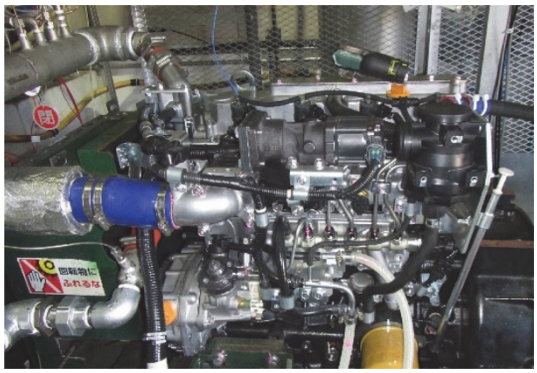
アンモニア混焼エンジンの技術開発

Development of Ammonia Co-firing Engine



田中 貴文*1 Takafumi Tanaka
今森 祐介*2 Yusuke Imamori
普世 梓*3 Azusa Fuse
小暮 涼介*1 Ryosuke Kogure

低炭素・カーボンニュートラル社会の達成に向けて，水素やアンモニアといった新燃料対応のエンジンのニーズがある。アンモニアは加圧することで容易に液化するため，ハンドリング性が重視される舶用燃料として注目されている。一方で，排出ガスに未燃アンモニアや温室効果のある N_2O が含まれるなどの課題もある。これらの課題に対して，三次元燃焼 CFD 解析，小型エンジンでの燃焼試験，及び排ガス後処理装置の触媒マッチングを通じ，未燃アンモニア・N_2O・NOx といった排ガスの低減を狙った。その結果，後処理装置後の性能評価において，ベースとなるディーゼルエンジンの軽油専焼に対して 89%の温室効果の低減見込みを得た。

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，舶用，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目指したエンジン開発を行っている(1)。

その中で本報では，カーボンニュートラル燃料として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。海運業界では，カーボンニュートラル燃料としてアンモニアが注目されている。アンモニアは，同じく脱炭素燃料である水素と比べ，加圧することで容易に液化するため，ハンドリング性が重視される舶用燃料に適している。その一方で，着火しにくく，燃焼速度が遅いという難燃性の特徴がある。当社は，難燃性のアンモニアを軽油と混焼させるシステムで，三次元燃焼 CFD 解析及び小型エンジンでの試験を通じ，安定燃焼範囲の確認と燃焼特性を検証した。また，アンモニアエンジンには，排出ガスに有害な未燃アンモニアや温室効果のある亜酸化窒素（以下，N_2O）が含まれるなどの課題もある。未燃アンモニアや N_2O，窒素酸化物（以下，NOx）といった排出ガスに関しては，排ガス後処理装置として触媒をマッチングさせることにより，排出低減を図った。

以上のとおり，アンモニアには燃料として，ハンドリング性で優れているという特徴がありつつも，燃焼面での課題がある。これらの課題に対しての取組み状況及び技術開発について紹介する。

2. CFD 解析による排ガス性能予測

三次元燃焼 CFD 解析により，表 1 に示すエンジン運転条件変更時（発熱量ベースのアンモニア混焼率変更時）の排ガス性能への影響を検討した(2)。本報では，軽油とアンモニアの燃焼に必

*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
*2 三菱重工業株式会社 総合研究所 燃焼研究部 室長 *3 三菱重工業株式会社 総合研究所 燃焼研究部

要な理論空気量を実際の空気量で除したものを当量比Φtotal，軽油のみの燃焼に必要な理論空気量を実際の空気量で除したものを当量比Φdiesel，アンモニアのみの燃焼に必要な理論空気量を実際の空気量で除したものを当量比ΦNH_3と呼ぶ。解析対象としたのは，後述する試験に供試した小型の単気筒エンジンモデルで，吸排気バルブ開閉による筒内ガス置換，ピストンの上下運動による燃焼室内の過渡的な圧力・温度変化を再現した。次に解析に用いた物理モデルを表2に示す。軽油とアンモニアの各々に関連する中間化学種と素反応，またそれらの相互作用を考慮した反応モデルを用いることで，軽油の着火からアンモニア火炎の伝播までを一気通貫で解析した。

図1に，クランク角ごとの筒内アンモニア濃度変化及び燃焼室中心断面における温度・アンモニア質量分布を示す。60deg.ATDC までではアンモニアの供給量の多い 94%混焼率条件の方が未燃アンモニア濃度は高いが，70deg.ATDC 以降では低くなる。コンター図より，75，94%混焼率両条件とも 60，70deg.ATDC では火炎はライナやキャビティの壁面には到達しており，高温域を形成している。70deg.ATDC での未燃アンモニアは，クレビス部（赤破線部）に多く残存するが，94%混焼率条件のほうが未燃アンモニアの領域は小さい。これは，高混焼率化によって，アンモニア火炎の燃焼温度が上昇するため，燃焼室内の温度が高くなり，未燃アンモニアの消費も活発になったことが要因と考えられる。

図2は，クランク角ごとの筒内N_2O濃度変化及び燃焼室中心断面における温度・N_2O質量分布を示す。N_2Oについては，75%混焼率条件では低温領域～高温領域にかけて広く残存しているが（緑破線部），94%混焼率条件では低温領域にのみ残存しており（青破線部），これは高混焼率化による燃焼温度増加で，N_2O分解反応が活発になったためと考えられる。以上から，燃焼温度を上昇させるような運転条件とすることで，未燃アンモニアや残存N_2Oを同時に低減できることが示唆された。

表1 計算条件

項目	低混焼率条件	高混焼率条件
NH_3混焼率(%)	75	94
Φtotal (−)	0.91	0.91
ΦNH_3 (−)	0.68	0.85
Φdiesel (−)	0.23	0.06

表2 物理モデル

項目	値
CFD コード	CONVERGE
乱流モデル	LES, Smagorinsky
噴霧分裂モデル	Modified KH-RT
燃焼モデル	詳細反応計算
反応メカニズム	Otomo + ERC v2

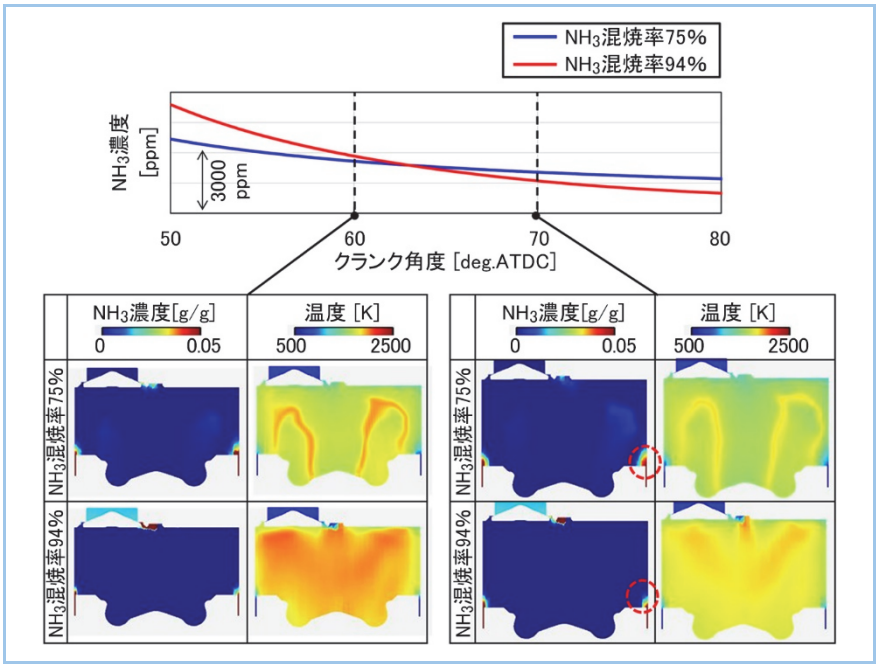


図1 筒内NH_3濃度，燃焼室内温度及びNH_3分布の遷移

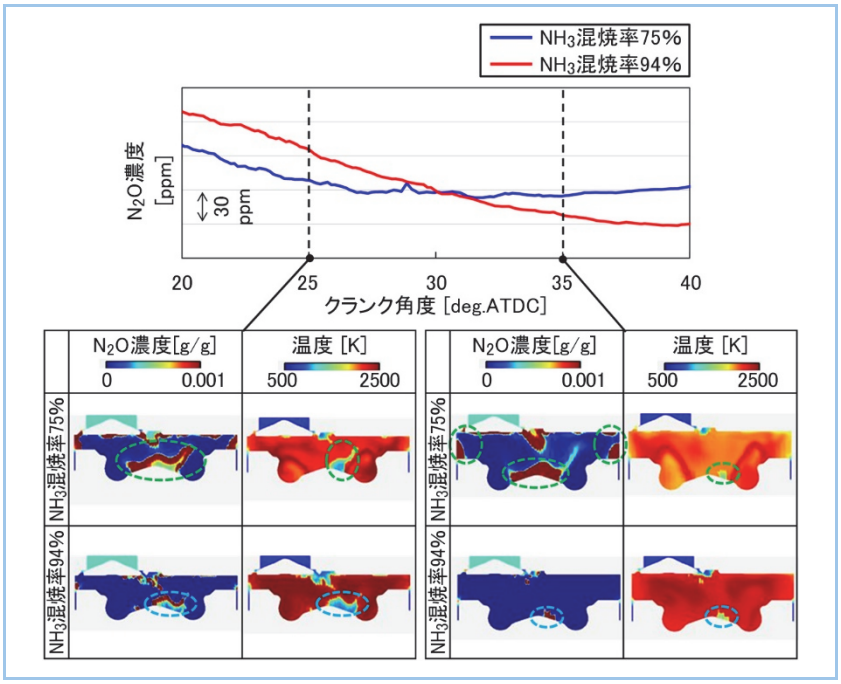


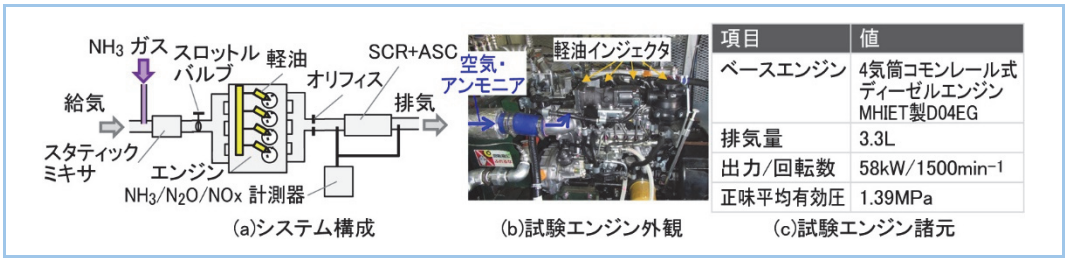
図2 筒内 N_2O 濃度，燃焼室内温度及び N_2O 分布の遷移

3. 小型多気筒エンジンによる燃焼特性の検証

小型の多気筒エンジンを用いて，アンモニア・軽油混焼時の燃焼特性を検証した[(3)]。図 3 にシステム構成，外観，及びエンジン諸元を示す。軽油を燃料としたコモンレール式ディーゼルエンジンの給気配管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。中・低負荷のエンジン吸入空気量を調節できるように，吸気スロットルバルブを設置した。また，排気系統には触媒を用いた排気後処理装置を設けており，詳細は次章で述べる。

図 4 に全負荷条件の排ガス計測結果を示す。各排ガス成分濃度の値は，触媒手前のエンジン出口の値である。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，Case1，2，3 の順に Φtotal を増加させた結果，未燃アンモニア濃度の低下，同時に N_2O 濃度も低減した。これは，N_2O 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，高当量比化に伴い，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。また，さらに Case3 では，高当量比化に伴い高いアンモニア混焼率でも安定燃焼させることができ，混焼率は初期設定の 75%から 94%に増大した。

図 5 に軽油噴射タイミング FIT を−4deg.ATDC としたときの各ケースの熱発生率及びその積算値を示す。Φtotal あるいは ΦNH_3 が増加すると熱発生開始時期が遅くなる傾向がみられる。これはアンモニアによる軽油着火反応の阻害の影響が大きくなったためと考えられる。また，ΦNH_3 が最も高い Case3 は，8deg.ATDC 付近で熱発生率の傾きが一旦緩やかになったのち，15deg.ATDC 付近に向けて傾きが再び急峻になる。8deg.ATDC は受熱量積算値が投入した軽油の発熱量に達する時期であり，最初に軽油が燃焼した後，火炎伝播によってアンモニアが燃焼したと考えられる。Case3 のエンジン出口の温室効果ガス(Green House Gas 以下，GHG)の排出率を図 6 に示す。アンモニア 94%混焼時は，軽油専焼に比べ GHG 排出率を 82%低減することができた。一方で，未燃アンモニア濃度が数千 ppm と高く，また燃焼室内温度上昇に伴い NOx も増大する傾向であるため，次章で述べるように排気後処理装置を適用した際の排ガス特性を検証した。



項目	値
ベースエンジン	4気筒コモンレール式ディーゼルエンジン MHIET製D04EG
排気量	3.3L
出力/回転数	58kW/1500min-1
正味平均有効圧	1.39MPa

図3 アンモニア混焼試験用小型多気筒エンジンの概要

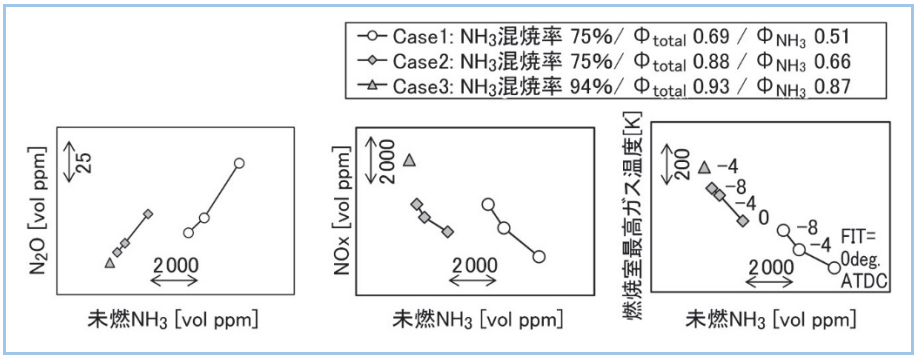


図4 エンジン出口排ガス計測結果(全負荷条件)

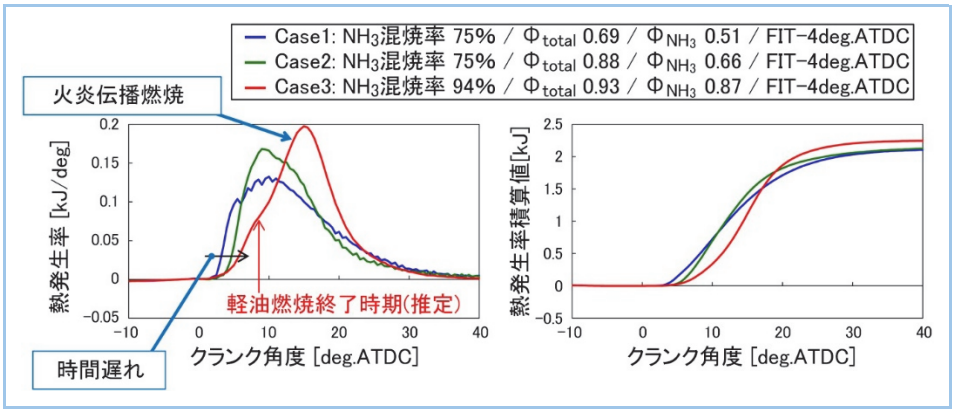


図5 熱発生率データ

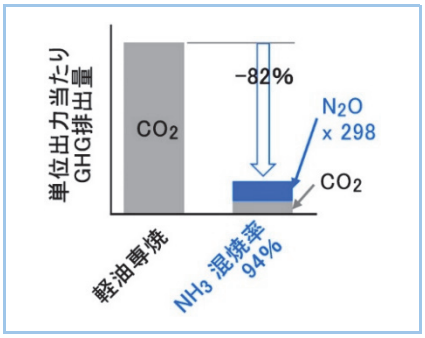


図6 エンジン出口 GHG

4. 排気後処理装置適用時の排ガス検証

供試した排気後処理装置は，選択触媒還元(Selective Catalytic Reduction 以下，SCR)とアンモニア除去触媒(Ammonia Slip Catalyst 以下，ASC)で構成されている。SCR は排ガス中のアンモニアを使って NOx を除去し，ASC は余剰なアンモニアを酸化して低減させることを狙ったものである。本装置は，排気系統にアンモニアや尿素等を追加供給しない方式とした。本試験では，エンジンの正味平均有効圧力(Brake Mean Effective Pressure 以下，BMEP)すなわち負荷を変化させた際の排気後処理装置出口の各種排ガス値を計測した。各 BMEP において，GHG 排出率や排ガス中の未燃アンモニア・NOx が低く，かつアンモニア混焼率ができるだけ高くなるよう

に，吸気スロットルバルブによりΦtotal を増大させたり，軽油の噴射タイミング・噴射圧力を適正化したりしている。

図 7 に試験結果を示す。GHG は BMEP が増加するとともに低減し，全負荷条件に相当する BMEP1.3MPa においては軽油専焼に対し 89%低減していることがわかった。一般的に ASC ではアンモニア処理時に N_2O が生成され GHG が増大する懸念があるが，本試験設定においてはエンジン出口のアンモニア濃度と NOx 濃度の比が適切であり，SCR にてアンモニアが十分に消費されたため，ASC での N_2O 生成が抑制されたことが要因と考えられる。また，このときのアンモニア濃度は数 ppm であり環境面において問題ないレベルである。また NOx も十分に低く，触媒が十分に機能していることが確認できた。BMEP を低下させると GHG と NOx は増加する傾向となったが，いずれも軽油専焼よりも低いレベルであった。これは全負荷条件に対してエンジン出口の排ガス温度が低下して触媒機能が低下したことや，エンジン出口のアンモニア・NOx 濃度の比が変化することにより，後処理装置出口の N_2O 及び NOx 濃度が増大したためと考えられる。

以上の結果より，本エンジン・後処理装置構成とすることで，前章で課題となっていた未燃アンモニアと NOx を BMEP0.9～1.3MPa の負荷範囲で十分に低減でき，さらに全負荷条件の GHG 排出率を軽油専焼に対し 89%低減できることが確認された。

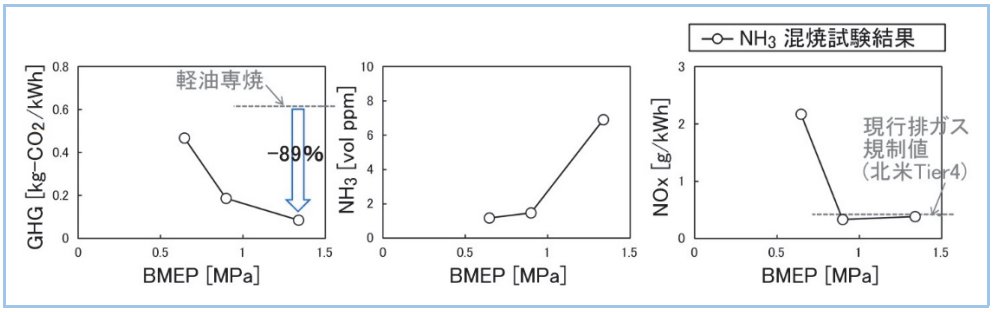
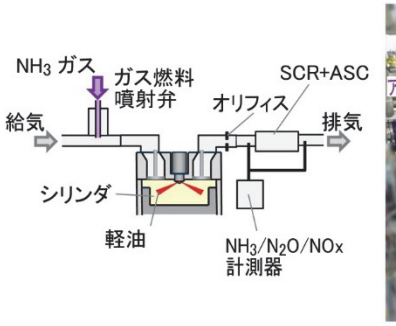


図7 後処理装置出口排ガス計測結果

5. 実機 SR シリーズへの展開

小型多気筒エンジン試験での知見を踏まえ，現在当社の舶用ディーゼルエンジンで主力となっている SR シリーズを対象にアンモニア混焼エンジンの開発を開始した。

SR シリーズでのアンモニア・軽油混焼の燃焼特性把握及び適切なエンジン仕様・燃焼条件の見極めにあたって，単気筒試験機を活用した評価を進めている。図 8 に単気筒試験機のシステム構成，外観，及び主要諸元を示す。軽油の噴射量や噴射時期を自由に設定でき，多段噴射も実施できるコモンレール式噴射装置を備え，外部過給により空気過剰率も自由に変更できるシステムとした。また，アンモニアガス燃料噴射弁を吸気ポート内に備えており，適切な噴孔配置及び噴射タイミングとすることで，アンモニアガスの筒内分布適正化やバルブオーバーラップ期間中の吹抜け低減を狙っている。排気後処理装置は小型多気筒エンジン試験と同じ構成とした。



(a)システム構成

(b)試験エンジン外観

項目	アンモニア単気筒試験
シリンダ径	170mm
ストローク長	220mm
定格回転数	1500min⁻¹
シリンダ数	1
定格出力	107kW
正味平均有効圧	1.71MPa
軽油噴射システム	コモンレール式噴射装置
アンモニア噴射方式	ガス燃料噴射弁による吸気ポート噴射
過給方式	外部過給
排気後処理装置	SCR+ASC

(c)試験エンジン諸元

図8 アンモニア単気筒試験機の主要諸元

単気筒試験機により基礎性能及び排ガス特性を取得することで SR シリーズにおける後処理装置を含めたシステム成立性を確認し，それをもとに実機多気筒エンジンの開発を推進していく。

6. まとめ

これから到来する低炭素・カーボンニュートラル社会に向け，舶用主機・補機などへの展開を見据えたアンモニア混焼エンジンの技術開発を推進中である。小型多気筒エンジンと後処理装置を含めたシステムでの検証試験にて，大幅に GHG を低減できる見込みを得た。この結果を踏まえて，実機を見据えた SR エンジンにて開発を進めている。今後，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，タイムリーな開発・商品化を図る。三菱重工グループは 2040 年での Net Zero を実現するため，“2040 年カーボンニュートラル宣言”をしている。当社も発電用，舶用，車両搭載用向けエンジンの脱・低炭素化を図ることで，カーボンニュートラル社会の実現に向けて貢献していく。

参考文献

(1) 今森祐介ほか，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)
(2) 普世梓ほか，アンモニア・軽油の二元燃料を用いた産業用エンジンにおけるアンモニア混焼率と空気過剰率の排ガス特性への影響，第 34 回内燃機関シンポジウム，2023 年 12 月
(3) Y. Imamori, et al., Experimental and Numerical Investigations of Emission Characteristics from Diesel-Ammonia-Fueled Industry Engines, SAE Paper JSAE 20239197/SAE2023-32-0064 (2023)