体高分子形(PEFC)と呼ばれる形式である。燃料電池は、発電運転時にCO₂やNOxが排出されないこと、燃焼や爆発といった現象がなく騒音が小さいこと、化学エネルギーを直接電力に変換するため効率が高いことなどの利点がある。一方、エンジンと比べて、スケールメリットが得られにくくコストが高いこと、さらに長寿命化や安全対策の確立などに課題がある。

当所では、国土交通省からの請負研究として、平成27年度より『水素燃料電池船の安全ガイドライン』を策定するための燃料電池に関する調査研究を進めてきた。本研究においては、燃料電池が船舶特有の環境に耐えられることを調べるための基礎試験や水素漏洩時の安全対策を検討するための

陸上試験を実施した²⁾。さらに、小型実験船に燃料電池システムを搭載し、水素燃料電池船の安全性を検証するための実船試験を実施した³⁾。

図4は、燃料電池の実船試験に用いた小型実験船である。実船試験においては、システムの安全対策や冗長性を調べる試験などを実施し、燃料電池システムを含む電気推進システム

に重大な支障はなく、安定した航行ができることを確認した。これらの実船試験の結果などを踏まえて、水素燃料電池船の安全要件について検討した結果、平成30年3月には国土交通省により『水素燃料電池船の安全ガイドライン』が策定された。



※1 IMO第72回海洋環境保護委員会(2018/4)において、国際海運のGHG削減目標やその実現のための対策等を包括的に定める「GHG削減戦略」が採択された。
 ※2 EEDI(トンマイルあたりのCO₂排出量)と想定される。
 ※3 減速航行および物流量増加により隻数が増えることが想定される。
 ※4 水中騒音を規制化する動きがある。
 ※5 水素・燃料電池戦略ロードマップ:平成26年策定、平成28年改訂、水素・燃料電池戦略協議会

図1 IMO GHG 削減戦略と海技研の長期ビジョン



図2 400 kW ガスエンジンの外観

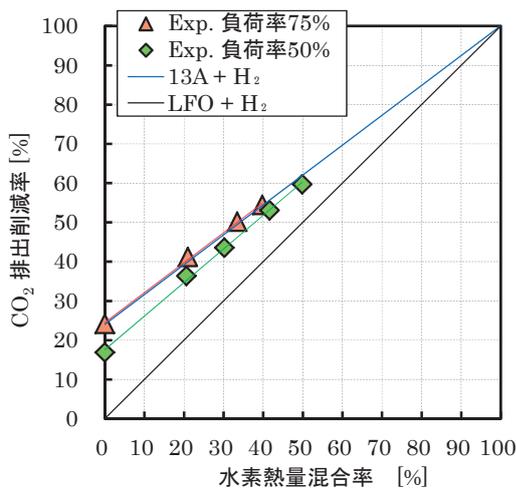


図3 水素混焼ガスエンジンの試験結果

3.3 アンモニア混焼エンジン

当所では、7.7kW 単気筒ディーゼルエンジン（無過給）の吸気にアンモニアガス（NH₃）を混合した実機試験を行っている。現在までに、発熱量比 20%までのアンモニアを吸気に導入した試験を行っており、電子制御によるパイロット燃料噴射を用いることで燃焼効率が向上すること、適切な負荷条件を与えることによって温暖化係数の高い亜酸化窒素（N₂O）の排出を削減できることなどを確認している⁴⁾。さらに、未燃アンモニアの対応技術として、脱硝触媒（SCR）を用いることによって、排ガス中の NO_x を削減しながら、未燃アンモニアを大幅に削減できることなども確認している。

4. GHG 削減技術導入の課題

以上に紹介したような研究で得られた知見や陸上分野を含めた技術開発の状況を調査した結果を踏まえて、船用動力システムに GHG 削減技術を導入する際の技術課題を抽出した。表 1 にそれぞれの GHG 削減技術を導入する際の技術課題をまとめている。船舶に低・脱炭素燃料利用技術や蓄電技術を導入する際には、各種エネルギー機器の技術的課題の他、機器及び燃料のコスト、燃料供給のインフラ設備、燃料のエネルギー密度減少に伴う船内機器配置などの課題があ

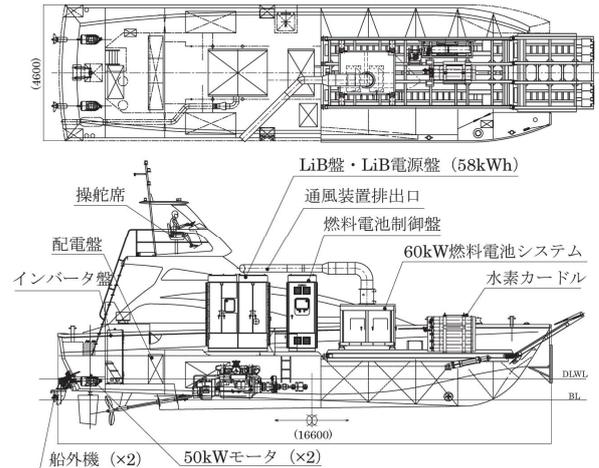


図4 燃料電池システムを搭載した小型実験船「神峰」

る。

表 2 は各種燃料の物性値及び燃料タンク容積をまとめたものである。同表において、燃料タンク容積（重油タンク比）は、熱効率が同一の動力源を使用するとして試算している。これより、LNG、液体水素、アンモニアなどの代替燃料を使用する場合のタンク寸法は、従来の重油タンクと比べて、2~4.5 倍程度の大きさになることがわかる。

図 5 は水素及びアンモニアを燃料とするバルクキャリアの検討例である。比較のため、同図(a)及び(c)に従来の重油を燃料とする船舶も併記している。この検討例においては、従来の重油焚き船舶と同等の航続距離（約 60 日）となるように代替燃料のタンク寸法を推定している。ただし、液体水素タンクの断熱構造や代替燃料を使用する際の関連設備の配置については十分な検討がなされていない。これらの検討結果より、球形の水素タンクを用いる場合、貨物スペースは従来の 70~80%程度になると想定される。

GHG 排出ゼロを目指す場合、蓄電池をエネルギー源として推進する船舶が有効である。現状の蓄電池は他の燃料と比べてエネルギー密度が低く、大型船舶の推進エネルギー源に用いることは極めて困難であるが、将来、蓄電池の高エネルギー密度化が図られた場合、船舶の推進動力への適用可能性が高まる。図 6 は、高エネルギー密度化が図られた次世代蓄電池をケーブルサイズバルクキャリアに搭載したイメージ図である。同図において、次世代蓄電池のエネルギー密度を現状の 2 倍程度の 1 kWh/L としており、航海速力 15 kt において航続距離は 4,000 mile（約 11 日、現状の 1/5 程度）と推定される。このような大型船舶の電池推進を実現するためには、次世代蓄電池の開発の他、海上充電設備の開発などに課題があると考えられ、技術的ハードルは高い。

5. まとめ

本報では、当所で進めている船用動力システムの GHG 削減技術の一部を紹介した。また、陸上分野を含めた技術開発の状況を調査した結果も踏まえて、GHG 削減技術を導入す

る際の技術課題を取りまとめた。現状では将来の船舶分野に 船の普及やバイオ燃料の利用、その次の段階としては水素や
 おける GHG 削減技術を明確に予測することは困難である アンモニアなどのカーボンフリー燃料を利用できる船舶用
 が、初期段階としては、既存技術で対応できる天然ガス燃料 大型エンジンや船舶での使用に耐える大出力燃料電池の技

表1 GHG 削減技術を導入する際の技術課題
 (a) 各種燃料・エネルギー貯蔵技術

燃料及び貯蔵の種類	技術課題
バイオディーゼル	<ul style="list-style-type: none"> ● 長期保管における酸化防止対策 ● 燃料ホースや配管部品等の劣化対策
バイオエタノール	<ul style="list-style-type: none"> ● 低引火点燃料としての安全対策
バイオガス	<ul style="list-style-type: none"> ● 燃料中に含まれる二酸化炭素の液化や昇華への対策 ● バイオガスから二酸化炭素を分離・除去とメタンの高濃度化（発熱量の増加）
液体水素	<ul style="list-style-type: none"> ● 外部からの入熱が少ない高度な断熱技術やタンク内のスロッシング対策 ● 液化に要するエネルギーの低減技術 ● 液体水素用大容量移送ポンプの開発
圧縮水素	<ul style="list-style-type: none"> ● 圧縮水素タンクの大型化 ● 適切な安全対策
水素吸蔵合金	<ul style="list-style-type: none"> ● 軽量化・高エネルギー密度化・低コスト化のための新技術の開発 ● 水素充填・放出過程における熱管理
有機ハイドライド	<ul style="list-style-type: none"> ● 水素貯蔵・脱水素反応の高効率化
アンモニア	<ul style="list-style-type: none"> ● 供給・製造技術 ● 銅合金の応力腐食割れや毒性・漏洩などの適切な対策
液化天然ガス	<ul style="list-style-type: none"> ● 断熱性能の向上と BOG の最小化 ● タンク内濃縮現象への対策やタンク内のスロッシング対策 ● タンク内燃料性状の均一化（ロールオーバー対策）
圧縮天然ガス	<ul style="list-style-type: none"> ● 圧縮天然ガスタンクの大型化 ● 適切な安全対策
蓄電池	<ul style="list-style-type: none"> ● 高エネルギー密度化（次世代蓄電池の開発） ● 海上充電設備の開発

(b) 各種エネルギー機器

燃料の種類	燃焼・発電技術	技術課題
バイオディーゼル	ディーゼルエンジン	<ul style="list-style-type: none"> ● 大幅に改造することなく使用可能 ● NOx 排出量の増加への対応 ● 低負荷運転時の燃料噴射制御
水素	水素専焼エンジン	<ul style="list-style-type: none"> ● 大出力化技術 ● 適切な安全対策
	水素混焼ガスエンジン	<ul style="list-style-type: none"> ● 最高燃焼圧力の増大への対応 ● ノッキング等の異常燃焼の抑制技術 ● 安全対策の確立
	水素タービン	<ul style="list-style-type: none"> ● 水素特有の燃焼特性に適合する安定燃焼技術 ● 低 NOx 化を実現する燃焼器の開発
	燃料電池（PEFC）	<ul style="list-style-type: none"> ● 低コスト化と長寿命化の両立 ● 安全対策の確立
アンモニア	アンモニア燃焼レシプロエンジン	<ul style="list-style-type: none"> ● 燃焼性が低いアンモニアの燃焼効率の向上 ● アンモニア由来 NOx の抑制 ● 温暖化係数の高い N₂O の削減
	アンモニア燃料電池（SOFC）	<ul style="list-style-type: none"> ● 高温の動作温度に至るまでの熱供給と起動停止時間短縮 ● 熱による劣化を防ぐ耐熱材料の開発
天然ガス	ガスエンジン （ガスインジェクション方式）	<ul style="list-style-type: none"> ● 局所燃焼温度の制御 ● NOx 低減技術
	ガスエンジン （リーンバーン方式）	<ul style="list-style-type: none"> ● 異常燃焼（ノッキング、失火、過早着火）の発生抑制技術 ● 未燃燃料（メタンスリップ）の低減技術
	天然ガス改質燃料電池	<ul style="list-style-type: none"> ● 改質器内の燃焼ガス加熱などの安全性確保 ● 水素生成速度の制限による発電負荷追従性 ● 負荷停止・減少時の余剰水素の処理

表2 各種燃料の物性値及び燃料タンク容積

	重油	天然ガス（液体）	水素（液体）	アンモニア（液体）
発熱量	42.7 MJ/kg	49.2 MJ/kg	121 MJ/kg	22.5 MJ/kg
密度	900 kg/m ³	460 kg/m ³	70.8 kg/m ³	695 kg/m ³
CO ₂ 排出係数	3.0 t/kL	2.7 t/t _{fuel}	0	0
体積あたりの発熱量 （重油比）	38.4 GJ/m ³ （100%）	22.6 GJ/m ³ （59%）	8.6 GJ/m ³ （22%）	15.6 GJ/m ³ （41%）
燃料タンク内容積 （重油タンク比）	1.0	1.7	4.5	2.5

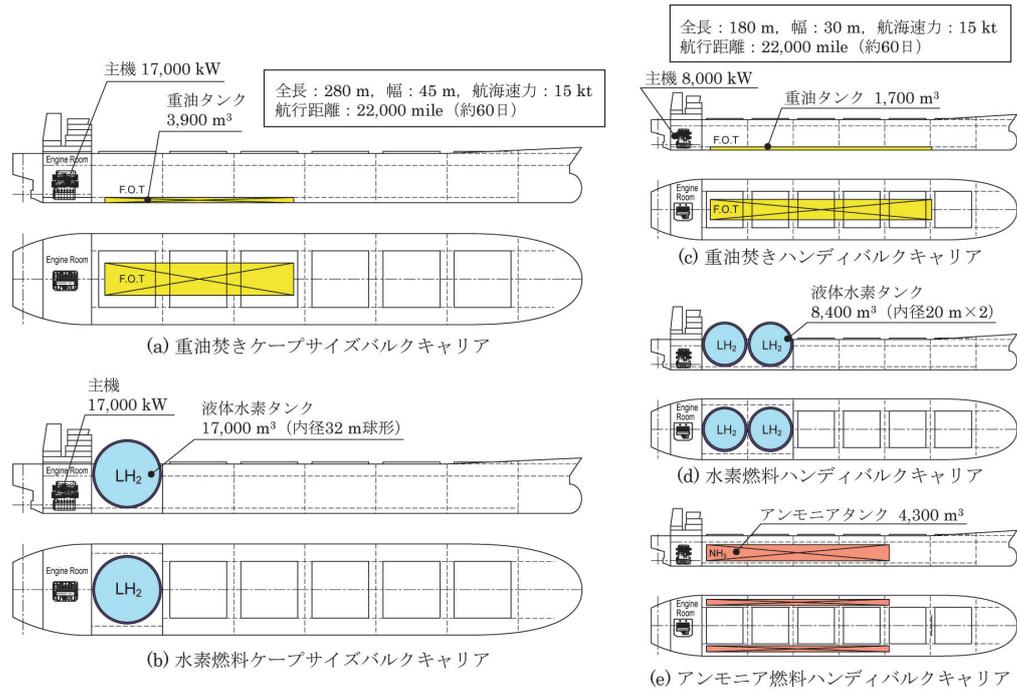


図5 水素及びアンモニアを燃料とするバルクキャリアの検討例

術開発が必要になると考えている。これらのカーボンフリー燃料を使用する際には、燃料の製造技術や供給技術についても並行して技術開発をしていく必要がある。また、陸上分野で活発な研究開発が進められているメタネーション技術（水素とCO₂からメタンを合成する技術）を利用できれば、船上で発生するCO₂を回収し、それを再利用することでカーボンフリーのシステムが完成する可能性がある。これらの技術を含めて、船舶分野における将来のGHG削減のシナリオを議論することが重要であると考えられる。

参考文献

1) 市川泰久, 関口秀紀, 平田宏一: 船用リーンバーンガス機関の水素混焼技術に関する研究, 第88回マリンエンジニアリング学会学術講演会講演論文集, p.131-132, 2018.
 2) 平田宏一: 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, 平成30年度(第18回)海上技術安全研究所研究発表会講演集, p.184-193, 2018.
 3) 平田宏一, 清河勝美, 灰底照繕, 平岩琢也, 行實文明: 水素燃料電池船の開発への取り組み, 日本マリンエンジニアリ

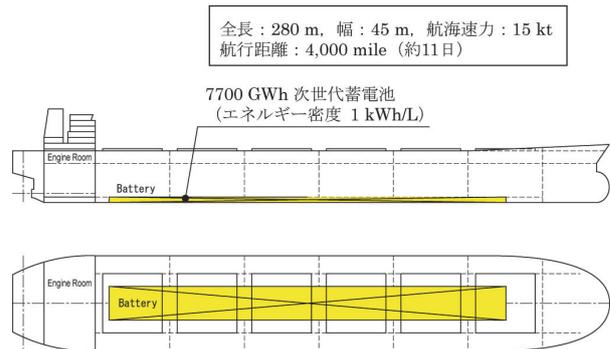


図6 高エネルギー密度の次世代蓄電池を搭載したケーブルサイズバルクキャリアの検討例

ング学会誌, 第54巻, 第2号, p.34-37, 2019.
 4) 仁木洋一, 新田好古, 春海一佳, 平田宏一, 西尾澄人, 関口秀紀, 市川泰久: アンモニア混焼エンジン, 平成30年度(第18回)海上技術安全研究所研究発表会講演集, p. 236-237, 2018.