船用大型 2 ストロークディーゼル機関用 SCR システム*

中 口 晴 允** 田 中 博 伸** 中 尾 徹***

Marine SCR System for Large 2-Stroke Diesel Engines

By Harunobu Nakaguchi, Hironaka Tanaka, Toru Nakao

The International Maritime Organization (IMO) has decided to implement a tighter limit for nitrogen oxide (NO_x) emissions from ships operating in emission control areas (ECA) from 2016. Hitachi Zosen Corporation has developed a Marine SCR (Selective Catalytic Reduction) system to denitrate exhaust gas of large two-stroke diesel engines in order to comply with the IMO regulation. Nippon Kaiji Kyokai issued a certificate attesting that a large two-stroke diesel engine Hitachi-MAN B&W 6S46MC-C7 with SCR system complies with the NO_x emission level required by the IMO regulation. This system was installed on a newly-built vessel, and verification tests were carried out for 2 years. As a result, the development was completed, and MAN Diesel & Turbo issued a certificate of approval for the manufacture and supply of High Pressure-SCR system to Hitachi Zosen Corporation for the first time in the world.

This paper reports on the outline of a marine SCR system, and sea trial results of the marine SCR system which was installed on the newly-built vessel. In addition, current efforts toward commercialization are introduced.

1. はじめに

近年、地球環境保全への関心が高まる中、船用ディーゼル機関から排出される大気汚染物質規制に対して国際的な取組みが進められている。IMO における船舶からの NO_x 排出規制も対象の一つとして重要視されており、図 1 に示すように段階的に規制が強化されている。

図 1 IMO の NO_x 排出規制

既に開始されている 2 次規制 (Tier II) は、2011 年以降に建造された船舶に適用されており、定格回転数 ≤130 rpm の機関では、2000 年から実施されている 1 次規制 (Tier I) の規制値より排出量を 15 %削減することが義務付けられている。また、2016 年より予定されている 3 次規制 (Tier III) は、その適用が指定海域 (ECA) に限定されるものの、Tier I から 80 %削減と非常に低い NO_x 排出規制値となっている。

この新規制への適用技術としては、もはや燃焼改善等機関単体での対応が困難であることから、既に陸上発電設備等で数多くの実績を有する SCR (Selective Catalytic Reduction) が期待されている。著者らは、陸上プラントで培った触媒脱硝技術を用いて、日立造船 (株) が製造する船用 2 ストロークディーゼル機関のライセンサーである MAN Diesel & Turbo と共同で、船用大型 2 ストロークディーゼル機関用 SCR システムを開発し、実用化した。

本稿では、このシステムを搭載した新造船での海上実証試験の結果を報告するとともに、現在行っている製品化に向けての取り組みを紹介する。

*原稿受付 平成 27 年 6 月 20 日。

** 日立造船株式会社 (大阪市住之江区南港北 1-7-89)。

***正会員 日立造船株式会社 (大阪市住之江区南港北 1-7-89)。

表 1 機関諸元

Hitachi-MAN B&W 6S46MC-C7	
No. of cylinder	6
Bore	460 mm
Stroke	1,932 mm
Output/Speed	6,780 kW×111 rpm

試験台にて行った脱硝試験の結果を図 5 に示す。本実証機関は IMO の 1 次規制適用の機関であり、図 5 に示すように SCR を用いない場合の加重平均値 (E3 サイクル値) は、IMO 1 次規制を満足する 14.6 g/kWh である。

この機関に対して SCR システムを作動させた結果を同様に図 5 に示す。全負荷域で NO_x の規制値 3.4 g/kWh を下回る結果が得られており、3 次規制要求を満足する高い脱硝性能が示された。

図 5 試験台での脱硝性能試験結果

本試験は日本海事協会立会の元で実施されており、IMO 3 次規制の NO_x 排出規制値を満足することを実証できたことから、図 6 に示す鑑定書が発行された。

図 6 日本海事協会による鑑定書

3.2 海上公試

3.2.1 SCR システムの機関室内配置

前項の陸上試験完了後、主機及び各 SCR 機器を船舶の機関室内に搭載し、実海域での SCR 運転による機関性能・応答性・脱硝性能を確認すべく、海上公試を行った。表 2 に SCR システム搭載船概要を示す。

表 2 SCR システム搭載船概要

Name	Santa Vista
Type	General Cargo, 38000DWT
Operator	JX Ocean Co., Ltd
Builder	Naikai Zosen Corporation
Ship Delivery	31 October 2011

SCR システムを設置した機関室の様子を図 7 に示す。SCR 構成機器を配置する際には、機関及び SCR のメンテナンスがし易いよう十分な配慮が払われている。

図 7 機関室内の SCR 配置状況

3.2.2 機関性能評価

SCR を作動させた時と作動させない時 (SCR バイパス運転) の機関性能を図 8 に示す。タービン前に SCR を配置している本方式では、排気ガスを排気集合管からタービンに直接導く場合に比べて圧力損失が大きくなるが、タービンの過給性能低下に伴う機関性能への影響は、図 8 に示すように大きな差異は見られないことが確認された。また、CBV (Cylinder By-pass Valve) の開度制御により低負荷でも、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 (図中の矢印) ことが確認された。

図 8 海上公試における機関性能評価

3.2.3 機関応答性評価

海上試運転時の急増速操作時の機関応答を図 9 に示す。RSV, RTV, RBV の 3 つのバルブを制御することで、緊急時を想定した 3 分間で急激に負荷上昇させた場合でも、掃気圧及びタービン回転数が速やかに安定し、高い応答性・追従性を得ることに成功している。同様に、急減速操作や SCR システム起動、停止時においても同様のバルブ制御を行っており、高い応答性を確保している。

図 9 海上公試における機関応答性試験結果

3.2.4 脱硝性能評価

海上公試では、目標脱硝率を 80% に設定して自動制御による脱硝運転を行った。この結果、図 10 に示す通り、25%, 50%, 75%, 100% の各負荷で 80% の脱硝率を達成するとともに、NOx 排出量の加重平均値 (E3 サイクル値) は 3.1g/kWh となり、3 次規制の規制値を満足することを確認した。

図 10 海上公試における脱硝性能

3.2.5 海上実証試験の内容

海上公試の後、2 年間に渡り海上実証試験を実施した。試験項目には、将来の長期運用を踏まえて、表 3 に示す通り様々な運転条件を盛り込んだ。これにより、最適な運用条件を確立するとともに、長期の安定運転が可能であることを実証した。

表 3 実証試験項目

脱硝率	30 %, 50 %, 80 %
尿素水濃度	32.5 %, 40 %
尿素性状	尿素水, 尿素粉
SCR 運転モード	使用, バイパス
反応器スツブロー試験条件 (噴霧間隔)	Long, Middle, Short
Exhaust Gas Economizer (EGE)	使用, バイパス
燃料中 S 分	1 %, 3 %

4. 製品化に向けた取り組み

4.1 SCR システム設計標準化

これら就航船における長期試験を基に、当社では 2016 年から開始される 3 次規制に向けて、SCR システムの標準化を進めている。SCR 機器サイズラインアップを図 11 に示す。処理ガス流量は、約 10000～450000 kg/h (概算機関出力：1000～59000 kW) に対応している。

なお、IMO による大気汚染物質規制は硫黄酸化物 (SOx) も対象となっていることから、昨今は主機燃料として低硫黄燃料も注目を集めているが、本 SCR システムは、高硫黄 (3.5 %) 及び低硫黄 (0.1 %) の両燃料油に対応可能である。

図 11 SCR 機器サイズラインアップ

また、当社では SCR ラインアップの整備とともに、造船所向けの標準資料を準備している。この標準資料

では、配管や機器等の設置要領も記載しており、本 SCR システムを容易に機関室内に配置することが可能である。

4.2 機関室内の SCR 配置計画

SCR システムの配置計画は、標準資料に基づき造船所にて図 12 に示す配置設計業務フローに従って進められる。

図 12 配置設計業務フロー

一例として、機関室内に配置した SCR 配管の応力解析結果の SCR 配置を図 13 に示す。排ガスによる熱膨張や排ガス圧力による作用力 (推力) を考慮して設計されている。

図 13 機関室内に配置した SCR 配管の応力解析の結果

4.3 尿素水製造装置

4.3.1 尿素水の保管方法

SCR システムは尿素水（還元剤）を使用するため、港停泊時にこれら尿素水を補充し船内に保管する必要がある。船内での尿素水の保管は重量やスペース等の船内環境や積載貨物量に影響を与える。船内での尿素水の保管方法には、以下の 2 種類が挙げられる。

- ① 航海中に必要な尿素水の全量をあらかじめ搭載してタンクに保管
- ② 尿素粉を船内に搭載して保管し、その都度船内造水装置の水で溶解して必要な量の尿素水を製造

4.3.2 尿素水と尿素粉の比較

ISO の尿素水の品質基準 AUS40 に基づき、国内で調達した場合を前提として、排ガス脱硝用尿素水（濃度 40.0 %）を使用する場合の尿素水と尿素粉の保管重量と体積の比較結果を図 14 に示す。尿素水で保管した場合を 100 % とすると、尿素粉で保管した場合、重量 40 %、体積 49 % となるため、尿素粉を船内で保管する方が有利であると言える。

図 14 尿素水と尿素粉の比較（重量・体積）

次に、TierⅢ適合船が TierⅢ海域（ECA 域）を航行する場合について比較して図 15 に示す。機関出力は 10,000 kW、NOx 低減量は 11.0 g/kWh とし、TierⅢ海域を 1 往復当たり 4 日で通過すると仮定して、1 往復したときの尿素消費量を試算した。なお、尿素水 1 L 及び尿素粉 1 kg の価格はほとんど同じなので、共に 70 円と仮定する。

図 15 対象船航海モデル

試算結果を図 16 に示す。尿素粉の方が、尿素水の場合よりも、1 航海当たり 614,000 円のコストダウンが可能との試算結果となった。すなわち、保管重量及び体積のみでなく、運用コスト面でも尿素粉を船内で保管する方が有利であると言える。

図 16 尿素水と尿素粉の比較（コスト）

4.3.3 尿素水製造装置の概要

SCR システムと同時に、当社では船内で尿素粉から尿素水を製造する尿素水製造装置も開発した。尿素水製造装置の概略を図 17 に示す。また以下に本装置の特徴を示す。

- a) 粉体投入時の破損を防止する為、攪拌翼を廃止し、循環ラインからのタンク内渦流発生により攪拌。
- b) 濃度を自動的に調整可能。
- c) 尿素水の循環及び貯蔵タンクへの移送は、バルブの切り替えによりポンプ 1 台で可能。

図 17 尿素水製造装置概略図

5. まとめ

陸上試験及び就航船での海上実証試験を経て、本システムの開発を完了させた。この実績を基に、2014年には世界で初めて、機関ライセンス (MAN Diesel & Turbo) から SCR システムの製造供給認証を取得した (図 18)。

今後は、さらに量産化に向けた設計標準化や製造体制の構築を進め、広く海運の低エミッション化ひいては地球環境の保全に貢献できるよう邁進する所存である。

図 18 MDT による装置認証

謝辞

本稿を執筆するにあたり、実証試験の場を提供して頂いた JX オーシャン株式会社、就航船の計画段階からご支援頂いた内海造船株式会社、共同開発パートナーとして協力頂いた MAN Diesel & Turbo を始め、多くの関係者の方々の多大なるご支援のもと、マリンエンジニアリングオブザイヤーを受賞することができた。その他多くの関係各位にこの場を借りて深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 馬場真二, 中尾徹, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 46, No. 6, pp.20-25, (2011).
- 2) 村上雅明, 中尾徹, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 50, No. 1, pp.107-112, (2015).
- 3) 村上雅明ほか 9 名, Hitz 技報, Vol. 75, No. 1 (2014)

著者紹介

中口 晴允
・ 1989 年生.
・ 日立造船株式会社
・ 最終学歴. 大阪府立大学, 院
機械系専攻修了

田中 博仲
・ 1971 年生.
・ 日立造船株式会社
・ 最終学歴. 大阪大学
・ 専門分野. 脱硝反応技術

中尾 徹
・ 日本マリンエンジニアリング学
会 正会員
・ 1950 年生.
・ 日立造船株式会社
・ 最終学歴. 大阪市立大学, 院
・ 専門分野. 内燃機関