

世界最大級船用低速ディーゼル試験機関 4UE-X3 — 一次期環境規制対応技術とガスエンジン技術の開発 —

World Largest Test Engine of Marine 2-Stroke Diesel
- Development of Exhaust Emission Control and Gas-engine Technology -



岡部 雅彦*1
Masahiko Okabe

阪口 勝彦*2
Katsuhiko Sakaguchi

杉原 正英*3
Masahide Sugihara

三柳 晃洋*4
Akihiro Miyanagi

平岡 直大*5
Naohiro Hiraoka

村田 聡*6
Satoru Murata

最新型 UE ディーゼル機関をベースにした世界最大クラスとなる4シリンダー、60cm ボアサイズの試験機関 4UE-X3 が完成した。本試験機を用いて、最新技術の性能及び信頼性検証を確実に実施し、今後更に厳しくなる環境規制や燃料多様化に向かう市場動向（特にガス燃料）に対応した技術開発を実施することにより、お客様のニーズに即した製品群をスピーディにご提供することが可能となる。この程、環境規制対応技術である EGR（排ガス再循環）の試験を実施し良好なデータが得られたため、試験機の概要と併せてこれら技術開発の動向について紹介する。

1. はじめに

全世界の船舶、特に商船等の大型船に搭載される主機（船舶を航行させるのに必要な動力を生み出す機関）は、その大部分が2ストロークディーゼルエンジンである。大型の2ストロークディーゼルエンジンは製油工程の残渣であるC重油が使用できる上に主機単体熱効率が約 50%と高く、また回転数を 100min^{-1} レベル以下にまで低くできることからプロペラを直に接続して使用でき、全体としてプラント効率を最も高くできるために経済的な機関として採用されているのがその理由である。当社はこの船用大型2ストロークエンジンの世界3大ライセンスの1つであり、開発・設計・製造までを全て行っている唯一のライセンスである。

近年、IMO（国際海事機関）による排ガス規制強化や LNG を燃料にした機関を志向する市場ニーズの高まり等、ライセンスとして新技術の開発がこれまで以上に重要になっている。競合ライセンス・ライセンシ各社においては開発のスピードと信頼性を同時に確保するために、汎用的な実機サイズの試験機関を新規導入する動きが相次いでいる。当社における船用2ストロークディーゼル試験機関としては長崎研究所に設置の NC33 試験機（1シリンダー、33cm ボアサイズ）があるが、中大型機関への設計展開をスピーディに行うために、実機サイズの多シリンダー試験機関の導入が望まれていた。従来の NC33 試験機は、これまで実エンジン設計に必要なエンジン内の現象を基礎的に把握することを主目的に用いてきたが、その知見とこの度完成した中型の 4UE-X3 試験機で得られる結果を併せて詳細に解析することにより、スピーディかつ信頼性の高い設計展開が可能になる。

*1 原動機事業本部船用機械・エンジン事業部 技監・主幹技師

*2 原動機事業本部船用機械・エンジン事業部船用ディーゼル部 次長

*3 原動機事業本部船用機械・エンジン事業部船用ディーゼル部 課長

*4 原動機事業本部船用機械・エンジン事業部船用ディーゼル部 主席技師

*5 原動機事業本部船用機械・エンジン事業部船用ディーゼル部

*6 技術統括本部長崎研究所

2. 試験機関 4UE-X3 の完成

2010 年より試験機関建設の計画を開始した。表1に主要諸元を示すが、これは最新の商用機をベースに今回完成した初期仕様であり、将来の高 Pme 化を見据えた機関仕様としている。本試験機関の主目的の一つが環境対応技術の開発であることから、試験において種々パラメータ調整することも考慮し、フル電子制御機関(Eco 機関)を採用した。

図1に試験機全景を、図2に試験機の概要を示す。



図1 4UE-X3 試験機全景

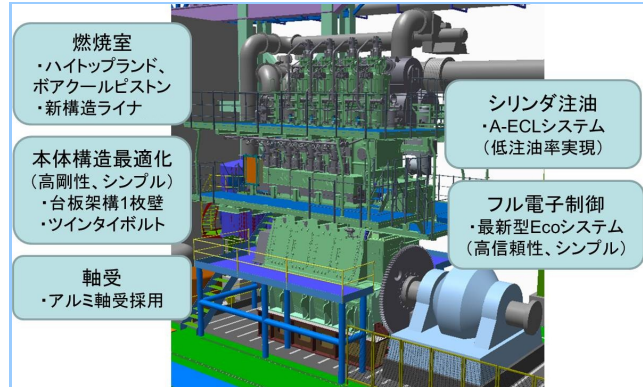


図2 4UE-X3 試験機概要

表1 4UE-X3 試験機 主要諸元

項目		内容
基本仕様	ベース機関	UEC60LSE-Eco
	ボア×ストローク	600mm×2400mm
	出力×回転数	9970kW×105min ⁻¹
	平均有効圧(Pme)	21bar(初期完成時) →将来的に高 Pme 化可能
構造・システム	本体構造	・将来の高出力化を見据えた新構造の適用 ツインタイボルト, 台板架構1枚壁 等
	燃焼室関連	・将来の高出力化を見据えた新構造の適用 ハイトップランド型ピストン, ボアクール冷却構造, 新構造シリンダライナ 等
	軸受関連	・アルミ軸受の採用
	制御システム	・新 Eco システムを適用(フル電子制御)
	シリンダ注油システム	・A-ECL システム搭載

以下に主な仕様につき説明する。

(1) 本体構造

機関本体(台板・架構)の隔壁は高剛性・軽量・シンプルかつ製作性を考慮した1枚壁構造とし、3D モデルを用いた FEM 解析等により構造・板厚の最適化を図っている。

(2) 燃焼室

高熱負荷に対応するため、ハイトップランド型ボアクールピストンを採用し、またシリンダライナは新構造となる強化リング型を導入した。

(3) 軸受

主軸受、クランクピン軸受には従来のホワイトメタルに代わりアルミ軸受を採用した。

(4) 電子制御

既述の通り、フル電子制御である。コンパクト・高信頼性の最新型商用機の Eco システムを踏襲しており、シリンダ注油システムも注油率の低減が図れる最新の A-ECL システムを採用した。

(5) 試験プラント制御

船舶での実運転を模擬できるよう、リモコン・アラームシステム等の設備も導入した。また補機類、その他付帯機器を統括制御するために、当社製制御システムである DIASYS Netmation® を使用している。(図3)



図3 制御・計測システム

2012年5月に完成し、6月の試験・検証運転を経て、7月には関係者を招待して披露式典を開催した。⁽¹⁾ また本設備は目的の一つにお客様・ARA(認定補修業者)等へのトレーニングがあり、既に数回のトレーニングに使用されている。

以降は本試験機を設置した主目的である技術開発につき規制の背景から述べることとする。

3. IMO における船舶の排ガス規制の動向

1988年にIMOの第26回海洋環境保護委員会(MEPC26)においてノルウェーが船舶から排出される大気汚染物質に関する検討の提案を行ってから、IMOを舞台として国際間での船舶の排出する大気汚染物質削減問題の議論が活発に始まった。長期にわたる議論の末、1997年のMARPOL73/78条約締約国会議において新議定書が採択され、2005年5月から同条約の附属書VIが発効し、現在に至っている。図4に示すように2008年のMEPC57では更に踏み込んだ厳しい規制を求める同条約の附属書VI改正案が承認され、2010年7月に発効となっている。排出規制には、ディーゼル主機関が排出するNO_x、SO_x及びPM(粒子状物質)等が含まれており、SO_xとPMに対しては使用する燃料油中の硫黄分の規制を行うこととなっている。

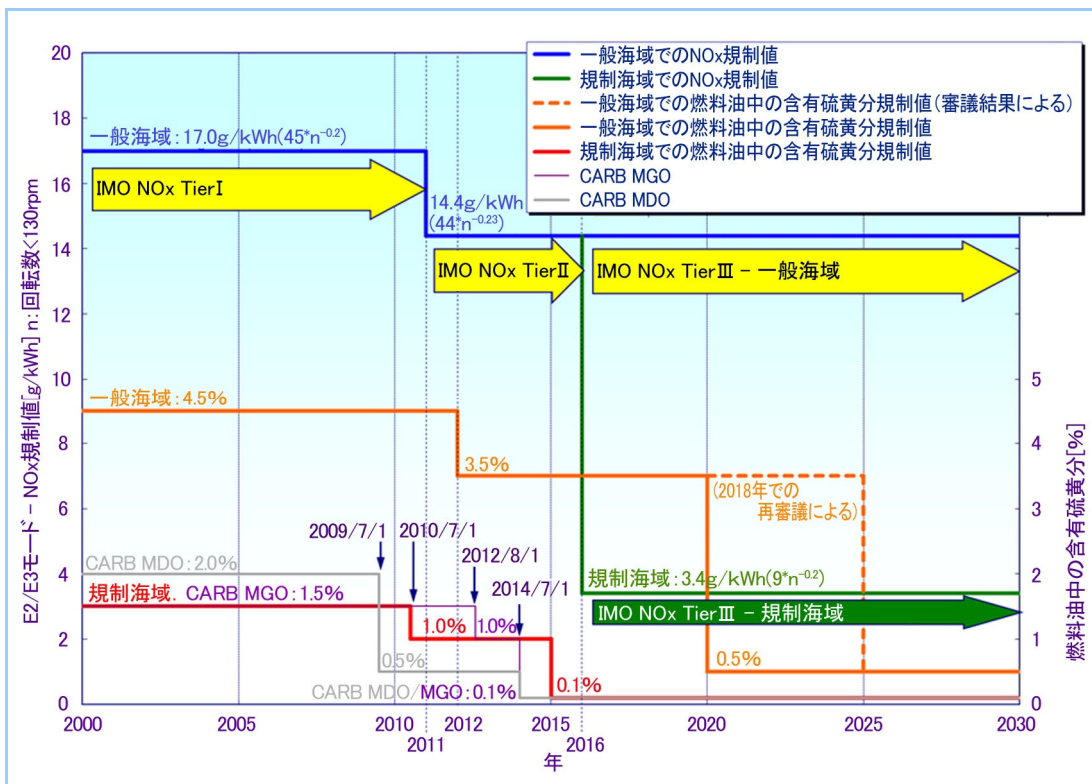


図4 IMO 及び CARB (California Air Resources Board) による規制動向

一方、NOx は機関の燃焼により発生するものが主であり、燃焼自体を改善することで現状でもある程度の NOx 低減効果が得られている。しかし、IMO の議論の中では、NOx 削減技術の開発を段階的に繰り返すのではなく、既に陸上設備で豊富な実績のある SCR (選択還元脱硝; Selective Catalytic Reduction) 装置等の導入を念頭に、2016 年開始予定の排出規制海域 (ECA; Emission Control Area) における Tier III 規制値を Tier I 規制値の 80% 低減とすることで合意されている。

4. 環境規制対応技術

NOx を低減する技術としては表2に示すように多々あり、現時点での規制である Tier II 規制までは燃料噴射タイミングリタード、燃料弁噴孔アレンジや掃排気系の最適化等の所謂エンジン内部のチューニングで対応している。しかしながら、大幅な NOx 削減が必要となる Tier III 規制ではエンジン内部のチューニングレベルでは適合できないため、大きく分けて2つの方式で対応することとなる。

表2 NOx 低減技術

項目	NOx 低減効果 (Tier I 比)	燃費悪化	技術レベル	初期投資	ランニングコスト
機関仕様最適化 (機械式機関)	Δ 20%	+2~+3%	現存技術にて対応可能	小	小
電子制御機関	Δ 20%	0~+1%	開発済	中	小
水噴射装置	水エマルジョン燃料: Δ 50%	+2~+3%	開発済	中	中
	独立水噴射: Δ 80%	+7~+10%	開発済	中	中
	層状水噴射: Δ 80% (燃料ポンプ容量他の制限により実質は Δ 40% 程度まで)	約+10%	開発済	中	中
スクラバー付 EGR 装置	Δ 80%	+1~3%	開発中 (基礎試験実施済)	大	中
SCR	Δ 80~90%	0~+1%	開発中 (実船搭載試験済)	大	大

1つは排ガス後処理技術である SCR、もう1つはエンジン内の燃焼状態を変化させて NOx を低減する EGR (排ガス再循環; Exhaust Gas Recirculation) である。

SCR は排ガス中にアンモニア等の還元剤を投入し、排ガスと均一に混合された状態でバナジウム-チタニア系触媒により NOx が無害な窒素と水に分解される技術で、当社は 2007 年から国土交通省主導による日本船用工業会の「スーパークリーンマリンディーゼルの研究開発」に参画し、船用大型2ストロークディーゼルエンジン用の過給機後流 SCR システムを開発し、実船試験による検証まで終了している。⁽²⁾ 過給機後流 SCR システムはエンジン本体の信頼性を損なわず、制御がエンジンと切り離して独立に行えることから制御性も良く、ECA 内/外での動作の ON/OFF が容易にできる特徴を持っている。

EGR については主に社内研究により開発を進めてきているが、こちらはエンジンから出る排ガスの一部を吸気に戻すことで燃焼室内の酸素濃度を下げ、かつ排ガスに含まれる H₂O、CO₂ 等の不活性ガスの割合を増し熱容量を大きくすることで、燃焼ガス温度の上昇を抑え NOx 生成反応を抑制する技術である。当社の EGR システムは過給機から出る低圧の排ガスを過給機の吸い込み側に戻す「低圧システム」を採用しており、昨年までに長崎研究所内の1シリンダー試験機 NC33 にて性能試験を実施している。

SOx に対しては規制の思想は既述のように燃料油中の硫黄分を制限するところにあるが、燃料油はこれまで同様の C 重油を使用して船舶からの SOx 排出量を低減する手段として EGCS (Exhaust Gas Cleaning System) があり、排ガスを洗浄するのに水を使用する湿式スクラバーと水を使用しない乾式スクラバーの2種類がある。また、燃料油を使用せずに LNG 等の硫黄分を含まない代替燃料を使用する手段もあり、これについても後述するとおり当社で開発に取り組んでい

るが、インフラ整備やコスト等不明確な面もあり、一足飛びに代替燃料に切り替わるという可能性は低いと考えられる。

以上に述べた技術のうち、4UE-X3 試験機を用いて EGR と湿式スクラバーの実証試験を行っており、次項にその概要を説明する。

5. EGR 検証試験結果

4UE-X3 試験機の EGR システムにつき、**図5**に示す。既述のとおり低圧 EGR システムであり、過給機タービン出口から出た排ガスの一部はスクラバーを通して PM と SO_x が洗い落とされた状態で過給機コンプレッサ入口に戻るラインとなっている。EGR システムにおいて必須のこのスクラバーに関して、当社は三菱化工機(株)と共同開発を行っている。IGS(Inert Gas System)でよく知られているベンチュリ式と充填塔式のスクラバーを組み合わせた構成で、ベンチュリ部で PM を洗い落とし、充填塔部で SO_x を除去するのが一般的である。スクラバー水は清水循環方式とし、排ガス洗浄後は SO_x 等を吸収して pH 値が変化するため、中和剤として苛性ソーダ(NaOH)水溶液にて pH をコントロールする。実用化の際にはこれに加えて船外への排水のためにこの循環水を廃水処理する装置が必要となる。また 4UE-X3 試験機の EGR システム統括制御には前述の DIASYS Netmation[®] を使用し、試験条件毎の各パラメータ設定が容易な試験システムを構築している。

試験結果を**図6**に示す。図6は代表例としてエンジン負荷 75%での結果を示すが、エンジンの各負荷に対して EGR 率と NO_x 低減効果の関係をデータとして取得している。また図中の「EGR 率」は EGR をしない条件(通常運転)での排ガス流量に対する EGR ガス(再循環ガス)の割合を示し、昨年度までの試験結果と同様に EGR 率を上げていくと NO_x 排出量が徐々に減少し、従来は達成困難と言われていた 80% 程度の NO_x 低減が可能であることを実証した。今後、NO_x 低減量を確保しつつ燃費悪化の最も少ない条件を確立していく予定である。

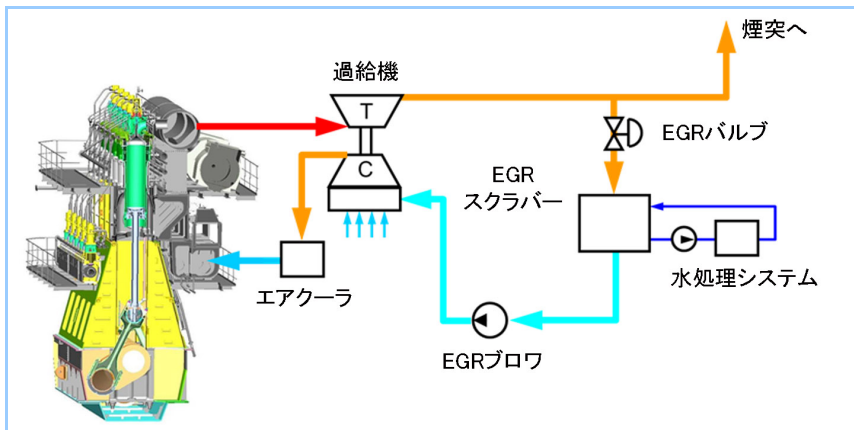


図5 EGR システム図

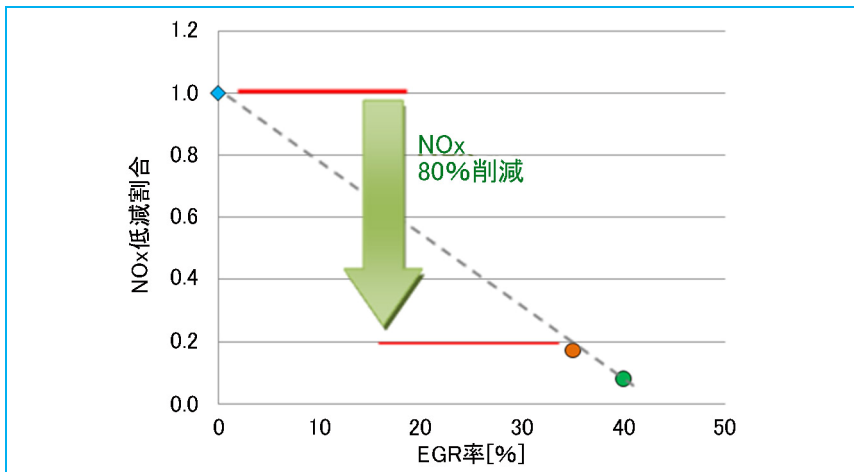


図6 EGR 試験結果例

スクラバーに対する性能評価として、SO_x の計測結果を図7に示す。スクラバー前後で SO_x は 98%以上除去できており、十分な性能を有していることが分かる。このスクラバーを排ガス全量に適用することで、前項に述べた SO_x 規制(燃料中の硫黄分規制)に対応することも可能であり、当社の採用している低圧 EGR システムは過給機出口後の排ガスを分岐/洗浄するため、本質的にこれに組み合わせることが容易である。重油価格や船主・オペレータの意向にもよるが、最適な船舶全体のシステムを提案できるようこの方面でも検討を進めていく。また、図8に示すように EGR システムとしてエンジンに必要な装置性能を見極めて小型化を進めることで、エンジン搭載型 EGR システムとして市場投入できるように開発を進める所存である。

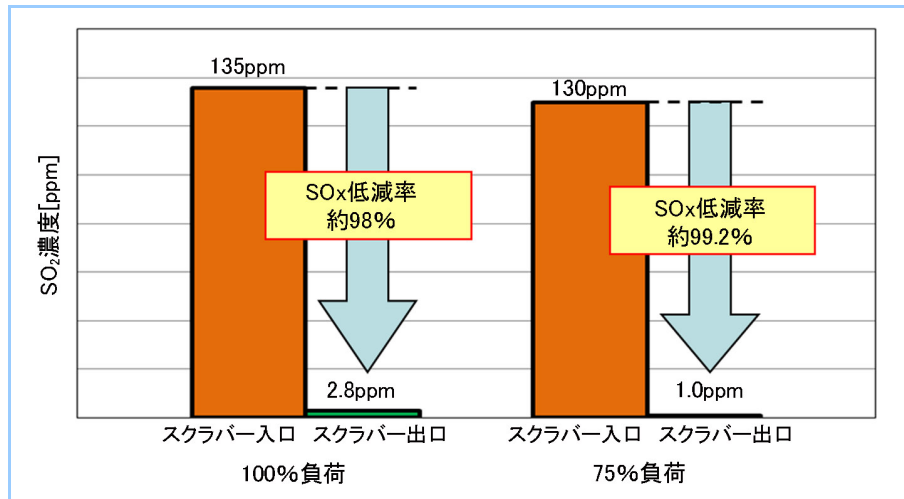


図7 試験結果(スクラバー性能)

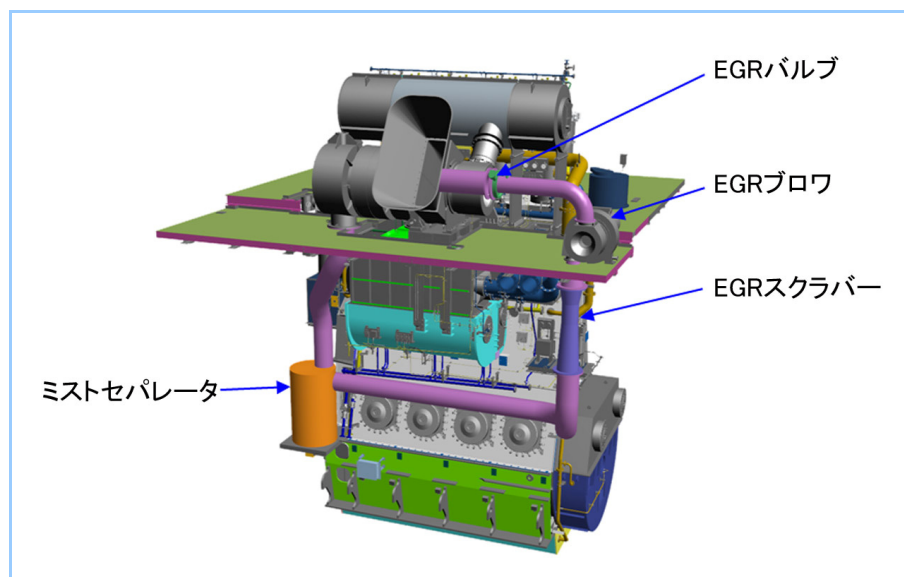


図8 エンジン搭載型 EGR システム計画図

6. UEC-LSGi (Dual Fuel エンジン) の開発

環境規制対応技術で述べた通り、SO_x 規制の対策として燃料油を LNG 等の代替燃料に切り替えることも1つの手段であり、また LNG は燃焼後の CO₂ 排出量が重油に比べて少ないため、環境負荷を低減する1つの策として、代替燃料の利用が近年急速に有望視されている。米国での所謂シェールガス革命等により LNG の価格メリットがクローズアップされている情勢もあり、環境負荷のみならず経済的理由からも代替燃料対応技術の開発が求められている。

LNGをディーゼルエンジンの燃料として使用するには表3に示すように大別して2通りの方式があり、4ストロークの中速エンジンで一般的な予混合燃焼方式と、大型の2ストロークエンジンで開発の進められている拡散燃焼方式がある。ディーゼルエンジンは重油焚きの場合、拡散燃焼であるので、燃料をLNG化した場合でも同じ拡散燃焼方式にしておけば、その特質である高い熱効率が維持でき、燃料切替等も比較的スムーズにできると考えられる。当社においても将来的な代替燃料の対応としてLNG燃料と重油の双方を燃料として使用できるDF(Dual Fuel)機関として、拡散燃焼方式の「UEC-LSGi」機関の開発に着手している。⁽³⁾

表3 DF 機関燃焼方式比較

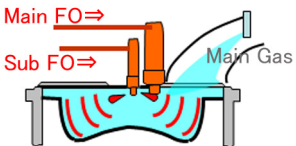
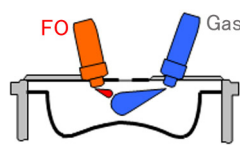
	予混合方式DF	拡散燃焼方式(直噴)DF
		
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・所要ガス圧低(5bar 前後) ・NOx が低い 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃焼安定性が高い ・外気条件、運転条件、LNG ガス組成(メタン価)の影響をほとんど受けない ・メタンスリップ無し ・重油モードと同じ機関性能
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・安定燃焼域が狭い ・外気条件、運転条件、LNG ガス組成(メタン価)の影響あり ⇒ 低速機関では負荷制限あり ・重油モードでは効率低下 ・メタンスリップ量の未燃ガス発生 ・燃料切替操作が煩雑 	<ul style="list-style-type: none"> ・所要ガス圧高(250~300bar) ・NOx が高い (拡散燃焼のため予混合 DF より高、重油ディーゼルより低)

図9に UEC-LSGi の燃料供給系の計画図を示す。重油ディーゼルエンジンで設置している部品の他に、LNG燃料を供給するための高圧LNGライン、高圧LNG噴射弁類、及び2重配管等の安全装置類が追加になる。LNGは300barレベルの高圧でエンジンに供給されるため、別途タンクから昇圧するポンプユニットが必要である。当社は「GEMS(Gas Equipment Modules and Systems)」としてモジュール部品を展開しており、UEC-LSGiもこの中の高圧LNGポンプの使用を前提として開発を進めている。2012年度から基礎試験、2013年度以降に4UE-X3試験機にて実機検証を計画している。

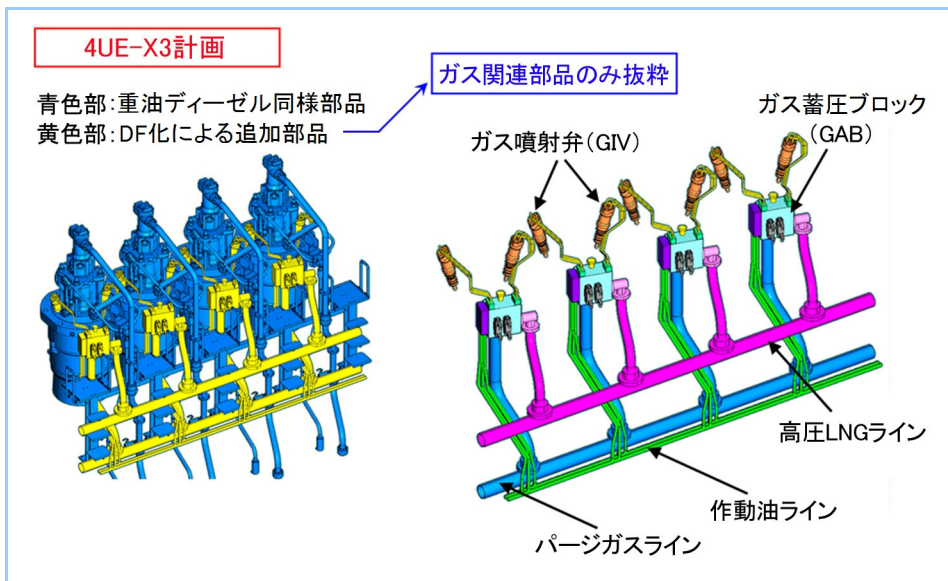


図9 UEC-LSGi 計画図

7. まとめ

最新型 UE ディーゼル機関をベースにした世界最大クラスとなる4シリンダー、60cm ボアサイズの試験機関 4UE-X3 が完成した。本試験機を用いて、環境規制対応技術である EGR システムの実機検証を実施し、EGR 単独で IMO の NOx Tier3 規制に適合するレベルの NOx 低減効果を確認した。また、EGR システムの重要構成装置であるスクラバー性能についても実機サイズでの検証を実施でき、SOx 除去性能が十分であることを確認した。今後、市場投入に向けて装置の小型化や全体システムの最適化等の玉成を行っていく。さらに、今後の開発としては DF 機関である UEC-LSGi 機関の実機検証も計画しており、開発から製造までを一貫して行う唯一のライセンスとして市場・顧客ニーズに即応した技術開発を継続していく所存である。

また本試験機はお客様のトレーニング機関としても運用を開始しており、CS 向上の一翼を担うものとして最大限活用していく。

参考文献

- (1) 三菱重工業(株), 船用ディーゼルエンジンのフルスケール試験設備が完成, (2012)
<http://www.mhi.co.jp/news/story/1207095231.html>
- (2) (社)日本船用工業会, Super Clean Marine Diesel Project, (2012)
<http://www.jsmea.or.jp/superclean.html>
- (3) 三菱重工業(株), 船用低速2ストローク デュアルフュエルエンジン「UEC-LSGi」の開発に着手, (2012)
<http://www.mhi.co.jp/news/story/1207055230.html>