

一般財団法人 日本海事協会殿
業界要望による共同研究成果報告会

ClassNK
R&D PROJECT

「PCTCに於けるSOx対策用 排ガス全量スクラバーの採算性の検討」


2013 10 23, 25

三菱重工業株式会社

交通・輸送ドメイン 船舶・海洋事業部

技術統括室 開発戦略グループ 小柳 翔

© 2013 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

 **三菱重工**
この星に、たしかな未来を

1. 概要
2. 脱硫装置種類 調査・比較
3. 基本設計条件
4. 排ガススクラバー本体・後処理装置基本設計
5. 本船配置検討・付帯設備検討
6. 採算検討、総合評価
7. まとめと今後の課題



本研究開発は、日本郵船株式会社、株式会社MTI、三菱化工機株式会社、一般財団法人日本海事協会との共同研究体制により実施すると共に、同協会の「業界要望による共同研究スキーム」による支援を受けて実施しました。

1.1) 背景

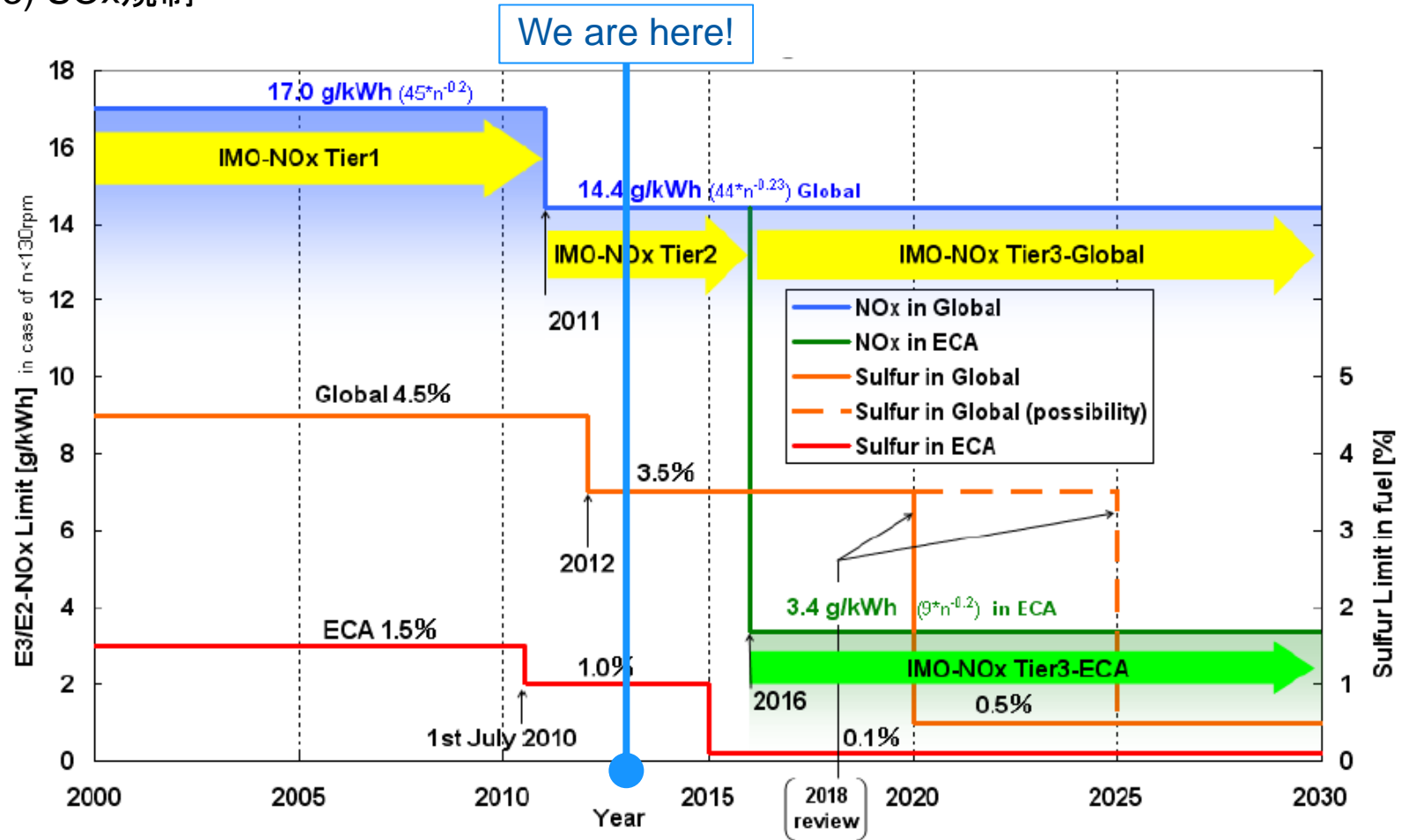
- A) 船舶からのSO_x排出量は、1997年採択され、2004年5月に批准・発効されたMARPOL 73/78 Annex VI Reg.14で規制されている。
- B) 内容は使用する燃料油中の硫黄分を制限している物で、一般海域では4.5%wtS分、特別海域ECA (Emission Control Area)では1.5%S分の燃料油を使用するか、6.0g/kWh 以下にSO_x排出量を削減できる主管庁が承認する排ガス浄化装置設置の義務化。
- C) さらに、2008年4月のIMO MEPC57で燃料中のS分は、添付に示す通り段階的に低減され、2020年には一般海域で0.5%、ECAでは0.1%の燃料油の使用が義務付けられ、排ガス浄化に関する要件・承認手続きを記載したMEPC184(59)が2009年7月に決議された。
- D) 一方、2020年(もしくは2025年)に掛かる低S分の船用燃料油の供給可否が疑問視されており、供給可能としてもそれら燃料油の価格がUnknownであるため、船主に対し膨大な燃料費の増加が強いられることが予測される。また、従来北海・バルト海に限定されていたECA海域も2010年のMEPC(60)で米国・カナダの200海里も対象となりSO_x排出規制は益々厳しい状況にある。(EU portでは先行して0.1%S分燃料油の使用が義務付けられている)
- E) 掛かる状況の中で、燃料油中のS分濃度によらない排ガス浄化装置の開発が急務であり、需要は出てくるものと予測される。

1.2) 目的

- A) 排ガススクラバーの技術は、タンカーの補助ボイラからの排ガスを洗浄しイナートガスを得るIGS装置で確立されているが、装置のコンパクト化、スクラバー洗浄水の中和、油分・固形物の除去技術等を加味し、PCTCへの搭載を前提とした試設計を確立する。
- B) 採算性をより明確に示すために燃料代のメリットだけでなく追設機器による自動車搭載台数の減、重量・重心変化による積付け台数の変化、スクラバー洗浄水の中和費用、補機による電力消費量などを検討の対象とし、新造時と改造時の初期投資費用も検討する。

1. 概要

1.3) SO_x規制

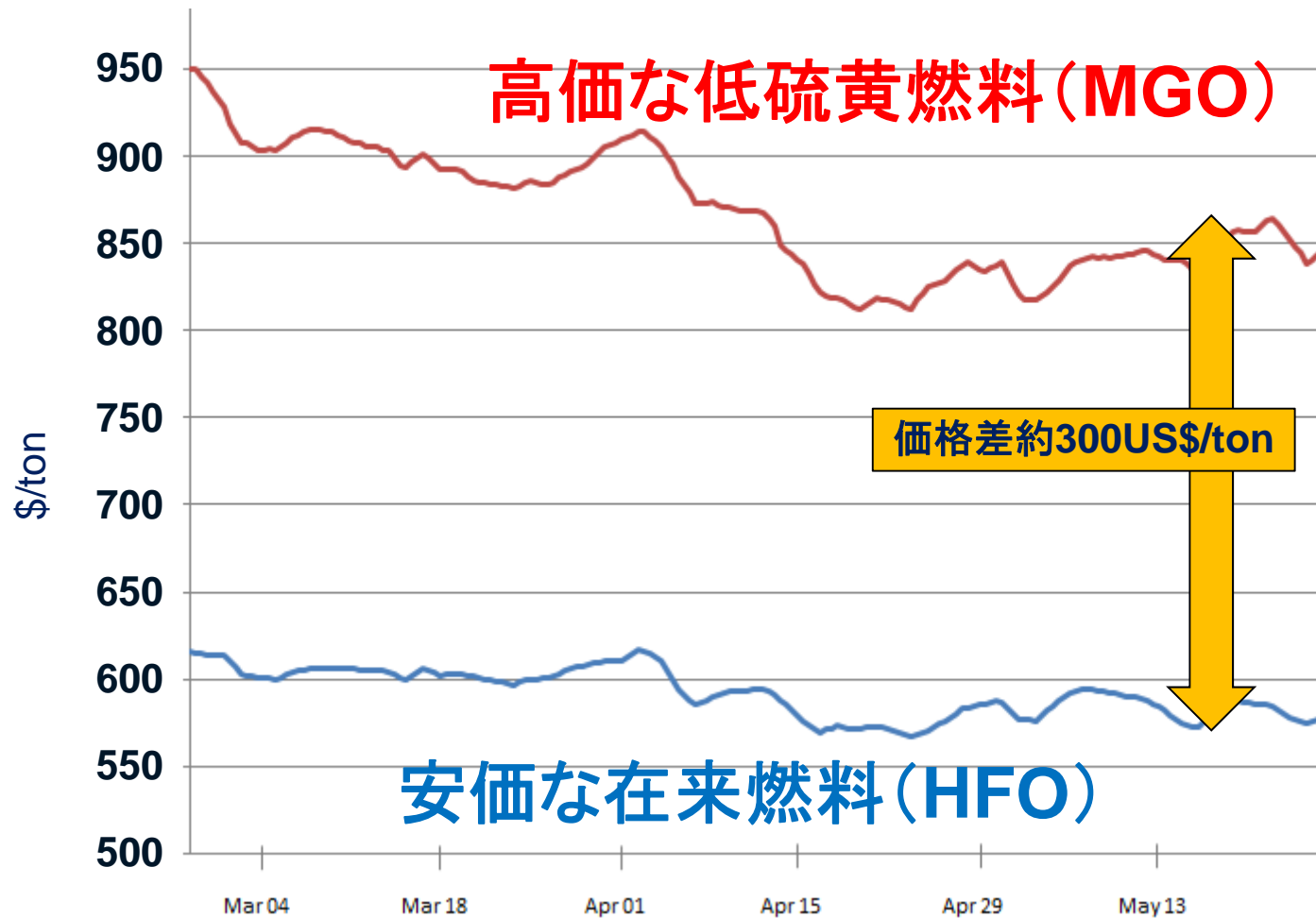


Expanding ECA(Emission Control Area)



1. 概要

1.4) 燃料油価格動向



Mar to May 2013 <http://www.bunkerworld.com>

2. 脱硫装置種類 調査・比較

2.1) 各種脱硫装置の調査・比較

脱硫装置の方式

湿式・・・吸収剤に液体を用いる方式

吸収剤の例) 石灰石スラリー、水酸化マグネシウム、水酸化ナトリウム

乾式・・・吸収剤に固体を用いる方式

吸収剤の例) 消石灰粉体、二酸化マンガン+アンモニア


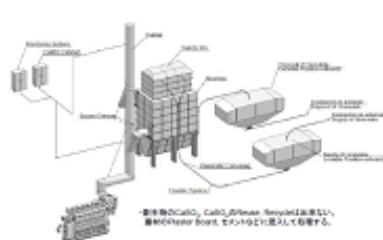


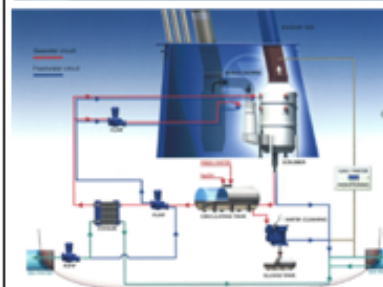
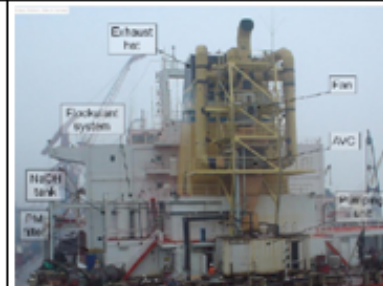
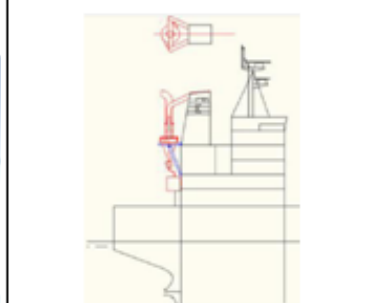


プロセスがシンプルで、メンテナンスが容易であり、脱硫率が高いという利点がある
水酸化ナトリウムを吸収剤とした湿式脱硫方式

アルカリ溶液吸収法を採用

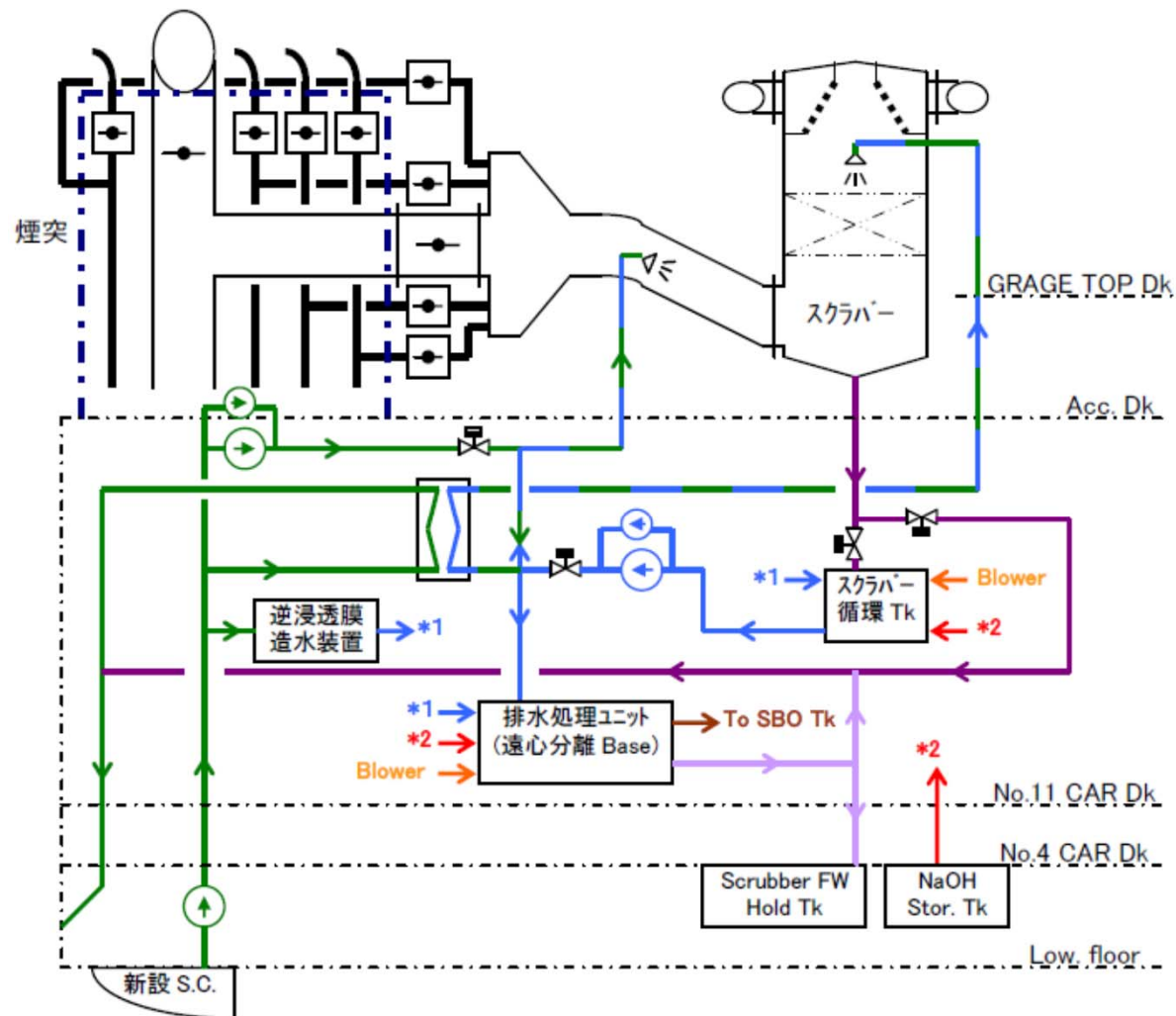
2. 脱硫装置種類 調査・比較

2.2) 各社 排ガススクラバーの実施例

各社状況	MAN Dry EGCS	Wartsila	Alfa Laval Aalborg	Clean Marine
船名	MV Timbus Cargo Ship	MT Suula Product tanker	DFDS Tor Fibia Ro/Ro	マースク Bulk Carrier
機関	Mak 8M32 3,840kW x 600rpm	Wartsila D/G 4L20 680kW	MAN 9L60MC-C 21,000kW	- 10MW
運転時間	3000 Hr 2009年11月	2009年3月	2010年5月~	
	 <p>Design MS Timbus</p> 	 <p>湿式スクラバー初契約 10口フィット、2011.12完工</p>	 	 

2. 脱硫装置種類 調査・比較

2.3) 三菱化工機 排ガススクラバー全体フローダイアグラム



3.1) 一般基本設計条件

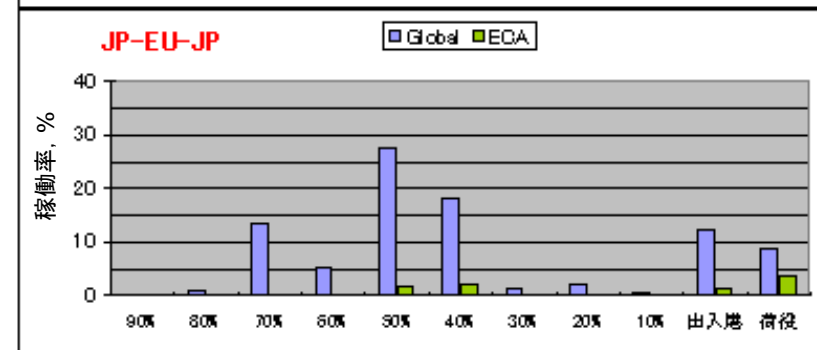
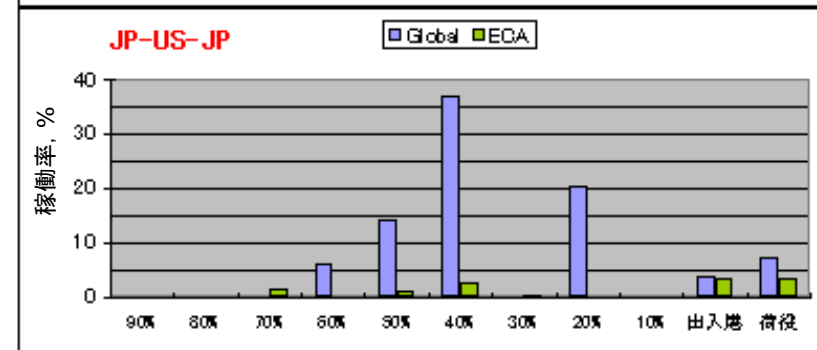
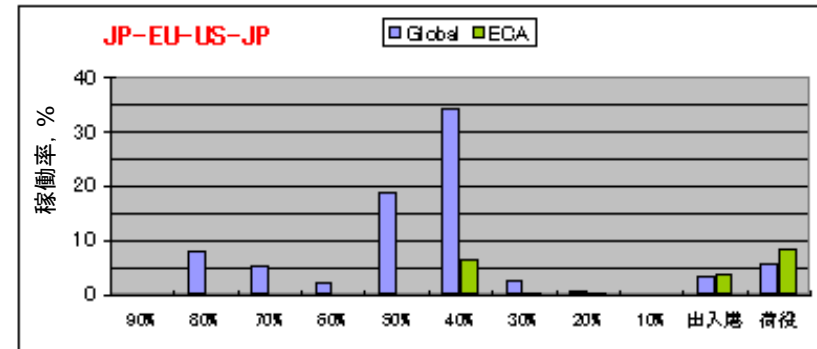
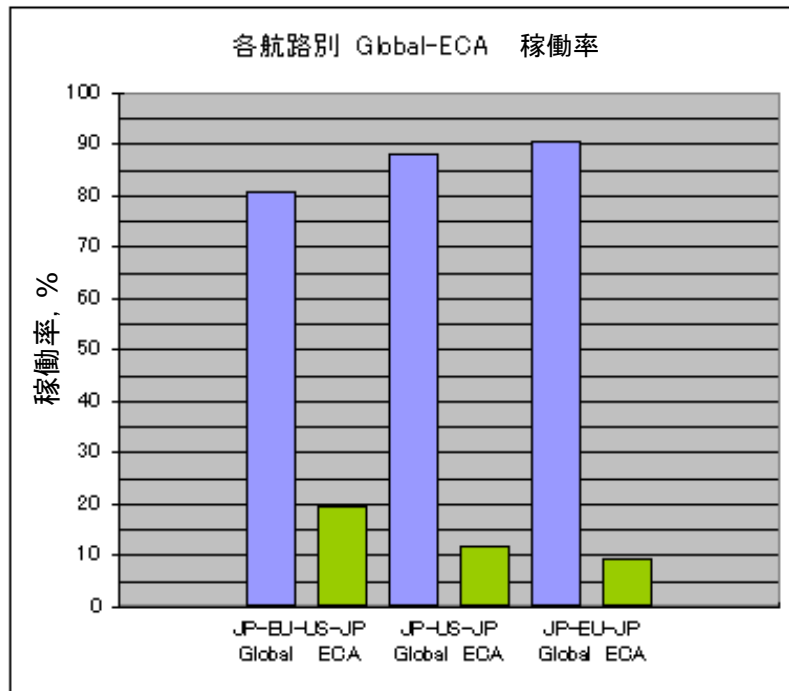
1) 一般基本設計条件

- ・排ガススクラバーの対象は主機関、発電機関、補助ボイラーの排ガスとする。
- ・各排ガスラインにはスクラバー/大気開放の切換ダンパーを装備する。
- ・排ガススクラバーは、実運航での負荷を考慮し、主機負荷85%および発電機2台75%負荷での排ガスを処理する容量とする。
- ・排ガス、排水の排出規定は基本的に、ANNEX 9 Resolution MEPC 184(59) “2009 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning System に準拠する。
- ・ECA海域での排ガススクラバーは清水循環及びNaOH溶液の中和によるClosed Cycle、Global 海域では海水ワンパス後、船外排出するOpen Cycle とする。(Open CycleでもNaOHで中和)
- ・Closed Cycleにおける排水(Bleed Off)は排水処理した後、ECA海域内ではScrubber FW Hold Tkに貯蔵する。(ECA海域外で船外排出)
- ・排ガススクラバー本体は曝露最上部に装備し、No.11 DkにScrubber FWの排水処理装置を配置する
- ・PCTCの運航パターンは添付ヒストグラムにより設計する。

3. 基本設計条件

3.2) PCTC ヒストダイアグラム

PCTC 運航の一例



3. 基本設計条件

3.3) MEPC 184(59) 排ガススクラバー要件

EGCS 承認Scheme

Document	Scheme A	Scheme B
SECP	X	X
SECC	X	
ETM Scheme A	X	
ETM Scheme B		X
OMM	X	X
EGC Record Book or Electronic Logging System	X	X

ETM-A: EGC System – Technical Manual for Scheme A

(装置の型式承認を取る方法、主管庁による承認)

ETM – B: EGC System – Technical Manual for Scheme B

(On Boardで都度、承認を取る方法、主管庁による承認)

OMM : Onboard Monitoring Manual

SECP : SOx Emission Compliance Plan

SECC : SOx Emission Compliance Certificate

3. 基本設計条件

3.3) MEPC 184(59) 排ガススクラバー要件 SO_x排出量の規定値

1.3 Compliance should be demonstrated on the basis of the SO₂(ppm)/CO₂(% v/v) ratio values.

Table 1

Fuel oil sulphur limits recorded in regulations 14.1 and 14.4 and corresponding emissions values

Fuel Oil Sulphur Content (% m/m)	Ratio Emission SO ₂ (ppm)/CO ₂ (% v/v)
4.50	195.0
3.50	151.7
1.50	65.0
1.00	43.3
0.50	21.7
0.10	4.3

Note: The use of the Ratio Emissions limits is only applicable when using petroleum based Distillate or Residual Fuel Oils. See Appendix II for application of the ratio method.

3.5%S分の燃料油で0.5%S分(2020年以降のGlobal海域)とするには $21.7/151.7=0.143$

85.7%除去率が必要

3.5%S分の燃料油で0.1%S分(2015年1月以降のECA海域)とするには $4.3/151.7=0.028$

97.2%除去率が必要

3. 基本設計条件

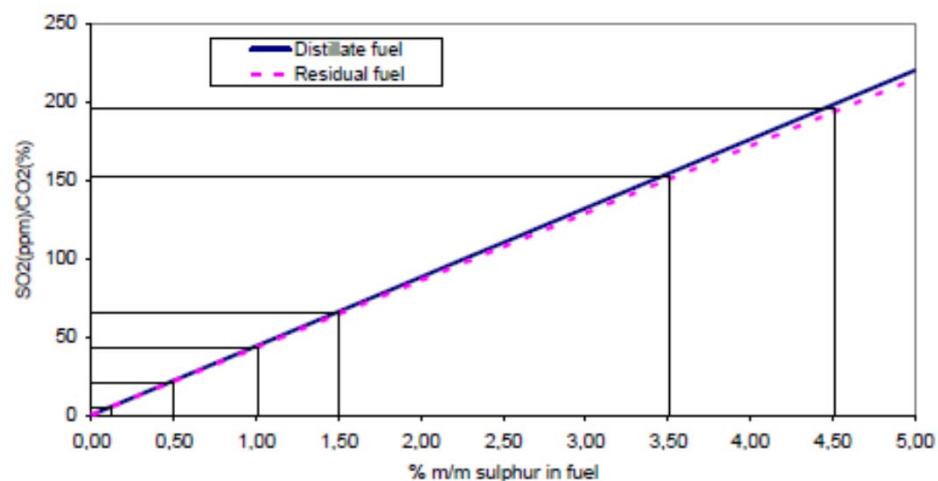
3.4) SO_x排出量の規定値 (IMO MEPC 184(59) Guideline Appendix IIより)

SO_x濃度は機関の空燃比で変化するので、CO₂(%V/V)に対する割合で規定される。

Table 2: Emissions calculations corresponding to 1.5 % fuel sulphur

	CO ₂	SO ₂	Exh SO ₂ /CO ₂	Exh S/C
	%	ppm	ppm/%	m/m
Distillate 0.17% S	8	59.1	7.4	0.00197
Residual 2.70% S	8	939.7	117.5	0.03136
Distillate 1.5% S	8	528.5	<u>66.1</u>	<u>0.01764</u>
Residual 1.5% S	8	515.7	<u>64.5</u>	<u>0.01721</u>
Distillate 1.5% S	0.5	33.0	<u>66.1</u>	<u>0.01764</u>
Residual 1.5% S	0.5	32.2	<u>64.5</u>	<u>0.01721</u>

SO₂/CO₂ ratio vs % sulphur in fuel



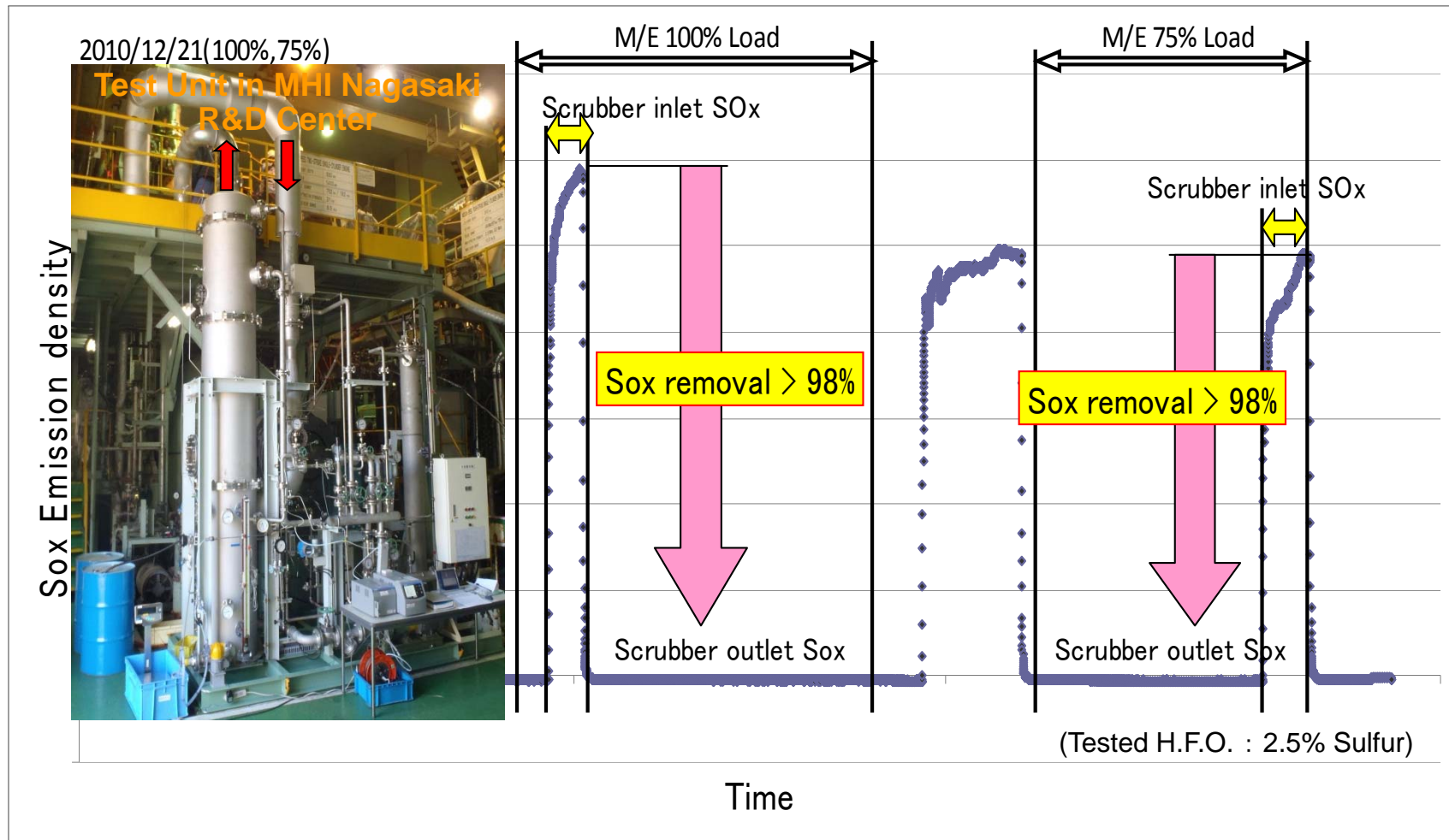
4.排ガスクラバー本体・後処理装置基本設計

4.1) MHI単筒試験機での三菱化工機排ガスクラバー試験結果

Exhaust gas cleaning test unit (MKK) by closed cycle with fresh water

NaOH consumption ;
approx. 30 kg/MWh

Fresh water consumption ;
approx. 300 kg/MWh



4.排ガススクラバー本体・後処理装置基本設計

4.2) 長研単筒試験機の排水処理試験結果

IMO要求値は朱書き部。(PH 6.5 以上のIMO要求値は中和剤で可能)

	単位	長研テスト機での 未処理排水性状 (清水循環時) *6	海水1パス時 (Open Cycle)		清水循環時 (Closed Cycle)	
			IMO Guideline 規制値	船外排出時 排水性状	IMO Guideline 規制値	排水処理装置 処理後排水性状 *4
スクラバー水		清水	—	海水	—	清水
スクラバー洗浄水 循環量	m3/h t/MWh	(0.04) 0.026	—	651 48.4	—	2.2 0.18
PAHs (多環芳香族 炭化水素)	μg/L	98.5	25 (下記表 *1)	<10	2250 (下記表 *1)	<10
Turbidity (濁度)	FNU	2,710	25	<10	25	<10
Nitrates (窒素酸化物 NO2 + NO3)	mg/L	155	30 (下記表 *2)	<10	(2700) (下記表 *2)	<200
油分 *3	mg/L	536	—	15ppm以下	—	15ppm以下

OK
OK
OK

スクラバー水循環量 海水ワンパス : 651 m3/h x 1.025 / (14.315 x 0.85 + 1.62) MW = 48.4 ton/MWh

清水循環 : 2.2 m3/h x 1.15 / (14.315 x 0.85 + 1.62) MW = 0.18 ton/MWh

*3 : IMO Guideline として規制値は無い。一般ビルジ水の規制として15ppmを目標とする。

*4 : 遠心分離 (PAC+凝集剤添加) + 油吸着材

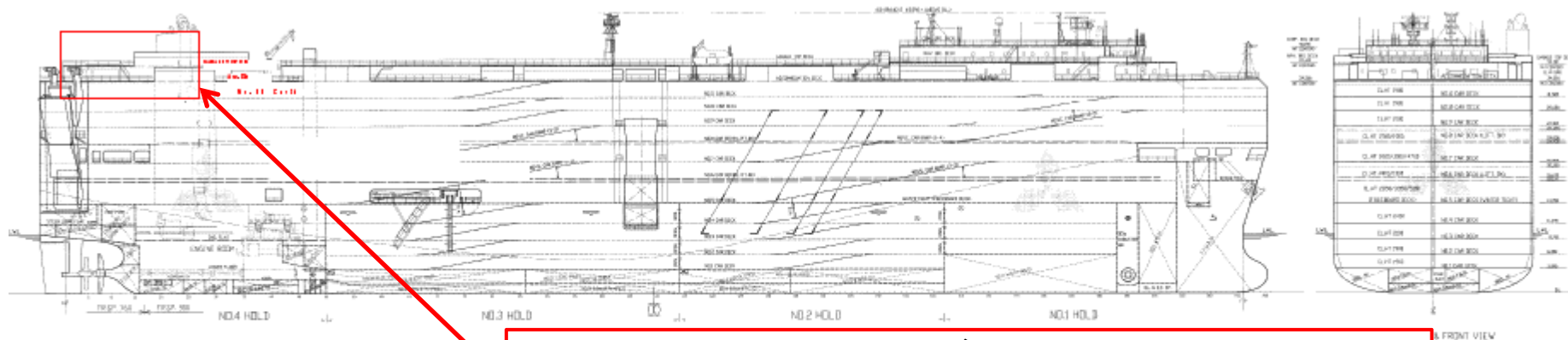
*5 : 米国EPA / Vessel General Permit (VGP) による。IMO Guidelineでは 45 t/MWhで60mg/Lの記述のみ。

*6 : 機関定格出力 762kW, 50%負荷時

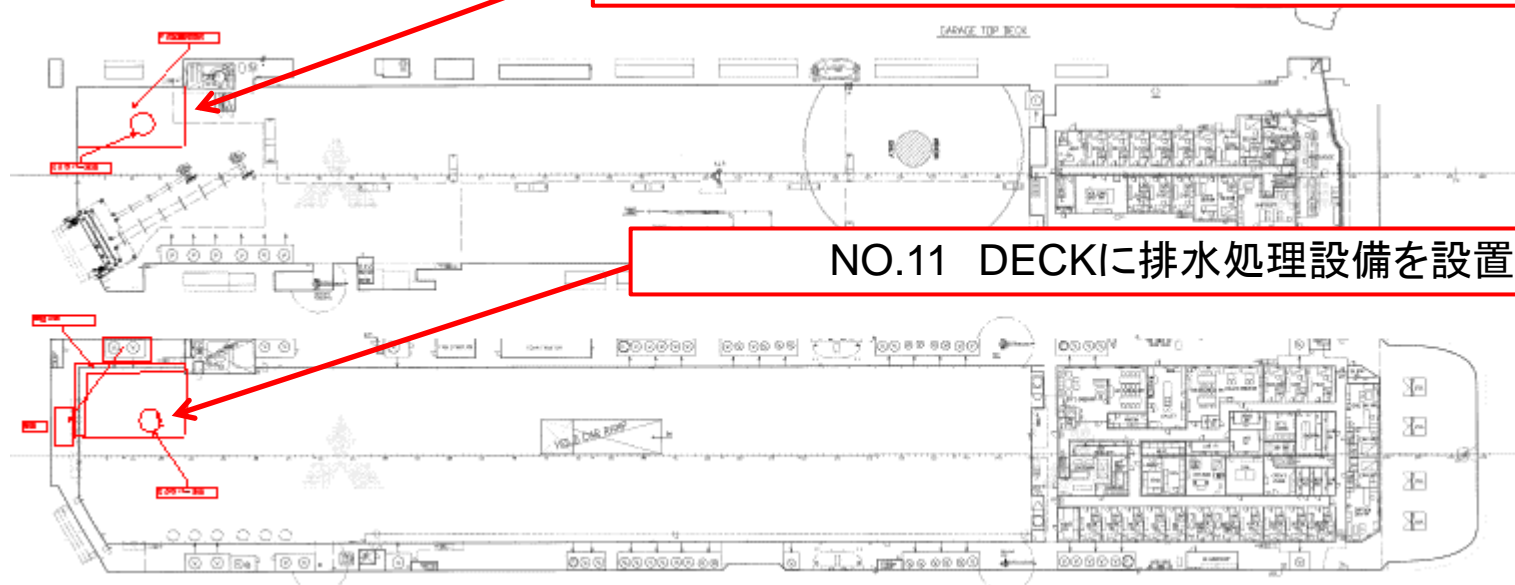
スクラバー水循環量	PAHs *1	測定方法	Nitrates *2 *5
	排出濃度基準		排出濃度基準
t/MWh	(μg/L PAH _{phe} equiv.)	—	(mg/L nitrate+nitrite)
0 ~ 1	2,250	Ultraviolet Light	2,700
2.5	900	Ultraviolet Light	1,080
5	450	Flourescence	640
11.25	200	Flourescence	240
22.5	100	Flourescence	120
45	50	Flourescence	60
90	25	Flourescence	30

5. 本体配置検討・付帯設備検討

5.1) レトロフィット対象船への配置検討

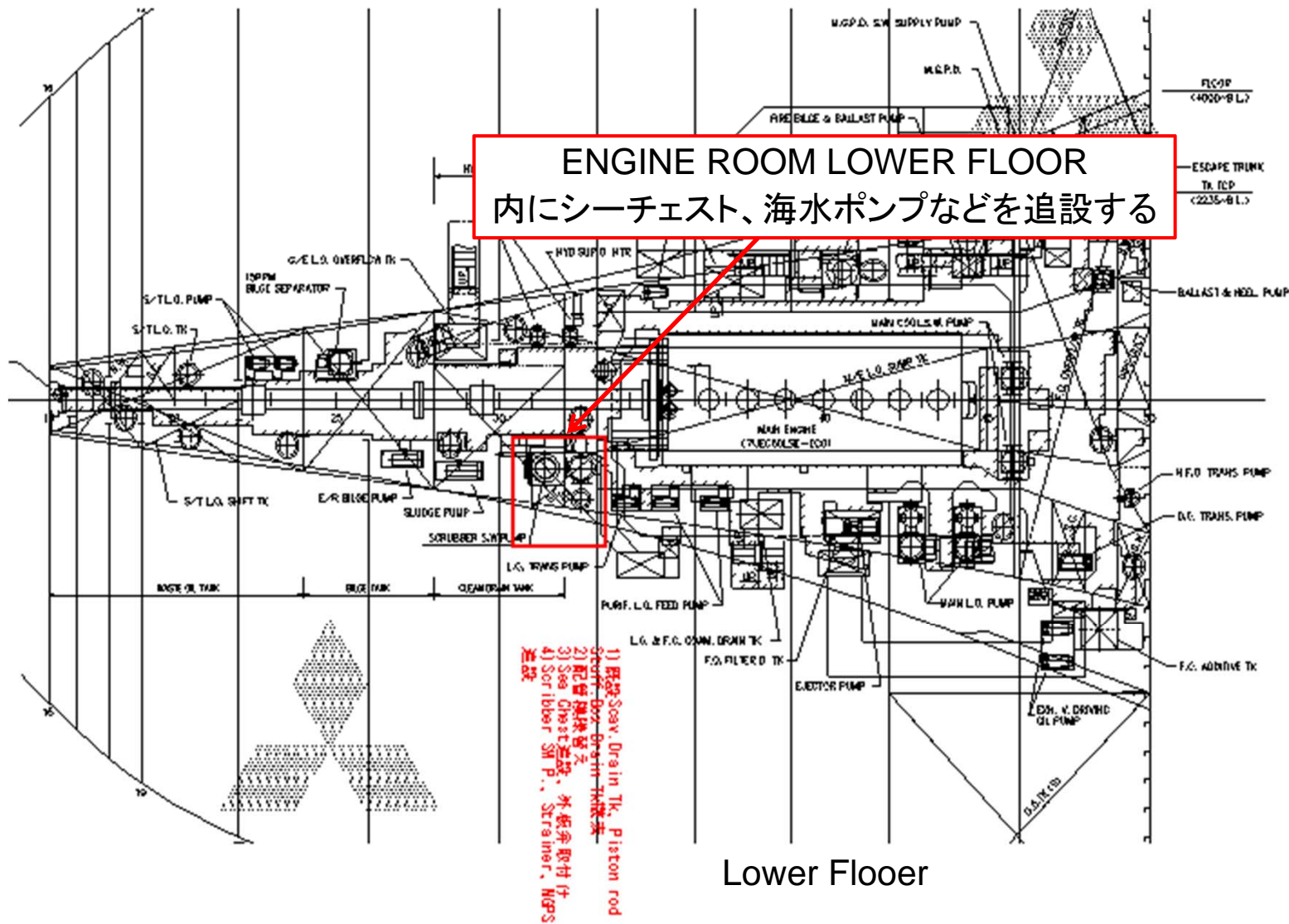


GARAGE TOP DECK 及びACCOMMODATION DECK
にスクラバー本体を設置

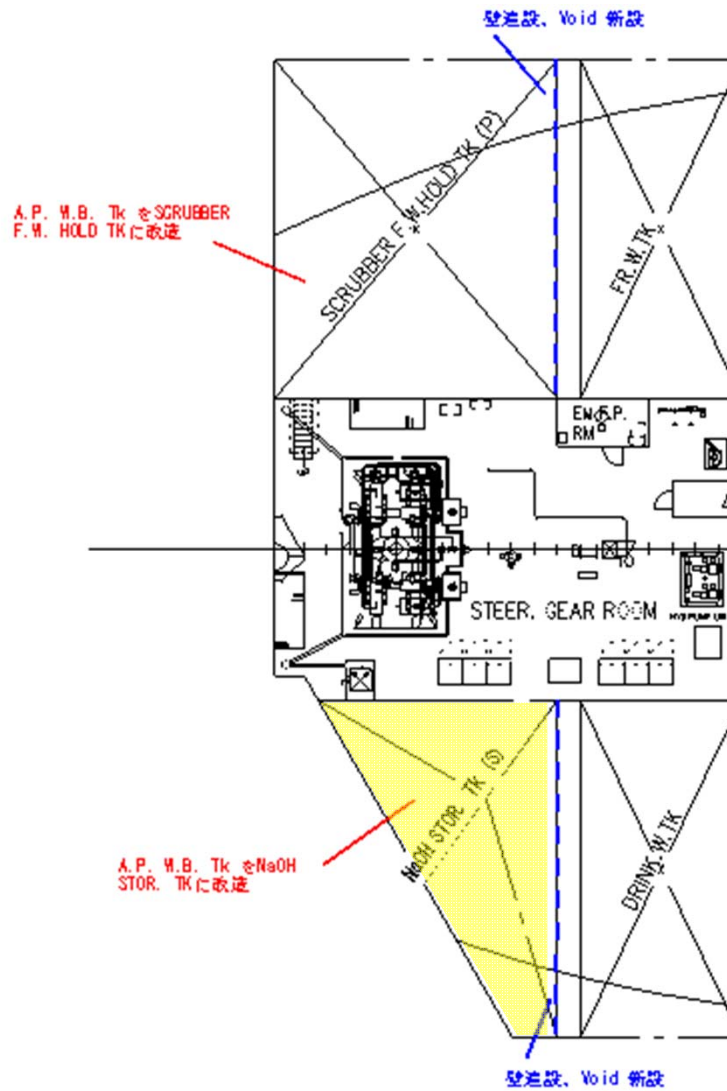


NO.11 DECKに排水処理設備を設置

5. 本体配置検討・付帯設備検討

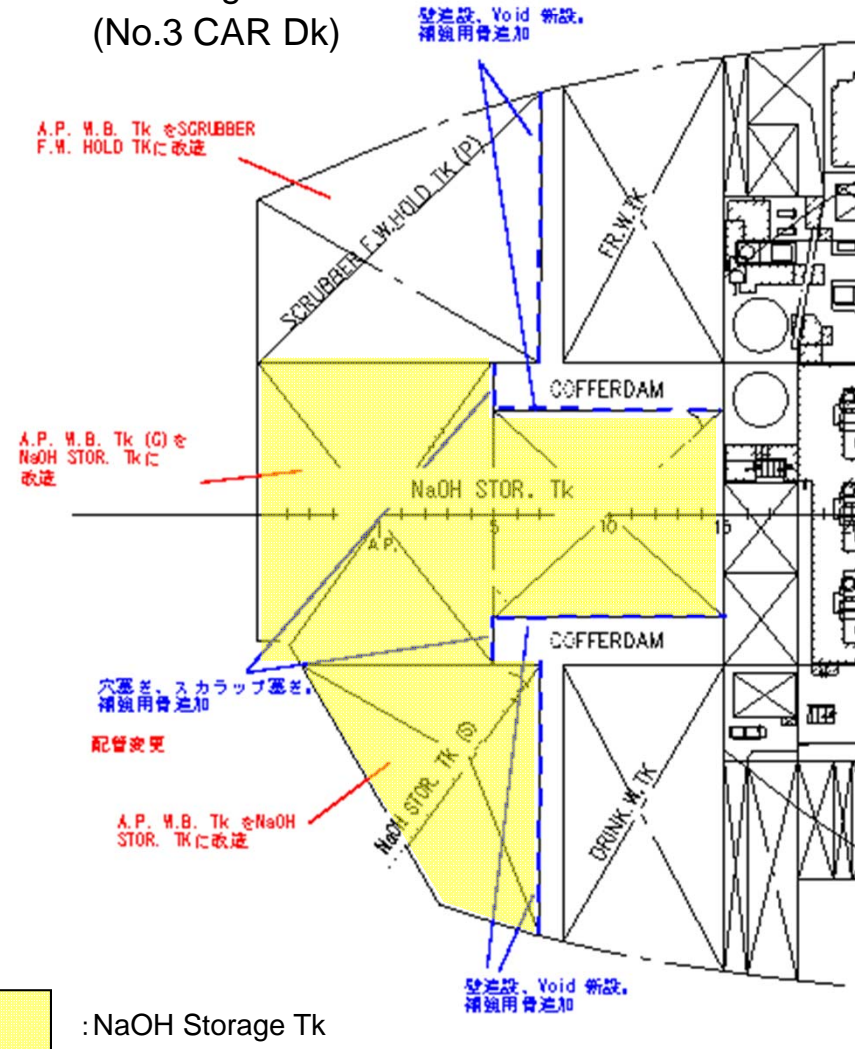


5. 本体配置検討・付帯設備検討



(No.4 CAR Dk)

Under Steering Gear Room
(No.3 CAR Dk)



5. 本体配置検討・付帯設備検討

5.2) 排ガススクラバーシステム 主要機器構成

機器番号	名称	台数
1	SCRUBBER F.W. PUMP	1
2	AUX SCRUBBER F.W. CIRC. PUMP	1
3	SCRUBBER S.W. PUMP	1
4	SCRUBBER S.W. BOOST. PUMP	1
5	AUX SCRUBBER S.W. BOOST. PUMP	1
6	SCRUBBER F.W. COOLER	1
7	SCRUBBER F.W. DRAIN TANK	1
8	SCRUBBER F.W. HOLD TANK	1
9	NaOH STORAGE TANK	1
10	PAC STORAGE TANK	1
11	SO _x SCRUBBER	1
12	SCRUBBER DRAIN PURIFIER	1
13	SCRUBBER F.W. DRAIN OILY WATER COALESCER	1
14	SCRUBBER F.W. DRAIN STATIC MIXER	1
15	SCRUBBER F.W. GENERATOR	1

5. 本体配置検討・付帯設備検討

5.3) 排ガススクラバー 清水・NaOH消費量、スクラバーFW排水量

主機負荷	夏・冬平均				清水消費量 kg/MWh	NaOH aq 消費量 kg/MWh	FWスクラ バー 排出量 kg/MWh
	清水 消費量 m3/h	NaOH aq 消費量 kg/h	NaOH aq 消費量 lit/h	FWスクラ バー 排出量 m3/h			
85%	4.01	403.5	265	2.08	291	29.3	173
80%	3.71	373.5	245	1.92	284	28.6	169
70%	3.39	341.5	224	1.76	291	29.3	174
60%	2.97	299.0	196	1.54	291	29.3	173
50%	2.57	259.0	170	1.33	293	29.5	174
40%	2.16	217.5	143	1.12	295	29.6	175
30%	1.75	176.0	115	0.90	295	29.8	176
20%	1.33	133.5	88	0.69	296	29.8	176
10%	0.92	92.5	61	0.48	302	30.3	179
Maneu.	0.92	92.5	61	0.48			
In Port	0.51	52.0	34	0.27			

5. 本体配置検討・付帯設備検討

5.4) NaOH 貯蔵TKとScrubber FW Hold TK 容量の検証

(単位 m³)

JP-EU-US-JP 航路			JP-US-JP 航路			JP-EU-JP 航路		
寄港地	NaOH 消費量	Scrubber FW 排水発生量	寄港地	NaOH 消費量	Scrubber FW 排水発生量	寄港地	NaOH 消費量	Scrubber FW 排水発生量
JP	6.8		JP	4.5		JP	9.1	
JP-SIN	29.0		JP-US	29.9		JP-SIN	28.7	
SIN-SUEZ	55.7		US IN ECA	8.2	63.6	SIN-SUEZ	71.3	
SUEZ-EU	30.2		US-US(E)	66.4		SUEZ-EU	33.8	
EU in ECA	20.2	148.9	US IN ECA	11.6	85.1	EU IN ECA	19.4	145.2
EU-US	44.7		US(E)-JP	74.8		EU-SUEZ	30.8	
US in ECA	7.5	53.8				SUEZ-FE(PK)	52.1	
US-US	44.0					FE(PK)-FE(JP)	64.7	
US in ECA	7.0	52.5						
US-JP	55.3							
2020年以前 必要量 *1	34.7			19.8			19.4	
2020年以降 必要量 *2	300.5			195.3			310.0	
Scrub. FW Hold Tk必要量 *3		148.9			85.1			145.2

*1 : ECA 海域NaOH 消費量の合計 *2 : 1航海のNaOH全消費量 *3 : ECA海域での最大排水発生量

緑のセルはECA海域を示す

- 1) 現状 NaOH 貯蔵TK 容量 : 350 m³
2020年以降は、全海域でNaOH が必要(グローバル海域にて排水pH6.5にするためNaOHにより中和した場合)
- 2) 現状 Scrubber FW Hold TK 容量 : 200m³
- 3) A.P. TK (P) : SCEUBBER F.W. HOLD TK A.P. TK(S) とA.P. TK (C) : NaOH STORAGE TK

5. 本体配置検討・付帯設備検討

5.5) 船内消費電力予測

TOTAL CALCULATION SCRUBBER 関連補機の電力を含む

CLASS: NK

CONDITION	NOR SEA GOING W/O FAN		N.S.G + 1/2 FAN		N.S.G+ALL FAN		MANUV. B/T + 1/3FAN		LOAD/UNLOAD	
	CONTINUOUS	INTTERRMITT	CONTINUOUS	INTTERRMITT	CONTINUOUS	INTTERRMITT	CONTINUOUS	INTTERRMITT	CONTINUOUS	INTTERRMITT
ENGINE AUXILIARY	658.7	100.1	656.8	100.1	656.8	100.1	760.1	42.1	449.3	82.4
BOILER AUXILIARY	21.1		21.1		21.1		7.5	12.6	7.5	12.6
SHIP SERVICE	70.4	63.8	70.4	63.8	70.4	63.8	164.5	62.1	164.5	67.8
DECK MACH & B/T	17.7		17.7		17.7		1473.1		1.5	
CARGO EQUIP & REF CONT			545.2		1051.8		420.8		1084.1	
LIGHTING etc	83.8		83.8		83.8		133.8		211.4	
LOAD SUM	851.7	163.9	1395.0	163.9	1901.6	163.9	2959.8	116.9	1918.3	162.8
INT P _m MAX LOAD		5.7		5.7		5.7		1.5		2.2
Pa MAX LOAD		50.2		50.2		50.2		20.0		50.2
P _m SUM LOAD		9.3		9.3		9.3		1.5		3.7
Pa SUM LOAD		154.7		154.7		154.7		115.4		159.1
DIVERSITY FACTOR		3		3		3		3		3
EQUIV. LOAD		34.8		34.8		34.8		31.8		36.3
TOTAL LOAD (AVE)	851.7 kW		1395.0 kW		1901.6 kW		2959.8 kW		1918.3 kW	
TOTAL LOAD (PEAK)	942.4 kW		1485.7 kW		1992.3 kW		3013.1 kW		2007.0 kW	
NUMBER OF RUNNING GENERATOR										
MAIN GENERATOR	1		2		2		3		2	
EMERGENCY GENERATOR										
AVAIL. POWER	1080 kW		2160 kW		2160 kW		3240 kW		2160 kW	
DEMAND FACTOR										
DMF (AVE)	78.9 %		64.6 %		88.0 %		91.4 %		88.8 %	
DMF (PEAK)	87.3 %		68.8 %		92.2 %		93.0 %		92.9 %	

Original 電力表からの変更点

- 1) Main Air Comp. / Maneuvering : 1-Run, 1-Auto ⇒ 1-Run
- 2) E/R Vent. Fan / Manruvering : 4-Run ⇒ 3-Run
- 3) Main Cool. S.W. Pump / Load Unload : High Speed ⇒ Low Speed
- 4) Scrubber 関連補機の運転。(清水によるClosed 循環方式で運転した状態)
Maneuvering/ Load Unload 時専用のScrubber F.W. Circ. Pump / Scrubber S.W. Boost Pump を運転

現状発電設備(D/G 1080kW x 3台)で
Peak 電力93.0%以下

5. 本体配置検討・付帯設備検討

5.5) 搭載スペース減による積載台数の減少

・PASSENGER CAR

	オリジナル	SOxスクラバー搭載	差
ACC.DK	377	359	Δ 18
No.11 DK	704	676	Δ 28
No.1~10 DK	5,260	5,260	0
合計	6,341	6,295	Δ 46

(単位:台)

・STANDARD CAR

	オリジナル	SOxスクラバー搭載	差
ACC.DK	311	298	Δ 13
No.11 DK	578	555	Δ 23
No.1~10 DK	4,333	4,333	0
合計	5,222	5,186	Δ 36

(単位:台)

・RV

	オリジナル	SOxスクラバー搭載	差
ACC.DK	265	254	Δ 11
No.11 DK	495	472	Δ 23
No.1~10 DK	3,660	3,660	0
合計	4,420	4,386	Δ 34

(単位:台)

6.1) 燃料油価格、NaOH価格による採算検討結果

1. 検討条件

- 1) 燃料代 : HFO(3.5%S分) 670\$/ton、MGO(1.0~0.1S分) 1,000\$/ton、@80¥/\$
- 2) 対象船種M/E出力 : PCTC 14,315kW
- 3) 稼働率 : 別紙ヒストダイアグラムによる。(NYK殿データ)
- 4) 排ガススクラバーは主機、発電機エンジン、補助ボイラーとする。
発電機エンジンは各航海モードでの電力で検討し、常用航海時は艙内1/2Fan、スクラバー必要電力も考慮。
- 5) シナリオ : 使用燃料油
(2020年以降は0.5%S分のHFOがないため、排ガススクラバー非搭載船は全海域でMGOを使用)

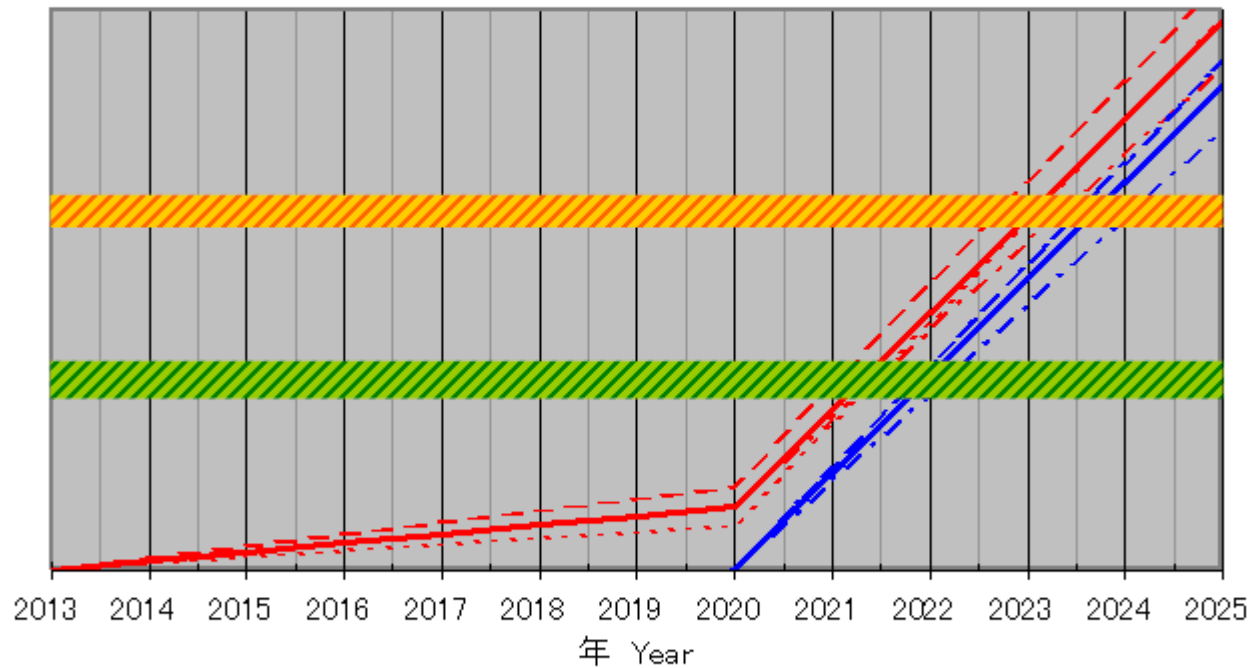
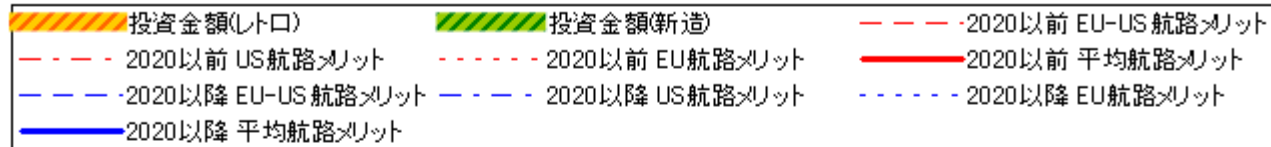
		2010~2020年		2020年以降	
		主機	D/G	主機	D/G
FO中のS分濃度	Global海域	2010-12年: max 4.5% 2012-20年: max 3.5%		2020年以降: max 0.5%	
	ECA海域	2010-15年: max 1.0% *1 2015-20年: max 0.1%		2020年以降: max 0.1%	
排ガススクラバー非搭載船	Global海域	HFO	HFO	MGO	MGO
	ECA海域	MGO	MGO	MGO	MGO
排ガススクラバー搭載船	Global海域	HFO	HFO	HFO (海水スクラバー)	HFO (海水スクラバー)
	ECA海域	HFO (清水スクラバー)	HFO (清水スクラバー)	HFO (清水スクラバー)	HFO (清水スクラバー)

注記 *1: EU port では2010年1月より燃料中のS分は0.1%以下

- 6) 排ガススクラバーの処理水 : ECA海域は清水のClosed Cycle、Global 海域は海水のOpen Cycle とする。
- 7) 清水スクラバーの中和剤はNaOHの50%水溶液を使用。各負荷での消費量を考慮。(MKK殿データ)
- 8) NaOH費用は75k¥/ton (MTI殿調査結果より)

6. 採算検討・総合評価

SOxスクラバー採算検討



- 条件 :1) HFO 670\$/ton, MGO 1,000\$/ton (@80円/\$) 2) NaOH 50%水溶液 75k¥/ton
 3) 運行パターンは別紙 JP-EU-US-JP、JP-US-JP、JP-EU-JPによる
 4) ECA海域は清水のClosed Cycle、Global海域は海水のOpen Cycle

7. まとめと今後の課題

まとめ

- 1) 試験機での実験結果より、NaOHを中和剤とした湿式SO_xスクラバーの脱硫能力はIMO規制値に対応できる事が確認できた。
- 2) 考案した遠心分離機をベースとした清水循環洗浄時の排水処理装置で、IMO要求の排水基準を満足する見通しができたが、よりコンパクトな排水処理装置を検討する。
- 3) 今回の想定したPCTC運航パターン、燃料油・NaOH価格での採算検討結果では、2020年以降の新造船は約2年、レトロフィットでは約4年で投資回収可能となった。(2013年適用の新造船、レトロフィットでは各々約8.5年、10年だが、ECA海域の稼働率の高い船舶では更に短くなる)
- 4) NaOHは欧州、シンガポール、日本、北米で入手可能な中和剤である。

今後の課題

- 1) 考案したSO_xスクラバーのメンテナンス費用の検証。
- 2) SO_xスクラバーの承認のスキーム、設備要件、故障時の処置方法などに関し、今後船級協会とも協議する必要がある。
- 3) 就航船での作動・性能確認と承認スキームの検証。
- 4) 排水pH規制について6.5以上から3.0以上への改正 (NaOH消費量の削減)

本日の講演内容は、
日本郵船株式会社殿
株式会社MTI殿
三菱化工機株式会社殿
一般財団法人日本海事協会殿
との共同研究体制により実施すると共に、一般財団法人日本海事協会殿
の「業界要望による共同研究スキーム」による支援を受けて実施しました。

改めて関係各位に対し、深く御礼申し上げます。