

船用大型2サイクルディーゼル機関用 SCRシステム（分離型）の開発

Development of Marine SCR System (Separate Type) for Large Two-Stroke Diesel Engines



村上 雅 明	Masaaki Murakami	㊦
田中 博 仲	Hironaka Tanaka	㊦
福山 雅 久	Masahisa Fukuyama	㊧
藤林 孝 博	Takahiro Fujibayashi	㊦
岡崎 重 樹	Shigeki Okazaki	㊦
柴田 隼 平	Junpei Shibata	㊦
田中 裕 士	Hiroshi Tanaka	㊦
平岩 俊 介	Shunsuke Hiraiwa	㊦
小林 諒 平	Ryohei Kobayashi	㊧
得津 裕太郎	Yutaro Ezu	㊧

あ ら ま し

IMO（国際海事機関）は、規制海域で運航する船舶から排出される窒素酸化物（NO_x）のより厳しい排出規制の実施を2016年から計画している。規制に対応するため、当社では脱硝触媒を活用した船舶用のSCRシステムを開発した。

本システムは、同規制のNO_x排出レベルを満たすことを証明する一般財団法人日本海事協会（NK）の鑑定書を取得し、新造就航船にて長期運用による実証を行った。

本稿では、船用SCRシステムの概要と就航船に適用したシステムの陸上や海上での試験運転結果、長期運用試験で得られた技術的な課題を解決するために自社の多気筒試験機関に適用したシステムでの試験結果に関して報告する。

Abstract

The International Maritime Organization (IMO) plans the implementation of tighter limits for nitrogen oxide (NO_x) emissions from ships operating in emission control areas (ECA) from 2016. Hitachi Zosen Corporation has developed a marine SCR system that utilizes a denitration catalyst as per IMO regulation. This system has been certified by Nippon Kaiji Kyokai (NK) that it satisfies the NO_x discharge level of according to IMO regulation. This marine SCR system was installed in a new active vessel, and the verification test was carried out over long-term operation.

In this paper, we will report a summary of the marine SCR system, shop test and sea trial operation result which involved installation to a new active vessel, and the test result of the system installed in our company's multi-cylinder test diesel engine in order to solve the technical issues derived from the long-term operational test.

1. 緒 言

国連の専門機関である国際海事機関（International Maritime Organization：IMO）の海洋環境保護委員会（Marine Environment Protection Committee：MEPC）では、船舶による大気汚染の防止を推し進めるため、汚染物質である窒素酸化物（NO_x）や硫黄酸化

物（SO_x）、排出微粒子（PM）及び揮発性有機化合物（VOC）等の排出基準に関わる規則を検討している。

2008年に開催されたMEPC58では、NO_xやSO_xの排出削減の新規制（MARPOL条約附属書VI改正）が採択され、130kWを超えるディーゼル機関を搭載する船舶において、NO_x排出削減の新たな義務が生じることとなった。

NO_x排出削減規制として2次規制（Tier II）は、2011年から就航する船舶で適用されており、2000年から実施されている1次規制（Tier I）の規制値より15～22%削減することとなった。また、2016年より予定されている3次規

㊦ Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 脱硝ビジネスユニット 設計部

㊧ Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 開発センター

㊨ Hitz日立造船㈱ 技術開発本部 機械・インフラ研究所

制(TierⅢ)は、その適用が指定海域(ECA)に限定されるものの、TierⅠから80%削減と非常に低い値となっている。

TierⅠやTierⅡは、燃料弁の最適化や機関仕様の変更等といった従来のディーゼル機関の技術で規制値を満足できたが、TierⅢでは、これらの技術の見直しだけでは、到底満足できない規制値である。

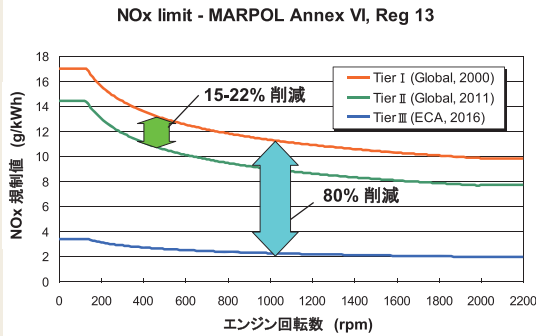


図1 IMOによるNOx排出規制

規制への適用技術として期待されているのが、自動車等の小型ディーゼル機関で既に実用化されている排ガス再循環(Exhaust Gas Recirculation: EGR)による方法と陸上プラント設備やトラック等で実績のある選択脱硝触媒(Selective Catalytic Reduction: SCR)による方法である。

EGRの原理は、排気ガスをシリンダ内に導き、燃焼用空気の酸素濃度を下げること、また熱容量を大きくして燃焼温度を下げることによりNOx発生量の低減を図るもの(内部処理)で、機関性能、特に燃料消費率が悪化する。SCRの原理は、排気ガス中にアンモニア(NH₃)等還元剤を投入し、触媒上でNOxを選択的に還元除去するもの(後処理)で、還元剤を必要とするが上流である機関側に影響を与えないという特徴がある。

どちらの技術も一長一短あるが、当社には陸上プラントで培った触媒脱硝技術があることから、ライセンスのMAN Diesel & Turbo社と共同で、船舶に適用したSCRシステムの開発に着手した。

本稿では、新造就航船に搭載したSCRシステムの陸上や海上での試験運転結果と、長期運用試験で得られた技術的な課題を解決するために自社の多気筒試験機関に適用したシステムでの試験結果に関して報告する。

2. 船用SCRシステムの概要

当社が開発した船用SCRシステムは、図2に示すように過給器(Turbo Charger: T/C)の上流にVaporizer(蒸発器)とSCR Reactor(反応器)を分離配置した構成となっている。Exhaust Receiver(排気集合管)から出た排気ガスを蒸発器に導き、蒸発器にて還元剤を噴霧・蒸発させる。反応器には、排ガスと還元剤の混合ガスが入り、反応器内にある触媒を通過する際、脱硝反応が進行する。処理後のガスは、T/Cに戻され、タービンで

仕事(給気過給)をしたのち、煙道を通じて、煙突より船外へ排出される。

脱硝触媒の活性温度は一般的に300℃以上であるのに対して、船用2サイクルディーゼル機関のT/C出口排気ガス温度は250℃程度である。一方、T/C入口の排気ガス温度は概ね300℃以上であり、また、T/C出口より入口の方が高压である。このことから、T/C上流の高温高压の排気ガスを利用する本システムは、以下のような特長を有している。

- 外部から熱を供給することなく、排気集合管の排気ガス温度だけで、SCRシステム内の温度を脱硝触媒の活性温度以上に維持することができる。
- 触媒活性は圧力が高いと向上するため、触媒量が少なく済み、システム構成をコンパクトなものにできる。

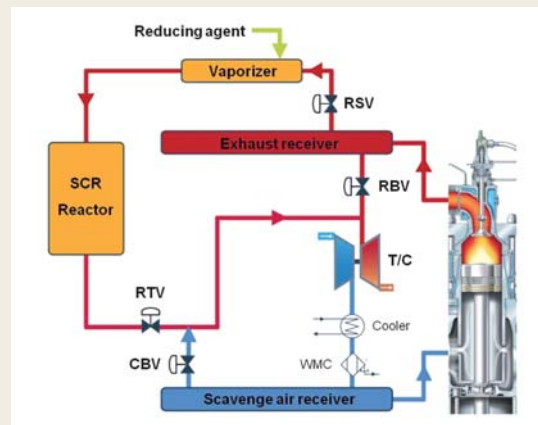


図2 船用SCRシステムのフロー

なお、本システムは図2に示す3個のバタフライバルブ(RSV、RTV、RBV)を装備しており、これらを制御することにより機関負荷変動への追従性を高めている。また、極低負荷ではT/C上流でも触媒活性温度よりも排気ガス温度が低くなるため、温度を上げるために空気量を減らすバタフライバルブ(CBV)も設けている。

SCRシステムに使用する触媒を図3に示す。触媒は、紙状の基材にチタニア-バナジウム系の触媒成分を含浸させ、図3に示すようなハニカム型の形状に成型した。この触媒は、軽量で薄く、体積当たりの表面積が大きく取れるといった特徴を有していることから、反応器をコンパクトにすることが可能である。

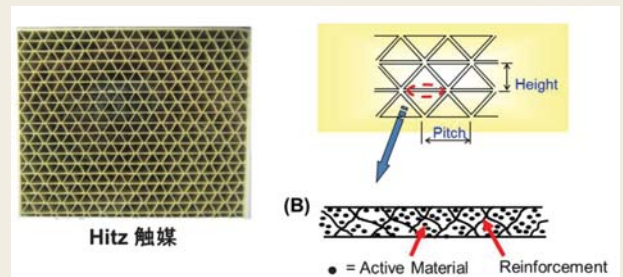


図3 SCR触媒

3. 新造就航船のディーゼル機関に適用した船用SCRシステムの陸上および海上試験

当社で開発した船用SCRシステムを新造する就航船で実証を行うために、システムを図4や図5のように就航船に搭載する船用ディーゼル機関(6S46MC-C)に、機関室のレイアウトを考慮して組み込み、出荷前に工場にて機関性能や脱硝性能の確認を行った。参考に、6S46MC-Cの機関諸元を表1に示す。

表1 機関諸元

Hitachi-MAN B&W 6S46MC-C7	
シリンダ数	6
ボア	460 mm
ストローク	1,932 mm
連続最大出力	6,780 kW × 111.0 rpm
常用出力	6,100 kW × 107.2 rpm



図4 SCRシステムを搭載した6S46MC-C概要



図5 陸上(工場)での試験の様子

3.1 陸上(工場)試験での機関性能評価 図6にSCRを作動した時と作動しない時(バイパス運転)の機関性能を示す。T/Cの前にSCRを配置している本方式では、直接排気ガスをT/Cに導く場合に比べて圧損が大きくなることから、T/Cの過給効率低下に伴う機関性能への影響が懸念された。しかしながら、図6の通り、機関

性能には大きな差異は見られなかった。また、CBVにより低負荷でのシリンダ出口排気ガス温度が、脱硝に必要な300℃付近に保たれることを確認できた。

機関性能を詳細に見ると、掃気圧やT/C回転数、シリンダ出口排気ガス温度はほぼ同等であるにも関わらず、T/C入口排気ガス温度が高い。これは脱硝が発熱反応で、排ガスに熱を与えたためと考えられ、この発熱分とSCR経路の圧損が概ね相殺されたため、機関性能に差が生じなかったと推察される。

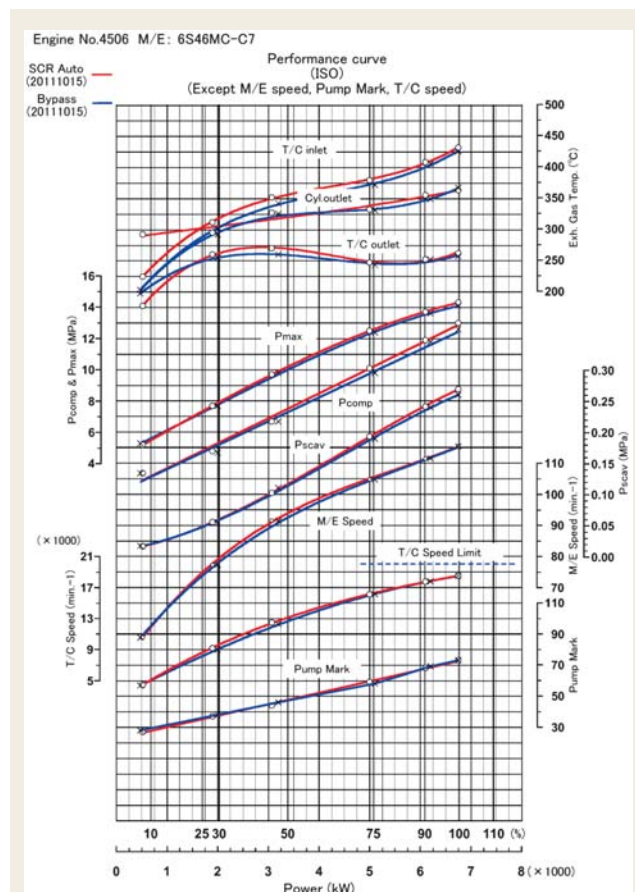


図6 工場試験における機関性能評価

3.2 脱硝性能評価 SCRシステムを作動させた時の脱硝特性を図7に示す。なお、本実証機関は、Tier I規制適用のディーゼル機関なので、SCRシステムをバイパスした時のNOx排出量も図中に示す。機関本体のNOx排出量は、低負荷では増加する傾向にあるが、全負荷での平均値を示すサイクル値は、14.6g/kWhであり、Tier I規制値を満たしている。この機関の仕様のまま、Tier III規制値を満たすレベルまでSCRを作動させて脱硝した結果は、図7に示すように全負荷域でNOx規制値3.4g/kWhを下回っており、高い脱硝特性を有することが確認された。全負荷での平均NOx排出量(サイクル値)が2.9g/kWhであり、Tier III規制値を十分に満足している。

これまでの取り組みから、本SCRシステムにより、Tier IIIのNOx排出規制値をクリアすることをNK立会いの元、実証できたことから、図8に示すNKの鑑定書を取得することができた。

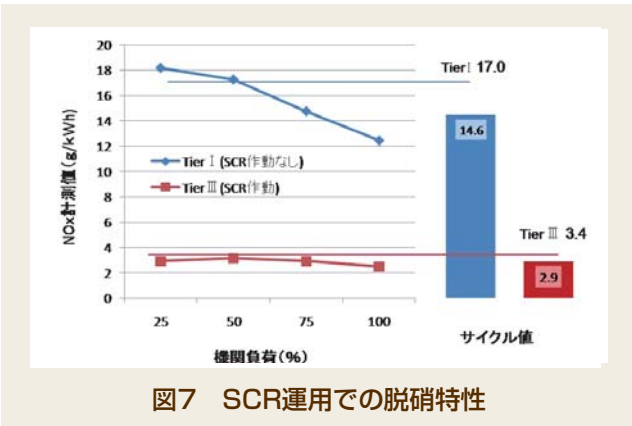
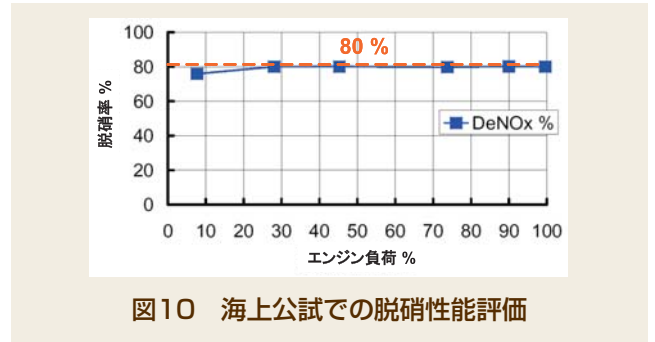


図9 SCRシステムを設置した機関室内の様子

海上公試の際、NKの立会いの元、脱硝率を80%に設定して自動制御を行った脱硝特性を図10に示す。図10より、25%、50%、75%、100%の負荷で80%の脱硝率を達成している。25%、50%、75%、100%の負荷でのNOx排出量の平均値(サイクル値)は3.1g/kWhであり、TierⅢ規制値も十分にクリアできている。



図8 日本海事協会による鑑定書



4. 実証試験の取り組みと多気筒試験機関による課題解決

船用SCRシステムを搭載した新造船は、2011年11月に船主に引き渡された。就航船では、船主の協力の元、引き続きシステムの信頼性や触媒性能の変化等の把握のための長期の実証試験に取り組んだ。

就航船は東アジアと北米の間を航行しており、試験は2014年1月現在も継続して行っている。SCRシステムはTierⅢ条件での脱硝率設定で累積1,896時間稼働させた。また30%脱硝等その他の設定でも、設定通りの脱硝が行えたことや触媒活性の変化がなかったこと等良好な成果が得られた。

3.3 海上試験 船主に船を引き渡す前に、実海域での運転による脱硝性能、操作性やメンテナンス等の課題を把握すべく、海上での運航試験を行った。表2に海上運航試験に用いたSCRシステムを搭載した船の概要を示す。SCRシステムを取付けた機関室は、図9に示すとおり、メンテナンスがし易いように空き空間が充分確保されている。

表2 SCRシステム搭載船概要

名称	Santa Vista
型式	General Cargo, 38000DWT
船主	JX Shipping Co., Ltd
造船所	Naikai Zosen Corporation
竣工日	31 October 2011
主機	1×Hitachi-MAN B&W 6S46MC-C7 (6780 kW, 111 rpm)

表3 機関諸元

Hitachi-MAN B&W 4S50ME-T	
シリンダ数	4
ボア	500 mm
ストローク	2,214 mm
定格回転数	117.0 rpm
定格最大出力	7,120 kW
正味平均有効圧	21.0 MPa

一方、長期に及ぶ試験で、陸上や引渡し前の海上試験では想定出来なかった課題が明らかとなった。次節以降にその課題を示すと共に、当社の多気筒試験機関(4S50ME-T)に船用SCRシステムを設置して行った課題解決のための取り組みについて示す。参考に4S50ME-Tの機関諸元を表3に示す。

シリンダ数やボア、ストロークに相違があるものの、出力や排気量は概ね同じであるため、就航船と同等のSCRシステムを位置関係(蒸発器を横配置で、反応器を縦配置)も合わせて設置した。また、機関室内の配置の自由度を考慮して、反応器の横配置についても、試験を行った。図11に4S50ME-Tに分離型SCRシステムを設置した概観を示す。

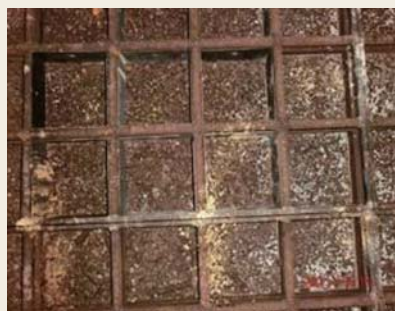


図11 4S50ME-Tおよび分離型SCRシステムの概観

4.1 SCRシステム内部の腐食 SCRシステムの長時間振動の影響を見るため、実証試験の初期にSCRシステムをバイパスして運航した。港でSCRシステムを調査したところ、蒸発器や反応器内部、触媒上に図12に示すような腐食や堆積物が確認された。



a) 反応器入口



b) 触媒入口

図12 バイパス運転後の反応器内の状況

これは、バイパス運転を行った時にSCRシステムのバタフライバルブのシート部から侵入した排ガスが原因と考えられる。IMOのSO_x規制によれば、2012年から燃料油中の硫黄含有量の上限が3.5%となっており、堆積が起きた時に就航船が使用していた燃料油は3.15%で規制値内であるものの、排気ガス中には硫黄酸化物(SO_x)も多く含まれる。さらに、バイパス運転時のSCR経路は、比較的低温になるため、硫酸の露点腐食が起きやすい環境になっていた。

そこで、この課題を解決するため、以下の方法が考えられた。

- 材質の耐酸性をあげる。
- バタフライバルブのシール性を上げる。
- SCRシステム内への排気ガスの侵入を防止する。

当社ではこれらの方法全てに取り組んだが、今回は就航船に採用したc)について述べる。

排気ガスの侵入を防ぐための方法として、還元剤供給装置で使用している空気ラインから新鮮な空気をSCRシステムに供給し、排気ガスを系外に押し出す方法を試みた。その結果を図13に示す。

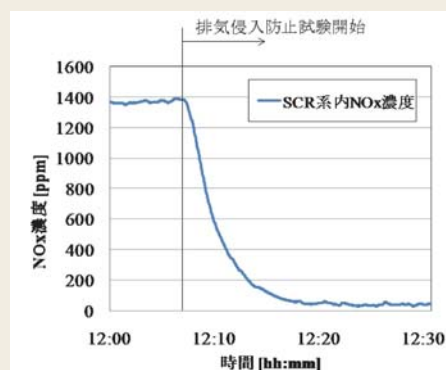


図13 排気侵入防止試験

侵入防止試験を開始する前はSCRシステム内のNO_x濃度が高く、排気が系内に侵入していることがわかる。空気の注入を開始した以降はNO_x値が低下しており、排気の侵入を防止できていることがわかった。本対策を実施した後の反応器内の様子を図14に示す。図14のように、対策実施後は図12のような腐食や堆積はなかった。その後も継続的な観察を行ったが、以降の試験ではSCRシステムの腐食トラブルは起きていない。

引き続き、4S50ME-Tを用いて、侵入防止のための空気量の最適化を進めている。



図14 触媒入口の状況(パージ後)

4.2 触媒差圧の上昇と活性の変化 実証試験でSCRを連続稼動させたところ、**図15**に示すような触媒の差圧が急激に増加する現象が生じた。

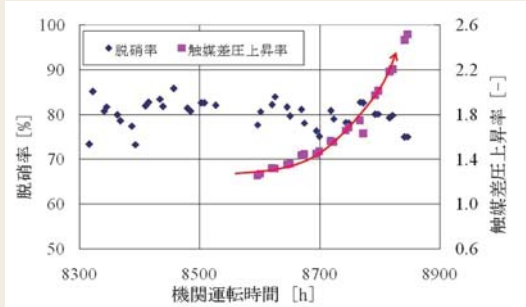


図15 就航船での触媒差圧の経時変化

触媒差圧の増加の原因は排気ガス中の煤等の物質により触媒が閉塞することであり、これにより触媒活性が低下してSCRシステムの性能に悪影響を与える。また機関側に対しても、空気量の減少により出力・燃費が低下するといった問題が生じる。

本システムには、稼働中の触媒清掃のために空気によるストブロー (Soot Brower : S/B) が装備されており、実船就航前の陸上・海上試験において、触媒閉塞防止に対する効果があることを確認していたこともあり、長期の運転でこのような問題が生じることは想定されていなかった。

この問題を解決するため、実証試験の結果を踏まえて以下の因子について検討し、S/B設計の最適化を行った。

- 噴射の時間間隔
- 噴射1回あたりの空気量
- 噴射の位置・向き

なお、最適化の前後でS/B全体での空気の消費量は変更していない。

図16に、S/B最適化の前後でのSCR稼動時の触媒差圧の推移を示す。

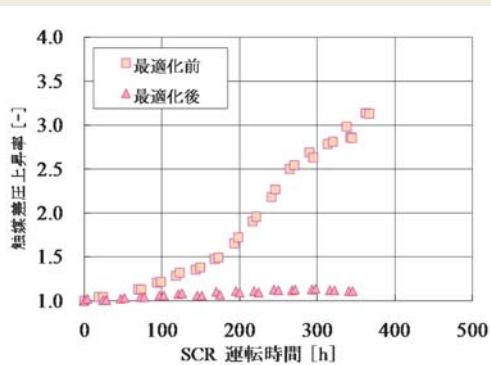


図16 S/B最適化前後の圧損上昇の比較

最適化前の設計ではSCRを稼動して約50時間を経過した時点から圧損が急激に増加しているが、最適化後では400時間程度の運転でもSCR稼動上問題のない程度に増加が抑えられている。以上の結果から、空気の消費量を変更しない範囲でS/Bの最適化を行うことで、長期の

運転においても触媒の閉塞を防止できることが確認できた。

また、最適化後のS/Bが触媒の構造を変更した場合にも有効であるかを確認するため、実船よりも触媒層を増加させ、触媒差圧が上昇し易い条件 (反応器内の排ガス温度:約310℃) とした場合のS/B試験を4S50ME-Tにて行った。**図17**に4S50ME-TでのS/B試験結果を示す。

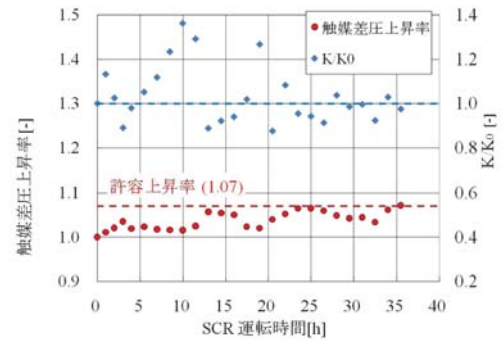


図17 触媒層を増加した際のS/B試験結果

図17のように、40時間の連続運転で触媒の差圧の増加は許容できる範囲内に収まっており、また、触媒の活性をあらわすK/K₀ (反応速度定数の初期値に対する経時後の値の比) にも低下は見られなかった。

4.3 排ガスエコノマイザ (排エコ) の圧損上昇

図18に示すように、実証試験において、TierⅢ脱硝でSCRシステムを運用している際、T/Cの後流に設置している排エコの圧損が急激に変化する事象が発生した。

港で排エコ内部を観察したところ、伝熱管や内壁に**図19**に示すような付着堆積が観察された。これより圧損上昇の原因は付着堆積による流路の閉塞であることがわかった。

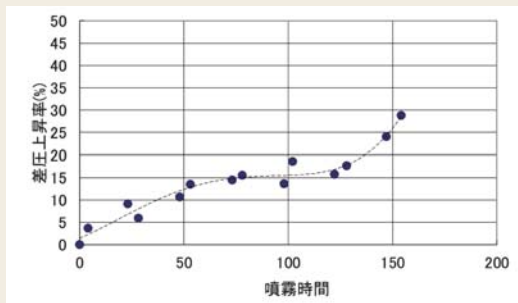


図18 実証試験での排エコの圧損上昇



図19 排エコの汚れ状況(硫黄分3.5%、155時間後)

SCRシステムをバイパスして運転している際、排エコには付着堆積がほとんどなかったことから、SCRシステムを稼動し、触媒を通過したNH₃(リークNH₃)がある時に、このような現象が起ると考えられた。

また、分析を行ったところ、付着堆積物の成分は煤が大半であるが、硫酸水素アンモニウム(酸性硫酸:(NH₄HSO₄))も多く含まれることが判った。

酸性硫酸の生成は、H₂OとSO₃とNH₃の反応によるもので、これらの物質はSCRシステム稼動中の排ガスに含まれることから、付着堆積の要因と考えられる。

そこで、付着堆積を抑制するため、以下の手法を検討した。

a) 到来物質(煤、H₂O、SO₃、NH₃)を減らす。

b) 付着堆積物を加熱減容させる。

前述の手法について、a)の煤の発生はディーゼルエンジンの燃焼状態と燃料性状に依存し、SO₃の発生は燃料油の選択に依存する。これらは、運転者側の判断によるため、SCRシステムとして取り組めるのは、リークNH₃の抑制となる。また、b)は酸性硫酸が熱を加えることで分解する現象を利用することで、付着堆積物を加熱する方法として、加熱した排気ガスを利用した。当社ではa)とb)の要素試験として、リークNH₃量の低減効果確認と排気ガス加熱の効果確認を行ったが、本稿では、リークNH₃の低減による効果について報告する。

4S50ME-Tに就航船と同じ排エコを設置するのは難しいので、本調査ではT/C後の排ガス系統から分岐した系統に、小規模の熱交換器(模擬排エコ試験装置)を設置した。その概観を図20に示す。



図20 模擬排エコ試験装置

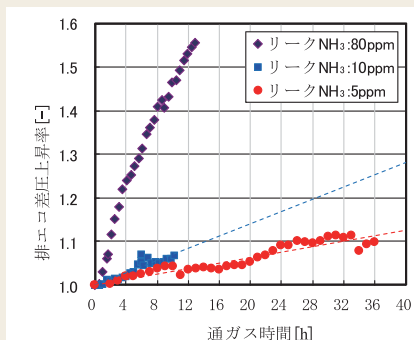


図21 リークNH₃濃度と排エコ差圧の関係

模擬排エコ試験装置でリークNH₃濃度を変えた時の排エコの差圧上昇の結果を図21に示す。なお、試験には、

陸上で使えるC重油(硫黄含有量:2.4%)を使用した。また、リークNH₃濃度は80ppm、10ppm、5ppmと3種類の濃度とした。

本試験では、まず、排エコの汚れを加速させるために、リークNH₃濃度を80ppmにして行った。想定どおり、圧損は急勾配で上昇し、就航船の排エコと同じように、酸性硫酸を含んだ付着堆積が起きていた。付着堆積の様子を図22に示す。次にリークNH₃濃度を下げた時の感度を見るため、10ppmにて試験を行った。80ppmの時よりも大幅に圧損の上昇は抑制できた。しかしながら、10時間で10%近く上昇しているの、100時間(約4日)で倍となることから、更に下げる試験を行った。

5ppmに下げると10ppmの時に比べて、排エコの差圧上昇は約44%に抑えられている。図23に付着堆積の様子を示す。一様に付着はあるが、非常に薄いものであり、問題ないものとする。

以上のようにリークNH₃を低下させることで、排エコの汚れや圧損の上昇を抑制できることを確認できた。

なお、リークNH₃は触媒量を最適化することで低減することが可能であり、当社では以上の試験結果と陸上のプラント等で培った知見より、排エコを健全な状態で保つ上で最適な触媒量を導き出した。今後、触媒量を最適にした状態での実証試験を行う予定である。



図22 NH₃濃度80ppmで試験した際の内部状況



図23 NH₃濃度5ppmで試験した際の内部状況

5. 結言

就航船での実証試験や4S50ME-Tでの各種試験において、分離型SCRシステムの課題と商用設計に必要な情報を得ることが出来た。分離型としての商品化開発は概

ね終了したので、今後は来るべき時に販売が出来るように、PR活動や営業活動に鋭意取り組むと共に、設計や製造の体制を構築していく所存である。

一方、長期運用の為の開発は継続すると共に、競争相手となるEGRやT/C後置きSCRに対しての差別化のための開発、例えば、蒸発器、反応器一体化によるコンパクトシステムの具体化といった事項にも、今後、鋭意取り組む予定である。

参考文献

- 1) H.Christensen, MAN Diesel & Turbo, Denmark: Continuous Development of TierIII SCR for Large Two-Stroke Diesel Engines, 27th CIMAC World Congress, 2013.
- 2) T.Fujibayashi, S.Baba, H.Tanaka:Development of Marine SCR System for Large Two-Stroke Diesel Engines Complying with IMO NOx TierIII, 27th CIMAC World Congress, 2013.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部
脱硝ビジネスユニット 設計部
村上雅明

Tel : 06-6569-0066 Fax : 06-6569-0115

E-mail : murakami_masaaki@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Machinery & Infrastructure Headquarters
DeNOx Catalyst & SCR System
Business Unit

Masaaki Murakami

Tel : +81-6-6569-0066 Fax : +81-6-6569-0115

E-mail : murakami_masaaki@hitachizosen.co.jp



村上 雅明



田中 博 仲



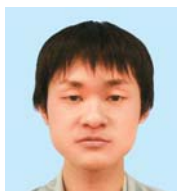
福山 雅久



藤林 孝博



岡崎 重樹



柴田 隼平



田中 裕士



平岩 俊介



小林 諒平



得津 裕太郎