

## IMOにおける排ガス規制動向と規制対策技術の紹介

Selecting Technologies for Compliance with Environmental Regulations in Shipping

高橋 千織

Chiori TAKAHASHI

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所  
海上技術安全研究所 環境・動力系動力システム研究グループ長  
博士（工学）  
Power and Energy System Research and Development Group Head  
Marine Environment & Engine System  
National Maritime Research Institute  
Dr. Eng.



大気汚染や地球温暖化問題に対する全球的な取り組みの必要性が叫ばれるなか、国際海事機関(IMO)においても大気環境規制の強化が段階的に実施されてきた。IMOにおける排ガス規制は、MARPOL条約附属書VIをもとに実施されており、その規制動向を概説する。また、これらの規制対策技術については、現在、規制の必要性について検討されているブラックカーボンについて行われた議論をもとに紹介する。適切な規制の実施のためには、適切な評価のための計測技術と計測手順の確立が重要である。

Owing to the rapid growth of global movement against air pollution and global warming, many measures have been increasingly required in recent years to reduce air pollutant and greenhouse gas emission from ships. Emissions of air pollutants from international shipping are regulated by MARPOL Annex VI, i.e. an international convention under the purview of International Maritime Organization (IMO), which sets some limits of air pollutants contained in exhaust gas from marine diesel engines and requires to improve ship energy efficiency by both technical and operational measures. In this article, the trend of relevant regulations is outlined, taking as an example the discussion on potential control measures against emission of Black Carbon, which has been considered by IMO based on existing Black Carbon abatement technologies, referring to the importance of appropriate measurement technologies and procedures for an effective implementation of environmental regulations.

キーワード：IMO, 排ガス規制, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, GHG戦略, ブラックカーボン

### はじめに

わが国の貿易に占める海運の割合は、重量ベースで考えると2016年時点で輸出入全体の99.6%を占めており、海運はわが国の貿易に不可欠な輸送手段である。また、国際海運は2012年時点で世界の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の約2.2%を占めたと推定されており、物流全体として見た場合、最もエネルギー効率の高い輸送手段となっている<sup>[1,2]</sup>。しかしながら、世界的に今後も海上輸送量は増加し続けることが見込まれていることなどから、海運分野においても環境負荷低減に向けた取り組みが加速している。

外航船舶が自動車などの陸上の輸送機関や工場などの固定排出源と大きく異なるのは、国境を越えて移動するため、1隻の船舶でも船社、船籍(船の登録国がその船舶の運航会社の国籍と一致するとは限らない)、寄港地など、複数国が

関与すること、また売買等によって船籍が変わることが珍しくない点にある。このため、安全や環境規制も含めた海事分野の諸問題については、国連の専門機関である国際海事機関(International Maritime Organization, IMO)において検討されている。このうち、船舶からの大気汚染防止については、「1973年の船舶による汚染の防止のための国際条約に関する1978年の議定書」(MARPOL条約)の中の附属書VI(1997年9月採択、2005年5月発効)に基づき、国際的な規制が行われている<sup>[3]</sup>。附属書VIは船舶からの窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)、粒子状物質(PM)などの排ガス規制のほか、タンカー等の貨物から発生する揮発性有機物質(VOCs)の削減、冷房設備や消火設備として使用されるオゾン層破壊物質の削減、船用燃料油の品質等に関する規制なども含んでいる。IMOでは世界的な環境保護意識の高まりや技術の進歩などを受け、規制強化に向けて条約の改正を常に検討、実施している状況である。本稿では、

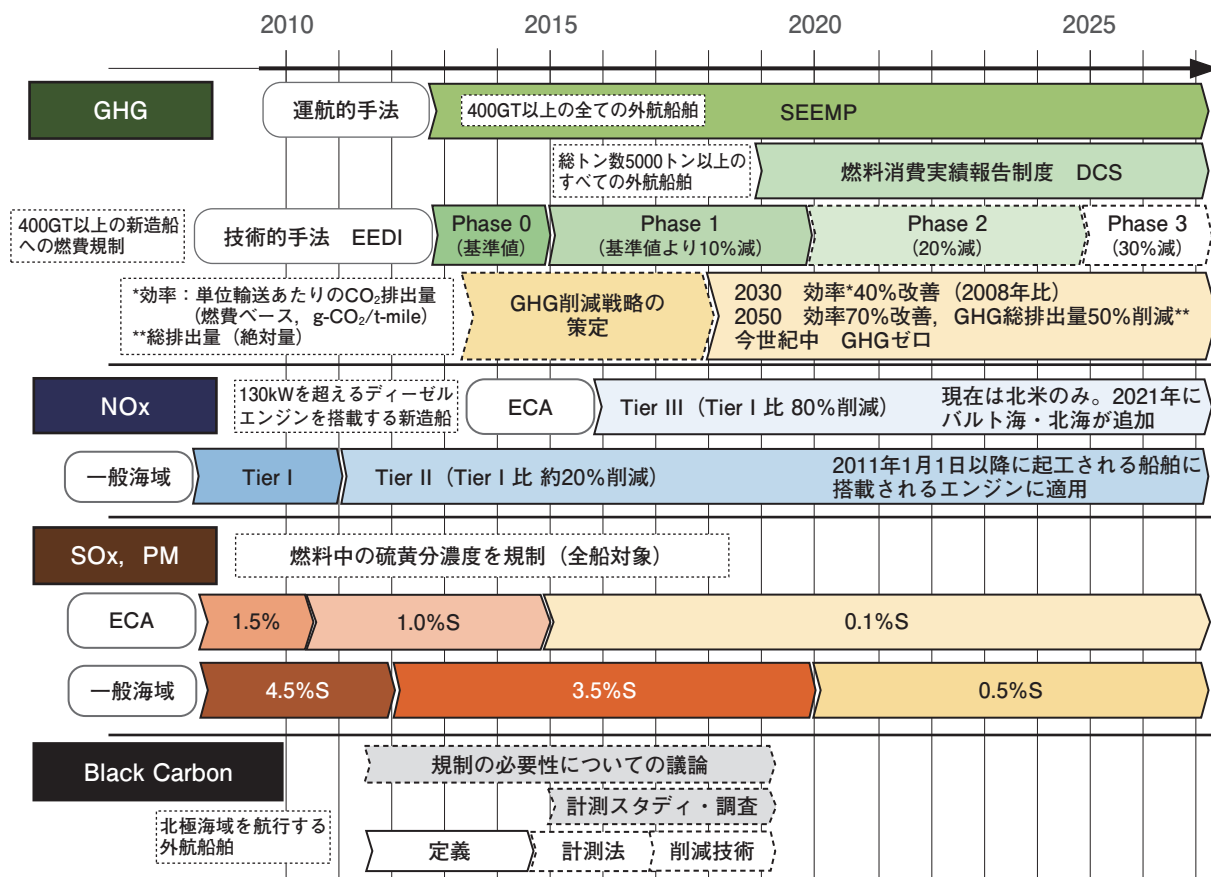


Figure 1 Exhaust gas regulations by IMO

IMOにおける排ガス規制の動向について、紹介するとともに、船舶における排ガス規制対策、計測に関する話題を提供する。

## 国際海運における排ガス規制の実施・検討状況

Figure 1に、現在IMOにおいて実施・検討されている排ガス規制の状況をまとめた。

2008年10月に開催されたIMOの第58回海洋環境保護委員会(Marine Environment Protection Committee, MEPC)では、船舶からの排ガス中のNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>およびPMを削減するための規制の枠組みが合意され、MARPOL条約附属書VIの改正案が採択された。これは2010年7月に発効となった。NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>およびPMの規制において特徴的なのは、Figure 1にも示されているように、海域を分けて規制の強化がおこなわれている点である。温室効果ガス(Greenhouse Gas, GHG)とは異なり、大気汚染物質の中でも酸性雨や光化学スモッグ、PMなど、人体や陸上の生態系への影響が大きい大気汚染要因物質であるNO<sub>x</sub>やSO<sub>x</sub>は、陸域への影響を考慮して陸地から近い指定海域(Emission Control Area, ECA)とその他の海域(一般海域)に分けて規制強化が進められてきた。2019年4月時点では、Figure 2

米国カリブ海)が指定されている。

ECAは各国が環境影響評価を行ったうえ、IMOでの審議を経て設定することができる。日本におけるECA設定の必要性については、国土交通省が2010年～2013年に「船舶からの大気汚染物質放出規制海域(ECA)に関する技術検討委員会」を設置して検討を行った。その結果、日本国内ではECA設定による大気環境の改善効果は期待できない(船舶から陸域への影響は低い)ことから、現段階では国内ECAの設定は行わないとしている<sup>[4]</sup>。

以下、各規制内容について概説する。

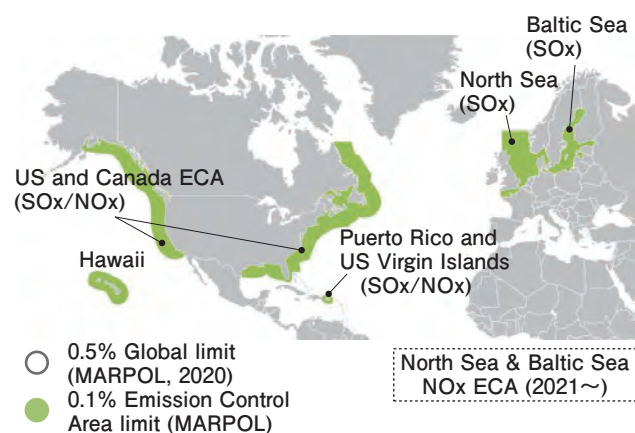


Figure 2 Emission Control Area(ECA) as of May 2019

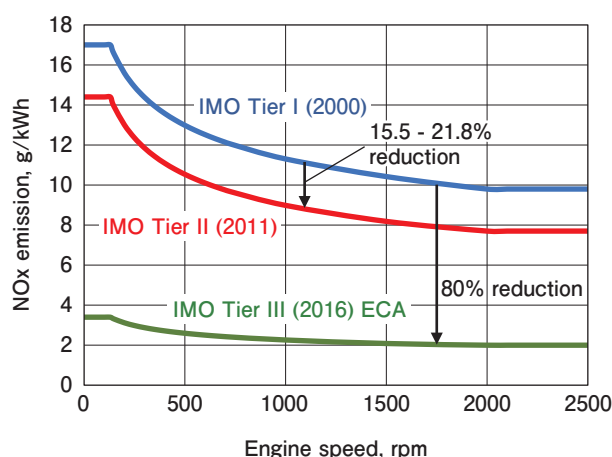


Figure 3 NOx emission limit

## 窒素酸化物 (NOx) 規制

船舶におけるNOx規制は、新造船を対象とする規制となっており、規制開始日以降に起工される船舶に搭載されるディーゼルエンジンで130 kWを超えるものに適用される。Figure 3に示すように、エンジンの定格出力あたりのNOx排出量(g/kWh)がエンジンの定格回転数に応じて定められた規制値を満足することが必要である。2000年1月1日に1次規制がスタートし、2011年からは全海域で2次規制(1次規制値から約15～22%削減)、更に2016年からは3次規制が始まっている。3次規制では2016年以降の新造船でECAを航行する船舶に対して適用されており(すなわちECA内のみの適用)、1次規制値の80%削減が求められている。規制に適合するためのエンジンの技術基準や認証方法については、IMOが作成したNOxテクニカルコードによって定められており、これに従ったNOx鑑定試験を実施し、主要エンジン機種で(後処理装置を用いる場合は結合した状態、またはエンジンと後処理装置を個別に評価したのち結合した状態の性能を証明することで)鑑定書の交付を受けることになっている。基本的には、この適合エンジンを使用していることが前提となるので、船上ではNOx排出に関係する運転パラメータのチェックをすることのみで、NOxの常時モニタリングなどは要求していない。

2次規制までは、燃料噴射タイミングリタード、掃排気系、燃焼室および燃料噴射弁の最適化などエンジン内部のチューニングで対応可能であるが、3次規制に適合させるためには、排ガス循環システム(Exhaust Gas Recirculation, EGR)、選択式還元触媒脱硝装置(Selective Catalytic Reduction, SCR)、水利用技術(エマルジョン燃料油や給気加湿など)、または予混合燃焼方式によるエンジン(リーンバーンエンジン)による液化天然ガス(LNG)利用などの新たな技術が必要である<sup>[5]</sup>。

## 硫黄酸化物(SOx) およびPM規制

IMOにおける排ガス規制のうち、SOxおよびPMについては、燃料油中の硫黄分含有量を規制することを基本としている。PMについては、船用燃料油中の硫黄含有量が%オーダー(現在のECA内でも0.10%以下)と、陸上の自動車用軽油の10 ppm以下などと比較して著しく高く、PM中に占めるサルフェート分(硫酸化合物)の寄与が大きいのである。このため、対象となる船舶は船種や大きさに関係なく、航行する海域のみで使用可能な燃料の硫黄分濃度が決まる。なお、MARPOL条約によるECAとは別に、地域規制として独自の硫黄分規制を実施している海域もある(例えば、EU域内のすべての港、カリフォルニアの沿岸24海里内、中国の指定海域など)。

Figure 1にも示したように、2015年1月1日からECA内では、燃料油中の硫黄分含有量が0.10%を上限値として引き下げられた。2020年1月に実施される一般海域規制では、燃料の硫黄分濃度を現行の3.50%以下から0.50%以下に引き下げる予定である。規制適合油については、地域による入手性や燃料性状の問題など懸念される点もあり、現在、IMOにおいて、2020年以降に起こりうる様々なケースを想定して統一的な規制実施のためのガイドラインの作成などが進められている。

燃料油の硫黄分規制への対応策としては、いくつかの選択肢が考えられる。一つは低硫黄燃料への燃料転換であり、今まで使用されてきた高硫黄の残渣燃料油(C重油)から、留出油(軽油や適合A重油)、バイオ燃料、またはLNGなどへの転換が考えられる。また、従来燃料の一種として、低硫黄C重油(Very Low Sulfur Fuel Oil, VLSFO)も供給される予定であるが、現時点でもどのような燃料性状の重油が提供されるのかははっきりしていない。特に海外では様々な性状の燃料が提供されることが予想されるため、燃料油の単独安定性や混合安定性、低温流動性、燃焼性などの問題が懸念されている。現在、IMOからの要請により船用燃料油規格であるISO8217の改訂作業が行われているが、2020年までには間に合わないため、公開仕様書(Publicly Available Standard, PAS)の形で対応する予定である。新たに単独安定性、混合安定性の試験法について検討されている。

低硫黄燃料の選択には価格と供給量、供給体制の整備が重要である。特にLNGについては、NOxやCO<sub>2</sub>、BCの排出量も低減可能なため非常に有望であるが、供給インフラの整備が遅れており、しばらくは限定された地域のみでの普及にとどまると考えられる。またバイオ燃料についても供給量の不足と価格のため、限定的にならざるを得ない。一方、もう一つの選択肢として、従来の高硫黄燃料油を使用して船上で排ガス脱硫をおこなう排ガス洗浄システム(Exhaust

Gas Cleaning System, EGCS)であるSO<sub>x</sub>スクラバにも関心が集まっている。SO<sub>x</sub>スクラバは、MARPOL条約附属書VI第4規則で認められている同等措置である。これについては、後述することにする。

## 温室効果ガス (GHG) 規制

IMOにおけるGHG排出関連の規制については、現在、燃費効率向上によってCO<sub>2</sub>排出削減を目指している。**Figure 1**に示したように、エネルギー効率設計指標 (Energy Efficiency Design Index, EEDI) および船舶エネルギー効率管理計画書 (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) が導入され、400 GT以上の外航船舶に適用されている (EEDIは新造船のみ)<sup>[2, 6-8]</sup>。EEDIはエネルギー効率の高い船舶の建造・調達を促すためのもので、船の設計データにより輸送能力あたりのCO<sub>2</sub>排出量 (g-CO<sub>2</sub>/t-mile) を計算し、指標化することにより、船のCO<sub>2</sub>排出に関するカタログ性能を表す。燃料種、エンジン、船型やプロペラデザイン、省エネ技術など技術的な手法に対して評価するが、船種ごとに異なるリファレンスライン (基準値) が提供されている。EEDIについては、現在IMOにおいてPhase 3の前倒し、Phase 4の導入について検討されている。一方、SEEMPは、運航の面から航行中のCO<sub>2</sub>排出量を抑制することを促すものである。もっとも効率的な運航方法 (減速航行、海流や気象を考慮した最適ルートを選定、適切なメンテナンスの実施等) をとるように「計画」、「実施」、「モニタリング」、「自己評価・改善」という4つのステップを通じて継続的に管理することで、広く運航管理の自己改善を図るようになっている。また、2019年からは燃料消費実績報告制度 (Data Collection System, DCS) が開始され、実燃費の報告が義務化されている。

加えて、2018年4月に行われたMEPC72では更なるGHG削減戦略が採択された。この戦略は、今までの個船ごとのエネルギー効率改善目標だけでなく、海運全体のGHG排出量 (総量) を2050年までに50%削減する (2008年をベース) とともに、今世紀中可能な限り早期にゼロ排出の努力を目指すという挑戦的な目標設定となっている。このため、削減技術についても、短期、中期、長期での戦略が必要となり、LNGなどのより低炭素な燃料への移行や、バイオ燃料などカーボンニュートラルな燃料、水素やアンモニアなどの脱炭素燃料の利用などに向けて技術開発が急務となっている。これらの代替燃料の利用では、ライフサイクル評価が重要であり、製造時に再生可能エネルギーの利用が望まれる。また、今まではCO<sub>2</sub>のみが対象となっていたが、その他のGHGについても (例えば、ガスエンジンのメタンスリップなど)、今後評価対象になるものと考えられる。IMOでは新たなGHGスタディが進められている。

## ブラックカーボン (BC) 規制の検討

現在IMOでは、北極海域でのブラックカーボン (BC) 排出に対して規制が必要かどうか検討されている。これは、大気中のBCが極域の雪氷上に落ちると、地表面の反射率が低下して太陽光を吸収するため、著しく融雪を促進して地球温暖化を加速すると考えられているためである。

2010年3月に行われたIMOのMEPC60において、ノルウェー、スウェーデン、米国から「北極圏における船舶からのブラックカーボン排出削減」について問題提起され、2011年7月のMEPC62において検討開始が合意された。当時のばら積み液体・気体物質 (Bulk Liquids and Gasses, BLG) 小委員会、現在の汚染防止・対応 (Pollution Prevention and Response, PPR) 小委員会に作業が委託され、①BCの定義を提案する、②最も適切な計測法を特定する、③適切なBC規制方法の調査を行う、の3項目について調査が始まった。小委員会では、2019年2月のPPR6ですべての委託事項についての調査を終え、2019年5月のMEPC74に報告がされた。PPRでの調査結果の概要を下記にまとめる。

### 国際海運におけるBCの定義

BCの定義の定義については、MEPC68 (2015年5月) において、下記のように基本合意した。この定義は、Bondらの定義<sup>[9]</sup>をもとにしたものである。

BCは炭素燃料を燃焼したときの炎の中でのみ形成される炭素状物質で、以下のような物理的性質を持つ。

- (1) 非常に強く可視光を吸収し、波長550 nmにおける質量吸収係数が5 m<sup>2</sup>/g以上
- (2) 熱的に非常に安定で、高温でももとの形態を保つ。気化温度は4000 Kに近い
- (3) 水および有機溶媒に不溶。大気中の他のエアロゾル成分にも不溶。
- (4) 微小球状の炭素粒子の集合体として存在。

上記の定義は、すなわち、BCとして、黒色の元素状炭素をターゲットとして、計測すべきことを表している。

### 適切なBC計測法

一つの計測方法に限定することはできず、フィルタスモークナンバー (Filter Smoke Number, FSN) 法、光音響 (Photoacoustic Spectroscopy, PAS) 法、レーザー誘起白熱 (Laser-Induced Incandescence, LII) 法の3つの手法が計測法として残った。また、各国がこれらの計測装置を用いて、BC計測結果を報告するための書式も作成された<sup>[10]</sup>。

### BC規制方法の調査

BC規制方法の調査については、通信部会 (Correspondence

Group, CG)において意見および情報を集約し、結果としてTable 1にある削減対策が候補として報告された。リストからわかるように、多くの対策はBCだけでなく、他の排ガス規制対策技術とも深く関連しているものが多い。特にPPRでの議論では、燃費向上=BC削減効果と考えられており、GHG対策技術が多く挙げられている。シップデザイン、運航の手法や政策的な規制措置による手法なども候補としてリストアップされている。NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>規制については、現在すでに導入されており、今後はこれらの規制を前提条件として、将来的なGHG戦略も考慮しつつ検討することになると考えられる。

Table 1 List of black carbon reduction to be reported to MEPC

<b>1 Fuel type</b>
*.1 Liquefied natural gas (LNG)
*.2 Distillate fuel
*.3 Biodiesel.
*.4 Methanol (Includes dimethyl ether)
.5 Nuclear
.6 Hydrogen
.7 Ammonia
.8 Other renewable fuels
<b>2 Fuel treatment</b>
*.1 Water-in-fuel emulsions (WiFE)
.2 Colloidal catalysts
<b>3 Exhaust gas treatment</b>
*.1 Diesel particulate filters (DPF)
*.2 Exhaust gas cleaning systems (scrubbers)
.3 Exhaust gas recirculation (EGR)
.4 Electrostatic precipitators (ESP)
*.5 Selective catalytic reduction (SCR)
.6 Diesel oxidation catalysts (DOCs)
*.7 EGR with scrubbers
.8 SCR with DPF
.9 SCR with scrubbers.
<b>4 Engine and propulsion system design</b>
.1 Engine stroke type
*.2 Slide valves
.3 Engine rating
*.4 Engine control technology
.5 Full battery electric
*.6 Hybrid/energy storage
Hydrogen fuel cells
<b>5 Ship design</b>
*.1 Improve energy efficiency of new ships
*.2 Improve energy efficiency of existing ships
<b>6 Operational measures</b>
*.1 Slow steaming.
*.2 Engine load
*.3 Voyage optimization
*.4 Training and crew awareness
*.5 Trim optimization
*.6 Adaptive engine/condition based maintenance
<b>7 Regulatory measures</b>
.1 Expand or establish additional ECAs
*.2 Prohibit the use of residual fuel
*.3 Establish a BC emission standard for ships.
*.4 Include BC in GHG reduction strategies
*.5 0.5% global fuel sulphur cap
.6 Engine tier.
<b>8 Other measures</b>
*.1 Promote ship recycling
*.2 Promote shore power.

\* : 5年以内に実施可能な対策について、CGでアンケートを行った結果、yesの回答があった対策

Table 1に示した対策を評価するにあたっては、CGでは削減効果(Effectiveness)だけではなく、新造船・既存船も含めた船舶への適用可能性(Feasibility)、船舶への適用可能となる時期も含めた技術(あるいは製品として)の利用可能性(Availability)、安全性(Safety)の4つの指標を用いて意見集約を行うとともに5年以内に実施可能な技術についてもアンケートを行った(表中\*)。結果として、CGレポートでは、特定の削減技術に絞り込むことをせず、候補として挙げられた削減策をすべて報告している。これらの評価は、船種や船の大きさ、燃料性状などによっても変わることがあり、前提条件が必要となる場合もあるので、単純に候補技術同士を比較することは難しい。CO<sub>2</sub>とNO<sub>x</sub>、PM、BCは、一般的にはトレードオフ関係にあるといわれているため、他の排ガス規制への影響(BCは削減可能であるが、NO<sub>x</sub>増加や燃費悪化など)、経済性など、マイナス側の要件についても考慮する必要がある。また、DPFなど直接的にBCを削減する技術があれば、燃費改善によって結果としてBC削減に貢献すると考えられる技術、複数の技術を組み合わせることで効果的な技術もある。このため、評価基準の作成自体が非常に複雑である。

## 削減技術と計測法について

各排ガス規制の中で紹介した削減技術を見ると、一つの削減技術が複数の排ガス規制に対応しているとともに、一部はトレードオフ関係になっている。対策技術選択の複雑さを示す例として、International Council on Clean Transportation (ICCT, 国際クリーン交通委員会)が主催するブラックカーボンに関するワークショップでのBC削減技術に関する議論の一部を紹介する<sup>[11]</sup>。ワークショップの報告書は、PPRにも提出された。ちなみに、ICCTはフォルクスワーゲンのNO<sub>x</sub>規制不正問題発覚のきっかけとなった非営利環境団体である。

本ワークショップは2014年から開催されており、PPRでは十分に議論する時間がないことから、IMOに積極的にデータを提供している国の研究機関や海事関係業界、環境団体などのステークホルダーが集まり、PPRの審議に先立って議論を深めることを目的として開催されている。昨年行われた第5回ワークショップでは、先に紹介したCGレポート

Table 2 Evaluation items to specify BC reduction measures<sup>[11]</sup>

Effectiveness	その削減技術がもつ一般的なBC削減効果
Feasibility	運転性能への負荷や費用、または安全性に過度の影響を与えずに、新造船や既存船に適用できるかどうか。
Availability	船舶分野において、どのくらいの時期に適用可能と考えられるか。短期(〜2023)・中期(〜2030)を対象。
Applicability	適用にどのような制約条件があるか(エンジンタイプ・サイズ、燃料油の種類等)。
Co-emitted pollutants	削減対策を行った場合に、ともに船から排出される環境汚染物質(気体、液体、固体の廃棄物を含む)。
Others	その他の懸念事項。考慮すべき事柄。

Table 3 Evaluation result of BC reduction measures with six items<sup>[11]</sup>

削減策	削減効果 <sup>1</sup>	船用への適用 <sup>2</sup>	導入可能時期 <sup>3</sup>	適用範囲、条件	その他の排ガス、副産物	その他課題など
LNG	高	N○, R△	短期	Gas or Dual-fuel engines	↓ CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM (削減率は、エンジン型式に依存) ↑ CH <sub>4</sub> (排出量はエンジンと負荷に依存), ホルムアルデヒド排出の可能性	インフラ整備
Distillate	中以下	N & R○	短期	All	↓ SO <sub>x</sub> , PM (燃料中の硫黄分濃度に依存)	
Biodiesel	中	N & R○	短期	All	↓ SO <sub>x</sub> , PM ↑ NO <sub>x</sub> (増加量は幅あり)	供給量不足 MARPOL18規則への適合不明
Methanol	中 (WSで示されたデータ) 高 (化学的考察に基づく)	N○, R○	短期	Diesel-cycle, dual-fuel	↓ NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM ↑ ホルムアルデヒド (排出可能性)	供給量とインフラ整備に課題 法整備が必要 (IGFコード)
Water-in-fuel Emulsions	未評価 データ不足	未評価 データ不足	短期	未評価 データ不足	↓ NO <sub>x</sub> , PM (?)	更なるデータ収集が必要 既に実船利用しているという情報あり
DPF	高	N○, R○	短期～中期	現状は留出油を使用する中速・高速機関	↓ PM ↑ CO <sub>2</sub> , 固体廃棄物	既存船への適用はスペースに制約。廃棄物保管, 背圧増加, 再生処理に懸念。 低速エンジンには大きさについて検討が必要
SO <sub>x</sub> scrubbers	低 (デザイン, 燃料などの条件に依存)	N & R○	短期	C重油を使用する低・中速機関	↓ SO <sub>x</sub> , PM ↑ CO <sub>2</sub> , 洗浄水, 固体廃棄物	既存船への適用, 廃棄物保管はスペースに制約
ESP	高	N○, R○ (スペースに依存)	短期～中期	C重油を使用する低速機関	↓ PM (wet ESPの場合はSO <sub>x</sub> も) ↑ CO <sub>2</sub> , 廃棄物処理	既存船への適用, 廃棄物保管はスペースに制約 低排ガス温度
DPF coated with SCR catalyst	高	N○, R○	中期	現状は留出油を使用する中速・高速機関	↓ NO <sub>x</sub> , PM ? CO <sub>2</sub> ↑ 固体廃棄物	陸上では実用化 既存船への適用はスペースに制約。廃棄物保管, 背圧増加, 再生処理に懸念。 低速エンジンは大きさについて検討が必要
Engine tuning with SCR/EGR	中以下	N○, R○	短期	All	↓ NO <sub>x</sub> , PM, CO <sub>2</sub> , HC, CO	
Engine Control Technologies	中以下 (エンジンタイプに依存)	N○, R○	短期	All	↓ NO <sub>x</sub> , PM, CO <sub>2</sub>	例えば, 低速機関へのスライドバルブ, コモンレール, 電子制御エンジン
Full battery electric	高	N○, R△	短期～中期 サイズに依存	限定的	船からゼロエミッション	重さ, 化学物質の漏洩の可能性, バッテリー材料の入手性,
Hybrid/ Energy Storage	中以下 (負荷に依存)	N○, R○	短期	負荷変動の大きな船に最適	↓ All	スペースに制約。化学物質の漏洩の可能性, バッテリー材料の入手可能性
Hydrogen fuel cells	高	N○, R△	短期～中期 サイズに依存	圧縮H <sub>2</sub> は液体H <sub>2</sub> より限定医的	船からゼロエミッション	供給, バンカリングインフラの整備 安全性への懸念 (可燃性) 燃料電池部品材料の入手可能性 規制のハードル

[1] BC排出削減率の定性的スケール高 (90%以上), 中 (30%から90%), 低 (30%未満)。

[2] N: 新造船, R: レトロフィット

定性的スケール○: 運用パフォーマンス, コスト, または安全性に過度の影響を与えずに測定を適用できる, ○: 性能, コスト, 安全性への影響は管理可能な範囲で, 対策可能, △: 対策はできるものの, 性能, コスト, または安全性に大きな影響を与える

[3] IMOのGHG排出量削減戦略 (決議MEPC.304(72))に合わせて, 短期は2023年まで, 中期は2023年～2030年)

をもとに, より実現性のある削減技術 (政策的なものは検討対象外とした) について議論を行った。ここでは, IMOのCGで議論のベースとなった評価項目をリバイスし, **Table 2**の評価クライテリアをもとにしている。ブラックカーボンCGレポートで挙げられている41の候補対策のうち, 18の削減技術について検討することになった。ちなみに, 水素キャリアとしてのアンモニアについては, その有害性に懸念の声があり対象外となった。

**Table 3**には, 18のうち, 特にエンジン, 排ガス後処理技術に関係する14の技術を抜き出して示した (スクラパ付きEGR, 酸化触媒, 減速運航, 陸上電力供給をリストから除外した)。ここで注目すべきなのは, 技術的にBC削減率が

高く, 船舶への搭載が短期で可能と考えられても, その他の排ガス成分の増加や, エンジンへの影響, 安全上の問題などがあり, どの評価項目を重視するかという選択は非常に難しい点である。例えば, DPF (Diesel Particulate Filter) は, 一部の環境団体などが非常に有望であることを主張したが, 他のメンバーはDPFによる背圧がエンジンの性能と安全性に大きな影響を及ぼすことを懸念している。また, DPF稼働のために余分な電力を消費する可能性もあり (送気ファンやフィルタの逆洗など), 燃料消費量が増える可能性がある。LNGの場合は, 表からわかるようにCO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, BC, PMとほぼすべての規制対象物質を削減できるものの, メタンスリップの問題が大きな懸念となっている。ただし, メタンスリップの問題はガスエンジンの

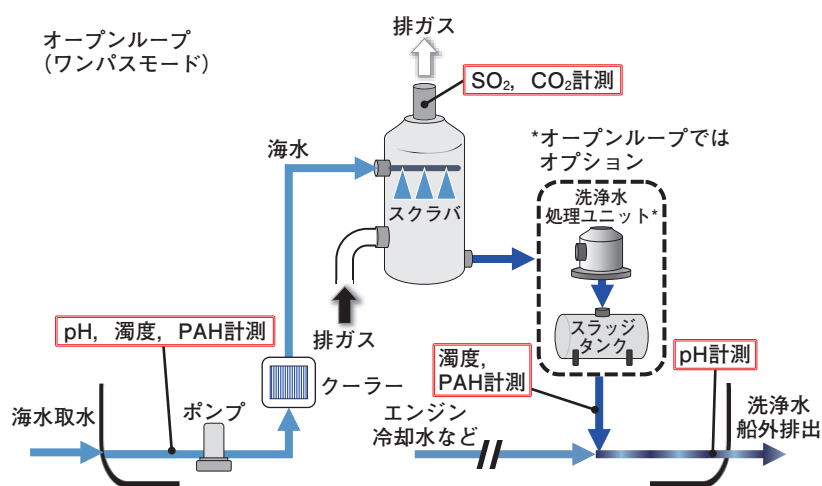


Figure 4 Configuration of open loop exhaust gas scrubber

方式に依存し、リーンバーンエンジンはメタンスリップが発生するが、NO<sub>x</sub>排出量は少なく、単独でNO<sub>x</sub>の3次規制をクリアする。これに対し、高圧ガス噴射方式 (Gas Injection, GI) 方式ではメタンスリップは少ないが、NO<sub>x</sub>の3次規制に対応するためにはSCRが必要となる。IMOのGHG対策であるEEDIでは、現時点ではCO<sub>2</sub>の排出のみをカウントしているが、今後メタンの排出もGHG戦略の中で検討される予定であるため、メタンスリップ削減技術の開発が望まれる。また、LNG、メタノールで指摘されたホルムアルデヒドについては、船用ガスエンジンで系統的に計測された例は非常に少なく、今後、調査が必要になるものと考えられる。

## 海事分野における計測の課題

大気環境規制に関する議論において、社会合理性のある適切な規制を構築し、実行可能な削減対策をとるためには、規制対象とする物質の環境影響評価および実装可能な削減技術の開発が重要である。そして、これらの評価には標準化された計測方法の確立と、信頼性が高く、入手が容易な計測装置の存在を欠かすことはできない。船舶の場合には、船用エンジン単体の試験であっても環境条件をコントロールすることは難しく、自動車とは大きく異なる。特に実船で用いる計測装置には計測値の信頼性だけでなく、コンパクトさや耐久性などが要求される。

前述したようにIMOの排ガス規制においては、多くの場合、船上での連続モニタリングなどは要求されていない。陸上での認証試験や燃料の消費量、あるいは燃料中の硫黄分を規制するなどの方策によって、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>排出を規制している。現在、唯一例外的にモニタリングが行われているのはSO<sub>x</sub>規制対策の同等措置として認められている排ガス浄化システム (Exhaust gas cleaning system, EGCS) である。EGCSはSO<sub>x</sub>スクラバとも呼ばれ、エンジンからの排ガスを海水または清水を用いて洗浄して、SO<sub>x</sub>

を除去する技術である。スクラバには洗浄水の経路・処理の違いによって装置構成が変わり、オープンループ方式、クローズドループ方式およびハイブリッド方式の3方式に分類される。Figure 4にはオープンループ方式の基本的な装置構成図を示す。この構成図の作成にあたっては、国際的なスクラバメーカの団体であるEGCSAのホームページなどを参考にした<sup>[12]</sup>。

オープンループ方式は、ワンパスモードともいわれ、一般海域での規制強化において、今後最も採用されると考えられる方式である。洗浄水は、弱アルカリである

海水を船外から取水し、1回のみ (ワンパス) 使用して排ガス中のSO<sub>x</sub>を除去し、そのまま船外排水する。この方式のメリットは、中和剤としてのアルカリ薬剤が基本的に不要なため、運用コストを低く抑えることができ、装置構成がシンプルになることである。一方、最大のデメリットは、地域規制などで排水規制の厳しいエリアでは、スクラバを使わず、低硫黄燃料油を使用する必要が生じることである。ドイツの港湾やベルギー沿岸など、すでに排水が禁止されているエリアもあり、今後IMOでも排水による海洋環境への影響について調査が行われる予定である。

スクラバの認証と運用の規定は、IMOの2015 EGCSガイドライン<sup>[13]</sup>に定められている (現在さらなる修正と明確化のための改訂作業を実施中)。SO<sub>x</sub>スクラバの脱硫性能に関する要件は、排ガスのSO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>比を用いて評価することになっており、SO<sub>2</sub>およびCO<sub>2</sub>濃度を計測して基準を満たしていることを示さなければならない。Table 4に、排ガス中のSO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>比と燃料中の硫黄分濃度上限値 (2020年以降の規制値) の関係を示す。

また、SO<sub>x</sub>スクラバのモニタリングは、排ガスだけでなく、使用した洗浄水の排出に対しても連続したモニタリングが義務づけられている。排水モニタリングの計測項目はTable 5のとおりである。洗浄水はSO<sub>x</sub>を吸収することで、著しく酸性になる。また、排ガス中に含まれるスス、重金属や油分なども洗浄水に吸収されるため、排水による環境影響を考慮して、pH、濁度、フェナントレン相当PAHを連

Table 4 SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> exhaust regulation values for gas scrubber

燃料油中の硫黄分濃度 (% m/m)	排出比上限 SO <sub>2</sub> (ppm) / CO <sub>2</sub> (% v/v)	規制の適用範囲と時期
0.50	21.7	一般海域 2020/1/1以降
0.10	4.3	ECA内 2015/1/1以降

Table 5 Continuous monitoring items and their regulation values for gas scrubber effluent

連続 モニタリング項目	排水条件
pH	1. $\text{pH}_{\text{排水}} \geq 6.5$ or $\text{pH}_{\text{取水}} - \text{pH}_{\text{排水}} \leq 2$ (航行時のみ) 2. 排水口から4 m先で $\text{pH} 6.5$ 以上 (停泊条件下で証明)
多環芳香族 炭化水素 (PAHs)	フェナントレン相当PAH $\text{PAH}_{\text{排水}} - \text{PAH}_{\text{取水}} \leq 50 \mu\text{g/L}$ (洗浄水量45t/MWhで標準化)
濁度	$\text{濁度}_{\text{排水}} - \text{濁度}_{\text{取水}} \leq 25 \text{ FNU or NTU}$

続監視することとなっている。なお、計測法も含めたスクラバに関する情報については、別報も参考にされたい<sup>[14-16]</sup>。

現在、スクラバメーカは北欧を中心に数十社に及ぶものと思われるが、船級協会の鑑定を受けて認められた排ガス、水質モニタリング装置を提供している計測器メーカは極めて少ない。いずれのモニタリング装置も非常に高価であり、例えば、PAH計は定期的に光源ランプなど主要部品の交換が必要である。このような性能にかかわる重要部品は、各メーカの本社でのみ交換可能な場合もあり(海外メーカの場合は、検出器を本国に送り返すなど)、内航船舶でスクラバが搭載された場合、メンテナンスや運用コストが懸念される。このため、一般海域規制の開始前に、国内メーカが製品を提供できるようになることが切望される。また、実際に船上で計測装置を使う場合、単発的な計測調査などではない限りは、乗組員が使用することになるので、特に日常的なメンテナンスや故障時の対処方法が煩雑であることや、入手が困難な標準ガスや標準試薬が必要とならないこと、故障時に速やかに復旧対応されるサービス体制のあることが望まれる。

以上はスクラバの例であるが、削減技術で例に挙げたように、今後、その他のガス成分なども計測が必要となる可能性がある。例えば、 $\text{NO}_x$ の船上計測、 $\text{NO}_x$ 対策技術であるSCRや将来的なGHG対策としてのアンモニア利用時のアンモニアスリップ、ガスエンジンのメタンスリップなどは、常時モニタリングの義務化には至らなくとも、今後、排出量の調査研究や場合によってはエンジン出荷時の計測が必要となる可能性もある。いずれにしても、このような議論がIMOなどで始まったときに、議論をリードできるだけの十分なデータを持っておくことが重要である。加えて計測法の確立、計測装置についても、関係団体、特に計測器メーカの協力が必要である。

## おわりに

今後、海事産業分野においても、IMOにおける排ガス規制、特にGHG戦略に対応するため、削減技術開発が加速するものと考えられる。現在、著者はISOにおいてEGCSに関する

ワーキンググループを立ち上げており(ISO SC2/TC8 WG10)、水質モニタリングのうちpH計の規格をより適切なものとするため、議論中である。EGCSガイドラインは、現在、改正作業中であるが、水質モニタリングに関してはpH以外にもまだ明確になっていない部分があり(例えば、フェナントレン相当PAHの定義がされていないなど)、今後、これらの問題についても科学的なデータをもとに検討されていくものと思われる。業界の意見を聞き取りつつ必要に応じて規格化していきたいと思っている。今後も各計測器メーカの協力を願いたい。

## 参考文献

- [1] <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Default.aspx>
- [2] 新井健太他、船会社における $\text{CO}_2$ 削減への取組み、日本マリンエンジニアリング学会誌、第50巻 第2号、(2015)109-111
- [3] [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/Resolution%20MEPC.176\(58\)%20Revised%20MARPOL%20Annex%20VI.pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/Resolution%20MEPC.176(58)%20Revised%20MARPOL%20Annex%20VI.pdf)
- [4] 船舶からの大気汚染物質放出規制海域(ECA)に関する技術検討委員会 取りまとめ(平成25年6月)<http://www.mlit.go.jp/common/001002259.pdf>
- [5] 例えば、「排ガス規制対応技術の最新動向」の特集号、日本マリンエンジニアリング学会誌、第51巻 第3号、(2016)
- [6] 柴田繁志、渡邊貴士、機関室におけるGHG 低減技術の紹介 一造船所機関部におけるEEDI低減への検討例、日本マリンエンジニアリング学会誌、第45巻 第6号、(2010)811-815
- [7] 平田信行、船舶の設計におけるCFDの活用 一環境規制への対応に向けて、日本マリンエンジニアリング学会誌、第48巻 第5号(2013)633-636
- [8] 荒木康伸、エネルギー効率設計指標(EEDI)規制と対応技術動向、日本マリンエンジニアリング学会誌、第52巻 第4号、(2017)480-484
- [9] T. C. Bond et al., J. of Geophysical Research: Atmospheres, 118(2013), 5380-5552
- [10] Reporting Protocol for voluntary measurement studies to collect Black Carbon data  
<https://www.euromot.eu/how-we-work/marine-seagoing-engines/>
- [11] ICCT, 5th workshop on marine black carbon emissions(2018.9)  
<https://www.theicct.org/events/5th-workshop-marine-black-carbon-emissions>
- [12] 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning System, MEPC 68/21/Add.1, May 2015
- [13] <https://www.egcsa.com/>
- [14] 高橋千織、国際海事機関による $\text{SO}_x$ 規制の概要と代替技術としての船用スクラバ、防錆管理、第61巻 第8号、(2017)285-292
- [15] 高橋千織、益田晶子、IMO 排ガス洗浄システム(EGCS)ガイドラインにおける排水規制とモニタリング、マリンエンジニアリング、第50巻 第3号、(2015)79-87
- [16] 益田晶子他2名、湿式スクラバーの水質モニタリング法の検討 一濁度と多環芳香族炭化水素について、マリンエンジニアリング、第51巻 第1号、(2016)117-123