

船舶分野における地球温室効果 ガス(GHG)排出削減技術

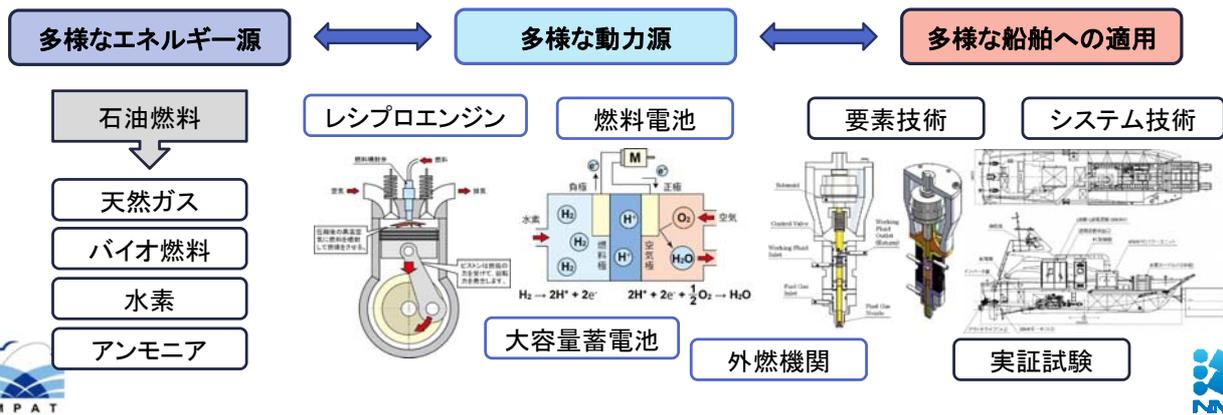
(国研)海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所 環境・動力系
平田 宏一

講演内容

1. はじめに
2. 低・脱炭素燃料の種類と特徴
3. 水素エネルギー利用技術に関する研究
4. その他のGHG削減技術
5. GHG削減技術導入の課題
6. まとめ

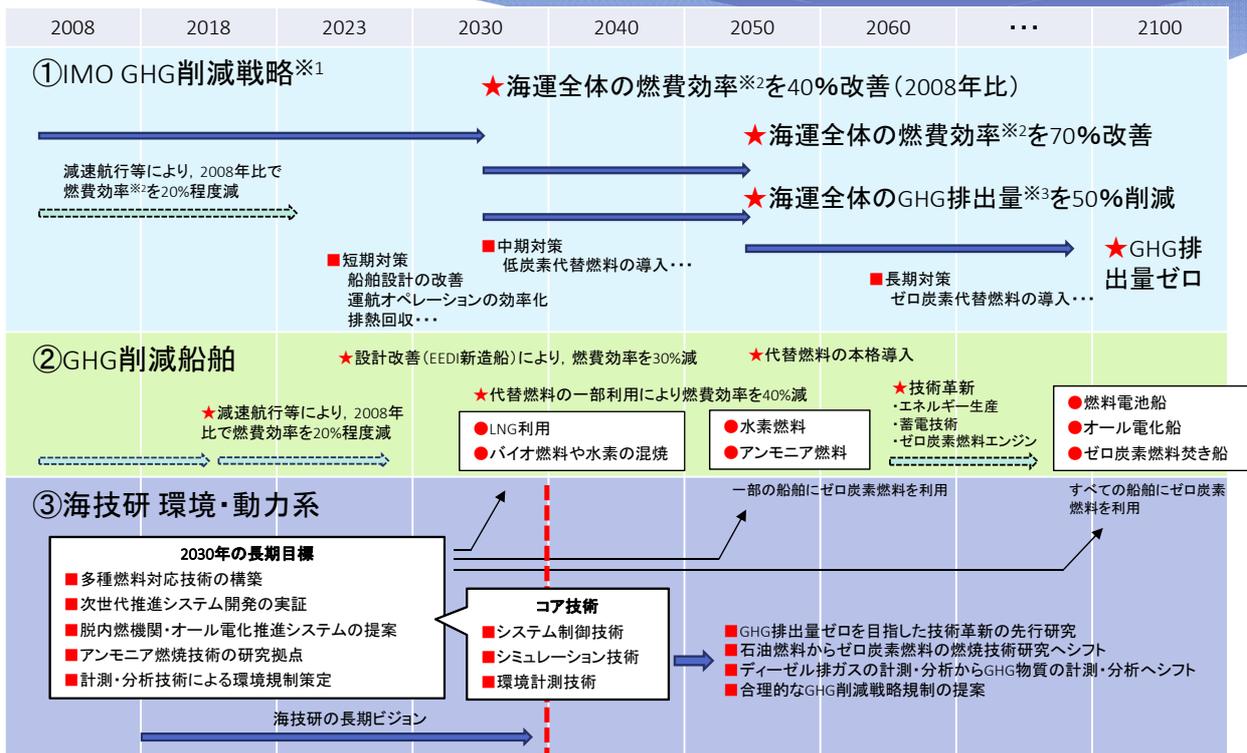
1. はじめに

- ◆ 低・脱炭素燃料を適用することにより、船舶分野において、大幅なGHG排出削減が可能になる可能性がある。
- ◆ 低・脱炭素燃料に対応する船舶エネルギー技術について、様々な研究を進めている。



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

IMO GHG削減戦略と海技研の長期ビジョン



※1 IMO第72回海洋環境保護委員会(2018/4/9~13)において、国際海運の温室効果ガス(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(未定義、議論中)。

※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。燃費効率70%削減と同等程度か？

2. 低・脱炭素燃料の種類と特徴

➤ 低・脱炭素燃料として、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、天然ガス、蓄電池、自然エネルギーなどがある。

種類	バイオ燃料	水素	アンモニア	天然ガス	蓄電池	自然エネルギー	原子力
特徴・概要	●バイオディーゼルなどの液体燃料のほか、気体燃料や固体燃料もある。 ●再生可能なカーボンフリー燃料である。	●使用時に二酸化炭素を排出しない。 ●燃焼速度が速い。	●使用時に二酸化炭素を排出しない。	●石油燃料と比べて、25%程度のCO ₂ 削減が可能である。 ●陸上および船舶の一部で既に実用・普及している。	●使用時に有害物質を排出しない。 ●重量あたりのエネルギー密度が小さい。	●太陽エネルギーや風力エネルギーを利用できる。	●発生する熱エネルギーにより、蒸気タービンなどの熱機関を運転できる。 ●二酸化炭素を排出しない。
メリット	●液体バイオ燃料は石油代替燃料として扱いやすい。	●燃料電池などで高効率発電ができる。	●水素と比べて、貯蔵がしやすい。	●技術的ハードルが低い。	●電気エネルギーとして扱いやすい。	●あらゆる有害物質を排出しない。	●重量・容積に対するエネルギーが大きい。
デメリット	●供給量 ●コスト ●再生方法	●漏れやすい。 ●他の燃料と比べて、大量貯蔵が難しい。 ●製造方法	●毒性 ●強い刺激臭	●カーボンフリーにならない。	●充電設備が必要となる。	●不安定	●社会的に合意されにくい。



3. 水素エネルギー利用技術に関する研究

水素エネルギーへの期待

将来のクリーンエネルギー源として、利用時にCO₂が排出されない水素エネルギーが期待されている。また、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ている。

水素社会に向けた取組

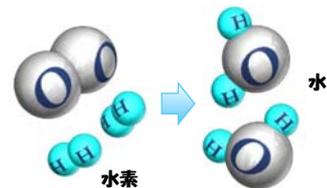
政府および民間企業は水素社会の実現に向けた基盤整備や技術開発に取り組んでいる。

政府方針

- 平成26年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画を受けて、燃料電池の適応分野拡大に関し、燃料電池船舶の導入に向けた実証業の推進等について検討していく旨言及された。
- 2020年の東京オリンピック・パラリンピックでは、ホテルや商業施設、交通手段等で水素エネルギーの利活用が検討されている。

民間企業

- 平成26年12月、トヨタ自動車は、燃料電池自動車を市場に投入した。
- 各社、水素供給サプライチェーンの本格導入を目指した輸送・貯蔵システムの開発を進めている。
- 川崎重工は、液化水素運搬船の開発を進めるほか、液化水素プラント、水素ガスタービン等の研究開発を実施している。



- ➡ 船舶分野・海事産業の分野においても水素利用の研究開発が進められている。
- ➡ 当所では、船舶において水素を安全に取り扱うための研究を実施している。



(1) 水素混焼ガスエンジン

- ▶ 海上技術安全研究所では、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いる。



ガスエンジンの外観

ガスエンジンの諸元

名称	AYG20L-SE(ヤンマー)
発電出力/回転速度	400 kW _e /1800 min ⁻¹
燃焼方式	ガス専焼/副室火花点火/希薄燃焼
ボア/ストローク	155 mm/180 mm
気筒数	6気筒
総行程容積	20 L
負荷	発電機+抵抗器
使用燃料	都市ガス(13A)



各種燃料の特性と水素混焼ガスエンジンの課題

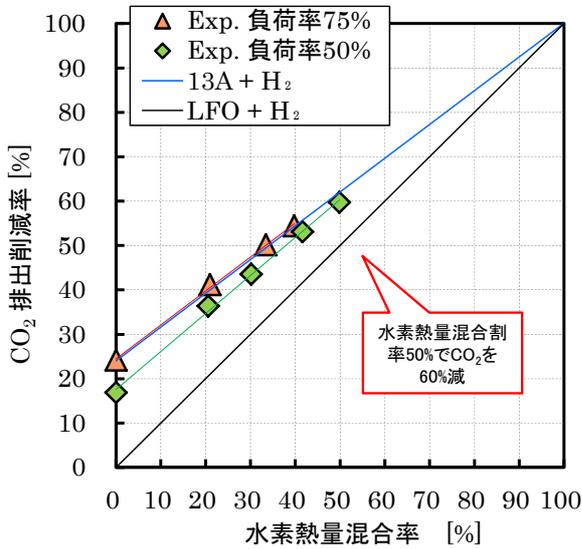
	単位	LFO	メタン(CH ₄)	水素(H ₂)
分子量	(g/mol)	223.6	16.0	2.0
低位発熱量	MJ / kg(fuel)	42.3	50.1	122
CO ₂ 排出係数	ton(CO ₂) / ton(fuel)	3.151	2.75	0
CO ₂ 排出特性	g(CO ₂) / MJ(fuel)	74.4	54.7	0
最高燃焼速度	cm/sec	-	37~38	270~290
最小点火エネルギー	mJ	-	0.29	0.015
着火温度	K	-	900~920	800~850

田島, 天熱然ガス系燃料の基礎 - 熱物性に基づく考察, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第51巻, 第3号(2016)

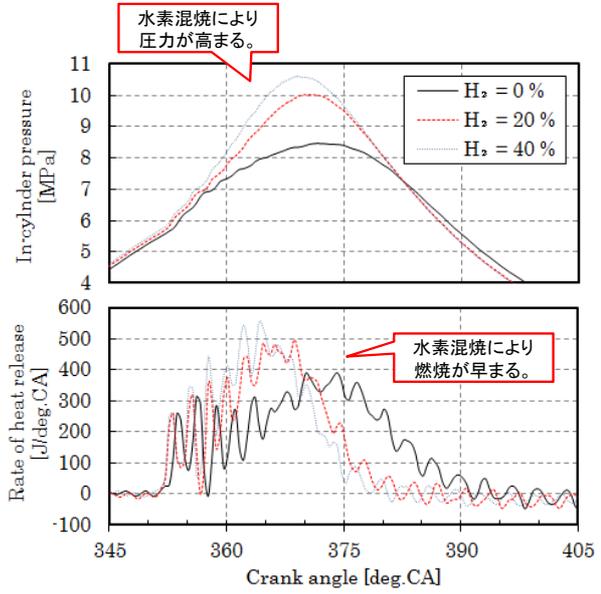
- | | |
|--------------------|------------------------------------|
| 最高燃焼速度が高い | ⇒ 最高燃焼圧力の増大 |
| | ⇒ NO _x 排出率の増大, ノッキングの発生 |
| 最小点火エネルギー・着火温度が小さい | ⇒ 過早着火の発生 |

水素混焼ガスエンジンのCO₂排出削減効果

- 現在までに、ディーゼルエンジンの基準性能に対するCO₂排出量は、ガスエンジン実測で約20%削減、水素混焼ガスエンジン実測で50~60%の削減を確認している。



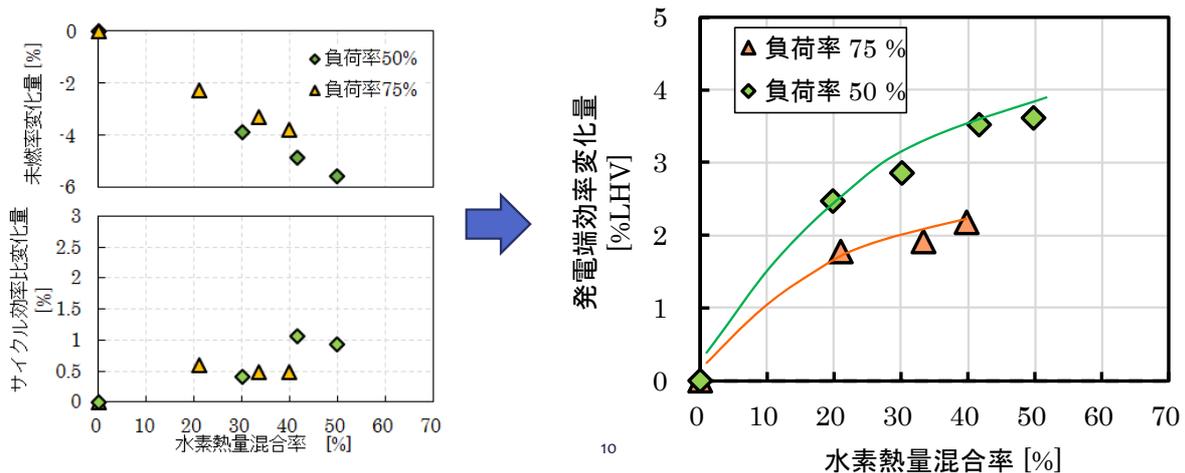
CO₂排出削減の試験結果



水素混焼時の燃焼波形

水素混焼ガスエンジンの熱効率

- 水素熱量混合率の増加によって未燃率(排ガス中THC排出量と都市ガス供給量の比)は大きく減少する。
- 水素熱量混合率の増加によって実/理論サイクル効率比が改善される。(理論ottoサイクル効率に近づく。)
- 燃焼が不安定な低負荷条件において、水素の効率改善効果によって、発電端効率の向上に寄与する。



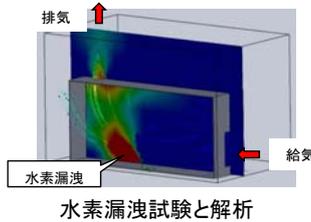
(2) 水素燃料電池

水素燃料電池船の安全ガイドライン策定に向けた調査検討(国交省請負研究H27~H29)

安全ガイドライン策定に向けて、船舶特有の課題に対応するための実験や検討を進めてきた。

多様なエネルギー源等を用いた新たな動力システムの研究開発(所内研究H29~)

多様なエネルギー源を選択できる環境整備の促進を目指して、バイオ燃料や天然ガス、さらに水素をエネルギー源として利用する技術についての研究を進めている。



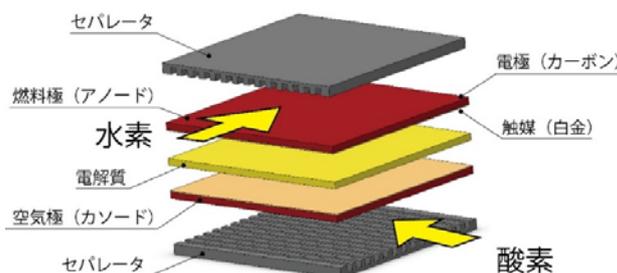
燃料電池のメリットとデメリット

期待(メリット)

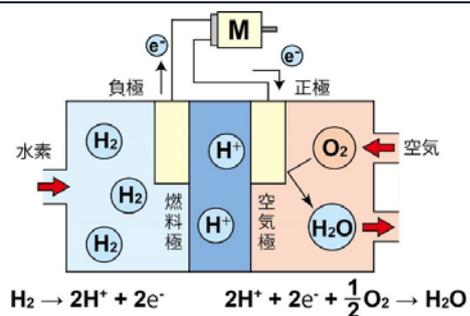
- ①環境にやさしい。 ➡ 発電運転時にCO₂やNO_x(窒素酸化物)が排出されない。
- ②騒音が小さい。 ➡ 燃焼や爆発といった現象がない。
- ③発電効率が高い。 ➡ 化学エネルギーを直接電力に変換するため効率が高い。

課題(デメリット)

- ①コストが高い。 ➡ エンジンと比べて、スケールメリットが得られにくい。
- ②寿命が短い。 ➡ 現状の寿命は4万時間程度と言われている。
- ③安全性が未確立。 ➡ 水素貯蔵や大流量使用、余剰水素の大気排出などに課題がある。



燃料電池の構造(単セル)



燃料電池の発電原理

燃料電池の種類と特徴

- 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。

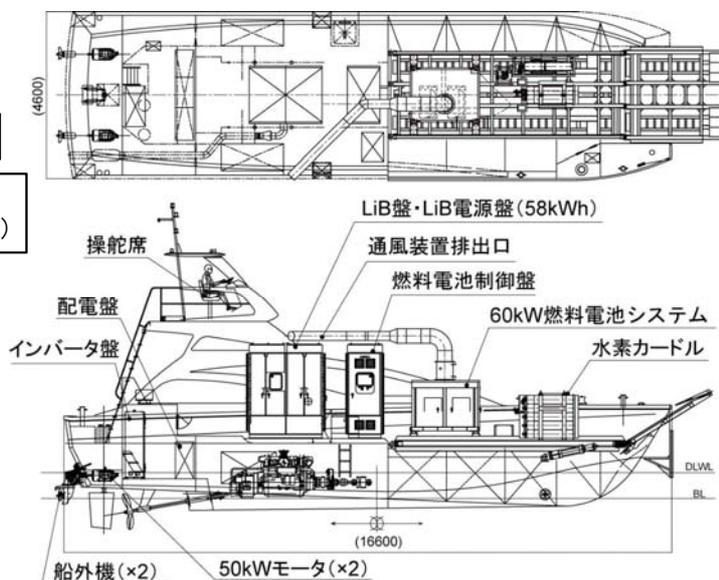
項目	固体高分子形 (PEFC)	リン酸形 (PAFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
電解質	高分子電解質膜	リン酸	炭酸塩	セラミックス
作動気体	水素	水素	水素 一酸化炭素	水素 一酸化炭素
作動温度	常温～90℃	150～200℃	650～700℃	750～1,000℃
発電効率	30～40%	35～42%	45～60%	45～65%
開発状況	実用化	実用化	研究開発段階	研究開発段階
主な用途	家庭用 携帯機器用 自動車用	工業用 産業用	工業用 分散電源用	工業用 分散電源用

水素燃料電池船の実船試験

- 実運用において燃料電池システムに発生する問題点を抽出するとともに、その問題点に対する原因と対策を整理する。



船用燃料電池推進システムを搭載した
実験船(平成29年度)



実験船「神峰」の全体配置

電気推進システムの構成

- ▶ 燃料電池とリチウムイオン電池によって推進用モータを駆動する電気推進システムを構築した。



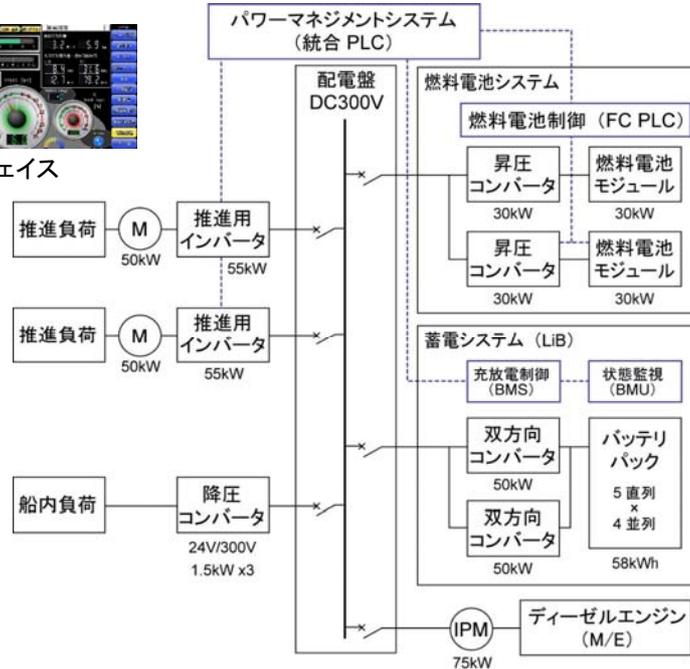
ユーザーインターフェイス



船外機(アウトドライブ)



推進用モータ



電気推進システムの基本構成(平成29年度)



水素カードル



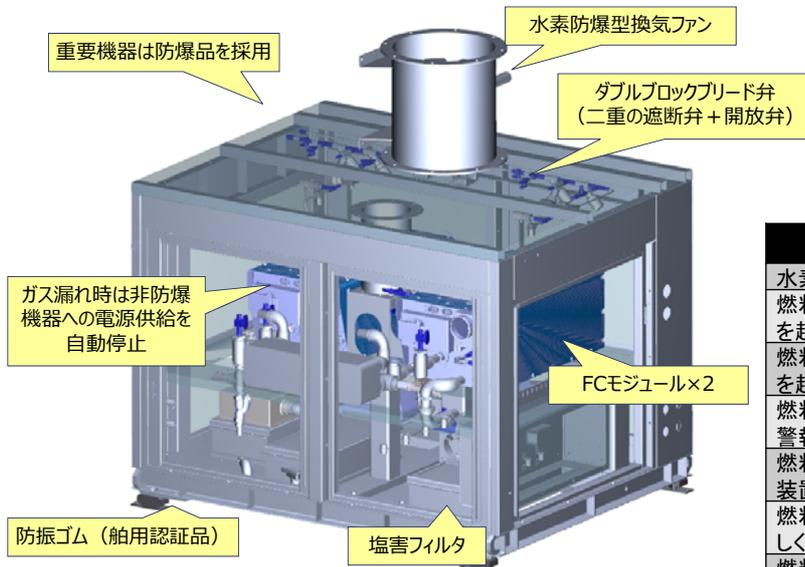
燃料電池システム
(ヤンマー株式会社)



LiBシステム
(BEMAC株式会社)

60 kW級燃料電池システム

- ▶ 2台のFCモジュールを使用した60kW級燃料電池システムを試作した(ヤンマー株式会社)。
- ▶ モジュールの運転に必要な機器類を配管またはホースで接続して、安全上必要となるガス検知器、火災検知用温度センサなどを筐体の内部に配置している。



燃料電池システムの基本構成

- ▶ 筐体上部には水素対応の換気ファンを設置し、筐体内部はESD (Emergency Shutdown) 保護機関区域と見なして設計している。

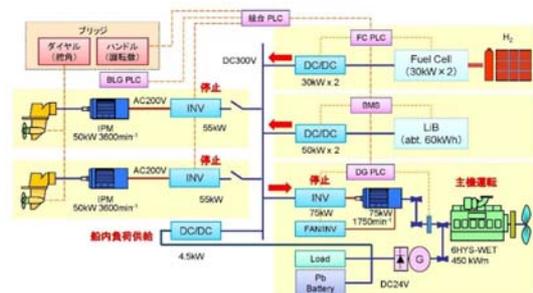
燃料電池システムの安全対策

項目	警報	水素遮断
水素燃料供給圧力異常	X	
燃料電池パワーユニット内で20% LELを超えるガス検知	X	
燃料電池パワーユニット内で40% LELを超えるガス検知	X	X
燃料電池パワーユニット内のガス検知警報装置の異常	X	X
燃料電池パワーユニットの排気式通風装置の異常	X	X
燃料電池設備の冷却水(圧力、温度もしくは流量)異常	X	
燃料電池設備への電力供給停止	X	X
燃料電池パワーユニットの火災検知	X	X

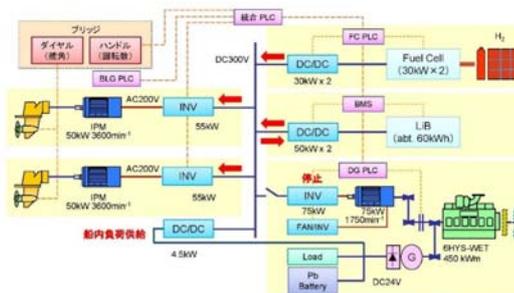
実船試験の概要

➤ 実船試験において実施した主な試験は以下の通りである。

No.	試験項目	概要
1	安全対策試験	運航に先立ち、FCおよびLiBシステムの安全対策を確認。
2	各運転モードの動作確認試験	負荷分担等、適切に動作することを確認。
3	推進動力の冗長性確認試験	FC緊急停止時、推進動力が維持できることを確認。
4	旋回試験・前後進試験	急旋回や全後進時、電気系統が適切に動作することを確認。
5	燃料電池出力変動試験	燃料電池の出力を故意に変動させたときの応答性等を確認。
6	水素カードル交換作業の安全確認	クレーン作業、玉掛け作業、配管作業、固縛作業時の安全を確認。
7	実運航試験	水素・LiB残量を監視しながら実運航を想定した運航試験を実施。



(a) 主機アシストモード



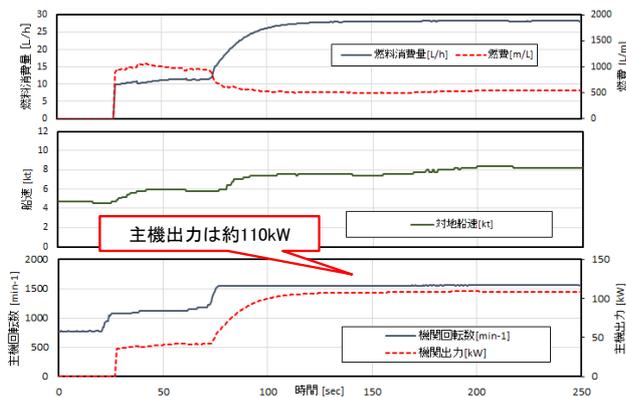
(b) 電池推進モード

主な運転モード

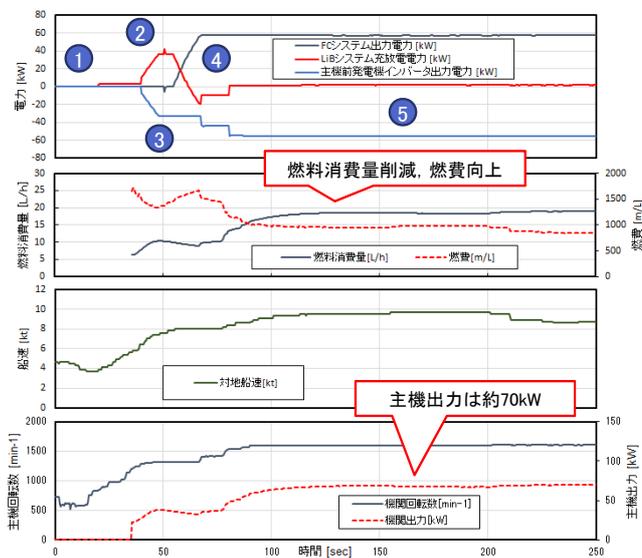
試験結果例：主機アシストモードの性能

- 主機アシストモード（ディーゼル推進時に主機前発電機をモータとして運転してアシスト）による試験を行った。
- 主機アシストにより、主機出力は約40 kW低減した（燃料電池の出力は約60 kW）。
- 軽油の燃料消費量（=CO₂排出削減量）は約35%削減、燃費（軽油1 Lあたりに進む距離）は約1.8倍向上した。

- ① 主機運転中
- ② 主機アシストモード開始（LiB運転）
- ③ 主機回転数上昇によりアシスト運転開始
- ④ FC運転開始
- ⑤ 主機回転数1600min⁻¹、主機出力70kWで運航



(a) ディーゼル推進時のログデータ



(b) 主機アシストモード時のログデータ

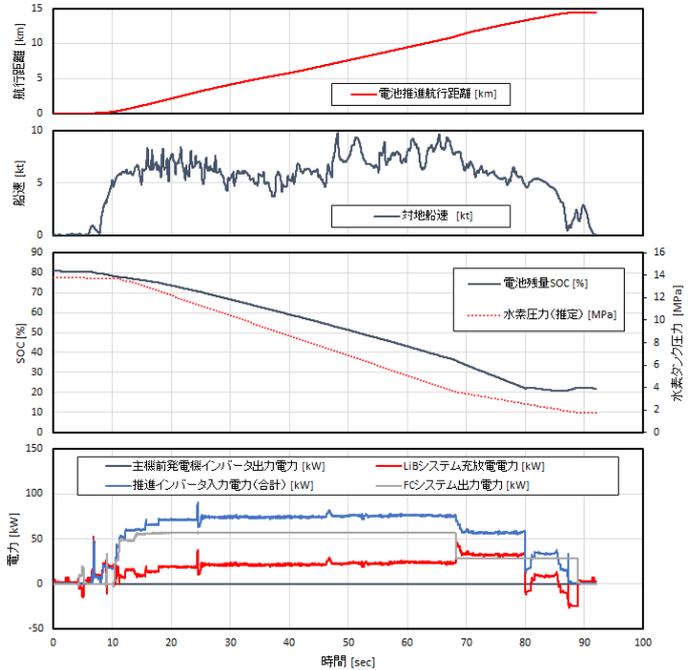
※ 主機出力および燃料消費量は排ガス温度と回転数から求めた推定値である。

試験結果例：電池推進モードによる実運航試験

- 電池推進モード(燃料電池とLiBによる推進)による出港から着岸に至るまでの実運航を想定した試験を実施した。
- 搭載する水素の量とリチウムイオン電池の容量からあらかじめ航路を決めている(速力7~8 ktで1時間程度の航行)。
- 航行中は、水素残量とリチウムイオン電池の残量(SOC), それらから推定される航行可能距離を操舵席のモニタに表示させながら操船し、水素およびリチウムイオン電池を概ね計画通りに使用できることを確認した。



実運航試験の計画航路と航跡



実運航試験の結果

BARI-SHIP 2019
IMABARI MARITIME FAIR
海上技術安全研究所セミナー

2019. 5. 23

4. その他のGHG削減技術

当所で実施している
エンジン混焼研究

- ① ディーゼルエンジンにおける軽油とメタンガスの混焼試験
- ② ディーゼルエンジンにおける軽油とアンモニアガスの混焼試験
- ③ ディーゼルエンジンにパーム油等のバイオ燃料を使用した試験
- ④ ガスエンジンにおけるバイオガス混焼試験とその性能評価
- ⑤ ガスエンジンにおける水素混焼試験
- ⑥ ディーゼルエンジンにおける廃棄物由来燃料の適用性調査...



(a) 実験用4ストロークディーゼルエンジン

Constructed in 1983
No. of Cyl.: 6 Cyl. Bore: 155mm
Max. Continuous Output: 400kW
Max. Continuous Speed: 1800rpm

Constructed in 1983
No. of Cyl.: 3 Cyl. Bore: 230mm
Max. Continuous Output: 257kW (350PS)
Max. Continuous Speed: 420rpm

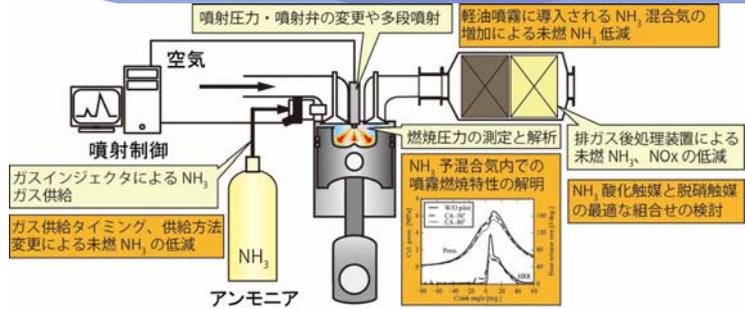


(b) 実験用ガスエンジン

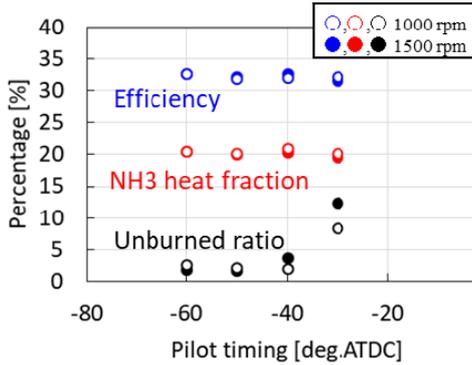


アンモニア混焼エンジン

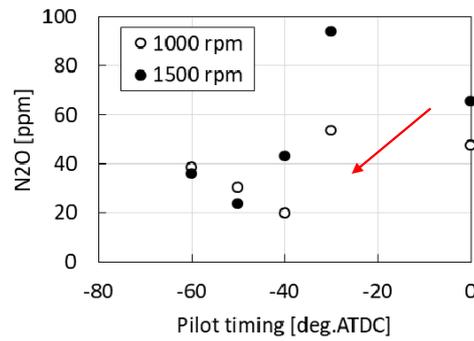
- 海上技術安全研究所では、7.7kW単気筒ディーゼルエンジンの吸気に、カーボンフリー燃料であるアンモニアガス(NH₃)を混合し、運転している。
- 発熱量比20%のアンモニアを混焼させた試験を行っている(20%GHG削減。)
- 液体燃料側の電子燃料噴射化(Pilot噴射を活用)などにより、アンモニアの燃焼効率98%を達成し、温暖化係数が高い亜酸化窒素(N₂O)の排出も低減している。



アンモニア混焼エンジンの概念図



熱効率, アンモニア熱量比, 未燃率

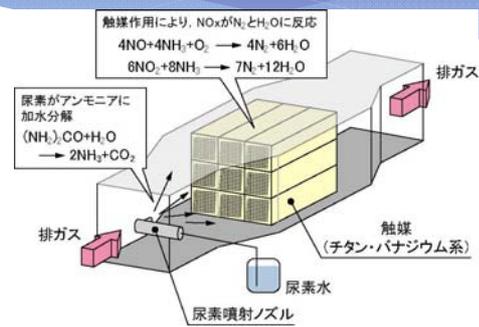


N₂O濃度

試験結果の一例(発熱量比20%)

アンモニア混焼エンジンの排ガス後処理装置

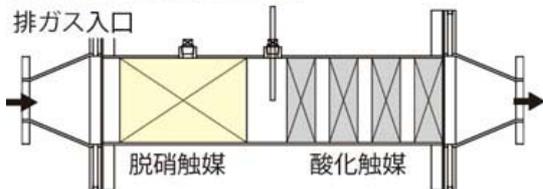
- 未燃アンモニアの対応技術として、脱硝触媒(SCR)との組み合わせを検討している。
- 触媒による後処理により、NOxを削減しながら、未燃アンモニアを大幅に削減できることを確認した。



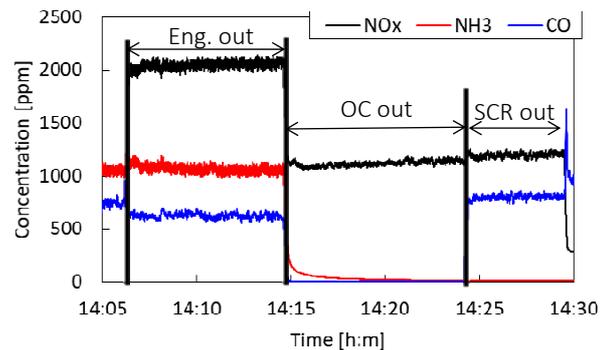
SCR脱硝装置の基本構成(尿素水)



- 脱硝触媒 1段
150 × 150 × 224 mm
- 酸化触媒 4段
150 × 150 × 50 mm



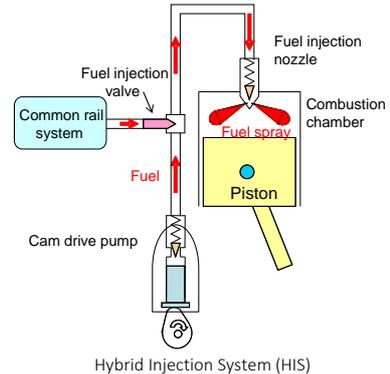
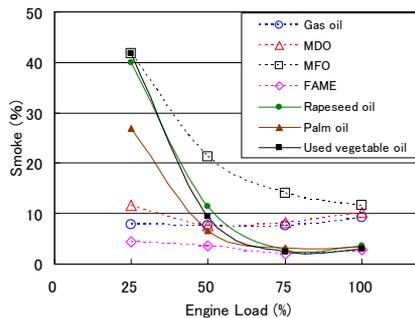
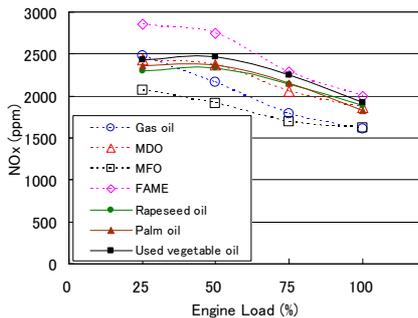
実験用エンジンに取り付けた排ガス後処理装置



試験結果の一例

船用ディーゼルエンジンにおけるバイオ燃料の燃焼実験

- 海上技術安全研究所の船用ディーゼルエンジンでバイオ燃料の燃焼実験を行った結果、BDF (FAME) はすべての運転条件で良好な燃焼であった。
- エステル化処理していないバイオ燃料でも高負荷運転では良好な燃焼であり、船用ディーゼル機関で直接燃焼できる可能性は高い。
- 海上技術安全研究所の船用ディーゼル機関の燃料噴射系を改造し、MDO (A重油)、FAME、CPO (Crude Palm Oil) を用いて燃焼及び排気特性を調べた。CPOは低負荷時でスモークがMDOより多いが、燃料噴射制御 (プレ噴射) により大幅に改善できることなどの知見が得られている。



(1) COMBUSTION AND EXHAUST CHARACTERISTICS OF BIO-FUELS IN MARINE DIESEL ENGINE, S. Nishio, Z. Xu, et al., ISME KOBE, 2011

(2) Influence of Palm Biofuel for Marine Diesel Engine on Combustion and Exhaust Emission Characteristics, S. Nishio, T. Fukuda, et al., Journal of the JIME Vol. 53 No.3, 2018

BARI-SHIP 2019
IMABARI MARITIME FAIR

海上技術安全研究所セミナー

2019. 5. 23

5. GHG削減技術導入の課題

- 船舶に水素エネルギー技術を導入するためには、各種エネルギー機器の技術的課題の他、機器および燃料のコスト、インフラ設備、エネルギー密度減少に伴う機器配置などの課題がある。
- 例えば、液体水素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、4.5倍程度の大きさになる。

各種燃料の物性値

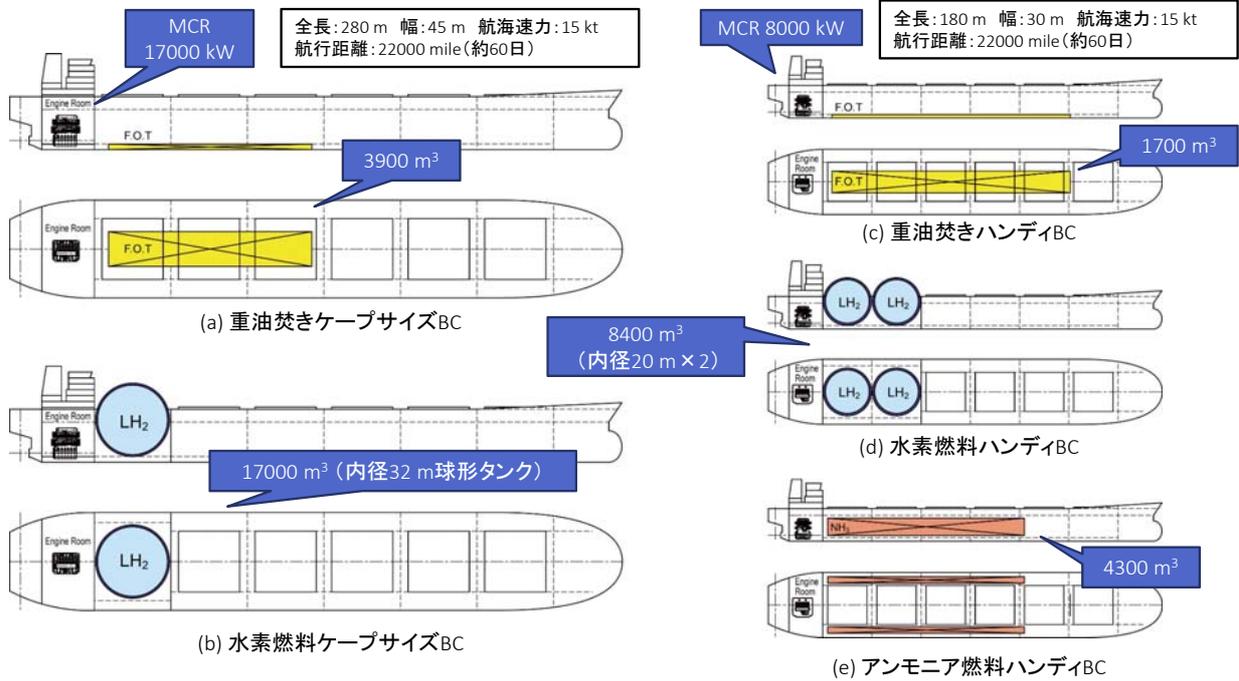
	重油	天然ガス (液体)	水素 (液体)	アンモニア (液体)
発熱量	42.7 MJ/kg	49.2 MJ/kg	121 MJ/kg	22.5 MJ/kg
密度	900 kg/m ³	460 kg/m ³	70.8 kg/m ³	695 kg/m ³
CO ₂ 排出係数	3.0 t/kL	2.7 t/t _{fuel}	0	0
体積あたりの発熱量(重油比)	38.4 GJ/m ³ (100%)	22.6 GJ/m ³ (59%)	8.6 GJ/m ³ (22%)	15.6 GJ/m ³ (41%)
燃料タンク内容積※ (重油タンク比)	1.0	1.7	4.5	2.5

※熱効率が同一の動力源を使用するとして試算。
※断熱構造を含めたタンク寸法については要検討。



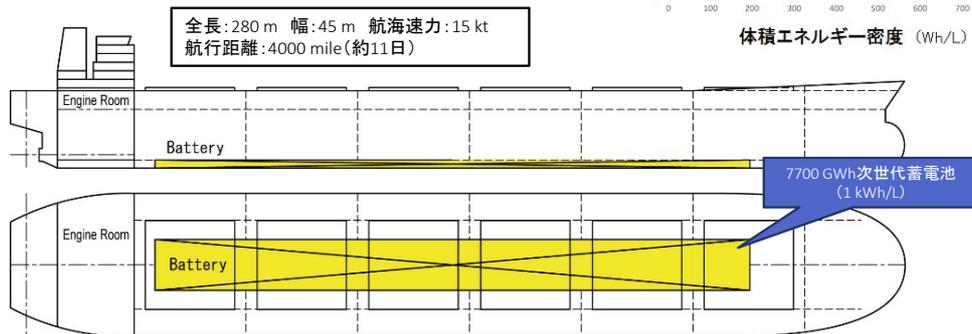
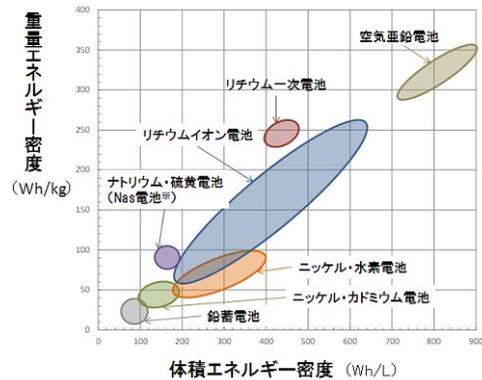
カーボンフリー燃料を利用する船舶の検討例

- 航行距離を現状と同じとした場合、従来の石油燃料を水素またはアンモニアに置き換えた場合のタンク配置を検討した。



大型電池推進船の検討例

- 次世代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。
- 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る。



電池推進ケーブサイズバルクキャリア(イメージ)

6. まとめ

- ① 船舶分野における将来のGHG削減・ゼロエミッション化を議論するため、現状の技術の状況を把握し、課題を整理している。
- ② 船舶にGHG削減技術を導入するためには、各種エネルギー機器の技術的課題の他、機器および燃料のコスト、インフラ設備、エネルギー密度減少に伴う機器配置などの課題がある。

各種船舶のGHG対策(イメージ)

	船種の例	動力源候補の例・備考
種別 (大きさ)	大型外航船	アンモニア専焼ディーゼルエンジン(2st)
	大型内航船(5000GT~)	アンモニア混焼ディーゼルエンジン(4st) 水素専焼ディーゼルエンジン(4st)
	小型内航船(~1000GT)	水素混焼ガスエンジン(4st)
	小型船舶	燃料電池(PEFC)
新技術	風力エネルギー推進船	新技術との組み合わせ
	カーボンキャプチャ船(CCS船)	陸上メタネーション技術が重要、既存内燃機関を利用可
	SOFC船	アンモニア利用、高効率化
	電池推進船	次世代蓄電池技術の利用、陸上充電設備との組み合わせ



ご清聴ありがとうございました。

