TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

電動船舶の最新技術動向：東京海洋大学における水素燃料電池船の研究開発(大変革)

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2022-03-30
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 大出, 剛
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2357

電動船舶の最新技術動向

~東京海洋大学における水素燃料電池船の研究開発~

国立大学法人東京海洋大学
大出　剛
海洋工学部　特任教授
低環境負荷次世代水上交通システム研究開発プロジェクト

船舶に起因する環境問題は，NOx 及び SOx・PM 排出などによる大気環境汚染，CO_2 排出などによる地球温暖化，油の流出や有害化学物質の流出による海洋汚染，船舶の解撤リサイクル時の廃棄物による汚染，船内騒音など船舶からの騒音，生物の越境移動による海洋生態系への影響などがある。大気環境に係る排ガス規制や地球温暖化に係る温暖化ガス規制などは，国際条約に基づき順次決められており，規制対応技術の開発や燃料転換がおこなわれている。また、国際海運から出される CO_2 は全世界の排出量の 2.2%となる約 8 億トンでドイツ 1 国分の排出量に匹敵し，2018 年の国際海事機関（IMO）海洋環境保護委員会において船舶からの温暖化ガスの排出量を 2050 年に 2008 年比で半減する戦略が採択されるなど前倒しで進められている。現在では液化天然ガス（LNG），液化石油ガス（LPG）を燃料とする船の開発が進んでいるが，今後は化石燃料を使わない推進方法の開発に進まねばならない。ゼロエミッションの発電システムである水素燃料電池は、温暖化ガス規制、排ガス規制に対する新たな方式として期待されている。国内における燃料電池船は 2014 年 4 月閣議決定されたエネルギー基本計画に基づいて策定された「水素・燃料電池戦略ロードマップ」に明記されている。さらに 2017 年水素基本戦略再生可能エネルギー・水素など関係閣僚会議においてモビリティでの利用のなかで燃料電池船（FC 船）の開発・導入が記載されている。国交省海事局は一般財団法人日本船舶技術研究協会に委託し、2015 年度から「水素燃料電池船の安全ガイドライン策定に向けた検討委員会」を開催し 4 年後の 2018 年第 6 回検討委員会において「燃料電池船の安全ガイドライン」案が提示されたが、実際にこの安全ガイドラインで燃料電池船が建造できるか実証し修正を要するため案のままになっている。東京海洋大学では、「スマートエネルギー都市に用いる水素燃料電池船開発」をテーマとした共同研究において、燃料電池を搭載した本学の実験船「らいちょう N」(図 1)を用い安全ガイドラインに沿ったさまざまな検証を実施してきた。本稿では燃料電池船の概要と実用化への取り組みを紹介する。

図 1　らいちょう N と燃料電池モジュール

電池推進船の技術動向

東京海洋大学では 2009 年より、船舶に搭載した電池に蓄えられた電力のみによって航行し、電気自動車に対する急速充電方式である CHAdeMO プロトコルに対応した電池推進船の開発をおこなってきた。電池推進船とは、船舶に搭載した電池に蓄えられた電力によって電動機を駆動し、電動機の発生した動力によって推進機が駆動し航行する船舶である。大型客船や砕氷船等を代表に電気推進船も多数導入されているが、一般の電気推進船は船内に搭載したディーゼル発電機が発生する電力によって電動機を駆動する方式となっている。そこで、一般の電気推進船と区別するために、電池に蓄えられた電気エネルギーによって航行する船舶に対して電池推進船とい

う名称を使用している。電池推進船の利点は，①航行時に排出ガスを排出しない。②電動機推進により騒音や振動が格段に小さい。③トルク制御、回転速度制御などが応答性よく高精度で実現できる。④暖機運転やアイドリング運転が不要で無駄時間、無駄に消費するエネルギーがない。⑤潤滑油交換や主機開放などなくメンテナンスフリーである。一方欠点は、エネルギーストレージに用いるリチウムイオン 2 次電池が、ガソリンや軽油と比較して体積エネルギー密度で 20 分の 1、重量エネルギー密度で 80 分の 1 程度しかなく多くのエネルギーを搭載することが難しいことにある。上記の④⑤は現在の自動車ではおこなうことはないが他は電気自動車と同様である。自動車と船舶で大きく異なる点の一つとして、陸上と海上での移動体に対する抵抗の違いがある。自動車の抵抗成分は車体の空気抵抗とタイヤの摩擦抵抗だが、水の密度は空気の密度の約 780 倍あり、船舶の主な抵抗成分は、水流と船体表面による粘性摩擦抵抗、船体後部で発生する渦による粘性圧力抵抗と波の発生による造波抵抗になる。自動車は加速時に大きなパワーを要するが等速運転になると数キロワット程度のパワーですむ。さらに減速時や坂道の下りなどは回生エネルギーを得ることができるが船舶は水の抵抗を常に受けているので航行するためには多くのエネルギーを必要とする。しかも回生エネルギーもほとんどない。しかしながら輸送重量単位当りの運航エネルギー消費量においては、船舶（内航船）は鉄道程度であり自動車に比べ 1/5 以下でもある。国内においてリチウムイオン 2 次電池のみをエネルギーストレージとして航行している電気推進船は、実験船 3 隻、来賓送迎船 1 隻、不定期船 2 隻、商業運転で毎日運航しているのは沖縄県石垣島の海中観賞用グラスボート 1 隻のみである。現在建造中で年内に進水する予定があるのは福井県美浜町の観光船と富山高専の実験船であるが建造計画は数隻あり確実に増えつつある。リチウムイオン 2 次電池で構成される電池システム（図 2 ）の搭載容量は国内ではまだ 600kWh 程度であるが、海外では 1,800kWh の容量を搭載する客船もある。東芝製リチウムイオン 2 次電池で構成された電池システムは国際船級協会である日本海事協会(ClassNK)の鑑定書を得ており船舶で採用しやすくなっているといえる。

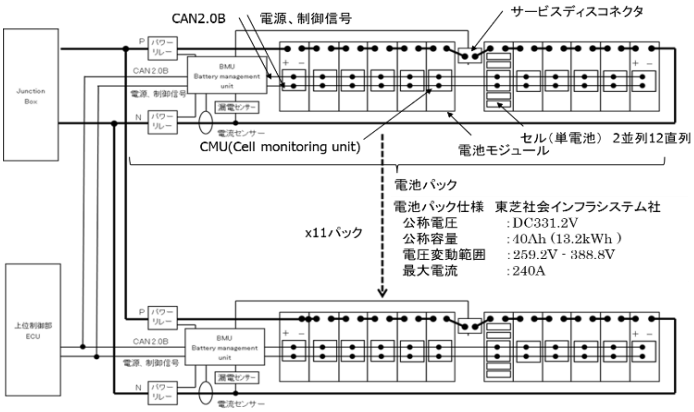

図 2 電池システム構成図

水素燃料電池船の概要と技術動向

現在，国内で燃料電池船として航行しているのは，図 1 に示す東京海洋大学の「らいちょう N」1 隻のみである。「らいちょう N」は 2014 年に急速充電対応型電池推進船の次世代水上交通システム用実験船として建造した。これまでに建造した「らいちょう I」，「らいちょう S」での研究成果を元に，環境負荷低減を図りつつ無人・省人化した定期運航する水上バスをイメージした低環境負荷次世代水上交通システムの研究開発基盤とした実用レベルのレンジエクステンダータイプ急速充電対応ハイブリッド電池推進船であり、現在水素燃料電池船として実験をおこなっている。図 3 に主要項を示す。

全長	14 m
全幅	3.5 m
全深さ	2.0 m
総トン数（排水量トン）	9.1ton (12 ton)
電動機連続定格(最大)出力	45 kW (80 kW)×2
電動機連続定格(最大)トルク	88Nm(130Nm)×2
インバータ動作保証電圧	DC230V-DC430V
リチウムイオン 2 次電池容量	145kWh
燃料電池定格出力	30kW
搭載水素量	21Nm^3

図 3 らいちょうN主要目（2020 年 4 月現在）

大きくは電気推進システム、発電システム、航海システムとユーティリティシステムで構成される。電気推進システムは、エンジン制御ユニット（E-ECU :Engine Electric Control Unit)、パワーラインの経路切替と監視をおこなう Junction Box、バッテリーマネージメントシステムで管理されるリチウ

ムイオン２次電池、CHAdeMO プロトコルに準拠している急速充電システム、モータドライブシステムと推進装置で構成している。

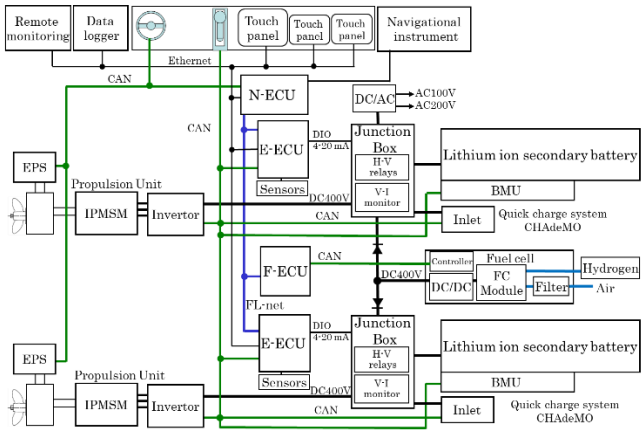

図 4 らいちょう N の電気推進システム構成図

電気推進システム（図 4）は、左右両舷に配置されそれぞれが完全に独立した電気推進システムとなっており、片舷がダウンしてもその影響を受けず残りの片舷で駆動できるシステムとなっている。発電システムは、FC 制御ユニット（F-ECU :Fuel cell Electric Control Unit）と 30kW 級水素燃料電池システム 1 基で構成され両舷の電気推進システムに電力を供給する。航海システムでは、操舵の制御のみでなく GPS など航海計器からのデータからエネルギーマネージメント、パワーマネージメントなどをおこなっている。航海制御ユニット（N-ECU :Navigation Electric Control Unit）は、電気推進システムの E-ECU 、発電システムの F-ECU と連動しそれらの制御のみではなく監視、データロギングもおこなっている。ユーティリティシステムは、リチウムイオン 2 次電池から AC100V・AC200V を船内電源として供給する。各 ECU 間は FL-net で接続しシステム間の制御、監視をおこない、情報系データは Ethernet で接続している。各機器間は、CAN (Controller Area Network)で接続し一定のサイクルで機器間の制御をおこなっている。それゆえ、操舵系を含め操船に必要な機器は全てコンピュータ制御が可能で、無人・省人化による航行を目指した研究開発をおこなうことができるようになっている。さらに NTTdocomo においては現状海上では沿岸 20km 程度まで通信可能なエリアが構築され「沿海区域」航行船については 90% 以上のエリアで通信可能な状態である。船内に搭載した監視・制御システム(SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition)や IP カメラとモバイルルータを用いた船陸間通信(図 5)など船舶のコネクテッド化の研究もおこなっている。

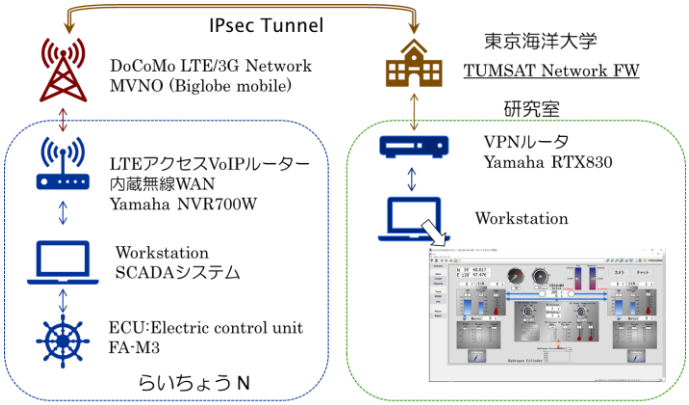

図 5 船陸間通信と監視・制御システム

水素燃料電池システムは 2016 年に 4kW 級 2 基を右舷左舷に搭載し船舶での運用を検証し、2019 年より現在の 30kW 級 1 基に換装して検証をおこなっているす。図 5 に示すよう後部甲板上に燃料電池チャンバーを設け、燃料電池機モジュール、燃料である水素ボンベと水素ガスを燃料電池に供給するガス機器パネルを設置し、機関室には燃料電池用制御ユニット、燃料電池の電圧をリチウムイオン 2 次電池の電圧に昇圧するための DC/DC コンバータ、放熱用熱交換器、空気極への空気供給と換気用空気のためのフィルタとファンを設置している。F-ECU はこれら燃料電池システムのデータロギング、監視、制御をおこなう。水素燃料電池は東芝エネルギーシステム株式会社製、最大出力 30 kW 発電効率 50 % 以上である。燃料として 14.7 MPa・7 Nm^3 の水素が充填されている 47 L 水素ボンベ 3 本を搭載し、そのエネルギーは、3×76.1 MJ = 228 MJ で 63 kWh と換算できる。燃料電池の出力が 30 kW で発電効率 $\eta = 0.5$ であるので発電時間は，63 kWh / 30 kW × 0.5 ≒ 1h となり 1 回のボンベ交換での発電量は 30 kWh である。一方、リチウムイオン 2 次電池は、東芝社会インフラシステム社のリチウムイオン 2 次電池モジュールを 12 直列した電池パック（図 2）とし、公称電圧 DC331.2 V、公称容量 40 Ah (13.2 kWh)、電圧変動範囲 DC2602 ～ DC390 V である。

この電池パックを 11 並列に接続し 145.2 kWh の容量としている。したがって搭載エネルギーは燃料電池の発電量とリチウムイオン 2 次電池と合わせると、約 175 kWh になるが燃料電池の発電量 30 kWh は全体の 17 %程度である。

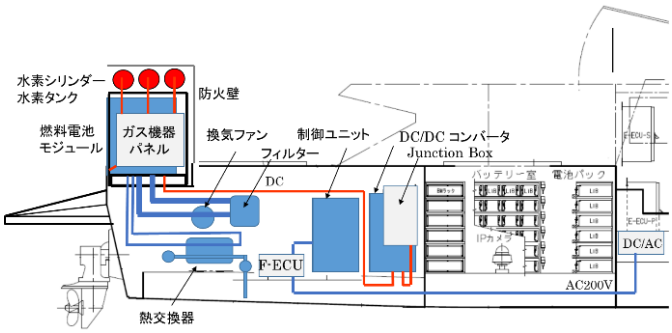

図 6 燃料電池システム配置図

図 7 は「らいちょう N」の船速と必要出力の関係を示している。また船速と必要出力には 3 乗則があり船速を 2 倍にするには 8 倍の出力を要することを示している。図より巡航速度を 8 kn（15 km/h）とするとそれに要する出力は 50 kW であり燃料電池の出力 30 kW はそれの 60 %しかなく賄うことはできない。それゆえ「らいちょう N」 では燃料電池はレンジエクステンダーとして位置付けている。

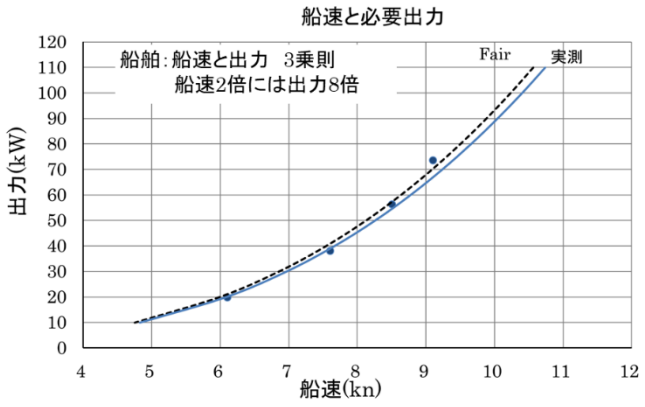

図 7 「らいちょう N」の船速と必要出力

最近の燃料電池の動向として自動車メーカが FCV で使用している燃料電池をコンパクトにコンポーネント化し自動車以外に展開を開始したことである。最大出力は 90～100kW であるが連続出力は 60kW 程度で船舶に用いるには必要台搭載すればよく期待できる。例えば総トン数 40～60 トン程度の船舶で 10kn 以下の航行時 200kW 程度の出力だとすれば、上記の燃料電池を 4 基搭載し、その出力で 6 時間航行するとすれば燃料電池の効率を 50%として次に示すような値となる。

200(kW)×6(h) / 33.3(kWh/kg)×2 = 72(kg) の水素を要することになり、水素タンクの容積は 70 MPa に圧縮（圧縮率 1.5）した場合は 1,700L、35MPa に圧縮（圧縮率 1.25）した場合 2,900L となる。表 2 に示すよう水素の体積エネルギー密度は、0.003 kWh/L で 70 MPa に圧縮しても 1.4k Wh/L と軽油の 10.1 kWh/L に比べると 1/7 以下と低く、上記で示したよう大きな水素タンクが必要になる。船の設計ではタンクの選定、設置、陸上インフラではバンカリングの方式、規則の策定と水素の価格が重要な課題である。水素燃料電池船が従来の化石燃料で運航している船舶と同じように採算の合う運航を継続しておこなうには、これらの課題を解決していかねばならない。またこれらが何隻も運航するには電池推進船同様、船と陸のインフラを合わせたエネルギーマネージメントが必要になる。そのための研究開発が望まれる。

エネルギーキャリア	体積エネルギー密度	
気体水素	0.003kWh/L	293K,0.1 MPa
リチウムイオン電池	0.50 kWh/L	—
圧縮水素	1.41 kWh/L	293K,70 MPa
液体水素	2.36 kWh/L	20K,0.1 MPa
メタノール	4.38 kWh/L	—
ガソリン	9.58 kWh/L	—
軽油	10.08kWh/L	—

図 8 体積エネルギー密度

バンカリング

船舶に燃料を供給することをバンカリングという。船内のリチウムイオン 2 次電池に充電するのもバンカリングである。先でも述べたが FCV のように燃料電池船に直接水素充填をおこなう規則はまだない。現状の水素のバンカリングは交換用ポータブルタンクによる水素燃料供給のみしかできない。2018 年国交省海事局の 2017 年度の事業として「船舶へのポータブルタンクによる水素燃料供給における安全対策」検討委員会が開催され、水素吸蔵合金タンクと水素ボンベで実証実験、水素燃料供給における安全対策検討報告書、オペレーションガイドライン、オペレーションマニュアルなどが示された。図 9 に本

学でのバンカリング実証実験時の写真を示す。これら可搬式タンクなどは現状の実験などを進めるために必要であり、直接充填は実運用普及のためには必須である。現在幾つかある燃料電池船の建造・運航計画の中でそれぞれバンカリングの検討が進められている。

図 9 バンカリング実証実験

船舶におけるリチウム 2 次電池の安全規格

船舶におけるリチウム 2 次電池の安全規格（基準）については、2013 年に「船用リチウム 2 次電池に関する JIS 原案作成」を目的として電気設備分科会の下に WG を設立し始められ、2014 年度に JIS F8102「船用電気設備-リチウム二次電池を用いた蓄電池設備」が発行された。隔壁や区画化が困難な小型船舶向けには 2017 年度に JIS F8103「舟艇—電気機器—リチウム二次電池を用いた蓄電池設備」として発行されている。

船舶における水素燃料電池の安全規格

大気汚染防止の観点から、次世代の船舶燃料として天然ガスの利用の検討が活発化し、天然ガスの特性を考慮し天然ガス燃料の使用に特化した船舶の安全要件を規定した国際ガス燃料船安全コード（IGF コード）が IMO(国際海事機関)から発行されている。適用船舶は発行日 2017 年 1 月 1 日以降に建造契約が結ばれたガス燃料船、発効日以降にガス燃料を使用する機関に換装した船舶であり、貨物を燃料に使用する液化ガス運搬船を除外などとされ、水素燃料もこれに含まれるとされている。国内における小型の水素燃料電池船においては、2018 年第 6 回「水素燃料電池船の安全ガイドライン検討委員会」が開催され、「水素燃料電池船の安全ガイドライン」案が提示された。適用船舶は、総トン数 20 トン未満の小型船舶又は総トン数 20 トン以上のものであって、スポーツまたは、レクリエーションの用途だけに供するものとして船体の長さが 24m 未満の船舶（電気推進に限る）としている。小型船舶においては、IGF コードは適用されないが、低引火点燃料に対する同コードの安全確保の考え方を取り入れるとしている。また、ガイドラインでの適用範囲は、燃料電池と蓄電池を利用したハイブリッド型の電源供給システムであること、燃料電池は固体高分子形燃料電池であること、燃料タンクの設計圧力は 70 MPa 未満とし、バンカリングは移動式水素ステーション、又は可搬式水素ボンベにより供給などとしている。

水素燃料電池船の実用にむけての取り組み

このように新しいカテゴリーの燃料はエネルギー密度が低く化石燃料を搭載した船舶が数週間分の燃料を搭載しているのとは異なりバンカリングが頻繁になり、かつそれに要する時間も長くなる。これらの船を複数隻運航するには、船のエネルギー状態や航行状態などと陸のバンカリングインフラの状態などを監視・制御しなければ正常な運航形態がとれなくなる。このような監視・制御システムを構築するためには、先に述べたような船のコネクテッド化が必須となる。このことにより船と陸上インフラのエネルギーマネージメント、運航管理のみならずその他のシステムとの接続が可能となる。さらに船舶のコネクテッド化は自動離着岸などのアシストに使用できると考えられる。

搭載する水素燃料電池においては、QCD(Quality: Cost: Delivery)に優れている車載用燃料電池をマリナイズすることなく船舶に搭載するための取り組みをおこなっている。今船舶において重要なことは陸での先端技術をどのように取り込み、船と陸との垣根のないシステムの構築をおこなうことであると考えている。東京海洋大学では燃料電池実験船「らいちょう N」を用いこれらの研究をおこなっている。これらの取り組みは建造コスト、運航コストが運航者にとって許容できる範囲になり、社会実験域から実用域へ進めることを目的としている。現在商用ベースの水素燃料電池の計画が進んでおりこれらの研究が活かされることを期待している。