

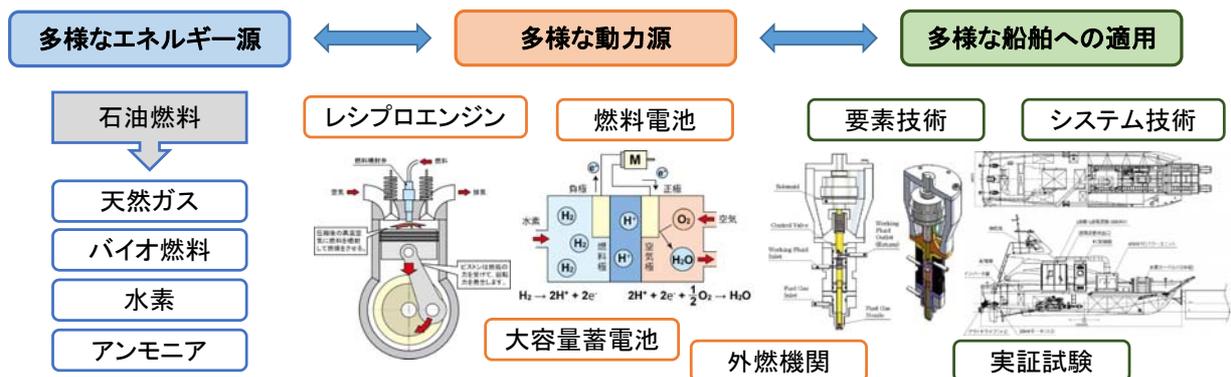
水素燃料電池船の実用開発に向けた取り組み

(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

- 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。

2030	2050	2100
★海運全体の燃費効率を40%改善(2008年比)		
★海運全体の燃費効率を70%改善		
★海運全体のGHG排出量を50%削減		
★GHG排出量ゼロ		
●LNG利用 ●水素等の混焼	●水素燃料 ●アンモニア燃料	★技術革新 ●燃料電池船 ●ゼロ炭素燃料船

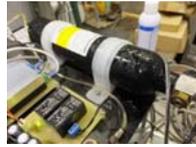


➡ 当所では, GHG削減技術の一つとして, 水素燃料電池船に関する研究に取り組んでいる。

●海上技術安全研究所における水素燃料電池関連研究

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。



水素貯蔵技術の調査



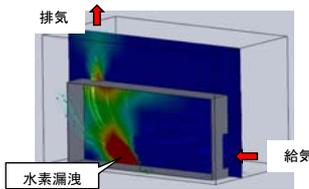
小型燃料電池の性能評価



燃料電池の基礎試験

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。



水素漏洩試験と解析



傾斜・動揺試験



海水浸水試験

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。



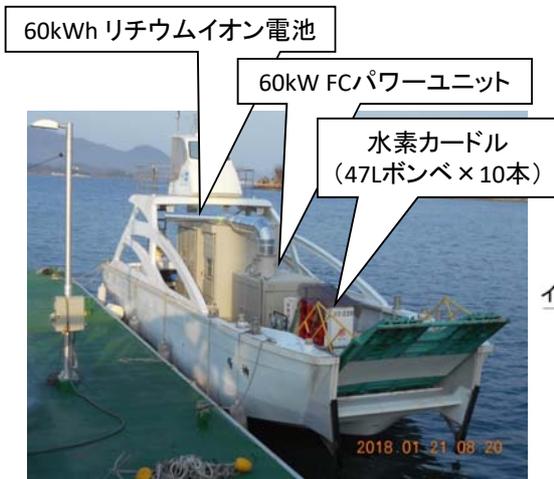
実船試験(H28-H29)



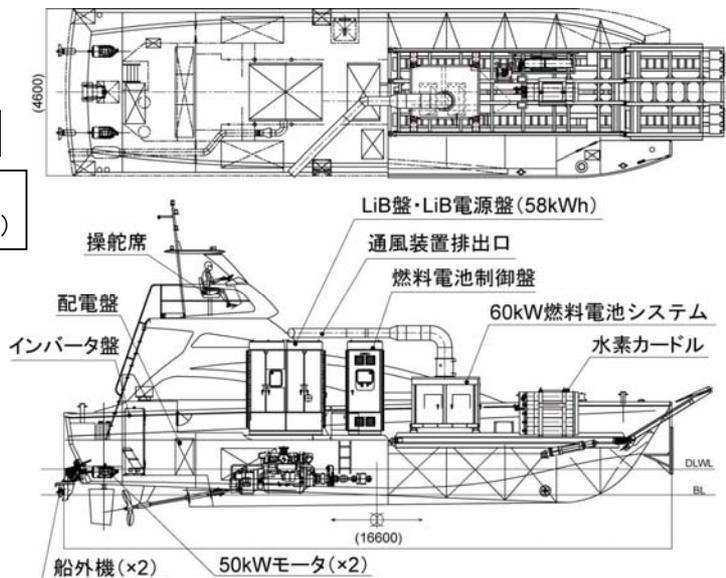
制御システム

2. 水素燃料電池船の実船試験

- 実船試験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する。
- 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。



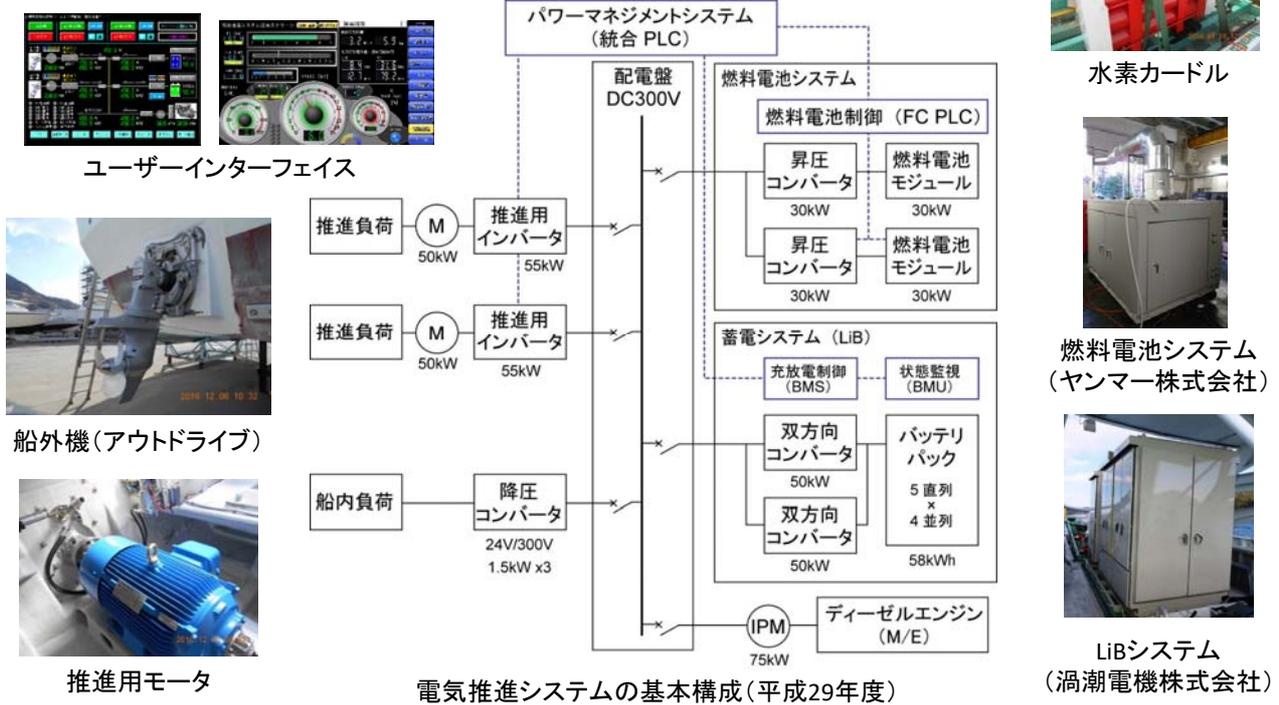
船用燃料電池推進システムを搭載した実験船(平成29年度)



実験船「神峰」の全体配置

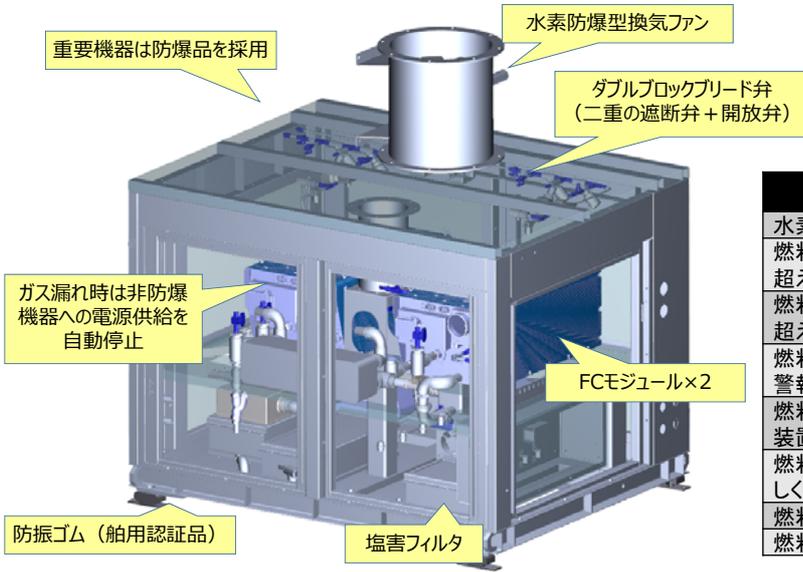
(1) 電気推進システムの構成

- 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。



(2) 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。
- 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

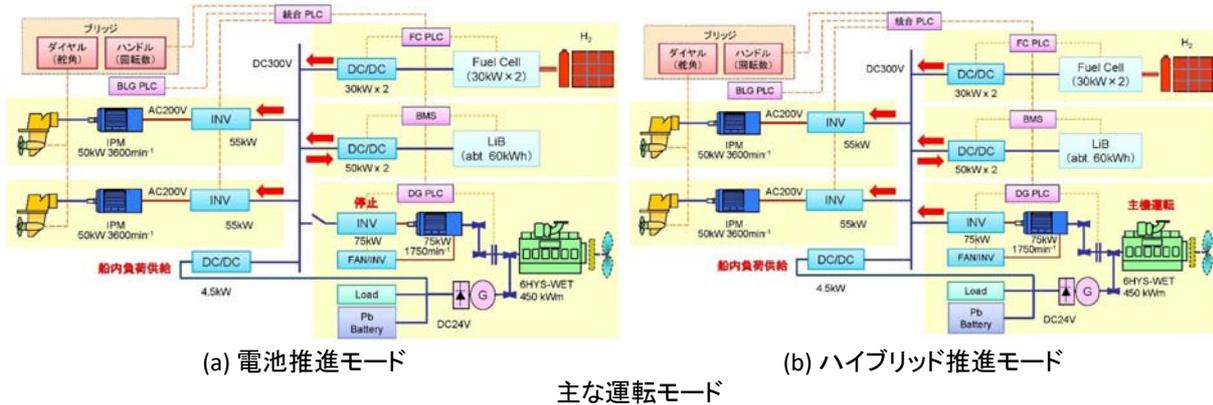
項目	警報	水素遮断
水素燃料供給圧力異常	X	
燃料電池パワーユニット内で20%LELを超えるガス検知	X	
燃料電池パワーユニット内で40%LELを超えるガス検知	X	X
燃料電池パワーユニット内のガス検知警報装置の異常	X	X
燃料電池パワーユニットの排気式通風装置の異常	X	X
燃料電池設備の冷却水(圧力、温度もしくは流量)異常	X	
燃料電池設備への電力供給停止	X	X
燃料電池パワーユニットの火災検知	X	X

燃料電池システムの基本構成

(3) 実船試験の概要 (平成29年度)

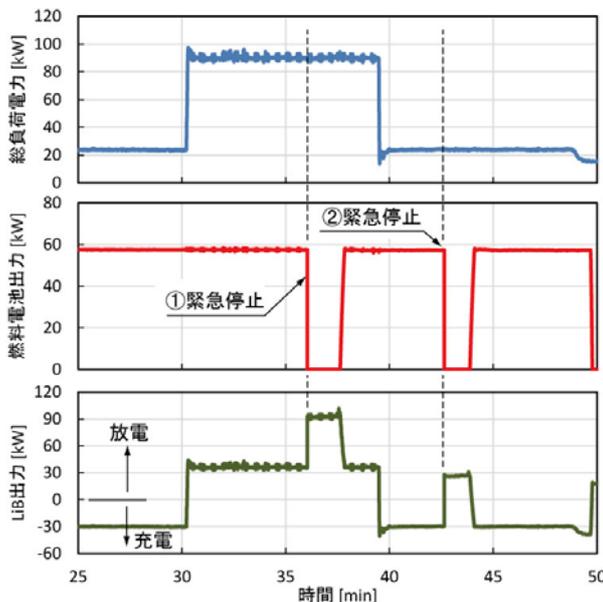
➤ 実船試験において実施した主な試験項目は以下の通りである。

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。



(4) 推進動力の冗長性確認試験

- 運航中、燃料電池システムが緊急停止した際、LiBからの電力供給に切り替わり、推進動力を維持する機能 (推進動力の冗長性)を確認する。
- (i)ハードウェアによる対応として母線への大容量コンデンサの追加, (ii)ソフトウェアによる対応として過電流を抑制する制御をDC/DCコンバータに追加するなどの対策を施している。

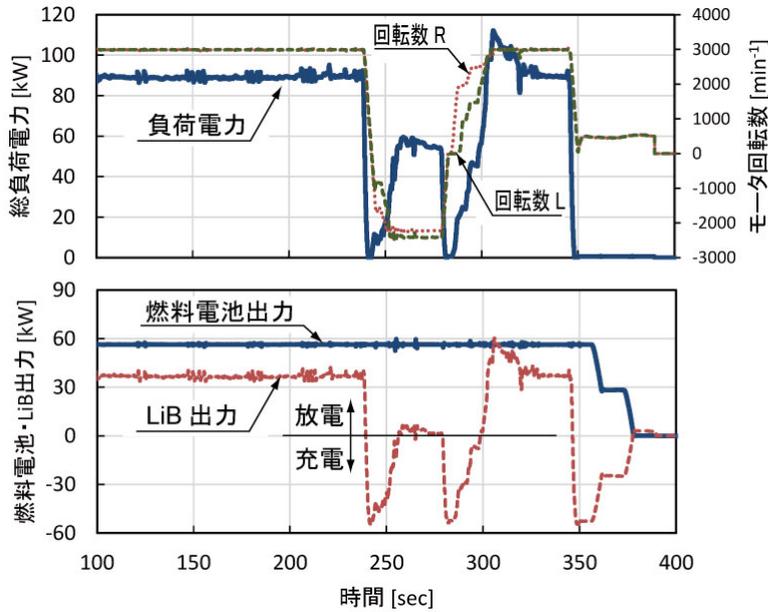


冗長性確認試験の結果(ソフトウェア対応)

- ◆ 運航中、①LiBを放電している状態および②LiBを充電している状態において、燃料電池システムを故意に緊急停止させている。
- ◆ 燃料電池システムを緊急停止させた場合においても、LiBの放電・充電状態に限らず、推進動力が維持されていることがわかる。
- ◆ ハードウェアによる対応においても推進動力が維持されることが確認されており、冗長性を確保するための手法としてハード・ソフト両面から有効な知見を得ることができた。

(5) 電気推進モードにおける前後進試験

- 全速前進から全速後進へ操作するクラッシュアスターンおよび後進の状態から全速前進へ操作する試験を行い、電気系統が適切に動作することを確認する。



- ◆ クラッシュアスターンで懸念されていたモータからの逆電力は確認されなかった。
- ◆ 後進から全速前進へ操作した際にはモータの定格を超える推進負荷が生じたものの、いずれの状態においても燃料電池システムを含む電気推進システムに重大な支障はなく、安定した運航を維持できることを確認できた。

9

(6) 水素カードル交換作業の安全確認

- 水素カードルの交換作業としては、クレーン作業、玉掛け作業、配管作業、固縛作業がある。
- 水素カードルの交換作業の安全対策は、安全運航対策マニュアルへの作業内容および作業手順の記載並びに水素カードル交換時のチェックリストの作成などであり、実船試験においてこれらの対策の効果を確認した。



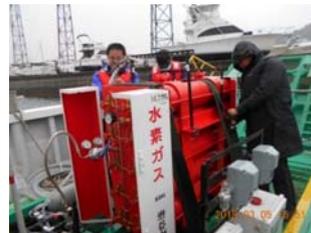
①クレーン作業
陸上のクレーンで水素カードルを吊り上げる。



②玉掛け作業
吊り具の取り付け、取りはずしを行う。



③配管作業
最低1箇所配管を接続する。



④固縛作業
船体に水素カードルを固定する。

水素カードルの交換作業の様子(実船試験時)

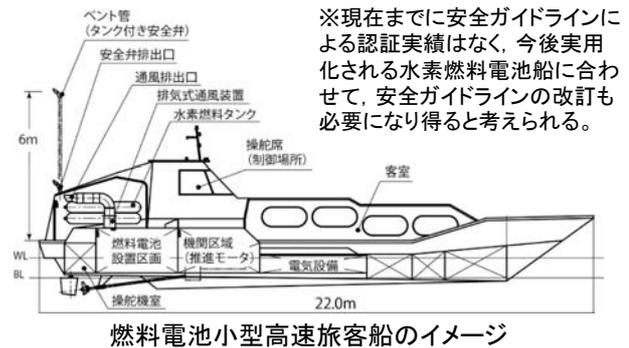
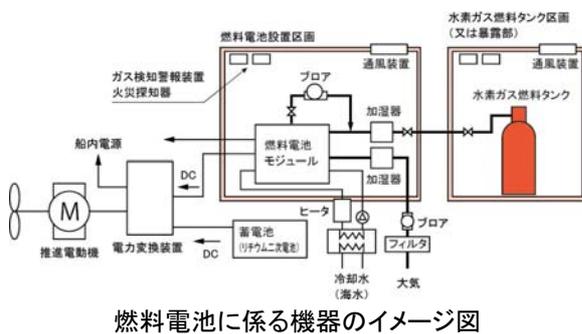
10

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)

- 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や水素漏洩時の安全対策を検討するための試験, 上記の実船試験などを実施した。
- 平成29年1月に発効したIGFコード(国際ガス燃料船安全コード)におけるガス安全の考え方を参考にして, 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た。

➡ これらの検討結果を取りまとめ, 国土交通省によって『水素燃料電池船の安全ガイドライン』(水素ガスを燃料とした内航(限定沿海・平水に限る), 小型船舶(20トン未満)に限定)が策定された。



※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。

(1) 水素燃料電池船の安全ガイドラインの概要

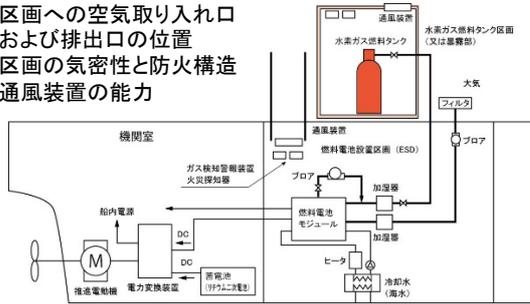
水素燃料電池船の安全ガイドラインの目次と概要

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

(2) 安全ガイドラインの試運用と課題

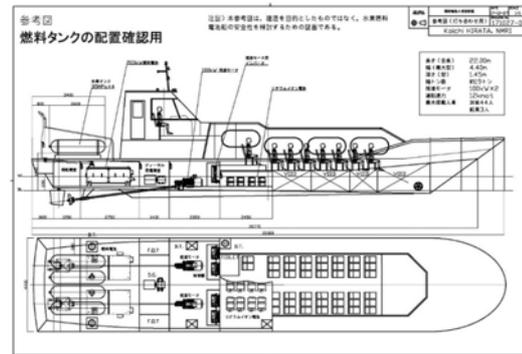
➤ 現在までに安全ガイドラインによる認証実績はなく、今後実用化される水素燃料電池船に合わせて、安全ガイドラインの追補等が必要になる可能性がある。

- 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
- 区画の気密性と防火構造
- 通風装置の能力

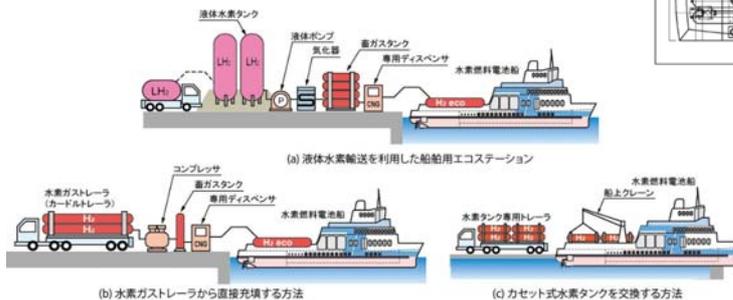


甲板下の燃料電池設置区画の例

- 事故時(衝突、座礁)のタンクの保護
- 安全装置作動時の被害の最小化
- 強度設計、検査方法



水素燃料タンクの検討例



水素バンカリングの検討例

- 安全かつ確実なバンカリング方法
- 要件の明確化
- 陸上設備との兼ね合いを考慮した基準策定

13

4. 水素燃料電池船の実用開発に向けて

(1) 水素燃料電池船の制御システムの開発

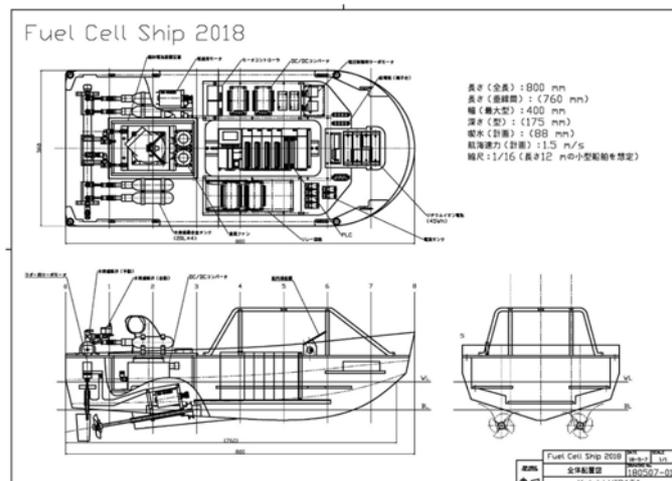
- 上記の実船試験と並行して、より完成度を高めた水素燃料電池船の制御システムの研究・開発を進めてきた。
- 模型船による陸上試験や水槽試験を行い、安全機能を含めた制御システムの高度化を進めている。

主な特徴

- ① 燃料電池設置区画と機関室・電気機器室の分離など、安全ガイドラインに見合った基本設計。
- ② 燃料電池とリチウムイオン電離の負荷分担と過電力防止のための出力制御機能。
- ③ 水素漏洩や通風ファンなどの監視。



模型燃料電池船の水槽試験

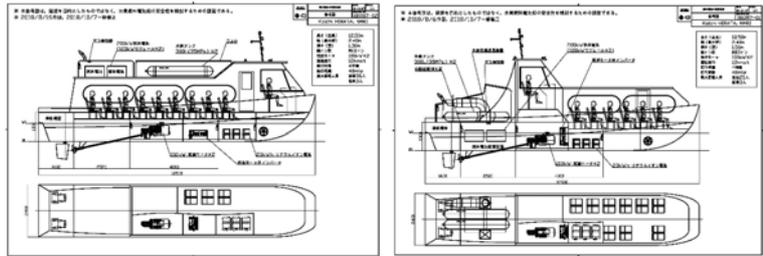


模型燃料電池船の構造

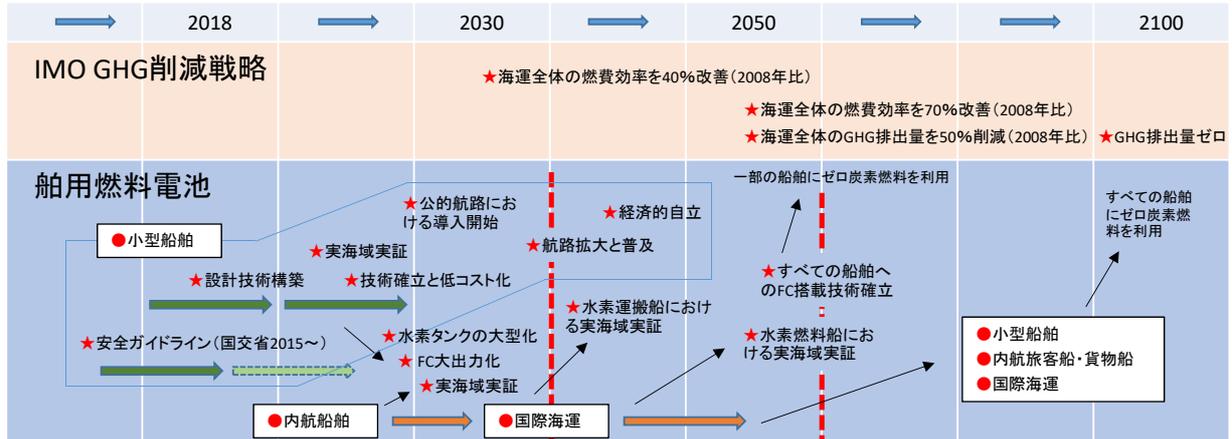
14

(2) 水素燃料電池船の試設計とロードマップ策定

- 現在までの調査結果を踏まえて、水素燃料電池船に適した用途の検討と試設計を進めている。
- 水素燃料電池船の実用化・普及を目指したロードマップ策定を進めている。



IMO GHG削減戦略と船用燃料電池ロードマップ素案のたたき台



15

5. まとめ

GHG排出削減の新たな技術を確立するため、水素燃料電池船に関する研究に取り組んでいる。

- ① 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。
- ② 本実験船においては、リチウムイオン電池の制御手法を工夫することにより、燃料電池システムが緊急停止した場合においても推進動力の冗長性を確保することができた。
- ③ 本実験船において様々な試験を行った結果、クラッシュアスターン等の厳しい条件においても、燃料電池システムを含む電気推進システムに重大な支障はなく、安定した航行ができることを確認できた。
- ④ これらの検討結果を取りまとめ、国土交通省によって『水素燃料電池船の安全ガイドライン』が策定された。
- ⑤ 水素燃料電池船の実用開発に向けて、水素燃料電池船に適した用途の検討と試設計並びに水素燃料電池船の実用化・普及を目指したロードマップ策定を進めている。

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た。また、実船試験に使用したリチウムイオン電池システムについては、渦潮電機株式会社の方々から多大な協力をいただいた。

水素燃料電池船の試設計と水素燃料電池船ロードマップ策定は、平成30年度燃料電池船技術評価FS事業(環境省)の一部として、みずほ情報総研株式会社、ヤンマー株式会社、流体テクノ株式会社らと検討を進めている。

16