

船舶からの排出ガス規制及び低減技術の現状と動向

平成24年6月

目次

1 IMO による船舶からの排出ガス規制動向	1
1.1 NO _x 規制動向	1
1.2 SO _x 規制動向	2
1.3 ECA(Emission Control Area)	3
参考文献	3
2 船舶からの排出ガス低減技術	4
2.1 船舶からの排出ガス低減基本技術の動向	4
2.2 NO _x 低減技術の現状と動向	5
2.2.1 大型2ストローク機関に関する技術動向(全般)	5
(1) 一次規制対応技術	5
① 燃焼改善(機関ファインチューニング)	5
② 電子制御機関	5
(2) 二次規制対応技術	6
① ミラーサイクル	6
② 高効率・高圧力比過給	6
(3) 三次規制対応技術	7
① 水利用技術(水添加燃焼)	7
(a) 水エマルジョン燃焼	7
(b) シリンダ内直接水噴射(その1)―独立水噴射―	8
(c) シリンダ内直接水噴射(その2)―燃料・水層状噴射―	8
(d) 筒内多量直接水噴射方式	8
(e) 吸気(給気)加湿システム	9
② EGR	10
③ SCR(Selective Catalytic Reactor)	11
④ その他のNO _x 低減装置	12
(a) EGR と Emulsion Fuel の組み合わせ	12
(b) WaCoReG(Water Cooled Residual Gas)システム	12
(c) EGS(Exhaust Gas Separation)システム	13
2.2.2 4ストローク機関に関する技術動向(全般)	13
(1) 一次規制対応技術	13
① 燃焼に関するパラメータの最適化	13
(a) 噴射時期遅延と圧縮比最適化	13
(b) 燃料噴射ノズル噴口の径・多噴口化と燃焼室と気流のマッチング	14
② 電子制御燃料噴射装置の採用	14
③ 水添加燃焼	14
④ ミラーサイクル	14
⑤ その他	14
(2) 二次規制対応技術	15
① ミラーサイクルと高圧力比過給機の組合せ	15
② 噴射系の最適制御	15
③ 電子制御燃料噴射系	15
(3) 三次規制対応技術	16
① EGR(Exhaust Gas Recirculation)	16
② SCR(Selective Catalytic Reactor (または Reduction))	18
③ 燃料の転換	18
(4) 各種技術によるNO _x 低減率	19
参考文献	19

3	SO _x 排出規制と燃料性状の動向	22
3.1	流通原油の性状	22
3.2	精製方法	22
3.2.1	常圧蒸留装置(トッパー)	22
3.2.2	減圧蒸留(フラッシング)装置(バキューム)	23
3.2.3	脱硫装置	23
3.2.4	流動接触分解装置 : FCC(Fluid Catalytic Cracking)	23
3.3	重油の調合方法	23
3.3.1	軽油(MGO : Marine Gas Oil)またはA重油(MDO : Marine Diesel Oil)	23
3.3.2	C重油(HFO : Marine Heavy Fuel Oil)	24
3.3.3	低硫黄燃料油(LSHFO : Low Sulfur Heavy Fuel Oil または単にLSFO : Low Sulfur Fuel Oil)	24
(1)	低硫黄原油からの製造	25
(2)	重質油基材に低硫黄燃料油を混合	25
(3)	重質油基材を脱硫装置で脱硫	25
3.4	軽油またはA重油への転換	25
3.5	燃料性状の動向	25
3.5.1	CLO(Clarified Oil)の問題	25
3.5.2	LCO(Light Cycle Oil)の問題	26
	参考文献	26
4	大型2ストローク電子制御ディーゼル機関	27
4.1	三菱型電子制御機関(UEC-Eco)の構成と特長	27
4.1.1	燃料噴射系及び排気弁駆動系の概要	28
4.1.2	コントロールシステム	28
4.1.3	電子制御による性能改善	28
(1)	NO _x の抑制	28
(2)	低負荷性能の改善	29
(3)	全負荷域にわたる性能改善	29
(4)	始動性能の改善	30
(5)	三菱 UEC-Eco 機関のメリット	30
4.1.4	シリンダ注油装置 Swirl Injection Principle (SIP)	30
4.2	MAN B&W 型電子制御機関(ME)の構成と特長	30
4.2.1	燃料噴射系及び排気弁駆動系の概要	31
4.2.2	コントロールシステム	31
(1)	冗長化	31
(2)	操作性の向上	31
(3)	メンテナンス性の向上	31
4.2.3	電子制御による改善	32
(1)	燃料噴射制御	32
(2)	排気弁駆動制御	32
(3)	始動空気系	32
4.2.4	シリンダ注油装置	32
4.3	Wartsila 型電子制御機関(RT-flex)の構成と特長	33
4.3.1	コモンレールシステム	33
4.3.2	コモンレールシステムによる燃焼制御	34
4.3.3	シリンダ注油装置	35
	参考文献	35
5	4ストローク中速機関における各社の対応技術	37
5.1	新潟原動機の規制対応技術	37
5.1.1	新潟原動機における IMO 一次規制対応技術(燃焼コンセプト)	37
5.1.2	新潟原動機の IMO 二次規制対応技術	38

(1) 燃料噴射率パターン適正化(シミュレーション解析結果)	39
(2) 吸・排気カムタイミング及び過給機マッチングによる給気圧力の上昇	39
5.1.3 新潟原動機の IMO 三次規制対応技術	39
5.2 ヤンマーの規制対応技術	40
5.2.1 燃焼室の構造	40
5.2.2 スモーク排出特性	40
(1) スモーク排出特性の比較	40
(2) スモーク低減技術	41
① 噴霧の微粒化促進(空気導入率の増加)	41
② ASSIGN 燃焼方式	41
5.2.3 NOx 排出特性	42
(1) NOx 低減の考え方	42
(2) NOx 低減技術	43
5.3 海外メーカーのその他の対応技術	44
5.3.1 Wartsila の対応技術	44
(1) コモンレール(CR : Common Rail)システムの採用	44
(2) 水添加燃焼および SCR	44
5.3.2 MAN Diesel & Turbo 社の対応技術	45
(1) コモンレール(CR : Common Rail)システムの採用	45
(2) その他の技術	45
参考文献	46
6 4ストローク高速機関における各社の対応技術	47
6.1 ヤンマーの規制対応技術	47
6.1.1 ヤンマーの一次規制対応技術	47
(1) 等圧燃焼	47
(2) 燃焼期間の短縮	47
(3) 千鳥型燃料噴射ノズルの採用による燃焼室内未利用空気の利用	48
6.1.2 IMO 二次規制対応	49
(1) 給気冷却	49
(2) EGR	50
① 外部 EGR 方式	50
② 内部 EGR 方式	51
(3) 電子制御燃料噴射	51
6.1.3 IMO 三次規制対応	51
6.2 燃料噴射装置を中心としたその他のメーカーにおける対応技術の開発動向	52
6.2.1 燃料制御の基本方式	52
(1) Electric Unit Injector System (E.U.I.)	52
(2) Electric Unit Pump System (E.U.P.)	52
(3) Double Popet System (D.P.S.)	52
(4) Common Rail System (C.R.S.)	52
6.2.2 各社の動向	52
(1) コマツ (高速機関への対応技術)	52
(2) 三菱重工業(発電機関用中速機関への対応技術)	52
(3) ボッシュオートモーティブシステム (中・高速機関への対応技術)	53
(4) ダイハツディーゼル(発電機関用中速機関への対応技術)	54
参考文献	56
その他の参考文献	57

船舶からの排出ガス規制及び低減技術の現状と動向

1997年9月IMO(International Maritime Organization 国際海事機関)条約締約国会議において採択された船舶からの大気汚染防止に関する改正付属書、いわゆる「船舶からの大気汚染防止条約(MARPOL73/78 ANNEXVI)」は、2004年5月18日にサモアが批准したことにより発効要件が満たされ、2000年1月1日以降建造された新造船についても遡及適用する形で、2005年5月19日に発効した。

付属書VIでは、オゾン層破壊物質、酸性雨の原因たる窒素酸化物(NOx)および硫黄酸化物(SOx)、粒子状物質(PM : Particulate Matter)などの船舶からの排出を規制するとともに、揮発性有機化合物(VOCs)の放出、廃棄物の船上焼却等についても規制している。その後、2008年の第58回海洋環境保護委員会(MEPC58)における付属書VIの改正によりNOxおよびSOxに対する段階的規制強化案が採択され、NOxについては2011年1月から二次規制が適用となっている。SOxについてはスクラバによる脱硫も認めつつ、NOxに先立ち一般海域より厳しい規制を課す排出規制海域 ECA(Emission Control Area)を指定(硫黄酸化物の場合 SECA(SOx Emission Control Area))し、燃料中の硫黄分濃度を抑えることにより、やはり段階的に厳しい規制へと移行することとなった。

2016年1月からの適用が予定されているNOx三次規制においては機関単体での調整技術だけでは対応が不可能であることから、これまで一次規制及び二次規制対応技術として培われてきた燃焼マッチングなどの種々の技術に加え、現在研究開発中の種々の新対応技術を組み合わせることが必要となる。

また、一次規制対象から外されていたCO₂などの温暖化ガス(温室効果ガス GHG : Green House Gas)の排出規制については、2006年のMEPC55(第55回海洋環境保護委員会)において規制に当たってはトン・マイル当たりの排出量を単位とすることについて合意された。そして2011年7月のMEPC62において、エネルギー効率指標を導入するなどの内容を含んだ付属書VIの改正案が採択され規制への動きが活発となってきた。

なお、CO₂とともに一次規制対象から外されていたPMは、燃料中の硫黄分から生成されるサルフェートにより構成される部分が多いことから、燃料中の硫黄分を規制するSOx排出規制とその結果の今後の状況を見つづつ規制について検討することとしている。

本報告では、これら船舶からの排気ガス規制ならびにその対応技術の現状及び動向について調査した結果を報告するとともに、燃料中の硫黄分の規制に関連して調査した燃料油の品質動向の調査結果についてもあわせて報告する。

1 IMOによる船舶からの排出ガス規制動向¹⁾⁸⁾

IMO(International Maritime Organization 国際海事機関)による船舶からの大気汚染防止条約(MARPOL73/78 付属書 ANNEXVI)に基づいた規制とは別に、欧州ならびに米国において関係当局が内水または沿岸を航行する一部の船舶に対し排出ガスに対する規制を課している。これらの規制は陸上用(自動車・建機用)機関に由来したエンジンを前提としたものであり、グローバルな航行海域を有する大形の船用機関に対する規制についてはIMOの規制が基本になる。

1.1 NOx 規制動向

NOx規制動向を図1.1^{9),10)}に示す。規制値は機関回転数により異なり、大形低速機関における規制値が緩やかであるのに対し中速、高速となるに従い厳しい値となっている。

2005年5月19日に発効、2000年1月1日以降建造された新造船について適用されたIMO一次規制では、規制実施当時のエンジン本体のIn-Engine対応(燃料噴射系及び燃焼室の設計と燃焼マッチングによる対応)技術で対応可能な値を規制値としており、大形2サイクル低速機関の高温高圧燃焼を基本とした低燃費特性に配慮したものであった。二次規制値は一次規制実施時点ですでに開発済み、または開発中のIn-Engine対応技術で対応可能な値である。これらに対し三次規制値は、一次または二次規制対応技術にさらにEGR(Exhaust Gas Recirculation)、SCR(Selective Catalytic Reactor)、水添加(Emulsion Fuel、DWI(Direct Water Injection)など)の対応技術を組み合わせることにより対応可能となる開発目標値としている。

三次規制対象海域は、一般海域より厳しい規制を課す排出規制海域として関係国などの申請とIMOなどの審査により指定されるECA(Emission Control Area)である。現在のSECA(SOx Emission Control Area)を基本とし、これに関係国沿岸地域等が加えられると思われる。日本近海については現在検討中である。

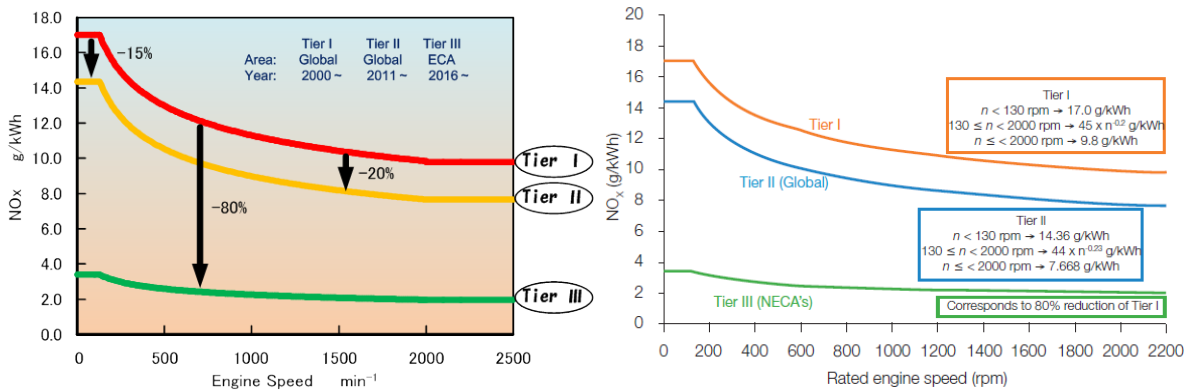


図 1.1 IMO NO_x 規制動向^{9), 10)}

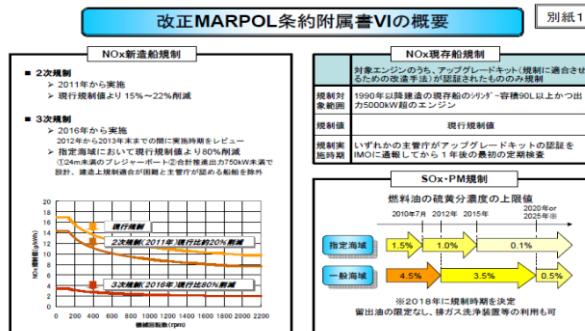
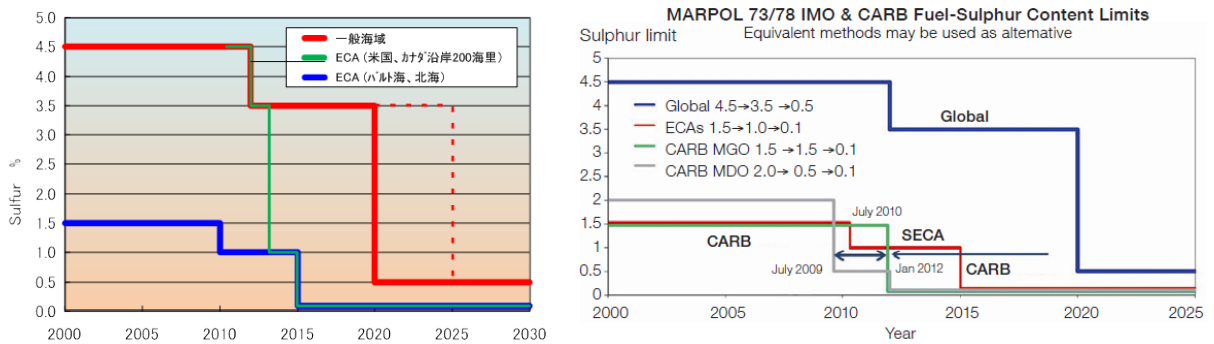


図 1.2 IMO による SO_x 規制動向^{9), 11), 12)}

1.2 SO_x 規制動向

スクラバによる燃料中の硫黄分の洗浄も認められるが、基本的には使用する燃料中の硫黄分を規制する。規制値には、全海域に適用する規制値と、酸性雨による森林等への被害が甚大な地域周辺の海域などとして指定された指定海域 SECA (SO_x Emission Control Area) に対するより厳しい規制値がある。

図 1.2^{9), 11), 12)}に SO_x 規制値の段階的強化の状況を示す。全海域(一般海域)と指定海域で二次および三次規制の施行時期が異なるのは、規制に合致した燃料油(通常のバンカー油及び低硫黄燃料油等)の供給体制の整備猶予期間などを考慮したものである。

SO_x 規制に関しては、低硫黄燃料供給体制の整備(インフラ整備)にある程度の時間を要すること以外に、船内での低硫黄燃料への切替に係る諸問題(タンクの増設の必要性、混合安定性の不良によるスラッジ大量発生に起因する燃料系統の閉塞、切替不手際による機関故障等)が懸念される。そのためこのような煩雑な事情を避けるため、バンカー油(いわゆる C 重油)から留出油(いわゆる A 重油や軽油)への転換も検討されている。この場合、留出油製造技術は進歩しているもののその需給バランスを維持できなくなる場合や、従来では考えられなかった低質の(着火性および燃焼性の悪い)留出油が市場に出回る恐れがある。このような低質の(着火性および燃焼性の悪い)留出油を使用した場合、出力低下や黒煙の排出のみならず、排気系の汚損による損傷、ピストンリング等の潤滑不良による焼きつきなど、機関の致命的な損傷を誘発する危険性も増してくることから、大形

2 サイクル機関のみならず、従来から留出油を使用してきた中・高速機関も含む船用ディーゼル機関のユーザーは、排気規制ならびにその対応技術動向とともに、燃料油の性状及び燃焼障害等に対する現状と動向にも配慮を怠ってはならない。

1.3 ECA(Emission Control Area)¹³⁾⁻¹⁵⁾

図 1.3¹³⁾⁻¹⁵⁾に ECA(Emission Control Area)を示す。ECA のうち SO_x に関する SECA (SO_x Emission Control Area)については、同図に示すように北海・バルト海が 2010 年 7 月から規制適用海域となっている。SO_x および NO_x のいずれをも規制対象とする ECA としては、米国がカナダと共同で北米の沿岸海域を申請し、2010 年 3 月に指定され、SO_x に関しては 2011 年 8 月から、NO_x に関しては 2016 年 1 月から規制が適用される予定である^{14),15)}。また、米国領のカリブ海周辺も 2011 年 7 月に同様に ECA として指定された。



図 1.3 ECA(Emission Control Area)¹³⁾⁻¹⁵⁾

【参考文献】

- 1) 平成17年度船舶排出大気汚染物質削減技術調査報告書,日本マリンエンジニアリング学会,(平成18年3月)
- 2) 平成18年度船舶排出大気汚染物質削減技術調査報告書,日本マリンエンジニアリング学会,(平成19年3月)
- 3) 平成19年度船舶排出大気汚染物質削減技術調査報告書,日本マリンエンジニアリング学会,(平成20年3月)
- 4) 特集「燃料油の着火・燃焼性」,日マリ学会誌, 第43巻第1号(2008年),2-26.
- 5) 特集「船舶からの排気ガス規制の強化とその対応方策」,日マリ学会誌, 第43巻第6号(2008年),1-53.
- 6) 日本海事協会, 船用燃料重油の低質化対策指針(Version II)－難燃性燃料油対策－,(2008年6月).
- 7) 特集「IMO 規制対応の現状及び将来技術」,日マリ学会誌, 第46巻第2号(2011年),1-32.
- 8) 特集「船舶起源排気エミッションの低減技術」,日マリ学会誌, 第46巻第6号(2011年),1-54.
- 9) 近藤・島田, 船用低速(MAN 型)機関における IMO 規制対応の現状及び将来技術, ,日マリ学会誌, 第46巻第2号(2011年),5-9.
- 10) MAN Diesel & Turbo, Tier III Compliance (Low Speed Engine)
- 11) 国土交通省ホームページ, <http://www.mlit.go.jp/>.
- 12) MAN Diesel & Turbo, Operation on Low-Sulphur Fuels
- 13) 坂部, 大形 2 サイクル船用エンジンの排ガス規制対応技術, エンジンテクノロジー, No.44(2006年6月), 20-25.
- 14) 石田, 船舶からの大気汚染物質排出規制に関する国際動向について, 日マリ学会誌, 第46巻第6号(2011年),46-48.
- 15) 四方・岡田, 諸外国における船舶にかかわる大気汚染施策の動向, 日マリ学会誌, 第46巻第6号(2011年), 49-54.

2 船舶からの排出ガス低減技術

2.1 船舶からの排出ガス低減基本技術の動向¹⁾⁸⁾

船舶に搭載された内燃機関(基本的にはディーゼル機関)から排出される排気ガス中の有害成分には、窒素酸化物(NOx)、硫黄酸化物(SOx)、粒子状物質(PM : Particulate Matter)、ばい煙(Smoke)、二酸化炭素(CO₂)などがある。窒素酸化物(NOx)および硫黄酸化物(SOx)は酸性雨の原因として、また CO₂は温室効果ガス(GHG : Green House Gas)のひとつとして、いずれも地球規模の自然破壊に繋がる。粒子状物質(PM : Particulate Matter)やばい煙(Smoke)は直接人体へ影響を及ぼし、健康被害の原因となる。

窒素酸化物(NOx)は、酸素が十分ある状態で、高温・高圧の活発な燃焼が行われる、すなわち効率(燃費)の良い燃焼が行われる際に発生しやすい。したがって NOx 低減は燃費悪化につながる。すなわち NOx 低減と燃費向上はトレード・オフの関係にあり、燃費悪化をいかに抑えたうえで NOx を低減するかが技術の要になる。CO₂の直接的な削減は燃費向上にほかならず、特に温室効果ガス(GHG : Green House Gas)である CO₂削減が確実に求められることとなった今、より一層の技術開発が必要となる

硫黄酸化物(SOx)は基本的に燃料に含まれる硫黄分が燃焼することにより発生するため、燃料中の硫黄分を制限することが対応の基本となる。原油にはもともと低硫黄のものもあるがその割合は限られており、原油精製時の脱硫等の改質が必要となる。また、精製により得られるより低硫黄の留出油への使用燃料の転換も予想される。この場合、製油所における精製製品の得率変更や新たな設備投資等が必要となり、燃料油価格の高騰、需給バランスの崩壊などが懸念される。

PM(Particulate Matter)については、前述したようにその生成メカニズム及び定量的な計測方法が未だ明確でない部分もあるため、当面、SOx 規制にあわせ PM 生成の主因といわれる燃料中の硫黄分濃度上限を規制することで対応することとされた。

一次規制対象から外されていた CO₂などの温暖化ガス(温室効果ガス GHG : Green House Gas) の排出規制については、2006 年の MEPC55(第 55 回海洋環境保護委員会)において規制に当たってはトン・マイル当たりの排出量を単位とすることについて合意され、その後 2011 年 7 月の MEPC62 においてエネルギー効率指標を導入するなどの内容を含んだ付属書VIの改正案が採択され規制が現実化してきた。CO₂削減は、前述したように省エネルギーを図ることである。ディーゼル機関本体の燃料消費率を低減させることがその一つの方法であることは間違いないが、これとトレードオフの関係にある NOx 排出量の削減も同時に実現しなければならず、機関本体の燃料消費率低減については、現段階ではもはや限界に近いといつてよい。そのため GHG 削減は船舶システム全体を通じて行わなければならない、船体抵抗の低減による燃料消費率の削減、排気ガスからの熱回収による船舶全体での省エネの実現、運航航路及び出入港時刻の最適化による省エネなど多方面での対応技術を総合的に適用することが必要となる。

このように排気ガス規制対応技術の開発においては、CO₂の減少を念頭に燃費を優先させれば NOx が増加し、NOx の低減を優先させれば燃焼が緩慢となり燃費が悪化し CO₂や PM の増大が懸念されるなどのトレード・オフの関係を克服しつつ、図 2.1¹⁾に示すような各種技術の検討されてきた。

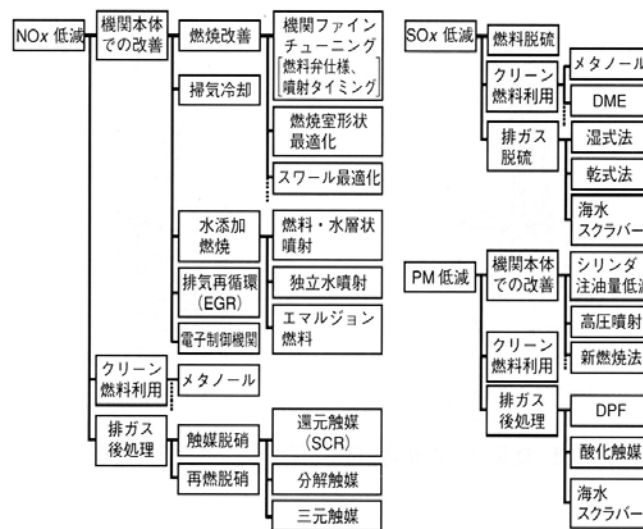


図 2.1 環境規制対応技術¹⁾

以下、本章においてNO_x低減技術について、また次章においてSO_x低減技術について現状と動向について調査結果をもとに解説する。

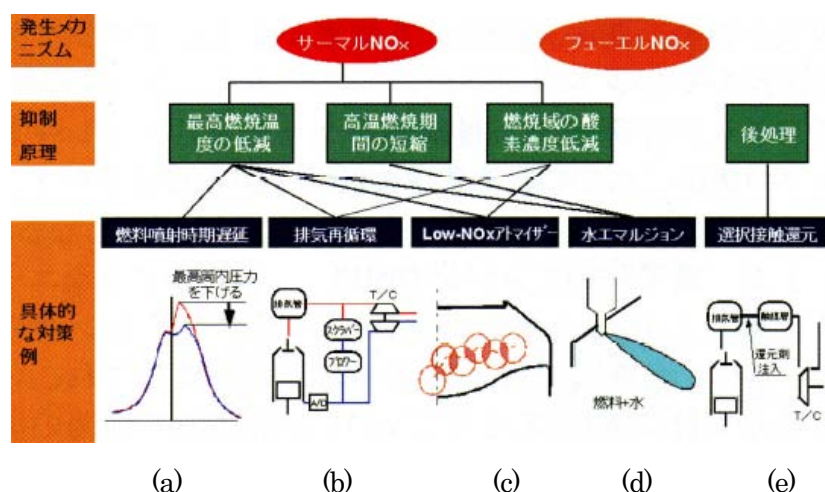


図 2.2 NO_x 生成メカニズムと低減技術^{7,9)}

2.2 NO_x 低減技術の現状と動向

2.2.1 大型 2 ストローク機関に関する技術動向(全般)

(1) 一次規制対応技術^{7,8)}

NO_x 生成要因と実用化またはそのめどがついた主要な NO_x 低減技術を図 2.2⁷⁾に示す。主要大型 2 ストローク機関メーカーである MAN-B&W 社、Wartsila 社および三菱 UEC 社の 3 社の IMO 一次規制に対する対策は、図 2.1 で「機関本体での改善」として示したいわゆる 1 次手法(Primary Method)による対応が中心であった³⁾⁵⁾。1 次手法(Primary Method)には、次のような方法がある。

① 燃焼改善(機関ファインチューニング)

噴射系及び排気弁の駆動および制御を、クランク軸からカムやチェーン等により駆動カム軸に装備されたカムによる行ういわゆる従来型(機械式)機関の場合は、次のチューニングを行った。

- (a) 燃料噴射時期の調整(遅延)
- (b) 高圧燃料噴射
- (c) 燃料噴射弁の噴口仕様の最適化(低 NO_x ノズルの使用など)

燃料噴射時期の遅延は、図 2.2(a)に示したものである。シリンダ内圧縮温度が十分高くなるまで噴射を遅らせ、着火遅れを短くして急激な燃焼圧力の上昇(急激な予混合的燃焼による過大な燃焼最高圧力の発生)に起因する燃焼温度の上昇を抑えることにより NO_x の生成を抑制するものである。しかしこれだけでは燃焼最高圧力の低下によるサイクル効率の低下や後燃え増大による燃費の悪化が避けられないため、あわせて高圧(正確には高圧かつ高噴射率の)燃料噴射によりピストンが上死点(TDC)付近にある間に迅速かつ確実な低圧燃焼に近い燃焼を行わせる。

図 2.3^{6),10)12)}は、燃料噴射弁の噴口仕様の最適化のひとつである低 NO_x アトマイザの例であり、図 2.2 の(c)に相当する。図 2.3(a)は噴霧の一部を重ねることにより燃焼領域全体の酸素濃度を、また同図(b)はスワールの上流側に噴霧をひとつ配置することによりこの燃焼ガスで下流側の噴霧の燃焼領域の酸素濃度をそれぞれ下げることにより、NO_x の生成を抑制するものである。図 2.3(c)はこのような対応技術に合わせて開発されたスライド弁式アトマイザを、従来型及びミニサック型アトマイザと比較したものである。スライド弁式アトマイザはサックボリュームが 0 であるため、燃費悪化の原因となるアトマイザからの燃料の後だれをなくするとともにスモークや PM の低減にも有効である^{10),12)}。

図 2.4⁹⁾は、MAN-B&W 社における対応状況を示すものである。同図に示すように一次規制の規制値 17g/kWh に対しては 1 次手法(Primary Method)で規制値をクリアできるが、ぎりぎりのものもある。

② 電子制御機関

MAN-B&W 社、Wartsila 社および三菱 UEC 社のいずれも、噴射系及び排気弁の駆動および制御を電子制御で行う電子制御機関を開発した。燃料噴射量だけではなく燃料噴射時期、燃料噴射率、排気弁開弁時期及び期間などをクランク軸の回転、すなわちピストン位置にかかわらず任意に制御できることから、従来型機関の手法に加えてさらに次の事項についても 1 次手法(Primary Method)のチューニング対象とした。

- (a) 燃料噴射率の調整
- (b) 燃料噴射パターンの調整
- (c) 排気弁の開閉タイミングの調整

電子制御機関はNOx 低減にともなう燃費の悪化はなく、燃費とNOx のトレードオフの関係を克服し、使用負荷または運転モードによっては燃費の向上も得られた。電子制御機関については、「4 大形2 ストローク電子制御ディーゼル機関」において解説する。

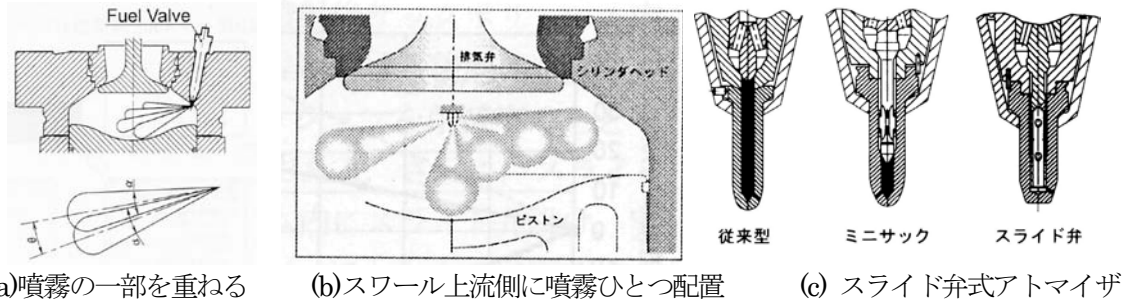


図 2.3 低NOx アトマイザの噴口配列 ⑥, 10-12)

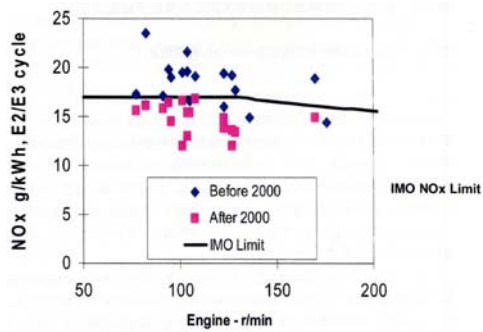


図 2.4 MAN-B&W における NOx 一次規制対応状況 ③)

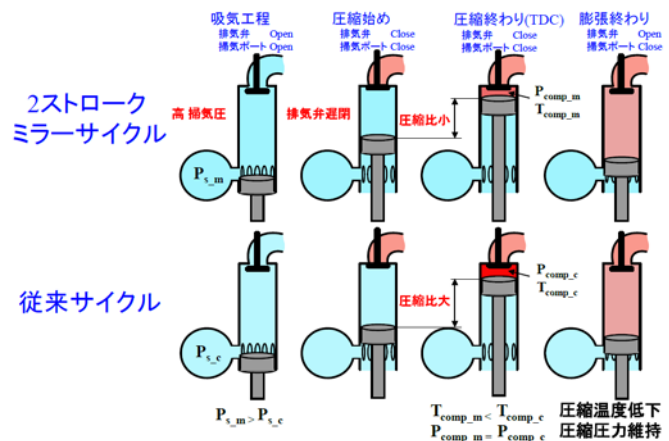


図 2.5 2 ストローク(排気弁遅閉じ)ミラーサイクル 12)

(2) 二次規制対応技術 7), 8)

現行規制値から 20%程度の低減を求める二次規制は 2011 年から適用となるが、これについては In-Engine すなわち機関本体のチューニングで対応が可能である。一次規制規制対応技術として完成された 1 次手法 (Primary Method) を基本とし、さらなる NOx の低減のために圧縮による給気の温度上昇を抑える機関チューニングを講じた。

① ミラーサイクル 12)

大形 2 ストローク機関の場合は図 2.5¹²⁾に示すように、排気弁の開鎖タイミングを遅らせ給気の圧縮行程を減じ、圧縮後の温度を抑えるいわゆる(排気弁)遅閉じミラーサイクルの採用である。ミラーサイクルは、圧縮行程と比較して膨張行程が大きいため、十分な膨張が得られ高い熱効率が期待できるものである。ただし、これのみでは圧縮比も小さく、また給気量が少ないため効率の悪化および出力の低下が避けられない。

② 高効率・高圧力比過給

ミラーサイクル採用時の効率悪化および出力低下を回避するため、あわせて圧縮シムの変更による高圧縮比化を図るとともに、高効率・高圧力比仕様の排気タービン過給機を装備して掃気圧を高めている。しかし、それでも一次規制対応機関と比較した場合、燃料消費率の悪化は避けられない。表 2.1 7)に MAN 型機関の場合の燃費悪化の状況を示す。ただし同表を見ると、従来型(機械式)機関(MC)と比較して電子制御機関(ME)は、3g/kWh 程度燃費が改善されている。

表 2.1 MAN-B&WTier-Tier2 対応機関の燃費比較⁷⁾

Engine type	Tier 1 L1 SFOC	Tier 2 L1 SFOC	差
K98ME7	171	174	3
K98MC7	171	177	6
K98ME-C7	171	174	3
K98MC-C7	171	177	6
S90ME-C8	167	170	3
S90MC-C8	167	173	6
K90ME9	171	174	3
K90ME-C9	171	174	3
K90MC-C6	171	177	6
S80ME-C9	167	170	3
S80ME-C8	167	170	3
S80MC-C8	167	173	6
K80ME-C9	171	174	3
K80ME-C6	171	174	3
K80MC-C6	171	177	6
S70ME-C8	169	171	2
S70MC-C8	169	174	5
L70ME-C8	170	172	2
L70MC-C8	170	175	5

Engine type	Tier 1 L1 SFOC	Tier 2 L1 SFOC	差
S65ME-C8	169	171	2
S60ME-B8		170	
S60ME-C8	170	171	1
S60MC-C8	170	174	4
L60ME-C8	171	172	1
L60MC-C8	171	175	4
S50ME-B9	169	170	1
S50ME-B8	170	171	1
S50ME-C8	171	172	1
S50MC-C8	171	175	4
S46ME-B8		173	
S46MC-C8	174	177	3
S42MC7	177	179	2
S40ME-B9	175	175	0
S35ME-B9	176	176	0
S35MC7	178	179	1
L35MC6	177	179	2
S26MC6	179	181	2

(3) 三次規制対応技術^{7),8),13),14)}

現行規制値から 80%の低減を求めるものであり、2016 年 1 月から適用される予定である。従来の In-Engine の低減技術の延長で対応することは不可能であり、一次および二次規制対応技術と、以下に述べる技術を組み合わせる必要となる。一部陸上用機関や船用 4 ストローク機関では実用化されているものもあるが、大形 2 ストローク機関への対応についてはいずれも開発課題をかかえている。

① 水利用技術(水添加燃焼)¹³⁾⁻¹⁷⁾

水添加燃焼のうち水-エマルジョン燃料の適用については、すでに陸上用の定置大形低速機関で実用化されている。船用低速機関に対する有効な水添加燃焼方法として、三菱重工、三井造船および九州大学等による筒内への多量の直接水噴射(DWI : Direct Water Injection)方式の開発や、MAN-B&W 社の掃気中への水噴射(SAM : Scavenge Air Moisturizing)方式の開発が進められている。水添加燃焼は次の効果で NOx 生成を抑制するもので、40~60%程度までの削減が可能といわれている。

- イ) 蒸発潜熱および熱容量の増加により高温燃焼領域を減少させる。
- ロ) 水蒸気が存在することにより高酸素濃度状態を抑制する。

(a) 水エマルジョン燃焼

水エマルジョン燃焼の場合、対燃料質量比 1%の水添加で約 1%の割合で NOx を減少させることが可能であるが、水を添加しすぎると着火遅れが長くなりディーゼルノックが激しくなる。そのため添加率は高負荷で 50~60%、低負荷で 30%が限界である。添加する水の分燃料噴射ポンプの容量を大きくすることが必要である。また、起動および停止時には通常燃料に切替えることが必要である。

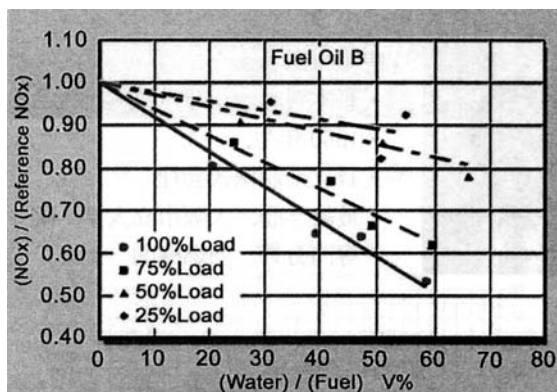
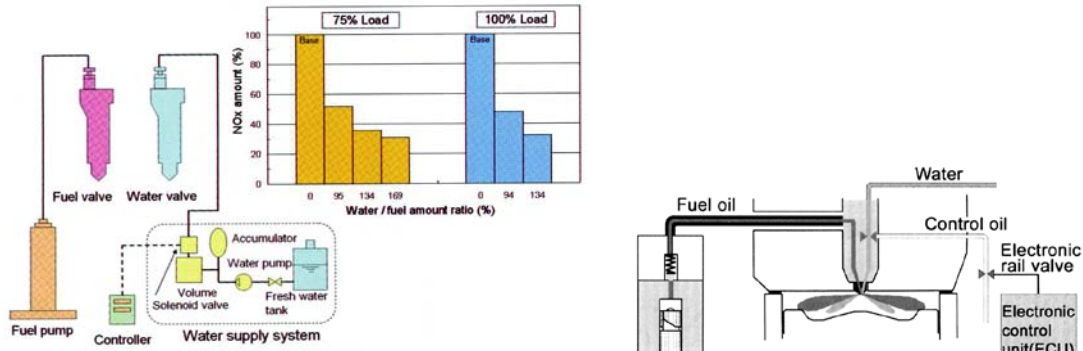


図 2.6 水エマルジョン加水率と NOx 低減率¹⁶⁾

(b) シリンダ内直接水噴射(その1)—独立水噴射—^{1),6),15)}

高温燃焼領域に直接水を噴射するため効果的であり、水供給の ON-OFF 制御が容易である。方法としては、図 2.7^{1),6),15)}に示すとおり、次の 2 種類がある。

- i) 燃料噴射弁と水噴射弁がそれぞれ独立しているもの。
- ii) ひとつの噴射弁に燃料の噴射経路と水の噴射経路が組み込まれているもの。



(a) 燃料噴射弁と水噴射弁が独立

(b) 水経路の組み込み

図 2.7 シリンダ内直接水噴射(その1)—独立水噴射—^{1),6),15)}

(c) シリンダ内直接水噴射(その2)—燃料・水層状噴射—^{6),15)}

噴射系の構造は複雑になるが、着火遅れに影響を及ぼさず効果的である。その一例を図 2.8¹⁵⁾に示す。

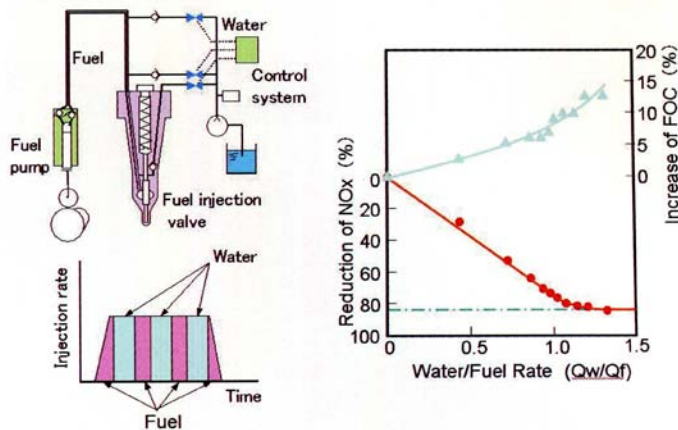


図 2.8 シリンダ内直接水噴射(その2)—燃料・水層状噴射—¹⁵⁾

(d) 筒内多量直接水噴射方式^{2),16)}

筒内多量直接水噴射方式の概念を図 2.9¹⁶⁾に示す。日本造船研究協会(九州大学、ナブテスコ、日本エヌ・ユー・エス、日本海事協会、日本内燃機関連合会、三井造船、三菱重工業、ユニバーサル造船が参加)によるもので、燃料に対し体積比で約 80%の水を筒内に直接噴射し、熱効率の低下を 3%以内に抑えて NOx の排出率を 80%低減することを最終目標としたものである。

九州大学で行った可視化機関による実験では、図 2.10^{2),16)}に示すように噴霧に対し適切な方向で水を噴射することにより燃焼温度を低下させることができ、燃焼温度と NOx 生成に関する図 2.11²⁾の関係を得た。その結果、燃焼温度を 200K 下げることにより NOx の生成量を 1 桁下げることができることを確認した。図 2.12²⁾に NOx 低減効果の一例を示す。

筒内直接水噴射(Direct Water Injection)多量の水を使用できることから試験では 70%と水関連技術では最大の NOx 削減率が得られているが、シリンダ内に多量の水を直接噴射するためシリンダ壁に当たる水により油膜が破壊され、シリンダコンディションを悪化させる懸念がある。

なお、筒内水噴射に用いる水の造水は主機冷却清水を熱源とする従来の造水システムを用い、熱量不足時には排ガスエコノマイザからの蒸気でバックアップすることにより対応可能である。

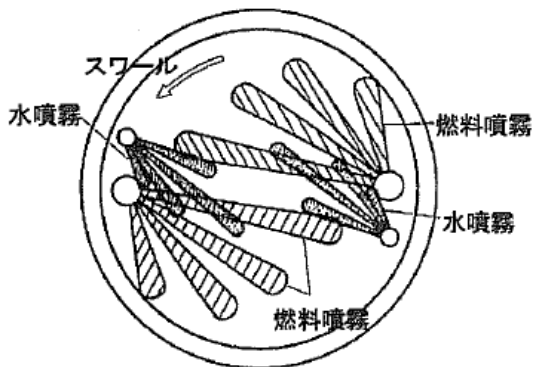


図 2.9 筒内多量直接水噴射方式の概念^{15),16)}

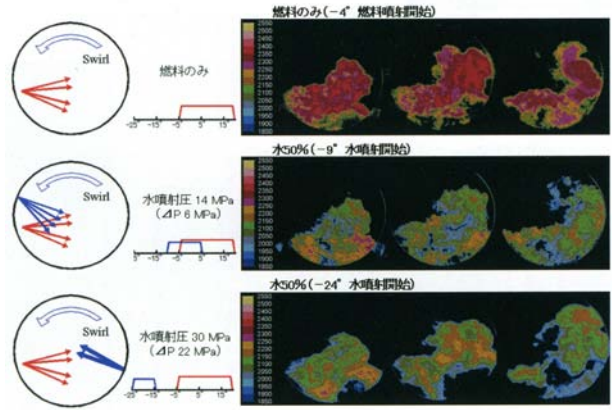


図 2.10 火炎温度^{2),16)}

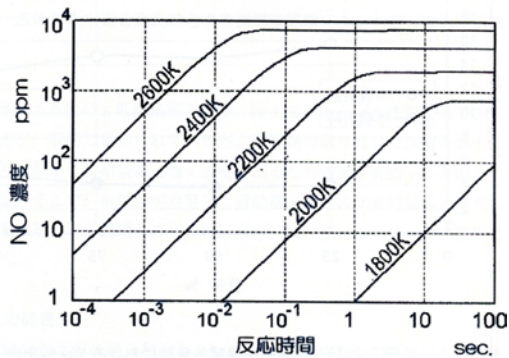
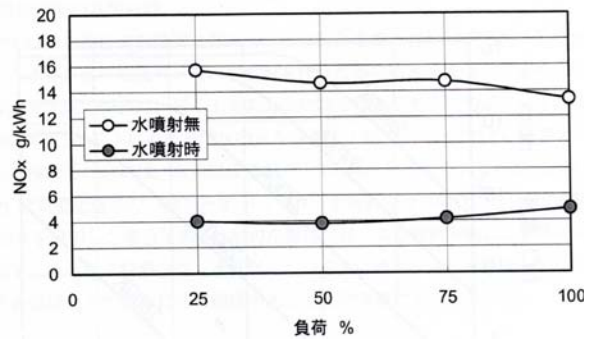
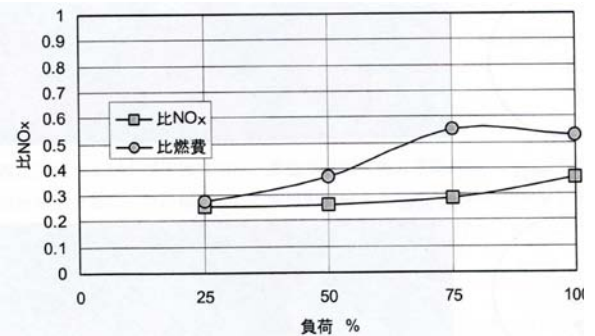


図 2.11 燃焼温度と NOx 生成量の関係²⁾



(a) 水噴射による NOx 低減効果



(b) 噴射による NOx と燃費の変化

図 2.12 水噴射の効果²⁾

(e) 吸気(給気)加湿システム^{16),17)}

掃気に水を噴射して掃気全体を加湿する方法であり、MAN Diesel & Turbo 社の SAM(Scavenging Air Moistening)などがこれに相当する。添加された水蒸気の大きな比熱により燃焼最高温度を下げることで、NOx の低減を図る。

図 2.13 に SAM システムの概要を示す。吸気加湿では多量の水が必要となるため、図のシステムでは過給機ブロワ圧縮機出口直後の空気にまず海水を噴射し、ある程度掃気の湿度を上げたうえで、その後清水で洗浄・冷却するシステムとなっている。これにより貴重な清水の使用量を最小限にすることができる。試験の結果、図 2.14 に示すように 40%の排出率低減が可能である。

掃気の加湿度(絶対湿度)は温度に依存し、加湿度を上げるには加湿前の掃気の温度を上げなければならない。そのため掃気温度上昇に伴う燃費の悪化を伴うが、効率的な廃熱(排熱)回収装置と組み合わせ、システム全体の効率を改善することにより補うことができる。

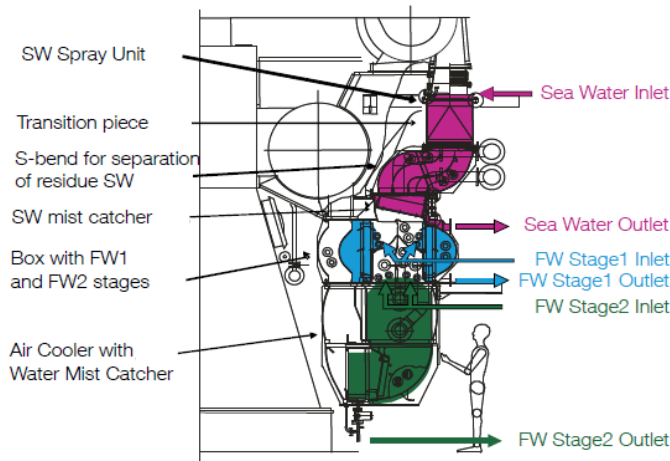


図 2.13 吸気(給気)加湿システムの例

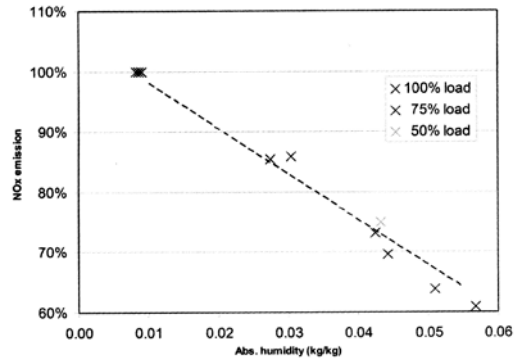


図 2.14 掃気湿度と NOx の関係²⁾

② EGR^{7,9,12,15-18)}

排気ガス再循環(EGR: Exhaust Gas Recirculation)は、燃焼ガスをシリンダ内に導き酸素濃度を下げ、また、熱容量を大きくして燃焼温度を下げることにより NOx 排出量の低減を図るものである。図 2.15^{7,9,12)}は EGR(高圧)システムの一例である。自動車用小型ディーゼルエンジンなどでは高圧燃料噴射装置(コモンレールシステム)などと組み合わせられてすでに実用化されているが、使用燃料の違いなどから船用ディーゼル機関についてはいまだ試験段階である。MAN Diesel & Turbo 社の陸上試験では、図 2.16¹²⁾に示すように EGR 単体で 80%の削減率を達成し、三次規制への対応可能性を示している。

掃気温度の上昇や燃焼ガス中のばいじん、PM、SOx 等による燃焼状況の悪化(黒煙発生等)、シリンダコンディションの悪化、燃費悪化などを避けるため、排気の清浄化や高過給技術等を併用しなければならない。排気の清浄化にはスクラバを用い、過給機には高効率・高圧力比使用のものを用いるが、スクラバの装備に当たっては洗浄水の処理設備も必要となる。また、EGR(高圧)システムでは排気タービン過給機入口の排気ガスをバイパスさせ、機関入口前すなわち排気タービン過給機圧縮機出口の掃気に再循環させるため EGR ブロウが必要となる。これらの関連装置の概要は図 2.17¹²⁾に示すとおりであるが、スクラバへの水供給のためのポンプ動力やブロウ動力も含め、今後 CO2 削減の観点から EGR システム全体の効率改善について留意しなければならない。なお、排気タービン過給機出口排気ガスを再循環させる低圧 EGR についても開発がすすめられている。図 2.18¹⁵⁾に低圧 EGR システムの一例を示す。

次項で解説するやはりスクラバの併用が不可欠な SCR と比較すると機器を比較的コンパクトに配置できることから、機関室構造への影響を小さくすることができると考えられている。図 2.19¹²⁾は MAN Diesel & Turbo 社が進めている就航船での実船テストに搭載されているシステムである。

なお、EGR は他の NOx 低減技術と組み合わせたシステムとして開発されることが多く、図 2.20¹⁸⁾に示す MAN Diesel & Turbo 社の EGR と SAM(Scavenging Air Moistening)を組み合わせたシステムや、後述する Wartsila 社の EGR と筒内直接水噴射を組み合わせた WaCoReG(Water Cooled Residual Gas)システムなどが提案されている¹⁸⁾。

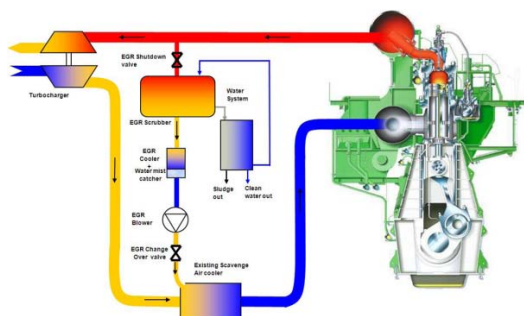


図 2.15 EGR(高圧)システムの例^{7,9,12,16)}

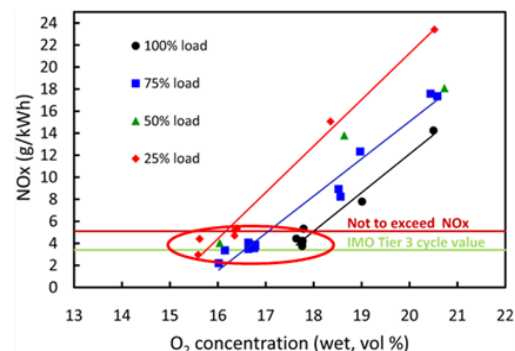


図 2.16 EGR 陸上試験結果¹²⁾

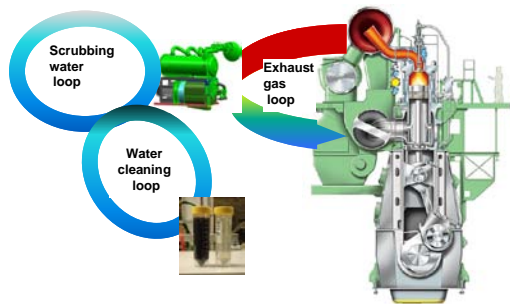


図 2.17 EGR 関連装置概要¹²⁾

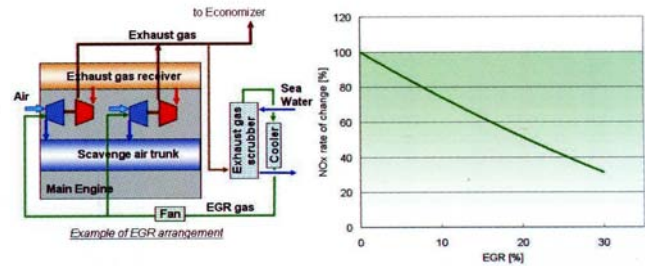


図 2.18 EGR(低圧)システムの例¹⁵⁾

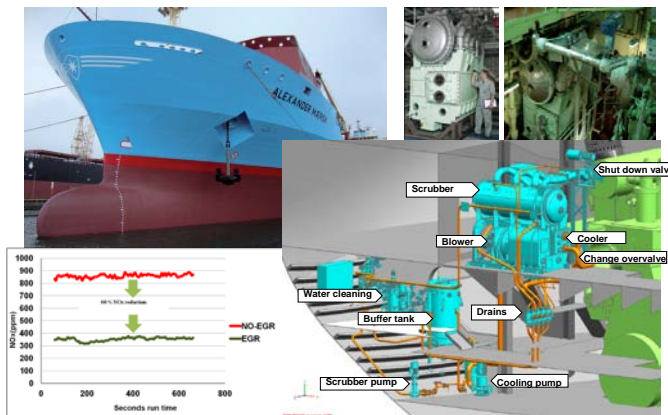


図 2.19 EGR 就航船試験装置概要¹²⁾

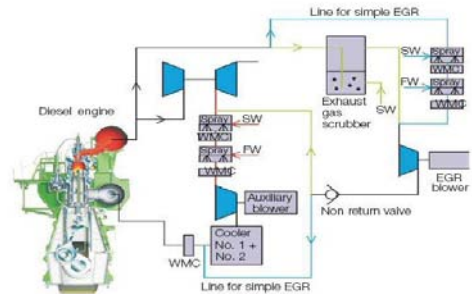


図 2.20 給気加湿システム(SAM)と EGR の組合せ¹⁸⁾

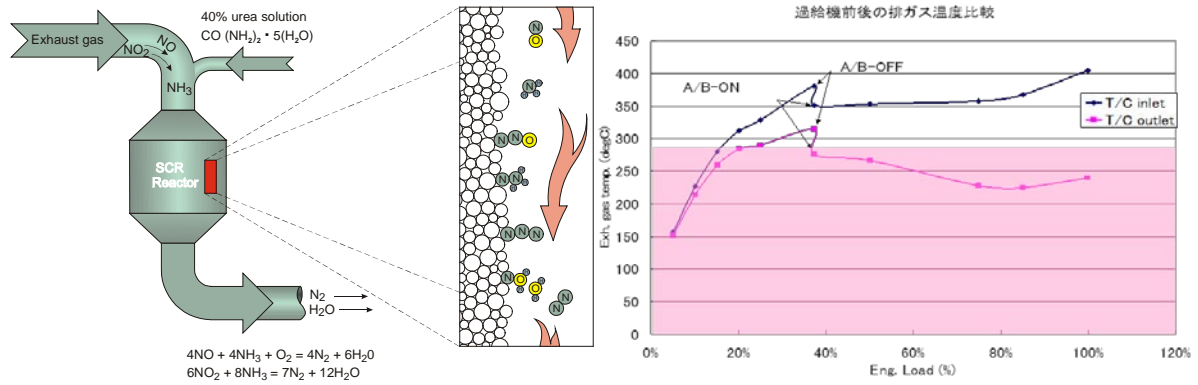
③ SCR(Selective Catalytic Reactor)^{6)-9),12),15)-20)}

SCR(Selective Catalytic Reactor (または Reduction))は、陸上の発電プラントではすでに広く実用化されており、アンモニアまたは尿素を還元剤とし、触媒上で NO_x を選択的に還元除去する脱硝装置である。アンモニアを使用する場合は液化アンモニアやアンモニア水を用いることとなるが、安全性の観点からは尿素を用い、その加水分解によりアンモニアを発生させることが望ましい。還元剤が高価であるためランニングコストは高くなるが、燃費の悪化なくして 80~90%程度の脱硝が可能である。図 2.21^{8),9),12)}は、SCR の原理および過給機前排気温度の概要を示すものである。

触媒の活性温度は通常 200~450℃であるが、燃料中に硫黄分が含まれている場合は硫酸や酸性硫酸が析出し触媒が目詰まりを起こすため、少なくとも触媒における排ガス温度 300℃以上で使用しなければならない。4 ストローク機関の場合は排気ガス温度は過給機後においてもこの温度を上回るが、熱効率の優れた大形 2 ストローク機関では図 2.21(b)⁸⁾に示すように、過給機後の排気ガス温度は 250℃程度と 300℃を下回る。したがって、SCR を過給機より前に設置しなければならず、機関動特性が損なわれる。Wartsila では 340℃以上を推奨しているが、高すぎても加水分解したアンモニアが燃焼するため 480℃以下に抑える必要がある¹⁷⁾。図 2.22¹²⁾は、MAN Diesel & Turbo 社の SCR 実船搭載例である。Wartsila 社も 1999 年 12 月 RoRo 船 3 隻による実船試験で 90%以上の削減率を達成している。

なお、過給機前に設置した場合でも低負荷時には触媒の活性温度を下回ること、また燃料中の硫黄分による問題は避けられないことから、SCR のコンパクト化と燃料中の硫黄分の除去が機関および SCR の信頼性を確保する前提になると考えられる。過給機後に SCR を設置する場合は、触媒のコンパクト化とともに触媒の予熱または排ガスの再熱技術の開発が必要となる。

前項の EGR と比較した場合、機関室スペースへの影響が大きい。しかし、EGR の場合、たとえば EGR 率 30%で 70%の削減を行う際 4g/kWh の燃費悪化を伴うのに対し、燃費の悪化なしに 80 以上の脱硝率が得られることから、今後のさらなる開発が望まれるところである。



(a) SCR の原理 9),12)

(b) 大形 2st 機関過給機前排気温度の概要 8),

図 2.21 SCR の概要 8),9),12)

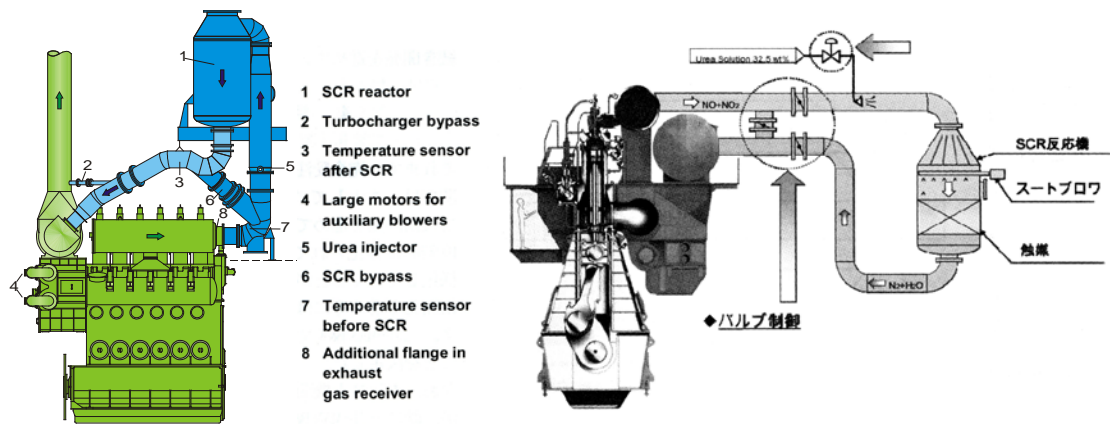


図 2.22 SCR 実船搭載例 9),12)

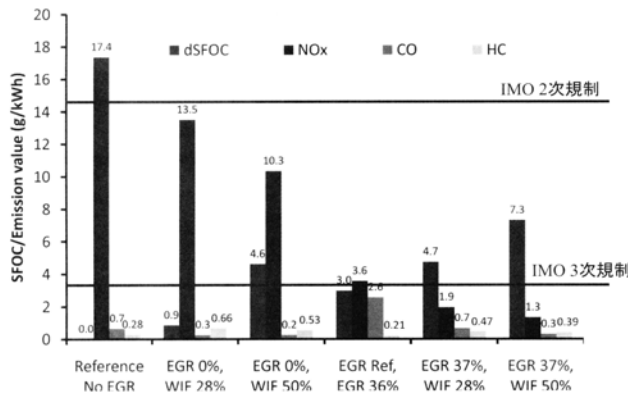


図 2.23 EGR と水エマルジョン燃料の併用効果 16)

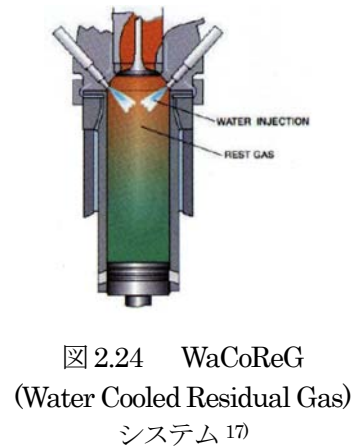


図 2.24 WaCoReG (Water Cooled Residual Gas) システム 17)

④ その他の NOx 低減装置 8),9),12) -18)

IMO NOx 三次規制に対する有望な対応技術として、水添加技術、EGR そして SCR が上げられるが、実際にはこれらの技術を組み合わせて適用することにより、それぞれの短所を補うことが可能となる場合がある。

(a) EGR と Emulsion Fuel の組み合わせ 16)

図 2.23¹⁶⁾は、MAN Diesel & Turbo 社の EGR 技術と水添加技術(WIF:Water In Fuel(EmulsionFuel))を組合わせた場合の NOx 低減効果に関する実験結果を示したものである。EGR 単体では EGR 率を増加すると燃焼が悪化し、CO や THC(Toatal Hydro Carbon : 排気ガスに含まれる燃料の未燃焼成分)が増大するが、水エマルジョン燃料を使用することにより燃焼が改善され、CO や THC の排出が大幅に削減されるという相乗効果が得られている。

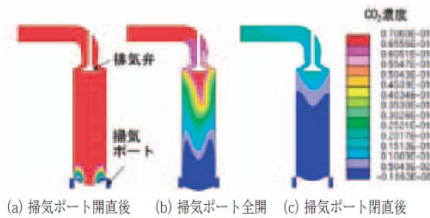
(b) WaCoReG(Water Cooled Residual Gas)システム¹⁷⁾

図 2.24 に概要を示すもので、後述する電子制御ディーゼル(RT-flex)において検討押されている方法である。筒内直接高圧水噴射(DWI)に、flex 機関の排気弁閉タイミング可変機能を用いた内部 EGR を併用したもので、NOx 削減率 70%を達成している。しかし、燃費の悪化が避けられず、課題が残っている。

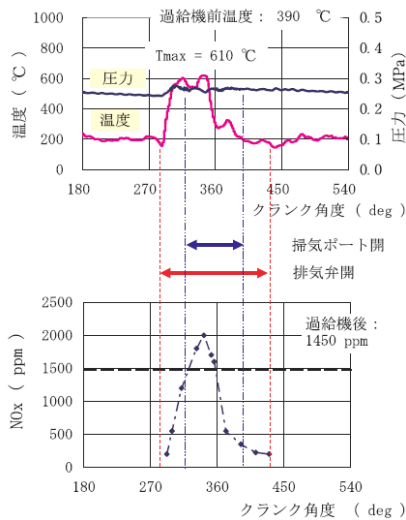
(c) EGS(Exhaust Gas Separation)システム^{8),18)}

ロングストローク化されたユニフロー掃気式大形 2st 機関では、シリンダ内の排気及び掃気の流れは層状に近い。図 2.25⁸⁾のシミュレーション及び実測結果に示すように、排気弁が開いた直後に排気される燃焼ガスは高温で NOx 濃度も高く燃焼後の排気ガスが主であるが、排気弁が閉じる直前のこれらはともに低く掃気が多く含まれていることが推定される。現状の排気方式では排気レシーバ内でこれらのガスが混合し温度も平均化してしまう。

そこで排気経路にスライド弁を装備し、低温の排気ガスは EGS レシーバを介して EGR に用い、高温の排気ガスのみ過給機へ導く仕組みとしたものが EGS(Exhaust Gas Separation)システムである。その概要を図 2.26⁸⁾に示す。低温排気による EGR 効果(NOx 低減機能)を付加しつつ、排気タービンへは高温の排気ガスのみ導くため排気温度は約 100°C上昇すると推測され、その結果、排熱回収効率の 1~2%程度の向上、過給機の小形化による所要動力の軽減、SCR の過給機後流への配置と触媒の小形化などが期待できる。また、排熱回収により CO2 削減効果も期待できるものである。

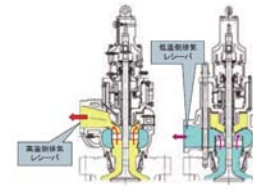


(a) シミュレーション結果

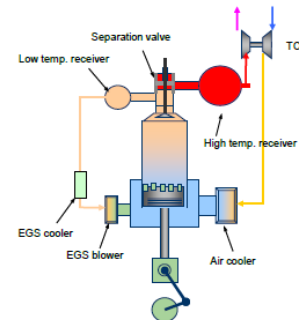


(b) 実測結果

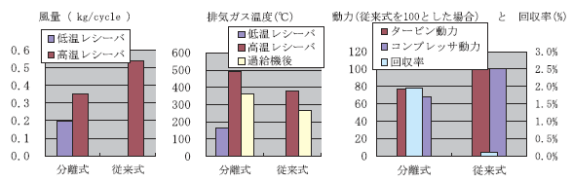
図 2.25 大形 2st 機関シリンダ内における排気及び掃気の流れ⁸⁾



(a) 排気分離システム断面図



(b) EGS システム概要



(c) 性能シミュレーション結果

図 2.26 EGS(Exhaust Gas Separation) システム^{8),18)}

2.2.2 4 ストローク機関に関する技術動向(全般)

4 ストローク機関の NOx 低減技術も、基本的には図 2.1 および図 2.2 示したような体系で開発されている。また船用ディーゼル機関への適用に際しての技術的課題についても同様である。ここでは 4 ストローク機関にみられる主要な対応技術を概説し⁶⁾、その後各社特有の技術開発状況について紹介する。

(1) 一次規制対応技術

① 燃焼に関するパラメータの最適化

これによる NOx の低減率は、概ね 30%程度までである。具体的には次のような技術が上げられる。

(a) 噴射時期遅延と圧縮比最適化

予混合的な燃焼を減らし高温燃焼領域を減らすことによるが、これだけでは燃費の悪化をとまうため、高

圧縮比化または高過給(給気圧の高圧化)と高圧燃料噴射(高噴射率)による急速燃焼を組合せることにより、サイクル効率を改善する。4サイクル中速エンジンによく用いられる手法であり、中には図 2.27 に示すようにディーゼルサイクル(定圧サイクル)に近い燃焼を狙ったものもある^{6),22)}。

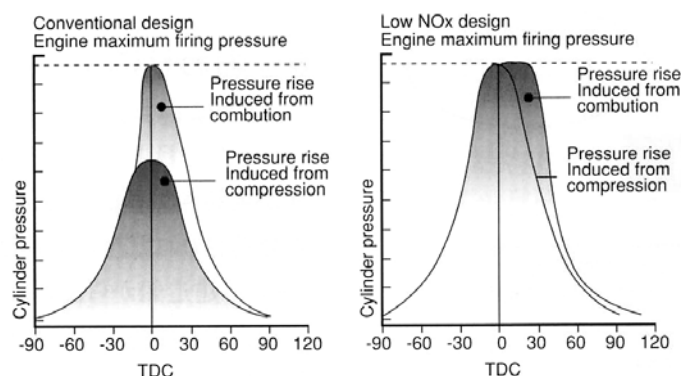


図 2.27 高圧縮比と燃料噴射時期遅延による低 NOx 化技術^{6),22)}

(b) 燃料噴射ノズル噴口の径・多噴口化と燃焼室と気流のマッチング

燃料噴射時期遅延による燃費悪化を避けるため、高圧噴射とともにノズル噴口の径・多噴口化ならびに気流とのマッチングを図ることにより、微粒化および空気との混合を促進し燃焼期間を短縮する。空気利用率を高めることにより酸素過剰の燃焼領域を減じ、また燃焼期間の短縮により高温滞留時間を減じ、NOx 生成を抑制する。気流をうまく利用することにより空気利用率を高めるばかりでなく、燃焼領域を燃焼ガスや未燃焼空気ですら適度に希釈することにより高温燃焼領域の形成を抑え NOx 生成を抑制する効果もある。

② 電子制御燃料噴射装置の採用

従来のポッシュ式燃料噴射装置に電子制御を追加したものやコモンレール式電子制御燃料噴射装置を採用する場合がある。電子制御により噴射時期や噴射パターンなどを最適化し、NOx を低減する技術がすでに確立されている²³⁾⁻²⁵⁾。さらにツインレールとすることにより燃料噴射率を制御し、NOx 及びスモークの低減と低燃料消費率の同時実現を狙った CRS(Common Rail System)も開発された²⁶⁾。

③ 水添加燃焼

水添加燃焼に関する基本的技術については、大形 2 ストローク機関に関する技術動向で述べたところと同様である。燃焼時に燃焼室内に水を噴射する水噴射システム、燃料油中に水をエマルジョン化して混合する手法、燃料-水層状噴射システムなどにより燃焼温度を低下させ、NOx を低減させる^{27),28)}。

給気加湿は、燃焼用空気に何らかの方法で水分を添加するもので、2 サイクル機関の SAM に対し四サイクル機関を対象として CAS(Combustion Air Saturation)や HAM(Humid Air Motor)などが開発・研究されている¹¹⁾。水添加燃焼と同様、燃焼温度の低下による NOx 低減が可能である。スプレーで燃焼用空気(給気)に水を加え飽和状態とした場合、NOx をほぼ半減することができるといわれている²⁷⁾。

④ ミラーサイクル

もともとミラーサイクルは、圧縮行程より膨張行程をより多くとることにより有効膨張行程を増大させ、熱効率の向上を図る技術である。2 ストローク機関のところでも紹介したが、実際には弁の開弁または閉弁時期をコントロールすることにより実現する。

4 ストローク機関の場合、吸気(給気)行程の途中で吸気(給気)弁を閉じる早閉じミラーサイクルと、圧縮行程の途中まで吸気(給気)弁を開いたままにしておく遅閉じミラーサイクルがある。前者の早閉じミラーサイクルの場合、断熱膨張で吸気(給気)が冷却されるため、燃焼温度の低下による NOx 低減効果が大きい。この方法を、Dry Method ともいい、研究が進められている^{12),27),29),30)}。図 2.28 に早閉じミラーサイクルの例を示す。

従来の NOx 低減技術にミラーサイクルを組み合わせることで、現状から 25~30%の NOx 低減が可能であるとされている^{21),27)}が、ミラーサイクル化のみでは実圧縮比が低下し給気量も減少するため、高圧力比形の過給機の装備などが必要となる²⁹⁾。

⑤ その他

その他の燃焼チューニングとして爆発度の最適化、タペットとプッシュロッドの間に油圧機器を備えることによる部分負荷での空気過剰率制御システムなどがある。また、使用燃料からのアプローチとして DME ディーゼルエンジンの研究が盛んに行われている³⁰⁾。

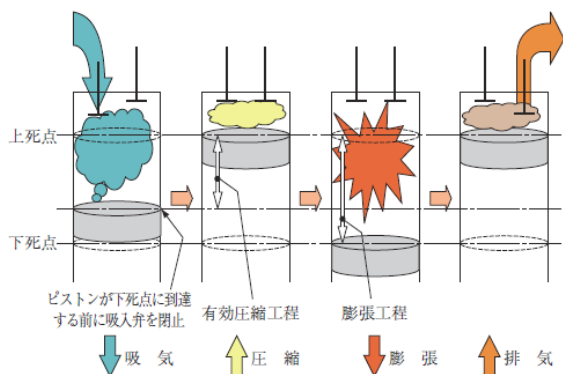


図 2.28 早閉じミラーサイクルの例²⁹⁾

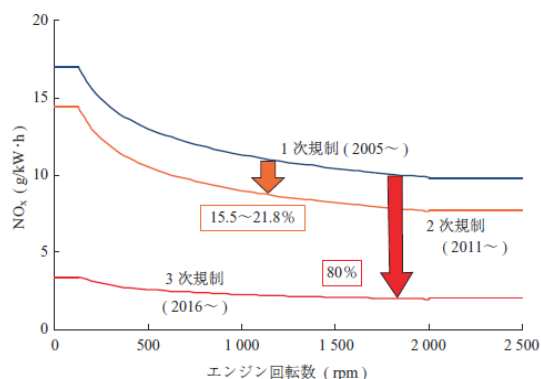


図 2.29 IMO NO_x 規制値²⁹⁾

(2) 二次規制対応技術

4 ストローク機関が多くを占めるは中・高速機関についての NO_x 規制は、図 2.29²⁹⁾に示されるように強化されることとなっている。各メーカーも(1)で述べた対応技術の延長上、すなわち機関本体での対応を基本としているが、来る三次規制への対応も念頭に、図 2.30³¹⁾に示すような燃費とのトレードオフ問題の解決に力を注いでいる。

① ミラーサイクルと高圧力比過給機の組合せ^{29),31),32)}

給気量の減少から高出力を得ることが困難とされていたため、これまで一部の SI(Spark Ignition)機関(ガソリンエンジン)でしか用いられていなかったミラーサイクルが広く用いられるようになった。これは過給機技術の発達により過給機の高圧力比化が加速したためである。早閉じミラーサイクルによるシリンダ内の温度低下の例を図 2.31³¹⁾ に示す。

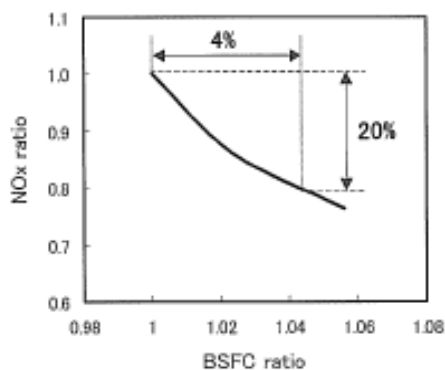


図 2.30 NO_x 低減と燃費とのトレードオフ³¹⁾

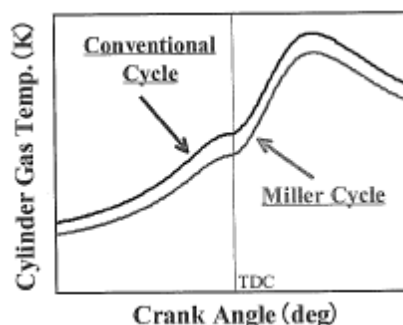


図 2.31 早閉じミラーサイクルによるシリンダ内の温度低下の例³¹⁾

② 噴射系の最適制御^{32),33)}

ミラーサイクルとともに、圧縮比の増大、高圧力比過給機の採用などを行い、さらに高圧・高噴射率噴射系により噴射開始時期遅延と噴射期間の短縮を図り、上死点付近でのディーゼル燃焼(定圧燃焼)を実現、理論熱効率を向上による燃費改善を図っている。図 2.32^{32),33)}は新潟原動機の開発例であるが、これらの技術により主要機種は IMO 二次規制をクリアしている。中速ディーゼル機関 28AHX の場合、ミラーサイクルの採用に当たっては低負荷域と高負荷域で吸気弁の開閉タイミングを最適に調整する VIVT(Variable Intake Valve Timing)機構を採用するとともに、過給システムの改良を行った。これは過給機システムにエアバイパスとウエストゲートを設け、全負荷域で過給機を最大限活用することを目的としたものである。その概略を図 2.33³⁴⁾に示す。低負荷時は過給空気を過給機の排気入口に戻して過給機の回転速度を確保し、高負荷時は過剰な排気を過給機を通さず排気し過給機の回転数を適正に維持するものである。

③ 電子制御燃料噴射系³¹⁾

噴射系の自由度が増せば In-Engine(機関本体)におけるチューニング等による排気規制対応の可能性が大きくなることから、様々な電子制御燃料噴射系が実用化されている。代表的なものとしては電子制御ガバナ EUJ(Electronic Unit Injector)、EUP(Electric Unit Pump)、コモンレール(Common Rail)がある。図 2.34³¹⁾に EUP 式電子制御燃料噴射装置の例を示す。燃料噴射ポンプ上部に設けた電磁弁内のスプール弁の開閉により噴射時期と噴射量の制御を行う。燃料高圧経路のムダ容積が少ないため、機械式噴射装置と比較して高負荷

域で高い噴射圧力が得られる。また、定格以外の実用負荷領域において噴射時期を最適調整することにより燃費低減も可能である。従来の機械式と比較して 2.5%程度の燃費改善が得られ、燃費同等の場合は NO_x を 10~15%低減できる。

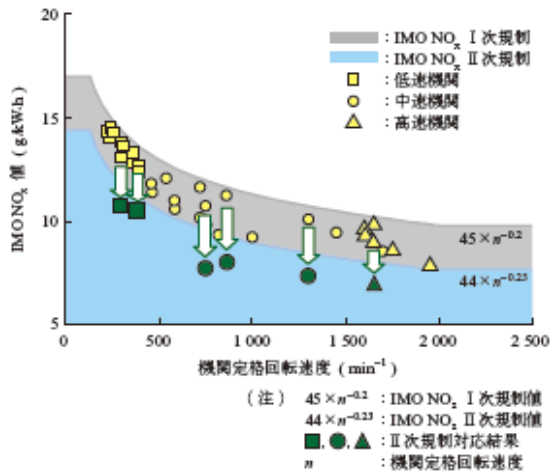
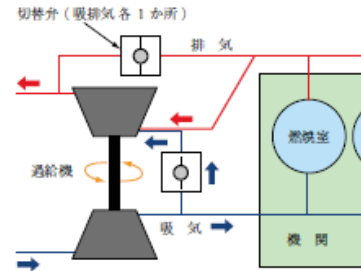
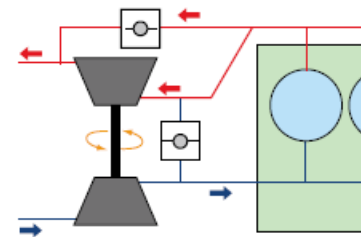


図 2.32 新潟原動機の二次規制対応状況^{32),33)}



(a) エアバイパスシステム



(b) ウェストゲートシステム

図 2.33 エアバイパスとウェストゲート³⁴⁾

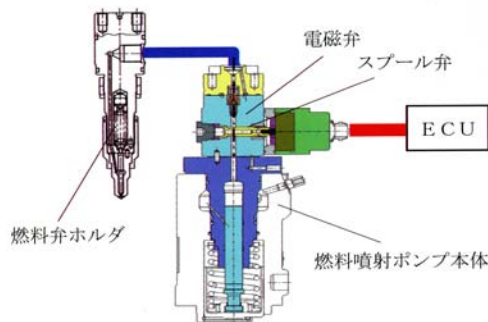


図 2.34 EUP 式電子制御燃料噴射装置の例³¹⁾

(3) 三次規制対応技術

2 ストローク機関と同様、一次および二次規制の延長技術のみでの対応が困難であることから、さらなる対応技術の開発が求められている。代表的なものとして、EGR(Exhaust Gas Recirculation)と SCR(Selective Catalytic Reactor (または Reduction))があげられる。EGR については自動車用ディーゼル機関において実用化され、また SCR については陸上の発電用定置機関やトラック等のディーゼル機関ではすでに実用化されているが、使用燃料中の硫黄分の多い船用ディーゼル機関の実用化については課題が残っている。

① EGR(Exhaust Gas Recirculation)^{31),35),36)}

EGR は三次規制対応の In-Engine 技術として開発が進められている。排気ガスを一部給気系に還流することにより、燃焼室内の酸素濃度を下げるとともに、熱容量の増加により燃焼ガス温度を低下させ、NO_x の低減を図るものである。自動車用エンジンでは NO_x の低減とポンピングロスの低減を目的として、まずガソリン機関で採用された。ディーゼル機関では排ガス中の微粒子 PM(Particulate Matter)によるシリンダ内各部摩耗の問題があり採用が遅れたが、コモンレール噴射系の採用による PM 低減が可能となった今、広く採用されている。

EGR の分類および具体的な方法を図 2.35^{31),36)}に示す。排ガスを排気経路から分流して給気経路に戻す外部 EGR と、バルブタイミングコントロールにより燃焼ガスをシリンダ内に滞留させる内部 EGR に大きく分類さ

れる。外部 EGR は EGR バルブ、VGT(Variable Geometry Turbine)、スロットルバルブなどの装置と組み合わせきめ細かい EGR 率コントロールが可能で、自動車用機関に広く採用されている。Cooled EGR は熱交換器が必要となるが、シリンダ内の温度低減効果が大きく、NOx 削減効果も大きい。

排ガスを給気経路に戻す際、過給機コンプレッサの上流側に戻す低圧経路(Low Pass)と、下流側に戻す高圧経路(High Pass)がある。高圧経路は過給圧が上昇した際 EGR 率が制限される場合があるが、一方の低圧経路では高い EGR 率を維持できるものの過給機やインタークーラの汚損が問題となる。現状では高圧経路が一般的である。図 2.36³⁶⁾に低圧経路と高圧経路の概要を示す。

船用ディーゼル機関については外部 EGR はほとんど適用されておらず、内部 EGR を適用した事例がみられる^{31),35),36)}。内部 EGR は外部 EGR と比較して、オイルの早期劣化、異常摩耗、硫酸腐食によりピストンリング、ライナ、動弁系部品の損傷などこれらの信頼性・耐久性の問題が少ない。図 2.35 に示すように、内部 EGR には給気行程で排気弁を開いてガスを再導入する排気弁再啓開方式と、排気行程で吸気弁を開き燃焼ガスを吸気ポートに逆流させる吸気弁事前啓開方式、そして吸排気弁のオーバーラップを調整する方法がある。

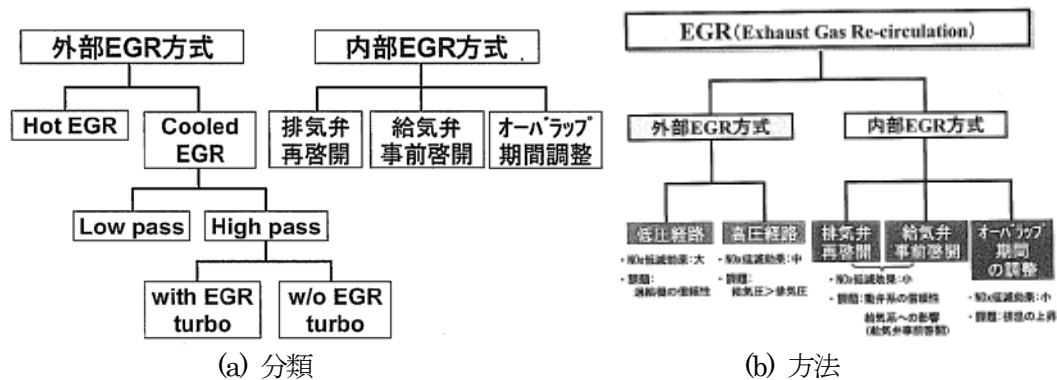


図 2.35 EGR システム^{31),36)}

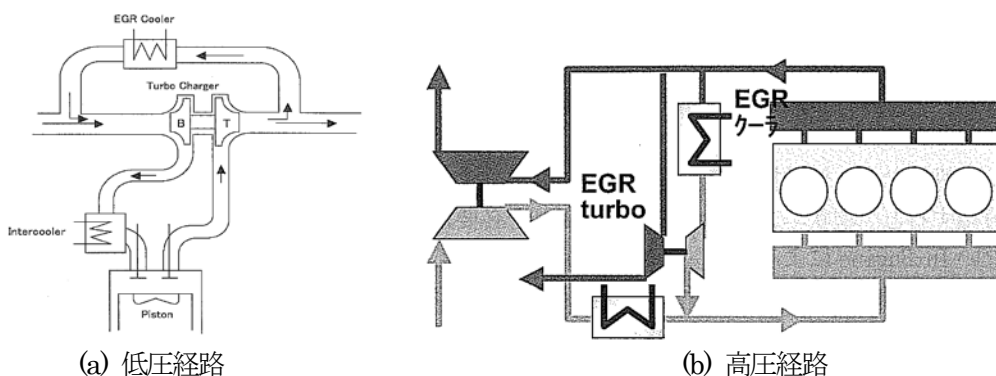
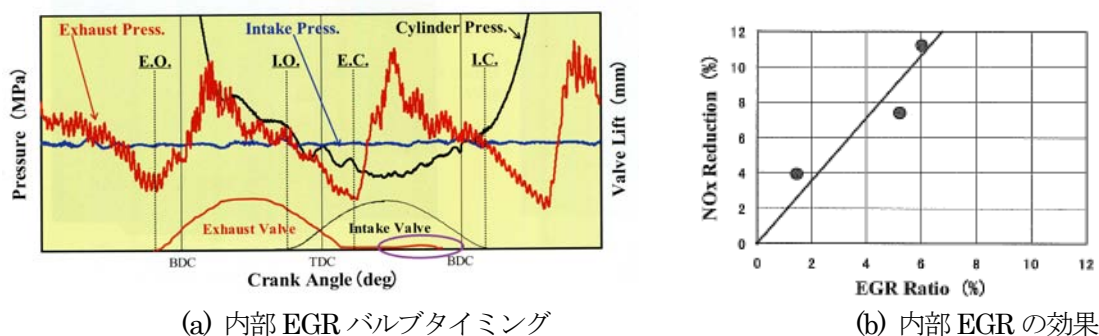


図 2.36 EGR 低圧経路と高圧経路³⁶⁾

図 2.37^{31),36)}に排気弁再啓開方式の例とその効果を示す。EGR 率 5%で NOx 低減率は約 10%であり、同じ EGR 率の外部 EGR での NOx 低減率が約 20%であることと比較すると、他の対応技術との組み合わせなどの検討が必要と考えられる。



(a) 内部 EGR バルブタイミング

(b) 内部 EGR の効果

図 2.37 内部 EGR^{31),36)}

② SCR(Selective Catalytic Reactor (または Reduction))^{31),33),35)}

SCR のシステム、機関室スペースの問題等の設置に関する課題などは、基本的には 2 ストローク機関の場合と同様である。ただし 2 ストローク機関と比較して排気温度が高いことから、適用はしやすいと考えられる。図 2.38^{33),35)}に SCR の基本システムと配置例を示す。

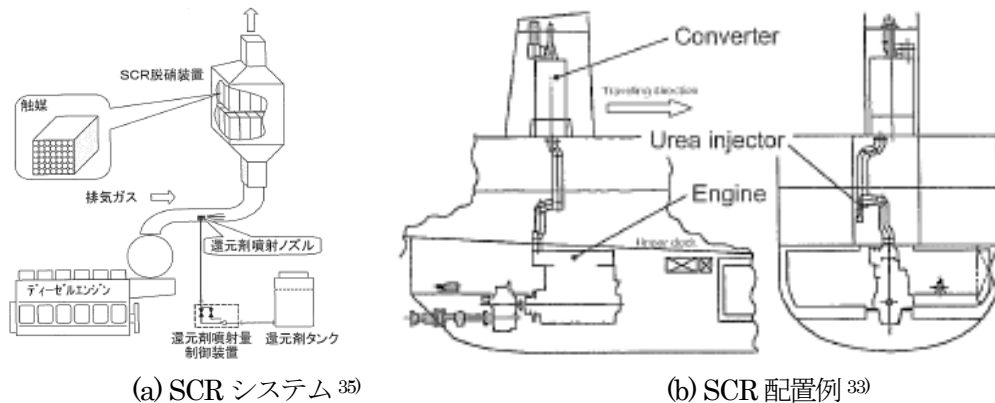


図 2.38 SCR^{33),35)}

③ 燃料の転換^{8),33),37)-39)}

メタンを主成分とする LNG(天然ガス)などを燃料とするガスエンジンは、陸上の発電設備やコージェネレーション設備として広く実用化されており、船用としては北欧等での実用化が進んでいる。このようなガスエンジンの燃焼方式は、大きく分けると表 2.2³⁷⁾のようになる。左端の SI(Spark Ignition)は、吸気管において噴射されたガスは希薄混合気としてシリンダ内に吸入され、主燃焼室上部の PCC(Pre-Combustion Chamber : 予燃焼室)に別途導入され形成された適正濃度の予混合気を火花点火し燃焼させるものである。中央の DF(Dual Fuel)は図 2.39³⁸⁾に示すような、ガス燃料とともに従来と同じような重油等の燃焼(専焼)も可能としたもので、吸気管において噴射され形成された希薄ガス混合気を主燃料とするときは、パイロット噴射弁から少量噴射する重油等の自発火によりガス燃焼を確立させる。右端の GI(Gas Injection)は、高圧に加圧したガス燃料を燃焼室内に噴射し重油等の噴霧と同様の状態となった状態でパイロット噴霧等により着火させるものである。GI の場合は、図 2.40³⁹⁾の右端に示すように、ガスの着火をグロープラグで行うものもある。それぞれの特徴は表 2.2 および図 2.40 に示すとおりであるが、大形 2 ストローク機関をベースとした造水プラントなどのガスディーゼル機関では GI が用いられ、船用中速ディーゼルをベースとしたガス機関では DF 方式が採用されることが多い。DF 方式のガスエンジンは、希薄混合気を用いることから燃料リッチによる高温場が生成しにくいことなどから、図 2.41³³⁾に示すように NOx の排出量はディーゼル機関と比較してかなり低い値となる。また、低炭素燃料であることから CO2 の排出量も 20%強低減することが可能であることから、NOx 対応技術としてばかりでなく、GHG 削減技術としても有望である。ただし现阶段ではインフラ整備の問題、負荷急変による異常燃焼の問題、負荷状況によっては NOx 低減にはさらに EGR や SCR を組み合わせることが必要であることなどから、航洋船への適用には課題がある。参考として MAN Diesel & Turbo 社の ME-GI エンジンの運転モードと規制対応状況を、図 2.42⁸⁾に示す。

表 2.2 Gas Engine³⁷⁾

	SI(port inj. premixed)	DF(port inj. premixed)	GI (dirt inj. diffusion)
Adv.	Clean emission (CO ₂ , NO _x , SO _x , PM)	< ditto except low load Fuel redundancy Stable ignition at starting	Robust combst. Low UHC < ditto < ditto
Dis adv.	Narrow stable combst. Window UHC	< ditto Low efficy at Diesel < ditto Switch over of fuel Care of Lub oil Restricted Gas operation at low load	High NO _x , SO _x , PM < ditto

A design of dual fuel engine (medium-speed engine)

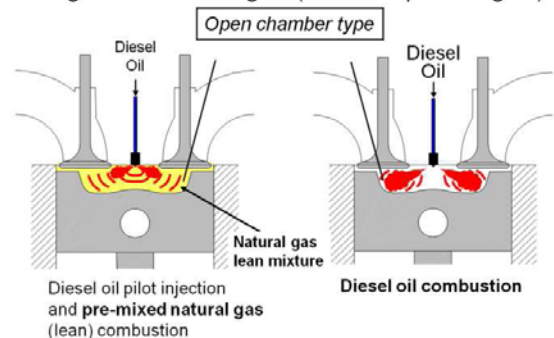


図 2.39 Dual Fuel Engine³⁸⁾

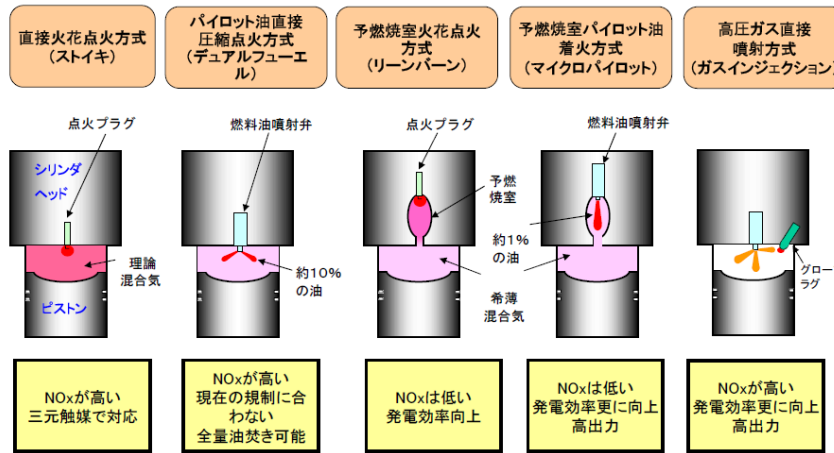


図 2.40 ガスエンジン³⁹⁾

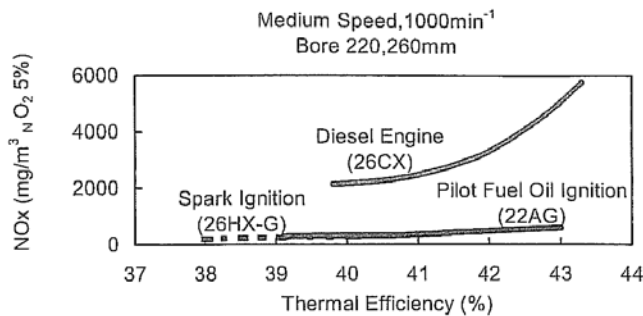
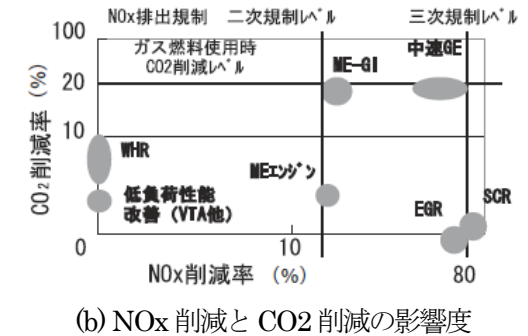
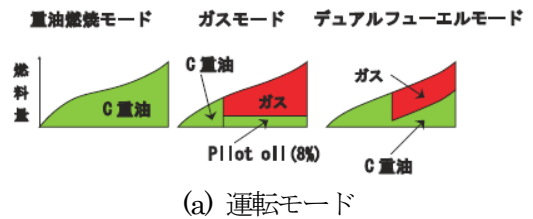


図 2.41 ガスエンジンの NOx 排出状況³³⁾

図 2.42 ME-GI エンジンの運転モードと性能⁸⁾

(4) 各種技術による NOx 低減率

いずれの技術も現在さらに研究開発が進んでおり、またこれらの技術の組み合わせによりさらなる低減が可能であると考えられる。参考として現段階での各要素技術による NOx 低減率を表 2.3⁶⁾および図 2.43^{1),5)}に示す。

表 2.3 各種 NOx 低減要素技術による NOx 低減率⁶⁾

NOx低減技術	NOx低減率 [%]	燃費増加 [%]	備考
燃料噴射時期遅延	10~20	1.5~3.0	2~4° CA遅延
高圧縮比・噴射時期遅延	25~40	0~2.0	Pmax/Pcomp=1.1~1.0
水エマルジョン燃料化	40~50	0~1.5	W/F=40~60v%
シリンダ内直接水噴射	50~60	1.0~2.0	W/F=60~100v%
燃料・水層状噴射	40~50	0~1.5	W/F=40~60v%
選択接触還元 (SCR) 法	90前後	0	NH ₃ /NOx=約100v%

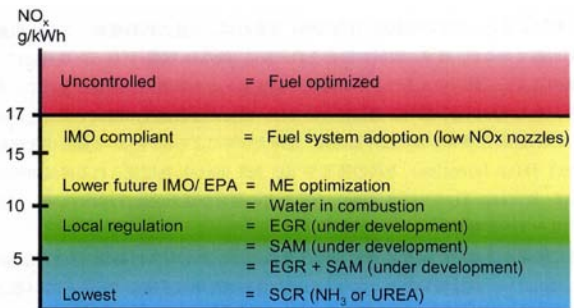


図 2.43 NOx 削減手法と NOx 排出量の関係 (MAN B&W 機関)^{1),5)}

【参考文献】

- 1) 坂部, 大形 2 サイクル船用エンジンの排ガス規制対応技術, エンジンテクノロジー, No.44(2006年6月), 20-25.

- 2) 平成17年度船舶排出大気汚染物質削減技術調査報告書, 日本マリンエンジニアリング学会, (平成18年3月)
- 3) Emission Control MAN B&W Two-stroke Diesel Engines”, MAN B&W Diesel A/S Technical Paper , http://www.manbw.com/article_004458.html.
- 4) 林潤一, 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, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第39巻第12号(2004年12月).
- 5) 杉原正英, 環境対応ディーゼル機関’三菱UEC Eco-Engine”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第39巻第12号(2004年12月).
- 6) 坂根, 船中・低速ディーゼルエンジンの NOx 低減技術, エンジンテクノロジー, No.09(2000年7月), 22-23.
- 7) 小池・田中, 船用ディーゼルエンジン, Hitz 技報, 第70巻第1号(2009年11月), 35-39.
- 8) 田中, ディーゼルエンジン—環境対応関連の技術開発—, 三井造船技報, No.200(2010年6月), 35-40.
- 9) 馬場・中尾, 船用大型2サイクル機関でのSCRによる排ガス対策, 日マリ学会誌, 第46巻第6号(2011年), 20-25.
- 10) 梶原ほか, 主機の環境対策(2), らん, 第57号(平成14年10月), 6-10.
- 11) K. Nakano et al., NOx Reduction Test Results on a Two-Stroke Low Speed Diesel Engine, 21st CIMAC Conference Paper, 1995, D20.
- 12) 近藤・島田, 船用低速(MAN型)機関におけるIMO規制対応の現状及び将来技術, 日マリ学会誌, 第46巻第2号(2011年), 5-9.
- 13) 特集「IMO規制対応の現状及び将来技術」, 日マリ学会誌, 第46巻第2号(2011年), 1-32.
- 14) 特集「船舶起源排気エミッションの低減技術」, 日マリ学会誌, 第46巻第6号(2011年), 1-54.
- 15) 柳, 船用低速(UE型)機関におけるIMO規制対応の現状及び将来技術, 日マリ学会誌, 第46巻第2号(2011年), 15-18.
- 16) 島田, 水技術(水エマルジョン, 水噴射, 吸気加湿等)によるNOx低減技術, 日マリ学会誌, 第46巻第6号(2011年), 26-31.
- 17) 森山, Wartsila 船用低速機関におけるIMO規制対応の現状及び将来技術, 日マリ学会誌, 第46巻第2号(2011年), 10-14.
- 18) 若月, 2ストローク低速ディーゼル機関の大幅NOx低減技術, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第43巻第6号(2008年11月), 36-43.
- 19) 田中・大津, 大型船用ディーゼル機関の特長と新技術, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第36巻第9号(2001年9月), 85-90.
- 20) G.Hellen, Controlling NOx Emissions at Marine Installations, Proc. of International Conference on Technologies for Marine Environment Preservation, 1995, 819-816.
- 21) J. Kytola, Development of Wartsila 4-stroke engine range, CIMAC 京都 2004 Paper No.123.
- 22) S.Kuramoto ほか3名, Improvement of the Low Load Performance of High-speed Engine by Common Rail System, ISME 東京 2005.
- 23) K. Goi ほか3名, New DAIHATSU 8DC-32 4-Stroke Medium Speed Diesel Engine, ISME 東京 2005.
- 24) S. Namekawa ほか2名, Development of New Common Rail Fuel Injection System for the Latest Developed MHI MARK-30B Engine, CIMAC 京都 2004, Paper No.113.
- 25) D. Paro, Successful Method of Reducing Air Pollution of Large Four-Stroke Marine Engines, ISME 東京 2005.
- 26) 三菱重工ニュース第3981号, 2002年2月13日.
- 27) P. Eilts ほか1名, Possibilities and perspectives of combustion system development using electronically controlled fuel injection systems, CIMAC 京都 2004, Paper No.138.
- 28) 川上, 排ガス規制と4ストローク中速機関の対応, 日マリ学会誌, 第43巻第6号(2008年11月), 30-35.
- 29) 高圧力比形AT14過給機の開発, IHI 技報, 第50巻第1号(2010), 61-65.
- 30) 増田ほか, DME大型ディーゼルエンジン発電システムの開発, 日マリ学会誌, 第40巻第6号(平成17年).
- 31) 古東, ヤンマーにおけるIMO規制対応の現状及び将来技術, 日マリ学会誌, 第46巻第2号(2011年), 19-22.
- 32) 田貝・三村・後藤, 省燃費・低NOxを同時実現する船舶排出ガス規制対応技術の開発, IHI 技報, 第50巻第4号(2010), 39-45.
- 33) 田貝・三村・後藤, 新潟原動機におけるIMO NOx規制対応技術, 日マリ学会誌, 第46巻第2号(2011年),

23-28.

- 34)永澤・今井・山本・加藤・園部, 新しい環境規制に対応した次世代中速ディーゼル機関 28AHX, IHI 技報, 第 50 巻第 3 号(2010), 84-87.
- 35)花本, 船用中速ディーゼル機関における IMO 規制対応技術, 日マリ学会誌, 第 46 巻第 2 号(2011 年), 29-32.
- 36)古東, 船用機関における EGR(排ガス再循環)による NO_x 低減技術, 日マリ学会誌, 第 46 巻第 6 号(2011 年), 6-11.
- 37)Shinji Yasueda, THE TECHNICAL CHALLENGES OF GAS ENGINES FOR LNG FUELLED SHIPS, Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (ISME) October 17-21, 2011, Kobe, Japan.
- 38)Koji TAKASAKI, JAPANESE NATIONAL PROJECTS FOR GLOBAL ENVIRONMENTAL PROTECTION OF THE MARITIME SECTOR, Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (ISME) October 17-21, 2011, Kobe, Japan.
- 39)後藤, 小型デュアルフェューエルディーゼル機関の開発, 第 2 回海事三学会合同シンポジウム講演資料, (2011 年 7 月).

3 SOx 排出規制と燃料性状の動向

船舶からの SOx 排出規制については燃料中の硫黄分の規制が基本となることについては、第 1 章の規制動向で解説したとおりである。低硫黄燃料(Low Sulfur Fuel Oil : LSFO)の需要が高まるとともに、さらなる規制強化に対しては LSFO での対応に加えてバンカー(残渣)油(Marine Heavy Fuel Oil : HFO (いわゆる C 重油))から留出油(Marine Diesel Oil : MDO (いわゆる A 重油)または Marin Gas Oil : MGO (いわゆる軽油))への転換も必要とされている。

原油から各種の油を精製する工程は連続工程であり、特定の油種のみ得率を変更することはできない。したがって得られた別油種をさらに分解装置等によって処理し所要の油種を生産することになる。このような状況では残渣油を構成する成分が多様になり燃焼性の悪化等、使用に当たって注意を要するものも増してくるとともに、設備投資等にかかるコストの燃料価格への転嫁等の問題も生じてくる。また日本の場合、税法の関係から A 重油には C 重油などが添加されるため、留出油である A 重油を使用する機関であっても、燃焼性の悪化等 C 重油で懸念される問題点について認識しておくことが必要となる。

ここでは燃料油にかかる現状と、今後の問題点について解説する¹⁾⁹⁾。

3.1 流通原油の性状^{1),3)}

表 3.1 から表 3.3 に原油の分類と特徴、硫黄分そして産油国別の製品得率を示す。日本はこのうちサウジアラビア、アラブ首長国連邦(UAE)などの中東系原油と、インドネシアなどの南方系原油を主として輸入している。中東系は硫黄分が多く、パラフィン分が少ないので流動点が低い。南方系は硫黄分が少なく重油留分はそのまま低硫黄重油となり、軽油留分はセタン価が高くディーゼル機関の燃料として燃焼性に優れる。

表 3.1 原油の分類と特徴¹⁾

分類	種類	特徴
製品得率による分類	軽質原油	ガソリン、灯油および軽油等の白油の成分を多く含み、密度は小さい。 付加価値が高いので原油価格は高い。アラビアン・ライト等
	重質原油	C 重油など黒油の成分を多く含む。
硫黄分による分類	低硫黄原油	硫黄分が少ないので、低硫黄軽油や重油の製造に適している。 価格が高い。スマトラ・ライト、欧州原油
	高硫黄原油	硫黄分が多く、価格は相対的に安い。カフジ原油等
組成による分類	パラフィン基原油	パラフィン系炭化水素(ワックス分)を多く含んだ原油で、灯油は燃焼性が良好で、軽油はセタン価が高い。高級潤滑油とワックスの製造にできしている。しかし、ガソリン分のオクタン価は低く、重油の流動点は高い。 スマトラ・ライト原油、大慶原油等
	ナフテン基原油	ナフテン系炭化水素を多く含んだ原油で、アスファルトが多く得られる。ガソリンはオクタン価が高いが、灯油は燃焼性が悪く、軽油はセタン価が低い。重油の流動点は低い。メキシコ、ヴェネズエラの原油
	混合基原油	パラフィン基原油、ナフテン基原油の中間の性状を持つ。灯油の品質は良好だが、ガソリンのオクタン価はさほど高くない。 アラビアライト原油、カフジ原油等

表 3.2 原油の硫黄分比較³⁾

地域	国名	原油名	硫黄分質量%
中東	サウジアラビア	アラビアン・ライト	1.73
	サウジアラビア	アラビアン・エクストラ・ライト	1.20
	イラン	イラニアン・ヘビー	1.78
	UAE	マーバン	0.80
	UAE	アッパー・ザクム	1.78
	クウェート	クウェート	2.74
欧州	イギリス	ブレント	0.37
	ノルウェー	エコフィスク	0.14
アフリカ	ナイジェリア	ボニー・ライト	0.13
	リビア	ズエチナ	0.24
アジア	インドネシア	スマトラ・ライト	0.07
	マレーシア	タピス	0.03

表 3.3 原油の性状と製品得率¹⁾

原油名(産油国)		スマトラ・ライト(インドネシア)	イラニアン・ヘビー(イラン)	アラビアン・ライト(サウジアラビア)	ドバイ(UAE)	イスムス(メキシコ)
原油性状	密度 kg/m ³	847	871	860	872	843
	流動点 °C	+35	-15	-25	-15	-15
	硫黄分 %m/m	0.07	1.71	1.73	2.00	1.20
	残炭分 %m/m	2.7	4.8	4.1	4.3	3.3
得率 (%)	ガソリン	9.5 %	12.6 %	18.3 %	18.0 %	21.9 %
	灯油	13.8 %	14.1 %	19.0 %	18.1 %	19.7 %
	軽油	15.1 %	14.0 %	15.0 %	15.0 %	18.0 %
	常圧残さ油	59.0 %	49.0 %	44.5 %	43.7 %	37.8 %

3.2 精製方法^{1),3)}

原油から石油製品を生産する代表的な流れを図 3.1¹⁾に示す。A 重油は軽油留分に C 重油などをブレンドして生産する。

3.2.1 常圧蒸留装置(トッパー)¹⁾

加熱炉で約 320°C に加熱されてから、連続的にほぼ大気圧の蒸留塔に張り込まれる。それぞれの沸点範囲に応じてナフサ(ガソリン)、灯油、軽油の各留分が中間の抜き出し栓から取り出される。残渣分はそのまま重油基材として使用されることはまれで、次の減圧蒸留装置でさらに軽質留分が取り出される。

3.2.2 減圧蒸留(フラッシング)装置(バキューム)¹⁾

内部はほぼ真空に近く、トッパーで分留できなかった重質軽油留分が取り出される(減圧軽油)。底部に残った残渣油(減圧残油)はアスファルテンや残炭分が主成分で、舗装用アスファルトやC重油のブレンド基材として用いられる。

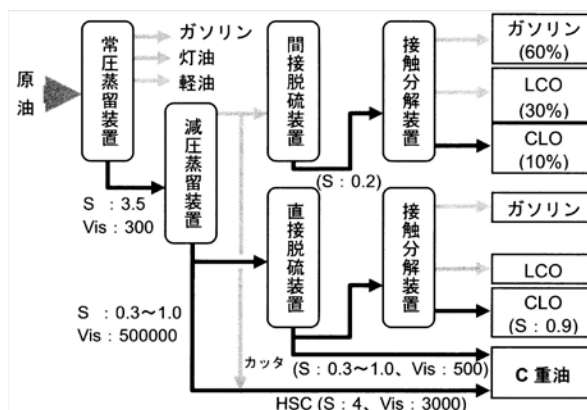


図 3.1 石油精製(脱硫・FCC)のフロー¹⁾

3.2.3 脱硫装置¹⁾

表 3.4 に脱硫装置の種類を示す。図 3.1 に示すように減圧軽油を脱硫する装置が間接脱硫装置で、減圧軽油脱硫装置、重油間接脱硫装置、間脱、アイソマックス(Isomax)などともよばれる。これに対し常圧および減圧蒸留装置の残(渣)油の脱硫装置が直接脱硫装置で、残油脱硫装置、直脱、RDS(Residue Desulfurization)、VRDS(Vacuum Residue Desulfurization)ともよばれる。

低硫黄重油を得るためだけに脱硫装置を用いることはなく、次の流動接触分解装置(FCC)においてさらにガソリンなどの軽質留分を得るための前処理装置として用いられる。これは原料中に硫黄分が含まれると FCC の性能低下および劣化が激しくなるためである。また、脱硫の過程でも原料の一部が分解しナフサ、灯油、軽油留分となるため、重質油分解の効果もある。

表 3.4 脱硫装置の分類¹⁾

	内容、目的
ナフサ水素化精製	ナフサの悪臭を防止し、ガソリン製造装置の接触改質装置の触媒活性を保ち、製品ガソリンの硫黄分を下げる。
灯油水素化精製	灯油の硫黄分を除去する。
軽油水素化精製	軽油の硫黄分を除去する。製品の超低硫黄化に対応するため、より脱硫反応を進めるため、深度脱硫、2段脱硫とも呼ばれる。
間接脱硫	減圧蒸留で残油と減圧軽油に分け、減圧軽油を水素化脱硫し、再び残油と混合して、製品重油の硫黄分を下げる。
直接脱硫	常圧残油あるいは減圧残油を水素化脱硫して重油の硫黄分を下げる。

3.2.4 流動接触分解装置 : FCC(Fluid Catalytic Cracking)¹⁾

重質油からガソリン増産するために開発された装置であるが、現在はさらに重油の生産削減およびガソリン以外の中間留分の増産のために用いられている。前項でも記載したように原料として用いられる減圧軽油および残渣油は前処理として脱硫するため、FCC からの製品(LPG・分解ガソリン・分解軽油などの軽質油)および FCC の残油(スラリー油または CLO(クラリファイドオイル : Clarified Oil))は低硫黄である。

常圧または減圧蒸留装置の残油を分解する場合は、特に残油 FCC と呼ぶことがある。分解軽油はライトサイクルオイル(LC : Light Cycle Oil)とも呼ばれ、低硫黄で発熱量も大きく低温流動性にも優れるが、芳香族成分が多くセタン指数が低いいため燃焼性に問題がある。混合安定性が優れているためディーゼル機関用 A 重油の基材として用いられることが多いため、その混合割合に注意することが必要である。

3.3 重油の調合方法¹⁾

3.3.1 軽油(MGO : Marine Gas Oil)または A 重油(MDO : Marine Diesel Oil)

日本の A 重油は基本的には軽油と同じ成分であるが、税法上これに残炭分を加えているものである。したがって国際規約上で留出油と表現される場合は、いわゆる A 重油もこれに該当する。図 3.2 に A 重油製造(基材の調合)フローを、また表 3.5 に A 重油基材の代表的性状を示す。

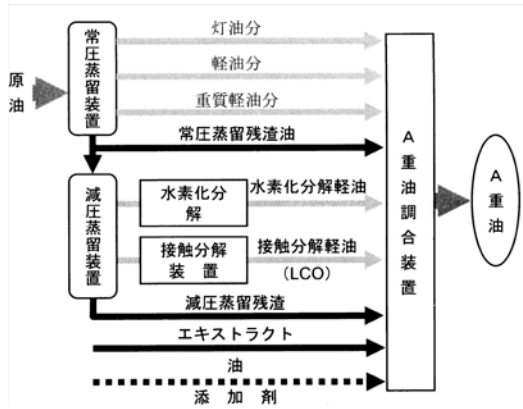


図 3.2 留出油(A 重油)の製造フロー¹⁾

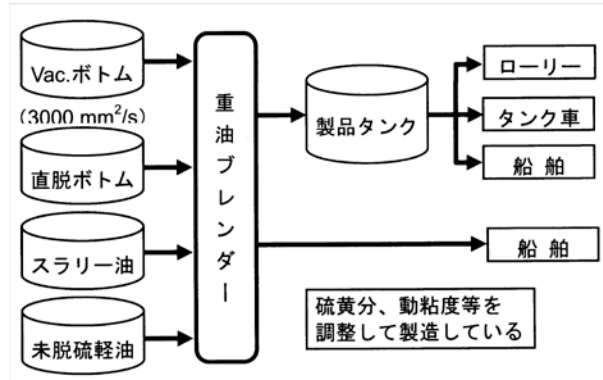


図 3.3 C 重油相当の製造フロー¹⁾

表 3.5 A 重油基材の代表的な性状¹⁾

	A 重油 代表性状	直留灯油	直留軽油	間脱軽油	軽質LCO	重質LCO
密度 @15℃ (kg/m ³)	864	792	850	865	872	916
蒸留 50% (℃)	—	200	284		229	304
動粘度 @50℃ (cSt)	2.7	1.0	3.5	2.9		
蒸留 90% (℃)	346	238	342		310	342
セタン指数	45	49.5	56	51	30	35
硫黄分 (%m/m)	0.94	0.1	1.3	0.03	0.06	0.24
窒素分 (ppm)	200		50~500	70	100	400
流動点 (℃)	-10	-30	-7.5	-2.5		
芳香族分 (%m/m)	28				50	57

3.3.2 C 重油(HFO : Marine Heavy Fuel Oil)

C 重油の原料は基本的には常圧または減圧蒸留装置の残(渣)油、脱硫装置の残油および FCC の残油などであり、これに流動性や燃焼性の向上のためにカッター材として軽油留分や分解軽油等を調合する。前述したように、最近は常圧蒸留装置の残油をそのまま C 重油の基材として用いることはない。図 3.3 に C 重油製造(基材の調合)フローを、表 3.6 に各種ボトム(残油)の性状を、また表 3.7 に C 重油基材の調合例を示す。

表 3.6 各種ボトムの性状¹⁾

		中東系 (ボトム)	RDS ボトム 直脱ボトム	CLO スラリー油
密度 @15℃	kg/m ³	993.6	942.7	1009.0
動粘度 @50℃	cSt	2700	282	36.7
流動点	℃	+ 20	+ 10	+ 20
硫黄分	%m/m	4.0	0.7	0.46
残炭分	%m/m	17.0	7.0	2.3
アスファルテン	%m/m	6.2	1.5	0
芳香族分	%m/m	41.5	36.2	63.8
CCAI		838	807	901
Al + Si	ppm	1~5	1~3	1~1000

表 3.7 C 重油基材の調合(各種ボトムとカッター材)割合と性状¹⁾

		中東系	RDS ボトム	CLO (スラリー油)	
				(中東系)	(RDS)
カッター (軽油)	%	23%	6%	55%	80%
ボトム	%				
密度 @15℃	kg/m ³	993	938	1002	956
動粘度 @50℃	cSt	166	170	170	174
流動点	℃	+ 15	+ 10	+ 20	+ 10
硫黄分	%m/m	3.4	0.7	2.0	0.65
残炭分	%m/m	13.5	6.6	8.9	6.1
アスファルテン	%m/m	4.9	1.4	2.8	1.1
芳香族分	%m/m	38.1	35.6	53.9	42.0
CCAI		835	808	872	826
Al + Si ppm	ppm	1~5	1~3	1~550	1~210

3.3.3 低硫黄燃料油(LSHFO : Low Sulfur Heavy Fuel Oil または単に LSFO : Low Sulfur Fuel Oil)^{3),6)}

低硫黄燃料油 LSHFO の製造方法としては次の 3 つがあり、HFO から留出油へ転換することで対応するこ

とも考えられている。

(1) 低硫黄原油からの製造³⁾

表 3.2 に示した欧州、アフリカおよびアジア系のような、原油段階で低硫黄であるものの残渣油を基材とするものである。しかし、現段階で低硫黄燃料の輸入量の増加は不可能であるので、これ以外の方法によらねばならない。

(2) 重質油基材に低硫黄燃料油を混合³⁾

調合の概要を図 3.4 に示す。低硫黄基材の割合を増すことにより製品の硫黄含有率を下げるものであるが、低硫黄基材の生産能力に余裕がない製油所では新たな設備投資が必要となる。

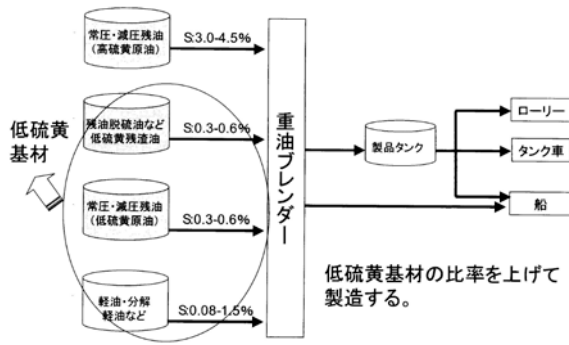


図 3.4 船用燃料油のブレンド方法³⁾

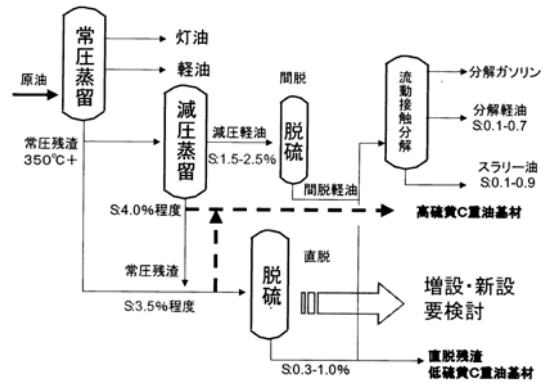


図 3.5 C 重油相当の製造フロー³⁾

(3) 重質油基材を脱硫装置で脱硫³⁾

脱硫装置の残油および FCC の残油など低硫黄残油を基材とするものであるが、図 3.5 に示すように脱硫装置の増設等の設備投資が必要になる。

3.4 軽油または A 重油への転換³⁾

軽油または A 重油は、基本的に硫黄分が低いいため、価格差は別問題としてこれらの油への転換が考えられる。しかし規制強化に対しては現状の硫黄分では対応できないため、軽油脱硫装置などの増設が必要となる。A 重油の製造フローを図 3.6 に、また現在の各種燃料の代表的性状を表 3.8 に示す。

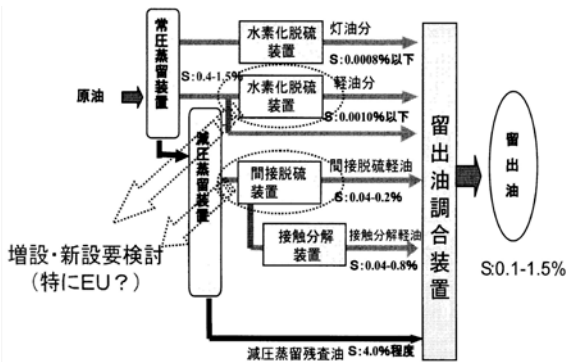


図 3.6 留出油(A 重油)の製造フロー³⁾

表 3.8 各種燃料油の性状¹⁾

項目	単位	軽油 サルファーフリー	留出油 (A重油相当)	残渣油 (MFO180相当)
密度	g/cm ³	0.828	0.8697	0.969
硫黄分	質量%	0.0006	0.06	2.47
窒素分	質量%	0.0005	0.032	0.22
残留炭素分	質量%	0.01>	0.03	11.5

3.5 燃料性状の動向^{1),4)}

3.5.1 CLO(Clarified Oil)の問題

図 3.7 は、低硫黄燃料製造における問題点を模式的に示したものである。同図(1)で示す製法は、低硫黄原油残渣油を基材とする場合でかつカッター材にも素性の明らかな軽油留分等を用いる場合である。同図(2)の場合には、残渣油基材が何であろうともカッター材に CLO を用いる場合の危険性を示す。従来カッター材は、適切な粘度を付与するだけでなく、難燃性の残渣油基材の燃焼を補う燃焼性に優れた、言い換えればセタン指数の高い軽油留分などが用いられていた。ところが最近では軽質油の需要増加等に対応するため、原油精製過程における深絞りが必要となり、その結果 FCC の残渣油として発生する CLO がカッター材として用いられることが

多くなってきた。CLOは優れた流動性および混合安定性を有するものの2または3環の芳香族が主成分で着火性に劣る。そのためこれをカッター材として用いたC重油などを用いた場合、2サイクル機関の場合はリングやシリンダライナの焼付き、4サイクル機関の場合は過給機の汚損または損傷などの低燃焼性に起因する障害が発生する。

この問題は基本的にはC重油使用機関の問題であるが、このC重油を基材としたA重油を用いる場合、特に高速ディーゼル機関に用いる場合は注意を要する。

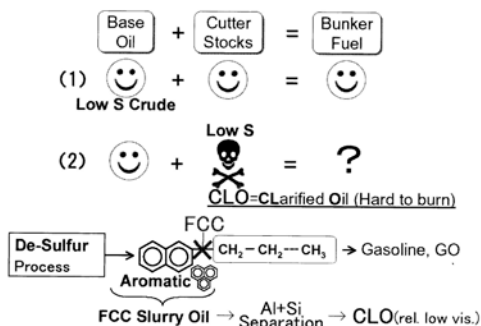


図 3.7 低硫黄バンカー油の製法⁴⁾

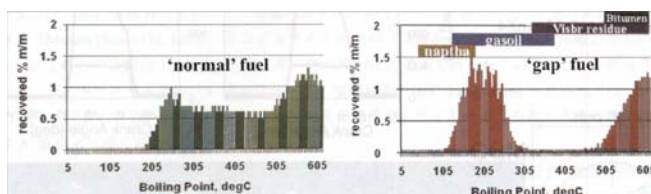


図 3.8 ダンベル燃料^{1),4)}

3.5.2 LCO(Light Cycle Oil)の問題

CLOと同様 FCCの副産物であるLCOは、1または2環の芳香族を主成分とするもので分解軽油とも呼ばれる。これがカッター材として用いられる場合は、図3.8に示すような着火性の悪いダンベル燃料として前項のCLOと同様、問題となる。しかしさらなる問題として、燃料中の硫黄分規制が強化されHFOから留出油への転換が図られた場合、このLCOが軽油としてそのまま市場に投入される恐れがある。その場合、軽油を燃料とする高速機関においても、現在A重油または場合によってはC重油使用機関において問題となっている種々の燃焼障害等が発生する恐れがある。

【参考文献】

- 1) 日本海事協会, 船用燃料重油の低質化対策指針(Version II)―難燃性燃料油対策―, (2008年6月).
- 2) 田山, 船舶の排気規制, エンジンテクノロジー, No.09(2000年7月), 17-21.
- 3) 特集「船舶からの排気ガス規制の強化とその対応方策」, 日マリ学会誌, 第43巻第6号(2008年), 1-53.
- 4) 特集「燃料油の着火・燃焼性」, 日マリ学会誌, 第43巻第1号(2008年), 2-26.
- 5) 林, 船用燃料油の硫黄分規制と低硫黄燃料油の供給について, 日マリ学会誌, 第44巻第1号(2009年), 104-111.
- 6) 林, 船用低硫黄燃料油の製造方法と供給体制, 日マリ学会誌, 第43巻第2号(2008年), 3-8.
- 7) 平成17年度船舶排出大気汚染物質削減技術調査報告書, 日本マリンエンジニアリング学会, (平成18年3月)
- 8) 平成18年度船舶排出大気汚染物質削減技術調査報告書, 日本マリンエンジニアリング学会, (平成19年3月)
- 9) 平成19年度船舶排出大気汚染物質削減技術調査報告書, 日本マリンエンジニアリング学会, (平成20年3月)

4 大型 2 ストローク電子制御ディーゼル機関

大型 2 ストローク機関の具体的な対応技術は、基本的には 2 章の排出ガス低減基本技術の動向で述べたものである。後述する 4 ストローク機関との違いは、次のとおりである。

- (a) 世界的にライセンサーが 3 社しかなく、またいずれも基本構造はロングストロークユニフロータイプであり、4 ストローク機関のような多くの機種バリエーションが存在しないため、対応技術も限られており、前述の低減基本技術に集約される。
- (b) 高い熱効率を追求した結果、空気過剰率が高く(酸素濃度が高く)、燃焼最高圧力・温度が高い。さらに機関回転数が低く、また十分な膨張行程を確保しているため、燃焼ガスの高温滞留時間も長い。そのため NO_x 生成条件がそろっており、逆に燃焼マッチングによる NO_x の低減対策は直ちに燃費の悪化につながり、これらのトレードオフの関係は 4 サイクルの機関の場合より厳しい。
- (c) 燃焼ガス量が非常に多いため、後処理装置の容量も大きくせねばならず、積載スペースの減少、速力の低下、後処理装置関連搭載物品の増加等が避けられない。
- (d) 4 ストローク機関以上にバンカー油の使用が当然となっているため、バンカー油硫黄分等に対する対応もあわせて行わなければならない、場合によっては後処理装置の設置条件等にも制約が生じる。

このような中、結果的にライセンサー 3 社とも電子制御ディーゼル機関を採用し、現状の規制に対応している。今後の規制強化に対しては、電子制御ディーゼル機関を前提として、これにシリンダ内水噴射等の水添加燃焼技術や EGR 技術または SCR などの後処理装置の開発を進めている。現在、これらの技術はある程度完成し実船実証試験等も行われているが、普遍的に用いられるにはいたっていない。

電子制御機関の最大の特徴は、燃料噴射圧力が機関回転数(船用主機の場合は出力)に影響されないことと、燃料噴射量、燃料噴射時期及び燃料噴射パターン(燃料噴射率)の選択においてそれぞれの独立性と高い自由度を有すること、あわせて排気弁の開閉タイミングを制御できることである。電子制御機関に共通の代表的な特徴は、次のとおりである。

- (a) 排気弁開閉タイミングならびに燃料噴射パターンおよびタイミングを最適制御することにより各負荷での燃料消費率が向上
- (b) 排気弁開閉タイミングならびに燃料噴射パターンおよびタイミングを最適制御することにより排気ガス中の有害成分(NO_x や煤塵、PM)が低減
- (c) (a) 及び(b)に関連して、燃費優先モードまたはエミッション低減優先モードを航行海域により容易に切替えることが可能。また、将来の規制強化に対してもある程度プログラムの変更により対応が可能
- (d) 高圧燃料噴射による最低回転数の低下と低負荷領域での安定運転が可能
- (e) 前後進切替においても機械的な切替が不要で電気的な迅速な切替となるため操船性が向上。また、シリンダごとの燃料噴射カットや排気弁固定が容易に行えるため、保守や応急運転が容易

以下、各社の大型 2 ストローク電子制御ディーゼル機関に関する技術について解説する¹⁾³⁸⁾。

4.1 三菱型電子制御機関(UEC-Eco)の構成と特長¹⁾¹³⁾

三菱 UEC-Eco 機関は、燃料噴射系、排気弁駆動系、始動系及びシリンダ注油系について、従来の機械式から電子制御化への転換を行った。これにより大型の機械部品点数が減少し、構造もシンプル化された。機械式からの変更点と主要構造をそれぞれ図 4.1 及び図 4.2 に示す^{6),7)}。機関の起動前は電動ポンプにより高圧作動油を発生させ、起動後はクランク軸動力により駆動されるパワーユニットにより作動油の圧力を維持する。機関起動後、電動ポンプは自動停止する。

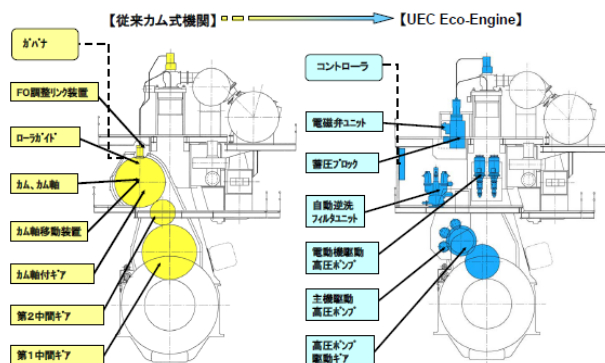


図 4.1 機械式から電子制御式への変更点⁶⁾

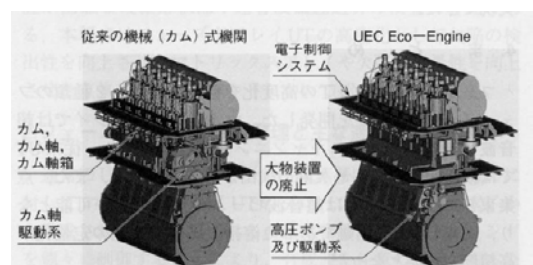


図 4.2 主要構造^{6),7)}

4.1.1 燃料噴射系及び排気弁駆動系の概要

燃料噴射系及び排気弁駆動系の概要ならびに関連する油圧系統の概要を、図 4.3 から図 4.5 に示す。作動油の圧力は燃料噴射系及び排気弁駆動系のいずれも約 30MPa(320bar)で、燃料噴射系ではこの圧力により増圧ピストンを作動させてより高圧の燃料噴射を実現する。同様の方式を採用している MAN B&W 社の ME 機関の場合は作動油圧力が約 20MPa であるため、これに比較すると作動油圧が高いことにより油量が少なく、コンパクトにすることができる。また、Wartsila 社の RT-flex 機関のコモンレール方式と比較すると、超高压の燃料配管がない分、安全性が高い。運転中の作動油の圧力脈動は、作動油を蓄圧するアキュムレータブロック内のチャンバで抑制されるため、シンプルで信頼性の高いメカニズムとなっている。

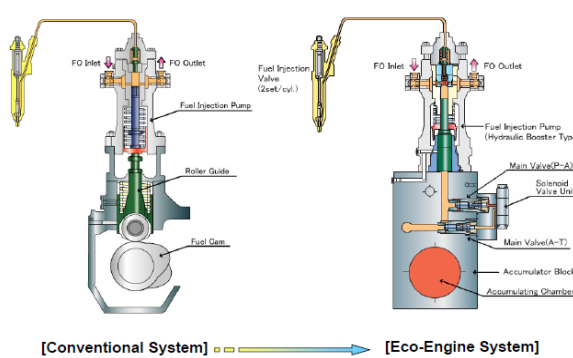


図 4.3 燃料噴射系 8)

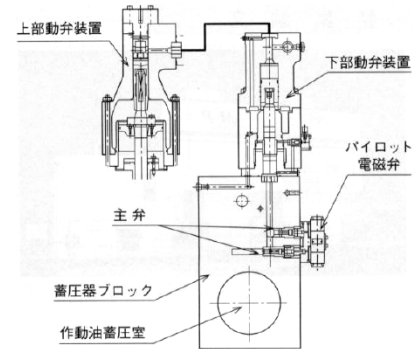


図 4.4 排気弁駆動系 6),7)

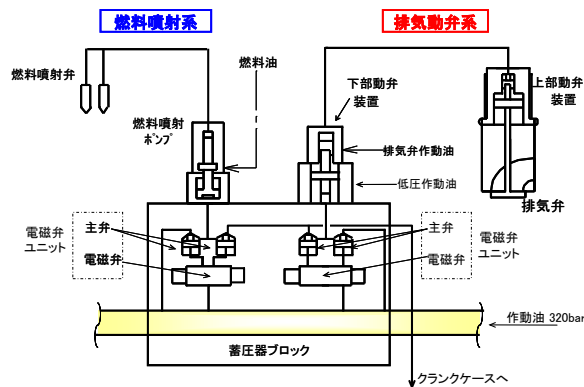


図 4.5 油圧回路機器 6)

燃料噴射系及び排気弁駆動系下部同弁装置のいずれの作動油も、コントロールシステムと ON/OFF タイプの電磁弁ユニットにより制御される。このように燃料噴射及び排気弁開閉タイミングがともに電気的に制御されるため、機関回転数に関係なく任意に制御することができ、常に最良の運転状況を実現できる。基本的な構造はカムを油圧に置き換えただけであるため、保守作業担当者に対する教育も最小限でよい。

4.1.2 コントロールシステム

図 4.6 に制御系の概略を示す。コントロールシステムは機関制御室に設けられる Eco Main Controller(EMC)、機側制御用の Local Control Box(LCB)およびシリンダごとに設けられる Eco Cylinder Controller(ECC)で構成される。これらのネットワークはすべて二重化されており、たとえば EMC は常に 2 つが並行してアクティブ側及びスタンバイ側として作動しており、互いにバックアップしている。

ECC は各シリンダの燃料噴射系、排気弁駆動系及び始動空気系のタイミングを制御するもので、個々のシリンダに設けられるが 1 つの ECC で 2 つのシリンダのコントロールが可能であるため、故障時には他のシリンダの ECC が自動的にバックアップする。

LCB は、リモコン機能や EMC が 2 系統とも故障したような非常時に機側で運転する際に使用するもので、燃料調量運転及びガバナ運転が可能である。

4.1.3 電子制御による性能改善

(1) NO_x の抑制

図 4.7 に示すように、メインとサブの電磁弁を制御することにより燃料噴射タイミング及び燃料噴射率(燃料噴射パターン)を制御し、初期の噴射率を低減することにより NO_x 生成を抑制することができる。

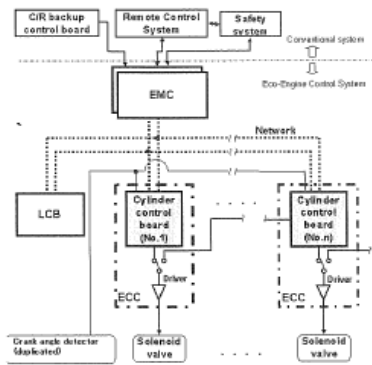


図 4.6 コントロールシステム 6)

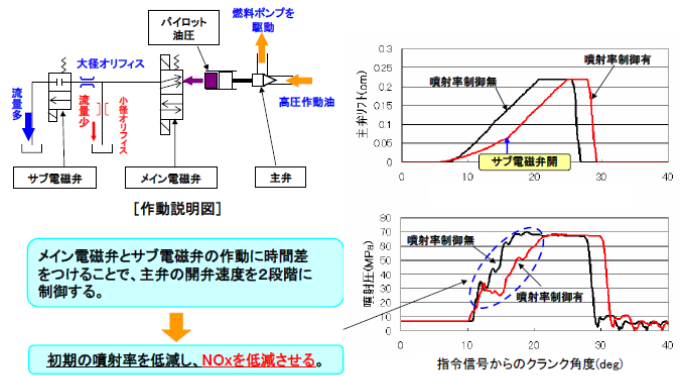


図 4.7 燃料噴射率の制御 6),7)

(2) 低負荷性能の改善

図 4.8 に示すように低負荷域から安定した高圧噴射が可能となるため、低負荷(少噴射量)でも微粒化が優れた良好な燃焼が得られる。そのため、黒煙の発生しない安定した低負荷連続運転が可能となる。また、連続最高回転数(定格回転数)の 10%程度の安定した低速回転が可能であり、操船性の向上も得られる。

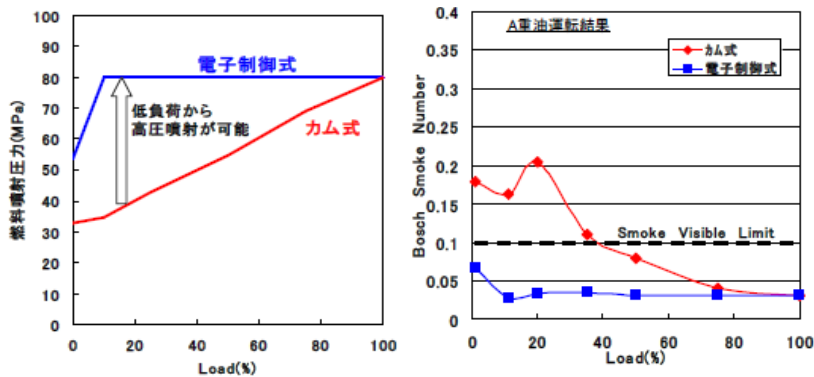


図 4.8 低負荷性能の改善 6)

(3) 全負荷域にわたる性能改善

上記(1)及び(2)に加えて、全負荷域での高圧噴射化、環境条件に応じた燃料噴射タイミング及び噴射率ならびに排気弁開閉タイミングの最適制御により、燃料消費率の改善と低エミッションを両立している。図 4.9 に示すように従来のカム式では不可能であった排気弁の開閉タイミングの制御が行えることから、前述の燃料噴射制御とあわせて制御することにより図 4.10 に示すように状況に適した適切な運転モードをスイッチひとつで選択することが可能となった。

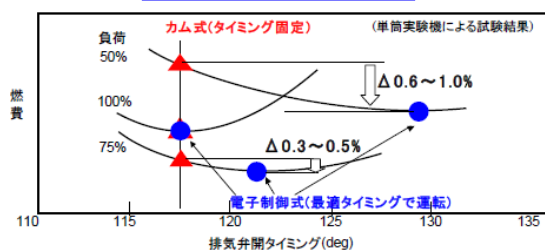


図 4.9 全負荷での性能最適化(排気弁開閉タイミングの最適化) 6)

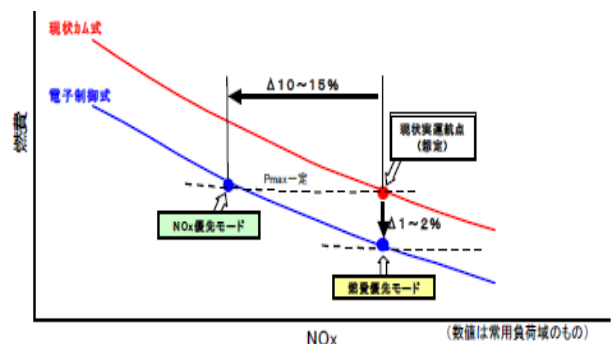


図 4.10 運転モードの選択 7)

燃料噴射率制御と排気弁開閉タイミングの最適化によって、「NOx 優先モード」(Low emission mode)においては、常用負荷で従来機関並みの燃料消費率を維持しつつ従来機関に比べて NOx を 10~15%低減することができる。「燃費優先モード」(Economy mode)においては、Low emission mode や従来機関に比べ、常用負荷で 1~2%燃料消費率を下げる事ができ、また低中負荷域においても燃料消費率を減らすことができる。燃料消費率の削減は CO₂ 排出量を低減することに相当し、今後の環境規制対応技術としても有効である。このように

運航モードを容易に切り替えることができるため、特定海域(たとえば ECA)における厳しい規制と一般海域における規制の両者に対しフレキシブルに対応することができる。

図 4.12 は IMO の一次規制発効時(二次規制値未確定時)に、UEC-Eco 機関による二次規制への対応のめどを示したものである。

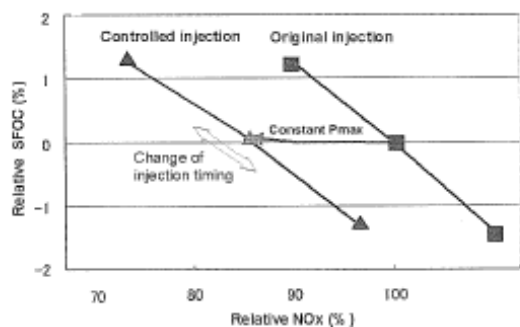


図 4.11 低 NOx と低燃費の両立⁶⁾

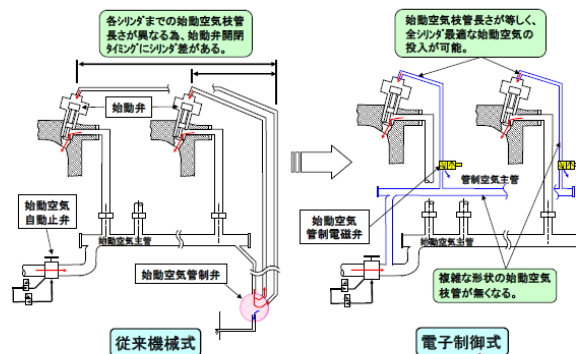


図 4.12 始動系の構成⁶⁾

(4) 始動性能の改善

始動空気系についても、図 4.12 に示すように始動空気管系の改善及び電子制御化により大きく改善された。すべてのシリンダに最適なタイミングで必要最小限の始動空気を供給することができ、かつ前述の最低回転数の改善もあり、始動性能が向上した。

(5) 三菱 UEC-Eco 機関のメリット

三菱 UEC-Eco 機関のメリットを整理すると、次のようになる。

- (a) 排気ガス特性の改善(低 NOx・低スモーク濃度)
- (b) 低負荷・部分負荷での燃料消費率低減(低 CO₂)
- (c) 最低回転数の改善⇒操船性の向上
- (d) 始動回数的大幅増加
- (e) 全負荷域における燃焼の最適化により燃焼室周りの部品の信頼性の向上⇒保守の軽減

4.1.4 シリンダ注油装置 Swirl Injection Principle (SIP)^{3),5),8),13)}

図 4.13 に、新しいシリンダ注油システムである Swirl Injection Principle (SIP)の概要及び構成部品を示す。必要かつ十分なシリンダ注油を行うために、各社で新しいシリンダ注油システムが開発され、機関の電子制御化とも連携しシステムの信頼性向上に寄与している。また、余分なシリンダ潤滑油を供給しないことは、排気ガス成分中の PM の低減にもつながり、環境対応技術としても重要なものである。

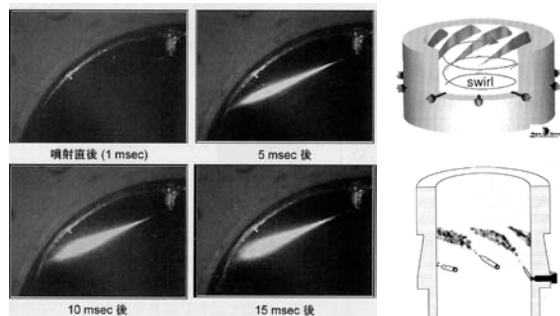


図 4.13 SIP:Swirl Injection Principle^{3),5),8),13)}

4.2 MAN B&W 型電子制御機関(ME)の構成と特長^{2),3),5),14)-32)}

図 4.14 に、MC 型機関から ME 型機関への変更点を示す。システムの基本構成は三菱 UEC-Eco 機関に近いものとなっており、燃料噴射装置及び排気弁駆動系は約 20MPa(200bar)の高圧サーボ油(作動油)を用いている。燃料噴射装置は、三菱 UEC-Eco 機関と同様の増圧ピストン方式で高圧燃料噴射を実現している。

機関の起動前は電動ポンプにより高圧サーボ油を発生させ、起動後はクランク軸動力により駆動されるパワーユニットによりサーボ油の圧力を維持する。機関起動後、電動ポンプは自動停止する。

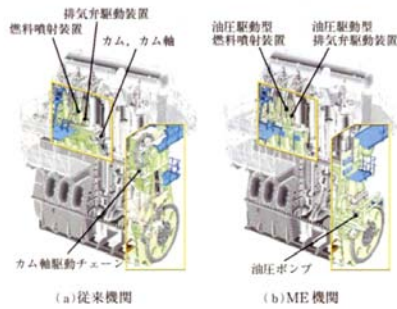


図 4.14 MC 型機関から ME 型機関への変更点¹⁸⁾

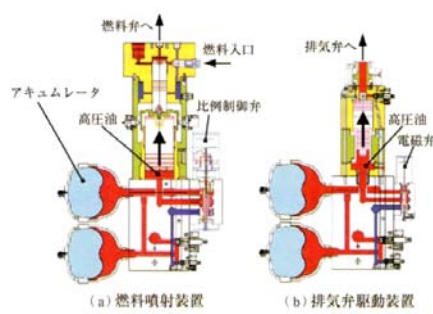


図 4.15 ME 機関の油圧ユニット¹⁸⁾

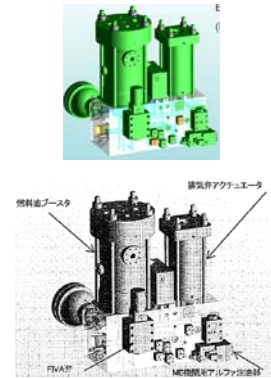


図 4.16 油圧シリンダユニット²⁵⁾

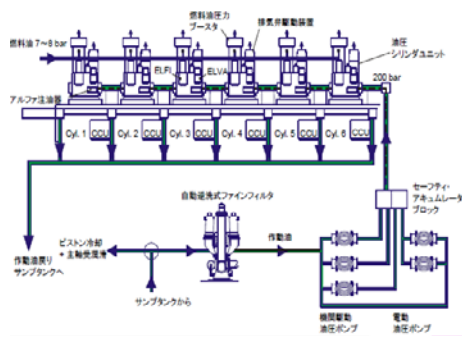


図 4.17 ME 機関作動油系統(システム油と共用配管)²⁵⁾

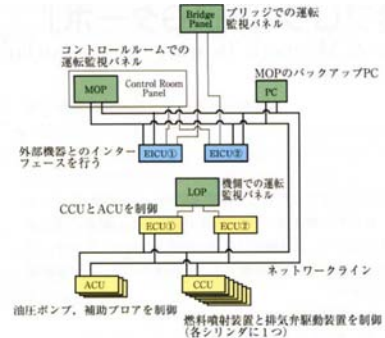


図 4.18 機関制御システム¹⁸⁾

4.2.1 燃料噴射系及び排気弁駆動系の概要

図 4.15 および図 4.16 に、油圧ユニットの概要を示す。高圧のサーボ油が電磁弁で制御される。これらにより燃料噴射については燃料噴射タイミングと燃料噴射量および燃料噴射パターンが、また排気弁の駆動に関しては排気弁開閉タイミングが制御される。また、これらの油圧系統は、サーボ油の系統をシステム油とは独立とした独立配管のものもあるが、ほとんどの場合は図 4.17 に示すとおり共用配管としている。

4.2.2 コントロールシステム

図 4.18 に制御システムの概要を示す。ME 機関のコントローラには主機関を総括制御する Engine Control Unit(ECU)、燃料噴射パターンや排気弁開閉タイミングを制御する Cylinder Control Unit(CCU)、油圧ポンプ、補助ブロワ、排気バイパス弁などの主機関連補機を制御する Auxiliary Control Unit(ACU)、リモコンなどの外部機器との接続ユニットをコントロールする Engine Interface Control Unit(EICU)ならびに運転条件の設定や運転状態を表示する Main Operating Panel(MOP)などから構成される。これらはネットワークで有機的に結合された分散制御を行っている。主な特徴は、次のとおりである。

(1) 冗長化

- (a) CCU 及び ACU はシリンダや補機ごとに設けられ、1 台が故障しても運転継続が可能である。
- (b) ECU と EICU は完全に二重化され、異常発生時には自動的に予備機に切り替わる。
- (c) ネットワークは二重化され、1 系統が断線してもシステムは稼働可能である。
- (d) 二重化された配線は機関周りの異なる経路に配線されるため、同時損傷の確率が低い。

(2) 操作性の向上

- (a) MOP 上で運転モードの設定・変更、パラメータの調整が可能である。
- (b) MOP 上でアラームを含め運転状態等が監視、把握できる。
- (c) リモコン装置を MODBUS 通信で接続し、船橋でも機関状態を把握できる。

(3) メンテナンス性の向上

- (a) 各制御ユニットの制御基盤が共通化されている。
- (b) 基板への配線はすべてコネクタ接続であり、基板交換が容易である。
- (c) プログラムはネットワーク経由で自動的にダウンロードされるため、基板交換等にもなう複雑なインストール作業が不要である。

4.2.3 電子制御による改善

(1) 燃料噴射制御

噴射初期から安定した高圧の矩形噴射率を得ることができ、負荷によらず良好な微粒化と燃焼が得られる。また、パイロット噴射をともなう2段噴射も可能であり、将来の排気ガス規制に対応した柔軟かつ良好な燃焼が可能である。

(2) 排気弁駆動制御

排気弁の開閉時期をそれぞれ独立して制御できるため、開閉タイミング及び開弁期間を自由に制御でき、燃料噴射制御による燃焼制御とともに、排気規制に柔軟に対応できる。

(3) 始動空気系

始動空気系については、三菱 UEC-Eco と同様の改善結果が得られており、すべてのシリンダに最適なタイミングで必要最小限の始動空気を供給することができ、かつ始動回数が大幅に増加した。

4.2.4 シリンダ注油装置

図 4.19 から図 4.22 に、ME 型機関のシリンダ注油システムである ME アルファシリンダ注油システムの概要及び構成部品を示す。三菱 UEC-Eco に用いられる Swirl Injection Principle (SIP)注油システムと同様、負荷や回転数に見合った必要かつ十分なシリンダ注油を行うことにより、機関信頼性の向上、排気ガス成分中の PM の低減等に寄与する。注油はシリンダ半径方向ではなく、リングに沿った円周方向に効果的に行われる。

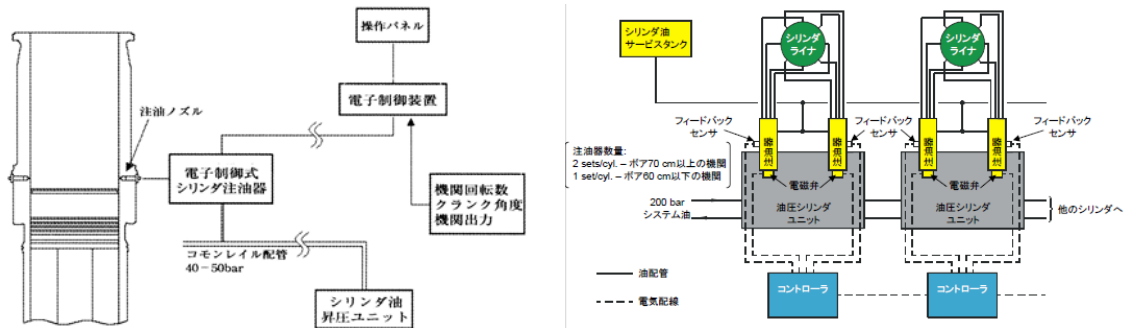


図 4.19 ME アルファシリンダ注油システムの概要(1)(3),5),27-33)

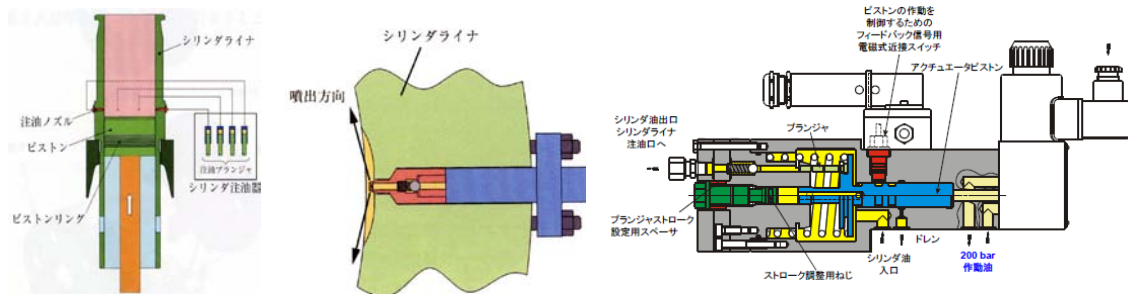
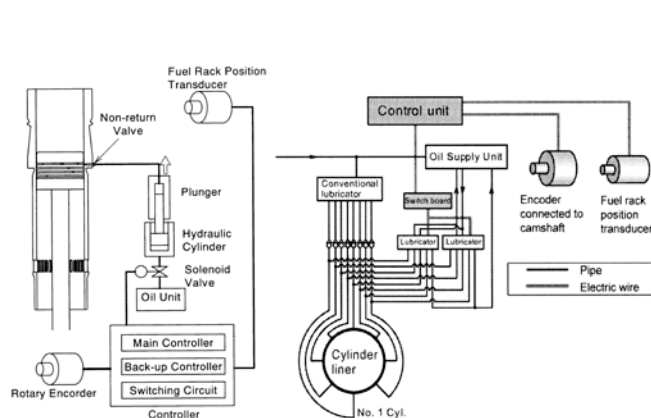


図 4.20 ME アルファシリンダ注油システムの概要(2)(3),5),27-33)



(a) 制御系

(b) レトロフィッティング

図 4.21 ME アルファシリンダ注油システムの制御系 (3),5),27-33)

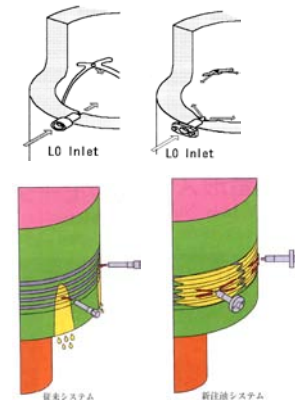


図 4.22 従来型注油システムと ME アルファシリンダ注油システムの比較

(3),5),27-33)

4.3 Wartsila 型電子制御機関(RT-flex)の構成と特長 2),3),5),34-38)

燃料噴射系統および排気弁駆動系に、三菱及びMAN B&W 社と異なるコモンレール方式を採用している。燃料は1000bar の高圧のレールに蓄圧され、On-Off 制御電磁弁により 200bar の作動油を介して噴射が制御される。このシステムでは燃料噴射及び排気弁駆動用の制御用油圧(コントロールオイル)についても、コモンレール方式を採用している。さらに始動空気系もコモンレールとみなせることから、これら4つのコモンレール系統を Wartsila Common Rail system と称している。

図 4.23 に RT-flex 機関の概要を、また図 4.24 に同機関の RTA 型機関からの変更点を示す。

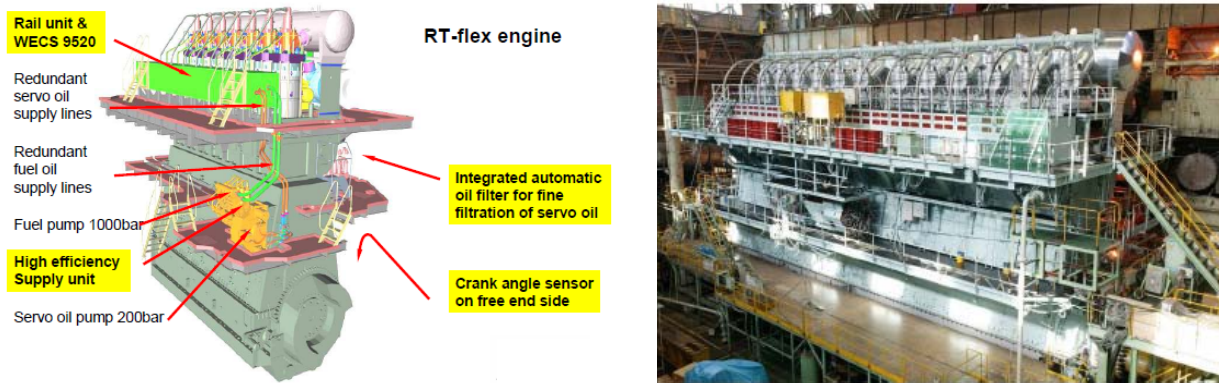


図 4.23 RT-flex の概要 34-38)

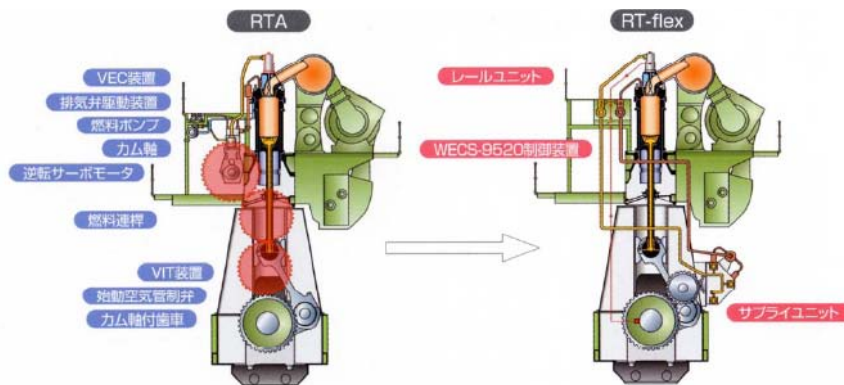


図 4.24 従来型機関との比較 34-38)

4.3.1 コモンレールシステム

コモンレールシステムの概要を図 4.25 から図 4.27 に、また代表的な機種概要を図 4.28 及び図 4.29 に示す。

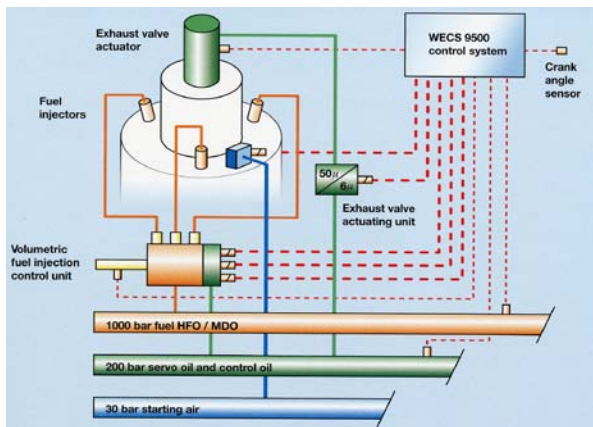


図 4.25 Common Rail System(1) 34-38)

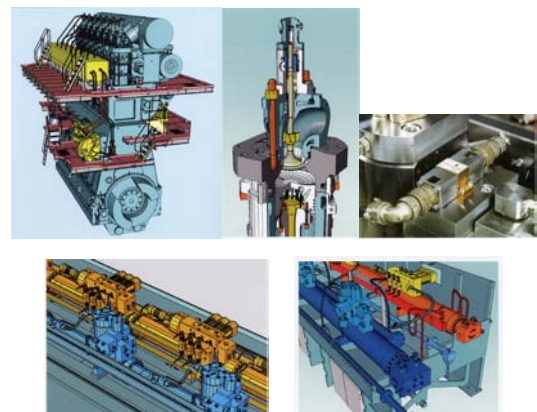
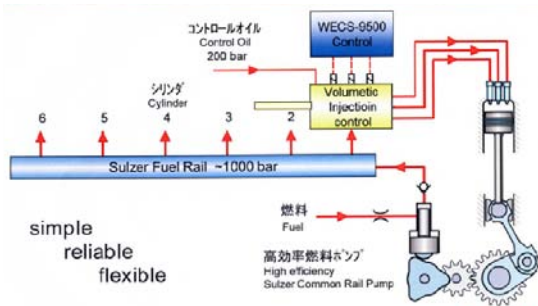
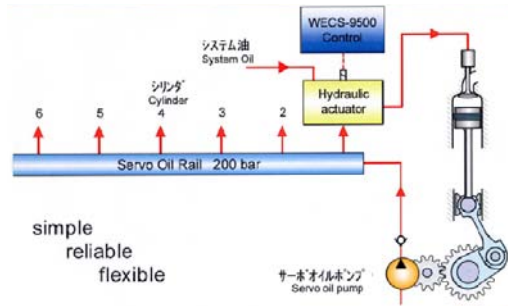


図 4.26 Common Rail System(2) 34-38)



(a) Fuel Injection System



(b) Exhaust Valve Drive System

図 4.27 Common Rail System(3)³⁴⁻³⁸⁾

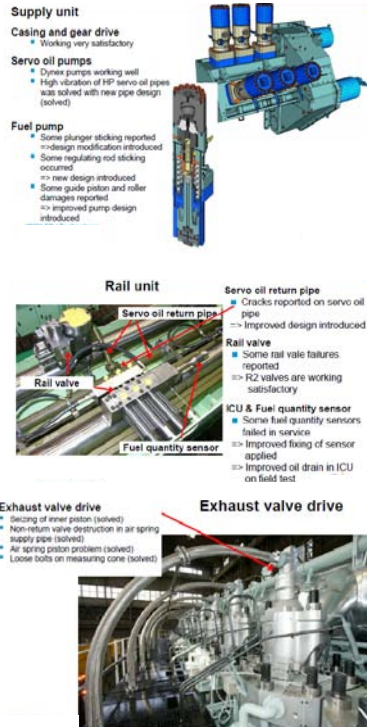
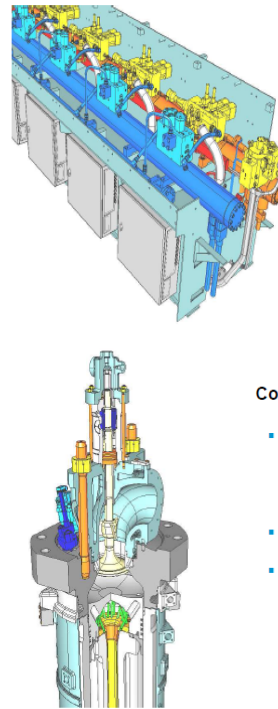


図 4.28 RT-flex96C³⁴⁻³⁸⁾



Rail Box

- Control oil rail eliminated
- Top covers removable (support beams remain)
- Wall removable on one side
- Connection of pipes from supply unit outside of box

Combustion chamber

- Bore cooled components
 - Piston
 - Cylinder cover
 - Exhaust valve seat
- Non-bore cooled cylinder liner
- Anti polishing ring

図 4.29 RT-flex50-B³⁴⁻³⁸⁾

4.3.2 コモンレールシステムによる燃焼制御

燃料はクランク軸からの動力で駆動されるサプライユニット内の燃料加圧ポンプにより 100MPa に昇圧され、燃料用コモンレールに供給される。高速電磁弁でコントロールオイルを介して制御される容積型噴射制御装置により所定の燃料が燃料噴射弁に供給噴射される。高速電磁弁は各シリンダにあり、WECS9520 という電子制御システムで制御され、燃料噴射タイミング、燃料噴射量及び燃料噴射パターンの各要素を、各シリンダの各燃料噴射弁に対し個別に調整することが可能である。噴霧パターンの一例と、これによる低負荷域でのスモーク低減の効果を図 4.30 に示す。

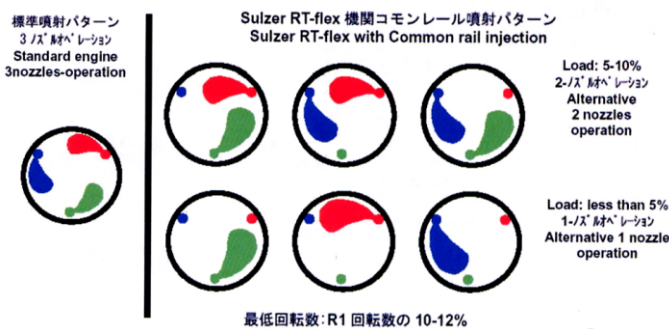
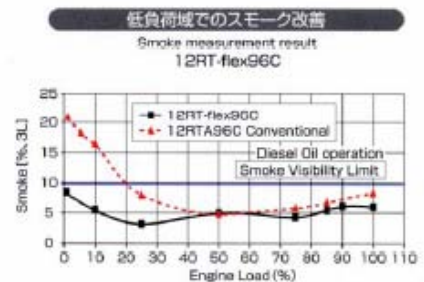


図 4.30 噴霧パターンとスモーク低減効果³⁴⁻³⁸⁾



4.3.3 シリンダ注油装置

Wartsila 社の新シリンダ注油システムであるパルスジェット注油システムを、図 4.31 に示す。電子制御により任意のタイミングで液滴噴射の形でライナ摺動面に潤滑油を噴射、塗布する。噴射のための作動油はコントロール(サーボ)オイルレールから供給されるため、独立動力源が不要である。

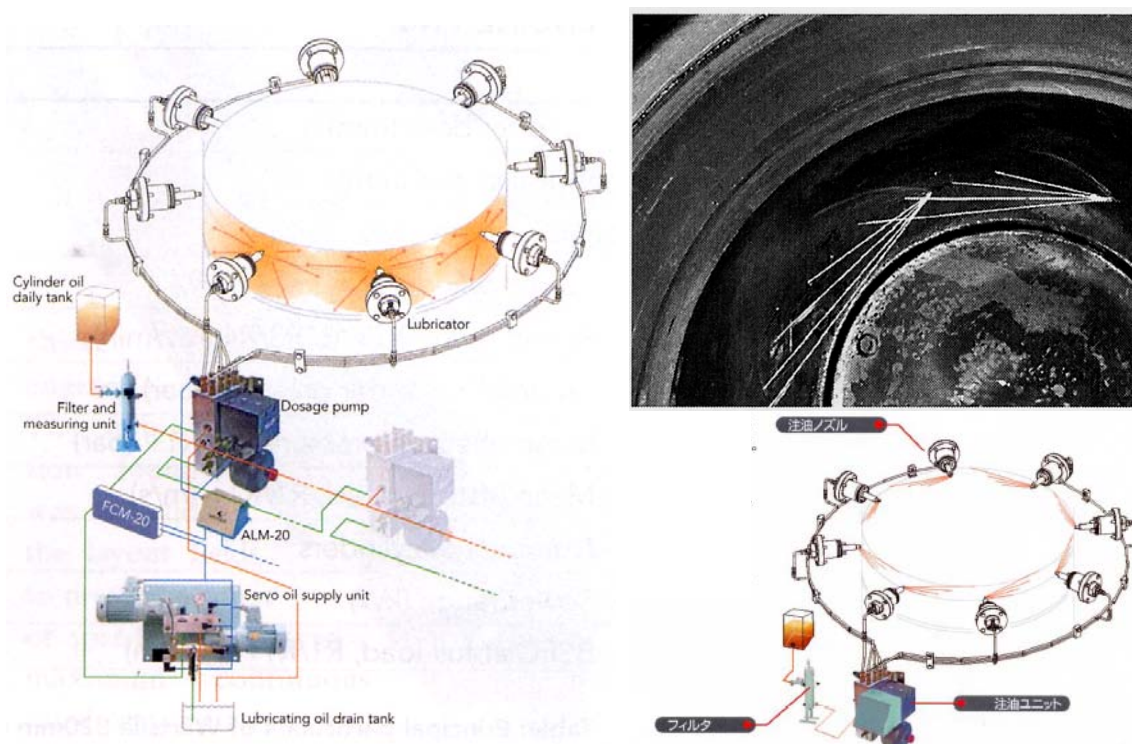


図 4.31 パルスジェット注油システム ③,⑤,③④-③⑧

【参考文献】

- 1) 日本海事協会, 船用燃料重油の低質化対策指針(Version II)―難燃性燃料油対策―, (2008年6月), 124-130.
- 2) 若月, 船用大形低速ディーゼル機関の燃料噴射システム, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第43巻第2号(2008年5月), 39-46.
- 3) 田中, 新しいシリンダ注油方法, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第37巻第2号(2002年2月), 32-40.
- 4) T. Jensen, Swirl Injection Lubrication Low Cylinder Oil Consumption without Sacrificing Wear Rates, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第37巻第2号(2002年2月), 41-50.
- 5) 坂口・山本, シリンダ注油システムの最新動向, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第40巻第2号(2005年3月), 72-78.
- 6) 杉原, 環境対応ディーゼル機関 “三菱EC Eco-Engine”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第39巻第12号(2004年12月), 47-52.
- 7) 坂口ほか8名, 環境対応ディーゼル機関 UEC Eco-Engine”, 三菱重工技報, 第41巻第1号(2004年1月), 20-21.
- 8) 坂部, 大形2サイクル船用エンジンの排ガス規制対応技術, エンジンテクノロジー, No.44(2006年6月), 20-25.
- 9) 若月, 2ストローク低速ディーゼル機関の大幅 NOx 低減技術, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第43巻第6号(2008年11月), 36-43.
- 10) 三菱重工株式会社神戸造船所殿ご提供資料, 船用電子制御ディーゼル機関の環境対応技術について “三菱 UEC Eco-Engine”.
- 11) 三菱重工株式会社殿ご提供資料, UEC Eco-Engine(2004年4月)
- 12) 三菱重工株式会社殿ご提供資料, UEC Eco-Engine について(2007年11月)
- 13) 三菱 SIP シリンダ注油システムカタログ.
- 14) 薦田, 船用低速ディーゼル機関の高効率化の変遷と今後の展望, エンジンテクノロジー, No.09(2000年7月), 8-11.

- 15)田中・大津, 大型船用ディーゼル機関の特徴と新技術, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第36巻第9号(2001年9月), 85-90.
- 16)大津, 三井-MAN B&W 新型機関の紹介, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第36巻第11号(2001年11月), 19-25.
- 17)薦田・花房, 船舶からの大気汚染物質の排出実態と規制動向 - 2 ストローク低速ディーゼル機関の対応 -, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第37巻第1号(2002年1月), 58-67.
- 18)川崎重工, 電子制御式船用2 ストロークディーゼル機関「ME 機関」, 川崎重工技報, 155号(2004年5月), 54-55.
- 19)花房, 主機関における排ガス制御の現状, TECHNO MARINE 日本造船学会誌, 第879号(2004年5月), 16-20.
- 20)元田ほか6名, 電子制御方式船用大型ディーゼルエンジンの実用化, 日立造船技報, Vol.65 No.1, (2004年5月), 3-9.
- 21)花房ほか3名, 三井-MAN B&W 機関の環境規制対応技術, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第39巻第12号(2004年12月), 53-58.
- 22)花房ほか3名, 三井-MAN B&W 電子制御機関と TES について, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第40巻第1号(2005年1月), 111-115.
- 23)花房ほか3名, 2 サイクル低速機関のメカトロニクス技術, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第40巻第5号(2005年9月), 8-11.
- 24)桑田ほか6名, 三井-MAN B&W 低速ディーゼル機関の最近の技術動向, 三井造船技報, No.191, (2007年6月), 3-9.
- 25)桑田・島田, 三井-MAN B&W 機関の燃料噴射系に関する解説, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第43巻第2号(2008年3月), 47-52.
- 26)佐々木・K.Aabo, MAN B&W 型低速機関における SCR の運転実績と新しい NOx 排出低減技術, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第43巻第3号(2008年7月), 87-94.
- 27)田中・上藪, 大型船用ディーゼル機関の潤滑油消費量低減を可能にするメカトロシリンダ注油器, 三井造船技報, No.177, (2002年10月), 13-19.
- 28)馬場ほか3名, メカトロ制御によるシリンダ注油機システム, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第37巻第12号(2002年12月), 29-33.
- 29)川崎重工, 新シリンダ注油システムの概要, 川崎重工技報, 154号(2004年1月), 76-77.
- 30)阪神内燃機工業, アルファシリンダ注油, ハンシン技術ニュース, No.42(2008年3月).
- 31)川崎重工業株式会社船用機械部殿ご提供資料.
- 32)MAN B&W 社カタログ.
- 33)ユニバーサル造船殿ご提供資料.
- 34)椿・林, Sulzer RT-Flex 機関の紹介, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第36巻第11号(2001年11月), 12-18.
- 35)林, 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, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第39巻第12号(2004年12月), 64-70.
- 36)盈, 電子制御機関における燃料噴射システム, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第43巻第2号(2008年5月), 53-56.
- 37)Wartsila Technical Seminar in Tokyo(2006年11月)資料.
- 38)Wartsila 社カタログ.

5 4 ストローク中速機関における各社の対応技術

5.1 新潟原動機の規制対応技術

5.1.1 新潟原動機における IMO 一次規制対応技術(燃焼コンセプト)

爆発度(=P_{max}/P_{comp})と NO_x の関係を図 5.1 に示す¹⁾。爆発度による P_{max} を抑えて NO_x の低減を図り、圧縮比の上昇、給気圧力の上昇により低爆発度を維持したまま P_{max} を設計点に維持することにより、燃費や煙濃度の悪化を極力抑えた。この燃焼コンセプトを示したものが図 5.2 である¹⁾。燃焼時間の長い低速 4 サイクル機関では燃料噴射率パターン適正化が必要なものもあるが、中高速機関については図 5.3 に示すように一次規制についてはこの燃焼コンセプトでクリアすることができた¹⁾。

図 5.4 から図 5.7 はこのような燃焼コンセプトのもとに、V20FX 型高速ディーゼルエンジンのチューニングについて解析、検討した結果である²⁾⁴⁾。このエンジンは V16FX エンジンで培った技術を基に開発されたもので、機関出力比重量が 3.15kg/kW の世界有数の高出力高速ディーゼル機関である。燃料噴射時期遅延、高圧短期間噴射および高効率過給機とのマッチングにより、低燃費と IMO 一次規制適合を達成した。大出力化に対応するため高圧力比の過給機が要求され 2 段過給とする場合もあるが、V20FX は 1 段過給で対応した。初期の過給システムは大型過給機 2 台を用いたものであったが、アイドル状態や極低負荷での使用が多く、また一方ではその状態から高速への鋭い立ち上がりのための優れた過渡特性(加速性)が求められたことから、低負荷対策(排気ガスの減少による大形タービン駆動力不足問題の解決)および応答性の向上(過給機の小型化による慣性力の減少)を図るため、図 5.4 に示すように小形過給機 2 台と中形過給機 2 台の計 4 台の過給機を用いたシーケンシャル過給に変更され、さらにアイドル時及び低負荷時のスモーク対策のためにリショルムコンプレッサ式スーパーチャージャも装備した。同図に示すようにシーケンシャル過給システムでは、低負荷時は小形過給機 2 台を使用し、中~高負荷時には中形過給機 2 台を加えた計 4 台の過給機で運転する。

その結果図 5.8⁵⁾に示すように、V20FX 型高速ディーゼルエンジンは IMO 一次規制をクリアし、さらにチューニングを図った A タイプはこのコンセプトで IMO 二次規制もクリア可能となった。

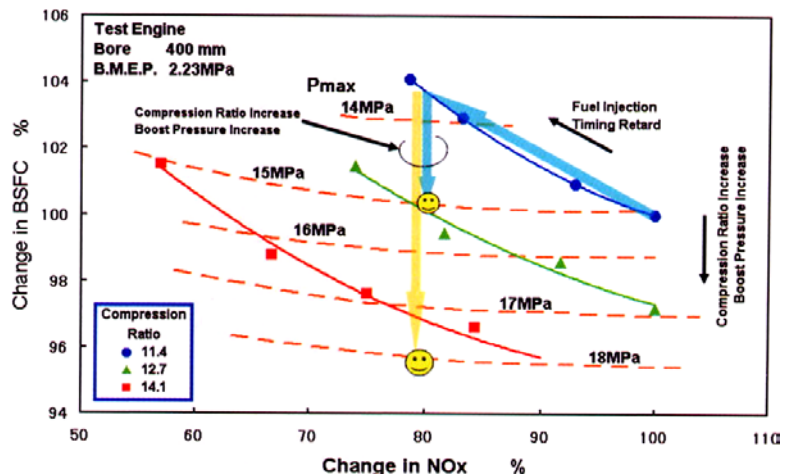
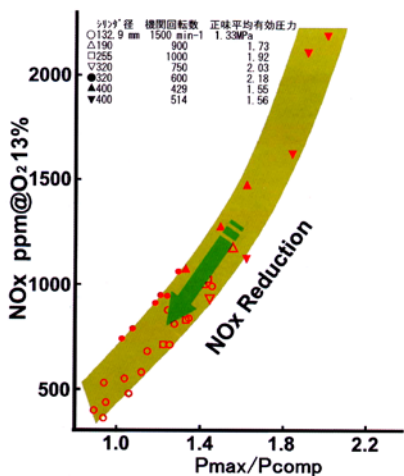


図 5.1 爆発度(P_{max}/P_{comp})と NO_x の関係¹⁾ 図 5.2 圧縮比、燃料噴射時期及びびが NO_x 及び燃料消費率に及ぼす影響¹⁾

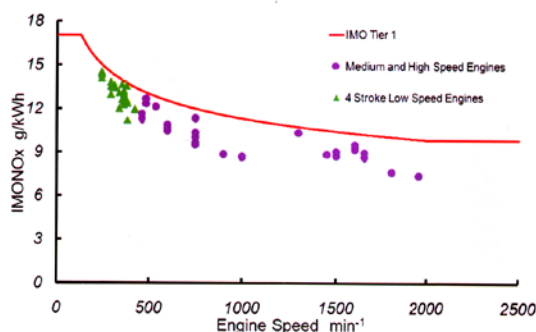


図 5.3 新潟原動機の IMO NO_x 一次規制対応状況¹⁾

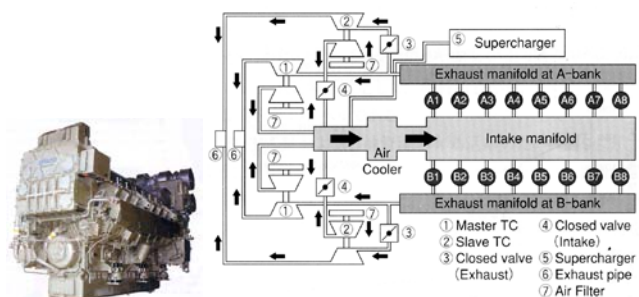


図 5.4 V20FX 型高速ディーゼルエンジン
シーケンシャルターボシステム²⁾

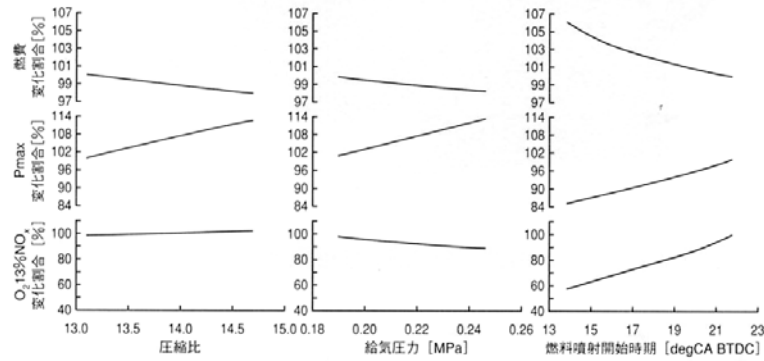


図 5.5 圧縮比、給気圧力及び燃料噴射時期が NOx、燃料消費率及びシリンダ内最高圧力に及ぼす影響(シミュレーション結果)²⁾

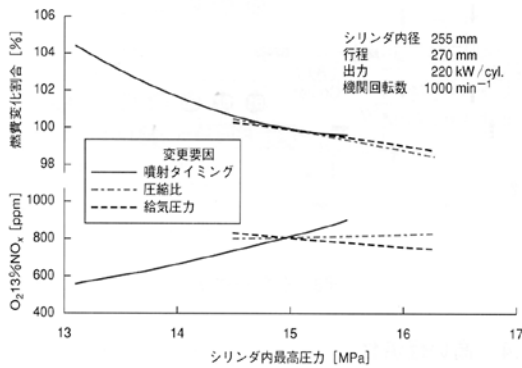


図 5.6 各種パラメータのシリンダ内最高圧力と NOx 及び燃料消費率の関係に及ぼす影響(シミュレーション結果)²⁾

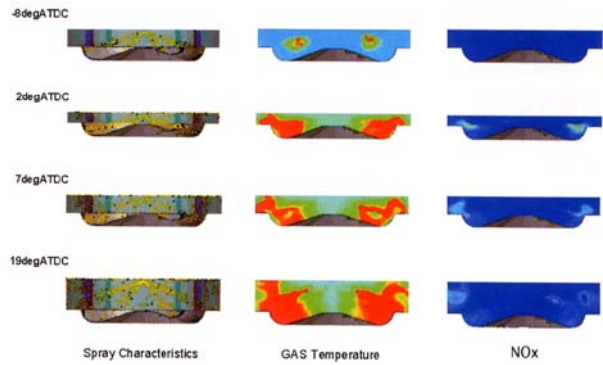


図 5.7 燃焼室内燃料噴霧形成過程、燃焼温度分布及び NOx 生成状況の解析結果²⁾

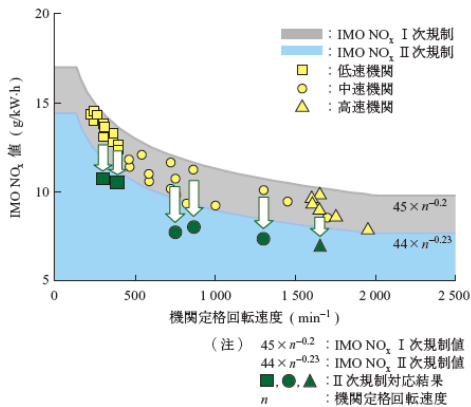


図 5.8 V20FX の IMO NOx 規制適合状況⁵⁾

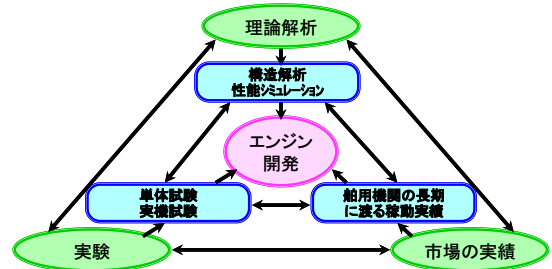


図 5.9 ニイガタ・ディーゼル機関開発システム²⁾

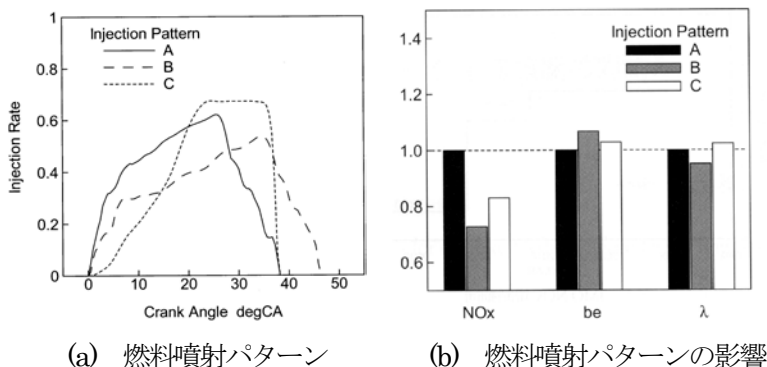
5.1.2 新潟原動機の IMO 二次規制対応技術

2011 年規制開始という短期間での対応が迫られることから、実績があり、機関の耐久性に影響を与えずまたユーザーにとっても負担の少ない、燃焼マッチングによる NOx 低減策の開発を目指している。高速機関や低速機関に比較して需要の少ない中速機関に対してはコモンレールシステムの開発が遅れており、すべての生産機種に対しコモンレール採用による対応は困難である。そこでこれまでと同様、次の低減対策を念頭にシミュレーションを行い、図 5.9 に示す技術開発システム²⁾で対応することとしている。

- (a) 燃料噴射率パターンの適正化
- (b) 吸排気カムタイミングの適正化(ミラーサイクルの採用)
- (c) 過給機マッチングによる給気圧力の上昇(高圧力比・高効率過給機の採用)

(1) 燃料噴射率パターン適正化(シミュレーション解析結果)

NO_xの低減技術は燃費とトレードオフの関係にあるため、種々の燃料噴射率パターンについてNO_x、燃料消費率(be)及び空気過剰率(λ)に及ぼす影響をシミュレーションにより解析した。その結果を図5.10¹⁾に示す。



(a) 燃料噴射パターン (b) 燃料噴射パターンの影響
図 5.10 燃料噴射パターンの適正化¹⁾

図5.10(a)のパターンAが現状(基本)の噴射パターンであり、パターンBは噴射初期の噴射率を抑えるため噴射期間が長くなった場合、パターンCは噴射初期の燃料噴射率を抑えかつ噴射期間(噴射終了時期)をパターンAと同じとするため後半の噴射率を高くしたものである。パターンBのNO_x低減率は大きいものの、燃焼期間が長くなりかつ空気導入率(空気過剰率λから類推)が低く燃料消費率、排煙濃度などの性能の悪化が避けられない。これに対しパターンCは、NO_x低減率はパターンBに劣るものの機関性能の低下は小さい。実際に燃料噴射率パターンを制御するにはコモンレール式電子制御の導入が好ましいと考えられるが、機種によってはカムプロファイルの変更等、機関本体の仕様により対応する。

(2) 吸・排気カムタイミング及び過給機マッチングによる給気圧力の上昇

ミラーサイクルの採用はNO_x低減に有効であるが、機関性能を維持するためには給気圧力を上昇させることが必要である。図5.11は吸気弁閉時期と給気圧力をパラメータとし、NO_x、燃料消費率及び空気過剰率をシミュレーションした結果である¹⁾。吸気弁閉時期を早めることでNO_xは低減できるが、燃費や煙濃度などの機関性能を維持するためにはNO_x低減率は小さくなるが給気圧力をある程度上昇させなければならない。また、機関性能として始動性や加速性についても検討が必要である。

5.1.3 新潟原動機のIMO三次規制対応技術¹⁾

ECAにおいて現規制から80%の削減が求められるIMO三次規制に対応するには、SCR脱硝装置による対応が不可欠と考えられている。図5.12は実船搭載実験を行っているSCR脱硝装置のレイアウトで、4サイクル機関であり排気温度に余裕があることから過給機下流側の化粧煙突内に脱硝反応器(Reactor)を設置し、還元剤としては安全で取扱いの容易な尿素水(濃度35%)を用いるものである。

試験結果ではかなりコンパクトなシステムとすることができ、高負荷時やある程度の負荷変動には対応可能であることが確認できたが、今後、低負荷での対応及びさらなるコンパクトを目指した開発が望まれている。

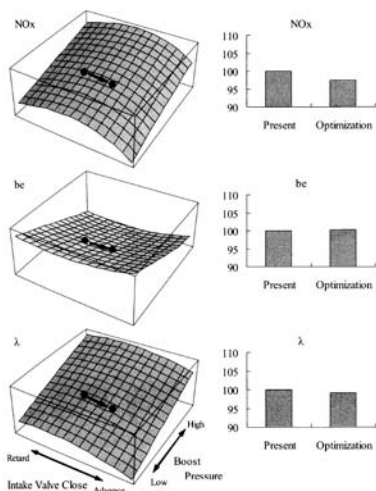


図 5.11 吸気弁閉時期と給気圧力の影響¹⁾

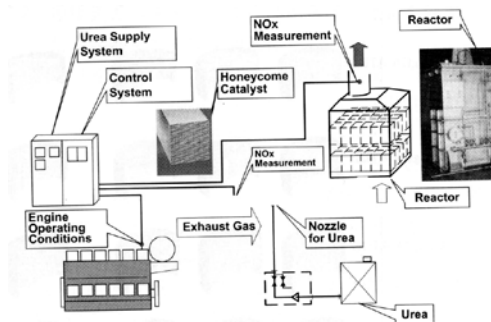


図 5.12 実船搭載試験SCRシステムレイアウト¹⁾

5.2 ヤンマーの規制対応技術

機関回転数が 1500rpm 以上の小形高速機関と比較して、回転数が 400~1200rpm、シリンダボア径が 170~500mm の中速機関はなじみが少ないが、これらは大型船舶の発電機関として、また中形船の主機として幅広く用いられている。燃焼形態から小形高速機関と排ガス特性が異なるため、自動車や建設機械用機関として開発された各種の対応技術をそのまま適用することができない場合もあり、中速機関固有の排ガス規制対応技術の開発が求められる場合が多い。機関サイズによる燃焼形態の違いをもとに排ガス特性ならびに対応技術の動向について以下に検討を加える⁶⁾。

5.2.1 燃焼室の構造

図 5.13 に、小形高速機関と中速機関の燃焼室形状の比較を示す⁶⁾。小形高速機関の場合、比較的低压の燃料噴霧を深皿燃焼室側壁に衝突させ、燃焼室キャビティ内で燃焼させる。このときキャビティに発生するスワールやスキッシュなどの空気流動により燃焼を促進させるため、キャビティ容積を大きくしトップクリアランスを小さく設計することにより空気流動を強化している。

中速機関の場合は逆に燃焼室外周部で燃焼させるため、浅皿としトップクリアランスは大きく設計する。燃焼室底面(ピストン頂面の浅皿の底)に噴霧を衝突させ、底面に沿って燃焼室外周部に到達して燃焼させるため、噴口角の狭いノズルを用いる。また衝突後の噴霧の広がりを円滑にするため、燃焼室底面形状の設計等に留意する。衝突後の噴霧の十分な拡がりが必要であるため燃料噴射圧力は高压とし、またスワールは燃焼室外周部の燃焼を阻害するため採用しない。

5.2.2 スモーク排出特性⁶⁾

(1) スモーク排出特性の比較

小形高速機関は過給機の有無により多くの出力レンジを実現しているが、要求出力レベルの高い中速機関ではすべて過給機付機関となる。無過給小形高速機関では高負荷時に吸入空気量が不足気味となるため黒煙を排出するが、過給機付小形高速機関では高負荷時には過給機により吸入空気量が増すため黒煙は発生しにくい。

中速機関は過給機付であるが過給機付小形高速機関と異なり、図 5.14 に示すように低負荷で黒煙が発生しやすく高負荷時にはスモーク特性が改善される。これは中速機関の場合、定格点(高負荷領域)での燃費を重視し、その点でのマッチングを基本とするため、定格負荷時に所要の燃料流量を短期間に噴射できるよう、燃料噴射圧力を上げ、またノズルの総噴口面積を設計している。そのため噴口径が大きく、これが燃料流量の少ない低負荷時には微粒化悪化の要因となりスモーク特性が悪化する。特に船用主機として三乗負荷則にのっとって負荷が変化する場合、低負荷では機関回転数も低くなり燃料噴射圧力が低下(ただし機械式燃料噴射装置の場合)するため、スモーク特性はさらに悪化する。

このときの様子を模式的に示したものが、図 5.15 である。機関回転数が一定であっても低負荷時には燃料噴射量が少なくなりポンププランジャ隙間からの漏れなどが相対的に増すため、やはり燃料噴射圧力が低下する。燃焼室底面に衝突後周辺部まで十分展開して燃焼するには高压噴射が不可欠であるが、燃料噴射圧力が低下した場合には、同図右に示すように燃焼室壁面への燃料の付着や空気導入率の低下による過濃混合気の滞留などスモーク濃度が悪化する。

中速機関の低負荷時のスモーク対策として、燃焼室底面への衝突を減ずるために噴口角の広いノズルとすると、噴射期間の長くなる高負荷時にピストン下降により露出する低温のシリンダライナを火炎が直撃し、スモーク及び燃費が悪化するばかりか、ライナ等の損傷の危険性も増す。

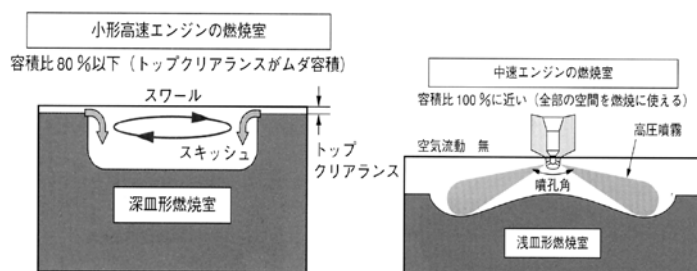


図 5.13 小形高速機関と中速機関の燃焼室形状比較⁶⁾

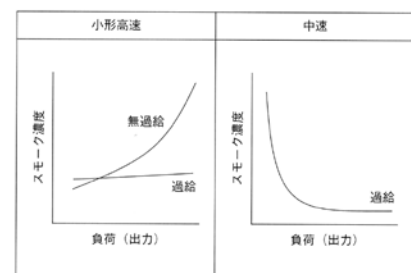


図 5.14 スモーク特性の比較⁶⁾

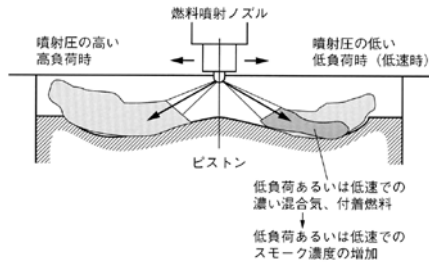


図 5.15 中速機関の燃焼⁶⁾

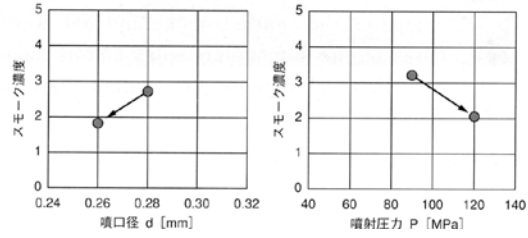


図 5.16 空気導入率⁶⁾

(2) スモーク低減技術

① 噴霧の微粒化促進(空気導入率の増加)

空気導入率は(5.1)式⁷⁾で示される。この式より図 5.16⁶⁾に示すように、空気導入率はノズル噴口径の 1/2 乗に反比例し燃料噴射圧力の 1/4 乗に比例することから、噴口径を絞り噴射圧力を高めることがスモーク低減に有効である。

$$\frac{G_a}{G_f} = \left[\frac{t \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\rho_f \cdot d} \right]^{0.5} \left\{ \frac{\rho_a \Delta P}{C} \right\}^{0.25} \quad (5.1)$$

ここで、

G_a/G_f : 噴霧内への空気導入率

t : 噴射開始からの時間

θ : 噴射角度

ρ_f : 燃料密度

ρ_a : 空気密度

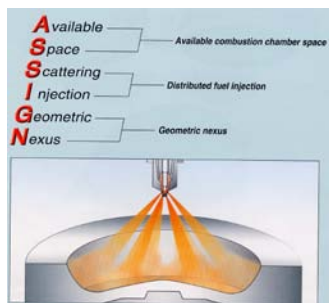
d : ノズル噴口径

ΔP : 噴射圧力

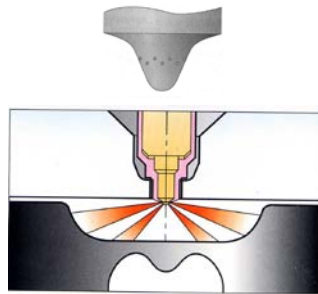
C : 係数

② ASSIGN 燃焼方式⁸⁾

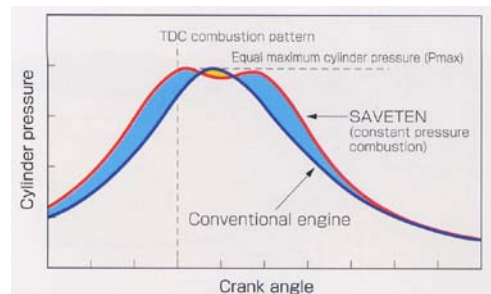
このようなコンセプトをもとに千鳥型ノズルならびに深皿形燃焼室を採用した ASSIGN 燃焼方式を開発し、これを用いた中速機関 SAVETEN シリーズを公表した。千鳥型ノズル、ASSIGN 燃焼方式のコンセプト及び SAVETEN と従来型機関との性能比較等を図 5.17⁹⁾に示す。千鳥型ノズルは同図に示すように小噴口径・多噴口径化により、総噴口面積を確保し、信頼性及び耐久性ならびにコストの観点から噴射圧力の増大なくして噴射期間の短縮と微粒化特性の向上を実現するとともに、噴口角を 2 通りにすることにより従来ノズルでは利用率の低かったノズル直下の空気も有効に利用するものである。



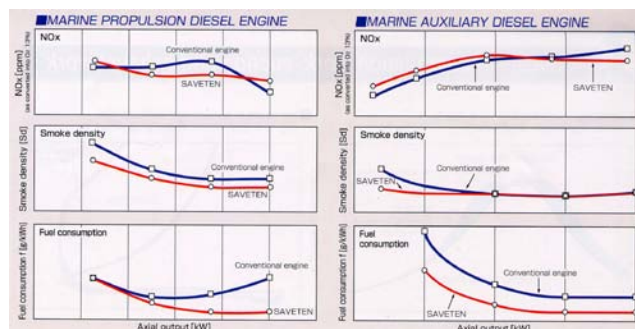
(a) ASSIGN 燃焼



(b) 千鳥型ノズル



(c) 定圧燃焼



(d) SAVETEN と従来型機関との性能比較

図 5.17 ASSIGN 燃焼と SAVETEN⁹⁾

中速(中型)ディーゼル機関は、従来、高圧燃料噴射による噴霧貫徹力を利用して混合気形成及び燃焼を行っていたが、SAVETEN シリーズでは高速機関で用いられてきた深皿形燃焼室とスキッシュやスワールによる流動技術を採用し、空気利用率を高め燃焼を悪化させることなく燃焼期間を短縮し、低燃費と低 NOx 及び低スモークを両立させた⁸⁾。

このような考え方をさらに進め、小形高速機関と同様の燃焼コンセプトを採用することも考えられる。一例として中速機関に小形高速機関並みの深皿燃焼室とスワールを適用すると、図 5.18 のようにスモークが改善される⁹⁾。しかし強力なスワールを付加することは給気効率の低下につながり、燃費重視の中速機関にとっては問題となる。また、トップクリアランスが小さくなるためピストンヘッドにバルブリースを設けることが必要となり局所熱応力の問題にも対応しなければならない。さらに図 5.19 に示すように、トップクリアランスなどのむだ容積の少ない浅皿形燃焼室の方が空気利用率に優れ、低い空気過剰率でもスモーク濃度は低い。このような点から、今しばらく浅皿形燃焼室が中速機関の主流を占めると考えられる。⁶⁾

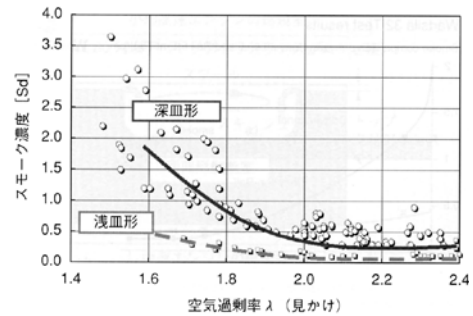
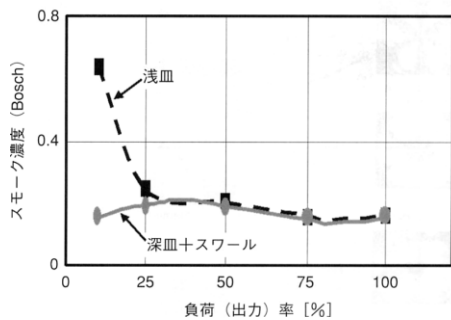


図 5.18 中速機関の深皿形燃焼室によるスモーク改善⁹⁾ 図 5.19 空気過剰率とスモーク濃度の関係⁶⁾

5.2.3 NOx 排出特性

(1) NOx 低減の考え方^{6),10)}

図 5.20 に、ディーゼルエンジンの燃焼過程を示す¹⁰⁾。同図(1)に示す燃焼初期は、混合状態が良好な空気過剰率 $\lambda=1$ のところから自発火、理論混合比付近の濃度の混合気による非常に高温の燃焼領域が形成されるため、ここで NOx が生成されやすい。同図(2)の燃焼中期においては、温度の低い未燃焼空気と混合しながら緩慢な燃焼となるため、燃焼温度は徐々に低下する。したがって未燃焼空気との混合を急速にすれば NOx 生成を抑制することが可能である。同図(3)の燃焼後期では燃焼ガスと残存過剰空気が燃焼室を占め、徐々に混合してさらに温度が低下する状態で、NOx の生成は少ない。すなわち、機関性能を維持しつつ、次の 2 点を実現することが NOx 低減に有効である。

- (a) 理論混合気($\lambda=1$)の燃焼領域を減らすこと。
- (b) 燃焼部分と未燃焼空気の混合を促進すること。

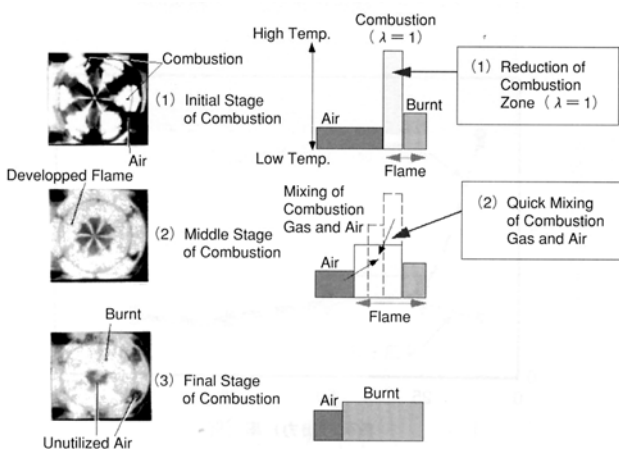


図 5.20 ディーゼル機関の燃焼過程¹⁰⁾

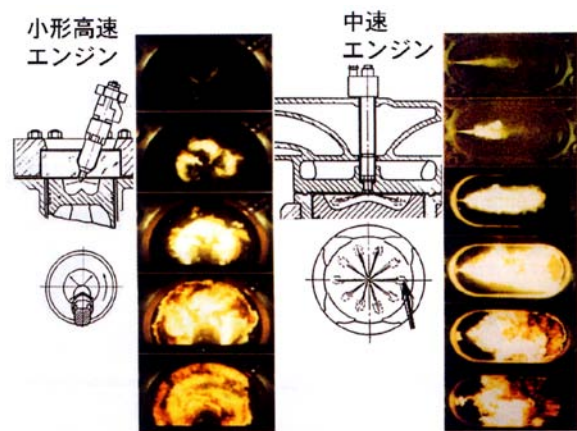


図 5.21 小形高速機関と中速機関の燃焼状態比較¹¹⁾

図 5.21¹¹⁾は、小形高速機関と中速機関の燃焼状況を比較したものである。小形高速機関では燃焼室壁面付近に火炎が形成されるのに対し、中速機関では発達した噴霧の周囲に火炎が形成される。図 5.22 は噴霧への空気の導入モデル⁷⁾で、この式に各種の物性値などを代入すると、空気過剰率 $\lambda=1$ となるノズルからの距離 X は

噴口径 d に対し、

$$X = 200d \tag{5.2}$$

で与えられる。すなわち、ノズル噴口径の概ね 200 倍の位置で $\lambda=1$ の理論混合気が形成され、活発な燃焼により NO_x も活発に生成されていると推測できる。この考え方で小形高速機関と中速機関のノズルから燃焼室壁面までの距離と燃焼状態を整理したものが、図 5.23¹²⁾である。

小形高速機関では $\lambda=1$ の混合気(理論混合気)が形成される前に噴霧は燃焼室壁面に衝突し壁面付近で火炎を形成するが、中速機関では小径・多噴口でかつ壁面までの距離が長いため、すべての噴霧が十分発達し多量の理論混合気が常に供給される状態で放射状の火炎が形成されているものと推定される¹²⁾。この高温燃焼領域の存在と、小形機関に比べて回転数が低いことによる長い滞留時間が影響し、中速機関の NO_x 排出量が多いものと考えられる。

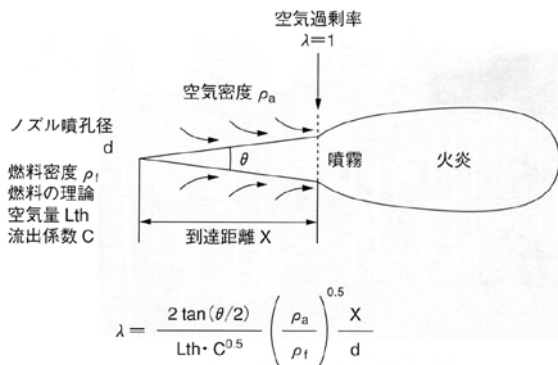


図 5.22 噴霧への空気導入による混合気形成⁷⁾

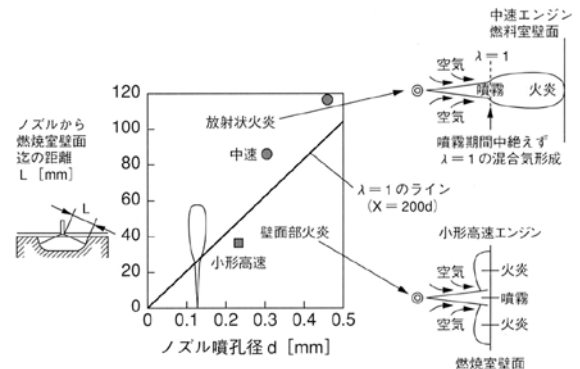


図 5.23 小形高速機関と中速機関の火炎¹²⁾

(2) NO_x 低減技術^{6),12)}

中速機関においても高速機関と同様、 $\lambda=1$ の理論混合気が形成される前に噴霧を燃焼室壁に衝突させるなどして理論混合気の高燃焼領域を減少させることにより、 NO_x 生成を抑制することが考えられる。

また、図 5.20 をもとに検討したように、燃焼部分と未燃焼空気の急速混合による燃焼温度低下により NO_x 生成を抑えることが可能である。燃焼部分と未燃焼空気の急速混合にはこれまで中速機関では採用されることの少なかったスワールを積極的に活用することになる。このような燃焼改善による対応例を、図 5.24¹²⁾に示す。燃焼室壁面までの噴霧の到達距離を短くするため噴口角 ϕ を小さくした($\phi=150^\circ \Rightarrow 130^\circ$)結果、壁面衝突によりその付近に過濃な混合気が形成されずが発生するが、スワールにより酸化(再燃焼)するためスモーク濃度は低減できる。

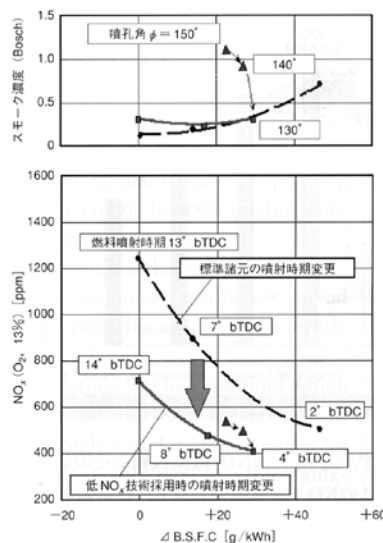


図 5.24 火炎の壁面制御とスワールによる NO_x の低減¹²⁾

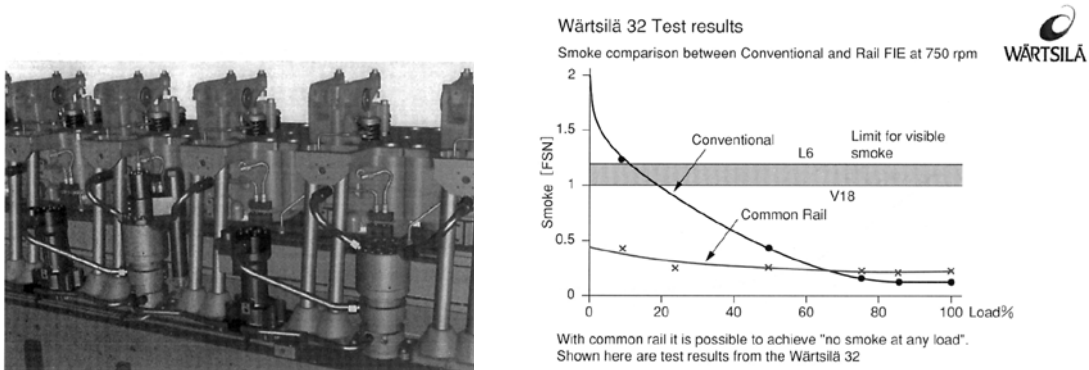
5.3 海外メーカーのその他の対応技術

海外エンジンメーカーの規制適合技術のうち、特長のあるものについて解説する。

5.3.1 Wartsila の対応技術

(1) コモンレール(CR : Common Rail)システムの採用

(5.1)式⁷⁾をもとにした空気導入率の検討の結果、ヤンマーは前述のとおり ASSIGN 燃焼方式を開発し、燃料噴射圧力を上げることなくスモークの低減を実現した。これに対し Wartsila は燃料噴射圧力の高圧化に着目し、低負荷時においても高圧噴射が確実な蓄圧式噴射系であるコモンレール(CR : Common Rail)を採用した。図 5.25 は、Wartsila 社の CR 搭載中速機関の外観とそのスモーク特性である¹³⁾。中速機関特有の低負荷域のスモーク濃度が大きく改善されている。



(a) 外観

(b) スモーク特性の改善

図 5.25 Wartsila 社の CR 搭載中速機関の外観とそのスモーク特性¹³⁾

(2) 水添加燃焼および SCR

図 5.26 は、IMO 一次規制開始当時の対応技術の見通しについて示したものである¹³⁾。Wartsila 社の場合、現在、図 5.27 に示す Low NO_x Combustion により燃費の悪化なくして 30-50%程度、シリンダ内直接水噴射で 50-60%程度、Compact SCR システムの採用により 85-95%程度削減可能としている^{14),15)}。図 5.28 に Wartsila 社のシリンダ内直接水噴射システムの概要を、また図 5.29 に Compact SCR システムの概要を示す^{13),15)}。

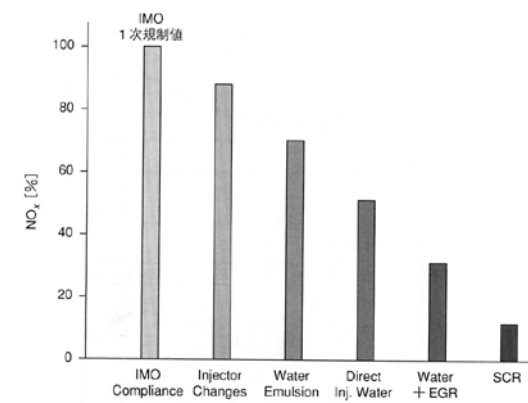


図 5.26 対応技術の見通し¹³⁾

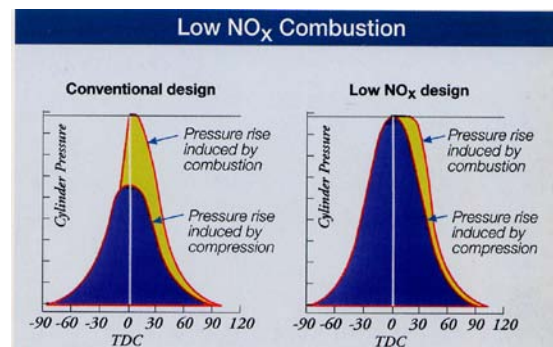


図 5.27 Wartsila Low NO_x Combustion¹⁴⁾

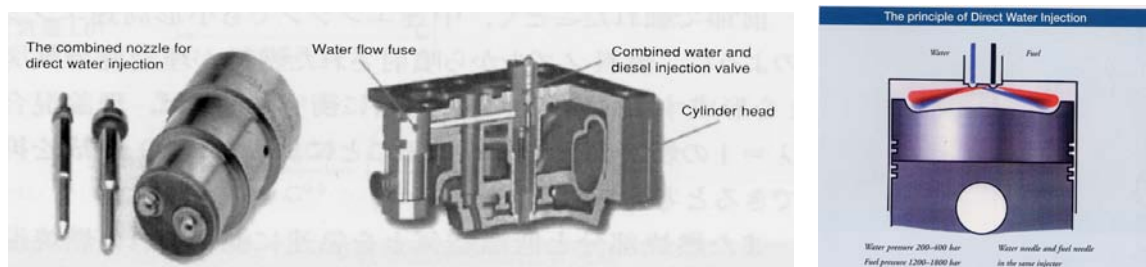


図 5.28 Wartsila 社のシリンダ内直接水噴射システム^{13),14)}

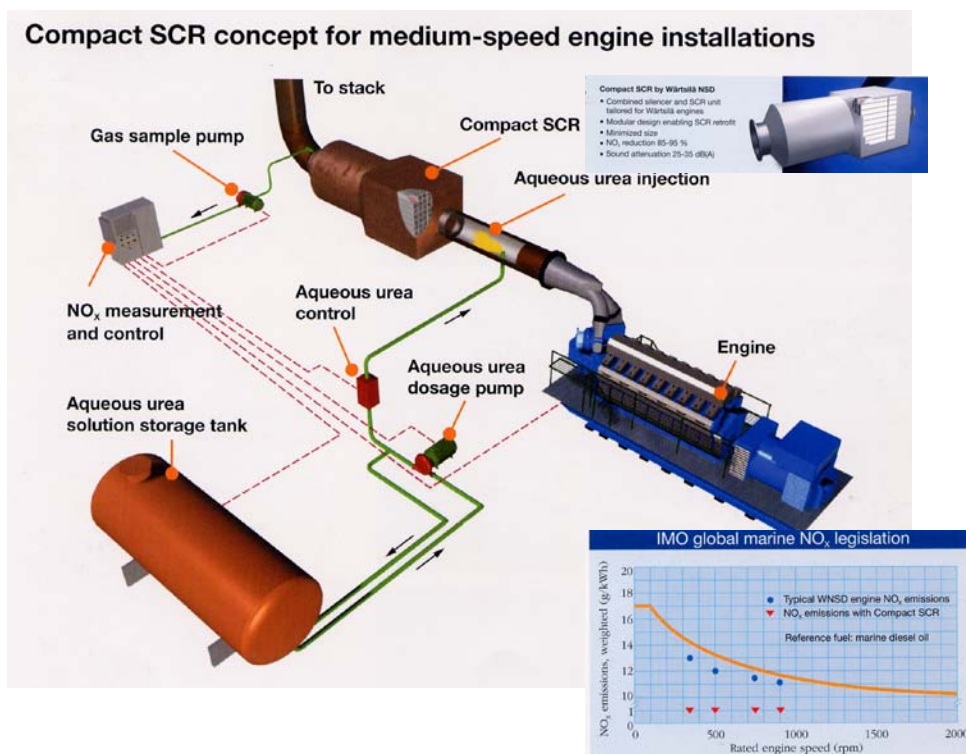


図 5.29 Wartsila 社 Compact SCR システム 14),15)

5.3.2 MAN Diesel & Turbo 社の対応技術

(1) コモンレール(CR : Common Rail)システムの採用 16), 17)

MAN B&W Diesel 社は電子制御コモンレールシステムを開発し、燃料噴射圧力及び噴射タイミングをそれぞれ独立して自由に制御できるなどの高い燃料噴射制御能力を活用して、低燃費と低エミッション、特に低負荷特性を改善した。このシステムは制御部分とともにモジュール化されており、既存機関への装備も可能である。図 5.30 にシステムの概要を、また、図 5.31 に性能改善の一例を示す 16), 17)。

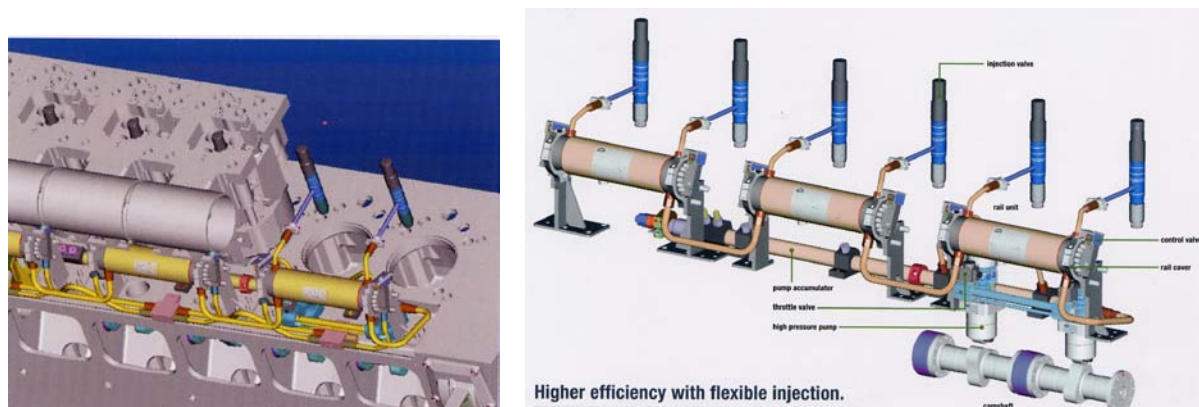


図 5.30 MAN B&W 社コモンレールシステムの概要 16), 17)

(2) その他の技術

MAN B&W 社は、既存ディーゼル機関の改良技術の開発も進め、燃焼室、燃料噴射装置およびバルブタイミングの改良と新過給機とのマッチングによる燃焼システムの改善、水エマルジョン燃焼システムの導入、SCR 式脱硝装置の採用などによる対応技術を確認している。燃焼システムの改善により IMO 一次 NO_x 規制をクリアするとともに、図 5.32 に示すように排煙濃度も改善された 18)。また、図 5.33 に示す HAM(Humid Air Motor)と呼ばれる給気加湿システムによる NO_x 低減技術も開発している 19)。

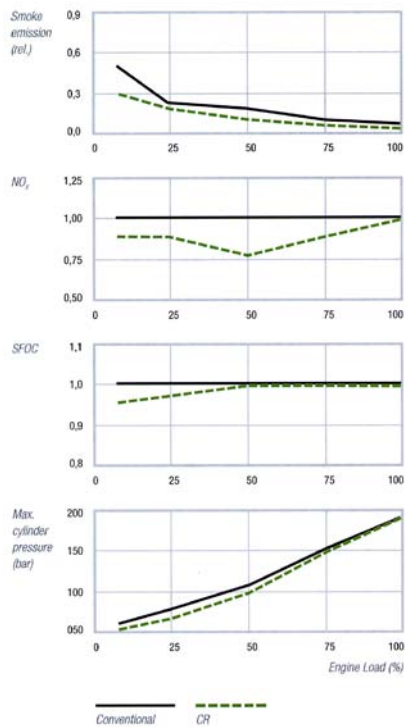


図 5.31 コモンレールシステムによる性能改善例^{16), 17)}

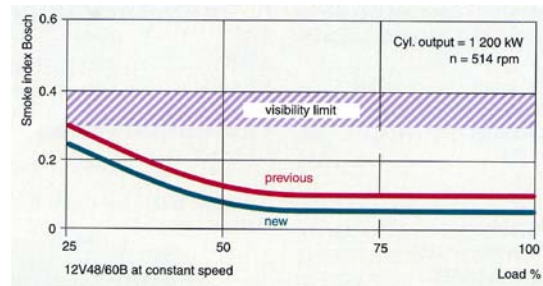
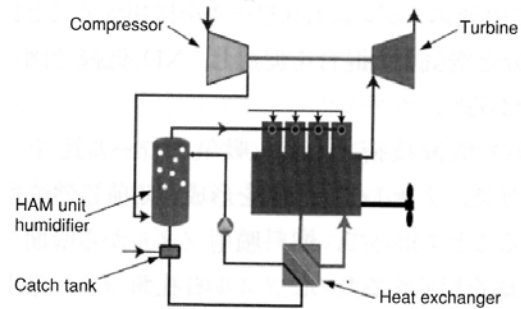


図 5.32 MAN B&W 社排煙濃度の改善¹⁸⁾

HAM - Principal Layout



Courtesy of MAN B&W

図 5.33 MAN B&W 社 HAM 給気加湿システム¹⁹⁾

【参考文献】

- 1) 川上, 排ガス規制と 4 ストローク中速機関の対応, 日マリ学会誌, 第 43 巻第 6 号(2008 年 11 月), 30-35.
- 2) 佐藤・三村・加藤, 高速船用新潟 V20FX 型高速ディーゼル機関, エンジンテクノロジー, No.44(2006 年 6 月), 26-30.
- 3) 佐藤・戸田, 16V20FX 及び 6MG17HX 型ディーゼル機関開発と実績紹介, 日マリ学会誌, 第 39 巻第 12 号(2004 年 12 月), 41-46.
- 4) 横山・矢口・松田, 新潟 V20FX 型高速ディーゼルエンジン, 日マリ学会誌, 第 36 巻第 11 号(2001 年 11 月), 26-29.
- 5) 田貝・三村・後藤, 省燃費・低 NO_x を同時実現する船舶排出ガス規制対応技術の開発, IHI 技報, 第 50 巻第 4 号(2010), 39-45.
- 6) 吉川, 高速船用エンジンの技術動向, エンジンテクノロジー, No.44(2006 年 6 月), 37-42.
- 7) 和栗ほか 3 名, 機論, 25-156(1959), 820.
- 8) ヤンマーディーゼル, ヤンマーディーゼルのエコディーゼル SAVETEN, エンジンテクノロジー, No.11(2000 年 11 月), 41-45.
- 9) ヤンマー, Eco Diesel SAVETEN カタログ.
- 10) S.Yoshikawa ほか 5 名, CIMAC, (1995), D28.
- 11) J.F.Alcock, Proc.I.Mech.E., No.5(1962), 179-200.
- 12) 秋本・吉川, 日マリ学会誌, 第 34 巻第 2 号(2003 年 3 月).
- 13) Wartsila 社カタログ, Technology Review (2003).
- 14) Wartsila 社カタログ, Economy and ecology meet at sea.
- 15) Wartsila 社カタログ, Emission control, Compact Selective Catalytic Reduction (Compact SCR).
- 16) MAN B&WDiesel 社カタログ, Common Rail-Less consumption. Less soot. Less NO_x.
- 17) MAN B&WDiesel 社カタログ, Common Rail-New HFO Common Rail System for Medium-speed Diesel Engines.
- 18) MAN B&WDiesel 社カタログ, Marine 4 stroke Diesel Engines.
- 19) MAN B&W カタログ, Technology Review (2003).

6 4 ストローク高速機関における各社の対応技術

6.1 ヤンマーの規制対応技術¹⁾

6.1.1 ヤンマーの一次規制対応技術

一次規制に対する基本的な対応手法は、燃料噴射時期の遅延であり、これに伴う燃料消費率の悪化を抑えるために種々の方策を組み合わせた ASSIGIN 燃焼方式²⁾⁴⁾を開発した。

(1) 等圧燃焼

内燃機関の基本サイクル(理論サイクル)において、最高圧力を制限した場合、図 6.1 および式(6.1)に示すように、理論上、定圧燃焼サイクルの理論熱効率が最高となる。NO_x を抑制するには予混合燃焼(定容燃焼)による急激な圧力および温度の上昇を抑えることが有効であることから、最高圧力を制限した定圧燃焼を実現することにより NO_x を抑制するとともに燃費の悪化を抑えることができる。これを目指して開発された燃焼方式が ASSIGIN 燃焼方式である。

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\rho \sigma^{\kappa-1}}{\rho - 1 + \kappa \rho (\sigma - 1)} \quad (6.1)$$

ここで、

η_{th} : 理論熱効率

ρ : 爆発度

ε : 圧縮比

σ : 締切比

κ : 断熱指数(比熱の比)

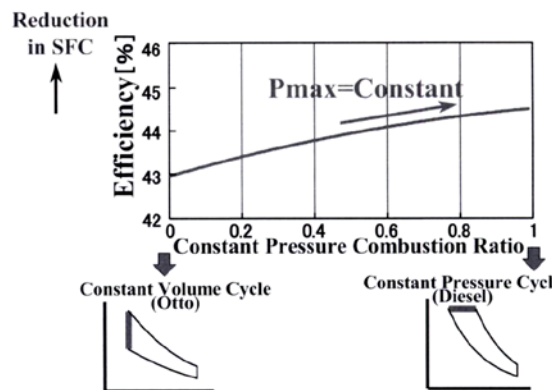


図 6.1 熱効率の計算結果

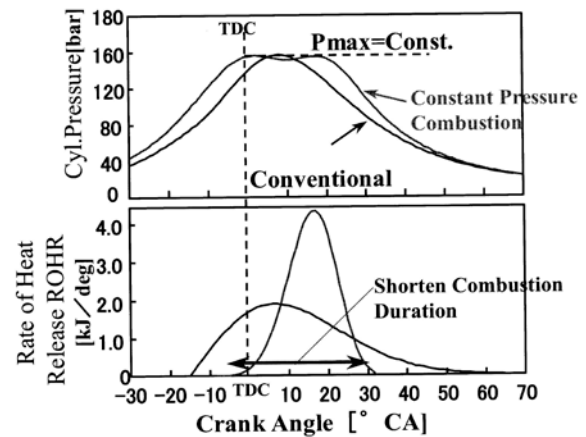


図 6.2 従来の燃焼方式と等圧燃焼の計算結果比較

従来の燃焼方式と ASSIGIN 燃焼方式を比較したものが、図 6.2 である。この燃焼方式を実現するためには、次の要件を充足することが必要である。

- (a) 圧縮圧力の増加
- (b) 燃焼開始時期の遅延
- (c) 燃焼期間の短縮

(a)の圧縮圧力の増加については過給圧および圧縮圧を増加することにより、また(b)の燃焼開始時期の遅延については噴射開始時期を遅延することにより、設計および機構的に対応した。(c)の燃焼期間の短縮については、次項のとおりである。

(2) 燃焼期間の短縮

ASSIGIN 燃焼方式においては、次の方法で燃焼期間を短縮している。

- (a) 燃料と空気の混合気形成促進
- (b) 燃料噴射期間の短縮

(a)の混合気形成促進は、高速ディーゼル機関において一般に用いられる図 6.3 に示す深皿燃焼室におけるスキッシュおよび吸気ポート形状により形成されるスワールを利用している。スキッシュおよびスワールを浅皿燃焼室の場合と比較した結果を、図 6.4 に示す。スキッシュについては約 7 倍、スワールについては約 2 倍の強度が得られることがわかる。

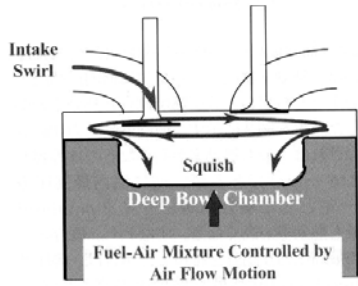
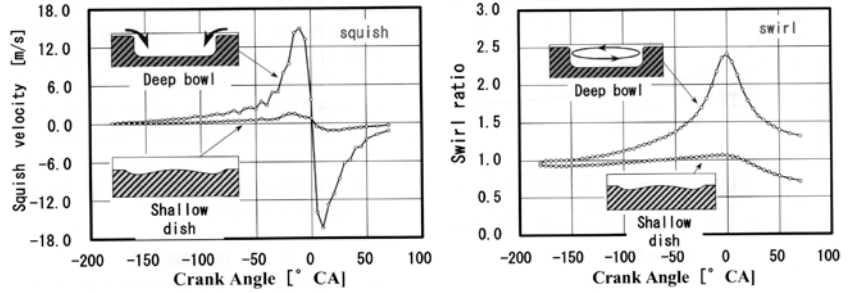


図 6.3 深皿燃焼室



(a)スキッシュ流速の計算結果 (b)スワール流速の計算結果

図 6.4 浅皿燃焼室と深皿燃焼室の比較

(b)の燃焼期間の短縮は、燃料噴射に引き続き拡散燃焼が主体のディーゼル機関では、燃料噴射期間の短縮が燃焼期間の短縮に有効である。

燃料噴射期間は、次式で示される。

$$\phi = \frac{K \cdot N \cdot Q}{n \cdot d^2 \Delta P^{0.5}} \quad (6.2)$$

ここで、

ϕ	: 燃料噴射期間	n	: ノズル噴口数
N	: 機関回転速度	d	: ノズル噴口径
Q	: 1 回当たりの燃料噴射量	ΔP	: 噴射圧力

(6.2)式より、次の事項により燃料噴射期間すなわち燃焼期間を短縮することができる。

- (e) 噴射圧力 ΔP の増加
- (f) ノズル噴口径 d の増加
- (g) ノズル噴口数 n の増加

(a)の噴射圧力の増加は既存の噴射系ではある程度限界に達しており、さらなる噴射圧力の増大にはコモンレールの採用等が考えられる。既存エンジンをベースにした場合、さらなる噴射圧力の増大はコスト面から厳しいため、他の方向で検討することが必要である。

(b)のノズル噴口径 d の増加は、噴霧粒径の増加すなわち微粒化が不十分となり燃焼不良、排気色悪化等につながる。この点については、排気色に影響する燃料噴霧内への空気導入率 G_a/G_f により検討することができる。

$$\frac{G_a}{G_f} = \left[\frac{t \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\rho_f \cdot d} \right]^{0.5} \left\{ \frac{\rho_a \Delta P}{C} \right\}^{0.25} \quad (6.3)(5.1 \text{ 式再掲})^5$$

ここで、

G_a/G_f	: 噴霧内への空気導入率	ρ_a	: 空気密度
t	: 噴射開始からの時間	d	: ノズル噴口径
θ	: 噴射角度	ΔP	: 噴射圧力
ρ_f	: 燃料密度	C	: 係数

(6.3)式(5.1 式の再掲)よりノズル噴口径 d の増加は、空気導入率 G_a/G_f を低下させ黒煙を発生させる要因となる。これに対しノズル噴口数 n の増加は、噴口総面積を増加させることが必要ではあるがノズル噴口径 d を小さくでき、噴霧内への空気導入率 G_a/G_f の向上に有効である。

ASSIGN 燃焼方式ではノズル噴口径 d を小さくしノズル噴口数 n を増加して、次項に示すように燃料弁と燃焼室の組合せを適切にすることにより燃料噴射期間すなわち燃焼期間の短縮を実現した。

(3) 千鳥型燃料噴射ノズルの採用による燃焼室内未利用空気の利用

図 6.5 に示すように、従来の燃料噴射弁ではノズル直下に未利用の空気が存在する。これは従来のノズルが

水平方向に対しひとつの俯角で配列されていたため、ASSIGN 燃焼方式ではこの俯角を図 6.6 に示すように 2 方向とすることにより、ノズル噴口径 d を小さくしノズル噴口数 n を増加して、かつノズル直下の従来の未利用空気を利用した迅速な燃焼を実現した。その燃焼状況を図 6.7 に、また燃焼時の圧力波形を図 6.8 に示す。シリンダ内の燃焼最高圧力は従来の燃焼方式と変わらないが、燃料噴射圧力は従来型よりも低くなっている。

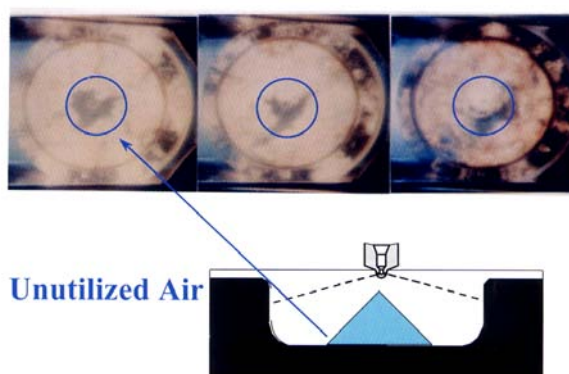


図 6.5 従来燃焼方式

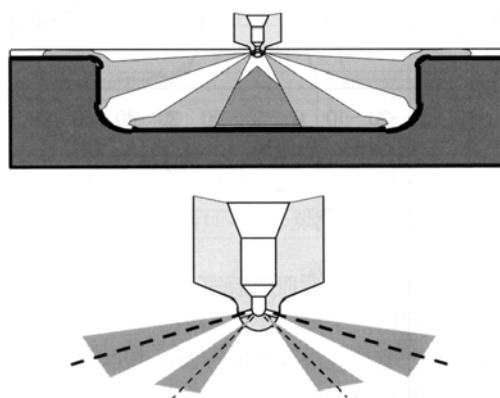


図 6.6 千鳥型ノズル

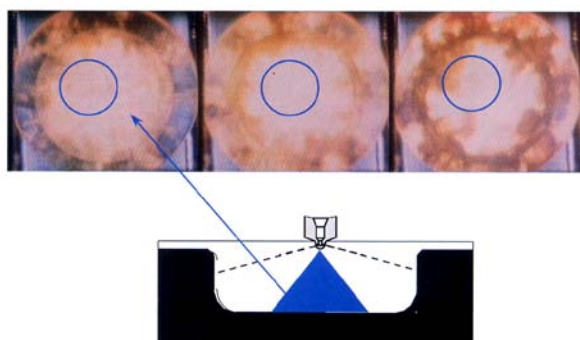


図 6.7 ASSIGN 燃焼

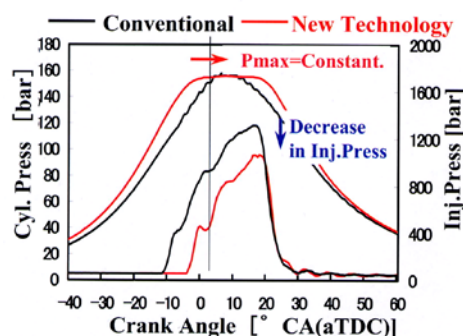


図 6.8 ASSIGN 燃焼圧力波形

6.1.2 IMO 二次規制対応

IMO 二次規制も In-Engine すなわち機関の設計による燃焼改善等に対応可能な範囲とされているが、機関のメリットを損なわずより厳しい規制をクリアするには、一次規制対応技術に加えてさらに、高圧力比過給機、EGR、電子制御燃料噴射装置(CR : Common Rail を含む)の採用等、基本設計の大きな変更と技術開発が必要である。

(1) 給気冷却

燃焼過程において燃焼部分と低温の未燃焼空気を急速に混合することができれば、燃焼温度を早く低下させることにより NOx の発生を抑制することが可能である。図 6.9 は、エアクーラの冷却水量を変化させることにより、高速機関でその効果を調査した結果を示す。吸気温度の変化に対する NOx の低減率はほぼ一定で、吸気温度を 10℃ 低下させることにより NOx を約 5% 低減することができる。吸気温度を下げると着火遅れが長くなるため初期燃焼は活発になるが、火炎領域の温度低下が得られるためその効果により NOx が低減するものと考えられる。

しかし、NOx を 20% 低下させるためには吸気温度を約 30℃ 低下させることが必要であるが、吸気冷却器の効率向上および容量増加には限界がある。そこで給気温度を低下させるというコンセプトを別の手法で実現しようとするものがミラーサイクル⁶⁷⁾の採用である。吸気弁の開閉時期をカムプロファイルにより調整することにより圧縮行程を膨張行程より短く(圧縮仕事を少なく)し、燃焼最高圧力および温度を低くするもので、図 6.17 に示すように燃焼前のシリンダ内温度(給気温度)を低下させることができる。給気の下行程で吸気弁を閉鎖する方式と、圧縮開始後に遅れて吸気弁を閉じる方法があるが、前者の方が断熱膨張を利用することによる給気温度低下の効果が大きいといわれている。ただし給気量確保のためには高圧力比の過給機が必要である

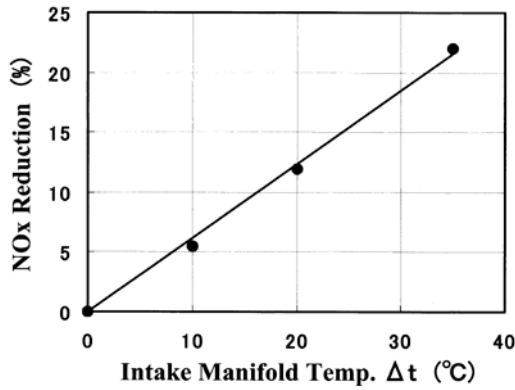


図 6.9 給気温度が NOx 生成に及ぼす影響

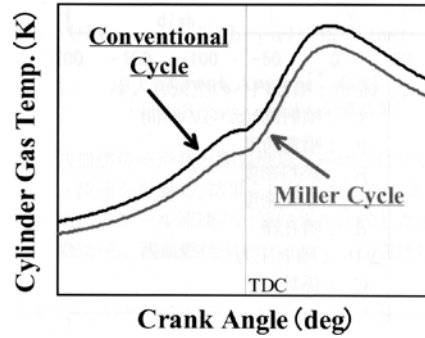


図 6.10 ミラーサイクルによるシリンダ内温度の変化

(2) EGR

EGR すなわち Exhaust Gas Recirculation(排気ガス再循環)は、熱容量の大きい排気ガスをシリンダ内に導入することにより、また、酸素分率を下げることにより NOx 生成を抑制することを目的としたものである。自動車用ガソリン機関ではすでに実用化された技術であるが、船用機関の場合、特に燃料中の硫黄分が多い場合には低温腐食の問題が生じるとともに、燃焼時の酸素不足によるスモークの問題が避けられないことや潤滑油の早期劣化、シリンダライナやリングの摩耗など、付随する技術的課題が多い。

EGR には外部 EGR と内部 EGR の 2 方式がある。

① 外部 EGR 方式

外部 EGR は排気経路から燃焼ガスの一部を吸気に還流するものであり、配管の基本的システムは図 6.11 に示すとおりである。その効果を図 6.12 に示す。ここで EGR 率とは次式で示される。

$$EGR \text{ Ratio} = \frac{Q_0 - Q_R}{Q_0} \quad (6.4)$$

ここで、

Q_0 : 通常運転時の吸入空気量

Q_R : EGR 適用時の吸入空気量

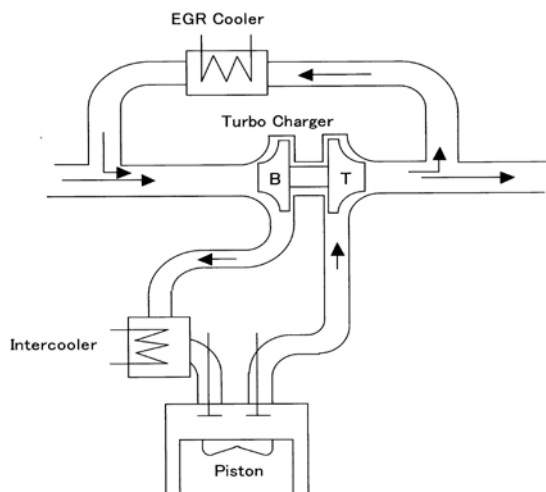


図 6.11 外部 EGR システム(低圧経路)

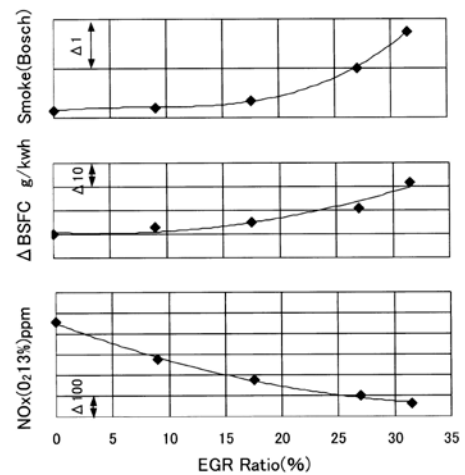


図 6.12 外部 EGR による NOx 低減効果

図 6.12 に示すように EGR 率 5% で NOx 低減率は 20% となり、燃費および排気色の悪化も少ない。関連機器の信頼性についての課題は残るが、有効な NOx 低減手段である。

図 6.11 は過給機を出た排気を再循環させるいわゆる低圧経路といわれるものである。この場合過給機出口の抵抗増加によるサージングの危険性がある。過給機入り口前から排気を再循環させる高圧経路の場合、過給機入力の減少に対応するために高効率過給機を用いなければならない。その結果、給気圧力が高くなり排気圧力による排気ガスのシリンダ内への還元ができない場合があるなどの課題が生じる。そのためたとえば MTU 社

などは、1 シリンダの排気管を給気マニホールドに直結し、ピストンのポンプ作用で排気ガスを強制的に給気管に戻す方式を採用している⁸⁾。高圧経路方式で EGR を実現させるために、ウェストゲート付過給機や VG 過給機等が採用されている。

② 内部 EGR 方式

内部 EGR 方式は、機関給排気弁の開閉を制御し、排気をシリンダ内に引き戻すことにより EGR 効果を得るものである。自動車用機関ではすでに実用化されたものであり、その一例(排気弁再啓開)を図 6.13⁹⁾に示す。排気弁再啓開による内部 EGR とは給気行程中に排気弁を再度開くことで、他のシリンダの排気パルスを利用して排気ガスの一部をシリンダ内に戻すものである。その効果は図 6.14 に示すとおりで、EGR 率 5% で NOx 低減率約 10% と外部 EGR に比べればその効果は小さい。また、回転数により EGR 率が変化することもあり、外部 EGR に比べて安定した効果を得るには関連技術の進展に期待しなければならない。なお、外部 EGR と同様、2 次規制に対応するには他の技術との組み合わせが不可欠である。

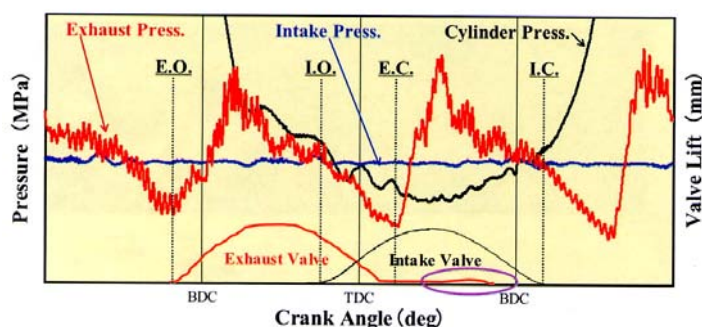


図 6.13 内部 EGR 方式(排気弁啓開適用時の給排気過程)

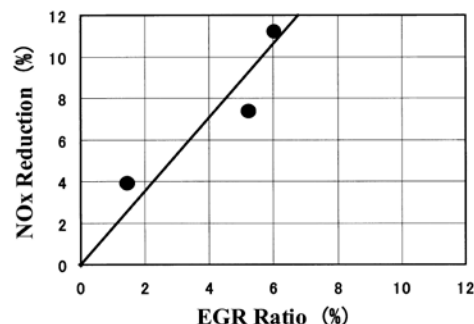


図 6.14 内部 EGR の効果

(3) 電子制御燃料噴射

低 NOx 対策または低スモーク対策として機械式燃料噴射系のマッチングを図る際は、カムタイミング及びカムプロファイルの変更(プランジャ速度の高速化)ならびにプランジャ径の増大による燃料噴射時期の遅延と高噴射率を実現するが、機械式噴射装置の場合は噴射特性が機関回転速度に依存するなど燃焼マッチングを図る自由度が小さい。

船用高速ディーゼル機関には、基本から船用専用として設計されたものと、陸上のトラック用または建設機械用として設計されたエンジンをベースに設計したものがある。後者は、陸上の厳しい環境規制に適合させるため、電子制御燃料噴射装置が装備されたものが多いが、最近では前者についても電子制御を採用する例が増えてきている。

ヤンマーでは 6LY3-ETP(5.8L S/D=110/105.9 3300rpm 353kW)において制御オイル経路のポートを電磁弁で制御する電子制御油圧タイマを採用し、機関回転速度と負荷に応じて噴射時期を最適制御することにより EPA Tier2 規制等をクリアした。噴射時期を可変制御することが可能となったため、実用域での排気エミッションと燃費の両立、高トルク特性、アイドル回転域での青白煙低減を実現した。

環境規制においては NOx のみならず PM をも低減することが要求され、電子制御燃料噴射装置による噴射時期の可変化と噴射圧力の高圧化のみでは対応が困難となってきた。これに対応するため最近の船用高速ディーゼル機関では、自動車用機関などと同様マルチ噴射が採用された例もある。マルチ噴射におけるプリ噴射は低 NOx、低騒音に有効であり、ポスト噴射はスートの酸化を促進するため排気色、PM 低減に効果があるといわれている。

代表的なマルチ噴射系として、Bosch 社の Modular Common Rail System (MCRS)¹⁰⁾がある。電磁弁、コントロールバルブなどをノズル近くに配置するとともに可動部分の質量を軽減することにより応答遅れの短縮と安定した微小噴射を実現している。MTU 社のシリーズ 2000CR モデルにおいてもこのシステムが採用されており、EPA Tier2 レベルに対応しつつ高出力(高トルク)、低燃費を実現した¹¹⁾。

6.1.3 IMO 三次規制対応

三次規制については In-Engine の燃焼技術だけでは対応することが困難であり、筒内水噴射技術や後処理装置等の外部処理装置の使用を前提としなければ対応が困難とされている。欧州では給気加湿や EGR などが中心技術として研究開発が進められているが、日本では SCR が有力な方法として開発が進められている。いずれについても、既存ならびに今後開発が期待できる In-Engine 燃焼技術などと組み合わせるため、懸案とされている SCR システム設置スペースの問題についても解決策が見出されるものと考えられる。

6.2 燃料噴射装置を中心としたその他のメーカーにおける対応技術の開発動向(中・低速機関への対応技術も含む)

6.2.1 燃料制御の基本方式¹²⁾

NO_x 低減には燃料噴射初期の噴射量を抑制し予混合燃焼を減じることが有効であるが、そのままでは噴射期間が長引きスモーク濃度や燃費が悪化する。したがって運転条件に応じて噴射率(噴射パターン)を制御することが必要であるが、機械式噴射装置では困難がともなうことから電気的な制御機構を導入した電子制御燃料噴射制御装置が開発されている。

ディーゼルエンジンにおける燃料制御の項目は次のとおりである。

- (a) 燃料量 : 回転数制御・負荷制御
- (b) 燃料噴射時期 : 燃費改善・エミッション改善
- (c) 燃料噴射パターン : 燃費改善・エミッション改善

具体的な制御方式としては次のようなものがあり、高速機関のみならず中速機関や大型機関にも適用されるものもある。

(1) Electric Unit Injector System (E.U.I.)

ユニットインジェクタ内部に電磁弁を備え、この電磁弁で逃がしのタイミングを調節することにより燃料油圧の昇圧タイミングを制御する。ユニットインジェクタ方式のエンジンの電子制御化の際に用いられる方式である。

(2) Electric Unit Pump System (E.U.P.)

燃料噴射ポンプ内にソレノイド弁を備え、燃料の供給/ドレンライン(戻りライン)の開閉を制御することにより、燃料油圧の昇圧タイミングすなわち燃料噴射時期を調整する。中には戻りラインへの絞りを調整(ソレノイドの電磁力などを調整)することにより、燃料噴射率(パターン)制御が可能なものもある。一例を図 6.15 に示す。

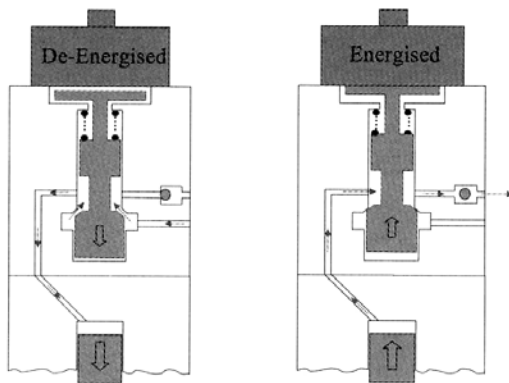


図 6.15 Electric Unit Pump System (E.U.P.)

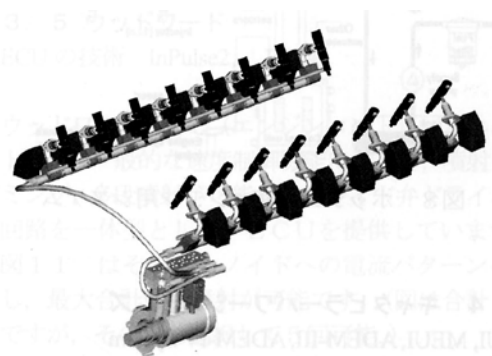


図 6.16 Common Rail System (C.R.S.)

(3) Double Popet System (D.P.S.)

E.U.P.システムをベースに 2 個のソレノイド弁を使用して、これらの差動を利用して燃料噴射率(パターン)の制御も可能としたものである。

(4) Common Rail System (C.R.S.)

現在、もっとも自由度の高い燃料制御方式である。高圧の燃料油をレール内に蓄圧し、インジェクタ内のソレノイドを制御・開閉して、燃料噴射時期、噴射率(パターンまたは回数)、噴射量を制御する。その一例を図 6.16 に示す。

6.2.2 各社の動向¹²⁾

(1) コマツ¹³⁾ (高速機関への対応技術)

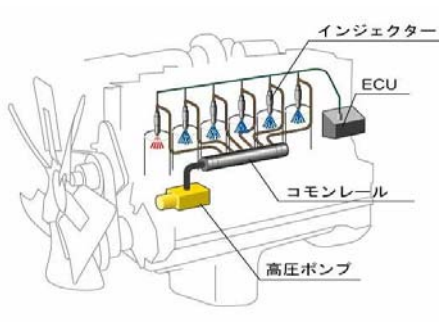
Heavy Duty HPCR System というコモンレールシステムを採用し多段噴射も採用している。HPCRは High Pressure Common Rail Fuel injection からネーミングしたものである。システムの概要を図 6.17 に示す。またこのシステムにあわせて、同図(c)に示す EGR 装置も用いられる。

(2) 三菱重工業¹⁴⁾ (発電機関用中速機関への対応技術)

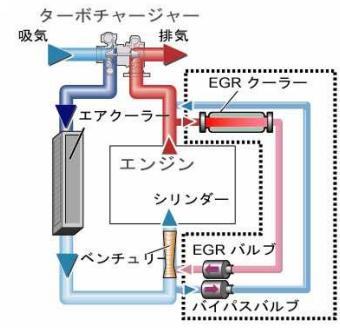
図 6.18 に示す Common Rail Fuel Injection System for MARK-30B Twin Rail injection System では、同図(b)に示す Boot-Shape 型燃料噴射パターンを採用し、NO_x の低減を図っている。初めの少量燃料噴射とそれに続くメイン噴射のために、低压と高圧のふたつの Common Rail を有し、各シリンダの燃料噴射経路に装備した低・高圧用それぞれの電磁弁を制御して Boot-Shape 型燃料噴射パターンを実現している。またこの機関シリーズでは、筒内直接層状水噴射システムの商用運転の実績も有している。



(a) 外観

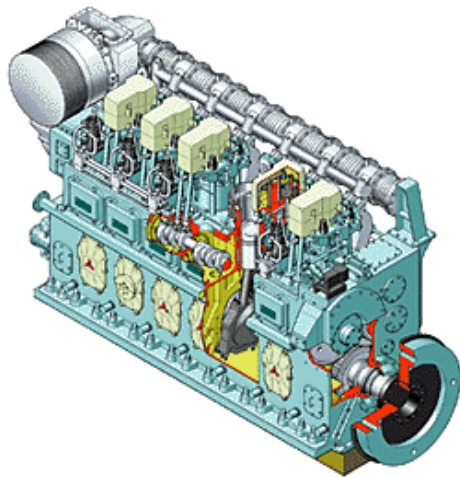


(b) 構成

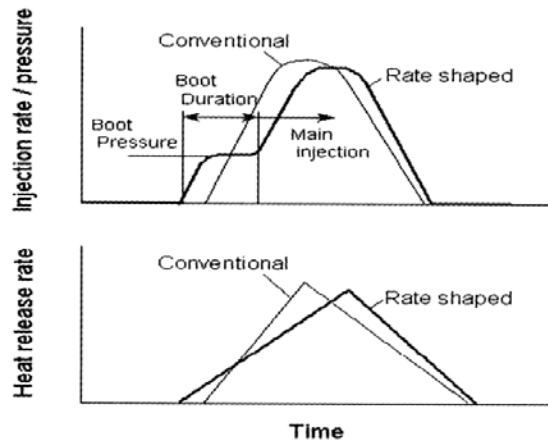


(c) EGR

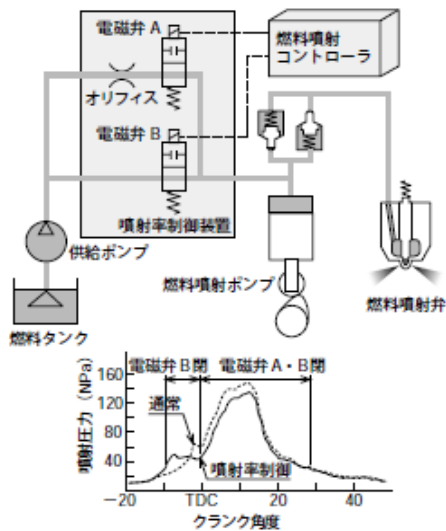
図 6.17 コマツ Heavy Duty HPCR System



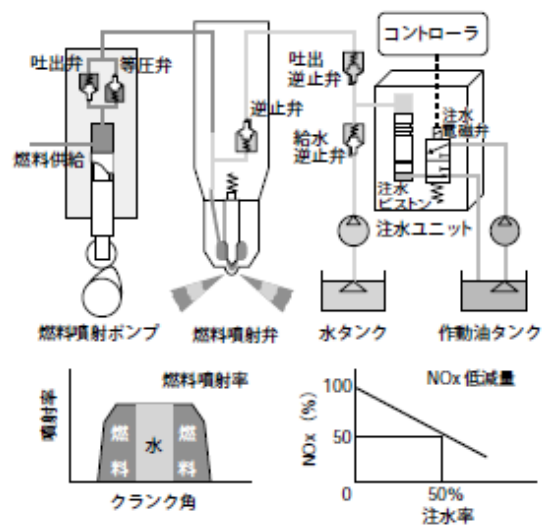
(a) 外観



(b) Boot-Shape 型燃料噴射パターン



(c) 噴射系

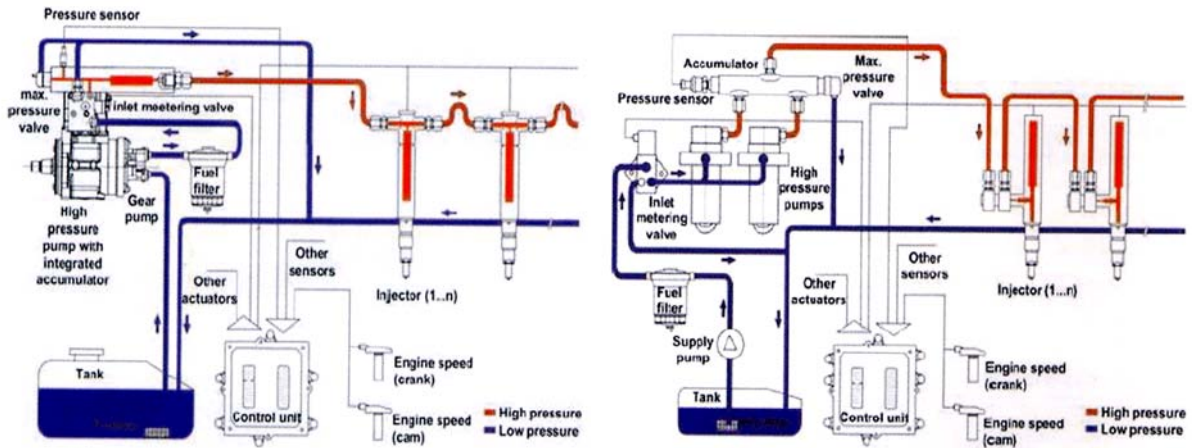


(d) 筒内直接層状水噴射システム

図 6.18 三菱 Common Rail Fuel Injection System for MARK-30B Twin Rail injection System

(3) ボッシュオートモーティブシステム^{12),15)} (中・高速機関への対応技術)

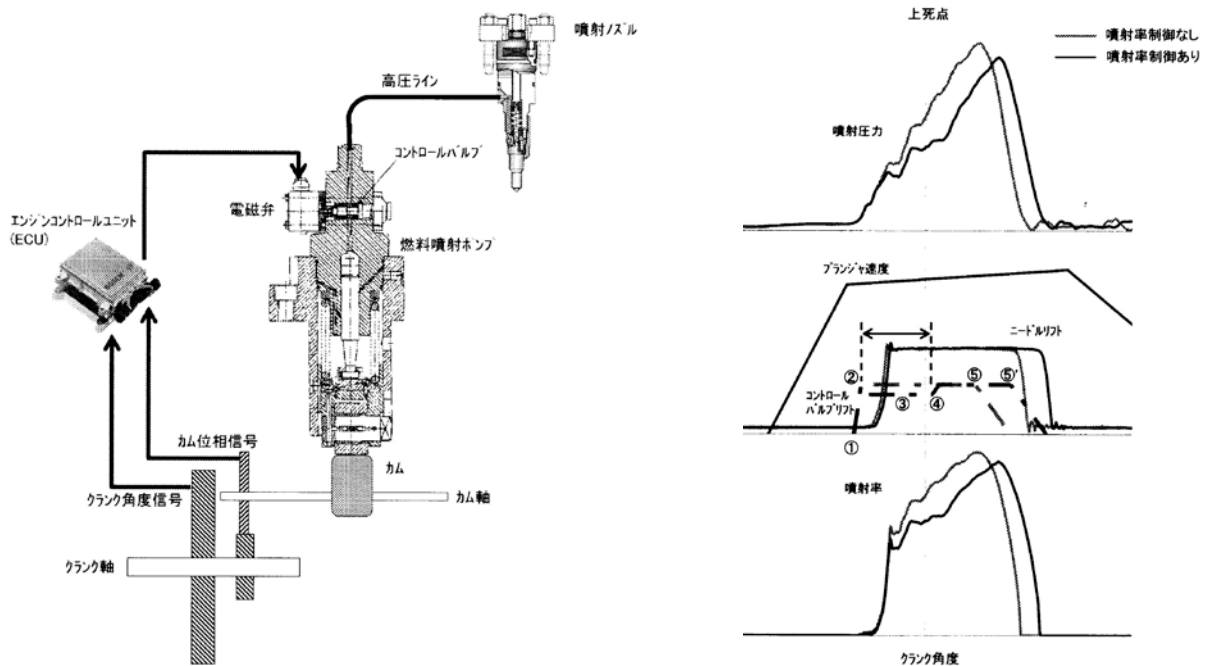
大型機関へコモンレールシステムを適用する際、レールやインジェクタに発生する高圧パルスや安全性の観点から要求される高コストのパイプの 2 重管化などの問題があり、これに対処するため Modular Common Rail System を提案している。このシステムでは燃料の蓄圧をレールとインジェクタに分散させることにより蓄圧部分とインジェクタの距離を縮め、高圧パルスを弱めることを目的としたものである。図 6.19 に高速機関用及び中速機関用のそれぞれのシステムを示す。



(a) 高速機関用 (b) 中速機関用
 図 6.19 Bosch Modular Common Rail System

(4) ダイハツディーゼル¹⁵⁾ (発電機関用中速機関への対応技術)

既存機関へのレトロフィットも可能な燃料噴射システムとして、機械式燃料噴射システムに CCRS(Current Controlled Rate Shaping) と呼ばれる電磁弁を用いて電氣的に噴射率と噴射時期を変えられる装置を組み込み、性能確認を行っている。CCRS 噴射装置の概要を図 6.20 に示す。



(a) 装置構成 (b) 噴射波形
 図 6.20 CCRS(Current Controlled Rate Shaping)噴射装置

噴射ポンプは従来の機械式の場合と同じジャーク式ポンプである。噴射ポンプの吐出部に電磁弁で駆動するコントロールバルブが組み込まれており、電磁弁の励磁状態(励磁時期、期間および強さ)で燃料噴射時期と噴射率(噴射パターン)を制御する。

図 6.20(b)の噴射圧力波形において、電磁弁等の動きは次のとおりである。

- ① - ② : 電磁弁励磁 通常 コントロールバルブ全閉 高圧燃料ライン昇圧
 - ③ : 電磁弁励磁 弱 コントロールバルブ半閉 高圧燃料ライン燃料油一部戻りへ回流 噴射率抑制
 - ④ - ⑤' : 電磁弁励磁 通常 コントロールバルブ全閉 高圧燃料ライン昇圧 噴射率増大
- 励磁開始の①で噴射開始時期を、励磁期間の①から⑤(または⑤')で噴射期間(噴射量)を制御し、期間③(=②か

ら④ : boot 期間)を変化させることにより噴射初期の噴射率を変化させることができる。噴射初期の噴射率を抑え、予混合燃焼の割合を減じて NOx の生成を抑制する。

シリンダごとに装備される各ポンプの電磁弁は、クランク角度信号及びカム位相信号をもとに着火順序にしたがって ECU(Engine Control Unit)により制御される。また、ECU は同時に噴射期間(燃料噴射量)を制御して速度制御も行う。

図 6.21 に性能試験結果を示す。同図(a)の 25%負荷ではもともと燃料噴射圧力が低いため boot により噴射圧力が下がり過ぎ、不整噴射等の問題が発生し、boot による噴射率制御効果はほとんどない。同図(b)の 75%負荷の場合 15° 以上の boot 期間を設定することが可能であったが、噴射初期での噴射率の低下のため boot が大きくなると噴射期間が長くなり、後燃え増大による機関性能低下が避けられない。

図 6.22(a)は、75%負荷における boot による機関性能の変化を示すものである。boot 期間 12° までは boot 期間の増大とともに NOx は低減し、12° で boot なしの場合より 28%の低減が可能である。12° 以上としても NOx 低減効果に変化はなく、逆にスモークが悪化する。燃費は boot の増大とともに悪化するが、噴射時期を早めることでこれを補うことができる。しかし噴射時期を早めることは NOx 排出率を増加させ、図 6.22(b)に示すトレードオフの関係は避けられない。

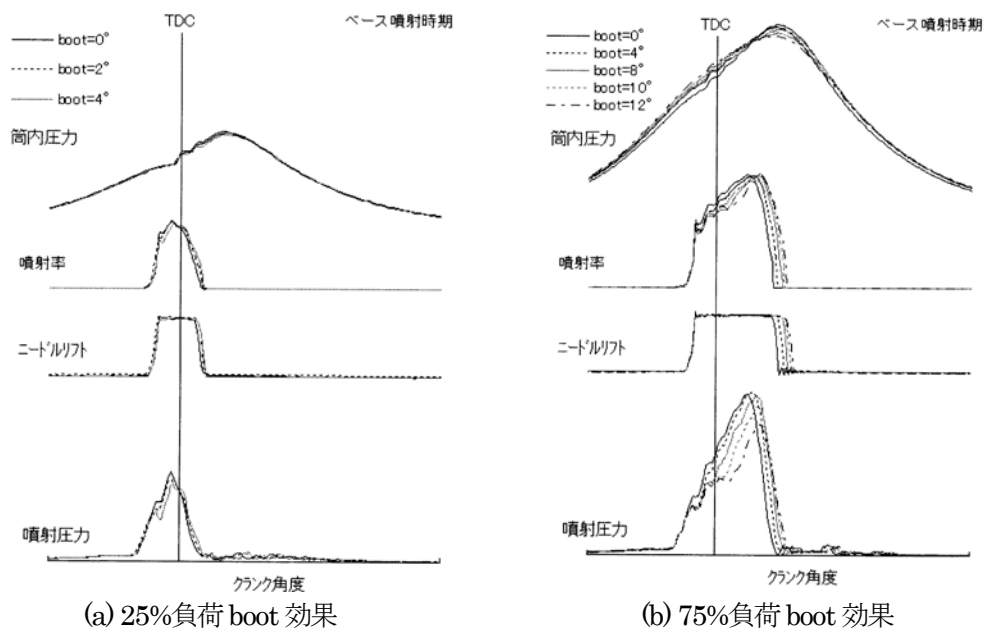
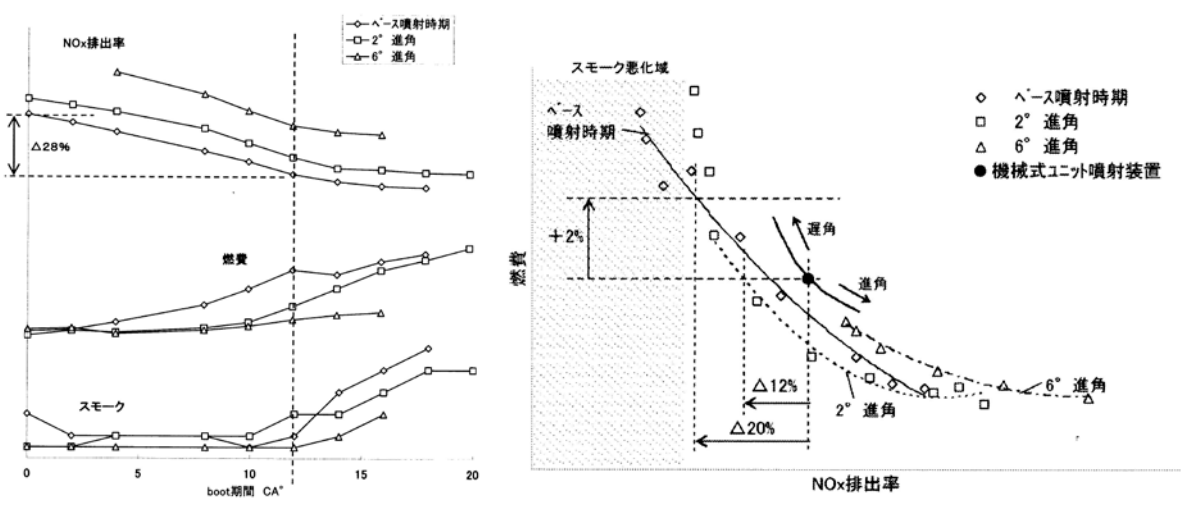


図 6.21 性能試験結果



(a) 75%負荷での機関性能 (b) NOx 排出率と燃費のトレードオフ

図 6.22 機関性能

図 6.22(b)の太線で示した従来の機械式噴射装置では、噴射時期遅延だけで NO_x 排出率を 20%低減させると燃費は 4%も悪化する。しかし boot を利用すれば、噴射時期がそのままでも 2%の燃費悪化で NO_x 排出率を 20%低減させることが可能である。さらに適度な噴射時期進角を組合せると、燃費の悪化なくして NO_x 排出率を 12%低減させることが可能である。

【参考文献】

- 1) 高畑, 4 ストローク高速機関の対応, 日マリ学会誌, 第 43 巻第 6 号(2008 年 11 月), 23-29.
- 2) 秋本, 日マリ学会誌, 第 36 巻第 5 号(2001 年 5 月), 58.
- 3) 吉川, 高速船用エンジンの技術動向, エンジンテクノロジー, No.44(2006 年 6 月), 37-42.
- 4) S.Okada et al., CIMAC Congress 2001, Vol.1, 178.
- 5) Y.Wakuri et al., Bulletin of the JSME, Vol.25, No.156, 1869, 820.
- 6) U.S.Kelling, CIMAC Congress 2007, NO.32.
- 7) G.Tinchmann, CIMAC Congress 2007, NO.148.
- 8) D.Bergmann et al., MTZ 01/2006, Vol.67,21.
- 9) 岡崎ほか 2 名, 機械学会第 75 期通常総会講演論文集, 98-1, 475.
- 10) J.Hlousec, CIMAC Congress 2004, No.117.
- 11) G.Stiesch, CIMAC Congress 2007, NO.50.
- 12) 林, 4 サイクル中・高速ディーゼル機関の燃料制御技術, 日マリ学会誌, 第 40 巻第 5 号(2005 年 9 月), 12-17.
- 13) コマツ News Release(2005 年 10 月 11 日), <http://www.komatsu.co.jp>.
- 14) 角田ほか 3 名, 新開発定置発電用ディーゼルエンジン, 三菱重工技報, 第 40 巻 4 号(2003 年 7 月), 250-253.
- 15) ボッシュ・ジャパンホームページ, <http://www.bosch.co.jp>.
- 16) 下村ほか 3 名, 4 サイクルディーゼル機関における燃料噴射パターン変更による NO_x 低減について, 日マリ学会誌, 第 43 巻第 2 号(2008 年 3 月), 57-61.

【その他の参考文献】

本文中に引用したもの以外に、次の文献等を参考にした。記して謝意を表する。

- 1) 日マリ学会誌, 第 45 巻第 5 号(2010 年 9 月).
- 2) 日マリ学会誌, 第 46 巻第 4 号(2011 年 7 月).
- 3) 日本海事協会, 日本海事協会会誌, 第 296 号(2011 年Ⅲ)
- 4) 日本海事協会, 日本海事協会会誌, 第 291 号(2010 年Ⅱ)
- 5) 日本海事協会, 日本海事協会会誌, 第 289 号(2009 年Ⅳ)
- 6) 日本海事協会, ClassNK テクニカルインフォメーション, 各号.
- 7) 日本ガスタービン学会, 日本ガスタービン学会誌, 各号.
- 8) 日本造船技術センタ, SRC News, 各号
- 9) 養賢堂, Engine Technology Review, 各号.
- 10) 日立造船株式会社, Hitz 技報, 各号.
- 11) 三菱重工株式会社, 三菱重工技報, 各号.
- 12) 三井造船, 三井造船技報, 各号.
- 13) 川崎重工株式会社, 川崎重工技報, 各号.
- 14) 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド, IHI 技報, 各号.
- 15) 阪神内燃機工業, ハンシン技術ニュース, 各号.
- 16) コマツ News Release 各号及びホームページ(<http://www.komatsu.co.jp>.)
- 17) MAN Diesel & Turbo 社 ホームページ及びカタログ.
- 18) Wartsila 社ホームページ及びカタログ.
- 19) ボッシュ・ジャパンホームページ(<http://www.bosch.co.jp>.)
- 20) JFE エンジニアリング株式会社ホームページ
- 21) ヤンマーディーゼルカタログ.
- 22) ダイハツディーゼルカタログ
- 23) 国土交通省ホームページ
- 24) 海上技術安全研究所ホームページ
- 25) ユニバーサル造船殿ご提供資料.
- 26) 三菱重工株式会社神戸造船所殿ご提供資料
- 27) 新潟原動機殿ご提供資料
- 28) 第 2 回海事三学会合同シンポジウム講演資料.
- 29) ISME Kobe 2011 講演資料.
- 30) 日本機械学会中国四国支部・九州支部合同企画フォーラム”船用大型ディーゼル機関デザインの環境対応技術”講演概要集(2010 年 10 月)