

イナートガスシステムの排水による 海水の汚染防止対策について

藤井 忍*・杉田政久**・田中邦彦*・内藤正一*・翁長一彦*

Prevention of Sea Water Pollution by Effluent of Inert Gas Systems

By

Shinobu FUJII, Masahisa SUGITA, Kunio TANAKA
Shoichi NAITO, and Kazuhiko OHNAGA

Abstract

Inert Gas System (IGS) which was developed to prevent the explosion of tankers, discharges acid water of large quantity to sea in harbour. MARPOL of 1973 rerulated to equip IGS with COW, therefore the number of IGS tanker increases and the pollution by effluent of IGS is concerned.

With regard to the prevention of pollution by IGS, the surveys of water discharge of IGS were made in some harbours and the studies of mechanism of scrubbers were carried out by using a pilot plant of IGS.

The results of the surveys and studies were showing as follows:

- 1) Pollution caused by the water discharge of IGS was not recognized. Although the value of PH in the effluent was between 2 and 3 and many quantity of total sulfur was contained, the effluent was completely diluted and varied chemically in sea water.
- 2) Multistep scrubbers were used in the pilot plant, it was recognized that the effluent of former step scrubbers were acid water and contained many sulfur, and that of after step scrubbers rather clean.
- 3) For performing to 100 % of extraction efficiency in SO_2 gas, it is necessary that quantity of the scrubber water was 0.5 % of volume of gas at least.
- 4) Purpose of the studies which make to decrease the quantity of the acid effluent was performed.

1. 結 言

イナートガスシステム (IGS) はタンカーの油タンク内を不活性化して爆発を防止するために開発され、ボイラの燃焼排気ガスを煙道の途中から引き出し、スクラバ、送風機、除湿器等を経てタンクに供給するシステムである。ボイラの排気ガスは通常酸素濃度が5~7%であって、このような低酸素濃度の雰囲気中では引火性ガスの爆発は生じない。

しかし、排気ガス中には SO_2 ガス、ばい塵等が含まれ、かつ高温であるためそのままではイナートガスとしては使用できない。そのため排気ガスをスクラバにより洗浄し、脱硫脱塵及び冷却を行うが、その排水にはガス中の SO_2 成分が溶解して強酸性を呈し、かつばい塵等を含んでおり、pH 値は2.0~3.0になるといわれている¹⁾。しかも IGS は主に貨油を荷揚げ中に運転されるため、そのスクラバ排水による港湾内での汚染が心配され、海洋汚染防止の関心が高まるにつれて、その排水に対する検討、対策が考えられるようになってきた¹²⁾。

特にタンカーのタンク内を積荷の原油で共洗いしな

*機装部, **元機装部

原稿受付: 昭和59年9月3日

がら揚げ荷する方法（原油洗浄，COW）が海洋汚染防止上有効と認められ，1973年 MARPOL 条約で IGS と一体として 2 万 DWT 以上の新造タンカーに義務づけられた。そのため各国では条約発効以前からこの方式を採用し始め，現在では小型の内航行タンカーを除き，ほとんどすべてのタンカーが IGS を装備するようになった。

IGS の運転により，20 万 DWT タンカーの場合 250～300 m^3/h ものスクラバ排水が港湾内に排出されるため，海水の移動の少ない港湾内の水質保全上好ましい事ではない。従来行われてきた IGS の研究は，専ら爆発防止性能の信頼性を確保するために酸素濃度をある値以下に維持するという研究， SO_2 ガスによる配管等の腐食の防止対策等に向けられており，また排水に対する規制も特になくために，排水による汚染の問題は特に採り上げられていなかったようである。因みに陸上の工場から海域への排水は，毎時 50 トン以上の場合には pH 値が 5.0～9.0 と規定されている。

本研究はこのような背景を基に，IGS からの排水の港湾に対する影響について実態調査を行うとともに，スクラバの洗浄機構と排水処理方法についてテストプラントによる実験的研究を行ったものである。

2. イナートガススクラバ排水の実態調査

イナートガスシステムを装備した外航タンカーが入港する港湾のうち，入港頻度の高い 4 箇所（千葉，鹿島，川崎，名古屋）を選びタンカーの入港時に実態調査を行った。

調査回数は計 5 回（千葉港で 2 回）である。

調査方法は，IGS 稼働中のスクラバ排水を船内で採取すると共に，船外の排出口付近の海水を数箇所から採取した。参考までに一般海域からも同時に採水を行った。

採取水の pH 値は現場で直ちに測定し，さらに持ち帰った試料については全硫黄量，硫酸塩，全酸度，遊離酸の分析を行った。

調査の対象としたタンカーに装備されている IGS のスクラバの構造，形式には種々のものがあつたが，原理としては燃焼ガスと海水との対向接触によって洗浄，冷却を行なうものであり，スクラバは一基のみ装備されているのが普通で，複数個が装備されているのは見当らなかつた。

調査したタンカーの主要目及び IGS の仕様は表 2.1 に示すとおり種々様々であり，イナートガス容量は

16,000～22,500 m^3/h ，スクラバ洗浄水量は 200～495 m^3/h の範囲にあり，イナートガス容量 (Q) に対する洗浄水量 (q) の値 q/Q は 0.0125～0.022 である。

スクラバ排水管のサンプリング弁又はドレイン弁から直接採水した排水の分析結果を表 2.2 に示す。第 3，4 は表 2.1 に示したように IGS の稼働開始時のため，pH 値は変動している。しかしそれ以外は定常的な運転状態にあつて，pH 値は予想どおり 2～3 の範囲にあり，IGS の機種による差や時間的変化はあまり認められなかつた。一方，pH 値以外の測定項目の値はかなり異り時間的にも変化している。IGS 運転開始後の数時間において，排水の水質が著しく変化していることが第 3，4 船に認められ，時間と共に pH 値が低下し，全硫黄量が増加する傾向が認められる。

周囲の海水については，スクラバ排水の船外流出口附近とし，スクラバ洗浄水の吸込口附近とからそれぞれ 10 個所以上を採水して分析を行ったが，表 2.3 に示すように採水の場所及び深さ方向による差はほとんど認められなかつた。むしろこの結果から，排水口付近の水質は表 2.4 に示すいくつかの港湾における海水の pH 値と比較して一般の港湾海水とほとんど差がないと考えられる。

すなわち，港湾ごとにかんがりの水質の差が認められるものの，IGS の機種，型式等によるスクラバ排水の水質の差はあまり認められないと言えよう。

周囲海水の pH 値と全硫黄量の分布を図-2.1 及び図-2.2 に示したこれらの図では川崎港，千葉港の水質の分散は大きく，鹿島，名古屋のそれは小さいことを示している。

船内より採水したスクラバ排水と周囲排水については，それぞれの pH 値と全硫黄量との関係を示したものが図 2.3 である。この図は周囲海水の水質の値と，その海水を用いたスクラバ排水の水質値とを線で結んだものであつて，スクラバ洗浄，及び海水への放流に応じて水質はこの線上を往復すると考えられる。

また，IGS の始動時には，時間経過に応じて線上の途中の値が観測されたこととなる。

pH 値の低下と硫黄量の増加の傾向には若干の差が認められるが，これは IGS の種類，周囲の海水の水質によるものと思われる。そしてスクラバ排水は海水中に排出されるとたちまち稀釈，拡散を生じ周囲海水の水質と等しくなると考えられる。

さらに，採取した排水を放置しておくだけでも pH 値は変化し，これを直射日光下で攪拌すると一層変化

が早い。従って何らかの化学変化も行われていると推定される。

以上のことから、現時点ではIGSからの排水により港湾内の環境汚染が生じる必配は全くないと思われる。近年環境保全が注目されるようになってから、各地方公共団体等による水質調査が定期的に行われている³⁾。それらに比較して本研究による調査は地域的にも時間的にもごく限られた範囲のものであるが、他の

水質調査資料からみてもIGSの排水による汚染は認められないといえる。

前にも述べたように、2万DWT以上の新造タンカーにIGSの装備が義務づけられ、既存船の改造も行われてきたため、IGS装備船の数は増加している。従って港湾内に排出される強酸性排水の総量は今後さらに増加し、永い間の蓄積を考慮すれば汚染が加速されることも考えられる。

表2-1 実態調査の諸要目

		第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
調査期日 ヶ 港 湾		55. 8. 29 京葉シーバース	55. 9. 18 鹿 島 港	55. 12. 8 京葉シーバース	56. 8. 4 川崎シーバース	57. 2. 15 名古屋シーバース
調査船 要目	Lpp m	305.00	310.00	320.500	304.00	305.00
	B m	53.00	53.00	54.50	52.40	53.00
	D/d m	25.30/19.70	25.00/19.42	26.00/19.588	25.70/19.848	25.30/19.652
	D.W. ton	233,656	237,750	252,059	236,426	230,405
IGS 仕様	ガス容量 m ³ /h	16,000	17,000	22,500	17,000	16,000
	ブロウ { m ³ /h×mmAq ×台数	8,000×2.500 ×2	8,500×1,800 ×2	11,250×1,500 ×2	8,500×1,350 ×2	8,000×2,500 ×2
	スクラバ ポンプ m ³ /h×mAq	220×80	350×50	600×-	280×50	220×80
	洗浄水量 m ³ h	200	341	495	280	200
	スクラバ { 寸法 m 容量 m ³	3.5×2.6×3.6 32.76	2.8×5.1 31.3	2.3φ×8.0 33.2	3.3×1.8×5.2 30.9	3.5×2.6×3.6 32.76
	排出口径 m	0.3	0.35	0.35	0.2	0.3
	調査時のIGS稼働状態	定 常	定 常	始 動 時	始 動 時	定 常

表2-2 スクラバ排水分析結果

		第1船			第2船				第3船			第4船				第5船			
調査日		55. 8. 29			55. 9. 18				55. 12. 8			56. 8. 4				57. 2. 15			
場 所		千葉・京葉 シーバース			茨 城・鹿 島 港				千葉・京葉 シーバース			神奈川川崎 シーバース				愛知名古屋 シーバース			
採取時刻		13.12	14.20	14.50	9.50	10.15	10.45	11.00	11.30	13.30	15.25	17.00	15.30	16.05	17.05	18.30	14.50	15.20	15.50
測 定 種 類	PH	2.6	2.6	2.8	2.36	2.32	2.34	2.32	2.30	7.10	4.75	2.91	6.67	3.56	4.01	5.97	2.60	2.43	2.55
	トータル サルファ	934	924	920	1088	1062	1074	1080	1090	796	826	856	856	942	917	906	924	955	931
	硫酸塩	80	69	80	12	31	16	140	78	48	120	65	44	97	56	39	83	100	170
	全酸度	165	160	180	660	665	660	685	705	0	15	115	0	214	149	198	156	203	217
遊離酸	125	125	115	650	594	597	608	610	0	5	80	0	134	82	196	-	159	150	

註：PH以外の数値の単位はmg/ℓ

表 2 - 3 周囲海水の水質分析結果

調査港湾		京 葉 シーバース		鹿 島 港		川 崎 シーバース		名 古 屋 シーバース	
採集位置		排水口 付 近	吸水口 付 近	排水口 付 近	吸水口 付 近	排水口 付 近	吸水口 付 近	排水口 付 近	吸水口 付 近
PH	最小値	7.78	8.02	8.34	8.35	8.42	8.62	8.10	8.30
	最大値	8.17	8.20	8.36	8.36	8.99	8.72	8.34	8.31
	平均値	8.13	8.10	8.35	8.36	8.79	8.62	8.29	8.31
全硫黄量	最小値	762	748	862	864	635	682	843	847
	最大値	814	776	872	876	793	715	862	848
	平均値	792	762	865	870	697	699	850	847
硫酸塩	最小値	19	110	37	32	18	80	40	75
	最大値	150	125	150	140	125	120	154	125
	平均値	76	118	96	101	63	100	88	100

註： pH以外の値はmg/l

表 2 - 4 港湾海水のPH 値

港 湾	PH
喜 入	8.3
宇 部	8.1
水 島	8.1
神 戸	8.10~8.15
伊 勢 湾	7.75~8.0
横 浜	6.4 ~6.6
千 葉	7.92~8.15
鹿 島	8.25~8.40

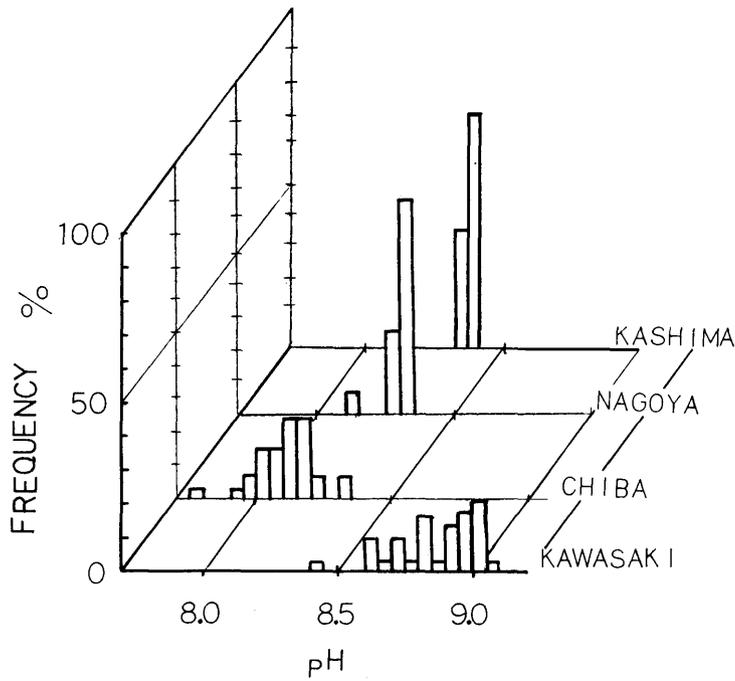


図-2.1 周囲海水の pH 頻度分布

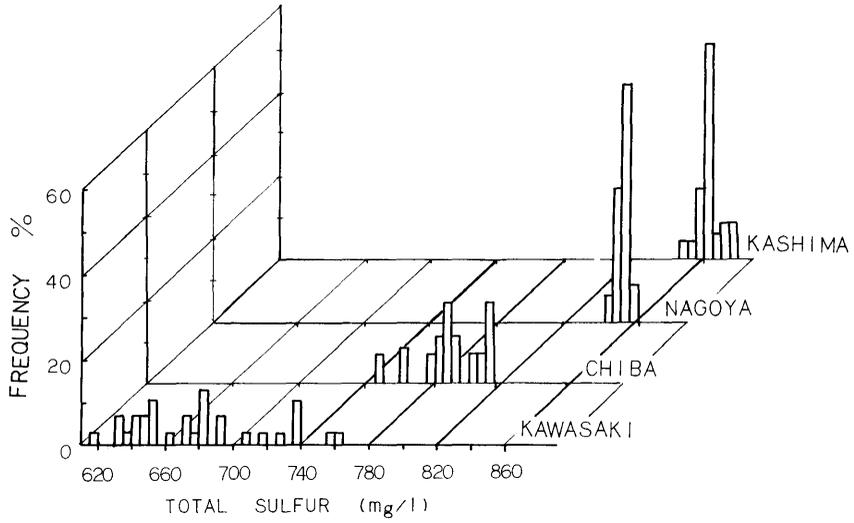


図-2.2 周囲海水の全硫黄量頻度分布

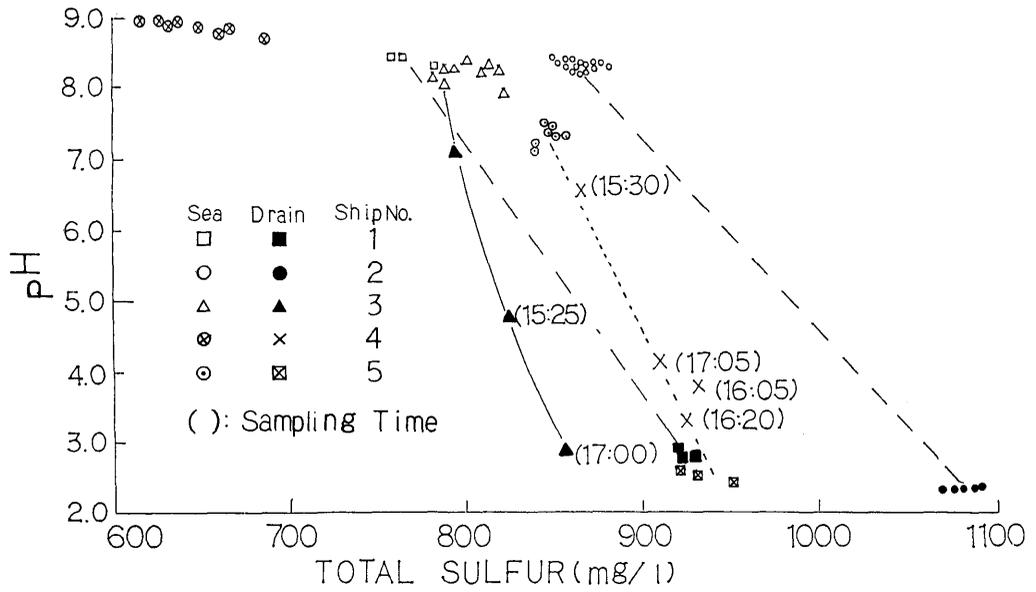


図-2.3 全硫黄量と pH との関係

3. スクラバ性能改良の方針

実態調査の結果、現時点での IGS の酸性排水による海水汚染の惧れはない事が明らかとなったが、今後は前述のように酸性排水の増大が予想される。このため、スクラバ洗浄排水を低濃度のものとそれに較べて少量の高濃度のものに分割できれば、環境保全上さらに好ましい。それは、低濃度の排水をそのまま船外に排出し、少量の高濃度汚染排水を貯留して外洋にて排出する等、排水処理を容易にする可能性が生じるためである。そこでスクラバの機能について検討を加え、IGS として望ましいスクラバの基本要件を求めることが必要となる。

従来の IGS の問題点は主にスクラバや配管タンク内の腐食作用であり、これは残存する SO_2 ガスの故と考えられるために脱硫率を上げる努力がなされていた。排水の量、すなわち洗浄水量が大量なのはこのためと推定されるが、実態調査の結果を始め製造者仕様等によれば、IGS のスクラバの場合、洗浄水量と燃焼ガス量との比は $0.013 \sim 0.022 \text{ m}^3 / \text{N m}^3$ と 2 倍近い開きがあり、さらに良質なイナートガスを発生させる装置では $0.06 \text{ m}^3 / \text{N m}^3$ のものがある。いわば多量の海水を使えば脱硫率が上るという考えがあって、後述するような船用としての制約下ではスクラバ排水の処理を難しくしているのではないと思われる。IGS のスクラバは、燃焼ガスの洗浄、脱塵及び冷却が主目的であり、特に SO_x 成分の除去が重要である。その過程は基本的に気体と液体の接触反応による物質移動の原理によるものである⁴⁾。高温の SO_x ガスが洗浄で冷却されるとミスト状となり、洗浄水に吸収される。このためには、気体と液体とを向流させ、接触面積を多くすることが重要であって、多くの IGS スクラバ、洗浄塔又は充填塔はそのような形式をとっている⁵⁾⁶⁾。

亜硫酸ガスに限って言えば、温度（特に洗浄水の温度）が低い程溶解しやすく反応速度も早い。すなわちガスをなるべく少量の洗浄水で急冷するか、またはスクラバ以外の方法で冷却することにより脱硫用の洗浄水量は少量ですむ。さらにスクラバの洗浄水をなるべく冷却して使用すれば脱硫効果が大きくなると考えられる。

スクラバ洗浄水の pH 値と亜硫酸ガスの溶解度との関係についてはあまり資料を見出すことができなかったが、洗浄水がアルカリ性であれば中和反応によってその反応速度が速まるのは当然である。pH 値が 8.0

以上の海水による洗浄作用は清水よりも有効であり、中和反応塔として用いられる例もある。したがって、陸上の清水を用いたスクラバに比較して IGS の海水を用いたスクラバの性質は陸上の中和反応塔に近く、その分だけ洗浄水量は少なくともすむはずである。それにもかかわらず大量の海水を用いている事、並びに一段洗浄だけで行なわれているのが現状である。ただ、船用の IGS の特色として、海水を自由に使用できること、一般の陸上における脱硫装置と異なり脱硫後のガスをイナートガスとして利用すること、船用として大きさや重量の制約があること、危険物薬品を使用したり脱硫による副産物が生じないこと、等の制約がある。

以上の理由から現用の IGS の基本的な形式が定まったと思われるが、単にスクラバを用いた海水洗浄により脱硫率を上げるだけでなく、洗浄排水の処理を考慮したスクラバ方式を検討する必要がある。

その一つの手段としてスクラバの洗浄冷却過程をいくつかに分割した多段洗浄方式⁸⁾により、水質の異なる数種類の排水を取り出す方法が考えられる。高濃度の SO_2 を含む高温の燃焼ガスに最初に接触する水滴群と、低濃度 SO_2 の低温ガスに接触する水滴群とでは洗浄効果が異なることが予想されるため、それぞれのスクラバ排水は異なるはずである。

以上のような考えの下に、IGS のスクラバの方式を改良することを目的として新方式 IGS のテストプラントによる実験を行った。

4. IGS スクラバの実験

4.1 実験装置

実験装置は IGS のスクラバの性能について基礎的な面から実験を行える装置であると共に、実用的な IGS 装置の開発を行うことが可能なテストプラントとしての要素をもつものとした。そのため、各種の試験条件を任意に変更でき、かつ以後の装置の改良等が可能なフレキシビリティを持つようにと計画した。図 4.1 に実験装置の概要を、表 4.1 にその要目を示す。

燃焼ガスは人工的にガスを混合調整する方式も考えられたが、テストプラントとして使用することを考慮して重油によって燃焼ガスを発生することとした。簡易な燃焼装置ですむように燃料には A 重油を使用した。実際の燃焼に相当する燃焼ガスを発生させられるように硫黄粉末等を添加可能なバイパスを設けた。

スクラバ装置としては、ベンチュリ式 1 段と上下 2

段に分割した散水塔式スクラバ3基を設け、合計7段の多段洗浄が可能なものとした。したがってガス発生機から発生した燃焼ガスを最高7回にわたって順次洗浄することができるが、任意の個所の洗浄ステップをとりやめることもできる。さらに、散水塔を並列に使用することが可能なものとし、かつ別種スクラバに取り換え可能なユニット配管とした。

ベンチュリ式スクラバは開度調節型であり、散水塔には円筒型陶器製ラシヒリングを充填してある。スクラバと主要配管の材料は耐腐食性を考慮して SUS 316 L を用いた。

ガス発生機の外観、ベンチュリ式スクラバおよび散水塔式スクラバを写真4.1~3に示す。

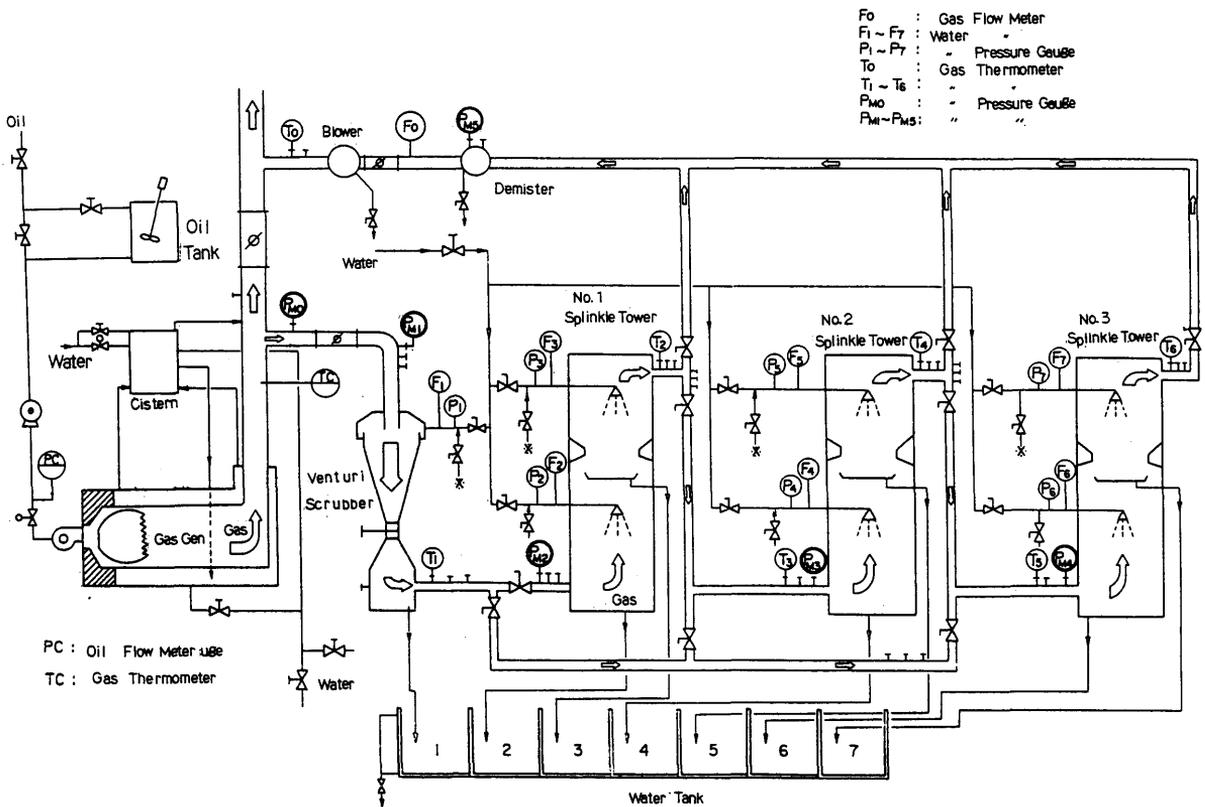


図-4.1 実験装置の概要

表 4 - 1 実験装置要目

ガス発生機	型式 燃料 ガス発生量 酸素濃度	横型水室付燃焼器 A重油(硫黄添加装置付) 150Nm ³ /h 6~7%
スクラバ	ベンチュリ式 散水塔 処理ガス量 散水量	1段開度調節型 縮率1/7.7 オリフィス部 10.2cm ² ×200mm 3基6段円筒型 充填材付 内径400mm 高さ550mm/段 全高1800mm/基 50Nm ³ /h 0.4m ³ /h/段
排気用ファン	型式 定格	ターボブロウ 102m ³ /h×800mm/Aq
海水供給装置	タンク容量 海水供給量	10m ³ (FRP製) 3m ³ /h
ガス吸収装置	形状	200φ×3719hmm (SUS316製)
アルカリ溶液タンク	タンク容量 形状	1m ³ (FRP製) 1000φ×1500hmm
酸溶液タンク	タンク容量 形状	200ℓ(PVC製) 490×860mm
混合酸化タンク	タンク容量 形状	10m ³ (FRP製) 2000φ×3000hmm
汙過装置	処理量 過面積 形状	3.5m ³ /h 2m ² 650φ×1000hmm (SUS 304製)

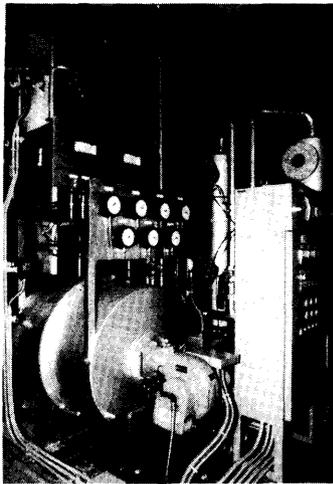


写真-4.1 ガス発生機

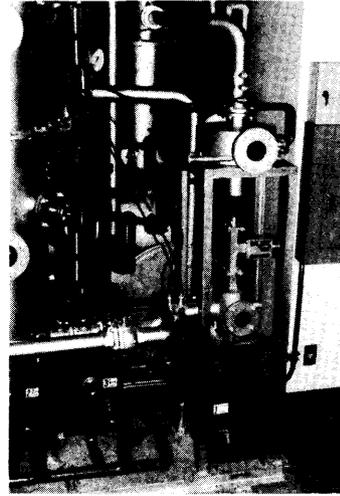


写真-4.2 ベンチュリ式スクラバ

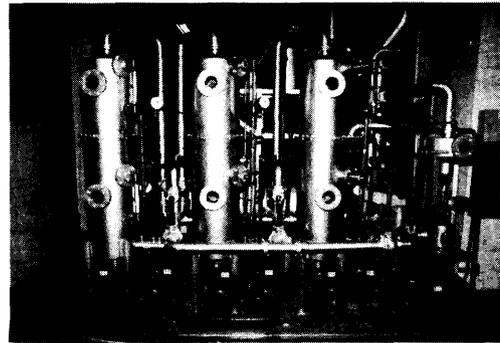


写真-4.3 散水塔式スクラバ

4.2 実験方法

現在の IGS における基本的な洗浄機構を解明する目的から洗浄水には清水と 3% 食塩水を用いた。実験を行う際にベンチュリスクラバの開度、洗浄水量、燃焼ガス量と硫黄含有量を (SO_2 濃度) をパラメータとした。

測定項目としては、各スクラバ毎の洗浄排水の pH 値と硫黄含有量を分析し、図 4.2 に示す計測ブロック

ダイヤグラムにより、排水温度、排気ガス管路中の温度及び SO_2 濃度の測定を行った。

散水塔式スクラバに使用した散水ノズルは、水量を変えても常に均一な水滴が得られるように、A~Cの3種類のノズルを使用した。

それぞれの水圧 2 kg/cm^2 における散水量 (ℓ/min) は8.6, 3.6, 2.1である。

なお燃料油中の硫黄含有量をC重油相当とするため、A重油に硫黄粉末の他にDBDS (Ditertiary Butyl Disulfide Sulfur) を添加し攪拌機にて混合したものを燃焼させた。

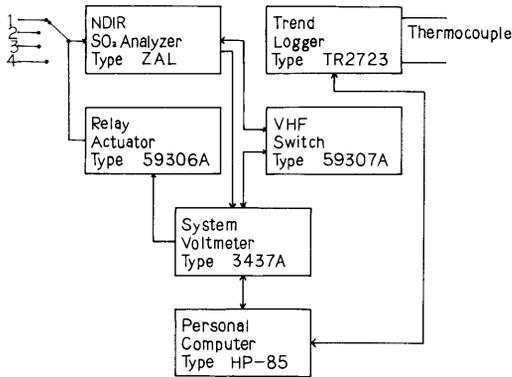


図-4.2 計測ブロックダイヤグラム

4.3 実験結果と検討

4.3.1 洗浄排水のpH値

1段目スクラバのベンチュリ開度と清水の洗浄水量(q)を変え(但し1~7段の q は等しい)た場合の実験結果の一例を図4.3(a)~(e)に示した。ガス発生機の燃料油はすべてA重油で硫黄含有量は0.86%である。

初段スクラバの排水は当然多量の SO_2 を吸収溶解するため強い酸性を示すが、後段のスクラバになる程酸性は弱まりpH値はほぼ一定値(6.0)となる。燃焼ガス量(Q)に対する洗浄水量(q)の値(q/Q)を大きくするにつれてpH値は上昇するが、その上昇する傾向は前段及び後段のスクラバで著しく、中段ではあまり変化が認められない。また、初段のベンチュリ式スクラバの開度による差は認められるが、これは開度によりスクラバを通過するガス量が変わるためと考え

られる。清水洗浄の場合に、後段のスクラバにおいてpH値が7~8と高い値を示す例があるが、これは q/Q が高い(洗浄水量が多い)場合に生じていることから、単に稀釈されているためと思われる。3%食塩水による洗浄時には同じ q/Q の値であってもこの現象は生じないが、これは元の洗浄水のpH値の違いによるものと考えられる。

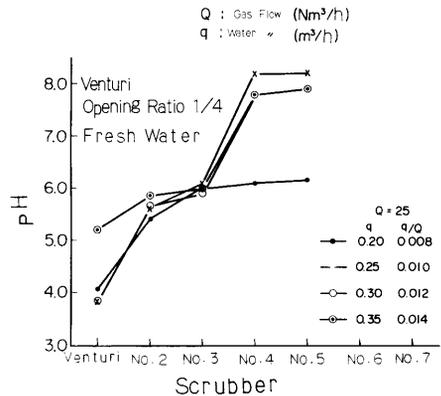


図-4.3(a) スクラバ段数に対するpH値

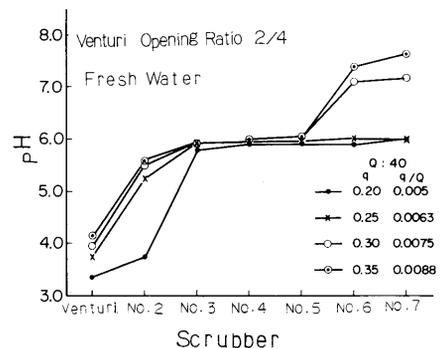


図-4.3(b) スクラバ段数に対するpH値

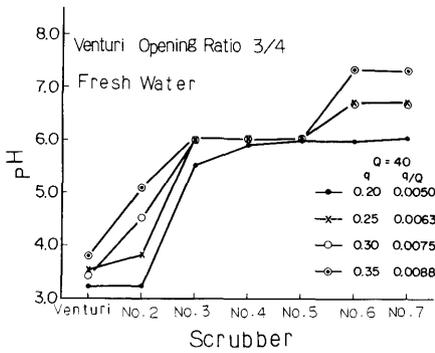


図-4.3(c) スクラバ段数に対する pH 値

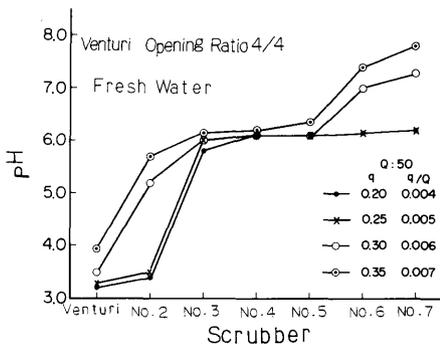


図-4.3(d) スクラバ段数に対する pH 値

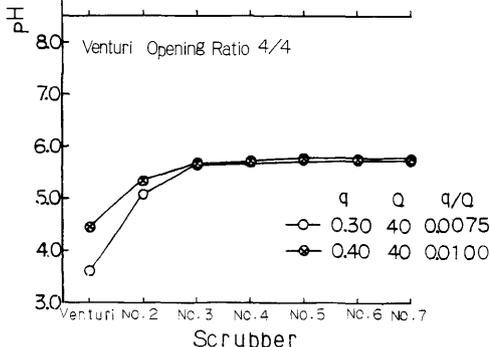
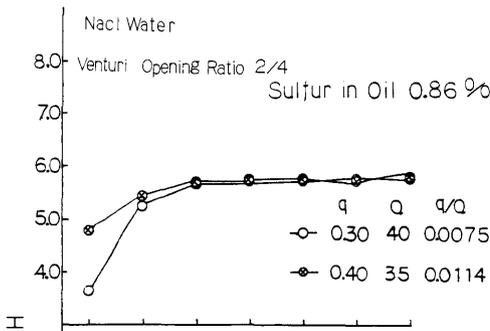


図-4.3(e) スクラバ段数に対する pH 値

図4.4は清水洗浄時に燃料油中の硫黄含有量を変化させ、高濃度のSO₂を発生させて実験を行い各スクラバ排水のpH値を測定したものである。図から明らかのように、燃料油中の硫黄含有量の増加にとともに1～2段目のスクラバ排水のpH値が低下するが、3段目以降はあまり差が認められない。

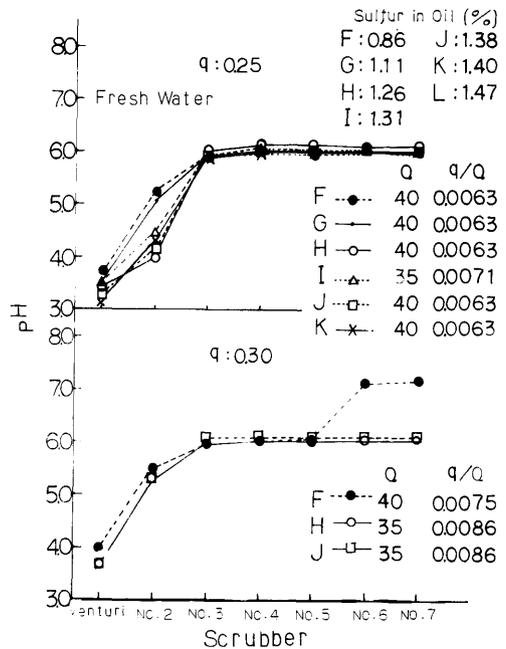


図-4.4 スクラバ段数に対する pH 値

図4.5(a), (b)には、燃料油中の硫黄含有量を2種類に変えた時に、清水と3%食塩水の各スクラバ排水のpH値の違いを示した。これらの図から、同一条件におけるpH値は、3%食塩水による洗浄の方が清水による洗浄時より常に低く、ガス中のSO₂をより多く溶解できる事が認められる。食塩水は弱アルカリ性であり、当初予想したとおりの結果が得られた。実際のIGSでも海水を使用していることから、洗浄効果、脱硫効果の上で有利な条件といえる。

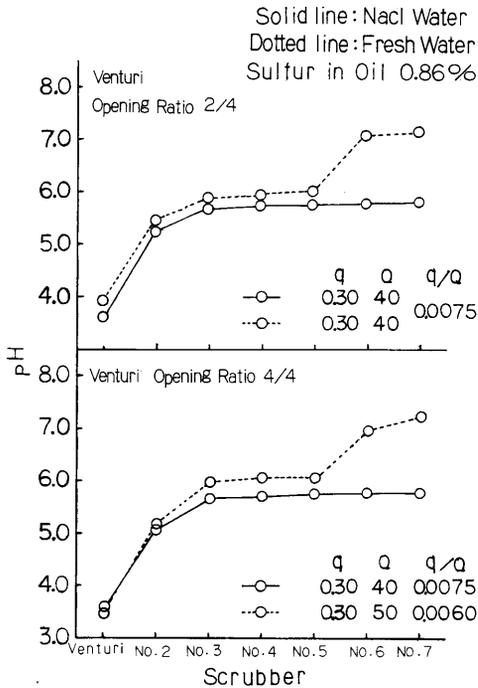


図-4.5(a) スクラバ段数に対する pH 値

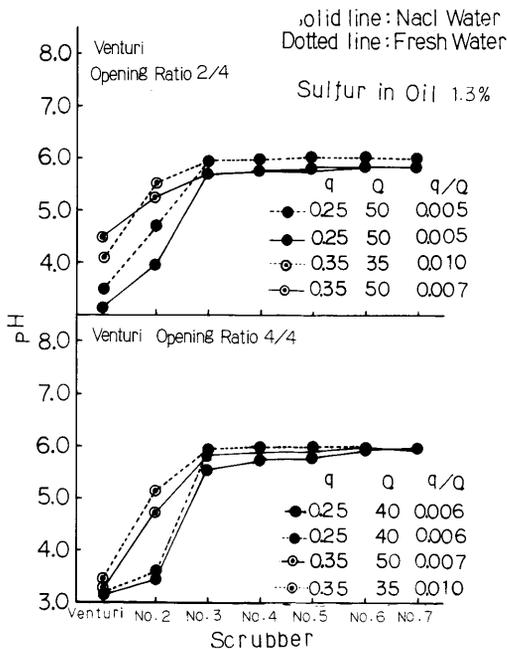


図-4.5(b) スクラバ段数に対する pH 値

さらに、初段のベンチュリ式スクラバを除いて散水塔式スクラバのみによる6段洗浄実験を行なった結果を図4.6(a)(b)に示した。これはスクラバの型式による洗浄効果の違いを見出すためであって、各スクラバ排水のpH値は q/Q の値とスクラバの段数の増加に伴い高くなっており、先のベンチュリ式スクラバを含んだ7段洗浄時と同様の傾向を示している。しかし水量の少ない場合でも2段目スクラバが比較的高くなる傾向が認められる。後に記す脱硫率(図4.16(b)に示す)も考慮すると燃料油中の硫黄含有量が1.3%の場合に燃焼ガスが十分に洗浄脱硫されたとみなし得る(pH値が一定となる)スクラバ段数及び1段当りのガス量に対する洗浄水量(q/Q)はそれぞれ3段及び0.4%である。

洗浄効果を良くするために単に洗浄水量を多くするのではなく、スクラバの位置(段数の順位)に応じた適切な水量がある。この考え方に基づき洗浄水量 q を変えてガス量 Q との比によりpH値を整理したのが図4.7(a)~(c)である。この図は直列に接続された1~4段のスクラバの特性を示したものである。従って各スクラバ単独の特性を示したものではなく、 q/Q に対する各スクラバの特性はかなり異っている。図中の曲線は、 $pH = a + b \cdot \ln[(q/Q) \times 10^3]$ とした時の回帰曲線を示している。

図から、pH値はスクラバの段数と洗浄水量(q/Q)が増加することにより高くなっていくが、その傾向はスクラバの順位により異っている。

洗浄水量に対するpH値の増加傾向は、初段及び4段目スクラバにおいて少なく、2~3段目のスクラバでは大きい。すなわち、初段スクラバにおける洗浄作用はガス量に対してほぼ飽和状態になっていることを示し、それ以降のスクラバでは水量と共に向上し、4段目以降ではほぼ洗浄作用が終了しているものと思われる。

図4.8は燃料油中の硫黄含有量を実際のIGSに使用しているボイラの燃料(C重油)相当として洗浄実験を行った結果である。この図から、燃焼ガスを完全に洗浄、脱硫するために必要なスクラバの段数及び1段当りの洗浄水量を推定すると、それぞれ4段のスクラバ、ガス量の約0.7%の洗浄水量が必要と思われる。これは先に述べた燃料油中の硫黄含有量が1.3%の場合に比べ、段数と洗浄水量が増加している。

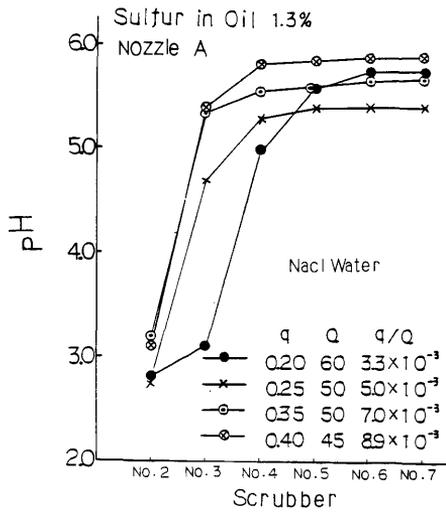


図-4.6(a) スクラバ段数に対する pH 値

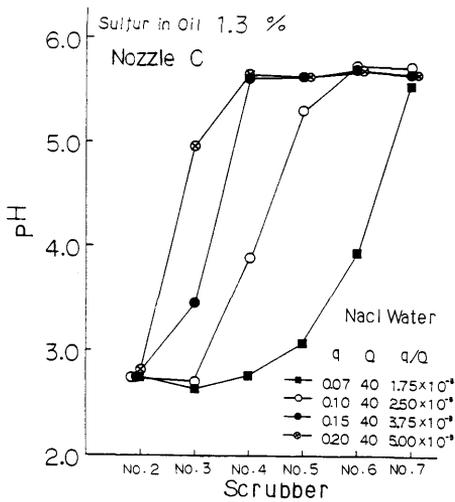


図-4.6(b) スクラバ段数に対する pH 値

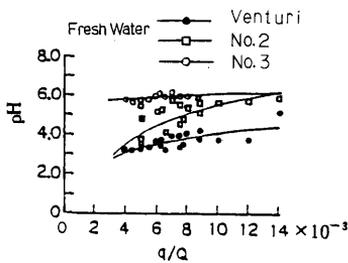


図-4.7(a) 洗浄水量に対する pH 値

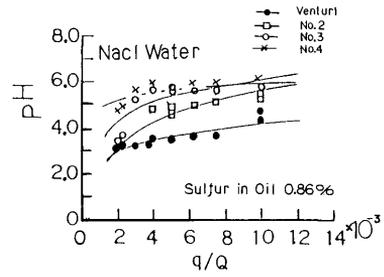


図-4.7(b) 洗浄水量に対する pH 値

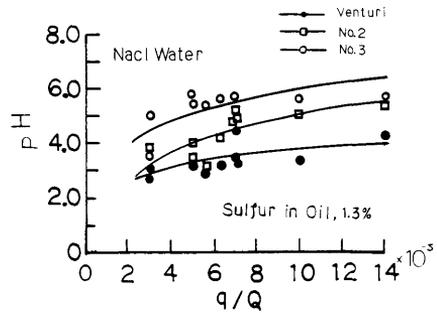


図-4.7(c) 洗浄水量に対する pH 値

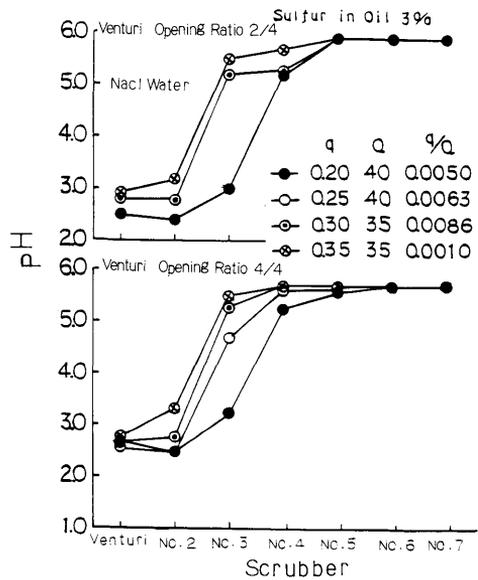


図-4.8 スクラバ段数に対する pH 値

4.3.2 洗浄排水中の全硫黄分

先に述べた各スクラバ洗浄排水の pH 値により、ある程度の洗浄効果を知ることができたが、さらに燃焼排気ガス中に含まれている SO₂ 成分がスクラバによって洗浄排水中にどの程度溶解しているかを定量的に求めた。

図4.9(a)~(b)は、各スクラバ排水中の全硫黄分を分析した結果の一例を示したものである。スクラバ排水中に含まれる全硫黄分の値はスクラバの順位及び洗浄水量の増加に伴い減少しており、その傾向は洗浄水によってあまり変わらない。

図4.10は燃焼ガス発生機に給する燃料油中の硫黄分を変化させて洗浄実験を行なった結果をまとめたものである。当然の事ながら燃料油中の硫黄含有量が増加するにつれて、排水中に含まれる全硫黄分は増加する。3段目までのスクラバにおいては、洗浄水量 (q/Q) の影響が大きいが、4段目スクラバで SO₂ 成分の溶解はほとんど終了しているものと考えられる。

初段のベンチュリ式スクラバを除き、6段の散水塔式スクラバによる洗浄実験を行った結果を図4.11(a)~(b)に示す。

この図から、燃焼排気ガスの洗浄作用は3段のスクラバ、及び1段当りガス量の約0.4%の洗浄水量で終了しているものと考えられる。それはNo.4スクラバ(3段目)以降の全硫黄分が10mg/l以下でほぼ一定値となっているからである。

このことと、先に述べた7段直列洗浄時の各スクラバ排水 pH 値、全硫黄分の値から考えると必ずしも初段のベンチュリ式スクラバの洗浄効果が大いとはいえず、定量的な洗浄作用の傾向もそれ程大きく変わらないことが推定できる。

図4.12には、先に述べた pH 値と同様の整理方法で q/Q に対する各スクラバの洗浄排水中の全硫黄分の値を整理したものであり、図4.12(a)は清水、(b)は3%食塩水で、燃料油中の硫黄含有量が0.86%と1.3%をまとめたものであり、(c)は3%である。

これらの図中に示した曲線は

$S = a + b \cdot \ln[(q/Q) \times 10^3]$ とした時の回帰曲線を示し、相関係数が平均0.7であり適合性が良い。

同一洗浄水量 (q/Q) により洗浄を行なった場合に、各スクラバの排水中の全硫黄分の値の洗浄水 (清水と3%食塩水) による相異を検討すると、清水の方が3%食塩水に比較して低い。これは3%食塩水の方が燃焼排気ガス中の SO₂ 成分を良くするため、洗浄効果が

優れていることを示している。しかし、スクラバの順位 (段数) 及び洗浄水量の増加に対する排水中の全硫黄分の変化の傾向はあまり変わらない。

図4.12(c)からも明らかなように、4段目スクラバに達すると全硫黄分の値はほぼ一定値 (10mg/l 以下) となり、燃焼排気ガス中の SO₂ 成分を十分吸収し洗浄作用が終了していることを示している。

図4.13(a)(b)は燃料油中の硫黄含有量3% (C重油相当) における各スクラバ排水中の全硫黄分を分析した結果の一例を示す。

これから明らかなように4段のスクラバ及びガス量の約0.7%の洗浄水量 (1段当り) があれば、十分燃焼排気ガスを洗浄することが可能であると考えられる。これは、4.3.1において述べた排水中の pH 値の結果と合致した。

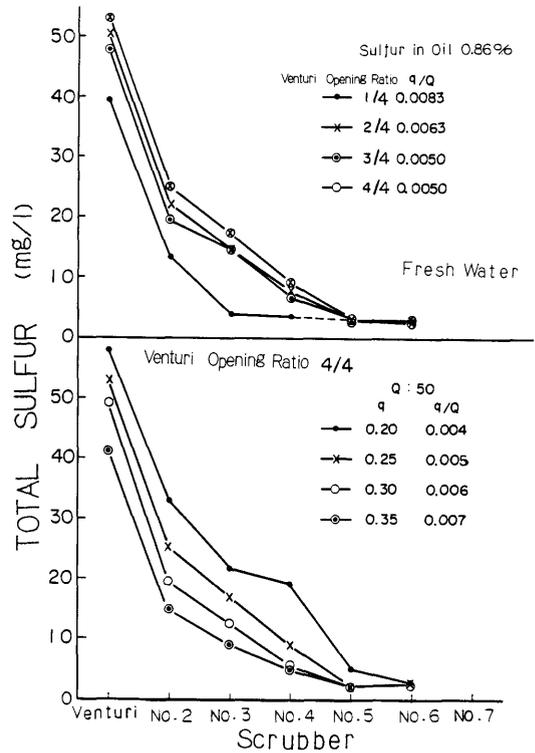


図-4.9(a) スクラバ段数に対する全硫黄量

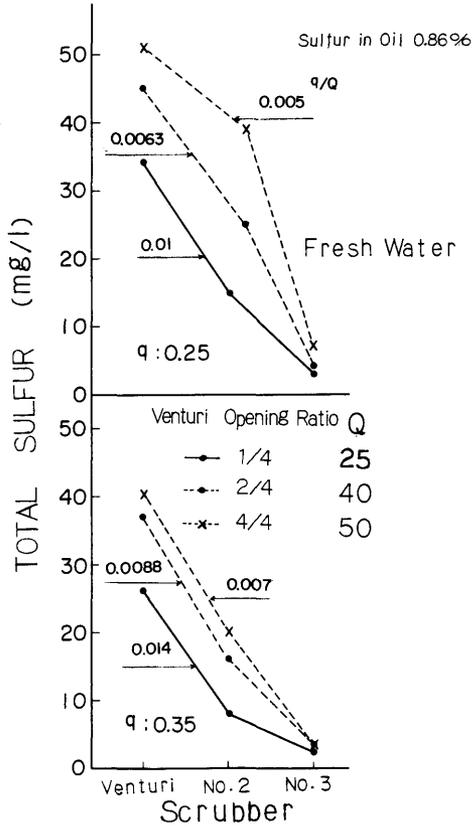


図-4.9(b) スクラバ段数に対する全硫黄量

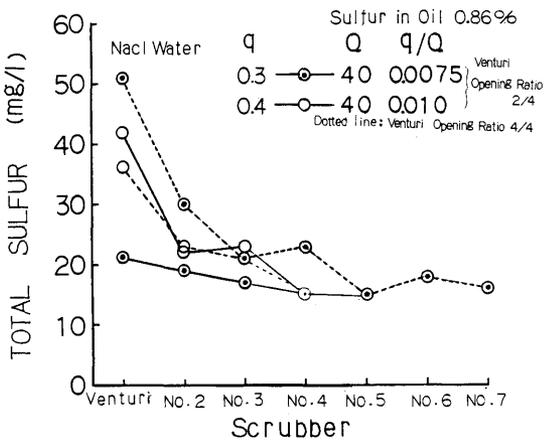


図-4.9(c) スクラバ段数に対する全硫黄量

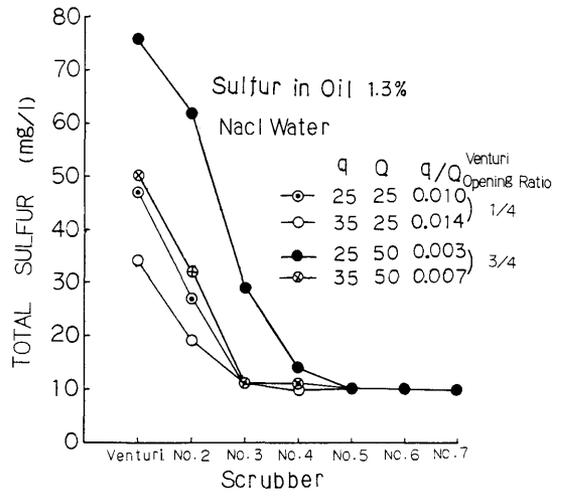


図-4.9(d) スクラバ段数に対する全硫黄量

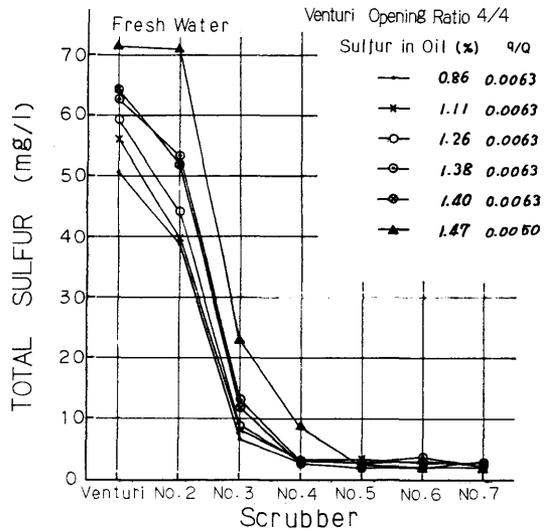


図-4.10 スクラバ段数に対する全硫黄量

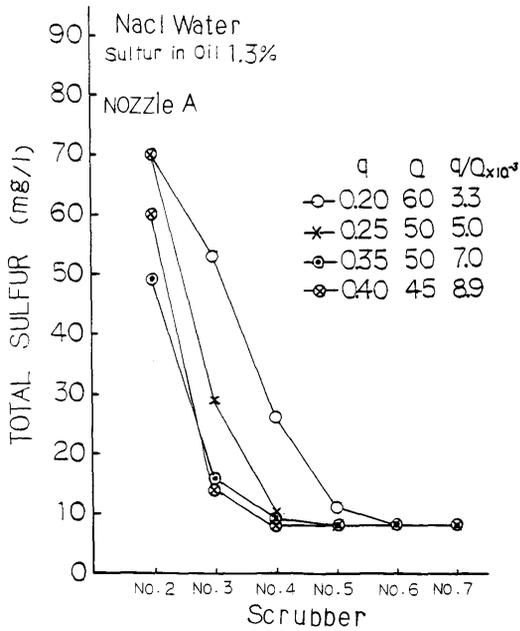


図-4.11(a) スクラバ段数に対する全硫黄量

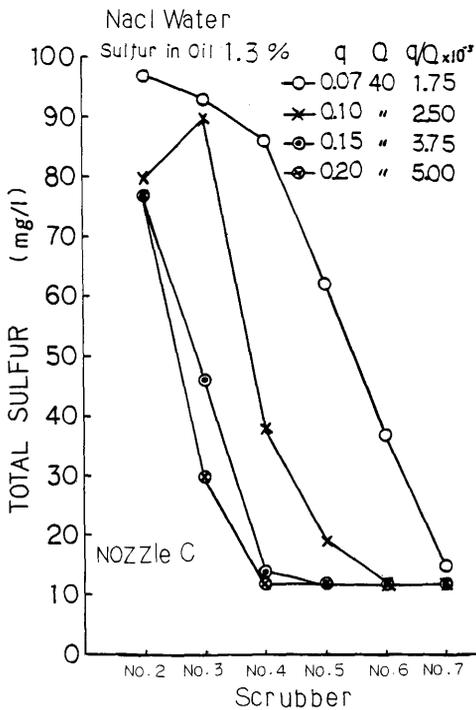


図-4.11(b) スクラバ段数に対する全硫黄量

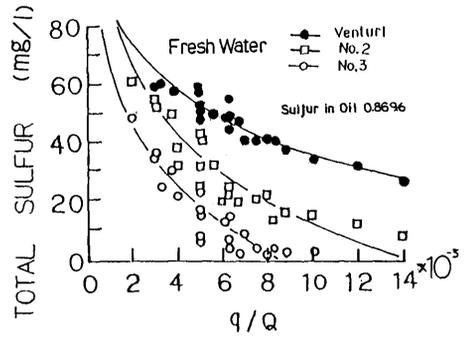


図-4.12(a) 洗浄水量に対する全硫黄量

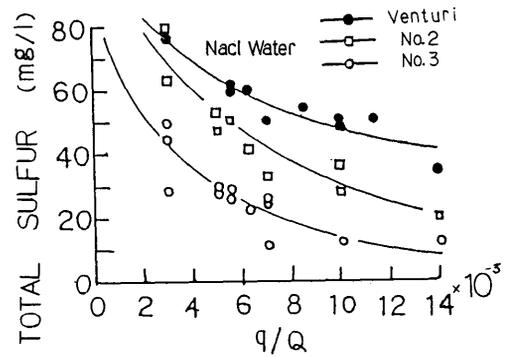


図-4.12(b) 洗浄水量に対する全硫黄量

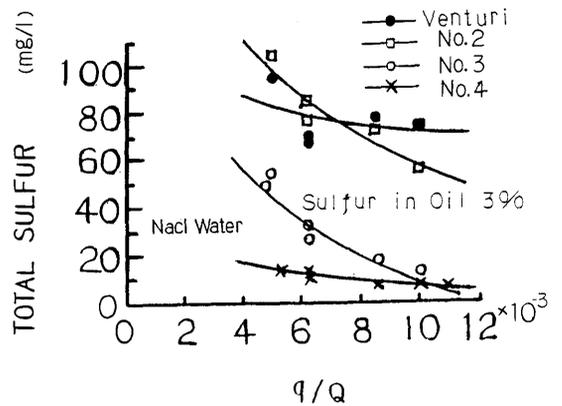


図-4.12(c) 洗浄水量に対する全硫黄量

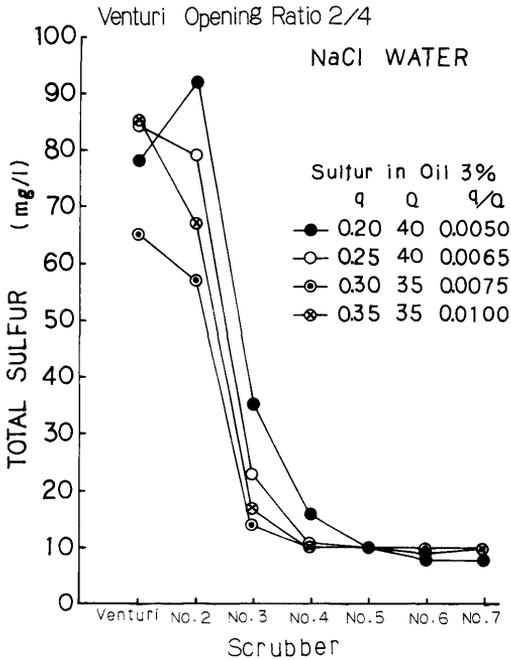


図-4.13(a) スクラバ段数に対する全硫黄量

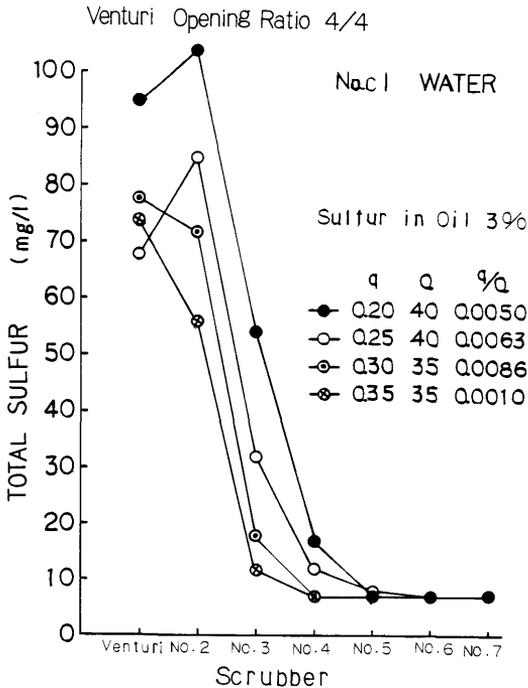


図-4.13(b) スクラバ段数に対する全硫黄量

4.3.3 燃焼排気ガスの脱硫率

燃焼排気ガスが多段のスクラバを通過することによる洗浄効果をスクラバ排水の pH 値、全硫黄分の分析により調べたが、これからはある程度の脱硫率の定性的な傾向を知るのみである。そこでガス中に含まれている SO₂ 濃度から各スクラバの脱硫率を直接求めた。

図4.14(a)(b)には燃料油中の硫黄含有量を変えた時の初段スクラバの入口と出口における SO₂ 濃度を示すが、明らかに燃料油中の硫黄含有量が増加することにより入口の SO₂ 濃度は著しく増加する。スクラバの出口の濃度変化も同様であり、洗浄水量を変えることにより SO₂ 濃度は低下する。しかし入口濃度が変化しても減少値は平均して約150~200 PPM であり変らない。燃焼排気ガス及び各スクラバの出入口における SO₂ 濃度を測定し脱硫率を求めた結果を図4.15(a)(b)に示す。

図から明らかなように、脱硫率はスクラバの段数及び洗浄水量 (q/Q) の増加に伴い増加し、また清水洗浄時に比較して 3% 食塩水による洗浄時の方が脱硫率は高い。

これから、燃料油中の硫黄含有量が A 重油 (0.86%) の場合に、排気ガス中の SO₂ を 100% 脱硫するためのスクラバ段数及び 1 段当りの洗浄水量は、それぞれ 3 段及び 0.5% で十分である。

燃料油中の硫黄含有量 1.3% の実験において初段のベンチュリスクラバを除き、散水塔式スクラバ 6 段の散水ノズルを変えて洗浄を行い、脱硫率を求めた結果を図4.16に示す。

散水塔式スクラバは上下 2 段のスクラバで構成されており、洗浄排水は別々に取り出すことが可能であるが、ガスの検出は出来ない。そのため No 2, 4, 6 スクラバの脱硫率は求めることができず、No 3, 5, 7 にそれぞれ含まれている。

この図から、スクラバの段数に対する脱硫率の傾向は先のベンチュリスクラバを含めた場合とあまり変わらず、この結果は pH 値及び全硫黄分の分析結果と一致する。

これから、ベンチュリ式スクラバを除いた散水塔式スクラバのみによる排気ガス中の SO₂ を 100% 脱硫するために必要なスクラバ段数及び 1 段当りの洗浄水量は、それぞれ 4 段及び 0.5% となる。

図4.17には、燃料油中の硫黄含有量を 3% と図4.17として高濃度 SO₂ ガスを発生させ、ベンチュリスクラバを含めた 7 段のスクラバ洗浄を行い、脱硫率を求め

たものである。これから、排気ガスを100%脱硫するために必要なスクラバ段数と1段当たりの洗浄水量は、それぞれ3段及び0.5%となる。

しかしこの値は、図4.16に示したベンチュリ式スクラバを除いた散水塔式スクラバ6段洗浄によるものに較べて燃料油中の硫黄含有量が増加しているにもかかわらず4段が3段に減少している。これは、先に述べた散水塔式スクラバ6段洗浄の場合(図4.16)は構造上(図4.1参照)の制約があって1段毎のSO₂濃度の測定が不可能であった(2段毎の測定)が、 q/Q の値が0.5における脱硫率は2段目ですでに100%近くに達しており、4段目で脱硫が完了されているとみなされることから、実際には3段目であつた洗浄水量も0.5%以下で十分100%の脱硫率が得られると考える。

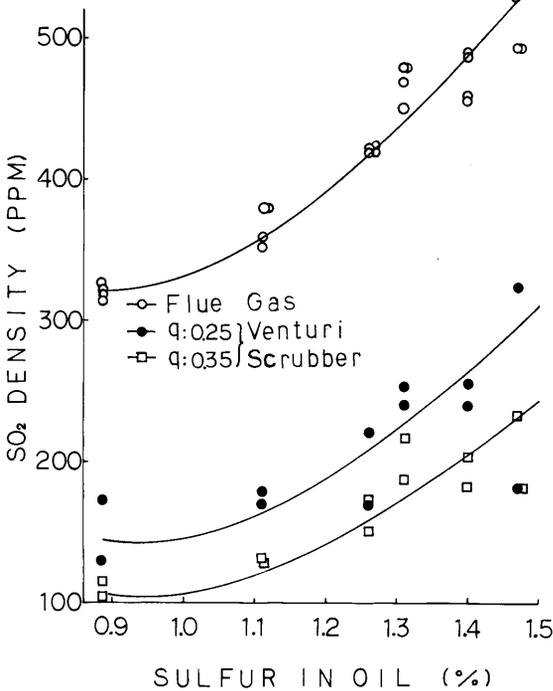


図-4.14(a) 燃料油中の硫黄分と SO₂ 濃度

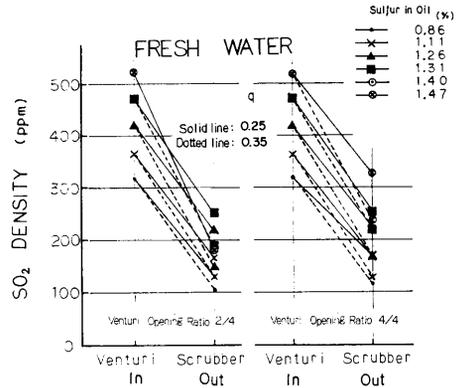


図-4.14(b) 燃料油中の硫黄分と SO₂ 濃度

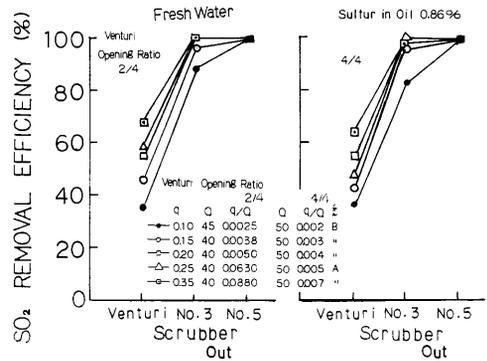


図-4.15(a) スクラバの脱硫率

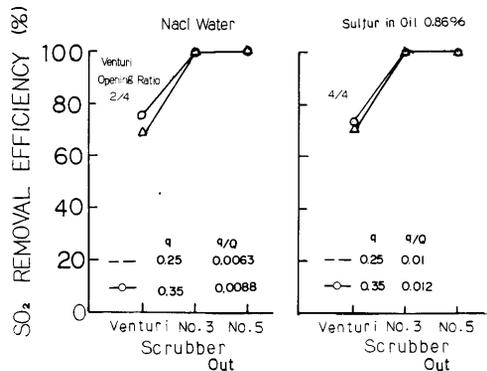


図-4.15(b) スクラバの脱硫率

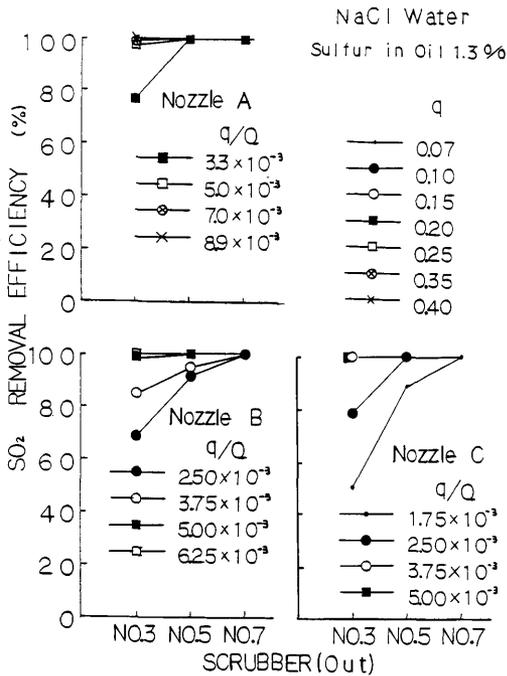


図-4.16 スクラバの脱硫率

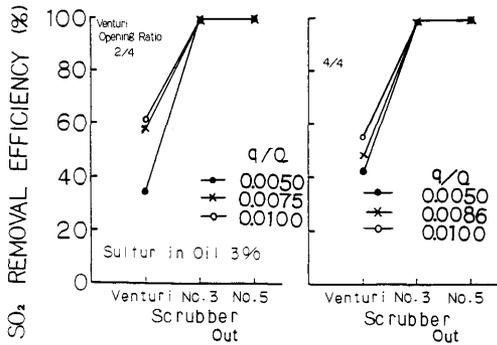


図-4.17 スクラバの脱硫率

4.3.4 散水塔式スクラバの充填材の影響

散水塔式スクラバには一般に充填材(ラシヒリング)を入れられており、その方が洗浄脱硫作用に有効とされている。

今回のスクラバにも写真4.4に示す円筒陶器製の充填材を使用し、その効果を確認するための実験を行った。

実験は、洗浄効果が最も高いと思われる第1散水塔(第2,3スクラバ)にて行い、その結果を図3.20に示した充填材の有無により、スクラバ段数に対する全硫黄分の減少傾向は充填材の無い場合は有る場合に比較してゆるやかになっている。これはスクラバ内での気液の接触状態に差が生じ、そのために吸収溶解度の違いが生じたものと考えられる。

スクラバ内では充填材により気液ともに拡散されより多くの粒子間の接触により吸収が行われ、洗浄効果等を向上させると考えられる。

図4.18に充填材の有無による各スクラバの全硫黄分を示した。

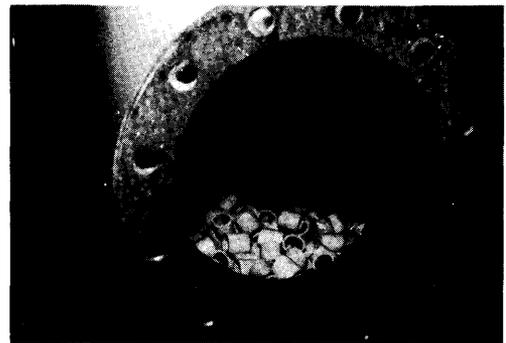


写真-4.4 散水式スクラバの充填材

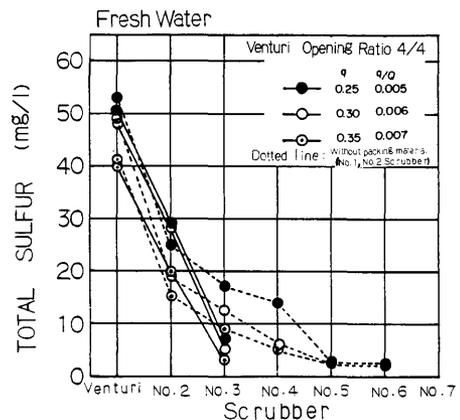


図-4.18 充填材の影響

4.3.5 スクラバの冷却効果

スクラバの洗浄水はほとんどが燃焼排気ガスの吸収、溶解作用に参与するものであって、ガスの冷却作用のためであれば、極めて少量で良いといわれている。しかし SO_2 ガスの水滴への溶解度は温度によってかなり変化すると考えられるため、冷却効果も検討した。

図4.19(a)(b)には清水洗浄時のスクラバ段数に対するガス及び排水の温度を測定した一例を示した。冷却効果は、初段のベンチュリ式スクラバと2段目の散水式スクラバの効果が大きく、かつ洗浄水量による差が認められる。

結局洗浄水量を増せば冷却効果が大きいことから、現在の IGS では多量の海水を洗浄水として使用しているとも推定できる。しかし先にも述べたように港湾内に多量の強酸性排水をたれ流すことは環境保全上好ましくない。従って極力汚染された排水を少なくするためには、多段のスクラバとして前段スクラバの水量を最低限に抑さえ、後段のスクラバ水量を大量として冷却能力を保持し、かつ脱硫率を100%近づける方法がよいと考えられる。

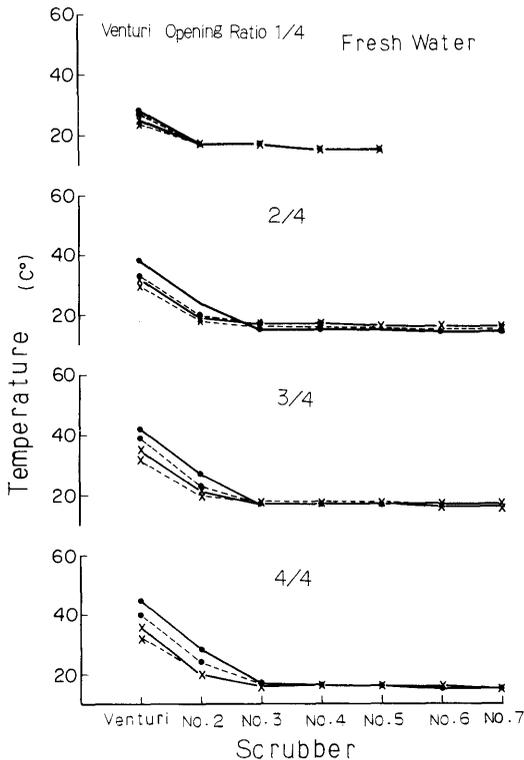


図-4.19(a) 排気ガス温度

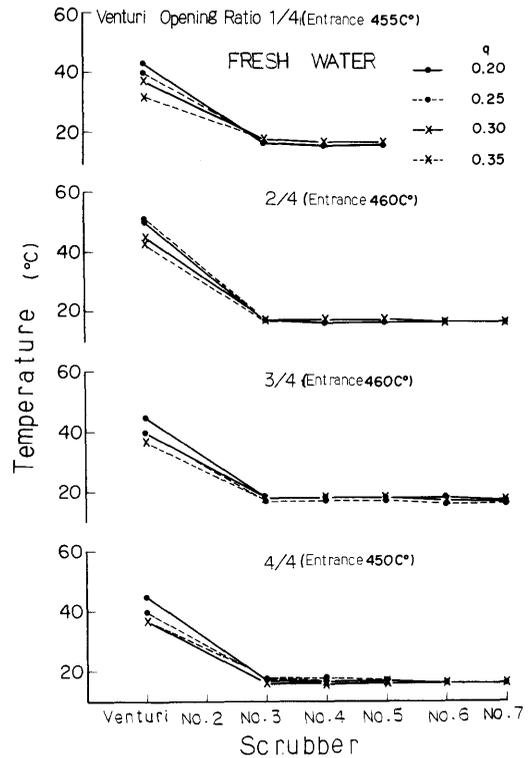


図-4.19(b) 排水温度

5. 結 言

IGS の排水について実態調査を行うとともに、スクラバの洗浄機構についてベンチュリ式、散水塔式各スクラバを含めたモデルプラントを用いて実験を行った。

海洋環境の保全に役立つものとしてタンカーに義務づけられている原油洗浄と IGS とは切り離すことができないものであり、そのため IGS は急速に普及している。本研究は汚染の未然防止という見知から検討を加え、さらに適切なシステムのあり方を追求し、その指針が得られた。

本研究によって得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 実態調査の結果から、pH 2~3 と強い酸性をもつ IGS よりの排水は、海中に放出されると急速に稀釈、拡散する。そしてたちまちもとの海水の水質に同質化し、港湾海水に対しては何の影響も与えていない。

- 2) スクラバによる排気ガスの洗浄効果及び脱硫効果は、清水洗浄に比較して3%食塩水による洗浄の方が常に高い。
- 3) 散水式スクラバについては、内部に充填物を入れた方が洗浄効果が高い。これは燃焼排気ガスと洗浄水適との接触面積が増加するために気液接触反応が効果的に行われるためと思われる。
- 4) 多段式スクラバを用いた実験により、燃焼排気ガスを完全に洗浄、脱硫するためのスクラバ段数及び1段当りのガス量に対する洗浄水量を推定することができた。その結果、実機に使用されているC重油燃料の場合、4段のスクラバ及びガス量の0.7%の洗浄水量があれば十分に脱硫される。しかし強い酸性排水はせいぜい2段目スクラバまでであり、これの水量はガス量の0.5%程度に低減しうる。このような方法により、現用のIGSの汚染排水量を $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{3}$ に低減することができる。
- 5) 多段スクラバ洗浄方式により、前段スクラバで少量の著しい汚染排水を、後段スクラバでは脱硫率を上げるための多量のほとんど汚染していない排水を得ることが可能であることが本実験で明らかとなった。この方式は、現在の単一スクラバ大量洗浄方式よりも汚染排水量の低減化に有効と考えられる。
- 6) 汚染排水が少量となれば、その処理方法として、例えば船内の空タンク等にバラストとして積載し沿岸を遠く離れた外洋で排出するか、陸上で処理する等が考えられる。

本研究では汚染排水の船内処理方法の開発に迄致らなかったが、汚染排水量を少なくする事により現実的な可能性が期待できる。

本報告は昭和55～57年度に実施された公害防止試験

研究の一部であり、実態調査に協力を与えて下さった船主、並びに調査に参加された金湖富士夫、宮田修両技官に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) イナートガス装置設計指針 日本造船学会造船設計委員会第2分科会編 海文堂
- 2) Inert Gas System for Oil Tankers (Proi, No.4), Contaminated Water Discharge from Inert Gas Scrubbers, R.H.Eriksen, Det Norske Veritas, Mar, 1976
- 3) 仮えば東京都内港プランクトン調査結果 東京都公害局水質保全部水質監視課 55年3月
公共用水域水質測定結果 神奈川県、横浜市、川崎市、横須賀市、藤沢市、相模原市、茨城市、55年3月等
- 4) スポルディング、物質移動論、産業図書
- 5) 気泡・滴液工学、化学協会、日刊工業新聞社
- 6) 鈴木、充填層の伝熱、化学工学、37—1 (1973)
- 7) 大竹他、気・液反応装置の設計、化学工学、36—5 (1972)
- 8) 橋本他、気液および気液固反応装置、化学工学、36—7 (1972)
- 9) 佐藤他、多段気液反応装置の動特性、化学工学、36—9 (1972)
- 10) 翁長一彦他3名、イナートガス装置のスクラバ排水について、日本船用機関学会誌、第18巻第3号、(1983)、PP. 58～65
- 11) 藤井忍・翁長一彦、イナートガス装置のスクラバ排水について (第2報)、日本船用機関学会誌、第19巻第4号、(1984)、PP. 41～49