

選択触媒還元法脱硝装置の 装備及び運用に関する研究 (最終報告書)

2014年12月19日

ダイハツディーゼル株式会社

DAIHATSU

研究体制



本研究開発は、
川崎汽船株式会社
株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド
(現 ジャパン マリンユナイテッド株式会社)
ダイハツディーゼル株式会社
一般財団法人日本海事協会
との共同研究体制により実施すると共に、同協会の
「業界要望による共同研究スキーム」による支援を
受けて実施しました。

目次

1. 背景
2. 研究目標
3. スケジュール
4. 研究内容
5. まとめ

1. 背景

2016年に適用が見込まれるIMO NO_x第三次規制では、選択触媒還元法脱硝装置（以後：SCR）により排ガスを処理する方法が有力である。

SCRは陸上施設では実績が多いが、舶用では北欧領域での地域NO_x規制に対応したもの（主に中型船）に限定され、ワールドワイドでの運航、大型コンテナ船等では未経験である。

2. 研究目標

- 大型コンテナ船へのSCR搭載上の課題
を明確化
- 運航上の問題点の確認
- 高硫黄燃料を用いた場合の性能低下と
回復方法の確認

3. 研究スケジュール

作業内容	2012年					2013年				2014年			
	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
SCR装置搭載	←————→												
性能確認				↔									
運用試験							←————→						
劣化・回復試験											↔		
脱硝効果に関する解析									←————→				
総合評価													↔

4. 研究内容

4-1) 対象船舶概要

4-2) 対象機関概要

4-3) SCR装置概要

4-4) 船内への搭載検討と工事施工

4-5) 試運転

4-6) 海上公試

4-7) 脱硝試験

4-8) 回復試験

4-9) 脱硝効果に関する解析試験

4-1) 対象船舶概要

船舶所有者：川崎汽船(株)

建造造船所：(株)アイエイチアイ・マリン・ユナイテッド 呉工場

現 ジャパン マリンユナイテッド(株) 呉工場

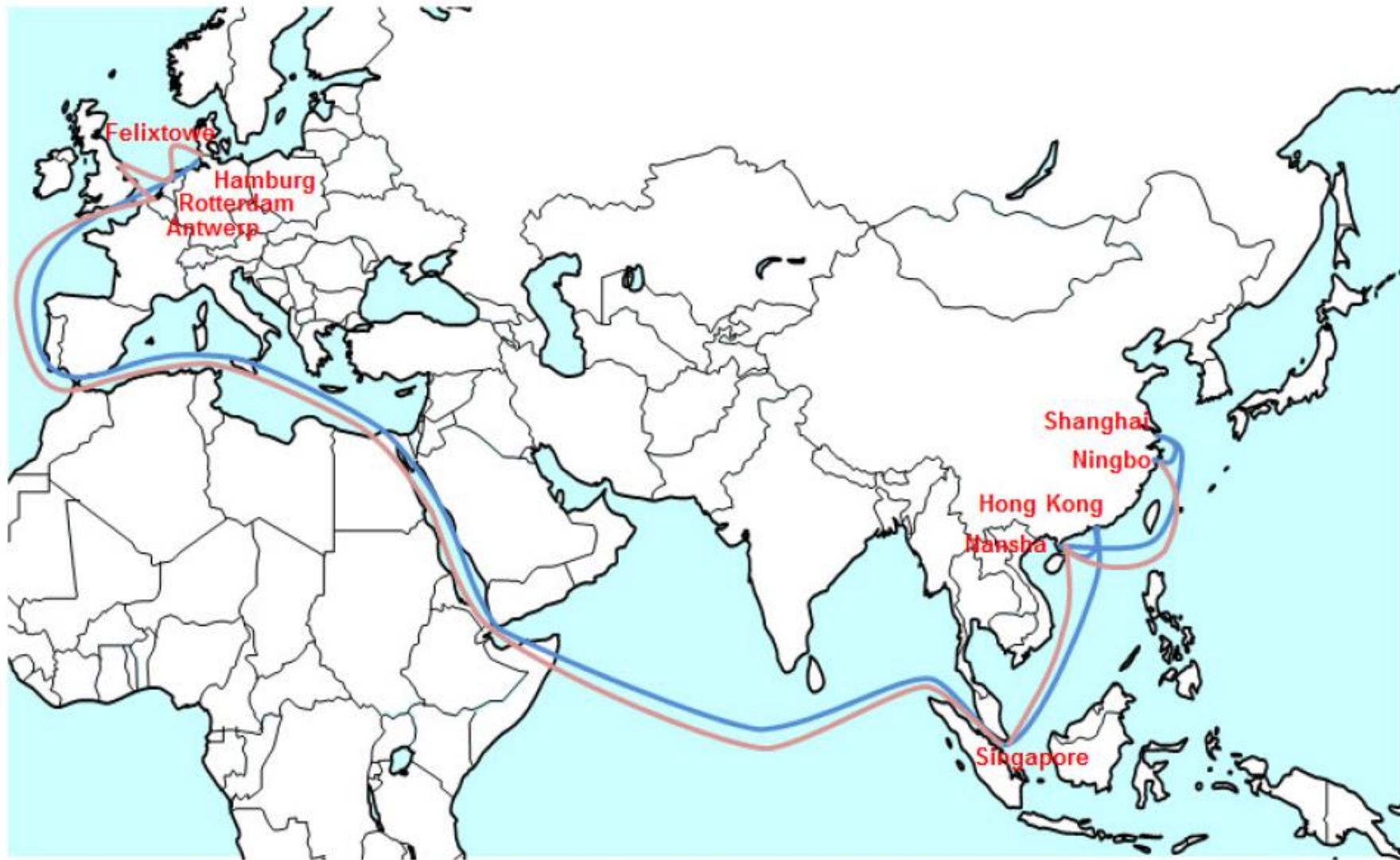
船番：3290番船(船名：Hanoi Bridge)

船種：コンテナ船 8,600TEU

就航開始日：2013年3月26日



対象船：Hanoi Bridge外観写真



対象船の航路

4-2) 対象機関概要

第2号発電機

ダイハツディーゼル(株)製 8DC-32

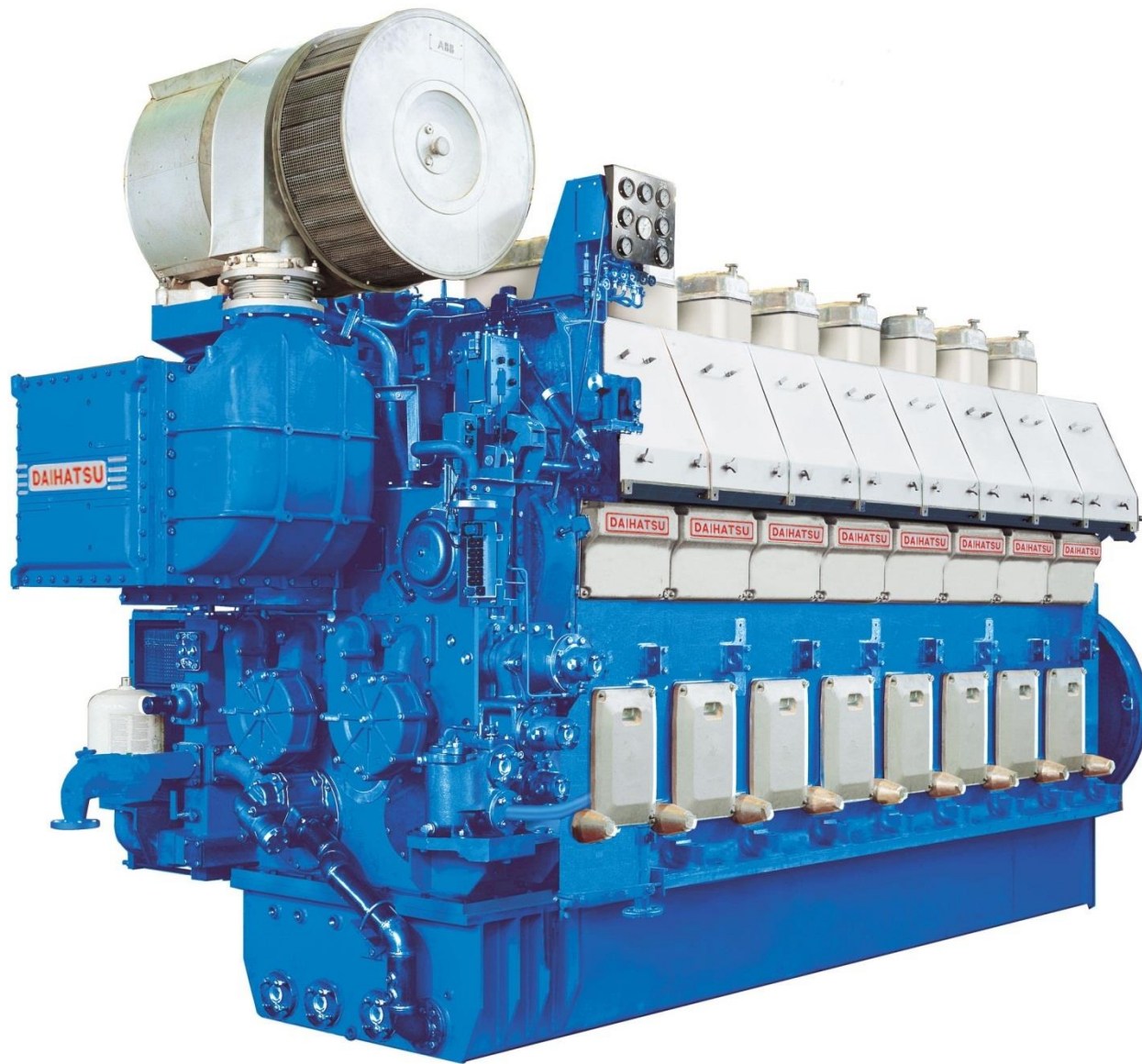
気筒数 : 8

ボア×ストローク : 320 mm x 400 mm

出力 : 3,000 kWm (2,800 kWe)

回転数 : 720 min⁻¹

NO_xレベル : IMO Tier- I 準拠 (< 12.1 g/kWh)



対象機関：8DC-32外観写真

4-3) SCR装置概要

脱硝能力 : IMO Tier Ⅲ相当 (< 2.3 g/kWh)

尿素水噴射量補正 : 付き

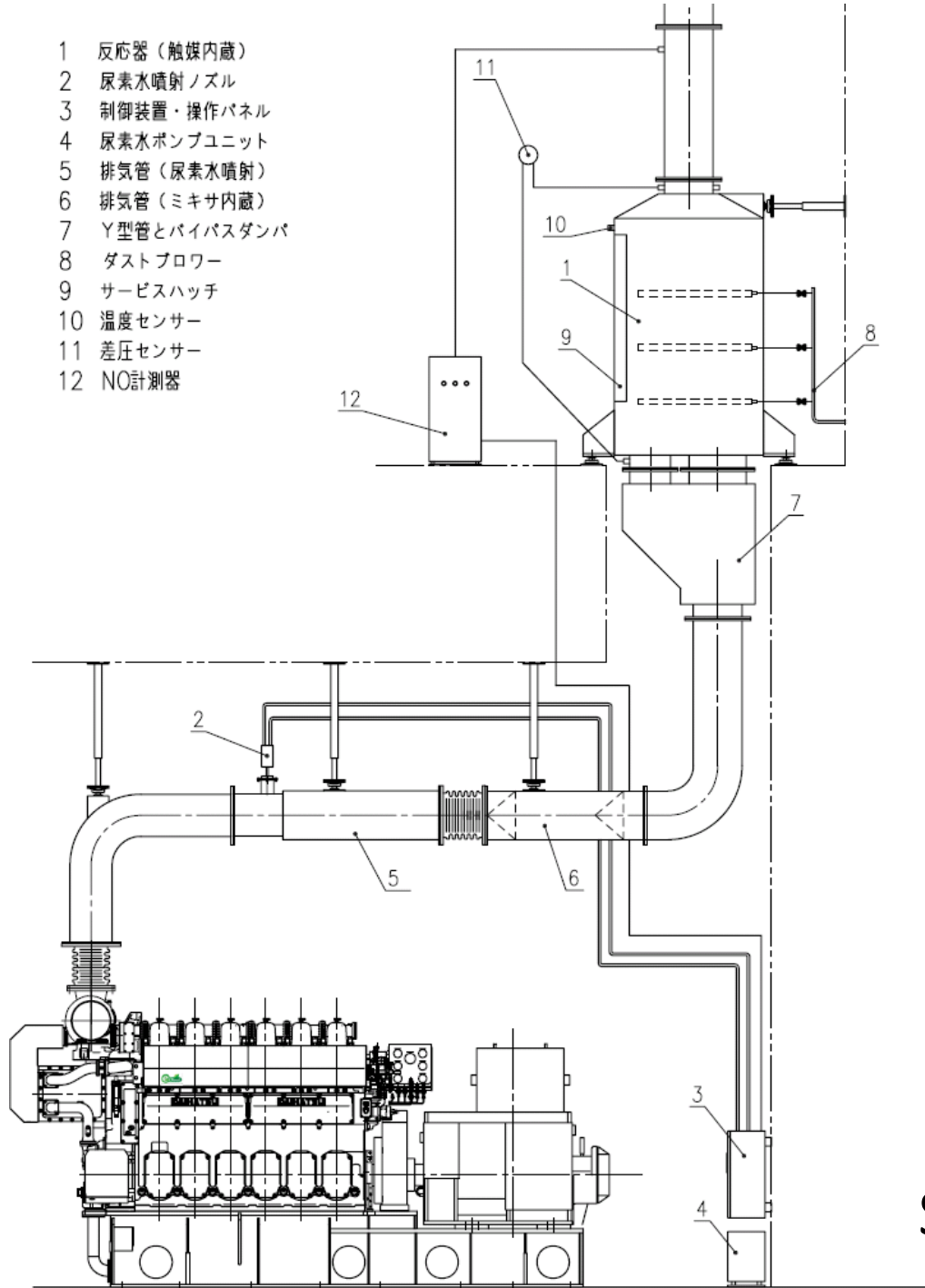
適用尿素水濃度 : 40%

排気バイパス : 有り(反応器と一体構造)

ダストブロー : 有り

尿素水タンク容量 : 10 m³

- 1 反応器（触媒内蔵）
- 2 尿素水噴射ノズル
- 3 制御装置・操作パネル
- 4 尿素水ポンプユニット
- 5 排気管（尿素水噴射）
- 6 排気管（ミキサ内蔵）
- 7 Y型管とバイパスダンパ
- 8 ダストブロワー
- 9 サービスハッチ
- 10 温度センサー
- 11 差圧センサー
- 12 NO計測器



SCR装置構成図

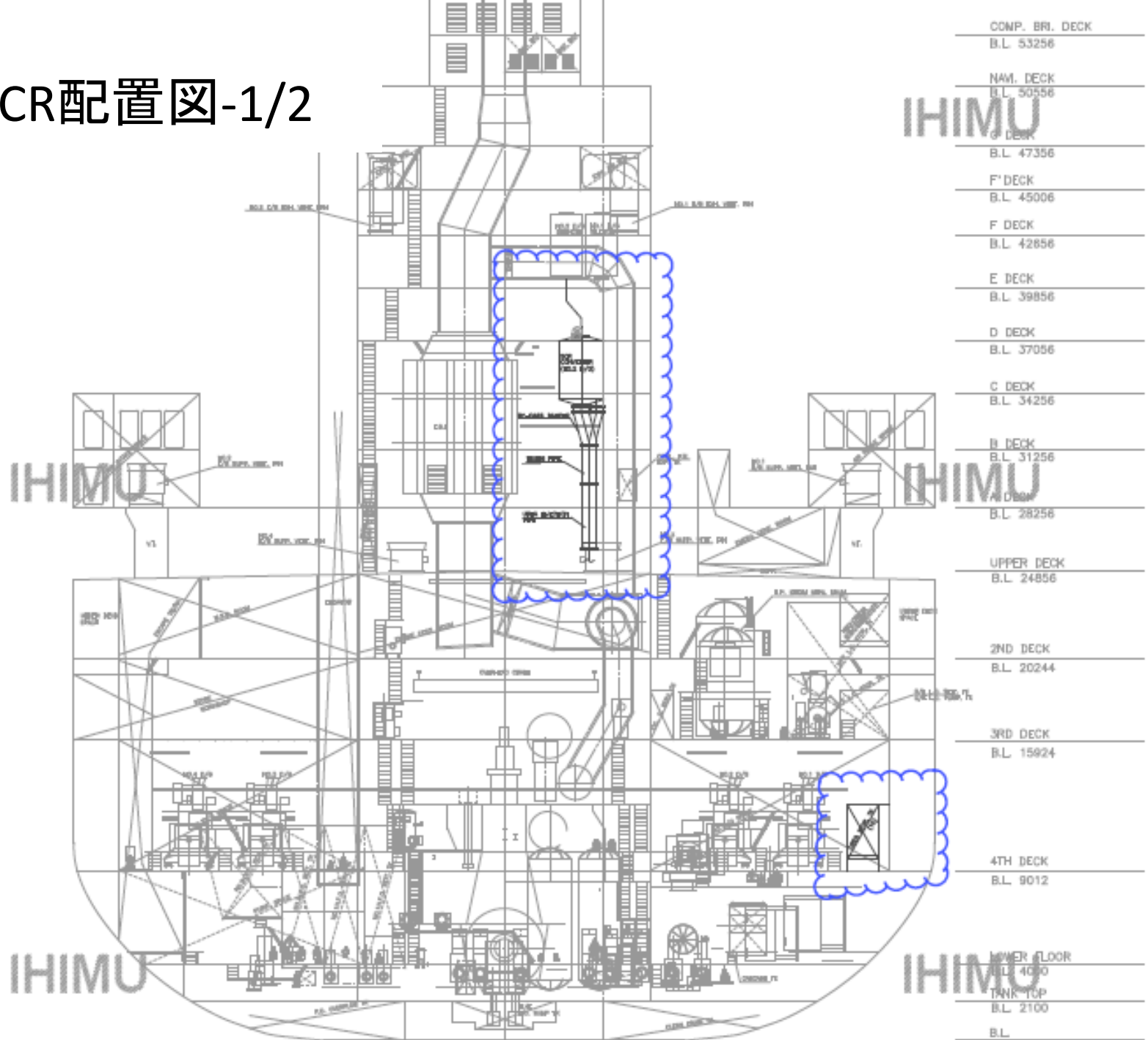
4-4) SCR搭載検討及び工事施工

検討開始時点で船体設計は完了していたため、製造工程に支障がなく、大きな変更を伴わない範囲で検討

装備位置は次の通り

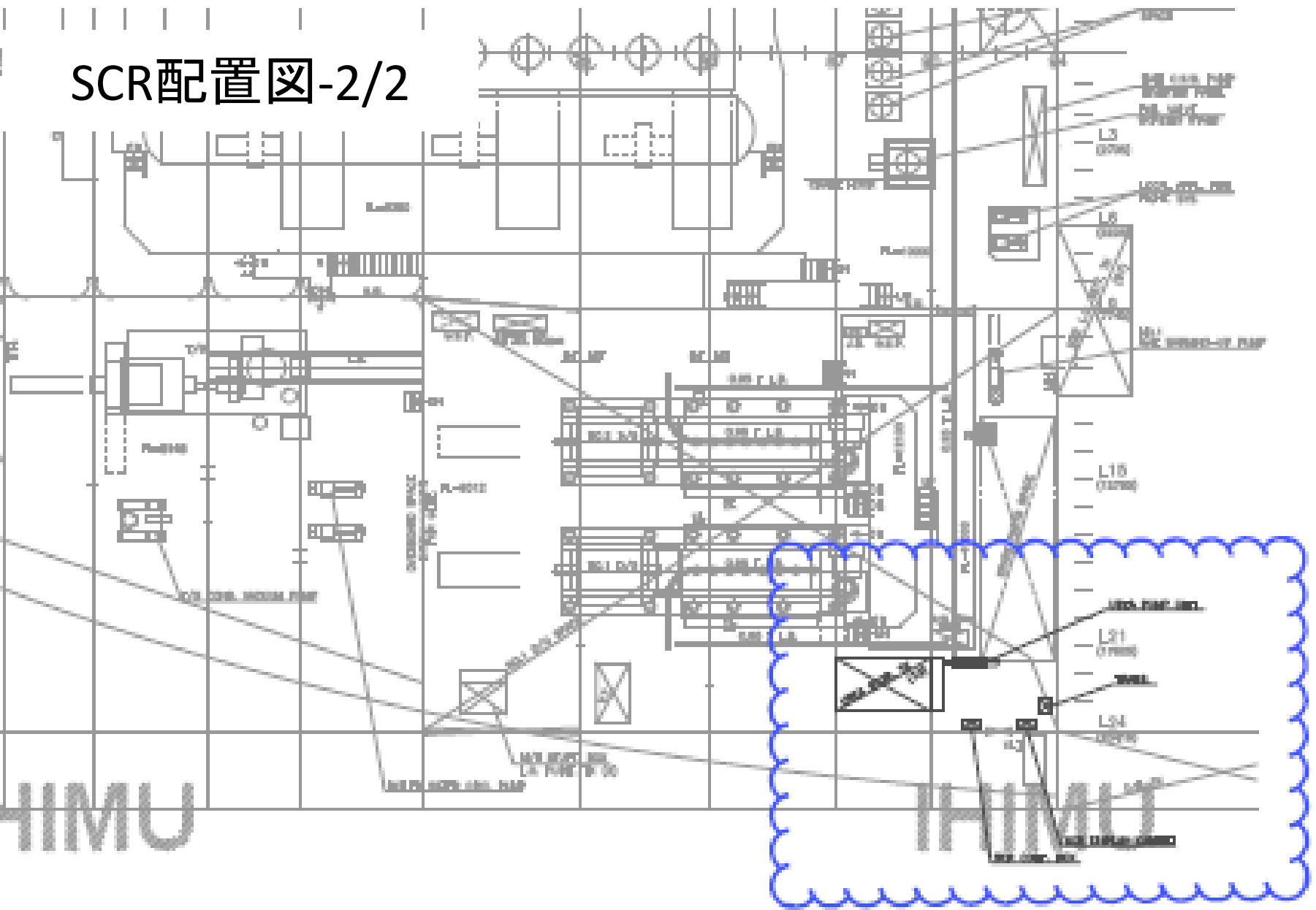
- 発電機関1～4号機の内、2号機にSCRを搭載
- SCR反応器はエンジン排ガスを改造し装備
- 尿素水タンク(10m³)はエンジン機側のスペースを利用

SCR配置図-1/2



COMP. BR. DECK
B.L. 53256
NAM. DECK
B.L. 50556
G DECK
B.L. 47356
F' DECK
B.L. 45006
F DECK
B.L. 42656
E DECK
B.L. 39856
D DECK
B.L. 37056
C DECK
B.L. 34256
B DECK
B.L. 31256
A DECK
B.L. 28256
UPPER DECK
B.L. 24856
2ND DECK
B.L. 20244
3RD DECK
B.L. 15924
4TH DECK
B.L. 9012
LOWER FLOOR
B.L. 4000
TANK TOP
B.L. 2100
B.L.

SCR配置図-2/2



4TH DECK

主要部品-1/2

ダストブロー管
ハッチ



反応器
バイパス
ダンパー
ミキサー管



尿素水噴射ノズル

主要部品-2/2



操作パネル

流量制御装置



上:尿素水タンク
下:ポンプ



NO_x計測器

4-5) 試運転(2012年11月)

4-5-1) 触媒詰め込み

輸送中の破損を懸念、

反応器据付け後に触媒を

詰め込んだ



触媒

反応器

4-5) 試運転(2012年11月)

4-5-2) 尿素水供給

- 国内陸上用SCRで実績のある尿素水メーカーを利用、タンクローリーで供給された。
- タンクローリー付きのポンプではアッパーデッキまで上がらないため岸壁から「タンクローリー＋高揚程ポンプ」で供給した。

尿素水供給作業



タンクローリー



高揚程ポンプ



ポンプ操作



左:エアアベント 右:取り入れ口

4-5-3) 動作確認

- 配管及び配線の確認

排気温度センサ、差圧計、エンジン負荷信号、
SCR制御盤への入力信号等

- 各機器の動作確認

バイパスダンパー、ダストブロー、尿素ポンプ、NO_x計等

- 尿素水流量の計測

4-5-4) 性能計測

IMO Tier III : D2 モード

負荷 [%]	100	75	50	25	10	規制値 < 2.41 g/kWh
重み係数	0.05	0.25	0.3	0.3	0.1	
NOx計測結果① [g/kWh]	2.47	1.97	1.03	0.39	0.21	1.44
NOx計測結果② [g/kWh]	-	2.78	1.55	1.32	-	-
NOx最終設定値 [g/kWh]	3.0	2.5	1.5	1.5	1.5	2.06

NH₃リーク量計測(簡易計測)

負荷 [%]	NH ₃ [ppm]
50	< 5
10	< 5

※NOx規制値より15%程度低い値に設定

※アンモニアリークはIMOで規定値は無いが、スウェーデン航路税の規定値(< 20 ppm)以下のレベル

4-6) 海上公試(2012年12月)

➤ 自動運転の確認

尿素水噴射開始、停止

負荷変動に対する尿素水噴射量の自動調整

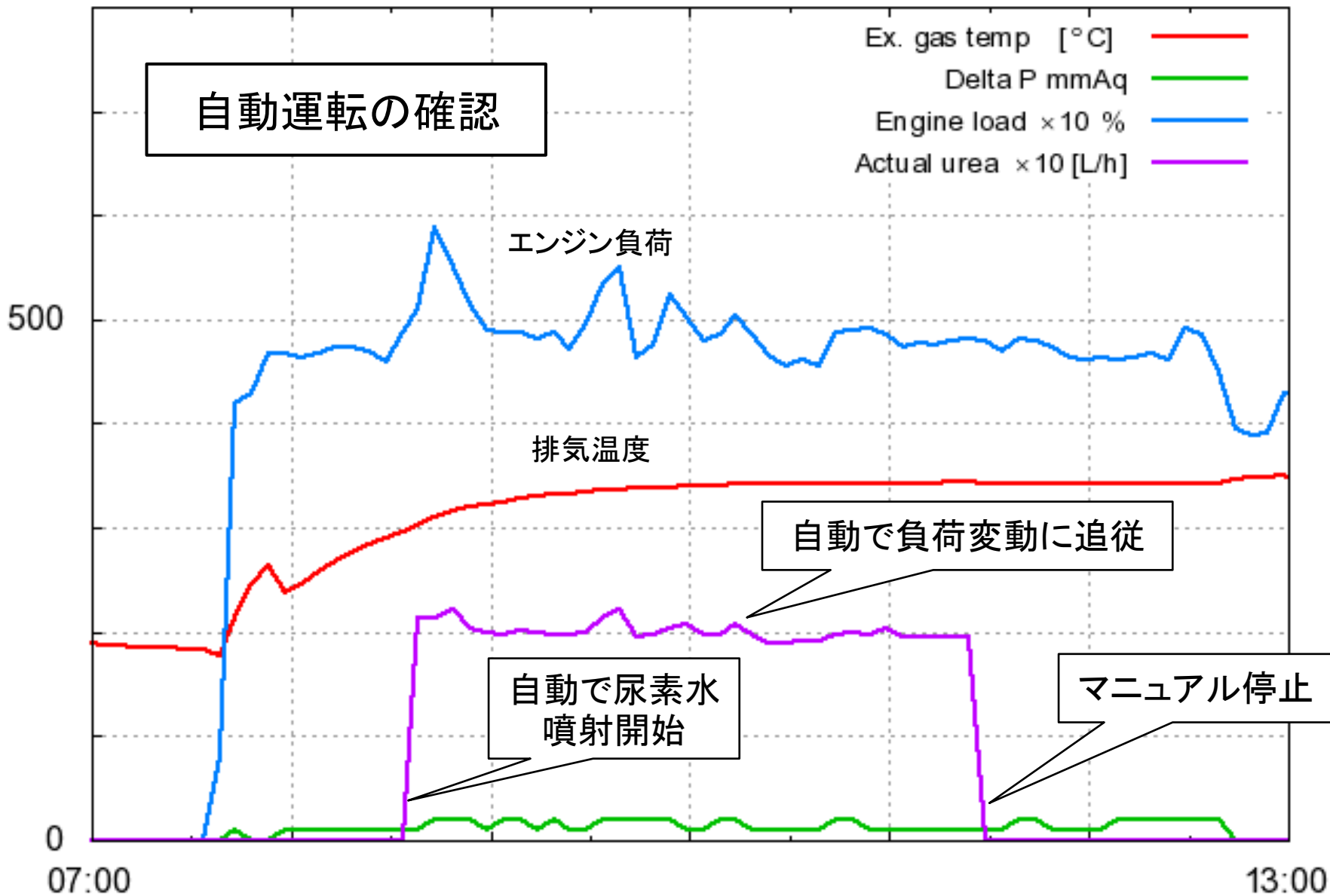
バイパスダンパ、ダストブロワーの作動

➤ 尿素水噴射量補正制御の確認

➤ エンジン負荷は海上公試の船内負荷を利用

(概ね30～40%)

自動運転の確認



尿素水噴射量補正制御確認

尿素水噴射量

・設定値(水色)

・実流量(紫色)

Engine load %

Actual urea × 10 [L/h]

Target urea × 10 [L/h]

Latest NO [ppm]

目標設定値 : 114 ppm

200

180 ppm (脱硝開始時)

134 ppm

121 ppm

112 ppm

エンジン負荷

0

10:00

12:00

初回NO計測値(180ppm)から、目標設定値(114ppm)に近づくよう尿素水噴射量が補正されており、フィードバック制御が正常に機能していることが判る。

4-7) 脱硝試験

(1)目的

欧州域内において脱硝装置を作動させる。SCR装置のON-OFF操作、運転状況確認とデータ収集、メンテナンス作業は船員殿にて実施頂く。また、各寄港地で尿素水の供給、触媒のサンプリングを実施する。これらの運転・作業における問題の有無を確認する。

(2)試験期間、条件等

2013年 4月～2014年5月

この間のSCR稼働時間 : 894時間

(3)オペレーション

欧州域内で硫黄分1%以下の燃料を使用する際にSCR-ONとした。

SCRのON-OFF操作は船員殿にて実施頂いた。

また、1回/月の間隔で、SCR操作パネルからデータを取り出し(USB使用)、K-LINE(シンガポール)殿経由でダイハツにデータを送付頂いた。

(4)メンテナンス

今回の試験では船員殿により機器類をメンテして頂くものはほとんど無く、各部の漏れ、異常などを適宜目視で確認頂いた。

尿素水フィルタと新品と約600時間運転後のフィルタの状況を次ページに示す。フィルタ内に目立った汚れは無く、微小なゴミが少々見られたが、その他の堆積物はなかった。



フィルタ(新品)



フィルタ内のゴミ

(5)訪船作業経緯

2013年

7月 8日 : 訪船①シンガポール 尿素水供給(7m³)

9月21日 : 訪船②シンガポール 尿素水供給(2m³)、
触媒サンプリング(1回目)

10月14日 : 訪船③ハンブルグ 尿素水供給(4m³)

12月 8日 : 訪船④シンガポール 尿素水供給(4m³)

2014年

3月17日 : 訪船⑤ハンブルグ 尿素水供給(4m³)

4月20日 : 訪船⑥シンガポール 触媒サンプリング(2回目)

(6) 尿素水供給作業

- ・尿素水はIBCタンクと呼ばれる1(m³)の容器でメーカーから供給された。
- ・これをトラックで港に運び、デッキクレーンでアッパーデッキに引き上げる。
- ・ホースを繋ぎ、コックを開け、自重で供給。
- ・供給に要する時間は1(m³)当たり約8分であった。

シンガポール、ハンブルグどちらも尿素水の港への持ち込みは問題無かった。

タンクの上げ下げに手間がかかるため、10(m³)以上の場合は岸壁からポンプで供給、又はタンクローリーから供給する方が作業効率が良いと思われる。



尿素水供給作業の様子

(7)尿素水の分析

- ・尿素水供給の際にサンプルを採取し、日本で成分分析を実施。
- ・弊社SCRに使用するのは40%濃度であるが、分析結果は車両用AdBlue(32.5%濃度)の成分基準と比較している。
- ・2014年10月に制定されたISOの40%濃度尿素水規格は32.5%の規定より全般的に緩い値である。
- ・サンプルはISO(40%濃度)に対し、いくつかの成分が規格外であったがSCRの運転に影響は無かった。但し、長期間の運転では影響が出る可能性があるため注意する必要がある。
- ・分析結果の一例とISO規定値を次に示す。

尿素水分析結果の一例

試験項目	単位	規格値	分析値	備考
尿素濃度	wt%		39.9	分析方法は JIS K2247-2
密度(20°C)	g/cm ³		1.112	
屈折率(20°C)			1.3949	不純物等の規格値 については、 32.5%AdBlueのもの を引用しています。
アルカリ度	wt%	≦ 0.2	0.03	
ビウレット	wt%	≦ 0.3	0.35	
アルデヒド	mg/Kg	≦ 5	0.37	
不溶解分	mg/Kg	≦ 20	<0.01	
PO ₄	mg/Kg	≦ 0.5	<0.01	
Ca	mg/Kg	≦ 0.5	0.07	
Fe	mg/Kg	≦ 0.5	<0.01	
Cu	mg/Kg	≦ 0.2	<0.01	
Zn	mg/Kg	≦ 0.2	0.14	
Cr	mg/Kg	≦ 0.2	0.01	
Ni	mg/Kg	≦ 0.2	0.04	
Al	mg/Kg	≦ 0.5	0.02	
Mg	mg/Kg	≦ 0.5	<0.01	
Na	mg/Kg	≦ 0.5	0.22	
K	mg/Kg	≦ 0.5	<0.01	
IRスペクトル		基準と同等	YES	

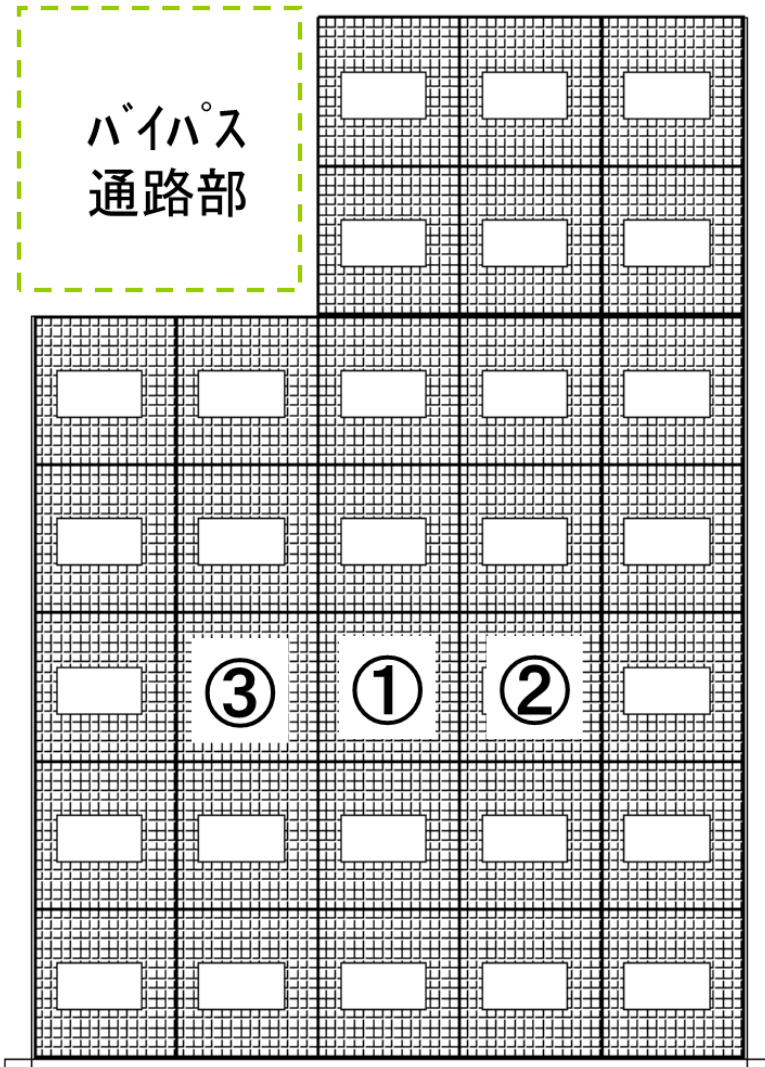
ISO 18611-1 40%濃度尿素水の成分規定

CHARACTERISTICS	UNIT	min.	max.	TEST METHODS
Urea content ^a	% (m/m) ^d	39	41	ISO 18611-2, Annex B ^e ISO 18611-2, Annex C ^e
Density at 20 °C ^b	kg/m ³	1 105	1 177	ISO 3675 or ISO 12185
Refractive index at 20 °C ^c	—	1,394 7	1,398 2	ISO 18611-2, Annex C
Alkalinity as NH ₃	% (m/m) ^d	—	0,5	ISO 18611-2, Annex D
Biuret	% (m/m) ^a	—	0,8	ISO 18611-2, Annex E
Aldehydes	mg/kg	—	100	ISO 18611-2, Annex F
Insoluble matter	mg/kg	—	50	ISO 18611-2, Annex G
Phosphate (PO ₄)	mg/kg	—	1	ISO 18611-2, Annex H
Calcium	mg/kg	—	1	ISO 18611-2, Annex I
Iron	mg/kg	—	1	
Magnesium	mg/kg	—	1	
Sodium	mg/kg	—	1	
Potassium	mg/kg	—	1	
Identity	—	identical to reference		ISO 18611-2, Annex J

(8)触媒サンプリング作業

- ・本船には訪船3日前から#2号機を運転しないよう連絡（冷却のため）。
- ・SCR反応器のハッチを開け、触媒を1個取り出し、新品と入れ替え。
- ・取り出し箇所は任意だが、およそ反応器断面の中心部から選定。

触媒サンプリング位置、ハッチ解放後の状況、触媒の写真を次に示す。



ハッチ側

触媒取り出し位置



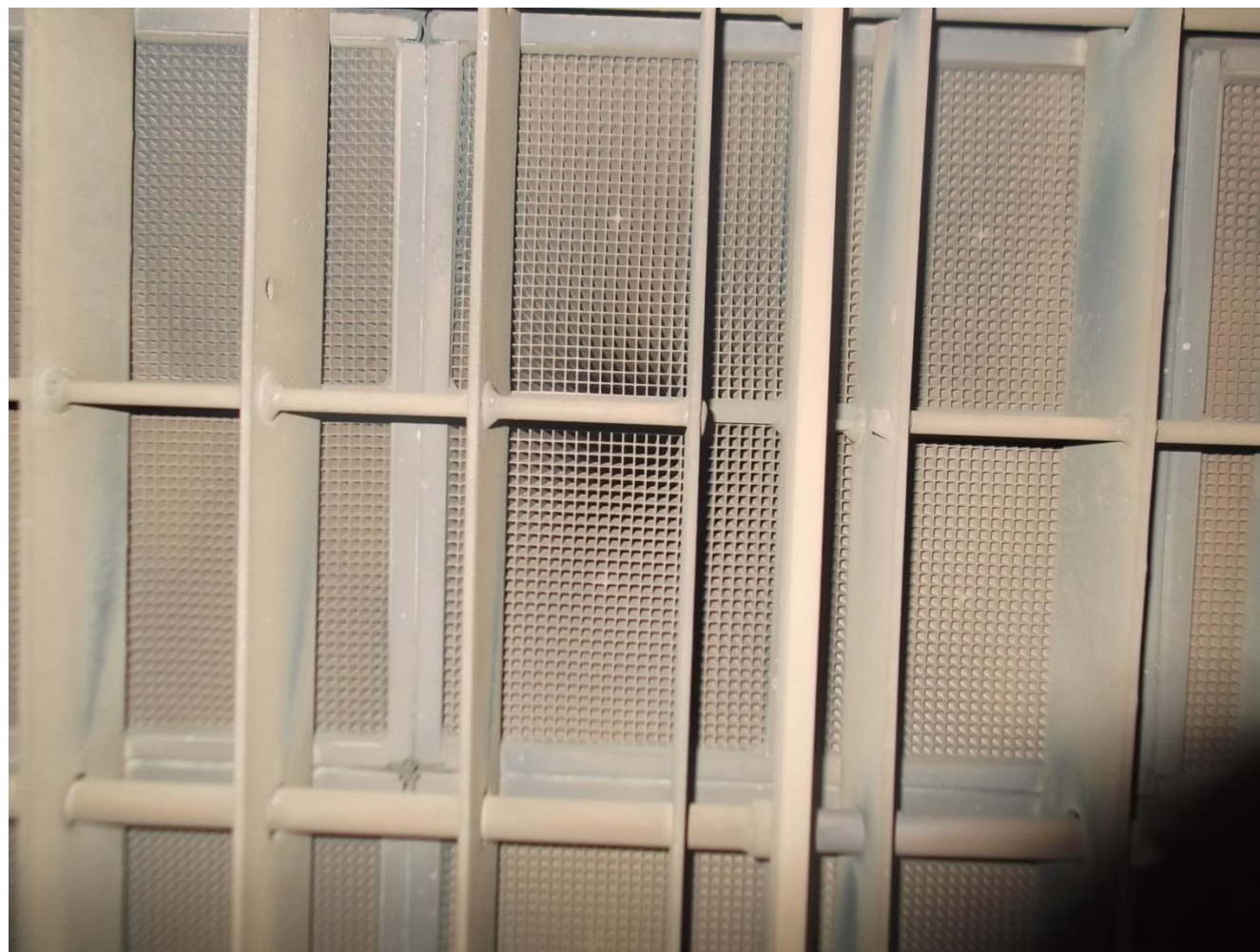
ハッチ解放後の状態



触媒(上流側)
薄い灰色



触媒(下流側)
新品時の薄い緑色のまま



触媒（2層目の上流側）

光の加減で薄い茶色に見えるが、実際は1層目下流側と同様に新品時の薄い緑色

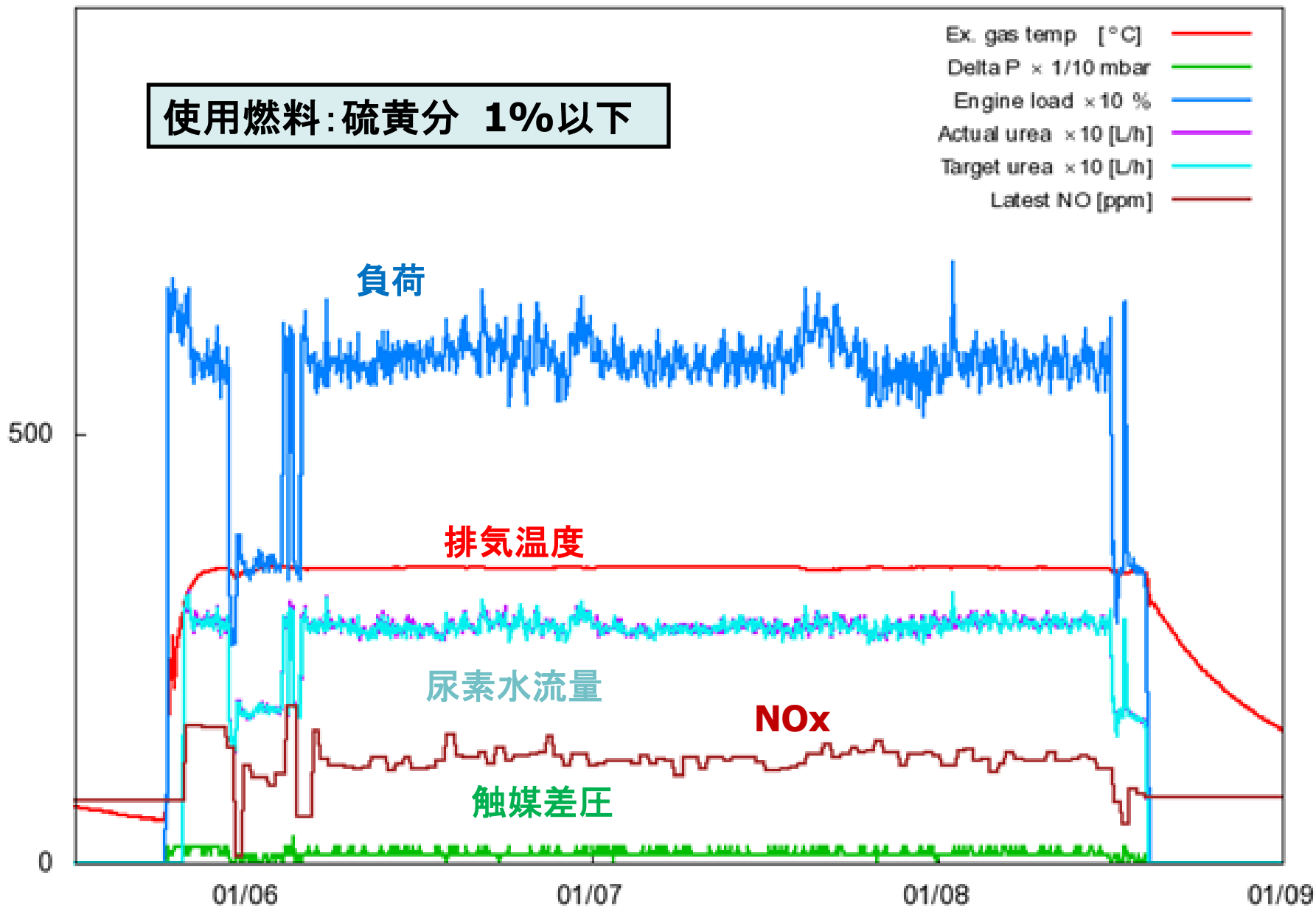
(9) 運転データ

2014年1月6日～9日の運転データを次スライドに示す。

本SCRシステムでは、エンジン負荷（青色）、排気温度（赤色）、尿素水噴射量（水色）、NO_x（茶色）、触媒差圧（緑色）をモニタリングしている。

運転データから、SCRがエンジンの起動／停止に対応して作動し、エンジン負荷に応じた尿素水が噴射され、NO_xや触媒差圧が安定しており、問題無く運転できていることが判る。

(9) 運転データ 2014年1月6日～9日の運転データ



(10)考察

欧州地域で894時間SCR運転を行い、船員殿によるSCRのON-OFF操作、データ収集、メンテナンス対応についても問題無いことを確認した。

運転データから、負荷変動に対して尿素水噴射量が追従して自動調整されていることが分かる。

また、本運転手順は2016年以降のECA領域に入／出する際と同じであり、規制開始後の実際の対応をシミュレーションすることができた。

4-8) 回復試験

(1)目的

低温もしくは高硫黄燃料油使用により脱硝性能を低下させた触媒を、高温もしくは低硫黄燃料油使用時の排気にて作動させ、触媒性能の回復状況を確認する。

(2)試験期間、条件等

2014年 5月～2014年10月12日

この間のSCR稼働時間 : 940時間

(3)オペレーション

航海地域を問わずC重油燃料を使用する際にSCR-ONとした。

C重油の硫黄分はバンカリング地により2%～3.2%の差があった。

操作作業、データ送付方法は脱硝試験と同様。

(4)メンテナンス

実施内容は脱硝試験と同様。

(5)訪船作業経緯

2014年

7月13日：訪船⑦シンガポール 尿素水供給(8m³)

8月 4日：訪船⑧シンガポール 尿素水供給(5m³)

10月12日：訪船⑨シンガポール 尿素水供給(8m³)、
触媒サンプリング(3回目)

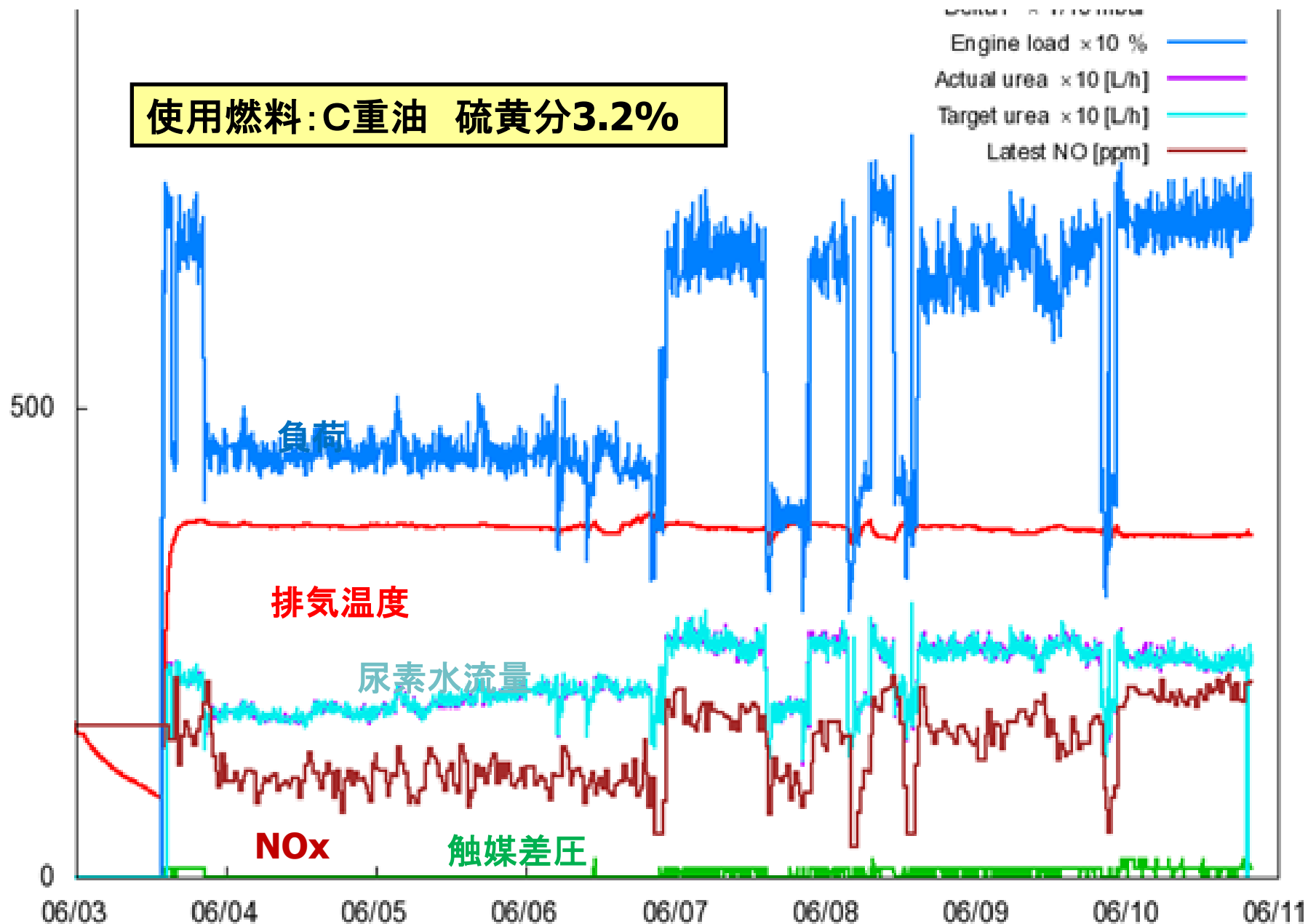
(6) 運転データ

2014年6月3日～11日の運転データを次スライドに示す。

運転データから、触媒差圧及びNO_xは安定しており、高硫黄燃料を使用しても問題無く稼働していることが判る。

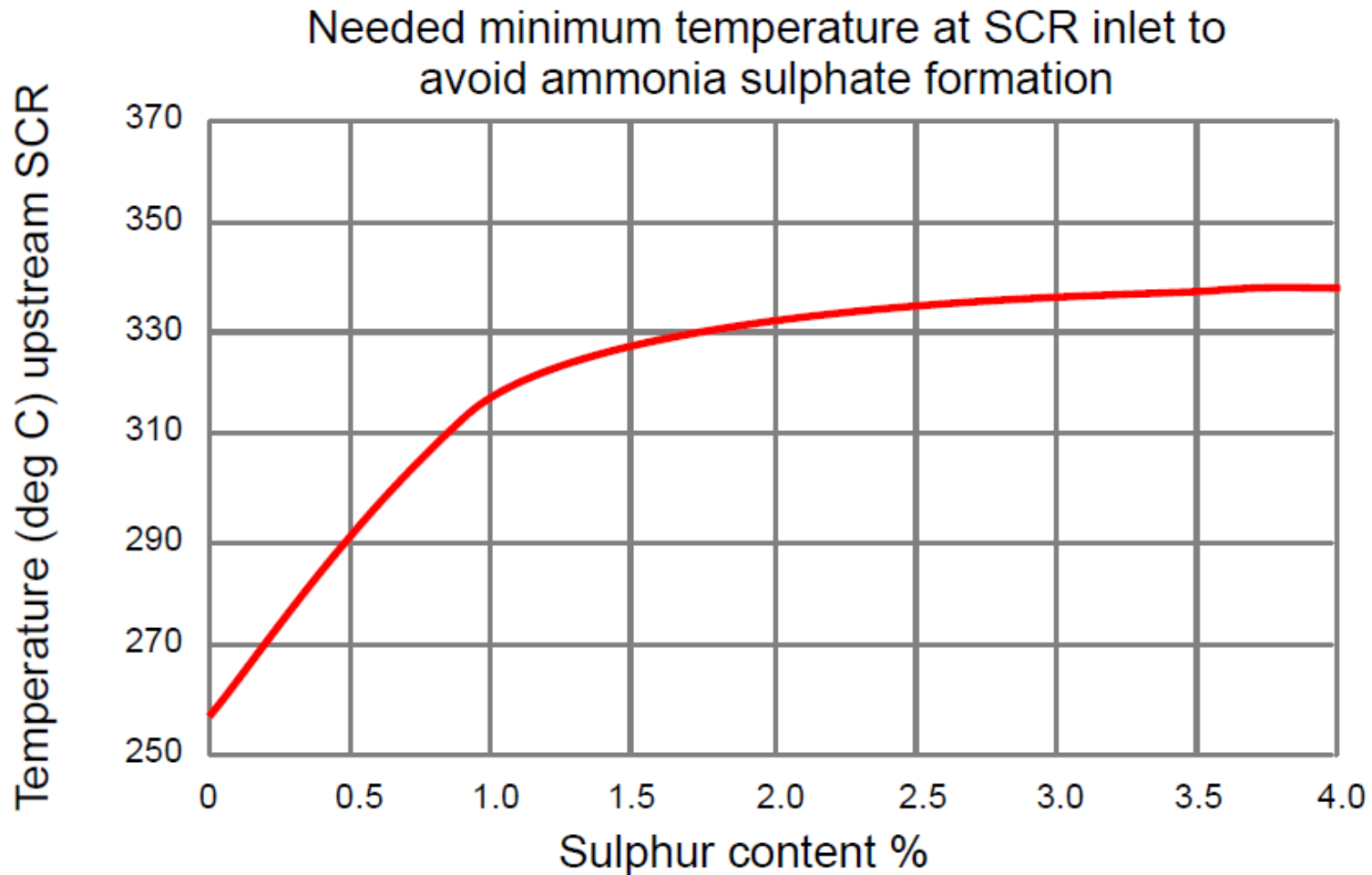
(6) 運転データ(2014年6月3~11日)

使用燃料:C重油 硫黄分3.2%



(7)考察

SCR入口最低必要温度



出典：佐々木, Kjeld Aabo, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 43 卷, 第 3 号 (2008)

SCRを使用する場合の安定運転条件は一般的に知られており、燃料中の硫黄分と排気ガス温度の影響が大きい。前ページグラフはSCR入口最低必要温度であり、カーブの上側が安定運転領域(硫黄が発生しない)を示す。硫黄分が3.5%の所を読み取ると、排気ガス温度は340°C必要となる。

今回の試験では、エンジンの排ガス温度が上記条件に対し十分に高かったためC重油を使用しても触媒の前後差圧の上昇(目詰まりの発生)は見られず、高硫黄燃料油で940時間問題無く運転できた。

4-9) 脱硝効果に関する解析試験

(1)目的

サンプリングした触媒を分析し、脱硝効率、k値の変化を把握する(1層目からサンプル採取)。

* K値とはSCR触媒の反応速度定数であり(単位は[m²/m³・h])、触媒の形状、格子数、排ガス量の影響を除外した反応速度のパラメータである。下記の式で表される。

$$K = -SV/A_p \times \ln(1 - \eta/100)$$

もしくは、

$$K = -AV \times \ln(1 - \eta/100)$$

η : 脱硝率 [%]

A_p : 比表面積(触媒の総壁面積[m²]/触媒の外形体積[m³])

SV : 空間速度(排ガス量[Nm³/h]/触媒の外形体積[m³])

AV : SV/A_p

マイクロリアクターを用いて脱硝率 η を計測し、反応速度定数Kを求める。

(2)触媒サンプリング履歴

2013年

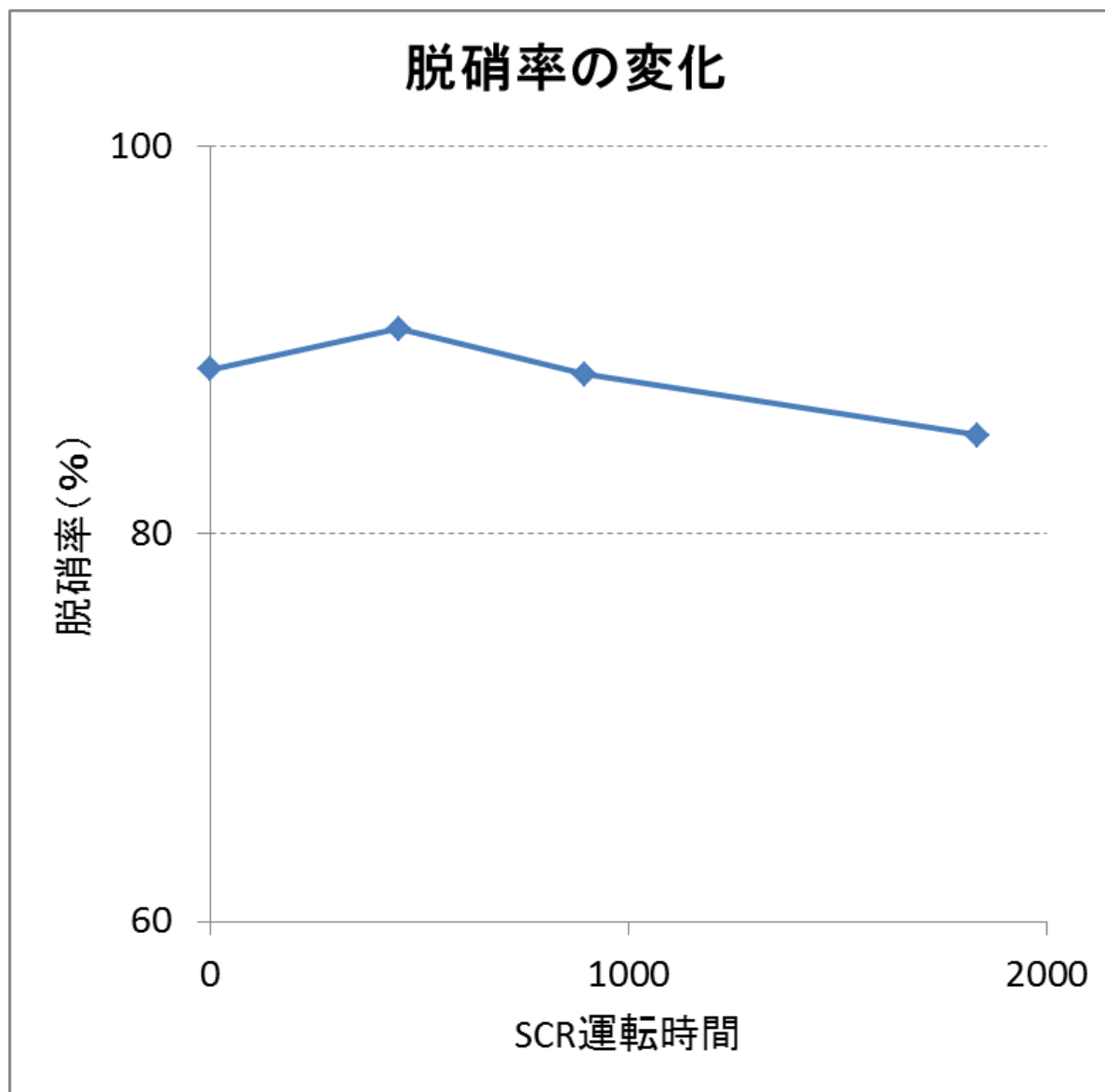
9月21日：訪船②シンガポール(1回目)450時間
($< 1\%$ 硫黄燃料)

2014年

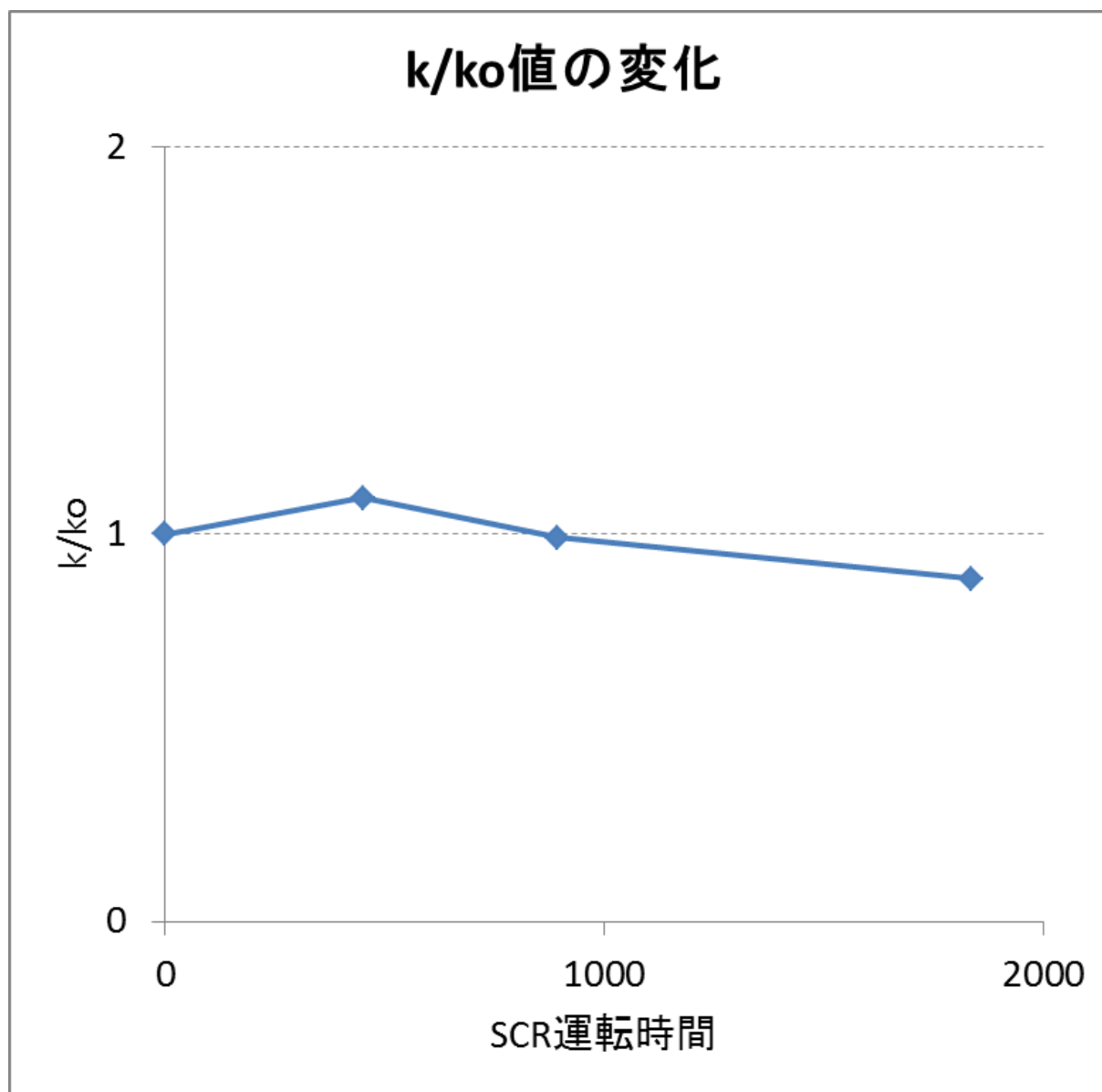
4月20日：訪船⑥シンガポール(2回目)894時間
($< 1\%$ 硫黄燃料)

10月12日：訪船⑨シンガポール(3回目)
894時間($< 1\%$ 硫黄燃料) + 940時間(高硫黄燃料)

(3)分析結果-1



(3)分析結果-2



(4) 考察

脱硝率では、1回目の分析結果が初期値より僅かに良くなっている。これは排気ガスの熱や硫黄分による触媒の活性化が影響しているものと考えられる。そして2回目では初期値と同等になり、3回目で初期値から約3%低下した値となった。

(注: 本分析では実際より厳しい条件下で脱硝・分析を行っているため、初期脱硝率は実際の状況とは異なる)

k/k_0 (初期値からの変化) も上記脱硝率と同様の変化を示した。

触媒分析による脱硝率、 k/k_0 は共に初期値から若干の性能低下が見られたが、触媒は2層あるためシステム全体の脱硝性能はトータル 1, 834時間 運転後も全く問題無かった。

5. まとめ

本研究事業は、選択触媒還元法脱硝装置の装備及び運用に関して、2011年12月22日から2014年12月21日までの3年の期間で実施された。

(1) 船体設計に関し、本船の様な大型のコンテナ船において、発電機エンジン1台分の脱硝装置については従来設計の船体構造を大きく変更することなく設置することが出来た。また、全機関へ搭載する場合は大幅な設計変更を要することも確認できた。

(2) SCRの性能については、岸壁での試運転でIMO Tier IIIのNOx排出規制を満足する性能が得られていることを示すと同時に、低アンモニアスリップを実現出来ていることを確認した。また、海上試運転において、尿素水噴射量の制御、バイパス弁切り替え、ダストブロー、NO計測などの各種シーケンスが自動で問題無く作動することを確認した。

5. まとめ

(3) 脱硝試験において、欧州域内で硫黄分1%以下の燃料を使用する際にSCRを運転し、域内を出る際にSCRを停止した。894時間の運転を行い、SCR装置のON-OFFは船員殿にて実施、船内での操作に問題が無いことを確認した。本運転手順は2016年以降のECA領域に入／出する際と同じであり、規制開始後の実際の対応をシミュレーションすることができた。

(4) 回復試験において、運転領域を限定せず硫黄分2～3%の燃料を使用する際にSCRを使用した。触媒脱硝性能を低下させてから低硫黄燃料の使用もしくは高温度排ガス条件で運転し、回復させる計画であったが排ガス温度が十分に高く、性能低下は起こらなかった(触媒前後の差圧に変化はなかった)。高硫黄燃料で940時間問題無く運転できた。

5. まとめ

(5)脱硝効果に関する解析試験において、触媒のサンプリングと分析を行った。トータル1,834時間運転後(前半は硫黄分1%以下、後半は硫黄分2~3%の燃料油使用)の触媒分析による脱硝率は初期値から約3%低下、k値(触媒の反応速度定数)も同様の傾向が見られたが、触媒は2層あるためシステム全体の脱硝性能は全く問題無なかった。

(6)脱硝試験、回復試験において尿素水(40%濃度)のバンカリングを実施。シンガポール、ハンブルグにてIBCタンク(1,000L容器)で尿素水を港に運び、デッキクレーンで本船のアップパーデッキへ置き、自重で供給した。IBCタンクがおおよそ10個以上の場合はタンクローリーやポンプで岸壁から供給する方が作業効率は良いと思われる。また、サンプルを取り成分分析を行ったところ、ISO規格(40%)に対しいくつかの成分が規格外であったがSCRの運転に影響は無かった。但し、長期間の運転では影響が出る可能性があるため注意する必要がある。

5. まとめ

最後に、本事業は一般財団法人日本海事協会殿の「業界要望による共同研究」スキームにより同協会の支援を受け実施されました。

一般財団法人日本海事協会殿、川崎汽船株式会社殿、ジャパンマリンユナイテッド株式会社殿、並びにご協力頂いた船員殿及び関係者の皆様に深く感謝致します。

以上