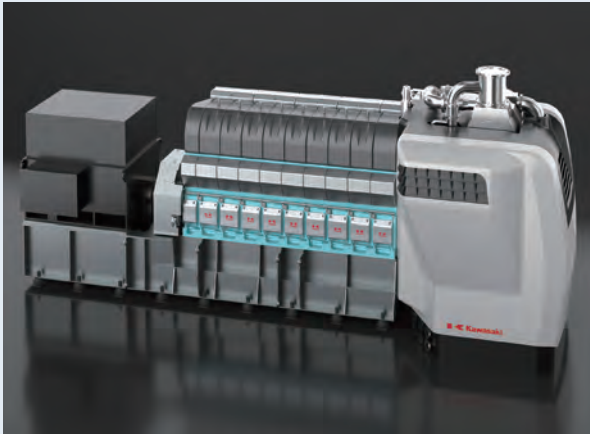


# 脱炭素社会を推進する舶用水素焚き二元燃料エンジンとMHFS（舶用水素燃料タンク・燃料供給システム）の開発

## Development of Marine Hydrogen Dual Fuel Engine and Marine Hydrogen Fuel System Promotes a Carbon Neutral Society



酒井能成①	Yoshishige Sakai
東田正憲②	Masanori Higashida
堀江尚③*	Takashi Horie
皿井康雄④	Yasuo Sarai
水谷好生⑤	Sumio Mizutani
仲井雅人⑥	Masato Nakai
辻陽平⑦	Yohei Tsuji
宮本世界⑧	Sekai Miyamoto

脱炭素社会における水素エネルギーの普及を見据え、水素を「つかう」技術開発として舶用水素エンジンと水素燃料を供給するシステムの開発に取り組んでいる。水素焚き二元燃料エンジンは2020年代の実証運航を目指す大型液化水素運搬船に搭載して長期実証を行う。また、舶用の水素燃料タンク・燃料供給システム（MHFS）は2030年までに実証を完了し商用化を目指している。

In preparation for the widespread use of hydrogen energy in a carbon neutral society, we are developing marine hydrogen engines and hydrogen fuel supply systems as technologies to make use of hydrogen. For long-term demonstration, we will install our marine hydrogen dual fuel engine on a large liquid hydrogen carrier targeting demonstration operation in the 2020s.

Also, we will complete the demonstration of the marine hydrogen fuel system (MHFS) by 2030 and are aiming for the commercialization of MHFS.

### まえがき

国連気候変動枠組条約 第21回締約国会議 COP21で採択されたパリ協定に基づき、国際海事機関であるIMOが国際海運においてGHG排出量削減目標として、2050年頃までの排出量ゼロを掲げ、国際合意されている。

日本国においても二酸化炭素排出量削減目標として2030年までに2013年比で46%、2050年までにはカーボンニュートラル実現を目指しており、内航海運業界では2030年度までの二酸化炭素排出量目標として2013年度比で約17%削減が掲げられている。

### 1 背景

国内外での情勢を受け、水素燃料が市場に幅広く供給される場合、海運業界の脱炭素化に向けて水素を燃料とするエンジンの市場が急速に拡大することが期待されている。現行は天然ガススペースでの高性能化やバッテリー併用における二酸化炭素削減が進められているが、近い将来には水素と液体燃料との水素混焼、さらにはその技術を活用した

水素専焼による水素エンジンの商用化が求められている。

舶用水素焚き二元燃料エンジン（舶用水素DFエンジン）および舶用水素燃料タンクおよび燃料供給システム（MHFS）は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構であるNEDOのグリーンイノベーション基金（GI基金）に採択され開発を開始した。

また、水素燃料を取り扱うにあたり、共通課題を共同で効率よく解決して、将来的な水素燃料船の普及に貢献することを目的として、当社・ヤンマーパワーテクノロジー株式会社・株式会社ジャパンエンジンコーポレーションと3社共同出資新会社であるHyEng株式会社を設立した。共通課題として、水素脆化評価・水素燃料供給システム・水素燃料に対する国際ルール対応などを進めていき、本GI基金をベースに各社がそれぞれ水素燃料エンジンの開発を実施するとともに当社がMHFSの開発を実施する。

その中で、当社が2020年代に実証運航する大型液化水素運搬船に舶用水素DFエンジンを搭載して実証評価し、将来には舶用推進用として商用化することを目的としている。また、MHFSもHyEngを構成する他社エンジン向けとして開発実証し2030年以降の商用化を実現する。

## 2 船用水素DFエンジンの開発

### (1) 開発コンセプト

主たる要求開発コンセプトは以下である。

- (i) 同サイズ、同クラスでトップとなる高い水素混焼率の実現

水素混焼率を熱量ベースで95%以上として二酸化炭素排出を大幅に削減する。

- (ii) 高出力化

シリンダ径300mmの大口径かつ高い平均有効圧力の実現により、単位シリンダあたりの出力を高出力化して、コンパクトで競争力のある製品を目指す。

- (iii) 低圧水素ガスの適用

液化水素貯蔵タンク内の水素の気化により発生するボイルオフガスを有効利用するため、燃焼室に入る前に過給空気と低圧水素ガスを混合する予混合ポート噴射する機能を設計に取り入れ、ガスを圧縮する補機の動力を低減する。

- (iv) 二元焚き燃料の適用

船用における冗長性を目的に水素燃料と液体燃料が使えるDual Fuelエンジンとして、水素運転で問題が発生した場合に液体燃料に切り替えられる構造とする。

その他、船用に適用するための船級対応および排ガス性能についても満足する必要がある。

### (2) 開発課題

当社はこれまで天然ガスベースの発電用ガスエンジンを2007年に開発しており、既に200台以上販売している。その中でエンジン制御や部材の信頼性について幅広い知見を有しているが、開発にあたり水素燃料の特性に起因する以下のような技術課題を解決することが必要である。

- (i) 異常燃焼の抑制

メタンを主成分とする天然ガスと比較して水素は着火する濃度である可燃範囲が広く、最小着火エネルギーが小さく、燃焼速度が速いため異常燃焼が発生しやすい。発生が予測される異常燃焼を表1に示す。いずれの場合においてもエンジンの安定運用に影響が出るだけでなく、エンジン部材に影響を与える可能性がある。特に高出力化をコンセ

表1 異常燃焼の項目と現象  
Table 1 Types and symptoms of abnormal combustion

項目	現象
① 逆火	給気管内に燃焼室から火炎が逆流
② 過早着火	主燃焼室内にて着火前に自己着火し過大な燃焼圧力が発生
③ ノッキング	着火源から遠い燃焼室壁面近傍で未燃ガスが膨張行程で自己着火し過大な燃焼圧力が発生

プトに挙げており、異常燃焼が発生しやすい状況となるため、異常燃焼を安定的に抑止することが求められる。

- (ii) 材料選定の評価

燃焼室を中心に高温で高圧の水素燃料にさらされることになり、水素脆化影響による主要部材の材料特性の低下が懸念されるため、実運用状態を想定した材料選定の評価が必要である。

- (iii) 船級の取得

水素燃料を適用するエンジンに対する船級規則が確立されていないため、安全評価を含めた基本的な考え方について評価して船級協会からの承認を取得することが必要である。

### (3) 開発の取組み

- (i) 異常燃焼の抑制

異常燃焼を抑制するには、エンジン内の酸素濃度を低く抑えることが効果的であり、排ガス再循環 EGR (Exhaust Gas Recirculation) の採用と最適化を図った。EGR量による燃焼圧波形の変化を図1に示す。EGR量を増加することにより燃焼圧力と温度を下げる事が可能となり、水素燃料の燃焼速度が速い特性を抑制できている<sup>1)</sup>。またEGRに加えて、燃焼室や制御ロジックを最適化した。

- (ii) 材料選定の評価

エンジン部品として使用する環境の水素濃度に応じた材料評価を実施した。低ひずみ速度引張試験 SSRT (Slow Strain Rate Technique) により水素脆化への影響が大きい環境を特定して、疲労限度に対する影響などについて評価した。適切な評価となるよう大学や日本海事協会 (Class NK) などの知見も得ながら実施している。今後も適宜水素燃料使用環境下における材料試験を実施する予定である。

- (iii) 船級の取得

当社船舶部門と基本設計を進めている160,000m<sup>3</sup>型の大型液化水素運搬船に搭載する水素DFエンジンおよび補機

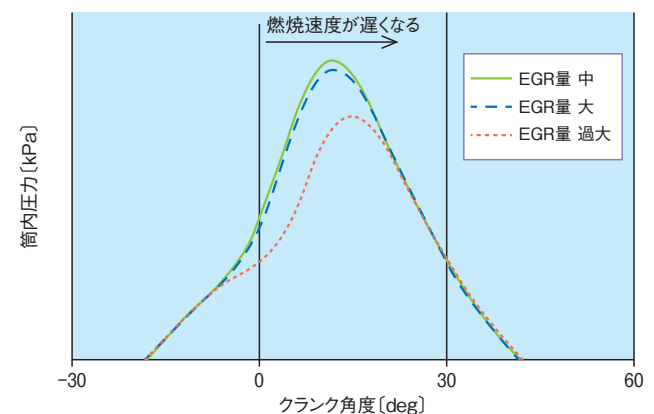


図1 EGR量増加による筒内圧力のピークの変化  
Fig. 1 Differences in peak in-cylinder pressure by EGR amount

の構成や配置を検討し、液化水素運搬船ガイドラインやIGCコードに基づいて基本設計を実施した。また、安全の観点では、HAZID解析法を用いてリスク評価して、さまざまなハザードが発生した場合でも安全に運航できる事を専門家を交えて確認した。これにより、ClassNKより基本設計承認 AiP (Approval in Principle) を取得した。

(4) 運転試験について

開発の全体スケジュールを図2に示す。多気筒エンジンの設計を2023年度までに完了し2024年度から陸上にて実機試験を実施する。その結果を反映した船舶搭載用エンジンを設計製造して、長期実証で大型液化水素運搬船の発電用補機として搭載する。エンジンの仕様を表2に示す。

(i) 単筒試験機による燃焼評価

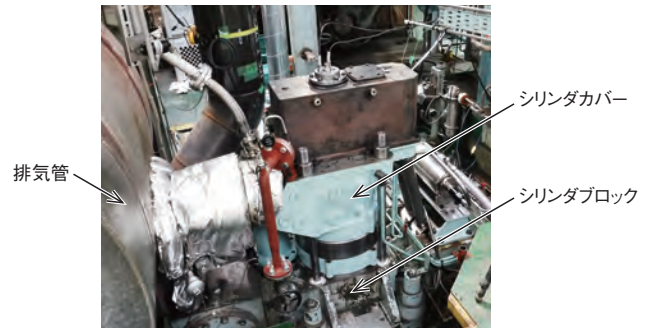
神戸工場と播磨工場で、図3に示す単筒試験機の運転評価を実施している。神戸工場での試験にて当初計画した水素混焼率95%で目標平均有効圧を達成した。引き続き2拠点の試験機で実機試験に向けて燃料・制御・信頼性の評価を実施する。

(ii) 陸上実機試験

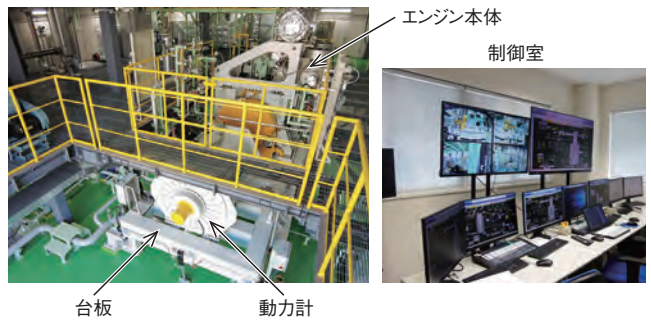
単筒試験機の結果を反映した実証エンジン（発電機も含む）を製造し陸上実機試験を実施する。性能評価・耐久評価・水素燃料運転での各機能評価・水素燃料と液体燃料の燃料切替試験を実施する予定である。

(iii) 長期実証試験

大型液化水素運搬船に実証エンジンを搭載して、発電用として船内に電力を供給しながらエンジンの長期実証を行



(a) 神戸工場



(b) 播磨工場

図3 単筒試験機  
Fig. 3 Single cylinder test engine

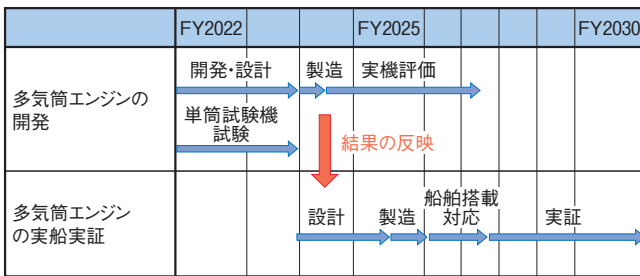


図2 全体開発スケジュール  
Fig. 2 Overall development schedule

表2 実証エンジン仕様  
Table 2 Specifications of demonstration engine

項目	内容	
エンジン緒元	発電出力 [kWe]	2,400
	シリンダ径 [mm]	300
	回転数 [1/min]	720
燃料	水素燃料 (ボイルオフガス) / 低硫黄燃料油 水素燃料カロリー-95%以上	
水素供給圧力 [MPa]	1.0未満	
排ガス規制	IMO NOxTier II	
認証	ClassNK	

い、エンジンの性能や信頼性を評価して、本水素DFエンジンの商用化に目途をつける。

3 水素燃料タンク・燃料供給システム (MHFS) の開発

開発するMHFSは2種類あり、国内他社が開発する船内発電用の中高速4ストローク水素エンジン（1MW級、1MPa低圧供給）、および船舶推進用の低速2ストローク水素エンジン（3MW級、30MPa高圧供給）に適用される。それぞれのMHFSにおいて水素燃料による実証運転を行い、安全性や信頼性および船用に求められる機能性を実船に搭載して確認する。2030年までにMHFSを実現させ、2030年以降の社会実装と海運における液化水素燃料の普及および海上輸送の脱炭素化を目指したMHFSの販売事業化を計画している。4ストローク水素エンジン用のMHFSの概要として表3に主要目、図4にユニット外観を示す。

MHFSの開発課題は、

- ・国際ガス燃料船安全コード (IGFコード) への適合
- ・水素特有のハザード (極低温, 水素脆化, 浸透性, 着火性など) に対応するための設計
- ・リスク評価に基づく安全対策の確認と必要に応じた追加対策の適用
- ・液化水素タンクや配管への侵入熱を最小とする真空断熱技術

表3 MHFSの主要目（4ストロークエンジン用）  
Table 3 Particulars of MHFS (for four-stroke engine)

ユニットサイズ	40フィートコンテナサイズ
液化水素燃料タンク	約30m <sup>3</sup> 、約1 MPaG 横置・円筒・真空多層断熱
液化水素充填量	約1,400kg
水素ガス燃料供給方式	タンク自己加圧方式 約0.7MPaG・常温にて約100kg/h

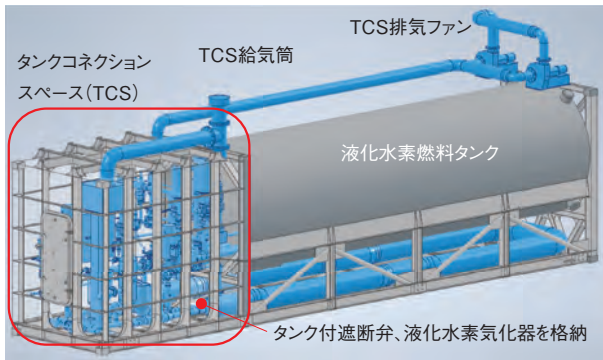


図4 MHFSのユニット外観（4ストロークエンジン用）  
Fig. 4 General view of MHFS unit (for four-stroke engine)

・船用に特有な事象および要求への対応，たとえば船体傾斜や揺動，タンク内部スロッシング，エンジン水素消費量の急変動への対応，限られた船上スペースに搭載するための小型化，などが挙げられる。

水素のハザードを対象とするリスク評価は今後，それぞれの水素燃料船プロジェクトに携わる関係各社（船主・運航者，造船所，水素エンジンメーカー，船級協会）と当社の連携によって実施されていく。現在はMHFSを搭載する水素燃料船の基本設計承認（AiP）の取得に向けた取組みを行っている。

造船所かつエンジンを含む船用機器メーカーとして船舶関連技術を熟知している当社が有する広範な水素関連技術とその実績および経験を最大利用し，当社のモノづくりの技術と提案力，さらに開発・設計段階における予測と検証を可能とする当社の高精度な数値解析（シミュレーション）の保有技術を駆使してMHFS開発と実船実証を進めていく。

## あ と が き

2020年代に実証運航が計画されている大型液化水素運搬に水素DFエンジンを搭載して実証する。またHyEngによる船用水素エンジンおよびMHFSの商用化が加速して，水素を「つかう」分野において当社のレシプロエンジンの展開を期待する。

なお，本内容の一部についてはNEDO助成事業の「水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発／大出力水素燃焼エンジン発電システムに関する技術開発」「グリーンイノベーション基金事業／次世代船舶の開発／水素燃料船の開発／船用水素エンジンおよびMHFSの開発」にご支援いただき実施しており深く謝意を示す。

## 参 考 文 献

- 1) 仲井雅人，宮本世界：NEDO水素・燃料電池成果報告会2022発表No.E-11



酒井能成



東田正憲



堀江尚



皿井康雄



水谷好生



仲井雅人



辻陽平



宮本世界