

令和元年(第19回)海上技術安全研究所研究発表会

# 低・脱炭素燃料に対応する船用動力システムに関する研究

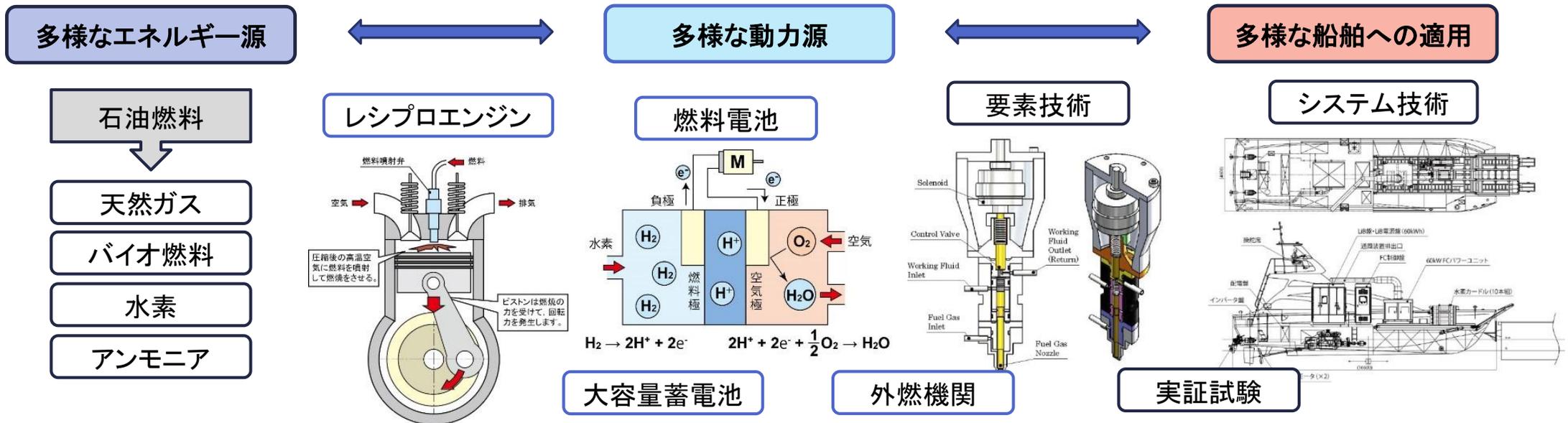


環境・動力系  
平田 宏一

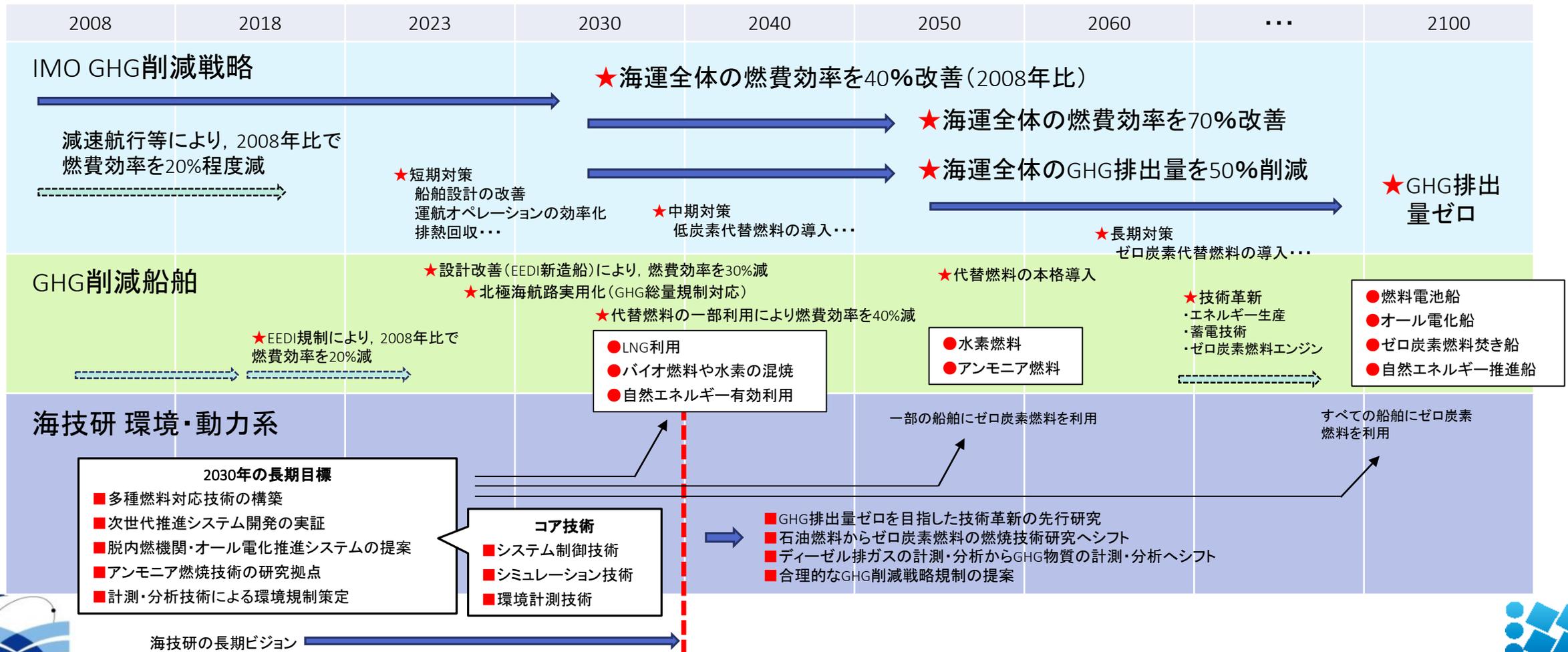


# 1. はじめに

- ◆ 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。



## 2. IMO GHG削減戦略と海技研の長期ビジョン



### 3. 低・脱炭素燃料利用技術に関する研究

- ▶ 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●再生可能なカーボンフリー燃料である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●使用時に二酸化炭素を排出しない。</li> <li>●燃焼速度が速い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●使用時に二酸化炭素を排出しない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●石油燃料と比べて、25%程度のCO<sub>2</sub>削減が可能である。</li> <li>●陸上・船舶の一部で既に実用・普及している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●使用時に有害物質を排出しない。</li> <li>●重量あたりのエネルギー密度が小さい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●太陽エネルギーや風力エネルギーを利用できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●二酸化炭素を排出しない。</li> </ul>
メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>●液体バイオ燃料は石油代替燃料として扱いやすい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●燃料電池などで高効率発電ができる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●水素と比べて、貯蔵がしやすい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●技術的ハードルが低い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●電気エネルギーとして扱いやすい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●あらゆる有害物質を排出しない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●重量・容積に対するエネルギーが大きい。</li> </ul>
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>●供給量</li> <li>●コスト</li> <li>●再生方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●漏れやすい。</li> <li>●他の燃料と比べて、大量貯蔵が難しい。</li> <li>●製造方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●毒性</li> <li>●強い刺激臭</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●カーボンフリーにならない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●充電設備が必要となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●不安定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●社会的に合意されにくい。</li> </ul>

## (1) 水素混焼ガスエンジン

- 海技研では、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CO<sub>2</sub>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 kWe/1800 min <sup>-1</sup>
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)

## (1) 水素混焼ガスエンジン

## 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 <sub>4</sub> )	水素(H <sub>2</sub> )
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 <sub>2</sub> 排出係数	ton(CO <sub>2</sub> ) / ton(fuel)	3.151	2.75	0
CO <sub>2</sub> 排出特性	g(CO <sub>2</sub> ) / 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

最高燃焼速度が高い

⇒ 最高燃焼圧力の増大

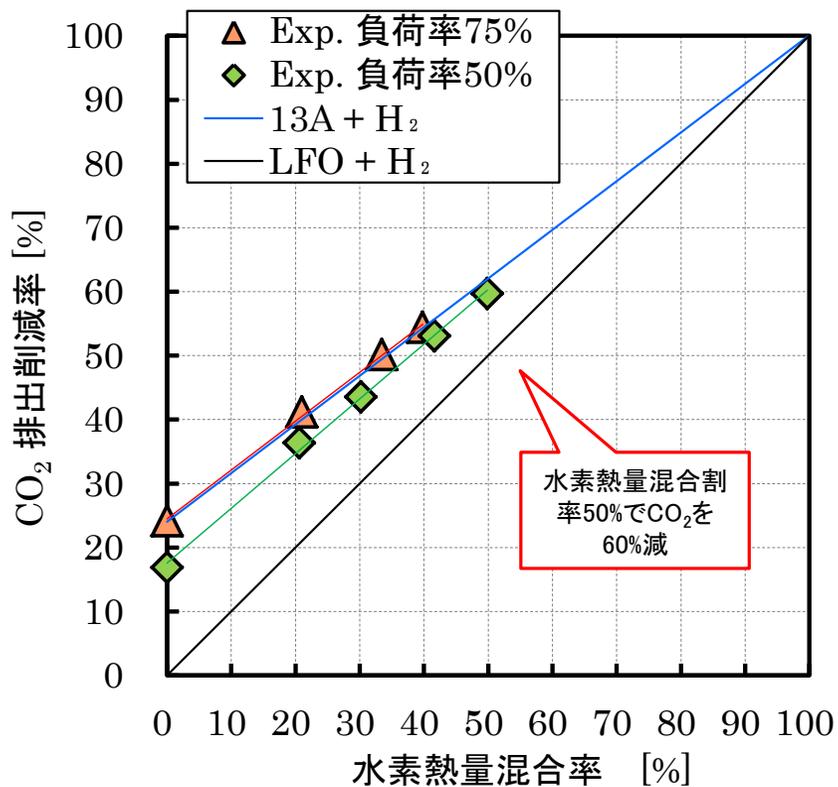
⇒ NO<sub>x</sub>排出率の増大, ノッキングの発生

最小点火エネルギー・着火温度が小さい

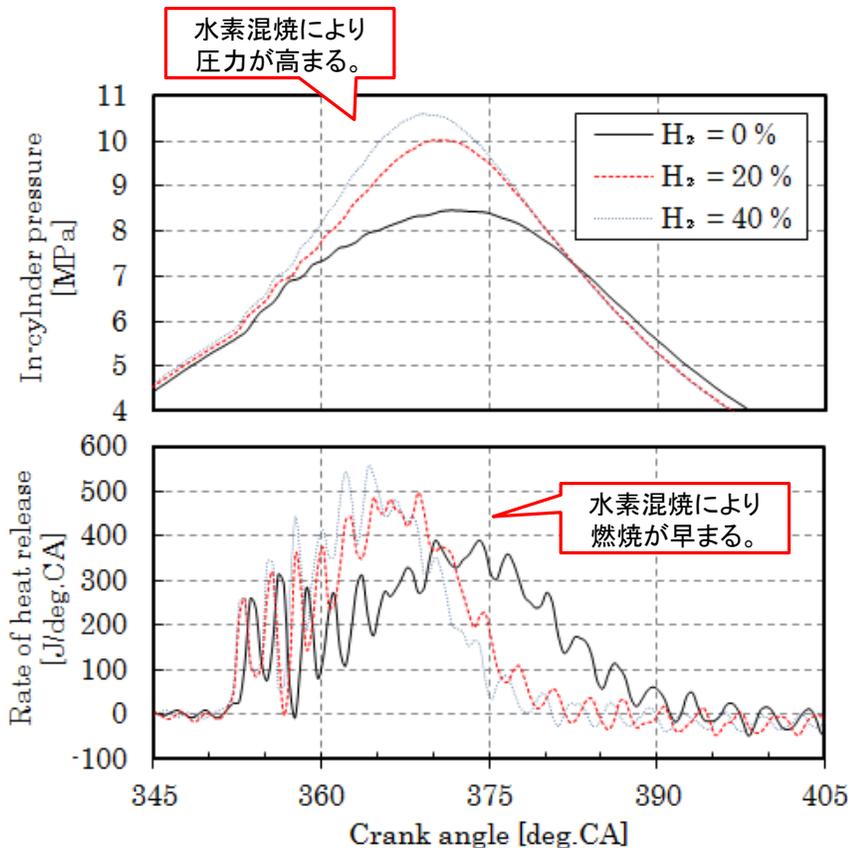
⇒ 過早着火の発生

(1) 水素混焼ガスエンジン

水素混焼ガスエンジンのCO<sub>2</sub>排出削減効果



CO<sub>2</sub>排出削減の試験結果

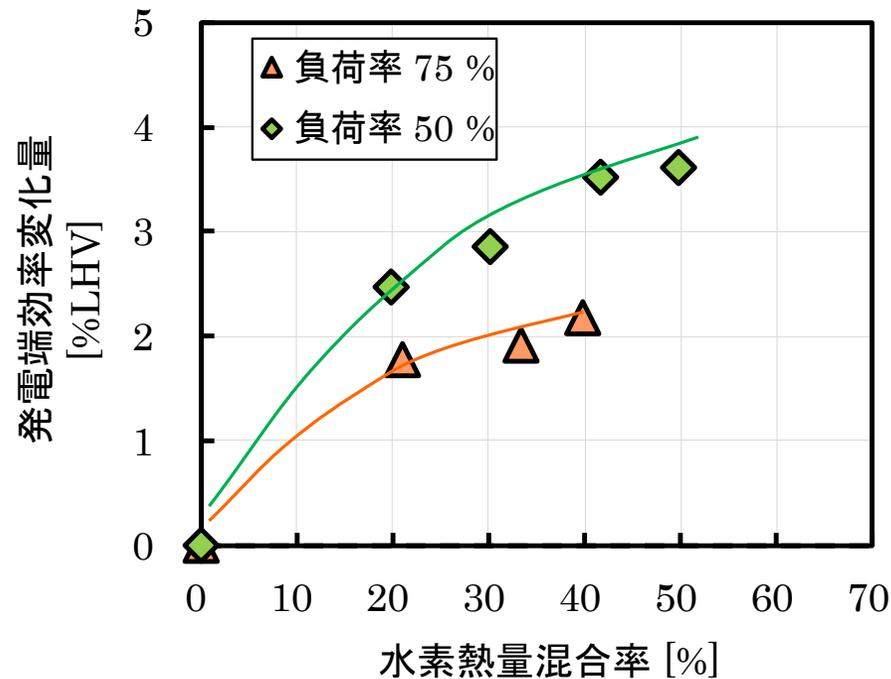
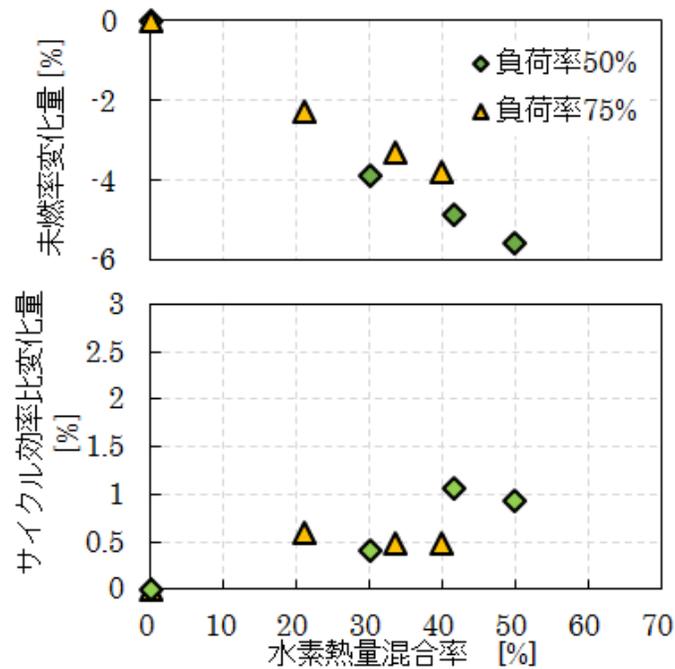


水素混焼時の燃焼波形

➤ 現在までに、ディーゼルエンジンの基準性能に対するCO<sub>2</sub>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。

(1) 水素混焼ガスエンジン

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。

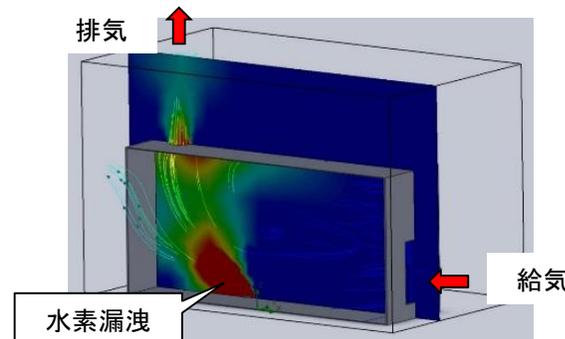
## (2) 水素燃料電池

### 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~)

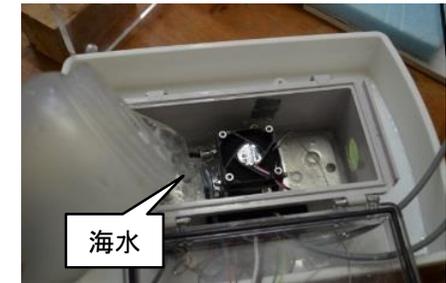
多様なエネルギー源を選択できる環境整備の促進を目指して、バイオ燃料や天然ガス、さらに水素をエネルギー源として利用する技術についての研究を進めている。



水素漏洩試験と解析



傾斜・動揺試験



海水浸水試験



実船試験(H28-H29)



制御システム

(2) 水素燃料電池

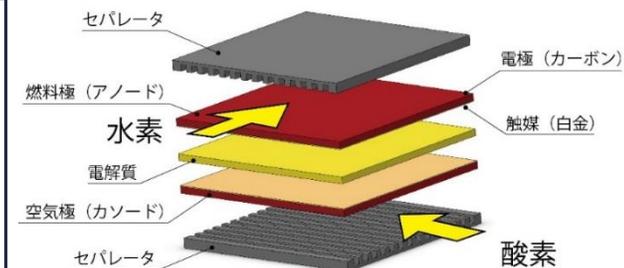
燃料電池のメリットとデメリット

期待(メリット)

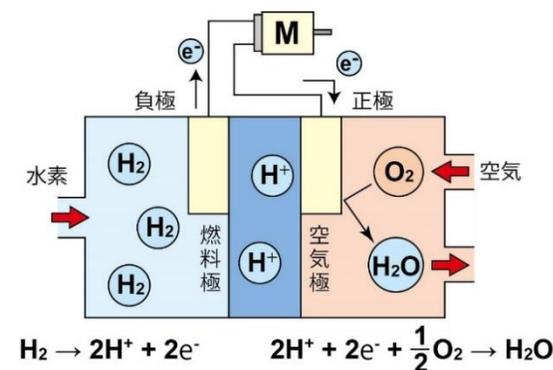
- ①環境にやさしい。 → 発電運転時にCO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>(窒素酸化物)が排出されない。
- ②騒音が小さい。 → 燃焼や爆発といった現象がない。
- ③発電効率が低い。 → 化学エネルギーを直接電力に変換するため効率が低い。

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)



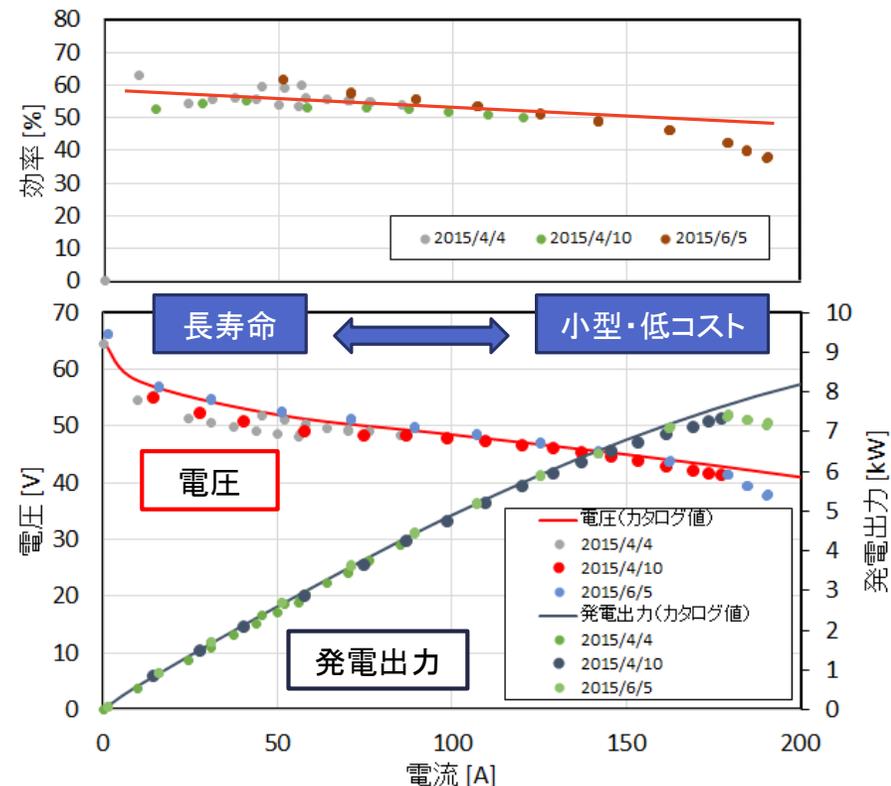
燃料電池の発電原理

(2) 水素燃料電池

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)	溶融炭酸塩形 (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



実験用燃料電池システムの試験結果例 (海技研)

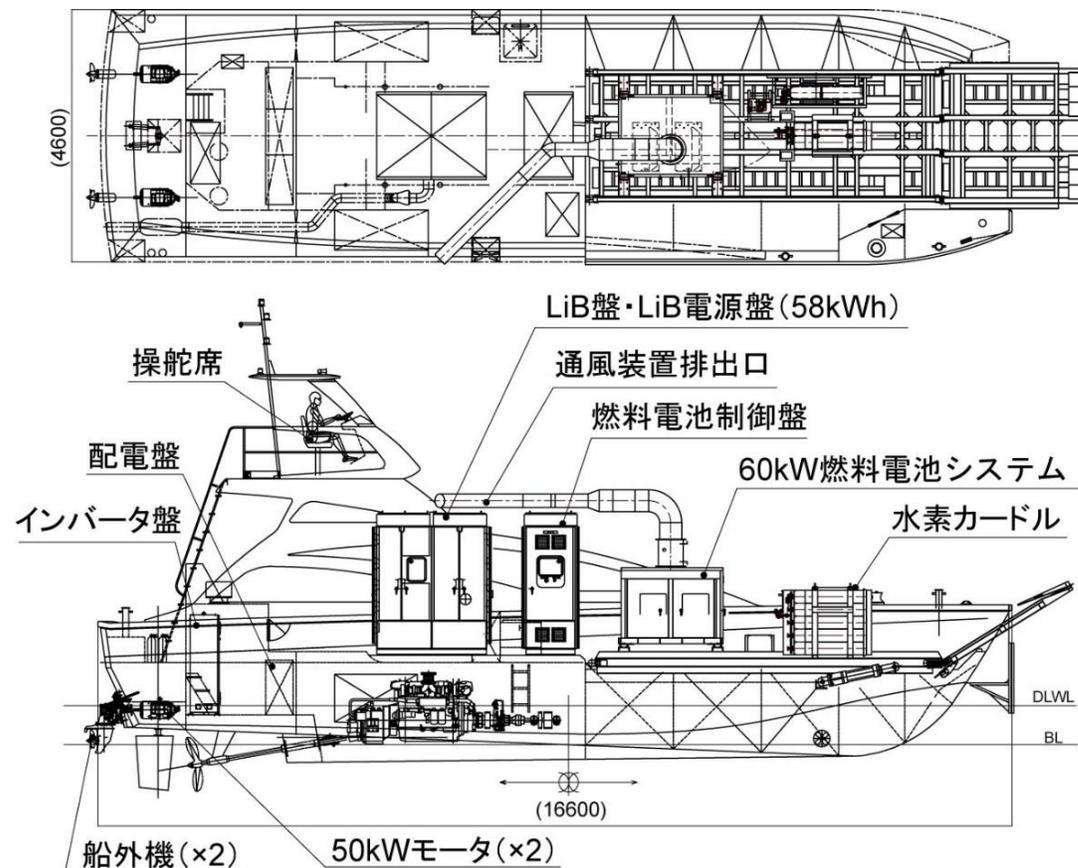
(2) 水素燃料電池

# 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)



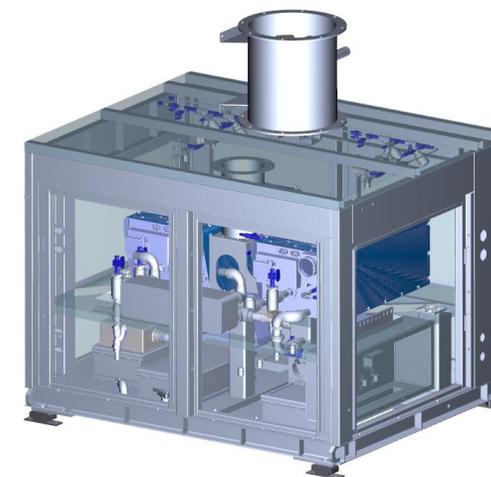
実験船「神峰」の全体配置

## (2) 水素燃料電池

## 水素燃料電池船の実船試験

▶ 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。



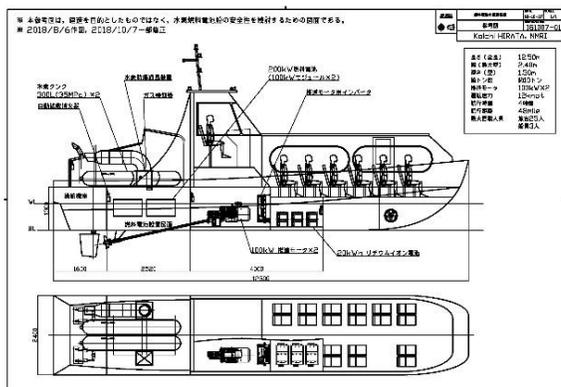
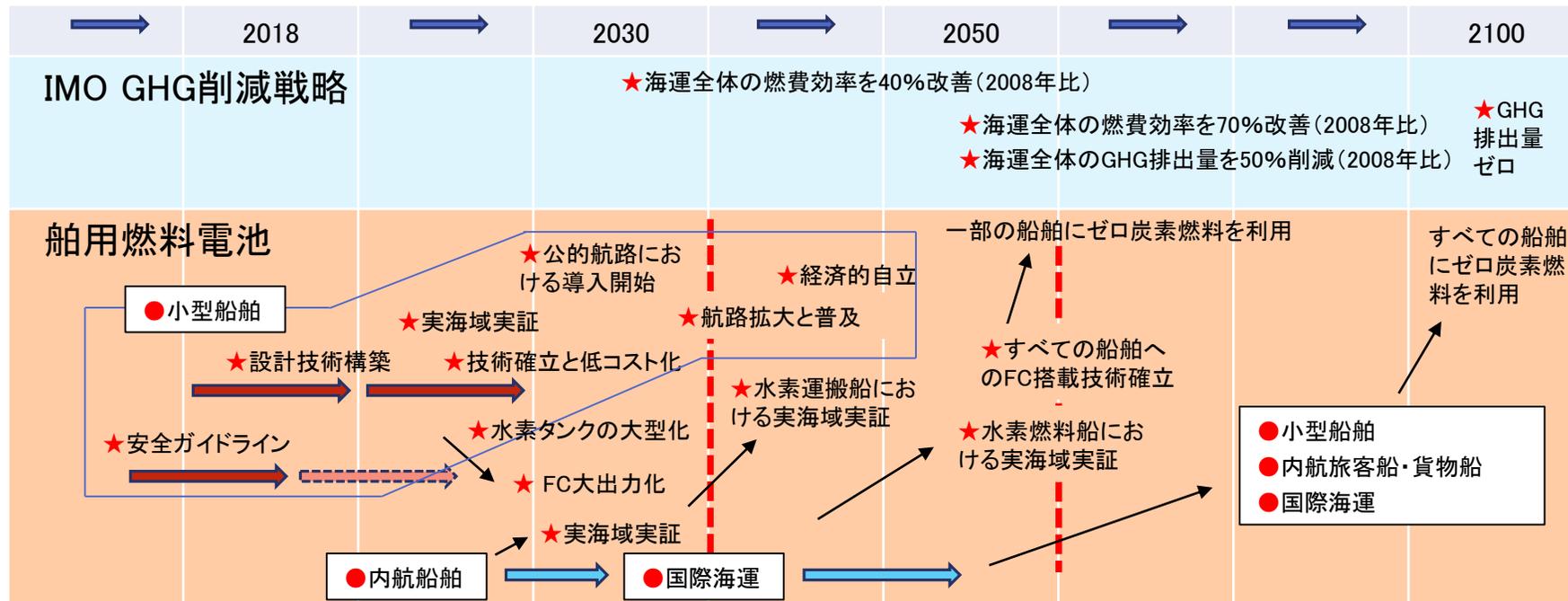
これらの検討結果を取りまとめ、国土交通省によって『水素燃料電池船の安全ガイドライン』（水素ガスを燃料とした内航（限定沿海・平水に限る）、小型船舶（20トン未満）に限定）が策定された。

(2) 水素燃料電池

# 水素燃料電池船ロードマップ策定

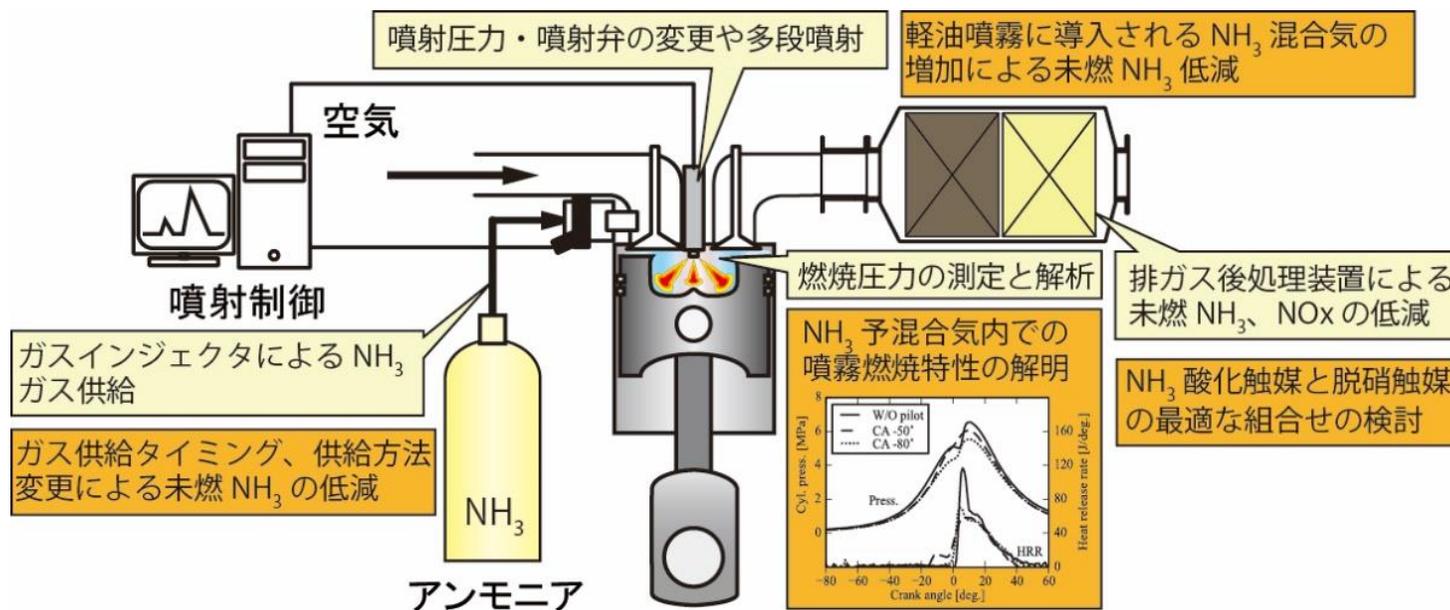
- 現在までの調査結果を踏まえて、水素燃料電池船に適した用途の検討と試設計を進めている。
- 水素燃料電池船の実用化・普及を目指したロードマップ策定を進めている。

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



### (3) アンモニア混焼エンジン

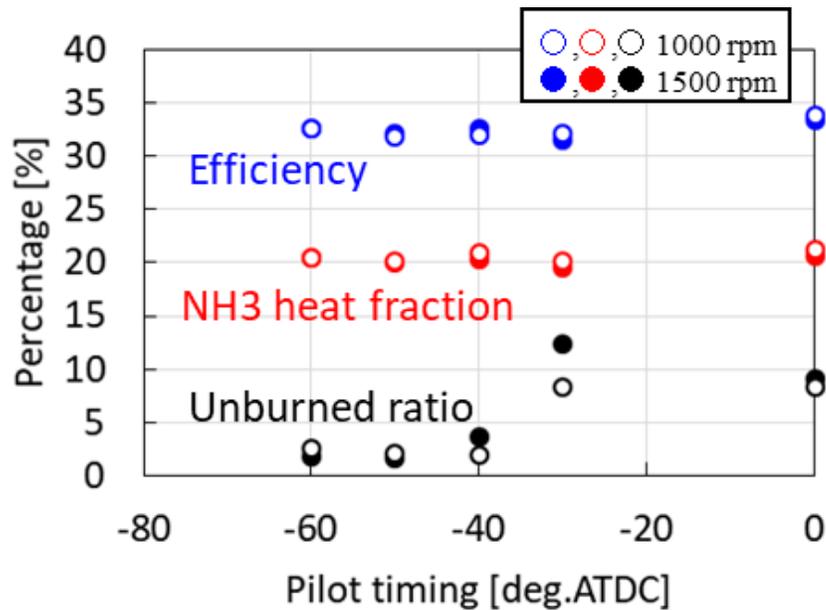
- 海技研では、7.7kW単気筒ディーゼルエンジンの吸気に、カーボンフリー燃料であるアンモニアガス(NH<sub>3</sub>)を混合し、運転している。
- 発熱量比20%のアンモニアを混焼させた試験を行っている(20%GHG削減。)



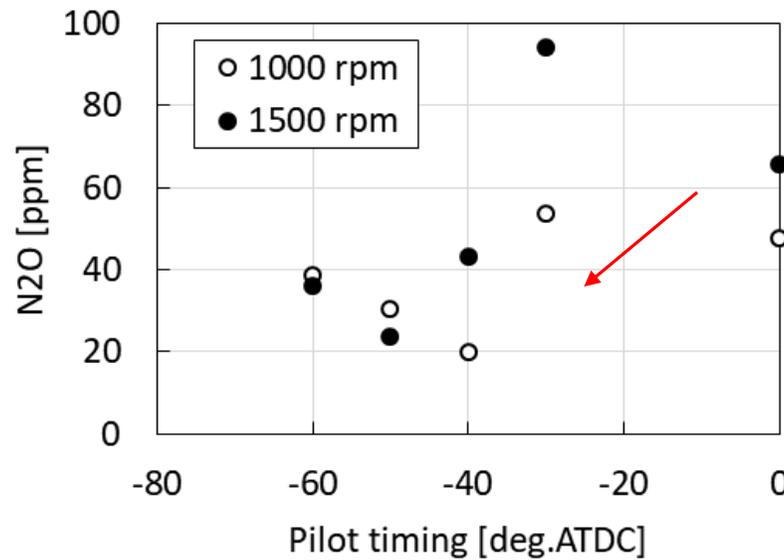
アンモニア混焼エンジンの概念図

(3) アンモニア混焼エンジン

陸上試験結果



熱効率, アンモニア熱量比, 未燃率



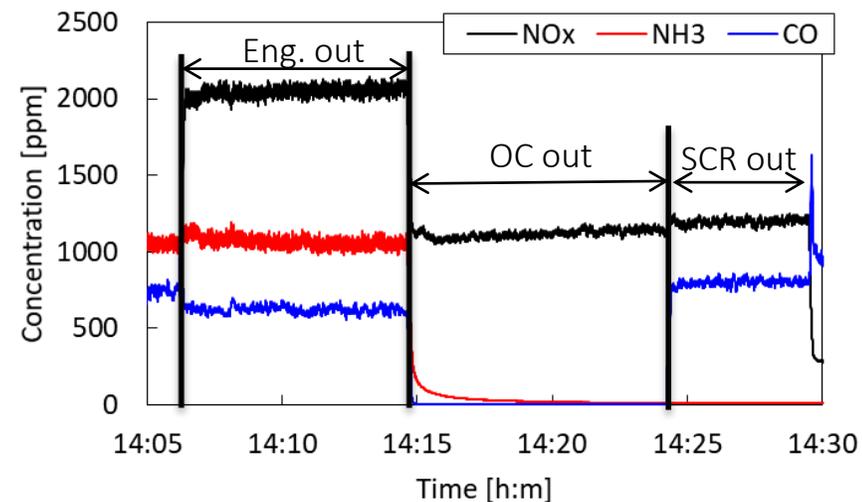
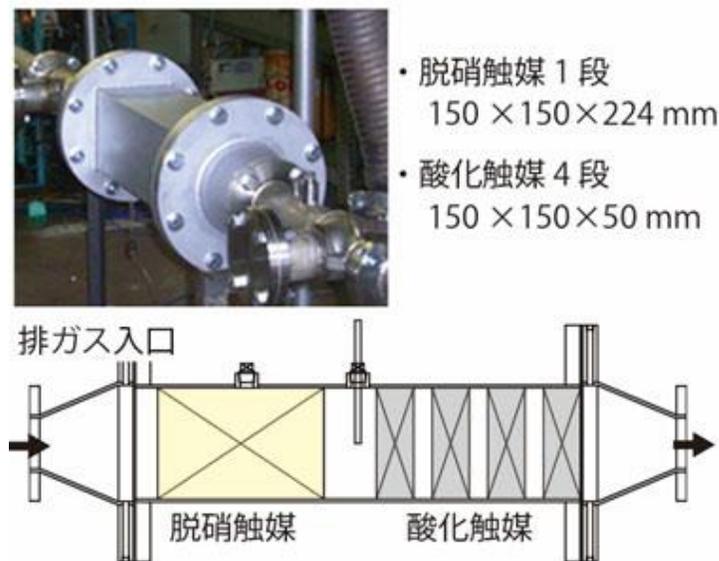
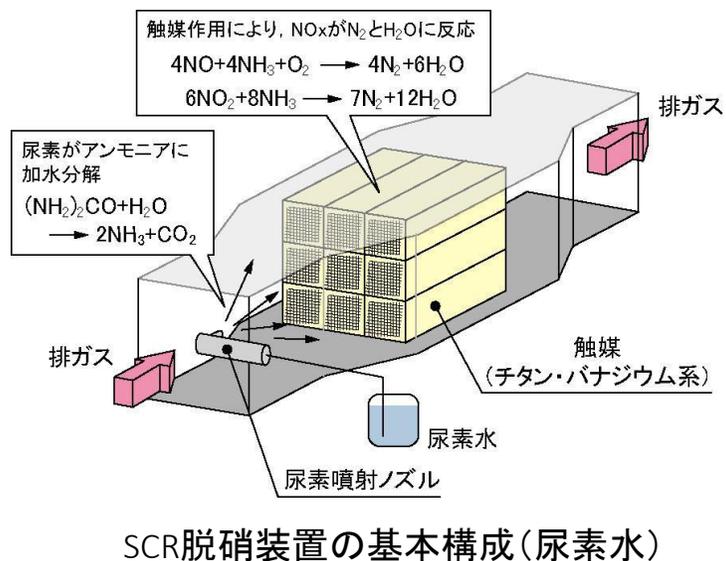
N<sub>2</sub>O濃度

➤ 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 (N<sub>2</sub>O) の排出も低減している。

(3) アンモニア混焼エンジン

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。



試験結果の一例

実験用エンジンに取り付けた排ガス後処理装置

## 4. 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。

燃料及び貯蔵の種類	技術課題
バイオディーゼル	● 長期保管における酸化防止対策, 燃料ホースや配管部品等の劣化対策
バイオエタノール	● 低引火点燃料としての安全対策
バイオガス	● 燃料中に含まれる二酸化炭素の液化や昇華への対策 ● バイオガスから二酸化炭素を分離・除去とメタンの高濃度化(発熱量の増加)
液体水素	● 外部からの入熱が少ない高度な断熱技術やタンク内のスロッシング対策 ● 液化に要するエネルギーの低減技術, 液体水素用大容量移送ポンプの開発
圧縮水素	● 圧縮水素タンクの大型化, 適切な安全対策
水素吸蔵合金	● 軽量化・高エネルギー密度化・低コスト化のための新技術の開発 ● 水素充填・放出過程における熱管理
有機ハイドライド	● 水素貯蔵・脱水素反応の高効率化
アンモニア	● 供給・製造技術, 銅合金の応力腐食割れや毒性・漏洩などの適切な対策
液化天然ガス	● 断熱性能の向上とBOGの最小化 ● タンク内濃縮現象への対策やタンク内のスロッシング対策 ● タンク内燃料性状の均一化(ロールオーバー対策)
圧縮天然ガス	● 圧縮天然ガスタンクの大型化, 適切な安全対策
蓄電池	● 高エネルギー密度化(次世代蓄電池の開発), 海上充電設備の開発

## 各種エネルギー機器の課題

燃料の種類	燃焼・発電技術	技術課題
バイオディーゼル	ディーゼルエンジン	<ul style="list-style-type: none"> <li>● NO<sub>x</sub>排出量の増加への対応</li> <li>● 低負荷運転時の燃料噴射制御</li> </ul>
水素	水素専焼エンジン	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大出力化技術, 適切な安全対策</li> </ul>
	水素混焼ガスエンジン	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 最高燃焼圧力の増大への対応</li> <li>● ノッキング等の異常燃焼の抑制技術</li> <li>● 安全対策の確立</li> </ul>
	水素タービン	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水素特有の燃焼特性に適合する安定燃焼技術</li> <li>● 低NO<sub>x</sub>化を実現する燃焼器の開発</li> </ul>
	燃料電池(PEFC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低コスト化と長寿命化の両立, 安全対策の確立</li> </ul>
アンモニア	アンモニア燃焼レシプロエンジン	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 燃焼性が低いアンモニアの燃焼効率の向上</li> <li>● アンモニア由来NO<sub>x</sub>の抑制</li> <li>● 温暖化係数の高いN<sub>2</sub>Oの削減</li> </ul>
	アンモニア燃料電池(SOFC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 高温の動作温度に至るまでの熱供給と起動停止時間短縮</li> <li>● 熱による劣化を防ぐ耐熱材料の開発</li> </ul>
天然ガス	ガスエンジン (ガスインジェクション方式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 局所燃焼温度の制御</li> <li>● NO<sub>x</sub>低減技術</li> </ul>
	ガスエンジン(リーンバーン方式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 異常燃焼(ノッキング、失火、過早着火)の発生抑制技術</li> <li>● 未燃燃料(メタンスリップ)の低減技術</li> </ul>
	天然ガス改質燃料電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 改質器内の燃焼ガス加熱などの安全性確保</li> <li>● 水素生成速度の制限による発電負荷追従性</li> <li>● 負荷停止・減少時の余剰水素の処理</li> </ul>

## エネルギー密度減少に伴う機器配置の課題

- 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。

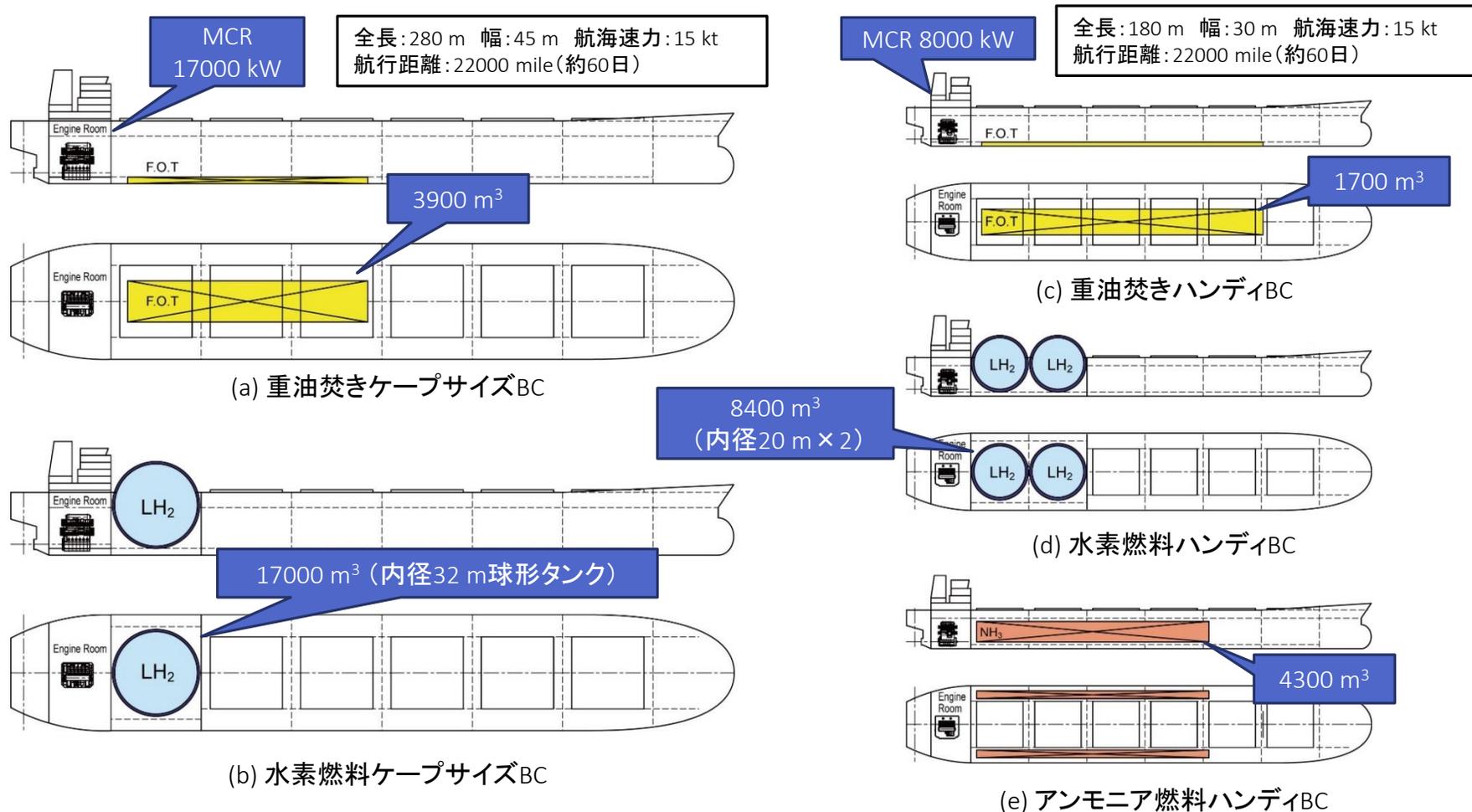
各種燃料の物性値

	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 <sup>3</sup>	460 kg/m <sup>3</sup>	70.8 kg/m <sup>3</sup>	695 kg/m <sup>3</sup>
CO <sub>2</sub> 排出係数	3.0 t/kL	2.7 t/t <sub>fuel</sub>	0	0
体積あたりの発熱量 (重油比)	38.4 GJ/m <sup>3</sup> (100%)	22.6 GJ/m <sup>3</sup> (59%)	8.6 GJ/m <sup>3</sup> (22%)	15.6 GJ/m <sup>3</sup> (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。

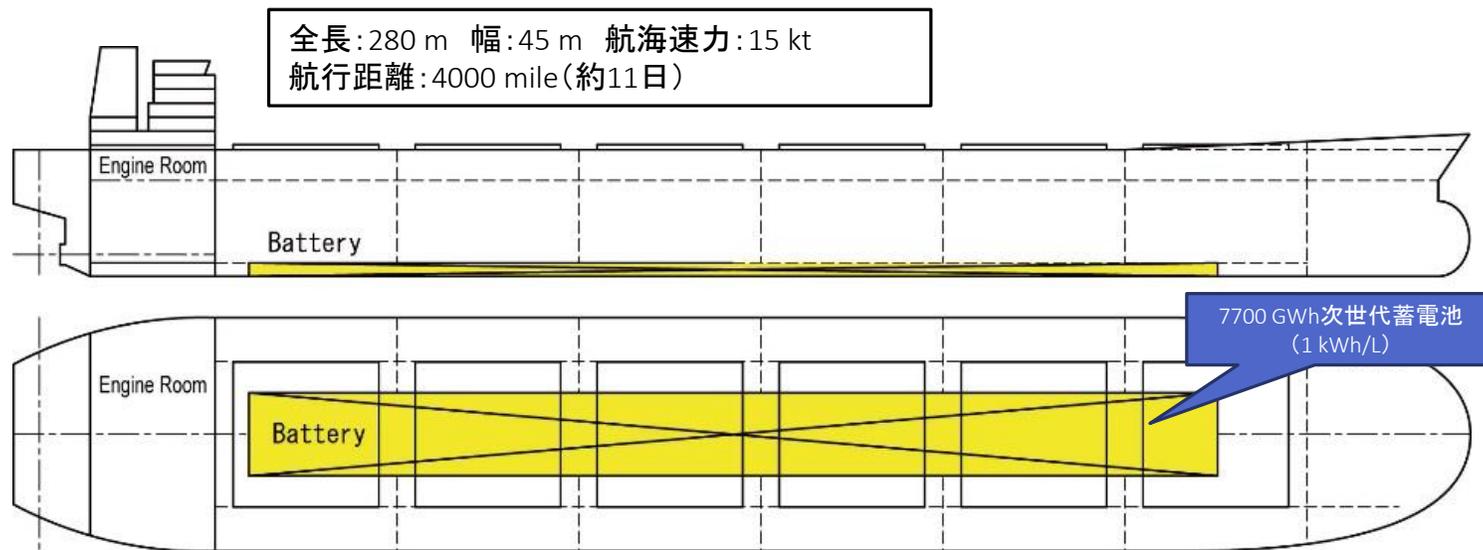
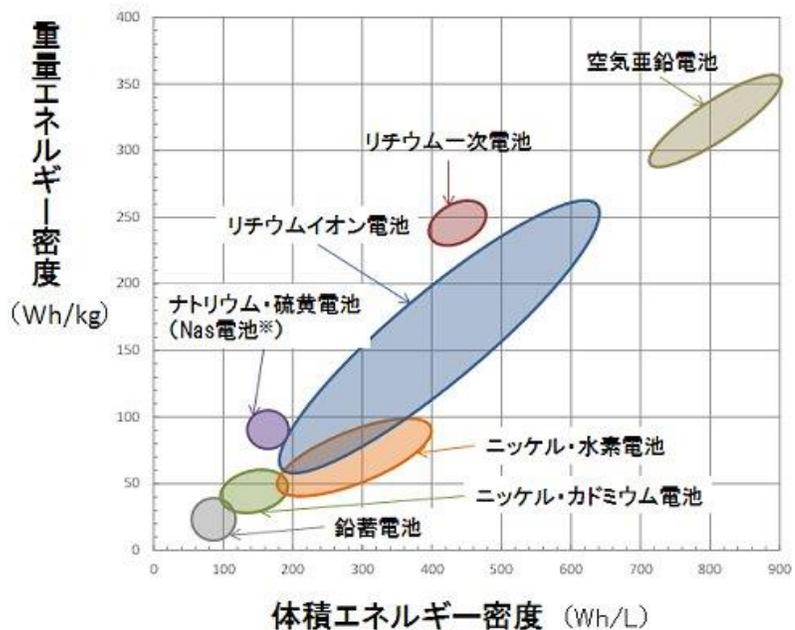
# カーボンフリー燃料を利用する船舶の検討例

➤ 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。



電池推進ケーブルサイズバルクキャリア(イメージ)

## 5. 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