

低炭素・脱炭素社会に貢献する 発電用水素混焼・専焼エンジンの開発

Development of Hydrogen Co-firing and 100% Hydrogen Engines for Power Generation
that Contribute to a Low-carbon and Decarbonized Society



野口 知宏^{*1}
Tomohiro Noguchi

古川 雄太^{*2}
Yuta Furukawa

中野 博紀^{*3}
Hiroki Nakano

内藤 敬太^{*4}
Keita Naito

渡邊 壮太^{*5}
Sota Watanabe

低炭素・脱炭素社会の実現に向け、水素を燃料として利用するレシプロエンジンの開発を進めている。水素混焼エンジンについては、都市ガス 13A に対し 15vol%の水素を混合した燃料で常用運転が可能な製品を開発した。水素専焼エンジンについては、数値シミュレーションと単筒試験機の検証結果をもとに、エンジン本体のハードウェア仕様と制御パラメータを決定した上で、自社工場内に新たに設けた水素専焼エンジン発電セット実証設備で実証試験を進めており、水素 100%燃料で始動から定格出力(435kW)までの運転を実現した。

1. はじめに

これまで三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社(以下、当社)は、発電用、船用、車両搭載用向けに性能、信頼性、環境特性に優れたディーゼル及びガスエンジンを提供してきた。低炭素・脱炭素社会の実現に向け、更なる環境特性の改善とエナジートランジションを意識したお客様の価値向上を図るべく、水素を燃料とした水素混焼エンジン及び水素専焼エンジンの開発を推進中である。

水素混焼エンジンに関しては、都市ガス 13A を燃焼させる従来ガスエンジンに対して、機器の大幅な仕様変更なく安定的に水素を混焼して発電可能なエンジンの仕様構成・運転条件を決定し、製品化を図った。水素専焼エンジンに関しては、流動や燃焼の数値シミュレーション技術及び単筒試験機を活用し、温室効果ガスを排出せず安定燃焼が可能な仕様を決定し、自社工場内に設置した実証設備にて実証試験を進めている。これらの開発状況について紹介する。

2. ガスエンジン GSR の特徴

水素エンジンのベース機種としているガスエンジン GSR は 1991 年に製品化して以来、部品の約 80%をベースとなるディーゼルエンジンと共有化することで信頼性と製造・部品供給の効率化を図ってきた。発電出力は 1 台当たり 315~1500kW をカバーし、ミラーサイクル及び希薄燃焼の適用により、同出力クラスで最高レベルの発電効率を実現している。更に、副室火花点火方式の採用により優れた負荷投入性能を有しており、BOS(Black Out Start)も可能であることから、非常時の電源セキュリティニーズに応えられる機器としても利用されている。東日本大震災以降ニーズが拡大した BCP(Business Continuity Plan)に対応するためラジエータ仕様もラインアップしている。また、高層ビル・工場・商業施設・病院等の常用電源やピークカット用の調整電源としても利

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 エナジー技術部 主席 PJ 統括

*2 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 エナジー技術部 主席 PJ 統括 技術士(機械部門、総合技術監理部門)

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 エナジー技術部

*4 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 エナジー技術部 主席技師

*5 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 エナジー技術部 次長 技術士(機械部門)

用されている。

3. 水素混焼エンジン

3.1 水素混焼エンジンの開発

当社は東邦ガス株式会社と共同で、GS6R2 を用いた水素混焼エンジンの開発に取り組み、水素混合時の燃焼性能への影響と温室効果ガスの削減効果を確認した^{(1),(2)}。また、市場で想定される運転パターンを模擬した検証試験を通して、異常燃焼等のリスクなく運用可能なことを確認した。

3.2 水素混焼エンジン発電セットの製品化

上述で開発を進めた GS6R2 を搭載したコージェネレーションシステム SGP-M450 水素混焼仕様の主要諸元を表 1 に、概略図を図 1 に示す。従来ガスエンジンからの変更範囲を最小限にすべく、水素混合率は最大 15vol% に設定した。本製品は、都市ガス 13A 専焼モード及び水素混焼モードでの運転が可能であり、各運転モードは負荷運転中に任意に切替可能である。

表1 SGP-M450 主要諸元

製品型式	SGP-M450	
エンジン型式	GS6R2-PTK	
使用燃料	都市ガス 13A 及び 都市ガス 13A-水素混合燃料 (水素混合率:最大 15vol%)	
シリンダ径	mm	170
ストローク長	mm	220
定格出力	kW	450
定格回転数	min ⁻¹	1200
正味平均有効圧力	MPa	1.55
燃焼方式	—	副室式希薄燃焼
点火方式	—	火花点火

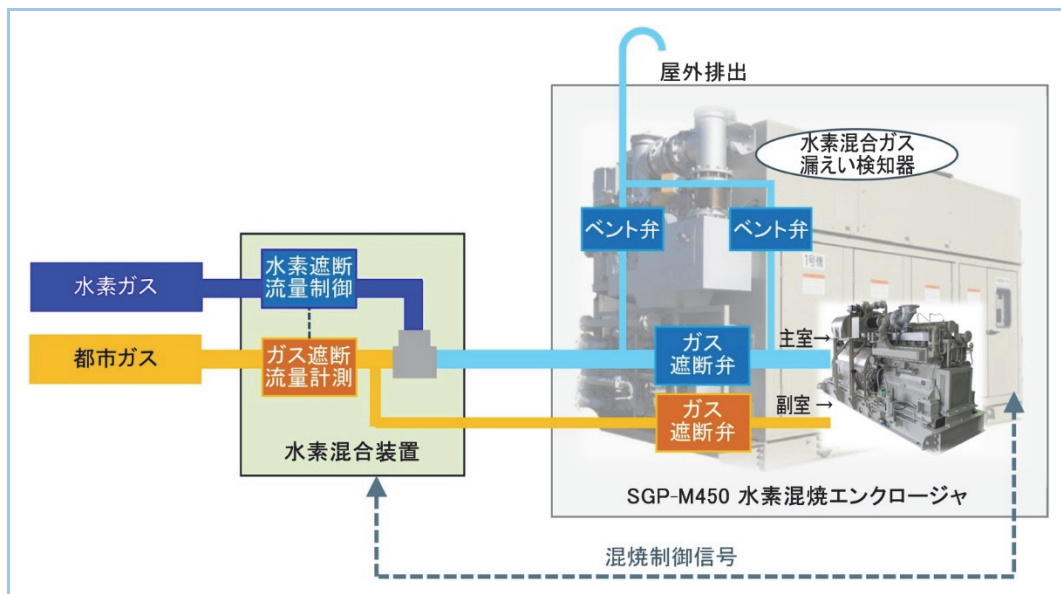


図1 SGP-M450 混焼仕様概略図

水素混焼時の発電出力は、従来の都市ガス 13A 専焼仕様と同じ出力を維持している。水素はエンクロージャに入る前で都市ガス 13A と混合し、混焼運転中に必要な量の混合燃料のみがエンクロージャ内の配管を通過するような燃料系統とすることで、純水素がエンクロージャ内に漏えいするリスクを回避した。また、混合燃料はエンジンの過給機前から主室にのみ供給し、副室には現行の都市ガス 13A 専焼エンジンと同様に都市ガス 13A のみを供給する方式を採用した。この燃料供給方式により、発電性能を大きく損なうことなく NOx の排出レベルを従来機と同じ

200ppm ($O_2=0\%$) 以下とすることができた。

一方、燃焼系の部品及び過給機の仕様を変更することなく水素混焼運転に対応させることで、都市ガス 13A 専焼時は従来の都市ガス 13A 専焼仕様と同等の性能を確保している。更に、エンジン始動時には都市ガス 13A を用いる仕様とすることで、自立運転時の初期負荷投入割合も都市ガス 13A 専焼仕様と同等の性能を有し、BCP 対応も可能とした。

4. 水素専焼エンジン

水素専焼エンジンも 3 章で紹介した水素混焼エンジンと同様に、現在当社が販売している希薄燃焼ガスエンジン GSR シリーズを基本に開発を進めている。水素専焼では混焼に対して更に燃焼速度が速く、バックファイア・過早着火・ノッキングなどの異常燃焼のリスクが高くなるため、燃焼の安定化と異常燃焼のリスク低減が課題となる。これらの課題への対応及び実機検証の取組みについて以下に述べる。

4.1 水素単気筒試験と解析による性能最適化

ガスエンジン GSR をベースに水素専焼エンジンの実機設計を行うに当たり、水素燃焼に関する基礎試験と、数値計算による解析の両輪を回すことで、短期間での水素専焼エンジン性能の最適化を目指した。水素の燃焼試験は、共同研究において国立研究開発法人産業技術総合研究所(以下、産総研)の所有する単気筒エンジンを使用した(図 2)。具体的な設計プロセスと、得られた成果の概要を以下に示す(図 3)。

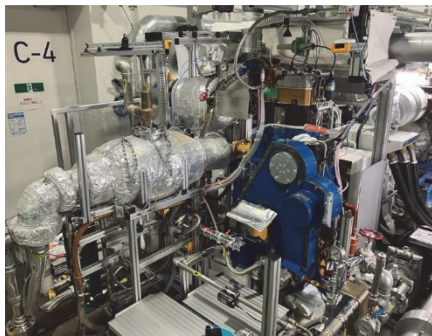


図2 産総研単気筒試験機

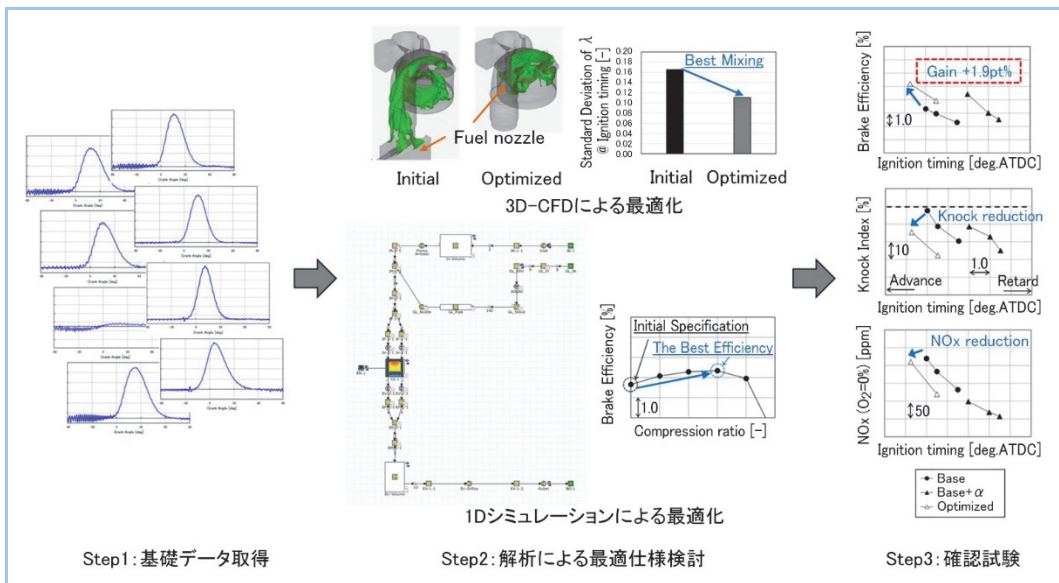


図3 単気筒エンジン試験と解析による最適設計

はじめに、エンジン部品や制御パラメータを変更させながら、水素燃焼の筒内圧や熱効率といった基礎データを幅広く取得し、水素燃焼に関する知見を獲得した。次に取得した基礎データをもとに解析モデルを構築し、水素専焼エンジン性能を設計するにあたり律速となるパラメータを把

握するとともに、製品性を最大化するようにハードウェア仕様と制御パラメータを最適化した。最後に、これらの設計変更点を加えて最適化した仕様にて、再度単筒機試験を実施した。その結果、水素専焼にて安定燃焼を実現し、ノッキング・NO_x 等の制約条件等を満足しつつ、目論みどりの熱効率向上ゲイン $\Delta 1.9\text{pt}\%$ が得られることを確認した⁽³⁾。

これら一連の試験と解析結果をもとに、安定燃焼の実現及び性能最適化の観点から、実証機のハードウェア仕様と制御パラメータを決定した。

4.2 水素専焼エンジン本体の設計

水素は都市ガス 13A と比較し、漏れ易い・着火し易い・燃焼速度が速い等の特徴がある。これらの特徴は、エンジン燃焼室での異常燃焼（ノッキング・過早着火）のほか、エンジン内の意図せぬ場所での着火（バックファイア・アフターファイア）のリスクを高めることから、リスクを低減するための設計に配慮した。ガスエンジン GSR からの主な変更点は①単室火花点火方式の採用、②筒内圧センサの採用、③ポートインジェクション方式の採用である（図 4）⁽²⁾。これらのコンセプトを反映し、6 気筒ガスエンジン GS6R2 をベースに実証機を設計した。実証機の諸元を表 2 に、外観写真を図 5 に示す。なお、諸元における発電出力及び正味平均有効圧力は初期目標値であり、更なる出力向上を目指す。以下に主な変更点の詳細を記す。

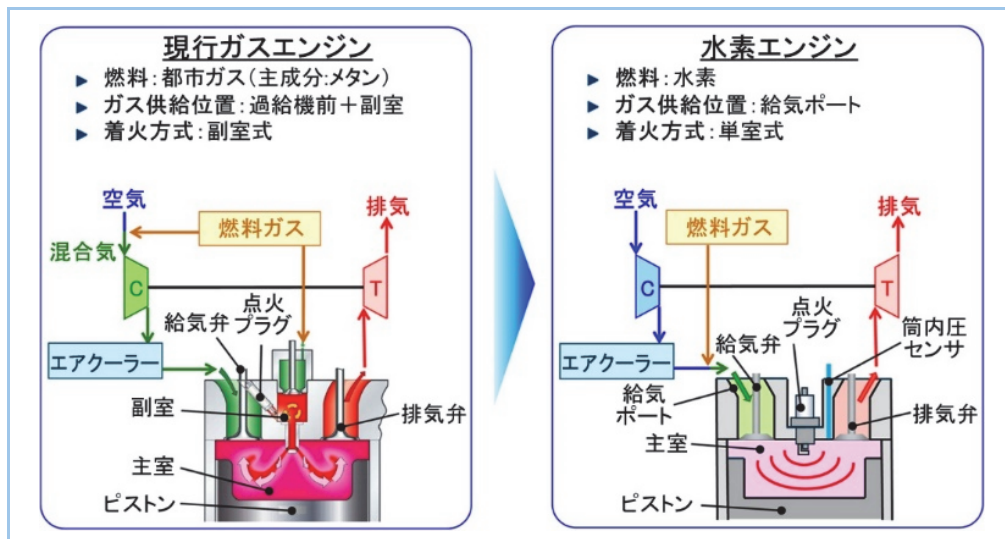


図4 水素専焼エンジンの変更点

表2 水素専焼エンジン実証機諸元

エンジン型式	GS6R2-PTK	
使用燃料	100%水素	
シリンダ径	mm	170
ストローク長	mm	220
定格出力	kW	435
定格回転数	min ⁻¹	1500
正味平均有効圧力	MPa	1.2
燃焼方式	—	単室式希薄燃焼
点火方式	—	火花点火

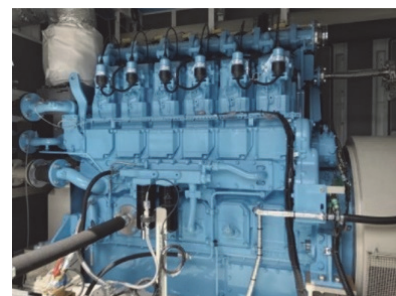


図5 水素専焼エンジン実証機

①単室火花点火方式の採用

水素専焼での速い燃焼速度を抑制することを目的として、従来 GSR シリーズで採用している副室火花点火方式から、単室火花点火方式に変更した。また、圧縮比・給気弁閉じ時期・空気過剰率等を見直し、燃焼速度の適正化・燃焼の安定化を図った。

②筒内圧センサの採用

水素専焼エンジンでは、新たに各気筒に筒内圧センサを搭載した。筒内圧センサで失火・過早着火・ノッキング等の異常燃焼を速やかに検知し燃料供給を停止させることで、

異常燃焼による機関損傷等のリスクを回避できる。

③ポートインジェクション方式の採用

従来 GSR シリーズではターボチャージャ上流に燃料を供給し、予混合気をターボチャージャから吸入する方式を採用しているが、水素専焼エンジンでは各気筒の給気ポートから燃料を供給する方式(ポートインジェクション方式)に変更した。本方式を適用することで、給気系における予混合気の存在領域が最小限に限定され、バックファイアが発生した際の機関損傷リスクを低減できる。

4.3 発電セットの設計

水素は都市ガス 13A と比較し、漏れ易く爆発し易い特性を有しているため、漏洩した場合でも爆発を回避し、安全に運転停止させなければならない。水素漏洩による爆発は、燃焼の3要素である可燃物(燃焼範囲内の水素)・支燃物(空気中の酸素)・着火源(火種・静電気・高温等)が同時に存在する状態でしか発生しない。そのため、水素専焼エンジン発電セットの設計では、3要素各々の発生ポテンシャルを下げつつ、同時に存在させないための未然防止設計が必要である。水素漏洩に対しては、水素を漏らさない設計、漏れを早期に検知し安全停止させる設計、漏れても滞留させない設計に配慮することで安全性を高めるよう努めた。具体例としてエンクロージャと水素系統の設計を以下に紹介する。

①エンクロージャ

図6に水素専焼エンジンのエンクロージャを示す。エンクロージャ内の燃料配管に水素が入っている状態では換気ファンを常時運転する計画とし、もし換気ファンが停止状態で水素が漏洩した場合でも自然に水素がエンクロージャ外に排出される屋根の形状とした。また、エンクロージャ内部には水素と都市ガス 13A に対応したガス漏れ検知器と火災報知器を設置した。

②水素系統

エンクロージャ内の燃料配管には、エンジン制御に必要な2重遮断弁や各種調節弁を設置しており、エンジン停止後には配管内部に水素が残留する。燃料配管にベント系統・窒素パージ系統を設置しエンジン停止後に自動でベント・窒素パージを行うことで、エンクロージャ内への水素漏洩リスクを低減した。また、燃料配管フランジ間をボンディングして接地することで静電気による着火リスク低減を図った。



図6 水素専焼エンジン発電セット

4.4 水素専焼エンジン発電セット実証設備

実機スケールでの水素専焼エンジン発電セットの性能・信頼性検証・安全性評価を目的に、当社相模原工場内に実証設備を新設した^{(4),(5)}。実証設備は、主に水素供給設備(トレーラ倉庫)と水素専焼エンジン発電セットで構成され、水素供給設備から水素専焼エンジン発電セットまでの水素配管は地上に敷設した。燃料となる水素は、株式会社やまなしハイドロジェンカンパニーが米倉山電力貯蔵技術研究サイト(山梨県甲府市)において再生可能エネルギー由来の電力を利

用し水電解装置にて製造したグリーン水素“HyGI(ハイジー)”を、株式会社巴商会を通じて調達する。更に、甲府市からの水素トレーラ走行時に排出される CO₂ にもカーボンクレジットを適用する。グリーン水素を活用することで、製造・貯蔵・輸送・消費の全ての水素サプライチェーンで水素利用による脱炭素化を実現できる実証試験体制を構築した。

4.5 水素専焼エンジン発電セット実証試験

2024 年 10 月より、水素燃料を導入した実証試験を開始した。実証試験は、水素気密確認試験や保護装置確認試験等により安全性を確認しながら、以下に示すとおり、①始動試験及び②定格出力(435kW)までの安定燃焼域確認試験まで完了した⁽⁶⁾。

①始動試験

本水素専焼エンジンは、始動時においても水素以外の燃料に頼らず、100%水素燃料で運用可能な仕様とした。始動時のエンジン挙動の一例を図 7 に示す。電動のスタータで 100min⁻¹ 程度まで回転させたのち、水素を供給し安定的に燃焼させながら定格回転数まで昇速させる必要がある。更に、配管内が窒素でパージされた状態から始動する際は、水素燃料中に一部窒素が混合しているような過渡状態の燃料供給の中で異常燃焼を抑えて燃焼を成立させる必要があるが、始動に関連する補器類のシーケンスやエンジン制御のパラメータを適正化することで、安定的に始動できることを確認した。

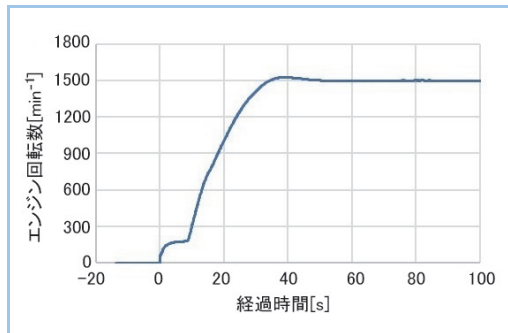


図7 始動時のエンジン挙動

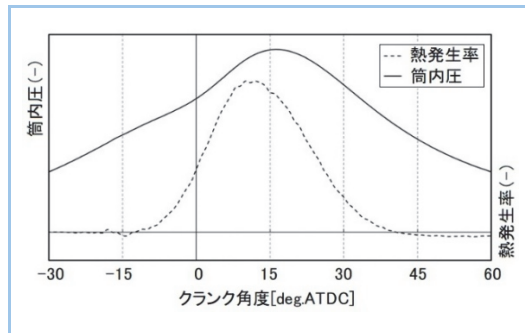


図8 定格出力時の筒内圧及び熱発生率

②安定運転域確認試験

始動試験完了後、負荷運転の実証試験を行っている。水素専焼エンジンではバックファイア・過早着火・ノッキングが発生しやすいことから、それらの異常燃焼を回避した条件で運転する必要がある。実証試験では出力を 10%毎に上昇させながら、異常燃焼の発生条件を把握する試験を実施した。定格出力時の筒内圧及び熱発生率を図 8 に示す。本試験を通して、各出力にて空気過剰率・点火タイミング・燃料噴射タイミング・燃料ガス供給圧力等を適正化することにより、無負荷から定格出力まで異常燃焼を回避し安定的に運転可能な条件を見出すことができた。

5. まとめ

低炭素・脱炭素社会の実現に向け、水素を燃料として利用するレシプロエンジンの開発を推進中である。ここで紹介した水素混焼エンジン・水素専焼エンジンはいずれも、十分な納入実績のあるガスエンジン GSR シリーズをベースとして開発を進めている。水素混焼エンジンは、都市ガス 13A に対し 15vol%の水素を混合した燃料で常用運転が可能な製品を開発した。水素専焼エンジンは、当社相模原工場内に発電セット実証設備を設けることで、開発から設計・製作・実証に至るまでを自社工場内で一貫して遂行する開発サイクルを構築しており、一連の実証試験で得た結果を迅速に製品に反映することが可能である。これまでに始動から定格出力(435kW)まで安定運転が可能であることを確認しており、引き続き、信頼性の検証評価に加え、発電セットとして求められる安全性評価や性能検証を実施予定である。

今後も、水素の供給インフラ整備の状況やお客様のニーズに応じて、水素混焼エンジン・水素専焼エンジンのタイムリーな開発・製品化を図ることで、水素利用拡大による低炭素・脱炭素社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 東 邦 ガ ス 株 式 会 社 , 三 菱 重 工 業 株 式 会 社 , プ レ ス リ リ ー ス (2021)
<https://www.mhi.com/jp/news/21082601.html>
- (2) 今森ほか, 低炭素・カーボンニュートラル社会に貢献する水素・アンモニアエンジンの開発, 三菱重工技報 Vol.59 No.4(2022)
- (3) 野村ほか, 水素専焼エンジンのノッキング回避条件の検討, 第 34 回内燃機関シンポジウム(2023)
- (4) 三菱重工業株式会社, プレスリリース(2023) <https://www.mhi.com/jp/news/230706.html>
- (5) 三菱重工業株式会社, プレスリリース(2024) <https://www.mhi.com/jp/news/24052902.html>
- (6) 三菱重工業株式会社, プレスリリース(2025) <https://www.mhi.com/jp/news/25031201.html>