

燃料電池船の実用化に向けた研究

著者	大出 剛, 清水 悦郎
雑誌名	咸臨 : 日本船舶海洋工学会誌
巻	93
ページ	38-43
発行年	2020-11
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00002138/

燃料電池船の実用化に向けた研究

タイトルカットが入ります

大出 剛 *1
清水 悦郎 *1

1. はじめに

船舶に起因する環境問題は、NO_x 及び SO_x・PM 排出などによる大気環境汚染、CO₂ 排出などによる地球温暖化、油流出や有害化学物質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行われている。また、国際海運から出される CO₂ は全世界の排出量の 3% となる 843 百トンでドイツ 1 国分に相当し、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 08 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MISSIONの発電システムである水素燃料電池は、温暖化ガス規制、排ガス規制に対応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き 2014 年 6 月に策定された「水素・燃料電池戦略ロードマップ」において「燃料電池船については、導入に向けた実証事業の推進等について検討していく」と明記されている。また、2017 年 12 月水素基本戦略再生可能エネルギー・水素等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・導入が次のように記載されている。「モビリティの中でも船舶は低炭素化が難しい分野であるが、今後は燃料電池の活用を含めた電動化等を進めることで、CO₂ 排出の削減を進めていくことが必要である」「このため、例えば燃料電池の静音性を活かし、まずはプレ

ジャーボートや旅客船、漁船などの小型船舶の FC 化を進めるべく、燃料電池船に係る安全ガイドラインの策定を進めるとともに、利用拡大のロードマップを作成し、それらに基づき、実船による実証試験を行い、費用対効果の大きいものから普及を目指す」とされている¹⁾。国土交通省海事局は、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」を開催した。海外事例、技術的課題の洗い出し、燃料電池の暫定安全ガイドライン策定に係る安全要件の検討などが示されたが、船舶における燃料電池関係の資料・データは、ほとんどない状態であった。4 年後の 2018 年 1 月第 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すると修正を要するため案にとどめられた。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「らいちょう N」を用い安全ガイドラインに沿った様々な検証を実施している。新造船が実現すれば安全ガイドラインの最初の適合船になる。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。

2. 水素燃料電池船の概要

2.1 電池推進船の概要³⁾⁴⁾

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²⁾に対応した電池推進船の開発を行ってきた。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

*1 国立大学法人東京海洋大学

動する方式 (Diesel-electric transmission) 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 (Battery Power Electric Boat) 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、回転速度制御等が応答性よく答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潤滑油交換や主機解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。次に本学で研究している電池推進船「らいちょう I」「らいちょう S」を紹介する。「らいちょう N」については燃料電池船として次節で示す。

「らいちょう I」は2010年に急速充電プロトコル CHAdeMO 規格に準拠した世界初の急速充電対応電池推進船のフィージビリティスタディ船として建造した。海洋低環境モダリティシフトに多大な貢献をし、現在は自動運転船舶の実現に向けて自動運転技術と遠隔監視・操船支援システムの開発などの研究に使われている。

「らいちょう S」は2011年世界初のモータ駆動ウォータージェット推進機を搭載した急速充電型電池推進船の実験船として建造した。小型で陸上移動が容易なため多くの社会実験を行ってきた。震災直後の小名浜の海底調査、長崎県水産部との対馬豆酛漁港での太陽光発電を用いたエコシステムの実証実験、北海道開発局との寿都漁港電動漁船実証試験 (寒冷地試験)、温暖な地域として沖縄県石垣島での運航試験と水中リモコン実験などを行った。さらに船舶が発生する水中音に関しても検証を行い通常の内燃機関船と比較すると格段に少ないことを確認している。現在は小網代湾で神奈川県薄膜太陽電池普及事業の一環として800Wの薄膜太陽光パネルをオーニングに貼りリチウムイオン2次電池と接続して充電して使用する社会実験を行っている。

2.2 らいちょう N の概要

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行っている。図1に燃料電池を搭載した「らいちょう N」と燃料電池の写真を、表1に主要目を示す。



図1 らいちょう N と燃料電池モジュール

表1 らいちょう N 主要目 (2020年4月現在)

全長	14 m
全幅	3.5 m
全深さ	2.0 m
総トン数 (排水量トン)	9.1 ton (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	DC230 V-DC430 V
リチウムイオン2次電池容量	145 kWh
燃料電池定格出力	30 kW
搭載水素量	21 Nm3

図2「らいちょう N」のシステム構成図を示す。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、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行う 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されている。図2で示しているように電気推進システムは、左右両舷に配置されそれぞれが完全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行っている。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、データロギングも行っている。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している。各 ECU 間は FL-net で接続しシステム間の制御、監視を行い、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行っている。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・省人化による運航を目指した研究開発を行うことができる。さらに船内に搭載した無線 LAN や携帯電話などの通信機器を通じて陸上に設置している先端ナビゲートシステムとも接続できる。先端ナビゲートシステムは船舶の運航データを蓄積するとともに、システム端末から指示を送り航行させることも可能な設計となっている⁵⁾。

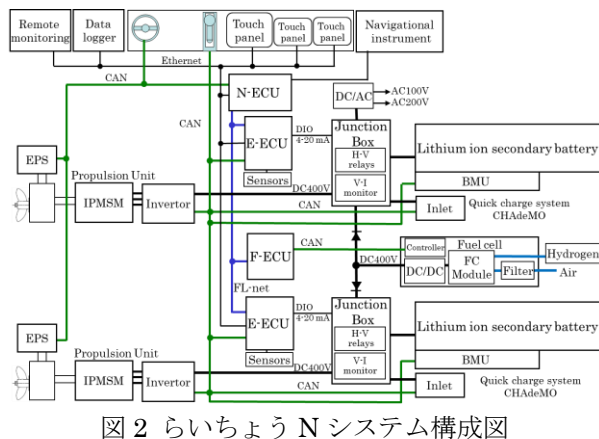


図2 らいちょう N システム構成図

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 11 月より現在の 30kW 級 1 基に換装して検証を行っている。図 3 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、制御を行う。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 Nm³ の水素が充填されている 47 L 水素ボンベ 3 本を搭載している。水素ボンベ 3 本分のエネルギーは、3*76.1 MJ = 228 MJ で 63 kWh と換算できる。燃料電池の出力は 30 kW で発電効率を $\eta = 0.5$ とすると発電時間は、63 kWh / 30 kW * 0.5 \approx 1 h となり 1 回のボンベ交換での発電量は 30 kWh である。

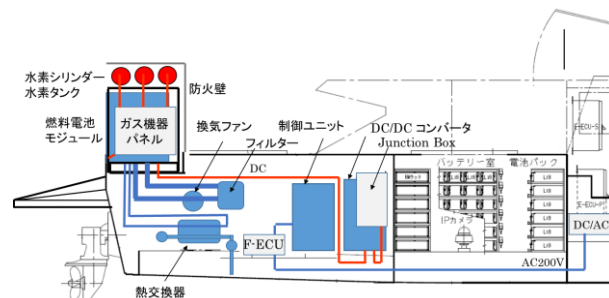


図3 燃料電池システム配置図

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 4) 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 V - DC390 V である。

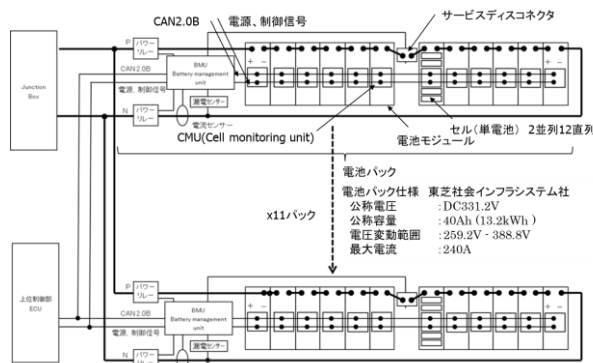


図4 電池パック

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。次に船速とそれに要する出力の関係を示す。図 5 は「らいちょう N」の船速

と必要出力の関係を示している。巡航速度を 8 kn (15 km/h) とするとそれに要する出力は図より 50 kW であり燃料電池の出力 30 kW はその 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。

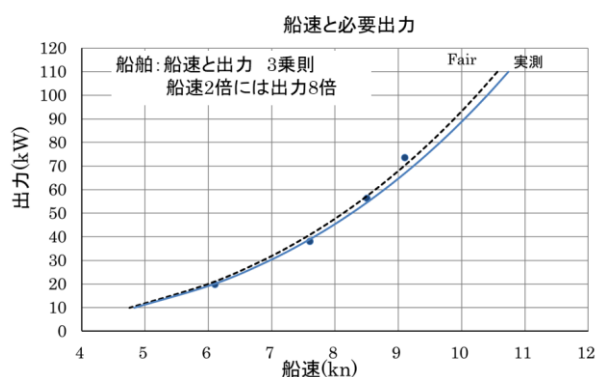


図5 「らいちょう N」の船速と必要出力

ここで、「らいちょう N」クラスの船舶を燃料電池のみの発電量での航行を試算する。運転条件は、船速を 10 kn (18.5 km/h) で 2 時間の連続航行とする。

船速 10 kn に必要な出力は、図 5 から 90 kW / 10 kn であるので燃料電池は 90 kW * 2 h = 180 kWh の発電をしなければならない。燃料電池の効率を 50 % とすると 360 kWh 分の水素を搭載することになり、水素 122 Nm³ に相当する。必要水素タンク容量は、70 MPa に圧縮 (圧縮率 1.5) した場合は、260 L 以上の水素タンクを要し、35 MPa に圧縮 (圧縮率 1.25) した場合には、435 L 以上の水素タンクを要することになる。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 1.4 kWh/L と軽油の 10.1 kWh/L に比べると 1/7 以下と低く、上記で示したような大きな水素タンクが必要になる。燃料電池は連続定格出力 50 kW を 2 基用いれば良いとなるが、水素圧が 35 MPa、70 MPa や液体水素での利用が対象になる。現状では船

表 2 体積エネルギー密度

エネルギーキャリア	体積エネルギー密度	
気体水素	0.003 kWh/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	10.08 kWh/L	

舶への直接充填の規則はなくインフラもなく、燃料電池、水素タンクの入手性にも課題はある。しかしながら水素燃料電池のみの発電量で運航できる船舶への取り組みは期待される所であり、検討を開始している。

2.3 水素燃料のバンカリング

船舶に燃料を供給することをバンカリングという。先でも述べたが、燃料電池車のような燃料電池船に直接水素充填を行う規則はまだない。現状は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 3 月国交省海事局の 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⁶⁾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 6 に本学でのバンカリング実証実験時の写真を示す。



図 6 バンカリング実証実験

3. 運航と実験

燃料電池システムを搭載し、本学越中島キャンパス周辺を 1 日約 2 時間航行して、係留時と走行時の発電状態、また航行時の揺れ、衝撃、塩害、冷却系の影響、I-V 特性の経時変化など各種データを収集し、解析を行っている。図 7 に燃料電池の運転状態の計測例を示す。図は出力を 5 kW、10 kW、15 kW、20 kW、25 kW、30 kW と段階的に上げたあと 25 kW、20 kW、15 kW、10 kW、5 kW と下げていき 30 kW まで上昇させている例である。図では燃料電池の電圧、電流、電力、水素圧、水素流量、熱交換器入口出口温度と燃料電池が消費する電力などを示している。

運転環境のデータとして以下に示す観測を行った。固体高分子形燃料電池において海塩粒子成分が腐食だけでなく白金触媒へ吸着したり白金溶出の促進を促すと言われている⁷⁾。図 8 に大気浮遊塩分 (海塩粒子) の 1 年間の測定結果を示す。2018 年 9 月か

ら 2019 年 10 月まで JIS Z 2382 (ISO 9225) に基づき 1 か月単位でドライゲージを取り換え大気浮遊塩分(海塩粒子)の付着度を船上と陸側で測定した。その結果、塩化物の付着度は船上の方が 3-4 倍多くなっていた。また 9 月の台風による増加は、風波により生じた海水の気泡の破裂が増したものと考えられるが船上に多く表れていることがわかる。

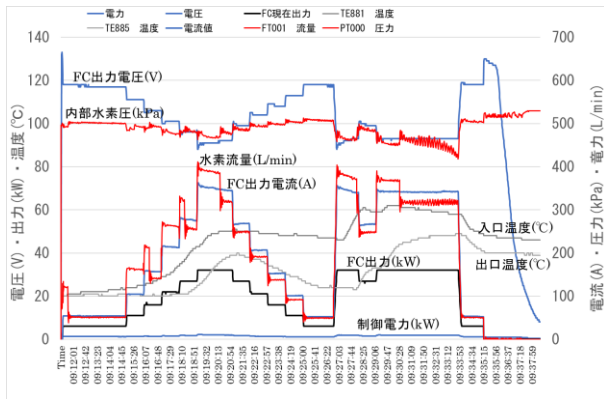


図 7 燃料電池運転時の計測例

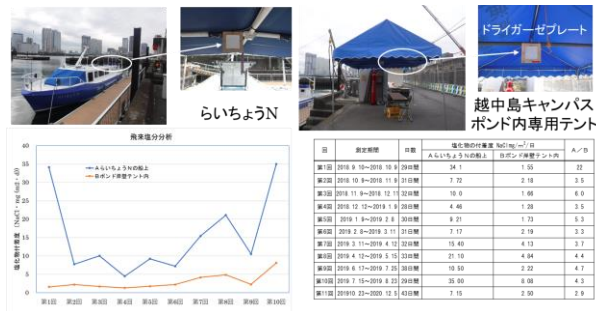


図 8 海塩粒子測定

4. 安全規格

4.1 船舶におけるリチウム2次電池の安全規格

船舶で用いる大容量のリチウムイオン2次電池は、大型船舶では補機(発電機)として、小型船舶では主機(モータ)へのエネルギー源として用いることが考えられる。大容量のリチウムイオン2次電池を船舶に搭載する規格(標準)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2次電池を用いた蓄電池設備」、2017年度に小型船舶向けJIS F8103「舟艇—電気機器—リチウム2次電池を用いた蓄電池設備」が発行された。現状小型船舶において大容量のリチウムイオン2次電池を搭載する場合は、日本小型船舶検査機構(JCI)の検査

他にリチウムイオン2次電池を搭載する小型船舶に係わる「安全運航対策マニュアル」を建造者、運航者が制作し、JCIに提出しなければならない。

4.2 船舶における水素燃料電池の安全規格⁸⁾

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)から発行された。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とされ、水素燃料もこれに含まれるとされている。水素燃料電池船においては、2018年1月第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、スポーツ又は、レクリエーションの用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70MPa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。

5. 燃料電池船研究の今後の展開

これまで3隻のタイプの異なる電池推進船を5年以上実験運航を行ってきたが、航続可能距離が短いという点を除き、船舶として十分に利用できる状況になっていると考えている。本学が監修したグラスボート「ちゅらら」は、2014年に竣工した沖縄県石垣市の(有)川平マリンサービスが保有し、川平湾にて運航する電池推進船である。2020年度に2隻目を計画している。燃料電池船は「らいちょうN」にてレンジエクステンダータイプの実用化が技術的にも安全ガイドラインにおいても検証ができ、このタイプの燃料電池船としては2020年度で本学での研究は一段落する。引き続き燃料電池のみの出力で

運航できる燃料電池船の研究開発を行う計画であり、燃料電池も定置型仕様から移動体仕様にしていく予定である。並行して燃料である水素の直接充填の規則、インフラなどにも取り組んでいく計画である。

一方、昨今、自動車の世界においては、自動運転車や運転を補助する自動ブレーキシステムの開発が盛んである。船舶の世界においても海難事故の多くは人的ミスによるものであるため、自動化技術を積極的に開発し導入することは安全運航に繋がるものである。このため無人操船を可能にするための技術開発を進めるとともに、交通システムとしての安全性を確保するために遠隔監視するためのシステム開発を行っている。

6. おわりに

本稿では、著者らがこれまで開発を行ってきた急速充電対応型電池推進船の紹介を行うとともに、これが基部となっている燃料電池船の開発状況と展開に関する紹介を行った。

2025年大阪万博のテーマは「命輝く未来社会のデザイン」でありコンセプトは「未来社会の実験場」としている。水素は脱化石燃料における代替燃料として期待されており万博でも様々な応用が出てくると想像できる。陸上の交通システムにおいては電気自動車、燃料電池自動車の利用など、環境にやさしい技術の導入を積極的に進めているが、水上交通システムに関しては燃料電池のみの出力で航行する商業船舶はまだない。積極的にアピールできるよう研究開発を進めるとともに、電池推進船や燃料電池船の普及に向けた広報活動も行っている。本稿が、燃料電池船技術の現状を理解していただくとともに、使ってみよう、というきっかけの一助になれば幸いである。

参考文献

1) 経済産業省 資源エネルギー庁 HP :

<https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basi>



大出 剛 (おおで つよし)
東京海洋大学
次世代水上交通システム研究開発プロジェクト
oode@kaiyodai.ac.jp



清水 悦郎 (しみず えつろう)
東京海洋大学
学術研究院
shimizu@kaiyodai.ac.jp

[c_plan/past.html](#)

2) CHAdeMO 協議会 HP :

<http://www.chademo.com/wp/japan/>

- 3) 大出剛, 清水悦郎: 第 24 回 燃料電池シンポジウム講演予稿集, 11-14 (2017)
- 4) 大出剛, 清水悦郎: 第 62 回 特別基金講演予稿集, 17-23 (2018)
- 5) 庄司りり: 東京海洋大学海洋工学部 船舶運航支援研究・教育設備・先端ナビゲートシステム, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 48 巻 6 号, pp.92-96,
- 6) 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 報告書, 株式会社日本海洋科学, (2018)
- 7) 大野和之, 今村大地: 空気中に含まれる海塩粒子成分が固体高分子型燃料電池性能に及ぼす影響, JARI Research Journal, 第 30 巻 7 号, pp.53-56, 2008.
- 8) 大出剛: 水素燃料電池船, 日本マリンエンジニアリング学会誌 vol.53 No.4, 61-62 (2018)