

# 船用4ストロークアンモニア燃料機関の開発

## 株式会社IHI原動機

代表取締役社長 保坂 知洋

(株)IHI原動機	技術センター アンモニアプロジェクト部	戸田 勝幸
(株)IHI原動機	技術センター アンモニアプロジェクト部エンジン開発設計グループ	増田 裕
(株)IHI原動機	技術センター アンモニアプロジェクト部エンジン開発設計グループ	眞島 豊
(株)IHI原動機	技術センター アンモニアプロジェクト部エンジン開発設計グループ	倉井 智広
(株)IHI	技術開発本部 技術基盤センター エネルギー変換技術部	佐々木 滉 廣瀬 孝行

### はじめに

地球温暖化対策として、国際的に温室効果ガス（GHG）排出削減が強く求められている。船用業界では、国際海事機関（IMO）が2030年までにGHG削減率20%以上、2040年までに70%以上、2050年には実質ゼロを目指す目標を掲げている。アンモニアは燃焼時に二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を排出しない次世代燃料として期待されており、将来的には世界の船舶の20～40%がアンモニア燃料で運航されるとの予測もある。

本開発は、こうした潮流に対応し、アンモニア燃料を主燃料とする船用4ストローク機関の実用化を目指したものである。なお、本事業はNEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）のグリーンイノベーション基金事業の助成により実施しており、ここに深く感謝の意を表す。

### 開発のねらい

アンモニアはCO<sub>2</sub>の元となる炭素を含まないため、環境面で有利な燃料として注目されている。一方、レシプロ機関燃料としての実用化には多くの技術的な障壁があった。

発熱量が低く、天然ガスと比べても約1/3程度しかないため多くの燃料供給が必要となる。最小点火エネルギーや自着火温度が高く着火が難しい上、層流燃焼速度が遅いため燃焼が不安定になりやすい（表1）。

表1 重油、天然ガス、アンモニアの物性値

項目	単位	重油	天然ガス	アンモニア
発熱量	MJ/kg	42.7	50.0	18.6
密度（液）	kg/m <sup>3</sup>	840	460	670
理論空燃比	kg/kg	14.7	17.4	6.1
最小点火エネルギー	mJ	0.24	0.28	170.00
自着火温度	℃	250	537	630
層流燃焼速度	cm/s	74.0	37.0	7.0
可燃範囲	Vol%	0.7～8.1	4.6～14.6	15.0～28.0
沸点	℃	180.0	-161.5	-33.0
毒性		—	—	劇物、臭気

さらに、毒性や臭気があるため漏洩対策や安全管理が不可欠であり、排ガス中には未燃アンモニアが含まれるため排ガス処理技術の高度化も求められる。加えて、燃焼過程で発生する亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）はCO<sub>2</sub>の約265倍の温室効果を持つため、GHG削減のためには排出低減技術が不可欠である。

このようにアンモニアには多くの燃焼・取り扱いの課題が存在しており、本開発ではこれらの技術課題の解決を通じて、GHG排出削減への寄与を目指した。

## 装置の概要

本開発では、既存の LNG デュアルフューエル機関をベースに、アンモニア燃料対応の改良を施した直列 6 気筒機関「6L28ADF」を開発した（図 1）。

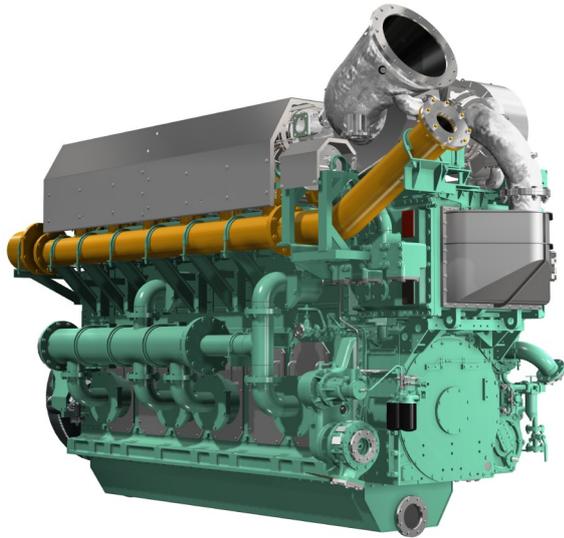


図1 6L28ADF 機関

主要諸元は表 2 の通りである。

表2 船用4ストロークアンモニア燃料機関の主要諸元

型式名	6L28ADF
気筒数	6
ボア径	280mm
ストローク	390mm
定格出力	1618kW
定格回転速度	750min <sup>-1</sup>

本機関は、アンモニアガスと A 重油を燃料とするデュアルフューエル仕様で、運転状況に応じてアンモニアモードとディーゼルモードの切り替えが可能である。

マイクロパイロット方式や燃焼室形状の工夫により、安定した着火と燃焼を実現、排気後処理装置により窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や N<sub>2</sub>O などの有害排出物を低減した。また、耐アンモニア性部材の採用で信

頼性の向上を図っており、環境性能・安全性を両立した次世代船舶用主機関となっている。

## 技術上の特徴

### ①燃焼・着火技術

アンモニアガスと少量のパイロット燃料 (A 重油) によるアンモニアモード、および A 重油のみを使用するディーゼルモードの両方で運転可能なデュアルフューエル機関である。

アンモニア燃焼に特有の着火性や燃焼安定性の課題に対しては、燃焼室設計の最適化や圧縮比の向上など、燃焼室内の温度・圧力条件を精密に制御する技術を導入することで、着火性および燃焼の安定性を向上させている。

燃料供給系統では、ガス化したアンモニアを吸気ポートに適切なタイミングで供給する (図 2) ほか、ガス配管径を拡大することで大量の燃料を安定的に供給できる設計とし、圧力変動を従来の LNG デュアルフューエル機関並みに抑制している。

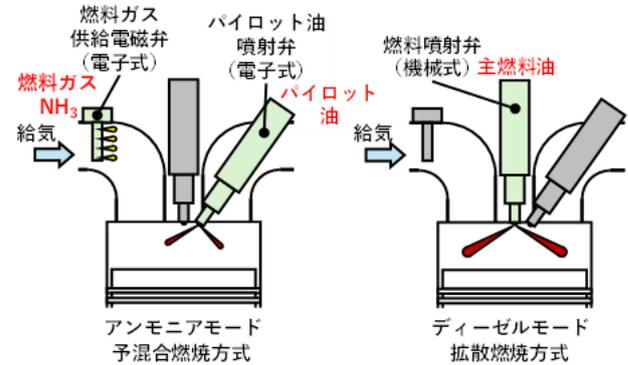


図2 デュアルフューエル機関の燃焼方式

パイロット燃料はシリンダヘッド中央から高圧で噴射され、最適なタイミングと量によって着火を促進し、安定した燃焼を実現している。

機関制御ユニットには燃焼室内圧力センサを装備し、リアルタイムで燃焼状況を監視することで、噴射量やタイミングを最適化し、全負荷域で安定した出力と高い燃焼効率を維持している。

### ②排気後処理技術

アンモニア燃焼により排気中に含まれる NO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O、未燃アンモニアなどの有害排出物へ

の対応として、排気後処理技術の高度化を図っている。

排気系統には、アンモニア分解触媒と  $N_2O$  分解触媒を適切に組み合わせて搭載し、排ガス中の有害排出物を効率的に分解・除去する設計とした。これにより、国際的な環境規制への対応や環境負荷の低減が可能となる。

アンモニア分解触媒は、排ガス中の未燃アンモニアを分解し、大気中への排出を抑制するとともに、 $N_2O$  分解触媒は温室効果ガスである  $N_2O$  の排出を低減する役割を担う。

これらの排気後処理技術の導入により、アンモニア燃焼モードにおいても有害排出物の発生が大幅に抑制され、環境性能の向上が図られている。

### ③安全設計

アンモニアは高い毒性と腐食性を有するため、安全設計には十分な配慮がなされている。燃料供給系統には二重管構造を採用し、二重管の外管と内管との間の空間(アニューラー部)に換気空気を流し、ガス検知器を設置することで、内管からの漏洩を速やかに検知できる設計とした。この構造により、燃料漏洩リスクを最小限に抑え、安全性を確保している。

さらに、クランクケース内を常時負圧に保つ換気システム(オイルミストセパレータ付き換気ファン)を採用し、排出先にも工夫を加えることで、機関内部からのアンモニア漏洩リスクを低減している。クランクケース内からの換気は適切に処理され、周囲環境への影響を最小限に抑える設計である。

腐食対策としては、長期間の運転による部品の劣化を防止するため、機関各部の部材およびシール材質をアンモニア耐性材に変更し、信頼性の向上を図っている。

また、燃料供給圧力や流量は常時監視されており、機関制御システムが異常発生時には警報を発し、迅速な対応を促す設計となっている。

加えて、メンテナンス時の安全性にも配慮し、機関停止後も換気システムを稼働させることでクランクケース内のアンモニア濃度を安全レベ

ルまで低減が可能となっている。

これらの対策により、アンモニア燃料を使用する機関において、運転中およびメンテナンス時の高い安全性を確保している。

## 実用上の効果

本機関の開発評価では、船舶用推進機関に適用される排ガス試験サイクル(E3モード)において、アンモニアモード時の混焼率が最大95%以上を達成した(図3)。アンモニアガスの着火には一定量のマイクロパイロット燃料が必要となるため、機関出力が低下すると混焼率も低下する傾向が見られるが、主要な負荷領域では90%以上の高い混焼率を安定して維持できることが確認されている。

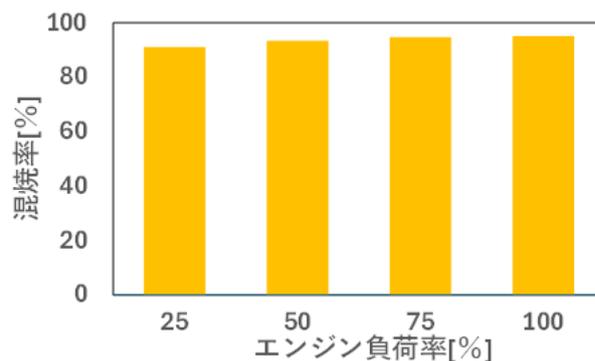


図3 アンモニア燃料の混焼率

また、アンモニア燃焼に伴い発生する  $N_2O$  を含めた GHG 削減率は最大90%以上となり、IMOが掲げる2040年のGHG削減目標を十分に達成可能であることが明らかとなった(図4)。

$NO_x$  についても、IMOが定める船舶用機関の  $NO_x$  排出規制(Tier III)をクリアしており、 $N_2O$  や未燃アンモニアについても主要な各負荷で排出量を25ppm以下、数ppmまで低減するなど、環境負荷の大幅な低減を実現している。

加えて、アンモニア燃料を主燃料とする機関として、世界で初めて一般財団法人日本海事協会(NK)の使用承認も取得している。

さらに、今回開発した船用4ストロークアンモニア燃料機関「6L28ADF」を2基搭載したア

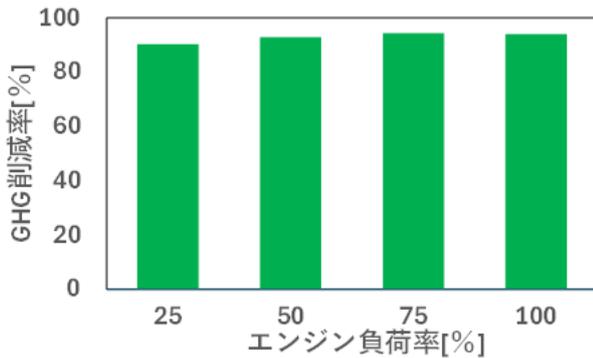


図4 GHG 削減率

ンモニア燃料タグボート「魁（さきがけ）」の実航海における実証試験・解析でも、開発評価と同等の高い混焼率およびGHG削減率が得られた。

これにより、陸上で確認された環境性能や信頼性が、実船運航という実際の運用環境下でも十分に発揮されることが実証されている。

これらの結果は、アンモニアが実用的かつ持続可能な船舶用次世代燃料として、現実的な選択肢となり得ることを示している。

加えて、これらの成果は海運業界におけるGHG排出削減に大きく貢献するだけでなく、港湾施設や燃料供給インフラ整備の促進にも寄与し、海事分野全体のエネルギー転換を加速させる波及効果が期待される。

## 知的財産権の状況

本開発品の装置に関する特許登録は下記の通りである。

### ① 日本国特許第 7394270 号

名称: レシプロエンジンシステム、レシプロエンジンの運転方法

概要: レシプロエンジンシステム、レシプロエンジンの運転方法に関する。

### ② 日本国特許第 7649433 号

名称: レシプロエンジン

概要: レシプロエンジンに関する。

他、国内特許 6 件、外国出願 4 件を出願した。

## むすび

当社は、海事クラスターの GHG 削減に対応すべく、世界初となる船用 4 ストロークアンモニア燃料機関を開発し、以下の成果を得た。

(1) 船用アンモニア機関「6L28ADF」において NK の使用承認を取得するとともに、アンモニアモードで IMO NO<sub>x</sub> の Tier III 規制をクリアした。

(2) アンモニア燃料における最大混焼率は 95% 以上を達成し、その際の GHG 削減率は最大で 90% 以上となった。これにより、IMO が目標とする 2040 年の GHG 削減率 70% 以上を十分に達成可能であることを実証した。加えて、本技術は 2030 年までにゼロエミッション燃料の使用割合 5 ~ 10% および CO<sub>2</sub> 排出量 40% 削減(2008 年比)という中間目標に対しても、実現性の高い技術的選択肢を提供するものである。

(3) 世界初となる商業用アンモニア燃料船の実船における実証試験を成功裏に完了した。

今後は、アンモニア燃料タグボートに搭載した機関の商用運航を通じて得られる技術課題の改善に努めるとともに、本開発によって確立されたアンモニア燃料機関技術は、船舶用途のみならず、陸用分散型発電システムへの展開も可能であり、再生可能エネルギー由来のグリーンアンモニアを燃料とすることで、カーボンニュートラルな発電ソリューションの提供にもつながる。災害時の非常用電源や、離島などエネルギー供給が課題となる地域での活用も期待される。

本開発は、海事分野の枠を超えて、内燃機関の燃料転換による地球温暖化対策の推進や、持続可能な社会の実現に向けた技術的基盤の構築に大きく寄与するものである。今後は、得られた知見や運用実績を活かし、さらなる技術革新と社会実装の深化に努めていく。また、アンモニア燃料機関技術の社会実装を通じて、地球規模での GHG 排出削減とエネルギー転換を牽引し、日本の海事産業およびエネルギー分野の国際競争力強化に貢献していく所存である。