

欧州における極低排出で効率的な船用エンジン に関する開発動向調査

2012年3月

社団法人 日本船用工業会
財団法人 日本船舶技術研究協会

はじめに

現在の世界経済の状況は、ギリシャの金融危機に端を発し、世界経済を牽引してきた中国等の新興国の経済成長に陰りが見え始める等、世界規模での景気後退が鮮明となってきている。また、国内では、歴史的な超円高状態が長期・停滞化しており、我が国製造業にとって大変厳しい状況となっている。我が国造船業・船用工業にとっても、景気後退に伴う造船市況の低迷に加え、超円高により、受注環境が悪化しており、今後の先行きについて決して楽観視できる状況にはない。

このように、我が国造船業・船用工業を取り巻く環境は大変厳しい状況となっているが、中長期的な視点で世界経済及び物流を眺めた場合、新興国及び発展途上国の生活水準向上に伴う経済成長及び物流量の増加は、今後も堅調に継続していくものと考えられる。このため、海上輸送の担い手である海運業・造船業・船用工業といった海事産業は、今後も着実に拡大・発展していくものと思われる。また、今後の中長期的な物流量の増大に伴い、環境に優しい輸送セクターである海運の役割及び期待は益々高まっていくことになろう。

一方、海運分野においては、国際海事機関（IMO）が中心となり、地球環境保全への動きが活発化している。昨年7月にはIMOにおいて、国際海運における世界初の二酸化炭素排出規制の導入が採択された。また、船舶からのNO_x及びSO_x等の排ガスに係る規制も今後大幅に強化されることとなっている。

こうした状況の中、環境先進国である欧州地域においては、地域、各国及び各メーカーが、今後の国際競争力の維持・向上を図るため、環境負荷低減技術及び省エネ技術の研究開発にしのぎを削っている状況にある。

したがって、欧州における環境負荷低減技術及び省エネ技術の研究開発状況を調査し現状把握することによって、我が国の船用企業が、今後の当該技術の研究開発戦略を効果的に策定等するための一助とするため、本調査を実施した。

目 次

1. 船舶からの排出ガスと規制の現状	1
1.1 概要	1
1.2 排出ガスの主要汚染物質	2
1.2.1 二酸化炭素 (CO ₂)	2
1.2.2 硫黄酸化物 (SO _x)	3
1.2.3 窒素酸化物 (NO _x)	4
1.2.4 粒子状物質 (PM)	5
1.2.5 煤煙	6
1.2.6 炭化水素 (HC)	6
1.2.7 一酸化炭素 (CO)	6
1.3 排出ガスの規制動向	7
1.3.1 概要	7
1.3.2 IMO 規制	9
1.3.3 欧州独自の規制と方策	12
2. 排出ガス削減方法と技術	19
2.1 概要	19
2.2 主な排出ガス削減技術とシステム	21
2.2.1 一次方式	21
2.2.2 二次方式	25
2.2.3 代替燃料	28
2.3 その他の排出ガス削減技術・方法	30
2.3.1 船舶運航方法	30
2.3.2 船舶設計	32
2.3.3 推進技術	34
2.3.4 動力関連技術	36
3. 欧州共同研究開発プロジェクト「HERCULES」	37
3.1 概要	37
3.2 HERCULES-A プロジェクト	39
3.2.1 概要	39
3.2.2 プロジェクト構成	40
3.3 HERCULES-B プロジェクト (2008～2011 年)	43
3.3.1 概要	43
3.3.2 参加企業・組織	45
3.3.3 プロジェクトの目標	54
3.3.4 プロジェクトの構成	56

3.3.5 プロジェクトの達成状況	60
3.4 HERCULES-C プロジェクト	76
4. その他の欧州共同研究開発プロジェクト	78
4.1 ULYSSES (超低速船)	78
4.2 BESST (欧州船舶・造船技術の躍進)	79
4.3 HELIOS (2ストローク船用ディーゼル・エンジン用電子制御ガス噴射システム) ---	80
4.4 EXTREAM (船舶からの排出ガス削減のための高度後処理方法)	81
4.5 METHAPU (メタノール動力ユニット)	81
4.6 STREAMLINE (革新的船用推進概念の戦略的研究)	82
4.7 ARGETS (海運のグローバル効率性に関する研究)	83
4.8 TEFLES (低排出ガス海運の技術とシナリオ)	83
4.9 TRIPOD (CRP、CLT、ポッド推進の利用によるトリプル・エネルギー削減) ----	84
4.10 CONNORESS (船舶の NO _x 及び騒音低減システム)	84
5. 欧州エンジンメーカーの動向	85
5.1 Wärtsilä	85
5.2 MAN Diesel&Turbo	88
5.3 Rolls-Royce	91
5.4 MTU Friedrichshafen	93
6. まとめ	95

1. 船舶からの排出ガスと規制の現状

1.1 概要

船舶から排出される有害ガスは、環境に敏感な海域を定期航行するフェリーやクルーズ客船に起因するものが特に注目を集めている。世界的、地域的に強化される排出規制に対応するため、船用エンジンメーカー等各社は環境に優しい新製品の研究開発と技術改良にしのぎを削っている。

船舶は、貨物のトンキロ当たりの排出ガス量が低く、エネルギー効率の大変優れた輸送手段である。しかしながら、世界的な海上輸送の増加とそのスケールによる排出ガスの絶対量は多く、改善されるべき課題は多いものと考えられる。

船舶からの排出ガスの主要成分は、二酸化炭素 (CO_2)、水 (H_2O)、窒素酸化物 (NO_x : 一酸化二窒素 (N_2O) 及び二酸化窒素 (NO_2))、硫黄酸化物 (SO_x)、一酸化炭素 (CO)、炭化水素 (HC) 及び粒子状物質 (PM) である。

大気中に排出されたガスの一部は、化学変化又は消滅するが、ガスによる対流圏オゾンの生成及びエアロゾル (固体状又は液状微粒子から成るガス状浮遊物) 等の排出は、大気汚染の原因となる。船用エンジンからの排出ガスは、大気中の構成物質の変化を引き起し、地域的又は全世界的な気候変動への影響が懸念されている。

国際海事機関 (IMO) において海洋汚染防止条約附属書VI (MARPOL73/78 ANNEX VI) が採択された 1997 年当時には、世界全体で排出される NO_x の約 7%、 SO_x の約 15% 及び CO_2 の 2% が、重油 (HFO) 及びディーゼル油 (MDO) を燃料とする船舶に起因するとされていた。

過去数十年にわたり厳しい規制が課されてきた陸上分野とは対照的に、海事分野への環境規制は比較的遅れていた。IMO による SO_x 規制以前には、各国又は各地域が独自の船舶に対する大気汚染防止策を講じていた。

IMO による国際環境基準は、今後も段階的に強化される予定である。船用エンジンメーカーによる研究開発の現在の焦点は、2016 年に発効予定の NO_x 排出に関する第 3 次規制への対応である。

また、これまで注目されてきた NO_x 、 SO_x 、煤煙以外に、粒子状物質等にも規制適用範囲を広げ、さらにはエネルギー効率と関連し、環境温暖化の原因となる CO_2 削減も焦点となろう。昨年 7 月には IMO において、国際海運における世界初の二酸化炭素排出規制の導入が採択されたところである。

以下にエンジンからの排出ガスの主要汚染物質の概要と、IMO 及び欧州の規制動向を概説する。

1.2 排出ガスの主要汚染物質

船用ディーゼルエンジンからの排出ガスの成分は、主に窒素、酸素、二酸化炭素及び水蒸気並びに少量の一酸化炭素、窒素酸化物、硫黄酸化物、未燃炭化水素及び粒子状物質である。排出ガス中の有害ガス含有率は、燃料の硫黄含有量・温度、エンジンの種類、回転数、運転効率及びメンテナンスの度合い等の要因によって異なるが、体積比で総排出ガスの0.25～0.4%であると見積もられている。

1.2.1 二酸化炭素(CO₂)

エンジン燃焼室に入った炭素は、ほとんど全てが酸化して二酸化炭素(CO₂)となるため、CO₂の発生は、燃料消費量と燃料中の炭素含有率に比例する。また、その化学的特性により、他の排出ガスのような後処理や船上保管はほぼ不可能である。このため、燃料消費量の削減とエンジン効率の向上がCO₂の削減に最も有効な手段である。

CO₂そのものには毒性はないが、CO₂は地球温暖化の原因となる温室効果ガスの主成分である。CO₂排出量は、NO_xその他の排出ガス削減策によりエネルギー効率が悪化し燃料消費量が増大することにより、増加することが問題(トレードオフの問題)となっている。

CO₂排出量は燃料1トン当たり約3,100～3,200kg、平均3,170kg/tと見積もられている。また、発電能力で見た場合のCO₂排出量は、660g/kwhである。¹

最近のディーゼルエンジンのエネルギー効率は50%近くに向上しており、これ以上の改善余地は少ないため、新たな手段を開発する必要がある。

CO₂削減手段としては、エネルギー効率の高い船型と推進手段の採用、エンジンを省エネルギーモードで稼動すること、常に最高効率で稼動するディーゼル電気推進の採用、ディーゼルと蒸気タービンの組合せ等が考えられる。また、蒸気噴射ディーゼル(STID)エンジンも、新たなCO₂削減手段となることが期待されている。

燃料油の種類も温室効果ガスの発生に影響する。重油よりも炭素含有量の少ない精製油、又はLPGや天然ガスの使用もCO₂削減に効果があろう。また、植物油、木質燃料、アルコール等の再生可能燃料の利用も検討されている。Wärtsiläは、数年前に木質廃材燃料を使用可能なディーゼルエンジンの研究開発を行っている。

CO₂の環境への影響は、世界的な関心事となっている。海運は世界のCO₂排出量の約3.3%²を排出しており、今後の規制動向が注目される。CO₂削減手段としては、上記の省エネエンジン開発等以外にも、船隊の効率的な運航、航路の最適化、エネルギー管理などの分野でCO₂削減に寄与することが可能である。

¹ Couple Systems GmbH

² Couple Systems GmbH

1.2.2 硫黄酸化物(SO_x)

エンジンの燃焼過程で硫黄が酸化し、主に二酸化硫黄 (SO₂) 及び三酸化硫黄 (SO₃) が発生するが、それらを総称して硫黄酸化物 (SO_x) という。SO_x 排出量は、主に燃料中の硫黄含有量に比例する。SO_x は、自然 (酸性雨) と人体 (気管支炎、喘息等) に悪影響を及ぼす物質である。

ディーゼル排気に含まれる SO_x は腐食性で、その一部はエンジン中の潤滑油により中和される。しかしながら、大気中に排出された SO_x は硫酸 (H₂SO₄) の水分と結合し、酸性雨の原因となる。排出された SO_x は、沈下する前に何百キロも移動する特性があるため、国境を越えた国際的な環境問題となっている。湖や河川に沈下した硫黄分は、水及び土壌の酸性化を引起す。

SO_x の排出量は燃料中の硫黄含有量により決定され、燃焼プロセスの改良で対応することは困難である。現在、船用ディーゼルエンジンに使用されている燃料油の平均硫黄含有率は 2.7% (27,000ppm) である。

硫黄含有率は原油の種類によって異なり、原油中の炭化水素と化学的に結合している。その結合力は強く、硫黄を炭化水素から分離することは困難な作業である。

大気の酸性化や酸性雨の原因となる SO_x の排出量も、主に燃料の硫黄含有率によって決定される。燃焼過程において、燃料中の硫黄が酸化し、15:1 の割合で二酸化硫黄 (SO₂) 及び三酸化硫黄 (SO₃) を形成する。SO₃ は直ちに水と反応して硫酸 (H₂SO₄) を形成するため、SO_x 排出量の研究には通常 SO₂ が用いられる。

SO_x はエンジンやボイラー等の燃焼機関から排出され、排出量はエンジンのデザイン、稼働状況、燃焼条件に関わらず、使用燃料中の硫黄含有量により決定される。SO_x と同様に、CO₂ の大部分も燃料の燃焼により発生し、ディーゼルエンジンの排出ガスの約 6% を占める。

1.2.3 窒素酸化物(NO_x)

これまでの国際的、地域的な大気汚染防止の第一のターゲットは、ディーゼルサイクルの特性である窒素酸化物(NO_x)であった。NO_xは、主にエンジンの燃焼過程で発生するが、一部は使用燃料中に含まれる窒素から発生する。大気中に排出されたNO_xは、動植物体系に大きな影響を及ぼし、光化学スモッグ、酸性雨及びオゾン層破壊の原因ともなる。NO_xに関しては、MARPOL条約附属書VI(Annex VI)で規制されている。

NO_x排出量の削減は、エンジンの内部構造改良、使用燃料の改良等の措置により実現されるが、これに加えて二次的、外部的な措置も有効である。競争の激しい海事産業では、運転効率や機器の信頼性を損なうことのないNO_x削減技術の開発と市場化を進めている。コスト削減も大きな課題である。

3-D技術、CFD分析、測定技術の進歩により、エンジンの内燃過程の詳細が解明されてきた。ガス・エクスチェンジ、燃料噴射、空気混合、着火過程等に関する新たな情報は、種類の異なる燃料を使用した場合の燃焼特性の違いや、NO_x、煤煙形成の過程の解明に役立っている。

ディーゼルエンジンから排出されるNO_xは、95%が一酸化窒素(NO)、5%が二酸化窒素(NO₂)で、排出量は燃焼温度と酸素量の影響を強く受ける。特に温度と酸素密度のピーク時の発生が多いため、燃焼時間の長い2ストローク低速エンジンの方が、4ストローク中速・高速エンジンよりも一般的にNO_x発生量が多くなる。

NO_x排出量は、エンジンの種類、負荷、使用燃料により決定され、一般的には、低速エンジンからのNO_x排出量は87kg/トン、中高速エンジンからの排出量は57kg/トン程度とされている。

NO_x排出量の削減には、エンジンシリンダー内での発生を抑える一次方式、又は発生したNO_xを外部的に取り除く二次方式(後処理)が考えられる。代替燃料の使用に関しては、近年ノルウェー政府及びノルウェー船級協会(DNV)をはじめとする各国船級協会がLNG燃料の利用を促進しており、主に北欧において実用化が進んでいる。

1.2.4 粒子状物質(PM)

PM は、大気中に含まれる固体又は液状の微粒子で、発生源は様々であるが、主に燃料油、潤滑油等の不完全燃料により分離した炭化水素、煤塵、水分等から発生する。PM の大部分は煤、即ち無機炭素粒子で、排気ガスの可視成分である。

PM は 2.5 μm を境に粒子と微粒子に分けられており、また直接大気中に排出される一次粒子と大気中の化学反応によって発生する二次粒子に分けられている。

一次粒子は主にエンジンの燃焼により発生し、炭素、炭化水素、金属酸化物その他の固形物質が含まれる。また、二次的に発生したエアロゾル、再凝縮した低揮発性の金属成分等の微粒子も含まれる。二次粒子は、有害ガス（二酸化硫黄、酸化窒素、アンモニア）の反応により発生したアンモニア性の硫黄と窒素である。

PM は、エンジンの排気ガス成分の僅か 0.003%に過ぎないとされている。煤は固形の炭素粒子で、呼吸器や目を刺激する有害物質である。煤粒子は水性炭化水素蓄積の原因となり、また発癌性の成分が含まれている。船舶からの PM のほとんどは、陸地から 400km 以内に排出されており、船舶からの排出削減が大きな課題となっている。

しかしながら、その複雑さと多様性により、船舶からの PM を正確に測定することは困難であるため、現時点における PM 発生に関連する規制は IMO と EU（欧州連合）による燃料油の硫黄含有量削減による規制のみとなっている。しかも低硫黄燃料でディーゼルエンジンを駆動するためには潤滑油が多く必要となるため、PM の発生が増加する恐れがあり、この点も対処すべき課題となっている。

Lloyds Register の研究（1995 年）では、残査燃料油（重油の基材）1 トンの燃焼につき 7.6kg、同じく MGO1 トンの燃焼につき 1.2kg の PM が発生するとしている。一方、IMO の船舶による温室効果ガスの排出に関する研究では、燃料油 1 トンからは 6.7kg、MDO1 トンからは 1.1kg の PM が排出されるとしている。

1.2.5 煤煙

煤煙はその可視性から、地域的環境規制に含まれる場合が多くなっている。煤煙の削減と除去は、エンジン開発の焦点のひとつとなっており、エンジンの競争力を決定する要因ともなっている。

黒煙と青煙は、通常不完全燃焼と酸素不足により発生する。また、白煙は燃料油中の水分と低いシリンダー温度が発生原因となる。このため、煤煙の発生は使用燃料の質に左右される。船用エンジンの場合、エンジン始動時や急激な負荷変動時の空気不足による不完全燃焼及び燃焼室の着火が、煤煙の主な発生原因である。

船舶の煙突から立ち上る黒煙は、目で容易に見える有害排出物質であるため、船主・船社は、自社船舶の環境性に加えて、自社と海運業のイメージ向上のためにも、エンジンからの煤煙の削減を求める傾向にある。

1.2.6 炭化水素(HC)

ディーゼルエンジンからの発生は少ないが、悪臭を持ち、スモッグや気管支炎の原因となる炭化水素（HC）には、発癌性があると考えられている。ディーゼルエンジンに使用される燃料油には、様々な種類の HC が含まれている。HC は完全に燃焼されなかった燃料油、潤滑油、気化燃料に含まれる。不完全燃焼は、シリンダー中心部より温度の低いシリンダー壁付近で発生することが多いため、燃焼効率が良く、メンテナンスが行き届いているエンジンからの発生は少ない。HC 排出に関しては、現時点では規制されていない。

1.2.7 一酸化炭素(CO)

一酸化炭素（CO）は、空気の不足による不完全燃焼や、二酸化炭素の分解により発生する。CO は無色でわずかな金属臭を持ち、高密度の場合は極めて毒性が強く、呼吸困難を引き起こす。

燃料中の気体比率が、CO 形成に影響する。ディーゼル機関の燃料中の気体比率は高く、CO の発生も最小限に抑えられている。しかしながら、不完全燃焼により CO が発生する可能性もある。よって、HC の場合と同様に、燃焼効率が良く、メンテナンスが良いエンジンからの発生は少ない。CO に関しても、現時点では規制はない。

1.3 排出ガスの規制動向

1.3.1 概要

2005年5月のMARPOL条約附属書VIの発効は、陸上と比べ比較的対応が遅れていた海事分野における大気環境保全への重要な第一歩となった。同附属書のNO_x規定は2000年1月1日以降に設置されたエンジンに適用され、規制は段階的に厳格化される。現在の焦点は、2016年発効予定のNO_x第三次規制である。

一方、欧州、特に環境保全意識の高い北欧では、附属書VIの発効に先駆け、各国や自治体の規制当局は、独自の大気環境保全策をとってきた。エンジンや使用燃料油に対する規制強化や課税だけでなく、環境性の高い船舶に対する航路税や港湾税の優遇、NO_x削減装置搭載への補助金制度等、新たな方策が注目されている。

2010~2020年に発効及び発効が予定されている排ガス規制及びその対応策の概要を以下に示す。

**表：船用エンジンの排ガス(NO_x、SO_x)に関する新たな排ガス規制の概要
(2010~2020年)**

発効年月日	条約等 (対象ガス)	内容	基準策定	規制エリア	対象船	影響	運航者の対応
2010年1月1日	2005/33/EC (SO _x)	EU 港湾に停泊中、及び EU 内の内水域では硫黄分 0.1%以下の燃料油を使用。	EU (欧州連合)	EU	現存船、新造船	機器の調整。 運航コストの上昇。	①停泊時、内陸水路では硫黄分 0.1%以下の燃料を使用。 ②LNG 燃料を使用。
2010年7月1日	IMO Annex VI (SO _x)	ECA (排出規制海域) では硫黄分 1%以下の燃料油を使用。	IMO	ECA	現存船、新造船	機器の調整。 排ガス後処理装置の設置。 運航コストの上昇。	①硫黄分 1%以下の燃料を使用。 ②硫黄分 1%以上の燃料とスクラバーを使用。 ③LNG 燃料を使用。
2011年1月1日	IMO Annex VI (NO _x)	Tier II 規制 (NO _x 排出量を現行の Tier I レベルから約 20%削減)	IMO	全世界	新造船	特殊エンジン、又は排ガス処理装置の設置。 運航コストの上昇。 投資コストの上昇。	①低 NO _x 排出エンジンを使用。 ②既存エンジンに SCR、EGR、HAM 等の排ガス処理装置を設置。

							③LNG 燃料を使用。
2012年1月1日	IMO Annex VI (SOx)	燃料油の硫黄分を3.5%以下に削減。2020年までに段階的に0.5%まで引き下げる予定。	IMO	全世界	現存船、新造船	運航コストの上昇。	①2012年までに硫黄分3.5%以下の燃料を使用。 ②2020年までに低硫黄燃料、またはスクラバーを使用。 ③LNG 燃料を使用。
2015年1月1日	IMO Annex VI (SOx)	ECA では硫黄分0.1%以下の燃料油を使用。	IMO	ECA	現存船、新造船	運航コストの上昇。 機器の調整又は排ガス後処理装置の設置。	①硫黄分0.1%以下の燃料を使用。 ②硫黄分0.1%以上の燃料とスクラバーを使用。 ③LNG 燃料を使用。
2016年1月1日	IMO Annex VI (NOx)	Tier III 規制 (ECA でのNOx 排出量をTier II レベルから約75%削減)	IMO	ECA	新造船	排ガス後処理装置の設置又はエンジン性能の大幅向上。 運航コストの上昇。 投資コストの上昇。	①SCR 等の排ガス処理装置を設置。 ②LNG 燃料を使用。

出所：DNV「Greener Shipping in the Baltic Sea」June 2010 より作成。

1.3.2 IMO 規制

NO_x

IMO による NO_x 排出に関する第一次規制 (Tier I、2005 年発効) は、2000 年 1 月以降に起工された 1 基当たりの出力が 130kW 以上の船用ディーゼルエンジンを搭載する新造船に適用されている。定格エンジン回転数 (n) に応じた NO_x 排出量上限は以下の通りである。

NO_x 第一次規制 (Tier I)

- ① n が 130rpm 未満の場合：17.0 g/kWh
- ② n が 130rpm 以上 2,000rpm 未満の場合： $45 \cdot n^{-0.2}$ g/kWh
- ③ n が 2,000rpm 以上の場合：9.8 g/kWh

2008 年には排出基準を強化する第二次規制 (Tier II、2011 年発効)、及び ECA (排出規制海域) のみに適応されるさらに厳しい第三次規制 (Tier III、2016 年発効予定) が合意された。また、2000 年以前に建造された船舶に対しても Tier I 規制を適用することを決定した。

NO_x 第二次規制 (Tier II、2011 年発効)

- ① n が 130rpm 未満の場合：14.4 g/kWh
- ② n が 130rpm 以上 2,000rpm 未満の場合： $45 \cdot n^{-0.23}$ g/kWh
- ③ n が 2,000rpm 以上の場合：7.7 g/kWh

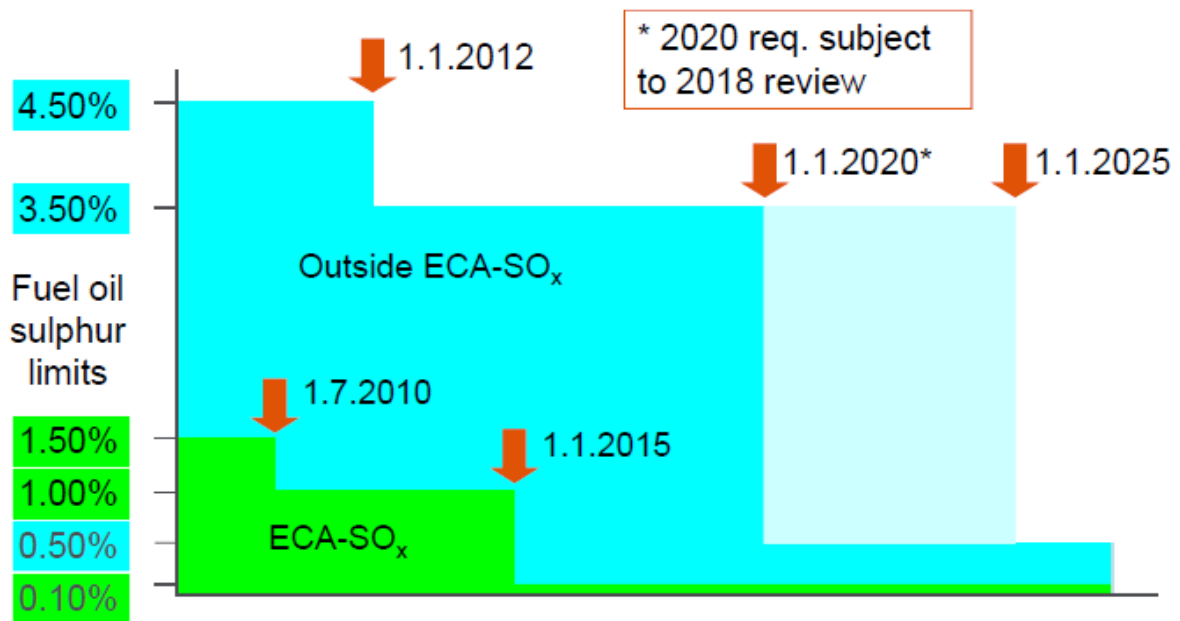
NO_x 第三次規制 (Tier III、2016 年発効予定)

- ① n が 130rpm 未満の場合：3.4 g/kWh
- ② n が 130rpm 以上 2,000rpm 未満の場合： $9 \cdot n^{-0.2}$ g/kWh
- ③ n が 2,000rpm 以上の場合：2.0 g/kWh

IMO の指定する排出規制海域 (ECA) のみに適応される第三次規制では、NO_x 排出量を第一次規制よりも約 75~80%削減する必要がある。現時点における第三次規制への適応方法としては、SCR 等の排ガス後処理装置の設置、又は LNG 燃料の使用が有効なオプションであると考えられている。

SO_x

SO_x 排出に関しては、NO_x 規制とは別に、下図のように燃料中の硫黄分含有率を段階的に削減する規制が制定されている。



図：SO_x 排出量規制(燃料中の硫黄含有量)

(出所) Lloyd's Register

MARPOL 条約附属書VIにおける 2006 年 5 月に発効した SO_x に関する規定では、エンジン出力 130kW 以上の全船舶の燃料中の硫黄含有率について、上限値を 5%から 4.5%に引き下げた。さらに、指定された海域（ECA：排出制限海域）では、硫黄含有率 1.5%以下という厳しい基準が適用された。SO_x 排出に関する同規定は、ECA であるバルト海では 2006 年 5 月、北海及びイギリス海峡では 2007 年 11 月にそれぞれ発効した。

MARPOL 条約附属書VIは 2008 年に改正され、硫黄含有率上限は 2012 年 1 月より 4.5%から 3%に引き下げられ、2020 年までに段階的に 0.5%に引き下げられる予定である。また、ECA では 2015 年までに 0.1%に引き下げられる予定である。

通常よりもより厳しい環境基準が適応される ECA は、MARPOL 附属書VI締結国の提案により、IMO が指定する特別海域である。ECA は、SO_x 及び PM、又は NO_x、又はその全部の組み合わせに関して特別な規制が適用される。

現在、ECA に指定されている海域は以下 3 海域である。(注：SO_x 排出量のみが規制されているバルト海、北海は「SECA」と称されることもある。)

バルト海：SO_x 規制、1997 年指定、2005 年発効

北海（イギリス海峡を含む）：SO_x 規制、2005 年指定、2006 年発効

北米（北米、ハワイ沖 200 海里）：SO_x 及び NO_x 規制、2010 年指定、2012 年発効

バルト海域では、沿岸国政府がバルト海海洋環境委員会（HELCOM）を通じ、SO_x だけではなく NO_x 規制も含めることを IMO に提案しており、今後さらなる規制強化が予想される。

IMO は、環境規制の厳しい ECA における SO_x 排出量削減方法のオプションとして、硫黄含有率 1.5%以下の燃料を使用する代わりに、SO_x 排出量を 6g/kWh に削減する承認された排出ガス除去システムの使用を認めている。

2005 年 7 月、IMO MEPC は、船用 SO_x 除去システムに関する技術ガイドラインを採択した。これは、SO_x 除去技術を用いた製品の型式承認のためのガイドラインとなるものである。

CO₂

2011 年 7 月、IMO MEPC は、国際海運からの CO₂ 排出規制導入に関する条約改正を採択した。本条約改正により、「2013 年以降に建造される船舶に対する船舶の CO₂ 排出指標の導入とこれに基づく CO₂ 排出規制の実施」と「省エネ運航計画の作成の義務付け」が実施されることとなっている。こうした対策により、何らの対策も講じない場合と比べ、2030 年には約 20%、2050 年には約 35%の CO₂ 排出量の削減が期待されている。また、IMO では、更なるエネルギー効率改善を促進するため、燃料油課金制度や排出量取引等の経済的枠組みについても審議を行っているところである。

その他

MARPOL 条約附属書VIでは、ハロン、フロン (chlorofluorocarbon : CFC) 等のオゾン層破壊物質の故意の排出を禁止している。オゾン層破壊物質を排出する機器の新造船への搭載は禁止されているが、代替フロン (hydro-chlorofluorocarbon : HCFC) を排出する機器の搭載は、2020 年 1 月 1 日まで認められている。

2010 年 7 月からは、船舶はオゾン層破壊物質を含む機器の記録を保持し、またオゾン層破壊活動の記録を保持する義務がある。³

船舶からの煤煙に関しては、世界的な規制はないが、既に米国や北欧その他で地域的な基準が制定されており、様々なエンジンの開発と改良を促進してきた。特に、クルーズ客船、フェリー等、特定航路と港湾を定期利用する船舶の船主による煤煙削減技術へのニーズは高い。

また、船用機器からの排出ガスで見落とされがちな分野は、クランクケース・ガスである。このため、海洋汚染の原因のひとつとして、今後クランクケース・ガスにも焦点が当たると予想される。

³http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_reference_report_2010_11_ships_emissions.pdf, pp. 34-35

1.3.3 欧州独自の規制と方策

MARPOL 条約附属書 VI の発効に先駆け、欧州連合 (EU)、各国や自治体の規制当局は、独自の環境規制と海洋環境保全策をとってきた。北ヨーロッパ諸国では、既に環境保全を目指した特別課税制度を打ち出している港湾もある。中でもスウェーデンの港湾の環境保全策と航路税及びノルウェーの NO_x 税と NO_x ファンドは、他国、他地域への参考となるものであろう。

NO_x

産業や自動車からの NO_x 排出量の規制を進めてきた欧州でも、NO_x 排出量全体の 25% 以上が起因するとされている船用エンジンに対する規制は比較的遅れていた。欧州海域内の海上輸送量は、2000~2020 年に約 40% 増加すると予想されており、追加的な対策を講じない場合には、2020 年には船舶からの NO_x 排出量は EU27 カ国の陸上ベースの NO_x 排出量に相当、又は上回る可能性が指摘されている⁴。特に地理的に閉鎖された海域であるバルト海の沿岸地域は排ガスの影響を受けやすく、その対応が急務となっている。

SCR (Selective Catalytic Reduction : 選択触媒還元)、HAM (Humid Air Motor : 吸気加湿装置)、EGR (Exhaust Gas Recirculation : 排気再循環) 等の NO_x 削減新技術は、ECA に指定されている環境規制の厳しいバルト海、北海を航行する現存船及び新造船に既に搭載されている場合が多い。また、北欧、特にノルウェーでは、定期フェリーを中心に LNG を燃料とするエンジンを搭載したガス燃料船の利用も進んでいる。

また、既に SCR 装置を設置していても、SCR 装置の使用が義務化されていない海域では、コストの問題から使用していない船舶もある。一方では、北欧の大手製紙会社等、環境に優しい企業イメージを重視している企業の中には、自社製品の輸送には SCR 装置を搭載した貨物船しか利用しないという方針を強くアピールしている企業もある。

北欧海域における SCR 装置の普及をより促進させるため、スウェーデンでは航路税の割引、ノルウェーでは NO_x 排出税と NO_x 削減装置設置への補助を組み合わせた方策を実施し、大きな効果を上げている。

SO_x

欧州連合 (EU) は、既存の IMO 規制に加え、船舶による排出ガスに関する独自規制を設けている。IMO の ECA 特別規制の発効とともに、欧州海域は厳しい SO_x 規制が適用される世界初の国際海域となった。

⁴ <http://www.airclim.org/reports/apc24.pdf>、Briefing: Reducing NO_x Emissions from Shipping, November 2009, transportenvironment.com pdf

2005年には、船用燃料の硫黄含有率に関するEU指令が既に発効しているが、ECAでの規制発効時期に関してはIMOと異なっており、硫黄含有率の1.5%上限は、バルト海では2006年8月、北海、イギリス海峡では2007年8月にそれぞれ発効した。

さらに、EUは上記規制をEU域内の港間を航行する全旅客船に適用することを決定し、その発効時期は当初予定されていた2007年7月から2006年5月に繰り上げられた。しかしながら、EU外部海域であるアゾレス諸島、マデイラ島、カナリア諸島、フランスの海外県に関しては、3%規制が適用された。

続いてEUは、2010年1月には、EU域内の港に2時間以上停泊する船舶及びEU内陸水域を航行する船舶に対し、硫黄含有率の上限を0.1%に制限した。当初EUは2008年1月の規制発効を計画していたが、技術的な適用準備期間の必要性を考慮し、発効を2年間遅らせることを決定していた。

このような状況下、船舶運航会社は、新規制への長期的対応策を決定する必要に迫られている。

2005年7月、IMO MEPCは、船用SO_x除去システムに関する技術ガイドラインを採択した。これは、新SO_x除去技術を用いた製品の型式承認のためのガイドラインとなるものである。本ガイドラインでは、規制上限となる6.0gk/Whという値は、船舶に対するもので、各内燃機関に対するものではないことが確認されている。

EUもIMOと同様の立場をとっている。EUの海洋硫黄指令(MSD)では、船舶からのSO_x排出量削減が硫黄含有率1.5%の燃料を使用した場合と同じ結果を達成できることを条件に、型式承認済みのSO_x除去装置の使用を認めている。

バルト海域の現状

特に環境意識の高い北欧、バルト海諸国では、近年海洋環境の悪化と船舶からの排出ガス規制の遅れが問題となっており、各国政府、地方自治体、バルト海海洋環境委員会(HELCOM)等が、IMOに規制強化を働きかけると同時に、地域的な独自の環境規制強化を進めている。

2008年のバルト海域の海上輸送量は8億2,200万トンで、全世界の貿易量の約11%を占めている。バルト海域では常時2,000隻以上の船舶が航行しており、世界でも船舶航行密度の非常に高い海域となっている。輸送量の58%はバルト海地域外への輸出で、ロシアのサンクトペテルブルク、プリモルスク等の原油輸出港がその貿易量の多くを占める。33%は輸入で、バルト海沿岸の様々な港湾が担っている。9%はバルト海域内の輸送である。⁵

バルト海を航行する船舶の40%以上は一般貨物船で、多くの場合バルト海域又は欧州北部を活動域としている。その他の船種では、石油ケミカルタンカー、ばら積み船、フェリー等が多い。その船齢範囲は新造船から40年以上の船舶まで幅広く、今後10年間に25%程度が代替されると予想されている。

2008年のバルト海域の船舶からのガス排出量は、SO_xが135,000トン、NO_xが393,000トン、CO₂が1,890万トンである。このNO_x排出量は、スウェーデンとデンマーク両国

⁵ DNV「Greener Shipping in the Baltic Sea」June 2010

の陸上からの NOx 排出量合計に匹敵し、また SOx 排出量は同じく 2 倍であり、問題の深刻さが指摘されている。

また、旅客・貨物フェリー（ROPAX）は隻数ではバルト海域の全船種の 5%に過ぎないが、定期運航やシャトル運航を行っている船舶が多く、船舶からの排ガス量の 27%を占めている。このため、バルト海諸国では、近年定期航行フェリーへの特別規制を強化している。

一方、隻数では多数を占める一般貨物船及び石油ケミカルタンカーからの排出ガスは、それぞれ全体の 14%と 7%に止まっている。

バルト海は、現在 IMO の SOx 特別排出海域（ECA）に指定されており、既に硫黄含有率 1%以下の低硫黄分燃料の使用が義務付けられている。また、ロシア以外のバルト海諸国が加盟する欧州連合（EU）による EU 域内の独自規制により、EU 域内の港湾に停泊時又は EU 域内の内陸水路航行時には、さらに厳しい硫黄含有量 0.1%以下の燃料を使用しなければならない。

さらに、ECA のみに適用される IMO の第三次規制により、2016 年 NOx 排出量を第二次規制レベルよりも約 8 割削減する必要がある。バルト海は、環境規制とその対策の有効性を調査するうえで、モデルとなる海域である。

スウェーデン:航路税による差別化

スウェーデン沿岸を航行する船舶の NOx 総排出量は、陸上産業や陸上輸送機関と比較して大きく、人口の少ない同国にとっては環境への影響が深刻であると考えられている。

スウェーデン海事局は、スウェーデン国内の港湾を使用する船舶に対し課される既存の航路税（fairway due）に、2008 年 4 月 1 日より、船舶の環境性能により差別化された税制を導入した。⁶

航路税は、船舶の総トン数、船種及びスウェーデン国内で取り扱われる貨物の重量によって決定される。新制度では、さらに、総トン数に対する税率を、使用燃料中の硫黄分及び NOx 排出量により、細かく差別化する。

例えば、硫黄分が 0.5~1.0%の低硫黄燃料を使用するフェリーその他の船舶には、他の船舶よりも低い税率が適用される。また、0.2%以下の燃料を使用する船舶には、硫黄追加税が免除される。

さらに、NOx 削減装置を設置した船舶に対しては、その NOx 削減量に応じてトン数ベースの航路税が段階的に割引される⁷。割引が適用されるには、NOx 排出量が 10 g/kWh 以下でなければならない。⁸

航路税への環境基準導入は重要な動きではあるが、航路税は航路・水路整備、砕氷作業、救助活動、調査等のスウェーデン海事局の活動に対する主たる財源であるため、収入確保のために割引率は比較的強く抑えられている。このため、後述のノルウェー NOx ファンド

⁶ <http://www.sjofartsverket.se/en/About-us/Dues--Fees/Fairway-Dues/>

⁷ http://www.sjofartsverket.se/upload/Listade-dokument/Rapporter_Remisser/EN/2007/EmissionTradingS-N-O.pdf p.26

⁸ <http://www.sjofartsverket.se/pages/1615/Fairway%20dues.pdf>

と比べた場合、船主の新環境技術導入へのインセンティブとしてはやや魅力に欠けるものとなっている。⁹

ヘルシンボリ(スウェーデン):SCR 搭載義務

地域的規制としては、スウェーデンの Helsingborg (ヘルシンボリ) では、スウェーデン-デンマーク間の Öresund 海峡が最も狭くなる海域であるヘルシンボリと対岸デンマーク Helsingør (ヘルシンエーア) 間を定期航行するフェリーに対し、NOx 削減のための SCR 装置の設置を義務付けている。¹⁰

ヘルシンボリはスウェーデン最大の旅客数を誇る港で、年間 1,100 万人以上の旅客を取扱っている。うち 96.6%を占めるのは、大小のフェリー運航会社 3 社 (Scandlines、HH-Ferries、Sundsbussarna) の旅客である。3 社は、通常 7 隻のフェリーで 1 日 24 時間運航を行っており、年間の発着便数は 45,000 便以上に上る。SCR を設置しない場合、これら 7 隻のフェリーは年間約 290 トンの NOx を排出しており、スウェーデンの大気環境基準に違反しているとヘルシンボリ環境局は主張した。

2000 年、ヘルシンボリ環境局はこれら 3 船社に対し、同航路で定期運航を行うフェリーの全ての主機及び補機に SCR 装置を設置することを命じた。設置期限は、Scandlines 社と HH-Ferries 社が 2001 年 5 月、Sundsbussarna が 2002 年 5 月と定められた。また、1 隻当たりの違反金を、Scandlines 社が 5 百万 SEK (スウェーデン・クローナ¹¹、6,000 万円)、HH-Ferries 社が 3 百万 SEK (3,000 万円)、Sundsbussarna が 50 万 SEK (600 万円) とした。

この決定を不服とする 3 船社側は、①ヘルシンボリ環境局にこのような規制を義務化する権限はない、②3 社は MARPOL 条約による基準を順守している、③7 隻のうち 4 隻はデンマーク船籍である、として提訴したが、2006 年 5 月にヘルシンボリ環境局が最終的に勝利を収め、SCR 設置が義務化された。

ヘルシンボリ環境局は、定期運航フェリー 7 隻の SCR 装置設置により、ヘルシンボリ港近隣地域では年間 230 トン、約 80%の NOx 削減になるとしている。もちろん、対岸のデンマークのヘルシンエーアでも同様の恩恵がある。

一方、SCR 装置を設置した船社にとってのメリットは、ヘルシンボリ港の港湾税の割引である。船舶によって異なるレートが定められているが、2006 年以降、港湾税は NOx 排出量に応じて段階的に引き下げられる。例えば、NOx 排出量が 0.51~1 g/kWh の場合、2007 年の港湾税は 2005 年時点の約半分となる。¹²

⁹http://www.sjofartsverket.se/upload/Listade-dokument/Rapporter_Remisser/EN/2007/EmissionTradingS-N-O.pdf pp.75-76

¹⁰<http://www.kimointernational.org/Portals/0/Files/Peter%20Jupen%20KIMO-konferens%20kortare%20version.ppt1.pdf>

¹¹ 2012 年 3 月 6 日現在 1SEK=12.0 円

¹² Scandlines 資料

ノルウェー：NO_x 排出税とNO_x ファンド

一方、複雑で長い海岸線を持つ隣国ノルウェーにとっても状況は同様で、海上輸送機関によるNO_x 排出量は全体の35%、CO₂ 排出量は10%に上るとされている。ノルウェーのトン数税制は、当該船舶の環境パフォーマンスも考慮されている。同国では、近年LNGを燃料とする近距離フェリー、オフショア支援船、沿岸ガスタンカーが次々に就航しており、環境に優しい動力機関への投資が盛んである。

また、船舶を対象とした新たな環境税として、2007年1月1日、ノルウェー政府は、出力750kW以上の船用エンジンに対し、NO_x 排出量1kg当たりNOK 15（ノルウェー・クローネ¹³、約214円、€1,765/tonに相当）の課税を導入した。

同時に、対抗策として、多くのノルウェー企業・組織が連合し、NO_x 排出税をNOK 4/kg（約57円、€470/tonに相当）に引き下げ、NO_x 削減を目指した基金である「Business Sector's NO_x Fund」（通称NO_x ファンド）設立に関する合意（環境合意）案を打ち出し、2008年5月にノルウェー環境省と締結した。

NO_x ファンドを通じ、続く3年間に年間6億クローネ（85億8,000万円）がNO_x 削減プロジェクトに投資されることとなった。NO_x ファンドは、SCR、EGR等の排ガス後処理装置の設置等のコスト効率の高いプロジェクトに対し、プロジェクトコストの最大75%までを出資する。また、NO_x ファンドは、SCR装置用の尿素水等のオペレーションコストにも補助を行う。補助率は以下の通りである。¹⁴

- 2009~2010年に申請し、2011年末までに実施されたプロジェクトには最大75%、NO_x 削減量1kgに対し最大100クローナ（1,430円）までの補助を行う。
- 2009年3月末までに実施されたプロジェクトには最大90%、NO_x 削減量1kgに対し最大180クローナ（2,574円）までの補助を行う。
- 2008年末までに申請し、2011年末までに実施されたプロジェクトには最大80%、NO_x 削減量1kgに対し最大180クローナ（2,574円）までの補助を行う。
- 2006年5月12日~2007年末までに実施されたプロジェクトには最大80%、NO_x 削減量1kgに対し最大50クローナ（715円）までの補助を行う。
- 燃料をガスとするガス焚き船舶への改造コストの最大75%、NO_x 削減量1kgに対し最大150クローナ（2,145円）までの補助を行う。

ノルウェー籍、外国籍に関わらず、ノルウェーのNO_x 排出税を課税されているあらゆる企業が環境合意に参加することができ、自社のNO_x 削減プロジェクトにNO_x ファンドからの補助を申請することができる。

¹³ 2012年3月6日現在、NOK1=14.3円

¹⁴ <http://www.nho.no/support-from-the-fund/category479.html>

NOx ファンドからの補助金交付の対象となるのは以下のコストである。なお、NOx 削減装置の設置中の収入損失は補助対象となるコストに含まれない。

- 機器購入コスト
- 改造コスト
- NOx 削減措置の実施前及び実施後の NOx 計測コスト

比較的新しく、実船稼働データの少ない NOx 後処理技術である SCR、EGR、HAM システム設置プロジェクトに関しては、装置の定期運転状況を 3 カ月以上モニターし、効果を確認した後、補助金全額を交付することを、ノルウェー政府が保証している。これは新システムのフルスケール運転状態における変動を監視することが目的である。

このため、SCR、EGR、HAM システムは設置時に補助金の 50%、3 カ月の通常運転後に残りの 50%が交付される。NOx ファンドは、さらにその後の 3 カ月の運転状況により、通常運転状況を評価するオプションも提示している。

SCR、EGR、HAM システム設置者は、システム設置後に NOx ファンドに提出する自己申告書に加え、通常運転を行った 3 カ月後に追加報告書を提出する義務がある。

上記の初期投資への補助金に加え、NOx 税対象海域で消費された SCR 装置用尿素水等のオペレーションコスト（3 カ月以上の作動の証明が必要。延長可能。）も補助金交付の対象となる。例えば、尿素水（濃度 40%）コストへの補助は最大 90%で、補助率は 6 か月毎に見直される。

NOx 削減プロジェクトに関する NOx ファンドへの補助申請の処理は、DNV が実施している。DNV は、プロジェクトの優先順位を決定し、最もコスト効率の高い基金運用法を NOx ファンド当局にアドバイスする。¹⁵

NOx ファンド設立の環境合意により、以下のように 3 年間で 30,000 トンの NOx 削減が義務付けられた。

2008 年及び 2009 年の NOx 削減目標は既に達成されている。2010 年 3 月、DNV は 2008 年 1 月 1 日~2009 年 3 月末の NOx 削減量は 6,221 トンで、目標を上回る 103%減であったと発表した。この削減量は、同時期に実施が予定されていた 216 のプロジェクト中 139 のプロジェクトからの結果である。2006~2007 年にも目標値を超えた 1,000 トン以上の NOx が削減された。現在申請されているプロジェクトが全て 2011 年末までに実施された場合、環境合意の NOx 削減目標は達成される見込みとなっている。¹⁶

上述したように、ノルウェーの NOx 税と NOx ファンドは、短期間で SCR システムの普及に大きな成功を収めている。これは近年の SCR メーカー各社のノルウェー船舶への SCR 装置納入実績から見ても明らかである。NOx ファンドは今後も継続が予定されているが、当初の実施期間は 2010 年までの 3 年間であったことも、駆け込み需要的な SCR 設置を加速したと考えられる。

¹⁵ <http://www.nho.no/the-nox-fund/category477.html>

¹⁶ <http://www.nho.no/emission-obligation/category609.html>

今後、ノルウェーの NOx 排出税と NOx ファンドの組み合わせのようなユニークな政策が、バルト海、北海沿岸国で地域別、国別又は海域全体で採用される可能性もある。フィンランドでも、海洋環境保全を目的とした経済的インセンティブの導入が計画されており、北欧海域の海洋環境規制は一層強化される方向にある。

課税と補助金を組み合わせた場合、SCR 装置設置等の投資コストの回収が容易になり、同時に環境保全にも役立つ強力なインセンティブとなる。バルト海全体に NOx 税が導入された場合、NOx 排出量は現在の 72%程度削減されるとの試算もなされている。¹⁷

¹⁷ Briefing: Reducing NOx Emissions from Shipping, November 2009, transportenvironment.com pdf

2. 排出ガス削減方法と技術

2.1 概要

船舶からの排出ガスの量と質は、主にエンジンに関連する以下の要因によって決まる。

- ① 使用燃料の質と量
- ② エンジンの種類
- ③ エンジンの燃焼効率
- ④ エンジンと推進装置の組合せの種類と効率
- ⑤ エンジンの稼働方法と負荷

本調査で焦点を当てるエンジンからの排出ガス（NO_x、SO_x、CO₂）の削減技術としては、エンジン内部及び外部において使用される様々な技術が既に実用化又は開発中である。しかしながら、有害ガスの種類によって化学的、物理的、機械的な性質が異なるため、それぞれの技術が限定された機能を持ち、全ての排ガス問題を一度に解決するソリューションは存在しないと考えられている。

エンジンから排出される有害ガス、主に NO_x の処理技術の分類方法としては、大きく分けて前処理、一次方式（エンジン内部での処理）、二次方式（後処理）の3つの方法がある。前処理は、主に燃料油の脱硝、代替燃料の利用、エンジン入室前の加水等の方法が考えられる。一次方式は、主にエンジン燃焼方法の変更である。二次方式は、エンジン外部に設置された専用装置によりエンジンから排出されたガスを処理する方法である。

一次方式は、エンジン内部の技術的な改良により、燃焼効率を向上させ、燃料消費量を削減することで、排出ガス量も削減する。主な技術は、コモンレール技術を利用した燃料噴射の最適化、先進ターボ技術による燃焼効率の向上等である。その他エンジン稼働方法の変更、燃焼過程の最適化、排ガス再循環（EGR）等がある。一次方式の NO_x 除去率は20～60%である。その主眼は、NO_x 発生と関連するシリンダー温度を低下させることである。

燃料の噴射タイミングを遅らせるというシンプルな技術により、最大燃焼圧力が減少し、温度が低下することにより、NO_x 排出量が最大で30%低下する。しかしながら、この方法はエンジン効率を低下させ、結果的に燃料消費量が5%程度増加するという欠点がある。

また、噴射圧力の増加と噴射遅延等の他の方法を組み合わせた場合、10～30%の NO_x 削減が可能である。圧縮率の増加のみでは、シリンダー圧力が増加し、シリンダー温度の上昇により、NO_x 発生量が増加するため、他の方法と組み合わせて使用する必要がある。また、噴射ノズルの形状変更も、NO_x 削減に有効であることが証明されている。

一次方式の諸技術は、MAN や Wärtsilä といった主要船用エンジンメーカーが研究開発を行い、既に実用化している。

一次方式の問題点は、燃焼温度を上昇させることにより燃焼効率は向上するが、NO_x 排出量も増加するという点である。このトレードオフ問題の解決には、二次方式、即ち排出ガスの後処理が最も効果的である。

近年特に注目され、研究開発と実用化が進んでいる排ガス後処理技術は、**NO_x** 後処理技術である **SCR** 及び **SO_x** 後処理技術であるスクラバーである。

80～95%又はそれ以上の **NO_x** 除去が可能である **SCR** に関しては、北欧を中心に実用化しており、既に数百基の **NO_x** 第三次規制を満たす **SCR** システムが実船搭載され、稼働している。スクラバーも製品化が始まっているが、開発中、実験段階のものも多く、実船搭載されているものは十数基に留まっている。また微粒子フィルターが、ヨット及びフェリーに利用されている例もある。¹⁸

SCR システムのスペシャリスト企業は、**DEC** (旧 **Munters**)、**Johnson Matthey** (旧 **Argillon**)、**H+H**、**Wärtsilä** 等で、自社システムに加え、主要エンジンメーカーと提携している場合が多い。

スクラバーに関しては、**Wärtsilä** が **Metso** と、**MAN** が **Couple Systems** とそれぞれ技術提携を行い、技術開発と製品化を進めている。

さらに、いくつかの技術を組み合わせることにより、排出ガスの削減率を高めることも可能である。例えば、電子制御方式とコモンレール噴射方式を、**Wärtsilä** の **DWI** システムと組み合わせた場合、**NO_x** の発生は 2.2～5.5g/kWh に低下する。さらに **SCR** を使用した場合には、1g/kWh 以下となると考えられる。**NO_x** 第三次規制を満たすためには、このような方策も必要となろう。

MAN Diesel & Turbo は、自社の環境技術として、一次方式としては燃料噴射システム (コモンレールを含む)、**VTA** 技術 (ミラー・サイクル)、ターボ技術 (**VTT**、**STC**)、二次方式としては **FWE** 技術、**HAM** 技術、**SCR**、スクラバー、**EGR** を挙げている。

同様に、**Wärtsilä** は、**IMO** 第三次規制を満たすための排出ガス削減策に焦点を当て、一次方式としてはエンジン内部技術 (**EGR**、**Low-NO_x** 燃焼技術、ミラー・タイミング)、及び環境負荷の低い燃料 (ガス) の利用、また、二次方式としては **SCR** とスクラバーを挙げている。

上記技術を含む現在開発中及び利用可能な主な排ガス削減技術とシステムを、次に概説する。

¹⁸ Couple Systems GmbH 資料より。

2.2 主な排出ガス削減技術とシステム

2.2.1 一次方式

①燃料噴射システム、コモンレール技術

コモンレール技術は、あらゆるエンジン負荷下で噴射圧力を高圧かつ一定に保つ電子制御燃料噴射により、NO_x 及び PM 排出量を削減する。またエンジン性能の向上により燃料消費量を改善し、CO₂ 排出量を削減する。

排気弁の開閉タイミングは個々に電子制御され、全てのパラメーターはエンジン負荷に応じて最適化され、NO_x と CO₂ の排出を低減する。

自動車等の陸上車両と異なり、大型船用ディーゼルエンジンは重油で稼働するため、電子制御による高性能燃料噴射には、まず燃料を 150 度程度に温め、粘性を調整する必要がある。重油に含まれる様々な腐食性物質も問題となる。

このため、信頼性の高いコモンレール技術の実現には、冗長性を持つ高性能で頑丈な燃料噴射システム、即ち高圧に耐えうる燃料ポンプ、インジェクター、センサー、制御ユニット等が必要となるため、製品コストは上昇する。

排気弁開閉タイミング制御技術が利用できない小口径 2 ストローク・エンジンには、下記の VTA 技術を用いたターボチャージャーが用いられる。

PM の発生は、燃料噴射圧力を上げることで抑制できるため、コモンレール技術が効果的である。Wärtsilä は、コモンレール式電子制御燃料噴射システム (CRI) を活用し、電子制御により燃料を噴射させることにより、燃費効率の向上等を実現している。

また、MAN も、ME シリーズの 2 ストローク・ディーゼルエンジンで、電子制御システムを用い、PM と NO_x の削減に成功している。MTU その他のエンジンメーカーもコモンレール技術を利用している。

②VTA 技術

VTA 技術 (Variable Turbine Area : 可変タービン・エリア) は、ターボチャージャーの効率を向上させる技術である。コモンレール技術が燃料の取り込みを調整するように、VTA システムは燃焼吸気を電子制御により柔軟に調整する。

VTA システムは、MAN が 2003 年に実用化した。2007 年以降、船用エンジンにも搭載され、現在 VTA 技術を用いた重油焼きエンジン向けのターボチャージャーのシリーズ生産を行っている唯一のメーカーである。

ターボチャージャーには、従来の固定式ブレードを用いたノズル・リングの代わりに、ターボチャージャーのアウトプットを制御する調整可能なブレードを用いている。VTA 技術は、給気量を燃料噴射量に応じて調整することにより、エンジン性能を向上させるとともに、低速運転時には燃料消費量を削減し、排出ガス量を低減させる。

また、VTA 技術により減速運航時にもエンジン性能の最適化が可能となり、これまで減速運航時に問題となっていた排出ガスの増加を回避することができる。VTA ターボチャー

ジャー技術を利用した場合、燃料消費量が最大で 2.5%低減する。これに伴い二酸化炭素発生量が低減、また炭化水素、一酸化炭素、カーボンブラックの排出量も減少する。¹⁹

③VVT 技術

VVT (variable valve timing : 可変バルブ・タイミング) 技術は、吸気弁の開閉タイミングにより圧縮過程及び燃焼中に温度を低下させる「ミラー・サイクル」を改良した技術である。「ミラー・サイクル」は、NO_x 発生量を低減させるが、部分負荷時の温度低下により黒煙が発生するという欠点がある。

VVT 技術は、バルブの開閉タイミングを正確に制御することにより、エンジン効率を最適化すると同時に燃料消費量を一定化させ、ガス排出量を低減させる。同技術の機械的コアとなるのは、可変バルブ・リフトを実現する精密に回転する偏心軸である。同技術を搭載したエンジンは、NO_x 排出量に関する現行の IMO の第二次規制を満たす。²⁰

④二段過給システム

エネルギー効率を向上する過給機の使用は、CO₂ 排出量の削減に寄与する。さらに、「スマート」な過給システムは、燃料中の空気比率をあらゆる条件下で最適化し、煤の発生も抑制することができる

最新の過給技術である二段過給システム (two-stage turbocharging) は、大型船用エンジンの環境性能を向上させ、ライフサイクルコストを削減する将来性の高い技術であると考えられている。同システムは、サイズの異なる過給機 2 基を組み合わせ、あらゆるエンジン稼働状況に柔軟に対応することにより、エンジンのパフォーマンスを最適化し、燃料消費と排出ガスを削減する。

同システムは後述の HERCULES プロジェクトでも研究が行われ、近年、Wärtsilä、MAN Diesel&Turbo 等が実用化している。

⑤LOW-NO_x 燃焼技術

Wärtsilä が 1995 年に発表した「Low NO_x」燃焼方式は、NO_x を 10%程度削減しながら、燃料消費量を同程度又は若干改善する。燃料消費量を考慮しなければ、更なる NO_x 削減も可能である。Low NO_x 技術は改良が続けられ、同社の中高速ディーゼル主機及び補機の全製品に採用されている。

¹⁹<http://www.mandiesel-greentechnology.com/0000517/Technology/Primary-Measures/Variable-Turbine-Area.html>

²⁰<http://www.mandiesel-greentechnology.com/0000516/Technology/Primary-Measures/Variable-Valve-Timing.html>

その主な特徴は以下の通りである。

- 燃料噴射タイミングを遅らせた短時間の噴射。
- 高圧縮率
- 4 ストローク・エンジンの「ミラー・バルブ・タイミング」原理を応用し、インレット・バルブの閉鎖タイミングを早める。
- 2 ストローク・エンジンの排気バルブの閉鎖タイミングを遅らせる。
- 燃料噴射システムの最適化。
- 燃焼室の最適化。

⑥直接水噴射(DWI)方式

燃料と水をひとつの噴射器から別々に燃焼室に噴射する直接水噴射（DWI）方式は、50～70%の水／燃料比率で燃料消費量を若干改善すると同時に、50～60%の NO_x 削減が可能であると考えられている。

⑦燃料水エマルジョン(FWE)技術

燃料と水のエマルジョン（Fuel Water Emulsion: FWE）技術は、事前に水と燃料を混合し、エンジンに噴射する技術である。噴射された燃料とともに水が蒸発し、シリンダー内の燃焼温度が低下し、NO_x 発生量が減少する。

MAN は、同社の FWE 技術により、水を 10%加えるごとに NO_x 発生量が 10%低下し、最大 30%の削減が可能であるとしている。もうひとつの湿式 NO_x 削減方法である HAM 技術（後述）と異なり、FWE 技術では塩分を含まない真水のみが使用される。電子制御により、燃料と水のエマルジョンはエンジン稼働中に製造・供給される。同技術は既に多くのクルーズ船、商船に利用されている。²¹

また、「ウォーター・イン・フュエル・エマルジョン・オン・デマンド」（WiFE on Demand）技術は、必要に応じて燃料と水を混合し、エマルジョンを供給するシステムである。水の混合比率は 0%～50%で、船内の利用可能な水の量やエンジン稼働状況により変化させる。例えば、水の混合比率が 30%の場合、NO_x 排出量は 30%、PM 排出量は 60～90%減少する。

同技術は、船内の油分を含んだ排水の有効利用法である。排水を再利用することにより、陸上での処理コストが削減される。また、あらゆる船種の燃料システムにレトロフィットが可能で、コスト効率の高い環境技術であると考えられる。

⑧湿式エア・モーター(HAM)

広く実用化されている HAM（humid air motor）技術は、燃焼空気に水蒸気を加えるこ

²¹<http://www.mandiesel-greentechnology.com/0000509/Technology/Secondary-Measures/Fuel-Water-Emulsion.html>

とによりシリンダー内温度をコントロールし、NO_x 発生量を削減する技術である。4 ストローク・エンジンと 2 ストローク・エンジンに使用される技術は若干異なり、2 ストローク・エンジン用のシステムは SAM (scavenging air moistening) 技術と呼ばれている。

同技術では、コンプレッサーからの高温給気を加湿し、給気の加熱能力を上昇させると同時に、酸素量を減少させる。結果として、エンジン内の燃焼温度が低下し、NO_x 発生量が最大 65% 減少する。水蒸気は海水から製造可能であるため、HAM システム稼働に必要な追加コストは低く、保守コストも少ないと考えられている。

欠点としては、燃料消費量が若干上昇し、排出ガス内の煙が増加する。また、排熱利用が限られ、システム設置のスペースも必要となる。²²

⑨燃料噴射ノズルのデザイン

燃料噴射ノズルのデザインは、噴射圧力とともに、NO_x 形成にも大きく影響する。例としては、MAN の大型 2 ストローク・エンジンが、スライド式燃料バルブの採用により、NO_x、CO、煤煙、未燃 HC の削減に成功している。

⑩排気ガス再循環(EGR)

排気ガス再循環 (EGR) は、燃焼温度を低下させるために、不活性な (酸素量の少ない) 気体となっている排気ガスをエンジン燃焼室に戻し、NO_x の発生を最大 80% 程度削減する技術である。

自動車メーカーは、EGR 技術の採用に積極的である。しかしながら、同技術には高質燃料油の使用が必要であるため、重油焚きエンジンを主流とする船舶への普及は遅れていた。2010 年、MAN は EGR システムの海上実験を成功させ、現在中速エンジン向けの EGR システムも開発中である。

Wärtsilä は、EGR 方式と DWI を組み合わせた水冷却残留ガス (WaCoReG) 方式を開発中である。

EGR 技術は、燃焼温度を低下させることにより NO_x 発生量を低減させる効果的な技術であるが、一方で、燃料である重油に含まれる硫黄分が部品の目詰まりや腐食を促すという問題も指摘されている。

MAN は、この問題の解決策として、第一段階でスクラバーにより排出ガスから硫黄分と微粒子を取り除いている。次に冷却器により排出ガス温度を 100 度以下に低下させ、ドリップ・キャッチャーで排ガスの湿度を除去し、ファンで排ガスの圧力を 0.4~0.7 バール上昇させた後、排ガスを再循環させる。EGR システムは必要に応じて、稼働・停止することが可能である。²³

²² http://www.mandiesel-greentechnology.com/article_006932.html

²³ <http://www.mandiesel-greentechnology.com/0000539/Technology/Secondary-Measures/Exhaust-Gas-Recirculation.html>

2.2.2 二次方式

①選択還元触媒(SCR)方式

ディーゼルエンジンの排出ガスから NO_x を除去する最も効果的であると考えられている方法は、選択還元触媒 (SCR) 方式で、船用エンジンに設置された場合、90～95%の NO_x 除去が可能である。同システムは、現在 IMO の NO_x 第三次規制を満たす唯一の NO_x 後処理方法であると考えられている。改良型エンジンと組み合わせた場合は、更なる NO_x 削減が期待できる。

SCR 装置は、触媒層からなるリアクター、還元剤の注入及び保管システム、制御システムで構成されている。2 ストローク・エンジンの場合、リアクターはターボチャージャー・タービンの前の排気システムに設置され、4 ストローク・エンジンの場合は、タービンの後に設置される。リアクターに排気ガス・サイレンサーを組み込むことも可能である。

還元剤には尿素水が使用される。尿素は、排気ガス中でアンモニア (NH₃) に変化し、排出ガス中の NO_x がアンモニアと結びつき、水と無害な窒素に分解される。尿素タンクの大きさは、エンジンの大きさや負荷特性及び尿素が入手可能な港への寄港頻度等によって決まる。

SCR 技術は 1989 年以来、実船で使用されてきたが、初期投資コスト、尿素や触媒等のランニングコスト、システム設置スペースの問題等により、地域的 (環境基準の厳しい北欧海域等) 又はビジネス上の特別な理由がない限り、SCR システムはほとんど利用されていないのが実情である。

このため、SCR 開発メーカーは、SCR 装置の小型化、軽量化、触媒の寿命延長、ランニングコストとメンテナンスコストの削減、廃棄物の削減等を今後の課題としている。

②スクラバー

排出ガスのスクラバー (洗浄) 技術は、近年実用化が開始された排出ガス後処理技術である。同技術は、エンジン内部技術では処理できない SO_x 削減に非常に効果的で、90～95%の削減が可能であるが、NO_x と PM 削減に関しては効果は限定的である。

初期のスクラバーシステムは、カナダ Marine Exhaust Solutions (MES) 社が、「EcoSilencer」として既に 1998 年に商品化しており、SO_x 削減率は最大 90%である。一方、NO_x 削減率は、5～15%程度に止まっている。近年は、大手エンジンメーカーが、それぞれのスクラバーシステムを製品化している。

海水を利用したスクラバー (オープン・ループ・スクラバー) では、エンジンからの排出ガスは、煙道に到達する直前に、シャワーヘッド形状のスプレー装置により海水で洗浄される。水と硫黄が反応して形成された硫酸は、海水中のアルカリ分により中和される。洗浄に利用された海水はフィルターにより微粒子と油分が取り除かれ、海に排出される。固形分はタンクに貯蔵され、陸上で廃棄される。海水スクラバー技術は、エンジン出力 1 メガワットあたり、1 時間に 40～50 m³の海水が必要となるため、システムの大きさと重量が欠点である。

MANをはじめとする船用メーカーは、海水の代わりに、中和成分として NaOH（水酸化ナトリウム）等を混入した真水を使用するスクラバーを開発中である。この「クローズド・ループ・スクラバー」では、水の必要量がエンジン出力 1 メガワットあたり僅か 0.1 m³で済み、従ってスクラバーも大幅に小型化可能となっている。スクラバーからの排水も非常に少ないため、海を汚染する恐れも少ないものと見られている。

さらに、排出ガスを粒状石灰（水酸化カルシウム）を通して洗浄する「ドライ・スクラバー」も開発中である。硫黄と石灰は反応して石こうとなり、陸上で廃棄される。利点としては、固形化した硫黄分は生物圏を汚染することないことである。欠点は、粒状石灰の保管スペースが必要なことである。²⁴

③プラズマ技術

プラズマによる NO_x、粒子状物質、煤の削減は、現在開発中の技術である。電気エネルギーが電子エネルギーに変換され、電子から発生したフリーラジカルが排出ガスに含まれる有害物質を破壊する。プラズマ技術は形状やサイズに柔軟性が高く、NO_x 排出量を 97% 低減させるが、触媒に貴金属を使用するところが普及のネックとなろう。

英国 AEA Technology 社は、船用ディーゼルエンジン向けの非熱プラズマ（NTP）システムを開発した。同システムは、SCR システムと同等の効率とランニングコストを持つが、尿素やアンモニア等の触媒を必要としない。プラズマは排気ガス中の粒子と NO_x に加え、多環芳香族炭化水素（PAH）その他の規制されていない芳香族化合物も分解する。同技術は、プラズマを維持するための電力供給設備が必要である。

AEA Technology 社の NTP プロトタイプ実験では、NO_x の 97% 除去という好結果が得られた。さらに、同システムは、小型でコンフィギュレーションに柔軟性があることが利点である。

④IS 技術

減煙技術として、MAN は、クルーズ船やフェリーが運航する環境規制の厳しい海域や港湾におけるエンジンからの煤煙発生の削減を目的としたインビジブル・スモーク（IS）技術を開発した。

IS 技術の主な特徴は以下の通りである。

- ターボチャージャーは最適化され、部分負荷に対応。
- 給気バイパスはエンジン負荷の 65% 以下。
- 給気プレヒーティングはエンジン負荷の 20% 以下。
- 噴射口径が小さい。
- FWE（燃料と水のエマルジョン技術）の利用。

²⁴<http://www.mandiesel-greentechnology.com/0000519/Technology/Secondary-Measures/Exhaust-Gas-Scrubber.html>

定期運航中の船舶での実験結果では、エンジン負荷 20%からアイドリング中でも、煤煙の可視性は、ボッシュ・スケールの許容上限 0.3 を下回った。

IS 技術は、既にスタンダード技術として MAN 中速エンジンに採用されている。規制の厳しい海域用には、他の NO_x、煤削減手段と組み合わせたパッケージが、新造エンジン及びレトロフィット向けに利用可能である。

⑤粒子状物質除去装置:セラミック・フィルター、酸化触媒

粒子状物質 (PM) や煤を除去するフィルター装置は、今後自動車への採用が増えることが期待されている。フィルターは定期的な交換が必要である。

一方、酸化触媒は、PM 中の CO、HC を触媒により酸化させ、水と二酸化炭素に変えるもので、EGR 搭載のディーゼルエンジンへの採用が予想される。PM フィルター、酸化触媒とも、貴金属触媒を使用する。

これらの技術の船用エンジンへの利用に関しては、現行の船用燃料を使用した場合、故障や目詰まりが予想される。現在利用可能な電気集塵装置等の PM 除去方法は、設置スペースや価格の問題があり、重油焚きの船用エンジンからの PM 除去は、引き続き今後の課題である。(ちなみに、重油を精製油に替えることで、PM 排出量は 50~90%削減可能である。)

⑥クランクケース・ガス・クリーニング

クランクケース・ガスは、燃焼室からのガスと煤、クランクケース内に常に存在するオイル・ミストから成る。このようなガスは安全性の面からも排気が必要があるが、オイルや煤という有害物質のため、そのままの排気には問題がある。

クランクケース・ガスのクリーニング方法としては、ペーパー・カートリッジ・フィルターの使用が一般的であるが、サイクロンや空気フィルター等の方法もある。

Alfa Laval と Wärtsilä は、遠心分離技術を用いた「PureVent」と呼ばれるオイル・ミスト・セパレーターを共同開発し、2005 年に発表した。Wärtsilä は、2006 年から同社新造エンジン全機種へのオプションとして、PureVent を提供している。

PureVent のクリーニング能力は 98%である。同システムは、小型・軽量のディスク遠心機で、既存の製品と比較して寿命が長いことが特徴である。また、排出ガスの削減に加え、甲板や船体の汚れを防ぐという利点がある。浄化された気体は放出され、分離された油分はエンジン潤滑油の代わりに再利用できる。²⁵

²⁵ Wärtsilä Environmental Product Guide - 3/2011, p.36

2.2.3 代替燃料

使用燃料の質と成分は、排出ガスに直接影響する。前処理、即ちエンジン内部技術以前の排出ガス削減方法としては、従来の重油（HFO）の代わりに、硫黄分や不純物の比較的少ない MDO、MGO 等の燃料、又は有害ガスがほとんど発生しない LNG、燃料電池等の新たな代替燃料の利用が考えられる。

更に厳格化する SO_x 排出規制を満たす手段としては、現在のところ、排出ガス・スクラバーを使用する以外には、このような硫黄分の少ない燃料（0.1%以下）を使用するしかないものと考えられる。

①低硫黄燃料

エンジンの燃焼室に入った硫黄分は全て酸化されて SO_x となり、大気中に排出される。このため、SO_x 排出量は、燃料中の硫黄含有量に比例する。また、粒子状物質の排出量も、燃料中の硫黄分等に影響される。高硫黄分燃料油を使用した場合の粒子状物質排出量は、精製油使用の場合の 3~4 倍に上る。

従って、最も経済的かつ単純な有害排出ガス削減方法は、燃料油中に含まれる硫黄分を削減することである。SCR 装置による SO_x 除去の場合でも、その効果を最大限にするには低硫黄分燃料を使用する必要がある。

特定海域では、燃料中の硫黄含有量の上限が厳格に規制されているため、船舶は、航海中に数種類の異なる燃料を使用することとなり、燃料システムや操作手順を変更しなければならない。また、重油に比べて価格が大幅に高いことも大きな課題となっている。

②ガス燃料

更に厳格化する SO_x 排出規制を満たす手段としては、SO_x をほとんど排出しないガス燃料は、近年注目されている代替燃料である。

液体燃料に加え、ガス燃料を使用する二元燃料（Dual Fuel: DF）エンジンは、ディーゼルエンジンに比べて NO_x 排出量が少ない。しかしながら、NO_x 規制の厳しい海域を航行する場合には、NO_x 削減量は十分でないため、SCR 装置などの追加手段が必要となる。ディーゼルエンジンよりも出力が 10~20%低いことも解決すべき問題である。

近年、通常運航では液体燃料を全く使用しないガス燃料船も普及し始めている。特に、内航及び沿岸海運による有害ガス排出の割合が高いノルウェーでは、政府と船級協会の主導でクリーンで安全な液化天然ガス（LNG）の船用利用を積極的に進めている。DNV によると、燃料として LNG のみを使用する船舶は CO₂ 排出量が 15%、NO_x 排出量が 85~90%がそれぞれ削減され、SO_x 及び PM 排出量はほぼゼロである。

ガス（LNG）燃料船は、2001年に実用化し、既に 20 隻が運航している。主なガスエンジンメーカーは、Wärtsilä、Rolls-Royce、MAN Diesel&Turbo、三菱重工である。

LNG 燃料の利点は、後処理装置なしに排出ガス基準を満たすことが可能な点である。また、課題としては、出力の低さ、初期投資コスト、LNG タンクの船上設置、LNG 燃料の安定的な供給路等である。

DNV は、例えば排出基準の厳しい ECA 内の定期航路を運航する新造小型フェリーの場合、長期的にはスクラバーや低硫黄分液体燃料 (MGO) を使用するよりも、LNG 燃料船がコスト的に有利であるとしている。

③燃料電池

NO_x、SO_x、PM を排出せず、高い熱効率を持ち、静かで振動もないという優れた特性を持つ燃料電池 (FC) は、船用産業の全セクターが大きな期待を寄せている新技術である。

現在のところ、商業的に実用化された船用燃料電池の利用は、ヨット等の超小型船舶に限られている。北欧では、出力 200kW 以上の船用燃料電池の実船搭載を計画している。

燃料電池は上記の特性から、大型クルーズ船やフェリーへの搭載が期待されているが、通常必要出力が 45MW を超えるクルーズ船への利用は、補機又は補助装置としても現状では不可能である。

また、FC 燃料として理想的な水素の供給設備も現状では整備されていない。このため、FC の船用利用には、既存の船用燃料油を水素に変換する装置も必要であり、技術的課題に加えて、そのコストが大きな課題となっている。

このように実用化にはかなりの時間を要すると考えられるが、欧州の造船所、船用メーカー及び海事組織は、船用に利用可能な FC 開発に向けて共同で研究開発を進めている。

特に、ドイツ船級協会 (GL) の主導で、MTU、HDW 等のドイツ企業が船用燃料技術分野での研究開発を牽引している。GL は、既に燃料電池利用のガイドラインを策定し、燃料電池の船用アプリケーションの安全性等の規制環境を整備している。GL 主導の数々のプロジェクトでは、現在数百 kW~2MW、さらに 5MW 弱の燃料電池が実用化されているが、通常の船舶に必要な 5~50MW にはまだ開きがある。

2.3 その他の排出ガス削減技術・方法

前述したエンジン関連の排ガス削減技術以外にも、船舶からの排出ガスの削減は可能である。具体的には、船舶の運航方法、船舶設計、動力・推進システム、発電システムの最適化等により実現可能である。以下に主な技術・方法を概説する。

2.3.1 船舶運航方法

①停泊時間の短縮

商船の港湾における停泊時間は、運航効率と燃料消費量に影響する。停泊時間を短縮することにより、余剰時間を低速運航に切り替えることができ、燃料の10%程度の節約が期待できる。

②プロペラ表面の加工・洗浄

プロペラ表面は、生物が付着・繁殖しやすく、プロペラの推進効率に大きく影響する。定期的なメンテナンスは、効率向上とスムーズな運航につながり、IMOの報告によると、0.5~3%の燃料消費量の削減が期待できるとしている。

③船体の洗浄と塗装

プロペラの場合と同様に、船体への藻や生物の付着は、船体抵抗を高め、推進効率の低下につながる。これは船齢、停泊時間、運航速度、水温、喫水の変化、積荷の重さと状態等の要因にも影響される。対策としては、定期的なメンテナンス、乾ドックによるチェック、表面加工と塗装があり、定期的な洗浄により約3%の効率向上が期待できる。また、最新の塗装技術を用いて船体の表面を滑らかで強固にすることにより、船体抵抗を低くし、また生物の付着を軽減することが可能である。IMOの報告によると、船体の表面処理と塗装は、0.5~5%の効率向上につながるとしている。

④低速運航

運航速度を減速することは排出ガス削減のための非常に有効な手段であり、1ノット減速するごとに燃料効率が11%程度向上すると考えられている。通常の運航速度を半分にすれば、CO₂排出量を70%削減することも可能であると考えられている。運航速度を半分に減速することは現実的には困難であるが、運航速度を最適化すれば0.1~4%の燃料消費量の削減が可能である。

⑤気象条件に応じた航路の最適化

最短コースは必ずしも最も効率的な航路ではない。気象条件が悪い場合には、最短コースではなく、最もスムーズな航路を選ぶことにより、1～4%の燃料の節約が期待できる。

⑥トリムの最適化

運航条件を調整し、トリムを最適化することにより、エネルギー効率の約5%向上が期待できる。トリムの最適化は容易な作業ではないが、Wärtsiläはコスト回収期間は比較的短いとしている。²⁶

⑦オートパイロット

高性能のオートパイロットの使用により、船舶運航の安定性が増し、燃料消費量の削減につながる。

⑧省エネ意識の向上

船員の省エネ運航に対する意識を高め、インセンティブやボーナスを与えることは、結果的に燃料コストの削減につながる可能性がある。ただし、本件実現のためには船員に対する特別なトレーニングや評価システムが必要である。

²⁶ Boosting Energy Efficiency at Sea, Wärtsilä 2010

2.3.2 船舶設計

①スケールメリット

通常、船舶は大型化するほどエネルギー効率が低い。これは新造船、既存船の両方に当てはまる。船用機器、港湾設備、インフラ等は大型船に対応しなければならないが、例えばコンテナ船を10%大型化した場合、運航効率は4~5%向上すると考えられる。スケールメリットはタンカー、コンテナ船、RORO船、フェリー等に有効であり、この戦略のコスト回収期間は比較的短いものと考えられる。²⁷

②バラストの軽量化

バラスト重量を最適化し、必要最低限に保つことにより、最大7%の燃料消費量の削減が可能である。復原性を保ちながらバラストが少なく済む新たな船型、さらにバラストを使用しないノンバラスト船も開発されている。

③船体の軽量化

新造船に関しては、船舶設計及び船体素材の最適化による船体構造の軽量化により、最大7%の燃料消費量の削減が期待できる。

④船型の最適化

船体の重量、長さ、幅、喫水の関係は、船体抵抗に大きく影響する。この比率を最適化することにより、最大9%の燃料消費量の削減が期待できる。有効な方法は船体の長さを大きくすることであるが、本戦略のコスト回収には比較的時間がかかるものと考えられる。パナマックス型の全長を長くしたポストパナマックス型の船舶の例では、30%の効率化が可能であるとのデータもある。

⑤インターセプター・トリム・プレーン

インターセプター・トリム・プレーンは、船舶のトランサムほぼ全長にわたる垂直の鋼材プレートで、船体抵抗を軽減する。インターセプターは、新造、既存のフェリーやRORO船に搭載が可能である。推進用のエネルギー需要は1~5%減少し、燃料消費量を4%程度低減することが期待できる。コスト回収期間は比較的短いものと考えられる。²⁸

²⁷ Boosting Energy Efficiency at Sea, Wärtsilä 2010

²⁸ Energy-efficient solutions for cruise ships, ferries & megayachts, Wärtsilä 2010

⑥船体開口部の抵抗軽減

船体の開口部は、通常スラスタ用のトンネルである。スラスタは大型船の操縦性向上に不可欠な装置であるが、船体開口部が適切に設計されていない場合、大きな推進抵抗が発生する。設計の最適化により、抵抗が軽減され、燃料消費量も減少できる。

⑦空気潤滑システム

船体の下に空気を掃気し、船舶と水の間に空気層を作ることにより、摩擦抵抗が大きく軽減される。この空気潤滑システムを装備した場合、フェリーでは 3.5%以上、タンカーでは最大 15%の燃料消費量の削減が期待できる。同システムの寿命は平均 30 年と言われており、コスト回収は比較的容易であるが、同システムの円滑な作動のためには船体表面をスムーズに保つことが必要であるため、メンテナンスコストは上昇すると見られている。

⑧運航形態に応じた設計

フェリーやオフショア支援船の新造船は、その運航・作業形態に応じた船型及び機械・機器構成の最適化による効率化が比較的容易であり、エネルギー効率は最大 35%向上すると考えられる。

2.3.3 推進技術

①ウイング・スラスタ

ウイング・スラスタは新たな推進装置で、フェリー、RORO 船、オフショア支援船に適用することにより、8～10%程度の効率化が可能で、初期コストの回収も比較的容易な技術であると考えられる。

②CRP プロペラ

1 基のプロペラの代わりに、お互い逆方向に回転するプロペラ 2 基を組み合わせた CRP プロペラは、エネルギー効率を 10～15%向上させることが可能である。このソリューションは初期投資コストが高いため、コスト回収には比較的時間がかかると考えられる。

③プロペラ設計とモニタリング

プロペラ設計は、船舶の燃費に大きな影響を与える。その効率化のための方法としては、プロペラと船体の関係の最適化、プロペラとラダーの最適化、プロペラ翼の最適化、プロペラ先端の最適化、プロペラ・ノズルの最適化、プロペラのモニタリングがあり、これらの最適化等の対応により、エネルギー効率の 15%程度の向上が期待できる。コスト回収期間は比較的短いと考えられる。

④推進抵抗の管理

船体表面の塗装と定期的なメンテナンスにより、推進効率の 5～10%向上が期待できる。²⁹

⑤定速運航

速度を一定にし、プロペラの回転数と回転数の変化を減らすことにより、最大 5%の燃料節約が期待できる。

⑥風力エネルギーの利用

将来性の高い風力エネルギーの利用には、大きく分けて 2 つの方法がある。ひとつは甲板上に帆を設置、又は船首部分にカイトを取り付ける方法で、推進効率は最大 20%の向上が期待できる。カイトの利用は、全長 30m 以上、速度 16 ノット以上の船舶に適している。もうひとつは、甲板上に設置された垂直ローターにより風力を推進力に変換する方法で、

²⁹ Napa Group 11 October 2011

推進効率は最大 30%の向上が期待できる。³⁰

⑦牽引スラスタ

新造フェリー、RORO 船、オフショア支援船に有効な推進手段である牽引スラスタは、10%程度の燃料消費量の削減が期待できる。コスト回収も比較的容易であると考えられる。

⑧海水潤滑船尾管軸受システム

船尾管内のオイルは推進装置の潤滑のために必要である。しかしながら、典型的な船尾管は 1,500 リットルもの潤滑油を含んでおり、運航中に損傷を受けやすく、船尾管からのオイル漏れは、海洋汚染につながる。近年、オイルの代わりに海水で潤滑を行う技術が開発されており、船尾管の環境性を高めると同時に、2%程度の燃料消費量の削減が可能であると期待されている。

³⁰ Napa Group 11 October 2011

2.3.4 動力関連技術

①ディーゼル電気推進システム

主機にディーゼル電気システムを採用することにより、燃料消費量の最大 20%削減が期待できる。ディーゼル電気推進システムは、新造の RORO 船、フェリー、オフショア支援船等に有効な動力技術である。

②動力管理システムと自動化

最適化された動力管理システムにより、船舶の運航効率は 5%程度向上することが期待できる。また動力管理の自動化により、更なる効率向上が期待できる。動力管理システムには、軸発電メーターや燃料消費メーター等が考えられる。

③冷却システムの適切な管理

エンジン冷却システムには多くのポンプとファンが組み込まれており、エネルギー消費量が多い。冷却システムの速度と負荷を適切に管理することにより、燃料消費量も削減することができる。

④太陽光発電

甲板の余ったスペースにソーラー・パネルを設置し、太陽光発電を行うことにより、燃料による船内電力消費が減少し、燃料消費量の 4%程度の削減が可能であると考えられる。本手法はコンテナ船やオフショア支援船等の特定船種には適用が困難という欠点はあるが、コスト回収は比較的容易であると考えられる。

3. 欧州共同研究開発プロジェクト「HERCULES」

3.1 概要

2002年に提案され、2004年に開始された「HERCULES」（ヘラクレス、英語読みは「ハーキュリーズ」）統合プロジェクトは、2012年現在も継続しており、これまで実施された船用関連の欧州での共同研究開発プロジェクトとしては最も大規模で野心的なプロジェクトのひとつである。プロジェクト名「HERCULES」とは、「High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships」（超低排出ガス船舶の燃焼方法の高効率研究開発）の略である。

HERCULESプロジェクトの目的は、排出ガス及びPMを大幅に削減しながら、効率と信頼性が高く、燃料消費量、CO₂排出量、ライフサイクルコストの低い船用ディーゼルエンジンを開発することである。

HERCULESプロジェクトには、1984年から継続しているEUの欧州科学技術共同研究開発計画である「フレームワーク・プログラム（FP）」及びスイス連邦政府が補助金を拠出している。

EUは、欧州が米国や日本、さらに将来的には中国やインドとの国際競争を行っていくためには、欧州企業及び研究組織による最先端技術、応用技術の開発が不可欠であると考えており、欧州はナレッジ・ベースの経済体制を発展させることを、環境に配慮した持続性のある経済成長のための最優先課題としている。また、EUは、特にエネルギー効率向上技術や低排ガス技術等における欧州企業の優位性の確保と維持を狙っており、HERCULESプロジェクトの規模はこのような欧州の研究開発戦略を裏付けるものである。

同プロジェクトは、世界の船用ディーゼルエンジン市場において圧倒的なシェア（80～90%）を持つ欧州の2大船用エンジンメーカーであるMAN Diesel&Turbo（旧MAN B&W、MAN Diesel）とWärtsilä Corporationの主導で2004年に開始された。HERCULESは、ライバル企業である両社がともに参加している唯一の研究開発プロジェクトで、その重要性とスケールは注目に値する。プロジェクトには、欧州の船用メーカー、船社、大学・研究機関、船級協会等、約40の企業・組織が参加している。

プロジェクトの第一段階であるHERCULES-A（2003～2007年、実施期間43か月）では、数々の燃料消費量削減及び排ガス削減ための方法と技術が幅広く検討され、次世代エンジンのテスト施設が設計・製造された。

後続プロジェクトであるHERCULES-B（2008～2011年）では、HERCULES-Aの研究結果を踏まえて、最も有望な排ガス削減技術に焦点を当てた研究が行われ、燃料消費量削減及び排ガス削減目標を達成した。研究分野を絞ったため、プロジェクト参加企業・機関は32社に縮小された。

続いて実施が提案されている HERCULES-C プロジェクト（2012～2015 年）では、エンジンの燃焼過程の最適化、システム統合、信頼性及びライフサイクル等の総合的な分析と問題点の解決及び開発された技術の実用化、製品化を目指した研究が行われる予定である。³¹

³¹ EC FUNDED RESEARCH (1990 – 2010) ON LARGE MARINE DIESEL ENGINES as background to the R&D programme HERCULES, Nikolaos P. Kyrtatos 26/1/2011

3.2 HERCULES-A プロジェクト(2004～2007 年)

3.2.1 概要

目的と結果

HERCULES プロジェクトの目的は、船用エンジンからの排出ガスと PM を大幅に削減し、同時にエンジン効率と信頼性を向上させることにより、燃料消費量と CO₂ 排出量を削減し、エンジンのライフサイクルコストを低下させることである。

このような目的達成のため、HERCULES-A プロジェクトでは、極値パラメーター・エンジン、先進燃焼技術、多段インテリジェント・ターボチャージャー、エネルギー再生・複合機能を持つ「ホット」エンジン、エンジン内部の排出ガス削減方法、排出ガスの後処理方法、排出ガス・モニター用のセンサー、インテリジェント・エンジンの制御技術等の研究開発が行われた。また、部品設計を支援するモデルとコンピューターツールが開発され、プロトタイプ製造と試験が行われた。さらに、開発された新技術の実証を行うための実験エンジンが開発された。開発されたシステムのフルスケール実船実験により、次世代船用エンジンの利点と可能性が証明された。

プロジェクトの研究結果は、参加企業・組織が今後 10 年間程度に開発・製造するエンジン、部品、技術に活用される。また、後継プロジェクト HERCULES-B、HERCULES-C プロジェクトで、更なる開発と実用化に向けた研究が続けられる。

参加企業・組織

9 の作業パッケージ (WP)、18 のタスク、54 のサブ・プロジェクトからなる HERACLES-A プロジェクトには、欧州 10 カ国 (EU9 各国及びスイス) から 40 企業・組織 (船用メーカー (60%)、大学 (19%)、研究機関 (12%)、船社・船級協会 (9%)) が参加した。

プロジェクト運営と調整は、本プロジェクトのために設立された MAN B&W (現 MAN Diesel&Turbo) と Wärtsilä の共同子会社であるアウグスブルクの Uleme EEIG が実施した。

予算

プロジェクト予算総額は 3,330 万ユーロで、その公的補助金 1,780 万ユーロのうち、EU の研究開発プログラムであるフレームワーク・プログラムが 1,500 万ユーロ、スイス連邦政府が 280 万ユーロを拠出した。

3.2.2 プロジェクト構成

HERCULES-A プロジェクトの主な WP 及びタスクの概要と参加企業・組織は以下の通りである。

WP1 極値デザイン・パラメーター

タスク 1.1 極値デザイン・パラメーターを持つエンジンの構造

参加企業・組織：Wärtsilä、ヘルシンキ工科大学、タンペレ工科大学、Miba、M.Juergensen

タスク 1.2 極値デザイン・パラメーターを持つエンジンの熱力学（2 ストローク及び 4 ストローク・エンジンの極値熱力学負荷におけるオペレーションの検証、新部品の設計、フルスケール・テスト。）

参加企業・組織：MAN B&W、Bodycote、Aido、Metso、Federal Mogul、Daros、Mahle、アテネ工科大学

WP2 高度燃焼概念

タスク 2.1 燃焼過程シミュレーション

参加企業・組織：Wärtsilä、トウルク・アカデミー、ETH スイス連邦技術研究所、アテネ工科大学、Paul Scherrer Institut (PSI)、ヘルシンキ工科大学

タスク 2.2 排出ガス形成シミュレーション（3-D CFD ツールを使用）

参加企業・組織：MAN B&W、ルンド大学、Institut fuer Technische Verbrennung

WP3 多段インテリジェント・ターボチャージング

タスク 3.1 可変ターボチャージング

参加企業・組織：Wärtsilä、ABB、ヘルシンキ工科大学、アテネ工科大学

タスク 3.2 インテリジェント・ターボチャージング

参加企業・組織：MAN B&W、KEGUEL-Kemmerich Gummersbach Elektromotoren、PBS Turbo

WP4 ターボ複合エンジン、ホット・エンジン

タスク 4.1 複合サイクル

参加企業・組織：Wärtsilä、ABB、M.Juergensen、Mahle

タスク 4.2 ホット・エンジン

参加企業・組織：MAN B&W、Aalborg Industries、Hapag-Lloyd、Peter Brotherhood

(WP5 は欠番)

WP6 排出ガス削減技術(液体ベース)

タスク 6.1 水噴射技術 (NO_x 削減技術)

参加企業・組織：Wärtsilä、Maersk Line、OMT-Officine Meccaniche Torino、Wallenius Marine

タスク 6.2 加湿方式 (NO_x 削減技術)

参加企業・組織：MAN B&W、Wallenius Marine

WP7 排出ガス削減技術(ガス・ベース)

タスク 7.1 エンジン内の排出ガス削減方法 (粒子状物質削減)

参加企業・組織：Wärtsilä、EMPA-Swiss Federal Laboratories

タスク 7.2 エンジン外の排出ガス削減方法：EGR (排出ガス再循環) 技術

参加企業・組織：MAN B&W、DLR Deutsches Zentrum fuer Luft- und Raumfahrt、Germanischer Lloyd

WP8 排出ガス後処理技術(スクラバー、プラズマ技術)

WP9 低摩擦エンジン

(WP10 は欠番)

WP11: 適応制御エンジン

以下の WP では、フルスケール・プロトタイプの実船設置が行われた。

WP4 (ターボ複合エンジン、ホット・エンジン)：プロトタイプが Hapag-Lloyd 社のコンテナ船に搭載され、動力装置の効率向上を実証。

WP6 (排出ガス削減方法、内部、水ベース)：水噴射システムが A.P.Moller-Maersk 及び Wallenius Lines 所有船に搭載され、NO_x (窒素酸化物) 削減における効果を実証。

W11 (適応制御エンジン)：ギリシャ Kristen Navigation 社の新造船にカムレス電子制御エンジンを搭載し、インテリジェント制御システムの有効性と信頼性を実証。

HERCULES-A プロジェクトの目的である極値エンジン (extreme value engine: EVE) の開発に関しては、超大型噴射燃焼室のデザイン、ピストンリング摩擦テスター、ホット・エンジン用のシリンダーライナー、大型 2 ストローク・エンジン用排ガスバイパス装置が開発された。

トレーニング活動

HERCULES-A プロジェクトの最終年である 2007 年には、以下のような船用エンジンの研究開発に関する専門的で高度なトレーニング・セミナーが行われた。

- 実験方法と測定方法 (コーディネーター: ヘルシンキ工科大学)
- CFD (計算流体力学) と燃焼過程 (ETH Zurich)
- プロセス・シミュレーション (アテネ工科大学)

3.3 HERCULES-Bプロジェクト(2008～2011年)

3.3.1 概要

HERCULES-Aプロジェクトの研究結果を基礎に、MAN Diesel と Wärtsilä Corporation は、HERCULESプロジェクトの続行を決定し、2008年に「HERCULES-B」が開始された。

実施期間 36 か月の同プロジェクトの主たる目標は、船用ディーゼル推進システムの効率を改善、その結果として燃費効率を改善し、CO₂等のガス排出量を削減することである。具体的な数値目標としては、船用ディーゼルエンジンの燃料消費量を 10%削減することである。

現在、全世界の船舶の 99%はディーゼル・エンジンで運航されている。産業全体で見ると、エンジンの熱効率を僅か 1%向上させるだけで、全船舶からの CO₂排出量が年間約 5 百万トン削減されることとなり、同プロジェクトの環境面におけるメリットは明白である。

また、本プロジェクトでは、2020年までに、超低排出ガス・ディーゼルエンジン、即ち NO_x 排出量の 70%削減、PM 排出量の 50%削減を実現するとしている。

HERCULES-Aプロジェクトの主たる成果は、様々な排ガス低減技術とエンジン効率化技術の実証であった。同時に、参加大学・研究所の研究環境が整備され、物理的実験が可能となり、実施された。HERCULES-Bプロジェクトでは、選択された技術の実用化、商品化が進められた。

2011年9月に完了予定であった HERCULES-Bプロジェクトは 2011年末まで継続し、その最終結果の詳細は現時点(2012年1月)では公表されていないが、中間報告によると、数々な成果を上げている。

まず、二段階過給技術に関する実証実験を行い、有効な結果を得た。同技術は、大型船用ディーゼルエンジンの環境性とライフサイクルコストにおける競争力の高い新エンジンの開発を実現するための重要技術である。

他の成果としては、噴霧式燃焼室とカムレスエンジン試作機の開発等が挙げられる。噴霧式燃焼室は、ディーゼルエンジンの燃料噴霧パターンと燃焼過程に関する数値モデリングを検証するために開発された。カムレスエンジン試作機は、現行のカムシャフト駆動に代わる電子制御の電子油圧バルブにより駆動される。バルブ開閉に関するテスト条件のプログラム変更を容易にするカムレス技術は、エンジン試験の迅速化と柔軟性向上に寄与する。

HERCULES-Bプロジェクトの成功を受け、2012～2015年に実施される後継プロジェクトとして HERCULES-Cが提案されている。HERCULES-Cプロジェクトの焦点のひとつは、HERCULES-A及び HERCULES-Bプロジェクトで開発された様々な技術の統合と最適化である。

上記の他に提案されている研究開発分野は、エンジンの信頼性とライフサイクルに影響する要素の研究である。環境性の高い製品ライフサイクル技術を導入し、エンジンのライフサイクルを通じた技術性能を保持する。これには、安全性と信頼性向上のための先進素材、トライボロジー及びセンサー並びに船用動力システムの有効性と制御性向上のための

監視及び計測技術並びに船用動力システムの研究等が含まれている。

HERCULES-B の予算総額は、2,500 万ユーロであった。現在提案されている HERCULES-C の目標予算は 1,900～2,100 万ユーロで、これを含めると HERCULES プロジェクト全体の予算総額は約 8,000 万ユーロとなる。

3.3.2 参加企業・組織

HERCULES-Aと同様に、HERCULES-Bプロジェクトには、船用エンジンに関連する多くのメーカー、大学・研究機関、船社、船級協会等の企業・組織が参加している。主要メンバーは変わらないが、専門技術メーカーや実証用の船舶を提供する船社の顔ぶれが変化し、参加企業・組織数が若干減少した。

船用メーカーは、それぞれの分野における競争力の向上と成長を目指し、大学・研究機関は基礎研究・技術開発を進めることにより、船用産業の発展を促す。ユーザー、即ち船社は、環境規制の強化への対応を迫られており、また環境性の高い船舶運航が競争力の向上につながるため、オペレーティングコストが低く、信頼性と環境性の高い動力システムを希求している。このように、参加企業・組織は、研究開発の成果という利益を共有する立場にある。

HERCULES-Bプロジェクトには、欧州13か国（EU11か国：オーストリア、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、イタリア、オランダ、スウェーデン、英国及びチェコ、その他の欧州国：スイス及びノルウェー）からの38企業・組織が参加した。その内訳は、19企業（50%）、10大学（26%）、4研究機関（5%）、2船社（5%）、3船級協会（8%）である。

プロジェクトの中核となる二大企業、MAN DieselとWärtsiläは、低速・中速エンジンで世界の船用エンジン市場の約90%のシェアを持つ。その他の船用企業も世界的に競争力のある企業が多く、30%の企業はそれぞれの市場分野におけるトップ企業である。

また、プロジェクトに参加している14の欧州の大学・研究機関も、それぞれの研究分野で世界的な卓越性を持っている。

ユーザーである欧州船社2社も、世界的な大手船社であるA.P. Moller-Maersk A/SとHapag Lloyd AGで、両社を合わせると500隻以上の船舶を運航している。

参加船級協会も、世界的に大きな影響力を持つノルウェーDet Norske Veritas (DNV)、ドイツGermanischer Lloyd (GL)、英国Lloyds Register (LR)が名を連ねている。

これらの多大な影響力を持つ企業・組織の研究能力を集結、統合し、世界的に重大な影響を与える特定の目標を持ち、長期的な視野に立った研究開発プロジェクトは、先例がないと言えよう。

以下にプロジェクト参加企業・組織の概要を述べる。

①プロジェクト・コーディネーター

ULEME E.E.I.G. (ドイツ)

ULEME E.E.I.G.は、プロジェクトの中核となる2大エンジンメーカーであるMANとWärtsiläが、HERCULESプロジェクトの調整と管理を行うコーディネーターとして特別に設立した組織である。

<http://www.uleme.com>

②メーカー

Aalborg Industries A/S (デンマーク)

Aalborg Industries の主要ビジネスは、熱・蒸気技術と関連製品の製造、販売、メンテナンスである。Aalborg Industries グループは、船用市場で 85 年以上の歴史を持ち、高性能バーナーとユーザーフレンドリーな最新制御技術を持つあらゆる船種向けのボイラーシステムを供給している。

<http://www.aalborg-industries.com>

ABB TURBO SYSTEMS AG (スイス)

ABB は、環境性の高い発電・自動制御技術におけるグローバルリーダーで、グループ全体では世界約 100 か国に 108,000 人の従業員を持つ。ABB グループ内の独立子会社である ABB Turbo Systems は、スイスのバーデンを本拠地に、900 人を雇用している。同社は、500kW 以上のディーゼル及びガスエンジン向けのターボチャージャー市場におけるグローバルリーダーで、船舶、発電所、電車、建設・鉱業用車両向けのターボチャージャーの供給台数は 18 万台に上る。

<http://www.abb.com/turbocharging>

BOEHLER SCHMIEDETECHNIK GMBH & CO KG (オーストリア)

Boehler Schmiedetechnik GmbH & Co KG (BSTG)は、ニッケル超合金、チタン合金、特殊鋼製の高品質鍛造メーカーで、船用ディーゼルエンジン、航空機、発電所用蒸気及びガスタービン向けの部品を全世界に供給している。同社は世界最大のねじプレス 2 基、ハンマー及び油圧プレス数基を持ち、高精度のネット・シェイプ鍛造が可能である。また、同社は、鍛造と熱処理過程の有限要素シミュレーション、プロトタイプ製造、チタンアルミナイド等のハイテク素材の研究開発を行っている。

<http://www.boehler-forging.com>

Componenta Pietarsaari MS Oy (フィンランド)

5,250 人の従業員を持つフィンランドの大手鉄鋼企業グループ Componenta Corporation の子会社である Componenta Pietarsaari MS Oy は、ディーゼルエンジン向け大口径ピストンの設計、製造、販売を行っている。Componenta Pietarsaari MS Oy は、中速ディーゼルエンジン向けのピストン市場で急速に成長している専門メーカーである。

<http://www.componenta.com>

ECKA Granulate GmbH & Co. KG

ECKA Granules は、青銅、銅、アルミ、錫粉末のメーカーである。子会社である ECKA Granulate Essen GmbH は、ホワイトメタル冶金を専門としており、ECKA の製造する特殊合金は、ディーゼルエンジン、発電機、タービン、ギアその他のベアリング用ライニングに使用されている。

<http://www.ecka-granules.com>

IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (ドイツ)

1983年に設立され、2,500人の従業員を持つ IAV GmbH, Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr は、自動車セクターの最大手専門企業のひとつで、自動車産業向けに幅広い高度エンジニアリングサービスを提供している。IAV は、パワートレイン、エレクトロニクス、次世代車両の開発が主要ビジネスで、独自の研究開発も行っている。

<http://www.iav.com/>

MAN Diesel (ドイツ)

(注:2010年1月1日、MAN Diesel SE は MAN Turbo AG と合併し MAN Diesel & Turbo SE となった。)

MAN Diesel Group は、船舶、発電所、鉄道向けの大型ディーゼルエンジンのトップメーカーである。また、ディーゼル発電機及びターボチャージャー製造大手でもあり、ターボチャージャーの販売実績は2万基以上に上る。2ストローク・エンジンの研究開発は、グループのデンマーク本社と最新の研究開発・設計設備のあるコペンハーゲンで行われている。

<http://www.mandiesel.com>

MAN DIESEL SAS (旧 S.E.M.T. Pielstick、フランス)

(注:2006年10月、S.E.M.T. Pielstick は MAN Diesel SE の子会社となり、同年12月、「MAN Diesel SAS」と社名を変更した。)

S.E.M.T. Pielstick は、発電所、艦船、商船、鉄道向けの4ストローク中高速ディーゼルエンジンの設計、開発、製造を専門に行っている。ライセンス製造も含め、同社は、出力500~26,500kWの14,000基のディーゼルエンジン(総出力41百万kW)の販売実績がある。HERCULESプロジェクト向けの研究は、フランス Saint-Nazaire にある同社のテスト&パフォーマンス部門(GETF)で行われる。

<http://www.pielstick.com>

Miba Gleitlager GmbH (オーストリア)

Miba は、グローバルなエンジン及び自動車産業の戦略的パートナーとして、焼結部品、ベアリング、摩擦材料の製造を行っている。同社のスライド・ベアリングは、大型トラック、中速エンジンから大型2ストローク・エンジンまで幅広く使用されている。研究開発及び製造は、同社のオーストリア Laakirchen 拠点で行われている。

<http://www.miba.com>

PBS Turbo s.r.o. Velka Bites (チェコ)

PBS Turbo s.r.o.は、MAN Diesel の NR/S シリーズのターボチャージャー及び部品のライセンス製造、独自のターボチャージャーの製造及びサービスを行っている。

<http://www.pbsturbo.cz>

Praxair Surface Technologies GmbH (ドイツ)

デュッセルドルフ近郊 Ratingen を拠点とし、約 100 人の従業員を持つ PRAXAIR Surface Technologies GmbH は、産業向けの高性能コーティングの製造を行っている。

<http://www.praxair-gmbh.de>

Sandvik Powdermet AB (スウェーデン)

Sandvik は、130 か国に拠点をもち、42,000 人を雇用するグローバルな産業グループである。子会社である Sandvik Powdermet は、熱間静圧圧縮成形 (HIP) 粉末冶金 (PM) 部品の開発、製造、販売を専門とし、100 グラムから 15 トンまでの超合金、ステンレス、ニッケル、銅合金、金属基複合材料を用いた熱間静圧圧縮粉末冶金ニアネットシェイプ部品の製造ではグローバルリーダーである。

<http://www.powdermet.com>

Vansco Electronics Oy (フィンランド)

Vansco Electronics は、重機の OEM 製造向けの電子システム・部品製造の大手メーカーで、船用及び発電所向けの中速ディーゼルエンジンの電子モジュールの開発と製造を行っている。

<http://www.vansco.ca/>

Wärtsilä Finland OY (フィンランド)

70 か国、130 拠点に 13,000 人の従業員を持つ Wärtsilä は、船用エンジン、推進機器、操船システムの最大手メーカーのひとつである。4 ストローク・エンジンの研究開発は主にフィンランド Vaasa で行い、その他にもイタリア、フィンランド、スペインに技術支援センターを持つ。製造拠点はフィンランドとイタリアである。推進機器、シール、ベアリングの研究開発と製造は、オランダ、ノルウェー、英国、日本で行っている。

<http://www.wartsila.com>

Wartsila Schweiz AG (スイス)

Wärtsilä は、2 ストローク・エンジンの研究開発をスイス Winterthur で行っている。製造は、主要造船所に近いアジア諸国のライセンシーが担当している。

<http://www.wartsila.com>

Wartsila Netherlands BV (オランダ)

(注: 2009 年 1 月 1 日、Wartsila Propulsion Netherlands BV と Wartsila Nederland BV は合併し、Wartsila Netherlands BV となった。)

Wartsila Propulsion Netherlands BV は、Wärtsilä の船用動力部門の一部で、世界の海運業向けに船用推進システムの設計、製造、販売を行っている。その製品は、固定及び可変ピッチプロペラ、ウォータージェット、トランスバース・スラスタ、操縦スラスタ、制御システム、シール、ベアリング、ギアボックス等である。

<http://www.wartsila.com>

Federal Mogul Friedberg GmbH (ドイツ)

Federal Mogul のグループ企業である Goetze は、1887 年以来、自動車及び船用産業向けのエンジン製造に深く関わってきた。Goetze の Normform ピストンリングは、欧州のエンジンメーカーに幅広く利用されている。

<http://www.federalmogul.com>

Kistler Instrumente AG (スイス)

圧力、エネルギー、トルク、加速の測定用センサーのメーカーである Kistler は、エンジン開発、自動車工学、プラスチック、金属加工、インストール技術、生物力学等の分野にセンサーを提供している。25 社のグループ企業、30 のディストリビューター、従業員 950 人を持つ同社は、動力測定装置の大手企業である。

<http://www.kistler.com/>

③大学・研究機関

Danish Technical University (デンマーク)

デンマーク工科大学機械工学科 (DTU/MEK) は、バイオマス、風力発電、波力発電等の再生エネルギー、内燃機関のエネルギー効率向上、エネルギー輸送、エネルギー消費等の研究に焦点を当てている。また、同大学内の国立研究所である Riso (DTU/Riso) は 660 人を雇用し、環境負荷低減を目指した新エネルギー技術を含む研究を行っている。DTU/Riso 内の光学プラズマ科は光学分析を担当している。

<http://www.dtu.dk>

Delft University of Technology (オランダ)

デルフト工科大学 (TU Delft) は、企業、研究所等に幅広い製品とサービスを提供している。主な製品とサービスは、計測・制御システム、IT マルチメディア技術、ガラス技術、空港開発、コンファレンス企画等の分野である。HERCULES プロジェクト以外にも、いくつかの共同研究開発プロジェクトに参加している。

<http://www.tudelft.nl/>

EMPA, Swiss Federal Laboratories (スイス)

スイス連邦研究所 EMPA は、材料科学及び技術の研究機関で、応用科学と特殊研究開発を専門とし、持続性のある材料科学と技術へのハイレベルなサービスを行っている。主な役割は、産業及び公的機関との連携、知識の伝搬、大学レベルの教育等である。

<http://www.empa.ch/>

ETH Zurich (スイス)

スイス連邦技術研究所 (ETH) 内の熱力学・内燃機関研究所は、高効率で超低排出ガスのエネルギー変換を目標に、先進コンピューター及び実験ツールを開発し、エンジン及び発電所の不安定な内燃システムの化学反応流の研究を行っている。

<http://www.ethz.ch>

Aalto University (フィンランド)

(注：ヘルシンキ工科大学 (TKK) は、2010年1月1日にヘルシンキ経済大学及びヘルシンキ芸術デザイン大学と合併し、アールト大学となった。)

1849年に設立され、1908年に大学となった TKK はフィンランドのトップレベルの工科大学で、12学部、250人の教授、15,000人の学生を有する。その内燃機関研究所は、最新のレーザー設備とコンピューターツール、CFD 及び シングル・シリンダーの中速リサーチ・エンジン、EVE エンジン、光学シングル・シリンダー高速エンジンをはじめとするリサーチ・エンジンを持ち、20人以上のスタッフが研究を行っている。

<http://www.aalto.fi>

National Technical University of Athens, LME (ギリシャ)

国立アテネ工科大学 (NTUA) は 1836年に設立されたギリシャ最古、トップレベルの工科大学である。その海洋工学研究所 (Laboratory of Marine Engineering : LME) は、School of Naval Architecture & Marine Engineering に属している。LME は、船用ディーゼルエンジン、電動及び油圧式動力計を含む最新の実験設備及びコンピューター設備を持ち、主にエンジン負荷と船用推進技術の研究を行っている。

<http://www.lme.ntua.gr>

Paul Scherrer Institut (スイス)

Paul Scherrer Institute (PSI) は、自然科学及び技術の総合研究所である。PSI はスイス国立研究所内の最大の機関で、1,200人のスタッフを有し、スイス内外の大学、研究所、産業と連携して固体物理学、材料科学、ライフサイエンス、核・非核エネルギー、エネルギー関連エコロジー等の分野における持続性のある発展を目指した研究開発を行っている。

<http://www.psi.ch>

Tampere University of Technology (フィンランド)

油圧・自動化研究所 (Institute of Hydraulics and Automation : IHA) は、タンペレ工科大学 (TUT) 内の最大の研究機関で、産業向けの油圧・自動化技術の研究開発及び大学教育を行っている。

<http://www.tut.fi>

Technical University of Munich (ドイツ)

ミュンヘン工科大学機械工学科の内燃エンジン研究所 (LVK) は、13 基のテストベッドと最新の計測設備を持ち、30 人のスタッフを有している。

<http://www.tum.de>

Karlsruhe Institute of Technology / ifKM (ドイツ)

(注：2009 年 10 月 1 日、カールスルーエ研究所とカールスルーエ大学が合併し、カールスルーエ技術研究所 (KIT) となった。)

1825 年に設立されたカールスルーエ大学は、ドイツ最古の工科大学で、学生数は 18,000 人である。同大学の機械工学科内のレシプロエンジン研究所は内燃機関の研究を専門に行っており、エンジン過程分析に豊富な経験を持っている。

<http://www.ifkm.kit.edu/>

University of Eastern Finland (フィンランド)

(注：2010 年 1 月、University of Kuopio と University of Joensuu が合併し、University of Eastern Finland が設立された。)

University of Kuopio は、環境科学が得意分野である。HERCULES プロジェクトに関する研究は、燃焼、大気エアロゾル、エアロゾル分析、ナノ粒子合成、エアロゾル粒子の健康への影響等を研究する環境科学学科内の微粒子エアロゾル技術研究所で行われている。

<http://www.uku.fi/laitokset/ifk/>

University of Siegen (ドイツ)

ジーゲン大学は、12 学部、学生数 12,000 人を持つ総合大学である。機械工学科は 24 人の教授、7 つの研究室が幅広い研究を行っている。HERCULES プロジェクトに参加している Prof. Dr. Oliver Nelles は機械工学科で自動制御・メカトロニクスを専門としている。

<http://www.uni-siegen.de>

VTT Technical Research Centre Of Finland (フィンランド)

2,700 人のスタッフを持つ VTT フィンランド技術研究センターの強みは、異なる学術分野の知識と経験を組み合わせ、競争力のある新技術とイノベーションを開発することである。HERCULES プロジェクトでは、排出ガスの特性とリスク分析、測定技術、排ガス削減技術を担当している。

<http://www.vtt.fi>

④船社

A.P. Moller-Maersk A/S (デンマーク)

Maersk Supply と Maersk Tankers を含めた A.P. Moller Maersk は、約 500 隻の船隊を運航する巨大船社グループである。同社内の技術組織 (T.O.) は、新造船建造とコンテナ船運航の調整を担当している。

<http://www.maersk.com/>

Stena Rederi AB (スウェーデン)

Stena は、定期フェリー、海運、オフショア掘削、不動産、金融、リサイクリング、環境サービス、貿易等のビジネスを持つスウェーデンの企業グループである。Stena の国際海運ビジネスは、Stena RoRo、Stena Bulk、Stena Teknik、Northern Marine Management、Concordia Maritime を傘下に持ち、造船、配乗、技術サービス、用船、ファイナンス、マーケティング等における豊富な経験を誇っている。

<http://www.stena.com/en/Market+areas/Rederi.htm>

Hapag Lloyd AG (ドイツ)

Hapag Lloyd Group は、定期コンテナ輸送を主要ビジネスとする世界 5 大船社のひとつである。ハンブルクを拠点とする船舶管理部門は、コンテナ船 35 隻、クルーズ船 4 隻の運航を行っている。

<http://www.hapag-lloyd.com/>

⑤船級協会

Det Norske Veritas (ノルウェー)

ノルウェー商船隊の技術評価のために 1864 年に設立された Det Norske Veritas (DNV) は、現在 100 か国に 300 拠点を持つ、人命、財産の安全確保や海洋環境保全を目的とした独立機関である。全世界 7,000 人の従業員の創造性、知識、経験が、DNV の最大の資産である。

<http://www.dnv.com/>

Germanischer Lloyd AG (ドイツ)

86 か国に 220 拠点を持つ 1867 年設立の Germanischer Lloyd (GL) は、船舶と海洋設備の品質、安全性、環境性の管理を行う独立機関である。その内燃機関部門は、陸上及び船用ディーゼルエンジンからの排出ガスと微粒子の測定と分析、及び排出ガスの後処理方法に関する豊富な知識と経験を持っている。

<http://www.gl-group.com/>

Lloyds Register (英国)

全世界に 5,000 人の従業員を持つ Lloyd's Register (LR) は、品質と安全性向上のために船舶、システム、設備の評価と認証を行っている。船級業務の他、LR は、緊急事態対策、燃料分析とアドバイス、技術調査、環境保護、状態評価、海事トレーニング等の海事関連コンサルティングサービスを提供している。

<http://www.lr.org/>

3.3.3 プロジェクトの目標

HERCULES-B プロジェクトにも適用される、HERCULES プロジェクト全体のビジョンともいえるべき目標は、以下の3つである。

- ① 2020年までに燃料消費量及びCO₂排出量を10%削減する。
- ② 2020年までにNO_x排出量を70%削減する。(IMO 2000年基準と比較した場合)
- ③ 2020年までにその他の排出ガス・物質(PM、HC)を50%削減する。

HERCULES-B プロジェクトは、上記の全体目標達成のために、ディーゼルエンジンの技術を網羅する以下の7つの作業パッケージ(WP1~8、W4は欠番)に分かれ、研究開発活動を行った。各作業パッケージは、進捗状況の指標となるプロジェクト内で達成可能な目標を持っている。

表:HERCULES-B プロジェクトの目標

	WP名	プロジェクト内で達成可能な目標
WP 1	極値パラメーターエンジン	<ul style="list-style-type: none"> • 2ストローク・エンジン:最大圧力 220 バール、平均ピストン速度 10 m/s • 4ストローク・エンジン:最大圧力 300 バール、平均ピストン速度 12 m/s
WP 2	燃焼	<ul style="list-style-type: none"> • 光学アクセス可能な透明シリンダーカバー、2ストローク、口径 500mm エンジン、4ストローク、口径 320mm エンジン、着火条件: 200 バール、2000℃ • 噴射と燃焼に関するフルスケール空間データ、CFD エンジンのシミュレーション評価
WP 3	ターボチャージング	多段ターボチャージング、テストエンジンでのチャージ圧力: 8 バール
WP 5	排出ガス削減方法	<ul style="list-style-type: none"> • 50%以上のNO_x削減: EGR、CG、スクラバーの実験 • SCR の高硫黄分燃料使用エンジンへの搭載
WP 6	パワートレインの最適化	効率 60%を目指した高圧ボイラーシステムの実験

WP 7	先進素材、 摩擦と疲労	ピストンリング摩擦とガイドヘッドシュー摩擦の 25%削減
WP 8	エレクト ロニクス と制御	セルフラーニング機能と、故障許容能力のあるインテ リジェント管理システムのテスト・エンジンへの搭載、 従来システムとの比較

また、HERCULES-B プロジェクトのいくつかの WP では、以下のイノベーションが目標とされている。

- 船用エンジンの「極値」機械・熱負荷に対応するパワーシリンダー技術
- 大型エンジンのシリンダー内部の測定、観測、ビジュアル化方法
- 「新」燃焼コンセプト
- 可変静翼を持つ多段式「インテリジェント」ターボチャージャー
- 複合蒸気サイクルを持つ「ホット」エンジン
- 重油焚きエンジン用の EGR、スクラバー、排ガス後処理方法
- 大型エンジン用の新センサー及び排出ガス測定方法
- 「低摩擦」、低疲労のピストンリングとクロスシューガイド素材
- 船用エンジンの「適応型」制御

3.3.4 プロジェクトの構成

HERCULES-B プロジェクトは、7つの作業パッケージ (WP)、13のタスク、56のサブプロジェクトに分かれている。プロジェクトの構成と担当企業・組織を以下に示す。

表:HERCULES-B:プロジェクト構成と担当企業・組織³²

WP	WP名	タスク	サブプロジェクト	企業・組織
1	極値パラメーター・エンジン	1.1: 極値負荷に対応するエンジンの開発	1.1.1 高出力エンジンの設計パラメーターと周辺条件	COMPONENTA, TKK, WFI
			1.1.2 部品の設計と製造	
			1.1.3 エンジン試験	
		1.2: 極値パラメーター・エンジンの機械設計	1.2.1 基礎設計と数値計算方法の開発	BSTG, ECKA, IAV, MD-DK,
			1.2.2 プロトタイプ部品の製造技術と調達	MD-FR, MD-DE, MIBA, PST, SANDVIK
			1.2.3 プロトタイプ試験	
2	燃焼	2.1: 燃焼過程モデリングと開発	2.1.1 基準データの取得と実証	ETHZ, PSI, WFI, WCH
			2.1.2 CFD サブモデル実証と開発	
			2.1.3 燃焼概念の開発	
		2.2: 実験的、数値的燃焼分析	2.2.1 2ストローク実験装置の設計、CFD 及び FEM 計算を含む	MD-DK, MD-DE, NTUA-LME, RISOE, UNIKARL
			2.2.2 4ストローク実験装置の設計、CFD 及び FEM 計算を含む	
			2.2.3 2ストローク実験装置部品の製造、組み立て	
	2.2.4 4ストローク実験装置部品の製造、組み立て			
	2.2.5 機器の選択と購入			
	2.2.6 2ストローク、4スト			

³² <http://www.hercules-b.com/49/article/english/49/4/index.htm>

			ローク実験装置の機能試験 2.2.7 2ストローク・エンジン試験、データ分析 2.2.8 4ストローク・エンジン試験、データ分析 2.2.9 数値モデルの実証試験と追加開発 2.2.10 2ストローク・エンジン排気管からの排出ガス測定	
3	ターボチャージング	3.1: 高効率、低排出ターボチャージング概念	3.1.1 ターボ・システムの仕様	ABB, ETHZ, PSI, TUT, WFI, WCH
			3.1.2 制御システムの開発	
			3.1.3 ターボチャージャーの開発	
			3.1.4 エンジンの適用	
			3.1.5 エンジンと燃焼の最適化	
			3.1.6 実証試験	
3.2: 高度インタージェント・ターボチャージャー	3.2.1 2ストローク用インタージェント・ターボシステム	MD-DE, PBST		
	3.2.2 4ストローク用インタージェント・ターボシステム			
5	排出ガス削減	5.1: 排出ガス削減方法	5.1.1 船用エンジンの微粒子排出特性	EMPA, UKU, VTT, WFI, WCH
			5.1.2 SO _x 、PM 削減技術	
			5.1.3 NO _x 削減率 60%以上の乾式、湿式技術	
			5.1.4 排出ガス削減方法の統合と最適化	
	5.2: 排出ガス削減：EGR と後処理方法	5.2.1: 高圧 EGR	AALBORG, MD-DK, MD-DE, TUM-LVK	
		5.2.2: CGR (Combustion Gas Recirculation)		
		5.2.3: 乾式スクラバー		
		5.2.4: 後処理方法		

6	パワートレイン全体の最適化	6.1: 船用動力伝達系（パワートレイン）の最適化	6.1.1 船用パワートレインの部品モデル	TUDELFT, NTUA-LME, WPNL
			6.1.2 測定及び実証データ	
			6.1.3 統合ソフトウェアツールの開発	
			6.1.4 ケーススタディ	
	6.2: 高圧ボイラー複合サイクル	6.2.1 高圧ボイラーの研究開発と縮小型テストモデル用ボイラー部品の開発	AALBORG, MD-DK	
		6.2.2: ボイラーとエンジンの統合：原寸大モデルの設計		
		6.2.3: 制御システムの仕様		
7	先進素材、摩擦と疲労	7.2: トライボロジーの最適化	7.2.1 稼働試験条件下でのピストンリングの摩擦と疲労	DTU, MD-DK, WCH, FMO
			7.2.2 フルスケール試験条件下でのピストンリングの摩擦と疲労	
			7.2.3 クロスヘッドシュー・ベアリングの摩擦最適化	
			7.2.4 ピストンリングと組立部品の摩擦と疲労の概念分析	
			7.2.5 ピストンリングと組立部品の試験	
8	エレクトロニクスと制御	8.1: 高度センサーと高信頼性適応制御	8.1.1 高度診断用のデジタル信号処理	TUT, VANSCO, WFI, WCH
			8.1.2 故障耐性のある適用制御	
			8.1.3 高信頼性エレクトロニクスの設計	
			8.1.4 プロトタイプ試験	
	8.2: インテリジェント・エンジン	8.2.1 センサー技術	MD-DE, NTUA-LME, UNISIEGEN	
		8.2.2 エンジン制御システムのハードウェア部品		
		8.2.3 最適化アルゴリズム		

			8.2.4 インテリジェント・エンジン制御システムのソフトウェア部品	
			8.2.5 インテリジェント・エンジン制御システムと部品のテストベッド試験	
9	プロジェクト管理			ULEME E.E.I.G.

3.3.5 プロジェクトの達成状況

2011年9月に終了予定であった HERCULES-B プロジェクトの最終会合は、2011年12月に開催された。最終達成状況の概要について、以下にまとめる。³³

最終達成状況

WP1: 極値パラメーター・エンジン

タスク 1.1: 極値負荷に対応するエンジンの開発

目標:

- 極値負荷状況で稼働する試験部品の開発と試験 (Aalto 大学の EVE テストエンジンを使用)
 - ◆ 同クラスの既存エンジンよりも 35% 高い燃焼圧力 (最高 300 バール) 及び 25% 速い平均ピストン速度 (最高 12m/s)
 - ◆ エンジンの性能及び排出ガスへの影響を検証
- 可変弁パラメーターを利用した先進サイクルのエンジン性能と排出ガスへの影響の研究及び評価
- シリンダー内部の高度測定技術の開発

最終結果:

- 2011年4月、最高燃焼圧力 300 バールを達成
- 高圧、異なる噴射パラメーター、給気条件における燃焼状態を調査
- ピストンスピード 12m/s における高速運転のシミュレーションを行い、2011年12月、実働に成功

成果と結論:

- 設計パラメーター、境界条件のシミュレーションと計算を完了
- 設計と製造は完了したが、今後の更なる改良が必要
- エンジンに機械的な損傷が発生し、プロトタイプエンジン製造に支障をきたしたが、損傷は軽度のもので、今後の参考となった。
- シリンダー内部の高度測定技術の開発に関しては、現在 EVE の状態が整った。
- 最大の成果は、全ての主要課題が克服され、圧力 300 バール、ピストンスピード 12m/s のリサーチエンジン製造という目標が達成されたことである。

³³ HERCULES - B Final Meeting and 4th Partners Forum

タスク 1.2: 極値パラメーター・エンジンの機械設計

目標:

極度の高熱負荷、高機械負荷に耐えるエンジン設計ソリューションの開発

最終結果:

- 基礎素材評価のためのテストリグの製造
- プロトタイプ部品の製造 (バルブ・シート・リング、断熱噴射ノズル、弁心棒、P/M 技術、冷却弁心棒、強化シリンダー・ライナーと主ベアリング)
- 新素材の導入
- プロトタイプ部品のテストエンジン、フィールドエンジンへの搭載

成果と結論

- 高度設計開発のための様々な技術分野における高度シミュレーション・ツールの適用
- 改良された特性を持つ先進素材の適用が可能な新製造方法の開発
- 高負荷に対応する将来的なエンジン設計のためのプロトタイプの良い試験結果
- いくつかの部品に関しては、要求される性能及び／又は新基準確認のための追加試験が必要



Sectioned prototype insulated nozzle.



Test rig to determine heat transfer coefficients

WP2: 燃焼

タスク 2.1: 燃焼過程のモデリングと開発

目標:

- 既存の船用エンジンに比べて燃費と排出ガス量のトレードオフが改善された燃焼概念の CFD 研究と提案

- モデル入力とモデル実証に必要な有効データの取得
- 船用エンジンの燃焼過程のシミュレーションに使用可能な CFD ツールとシミュレーション手法の開発と適応

最終結果:

- 重油（HFO）を含む異なる燃料による噴霧測定（PDA：粒子力学分析）
- 液滴のサイズと速度の測定
- CFD サブモデルを測定値に整合
- 初期分解の新モデルを提案
- 最適化アルゴリズムの適用（DoE）
- 異なる噴射、ノズル、燃料、スワール、EGR、エンジン主要寸法、燃焼室形状を用いた様々なシリンダー内燃焼シミュレーションの実施

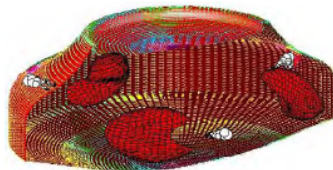
成果と結論

- シリンダー内部の燃焼過程の把握
- 噴霧燃焼室の試験データを CFD サブモデル改善に利用
- CFD 手法と予測能力の大幅な改善
- 新たに開発、改善されたシミュレーション手法とモデルについて、既存及び新たな燃焼システムの最適化に利用

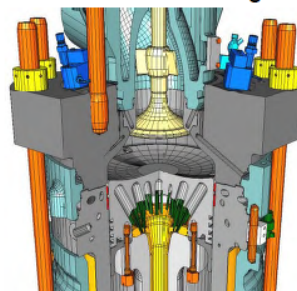
Spray Combustion Chamber



Calculation & Simulation



Engine



タスク 2.2: 実験的、数值的燃焼分析

目標:

- 燃焼室内の過程の把握
- エンジン燃焼室内のフロー、噴射、燃焼の光学レーザー調査方法の開発
- 将来的なエンジン制御戦略のための排出ダクト内の高速過渡エンジン排出ガス測定方法の試験
- CFD モデルの実証と改良及びエンジン燃焼過程への適用

主な結果:

光学アクセスが可能なシリンダカバーの開発、噴霧と燃焼調査のための光学測定

- 炎の伝搬とピストンとの相関関係調査のための炎の高速画像を取得
- 炎温度の 2 色高速高温測定を実施
- エンジン実働条件下における光学レーザーによる噴霧調査を実施
- 掃気段階の燃焼ガスの可視化とエンジン冷却方法改善のための燃焼室壁のサーモグラフィの赤外線画像を取得
- 将来的な排出ガス抑制と実証のための排出ダクト内の高速過渡エンジン排出ガス測定を実施

以下の目的のための噴霧浸透、炎伝搬、排出ガス形成に関する CFD 燃焼シミュレーション・ツールの評価と改良

- エンジン開発の初期段階における燃料消費率及び排出ガスに関連する燃焼室設計とエンジン部品の最適化
- CFD 燃焼シミュレーションの代用による必要なエンジン試験回数の削減
- 将来的なエンジン燃焼システムのコンピューターによる最適化の準備

参加パートナーと役割:

MAN Diesel & Turbo SE

- 2 ストローク及び 4 ストロークテストエンジンのレーザー光学測定用のカスタムメイドの透明シリンダー・カバーの開発
- 安全で再現可能な「光学」エンジン試験の手順とエンジン制御戦略の開発
- シリンダー内部のフロー、燃料噴射、燃焼に関する局所的測定データの提供
- CFD モデルの評価と改良

カールスルーエ大学 IfKM

- テストエンジンへの光学アクセスの設計と設置に関し、MAN アウグスブルクを支援
- CFD データと光学測定データの比較に関する理論的、数値的研究

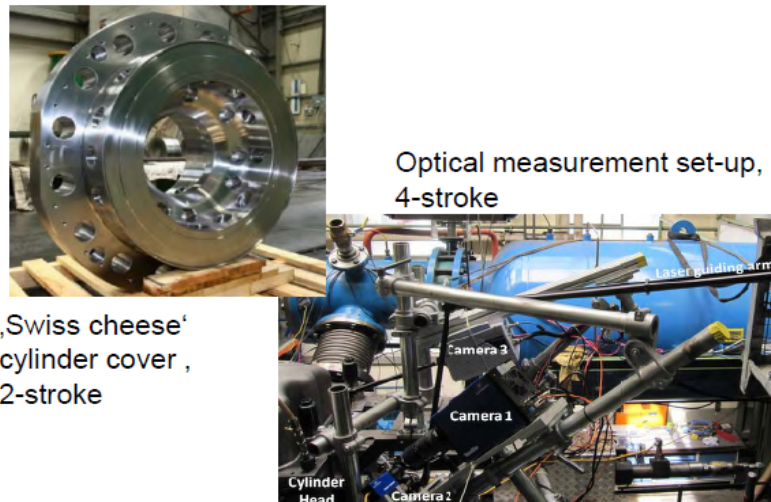
デンマーク工科大学 Risø

- 排気管の過渡的排気測定のための赤外線及び紫外線センサーの開発と適用

- 燃焼室壁の高速 MIR (Medium Infrared) 熱像法の開発

アテネ工科大学

- 4T50ME-X エンジンへの高速燃焼 NO_x センサーの適用



WP3:ターボチャージング

タスク 3.1:高効率、低排出ターボ概念

目標:連続高圧ターボシステムの実現と制御方法の開発

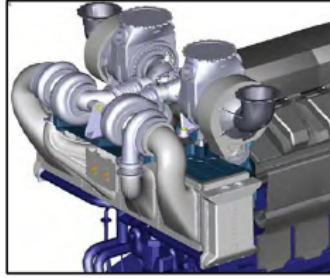
最終結果:

- ミラー・バルブ・タイミングを利用した 2 段過給システムの高い NO_x 削減率及び燃料消費削減率を確認 (NO_x 50%削減、燃料消費量 5~6 g/kWh 削減)
- ターボ効率 76%を達成
- 現象学的燃焼及び排出モデルの開発
- あらゆる負荷における良好な稼働状態で負荷許容試験をクリア
- エンジン効率と排出ガスに関する知識向上

成果と結論:

- テストエンジン 3 基を設計し、2 段過給システムに転換
- 800 時間の試験計画と実施
- 燃焼と排出のモデル開発
- 1-D シミュレーションを実施
- 噴霧、燃焼、排出ガス形成に関する 3-D CFD シミュレーションを実施
- 排出ガス削減及び効率化技術を開発
- エンジンの負荷加速と低負荷運転時の性能改善の方法を開発

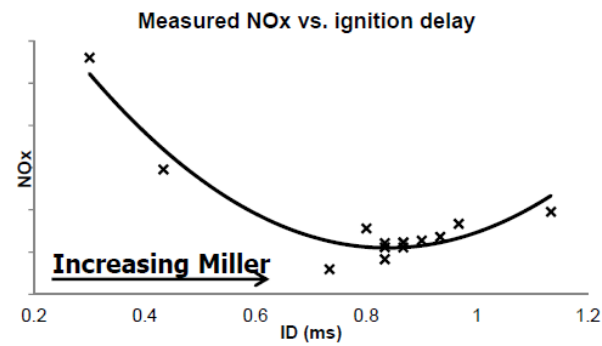
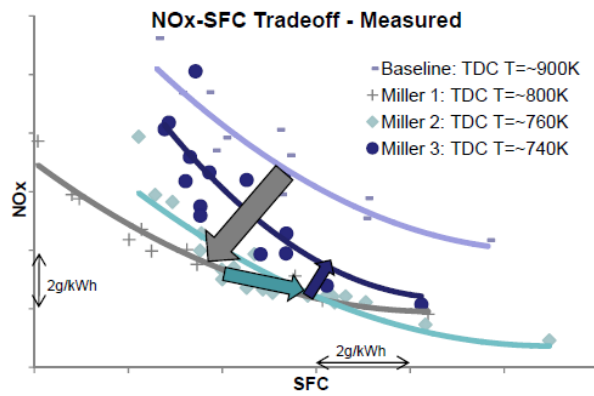
4-stroke, WFI



2-stroke, WCH



4-stroke, PSI



タスク 3.2: 高度インテリジェント・ターボチャージャー

目標:

2 ストローク船用ディーゼルエンジン:

- 2 段過給システム
- エンジン平均有効圧の増加
- 複合サイクルプラント効率の 2% 改善
- PTI/PTO ユニットー燃費の 2~3% 向上

4 ストローク船用ディーゼルエンジン:

- 2 段過給システム、可変流領域 (VTA)、PTI
- IMO 第 1 次規制と比較して NO_x を 50% 削減し、少なくとも同等の燃料効率を実現する平均有効圧力 30 バールのエンジンの開発

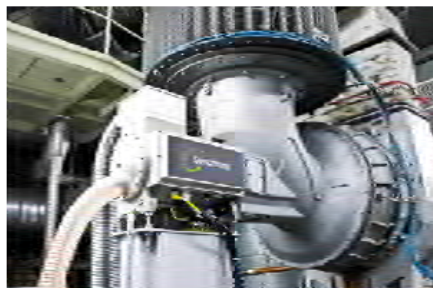
最終結果、成果と結論:

2 ストローク船用ディーゼルエンジン:

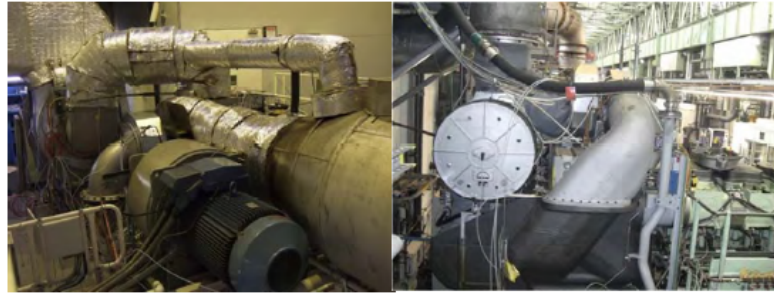
- 掃気圧 6.5 バール、高度ミラーサイクルにて 2 段過給効率 78% を達成
- エンジン平均有効圧力 21 バールを達成
- IMO 第 2 次規制対応エンジンと比較して 40% の NO_x 削減
- PTO : 220 kW @ 18000 rpm、燃料消費量の削減
- PTI : 350 kW @ 18000 rpm、補助ブロワーの交換

4 ストローク船用ディーゼルエンジン:

- VIGV (Variable Inlet Guide Vane) + VTA (可変タービン領域) 使用により、ターボチャージャーが 67~100% のフローレートを達成
- 給気圧約 7 バールにて 2 段過給効率 78% を達成
- エンジン平均有効圧力 21 バールを達成
- IMO 第 1 次規制と比較して、一定燃料消費率で NO_x を 50% 削減、一定 NO_x 削減率で燃料消費量を 10% 削減、可変バルブ・タイミングで煤煙を削減 (スモークレス運転)



Turbocharger with PTI/PTO Turbocharger with VIGV



Two-stage turbocharging applied to a two-stroke 4T50ME-X engine

Two-stage turbocharging applied to a four-stroke 6L32/44 CR TS engine

(WP4 は欠番)

WP5: 排出ガス削減

タスク 5.1: 排出ガス削減方法

目標:

- PM 排出のノウハウの拡大、異なる燃料品質による煤と微粒子形成メカニズムのモデルの開発
- SO_x 及び PM 削減技術の更なる開発と評価
- エンジン統合型 SCR システムの開発、最適化
- NO_x 削減率 60%を上回る乾式、湿式及び両方式を組み合わせた新たな NO_x 削減方法の研究
- 超低排出概念の船用エンジンへの適用

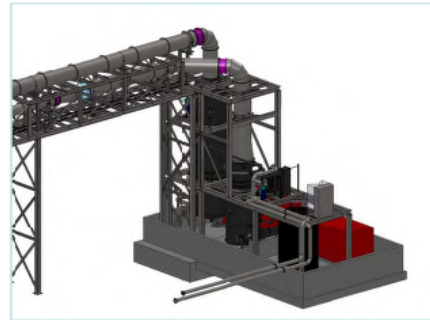
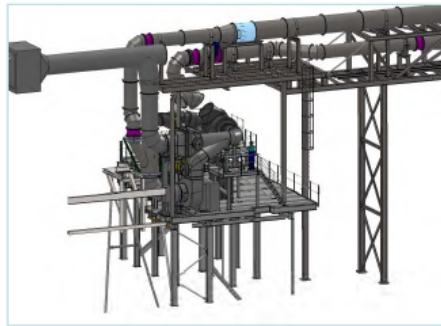
最終結果:

- 燃料油の品質、潤滑油供給率、SCR 触媒装置の影響評価のための詳細な PM 測定
- SCR 搭載 4 ストロークエンジンの IMO 第 3 次規制達成、新 2 ストローク試験エンジンでも同様の評価試験を実施予定
- NO_x 及び SO_x 後処理装置の PM 排出への影響を評価、PM 除去装置の評価

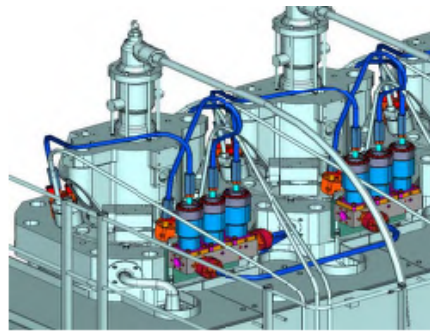
成果と結論:

SCR に関する以下の研究を実施

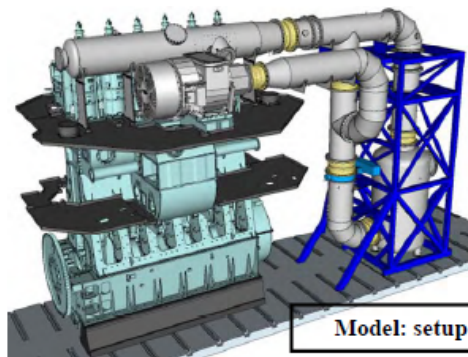
- プレ・ターボ概念と統合
- 低負荷時の SCR 稼働におけるエンジン運転の信頼性、硫黄耐性の研究
- SCR の代替となるシステムの研究（理論的評価、シミュレーション、準備と試験）
- 高比率の水／燃料の DWI のテストリグにおける試験を継続中
- 低圧及び高圧 EGR システム製造中



Model: setup of the lp-EGR system



Model: setup of the DWI system



Model: setup of the SCR system

タスク 5.2: 排出ガス削減方法 (EGR と後処理方法)

目標:

- 2 ストロークディーゼルエンジン搭載の EGR による NO_x 排出量の 80%削減
- EGR システムの実用試験
- 燃焼ガス再循環 (CGR) システムの開発と評価
- 高圧ボイラー (HPB) の試験
- 乾式スクラバーの研究
- SCR の研究と 4 ストロークディーゼルエンジン上での試験

最終結果：

2 ストロークディーゼルエンジンと EGR：

- 4T50ME-X エンジン上での EGR 試験で 85%以上（目標は 80%）の NO_x 削減を達成、燃料消費率、CO、煤煙は許容範囲内
- 高圧ボイラー試験では、熱伝達の計算値と測定値の相関性を実証
- 試験において 70%以上（目標は 50%）の NO_x 削減を達成
- 硫黄分 3%の HFO を使用した EGR の 600 時間以上の試験を達成、燃焼室への悪影響はなし
- 4T50ME-X エンジン用の CGR 部品を設計

4 ストロークディーゼルエンジンと EGR：

- SCR 運転の目標温度達成
- 熱流束モデルの計算値と測定値の相関性を実証
- 損傷を受けた部品の改良により、エンジン部品の温度を変化なく維持

成果と結論：

2 ストロークディーゼルエンジン

- EGR 利用により IMO 第 3 次規制を満たすことを確認
- EGR サービス試験により、EGR が将来的な HFO 使用時の NO_x 削減の有効技術であることを確認
- EGR サービス試験は、将来的な第 3 次規制対応 2 ストローク EGR ディーゼルエンジンの重要なステップとなった。

4 ストロークディーゼルエンジン

- HFO 使用時の SCR 運転条件とエンジン部品の許容条件を確認



WP6: パワートレインの最適化

タスク 6.1: 船舶パワートレインの最適化

目標:

- 船舶推進パワートレインの最適化された仕様とパフォーマンスのための方法とツールの開発
- 有害物質の削減と推進効率の向上
- オペレーションの効率化による推進効率の 3% 向上
- 設計の最適化による推進効率 3% 向上

最終結果:

- 静的及び動的シミュレーションツールの開発
- ベースライン・オペレーションと比較して 3% 以上の削減を達成
- 新たな又は改良された概念と製品の評価基準を設定

成果と結論:

2 つのケーススタディで以下の削減率を達成:

- タンカー: 燃料消費量及び排出ガス 3% 削減、低速運転では 10% 削減
- ROPAX フェリー: 燃料消費量及び排出ガス 5% 削減
- 推進パワートレインの設計と運転はシミュレーションベースの研究で改善可能

タスク 6.2: 高圧ボイラー複合サイクル

目標:

2 ストロークエンジンのターボチャージャーの前の排ガス経路に、エンジンと一体化した排ガスボイラーを統合し、熱効率 60% で既存システムよりもサイズが小さいためコスト効率の高い革新的な総合システムを設計

最終結果:

- 柔軟性の高い新ボイラー構成要素が実用化され、新ボイラー構成要素は蒸発器及び過熱器の両方に利用可能
- 高圧ボイラーの利用により、熱効率が約 60% 向上。特に、パワータービン又は EGR 及び WHR のバイパスライン使用した場合に効果的

WP7: 先進素材、摩擦と疲労

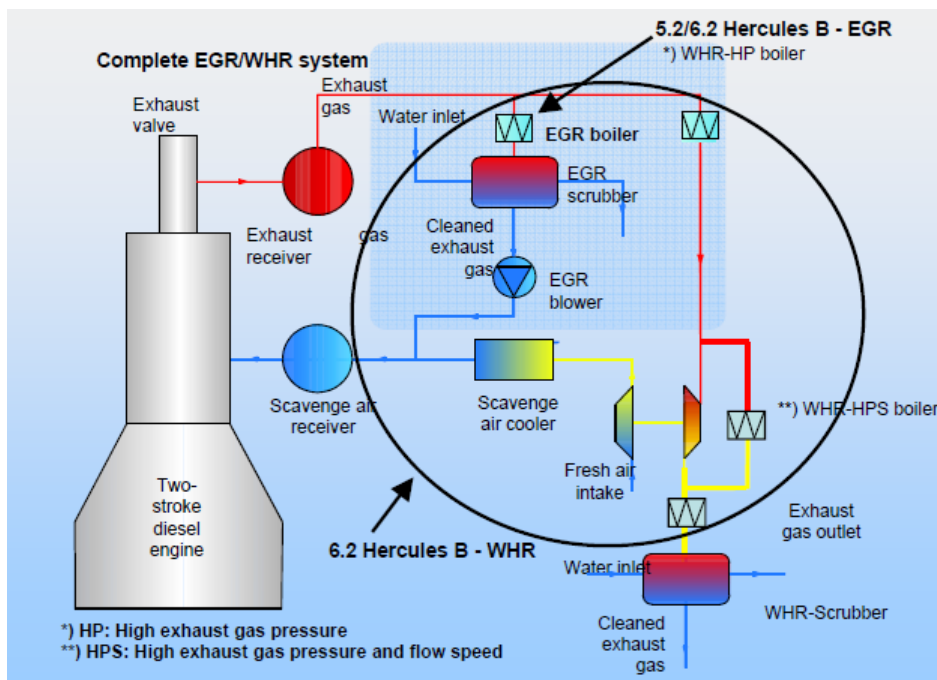
(タスク 7.1 はなく、タスク 7.2 が a と b に分かれている。)



HP Super Heater



Basic Boiler Element configuration



タスク 7.2.a: 摩擦最適化

目標:

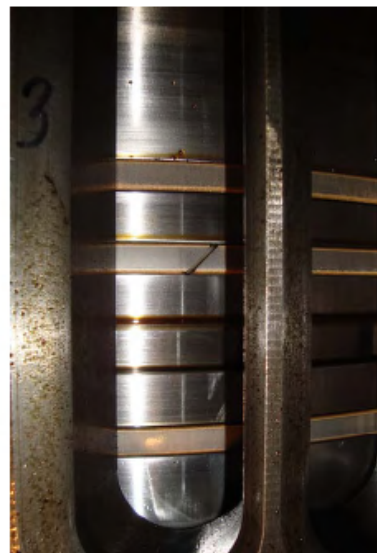
- 低摩擦・疲労特性（25%削減）を持つ新ピストンリングの設計
- 低摩擦特性（25%削減）を持つ新クロスヘッドシューの設計

最終結果:

- 摩擦の数値化
- 疲労耐性の高い CGI (コンパクト黒鉛鋳鉄) ライナー素材の開発
- ピストンリング摩擦を 30%低減 (シミュレーション)
- 大口径エンジン向け低摩擦クロスヘッドシューについて、摩擦を 26%低減、重量を 20%低減

成果と結論:

- ピストンリング、シリンダライナーの異なる素材の組み合わせと表面処理の研究
- 数値モデルの開発
- 新低摩擦ピストンリングの実用化
- 新シリンダライナー素材の実用化
- 新低摩擦クロスヘッドシュー・ベアリングの実用化



Three Ring Piston Installed



Standard Design of the K98ME-C
Guide Shoe
Power loss =18.3 kW/shoe

New Low Friction Design of the
K98ME-C Guide Shoe
Power Loss = 13.0 kW/shoe

タスク 7.2.b: 摩擦最適化

目標:

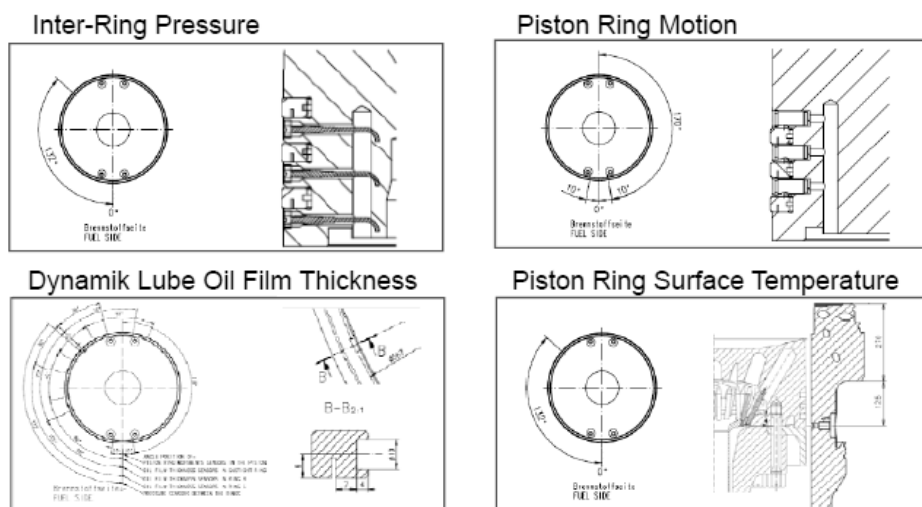
改良されたジオメトリー、疲労耐性を持つ寿命の長い新ピストンリング・パックの開発と最適化

最終結果:

- テストエンジンに搭載された新ピストンリング・パックへの水及びガスの動的影響の解明
- 摩擦関連システムの耐性向上と寿命向上のための素材構成の検証
- 新ピストンリング・パックのシミュレーション・ツールの開発
- 長期フィールドテストによる新ピストンリング・パックの評価

成果と結論:

- 新ピストンリング・パックのシミュレーションツールは非常に精度が高く、将来的なピストンリング・パックの設計を支援する。
- 摩擦関連システムに利用可能な素材に係る知識の向上
- フィールドテストにより、新ピストンリング・パックの性能を確認



WP8: エレクトロニクスと制御

タスク 8.1: 高度センサーと高信頼性適応制御

目標:

- エンジン診断用の高度信号処理方法の開発
- エレクトロニクスの信頼性向上のための新設計手法の開発
- 先進エンジン制御方法の開発
- フルスケールエンジン試験の評価

最終結果と成果:

- シリンダー圧力制御のための測定技術と方法の開発
- コモンレール燃料噴射システムの故障診断技術の開発
- 汎用的制御方法の開発
- 安全性に関連するシステム研究の実施

タスク 8.2: インテリジェント・エンジン

目標:

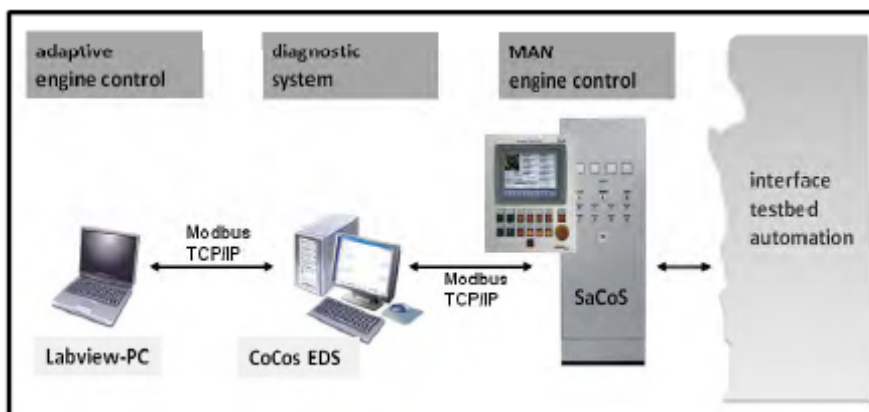
自己学習機能と適応機能を持つ適応エンジン制御・管理システムのプロトタイプ開発

最終結果:

- NO_x センサーの長期的評価
- LabVIEW-PC での詳細なエンジンモデルを含むシミュレーション環境の開発
- エンジン最適化のための制御システムの開発
- 適応エンジン制御システムの設計
- シミュレーション環境及びテストベッド上での評価

成果と結論:

- エンジン特性のオンライン最適化が可能な適応エンジン制御システムのプロトタイプの評価
- 異なる最適化手法の研究の実施
- センサーの質が重要なパラメーターの特定
- 将来的な研究課題は、各エンジン・シリンダーの最適化



最終達成状況の概要(2011年12月)

表:HERCULES-Bの目標と最終達成状況の概要(2011年12月)

WP	目標	最終達成状況の概要
WP1 極値パラメータ・エンジン	4ストローク・エンジン: 最大噴射圧 (Pmax) 300 バール、 平均ピストン速度 12 m/s	Pmax 300 バールは 2011年4月に達成 ピストン速度 12 m/s は 2011年12月に達成
	2ストローク・エンジン: Pmax 220 バール 平均ピストン速度 10 m/s	試験運転で Pmax200 バール、ピストン速度 9m/s を達成
WP2 燃焼	2ストローク、ボア 550 mm及び4ストローク、ボア 320 mmテストエンジンの燃焼過程のレーザー光学計 測用透明シリンダーカバーの開発	目標達成
	燃料噴射及び燃焼のフルスケール空間データ (燃料 噴射、液滴の計測) シリンダー内燃焼過程のシミュレーション (CFD エ ンジンシミュレーション実証用)	目標達成
WP3 ターボ チャージン グ	2ストローク、4ストロークエンジン用の二段ターボ チャージング開発、給気圧 8 バール、エンジン MEP21 バール (2ストローク)、30 バール (4スト ローク) テストエンジン 3 基を二段ターボチャージング用に 設計または改造	目標達成
WP5 排出ガ ス削減	各排ガス削減手段 (EGR、燃焼ガスリサイクル、乾 式スクラバー) による IMO 第一次規制比 50%以上 の NOx 削減	目標達成
	高硫黄分燃料に対応するエンジン統合型 SCR シス テムの開発	目標達成
WP6 パワー トレインの 最適化	オペレーション効率化による推進効率の 3%向上 設計最適化による推進効率の 3%向上	設計ツールにより目標 達成
	試験動力効率 60%の高圧ボイラー複合システムの 開発	設計、調達完了
WP7 先進素 材、摩擦と疲	低摩擦・疲労特性 (25%削減) を持つ新ピストンリ ングの設計	目標達成

労	低摩擦特性（25%削減）を持つ新クロスヘッドシュー ーの設計	
WP8 エレク トロニクス と制御	インテリジェントエンジン管理システムのプロトタ イプ製造（自己学習機能を持ち故障耐性の高い適応 エンジン制御管理システム）の開発	試験成功

3.4 HERCULES-C プロジェクト(2012～2015 年予定)

2010 年 12 月、2002 年以來、欧州規模の研究開発プロジェクトである HERCULES プロジェクトを主導してきた MAN Diesel & Turbo と Wärtsilä Corporation は、HERCULES-A 及び B プロジェクトに続き、HERCULES-C プロジェクトを立ち上げることに合意した。

2012 年から 2015 年にかけて実施予定の HERCULES-C は、エンジンの燃焼過程、システム統合と最適化、エンジンの信頼性向上とライフタイムの延長を目指す。その目的は、船用エンジンのライフサイクルにわたるコストを含めた効率化、天然資源の有効活用と環境への配慮である。

HERCULES-A では、様々な排出ガス削減方法が研究、検討され、エンジンの環境性向上に寄与した。続いて HERCULES-B では前プロジェクトの成果を基に、最も効果的な排出ガス削減方法に焦点が当てられた。同時に、エンジンの効率向上による燃焼消費量と CO₂ 排出量の削減を主目的とした。

目標予算総額 1,900～2,100 万ユーロの HERCULES-C プロジェクトを含めると、HERCULES プロジェクト全体の予算総額は約 8,000 万ユーロに上る。詳細は未だ発表されていないが、HERCULES-C は、これまでと同様に EU フレームワーク・プログラム (FP) からの助成を受ける予定である。

HERCULES-C では、作業パッケージを 5 つ程度に縮小し、エンジンの稼働と使用用法を最適化し、更なる燃料消費量の大幅な削減に焦点を当てる。改良された燃料噴射方法を含めた先進的エンジンの開発、船内の動力管理の最適化、運航効率向上を支援するエンジン技術等が、目標達成の手段として考えられている。

また、エンジンのライフサイクルを通じた技術パフォーマンスを維持するため、「グリーン・プロダクト・ライフサイクル技術」を導入する予定である。これには、安全性と信頼性向上を実現する先進素材等の開発、船用動力システムの制御性と信頼性を高めるためのモニタリング及び測定技術の改善等が含まれる。

さらに、これまで研究開発が行われてきた様々な技術を統合し、船舶からの排出ガスを限りなくゼロに近づけることを、究極的な目的のひとつとしている。³⁴

³⁴<http://mandieselturbo.com/1015347/Press/Press-Releases/Trade-Press-Releases/Company/W%C3%A4rtsil%C3%A4-and-MAN-Diesel-and-Turbo-Continue-HERCULES.html>

欧州二大エンジン・メーカーを含めた多くの船用企業が参加している **HERCULES** プロジェクトのもうひとつの目的は、研究された技術の実用化、製品化である。例えば、**Wärtsilä** と **MAN** は、**HERCULES-A** で基礎研究が行われた二段過給システムを既に製品化している。**HERCULES-C** では、排出ガス後処理技術をエンジン本体に組み込んだ製品の開発等も進められる予定である。

4. その他の欧州共同研究開発プロジェクト

欧州では環境保全が最優先課題のひとつとなっており、HERCULES プロジェクト以外にも、欧州規模で大小様々な環境関連の共同研究開発プロジェクトが行われている。以下に現在実施中及び最近終了した船用環境技術関連のプロジェクトの例を挙げる。その主な目的は、燃料消費量削減、エネルギー効率向上、排ガス削減及びライフサイクルコストの削減等である。

4.1 ULYSSES(超低速船)

「ULYSSES」プロジェクトは、EU 第7次フレームワーク・プログラム (FP7) の環境目標の一環として助成を受けたプロジェクトである。

同プロジェクトの主目的は、超低速運航と関連技術の組み合わせによる運航効率向上の実現であり、これにより海運業の CO₂ 排出量も大幅に削減できることを証明することである。

プロジェクトの主たる目標は、以下の通りである。

- ・ 2020 年までに、温室効果ガス排出量を、1990 年時点レベルから 30%削減する。
- ・ 2050 年以降は、温室効果ガス排出量を、1990 年時点レベルから 80%削減する。

ULYSSES プロジェクトでは、船舶全体の CO₂ 排出量の 60%を排出しているばら積み船とタンカーを研究対象船種として選択した。ばら積み船とタンカーは既に比較的低速で運航しているため、CO₂削減に効果のある更なる低速化は難しい。このため、同プロジェクトでは、推進・エンジン技術だけではなく、安定性や保針性等の研究も行うこととしている。

ULYSSES プロジェクトには 13 の企業・組織が参加しており、コーディネーターはフランス船級協会 Bureau Veritas (フランス) である。その他参加企業・組織は、AS2CO_n-Alveus (クロアチア)、Centre de Recherche pour l' Architecture et l' Industrie Nautiques (フランス)、Chalmers University of Technology (スウェーデン)、Danish Maritime Authority (デンマーク)、Technical University of Denmark (デンマーク)、Euronav (ベルギー)、Germanischer Lloyd (ドイツ)、SSPA (スウェーデン)、TNO (オランダ)、Newcastle University (英国)、Wärtsilä (フィンランド及びオランダ子会社) である。

4.2 BESST(Breakthrough in European Ship and Shipbuilding Technologies:欧州船舶・造船技術の躍進)

「BESST」プロジェクトは、欧州造船業界団体 EUROYARDS 主導の EU 助成プロジェクトで、クルーズ船、大型フェリー、メガ・ヨット等の高額な船舶の造船市場における欧州造船所の競争力を高めることを目標としている。

同プロジェクトでは、ライフサイクルコストの低減、高環境性、高安全性を実現する船舶設計により、欧州の造船所が建造する船舶の競争力を高めることを目標としている。具体的には、パナマックス型の船舶のライフサイクルコストを 1 億 2,000 万ユーロ程度低減し、また、CO₂ 排出量を約 12% 削減するとしている。

主要技術開発目標は、スペースの最適化、メンテナンスの簡易化、トン当たりの積載量の増加、建造・改造コスト効率の改善、エネルギー効率の改善、排ガス量の削減、船内騒音の軽減、モデル・ベースの設計と状態監視による信頼性向上、安全性とセキュリティーの向上等となっている。

プロジェクトで開発された豪華客船等の高額船舶向けの技術は、将来的には他の船種にも適用可能なモジュール化されたソリューションとして活用する。研究開発活動における協力とネットワーキングを通じ、規模の小さい欧州造船所がアジアの巨大造船所に対抗し得る競争力を培うことを目的としている。

プロジェクトの実施期間は 42 か月で、2013 年夏に完了予定である。同プロジェクトには、欧州主要造船所 (Fincantieri、Meyer Werft、STX Finland、STX France、Thyssen Krupp Marine Systems、Damen Group)、船級協会 5 社、研究機関 20 機関、海事企業 31 社が参加しており、海事研究開発プロジェクトとしては最大の参加企業・組織数となっている。

4.3 HELIOS(High-pressure Electronically Controlled Gas Injection for Marine Two-Stroke Diesel Engines:2 ストローク船用ディーゼルエンジン用の電子制御ガス噴射システム)

2010年9月に開始された「HELIOS」プロジェクトの目的は、低速2ストローク・ガス・ディーゼルエンジンの研究開発である。

現行のディーゼルエンジン技術と比較した場合、新エンジンの排出ガス量は大幅に低く、CO₂排出量は20～30%、NO_x排出量は10～15%、SO_x排出量は90～100%、PM排出量は60～70%削減が見込まれている。

プロジェクトでは、新エンジンの新造船搭載に加え、既存船へのガスディーゼル技術のレトロフィットに関する研究も行っている。

開発された新エンジンは、圧縮天然ガス(CNG)及び液化天然ガス(LNG)を燃料とする次世代高压ガス噴射エンジンの基礎となる。次世代エンジンは完全電子制御で、出力範囲は5,000kW～100,000kWとなる。

技術開発課題は、信頼性の高いガス噴射システムの開発、着火制御方法、エンジン監視・診断、燃焼室の素材等の燃焼システムの開発である。また、CNG、LNG燃料の船内貯蔵に関連した研究も行われている。

プロジェクトの実施期間は3年間で、2013年8月31日に完了の予定である。EU第7次FP内の同プロジェクトの予算総額は511万ユーロで、うち298万ユーロはEUからの助成金となっている。

プロジェクト・コーディネーターはMAN Diesel & Turboで、ドイツ(TGE Marine Gas Engineering、Germanischer Lloyd、Friedrich-Alexander University)、スウェーデン(Tekniska Hogskolan Jonkoping、Uppsala University、Sandvik Powdermet、Lund University)、スイス(Kistler Instrument)各国の企業・組織が参加している。

4.4 EXTREAM (Advanced aftertreatment solution for the mitigation of emissions from ships: 船舶からの排出ガス軽減のための高度後処理方法)

排出ガス処理技術に焦点を当てた「EXTREAM」プロジェクトは、EU 第7次フレームワーク・プログラムへの応募を行った。

プロジェクトの目的は、海洋、沿岸、港湾においてあらゆる種類の船舶から排出される二酸化炭素 (CO₂)、窒素化合物 (NO_x)、硫黄化合物 (SO_x)、微粒子状物質 (PM) のコスト効率の高い複合的削減方法の開発と実証である。

提案されている作業は、以下の通りである。

- ・排ガスと煤煙の削減のための後処理技術の開発
- ・複合技術を用いた既存船からの排ガス削減のコスト効率の高い方法の開発
- ・港湾に停泊時の船舶からの排ガス削減のためのコスト効率の高い方法の開発

4.5 METHAPU(メタノール動力ユニット)

船用燃料電池に関する EU 助成プロジェクトである「METHAPU」プロジェクトは、2010年に海上実験を開始した。2010年5月末、Wallenius Lines 所有の自動車・トラック運搬船 (PCTC) 「Undine」にメタノールを燃料とする Wärtsilä WFC20 型燃料電池が実船搭載された。実験は2010年11月末までに完了した。

Undine に実船搭載された燃料電池の出力は 20kW で、同船の補助動力システムの一部となる。燃料電池ユニットのガス排出量はほぼ皆無である。実船実験により得られた結果は、燃料電池の商品化への貴重なデータとなる。

燃料電池ユニットは、平面固体電解質型燃料電池 (SOFC) 技術に基づいており、燃料としては変成が容易なメタノールが選ばれた。メタノールは天然ガス又はガス化バイオマス等の再生可能燃料からも製造が可能である。メタノールは石油精製産業で広く使われており、ほとんどの大型港湾で入手可能である。

同プロジェクトは Wärtsilä が主導しており、Wallenius Marine (Wallenius Group の船舶運航部門)、Lloyd' s Register、Det Norske Veritas (DNV)、ジェノバ大学が参加している。

Wallenius Marine は、「今後 5~10 年以内に燃料電池は実用化され、Wallenius と Wärtsilä が目標とする持続性のある海運業の実現に一步近づくであろう」と述べている。

4.6 STREAMLINE (Strategic Research for Innovative Marine Propulsion Concepts: 革新的船用推進概念の戦略的研究)

EU 第 7 次 FP 内で 2010 年 3 月に開始された「STREAMLINE」プロジェクトの主目的は、効率性向上につながる新たな推進概念の開発である。プロジェクト実施期間は 48 か月で、総予算 1,091 万ユーロのうち、795 万ユーロが公的助成金である。

プロジェクトの主目標は、以下の通りである。

- ・現在の最新推進システムと比較して 15%以上の効率向上を実現する革新的な推進概念の開発。新推進概念は最高のエネルギー効率を持ち、低キャビテーション、低騒音、低振動という特性を持つ。
- ・ポッド型推進、ウォータージェット等の既存の最新推進システムの最適化。最適化には新たな CFD (計算流体力学) を利用し、船舶設計には大きな変更なしに推進効率を改善する。
- ・統合された船体と推進システムの分析により、新推進概念の流体力学的性能を最適化する高度 CFD ツールの開発。
- ・それぞれの新推進概念の性能、経済性、船級等に関する特徴の明確化。

STREAMLINE プロジェクトは、幅広い船種に採用可能なソリューションを提供するが、当初は近距離輸送と内水域輸送に従事する船舶に焦点を当てる予定である。

同プロジェクトは、2010 年に開始されたプロジェクトの中では、最大の参加企業・組織数 (30 企業・組織) と実施期間 (4 年) を持つ。プロジェクトは英国 Rolls-Royce Power Engineering が主導し、欧州 8 か国から 30 企業・組織が参加している。主な参加企業はノルウェーとスウェーデンの Rolls Royce 子会社、スウェーデン船社 Stena Rederi で、その他フランス、ドイツ、イタリア、ポーランド、スウェーデンの研究機関、船用メーカー、技術専門企業、大学、船級協会等が参加している。

4.7 TARGETS (Targeted Advanced Research for Global Efficiency of Transportation Shipping: 海運のグローバル効率性の標的高度研究)

商船のエネルギー消費量は、流体力学が大きく影響する。船内で製造されるエネルギーの 80% 近くが流体抵抗と損失に消費されているため、船舶の抵抗と推進効率性の研究による技術的改善の可能性は高い。

TARGETS プロジェクトの目的は、総合的なエネルギー効率評価と予測の系統的な方法論を開発することである。本プロジェクトでは、船舶のライフサイクルを通じた最適なエネルギー消費を実現する信頼性の高いシミュレーションツール、またそれに必要な船舶とオペレーティングシステム両方の設計情報を開発するとしている。

船舶のエネルギー効率の総合的、統合的な研究を行う TARGET プロジェクトは、欧州の 11 企業・組織が参加し、2010 年に開始された。

同プロジェクトは、流体力学研究機関、エネルギー研究機関、船主が主体となっている。Hamburg Ship Model Basin (HSVA) がコーディネーターとなり、Technical University Hamburg-Harburg (TUHH)、Newcastle-upon-Tyne University、Strathclyde University、デンマーク船社 A.P.Moller-Maersk 等が参加している。

4.8 TEFLES (Technologies and Scenarios for Low Emission Shipping: 低排出ガス海運の技術とシナリオ)

2011 年 1 月に開始された TEFLES プロジェクトは、船舶から排出される汚染物質と温室効果ガスの 15~35% 削減を目標とした研究開発プロジェクトである。3 年間のプロジェクト総予算 400 万ユーロのうち、260 万ユーロが EU 第 7 次 FP から拠出される。

研究の中心となる分野は、航海時間、停泊、荷役を含む各航海における船舶の運航効率を向上させることである。その目的は、環境負荷を低減し、オペレーティングコストを削減するための最適な技術を特定し、開発することである。

欧州 6 か国からの企業・組織が TEFLES プロジェクトに参加しているが、特に海事産業、造船業の盛んなスペイン北西部ガリシア地方からの参加が多いことが特徴である。

ガリシア地方からの参加企業・組織には、EU 助成金 100 万ユーロが分配されている。ガリシア地方の企業・組織のプロジェクトマネージャーはガリシア地方 Vigo を拠点とする技術革新コンサルティング組織 Inova である。プロジェクト全体のコーディネーターは、同じく Vigo の造船技術研究所 VICUS Desarrollos Tecnologicos (VICUSdt) で、同研究所はプロジェクトの 2 つの作業パッケージのリーダーでもある。ガリシア地方からのその他の参加企業・組織は、造船所 Hijos de J.Barreras 及び港湾事業者 Autoridad Portuaria de Vigo である。

VICUSdt は、港湾における作業支援船向けに利用可能なハイブリッド駆動技術とエネルギー貯蔵方法の研究、及びスペイン Vigo 港とフランス St Nazaire 港を使用する船舶の排出ガス分析と削減方法の研究を担当している。

4.9 TRIPOD(CRP、CLT、ポッド推進の利用によるトリプル・エネルギー削減)

2010年11月に開始されたプロジェクト「TRIPOD」は、3種類の推進技術を組み合わせ、船舶のエネルギー効率を改善することを目的としている。同プロジェクトはEU第7次FPから総予算161万ユーロのうち118万ユーロの助成を受け、実施期間は30か月である。

同プロジェクトは、既存の3種類の推進技術の組み合わせと統合により、推進効率を最適化することを目的としている。同プロジェクトでは、ポッド推進とCLT (tip-loaded end-plate) プロペラというEUで開発された推進技術の統合による新推進概念のフィジビリティ及び二重反転プロペラ (CRP) 原理を用いた推進効率の最適化に関する研究を行うとしている。

これら3種類の推進技術は、これまでのところ別々の商船に利用されており、従来の推進方法と比較した場合の高効率性は証明されているが、これまで3技術が組み合わせられた「パッケージ」として使用された例はない。

プロジェクトでは、以下の実証を行う予定である。

- ・CLTプロペラとポッドの組み合わせ
- ・CLTプロペラ、CRPプロペラ、ポッドの組み合わせ

また、研究結果として、新造船及びレトロフィット向けの新推進システムの推進効率と推進形状の最適な使用法を検証するツールを開発するとしている。

プロジェクトコーディネーターはフィンランド Valtion Teknillinen Tutkinuskeskus で、その他 ABB Marine (フィンランド)、A.P.Moller-Maersk (デンマーク) Sistemar、Cintranaval-Defcar、Canal de Experiencias Hidrodinamicas de El Pardo (以上スペイン) が参加している。

4.10 CONNORESS(船舶のNO_x及び騒音低減システム)

2010年4月にEurekaプログラムからの助成金が認められた「CONNORESS」プロジェクト (Eureka No.5109) は、船用エンジンの新たな排ガス処理システムの開発と設置を目標としている。新システムは、効果的なSCR (selective catalytic reduction : 選択触媒還元) 装置と信頼性の高いサイレンサーを組み合わせたものとなり、NO_x排出量と騒音の両方を軽減し、沿岸地域の環境保護に寄与するとしている。

プロジェクトには、オランダ Emitech とギリシャ Environmental Protection Engineering が参加し、予算総額は765,700ユーロ、実施期間は28か月となっている。

5. 欧州主要船用エンジンメーカーの動向

欧州の船用エンジンメーカーは、共同研究開発プロジェクトに参加すると同時に、独自に又は専門技術メーカーと協力して、新技術、新製品の開発を行っている。以下に、欧州4大船用エンジンメーカーの環境関連の最新技術・製品動向を概説する。

5.1 Wärtsilä

世界70か国に160拠点、従業員17,000人を持つWärtsiläは、中速エンジン市場では46%、低速エンジン市場では18%、補機市場では3%のシェアを持っており、船用、発電用エンジンの最大手企業のひとつである。前述のHERCULESプロジェクトでは、ライバル企業であるMAN Diesel&Turboとともに主導的役割を担っている。

2010年の研究開発予算は1億4,100万ユーロであった。2011～2012年の研究開発活動のため、欧州投資銀行から1億5,000万ユーロの10年融資を受けている。研究開発活動には約700人が従事している。³⁵

次々と新製品を発表している主力製品である4ストローク及び2ストロークのディーゼル及びDFエンジン、プロペラ、スラスタ等推進器の他、既存ディーゼルエンジンの環境性を向上させた改良型エンジンの開発も優先されている。また、SCRやスクラバー等の排出ガス後処理システムも近年力を入れている研究開発分野である。さらに、燃料電池、バイオ燃料エンジン等の将来的な環境技術の研究開発も行っている。

Wärtsiläの最近の主な新製品・新技術及び開発中の製品・技術を以下に概説する。

①ガスDFエンジン

Wärtsiläは、近年、従来の液体燃料に加え、ガス(LNG)でも駆動する二元燃料型(DF)エンジンに力を入れており、2011年後半には船用、陸上発電用のDFエンジンの販売台数は、業界トップの470基となった³⁶。船用では、フェリーやオフショア支援船向けのガスDFエンジンの販売を順調に伸ばしている。

同時に、同社はガス・エンジンの開発を加速させ、環境対応型製品で更なるシェア拡大を図っている。2011年9月には、同社トリエステの試験所において行われた低速2ストローク・ガス・エンジンの試験で、IMOのNOx第三次規制をクリアすることに成功した。

Wärtsiläは船用及び陸用ガス・エンジンの開発に40年以上の歴史を持つが、1990年代半ばのDFエンジンの開発から飛躍的に技術が進歩し、このRTX5型2ストローク・テストエンジンは、Wärtsiläの2ストロークDFエンジン開発プログラムの一環として、わずか7か月で開発された。同エンジンの試験は2012年も続けられ、同社は主力製品の中速

³⁵<http://www.wartsila.com/en/press-releases/wartsila-and-european-investment-bank-agree-on-eur-150-million-loan-for-rd-activities>

³⁶ <http://www.wartsila.com/en/press-releases/interim-report-q3-2011>

DF エンジンに加え、近い将来、低速エンジンのポートフォリオに低速ガス・エンジンを投入する意向である。³⁷

②バイオ燃料船

2011年5月には、液体バイオ燃料（LBF）のみを使用する欧州初の商船にエンジン供給を行った。2012年春に竣工予定のフィンランド Meriaura Ltd.の新造多機能乾貨物船「Aura II」（4,350DWT）は、ディーゼル電気推進船として Wärtsilä 6L20 3基で駆動され、燃料として LBF を使用するが、必要な場合は MDO の使用も可能である。LBF はフィンランド Uusikaupunki にある船主所有の精製所で製造される。

③スクラバー

陸上発電所向けの SO_x 処理用スクラバーで豊富な経験を持つ Wärtsilä が、Metso Corporation と共同開発したの船用スクラバーは、船級協会（DNV、GL）から IMO 認証を受けた業界初のスクラバーである。

2010年12月に初受注し、2011年8月に Containerships Ltd Oy のコンテナ船（主機は Wärtsilä W7L64）にレトロフィットされたこの真水を利用したクローズド・ループ式のスクラバーは、Wärtsilä の実船主機搭載の第一号機である。³⁸

Wärtsilä と Metso Corporation は、2005年以来、他のフィンランド企業とともに船用スクラバーの開発を進めてきた。2007年秋には試験機が完成し、フィンランド船社 Neste Shipping のタンカー MT Suula に搭載され、2008年11月から2010年半ばにかけて実船実験が行われた。同船は主にバルト海を航行し、同スクラバーは SO_x 削減能力、また洗浄後の排水に関しても、IMO の厳格な基準を満たすことが証明された。³⁹

④CSNO_x 排出ガス削減技術

Wärtsilä とシンガポールの排ガス削減技術専門企業 Ecospec Global Technology 社は、船用、陸上用エンジン向けの排ガス削減技術開発において提携している。その目的は、CO₂ 排出量の低減、重油（HFO）使用時における SO_x のゼロ排出、将来的な NO_x 規制への対応である。

提携の中心は、Ecospec が開発した CSNO_x システムである。Wärtsilä は、同システムのエンジン・アプリケーションへの統合を担当する。これには、エンジニアリング、設置、監視、プロジェクト管理、新造船及び既存船両方へのシステム統合等の作業が含まれる。一方、Ecospec は、CSNO_x システムの主要構成部品を提供する。

³⁷<http://www.wartsila.com/en/press-releases/wartsila-successfully-tests-new-2-stroke-dual-fuel-gas-engine-technology-to-comply-with-IMO-Tier-III-emission-limits>

³⁸ Wärtsilä Corporation, Trade & Technical press release, 19 January 2011

³⁹ Wärtsilä Corporation, Trade & Technical press release, 16 June 2011

⑤第二世代コモンレール・システム(CR2)

Wärtsilä は、同社 4 ストローク・エンジン向けにコモンレール・システムの第二世代 (CR2) を開発中である。開発の焦点は、部品数の削減、構造の簡素化、ライフサイクルコストの削減である。Wärtsilä の開発部門は、1,800 バールの圧力への耐性を持ち、噴射前、噴射後のエネルギー成形を助けるシステムの開発を目標としている。

CR2 の主な特徴は、噴射装置と蓄圧器の統合及びノズルに近接したパイロット・バルブである。多素子燃料ポンプ 1 基が、各エンジンシリンダーのバンクに使用される。又は、主機が 1 基のみの船舶において冗長性を持たせるために、ポンプ 2 基を使用するオプションもある。

CR2 の燃料ポンプは、Wärtsilä の W20CR 型小型中速エンジンで搭載実績のある L' Orange タイプで、重油 (HFO) 使用時に最高回転数 3,150RPM を可能にするギア・ドライブを採用している。また、噴射装置のノズル上部に蓄圧器を組み込むことにより、CR2 システムは噴射の安定性が改善し、マルチ噴射の場合の噴射間隔が短縮化されたとしている。

第一世代 (CR1) で使用されたシャトル・バルブの制御システム又はサーボオイルシステムは、CR2 では使用されていない。CR2 では、ソレノイドバルブ (電磁弁) がノズル上部に配置され、システムレスポンスを向上させる。排ガスと煙形成を抑えるために、CR2 ノズルは CR1 ノズルよりも小型である。

Wärtsilä は、CR2 の利点として、特にサーボオイルシステムを排除したことによる部品数と複雑性が減少したことを挙げている。また、圧力振動の低減、ロバスト性の向上、柔軟性向上と性能改良の可能性が高いことも利点であるとしている。Wärtsilä はこれらの技術改良を既存エンジンにも適用する意向である。

⑥二段過給システム

2010 年 4 月、Wärtsilä とスイス企業 ABB Turbo Systems は、大型ディーゼルエンジン向けの二段過給システムの共同開発を行うと発表した。両社は様々な製品開発で長年協力しており、ともに HERCULES プロジェクトに参加している。今般の合意は技術協力関係を更に進めるものである。

Wärtsilä の開発目的は、二段過給技術と先進エンジン技術を統合し、燃費向上と排ガス削減という利点を持つ最高性能のエンジンを実現することである。ABB Turbo は、エアフロー、効率性等の分野で性能向上を実現する過給技術を提供する。

燃費向上と CO₂ 及び NO_x 削減レベルの正確な組み合わせは、システムの構成により選択できる。インテリジェント制御システムにより、あらゆる負荷条件で先進エンジンの最適化された制御が可能であるため、NO_x 排出量は大幅に削減できるとしている。

二段過給システムの試験は、Wärtsilä の 20 型及び 30 型 4 ストローク・エンジンを用いて、フィンランド Vaasa に位置する同社試験設備で行われ、Wärtsilä は、今後、同技術を 2 ストローク・エンジンにも採用する計画である。

5.2 MAN Diesel & Turbo

2010年1月1日、MAN Group傘下のMAN DieselとMAN Turboは合併し、MAN Diesel & Turbo SEとなった。MAN Groupは、新会社を同グループの動力エンジニアリング部門と位置づけ、両社のディーゼルエンジンとターボ技術を組み合わせた船用排熱回収システム等のパッケージ製品を提供していく戦略である。（注：親会社MAN SEは、2011年11月にVolkswagen AGに買収された。）

アウグスブルク（ドイツ）に本社を置くMAN Diesel & Turboは、世界150カ国以上に拠点・代理店を展開し、総従業員数は12,500人（旧MAN Dieselは約7,700人）である。

同社は、2ストローク船用ディーゼルエンジン市場では80%以上と圧倒的なシェアを誇っている。中速4ストローク・エンジン市場でも強い立場を持ち、船用エンジン市場全体では50%のシェアを持つ。また、2ストローク及び4ストローク中速ディーゼルエンジン向けのターボチャージャーでも世界第2位のメーカーである。⁴⁰

MAN Diesel&Turboの環境技術関連の主な新製品及び研究開発プロジェクトは、以下の通りである。

①クリーンシッププロジェクト

MAN Diesel & Turboは、研究開発プロジェクト「クリーンシップ」を立ち上げる計画である。開発目的は、大幅な効率向上と低排出ガステ性を持つ4ストローク・エンジンに基づいた推進概念を開発することである。開発目標は、現行の4ストローク・エンジンと比較した場合、CO₂を40%削減、NO_xを85%以上削減し、PM及びその他の有害ガスもほぼ完全に削減することである。

「クリーンシップ」は、ガス燃料エンジンを基礎としている。最近まで、ガスを唯一の燃料とするエンジンは、負荷要求に大きな幅を持つ中・大型船への利用には不適合であった。二元燃料（DF）エンジンも有効なソリューションであるが、ガスのみを燃料とした場合には、更なる排ガス削減という利点がある。

MANは、ガスのみを燃料としたエンジンの場合のNO_x削減率は約85%、SO_x発生はほぼゼロであるとしている。同時にCO₂も20%削減できる。船舶の流体力学設計、推進システム、補助システムを改善し、排熱回収技術を採用することにより、CO₂を更に20%削減することも可能であるとしている。⁴¹

②TCX 過給機／二段過給システム

MANは、大口径ディーゼルエンジン向けのTCXシリーズ過給機の発売により、二段過給システムの市場化を開始した。

⁴⁰<http://www.mandieselturbo.com/0000442/Company/About-Us/Facts-and-Figures.html>

⁴¹<http://www.mandiesel-greentechnology.com/0000503/Research-for-Nature/Clean-Ship.html>

TCX シリーズは、実績のある TCA 及び TCR シリーズの設計に基づき、非冷却鋼と耐久性滑り軸受を使用している。一方、TCA タイプは軸流 (axial) タービン、TCR タイプは半径流 (radial) タービンを使用しているが、TCX 過給機は低圧縮率に最も適した新型の対角 (diagonal) タービンを使用している。

二段過給システムには、過給機関連だけではなく、エンジンの給気システムに関する多くの課題がある。2 基目の過給機設置のスペースと配管への配慮に加え、MAN は、最適化された中間冷却器をシステムに含めた。この小型システムでは、過給機 2 基が 90 度の角度で配置されている。

本システムは、給気圧を大幅に上昇させ、エンジンの平均有効圧を増加させる。これにより、エンジン出力は上昇するが、排ガスは減少する。

③DryEGCS 排出ガス浄化システム

MAN Diesel & Turbo とドイツの環境技術企業 Couple Systems は、船用市場向けに乾式排ガススクラバーシステム「DryEGCS」の共同開発を行っている。本共同開発は、今後更に厳格化が予定されている船舶エンジンの排ガス規制、特に SO_x (硫黄酸化物) の削減に対応するものである。

MAN は、排出ガススクラバーと NO_x 削減用の SCR システムの両方を搭載した排出ガス処理システムとエンジンの統合システムを提供する。同システムにより、厳しい規制が課された SO_x 規制海域や港湾においても、重油 (HFO) を用いて経済的に運航することが可能となるとしている。

現行のスクラバーシステムの大部分は湿式であるが、粒子状の水酸化カルシウムを充填した反応器を用いた乾式スクラバーは、SO_x を最大 99% 排除するよりシンプルな方法であるといわれている。

MAN によると、湿式スクラバーと比較した場合の乾式スクラバーの利点は、以下のとおりである。

- ・排出ガス温度を大きく低下させないため、下流に設置された SCR システムが作動温度に達することができる。
- ・この排出ガス浄化システム 1 基で、NO_x と SO_x の両方が排除できる。
- ・システム自体のエネルギー消費量は非常に少ない。
- ・粒子状物質 (水酸化カルシウム) は取扱いが容易で、再利用が可能である。

④NO_x 第 3 次規制適用型エンジン

2011 年 3 月、MAN Diesel&Turbo は、2016 年に発効予定の NO_x 第 3 次規制を満たす世界初の 2 ストローク・エンジンを発表した。この MAN B&W 6S46MC-C8 型エンジンには SCR システムが統合されており、NO_x 排出量を 80% 削減する。同エンジンは 2010 年に日立造船で製造され、日本の一般貨物船に搭載される予定である。

MAN Diesel&Turbo は、単にエンジンに SCR システムを付け加えただけではなく、エンジン及び SCR システムのメーカーとして、制御システムも含め統合され最適化された

システムをパッケージで提供できるという利点を強調している。⁴²

さらに、2011年11月には、同じくNO_x第3次規制を満たす第二世代EGRを搭載したMAN B&W 6S80ME-C9型2ストローク・エンジンを初受注した。同エンジンは、2013年に竣工予定のMaersk Lineの新造コンテナ船（4,500TEU）に搭載される予定である。

第二世代EGRは、冷却器、スクラバー、ウォーター・ミスト・キャッチャー、ブローアから構成され、給気冷却システムとしてエンジンの一部に統合される。同システムは排気ガスの40%を再循環させる。コンパクトなデザインが特徴で、エンジンの外見にもほとんど影響を与えないため、造船所における大きな設計変更の必要はない。

MAN Diesel&Turboは、18,000～20,000隻運航している2,000DWT以上の船舶を、同EGRシステムのターゲット顧客と想定している。⁴³

⑤LPG燃料 ME-GI型エンジン

MANの2ストローク電子制御MEエンジンの全機種は、高圧ガス噴射システムを持つME-GI二元燃料(DF)バージョンとして利用可能である。これらエンジンの焦点は、LNG船及び他の船種で、LNGを燃料のひとつとして用いることであったが、今般MANでは、燃料のオプションを更に拡大し、LPG（液化石油ガス）を燃料として用いることのできるエンジンを開発した。

LPG 焚きME-GI二元燃料エンジンでは、船主は燃料価格と航行海域の排ガス規制によって、HFOとLPGを燃料として使い分けることが可能である。

MANは、既にLPG燃料の小型中速エンジン開発の実績があるが、2007年建造のデンマークのエチレン・LPG・VCM運搬船のMAN 16/24型補機4基のうち1基は、二元燃料エンジンに改造され、貨物であるLPGのボイルオフを燃料として使用できる。MANは、同船の姉妹船からも同様の「ガス・パッケージ」を受注している。

2010年初め、MANは、年末までに4T50ME-X型リサーチ・エンジンをLNG燃料の4T50ME-GIユニットとして改造することを決定した。同年9月にはGI（Gas Injection）技術の船用利用に関するフルスケールの性能試験と評価を開始し、2011年5月、MANはME-GI型低速ガスDFエンジンを発表した。

MANでは、EGR及びWHR（廃熱回収）システムと組み合わせた場合、同エンジンは、NO_x第三次規制を満たすことができるとしている。⁴⁴

⁴²<http://www.mandieselturbo.com/1015861/Press/Press-Releases/Trade-Press-Releases/Marine-Power/Low-Speed/World%e2%80%99s-First-Tier-III-Compliant%2c-Two-Stroke-Engine-Unveiled-in-Japan.html>

⁴³<http://www.mandieselturbo.com/1016608/Press/Press-Releases/Trade-Press-Releases/Marine-Power/Low-Speed/First-Tier-III-EGR-Engine-Order-Landed.html>

⁴⁴<http://www.mandieselturbo.com/1015968/Press/Press-Releases/Trade-Press-Releases/Marine-Power/Low-Speed/World-Premiere-of-MAN-Diesel-and-Turbo-Gas-Engine.htm>
1

5.3 Rolls-Royce

Rolls-Royce は、世界 50 カ国に総従業員数 39,000 人以上を持つ、民間航空、防衛航空、船用、エネルギーそれぞれの分野において世界的なトップ企業の一つである。

Rolls-Royce の船用部門は、全世界に 70 の海軍を含む 2,500 社以上の顧客を持ち、同社製品の搭載船舶は 30,000 隻以上に上る。

Rolls-Royce は、過去 10 余年に有力船用企業の買収を繰り返し、造船・船用部門の製品、技術、顧客ベースを大幅に拡大した。現在、船用エンジン部門は、ノルウェーのエンジンメーカー旧 Bergen 社が主体となっている。オフショア船、漁船を中心に、自社船型とエンジン、推進システム、制御機器、荷役装置等の自社製品をパッケージで提供できることが Rolls Royce の強みである。

2011 年には、後述の MTU の親会社であるドイツ Tognum を買収した。今後高速エンジン技術における提携が予想され、Rolls-Royce の船用中高速エンジン市場での競争力を更に高めよう。

①ガスエンジン

K シリーズのガスエンジン製造で 25 年に経験を持つ Rolls-Royce は、新型船用ガスエンジンである C シリーズを開発した。新 Bergen C26:33 シリーズは、実績のある Bergen の希薄燃焼ガスエンジン技術と Bergen C25:33 型ディーゼルエンジンの構造を組み合わせたものである。最初にリリースされる C26:33 型ガスエンジンは、直列型 6、8、9 シリンダーモデルで、回転数 900RPM 又は 1,000RPM で、出力 1,469 kW~2,430 kW を実現する。

新エンジンの最大の利点は、ガス排出量の低さである。液体燃料（石油）エンジンと比べた場合、C26:33 ガスエンジンの CO₂ 排出量は 23%、NO_x 排出量は 92%少なく、SO_x と PM の排出はほぼゼロである。同エンジンは、将来的な IMO の NO_x 第三次規制を満たすことができるとしている。

Rolls-Royce の技術目標のひとつは、C25:33 型ディーゼルエンジンからできる限り多くの部品を利用し、部品の互換性を高めることであった。エンジンブロック、カムシャフト等の主要構造は変わっていない。希薄燃焼オットーサイクルの最適化により、口径は 250mm から 260mm に拡大した。また、副燃焼室、副燃焼室ガスバルブ、ガス導入バルブ等の追加により、燃焼室の設計が変更された。

C シリーズのガスエンジンは、Bergen の K シリーズのガスエンジンの後継シリーズである。K シリーズは、既にノルウェーのガスフェリー 5 隻に搭載されている。

2010 年 7 月には、自社船型である UT776 型プラットフォーム補給船 (PSV) に、C26:33 シリーズ・エンジン 2 基を納入した。Rolls Royce は、過去数年間、ガス (LNG) 燃料エンジンを搭載したオフショア船の開発を進めてきた。Island Offshore 社向けの全長 96m の新造 PSV は、Rolls-Royce の開発したガスエレクトリック、ディーゼルエレクトリックの推進システムを持ち、容量 200 m³ のガスタンクはガスのみで 10~20 日の運航が可能である。⁴⁵

⁴⁵http://www.rolls-royce.com/marine/news/2010/27_8_2010_ut-design_to_use_lng_fuel.jsp

また、2010年9月には、ノルウェーの世界最大のガス駆動のフェリー（全長129.9m、1,300DWT）向けに、C25:33L9A型ガス・エンジン3基を納入した。これらのガスエンジンはRolls-RoyceのAzipullスラスタ4基を電気駆動する。⁴⁶

②高環境船「Environship」

Rolls-Royceは、自社技術と製品、ノウハウを結集した高効率で環境性の高い船舶「Environship」の概念を開発した。同概念は2011年5月にオスロで開催されたNorshipping海事展で「次世代船舶賞」を受賞した。その主な特徴は以下の通りである。

- ディーゼルエンジンよりもCO₂排出量が17%少ないBergen Bシリーズの希薄燃焼ガスエンジンを搭載。
- NO_x排出量を90%削減、SO_x排出量はほぼゼロに近い。
- よって2016年発効のIMO第三次規制を満たしている。
- ラダーとプロペラを統合したRolls-Royce Promas推進システムにより、推進効率が5~8%向上。
- 自社設計の革新的な船首形状と船体設計により、船体抵抗を8%削減し、燃料消費量と排出ガス量を更に削減。
- 垂直船首形状により、波浪中でも船速を維持することが可能になり、余分な燃料消費と時間を必要とせずに運航スケジュールを達成できる。
- 総合的には燃料効率が18%向上、CO₂排出量の40%削減が可能。

「Environship」概念は、旅客船、ケミカル／プロダクト・タンカー、LNG／LPGタンカー、ばら積み船、LNG補給船、スーパーヨット等に適用可能である。

2011年10月、Rolls-Royceは同概念を適用した船舶2隻を初受注した。これらはノルウェーNor Lines AS向けの先進貨物船で、Rolls-Royceは、Environship概念を用いたNVC 405船型の設計と統合動力・推進システムを提供する。⁴⁷

⁴⁶ http://www.rolls-royce.com/marine/news/2010/worlds_largest_gas_ferry.jsp

⁴⁷ http://www.rolls-royce.com/marine/news/2011/110929_environship_first_order.jsp

5.4 MTU Friedrichshafen

高速船向け船用ディーゼルエンジン市場において高い競争力を持つ MTU は、総合産業エンジン事業持株会社である独 Tognum AG 内のメインブランドである。

2011 年 9 月、Daimler AG と Rolls-Royce Group plc のジョイントベンチャーである Engine Holding GmbH が、Tognum の筆頭株主となった。

MTU は、出力範囲 75～9,100kW のディーゼルエンジン、最大出力 2,150kW までのガスエンジン、45,000kW までのガスタービンの開発、製造、販売を行っている。

MTU のコアビジネスは、商船、艦艇、ヨットなどの高速船用エンジンであるが、その他石油・ガス産業、工業（鉄道、農業、建設、鉱業用車両）、防衛（軍用車両）向けのエンジンも広く取扱っている。また、関連したグローバルなアフターセールス（スペア部品、顧客支援、修理、改造）も展開している。⁴⁸

MTU は、ターボチャージャー、燃料噴射システム、エレクトロニクスというエンジンの主要技術は自社開発・製造を行っており、全ての動力部品が調整され、常に最適化されたエンジンパフォーマンスを提供している。⁴⁹

厳格化する排ガス規制を満たすことを目指した MTU のエンジン新製品及びその搭載技術を、以下に概説する。

①新高速エンジン

MTU は、新世代 2000 シリーズ高速エンジンを発表した。この改良型エンジンは、1996 年発売の 2000 シリーズの後継機となる。

新世代エンジンは、現行の 2000 シリーズを構造ベースとしているが、完全な設計変更がなされ、改良された部品が使用される。

新 2000 シリーズには、コモンレール燃料噴射装置と EGR を搭載しており、燃料消費に影響を与えずに 50% 近くの NOx 排出量を削減し、米国環境保護庁（EPA）の第四次中間規制の排ガス規制を満たしている。MTU の EGR システムは、従来の高圧排ガス再循環よりもガス損失量を少なくする同社の特許技術「ドナー・シリンダー概念」を採用している。これはターボチャージャーの効率を高め、燃料消費量の削減にも寄与する。⁵⁰

同時に、コモンレールシステムの最適化された燃料噴射により、PM の発生も削減される。MTU はグループ企業である L'Orange 社と技術提携し、1996 年に業界で初めてコモンレール燃料噴射システムを大型ディーゼルエンジンに標準搭載した。⁵¹

さらに、中間冷却器をはさんだ 2 基の過給機を組み合わせた二段過給システムの採用により、加速性能が高まり、低速でも高いトルクを発揮することができる。

⁴⁸ <http://www.tognum.com/press/facts-data/>

⁴⁹ <http://www.mtu-online.com/mtu/mtu/>

⁵⁰

http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/white-papers/MTU_White_Paper_Exhaust_Gas_Recirculation.pdf

⁵¹http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/white-papers/MTU_White_Paper_Fuel_Injection.pdf

上記の技術に加え、新シリーズでは、MTU が自社開発した電子エンジン管理システム「ADEC」に、従来のエンジン速度、高圧噴射、噴射タイミングの制御機能だけではなく、排気再循環と二段過給を制御するセンサーを組み込んでいる。これらの追加機能に対応するため、ADEC モジュールの処理能力は 10 倍に拡大した。⁵²

MTU は、他シリーズのディーゼルエンジンにも、順次 2000 シリーズと同様の改良とアップグレードを行っている。

海洋タグボート、オフショア支援船、特殊船等の高出力船向けの 4000 シリーズ高速エンジンを改良し、「Iron Men」シリーズとした。同シリーズには、12 及び 16 シリンダー・エンジンに加え、2010 年に 8 シリンダー・エンジンが加わった。

さらに、4000 シリーズ・エンジンの新世代機種も開発中である。新 2000 シリーズと同様に、新機種には、EGR 技術が組み込まれる予定で、初期実験の結果では、新エンジンは米国の第四次中間規制の排ガス規制を満たすが、燃料消費量は変わらないとしている。

②1163 シリーズ・エンジンのアップグレード

MTU は、同社 1163 シリーズ船用エンジンを、IMO の第 2 次規制、第 3 次規制に対応するようアップグレードを行っている。現行機種に採用されている二段過給システムはさらに改良される。新たな機能は、コモンレール噴射システム（噴射圧力 1,800 バール）、ADEC 電子エンジン管理システム、新燃焼過程である。IMO 第二次規制には、エンジン内部技術のみで対応でき、排ガス後処理装置の必要はない。⁵³

⁵² MTU Report 01/11, p.23

⁵³http://www.tognum.com/press/press-releases/presse-detail/news/mtu_upgrades_series_1163_marine_engines_for_imo_2_and_3_emission_standards/news_smode/text/cHash/7a60019d81b1eb162a9573d3cc6952e3/

6. まとめ

環境に配慮した NO_x 等の排出ガス基準を満たしながら、エンジンの燃料効率やコストへの影響を最小限に抑えることは、貿易量の大部分を担う海運業、船用産業を含めた世界の海事産業全体の重要な課題で、IMO 規制導入以前より大気汚染削減の準備が進められてきた。

船用エンジンメーカーは、世界的、地域的な排出ガス規制環境へのコンプライアンスと同時に、経済効率、コスト、信頼性全ての面における性能改善というチャレンジを強いられている。今後も厳格化が予定されている規制環境に対応するエンジン技術の改良及び新技術への研究開発への資金や人材の配分は、厳しい経済環境の中、エンジンメーカーが直面している大きな課題である。一方、ユーザーのニーズに合致し、研究開発資金が有効に回収できる環境性の高い製品を開発し、その製品への需要が高ければ、製造コストとユニットコストの低下が実現し、更に企業としての競争力も高まる。

特に独自の環境規制を持つ欧州では、本来はライバル企業でもある最大手エンジンメーカーである MAN Diesel&Turbo と Wärtsilä が、多くの欧州船用メーカー、欧州船社が参加している欧州研究開発プロジェクト「HERCULES」において、初めて共同で高効率で環境性の高いエンジンの研究開発を行うなど、「欧州の技術」を確立すると同時に欧州全体の競争力の向上を狙っている。

また、HERCULES プロジェクト等の研究開発活動は、新技術の実用化、製品化が大きな目的であり、プロジェクト参加メーカーは既に新製品の市場投入を始めている。SO_x、NO_x 等の排出ガス規制海域は、今後欧州、北米以外にも拡大されることが予想され、新造船を中心に、環境性の高いエンジンの需要は更に高まろう。

2016 年発効予定の IMO の第三次規制に向けた各エンジンメーカーの製品・技術開発は、燃焼過程の効率化、新たな過給技術の採用等のディーゼルエンジン内部技術の改良と、それだけでは対応しきれない部分は EGR、SCR、スクラバー等の排ガス後処理装置の利用という動向に集約されつつある。欧州大手エンジンメーカーは、新造船向けには高環境性ディーゼルエンジンと排出ガス後処理装置をパッケージで提供してゆく戦略を持っている。

一方、ディーゼルエンジンの効率化と排出ガス削減以外の船舶の環境性向上方法の研究開発と実用化も進んでいる。その最も有力な手段のひとつは、ガス (LNG) を燃料とする船舶で、欧州大手エンジンメーカーは、二元燃料 (DF) エンジンの開発と製品化に非常に積極的である。

DNV によると、燃料として LNG のみを使用する船舶は CO₂ 排出量が 15%、NO_x 排出量が 85~90% がそれぞれ削減され、SO_x 及び PM 排出量はほぼゼロである。LNG 燃料船の利点は、排出ガスの後処理装置なしに将来的な NO_x 排出基準を満たすこと、及び長期的な稼働コスト削減の可能性である。DNV は、例えば排出基準の厳しい ECA 内の定期航路を運航する新造小型フェリーの場合、長期的にはスクラバーや低硫黄分液体燃料 (MGO) を使用するよりも、LNG 燃料船がコスト的に有利であるとしている。

しかしながら、ディーゼルエンジンに比較して低い出力、初期投資コスト、LNG タンクの船上設置、LNG 燃料の安定的な供給路の確保等、解決すべき課題も多くあり、これまでのところ、利用は北欧等の一部地域の特定船種のみにとどまっている。代替燃料としては、

環境面では燃料電池も非常に有効な手段ではあるが、大型船への実用化への道のりは長く、現実的には船舶分野における液体燃料を使用するディーゼルエンジンの優位性は中長期的にも変わらないと予想される。ディーゼルエンジンを中心としたエンジンの環境性改善と新技術の研究開発動向が、今後も引き続き注目される。



この報告書はボートレースの交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました。

欧州における極低排出で高効率な船用エンジン
に関する開発動向調査

2012年（平成24年）3月発行

発行 社団法人 日本船用工業会

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-13-3
虎ノ門東洋共同ビル 5階
TEL 03-3502-2041 FAX 03-3591-2206

財団法人 日本船舶技術研究協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 2-10-9 ラウンドクロス赤坂
TEL 03-5575-6426 FAX 03-5114-8941

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。

