

排ガス洗浄装置に係る国際規格化への取り組み

高橋 千織*, 益田 晶子*, 安藤 裕友*, 松本 怜大**

Activities for Developing International Standards on Exhaust Gas Cleaning Systems

by

Chiori TAKAHASHI, Akiko MASUDA, Hirotomo ANDO, and Reita MATSUMOTO

Abstract

Owing to rapid growth of global movement against air pollution and global warming, many measures have been increasingly required in recent years to reduce emissions of air pollutants and greenhouse gas from ships. Emissions of air pollutants from international shipping are regulated by Annex VI to the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (the MARPOL Convention), i.e. Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships, which are under the purview of International Maritime Organization (IMO). From 1 January 2020, the upper limit of sulphur content in fuel oil used on board ships going outside designated emission control areas will be reduced from 3.50% to 0.50% in order to reduce emissions of sulphur oxides (SOx) and particulate matter (PM). It is permitted by a regulation of Annex VI to MARPOL to use exhaust gas cleaning systems (EGCSs, also known as ‘scrubbers’) instead of using fuel oil with sulphur content of 0.50% or less. Scrubbers have already been installed on ships and deemed to be installed more in future, to enable them to use oil fuel having higher sulphur content than the limit. In a wet scrubber, the exhaust gas is mixed with washwater and the water-soluble components in the exhaust gas are removed. In accordance with 2015 EGCS guidelines adopted by the IMO, the values of properties and contents of washwater such as pH, temperature, turbidity and concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) should be monitored and recorded continuously while the scrubbers are operated in ports, harbours, or estuaries. A Working Group 10 “Exhaust Gas Cleaning Systems” in ISO/TC 8/SC 2 was established to develop an international standard for continuous on-board pH monitoring method. In this paper, we describe the background to the launch of the Working Group and overview of the international standard currently under development.

* 環境・動力系, ** 一般財団法人日本船舶技術研究協会

原稿受付 令和元年 7 月 31 日

審査日 令和元年 10 月 1 日

目 次

1. まえがき	26
2. 国際海事機関（IMO）における大気環境規制の動向	26
2.1 IMO における大気環境規制	26
2.2 硫黄酸化物（SO _x ）および PM 規制	27
3. SO _x スクラバーと排水規制の概要	27
3.1 SO _x スクラバー	27
3.2 EGCS ガイドラインにおける排水規制	28
3.3 EGCS ガイドラインにおける pH モニタリングの意義と問題点	28
4. 国際規格案 WD 23668 の概要	30
4.1 pH 計 ISO 規格案のターゲット	30
4.2 WD 23668 の構成	30
4.3 WG 10 の活動状況	32
5. おわりに	32
参考文献	32

1. まえがき

国際標準化機構（International Organization for Standardization, ISO）の船舶及び海洋技術専門委員会／海洋環境保護分科委員会（ISO/TC 8/SC 2）に、2019 年 1 月新たに設置された排水監視システム作業委員会（WG 10 Exhaust Gas Cleaning Systems）は、本稿執筆時点において（以下、現在と記す）、排ガス浄化装置（EGCS）から排出される洗浄水の pH を連続監視するための計測装置に関する国際規格“ISO/NP 23668 (Ships and marine technology – Marine environment protection – Continuous on-board pH monitoring method)”を開発している。EGCS は既存の高硫黄燃料油を用いてエンジンを運転した時の排ガスに、水を噴霧することで SO_x を除去する設備である。2020 年 1 月から開始される国際海事機関（International Maritime Organization, IMO）による船用燃料油の硫黄分規制において、規制適合油の同等手段として認められている。著者らは本作業委員会に、コンビーナ兼プロジェクトリーダー、並びにエキスパートとして参加し、国際規格の開発に貢献している。本稿ではこの WG を立ち上げることとなった背景と、現在開発中の国際規格の概要について解説する。

2. 国際海事機関（IMO）における大気環境規制の動向

2.1 IMO における大気環境規制

船舶に起因する汚染防止については、「船舶による汚染の防止のための国際条約」（MARPOL 条約）に基づき、国際的に規制されている¹⁾。この条約の附属書 VI（1997 年 9 月採択、2005 年 5 月発効）は、大気汚染防止のための規則である。附属書 VI は船舶からの窒素酸化物（Nitrogen Oxides, NO_x）、硫黄酸化物（Sulphur Oxides, SO_x）、粒子状物質（Particulate Matter, 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（Volatile Organic Compounds, VOCs）、冷房設備や消火設備に使用される代替フロン等のオゾン層破壊物質、船用燃料油の品質等に関する規制も含んでいる。

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、規制強化に向けての条約改正が常に検討・実施されている。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_x、SO_x 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（2010 年 7 月に発効）。

NO_x および SO_x・PM 規制において特徴的なのは、海域を分けて規制の強化がおこなわれている点である。これは、全球的な問題である温室効果ガス（Greenhouse Gas, GHG）とは異なり、NO_x や SO_x が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ためである。このため、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、図1に示す地域（北海、バルト海、米国・カナダ沿岸200海里内、米国カリブ海沿岸）がECAとして指定されている。

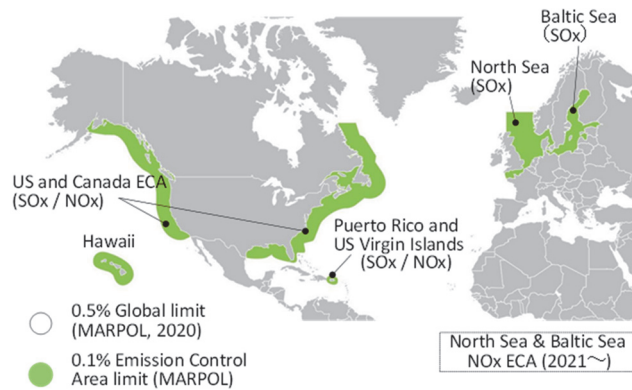


図1 IMOにおける排出規制海域 ECA

2.2 硫黄酸化物（SO_x）およびPM規制

IMOにおける排ガス規制のうち、SO_xおよびPMに関するものは、燃料油中の硫黄分濃度を規制することを基本としている。燃料油の硫黄分がPMに影響するのは、船用燃料油中の硫黄分濃度はパーセントオーダー（現在のECA内でも0.10%以下）であり、陸上の自動車用軽油の10ppm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）の寄与が大きいためである。このため、対象となる船舶の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められている。図1に示されているECA内では、すでに2015年1月1日から燃料油中の硫黄分濃度の上限が0.10%に引き下げられている。一方、一般海域では、2020年1月に、燃料の硫黄分濃度の上限が現行の3.50%から0.50%に引き下げられる。

この燃料油の硫黄分規制への対応策には、いくつかの選択肢がある。一つは今まで使用されてきた高硫黄の残渣燃料油（C重油）から低硫黄燃料への燃料転換であり、低硫黄燃料油としては、留出油（軽油や適合A重油）、または、現時点では性状は不明だが低硫黄C重油（Very Low Sulphur Fuel Oil, VLSFO）も供給される予定である。また、代替燃料として期待されるバイオ燃料やLNGなどへの転換も考えられる。低硫黄燃料あるいは代替燃料の選択には価格と供給量、供給インフラの整備状況が大きく影響するが、一部の燃料種では入手が限定的になる場合もあると考えられる。

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からの脱硫をおこなうEGCS（以降、SO_xスクラバーとも呼ぶ）にも関心が集まっている。SO_xスクラバーは、MARPOL条約附属書VI第4規則で認められている同等手段である。

3. SO_xスクラバーと排水規制の概要

3.1 SO_xスクラバー

IMOの排ガス規制においては、多くの場合、船上での排ガスモニタリングは要求されていない。陸上試験により認証された条件で運転していることをエンジン・後処理装置の運転パラメータの監視により証明する、あるいは燃料消費量を報告する、燃料中の硫黄分を規制するなどの方策によって、NO_x、CO₂、SO_x排出量を規制している。現在、唯一例外的に排ガスのモニタリングが行われているのは、SO_x規制対策の同等手段として認められているEGCS、すなわちSO_xスクラバーである。前述のとおり、SO_xスクラバーは、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、SOx を除去する装置である。スクラバーは洗浄水の経路・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（オープンとクローズドループを必要に応じて切り替え可能な方式）の3方式に分類される。図2にオープンループ方式とクローズド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、国際的なスクラバーメーカーの団体であるEGCSA（Exhaust Gas Cleaning Systems Association）のホームページなどを参考にした²⁾。

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、弱アルカリ性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SOx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、SOxスクラバーを使わず、低硫黄燃料油を使用する必要があることである。ドイツの港湾やベルギー沿岸などの閉鎖的海域で、すでに排水が禁止されているエリアもあり、今後IMOにおいて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。

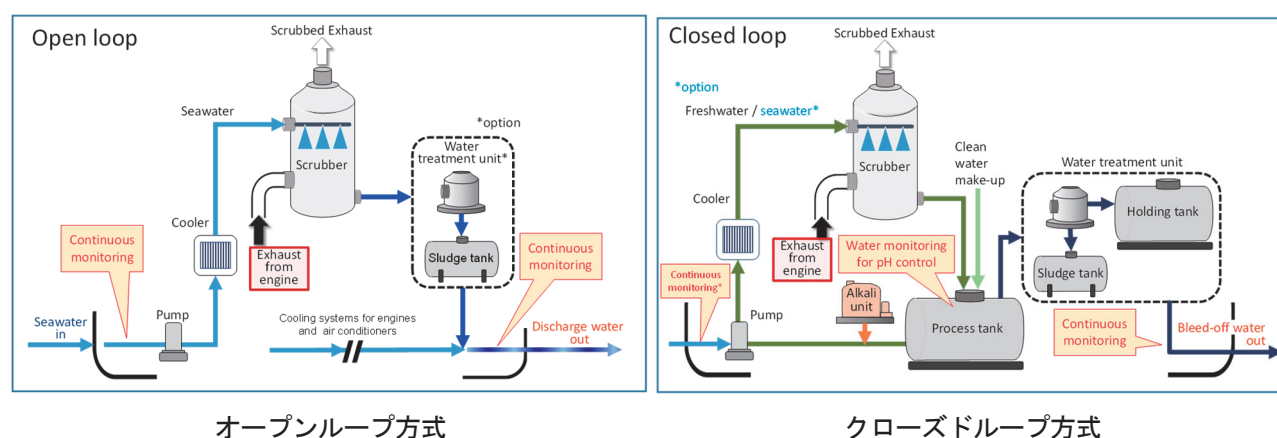


図2 SOxスクラバーの装置構成

3.2 EGCS ガイドラインにおける排水規制

SOxスクラバーの認証と運用の規定は、IMOの2015 EGCSガイドライン³⁾に定められている。なお、現在さらなる修正と明確化のため、汚染防止・対応（Pollution Prevention and Response, PPR）小委員会は、このガイドラインの改訂作業を実施中である。SOxスクラバーの脱硫性能は、排ガス中のSO₂ (ppm)/CO₂ (% v/v) 比を用いて評価することになっており、SOxスクラバーを用いるには、SO₂およびCO₂濃度を連続計測して規制適合油と同等のSOx排出量を達成していることを示さなければならない。

また、EGCSガイドラインでは、排ガスだけでなく、使用した洗浄水の排出に対しても規制値を設けており、そのうちの表1に示す計測項目については連続したモニタリングが義務づけられている。洗浄水はSOxを吸収することで、著しく酸性になる。また、排ガスに含まれるスス、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（主にススや重金属などの排出に関連）、フェナントレン相当多環芳香族炭化水素（PAH、主に油分等の排出に関連）を連続監視することとなっている。図2及び表1からわかるように、船外から洗浄水を取水する場合には、一般に取水と排水の差によって規制値が決まるので、多くは取水側と排水側の2か所でモニタリングをおこなっている。

3.3 EGCS ガイドラインにおけるpHモニタリングの意義と問題点

pHは周囲の水環境や水生生物に直接的または間接的に影響を与えることが知られており、適切なpH値での排水が必要である。また、環境保全のためだけでなく、EGCS装置の効率的な運転や維持管理にもpHの連続モニタリングは重要な役割を果たすと考えられる。

表1 SOx スクラバーの連続モニタリング項目と排水基準

連続モニタリング項目	排水条件
pH	1. $\text{pH}_{\text{排水}} \geq 6.5$ $\text{pH}_{\text{取水}} - \text{pH}_{\text{排水}} \leq 2$ （航行時のみ適用） 2. 排水口から4m先でpH 6.5以上 （停泊中に最大出力の条件下で、実測または数値計算により証明） 上記1あるいは2のいずれかの条件を満たせばよい
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 45 t/MWh で標準化）
濁度	$\text{濁度}_{\text{排水}} - \text{濁度}_{\text{取水}} \leq 25 \text{ FNU or NTU}$

2015 EGCS ガイドラインの排ガス洗浄水排出クライテリアにおいて、排水モニタリング装置について、pH 計は以下のように規定されている。ただし、EGCS ガイドラインと開発中の pH 計規格では、pH 計の各部名称に異なる点があるため、本稿では、pH 計は pH 電極と表示部である pH メーター（トランスミッター）から構成されるものとして、以下に記述する。

10.2 Washwater monitoring

10.2.1 pH, oil content (as measured by PAH levels), and turbidity should be continuously monitored and recorded as recommended in section 7 of these guidelines. The monitoring equipment should also meet the performance criteria described below:

(10.2.1 pH, 油分濃度 (PAH として計測), 濁度は連続的にモニタリングし、当該ガイドラインの7章で推奨されている方法で記録する。監視機器は以下の性能要件を満たすこと：)

pH

10.2.2 The pH electrode and pH meter should have a resolution of 0.1 pH units and temperature compensation. The electrode should comply with the requirements defined in BS 2586 or of equivalent or better performance and the meter should meet or exceed BS EN ISO 60746-2:2003.

(10.2.2 pH 電極と pH メーターは 0.1pH 単位の分解能と温度補償をもたなければならない。電極は BS 2586 規格あるいは同等かそれ以上の規格に定義された要件を満足しなくてはならない。pH メーターは BS EN ISO 60746-2:2003 かそれ以上の要件に合致しなくてはならない。)

ここで pH 電極の規格として引用されている BS 2586⁴⁾は、1979 年に開発された実験室用の pH 電極の規格であり、船上でのスクラバー排水モニタリングのための pH 電極の規格としては、以下の問題がある。

- 1 BS 2586 は極めて高精度の計測を必要とする実験室用の pH 計測のために定められた電極規格であり、新品の電極を評価するための規格であり、スクラバー排水をモニタリングするような連続プロセスモニタリングを意図した規格ではない。
- 2 pH 計の電極は、現在、特にプロセス用の pH 計では図3に示すようなガラス電極、参照電極、および温度センサーが一体となった複合電極が主流となっている（温度センサーが内蔵されていない複合電極もある）。BS 2586 は、個々の電極の性能を個別に評価する規格であり、複合電極を評価する場合であっても、内包されるガラス電極、参照電極単体をそれぞれ評価する方法が採用されている。しかし、一体として製品化される複合電極においては、実際に使用に供する状態（電極全体）での性能を評価する方が適切であると考えられ、また pH 計は、装置全体がある種の電子回路を形成することになるため、装置全体としての評価も必要であると考えられる。
- 3 BS 2586 では Harned Cell という非常に特殊な水素ガラス電極を基準に、対象のガラス電極を評価することになっている。この Harned Cell は世界でも数が限られており（日本では国立研究開発法人産業技術総合研究所 計量標準総合センター (NMIJ) が保有）、このセルがないと BS 2586 に適合しているかどうかの評価試験は実施できない。
- 4 現在、BS 2586 に適合した市販の pH 電極は存在しない。

以上のような理由により、著者らは、BS 2586 のみではスクラバーの排水監視用の pH 電極規格としては不十分であり、実用電極の評価法として使用不可能な規格が引用されていることが、多くの pH 計メーカーの参入を妨げ、ユーザーにとっても採用基準が不明瞭でデメリットになっていると考えた。

そこで著者らは、船用の用途に絞り、複合電極を用いた連続 pH モニタリングを長期にわたって安定的かつ精度良く実現するための新しい pH 計の ISO 規格を開発中である。

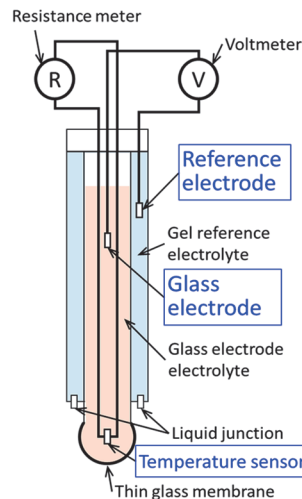


図3 複合 pH 電極の構成例

4. 国際規格案 WD 23668 の概要

4.1 pH 計 ISO 規格案のターゲット

スクラバーは、SO_x 削減のための EGCS 装置だけでなく、NO_x 削減技術の一つである EGR (Exhaust Gas Recirculation) 装置においても利用されている。このとき、高硫黄燃料を使用した際に排出される排ガスを洗浄する場合には、EGCS ガイドラインの排水クライテリアが適用され、連続モニタリングが義務づけられている。一方、低硫黄の燃料油を使用する場合には、上記の排水クライテリアは適用されない。しかしながら、EGR スクラバーの制御には pH 計測が行われている。よって、この規格では、SO_x スクラバー、EGR スクラバーのみならず、将来的に pH 管理が必要となる船上装置をターゲットとしている。

4.2 WD 23668 の構成

現在開発中の規格である WD 23668 “Continuous on-board pH monitoring method” の規格の構成を表 2 に示す。

最初に pH 計測において重要となる pH 標準液について明確化した (①)。pH 値は、物理的、化学的方法で決定することはできないため、実用上は規定の組成をもつ pH 標準液で値付けがおこなわれている。pH 標準液の国際的な同等性確保については、国際的に合意された pH の一次測定法である Harned Cell 法を用いて、国際度量衡委員会 (CCQM) に認定された各国標準機関 (NMIJ など) が値付けする^{5,6)}。この一次標準液へのトレーサビリティを担保するために、この標準液を用いて校正した pH 計を用いて値付けを行った二次標準液を用いる体系になっている (図 4 参照)。本 ISO 規格案では、メーカーは国際的な標準機関の一次標準液へのトレーサビリティが認められた市販の認証 pH 標準液 (Certified pH buffer solution) を用いて pH 計の性能要件を評価する一方、ユーザーは市販の pH 標準液 (Practical-use pH buffer solution) を用いて校正をおこなうとした。

次に、pH 計メーカーに対し、pH 電極と pH 計の性能要件を明らかにした (②, ③)。本規格の主たる目的は、船用スクラバーの pH 計測に供することから、精度に関しては EGCS ガイドラインの要求と同等以上の性能をもつこと、特有の条件 (海水または清水中での計測、気泡、スクラバー排水による汚損) に対応できること、長期

運用を可能にするための施策を適切におこなう必要があることを記載した。計測を妨害する干渉要素である汚損に対しては、自動洗浄装置、および手動での洗浄法について情報を提供している。

最後に、pH 計の性能を維持するため、ユーザーがおこなうべき校正、メンテナンスについて言及した（④）。

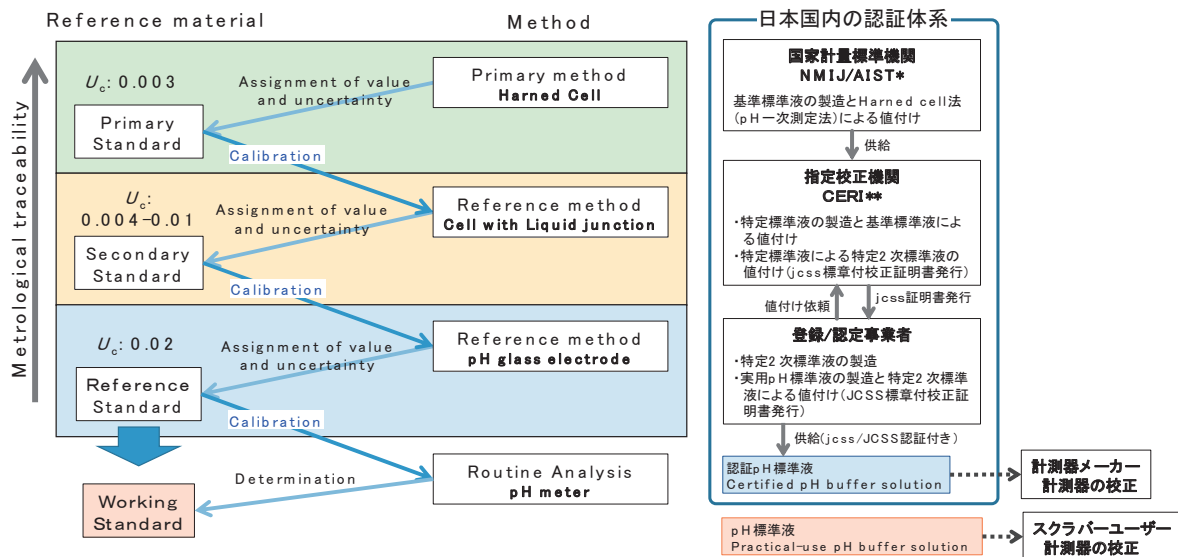


図4 pH標準液のトレーサビリティ

表2 WD 23668 の構成（本稿作成時の暫定案）

Introduction		
1	Scope	
2	Normative references	
3	Terms and definitions	
4	pH buffer solution	① 定義及び標準試薬
4.1	Certified pH buffer solution	
4.2	Practical-use pH buffer solution	
5	Performance requirements and test procedures for combination electrode	② メーカー向け 電極の性能要件
5.1	Slope force	
5.2	Repeatability	
5.3	Linearity	
6	Interferences.	③ メーカー向け pH 計の性能要件
7	Requirements for pH meter for continuous on-board monitoring	
7.1	Apparatus	
7.2	pH range	
7.3	Temperature range	
7.4	Report	④ ユーザー向け 取り扱い上の注意
8	Calibration	
9	Maintenance	
9.1	Manual cleaning	
9.2	Automatic cleaning	
9.3	Storage of the pH combination electrode	
Annex A (informative)	pH combination electrode performance criteria	

4.3 WG 10 の活動状況

WG 10 には、現在、6 団体から 16 名のエキスパートが登録され、規格開発のため活動している。WD 23668 の検討状況を表 3 に示す。

表 3 ISO/TC 8/SC 2/WG 10 検討状況

2018 年 6 月	マルメ（スウェーデン）にて開催された SC 2 総会において、新規作業計画を提案予定としてプレゼン。IMO の EGCS ガイドラインで指定されている BS 2586 の問題点を指摘し、船上で連続かつ安定的に使用可能な pH 計の評価法と計測について、新たな規格が必要であることを説明した
2018 年 9 月	新規作業計画（NP）の投票開始
2018 年 11 月	NP として承認され、正式登録（AWI）
2019 年 1 月	WG 10 設立。コンビーナ就任
2019 年 3 月	WG 内で最初の WD 回章
2019 年 5 月	京都にて開催された SC 2 総会に合わせて、第一回 WG10 会合を開催 WD について討論および修正
2019 年 7 月	WG10 内での WD 修正版の回章開始
2019 年 9 月	CD 投票開始予定
2019 年 10 月	CD 投票終了予定。承認されれば、CD 投票時に出された意見に対応して修正作業予定。
[2020 年 11 月]	[DIS 登録期限]
[2021 年 11 月]	[規格発行期限]

5. おわりに

本 WG には、当所からは、高橋が WG のコンビーナ兼プロジェクトリーダーとして、また、益田と安藤がエキスパートとして参加している。本稿で紹介した船上モニタリングのための pH 計規格案は、日本主導で開発しており、日本船舶技術研究協会に設置された国内対応委員会メンバーのアドバイスや WG 各国メンバーの協力を得て、順調に開発のステップを進めている。先にも述べたように 2019 年 9 月に CD 投票を始めようとしている段階である。本規格は、2020 年から始まる船用燃料油の硫黄分規制とも関係することから、国内外の意見を取り入れながらより良いものにしつつ、なるべく早く規格の制定を実現したいと考えている。また、今後の活動に関しては、国内関連業界の意見を注意深くヒアリングし、国内製造会社の国際競争力強化や国内海運会社にとって有益となる新たな国際規格の開発を検討するつもりである。コンビーナとして、国際的に公正な立場を守り、国内外のエキスパートからの信頼が得られるよう努力していきたいと考えている。

最後に、排ガス洗浄装置に係る国際規格の開発にご協力いただいている関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Revised MARPOL Annex VI, Resolution MEPC.176(58), MEPC 58/23/Add.1, October 2008.
- 2) <https://www.egcsa.com/>.
- 3) 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning System, MEPC 68/21/Add.1, May 2015.
- 4) BS 2586:1979 Specification for glass and reference electrodes for the measurement of pH.
- 5) R. P. Buck, S. Rondinini, A. K. Covington, F. G. Baucke, C. M. Brett, M. F. Camoes, M. J. Milton, T. Mussini, R. Naumann, P. Spitzer, G. S. Wilson Measurement of pH: Definition, Standards, and Procedures (IUPAC Recommendations 2002), Pure Appl. Chem., Vol. 74, No. 11, pp. 2169–2200, 2002.
- 6) P. Spitzer, S. Seitz, Metrological Traceability Chain for pH Measurement Results, J. Metrol. Soc. India, Vol. 25, pp.191–196, 2010.