

SO_x・PM 規制強化による 環境改善効果と対応技術動向

－国際海事機関(IMO)による
2020年規制強化をうけて－

2016年11月29日

「2020年からのSO_x・PM規制強化に関するセミナー」

日本海事協会 技術研究所 調査企画部
特任検査員 華山 伸一

1. はじめに
2. 附属書におけるPM削減の位置づけ
3. 燃料中硫黄分とPM排出量の関係
4. 期待される日本周辺環境改善効果
5. 対応技術の概観
6. NKとしての対応

本講演では、今回の規制強化を、硫黄が燃焼中に酸化されて生じるSOx環境濃度に対する対策のみとして位置付けるのではなく、粒子状物質、特にPM2.5(粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子状物質)環境濃度に対する対策に注目する。

日本国の大気汚染のうち、SOx(SO₂)に関しては、環境濃度は改善環境基準(SOxのうちSO₂に対して設定)やWHOの指針値は十分に達成

→日本国などにおいて、SOx (SO₂) 環境濃度に対する追加対策の必要性 低

他方、PM2.5については、2013 年に入ってから中国において広い地域で高いPM2.5濃度が連続的に観測され、日本でも西日本を中心に我が国の環境基準値(1 日平均 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$)を越える濃度が頻発している。

→日本国などにおいて、PM2.5環境濃度に対する追加対策の必要性 高

陸上ディーゼル機関と船用機関との対応技術の比較

NO_x、SO_xの排出については、自動車、特に大型ディーゼル自動車の排出規制やそれに対応する排ガス処理技術が船舶に対しても使用されてきた。

他方、PM対策については大気汚染構造そのものが変化した

自動車でPMが問題になっていた80年代90年代

主要道路付近での排出を抑えるため、ばいじんを含むディーゼル粒子の燃焼改善による削減+DPFによる除去で対応

PM2.5が問題になっている現代

規制対象を二次粒子（大気中でガスから粒子に変換するもの）に拡大する必要がある

→異なった対応技術が求められる

1. はじめに
2. 附属書におけるPM削減の位置づけ
3. 燃料中硫黄分とPM排出量の関係
4. 期待される日本周辺環境改善効果
5. 対応技術の概観
6. NKとしての対応

MARPOL 73/78 条約附属書VI (船舶からの大気汚染防止)
見直しを2006 年4 月より開始、2008年4月に最終化。

主な論点は二つ

①SO_x、NO_x規制の強化について審議

→全海域共通の規制+「排出規制海域(Emission Control Area; ECA)」内にのみ適用される規制の二つに分けて規制値を強化。

② PM規制の追加

→燃料中硫黄分の削減によるPM規制効果を認め、新たにPM 規制として追加。

附属書VI 題14章のタイトルは、
Sulphur Oxides (SOx) and Particulate Matter
すなわち、「**硫黄酸化物と粒子状物質**」に対する
排出規制に変更された。

一般海域

2012年1月1日以降 3.50%未満

2020年1月1日以降 0.50%未満

排出規制海域

2010年3月1日以降 1.00%未満

2015年1月1日以降 0.10%未満

燃料硫黄分規制にはPM排出量を削減する目的が含まれていることになる。

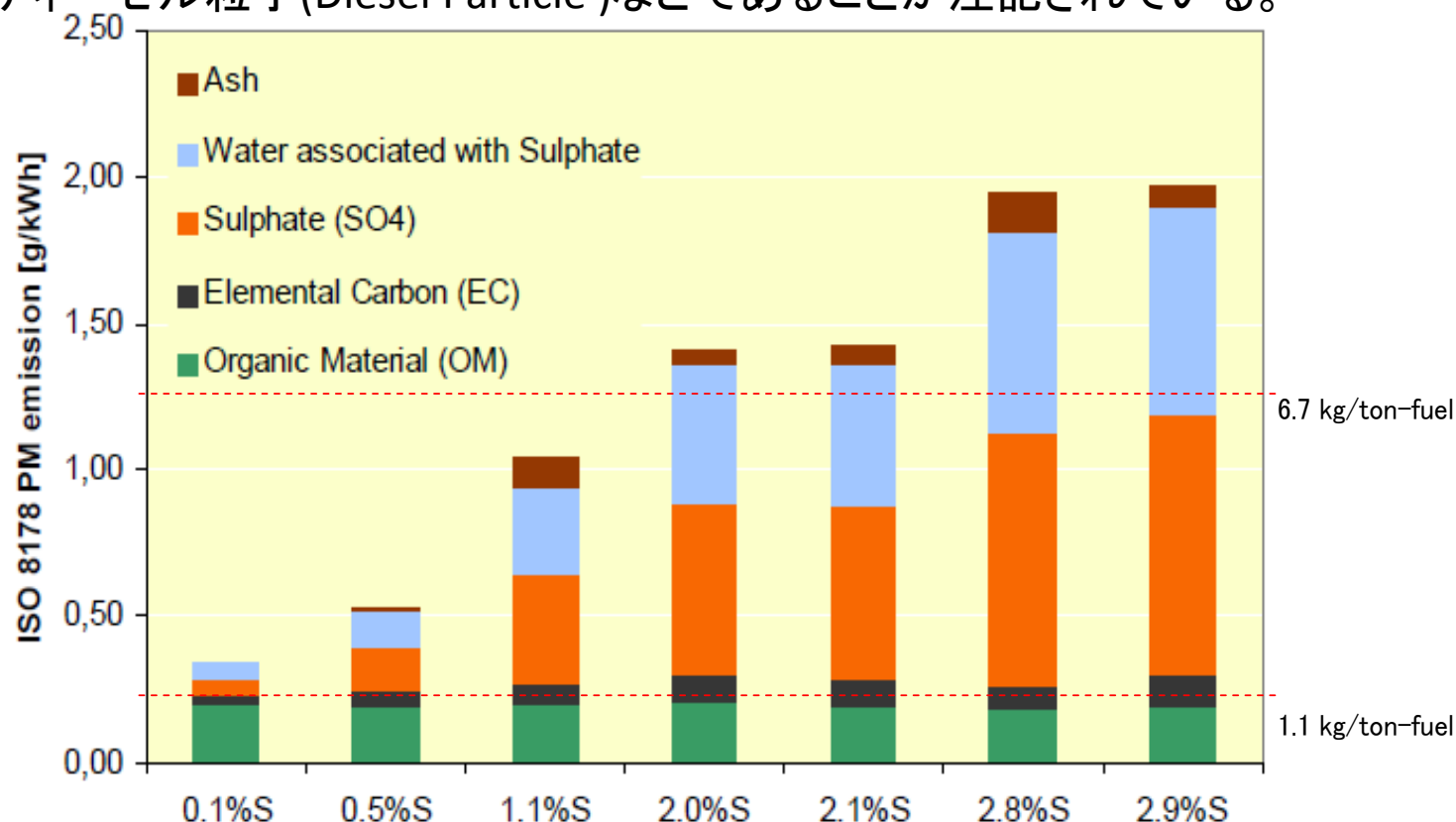
燃料中の硫黄分削減が、PMの削減に繋がる機構は？

1. はじめに
2. 附属書におけるPM削減の位置づけ
3. 燃料中硫黄分とPM排出量の関係
4. 期待される日本周辺環境改善効果
5. 対応技術の概観
6. NKとしての対応

燃料中硫黄分とPM排出量の関係

見直し作業時に、IMOに提出された提案文書や議事録には、燃料中の硫黄分がPM 排出量に対して直接的な影響があることが強調されている。

たとえば、下記データを基に希釈法で測定した場合、全PM量のおよそ8割が硫酸ミスト、残りがディーゼル粒子(Diesel Particle)などであることが注記されている。



燃料中の硫黄分 (%) に対するPM排出係数 (g/kWh)

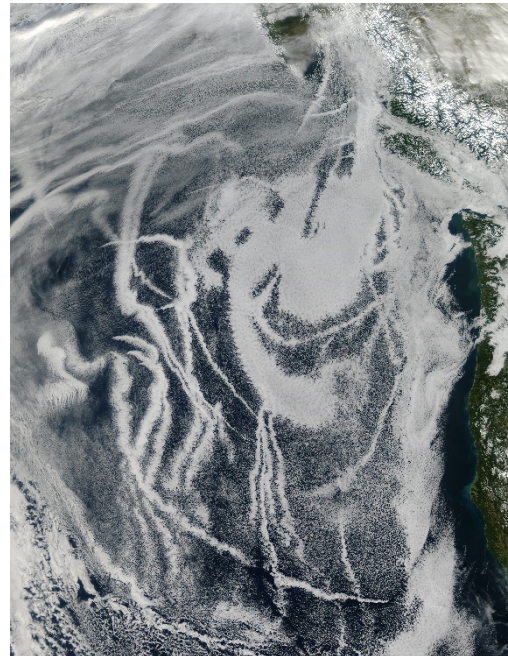
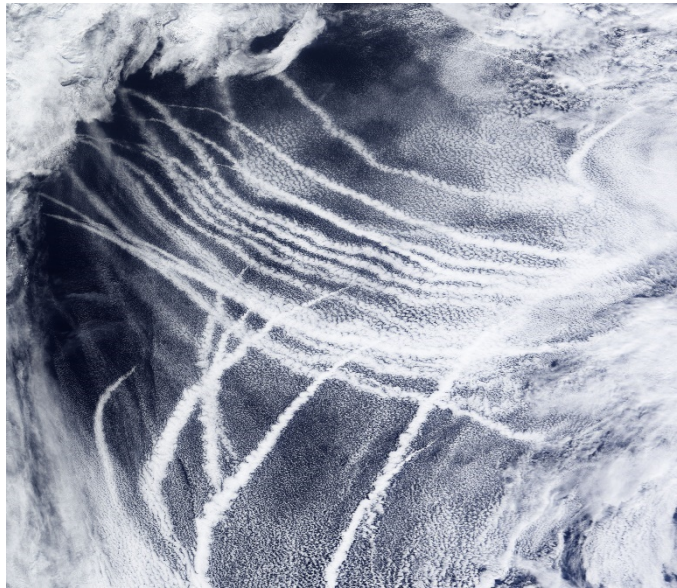
(海洋政策研究財団、IMO BLG-WGAP 2、Berlin、2007)

船舶の排ガスが、硫酸ミスト+水分であることを示す一つの例。

船舶からの排気ガスに含まれる硫酸ミストは雲の凝結核として最適な大きさになる。

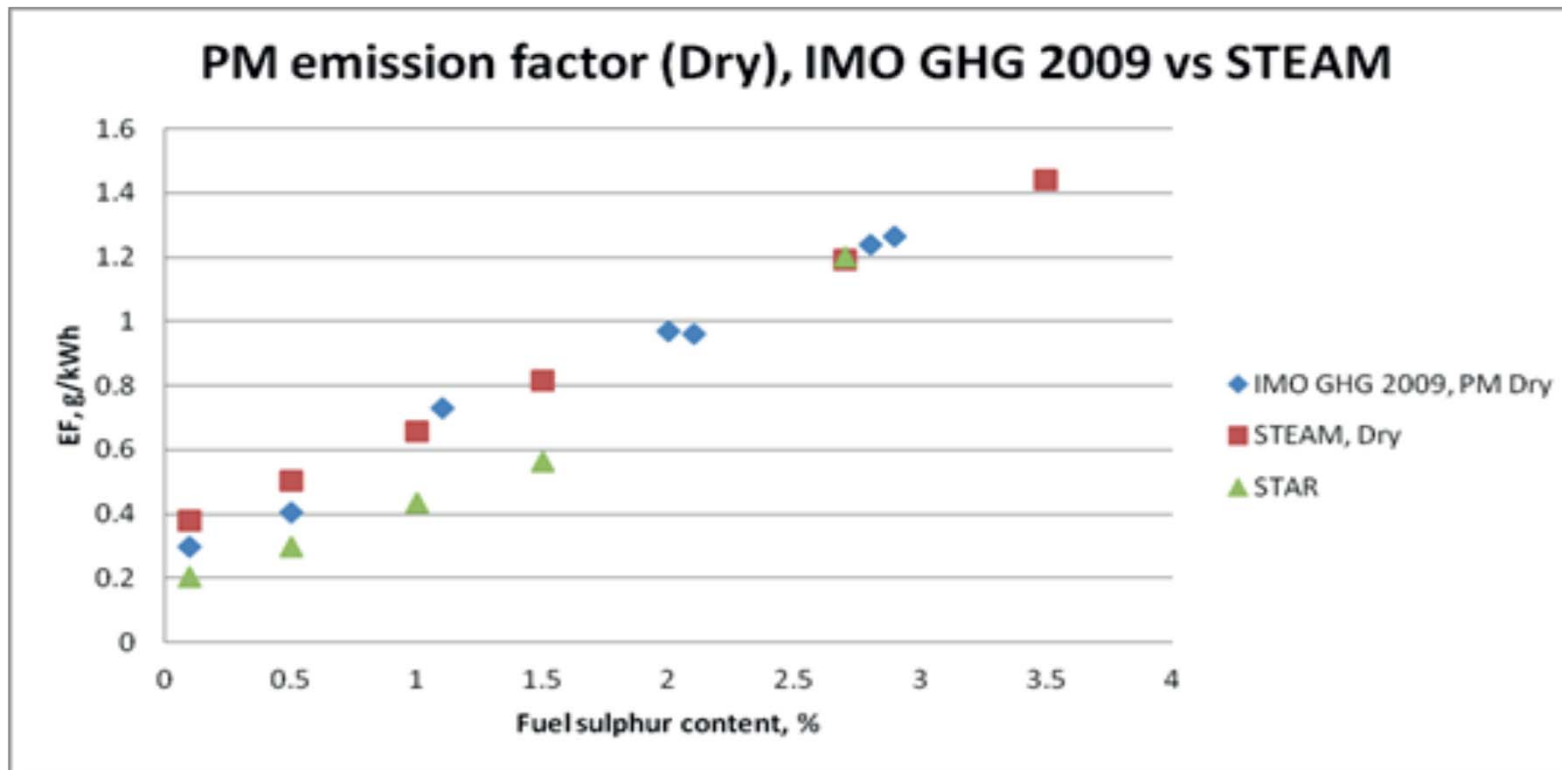
このため、湿度の高い大洋においては、飛行機雲ならぬ 船舶雲 (ship trace) ができることが知られている。

米国NOAAが衛星から観測したアリューシャン列島付近および米国西岸の船舶雲の軌跡



粒径の小さい粒子状物質はたとえその大半が水分であっても、肺胞に容易に達するとともに、物理的な刺激などから呼吸器系・循環器系に一定の影響があるといわれる。

3rd IMO GHG study 2014の作成作業において9ページの関係式を検証。3つの調査結果は一直線上によく乗っており、船舶排ガスに含まれるPMは硫酸塩がその過半を占めることが確認された。



燃料中の硫黄分 (%) に対するPM排出係数 (g/kWh) (IMO、2015、3rd IMO GHG Study 2014) (2012年▲、および2013年■に実施された調査において、PMの分析方法が異なり、水分は計測されない。このため、9頁と絶対値は異なる)

1. はじめに
2. 附属書におけるPM削減の位置づけ
3. 燃料中硫黄分とPM排出量の関係
4. 期待される日本周辺的环境改善効果
5. 対応技術の概観
6. NKとしての対応

期待される日本周辺環境改善効果 ClassNK

規制強化によって、2020年に期待できるPM排出量の削減は?また その環境改善効果は?

排出係数では、**7割程度**の削減。東京湾内の全ての船舶から排出される排出量ベースでは2020年において、規制を強化しない場合に比較して**6割程度**の削減に繋がると試算できる。

現行燃料中の硫黄分が0.50%に規制された場合のPM排出係数の改善

硫黄分 %	PM排出係数 (g/kWh)	現状に対する 割合
2.46	1.72	-
0.50	0.57	33%

現行燃料中の硫黄分が0.50%に規制された場合の東京湾の全船舶からのPM排出量の変化
@2020年

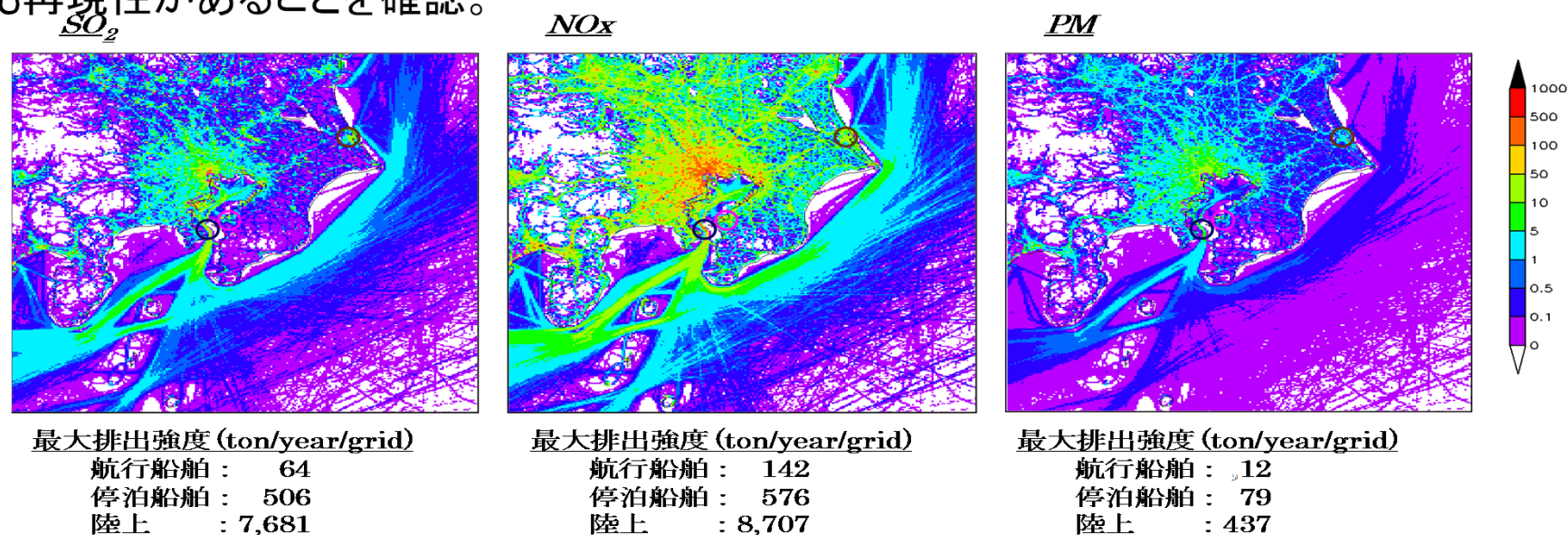
シナリオ	PM排出量 (ton/year)	現行のままからの削減量 (Δton/year)
現行のまま C重油 2.46% A重油 0.61%	2,588	-
0.5% 規制強化時	1,069 (41.3%)	1,519

期待される日本周辺環境改善効果 ClassNK

US EPAが開発したCMAQ (Community Multiscale Air Quality) を用い、大規模大気汚染シミュレーションによって2020年の改善効果を予測。

希釈・拡散だけでなく、各種大気汚染物質の光化学反応、粒子化、陸上や海面への沈着、降雨などによる除去過程などを考慮。

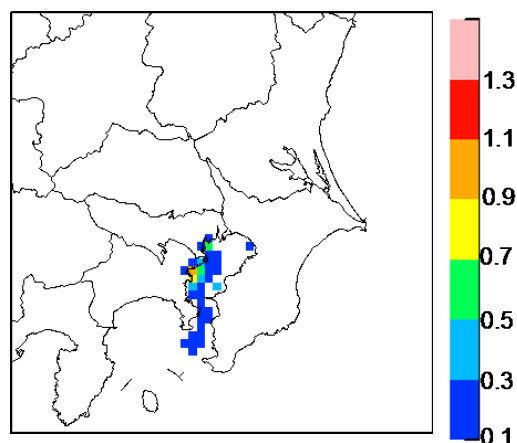
シナリオを設定する前の現況再現性(2004年が対象)についても実際の測定値との照らしあわせを行い、一次粒子だけでなく、オゾンや硫酸塩、硝酸塩などの二次粒子についても再現性があることを確認。



期待される日本周辺環境改善効果 ClassNK

① 2020年の将来ケース(ただし船舶規制強化なし)と、② 2020年の将来ケース(0.50%規制強化あり)の二つのケースで年間の計算を行った。
全グリッドにおいて①-②の差分を取ることで、規制強化による大気環境改善効果を推定した。なお、排出量は東京湾外でも減少しているが、差分計算は東京湾内のみで行った。

関東域、特に沿岸部周辺においてPM2.5濃度($\mu\text{g m}^{-3}$)は、一定程度の減少。広域からの移流や他の排出源からの二次粒子の影響が大きい、極端に高い濃度の出現率は大きく減少することが確認できた。



米国が、IMOに対するECA申請書において用いた人体健康影響評価コード(BenMAP)を用いて試算したところ、図中の計算領域内において年間に約281人の慢性肺疾患による死亡者の減少が期待できる

Global Switch設定時のPM2.5 大気中濃度
(年平均値)の削減幅) 単位 ($\Delta\mu\text{g m}^{-3}$)

1. はじめに
2. 附属書におけるPM削減の位置づけ
3. 燃料中硫黄分とPM排出量の関係
4. 期待される日本周辺環境改善効果
5. 対応技術の概観
6. NKとしての対応

燃料中硫黄分0.50%に対応するための技術

条約適合のためには多くの対応技術がある。

- ① 燃料中硫黄分に適合した重油燃料(HFO あるいは C 重油相当)を使用
- ② 軽質燃料(MGO あるいは A重油相当)の使用
- ③ LNG、バイオフューエル、メタノールなどの代替燃料の使用
- ④ EGCS(SO_xスクラバー)を用いた排ガス後処理技術

いずれも、陸上では完成、実用化された技術であるが、船舶に応用した際の利点と欠点について整理。

対応技術の選択のためには、コスト評価が必須であるが、2020年における燃料コスト予想に不確実性が残るため、これらの技術のコスト評価は現時点では難しい。

IMO低硫黄燃料供給可能性調査の結果では、2020年における予想燃料価格は下記のように評価。ただし、2020年の原油価格に大きく影響されると明記されている。

さらに将来のECAの追加、EGCS排水排出規制(港湾内での排水禁止を含む)などによって、大きく影響される。

Product	prices USD/ton
MGO 硫黄分0.10%	616
HFO 硫黄分0.50%	595
HFO 硫黄分1%	569
HFO 硫黄分3%	466
Brent crude (USD/bbl)	77

IMOの調査において、2020年において最も多く使用されることが想定されている対応策。

主な性状は下記のように予想

動粘度	10-180 cSt
密度	908-934 kg/m ³
CCAI	821-858
引火点	94-118°C

機関や補機類に大きな変更は必要無いと結論されている。

2020年の実使用に起きうるトラブル

- ①新燃料が**低粘度**であるため、燃料ポンプのポンプシール部の漏れが増加し、シリンダ内への**供給量不足**となる可能性がある。
- ②新燃料が**低潤滑性**のため、燃料噴射ポンプの**プランジャ・バルブ**等が**異常摩耗**する可能性がある。
- ③新燃料が**低揮発点**のため、重油からの切り替えを実施した際に高温になった燃料油管で蒸発し、**ベーパーロック**等の不具合が発生する可能性がある。
- ④新燃料が**低引火点・低揮発性**のため、ボイラ炉内に燃料が漏れた際に**フラッシュバック**の可能性が高まる。
- ⑤ **硫黄分減少**に伴いディーゼル機関の燃焼で生成する硫酸(H_2SO_4)も減少するため、高アルカリ価のシリンダ油を使用した場合に堆積物が生成され、シリンダライナの異常摩耗が発生する可能性がある。

IMOの調査においては、2020年に使用することが想定されていない。調査では、軽質油はECA-S内で用いられる0.1%の燃料のみを想定。

内航船や漁船だけでなく、一部の外航船については、メンテナンスコスト削減のために硫黄分0.50%のMarine Gas Oilを使用する可能性があるが、0.50% MGOと0.50% HFOの価格差は不明。

新造船については、purifierなどの燃料前処理装置を単純化し、燃料メンテナンスコストにかかるランニングコストを小さくするとともに、エンジンルームの省スペース化を図るというオプションはあるか？

附属書では排ガス処理装置(EGCS)の利用が認められている。
(SO₂/CO₂比による適合によって性能確認)

ECA-C域内においては、ランニングコストで評価した場合、
0.1%MDO燃料に比較して、EGCSの利用は十分なメリットがある。
IMO調査においても2020年までに3,800隻(2020年において36百
万トン/年の硫黄分0.50%以上の燃料)のEGCS搭載を予想。

他方、0.50%規制対応EGCSについては、2020年初頭において
は、0隻を見込む。

日本海事協会は、2009年より「0.50%規制に対応するEGCSのレ
トロフィットに関する調査」を含むSO_xスクラバーに関する共同研
究を多く実施。自動車運搬船(新造)、バルクキャリア(新造)、など
への搭載を実施。

SOxスクラバー

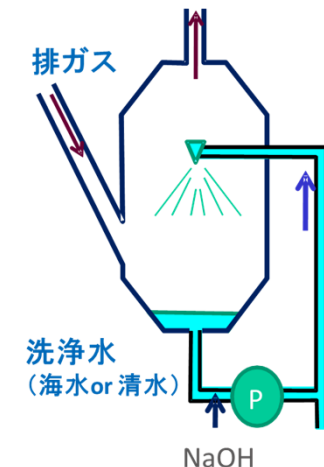
- ✓ 水により排ガスを洗浄する湿式スクラバーと固体吸着剤を用いる乾式スクラバーに大別。

湿式スクラバー

- 脱硫剤として水を使用
 - オープンループ（海水を使用，船外への排水）
 - クローズドループ
(NaOH等を加えた清水又は海水を循環使用)
 - ハイブリッド

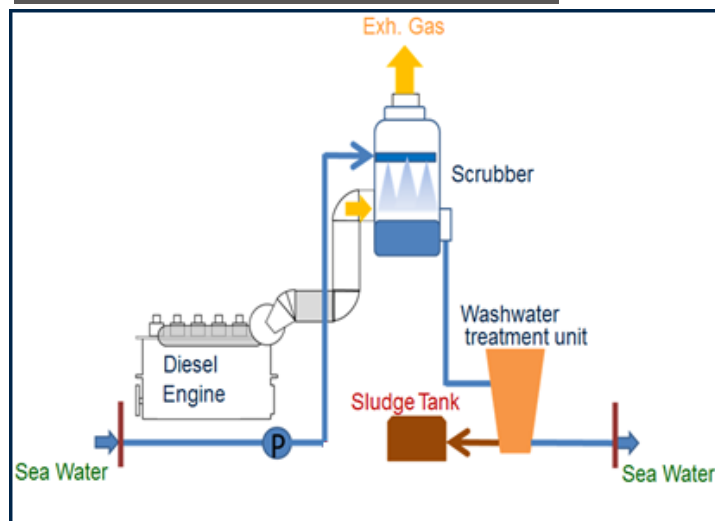
乾式スクラバー

- 脱硫剤として消石灰等の化学物質を使用



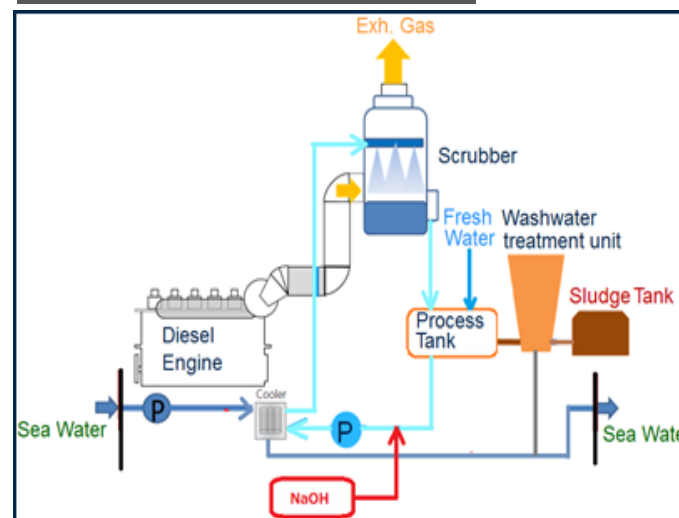
- ✓ 98%の脱硫、70-80%程度のPM除去が可能と言われる。
- ✓ 陸上船用ともに、主に湿式スクラバーが開発されている。

海水オープンループ



- 洗浄水として海水を使用
- 使用後の洗浄水は船外へ排水

クローズドループ



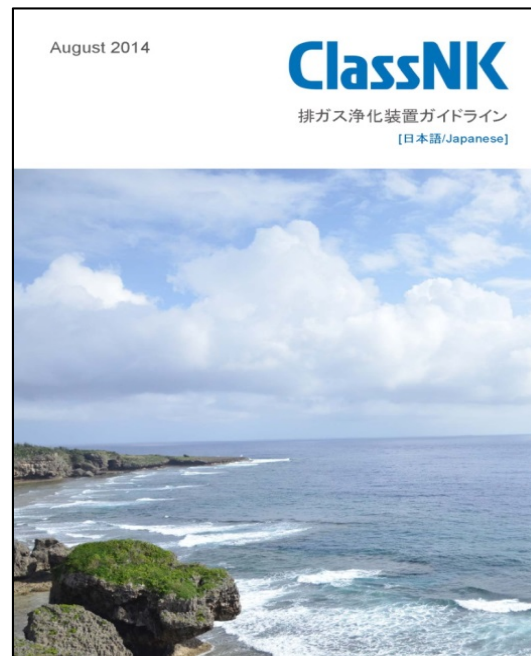
- NaOHを加えた清水/海水を循環使用

➡ 船外排出不要

	海水オープンループ	クローズドループ
水酸化ナトリウム	不要	必要 ➡ 運用コスト高
追加設備	水処理装置(不要の場合あり) 排水監視装置 スラッジタンク	水処理装置 排水監視装置 スラッジタンク 水酸化ナトリウムタンク プロセスタンク、クーラー

日本海事協会は2014年に、「排ガス浄化装置ガイドライン」を発行

- ①SO_xスクラバー技術の概要、
- ②2009年排ガス浄化装置ガイドライン(MEPC.184(59))の要件解説、および
- ③SO_xスクラバー搭載にあたり適用となる船級要件など



- LNGをガス燃料として用いた場合、理論上SO_xはゼロ
- ディーゼル粒子の生成も無視できるレベルまで削減
- IMOの調査においては、2020年においてドライバルク、コンテナ船、タンカーを含む170隻のLNG燃料船が主にECA-S内および短距離航海で運航を予想。
- 2020年を過ぎても、現在のLNG燃料コスト予測(583 USD/ton)においては、今回の規制強化により大幅な利用増加を想定していない。
- その他、LNG以外にメタノール、バイオフューエル、LPG、DMEなどの代替燃料が研究レベルでは検討中。今回の規制強化で大幅に増加することはない。

- MEPC70における決定直後のため、0.50% Marine HFO、0.50% MGOともに、コストや予想燃料性状に関する情報が極めて少ない。このため、現時点で各対応技術について定量的なコスト評価を行うことが困難である。
- 来年2月に開催されるPPR4における審議を含めて、新たなISO規格の策定など必要とされる規格や情報の整理が急ピッチで進むことが想定。
- これらにより、正確なシナリオに基づくコスト解析評価を行うことが可能。

1. はじめに
2. 附属書におけるPM削減の位置づけ
3. 燃料中硫黄分とPM排出量の関係
4. 期待される日本周辺環境改善効果
5. 対応技術の概観
6. NKとしての対応

今回の規制強化

- 外航、内航に係わらず大きな変革を迫られる。
- 新造船、既存船を含め推進系の全てのコンポーネントに大きな影響を及ぼす可能性がある。

海事クラスターはこの変革に必要な要素技術開発を進めてきた。今後は、要素技術のなかから、費用とともに、安全面や地域規制との整合性を取りながら、ケースごとに適切にオプションを選択し、船上で安全かつ適切に運用していくことが肝要である。

日本海事協会は、今後も関係する技術課題について業界のご意見を取り入れながら継続的に評価を行い、応用研究や適用研究に一丸となって取り組む所存です。

ご清聴ありがとうございました。

本報告の執筆に際して、九州大学 大学院 総合理工学研究院 熱機関工学研究室の高崎 講二教授 および 明星大学理工学部 総合理工学科(環境科学系)の櫻井 達也 准教授に多くのご指導を頂いた。この場を借りて御礼申し上げます。

