

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

(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

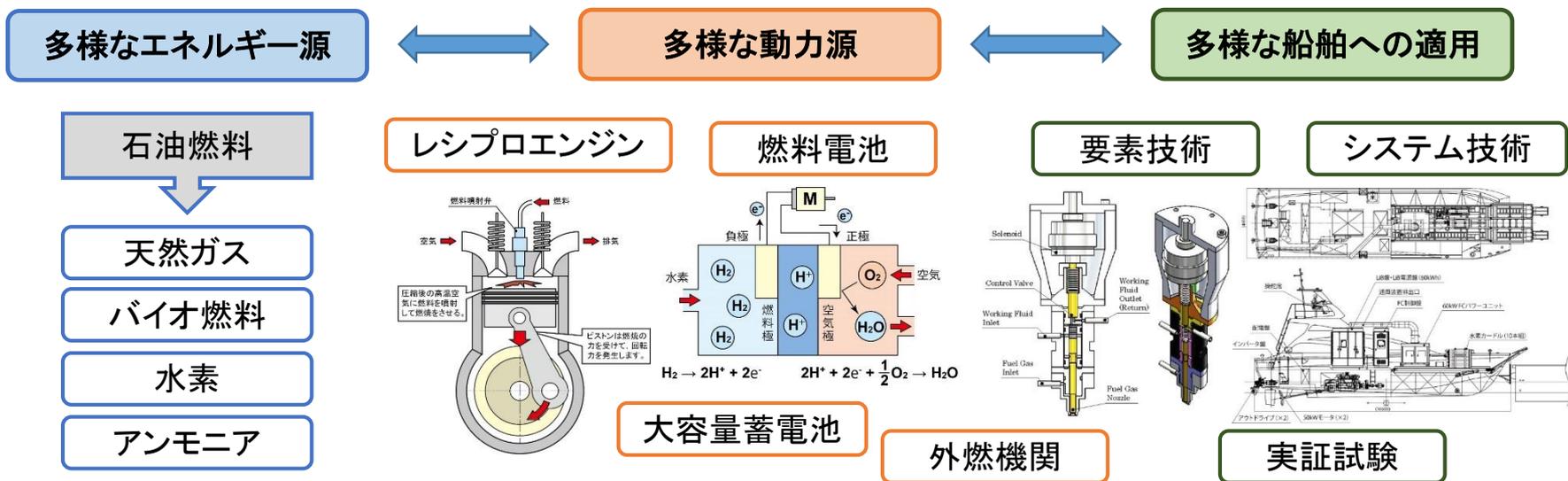
1. はじめに

多様なエネルギー源を利用する技術の必要性

船舶の省エネ化や高度化, さらに船舶分野の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, 様々な研究開発を進めている。

IMO GHG削減戦略

IMO第72回海洋環境保護委員会(2018年4月)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。



→ 当所では, 船舶において多種・多様なエネルギーを利用する技術についての研究開発を実施している。

●海上技術安全研究所における「エネルギー多様化」関連研究

マリンハイブリッドシステムに関する研究開発(所内研究H23～H28)

船舶の省エネ化や高度化を目指して、大容量二次電池や電気モータを利用した船舶のハイブリッド化や燃料電池の船舶適用性についての調査を進めてきた。

- ➡ ✓ リチウムイオン電池の安全性評価
- ✓ 水素燃料電池の船舶適用性の検討

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、従来の石油製品ばかりでなく、バイオ燃料や天然ガス、LP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調査を進めている。

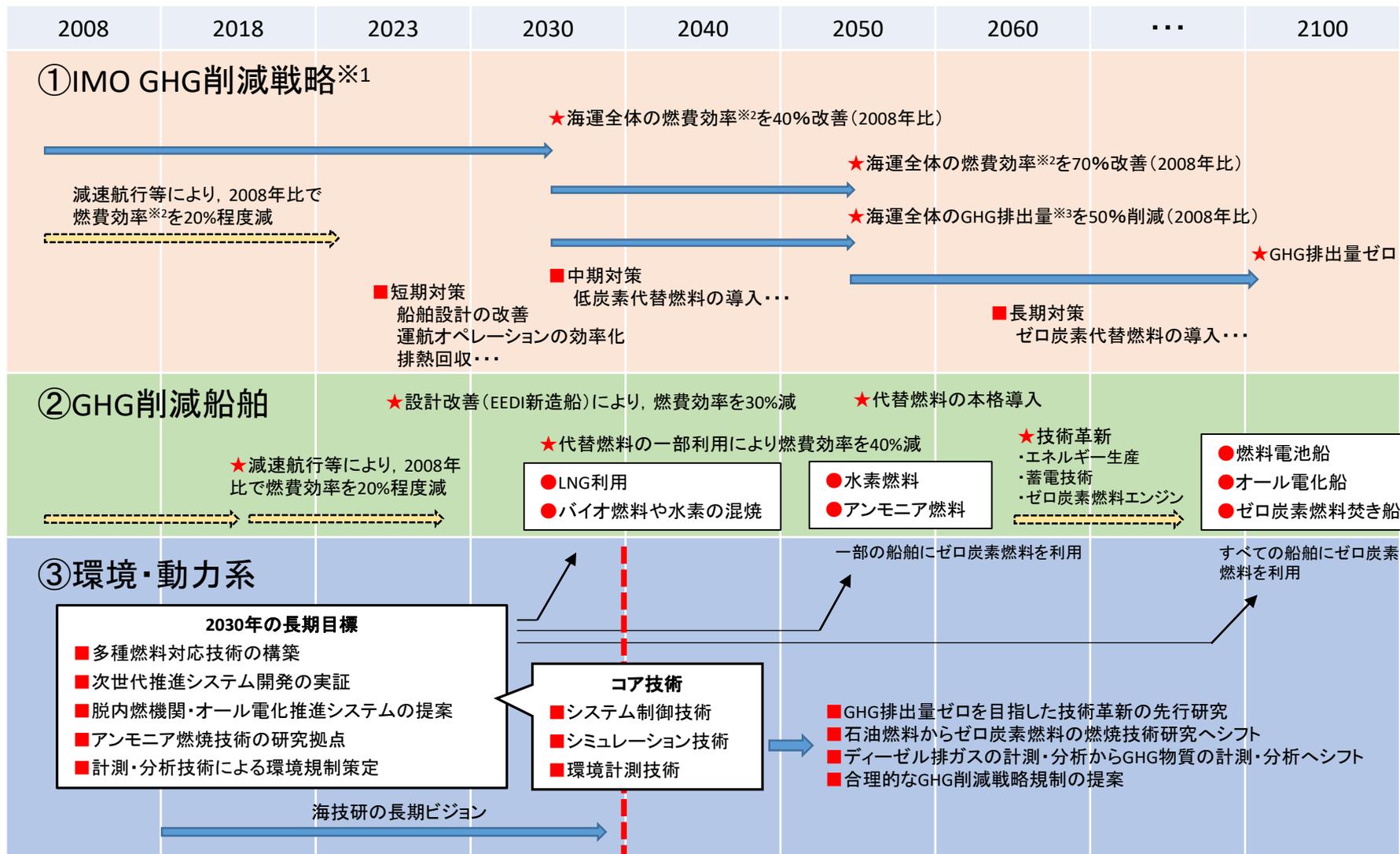
- ➡ ✓ 各種燃料のエンジン混焼技術
- ✓ 水素エネルギーの利用技術

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。

- ➡ ✓ 陸上基礎実験の実施
- ✓ 小型実験船による実船試験の実施
- ✓ 水素燃料電池船の安全ガイドラインの策定

● 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. GHG排出削減のためのエンジン混焼技術

GHG排出削減のための調査や基礎研究を進めるとともに、既設の実験用エンジンを利用して、多様な燃料を使用した各種エンジン混焼試験を実施している。

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・・・



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

(a) 実験用4ストロークディーゼルエンジン

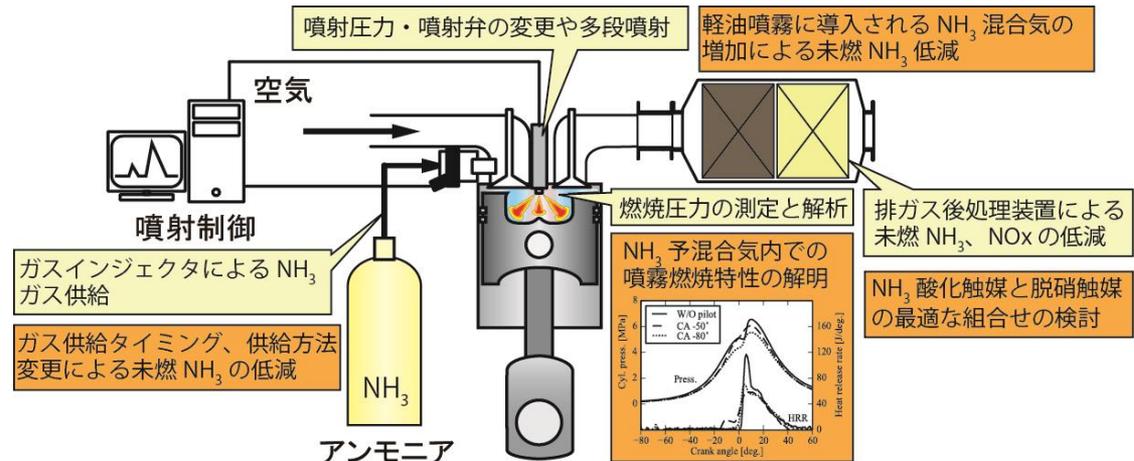


Constructed in 1983
No. of Cyl.: 3 Cyl. Bore: 230mm
Max. Continuous Output: 257kW (350PS)
Max. Continuous Speed: 420rpm

(b) 実験用ガスエンジン

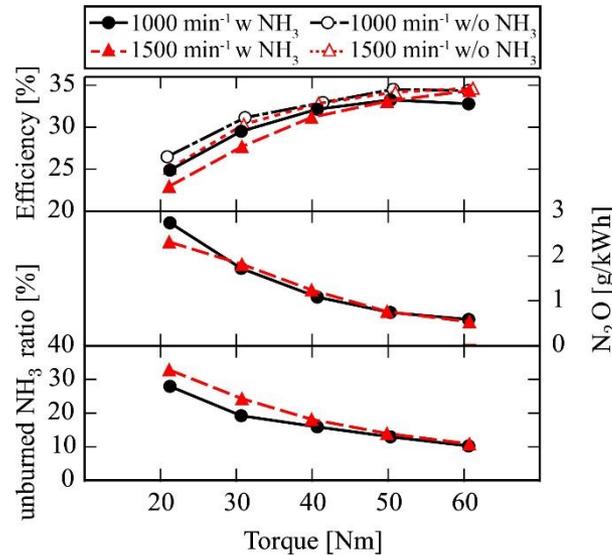
(1) アンモニア混焼エンジン

➤ ディーゼルエンジンの吸気にアンモニアガスを混合し、燃焼生成物・筒内圧力の計測および燃焼解析を行い、船用ディーゼルエンジンにおけるアンモニア燃焼方式の検討を行っている。

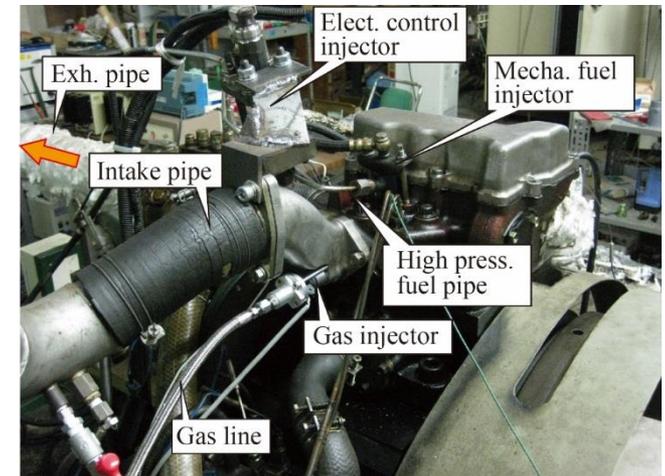


アンモニア混焼エンジンの概念図

➤ アンモニアの混合により未燃アンモニアや亜酸化窒素 (N_2O) の排出が確認されており、それらの削減技術の確立が重要である。



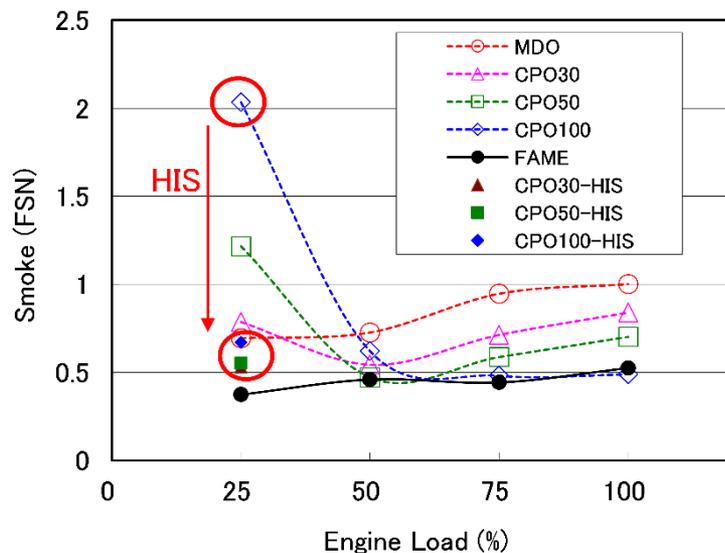
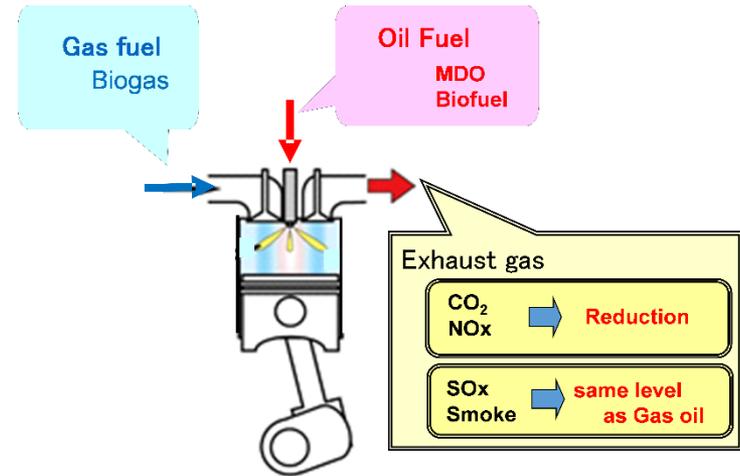
試験結果の一例(発熱量比20%)



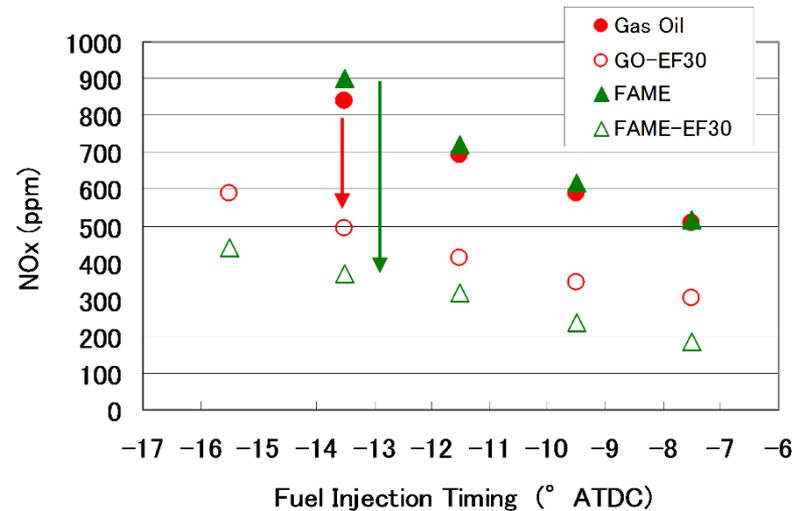
シリンダヘッドの外観
(7.7kW単気筒試験エンジン)

(2) バイオ燃料の混焼技術

- ▶ パーム油からつくられたFAME (Fatty Acid Methyl Ester) や模擬バイオガス(メタンと二酸化炭素の混合ガス)を用いたディーゼルエンジンの実機試験を実施している。
- ▶ 低負荷運転時のSmoke削減にハイブリッド・インジェクション・システム(HIS)による燃料噴射制御が有効であること, エマルジョン燃料化でNOxおよびSmokeの同時低減が可能であることなどを確認している。



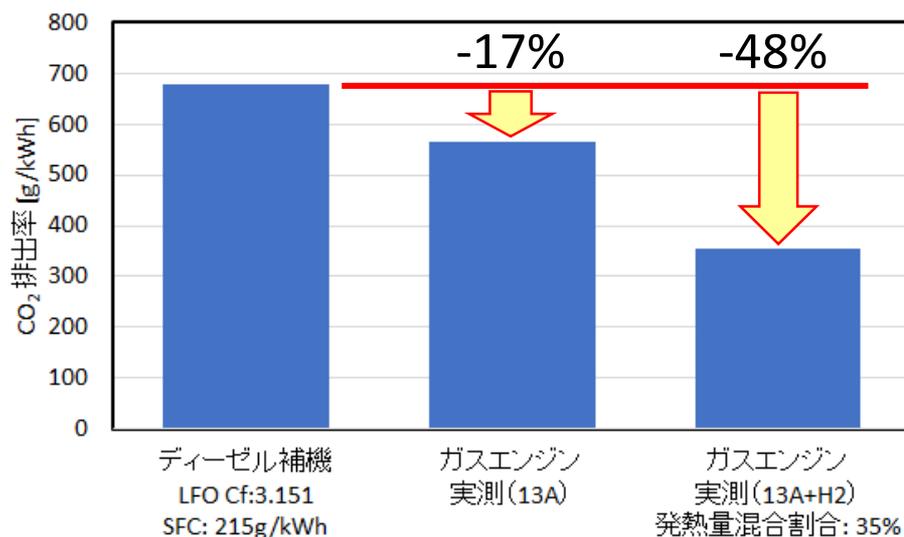
燃料噴射制御によるSmoke削減の例



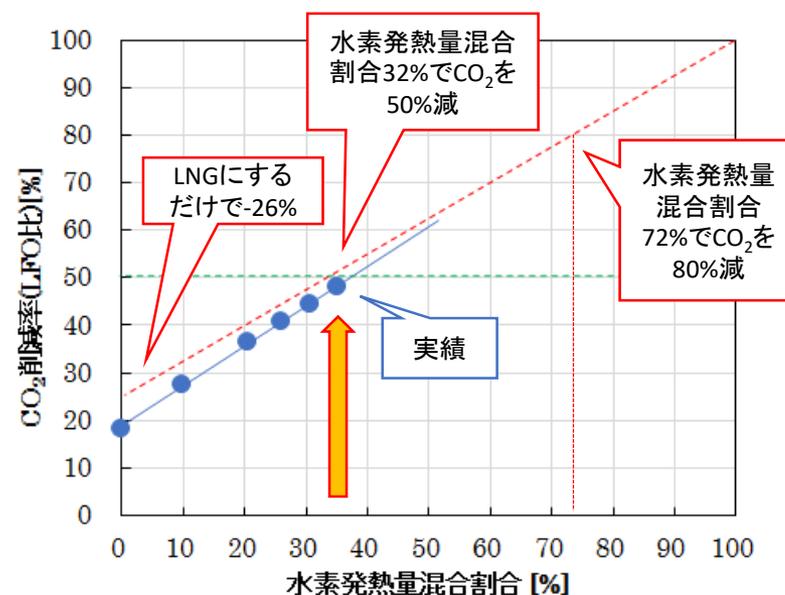
エマルジョン燃料と噴射時期変更実験の結果

(3) ガスエンジンに水素を混合した際のGHG排出削減効果

- 水素・水ポートインジェクション装置および大規模EGR装置を用いて、400kWガスエンジンの給気に大量の水素を混合した際のCO₂排出削減効果並びに燃焼安定性を調べる試験を実施している。
- ディーゼルエンジンの基準性能に対するCO₂排出率は、ガスエンジン実測(都市ガス13A, 負荷率50%)で-17%の削減, 水素混焼ガスエンジン実測(13A+H₂, 負荷率50%, 水素発熱量混合割合35%)で-48%の削減を確認している。



CO₂排出削減の試験結果



水素混焼率とCO₂排出削減率

3. 水素燃料電池船の安全ガイドライン

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)

平成27年度

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

➡ ✓ 塩害試験, 傾斜・動揺試験, 振動・衝撃試験

平成28年度

水素漏洩を防止するための知見を得る試験

➡ ✓ 水素配管の漏洩特性評価試験

水素漏洩時の安全対策を検討するための試験

➡ ✓ 換気システムの陸上試験

平成29年度

安全ガイドライン策定のための調査・検討

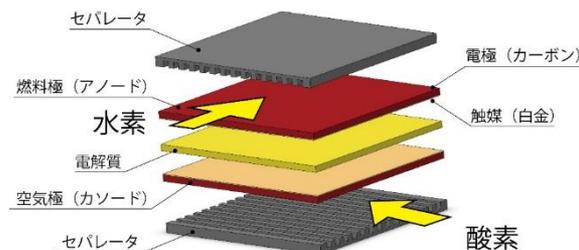
➡ ✓ 水素物性調査や水素燃料タンクの安全要件

安全ガイドライン策定のためにと実船試験

➡ ✓ 安全対策の確認, 安全運航対策マニュアルの作成

安全ガイドラインの試運用

➡ ✓ 小型FC旅客船の試設計



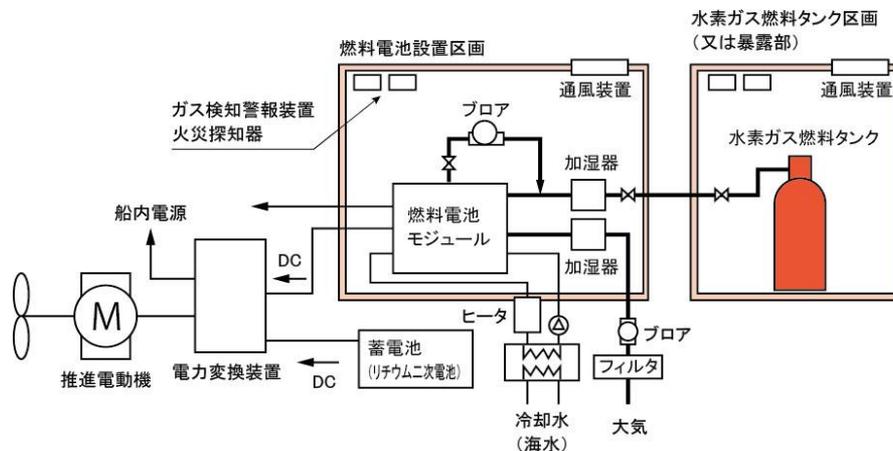
燃料電池の構造(単セル)

※平成27年度「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」、平成28年度「水素燃料電池船の安全性確保のための調査検討」、平成29年度「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」は国土交通省海事局からの請負研究として、(一財)日本船舶技術研究協会およびヤンマー株式会社と共同で実施しました。

●水素燃料電池船の安全ガイドライン策定の経緯

経緯

- 平成27年度より進めてきた試験や様々な調査結果を踏まえて、平成28年度に『燃料電池船の安全ガイドライン暫定案』を取りまとめた。
- 平成29年1月にIGFコード(国際ガス燃料船安全コード)が発効し、船舶安全法において天然ガスを含む低引火点燃料を使用する20トン以上の船舶にIGFコードが適用されることとなった。
- 上記に伴い、IGFコードの要件をそのまま取り入れるのではなく、IGFコードにおけるガス安全の考え方を参考に、一般の内航小型船舶(限定沿海・平水を航行するディーゼル船)と同等の安全性を確保するための検討を進めてきた。
- 平成29年度には、適用範囲を水素ガスを燃料、内航(限定沿海・平水に限る)、小型船舶(20トン未満)に限定して、「水素燃料電池船の安全ガイドライン」を取りまとめた。

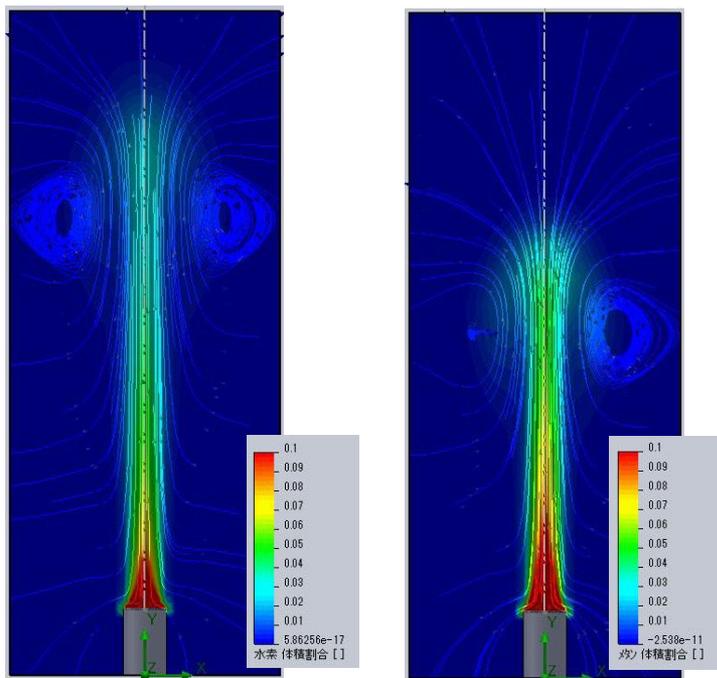


燃料電池に係る機器のイメージ図

(1) 陸上基礎試験の概要

(a) 水素の拡散性試験

●水素の拡散性を調べるため、水素・ヘリウム・メタン等のガスを使用し、排出後の濃度を計測した。また、一部の試験結果について、CFDによる計算結果と比較した。



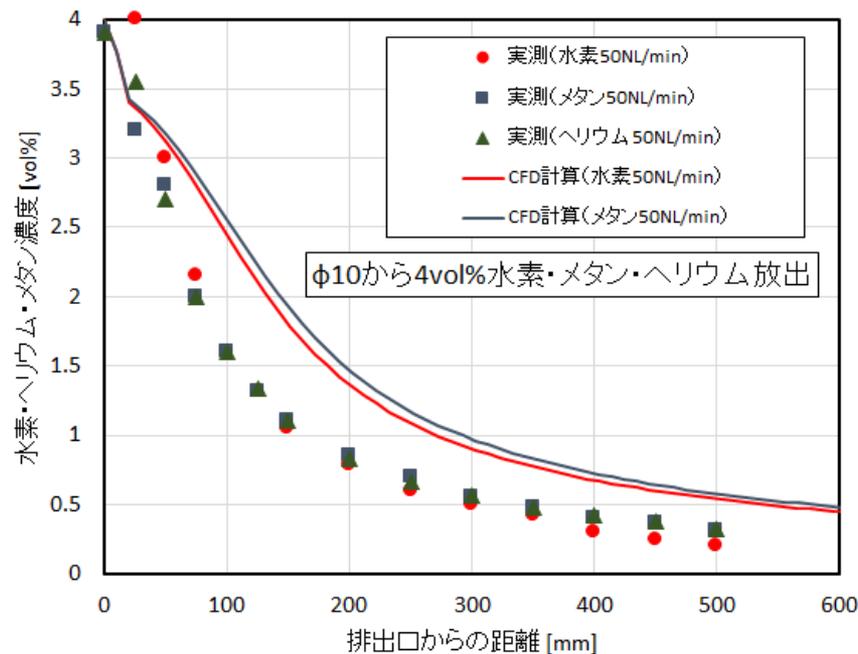
(a) 水素 (3sec)

(b) メタン (3sec)

微小流量を放出したときのCFD計算例

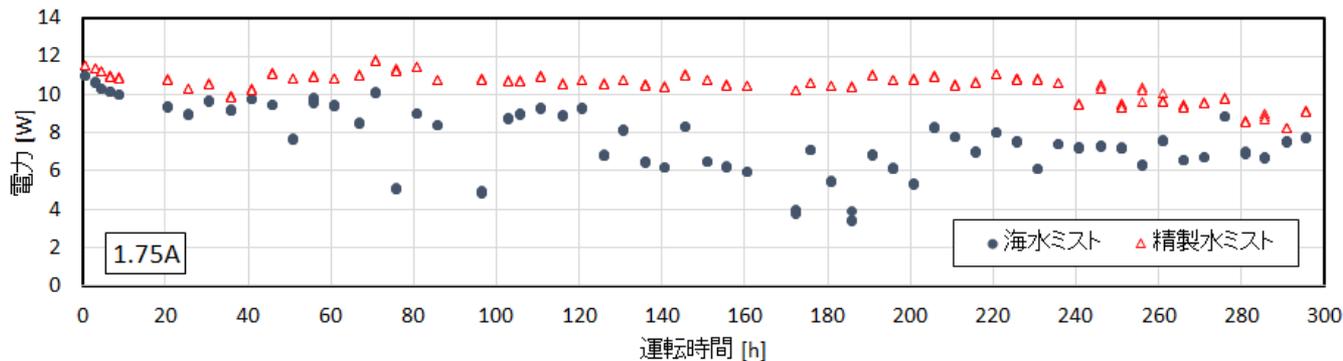
応答性が高いマルチガスモニタ(ハイセーフノーミ製)を使用

- 濃度0.1~100%に対応できる。
- 水素ガスの拡散、漏えい時における迅速な濃度変化を測定できる(応答時間:0.3秒以下)。
- 設定パラメータを変更することで、水素、メタン、ヘリウムの濃度を計測できる。

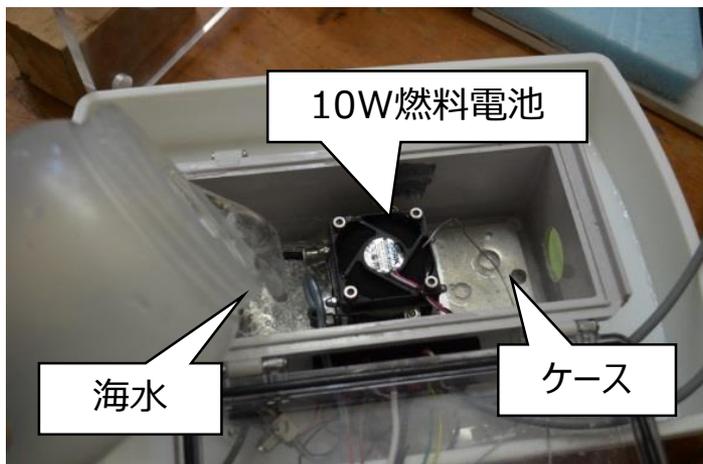


(b) 燃料電池の塩害試験

●海塩粒子による暴露により、特に高負荷時の出力が不安定になることなどを確認した。



(c) その他の陸上試験



海水浸水試験



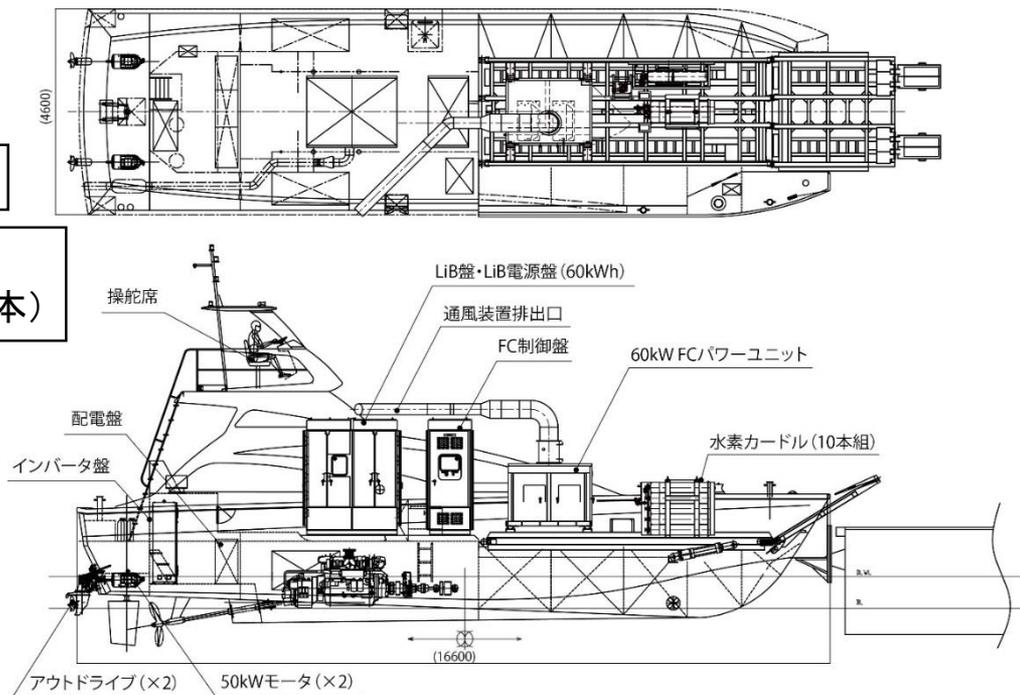
配管継手等の気密試験

(2) 水素燃料電池船の実船試験

- 実運用を想定した試験運航を実施することにより、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し、その問題点に対する原因と対策を整理することで、安全ガイドライン案に反映する。



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)



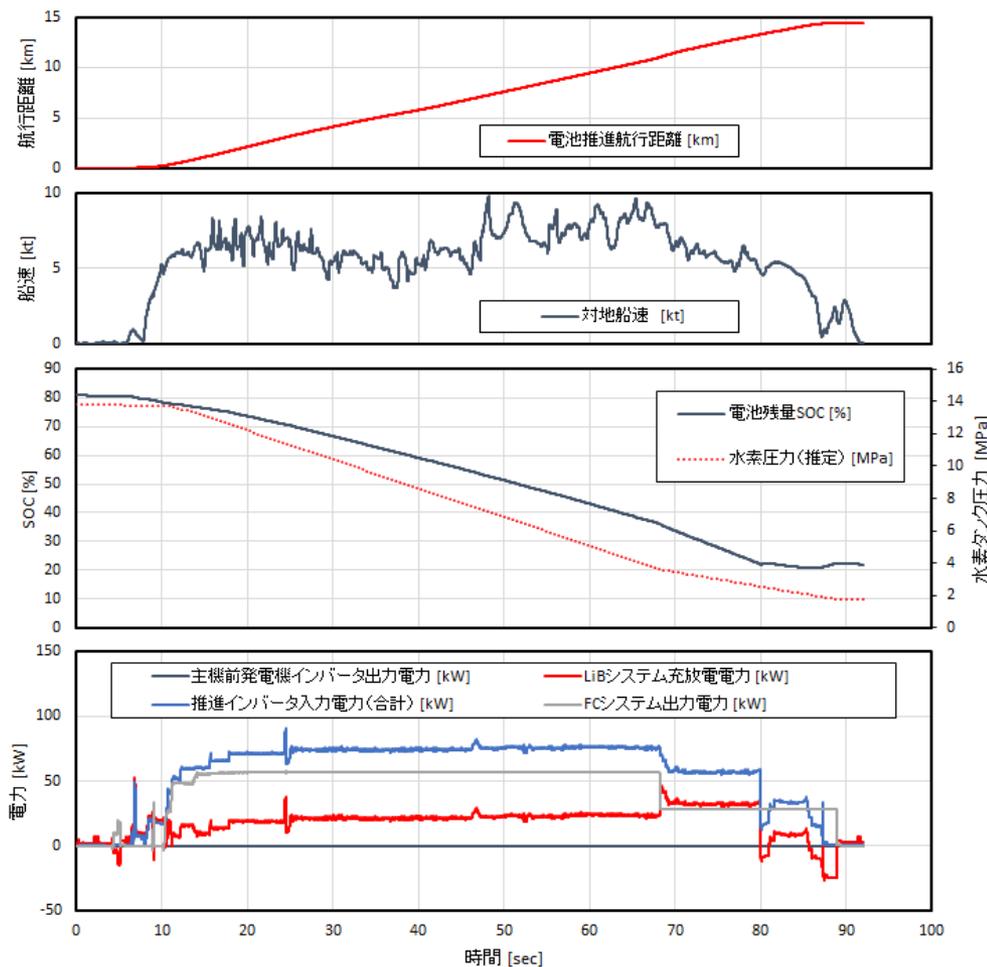
実験船「神峰」の全体配置

●実運航試験

- 電池推進モード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(速度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ている。
- 概ね計画通りの航路を航行し、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ている。



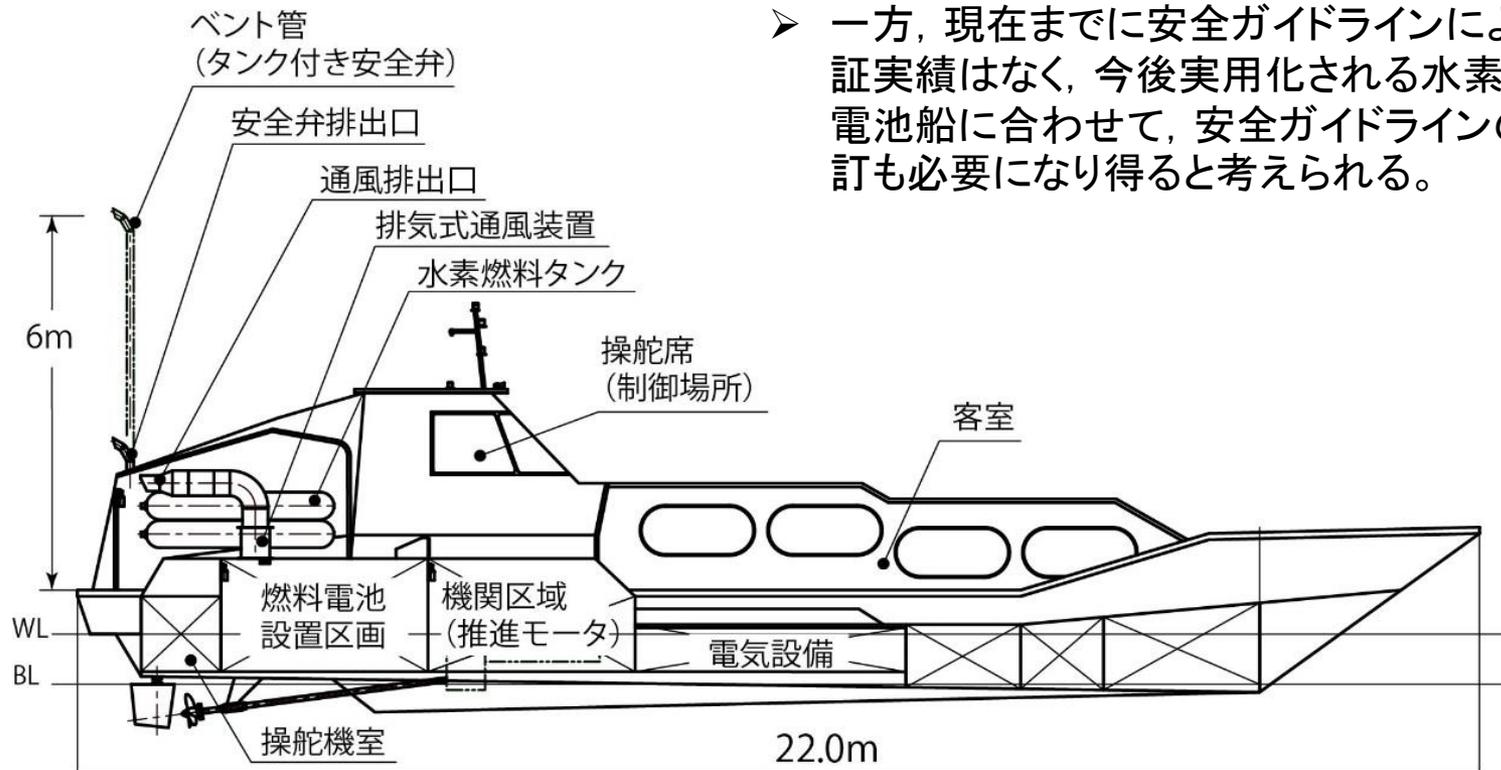
実運航試験の計画航路と航跡



実運航試験の結果

(3) 安全ガイドラインの試運用

- 運用上、安全ガイドラインに問題ないことを確認するため、安全ガイドラインに従い、水素燃料電池船の試設計を行った。
- 各機器の配置や区画は安全ガイドラインの要件に従って検討した。システム構成の詳細な設計には至っていないが、船長20m程度の小型船舶への適用は概ね問題ないと考えられる。



- 一方、現在までに安全ガイドラインによる認証実績はなく、今後実用化される水素燃料電池船に合わせて、安全ガイドラインの改訂も必要になり得ると考えられる。

FC旅客船のイメージ

(4) 水素燃料電池船の安全ガイドラインの概要

水素燃料電池船の安全ガイドラインの目次と概要

章	概要
1. 通則	本ガイドラインの目的, 適用範囲などについて記載
2. 定義	本ガイドラインで用いる主な用語及び定義を記載
3. 機能要件	安全運航の基本となる機能の必要性を明確に定義
4. 一般要件	リスク評価及び爆発影響の最小化について記載
5. 船舶の設計及び配置	機械的損傷から保護するための動力源装置や燃料貯蔵装置の設置場所等の要件
6. 燃料格納設備	水素ガスの貯蔵を適切に行うための要件
7. 材料及び燃料管装置	水素の性質を考慮した燃料管装置及び材料の要件
8. バンカリング	燃料の補給を行うために適切なシステムを提供するための要件
9. 機器への燃料の供給	燃料電池への燃料の供給の安全性及び信頼性を確保するための要件
10. 燃料の使用及びエネルギー供給	エネルギーを安全に供給するための燃料電池及び蓄電池の要件
11. 火災安全	防火, 火災探知及び消火についての規定を記載
12. 防爆	爆発の防止及び爆発による影響を制限するための防爆の要件
13. 通風装置	水素燃料機器及び設備の安全な操作のため要求される通風装置に関する要件
14. 電気設備	可燃性雰囲気における発火のリスクを最小化するための電気設備の要件
15. 制御, 監視及び安全装置	水素燃料設備の有効で安全な運転を支える制御, 監視及び安全装置に関する要件
16. 検査, 図面及び資料	必要となる検査, 承認用図面及び資料等について記載
17. オペレーション	安全運航対策マニュアル等について記載

(a) IGFコードの見直し作業

- 水素燃料を使用する内航(限定沿海・平水に限る)の小型船舶に対し、一般の内航小型船舶(限定沿海・平水を航行するディーゼル船)と同等の安全性を確保すべく、IGFコード第4章までの機能要件や一般要件、第5章以降の詳細要件に基づくガス安全の考え方を参考に検討を進めている。
- 特に、IGFコード第5章以降については天然ガス燃料のための要件であるが、そのガス安全の考え方を精査し、安全ガイドラインに取り入れるべき要件の検討及び、その中で小型船舶には適用が厳しい要件については代替案の検討を進めてきた。

IGFコードの目次

- 1 緒言
- 2 一般
- 3 目標及び機能要件
- 4 一般要件

目標, リスク解析, 爆発影響の最小化などの一般的な概念が記載されている。

- A-1部 燃料として天然ガスを使用する船舶に対する特定要件
- 5 船舶の設計及び配置
 - 6 燃料格納設備
 - 7 材料及び燃料管装置
 - 8 バンカリング
 - 9 機器への燃料の供給
 - 10 推進器及び他のガス使用機器を含む動力生成
 - 11 火災安全
 - 12 防爆
 - 13 通風
 - 14 電気設備
 - 15 制御、監視及び安全装置

以下, B-1部 16 製作, 組立及び検査, C-1部 17 演習及び緊急時対応訓練, 18 オペレーションと続く。

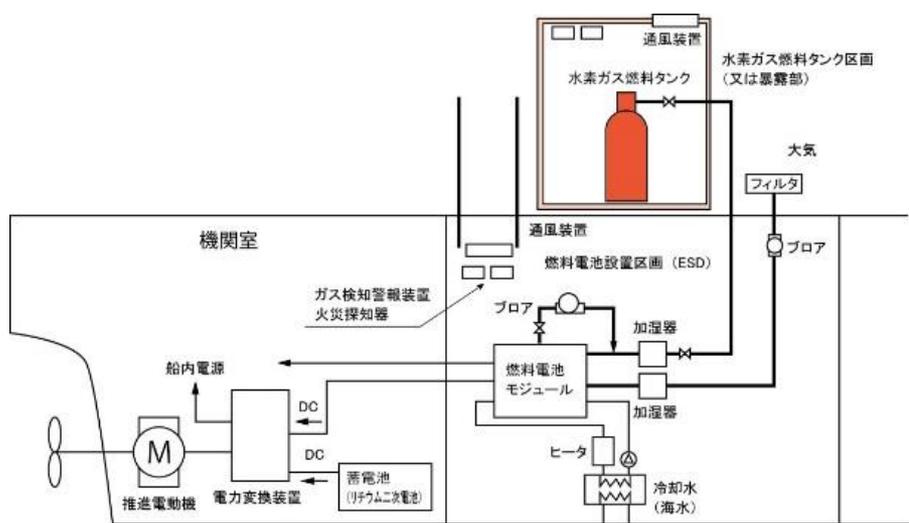
IMOにおいては燃料電池についても検討されはじめている(天然ガス改質が主対象)。

(b) 燃料電池設置区画とESD保護機関区域

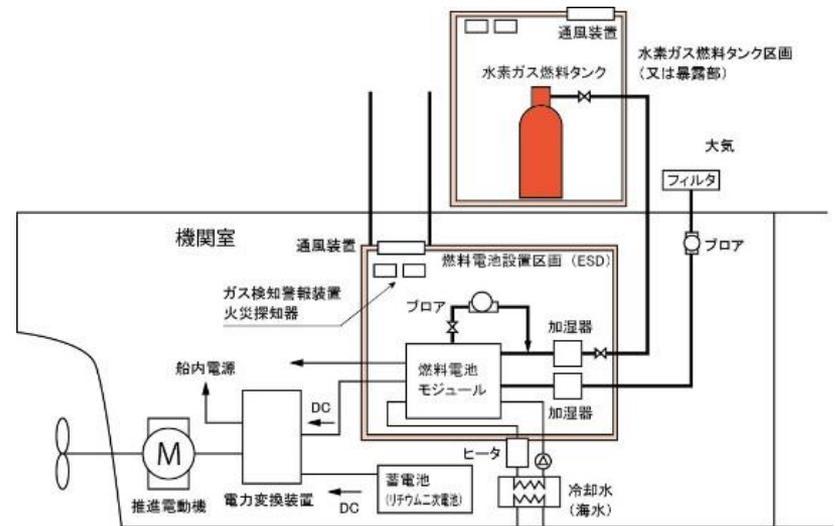
- 燃料電池はESD保護機関区域 (Emergency Shut Down, 緊急遮断) に設置することが基本となる。
- ESD保護機関区域には、ガス検知器, 通風装置, 燃料遮断弁などが設置され、ガス漏れ発生時には防爆仕様を除く電気機器を遮断する必要がある。

➡ 燃料設置区画の要点は以下の通りである。

- 適切な機器の設置とESD
- 区画への空気取り入れ口および排出口の位置
- 区画の気密性
- 通風装置の能力 (特に水素漏洩時)



甲板下の燃料電池設置区画の例



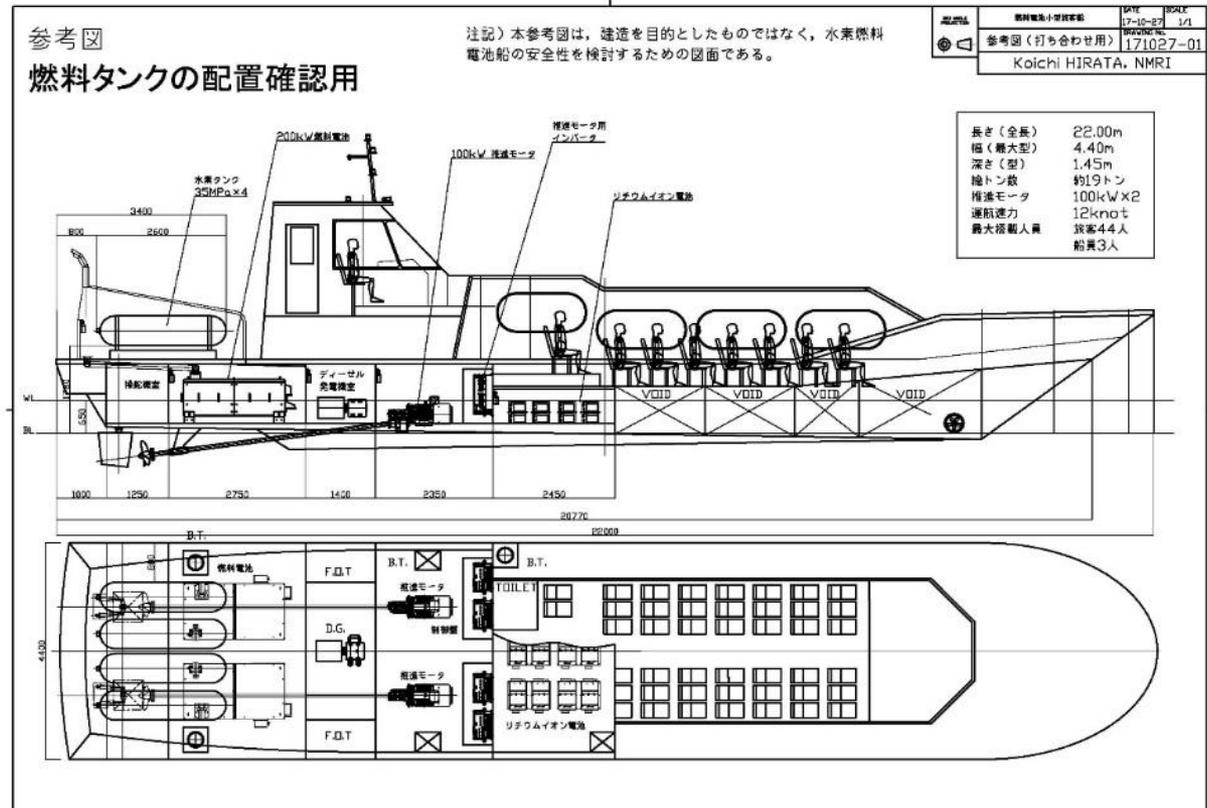
機関室内への燃料電池の配置案

(c) 水素燃料タンクの配置

- IGFコード5.3.3において、衝突や座礁による外的損傷から燃料タンクを保護するために、船側からの距離、船側および船尾端の外板からの距離、燃料タンクの最下部境界が決められている。
- 多くの小型船舶においては、燃料タンクは、船側からの距離が幅B'/5よりも船内側、船側および船尾端の外板から0.8 m以上、最下部境界はB'/15の上方に配置することが要件となる。



- 全長20m程度の小型船舶であれば、この条件を満足できると考えられる。
- しかし、より小さい船舶や長距離航路の船舶(タンクが大きい)においては、この条件を満たすことが難しくなる。
- 同等の安全性を確認できるかが課題となる。



4. まとめ

- ① GHG排出削減の新たな技術を確立するため、アンモニアやバイオ燃料、水素などの多様な燃料を使用した各種エンジン混焼試験を実施している。
- ② バイオ燃料使用時の燃料噴射制御やエマルジョン燃料化により排ガスのクリーン化が可能であること、ガスエンジンの水素混焼により約50%のCO₂排出削減が可能であることなどを確認した。
- ③ 水素燃料電池船の実船試験を実施した結果、構築したパワーマネジメントシステムの各種動作モードに関して、いずれのモードも燃料電池を含めた各周辺機器・装置の安定動作を確認することができた。また、水素残量の適切な監視に加え、燃料電池と共に搭載される蓄電池の電池残量の把握が概ね適切に管理できることを確認できた。
- ④ 水素燃料電池船の安全ガイドラインの試運用として、小型旅客船の試設計を行い、安全ガイドラインの適用性を確認した。
- ⑤ これらの水素燃料電池船の検討結果を取りまとめ、国交省によって『水素燃料電池船の安全ガイドライン』が策定された。