

メガコンテナ船向け舶用 SO_x スクラバー実設計

Practical Design of Marine SO_x Scrubber for Mega-Container Ships



佐々木 良三^{*1}
Ryozo Sasaki

長安 立人^{*2}
Tatsuto Nagayasu

神宮 敏樹^{*3}
Toshiaki Shingu

渡辺 祐輔^{*4}
Yusuke Watanabe

森 貴昭^{*5}
Takaaki Mori

櫻井 秀明^{*6}
Hideaki Sakurai

2020年1月よりIMO(International Maritime Organization:国際海事機関)の定める規則により全海域において船舶で使用する燃料油中硫黄分の規制が強化される。本規制に対応でき、かつ超大型コンテナ船用の大出力機関にも対応できる処理能力を実現したSO_xスクラバーの実設計について紹介する。三菱日立パワーシステムズ(株)(以下、当社)が陸上ボイラ向けに長年培ってきた角形排煙脱硫装置を船舶向けに展開することで、特に大型コンテナ船向けにおいて配置優位性があり、積み荷を減らすことなく設置することが可能となる。排出規制が特に厳しいECA(Emission Control Area:排出規制海域)を含めた全海域の規制に対応可能な高い硫黄除去効率を得られる設備を提供する。

1. はじめに

大気環境でのSO_x排出規制は、従来、火力発電所等の陸上での固定排出源を対象に、規制されていた。

海上での船舶においても、IMOの定める規則により欧州の北海及びバルト海や北米沿岸海域など汚染物質のECAでは2015年1月1日以降、硫黄分が0.1%を超えない燃料油の使用が強制化され、ECA以外の一般海域においても2020年1月1日以降、0.5%を超えない燃料油を使用することが義務づけられる(図1)。

一方、低硫黄燃料油使用の代替手段として、従来の重油燃料を推進用及び発電用ディーゼルエンジンで燃焼させ、その燃焼排ガス中の硫黄酸化物を規制値以下に低減できる装置(Exhaust Gas Cleaning System:EGCS)を使用することが認められており、SO_x規制に対する同等措置に関する指針として、決議MEPC.259(68):2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems(以下、IMO EGCSガイドライン)が採択されている¹⁾。低硫黄燃料は従来の重油燃料に比べ高価な上、将来的な需要増加に対する供給能力は不透明であるといった背景から、安価で十分な供給能力のある従来の重油燃料の継続使用が可能なEGCSに対する需要が高まっており、多くの舶用機器メーカや排煙脱硫装置メーカがこの市場に参入している。

*1 三菱日立パワーシステムズ(株)環境プラント総括部環境プラント技術部

*2 三菱日立パワーシステムズ(株)環境プラント総括部 副総括部長 技術士(機械部門)米国 Professional Engineer

*3 三菱日立パワーシステムズ(株)エンジニアリング本部建設総括部土木建築技術部 主席技師

*4 三菱造船(株)マリンエンジニアリングセンター開発部 主席技師

*5 三菱造船(株)マリンエンジニアリングセンター長崎設計部 *6 三菱重工(株)総合研究所化学研究部

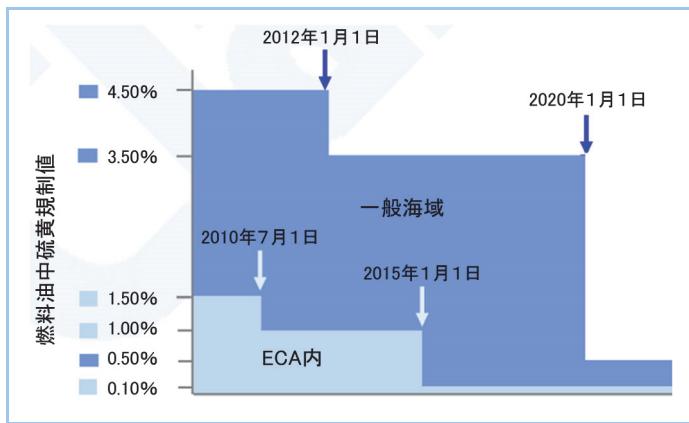


図1 船舶用燃料油中硫黄規制値

2. 火力発電所向け海水方式脱硫装置

日本では 1960 年代以降に深刻化した環境問題への対応から大気汚染物質の排出基準値が段階的に強化されており、各排煙脱硫装置メーカーは国内外の主に火力発電所向けに環境装置を設計・納入し環境保全に取り組んできた。

火力発電所からの排ガスを脱硫処理するプロセスとしては主に湿式法、乾式法、半乾式法がある(表1)。

表1 火力発電所における主な脱硫技術の概要

脱硫方法		プロセスの概要
湿式法	アルカリ吸収法 (代表例) ○ 石灰石膏法 ○ 海水法 ○ ソーダ法 ○ 水酸化マグネシウム法	①SO ₂ をアルカリ水溶液又はスラリーで吸収 ②生成する亜硫酸塩を必要に応じて酸化し硫酸塩に転化 ③生成物は、回収利用または廃棄 ④使用するアルカリの種類により幾つかのプロセスがある ⑤主なプロセスは石灰石膏法と海水法
半乾式法／乾式法	スプレードライ法	①消石灰スラリーを反応塔中に噴霧して SO ₂ を亜硫酸カルシウムなどの粉体に転化 ②集じん装置で捕集、捕集物は廃棄
	活性炭法	①活性炭により SO ₂ を吸着 ②吸着 SO ₂ を加熱脱着して高濃度 SO ₂ を回収し、石膏、硫酸等に転化

その中でも船舶の排煙処理に適した湿式法における海水脱硫方式について紹介する。

図2に海水脱硫装置のシステムフロー図を示す。海水方式の脱硫装置では、排ガス中硫黄分の吸収剤として石灰石や水酸化マグネシウム等の薬剤を使用せず、海水中に自然に含まれるアルカリ成分(HCO₃⁻)を利用して脱硫を行う。

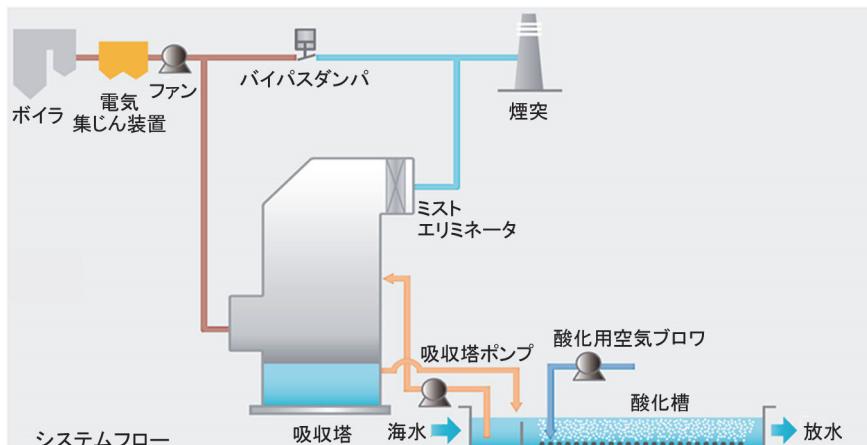
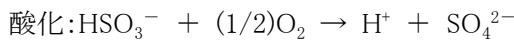


図2 海水脱硫装置のシステムフロー

この方式はシンプルな構成であることから吸収剤が入手困難である場合や、副生物の処理が困難な場合でも、脱硫が可能であるため近年東南アジアや中近東、インドを中心に新興国の発電所で採用される機会が増えている。海水脱硫の原理としては、吸収塔で海水中に排ガス中の SO_2 を吸収し、これにより発生した亜硫酸イオン (HSO_3^-) を酸化槽で大量の空気と接触させることにより酸化処理することで、硫酸イオン (SO_4^{2-}) として無害化するものである。硫酸イオンは海水中に大量に含まれており海洋環境に対しての影響はほとんどない。酸化槽では中和・ばつ氣処理により pH が調整されるとともに、酸化処理によって減少した溶存酸素が回復され、最終的に海洋に放流される。反応は以下のとおりとなる。



当社は海水脱硫として最高濃度レベルの SO_2 を処理する重油焚きプラント向け(サウジアラビア)や、世界最大級 1000MW の石炭焚きプラント(マレーシア)に海水脱硫装置を納入し、正常に稼働している実績を生かして、多様なお客様のニーズに応える海水脱硫装置の設計を行っている。火力発電所向け海水脱硫装置の脱硫率実績値は 99%を超える、ECA で求められる脱硫率(97.1%)に対して、十分に高い実績を得られている。

3. 船用 SOx スクラバーへの展開

船用 SOx スクラバーでは、脱硫吸収液として海水を使用し、構成がシンプルで限られたスペースに設置可能な海水方式の脱硫装置を採用する。図3に船用 SOx スクラバーのシステムフローを示す。基本原理は火力発電用の脱硫装置と同様で、取水した海水を吸収塔に供給、直接排ガスに散布する。海水中に自然に含まれるアルカリ成分を利用して硫黄分を除去するシステムである。相違点としては脱硫処理後の海水の処理方法にある。火力発電所の場合、各全国各地域の規制に適合するように、酸化槽で脱硫処理後の海水に酸化・pH の調整等を行い発電所近隣の海洋へ排水するが、船用 SOx スクラバーでは、IMO EGCS ガイドラインに従い排水の pH、多環芳香族炭化水素(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAH)、濁度等の規制値に適合していることを確認した上で船外へ排出することになる。また、船用 SOx スクラバーはユニット毎に船級協会よりガイドラインへの適合性について承認を受ける必要がある³⁾。

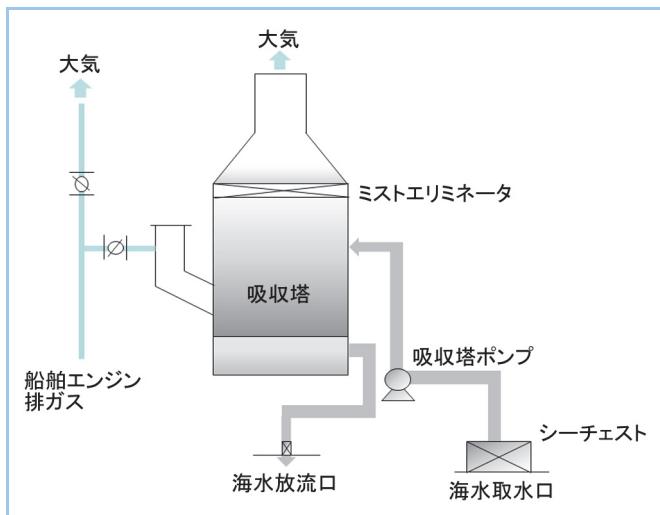


図3 船用 SOx スクラバーのシステムフロー

表2に火力発電所向け脱硫装置と大型船舶向け脱硫装置における設計条件の相違点をまとめた。脱硫装置の規模としては、陸上の火力発電所向けが大きく、より高い脱硫性能が求められている。

表2 火力発電所向け脱硫装置と大型船舶向け脱硫装置における設計条件の相違点

	火力発電所向け	大型船舶向け
排ガス処理量 (Nm ³ /h)	600 000~4 000 000	23 000~540 000
燃料	重油 / 石炭 等	重油
脱硫装置入口 SO ₂ 濃度 (ppm-d)	100~1 800	700
脱硫装置出口 SO ₂ 濃度 (ppm-d)	10~220	20
SO ₂ 除去効率(%)	75~98	97.1(3.5%S→0.1%S):ECA海域 85.7(3.5%S→0.5%S):一般海域
放流海水規制項目	pH, 溶存酵素(DO), 温度等	pH, PAH, 濁度, 硝酸塩

3.1 IMO EGCS ガイドラインの概要^{1),3)}

ここでは、舶用 SO_x スクラバーの特徴的な要求事項として規定されている放流海水規制項目について、説明する。

3.1.1 排水 pH 排出基準

洗浄排水の酸性度を制限するもので、船舶が静止した状態で船外排出口から4m先で pH6.5 以上であること。運用中の監視が義務づけられている。

3.1.2 排水濁度排出基準

洗浄排水の濁り(Turbidity)を制限するもので、取水と排水の濁度差が 25FNUs(ホルマジン比濁計単位)または 25NTUs(比濁計濁度単位)を超えないこと。運用中の監視が義務づけられている。

3.1.3 排水 PAH 排出基準

洗浄排水中に含まれる PAH を制限するもので、例えば、洗浄水流量 45t/MWhにおいて取水との差が 50 μg/L PAHphe(フェナントレン相当)を超えないこと。基準値は洗浄水流量に対して標準化したものが定められている。運用中の監視が義務づけられている。

3.1.4 排水硝酸塩排出基準

洗浄排水の硝酸塩濃度を制限するもの。以下のいずれか高いほうを超えないこと。

- ① 排ガス中の NO_x 排出量の 12%。
- ② 45t/MWh の洗浄水流量において 60mg/L の硝酸塩濃度。

3.2 舶用 SO_x スクラバー設計における留意点

3.2.1 外部振動によるスクラバー振動対策

船舶に SO_x スクラバーを搭載するにあたり検討しなければならない課題として、船舶特有の振動による対策がある。機器や構造物にはそれぞれ固有の揺れやすい周波数(固有振動数)があり、外部からこれを揺らそうとする加振力の周波数が固有振動数に近くなると、機器や構造物の振動が大きくなる共振と呼ばれる現象が起こり、構造物の破損を招く恐れがある。このため、数値シミュレーション等により固有振動数を把握し、加振周波数との共振を回避するための構造設計を行うことが重要となる。

表3に船舶において発生する起振力とそれによる船体振動方向の例を示す。このように、船舶ではエンジンのピストン往復運動やクランク軸の回転運動に伴う主機関慣性力、スクリュープロペラの回転により海水を介して船尾外板に作用するサーフェイス力に起因するプロペラ起振力等が SO_x スクラバーを揺らす力となる。

図4に全船振動応答モデルを示す。SO_x スクラバーに関しては、振動応答－疲労強度統一評価を狙いとして、主柱などの形鋼や板材などの強度部材をシェル要素とし、配管などの鋼管、内部構造材及びサポート構造は梁要素としてモデル化した。

表3 船舶で発生する起振力とそれによる船体振動方向の例

起振力	次数										
	1N	2N	3N	4N	5N	6N	7N	8N	9N	10N	11N
主機慣性力	●	●									
軸縦伝達力			●	●							
プロペラ起振力						●					
10 シリンダ船							●			●	
11 シリンダ船					●			●			●
主要振動方向	上下・前後	前後・上下	揺れ	上下	揺れ・左右	—	—	—	—	—	左右

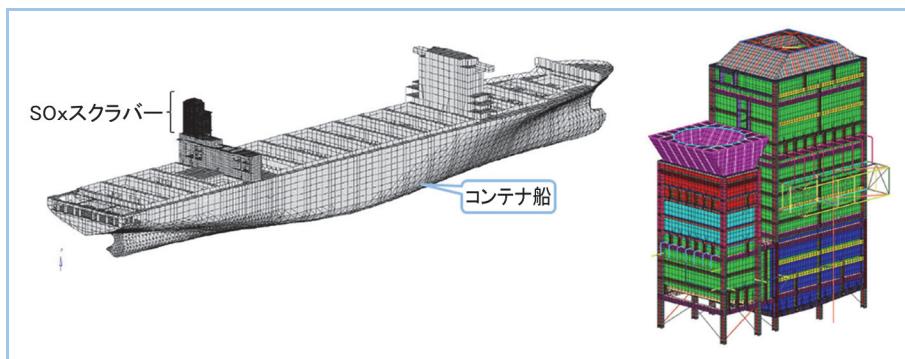


図4 全船振動応答解析モデル

本モデルを用いた振動応答解析の結果、SOx スクラバー構造全体、ダクト部、内部構造部材、囲壁パネル部、配管部はいずれも、外部起振力による周波数との共振は回避していることを確認した。更に、SOx スクラバー構造で応力集中する箇所においても十分な疲労強度を有することを確認した。

3.2.2 材料の選定方法

海水脱硫装置では、海水と排ガスから吸収される酸への耐性が求められるため、耐腐食性の高い材料を使用する必要がある。陸上の火力発電所向けの脱硫装置では、樹脂ライニング材料やFRP(Fiber Reinforced Plastic)など、耐酸性の強い材料が多く使われてきた。一方、船舶用では、火力発電所と比べてメンテナンス期間が短いため、メンテナンスに時間がかかる樹脂系の材料は好まれないケースが多い。そのため金属を採用することが多く、主としてスクラバータワーの材料には2相ステンレスが採用される。また、排ガス導入部は高温排ガスと海水が最初に接触し、最も厳しい腐食環境となるため、高耐食ステンレス鋼を採用する必要がある。同時に、排ガス導入部における海水噴霧方法や構造を十分に検討しなければ、短期間で腐食が発生してしまうほど厳しい環境である。

4. 船用 SOx スクラバーの特徴

4.1 ECAにおいてもオーブンループ方式で対応可能

船用 SOx スクラバーでは吸収液となる海水をワンパスで吸収塔へ送液するオーブンループ方式と苛性ソーダなどの薬剤を用いた循環液を使用するクローズドループ方式、また両方を併用させたハイブリッド方式がある。当社と三菱造船(株)は 30~75MW クラスの大出力機関の排ガス脱硫処理に対して、苛性ソーダ等の薬剤を用いる必要のないオーブンループ方式を採用し、ECA の規制値にも対応可能な船用 SOx スクラバーを開発した。

4.2 容積効率の高い角型吸収塔

図5に船用 SOx スクラバーの外観図を示す。角型の吸収塔は縦・横比を比較的自由に変更できるため、限られたスペースの船舶に対して最適な配置が可能であり、既存の円筒形スクラバーに比べると容積効率が高い。中でも大型コンテナ船に対しては、コンテナ積載量を減すことなくスクラバーを搭載することができ、角型による配置上の大きな優位性がある。図6に大型コンテナ

船にスクラバーを搭載した配置イメージを示す。本船は居住区とエンジンケーシングが独立した2アイランド型の大型コンテナ船で、エンジンケーシング内にスクラバーボディーが収まりコンテナ積載数を減らすことなく配置している例である。



図5 船用 SOx スクラバー外観図



図6 大型コンテナ船にスクラバーを搭載した配置
イメージ

5. 搭載エンジニアリング

三菱造船(株)では SOx スクラバーをより早く、より簡単に、より確実に計画船に搭載したいというお客様のために搭載エンジニアリングも請け負っている。SOx スクラバーメーカーとしての知見と、造船ヤードとしての経験を併せ持つという特色を生かしたサービスをご提供し、お客様の計画をサポートしている。本サービスは就航船レトロフィットのためにお客様が利用されるほか、造船所様が計画中の新造船に活用されるケースも増えてきている。三菱造船(株)は、新造船/就航船、自社建造船/他社建造船に関わらず、計画船と調和のとれた搭載案をご提案する。

就航船レトロフィットの搭載エンジニアリングは、概略以下で構成される。

- (1) リバースエンジニアリング(3次元レーザ計測)
 - (2) 基本計画
 - (3) 詳細設計
- (1) リバースエンジニアリング

就航船レトロフィットの搭載エンジニアリングを行うためには、スクラバー搭載対象船の図面情報が必要になる。特に詳細配管図面は、配置設計を行うときに必要だが、一般的に建造造船所の工作用図面なので、入手できない場合がある。また、これら工作用図面を入手できたとしても、就航後の改造などで、図面と実物が異なる場合もある。このような場合は3次元レーザスキャンを行い、作成した3次元モデル(3次元アズビルトモデルという)を元に配置設計を行ってゆく。

3次元レーザスキャナはスキャナを中心とする半径数十メートルの半球内にレーザパルスを連続的に照射し、半球内に存在する船殻・配管・補機器等測定対象物に反射して帰ってきた反射波と照射波の位相差を比較することで対象物からの距離を算出する。また、レーザを発射した方向から角度を割り出し反射点の位置を特定し、1回の計測で数千万点の点群情報を取得する。同様の計測を改造対象となる全区画で実施し、これら点群情報を連結させることにより、測定対象物を立体として視覚するための位置情報を補完的に合成することができる。この点群情報を3次元 CAD データとして扱えるように変換する。

(2) 基本計画

スクラバーの機器情報とスクラバー搭載対象船の情報を基に、基本計画を開始する。就航船の改造工事においては改造物量が少なく、工期が短くて済む改造計画を提案することが、搭載エンジニアリングの付加価値となる。

対象船の3次元アズビルトモデルを基に、スクラバータワー、排ガスダンパー、海水ポンプ、スクラバー制御盤、各種センサなどの配置計画と、海水管、排ガス管などの大径管配管ルートを計画する。並行してスクラバータワーを内蔵する上部船体構造と、船底部に設置する海水取水シーチェスト構造の改造計画も行う。更に、スクラバー搭載による船の復元力(姿勢安定性)、船体強度、荷物積載量、船内消費電力などへの影響を確認する。このような手順で基本計画を進め、船舶の安全性や性能への影響を見極めた最適な改造計画をお客様にご提案する。

(3) 詳細設計

スクラバー搭載に関わる改造内容を機関室配置図、配管系統図、詳細配管図、電力表、電装系統図、電気品配置図、船殻構造図などの詳細設計図面に展開し、工事物量の算出を行う。船級協会や主管庁からの承認取得も並行して行う。工事物量は、お客様が手配する修繕ドックの工費見積り用として参考とされ、詳細設計図面は、修繕ドックの工事計画用として活用される。

6. まとめ

IMO環境規制への対応には、規制に適合した低硫黄燃料の使用、SO_xスクラバーの搭載、液化天然ガス燃料の使用という選択肢がある。スクラバーを搭載することで従来燃料の継続使用が可能となり、高価な低硫黄燃料を使用した場合に比べて燃料費を抑えることができる。スクラバー設置の投資回収期間は2年から5年と試算されるケースが多く、その需要は高まっている。

船舶排ガスによる大気環境への負荷低減のため規制が強化される中、火力発電所向けの排煙脱硫技術を転用して舶用 SO_xスクラバーを開発した。本装置は航行される海域によらず規制値を満足できる仕様であり、多様なお客様のニーズに応えることができる。

2020年の規制強化開始に向けて、舶用 SO_xスクラバーを世界各国のお客様へ提供していくことを通じて、当社ビジョンステートメントでもあるエネルギーと環境という地球規模の課題解決に貢献していきたいと考える。

参考文献

- (1) (一財)日本海事協会、排ガス浄化装置ガイドライン(Ver.2), (2017)
- (2) 佐々木良三、産業機械, 812, 23(2018)
- (3) 三菱造船(株),
船舶用 SO_xスクラバー DIA-SO_x. <http://www.msb.mhi.co.jp/products/AF/index.html>