

中型船における CO2 回収装置設置の試設計に関する調査  
報告書

2023 年 3 月

# 「中型船における CO2 回収装置設置の試設計に関する調査」

## 目次

1. 本調査の目的	2
2. 本調査の調査対象	2
3. 船舶に搭載する CO2 回収装置 に関する仕様及び要目表	3
4. 調査対象船舶の一般配置図	6
5. 配管系統図	14
6. 復原性に関する資料	16
7. まとめ	18

## 1. 本調査の目的

2050年カーボンニュートラルに向けた地球温暖化対策の強化に伴い、内航海運業界においても2050年カーボンニュートラルへの対応が求められており、昨年度、国交省において内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会が開催され、その方向性が示されている。当該検討会において、内航海運業界の対応は、水素、アンモニア、LNG等といった代替燃料、省エネ機器等を組み合わせた連携型省エネ船の開発等が掲げられている。代替燃料は、機関部のプラントを抜本的に変更するため、船員の再教育、燃料タンクの大形化、燃料供給体制の構築等といった課題があり、また、連携型省エネ船は、省エネ機器を組み合わせてもGHG削減率に限界がある等といった課題がある。

一方、陸上の清掃工場やセメント製造工場等において、排気ガス中のCO2を回収するための装置（以下、「CO2回収装置」）を設置し、回収したCO2を再利用するといった事例があることから、船舶においても、昨年度、外航船にCO2回収装置を設置した実証試験が実施されており、回収したCO2濃度等に関して良好な結果を得ている。CO2回収装置は、排気ガス系統に追加を要するものの、現状の機関部のプラントを変更する必要がないため、内航船におけるカーボンニュートラルに向けた有望な技術の一つであると考えられる。

そこで、中型船にCO2回収装置を設置するとした場合の試設計を行い、CO2回収率、機関部のプラント周りの変更点、復原性能等の航行に必要な諸性能、技術的課題を調査し、CO2回収の設置の可能性を調査する。

## 2. 本調査の調査対象

CO2回収装置（アミン吸収液を利用した化学吸収法）を念頭に置いた、モデル船の復原性等に問題が出ない設置量（船側のキャパシティ）の検討を行う。

本調査の調査対象船舶は、旅客船1隻、貨物船1隻とする。就航船に対応するべく貨物などへの影響を少なくできるよう配置を行う。また、搭載前後比較として船の構造・強度、船速を同等とするため、構造喫水の変更は行わず、軽荷重量の増加分は載荷重量の減少にて対応する。

### 3. 船舶に搭載する CO2 回収装置 に関する仕様及び要目表

本船に搭載する CO2 回収装置はアミン吸収液を利用した化学吸収法を用いた CO2 分離回収技術である。吸収塔内にて CO2 を含有する排ガスとアミン吸収液を向流接触させることで、ガス中の CO2 が選択的にアミン吸収液に吸収される。CO2 を吸収したアミン吸収液はその後、再生塔へと移送される。再生塔で加熱し、アミン溶液と CO2 を分離、回収する。

#### (1) CO2 回収装置ユニット

表 1 CO2 回収装置ユニット要目

	単位	1 ユニットあたり
CO2 回収量	kg/日	300
排ガス流量	m3/h	100
CO2 回収率	%	70
消費電力	kW	15(※)
サイズ	mm	2200 x 2200 x 2800
重量	kg	3500

※ 再生塔の加熱は排ガスエコノマイザーで回収した熱エネルギーを利用することとし、電気ヒータは装備しない

ユニットの構成図を図 1 に示す。

概略システム図を図 2 に示す。

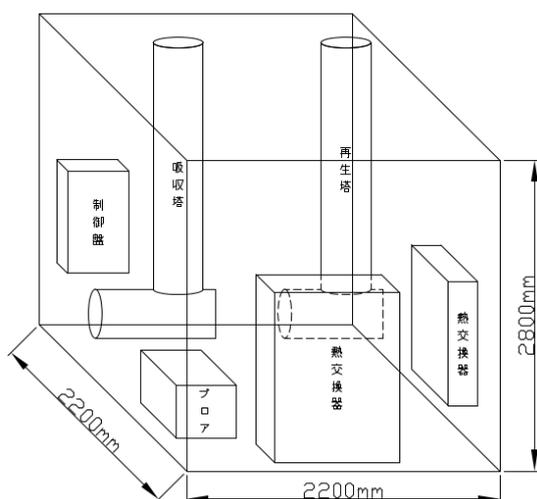


図 1 CO2 回収装置ユニット構成図

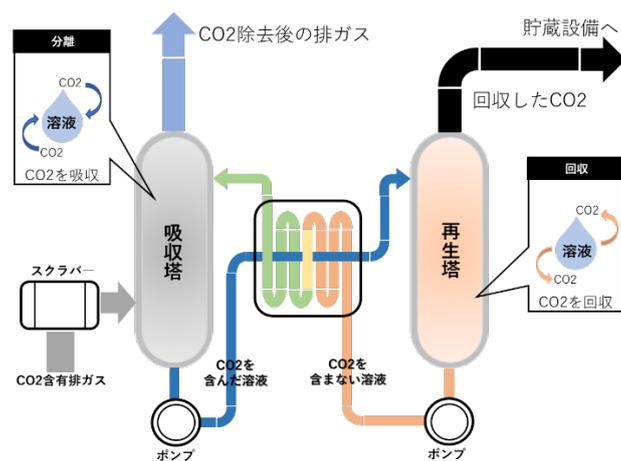


図 2 概略システム図

(2) SO<sub>x</sub> スクラバー

排ガス洗浄および冷却を兼ねて前処理設備として SO<sub>x</sub> スクラバーを装備する。

概略外形図を図 3 に示す。

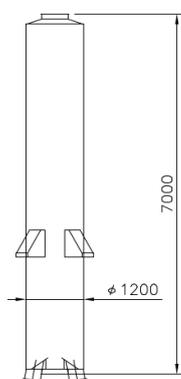


表 2 SO<sub>x</sub> スクラバー要目

	単位	1 基あたり
消費電力	kW	45
サイズ	mm	φ 1200 x 7000
重量	kg	4500

図 3 概略外形図

(3) CO<sub>2</sub> 貯蔵設備

回収した CO<sub>2</sub> を圧縮、冷却を行いタンクに貯蔵する。概略図を図 4 に示す。

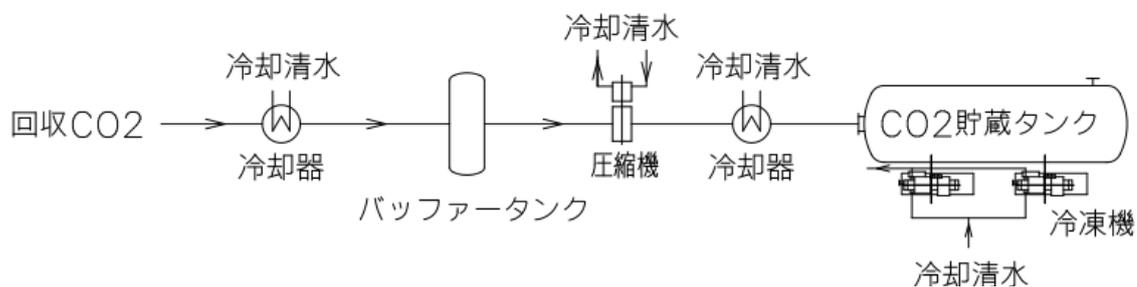


図 4 CO<sub>2</sub> 貯蔵設備概略図

表 3 CO<sub>2</sub> 貯蔵タンク要目

	単位	1 基あたり
貯蔵容量	kg	3000
圧力	MPa	2.1
温度	℃	約 -20
消費電力	kW	16
サイズ	mm	φ 1200 x 4000
重量	kg	6000

#### (4) 陸揚げ方法

貯蔵した CO2 は港側の設備が不要でどこでも陸揚げが可能な低温液化ガスローリー車に陸揚げする。

ローリー車と船上の CO2 貯蔵タンクの高低差を利用し移送する。

イメージ図を図 5 に示す。

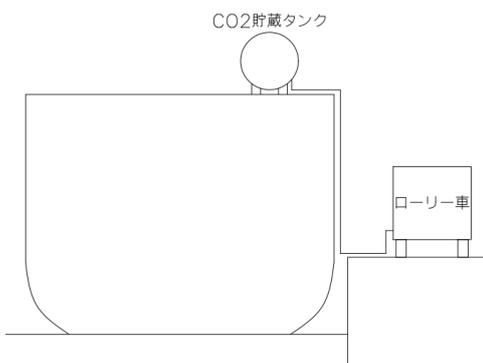


図 5 CO2 陸揚げイメージ図



表 4 低温液化ガスローリー車要目

	単位	ローリー車
貯蔵容量	kg	約 9000
サイズ	m	長さ 10 x 高さ 2.9

また、港に入港および陸揚げの際には港則法第四章ならびに危険物船舶運送及び貯蔵規則第五条の四に注意を払う必要がある。港の許可が必要となるが、CO2 は非引火性非毒性高圧ガスに分類され、他の危険物と比較し規制は緩やかである。

4. 調査対象船舶の一般配置図

就航船に対応するべく甲板上の空スペースを活用し、機関室配置、貨物への影響を少なくできるように CO2 回収装置の配置を行う。また、搭載前後比較として船の構造・強度、船速を同等とするため、構造喫水の変更は行わず、軽荷重量の増加分は載荷重量の減少にて対応する。

(1) 旅客船

表 5 旅客船要目

	単位	旅客船
全長 x 幅 x 深さ x 構造喫水	m	120 x 16 x 10.6 x 4.6
総トン数	トン	2720
定員	名	600
最大搭載車両重量	ton	706 (8 tトラック 38 台、乗用車 28 台)
主機関出力	kW	3300 x 2 基
通常航海中消費電力	kW	500
CO2 排出量(※)	kg/日	95696

※ CO2 排出量 = (主機関からの CO2) + (補助機関からの CO2)

$$\begin{aligned}
 &= (\text{CF} \times \text{主機常用出力} \times \text{燃料消費率}) + (\text{CF} \times \text{通常航海中消費電力} \times \text{燃料消費率}) \\
 &= 3.206 \times 3300 \text{ kW} \times 0.85 \times 2 \text{ 台} \times 201 \text{ g/kWh} + 3.206 \times (500/0.93) \text{ kW} \times 215 \text{ g/kWh} \\
 &= 95696 \text{ kg/日}
 \end{aligned}$$

CF : 二酸化炭素排出係数 (3.206 at A 重油)

CO2 回収装置を搭載する前の一般配置図を図 6、3D イメージ図を図 7 に示す。

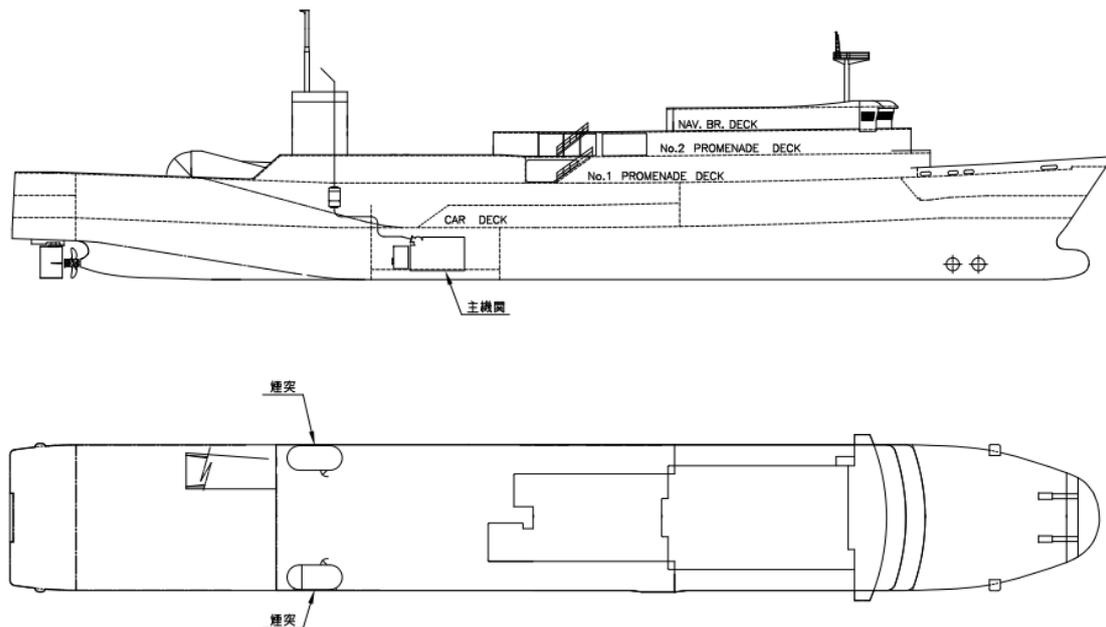


図 6 一般配置図 (旅客船)



図 7 3D イメージ図 (旅客船)

C02 回収装置を搭載した場合の一般配置図を図 8、3D イメージ図を図 9 に示す。

エンジンケーシング内に SOx スクラバー x 2 基を装備する。

C02 回収装置の搭載面積を設けるため、層内ランプ配置に影響が出ない範囲で No. 2 PROM. DECK を拡張した。従来の暴露部と拡張した DECK に C02 回収装置を設置する。機器（電気品含む）の保護のため区画を新設し、内部に C02 回収装置ユニットを 10 基、貯蔵設備を装備する。

機関室内には SOx スクラバー海水ポンプおよびシーチェストを装備する。

表 6 C02 回収装置ユニット装備による変更点

	単位	C02 回収装置ユニット装備
総トン数	トン	2830
最大搭載車両重量	ton	578 (8 tトラック 38 台、乗用車 28 台)
通常航海中消費電力	kW	756
C02 排出量(※)	kg/日	100212

※ C02 排出量 = (主機関からの C02) + (補助機関からの C02)

= (CF x 主機常用出力 x 燃料消費率) + (CF x 通常航海中消費電力 x 燃料消費率)

= 3.206 x 3300 kW x 0.85 x 2 台 x 201 g/kWh + 3.206 x (756/0.93) kW x 215 g/kWh

= 100212 kg/日

CF : 二酸化炭素排出係数 (3.206 at A 重油)

C02 回収装置関連機器の消費電力増加に対する C02 排出量は 4515 kg/日である。C02 回収量 3000kg/日に対し、排出量が逆転する結果となった。

排ガス洗浄、冷却など C02 回収装置関連機器の簡略化などによる消費電力の低減また C02 回収能力の向上が今後の課題として考えられる。

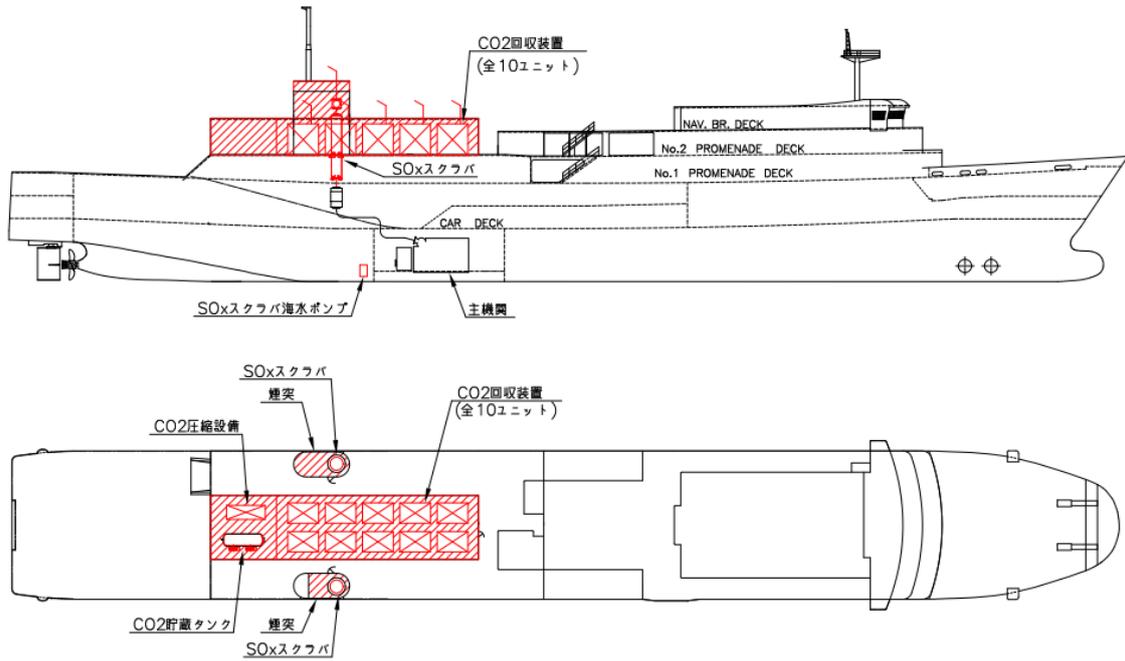


図 8 一般配置図 (旅客船、CO2 回収装置装備)



図 9 3D イメージ図 (旅客船、CO2 回収装置装備)

(2) 貨物船 (7,000 kL Tanker)

表 7 貨物船要目

	単位	貨物船
全長 x 幅 x 深さ x 構造喫水	m	110 x 18 x 8.6 x 5.95
総トン数	トン	4250
定員	名	18
載貨重量	ton	6000
主機関出力	kW	2200 x 1 基
通常航海中消費電力	kW	180
CO2 排出量(※)	kg/日	29900

※ CO2 排出量 = (主機関からの CO2) + (補助機関からの CO2)

$$= (CF \times \text{主機常用出力} \times \text{燃料消費率}) + (CF \times \text{通常航海中消費電力} \times \text{燃料消費率})$$

$$= 3.206 \times 2200 \text{ kW} \times 0.85 \times 184 \text{ g/kWh} + 3.206 \times (180/0.93) \text{ kW} \times 230 \text{ g/kWh}$$

$$\approx 29900 \text{ kg/日}$$

CF : 二酸化炭素排出係数 (3.206 at A 重油)

CO2 回収装置を搭載する前の一般配置図を図 10、3D イメージ図を図 11 に示す。

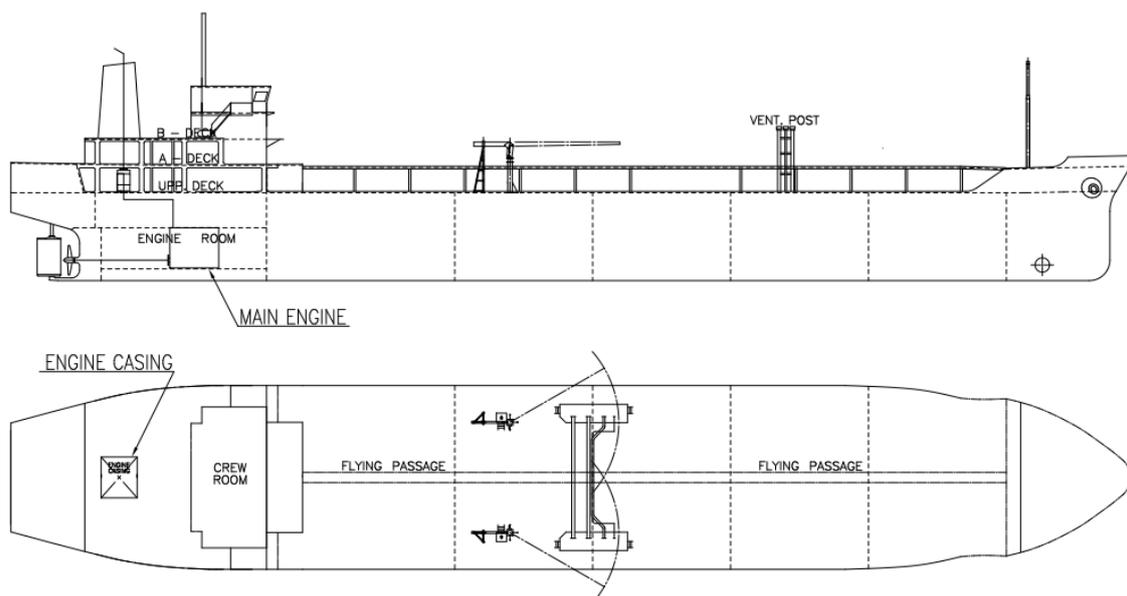


図 10 一般配置図 (貨物船)



図 11 3D イメージ図 (貨物船)

C02 回収装置を搭載した場合の一般配置図を図 12、3D イメージ図を図 13 に示す。

エンジンケーシング内に SOx スクラバー x 1 基を装備する。

C02 回収装置の搭載面積を設けるため B DECK を拡張した。従来の暴露部と拡張した DECK に C02 回収装置を設置する。機器（電気品含む）の保護のため区画を新設し、内部に C02 回収装置ユニットを 3 基、貯蔵設備を装備する。

機関室内には SOx スクラバー海水ポンプおよびシーチェストを装備する。

表 8 C02 回収装置ユニット装備による変更点

	単位	C02 回収装置ユニット装備
総トン数	トン	4410
載貨重量	ton	5920
通常航海中消費電力	kW	296
C02 排出量(※)	kg/日	31041

※ C02 排出量 = (主機関からの C02) + (補助機関からの C02)

= (CF x 主機常用出力 x 燃料消費率) + (CF x 通常航海中消費電力 x 燃料消費率)

= 3.206 x 2200 kW x 0.85 x 184 g/kWh + 3.206 x (296/0.93) kW x 230 g/kWh

= 31041 kg/日

CF : 二酸化炭素排出係数 (3.206 at A 重油)

C02 回収装置関連機器の消費電力増加に対する C02 排出量は 1141 kg/日である。C02 回収量 900kg/日に対し、排出量が逆転する結果となった。

排ガス洗浄、冷却など C02 回収装置関連機器の簡略化などによる消費電力の低減また C02 回収能力の向上が今後の課題として考えられる。

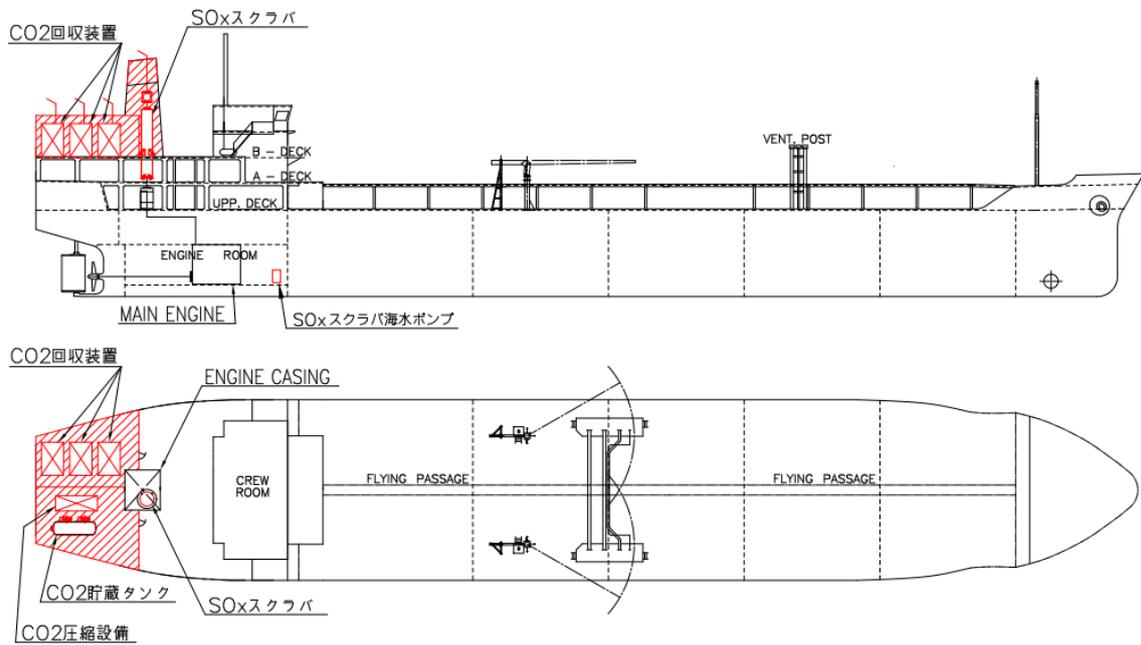


図 12 一般配置図（貨物船、CO2 回収装置装備）



図 13 3D イメージ図（貨物船、CO2 回収装置装備）

5. 配管系統図

(1) 旅客船

CO2 回収装置を搭載した系統図を図 14 に示す。追加、変更箇所を赤字部とする。

排ガスエコノマイザー後流部に CO2 回収装置を設ける。

SOx スクラバーにて洗浄、冷却処理した排ガスを切替えダンパーにて分岐供給した排ガスを回収装置ユニットに導設する。

回収した CO2 は冷却、圧縮を行い CO2 貯蔵タンクに貯蔵行う。

SOx スクラバーに必要な海水は機関室に海水ポンプ、シーチェストを装備し供給することとする。各機器に必要な冷却清水は機関室の既存の冷却清水系統より分岐供給する。

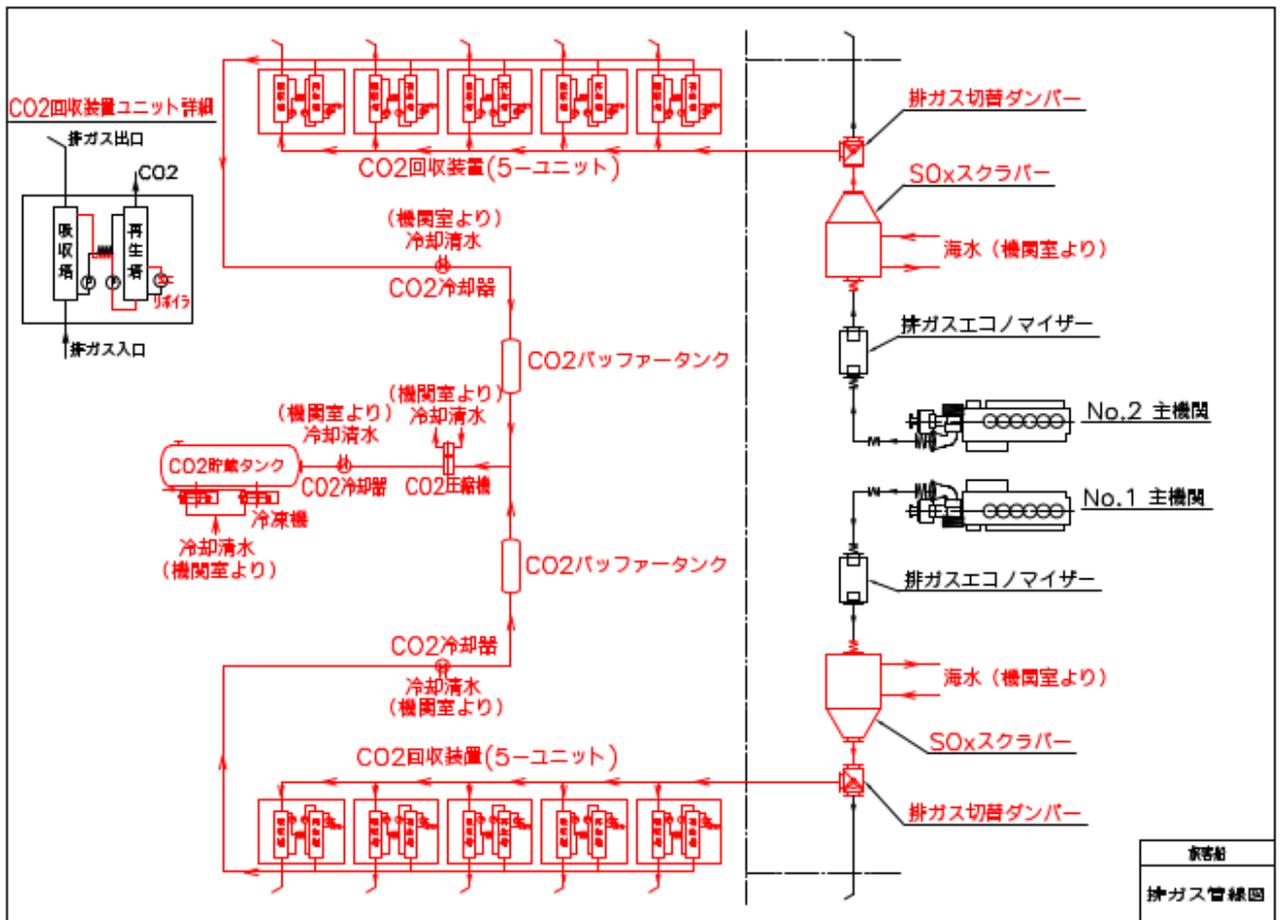


図 14 系統図 (旅客船)

(2) 貨物船 (7,000 kL Tanker)

CO2 回収装置を搭載した系統図を図 15 に示す。追加、変更箇所を赤字部とする。

排ガスエコノマイザー後流部に CO2 回収装置を設ける。

SOx スクラバーにて洗浄、冷却処理した排ガスを切替えダンパーにて分岐供給した排ガスを回収装置ユニットに導設する。

回収した CO2 は冷却、圧縮を行い CO2 貯蔵タンクに貯蔵行う。

SOx スクラバーに必要な海水は機関室に海水ポンプ、シーチェストを装備し供給することとする。各機器に必要な冷却清水は機関室の既存の冷却清水系統より分岐供給する。

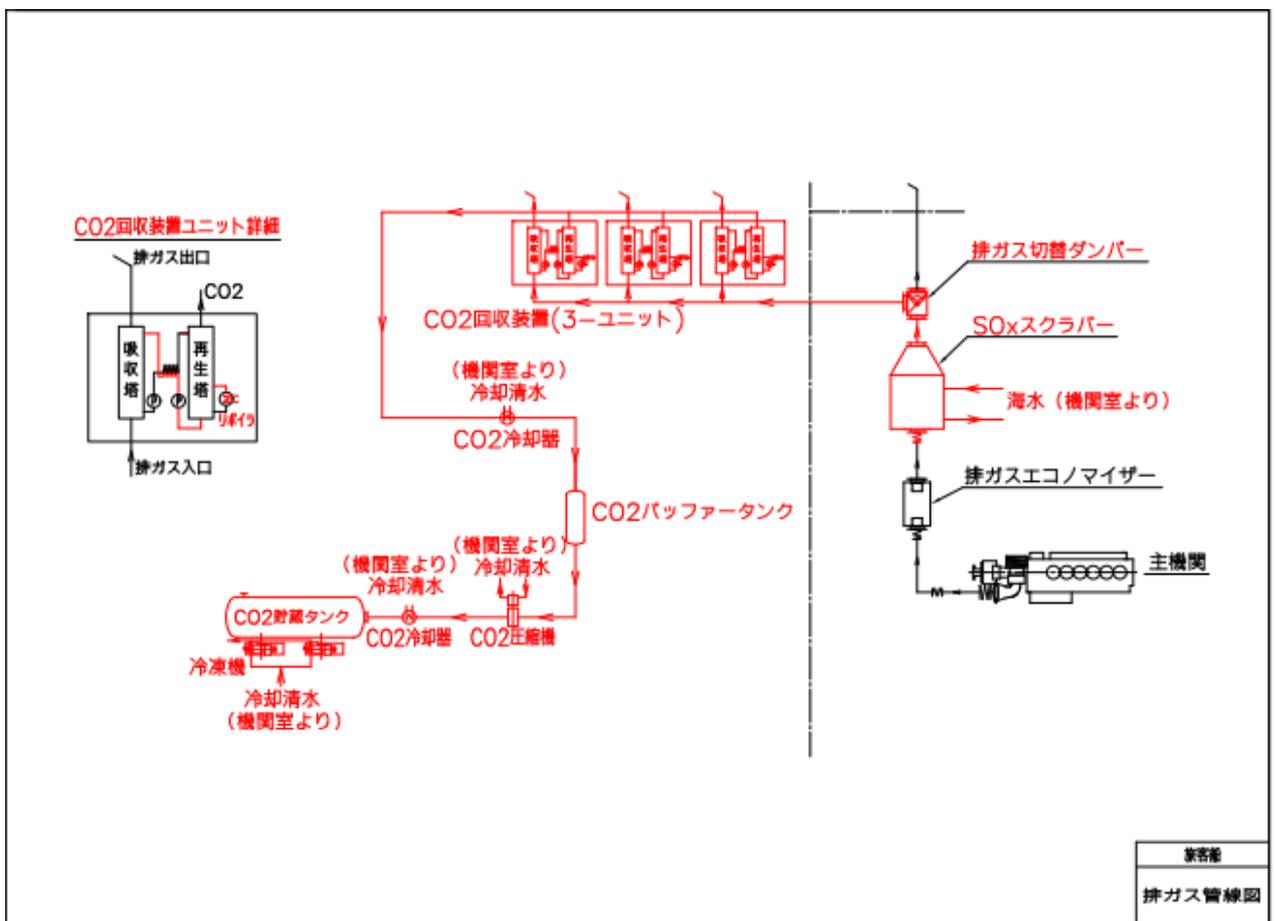


図 15 系統図 (貨物船)

## 6. 復原性に関する資料

### (1) 旅客船

#### 1) トリム計算概要

本計算については、CO2 回収装置搭載前にて最も復原性能の厳しい「満載入港状態 全旅客最上層甲板集合状態」にて搭載前後の評価を行う。

最も厳しい状態の選定については、別添-1 の 1 ページ、総括表より行うが、復原性基準はどのケースにおいても十分に満足しており、本計算上厳しくなるのは損傷時復原規則である為、GoM で選定を行った。

また、トリム計算を行う際には、下記条件のもと計算を行う。

- ①船の構造・強度、船速を同等とするため、構造喫水の変更は行わず、CO2回収装置搭載における、軽荷重量の増加分は載荷重量の減少にて対応する。
- ②載荷重量の変更の際は、航続距離は同等、客室や車両搭載可能箇所に変更がないため旅客人数や車両台数は変更を行わず、車両の単重にて調整を行う。

#### 2) トリム計算 及び 復原性

「満載入港状態 全旅客最上層甲板集合状態」については、消費物件は 90%消費として F.O. 及び D.O.、F.W. は 10%積付、トラック及び乗用車は満載、旅客は最上層に集合した状態である。CO2 回収装置搭載後においては、搭載前とトリムや GoM が同等になるよう調整を行う。また、CO2 回収装置については、別添-1 の 4 ページにて軽荷重量の変化として評価を行う。

別添-1 の 2 ページ、CO2 回収装置搭載前のトリム計算において、GoM は 1.94 m である。別添-1 の 5 ページ、CO2 回収装置搭載後のトリム計算における GoM は 1.74 m となっており、GoM が 0.20 m 悪化する結果となった。

本船は前述の通り、損傷時復原が厳しい船となっており損傷時復原性を満足するためには、別添-1 の 6 ページに示す許容 GoM 曲線の右側に各コンディションがプロットされる必要がある。本図において、CO2 回収装置搭載後においても、許容 GoM 曲線を満足するため、搭載後についても問題ない復原性を有する。

しかしながら、CO2 回収装置搭載における関連重量分である約 128 t 分の重量分、貨物重量 (TRUCK 及び CAR) が減少することとなった。

## (2) 貨物船 (7000 kL Tanker)

### 1) トリム計算概要

本計算については、CO2 回収装置搭載前にて最も復原性能の厳しい「WORST STABILITY CONDITION」にて搭載前後の評価を行う。

最も厳しい状態の選定については、別添-2 の 1~2 ページ、SUMMARY TABLE より行い、復原性を満足するためには、別添-2 の 7 ページに示す、REQUIRED GoM CURVE の SUFFICIENT STABILITY 側にある必要があるが、この図にて最も厳しいケースが「WORST STABILITY CONDITION」であることが確認できる。

また、トリム計算を行う際には、下記条件のもと計算を行う。

- ①船の構造・強度、船速を同等とするため、構造喫水の変更は行わず、CO2 回収装置搭載における、軽荷重量の増加分は載荷重量の減少にて対応する。
- ②載荷重量の変更の際は、航続距離は同等とし、CARGO OIL の重量にて調整を行う。

### 2) トリム計算 及び 復原性

「WORST STABILITY CONDITION」については、消費物件及び貨物は満載にした状態で、各バラスタンクの積載を 1%とし、各バラスタンクの自由表面影響を最大で評価した積付である。CO2 回収装置搭載後においては、搭載前とトリムや GoM が同等になるよう調整を行う。また、CO2 回収装置については、別添-2 の 5 ページにて軽荷重量の変化として評価を行う。

別添-2 の 3 ページより CO2 回収装置搭載前のトリム計算において、GoM は 0.66 m である。

この状態において、CO2 回収装置搭載を行うと GoM が 0.1 m 悪化し、別添-2 の 7 ページに示す許容 GoM 曲線にて確認できる通り復原性を満足することはできない。

対策として、GoM に悪影響を与えている液体の自由表面影響を少なくする為、No. 2 及び 3 W. B. T を P/S/C の 3 タンクに分割し対策を行う。この対策により、該当タンクの自由表面による慣性モーメントは、合計 3,090m<sup>4</sup> から 1,500m<sup>4</sup> と減らすことができる。

また、貨物はトリムを考慮し可能な限り船尾側から減らすが、No. 5 C. O. T. は SLOP T. も兼用しているため、No. 4 C. O. T. の積載量を減らす。

上記対策の結果、別添-2 の 7 ページに示す通り、CO2 回収装置搭載後のトリム計算における GoM は 0.76 m となり、搭載前と同等以上の GoM が得られる為、復原性能を満足する。

しかしながら、CO2 回収装置搭載における関連重量分である約 80 t 分の重量分、貨物重量 (No. 4C. O. T への積載) が減少することとなった。

## 7. まとめ

C02 回収装置の設置について、排気ガス系統に装備を要する事から船体の上層部への装備を行う必要があった。貨物スペースへの影響を抑えるべく検討したこともあり、甲板上の空スペースを利用した。設置スペース、復原性能への影響を考慮し C02 回収装置を分割配置（旅客船 10 ユニット、貨物船 3 ユニット）とした。

C02 回収装置の前処理装置として SOx スクラバーを装備するため、機関室内に海水ポンプおよびシーチェストの追加を行った。各機器の冷却清水は既存冷却清水系統からの分岐供給とした。

C02 回収装置関連による重量重心変化は高所に積載するため影響はあり、復原性は悪くなる。旅客船に関しては、規則満足値から GoM にて約 0.25m 裕度があり、C02 回収装置搭載による影響は GoM にて 0.20m 低下となっており、裕度内の変化であるため、復原性については問題ない結果となった。一方で、貨物船では WORST STABILITY CONDITION にて、裕度がなく、対策前で GoM が 0.1m 低下し復原性を満足することができないが、本コンディションにて GoM に影響の大きい自由表面影響に対して、W. B. T. のタンク分割数を増やすことで自由表面影響を低下させて、復原性を満足させる対策とした。

また、搭載前後比較として船の構造・強度、船速を同等とするため、構造喫水の変更は行わず、軽荷重量の増加分は載荷重量の減少にて対応しているため、旅客船については 128t 分トラック及び乗用車の重量が減少、貨物船については 80t 分 CARGO TANK への積載量が減少する。

今回の検証では C02 回収装置関連機器の消費電力増加に対する C02 排出量が C02 回収量よりも増えてしまう結果となった。今後の課題として、排ガス洗浄、冷却など C02 回収装置関連機器の簡略化、回収装置の能力向上による消費電力の低減を行う必要がある。また、C02 回収量に対する軽荷重量の増加（載荷重量の減少）分についても C02 回収装置の採否の判断基準となる。

表 9 総括表

	C02 回収量 (kg/日)	消費電力 変化 (kW)	総トン数 変化 (トン)	載荷重量 変化 (ton)	GoM 変化 (m)	復原性能
旅客船	3000	+256	+210	-128	-0.2	満足
貨物船	900	+116	+160	-80	-0.1	不満足
					※+0.1	※満足

※GOM 改善対策として、バラスタンクの分割を行う