

世界の海で環境性能を リードする船用エンジン

デュアルフューエルエンジン搭載の新造船市場 8割に迫るシェアを獲得した X-DF

石油、石炭、天然ガスなどのエネルギー資源、木材や鉄鉱石などの原料資源、車などの製品、食料品など、国際的な物流の99%以上は今の時代も船舶が担っている。これら船舶を推進するエンジンの排気規制も厳しくなるなか、IHIと株式会社 IHI 原動機は次世代を見据えて、技術的な壁である大型船用エンジンの希薄予混合燃焼方式に挑戦し、環境性能の高いデュアルフューエルエンジンの開発に成功した。



X-DF 初号機搭載船「MS Damia Desgagnes」

大型船舶用エンジン

世界の物流を支える大型船舶には、自動車と同じレシプロエンジンが使われているが、排気量は一般的な自動車が1～3l程度であるのに対し、数千l以上と極めて大きく、出力は数千kW、熱効率は50%にも達する巨大で高効率なエンジンである。さらに、経済的に有利な粗悪油などが燃料として使用できることもその特徴の一つであり、使用される部品の長寿命化などと合わせて物流コストの削減に大きく貢献している。

近年、陸上での環境規制に追随して沿岸部での排出

規制が一段と厳しくなり、これに適合させるため、温室効果ガス（GHG）や硫黄酸化物（SO_x）の排出がより少なく、環境負荷の小さいLNG（液化天然ガス）を燃料として使えるエンジンが求められるようになった。シェールガスの開発などにより、LNG供給量が安定していることもこの動きを後押ししている。ただし、LNG燃料を供給できる港が今のところ限定的であること、双方の燃料価格が諸情勢により変動することなどにより、LNGと従来の液体燃料のどちらも利用できるデュアルフューエル（DF）方式とするのが一般的である。

お客さまのニーズ

船用エンジンメーカーとして DF エンジンを開発するに当たり、LNG をどのような方式で燃焼させるのかを決定する必要があった。方式の違いにより開発難易度と排気の特徴が大きく異なるためである。

従来のディーゼルエンジンは、ピストンで圧縮された高温高压の空气中に燃料を高压で噴射することで、火炎の中に空気を順次取り込みながら燃焼させる。燃焼は安定するものの、火炎表面の高温部からは窒素酸化物 (NO_x) が、火炎内部の燃料の濃い部分からはすすが発生する。このことは、燃料を液体燃料からガス燃料に変えても基本的に同じであり、燃焼室内圧力よりも高い 30 MPa 程度の圧力まで燃料ガスを昇圧し噴射させれば、従来技術の延長線上で液体燃料使用時と同様に燃焼が安定する。これが高压方式の拡散燃焼である。

しかし、燃焼室内よりも高い圧力まで燃料ガスを昇圧するためには大掛かりな昇圧装置と膨大な動力が必要である。また、火炎高温部での大量の NO_x 生成が避けられず、 NO_x 規制をクリアするには NO_x 低減用の排気後処理装置などが必要になる。さらには、気体燃料を 30 MPa という高压で扱うため、不測の燃料漏えいなどに対して高リスクとなることが懸念される。一方、低压方式では、ピストンの圧縮行程の初期に燃料ガスを噴射し、燃料ガスと空気を圧縮行程中に燃料ガス濃度が希薄になるように混合させ、少量のパイロット燃料を起点に着火する。この方法は希薄予混合燃焼と呼ばれ、火炎の高温部をなくして燃焼中の

NO_x 生成を大幅に低減できる。高压ガスが不要という点で本質的に安全であるだけでなく、大掛かりな昇圧装置も不要になり、船体側の設計も容易になる。また、燃焼室内では燃料の顕著な濃淡がないためすすの排出がほとんどゼロであるだけでなく、エンジンから排出される NO_x を常時大幅に抑えることができる。このため、航行する海域の規制状況によらず常にクリーンな排気が可能となり、物流における環境負荷を低減できる次世代にふさわしい方式と言える。

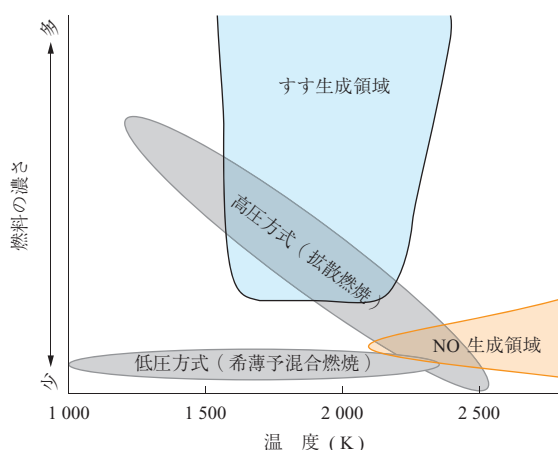
環境対策を謳う企業の多くは、物流サプライチェーンにおいても環境負荷をできるだけ小さくする努力を怠らない。たとえば、自動車メーカー、発電用燃料を運ぶ電力会社、木材を原料とする製紙会社などは使用する船舶の環境負荷に関して特に注意を払う。

このようなお客さまの次世代のニーズを見据えれば、環境負荷低減や本質安全の観点から理想的な低压方式を選択すべきと考えるのが当然であった。しかし、低压方式には高い技術的な壁があった。

低压方式への挑戦

高压方式では、燃焼室内に噴射されたガスが順次燃焼するためガスの燃焼状態は安定している。一方、低压方式による希薄予混合燃焼は、少量のパイロット燃料による火炎を起点に着火した後、燃料と空気が混ざった予混合気中を火炎伝ばするという形で燃焼が進行する。このため、燃焼が始まると制御することが困難であり、あらかじめ均質で精度が高い混合比の予混合気を毎サイクル作ることを肝要である。排気量が自動車用エンジンの数千倍にもなるため、限られた時間に均質な混合気を形成し、燃焼を制御するための技術的難易度が格段に高い。

こうした背景から、大型船舶用エンジンでの希薄予混合燃焼は世界でも前例がなく、技術的には一見無謀にさえ見える低压方式である。しかし、IHI グループはガスタービンや小・中型ガスエンジンの豊富な開発経験から、燃焼が安定する条件は極めて限定的ではあるものの、確かに存在し得ることをつかんでいた。このため、主要な開発課題を、さまざまなエンジン出力や実際の使用環境において、これを満たす燃焼条件、特に燃料ガスと空気の混合が実現可能かという点に絞ることができた。



(注) SAE880423 をもとに作成
高压/低压方式の燃焼形態の違い

2010年、机上検討やシミュレーションに着手し、安定的に燃焼可能な条件を掌握し、ライセンスである Winterthur Gas & Diesel (WinGD) に開発を提案・説得した。

船用エンジン業界のしきたりを越えて

最近の大型船舶用エンジンは、主に造船業の盛んな日本、韓国、中国の各地で製造されているが、エンジンの開発を行っているライセンスは、世界に三つしかない。全体の約70%のシェアを占める MAN ブランド (Man Energy Solutions) と、約30%を占める WinGD ブランド、約1%が日本の UE ブランド (株式会社ジャパンエンジンコーポレーション) である。IHI グループは、播磨造船所時代の1948年に、当時は WinGD の前々身だった Sulzer Brothers 社とライセンス契約を結び、以来71年間の長きにわたり、そのエンジン製造を続けており、現在は株式会社 IHI 原動機 (IPS) に引き継いでいる。

エンジンの開発は通常ライセンスが行い、ライセンスは開発されたエンジンを製造する立場である。1ライセンスにすぎない IPS (当時は株式会社ディーゼルユナイテッド (DU)) が次世代エンジンの開発を提案したことは型破りの行動であった。しかし、長年培ったライセンスとの良好な協力関係を背景に、IHI グループで積み重ねた技術データの説明を背景に粘り強く協議を繰り返した結果、共同開発を進める合意を得るに至った。

このころ、MAN 陣営は高圧方式を採用し、開発を進めていた。NO_x 規制に関しては、主に排気通路に排

気後処理装置として NO_x 還元触媒 (SCR) を設置することで対応していた。SCR には尿素水などの還元剤を別途用意する必要があるため、ランニングコストが掛かり、かつ触媒やタンクの設置場所、複雑なシステムの制御やメンテナンスを要するなどの課題もあった。

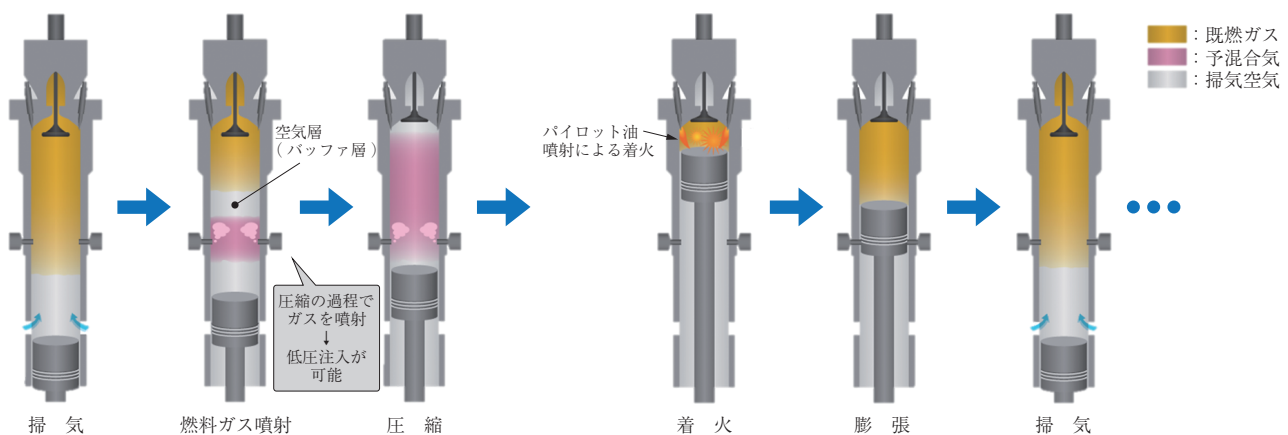
DF エンジン X-DF 誕生

IHI グループは蓄積された各種数値シミュレーションや要素試験などの結果を踏まえ、2011年にピストン直径 500 mm の RT-flex50 機関を用いた DF エンジン実機試験に臨んだ。

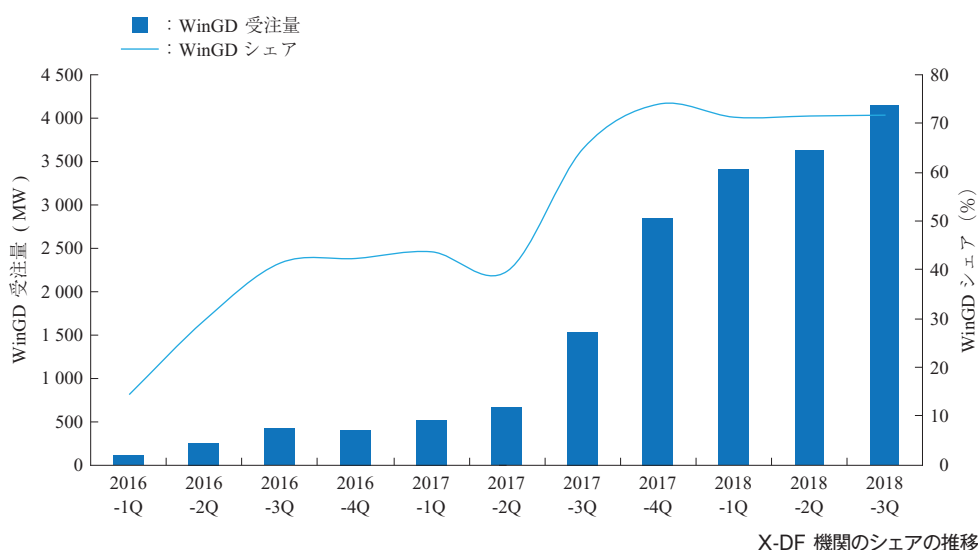
NO_x 排出量は想定どおり極めて低く、順調にみえた試験であったが、実際の使用環境を想定したさまざまな条件での試験・評価を行うにしたいが、燃焼安定性の確保に苦勞することになった。

こうした低圧方式の DF エンジン特有の課題を解決するに当たり大きな武器となったのが、電子制御であるコモンレール式燃料噴射、排気弁開閉時期制御など、WinGD が他社に先駆けて開発・採用していた高度なエンジン電子制御技術であった。この電子制御技術を駆使することで、低圧方式の DF エンジンの燃焼安定の鍵となる限定的な空気とガスの混合状態や燃焼状態を実現することができ、異常燃焼を抑制することに成功した。この結果、大型船舶用エンジンにおける希薄予混合燃焼技術開発にめどをつけることができた。

その後、ライセンスとの共同開発を加速し、2015年には DU の相生工場 (兵庫県) において、ピストン直径 720 mm の X72DF 試験機関の運転に成功した。



X-DF 機関の燃焼方式



X-DF 機関のシェアの推移

必要なのは環境性能

IHI グループがライセンサーに開発を提言してから実に 3 年を経た 2013 年、WinGD は低圧・予混合方式 DF エンジン X-DF を公式に発表した。

しかし、何よりも安全性と信頼性が重視される保守的な大型船舶用エンジン市場では、従来のディーゼルエンジン技術の延長線上で実現可能な高圧方式が優先して採用されていた。そのため、X-DF のリリース直後は X-DF の市場シェアは高くなかった。だが X-DF の初号機を搭載した船が 2016 年に就航し、その実績

が評価されるにしたがい、低圧方式の良さが徐々に浸透し認められ始めた。X-DF は年間発注シェアを急激に伸ばし、最近では、DF エンジン搭載の新造船の約 80% に迫るシェアを獲得する勢いである。環境性能を優先した選択に誤りはなかった。

IHI 原動機として始動

低圧方式の技術が評価され、「マリンエンジニアリング・オブ・ザ・イヤー（土光記念賞）2017」を受賞した。ディーゼルエンジンの開発は、排気弁制御や燃料噴射の自由度を大幅に向上させたコモンレール方式などの電子制御技術、燃料の選択肢を増やした低圧方式の DF エンジンと続いてきた。そして、エンジンの主要設計因子である圧縮比を自由に変えられる可変圧縮比機構の開発へと移り、現在に続いている。

2019 年 7 月、DU は新潟原動機株式会社、IHI の航空機転用型ガスタービンの事業部門と統合し、株式会社 IHI 原動機として生まれ変わった。これまで以上に総合力を遺憾なく発揮し、お客さまに喜ばれるしなやかなエンジンの開発を加速させていく。



国内最大級のテストエンジン 6X72DF

問い合わせ先

株式会社 IHI 原動機
 船用事業部 営業統括部
 大型原動機営業部
 電話 (03) 4366 - 1228
<https://www.ihi.co.jp/ips/>