

スーパークリーンマリンディーゼルの研究開発

[中速機関グループ]

新潟原動機株式会社

ダイハツディーゼル株式会社

三井造船株式会社

目 次

1.技術開発の目的	1
2.技術開発の目標	1
3.研究開発計画	1
3.1.各年度の計画内容	4
4.実施内容	8
4.1 要素技術開発	8
4.1.1 機関単体における要素試験	8
4.1.2 SCR脱硝装置の要素試験	20
4.1.3 SCR脱硝装置との組合せによる目標性能確認試験	37
4.2 実船試験	39
4.2.1 実船改造設計及び改造工事	39
4.2.2 脱硝装置の設計・製作	40
4.2.3 実船試験用機器の手配	41
4.2.4 実船試験の実施	41
4.2.5 実船試験の評価とまとめ	42
4.3 総合評価	46
4.3.1 要素技術開発	46
4.3.2 実船SCR試験	48
4.3.3 まとめ	50
5.参考文献	50

1.技術開発の目的

2005年5月19日よりMARPOL 73/78条約附属書VIが発効され、その条約は日本国内を含め、全世界の出力130kWを超える船用ディーゼル機関に対してIMO NOx規制として適用されている。この規制は、将来の技術水準の向上を踏まえて、発効後5年ごとに規制強化が計画されており、このため2005年のMEPC53から規制見直しが進められてきた。その結果、2008年に開催されたMEPC58において、2011年からエンジンの定格回転数に応じて第1次規制値から15～22%削減する第2次規制が、更には2016年から指定海域において第1次規制値から80%減とする第3次規制が採択された。

本研究では尿素水を還元剤として使用する選択還元式脱硝装置の導入を前提として、IMO NOx 3次規制を見据えた低環境負荷型中速ディーゼル機関の研究開発を目的とする。

具体的には、燃料消費率の悪化を極力抑制しつつ、燃焼改善等により機関単体からのNOx排出を低減する技術や選択還元方式の排気ガス後処理装置の技術開発を行う。硫黄分の多い(3%程度)C重油を使用して、排気ガス温度が300℃程度を下回った場合の、還元脱硝中に生成される酸性硫酸による触媒の被毒や、400℃を上回る高温時の触媒劣化や硫酸ミスト等の対応技術が課題である。更に船用仕様を考慮し、限られた船内に配置するためのSCR脱硝装置の小型化や、運用の最適化が求められるものである。

本研究により、将来船舶に要求される非常に厳しい排気エミッション規制を満足すると共に、ユーザーに安全な船舶運航を継続的に提供することができる。

2.技術開発の目標

目標性能を表1に示す。

GHG排出量とは、本研究開発において燃料消費量を表す。

表1 目標性能

開発目標	NOx 排出量 : 機関及び後処理装置によって、80%削減(IMO 1次規制対比、アンモニアスリップ 10ppm 以下)を図る。 なお、機関本体では30%削減(IMO 1次規制対比)を目標とする。 GHG 排出量 : 現状レベル維持
------	--

3.研究開発計画

・全体計画

平成19年度から平成22年度までの「中速船用ディーゼル機関におけるIMO3次規制対応技術開発」及び「中速船用ディーゼル機関の排ガス後処理装置の技術開発」の全体計画を表2、表3に示す。

また、これらの研究開発成果を踏まえて、平成21年度から平成23年度に実施した「中速船用ディーゼル機関NOx低減装置の実船試験」の全体計画を表4に示す。

表 2 中速舶用ディーゼル機関における IMO3 次規制対応技術開発

実施項目	平成 19 年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
(1)船種によるレイアウト、運転パターンの調査		*****	*****	
(2)試作品設計要目の解析検討		*****	*****	*****
(3)試験部品の設計・製作			*****	*****
(4)実機による性能試験準備			*****	*****
(5)報告書作成				*****

実施項目	平成 20 年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
(1)試作品設計要目の解析検討	*****	*****	*****	*****
(2)試験部品の設計・製作	*****	*****	*****	*****
(3)実機による性能試験	***	*****	*****	*****
(4)報告書作成				*****

実施項目	平成 21 年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
(1)試作品設計要目の解析検討	*****	*****		
(2)試験部品の設計・製作		*****	*****	
(3)実機による性能試験		*****	*****	*****
(4)SCR 脱硝装置の製作	*****			
(5)SCR 脱硝装置の設置		*****		
(6)SCR 脱硝装置と試験機関による適合試験			*****	*****
(7)実船試験搭載 SCR 脱硝システムの検討				*****

実施項目	平成 22 年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
(1)実機による性能試験	***			
(2)SCR 脱硝装置と試験機関による適合試験	*****			
(3)実船試験搭載 SCR 脱硝システムの検討	*****	***		

表 3 中速船用ディーゼル機関の排ガス後処理装置の技術開発

実施項目	平成 19 年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
(1)マイクロリアクター基礎試験				
触媒の選定と試作		*****	*****	*****
触媒の単体性能確認試験				*****
(2)脱硝装置の設計			*****	*****
(3)試験機関及び実験用 SCR 脱硝装置の製作				*****

実施項目	平成 20 年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
(1)試験機関及び実験用 SCR 脱硝装置の製作	*****	****		
(2)マイクロリアクター基礎試験				
触媒の選定と試作	*****	*****		
触媒の単体性能確認試験	*****	*****		
(3)実験用 SCR 脱硝装置性能試験				
エンジンとの結合、基本性能試験		****	***	
触媒性能変更試験 触媒、触媒セル、SV 値変更試験			*****	*****
酸性硫安による触媒被毒調査				
(4)SCR の還元剤システム検討				
還元剤最適注入システムの検討			*****	*****
CFD 還元剤噴射条件検討	*****	*****		

実施項目	平成 21 年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
(1)マイクロリアクター基礎試験				
触媒の選定と試作	*****	*****		
別種触媒と別種還元剤検討		*****	*****	
触媒被毒復旧対策と耐久性評価			*****	*****
(2)還元剤最適注入システムの製作	*****			
(3)SCR 脱硝装置改良型性能試験				
還元剤最適注入システム試験		*****		
酸性硫安による触媒被毒調査		*****	*****	
運転制御系の信頼性評価		****		

実施項目	平成 22 年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
(1)マイクロリアクター基礎試験	****			
触媒の選定と試作	*****			
(2)SCR 脱硝装置改良型性能試験	*****	*****		
(3)総合評価	*****	*****		
(4)実船試験準備				
実船試験事前調査		****		

表 4 中速船用ディーゼル機関 NOx 低減装置の実船試験

実施項目	平成21年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
実船改造設計		****	*****	*****
エンジン本体改造設計, 部品手配		*****	*****	
脱硝装置基本設計		*****	*****	*****

実施項目	平成22年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
実船改造設計及び改造工事	*****	*****		
脱硝装置設計製作	*****			
実船試験用機器の手配	*****			
実船試験の実施		*****	*****	
実船試験の評価とまとめ			*****	*****
復旧工事				*****

実施項目	平成23年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
実船試験の評価とまとめ				
陸上検証試験	*****	*****		
最終的な評価とまとめ	*****	*****	*****	
報告書作成				*****

3.1 各年度の計画内容

(1)平成 19 年度

[中速船用ディーゼル機関における IMO3 次規制対応技術開発]

・船種によるレイアウト、運転パターンの調査

設置スペースに制約の多い機関室内等で小形化を実現するためには、機関単体に SCR 脱硝装置を装着した状態での性能確認のための運転パターンの検討や、還元剤の尿素水タンク容量の検討、また船種による運転パターン、運航範囲の確認も必要となるため、高速船、タグボート、内航船の船種についてレイアウト、運転状況等の調査を実施する。

・試作品設計要目の解析検討

下記項目についてシミュレーション技術を用いて、目標性能達成のための方向付けを実施する。

(ア) 燃焼室廻り(圧縮比、ピストン形状、FV 要目)の適正化

(イ) 吸排気弁タイミング及び高圧力比過給機の適正化

(ウ) 噴射系の最適化

・試験部品の設計・製作

方向付けされた各設計要目を具体的な試験部品として設計し、製作する。

・実機による性能試験準備

試験機関に計測機器及びセンサを取り付け、性能評価試験ができるようにする。

[中速船用ディーゼル機関の排ガス後処理装置の技術開発]

・試験機関の設計・製作

試験機関の設計を行い、製作手配を行う。

・SCR 脱硝装置設計・製作

試験機関用 SCR 脱硝装置及び環境条例対応用設備の SCR 脱硝装置の設計を行い、製作手配を行う。

・マイクロリアクター基礎試験

マイクロリアクター装置及び排ガス計測装置を手配し、触媒の基礎試験を実施する。基本設計のパナジアーチタニア系触媒の選択を中心に、排ガス温度と脱硝効率の改善及びパナジアーチタニア系触媒の改良を含む触媒単体テストを実施する。

(2)平成 20 年度

[中速船用ディーゼル機関における IMO3 次規制対応技術開発]

・試作品設計要目の解析検討

下記項目についてシミュレーション技術を用いて、目標性能達成のための方向付けを実施する。

(ア)燃焼室廻り(圧縮比、ピストン形状、FV 要目)の適正化

(イ)吸排気弁タイミング及び高圧力比過給機の適正化

(ウ)噴射系の最適化

・試験部品の設計・製作

方向付けされた各設計要目を具体的な試験部品として設計し、製作する。

・実機による性能試験

試験部品を試験機関に組み込み、目標性能の達成を実機試験にて確認する。

[中速船用ディーゼル機関の排ガス後処理装置の技術開発]

・試験機関及び SCR 脱硝装置製作

試験機関及び SCR 脱硝装置の製作を行う。

・マイクロリアクター基礎試験

次のマイクロリアクター試験を行う。

排ガス温度と脱硝効率の改善及び触媒単体テストを実施する。

触媒セル数と SV 値の最適化から小型コンパクト化を推進する。

・試験用 SCR 脱硝装置性能試験

試験用 SCR 脱硝装置を製作し、脱硝性能試験を実施する。(エンジンとの結合試験)

エンジンとの結合、基本性能試験を実施する。

酸性硫安による触媒被毒調査を行う。

・SCR 脱硝装置の還元剤最適注入システムの検討

CFD 検討を実施し、SCR 還元剤噴射条件の検討を行う。

起動時や負荷変動に対応する制御システムの検討を行う。

(3)平成 21 年度

[中速船用ディーゼル機関における IMO3 次規制対応技術開発]

・試作品設計要目の解析検討

下記項目についてシミュレーション技術を用いて、目標性能達成のための方向付けを実施する。

(ア)燃焼室廻り(圧縮比、ピストン形状、FV 要目)の適正化

(イ)吸排気弁タイミング及び高圧力比過給機の適正化

(ウ)噴射系の最適化

・試験部品の設計・製作

方向付けされた各設計要目を具体的な試験部品として設計し、製作する。

・実機による性能試験

試験部品を試験機関に組み込み、目標性能の達成を実機試験にて確認する。

・SCR 脱硝装置の製作・設置

SCR 脱硝装置との組合せで排気ガス量、排気ガス中の NO_x 等を確認するため、別途実施される中速船用ディーゼル機関の排ガス後処理装置の技術開発成果を基に、船用機関に有効と評価された触媒を採用した SCR 脱硝装置を手配し、設置する。

・SCR 脱硝装置と試験機関による適合試験

試験機関に SCR 脱硝装置を設置し、最終目標性能の達成を確認するための試験を実施し、NO_x 低減率、リークアンモニア量を計測する。

[中速船用ディーゼル機関の排ガス後処理装置の技術開発]

・マイクロリアクター基礎試験

SCR 脱硝性能試験結果を踏まえ、引き続き、マイクロリアクター試験を行う。

排ガス温度と脱硝効率の改善及び触媒単体テストを実施する。

別種触媒と別種還元剤の可能性を検証する。

触媒披毒復旧対策の検討と耐久性事前評価を行う。

・実船試験搭載 SCR 脱硝システムの検討

中速船用ディーゼル機関の排ガス後処理装置の技術開発の成果、SCR 脱硝装置と試験機関による適合試験及び船種の調査結果を基に実船において試験を行うための SCR 脱硝装置システムを設計及び検討を行う。

・SCR 脱硝装置の還元剤最適注入システムの製作

SCR 脱硝装置の還元剤最適注入システムの製作を行い、基本性能を評価する。

・SCR 脱硝装置改良型性能試験

改良型 SCR 脱硝装置の試験を実施する。

酸性硫安による触媒披毒調査を行う。

運転制御系の信頼性確認を行う。

・SCR 脱硝装置耐久性評価

触媒の経時劣化特性を検証し、耐久性の検討を行う。

[中速船用ディーゼル機関 NO_x 低減装置の実船試験]

・実船改造設計

脱硝装置および必要な機器の実船への搭載のための設計を行う。

- エンジン本体改造設計、部品手配

脱硝装置の触媒活性を維持するための機関条件の検討と必要な改造部品の設計製作手配を行う。

- 脱硝装置基本設計

実船に搭載するシステムにおいて、必要な機器およびその形状設計を行う。また、触媒量の比較評価(SV 値変更)ができる装置の検討を行う。

(4)平成 22 年度

[中速船用ディーゼル機関における IMO3 次規制対応技術開発]

- 実機による性能試験

試験部品を試験機関に組み込み、目標性能の達成を実機試験にて確認する。但し、燃料油はA重油を使用する。

- SCR 脱硝装置と試験機関による適合試験

SCR 触媒の活性維持を目的として排気温度を上昇させる運転条件を設定し、機関単体試験にてその効果を確認する。

実船を想定して、負荷変動時の SCR 脱硝装置の制御方法についての試験を実施し、負荷変動時の脱硝率、排気温度などを確認し、実船搭載時に問題ないことを確認する。このとき、負荷変動範囲については動力計と試験機関とのマッチングも考慮して決定する。

[中速船用ディーゼル機関の排ガス後処理装置の技術開発]

- マイクロリアクター基礎試験

SCR 脱硝性能試験結果を踏まえ、引き続き、マイクロリアクター試験を行う。

- 実船試験搭載 SCR 脱硝システムの検討

中速船用ディーゼル機関の排ガス後処理装置の技術開発の成果、SCR 脱硝装置と試験機関による適合試験及び船種の調査結果を基に実船において試験を行うためのSCR脱硝装置システムの設計及び検討を行う。

- SCR 脱硝装置改良型性能試験

触媒の経時劣化特性を検討し、耐久性の検討を行う。

- 実船試験事前調査

実船試験準備として実船における装置の据付方法等の検討を行う。

[中速船用ディーゼル機関 NOx 低減装置の実船試験]

- 実船改造設計及び改造工事

脱硝装置の実船搭載設置工事を実施する。

- 脱硝装置設計製作

実船に搭載する装置の設計製作を行う。

- 実船試験用機器の手配

実船試験内容、条件の具体的検討および、実船試験用機器の手配を行う。

- ・実船試験の実施
脱硝装置の実船搭載試験を実施する。
- ・実船試験の評価とまとめ
実船試験で得られた計測データの整理、分析を行う。
- ・復旧工事
改造実船を、試験前の状態に復帰させる。

(5)平成 23 年度

[中速船用ディーゼル機関 NOx 低減装置の実船試験]

- ・実船試験の評価とまとめ
陸上検証試験を実施し、実船試験データとの比較、考察、触媒の耐久性評価を行う。また、最終的な評価とまとめを行う。
- ・報告書作成
最終報告書を作成する。

4.実施内容

4.1.要素技術開発

4.1.1 機関単体における要素試験

4.1.1.1 船種によるレイアウト、運転パターンの調査

4.1.1.1.1 船種の選定(調査対象の船種)

新潟原動機で生産している船用ディーゼル機関のうち、船用主機関として搭載されている船舶の種類は非常に多く、全ての船舶を調査することは不可能である。従って低速、中速、高速機関を主機関とするそれぞれ代表的な船舶として次のように選定した。

低速ディーゼル機関を主機関とする船舶のうち大部分は内航船であるので、低速ディーゼル機関は内航船とした。また、中速ディーゼル機関を主機関とする船舶の中において当社で多くの実績があるタグボート用主機関を中速ディーゼル機関とした。高速ディーゼル機関を主機関とする船舶は高速船とした。

低速ディーゼル機関	内航船
中速ディーゼル機関	タグボート
高速ディーゼル機関	高速船

4.1.1.1.2 各船種における機関及び排気煙道のレイアウト

選定した各船種においてスペースがどの程度あるかを検討するための具体例として、表 5 に示す各船舶における機関から排気煙道出口までの配置図を用いて検討した。

排気煙道は甲板よりも高い場所に煙道出口があり、甲板上部には十分なスペースがあることがわかった。また、平成 6 年度に実施した「内航船用小型排ガス脱硝装置の開発」²⁾において練習船での実用化試験を行ったときの主機関と SCR 脱硝装置の配置を図 1 に示す。実際に練習船において SCR 脱硝装置を搭載した実績もあるが、内航船については練習船ほどのスペースは少ないものの、SCR 脱硝装置のスペースに関しては比較的ゆとりがあることがわかった。

タグボート船内の排気煙道が 5 本存在し、全ての排気煙道は船尾が出口となっており、甲板よりも低

い位置になっていることに加えて、タグボートの特徴として船尾になるほど空間が狭くなるため、SCR 脱硝装置を設置する場所が非常に少ないことがわかった。

高速船もタグボートと同様に主機関 4 台分の排気煙道は船尾が出口となっている。また、排気煙道出口が甲板よりも低い位置になっているため、タグボートと同様に SCR 脱硝装置を設置する場所が非常に少ないことがわかった。

表 5 各船種における搭載機関と推進方法

	内航船	タグボート	高速船
主機関	低速ディーゼル機関	中速ディーゼル機関	高速ディーゼル機関
推進方式	1機1軸	2機2軸	4機2軸
主機関台数	1	2	4
補機関台数	2	2	2
非常用機関台数	0	1	0
総台数	3	5	6

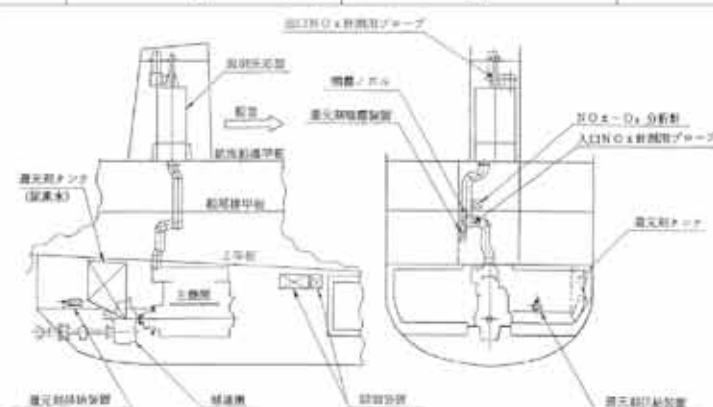


図 1 練習船用小型排ガス脱硝装置搭載時の全体配置図

4.1.1.2 エンジンでの NOx 低減

4.1.1.2.1 計算による試験部品の方向付け

IMO NOx1 次規制値に対して、機関単体で 30%の低減を狙うためには、サイクル因子を適切に変更する必要がある。NOx 排出率に影響を及ぼすサイクル因子としては、燃料噴射時期や過給圧力等があるが、燃料消費率の悪化を抑制するために圧縮比や吸排気タイミングと組合せて変更される場合が多い。

大形中速ディーゼル機関における NOx 低減の取り組みは、Kawakami³⁰⁾らにより実施され、圧縮行程終わりの筒内圧力と最高燃焼圧力の比で定義される爆発度が、NOx 排出量を設計する上での設計指標として有効であることが示されている。すなわち、NOx 排出量を低く設定するためには、爆発度を小さくするようなサイクル因子の設計が必要であり、サイクル論からすれば、従来の中形ディーゼル機関がサバテサイクルにより構成されるのに対して、ディーゼルサイクルを指向する必要がある。

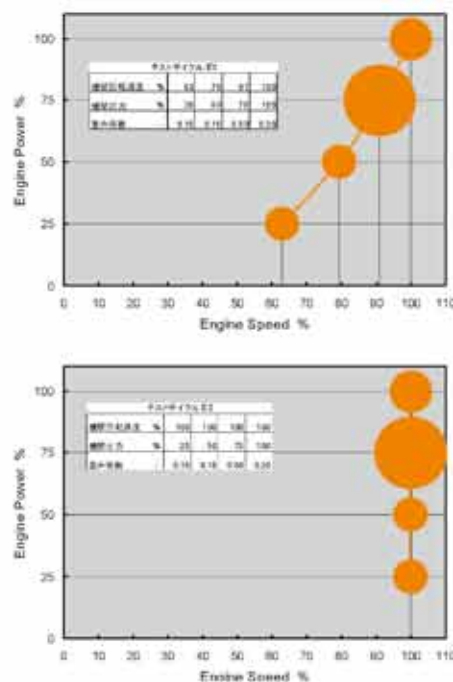


図 2 船用主機関(テストサイクル E2、E3)における重み係数

本研究では、NOx 排出率目標を達成するためのサイクル因子の組合せを機関性能シミュレーションにより追究した。具体的にはディーゼルサイクルを実現するための燃料噴射率の変更と、更なる筒内ガス温度の低下を目的としたミラーサイクル化(過給機圧力比増大、吸気弁閉じ時期変更)を実施し、機関性能に及ぼす影響を個別に調査した。

さて、IMO による NOx 規制では、図 2 に示されるテストサイクルで既定された部分負荷の排出ガス性能に対して、それぞれのモードで設定されたウェイトを乗じて評価されている。船用主機関に対しては、実際の運航状況を反映した E3 モード(船用 3 乗特性)が適用となっており、この場合 75%負荷のウェイトが最も高く設定されている。したがって、以降の考察では特に断りがない限り、NOx 排出性能を強く支配する 75%負荷に関して議論することとした。

4.1.1.2.1.1 燃焼室廻り(圧縮比)の最適化

一般に、NOx 排出率と燃料消費率の間にはトレードオフの関係があることが知られており、IMO NOx1 次規制対応機関を 2 次規制へ対応させるには著しい燃料消費率の悪化が予想される。ここで、ディーゼルサイクルの効率を、

$$\eta_{dth} = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \cdot \varepsilon^{k-1} (\rho - 1)} \quad (1)$$

ここで

η_{dth} :理論熱効率

ε :圧縮比

k :比熱比

ρ :縮切比 $\rho = \frac{v_3}{v_2}$

で表され、効率は筒内ガスの比熱比、圧縮比及び縮切比の関数となっている。NOx 低減手法を適用する前準備として、まずは圧縮比を増加させることで熱効率の向上を図った。具体的には、初期設定値から機関の構造上許される最大の圧縮比まで変化させた場合の燃料消費率及び排出ガス性能の変化を確認した。この時、ピストン頂面から吸排気バルブまでの距離を一定に保つため、図 3 に示すように排気弁閉じ時期を進角し、吸気弁開時期を遅角させた。なお、燃料噴射時期や過給圧力等の他のサイクル因子については一定とした。

圧縮比を初期設定値に対して 8.5%、及び、17%増加させた場合の燃費性能及び排出ガス性能を図 4 に示す。圧縮比の増加により燃料消費率は負荷によらず大幅に向上し、最良燃費を示す 75%負荷において約 3%向上した。圧縮比の増加に際して吸排気弁の開閉時期を調整したため、結果としてバルブオーバーラップ期間が短縮されている。このため新気の吹き抜け量が減少して、タービン入口温度が上昇した。NOx 排出率については、高負荷において低減が見られるが、その変化量は最大で 4%程度であり、大きくはない。

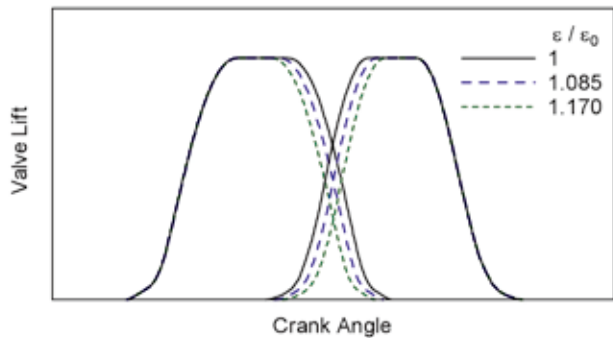


図3 圧縮比と吸排気弁開閉時期の関係

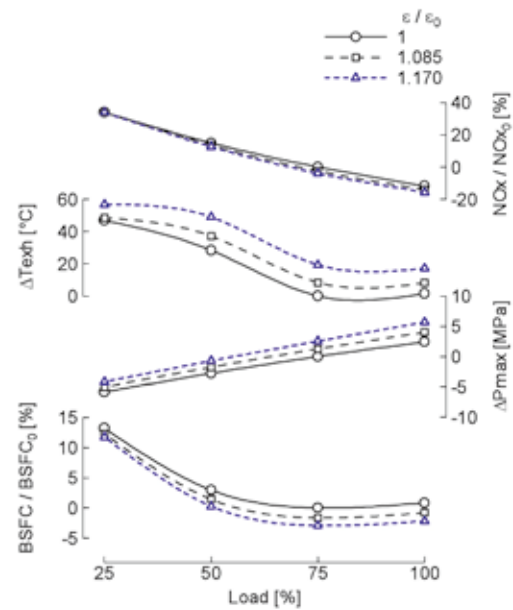


図4 圧縮比が機関性能に与える影響

4.1.1.2.1.2 噴射系の最適化

次に、燃料噴射率が NOx 排出率に及ぼす影響について調査した。NOx 排出率低減のための燃料噴射率の設計コンセプトは、Kawakami ら⁴⁾の提案を踏襲した。すなわち、初期の噴射率を極力小さくして NOx 排出率を抑制し、相対的に後期噴射を増加して噴射期間を同程度に維持することで燃費の悪化を最小限に抑える。本研究では、このコンセプトをジャーク式燃料噴射ポンプにて達成するために、噴射期間を基準より短縮しつつ噴射終了時期を合わせることで対応した。これにより、実質的には燃料噴射開始時期が遅れるため、筒内最高圧力が低下してディーゼルサイクルに近づくこととなる。

以下に、燃料噴射率の影響を(a)噴射期間と(b)噴射開始時期の2段階に分けて実施した結果についてまとめる。

4.1.1.2.1.2.1 噴射期間短縮の影響

75%負荷における燃料噴射率を図5に示す。黒色実線で示されるベース機関の燃料噴射率に対して、ピーク値を過ぎた時点から速やかに噴射終了となるような燃料噴射率(Case1)を新たに設計した。2つの燃料噴射率による機関性能及び熱発生率時間履歴を図6、7にそれぞれ示す。噴射率の重心が進角方向へ移動したため、最高筒内圧力が上昇して NOx 排出率は増加した。一方、後燃え期間の短縮により排気温度は著しく低下して、燃料消費率及び排煙濃度は大幅に改善された。

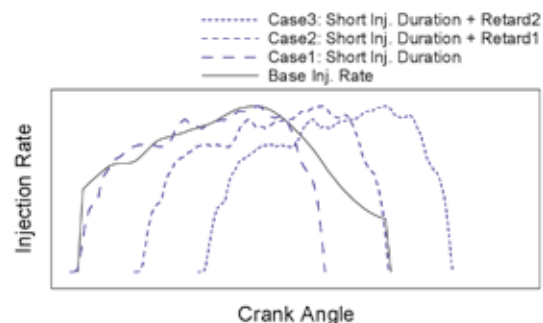


図5 負荷率75%における燃料噴射率比較

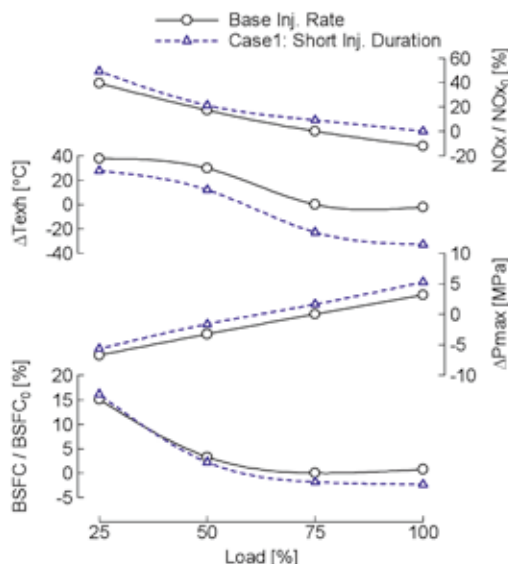


図 6 燃料噴射率が機関性能に与える影響

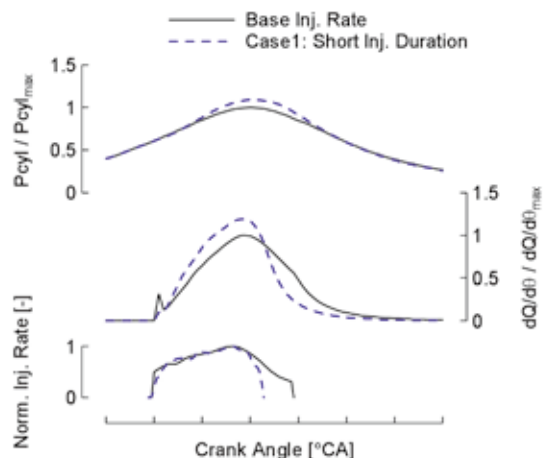


図 7 燃料噴射率が燃焼特性に与える影響

4.1.1.2.1.2.2 噴射開始時期変更の影響

次に、噴射開始時期を遅角した場合の機関性能及び熱発生率時間履歴を図 8、9 に示す。噴射期間を短縮した Case1 の噴射終了時期を、初期の時期と一致するまで遅角した場合を Case2 とし、さらに遅らせた場合を Case3 とした。

燃料噴射時期の遅角に伴って燃焼期間は膨張行程へ移動するため、排気温度が上昇し、燃料消費率は悪化する。特に、Case2 及び Case3 の 100% 負荷では、燃焼圧力が圧縮圧力と同等かそれ以下であり、燃焼圧力のピーク時期も大幅に遅れるために燃料消費率の悪化が著しい。NOx 排出率については、燃料噴射時期の遅角の影響を大きく受けて、いずれの負荷においても著しく低減された。75% 負荷における低減率は約 26% に達している。

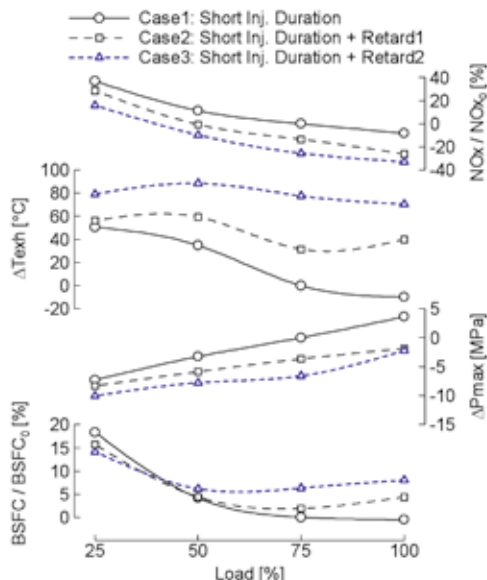


図 8 噴射時期の機関性能への影響

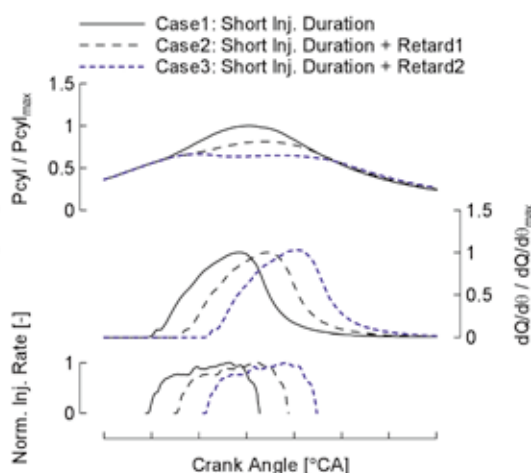


図 9 噴射時期の燃焼特性への影響

4.1.1.2.1.3 吸排気弁タイミング及び高圧力比過給機の適正化(ミラーサイクル化の影響)

さらなる低 NOx 化の手法として、ミラーサイクル化の導入を検討した。ここでは、実機試験での実現可能性を考慮して、まずベースエンジンで使用している過給機シリーズの中から選定可能な範囲

で圧力比を設定した。次に、圧縮行程終わりの筒内圧力を一定に保つべく、図 10 に示すように吸気弁閉じ時期を調整した。このようにして設定した過給機圧力比と吸気弁閉じ時期の 3 通りの組合せに対して NOx 低減率を調査した。

図 11、12 に、過給機圧力比を初期設定値に対して最大約 20%上昇させた場合の燃料消費率、排出ガス特性の変化及び 75%負荷における熱発生率時間履歴の変化を示す。ミラーサイクル化の度を強めるにつれて圧縮行程の筒内平均ガス温度が低下するため、これに導かれて燃焼期間の温度も低下する。そのため、NOx 排出率は負荷によらず大幅に低減されて 75%負荷では 14%の低減率が達成された。また、過給機圧力比の増大にともなって、バルブオーバーラップ期間中の新気の吹き抜け量が増加するため、排気温度も大きく低下した。

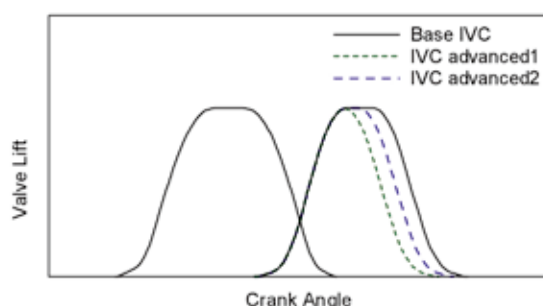


図 10 吸気弁閉時期を変えた場合の吸排気弁リフト線図

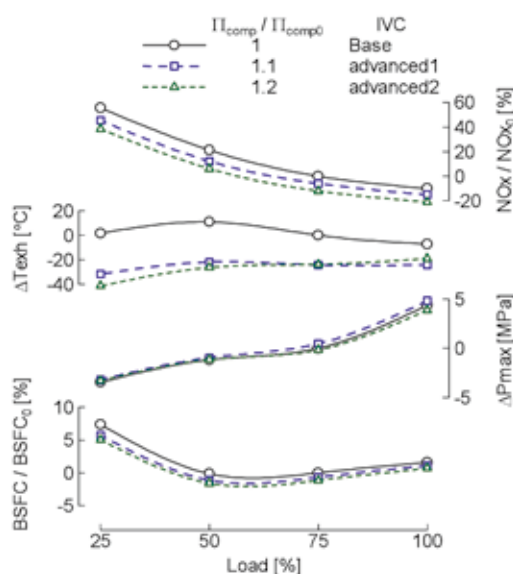


図 11 ミラーサイクルの機関性能への影響

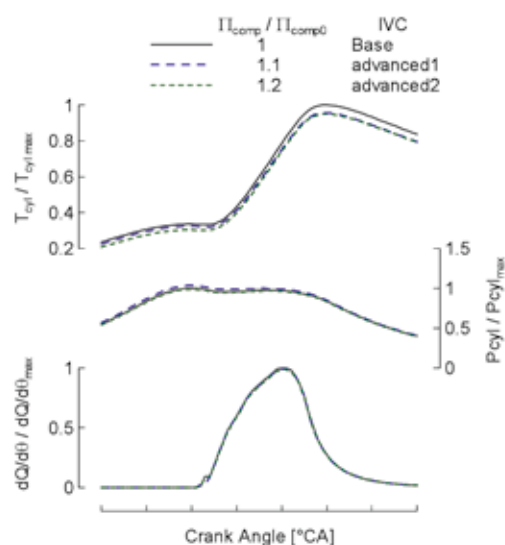


図 12 ミラーサイクルの燃焼特性への影響

4.1.1.2.1.4 燃焼室廻り(ピストン形状,FV 要目)の最適化

NOx 排出率及び排煙性能に及ぼす燃焼室形状の影響を調査するため、図 13 に示される様にピストン頂部の形状を変更して燃焼 CFD 解析を実施した。燃焼室形状の変更では、圧縮比、ボウル深さ(図 13 中の H_{bowl})、ボウル径(図 13 中の D_{bowl})を同一に保ちつつ、ボウル底部の隅部半径(図 13 中の R_{bowl})を変更している。従来仕様の燃焼室形状をピストン A とし、計算にて最適化した圧縮比においてボウル径は従来のピストンと同一としてボウル内の形状を B~D のように変更した。ピストン B はピストン A よりも圧縮比が高いため、ボウル径はほぼ同じでボウル深さを浅くした形状とした。また、

ピストン B~D についてはボウル径を同一とし、ピストン B,C,D の順に燃焼にはあまり影響を与えない噴霧領域の下側に接するピストン頂部の面積を大きくしている。その分噴霧の先端までの距離を長くしている。さらに噴霧中心の先端がピストンに当たる位置の高さを一定して、距離を変更した形状になっている。ピストン A~D における CFD 解析結果を図 14 に示す。図 14 中の SIA は燃料噴射弁の噴孔角度を示す。図 14 より、ピストン B~D における燃焼コンセプトは従来(ピストン A)とは異なり、熱発生率の重心位置が遅延しているため、NO 排出量が低くなっている。しかし、この図ではピストン B~D における明確な差がわかりにくいので、図 15 に示すように各ピストンにおける NO と BMEP を比較した。ここで BMEP が高いほど燃料消費率が低いことを意味している。各ピストンにおけるクランク角度毎の NO の発生状況を図 16 に示す。図 15 から明らかのように従来のピストン形状よりも NO は低くなっており、図 62 からピストン D は排気弁開時期における NO 発生量が最も少ないことがわかった。

これらの結果より、NO が最も低く、BMEP についても比較的高いピストン D を選定した。

次にピストン D において燃料噴射弁の噴孔角度(SIA: Spray Inner Angle)を 147.5 度から 2.5 度刻みで 157.5 度まで 5 通り変更し、燃焼 CFD 解析を実施して SIA が機関性能に与える影響について調査した。その解析結果のうち、機関性能比較を図 17 に、燃焼解析結果を図 18 に示す。図 19 には各燃料噴射弁における NO 発生状況を示す。図 17 より、噴孔角度(SIA)を狭めるほど NO が低下し、Soot は増加することがわかった。噴孔角度(SIA)が 150 度以下では NO はほぼ一定となり、それ以上低減できない。また、Soot については噴孔角度(SIA)を狭めるほど、高くなることと前述の NO の排出特性から噴孔角度は 150 度が最良であることがわかった。また、図 19 において噴孔角度が 157.5 度の場合、NO が高い部分(赤い部分)がシリンダライナーに接していることがわかった。これは NO が高いということは温度が高いことを意味しており、火炎がライナーに当たっていることを表しており、潤滑油が燃焼し、潤滑油消費量が多くなる等の問題が発生するため、この角度

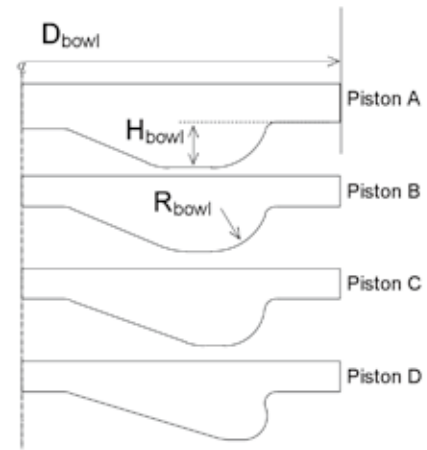


図 13 ピストン形状

Run No.	ϵ	Piston	SIA [deg]
1	14.1	Bowl-A	150.0
2	16.4	Bowl-B	150.0
3	16.4	Bowl-C	150.0
4	16.4	Bowl-D	152.5

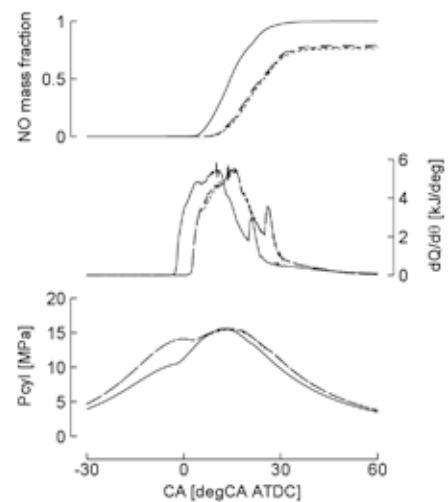


図 14 各ピストンにおける燃焼状況

Run No.	ϵ	Piston	SIA[deg]
1	14.1	Bowl-A	150.0
2	16.4	Bowl-B	150.0
3	16.4	Bowl-C	150.0
4	16.4	Bowl-D	152.5

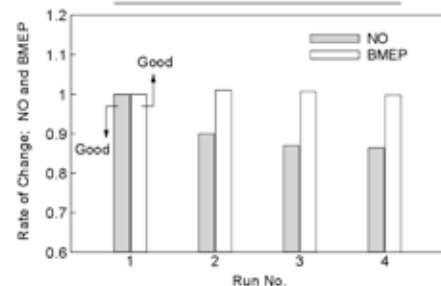


図 15 各ピストンにおける排気性能比較

の燃料噴射弁は採用できない。

従って、これらの結果を踏まえて、ピストン D と噴孔角度 150 度の燃料噴射弁を供試エンジンに組み込み、試験を行った。

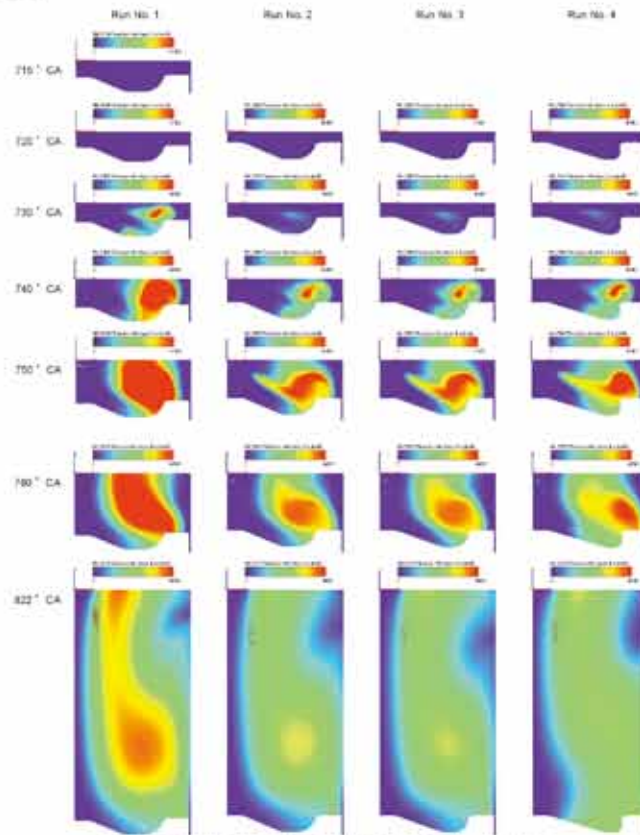


図 16 各ピストンにおける NO 生成状況

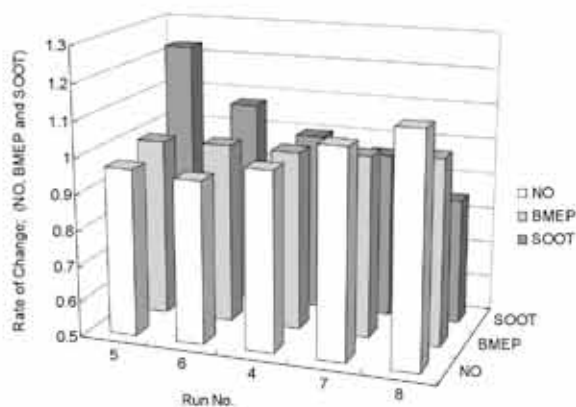


図 17 噴孔角度が排気性能に与える影響

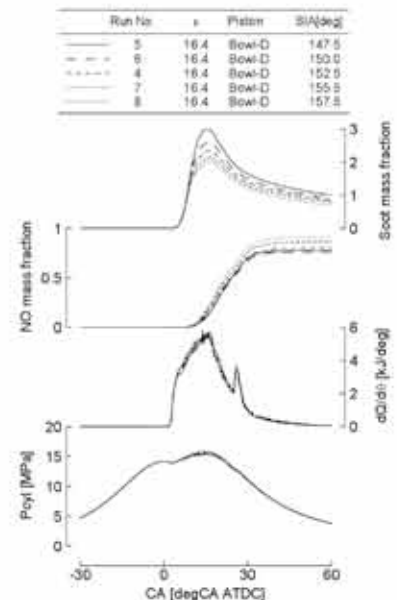


図 18 噴孔角度が燃焼状況に与える影響

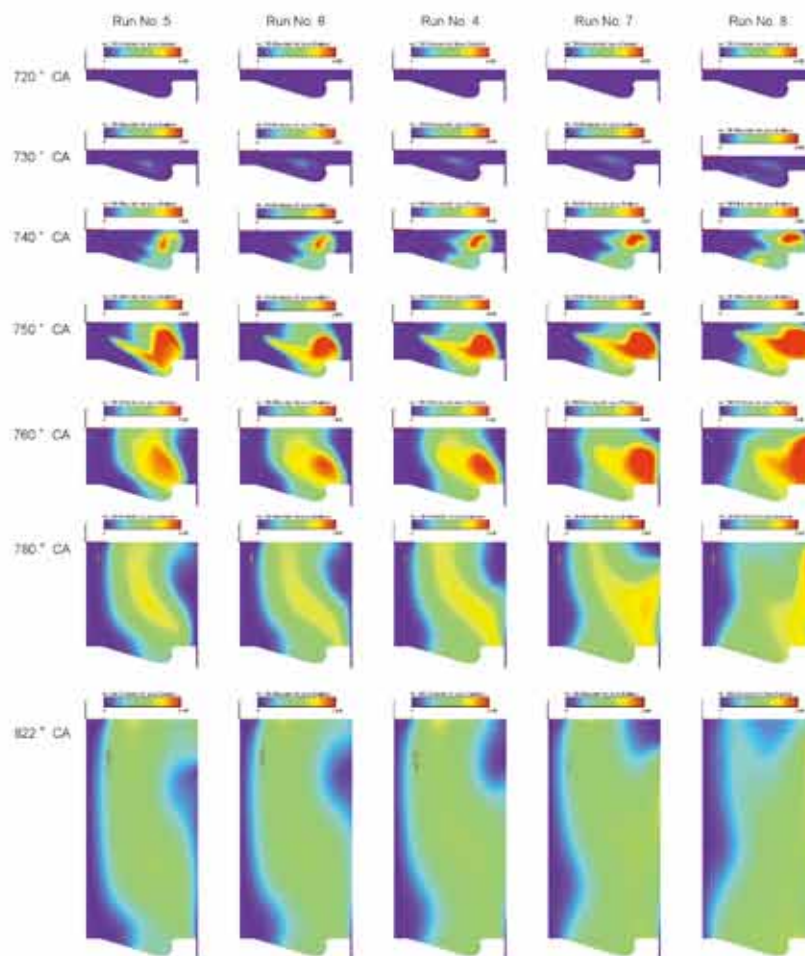


図 19 燃料噴射弁噴孔角度が NO 生成状況に与える影響

4.1.1.2.1.5 最適化

これまでに、圧縮比、燃料噴射率、燃料噴射時期、及び、ミラーサイクル化が NOx 排出率に及ぼす影響について述べてきた。これらの要目を組合せて変更した場合の機関性能を、初期性能と比較した結果を図 20 に示す。本試行では、燃料噴射開始時期を負荷毎に設定することにより、低負荷では燃費の悪化を最小限に抑えつつ、高負荷では NOx 排出率の低減を追求した。結果として、NOx 排出率はいずれの負荷においても著しく低減しており、目標の IMO NOx 値をクリアした。一方、燃料消費率は、高負荷において若干悪化したものの、低負荷において大幅に改善させることができた。計算では、初期設定に対して圧力比のみを変更した過給機モデルを適用した。実際には、要目の組合せによって要求風量が異なることが予想されるし、排気温度や過給機回転速度の制限に対する評価も必要になるため、試験部品の詳細設計ではさらに詳細な過給機モデルを適用した計算が要求される。

75%負荷における熱発生率の時間履歴を図 21 に示す。噴射開始時期の遅角により筒内圧力には明確な燃焼波形が確認されていない。着火は上死点後に発生し、熱発生率のピーク発生時期は大幅に遅れているが、噴射期間が短縮されたため後期燃焼は速やかに終了した。図 22 に p-v 線図を比較すると、75%負荷における要目変更後の線図では、ほぼ等圧力で燃焼が行われており、ディーゼルサイクルが再現されていることが確認された。ここで、爆発度を式(2)により求めて NOx 排出率との相関を図 23 にまとめると、両者の間には比例関係が成立しており、爆発度は NOx 排出率を

予測するための指標として有効であることが再確認できる。ちなみに、これまでの機関要目の変更により75%負荷における爆発度は1.33から0.78まで低下している。

図24にIMO NOx値と燃料消費率の関係を示す。NOx排出率低減への寄与度という観点から見ると、噴射時期遅延とミラーサイクル化の効果が顕著であるが、噴射時期遅延は燃料噴射率の著しい悪化を伴うため単独では適用できない。このため、燃費性能を向上させる効果がある圧縮比増加、及び、噴射期間短縮との組合せが必須である。

$$\frac{P_{max}}{P_{comp}} = \frac{P_{max}}{P_{IVC} \cdot \varepsilon_{eff}^{\kappa} - P_{amb}} \quad (2)$$

ここで

- P_{max}/P_{comp} : 爆発度
- P_{max} : シリンダ内最高圧力 (abs)
- P_{comp} : 圧縮圧力 (abs)
- P_{IVC} : 吸気弁閉時期におけるシリンダ内圧力 (abs)
- P_{amb} : 大気圧
- \cdot : 比熱比
- \cdot_{eff} : 有効圧縮比

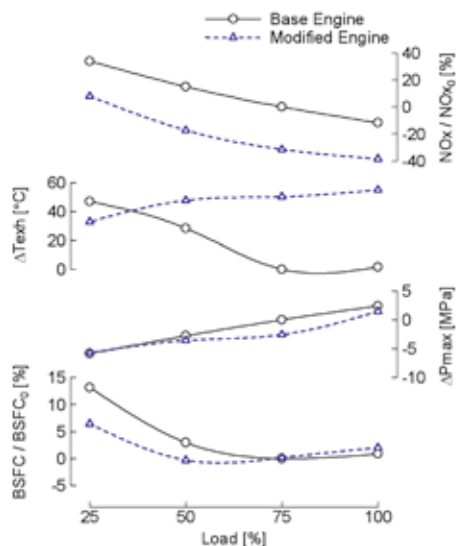


図20 最適化仕様における機関性能

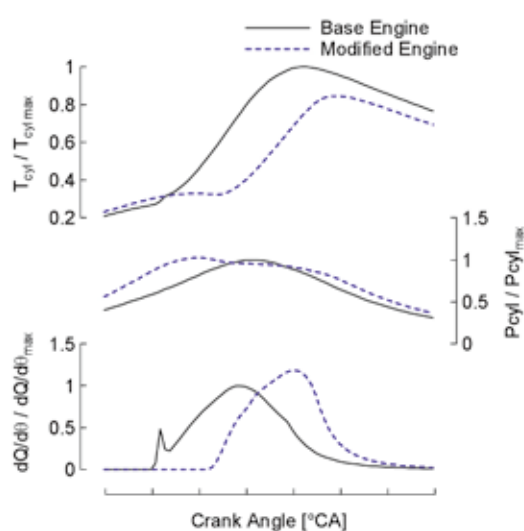


図21 最適化仕様における負荷率75%での燃焼特性

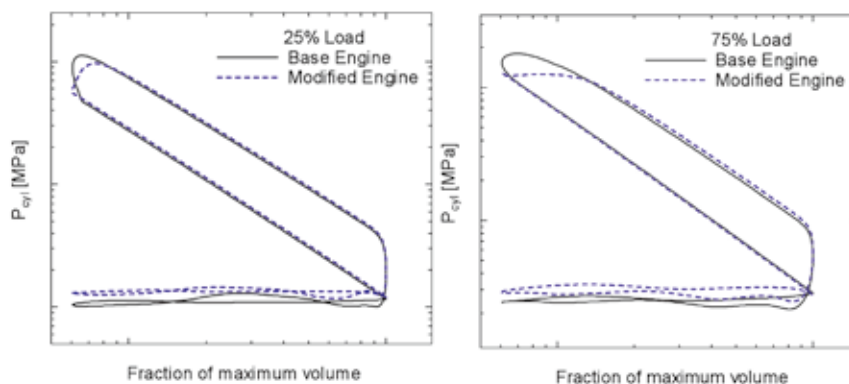


図22 最適化した仕様における負荷率25%及び75%でのPV線図

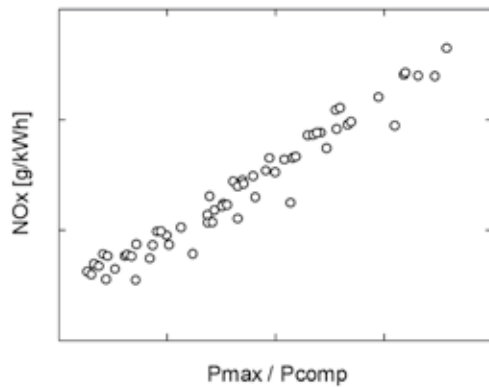


図 23 爆発度と NOx 排出率の関係

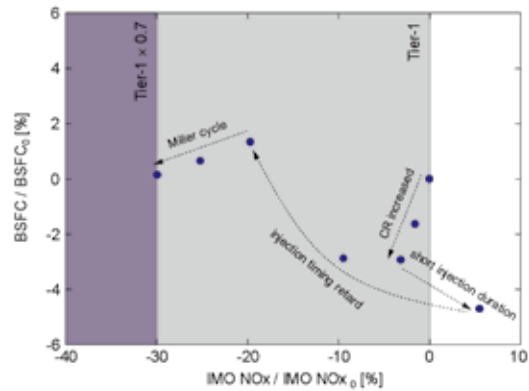


図 24 IMO NOx 値と燃料消費率の関係

4.1.1.2.2 試験部品の設計・製作

得られた計算結果により、供試機関において目標性能達成のための試験部品として、次の部品についての計測器の組込みを含め、詳細な仕様を決定した上で設計作業を行い、手配した。

- 燃料噴射ポンプ
- 燃料弁本体
- 燃料弁ノズル
- 燃料、吸排気カムプロファイルを含むカム軸
- ピストン
- 高圧力比の過給機
- 吸気弁タイミング可変装置
- 電子制御噴射系システム

4.1.1.2.3 試験用エンジンによる目標性能確認試験

4.1.1.2.3.1 試験及び運転設備

試験機関及び試験装置を用いて、試験用エンジンによる目標性能確認試験を実施した。

4.1.1.2.3.1.2 吸排気弁タイミング

吸気弁閉じ時期を固定し、バルブオーバーラップ期間(VOL)を変更するため、カム軸を交換して試験を行った。そのときの機関性能比較結果を図 25 に示す。また、そのときの燃焼解析結果比較を図 26 に示す。

図 25 より、バルブオーバーラップ期間が長くなるほど、排気温度は低くなり、高負荷域の燃料消費率が増加し、NOx は低くなることがわかった。これは、図 26 に示すようにバルブオーバーラップ期間が長くなるとシリンダ内平均ガス温度が低くなるため、NOx が低減される。

また、吸気タイミング可変装置を用いて、バルブオーバーラップ期間を固定して、吸気弁閉じ時期(IVC)を変更して試験を実施した。そのときの機関性能比較結果を図 27 に示す。また、そのときの燃焼解析結果比較を図 28 に示す。

図 27 より、吸気弁閉じ時期(IVC)をミラーサイクル(進角)にすると、中高負荷域において NOx は低くなり、燃料消費率は高くなるというトレードオフの関係になることがわかった。図 28 に示すように吸気弁閉じ時期を進角すると、シリンダ内の温度が下がり、燃焼開始時期が遅れて、シリンダ内最高平均ガス温度に達するまでの期間が長くなるため、NOx が低くなる。

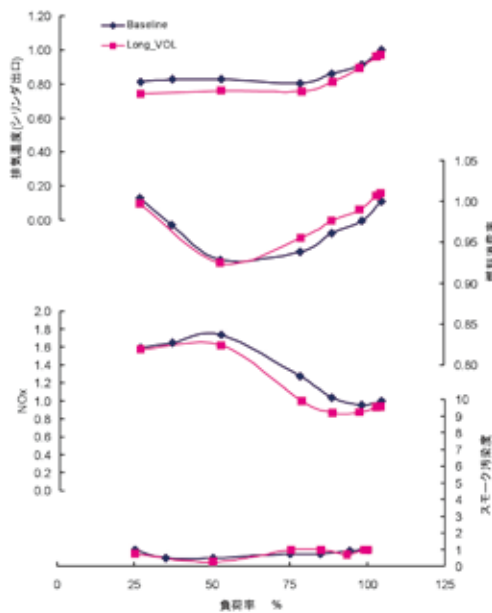


図 25 VOL が排気性能に及ぼす影響

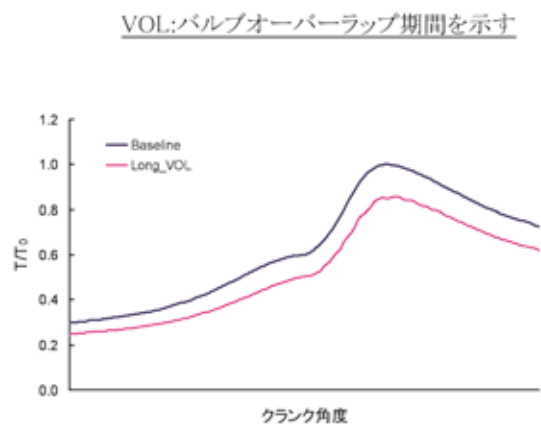


図 26 VOL が平均ガス温度に及ぼす影響

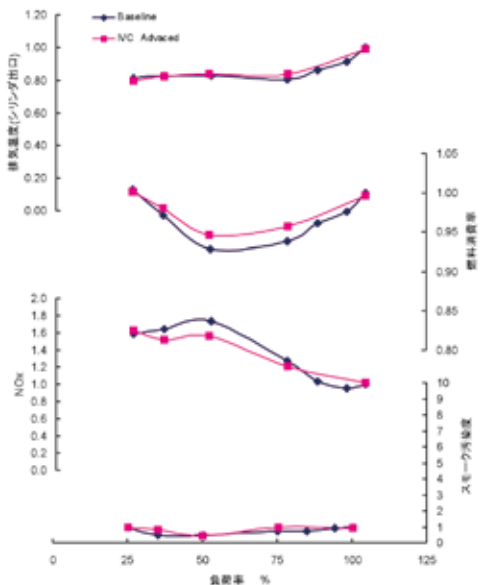


図 27 IVC が排気性能に及ぼす影響

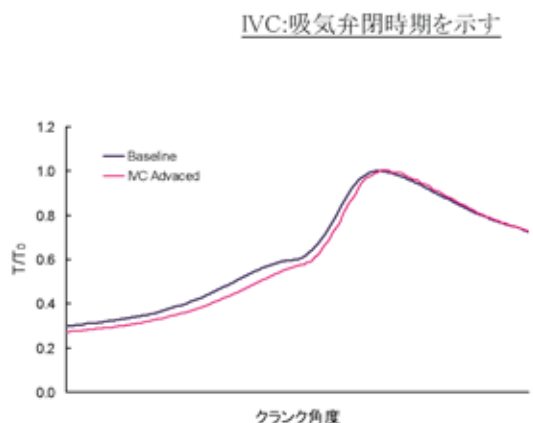


図 28 IVC が平均ガス温度に及ぼす影響

4.1.1.2.3.1.3 噴射系の最適化

燃料噴射弁噴孔要目のうち燃料噴射弁噴孔径を変更して、噴射期間が機関性能に与える影響について、試験を実施した。そのときの機関性能比較結果を図 29 に示す。また、そのときの燃焼解析結果比較を図 30 に示す。

燃料噴射弁噴孔径を大きくして、噴射期間を短くした場合、図 29 より、負荷率 50%以上の高負荷域において燃料消費率が低くなり、NOx は高くなることがわかった。図 30 に示すように噴孔径を広げたことによって、噴射期間が短くなっていることから初期の噴射率が高くなったため、図 31 のようにシリンダ内平均ガス温度が高くなり、NOx が高くなった。

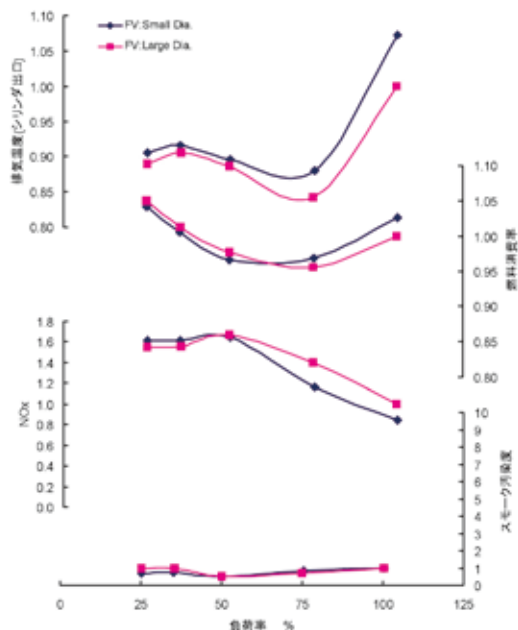


図 29 噴孔径が排気性能に及ぼす影響

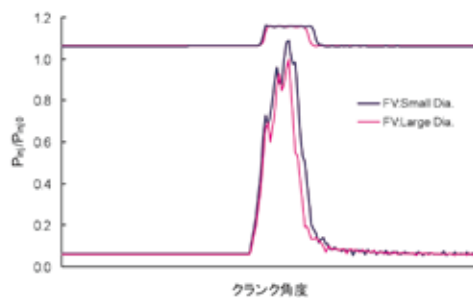


図 30 噴孔径が噴射特性に及ぼす影響

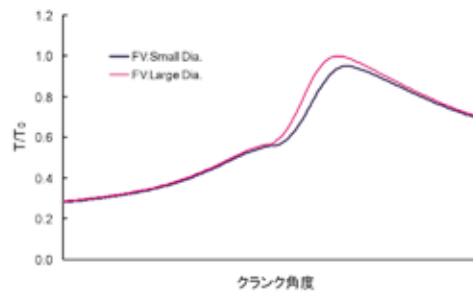


図 31 噴孔径がシリンダ内平均ガス温度に及ぼす影響

4.1.1.2.3.1.4 目標性能に対する最適化

バルブオーバーラップ期間を含めた吸気弁開閉時期、過給機マッチング、燃料噴射弁要目及び噴射開始時期を変更して、試験を実施した。

試験結果における IMO NOx 排出率と燃料消費率の関係を図 32 に示す。図 32 より、エンジン単体における目標性能(IMO NOx1 次規制-30%、GHG 排出量(燃料消費量)は IMO NOx1 次規制レベル以下)を達成した。

また、目標達成した条件と従来機関における負荷率 75%の燃焼解析結果の比較を図 33 に示す。

図 33 より、Baseline である従来の機関と比較するとシリンダ内平均ガス温度はミラー化及び噴射開始時期遅延の影響で低くなったため、NOx が低減することができた。また、燃焼終了時期については両者共にほぼ同等であることから、燃料消費率は従来機関とあまり変わらないものと考えられる。

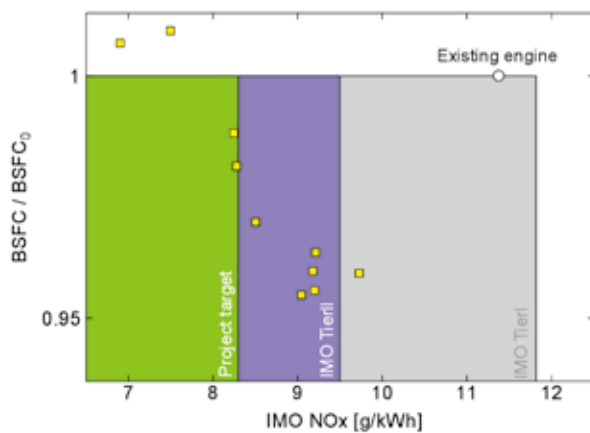


図 32 IMO NOx と燃料消費率の関係

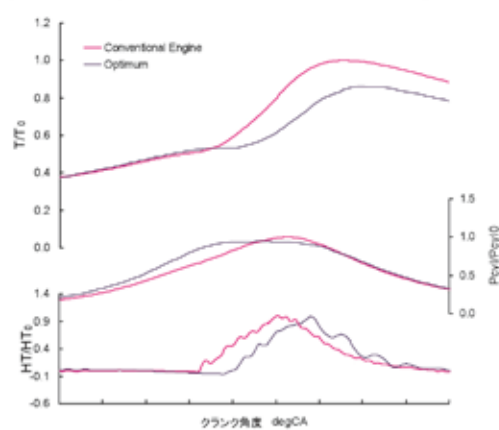


図 33 従来と最終仕様との燃焼解析結果比較(M75)

4.1.2 SCR 脱硝装置の要素試験

4.1.2.1 マイクロリアクター基礎試験

4.1.2.1.1 触媒の選定と単体性能確認試験

尿素-SCR 触媒としてハニカム形状のバナジウム系触媒の試作を行い、V(バナジウム)、W(タングステン)など活性金属の配合比の異なるバナジウム系触媒比較を触媒メーカー 2 社より表 6 に示す二式計 6 種を選定した。

実験装置には図 34 の固定床小型流通式触媒試験装置(以下マイクロリアクターと称す)を用いた。充填触媒として断面 20mm 角、長さ 180mm の寸法のハニカム触媒(容積 72cc)を充填した。触媒活性比較の試験条件として、排ガス温度は 200℃~400℃、SV 値は 25000 h⁻¹、中速ディーゼル機関排ガス模擬のフィードガス組成として NO:1500ppm、O₂:13%、CO₂:10%、H₂O:10%、CO:400ppm、N₂ バランスとした。NOx 濃度は、化学発光式の NOx 計を用いて計測し、脱硝率 η は、触媒入出口の各 NOx 濃度から図 34 中の計算式より求めた。

表 6 に示す全 6 組成のバナジウム触媒の脱硝性能結果を図 35 に示す。中速ディーゼル機関模擬排ガスの温度範囲 250℃~400℃において B 社製低温用脱硝触媒 SampleD が最も脱硝性能が高いことがわかる。よって、触媒装置のコンパクト化が図れる SampleD を SOx 耐久性試験用代表触媒として選定した。

表 6 V 系脱硝触媒試料 一覧表

試料名	製造元	温度仕様	推奨使用温度域
Sample A	A社	低温用触媒	170℃~250℃
Sample B	A社	中温用触媒	300℃~380℃
Sample C	A社	高温用触媒	400℃~500℃
Sample D	B社	低温用触媒	200℃~350℃
Sample E	B社	中温用触媒	200℃~450℃
Sample F	B社	高温用触媒	300℃~480℃



図 34 固定床小型流通式触媒試験装置 (マイクロリアクター)

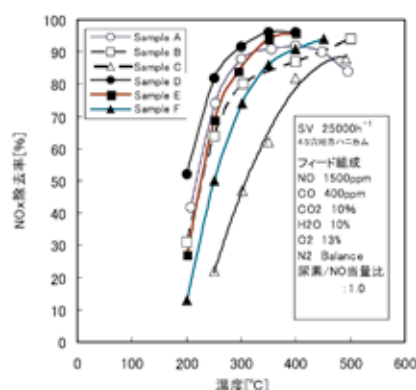


図 35 使用温度別触媒6種類における脱硝活性比較

4.1.2.1.2 別種触媒と別種還元剤の検討

4.1.2.1.2.1 ゼオライト触媒試験

実験装置には前述の図 34 のマイクロリアクターを用いた。触媒試料は市販 UD 社ゼオライトハニカム脱硝触媒、Fe 担持ゼオライトハニカム脱硝触媒、比較として市販 B 社製 V 系低温用および高温用ハニカム脱硝触媒を用いた。充填触媒として断面 20 mm 角、長さ 180 mm の寸法のハニカム触媒(容積 72cc)を充填した。標準試験条件として、排ガス温度は 200℃~400℃、SV 値は 25000h⁻¹、フィードガス組成は、NO:1500ppm、O₂:13%、CO₂:10%、H₂O:10%、CO:400 ppm、N₂ バランスである。SO₂ 濃度は、30 ppm、80 ppm、400 ppm、800 ppm の 4 組成で行った。NOx 濃度及び脱硝率 η は、上述の単体性能確認試験と同じ計測及び評価を行った。また、劣化の有無の判断基準として

は、通ガス脱硝 100 時間後の脱硝率が初期性能の脱硝率の-1%以内のものを劣化なしとした。

1)ゼオライト系触媒の尿素水脱硝性能の温度特性について

図 36 に SO₂ 0 ppm における Fe ゼオライト触媒の脱硝性能の温度依存性結果を示す。350℃、250℃ 及び 200℃での各脱硝率は SV 値 25000 h⁻¹において 28%、3.4%及び 1.9%であった。図 37 に SO₂:0 ppm における UD ゼオライト触媒の脱硝性能の温度依存性結果を示す。350℃、250℃及び 200℃での各脱硝率は SV 値 25000 h⁻¹において 94%、64%と 300℃以上の温度では比較的活性が高く、250℃、200℃では脱硝率 28%、5%と低温では活性が低い結果であった。

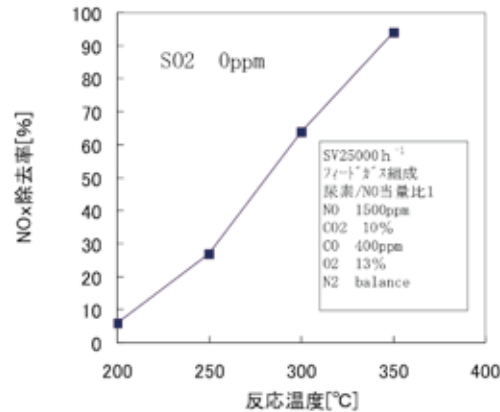
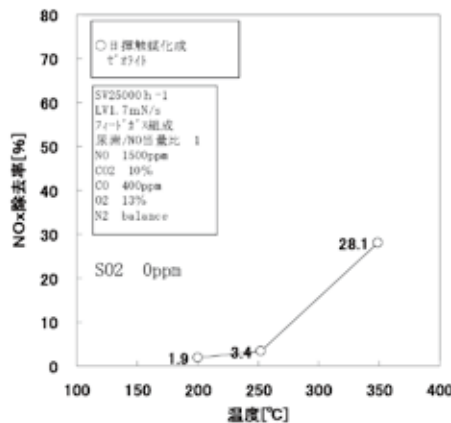


図 36 Fe ゼオライト触媒の脱硝性能温度特性

図 37 UD ゼオライト触媒の脱硝性能温度特性

2)V系触媒種とゼオライト触媒の活性比較

図 38 に SO₂ 0ppm におけるV系触媒種とゼオライト触媒種の脱硝性能の比較結果を示す。UD ゼオライト触媒の尿素水脱硝性能は、350℃において、同容積あたりでは市販V系脱硝触媒と同じレベルであった。Fe ゼオライト触媒の尿素水脱硝性能は、350℃において、同容積あたりでは市販V系脱硝触媒の 1/3 程度の脱硝率しかなかった。図 39 に SO₂:0 ppm におけるV系触媒種とゼオライト触媒種の単位表面積あたりの 1 次反応速度定数の比較結果を示す。単位表面積あたりの性能は、B 社低温用V触媒 SampleD>B 社高温用V触媒 SampleE>UD ゼオライト触媒>Fe ゼオライト触媒の順であった。

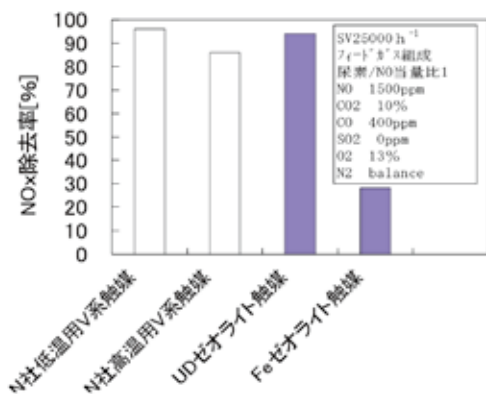


図 38 V系、ゼオライト系触媒種の脱硝性能比較 (350℃、SO₂:0ppm)

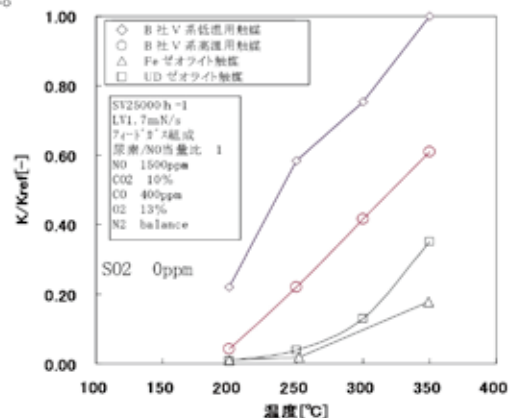


図 39 ゼオライト触媒の脱硝活性比較 (K_{ref}:350℃のV系低温用触媒の一次反応速度定数)

3)C 重油焚き排ガスレベル SO₂:800 ppm の脱硝性能への影響

図 40 に 200℃、350℃における SO₂:800ppm 供給前後の Fe ゼオライト触媒の脱硝性能結果を示す。図 40 に見られるように Fe ゼオライトでは、200℃、350℃共に脱硝率は、2 時間～50 時間程度の短時間では SO₂ 800 ppm の悪影響を受けなかった。

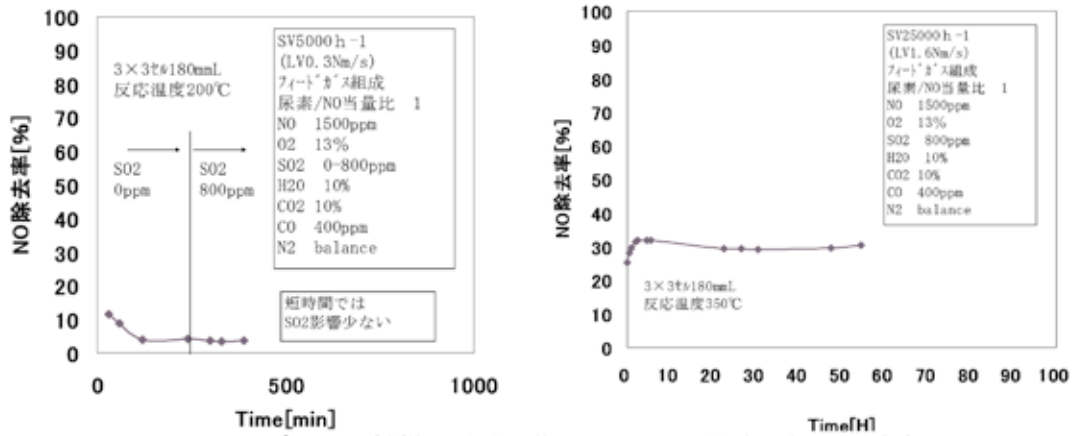


図 40 Fe ゼオライト触媒の脱硝性能への SO₂ の影響(200℃と 350℃)

図 41 に 200℃、350℃における SO₂ 800ppm 供給前後の UD ゼオライト触媒の脱硝性能結果を示す。図 41 に見られるように UD ゼオライト触媒では、SO₂ 濃度 800ppm 以下、1 時間で脱硝率が新品の 3～4 割に低下した。

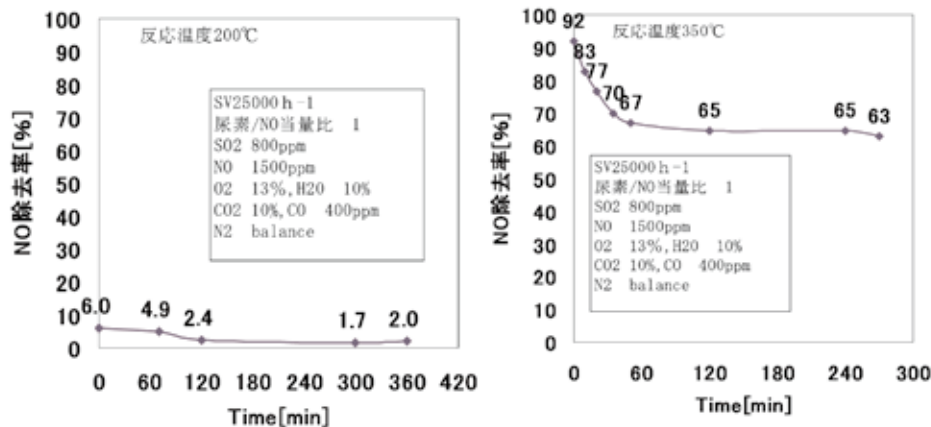


図 41 UD ゼオライト触媒の脱硝性能への SO₂ の影響

4)A 重油焚き排ガスレベル SO₂ 80ppm の脱硝性能への影響

図 42 に 200℃、350℃における SO₂ 80 ppm 供給時の UD ゼオライト触媒の脱硝性能結果を示す。350℃では初期脱硝率 98 %が 100 h 経過時点 96%、200℃では初期脱硝率 7%が 30 h 経過時点で 1.3%と SO₂ 80 ppm 以下でも UD ゼオライト触媒は 350℃および 200℃共に脱硝率が徐々に低下する傾向であった。

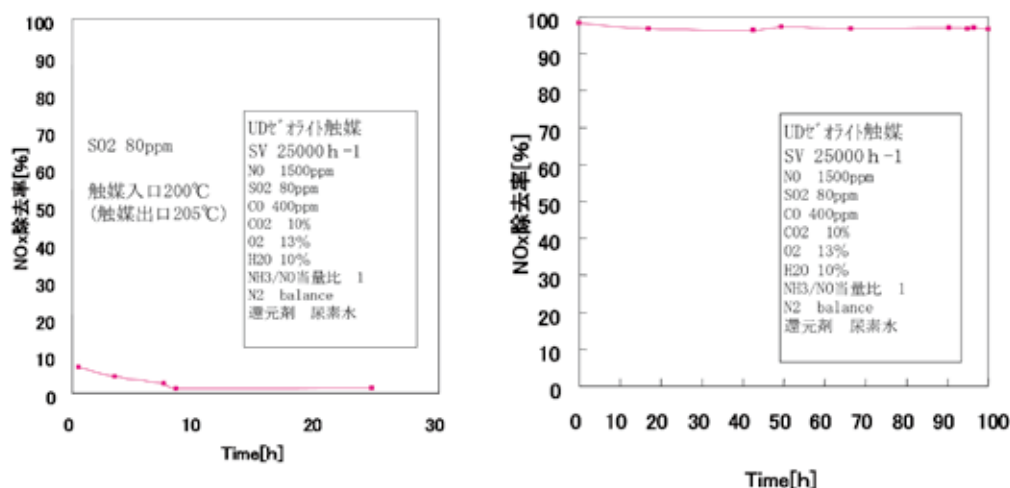


図 42 UD ゼオライト触媒の脱硝性能への A 重油相当 SO₂ 濃度の影響(200℃と 350℃)

結論として船用レベル SO_x 濃度のディーゼルエンジン排ガス向け脱硝に用いる観点では、ゼオライト系脱硝触媒は SO_x 耐久性面および脱硝性能絶対値面から V 系脱硝触媒よりも実用性に劣ることがわかった。

4.1.2.2 触媒被毒復旧対策と耐久性評価

4.1.2.2.1 触媒劣化原因の調査

脱硝触媒メーカーに対し市販 V 系脱硝触媒の運用に関する注意点に関してヒアリング調査を行った結果、次のような情報を得られ、V 系脱硝触媒の劣化に関しては、次のようにまとめられる。

- 1) 排ガス成分によるものにおいては、SO_x が主原因
- 2) 排ガスの高温によるものにおいては、再生処理時に注意が必要

4.1.2.2.2 100 時間劣化耐久試験

触媒試料として市販 B 社製 V 系低温用ハニカム脱硝触媒 Sample D を用いた。

標準試験条件として、排ガス温度は 200℃～400℃、SV 値は 25000h⁻¹、フィードガス組成は、NO: 1500 ppm、O₂: 13 %、CO₂: 10 %、H₂O: 10 %、CO: 400 ppm、N₂ バランスである。SO₂ 濃度は、30 ppm、80 ppm、400 ppm、800 ppm の 4 組成で行った。実験装置、充填触媒の大きさ、NO_x 計、脱硝率 η 及び劣化判断は前述と同じとした。

排ガス温度各 310℃、320℃および 330℃の SO₂ 濃度 800 ppm 時 100 時間性能挙動結果をそれぞれ図 43、図 44 および図 45 に示す。結果として C 重油焚き相当 SO₂ 800 ppm では、排ガス温度 330℃以上で硫安劣化しないことがわかった。また、排ガス温度 320℃、310℃と排ガス温度が低くなるにつれ、脱硝性能の低下が速くなっている傾向が見られた。

また、排ガス SO₂ 濃度と触媒劣化・未劣化の触媒塔運転温度との関係を図 46 に整理した。図 46 より、SO₂ 濃度が低くなるにつれ、触媒劣化しない排ガス温度が低温化する傾向がみられた。図中の実線は文献¹⁾の硫安析出温度式から試算した硫安析出温度であり、点線の実験値の傾向と定性的に一致した。

100 時間触媒性能試験による硫安劣化温度の把握として以下の事がわかった。

- 1) C 重油焚き相当 SO₂ 800 ppm では、排ガス温度 330℃以上で硫安劣化しなかった。
- 2) A 重油焚き相当 SO₂ 80 ppm では、排ガス温度 295℃以上で硫安劣化しなかった。

3)軽油レベルの低硫黄燃料相当 SO₂ 30 ppm では、排ガス温度 250℃以上で硫安劣化しなかった。

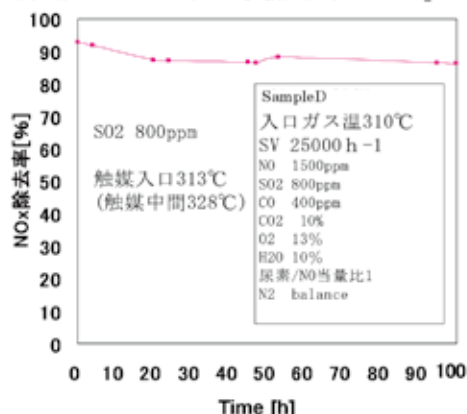


図 43 SO₂800 ppm、310℃、100 時間挙動

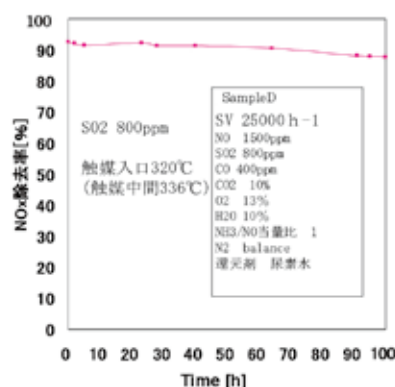


図 44 SO₂800 ppm、320℃、100 時間挙動

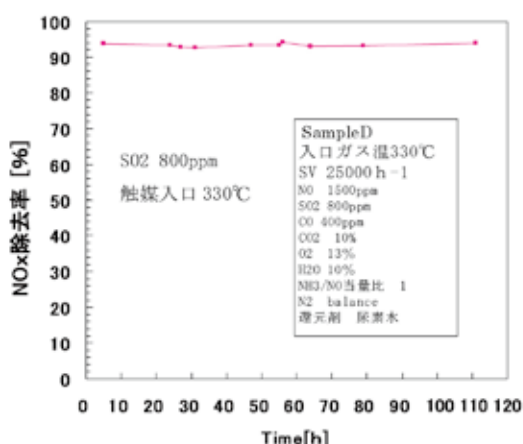


図 45 SO₂800 ppm、330℃、100 時間挙動

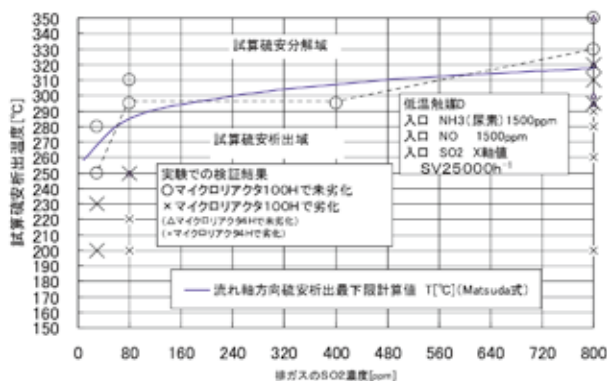


図 46 低温触媒における硫安析出計算と実験値状況

4.1.2.3 SCR 脱硝装置性能試験

4.1.2.3.1 基本性能試験

以上に述べたマイクロリアクターによる性能評価試験や劣化再生シミュレーションの構築とともに、(独)海上技術安全研究所に設置した定格出力 750kW の 4 ストローク中速ディーゼル機関を運転し、SCR 脱硝装置の基本性能を調べる試験を実施した。

図 47 に 4 ストローク中速ディーゼル機関の SCR 評価試験装置の構成を示す。機関の排気ガスは、排気ガス冷却器を通り、試験用 SCR 装置へと導かれる。触媒の前後には複数の排ガス分析計が設置してあり、NO_x 濃度やリークアンモニア濃度を測定できる。本試験装置の特徴としては、還元剤として尿素水とアンモニアガスを使用できること、燃料に A 重油および C 重油を使用できること、排気ガス冷却器によって低温排ガス時の触媒性能を評価できることがあげられる。

SCR 脱硝装置には、触媒前後の NO_x 濃度等を計測するための排ガス分析計を取り付け、それらの計測データは排ガス分析用パソコンで処理される。フォレコ社が製作した触媒制御盤は、試験用機関から排ガス温度等の信号を受け取るとともに、別途準備した触媒計測・制御用パソコンから、尿素量を設定するためのアナログ信号を受け取る。触媒計測・制御用パソコンには、触媒制御盤からの各種計測データや触媒周辺の排ガス温度、試験機関の燃料流量、排ガス分析用パソコンからの触媒前 NO_x 濃度を処理し、適切な尿素量を推定している。

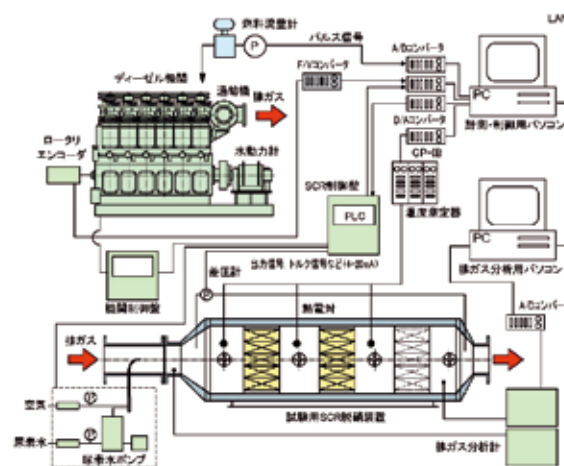
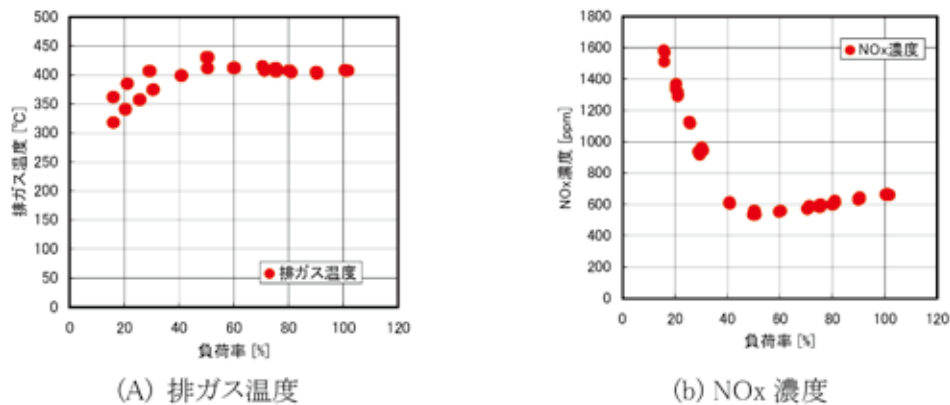


図 47 4 ストローク中速ディーゼル機関の SCR 評価試験装置の構成

図 48 は、燃料に A 重油を使用し、供試機関を部分負荷で運転した場合の排ガス温度と触媒前 NOx 濃度の測定結果である。供試機関の排気ガス温度は 300～400℃程度であり、触媒前の NOx 濃度は負荷率 50%以上の範囲で 600～700ppm 程度である。



(A) 排ガス温度 (b) NOx 濃度
図 48 部分負荷における排ガス温度と NOx 濃度(A 重油)

4.1.2.3.2 燃料油及び還元剤変更試験

図 49 は、試験機関の負荷率を 25%、50%、75%及び 100%とし、還元剤に尿素水を用いた場合の当量比(設定値)に対する触媒前後の NOx 濃度並びに脱硝率の試験結果である。以下の運転試験においては、脱硝反応器の中に、断面形状 150 mm×150 mm、長さ 450mm の触媒を 25 本ずつ 2 段に挿入しており、負荷率 100%における SV 値は約 15000h⁻¹である。図 49 より、脱硝率は当量比に対して概ね比例しており、SCR 脱硝装置は概ね適切に機能しているものと考えられる。ただし、本触媒計測・制御用パソコンでは、回転数並びに給気圧力から簡易的に排ガス流量を求めているが、その推定精度は明確でない。なお、炭素バランス法および酸素バランス法による排ガス流量の推定も行っているが、触媒計測・制御用パソコンに入力される燃料流量の計測値にばらつきが大きく、尿素量制御に使えるまでには至っていない。

図 50 及び図 51 は、還元剤にアンモニアガスを使用し、燃料油に A 重油及び C 重油を用いた場合の当量比に対する脱硝率の測定結果である。尿素水を用いた試験と同様、すべての運転条件において、当量比が 100%以下の範囲で当量比と脱硝率はほぼ等しく、触媒は適切な脱硝をしていることがわかる。

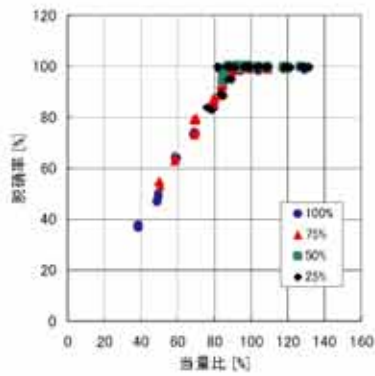


図 49 当量比と脱硝率の関係
(尿素水、A重油)

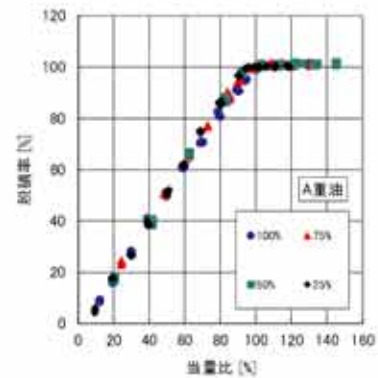


図 50 当量比と脱硝率の関係
(アンモニアガス、A重油)

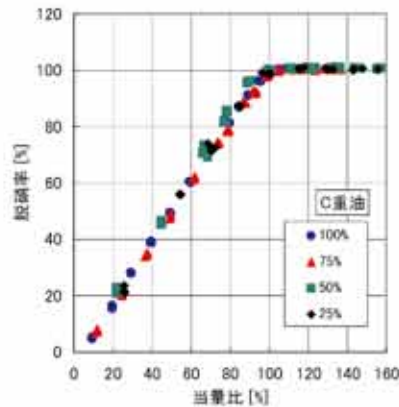


図 51 当量比と脱硝率の関係
(アンモニアガス、C重油)

図 52～図 54 は、上記の試験においてリークアンモニア濃度を計測した結果である。リークアンモニアの計測は、日本サーモ社製レーザアンモニア計 LGA-4100 を使用した。これらの図より、リークアンモニア濃度は、当量比が 100%以下の範囲で最大 10ppm 程度であり、当量比が 100%を超えるとリークアンモニアが急激に増加することがわかる。

なお、数種類のアンモニア計測計を用いてリークアンモニア濃度の計測をしたところ、それぞれの測定値には大きな相違があった。また、上記のレーザアンモニア計を用いた触媒前のアンモニア濃度の測定値が、噴射した尿素水あるいはアンモニアガス量と整合性が取れていないことが確認された。アンモニアは水溶性が高いこと、また他の物質との干渉が生じ得ることなどにより、実機関における高精度な測定はかなり難しいことが確認されている。

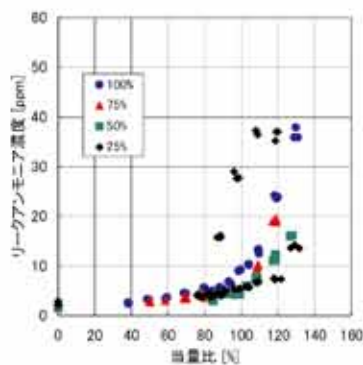


図 52 当量比とリークアンモニア濃度
の関係
(尿素水、A重油)

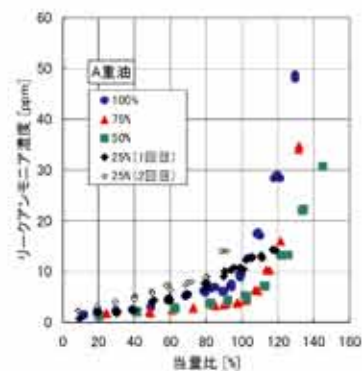


図 53 当量比とリークアンモニア濃度
の関係
(アンモニアガス、A重油)

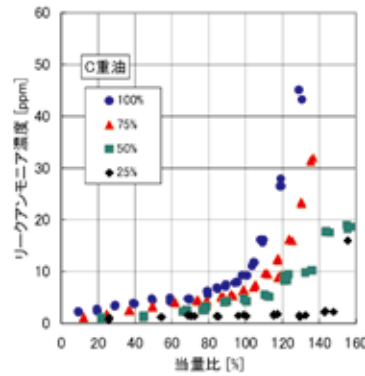


図 54 当量比とリークアンモニア濃度の関係
(アンモニアガス、C 重油)

4.1.2.3.3 触媒性能変更試験

図 55、図 56 は、SV 値を約 8800h⁻¹、17500 h⁻¹、20000 h⁻¹とした場合の脱硝性能について試験を行った結果である。機関及び SCR 運転状態は、船用特性 75%負荷率にて、燃料油に A 重油、還元剤に尿素水を用いている。船用特性の 75%負荷率では、排気ガス温度は、脱硝触媒の前にて 410℃程度あり、触媒の一次反応定数から推算される脱硝性能は、SV 値によらず噴射した還元剤の当量比は、脱硝反応が可能な温度である。

図 55 に、各 SV 値での脱硝性能を、図 56 に SV 値と脱硝率の関係を示す。SV 値 20000h⁻¹では、噴射される還元剤の当量比が上がるにつれて、当量比と脱硝率の差が大きくなっているのがわかる。また、SV 値 8800 h⁻¹、17500 h⁻¹では、同等の脱硝性能であるが、SV 値 20000 h⁻¹では、脱硝性能が低下していることがわかる。

一方、図 57 は SV 値 20000 h⁻¹において、還元剤に尿素水とアンモニアガスを使用した場合の脱硝試験の結果であり、還元剤にアンモニアガスを使用した場合、噴射した還元剤の当量比の脱硝率が得られていることがわかる。

排気ガス温度が十分に高い場合、尿素水の加水分解が速やかに行われるため、還元剤に尿素水またはアンモニアガスを用いた場合の脱硝性能の相違はほとんどないと考えられる。図 57 における脱硝性能の相違は、排気ガス中の還元剤の分散によるものと考えられる。尿素水は排気管中心から一つの噴孔により円錐状に噴霧される方式である。一方、アンモニアガスは、図 58 に示すように、多点からの噴射である。このため、NH₃ガスでは排気ガス中に還元剤が分散していると考えられる。

さらに、図 59 に示すように SV 値 20000 h⁻¹とした条件の実験では、触媒部分の圧力損失が小さいため触媒入口での排気ガスの混合は期待できない。還元剤の分散が不十分になり、脱硝に有効に使用される触媒が減少したため、脱硝性能が低下したと考えられる。

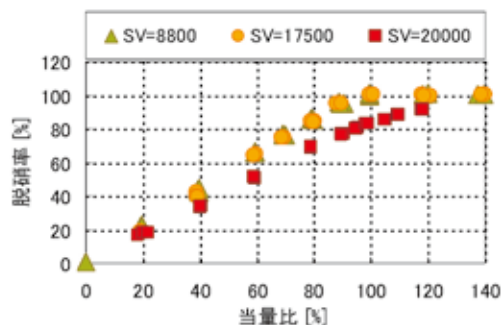


図 55 各 SV 値での脱硝性能

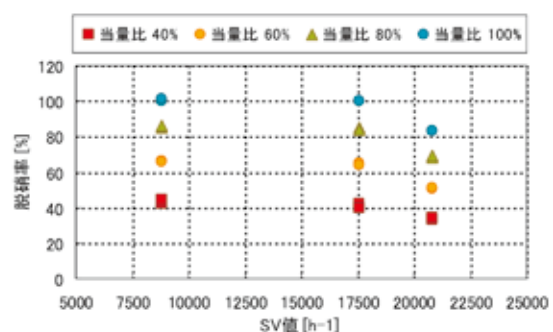


図 56 SV 値と脱硝率の関係

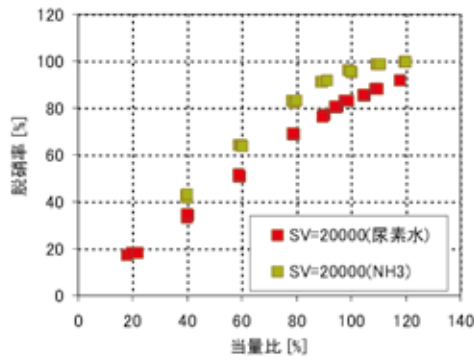


図 57 アンモニアガスと尿素水での脱硝性能

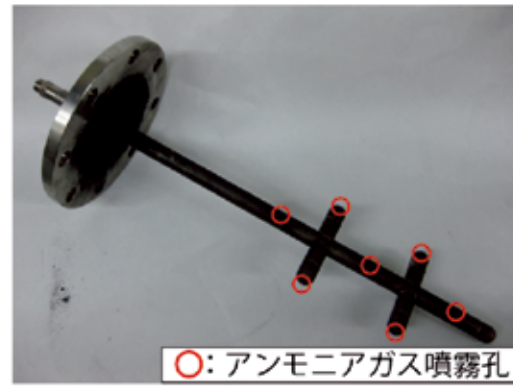


図 58 アンモニアガス噴射ノズル

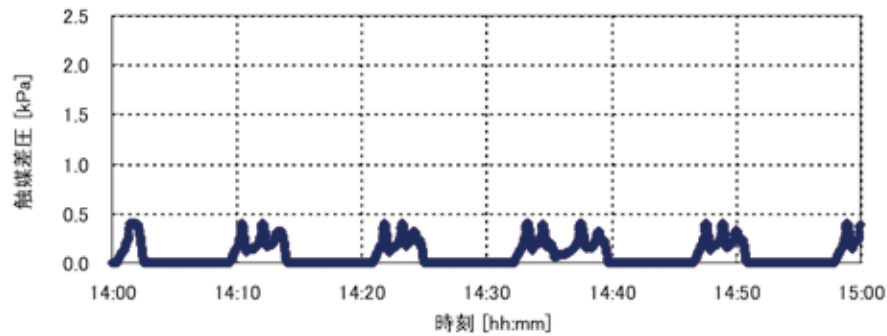


図 59 SV 値 20000h⁻¹での実験触媒差圧

図 60 は、SV 値を 20000 h⁻¹とした実験条件における還元剤噴射当量比と NO_x 排出率の関係を示している。本実験において、燃料には A 重油または C 重油、還元剤には尿素水を用いており、それぞれの条件において排気ガス温度を触媒入口部で 300℃に低減した場合についても実験を行っている。なお、NO_x 排出率の計算は E3 モードによって行った。これより、燃料に A 重油、C 重油を用いた場合、また、それぞれ排気ガス温度を触媒入口で 300℃に低減した場合においても、尿素水の噴射量を当量比 80%にすることで、SCR の初期性能は IMO3 次規制の NO_x 排出率を満足していることがわかる。しかし、図 55 及び図 56 からわかるように、当量比を 80%とした際の脱硝率は 70%程度であり、この相違はリークアンモニア排出の原因となる。また、後述するように、触媒への酸性硫酸やストの付着を考えた場合、SV 値が 20000 h⁻¹の触媒を長期に使用することは難しい。

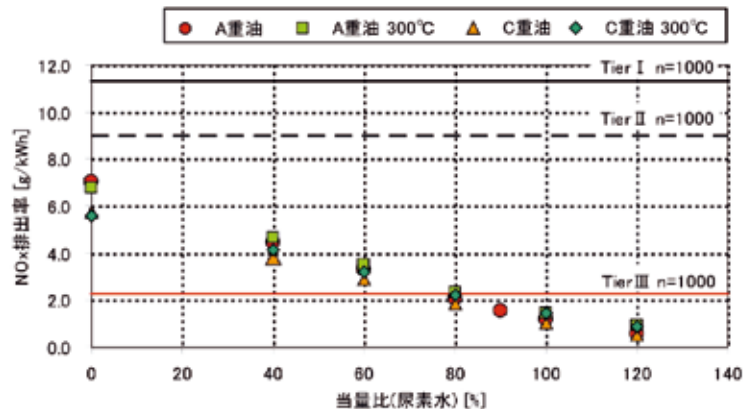


図 60 還元剤噴射当量比と NO_x 排出率の関係

4.1.2.3.4 酸性硫安による触媒被毒調査

触媒の劣化特性を調べるため、燃料油にC重油を使用し、負荷率75%、当量比80%、排気ガス温度250℃の運転条件で36時間の連続運転を実施した。図61～図66に試験の時系列データを示す。図61より、運転中、排気ガス温度は概ね250℃に保たれていることがわかる。

また、触媒後NOx濃度は、1段目の触媒の後流側から2種類の排ガス計測器によって測定しており、36時間の運転後、10%～40%程度の脱硝率の低下が確認された。これは劣化シミュレーションの結果とオーダ的に概ね一致している。劣化原因の主たるものは酸性硫安による触媒被毒と考えられるが、運転後の分解・点検により、すすの付着が不均一であったこと、測定位置によってNOx濃度が大きく異なることなど、実機関における触媒劣化の適切な評価には至っていない。

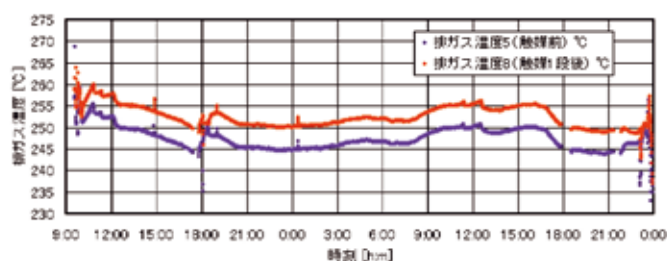


図 61 排ガス温度の測定結果

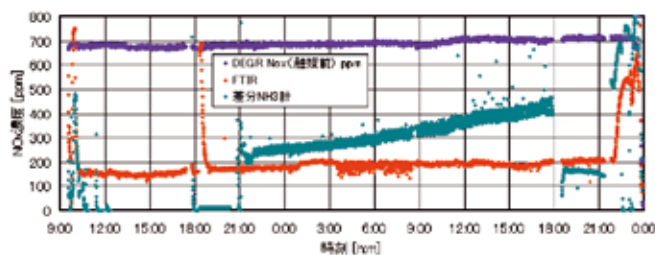


図 62 NOx 濃度

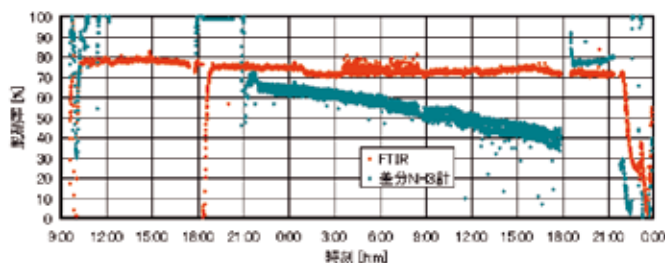


図 63 脱硝率

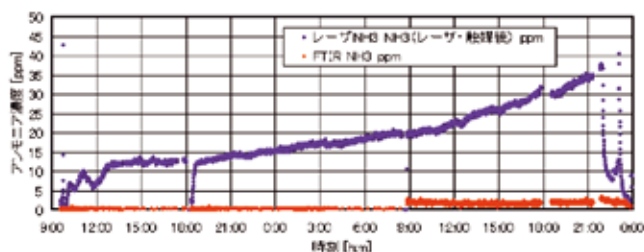


図 64 リークアンモニア濃度

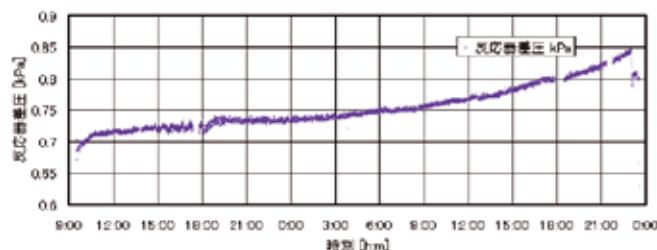


図 65 反応器差圧(圧力損失)

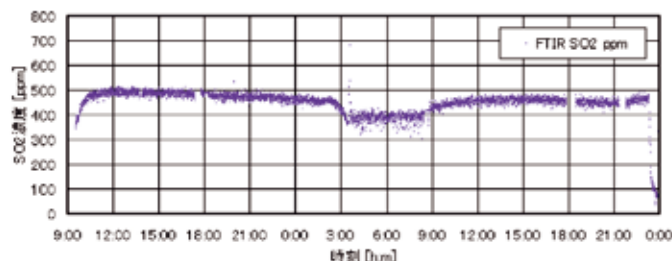


図 66 SO₂濃度

4.1.2.3.5 低温排気ガスによる触媒性能評価試験

本試験設備の特徴の一つは、排気ガス冷却器により低温排気ガス条件での触媒評価ができることである。図 67～図 70 は、低温排気ガス条件において触媒性能評価試験を行った結果の一例であり、還元剤に尿素水を使用し、燃料油に A 重油及び C 重油を用いた場合の当量比と脱硝率の関係を示している。この際、機関の負荷率は 75%としており、排ガス温度が 200～370℃の範囲で排気ガス冷却器を運転している。これらの図より、脱硝率は、排ガス温度が低温になるほど低下していることがわかる。また、低温排気ガス条件では測定値のばらつきが大きく、測定値の再現性が低いことが確認されている。これは、還元剤が触媒表面に付着するなどの現象によって、触媒性能が安定していないためであると考えられる。

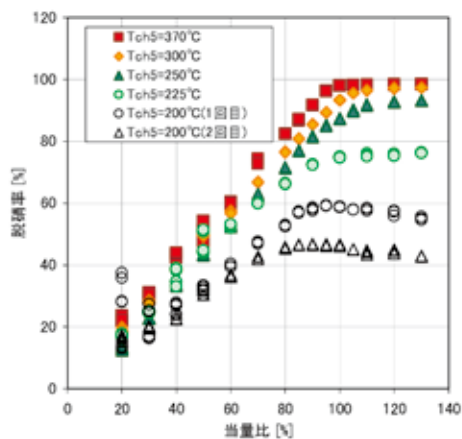


図 67 低温排気ガス条件における当量比と脱硝率の関係(A 重油)

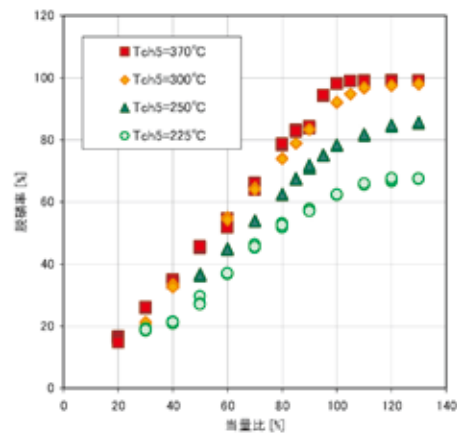


図 68 低温排気ガス条件における当量比と脱硝率の関係(C 重油)

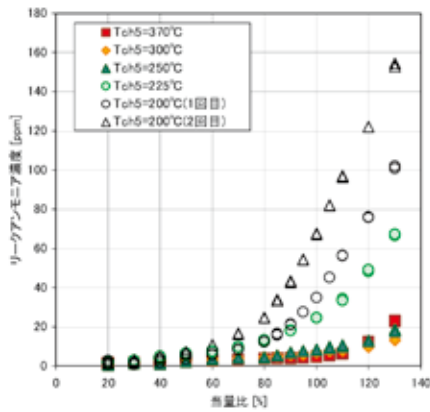


図 69 低温排気ガス条件におけるリークアンモニア濃度(A 重油)

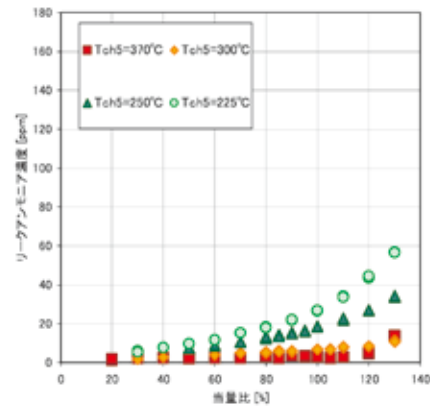


図 70 低温排気ガス条件におけるリークアンモニア濃度(C 重油)

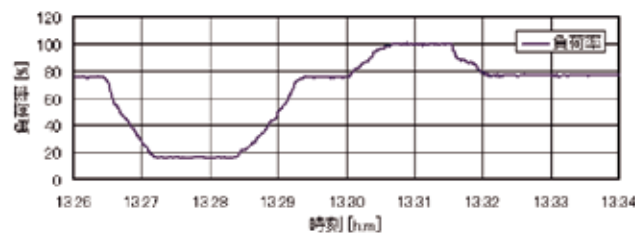
4.1.2.4 SCR の還元剤システムの検討

4.1.2.4.1 還元剤最適注入システムの検討

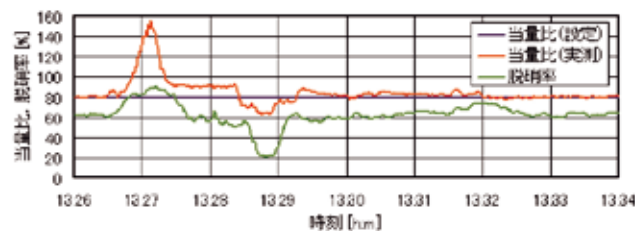
本研究においては、下記に示す数種類の還元剤注入システムの制御プログラムを開発した。

- ① 常設型排ガス分析計により測定した触媒前 NOx 濃度およびエンジン回転数と吸気圧力から換算される排ガス流量の測定値から噴霧する還元剤流量を求める制御
- ② 事前に測定しておいたエンジン回転数と NOx 濃度のマッピングから還元剤流量を求める制御
- ③ 事前に測定しておいたトルクと NOx 濃度のマッピングから還元剤流量を求める制御
- ④ 事前に測定しておいた軸出力(負荷率)と NOx 濃度のマッピングから還元剤流量を求める制御
- ⑤ あらかじめ測定しておいた排ガス温度と NOx 濃度のマッピングから還元剤流量を求める制御
- ⑥ 耐久性が高いジルコニアセンサによって測定する触媒前 NOx 濃度から還元剤流量を求める制御

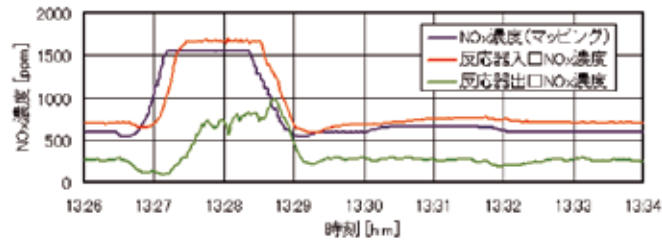
図 71 は、上記②のマッピングによる制御の試験結果である。当量比の設定値を一定に保ちながら、運転中に負荷率を変化させている。



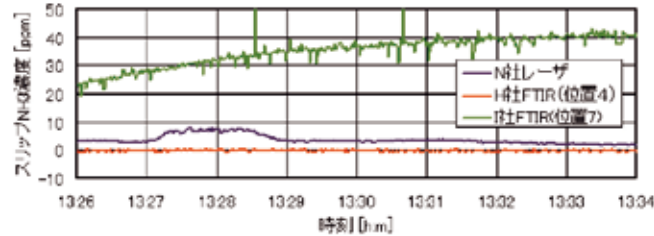
(a) 負荷率



(b) 当量比および脱硝率



(c) NOx 濃度



(d) スリップアンモニア

図 71 還元剤注入システムの性能評価試験の実施例

4.1.2.4.2 CFD 解析による還元剤噴射条件の検討

船舶に SCR 排ガス後処理装置を搭載することを考えた場合、機関出口から排ガス煙突までの間に設置することになるが、この設置場所に対する制約は比較的大きい。SCR 触媒の特徴から排ガス温度はなるべく高い方が良く機関出口直後が好ましいが、この位置に触媒を置くだけのスペースは機関室内には取りづらいのが現状である。また、尿素噴射ノズルから触媒入口までの間で尿素水は完全に蒸発していないと脱硝性能が維持できないことや、触媒に固形物として付着物が堆積する可能性もあり、触媒性能を劣化させる原因にもなり得る。そのため、排ガス後処理装置の小型化が重要な課題であり、触媒本体の性能だけではなく排ガス脱硝に用いる還元剤の噴霧システムの小型化、噴霧の高分散化や排ガス性状による制御が必要である。ここでは、還元剤の粒径及び配管形状による影響を数値シミュレーションにて予測することを試みた。

(1) 計算条件

今回用いた曲がり管、直管の格子形状を図 72 及び図 73 に示す。曲がり管の場合、Inlet から排ガスが導入され、250mm の位置から尿素水が円管中央から噴射される。更に 600mm 直管を下ってから、半径 410mm の曲がりの後、1500mm の直管を進んでから触媒部となる。計算には汎用流体解析ソフト FLUENT を用いている。

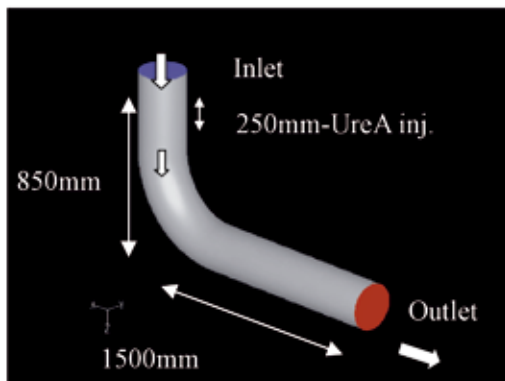


図 72 格子形状(曲がり管)

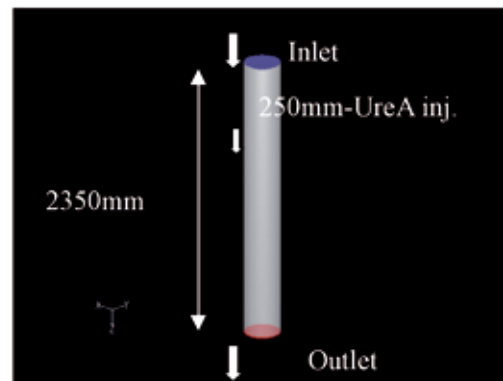


図 73 格子形状(直管)

(2) 計算結果

まず、粒径の効果を調べるため、粒径を 50、100 μm の 2 条件にて計算を行った。結果を図 74 に示す。50 μm の場合、配管内で尿素水は完全に蒸発しており壁面へ衝突している液滴もほとんどない。液滴は曲がり管を通過した付近まで存在し、管内にある程度分散していることが確認できた。粒径が 100 μm とした場合、全ての粒子が管壁に衝突することを確認できた。また、出口境界に達するまでに、噴射量の約 17% が蒸発せずに出口境界に達する結果となった。これより、粒径の大きさによって蒸発の状況(蒸発量、空間分布)が大きく変わり、脱硝率に過大な影響を与えることが予測できた。これはノズルの形状等によって蒸発が促進できるようにすることが SCR の性能において重要であることが明らかになった。

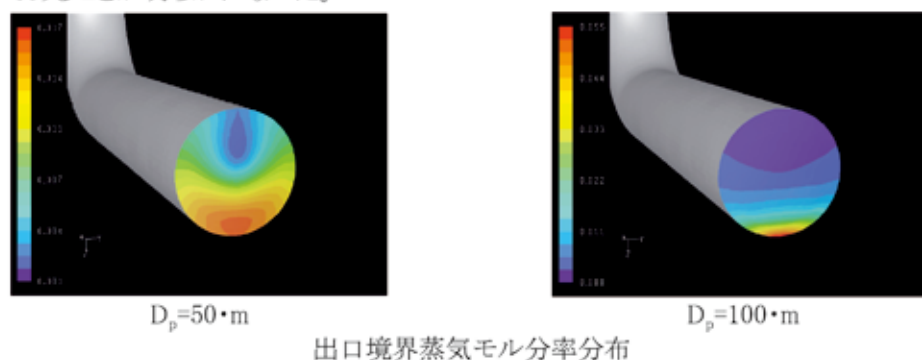


図 74 粒径の違いによる出口での蒸気モル分率

次に、直管・曲がり管の効果について調べた。液滴径は 50 μm である。図 75 に直管での粒子の飛翔と出口境界での蒸気濃度分布を示す。直管の場合でも曲がり管の場合と同様、壁面に衝突する液滴はほとんどなく、出口までに全て蒸発していることがわかる。また、出口での蒸気濃度分布では、中心から壁面に向かって濃度が薄くなり、軸対称分布になっていることがわかる。図 74 での分布と比べると、明らかに分布は異なっている。濃度を定量的に比較するため、直管、曲がり管での半径方向濃度分布を図 76 に示す。横軸 R は軸中心を 0 とし、円管下方をマイナス、上方をプラスとしている。曲がり管の場合、濃度差は直管よりも小さい。また、直管の最大濃度は曲がり管のそれより約 25% 大きい値になっていることから、曲がり管の方は蒸気拡散がなされているといえる。

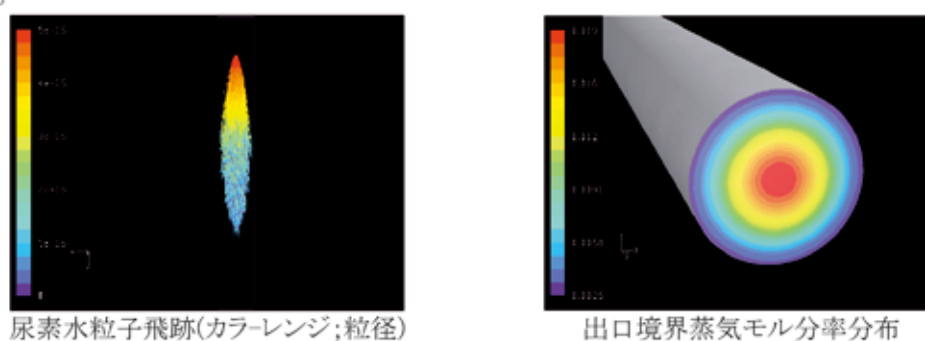


図 75 直管での液滴飛翔と蒸気濃度分布

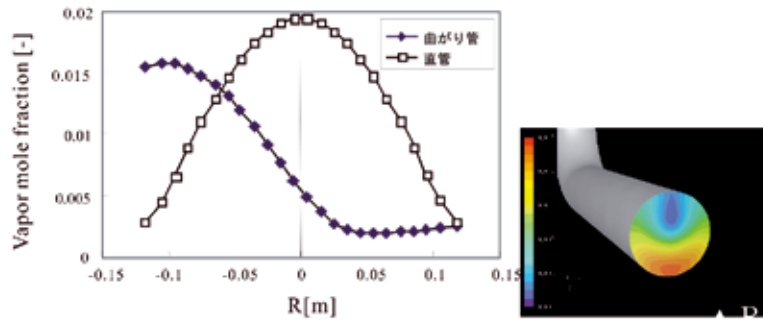


図 76 直管、曲がり管での半径方向蒸気濃度部分布

4.1.2.4.3 運転制御系の信頼性評価

表 7 は、現在までの SCR 脱硝装置に関する研究開発による知見から、運転制御系の信頼性評価を試みた検討結果である。運転制御系の信頼性を悪化させる主要因は、NOx センサ(排ガス分析器)と制御用コンピュータであると考えられる。また、信頼性を向上させるためには、尿素水ノズルのつまり防止対策、排ガス温度等のエンジン運転状況の適切なモニタリングなどが重要であると考えている。

表 7 運転制御系の信頼性評価

項目	概要
(a) NOx センサ	NOx センサは、排ガス中のスートの影響などによって不具合が生じる可能性が高い。NOx センサを用いない制御システムの構築が望ましい。
(b) 制御用コンピュータ	ハードディスクを使用するコンピュータは、船舶の振動や機関室の温度によって不具合が生じる可能性が高い。強固な工業用センサーの使用が望ましい。
(c) 還元剤流量制御	還元剤の過噴射は、排気管内に尿素由来の固形物が蓄積するなどの不具合を生じさせることがある。様々な運転条件において、還元剤流量を適切制御するシステムが必要不可欠である。
(d) 尿素水ノズルのつまり防止	尿素水ノズルのつまりを防止するためには、触媒運転停止時のノズルの洗浄が重要である。短時間に確実にノズルを洗浄するシステムの構築は重要課題の一つである。
(e) 運転状況モニタリング	触媒の運転では、エンジンの運転条件に適合した制御が必要である。エンジンの起動や停止時の適切なモニタリング、あるいは触媒の運転条件が成立する条件のモニタリングなどが重要となる。
(f) ストファイア防止	触媒に堆積したスートが排気管内で燃焼することは避けなければならない。そのためには、スートの除去技術や適切な検知システムの構築が必要である。

4.1.2.5 SCR 脱硝装置改良型性能試験

4.1.2.5.1 一流体ノズルを用いた SCR 脱硝装置の性能試験

前項までの SCR 脱硝試験では、尿素水を高圧空気で噴霧化する二相流体ノズルを使用していた。改良型の装置の一つとして、一流体ノズルでの検討を行った。一流体ノズルは、尿素水を最高 10MPa 程度まで加圧できる圧縮空気駆動ポンプを使用し、霧化のための高圧空気を用いない形式である。改良型装置の特徴は、今までの装置と比べて、制御機器や配管がシンプルになることである。一流体ノズルを設置した様子を図 77 に示す。尿素水噴射のための配管が、尿素水配管のみであるため、設備設置が容易である。

一流体ノズルを用いて、尿素水噴射量を変更しながら、脱硝性能の試験を行った。その結果を図 78 に示す。従来型と比較して、噴射した尿素水の当量比に比べ、脱硝率が低くなっている。



図 77 尿素噴射装置外観(一流体ノズル)

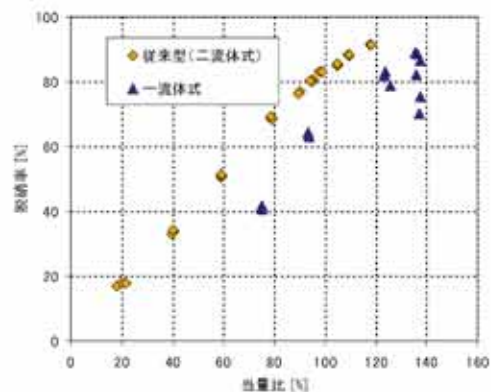


図 78 脱硝試験結果

本実験で用いた一流体ノズルでは、排気ガス中の還元剤の分散に問題があったと考えられる。特に、当量比が少ない場合、すなわち吐出量が少ない場合には噴射圧力が低くなるため、噴霧の粒径が大きくなり、噴霧の拡散が十分でなくなると考えられる。すなわち、還元剤の分散が不十分になり、脱硝に有効に使用される触媒が減少したため、脱硝性能が悪化したと考えられる。

一流体ノズルは、設備を簡便にすることが可能であるが、高圧噴射をするために、圧縮空気駆動の往復動ポンプを用いているため、尿素水噴射量の制御並びに尿素水ノズルの洗浄方法等に課題が残る。

4.1.2.6 SCR 触媒の耐久性検討

4.1.2.6.1 耐久性検討

これまで構築した計算モデルを用いて、酸性硫酸による触媒寿命予測を行う。触媒の寿命に関して実証実験を行うことは重要である。しかし、一定の条件で実験を行うのは難しく、また意図してパラメータを変更するのも容易ではない。そこで、これまで検討を行った数値モデルによってどのような結果になるのか予測する。時間は 3 年間、一定の条件にて運転した場合を想定している。SO₂ を 800ppm で計算した。条件として C 重油を想定している。その他の条件は、SV 値 25000h⁻¹、H₂O=10%、O₂=13%、NO=1500ppm、 $\alpha=1$ とした。

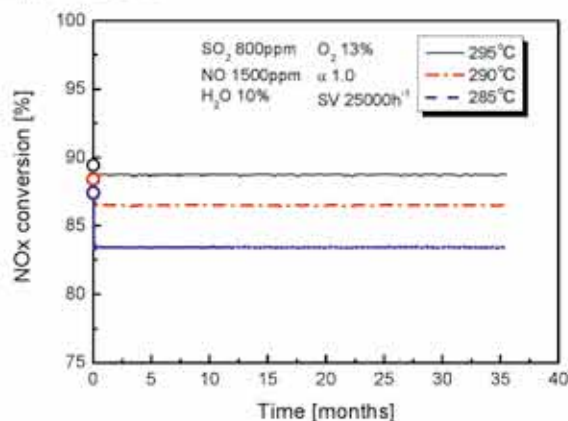


図 79 長期脱硝性能劣化予測(SO₂=800ppm)

図 79 に計算結果を示す。温度は 285、290、295°C の 3 条件である。初期の脱硝性能を丸印で示している。どの温度条件でも脱硝を開始した直後に触媒性能に劣化を生じた後、脱硝率は一定になっている。これは、性能劣化の原因である酸性硫酸の生成と蒸発がバランスしているからである。実

際の触媒においては、温度、濃度等の各条件を一定に保ち続けることはできないので、このように酸性硫酸の付着量が一定に保たれることによって、脱硝率が維持され続けることはないと思われるが、長期運転の場合には少なくともある温度以上に保つことによって触媒性能を維持できる可能性があると考えられる。

4.1.3 SCR 脱硝装置との組合せによる目標性能達成

4.1.3.1 SCR 脱硝装置の製作・設置

本試験機関に適合する SCR 脱硝装置の仕様を試験機関の機関性能データより排気ガス量、排気温度及び必要な脱硝率について検討し、決定した。

さらに、工場内のスペース及び試験用脱硝装置サイズの制約上、図 80 に示すように排気ガスの一部だけを分流して SCR 脱硝装置を通すようなシステムとした。

各装置(反応器、尿素水噴射ユニット、尿素水タンク等)の大きさは、船舶搭載を考慮し、省スペースを意識した各装置の大きさとした。

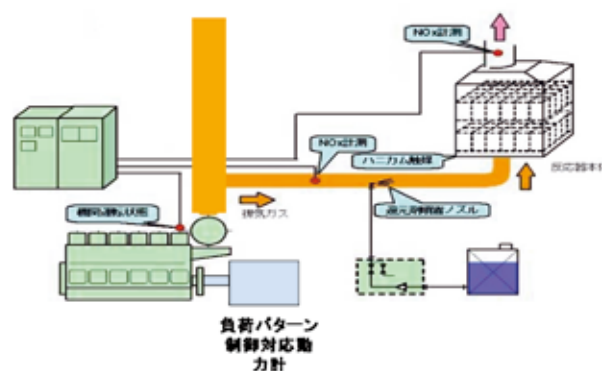


図 80 試験機関を含む SCR 脱硝装置の概要

4.1.3.2 SCR 脱硝装置と試験機関による適合試験

4.1.3.2.1 目標性能試験

表 1 に示す目標性能を達成するため、25%,50%,75%,100%の各負荷率において SCR 装置の還元剤のモル比を 0.3,0.5,0.8 に変更し、IMO NO_x 排出率を評価した結果を図 81 に示す。図 81 より、定格出力における SV 値約 8400h⁻¹においてモル比(還元剤として投入される NH₃/排出される NO の比率)0.8 にすることによって、目標性能(IMO1 次規制値の 80%削減)を達成することがわかった。

また、目標性能を達成したときのリークアンモニア濃度を図 82 に示す。全負荷域においてリークアンモニア濃度は 10ppm 以下になることを確認した。

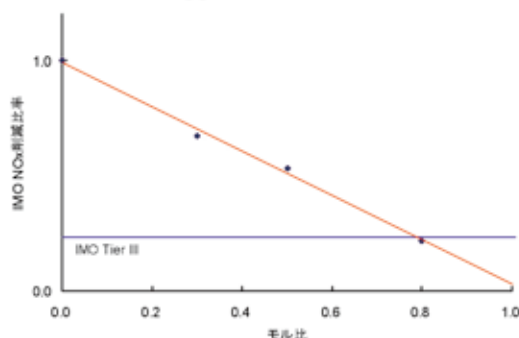


図 81 尿素水流量変更試験結果

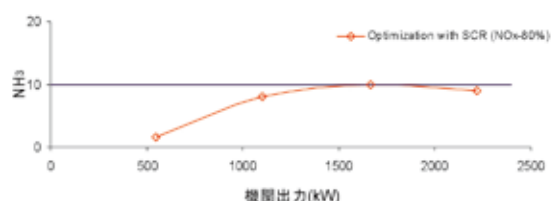


図 82 目標性能達成時のリークアンモニア

4.1.3.2.2 実用化試験

SCR 脱硝装置を船舶に搭載することを想定した実用化試験として、次の試験を実施した。

- 1) 触媒入口温度変更試験
- 2) SV 値変更試験

1) 触媒入口温度変更試験

SV 値約 3600h^{-1} 、負荷率 50%において脱硝率 30%一定のもと、触媒入口温度を変更して、NOx 浄化率、リークアンモニア等を与える影響について試験を実施した。その結果を図 83 に示す。

図 83 より、触媒入口温度約 230°C においても設定した脱硝率 30%と同等の NOx 浄化率が得られることがわかった。しかし、リークアンモニア濃度は触媒入口温度が低くなるほど高くなる傾向を示しており、触媒入口温度が 300°C 以上のときよりも約 230°C の方がリークアンモニア濃度は約 3 倍以上になる。これは、触媒反応器における温度が低く、活性化温度以下であることから、反応器での還元量が少なくなるため、脱硝率 30%を維持するのに尿素水の投入量が増加する制御となっているので、アンモニアが反応器に留まらずにそのまま放出されたものと考えられる。それによって、図 83 に示すように触媒反応器前後の温度上昇が小さくなったものとする。

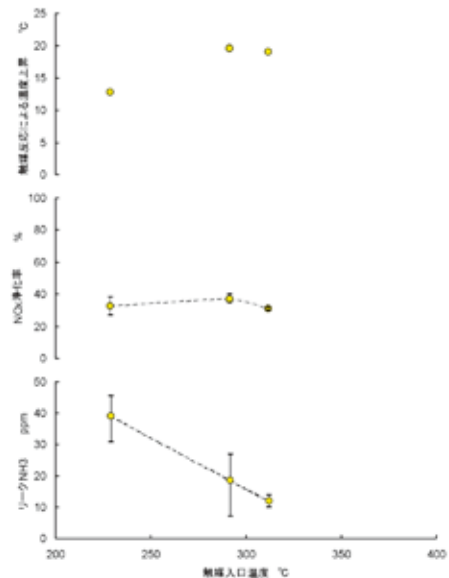


図 83 触媒入口温度が脱硝性能に与える影響(負荷率 50%,脱硝率 30%)

2) SV 値変更試験

負荷率 100%における SV 値約 8400h^{-1} に相当する触媒量(セル数 5x5)が反応器に収まっているが、図 84 に示すように 6 セル及び 12 セル分の触媒前に閉止板を配置し、触媒量を小さくし、また、負荷率を変更して、排気ガス量を変更して SV 値が脱硝特性に与える影響について試験を実施した。

モル比 0.8 一定における SV 値と NOx 浄化率、圧力損失の関係を図 85 に示す。図 85 より、SV 値が 12000h^{-1} を越えると設定モル比 0.8 よりも NOx 浄化率が低くなることがわかった。また、圧力損失においては SV 値が大きくなるほど、直線的に増加する傾向になることがわかった。



SV 値:11000h⁻¹@M100



SV 値:16500h⁻¹@M100

図 84 閉止板による SV 値変更

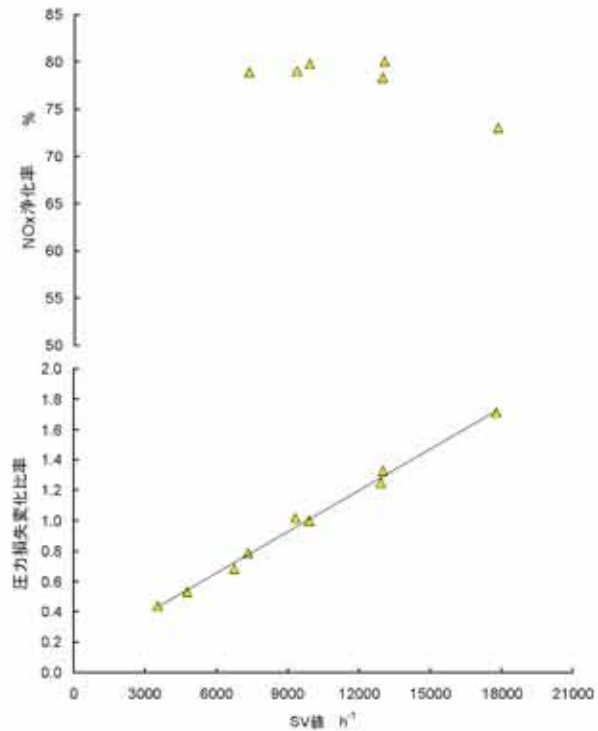


図 85 SV 値が脱硝性能に与える影響

4.1.3.2.3 試験結果による実船用 SCR 脱硝装置へのフィードバック

これらの結果を実船試験用 SCR 脱硝装置の設計にフィードバックした。

4.2. 実船試験

4.2.1 実船改造設計及び改造工事

4.2.1.1 対象船とエンジン

今回の SCR 脱硝装置を搭載する試験船及び搭載主機関を図 86 及び図 87 に示す。

試験船概要

- ・総トン数 : 748 トン
- ・竣工 : 1994 年 1 月
- ・全長 : 86.25m
- ・全幅 : 13.00m
- ・型深 : 7.80m
- ・用途 : 一般貨物船



図 86 SCR 脱硝装置搭載船舶

搭載主機関(図 87)

- ・機関型式 : 6M34AFT
- ・出力 : 1471kW(2000PS)
- ・回転数 : 300min⁻¹
- ・シリンダ径 : 340mm
- ・ストローク : 620mm
- ・使用燃料油 : C 重油(試験は A 重油)



図 87 搭載主機関

今回の試験は、C 重油加熱の排ガスボイラーを撤去し、A 重油を用いて実施した。

4.2.1.2 実船改造設計

船上調査に基づき、工法及び付帯工事を検討し、脱硝反応搭本体の取付け及び点検口、ストブロー、温度計等の位置変更を含め、最終的な改造図面を纏めた。しかし、盤関係の製作形状は、設置場所付近の利用可能空間を考慮して最終形状を決定した。

4.2.1.3 改造工事

SCR システムの機器については、機関室内の比較的スペースがあるところに尿素水ポンプユニット、THC 計を含め排ガス分析計 4 台、SCR 制御盤及び尿素水噴射ユニットを配置し、触媒反応器については、既設の排ガスボイラーを取外し、化粧煙突内に配置した。また、安全面に加えて、排気ガス温度の低下を抑えるため、触媒反応器出口までの排気管に保温材を装着した。

機関の運転状況及び SCR 脱硝装置の制御状況がわかるよう、機関各部及び SCR 装置にセンサを取付け、そこから SCR 制御盤まで配線工事を実施した。

改造工事後、SCR 制御に関する動作確認を行い、正常動作することを確認した。

4.2.2 脱硝装置の設計・製作

4.2.2.1 SCR 脱硝装置

図 88 に示すように実船における脱硝システムは陸上で使用したシステムと基本的には同様である。触媒反応器は排ガスボイラーを取り外し、化粧煙突内に設置した。船舶搭載の SCR 脱硝システム構成を表 8 に示す。主機関から排出された排気ガスが触媒反応器の下側から入り、上方へ排出させるよう、シンプルな構造、かつ、最短経路で排気ガスが排出されるように配管した。

触媒反応器内の触媒は 2 段構造とし、反応器出口において SV 値は約 9000h^{-1} である。尿素水噴射ユニットから触媒入口までの距離も約 3m と、陸上での SCR 装置よりも約 2m 短く配置し、実用化を意図し、省スペースとなるよう搭載した。

さらに、図 89 に示すように反応器入口、出口及び中間にそれぞれ NOx 分析計を配置することにより、触媒反応器入口と触媒反応器中間での NOx 濃度の削減量によって SV 値約 18000h^{-1} まで評価可能な装置とした。

また、排気ガス量及び IMO NOx を評価するため、触媒反応器入口には NOx 分析計の他に THC 分

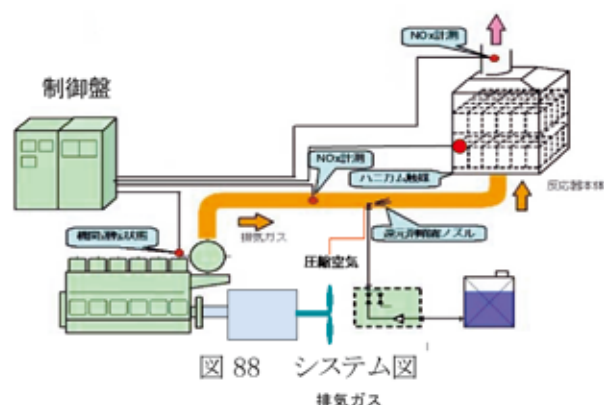


図 88 システム図

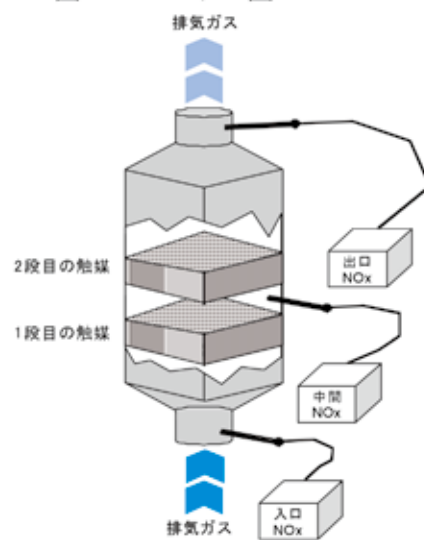


図 89 触媒反応器の構造と NOx 分析計の配置

析計等を取り付けた。

表 8 船舶搭載の脱硝システム構成

NO	機器	数量	大きさ等
1	脱硝反応器	1	1257x1257x4400
2	触媒	1式	1200x1200x420x2段
3	ポンプユニット	1式	
4	尿素水タンク	3基	800Lx3基
5	尿素水注入ノズル	1個	
6	脱硝制御盤	1ユニット	600x600x1800

4.2.3 実船試験用機器の手配

主機関の運転状況を監視して、SCR 脱硝装置の尿素水量を制御するため、表 9 に示す機器類を手配し、主機関及び SCR 脱硝装置に取付けた。

脱硝試験なので、排ガス分析計を装備することは当然であるが、負荷率を推定するため、燃料流量計及びラック発信器を装備した。また、NO_x は周囲の温度及び湿度により影響を受けるため、周囲の大気条件を ISO 標準状態に換算する必要があるため、給気温度センサと気温・湿度変換器を装着し、ISO 標準状態に換算して、NO_x を評価した。

さらに、通常は乗組員のみでの航海になるので、SCR 脱硝装置稼働中のデータを自動計測するためにデータロガーを装着した。

表 9 実船試験用機器一覧表

No.	機器	数量	No.	機器	数量
1	燃料流量計	1	5	排ガス分析計(4成分)	3
2	ラック発信器	1	6	排ガス分析計(THC)	1
3	給気温度センサ	1	7	データロガー	1
4	気温・湿度変換器	1			

4.2.4 実船試験の実施

実運航前に SCR 脱硝装置の調整を行うための運転を行い、図 90 から、SCR 稼働条件(負荷率 25%以上)において過給機出口排気温度は 300℃以上になっており、触媒反応器の触媒活性化温度(300℃)以上であることを確認した。

NO_x 浄化率に与える影響を調査した結果を図 91 に示す。図 91 より、その結果を基に SCR 脱硝装置を調整した。最終調整後、SCR 脱硝装置の正常動作を確認した。

また、乗組員の方に排気ガス分析計の短周期で交換する必要があるフィルタなどの消耗品の交換方法及び緊急事態発生時の SCR 脱硝装置の停止方法などの使用方法を伝授した。

実船試験で使用する尿素水はアドブルー(AdBlue)を使用した。この尿素水は JIS K2247-1 により、表 10 に示すように品質規格化されている。

次の項目における試験を実施した。

- ・ 目標性能試験
- ・ 小型化に対する評価試験
- ・ 耐久性評価試験

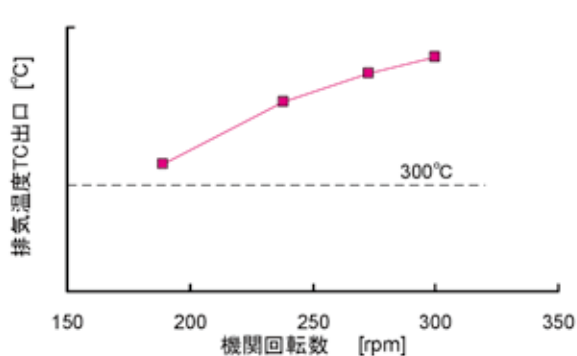


図 90 調整運転時の排気温度

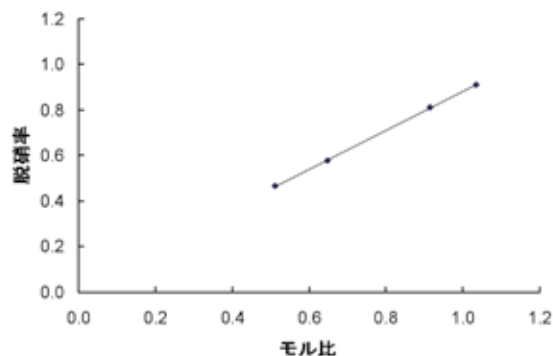


図 91 モル比と脱硝率の関係

表 10 JIS K2247-1 尿素水(アドブルー)成分

尿素濃度	31.8～33.2wt%	カルシウム	0.5mg/kg 以下
密度	1.087～1.093g/Cm ³	鉄分	0.5mg/kg 以下
屈折率	1.3817～1.3843	銅	0.2mg/kg 以下
アルカリ度	0.2%以下	亜鉛	0.2mg/kg 以下
炭酸塩	0.2%以下	クロム	0.2mg/kg 以下
ピウレット	0.2%以下	ニッケル	0.2mg/kg 以下
ホルムアルデヒド	5mg/kg 以下	マグネシウム	0.5mg/kg 以下
不溶解分	20mg/kg 以下	カリウム	0.5mg/kg 以下
りん酸	0.5mg/kg 以下	ナトリウム	0.5mg/kg 以下

4.2.5 実船試験の評価とまとめ

平成 22 年度は実船試験を行い、23 年度は実船試験にて使用した SCR 脱硝装置を工場に設置し、陸上試験を行い、小型化及び耐久性の評価を実施した。陸上試験に使用した試験機関諸元を表 11 に示す。

表 11 SCR 試験における供試機関諸元比較

	実船 SCR 試験	陸上 SCR 試験
定格出力/回転速度	1471kW/300rpm	2220kW/800rpm
ボア x ストローク	340mm x 620mm	280mm x 390mm
SV 値	9000	10000

(1) 目標性能試験

内航船の主機関に SCR 脱硝装置を搭載し、8 月から 12 月までの約 5 ヶ月間、図 92 に示すように大分港を中心に西日本方面へ 27 航海、運航した。その結果、機関総運転時間約 830 時間のうち、SCR 脱硝装置は約 700 時間稼働した。その間の反応器出口と中間における脱硝率及び機関回転数の時間変化を図 93 に示す。図 93 より、NO_x 分析計の不具合等もあったが、脱硝率 80%以上を維持していることがわかる。

さらに、船舶に搭載していた SCR 脱硝装置を工場に設置し、陸上運転にて 400 時間以上運転(SCR 脱硝装置稼働時間:300 時間)を行い、その間の脱硝率及び機関回転数の時間変化を図 94 に示す。SCR 脱硝装置の総稼働時間は実船試験と合せて、1000 時間に達した。図 94 より、NO_x 分析計の不具合等もあったが、脱硝率 80%以上を維持していることがわかる。



図 92 船SCR脱硝試験における航海ルート

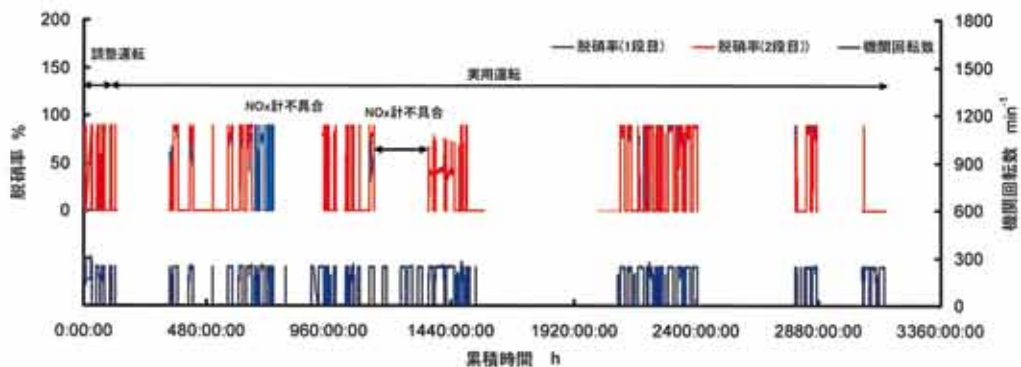


図 93 機関回転数と脱硝率の時間変化(実船試験)

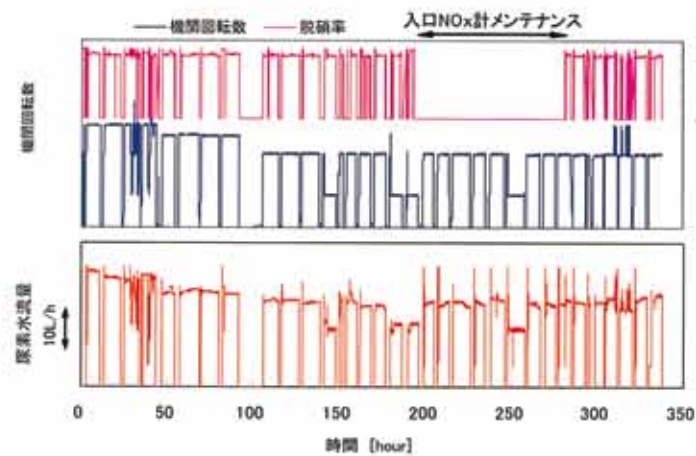


図 94 機関回転数と脱硝率の時間変化(陸上試験)

(2)小型化に対する評価試験

SCR 脱硝装置総稼働時間約 700 時間にも及ぶ運転データより、時々刻々と変化する排気ガス量と触媒量より求めた SV 値に対する脱硝率を図 95 に示す。なお、触媒出口 NO_x 濃度と触媒反応器の中間位置での NO_x 濃度の両方で脱硝率を求め、評価した。また、触媒量は反応器中間では全触媒量の半分として SV 値を求め、評価した。

図 95 より、SV 値約 9300h⁻¹において脱硝率 80%以上を維持することが可能であることを確認した。平成 21 年度に実施した陸上での SCR 脱硝試験装置(分流式)と比較して、尿素水ノズル位置と触媒入口までの距離を 2m 短くし、コンパクト化したうえで、SV 値約 9300h⁻¹にて脱硝率 80%を維持する

ことができることを確認した。

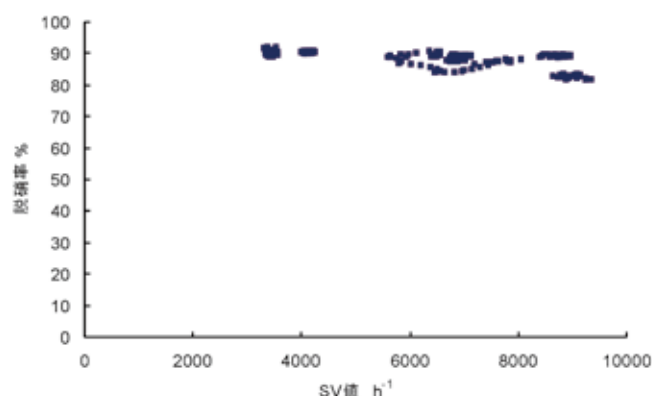


図 95 SV値変更試験(実船試験)

(3)耐久性評価試験

排ガス分析計(NO_x分析計)を除くSCR脱硝システムはトラブルの発生もなく、搭載してから撤去するまでの間、約700時間稼働した。

SCR脱硝装置を船舶から撤去した後、SCR脱硝装置メーカー立会いのもと、反応器を3分割に分解し、触媒収納部を上下方向と1段目と2段目の間にある覗き窓より、約700時間稼働後の触媒の状況調査を実施した。なお、触媒は反応器に2段入っているため、それぞれの触媒について調査を実施した。

立会いしたメーカーの担当者によると一般的な陸上常用ディーゼル機関に搭載されているSCR脱硝装置よりも図96に示すように煤の付着がほとんどなく、状態は非常に良く、平成23年度に実施した陸上でのSCR脱硝試験においても今回使用した触媒を利用して問題ないことを確認した。また、図97に示されるように、触媒反応器前後の差圧は時間的に変化していないことから触媒反応器内の触媒に目詰まりが発生していないことがわかる。

さらに、船舶に搭載していたSCR脱硝装置を工場に設置し、陸上運転にて400時間以上運転(SCR脱硝装置稼働時間:300時間)を行い、SCR脱硝装置の総稼働時間は実船試験と合せて、1000時間に達した。

SCR脱硝装置総稼働時間1000時間経過後の触媒劣化を調査した結果を表12、表13及び表14に示す。表12には1000時間使用した上下に配置した触媒の活性(脱硝性能)を評価した結果を示す。この結果から、新品の触媒(Fresh触媒)の脱硝性能と比較しても、ほとんど変わらないことから、1000時間使用した触媒の脱硝性能の低下がないことを確認した。

表13には新品の触媒と物性(比表面積、細孔容積、圧壊強度)を比較した結果を示す。この結果から、比表面積の低下があったが、活性に影響を及ぼすほどではないことが確認された。また、細孔容積の低下はなく、触媒強度は排ガス曝露により、横方向は変化無く、軸方向は同等もしくは強くなっており、問題ないことを確認した。

表14には触媒の付着物、蓄積物の分析結果を示す。この結果から、アルカリ物質(Ca、K、Na)、P及びS分の触媒への付着が無く、問題ないことを確認した。

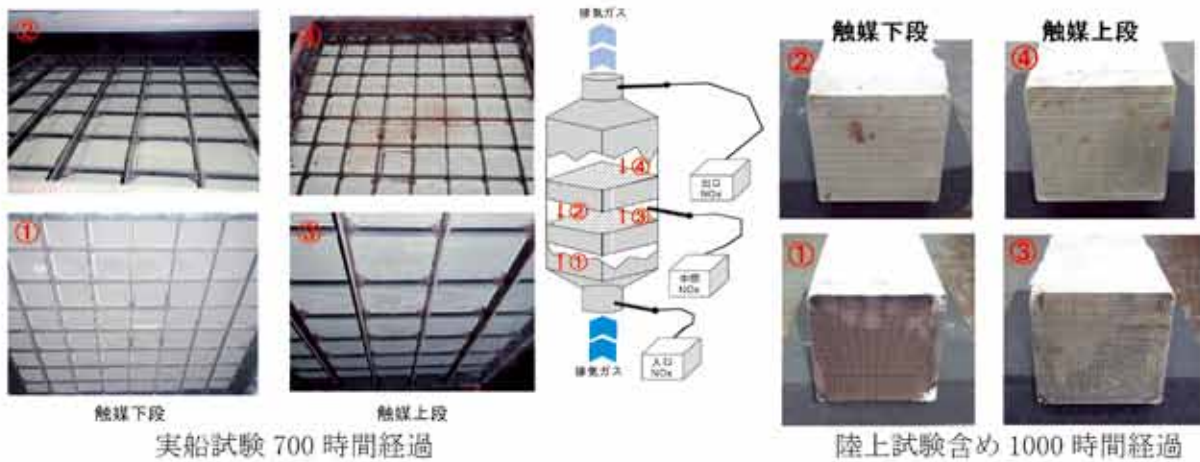


図 96 触媒の劣化状況(700 時間経過後、1000 時間経過後)

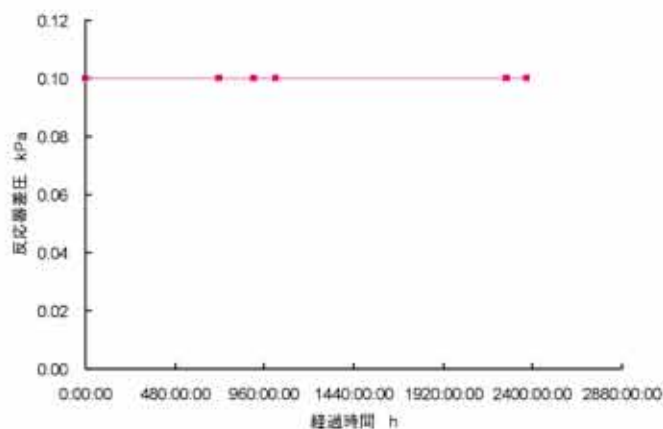


図 97 実船試験期間中の触媒反応器前後の差圧変化

表 12 脱硝性能分析

SV	16529h ⁻¹	NO	900ppm
LV	1.93mN/s	SO ₂	200ppm
ガス温度	360°C	O ₂	13.40%
NH ₃ /NO _x	1.00	H ₂ O	5%
測定セル×長さ	2セル×2セル×420mm N ₂	Balance	

試験結果

NH ₃ /NO _x		1.00	相対活性比
		脱硝率(%)	
Fresh 触媒		95.5	100
抜き出し触媒	下流	95.5	100
抜き出し触媒	上流	95.1	98

①相対活性比: Fresh触媒の反応速度定数値を100としたときの活性比を示す。

表 13 物性分析結果(比表面積、細孔容積、圧壊強度)

	比表面積 m ² /g	細孔容積 (cc/g)	圧壊強度(kg/cm ²)	
			横方向	軸方向
Fresh 触媒	137	0.445	9.8	26.5
抜き出し触媒	97	0.476	8.9	30.6
抜き出し触媒	97	0.455	9.9	37.3

表 14 付着、蓄積物の分析結果(蛍光 X 線定量分析)

	wt%					
		CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	S
Fresh 触媒		1.70	0.01	0.11	0.10	0.31
抜き出し触媒	下流	1.76	0.05	0.10	0.11	0.34
抜き出し触媒	上流	1.81	0.01	0.10	0.11	0.34

(4)実船試験での課題

NO_x 分析計

NO_x 分析計は IMO により規格化されている CLD(ポータブル式)で、温調されたサンプリングガスを計測している。

実船による SCR 脱硝試験においては乗船した係員が校正するため、おおよそ1ヶ月に1度のペースとなる。また、消耗部品は乗組員が数日毎に交換して、NOx を計測した。NOx 分析計は船舶が運航中のみ、稼働させた。

実船による SCR 脱硝試験開始から約5ヶ月間に大小合せると5回の不具合が発生した。

サンプリングラインの詰りの要因は係員が乗船したときに校正を実施したが、その間隔が長かったためと考えられ、係員が乗船したときに校正すると正常に戻ることから、試験前には校正が必要不可欠であることを確認した。従って、校正はオート校正機能又は校正レスな NOx 分析計が必要と考える。

もう1つの不具合については NOx 分析計のドレン配管は、鋼管にて製作し、船外へ排出させるため、船外への排出口を NOx 分析計よりも高い位置とした。そのため、ドレン配管内に含まれている水分が配管内に溜まり、ドレン配管内に背圧がかかり、その水分が NOx 分析計内部に悪影響したものを考える。

対策としてドレン配管をドレンタンクに戻し、ドレン配管内に水分が溜まらないようにした。

尿素水の入手(インフラ)

当初、陸用発電機関における SCR 脱硝装置によく使用される工業尿素水(濃度 35~40%)を還元剤として使用する予定だったが、船舶が不定期船であることと工業尿素水の入手性の悪さから、トラック用 SCR 装置に流通している尿素水(アドブルー)(濃度 31~33%)を供給元の協力も得られ、採用した。

港や造船所においてタンクローリーによる供給となり、尿素水約2000Lを供給するのに約30分要した。

今回、実施したタンクローリーによる尿素水の供給について、船舶が不定期船ということもあるが、供給量、供給場所(港)、日時が直前まで不明確であり、尿素水供給業者、船主共に尿素水の手配、チャージ、供給する港の手配などに時間を多く要した。

これらの結果を踏まえると、IMO 3次規制発効前に尿素水の品質やインフラ整備が必要と考える。

4.3. 総合評価

平成19年度より平成23年度までの5ヵ年間、本研究開発において、それぞれの項目について以下の評価を行った。

4.3.1 要素技術開発

4.3.1.1 機関単体における要素試験

4.3.1.1.1 船種の調査

様々な種類の船舶の中から内航船、タグボート及び高速船の3種類の船舶において SCR 脱硝装置の取り付けについて検討した。

それらの検討結果より、次の対策及び注意が必要であることを確認した。

- ・内航船において SCR 脱硝装置を搭載可能なスペースが十分に存在することを確認した。
- ・タグボート及び高速船において SCR 脱硝装置を搭載する際、十分なスペースがないことを確認した。
- ・タグボート及び高速船において SCR 脱硝装置の中で最もスペースが必要な触媒反応器を排

気煙道に装着する場合、隣り合う触媒反応器の位置をオフセットさせる等の工夫が必要である。また、触媒のセル数を多くして触媒反応器の大きさをなるべく小さくする等の工夫が必要であることを確認した。

- ・触媒反応器入口温度は過給機出口排気温度に相当し、季節の気温変化によって変化するため、季節変化を考慮する必要がある。
- ・タグボート及び漁船の主機関である中速ディーゼル機関を1日運転する場合、60～85%以上が負荷率50%以下の低負荷域で運転するため、SCR脱硝装置を搭載する場合には低負荷域の排気温度制御が必要と考えられる。
- ・船用3乗特性(E3モード)よりも一定回転特性(E2モード)の方は過給機出口排気温度が低くなる機関も存在することを確認した。

4.3.1.1.2 エンジンでのNO_x低減

IMO NO_x1次規制値に対して機関単体で30%低減を狙うための機関要目の変更を、機関性能シミュレーションにより検討し、供試機関において試験を行った結果、以下の知見を得た。

- ・吸気弁開閉時期、過給機マッチング、噴射開始時期及び燃料噴射弁要目の最適化により、実機試験において機関単体での目標性能(NO_x排出量IMO1次規制対比30%削減、GHGは現1次規制レベルの燃料消費率以下)を達成した。
- ・燃費性能の悪化を抑制するために、上記サイクル因子に加えて燃料噴射期間の短縮及び圧縮比増加を組合せる必要がある。
- ・高圧力比過給機を搭載することによって、NO_xが若干低減されることを確認し、機関単体での目標性能よりもIMONO_xを若干低くすることが可能であるため、目標性能達成のための脱硝率を低く設定することが可能となることがわかった。

4.3.1.1.3 機関本体とSCR脱硝装置を組合せたNO_x低減の確認

本研究開発において製作したSCR脱硝装置を用いて、SV値約8400h⁻¹における実機試験においてモル比0.8において、最終目標性能を達成した。

また、次のような実用化試験を実施し、次のような知見が得られた。

1)触媒入口温度変更試験

触媒入口温度を変更した場合、NO_x浄化率は維持できるが、触媒入口温度が低くなるほど、リークアンモニアが急激に増加するため、対策が必要と考える。

2)SV値変更試験

「中速船用ディーゼル機関におけるIMO3次規制対応技術開発」及び「中速船用ディーゼル機関の排ガス後処理装置の技術開発」の研究開発における4ストローク中速ディーゼル機関を用いた試験結果では、SV値10000h⁻¹以下が実用可能なレベルとの成果が得られている。

これらの成果を踏まえて、実船SCR試験における触媒のSV値を約9000h⁻¹として設計した。

4.3.1.2 SCR 脱硝装置の要素試験

4.3.1.2.1 マイクロリアクターによる触媒基礎試験

(1) バナジウム触媒の1次反応速度定数

マイクロリアクターによる触媒基礎試験では、数種類の触媒の触媒温度に対する脱硝率を詳細に調べ、各触媒の1次反応速度定数を実験により求めた。これにより、脱硝性能に与える触媒形状や触媒容積の影響を予測計算することができるため、SCR 脱硝装置を設計・開発する際の有効な基礎データとなるものと考えられる。

(2) 別種触媒と別種還元剤の検討

ゼオライト脱硝触媒の性能試験やハイドロカーボン-SCR 触媒の文献調査等を行い、船舶に用いる触媒の検討を行った。その結果、現在の技術では、バナジウム触媒が有望であることが確認された。

(3) 触媒被毒復旧対策と耐久性評価

多くの実験条件により、運転時間を100時間程度とした触媒の劣化・再生試験を実施した。これにより、排ガス温度やSO₂濃度が触媒の劣化に及ぼす影響や触媒再生のための有効な手法が明らかになりつつあり、今後の実用開発に有効なデータが得られたものと考えている。

4.3.1.2.2 4ストローク中速ディーゼル機関による脱硝性能の評価

新潟原動機製4サイクル中速ディーゼル機関 6L19HX 形(定格出力 750kW、定格回転数 1000rpm)を実験機として整備し、SCR 脱硝装置の実験を行った。その結果触媒のSV値や排ガス温度、SO₂濃度、さらには還元剤の種類が脱硝性能に及ぼす影響を調べることができた。また、燃料にA重油、C重油を用いた場合、また、それぞれ排気ガス温度を触媒入口で300°Cに低減したどの場合においても、尿素水の噴射量を当量比80%にすることで、IMO3次規制のNO_x排出率を達成することが確認できた。

また、実エンジンのSCR 脱硝装置を適切に運転するためには、マイクロリアクターによる触媒基礎試験ではほとんど問題とならなかった還元剤の分散性が重要であることが確認された。

4.3.1.2.3 SCR 脱硝装置の触媒耐久性

SCR 脱硝装置の触媒耐久性を検討するため、触媒の脱硝反応を再現できる劣化モデルを構築し、3年以上の耐久性あることの事前評価を行った。その結果、長期運転の場合、少なくともある温度以上に保つことによって触媒性能を維持できる可能性があることが確認できた。

4.3.2 実船 SCR 試験

(1) 実船改造設計及び改造工事

- ・最終的な改造図面をまとめ、SCR 脱硝装置の各種装置の配置を決定した。
- ・最終的な改造図面に基づき、対象船舶にSCR 脱硝装置を搭載し、制御に関する動作確認を行い、正常動作することを確認した。

(2) 脱硝装置設計製作

- ・実船に搭載するSCR 脱硝装置及び付属機器の最終仕様を決定し、手配した。

(3) 実船試験用機器の手配

- ・機関データ及び SCR 脱硝データを監視するのに必要な機器類をピックアップし、各機器類の最終仕様を決定し、手配した。

(4)実船試験の実施

- ・内航船の主機関に SCR 脱硝装置を搭載し、2010 年 8 月から 12 月までの約 5 ヶ月間、機関総運転時間約 830 時間のうち、SCR 脱硝装置は約 700 時間稼動した。
- ・制御方法及び機関運転パターンなどを変更し、SCR 脱硝装置の実船搭載試験を実施した。

(5)実船試験の評価とまとめ

- ・SCR 脱硝装置総稼働時間約 700 時間にも及ぶ運転データより、時々刻々と変化する排気ガス量と触媒量より求めた SV 値に対する脱硝率を解析した結果、SV 値約 9300h^{-1} において脱硝率 80%以上を維持することが可能であることを確認し、開発目標を達成した。
- ・排ガス分析計(NO_x 分析計)を除く SCR 脱硝システムはトラブルの発生もなく、搭載してから撤去するまでの間、約 700 時間稼動した。
- ・約 700 時間稼働後の触媒について状況調査するため、脱硝装置メーカー立会いのもと、反応器を 3 分割に分解し、触媒収納部を上下方向と 1 段目と 2 段目の間にある覗き窓より、観察した結果、煤の付着がほとんどなく、状態は非常に良いと評価された。
- ・運航中において触媒反応器付近を中心に機関回転速度を変更した時の振動を計測し、主機関との共振及び船舶との共振について評価した結果、変位の増加は回転上昇に伴う慣性力の増加によるものであり、急激な変位の上昇は見られないので共振の可能性は低い。
- ・排気煙突からの騒音についても計測した結果、本船は消音器が元々搭載されていないが、問題になるレベルではなかった。脱硝装置(ハニカム形状の触媒)を介することによる消音効果も考えられる。
- ・制御方法によっては NO_x 分析計が必要となるが、消耗品の比較的短期間での交換及び毎回の校正作業等の乗組員の負担軽減を考慮すると、校正はオート校正機能又は校正レスな NO_x 分析計が必要と考える。
- ・タンクローリーによる尿素水の供給では、尿素水供給業者、船主共に尿素水の手配、チャージ、供給する港の手配などに時間を多く要したことから、IMO3 次規制発効前に尿素水の品質やインフラ整備が必要と考える。

(6)復旧工事

- ・実船から SCR 脱硝装置を撤去し、SCR 脱硝装置搭載前に装備していた排ガスボイラーを取付け、改造前の船舶の姿に戻した。

(7)耐久性評価(船上及び陸上運転合せて、1000 時間以上)

実船 SCR 搭載での稼働時間は 700 時間に加えて、陸上において SCR 脱硝装置稼働時間の 300 時間、合せて 1000 時間に達した。

1000 時間経過時において、触媒の劣化状況を確認した結果、脱硝性能は新品と変わらないこと、特に問題となる不純物も確認されず、触媒の強度も問題ないことを確認した。

4.3.3 まとめ

5 ヶ年間における研究開発成果として、機関単体での NOx30%削減と後処理装置を利用して NOx80%削減という 2 つの開発目標をそれぞれについて考察する。

- 1) 吸気弁開閉時期のミラー化、高圧縮比化、燃料噴射系の改良及び高圧力比過給機の採用により機関単体での目標性能(NOx30%削減)を達成した。
- 2) 実船 SCR 試験に使用する触媒反応器は営業運転中の内航船に搭載するため、少しでも目詰まり等の危険因子を発生させないよう、SV 値を約 9000h⁻¹として設計した。
- 3) 実船における SCR 搭載試験において SV 値約 9000h⁻¹の SCR 脱硝装置を搭載して、モル比 0.8 において目標性能である NOx の 80%削減を達成した。
- 4) 実船 SCR 搭載での稼働時間は 700 時間に加えて、陸上において SCR 脱硝装置稼働時間の 300 時間、合せて 1000 時間に達し、その間、目標性能を維持することを確認した。
- 5) 1000 時間経過時において、触媒の劣化状況を確認した結果、脱硝性能は新品と変わらないこと、特に問題となる不純物も確認されず、触媒の強度も問題ないことを確認した。
- 6) 以上の実船 SCR 試験結果を基に小型化(SV 値)に対する評価を行うと、約 9000h⁻¹までの SV 値であれば、問題ないと考えられる。

5.参考文献

- 1) S MatsUDA et.al, Ind.Eng.Prod. Res. Dev.1982、 21、 48-52
- 2) 平成 6 年度「内航船用小型排ガス脱硝装置の開発」シップ・アンド・オーシャン財団
- 3) Kawakami et al., Environmental Contribution with Niigata Marine Diesel Engines, CIMAC Paper No. 28, 25th CIMAC World Congress, 2007
- 4) Kawakami et al., Investigation on reducing NOx emission of medium-speed diesel engines, CIMAC Paper No. D27, 18th CIMAC World Congress, 1989