

排ガス規制の進展と 技術ソリューションの行方

海上技術安全研究所 第14回講演会
2014年11月17日

独立行政法人 海上技術安全研究所
環境・動力系 春海一佳

本日の講演内容

1. 船舶に関連する排ガス規制
(NO_x、SO_x、EEDI)
2. 環境規制の状況
(NO_x、SO_x、BC、スクラバ排水)
3. 規制への対応
(NO_x、SO_x、EEDI)
4. 燃料転換のシナリオ例
5. まとめ

船の排ガス規制

- 排ガス規制
 - IMOによる有害排ガス (NO_x , SO_x , PM) 規制
 - 大洋上と陸域近くは規制の重要度が異なる (地理的規制)
 - NO_x はg/kWh値で規制, 新造船から3段階 (Tier 1 ~ Tier 3)
 - SO_x , PMは燃料油のS分規制
- 温暖化ガス規制
 - 国際海運は京都議定書の対象外 (国別規制になじまない)
 - IMOで規制することが要請されている (国際航空はICAO)
 - 総量規制ではなく, 排出原単位 (g/ton·mile) 規制を志向
 - エネルギー効率設計指標 (EEDI) を定義
$$\text{EEDI} = \text{燃費} \times \text{機関出力} \times \text{排出係数} / (\text{積載重量} \times \text{速度})$$

PM排出への直接的な規制 (Black Carbon:BC, PM2.5) ?

EEDI 30%減が最終目標 ?

排ガス規制 (NOx, SOx)

国土交通省資料から

SOx・PM規制

燃料油の硫黄分濃度の上限値

レビュー実施: 規制開始時期を決定

前倒し?

2020年or
2025年

2010年7月

2012年

2015年

← 2018年

指定海域

1.5%

1.0%

0.1%

一般海域

4.5%

3.5%

0.5%

NOx規制

2011年

2016年

一般海域

NOx
1次規制

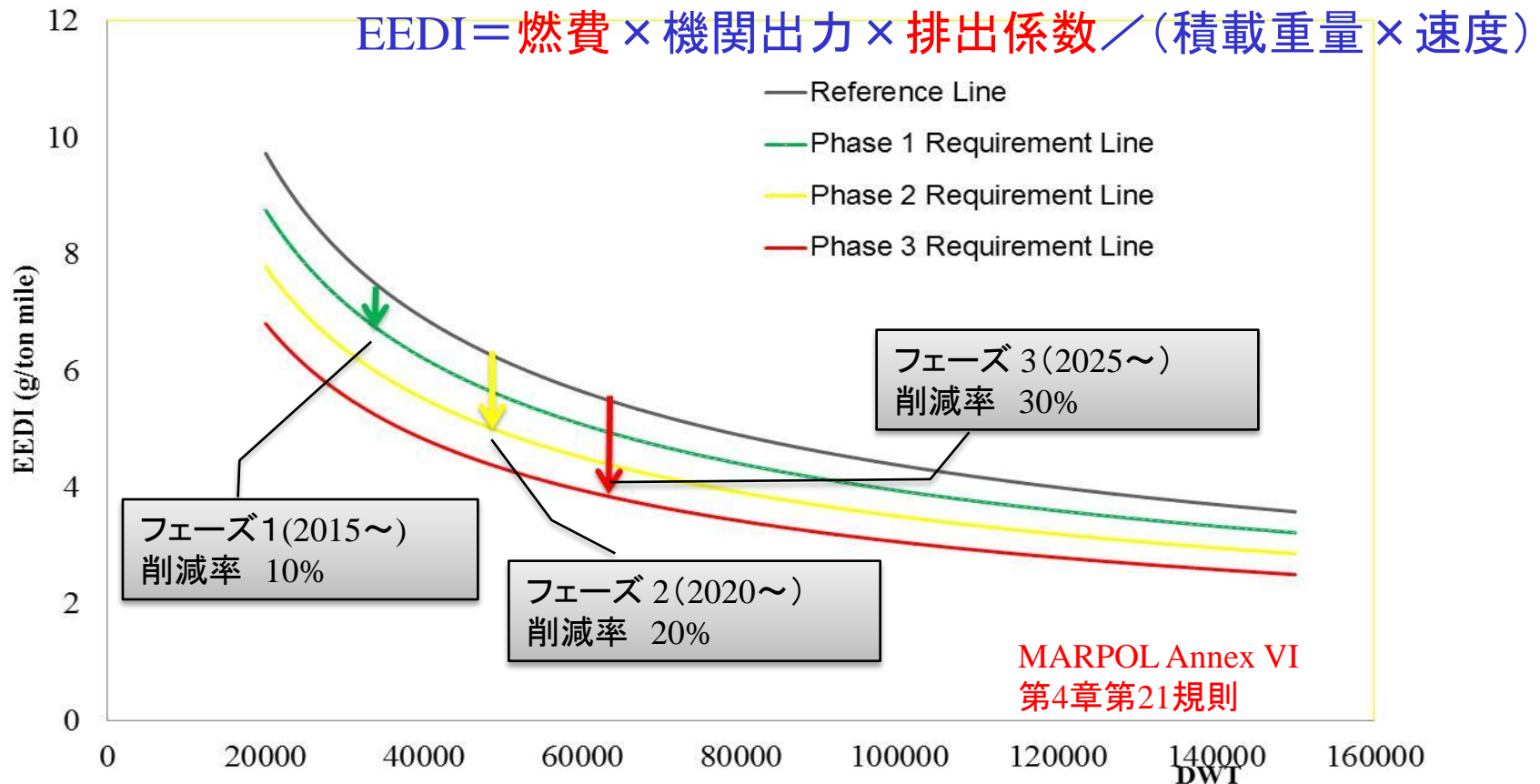
指定海域

NOx 2次規制
(1次規制比20%削減)

NOx 3次規制
(80%削減)

EEDI規制

- 総量規制ではなく、技術発展に期待する排出率規制
- リファレンスライン(既存船平均値)を基準とし段階的に強化
- 船種・サイズ(DWT)により異なる規制値



NO_x規制の状況

OMEPC (Marine Environment Protection Committee) 66
(2014年3月): NO_x3次規制 (Tier III) の実施時点は予定
通り2016年から



ECAを航行しない限り対応する必要は無い
(影響は限定的?)
将来、ECA設定海域拡大の可能性

SO_x規制の状況

○2015年からのECA内での使用燃料油中の硫黄分0.1%規制も規定通りそのまま実行される予定。

○ 2020年からの**全海域での硫黄分0.5%規制**について、条約上、その見直し(主として燃料油の供給体制に関する検討)を2018年までに実施と記載。しかし、MEPC66に英国より前倒しで見直しの提案が行われた。

船の建造時期、航行海域にかかわらず使用される燃料そのものにかかる規制

現状で硫黄分0.5%を超える燃料を使用している全ての船にかかる

影響大

BC規制・スクラバ排水規制の状況

○BC (Black Carbon) : 北極氷海域での太陽光の反射を減少させる要因としてIMOで議論に。

現在、MEPCからPPR (Sub-Committee on Pollution Prevention and Response) に①定義、②計測法、③規制方法(可能であれば)の3つの検討が付託。

○スクラバ排水: MEPC59 (2009年)で、EGCSガイドラインが採択され、そこで排水基準は定められている。しかし、MEPC65でガイドライン改正の検討の必要性が合意、MEPCからPPRに検討が付託。規程における曖昧さに関する検討等を実施。検討期間は2015年まで。

NO_x規制への対応

- Tier 2: NO_x排出率20%削減(2011年～)
 - 燃焼の制御で達成, 熱効率微減
- Tier 3: NO_x排出率80%削減(2016年～, 放出規制海域(ECA)のみ)
 - 選択触媒還元(SCR)による脱硝
 - 排ガス再循環(EGR)による低NO_x排出燃焼
 - 排ガス中のSO_xによる性能低下
 - SCR、EGRともに実用化の段階に
 - 実運用においては**耐久性**に課題
- **燃料転換**によるNO_x低減
 - LNG燃料への転換: Lean burnガスエンジンでは燃焼制御で達成の可能性も
 - 自然エネルギー(ハイブリッド化～太陽光等)

SO_x規制(≒PM規制)への対応

● ECA規制(指定海域)

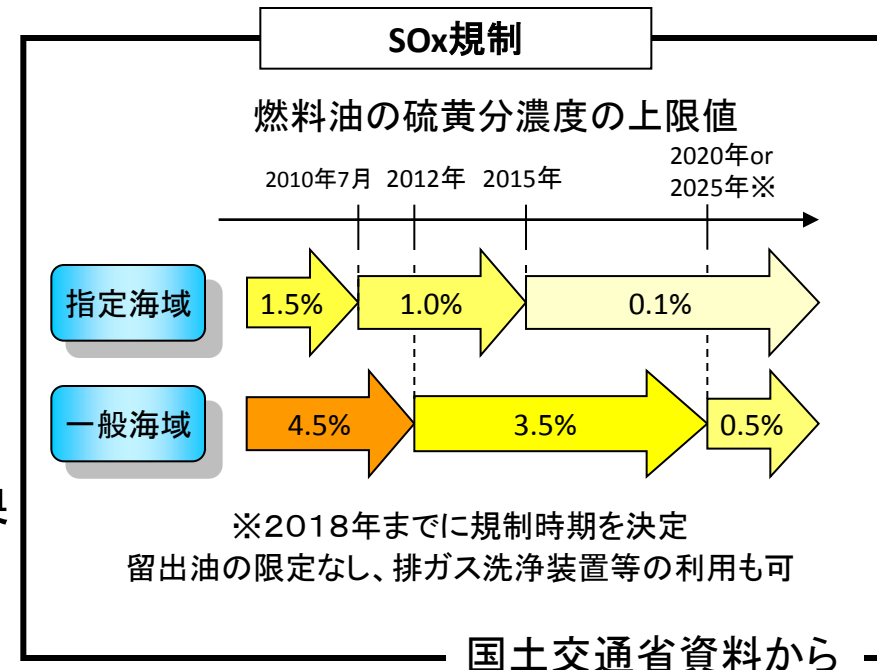
- ECA海域では留出油(A重油・軽油=MDO)の使用、あるいは新規開発燃料

● Global規制(一般海域)

- 複数の選択肢
 - ・残渣油(C重油)+脱硫装置(スクラバ)
 - ・・・("Equivalent"規定)
 - 主管庁判断で同等手段(Equivalents)も選択できる
 - ・低硫黄残渣油への転換
 - ・留出油(A重油・軽油=MDO)への転換
 - ・他の低硫黄燃料の転換(LNG等)

<選択肢は多様>

- コスト, 供給体制の整備等により決まる可能性
- NO_x規制, 燃費等, 他の規制とも関係

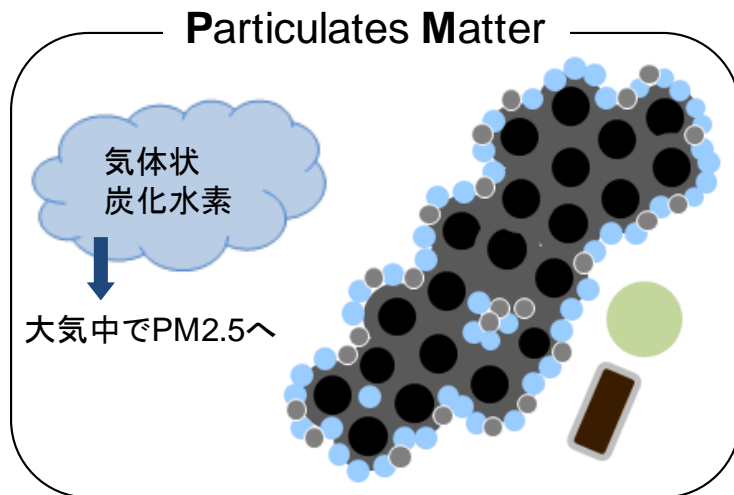
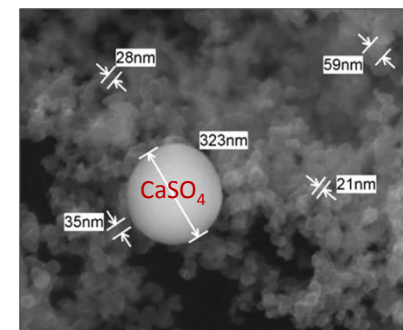


なぜSO_x規制≒PM規制？(1)

船から排出されるPMとは？

PM (Particulate Matter: 粒子状物質): フィルター重量法で測定されるもの

しかし船の場合、燃料のせいで、実際は多種多様な物質の集合体

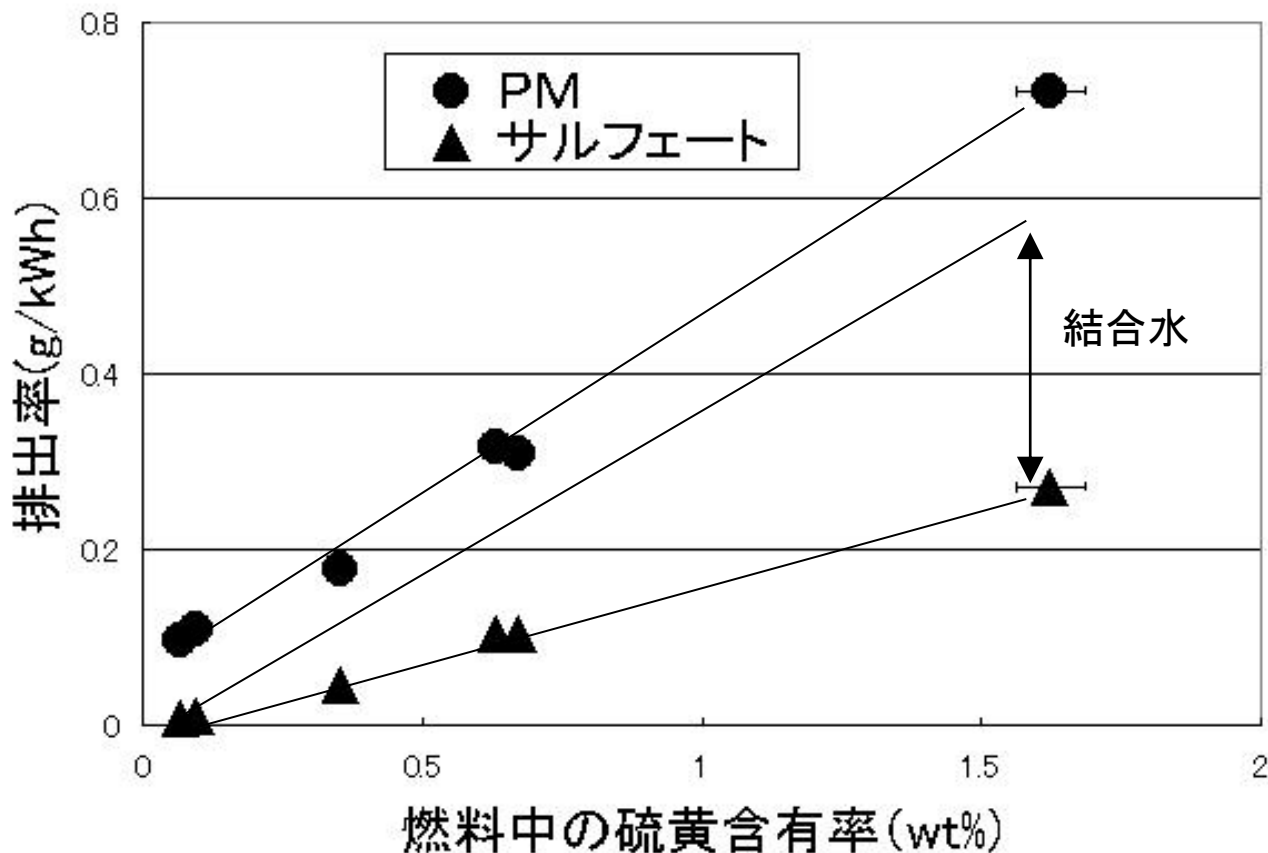


- 元素状炭素EC: 数十nmサイズ
 - 吸着した炭化水素
 - 液相の粒状炭化水素
 - サルフェート(硫酸イオン+結合水)
 - 重金属類(燃料由来)
 - 硫酸カルシウムなど(潤滑油由来)
- } SOF分 = OC

なぜSO_x規制≒PM規制？(2)

船用ディーゼル機関から排出されるPMの特徴

- ・重油起源の硫酸イオン(サルフェート)
- ・重油・潤滑油起源の可溶性有機化合物(SOF)



- ・サルフェートとその結合水の排出率は、硫黄分にほぼ比例
- ・高硫黄分燃料油では、PMの大半がサルフェートとその結合水

SO_x規制への対応(燃料)

●ECA対応燃料(0.1%硫黄分)

2015年からの規制に対応した**新燃料**の開発

例えば、Exxonmobil Premium HDME 50

- ・ 0.1%硫黄分
- ・ HFO程度の高い引火点、低い揮発性
- ・ **高粘度**→燃料切り替え時のトラブルがない

●一般海域対応燃料(0.5%硫黄分)

0.5%残渣油？

MDO、MGO

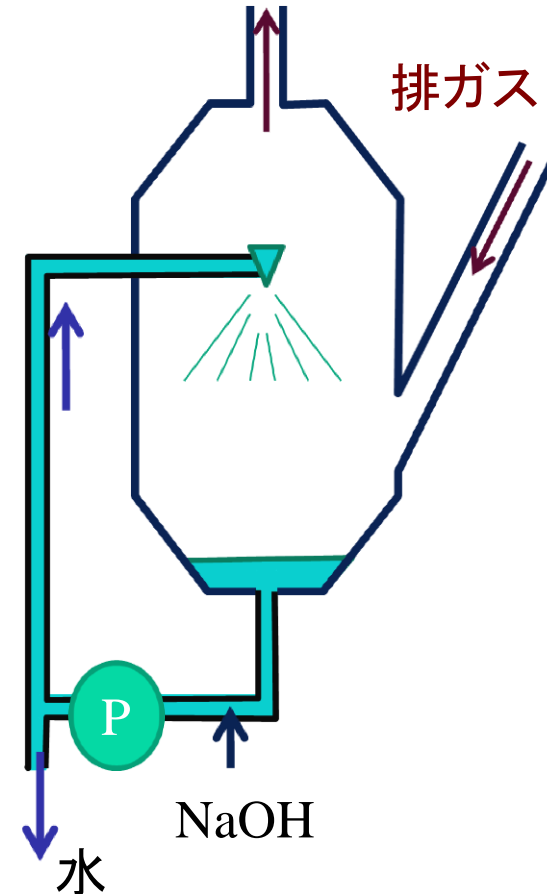
●代替燃料→EEDI削減にも有効

ガス燃料(LNG、CNG、H₂等)

バイオ燃料、GTL等

SO_x規制への対応（湿式脱硫法：スクラバ）

- Equivalent規定
 - MARPOL条約 Annex VI, Regulation 4
 - 規制値を満たす燃料を使用した場合の排ガス中のSO_x濃度と同等の濃度まで排ガスを浄化できるのならば、主管庁がEquivalent手法を認めることができる



燃料油中の硫黄分濃度 (% m/m)	排出比 SO ₂ (ppm)/CO ₂ (% v/v)	規制の適用範囲と時期	
		一般海域	2012/1/1より前
4.50	195.0	一般海域	2012/1/1より前
3.50	151.7	一般海域	2012/1/1以降
1.50	65.0	ECA内	2010/1/1より前
1.00	43.3	ECA内	2010/1/1以降
0.50	21.7	一般海域	2020 or 2025/1/1以降
0.10	4.3	ECA内	2015/1/1以降

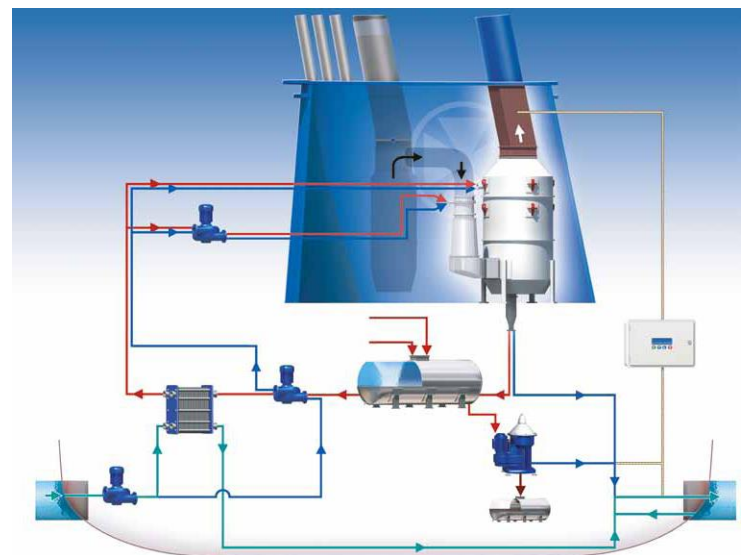
湿式スクラバ：水（海水／清水）による硫黄分（硫酸／硫酸塩）除去
排ガスの冷却、水との衝突による硫酸分捕獲



湿式スクラバの例



257kW中速エンジン用
高さ:4.3m, 直径:0.55m



21,000kW
主機用
高さ:10.5m
直径:4.6m

アルファラバル社
ホームページから

湿式スクラバの課題(大きさ)

主機出力とスクラバの大きさ

エンジン出力[kW]	直径[m]	長さ[m]	高さ[m]	乾燥重量[ton]
4,000	2	3.5	5.6	11
12,000	3.5	5.8	8.1	18
20,000	4.6	7.8	10	25
32,000	5.9	10.6	11.6	38
55,000	7.7	13.9	14.4	62

内航船を対象とした検討

アルファラバル社ホームページから

(主機MCR、199GT:735kW、499GT:1300kW、749GT:1600kW)

船 級	199G/T		499G/T		749G/T	
	既存品	30%減	既存品	30%減	既存品	30%減
胴径 [m]	0.90	0.63	1.10	0.77	1.40	0.98
高さ [m]	3.90	2.73	4.03	2.82	4.35	3.05
幅 [m]	1.78	1.24	1.84	1.29	2.21	1.55

設置において、高さがネックになる可能性大

湿式スクラバの課題（排水モニタリング）

排水基準 (IMO)

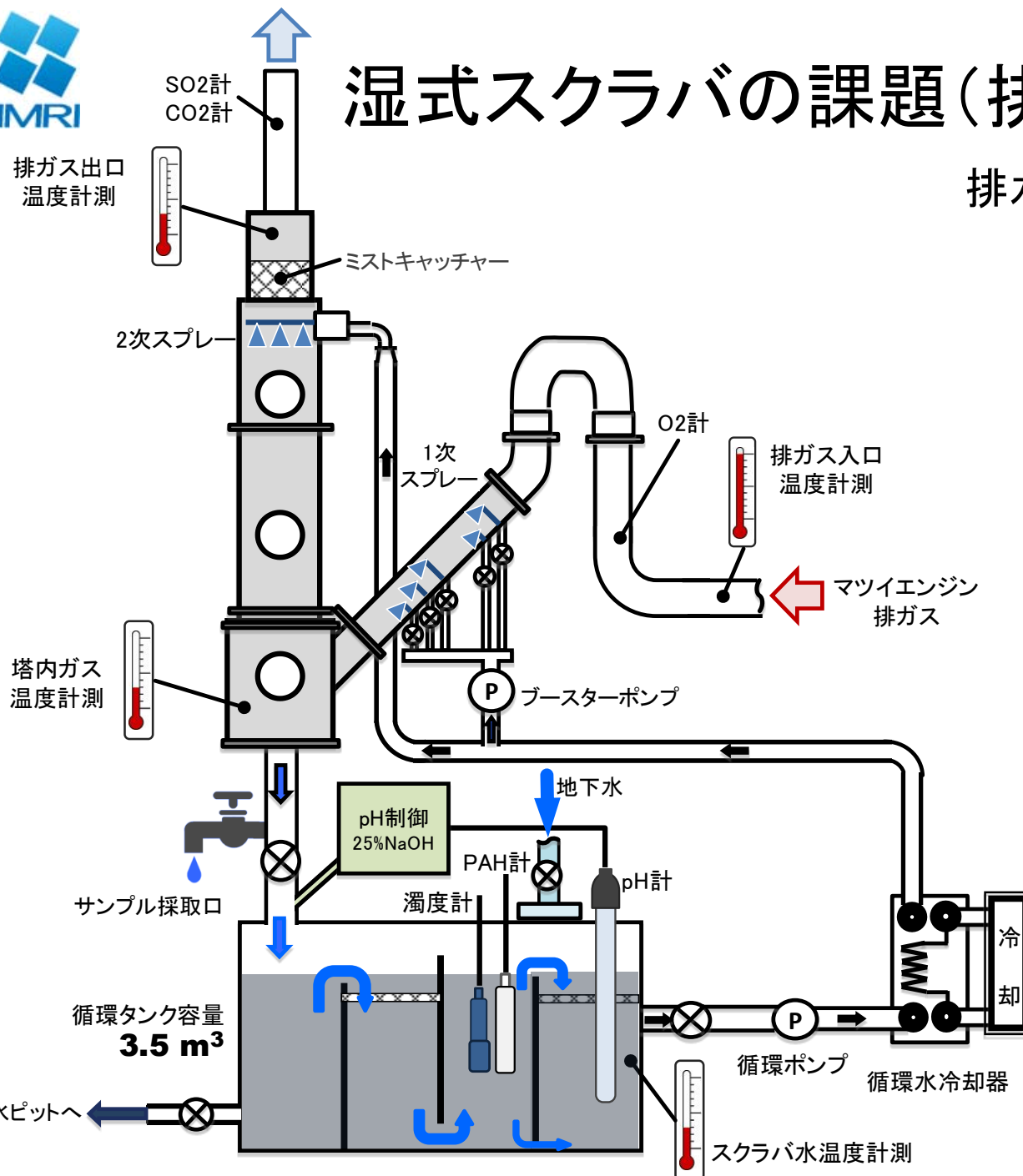
Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems (10. Washwater Discharge Criteria)

- pH規定
- PAHs規定
- 濁度・SPM
- 硝酸塩排出
- 排水添加物など

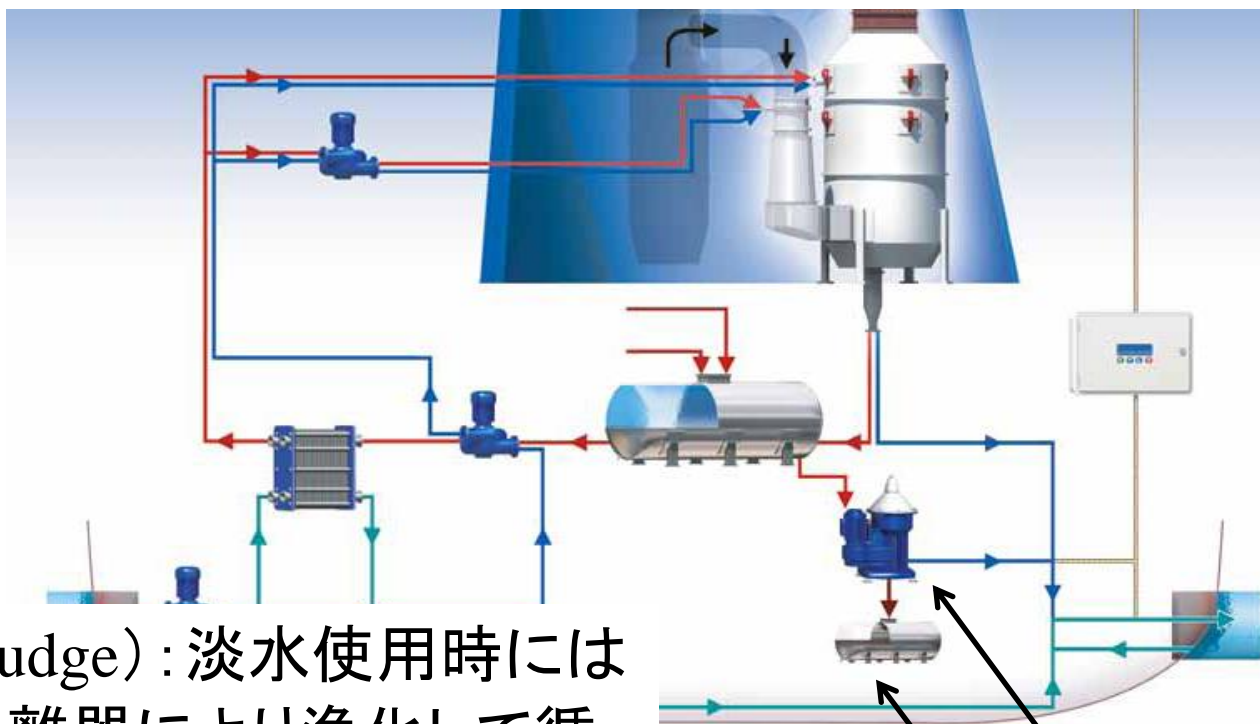
常時モニタリング項目：

温度, pH, 濁度, PAHs
 例えば、濁度はPAHsの計測に影響を及ぼすが濁度の値は計測方法による
 →「正しい」方法は？

スラッジの処理は？



湿式スクラバの課題(スラッジ)



スラッジ (Sludge) : 淡水使用時には水を遠心分離器により浄化して循環使用するが、その際に生じるゴミ。

- ・スラッジタンクに航海中は保持、寄港時に陸揚げ
- ・発生するスラッジは使用燃料の1%程度の重量

遠心分離器
スラッジタンク



スラッジタンク容量
スラッジ処理のインフラ

EEDI規制への対応

- EEDI:
 $\text{燃費} \times \text{機関出力} \times \text{排出係数} / (\text{積載重量} \times \text{速度})$
 - ディーゼルエンジン本体の熱効率改善はほぼ限界
 - 排熱の有効利用, 機関の最適効率範囲での使用
 - 燃料の転換(熱量当たりの二酸化炭素排出を抑制)
- 排出係数:
 - 新燃料(LNG, バイオ燃料)
 - 自然エネルギー(ハイブリッド化~太陽光等)
- 燃費・燃料消費量:
 - 高効率化(排熱回収, ハイブリッド化)
 - 出力の平準化(ハイブリッド化)
 - 船体抵抗低減(空気潤滑への掃気利用, 塗料)

これからの最重要課題

0.5%硫黄分燃料規制(全ての船に影響)

- 規制開始時期の不確実性
- 燃料供給の不確実性
- 選択肢の多様化(燃料転換, 船上脱硫)
 - 他の排ガス規制への対応と関係

燃料、排ガス規制への対応法の選択に際しては
信頼性, 運用性, 初期コスト, 運用コスト, ……
多面的な検討が必要



燃料はどうなる？

- 燃料中硫黄分規制により，燃料選択が必要
 - グローバル規制によりすべての船舶に適用の可能性
 - 燃料により最適な動力プラント構成が異なる
- 燃料の選択肢
 - 残渣油 (S<3.5%)・・・Equivalent規定(後処理)
 - 残渣油(低S分)・・・直接脱硫，軽油添加
 - 留出油(A重油・軽油)
 - 代替燃料(低硫黄)
 - LNG・・・S-free, C/H比が低い(同じ熱量ならGHG低減)
 - LPG
 - GTL・・・天然ガスから製造される“軽油”
 - バイオ燃料・・・“カーボンニュートラル”
 - 水素・・・2次エネルギー(他のエネルギー源を使って製造)

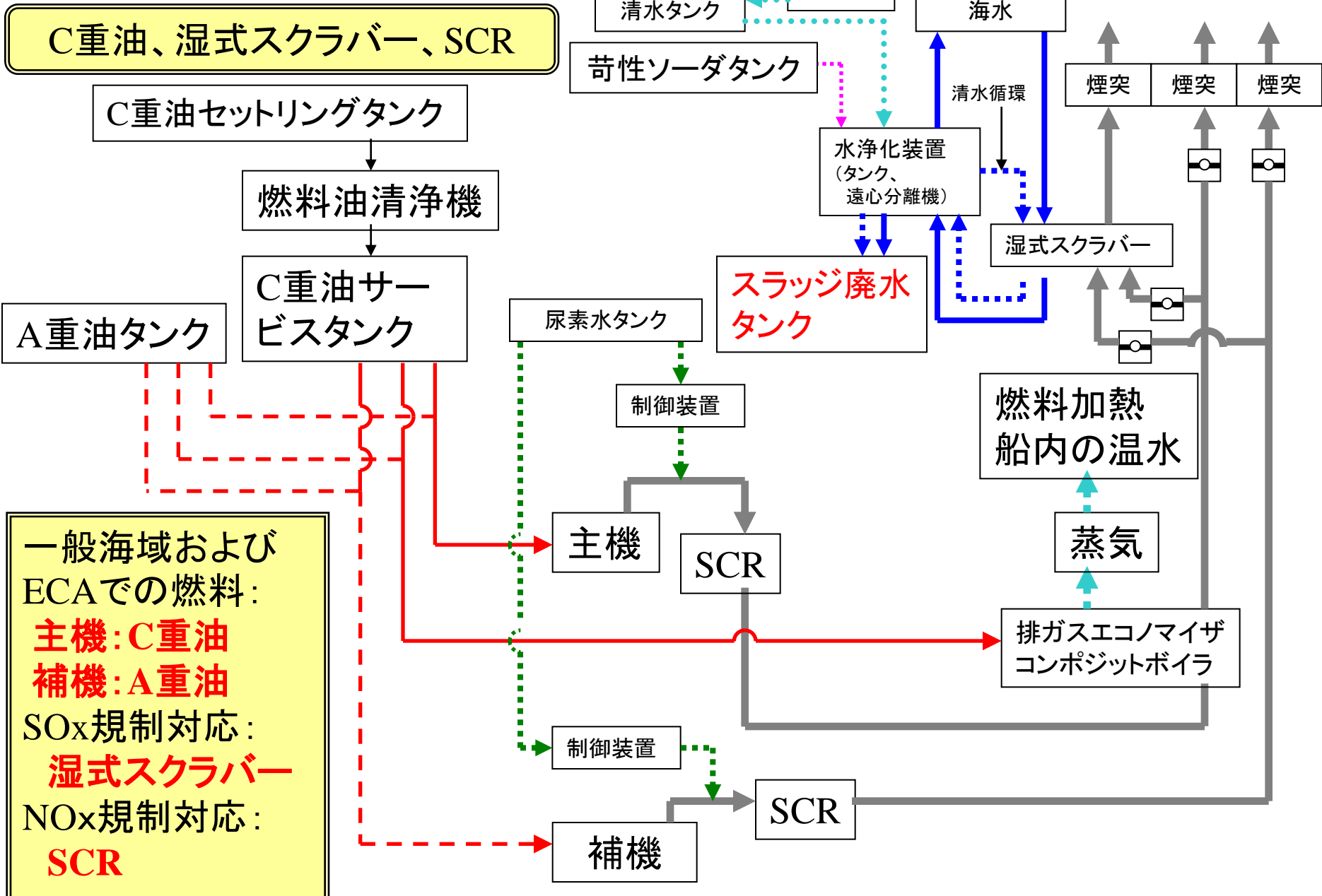
燃料に応じたシナリオの例

	使用燃料		SO _x 対応		NO _x 対応	EEDI
	一般海域	ECA	一般海域	ECA	ECA	
1	0.5%S	0.1%S	不要	不要	EGR or SCR	-
2	0.5%S	0.5%S	不要	スクラバ	EGR or SCR	-
3	HFO	0.1%S	スクラバ	不要	EGR or SCR	-
4	HFO	HFO	スクラバ	スクラバ	EGR or SCR	-
5	LNG	LNG	不要	不要	GIの場合EGR or SCR	○

- ・4番目のシナリオはSCRやEGRへの影響が大きい(2番目も?)
- ・LNGへの切り替えにはGHG削減効果もある

シナリオ4

C重油、湿式スクラバー、SCR



一般海域および ECAでの燃料:
主機:C重油
補機:A重油
 SOx規制対応:
湿式スクラバー
 NOx規制対応:
SCR

シナリオ1

規制対応燃料、SCR

0.1%S分燃料タンク

A重油タンク(0.5%S)

尿素水タンク

制御装置

主機

SCR

船内の温水

蒸気

排ガスエコノマイザ
コンポジットボイラ

煙突

煙突

一般海域:
主機・補機:0.5%S
ECA:
主機・補機:0.1%S
NOx規制対応:
SCR

制御装置

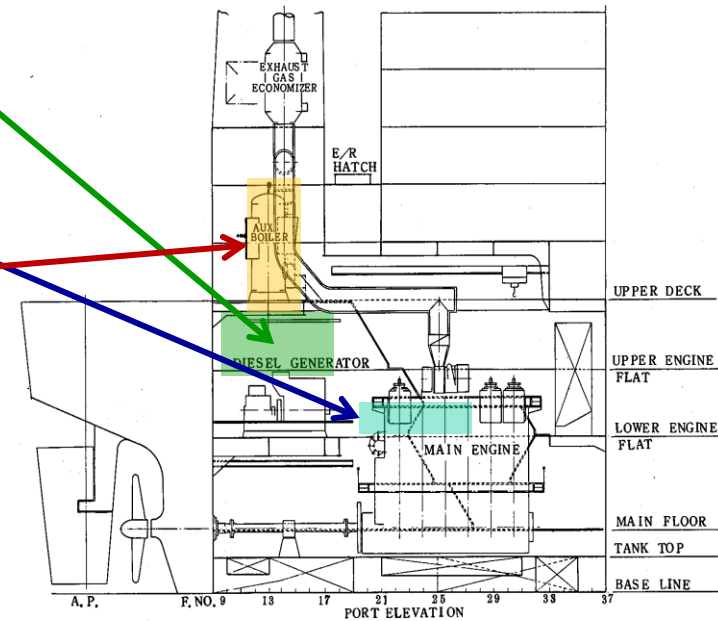
補機

SCR

留出油に転換したら

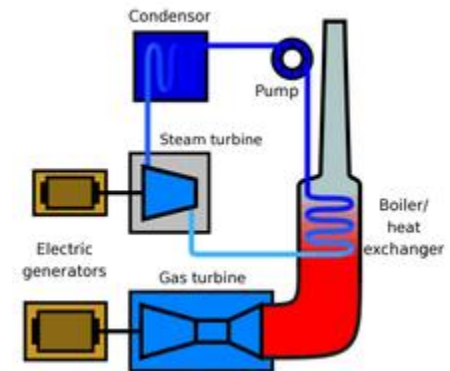
留出油(A重油・軽油) 焚きプラント

- 安全性の向上
 - 腐食・清浄機等のトラブル低減, 燃料切り替えに伴う船員負担軽減
- 後処理系のトラブル軽減
 - SCRの硫酸水素アンモニウム蓄積が軽減(バーナーによる再生不要)
 - エコマイザ(排熱回収熱交換器)の硫酸腐食の軽減
- 燃料系統が簡素化
 - 燃料が1系統に. サービスタンク以外は不要に.
 - 燃料の加熱系, 前処理系(清浄機等)等が不要に.
- 排熱回収の熱量増加
 - 燃料加熱ボイラが不要→余剰熱の利用
- 機関室に空間
 - 後処理系(排熱回収等)の設置が容易
 - 潤滑油が清浄に保持
→2st主機でトランクピストン型も可能
- 問題点
 - 燃料価格が高い(将来は船用グレードの低硫黄留出油も)
 - 動粘度が低く, 潤滑等の問題も



LNG燃料の利用

- ガスエンジン
 - デュアルフュエル・・・燃料の冗長性あり. C/H比は高くなる
 - リーンバーン・・・メタンスリップに要注意. 燃焼安定性が課題
- ガスタービン
 - 比出力が大きく, 小型化が可能
 - 蒸気タービンによる**排熱回収(コンバインドサイクル)で高効率化**
 - 日常のメンテナンス軽減
- 燃料電池
 - 化学エネルギーを直接電気に変換. **高効率**の電気推進が可能.
 - 水素燃料搭載には課題が多い. LNG, DME等からの改質であれば現実的な選択肢
 - 本質的に**NO_x, SO_x, PMの排出はない**



課題: 燃料供給インフラ、コスト(燃料、エンジン、タンク)、タンク容量

まとめ

- S分規制(0.5%)の影響は大きい
- スクラバにもまだ課題はある
- 燃料選択が鍵(残渣油、低硫黄残渣油、留出油、LNG、……)
- 動力源(エンジン)も多様化し、それに伴い周辺装置も変化する可能性
- 詳細なコスト評価が重要だが、燃料価格の変動は大きな誤差要因に

ご静聴ありがとうございました。