

スーパークリーンマリンディーゼルの研究開発

[小形高速機関グループ]

ヤンマー株式会社

目 次

	Page
1. 事業の目的等	1
1. 1 事業の目的	1
1. 2 事業の目標	1
1. 3 事業の内容	2
1. 3. 1 小形高速主機関	2
1. 3. 2 小形補機関	2
1. 4 研究計画スケジュール	3
2. 要素技術開発内容	4
2. 1 小形高速主機関の事業内容と成果	4
2. 1. 1 実機排気ガス調査とEGRによる低NO _x 化	4
2. 1. 1. 1 実機排気ガス調査	4
2. 1. 1. 2 EGR装置の開発	5
2. 1. 1. 3 EGRによる低NO _x 化試験	6
2. 1. 1. 4 ミラーサイクルによる低NO _x 化試験	8
2. 1. 2 A重油対応可能な触媒の開発	10
2. 1. 2. 1 高効率脱硝触媒の検討	10
2. 1. 2. 2 実機先行試験による高効率脱硝触媒の評価	11
2. 1. 3 尿素供給装置および制御装置の開発	14
2. 1. 3. 1 過度応答対応可能な尿素供給装置の開発	14
2. 1. 4 実機での脱硝性能調査	17
2. 1. 4. 1 実機用触媒装置の設計製作	17
2. 1. 4. 2 定常モードでの実機性能調査	17
2. 2 小形補機関の事業内容と成果	21
2. 2. 1 実機排気ガス調査	21
2. 2. 1. 1 実機排気ガス調査の準備	21
2. 2. 1. 2 実機排気ガスおよび機関性能調査	22
2. 2. 1. 3 PM中の金属成分の調査	23
2. 2. 2 C重油対応可能な触媒の開発	25
2. 2. 2. 1 要素試験装置の改造	25
2. 2. 2. 2 高硫黄分含有燃料対応脱硝触媒の検討	26
2. 2. 2. 3 実機先行試験による高硫黄分含有燃料対応脱硝触媒 の評価	29
2. 2. 3 尿素供給装置の開発	30
2. 2. 3. 1 最適な排気系の形状および尿素供給位置の検討	30
2. 2. 3. 2 負荷変動対応可能な尿素供給装置の開発	32
2. 2. 4 実機での脱硝性能調査	33
2. 2. 4. 1 実機性能調査	33
2. 2. 4. 2 負荷変動時の実機性能調査	35

2. 2. 5	耐久性調査	36
2. 2. 5. 1	実機先行耐久試験準備	36
2. 2. 5. 2	実機先行耐久試験	36
2. 2. 5. 3	回収調査	39
3.	実船試験内容	44
3. 1	小形高速主機関の事業内容と成果	44
3. 1. 1	試験概要	44
3. 1. 2	触媒反応器詳細と実船レイアウト	46
3. 1. 3	初期脱硝性能の評価	47
3. 1. 4	触媒耐久性評価	49
3. 1. 5	触媒回収調査	50
3. 1. 6	メンテナンスインターバル決定のための指針策定	53
3. 1. 7	復旧工事	53
3. 2	小形補機関の事業内容と成果	54
3. 2. 1	試験概要	54
3. 2. 2	触媒反応器詳細と実船レイアウト	55
3. 2. 3	初期脱硝性能の評価	57
3. 2. 4	触媒耐久性評価	57
3. 2. 5	触媒回収調査	64
3. 2. 6	メンテナンスインターバル決定のための指針策定	72
4.	まとめ	73
4. 1	要素技術開発について	73
4. 1. 1	機関出口NO _x の低減	73
4. 1. 2	SCR技術の開発	73
4. 2	実船試験について	74
4. 2. 1	小形高速主機関	74
4. 2. 2	小形補機関	75
4. 3	全体を通して	75

1. 事業の目的等

1. 1 事業の目的

船用機関に対する国際的な排気ガス規制であるIMO規制において、大気環境の改善が必要な海域(E.C.A)に限定して、1次規制値より80%低減するNOx 3次規制が、MEPC 58において採択された。本規制値のNOx低減レベルは、機関単体のみでの対応は困難で、後処理技術の適用が第一に考えられる。施行時期は、2016年が予定されている。

小形高速船用ディーゼル機関の中で小形高速主機関は、狭い船内スペースに設置されていることが多く、後処理装置の小型化がきわめて重要な課題になる。また、主にA重油が用いられており、自動車などに用いられる軽油に比べ数百倍の高い硫黄含有量であることから、自動車用ディーゼル機関で開発されている触媒技術をそのまま転用することは困難である。小形補機関では、燃料としてC重油使用が一般的であり、自動車用の触媒技術の転用が困難であることは言うまでもない。IMOによる燃料硫黄分規制ではE.C.Aにおいて0.1%以下(2015年～)が規定されるが、燃料経済性の観点から、スクラバー装置の設置と共にC重油使用の可能性があるとされており、技術開発が必要である。

これらを背景に、船用ディーゼル機関(小形高速主機関及び小形補機関)に適用可能な後処理装置は、火力発電所や定置用ディーゼル機関で一部用いられているアンモニアもしくは尿素脱硝装置になる。しかし、これらの後処理装置においても、負荷変動や高濃度硫黄含有量への対応など、技術的課題が多いものと考えられた。そこで本事業では、小形高速船用ディーゼル機関(小形高速主機関及び小形補機関)を対象として、IMO 3次規制に対応可能な以下の尿素脱硝装置(触媒・尿素供給装置・制御装置および機関との連携を含む)を開発することを目的とする。

- ① 低硫黄A重油燃料を前提に狭い船内に設置可能な小形高速主機関用尿素脱硝装置
- ② 高硫黄分含有燃料(C重油)使用に於いても十分な耐久性を有する小形補機関用尿素脱硝装置

開発は、「要素技術開発」(陸上ベンチ試験)と「実船試験」の大きく二つのフェーズに分けて行う。要素技術開発で得られた知見をもとに試作した尿素脱硝装置を実船に適用し、搭載性や脱硝性能の経時変化ならびに耐久性等、システム全体における総合評価を行う。

1. 2 事業の目標

小形高速主機関、小形補機関での要素技術開発目標を各々表1-1、1-2に、共通の実船試験目標を表1-3に示す。

表1-1 小形高速主機関の要素技術開発目標値

項目	目標値	備考
NOx	低減率 $\geq 80\%$ 以上	一次規制対比
触媒容積	SV値 $50,000\text{h}^{-1}$	燃料:低硫黄A重油(LSA)

表1-2 小形補機関の要素技術開発目標値

項目	目標値	備考
NOx	低減率 $\geq 80\%$ 以上	一次規制対比 燃料:C重油
触媒容積	SV値 20,000h ⁻¹	

表1-3 実船試験での目標値 (小形高速主機関・補機関)

項目	目標値
NOx	低減率 $\geq 80\%$ 以上
耐久性	メンテナンスインターバル決定のための指針策定

1. 3 事業の内容

1. 3. 1 小形高速主機関

脱硝装置の開発にあたり触媒単体での小型化には限界があり、機関出口のNO_x低減が重要になる。機関出口のNO_xが低減されればされるほど、脱硝装置に係るNO_x低減の割合を減少させることができる。小形高速主機関における使用燃料は、低質燃料と比較すると、燃料中のバナジウムなどの金属成分や、燃料中の硫黄分から生成されるサルフェートが少ない。そこで要素技術開発において、EGRを適用し、機関出口の低NO_x化を図る。但し、EGR率の確保、機関性能の確保が課題となる。

同様に使用燃料の観点から、小形高速主機関の脱硝装置の開発は産業用機関で用いられている脱硝触媒をベースに改良を加えることで、対応可能であると考えられた。しかしながら、狭い船内に設置可能とするためには、陸用尿素脱硝装置の課題や耐久性を明確にするとともに、触媒の利用率を向上させる必要があり、如何に触媒内の化学反応を均一に行わせるかが焦点となる。

また、小型化と共に課題となる排気圧力損失増加にも対応しなければならない。排気圧力損失と脱硝性能とはトレードオフの関係になる。トレードオフの打破と触媒容量は密接に影響することから、実船試験での搭載性評価が肝要になる。実船での機関室内スペースは限られるため、これに見合う触媒反応器を設計しなければならない。

1. 3. 2 小形補機関

小形補機関では、小形高速主機関と異なり低質燃料（C重油）が使用される。また、EGRを適用する場合、機関特性からEGR率の確保が難しいことが想定される。従って、機関出口NO_xの削減に対しては、ミラーサイクルを中心に検討する。

移動用ないしは内燃機関用として市場で入手可能な脱硝触媒は、いずれもA重油対応のものである。これらは、ある程度の燃料硫黄分には対応している（1%程度）が、C重油レベ

ルの硫黄分には対応していない。そのため、市販品よりも硫黄被毒に強くかつサルフェートを生成しない、新たな触媒の開発が必要になる。火力発電所などで採用されている触媒は、本事業目標の3～5倍程度大きなものであるため、これを小型化するとともに、負荷変動に対応して、より広い温度範囲で、高いNO_x低減率を確保しなければならない。

その上で、C重油に長時間暴露されても、触媒の劣化を抑制して耐久性を確保する必要がある。そこで管理された運転条件にて陸上耐久試験を行い、脱硝性能の経時変化を調査し、触媒劣化特性を明確にする。システムとしては実船試験と同様のレイアウトで行う。実船試験では、陸上よりも長時間、かつ実際に使われる運転パターンでの評価となる。これらから回収した触媒サンプルを用いて、マイクロリアクタによる詳細分析を行うと共に、得られた知見からメンテナンスインターバル決定のための設計指針を策定する。長期に渡るススの堆積による触媒の目詰まりへ配慮した対策もその内の一つになる。

また、両者共通して、各実機試験、要素試験に加え、尿素供給装置の開発には、CFD解析を用いて、技術開発を効率良く進める。

さらには、その尿素供給装置については、定常状態だけでなく、実用性を考慮に入れて、過渡運転にも対応できるよう、検討を行う。

1. 4 研究計画スケジュール

小形高速主機関、小形補機関の研究計画スケジュールについて、要素技術開発と実船試験のフェーズに分けて、図1-1に示す。

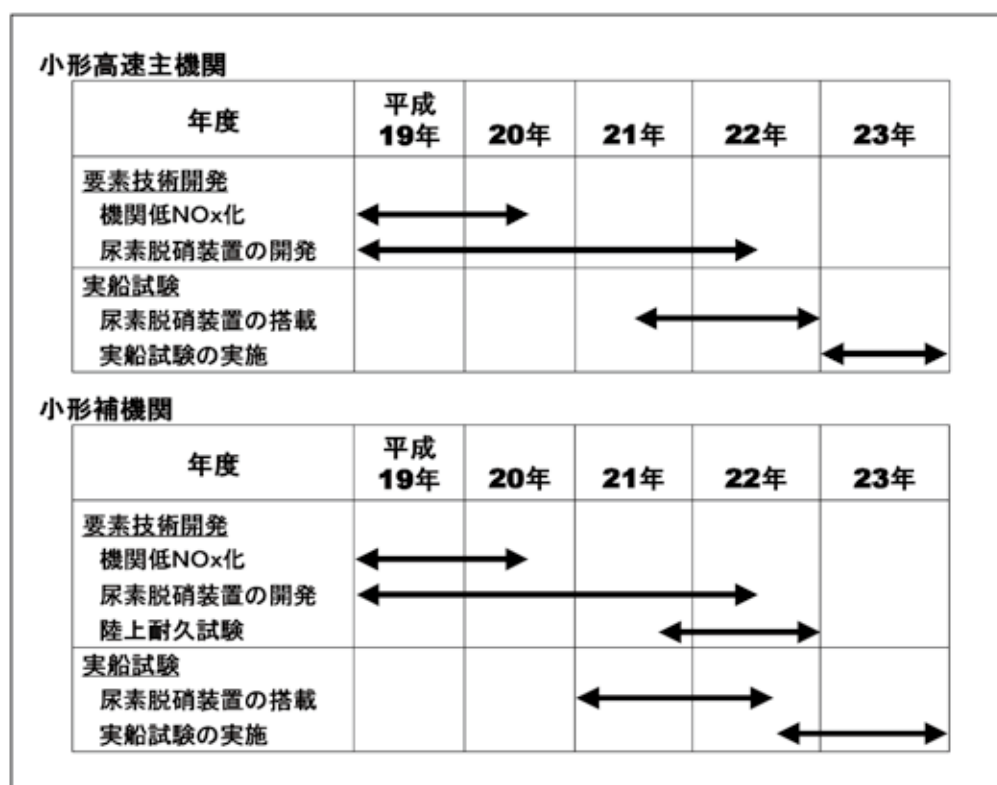


図1-1 研究計画スケジュール

2. 要素技術開発内容

2. 1 小形高速主機関の事業内容と成果

2. 1. 1 実機排気ガス調査とEGRによる低NO_x化

2. 1. 1. 1 実機排気ガス調査

まず、本事業の供試機関として、小形高速主機関の中でも弊社におけるラインナップの中で出荷台数が最も多い6AYS形機関（IMO1次仕様）を選定した。その主要目を表2-1に示す。

表2-1 6AYS形機関の主要目

機関名称		6AYS-GT	
			
形式		立形水冷4サイクルディーゼル機関	
燃焼方式		直接噴射式	
過給方式		インタークーラ付排気ガスタービン過給	
シリンダ数		6	
シリンダ内径× 行程	mm	155×180	
総行程容積	ℓ	20.4	
連続定格出力	kW/min-1	670/1938	
実用最大出力	kW/min-1	737/2000	

計測準備の後、6AYS-GT形機関のIMO1次仕様において燃料噴射時期変更を行い、燃費、排気ガス成分などの調査（データ取り）を実施し、機関出口NO_x低減試験のベース性能とした。

燃費とNO_xの試験結果（IMOのE3モード値の比率）を図2-1に示す。一般的にも言われているとおり、燃費とNO_xはトレードオフの関係にある。

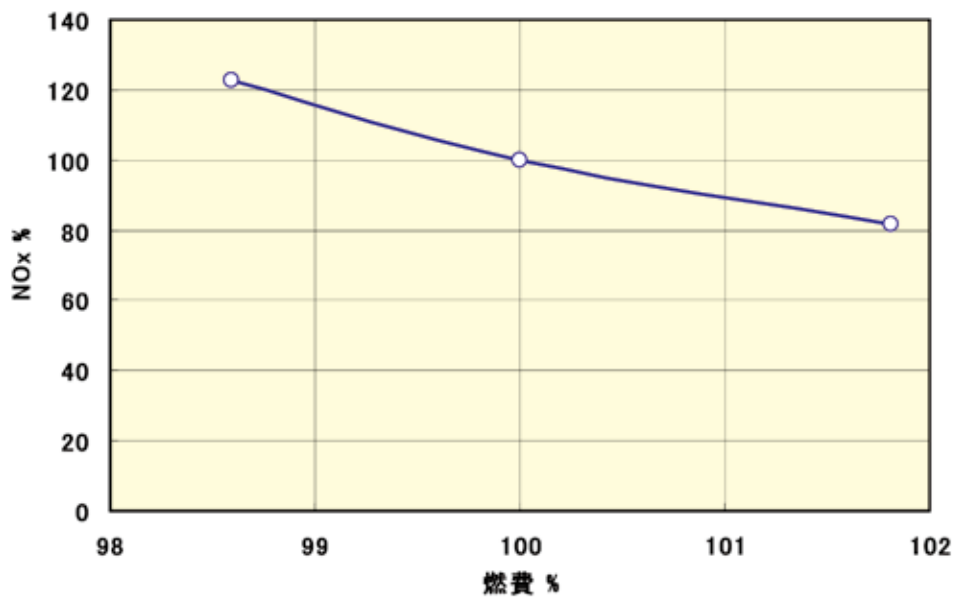


図 2-1 燃料噴射時期変更試験結果 (IMO 1 次仕様)

次に、IMO 1 次仕様における給排気圧力の実測結果を図 2-2 に示す。IMO の E 3 モードにおいてウエイトファクターが最大である 75% 負荷付近において給排気圧力差が最大になる。従って、機関出口 NO_x 低減の方策の一つとして計画した、高圧の給気側へ低圧の排気を戻す EGR (排気ガス再循環) を実現することは容易ではないと考えられた。この試験結果を構想検討にも織り込み、機関側の開発を進めることとした。

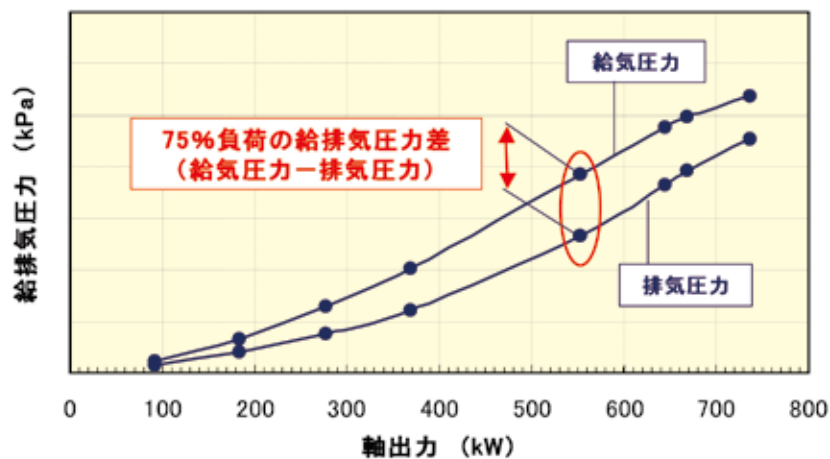


図 2-2 給排気圧力実測結果

2. 1. 1. 2 EGR 装置の開発

外部 EGR システムの方式としては、NO. 1-3 気筒の排気片群からの 1 系統と NO. 1-3 気筒および NO. 4-6 気筒の排気両群からの 2 系統について、検討を行った。システム構想を図 2-3 に示す。給排気圧力の平均値は全負荷域で (給気圧力) > (排気圧力) となっており、EGR を実現するためには排気圧力の脈動によって (排気圧力) > (給気圧力) とな

る部分を利用しなければならない。しかし、(給気圧力) > (排気圧力) の部分では給気が排気へ逆流してしまうため、逆流を防止するリード弁を設ける。

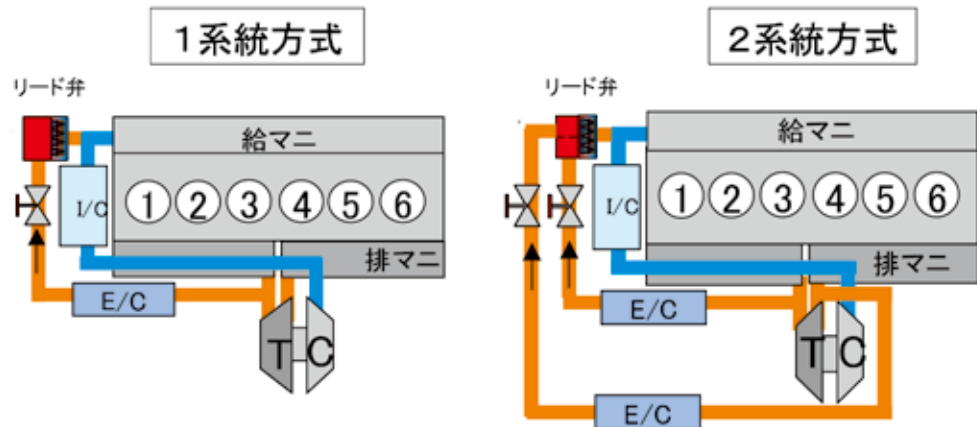


図 2-3 外部EGRシステム

2. 1. 1. 3 EGRによる低NO_x化試験

(1) 外部EGRの適正化試験

各システムによるNO_x低減効果について、実機試験を行った結果を述べる。

まず、EGR1 系統用部品の設計・製作を行い、6AY形機関において、リード弁関連・EGRパイプ・EGRガス取出し位置等の適正化を行った。75%負荷のEGR率実測結果を図2-4に示すが、EGRを実現することはできなかった。次にEGR2系統用部品についての適正化試験を実施した結果、これについても効果はあまり得られなかった。そこで、吸気絞り・排気絞りによりEGR率増大を図ったところ、EGR率の増大は見られたが、依然効果としては小さく、燃費悪化を伴うことを確認した。

そして、シミュレーション計算によって、事前に有効性を確認した新EGRシステムについて、設計・製作を行い、適正化試験を実施した結果、最大のEGR率を実機にて得ることができた。新EGRシステムとは、EGR率を確保するために、排気マニホール内に排気圧力上昇手段を設けたものである。

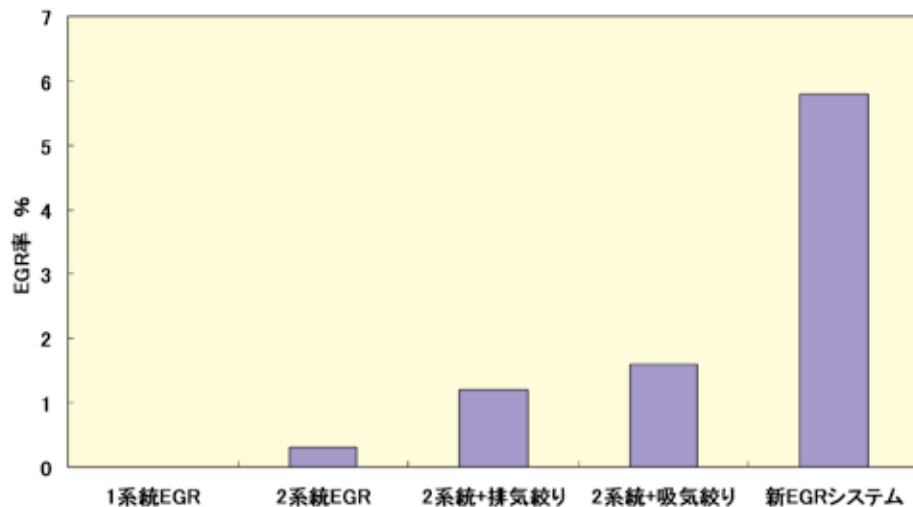


図 2-4 外部EGRシステム試験結果 (75%負荷)

新EGRシステムについて、燃料噴射時期を変更した時の燃費とNO_xの試験結果(E3モード値)を図2-5に示す。燃費とNO_xのトレードオフを打破することができ、実用化に向けて有効な技術であると言える。

なお、本システムに関する特許を、平成20年6月11日に出願済みである。

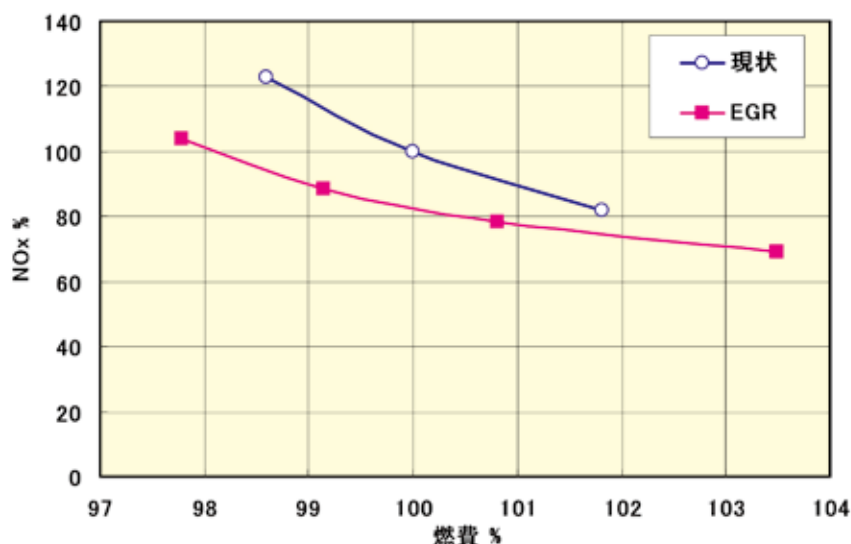


図2-5 新EGRシステムでの燃料噴射時期変更試験結果

(2) 内部EGRカムの検討

排気ガスを外部経路によって再循環させる外部EGRとは別に、シリンダ内の残留ガス濃度を高める内部EGRの検討を、次に実施した。

内部EGRを適用するに当たり、3種類のカムシャフト(排気弁再啓開: 2種類、給気弁事前啓開: 1種類)を供試した。なお、排気弁再啓開は、給気行程中に排気弁を再啓開することにより、排気ガスの一部を再度シリンダ内に取り込むものである。また、給気弁事前啓開は、排気行程中に給気弁を事前啓開することにより、給気に排気ガスの一部を混合するものである。

(3) 内部EGRの適正化試験

製作した3種類のカムシャフトを供試し、6AY形機関での内部EGR適正化試験を行った時の機関出口NO_x(E3モード値の比率)を図2-6に示す。

図2-6より、機関出口NO_xの低減方策として適用可能な技術であることが分かり、排気弁再啓開(第2案)のNO_x低減率が最大となった。排気弁再啓開(第1案; 2案とはリフト量相違)と給気弁事前啓開は、ほぼ同等の結果であった。

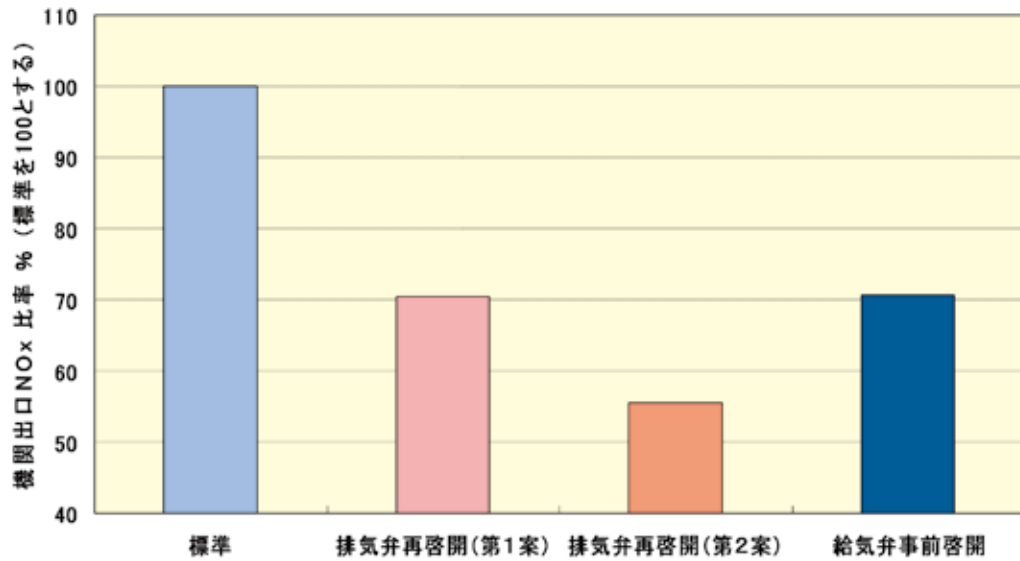


図 2-6 内部EGRでのNO_x比較 (試験結果)

2. 1. 1. 4 ミラーサイクルによる低NO_x化試験

給気弁を早閉じとして、シリンダ内の圧縮端温度を低減するミラーサイクルの検討を実施した。

(1) ミラータイプカムの検討

給気弁閉時期を早めた場合のシリンダ内状態量の変化を予測するために、シミュレーション計算を実施した。圧縮端温度・吸入空気量の計算結果を図 2-7 および図 2-8 に示す。

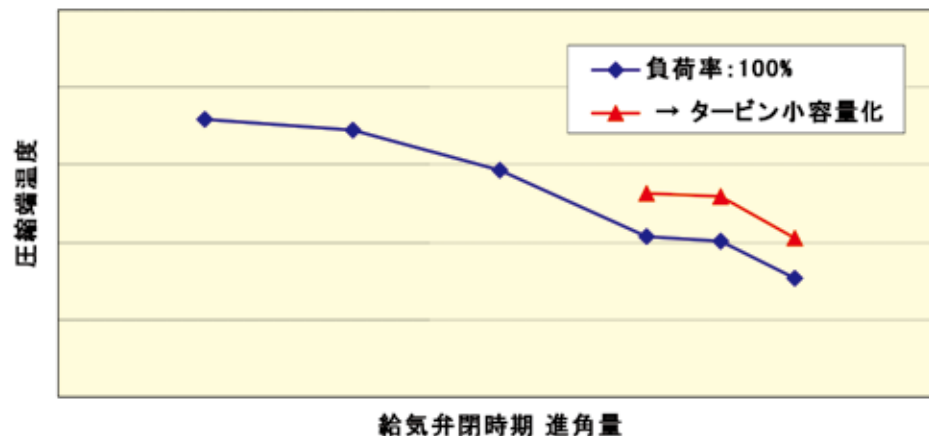


図 2-7 給気弁閉時期進角量と圧縮端温度の関係 (計算結果)

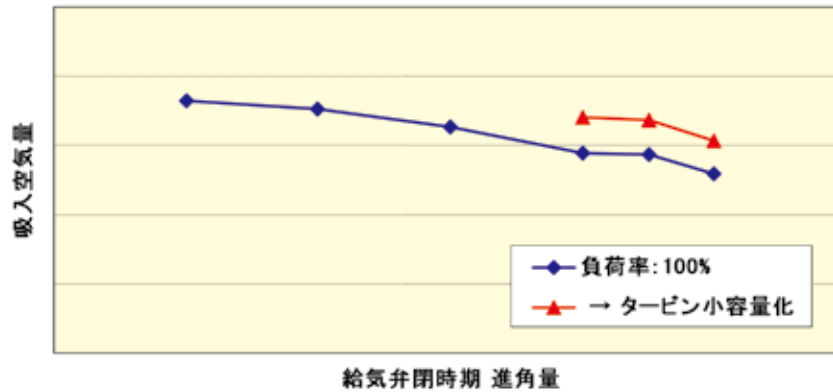


図2-8 給気弁閉時期進角量と吸入空気量の関係 (計算結果)

給気弁を早閉じにする（給気弁閉時期の進角量を増大させる）ことによって、圧縮端温度を低減することができるが、同時に吸入空気量も減少してしまうため、これを補うために過給機のタービン小容量化およびコンプレッサーの高圧力比化が必要となる。しかしながら、吸入空気量を確保する場合には圧縮端温度も若干上昇傾向になっている。

(2) ミラーサイクルの適正化試験

シミュレーション計算結果に基づき設計、製作した給気弁閉時期を早めたカムシャフトを供試し、6AY形機関でのミラーサイクル適正化試験を行った。機関出口NOx (E3モード値の比率)を図2-9に示す。

ミラーサイクルによるNOx低減率は約25%であり、内部EGRによる低減効果と比較して小さい結果であったものの、その有効性を確認できた。

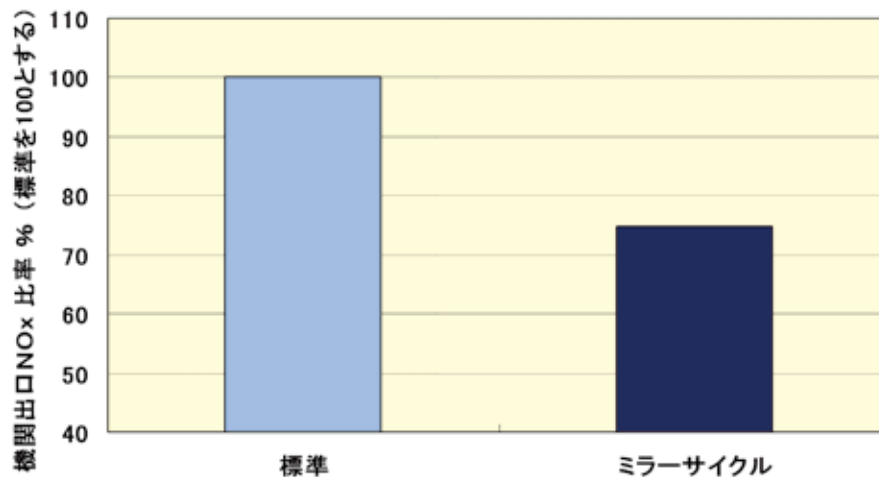


図2-9 ミラーサイクルでのNOx低減効果 (試験結果)

以上、小形高速主機関における機関出口NOxの低減方策を決定するために、「外部EGR」・「内部EGR」・「ミラーサイクル」の適正化試験を実施した結果、各々の方策において、NOx低減の有効性を確認できた。この中で、実用化に向けて最も現実的であると判断した「内部EGR」を最終的に選択することとした。

2. 1. 2 A重油対応可能な触媒の開発

2. 1. 2. 1 高効率脱硝触媒の検討

船用主機関に搭載する触媒候補材を選定するため、模擬ガスを用いた要素試験装置により、基礎脱硝特性調査を行った。

要素試験装置は、ガス混合装置、液体成分添加装置、反応炉、温度制御装置および同時ガス分析装置から構成され、ガス混合装置にて各種のガスを調量・混合し、実機排気ガスを模擬したモデルガスを発生させる。反応炉内には石英管が設置されており、この内部に触媒試験片を固定しモデルガスを流通させて、反応したモデルガスを下流に接続した同時ガス分析装置にて表2-2に示すガス濃度を測定し、浄化特性を評価する。

表2-2のモデルガス組成は、代表的な排ガス成分を基に設定しており、要素試験条件として設定した。なお、炭化水素成分としてはプロピレン (C₃H₆) を、還元剤としてアンモニアガス (NH₃) を用いた。

表2-2 モデルガス組成

成分	単位	設定値
NO	ppm	1200
O ₂	%	11.0
CO ₂	%	7.5
CO	ppm	100
C ₃ H ₆	ppm	100
H ₂ O	%	7.5
N ₂	%	Balance

供試触媒として、表2-3に示す3種類のSCR触媒を準備し、アンモニアとNOの比 (ANR)、触媒上流ガス温度および空間速度 (SV値) をパラメータとして、新品状態でのNO_x低減率および未反応のまま排出されるアンモニア濃度を測定した。

表2-3 供試触媒および試験条件

	触媒 A (低温タイプ)	触媒 B (触媒 A 改良タイプ)	触媒 C (触媒 A 改良タイプ)
セル密度	200cpsi	200cpsi	200cpsi
NH ₃ /NO 比	0.5~1.5	0.5~1.5	0.5~1.5
ガス温度 °C	200~400	200~400	200~400
空間速度 hr ⁻¹	50,000	50,000	50,000

実機の排気ガス温度は320~410°Cであり、ANRの上限を0.9程度とすると、全ての触媒にてNO_x低減率80%以上の結果を得た。一方、低温領域 (300°C以下) の未反応アンモニアの排出特性を比較すると、触媒Cが最も優れていることが分かった。

以上の結果から、実機先行試験供試用として触媒Cを選定することとした (図2-10)。

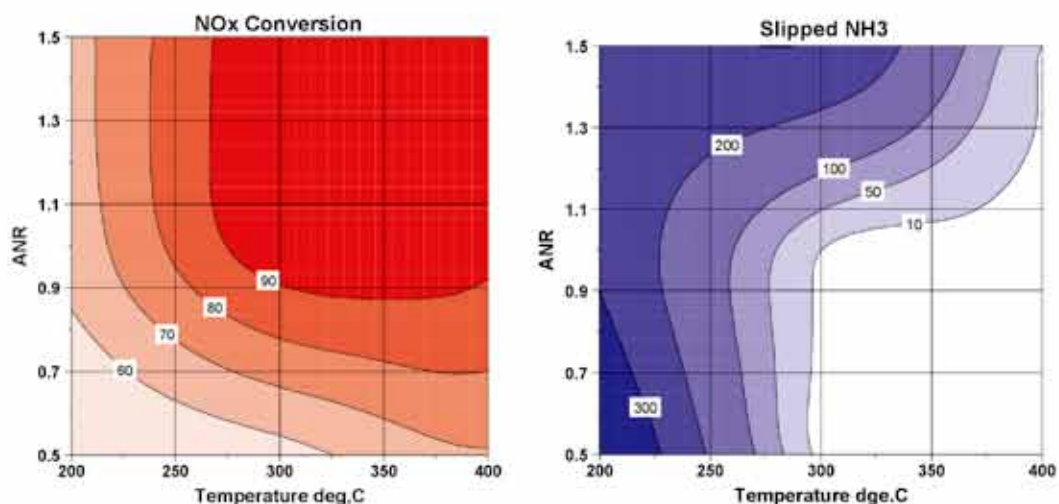


図 2-10 触媒CのNO_x低減率マップ(左)と未反応アンモニア濃度マップ(右)

2. 1. 2. 2 実機先行試験による高効率脱硝触媒の評価

触媒装置（触媒反応器、排気系統）を設計・製作し、2. 1. 2. 1項により選定した触媒Cを用いて、実機による脱硝性能の評価と先行調査を実施した。試験モードは、E3モードである。

(1) 触媒装置

表2-4に主要諸元を、図2-11に系統図を示す。触媒構成は、150mm角の触媒ブロックを1段につき9個配置し、2段、3段積の2種類のSV値条件にて試験を行った。また、尿素水と排気ガスの混合促進のため、ミキサーを尿素インジェクターと反応器の間に配置し、その効果を調査した。

尿素水は、機関回転速度および負荷、機関出口NO_x濃度より必要噴射量を算出し、アンモニアとNO_xの比（ANR）が0.9の条件で試験を行った。

表 2-4 触媒装置の主要諸元

脱硝方式		乾式選択還元方式	
触媒ブロック寸法	mm	150×150×150	
触媒段数	段	2	3
触媒ブロック個数	個	18	27
定格時の空間速度 (SV)	hr ⁻¹	50,000	35,000
還元剤種類		32.5%尿素水	
還元剤噴射方式		エアレス方式	

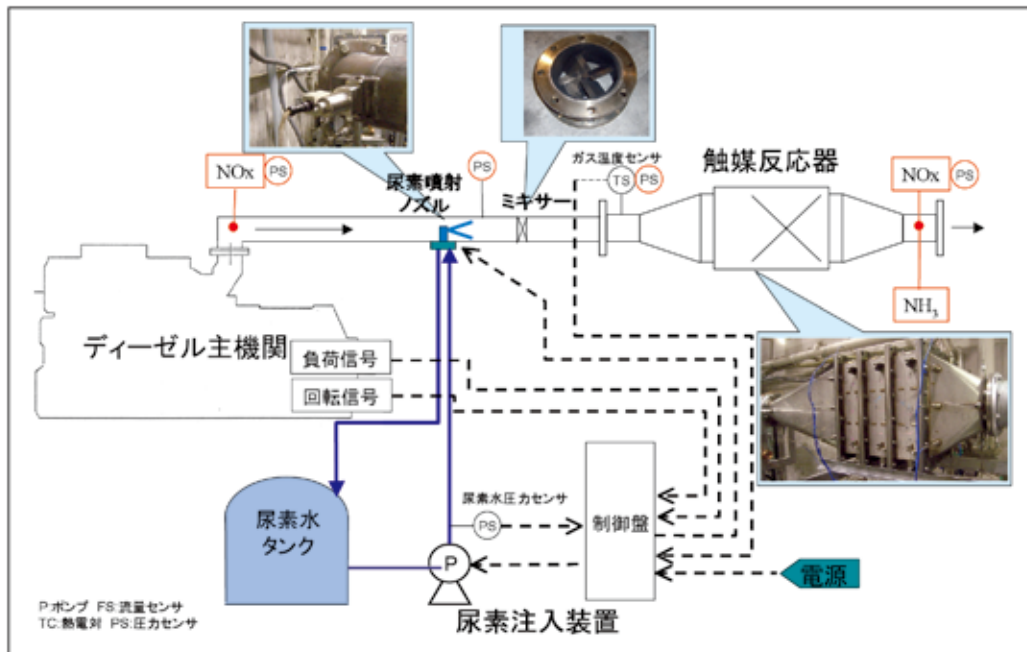


図 2-1-1 触媒装置系統図

(2) 実機排ガスによる初期性能評価

IMO 3次規制では、モードNO_x値と各負荷での上限を定めたエミッションキャップ（モードNO_x値の1.5倍以下）が規定されている。本供試機関（定格回転数：1880min⁻¹）のNO_x規制値は1.99g/kWh、エミッションキャップは2.99g/kWhとなる。

図2-1-2に触媒層2段（定格時のSV=50,000h⁻¹）でのE3モードNO_xの試験結果を示す。モードNO_x値および各負荷での重みつきNO_x値は3次規制値を満足する結果となり、目標値をクリアした（低減率で80%以上）。図2-1-3に、触媒層3段（定格時のSV=35,000h⁻¹）での同様の試験結果を示す。図2-1-2と比較してNO_x値は低下しており、SV値を小さく（触媒サイズを大きく）することによるNO_x低減効果について、実機確認できた。

なお、アンモニアスリップについては、触媒層2段では高負荷域において発生する傾向を示したことから、負荷に応じたANR制御等の対応を検討することとした（図2-1-4）。触媒層3段では、全負荷域において発生は見られなかった。これにより、SV値を小さく（触媒サイズを大きく）することによるアンモニアスリップ低減効果についても、実機確認できた。

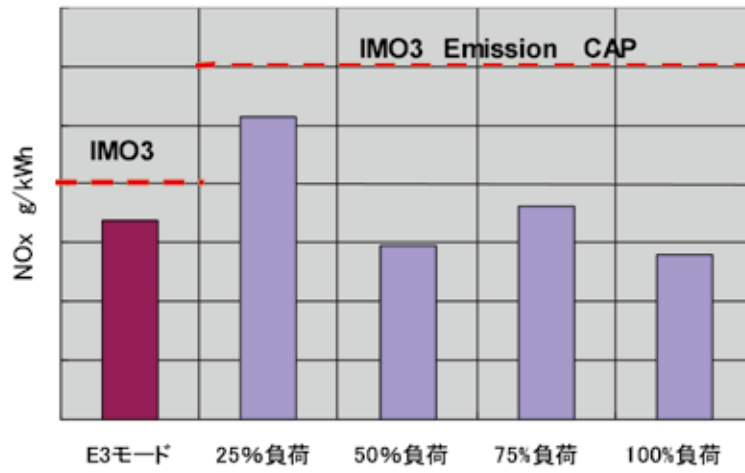


図 2 - 1 2 NOx 排出特性 (SV=50,000h⁻¹)

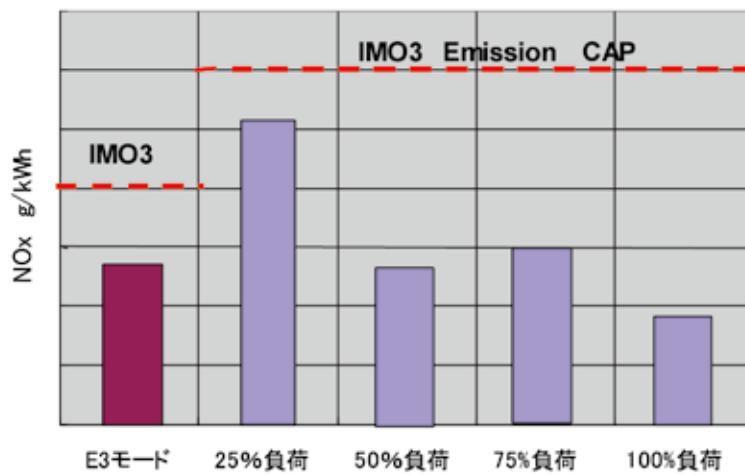


図 2 - 1 3 NOx 排出特性 (SV=35,000h⁻¹)

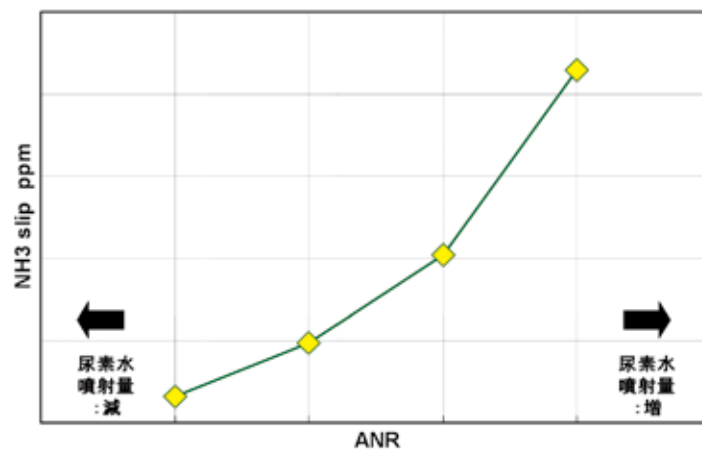


図 2 - 1 4 ANR とアンモニアスリップの関係

次に、触媒装置の圧力損失の試験結果を図2-15に示す。触媒層の段数を増加する、SV値を小さくすることで、NO_x低減効果はより大きくなり、アンモニアスリップも全負荷域で発生しなくなるが、圧力損失が増大し、触媒層の2段（図2-15の右側）と3段（図2-15の左側）では、約3割増大することが分かった。

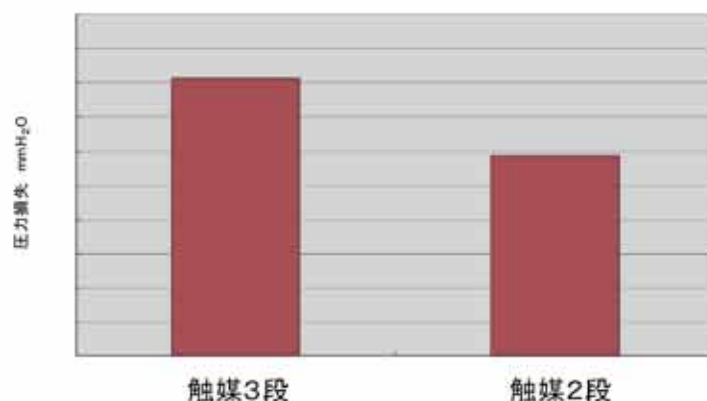


図2-15 触媒装置の圧力損失（触媒層の影響）（定格）

以上の実機先行試験結果から、以下のことが明らかになった。

- ・SV値を変更した場合、脱硝性能と触媒層の圧力損失はトレードオフの関係にある。
- ・触媒層の高圧力損失は燃料消費量等の機関性能に悪影響を与えるケースがある。従い、セル密度の変更や、SCRシステム全体の低圧力損失化等により、脱硝性能と圧力損失のバランスを適正化した構成を準備しておく必要がある。

2. 1. 3 尿素供給装置および制御装置の開発

排気管内に噴射された尿素は、蒸発と共に加水分解し、アンモニアに変化する。脱硝性能を高めるためには、十分にアンモニアに分解させることと、これを均等に触媒に拡散させることが重要になる。そこで流体解析を用いて、触媒反応器形状と、排気管内の尿素噴霧の挙動を正確に計算し、最適な尿素噴射位置、排気系の形状を決定した。

また、脱硝性能を高めると共にアンモニアスリップを防止し尿素消費量を抑制させるために、機関との統合制御を行い、尿素を正確に、かつ効果的に投入させる必要がある。

2. 1. 3. 1 過渡応答対応可能な尿素供給装置の開発

定常状態の機関運転と共に、過渡状態で負荷・回転速度が時々刻々変化した際にも、尿素有過剰噴射によるアンモニアスリップ等を防止するためには、尿素噴射量をより高度に、かつ効果的に定量化しなければならない。そのためには、加減速時に尿素噴射量を素早く変化させることが可能な尿素供給装置および制御装置の開発が必要である。加えて、その制御装置を支えるためのセンシング技術の開発も重要となる。

(1) NO_x 算出方式

NO_x 排出量を見て、尿素噴射量を決定する。NO_x 算出方式は2方式に大別され、マップとNO_x センサーによる制御が挙げられる。NO_x センサーによる方式として、さらに分かれ、オープンループとクローズドループ制御がある。概要は以下のとおりである(図2-16)。

- ・ マップ制御
 - ① 機関回転速度と負荷(ラック量検知)による。
- ・ NO_x センサーによる制御
 - ② 機関出口(触媒入口) NO_x 濃度による。
 - ③ 触媒出口 NO_x 濃度が目標になるようにフィードバックをかける。

これらの中から、今回は、①あるいは②、またはその組合せを基本方針として掲げ、実機試験に組み込み、最適化を行うこととした。

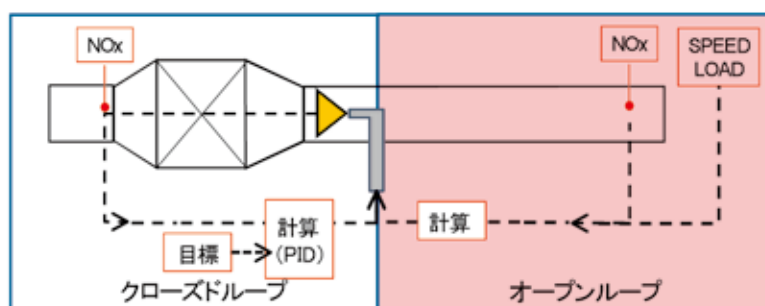


図2-16 NO_x 算出方式の概要

(2) 過渡制御概要

次に、検討した過渡に対する制御概要について述べる。

負荷(ラック量)の変化率を設定し、しきい値を上回っている(加速)、もしくは下回っている(減速)時、加減速検知状態とし、その時点での噴射量に対し設定された割合(%)を乗じて噴射量を制限することとする。さらに加減速検知状態から回復した時点から、設定された時間、噴射量制限を継続し、ある時間経過後通常噴射に戻るようにした。図2-17に、その概要を示す。

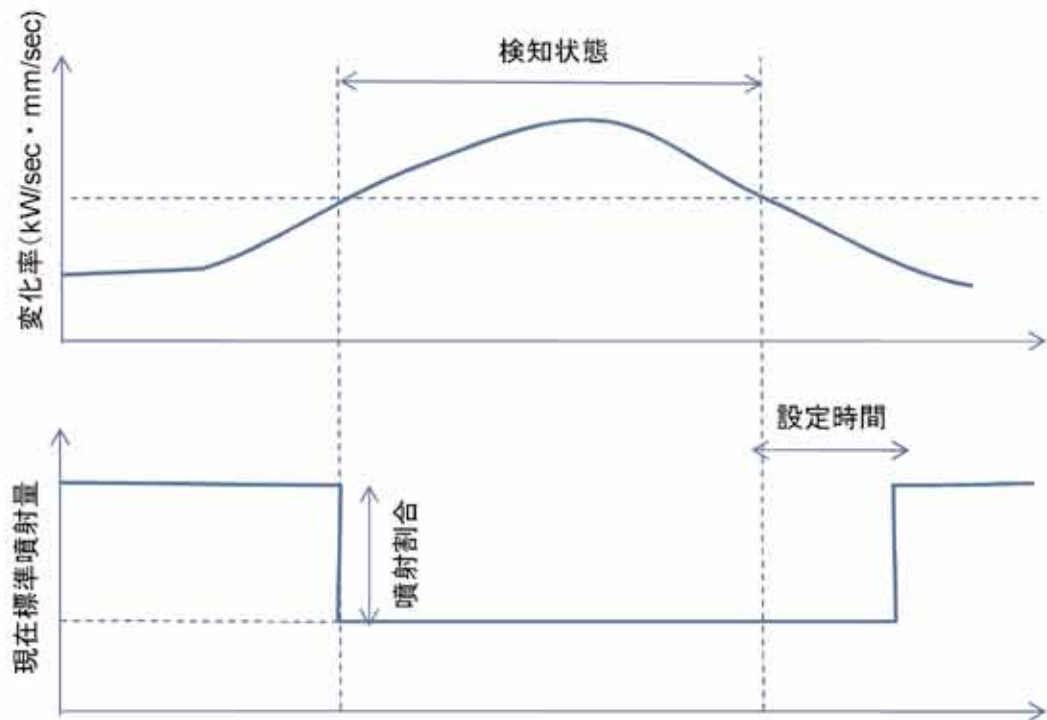


図 2-17 過渡制御概要

以上の検討結果を盛り込み、制御装置を開発した。これについては、実船試験用の開発と並行に進めており、ここではその実船試験用も兼ねた構成機器の外観を示す（尿素供給装置を含む）。

図 2-18 が SCR システム制御盤（各種センサより機関および触媒の状況を検出し、システム全体の制御を司る）、図 2-19 がポンプユニット、図 2-20、21 がノズルユニットである。尿素供給方式としては、エアアシスト式を最終的に採用した。



図 2-18 SCRシステム制御盤

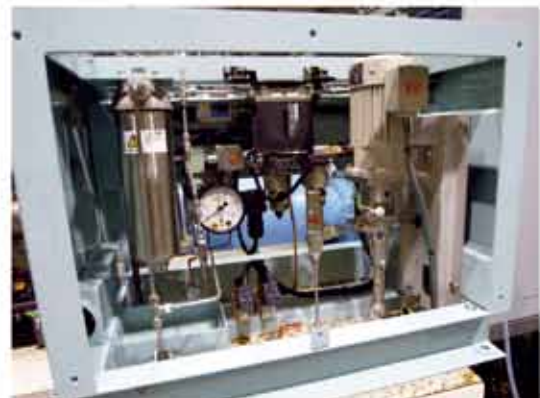


図 2-19 ポンプユニット

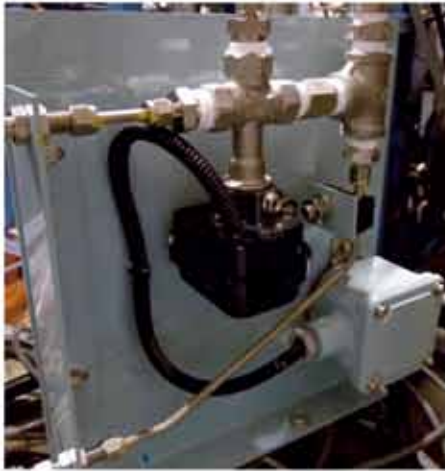


図2-20 ノズルユニット (尿素)



図2-21 ノズルユニット (エア)

2. 1. 4 実機での脱硝性能調査

2. 1. 4. 1 実機用触媒装置の設計製作

(1) 触媒装置

2.1.2.2項にて前述した実機先行試験結果から、脱硝性能と触媒層の圧力損失のトレードオフ改善試験を実施するため、触媒セル密度と触媒サイズ、および触媒種の変更に必要な設計を行った。スペック詳細は次項で後述する。また、ベンチレイアウトの変更を実施し、同時に排気系の圧力損失軽減に配慮した。

(2) エアアシスト式尿素供給装置用配管

エアアシスト式の尿素供給装置を用いて実機試験が行えるように、排気管へのノズル組付け性を検討し、専用の排気管設計を行った。

2. 1. 4. 2 定常モードでの実機性能調査

(1) 触媒装置の圧力損失低減と脱硝性能の両立

触媒セル密度と触媒サイズを変更した際の触媒装置における圧力損失（定格負荷）の比較を図2-22に、E3モードNO_x値の比較を図2-23に示す。

セル密度を230epsiから100epsiに変更した結果、約75%の圧力損失を低減することができた。また、同一のセル密度（100epsi）で触媒種を変更した結果（100-1⇒100-2）、さらに圧力損失の低減が可能になることが分かった。そして、その変更後の触媒種（100-2）において、最も良好な脱硝特性が得られた。

これにより、NO_x低減率80%以上を得るだけでなく、圧力損失とのトレードオフを打ち破るシステム構成をも見出した。

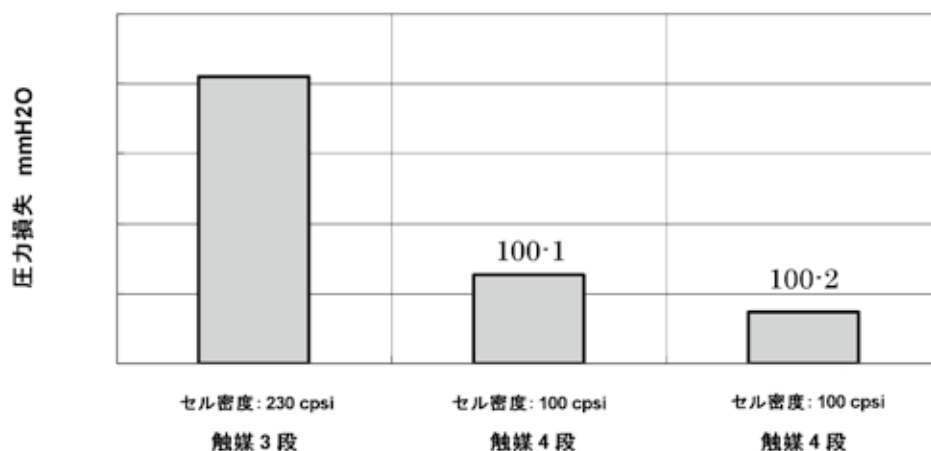


図 2-22 定格時の触媒装置圧力損失

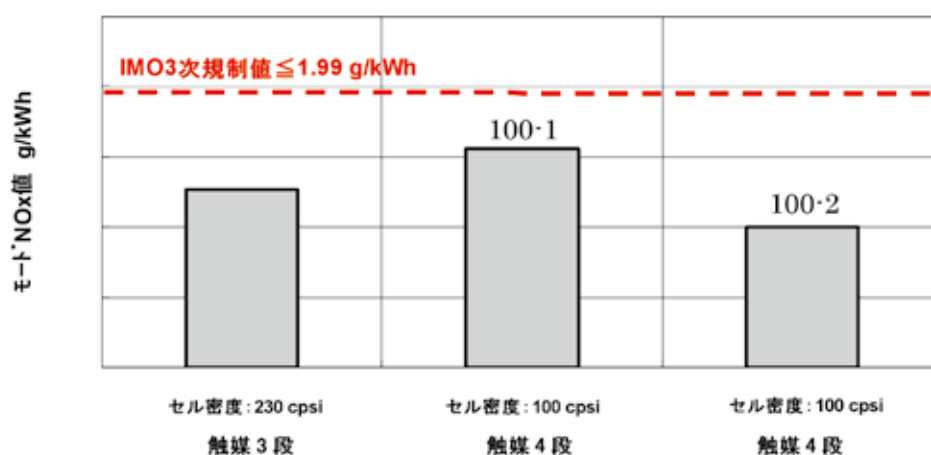


図 2-23 E3モードNO_x値の比較

(2) エアアシスト式尿素供給装置の実機検証

エアアシスト式尿素供給装置について、エアレス式と対比して、図 2-24 に排気管内の尿素析出状況を、図 2-25 に脱硝性能 (NO_x 低減率) を示す。

まずは、図 2-24 より、エアアシスト式では排気管内への尿素析出が発生していないことが分かる。排気管内の尿素析出は、尿素噴霧により排気管内壁が局所的に冷却されてしまうために発生する。発生を防止するためには、排気管内壁の温度を下げないことが必要である。エアレス式は間欠噴射であるのに対して、エアアシスト式は尿素と空気をノズルの内部にて混合し (2 流体式)、排気管内へ噴霧することから連続噴射であるために、噴霧の時間的分散が均一である。さらにエアレス式では、配管の半径方向に噴

射、エアアシスト式では排気ガスの流れ方向に噴射するという特徴から、尿素の分散が空間的にも均一であるために、排気管内壁が局所的に尿素噴霧で冷やされること無く、尿素が析出しなかったと考えられる。

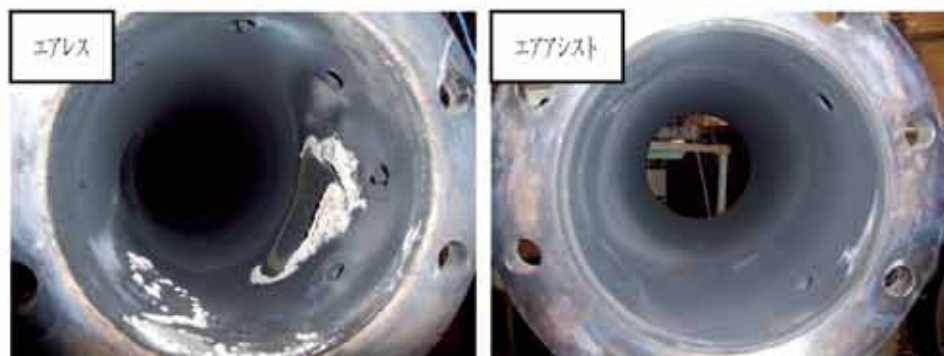


図 2-24 排気管内への尿素析出状況

次に図 2-25 より、脱硝性能に関してはエアレス式とほぼ同等になった。この理由としては、供試機関において触媒入口の排気温度が高いことが挙げられる。両者共、全負荷域で高く、噴霧状態に無関係に十分な脱硝能力を発揮したものと推定する。

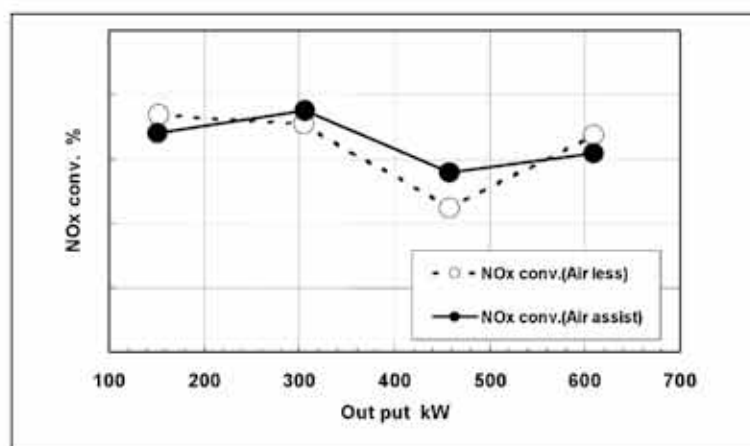


図 2-25 尿素供給装置による脱硝性能の比較

(3) 脱硝性能達成状況

本項(1)で示した実機試験の結果を基に、図 2-26 に脱硝性能の達成状況を仕様ごとに示す。“標準”は IMO 1 次仕様であり、“機関対応”は IMO 2 次仕様で機関出口 NOx 低減結果を示し、“+SCR 装備”が IMO 2 次対応機関に SCR (低圧力損失型/SV=2.7, 0.00 h⁻¹) による脱硝を加えたものである。SCR を装備することで大幅に NOx を低減していることが分かり、IMO 3 次の NOx 規制値を余裕をもってクリアしている。なお、各負荷、エミッションキャップ、アンモニアスリップを満足している。尿素供給装置は、エアアシスト式である(本項(2))。

また、SCR の諸元であるが、脱硝性能以外に、長期的に亘る経時的な触媒目詰まり

にも注意する必要がある。脱硝性能と圧力損失(初期)のトレードオフを打破すべく設定した、ここでの触媒サイズは、その意味を含む。

なおNO_x低減に対しては、2.1.2.2項で示したとおり、SV=50,000 h⁻¹においても、低減率80%以上を確認している。

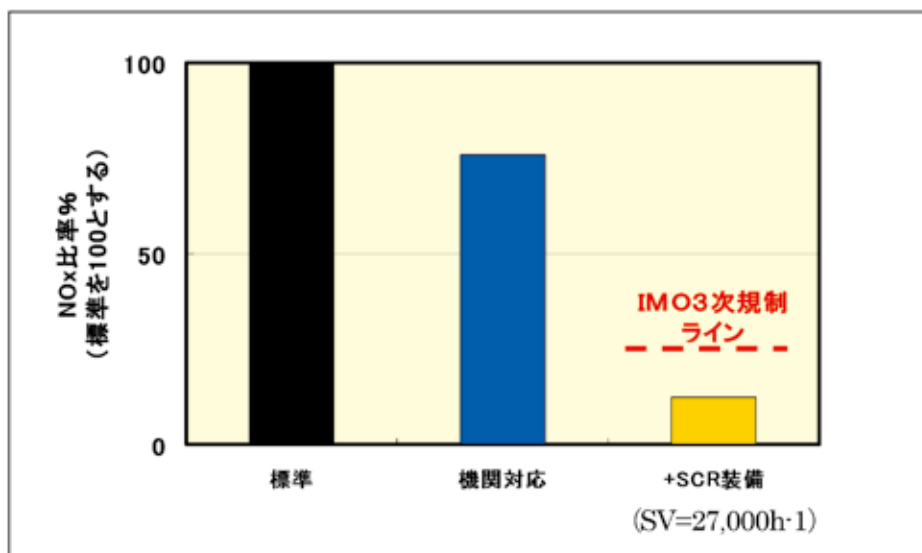


図 2 - 2 6 脱硝性能達成状況

2. 2 小形補機関の事業内容と成果


2. 2. 1 実機排気ガス調査

2. 2. 1. 1 実機排気ガス調査の準備

(1) 供試機関の選定

国内外の市場動向を鑑みると補機関1台当りの発電容量レンジは、1000kWe程度までの台数が最も多い。弊社においても補機関のラインナップの中で出荷台数が最も多い機関出力レンジであり、代表機種である6EY18(A)L形機関を供試機関として選定することとした。その外観および主要目を表2-5に示す。

表2-5 6EY18(A)L形機関の主要目

機関名称		6EY18L	6EY18AL
外観			
形式		立形・水冷・4サイクル ディーゼル機関	
シリンダ数	個	6	
ボア×ストローク	mm	180×280	
総行程容積	ℓ	42.75	
回転速度	min ⁻¹	720/750	900/1000
連続定格出力	kW	400~615	455~800
正味平均有効圧	MPa	1.28~2.50	
燃焼方式		直接噴射式	

(2) 供試機関の仕様検討

小形高速主機関と比較して触媒装置の機関室内への設置スペースが広いこと、機関性能確保の観点(良好な燃費維持)などから、IMO3次規制においてE.C.A.(Emission Control Area)外で適用されるIMO2次規制値を、小形補機関の機関出口NOxの指標とした。

NOx低減の方策は機関単独によるものであり、また低質で高濃度の硫黄分を含むC重油焚きであることへの考慮、機関の給排気特性などから、ミラーサイクル(給気弁早閉じ)を選択した。小形高速主機関でも検討した技術である。

2. 2. 1. 2 実機排気ガスおよび機関性能調査

(1) 機関出口NO_x調査

機関出口NO_xの調査を実施した。定格回転速度900min⁻¹におけるD2モード値の計測結果について、図2-27に示す。ミラーサイクル採用のIMO2次仕様において、1次仕様に対し、約20%のNO_x低減効果が得られた。この後、機関スペックの最終マッチングを実施し、C重油焚きでの機関性能を確定した。

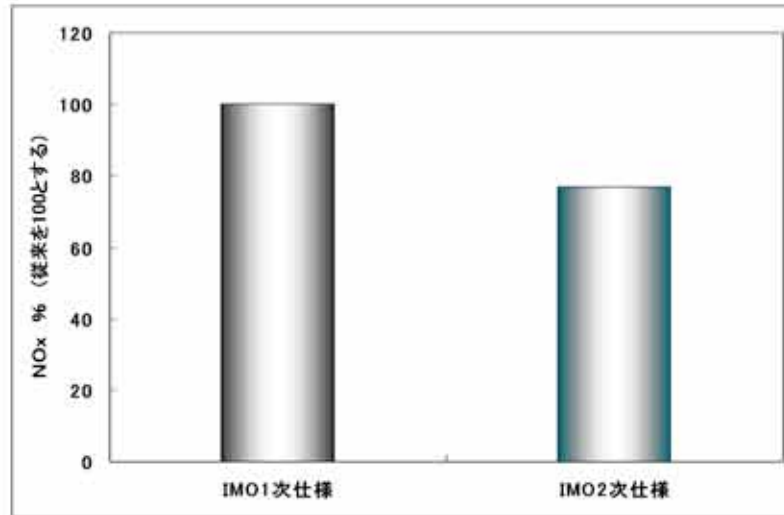


図2-27 機関出口NO_x低減結果

(2) 機関性能調査

まず、触媒活性の観点から重要となる排気温度についての調査を行った。図2-28に、機関出口の排気温度計測結果を示す。高負荷域において過給機効率が良好な典型的なパターンであり、これにより排気温度が低下する。この高負荷域に適合した活性の高い脱硝触媒の開発が必要になることが分かった。

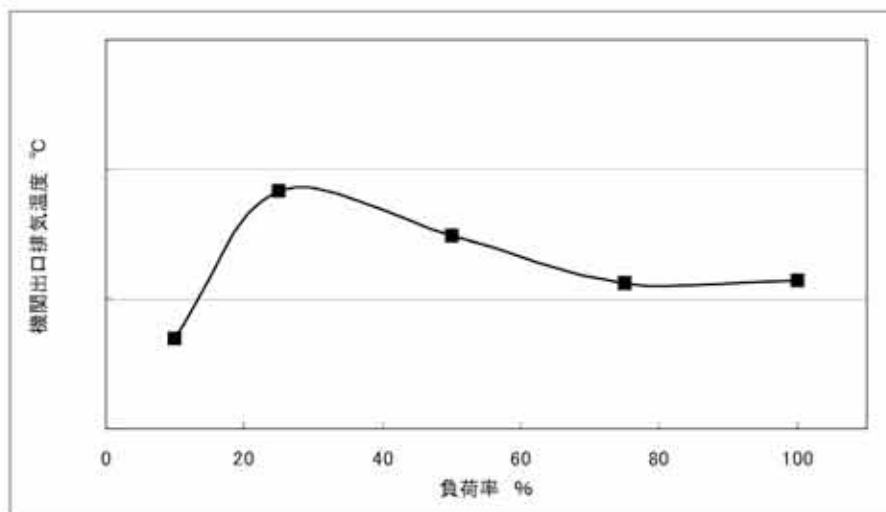


図2-28 機関出口排気温度計測結果 (補機D2モード)

次に、機関出口の排気圧力（以下、背圧）変更試験を実施した。前述したように、NO_x低減率と触媒の圧力損失、アンモニアスリップと圧力損失は各々トレードオフの関係になる。これは小形補機関でも同様であり、圧力損失が機関性能に与える影響を事前に把握しておく必要があった。

図2-29に、定格負荷での背圧変更による排気色S_d（上）と機関出口の排気温度（下）計測結果を示す。本結果から、触媒装置適用における圧力損失の許容値を決定した。

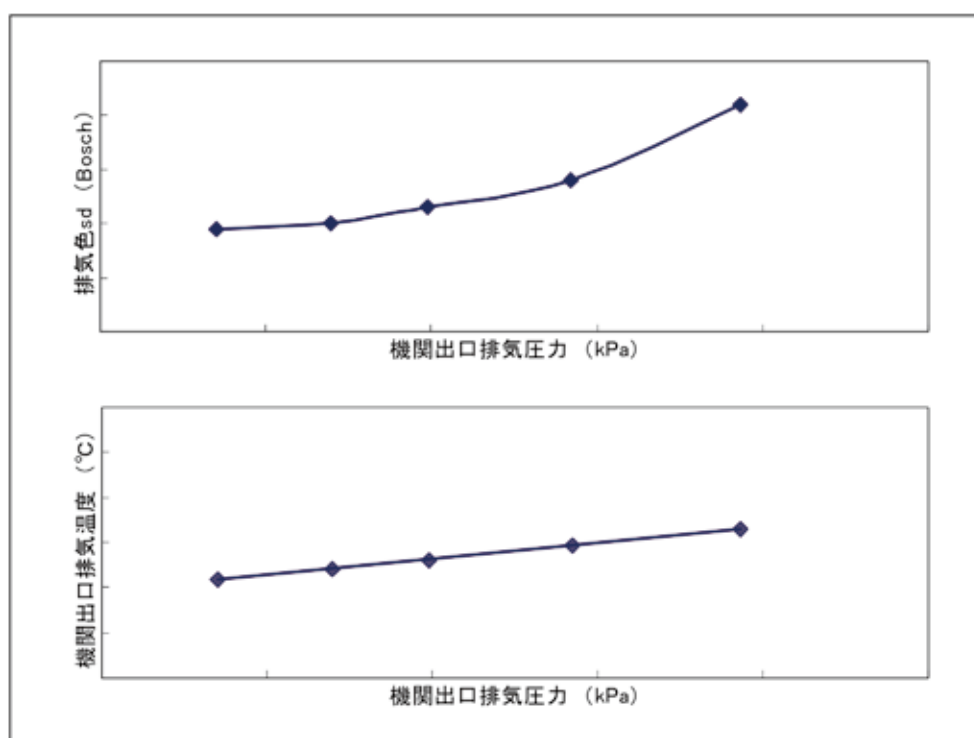


図2-29 機関出口の排気圧力(背圧)の影響(定格負荷)

2. 2. 1. 3 PM中の金属成分の調査

C重油焚きに十分な耐久性を有する触媒装置を開発する上で、C重油における金属成分を把握することは極めて重要である。そこでまず、マイクロトンネル、およびSOF分離装置を導入し、C重油によるPM排出率とPM中の成分割合を調査した。

PM捕集方法について図2-30に示す。マイクロトンネルを用いた部分希釈によるPM捕集方式である。本方式では排気ガス量の一部を、元の排気ガス量との比率(分割比)が常に一定になるように採取後、コンプレッサからの空気により一定流量に希釈した排気ガスの全量をPM採取フィルタで捕集する。

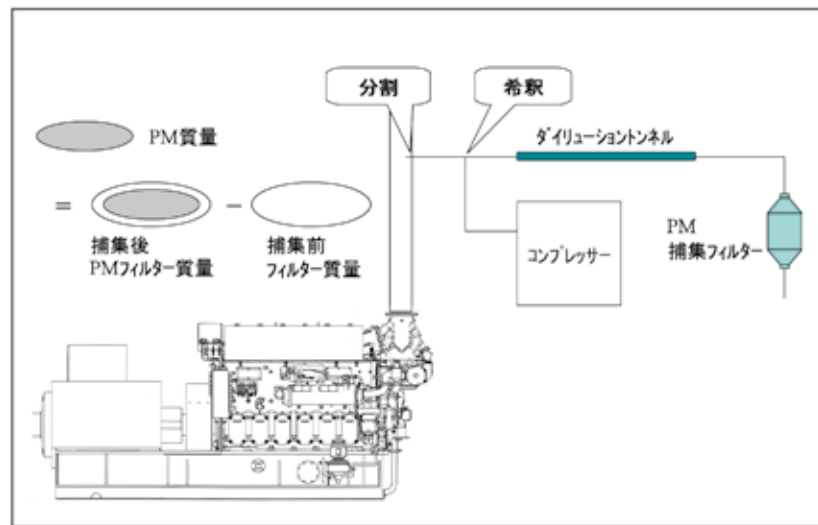
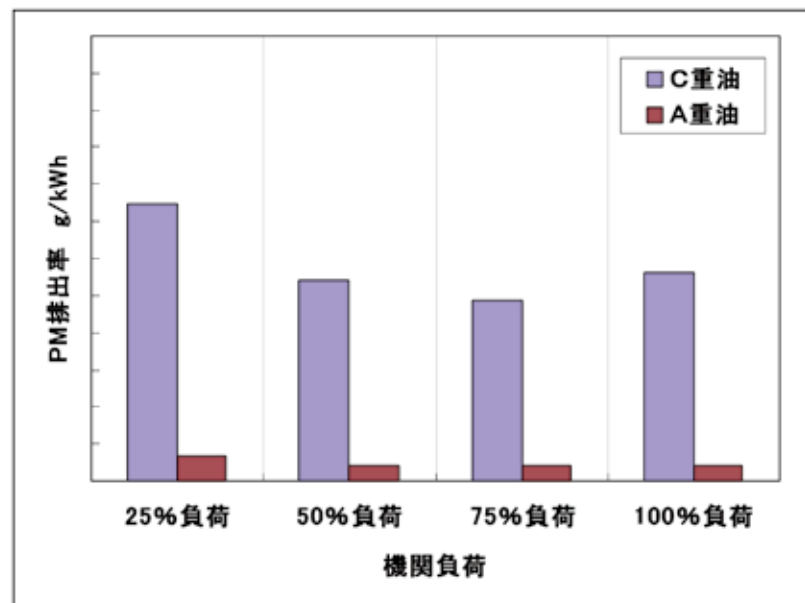


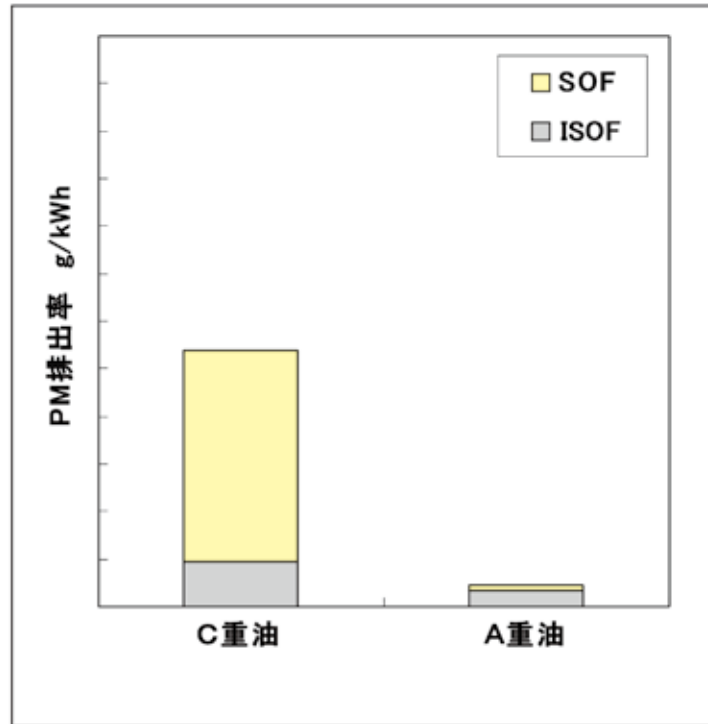
図 2-30 PM捕集方法 (系統概略図)

この装置を用いて、A重油ならびにC重油で運転した場合のPM排出率を測定した結果を図2-31に示す。(a)図より、いずれの負荷においても、C重油の方がPM排出率は増加しており、増加の程度はやや大きい結果となった。供試したC重油の硫黄分はS=2.6%であった。(b)図より、成分としてはISO Fの増加もあるが、SOFの増加が大半を占めていることが分かった。



(a) 機関負荷率に対するPM排出率

図 2-31 C重油によるPM排出率 (A重油との比較)



(b) 50%負荷におけるPM中に含まれる成分

図2-31 C重油によるPM排出率 (A重油との比較)

2. 2. 2 C重油対応可能な触媒の開発

2. 2. 2. 1 要素試験装置の改造

アンモニア (NH_3) 及び中間生成物であると想定されるシアン化水素 (HCN)、イソシアヌル酸 (HNCO) が計測可能な同時ガス分析装置を導入し、既存の要素試験装置の改造を行った。図2-32に触媒の要素試験に用いた要素試験装置のフローダイアグラムを示す。

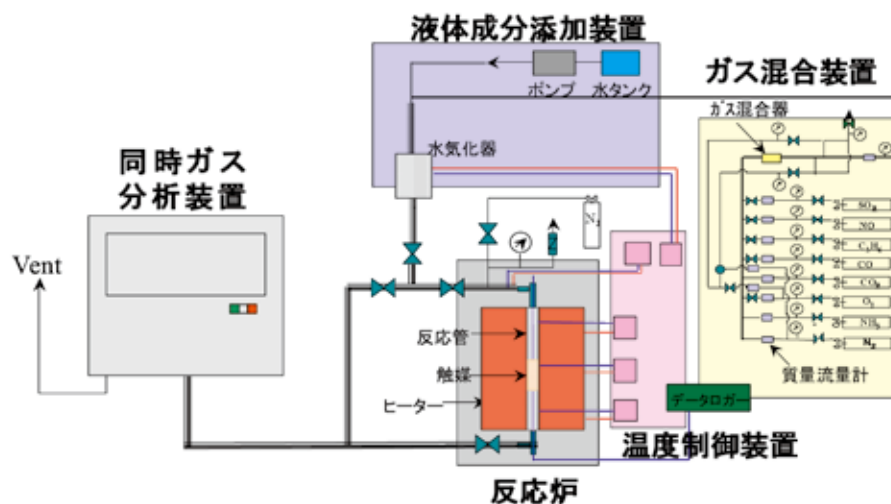


図2-32 要素試験装置のフローダイアグラム

要素試験装置は、ガス混合装置、液体成分添加装置、反応炉、温度制御装置および同時ガス分析装置から構成され、ガス混合装置にて各種のガスを調量・混合し、機関の排気ガスを模擬したモデルガスを発生させる。反応炉内には石英管が設置されており、この内部に触媒試験片を固定しモデルガスを流通させて、反応したモデルガスの濃度を下流に接続した同時ガス分析装置にて測定し、脱硝特性を評価する。

2. 2. 2. 2 高硫黄分含有燃料対応脱硝触媒の検討

要素試験による初期脱硝特性の明確化について、実施内容を以下に述べる。

まず、一般的な排気ガス成分を基に、触媒要素試験条件を設定した。表 2-6 にモデルガス組成を示す。なお、炭化水素成分としてはプロピレン (C₃H₆) を用いた。

表 2-6 モデルガス組成

成分	単位	設定値
NO	ppm	800
O ₂	%	11.0
CO ₂	%	7.4
CO	ppm	60
C ₃ H ₆	ppm	70
H ₂ O	%	7.7
N ₂	-----	Balance

次に供試触媒として 100cpsi の基材を用いたバナジウムタイプの触媒候補材 A、B (表 2-7) について、脱硝特性の基礎調査を行った。

要素試験結果を図 2-33 に示す (触媒 A を抜粋)。ANR を 0.9 程度にすれば、2 種類共、NO_x 低減率 80% 以上の結果を得た。但し、未反応アンモニアの排出濃度については、触媒 A の方が良好な結果を示した (≤ 10 ppm)。

表 2-7 供試触媒および試験条件

	触媒 A	触媒 B
触媒種	バナジウム系	バナジウム系
セル密度	100cpsi	100cpsi

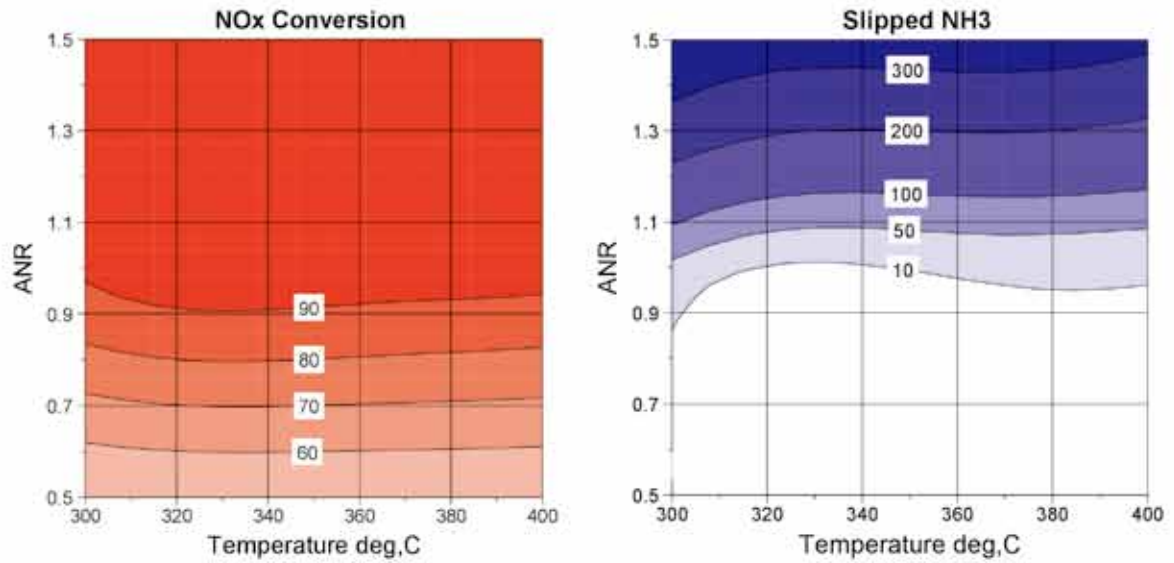


図 2-33 触媒AのNO_x低減率マップ(左)と未反応アンモニア濃度マップ(右)

次に、触媒Aについて硫黄被毒試験を行った。図 2-34 に硫黄被毒後に脱硝性能を調査した結果を示す。

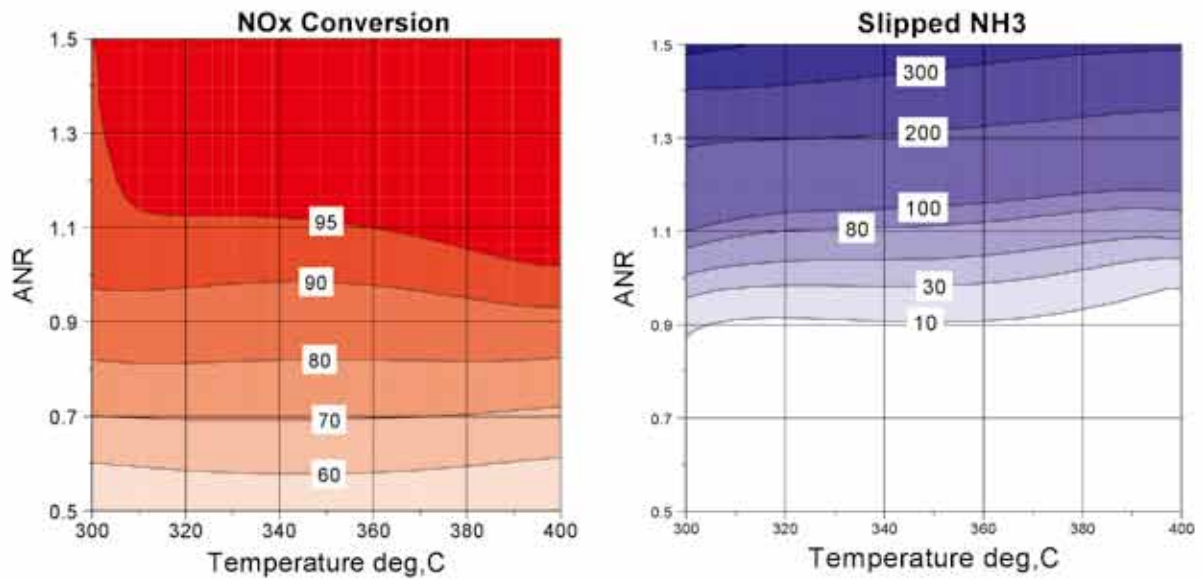


図 2-34 硫黄被毒後のNO_x低減率マップ(左)と未反応アンモニア濃度マップ(右)
(触媒A)

触媒Aの初期特性（図2-33）と比較すると、硫黄被毒によりNO_x低減率および未反応アンモニアの排出特性は若干劣るものの、実機の排気ガス温度範囲、かつANR0.9においてはNO_x低減率80%以上、未反応アンモニアの排出濃度10ppm以下を確保していることを確認した。

以上のとおり、バナジウム系触媒の耐硫黄性は高く、C重油燃料使用時の適応可能性が確認されたため、実機先行試験供試用として触媒Aを選定した。

2. 2. 2. 3 実機先行試験による高硫黄分含有燃料対応脱硝触媒の評価

触媒装置（触媒反応器、排気系統）を設計・製作し、要素試験により選定した触媒Aを用いて、実機排気ガスによる初期性能を評価した。試験モードはD2モードである。

(1) 触媒装置

表2-8に触媒装置の主要諸元、図2-35に同系統図を示す。触媒構成は、150mm角の触媒ブロックを1段につき16個配置し、4段積とした。その触媒層を出入口ダクトで挟み、触媒反応器を構成している。

また、尿素と排気ガスの混合促進のため、小形高速主機と同様にミキサーを尿素噴射ノズルと触媒反応器の間に配置し、その効果を調査した。尿素は、機関回転速度および負荷、機関出口NOx濃度より必要噴射量を算出し、アンモニアとNOx比（ANR）が0.9の条件で計測を行った。但しD2モードのうち、10%負荷においては、後述するとおり尿素噴射を行わなかった。

表2-8 触媒装置の主要諸元

脱硝方式		乾式選択還元方式
触媒ブロック寸法	mm	150×150×150
触媒ブロック個数	個	64
定格時の空間速度（SV）	h-1	20,000
還元剤種類		40%尿素水
還元剤噴射方式		エアレス方式

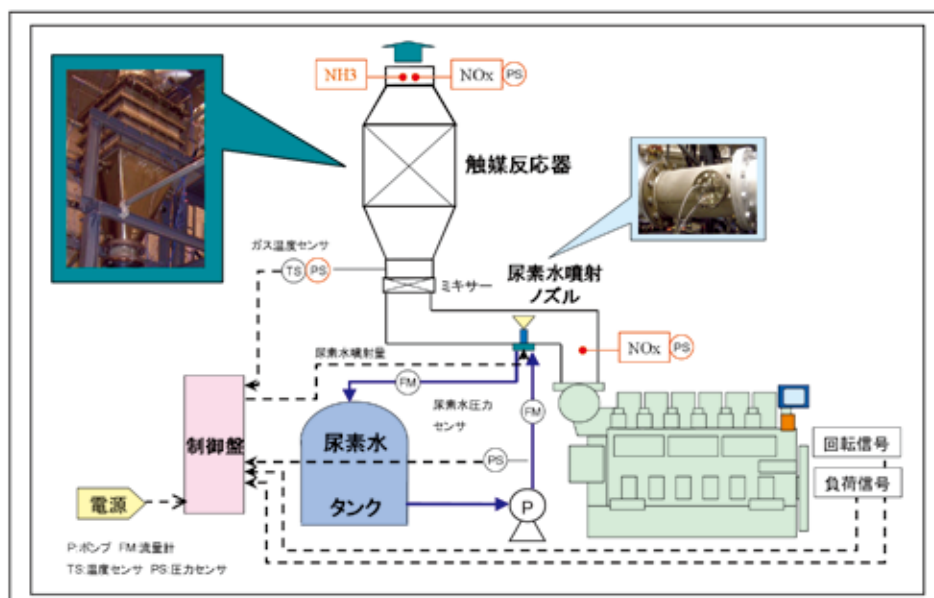


図2-35 触媒装置系統図

(2) 実機による初期性能評価

IMO 3次規制では、モードNO_x値と各負荷での上限を定めたエミッションキャップ（モードNO_x値の1.5倍以下）が規定されている。本供試機関の場合、定格回転速度900min⁻¹であるため、NO_x規制値は2.3g/kWh（D2モード）、エミッションキャップは10%負荷を除き、約3.5g/kWhとなる。

図2-36にD2モードでのNO_x計測結果を示す。モードNO_x値およびエミッションキャップについて、IMO 3次規制値を満足する初期性能が得られた。またアンモニアスリップは、10ppm以下であった。規制、および機関出口の排気温度が低いことを踏まえて10%負荷での尿素噴射は行っていない。

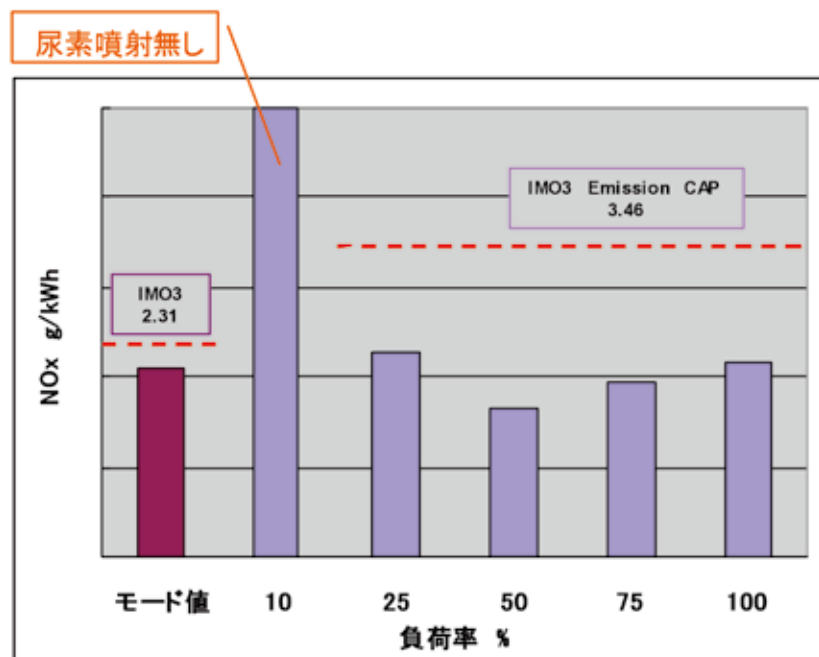


図2-36 NO_x排出特性 (SV=20, 000h⁻¹)

2.2.3 尿素供給装置の開発

2.2.3.1 最適な排気系の形状および尿素供給位置の検討

流体解析を用いて、尿素を供給する位置・方法および排気管や触媒反応器に関する詳細検討結果について述べる。尿素供給方式について、抜粋して後述する。

まず、流体解析に用いる尿素噴霧モデルの調整を行った。供試した噴射ノズルは1秒間における噴射のON/OFF期間の割合を変更することで噴射量を調節しているため、実機排気ガス量に関係なく、噴射中の噴射圧は0.8MPaで、噴射中の噴射量は5.6g/secと一定である。

図2-37にモデルの調節結果を高速度カメラで撮影した写真と共に示す。実機における尿素噴射圧力で大気中に噴射し、噴霧が発達していく様子と一致するように、噴霧モデルの調節を行った結果、小形補機関においても噴霧の角度および発達していく過程を良好に再現

させることができた。なお、尿素水の約7割が水であるため、この流体解析では尿素水の物性値の代わりに水の物性値を用いて解析を行っている。

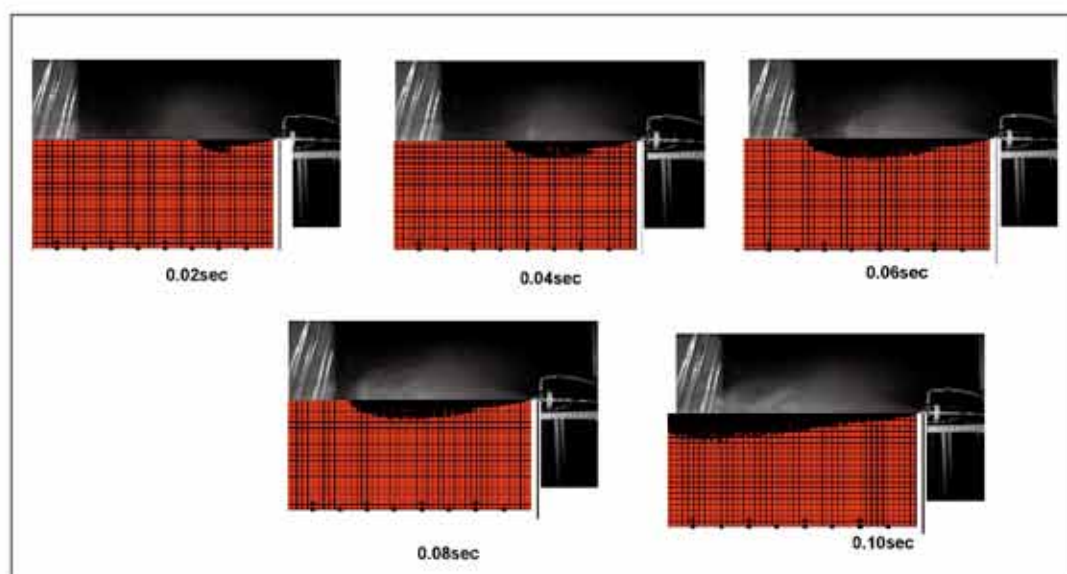


図2-37 尿素噴霧の比較（写真上：実験、写真下：流体解析）

尿素噴射ノズルについて、尿素と圧縮空気を同時に噴射して、噴霧の微粒化を促進させた2流体式ノズル（エアアシスト式）が有効であることを確認するために、エアアシスト、エアレス、それぞれによる尿素噴霧の分布について、噴霧の粒径を変更した解析を行った結果を示す（図2-38）。

図2-38は、尿素噴霧が触媒に到達した直後の尿素分布を示しており、時間が経つにつれて尿素的混合気が触媒コーン部に満たされていく前段階の状態である。エアアシスト式ノズルから噴射された尿素はミキサーに到達するまでに蒸発し、排気ガスとの混合気になって、ミキサーによってコーン部を左右対称に広がりながら、触媒入口に到達しているのに対し、エアレス式（エアアシストなし）の場合は、尿素噴霧の液滴が蒸発する前に触媒入口に達し、排気管の曲がり形状の影響で触媒の片側に流されていくことが分かった。

本解析モデルには実船試験用の排気管を用いて、実船レイアウト上の曲がりの影響についての事前検討も兼ねることとした。これも含めて、エアアシスト式ノズルの効果を確認することができた。

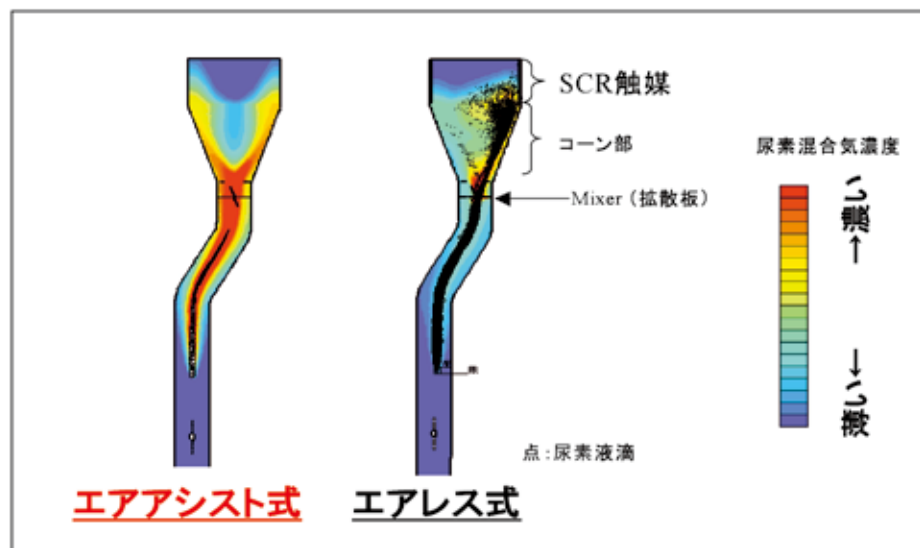


図 2-38 尿素供給方式による影響

2. 2. 3. 2 負荷変動対応可能な尿素供給装置の開発

(1) 制御ロジック (概要) について

定常状態での機関運転とは別に、負荷が急変動した際（小形補機関では負荷投入や遮断時）の尿素過剰噴射によるアンモニアスリップ等を防止するためには、尿素噴射量をより高度に、かつ効果的に定量化しなければならない。そのためには、急激な負荷変動にも対応して尿素噴射量を素早く変化させることが可能な尿素供給装置および制御装置の開発が必要である。加えて、その制御装置を支えるためのセンシング技術の開発も必要になる。

NO_x算出方式と過渡制御概要については、小形高速主機関と同様のロジックを検討しており、2. 1. 3. 1項にて述べたため、ここでは省略する。負荷と回転信号については、発電機から得る。なお、小形高速主機関との大きな相違点は、IMO規制モードにおいて、尿素噴射量をゼロにする負荷（10%負荷）を設定することにある。

これらを盛り込んで、実機先行耐久試験用SCR統合制御盤を製作した。

(2) 尿素噴射装置について

① 調量方式

ポンプ回転数をインバータ制御で可変とし、その回転数に対して吐出量が正確に比例するポンプを採用するインバータモータポンプ式とした（図2-39、40）。

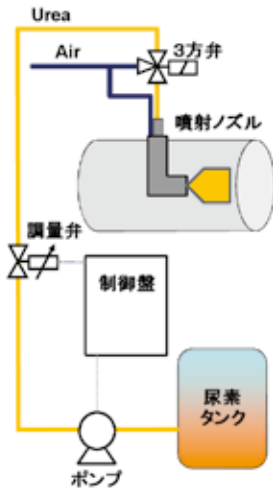


図 2-39 調量弁方式



図 2-40 インバータモータポンプ方式

② 尿素噴射ノズル

尿素噴射ノズルについては、広い流量レンジについてラインナップされている内部混合式の2流体ノズルを採用した。

2. 2. 4 実機での脱硝性能調査

2. 2. 4. 1 実機性能調査

(1) エアアシスト式尿素供給装置による性能調査

尿素供給装置の脱硝性能に与える影響を調査するために、実機によるエアレス式とエアアシスト式の比較検証試験を行った。図 2-41 にその結果（負荷変更）を示す。横軸はANR (NH₃/NO_x比) である。

エアアシスト式の方がエアレス式よりも、各負荷域においてNO_x低減率が高い結果を示した。これは、エアアシスト式の方が微粒化が促進され、排気管内中央での尿素噴射により噴霧の分散が良好になることから、蒸発促進およびアンモニアの生成が効率的に行われたものと考えられる。

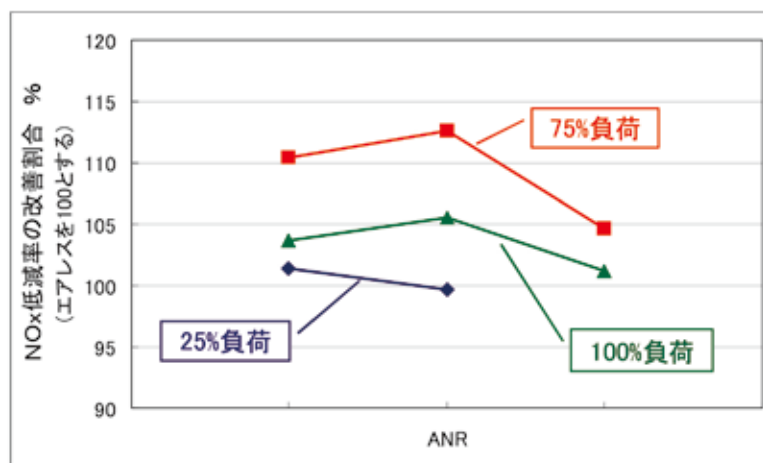


図 2-41 尿素供給装置による脱硝性能への影響

(2) 脱硝性能達成状況

図2-42に、小形補機関の脱硝性能達成状況を仕様ごとに示す。標準”はIMO1次仕様であり、“機関対応”はIMO2次仕様で機関出口NOx低減結果を示し、“+SCR装備”がIMO2次対応機関にSCRによる脱硝を加えたものである。SCRを装備することで大幅にNOxを低減していることが分かり、IMO3次のNOx規制値に対し、余裕をもってクリアしている。NOx低減率としては、IMO2次対応機関をベースに80%以上になる(SV=20,000h⁻¹)。なお、各負荷、エミッションキャップ(10%負荷を除く)、アンモニアスリップを満足している。尿素供給装置は、エアアシスト式である。

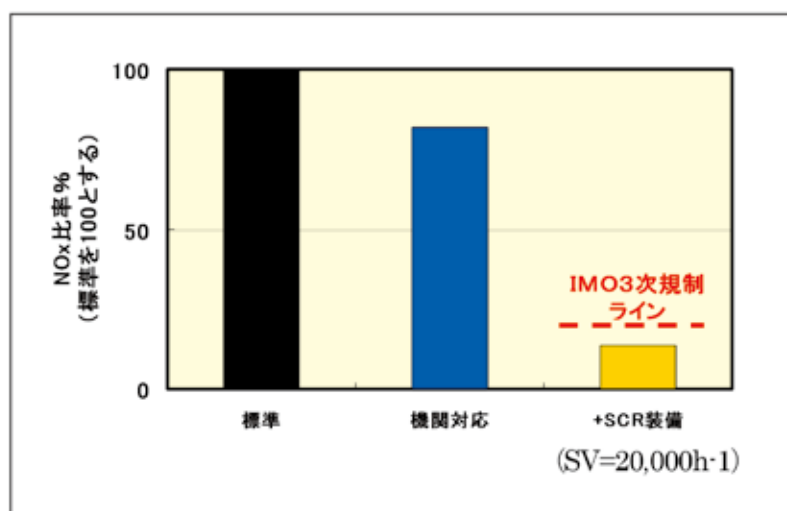


図2-42 脱硝性能達成状況

(3) 実機による予備調査結果

2.2.1.2項の機関出口の排気温度調査結果より、負荷に対して温度範囲のあることが分かっていたため、機関出口排気温度、すなわち触媒入口での排気温度と脱硝性能の関係について、追加調査した。その結果を図2-43に示す。

図2-43より、触媒入口の排気温度が低下すると、アンモニアスリップが増加することが分かった。アンモニアスリップの増加はある温度以下で徐々に増え始め、さらに温度が低下すると急増している。一方、NOx低減率はこれと逆の関係になり、ある温度を下回ると急激に低下する。しかしながら、温度が低い場合でもNOx低減率はある程度維持する傾向にある。これより、温度低下時には、アンモニアスリップの急増が、特に課題になることが分かった。

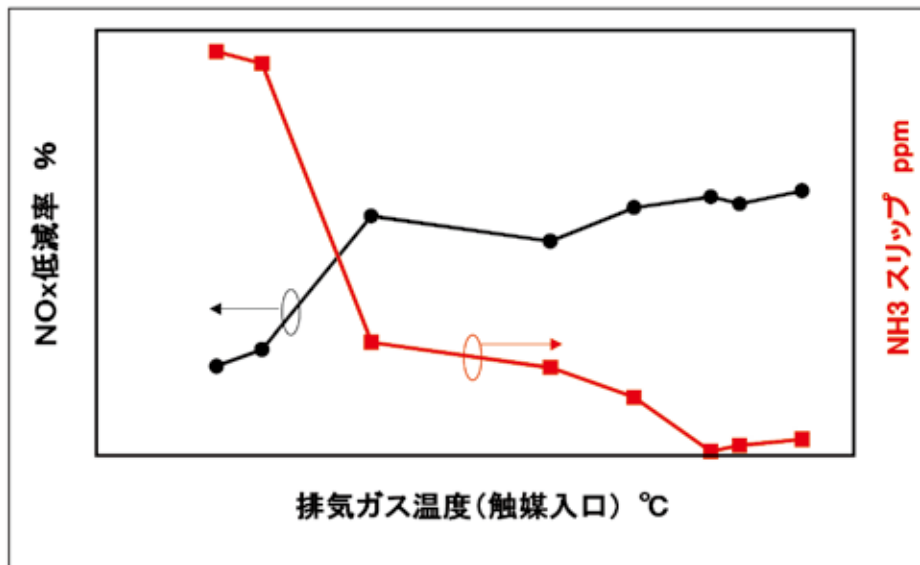


図 2-43 排気ガス温度と脱硝性能の関係

2. 2. 4. 2 負荷変動時の実機性能調査

開発したSCR統合制御盤と周辺装置を用いて、負荷投入・遮断試験を実施した。

図 2-44 に、低負荷から中負荷へ1段投入（のみ）を実施した場合の脱硝性能の挙動を示す。横軸は、負荷投入時を0 sとした時間を示す。負荷投入に伴い排気ガス流量が増加するために、SV値は急上昇する。結果、投入直後、若干の遅れから尿素供給量（Urea cc/min）の増加が始まり、その後、短時間で安定する。この間、負荷投入直後では触媒入口のNO_x濃度の変動も受けてNO_x低減率が若干低下しているものの、出口NO_x濃度は負荷投入前後でほぼ一定であり、触媒機能としては連続的に脱硝を継続していると考えられる。

NO_x低減率が低下しているとは言え、その低下量はわずかであり、短時間で投入前（定常状態）の状態に回復している。また、アンモニアスリップの発生は見られなかった。

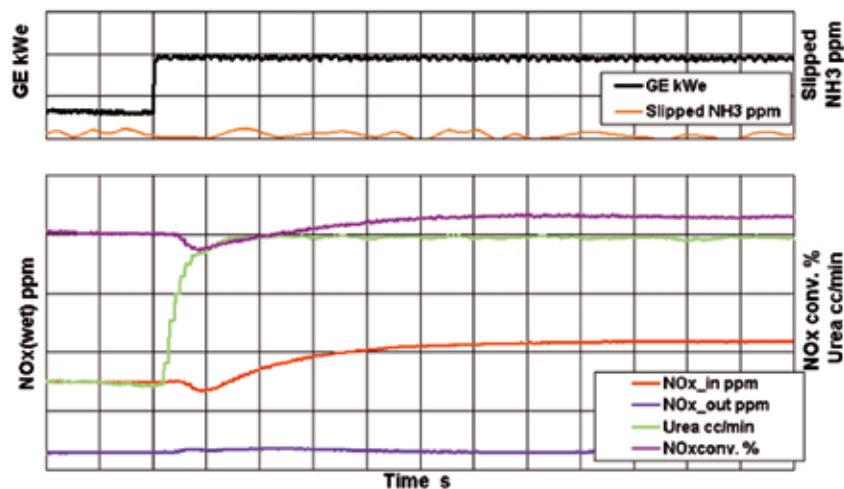


図 2-44 1段投入における試験結果

2. 2. 5 耐久性能調査

2. 2. 5. 1 実機先行耐久試験準備

実船試験フェーズを最終総合評価と位置付けたうえで、以下を目的として実機先行耐久試験を実施するためのベンチ改造、新触媒反応器（触媒回収可能、スートブロー付き）の設計製作などを行った。

- ① 管理された負荷設定のもとで連続運転を行い、定期的な触媒の回収を行うことで精度の高い劣化データを取得する。
- ② あらかじめ陸上においてシステム全体としての総合運転を行うことで、初期に発生する軽微な不具合を払拭し、実船試験の実質耐久時間確保を確実なものとする。

2. 2. 5. 2 実機先行耐久試験

(1) 試験方法：負荷パターン、データ計測

機関の運転パターンについて、実用的な使用を想定し、補機D2サイクルをベースとした運転パターンを適用することとした。D2サイクルは図2-45のようなウェイティングファクタが設定されており、これを23時間1サイクルとして各負荷にウェイティングファクタ相当の時間を割り振った（図2-46）。

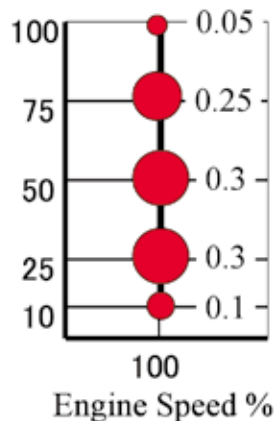


図2-45 補機D2モード

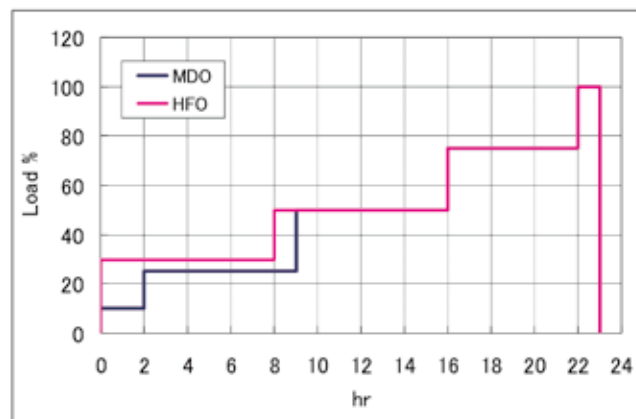


図2-46 耐久試験 負荷パターン

(2) 耐久試験要領

耐久試験は、燃料中に含まれる硫黄分のレベルに対して、大きく二つのフェーズに分けて実施した。第1フェーズは硫黄分0.04%、0.6%の燃料で、第2フェーズは硫黄分2%のC重油を用い、各フェーズで触媒の仕様を変更した。また、第1フェーズでは途中で機関仕様の変更を行った。変更した仕様の経緯を図2-47に示す。

第1フェーズ 運転時間	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
燃料中 硫黄分	0.04%					0.60%			
機関仕様	IMO Tier1				IMO Tier2				
触媒	MDO用触媒								
触媒配置	4*4*3								

第2フェーズ 運転時間	0	250	500	750	1000
燃料中 硫黄分	2%				
機関仕様	IMO Tier2				
触媒	HFO用触媒				
触媒配置	4*4*5				

図 2-47 各フェーズの仕様変更経緯

(3) 耐久試験結果

① 第1フェーズ

第1フェーズでの耐久試験結果について、図2-48に定格負荷のNOx低減率と触媒差圧の推移を示す。

耐久開始から750時間までは1次規制対応機関を供試していることから、ANRを0.7設定とし、2次規制値から3次規制値へのNOx低減量と同じになるように制御した。図2-48において750時間を境に、NOx低減率の絶対値が変化している（低い値から高い値へ）のは、そのためである。750時間以降は、2次規制対応機関とし、ANRを0.9に設定した。推移としては、2000時間の試験中、顕著なNOx低減率の低下（触媒劣化）は見られなかった。なお、運転時間1000時間での燃料変更（硫黄分0.04→0.6%）についても大きな影響（NOx低減率の急低下等）は出なかった。触媒差圧は、初期値から変化無く推移しており、触媒へのスス堆積を防止するためのストロー装置による効果が大きいと考える。なお、アンモニアスリップも問題ないレベルであった。

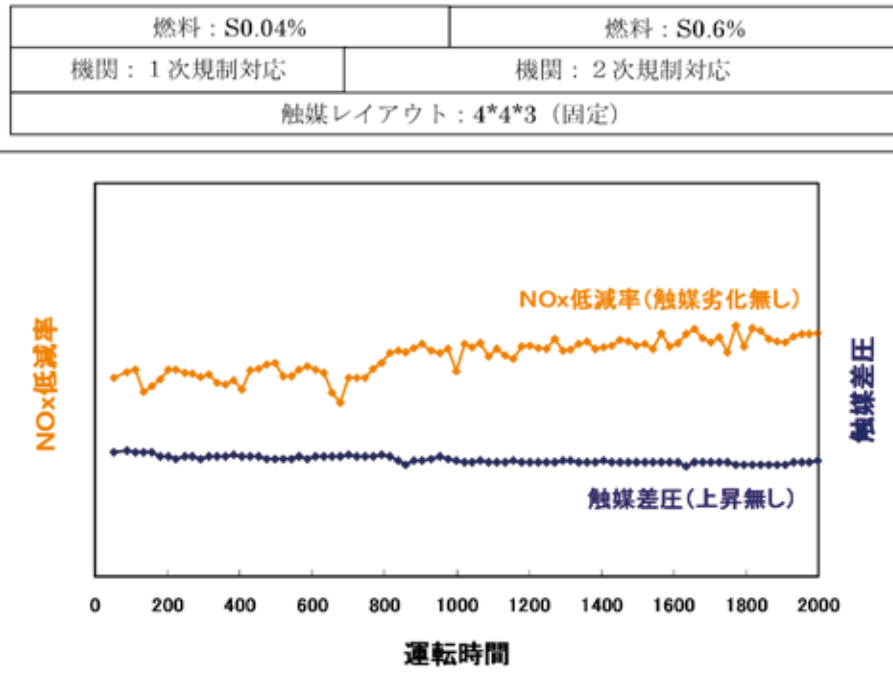


図 2-48 NOx 低減率と触媒差圧の推移（第1フェーズ）

② 第2フェーズ

第1フェーズ終了後、2次規制対応機関にて触媒仕様を変更して、C重油による耐久試験を実施した。触媒仕様の変更に伴い、耐久試験開始前に初期脱硝性能調査を行い、NOx低減率が80%以上であることを確認した（比較を含めて硫黄分0.04%の燃料を使用）。アンモニアスリップもほぼゼロであった。

第2フェーズでの耐久試験結果について、図2-49に定格負荷のNOx低減率と触媒差圧の推移を示す。C重油では燃料中に硫黄分が2%含まれていることから、硫黄による触媒劣化が懸念されたが、今回の1000時間耐久運転結果においては、第1フェーズの結果と同様に、顕著なNOx低減率の低下（触媒劣化）は見られなかった。また、触媒差圧もほぼ初期値から変化が無く、閉塞も発生していないことを別途目視確認した。スートブロー装置の有効性がさらに高まった結果である。なお、アンモニアスリップも問題ないレベルであった。

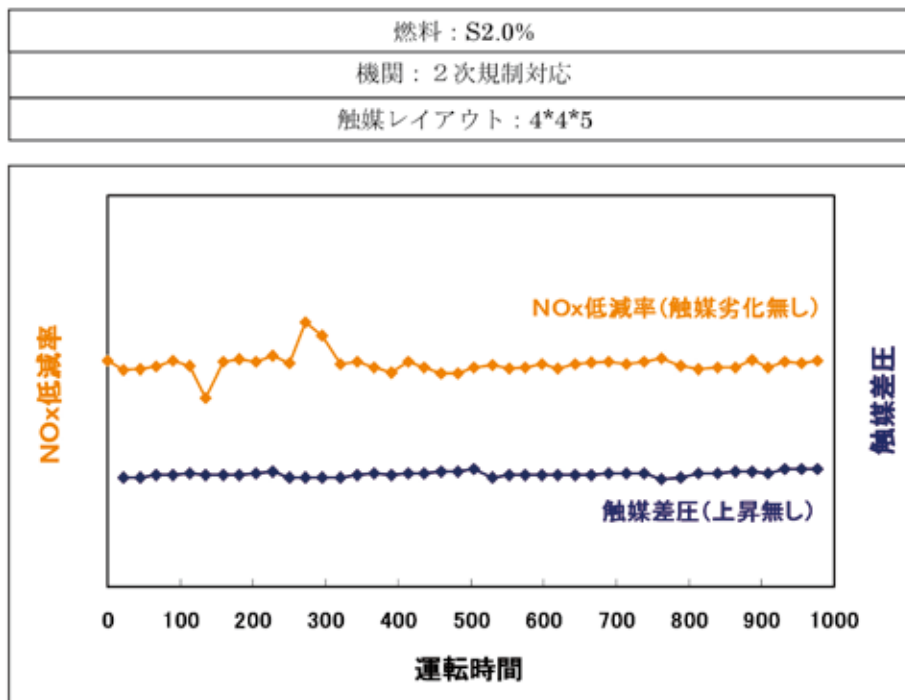


図 2-49 NOx低減率と触媒差圧の推移 (第2フェーズ)

2. 2. 5. 3 回収調査

前項の実機先行耐久試験：

第1フェーズ (硫黄分0.04%、0.6%燃料による/運転時間合計2000時間)

第2フェーズ (硫黄分2%燃料による/運転時間1000時間)

において運転された触媒ブロックについて、各々定期的にサンプリングし、要素試験により、汚染状況ならびに脱硝性能の経時変化を調査した。

(1) 触媒ブロックの回収要領

触媒ブロックは、250時間毎に1層目から1つずつ抜き取り、調査に供した。

(2) 回収調査項目および方法

表2-9に、調査項目と方法を示す。

表 2-9 回収調査項目および方法

No.	調査項目	方法
1	触媒ブロックの割れ・欠け	目視点検
2	セル内部のスート付着状況	写真撮影
3	触媒中の炭素分	高周波誘導加熱式炭素・硫黄分析
4	触媒中の硫黄分	高周波誘導加熱式炭素・硫黄分析
5	NOx低減率	流通式固定床型触媒反応装置

触媒ブロックサンプルの外観上の割れ・欠けを目視にて点検した後、ブロックを切断しセル内部のスト付着状況を写真撮影した。また、触媒に堆積された炭素分および硫黄分を高周波誘導加熱式炭素・硫黄分析装置（堀場製作所製EMIA-920V）を用いて分析した。さらに、触媒ブロックから、直径25.4mm×長さ75mmの円筒状テストピースをくり抜き、マイクロリアクターによりNO_x低減率を測定した。

NO_x低減率の測定については、表2-10に示すように劣化特性がより明確に捕らえやすい厳し目の条件にて実施した。実機試験条件よりも厳しい評価となっている。なお、還元剤はアンモニアガスを用い、ガス成分はフーリエ変換赤外分光（FT-IR）式ガス分析装置にて行った。

表2-10 NO_x低減率測定条件

項目	単位	設定値	
温度	℃	250, 300	
SV値	h ⁻¹	20,000	
アンモニア/NO _x 比	mol/mol	0.9	
模擬 ガス 成分	NO	ppm	1,000
	O ₂	%	12.0
	CO ₂	%	6.5
	H ₂ O	%	6.5
	HC (C ₃ H ₆)	ppmC ₁	100
	CO	ppm	50
	NH ₃	ppm	900

(3) 調査結果と考察

(3-1) 第1フェーズ(硫黄分0.04%および0.6%燃料による耐久運転)からの回収

① 触媒内部の炭素・硫黄分布

セル内部の炭素・硫黄分布を調査するため、触媒ブロック中央部より30W×150L×10tのサイズに切断し、セル内部のスト付着状況を調査した。調査結果を図2-50に示す。さらに図2-51に示すように、流れ方向に沿って6分割し、それぞれの全量をめのう乳鉢にて粉碎・平均化し、硫黄および炭素の分布を求めた。炭素分析結果を図2-52に示す。

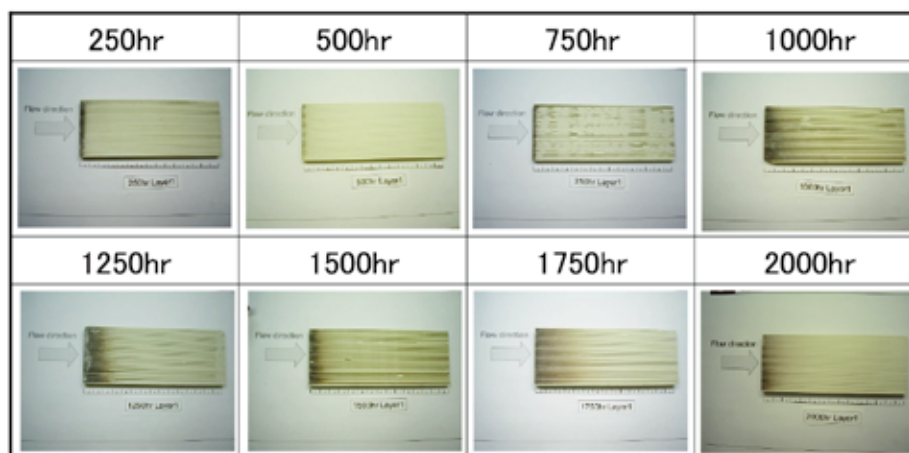


図 2-50 セル内部のソート付着状況 (硫黄分 0.04%、0.6%燃料)

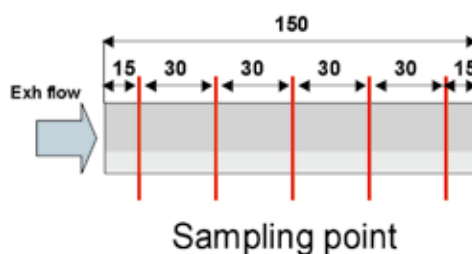


図 2-51 サンプル切断位置

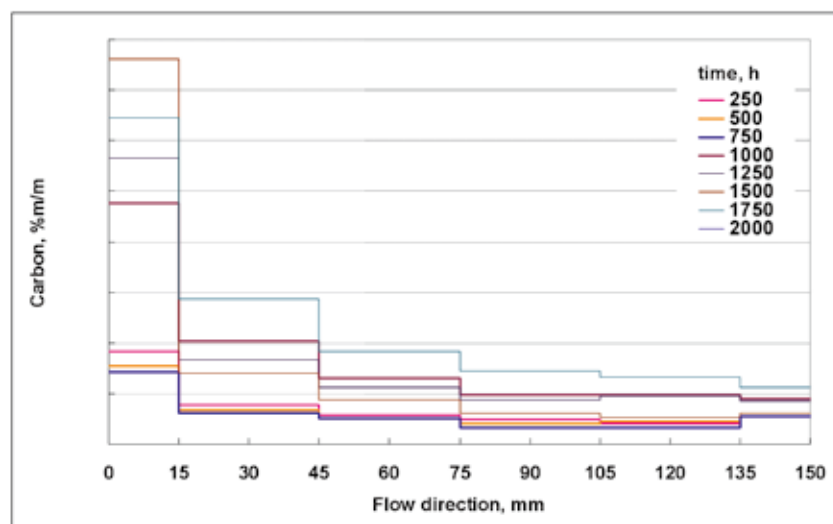


図 2-52 セル内部の炭素分布
(硫黄分 0.04%、0.6%燃料)

セル内の炭素は、触媒上流端に多く堆積しており、下流端では、ほぼ一定の値となっている挙動がうかがえる。これは触媒内へのソートの付着は上流から進行するが、

運転中に実施したストローにて脱離したストはセル壁面に再付着することなく、下流に排出されている効果を示しているものと推定される。

一方、セル内部の硫黄の分布は殆んどない。これは、触媒の酸化作用により排気ガス中の SO_2 が酸化されサルフェート(SO_3)として触媒表面に吸着されるが、 SO_3 への転化率は極めて低いため、セル内部全面に渡って吸着が起こることを示唆しているものと推定される。また、硫黄濃度は燃料中の硫黄分に依存している傾向が認められ、硫黄分0.04%燃料ではほぼ0%、硫黄分0.6%燃料では0.1~0.2wt%であった。

② NO_x 低減率

SV=20, 000 h^{-1} での NO_x 低減率の推移を図2-53に示す。硫黄分0.04%、0.6%燃料において、 NO_x 低減率は安定しており、著しい劣化は認められない。

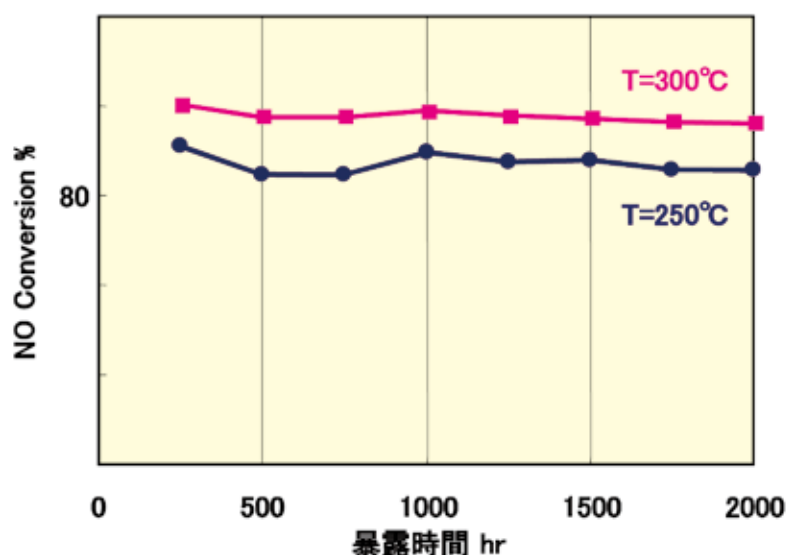


図2-53 NO_x 低減率の推移 (硫黄分0.04、0.6%燃料)

(3-2) 第2フェーズ(硫黄分2%燃料による耐久運転)からの回収

① 触媒内部の炭素・硫黄分布

3-1と同様に、セル内部のスト付着状況を図2-54に、触媒内部の炭素分布の測定結果を図2-55に示す。

炭素分については、硫黄分0.04%、0.6%燃料とほぼ同等の値となっているが、硫黄分については、A重油よりも高い値(0.25~0.35wt%)を示しており、また、運転時間に伴い増加する傾向が認められた。

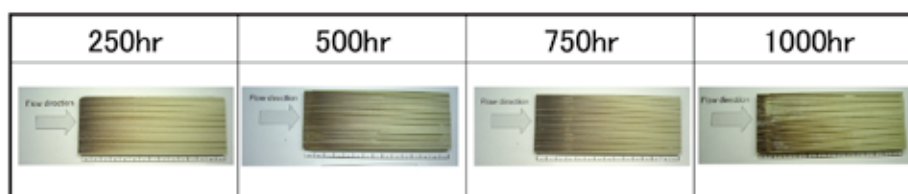


図2-54 セル内部のスト付着状況 (硫黄分2%燃料)

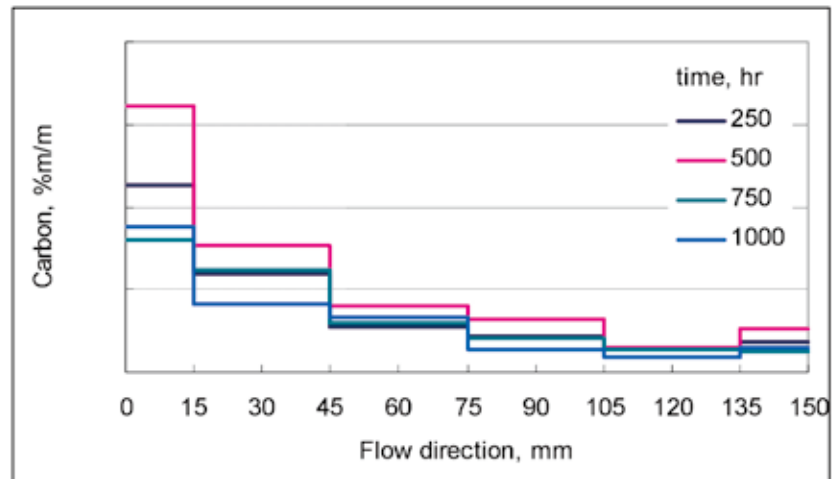


図 2-55 セル内部の炭素分布 (硫黄分 2%燃料)

② NO_x 低減率

SV=20, 000h⁻¹でのNO_x低減率の推移を図2-56に示す。初期劣化が認められるものの、500時間以降から徐々に安定化する傾向が認められ、1000時間にて、NO_x低減率80%がほぼ確保されることを確認できた (触媒入口温度は300℃で、実機よりも低い条件)。

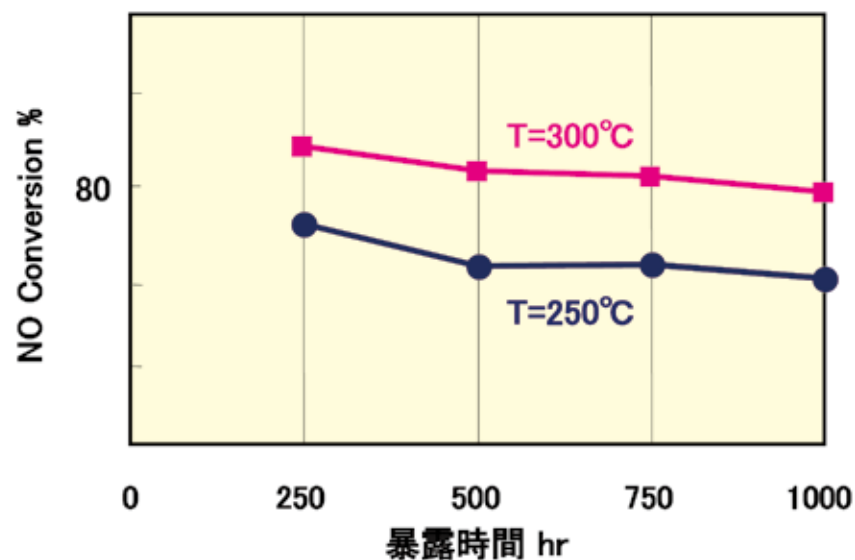


図 2-56 NO_x 低減率の推移 (硫黄分 2%燃料)

3. 実船試験内容

3. 1 小形高速主機関の事業内容と成果

3. 1. 1 試験概要

小形高速主機関における尿素脱硝装置（SCR）の実船試験について、試験概要を先に述べる。表3-1はSCR装置主要目、図3-1は試験船外観（概要含む）と触媒反応器の機関室への設置状況である。

表3-1 SCR装置主要目

装置	項目	仕様
尿素脱硝装置	触媒の種類	バナジウム系
	ハニカムサイズ	150×150×150(mm)
	SV値	30,000h ⁻¹
	バイパスライン	基本的には無し
	スートブロー装置	触媒前面への装備
尿素供給装置	尿素噴射装置	エアアシスト式
	尿素タンク容量	200L（定期的に補給）
	尿素タンク設置場所	舵機室内



図3-1 実船試験船外観と触媒反応器設置状況
(小形高速主機関)

表3-2に、実船試験での調査項目と内容、方法について、示す。触媒劣化については回収後の要素試験によるもので、本章の3.1.5項で後述する。

表3-2 実船試験調査概要

項目	詳細内容	方法
SCR性能	脱硝性能、NH ₃ スリップ 触媒差圧(ブロー性能) 触媒入口排気温度	データ収録装置
システム	搭載性 構成ユニットの耐久性 制御ロジック	設置工事、他 試験終了後調査 データ収録装置
エンジン性能	タービン出口排気温度 背圧、他	データ収録装置
触媒劣化	脱硝率、NH ₃ スリップ S付着量(燃料S分変更) C付着量、等	触媒回収 回収後、要素試験

3. 1. 2 触媒反応器詳細と実船レイアウト

触媒反応器詳細について図3-2に、SCR装置の全体レイアウトについて図3-3に、各機器設置状況を図3-4に示す。

小形高速主機関における触媒反応器は、排気系統上、水平置きで、触媒を反応器に密閉するように挿入している（一体型であり、小形補機関のカセット式とは異なる）。そして、使用燃料が軽油であること、機関室のスペースが少ないこと等を考慮し、スートブロー槽は触媒の前面にのみ、配置した。構造としては、触媒槽と同型の槽の内部にスートブロー管を組み込んでいる。

図3-3において、図中“NO_xセンサ”がNO_x計測位置を示す。バイパス管は、エマージェンシー用として設置し、海域による切り換えを想定せず、触媒が常時排気ガスに暴露されることになる。スペース上、排気主管と同径のバイパス管設置は困難であった。なお、圧縮空気を供給するため、コンプレッサを新規に搭載した。

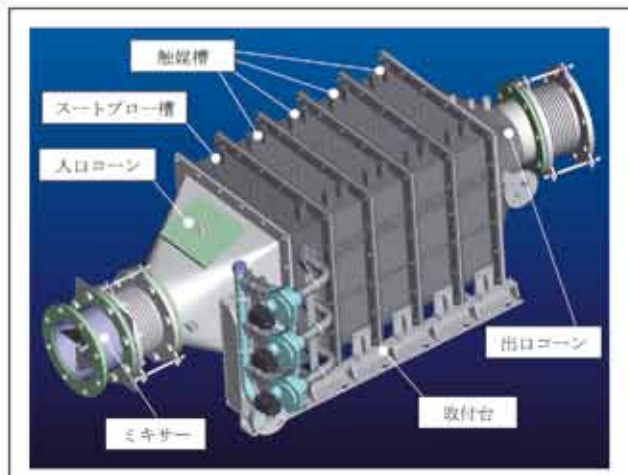


図3-2 触媒反応器詳細

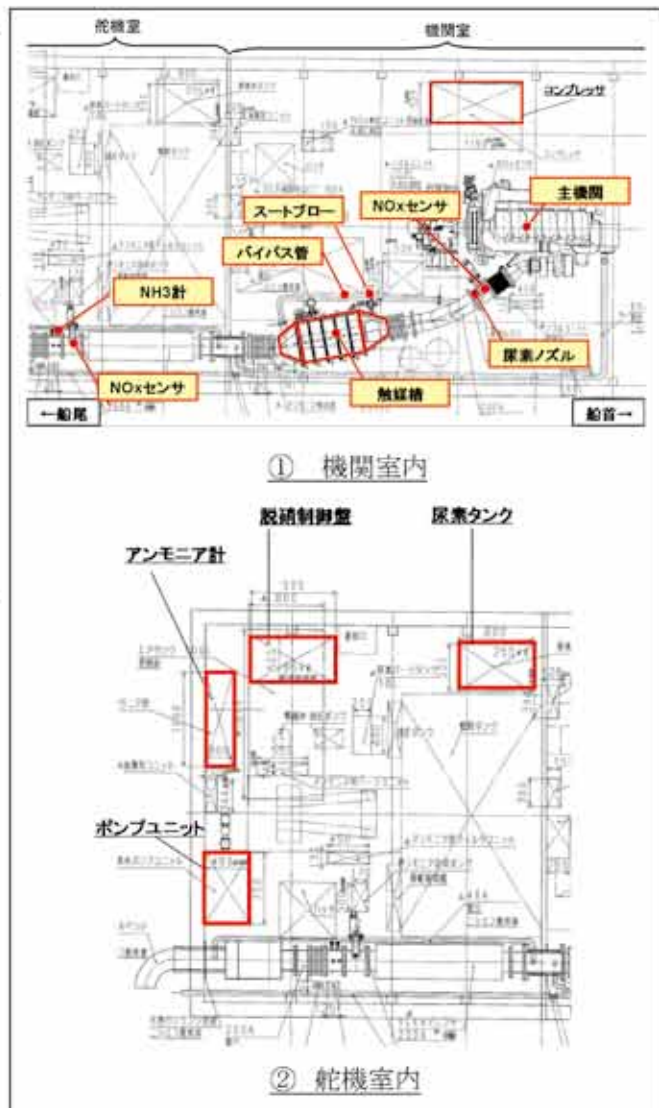


図3-3 SCR装置全体レイアウト



図 3-4 各機器設置状況(外観)(赤：機関室内、青：舵機室内)

3. 1. 3 初期脱硝性能の評価

試験船搭載機関への対応要領と共に、初期脱硝性能について、述べる。

試験船への搭載機関（弊社6AY-SGT形機関）は、要素技術開発にて触媒サイズを確定した際の機関条件に比べて、出力が高く、NO_x排出量が多かった（要素技術開発でのIMO 2次仕様に対し、本船はIMO 1次仕様であった）。本船のようなケースにおいてSCRを適用するには、装置をコンパクトにまとめることが、特に重要な要素になる。そのため、触媒容量を増加させて同等のSV値をねらうのではなく、触媒サイズを固定し、機関回転速度に応じた尿素噴射量（ANR）制御のロジック（図3-5）を導入することとした。図中プロットは、IMOのE3モード点を示す。

高SV域での触媒への負担を少なくするため、高回転速度（高負荷）域でANRを抑制

し、低回転速度（低負荷/低SV）域でANRを高める制御を実船試験の初期段階にて行った結果（図3-6）、全域、ANRに略等しい脱硝率を確保できることを実証した。その際、アンモニアスリップの発生も、目標値以内に抑制することができた。そして検証のために、この実船でのNO_xデータと、燃費等その他はベンチ試験データを用いることにより、SCR適用時のIMOのE3モードNO_x値を算出した結果、NO_x低減率（脱硝率）80%になることを確認した。なお、図3-7において、“機関出口NO_x”はベンチ試験データである。

ANR制御との組合せにより、高SV値への対応を図ることができることを確認した後、本船での試験を開始した。

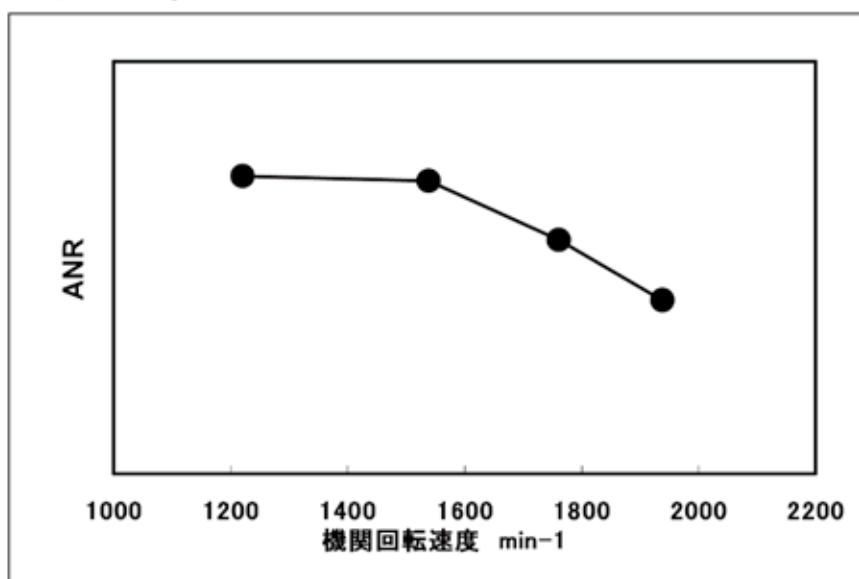


図3-5 機関回転速度に応じたANR制御

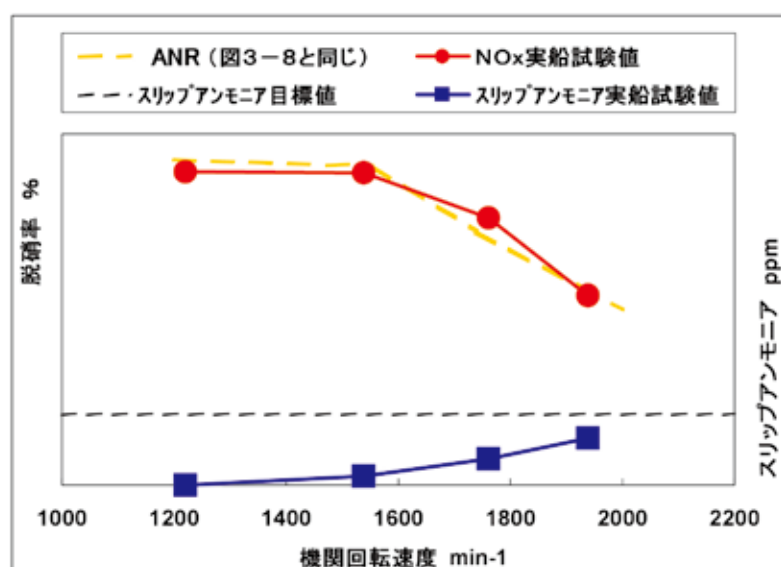


図3-6 初期脱硝性能

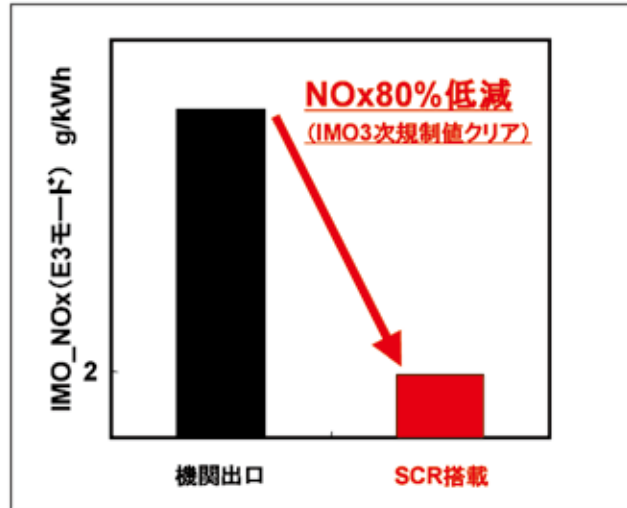


図3-7 IMO-NO_x値(3次規制値=1.98g/kWh)

3.1.4 触媒耐久性評価

図3-8に、実船運転でのSCRによる脱硝率の履歴を示す。幅広い回転速度と負荷域をもった運転パターンの中で、最も厳しい(高SVの)定格負荷付近(1800~1900min⁻¹)で巡航状態となった際のデータを示した(プロットが無い部分も運転を行っている)。運転時間は、約150時間であった。船の搭乗人員、積載量、波の高さなど、運行事情により巡航状態となる回転速度がある程度変動するため、これに応じて脱硝率も変動しているが、初期値からの著しい低下といった現象は見られなかった。回転速度に応じたANR制御に基づく脱硝率と実際の値とを比較しても誤差は小さく、尿素噴射量の大きなバラツキ無く、良好な制御を保つことができたことも伺える。

なお、運転時間が100時間を迎えた際に、初期と同様に船上でのE3モード点(相当)での脱硝率を計測しているが、各点でも低下は見られていない。また、排気ガスが常時暴露される結果になったが、触媒差圧の上昇は見られなかった。

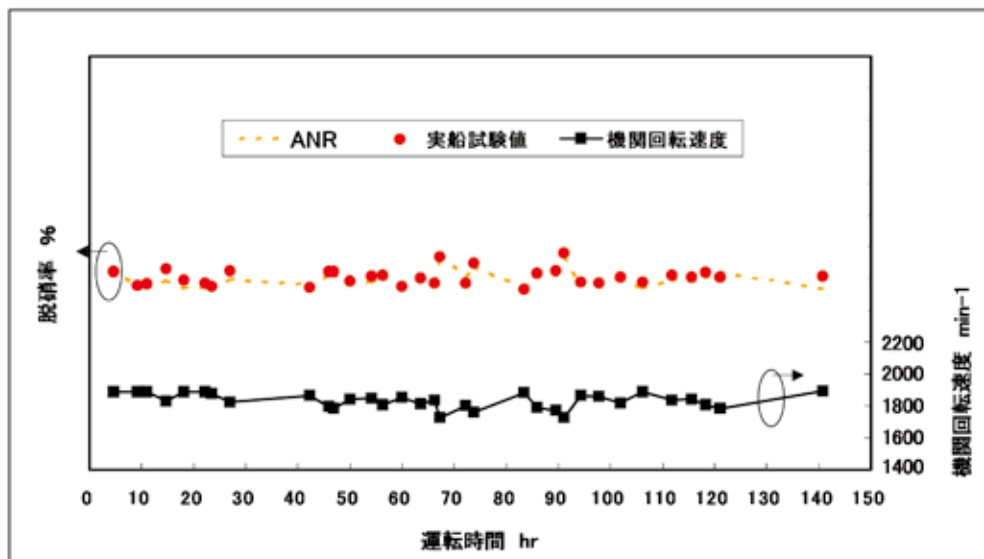


図3-8 実船運転でのSCRによる脱硝率の推移

3. 1. 5 触媒回収調査

小形高速主機関の実船試験から回収された軽油による耐久（150時間）サンプルについて、要素試験による詳細分析を行った。実船試験に供試した触媒諸元を表3-3に改めて示す。触媒仕様は、小形補機関のA重油用とほぼ同一のセル密度を供試した。

表3-3 小形高速主機関の実船試験への供試触媒諸元

	軽油耐久試験
セル密度	100psi
触媒ブロック寸法	150×150×150mm
触媒ブロック配列	3×3×4
総触媒容積	0.1215m ³

(1) 調査項目

実船試験より回収した触媒サンプルについて、セル内部の汚染状況および脱硝性能を調査した。調査項目を表3-4に示す。

表3-4 触媒調査項目と方法

No.	調査項目	方法
1	触媒ブロックの割れ・欠け	目視点検
2	セル内部のスート付着状況	写真撮影
3	触媒中の炭素分	高周波誘導加熱式炭素・硫黄分析
4	触媒中の硫黄分	高周波誘導加熱式炭素・硫黄分析
5	脱硝率	流通式固定床型触媒反応装置

触媒ブロックサンプルの外観上の割れ・欠けを目視にて点検した後、ブロックを切断して、セル内部のスート付着状況を写真撮影した。また、触媒に堆積された炭素分および硫黄分について、高周波誘導加熱式炭素・硫黄分析装置（堀場製作所製EMIA-920V）を用いて分析した。さらに触媒ブロックから、直径25.4mm×長さ75mmの円筒状テストピースをくり抜き、マイクロリアクターにより脱硝率を測定した。表3-5に、その測定条件を示す。

脱硝率は、各層の劣化状況を明確にするために、より低温な条件にて測定した。なお、還元剤はアンモニアガスを用い、ガス成分はフーリエ変換赤外分光（FT-IR）式ガス分析装置（ベスト測器製SEASAM3）にて行った。

表 3-5 脱硝率測定条件

項目	単位	設定値	
温度	℃	250, 300	
SV 値	h ⁻¹	20,000	
アンモニア/NOx 比	mol/mol	0.9	
模擬ガス成分	NO	ppm	1,000
	O ₂	%	12.0
	CO ₂	%	6.5
	H ₂ O	%	6.5
	HC (C ₃ H ₆)	ppmC ₁	100
	CO	ppm	50
	NH ₃	ppm	900

(2) 軽油耐久試験サンプル

① 供試触媒

調査に供した触媒サンプルは、軽油での運転時間が約 150 時間のものである。

触媒槽は 4 層構造となっており、各層の中央近傍の触媒ブロックを 1 層目と 4 層目について、各 1 個を取り出して調査した。

② セル内のスート付着状況

図 3-9 に触媒の断面写真を示す。1 層目の上流近傍では、黒色のスート成分の付着が若干観察されたが、その他の部位では、ほぼ新品状態の色調を示していた。

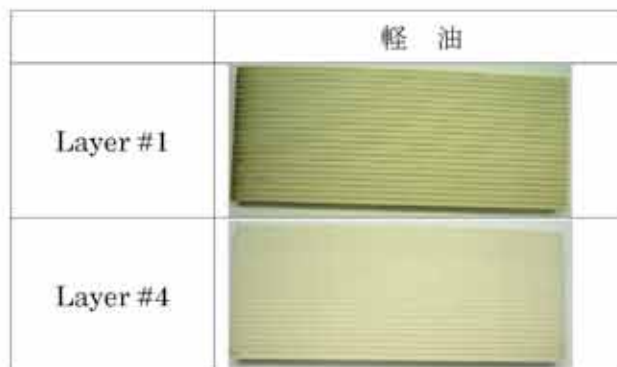


図 3-9 触媒の断面写真

そこで、触媒サンプルを図 3-10 に示すように 6 分割し、それぞれについて触媒中の炭素濃度および硫黄濃度を計測した。その結果を図 3-11 に示す。

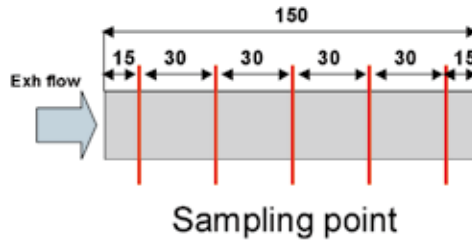


図 3-10 炭素・硫黄分布分析用サンプル採取位置

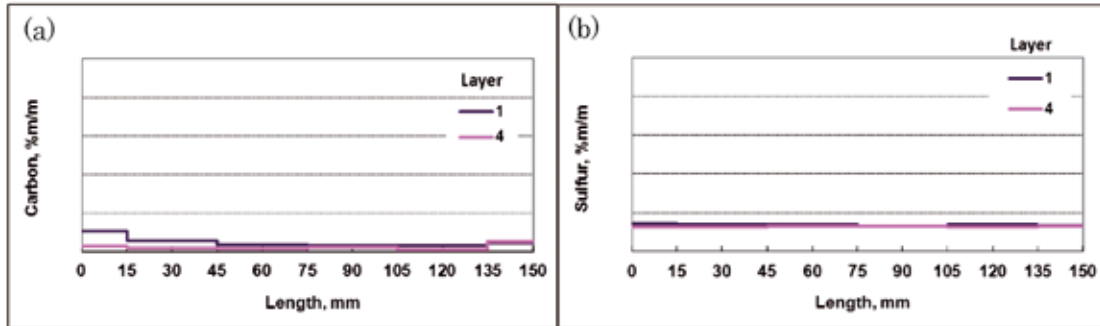


図 3-11 各触媒の (a) 炭素分布および (b) 硫黄分布

セル内の炭素は触媒上流端に堆積しており、下流端では、ほぼ一定の値となっている挙動がうかがえる。これは、触媒内へのスートの付着が上流から進行するが、運転中に実施したスートブローにて脱離したスートはセル壁面に再付着することなく、下流に排出されている効果を示しているものと推定される。一方、セル内部の硫黄の分布は殆んどない。脱硝特性の調査結果を図 3-12、13 に示す。

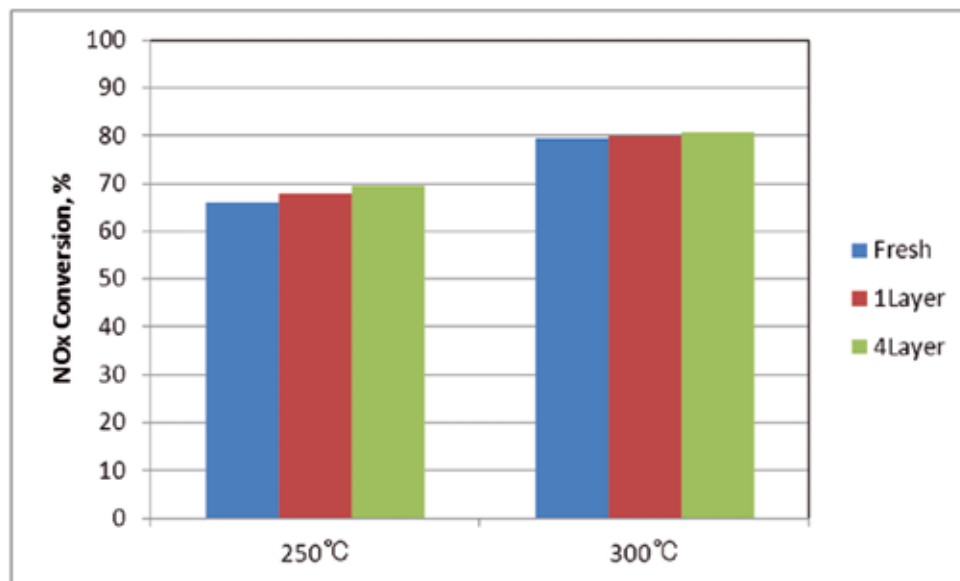


図 3-12 脱硝率測定結果 (軽油サンプル)

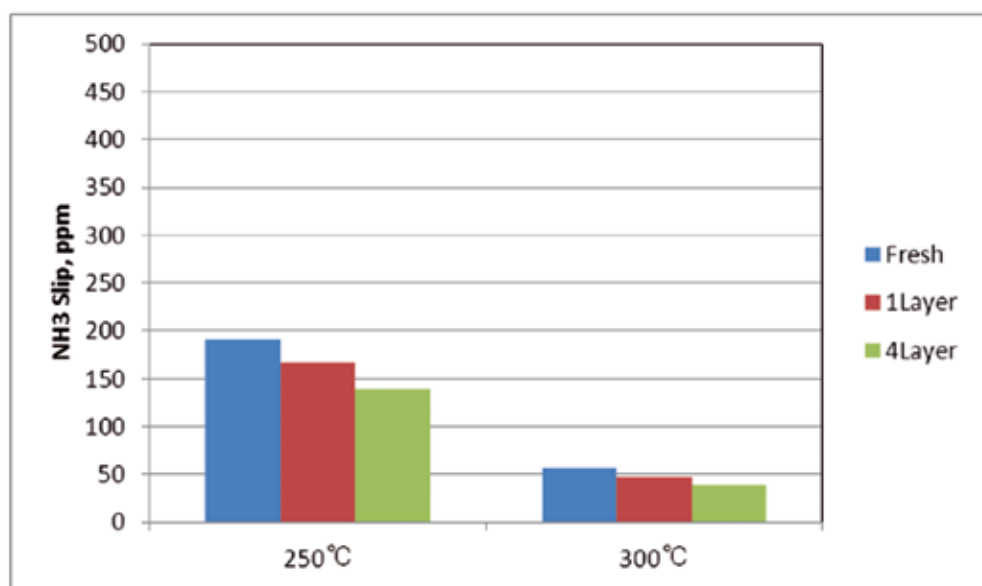


図3-13 アンモニアスリップ測定結果（軽油サンプル）

1層目と4層目の脱硝率はいずれも新品触媒と同等であった。また、1層目と4層目の差もほとんど認められなかったことより、触媒は劣化していないことが分る。

3. 1. 6 メンテナンスインターバル決定のための指針策定

前項では、触媒各層の劣化状況を明確にするために、より低温な条件にて測定を行っている。その結果として、脱硝率の低下は見られなかった。言い換えると、排気ガス温度が高く、かつ低硫黄燃料を用い、スート、サルフェートが少ない条件においては、十分な触媒耐久性が得られるものと考えられる。また、今回、常時排気ガスに暴露される条件で、かつスートブローは前面のみ適用したことに対し、分析の結果、触媒へのスート付着が比較的少なかったことから、スートブローのインターバルを伸ばし、ブロー用エアの消費量を低減することも可能であると推定される。

なお、本船搭載主機関の排気ガス温度は高く、今回、低硫黄燃料を用いており、スートブロー層数、ブローのインターバルなどを含めて、設計指針として挙げられる。これらをもとに、メンテナンスインターバル決定のための指針を策定した。

3. 1. 7 復旧工事

実船試験終了後、実験船より触媒反応器を含む尿素脱硝装置一式を撤去し、復旧工事を行った。

3. 2 小形補機関の事業内容と成果

3. 2. 1 試験概要

小形補機関における尿素脱硝装置（SCR）の実船試験について、小形主機関と同様に、先に試験概要を示す。表3-6はSCR装置主要目、図3-14は試験船外観と触媒反応器の機関室への設置状況である。本線は外航船であり、補機関3台の内、1台にSCRを設置し、実船試験を行った。実船試験調査項目は表3-2と同じである。

表3-6 SCR装置主要目

装置	項目	仕様
尿素脱硝装置	触媒の種類	バナジウム系
	ハニカムサイズ	150×150×150(mm)
	SV値	A重油：17,000h ⁻¹ C重油：12,000h ⁻¹
	バイパスライン	有り
	スートブロー装置	各段装備
尿素供給装置	尿素噴射装置	エアアシスト式
	尿素タンク容量	13.5m ³ (85%負荷で2000時間相当)
	尿素タンク設置場所	機関室内

()…試験開始	外航補機(2010.11~)	
試験船		【試験船（トン数）】 バルクキャリア（95,000 t） 【供試機関、対象規制】 6EY18AL、IMO2 次仕様 (550kW/900min ⁻¹)
SCR 触媒反応器 (機関室内)	触媒反応器  (補機関)	【運転負荷】 40~80%負荷 【使用燃料】 A重油（本試験限定） C重油

図3-14 実船試験船外観と触媒反応器設置状況
(小形補機関)

3. 2. 2 触媒反応器詳細と実船レイアウト

小形補機関の触媒反応器詳細について図3-15に、SCR装置の全体レイアウト（NO_x計測位置を含む）について図3-16に、各機器設置状況を図3-17に示す。

小形高速主機関用（図3-2）とは異なり、小形補機関の触媒反応器（図3-15）では特にC重油使用の観点から、スートブロー槽を各触媒槽に装備している。また、触媒槽においては、外枠と触媒保持器（以下、カセットという）

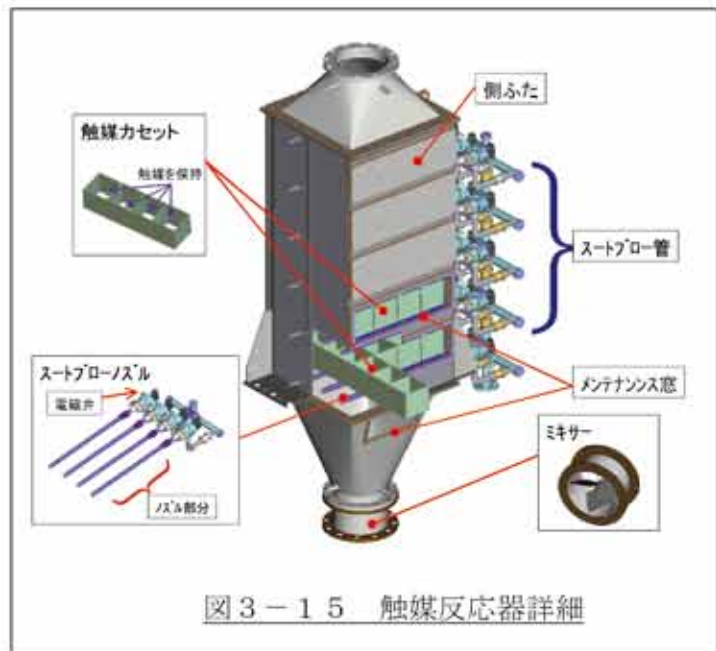


図3-15 触媒反応器詳細

とを機能分けし、触媒槽の窓からカセットを出し入れ可能にした。触媒槽内のカセットは側フタにより押さえつけられ、振動条件下においても固定される構造になっている。1つのカセットに組み込む触媒の個数は、人が運搬可能な重さになるように設計した。これらにより、触媒はカセット内に確実に保持される一方、回収と入れ換えが容易に行えるよう、メンテナンス性に配慮した（触媒目詰まりといった万一の不具合対応への考慮を含む）。

そして、触媒反応器の前後にはバタフライ弁式の排気ダンパを設け、切り換えによりバイパスラインの使用を可能にした。エマージェンシー用とIMO3次規制におけるECAと一般海域での切り換えを想定したものである。

これらの構造は、陸上での耐久試験

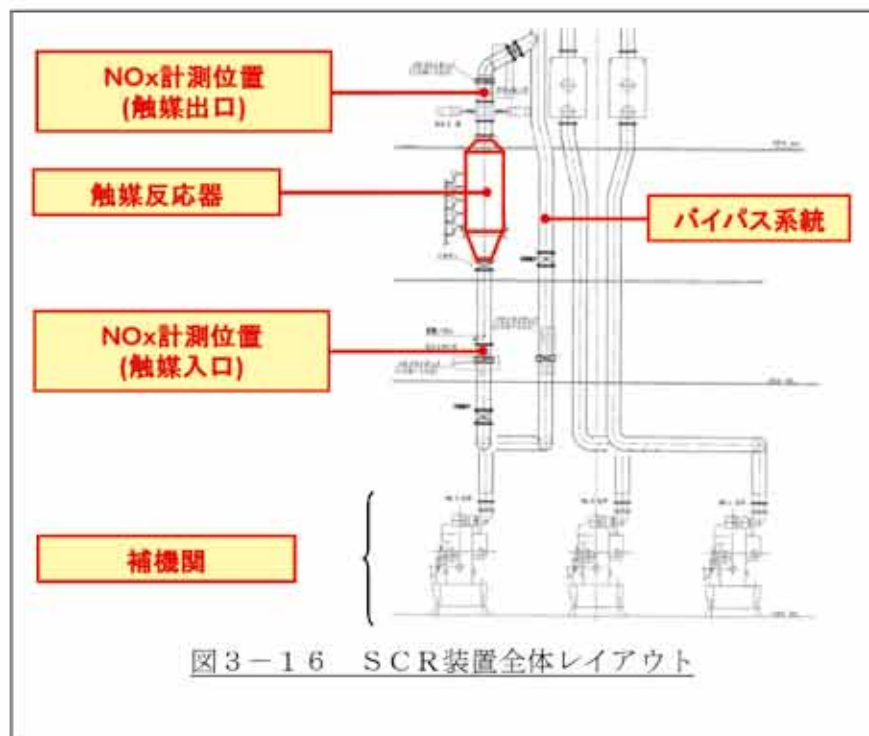


図3-16 SCR装置全体レイアウト

に供試したのと同じであり、実船へも搭載可能であることを確認した。触媒槽は2nd

デッキとアッパーデッキの間に設置された。触媒槽前には既設の通路があり、触媒槽のチェックや触媒交換が容易に行える構造になっている。また、尿素供給装置、NO_xセンサ等、各機器もデッキからのアクセスが容易である。本船の排気レイアウトにおいては、尿素噴射ノズルから触媒反応器までは直管となった。

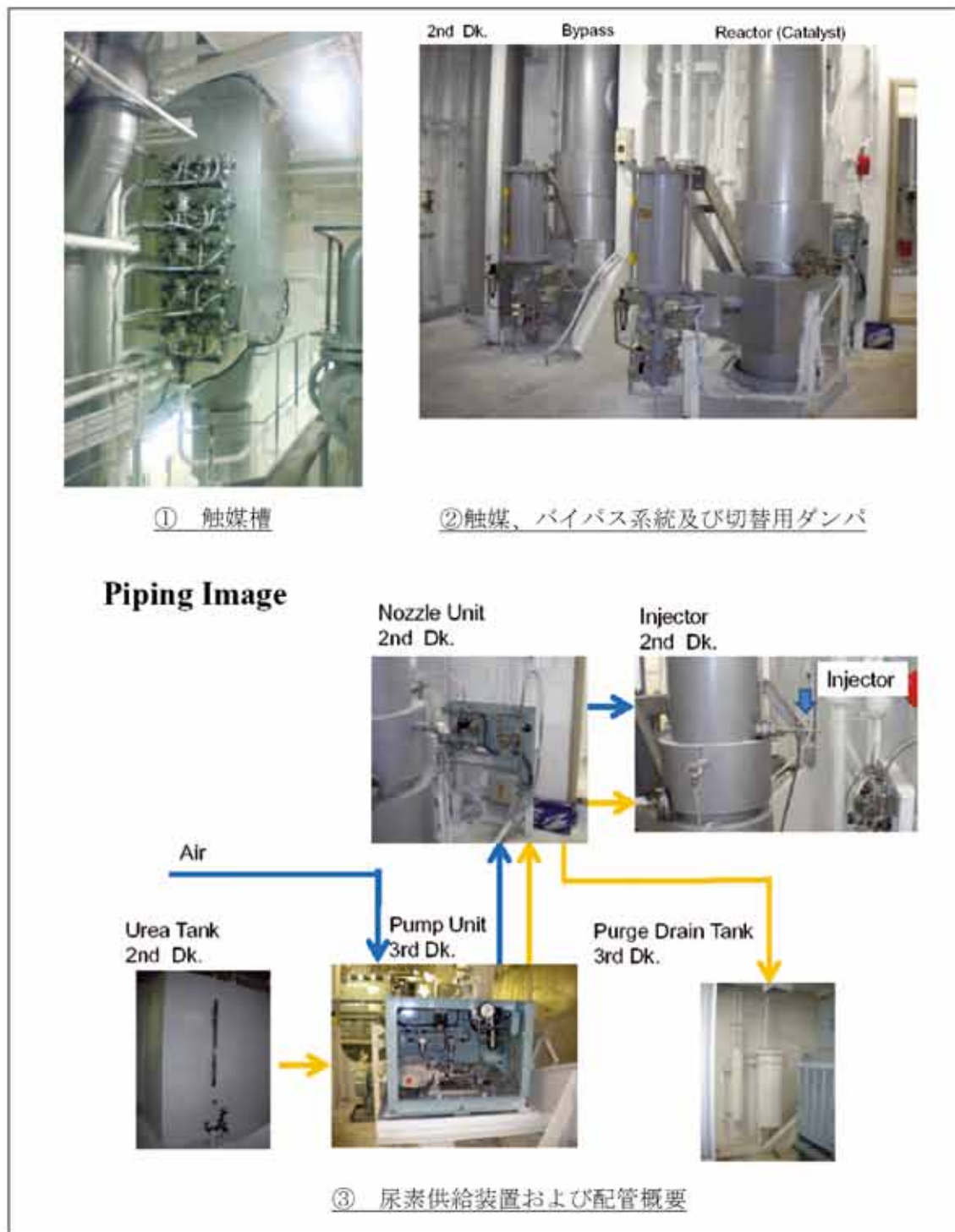


図 3-17 各機器設置状況

3. 2. 3 初期脱硝性能の評価

先行して、ベンチ試験を実施した結果について、ここでは述べる。

要素技術開発の結果から、適正排気温度の機関を本実船試験に供試した。機関出口NO_xはIMO 2次規制を満足している。その仕様にSCRを適用した際の脱硝性能のベンチ試験結果を図3-18に示す（NO_xは、補機D2モードである）。結果、十分な脱硝性能が得られ、アンモニアスリップの発生も無かった。10%負荷については、尿素噴射を行っていない。なお、この時の触媒仕様は実船でのA重油仕様と同等であり、周辺の機器類も実船試験への供試品を用いたことから、初期脱硝性能の確認も兼ねた。

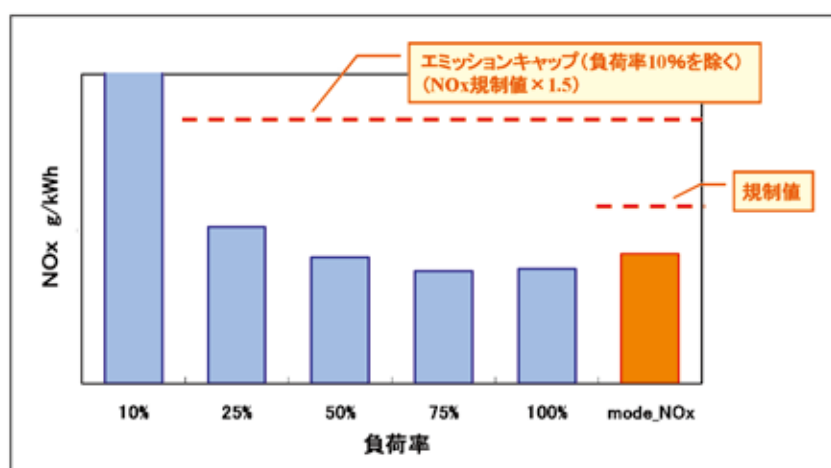


図3-18 初期脱硝性能（実船試験仕様）

3. 2. 4 触媒耐久性評価

本試験船は外航船であり、航跡と共に試験結果を示す。なお、補機3台の内、1台にSCRを搭載したことから、搭載機関を優先的に運転することとした。

(1) A重油による評価

図3-19に航跡を示す。燃料事情等により、SCR試験を一時中断した期間もあったが、ノルウェーのNarvikにて、2006時間運転を達成した。

図3-20に示すのは、耐久開始から2006時間までの運転中0:00と12:00における発電機負荷および脱硝率の推移である。表3-7に2006時間までの発電機負荷および脱硝率の最大・最小・平均値を示す。

- 平均負荷は305 kWで、使用負荷域は40～80%であった。
- 平均脱硝率は85.9%で、目標値である80%以上を満足した。
- 顕著な脱硝率の低下は見られなかった。ただ特異的に、脱硝不足・過脱硝の局面が試験期間中に散見された。特に図3-20中、A、B、C部が顕著であった。但し、全て対策を完了し、後述するC重油での運転に移行した。

年月日	寄港・出港地
2010/10/29	日本
2010/11/10	オーストラリア Mackay
2010/12/10	オーストラリア Mackay
2011/01/24	ドイツ Hamburg
2011/02/11	アメリカ合衆国 New Orleans
2011/03/14	オランダ Amsterdam
2011/03/19	ノルウェー Narvik



図 3 - 1 9 試験船航跡 (A重油運転)

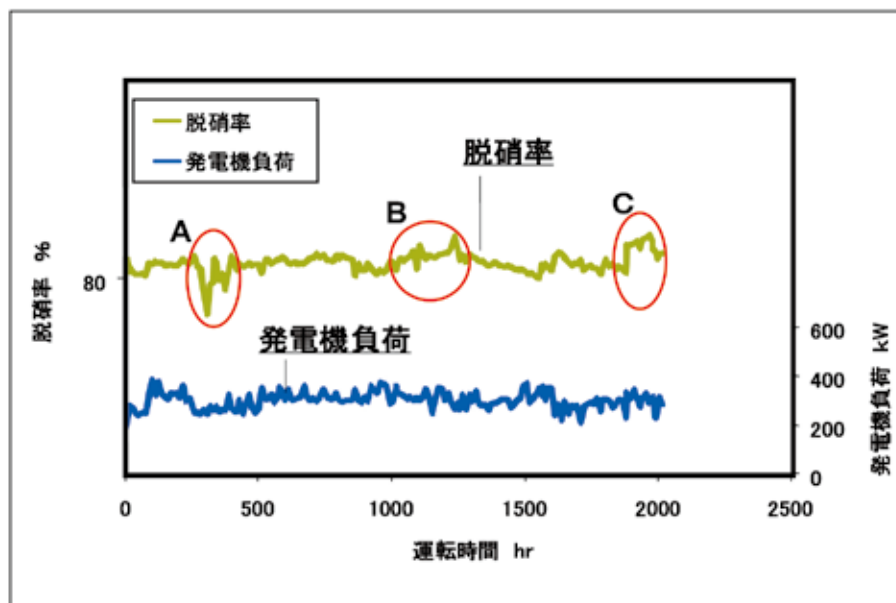


図 3 - 2 0 発電機負荷および脱硝率の推移 (A重油運転)

表3—7 発電機負荷および脱硝率の抜粋（最大・最小・平均）

	負荷(kW)	脱硝率(%)
最大	390	97.2
最小	195	67.2
平均	305	85.9

図3—20中のA、B、C部について、状況と対策を以下に述べる。

A部は、オーストラリア（Mackay）での沖止め停泊時期である。停泊後の負荷低下に伴い、尿素ノズルへの固体尿素析出が発生し、脱硝率が一旦低下したが、尿素水供給装置において負荷レベルに合わせたアシストエア圧の微調整により、即回避した。

B部は、尿素水温度低下による過噴射により、過脱硝となったものである。尿素水噴射に使用しているポンプは流体温度の影響を受け、「液温低⇒流量増、液温高⇒流量減」という特性を持つ。本船のハンブルグ北上に伴い、機関室温度・尿素水タンク温度が低下し、液温が低下したため、目標噴射量に対し過噴射となり過脱硝に至った。この傾向は、ハンブルグで尿素水を補給した際、尿素水温度が一気に下がった時が特に顕著であった。対策として、尿素水タンクとポンプ入口温度を基準にした温度補正機能を追加することとした。

C部は、NO_xセンサの校正不具合によるものである。本船の燃料事情から試験中断があり、再開した過程で発生した。本試験では、尿素水噴射量をNO_xセンサにより制御しており、自動でのゼロ・スパン調整を行っている。この校正は、NO_xセンサが通電中に実施されるが、エンジン停止中（冷態状態）と運転中（温態状態）での校正とが対応しなかったものと推定している。エンジンの長期停止から運転に切り替わった際、強制的に校正を実施するロジックを追加し、改善を図った。

このように、試験期間中の脱硝率変動要因に対して、都度、原因究明、対策を講ずることで、システムの完成度を高めることができた。様々な条件が大きく変化する実船試験では、原因究明は難しい場合もあるものの、得られる知見は多く、今後の実用化に向けて、非常に有意義なものとなった。

なお、ここでは脱硝率を代表的に示したが、A重油2006時間運転において、アンモニアスリップ、触媒圧損についても、問題無く推移したことを追記しておく。また、触媒入口の排気ガス温度については、機関出口と比較して過度の低下は無く、実船での排気レイアウトにおいて適正状態を維持することを確認した。

(2) C重油による評価

C重油運転に入る前に、まずC重油仕様触媒への改装を実施した。A重油仕様と対比して、セル密度の小さい（目の大きい）諸元であり、同時に触媒容量も増加させた。A

重油試験と同様に、SCR搭載機関を優先的に運転し、図3-21に示す航跡をたどり、平成24年1月7日、徳山港で運転時間3937時間（約4000時間）を以って、実船試験を終了した。

年月日	寄港・出港地および海域
2011/6/28	シンガポール
2011/7/2	東シナ海
2011/7/6	韓国 唐津(Dangjin)
2011/7/20	シンガポール
2011/8/17	ブラジル Tubarao
2011/9/17	シンガポール
2011/9/27	中国 嵐山(Lanshan)
2011/10/1	韓国 麗水(Yeosu)
2011/10/24	オーストラリア Newcastle
2011/11/6	日本 小名浜
2011/12/18	オーストラリア Newcastle
2012/1/4	日本 徳山
2012/1/7	日本 徳山



図3-21 試験船航跡（C重油運転）

図3-22に示すのは、耐久開始から3937時間までの運転中0:00と12:00における発電機負荷および脱硝率の推移である。

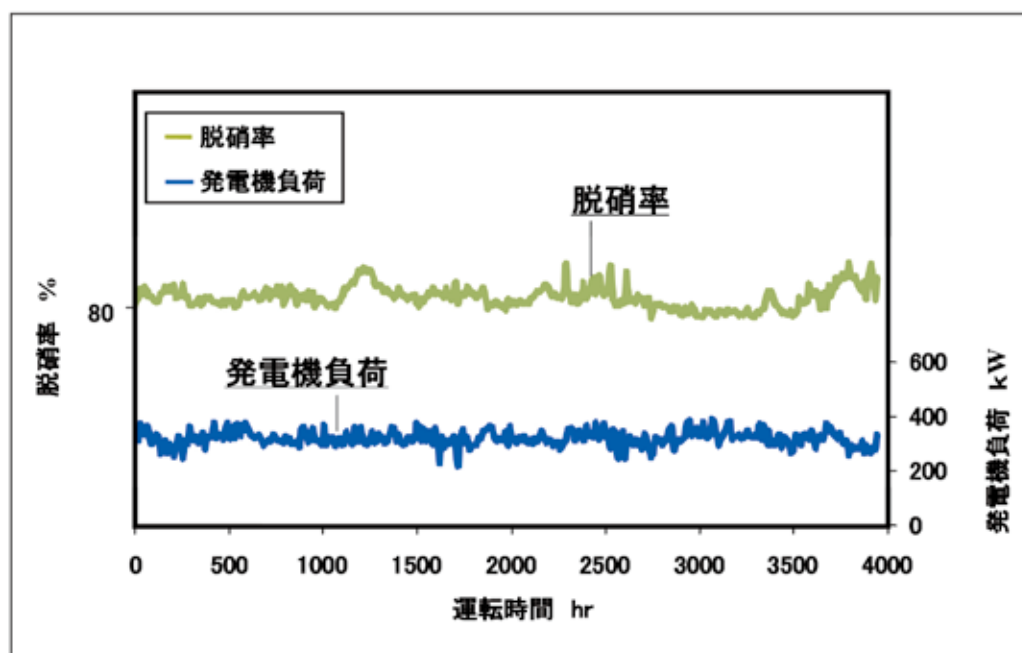


図3-22 発電機負荷および脱硝率の推移 (C重油運転)

- 平均負荷は316 kWで、使用負荷域は40～80%であった (A重油運転時と同じ)。
- 平均脱硝率は82.9%で、目標値である80%以上を満足した。
- 顕著な脱硝率の低下は見られなかった。特異現象が散見されたが、A重油運転時からの改善によりシステムの完成度は高まり、A重油運転時ほど、大きな変動無く、回数も少なく、安定して推移した。
- 触媒へのスス付着についてはA重油運転時と比較して、増加兆候が見られた。これに対しては、スートブローのロジック (層による噴射順序、噴射間隔) 変更により、対応した。

(3) 尿素水補給

本船の尿素水タンクは容量13.7 kLである。総運転時間は約6000時間であり、実船試験を進めるに際しては、補給を前提とした。ここで、その事例として2件を紹介しておく。なお、尿素水はIBCタンクと呼ばれる樹脂タンクに充填され納入される。1 kL/個の容量であり、残量に従い、これを必要個数用意した。

① ドイツ・ハンブルク港での補給

5 kL補給のため、IBCタンク5個分の尿素水を補給した。補給口は、本船左舷側デッキにある。入港が右舷接岸になり、左舷側クレーンが使用できなくなったため、

別途陸上のクレーン車により右舷側岸壁から左舷側へ、一旦、IBCタンクを運び(図3-23)、その状態で左舷側クレーンと重力により尿素水を補給した(図3-24)。左舷接岸の場合は、左舷側クレーンを運搬から補給まで使用することになる。



図3-23 陸上クレーン車による尿素水タンク運搬状況



図3-24 本船上での尿素水補給作業(ハンブルク)

なお、供試している尿素水濃度は40%である。0℃以下になると凍結や尿素析出を発生する特性を持っていたため、ハンブルクでの補給は当初懸念されたが、問題無かった。

② 日本・福島県小名浜港での補給

①の方法では、クレーン車の手配やプロビジョンクレーンの操作を本船側で実施する必要があるなど、手間と工数を費やすため、ここではエア駆動式のダイヤフラムポンプを用いて、岸壁からタンクへ尿素水を圧送する方法を試行した（図3-25）。ポンプ駆動のための圧縮空気は本船側から供給した。

圧縮空気圧力を0.3MPaに設定した結果、IBCタンク1個あたり、約20分での補給となった。ここでの作業員は1名のみであり、効率的に尿素水補給を行うことができた。



図3-25 ダイアフラムポンプによる尿素水補給状況

3. 2. 5 触媒回収調査

小形補機関の実船試験から回収されたA重油による耐久サンプル（2000時間相当）およびC重油による耐久サンプル（2000、4000時間相当）について、要素試験による詳細分析を行った。実船試験に供試した触媒諸元を表3-8に改めて示す。C重油仕様では、スートによる触媒セルの閉塞を考慮し、セル密度を変更（目を大きく）した。

表3-8 実船試験への供試触媒諸元

	A重油耐久試験	C重油耐久試験
セル密度	100cpsi	66cpsi
触媒ブロック寸法	150×150×150mm	150×150×150mm
触媒ブロック配列	4×4×3	4×4×5
総触媒容積	0.162m ³	0.270m ³

(1) 調査項目

調査項目は表3-4と同じである（脱硝率は、各層の劣化状況を明確化するために、高SV条件にて測定した）。表3-9に、小形補機関の測定条件を示す。

表3-9 脱硝率測定条件

項目	単位	設定値	
温度	℃	250, 300	
SV値	h ⁻¹	20,000	
アンモニア/NO _x 比	mol/mol	0.9	
模擬ガス成分	NO	ppm	1,000
	O ₂	%	12.0
	CO ₂	%	6.5
	H ₂ O	%	6.5
	HC (C ₃ H ₆)	ppmC ₁	100
	CO	ppm	50
	NH ₃	ppm	900

(2) A重油耐久試験

①供試触媒

調査に供した触媒サンプルは、A重油での運転時間が2006時間のものである。触媒槽は3層構造となっており、各層の中央近傍の触媒ブロックを各1個取り出して

調査を行った。

②セル内のスート付着状況

図3-26に触媒の断面写真を示す。1層目の上流側から約20mmの範囲においては、黒色のスート成分の付着が明瞭に観察された。

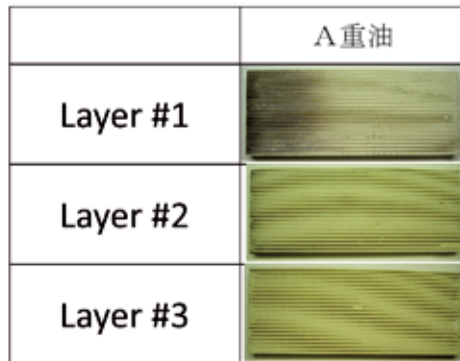


図3-26 触媒の断面写真

そこで、触媒サンプルを図3-27に示すように6分割し、それぞれについて触媒中の炭素濃度および硫黄濃度を計測した。その結果を図3-28に示す。

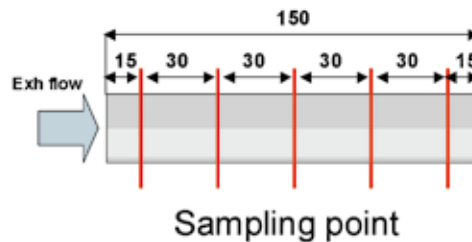


図3-27 炭素・硫黄分布分析用サンプル採取位置

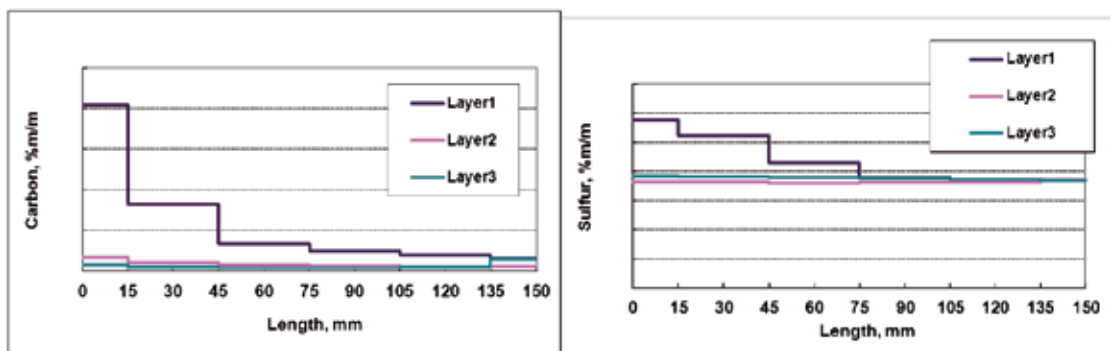


図3-28 各触媒の (a) 炭素分布および (b) 硫黄分布

セル内の炭素は、触媒上流端に多く堆積しており、下流端では、ほぼ一定の値となっている挙動がうかがえる。これは触媒内へのスートの付着が上流から進行するが、運転中に実施したスートブローにて脱離したスートはセル壁面に再付着することなく、下流に排出されている効果を示しているものと推定される。

一方、セル内部の硫黄の分布は殆んどない。これは、排気ガス中のサルフェート（ SO_3 ）がセル内に付着したものと推定される。

そして、脱硝特性の調査結果を図3-29、30に示す。

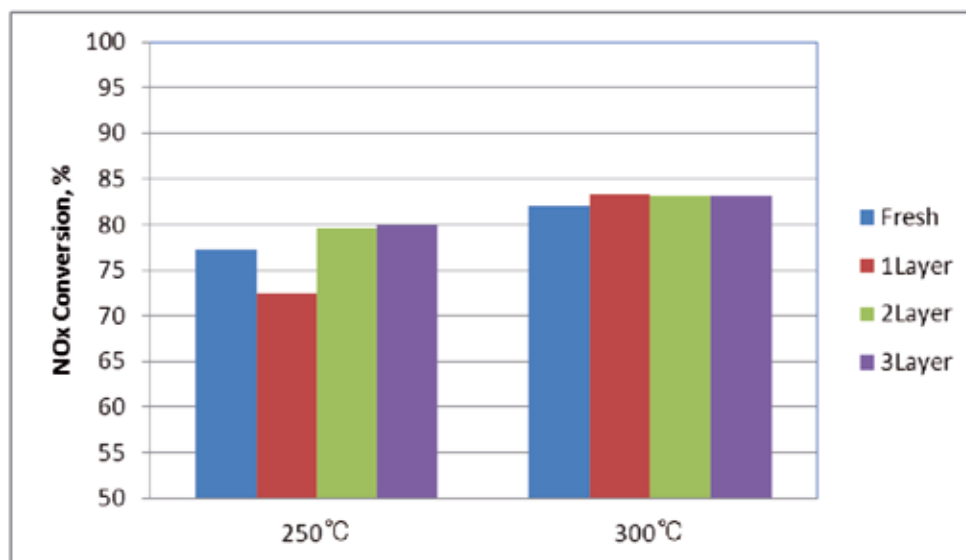


図3-29 脱硝率測定結果（A重油サンプル）

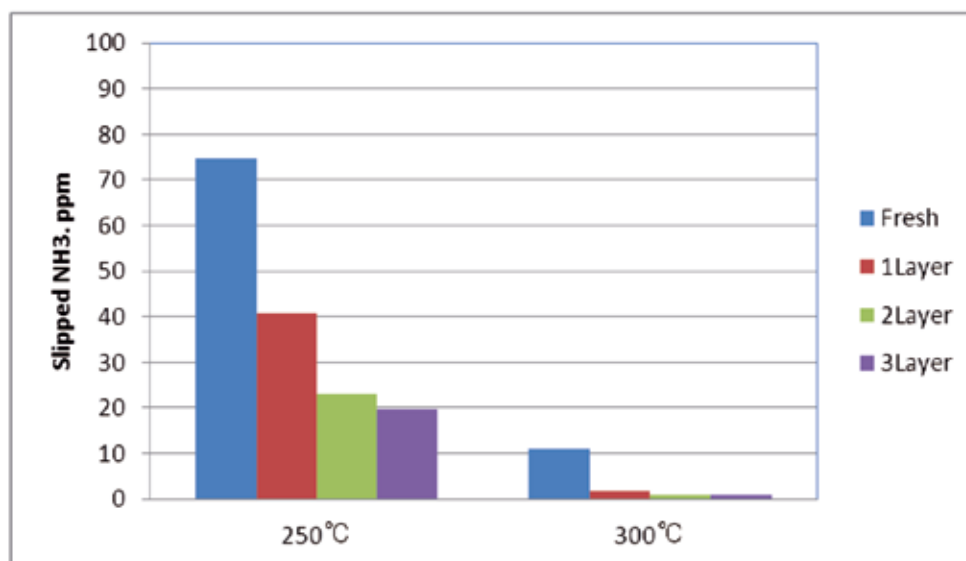


図3-30 アンモニアスリップ測定結果（A重油サンプル）

1層目の触媒は、新品触媒と同等の脱硝率を示しているが、2層目および3層目は、いずれも新品触媒より脱硝率が向上している。V/TiO₂系脱硝触媒においては、高温で微量のSO₂の存在により、NO_x浄化活性が向上することが報告されている。触媒表面上に生成した硫酸イオン(SO₄²⁻)が触媒の酸性度を向上させるため、この結果として、触媒活性が促進されることが述べられている。本触媒においても、前述したように触媒の全面にわたって硫黄分が検出されている。従って、このようなSO₄²⁻の促進効果によ

り、新品触媒に比べて、2層目および3層目の触媒による脱硝率が向上したものと推定される。1層目の脱硝率が2、3層目に比べて低いのは、1層目では炭素分が多いため、触媒表面にスートが堆積することによる性能劣化（マスキング）あるいは触媒の細孔内部へのスートの侵入による性能劣化（プラグニング）が僅かに生じたためであると推定される。

参考文献 1) Zhenping et al, SCIENCE CHINA (Series B) vol.43, No.1 p.51

(3) C重油耐久試験

①供試触媒

調査に供した触媒サンプルは、C重油での総運転時間（3937時間）のうち、2378時間および3719時間のものである。触媒槽は5層構造となっており、各層の中央近傍の触媒ブロックを各1個取り出し同様の調査を行った。

②セル内のスート付着状況

2378時間での触媒サンプルのうち、1層目の触媒入口部には黒色粉末が堆積していた。そこで、この堆積物を走査電子顕微鏡（SEM）およびエネルギー分散型X線分析装置（EDX）にて、形状観察と金属成分分析を実施した。SEM観察結果を図3-31に、金属成分分析結果を図3-32に示す。

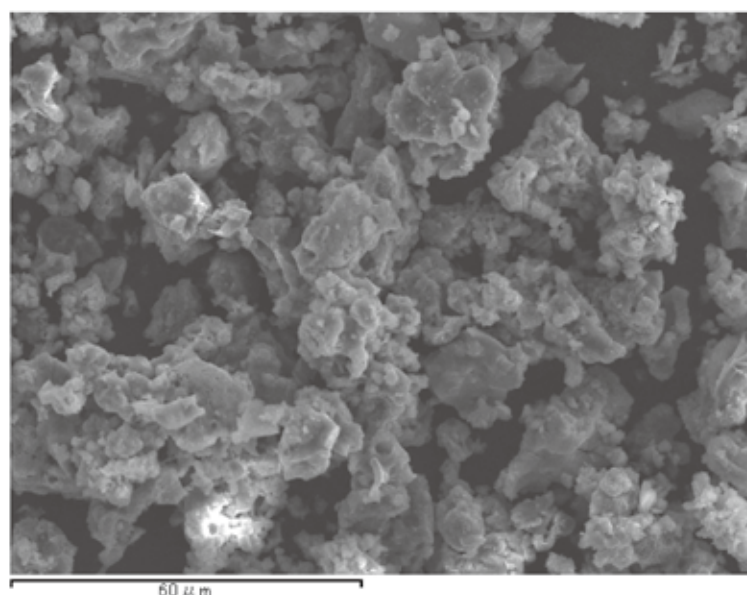


図3-31 堆積物のSEM写真

堆積物は、2~10 μm の1次粒子が凝集した数十 μm の2次粒子から構成されており、金属成分は、C、Sの他、V、Ca、Al、Si、Na、Fe、Niが検出された。これは、使用した燃料中の金属成分（図3-33）の比率とほぼ一致していることから、燃料由来の燃焼残渣物であるものと推定される。

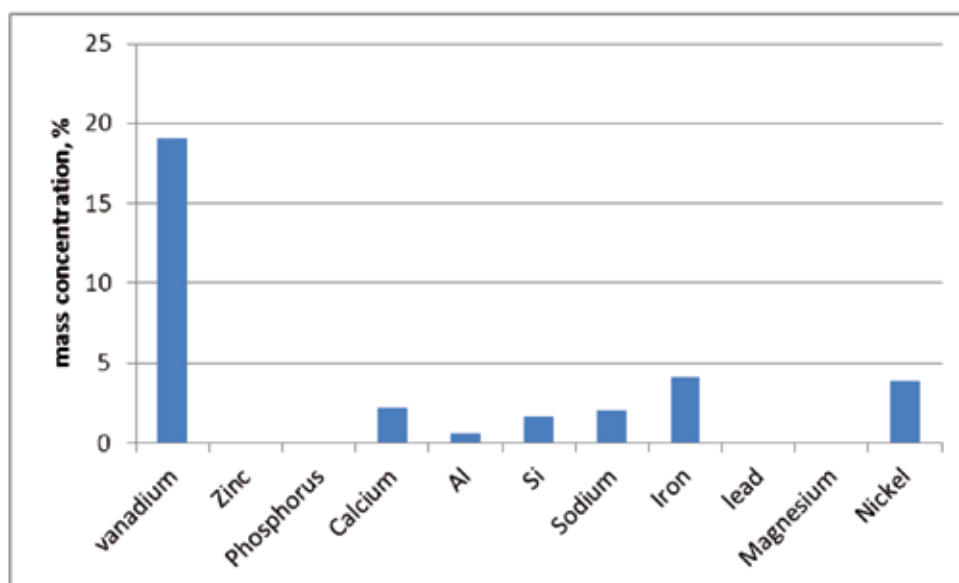


図 3-3 2 堆積物の金属成分

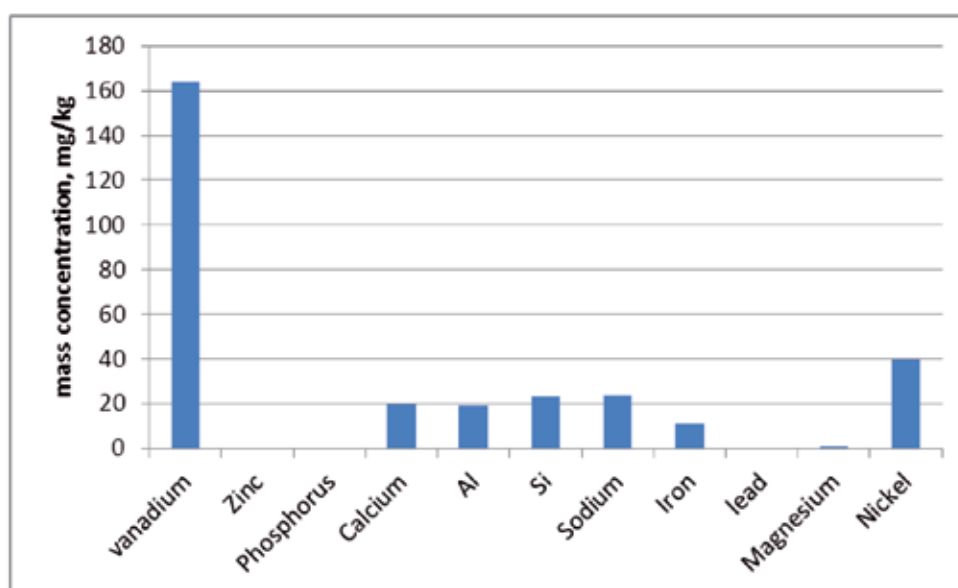


図 3-3 3 供試C重油中の金属成分

次に、図 3-3 4 に触媒の断面写真を示す。1 層目および 2 層目の上流側にスートと思われる黑色粉末が付着しているが、3 層目以降は顕著な変化は認められない。

図 3-3 5、3 6 に触媒中の炭素濃度および硫黄濃度の計測結果を各運転時間で示す。

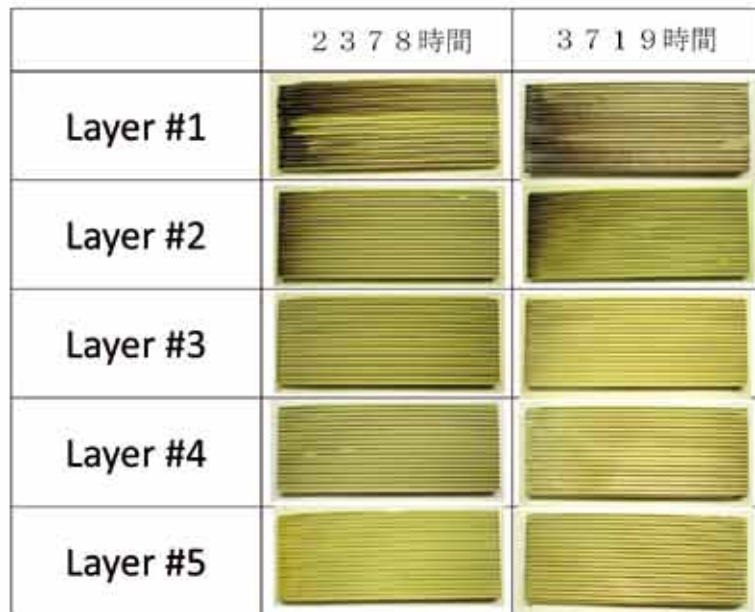
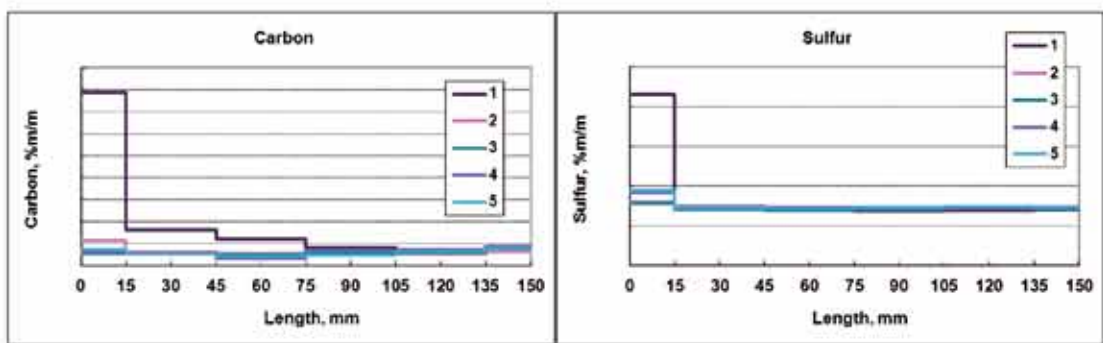


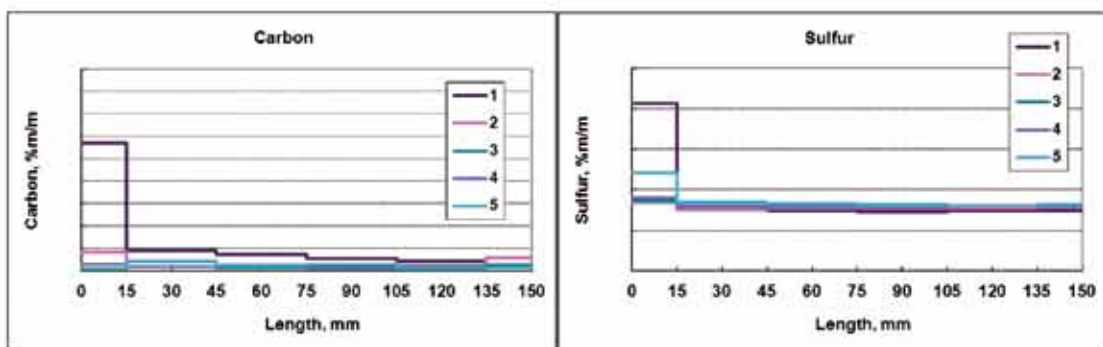
図 3 - 3 4 触媒の断面写真



(a)

(b)

図 3 - 3 5 各触媒の (a) 炭素分布および (b) 硫黄分布 (2 3 7 8 時間)



(a)

(b)

図 3 - 3 6 各触媒の (a) 炭素分布および (b) 硫黄分布 (3 7 1 9 時間)

図3-37、38に、2378時間触媒サンプルの脱硝率、アンモニアスリップの調査結果を示す。各層の脱硝率は、下流に行くに従い上昇し、3層目以降はほぼ新品と同様の値を示した。

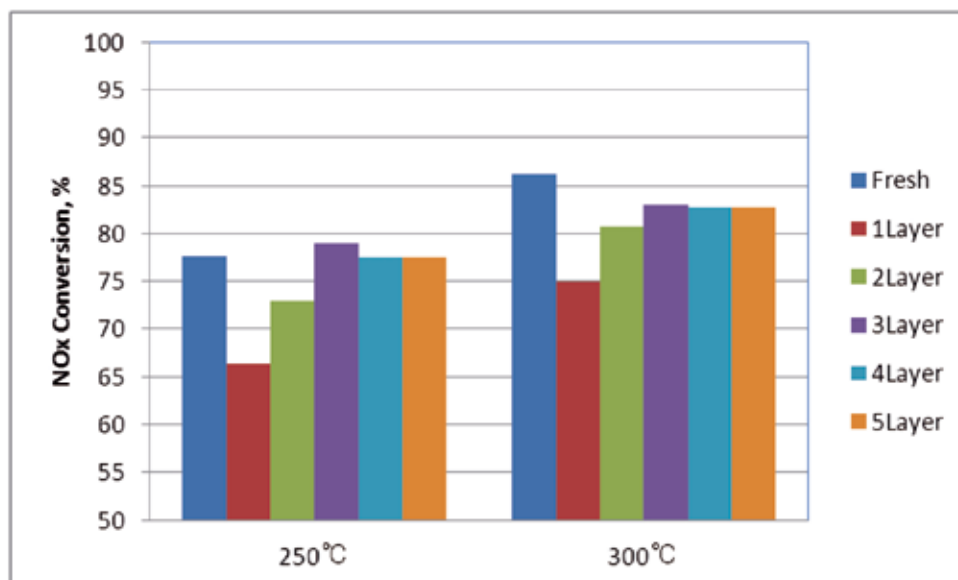


図3-37 脱硝率測定結果 (2378時間)

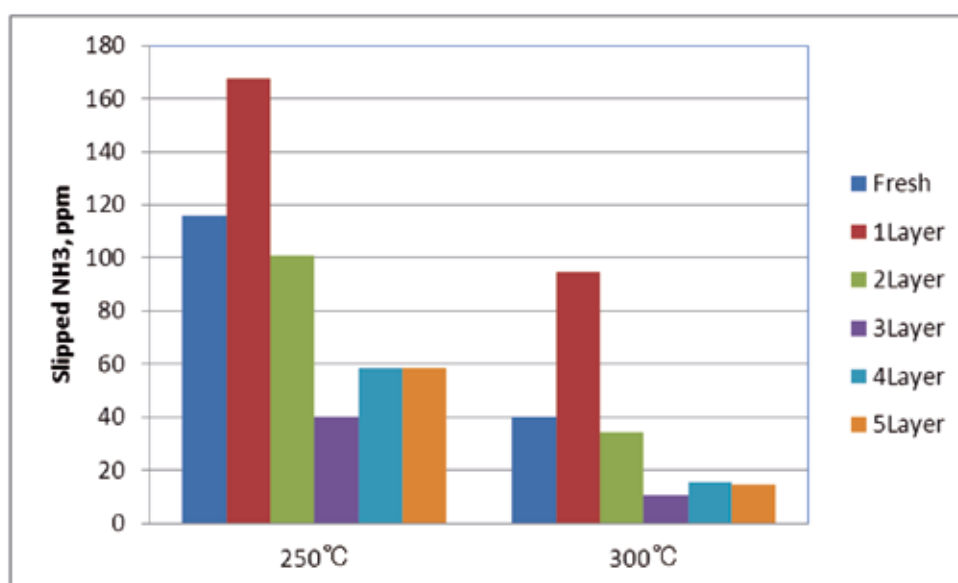


図3-38 アンモニアスリップ測定結果 (2378時間)

図3-39、40に、3719時間触媒サンプルの脱硝率、アンモニアスリップの調査結果を示す。2378時間と同様に、各層のNOx浄化特性は、下流に行くに従い上昇しているが、全体的に2378時間に比べ、脱硝率が低下している。

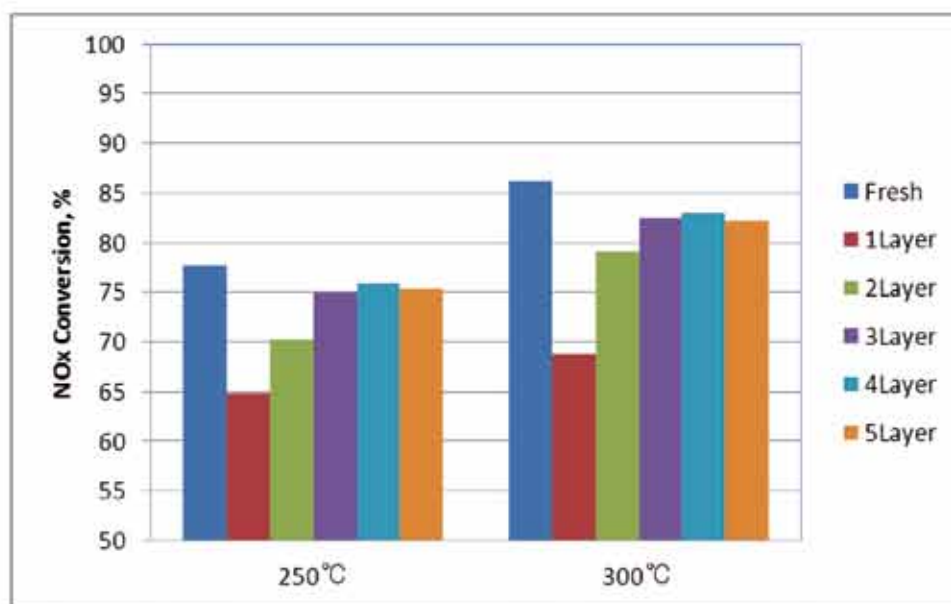


図 3-39 脱硝率測定結果 (3719時間)

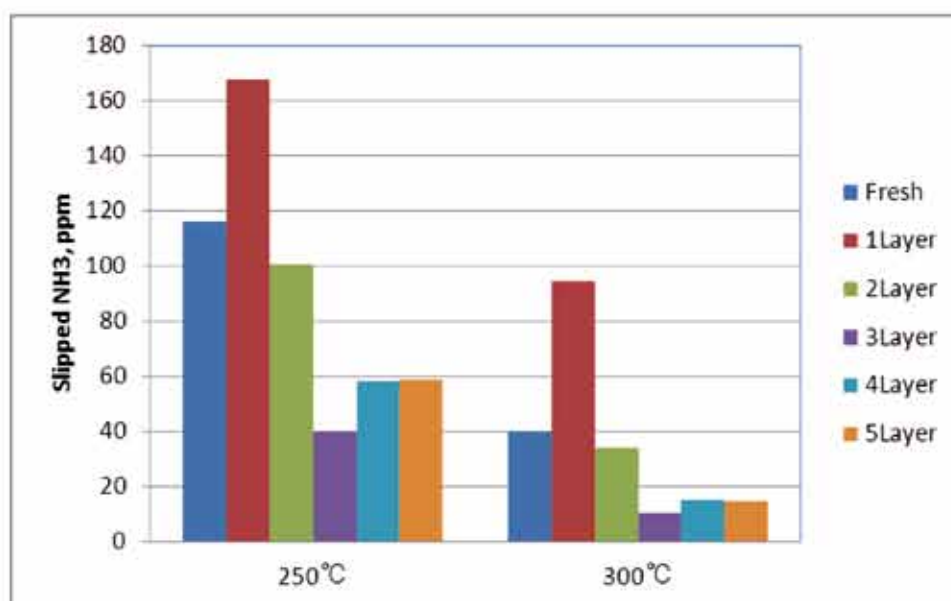


図 3-40 アンモニアスリップ測定結果 (3719時間)

以上、高SV値での要素分析結果をまとめると、C重油燃料では、排気ガス中のスートおよびサルフェート成分が触媒のセル内部に付着することにより触媒の劣化が促進され、スート付着量（炭素分）の大きな上流側の性能低下が大きいことが分かった。

本項の最後に、実船試験データとの照合を図るために、図3-37～40の結果を用いて、平均的な運転条件（60%負荷）における触媒槽全体（5層）での脱硝率を試算した。その結果（図3-41）、試験データと同様に脱硝率の低下は見られなかった。

各層の触媒の劣化状況を判別するために、高SV値での要素評価を行った際、1層目

の触媒が劣化している兆候が見られたが（図3-37～40）、実機でのSV値、排気ガス温度においては、その影響が軽微になり、かつ3層目以降の劣化が無く、活性が高いままのため、トータルで脱硝率の低下が見られなかったものと考えられる。詳細分析においても、十分な脱硝性能を確保することが出来ていると言える。

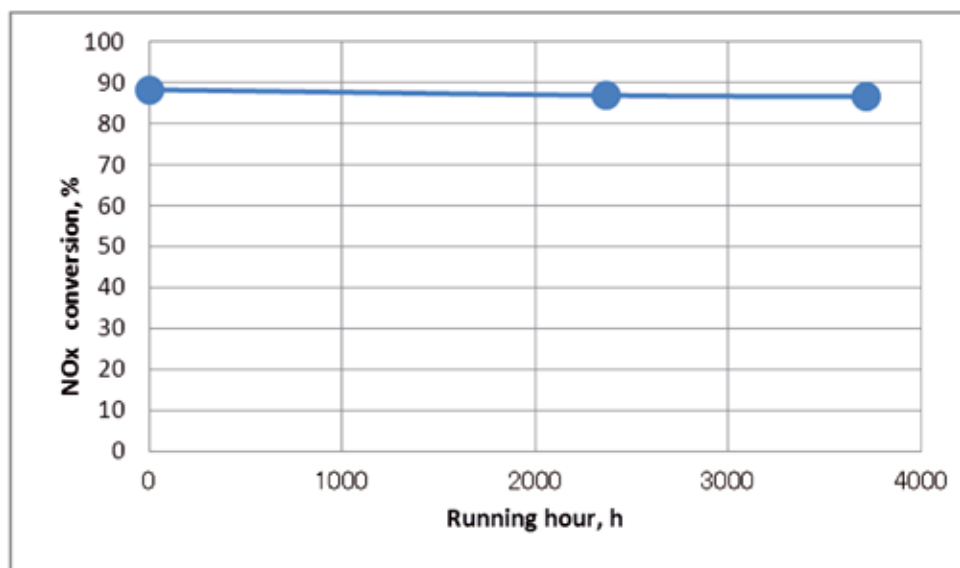


図3-41 要素試験結果から得られた実船試験条件での脱硝率推定

3. 2. 6 メンテナンスインターバル決定のための指針策定

前項から、C重油燃料使用時、排気ガス中のスートおよびサルフェート成分が触媒のセル内部に付着することにより、触媒槽5層の内、1層目および2層目触媒の性能低下があることが分かった。従って、この1層目および2層目触媒へのスートブロー方法の更なる最適化を行うことにより、触媒劣化を軽減することができ、メンテナンスインターバルの向上に寄与できるものと考えられる。

また、上記は排気ガス温度により条件が異なるものである。燃料中の硫黄分との関係から、排気ガス温度が低下すれば酸性硫酸による触媒劣化が発生する場合があるだけに、酸性硫酸が生成しなかった陸上耐久試験、実船試験での排気ガス温度は、一つの設計指標となる。さらにはSV値により、単位時間あたりに触媒を通過するスート、サルフェート量に変化するため、許容される触媒劣化率（メンテナンスインターバル）を確保するためには、限界SV値を設定する必要がある。即ち、陸上耐久試験、実船試験で設定したSV値からもメンテナンスインターバルが決定されることになる。

以上をもとに、メンテナンスインターバル決定のための設計指針を策定した。

4. まとめ

4. 1 要素技術開発について

4. 1. 1 機関出口NO_xの低減

機関を問わず、「(早閉じ) ミラーサイクル」、「(内部) EGR」、共にNO_x低減効果は得られる。しかしながら、全性能を満足させる上では、機関特性や過給機の圧力比、使用燃料に左右されるために、方策を使い分けることとした。

(1) 小形高速主機関

- ・主機関では、「内部EGR」を選択した。「(早閉じ) ミラーサイクル」を採用しなかったのは、圧縮端温度が低くなりすぎ、低力燃焼性能が成立しなかったためである。また、補機関と比べて過給機の圧力比が低いこと等から、十分な空気量を確保できないため、その他の機関性能を満足しないことも理由として挙げられる。
- ・NO_x低減率としては、約40%まで得られた。EGR率で約6%である。

(2) 小形補機関

- ・補機関では、高圧力比形の過給機との組合せにより、「(早閉じ) ミラーサイクル」を選択した。「内部EGR」を採用しなかったのは、主機関と比較して機関回転速度が低い分、給排気(ガス交換)特性が良いことや、過給機効率が高いことから、有効なEGR率が得られない(モード上、NO_xが低下しない; シリンダ内圧と排気圧との差圧が、中高負荷域において十分得られない)ためである。また、C重油使用の前提から、硫酸腐食の懸念があったことも理由の一つとして挙げられる。
- ・NO_x低減率としては、約20%まで得られた。

4. 1. 2 SCR技術の開発

(1) 小形高速主機関

- ・低硫黄A重油燃料を前提に、狭い船内に設置可能な小形高速主機関用の尿素脱硝装置を開発するために、機関出口NO_xの低減に加え、以下の項目について実施し、IMO3次のNO_x規制値をクリアした。
 - A重油対応可能な触媒の開発
 - 尿素供給装置および制御装置の開発
 - 実機での脱硝性能調査
- ・目標のSV値(=50,000h⁻¹)と80%以上の脱硝性能を達成した。
- ・脱硝性能と圧力損失とのトレードオフを打破する装置の構成を見出した(実船試験における触媒サイズについては、これを展開した)。

(2) 小形補機関

- ・高硫黄分含有燃料(C重油)使用に於いても十分な耐久性を有する小形補機関用の尿素脱硝装置を開発するために、機関出口NO_xの低減に加え、以下の項目について実施し、IMO3次のNO_x規制値をクリアした。
 - C重油対応可能な触媒の開発
 - 尿素供給装置の開発

- 排ガス前処理装置の検討
- 実機での脱硝性能調査
- 耐久性能調査

- ・目標のSV値(=20,000h⁻¹)と80%以上の脱硝性能を達成した。
- ・実機先行耐久試験においては、C重油使用における触媒目詰まりに余裕を持たせるために、低セル密度に設定した触媒を供試した(実船試験における触媒サイズについては、これを展開した)。

(3) 尿素供給装置の開発

- ・小形高速主機関、補機関共に、エアアシスト式の尿素供給装置を開発した(制御装置を含む)。
- ・過渡運転モード(主機関;加速、減速、補機関;負荷投入・遮断)においても、アンモニアスリップに問題が無いことを確認した。

(4) 小形補機関における陸上での耐久性能評価

- ・耐硫黄性の高い触媒の選定、触媒セル密度の適正化、スートブロー装置の実装、尿素噴射量の適正制御等により、C重油1000時間運転でNO_x低減率の低下、触媒差圧の上昇が無いことを確認した。
- ・触媒圧損の上昇が全く見られなかったことは、開発したスートブロー装置の触媒層へのスス堆積防止の効果を裏付けると共に、触媒の劣化速度の低減にも有効で、メンテナンスインターバル確保への知見が得られた。

4.2 実船試験について

4.2.1 小形高速主機関

- ・機関室スペースに余裕の少ない19t(実習)船に対し、舵機室、デッキにも機器を配置させることで、尿素脱硝装置の搭載を可能にした。触媒反応器について、触媒と反応器は一体型であり、触媒前面にスートブロー槽を配置した。
- ・尿素供給装置はエアアシスト式であり、圧縮空気供給装置を新たに搭載した。
- ・排気主管径相当のバイパス管設置は困難であり、排気ガスによる常時暴露でのSCR評価となった。E.C.A.如何とは言え、本船クラスへのSCR設置は今回と同様にバイパス管が取り付けられないことが想定される。
- ・実船において80%以上の脱硝性能を達成(モード値ベース)し、約150時間(排気ガスによる暴露を含む)の運転において、NO_x低減率の低下、触媒差圧の上昇が無いことを確認した。
- ・今回の実船運転において触媒劣化兆候が見られなかったのは、高い排気ガス温度条件、低硫黄燃料の使用によるものであると考えている。これらにスートブロー層数(今回の実船運転では1層のみ)、エアの噴射間隔などの設定を加えて、メンテナンスインターバル決定のための設計指針を策定した。すなわち、市場要求から想定されるメンテナンスインターバルにおいて、脱硝性能が維持される設計条件を得た。

4. 2. 2 小形補機関

- ・95,000 tバルクキャリアにおいて、補機関3台の内、1台に尿素脱硝装置を搭載した。触媒反応器は陸上耐久試験と同一構造であり、触媒はカセットにより保持され、スートブロー槽は各層に配置した。
- ・実船において80%以上の脱硝性能を達成し、A重油、C重油、トータルで約6000時間運転において、NO_x低減率の低下が無いことを確認した。特にC重油使用については硫黄分3%の燃料を供試したが、陸上耐久試験の4倍の運転時間においてもNO_x低減率は安定し、触媒の劣化兆候は見られなかった。
- ・要素試験の結果からも、A重油による耐久サンプルにおいては触媒劣化の兆候は見られなかった。C重油による耐久サンプルでは、高SV値評価において1層目に触媒劣化の兆候が観察された。排気ガス中のスートおよびサルフェート成分が触媒のセル内部に付着することにより、触媒の劣化が促進されたものと推定しているが、低SV値においてはトータルでNO_x低減率が低下するほどの影響までには至っていないというのが実機（実船）での結果である。
- ・A重油と比較し、C重油運転時においては触媒へのスス付着の増加兆候が見られた。これについては、スートブローのロジック（層による噴射順序、噴射間隔）変更により、対応した。
- ・今回の実船運転において触媒劣化兆候が見られなかったのは、スートブロー装置の装備（適正ロジック）、適正排気温度、適正SV値の設定による結果であると考えている。これらをもとに、メンテナンスインターバル決定のための設計指針を策定した。すなわち、市場要求から想定されるメンテナンスインターバルにおいて、脱硝性能が維持される設計条件を得た。

4. 3 全体を通して

- ・要素技術開発を通じて機関出口NO_x削減技術、SCR技術を確立させ、実船で尿素脱硝装置を稼働させることにより、E. C. A.（低硫黄）燃料において、小形高速主機関、小形補機関におけるIMO3次規制対応への目処を立てることができた。
- ・市場環境の変化、市場要求の多様化から、スクラパー装置の適用と共に低質燃料が使用され続ける可能性がある。これに対し、小形補機関事業の結果から、C重油使用においても、尿素脱硝装置にスートブロー装置を付属させることにより、実用化の可能性を見出すことができた。
- ・船型により、排気管のレイアウトが異なってくる。曲がり等を含めたレイアウトに対し、SCR触媒の脱硝性能を確保する手法として、CFD技術の有効性を、要素技術開発、実船試験を通して、実証できた。



「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。」

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
電話 03-3502-2041
FAX 03-3591-2206
<http://www.jsmea.or.jp>