2ストローク低速ディーゼル機関の

大幅 NOx 低減技術*

若 月 祐 之**

Reduction Technologies of Large Amounts of NOx from 2-stroke Cycle Low Speed Diesel Engines*

Yuji WAKATSUKI**

The outline of Tier 2 and Tier 3 NOx reduction regulations of IMO became clear at the meeting of MEPC57, which was held on this spring. Tier 2 can be achieved using conventional technologies; timing retard, engine tuning, electronically control of fuel injection and water technologies. However, Tier 3 will not allow such technologies, which are not able to achieve the future regulation line. The most closed technology is the after treatment system; SCR (Selective Catalytic NOx Reduction system). SCR has some problem to install the vessels which are propelled by the 2-stroke cycle low speed diesel engines. The biggest problem is the low temperature of exhaust gas, which is under the 300 °C. In the atmosphere of the exhaust gas with Ammonium under the 300°C, it is generated the acid ammonium sulfate, which coated on the surface of catalyst and decrease the effectiveness of chemical reaction. In conventional trials of SCR on actual vessels, all SCRs were installed before turbochargers in order to avoid the low temperature exhaust gas. However, with SCR installed before turbocharger is not convenient for the partial load operation or coastwise services.

1. はじめに

本学会員諸兄が本報を目にする頃には、国連の組織である IMO(国際海事機関)の MEPC58(第 58 回海洋環境保護委員会)が既に終了し、船舶が排出する有害物質による大気汚染に関する新たな規制案が確定し、採択に向け参加各国が動き始めているであろう。この議論において、今春開催された MEPC57 において、図 1 に示す様に船舶起源の NOx 排出規制が今後更に厳しいものへとなることとなった。2011 年からの 2 次規制は

従来の技術を組合せる等して達成可能な範囲にあるが、2016 年からとされている 3 次規制は、指定海域(ECA)内とはいえ、現状より 80%減という大幅な NOx 削減の規制値が示されており、陸上機関で多くの使用実績のある選択式還元触媒脱硝法(SCR)を用いなければ、規制値を安定的にクリアするのは難しいと考えられる。

船用機関の低 NOx 化技術をはじめとする有害排出物質削減へ向けた技術も近年次々と新しい試みが行われ、いろいろな可能性が広がっているが、将来の規制を見据えて、これらの技術を取捨選択していく必要がある。特に、大幅に NOx を低減する技術は、これまでの様に燃料消費率とトレードオフの関係のままでは、機関の信頼性に大きく影響する可能性がある上、GHG(温室効果ガス)の主要因である CO₂の排出量を増大させてしまい、運航上の経済的なメリットも薄まり、これまでの低速ディーゼル機関の特徴を失うこととなり、低速ディーゼル機関を船舶の推進機関として採用する根拠までも失われてしまう。

ディーゼル機関の低 NOx 化技術は、既に自動車やコージェネプラントの陸上でのディーゼル機関等でいろいろな試みがなされ、多くの技術が開発されてきているが、それらを船用機関に適用する時に種々の課題が発生する。例えば、大型化が容易にできるか、熱や振動

図 1 IMO/MEPC57 における NOx 規制値案

* 原稿受付 平成 20 年 8 月 6 日。

** 正会員 三菱重工業株式会社

等の使用環境に十分対応可能か、世界中どここの港でもメンテナンスや修理、あるいは部品供給が可能か、船舶の安全航行に支障を来さないか、必要な時に直ちに稼動できるか等が直ぐに挙げることができる。また、大形低速2ストローク機関は、あらゆる熱機関の中で最も単体熱効率がよく、経済的であり、GHGの排出量が少ないという利点を損なわない様な技術でなければならない。更に、経済性という観点では、現状大形機関のほとんどで使用されている残渣油(C重油)は、IMOのMEPCでも議論されている。SOxやPM(粒子状物質)の排出という観点より今後残渣油の品質が変化する可能性があり、それに伴いNOxの対応技術にも影響が出る可能性もある。一方で、運航コストがあまりに高騰して、運航経済性を損なうと、ディーゼル機関の将来は短いものになってしまう可能性もあり、これら技術の採用には、経済性も含めた入念な検討をしておく必要があると考える。本報では、これまでの低NOx化技術の総ざらいをして、将来の厳しい規制へ向けて各技術の有利な点や問題のある点を明確にして、今後の技術開発の一助としたい。

2. NOx 発生メカニズム

低速2ストロークディーゼル機関が排出するNOxは、空気中の窒素が高温で燃焼した時に酸素と反応してNOが酸化生成するNOxが主流である。燃焼温度は約2300℃程度であり、この環境下での発生メカニズムは拡大ゼルドヴィッチ(Zeldovich)機構と呼ばれており、以下の様な化学反応と考えられている。

また、これにより生成したNOxのことをサーマルNOxと呼び、熱分解により生成する炭化水素が空気中の窒素と反応し、さらに酸化して生成するプロンプトNOxや燃料中に含有される窒素に起因したフューエルNOxと区別されている。ただし、現在のディーゼル機関の燃焼ではサーマルNOxが圧倒的に多く、プロンプトNOxやフューエルNOxは数%と考えられている。現在の大形低速ディーゼル機関で実用化されているNOx低減技術は、後処理を除いてほとんどがサーマルNOxの生成を抑制する対策である。

3. 現状の対応技術

現在生産されている船用ディーゼル機関のほとんどは、2005年に発効されたIMOのMARPOL条約附属書VIにて定められている2000年建造船に遡って適用さ

れた現行の規制値を満足しており、特段の混乱は生じていない。しかし、ほとんどの場合が、燃料消費率を犠牲にして規制値をクリアしているため、更なる規制がスムーズに実施できるか否かは未だ不透明である。現状におけるIMOのNOx規制への対応は、機関チューニングとタイミングリタード(燃料噴射時期遅延)が一般的に実施されている。機関チューニングには、いくつかの方法が存在する。圧縮比変更(排気弁タイミングの変更あるいはピストン棒下の圧縮シム厚の変更)、燃料噴射弁仕様変更等である。また、これらのNOx低減技術は、簡便であるが常に燃料消費率とトレードオフの関係にあり、燃料消費率改善対策を行っている場合を除いて、燃料消費率の増加を伴ってしまう。

圧縮比の変更は、タイミングリタードにより低下した筒内圧を回復し、燃料消費率を改善する意味もある。また、掃気圧を増加して圧縮比を低減し、同等の筒内圧を得る考え方もあるが、過給機の仕様変更を伴うため従来機関での適用は少ない。機種によっても対応が異なっている様だが、圧縮比の変更はタイミングリタードとの組合せで最適点が見つかる、燃料消費率の犠牲を最小限に食い止めることができています。

燃料噴射弁の仕様変更は、一般的に採用されており、低NOx仕様の燃料噴射弁と呼ばれる仕様のものができている。従来型の燃料噴射弁は、いずれも燃料消費率の最適点で設計されていたため、低NOx仕様の燃料噴射弁では一般的に燃料消費率が增加する。特に、注意を要する点として、従来の仕様は燃料消費率だけが最適点であったのではなく、燃焼室内の燃料噴霧あるいは燃焼火炎の燃焼室内における位置としても最適なものであったため、仕様変更時に十分な検討を怠ると、排気弁やピストンクラウンの焼損に至る危険性がある。従って、新造船における低NOx仕様の燃料噴射弁を、十分な検討を行わずに就航船等へ安易に転用すると、トラブルに繋がる可能性がある。更に、燃料噴射弁の仕様変更に伴って燃焼室形状を変更する考え方もあるが、従来機種での一般的な低速ディーゼル機関のNOx低減では、そこまでの対応は行われていないと考えられる。勿論、新機種の設計には、その様な配慮が当然なされるべきである。

MANディーゼル社のMAN B&W型機関では、低NOx仕様の燃料噴射弁として、スライド弁も採用されている。スライド弁は、従来型の燃料噴射弁に比べてサックボリュームがほとんどなく、燃料消費率の改善が見込める。そのため、燃料消費率改善とNOx低減との両方に対して好ましい傾向を得ることができている。この例の通り、機関の燃料消費率改善技術は、NOx低

減への余裕を生むため、近年積極的に検討される様になってきている。

4. 水利用技術

前項で紹介した現状の低減技術の機関チューニングとタイミングリタードでは、NOxの低減率に限界があり、今後のより厳しい規制に対しては対応できなくなってくる。そこで、更なるNOx低減を実現するために最初に考えられた技術が水利用技術である。水利用技術にはいくつかの手法に分かれる。最も古くからある技術は、エマルジョン燃料(乳化油)である。次に、筒内水噴射であり、これには水と燃料を別々に噴射する独立水噴射と同一の噴射弁から燃料と水を交互に噴射する層状水噴射とがある。また、近年欧州で開発が盛んな給気加湿もあり、多くの水を用いたアプローチが行われている。燃焼室に水を直接供給する技術は、水自身の熱容量や蒸発潜熱が、燃焼により生じた熱を吸収し、燃焼温度を低減することを目的としている。一方、腐食や錆等の問題も考えられ、機関の信頼性に関する十分な検討が必要な技術でもある。更に、大幅にNOxを低減するためには、多くの水が必要となり、船内での清水の確保も重要となる。大形の造水機においても熱源の問題等があり、船用ディーゼル機関の水利用技術のひとつの限界点になる可能性もある。

(1) エマルジョン燃料

水を微粒化して燃料油中に混合する技術は古くより研究され、実用化されてきた。従来の水の混入量は、燃料100%に対して、水数%から十数%程度で、目的はNOx低減の他、燃焼改善、燃料消費率改善、燃焼室の汚れ低減等であった。NOxの低減量もこの程度の混入量であれば、数%から10%程度であったと考えられる。更に、軽油やA重油の場合は、混合時によく攪拌しても直ぐに分離してしまうため、界面活性剤の導入が必要となる。一方、C重油は十分に攪拌すると比較的容易にエマルジョン化して、分離もし難い。

NOxを大幅に低減するためには、水の量を増加する必要があるが、これまでの種々の試験結果に基づく、燃料100に対し水50程度のエマルジョンで、NOxは約40%程度低減できている。水は機関出力に対しては貢献しないため、機関出力を維持するためには燃料の量を変更できない。そこで、水の量が増加した分、エマルジョン燃料の吐出量は増加する。従って、燃料噴射系の容量を増加しなければならず、カム軸の強度等も見直す必要が生じる。また、燃料噴射期間が延びると燃料消費率が増加してしまう。NOxは低減するが、筒内圧力が低減するので、燃料噴射タイミングを進角

する等して燃料消費率をリカバーしようとする、一般的にはNOxも少し戻してしまう。

エマルジョン燃料は、水を入れれば入れただけ効果を得られる筈だが、実験的には60%を越えたあたりに限界が出てくる様である。そのため、現状では、エマルジョン燃料による安定したNOxの低減量は、一般的に40~50%と考えられている。また、あまりに大量の水を混合したエマルジョンは、その性質も変化して、燃焼し難い燃料になってしまう。特に、水の混入により燃料の粘度が増加するため、燃料噴射系の設計には、注意が必要となる。多量の水を導入したエマルジョン燃料を用いる場合、燃料噴射系等で腐食対策を実施すべきであり、従来の燃料噴射系で用いられていた材料をそのまま長期間使用することができなくなる可能性もある。

(2) 水噴射技術

エマルジョン燃料は噴射される燃料の全域に水が均等に分布している。より温度が高く、NOxを多く発生させていると考えられる主燃焼領域により効果的に水を供給する方法として筒内水噴射がある。現在、大形2ストローク機関の水噴射には、水噴射弁を有する独立水噴射と燃料噴射弁から燃料と水を交互に噴射する層状水噴射との二種類の方式が考案されている。ひとつの燃料噴射弁に水のノズルと燃料のノズルがそれぞれ別系統として装備されているものは、独立水噴射とみなすことができる。

独立水噴射は、燃料噴射弁の他に水噴射弁があり、シリンダカバーに水噴射弁を設置する孔を新たに設ける必要がある。一般的には、噴射した燃料の火炎に向けて水を噴射するために、水噴射弁は燃料噴射弁と同数必要となる。水を噴射するタイミングも、燃料噴射の前にするものと燃料噴射とほぼ同時にするもの、更に、燃料噴射より遅れてするもの等が考えられ、定まった方法は確立されていない。中速機関等にあるセンターインジェクション方式の場合、燃料と水を合わせるのは比較的容易であるが、現在のほぼ全ての2ストローク低速機関で採用されている複数の燃料噴射弁によるサイドインジェクション方式の場合、機関負荷、燃料の性質、外気条件や機関の経年変化による燃料噴霧、掃気圧、スワール強度等の変化に応じた適切な水噴射は困難である。そのため特定の負荷域で効果のある水噴射を設計しており、どの負荷域でも常に高いNOx低減効果を維持することには課題が残る。また、エマルジョン燃料と同様に、水の量を増加してもNOxの低減量に限界があると考えられ、現状での報告値としては実験機関においても70%程度にとどまる。

図2 層状水噴射の実験結果 (三菱重工業)

層状水噴射の場合は、「燃料-水-燃料」と、燃料噴射弁より燃料と水を交互に噴射することにより、比較的燃焼火炎の中心となる燃料噴霧の中央部に効果的に水を配置して噴射することができ、エマルジョンよりも少ない水量で、効果的にNOxを低減することができる。しかし、エマルジョン燃料と同様に燃料噴射ポンプの容量やカム軸の強度を増加する必要がある。また、噴射水量を増加すると噴射期間が延び、燃焼が悪化していくが、これは三菱重工業が行った試験で、図2に示す様に「燃料-水-燃料-水-燃料」等とするシステムの開発により、燃料消費率を増加させずにNOxが低減できるように改善できている。しかし、こちらも現状では低速機関における実験において、最大で60%程度のNOx低減率に留まる。

(3) 給気加湿

給気加湿と総称される水利用技術は、主に欧州地域のエンジンメーカーで盛んに試験が行われている。4 ストローク機関でのCAS(Combustion Air Saturation)システムおよびHAM(Humid Air Motor)、2 ストローク機関におけるSAM(Scavenging Air Moistening)システム等がある。我が国における実施例はないが、欧州で実施されているHERCULESプロジェクトの一開発項目として挙げられており、実船試験も実施されている。MANディーゼル社の公表資料によると、掃気空気^{ヘラクレレス}の絶対湿度を飽和状態にした時のNOx低減率は約35%程度と

なっている。

エマルジョン燃料や筒内水噴射では、水の容量や蒸発潜熱により燃焼温度の低下を狙ってNOxを低減していたが、給気加湿の場合は、掃気に水蒸気を含ませることにより掃気中の酸素濃度低下を狙い、燃焼室の圧縮空気の比熱を増大させることで、燃焼温度の低下を図っている。解り易く言い換えれば、燃焼室の空気を熱し難くしていると言える。SAMでは、エマルジョン燃料や筒内水噴射より更に大量の水を必要とするため、一部に海水を使用することで清水使用量の低減を図っている。筒内水噴射以上にNOx低減が可能という情報もあるが、具体的なデータは公表されていない。また、特に大形の2 ストローク低速機関では、水分や塩分によるシリンダライナの腐食摩耗の危険性を排除することができていないため、実用化までにはまだ高いハードルが残っている技術と考えられる。

図3 給気加湿システム(SAM)およびEGRの試験系統図 (MAN Diesel)

5. 電子制御機関

小形機関においては電子制御機関の研究は古くより行われており、現在では自動車等の燃料噴射系では広く普及した技術となっている。一方、大形船用機関においても長年研究が行われてきたが、信頼性、コスト、実績等の点でなかなかユーザに受入れられてこなかった。しかし2000年以降、Wärtsilä社のコモンレールシステムのRT-flex機関やMANディーゼル社のME機関等が生産され始め、三菱重工業のUEC-Eco機関を含め三大ブランドの全てで電子制御機関を製造することが可能となった。電子制御機関が実用化に至った大きな要因のひとつは、燃焼改善によるNOx低減がある程度可能であり、経済性と低NOx化の両面でのメリットが期待できたからである。

Wärtsilä 社の RT-flex 機関に搭載されているコモンレールシステムは、4 ストローク機関でよく採用されているシステムで、100MPa に加圧された共通管(コモンレール)の燃料を各シリンダの燃料噴射弁へ電磁弁を介して供給するもので、極めて制御性が高いシステムである。このシステムの特徴として、複数個ある燃料噴射弁をひとつひとつ別々に制御できるため、燃焼の制御に選択のバラエティがあることである。Wärtsilä 社は、複数個ある燃料噴射弁を同時噴射するパターン以外に、シーケンシャル制御と称する複数個の燃料噴射弁の噴射開始のタイミングをずらし噴射終了時は揃えた燃料噴射モード(低NOxモード)を提案した。また、低負荷時に1燃料噴射弁のみ噴射して、十分な燃料の噴霧状態を維持する等のこれまでにない燃料噴射モードも提案している。前者の場合、NOx 低減効果が確認されているが、設定条件によっては燃料消費率も増加してしまうため、更なる改善が必要と考えられる。

図4 RT-flex 機関の燃料噴射パターン (Wärtsilä Switzerland)

図5 ME 機関の燃料噴射パターンと NOx 排出濃度

(MAN Diesel)

MAN ディーゼル社は、ME 機関に搭載されている増圧ピストン構造の電子制御式燃料噴射系により従来型のエコノミーモードと低 NOx 仕様のエミッションモードとを設定し、大幅な NOx 低減を実現したとしている。図5に示す様に NOx 値が半分以下に低減したデータもあるが、これも燃料消費率の大幅な増大が課題であると考えられる。増圧ピストン式では、従来の燃料

噴射ポンプにあたる部分のプランジャーの制御を電磁弁による油圧で行っているため、燃料噴射モードは燃料ポンプで決まり、燃料噴射ポンプの吐出弁から燃料噴射弁までの構造は、従来機関と同じものである。

三菱重工業のUEC-Eco 機関でもMAN ディーゼル社と同じ増圧ピストン方式を採用している。UEC-Eco 機関もやはり低エミッションモードとエコノミーモードを有しており、前者は燃料消費率の変化なしに NOx を10~15%程度の低減を実現している。これは、燃料噴射ポンプのプランジャーを駆動する作動油を制御する電磁弁とオリフィスの組合せにより、図6に示す様な燃料噴射期間の初期の噴射圧を抑制した最適な燃料噴射率モードを作り出したことにより達成できている。だが、これらの燃料噴射制御による NOx の低減量には限界があり、燃料噴射弁仕様の最適化と併せても、使用可能なレベルでの低減は30%程度と考えられる。

Example of fuel injection pattern

図6 UEC-Eco 機関の燃料噴射モード制御例 (三菱重工業)

しかし、前述の筒内水噴射と電子制御燃料噴射を組み合わせることにより70%を超える大幅なNOx低減が可能となる試算もある。前述の通り、水噴射は負荷や燃料、運航状態等により噴射タイミングを変化させて、最適なポジションへ水を的確に供給する必要がある。電子制御のフレキシビリティはこれに十分対応することができる。ただし、水噴射システムの電子制御は、電磁弁や水噴射弁等の系統全体の材料選定から検討する必要がある。新しい実績作りから始めなければならない新技術でもある。水制御技術自体は、既に確立されたものがあるが、船用大形ディーゼル機関に適用したことはこれまでにはなかったと言える。

6. EGR

EGR(排ガス再循環, Exhaust Gas Recirculation)システムも留出油を使用する小形高速機関では既に実用化されているが, 大形機関では実験段階にあると言える。国内では, 川崎重工業による MAN B&W 機関を用いた実験例がある。海外でも MAN ディーゼル社からの報告がある。EGR は, 燃焼後の排ガスの一部を過給機の前に導入して新気と混合し, 給気の酸素濃度を低減し, 排ガス中に含まれる二酸化炭素や水蒸気が増加し, 給気の比熱が増大するため燃焼温度が低下して, NOx が低減する。原理的には, 給気加湿と同じ理屈で NOx を低減できている。

Exhaust gas recirculation system

図7 EGR 実験のシステム図 (川崎重工業)

図8 EGR システムの実験結果

5S70MCE 機関 (100% Load) (川崎重工業)

EGR に使用する排ガスは, 過給機の前に導入するまでにいくつかの処理が必要になる。特に重要なのは, 排ガス中の煤塵等の不純物を取り除くことである。中でも燃料中の硫黄分は低温環境下では水分と結合して硫酸となり非常に強い腐食環境を作り出すため, 硫黄分あるいは SOx の除去が必ず必要になる。その他, 排ガスの高い温度の低減も必要であり, ガス冷却機の設置が必要となる。更に冷却した排ガスに生じる結露水を除去するためのミストセパレータの設置も考慮しなければならない。図7に川崎重工業にて実施された EGR 試験のシステム図を示す。MAN ディーゼル社では, EGR システムの中に海水スクラバーを設置した前項の SAM システムと同様のシステムの導入を提案している。(図3参照)

図8に示す川崎重工業の実験結果によると, 留出油(A重油)を用いて, EGR 率(シリンダへ導入する排ガスと空気の混合気中に占める排ガスの割合)を 28%とした運転にて, 69%の NOx 低減率を得ている。MAN ディーゼル社でも EGR 率 20%で, NOx 低減率 50%が確認された。川崎重工業の実験結果では, 燃料消費率の増加や煤塵の増加もそれほど多くなく, 大幅 NOx 低減に効果的な手法と認められる。しかし, 実船においては, より硫黄分を多く含む残渣油(C重油)燃料での使用となることから, 更なる硫黄分除去対策が必要となり, また, 硫黄分による腐食対策も避けて通ることができないかも知れない。高温の排ガスを処理するシステムを過給機に近い機関上段に設置しなければならない等, システム全体が大規模になることも, EGR の導入が進まない理由のひとつと考えられる。しかし, NOx 削減量は大きく, 魅力のある技術のひとつである。

7. SCR

これまでに紹介した低 NOx 化技術は, いずれも燃焼を制御して NOx の発生を抑え様とするものだが, SCR (選択式還元触媒脱硝, Selective Catalytic Reduction)は酸化生成した NOx を還元して低減する技術である。もともと事業用火力発電所やゴミ処理施設等の排ガス処理用に我が国で開発され, 世界中で使用されている技術である。陸上用のディーゼルコージェネレーションプラントで採用されたのは 1980 年代末からのことである。少し遅れて, 韓国の現代重工業で建造された MAN B&W 型ディーゼル機関搭載船にデンマーク製の SCR が世界で初めて船舶に採用された。

還元剤としてアンモニアまたは尿素が使用され, NOx の低減率は, 触媒が新しいものであれば 99%という陸上での実績もある。また, NOx とアンモニアが触媒で反応して窒素と水になるため, 大気に放出するこ

とができ、廃棄物を発生させない点も非常に使い易いと言える。触媒も汚れなければ半永久的に使用できるものであり、還元剤のみが消費材である。

図9 2002年にMAN B&W 6S35MC 機関に搭載されたSCRの例 (MAN Diesel)

通常、アンモニアはアンモニア水(安水)、尿素は尿素水として供給するのが、船舶として簡便で、安全と考えられるが、広く採用するためには世界中の港湾に供給システムを設置しなければならない。また、船側にもアンモニア水または尿素水を保管するタンクが必要となる。欧州では尿素水が船用のSCRに使用されている例が多いが、我が国のコージェネレーションプラントにはアンモニア水が使用されている例も多い。更に問題となるのは、大型機関に合わせたSCRが非常に大きなものとなり、狭い機関室のスペースを占拠することと考えられる。SCRの反応器の大きさは、排ガス量、排ガス温度、計画脱硝率等により決まる。陸上コージェネプラントの例では、機関出力 5,000kW、排ガス量 32,000Nm³/h、脱硝率 80%の機関用SCRで、約 30m³の外形になる。この外形の容器の中に触媒がぎっしりと詰まっている訳ではないが、この比例で単純に考えても、現在世界最大の 80,000kW の主機を搭載するコンテナ船の 100%負荷でも同等の脱硝率を可能なものとする場合、約 480m³、即ち立方体にすると 1 辺が約 7.8m にもなる。この単純な計算では過大評価している様であるが、付随する排気管やバルブ類、還元剤のタンク、噴射装置とコントローラ等のことを考えれば、決して大げさな表現ではないと考えられる。

スペースの問題以上にSCRを大形2ストローク低速機関に搭載する場合の問題点は、燃料中の硫黄分の影響である。燃料中の硫黄分は燃焼により SOx となるが、その内 SO₃ となったものは、約 300℃以下の環境下で

アンモニアと反応して酸性硫酸(硫酸水素アンモニウム)を生成して、触媒表面に付着し、触媒の活性を低下させる。従って、現在 10 隻足らずの 2 ストローク機関に搭載されている SCR は、全て排ガス温度の高い過給機前に配置されており、機関の制御性や部分負荷における脱硝を犠牲にしたシステムとなっている。

排ガス温度が 300℃より高い 4 ストローク中高速機関では、過給機の後流側に配置しても酸性硫酸の生成がなく、十分に使用できる。国内のディーゼルコージェネレーションプラントも同様である。しかし、機関の熱効率が低い低速 2 ストローク機関や低速 4 ストローク機関では、図9に示す様な過給機前の配置にしなければ、300℃以上の高温の排ガスを得ることはできない。だが、過給機の前に大きな SCR を配置するとその熱容量の大きさから、機関の応答性に問題が生じる可能性がある。特に、船舶は危険回避のために機関を急激に停止したり、発進したりする性能を求められる。また、荒天時の運航では、激しい負荷変動が発生する可能性がある。機関の出力を一定に保っている陸上用の発電機関とは異なった使用形態を持つ船用機関において、過給機の前に SCR を配置してしまうと、過給機のタービン側に供給される排ガスの温度変化の追従が悪くなり、発停時、低負荷運航時、負荷変動時等の運転が上手くできなくなる可能性がある。そのため、発停時や低負荷運航時は、SCR をバイパスした排ガスを過給機へ供給することとなる。

一方、NOx は沿岸航行時に陸地への影響が大きい。発停時や極低負荷時は、排ガス量も少ないため、NOx の排出量の絶対値も少ないので、バイパスという手段も考えられるが、港湾地域や河川、近海域の航行時における NOx 低減が、陸地への影響を考慮すると大洋航行中よりもむしろ重要であるため、低負荷運航時等は脱硝すべきではないかと考える。そのためには、低負荷時にバイパスしている使用法では問題がある。

また、過給機の後流に SCR を配置すると低負荷でも使用可能であり、複雑な排気管の配置も行わずに済む。しかし、温度の問題を克服する必要がある。最近の低速ディーゼル機関の過給機出口の排ガス温度は、低いものでは 250℃を下回るものもある。従って、排ガス温度を 50℃以上上昇させなければならないが、そのために機関の熱効率を低下させて、燃料消費率を増大させたり、別のエネルギーを投入したりしたのでは、低速ディーゼル機関を使用している意味がなくなる。同様に燃料の硫黄分を極端に低減することも、燃料代の著しい上昇を招き、経済性を損ない、やはり低速ディーゼル機関を使用する意味がなくなってしまう。

現在、我が国で国土交通省および日本船用工業会を中心に日本財団の補助金を得て進められているスーパークリーンマリンディーゼル機関の開発研究において、低速ディーゼル機関では、三菱重工業と赤阪鐵工所が堺化学工業の協力を得て、東京海洋大学の実験機関を用いた図 10 に示す様な低温脱硝触媒あるいは低温の排ガスで使用可能な過給機の後流側に配置できる SCR の開発に着手している。

図 10 スーパークリーンマリンディーゼル機関の開発プロジェクトにおける低温 SCR 実験計画図

8. おわりに

現行の IMO 規制の 80%低減が決定されようとしている今日、大幅な NO_x 削減技術は SCR の適用を中心に待った無しの展開をしていると言える。国家プロジェクトのスーパークリーンマリンディーゼル機関の開発研究の今後も注目する必要があるが、同時に今後の IMO の議論により、規制の形態がどの様になっていくのかも注視していかなければならない。更に、GHG(温室効果ガス、主に CO₂)等の排出がこの議論にどの様に係ってくるのかもよく見極めていく必要がある。PM や GHG 等の物質は、基本的に燃料消費率を増加させる NO_x 低減法では増加してしまう。その上、ディーゼル機関の信頼性も燃料消費率の増加と共に低下してしまうというのが基本的な見方である。従って、大幅な NO_x 低減には、機関本体にあまり影響を与えない SCR の様な後処理装置が適していると考えられる。

これからの IMO による NO_x 規制にどの様に対応していけるかで、今後の船用ディーゼル機関の将来も見えてくるといっても過言ではない。これまでに培ってきたディーゼル機関の運航経済性や機関の信頼性を、地球環境保護とどの様に両立させていくのかが、我々ディーゼル機関の製造・開発に携わる関係者の使命であると言える。

9. 謝 辞

本報は、第 51 回特別基金講演会(2008.02)の講演資料を基に作成した。Wärtsilä 社および MAN ディーゼル社関連の表記と図の使用のご承認を頂きましたバルチラジャパンの大窪 範夫 氏および MAN ディーゼル日本の佐々木 耕 氏に深く感謝致します。EGR 関連は、川崎重工業の山本 寛一 氏に図の使用のご承認を頂き、深く感謝致します。最後に、原稿執筆に協力頂いた三菱重工業の同僚諸氏にも感謝の意を表する。

10. 参考文献

- 1) 日マリ学会「平成 18 年度 船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査」報告書 (2007.03)
- 2) 日マリ学会「平成 17 年度 船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査」報告書 (2006.03)
- 3) 杉原 日マリ学会誌 Vol.39, No.12「環境対応ディーゼル機関“三菱 UEC Eco-Engine”」(2004.12)
- 4) 花房, 島田, 志岐 日マリ学会 Vol.39, No.12「三井-MAN B&W 機関の環境規制対応技術」(2004.12)
- 5) 林 日マリ学会誌 Vol.39, No.12「電子制御コモンレール式低速船用主機 - Diesel United - Sulzer RT-flex 型機関」(2004.12)
- 6) 高崎 日マリ学会 第 77 回 ME 学術講演会 No.106「燃料油の低質化と NO_x 対策」(2007.10)
- 7) 東田, 山本 日マリ学会 第 77 回 ME 学術講演会 No.109「船用ディーゼル機関における EGR および SAM 技術の紹介」(2007.10)
- 8) 中島, 藤井, 大窪 日マリ学会 第 77 回 ME 学術講演会 No.110「DU-Wärtsilä 電子制御機関の低 NO_x 化技術について」(2007.10)
- 9) 政次, 清水, 野島 日マリ学会 第 77 回 ME 学術講演会 No.113「ディーゼル機関用脱硝触媒について」(2007.10)
- 10) 清澤 日マリ学会 第 77 回 ME 学術講演会 No.114「脱硝装置の陸用ディーゼル発電設備への適用」(2007.10)
- 11) 佐々木 日マリ学会 第 77 回 ME 学術講演会 No.115「SCR 採用の MAN B&W 低速機関の運転実績」(2007.10)
- 12) 三木, 中野, 園田, 中村, 徳岡, 桜井 日舶機学会誌 Vol.29, No.2「環境保全・信頼性から見た船用エネルギーシステム機器の現状と課題 6. 船用大型ディーゼル機関の NO_x 低減策について - 実機に於ける効果の確認 -」(1994.02)
- 13) 本村, 前田, 近藤, 辰巳, 岡部, 小田 日舶機学会誌 Vol.34, No.1「脱硝装置付き低速ディーゼル機関の運転動特性」(1999.01)