

# SR 241

---

SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

● 船用EGR等NOx防止システムの研究

## 成 果 報 告 書

● 平成13年3月

法人 日本造船研究協会

## 大気汚染防止システムの調査研究



予備検査シミュレーションの様子 平成11年8月4日



平成11年8月4日：工場での予備検査



平成11年8月4日：工場での予備検査



平成12年11月9日：燃料弁取出開放時  
燃料弁ノズル ID MA-U85B



平成12年11月13日：船上での定期検査  
ピストンヘッド ID : SR241-4

N O<sub>x</sub> 関連パラメータの I D 刻印 (定期・中間検査シミュレーション)



平成11年3月4日：工場での予備検査



平成11年3月4日：工場での予備検査



平成12年11月13日：船上での定期検査

燃料カム ID SR 241-2



平成12年11月13日：船上での定期検査

シリンダカバー ID : SR 241-3



平成11年3月4日：工場での予備検査



エアクーラ ID : 110/22/16/2

NOx 関連パラメータの ID 刻印



平成11年3月4日：工場での予備検査



平成12年11月13日：船上での定期検査

燃料噴射タイミング確認

(定期・中間検査シミュレーション)

## EGRシステムの船用化研究



排ガス洗浄用スクラバーと単筒実験機関

# S R 2 4 1 「船用E G R等NO<sub>x</sub>防止システムの研究」 要 約

## SHIP RESEARCH PANEL 241 Research of NO<sub>x</sub> emission control by marine EGR system etc.

In September 1997, the Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines was adopted. As a result, subsequent to the entry into force of Annex VI – Regulations for the prevention of Air Pollution from Ships, of MARPOL 73/78, each marine diesel engine to which regulation 13 of that annex applies, must comply with the provisions of this code.

Although the above technical code was established, for diesel engines currently used with most merchant vessels, some questions are pointed out in execution of NO<sub>x</sub> certification of engines, on-board NO<sub>x</sub> verification, periodical inspection and modification of engines, etc.

For this reason, it is the first purpose of this research to obtain the basic interpretation and data, which will be necessary at engine manufacturing, shipbuilding, ship operation and ship-management, by studying various questions from technical and economical viewpoint.

In the meantime, the most of countermeasures for NO<sub>x</sub> reduction for diesel engines cause the increase of CO<sub>2</sub> emission in general. However, CO<sub>2</sub> increase will not be permitted any more by the global request.

Consequently, the development of EGR system for marine diesel engines, which has less penalties called CO<sub>2</sub> increase than other countermeasures, has been important. Basic study of specially designed EGR system for marine diesel, in which an exhaust gas-washing device called scrubber is applied, is the second theme of this research.

### 1. 研究の目的

陸上のみならず、船舶から排出される大気汚染物質の低減についても国際的な議論が進められ、1997年9月IMO海洋汚染防止条約締約国会議においてMARPOL73/78附属書VI「船舶からの大気汚染防止のための規則」が採択された。

この付属書の中で、最も取扱いが煩雑で、複雑な運用になると予想されているのが、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)の規制である。NO<sub>x</sub>計測そのものが容易でないこと、その低減手法が多岐に亘っていること、更にNO<sub>x</sub>関連部品の定期的な点検(就航後の改造によって排出量が変化していないかの検証)が必要となること等から、機関の鑑定、定期検査の運用にあたって幾つかの疑問点・問題点が指摘されている。

そこで、このNO<sub>x</sub>排出規制対策を円滑に実施していくため、機関の鑑定に関わる基準の統一、機関パラメータ変更時の対応方法等、運用に係わる課題の調査研究を実施して、来るべき条約発効に備えることが造船・海運業界の急務となってきた。

このため、船用ディーゼル主機関を対象として上記の実運用に係わる課題を技術的・経済的な観点から調査研究し、機関製造・船舶建造段階のみならず、竣工後の船舶運用(運航、保船、検査、アフターサービス等)が円滑に機能するために必要且つ有効な基礎データを得ることが本研究の第一の目的である。

一方、地球温暖化防止の観点から CO<sub>2</sub>の増加はいかなる理由があろうとも、もはや正当化されない趨勢となっている。ところが、一般的に NO<sub>x</sub>低減対策を施行すると熱効率が低下し、結果的に CO<sub>2</sub>発生量が増加する傾向が存在する。そこで、幾つかの NO<sub>x</sub>対策の中で CO<sub>2</sub>増加というペナルティが少なく、且つ経済性・安全性に優れている EGR（排ガス再循環：Exhaust Gas Re-circulation）方式の実用化が、重要な開発課題となってきた。

しかし、低質油を使用する舶用機関では、再循環ガスに含まれる SO<sub>x</sub>や燃焼残渣によるピストンリング・ライナの摩耗、空気冷却器、掃気トランクの汚れ等が予想されるため、機関の信頼性・耐久性低下が懸念され、これが実用化の妨げとなってきた。

そこで、舶用実績のある IGS スクラバを利用したガス洗浄装置を排ガス再循環ラインに組み込むことで信頼性・耐久性の向上を狙った舶用 EGR システムの試験プラントを設計・運転し、その技術的・経済的課題を抽出し対策を立案することで、トータルシステムとして舶用化の目処を立てることとした。これが本研究の 2 番目の目的である。

## 2. 大気汚染防止システムの調査研究

### 2.1 研究内容と得られた成果

「IMO MARPOL73/78 附屬書VI」の第13規則および「舶用ディーゼルエンジンからの NO<sub>x</sub>規制に関するテクニカルコード」（以下 NO<sub>x</sub> テクニカルコード）の実運用は次の 3 つのステップに分けることが出来る。始めのステップでは、エンジン本体の認証が行われ、「エンジン国際大気汚染防止（EIAPP）証書」が発給される。次のステップでは、船舶の認証が行われ、船舶に対し「国際大気汚染防止（IAPP）証書」が発給される。最後のステップでは、第13規則が維持されていることが確認され、「IAPP 証書」の裏書または再発給が行われる。

しかし、例えば海上公試時や通常運航時の NO<sub>x</sub>測定方法・装置、規制値を超えた場合の扱いや、経年劣化による変化の扱い、発効前の対応等、具体的に起り得る問題に対しては規制の内容が不明瞭であり、実際のエンジンや船舶の建造・運航にあたり解決しなければならない問題も多い。このため本附屬書が発効した場合、運用に当たり混乱を来すことが予想される。

そこで本研究では、舶用低速ディーゼル主機関から排出される NO<sub>x</sub>を対象として、附屬書VIの実際の運用にかかる問題点を技術的、経済的な観点から調査・整理することを目的として、以下に述べる研究を実施した。

#### 2.1.1 「国際大気汚染防止（IAPP）証書」取得に関する手続・申請サンプルの作成

NO<sub>x</sub>排出に関する書類の作成が要求されているが、記載内容については統一的な解釈は示されていない。しかし、関係者間の解釈の相違を避けるためには、統一された書式を用いることが極めて有効である。

そこでエンジンの機種やメーカーの違いに関らず、どの機種についても不足の無い統一書式を目指し、必要書類の作成を行った。

#### 2.1.2 運用シミュレーションの実施と検証

NO<sub>x</sub> テクニカルコード等には、NO<sub>x</sub>排出規制に適合していることを確認するための検査等が述べられているが、その詳細については決定されていない。

そこで、実機および実船を使用して、申請手続・証書の発給から就航後の検査に至る NO<sub>x</sub>

鑑定作業を模擬実施（シミュレーション）し、その可否について確認し、問題点等に対する対応策を検討・整理した。

#### 2.1.3 パラメータ変更時の対応

就航後の船舶では、エンジンの修理や改造、部品の設計変更が行われることが少なくない。NOx 排出率に影響を及ぼすパラメータの変更や調整がある場合は、定められた方法で検証しなければならないことが規定されているが、具体的な手続や対応方法については言及されていない。

そこで、比較的変更頻度の高いパラメータを選定し、その変更が NOx 排出率に及ぼす影響を、一部は実機実験により調査・確認し、これと共に、パラメータ変更に関する条約上の解釈について幾つかのケースを想定して検討した。

その結果、場合によっては運用上の問題が発生する可能性があることが判った。

#### 2.1.4 既存船適用時への対応

附属書VIでは、2001年1月1日より前に建造された船舶（既存船）においても、「実質的改造」がある場合は NOx 規制対象エンジンとなることが規定されている。

そこで、第13規則が既存船に適用された場合に発生すると考えられる技術的な問題点などを抽出し、対応方法等を検討した結果、既存船への適用は極めて非現実的であることが判った。

#### 2.1.5 附属書VI発効時への対応

第13規則は、2000年1月1日以後の建造船舶から遡及適用されることになっている。条約発効までの対応手段として、NOx 排出に適合していることを示す仮証書（鑑定書）の発給が船級協会により行われているが、発効までの対応方法に関する明確な公的指針は全く示されていない。

そこで発効に向けてどこまでの準備をしておくことが必要であるかとの観点から、附属書VI発効時の対応・準備対策について調査、検討した。

その結果、少なくとも予備認証に対応する鑑定書は所有しておいた方が良いであろうとの結論に至った。

#### 2.1.6 情報の収集

附属書VIや NOx テクニカルコードの実運用に関する問題点等を、より幅広くピックアップするため欧州の関連業種との意見交換、4つの船級協会との意見交換および、アンケート調査を実施した。

これらを実施した結果、NOx 排出規制に関する問題について共通の理解あるいは相違点を確認することができた。またアンケート調査では具体的な手順を中心に多くの問題点が指摘された。国際間の統一認識を確立することの必要性、および本規制の円滑なる運用を目指す本研究部会の目的、意義の重要さを強く再確認した。

#### 2.1.7 問題点の整理

NOx テクニカルコード等の実運用に関する問題点を抽出・整理した。

問題点は、1) 書類に関する問題点、2) 検査に関する問題点、3) 測定に関する問題点、4) 運用に関する問題点に分類した。予備検査等の実際に作業が発生している部分については、幾つかの問題点はあるものの実運用可能と判断できたが、就航後に発生するであろうパラメータの変更やテクニカルファイルの更新、発効時への対応、既存船への適用等、明記されていない部分に多くの問題点を含んでいることがわかった。

特に、既存船への第13規則の適用には、a. 使用部品等のリストアップおよび定期的な照合作業が必要であること、b. 緊急時は事前計測が不可能であること、c. 全船舶が NOx 排出規制に対応できるとは限らないこと等、解決が極めて困難な問題点があることから、これを削除するか実現可能とするための大規模な見直しを提案した。

### 2.1.8 費用の試算

パラメータの変更や、既存船への適用、発効時への対応等に要する費用を試算した。

## 2.2 成果の活用

船舶を発生源とする大気汚染防止のため国際的な規制を行い、地球環境を保全することは非常に意義深い。しかし規制に当たっては、何よりもまず附属書VIが効果的かつ公平に遵守されることが前提である。本研究により、現実的にすぐにでも起り得る問題点が数多くピックアップされたが、今後はこれらの指摘された多くの問題点を一つ一つ解決して行く作業が必要であろう。このことによって附属書VIをより効果的かつ公平な規制とすることが出来る。

前述の通り、附属書VIの批准作業が遅れているが、今後予定されている発効要件見直し時等に、効果的で実体に則した提言を日本が行うまでの基礎資料として本成果が活用されることを望みたい。また、エンジンメーカーや造船所、船主、船級協会等の関係業種にあっては、附属書VIの運用に際し、個々のあるいは共通の現場で発生する諸問題を解決するための資料として活用されることを希望する。

本研究部会で実施した研究のうち附属書VIや NOx テクニカルコードに明記されていない事項については、最も可能性が高いと考えられる場合を想定した。

ただし、附属書VIやNOxテクニカルコード等の運用に関する裁量権は船籍国主管庁に帰属するので、最終的には主官庁の指示に従うこととなる。

## 3. EGR システムの船用化研究

### 3.1 研究内容と得られた成果

#### (1) EGR の課題調査

エンジンで特別の対策無しで EGR を行うと摺動部が異常摩耗する。その主な原因は排ガス中に含まれる SOx やばいじんが潤滑油に混入し摩耗させるからである。<sup>\*1</sup> 実際にシリンダ油にカーボン粒子を混入し摺動試験を行うと油中カーボン濃度に比例して摩耗量が増加する。

<sup>\*2</sup> このため、EGR 実施時の有力な異常摩耗対策として再循環するガスを極力クリーンにする排ガス浄化装置を開発し装着することであると考えられる。

## (2) 試験用 IGS スクラバーの設計と性能

実船で長年、実績のある IGS スクラバーの基本設計法を応用して EGR 率30%まで対応可能な試験用スクラバーの主要諸元を表3.1のとおり決定した。

表3.1 試験用スクラバー主要諸元

処理ガス量	洗浄水量	主塔径	ガス出入口径
1385Nm <sup>3</sup> /h	20m <sup>3</sup> /h	550A( $v=1.64\text{m/s}$ )	200A
洗浄水管径	配水管径	エレメント間隔	デミスター
1次:20A, 2次:65A	100A	16mm, 9mm	EL-222( $v=4\text{m/s}$ )

IGS スクラバーの浄化部である折れ板型エレメントのディーゼルばいじんを対象にしたばいじん除去効率を予測計算した。試算結果を図3.1に示す。この試算結果から折れ板型エレメントを持つ充填塔方式スクラバーのはいじん除去効率は最大でも20%程度であると考えられる。

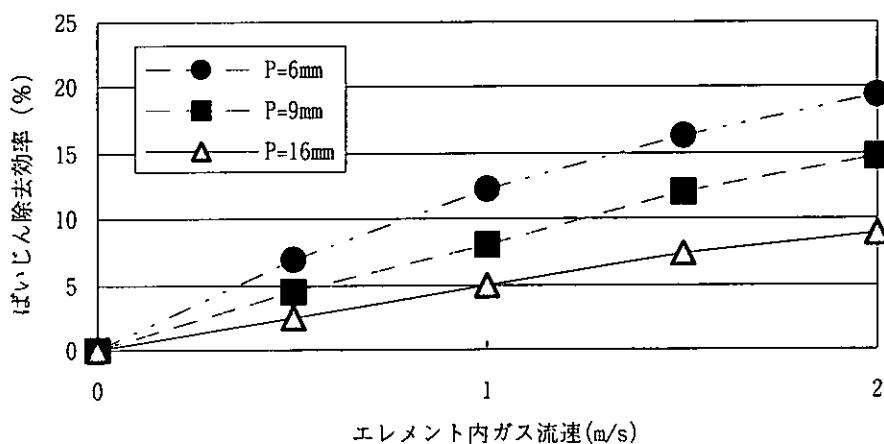


図3.1 エレメント間隔 (P) とばいじん除去効率

## (3) 改善型スクラバーの設計と性能

大型舶用ディーゼルエンジンの排ガスが本来、微細なばいじん主体であるため、充填塔方式スクラバーではばいじん除去効率に限界があることから、EGR 時のリング・ライナ摩耗を低減するには、不十分であることが予測された。このため、ディーゼルばいじんの主体である  $2 \mu\text{m}$  程度の微細粒子領域まで捕集する方法として高圧の微細な水滴を EGR ガスに噴射衝突させ、微細ばいじんを肥大化させて捕集できるジェットスクラバーの性能計算法を確立すると共にそれを採用したスクラバーを設計製作した。

この改善型スクラバーの浄化性能確認試験を実施した結果、次の性能を得た。

ばいじん除去効率 : 70%

SOx 除去効率 : 98%以上

## (4) スクラバー装着エンジン試験結果

改善型スクラバーを50%NOx 低減可能な EGR 率で21時間連続運転した。リング摩耗量は 1st リングで比較すると改善型スクラバーの方がスクラバー無しより30%以上低減しており、

EGR にはスクラバーの利用が必須であるといえる。また、従来型である IGS スクラバーも摩耗低減に効果があることが確認できた。

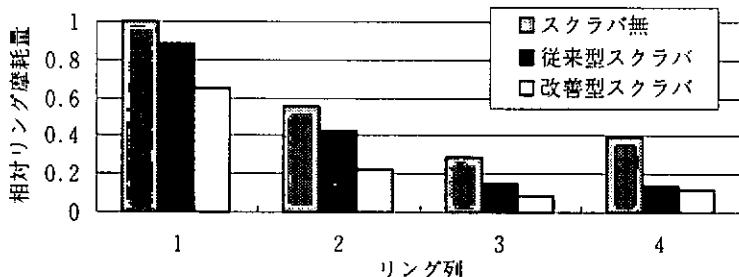


図3.2 EGR 時のスクラバーの効果

### 3.2 成果の活用

NOx 規制が強化されると EGR の実船適用が現実となる。その場合、使用するスクラバーとして次のように使い分ける。

#### (1) IGS スクラバー兼用の場合

現行 IGS スクラバーのガス処理能力は EGR 率15~16%の容量と同一であるため、NOx 発生量 $\geq 13\text{g/kwh}$ までの規制に使用する。但しエレメント間隔は 9 mm に変更する。

#### (2) 改善型スクラバー使用の場合

専用スクラバーでは50~60%の NOx 低減可能な EGR 率25~30%のガス処理能力を持つものを基準とする。このため NOx 発生量 $\geq 8\sim 10\text{g/kwh}$ までの規制に対応が必要な時に製作し使用する。またはタンカー以外で NOx 対応が必要な場合に使用する。

なお、本研究で開発した海水スクラバーは洗浄水である海水を直接排水しながら使用するので燃料性状の変化や機関構成部品の経年劣化により或いは水質規制強化によっては直接排水が困難となる可能性が予測される。このため、今後燃焼状態の監視に加えスクラバーの排水処理を含めた管理システムを確立し将来の規制に対応していく必要がある。

#### (参考文献)

- \* 1 : EGR 時のリング摩耗とピストン摩擦力特性に関する研究  
(自技会学術講演会前刷集996)  
ディーゼルエンジンにおける EGR とその問題点について  
(トライボロジー先端講座 41<sup>st</sup>, 1996)
- すすの動弁系摩耗機構に対する考察  
(石油学会誌 Vol. 40, No. 6, 1997)
- ディーゼルスージがエンジン油の性能に与える影響  
(トライボロジスト Vol. 42, No. 6, 1997)
- \* 2 : Abrasive concentration effects on wear under reciprocating conditions.  
(Wear, 140(1990))

## はしがき

本成果報告書は、日本財団の助成事業として、日本造船研究協会第241研究部会において、平成11年度から平成12年度の2カ年計画で実施した「船用EGR等NOx防止システムの研究」の成果をとりまとめたものである。

### 第241研究部会 委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	福垣 敦男(東海大学)	高杉 喜雄(船舶技術研究所)
代表幹事	平井 忠(三菱重工業)	永留 隆司(日本海事協会)
委員	立石 智裕(三菱重工業) 永田 勝利(日本海事協会) 千葉 廣(日本船主協会) 陣内 幸児(日本郵船) 佐藤 秀彦(日本郵船) 竹口 順啓(商船三井) 山口 正隆(川崎重工業) 山田 知夫(三菱重工業) 林 潤一(ディーゼルユナイテッド) 佐々木 耕(三井造船) 太田 昇(赤阪鐵工所) 後藤 悟(新潟鐵工所) 田中 英治(NYK輸送技術研究所) 稻永 紀康(三菱重工業) 荒堀 芳正(川崎重工業) 永澤 映二(日本鋼管) 黒石 博雅(オルボルグインダストリーズ)	桑田 敬司(日本船主協会) 古澤 博司(日本郵船) 釜田 和利(日本郵船) 村上 喜光(川崎汽船) 小野 亨(日本钢管) 田山経二郎(三菱重工業) 花房 真(三井造船) 太田 昇(赤阪鐵工所) 常世田哲郎(新潟鐵工所) 宮野 春雄(NYK輸送技術研究所) 高石 龍夫(三菱重工業) 大松 哲也(石川島播磨重工業) 大谷 紳一(川崎重工業) 熊谷 猛(日立造船)

### 第241研究部会幹事会名簿

(敬称略、順不同)

主査	平井 忠(三菱重工業)	永留 隆司(日本海事協会)
委員	立石 智裕(三菱重工業) 陣内 幸児(日本郵船) 竹口 順啓(商船三井) 小野 亨(日本钢管) 林 潤一(ディーゼルユナイテッド) 常世田哲郎(新潟鐵工所) 宮野 春雄(NYK輸送技術研究所) 大松 哲也(石川島播磨重工業)	古澤 博司(日本郵船) 村上 喜光(川崎汽船) 田山経二郎(三菱重工業) 佐々木 耕(三井造船) 後藤 悟(新潟鐵工所) 高石 龍夫(三菱重工業)

## 第241研究部会WG1名簿

(敬称略、順不同)

主査	陣内 幸児(日本郵船)(~H12.9)	
	宮野 春雄(NYK 輸送技術研究所)(H12.9~)	
委員	平井 忠(三菱重工業)	立石 智裕(三菱重工業)
	高杉 喜雄(船舶技術研究所)	永田 勝利(日本海事協会)
	永留 隆司(日本海事協会)	千葉 廣(日本船主協会)
	桑田 敬司(日本船主協会)	古澤 博司(日本郵船)
	佐藤 秀彦(日本郵船)	釜田 和利(日本郵船)
	竹口 順啓(商船三井)	村上 喜光(川崎汽船)
	山口 正隆(川崎重工業)	小野 亨(日本鋼管)
	山田 知夫(三菱重工業)	田山 経二郎(三菱重工業)
	林 潤一(ディーゼルユナイテッド)	花房 真(三井造船)
	佐々木 耕(三井造船)	太田 昇(赤阪鐵工所)
	常世田哲郎(新潟鐵工所)	後藤 悟(新潟鐵工所)
	宮野 春雄(NYK 輸送技術研究所)	田中 英治(NYK 輸送技術研究所)
	大松 哲也(石川島播磨重工業)	

## 第241研究部会WG2名簿

(敬称略、順不同)

主査	高石 龍夫(三菱重工業)	
委員	平井 忠(三菱重工業)	立石 智裕(三菱重工業)
	陣内 幸児(日本郵船)	古澤 博司(日本郵船)
	田山 経二郎(三菱重工業)	佐々木 耕(三井造船)
	宮野 春雄(NYK 輸送技術研究所)	稻永 紀康(三菱重工業)
	大松 哲也(石川島播磨重工業)	荒堀 芳正(川崎重工業)
	大谷 紳一(川崎重工業)	永澤 映二(日本鋼管)
	熊谷 猛(日立造船)	黒石 博雅(オルボルグインダストリーズ)

## 討議参加者

(敬称略、順不同)

中島 康晴(船舶技術研究所)	奥村 吉男(日本郵船)
皆川 秀悟(川崎汽船)	山本 寛一(川崎重工業)
永所 和俊(三井造船)	島田 一孝(三井造船)
美澤 啓介(赤阪鐵工所)	三村 敬久(新潟鐵工所)
木村 浩明(新潟鐵工所)	小田 裕司(三菱重工業)
赤川 裕和(三菱重工業)	山崎 陽平(三菱重工業)
幅田 望(石川島播磨重工業)	森川 智(川崎重工業)
池上 剛二(日本鋼管)	福島 二郎(日立造船)

林 雅俊(日立造船) 田尻 俊雄(オルボルグインダストリーズ)  
本郷 雄二(ABS パシフィック) 谷内 武(ABS パシフィック)  
古賀 久義(デットノルスケベリタスエーエス) 森田 裕(ロイドレジスター・オブ・シッピング)

事務局(日本造船研究協会)

山内 康勝 大森 勝 海部 雅之

## 目 次

1. 研究の目的と狙い	1
2. 大気汚染防止システムの調査研究	2
2.1 研究の内容	2
2.2 研究の成果	2
2.2.1 「国際大気汚染防止（IAPP）証書」取得に関する手続・申請サンプルの作成	2
2.2.2 NO <sub>x</sub> 鑑定シミュレーションの実施	4
2.2.3 パラメータ変更時の対応	6
2.2.4 既存船適用時への対応	13
2.2.5 附属書VI発効時への対応	15
2.2.6 情報収集	15
2.2.7 問題点の整理	17
2.2.8 費用の試算	18
2.3 成果の活用	19
2.3.1 成果	19
2.3.2 成果の活用	20
3. EGR システムの船用化研究	22
3.1 研究の内容	22
3.2 研究の成果	22
3.2.1 EGR の課題調査	22
3.2.2 大型船用ディーゼルエンジンのばいじん粒子調査	23
3.2.3 スクラバーの原理とばいじん除去効率試算及び試験用スクラバー試作	23
3.2.4 スクラバーばいじん除去性能改善法検討	25
3.2.5 EGR 評価試験法	25
3.2.6 EGR 燃焼試験及びスクラバー単体試験	27
3.3 成果の適用	31
4. 結言	33

## 1. 研究の目的と狙い

地球温暖化ガスの一つと言われる CO<sub>2</sub>の排出削減が世界的に関心の高い環境問題であるが、船舶から排出される大気汚染物質の低減についても国際的な議論が進められ、1997年9月 IMO 海洋汚染防止条約締約国会議において MARPOL73/78附属書VI「船舶からの大気汚染防止のための規則」が採択された。

この付属書の核となるのが硫黄酸化物 (SOx)、及び窒素酸化物 (NOx) の規制であるが、SOx の現実的な低減方法は低硫黄分の燃料の選択であるため、経済的側面を除けば技術的に困難な課題は殆どない。しかし NOx については、商船の殆どで使用されているディーゼル機関において、NOx 計測そのものが容易でないこと、その低減手法が多岐に亘っていること、更に機関の NOx 関連部品の定期的な点検（就航後の改造によって排出量が変化していないかの検証）が必要となること等から、機関の鑑定、定期検査の運用にあたって幾つかの疑問点・問題点が指摘されている。

そこで、この NOx 排出規制対策を円滑に実施していくため、機関の鑑定に関わる基準の統一、機関パラメータ変更時の対応方法、その手続き等、運用に係わる課題の調査研究を実施して、来るべき条約発効に備えることが造船・海運業界の急務となってきた。

このため、船用ディーゼル主機関を対象として上記の実運用に係わる課題を技術的・経済的な観点から調査研究し、機関製造・船舶建造段階のみならず、竣工後の船舶運用（運航、保船、検査、アフターサービス等）が円滑に機能するために必要且つ有効な基礎データを得ることが本研究の第一の目的である。これを（その1）大気汚染防止運用システムの調査研究として進めることとした。

一方、既述のごとく現在最も関心の高い環境問題は CO<sub>2</sub>の削減であることから、SOx、NOx 等の排出を削減する為に CO<sub>2</sub>が増加することが容易には許容されない趨勢になっている。ところが、一般的に NOx 低減対策を施行すると熱効率が低下し、結果的に CO<sub>2</sub>発生量が増加する傾向が存在する。そこで、幾つかの NOx 対策の中で CO<sub>2</sub>増加というペナルティが少なく、且つ経済性・安全性に優れている EGR（排ガス再循環：Exhaust Gas Re-circulation）方式の実用化が、重要な開発課題となってきた。

しかし、EGR は自動車用小型ディーゼル等で実用化されているものの、低質油を使用する船用機関では、再循環ガスに含まれる SOx や燃焼残渣によるピストンリング・ライナの摩耗、空気冷却器、掃気トランクの汚れ等が予想されるため、機関の信頼性・耐久性低下が懸念され、これが実用化の妨げとなってきた。

そこで、タンカーで十分な舶用実績のある IGS スクラバを利用したガス洗浄装置を排ガス再循環ラインに組み込むことで信頼性・耐久性の向上を狙った舶用 EGR システムの試験プラントを設計・運転し、その技術的・経済的課題を抽出し対策を立案することで、トータルシステムとして舶用化の目処を立てることとした。これを、（その2）EGR システムの舶用化研究することとした。

本研究では、以上の2つのテーマを取り扱うこととしたが、課題が広範囲に亘る為、船舶技術研究所、船級協会、船主協会、大手船社、大手造船所、主要機関メーカー、及び IGS メーカーと言う体制で、本研究を進めることとした。

## 2. 大気汚染防止システムの調査研究

### 2.1 研究の内容

「IMO MARPOL73/78 附属書VI」の第13規則および「船用ディーゼルエンジンからの NOx 規制に関するテクニカルコード」(以下 NOx テクニカルコード) の実運用は次の3つのステップに分けて考えることが出来る。

始めのステップでは、エンジン本体の認証が行われ、NOx 排出率が許容限度を満足していることが確認されれば、エンジンに対して「エンジン国際大気汚染防止 (EIAPP) 証書」が発給される。次のステップでは、船舶の認証が行われ、船舶搭載後のエンジンが要件を満たしていれば、その他の要件も含め船舶に対し「国際大気汚染防止 (IAPP) 証書」が発給される。最後のステップは、船舶の生涯を通じ最も長い期間となるが、第13規則が維持されていることが確認され、「IAPP 証書」の裏書または再発給が行われる。

しかし、例えば海上公試時や通常運航時の NOx 測定方法・装置、規制値を超えた場合の扱いや、経年劣化による変化の扱い等、具体的に起り得る問題に対しては規制の内容が不明瞭であり、実際のエンジンや船舶の建造・運航にあたり解決しなければならない問題も多い。また、第13規則は、2000年1月1日以後に建造された船舶（エンジン）に遡及適用されることになっていることから、既に第13規則の対象となるエンジンが出現しているが、対象となる船舶（エンジン）が発効前にどのような対応をとるべきかについても不明確である。更に言えばこれらの規制は、附属書VIに基づき、船籍国政府（主管庁）の管理の下に実施されることとなるが、附属書VIが発効していないため、現時点では船籍国主管庁の意向は明らかにされていない。このため発効した場合、附属書VIに基づいて船舶を運用するに当たり混乱を来すことが予想される。

そこで本研究では、船用ディーゼル主機関から排出される NOx を対象として、附属書VIの実際の運用にかかる問題点を技術的、経済的な観点から調査・整理することを目的として、以下を実施した。

- 1) 「国際大気汚染防止証書 (IAPP)」取得に関する手続・申請サンプルの作成
- 2) 運用シミュレーションの実施と検証
- 3) パラメータ変更時の対応方法の検討
- 4) 既存船適用時への対応方法の検討
- 5) 附属書VI発効時への対応方法の検討
- 6) 情報収集（欧州事情調査、船級協会との意見交換会、アンケート調査）
- 7) 問題点の整理
- 8) 対応に要する費用の試算

### 2.2 研究の成果

#### 2.2.1 「国際大気汚染防止 (IAPP) 証書」取得に関する手續・申請サンプルの作成

附属書VIでは、エンジンや船舶の NOx 排出に関する書類が要求されているが、その詳細な内容については不明瞭な部分も残っており、統一的な解釈は示されていない。更に現時点では各国主管庁の意向が全く表明されていないため、主管庁や船級協会、エンジンメーカー毎に異なった書式となる可能性が極めて高いが、書式や記載内容に相違があった場合、主管庁等からこ

これらの過不足を指摘される可能性がある。従って各関係者間の解釈の相違による混乱や不公平をなくし、附属書VIの運用を出来るだけスムーズに行うためには、統一された書式を用いることが極めて有効である。

本研究部会では、ディーゼル主機関を対象とし、表2.2.1に示す統一書式の作成を、代表的な3機種の低速2サイクルディーゼルエンジンおよび3機種の中速4サイクルディーゼルエンジンについて行った。書式の統一化では、エンジンの機種やメーカーの違いにより記入内容が異なることが問題となるが、この相違を包含し、どの機種についても不足の無い統一書式の作成を目指した。

表2.2.1 作成した国際大気汚染防止（IAPP）証書 関連の統一書式

No.	名 称
1.	TECHNICAL FILE FOR VERIFICATION FOR CONTROL OF NOx EMISSION
2.	ON-BOARD NOx VERIFICATION PROCEDURE FOR PARAMETER CHECK METHOD
3.	ENGINE'S RECORD BOOK OF ENGINE PARAMETERS FOR ON-BOARD VERIFICATION FOR CONTROL OF NOx EMISSION
4.	PLAN FOR NOx MEASUREMENT ON TEST BED
5.	ON-BOARD NOx VERIFICATION PROCEDURE FOR SIMPLIFIED MEASUREMENT METHOD

図2.2.1～2.2.5に作成した統一書式の一例（部分）を示す。

TECHNICAL FILE FOR VERIFICATION FOR CONTROL OF NOx EMISSION					
Engine Manufacturer	Model Number	Engine Serial Number	Test Cycle(s)	Rated Power(kW) Rated Speed(RPM)	Engine Approval Number
<b>Content</b>					
Sheet No.					
1. Particulars of the engine ..... 3 2. List of components and setting that influence the NOx emission ..... 4 2.1 Fuel oil injection system 2.2 Combustion chamber 2.3 Instrument of charge air and exhaust gas 2.4 Turbocharger 2.5 Air cooler 3. Allowed components and settings ..... 7 4. Engine group definition ..... 7 4.1 Particulars(common items of engine group) 4.2 Use of engine(test cycle to be applied) 4.3 The range in an engine group covered by the parent engine 5. Engine performance data ..... 8 5.1 test-bed performance parameters 5.2 Test-bed Ambient and gaseous Emission parameters 6. On-board NOx Verification procedures ..... 8 7. Specification of spare parts/components ..... 9					
<b>Attached:</b>					
8. Emission test report ..... 9 9. Inspection Record ..... 9					
<b>(Name of Manufacture)</b>					
Date of issue :					

**1. On-board NOx Verification Procedures**

1.1 Inspection of fuel oil injection system for each cylinder of the engine  
Check ID number of  
- Injection nozzle(atomizer)  
- Fuel cam  
- VIT cam  
or Check of  
- VIT parameters

Check of  
- FQS setting  
Measurement of  
- injection timing (beginning) for each cylinder of the engine in accordance with instruction manual.  
- plunger diameter with a caliper rule.

1.2 Inspection of combustion chamber for each cylinder of the engine  
Check ID number of  
- Cylinder cover  
- Piston (ID number can be seen through the liner scavenging ports of the cylinder when the camshaft is turned to the position of the cylinder 50 deg CA before BDC)  
- Piston rod

Measurement of  
- Compression shim thickness of each cylinder

1.3 Inspection of instrument of charge and exhaust gas(if applicable)  
Not applicable

1.4 Inspection of turbocharger  
Check the name plate and confirm the correct specification

1.5 Inspection of air cooler  
Check the name plate and confirm the correct specification

図2.2.1 テクニカルファイル

図2.2.2 船上におけるNOx検証方法  
(エンジンパラメータチェック法)

Plan for NOx measurement on test bed					
Engine Manufacturer	Model Number	Engine Serial Number	Test Cycle(s)	Rated Power(kW) Rated Speed(rpm)	Engine Approval Number
			E3	(kW) (rpm)	NK

**Content**

1. Test schedule
2. Particulars of the engine
3. Engine group information
4. Engine setting
  - 4.1 Exhaust gas system and sampling position
  - 4.2 Sampling probe(s)
5. Test cell (Analyzer) specification
- 5.1 Emission equipment
- 5.2 Test-cell equipment
- 5.3 Measured performance parameters
6. Fuel and lub. oil specification

**Enclosure**

1. Calibration results of the emission equipment
2. Specification of the calibration gasses

**1. Test schedule**

Date \_\_\_\_\_  
Place \_\_\_\_\_  
Test cycle E3 test-cycle  
Test schedule

Time	Load	Remark
-	Span check & Leak test	
100%		
75%		
50%		
25%		
-	Span check	

図2.2.3 試験台上におけるNOx計測方法

**1. On-board NOx Verification Procedures for Simplified Measurement Method**

**1.1 Test and Measurement Procedure**

The simplified measurement method shall be carried out with the analyzers, which meet the specifications as set out in Appendix 3 of the IMO/NOx Technical Code.

The gaseous emission concentrations of NOx, together with O2 and/or CO2 and CO, shall be measured in accordance with the test cycle as shown in Section 1.2.

The engine parameter listed in the table of Section 1.6 shall be measured during on-board verification procedures.

**1.2 Engine Load and Operation Hours of Test and Measurement**

The test and measurement shall be carried out in accordance with the test cycle specified in the IMO NOx Technical Code 3.2 as follows:

Number	Engine Load	Engine Speed	Operation Hours
1-1	25% MCR	Remarks	30 min.
1-2	50% MCR	Remarks	30 min.
1-3	75% MCR	Remarks	30 min.
1-4	100% MCR	Remarks	30 min.

Remarks: Engine speed shall correspond to the engine load (if the engine load specified in the Table is not available, alternative load shall be considered).

During the test and measurement, the constant engine speed shall be maintained as far as possible.

**1.3 Test Fuels**

The test and measurement shall be carried out with the engine running on marine heavy fuel oil of an ISO 8217, 1996, RM-grade.

In the case of using a RM-grade fuel oil (ISO 8217, 1996), an allowance of 10% may be granted for the test and measurement on-board, (with reference to IMO NOx Technical Code 6.3.11.1)

The fuel oil used for the test and measurement shall be analyzed for its composition prior to the test and measurement.

**1.4 Engine Output (Shaft Output) Measurement**

When the shaft torque meter is provided, the engine torque and engine speed shall be measured directly and used for the calculation.

If the shaft torque meter is not provided, the brake power may be estimated by any other means recommended by the engine manufacturer and examined by the Authority (the Society). (with reference to IMO NOx Technical Code 6.3.1.3)

図2.2.4 船上におけるNOx検証方法  
(船上簡易計測法)

**ENGINE'S RECORD BOOK OF ENGINE PARAMETERS**  
**For**  
**On- board Verification for Control of NOx Emission**

Ship Builder	Ship Number	Engine Manufacturer	Model Number	Serial Number	Test Cycle(s)	Rated Power Rated Speed	Engine Approval Number
					E3		

This record book, based on Technical File: \* \* \* \*, is used for parameter check method for on-board NOx verification.  
All changes of engine parameters which influence exhaust emission, including adjustments, parts replacements and modifications to engine parts, shall be recorded chronologically in this record book.

**Content**

Fuel injection system  
 1.1 Fuel injection Timing  
 1.2 Fuel injection Nozzle  
 1.3 Fuel injection Pump/Plunger/Barrel  
 1.4 Fuel cam  
 Combustion chamber  
 2.1 Cylinder cover  
 2.2 Piston head  
 2.3 Piston rod  
 2.4 Compression shim thickness  
 Turbocharger system  
 3.1 Turbocharger  
 Charge air cooling system  
 4.1 Air cooler

(Stamp or stamp of the authority, as appropriate)

SR241-WG1-ERB-bl 2/12

図2.2.5 エンジンパラメータ記録簿

## 2.2.2 NOx鑑定シミュレーションの実施

### (1) NOx鑑定シミュレーションの実施方法

附属書VIに規定されるNOx排出規制に適合していることを確認するための検査およびその手法は、テクニカルコード第2章で表2.2.2のように定められている。しかし、すでに指摘したごとく、検査手法の詳細については附属書VIやNOxテクニカルコードでも明確に決定されていないのが現状である。

表2.2.2 証書および検査とその手法

証書	検査	検査手法
EIAPP 証書 発給 (エンジン国際大気汚染防止証書)	予備検査	1. 試験台での試験 2. 予備検査と初回検査を同時に行う船上試験
IAPP 証書 発給 (国際大気汚染防止証書)	初回検査	3. エンジンパラメータチェック法
IAPP 証書 更新 (国際大気汚染防止証書)	定期検査 中間検査 年次検査	4. 簡易船上計測法 5. 船上直接計測および監視

そこで、NOx 鑑定検査を実機および実船で実施する際の不明瞭点や問題点を抽出し、解決方法を検討するため、申請手続・証書の発給から就航後の検査に至る NOx 鑑定のシミュレーションを実施した。それぞれ異なる船主・造船所・エンジンメーカーの組合せで3組を組織し主機関について実機・実船でのシミュレーションを実施した。(表2.2.3)

検査方法は、予備検査として試験台での試験を、初回検査としてエンジンパラメータチェック法および簡易船上計測法を、定期・中間・年次検査はエンジンパラメータチェック法を採用した。定期検査等では部品が汚損した場合の影響調査を目的として、就航1年後および既存船においても実施した。

表2.2.3 シミュレーション対象エンジン・対象船舶

組合せ	A組 船主A 造船所A エンジンメーカーA	B組 船主B 造船所B エンジンメーカーB	C組 船主C 造船所C エンジンメーカーC
対象エンジン	A (低速2サイクル)	B (低速2サイクル)	C (低速2サイクル)
1. 予備検査シミュレーション			
方法	試験台試験	試験台試験	試験台試験
対象船	A1丸	B丸	C丸
実施日	平成11年10月8日	平成11年5月31日	平成11年7月12日
2. 初回検査シミュレーション			
方法	パラメータチェック法	簡易船上計測法	パラメータチェック法
対象船	A2丸	B丸	C丸
実施日	平成11年8月4,5日	平成11年11月22-25日	平成11年9月9日
3. 定期・中間・年次検査シミュレーション			
方法	パラメータチェック法	パラメータチェック法	パラメータチェック法
対象船	A1丸、A3丸	B丸	C丸
実施日	平成11年9月28日 平成12年11月13日	平成11年12月6日	平成11年12月10日

## (2) NOx 鑑定シミュレーションの実施結果

各シミュレーションを実施した結果以下のことが判った。

### (a) 試験台での試験

- 1) 試験手順自体はおおむねスムーズに実施できるという感触を得た。
- 2) 試験に供する分析機器や測定計器類の検定間隔が短い。

- 3) 分析計の安定度が低い場合は、こまめな較正が効果的である。
- 4) 所要時間は、約4時間程度と予想される。

(b) 船上での検査 「エンジンパラメータチェック法」

- 1) 経年的な汚損を考慮した刻印場所、刻印方法等の検討を要す。
- 2) ピストン抽出時はターニングができないため、ID番号が確認できない部品がある。
- 3) 所要時間はピストン抽出を伴わない場合で、1シリンダ約1時間である。
- 4) NOx 関連部品との適合性の初期確認をいつ実施したらよいかが明確でない。

(c) 船上での検査 「簡易船上計測法」

- 1) 海上計測に適した可搬性のある測定機器が少ない。
- 2) 所要時間は、各負荷での計測に約1時間、全体で約4時間を要した。
- 3) 時間の制約や海域の設定、計測員の手配を要し、当日の気象等に左右される。
- 4) 検査結果の即時性が求められる。
- 5) NOx の制限値を超えた場合の一時的な救済措置を講じておくことが必要。

エンジンの製造から、就航後にわたる NOx 鑑定シミュレーションの実施例は、世界的に見ても初めてのケースと思われる。本シミュレーションを通じ、附属書VI発効前に解決しておかなければならぬ問題点を効果的にピックアップすることが出来た。附属書VIを効果的に運用するためには、現状からあまり逸脱しない、簡便かつ効果的な検査方法について、今後更に検討する必要がある。

### 2.2.3 パラメータ変更時の対応

NOx テクニカルコードでは NOx 排出率に影響を及ぼすパラメータとして以下のものを挙げているが、燃焼改善の目的で運転諸元を調整したり、部品を変更する場合は、これらのパラメータを変更する場合が多い。

- |                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| 1) 噴射タイミング                         | 2) 噴射ノズル     |
| 3) 噴射ポンプ                           | 4) 燃料カム      |
| 5) コモンレイル方式における噴射圧                 | 6) 燃焼室       |
| 7) 圧縮比                             | 8) 過給機型式及び構造 |
| 9) 空気冷却器、空気予熱器                     | 10) バルブタイミング |
| 11) NOx 低減装置 “水噴射”                 |              |
| 12) NOx 低減装置 “エマルジョン燃料（水エマルジョン燃料）” |              |
| 13) NOx 低減装置 “排ガス再循環（EGR）”         |              |
| 14) NOx 低減装置 “選択接触還元法を用いた脱硝装置”     |              |
| 15) 主管庁が指定するその他のパラメータ              |              |

これらの規定されたパラメータに変更や調整がある場合は、変更後のパラメータが NOx 排出規制に適合していることを定められた方法で検証しなければならないことから、NOx 排出規制対象船においてパラメータの変更が行われた場合の取扱いについて検討することとした。また、陸上の試験台上において実機を使用して過給機のノズルリング等の変更を行って NOx 排出率を実測し、変更による排出特性の違いを調査した。合せて、SR235部会における調査結果につ

いても引用して検討した。

### (1) パラメータ変更例

パラメータを変更するケースとしては、船主サイドが各船舶のトラブル等の事情に応じて変更する場合（表2.2.4）と、エンジンメーカサイドで機種全体に関して性能改善等を目的として設計変更等がなされる場合（表2.2.5）とがある。

船主の変更目的は、一部にパワーアップがあるが、多くの場合燃焼改善である。

表2.2.4 船主サイドの NOx 関連パラメータの変更事例

No.	変更パラメータ	変更内容	変更による期待効果	変更目的
1	過給機	ノズルリング、ディフューザ仕様変更	空気量增加	燃焼改善
		ノズルリング、ディフューザ仕様変更		過給機マッチング
		ローター、ノズルリング、ディフューザ仕様変更		パワーアップ
	過給機 ターボコンパウンド システム搭載船	ノズルリング仕様変更	過給機汚損防止	燃焼改善
		タービンブレード仕様変更		
		パワータービン容量減少	過給機ガス量增加	燃焼改善
2	燃料弁	パワータービン撤去		
		過給機ローター変更		
		アトマイザ変更		燃焼改善
		ノズル噴孔角度変更 (内向噴孔)	スカッティング、 プローバイ解消・低減	燃焼改善
		ノズル噴孔数変更 (噴孔数追加)	シリンダライナ壁の温度低下	
		小噴孔径に変更		
3	噴射タイミング	大噴孔径に変更		パワーアップ
		本数、仕様変更（4本→2本）	メンテナンス簡略化	コストセーブ
4	排気カム	タイミング変更（VIT、FQS）		燃焼改善
		タイミング変更	メンテナンス簡略化	コストセーブ
5	圧縮シム	開タイミング変更	プローバック減少	燃焼改善
		形状変更		
6	ピストンクラウン	シム厚の変更	ピストンクラウン 頂面の温度低下	信頼性向上
		触火面形状変更	ピストンクラウン 頂面の温度低下	
		ハイトップランド型に変更	ピストンクラウン汚損防止	
		ピストンリング数変更		
7	シリンダカバー	冷却ノズル径拡大		信頼性向上
		足高カバーに変更		
8	エアクーラ	ドレンキャッチャー改良	スカッティング、 プローバイ解消・低減	信頼性向上
		腹巻取付、インシュレーショ ンチューブ挿入、長さ変更		
9	シリンダライナ	ローポート型に変更		燃焼改善
		温度設定変更		
10	ジャケット冷却水	形状変更	耐スカッティング性向上等	信頼性向上
11	ピストンリング			信頼性向上

表2.2.5 エンジンメーカサイドの NOx 関連パラメータ変更例

No.	変更パラメータ	変更目的（例）
1.	燃料弁噴孔、燃料噴射ポンプ、噴射タイミング変更、過給機仕様、圧縮比変更、ピストンクラウン	低負荷性能改善
2.	燃料弁噴孔、燃料噴射ポンプ、噴射タイミング変更、過給機仕様、圧縮比変更	排気温度低減
3.	燃料弁噴孔、過給機仕様、圧縮比変更、ピストンクラウン	潤滑油消費量対策
4.	燃料弁	性能改善(要目変更)
5.	過給機マッチング(ディフューザ、ノズル)交換	性能改善(要目変更)

(2) パラメータ変更が NOx 排出率に及ぼす影響

(a) エンジンメーカでの調査例

NOx テクニカルコードに挙げられたパラメータの中から変更後の NOx 排出率に及ぼす影響が大きいと考えられるもの、および変更頻度が高いと考えられるパラメータを選定し、その変更内容と NOx 排出率に及ぼす影響を調査した。

表2.2.6に選定したパラメータを示し、表2.2.7にパラメータの変更が NOx 排出率に及ぼす影響を示す。

パラメータのうち、燃料弁に関しては、その影響がよく調査されている。噴射角度（水平・垂直方向）やノズル穴数、ノズル径により NOx 排出率は大きく変化することがわかつており、その変化量も定量的に把握されている。

圧縮シムやピストンヘッド形状、シリンダカバー形状は、通常は単独で変更する場合はほとんどなく、組合せて変更する場合が多い。従って、これらのパラメータを単独変更した場合の影響評価は、あまり意味がない。一方、エンジンメーカーでは、シリンダ内最高圧力 ( $P_{max}$ ) のような指標で NOx 排出率を予測する方法を用いる場合が多いが、この  $P_{max}$  は部品段階、もしくは機関停止中に客観的な確認ができないため、NOx 排出率に関連としてテクニカルファイルに挙げられたパラメータには含まれていない。

現段階ではバックデータは充実していないが、今後第13規則対象エンジンの増加に伴って、バックデータが充実してくるのでバックデータのみから NOx 排出率を定量化することが可能になるとおもわれる。

表2.2.6 本研究で検討したパラメータ、変更内容

No.	変更内容	NOx 関連パラメータ
1	1) ノズル数 2) 角度（上向・下向、内向・外向） 3) 減速ノズル	燃料弁
2	1) 各社の実状	噴射タイミング (VIT)
3	1) ロータを含めた変更 2) ノズル・ディフューザのみの変更	過給機
4	1) 厚さ	圧縮シム
5	1) 寸法      2) 形状	ピストンクラウン
6	1) 寸法      2) 形状	シリンダカバー

表2.2.7 パラメータの変更内容と NOx 排出率の傾向

No.	パラメータ	NOx 排出率の傾向
1.	燃料弁	1) ノズル（噴孔）数 ・ノズル（噴孔）数の増加により減少（噴孔角度、総面積一定） 2) 噴孔径 ・噴孔径を小さく（噴射期間の増大）すれば NOx は減少する傾向 ・E 3 モードでの変化は殆ど無いが、各負荷での傾向が異なる。 3) 角度（上向・下向、内向・外向） ・噴霧角度の増加により減少（噴孔角度、数一定） ・内向きのほうが NOx 減少傾向 4) 減速ノズル ・噴孔径を小さくすれば減少
2.	噴射タイミング (VIT)	・タイミングを早めると増加 ・タイミングを遅くすると減少
3.	過給機	・給気圧力の増加により減少 （Pmax 等の調整が行われた場合）
4.	圧縮シム	・圧縮比の減少により増加 ・Pmax の修正を伴わなければ影響は少ない ・圧縮シム厚を減少し、噴射タイミングを早めると NOx 排出率は増加 ・圧縮シム厚を増加し、噴射タイミングを遅らせると NOx 排出率は減少
5.	ピストンクラウン	・触火面形状、圧縮比が変わらなければ影響ない ・単独で変更する可能性は非常に低い
6.	シリンダカバー	・触火面形状、圧縮比が変わらなければ影響ない ・単独で変更する可能性は非常に低い

(b) 過給機マッチング変更試験（実機試験）

実機を使用して過給機のマッチングを変更した場合の NOx 排出率の変化について調査した。コンプレッササイドはディフューザリングだけを変更し、タービンサイドはノズルリングだけを変更し、NOx 排出率がどのように変化するかについて注目した。

1) 過給機ノズルリング変更試験

本試験に供試したエンジンの概要と計測結果を表2.2.8に示す。

表2.2.8 ノズルリング変更試験エンジン概要と計測結果

試験内容	(i)スロート面積の大きい ノズルリングに変更	(ii)スロート面積の小さい ノズルリングに変更
実施時期	平成12年9月	平成12年8月
エンジンタイプ	B 1	B 2
過給機型式	T 2 (3台)	T 1 (2台)
ノズルスロート面積比	+ 4 %	- 4 %
NOx 排出率変化 (E 3換算)	+ 0.2 g/kWh	- 0.1 g/kWh

2) 試験結果（過給機ノズルリング変更試験）

図2.2.6にノズルリング変更による NOx 排出率の変化量を示す。

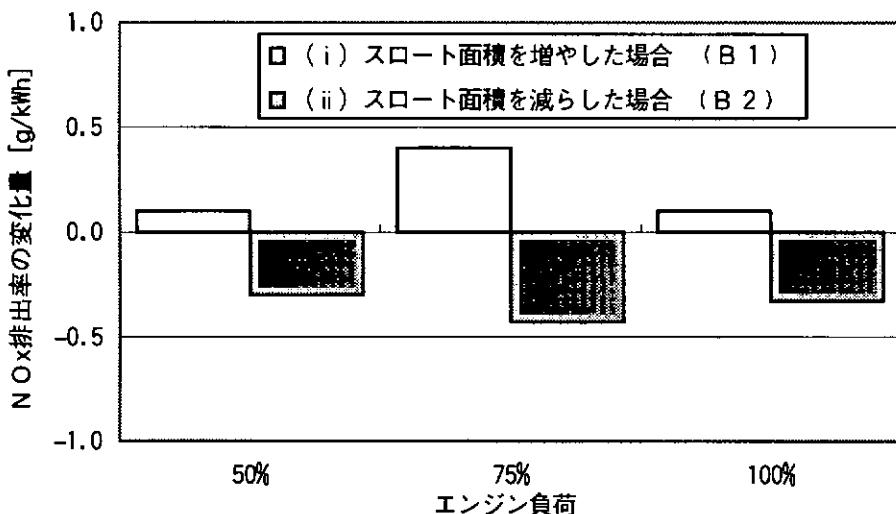


図2.2.6 ノズルリング変更試験結果

### 3) 過給機ディフューザ変更試験

本試験に供試したエンジンの概要と計測結果を表2.2.9に示す。

表2.2.9 ディフューザ変更試験 -エンジン概要と計測結果-

試験内容	(i)スロート面積の小さい ディフューザリングに変更
実施時期	平成12年8月
エンジンタイプ	B3
過給機型式	T3 (1台)
ディフューザスロート面積比	-6%
NOx排出率変化	-0.3 g/kWh

### 4) 試験結果（過給機ディフューザ変更試験）

図2.2.7にディフューザ変更によるNOx排出率の変化量を示す。

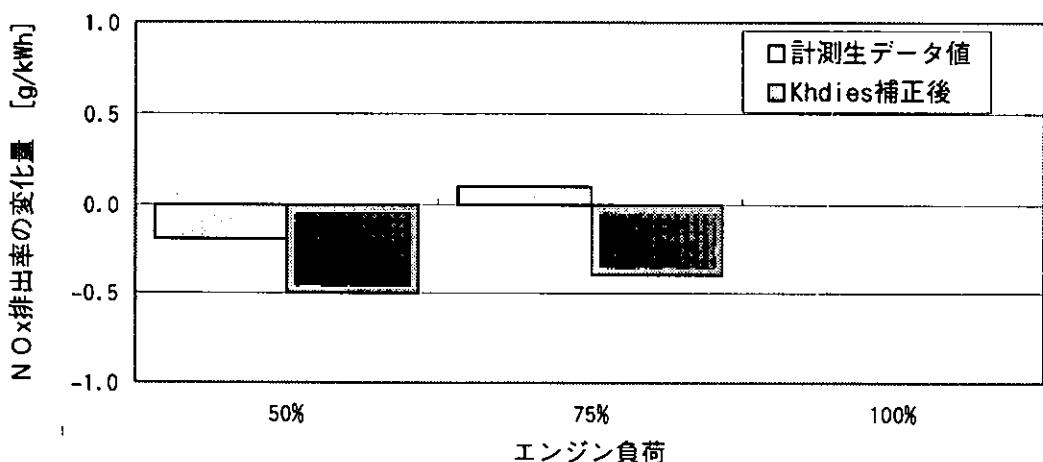


図2.2.7 ディフューザ変更試験結果

## 5) 試験結果まとめと考察

### a. ノズルリング変更試験

ノズルリング変更試験では、スロート面積を狭めると NO<sub>x</sub> 排出率は減少し、スロート面積を増やすと NO<sub>x</sub> 排出率は増加した。これは P<sub>max</sub> が各負荷で設定した値になるように燃料噴射タイミングを変更したためで、これにより NO<sub>x</sub> 排出率が減少したものと考えられる。

### b. ディフューザリング変更試験

ディフューザリング変更試験では、スロート面積の小さなディフューザに変更した結果、50%と75%負荷の NO<sub>x</sub> 排出率が低下した。スロート面積を狭める変更の場合、NO<sub>x</sub> 排出率は変化しない若しくは効率が低下するため微増と予想していたが、予想と若干異なる結果が得られた。この原因の一つとして、NO<sub>x</sub> テクニカルコードに記載されている温度・湿度に関する NO<sub>x</sub> 補正係数 (KHDIES) が不適切であることが考えられる。

### (c) SR235における調査例

SR235 「経年劣化に伴う機関性能ライフサイクルの研究」では、エンジン部品の劣化が運転性能に及ぼす影響が調査されており、実際に劣化を模擬した部品を使用して実機を運転し、NO<sub>x</sub> 排出率が測定されている。

表2.2.10に SR235 の実験結果（まとめ）を示す。

表2.2.10 部品の劣化と NO<sub>x</sub> の関係 (SR235報告書よりのまとめ)

No.	劣化部品および劣化内容	劣化の程度	NO <sub>x</sub> 排出率(%) 標準状態: 100%
1.	燃料弁 噴孔 Aタイプ (整備基準内) Bタイプ (整備基準外)	使用時間 A : 2500~3000hr B : 4800hr	A : 98 B : 80
2.	プランジャクリアランス拡大	28~38 μm	100.5~89
3.	排気弁吹抜	吹抜面積 1.5~6mm <sup>2</sup>	112~104
4.	過給機効率低下	低下率 4.7~6.5%	84~88
5.	掃気温度上昇	60°C	98
6.	掃気圧力低下 (掃気温度上昇時)	80%	85
7.	リング合口拡大 (通常 2.0~2.3mm)	Top : 22mm, 2nd : 張力なし	96
8.	ピストン冷却油量低下 (ピストン温度上昇)	90%	112
9.	燃料系劣化 組合せ 噴孔拡大、プランジャ摩耗+シート不良		86~87
10.	燃料系・燃焼系劣化 組合せ プランジャ摩耗+シート不良 +リング・ライナ劣化		78~90
11.	掃気系 劣化組合せ エアクーラ劣化+過給機劣化		94~95
12.	燃料・掃排気系劣化組合せ プランジャ摩耗+シート不良 +エアクーラ劣化+過給機劣化		95~96
13.	総合劣化組合せ		85~90

想定された劣化に対して、一部の例（排気弁の吹抜けおよびピストン温度上昇）を除けば、部品の劣化により NOx 排出率は減少している。従って日常的に発生する NOx 関連部品の経年劣化の場合、NOx 排出率は減少するものと考えられる。

なお、SR235における実機の運転条件は、実際の運航の場合と異なるのでこの結果の利用については注意が必要である。

### (3) NOx テクニカルコード上の解釈

NOx テクニカルコード上の解釈については、パラメータを変更する場合の具体的な取扱い等が NOx テクニカルコードに規定されていない。このため、従来の知見・データ等から推測して、変更後の NOx 排出率が、変更前と比べて加するか増加しないかによりその対応方法が異なると考えて検討を行った。

増加しないとみなされる場合には、社内試験データ等を活用し、増加しないことを証明することによって、検査員立会による承認試験は必要ないものと考えられる。

これに対し、増加するとみなされる場合には、基本的には承認試験が必要であると考えられる。ただし、あるパラメータの変更により NOx 排出率は増加するが、グループまたはファミリーにおいて親エンジンに変更はなく、かつ、メンバーエンジンの NOx 排出特性の序列に変更がない場合には、そのパラメータの変更によるファミリーまたはグループ全体の NOx 排出特性を定性的に把握できるものと考えられる。従ってこのような場合には、少なくとも 1 ファミリーまたはグループに対して承認試験を行うこととし、他のファミリーまたはグループに対して同様の変更を行う場合には、社内試験データの提出で認められるものと考えた。

#### (a) パラメータ変更時の作業・手続き

上記の解釈から予想したパラメータ変更時の作業・手続きフローを図2.2.8に示す。

基本的にはパラメータの変更を反映させる個々のエンジンに対して、そのパラメータ変更時の作業・手続きが必要となるが、陸上の同型のエンジンを使用した認証試験により適合が確認されれば、船舶に搭載されているエンジンに対しては、初回検査のみの実施により適合性は確認できるものと考えられる。

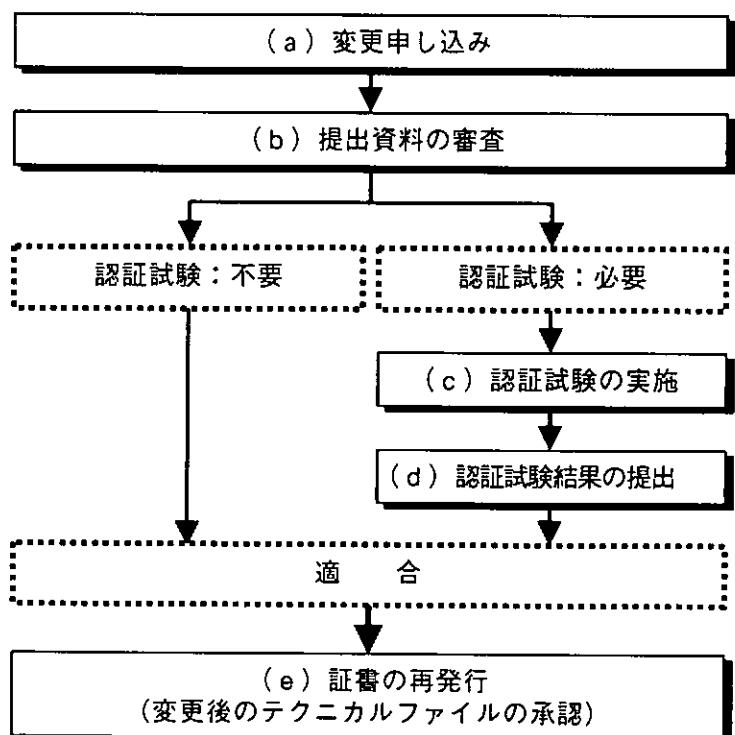


図2.2.8 パラメータ変更時の作業・手続きフロー

## 2.2.4 既存船適用時の対応

2000年1月1日より前に建造された船舶（既存船）に搭載されるディーゼルエンジンに「実質的改造」があり第13規則の規制対象船となった場合あるいはエンジンの改造により規制対象船となる可能性がある場合の対応策について検討した。

### (1) 既存船に搭載されるディーゼルエンジンへの適用に関する規定

附属書VI第13規則およびNOx テクニカルコードには、既存船に搭載されるディーゼルエンジンに対し第13規則が適用される場合が規定されている。これによれば2000年1月1日以後に「主要な改造」が行われる出力130kWを超えるディーゼルエンジンとなっており、「主要な改造」とは、新エンジンとの交換、10%を超える出力の増加および「実質的改造」を指す。ここで「実質的改造」は「簡易計測法により確定された現状の排出特性を、規定された許容値を超えて増加させるようなエンジンの改造を意味する。この改造には、これに限定されるものではないが、その運転や技術的パラメータ（例えば、カムシャフト、燃料噴射装置、吸気装置、燃焼室形状の変更又はエンジンのタイミングの調整）における変更を含む。」と定義されている。

従って、既存船に搭載される出力130kWを超えるディーゼルエンジンも、NOx テクニカルコードの規定に該当する実質的改造を行った場合には、附属書VI第13規則の適用を受けることになり、該当する NOx 排出制限値に適合させる必要が生ずる。しかし、NOx テクニカルコード等には既存船に実質的改造がある場合の詳細については明記されておらず、具体的な手続や対応方法も明示されていない。そこで、既存船が第13規則の NOx 排出規制対象船となる場合を予想し、その過程において発生すると考えられる対応方法や問題点について検討した。

### (2) 既存船の改造に関する技術的対応策

エンジンの改造は、主として燃焼改善の目的で改造が行われる。一般的に燃焼改善と NOx 排出率は相反する関係にあると考えられており、燃焼改善対策を実施することにより、NOx 排出率は増加すると考えて良い。「実質的改造」の対象となる既存船は船齢20年を超える場合も少なくなく、船齢等により対応の難易度は大きく相違する。ここではエンジンの製造時期等により次の3つのケースに分類した。

- 1) 同型エンジンが既に第13規則の規制対象エンジンとなっているエンジンではエンジン本体の改造や調整のみによる技術的対応は可能である。
- 2) 同型エンジンは第13規則の規制対象エンジンとなっていないが、生産が継続されているエンジンでは、陸上の実機において NOx 排出率に関連するパラメータ設定のための試験を要すが、技術的な対応は可能である場合が多い。
- 3) 既に生産が中止されているエンジンでは、エンジン本体のみの改造や調整による対応は困難であるが、NOx 低減装置の付加により対応可能である。

### (3) NOx 低減装置

エンジンの改造や調整のみで NOx 排出規制値を満足できない場合は、NOx 低減装置により対応することが出来る。ここでは既に実用化されている、選択接触還元法を用いた脱硝装

置 (SCR)、エマルジョン燃料 (水エマルジョン燃料) および水噴射を用いた NOx 低減装置について調査した。各装置の概要を表2.2.11に示す。NOx 低減装置は付加設備や多量の清水や薬品を必要とするが、NOx 排出率の大幅な低減が可能となる。なお、NOx 低減装置は設置スペースを必要とする場合やエンジンの大幅な改造が必要となることがあるので全ての船舶に付加できるとは限らない。

表2.2.11 NOx 低減装置の概要

No.	NOx 低減装置	NOx 低減率 (%) 薬品、水の消費量	必要な設備、改造等
1.	選択接触還元法 (SCR)	85 ~ 95 % 6~8g/kWh (アンモニア) 20g/kWh(尿素40% + 水60%)	1) SCR 反応塔 2) 薬品 (尿素、アンモニア等) 3) 薬品タンク 4) 制御装置 5) 造水装置 6) 清水タンク(要すれば) 等
2.	水エマルジョン	20 ~ 50 % 40~90g/kWh (水) 燃料消費率の20~50%	1) 燃料供給・噴射装置の改造 2) エマルジョン装置 3) 制御装置 4) 造水装置 5) 清水タンク(要すれば) 等
3.	水 噴 射	50 ~ 60 % 75~130g/kwh (水) 燃料消費率の40~70%	1) 水噴射用複合ノズル 2) 高圧水ポンプ 3) 制御装置 4) 造水装置 5) 清水タンク(要すれば) 等

#### (4) 実質的改造の場合の手続等のフロー

手續等については、改造前後の計測の具体的な手続き・適用方法が規定されていないため詳細は不明ではあるが、次の1)から5)の段階を踏むものと予想した。

- 1) 改造前の NOx 排出率の測定 (その後エンジンの改造作業)
- 2) 改造後の NOx 排出率の測定
- 3) 改造後の測定結果が改造前の結果を超えていた場合の再改造・調整

次の 2 つの対応方法を考えた。

- ・第13規則の NOx 排出許容限度以下にするための再改造・調整。
- ・改造前の NOx 排出率以下にするための再改造・調整。

この場合は第13規則対象船ではないので条約上の手續は不要となる。

#### 4) 検査の準備

必要書類の作成や NOx 排出率に影響を及ぼす部品への ID 番号の刻印等。

#### 5) 申請、検査、証書の発給認証および確認のための検査

検査は、「予備検査と初回検査を同時に行う船上試験」が要求されると考えた。なお、同型エンジンが既に第13規則の規制対象船になっている場合や、生産中のエンジンの場合では、他の同型エンジンの実績や陸上での試験結果が考慮されるものと思われるが、最終的な判断は船籍国主管庁が行うこととなる。

## 2.2.5 附属書VI発効時への対応

附属書VIの第13規則は2000年1月1日以後の建造船舶から遡及適用されることになっているので、既に NOx 規制の対象となるエンジンを搭載した船舶が就航しているが、第13規則や NOx テクニカルコードでは発効時までの対応方法に関して規定されていない。そこで便宜的な手段として、船籍国主管庁から鑑定書発行の代行権限を与えられた船級協会が、希望する船主に対して NOx 排出率が規定内にあったことを示す鑑定書を発行している。鑑定書には予備検査に対応するものと、初回検査に対応するものがあるが、これに加え初回検査鑑定書が定期的な検査によって有効に維持されているかの証明も重要である。附属書VI発効時への対応方法としては、予備検査鑑定書および初回検査鑑定書の有無およびその初回検査鑑定書の有効性によって最終的には次の3つの方法が取られると考えられる。

- 1) 予備検査および初回検査鑑定書を所有し、かつ定期的な検査により初回検査鑑定書が有効に維持されている場合は、予備検査鑑定書はそのまま EIAPP 証書に切替る考えられる。また、NOx に関する船上初回検査を行う必要はないものと考えた。ただし、この検査を船級協会が行うかどうかは船籍国主管庁の指示（主管庁代行権限の有無）によるものである。
- 2) 予備検査鑑定書のみを所有している場合、もしくは予備・初回検査鑑定書とも所有しているが、初回検査以後定期的な検査を実施しておらず無効となっている場合は、予備検査鑑定書はそのまま EIAPP 証書に切替る考えられるが、初回検査は実施することになると考えられる。検査は NOx テクニカルコードに規定されるパラメータチェック法または簡易計測法のいずれかの検査を行うことになる。
- 3) 予備検査および初回検査鑑定書とも所有していない場合は、NOx テクニカルコードの規定に従い、予備検査と初回検査を同時に使う船上試験が要求されるものと考えられる。

EIAPP 証書および IAPP 証書についての責任および権限は船籍国主管庁が持っており最終的な判断は、船籍国主管庁が行うこととなるが、以上のことから推測すると、少なくとも予備検査鑑定書は所有しておいた方が良いと思われる。

## 2.2.6 情報収集

### (1) 欧州の NOx 規制に関する実態調査

本研究部会の委員2名が、欧州の船級協会、エンジンメーカー、船会社を訪問し付属書VIの運用に係わる欧州の動向・見解を調査した。

- 1) 期間 : 平成11年9月12日(日)～9月18日(土)
- 2) 訪問先、訪問日：

a. 船主A (英国 9月13日)	b. 船級協会B (英国 9月13日)
c. 船主C (デンマーク 9月15日)	d. エンジンメーカーD (デンマーク 9月15日)
e. 船主E (ノルウェー 9月16日)	f. 船級協会F (ノルウェー 9月17日)
- 3) 調査結果

全般的には、各団体とも予想に反し、さほど関心が無いように感じられ、特に大手の船主において関心度が低いことが印象的であった。船級協会では各国主管庁の代行権限を得る等の行動を起してはいるものの、各船級協会間での横通しあるいは、実運用に関連した主管庁とのコンタクトはされていない。いずれの業種ともそれぞれが現在しなければならないことを必要に応じて実施しているという印象であり、従って全体を纏めよう

とする動きは伺えない。

欧州の実態を調査し、国際間の統一認識を確立することの必要性を感じた。また、本規制の円滑なる運用を目指す本研究部会の目的、意義の重要さを強く再確認した。

## (2) 船級協会との意見交換会

第13規則は、2000年1月1日以後に建造されたディーゼルエンジンに遡及適用されることになっていることから、希望する船主に対しこれらのエンジン（船舶）の検査立会や鑑定書の発行等の実務が船級協会により為されている。そこで世界を代表する4つの船級協会を招き、第13規則に関する鑑定書の発行等の現実的な問題をテーマとした意見交換会を開催した。

（参加者：26名、うち船級協会 6名）

各船級協会とも、約300～900台のエンジンについて鑑定業務を実施しており、その殆どが予備検査に相当するものである。この段階では、少数の例を除きほぼ問題なく鑑定業務が行われている。また代行権限については、各船級協会はそれぞれ13から33ヶ国の主管庁からその権限を与えられている。

発効時への対応としては、予備検査に相当する鑑定書は取得しておいたほう良いというのが共通の見解であるが、初回検査に相当する検査については、附属書VIが未発効であることや、発効時に改めて要求されるとの見方が強く、現時点では必要ないであろうとしている。附属書VIが発効していないので、NOx排出規制に関する詳細については、発効時の各諸官庁の意向に委ねることとなる。

なお、発効前であっても NOx 排出率に影響を及ぼすパラメータに変更があった場合はその履歴を正確に記録、保管しておくことが大切であるとの助言を受けた。

IMOによるNOx排出規制に関する問題について、関係する業種、特に複数の船級協会を交えて意見交換する機会はこれまで無かった。この意見交換会を通じ、共通の理解あるいは相違点を確認することができた。

## (3) IMO NOx 規制に関するアンケート調査

NOx テクニカルコード等を実運用する際に発生することが予想される問題点を幅広く抽出するために、アンケート調査を実施した。（表2.2.12）

なお、附属書VIには触れられていないが、今後予想される問題として、既存船への NOx 規制の導入、NOx 規制と CO<sub>2</sub>の規制との関係および地域的な排気ガス規制に関する設問を設けた。

調査の結果、NOx 規制への適合認証を得るための方法（試験台試験、エンジンパラメータチェック法、簡易船上計測法、船上直接計測および監視）の具体的な手順を中心に多くの問題点が指摘された。

またアンケートの結果、次の項目に関し業種間で意見が一致していないことが判明した。附属書VIおよびNOx テクニカルコードの円滑な実運用を行うためには、特にこれらの項目に関し今後の調整が必要と考える。

- 1) テクニカルファイルの統一
- 2) 試験台での NOx 計測手順
- 3) エンジンパラメータチェック法
- 4) エンジンメーカー以外の部品の使用

表2.2.12 アンケート調査表の依頼回答状況

	合 計	エンジンメーカー	造船所等	船 主	船級協会	研究者
依頼数 (名)	85	25	19	28	8	5
依頼数 (団体)	74	22	18	25	5	5
回答数 (名)	65	18	19	18	6	4
回答数 (団体)	58	16	18	16	4	4
回答率 (%)	76.5	72.0	100.0	64.3	75.0	80.0

## 2.2.7 問題点の整理

NOx テクニカルコード等の実運用に関する主な問題点は次の通りである。

### (1) 書類に関する問題点等

- 1) テクニカルファイル更新時の対応：パラメータの変更や図面の更新や改正があった場合の NOx 排出率との照合方法や、親エンジンの変更がある場合の対応等の記載が不充分である。
- 2) パラメータチェックリスト：エンジンパラメータチェックリストおよび記録簿の各項目についての承認およびテクニカルファイルとの照合が必要である。

### (2) 検査に関する問題点等

- 1) エンジンパラメータチェック法：船上検査としてエンジンパラメータチェック法を採用した場合、NOx 関連部品の適合性の初期確認をいつ実施したらよいかが明確でない。ID 刻印場所は汚損や開放整備要領等を充分に考慮した上で決定する必要がある。
- 2) 簡易船上計測法：時間的な制約、海域の設定、計測員の手配、当日の気象等に大きく左右され、排出率計算に即時性が要求されるため、充分な準備と慣れが必要となる。また、再計測実施を行うことは現実的には極めて困難と思われるため、排出率が規制値を超過した場合の対応策を考えておく必要がある。

### (3) 測定に関する問題点等

- 1) 計測器の校正：校正間隔は非常に短いと思われる。再検討が必要である。
- 2) 計測器の要求仕様：簡易船上計測で使用出来る可搬性のある測定器の機種が少ない。

### (4) 運用に関する問題点等

- 1) パラメータ変更時の対応について：パラメータの変更があった場合の具体的な取扱いについて明記されていない。パラメータの変更は、少ながらぬ頻度で発生すると考えられるが、変更に至る経緯により、事前に取り得る手段が異なってくるためより具体的な指針が必要である。
- 2) 既存船への第13規則の適用について：解決が困難な以下の問題点があることから、テクニカルコードに規定された既存船への適用については、これを削除するか、または実現可能とするための大幅な見直しを提案したい。
  - a. 実質的改造があるか否かの調査を定期的に実施する必要があると考えられるが、このためには既存船全船について、使用部品等のリストアップを行い、定期的な照合

作業が必要になる。これは極めて非現実的な作業である。

- b. 緊急時対応の場合は事前の計測は殆どの場合実施不可能である。
  - c. エンジン本体の改造のみにより NOx 排出率を許容範囲以下に低減することは、エンジンの信頼性を阻害することとなりかねない。また、NOx 低減装置は増設スペースの問題等がある。このため、全ての船舶が何らかの方法で NOx 排出規制に対応できるとは限らない。
- 3) 発効時への対応：主管庁の意向が現時点では不明であるため、場合によっては、鑑定書が無効となる懸念がある。どのような事前対応を実施しておけば良いかに関する共通のガイドラインの策定を提案したい。
- 4) 救済策（実測を伴う場合）：パラメータは承認範囲内であっても、実測値が許容値を超えるケースは現実的に起り得るが、NOx 排出率が規制値を超えていた場合は、船用ディーゼルエンジンの運転は禁止されている。これは船舶の運航に直接関係することから、実測値が規制値を超えていた場合の対応策に関する共通のガイドラインの策定を提案したい。
- 5) いわゆる海賊部品の扱いについて：本研究では具体的には扱わなかったが、現実的な問題として今後関係者間での検討・意見調整が必要である。

第13規則や NOx テクニカルコードは、親エンジンの選定や予備検査等の実際に作業が発生している部分については、幾つかの問題点はあるものの実運用可能と判断できる。しかし就航後に発生するであろうパラメータの変更やテクニカルファイルの更新、発効時への対応、既存船への適用等の明記されていない部分に多くの問題点を含んでいる。従って、就航時に起り得る NOx 排出率に影響を及ぼす種々の状況について細部に亘る見直しを行い、より充実した規制とすることを望みたい。

## 2.2.8 費用の試算

本研究で検討を実施したパラメータ変更時や、既存船適用時、附属書VI発効時に予想される費用の試算を、以下の検査に要する費用をもとに行った。

- 1) 試験台上試験、
- 2) パラメータチェック法、
- 3) 簡易船上計測法、
- 4) 船上同時試験

表2.2.13に各検査の試算条件および試算結果を示す。

パラメータ変更時への対応費用等はこれらの試算結果を組合せることによって試算することが出来る。

なお、本試算はおおよその推測値であり、実際の検査等ではその条件により大きく変動する可能性がある。

表2.2.13 各検査に要する費用 (東京湾内港で、燃料弁の変更検査を実施した場合)  
合計の下段( )はオフハイヤ費を含んだ費用

検査方法	船 工 業 用 機 器 出 力 ( kW )	費用(千円)						
		パラメータチェック費	陸上試験費(親エンジン)	簡易船上計測費	時船上試験費(予備/初回検査)同	船級検査費	オフハイヤ費(一日分)	
パラメータチェック法 (1) *1	低速 16,040kW (バルカー)	500				300	—	800
	中速(1) 4,500kW (—)	560				140	—	700
	中速(2) 1,545kW (—)	600				140	—	740
パラメータチェック法 (2) *2	低速 16,040kW (バルカー)	500	1,900			800	—	3,200
	中速(1) 4,500kW (—)	560	3,000			450	—	4,010 (—)
	中速(2) 1,545kW (—)	600	1,800			450	—	2,850 (—)
簡易船上計測	低速 25,081kW (V L C C)			2,250		600	4,500	2,850 (7,350)
	中速(1) 4,500kW (—)			4,000		600	—	4,600 (—)
	中速(2) 1,545kW (—)			1,800		600	—	2,400 (—)
同時船上試験 (予備検査) +(初回検査)	低速 27,030kW (V L C C)				3,900	750	4,500	4,650 (9,150)
	中速(1) 4,500kW (—)				4,000	600	—	4,600 (—)
	中速(2) 1,545kW (—)				2,600	600	—	3,200 (—)

\*1: パラメータチェック法(1) --- 変更に関するバックデータがある場合

\*2: パラメータチェック法(2) --- 変更に関するバックデータがなく、  
陸上の親エンジンでの試験を伴う場合

## 2.3 成果の活用

### 2.3.1 成果

#### (1) 検査等に関する確認

NOx テクニカルコード等に定められた検査のシミュレーション等を行うことによって、第13規則や NOx テクニカルコードは、親エンジンの選定や予備検査等の実際に作業が発生している部分については、幾つかの問題点はあるものの実運用が可能であることを確認した。

#### (2) 技術的な対応方法の明確化

NOx に影響を及ぼすパラメータの変更が NOx 排出率に及ぼす影響を調査し、現時点で判明している影響の程度を明らかにした。また、NOx 低減装置について概要を把握した。

### (3) 対応策の検討

附属書VIや NOx テクニカルコードで明確に規定されていない事例の扱いについて幾つ期のケースを想定して検討し、最も可能性の高い対応方法を予想した。合せて対応に要する費用を試算した。

### (4) 問題点等の抽出

船舶就航後に行われるパラメータの変更やテクニカルファイルの更新、また発効時への対応や2000年1月1日より前に建造された既存船への適用等、附属書VIや NOx テクニカルコードに明記されていない部分に多くの問題点を含んでいることが判明した。主な問題点は以下の通りである。

#### (a) 書類に関する問題点等

- 1) テクニカルファイル更新時等の扱いや対応に関する記載が不充分であり、またエンジンパラメータチェックリストとの照合が必要である。

#### (b) 検査に関する問題点等

- 1) エンジンパラメータチェック法における NOx 関連部品の適合性の初期確認が規定されていない。
- 2) 簡易船上計測法は、時間的制約があり気象等に左右され、排出率計算に即時性が要求される。また規制値を超えた場合の対応策が規定されていない。

#### (c) 測定に関する問題点等

- 1) 計測器の校正間隔が非常に短いと思われる。再検討が必要である。
- 2) 簡易船上計測で使用出来る機種が少ない。

#### (d) 運用に関する問題点等

- 1) パラメータの変更の具体的な扱いが明記されていない。変更に至る経緯により、事前に取り得る手段が異なってくるためより具体的な指針が必要である。
- 2) 既存船への第13規則の適用には、a. 使用部品等のリストアップおよび定期的な照合作業が必要であること、b. 緊急時は事前計測は殆ど不可能であること、c. 全船舶が NOx 排出規制に対応できるとは限らないこと等、解決が極めて困難な問題点がある。既存船への適用は削除するか実現可能とするための大幅な見直しを提案した。
- 3) 発効時への対応方法が規定されていなため共通のガイドラインの策定を提案した。
- 4) NOx 実測値が許容値を超えた場合の対応について規定されていなため共通のガイドラインの策定を提案した。
- 5) いわゆる海賊部品の扱いについては現実的な問題として今後関係者間での検討・意見調整が必要である。

### 2.3.2 成果の活用

船舶を発生源とする大気汚染防止のため国際的な規制を行い、地球環境を保全することは非常に意義深い。しかし規制に当たっては、何よりもまず附属書VIが効果的かつ公平に遵守され

ることが前提である。本研究により、現実的にすぐにでも起り得る問題点が数多くピックアップされたが、今後はこれらの指摘された多くの問題点を一つ一つ解決して行く作業が必要であろう。このことによって附属書VIをより効果的かつ公平な規制とすることが出来る。

前述の通り、附属書VIの批准作業が遅れているが、今後予定されている発効要件見直し時等に、効果的で実体に則した提言を日本が行う上での基礎資料として本成果が活用されることを望みたい。また、エンジンメーカーや造船所、船主、船級協会等の関係業種にあっては、附属書VIの運用に際し、個々のあるいは共通の現場で発生する諸問題を解決するための資料として活用されることを希望する。

本研究部会で実施した研究のうち附属書VIや NOx テクニカルコードに明記されていない事項については、最も可能性が高いと考えられる場合を想定した。

ただし、附属書VIや NOx テクニカルコード等の運用に関する裁量権は船籍国主管庁に帰属するので、最終的には主官庁の指示に従うこととなる。

### 3. EGR システムの船用化研究

#### 3.1 研究の内容

NO<sub>x</sub> 低減のキー技術である EGR を大型船用エンジンに導入するため、予測される汚れを防止し、発生するトラブルを未然に防止する技術として、タンカーのイナートガスシステムで長期間使用されてきた IGS スクラバーを、海水洗浄排ガス浄化装置として使用できる可能性や課題を研究することになった。

IGS スクラバーが対象としてきた排ガスは、数百ミクロンのばいじんが大半と言われているボイラー排ガスであるのに対し、数十ミクロン以下のばいじん粒子主体のディーゼル排ガスを対象にすると排ガス浄化性能上、種々の問題が生じると考えられる。

そこで本研究では NO<sub>x</sub> 低減率50%が実現できる EGR 率相当分のガス容量を前提にして、必要な浄化効率が得られるスクラバー開発を目指して次の項目を実施した。

- (1) EGR の課題調査
- (2) 大型船用ディーゼルエンジンばいじん粒子調査
- (3) スクラバーの原理とばいじん除去効率試算及び試験用スクラバー試作
- (4) スクラバーばいじん除去性能改善法検討
- (5) EGR 評価試験法
- (6) EGR 燃焼試験及びスクラバー単体試験

#### 3.2 研究の成果

##### 3.2.1 EGR の課題調査

大型船用機関で EGR を実施する場合に問題が発生する主たる場所は、ピストンリング、シリンドライナ、ピストン棒、排気弁等の摺動部、過給機のタービンとコンプレッサー部の回転部等と予測する。本研究では EGR の及ぼす影響が大きいピストンリングとシリンドライナに限定して EGR の影響度を文献調査した。

その調査結果の一例を図3.2.1に示す。<sup>\*1</sup>

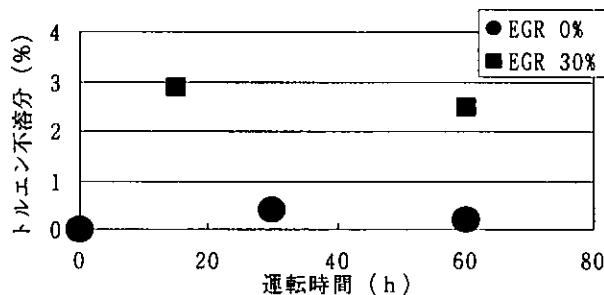


図3.2.1 EGR とトルエン不溶分

EGR によりシリンドラ油中に燃焼生成物の混入量が増加し、これがリング・ライナの摩耗を増加させる原因の一つになっていると予測される。EGR しない場合も排ガス中の煙が増加するとピストンリングの摩耗が増加するが、<sup>\*2</sup>その原因是油中に研磨剤の役割を果たすカーボン等の燃焼生成物が増加するからである。この摩耗増加を防止する有力な武器がスクラバーの排ガス洗浄と考えている。

### 3.2.2 大型船用ディーゼルエンジンのばいじん粒子調査

大型船用ディーゼルエンジンにおいてC重油が燃焼した時の排ガス中のばいじん粒子径分布が不明のままでは対象とするスクラバーの性能を検討することは出来ない。そこで、本研究の単筒実験機関でC重油燃焼時の排ガスのばいじん粒度分布を計測した結果を図3.2.2に示す。<sup>\*3</sup>

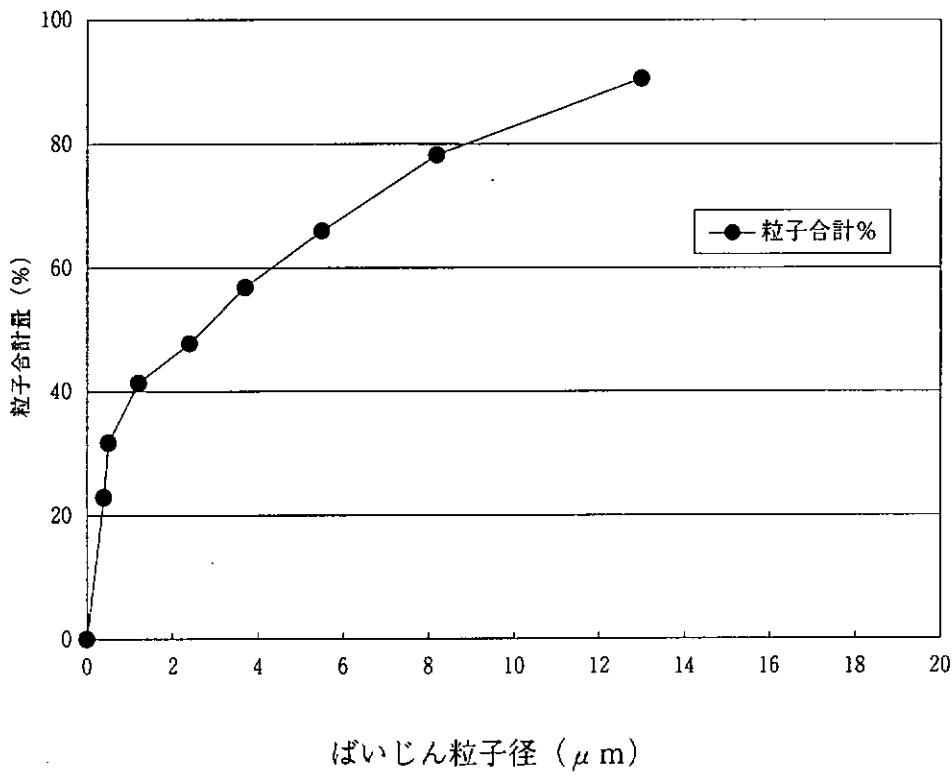


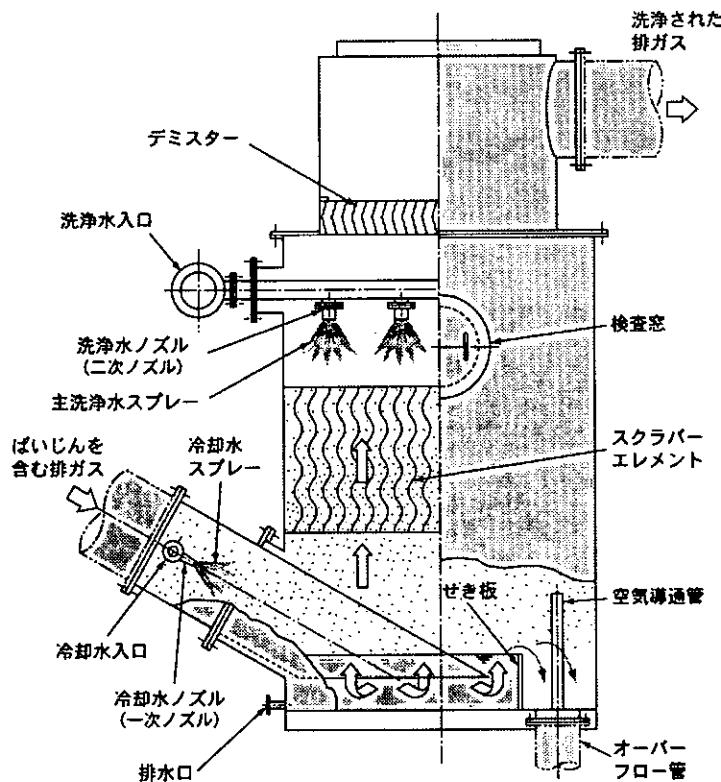
図3.2.2 C重油燃焼時のばいじん粒子径分布

この測定結果よりC重油の排ガスを構成するばいじんは2  $\mu\text{m}$ 以下が概略45%であり、形成されるシリンダ油膜厚さや摺動面粗さ(2  $\mu\text{m}$ )を考慮すると除去すべき有害ばいじん径は2  $\mu\text{m}$ 以上と考える。このため、ばいじん除去効率としては50%以を目指とする。

### 3.2.3 スクラバーの原理とばいじん除去効率試算及び試験用スクラバー試作

今回試作したスクラバーの基本構成を図3.2.3に示す。スクラバー入口部に流入する高温の排ガスに対し一次ノズルで冷却水を噴射しプレクーリングと簡易脱硫を行う。せき板部分の水シールを経て、充填層である折れ板型のエレメント内に流入する。この屈曲した壁に粒子が慣性衝突することでばいじんが付着除去される。また二次ノズルからの洗浄水がエレメントの表面を常時流れしており、残存のSO<sub>x</sub>が吸収される。こうして浄化された排ガスは出口にあるデミスターで水滴を落とし下流側に清浄ガスを供給するのがスクラバーの作用である。

このスクラバーのIGSシステムにおける実績はSO<sub>x</sub>除去効率90%以上、ボイラー(数百  $\mu\text{m}$ )の場合、ばいじん除去効率は90%以上と言われている。



IGS (イナートガスシステム) スクラバーの基本構成

図3.2.3 試験用に試作したスクラバーとその構成

この充填塔式スクラバーのディーゼル排ガスに対する SO<sub>x</sub> 除去効率は90%以上が期待できるがばいじん除去効率に対しては、どの程度が期待可能かを予測した。スクラバーエレメントの代表寸法であるエレメント間隔 (P) をパラメータに試算したのが図3.2.4である。

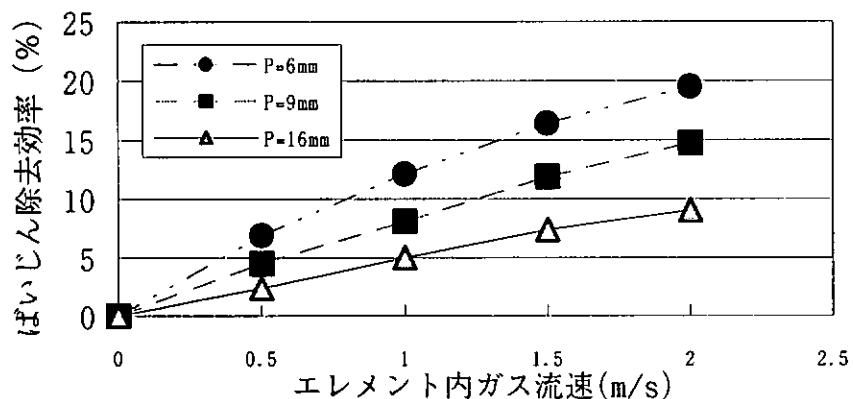


図3.2.4 エレメント間隔 (P) と除塵効率

NO<sub>x</sub> 低減率50%時の EGR 率を25%程度と仮定するとガス流速1.5m/s であるからばいじん除去効率は、入手可能最小間隔 P = 6 mm でも16~17%である。これをディーゼルばいじん粒子径分布 (図3.2.2) に対応させるとばいじん粒子径で11 μ m以上が捕集できる程度と予測される。この除去効率は目標に比較して十分な性能ではないと判断した。

### 3.2.4 スクラバーばいじん除去性能改善法検討

目標とするばいじん除去効率を確保するには折れ板方式の充填塔スクラバーの慣性衝突では十分でない。そこで洗浄水を高圧高速で排ガス中に噴射させて水滴と微細なばいじん粒子を衝突させて肥大化させ除去するジェットスクラバーの有効性を試算検討した。その結果を図3.2.5に示す。

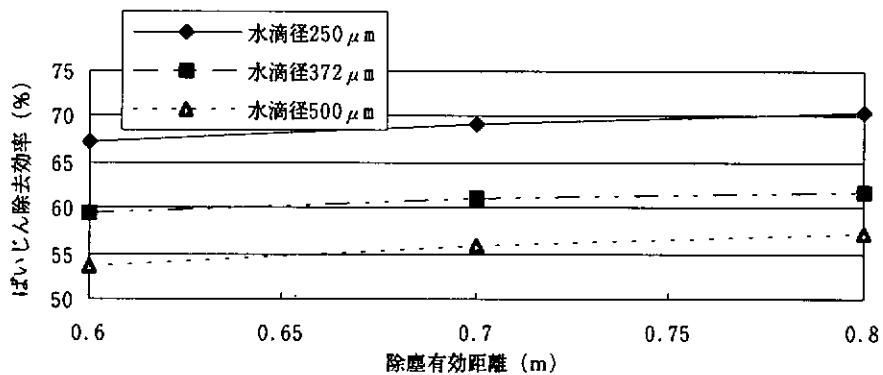


図3.2.5 ジェットスクラバー部の予測性能

噴射する水滴径が $500\text{ }\mu\text{m}$ 以下に出来れば目標とするばいじん除去効率50%以上が達成可能である見通しが得られた。

そこで図3.2.3の一次ノズルを高圧化且つ、複数の噴射ノズルを装着できる構造にしたジェットスクラバー主体の改善型スクラバーを試作した。

なお、選定したノズルは噴射圧力が $0.7\text{ MPa}$ で水滴径の実測値が

算術平均径 :  $153\text{ }\mu\text{m}$

面積平均径 :  $194\text{ }\mu\text{m}$

体積平均径 :  $241\text{ }\mu\text{m}$

ザウター平均径 :  $372\text{ }\mu\text{m}$

のものを使用した。

### 3.2.5 EGR評価試験法

本研究ではEGRに対するスクラバーの効果を評価するため、スクラバー単体による浄化効率試験及び実験機関連続運転によるリング・ライナ摩耗試験を行った。特に実験機関連続運転でのリング・ライナー摩耗を計測評価するに当たっては、馴染みを加速させるため鉄製ライナーはホーニング仕上げ、ピストンリングは馴染みを模擬したバレル形状のメッキ無しリングを使用した。この組み合わせの場合は僅か1時間程度の摺り合わせで比較可能という実績があり、相対比較を行った。また、運転時間としては21時間とし、実施した連続運転のパターンを図3.2.6に示す。また、スクラバー単体試験では実験機関を定格で運転し、その排ガスをスクラバーに導入した。この時の浄化性能を評価する計測は表3.2.4に示す方法で実施した。

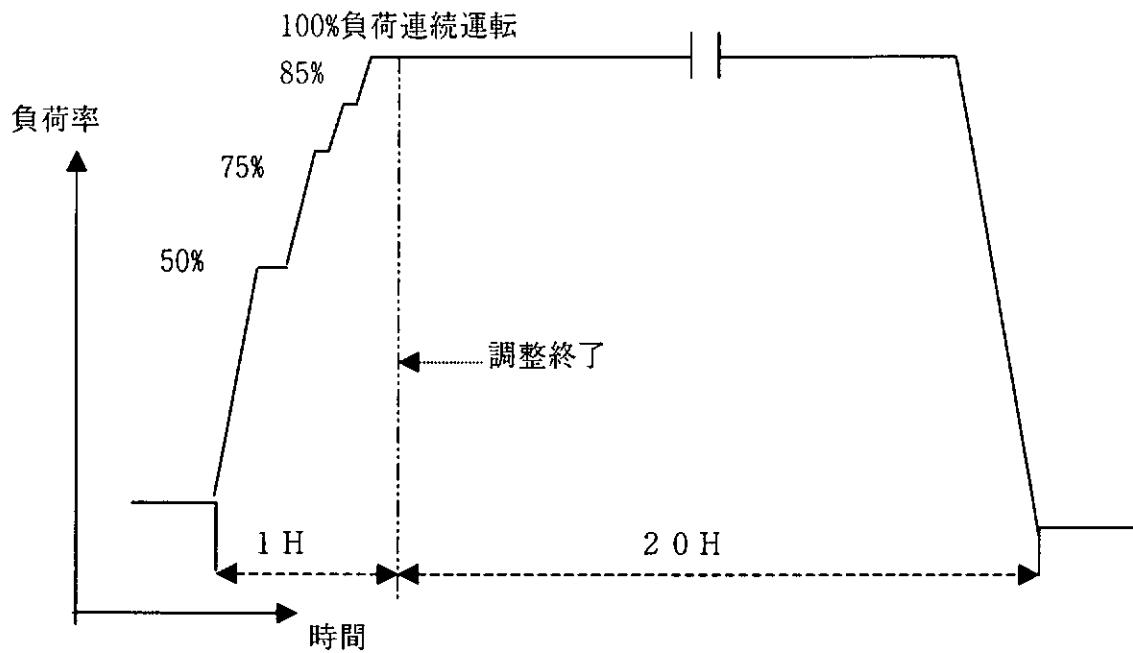


図3.2.6 21時間連続運転パターン

試験に使用した実験機関の主要目、C重油性状及びシリンダ油性状を表3.2.1～表3.2.3に示す。

表3.2.1 実験機関主要目

名称	単筒実験機関	N C 3 3
ボア	mm	330
ストローク	mm	1400
試験出力	kW	499
エンジン回転数	$\text{min}^{-1}$	157.8
正味平均有効圧力	M P a	1.59
平均ピストン速度	m/s	7.35
筒内最高圧力	M P a	17.6
燃料噴射系 弁数 開弁圧力 静的噴射時期		2 3.2 M P a 0° (上死点)
燃焼系 シリンダーカバー ピストン		2燃料弁オリジナル 浅皿型標準ピストン
シリンダ油		注油率 1.1 g/kWh

表3.2.2 C重油性状

密度 g/cm <sup>3</sup>	動粘度 mm <sup>2</sup> /s	硫黄分%	残留炭素%	真発熱量 j/g
0.986	176	2.34	10.1	40510

表3.2.3 シリンダ油性状

名 称	密度 g/cm <sup>3</sup>	動粘度 mm <sup>2</sup> /s	S A E	TBNmgKOH/g
S/DZ70	0.925	217/40°C	50	70

表3.2.4 スクラバー性能計測法

計測項目	計測場所	計測器または計測法
流入ガス量	排ガスクーラ出口	オリフィス
新気流量	サーボタンク入口	オリフィス
ばいじん量	スクラバー前後	円形滤紙法 (JISZ8808)
水滴量	スクラバー後	吸湿管法 (JISZ8808)
SOx	スクラバー前後	沈殿滴定法(JISK0103) 比濁法(JISK0103)
洗浄水量	洗浄水ポンプ出口	流量計
P H	洗浄水タンク	P H計

### 3.2.6 EGR 燃焼試験及びスクラバー単体試験

#### (1) IGS スクラバー単体試験結果

実船イナートガスシステムの標準仕様であるエレメント間隔  $P = 16\text{mm}$  を  $P = 9\text{mm}$  に換えて単体試験した結果を表3.2.5に示す。

表3.2.5 IGS スクラバー単体試験結果

洗浄水量 一次 t/h	洗浄水量 二次 t/h	ばいじん 除去効率 %	SOx 除去効率 %	水滴捕集 効率 %	エレメント 仕様ほか	洗浄水 仕様
1. 0	17. 6	17	98	100		
1. 0	18. 0	8	98	100	$P = 9\text{mm}$	清水
0. 8	18. 0	4	98	100		

この結果、従来方式の IGS スクラバーにおいても SOx 除去効率とデミスターの水滴捕集効率は問題無い良い性能である。しかし、ばいじん除去効率に関してはデータにバラツキがあるが平均で10%、最大で17%である。これは図3.2.4で予測した12%に極めて近い値である。以上のことから IGS スクラバーの実態のばいじん除去効率としても図3.2.4予測値にほぼ近い値と判断できる。この程度の除去効率が摩耗上、どの程度の効果を示すかが問題である。

#### (2) 改善型スクラバー（ジェットスクラバー）の単体試験結果

この改善型スクラバーの単体試験に際しては洗浄水として海水を使用し且つ、スクラバーエレメントの必要性の有無を確認する試験を実施した。その結果を表3.2.6に示す。

改善型スクラバーの場合も SOx 除去効率と水滴捕集効率は全く問題無いことが明白である。特に今回はスクラバー出口で排ガス中の塩分濃度を計測した結果、洗浄水に海水を使つても、ガス中には 1 ppm 以下という値であることがわかった。一般に海上では 2 ~ 3 ppm の塩

分が空気中に含まれているのでスクラバーを EGR ラインに設置しても、何らの問題も無いことが証明された。

一方、課題のばいじん除去効率はスクラバーのエレメントの有無に関係なく 70% 程度の除去効率を示すことがわかった。

一次ノズルをいわゆるジェットノズル化したことが目標を上回るばいじん除去効率を得る結果になった。

また、エレメントを外しても脱硫率に変化が無いことから、ジェットスクラバーパー部で十分な脱硫が行われていると予測できる。

表3.2.6 改善型スクラバー単体試験結果

洗浄水量 一次 t/h	洗浄水量 二次 t/h	ばいじん 除去効率 %	SOx 除去効率 %	水滴捕集 効率 %	エレメント 有無	ガス中塩分 濃度 ppm
4. 9	14. 3	69	98	100	P=6mm 有 同上	0. 67 0. 44
5. 0	15. 0	80	98	100	なし	0. 17
5. 0	7. 5	71	98	100	同上	0. 10
4. 1	15. 0	67	98	100	同上	0. 31

#### (1) 21時間実験機関連続運転試験結果

スクラバーの浄化性能をエンジンサイドから確認する方法として21時間の連続運転を行いピストンリングとシリングライナーの摩耗に及ぼす効果を確認した。実施した試験ケースを表3.2.7に示す。

表3.2.7 試験ケース

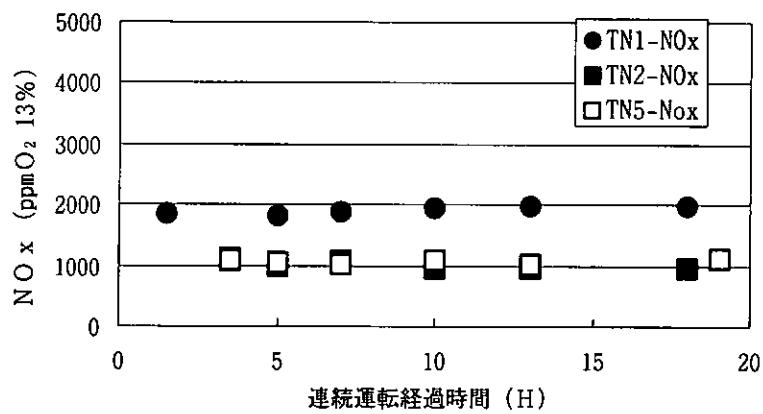
試験番号	試験時 EGR 率 (%)	スクラバー仕様	備考
T N 1	0	なし	
T N 2	23	改善型スクラバー	P=6mm
T N 3	22. 5~23	I G S スクラバー	P=12mm
T N 4	22. 5~23	なし	
T N 5	22. 5~23	なし	

なお、実験機関の連続運転ではスクラバーに洗浄水として清水を使用した。

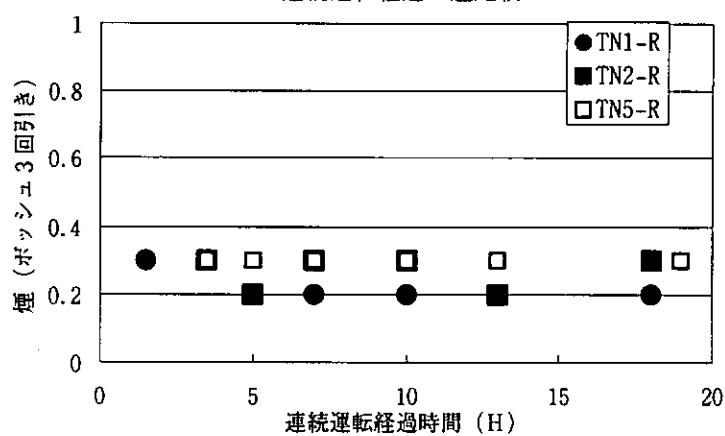
代表的な試験ケースとして T N 1, T N 2 及び T N 5 を選定し EGR 有無の連続運転中の性能値の変化を図3.2.7に比較して示す。

この結果、EGR により NOx が20% 低減し燃費が 2 % 増加するが運転中は安定していることが明白である。

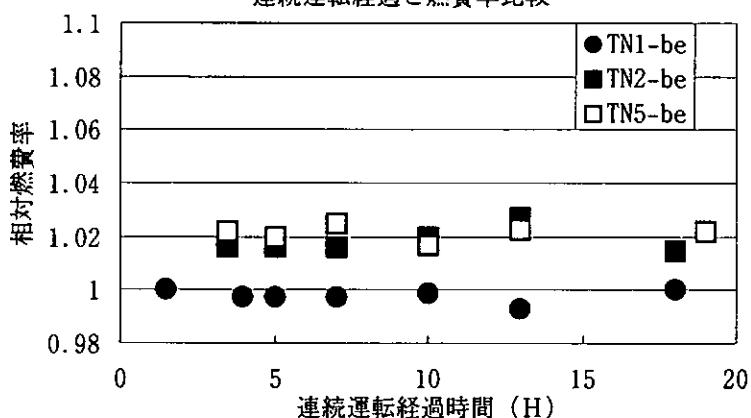
連続運転経過と NO<sub>x</sub> 比較



連続運転経過と 煙比較



連続運転経過と燃費率比較



### 3.2.7 EGR 有無の燃焼性能変化

全試験のピストンリングの摩耗データを図3.2.8に示す。

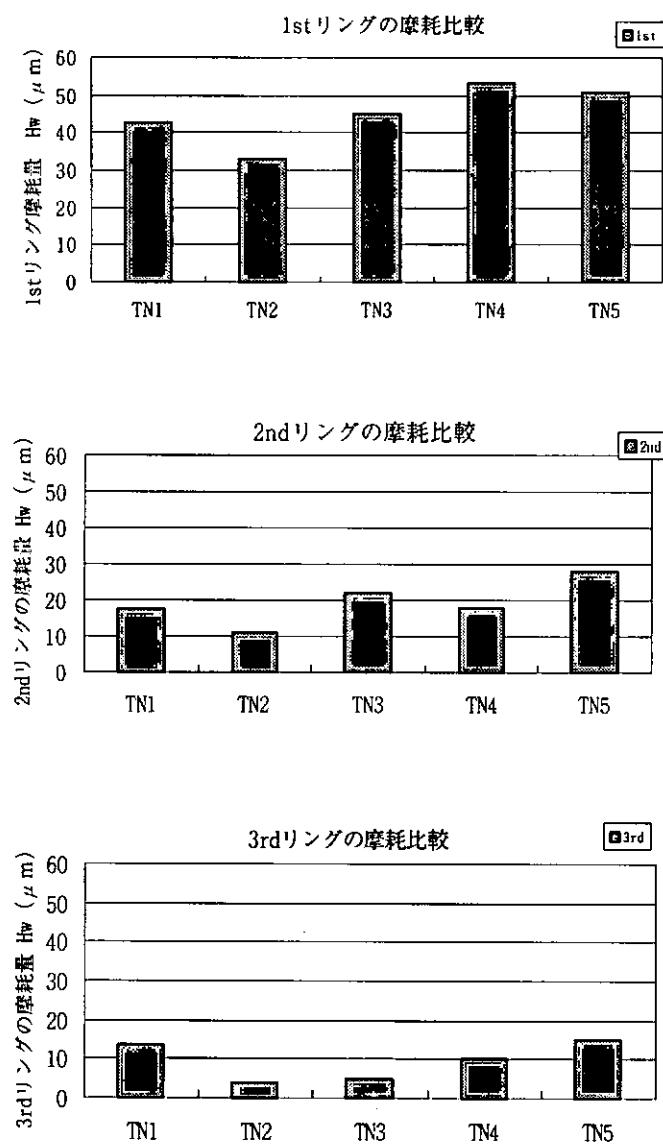


図3.2.8 全試験のピストンリング摩耗比較

リング摩耗の試験結果から概略、次のことが言える。

- 1) EGR 時に従来型の IGS スクラバーを装着するとスクラバー無しに比較してリング摩耗低減に効果がある。
- 2) スクラバーをジェット方式の改善型スクラバーにすると摩耗低減効果が大きくなり、1st リングで比較すると30%以上低減できる。
- 3) 基準試験データとしていた EGR 無しのデータがバラついているため評価基準データの役割を果たしていない。今後、データの蓄積が必要である。

次に試験後のシリンダライナーの摩耗を比較したのが図3.2.9である。

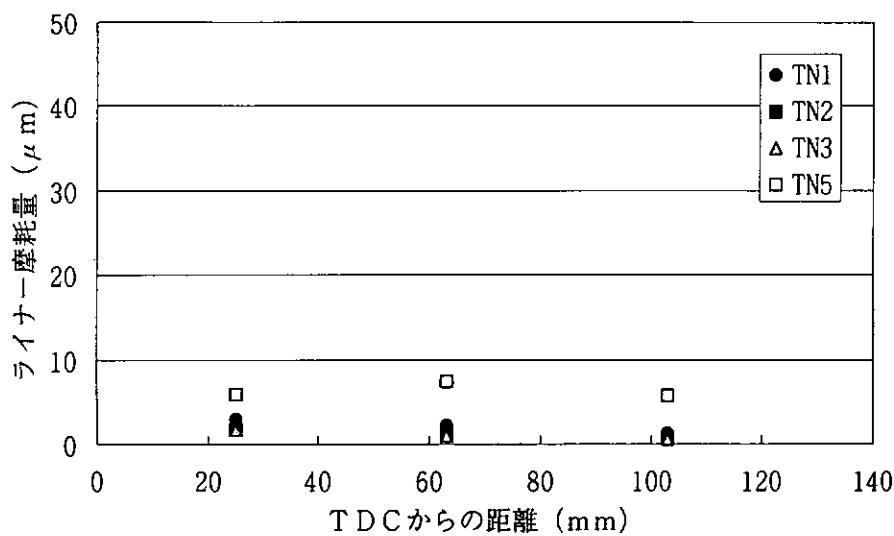


図3.2.9 改善型スクラバーのライナー摩耗比較

スクラバー無しで EGR を実施した場合のシリンダライナー摩耗 (TN5) は他のスクラバー有りに比較して摩耗量が多いのがわかる。運転時間が短いにも関わらず、差が出ているのはシリンダライナー摩耗に対しスクラバーの必要性を示す結果であると判断できる。

以上により、大型船用ディーゼルエンジンが排出する排ガスに対して従来型スクラバーと改善型スクラバーを設計製作し一連の試験の結果、次の結論を得た。

- 1) 従来型 IGS スクラバー、改善型スクラバーいずれも水滴捕集効率100%、SOx 除去効率は98%以上で良い性能を有する。
- 2) ばいじん除去効率は従来型 IGS スクラバーが12%程度に対し、改善型は70%程度で目標の50%を越える性能を確認した。また、
- 3) 改善型スクラバー後の排ガス中塩分濃度を測定した結果、1 ppm 以下で通常、航行中の吸い込み空気中の塩分濃度と差がない。
- 4) EGR 連続運転によるリング・ライナー摩耗量にてスクラバーを評価した結果、EGR 運転時にはスクラバーの装着が必須条件である。また、
- 5) 従来型 IGS スクラバーに比較して改善型スクラバー使用時のピストンリング摩耗が少なくなる。このため、スクラバー新作時には改善型スクラバーの製作設置が望ましい。

### 3.3 成果の適用

大型船用機関の分野も NOx 規制が早晚、実施される段階にきている。その規制も年々強化されることは明白である。こうした NOx 規制強化に対して EGR の実船適用は避けられないと予測している。この場合に次のようにスクラバーを使用する。

#### (1) IGS スクラバー兼用の場合

現行 IGS スクラバーのガス処理能力は EGR 率15~16%の容量と同一であるため、NOx 発生量 $\geq 13\text{g/kwh}$ までの規制に使用する。但しエレメント間隔は 9 mm に変更する。

## (2) 改善型スクラバー使用の場合

専用スクラバーでは50~60%の NOx 低減可能な EGR 率25~30%のガス処理能力を持つものが基準である。このため NOx 発生量 $\geq 8\sim 10\text{g/kwh}$  のまでの規制に対応が必要な時期に製作し使用する。またはイナートガスシステムが不要なタンカー以外の船で低 NOx 対応が必要な場合に使用する。

なお、本研究で開発した海水スクラバーは洗浄水である海水を直接排水しながら使用するので燃料性状の変化や機関構成部品の経年劣化により、或いは水質規制強化によっては直接排水が困難となる可能性が予測される。このため、今後燃焼状態の監視に加えスクラバーの排水処理を含めた機関管理システムを確立し将来の規制に対応していく必要がある。

### (参考文献)

- \* 1 : A study of Abnormal in Power Cylinder of Diesel Engine with EGR-Wear Mechanism of Soot Contaminated in Lubricating Oil. SAE2000 01-0925
- \* 2 : ディーゼル Nox の生成機構と抑制に関する調査報告書 PEC-1996-131
- \* 3 : 船用 EGR 等 Nox 防止システムの研究 (平成11年度報告書)

## 4. 結言

本研究の一番目のテーマである「大気汚染防止運用システムの調査研究」では、各業界の最前線におられる方々に参加頂き、机上検討のみならず可能な限り現実と同じ条件を取り入れた模擬運用の実施に努めた結果、予想を上回る有益な経験と基礎データを蓄積することが出来た。本研究の開始にあたっては、得られる成果の見通しが必ずしも明確でないため懸念もあったが、海外の実情調査、海外船級協会との意見交換等を実施して行く過程で、この調査研究が世界的にも例がなく先進的な活動であることが次第に判明してきた。これを励みにしながら、予算的にも厳しい状況の中で全委員が成果達成に向け努力してきたことは特筆すべきであろう。

本研究によって IMO 附属書の解釈・理解が深まった結果、条約発効に至っていないこの時期に各事業者がどの様な準備、対応をすべきか判断できるようになったことが、最も大きな成果である。また、事前には予想していなかった課題が見えてきたことも、副産物であった。排出規制に対する漠然とした不安が解消され、我が国の業界関係者が NOx 対策に対して沈着、冷静に対応できるようになったものと確信する。

一方、第二の研究テーマである「EGR システムの舶用化研究」では、C 重油という低質燃料を使用する舶用機関において、海水を利用した排ガス洗浄装置を組み入れる事により、懸念材料であったピストンリング、シリンダーライナー等の信頼性低下を克服する目処を得ることが出来た。予算の制約上必ずしも十分な確認運転が出来たとは言えないが、少なくとも実用化は可能であり、且つ、第 2 次 IMO 規制で予想される30%以上の NOx 低減率を実現するための有力な選択肢として、EGR を位置づけることが可能になったと評価できる。また、この研究を通じて、従来ボイラの排ガス洗浄装置として広く採用されていた充填塔スクラバーではなく、ジェットスクラバーという別的方式が EGR に適していることが判明したことでも大きな成果である。

1997年9月に採択された MARPOL73/78附属書VIの発効要件は、15カ国以上の国であってその商船船腹量の合計が総トン数で世界の船腹量の50%に相当する以上となる国が締約国（批准国）となることとされている。

現時点では、スウェーデン、ノルウェー、シンガポールの3カ国が批准しているのみで船腹量もまだ約10%であるため条約発効の見通しが立っていないが、2002年までに発効しない場合は、発効要件の見直し等を検討する会議が開催されることになっている。

短期的には賛否の拮抗が予想されるが、長期的に見れば環境保全の流れが留まるとは考えにくいため、何れ条約が発効し更に次第に規制が強化されていくものと予想される。条約発効の見通しが立っていないにも拘わらず、大方の機関メーカーが積極的に親エンジン等の予備鑑定を進めており、一方、相当数の船主が NOx の予備鑑定を選択している状況であるが、これも関係者の多くが環境保全の流れを重視している証拠であろう。

一方、最も海洋の環境対策に力を入れているバルト海周辺諸国では、既に一定以上の排出に対し課税されるシステムがスタートしており、グローバル規制を待たずローカル規制が先行することも考えられる。

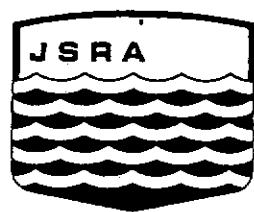
この様な環境下で、NOx 対策に関わる 2 つのテーマを 2 年間に亘って研究してきたが、これにより NOx 対策に関する我が国の関連業界のポテンシャルが大いに向上したことは明白であり、また今後予想される国際的な議論の場においてもこの成果が必ずや有効に利用されるものと期待する。

---

発 行 平成13年3月  
発 行 所 社団法人 日本造船研究協会  
〒105-0001 東京都港区虎ノ門一丁目15番16号  
                  日本財団ビル6階  
電 話 総務部 03-3502-2132  
                  研究部 03-3502-2133  
F A X           03-3504-2350

---

「本書は、日本財団の助成金を受けて作成したものを頒布するものです。」



The Shipbuilding Research Association of Japan