

「海事行政の最近の動向」に関するセミナー 資 料

1. 今後の海事産業の変革について
(国土交通省 海事局 船舶産業課)
2. カーボンニュートラル、自動運航の実現に向けて
～ 海上技術安全研究所の最近の研究の動向 ～
(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所)

2022年2月

一般社団法人 日本船舶品質管理協会

2. カーボンニュートラル、自動運航の実現に向けて

カーボンニュートラル、自動運航の実現に向けて ～ 海上技術安全研究所の最新の研究の動向 ～

報告内容

1. はじめに
2. 船舶分野におけるカーボンニュートラル技術の動向
3. 海技研におけるカーボンニュートラル技術の研究
4. 海技研における自動運航船の研究
5. まとめ

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所
GHG削減プロジェクトチーム
平田 宏一



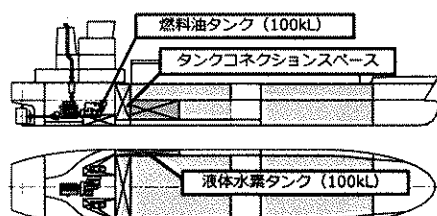
1. はじめに

- 海上技術安全研究所では、海洋環境の保全や海上輸送を支える基盤的技術開発といった、海事分野における国の施策や産業競争力の強化を技術面で支えるための研究を進めている。
- 2020年3月には、いくつかの喫緊の課題に対する技術開発を機動的に対応するため、4つのプロジェクトチームを設立した。

<4つの重点研究分野>

1. 海上輸送の安全の確保
2. 海洋環境の保全
3. 海洋の開発
4. 海上輸送を支える基盤的技術開発

GHG削減プロジェクトチーム



カーボンニュートラルを目指した
ゼロエミッション船のコンセプト

自動運航船プロジェクトチーム

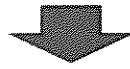


小型実験船による自動運航システムの実証試験



2. 船舶分野におけるカーボンニュートラル技術の動向

- ▶ IMOのGHG削減戦略では、2050年までにGHG 排出量を50 %以上削減（2008年比）するといった目標を掲げている。
- ▶ 内航海運において、令和3年に改訂された地球温暖化対策計画では、2030年度までにCO₂排出量181万トン削減の目標が掲げられた。
- ▶ 昨今、世界的な脱炭素に向けた動きが加速し、2050年ネットカーボンニュートラルなど、これまで以上のCO₂排出削減に向けた取り組みの強化が求められている。



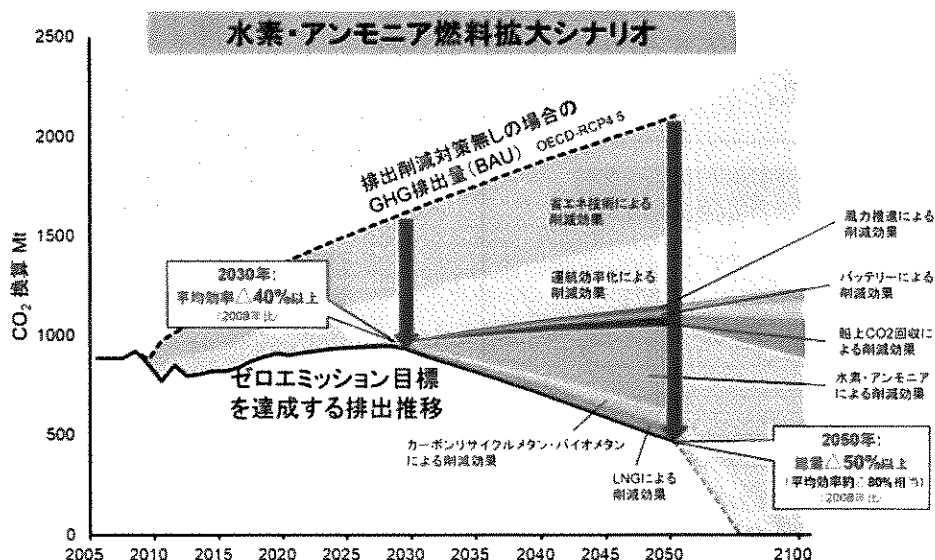
2030年頃までの短期的取り組み・2050年ネットカーボンニュートラルの検討

- ① 国際海運ゼロエミッションプロジェクト（国交省・船技協）
- ② 内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会（国交省）



(1) 国際海運GHG削減ロードマップ

- ▶ 2019年度、国土交通省・船技協らにより、2050年国際海運GHG50%削減のためのロードマップが策定された。
- ▶ 昨今、世界的な脱炭素に向けた動きが加速し、2050年ネットカーボンニュートラルといった、これまで以上のGHG排出削減に向けた取り組みの強化が求められている。

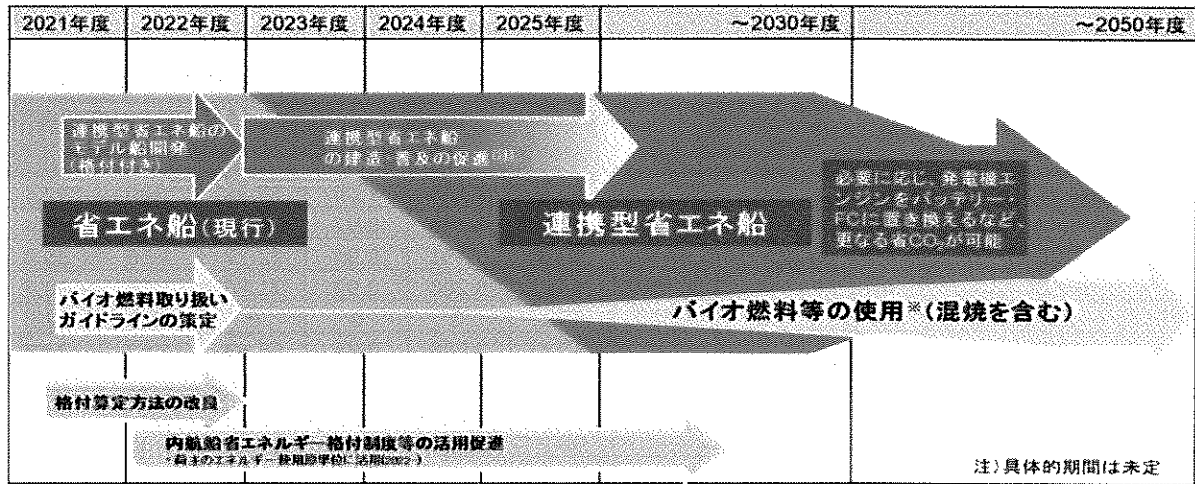


国際海運GHG 排出量・削減量の推移
(国土交通省・船技協「国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ」(2020年)より)



(2) 内航海運の低・脱炭素化に向けたロードマップ

- 2021年度に実施された国土交通省「内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会」では、現時点で入手可能な情報を踏まえて、内航海運のロードマップが作成された。
- 既存省エネ技術の組み合わせや荷主・オペレータ・船主・造船所による連携による省エネの強化を目指した“連携型省エネ船”が提案された。



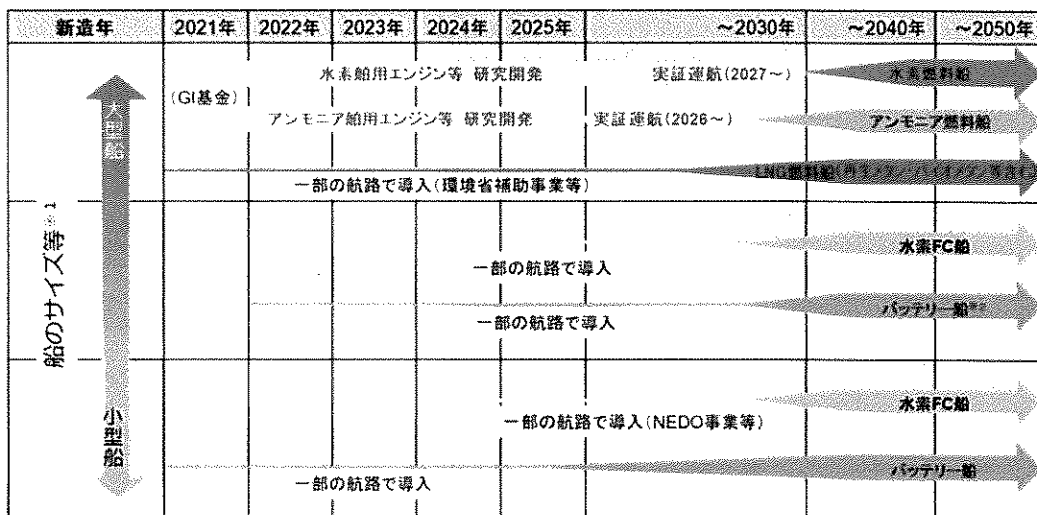
※供給量や経済合理性等の条件も使用拡大に大きく影響

連携型省エネ船等のロードマップ
(国土交通省「内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会」とりまとめより)



(2) 内航海運の低・脱炭素化に向けたロードマップ

- 2030年度以降、技術の成熟や燃料供給インフラの整備等が進むことにより、水素燃料電池船、バッテリー船、LNG燃料船等の導入の拡大が想定される。
- 実際の適用可能性については、給電や燃料補給施設等のインフラや経済合理性等の条件も大きく影響することに留意する必要がある。



※1：船種、航路等により適用可能性は大きく異なる
※2：航路が比較的短距離の場合に適用可能

代替燃料の活用等、先進的技術の適用可能性
(国土交通省「内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会」とりまとめより)



(3) カーボンニュートラル実現のための代替燃料技術

- カーボンニュートラル実現のために様々な石油代替燃料が検討されている。
- 将来の船用燃料としては、水素、アンモニアなどのカーボンフリー燃料が期待されており、様々な取り組みが始められている。

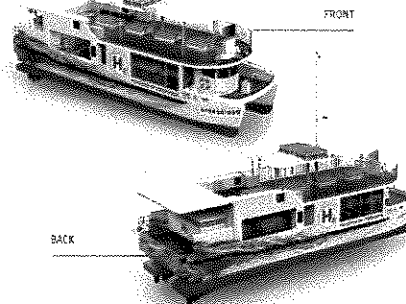
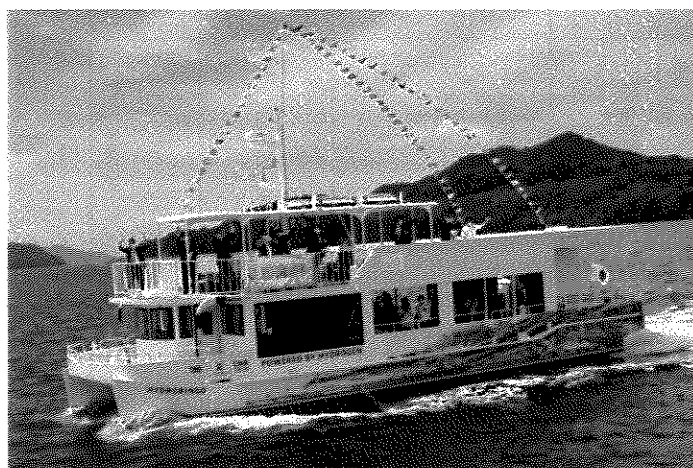
各種燃料の物性値

燃料	密度 (液体) [kg/L]	融点 [°C]	沸点 [°C]	低位発熱量 [MJ/kg]	CO ₂ 換算 係数 [t-CO ₂ /t- Fuel]	熱量あたりの CO ₂ 排出量		熱量あた り燃料体 積 (C重油 を1とした index)	体積エネ ルギー効 率 [MJ/L]
						C重油を1 とした index	[g- CO ₂ /MJ]		
船用重油 (C重油)	0.93	---	350以上	40.4	3.126	1.00	77.38	1.00	37.6
船用重油 (A重油)	0.83	---	350以上	42.7	3.206	0.97	75.08	1.07	35.4
軽油	0.83	-29~-18	150-350	43.3	3.151	0.94	72.77	1.06	35.9
ガソリン	0.73	---	30-200	44.8	3.206	0.92	71.56	1.16	32.7
バイオディーゼル (FAME)	0.885		約350	37.1	0	0	0	1.16	32.8
LPG	(0.6)			(45.8)	3.006	0.85	65.63	1.63	27.5
LPG (プロパン)	0.582	-187.69	-42.1	46.3	3.000	0.84	64.79	1.61	26.9
LPG (ブタン)	0.601	-138.2	-0.5	45.7	3.030	0.86	66.30	1.43	27.5
LNG	0.48			48.0	2.693	0.73	56.10	1.65	23.0
メタン (CH ₄)	0.425	-182.5	-161.5	50.0	2.75	0.71	55.00	1.80	21.3
メタノール (CH ₃ OH)	0.791	-98	65.4	19.9	1.375	0.89	69.10	2.39	15.7
エタノール (C ₂ H ₅ OH)	0.79	-130	78	26.8	1.913	0.92	71.38	1.79	21.2
水素 (H ₂)	0.0708	-259.35	-252.88	120.0	0	0	0	4.46	8.5
アンモニア (NH ₃)	0.673	-77.73	-33.34	18.6	0	0	0	3.00	12.5

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

(4) 水素エンジンの開発状況

- 2021年7月、ツネイシクラフト&ファシリティーズは水素混焼エンジン搭載旅客船「ハイドロびんご (Hydro BINGO)」を竣工し、ジャパンハイドロ社が受領した。
- 2基の水素混焼エンジン（最大出力441kW×2基）を搭載し、従来のディーゼルエンジンと比較して、最大50%のCO₂排出削減を実現する。



水素混焼エンジン搭載旅客船「Hydro BINGO」

- (1) ツネイシクラフト&ファシリティーズ, <https://news.tsuneishi-fc.com/2021/07/12世界初となる水素燃料フェリーを竣工/>
- (2) ジャパンハイドロ, <http://jpnhydro.com/solution/>
- (3) CMB.tech, <https://cmb.tech/solutions/marine/hydrobingo>

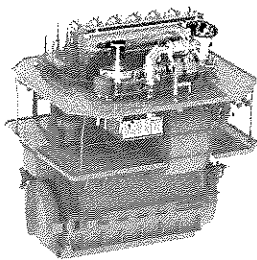


(4) 水素エンジンの開発状況

- 小・中出力の4ストローク水素エンジン（専焼・混焼）は多くのエンジンメーカーによって開発・実証が進められている。
- 外航船主機向けの大出力2ストローク水素エンジンの開発も進められている。

2ストロークエンジン

- ジャパンエンジン社は、DFガスエンジンの技術を適用し、高圧噴射方式を採用することで安定的な燃焼を実現としている。



水素燃料エンジンのイメージ(1)

※ 初号機の出力は5000kW、2026年に完成予定。
 ※パイロット燃料が不要な水素専焼エンジンの開発についても検討されている。

4ストロークエンジン

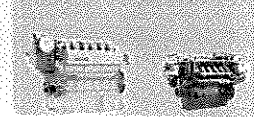
- GI基金事業において、川崎重工社が中速4ストロークエンジン、ヤンマーパワーテクノロジー社が中・高速4ストロークエンジンを開発する。



推進用 中速4ストローク水素エンジンの開発 (2,000~3,000kW)



補機用 中高速4ストローク水素エンジンの開発 (800kW、1,400kW)



4ストローク水素エンジン(2)



(1) ジャパンエンジン社, https://www.j-eng.co.jp/product/lsja_lsgh.html
 (2) <https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001428911.pdf>



国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

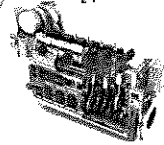
9

(4) 水素エンジンの開発状況

MAN E&S

- 液化水素タンクの開発や4ストローク水素混焼エンジンの試験を進めている。
- 部分負荷まで水素専焼が可能なDFエンジン、さらに専焼エンジンの開発を進める。

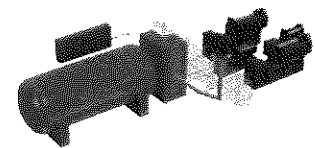
Limited H₂-energy share / limited H₂ power



Alexander Feindt, MAN E&S, H2 Technologies in Shipping, 2021.

Wärtsilä

- 既に水素60%と天然ガス40%の混焼エンジンの試験を行っている。
- 水素専焼エンジンの開発を進める。

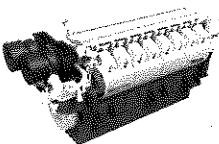


Fuel gas System for hydrogen

WÄRTSILÄ ANNUAL REPORT 2020
 J. Kytölä, WÄRTSILÄ & HYDROGEN, 2020.

BeHydro (ABC, CMB)

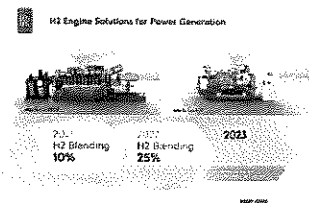
- ベルギーのエンジンメーカーABC社と海運会社CMB社との合併ベンチャー企業である
- 2020年、水素85%と液体燃料15%の1000kW混焼エンジンを開発した。
- 出力レベルは1000~2670kWである。



<https://www.behydro.be/en/home.html>

Rolls-Royce, mtu brand

- 10%水素混焼が可能な発電機を開発している。
- 2022年には25%水素混焼、2023年には水素専焼エンジンを販売するとしている。



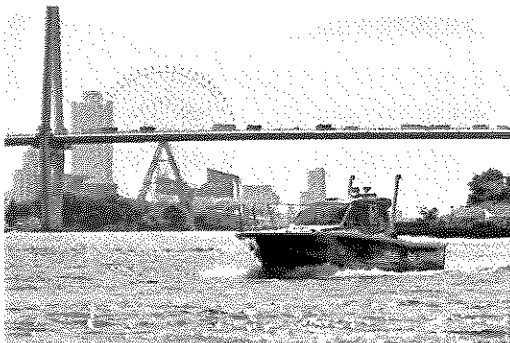
<https://www.mtu-solutions.com/eu/en/news-and-media/media-center.html>

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

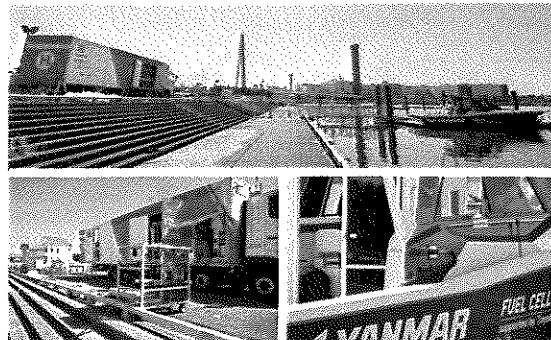
10

(5) 水素燃料電池の開発状況

- ▶ ヤンマーパワーテクノロジーらは、トヨタ自動車製燃料電池ユニットなどを組み合わせた船舶用燃料電池システムを開発し、2021年3月より自社製ボートによる実証試験を開始した。
- ▶ リチウムイオン電池と組み合わせたパワーマネジメントにより、急激な負荷変動にも対応できることなどが確認された。
- ▶ 2021年9月～10月には、70MPa高圧水素充填を行い、大阪・関西万博会場予定地と市内沿岸部の観光地を結ぶ航路での航行試験を実施した。
- ▶ 同社は、様々な船種に搭載可能な300kW級の舶用水素燃料電池システムの開発を進めており、2023年の市場投入を目指している。



大阪湾を試験航行する水素燃料電池試験艇



70MPa高圧水素充填試験の様子



- (1) ヤンマー, <https://www.yanmar.com/jp/news/2021/03/24/89083.html>
- (2) ヤンマー, <https://www.yanmar.com/jp/marinecommercial/news/2021/10/13/98421.html>
- (3) ヤンマー, <https://www.yanmar.com/jp/about/ymedia/article/fuel-cell2.html>



(6) アンモニアエンジンの開発状況

- ▶ 国内エンジンメーカーによって、アンモニアエンジンの開発が進められている。
- ▶ 欧州エンジンメーカーMANは、既存のLPG燃料エンジンに技術をベースとしたアンモニアエンジンの開発を進めている。

次世代船舶の開発

アンモニア燃料国産エンジン搭載船舶の開発

別紙

事業の目的・概要

- 海上輸送のゼロエミッション化推進・次世代船舶分野における日本海事クラスターの競争力維持・向上を目的として、アンモニア燃料国産エンジンを搭載するアンモニア燃料船の研究開発を行う。
- ① アンモニア燃料タグボート（内航船）の開発・運航
 - 国産4ストローク主機の開発、安全性・実用性に配慮したアンモニア燃料船の設計、アンモニア燃料船に係る運航・メンテナンス手法の確立などに取り組み、2024年の竣工を目指す。
- ② アンモニア燃料アンモニア輸送船（外航船）の開発・運航
 - 国産2ストローク主機および国産4ストローク主機の開発、外航船の船型主要目的の開発とアンモニア燃料・荷役配管システムおよびオペレーションシステムの開発、アンモニア毒性に対する船内安全システムの確立、アンモニア燃料船に係る運航・メンテナンス手法の確立などに取り組み、2026年の竣工を目指す。

実施体制 炭太字：幹事企業

- ① 日本郵船株式会社、株式会社IH原動機
- ② 日本郵船株式会社、株式会社ヤンパワーエンジンコーポレーション、株式会社IH原動機、日本シップヤード株式会社（一般財団法人日本海事協会 ※NEDO助成先対象外）

事業期間

2021～2027年度（7年間）

事業内容

<アンモニア燃料船の開発・運航の進捗>

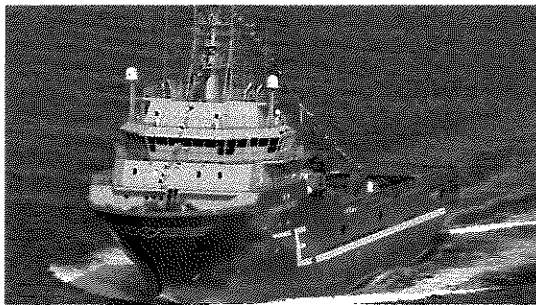
年次	2021年	2024年	2026年
エンジン開発	アンモニア燃料技術の確立/エンジン設計	内航船/アンモニア燃料タグボートの開発・運航	外航船/アンモニア燃料アンモニア輸送船の開発・運航
船体設計の進捗	国産4ストローク主機の社会実装	世界に先駆けてアンモニア燃料船を実装	国産2ストローク主機/国産4ストローク主機の社会実装
運航試験の実施	アンモニア燃料外航船の社会実装	アンモニア海上輸送の低炭素化	

出典：日本郵船、株式会社ヤンパワーエンジンコーポレーション、株式会社IH原動機、日本シップヤード

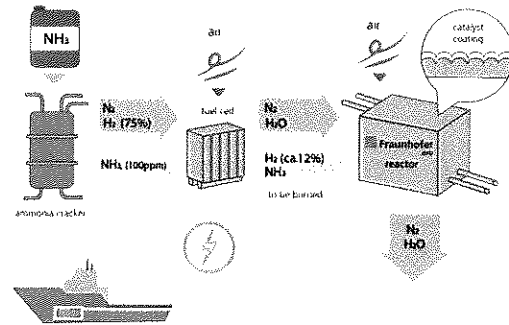


(7) アンモニア燃料電池の開発状況

- ▶ アンモニアを直接供給する燃料電池（SOFC）の研究開発が進められている。
- ▶ 欧州のEidesvik, Wärtsiläらは、LNG燃料船「Viking Energy」に2MWのアンモニア燃料電池を搭載するプロジェクトを進めており、2024年の試験運航を計画している^{(1),(2)}。詳細は不明であるが、アンモニアの水素改質が検討されていると思われる。
- ▶ その他、国内においても、アンモニアを分解して水素を生成し、水素燃料電池により発電するなどの研究が行われている⁽³⁾。



LNG燃料船「Viking Energy」



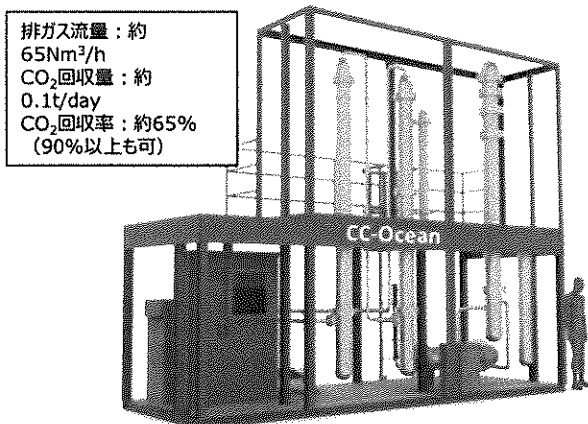
アンモニア燃料電池システム⁽²⁾

- (1) <https://eidesvik.no/viking-energy-with-ammonia-driven-fuel-cell/>
- (2) <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2021/march-2021/worlds-first-high-temperature-ammonia-powered-fuel-cell-for-shipping.html>
- (3) <https://www.zaikai.co.jp/releases/377980/>など

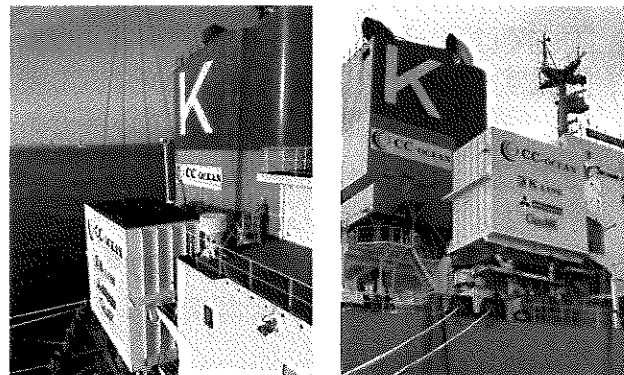


(8) 船上CO₂回収システム

- ▶ 三菱造船、川崎汽船、日本海事協会は、洋上用CO₂回収装置の検証プロジェクト“CC-Ocean (Carbon Capture on the Ocean project)”を進めている。
- ▶ 2021年8月から、石炭運搬船“CORONA UTILITY”にCO₂回収小型デモプラントを搭載し、高純度（99.9%以上）なCO₂回収に成功している。



CO₂回収小型デモプラントのイメージ⁽⁴⁾



実船の搭載したCO₂回収デモプラント⁽³⁾

- (1) 三菱造船, <https://www.mhi.com/jp/news/211020.html>
- (2) <https://www.kline.co.jp/ja/news/csr/csr-5939840059496259063/main/0/link/211020JA.pdf>
- (3) <https://www.kline.co.jp/ja/news/csr/csr7469520701057026010/main/0/link/210805JA.pdf>
- (4) 佐伯和基（三菱造船）, <https://www.jasnaoe.or.jp/lecture/pdf/e.210224.03.pdf>



(9) バイオ燃料

- ▶ バイオ燃料は石油燃料と比べて酸化しやすいため長期保管が課題となること、供給量に制限があること、陸上分野・航空機分野における消費が見込まれていることから船用分野への供給が期待できるか不明確であること等の課題がある。

区分※	概要	メリット（特徴）	デメリット（課題）	状況
第1世代 バイオ燃料	<ul style="list-style-type: none"> ● 砂糖やでんぷん、植物油等の食糧生産と競合する原料を使用する。 ● 既にバイオエタノールやバイオディーゼル（FAME）が代替燃料として使用されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 製造技術が確立され、既に自動車分野などで実用化されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 安定性や低温流動性などに問題がある。 ● 既存設備を使用する場合、混合比率に制限がある。 ● 食糧生産との競合により生産量に限界がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ● ブラジルや米国の自動車分野で広く普及している。 ● バイオディーゼルの混焼などは陸上分野において商業レベルで使われている。
第2世代 バイオ燃料	<ul style="list-style-type: none"> ● バイオマスの非可食部であるセルロースなどを原料とする。 ● 既存のインフラ設備に対する親和性の高い炭化水素系のバイオ燃料 	<ul style="list-style-type: none"> ● 原料が多岐に渡るため、生産量を高めやすい。 ● 適切に精製することで化石燃料由来の燃料とほぼ同じ燃焼特性を実現する。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 非食用農作物を生産するための新たな耕地が必要となる。 ● 燃料の製造工程が複雑になり、従来燃料と比べてコスト競争力が課題となり得る。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 燃料製造のための触媒技術の研究開発、藻類のバイオ燃料化等が進められている。 ● 船舶分野においても各種実証試験が行われている。

※ 第1世代バイオ燃料、第2世代バイオ燃料の定義は明文化されていない。

(10) カーボンニュートラル技術動向のまとめ

- ① 世界的な脱炭素に向けた動きが加速し、2050年ネットカーボンニュートラルなど、これまで以上のCO₂排出削減に向けた取り組みの強化が求められている。
- ② 国内において水素混焼エンジン船（小型船舶）の実運航が開始された。国内外のエンジンメーカーによって舶用水素エンジンの開発が活発に進められている。
- ③ 国内において、自動車用PEFCを搭載した水素燃料電池船（小型船舶）の開発や高圧水素充填の実証が行われた。
- ④ 国内ではアンモニア直接供給燃料電池の研究、欧州ではアンモニア燃料電池を船舶に搭載するためのプロジェクトが進められている。現時点では研究フェーズであると考えられるが、今後の開発動向には注意が必要である。
- ⑤ 船上CO₂回収（化学吸収法）の小型デモプラントによる実証試験が行われた。国内外で様々な検討が進められている。
- ⑥ 食料との競合がなく、既存のインフラ設備に対する親和性の高い第2世代バイオ燃料について、製造技術の研究開発や実証試験が進められている。ただし、船舶分野への供給量は不明瞭である。

2. 海技研におけるカーボンニュートラル技術の研究

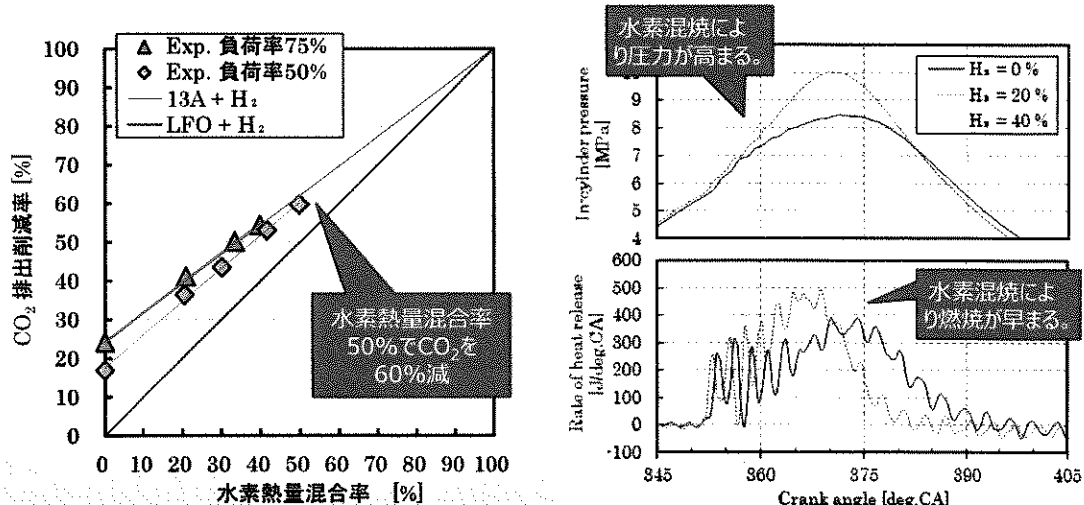
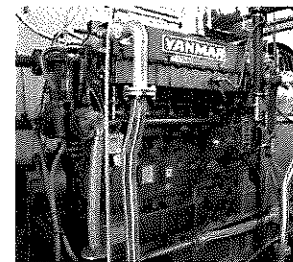
- 2030年頃に就航開始されるゼロエミッション船の「一番船」に海技研の技術を導入することを目指して、流体力学、代替燃料および海上物流の分野における研究を行っている。

GHG削減プロジェクトチーム（海技研）の研究課題

項目	技術課題	概要（目標）
1	低速運航船の開発	● 超低速船に関する流体評価技術の確立（推進・操縦・耐航性能に関する実験・CFD技術）
	高度空気潤滑技術（AdAM）	● 省エネ効果最大30%の空気潤滑システムの開発
	GHGゼロエミッション船のコンセプト	● 経済性を考慮した代替燃料使用のコンセプト船の提示
2	水素燃焼技術	● 適切な燃焼状態を保つための燃焼制御技術
	アンモニア燃焼技術	● 燃焼促進技術と未燃アンモニアの低減
	代替燃料利用技術（安全性）	● 代替燃料の船内貯蔵と安全設備，規則・基準整備の補助
	その他のGHG削減技術	● 燃料電池，船上CO ₂ 回収，バイオ燃料，合成燃料など
3	海上物流需要予測技術	● 既存の海上物流需要予測を発展させるための技術開発
	GHG総排出量推定ツール	● 輸送シミュレーションによるGHG排出量の計算
4	ビジネスモデル立案	● 国際海運ビジネス，国内海運業界ビジネスモデルの提案
	ゼロエミッション船の実現	● ゼロエミッション船の「一番船」に海技研の技術を導入

(1) 水素混焼ガスエンジン

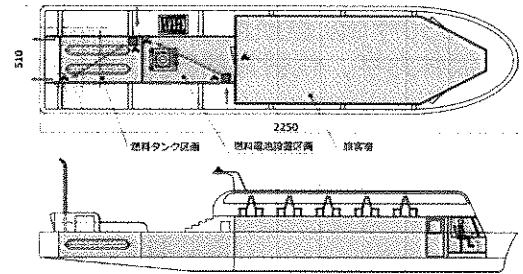
- 都市ガス13Aを主燃料とした400kWガスエンジンの給気に水素を混合した際のCO₂排出削減効果並びに燃焼特性を調べる試験を進めてきた。
- 最高燃焼圧力の増大，NO_x排出率の増大，ノッキングの発生を抑えるための燃焼抑制技術に関する研究を行い，それら技術の有用性を確認した。



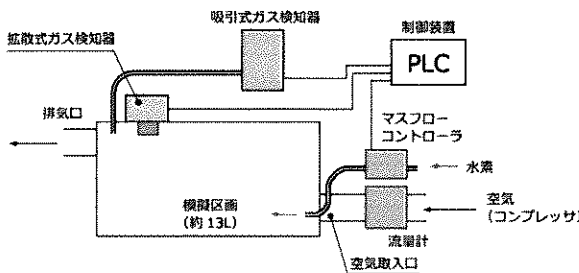
水素混焼ガスエンジンの試験結果例

(2) 水素燃料船の安全性

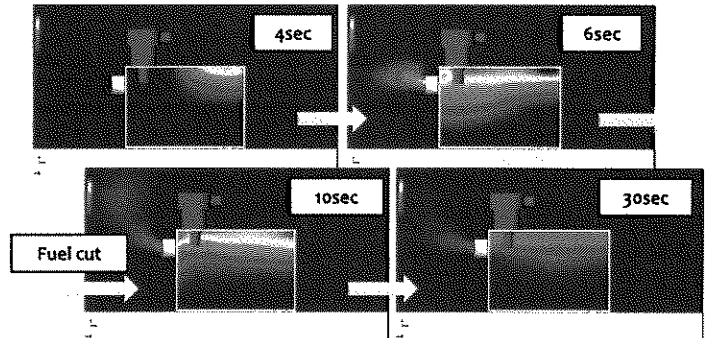
- ▶ 小型燃料電池船の水素関連機器と関連区画を模擬したモックアップを製作し、通風装置やガス検知器、自動遮断弁などの機能確認試験などを行った。
- ▶ CFDとの比較などを行いつつ、水素漏洩時の自動遮断（ESD）の有効性、隣接区画への水素の流入やその防止対策など、水素燃料船の安全性について検証した。



模型燃料電池船モックアップのイメージ



自動遮断（ESD）試験装置の構成



CFD計算結果の例

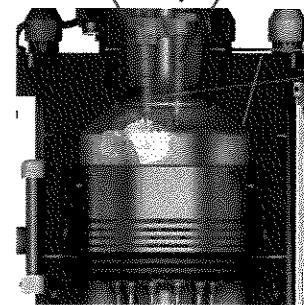


(3) アンモニアエンジン

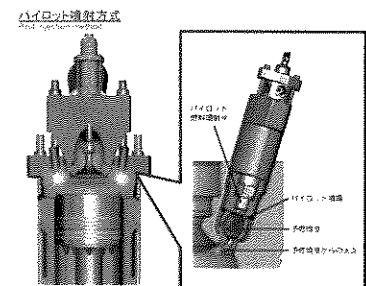
アンモニアエンジンの課題

- アンモニアの燃焼速度は遅く、着火温度や引火点が高いため燃えにくい。それを補うために石油系燃料のパイロット噴射が有効とされている。
 - 排ガス中に含まれる N_2O （温暖化係数が CO_2 の265倍）や未燃アンモニアの抑制が課題。
 - 現時点では、実スケールのアンモニアエンジンの開発事例が報告されていないため、燃焼方式を含めて、詳細な検討が難しい。
- ↓
- 海技研では、小型単気筒エンジンおよび中速ディーゼルエンジンを用いて、アンモニア混焼時の燃焼促進技術や N_2O 排出削減技術などの研究を進めている。

アンモニア燃料噴射弁 (60.0-70.0 MPaに昇圧) パイロット燃料弁



ME-LGI機関（直噴方式）(1)



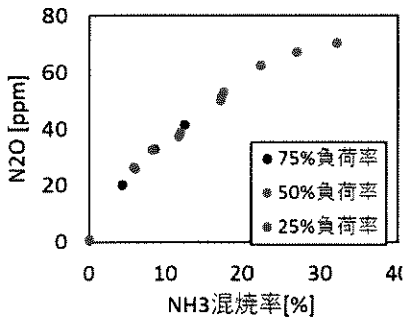
予混合燃焼方式ガス機関(2),(3)



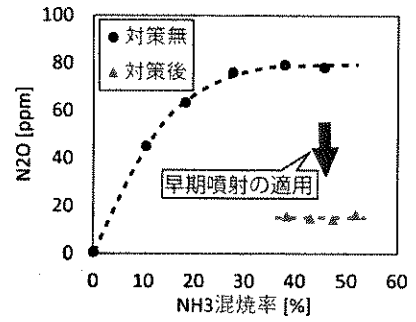
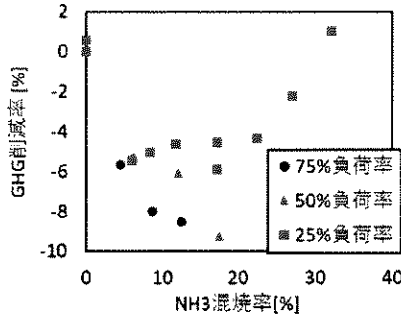
(1) 白井俊範（三井E&S）代替燃料と主機関について、日本船舶海洋工学会，東部支部ワークショップ，2021。
 (2) <https://www.mlit.go.jp/common/001127900.pdf>
 (3) <https://www.ihf.co.jp/du/topics/newarrival/newarrival154.html>

● 排ガス中に含まれるN₂Oの実態と対策

- 750kW船用4ストロークディーゼルエンジンおよび小型単気筒エンジンを用いてアンモニア混焼時のN₂O等の排ガス計測を行った。
- 既存のディーゼルエンジンの給気にアンモニアを供給した場合、数十ppmレベルのN₂Oが発生し、十分なGHG削減効果は得られないことが確認されている。
- 小型単気筒エンジンを用いた試験より、軽油を早期噴射して混合気を燃えやすい状況にしておくことにより、N₂Oを80%程度削減できることを確認している。



750kW船用4ストロークディーゼルエンジンによる
アンモニア混焼試験の結果 (海技研)



小型単気筒エンジンによる
アンモニア混焼試験結果 (海技研)

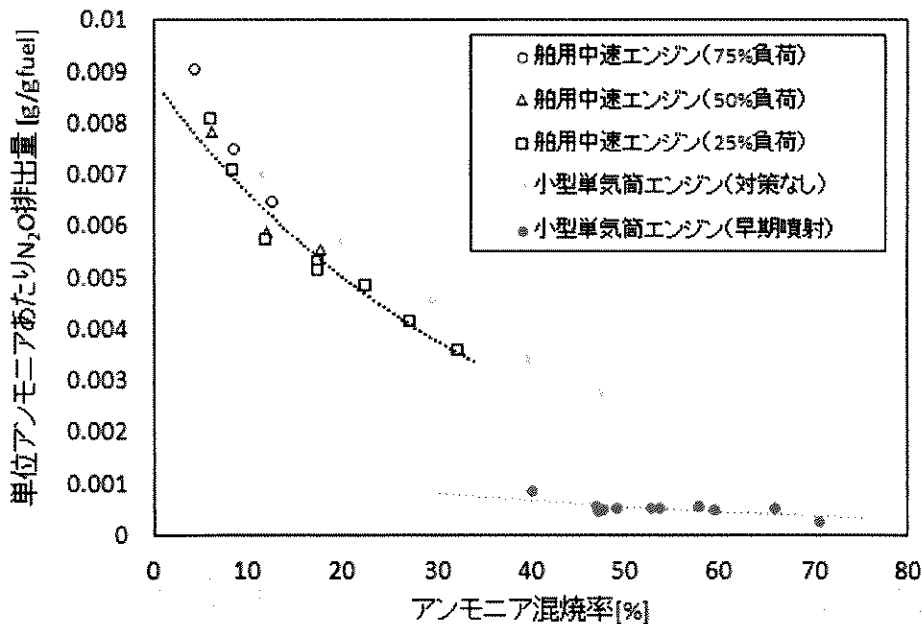


※ 国土交通省受託研究「アンモニア燃焼による排気ガス中の温室効果ガスに関する調査 (2020年度)」等で実施。



● 排ガス中に含まれるN₂Oの実態と対策

- アンモニア混焼エンジンの試験結果を整理し、単位アンモニアあたりのN₂O排出量を求めた。



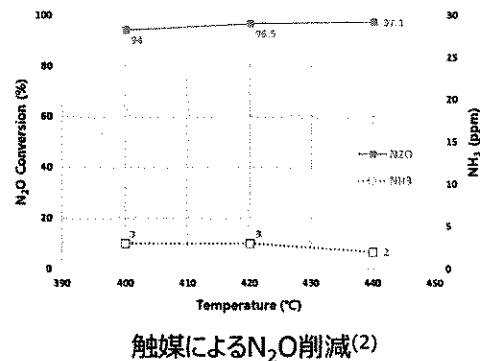
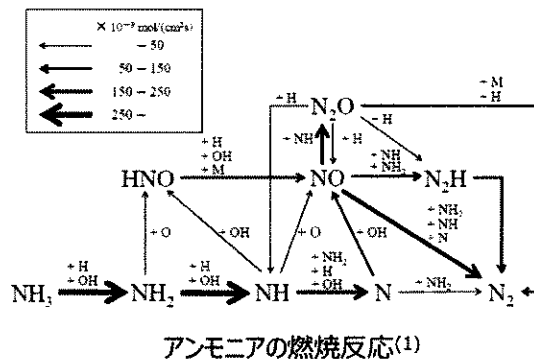
アンモニア混焼試験の結果 (海技研)

- ◆ N₂O排出量は、アンモニア混焼率の増加に伴い低下する。
- ◆ 燃焼改善の対策をしていない船用中速エンジンと小型単気筒エンジンのN₂O排出量は同程度である。
- ◆ 早期噴射による燃焼改善をした場合、N₂O排出量は0.0005g/gfuel程度である。



●排ガス中に含まれるN₂Oの実態と対策

- N₂O排出量は燃焼状態によって大きく異なる。例えば、軽油等の補助燃料を早期噴射することによって、アンモニア噴射の前に燃えやすい混合気を生成できるため、燃焼が促進され、N₂O排出を削減できる可能性が高い。
- アンモニア燃焼におけるN₂Oは、火炎帯に高濃度で存在するNOから生成されると考えられる（下左図）。生成したN₂Oを速やかに還元するためには、燃焼ガス温度を高温に維持することが効果的であると考えられる。
- 各触媒メーカーは、N₂O削減触媒の開発を進めている。アンモニアエンジン排ガスへの効果は不明であるが、このような後処理技術も有望である。

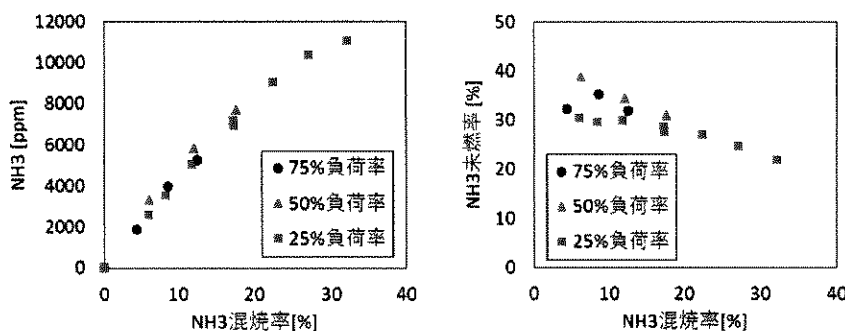


(1) A. Hayakawa, Mechanical Engineering Journal, Vol.2, No.1,(2015).
 (2) ACR社ホームページ, <https://www.acr-ltd.jp/product/n2o/>など。

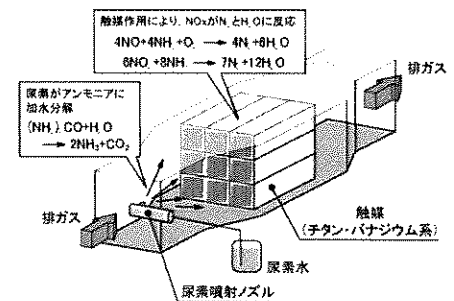


●未燃アンモニアの実態と対策

- 750kW船用4ストロークエンジンによるアンモニア混焼試験において、未燃アンモニアは、アンモニア混焼率の上昇に伴い増加し、アンモニア未燃率は20～30%に達している。
- 未燃アンモニアは、燃焼室内で比較的低温の部分において未燃のまま排出されるものと、給・排気バルブのオーバーラップ期間に給気トランクから供給されたアンモニアがそのまま排気側に流れる吹き抜けが考えられる。これらの対応策としては、燃焼室形状の最適設計やアンモニア噴射時期の最適化などが考えられる。
- 未燃アンモニアと排ガス中のNOxとを反応させるNOx還元触媒（SCR）の利用も考えられる。なお、SCR使用時にN₂Oが生成される事例の報告があるので注意が必要である。

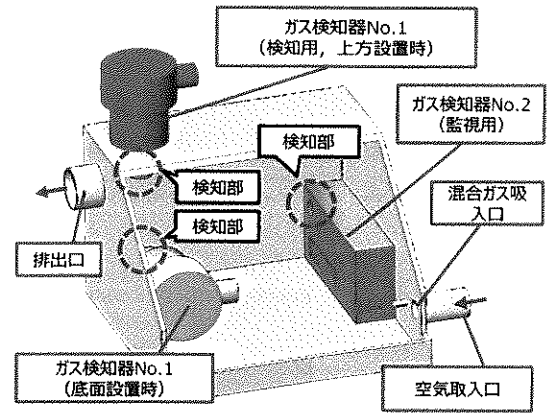
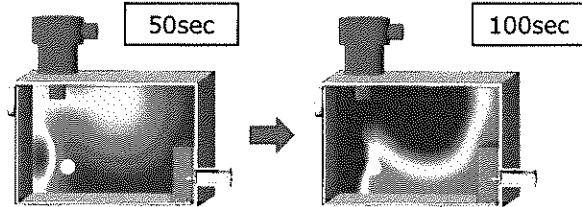


750kW船用4ストロークディーゼルエンジンによる
アンモニア混焼試験の結果（海技研）

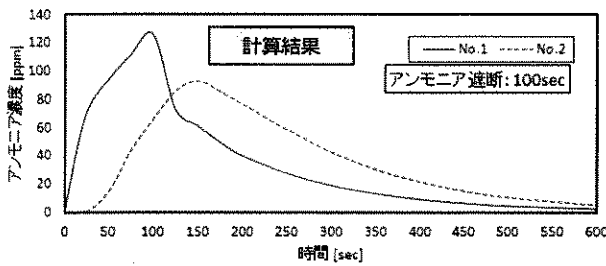


(4) アンモニア燃料船の安全性

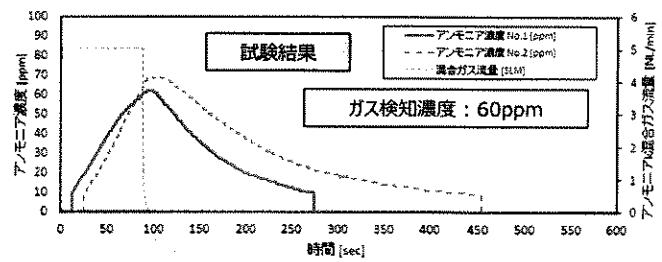
- ▶ 水素漏洩試験と同様，アンモニア関連機器と関連区画を模擬したモックアップを製作し，通風装置やガス検知器、自動遮断弁などの機能確認試験などを行った。
- ▶ CFDとの比較などを行いつつ，アンモニア漏洩時の自動遮断の有効性や課題を検討した。



アンモニア自動遮断試験に用いた模擬区画
(低濃度アンモニア混合ガス)



CFD計算結果の一例

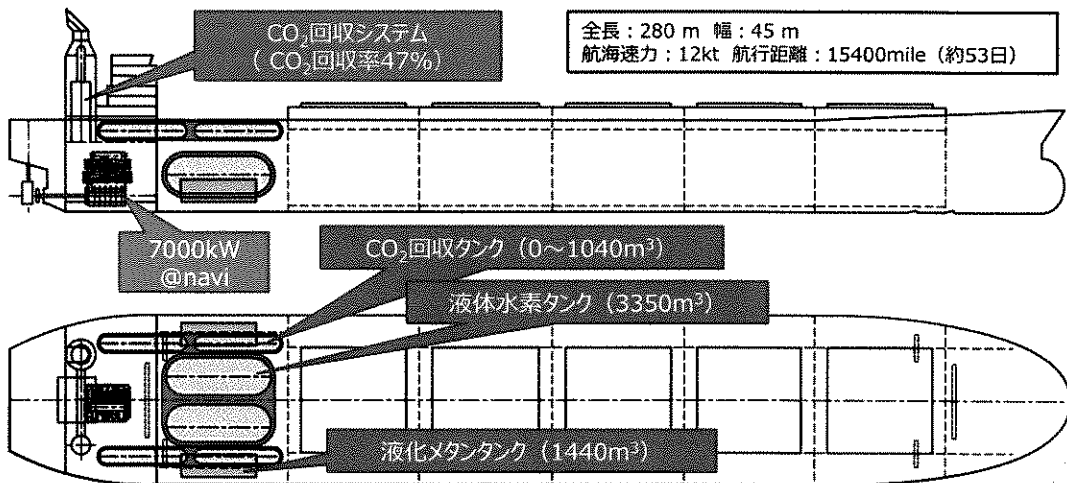


試験結果の一例



(5) 水素混焼エンジン+CO₂回収システム

- ▶ 水素混焼エンジンとCO₂回収システムを組み合わせたコンセプト船を紹介する。
- ▶ 50%水素混焼の合成燃料（メタン）エンジンを使用する。
- ▶ 抵抗低減技術等によりCO₂を20%削減し，さらに20%の減速航行を行う。
- ▶ 連続航続距離を30%短くする。

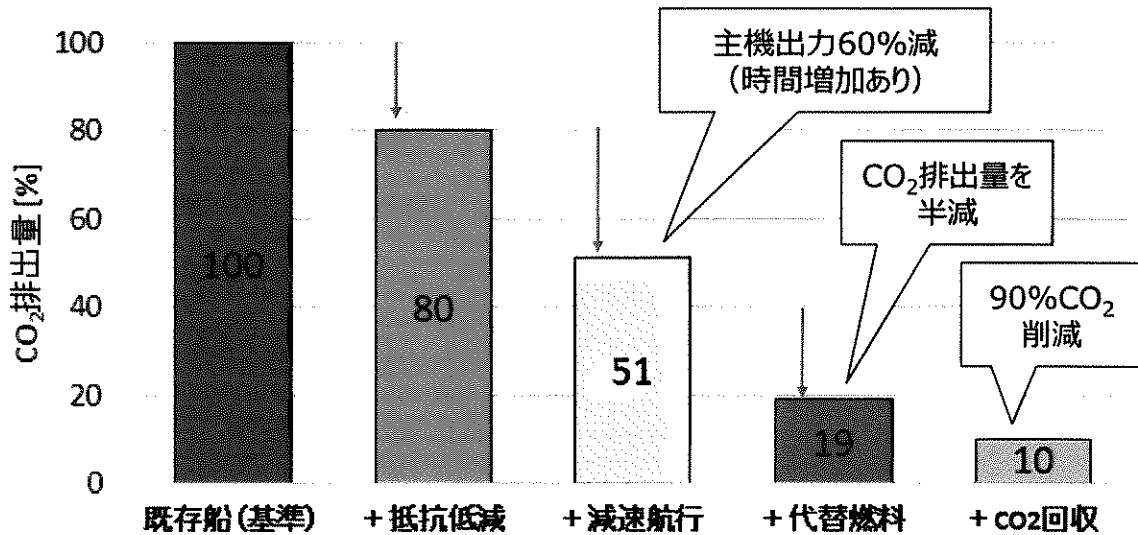


ゼロエミッション船 (80~90%GHG削減)



(5) 水素混焼エンジン + CO₂回収システム

- 抵抗低減技術や減速航行により、エンジン出力（主機）は約60%削減する。
- 代替燃料は容積あたりのエネルギー密度が小さいため、タンク容量が増加する。連続航続距離を30%短くして全タンク容量を小さくする。

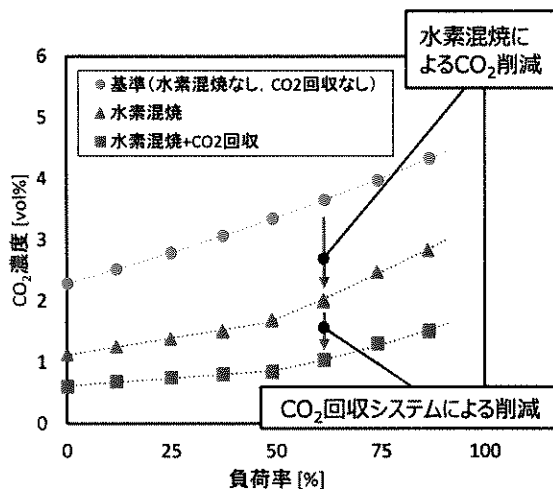
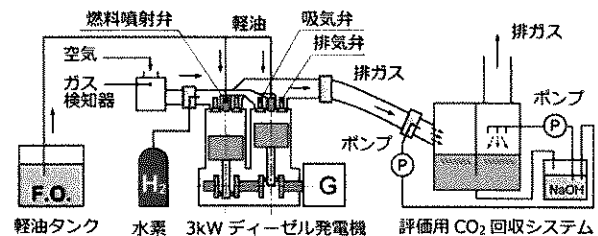


ゼロエミッション船のCO₂排出削減（主機）

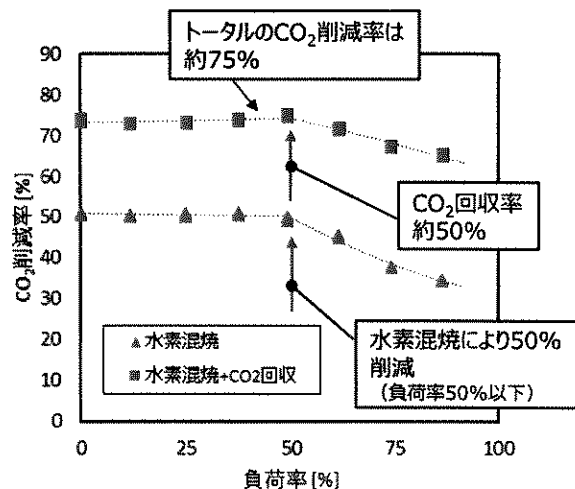


(5) 水素混焼エンジン + CO₂回収システム

- 上記コンセプトを検証するため、水素混焼エンジンとCO₂回収システムを組み合わせた模型レベルのシステム実証試験を行った。



水素混焼 + CO₂回収時の排ガス中CO₂濃度の試験結果



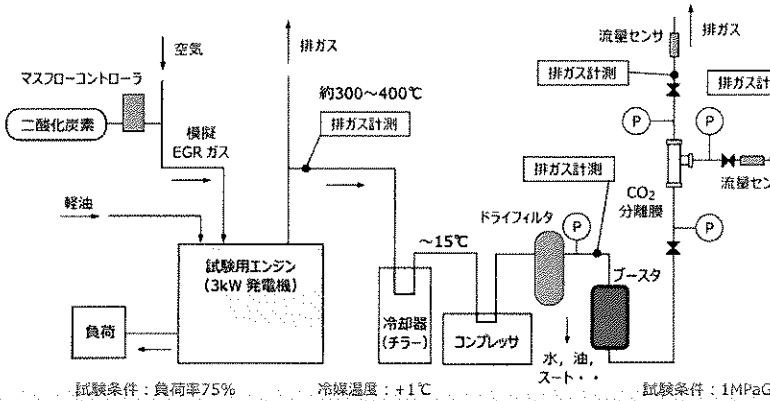
水素混焼 + CO₂回収時のCO₂削減率



(6) CO₂分離膜の船舶適用性

- 小型ディーゼルエンジン発電機の排ガスを分流し、CO₂分離膜の試験を行った。
- 最高50%程度のCO₂削減率が得られ、分離側ガス中のCO₂濃度は最高70vol%程度まで高まることを確認した。
- ドライ状態で高濃度のCO₂を分離できるといった特徴を活かした船上CO₂回収システムの提案ができる。
- CO₂分離膜を船舶に搭載する際の課題としては、排ガス圧力を高める手段、排ガス中の水分等を除去する手段の検討がある。

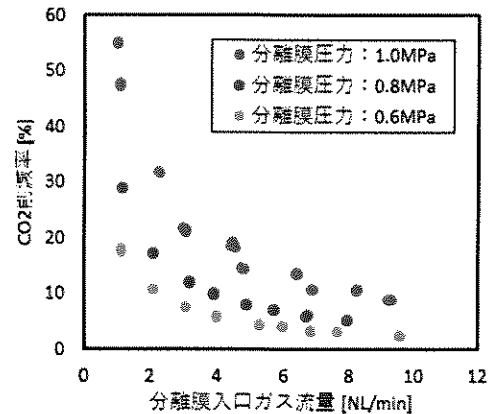
ディーゼルエンジン排ガスから回収したドライアイス



試験条件：負荷率75% 冷媒温度：+1℃ 試験条件：1MPaG

CO₂分離膜試験装置の基本構成

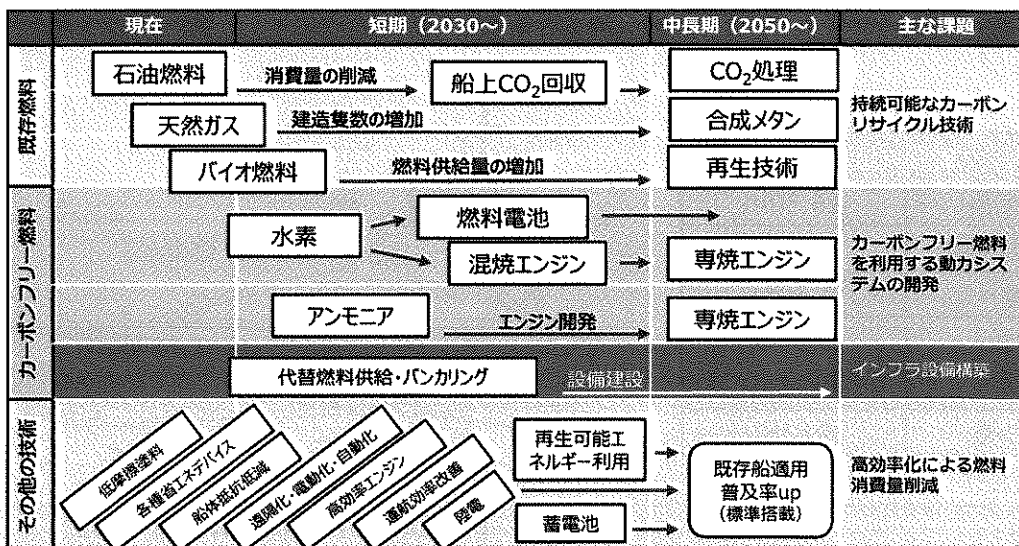
(海技研, 日本ガイシ, 第一中央汽船, 新来島とっくによる共同研究, 2021年)



CO₂削減率の試験結果の一例

(7) カーボンニュートラル技術研究のまとめ

- ① カーボンニュートラル実現に向けて、水素やアンモニアなどのカーボンフリー燃料の利用技術並びに安全性に関する研究を進めている。
- ② カーボンニュートラル実現のためには、ゼロエミッション船へのスムーズな移行とともに、既存船の省エネ対策の導入・普及が重要である。実効性が高く、実装が容易な技術を含めて、海運分野に貢献する研究を進めていく。



4. 海技研における自動運航船の研究

- 特に内航海運においては、船員の不足と高齢化の問題が深刻化しており、船員の安定的・効果的な確保のため船員の労働環境を改善する必要がある。
- 海技研では、船員労働負荷低減や操船作業の省力化を目指して、運航支援システムや自動化システムの研究開発を進めてきた。
- 以下、当所が進めている小型実験船「神峰」による自動運航船の研究を紹介する。

運航支援船

船上の操船者が常に監視し、操作の最終判断をする。

一部の機能を自動化することによって、操船者の負担を低減する。

遠隔操船

陸上の遠隔操船者の判断に基づき運航する。

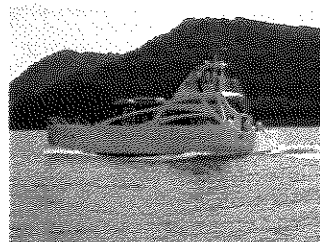
自動運航船

原則として、機械が操船の判断をする。



(1) 小型実験船「神峰」について

- 2014年建造の「神峰」は、離島航路のシームレス船システムの社会実験、リチウムイオン電池・水素燃料電池の安全性確認試験、船員負荷低減のための支援システムや自動運航システムの実船試験に用いてきた小型実験船である。

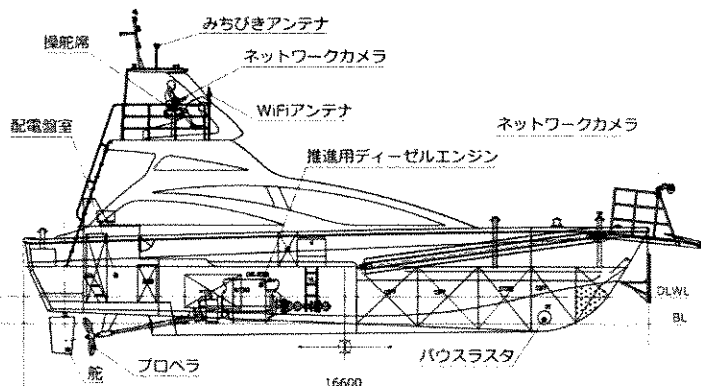


離島地域交通の社会実験（2014）



燃料電池安全性試験（2017）

主要寸法	
長さ（全長）	16.50m
長さ（垂線間）	14.90m
幅	4.60m
深さ	1.50m
喫水	0.75m
総トン数	約17トン

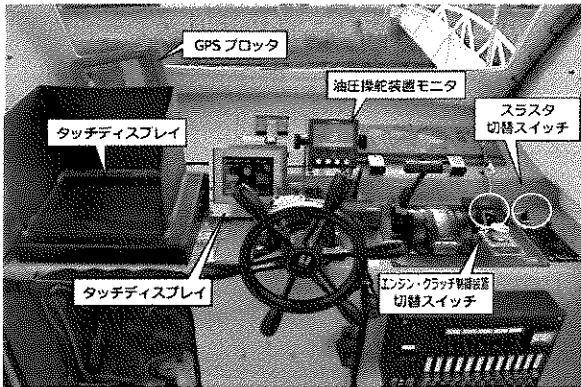


小型実験船「神峰」の全体配置（2021）

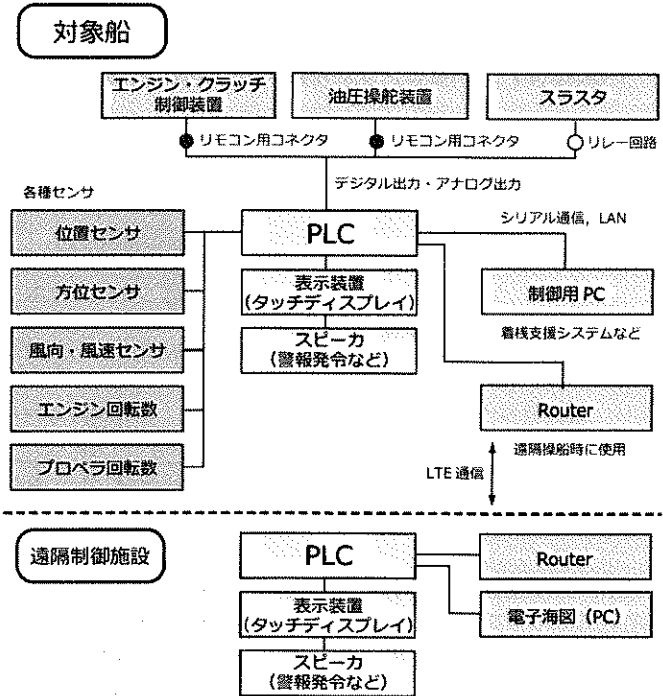


● 小型実験船「神峰」の運航支援・自動運航システム

- エンジン・クラッチ，操舵装置，スラストの動作をPLCによって制御できる（PLC操船）。
- 手動スイッチによって，PLC操船と通常の手動操船を切り替えることができる。



小型実験船「神峰」の操舵席

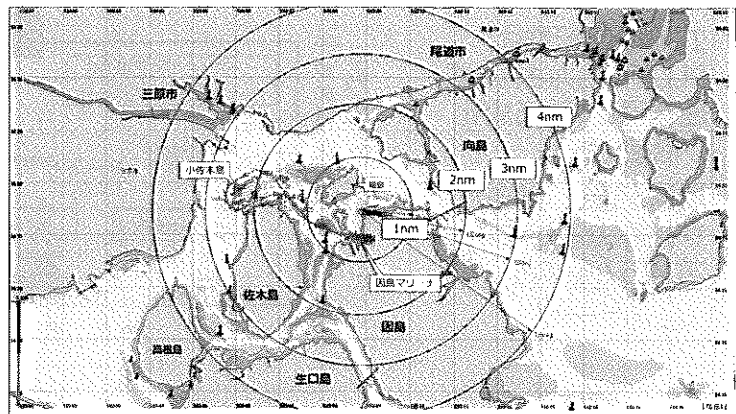


システム基本構成（2021）



(2) 自動化システムの機能確認試験

- それぞれの自動化システムについての安全要件（開発目標）を整理し，試験方案を準備した。
- 2021年4月，因島周辺海域（広島県）において，各自動化システムの機能を確認するための実船試験を実施した。



本船の試験海域（広島県因島周辺）

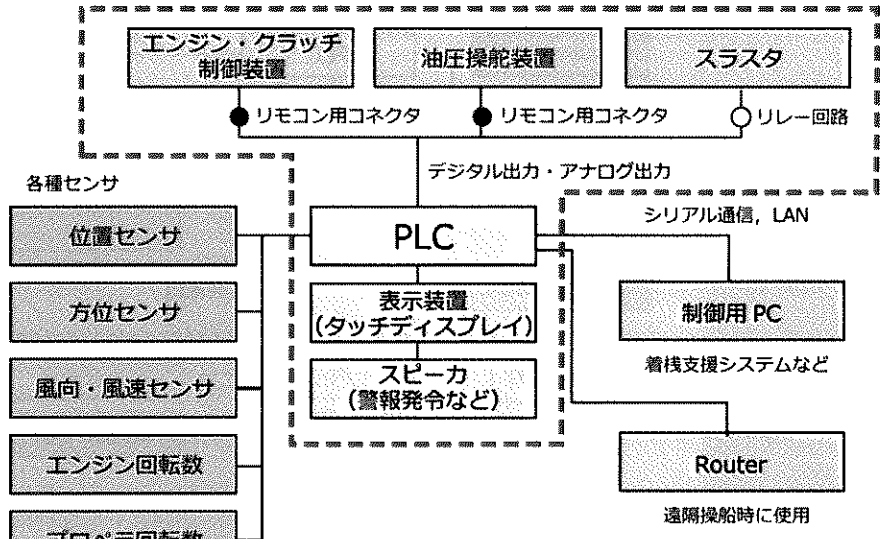
本船に設置した制御システムの構成

No.	自動化システム	概要
1	操船基本システム	PLCによって，エンジン・操舵機等の動作を制御する基本システム
2	自動着積システム	PLCに接続した制御用PCによって着積操船の自動化を実行するシステム
3	ウェイポイント運航システム	あらかじめ設定したウェイポイントを目標進路として舵角を自動制御するシステム
4	遠隔操船システム	遠隔制御施設とをLTE通信によって接続し，遠隔操船するシステム

(3) 操船基本システム

- エンジン・クラッチ，操舵装置，スラストの動作をPLCによって制御する。
- PLCには，各種センサや制御用PCなどが接続される。

操船基本システムの機能と試験



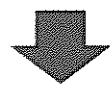
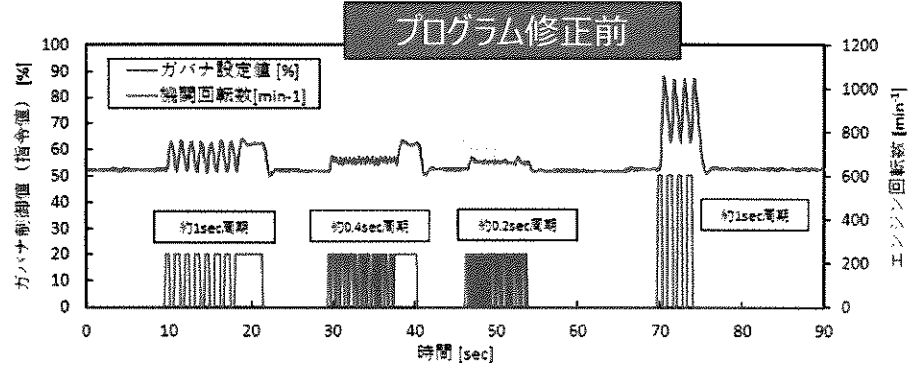
- 制御モードの切り替え
- 制御結果の把握
- 警報機能
- 急発進防止
- 船内機器の保護
- 非常停止機能

※ PLC : Programmable Logic Controller
操船基本システムのハードウェア構成

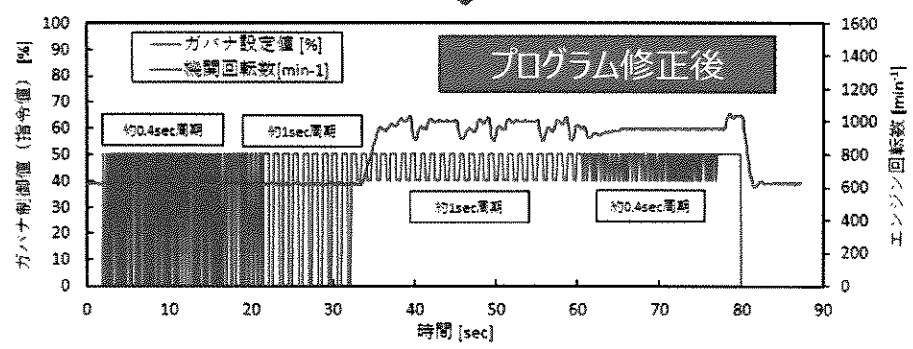


● エンジン回転数の過度な変動防止

- エンジン回転数は，PLCから出力される電圧信号に対する変化が機敏である。
- 増速が遅く，減速がやや速くなるようにPLCプログラムを修正した。



- 指令値に過度な変動があった場合でもエンジン回転数の変動を小さくしている。



● 操船基本システムの試験結果（一部抜粋）

箇条	安全要件	試験方案・判定基準	試験日時および結果	合否
5.2 (1)	PLC操船への切り替えと解除	決められた方法により円滑に切り替わる（付録B1参照）。	2021/4/19確認	○
5.2 (2)	PLC操船から手動操船への切り替え	b) PLC操船による運転中，手動操船への切り替え動作を行う。	2021/4/19確認	○
5.2 (4)	可視可聴警報	c) 操船基本システムの機能喪失が判断され，可視可聴警報が発令される。	未対応 現状，機能喪失を判断する機能がない。	×
5.3 (1)	急発進防止機能	a) PLC操船のクラッチをF（フォワード）にしているとき，手動操船からPLC操船に切り替わらない。	2021/4/20確認 PLC操船に切り替える際，強制的にニュートラルとする制御がかかる。	○
5.3 (3)	船内機器の保護	外部に接続したPCの模擬信号によって，ガバナ制御がハンチングしないことを確認する。	2021/4/21 am10:35頃実施。 PLCプログラムの修正により対応した。	○
5.3 (3)	船内機器の保護	外部に接続したPCの模擬信号によって，クラッチがハンチングしないことを確認する。	未対応 （機器破損の可能性があるため，試験を実施していない。）	×

➡ 28の試験項目中，○=21，×=5，その他（未実施など）=2であった。

※ その他，急旋回防止機能，クラッチ・スラストのハンチング防止などが×であった。



(4) 自動着棧システム

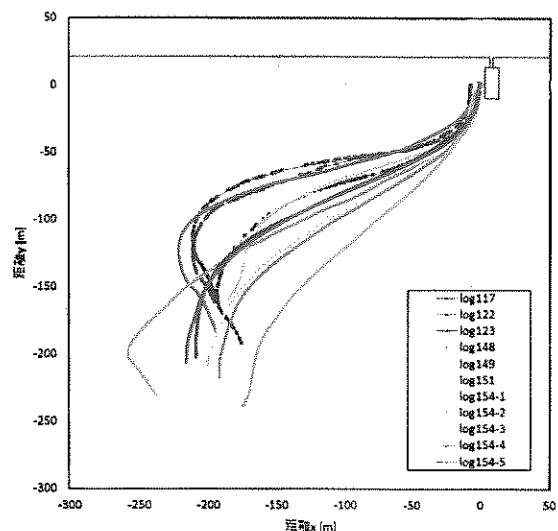
- ◆ 2019年度より進めてきた小型実験船向けの自動着棧システムを更新し，機能確認試験を実施した。
- ◆ 基本動作機能の他，センサの安全性，PC-PLC間通信の安全性などを行った。
- ◆ 風外乱をキャンセルするフィードフォワード制御の導入などによって，8～10m/s程度の強風時においても比較的安定した自動着棧ができることを確認した。
- ◆ 安全な自動着棧を行うための制御・リアルタイム監視画面を開発した。



小型実験船による実証試験



安全な自動着棧を行うための制御・リアルタイム監視画面



機能確認試験時の航跡例



●自動着棧システムの試験結果（一部抜粋）

箇条	安全要件	試験方案・判定基準	試験日時および結果	合否
6.2 (1)	自動着棧システムへの切り替えと解除	決められた方法により円滑に切り替わることを確認する。	2021/4/19確認 ただし、扱いやすい切り替え手順については要検討。	○
6.3 (1)	位置センサの健全性常時監視	GNSS（みちびき）のほか、陸上に設置した距離センサの監視機能により健全性を監視できる。	未対応（陸上設置の距離センサを準備中）	×
6.3 (1)	方位センサの健全性常時監視	GPSコンパスのほか、GNSS（みちびき）の方位監視機能により健全性を監視できる。	2種類の方位センサの確認をできる。 ただし、異常を判断する機能はない。	△
6.4	通信遮断時のシステム制御停止	故意に通信遮断をして、一定時間、通信が途絶えた場合に非常停止機能を作動させる。	2021/4/20 pm4:55頃実施。 10sec（設定可）の通信遮断時、非常停止機能が作動する。	○
6.7 (1)	リアルタイム確認手段	計画経路と実際の航路との相違をモニタ表示によって確認できる。	2021/4/19確認	○
6.7 (2)	停船判断支援機能	現状、操船者が着棧中止の判断をするための機能はない。	未対応（今後の課題とする。）	×

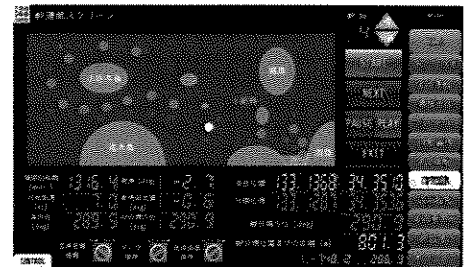
➡ 27の試験項目中、○=16、×=8、その他（未実施など）=3であった。

※ その他、制御システムのノイズ対策、通信経路の二重化、座礁防止対策などが×であった。

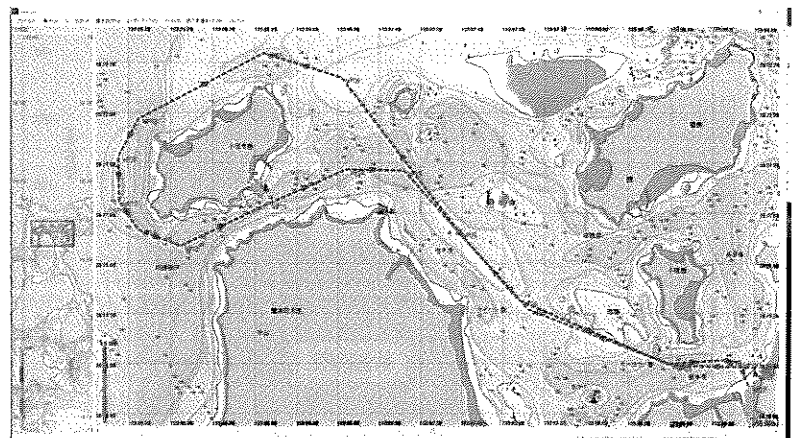
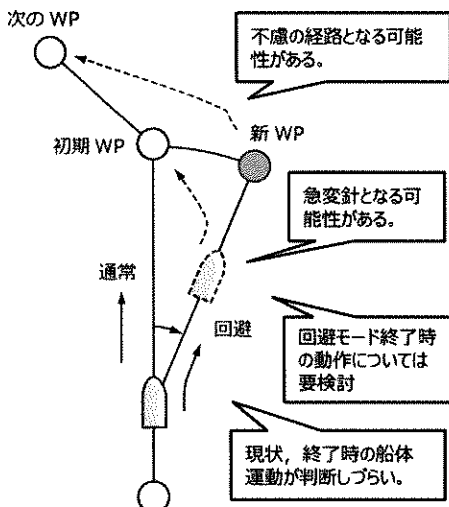


(5) ウェイポイント運航システム

- ◆ あらかじめ設定したウェイポイント（WP）を通過する自動操舵制御であり、遠隔操船時においても使用する。
- ◆ WP運航中、一時的に進路を変更する機能（回避モード）を設けている。



WP運航監視画面



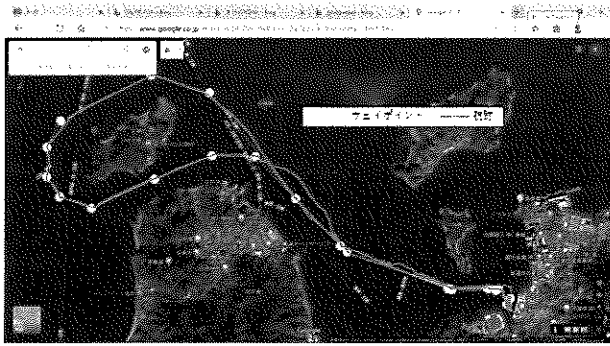
ウェイポイント運航時の回避モード

ウェイポイント運航試験時の計画航路

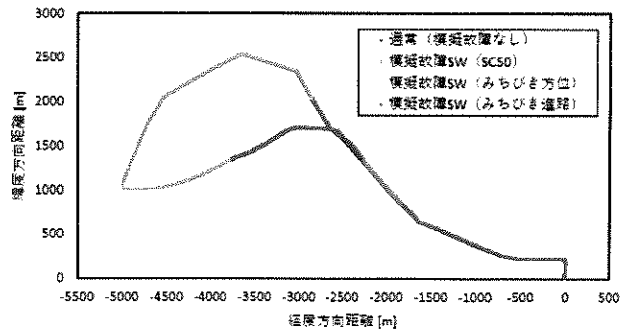


●ウェイポイント運航システムの試験結果

◆ オートパイロット機能や回避モードの機能確認や各種センサの模擬故障試験を実施した。



ウェイポイント運航試験時の航跡



模擬故障試験 (センサ切り替え)

箇条	安全要件	試験方案・判定基準	試験日時および結果	合否
7.4 (2)	変針動作	変針点に到達したことを認識し、自動的に変針する。(オプション画面の操作が必要)	2021/4/19確認。 画面操作により、自動変針が適切に機能すること確認した。	○
7.5 (1)	回避手段	a) 模擬的な回避試験を行い、設定した進路変更が適切に機能することを確認する。	2021/4/19 pm2:30頃実施。	○

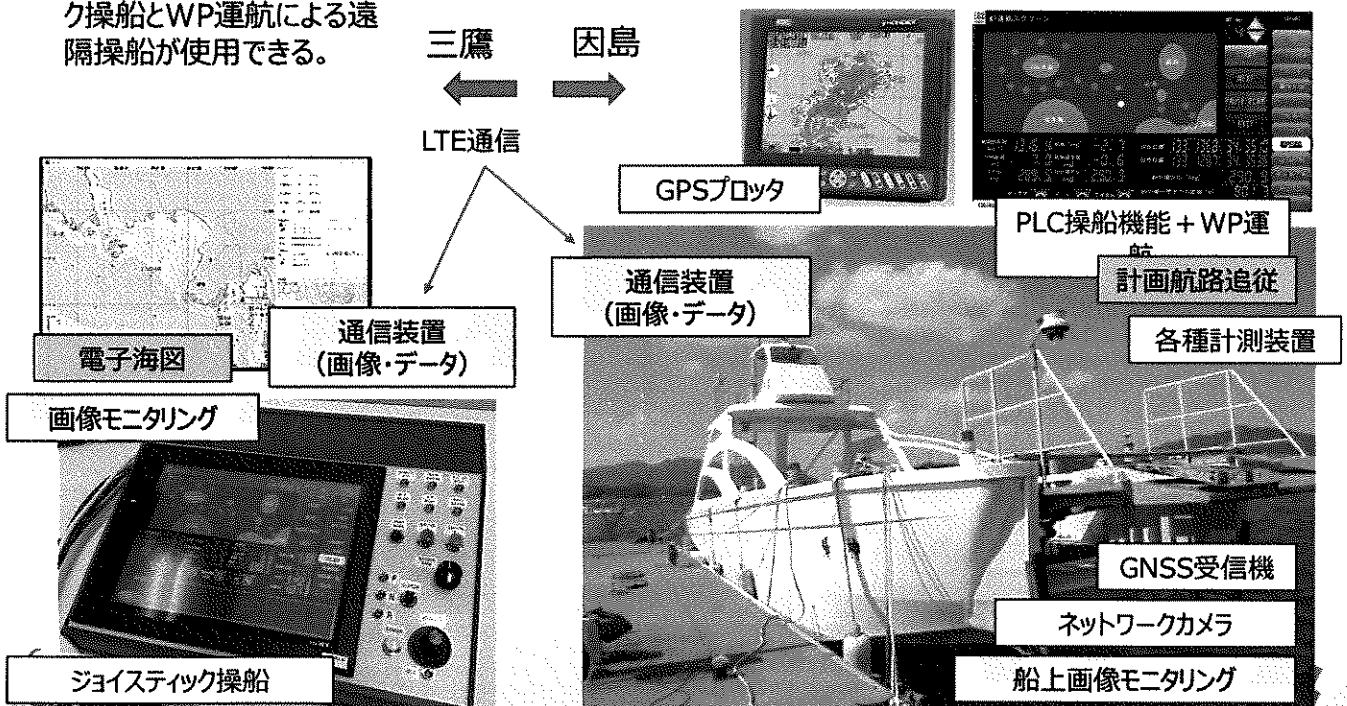
➡ 23の試験項目中、○=13, ×=7, その他 (未実施など) =3であった。

※ その他、計画経路への復帰手段や誤操作防止対策などが×であった。

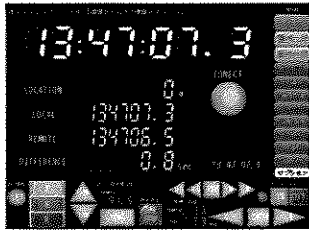


(6) 遠隔操船システム

- ◆ 対象船と遠隔制御施設とをLTE通信によって接続し、遠隔制御施設における操作によって対象船を運航する。
- ◆ 制御盤によるジョイスティック操船とWP運航による遠隔操船が使用できる。



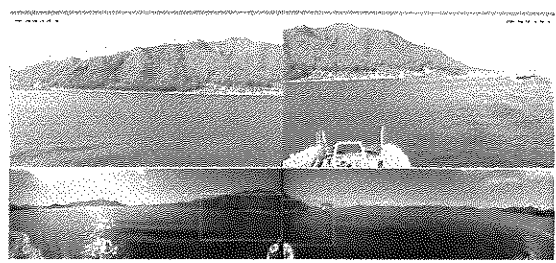
● 遠隔操船システムの試験結果



通信遅れ時間の確認画面



遠隔操船試験の様子



遠隔操船施設におけるカメラ映像の例

箇条	安全要件	試験方案・判定基準	試験日時および結果	合否
8.3 (1)	通信遅れ	故意に通信遮断を生じさせて、一定時間、通信が途絶えたことを判断し、可視可聴警報を発令する。	2021/4/22-23確認	△
8.3 (1)	通信経路の二重化	試験艇であり、通信経路の二重化などの対応はしていない。	未実施	×
8.4 (3)	周囲情報の把握	周辺海域の映像を配信する。映像から他船の有無や状態を判断できる。	2021/4/22確認 ただし、映像による判断の可否については要確認である。	○

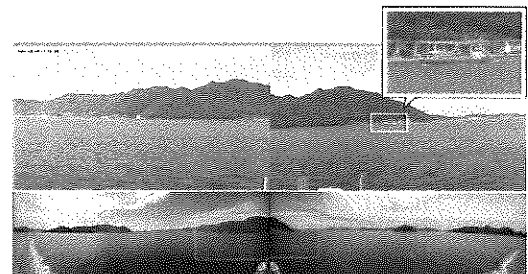
➡ 35の試験項目中、○=24、×=6、その他（未実施など）=5であった。

※ その他、遠隔制御施設（陸上）からの機能切り替え機能などが×であった。



(7) 遠隔操船試験

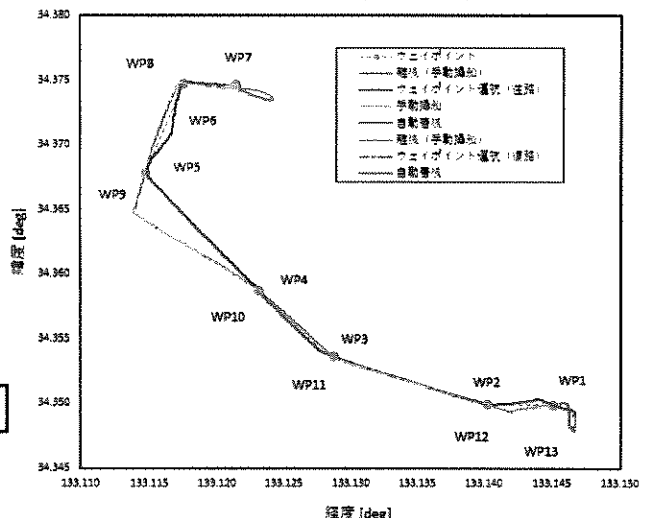
- ◆ 計画・停泊・離棧・航行・着棧に至るシナリオを作成し、陸上の操船者による周囲安全確認や変針・モード切替の判断の可否を確認した。
- ◆ 遠隔操船試験は、片道20分程度（離着棧を除く）を往復する計画航路とした。



他船回避 (WP No.5)



遠隔操船試験の計画経路



遠隔操船試験の航跡



● 遠隔操船試験の結果（一部抜粋）

簡条	安全要件	試験方案・判定基準	試験日時および結果	合否
8.5 (1)	計画時	船長（陸上）が航海計画を作成または修正し、船上に送信する。	陸上でウェイポイント（緯度・経度）を修正できることを確認した。	○
8.5 (3)	離棧時	船長（陸上）が離棧作業の開始判断をする。	現状では判断が難しい。（実際には、船上で係船ロープの状態、係船作業者の乗船、風向・風速などを確認して離棧している。）	△
8.5 (4)	航行時	ウェイポイント運航システムを利用し、遠隔制御施設における操作に支障がないことを確認する。	ウェイポイント運航システムの動作には問題ない。	○
8.5 (4)	航行時	陸上操船者が、回避モード（7.5節参照）によって避航する。	回避モードの機能を確認した。	○
8.5 (4)	航行時	陸上から各システム（位置センサ異常）を監視する。	複数のセンサの計測値を確認できるが、異常の判断はできない。	△
8.5 (4)	航行時	次のフェーズ（自動着棧）への移行の判断をする。本船が適切な自動着棧システム開始位置であることを確認する。	船長（陸上）は、自動着棧システム開始位置であることを確認できる。	○
8.5 (5)	着棧時	自動着棧システムの遠隔制御施設における操作に支障がないことを確認する。	自動着棧システムの動作には問題ない。ただし、操作手順は要検討である。	△
8.5 (5)	着棧時	船長（陸上）が着棧作業の終了を判断する。	映像で確認できる。（係船ロープの状態を確認して着棧終了と判断する。）	○

➡ 20の試験項目中、○=9、×=3、その他（未実施など）=8であった。

※ その他、エンジンの遠隔監視機能や他船の情報把握（他船の進路）などが×であった。



(8) 自動運航技術によるGHG削減の検討

(a) ウェイポイント運航・遠隔操船システム

- あらかじめ設定したウェイポイント（WP）に合わせて、オートパイロット運転を行う。
- 既存技術だけで対応でき、推進・操舵の制御系と位置センサ（GNSS）を除き、新たに必要となるハードウェアはない。

※安全性の確保（事故時の責任）等の観点から、実船試験において、WP変更の判断は船員が行うシステムとしている。

➡ ウェイポイント運航や遠隔操船は、船員負担を上げずに、定時運航をしやすくなり、GHG削減に貢献する？

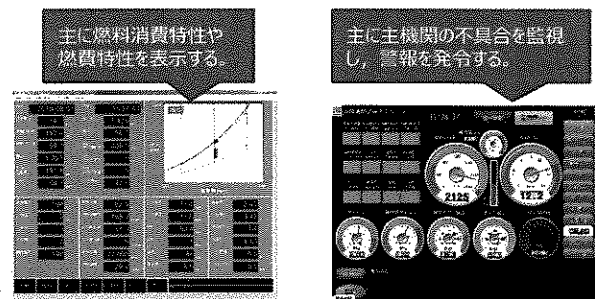


ウェイポイント運航のイメージ

(b) 遠隔監視・陸上サポートシステム

- GHG削減や運航効率改善の「見える化」システムの開発を進めている（Eco監視）。
- 運航の安全、船員の負担低減のための船内機器の遠隔監視機能と陸上サポート機能を検討している。

➡ 機器の故障を未然に防ぐ陸上サポートによって、欠航率を低減でき、トータルのGHG削減に貢献する？



ECOモニターの本画面

機関部遠隔監視画面（小型船舶向け）のイメージ



(9) 自動運航船研究のまとめ

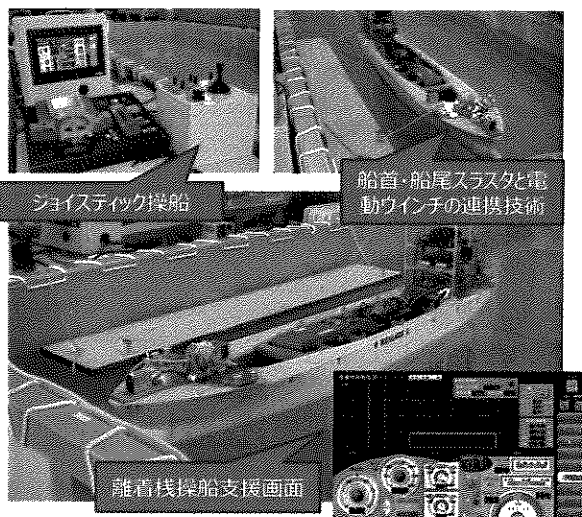
- ① 小型実験船「神峰」による各自動化システムの機能確認試験を実施し、開発課題を抽出するとともに対策を施している。現在、他船検知、避航操船、遠隔機関監視システムなどの研究を進めており、運航支援・自動運航の高度化を目指している。
- ② 小型実験船による実船試験以外にも、シミュレータや模型船を用いた自動運航船の研究開発を進めている。

自動運航船開発のためのシミュレータの活用

- a. 自動離着システム
- b. Full自動運航システム
- c. 電子海図
- d. 機関遠隔監視システム
- e. 他船検知・回避モード



自動運航船の研究開発に用いている簡易シミュレータ



模型船による自動化システムの研究開発



5. まとめ

➤ カーボンニュートラル実現への取り組みと課題、今後の検討事項をまとめる。

- ① 様々なGHG削減技術の選択肢があり、技術開発と実装に取り組むことで、短期のGHG削減と中長期のカーボンニュートラルを実現する必要がある。
- ② CO₂削減技術は、新造船だけでなく既存船にも適用し、普及させることが重要である。
- ③ 石油燃料や天然ガス、バイオ燃料などの燃焼時にCO₂を発生する燃料を利用する場合、持続可能なカーボンリサイクル技術の開発が必要不可欠である。

➤ 自動運航船への取り組みと課題、今後の検討事項をまとめる。

- ① 小型実験船「神峰」によって、様々な自動化システムの機能確認試験を実施し、開発課題を抽出した。
- ② 今後、これらの課題の対策を施し、運航支援・自動運航の高度化を図る。

