

環境負荷を低減した先進的大型船用機関 最先端電子制御テクノロジーを融合した「Wärtsilä X シリーズ」

Advanced Marine Engine which Reduces Environmental Load “The Wärtsilä X-series” Featuring a Fusion of Advanced Electronic Control Technologies

橋本 秀之 株式会社ディーゼルユナイテッド 技術部

ディーゼル燃焼においては、一般的に窒素酸化物 (NO_x) の低減と燃料消費率の低減は相反する関係にあるが、コモンレール式を採用した電子制御機関（カムレス機関）では燃料噴射や排気弁の開閉タイミングが機関負荷に応じて可変であり、各種検討および実機試験の結果に基づき最適化された設定によって、低 NO_x ・高効率燃焼を実現し、環境負荷低減に大きく貢献している。

In diesel combustion, there is generally a trade-off between fuel consumption and NO_x emissions. With electronically controlled engines (cam-less engines) that employ a common rail fuel injection system, there is flexible control of fuel injection and exhaust valve timing in accordance with engine load. By optimizing the setting of parameters based on the result of various simulations and engine testing, low- NO_x , highly efficient combustion has been achieved, which makes a major contribution to reducing environmental load.

1. 緒 言

自動車用機関では、コンピュータを用いた電子制御や燃料噴射系のコモンレール式は一般的な技術として導入されている。コモンレール式とは燃料をポンプで昇圧し、共通高圧圧力管（コモンレール）にいったん蓄え、蓄えられた高圧の燃料を電子制御された電磁弁によって、所要のタイミングで各気筒内に噴射するディーゼルエンジンの燃料噴射システムである。大型 2 ストローク船用ディーゼル機関では、自動車用機関と比べると行程容積比で 4 000 倍と燃料噴射量が桁違いに多く、かつ燃料には高粘度で多量の不純物を含む残さ油（HFO：Heavy Fuel Oil）が用いられることなどから、コモンレール技術の適用には、技術的に解決すべき課題が多かった。

株式会社ディーゼルユナイテッド（DU）のライセンサであるバルチラスイス社（スイス）は、1981 年から燃料噴射システムの電子制御化に取り組み、数次にわたる技術的改良を重ねた結果、大型船用機関の燃料噴射系のコモンレール技術を確立した。また、排気弁、始動弁の制御も電子化し、コモンレールを有した大型船用機関として世界初の RT-flex 機関を 2001 年に市場に送り出した。現時点でも残さ油を許容するコモンレール技術を実現している大型低速船用機関は、RT-flex 機関とその後継機関である

Wärtsilä X シリーズ（W-X 機関）のみである。

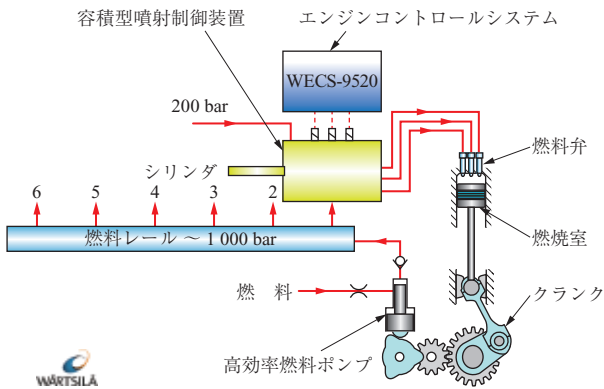
最近では、船用機関にも環境対応が求められており、国際条約に従い、段階的に窒素酸化物（ NO_x ）などの排出率を削減していく必要がある。2000 年から国際海事機関（以下、IMO） NO_x 1 次規制、2011 年から 2 次規制が適用されており、2016 年からは 3 次規制を満足することが求められている。また、 CO_2 削減とともに船舶の運航コストに多大な影響を与える燃料消費率の削減も求められている。

本稿では、大型船用機関のコモンレール式電子制御による環境負荷低減技術について述べる。

2. コモンレール式電子制御機関の特徴について

従来のカム駆動プランジャ方式の燃料ポンプは、燃料をカムの回転によりプランジャを上昇させて圧縮することによって昇圧しているため、噴射時期の制御や噴射圧力の自在な最適化には困難を伴っていた。

一方、コモンレール式電子制御機関では、燃料を噴射する都度、昇圧するのではなく、コモンレール内の圧力を常時高圧に保持しておき、自動制御化された所望の期間に燃料弁を開閉することによって燃料を噴射する仕組みで、コモンレール内に充填、保持された燃料圧力の設定も任意にできる。第 1 図にコモンレール式燃料噴射システムを



第 1 図 コモンレール式燃料噴射システム
Fig. 1 Common-rail type fuel injection system

示す。

2.1 燃料噴射圧力について

カム式機関の場合、噴射圧力は、概略、プランジャ上昇速度の 2 乗に比例し、プランジャの上昇速度はカム回転速度に、カム回転速度は機関回転速度によって決まるため、機関の低回転域では噴射圧力が低く、高回転域では噴射圧力が高くなる特性がある。つまり、燃料噴射圧力を機関回転速度と無関係に制御することが困難で、最適チューニングを目指すうえでの制約となっていた。

コモンレール式電子制御機関では、燃料噴射圧力が機関負荷ごとに最適な圧力となるように機関回転数・負荷に依存せず制御されている。コモンレールに燃料を供給する燃料供給ポンプの吐出量は、レールの圧力に基づいて制御されているが、このとき燃料ポンプの吐出タイミングは機関回転数とは無関係であり、RT-flex 機関では、機関回転数の 7~8 倍程度の回数で燃料ポンプが駆動されている。従来のカム式機関では各シリンダに必要であった燃料ポンプの装備台数は、RT-flex 機関のもっとも少ない機種では 2 台のみである。

また、カム式機関の燃料ポンプの場合、噴射終了時にプランジャ内の圧力を逃がすことによって切れの良い噴射終了を実現していた。しかし、昇圧した圧力を逃がすことはエネルギーを捨てることであり、ポンプ効率は良くなかった。また、このエネルギーが燃料戻り油路に脈動やキャビテーションエロージョンを発生させるため、これらの対策が必要であった。しかし、コモンレール用の燃料ポンプでは、電子制御によって必要量だけ吐出するため、効率が良く、燃料戻り油路にキャビテーション対策や脈動対策は不要である。

2.2 燃料噴射制御について

RT-flex 機関では機関回転数・負荷に応じて、① 噴射タ

イミング② 1 行程中の全噴射量③ 噴射圧力に依存する単位時間当たりの燃料噴射量（以下、噴射率）、を最適に制御している。上記のうち、③の噴射圧力を除く燃料噴射制御は WECS (Wärtsilä Engine Control System) からの指令に基づき、レールバルブ（高速電磁弁）で作動油通路を切り替え ICU (Injection Control Unit) 内の制御弁を駆動することで実現している。③の燃料噴射圧力は、機関回転数・負荷に依存せず制御可能であり、高い制御自由度を確保している。

先にコモンレール式を大型船用機関に適用することが困難であった一つの理由が燃料であることを述べた。これは、大型船用機関の燃料は残さ油であるため、粘度、発熱量、不純物などの性状が燃料補油ごとに異なることに起因し、燃料を作動油として直接使用することが困難なためである。ICU は昇圧された性状が安定している潤滑油を作動油とし、この作動油路をレールバルブで切り替えることで、燃料噴射を的確に制御できる機能を確立し、同時に、高圧配管や燃料弁不良が生じた場合のフェールセーフ機能を有している。この機構が、コモンレール式燃料噴射系を高い信頼性が求められる大型船用機関に適用できる突破口となった。

また、RT-flex 機関の後継機関である W-X 機関では、ICU の機能の一部を燃料弁へ移すことにより、燃料噴射における噴射遅れの改善がなされている。これについては、後述する。

2.3 コモンレール式による高度な燃料噴射制御

RT-flex 機関、W-X 機関では、さまざまな燃料噴射パターン、パラメータを設定することが可能である。代表的な二つの燃料噴射制御パターンについて述べる。下記のいずれも、シリンダに装備されている複数の燃料弁を個別に制御可能なコモンレール式機関のみがもつ機能である。

2.3.1 燃料噴射ノズル本数制限

低出力運転では燃料噴射量が減少するため、燃料弁が開いている時間が非常に短くなる。従来方式では各シリンダに設置された燃料ポンプで複数の燃料弁を動作させていたため燃料弁個別の制御ができず、噴射燃料油の良好な霧化が得られにくかった。しかし、電子制御機関では複数装備されている燃料弁のうち、作動する燃料弁の本数を制限することができ、燃料弁当たりの燃料噴射量を増加させ、極低出力でも良好な霧化を実現し、その結果として安定した燃焼を達成している。なお、噴射する燃料弁を一定時間ごとに切り替えることで、燃焼室内の熱負荷の均一性を確

保する機能ももつ。第2図に、低負荷時の燃料噴射ノズル本数制限を示す。

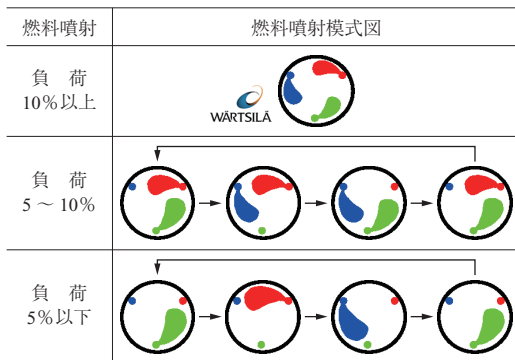
2.3.2 シーケンシャル噴射

第3図にシーケンシャル噴射を示す。一つのシリンダに複数装備されている燃料弁を時間差で噴射させる制御方式である。これは、熱発生率の制御を目的としており、先に述べた燃料噴射圧力制御と組み合わせることで、より精緻な熱発生率制御を実現している。

熱発生率を制御する重要性は、3章で述べる。

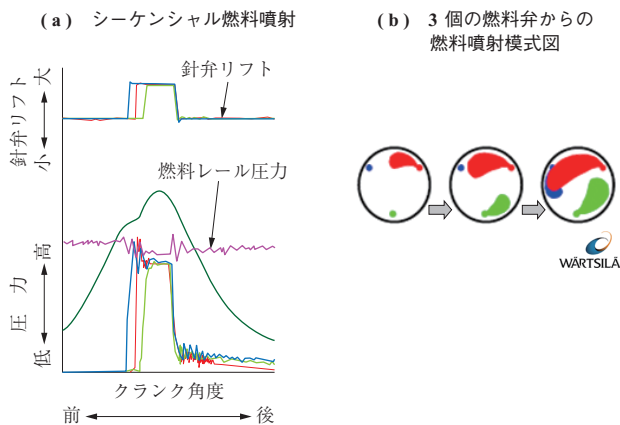
2.4 排気弁開閉制御について

第4図に排気弁開閉制御を示す。RT-flex 機関およびW-X 機関では、排気弁開閉制御にもコモンレール技術が適用されている。機関の潤滑油を作動油とし、クランク軸からサーボポンプを駆動し昇圧した油をサーボオイルレールに蓄圧する。その後、燃料噴射制御と同様に WECS からの指令によって、EVCU (Exhaust Valve Control Unit) に装備されているレールバルブを切り替えることで、油圧によって排気弁を開く。排気弁には空気ばねが組み込まれており、レールバルブを切り替えることで、排気弁駆動ユニット内の油が押し戻されて排気弁が閉じる。

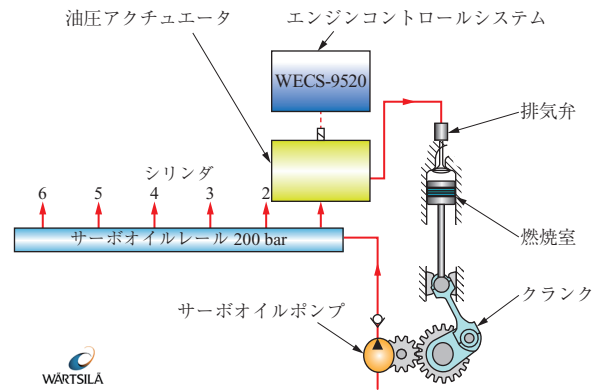


第2図 低負荷時の燃料噴射ノズル本数制限

Fig. 2 Control of number of fuel injection nozzle used at low load



第3図 シーケンシャル噴射
Fig. 3 Sequential injection



第4図 排気弁開閉制御機構
Fig. 4 Exhaust valve control system

従来のカムによる排気弁駆動では、カムプロファイルに基づいた排気弁開閉動作となるため、出力や機関チューニング方法に応じたフレキシブルな排気弁開閉制御を行うことができなかった。また、機械系駆動機構上の制約から、カムプロファイルは、なだらかな形状にする必要があり、その結果、排気弁の開閉もなだらかなカーブとなり排気最適制御の自由度が制限されていた。

3. フレキシブルな制御による環境負荷低減

3.1 燃料消費率と NO_x 排出率の同時低減

一般的にディーゼル機関において、燃料消費率と NO_x は相反する関係にあり同時低減は難しい。ピストンが上死点 (TDC) 付近にあり、燃焼室容積が小さい期間に燃焼を完了させるチューニングを行うことで熱効率が上がり、燃料消費量を低減できるが、燃焼室内の作動ガス温度は高くなるため NO_x は増加する。これは NO_x の大部分は、空気中の N₂ と O₂ の熱反応によって生成したものであり、この生成速度は、温度依存性が非常に大きいためである。たとえば、燃焼期間が 10 ms 程度の場合、火炎温度が 2 200 K の場合に比べ 2 400 K では、NO_x 生成量が 10 倍程度になる。

このため、NO_x 排出率を削減しつつ、燃料消費率を低減するには、きめ細かい制御によって燃焼温度上昇を抑制しながら良好な燃焼を実現する必要がある。この燃焼を実現するために、RT-flex 機関ではコモンレール式電子制御機関の優れた機能を活用しており、以下にそれらの効果について述べる。

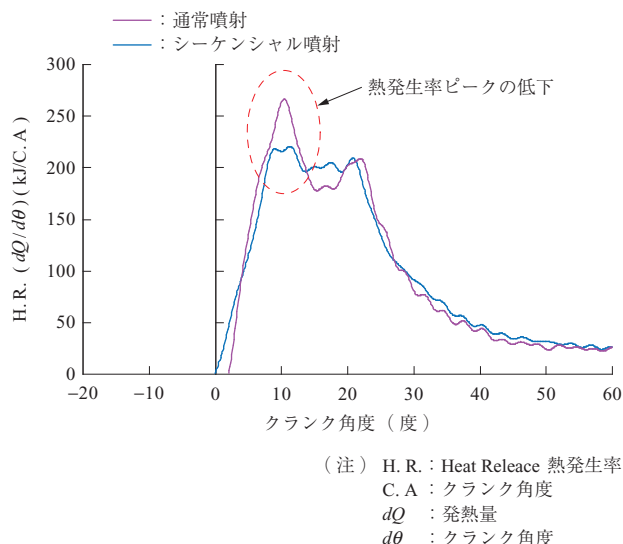
3.2 シーケンシャル噴射の効果について

燃料のシーケンシャル噴射は、燃料噴射率を制御することで単位時間当たりの発熱量 (以降、熱発生率) を制御している。ディーゼル機関は、シリンダ内に充填された空

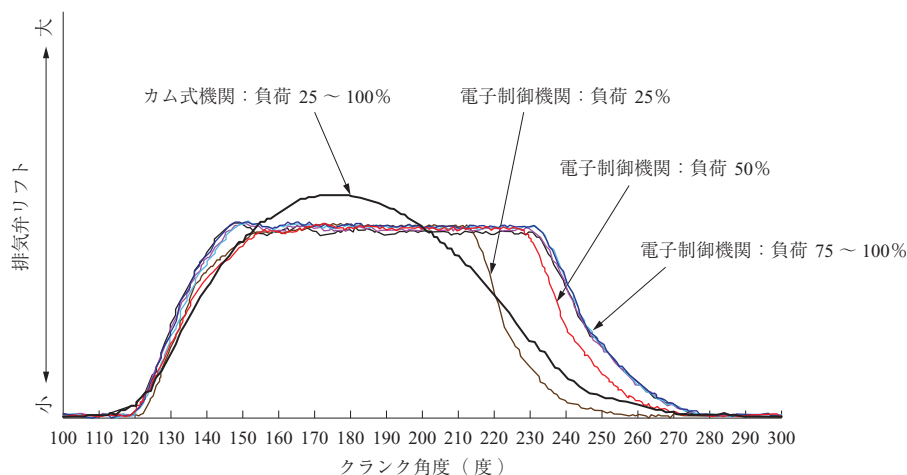
気をピストンで圧縮し、高温になった圧縮空気内に燃料を噴射することで燃料を自着火させる燃焼形態である。高い熱発生率は火炎温度の上昇を助長し、前述のように NO_x 生成量が増加する。燃焼初期において熱発生率が高くなるのは着火遅れによる予混合燃焼によるもので、燃料噴射初期の噴射量抑制が効果的である。

シーケンシャル噴射では、総燃料噴射量を変えずに複数の燃料弁を時間差で噴射させることによって、噴射率を燃焼前半で低く抑えることが可能になり、初期の熱発生率を抑制することができる。第5図に、通常噴射とシーケンシャル噴射での熱発生率の比較を示す。シーケンシャル噴射を適用することで、燃焼前半の熱発生率のピークが低下していることが分かる。

油圧カム方式などのほかの電子制御機関では、シリンダ



第5図 熱発生率の比較
Fig. 5 Comparison of heat released



第6図 排気弁開閉制御の比較
Fig. 6 Comparison of exhaust valve control

ごとに装備された燃料ポンプが複数の燃料弁を同時に作動させるため、燃料弁ごとの制御ができない。このため、燃料噴射前半の噴射圧力を下げることで燃料噴射率を低減させ、燃焼前半の熱発生率の低下を図っている。しかし、この方法では、残さ油を燃料とする大型船用機関においては、難燃性燃料が補油された場合などに、燃料の霧化不足による燃焼不良や後燃えなどによって、燃焼室部品への悪影響を与えることが懸念される。

3.3 排気弁開閉制御の効果について

排気弁の開閉時期の制御は、燃焼温度の低下とサイクル効率の向上の両方に有効である。高温ガスによる自着火で燃焼が開始するディーゼル機関では、燃焼に必要な空気量を確保したうえで、自着火に必要な圧縮温度の下限を目指すことも燃焼温度を下げる方策の一つとなる。具体的には、圧縮前温度と圧縮比に依存する圧縮空気温度を下げるために、圧縮比を低下させるが、この際、排気弁の開閉タイミングを可能な限り遅らせる設定が有効となる。また、排気弁の開閉タイミングを遅らせることは、ピストンによる圧縮仕事の低減になる。さらに、排気弁開閉タイミングを可能な限り遅らし、膨張行程を長くすることで、サイクル効率の向上につながる。

このような圧縮行程より膨張行程の有効長を大きくする低圧縮比・高膨張比のサイクルはミラーサイクルと呼ばれ、サイクル効率向上に有効な手段であることが知られている。第6図に、カム式機関と電子制御機関の排気弁開閉制御の比較を示す。電子制御機関は負荷に応じて、排気弁開閉時期を柔軟に変化させており、機関負荷によって異なる最適な排気弁開閉タイミングに制御していることが分かる。また、排気弁の開閉が従来のカム式機関よりも矩形的

になり、排気弁開閉応答性を改善し、弁流路の流量係数が向上されていることが分かる。

さらに、過給機系の排気ウエストゲートの有無など、機関仕様によっても最適な排気弁閉タイミングは異なるため、機関のもつポテンシャルを最大限に引き出すためにも排気弁の開閉タイミングのフレキシブルな制御性が得られたことは、最適チューニングを目指すうえで重要である。

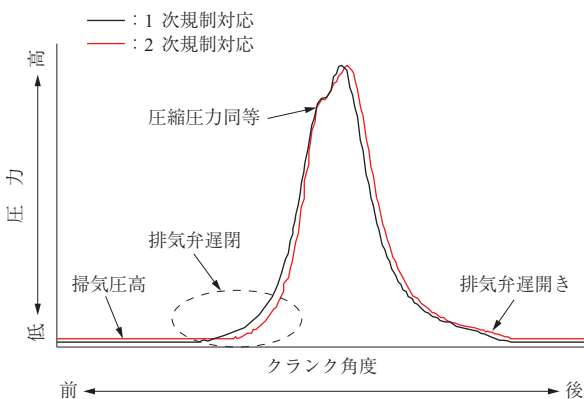
上記において、燃焼に必要な空気量を確保しつつ、圧縮比をできる限り低減するには、掃気圧力（過給圧力）を高め、空気密度を高めておけばよい。この掃気圧力は過給機性能に依存する部分が大きく、大型船用機関の環境負荷低減において、高圧力比かつ高効率な過給機が非常に重要な役割を果たしている。

上記に述べたチューニング方法の違いについて、第7図にシリンダ内圧力の計測結果比較を示す。このような燃焼によって低NO_x・高効率燃焼を実現している。

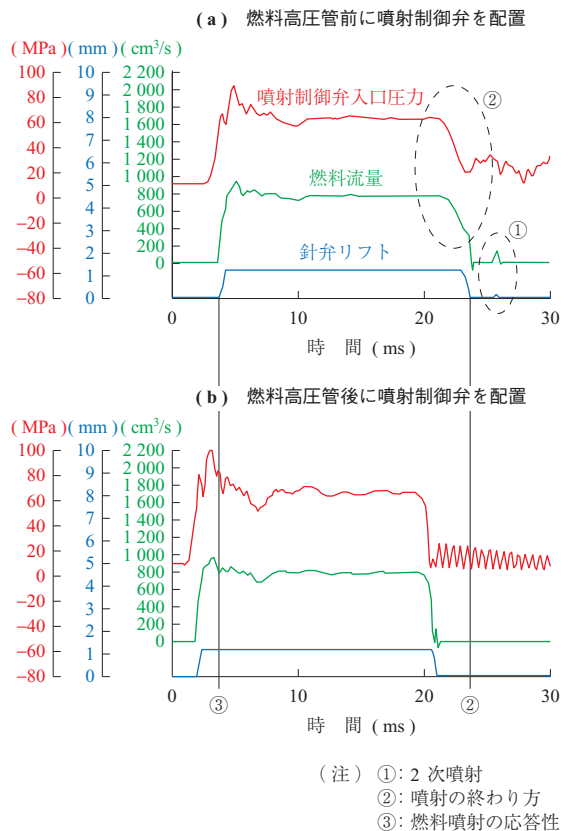
4. コモンレール機関の進化

RT-flex 機関の後継機関として、さらなる船体との適合性や熱効率の向上を目指した W-X シリーズ機関がリリースされている。これらは、RT-flex 機関（コモンレール式電子制御機関）のさらなるロングストローク化による機関回転数低下、最新の燃料噴射機構、制御システムなどが盛り込まれている。コモンレール式電子制御機関の進化と優位性を示す例として、第8図に熱効率向上に効果のある燃料噴射機構の改善の一環として、噴射制御弁を燃料高压管の前に配置した場合（RT-flex 機関）と、高压管の後に配置した場合（W-X 機関）の燃料噴射挙動の数値シミュレーション結果比較を示す。

噴射制御弁を燃料高压管の前に配置した場合は、主噴射終了後に2次噴射をしている（第8図：①参照）。実際



第7図 シリンダ内圧力の計測結果比較
Fig. 7 Comparison of internal cylinder pressure



第8図 燃料噴射挙動のシミュレーション結果比較
Fig. 8 Simulation comparing F.O. Injection

の機関でも、条件によっては、2次噴射が発生していることが確認されており、2次噴射によってシリンダに投入される燃焼に寄与しない燃料の削減は燃料消費量削減につながる。

また、従来方式では、噴射の終わりが緩やかであるのに対し、噴射制御弁を燃料高压管の後に配置した場合は、シャープに噴射圧力が下がっており、かつ噴射終わりも早い（第8図：②参照）。噴射圧力の緩やかな低下は、低圧力での燃料噴射による燃焼の悪化を誘起することから、噴射制御弁を燃料高压管の後に配置することによって燃焼改善が期待される。

さらに、高压管後に噴射制御弁を配置することで、指令から実際に燃料が噴射されるまでの応答遅れが短縮されていることも、機関制御性の改善に大きく貢献する要素となる（第8図：③参照）。なお、実際の機関ではこの応答遅れを加味した制御を行っている。

5. 結 言

DU-バルチラ大型船用ディーゼル機関は、クランク軸に同期するカム軸回転を基準に制御されていた従来の常識を一新し、カムレス機関として排気規制への適合や運用出

力域全般にわたる高効率化などの強みを大いに発揮し、環境に優しい省エネ船用機関として市場投入された。近年、大型船用機関の市場では、環境負荷低減のために受注機関のほぼ全数が電子制御機関となりつつあるが、DU では、すでに 2008 年から、生産機関のほぼ 100%が電子制御機関となっている。これはシンプルかつ柔軟で多機能な特徴をもつ RT-flex 機関のコモンレール式電子制御技術が市場に高く評価されている結果と考えている。

電子制御化によって、各種制御自由度を獲得し、環境負荷低減対策だけではなく、経済性追求のための連続減速運転への対応をも容易としている。また、電子制御部品からの各種フィードバック情報に基づいた自動トラブルシューティング支援機能の充実などにも大きく貢献しており、これまでに述べた機関性能以外に関するメリットも大きい。

現在、重油を燃料としたディーゼル燃焼に加えて、天然ガスを燃料とした予混合燃焼も可能な、Dual Fuel 機関も W-X 機関シリーズとしてラインナップされつつある。この Dual Fuel 機関実現には、これら電子制御技術が不可欠である。

このように、コモンレール式電子制御は、今後の大型船用機関発展のベースとなる技術であり、また、コンセプトのシンプルさ、制御自由度の高さは、さらなる進化が十分に可能であることを示している。

今回報告した大型船用機関と電子制御技術の融合をベースに、今後も、燃料消費率の低減と NO_x 排出量低減の両立、運用出力全域での柔軟な使い勝手に配慮した環境負荷低減技術のさらなる進化を目指して尽力していく。