

世界最小の船舶用サイクロン式 SO_x スクラバ

World's Smallest SO_x Removal Cyclone Scrubber for Marine Vessels

青木 幸男 AOKI, Yukio

豊角 浩之 TOYOZUMI, Hiroyuki

高橋 邦幸 TAKAHASHI, Kuniyuki

船舶排ガス中には硫黄酸化物 (SO_x) が多く含まれ、大気環境保護の観点から国際的な問題となっている。排ガス中の脱硫技術である SO_x スクラバは大型のものが多く、小型化が望まれている。しかし、小型化に有利な脱硫方法であるサイクロン方式は、一般的に他の方式と比べて脱硫性能が劣る。富士電機は、小型かつ脱硫性能が優れた世界最小のサイクロン式 SO_x スクラバを開発し、実船上試験で指定海域でも使用可能であることを実証した。SO_x スクラバの小型化で普及が加速し、低価格の高硫黄燃料油が継続使用可能となり、国際物流を支える海運会社の事業コスト低減に寄与することができる。

The exhaust gas of marine vessels contains a high concentration of sulfur oxide (SO_x), which from the viewpoint of protecting the environment, has become a worldwide problem. Most SO_x scrubbers that desulfurize exhaust gas are large in size, and there has been increasing demand for more compact ones. In this respect, cyclone types have the advantage of being smaller in size, but their desulfurization performance in general is inferior to other types of scrubbers. Fuji Electric has developed the world's smallest cyclone SO_x scrubber with high level desulfurization performance and has demonstrated that the scrubber is capable of being used in emission control areas through field tests on ships. Downsizing a SO_x scrubber will facilitate its prevalence, allowing low-priced high-sulfur fuel oil to be used continuously. This could contribute to reducing the operating cost of shipping companies that support international logistics.

① まえがき

船舶の主機関や補機関として用いられているディーゼル機関の排ガス中には、硫黄酸化物 (SO_x) や窒素酸化物 (NO_x)、浮遊粒子状物質 (PM: Particulate Matter) が多く含まれ、大気環境保護の観点から国際的な問題となっている。国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization) では、「改正 MARPOL 73/78 条約付属書Ⅵ」⁽¹⁾ を 2008 年に発効し、排ガス中の SO_x および PM を低減するため、低硫黄燃料油を用いるか、あるいはこれと同等の措置と旗国主管庁に認められた排ガス浄化システム (EGCS: Exhaust Gas Cleaning Systems) を搭載するよう定めている⁽²⁾。図 1 に排ガス規制スケジュールを示す。これまで北米沿岸や北海などの指定海域 (ECA) に限定して燃料に含まれる硫黄分濃度の上限を設定していたが、2020 年からは一般海域に対しても規制が強化される。このため、2020 年以降は全ての船が規制に適合する燃料油

を使用するか EGCS を搭載する必要がある。

EGCS は、指定海域に隣接する欧米主導で実用化されており、その主要機器は排ガス中の SO_x をアルカリ性の水で吸収して中和する湿式スクラバ (通称: SO_x スクラバ) である。しかし、既存の SO_x スクラバは大型のものが多く、機器配置上の制約が厳しい場合、搭載しにくいといった課題がある。本稿では、世界最小の船舶用サイクロン式 SO_x スクラバの特徴および性能について述べる。

② 排ガス浄化システム (EGCS) の構成

富士電機が提案する EGCS は、排ガス中の硫黄成分を除去するための SO_x スクラバ、EGCS 運転時に SO₂ および CO₂ の排出量を連続監視するためのガス分析計、ならびにスクラバ水の水質を監視する水質計から構成されている。

EGCS の運転方法として、海水をくみ上げて排ガスを洗浄する運転モード (Open loop) と、海水あるいは精製水にアルカリ剤を添加して循環使用する運転モード (Closed loop) があり、通常の世界では Open loop を使用する。図 2 の Open loop のシステム構成例に示すように、システムが簡素であるため投資の負担と、設置スペースを抑えることができる。

洗浄水排出禁止海域に対応する場合、Closed loop を採用する必要がある。Closed loop モードには、全く洗浄水を排出しない Full-Closed loop と、除濁などの浄化処理後に洗浄水を排出する Semi-Closed loop がある。図 3 に Closed loop のシステム構成例を示す。Open loop と比較して、Closed loop の場合は熱交換器や水処理装置などのシステム構成機器が多くなるため、大きな船内空間が必要になってしまう。EGCS において、主要構成機器である

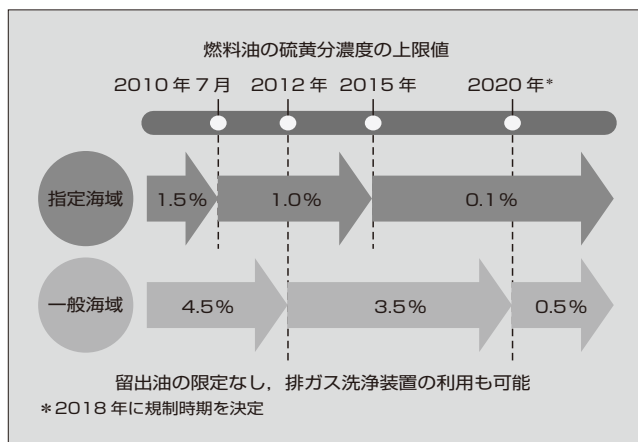


図1 SO_x・PM規制の施行スケジュール

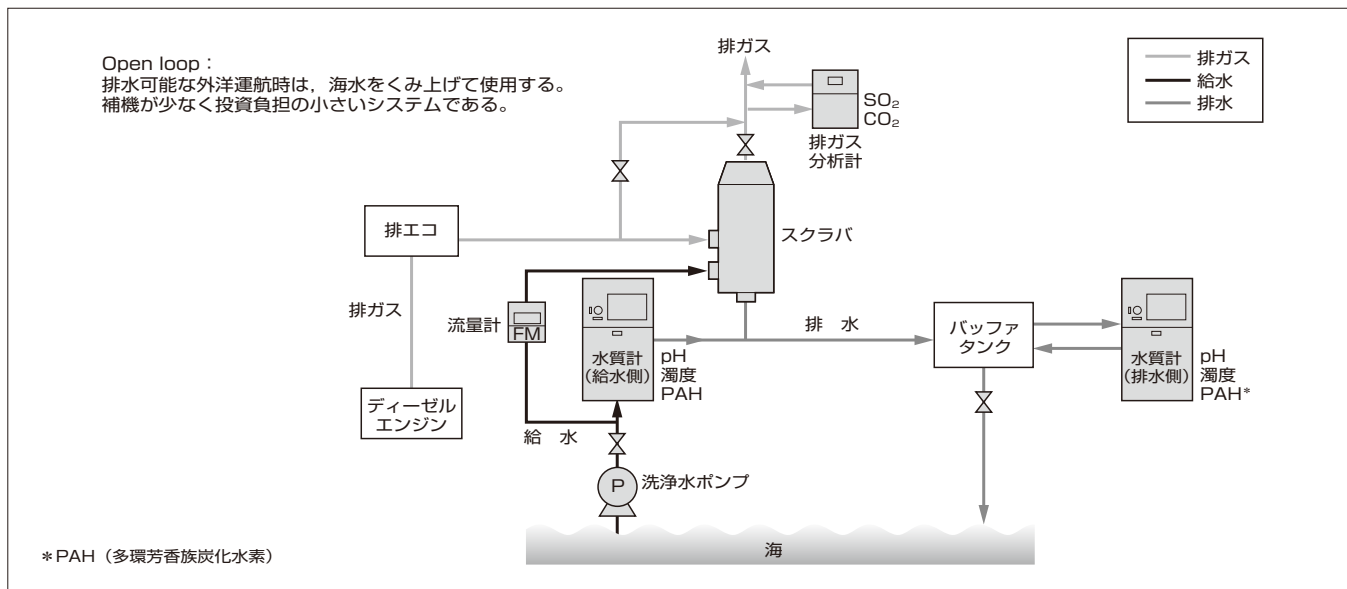


図2 Open loop のシステム構成例

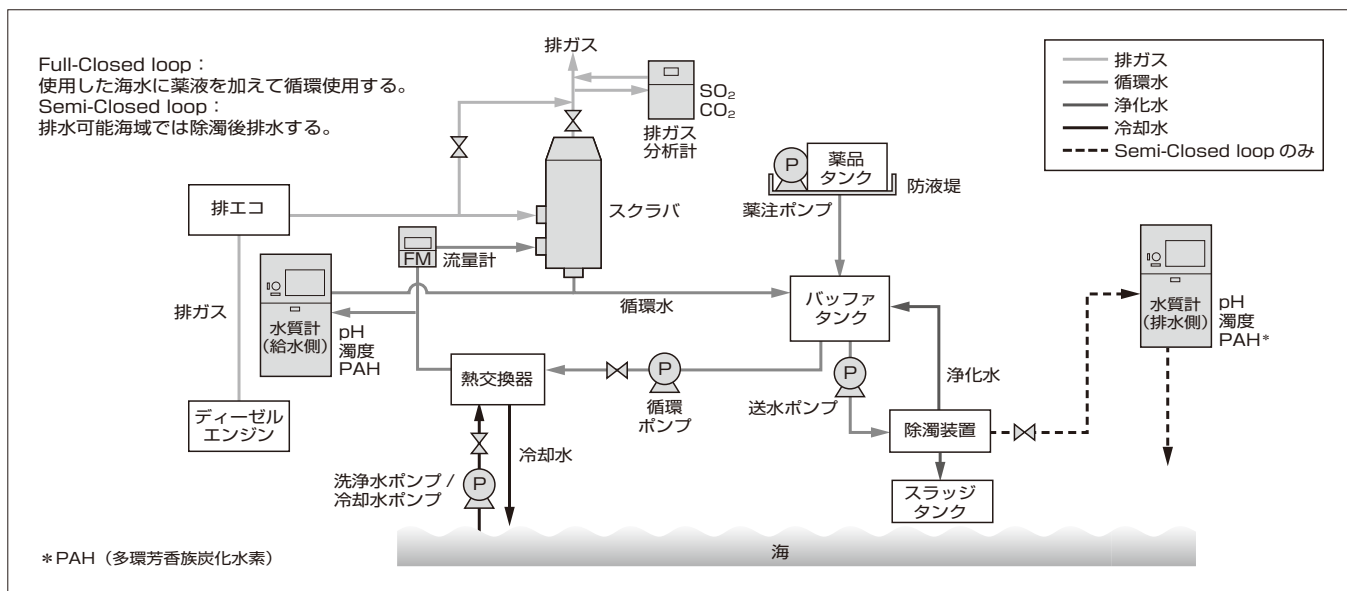


図3 Closed loop のシステム構成例

SO_x スクラバは最も装置の寸法が大きい。最大限、船内空間を確保するため、SO_x スクラバの小型化が強く求められる。

③ サイクロン式 SO_x スクラバ

3.1 従来の SO_x スクラバ

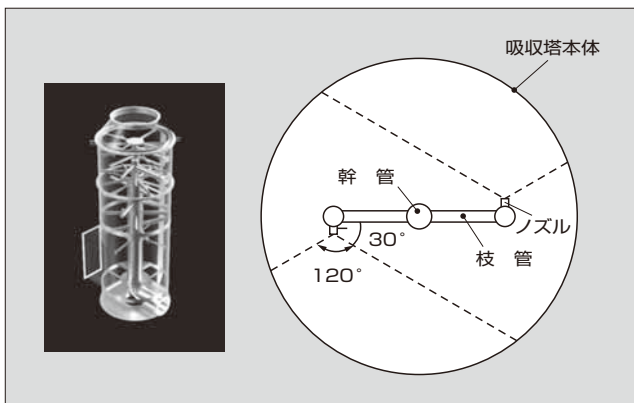
表1に陸上の施設で使用されてきた従来のSO_x スクラバの処理方式を示す。一般に、排ガスの空塔速度が速いほど小型化が可能であるが、SO_x スクラバのSO_x 除去率（脱硫性能）は空塔速度が遅いほど高くなる。そこで、富士電機は、小型化と高脱硫性能の両立、ならびに内燃機関の許容背圧への影響を最小限にするサイクロン式SO_x スクラバに着目した。サイクロン方式は装置内で渦流を発生させ、気液分離を行う構造であるため、対向流型などの従来法と

表1 SO_x スクラバの処理方式

仕様と方式	サイクロン	スプレー塔	充填塔	棚板/充填剤+スプレー
空塔速度 (m/s)	～10	～10	1.0～1.5	1.6～3.5
吸収材液量	中	多	少	少
脱硫率 (%)	～95	～90	95～98	95～98
特徴	○塔中心から吸収液を噴霧 ○簡単な構造 ⇒小型化可能	○簡単な構造 ○ガスの偏流リスク有 ⇒脱硫率低下	○脱硫率高 ○圧力損失高 ○保守性悪い	スプレー塔と充填塔の中間特性

比較して圧力損失が大幅に小さい。また、空塔速度を他の方式の2～5倍にでき、大幅な小型化が可能である。

図4にサイクロン式SO_x スクラバの構造例を示す。円

図4 サイクロン式 SO_x スクラバの構造例

筒状の塔の底部から旋回上昇する排ガスに、塔内のスプレーノズルから塔内半径方向に噴霧される液滴を接触させて SO_x を吸収し、中和する。船舶用ディーゼル機関から排出される SO_x はほとんどが SO₂ であり、アルカリ性の海水によって式(1)および式(2)に示すように、吸収と中和が行われる。なお、式(2)において A はアルカリ金属を示す。



通常、スプレーノズルは枝管に対して垂直に設置される。この場合、スプレーノズルの噴霧パターンが扇形であれば噴射角度は広くても 120 度であり、少なくとも中心方向の 30 度分には液滴が噴霧することはない。また、枝管の延伸方向側の周壁とスプレーノズルの噴口との間の距離が短いため、この部分に噴霧される液滴の飛距離は短くなる。SO_x スクラバの脱硫性能は、排ガスと液滴との接触面積および接触時間に依存する。したがって、スプレーノズルから噴霧される液滴が広い範囲に拡散しない場合には十分な接触面積が得られない。また、飛距離が短い場合には、十分な接触時間が得られない。このように性能向上のためには、スプレーノズルの数を増やして気液接触性を確保する必要があり、スクラバが大型になってしまう。また、一般的な実用サイズのサイクロンスクラバは、SO_x 除去率が 90 ～ 95% 程度であるが、この程度の性能では指定海域の規制には対応できない⁽⁴⁾。

3.2 船舶用サイクロン式 SO_x スクラバの開発

EGCS ガイドラインでは、SO_x スクラバの排ガス浄化性能について、排ガス中の成分濃度比 (Ratio Emission : SO₂/CO₂) を指標として連続監視するよう要求している⁽²⁾。表 2 に燃料油中の硫黄濃度に対する SO₂/CO₂ 比を示す。ECA 基準 (0.1% 硫黄燃料油使用と同等) に対応するためには、上述の Ratio Emission が 4.3 以下を満足しなければならない。船舶に搭載する脱硫装置は、最大 98% (3.5% 硫黄⇒0.1% 硫黄) の脱硫性能が求められているが、従来のサイクロン式 SO_x スクラバでは脱硫性能を満足できない。そこで、サイクロン式の高風速処理で低圧力損失であるという特長を生かしながら、98% 以上の脱硫効率を達

表 2 燃料油中の硫黄濃度に対する SO₂/CO₂ 比

Fuel Oil Sulphur Content [% 質量 (mass)]	Ratio Emission SO ₂ /CO ₂ [ppm/% 体積 (volume)]
4.50	195.0
3.50	151.7
1.50	65.0
1.00	43.3
0.50	21.7 (Global)
0.10	4.3 (ECA基準)

成できるように開発した。

富士電機では、排ガスと液滴との接触面積および接触時間を増加させるため、SO_x スクラバの内部構造を工夫している。内部構造の最適化により、効率よく液滴と排ガスを接触させることで脱硫効率が向上する。

4 船上における EGCS 性能実証試験

上述のような設計技術を基に、段階的なスケールアップ検証を陸上試験で実施した。その成果を基に設計・製作したサイクロン式 SO_x スクラバを実船搭載し、船上試験を行った。図 5 に実証船である NADESHIKO の外観を、図 6 にサイクロン式 SO_x スクラバを示す。9 MW エンジンを積んだ船に富士電機の SO_x スクラバ〔φ 2,000×H6,000 (mm)〕を搭載し、性能試験を行った。性能目標は ECA 基準に対応可能な Ratio Emission を 4.3 以下とした。

4.1 Open loop 運転における性能試験結果

図 7 に、エンジン負荷 50% で運航した際の Open loop 運転による脱硫性能を示す。約 6 時間の連続運転を行い、ECA 基準を安定して満足することを実証した。

図 8 に、エンジン負荷 85% で運航した際の Open loop 運転による脱硫性能を示す。約 1 時間の連続運転を行い、SO_x スクラバの設計ポイント (最大排ガス量) において、

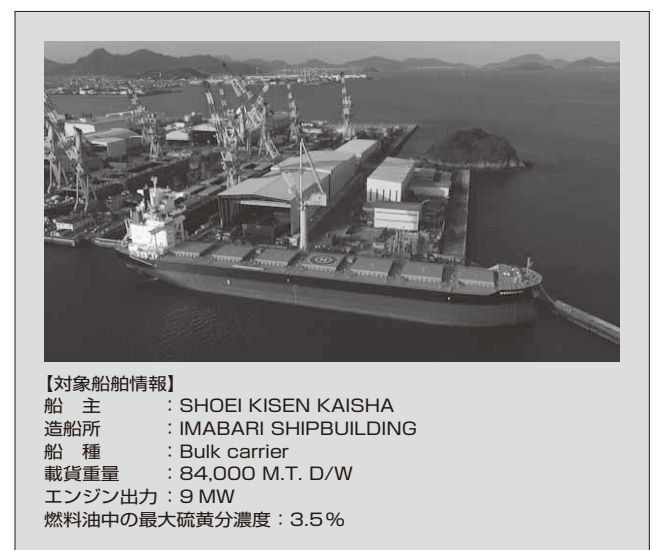


図5 NADESHIKO の外観



【SO_x スクラバ仕様】
スクラバサイズ：φ2,000 × H6,000 (mm)
スクラバ重量：4.5 t

図6 サイクロン式 SO_x スクラバ

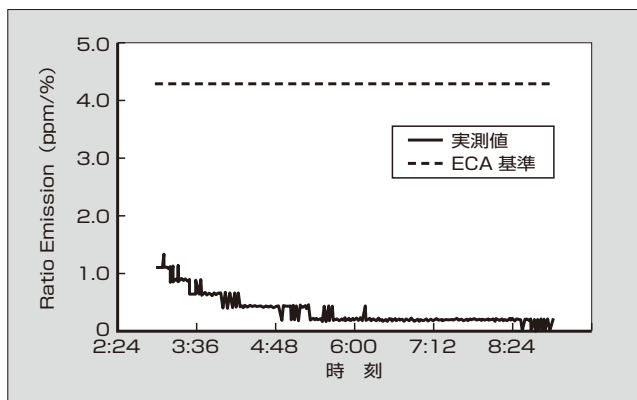


図7 エンジン負荷 50% 時の Open loop 脱硫性能

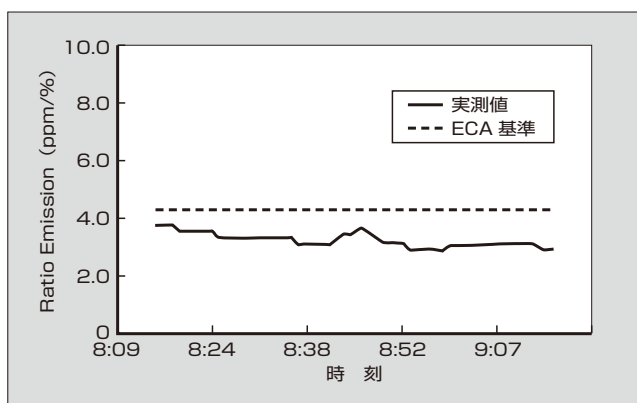


図8 エンジン負荷 85% 時の Open loop 脱硫性能

ECA 基準を安定して満足することを実証した。

4.2 Closed loop による性能試験結果

図9 にエンジン負荷 50% で運航した際の Semi-Closed loop 運転による脱硫性能を、図10 にエンジン負荷 50% で運航した際の Full-Closed loop 運転による脱硫性能を示

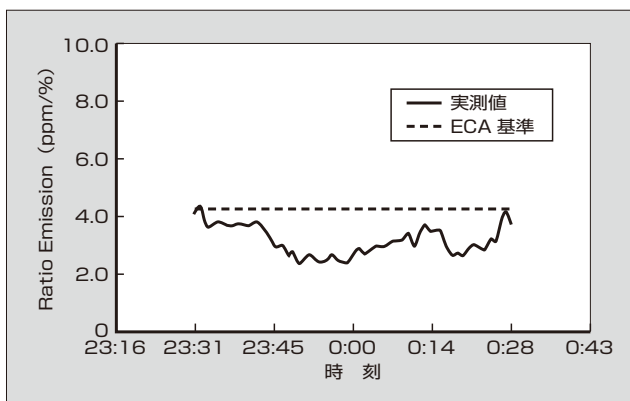


図9 エンジン負荷 50% 時の Semi-Closed loop 脱硫性能

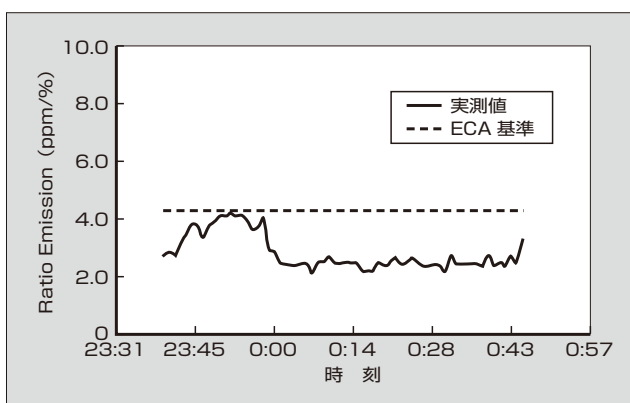


図10 エンジン負荷 50% 時の Full-Closed loop 脱硫性能

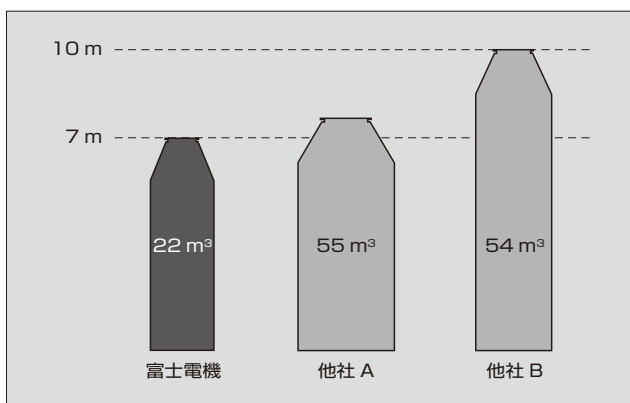


図11 SO_x スクラバの体積比較 (10MW 級)

す。約1時間の連続運転を行い、いずれの場合も ECA 基準を安定して満足することを実証した。

5 実証試験の成果

EGCS 性能実証試験結果から、富士電機の SO_x スクラバは各運転モードで十分な脱硫性能を発揮することを確認できた。

図11 に、船上試験用試作機相当のサイクロン式 SO_x スクラバと従来の SO_x スクラバの体積比較を示す。富士電機のサイクロン式 SO_x スクラバは、従来と比較して体積が 50% 以下でありながら、ECA 基準を満足する排ガス浄

化性能を達成した。また、低圧力損失と小型化に伴う軽量化により、船内への設置性が一段と高まる。

6 あとがき

世界最小の船舶用サイクロン式 SO_x スクラバについて述べた。

今回の船上試験では、実船に搭載した EGCS が船舶の SO_x・PM 規制において最も厳しい指定海域にて使用可能であることを実証した。SO_x スクラバの小型化で普及が加速し、従来どおりの低価格な高硫黄燃料油が使用可能となり、国際物流を支える海運会社の事業コスト低減に寄与することができる。

今後、SO_x スクラバのさらなる小型化と EGCS の運用コスト低減を可能とする技術開発を行い、より多くの船種に適用可能な EGCS を市場に提供することで、全球的な環境負荷低減に貢献していく所存である。

なお、船上試験は、正栄汽船株式会社、今治造船株式会社および一般財団法人日本海事協会との共同研究体制の下、日本海事協会の“業界要望による共同研究”のスキームにより研究支援を受けて実施している。富士電機は、今治造船株式会社から業務委託され、本研究開発において、EGCS 設備一式の設計・製作および試験遂行を実施した。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) “Prevention of Air Pollution from Ships”. <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>, (accessed 2018-02-01).
- (2) “2015 GUIDELINES FOR EXHAUST GAS CLEANING

SYSTEMS”. <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/MEPC.259%2868%29.pdf>, (accessed 2017-12-07).

- (3) 株式会社NEプロジェクト. NEサイクロンラバー. <http://neproject.eco.coocan.jp/yunittokiki.html>, (参照 2018-02-01).
- (4) 乾貴誌ほか. 排ガス浄化システム (SO_xスクラバ) の小型化技術. 日マリ学誌, 2015, vol.50, no.3, p.324-331.
- (5) 乾貴誌ほか. IMOの国際的規制に対応した小型化を可能とする排ガス浄化システムの技術開発. 日本船舶用工業会.
- (6) 富士電機株式会社. 排ガス処理装置. 特許第5998915号. 2012-12-19 (出願日).
- (7) 富士電機株式会社. 排ガス処理装置. 特許第5983802号. 2015-02-24 (出願日).



青木 幸男

船舶用排ガス浄化装置ほか道路トンネル用集塵システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム事業部ファクトリーオートメーション事業部 FA システム技術部課長。



豊角 浩之

船舶用排ガス浄化装置のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム事業部 FA システム技術部。



高橋 邦幸

船舶向け脱硫装置ほか業務用 SOFC の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター熱エネルギー技術研究部主任。技術士（機械部門）。日本技術士会会員、電気学会会員。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。