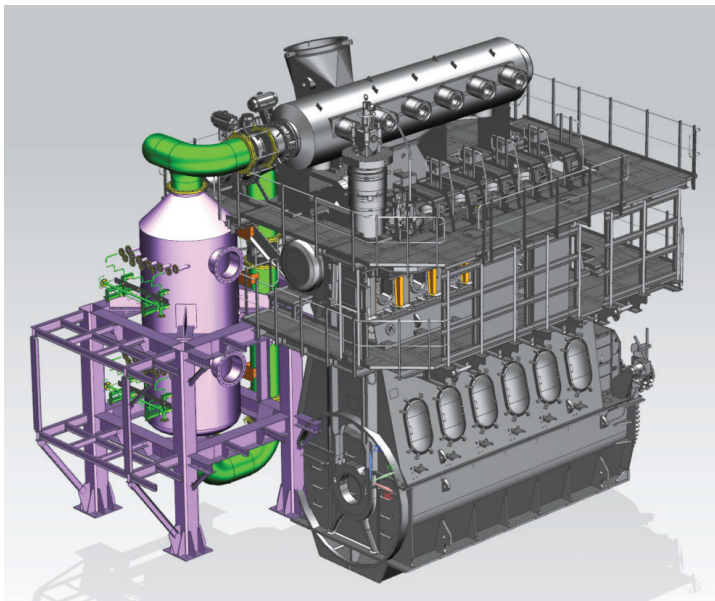


船用2サイクルディーゼル機関用SCRシステム 第2世代コンパクトSCRシステムの開発



岡崎 重樹 □
安部 慎太郎 □
森 勇人 □
梶上 恵理 □
児玉 渉 □

要旨

環境汚染物質に関する排出抑制の一環として、船舶由来の窒素酸化物（NO_x）の規制が施行されており、約80%の除去率が要求される第3次規制（TierⅢ）の適用が一部海域で開始されている。当社は陸用脱硝装置で培った触媒を含むSCR技術をベースに、2010年よりTierⅢ規制を満足する船用SCRシステムを開発し、実証船での検証試験を経て2017年に初号機を受注した。

この後、顧客からさらにコンパクトなシステムを実用化して欲しいとの要望があり、従来の高圧型SCRシステム（以下、HP-SCR Mk-I）を小型化した第2世代高圧型SCRシステム（以下、HP-SCR Mk-II）を開発し、こちらも2020年より納入を開始した。このHP-SCR Mk-IIは、HP-SCR Mk-Iで必須だった蒸発器を省略したことにより省スペース化を実現しており、顧客から高い評価をいただいている。

本稿ではHP-SCR Mk-IIシステムを実用化する際の課題および検討結果について報告するとともに、HP-SCR Mk-IIシステムを活用したさらなる省スペース化と、艤装の簡素化を実現するために検討を進めている支持構造案について報告する。

キーワード

IMO, NO_x TierⅢ, 船用ディーゼル機関, 2ストローク機関, SCR, 尿素SCR, 脱硝, 省スペース, 艤装

1. 緒言

世界的な経済成長に伴う海運量の増大が見られるなか、重油を主体とした化石燃料由来の大気汚染物質を対象に各種環境規制が施行されており、PM2.5や酸性雨の原因物質とされる窒素酸化物（NO_x）についても国際的な規制が適用されている。国際海事機構（IMO：International Maritime Organization）によるNO_x規制は2000年から開始されており、2016年以降の起工船に対し、もっとも厳しい第3次規制（TierⅢ）が一部海域で適用されている。この大気汚染物質放出規制海域（ECA：Emission Control Area）では、エンジン1 kWhあたりNO_x排出量3.4 g/kWh以下を満足することが要求されている。このECA域として、2016年に北米海域が最

初に指定され、次いで2021年には北海、バルト海も指定されている。いずれも海上交通への影響が大きい先進国沿岸域が対象であることから、年別の新造外航船建造数に対するTierⅢ適用率は、すでに半数を超える状況となっている。

この第3次規制値は、第2次規制（TierⅡ：一般海域で14.4 g/kWh以下）に比べて許容NO_x排出量が1/4未満となる非常に厳しい値であるため、従来の燃料弁の最適化や機関調整の変更等といったディーゼル機関の燃焼技術を用いた対策では規制値を満足できず、化学反応を利用した選択的触媒還元法（SCR：Selective Catalytic Reduction）あるいは排ガス再循環方式（EGR：Exhaust Gas Recirculation）による装置が必要となる。現在では両方式とも実用化され、広く搭載が進行している。

当社は船用エンジン製造だけでなく、陸上用機器を

対象としたSCR触媒の開発と製造、ならびにSCRのシステムエンジニアリングを長期にわたり保有していることから、2010年よりTierⅢ規制に向けた船用SCRシステムを開発し、実証船での検証試験を経て、2017年に初号機を納入した。現時点(2022年9月末)までの船用HP-SCRシステムの受注台数は約150台に達している。またSCRの累計運転が10,000時間を超える複数の船で、触媒を含むSCRシステムには不具合が見られないなど、SCR稼働状況は総じて順調である。

このHP-SCRシステムは機関室内に配置されることから所要容積や設置場所の確保が従来から課題とされてきた。加えて、SCR搭載対象船が小型船側へも徐々に拡大するにつれ、さらにコンパクトなシステムの実用化に向けての顧客要望が増加した。このコンパクト化はSCR製品の競争力向上にも直結することから、当社では従来の高圧型SCRシステム(以下、HP-SCR Mk-I)の改良型となる第2世代高圧型SCRシステム(以下、HP-SCR Mk-II)を開発・製品化し2020年度より納入を開始した。

このHP-SCR Mk-IIの最大の改良点は、尿素水を噴霧していた蒸発器を省略し、代わりにエンジン上で各シリンダからの排気を集合させている排気管内にて尿素水を噴霧する方式に変更することで省スペース化を実現した点である。この改良は顧客からも高い評価をいただいております。現時点(2022年9月)で70台以上の受注に繋がっている。

本稿ではHP-SCR Mk-IIシステム実用化を考えるうえでの課題および検討結果について報告する。また、顧客からのさらなる改良要望を背景に、HP-SCR Mk-IIシステムを活用した省スペース化、艙装の簡素化のために検討中の支持構造提案についても併せて報告する。

2. HP-SCR Mk-IIの概要

SCRシステムとは排ガス中にNH₃や尿素といった還元剤を予め混合しながら、下流側に配置する脱硝触媒上での化学反応を利用してNO_xを除去する技術である。1970年代に実用化された陸上固定発生源用に加え、近年では自動車など移動発生源用としても各国で実用化され、船用機器で実用化する前からNO_x除去方式として確固たる地位を構築している方式である。船用SCRシステムでは保存の容易さおよび安全性の観点から還元剤として尿素水を使用する。高温の排気ガス中に噴霧された尿素水は、蒸発および加水分解によりNH₃に転換され、触媒上でNO_xと反応することで、有害なNO_xが無害なN₂とH₂Oに還元される。

図1のHP-SCR Mk-Iシステムの場合、排気ガスは排気管より蒸発器に導かれ、この蒸発器内で還元剤である尿素水の噴霧・蒸発が行われる。排気ガスと還元剤の混合ガスは、下流側の反応器内に設置された触媒を通過する際に脱硝反応が進行してNO_xが除去される。無害化された反応後の排気ガスは、ターボチャージャー(T/C)を経由して煙突より船外へ排出される構成となっている。

一方、図2のHP-SCR Mk-IIでは複雑な非常流れとなる排気管内に尿素水を噴霧することで、従来蒸発器内で行われていた尿素水の蒸発および排気ガスと還元剤のミキシング過程を排気管内で完了できる利点がある。これによりHP-SCR Mk-Iでは必要だった蒸発器を省略することが可能となり、小型化を実現できた。



図1 HP-SCR Mk-I



図2 HP-SCR Mk-II

3. HP-SCR Mk-IIシステムの実証試験

HP-SCR Mk-IIの検討では、排気管内で還元剤(尿素水)の噴霧、蒸発、加水分解のプロセスが実現可能であることを実証する必要があった。このため自社保有の試験エンジン(4S50ME-T)を対象に、シミュレーションによる検討を行い、さらに実機での陸上運転にて実現可能性を確認した。

3.1 解析による検討

シミュレーション検討では、CFD流体解析法により排気管内噴霧後の還元剤の蒸発挙動及び排気ガスへの拡散及び濃度均一化過程を解析した。この際、実際の噴霧現象を再現するために、以下の連成解析を実施した。

- 燃焼室出口の境界条件を排気ガス条件とし、エンジンの着火順序で排気管に流入させた流体解析
- 還元剤噴霧及び蒸発と加水分解反応解析

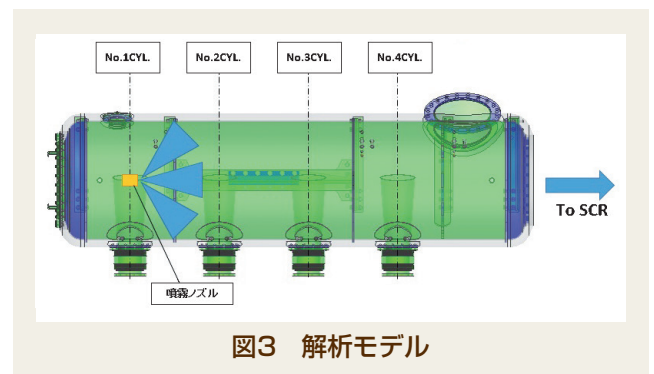


図3 解析モデル

解析の結果、還元剤の蒸発および排気ガスへの拡散が排気管出口で完了していることと、還元剤粒子が排気管壁面に接触する前に蒸発が完了していることを確認した。

これらは、本システムの成立に必要な設計条件であり、解析の結果、蒸発器を廃止して排気管内で還元剤を噴霧するシステムが成立する可能性が高いことを確認できた。

3.2 陸上試験での確認 先述した解析結果を基に、自社試験エンジンを用いて排気管内還元剤噴霧の妥当性を検証した。検証項目は、脱硝性能と、排気管内壁への還元剤由来の付着物の有無とした。

脱硝性能の確認では、注入NH₃(還元剤)/NO_xモル比と脱硝率に相関性があり、またMk-Iと同等の脱硝性能が得られたことにより、排気管内で尿素水を噴霧した際のミキシング性能および脱硝性能が十分確保されていることを確認した。

脱硝試験を行ったのち、排気管内部及び反応器における還元剤由来の付着物の有無を確認した。この際、排気ガス最低温度維持制御をカットして条件を悪化させながら運転したが、**図4**に示すように排気管内部の様子は尿素水噴霧が無い場合と変わらず、目立った付着物は見られなかった。また、還元剤噴霧のために挿入している噴霧ノズルのランス部の一部に白色の付着物が確認されたものの、通常運転時における排気管内雰囲気温度の昇温により消失可能なことを確認した。これらに加え、尿素水流量の追従性や制御シーケンスを確認し、従来型HP-SCR Mk-Iと同様に問題なく運転できることを確認した。

これら各種運転試験の結果を元に、排気管内還元剤噴霧技術を確立し、エンジンライセンサー(MAN-ES)より本システムの製造承認を取得した。

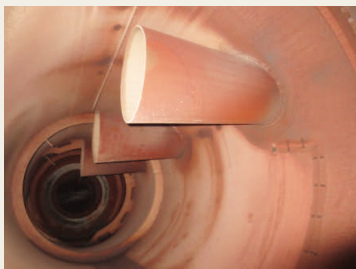


図4 脱硝試験後の排気管内部点検結果

4. 排気管噴霧の実機適用のための設計検討

還元剤の排気管内噴霧に対する基本設計思想の妥当性検証試験の完了後、実機適用を考慮して、大きさ、構造など様々なバリエーションを有する排気管への適用検討を実施した。

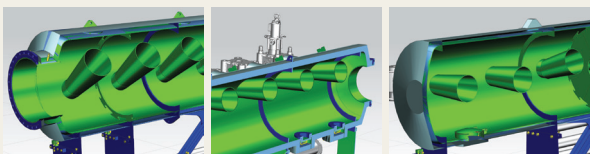


図5 各エンジンタイプの排気管構造

代表的な検討項目としては以下が挙げられる。

- 排気管首尾方向の還元剤噴霧ノズルの設置位置
- 振動環境(エンジン排気管内部)をふまえた還元剤噴霧ノズルの構造

これら各項目に関する検討内容及び結果を4.1及び4.2に示す。

4.1 排気管首尾方向の還元剤噴霧ノズル設置位置 シリンダ数はエンジンのタイプによっても異なるが、商業機には一般的に5気筒以上が適用されている。排気ガスへの尿素水の均一混合という観点からは気筒数が少ないほど不利であるとも考えられるが、ここでは適用例が多い6シリンダエンジンに対し、排気管内で還元剤噴霧ノズルの位置を変えながら実施した試験結果を示す。**図6**に試験エンジンのシステム概要図を示す。

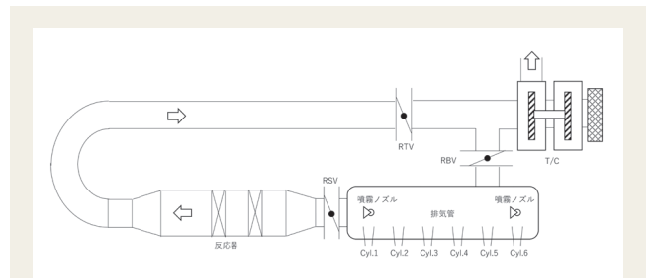


図6 試験エンジンのシステム概要図

図6に示すように、還元剤噴霧ノズルを排気管出口側近傍のNo.1シリンダ(Cyl.1)、No.2シリンダ(Cyl.2)及び排気管出口から最も離れたNo.6シリンダ(Cyl.6)の位置に配置した。

この条件下で脱硝性能及び排気管内壁面へ及ぼす影響を比較したところ、各噴霧位置での脱硝性能は同等であり差異は生じないことを確認できた。このことから、脱硝性能に対する還元剤の噴霧位置の影響はほとんどなく、排気管内の任意の位置に還元剤噴霧ノズルを設置可能と判断した。

4.2 還元剤噴霧ノズルの構造検討 還元剤噴霧ノズルは、細長い鋼管と、その先端に取り付けた還元剤噴霧装置で構成される(**図7**参照)。トップヘビーな構造のため、振動環境下である排気管内への設置に際しては、ノズルの固有振動数とエンジンの振動周波数とが合致しないよう設計的配慮が必要となる。

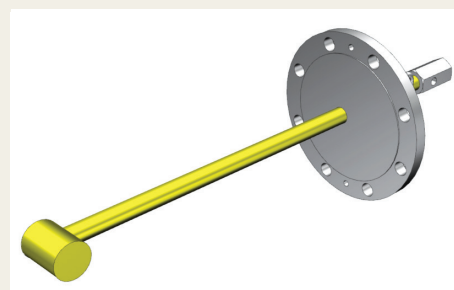


図7 還元剤噴霧ノズル概略図

メンテナンス時の着脱の簡便さと機関室内アクセスを考慮して、排気管下部から人の手によって噴霧ノズルを挿入・着脱する必要があることから、本ノズルの重量は20 kg以下を目標として設計している。

また、噴霧によってミスト化した還元剤は円錐状に広

がる。この広がり半径はノズル先端の噴霧装置の位置で変化することから、ミスト化した還元剤が周辺構造物に接触しないよう、還元剤噴霧ノズルの長さを選定するようにした。

設計・選定した還元剤噴霧ノズルの重量と長さの妥当性を検証するため、前述した固有振動数の解析および実機の振動計測結果を比較した。いずれの機関負荷においても共振するような振動は見られなかった。また計測された固有振動数は解析値とも近い値を示したことから、固有値解析結果の妥当性も確認できた。

またこの検討により、エンジンの回転一次振動数に対して、固有振動数が1.5倍以上のマージンを持っていることも確認した。

以上の結果から、振動環境下における還元剤噴霧ノズル構造の妥当性を確認できた。

5. HP-SCRの省スペース化と艙装簡素化検討

3章及び4章でそれぞれ検討した結果を基にして実機設計基準を構築し、本基準をベースに2020年度にMk-II初号機を納入以降、いずれも順調な稼働実績を示している。

なおMk-I/Mk-IIに関わらずHP-SCRでは反応器設置位置の検討ならびにエンジンとHP-SCRを接続する排気ガス管の設計が必要であるが、造船所や船種によって異なる配置が計画されることから、実際の設計ではケースバイケースとなっているのが実情である。排気ガス管の設計は当社の顧客である造船所の所掌範囲であるが、高温・高圧の排気ガスを前提とした設計であり設計難易度も高いため、当社では『船用SCRシステム全体にかかる熱応力解析の実施と配管レイアウト及び配管サポート形状の助言』などの設計支援を行うことで顧客の負担軽減に努めてきた。熱応力解析例を図8に示す。

この設計支援には一定の評価を頂いているものの、依然として顧客での詳細設計や艙装が残ることから、この部分を如何に簡略化するかが次の検討課題となっている。

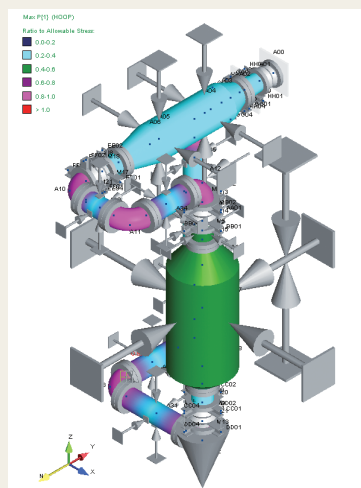


図8 排気管の熱応力解析の例

この課題解決へのアプローチとして反応器支持架構を新たに設け、これに排気ガス管を含むSCRコンポーネントをプレファブ化する方式の検討を新たに開始した。具体的には、支持架構ごとエンジン直近に配置することで排気ガス管長さを最小化する方式である。排気ガス管の熱応力解析から詳細設計に至る顧客の設計負荷の低減と艙装簡素化の両立を目的としたアプローチである。

5.1 反応器と排気ガス管のプレファブ支持架構化による造船所側の省力化

前述したように反応器支持架構をエンジン近傍に設置することにより排気ガス管総延長の最小化が期待できることから、まずエンジン近傍に反応器支持架構の設置が可能か検討した。

支持架構は反応器重量や排気ガス管付帯部品の静的荷重および排気ガス管に作用する熱応力由来の力に加え、船体揺動も考慮した上での構造設計が必要となる。図9に支持架構のイメージを示す。図中の紫色に着色した部分が反応器ならびに支持架構である。

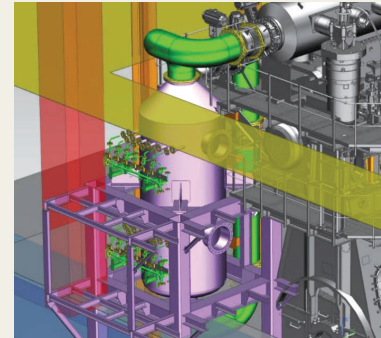


図9 反応器ならびに排気ガス管一体化設計における支持架構のイメージ

5.2 エンジン搭載スペースへの設置検討

このプレファブ化の最大の特長は、反応器の搭載及びHP-SCR排気ガス管の組付けを支持架構内部で完結することが可能となり、さらにエンジン搭載スペースへエンジン本体と並べて設置することを期待できる点である。これらはTier IIからTier III NOx規制対応船の製造へと移行する上で、顧客側から見ても大きなメリットとなると考えられ、引き続き顧客と協同で実用化を目指すこととしている。

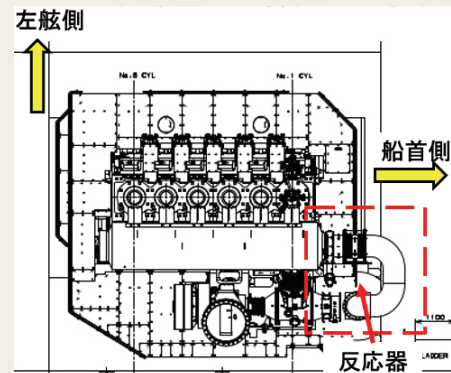


図10 機関室内でのエンジン、SCR設置案

6. まとめ

日立造船では長年培ってきたエンジン製造、SCR触媒およびシステム構築技術を組み合わせながら船用SCRシステム（HP-SCR Mk-I）を他社に先駆けて実用化し、2017年に初号機を納入している。

顧客（船主および造船所）からはさらにコンパクトな装置をとの要望を頂いてきた。そのご期待に応えられるよう研究開発を継続し、従来型のHP-SCRシステム（HP-SCR Mk-I）を小型化したHP-SCR Mk-IIを開発した。2020年度の納入開始ののち、多数の発注を頂戴している。

現在、機関室内のスペースやデッキ高さに制約のある船種（例えばコンテナ船など）に対するSCRの搭載に対して、HP-SCR Mk-IIをベースに、さらなる省スペース化や艙装簡略につながるプレファブ化の検討を実施しているところである。

本検討では、一般的なバラ積み船向けを想定して機関室船首側への配置をベースとした。しかし、機関室船首側のみでなく機関室船尾側やエンジン上方スペースなど、顧客によって配置場所の要望が異なることが予想される。これらの要望に対し、当社の豊富な経験と実績を基に、より幅広い船種にも適用できるように、技術研鑽を継続する所存である。

SDGsに貢献する技術

IMOの定める窒素酸化物（NO_x）の第三次規制（Tier III）を達成することにより、規制海域での海洋酸性化に貢献する。

文責者

日立造船株式会社 脱炭素事業本部
船用機器・脱硝ビジネスユニット 脱硝設計部
岡崎重樹
E-mail : hitzgiho001@hitachizosen.co.jp

Development of Second-Generation Compact Marine SCR System for Two-Stroke Diesel Engines

Abstract

As part of its efforts to limit the emission of environmental pollutants, the International Maritime Organization (IMO) enforces controls on nitrogen oxide (NO_x) emissions from marine diesel engines. Its strict Tier III controls, requiring NO_x reductions of about 80%, have been in place for vessels operating in some areas since 2016. At Hitachi Zosen, we drew on our land-based SCR technologies, including NO_x removal catalysts, to develop a marine SCR system that satisfies Tier III standards in 2010, and following on-board tests, launched our first commercial SCR system in 2017.

After delivery, in response to the customer's request for a system even smaller in size, we improved on our high-pressure SCR system HP-SCR Mk-I and developed a more compact second-generation system, HP-SCR Mk-II, and delivered the first unit in 2020. The HP-SCR Mk-II was welcomed by the customer for the space savings achieved by removing the vaporizer that was essential in the HP-SCR Mk-I.

This paper reports on the technical challenges of and our solutions to commercializing the HP-SCR Mk-II, and presents our future proposal of a supporting structure based on the HP-SCR Mk-II for further space savings and simplified rigging work.

Authors

Shigeki Okazaki (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : hitzgiho001@hitachizosen.co.jp)
Shintaroh Abe Yuto Mori Eri Kajiue Sho Kodama