

# 船舶分野における燃料電池システムの展開



(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

## 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CO<sub>2</sub>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。

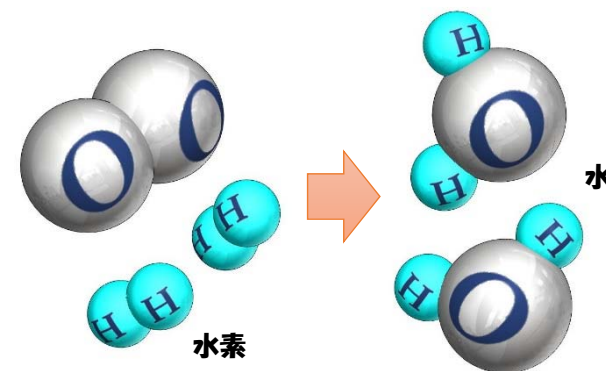
### 政府方針

- 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策定された「水素・燃料電池戦略ロードマップ」(平成26年6月策定、平成28年3月改訂)において、燃料電池の適用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。
- 平成29年6月に策定された「未来投資戦略2017」において、水素エネルギーを本格活用する水素社会の実現に向け、燃料電池自動車や燃料電池バス、水素ステーション等の普及を加速化する旨記載された。
- 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。

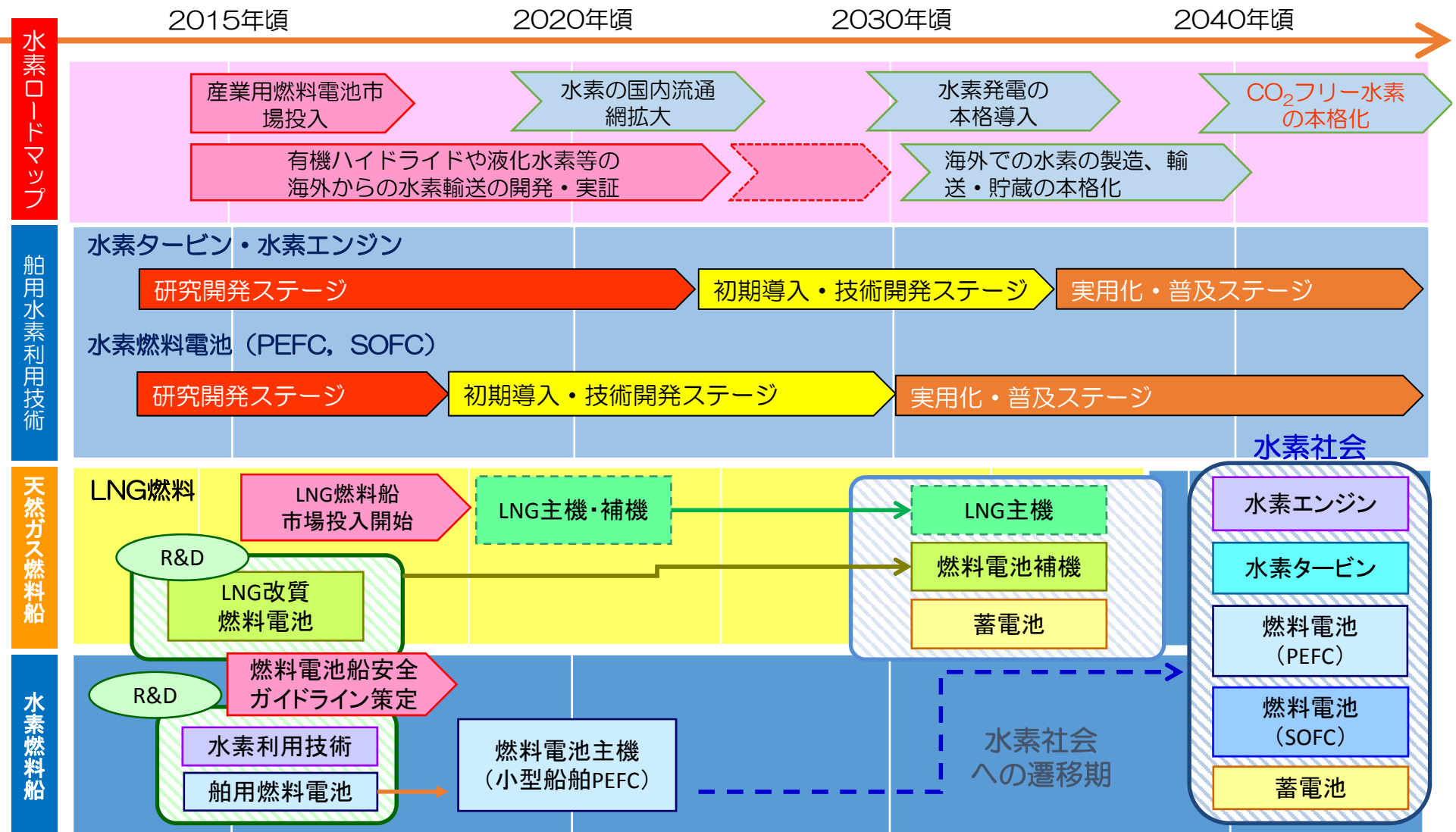
➡ 船舶分野・海事産業の分野においても水素利用の研究開発が進められている。

### 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。
- 千代田化工は、有機ハイドライドによる大量輸送のための研究開発を実施している。
- 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。



# ●海上水素社会の発展イメージ



# ●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)

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排熱回収システムの研究開発、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
- ✓ リチウムイオン電池の小型実験船への搭載
- ✓ 小型燃料電池の負荷試験・燃料電池船の検討

## 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～H28)

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 ➡
  - ✓ 塩害の影響と対応策
  - ✓ 傾斜・動揺時の燃料電池の負荷試験
  - ✓ 振動・衝撃の影響と対応策
  - ✓ 船内水素配管の漏洩特性評価試験
  - ✓ 換気システムやガス検知器の陸上試験
- ★実船試験の実施 ➡
  - ✓ 船用推進システムの検討
  - ✓ 実験船の準備と試験実施
- ★安全要件のとりまとめ ➡
  - ✓ 安全ガイドライン暫定案の作成

※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」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。

## 2. 船用燃料電池システム関連の基礎試験

平成27年度

燃料電池が船舶特有の環境における使用に耐えられることを調べるための基礎試験

- ➡ ✓ 塩害試験・フィルタ性能試験
- ✓ 傾斜試験・動揺試験, 振動・衝撃試験など

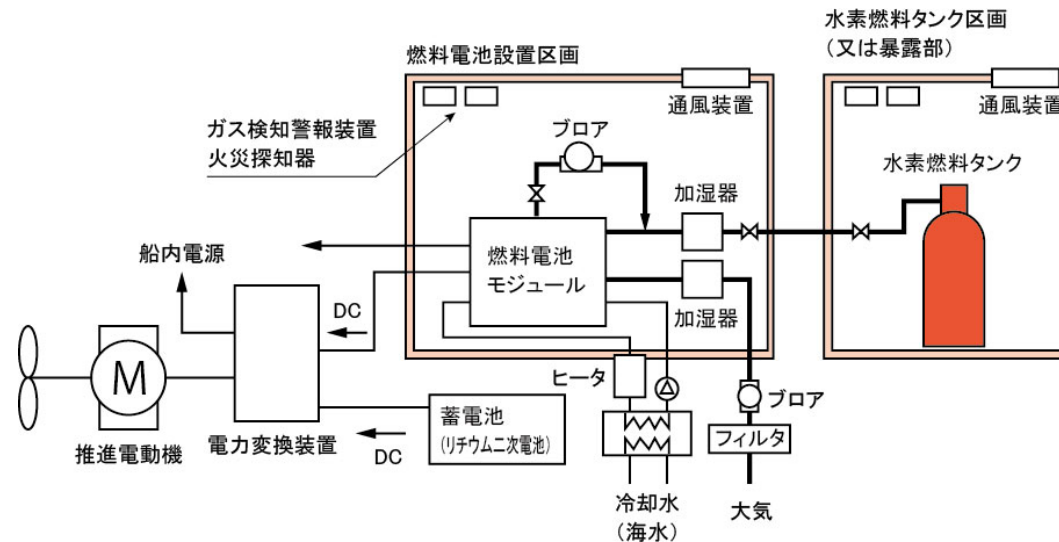
平成28年度

水素漏洩を防止するための知見を得る試験

- ➡ ✓ 船内水素配管の漏洩特性評価試験など

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など

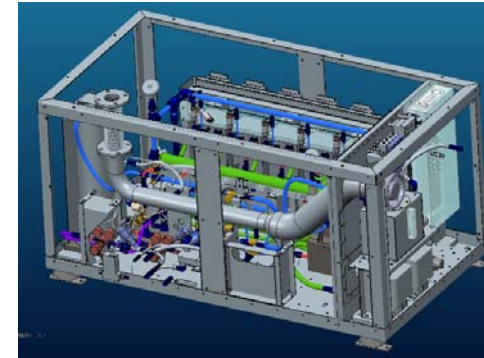


## 2.1 燃料電池システムの傾斜・動揺試験

●海技研に設置されている大型動揺台を使用して、ヤンマーが開発した5 kW船用燃料電池システムの動揺条件下における試験(最大傾斜角度約24 deg, 周期10~15秒)を実施した。

●結露水および生成水の排水性を悪化させると、セル電圧の低下や変動が発生することが確認された。これはフラッディング※が生じているためと考えられ、大傾斜が想定される船舶に搭載する場合には排水方法について留意する必要がある。

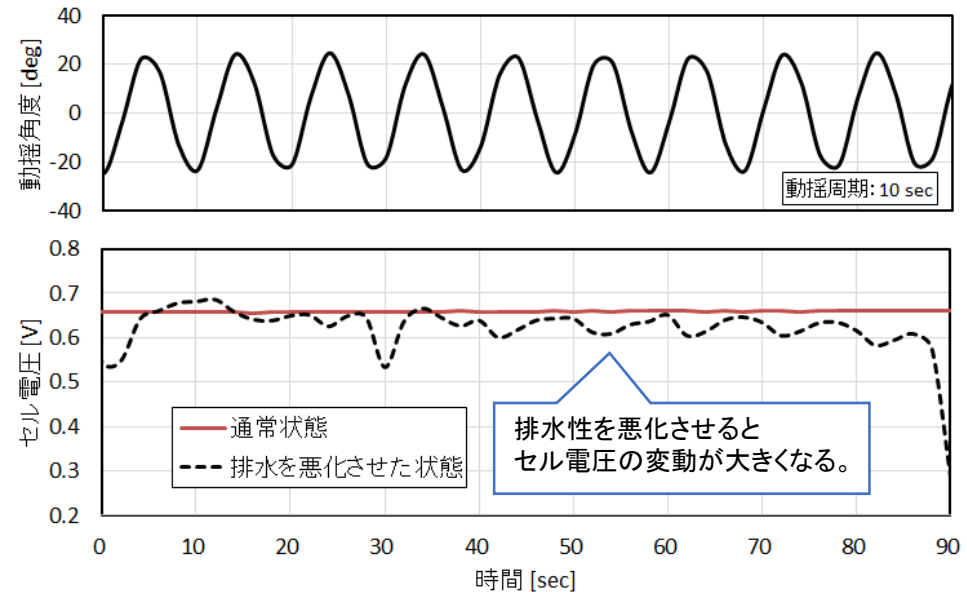
※フラッディング:カソード(空気極)で生成する水があふれてガスの流路を妨げる状態



5kW船用燃料電池システム



動揺試験の様子



試験結果の一例

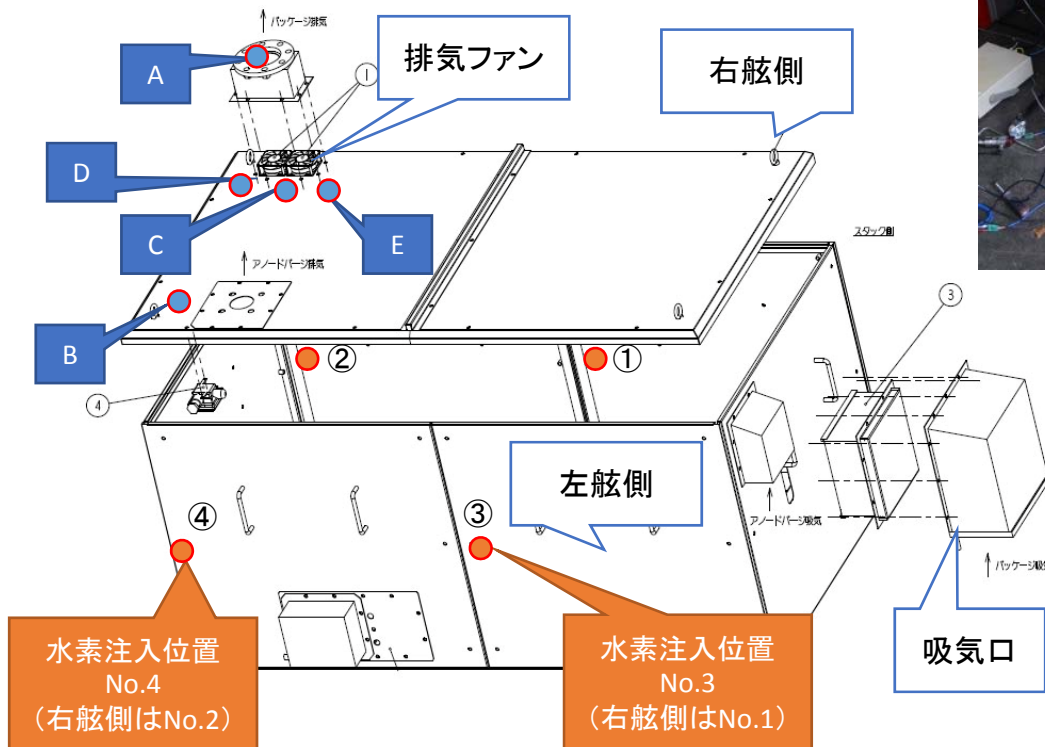


## 2.2 燃料電池システムの水素漏洩試験

●実船試験のために準備した燃料電池システムの筐体を用いて、水素漏洩時のガス検知器の作動状態を確認する。

ガス検知器設置位置

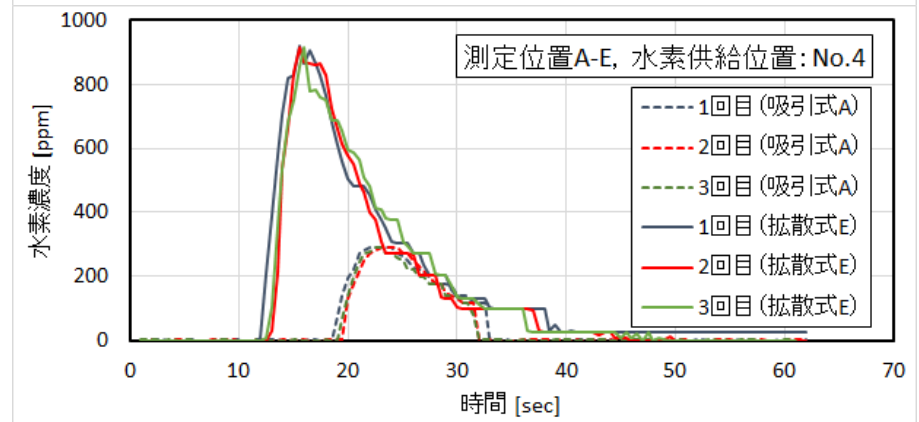
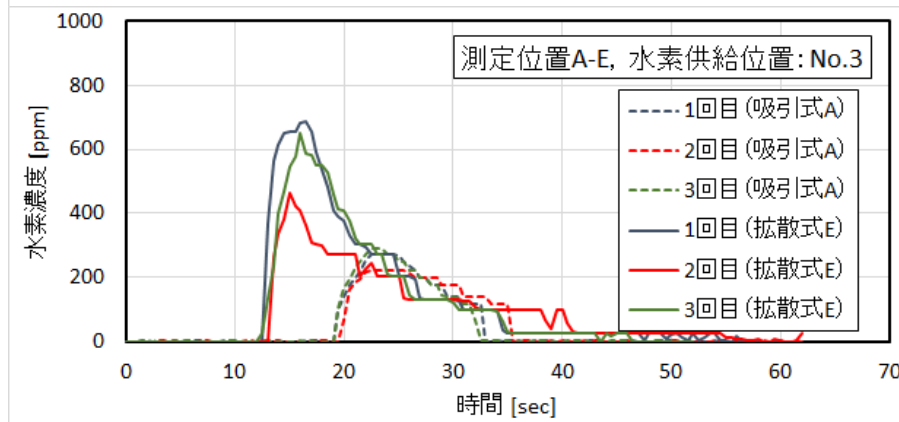
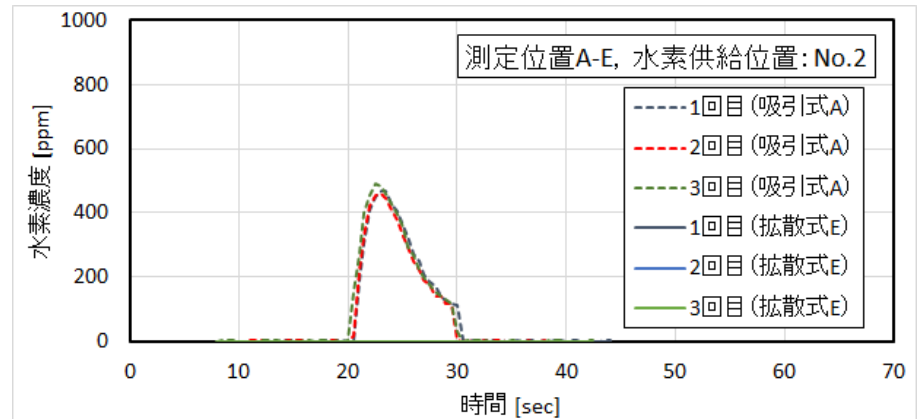
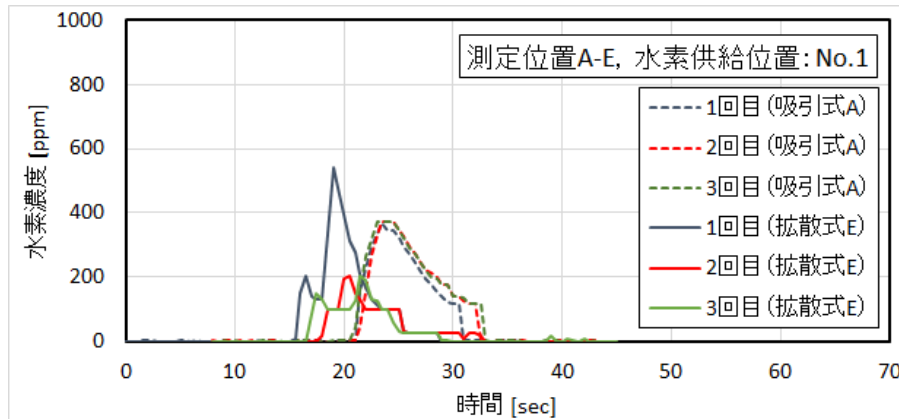
A	換気口配管出口(吸引式)
B	左舷前方(水素ガス滞留位置, 拡散式)
C	換気ファン上流・真下(吸引式)
D	換気ファン上流・前方(拡散式)
E	換気ファン上流・後方(拡散式)



吸引式ガス検知器(左)と  
拡散式ガス検知器(右)

- 水素注入位置は、No.1～No.4の4箇所(右舷中央, 右舷前方, 左舷中央, 左舷前方)とし、注射筒を使用して約1 secで100 ccの水素を供給する。
- ガス検知器の設置位置はA～Eの5箇所とし、数種類のガス検知器を使用する。
- 再現性を確認するため、同一条件で3回ずつの計測を行う。

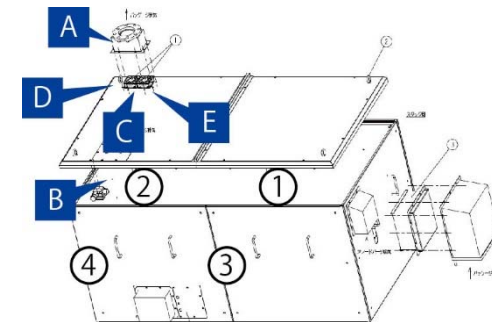
## ●換気試験の計測例(計測位置A, E)



●測定位置A(換気口配管出口)では, 水素供給位置No.1~No.4のいずれにおいても200~400 ppm(0.02%~0.04%)の水素濃度が計測されている。

●測定位置E(換気ファン上流・後方)は筐体内の空気がよく流れている場所であり, 拡散式のガス検知器を設置した場合, 右舷前方の水素供給位置No.2以外では水素がよく検知される。

●拡散式のガス検知器は吸引式と比べて水素注入後の応答が早く検知濃度が高い。今回の試験装置では拡散式と吸引式の検知時間の差(8~10秒程度)である。

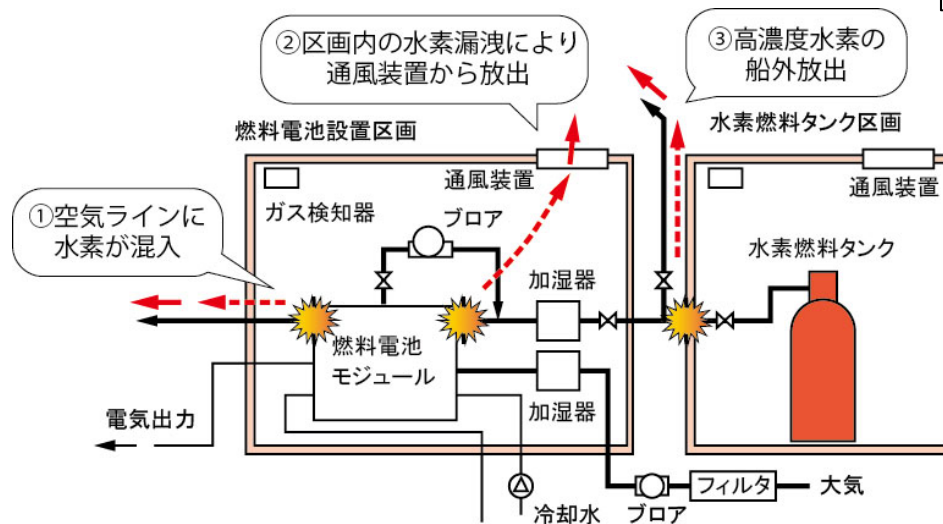




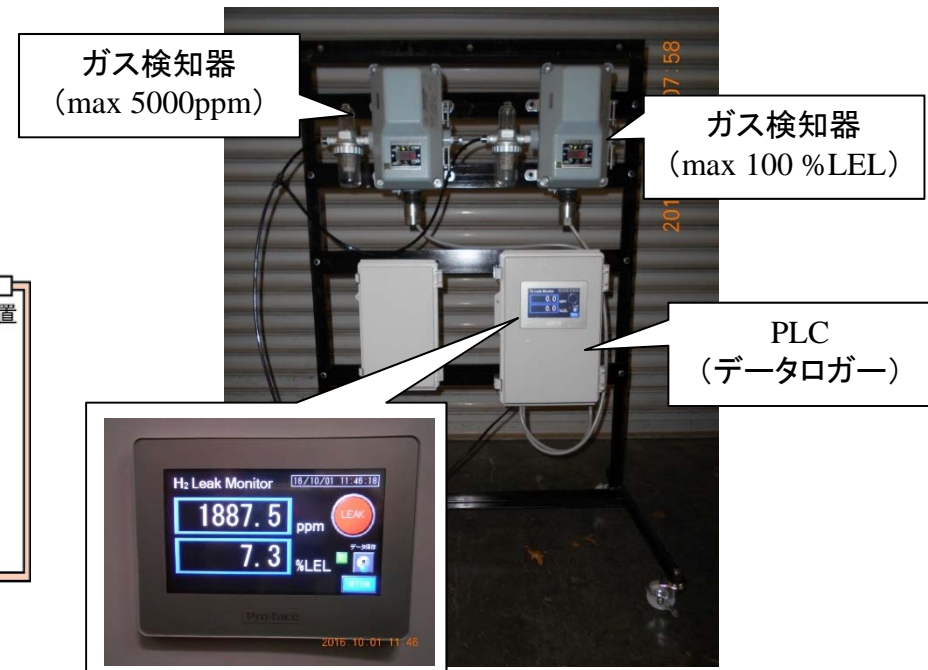
## 2.3 換気システムの基礎試験とCFD計算

● 船上のガス危険区域やガス検知，換気システムの安全要件を明確にするため，配管からの水素漏洩や燃料電池システムからの水素放出等を模擬した換気システムの陸上試験を実施した。

➡ 水素ガス検知器を用いた陸上試験とCFD (SolidWorks Flow Simulation) を併用して水素の拡散状況などを調べる。



想定される水素漏洩

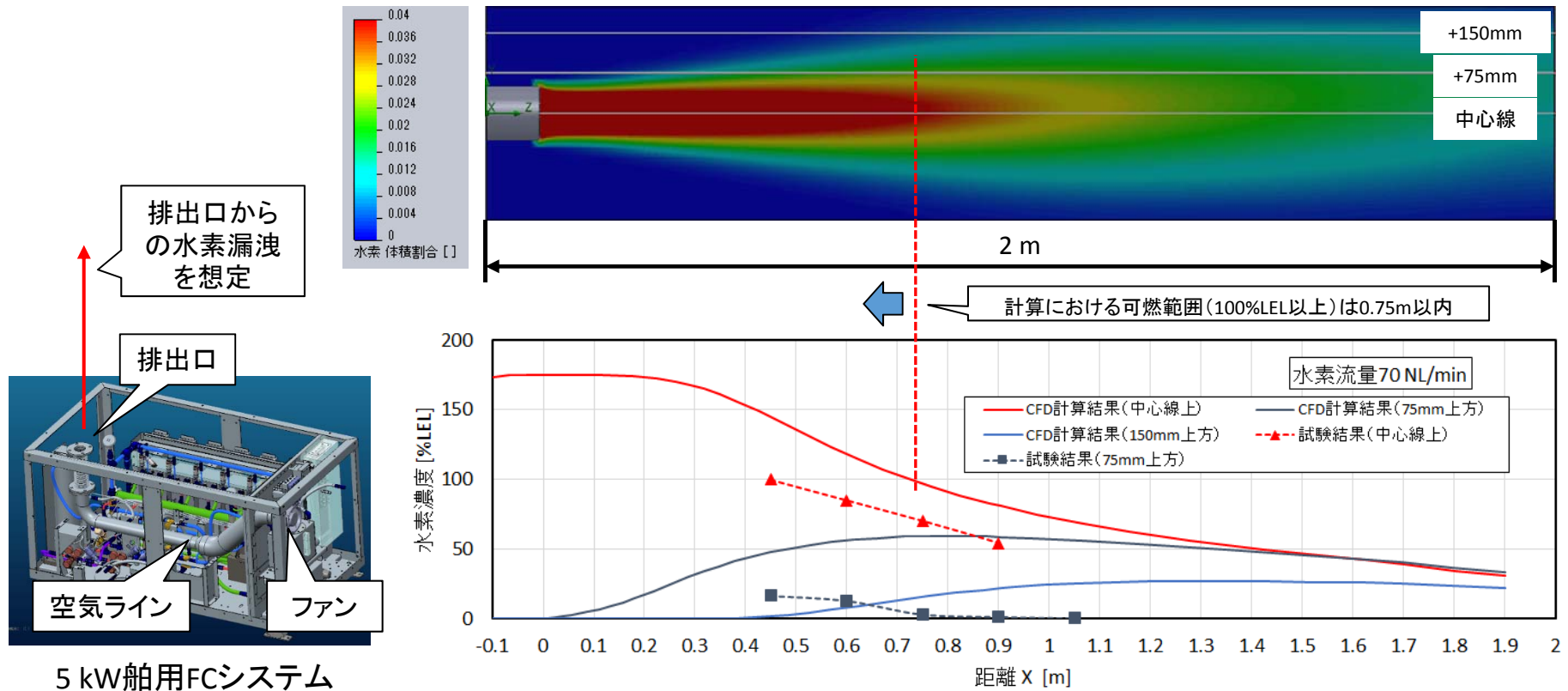


試験装置(水素ガス検知器)

# (1) 水素放出の模擬試験とCFDとの比較

流量1000 NL/minの空気が流れるパーズライン中に70 NL/minの水素(濃度100%)が流入し、その混合ガスが直径90 mmの配管から船外に放出されることを想定した模擬試験(屋外)およびCFD計算を実施した。

→ 中心線上の水素濃度の試験結果はCFDによる計算結果よりもやや低い。また、上方の水素濃度の試験結果はばらつきが大きく、CFDによる計算結果よりもかなり低い。

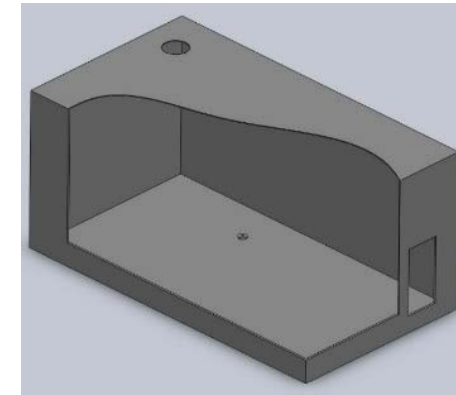


CFD計算と模擬試験結果との比較

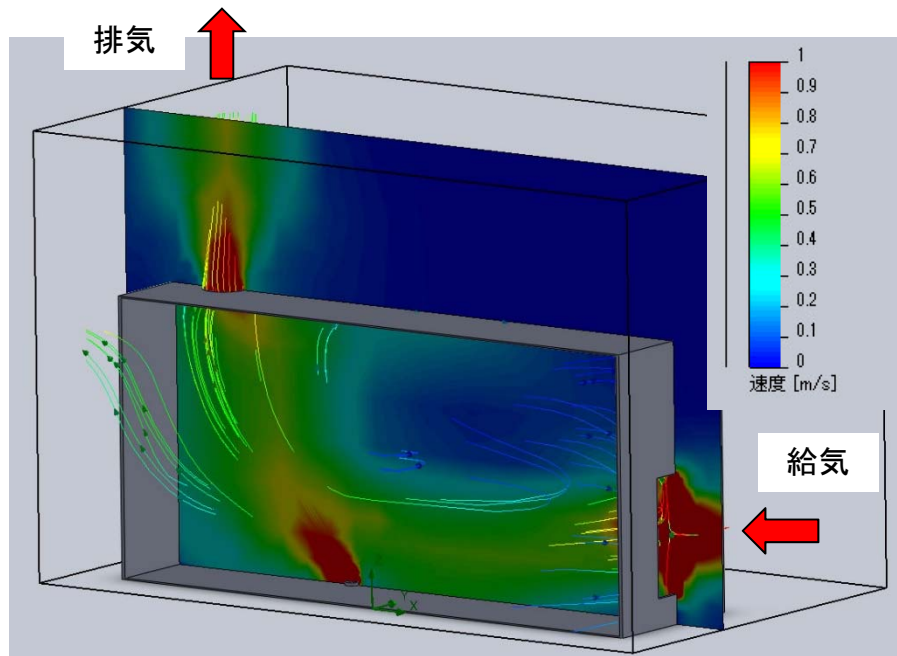
## (2) 換気された区画内での水素漏洩

強制通風された燃料電池設置区画内(筐体内)で高濃度の水素が漏洩したことを想定したCFD計算を行った。

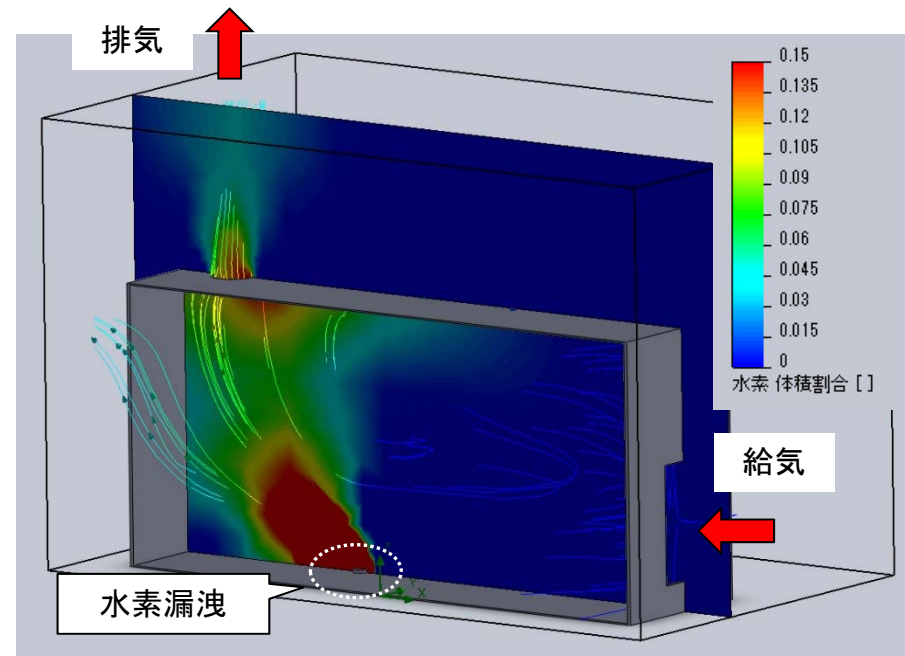
→ CFD計算の結果と試験結果を比較し、詳細に評価することで、船上のガス危険区域やガス検知、換気システムの安全要件を明確にする。



FC筐体モデル



CFDによる流速の計算例



CFDによる水素濃度の計算例

### (3) 高濃度水素の船外放出のCFD計算例

高濃度水素(100%)を船外に排出することを想定してCFD計算を行った(口径25 mmの排出管から100 NL/minの水素が放出)。

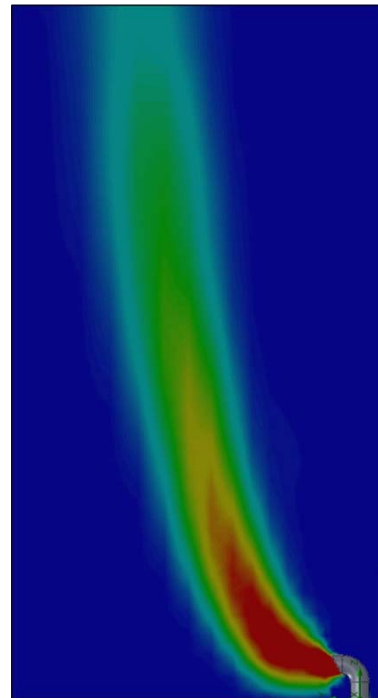
➡ 無風状態において、水素はほぼ真上に向かって流れていく。

周囲に空気の流れ(風)があると水素は拡散しやすい。

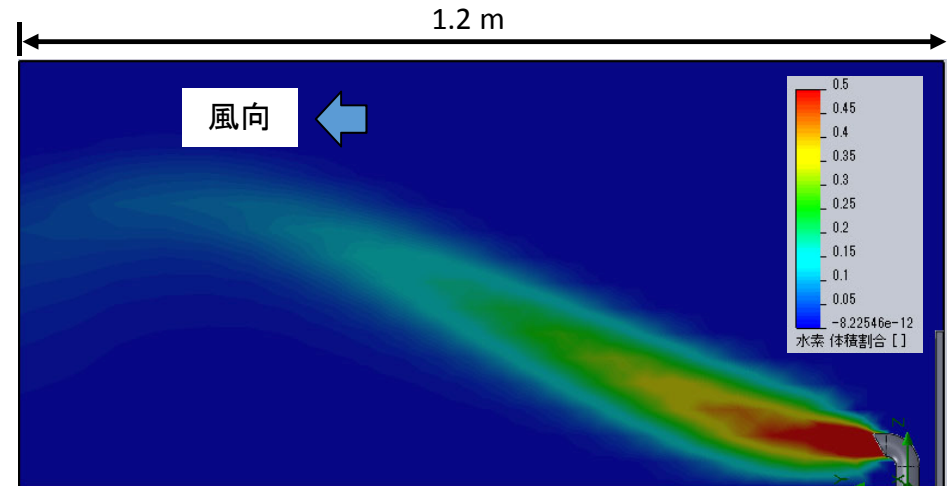
燃焼範囲は、風速が速くなるほど狭くなる。



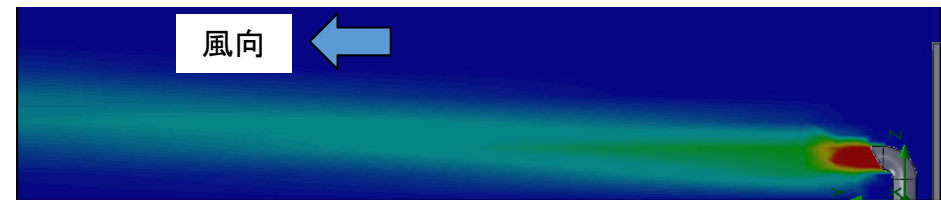
船外排出管モデル  
(口径25 mm)



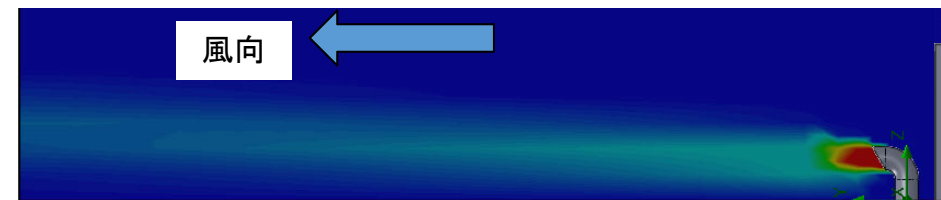
(a) 無風



(b) 風速1 m/s



(c) 風速5 m/s



(d) 風速10 m/s

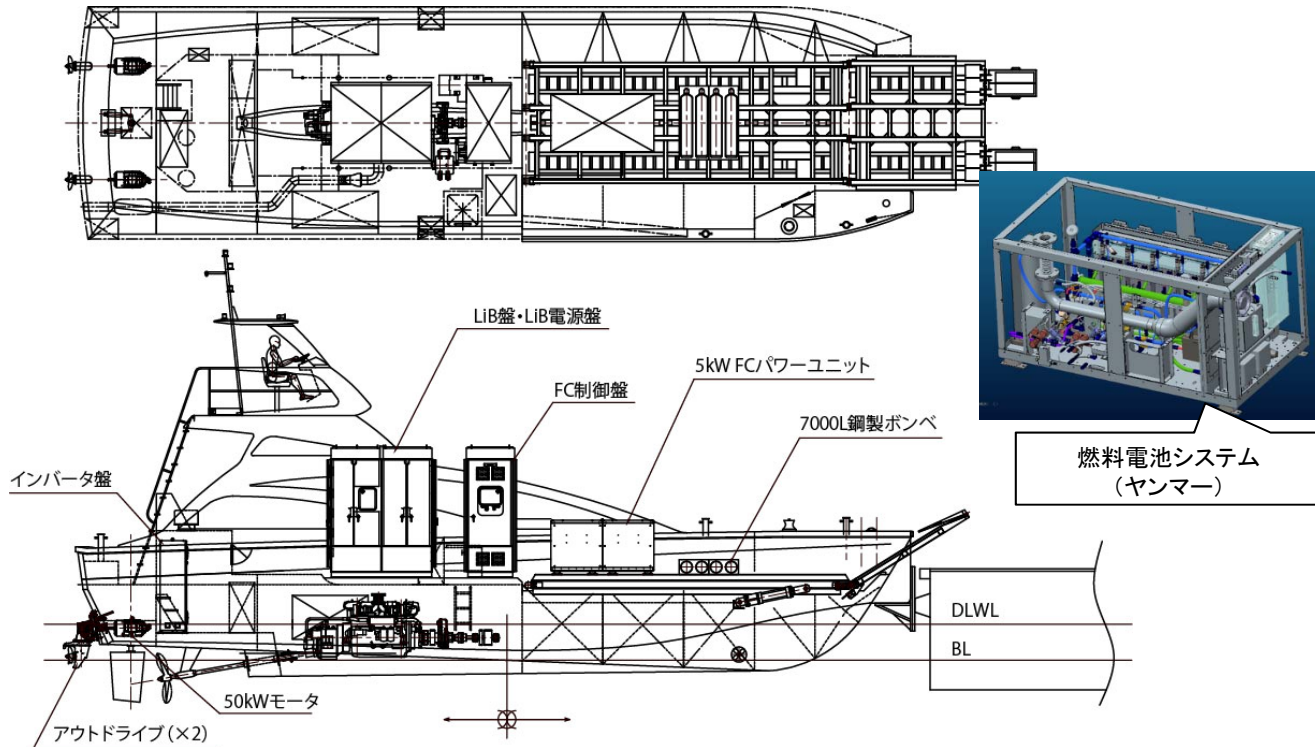


### 3. 実験用燃料電池システムの開発と実船試験

- 燃料電池船の安全航行のためには、多様な航海状態における負荷変動に対し、速やかに追従できるパワー・マネジメント・システム(二次電池とのハイブリッド設計による電気推進システム)が必要となる。
- 実機による陸上試験および実船試験を行い、船舶の航行安全に必要なパワー・マネジメント・システムを検証した。



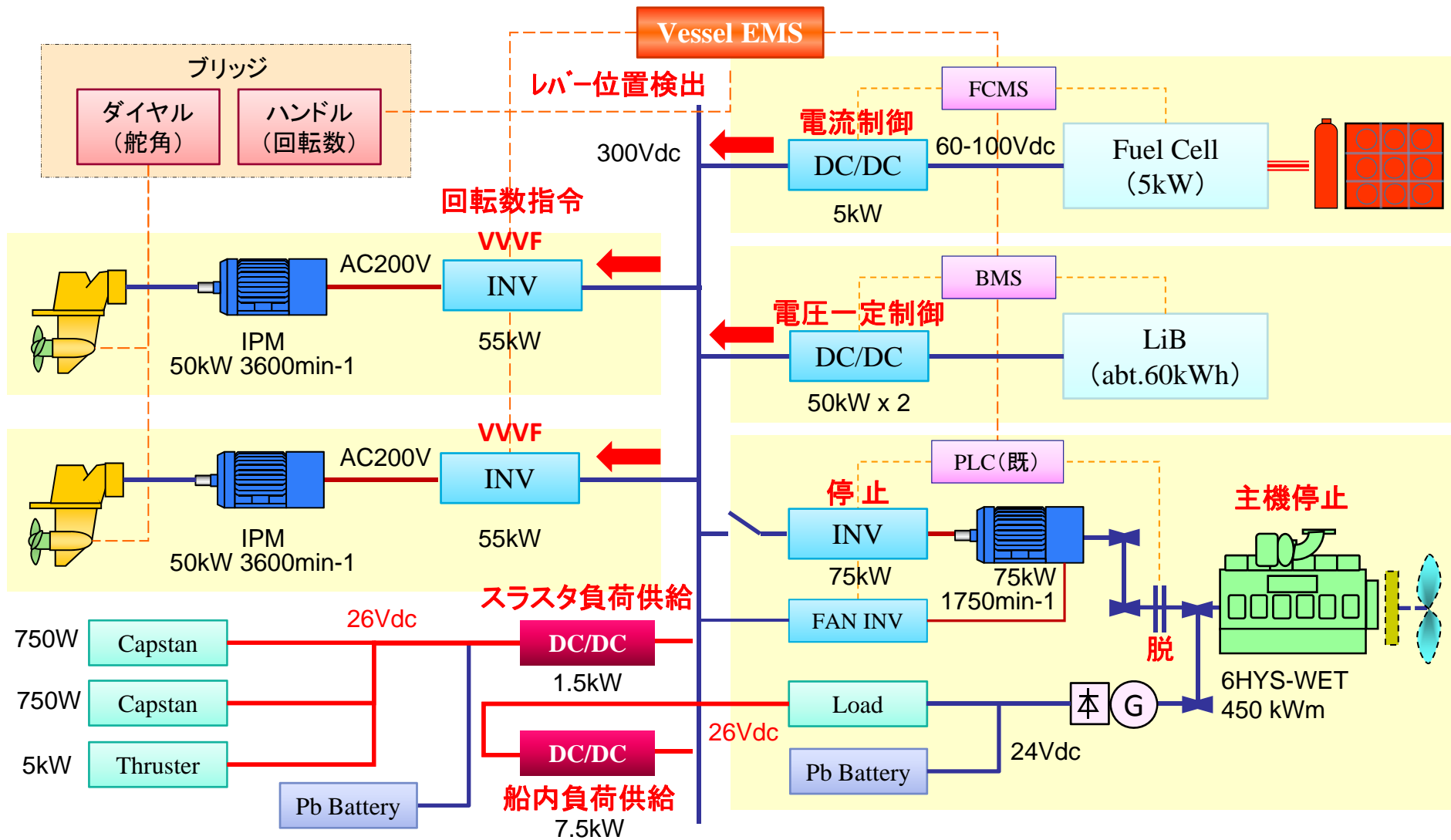
リチウムイオン電池  
(渦潮電機)



実験船への船用燃料電池推進システムの搭載

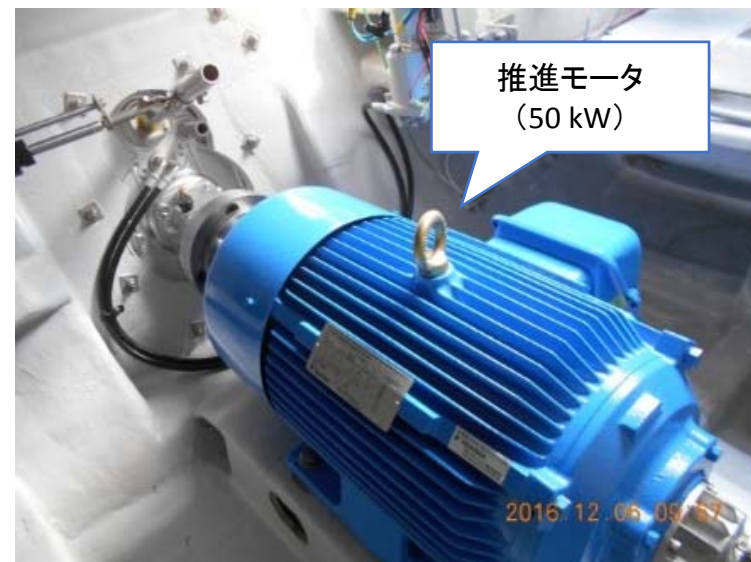
※本実験船は、海上技術安全研究所が国土交通省による交通運輸技術開発推進制度「離島の交通支援のためのシームレス小型船システムの開発」として社会実験を行ったプロジェクトで開発しました。

### 3.1 実船試験のシステム構成





## ● 実験船への船用燃料電池推進システムの搭載



## 3.2 実船試験における各種運転モード

### ①電気推進モード

ディーゼルエンジン発電機(主機前駆動)を電力源として航行する。

### ②電池推進モード

燃料電池, リチウムイオン電池を電力源として電池のみで航行する。

### ③ハイブリッド推進モード

FC, LiB, 主機前発電機を電力源としてハイブリッド電力供給で航行する。

### ④主機アシストモード

FC, LiBを電力源として主機前発電機をモータリングしてトルク加勢する。  
もしくは主機航行中にアウトドライブを駆動して推進加勢する。  
(いわゆるエンジンとモータのハイブリッド推進)

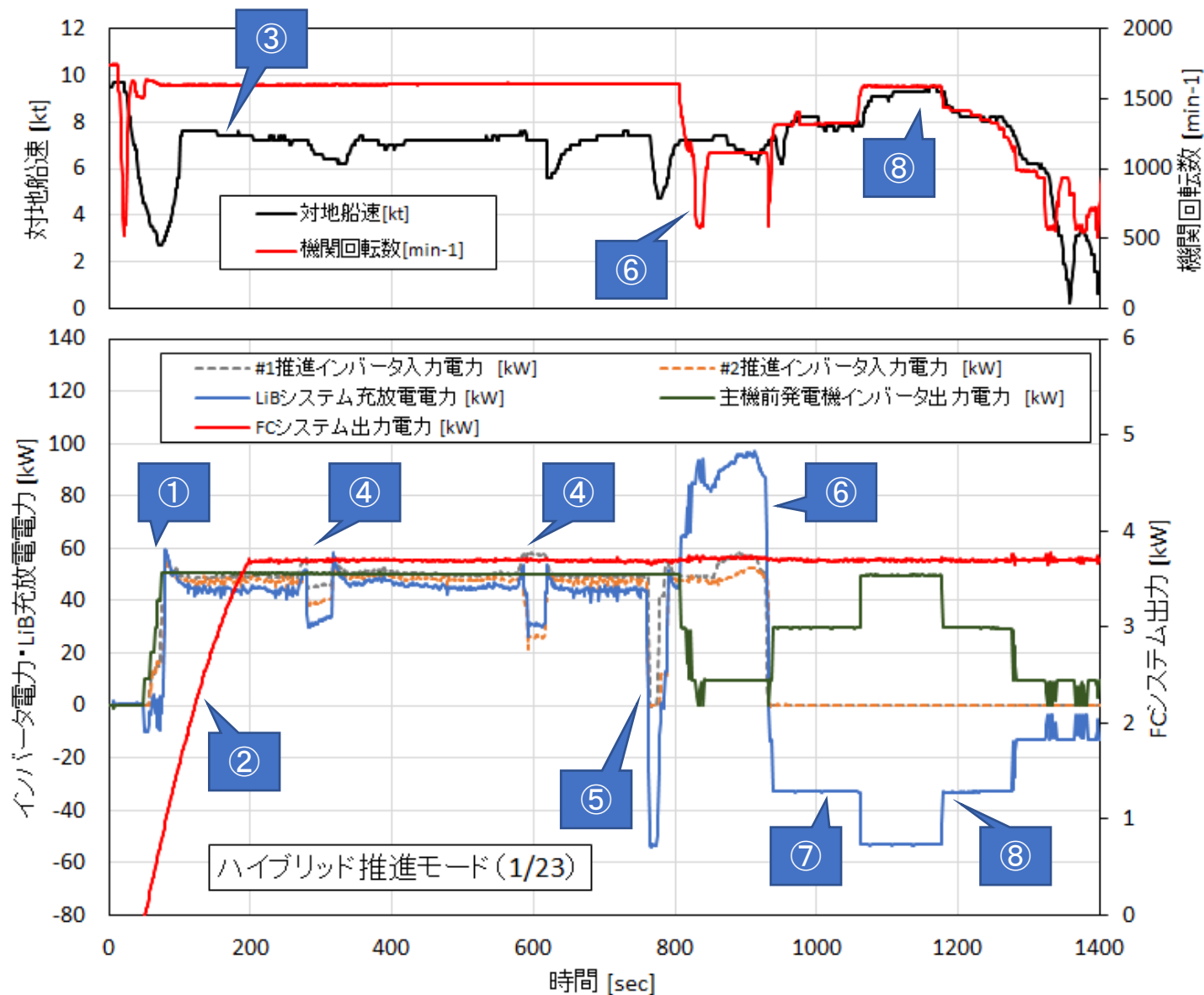
### ⑤LiB充電モード

FC, 主機前発電機を電力源としてLiBに充電する(航行中/停泊中)。



実船実験では, 各モードについて, 制御システムや安全対策の作動状況を確認した。

### 3.3 実船試験における計測例(ハイブリッド推進モード)



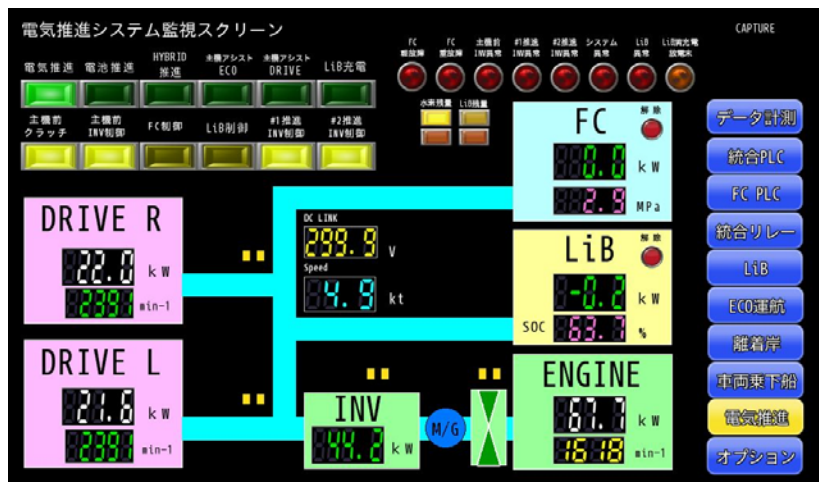
- ①ハイブリッド推進モード起動
- ②FCシステム起動
- ③約100 kW出力の推進モータによる航行
- ④旋回(推進モータの回転数制限)
- ⑤推進モータの回転数指令低下により、ディーゼルエンジン発電機からLiBに充電
- ⑥ディーゼルエンジン回転数低下指示によりディーゼルエンジン発電機が停止し、FC・LiBで推進
- ⑦推進モータを停止し、ディーゼルエンジン発電機によりLiBを充電
- ⑧ディーゼルエンジン回転数の変化により、LiB充電電力が段階的に変化



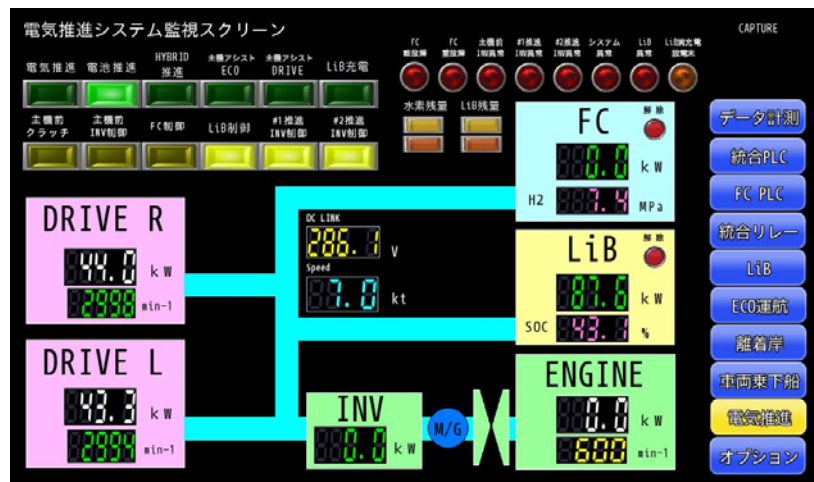
いずれの運転時にも燃料電池は安定した電力供給をしている。

### 3.4 実船試験時の監視用モニタ

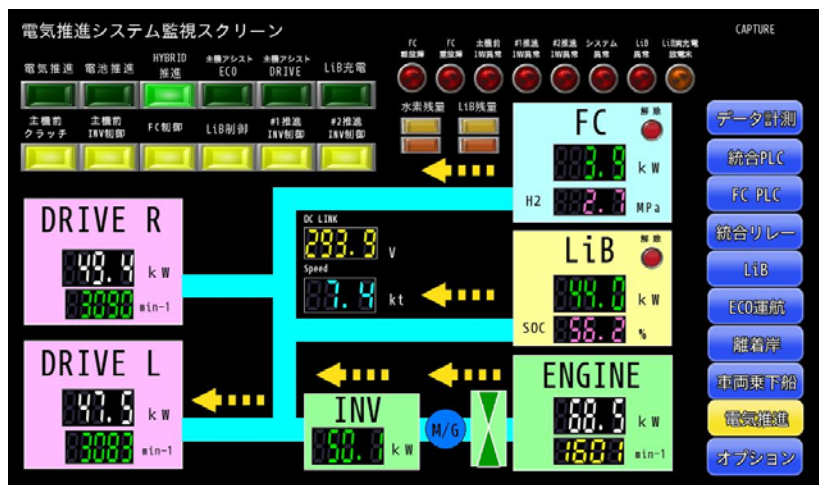
#### ①電気推進モード



#### ②電池推進モード



#### ③ハイブリッド推進モード



#### ①電気推進モード

ディーゼルエンジン発電機(主機前駆動)による約50 kWの電力だけを利用して電動船外機を運転し、速力約5 ktで航行している。

#### ②電池推進モード

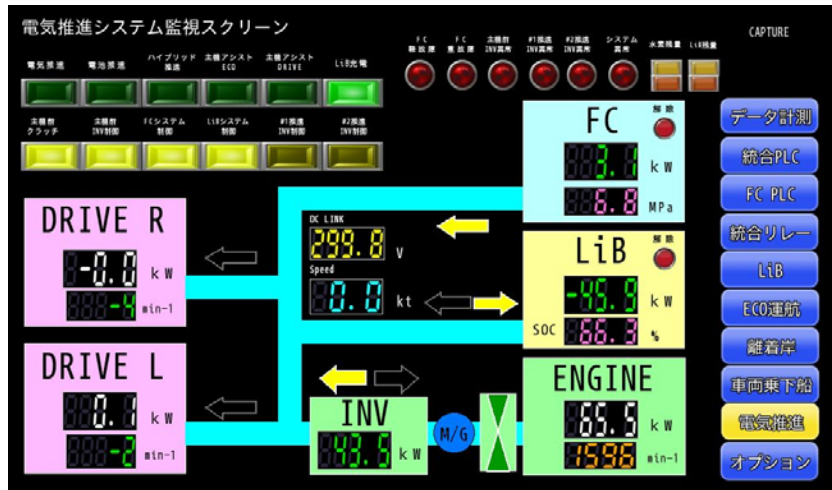
LiBによる約90 kWの電力を利用して電動船外機を運転し、速力約7 ktで航行している。(このとき、ディーゼルエンジンはアイドリング状態、FCは未使用。)

#### ③ハイブリッド推進モード

FC, LiB, ディーゼルエンジン発電機による電力により速力約7.4 kt航行している。



#### ④LiB充電モード



#### ④LiB充電モード

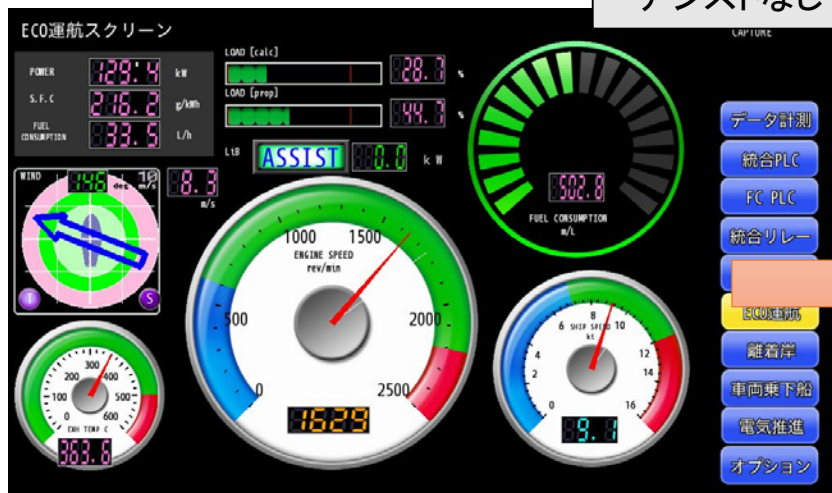
停船中，ディーゼルエンジン発電機（主機前駆動）とFCによる約50 kWの電力によってLiBを充電している。

#### ⑤主機アシストモード

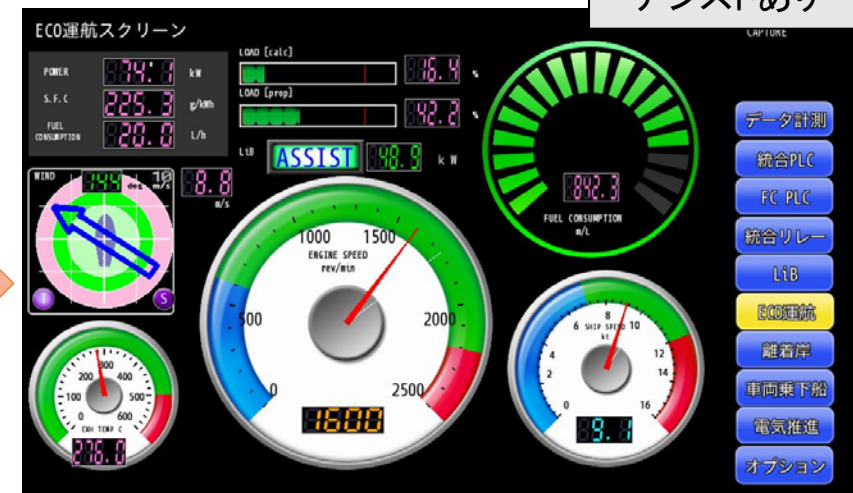
アシストなしの状態ではディーゼルエンジン推進により航行している（燃費は約500 m/L）。

アシストありの状態ではLiBによる約50 kWの電力を利用して主機のトルク加勢をしている（燃費は約840 m/L）。

#### ⑤主機アシストモード



アシストなし



アシストあり

## 4. まとめ

- (1) 水素燃料電池船の安全性評価を主目的として、水素配管の漏洩特性評価試験や燃料電池システムの換気試験を実施し、通風装置やガス検知器の安全要件等の有効な知見が得られた。
- (2) 船用燃料電池システムとリチウムイオン電池システムを組み合わせた電気推進システムを構築し、実船試験を実施した。実船試験により、システムの安全性に関する様々な知見が得られ、燃料電池船の安全航行を確保するための情報を収集した。
- (3) 海事分野における水素の利用促進を目指した燃料電池船の建造・運航に必要な不可欠な安全ガイドライン策定のための暫定的な安全要件を整理している。

本講演の内容は、国土交通省海事局からの請負研究「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27年度）」および「水素燃料電池船の安全性確保のための調査検討（平成28年度）」において、海上技術安全研究所、ヤママー株式会社、一般財団法人日本船舶技術研究協会との共同研究体制により実施しました。