

# スーパークリーンマリンディーゼルの研究開発 成果報告書

平成24年3月

社団法人 日本船用工業会

## はじめに

近年、酸性雨等を引き起こす原因となるNO<sub>x</sub>（窒素酸化物）等大気汚染の排出が世界的な問題となっていることから、IMO（国際海事機関）では船舶から排出されるNO<sub>x</sub>について、平成17年に1次規制を実施しました。その後、更なる規制強化の検討を行い、平成23年から実施される2次規制ではNO<sub>x</sub>規制値を1次規制値から20%削減し、平成28年から実施される3次規制では、指定海域に於いて1次規制値から80%削減すること等を内容とする条約改正案が平成20年10月に採択されています。

このようなIMOの動きに対応して、国土交通省では平成19年度より、「船舶からの環境負荷低減に係る総合対策」を推進しており、その一環として、日本船用工業会も、ポートルースの交付金による日本財団の助成金を受けて、環境規制対応船用ディーゼル機関「スーパークリーンマリンディーゼルの研究開発」を平成19年度から実施しています。

陸上ではNO<sub>x</sub>低減のために、排ガスの後処理装置としてSCR（選択触媒還元方式）脱硝装置の採用が進んでいますが、これを船舶で利用するためには、低質燃料が使用されること、負荷変動があること、SCR脱硝装置の搭載スペースの問題等が課題となってきます。

「スーパークリーンマリンディーゼルの研究開発」では、燃費性能を維持し、NO<sub>x</sub>を1次規制値より80%削減することを目標に、燃焼改善による機関本体でのNO<sub>x</sub>低減技術、船用ディーゼル機関に適用できるコンパクトなSCR脱硝装置の開発を行うこととし、船用ディーゼル機関の特性を踏まえ、低速機関グループ、中速機関グループ、小形高速機関グループの3グループで実施しました。また、研究開発にあたっては、開発期間の前半（平成19～22年度）では後処理装置等要素技術の開発を、後半（平成22～23年度）では実船試験を実施しています。

今般、各グループでの実船試験の結果、NO<sub>x</sub>80%削減という目標を達成することができましたので、今までの研究開発の成果を本報告書にとりまとめました。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びにご協力頂いた関係者の皆様に深く感謝するとともに、本報告書が関係者の間で広く活用されることを祈念いたします。

## 《報告資料》

### 【低速機関グループ】

事業名：低速船用ディーゼル機関低温排ガスに対応する脱硝システムの技術開発

委託先：三菱重工業株式会社、株式会社赤阪鐵工所

事業名：低速船用ディーゼル機関低温排ガスに対応する脱硝システムの実船試験

委託先：三菱重工業株式会社、株式会社赤阪鐵工所、株式会社大島造船所、堺化学工業株式会社

### 【中速機関グループ】

事業名：中速船用ディーゼル機関における IM03 次規制対応技術開発

委託先：新潟原動機株式会社

事業名：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

委託先：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

事業名：中速船用ディーゼル機関 NOx 低減装置の実船試験

委託先：新潟原動機株式会社

### 【小形高速機関グループ】

事業名：小形高速船用ディーゼル機関における IM03 次規制対応技術開発

委託先：ヤンマー株式会社

事業名：小形高速船用ディーゼル機関 NOx 低減装置の実船試験

委託先：ヤンマー株式会社

# スーパークリーンマリンディーゼルの研究開発

[低速機関グループ]

三菱重工業株式会社

株式会社赤阪鐵工所

株式会社大島造船所

堺化学工業株式会社



## 目次

	ページ
1. 研究開発計画	1
1.1 概要	1
1.2 研究開発の前提条件	1
1.3 研究開発の目的	1
1) 要素技術開発	1
2) 実船試験	2
1.4 開発目標	2
1.4.1 要素技術開発	2
1.4.2 実船試験	2
1.5 全体計画	2
1.5.1 実施スケジュール	2
1.5.2 試験機関	3
1.5.2.1 要素技術開発	3
1.5.2.2 実船試験	3
1.5.3 各年度の開発計画内容	4
1.5.3.1 要素技術開発	4
1) 平成 19 年度 (2007 年度)	4
2) 平成 20 年度 (2008 年度)	4
3) 平成 21 年度 (2009 年度)	4
4) 平成 22 年度 (2010 年度)	4
1.5.3.2 実船試験	4
1) 平成 21 年度 (2009 年度)	4
2) 平成 22 年度 (2010 年度)	4
3) 平成 23 年度 (2011 年度)	4
2. 脱硝原理および触媒単体試験	5
2.1 脱硝原理	5
2.1.1 反応機構	5
2.1.2 触媒の形状	6
2.1.3 触媒の特性	6
2.2 触媒単体試験	7
2.2.1 試験触媒	7
2.2.2 試験条件	7
2.2.3 試験結果	7

2.2.4	試験結果のまとめ	8
3.	東京海洋大 SCR 試験装置による実排ガス試験（全量）	9
3.1	試験装置計画・設置	9
3.1.1	装置諸元	9
3.1.1.1	供試機関	9
3.1.1.2	脱硝前提条件	9
3.1.1.3	SCR 装置主要目	10
3.2.	実排ガスによる性能確認試験	11
3.2.1	機関性能	11
3.2.1.1	機関データ	11
3.2.1.2	排ガス性状	11
3.2.1.3	使用燃料油の硫黄分	11
3.2.1.4	PM 計測	11
3.2.2	SCR 脱硝性能確認試験	12
3.2.2.1	第 1 回脱硝性能確認試験	12
3.2.2.2	第 2 回脱硝性能確認試験	12
3.2.2.3	第 3 回脱硝性能確認試験	12
3.2.2.4	第 4 回脱硝性能確認試験	13
3.2.3	試験結果およびまとめ	13
4.	東京海洋大 SCR 試験装置による実排ガス試験（分流 4 系統化）	14
4.1	東京海洋大 SCR 試験装置の改造	14
4.1.1	装置諸元	14
4.1.1.1	装置概要	14
4.1.1.2	改造 SCR 装置主要目	15
4.2	実排ガスによる性能確認試験	16
4.2.1	機関性能および排ガス性状	16
4.2.2	使用計測機器	16
4.2.3	装置改造後の脱硝性能確認試験	16
4.2.3.1	第 5 回 脱硝性能確認試験	17
4.2.3.2	第 6 回 脱硝性能確認試験	17
4.2.3.3	第 7 回 脱硝性能確認試験	17
4.2.3.4	第 8 回 脱硝性能確認試験	17
4.2.4	亜酸化窒素計測	17
4.2.5	試験結果	18

4.2.6	触媒劣化分析	19
4.2.6.1	分析結果	19
5.	考察	20
5.1	燃料 S 分の影響について	20
5.2	ダストの影響について	20
5.3	加熱再生について	20
5.4	耐久性、寿命について	21
5.5	還元剤について	22
6.	実船試験 SCR 試験装置計画	23
6.1	装置諸元	23
6.1.1	対象機関	23
6.1.2	SCR 試験システム概要	23
6.1.3	SCR 装置主要目	25
1)	反応器	26
2)	排ガスダクト系	27
3)	アンモニア水タンクユニット	28
4)	還元剤供給系	29
5)	還元剤噴射ノズルユニット	30
6)	昇温バーナー	30
7)	制御系	31
8)	計測系	32
6.1.4	SCR 装置搭載	32
6.2	アンモニア水搭載	33
6.2.1	アンモニア水	33
6.2.2	ポンプユニット	33
6.2.3	搭載作業	34
7.	海上試運転	35
7.1	試運転方案	35
7.2	試運転結果	36
8.	実船試験	37
8.1	試験運転方案	37
1)	基礎性能試験	37



2) 定常運転	38
3) 劣化・再生運転	38
4) 非定常運転	38
8.2 実船試験結果	41
8.2.1 基礎性能試験結果	41
8.2.2 定常運転結果	42
8.2.3 劣化再生運転結果	43
8.2.4 非定常運転結果	43
8.3 実船試験時装置状況	44
1) 反応器	44
2) 排ガスダクト系	44
8.4 実船試験装置確認結果	44
1) 反応器	44
2) 排ガスダクト系	45
3) アンモニア水タンクユニット	45
4) 還元剤供給系	46
5) 還元剤噴射ノズルユニット	46
6) 昇温バーナー	47
7) 制御系	47
8) 計測系	47
8.5 まとめ	48
9. 開発成果	49
9.1 成果	49

## 1. 研究開発計画

### 1.1 概要

2ストローク船用低速ディーゼル機関は、単体熱効率が50%以上と原動機の中で最も高く、温室効果ガス（GHG）排出量も少ないことから、全世界で建造される大型商船の大部分に主機関として搭載されている。しかし、陸上の厳しい環境規制と比較し、海上の環境規制が緩い状況から、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）ならびに硫黄酸化物（SO<sub>x</sub>）／粒子状物質（PM）の陸上並み排出抑制規制の適用がIMOにより段階的に実施されている状況にあり、GHG等の排出抑制規制もいずれ制度化されることが予想される。特に単体熱効率に優れた船用低速ディーゼル機関は、GHGとトレードオフの関係にあるNO<sub>x</sub>排出量に対して格段の削減努力を製造者側に要求されている。

従来、船用低速ディーゼル機関のNO<sub>x</sub>排出量削減は、燃料噴射タイミングを遅らせて燃焼が緩慢になる方向で調整したり、燃料に水を添加する等の手法で対処が試みられてきたが、これらの方法では、NO<sub>x</sub>排出量を現状レベルからIMOの3次規制で要求されているように大幅に削減することに限界がある。また、このような削減手法はGHG排出量の増加ならびに機関の信頼性・耐久性の低下を来とし、必ずしも最適な削減手法とは言えない。

GHG排出量の増加を押さえ、NO<sub>x</sub>排出量を削減させる手法としては、陸用で実績のあるアンモニアを還元剤とする乾式選択接触還元法（SCR法）が考えられるが、船用低速2ストロークディーゼル機関や一部の船用低速4ストロークディーゼル機関では、過給機出口の排ガス温度（排温）が300℃を下回るため、還元脱硝中に生成される酸性硫酸による被毒のため触媒が劣化し、既存技術をそのまま適用できない状況にある。また、陸用の場合はリークアンモニアの問題もあり、SCR装置は原則戸外に設置されるが、船舶の場合は密閉した機関室内にSCR装置を設置せざるを得ないので、船用で採用する場合は様々な問題を克服する必要がある。本研究開発の目的等を整理すると以下のとおりとなる。

### 1.2 研究開発の前提条件

IMO（国際海事機関）において、NO<sub>x</sub>については「大気汚染物質放出規制海域（NO<sub>x</sub> Emission Control Area）」で平成28年（2016年）から1次規制値より80%削減すること、また、SO<sub>x</sub>についても「大気汚染物質放出規制海域（SO<sub>x</sub> Emission Control Area）」で平成27年（2015年）から燃料中硫黄分0.1%以下に削減することなどを盛り込んだMARPOL（海洋汚染防止）条約改正案が採択されている。

### 1.3 研究開発の目的

#### 1) 要素技術開発（250℃レベルの低温排ガスに対応する触媒と還元剤の開発）

従来「300℃以下での排ガスに対応する脱硝触媒は技術的に困難」とされてきたが、250℃レベルの低温で使用する触媒と還元剤の検討の必要性に迫られてきたことから、実用化の目途がつくよう要素技術開発を行う。

## 2) 実船試験

要素技術開発で得られた SCR を実船に搭載し、その機能、性能の検証を行う。

### 1.4 開発目標

#### 1.4.1 要素技術開発

- 1) S 分が 0.5% 以下のわが国に於ける A 重油相当品を燃料とした時に、過給機出口で 300°C を下回り、250°C レベルの低温排ガスに対応する触媒と還元剤を検討し、脱硝率を 50% から逐次 60~80% に引き上げる。

#### 1.4.2 実船試験

- 1) 低速船用ディーゼルの過給機後流に設置する SCR が IMO NOx Tier III 規制 (IMO NOx Tier I 規制から 80% 削減) をクリアすることを確認する。
- 2) 脱硝性能およびシステムの信頼性を検証する。

### 1.5 全体計画

#### 1.5.1 実施スケジュール

全体の実施スケジュールを表 1.5 に示す。

表 1.5 実施スケジュール

要素技術開発 実施項目	H19	H20	H21	H22	H23
触媒の単体性能試験	→				
SCR 装置の計画・設計	→				
SCR 装置の製作		→			
実ガス試験		→			
SCR 装置の計画・設計 (4 系統)			→		
SCR 装置改造 (4 系統)			→		
実ガス試験 (4 系統)			→		
試験結果の分析・検討・総括				→	

実船試験 実施項目	H19	H20	H21	H22	H23
SCR システムの仕様決定・装置設計			→		
SCR 装置の設計・製作				→	
SCR 装置の搭載・作動確認				→	
海上試運転				→	
実航海試験					→
解析・評価・まとめ・総括					→

## 1.5.2 試験機関

### 1.5.2.1 要素技術開発

(株)赤阪鐵工所が東京海洋大学（越中島キャンパス）に昭和 63 年（1988 年）に納入した 2 ストローク低速ディーゼル実験機関 3UEC37LA（1103kW×188min<sup>-1</sup>）を用いて実証試験を行う。

### 1.5.2.2 実船試験

試験船：(株)大島造船所が建造する船名 INITIAL SALUTE（88.1 BC）。

主機関（低速船用ディーゼル）：三菱重工業(株)が納入する、三菱 6UEC60LS II（11910 kW×105rpm、IMO NOx Tier I 規制対象）。

### 1.5.3 各年度の開発計画内容

#### 1.5.3.1 要素技術開発

##### 1) 平成 19 年度 (2007 年度)

- \* 250℃レベルの低温排ガスに対応する触媒と還元剤を選定する。(S分0.5%以下のA重油を使用)
- \* 堺化学工業(株)所有の試験機を用いて、触媒の単体性能確認試験を実施する。
- \* 東京海洋大学の実験機関に搭載する SCR 装置の計画・設計をする。

##### 2) 平成 20 年度 (2008 年度)

- \* 東京海洋大学の 2 ストローク低速ディーゼル実験機関 3UEC37LA の全負荷の排ガス量に見合う脱硝触媒ならびに SCR (脱硝装置) を製作する。
- \* 脱硝触媒の実排ガスを脱硝触媒に通して SCR (脱硝装置) の性能および耐久性、酸性硫安被毒耐性、触媒設置に伴う機関に与える影響等を確認する。
- \* 過給機後流側に SCR を設置する方式の目処をつけるため、エンジン実ガスによる触媒暴露試験・触媒再生試験、試験後触媒の詳細評価試験等を実施する。

##### 3) 平成 21 年度 (2009 年度)

- \* 脱硝触媒の試験の結果、開発した触媒の実用化の見極めをつける。
- \* 過給機後流側 SCR の継続試験のため、東京海洋大学に設置の SCR 試験装置を 4 系統化する改造の検討および設計を行う。
- \* 改造装置部品および脱硝触媒を製作し、SCR 試験装置に組み込む。
- \* 東京海洋大機関の実排ガスを脱硝触媒に通して、脱硝性能ならびに耐久性、酸性硫安被毒耐性を確認する。

##### 4) 平成 22 年度 (2010 年度)

- \* 平成 21 年度までに試験した結果を分析・検討し、実船適用時の耐久性、運転方法等について検討する。要素技術開発について総括をする。

#### 1.5.3.2 実船試験

##### 1) 平成 21 年度 (2009 年度)

- \* SCR システムの仕様決定し、搭載機器・配管系統の詳細協議する。
- \* 機関室アレンジメント、船舶の構造設計、機関室装置設計する。

##### 2) 平成 22 年度 (2010 年度)

- \* 搭載機器の設計・製作し、造船所へ納入、船体への取付けをする。
- \* 各搭載機器の作動確認を行い、海上試運転での動作確認をする。

##### 3) 平成 23 年度 (2011 年度)

- \* 実船試験での脱硝性能およびシステムの信頼性確認をする。
- \* 解析・評価・まとめを行い、実船試験の総括をする。

## 2. 脱硝原理および触媒単体試験

### 2.1 脱硝原理

#### 2.1.1 反応機構

現在、固定発生源の窒素酸化物除去は、チタニア-バナジウム系触媒による乾式選択接触還元法（SCR法）が主流になっている。

窒素酸化物は、触媒上で、アンモニア（NH<sub>3</sub>）と反応し、無害な窒素と水に分解される。図2.1.1.1に反応式を示す。

NO/NO<sub>2</sub> ≥ 1の場合、NO<sub>x</sub>とNH<sub>3</sub>は1:1で反応する。NO<sub>2</sub> 100%（NO/NO<sub>2</sub>=0）の場合、1:1.33となる。

反応は、

1) 触媒上へNH<sub>3</sub>の吸着、2) NO-NH<sub>3</sub>の反応、3) 窒素と水の生成、4) 触媒表面の再生のサイクルで起こる。図2.1.1.2にSCR法の反応機構を示す。

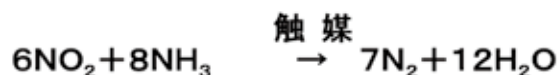
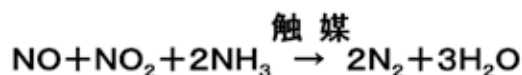
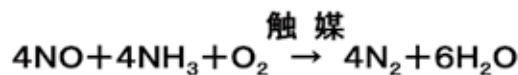


図2.1.1.1 SCRの反応式

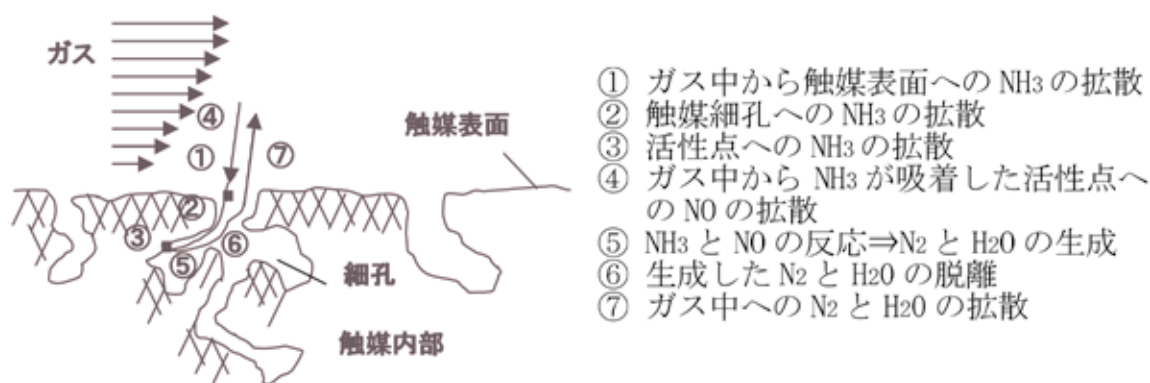


図2.1.1.2 SCR法の反応機構

図2.1.1.3にNH<sub>3</sub>源の種類と反応を示す。還元剤であるNH<sub>3</sub>源としては、アンモニア水そして尿素水などが使用可能である。

大規模な固定発生源では、アンモニア水が広く使用されている。小規模な固定発生源及び移動発生源では、取扱いが容易で、漏洩時の安全性の高い尿素水が使用される場合が多い。尿素水を使用する場合には、尿素が分解するのに必要な温度以上の煙道に注入する必要がある。

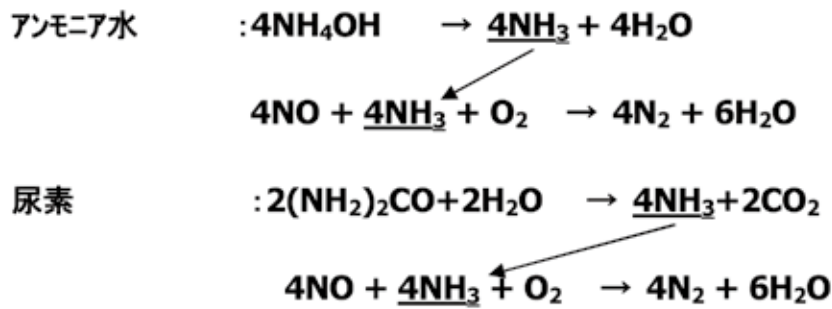


図2.1.1.3 アンモニア源の種類と反応

### 2.1.2 触媒の形状

当初は製造の容易なペレット型やヌードル型が主流であったが、圧損が高く吹き抜けが起こる問題があった。この問題を解決するため、ソリッドハニカム型脱硝触媒が開発され、現在は、低圧損で高活性なハニカム型触媒が広く使用されている。

ハニカム型触媒は、モジュール化して使用する。従って、船用で使用する場合、船舶の定修時にモジュールごと交換することが可能である。また、ハニカム型触媒は、船用で使用可能な機械的強度を有している。

使用する触媒のピッチは、排ガス中のばいじん量により選択する。ディーゼル排ガス処理用では、5～7.4mmピッチの触媒が使用される場合が多い。

### 2.1.3 触媒の特性

排ガスの組成及び使用温度により触媒に求められる特性は異なる。天然ガス焼きのような低ばいじん量で硫黄酸化物(SOx)が少ない場合には、主として高い脱硝性能が求められる。これに対し、高ばいじん量/高SOxの場合には、脱硝性能に加え、酸性硫酸やアルカリによる劣化が少ないことやSO<sub>2</sub>酸化率が低いことが求められる。

触媒の性能低下の主な原因をまとめると、

- ① 酸性硫酸、硫酸カルシウム、シリカ、PM等による細孔閉塞
- ② アルカリ金属及び重金属による活性点の失活
- ③ 熱的影響による触媒自体の変質

等がある。一般的にはいくつかの要因が複合している場合が多い。①は、ガスの拡散阻害による劣化であり、②及び③は、活性点の失活による劣化である。

以上のような触媒の特性をふまえ、触媒の性能を最大限発揮させるためには、システム全体として最適化が必要である。

## 2.2 触媒単体試験

本項では、触媒量算出に必要な脱硝性能の測定を行った。

### 2.2.1 試験触媒

低速船用ディーゼル機関は燃料として重油を使用するが、燃料中に硫黄 (S) が含まれており、ディーゼル機関内でその大半は硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) となる。SCR 触媒を使用する場合、排ガス中の硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) と SCR に必要な還元剤であるアンモニア (NH<sub>3</sub>) により、低温度で触媒に経時的に酸性硫酸が析出し触媒性能を低下させる。

触媒には、①初期脱硝性能が高い事 ②耐久性に優れている事が要求されるが、両者を両立させる触媒は未だ見出されていない。

その為、試験は以下の2種類を用いて行った。

- ①触媒 A：初期脱硝性能の高い触媒（低温高活性タイプ）
- ②触媒 B：初期脱硝性能は低いが、耐久性に優れていると考えられる触媒

### 2.2.2 試験条件

試験条件の内ガス組成は低速船用ディーゼル機関での測定値を基本とし、ガス温度・SV 値・NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> モル比等は SCR 装置の使用が想定される範囲とした。

- ①ガス温度 230 ～ 290 (°C)
- ②SV 値 4000 ～ 9000 (1/H) \* 1
- ③NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> モル比 0.5 ～ 1.0 (-) \* 2

\* 1 SV 値：S V 値とは、排ガス量を触媒量で除したもの

\* 2 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> モル比：排ガス処理前の NO<sub>x</sub> 濃度に対し、添加する NH<sub>3</sub> の濃度

### 2.2.3 試験結果

<ガス温度と脱硝性能の関係>

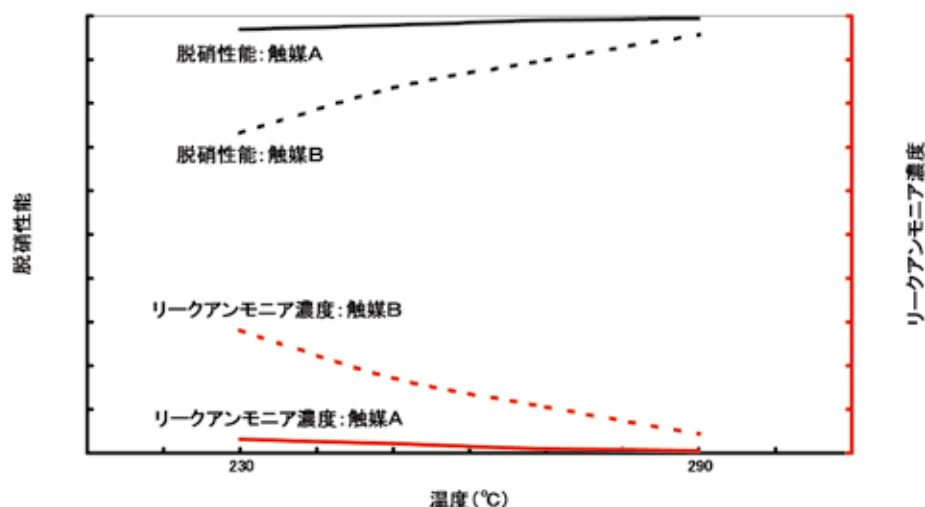


図 2.2.3.1 ガス温度と脱硝性能及びリークアンモニア濃度の関係



<SV 値と脱硝性能の関係>

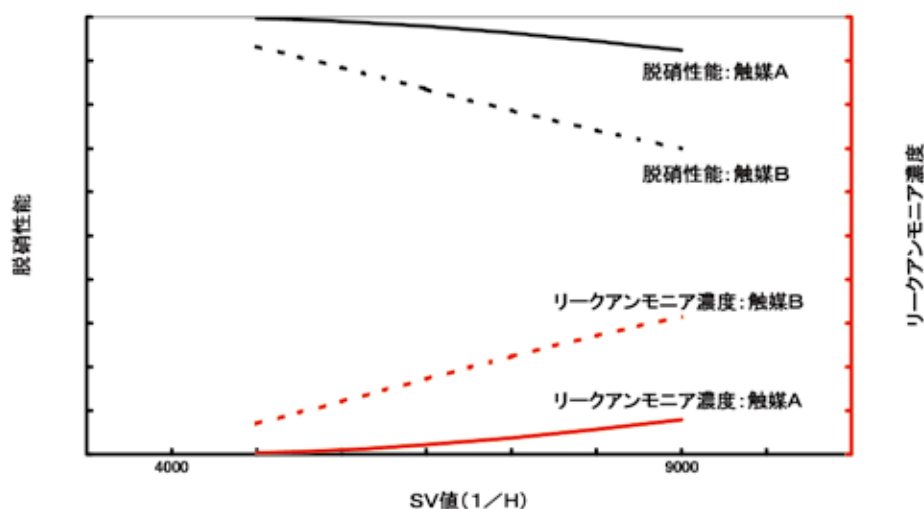


図 2. 2. 3. 2 SV 値と脱硝性能及びリークアンモニア濃度の関係

<NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> モル比と脱硝性能の関係>

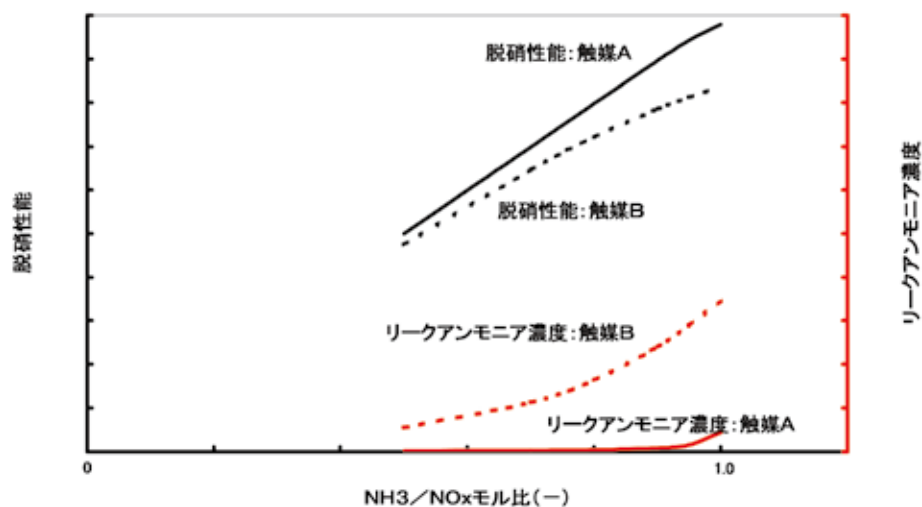


図 2. 2. 3. 3 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> モル比と脱硝性能及びリークアンモニア濃度の関係

2. 2. 4 試験結果のまとめ

触媒単体性能試験から以下の結果が得られた。

- ①ガス温度が高くなるほど脱硝性能は向上し、リークアンモニア濃度は減少する。
- ②SV 値が高くなるほど脱硝性能は低下し、リークアンモニア濃度は増加する。
- ③NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> モル比が高くなるほど脱硝率=モル比の理想値よりも脱硝率は低下し、リークアンモニア濃度は増加する。
- ④低温高活性型の触媒 A の脱硝性能が高く、又リークアンモニア濃度も低い。

### 3. 東京海洋大 SCR 試験装置による実排ガス試験（全量）

#### 3.1 試験装置計画・設置

東京海洋大実験機関(3UEC37LA)に SCR 試験装置を設置した。  
装置諸元について 4.1.1 に、設置工事概要について 3.1.2 に示す。

##### 3.1.1 装置諸元

###### 3.1.1.1 供試機関

東京海洋大実験機関(3UEC37LA)の主要目を表 3.1.1.1 に示す。

表 3.1.1.1 供試機関主要目

要目	諸元	備考
機関形式	3UEC37LA	低速 2 ストローク ディーゼル機関
定格出力	1103kW	
定格回転数	188min <sup>-1</sup>	
シリンダ数	3	
シリンダ内径	370mm	
ピストン行程	880mm	

###### 3.1.1.2 脱硝前提条件

平成 20 年度（2008 年度）の目標脱硝率は S 分 0.5%以下の A 重油使用で 60～80%であるが、装置の設計としては実験開始時に触媒 A で 80%脱硝まで可能なものとする。（被毒の影響が予測できないため）触媒量算出結果を表 3.1.1.2 に示す。

表 3.1.1.2 触媒量算出結果

項目	諸元値（負荷 100%値）	備考
排ガス量	8000 Nm <sup>3</sup> /h	
排ガス温度	250 °C	
リーク NH <sub>3</sub>	10 ppm	陸上プラント設計値
触媒量	1.2 m <sup>3</sup>	
触媒本数	72 本	

### 3.1.1.3 SCR 装置主要目

表 3.1.1.3 に SCR 試験装置の主要目、図 3.1.1.4 に試験装置計画図を示す。

表 3.1.1.3 SCR 装置主要目

装置	仕様	数量	備考
脱硝反応器	内寸 1085×1085×3550 ケーシング材質：S-TEN2 強度部材材質：SS400 保温：75mmt (外装アルミ)	1	寸法には点検フタ、架台、補強等含まず
アンモニア水タンク	3000L 材質：PE φ 1600×1800H	2 連	
防液堤	3200L 材質：SS400 1800W×2400L×800H	2	タールエポキシ塗装
除害塔	110L 材質：SUS304 φ 500×600H	2 連	
アンモニア水供給ポンプ	ダイヤフラム定量型 1L/min×0.3MPaG 材質：PVC 他	1	
アンモニア水噴射ノズル	2 流体ノズル 液流量 1L/min (0.25MPa) 空気流量 150LN/min (0.30MPa) 材質：SUS316L 他	1	
制御盤	800W×500D×1600H (本体)	1	指示計、記録計等
NOx 計	700W×358D×1652H	1	

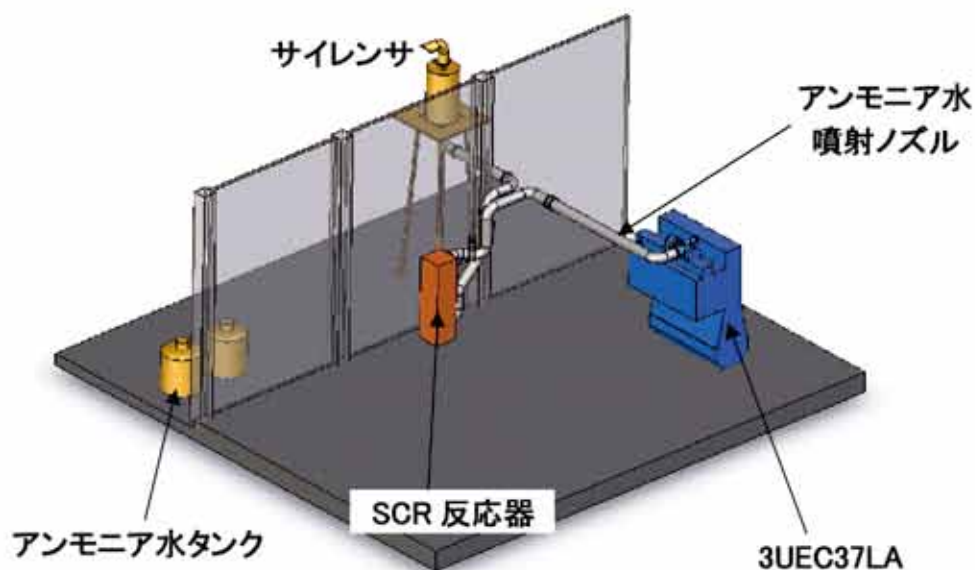


図 3.1.1.4 SCR 試験装置計画図

### 3.2. 実排ガスによる性能確認試験

東京海洋大学の実験機関 3UEC37LA に SCR 装置を設置し、脱硝性能の確認試験を実施した。

#### 3.2.1 機関性能

##### 3.2.1.1 機関データ

試験では触媒の劣化を加速させる目的で、できる限り多くの排ガスを短期に触媒に通ガスするよう実験機関を 100% 負荷で運転した。また、100% 負荷運転での過給機出口排ガス温度は 320~360°C であったため、希釈ブロワにより SCR 装置入口において 250°C となるよう排ガスの希釈・温度低減を行った。

##### 3.2.1.2 排ガス性状

SCR 装置入口の排ガス性状を表 3.2.1.2 に示す。実験機関は NOx 規制以前の製造であるため、NOx 値は 1 次規制レベルより高くなっている。

表 3.2.1.2 SCR 装置入口 排ガス性状

排ガス性状	NOx	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	排ガス流量
	ppm	%	%	ppm	Nm <sup>3</sup> /h
実測値	1585~1977	14.3~14.8	4.3~4.7	35.9~74.0	7199~8036

##### 3.2.1.3 使用燃料油の硫黄分

本研究では、使用する A 重油の硫黄分濃度の目標値を 0.5% としていたが、濃度を指定した A 重油の調達が困難であるため、硫黄分濃度が同等となるよう調達先を限定し、試験期間を通じて硫黄分約 0.7% の HSA 重油を補給した。また、第 4 回の試験では、硫黄分 0.1% 以下の低硫黄 A 重油（以下 LSA 重油）を使用した。試験に使用した HSA 重油及び、LSA 重油の性状分析結果の一例を表 3.2.1.3 に示す。

表 3.2.1.3 A 重油性状分析結果

項目	単位	分析結果	
		HSA 重油	LSA 重油
硫黄分	mass%	0.73	0.065

##### 3.2.1.4 PM 計測

実験機関の PM 排出量を把握するため、水産大学校に依頼しマイクロダイリューショントンネルを使った PM 計測を実施した。

計測の結果、反応器入口の PM 排出量は 113.4mg/Nm<sup>3</sup> であった。また、PM を捕集したフィルタは薄い灰黄色を呈しており、PM が低速 2 ストローク機関で特徴的な SOF 主体のものであることが判った。

### 3.2.2 SCR 脱硝性能確認試験

脱硝性能確認試験を下記日程で実施した。

#### <試験日程>

第1回：平成20年8月2日～8月22日	運転時間 69時間
第2回：平成20年9月10日～11月23日	運転時間 100時間
第3回：平成20年12月10日～平成21年1月14日	運転時間 85時間
第4回：平成21年3月17日～5月21日	運転時間 85時間

- 注) 1. 触媒は各回終了後全て新品に交換した。  
2. 運転時間はアンモニア水注入開始後の脱硝運転の時間を示す。  
3. 第1回から第3回までの試験では硫黄分約0.7%のHSA重油を、  
第4回試験では硫黄分約0.07%のLSA重油を使用した。

試験では、実験機関を100%負荷までロードアップした後、流路を切換え反応器に排ガスを導入し、希釈ブロウにより反応器入口の排ガス温度を250℃に調整、反応器出口排気温度が規定温度に達するまで触媒を昇温させたのちアンモニア水を注入し脱硝を開始した。

#### 3.2.2.1 第1回脱硝性能確認試験

第1回脱硝性能確認試験では、排ガス中に共存するアンモニアガスの影響で、当初は精度の良いNO<sub>x</sub>計測が困難であり、触媒性能の妥当な評価に支障をきたしていた。しかし、ガス計測ラインの改良、湿式前処理装置の追加によりアンモニア成分の影響を受けないNO<sub>x</sub>計測が可能となった。

#### 3.2.2.2 第2回脱硝性能確認試験

第2回の試験では、NO<sub>x</sub>計測ラインの改良を行い触媒を全て新品に交換し試験を実施した。結果、初期脱硝率は注入したアンモニアとNO<sub>x</sub>が全て反応した場合に得られる脱硝率80%を下回った。また、100時間運転後の脱硝率は初期値に対し約40%低下しており、比較的短時間で触媒性能が低下することを確認した。なお、初期の脱硝率が目標に達していない原因として、反応器内部のガスの流れが偏っており、触媒全体を有効に活用できていなかった可能性があると考えられた。

#### 3.2.2.3 第3回脱硝性能確認試験

第2回の脱硝性能確認試験の結果より、反応器内のガス偏流が脱硝率に影響を与えている可能性があったため、偏流対策を行い、確認試験を再実施した。なお、試験条件は第2回と同一である。結果、初期脱硝率は改造前に対し10%以上向上し、脱硝率向上の効果が確認された。

#### 3.2.2.4 第4回脱硝性能確認試験

硫黄分約 0.7% の HSA 重油を使用した第 3 回までの試験では、触媒の劣化により脱硝率が短時間で大幅に低下した。触媒劣化要因の 1 つとして、燃料中の硫黄分に起因する酸性硫酸による被毒が考えられるため、本試験では、燃料中の硫黄分が約 0.07% の LSA 重油を使用し、燃料中の硫黄分が脱硝性能に与える影響を確認した。なお、試験条件は第 3 回試験と同一である。

試験結果を図 3.2.2.4 に示す。LSA 重油を使用した今回の試験結果と HSA 重油を使用した第 3 回試験の結果を比較すると、初期脱硝率には大きな違いは見られなかったが、HSA 重油では時間の経過と共に脱硝率が低下していくのに対し、LSA 重油では脱硝率の低下はほとんど見られなかった。250℃の低温排ガスにおいても、硫黄分の少ない燃料油を使用することで、触媒の劣化を大幅に抑えることができた。

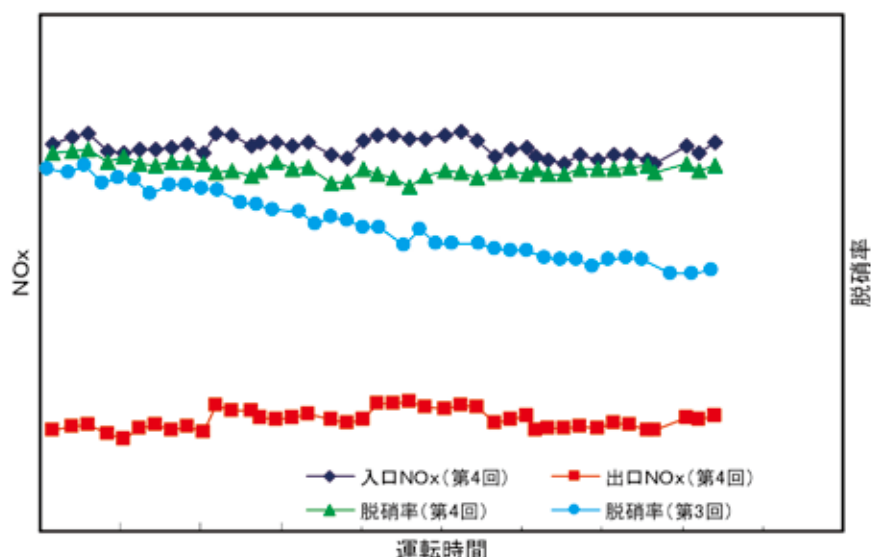


図 3.2.2.4 脱硝性能確認試験結果

#### 3.2.3 試験結果およびまとめ

実機における SCR 性能確認試験において以下の結果が得られた。

- 1) 湿式前処理を行うことでアンモニアが共存する排ガスにおいても、精度良い NOx 計測が可能となった。
- 2) 硫黄分約 0.7% では比較的短時間の運転で脱硝率の低下が確認された。
- 3) 反応器内部のガス流れを改善することで初期の脱硝率は向上した。
- 5) 硫黄分約 0.07% の低硫黄燃料油を使用することで、250℃の低温排ガスにおいて、触媒の劣化を大幅に抑えることができた。

## 4. 東京海洋大 SCR 試験装置による実排ガス試験（分流4系統化）

### 4.1 東京海洋大 SCR 試験装置の改造

平成 21 年度（2009 年度）は、平成 20 年度（2008 年度）に東京海洋大実験機関（3UEC37LA）に設置の SCR 試験装置を改造した。

#### 4.1.1 装置諸元

##### 4.1.1.1 装置概要

実験機関より排出される排ガスを一部分流し、排温低減用希釈ブロウにてガス温度を下げた後、さらに流路を4系統に分割して同時に4条件の試験を実施可能な装置とする。表 4.1.1.1 に触媒量算出結果、図 4.1.1.2 に試験装置計画図を示す。

表 4.1.1.1 触媒量算出結果（反応器1系統当り）

項目	諸元値（負荷 100%値）	備考
排ガス量	222 Nm <sup>3</sup> /h	
排ガス温度	250 °C	試験条件は別
触媒量	0.034 m <sup>3</sup>	
触媒本数	2 本	直列配置

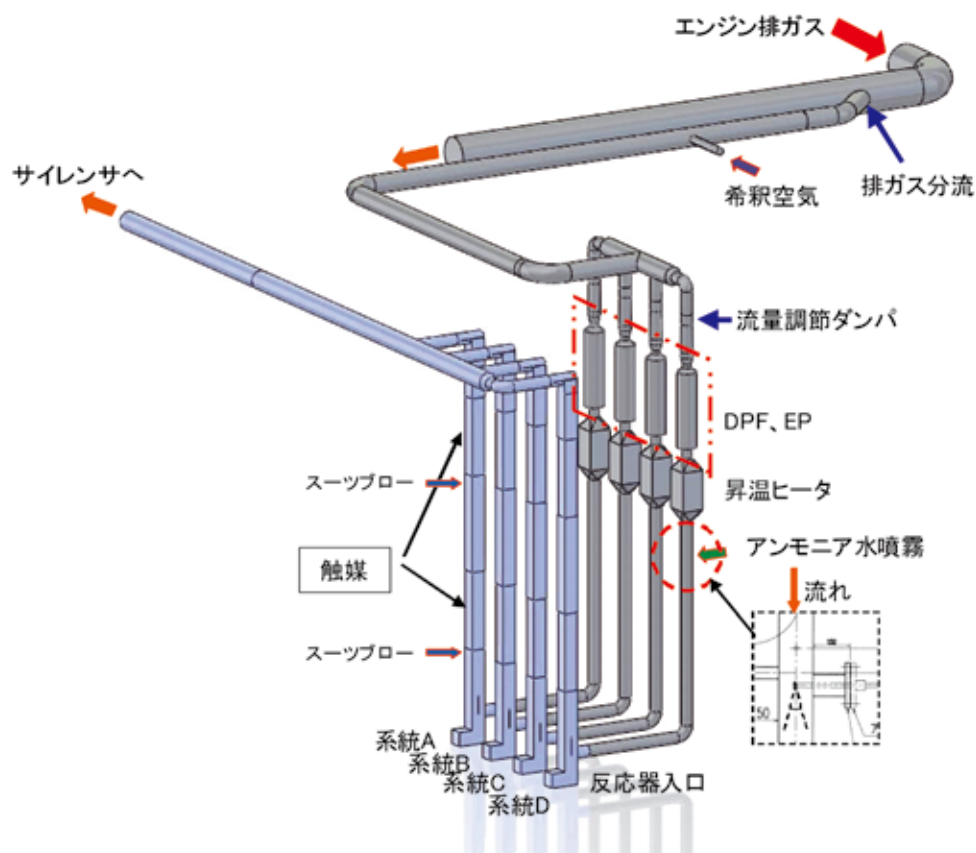


図 4.1.1.2 SCR 試験装置計画図

#### 4.1.1.2 改造 SCR 装置主要目

表 4.1.1.2 に改造 SCR 試験装置の主要目を示す。

表 4.1.1.2 SCR 装置主要目

装置	仕様	数量	備考
脱硝反応器	外寸 165×165×4490H ケーシング材質：S-TEN2 強度部材材質：SS400 保温：100mmt (外装アルミ)	4	寸法には点検フタ、架台、補強等含まず
スーツブロワ	使用空気量：6.8m <sup>3</sup> N/min 本 最低使用圧力：0.6MPa 材質：STPG370 他	16	各触媒前後配置（並流および向流）
昇温ヒータ	ダクトヒータ 200V×3φ、60Hz、15kW 材質：SUS304、SS400 他	4	
DPF	外寸φ340×881 圧損：0.5kPa、DC24V、1kW	3	ACR 製 APEX 2 シリーズ
EP	外寸φ340×881 電極間荷電：-20kV 電源：1φ×100V	1	MHI-MS 製 碍子部、カバー、配管取合い含まず
アンモニア水ポンプ	ダイヤフラム定量型 25mL/min×0.3MPaG、材質：PVC 他	4	
アンモニア水噴射ノズル	2 流体ノズル 液流量：1.5L/H×0.1MPa 空気流量：35LN/min×0.35MPa 材質：SUS316L 他	4	
制御盤	1400W×600D×1950H	1	指示調節計、記録計等
NO <sub>x</sub> 、O <sub>2</sub> 分析計	CLD、ジルコニア方式 サンプル流量：1L/min	5 式	島津製 NOA-7000
CO、CO <sub>2</sub> 分析計	NDIR 方式、サンプル流量：1L/min	1 式	島津製 CGT-7000



## 4.2 実排ガスによる性能確認試験

### 4.2.1 機関性能および排ガス性状

装置改造後の試験では、実験機関（3UEC37LA 1103kW/188min<sup>-1</sup>）を85%負荷で運転し、その排ガスの一部を分流しSCR装置に導入した。機関出口の排ガス温度は330℃以上と高いため、希釈ブロワにて排ガスを230℃に冷却し、その後各反応器手前に設置したヒータにより排ガスを各反応器の設定温度まで昇温させた。

実験機関の機関性能と排ガス性状及び、排ガス希釈後（反応器入口）の排ガス性状を表4.2.1に示す。

表 4.2.1 機関性能及び排ガス性状

機関出力		937kW	
機関回転数		178min <sup>-1</sup>	
負荷率		85%	
排ガス 温度	シリンダヘッド出口	360～385℃	
	過給機入口	415～445℃	
	過給機出口	335～360℃	
希釈後排ガス温度		230℃	
排ガス 性状	機関出口	NOx	2250～2500ppm
		O <sub>2</sub>	11.4～12.8%
	反応器 入口	NOx	1450～2000ppm
		O <sub>2</sub>	15.1～15.8%

### 4.2.2 使用計測機器

改造後の試験装置では、反応器入口と各反応器出口にNOx/O<sub>2</sub>計を設置し、常時NOx、O<sub>2</sub>の計測を実施した。また、反応器入口ではCO、CO<sub>2</sub>の計測も実施した。

### 4.2.3 装置改造後の脱硝性能確認試験

試験装置改造後、下記日程で各種試験を実施した。なお、装置改造後の試験は、全てLSA重油を使用した。

#### <試験日程>

第5回試験（温度条件変更試験）	平成21年8月4日～9月18日
第6回試験（加熱再生試験）	平成21年9月29日～11月6日
第7回試験（スツブロー、除塵試験）	平成21年11月18日～平成22年1月22日
第8回試験（触媒仕様変更試験）	平成22年2月3日～2月23日

#### 4.2.3.1 第5回 脱硝性能確認試験

第5回（試験装置改造後の第1回）の試験では、反応器入口の温度条件を反応器毎に変え、排ガス温度が脱硝性能に与える影響を確認した。

また、第4回までの試験結果より、触媒に付着するダストが触媒劣化要因の1つと考えられたため、排ガス中のダストを除去する目的で、B系統の反応器に㈱ACR製のDPF（Diesel Particulate Filter）を取付けた。

#### 4.2.3.2 第6回 脱硝性能確認試験

第6回の試験では、脱硝運転と触媒の加熱再生運転を行う運転サイクルを繰り返し、合計100時間の運転を行った。なお、加熱再生時は昇温ヒータにより350℃に加熱し、加熱再生中にもアンモニア水を投入して脱硝を継続した。

#### 4.2.3.3 第7回 脱硝性能確認試験

第7回の試験では、触媒表面に付着するダストを除去する目的でスツブローを、排ガス中のダストを除去する目的で小形の電気集塵器（EP）を設置し、スツブロー、EPによるダスト除去による触媒性能への影響を調査した。また、B系、C系では約100時間の脱硝運転後加熱再生運転を実施した。

#### 4.2.3.4 第8回 脱硝性能確認試験

第8回の試験では、第7回試験までに使用した触媒に加え3種類の異なる触媒を用いて約50時間の比較試験を実施した。

- A系触媒・・・従来触媒
- B系触媒・・・小ピッチ触媒
- C系触媒・・・新規開発触媒①（新たな活性成分を担持）
- D系触媒・・・新規開発触媒②（触媒形状変更品）

#### 4.2.4 亜酸化窒素計測

SCRでは、触媒の作用により温室効果の高い亜酸化窒素（以下 $N_2O$ ）の排出が懸念されている。このため、各反応器出口における $N_2O$ 排出レベルを把握するべく、 $N_2O$ 計測を実施した。

#### 4.2.5 試験結果

試験装置改造後の SCR 確認試験において以下の結果が得られた。また、試験設備改造後の SCR 検証試験の一例を図 4.2.5 に示す。

- 1) 反応器入口の排気温度条件を変更した約 100 時間の試験では、排気温度の最も低い 230℃では初期の脱硝率が低く、時間経過とともに脱硝率が低下していく傾向が見られた。しかし、温度が高くなるに従い脱硝率は上昇、排気温度 330℃では脱硝率は高く、低下の傾向も見られなかった。
- 2) 脱硝と加熱再生 (350℃) を繰り返す試験では、全ての系統で約 100 時間後の脱硝率が初期値に対し僅かに低下した。但し、試験後抽出した触媒の模擬ガスを使った性能評価では、新品触媒と同等の脱硝性能を示した。
- 3) スーツブローの有無を比較すると、初期脱硝率と約 100 時間の運転における脱硝率低下の傾向に差は無く、スーツブローの優位性は確認できなかった。EP の有無を比較すると、初期脱硝率に差は見られなかったが、EP 無では約 100 時間運転後の脱硝率が僅かに低下するのに対し、EP 有では低下は認められず初期の脱硝率を維持していた。但し、約 100 時間運転後の脱硝率の差は僅かであり、EP の顕著な優位性を確認するにはいたらなかった。
- 4) 触媒仕様変更試験では、小ピッチ触媒および新規開発触媒②において従来触媒よりも高い脱硝率が得られた。新たな活性成分を担持した新規開発触媒①では、従来触媒と比較し脱硝率低下の割合が大きかった。
- 5) 亜酸化窒素計測の結果、反応器出口の  $N_2O$  濃度は 1ppm 以下であり、十分に低いレベルであることを確認した。

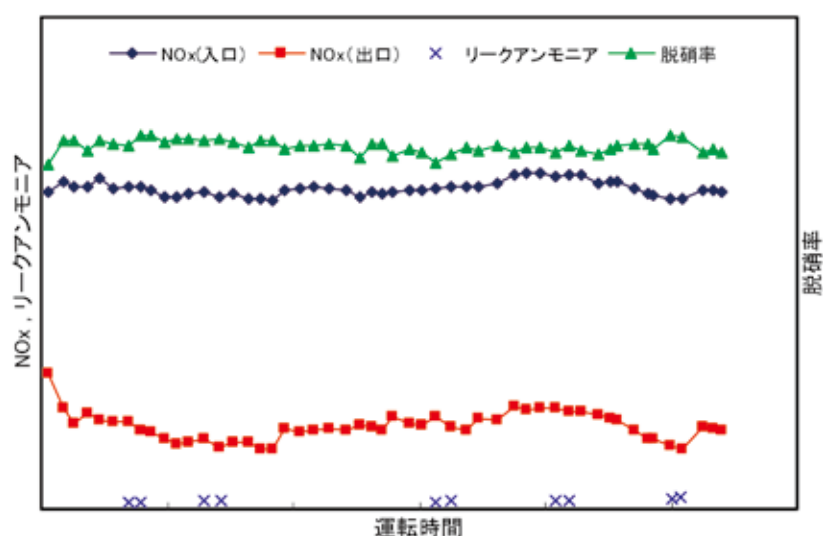


図 4.2.5 SCR 検証試験結果 (装置改造後)

#### 4.2.6 触媒劣化分析

4系列化後の第5回から第8回暴露触媒を触媒反応層から取り出し、触媒の評価試験を実施した。

試験装置は、ポンペ等のガスを調整し、系統ごとの暴露温度で脱硝性能を測定した。試験ガス条件は実際の暴露試験と同一条件で、 $\text{NH}_3/\text{NO}_x$ モル比は1とした。

##### 4.2.6.1 分析結果

触媒劣化分析は、①4系列反応器にて、加熱再生の可否と除塵装置の効果、②触媒ピッチの効果、③新規開発触媒（活性金属、触媒形状）を確認した。

加熱再生では、1) 約100時間運転後350℃加熱再生、2) 脱硝運転・加熱再生繰り返しのいずれにおいても、脱硝性能が新品触媒同等まで回復することが確認された。加熱再生前後の触媒内部状況を図4.2.6.1に示す。

<加熱再生前>



<加熱再生後>



図 4.2.6.1 加熱再生前後の触媒内部状況

除塵装置では、EP、DPFのいずれも脱硝性能低下を小さくする効果があることが確認された。それらの効果の優位性を比較するのは難しいが、スーツブロー設置により触媒へのダスト堆積を軽減することにより、触媒長寿命化が図れることが期待される。

小ピッチ触媒では、接触面積の増加に伴い脱硝率が向上すること、脱硝性能低下の度合いが、従来触媒と同等であることが確認された。触媒表面へのダストの付着は認められたが、触媒孔目の閉塞は認められなかったことから、除塵装置等と組み合わせることにより、小ピッチ触媒が使用できる可能性がある。

新規開発触媒として、活性金属種変更品と触媒形状変更品を検討した。活性金属種変更品では、ダスト付着量の低減が認められた。

触媒形状変更品では、接触面積増加分の脱硝率が向上すること、脱硝性能低下の度合いが従来触媒とほぼ同等であることが確認された。

## 5. 考察

要素研究開発において得られた成果をもとに、以下考察する。

### 5.1 燃料S分の影響について

本試験研究では硫黄分約0.7%のHSA重油と約0.07%のLSA重油を使用してSCRの検証試験を実施した。本試験の結果、硫黄分0.1%以下の燃料を使用することで、250℃という低い排気温度条件において、100時間程度は脱硝率を維持できる見込みを得た。

### 5.2 ダストの影響について

触媒性能の低下要因として、酸性硫酸の他に触媒表面に付着するダストによる劣化が考えられる。排ガス中のダストを除去するためDPF、EPを設置し、その効果と触媒性能への影響を調査した。また、スーツブローの有無による脱硝性能の違いについて調査した。

本試験の結果、排ガス中のダストを除去し、触媒上への付着を防止する事は、触媒性能維持に効果があると考えられる。一方、スーツブローについては、100時間という短い試験時間の中では、脱硝率に明確な違いは見られず優位性は確認できなかった。

### 5.3 加熱再生について

排ガス加熱による触媒の再生が触媒の長期使用に寄与する可能性を確認したことは、本研究における最も重要な成果の一つと言える。

エンジン排ガス全量を通す試験装置から始め、中間年度で4系統の試験を一度に実施できるシステムに変更し、排ガス温度やダストが触媒に与える影響を比較することができ、多くの貴重な知見を得ることができた。平成21年度の試験においては、被毒した触媒の再生についても確認した。被毒した触媒を再生しながら使用すれば、使用期間が大きく延びることとなる。

これまで実施してきたSCRの実機排ガス試験は100時間程度の運転を目安として行ってきたもので、評価として十分であるとは言い難い。しかしながら、これまでに得られたデータを整理すると、短時間での低温脱硝→加熱再生の繰り返し運転であれば、比較的長期間に渡って性能が持続できる可能性があるかと期待している。

実用化のためには製品寿命の精度の高い予測が要求され、加熱再生技術の可否が課題の一つである。

#### 5.4 耐久性、寿命について

触媒性能低下の主な原因をまとめると、

- ① 酸性硫安、硫酸カルシウム、シリカ、微粒子ダスト等による細孔閉塞
- ② アルカリ金属及び重金属による活性点の失活
- ③ 熱的影響による触媒自体の変質

等がある。一般的にはいくつかの要因が複合している場合が多い。①は、ガスの拡散阻害による劣化であり、②及び③は、活性点の失活による劣化である。

①のうち酸性硫安は、硫黄酸化物とアンモニアから生成する。酸性硫安の生成に関与する硫黄酸化物は  $\text{SO}_3$  であり、燃料油中の S 分に起因する  $\text{SO}_3$  と触媒上で  $\text{SO}_2$  が酸化された  $\text{SO}_3$  がある。250℃程度の温度では前者の寄与の割合が多い。アンモニアは、還元剤として注入されるアンモニアである。性能低下を防ぐためには、硫黄酸化物及びアンモニアの濃度をできるだけ下げる必要があり、S 分の少ない燃料の使用及び注入アンモニア量の適切な制御が必要である。本研究で、燃料油中の S 分低減により触媒性能低下が抑制できることを確認できた。また、酸性硫安の生成は低温ほど多くなるので、温度管理も重要である。

①の酸性硫安以外の細孔閉塞では、硫酸カルシウム、シリカ、微粒子ダスト等により活性点が被覆され触媒性能が低下する場合がある。本研究の暴露触媒では、100 時間程度の試験ではあるが、本項の細孔閉塞による性能低下は認められなかった。

②の活性点の失活は、燃料油や潤滑油中のアルカリ金属や重金属が触媒の活性点に付着することにより、アンモニアが吸着される活性点がなくなることにより起こる。本原因による性能低下の場合触媒再生が難しいので、配慮が必要である。

③の熱的影響は、触媒に 600℃を超えるような高温のガスが通気された場合だけでなく、可燃物質が触媒上で酸化分解された際の燃焼熱による場合があることにも注意が必要である。本原因による性能低下の場合は、再生は不可能である。

また本研究では、暴露試験及び加熱再生を繰り返し実施し触媒性能が回復することを確認した。これにより、船上で一定時間ごとに再生する方法で触媒を長期間使用できる可能性があると考えられる。

## 5.5 還元剤について

アンモニア水を使用するに当って、周囲環境（気温）に十分注意する必要があるという知見を得られたことは、非常に重要であった。本研究開発で使用した25%アンモニア水は、39°C程度で蒸発するという物性を有しているが、これが250°Cの排ガス中に噴射する前に蒸発してしまうと、噴射系に支障をきたすため、アンモニア水噴射系は断熱して周囲温度の影響を受けにくくする必要があり、必要に応じて冷却も考えるべきである。これら注意点をクリアすれば、船舶搭載においてもアンモニア水を安全に使用することが可能であり、技術的には確立したと考えたい。

## 6. 実船試験 SCR 試験装置計画

平成 21 年度に実船試験用の SCR 試験装置について基本計画を実施し、平成 22 年度に SCR 試験装置を製作および搭載、そして海上試運転を実施した。

詳細を以下に示す。

### 6.1 装置諸元

#### 6.1.1 対象機関

実船搭載船舶は(株)大島造船所建造の 88, 100DWT バルクキャリアとし、当該船舶が搭載している機関(6UEC60LS II)の主要目を表 6. 1. 1 に示す。

表 6. 1. 1 対象機関主要目

機関形式	6UEC60LS II	備考
サイクル	低速 2 ストローク ディーゼル機関	Tier I 規制対象
定格出力	11910kW	
定格回転数	105min <sup>-1</sup>	
シリンダ数	6	
シリンダ内径	600mm	
行程	2300mm	
NOx 排出量	17 g/kWh 以下	Tier I 規制値

#### 6.1.2 SCR 試験システム概要

今回の実船試験に使用する船舶は実際に商用運航の最中に SCR の性能確認試験をするという使い方を想定しているため、SCR システムを従来の排ガスラインに組み入れる形ではなく、排ガス全流を分岐して完全に別システムを構成することとした。システム概念図を図 6. 1. 2. 1 に示す。

これは、要素技術開発の結果やその他の知見から、S 分 0.1%以下の低硫黄 A 重油を燃料とした場合でも酸性硫安の生成を回避できないため、特に SCR 下流にボイラ等を配置する構成では、そのボイラ等に酸性硫安が析出してしまうという二次的な影響を解消することを主目的としている。また、還元剤は要素技術開発同様 25%アンモニア水としているが、これについては後述するように船級協会 (NK) と協力して安全上の観点からシステムの作り込みを実施した。また、タンク容量の決定には後述する実船試験方案を前提としている。

各装置部品の詳細は 6. 1. 3 に示す。



## SCR装置システム概念図

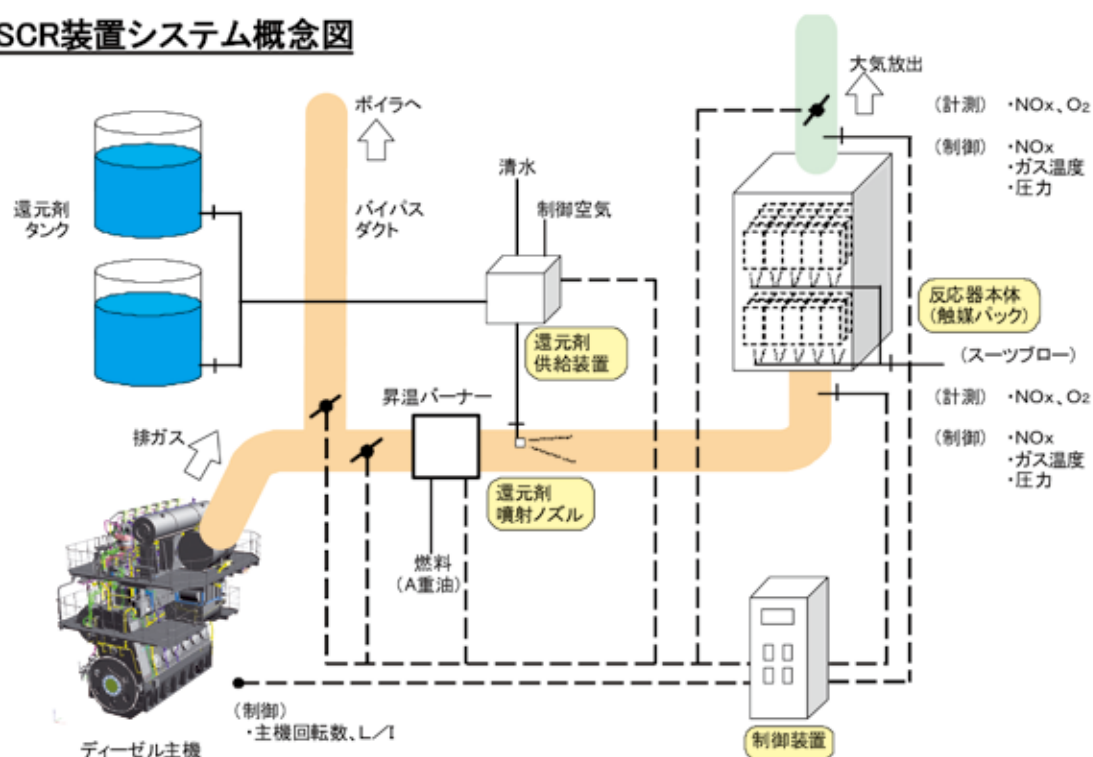


図 6.1.2.1 試験装置概要

対象機関は IMO NOx Tier I 対応エンジンのため、SCR 装置の脱硝性能は 80% を目標とする。

脱硝性能を左右する触媒量は、連続使用時間が長く、外洋という陸上より格段に厳しい環境のため、安全を見て要素技術開発（平成 20 年度装置）の排ガス体積当り触媒量の 2 倍とした。表 6.1.2.2 に触媒量算出条件を示す。

これにより装置の大型化が想定されるため、後述するように一部装置をデッキ上に設置することで進めた。

表 6.1.2.2 触媒量算出条件

項目	諸元値 (負荷 100% 値)	備考
排ガス量	約 82000 Nm <sup>3</sup> /h	
排ガス温度	250 °C	試験条件は別
触媒段数	3 段	

### 6.1.3 SCR 装置主要目

表 6.1.3 に SCR 試験装置の主要目を示す。各装置の詳細については 6.1.3-1) 以降に示す。

表 6.1.3 SCR 装置主要目

装置	仕様	数量	備考
脱硝反応器	外寸 4730×4040×5500H ケーシング材質：S-TEN2 強度部材材質：SS400 保温：100mmt	1	寸法には点検フタ、架台、補強等含まず
アンモニア水タンク ユニット	30m <sup>3</sup> (有効) タンク本体材質：SUS304 カバー材質：SS400	2 式	換気ファン、エアコン、ブリーザ弁有
還元剤ポンプユニット	外寸 3000×1450×2560H 容積型ポンプ 0.1～1L/min×4 台 材質：SUS 他	1 式	別途チラーユニット有 尿素水洗浄用ポンプ有
還元剤噴射ノズル ユニット	2 流体ノズル 液流量：1L/min×0.1MPa 空気流量：180LN/min× 0.35MPa 材質：SUS316L 他	4	
昇温バーナー	DT 型排ガス加熱炉 本体部 1770×5490×2150 材質：耐火煉瓦、SS400 他	1 式	別途ポンプユニット、 燃焼用空気ファン他有
スーツブロワ	トラバース型 使用空気量：14m <sup>3</sup> N/min 台 噴射圧力：0.5MPa	12	各触媒段上流配置
制御盤	①システム全体用 1500W×600D×2100H ②昇温バーナー用 800W×450D×1850H ③スーツブロワ用 800W×400D×1950H	各 1	計測用表示器含む ③別途トランス箱有
流路切替ダンパ	密閉タイプ 1300A 電源：3φ×440V	2	バタフライ弁
NO <sub>x</sub> 、O <sub>2</sub> 分析計	ジルコニア方式	2 式	堀場製 (制御用)
排ガス分析計	壁掛型 590H×950W×250D 定電位電解法他	2 式	testo 製 (計測用) GL 認定品

## 1) 反応器

反応器は縦型とした。船舶の構造上、主機関の配置から、排ガスは反応器下方から入り上方へ排出される流れ方向とした。150mm 角の触媒を一定本数でパック化し、圧損も考慮して排ガス流れ方向に3段のパックが配置されるようにした。要素技術開発結果から、各段上流側にスリーブブロワを設置し、ダストによる触媒の閉塞が生じないように配慮した。また反応器側面部に点検フタを設け、触媒各段の状態を目視確認できる構造とした。反応器上流の接続ダクトには、CFD 解析の結果から整流板を内包することとした。

反応器本体の構造決定後、信頼性評価のため FEM 解析を実施した。FEM 解析では、反応器の固有振動数を求め、常用範囲に共振が起こるかを確認すると共に、共振が発生する場合には応答解析を行い、実船の振動条件下において強度上問題ないことを確認した。図 6.1.3.1 に FEM 解析の一例、製作中の反応器概観を示す。

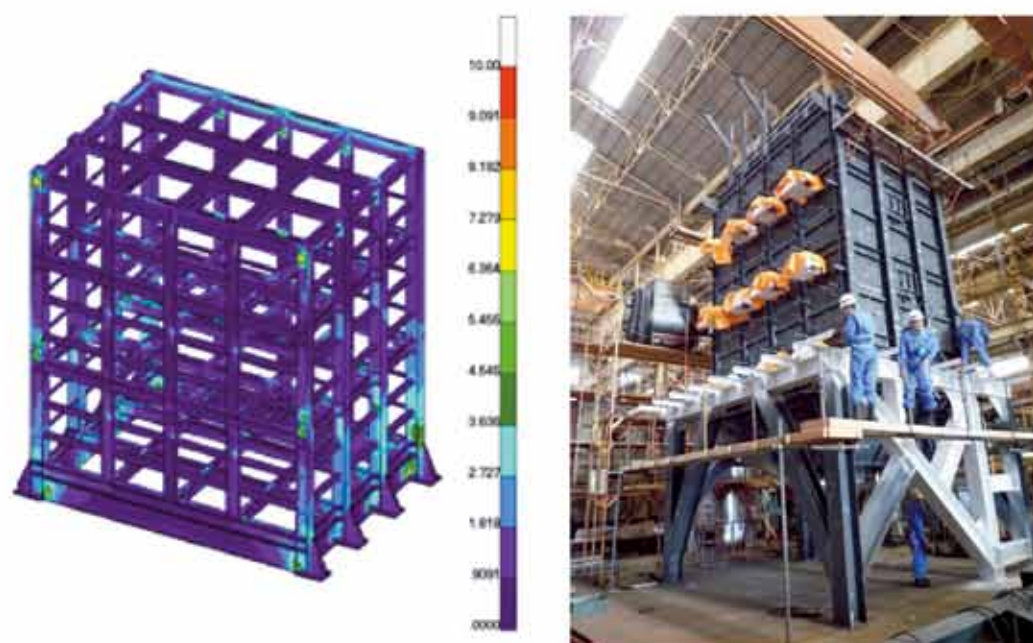


図 6.1.3.1 FEM 解析(左図)、製作中の反応器概観(右図)

## 2) 排ガスダクト系

前述したように SCR システムを従来の排ガス管ラインに組み入れる形ではなく、排ガス全流を分岐して完全に別系統を構成することとした。排ガスダクト系の概略図を図 6.1.3.2.1~2 に示す。

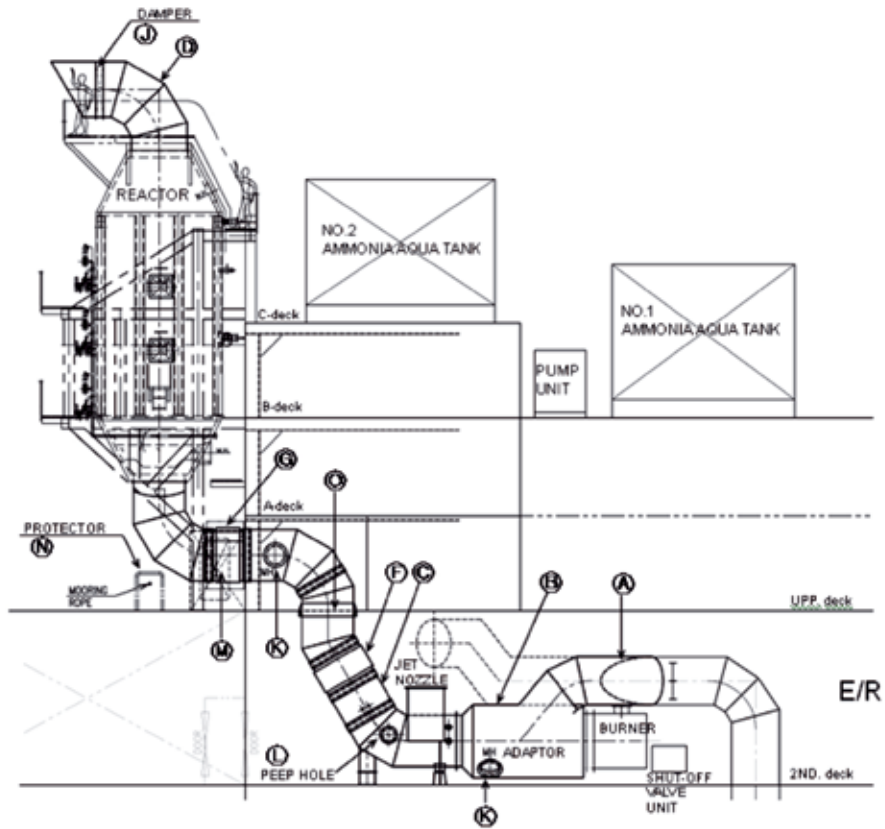


図 6.1.3.2.1 SCR 装置配置概要図 (側面図)

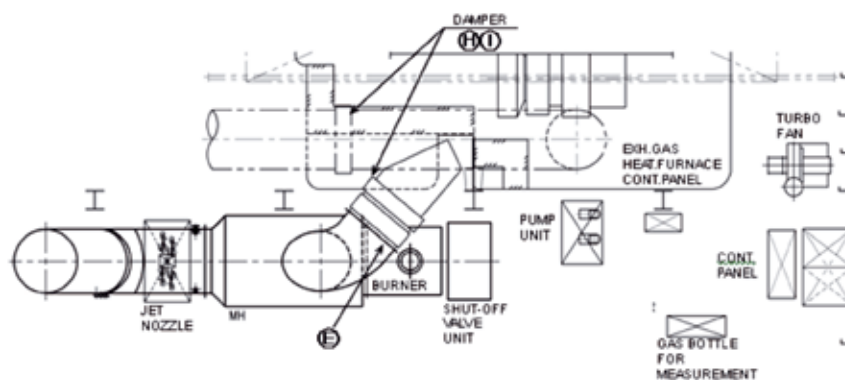


図 6.1.3.2.2 SCR 装置配置概要図 (2ND DK 平面図)

### 3) アンモニア水タンクユニット

アンモニア水に関連するシステム、装置については船級協会（NK）と安全上の観点から必要とされる項目を決定した。図 6.1.3.3 に概要を示す。

アンモニア水は劇物であることから、漏洩を考慮したシステムを要求された。アンモニア水が漏れた際に他へ流れてしまわないよう、供給ラインの漏洩対策として換気が可能な2重管構造と合わせて、タンクを別体のカバーで丸ごと覆う構造とした。タンク本体の材質はアンモニア水の腐食性を考慮してSUSとし、カバー（2重管部含む）は鋼板とする。万が一漏洩した場合には一旦カバーに溜めておき、外洋にて適切に処理するためのドレンラインを設けることとした。

タンク内のアンモニア水から揮発するアンモニアガスの対策としては、配置が暴露部であるため除害塔のような装置は不要で、排出を制御できるブリーザー弁を2個設置することとした（2次的措置）。ブリーザー弁から排出されるガスに対しての強制排気は不要であるが、ガスの分圧から試算した濃度から考えて、希釈排気ファンを設け、タンクユニット系外へ大気放出される際には十分低濃度となることとした。またアンモニア水漏洩後の立入り安全のため、タンクカバーおよび2重管部の全容量の空気を1時間に8回換気できる装置構成とした。タンクの耐圧については、NK鋼船規則N編4章 4.12.1を適用した。タンク容量は、1航海で60m<sup>3</sup>が必要であり、搭載船舶のデッキ上空間の制約から30m<sup>3</sup>タンクを2個とした。

アンモニア水関連システム構成

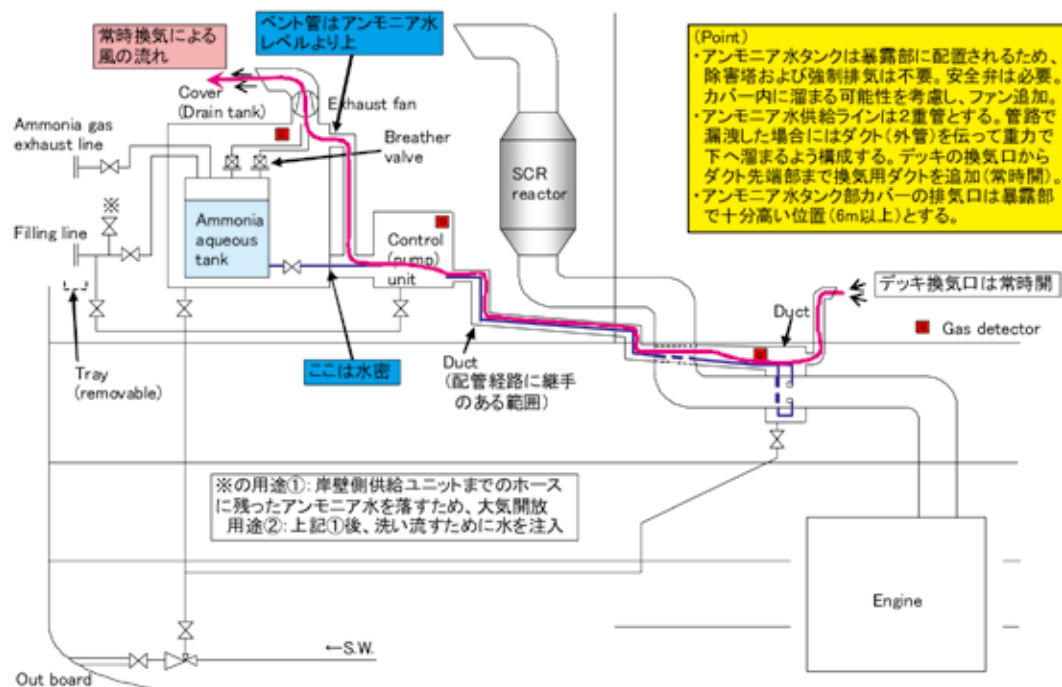


図 6.1.3.3 アンモニア水関連構成概要

#### 4) 還元剤供給系

アンモニア水濃度は25%とし、同型対象機関のNOx排出量から、単位時間当たりの必要アンモニア水が表6.1.3.4.1のように計算される。

表 6.1.3.4.1 アンモニア水注入量

項目	単位	負荷 100%値	備考
発生NOx量 (同型対象機関)	g/kWh	14.3	同型対象機関NOx鑑定データ NOx分子量：46 (NO2換算のため)
	kmol/h	3.70	
目標脱硝率	%	80	
アンモニア 必要量	kmol/h	2.96	リークアンモニアは0として概算 NH3分子量：17
	kg/h	50.4	
アンモニア水 注入量	kg/h	201	アンモニア水濃度：25%
	L/h	222	アンモニア水比重：0.906
	L/min	3.7	

これから、還元剤ポンプユニットとしての供給能力は定格4L/minとした。排ガス管径が1400Aと比較的大きいため、噴射ノズルを複数配置することとするが、配置の容易さ等を考慮して4個とし、これに対応するようにポンプを各1台配置するため、供給ポンプとしては1L/minのものが4台となる。またポンプユニットとしてはアンモニア水の噴霧に必要な圧縮空気の流量を制御する機構とし、尿素水を使用する場合も想定して洗浄用水ポンプを1台配置した。

ポンプユニット、供給配管とも既述のようにアンモニアが漏洩した場合を考慮して2重管化が必要だが、ポンプユニットについてはアンモニア水の流れる部分のみを独立した箱体とし、その他部品の扱いに影響がないよう配慮した。

アンモニア水配管に関しては、船級協会 (NK) から、貨物管ではないため、NK鋼船規則D編1.1.4規定の軽減から、設計圧力1MPa未満かつ設計温度230℃以下のためJIS規格で問題ないことを確認した。バルブ、継手類についても同規定から100A未満、設計圧力3MPa未満、設計温度230℃以下であるためJIS規格品で問題ないことを確認した。図6.1.3.4.2にポンプユニット概観を示す。



図 6.1.3.4.2 ポンプユニット概観

### 5) 還元剤噴射ノズルユニット

還元剤噴射ノズルは要素技術開発と同様に2流体ノズルを使用し、液体の還元剤を圧縮空気により排ガス管内に噴霧することでアンモニア気化を促進させる。ノズルユニット周辺のCFD解析の結果から、噴射ノズルは4個に分散する配置が必要で、それに付随する還元剤流路用電磁弁、噴霧用空気電磁弁、パージ用電磁弁および洗浄水用電磁弁と周辺配管・継手類をユニット化し液溜り等の動作不良につながる事象を避けるよう構成した。図6.1.3.5に還元剤噴射ノズルユニットCFD解析の一例、ノズル概観を示す。



図 6.1.3.5 還元剤噴射ノズルユニットCFD解析(左図)、ノズル概観(右図)

### 6) 昇温バーナー

要素技術開発の結果から、250℃レベルの低温ディーゼル排ガスの還元脱硝では燃料中S分の影響で酸性硫酸が生成し、脱硝性能が経時的に低下して行く知見を得たため、加熱再生手段により性能低下を抑えるシステム構成とする。

バーナーとしては陸上で実績のある排ガス加熱炉を流用し、省スペースで効率よく燃焼してディーゼル排ガスを加熱できるように、CFD解析によりシステムを最適化した。

安全性を考慮し、失火を検知するフレイムアイを設置、失火を検知したらすぐにバーナー用燃料ポンプを止める制御を行うシステムとした。また、未燃燃料等の堆積を防ぐために、バーナー燃焼前後にプレパージ/ポストパージを入れ、火災に至る危険を排除する。また、バーナーの火炎が主機の排ガスラインに届かないよう、燃焼炉(アダプタ含む)内にて完全燃焼するシステムとした。

図6.1.3.6に昇温バーナーの燃焼試験の様子を示す。



図 6. 1. 3. 6 昇温バーナー燃焼試験

## 7) 制御系

SCR システム全体を制御する制御盤、昇温バーナーの制御盤、スーツプロワの制御盤の3つの制御盤と必要なセンサ類で構成した。昇温バーナーおよびスーツプロワの運転指令はSCR制御盤より出す。また、警報等で一部運転室との情報のやりとりが必要なため、これもSCR制御盤にてI/Oを一括する。図6.1.3.7に制御系システム構成図を示す。

アンモニア水注入量の制御は基本的にはエンジン回転数によるマップ制御とし、これにSCR反応器前後でのNOx濃度から計算される脱硝率により微調整のF/Bを入れることとした。また、全体に噴射量を変更する場合には、ポンプストロークを手動で微調整することもできる構成としている。

なお、排ガス管路の切替ダンパの操作もSCR制御盤で行うが、メインライン/バイパスラインのどちらかの管路が常に開いている条件で開閉動作を行うことで、エンジンの緊急停止等の危険を回避する。

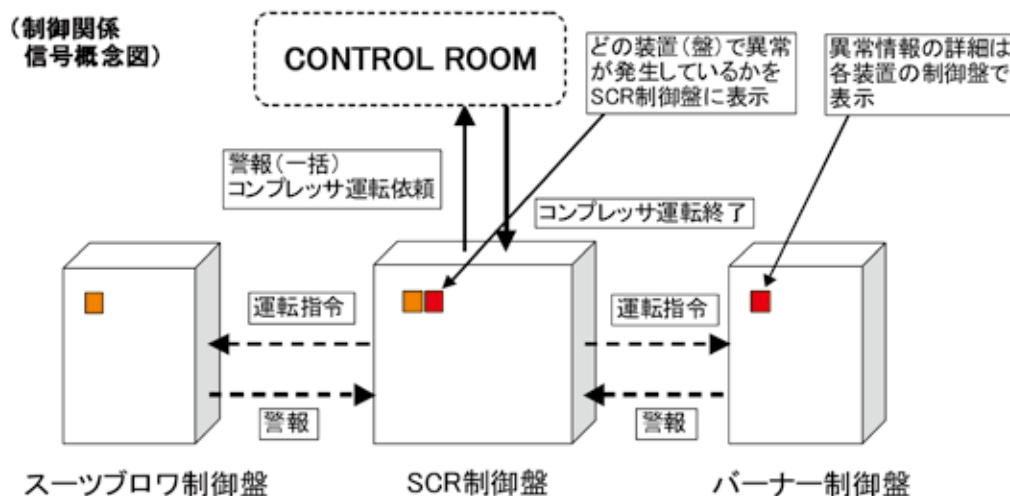


図 6. 1. 3. 7 制御系システム構成図



## 8) 計測系

排ガス量算出およびNO<sub>x</sub>濃度を計測し脱硝性能を計算するため、SCR反応器後にガスサンプリング方式の多成分排ガス分析計を設置した。ガス量を算出するために反応器上流でCO/CO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>/O<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>を、反応器下流でNO<sub>x</sub>/O<sub>2</sub>を計測する。また温度、圧力も各点で随時計測する。排ガス分析計の仕様を下記表 6.1.3.8 に示す。

表 6.1.3.8 排ガス分析計仕様

testo 350-MARITIME						
対象	O <sub>2</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
方式	ガルバニ電池式	定電位電解法	定電位電解法	定電位電解法	NDIR	定電位電解法
計測範囲	0~25vol%	0~3000ppm	0~500ppm	0~3000ppm	0~40vol%	0~3000ppm
計測精度	GL認定型式NO <sub>x</sub> テクニカルコードの設定値と同じ					

## 6.1.4 SCR装置搭載

製作したSCR装置を本船へ搭載した。搭載後の本船の概観を図 6.1.4 に示す。



図 6.1.4 SCR装置搭載後の本船概観

## 6.2 アンモニア水搭載

SCR の海上試運転および実船試験で使用する量を本船引渡し前に全量搭載することとした。

### 6.2.1 アンモニア水

実船試験で使用するアンモニア水の性状を表 6.2.1 に示す。実船試験でも、東京海洋大学で実施した要素試験と同様に 25%アンモニア水を使用することとした。

表 6.2.1 アンモニア水の性状

項目	単位	品質規格	2/12 搭載分	3/12, 13 搭載分
比重(t/4℃)	—	—	0.9069	0.9057
濃度	%	≥25.0	25.32	25.35
強熱残分	%	≤0.005	<0.001	<0.001
塩化物	%	≤0.001	<0.0001	<0.0001

(宇部興産株検査成績書より)

### 6.2.2 ポンプユニット

本船上のアンモニア水タンクにアンモニア水を搭載する為に、図 6.2.2.1 に示すポンプユニットを製作した。ポンプユニットは、補給タンク、補給ポンプ、廃液タンク、スクラバで構成され、タンクローリからのアンモニア水を一時補給タンクに溜め、補給ポンプで本船上のアンモニア水タンクに送り込む構造システムになっている。また、補給タンク等に溜まったアンモニアガスはスクラバで処理され、補給タンクや供給用ホース内に残留したアンモニア水は、廃液タンクに溜められるようになっている。



図 6.2.2.1 ポンプユニット

### 6.2.3 搭載作業

本船へのアンモニア水搭載作業は、下記の日程で大島造船所内で実施した。

SCR 海上試運転用：平成 23 年 2 月 12 日

実航海試験用：平成 23 年 3 月 12、13 日

搭載作業は、本船を岸壁に接岸し、岸壁に設置したポンプユニットと本船上のアンモニア水タンクを 120m の供給用ホースで接続し、タンクローリからのアンモニア水を一時補給タンクに溜め、補給ポンプで本船上のアンモニア水タンクに搭載した。(図 6.2.3.1 参照)



図 6.2.3.1 アンモニア水搭載作業

なお、本船へのアンモニア水の搭載量は表 6.2.3.2 の通りである。

表 6.2.3.2 アンモニア水の搭載量

	搭載量 [kL]
NO.1 タンク	27.6
NO.2 タンク	32.1
合計	59.7

### 6.3 その他 (保護具等)

本船の FIRE STATION 内に保護具としてガスマスク、アンモニア水中和用ホウ酸、ゴム手袋、防護服を準備した。

## 7. 海上試運転

搭載した SCR システムが正常に作動するかどうかを確認するため、本船引渡し前に海上試運転を実施した。

### 7.1 試運転方案

表 7.1.1 に海上試運転にて確認する項目を、図 7.1.2 に海上試運転スケジュールを示す。事前の計画では表 7.1 にある SCR 性能区分のみの予定であったが、本船上にて船主殿よりご要望が出たため、本船への影響および安全に関する確認項目を追加で実施することとした。

海上試運転ではまず単体作動確認を行ってきた SCR 関連搭載機器がシステムとして組み合わせて正常に作動するかを確認することと、排ガスを通さないと本動作することができない昇温バーナーの燃焼について、それぞれ基本性能を確認することとした。昇温バーナーについてはエンジン回転数を 75% 負荷相当から 25% 負荷相当まで下げた際の追従性についても確認し、計画した制御パラメータで温度高による自動トリップに陥らないことを確認した。

またスーツブローによる空気タンク圧力低下に伴うコンプレッサの自動起動と圧力が復帰するまでの時間と、アンモニアガス検知器を模擬入力により強制的にトリップさせシステムが安全側に動作するロジックになっているかを確認した。

表 7.1.1 海上試運転確認項目

区分	運転項目	確認内容	備考
SCR 性能	シーケンス動作確認	SCR 制御盤による自動運転が正常に作動することを確認	
	昇温バーナー定常性能	常用負荷近辺で昇温バーナー能力について確認	
	昇温バーナー過渡応答	エンジン回転数を変動 (75→25%) させ、燃焼が追従することを確認	
	昇温バーナー低負荷安定性	負荷 25% 相当エンジン回転数時にバーナー燃焼の安定性を確認	
本船への影響	スーツブロー	ブロー→コンプレッサ運転にて元空気タンクの圧力上昇、に必要な時間を確認	本船上にて追加項目
安全	アンモニアガス検知	緊急時を想定し、アンモニアガス検知器に模擬入力にてシステムがトリップすることを確認	本船上にて追加項目

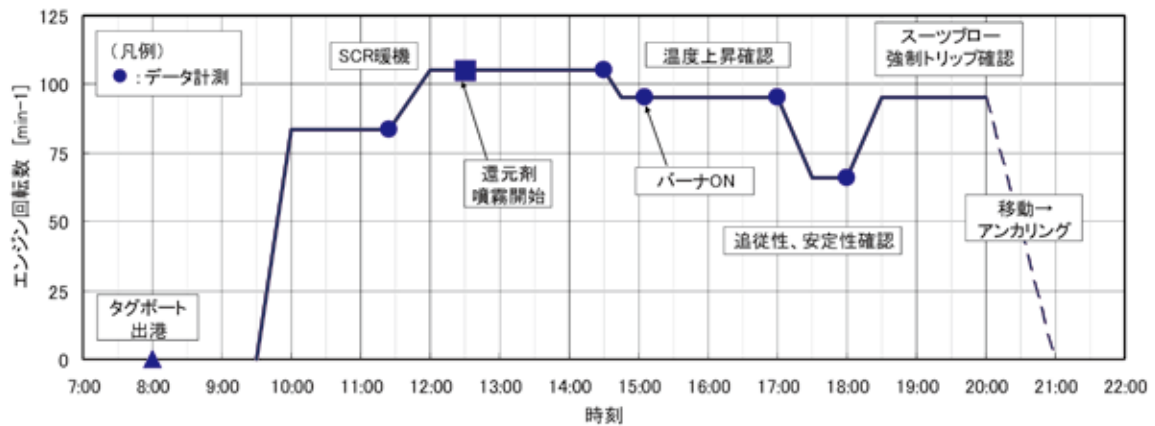


図 7.1.2 海上試運転スケジュール

<海上試運転実施日> 2011年2月17日

前日は本船の公式試運転のため(株)大島造船所には戻らず、白瀬沖までタグボートで移動し沖にて本船に乗り込むこととした。

## 7.2 試運転結果

海上試運転結果の一覧を表 7.2 に示す。

表 7.2 海上試運転結果一覧

区分	
SCR 性能	SCR システムの制御は問題なく、自動運転できることを確認した。
	脱硝性能については還元剤供給ポンプの不調により規定流量が得られなかったため、参考。
	昇温バーナーについては定常燃焼、変動追従性ともに問題なく制御できることを確認した。
本船への影響	スーツブロー時の空気タンク圧力低下状態からのコンプレッサ起動による復帰時間は、2台同時起動により20min程度であった。圧力低下はほぼ計算通りであった。
安全	アンモニアガス検知器模擬入力による強制トリップで、排ガス切替ダンパが正常に切り替わること及び還元剤供給ポンプが停止することを確認した。

## 8. 実船試験

実船試験は、日本郵船株所有の石炭運搬船「INITIAL SALUTE」において、2011年6月17日～6月30日、愛知県碧南市衣浦港からオーストラリアのニューキャッスルに至る14日間の航路で実施した（図8）。

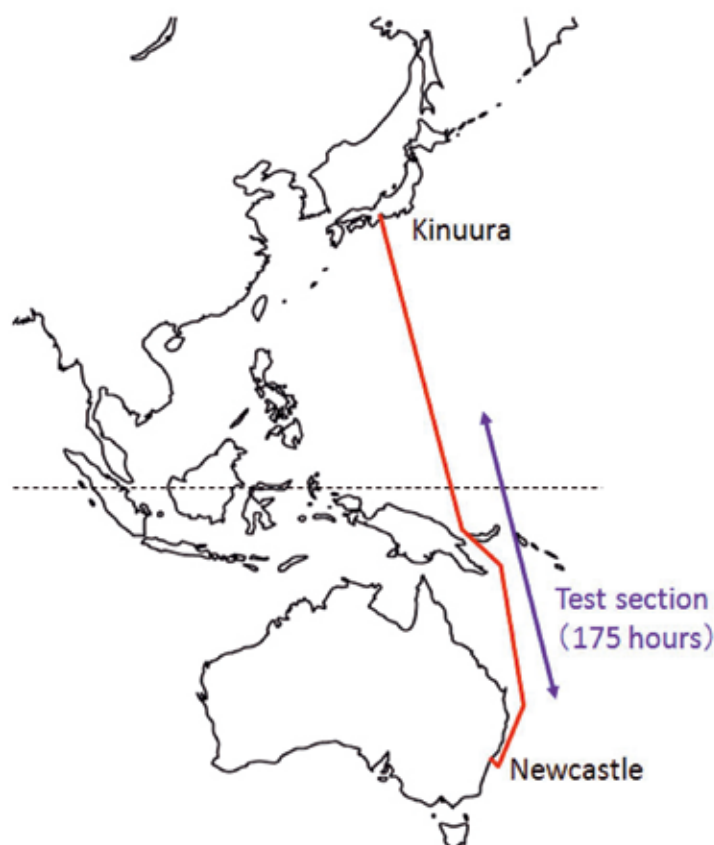


図8 衣浦－ニューキャッスル航路

### 8.1 試験運転方案

表 8.1.1 は、試験開始前に検討した試験スケジュールである。出港直後の SCR の動作確認を兼ねた基礎性能試験を除き、最初の6日間に SCR の試験は行わず、7日目以降で集中的に行う計画であった。なお、これらの試験スケジュールは、アンモニア水及びA重油の消費量から決定した。

SCR の試験は、基礎性能試験、定常運転、劣化・再生運転並びに非定常運転の4種類を実施することとした。表 8.1.5 にそれらの概要を示す。

#### 1) 基礎性能試験

出港直後に行う基礎性能試験は、還元剤ポンプ等の構成機器や排ガス計測器の動作を確認し、SCR が適切に脱硝することを確認するために実施した。試験では、モル比を0.2～1.2の範囲で1時間ごとに変化させて、そのときの脱硝性能を確認した（表 8.1.5(1)参照）。

## 2) 定常運転

定常運転における試験は、IMO の NOx Technical Code 2008 に規定されている船用主機関のテストサイクルと同様に、25%、50%、75%、100%の各負荷率に相当する機関回転数において排ガス計測を行った。ただし、本実船試験はバラスト状態での航行であったため、実際の負荷はやや低い値となっていたと考えられる。排ガスの温度条件としては、昇温バーナーを使用しない状態、昇温バーナーを使用して排ガス温度を 280～300℃に過熱した状態を計画した（表 8.1.5(2)、図 8.1.2 参照）。

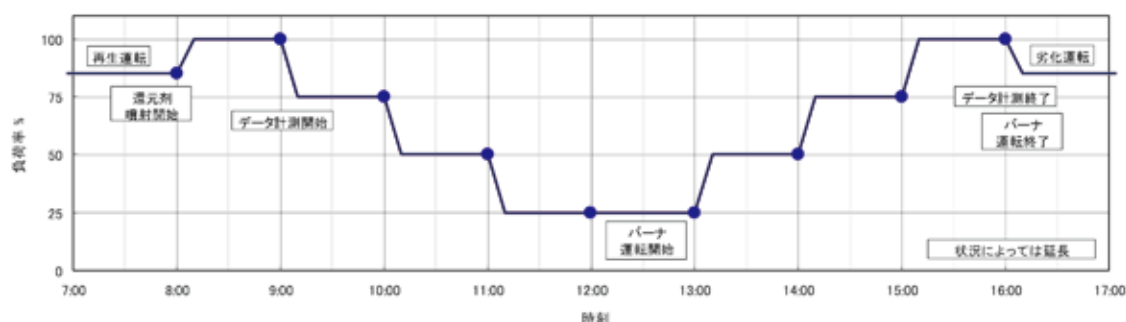


図 8.1.2 定常運転

## 3) 劣化・再生運転

劣化・再生運転は、昇温バーナーを使用しない状態で 12 時間の連続運転（劣化運転）を行った後、排ガスを昇温バーナーによって約 350℃まで加熱し、4 時間の触媒の再生運転を行い、再生の効果を調べる試験を計画した（表 8.1.5(3) 参照）。このときの主機関の負荷率は通常航行の 75～85%を想定した。

## 4) 非定常運転

非定常運転は船舶の入出港を模擬した試験であり、機関回転数を通常航行の 99.5rpm（負荷率 85%）から、Full の 76.7rpm（負荷率 39%）、Half の 59.3rpm（負荷率 18%）、Slow の 43.3rpm（負荷率 7%）、Dead Slow の 32.6rpm（負荷率 3%）に段階的に変化させることとした（表 8.1.5(4)、図 8.1.4 参照）。試験においては、昇温バーナーの有無等により、SCR の動作や脱硝性能の変化を確認する計画とした。

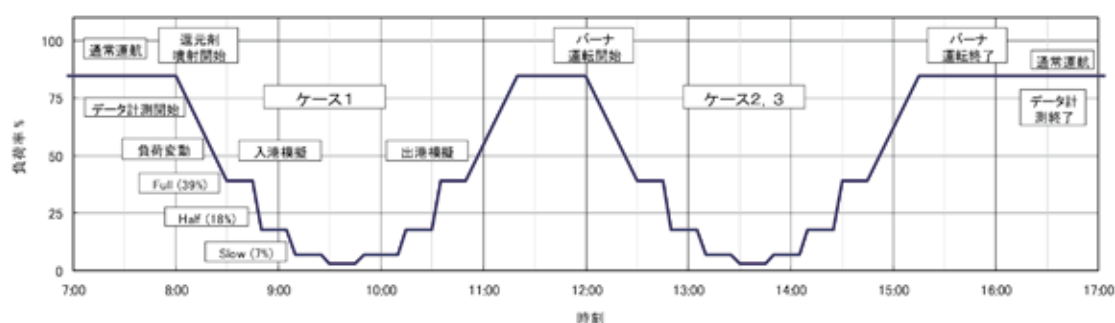


図 8.1.4 非定常パターン

表 8.1.1 試験スケジュール

日付	時間帯	SCR 実験	NH3 水 [t]	A 重油総消費量 [t]	A 重油(主機) [t]	A 重油(バーナ) [t]	A 重油(発電機) [t]	備考
1	0:00~4:00			7.59	7.29	0.00	0.30	A 重油で出港
	4:00~8:00			7.59	7.29	0.00	0.30	SCR 暖気
	8:00~12:00	動作確認・基礎性能試験	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	12:00~16:00	(一定負荷運転が可能となった時点で	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	通常運転(可能な限り負荷率一
	16:00~20:00	SCR 運転開始)	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	定)で、還元剤量を変化させて運転
	20:00~24:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
2~6	0:00~4:00			C 重油運				通常運転
	4:00~8:00			転				
	8:00~12:00							
	12:00~16:00							
	16:00~20:00							
	20:00~24:00							
7	0:00~4:00	劣化・再生運転(16h)	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	4:00~8:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	状況によって基礎性能試験を実施
	8:00~12:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	12:00~16:00		1.02	9.08	7.29	1.49	0.30	
	16:00~20:00	劣化・再生運転(16h)	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	20:00~24:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	状況によって基礎性能試験を実施
8	0:00~4:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	4:00~8:00		1.02	9.08	7.29	1.49	0.30	
	8:00~12:00	定常運転(ケース 1, 1 回目, 4h)	0.74	5.64	5.34	0.00	0.30	別紙線図参照
	12:00~16:00	定常運転(ケース 2, 4h)	0.74	6.73	5.34	1.09	0.30	
	16:00~20:00	劣化・再生運転(16h)	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	20:00~24:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	定常運転時間延長の可能性あり
9	0:00~4:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	4:00~8:00		1.02	9.08	7.29	1.49	0.30	
	8:00~12:00	定常運転(ケース 1, 2 回目, 4h)	0.74	5.64	5.34	0.00	0.30	別紙線図参照
	12:00~16:00	定常運転(ケース 3, 4h)	0.74	6.73	5.34	1.09	0.30	
	16:00~20:00	劣化・再生運転(16h)	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	20:00~24:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	定常運転時間延長の可能性あり
10	0:00~4:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	4:00~8:00		1.02	9.08	7.29	1.49	0.30	
	8:00~12:00	定常運転(ケース 1, 3 回目, 4h)	0.74	7.59	7.29	0.00	0.30	別紙線図参照
	12:00~16:00	定常運転(ケース 4, 4h)	0.74	7.59	7.29	0.00	0.30	
	16:00~20:00	劣化・再生運転(16h)	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	20:00~24:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	定常運転時間延長の可能性あり
11	0:00~4:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	4:00~8:00		1.02	9.08	7.29	1.49	0.30	
	8:00~12:00	非常パターン(ケース 1, 4h)	0.49	3.79	3.49	0.00	0.30	別紙線図参照
	12:00~16:00	非常パターン(ケース 2, 4h)	0.49	4.50	3.49	0.71	0.30	
	16:00~20:00	劣化・再生運転(16h)	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	20:00~24:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
12	0:00~4:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	4:00~8:00		1.02	9.08	7.29	1.49	0.30	
	8:00~12:00	非常パターン(ケース 1, 4h)	0.49	3.79	3.49	0.00	0.30	別紙線図参照
	12:00~16:00	非常パターン(ケース 3, 4h)	0.49	4.50	3.49	0.71	0.30	
	16:00~20:00	劣化・再生運転(16h)	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	別紙線図参照
	20:00~24:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
13	0:00~4:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	4:00~8:00		1.02	9.08	7.29	1.49	0.30	
	8:00~12:00	非常パターン(ケース 1, 4h)	0.49	3.79	3.49	0.00	0.30	別紙線図参照
	12:00~16:00	非常パターン(ケース 2, 4h)	0.49	4.50	3.49	0.71	0.30	
	16:00~20:00	劣化・再生運転(16h)	1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	20:00~24:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
14	0:00~4:00		1.02	7.59	7.29	0.00	0.30	
	4:00~8:00		1.02	9.08	7.29	1.49	0.30	
	8:00~12:00	非常パターン(ケース 1, 4h)	0.49	3.79	3.49	0.00	0.30	別紙線図参照
	12:00~16:00	非常パターン(ケース 3, 4h)	0.49	4.50	3.49	0.71	0.30	
	16:00~20:00			C 重油運				
	20:00~24:00			転				
合計 [t]			44.95	373.3	340.9	16.93	15.56	往路の使用量小計



表 8.1.5 各 SCR 試験の概要

(1) 基礎性能試験								
運転時間(h)	1	1	1	1	1	1	1	1
負荷(%)	75~85%(可能な限り一定)							
補助プロア(台)	0	0	0	0	0	0	0	0
排気ガス温度(°C)	排ガス温度そのまま							
還元剤当量比(%)	20	40	60	70	80	90	100	120

(2) 定常運転								
運転時間(h)	1	1	1	1	1	1	1	1
負荷(%)	100	75	50	25	25	50	75	100
補助プロア(台)	0	0	0	1	1	0	0	0
排気ガス温度(°C)								
ケース1(バーナなし)	排ガス温度そのまま							
ケース2(バーナあり)	280°C							
ケース3(バーナあり)	300°C							
ケース4(バーナあり)	(280°C)ケース2, 3の結果を踏まえて決定							

(3) 劣化・再生運転								
運転時間(h)	12				4			
負荷(%)	75				75			
補助プロア(台)	0				0			
排気ガス温度(°C)								
ケース1(バーナなし)	排ガス温度そのまま							
ケース2(バーナあり)	350°C							
備考	通常脱硝				再生			

(4) 非定常パターン								
運転時間(h)	2	2	2	2	2	2	2	2
負荷(%)	85→Dead Slow		Dead Slow→85		85→Dead Slow		Dead Slow→85	
補助プロア(台)	0	2	2	0	0	2	2	0
排気ガス温度(°C)								
ケース1(バーナなし)	排ガス温度そのまま							
ケース2(バーナあり)	280°C							
ケース3(バーナあり)	300°C							

## 8.2 実船試験結果

本船に試験要員が乗船し、実船試験を以下のとおり実施した。

試験期間：2011年6月17日～6月30日(14日間)

航路：愛知県碧南市衣浦港→オーストラリア ニューキャッスル

本試験で使用したアンモニア水の性状分析結果を表 8.2 に示す。

表 8.2 アンモニア水 性状分析結果

採取日：2011年6月29日

項目	単位	分析結果
濃度	%	24.5
比重	—	0.91

### 8.2.1 基礎性能試験結果

基礎性能試験では、SCR装置の性能を把握するために、機関回転数を一定に保った状態(75%負荷の回転数)でモル比を0.2から1.2まで約1時間毎に徐々に上昇させ、脱硝率の変化を確認した。その結果、モル比の上昇にほぼ比例して脱硝率も上昇し、モル比1.0でほぼ100%の脱硝率が得られることを確認した。(図 8.2.1)

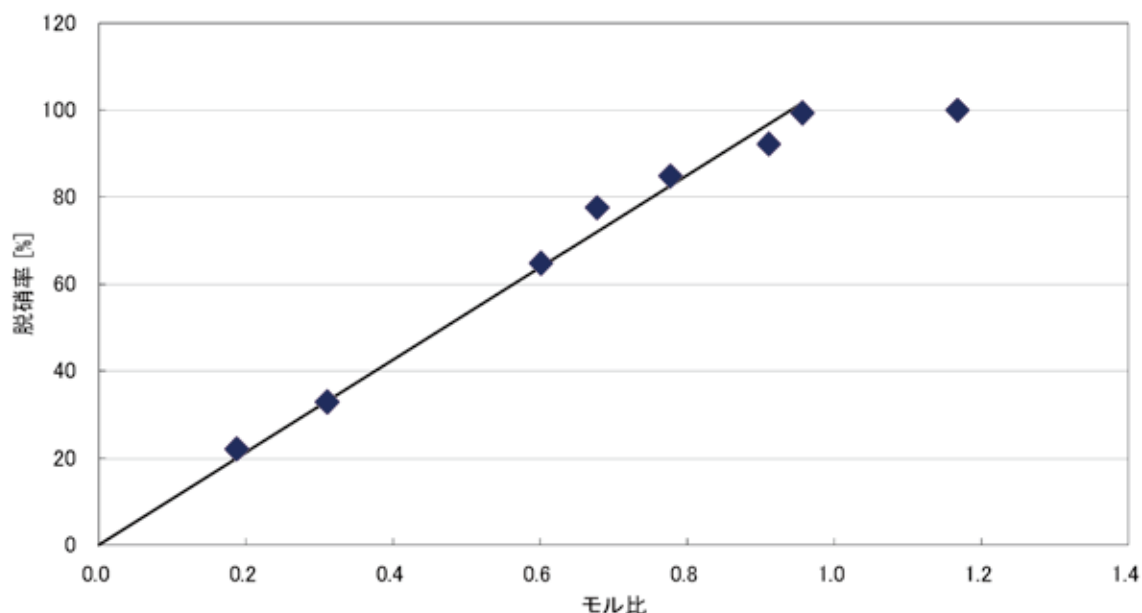


図 8.2.1 基礎性能試験結果

### 8.2.2 定常運転結果

定常運転の試験条件を表 8.2.2.1 に示す。定常運転では、船用特性上の 25%、50%、75%、100% 負荷の各回転数において計測を実施した。なお、試験運転方案 (表 8.1.5(2)) では反応器入口の排ガス温度を未調整 (ケース 1)、280°C に昇温バーナーで昇温 (ケース 2)、300°C に昇温バーナーで昇温 (ケース 3) の 3 ケースで試験を行う予定であったが、未調整 (ケース 1) の状態で排ガス温度が 280°C を上回る負荷があったため、280°C に昇温するケース 2 は実施せず、300°C に昇温するケース 3 のみを実施した。

表 8.2.2.1 定常運転の試験条件

負荷	100% 相当	75% 相当	50% 相当	25% 相当	25% 相当	50% 相当	75% 相当	100% 相当
定常運転①	ケース 1 排ガス温度そのまま				ケース 1 排ガス温度そのまま			
定常運転②	ケース 1 排ガス温度そのまま				ケース 3 排ガス温度 300°C (バーナー使用)			
定常運転③	ケース 1 排ガス温度そのまま				ケース 1 排ガス温度そのまま			

定常運転では、いずれの試験条件においても 80% 以上の脱硝率を確認した。結果の一例を図 8.2.2.2 に示す。

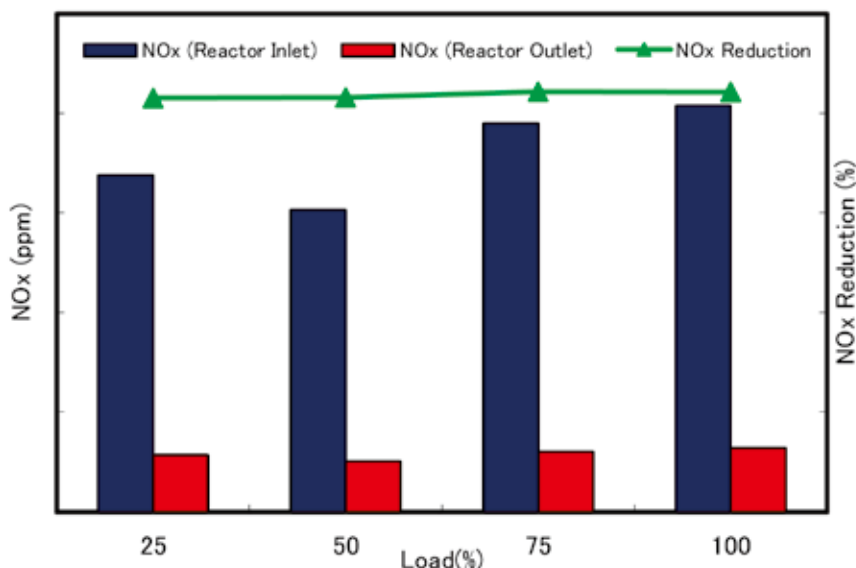


図 8.2.2.2 定常運転結果

### 8.2.3 劣化再生運転結果

劣化再生運転では、機関回転数一定(75%負荷の回転数)で、昇温バーナーを使用しない脱硝運転を12時間、昇温バーナーで350℃に昇温した排ガスで触媒を再生しながらの脱硝運転を4時間実施し、これを複数回繰り返した。本試験では、再生の効果が確認できるほど、触媒は劣化しておらず、脱硝率の低下を招かずに継続的に運転ができた。

### 8.2.4 非定常運転結果

非定常運転の試験条件を表8.2.4.1に示す。非定常運転では、入出港を模擬して回転数を通常運航状態(85%負荷)からDead Slowまで徐々に低下させて、その後再び通常運航状態まで上昇させる運転を行い、それぞれの負荷において計測を実施した。なお、排ガスを280℃に昇温するケース2及び300℃に昇温するケース3については、排ガス温度が280℃または、300℃以下になった場合のみ昇温バーナーを使用し、排ガス温度をそれぞれ280℃、300℃に調整した。

表 8.2.4.1 非定常運転の試験条件

負荷	85%相当→Dead Slow→85%相当	85%相当→Dead Slow→85%相当
非定常運転①	ケース1 排ガス温度そのまま	ケース1 排ガス温度そのまま
非定常運転②	ケース1 排ガス温度そのまま	ケース2 排ガス温度280℃(バーナー使用)
非定常運転③	ケース1 排ガス温度そのまま	ケース3 排ガス温度300℃(バーナー使用)
非定常運転④	ケース1 排ガス温度そのまま	ケース2 排ガス温度280℃(バーナー使用)

非定常運転の結果から、昇温バーナーを使用していない場合でも、還元剤の制御を正確に行なえば、入出港時のような負荷変動があり、排ガス温度が大きく低下する低負荷域でも、80%以上の脱硝率を維持できることが確認できた。また、昇温バーナーで排ガスを昇温することで、排ガス温度が低下する低負荷域において、より高い脱硝率が得られた。

### 8.3 実船試験時装置状況

実船試験時の各装置の状態について運転 3.3-1) 以降に示す。

#### 1) 反応器

SCR 起動後、反応器の暖機運転を実施した。暖機運転は、噴霧可能温度として指定した反応器出口温度が 240℃以上となるまで実施した。暖機時の反応器出口の排ガスを確認すると、褐色煙が排出されていることが判明した。褐色煙は、排ガスの成分と色から NO<sub>2</sub> が原因と推定される。

#### 2) 排ガスダクト系

実船試験前に排ガスダクト系の内部点検を実施した。排ガスダクト内には付着及び堆積物があった。分析の結果、付着及び堆積物は硫酸化合物であることが分かった。硫酸化合物は、SCR 未使用期間（本船就航後約 3 ヶ月間）における C 重油燃料での運転中に SCR の流路切替ダンパから排ガスが若干漏れ、漏れた排ガス中に含まれる SO<sub>3</sub> が酸露点の関係により硫酸化合物として析出したことが原因と考えられる。

### 8.4 実船試験装置確認結果

実船試験装置の実航海後の状態確認及び性能面での評価を実施した。詳細を 8.4-1) 以降に示す。

#### 1) 反応器

反応器内に設置した触媒パックについて、実船試験後に反応器を開放し点検を実施した。触媒パックは、実航海を想定した振動試験結果を反映して製作したため、実航海運転において若干の変色及び微少な触媒の割れはあるが、良好な状態であった。また、触媒の割れは、スーツブロワ使用時に冷たい空気によって触媒が急冷された際の熱衝撃によって発生したと考えられる。

また、反応器内の触媒パックのフレーム及びスーツブロワについては、錆の発生が確認された。錆は発生しているが、実使用には問題ないレベルであった。試験後の反応器内部を図 8.4.1 に示す。

反応器外に設置したスーツブロワは、実使用には問題なかったが、外部に設置した装置であるため、塩害等による腐食によりスーツブロワ本体の塗装割れ、リミットスイッチの固着等が発生した。対策として、再塗装、固着除去を実施した。今後、実用化に向けて、実使用における耐久性向上のため、スーツブロワ本体の配置検討、塗装仕様検討が必要になってくる。



図8.4.1 反応器内部状況

## 2) 排ガスダクト系

排ガスダクト系は漏れの発生、配管の割れ、表面の断熱性能に問題無く良好な状態であった。試験後の内部検査を実施した結果、内部にアンモニア由来の付着物無く、良好な状態であった。排ガスダクト系の状態を図8.4.2に示す。

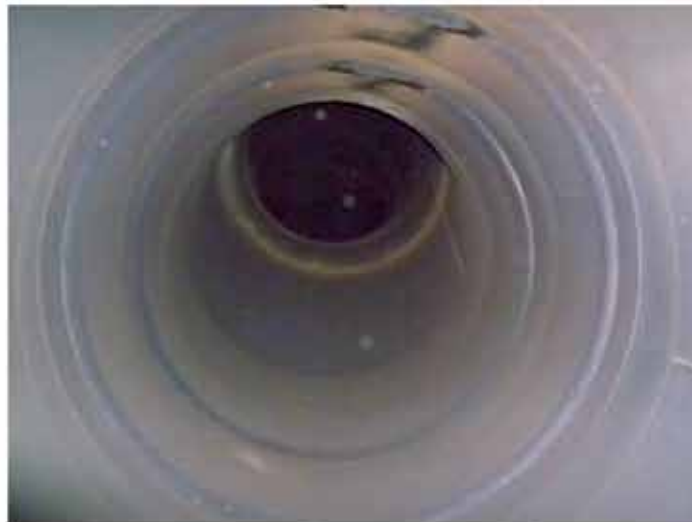


図8.4.2 排ガスダクト内部

## 3) アンモニア水タンクユニット

アンモニア水タンクユニット内の空調機器は、タンクにアンモニア水を供給した後に常時運転させ、タンク内の冷却を行った。タンク性能は、タンク内温度変化ではなく、脱硝に関係のあるアンモニア水濃度で評価を行う。ここで、アンモニア水供給(H23年3月)及び実航海試験後(H23年6月)のアンモニア水濃度を表8.4.3に示す。

アンモニア水供給から実航海試験終了までの約3ヶ月間、本船は赤道付近(外気温45℃)を航行することもあったが、アンモニア水濃度の低下は1%以下であった。試験時には、アンモニア水濃度低下が脱硝性能に影響を及ぼすことなく、結果としてアンモニア水タンクユニットの性能が実用上問題ないレベルであることが確認できた。

表 8.4.3 アンモニア水濃度変化

日時	アンモニア水濃度 (%)
アンモニア水供給(H23年3月)	25.3
実航海試験後(H23年6月)	24.5
差	-0.8

#### 4) 還元剤供給系

試験時、還元剤ポンプユニット内の電磁弁の詰まりが発生する等のトラブルはあったが、供給ポンプ性能、熱交換器性能が実用上問題無いことが確認できた。

試験後のポンプユニット内点検においても、内部に若干の錆が見られるものの、性能とは無関係な箇所であったため問題無し。

#### 5) 還元剤噴射ノズルユニット

試験時、還元剤噴射ノズルユニットはノズル孔の詰まり、アンモニア水の漏れ無く正常に使用できた。試験後に点検を実施したところ、排ガスの還元剤噴射ノズルユニット表面に変色があるが、性能とは無関係な箇所であったため問題無し。試験後の還元剤噴射ノズルユニットを図8.4.5に示す。

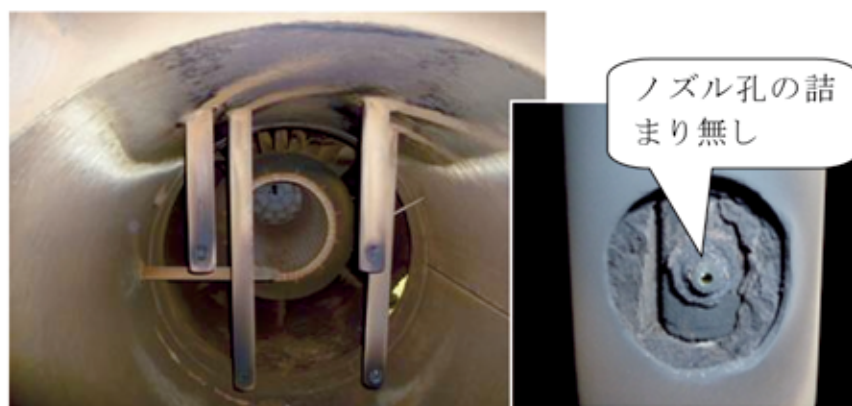


図 8.4.5 還元剤噴射ノズルユニット

#### 6) 昇温バーナー

試験後に昇温バーナー内部を確認したところ、耐熱煉瓦の細かな破片はあるが、大きな割れも無く、使用上問題ないレベルであった。試験後の昇温バーナー内部の様子を図 8.4.6 に示す。



図 8.4.6 昇温バーナー内部

#### 7) 制御系

搭載後の作動試験、海上試運転において制御系の動作確認を実施していたため、実船試験時には問題なく動作した。ただし、実船試験時は、本船が空荷(主機にとっては低負荷)のためか、各回転数にて当初予定していた NOx 排出量よりも少なかったため、還元剤投入量を手動にて調整する必要があった。今後、制御面では検討が必要であるが、アンモニア水を用いた SCR システムとしては、実用化レベルであると判断する。

#### 8) 計測系

実船試験のシステムでは、NOx センサ、多成分排ガス計測器の 2 系統の計測器にて計測を実施した。



## 8.5 まとめ

実船試験では、要素研究開発の成果を基にして、実船適用のフルスケール装置を設計・製作・搭載し、さらに制御システムを構築し実際に実運航時に実船試験計測を実施した。

実船適用のフルスケール装置の設計では、装置の強度解析、排ガス管内の流れ解析により、装置の信頼性評価、最適化を実施した。製作時には耐圧試験等を実施し、装置の信頼性を確認した。

本船に製作した装置を搭載後、機器の単体作動確認、海上試運転を実施し、SCRシステムとして作動することを確認した。排ガスを通さないと本動作することができない昇温バーナーについては、昇温性能だけでなく主機の負荷変更時の追従性についても確認することが出来た。制御面においては、切替バルブの制御、還元剤噴霧の制御、トリップ時の動作についてもロジック通り作動することを確認した。

実船試験計測では、還元剤として25%アンモニア水を用いた脱硝装置の性能計測を実施した。結果として、IMO NOx Tier III規制に適合出来るレベルであることを確認した。また、劣化再生試験において触媒の劣化度合、再生度合を確認したが、低SV値、高ガス温度のため劣化が進まず、再生性能の確認は出来ていない。但し、昇温バーナーを用いて排ガスを触媒再生に必要とされる350℃に加熱出来ることを確認出来たため、触媒が劣化したとしても再生可能であると言える。

装置単体の評価としては、昇温バーナーの耐火材や触媒に微少な割れ、その他装置の錆等は見られたが、装置の重大な故障も無く試験を実施して性能確認することが出来たため、装置としても実用化レベルにあると言える。

実使用面では、起動時の褐色煙、外部に設置した装置の腐食・故障があり、これらは実用化までに克服しなければならない課題となっている。

## 9. 開発成果

### 9.1 成果

本研究開発事業は、平成 19 年度(2007 年度)から平成 22 年度(2010 年度)上期までの 3 年半の期間で実施された要素技術開発と、平成 21 年度(2009 年度)から平成 23 年度(2011 年度)までの 3 年の期間で実施された実船試験で構成される。

要素技術開発の初年度は準備段階であり、試験計画を中心に実施し、2 年目は東京海洋大学の実験機関に全量の排ガスに対応できる SCR を製作して取り付け、実験を行った。3 年目は前年度の試験結果を受け、更に可能性の追求を行うために実験機関の排ガスを分流して、4 種類の条件下における試験を同時に実施する装置を製作し、実験を行った。最終年度ではこれまでの試験結果とその考察をまとめ、報告書を作成すると共に、既にスタートしている実船試験の研究事業への提言も行った。

本研究開発事業を開始する時点において、大型 2 ストローク機関などの低速ディーゼル機関では排ガス温度が低いため、また使用する燃料の硫黄分が高いため、中速機関と同様な過給機後流側への SCR の設置は無駄な試みであるとの見方が一般的であった。欧州等で試みられている低速ディーゼル機関を搭載した就航船に SCR を設置する事例は少なく、また増加する気配もなかった。三菱重工の神戸造船所に設置されている発電設備の比較的小形の低速 2 ストロークディーゼル機関に取り付けられた SCR も、これらの就航船の前例に倣い、過給機前の高温の排ガスを SCR に導入する構造としているが、ディーゼル機関の発停や負荷変動に対して、SCR の熱容量が大きいため過給機の応答性が著しく低下し、低負荷域での使用は困難であった。この発電設備は、結局排ガス通路にバイパスを設けて、低負荷時には SCR を使用せず、高負荷の安定した時のみ SCR を使用するしかなかった。つまり、先行していた就航船の SCR もごく限られた条件での限定的な使用であったと考えられた。

低速ディーゼル機関でも広範囲に安定的に SCR を使用するためには、中速機関と同じ様に過給機の後流側に設置して、機関性能に影響を及ぼさないようにしなければならない。従って、本研究開発事業において設定した試験条件は、排ガス温度 250℃、燃料硫黄分 0.5%、過給機後流配置の SCR にて、IMO Tier III の NOx 規制をクリアするための脱硝率 80%を確保して、長期間使用可能な SCR 装置の成立であった。この 3 年間の関係者の努力の結果、燃料の硫黄分濃度が 0.1%以下であれば、250℃程度の低温排ガスであっても脱硝率 80%を確保する使用に耐える SCR 装置が成立できる見込みを得た。この装置の成立こそが、将来の厳しい NOx 規制の時代になっても、ディーゼル機関を主機とする大型船舶が世界の物流の担い手であり続けることができる必要条件であると言っても過言ではない。

これまで実際に低速機関を搭載した船舶に SCR を設置して脱硝を行った実績は、全世界で 8 隻に留まり、かつ過給機前の高温排ガスによるシステム構成であることから、本実船試験で挑戦した「過給機後流 SCR 配置」の排ガス全量を通す試みは世界初となると考えられる。

実船試験の成果としては、実船適用のフルスケール装置により実際の航海で脱硝運転を実施したことである。既述のように排ガス温度の影響はあったものの脱硝率としては目標としていた80%を超える値を確認でき、改めてSCRというシステムのポテンシャルの高さを実感した。上述したように過給機後流SCR配置での排ガス全量を通す試験を実航海にて行えたことは有意義であり、負荷変動時の応答性や極低負荷での性能追従性についても確認できた。

大気汚染物質放出規制海域（ECA）での使用が想定される含有S分0.1%以下の燃料（A重油）を使用する前提においても、要素技術開発の知見からは低速機関の排ガス温度では酸性硫酸が生成し、長期的に見れば脱硝性能が低下することが分かっている。要素技術開発でも試験した加熱再生手段を採用することによりこの酸性硫酸を分解できるため、本実船試験では排ガス温度を上げるための昇温バーナーを組み入れることとしたが、定常時の昇温能力、条件変更時の過渡応答ともに問題なく、また連続加熱再生運転においても装置トラブルなく、一つの大きな成果となった。極低負荷時においては過給機後流の排ガス温度は200℃を下回るが、昇温バーナーを使用することで脱硝性能が安定することを確認した。ランニングコストとのトレードオフはあるが、排ガス温度を規定温度以上に保つことの重要性をデータをもって示すことができた。

一部構成部品の不調はあったものの、各装置本体の強度、本船サイドとの連携、SCRシステム内の制御ロジック（トリップ制御含）等が計画通り作動することを確認できたことで、実用化へ向けて一歩近付いたと言える。要素技術開発同様、還元剤としてアンモニア水を使用するために、安全上必要なシステムを船級協会（NK）と協議した。今回試験の機器配置に限定した構成ではあるが、万が一の漏洩や常時換気といった実用化時にも必要と思われるシステムを構築し、供給ラインの完全2重化やアンモニア水タンク室の換気やブリーザ弁から出るガスの希釈排気方法等について問題なく作動することを確認できたことは大きな成果と言える。

一方、既述のように起動時に褐色煙が発生したり、装置内各部の腐食の進行など、想定外の課題も新たに見付かった。今回の装置は試験搭載ではあるが、上述したように実用化を見越したシステム構成と装置によりECA内外を想定した実運航に近い条件で実施することができたため、実用化へ向けて克服が必要な検討項目や改良点が見えたと言いたい。

本研究開発の成果が全世界の環境負荷を低減できる将来を祈念して止まない。