

船上CO₂回収貯蔵装置ガイドライン及びその最新改訂の概要

若生 拓也*, 宋 玉中*, 服部 俊介**, 福士 容平***

1. はじめに

世界的に気候変動への危機意識が高まる中、国際海事機関（IMO：International Maritime Organization）は2023年にGHG削減戦略を採択した。これにより、2050年頃までに国際海運のGHG排出量をネットゼロとすることが明確な目標として定められた。これを受け、アンモニアや水素といったカーボンフリー燃料に加え、合成燃料（e-fuel）やバイオ燃料などのカーボンニュートラル燃料の導入を主軸とする多様な技術開発や施策が進められている。しかしながら、これらの新燃料の導入のみに依存する場合、2050年頃までにネットゼロを達成することは、時間的制約の観点から極めて困難であると指摘されている。一方、国際的な気候目標の達成に関しては国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）もまた、CCUS（Carbon Capture Utilization and Storage）なしでは目標の達成は実質的に不可能であるとの見解を示している¹⁾。このため、海運分野においても、供給が安定している既存の重油やLNGなどの燃料を利用しつつ、船上でのCO₂回収・貯蔵を実施することにより排出削減を図ろうとする機運が、近年高まりつつある。

2021年には、一般財団法人日本海事協会、川崎汽船株式会社（以下、川崎汽船）、三菱造船株式会社（以下、三菱造船）の三者による共同プロジェクト“CC-OCEAN”²⁾において、洋上で船舶の排ガスからアミン吸収液を用いた化学吸収法でCO₂を回収する実証試験が実施され、世界で初めて船上でのCO₂の回収に成功した。この成果を契機として、海運業界では船上CO₂回収貯蔵装置の導入に対する関心が急速に高まり、現在では多様なCO₂回収貯蔵装置を搭載した船舶が登場している。2025年8月時点のClarksons Researchデータに基づき、世界のCO₂回収貯蔵装置の搭載隻数を図1に、レトロフィットによるCO₂回収貯蔵装置搭載船の推移を図2に示す。CO₂回収貯蔵装置の搭載については、現時点ではレトロフィット船が大半を占めていることがわかる。一方、近年では新造契約時点での搭載を検討するケースも増えており、今後は新造船への搭載事例も増加していくと考えられる。

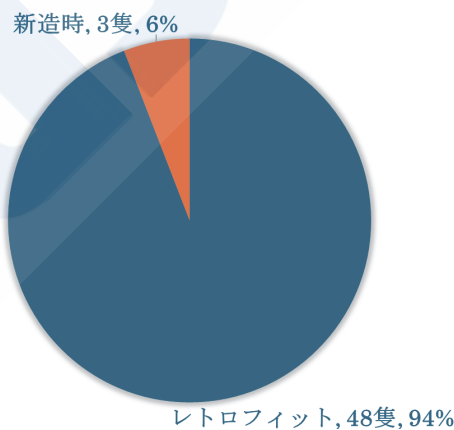


図1 世界のCO₂回収貯蔵装置の搭載隻数（Clarksons Researchデータに基づく）

* 開発本部 技術研究所

** 技術本部 機関部

*** 技術本部 技術部

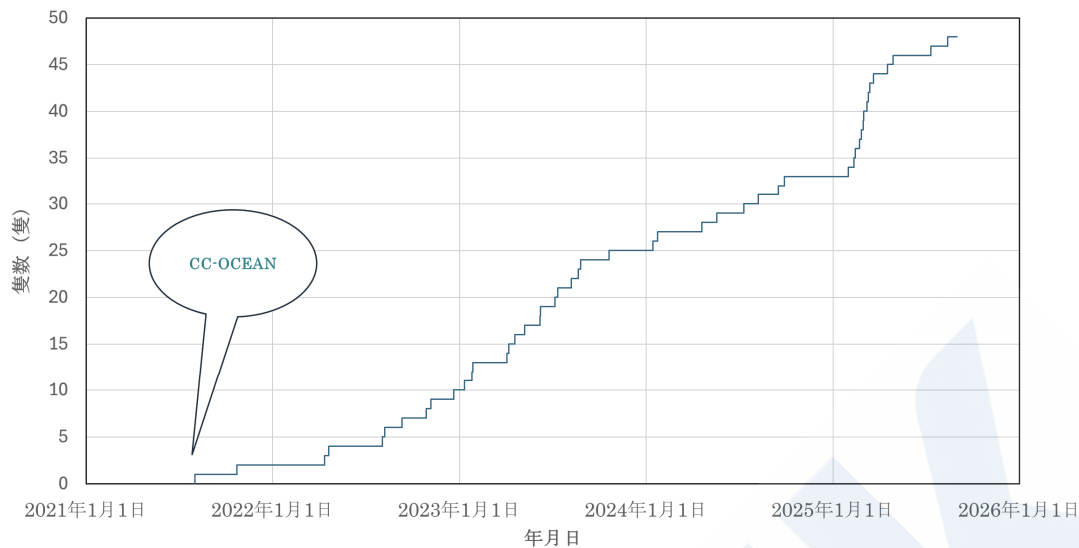


図2 レトロフィットによるCO₂回収貯蔵装置搭載船の推移 (Clarksons Researchデータに基づく)

また、CO₂回収貯蔵装置搭載船について、船種、船舶の推進方式及びDWT（載貨重量トン数）ごとの分布を図3に示す。多少の違いはあるものの、様々なスペックの船に搭載されていることがわかる。

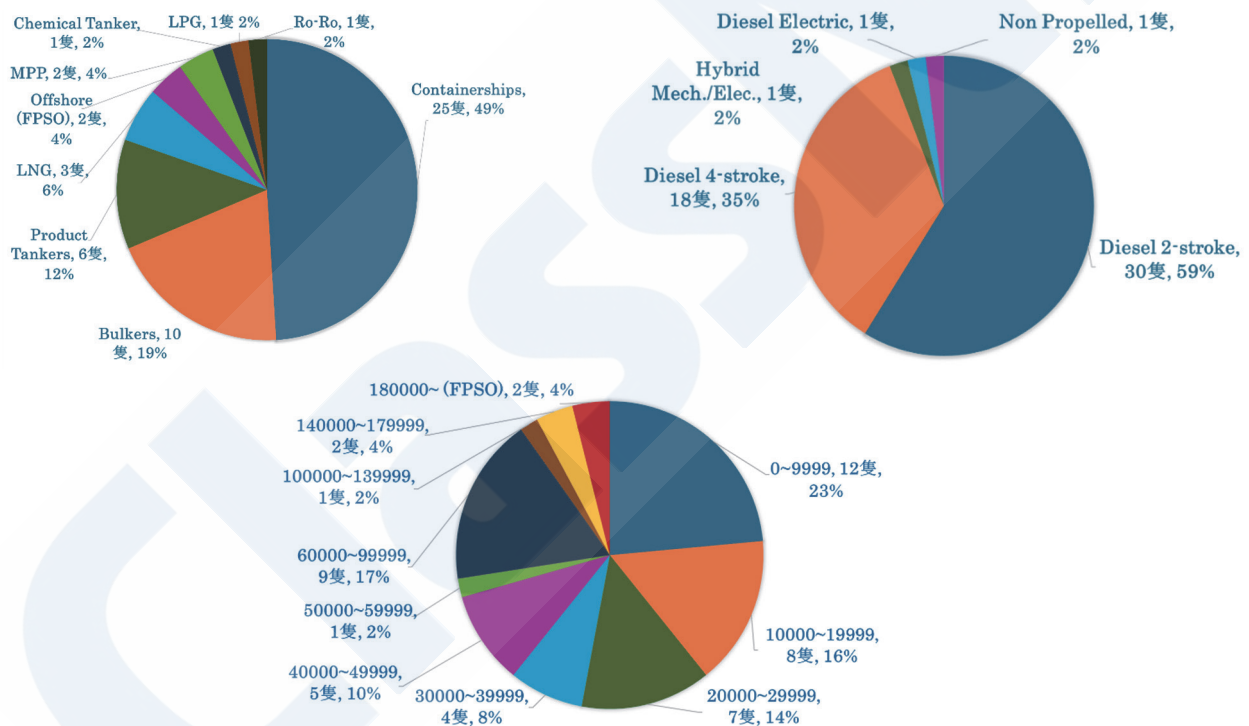


図3 CO₂回収貯蔵装置搭載船の分類別（船種、推進方式、DWT）割合 (Clarksons Researchデータに基づく)

このような船上CO₂回収・貯蔵装置といった新技術の社会実装に向けた試みに対し、安全性の観点から指針を示すため、本会はアミン吸収液を用いた化学吸収法を対象とする関連要件をまとめたガイドラインを、2023年4月に発行した。その後、当該ガイドラインに基づく認証サービスの提供を通じて、社会実装の支援を継続的に行っている。2024年4月には、Evergreenが所有するネオパナマックス型コンテナ船“EVER TOP”（パナマ籍）に搭載されたCO₂回収貯蔵装置により、実際の排ガスからCO₂が回収され、陸上施設に陸揚げ、再利用された。また、本会は陸揚げされたCO₂量を確認し、旗国であるパナマ海事庁の指導のもと、当該CO₂量を本船のCII（Carbon Intensity Indicator）評価における年間CO₂排出量から控除した³⁾。これら一連の取り組みは、GHG排出削減に向けた実運用の先駆けとなる世界初の事例であり、海事業界が目指すGHG排出量ネットゼロの実現に向けた重要な一歩となった。

一方、IMOにおいてもCO₂回収貯蔵装置を搭載し、排出されたCO₂の回収・貯蔵によって回避される排出量の適切な算定手順については、議論が継続して行われている⁴⁾。このような中でも、船上CO₂回収技術は、化学吸収法に加え、対象船や回収目標に応じて膜分離法など多様な方式へと広がりつつあり、技術の選択肢は増加している。こうした技術的多様化に対応するため、2025年10月に膜分離法に関する規定を追加した改訂ガイドラインを発行した⁵⁾。

本稿では、膜分離法によるCO₂回収貯蔵技術の基本原理と、本会の発行する船上CO₂回収貯蔵装置ガイドラインの概要、そして2025年10月の改訂内容について説明する。

2. 膜分離法によるCO₂分離・回収の基本原理

2.1 膜分離によるCO₂回収貯蔵装置の基本構成について

膜分離によるCO₂回収貯蔵装置の基本構成を図4に示す。各機器・ユニットで前処理した排ガスを分離膜にてCO₂を分離させ、液化・貯蔵する流れとなっている。

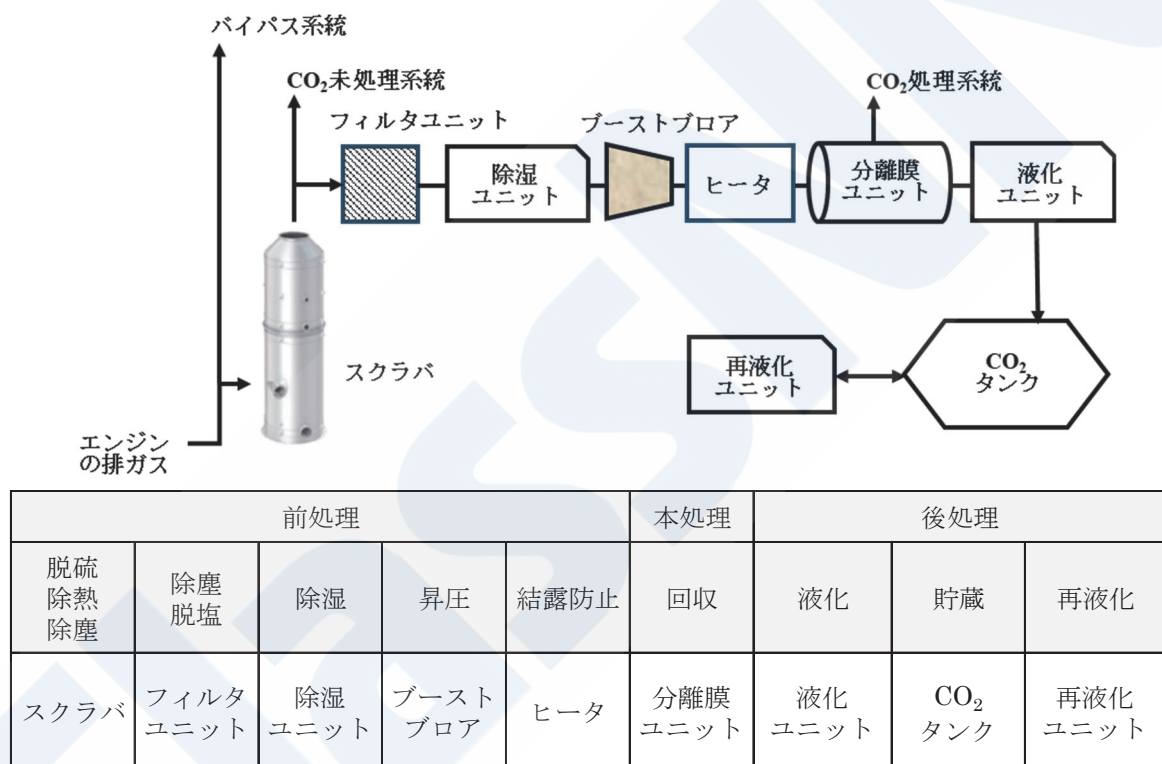


図4 膜分離法によるCO₂回収貯蔵装置の基本構成

2.2 分離膜の性能について

分離膜の性能はCO₂透過性（permeance）とCO₂選択性（selectivity）で表される。透過性は、溶解や拡散などの物質移動が絡み合っている現象であるものの、図5のように概ね動的分子径（分離膜の孔径の通過しやすさを見積もるための便宜的な代表長さ）による分離（分子ふるい）として理解することができる。ここで、エンジンから排出されるガスに関連する成分と、その動的分子径を表1に示す。H₂OはCO₂の動的分子径より小さいので、除湿が事前に必要であることがわかる。

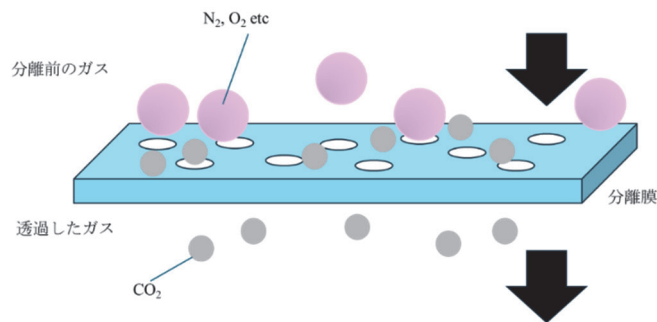


図5 分子ふるいのイメージ

表1 動的分子径の例

分子名	分子量	動的分子径 (pm)
CO ₂	44	330
O ₂	32	346
N ₂	28	364
H ₂ O	18	265
CH ₄	16	380
NH ₃	17	260
N ₂ O	44	330

表2に、各温度に対する透過性と選択性を示す。温度が上がるほど、CO₂、O₂、N₂の透過性は高まる。これは、図5のように実際には円筒型の穴ではなく、迷路のように穴が入り組んでいることに起因する。すなわち、分離膜を突破するための運動エネルギーが必要となる。透過性は、分離膜のガスからより多くのCO₂を回収することを検討する際に重要な要素となる。一方、選択性は、異なるガスの透過性との比であり、例えば、表2のCO₂/N₂は「CO₂の透過性/N₂の透過性」を示す。この場合、温度が上昇するとCO₂の透過性は高くなる一方、N₂の透過性もそれ以上に増加するため、選択性は温度上昇に対して低くなる。従って、温度において透過性と選択性はトレードオフの関係にある。選択性は、回収したCO₂の純度を考慮する際に重要な要素となる。

表2 透過性と選択性の例

温度 (°C)	透過性 (GPU)※			選択性	
	CO ₂	O ₂	N ₂	CO ₂ /N ₂	CO ₂ /O ₂
21	530	28	12	44	19
35	908	50	22	41	18
50	1,160	93	43	27	12

※GPU (Gas Permeation Unit) : 透過性の指標

$$X = 10^{-6} \times V / (A \times T \times \Delta P) \quad (1\text{GPU} = 10^{-6} \frac{\text{cm}^3(\text{STP})}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg}})$$

V : 標準状態に換算したガス体積 (cm³(STP))

A : 膜や試料の面積 (cm²)

T : 透過に要する時間 (s)

ΔP : 膜両側の圧力差 (水銀柱換算の圧力, cmHg)

また、分離膜装置によるCO₂の回収性能を維持するためには、分離膜前後の圧力（CO₂の分圧）差が重要となる。圧力差を生み出す方法としては、図4に示すように、分離膜の前段で気体をブーストブロアより昇圧する方法と、分離膜の後段に真空ポンプを配置して減圧する方法の2種類がある。前者の場合、大量のガスを一括で圧縮するため、圧縮に要するエネルギーが大きくなる。一方、後者では、減圧の対象が主に分離膜を透過した

CO₂に限られるため、真空ポンプの駆動に必要なエネルギーは比較的小さい。ただし、真空ポンプによって十分な圧力差を確保できない可能性があり、より多くのCO₂を回収するには、分離膜の面積を増やす必要があると考えられる。

2.3 分離膜の構造について

CO₂分離膜には主に平板膜（Flat sheet membrane）と中空糸膜（Hollow fiber membrane）の2種類の形態があり、以下にそれぞれを説明する。

2.3.1 平板膜の構造とモジュールについて

平板膜は、薄いシート状に作られた平らな分離膜であり、分離膜の片側に圧力の高い排ガスを通過させ、排ガス中のCO₂が分離膜を透過して、圧力の低い反対側に移動・回収される構造となっている。分離膜自体は非常に薄いため、一般的には強度を確保する目的で、図6に示すような三層構造が採用される。最下層の支持層は、高い強度と通気性を兼ね備えた多孔性の構造であり、分離膜全体の機械的強度を担う。図6より分離層と支持層の間には、一般的に「ガッター層」と呼ばれる中間層が設けられることが多い。ガッター層は、圧力差によって分離膜が支持層の孔に押し込まれるのを防止する役割を果たしている。

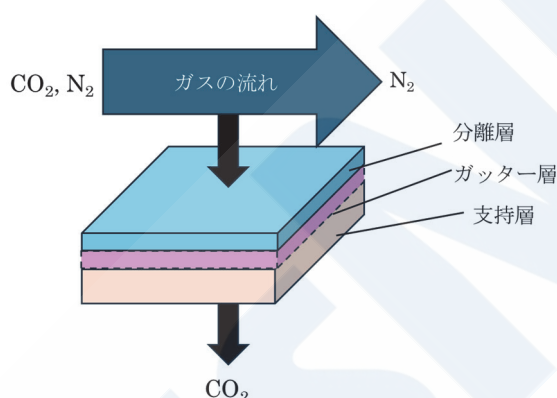


図6 平板膜の構造

図7に示すように、平板膜を用いる場合には、膜面積密度を高めるため、透過前スペース、分離膜、透過後スペースの順に積層するのが一般的である。分離膜を挟んで一方には圧力の高い排ガスが流れ、他方の圧力の低い側にCO₂が透過して分離・回収される仕組みである。

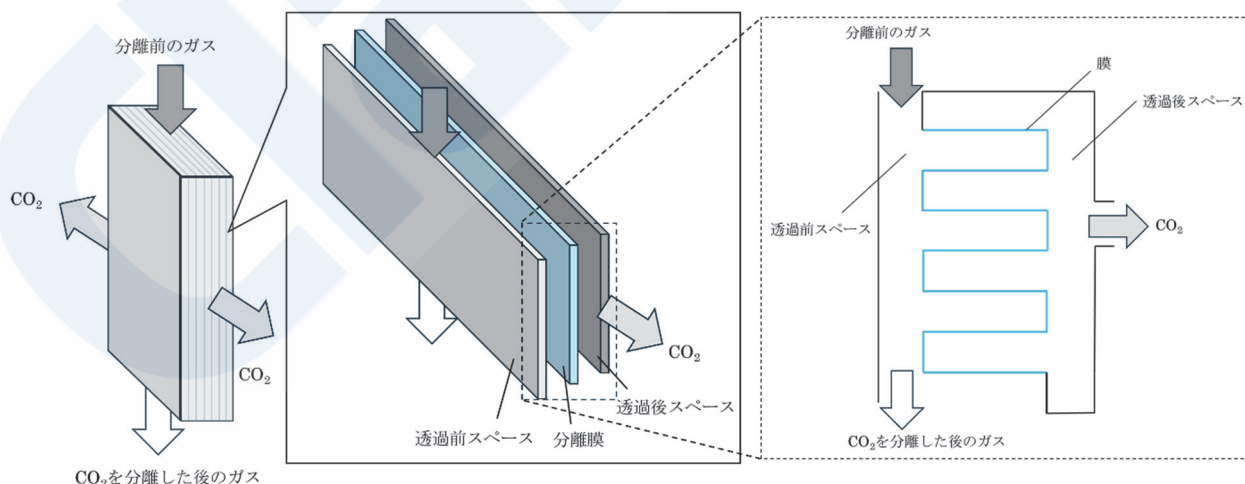
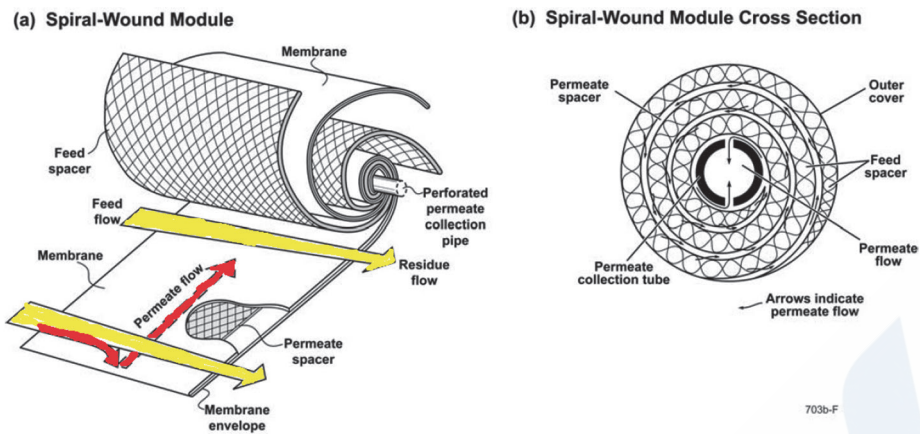


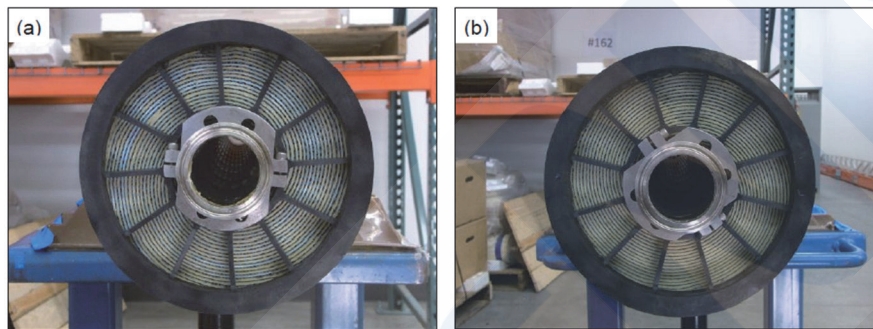
図7 平板膜のモジュール構造

また、平板膜を渦巻き状にして膜面積密度を向上させる設計もある。参考までに、MTR社^{6) 7)}が考案したモジュールを図8に示す^{*1}。渦巻き状の隙間にガスを流入し、軸の中心に分離したCO₂を集める構造になっている。

*1 図8中の着色部分は著者によって追加した。



(a) Exploded view of a conventional spiral-wound gas separation module and (b) a cross-section of this module.



Pictures of feed gas inlet (a) and residue gas outlet (b) of module 6419. The module was tested on the 1 TPD system at NCCC from April to August of 2012.

図8 平板膜を渦巻き状にしたモジュール

2.3.2 中空糸膜の構造とモジュールについて

中空糸膜は、中空糸の内孔（糸）に排ガスを通過させ、排ガスが糸を通過する間に排ガス中の CO_2 が糸の壁膜を透過して回収される構造となっている（図9）。これをいくつかのラインに分け効果的に CO_2 を回収できるようなモジュールにするのが一般的である。

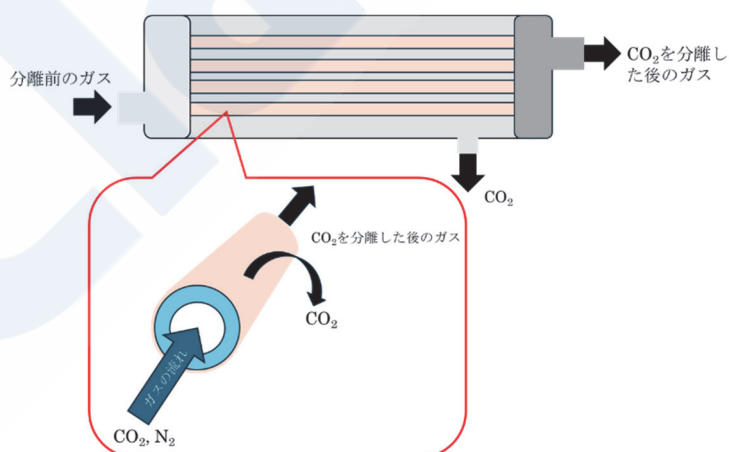


図9 中空糸膜の構造とそのモジュール

3. 船上CO₂回収貯蔵装置ガイドラインの概要

3.1 策定及び改訂の背景

ガイドライン初版発行当初は、陸上で広く実績があり、技術的に成熟している化学吸収法をベースとして作成された。現在においても、化学吸収法に基づくCO₂回収システムが主流となっている。

一方で、近年では船種、船のサイズ、使用燃料、運航地域などを考慮し、用途により適した他の回収方法を試みる動きが多数見られるようになってきた。その中でも、膜分離法に対する関心が特に高まってきている。陸上では、大規模な試験が実施されるようになり、実用化に向けた取り組みも加速している⁸⁾。様々な企業で膜分離による船上CO₂回収に関する検討が行われており、実装の拡大を見据えて、ガイドラインの改訂を行った。改訂ガイドラインの表紙を図10に示す。



図10 改訂ガイドラインの表紙

3.2 船上CO₂回収貯蔵装置ガイドラインの構成について

本ガイドラインは全6章及び付録から構成される。ガイドラインの各タイトルとその概要を表3に示す。

表3 ガイドラインの各タイトルとその概要

章	タイトル	概要
第1章	通則	適用範囲、用語定義、CO ₂ 分離・回収の基本技術の概要、CO ₂ 特性を記述。
第2章	機能要件	CO ₂ 回収貯蔵装置の安全性、保守性、信頼性を確保するための要件を規定。
第3章	CO ₂ 回収装置 関連設備	化学吸収法・膜分離法によるCO ₂ 回収装置について、機能、材料、リスク評価、構造、配置、制御、警報、復原性、電気設備、安全・保護具などに関する要件を規定。
第4章	CO ₂ 貯蔵装置 関連設備	CO ₂ 貯蔵装置の機能、材料、リスク評価、貯蔵タンク、ポンプ、圧縮機、熱交換器、復原性、構造・配置、通風、制御、安全・警報装置、ガス監視・検知装置、保護具などに関する要件を規定。
第5章	船級符号への 付記	ガイドラインの規定を一部または全て満足する船舶への船級符号付記の取り扱いを規定。
第6章	検査	第3・4章で規定した回収・貯蔵設備の製造中・製造後の検査要件を規定。
—	付録	化学吸収法の追加エネルギー消費と関連設備の寸法概算を記述。

3.3 改訂内容について

今回の改訂で追加した膜分離法に関する要件はガイドライン第1章4節(1.4)及び第3章3節(3.3)の「膜分離法によるCO₂回収貯蔵装置」である。ガイドラインの1.4では、膜分離法を用いたCO₂回収貯蔵装置の基本的なシステム構成、各機器装置の機能及び分離膜の基本的な性能について説明している。また、ガイドラインの3.3では、膜分離法を用いたCO₂回収装置について主にリスク対策の要件を記載している。

3.3.1 追加された機能要件について

船舶に搭載されるCO₂回収貯蔵装置関連設備の設計、構造及び運用について安全に配慮したものであるとするための要件が本ガイドラインに記載されている。今回、(1)から(4)の機能要件を新たに追加した。

- (1) フィルタユニットは、下流の機器保護に必要な除塵・脱塩機能を有するものとする。
- (2) 除湿ユニットは、分離膜に必要な湿度が確保されるようにすること。
- (3) ブーストブロアは、分離膜に必要な圧力及び流量が供給できるものとする。
- (4) ヒータは、分離膜に必要な温度が確保されるようにすること。

3.3.2 追加されたリスク対策の要件

本ガイドラインでは、CO₂回収貯蔵装置の設置及び使用によって生じる人員、環境、船体の構造強度又は保全性に対して、承認されたリスク分析手法を用いて評価することを規定している。

膜分離法に関しては、次の(1)から(3)のリスクについて考慮しなければならない旨の要件を追加した。

- (1) ガスの漏洩
- (2) スクラバ以降の膜分離回収装置関連の故障
- (3) 膜の健全性

また、上記以外にも、装置の仕様に応じて設計又は運用に起因するリスク評価を適切に行うことが望ましい。

4. おわりに

本会は、2025年10月に「船上CO₂回収貯蔵装置ガイドライン第2.0版」を公表し、膜分離法に関する規定を追加した。今後、本ガイドラインに定められていない新たな技術を用いたCO₂回収貯蔵装置が実用化された際は、ガイドラインの基本的な考え方に基づいて適宜審査することができる。また、当該装置に関する知見が蓄積され次第、ガイドラインを順次更新していく所存である。

参考文献

- 1) International Energy Agency. CCUS in Clean Energy Transitions.
<https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>
- 2) 一般財団法人日本海事協会. 「川崎汽船、三菱造船と共同で洋上用CO₂回収装置検証のための小型デモプラント試験“CC-Ocean”プロジェクトを実施」プレスリリース、2020年8月31日.
https://www.classnk.or.jp/hp/ja/hp_pressrelease.aspx?id=5302&layout=1
- 3) 一般財団法人日本海事協会. 「パナマ海事庁、エバグリーン、711研究所、日本海事協会の4者で、船上CO₂回収および貯蔵装置（船上CCS装置）の実運用を実施」プレスリリース、2024年10月1日.
https://www.classnk.or.jp/hp/ja/hp_news.aspx?id=12302&type=press_release&layout=1
- 4) 三宅竜二, 日本海事協会. IMOにおける船用燃料ライフサイクルGHG強度評価に関する最新動向, 第2回船舶のバイオ燃料利用に向けた勉強会, 令和7年7月25日.
<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001903037.pdf>
- 5) 一般財団法人日本海事協会. 船上CO₂回収貯蔵装置ガイドライン第2.0版, 2025年10月29日.
<https://www.classnk.or.jp/hp/ja/news.aspx?id=14242&type=p>
- 6) Merkel, T., Amo, K., Baker, R., Daniels, R., Friat, B., He, Z., Lin, H., & Serbanescu, A. (2009, March 31). Membrane Process to Sequester CO₂ From Power Plant Flue Gas (Report No. DOE/OSTI 1015458). Membrane Technology & Research, Inc. / U.S. Department of Energy.
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1015458>
- 7) Merkel, T. “Pilot testing of a membrane system for postcombustion CO₂ capture,” OSTI, 2015.
<https://www.nationalcarboncapturecenter.com/wp-content/uploads/2021/01/Membrane-Technology-and-Research-Operational-History-at-NCCC-for-the-20-TPD-Small-Pilot-System-2015.pdf>
- 8) George, V. (2024, December 17). MTR completes world's largest membrane carbon capture testing facility. Carbon Herald.
MTR Completes World's Largest Membrane Carbon Capture Testing Facility