

# 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

Development of Hydrogen and Ammonia Engine that Contributes to Decarbonized Society



今森 祐介\*<sup>1</sup>  
Yusuke Imamori

渡邊 壮太\*<sup>2</sup>  
Sota Watanabe

田中 健吾\*<sup>3</sup>  
Kengo Tanaka

野口 知宏\*<sup>4</sup>  
Tomohiro Noguchi

森 直之\*<sup>5</sup>  
Naoyuki Mori

山田 哲\*<sup>6</sup>  
Satoshi Yamada

低炭素・カーボンニュートラル社会の達成に向け、水素・アンモニア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。水素混焼エンジンでは、都市ガスへの水素混合割合を35vol%まで増加させた場合の燃焼特性を実機検証し、ノッキングやブレイグニッション（過早着火）の異常燃焼の回避条件の明確化、今後の商品化仕様の決定に繋げた。水素専焼エンジンでは、数値シミュレーションと単筒試験機による検証にて、異常燃焼を回避しつつ、高出力・高効率を実現する運転条件及び各部品の仕様選定を図り、それらを展開した実機設計を推進中である。また、船用エンジンへの展開を見据えたアンモニア混焼エンジンでは、 $N_2O$  を含む温室効果ガスの大幅低減が可能な燃焼形態を数値シミュレーションの活用により探索し、小型試験機での検証にて従来比 82%低減を確認した。

## 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・カーボンニュートラル社会の達成に向け、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、トリプルハイブリッド発電<sup>(1)-(3)</sup>、カーボンニュートラル燃料への対応、 $CO_2$  回収装置の適用<sup>(4), (5)</sup> などの開発を進めている<sup>(6)</sup>。その中で本報では、カーボンニュートラル燃料として水素・アンモニアを適用する新エンジンの開発状況について紹介する。

水素に関しては、都市ガス 13Aを燃焼させる既存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と混焼して発電可能なエンジンの仕様構成および運転条件を決定している。更に 100%水素での安定燃焼運転の実現に向け、流動や燃焼の数値シミュレーション技術を活用し、高効率で温室効果ガスを排出せず安定燃焼可能な水素専焼エンジンを開発中である。

また、海運業界でカーボンニュートラル燃料として有望なアンモニアに対し、難燃性であるアンモニアを軽油で着火して安定燃焼させつつ、温室効果の高い  $N_2O$  の排出を大幅低減可能な運転条件や部品仕様を見出し、更なる改善に取り組み中である。これらの開発状況について紹介する。

\*1 三菱重工業株式会社 総合研究所燃焼研究部 主席研究員

\*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・エナジー事業部技術開発室 主席PJ統括 技術士（機械部門）

\*3 三菱重工業株式会社 総合研究所燃焼研究部 主席研究員 技術士（機械部門）

\*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・エナジー事業部技術開発室 主席技師

\*5 三菱重工業株式会社 総合研究所燃焼研究部

\*6 三菱重工業株式会社 総合研究所燃焼研究部 室長

## 2. 水素混焼エンジンの開発

我が国では“2050年カーボンニュートラルの実現を目指す”政府方針が示された。カーボンニュートラル達成の鍵となる水素利用は、水素を都市ガスと混合し利用することから始まる可能性がある。そこで、当社は東邦ガス株式会社と共同で当社製ガスエンジンを用いた水素混焼エンジンの開発に取組み、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<sup>(7)</sup>。

### 2.1 水素混焼エンジンの仕様

試験には、東邦ガス技術研究所に設置されている当社製ガスエンジンの主力機種であるGS6R2を用いた。エンジン仕様は基本的に都市ガス13A仕様から変更せずに水素供給系を追加して適応させた。エンジンの外観及び主要諸元を図1に示す。着火方式は副室式で、安定した希薄燃焼を実現している。

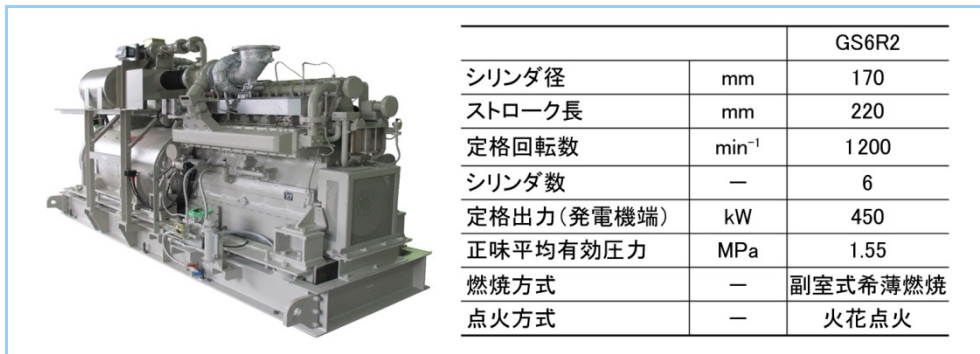


図1 エンジン外観、主要諸元

空気・燃料供給系統を図2に示す。燃料供給ラインは水素と13Aの混合ガスを過給機上流から供給した。13Aと水素の混合割合の調整は水素供給系に設けた流量調整弁にて行った。水素混焼時の運転出力は13A専焼時の100%出力と同等とした。

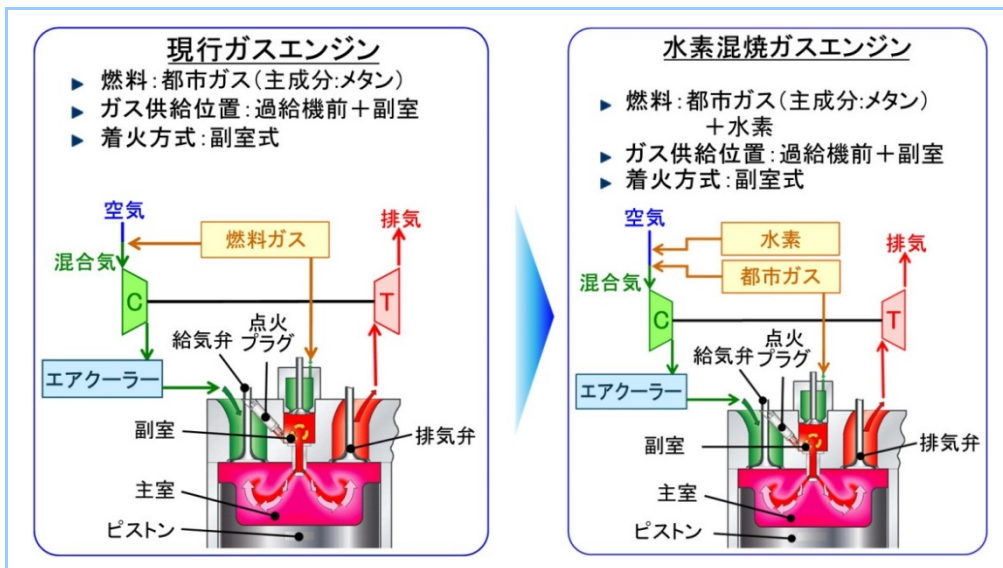


図2 空気・燃料供給系統(水素混焼エンジン)

### 2.2 水素混焼エンジンの試験結果

同一空気過剰率、同一点火時期で水素混合率を増大した際の各種エンジン性能を図3に、水素混合率0%と35vol%(熱量割合で12.5%)混合した場合の筒内圧力と熱発生率の比較を図4に示す。図3の各グラフの縦軸は、点火時期ベース、水素混合率0%に対する比率で示した。水素は13Aと比べて燃焼速度が速いことから、水素を混合すると熱発生率の立ち上がりが早くなり、熱発生期間が短縮し、燃焼の等容度が向上する。熱発生期間の短縮に伴って筒内平均ガス温

度が上昇し、壁面との温度差拡大により冷却損失は増大するが、等容度向上の効果の方が大きく、熱効率も向上する。一方、水素混合率を高めると NOx 排出濃度も増大することから、点火時期の遅角化や空燃比の調整などの対策が必要となる。

水素混合率を増加するとノッキングやプレイグニッションが発生しやすくなることから、これらの異常燃焼の発生を回避できる水素混合率と空気過剰率の範囲を試験により確認した上で、商品化仕様を決定する予定である。

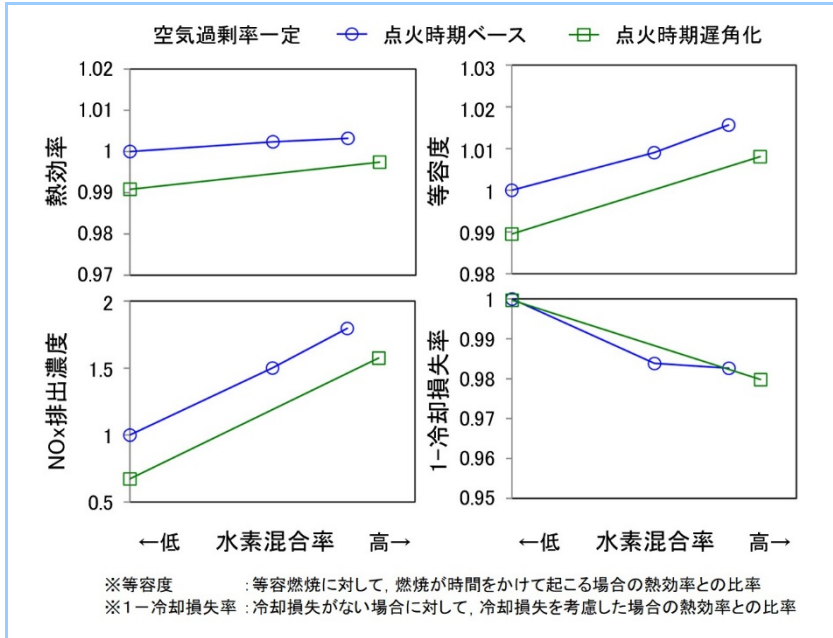


図3 水素混合率に対する各種性能

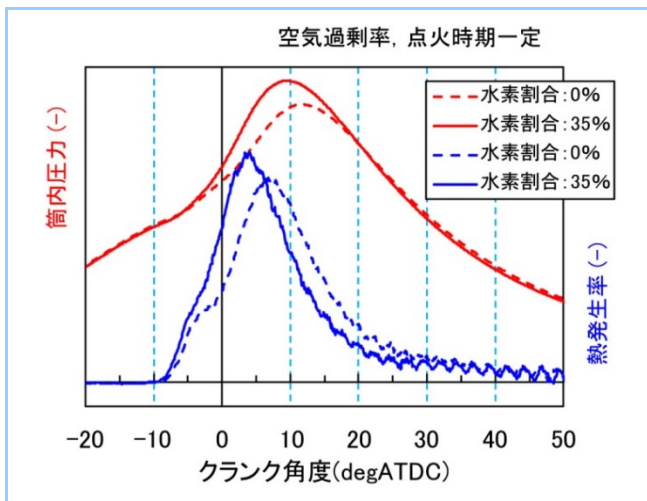


図4 筒内圧力・熱発生率の比較

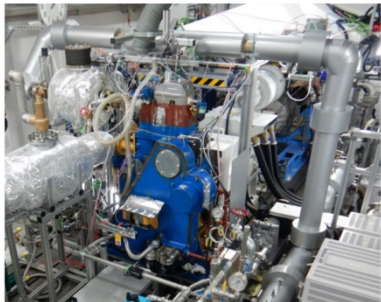
### 3. 水素専焼エンジンの開発

CO<sub>2</sub>を排出しない水素 100%を燃料とした水素専焼エンジンの開発を進めている。当社は国立研究開発法人 産業技術総合研究所・福島再生可能エネルギー研究所との共同研究にて、燃焼速度が速い水素を安定かつ高効率で燃焼させる条件を単筒試験機で実証してきた<sup>(8)</sup>。また、これまでの研究開発で積み上げてきた流動、燃焼、強度など関連する要素技術の数値シミュレーション手法を駆使し、実機的设计を行っている。

#### 3.1 単筒試験機

水素専焼で適切なエンジン仕様・燃焼条件の見極めにあたって、単筒試験機を活用した評価を進めている。図5に単筒試験機の主要諸元および運転条件を示す。ここでは例として、水素専

焼で空気過剰率 $\lambda$ を適正化することによる効果を図6に示す。水素は燃焼速度が非常に速いため、天然ガス相当の $\lambda$ ではノッキング回避が制約となって点火時期成立範囲が狭いが、空気過剰率を適切にリーン化することで、燃焼成立範囲を広げて、熱効率や正味平均有効圧力の向上に繋げられる。現在、本単筒試験機にて、圧縮比や給気弁閉じ時期等の適正仕様の検証を進めている。



		水素単筒試験機
シリンダ径	mm	170
ストローク長	mm	220
定格回転数	min <sup>-1</sup>	1500
シリンダ数	—	1
定格出力	kW	75
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 水素専焼単筒試験機の主要諸元と運転条件

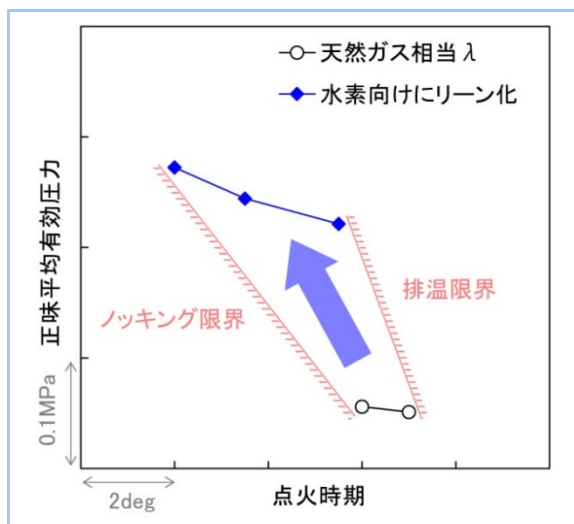


図6 単筒試験機結果例

### 3.2 実機設計に関連する解析検討

水素専焼エンジンで採用するポートインジェクションや単室火花点火方式に適した燃焼室仕様を選定するにあたって、単筒試験機とともに CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を活用している。まず、ポートインジェクション化に伴って、筒内混合気の燃料濃度均一性を評価した結果を図7(a)の当量比コンター図にて示す。燃焼室形状を適正化することで、マクロな筒内流動やスキッシュ効果に変化して、局所的に燃料が濃い領域を低減することができている。次に、このような混合気分布が存在する条件下で、筒内火炎伝播の様相を評価した結果を図7(b)に示す。火炎進行が極端に遅い領域が存在すると、その周辺の未燃域で強度の高いノッキングが発生するリスクが高まるため、それらを考慮した上で燃焼室仕様を適正化し、更なる熱効率・最大出力の向上に取り組んでいる。

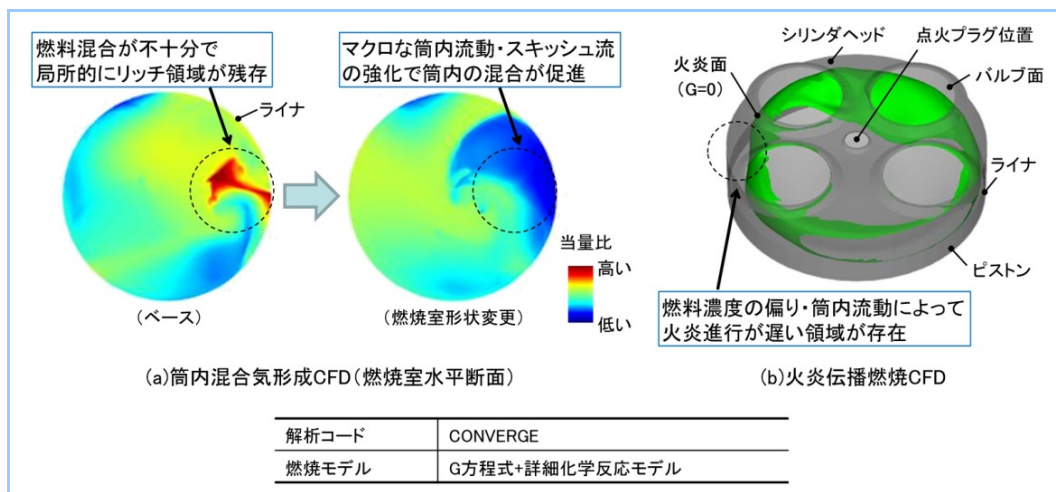


図7 筒内の混合気形成及び火炎伝播燃焼に関する CFD 解析例

### 3.3 実機設計

水素専焼エンジンも2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(図8)。水素専焼では混焼に対して更に燃焼速度が速く、バックファイヤ(逆火)、プレイグニッション、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。これらの課題に対する対応技術について以下に述べる。



図8 水素専焼エンジン

#### (1) 燃焼安定化

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、従来の 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する(図9)。また、3.1 節に示す単筒試験機での検証を通して、圧縮比・給気弁閉じ時期・空気過剰率などを見直し、燃焼速度の適正化・燃焼の安定化を図った。

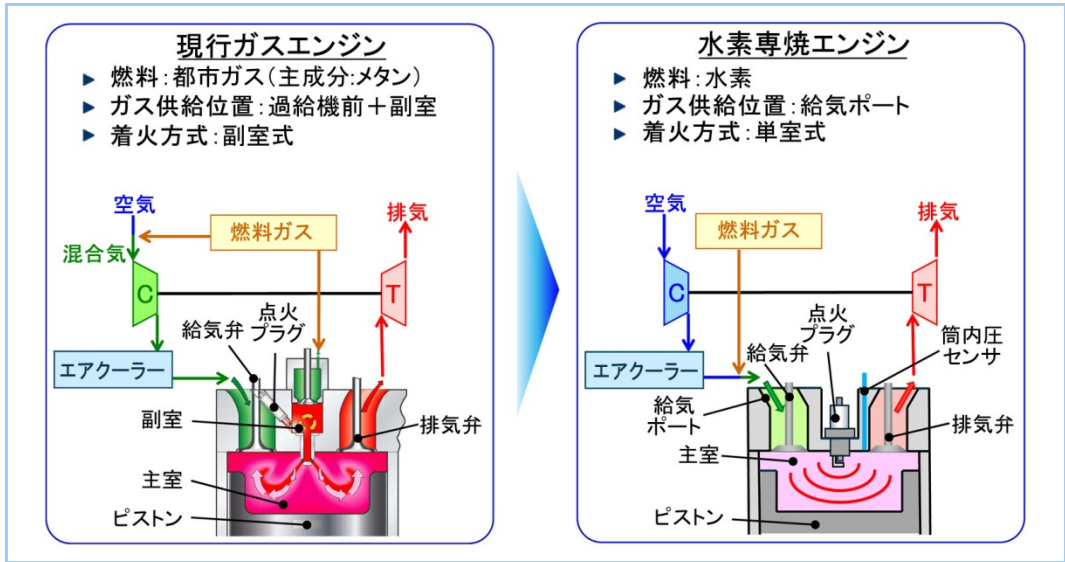


図9 空気・燃料供給系統(水素専焼エンジン)

(2) 異常燃焼のリスク回避

水素専焼エンジンでは従来のGSRシリーズに対して新たに各気筒に筒内圧センサを搭載する(図9)。筒内圧センサでプレイグニッションやノッキングなど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。また、従来GSRシリーズでは過給機上流に燃料を供給し予混合気を過給機から吸入する方式を適用しているが、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させる方式(ポートインジェクション方式)に変更する。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、バックファイヤ(逆火)が発生した際の機関損傷リスクを低減できる。上記の課題に対応した実機設計を進め、2023年度以降から性能・信頼性に関する実機検証試験を開始する計画である。

**4. アンモニア混焼エンジンの開発**

カーボンニュートラルの達成に向けた新燃料の一つとして着目されるアンモニアに対応したエンジン開発を進めている。アンモニアは水素から製造でき、加圧することで容易に液化して体積が減るため、燃料タンクの容量に制約がある船用エンジン等への適用が期待されている。以下、当社製の小型エンジン試験により温室効果ガスの削減効果を検証した結果を示す。

**4.1 アンモニア燃焼の課題**

燃焼室への燃料供給方法を図10(a)に示す。軽油を燃料とした従来のディーゼルエンジンをもとに、吸気系統にアンモニアガスを供給することで、運転条件に応じて軽油とアンモニアの比率を任意に調整できる構成としている。ベースとするエンジンは、図10(b)および(c)に示すとおり、軽油の噴射量や噴射時期を自由に設定できるコモンレール式噴射装置を備えた、4気筒小型ディーゼル機関とした。アンモニア燃焼の課題は、アンモニアは水素や天然ガスよりも着火しにくく、燃焼速度が低いため、未燃分が多く排出されることである。また、アンモニアの熱分解等により温室効果が二酸化炭素の約300倍の亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)が生成される点や、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)が多い点が挙げられる。燃焼シミュレーションにより燃焼室内のガス分布を予測した結果(図11)、端部に未燃アンモニアが多く滞留しており、軽油火炎が届かない領域の燃焼促進が課題となることがわかった。

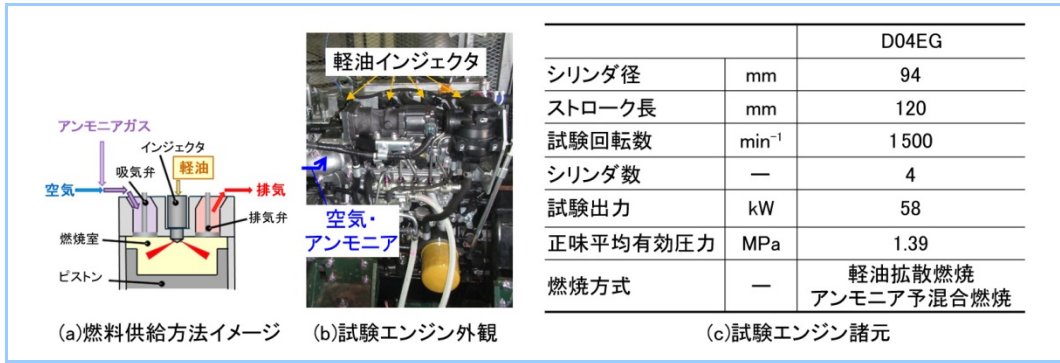


図 10 アンモニア混焼エンジンの概要

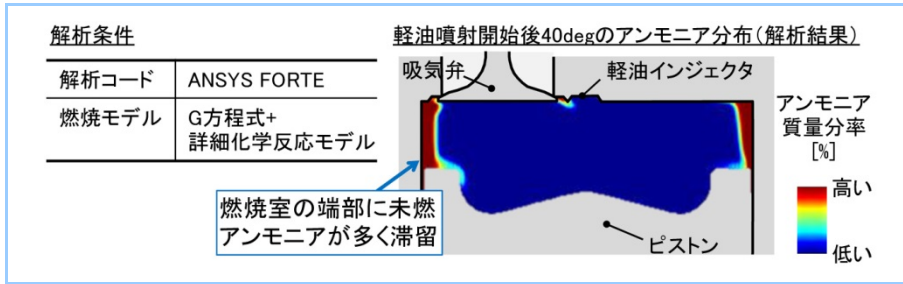


図 11 アンモニア燃焼シミュレーション結果

### 4.2 アンモニア混焼試験結果

エンジン混焼試験結果の一例を図 12 に示す。アンモニアの燃焼促進のため燃焼速度を増大させることを狙い、空気過剰率 $\lambda$ を低減させた結果、図 12(a)のとおり排気中の未燃アンモニア濃度が低下した。また  $N_2O$  濃度も低減しており、上述のとおり生成要因の一つである未燃アンモニア量が低減したことや、低 $\lambda$ 化に伴い燃焼室内温度が増大して  $N_2O$  の消費が進んだことが原因と考えられる。さらに、アンモニアの燃焼が促進されたことによりアンモニアの混焼率(全燃料に対するアンモニアの熱量割合)を増やしても安定燃焼させることができ(図 12(b))、初期設定の混焼率 75%から 94%に増大した。図 12(c)に温室効果ガスの排出率の推移を示す。アンモニア混焼率の増大および  $N_2O$  低減により、温室効果ガス(GHG)を軽油専焼比で 82%削減した。

低 $\lambda$ 化の排反事象として、 $NO_x$  や燃焼室・排気系部品への熱負荷の増大が挙げられる。引き続きシミュレーションおよびエンジン試験により適正な設定を見出し、カーボンニュートラルの達成に貢献するアンモニアエンジンの開発を加速させる。

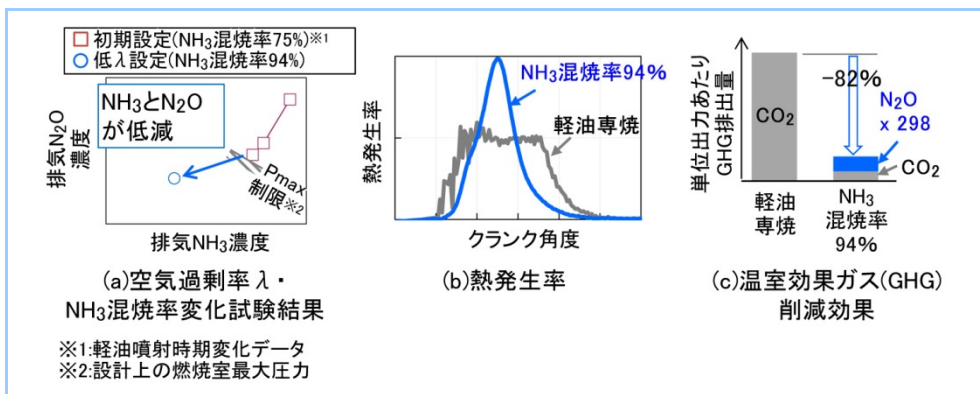


図 12 アンモニア混焼試験結果

## 5. まとめ

今後到来する低炭素・カーボンニュートラル社会に向け、分散電源や船用主機・補機などへの展開を見据えた水素混焼エンジン、水素専焼エンジン及びアンモニア混焼エンジンの研究開発を推進中である。その中でも水素混焼エンジンは、早期の市場投入による環境負荷の改善、お客様の価値向上に繋げるべく、商品化の最終段階にある。また、水素やアンモニアの供給インフラ整備の状況や市場への燃料普及状況、社会及びお客様のニーズに応じて、水素専焼エンジン、アンモニアエンジンのタイムリーな開発・商品化を図り、三菱重工グループとして 2040 年にカーボンニュートラルの達成を目指す“MISSION NET ZERO”に貢献し、サステナブルな社会の実現を目指していく。

## 参考文献

- (1) 田中政之ほか, 分散電源時代に向けたトリプルハイブリッド発電システムの実証 “EBLOX” “COORDY”の開発, 三菱重工技報 Vol.56 No.2 (2019)
- (2) 三菱重工, プレスリリース, (2021) <https://www.mhi.com/jp/news/210623.html>
- (3) 三菱重工, プレスリリース, (2022) <https://www.mhi.com/jp/news/22032201.html>
- (4) 桧垣浩平ほか, カーボンニュートラル社会実現に向けた CO<sub>2</sub> 回収技術に関する最新状況, 三菱重工技報 Vol.59 No.2 (2022)
- (5) 三菱重工, プレスリリース, (2022) <https://www.mhi.com/jp/news/220602.html>
- (6) 低炭素・脱炭素エンジン製品の紹介, 三菱重工技報 Vol.58 No.2 (2021)
- (7) 東邦ガス株式会社, 三菱重工, プレスリリース, (2021) <https://www.mhi.com/jp/news/21082601.html>
- (8) 三菱重工, プレスリリース, (2021) <https://www.mhi.com/jp/news/210121.html>