

ClassNK 技報

No.12 2026年 (I)

特集記事： CCS (CO₂ 回収貯蔵)



—目 次—

巻頭言	開発本部 技術研究所長 石橋 公也.....	1
-----------	------------------------	---

特集記事 「CCS（CO₂回収貯蔵）」

GHG規制における船上CO₂回収・貯留／利用に関する取り扱いと課題について

.....	開発本部 技術研究所 三宅 竜二.....	3
-------	-----------------------	---

2050年GHGネットゼロ排出に向けて、船舶からのGHG排出削減手段として、船上CCS/CCU（Carbon dioxide Capture and Storage/Carbon dioxide Capture and Utilization）に対する関心が急速に高まっている。一方、GHG排出削減規制において、その削減効果がどのように取り扱われるかで船上CCS/CCUの普及は大きな影響を受けるため、本稿では、EUとIMOのGHG規制における船上CCS/CCUの取り扱いと課題について、最新情報を交えて解説する。

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

.....	開発本部 技術研究所 若生 拓也，宋 玉中， 技術本部 機関部 服部 俊介，技術本部 技術部 福士 容平.....	11
-------	--	----

船上におけるCO₂回収貯蔵技術は、GHG削減に向けた有効な手段の一つとして注目されている。本会は2023年に化学吸収法を前提とした船上CO₂回収貯蔵装置ガイドラインを発行した。近年では他の回収方式の検討が進みつつあり、2025年10月には膜分離法に関する要件を追加した改訂ガイドラインを公表した。本稿では、改訂ガイドラインの概要及び、新たに追加された膜分離技術について概説する。

CCS事業における船舶輸送

.....	独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構 村田 朋之.....	19
-------	----------------------------------	----

日本政府は2020年10月に、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラル目標を掲げ、2021年4月には2030年度において温室効果ガスを2013年度比で46%削減することを宣言した。本稿では二酸化炭素削減のひとつの方法としてCCSを取り上げ、液化二酸化炭素（LCO₂）の低温低圧船舶輸送と「LCO₂船舶輸送バリューチェーン共通化ガイドライン」について概要を解説する。

NEDOが取り組む液化CO₂船舶輸送の技術開発

……………国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 布川 信, 川北 千春………… 31

NEDOでは、CO₂排出源から回収するCO₂を貯留・利用地点に安全かつ低コストで輸送する手段の一つとして、CO₂を液化して船舶で輸送する技術の開発に取り組んでいる。大量輸送に適した液化CO₂の温度・圧力条件での輸送が可能なカーゴタンクシステムを開発し、CO₂の液化、貯蔵、荷役、海上輸送する船舶一貫輸送システムに必要な技術検討を進めている。さまざまな温度・圧力条件の液化CO₂を積載できるタンクシステムを搭載した実証試験船「えくすくうる」と、陸上設備（舞鶴および苫小牧）と連携した長距離輸送実証試験の概要を紹介する。

三菱重工業のCO₂回収技術……………三菱重工業株式会社 仙波 範明, 米川 隆仁………… 39

国際海事機関（IMO）の“GHG 削減戦略”を大幅な見直しにより、海運セクターでのCO₂回収技術の適用が検討されている。三菱重工業では、約30年間前からCO₂回収技術の開発を行っており、世界最大のCO₂回収設備をはじめ、陸上設備において18基の稼働実績を有している。また、船舶向けでは、川崎汽船株式会社、日本海事協会と共同で、船上CO₂回収装置の実証プロジェクト“CC-Ocean”に参画している。これらの事例について紹介する。

技術一般

洋上風力の展望と関連する作業船の安全に関する本会の取り組み

……………認証本部 再生可能エネルギー部………… 45

2025年2月に策定された第7次エネルギー基本計画においては2040年までに再生可能エネルギー発電の比率を4～5割に引き上げることとされており、洋上風力発電所の建設工事は、今後、より広範な海域において行われる見込みである。本会では、こうした工事に従事する作業船の安全向上の観点から、2024年より、作業船の安全管理等を第三者機関として評価するサービスを開始したところであり、これまでの実施結果を踏まえ、作業船の安全管理・運用面での課題を紹介する。

自動運航船の動向と本会の取り組み……………開発本部 技術研究所 伊藤 誠………… 53

自動運航船は、ヒューマンエラーの低減や、船員の高齢化・人材不足への解決策として注目され、各国では実証を積み重ねながら社会実装が進んでいる。これと並行して、法令・制度整備が進んでおり、国際的にはMASS Codeの策定が進められている。さらに社会実装を加速させるためには、詳細な技術要件の確立も求められる。本稿では、各国における自動運航船の開発と法令・制度整備の動向を概観した上で、これらの動向に早期から対応してきた本会の取り組みとその成果を紹介する。

揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチ	開発本部 開発部.....	63
----------------------------	---------------	----

2023年6月に開催されたMSC107において、揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチに関する SOLAS条約改正案がIMO決議MSC.532(107)として採択された。また、具体的な安全要件を記したガイドラインがMSC.1/Circ.1662及びMSC.1/Circ.1663として承認された。

本会においては、当該SOLAS条約改正及びガイドラインを本会規則に取り入れるため、「揚貨設備規則」を「揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチ規則」に改め、2026年1月から適用している。

本稿では、IMOでの審議経緯、ILO C152及び揚貨設備規則の改正について紹介する。

IMO GHG削減中期対策を踏まえたコストシミュレーション

.....企画本部 グリーントランスフォーメーションセンター.....	81
-------------------------------------	----

本稿では、国際海事機関（IMO）が検討を進めるGHG削減中期対策を踏まえ、その枠組みの下で求められるコスト評価の考え方を整理する。また、燃料転換や運航効率化など、将来を見据えた取組みの方向性について解説する。

Research on Carbon Reduction Strategies for Operating Small-and Medium-Sized Bulk Carriers

.....COSCO Shipping Heavy Industry CO., LTD. Wenyu XU Nantong COSCO KHI Ship Engineering CO., LTD. Nan WANG.....	89
---	----

Most small and medium-sized bulk carriers operate on non-fixed routes, making them unsuitable for the relatively “predictable” new energy (i.e. alternative fuel) retrofits that are being utilized by fixed-route vessels. To meet IMO’s new emission requirements throughout their operational lifecycle, this paper systematically categorizes carbon reduction technologies applicable to small and medium-sized bulk carriers, that are currently in service, and proposes a “phased” emission reduction pathway. Using a 10-year-old KAMSARMAX bulk carrier as a case study and based on established assumptions, we demonstrate that a staged “phased” retrofit approach currently represents the most cost-effective option. The corresponding research has also been validated on an 11-year-old ULTRAMAX bulker. This research provides sustainable, affordable compliance solutions for small and medium-sized bulk carriers, offering retrofit references for vessels currently in operation.

IMOの動向	開発本部 国際部.....	101
--------------	---------------	-----

本稿では、国際海事機関（IMO）における国際条約等の審議動向を紹介する。今号では、第83回海洋環境保護委員会（MEPC 83）及び第110回海上安全委員会（MSC 110）の審議概要を紹介する。

巻頭言

特集「CCS（CO₂回収貯蔵）」発刊によせて

開発本部 技術研究所長 石橋 公也

ClassNK技報No.12の発行に際して、一言ご挨拶申し上げます。

技術広報誌「ClassNK技報」は、本会の技術活動や研究成果などの公表により、海事産業などへの技術的貢献を図ることを目的に発行しています。前号（ClassNK技報No.11）では、2025年1月に開催されたClassNK R&D Forumでの講演テーマ「より安全で環境にやさしい船舶を目指して」に関連する技術動向及び最新の研究開発成果等を報告いたしました。

IMOが設定した「遅くとも2050年頃までにGHGネットゼロ排出を目指す」という目標達成に向けて、船上CCS/CCU（Carbon dioxide Capture and Storage/Carbon dioxide Capture and Utilization）技術が船舶からのCO₂排出削減のための有効な手段の一つとして考えられています。この技術の普及は、EUとIMOのGHG排出削減規制において、回収による削減効果がどのように取り扱われるか等に大きく影響を受けることから、最新の規制動向と実現に不可欠となる貯蔵インフラ整備等の現状と課題について概説するとともに、船舶に実装可能な船上CO₂回収貯蔵技術に関連して、2025年10月に膜分離法に関する要件を追加し改訂した本会ガイドラインに関する技術的解説を行いました。

一方、日本政府は全体として「2050年カーボンニュートラル」の目標を掲げ、CO₂排出削減のための取組みを実行しています。火力発電等処理されるべき膨大な量のCO₂に対応するには、CCSが現時点で最も現実的な方法であり、その実現の柱となる液化CO₂（LCO₂）の低温低圧船舶輸送とそのバリューチェーン共通化ガイドラインの整備に関する概説、それを踏まえた、CO₂を安全かつ低コストで輸送する液化CO₂船舶輸送技術の開発と、実証試験船「えくすくうる」を用いた舞鶴・苫小牧間での長距離輸送実証試験に関してそれぞれ外部の専門家にご寄稿いただきました。

最後に共通技術として約30年間のCO₂回収技術開発実績を有し、世界最大規模を含む18基の陸上設備稼働実績がある民間企業から大規模CCS設備等に関する技術を概説していただき今回の「CCS（CO₂回収貯蔵）」特集といたしました。

特集以外にも2025年10月及び11月に開催されたClassNK技術セミナーで講演された、IMO GHG削減中期対策等の国際条約等の最新動向及び洋上風力作業船の安全並びに自動運航船に係る最新の技術動向についても掲載いたしました。

本会は、これまで以上に「良い船」、「良い管理」、「良い運航」という視点から社会や業界のニーズを踏まえて、海上における人命と財産の安全確保、海洋環境の保全及び社会を先導するイノベーションの創出に資する研究開発に鋭意取り組み、海事産業の更なる発展への貢献に努めてまいります。

今後とも皆様のご理解とご支援をお願い申し上げます。

GHG規制における船上CO₂回収・貯留／利用 に関する取り扱いと課題について

三宅 竜二*

1. はじめに

欧州では、欧州連合（EU）がGHG排出量の2050年実質ゼロの達成を目指して、GHG排出量を2030年までに1990年比で55%以上削減する目標を掲げている。2021年7月に、2030年目標達成のための包括的な気候変動政策パッケージ「Fit for 55」が発表され、地域規制として、炭素課金制度であるEU排出量取引制度「EU-ETS」の海運セクターへの拡大案、及び船舶で使用する燃料のライフサイクル全体におけるGHG削減を促進するための「FuelEU Maritime」規則案などが発表された。その後、「EU-ETS」は2024年1月から海運セクターに導入され、「FuelEU Maritime」は2025年1月から開始された。

一方、国際海事機関（IMO）では、GHG削減に関する取り組みとして、GHG削減と経済発展の両立の観点から個船のエネルギー効率の改善に着目し、2013年から設計上の燃費規制のEEDI（エネルギー効率設計指標）と運航上の燃費規制のSEEMP（船舶エネルギー効率管理計画）が実施されている。さらに、2018年にGHG削減戦略が合意され、その短期対策として、2023年からEEXI（就航船の燃費性能指標）と燃費実績の格付け制度（CII格付け）が開始された。2023年7月に開催されたMEPC 80でGHG削減戦略が見直され、新たに「遅くとも2050年頃までにGHGネットゼロ排出を目指す」という野心的な目標が掲げられた。この目標を達成するために、2025年4月に開催されたMEPC 83において、使用燃料のGHG強度規制（GFI規制）とIMOネットゼロ基金による脱炭素化の促進を含むMARPOL条約附属書VIの改正が承認され、2028年から開始される予定である。

船舶から排出されるGHGを削減する手段として、船舶の燃費性能や運航効率の改善をはじめ、使用燃料の低・脱炭素燃料への転換などがある。GHGネットゼロ排出を達成するには、船舶の燃費性能や運航効率の改善には限界があるため、脱炭素燃料への転換が求められ、脱炭素燃料の十分なバリューチェーンを確立する必要がある。一方、2050年においても相当数の化石燃料船が運航され続けることが予想されるため、この問題への対応は今後極めて重要となる。船舶からのGHG排出削減手段として、これまで減速運航や省エネ装置の搭載等が行われてきたが、低・脱炭素燃料への転換には時間を要するため、それまでの解決策「ブリッジソリューション」として、排出されたCO₂を船上で回収し、貯留もしくは利用する「船上CO₂回収・貯留／利用（Onboard Carbon Capture and Storage/Utilization : OCCS/OCCU）」が注目されており、この技術に対する関心が急速に高まっている。船上CCS/CCUは重油焚き船だけでなく、LNGのようなGHG排出量が比較的少ない燃料との組み合わせや、水素やアンモニアのようなゼロエミッション燃料もパイロット燃料に重油を使用するため、ゼロエミッション燃料との組み合わせも考えられる。船上でのCO₂回収は以前からトライアルが実施されてきたが、とりわけ、コスト面で実用化は難しいとされてきた。しかしながら、上述のようなGHG排出削減規制により、罰金や抛出金が求められるようになったため、CO₂排出が運航コストに含まれるようになり、さらに技術の進歩でCO₂の回収効率も向上しコスト削減も進んでいることから、船上でのCO₂回収が経済的に成立する可能性が出てきた。

2050年GHGネットゼロ排出に向けて、船舶からのGHG排出削減手段として、船上CCS/CCUに対する関心が急速に高まっている。一方、GHG排出削減規制において、その削減効果がどのように取り扱われるかで船上CCS/CCUの普及は大きな影響を受けるため、本稿では、EUとIMOのGHG規制における船上CCS/CCUの取り扱いと課題について、最新情報を交えて解説する。

* 開発本部 技術研究所

2. EUのGHG規制における船上CO₂回収・貯留／利用（船上CCS/CCU）の取り扱い

2.1 EU-ETS

2.1.1 船上CO₂回収・貯留（船上CCS）の取り扱い

海運セクターにおけるEU-ETSでは、対象船舶から排出されたCO₂に相当する排出枠（allowance）を、検証を受けた上で償却しなければならない。一方、「EU ETS指令 Article 12 3a.」^①により、図1に示す通り、船上で回収されたCO₂のうち、EU/EEA加盟国の管轄当局から「EU CCS指令」^②に基づき許可された貯留施設（EU/EEA域内）に永久貯留するために輸送されたCO₂については、排出枠償却義務の対象外となる。

恒久的な貯留のために船上で回収されたCO₂の輸送時又は貯留時に漏洩したCO₂については、「EU ETS指令 附属書 I」において、「EU CCS指令」^②に基づき許可された貯留場所への輸送及び貯留に係る施設がEU-ETSの対象施設とされているため、CO₂を排出した船舶ではなく、輸送又は貯留施設の事業者が当該漏洩したCO₂に相当する排出枠の償却義務を負うことになる。このため、「EU ETS and MRV Maritime General guidance 5.2.3-2」^③により、船上CCSにより排出枠償却義務の対象外となるCO₂は、船上で回収されたCO₂量ではなく、CO₂を輸送する事業者に引き渡された量、もしくは、貯留施設に直接引き渡された量となる。

航海区分	EU/EEA加盟国とEU/EEA加盟国以外の 港湾間の航海（航路①）	EU/EEA加盟国の港湾間の航海（航路②）、 及び EU/EEA加盟国の港湾での停泊
EU-ETSの対象 となるCO ₂ 排出量	CO ₂ 排出量の50%	CO ₂ 排出量の100%
償却義務の対象外 となるCO ₂ 排出量	回収・貯留したCO₂の50%	回収・貯留したCO₂の100%

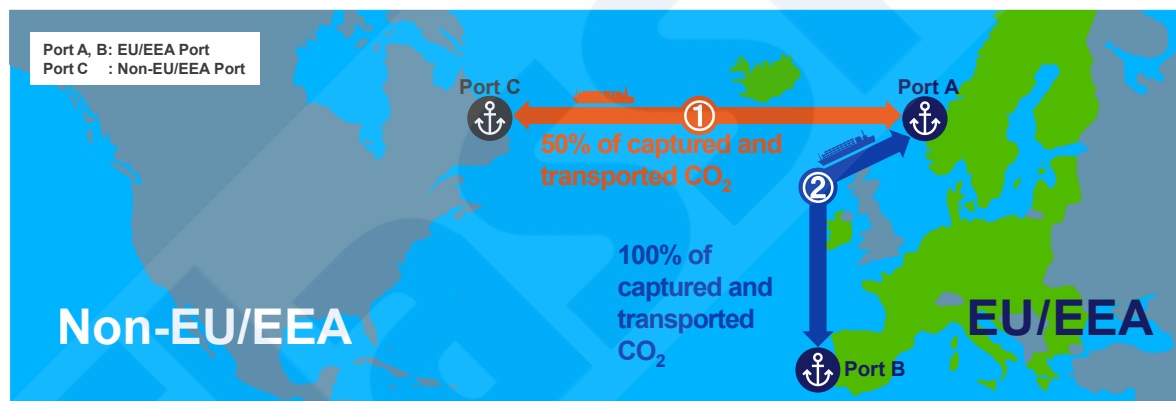


図1 償却義務の対象外となるCO₂排出量

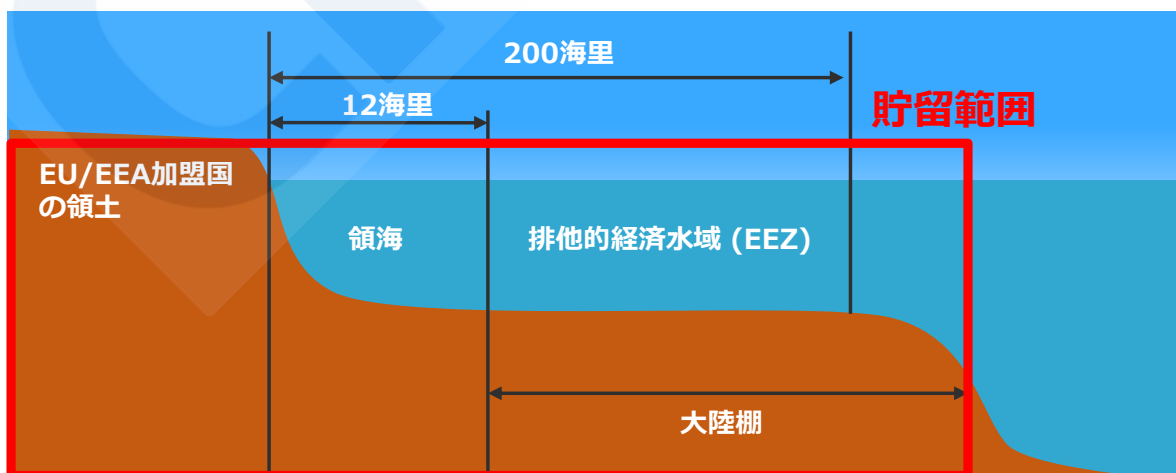


図2 CO₂の貯留が認められている場所

表1 EU/EEA域内で稼働中の貯留施設及び当局から貯留許可を取得した貯留施設例（2025年1月時点）

	地域	施設名	概要	施設のCO ₂ 貯留 可能量(トン/年)	稼働年	貯留許可
EU	クロアチア	Zutica and Ivanic grad storage	ガス精製プラントで生じるCO ₂ の回収・輸送・貯留	不明	稼働中（2014年）	不明
	ハンガリー	MOL Szank Field	ガス精製プラントで生じるCO ₂ の回収・輸送・貯留	不明	稼働中（1992年）	不明
	オランダ	Porthos	複数の排出源から回収したCO ₂ の輸送・貯留	250万	2026年	許可取得済
	デンマーク	Greensand	CO ₂ の船舶輸送・貯留	150万～800万	2025年末～2026年	申請中 (デンマーク初の許可 施設となる見込み)
EEA	アイスランド	Climeworks Orca	DACにより回収したCO ₂ の貯留	4千	稼働中（2021年）	不明
	アイスランド	Climeworks Mammoth	DACにより回収したCO ₂ の貯留	3万6千	稼働中（2024年）	不明
	アイスランド	Silverstone	地熱発電所から排出されるCO ₂ の回収・貯留	3万7千	2025年	許可取得済
	ノルウェー	Equinor Sleipner	天然ガス田からのガス生産時に生じるCO ₂ の 分離・貯留	100万	稼働中（1996年）	許可取得済
	ノルウェー	Equinor Snøhvit	天然ガス田からのガス生産時に生じるCO ₂ の 分離・貯留	70万	稼働中（2008年）	許可取得済
	ノルウェー	Longship (Northern Lights)	工場等で回収したCO ₂ を中間貯蔵施設まで船舶 輸送、海底パイプラインで貯留	150万～350万	2025年	許可取得済

出典：Global CCS Institute, Global Status of CCS 2024, IOGP, CO₂ storage projects in Europe, European Commission, Reports on the implementation of the CCS Directive など

表2 欧州におけるCO₂を荷役可能な港及び計画中の港例（2025年1月時点）

	地域	施設名	概要	CO ₂ 荷役可能量 (トン/年)	稼働年
運用中	英国	Nippon Gases Tilbury, Warrenpoint & Teesside Ports	液化CO ₂ の荷揚げ港（食品・飲用向けに使用）	不明	2019年
	フィンランド	Loviisa Port	液化CO ₂ の積み出し港（食品・飲用向けに使用）	不明	不明
	ドイツ	Port of Hamburg	液化CO ₂ の荷揚げ港（食品・飲用向けに使用）	不明	不明
計画中	ポーランド	Port of Gdansk	オープンアクセスの液化CO ₂ 輸出入ターミナル	270万～870万	2025年
	ノルウェー	Northern Lights	Øygardenの受け入れターミナルにて液化CO ₂ の 荷揚げ可能	150万～350万	2025年
	スウェーデン	Port of Gothenburg	CO ₂ 輸送チェーンの構築	400万	2025年
	オランダ	CO2Next Terminal, Port of Rotterdam	オープンアクセスの液化CO ₂ 輸出入ターミナル	540万	2028年
	オランダ	Project Aramis, Maasvlakte, Port of Rotterdam	液化CO ₂ の荷揚げ	2,200万	2030年

出典：Global Centre for Maritime Decarbonization (GCMD), Concept Study to Offload Onboard Captured CO₂ など

一方、「EU ETS and MRV Maritime General guidance 5.2.3-4」³⁾により、CO₂回収のために船上で追加発生したCO₂排出量は排出枠償却義務の対象となるため、船上CCS装置をモニタリングプランに追加し、追加発生したCO₂排出量も含めてエミッションレポートで報告する必要があるが、回収CO₂の輸送又は貯留の際に漏洩したCO₂はモニタリングの対象外となる。回収CO₂は、図2に示す通り、「CCS指令 Article 2」²⁾に、EU/EEA加盟

国の領土、領海、排他的経済水域及び大陸棚に貯留することが規定されており、これら以外に貯留したCO₂は排出枠の償却対象外として認められない。

Global CCS Institute, Global Status of CCS 2024, IOGP, CO₂ storage projects in Europeなどを調査した結果、2025年1月時点で、欧州で稼働・計画中の商用CCSプロジェクトは191件あったが、このうち、EU/EEA域内で稼働中（パイロット稼働を含む）のCO₂貯留施設は10件（表1）で、貯留施設がCO₂を貯留可能な合計量は年間約750万トンであった。

CCS指令には貯留施設への第三者アクセスの規定「CCS指令 Article 21」²⁾があり、貯留施設事業者以外の第三者が既存の貯留施設や輸送インフラを使用できるようになっている。このため、他所で回収・輸送したCO₂についても貯留は可能だが、CCSプロジェクトでは一般的にCO₂の回収元は特定の排出源・事業者が契約上事前に決まっており、特定の事業者からの貯留が優先されるため、第三者が貯留するためには貯留施設事業者との別途契約が必要となる。表2に示す通り、欧州におけるCO₂を荷役可能な港は2025年1月時点で3港だけで、計画中の港はCO₂の回収・貯留プロジェクトの一環として整備が進められており、いずれのプロジェクトも船上回収CO₂の受け入れを前提としたプロジェクトではないが、船上回収CO₂も受け入れる可能性がある。

2.1.2 船上CO₂回収・利用（船上CCU）の取り扱い

「EU ETS指令 Article 12 3b.」¹⁾により、船上で回収されたCO₂を製品に恒久的に結合し、大気中に放出されないよう利用されたCO₂については、排出枠償却義務の対象外となる。ETS指令の補足規則のCCUに関する規則「Commission Delegated Regulation(EU) 2024/2620 Annex」⁴⁾により、大気中にCO₂を放出しないためにはCO₂を固定化する必要があり、燃料のように燃焼を前提とする利用は認められておらず、以下の建設製品に恒久的にCO₂を結合（炭酸塩鉱物）する必要がある。

- ◇ 鉱物ベースの建設製品に使用される、非結合又は結合した炭酸化骨材
- ◇ 建設製品に使用されるセメント、石灰、その他の水硬性結合剤の炭素成分
- ◇ プレキャストブロック、舗装材、気泡入りコンクリートなどの炭酸化コンクリート
- ◇ 炭酸化レンガ、タイル、その他の石積みユニット

CCUに関する規則⁴⁾には、CCUに使用するCO₂の回収場所及びCO₂を利用する場所に関する規定はないが、EU-ETSの趣旨やEU-ETS指令におけるCCSの規定を考慮すると、EU/EEA域内にてCO₂の回収及び製品利用されたものが対象になると考えられる。

2.2 FuelEU Maritime

FuelEU Maritimeでは、現在のところ、船上で回収されたCO₂の貯留や利用に関する規定がないため、回収CO₂をGHG強度から控除することは認められていない。「FuelEU Maritime規則 Article 30 2(i)」⁵⁾によると、船上CCS/CCUを含む新しいGHG削減技術をGHG強度の算定に含める可能性について、2027年末までに欧州委員会（EC）がレポートを作成し、検討する予定である。

3. IMOのGHG規制における船上CO₂回収・貯留／利用（船上CCS/CCU）の取り扱い

国際海事機関（IMO）では、国際海運におけるCO₂排出削減対策として、現在、新造船のエネルギー効率設計指標（EEDI）規制、就航船の燃費性能指標（EEXI）規制、及び燃費実績の格付け制度（CII格付け）を実施しているが、現状、船上CCS/CCUに関する規定がなく課題である。さらに、2028年から開始される使用燃料のGHG強度規制（GFI規制）については、現時点ではGFIの算定式に船上で回収されたCO₂を控除するための項が組み込まれていないが、「EIj（単位エネルギー当たりのGHG排出量）」という要素が導入されているため、その中に船上回収CO₂をどう組み込むかが今後の論点となる。一方、2024年3月に開催されたMEPC 81で採択された「船用燃料ライフサイクルGHG強度ガイドライン（2024年LCAガイドライン）」⁶⁾では、GHG強度の算定式に船上回収CO₂の控除の項が盛り込まれているものの、現状、その計算方法等の詳細が規定されておらず課題である。このため、2025年4月に開催されたMEPC 83において、「非CO₂のGHG排出及び船上CO₂回収・貯留（OCCS）に関する通信部会」より、「船舶から排出されるメタン及びN₂O、並びに船上CO₂回収・貯留（OCCS）に関する報告書」が提出され、審議の結果、「船上CO₂回収・貯蔵を利用するための規制の枠組みを開発するための作業計画」⁷⁾が策定された。作業計画には、船上CO₂回収・貯留の試験・検査・認証に関するガイドラインの開発などが組み込まれたが、とりわけ、船上回収CO₂の恒久貯留又は利用のためには、これらを妨げる可能性がある国際条約と整合を図る必要があるため、関係する国際条約による法的障壁に関する検討も組み込まれ

た。さらに、作業計画に基づき、「船上CO₂回収・貯留の利用に関する規制枠組み」を開発するために、通信部会が再設置され、2026年4月に開催予定のMEPC 84に報告書を提出する予定である。

一方、船上回収CO₂を地中や海底に恒久貯留した場合や、メタノールやメタンなどの燃料の原料として再利用した場合、さらには、セメントなどに恒久的に固定した場合に、回収CO₂を船舶のCO₂排出量からどのように控除するのか、その割り当てをどうするのか、などの問題については、今後、LCAの規制枠組みのさらなる開発において検討される予定である。

4. 回収CO₂の越境移動に関する国際条約

船上で回収されたCO₂の恒久貯留又は利用を妨げる可能性がある国際条約として、CO₂の海底下貯留及び海底下貯留目的のCO₂輸出を規制するロンドン議定書、さらには、有害廃棄物の輸出を規制するバーゼル条約が挙げられる。

4.1 ロンドン条約及びロンドン議定書

「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」（通称：ロンドン条約）は、1972年12月にロンドンで採択され、1975年8月に発効した。同条約では、水銀、カドミウム、放射性廃棄物などの有害廃棄物を限定的に列挙し、これらの海洋投棄のみを禁止していた。その後の世界的な海洋環境保護の必要性への認識の高まりを受けて、同条約による海洋汚染の防止措置をさらに強化するため、「1972年の廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約の1996年の議定書」（通称：ロンドン議定書）が1996年11月にロンドンで採択され、2006年3月に発効した。同議定書は、廃棄物等の海洋投棄及び洋上焼却を原則禁止しており、「廃棄物その他の物」にはCO₂が含まれ、かつ、「投棄」の概念には、海への投入等に限らず、海底下の地層への処分も含まれた。さらに、海洋投棄目的（海底下貯留目的含む）で廃棄物等を輸出することも一切禁止された。

ロンドン議定書は、2006年、2009年、2013年、2022年と4度にわたり改正された。このうち2006年の改正（CO₂の海底下地層への処分（貯留）を可能とするもの）及び2022年の改正（海洋投棄を検討できる廃棄物等から下水汚泥を削除）は発効済みだが、2009年の改正（海底下地層への処分（貯留）目的のCO₂の輸出を可能とするもの）及び2013年の改正（海洋地球工学行為規制に関する改正）は未発効である。

2024年1月現在、ロンドン条約の締約国は87か国、ロンドン議定書の締約国は54か国（米国は議定書を未締結）で、事務局は国際海事機関（IMO）本部である。

4.1.1 CO₂の海底下貯留（2006年改正）及び海底下貯留目的のCO₂輸出（2009年改正）

ロンドン議定書は2006年の改正により、CCS目的で回収されたCO₂が附属書 I に追加され、許可を受けることでCO₂の海底下貯留が認められた。さらに、ロンドン議定書では、海洋投棄目的（海底下貯留目的含む）で廃棄物等を輸出することが一切禁止されていたが、CCS活用の必要性が高まってきたため、2009年の改正により、例外として、輸出国と受入国が協定又は取決めに締結していることを条件に、海底下貯留目的のCO₂輸出が認められた。一方、2009年改正が発効するためには、締結国の3分の2（54か国中36か国）の受諾が必要となるが、2024年1月時点で受諾は11か国のみである。2009年改正は未発効だが、2019年の締約国会議決議により、当該改正の暫定的適用に関する宣言をIMOに寄託した国は当該改正を暫定的に適用することが可能となった。ノルウェー、英国、オランダ、スウェーデン、デンマーク、ベルギー、スイス、韓国の8か国が暫定的適用を宣言しており、2009年改正が暫定的に適用されている。

4.2 バーゼル条約

有害な廃棄物の国境を越える移動は1970年代から欧米諸国を中心にしばしば行われてきた。1980年代に入り、ヨーロッパの先進国からの廃棄物がアフリカの開発途上国に放置されて環境汚染が生じるなどの問題が発生し、何らかの事前の連絡・協議なしに有害廃棄物の国境を越えた移動が行われ、最終的な責任の所在も不明確であるという問題が顕在化した。これを受けて、OECD及び国連環境計画（UNEP）で検討が行われ、1989年3月、スイスのバーゼルにおいて、一定の有害廃棄物の国境を越える移動等の規制について国際的な枠組み及び手続等を規定した「有害廃棄物の国境を越える移動及びその処分の規制に関するバーゼル条約」が作成された（1992年5月5日効力発生。2023年11月現在、締約国数は189か国、EU及びパレスチナ）。

バーゼル条約では、この条約に特定する有害廃棄物及びその他の廃棄物の輸出には、輸入国が締約国であっても、輸入国の書面による同意を求めているため、同意がなければ、輸出を行うことはできない。一方、非締約国との廃棄物の輸出入を原則禁止しているものの、条約の趣旨に反しない限り、非締約国との間でも、廃棄

物の国境を越える移動に関する二国間又は多数国間の取決めに締結することを条件に輸出入を認めている。

4.2.1 規制対象となる有害廃棄物

バーゼル条約は規制対象となる有害廃棄物を附属書 I, III, VIII及びIXに規定している。一方、輸出国、輸入国又は通過国である締約国の国内法令により有害であると定義され又は認められている廃棄物についても、バーゼル条約の規制対象となることが規定されている。CO₂は附属書に記載されていないが、輸入国又は通過国が国内法令でCO₂を「有害廃棄物」として指定している場合は、バーゼル条約の規制対象となるため、輸出には輸入国又は通過国の同意が必要となる。

5. GHG規制における船上CCS/CCUの課題

船上CCS/CCUの普及には多くの課題があるが、とりわけ、回収CO₂を貯留／利用するためのバリューチェーンの確立が不可欠である。図3に示す通り、回収CO₂の海底や地中への恒久貯留をはじめ、油田に回収CO₂を圧入することで原油の回収率を向上させるEOR「Enhanced Oil Recovery（原油増進回収）」、回収CO₂をメタンやメタノールなどの燃料や化学品の原料として再利用するカーボンリサイクルなどが期待されており、これらのプロジェクトが実施されているものの、いまだ商業的に成り立つ段階には至っていない。船上CCS/CCUを普及させるには、まずは船上回収CO₂を陸揚げするための港湾設備を整備する必要があるが、上述の通り、欧州においても荷役可能な港は限られており、世界中の港に受け入れ設備を整備するにはかなりの時間を要すると考えられる。さらに、上述の通り、ロンドン議定書はCO₂の海底下貯留及び海底下貯留目的のCO₂輸出を規制しており、バーゼル条約は有害廃棄物の輸出を規制しているが、どちらも輸出国と受入国の同意が必須であり、船上で回収したCO₂を陸揚げするには、該当船の旗国と受入国との間で明確な合意が必要となる可能性がある。

EU-ETSでは、償却義務の対象外として、船上回収CO₂のセメントなどへの恒久的な固定は認められているものの、メタノールやメタンなどの燃料への再利用（カーボンリサイクル）は認められていない。このカーボンリサイクル燃料の取り扱いについては、現在、IMOで検討されているものの、CO₂の排出責任者（CO₂排出者）を、CO₂を回収した者とするのか、カーボンリサイクル燃料を使用して最終的にCO₂を排出した者とするのかなど、その割り当ては非常に難しい問題である。

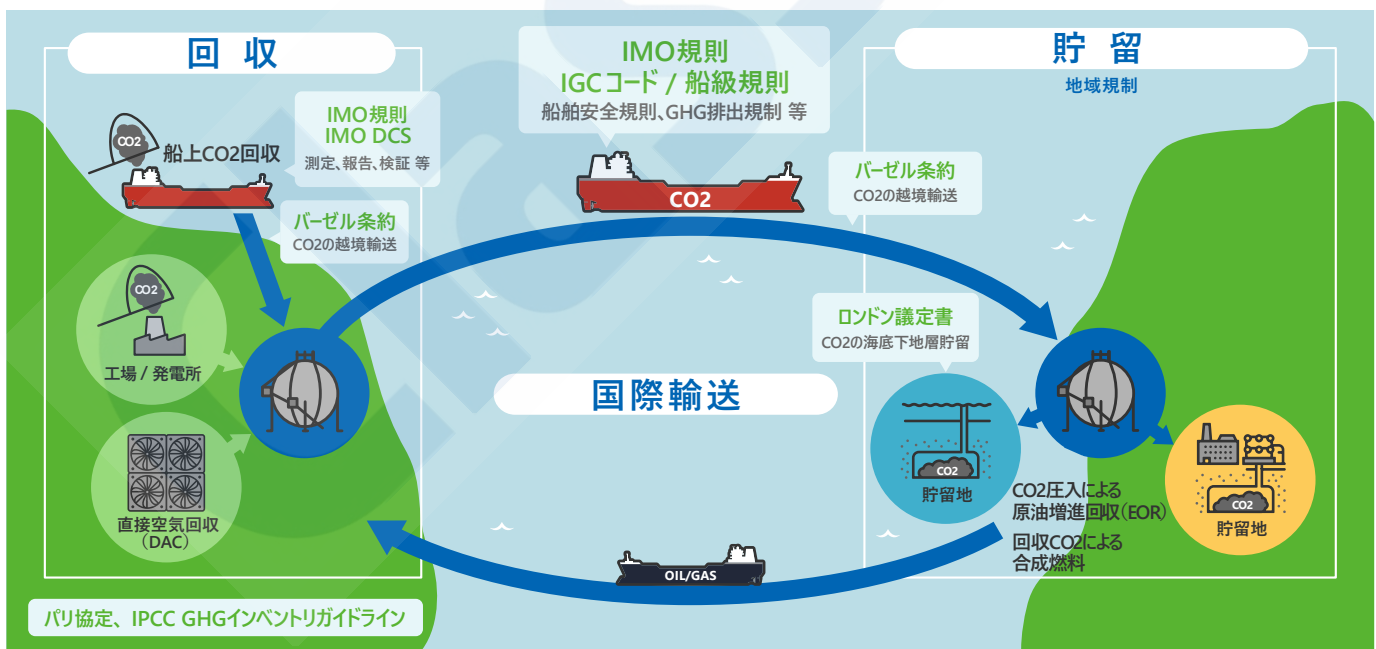


図3 回収CO₂のバリューチェーンに関する規制の枠組み

参考文献

- 1) EU : Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community (Text with EEA relevance)
- 2) EU : Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006 (Text with EEA relevance)
- 3) EU : The EU ETS and MRV Maritime General guidance for shipping companies, Guidance document No. 1, Updated Version, 5 November 2024
- 4) EU : Commission Delegated Regulation (EU) 2024/2620 of 30 July 2024 supplementing Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council as regards the requirements for considering that greenhouse gases have become permanently chemically bound in a product
- 5) EU : Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC (Text with EEA relevance)
- 6) IMO : 2024 GUIDELINES ON LIFE CYCLE GHG INTENSITY OF MARINE FUELS (2024 LCA GUIDELINES), IMO RESOLUTION MEPC.391(81)
- 7) IMO : ANNEX 8 WORK PLAN FOR THE DEVELOPMENT OF A REGULATORY FRAMEWORK FOR THE USE OF ONBOARD CARBON CAPTURE AND STORAGE (OCCS), MEPC 83/17

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。

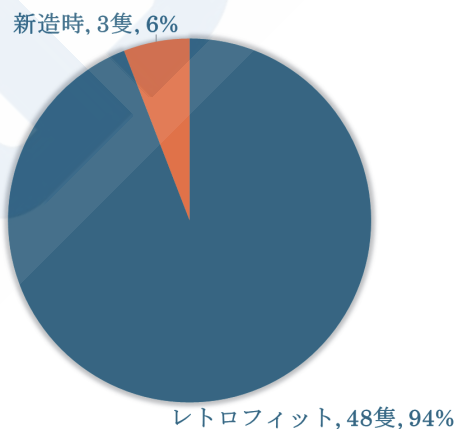


図1 世界のCO₂回収貯蔵装置の搭載隻数（Clarksons Researchデータに基づく）

^{*} 開発本部 技術研究所

^{**} 技術本部 機関部

^{***} 技術本部 技術部

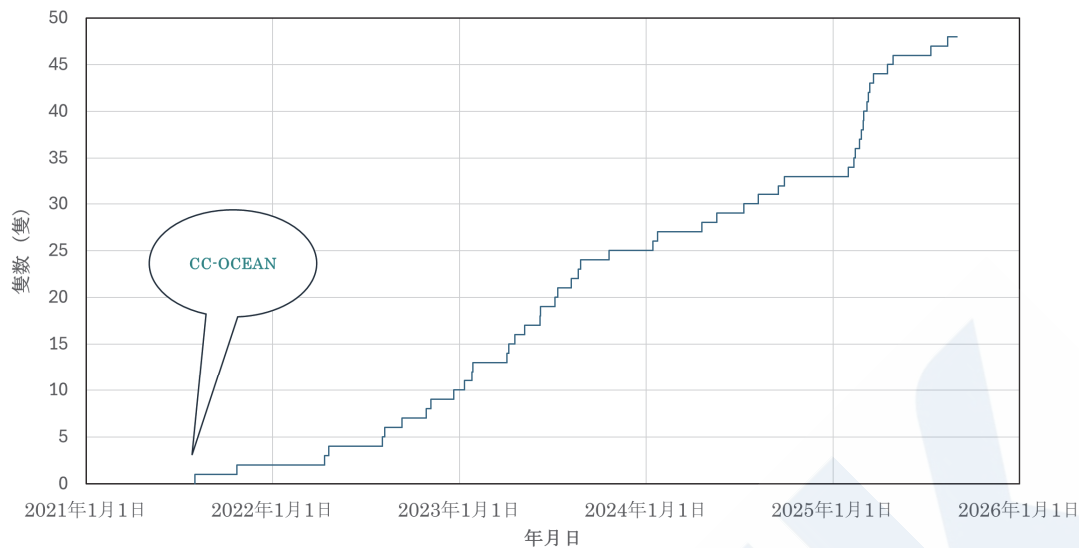


図2 レトロフィットによるCO₂回収貯蔵装置搭載船の推移 (Clarksons Researchデータに基づく)

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。

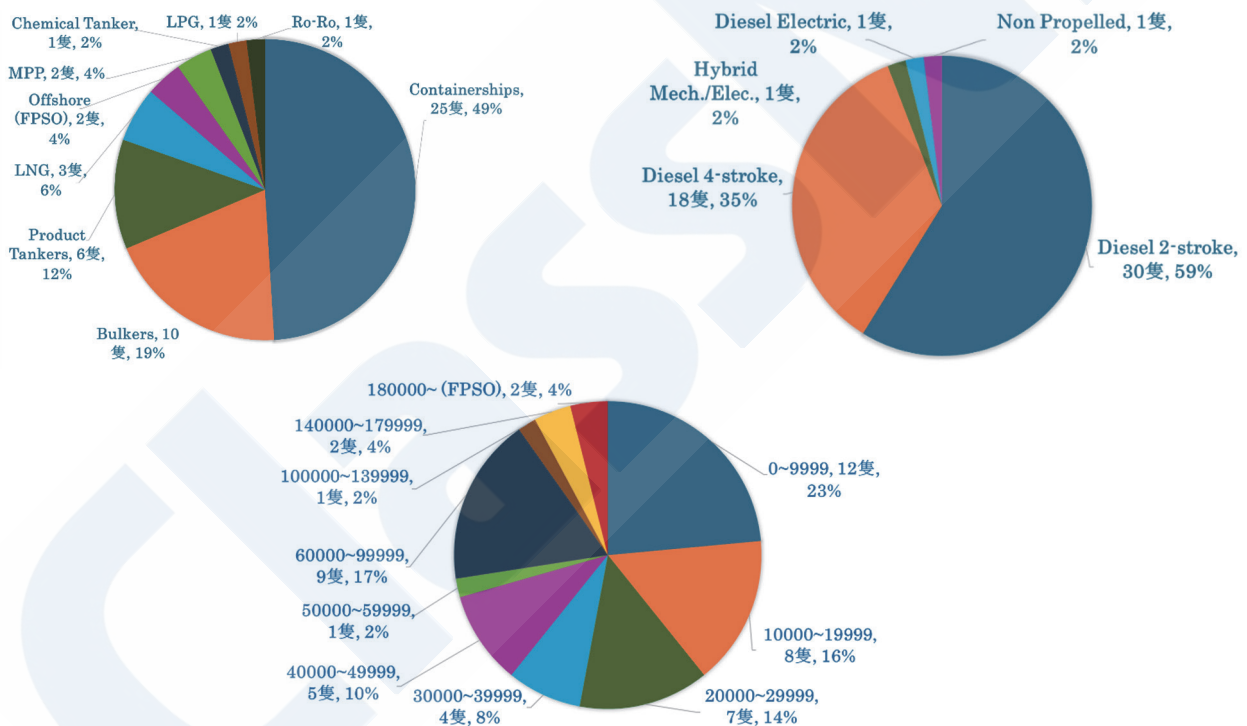


図3 CO₂回収貯蔵装置搭載船の分類別（船種、推進方式、DWT）割合 (Clarksons Researchデータに基づく)

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。

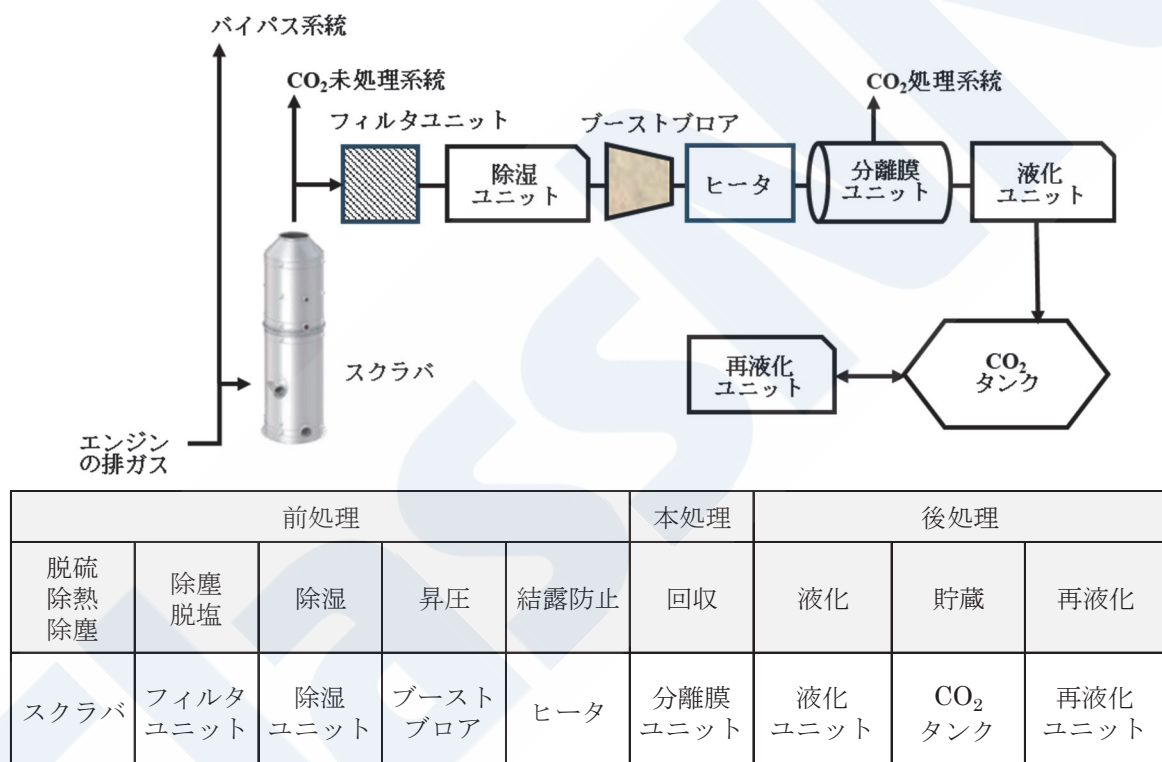


図4 膜分離法によるCO₂回収貯蔵装置の基本構成

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。

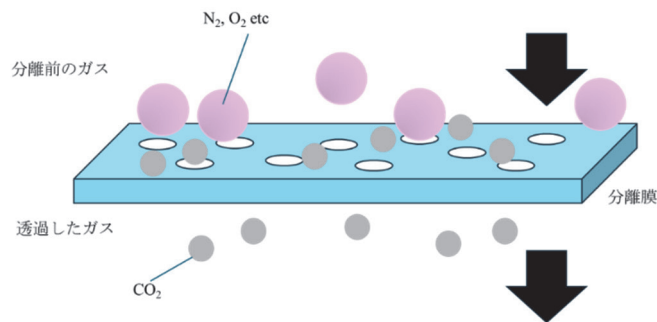


図5 分子ふるいのイメージ

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ー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。

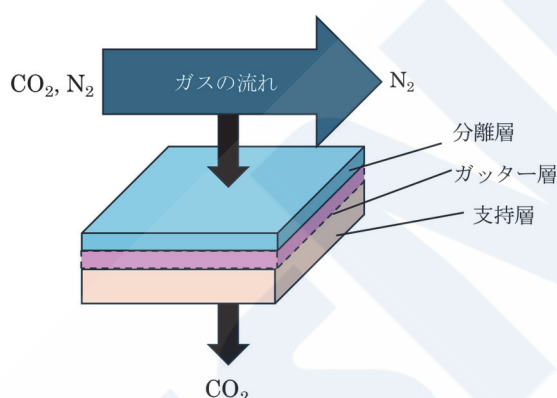


図6 平板膜の構造

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。

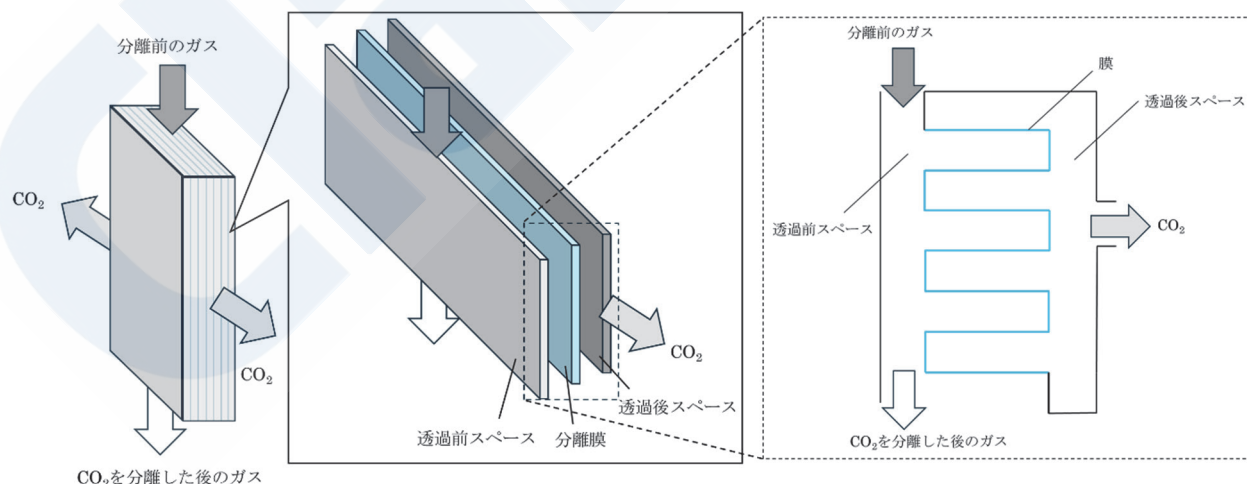
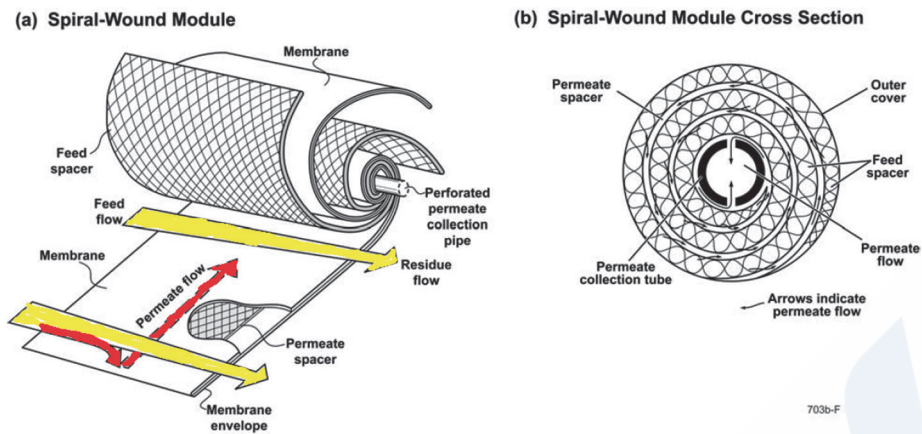


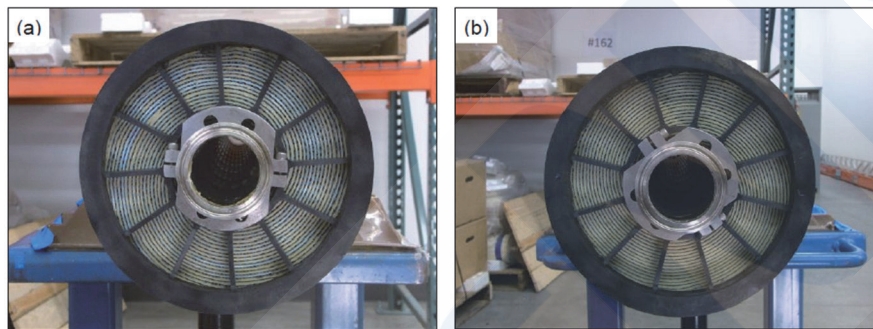
図7 平板膜のモジュール構造

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。

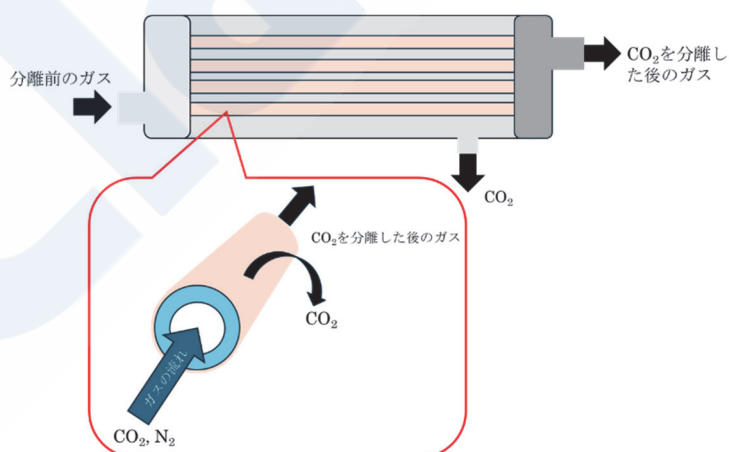


図9 中空糸膜の構造とそのモジュール

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) ブーストブローは、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

CCS事業における船舶輸送

— LCO₂低温低圧輸送方式概説 —

村田 朋之*

1. はじめに

日本政府は2020年10月に、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラル目標を掲げ、2021年4月には2030年度において温室効果ガスを2013年度比で46%削減することを宣言した。本稿では二酸化炭素削減のひとつの方法としてCCS*1を取り上げ、液化二酸化炭素（LCO₂）の低温低圧船舶輸送と「LCO₂船舶輸送バリューチェーン共通化ガイドライン」（以下、共通化ガイドライン）について概要を解説する。

2. 低炭素化技術

カーボンニュートラルを実現するための技術＝低炭素化技術であるが、

- a) 現行機器の省エネ化
- b) 再生可能エネルギー（太陽光・風力・水力・地熱等）
- c) 代替燃料（水素・アンモニア・バイオマス燃料・SAF燃料・バイオディーゼル燃料・合成燃料e-fuel・固形燃料RPF等）
- d) CCS・CCUS
- e) 原子力発電

等が挙げられ、それぞれの分野で鋭意研究開発が進められている。いずれの技術にもメリット・デメリットがあるが、特にCO₂の排出が避けられない業種において、かつ処理されるべき膨大な量のCO₂に対応するには、開発期間や実現可能性とバリューチェーン総合コストの面から、現時点ではd) CCS・CCUSが最も現実的な方法だと考えられる。

3. CCS事業と各種法令・規則

3.1 CCSに関連する条約・法令・規則等

- ◆ バーゼル条約 有害廃棄物やその他の廃棄物の国境を越える移動およびその処分の規制に関する国際条約。環境汚染や人の健康被害を防ぐことを目的とする。1989年採択（注：現在、二酸化炭素は対象物質ではない）
- ◆ ロンドン条約 廃棄物（限定列举）の海洋における投棄を禁止
1972年採択・1975年発効・日本では1980年締結
1996年議定書 海洋汚染防止を強化
2009年議定書改正 海底下の地層への処分のための二酸化炭素を含んだガスの輸出を一定の条件下で行うことができるとする。輸出国と受入国が協定（所謂、二国間協定）を締結することを条件として、二酸化炭素を含んだガスの輸出を行うことが可能になった。
- ◆ 海洋汚染防止法 海底下貯留するCO₂の濃度は99%Vol以上で回収方法はアミン吸収方式に限定
- ◆ 二酸化炭素の貯留事業に関する法律（所謂、CCS事業法）2024年5月成立
- ◆ 2025年改正GX推進法 GX-ETS排出量取引制度 2026年度から二酸化炭素（CO₂）排出量が年間10万トン以上の企業に参加を義務づける。排出量の大きい電力会社や鉄鋼、化学、運輸業をはじめ300～400社が対

* JOGMEC：独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構 エネルギー事業本部 CCS事業部 先進的CCS事業課 船長

*1 CCSはCarbon dioxide Capture and Storage, CCUSはCarbon dioxide Capture, Utilization and Storageの略で、大気中に放出されるはずだったCO₂を回収し有効活用あるいは貯留することで、地球温暖化の原因とされるCO₂排出量を削減することを意味する。工程は大別してCO₂の①分離・回収 ②輸送 ③有効活用または貯留、の3パートに分けられる。

象となる見込み

- ◆ EU-ETS EU排出量取引制度 海運部門は2024年1月適用開始

3.2 LCO₂船舶輸送に関連する法令・規則等と関連項目

- ◆ IGCコード：国際海事機関（IMO）において採択された「液化ガスのばら積み運送のための船舶の構造及び設備に関する国際規則」
- ◆ NK鋼船規則：液化ガスばら積船・Type-C貨物タンク・溶接後熱処理・タンク材料等
- ◆ 危険物船舶運送及び貯蔵規則：高圧ガス*2 *3
- ◆ 港則法：危険物を荷役する場合
- ◆ 船員法：危険物取扱責任者
- ◆ SIGTTO*4：Carbon Dioxide Cargo on Gas Carriers ガイドライン

4. JOGMECの先進的CCS事業

4.1 先進的CCS事業

GX推進戦略に基づき2030年代初頭までのCCS事業開始に向けた事業環境を整備するため、模範となる先進性のあるプロジェクトを支援している。国内貯留5案件、海外貯留4案件の9案件合計で年間約2,000万トンのCO₂貯留を目標とする。これら9案件のうち、船舶案件は国内・海外輸送を合わせて6案件である。

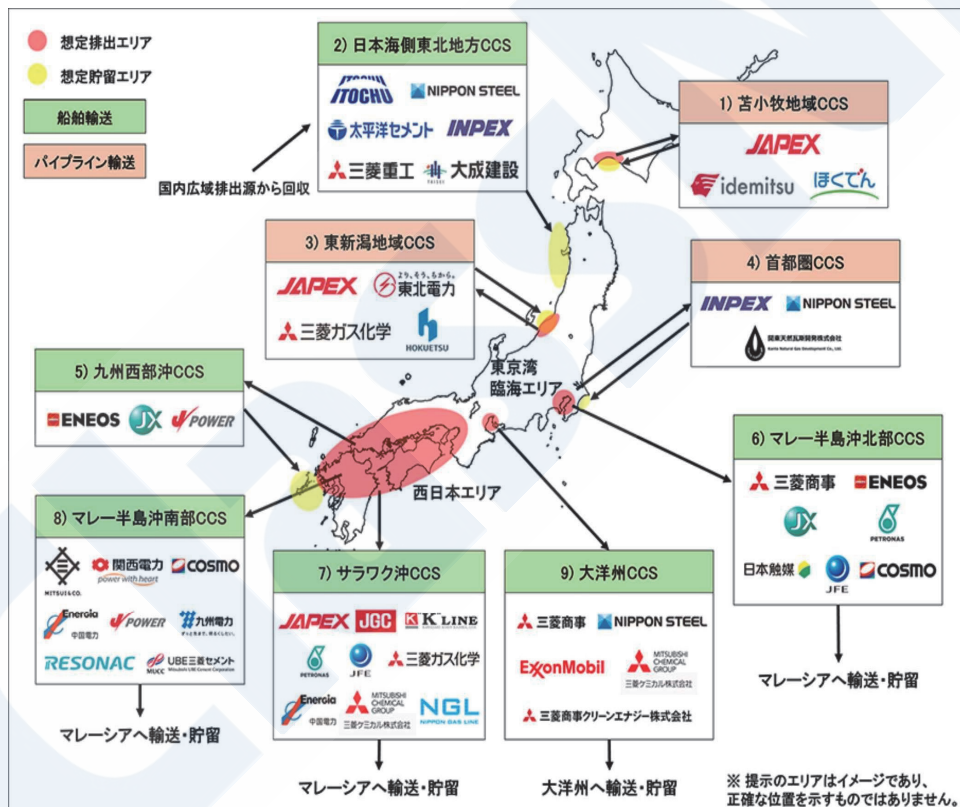


図1 JOGMEC 先進的CCS事業 https://www.jogmec.go.jp/ccs/advancedsupport_002.html (2024年6月時点)

2023年に実施したCCSバリューチェーンの構築可能性について検討する事業性調査の結果、以下の点がCCSを実現する上での共通的な課題として認識されている。

- ① CO₂の回収に必要な蒸気や電力等の用役コストの削減
- ② 船舶によるCO₂輸送に必要な貯蔵タンクや船舶の国内建造能力の増強

*2 LCO₂輸送船は海上交通安全法の「危険物積載船」には当たらない。水先法も同様の解釈

*3 海上衝突予防法には危険物積載船の航法について直接的な記述はない。

*4 SIGTTO (The Society of International Gas tanker and Terminal Operators)：国際ガスタンカーおよびターミナルオペレーター協会／非営利の非政府組織 <https://www.sigtto.org/>

③ CO₂の貯留可能量，地下への圧入性，封じ込め能力，長期健全性の評価のためのデータ取得
本稿では次段以降で，特に②船舶輸送について記述する

4.2 CO₂の大量輸送手段

CCSにおけるCO₂の大量輸送手段には大別してパイプライン輸送と船舶輸送の2種類がある。

- (1) **パイプライン輸送**：現代において十分に確立・成熟した流体輸送技術であり，LPG・LNG・CO₂（EOR用）輸送等でも使われている。設備完成後は昼夜を問わず連続的に大量輸送ができるというメリットがある。建設時に製造場所と貯留場所，そしてそれらを結ぶルートが固定されているため，設置後に変更することは難しい。長距離のパイプライン建設のCAPEX，メンテナンスや土地使用料等のOPEX，常温高压輸送での事故発生時のリスク（例えば人口密集地域を通る配管からの漏洩）と輸送停止の可能性等に留意が必要。
- (2) **船舶輸送**：LCO₂の中温中圧方式での輸送は，陸上ではタンクローリーやポンプによるものが日常的に行われている技術である。国内の船舶輸送では過去に「あまぎ丸」（中温中圧，タンク容量365m³，1986年建造）での輸送実績があるが，低温低压方式での船舶輸送技術は未だ確立されていない。

船舶輸送はCO₂の払出場所（港）と受入場所（港）の設定・変更が容易で，輸送ルートの変更も自由度が高い。海上において漏洩事故発生時には風によって直ちに大気拡散するため窒息危険性が比較的低い。また輸送システムの面から見ると事故発生時でも代替船による輸送継続が可能であり冗長性に優れる。一方，船舶建造コストCAPEX（特に低温貨物タンクの材質，タンク大型化に対応する製造設備の整備），船舶の保守管理費や燃料費のOPEX，輸送時に船舶機関等から発生するCO₂の低炭素化，液化ガス輸送の資格を持つ船員の確保等に留意が必要である。

一般的にLCO₂の輸送距離が200km以上になると，パイプライン輸送と比較して船舶輸送がコスト的に有利という研究成果が知られている。海上輸送では輸送船が大型で1航海あたりの輸送量が多い方が効率が良いのだが，中温中圧方式だと使用できるタンクの仕様（高い圧力に対応する鋼材・板厚・直径）に制限があり一定以上の大型化には難点がある。それに対して低温低压方式では圧力タンクの設計圧力が低いためサイズを大きくできる優位性がある。ただし，低温低压（-50℃・0.58MPaG）輸送は，LCO₂がドライアイス化する温度圧力の三重点（-56.6℃／0.42MPaG）にかなり接近しているというリスクがあり，輸送安全性と輸送温度・圧力範囲，そして経済的合理性とのベストバランスを策定しなければならない。

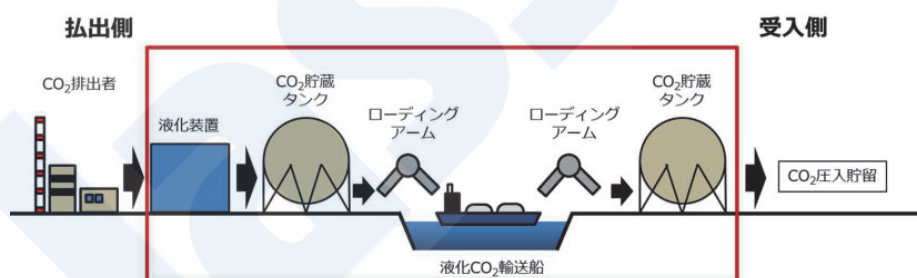


図2 LCO₂船舶輸送によるCCSの一般的な流れ／共通化ガイドライン P. 3

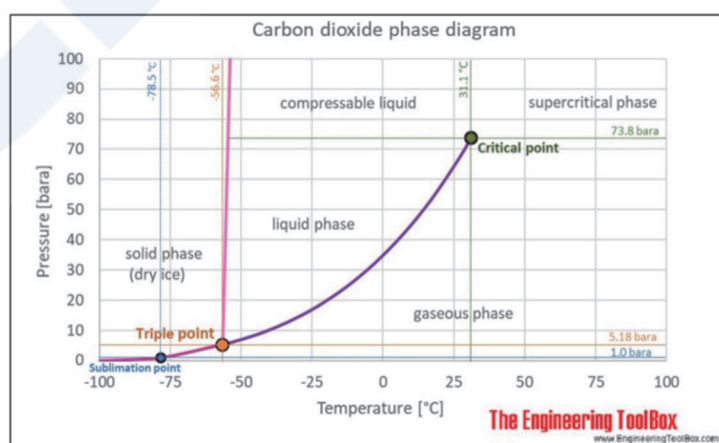


図3 LCO₂フェーズ表

Source: https://www.engineeringtoolbox.com/CO2-carbon-dioxide-properties-d_2017.html

4.3 2方式の比較検討

(1) 中温中圧方式 Medium Temperature Medium Pressure

CCS技術の研究では先頭を行く欧州の殆どのCCS事業では船舶輸送に中温中圧方式を採用しており、世界初のフルスケールLCO₂輸送事業であるノルウェーのNorthern Lightsの輸送船も中温中圧方式である。

欧州のプロジェクトが中温中圧方式を採用する理由は、

① 中温中圧方式の技術成熟度レベル (TRL) が高いため (既に確立されて長期間の運用実績がある)

1823年にマイケル・ファラデーとハンフリー・デービーによって世界で初めて液化に成功して以来、CO₂は様々な分野で使用されてきた。例えば炭酸飲料、ビール、スパークリングワイン、アーク溶接のシールドガス、化学工業原料、消火剤として利用され、近年では農業用 (ビニールハウス栽培の環境用)、パンク修理材、炭酸ガスレーザー等にも使われている。日本国内では高圧ガス保安法の規定によりCO₂は緑色のボンベに封入されている。(図4) 立体駐車場や電気室のように水消火では対応が不向きな場合にCO₂ (あるいはハロン等の窒息性ガス) 消火設備が設置されている事例がある。さらに大型フェリーや自動車専用船のような車両火災のリスクがある船舶では船内消火用としてLCO₂の大型タンク設備を備えている場合がある。(図5) これらの据置型タンクに補充するためには、CO₂製造工場からタンクローリー (中温中圧) で輸送しフレキシブルホースで充填するという作業が日常的に行われている。

② 欧州域内のプロジェクトは輸送距離が短いため

輸送距離が短い場合、液化ガス輸送中にタンク内に侵入する熱量によって発生するBOG (Boil off Gas) が少ない。つまり設置場所を必要とし、かつコストの掛かる再液化装置あるいは冷却装置を持たなくても、断熱材のみで入熱を抑制しタンクの運用圧力を越えずに保圧輸送できることを意味する。もちろんタンク設計圧力を輸送中の圧力上昇分を勘案して設定する必要があるので、高ニッケル鋼のような高級鋼材を採用するか、炭素鋼ではタンク壁厚さを増やす、あるいはタンク最大直径に限度がある点に留意が必要。

③ ドライアイス化リスクが低いため

LCO₂がドライアイスに相転移する現象は液温度・圧力が三重点以下に低くなった場合に発生するので、輸送温度・圧力が三重点から遠いこの方式は相対的にドライアイス化リスクが低いというメリットがある。



図4 液化炭酸ガス容器 (小型ボンベは常温高圧)

神鋼エアテック株式会社ホームページから

https://shinko-airtech.com/gasliquid_CO2.html



図5 船舶用CO2消火装置 (-17℃・2.1MPa)

エア・ウォーター防災株式会社ホームページから

<https://awb.co.jp/service/vessel/>

(2) 低温低圧方式 Low Temperature Low Pressure

将来の日本のCCS事業における大量輸送と大量貯留を考えた場合、海外貯留地というのは有望な選択肢になる。そのためには長距離・大量輸送の可能な大型LCO₂輸送船が必要になるが、その条件下では低温低圧方式が最も合理的だと言えるだろう。共通化ガイドラインではLCO₂タンクの最低運用温度を-50℃、最低設計温度を-55℃と設定している。LCO₂の液温が低いほど液密度が高くなり輸送質量は増えるのだが、IGCコード、“6.4 Requirements for metallic materials”に規定の通り、船用貨物タンクの設計温度を-55℃より低く設定する場合には、より高度な設計要件への対応が求められ、それによる設計・製造難度の上昇に伴うコスト増加を避けることと、ドライアイス化のリスクがある三重点 (-56.6℃) からの安全マージンを取るため上記の設定値が採用されている。

先に述べた中温中圧方式と比較して、低温低圧方式では①技術成熟度レベル（TRL）は「6～7：実証段階」で中温中圧方式に劣後している、②海外貯留地までの長距離輸送なのでBOGを処理する再液化装置あるいは冷却装置は必須、③三重点に近い液温度・圧力なのでドライアイス化のリスクが高くなる、④払出・受入タンク設備が1回の船舶輸送量より大きい容量のものが要求され、陸上CAPEXが高くなる、という欠点があるが、それに対して以下の利点がある。

- a) -50°C の LCO_2 の密度は 1.15kg/L であり、 -20°C での密度 1.03kg/L より1割以上大きく、輸送効率が良い。
- b) 貨物タンクの設計圧力が中温中圧のものより低いので、高価なニッケル鋼よりも比較的安価な低温炭素鋼を使うことが可能で、また板厚を薄くあるいはタンクの直径を大きくでき、軽量化と積載量の大容量化そしてコストダウンが期待できる。（鋼材板厚制限と溶接後熱処理の詳細については説明を割愛する。）
- c) 船舶の大型化ができればプロジェクトに必要な LCO_2 輸送量に対して使用する船舶数や航海数を低減・合理化できることを意味し、CAPEX・OPEXを合わせたトータル輸送コストの低減が期待できる。
- d) 船舶数が低減できるということは、国内造船業の船舶建造能力の不足緩和に有利であり、またそれらの船舶に乗船する船員の数も低減できるため、船員不足の緩和にも有利となる。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）では LCO_2 輸送船での長距離・大量輸送について検討した結果、低温低圧方式に優位性を見出し2021年から委託事業「CCUS研究開発・実証関連事業」として、低温低圧（ $-50^{\circ}\text{C} \cdot 0.58\text{MPaG}$ ）の LCO_2 の大量・長距離輸送試験に向け建造された実証試験船「えくすくうる」996G/T（2023年就航）を使い、各種荷役や船舶輸送についての実証試験が行われている。

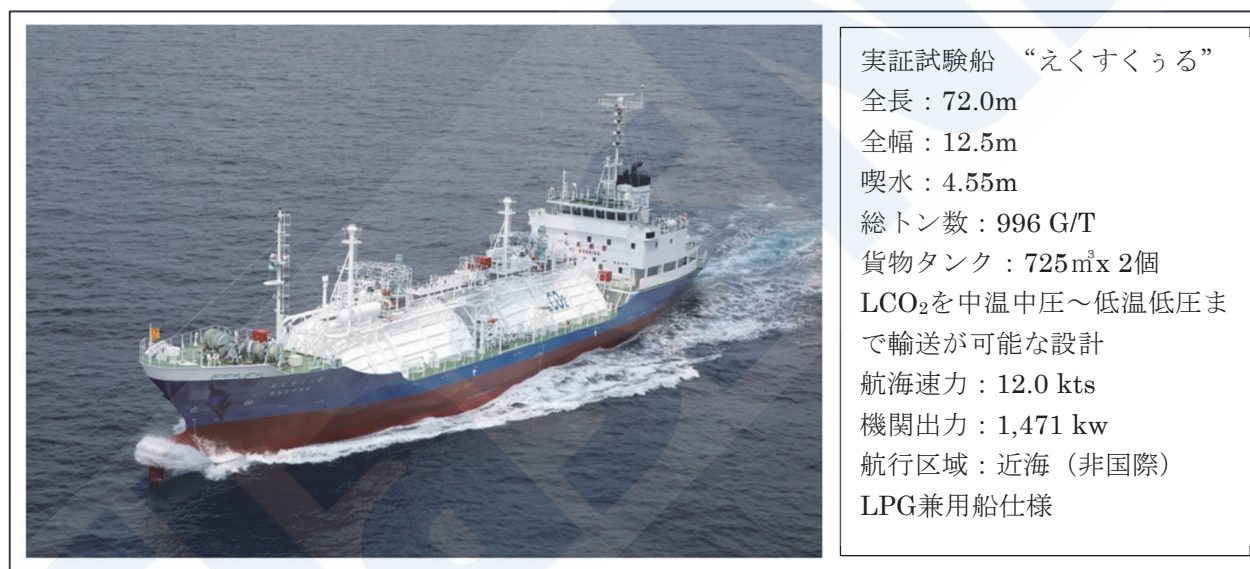


図6 えくすくうる^{*5} 日本ガスライン株式会社ホームページNEWS 2023.11 <https://ngl.co.jp/news/>

4.4 欧州CCS事業の特徴

欧州のCCSプロジェクトの形態は、複数エミッターの工場から集合パイプラインで積出港の施設まで送り、そこで集積・液化を経て払出タンクに貯め、中温中圧で輸送船に積載し欧州域内を輸送、貯留施設の受入タンクに揚荷し超臨界状態まで昇温昇圧して海底深くに注入という方式が多く見られ、ロンドン議定書（二国間協定）の適用を基本にEUあるいはEU以外とも二国間の越境輸送を行うことを想定している。

また欧州では、数年前から小規模の CO_2 海上輸送が商業化されており、生産工場から沿岸の流通ターミナルまで食品品質の CO_2 を輸送するために船舶・バージが使用されている。現在の商用船のサイズは $1,000 \sim 1,500\text{m}^3$ の間であり、輸送圧力は $14 \sim 20\text{barA}$ の範囲（中温中圧）である。

^{*5} “えくすくうる”という船名の由来は「CCSは地球温暖化防止への対策」と「 LCO_2 を -50°C の低温で輸送する船」というテーマを前提に考案されたもの。液化二酸化炭素を意味する LCO_2 をアルファベットに分解して LCOO とし、アナグラムで COOL と変換、「地球を冷やすためのCCS」とさらに「 -50°C の LCO_2 はとても冷たい」という2重の意味で COOL の前にEを冠して EXCOOL に造語。そして地球環境への優しさと日本らしさを表現するために、ひらがな表記の“えくすくうる”とした。（船名考案は筆者）

以下に、欧州におけるLCO₂船舶輸送の研究および進行中の事業についていくつか紹介する。

(1) ZEP^{*6}報告書 Achieving a European market for CO₂ transport by ship

この報告書において、欧州における船舶輸送は次のように位置付けられている。『欧州委員会は2030年にCO₂を少なくとも年間5,000万トン貯留することを目指す。船舶輸送はCCS事業において重要な役割を担う。年間100万トンのCO₂を輸送するには積載量20,000トンのLCO₂船が1ラウンド1週間の航海を行う必要がある。26件の貯留プロジェクトがCO₂の船舶輸送を使用する。欧州の為政者は工業的脱炭素化のためにCO₂の船舶輸送の開発について支援すべき。(Page 7)』

(2) ZEP報告書 Guidance for CO₂ transport by ship 2022

『この報告書は、CO₂を船舶で輸送することを目的としたCCSプロジェクトにおいて、CO₂インフラストラクチャの開発を最適化するため相互運用性が重要になる可能性があり、CO₂仕様（組成、圧力、温度など）・船舶の設計と仕様（例：積み降しを参照）については、ある程度の標準化の必要性があるとして策定されている。(Page 7)』

(3) SINTEF^{*7}Report

SINTEFでは2021年に、中温中圧方式と低温低压方式との詳細な比較研究を行い、最終的に圧力7barGで液温-46℃の船舶大量輸送が最もコストが（約30%）低くなると結論付けている。（SINTEFの元論文でも確認済）

A July 2021 SINTEF paper entitled “At what pressure shall CO₂ be transported by ship? An in-depth cost comparison of 7 and 15 Barg Shipping” concludes that 7barg /-46C is the optimal condition for large volume shipping due to the lower vessel cost(~30%)

Source: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5635/pdf>

図7 ZEP Guidance for CO₂ transport by ship 2022 Page14

(4) Northern Lightsの予測

Northern Lights Projectは、彼らのフルチェーン（市場ベースの船舶設備投資コストを使用した）経済評価の情報として、20,000m³以上の大型LCO₂輸送船では低温低压方式が最低コストになると結論付けている。

5.1.1.2 Recent Northern Lights projections

The Northern Lights project has provided information advising that their full chain economic evaluation using market-based ship CAPEX costs indicates that

Vessel cargo size	Lowest end-to-end costs
Up to 15,000m ³	Medium pressure ((~15 barg) and at -30°C) gives lowest cost
15,000-20,000 m ³	Evaluation inconclusive. Either medium or low pressure may be lower cost depending on finer details of the project
Above 20,000 m ³	Low pressure ((~7 barg) and at -50°C). gives lowest cost

Figure 6: Cryogenic ship cargo size at different pressure and temperature

The reason for the two cryogenic operating conditions relates to the mass of steel required. In the smaller vessels the steel required to contain a pressure of 15 barg is acceptable. In a larger vessel the mass of steel required to contain 15barg becomes uneconomic despite the greater energy requirement to cool the liquefied gas to -50°C.

図8 ZEP Guidance for CO₂ transport by ship 2022 Page15

^{*6} ZEP : Zero Emissions Platform—欧州委員会の戦略的エネルギー技術計画（SET-Plan）の下部組織である欧州の技術とイノベーションプラットフォーム（ETIP）があり、ZEPは、CCSとCCUの展開に関する欧州委員会の技術顧問である。

^{*7} SINTEF : 「産業技術研究財団」ノルウェーのトロンハイムに本部を置く、1950年に設立された独立研究機関であり、契約による研究開発プロジェクトを実施している。

(5) 欧州LCO₂船の事例**Northern Lights / The Longship CCS project**

事業概略：ノルウェー・デンマーク・オランダの顧客から回収したCO₂をノルウェー西部のOygardenにある受入基地まで輸送。それぞれ年間40万トン以上を輸送し、パイプラインで海底2,600mの貯留層に圧入する。



図9 川崎汽船株式会社ホームページ 2024年11月26日ニュースリリースより
https://www.kline.co.jp/ja/news/liquefied_gas/liquefied_gas-20241126.html

Greensand Future Project

事業概略：デンマーク Esbjerg ~ Nini West Platform (North Seaの枯渇油田) へ、年間40万トンの輸送を計画

Carbon Destroyer 1：2025年5月14日進水 EUで建造された最初の大型LCO₂船



図10 The Maritime Executive 2025.05.14記事より
<https://maritime-executive.com/article/video-carbon-destroyer-1-eu-s-first-co2-carrier-for-ccs-is-launched>

5. LCO₂船舶輸送バリューチェーン共通化ガイドライン

5.1 LCO₂船舶輸送バリューチェーン共通化ガイドラインの策定

JOGMECでは、先進的CCS事業における船舶輸送のパートだけでなく、バリューチェーン全体の最適効率化を図るため、経済産業省の協力のもとLCO₂船舶輸送バリューチェーン共通化協議会（以下、共通化協議会）を設置し協議・検討を重ねた。2025年5月30日、先進的CCS支援事業で活用されるとともに、将来CO₂の船舶輸送を行うCCS事業を検討する際に参考となるよう、「CCSの社会実装に向けたLCO₂船舶輸送バリューチェーン共通化ガイドライン」*8を発行した。

共通化協議会では、共通化の検討を行うにあたり、長距離・大量輸送の船舶輸送を実現するには低温低圧方式が最適であるという前提に基づき検討し、とりまとめている。

5.2 大型の低温低圧LCO₂輸送船*9

5.2.1 共通化仕様

日本のCCS船舶輸送において欧州プロジェクトと決定的に違う条件は、海外貯留地までの輸送距離が相当長く、片道2,300～5,000NM程度の航行距離と、6日～16日程度の航海日数を想定しており、それゆえ船体の大型化と大量輸送によるコストダウンが必要という部分である。

(1) 基本船型

① 全長：235m未満

協議会参加者に対し「岸壁等の制約を踏まえた受入可能な船舶の最大全長に関する調査」を実施した結果。

② 喫水：11.5m以下

協議会参加者の計画する、「LCO₂の払出・受入が想定されている既存岸壁の荷役栈橋の新設が想定されている岸壁の喫水制限、航行予定航路の水深、航行規則、潮汐等の調査」を実施した結果。

③ 貨物容量：50,000m³

先述した船体条件と航海条件に基づき、搭載できる貨物タンクを低温炭素鋼で建造した場合を想定し、最大積載量を6タンク合計で50,000m³と試算。

④ タンクの設計温度・圧力と運用温度・圧力範囲

設計温度 -55℃, 圧力 0.8MPaG

運用温度 -50℃～-44℃, 圧力 0.58MPaG～0.76MPaG （純粋LCO₂での数値）

(2) 荷役設備

① 荷役時間：16～20時間

港則法に定める危険物積載船については港長によって夜間の入出港や荷役時間が制限されている事例が多くあり、それら入出港時間と荷役時間を勘案したサイクルを、案件毎に最適化して検討する必要がある。

② 流速：2m/s～5m/s

LCO₂の配管内流速を上げるとドライアイス化のリスクが増大すると考えられ、欧州を中心に多くの専門家による研究が進められているが、低温低圧LCO₂の安全荷役の最大流速は未だ確定されていない。実績ではNEDO実証試験船えくすくうるのLCO₂の荷役では、配管内流速を2m/s*10を基本として本船～陸上設備間の移送試験がなされている。よって本ガイドラインでは安全性確保の観点から2m/sを起点として検討している。当然だが流速が低い場合は、予定荷役量・荷役時間を賄うために配管の条数が多くなることに留意すべきである。また海外造船所の設計では配管内最大流速を4～8m/sの範囲で提示されており、今後は日本の造船所側の設計でも少なくとも同等レベルの流速を提示できないと競争力として劣後することになる。

③ 本船マニフォールド配管条数と配置

配管径はDN200～DN400を想定。配管径が細いと流量が少なくなり、荷役時間が長くなることを許容す

*8 「本ガイドラインにより、安全確保を前提としたLCO₂船舶輸送における①払出・受入の互換性及び共同利用の可能性の確保、②効率的なサプライチェーンの確保、③輸送コストの低減が期待されるものの、本ガイドラインが各事業者のCCS事業構想への拘束力や規制事項を有する規格・標準を定めるものではない。」（共通化ガイドライン P.2より）

*9 共通化ガイドラインでは大型外航船以外にハブ&クラスターまたは国内輸送用の中型（23,000m³型）・小型内航船（5,000m³型）の仕様も策定しているが、本稿では紙面の都合上それらについては説明を割愛する。

*10 日本ガスの最新の実証試験の報告では、船上に設置された2基の貨物タンクを用いて、液化CO₂をタンク間で移送する船上CO₂ハンドリング実証を実施し、流速4m/s以上での移送試験を行っている。

<https://ngl.co.jp/wordpress/wp-content/uploads/2025/06/20250630船上高流速PR-和文.pdf>

るかあるいは配管条数を増やす必要がある。また現行の液化ガス輸送船であるLPG船やLNG船の配管径を揃えることにより汎用品の利用とコストダウンが期待できる。

CCSプロジェクトにより要求される1航海あたりの貨物量と荷役時間が様々で、またそれらを満たす配管径と流速と配管条数が変わる。また配船変更等で使用する輸送船が代替した場合、マニフォールド直径が1段階違ってもレデューサーで対応できるが、配管の配置は可能な限り共通化しておく方が効率的だろう。マニフォールドの液配管とベーパー配管の条数と配置が、積出港・受入港のターミナルで違っていても、あるいは着岸舷が左右反対でも対応できるように、ベーパー配管を中央とする基本的な配置例を提示している。

④ ローディングアーム

LCO₂用のローディングアームは耐圧のため肉厚がLPG・LNG用に比べて厚くなり設備重量が増す。荷役時間と流量の関係から条数が増える場合、ローディングアームの設備総重量が増大するため、岸壁の耐荷重や設置スペースの確保に留意が必要である。

ローディングアームの配管の配置は可能な限り共通化し、本船マニフォールドに問題なく接続されるようにすべきである。もし本船と配管種類と条数が違っていても接続が可能なように、ローディングアームも基本的に本船のマニフォールドと同様にベーパー配管をマニフォールド列の中央に配置し、液配管をその前後に対称に配置して本船との接続親和性が高くなるような事例を提示している。

5.2.2 不純物の種類とその影響

輸送されるLCO₂に含まれる不純物の内容と濃度は排出源、分離・回収方法、液化前処理等によって異なる。

LCO₂船舶輸送において、流速によるドライアイス化リスクと同様に注意が必要な項目は、不純物の存在とその濃度についてである。LCO₂に不純物が含まれている場合に発生すると考えられている問題点は、大別して①非凝結成分による蒸気圧上昇、②腐食性物質の生成、③人体・環境に影響がある成分、が挙げられる。

現在、輸送されるLCO₂の不純物の種類と許容濃度についてのリストは、Northern Lights（中温中圧方式）が発表しているものが一般的に参照されている。

表1 Northern Lights 不純物許容濃度表

Component	Unit	Limit for CO ₂ Cargo within Reference Conditions ¹
Carbon dioxide (CO ₂)	mol-%	Balance (Minimum 99.81%)
Water (H ₂ O)	ppm-mol	≤ 30
Oxygen (O ₂)	ppm-mol	≤ 10
Sulfur oxides (SO _x)	ppm-mol	≤ 10
Nitrogen oxides (NO _x)	ppm-mol	≤ 1.5
Hydrogen sulfide (H ₂ S)	ppm-mol	≤ 9
Amine	ppm-mol	≤ 10
Ammonia (NH ₃)	ppm-mol	≤ 10
Formaldehyde (CH ₂ O)	ppm-mol	≤ 20
Acetaldehyde (CH ₃ CHO)	ppm-mol	≤ 20
Mercury (Hg)	ppm-mol	≤ 0.0003
Carbon monoxide (CO)	ppm-mol	≤ 100
Hydrogen (H ₂)	ppm-mol	≤ 50
Cadmium (Cd), Thallium (Tl)	ppm-mol	Sum ≤ 0.03
Methane (CH ₄)	ppm-mol	≤ 100
Nitrogen (N ₂)	ppm-mol	≤ 50
Argon (Ar)	ppm-mol	≤ 100
Methanol (CH ₃ OH)	ppm-mol	≤ 30
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	ppm-mol	≤ 1
Total volatile organic compounds (VOC) ²	ppm-mol	≤ 10
Mono-ethylene glycol (MEG)	ppm-mol	≤ 0.005
Tri-ethylene glycol (TEG)	ppm-mol	Not allowed
BTEX ²	ppm-mol	≤ 0.5
Ethylene (C ₂ H ₄)	ppm-mol	≤ 0.5
Hydrogen cyanide (HCN)	ppm-mol	≤ 100
Aliphatic hydrocarbons (C ₂ +) ⁴	ppm-mol	≤ 1,100
Ethane (C ₂ H ₆)	ppm-mol	≤ 75
Solids, particles, dust	ppm-mol	≤ 1

Table 14: LCO₂ Quality Specifications [24].

https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/knowledgecenter/CO2_Impurities_and_LCO2_Carrier_Design-Practical_Considerations.pdf (Page20)

以前から不純物についての研究は世界各国の専門家・研究グループによって進められており現在も鋭意進行中だが、数多く存在する不純物の影響を個々の物質について、濃度別の影響を研究しさらに複数の不純物が複合した状態での現象を研究し結論を得るには、さらなる時間とコストが掛かると考えられる。

先に述べたように不純物の種類とその影響内容は以下のように3種類に分類できる。

(1) 非凝結成分

CO₂よりも分子量が小さく沸点温度が低いため-50℃のLCO₂に含まれていても気体状態で存在する成分で、水素 (H₂)、窒素 (N₂)、酸素 (O₂)、アルゴン (Ar)、一酸化炭素 (CO)、メタン (CH₄) が挙げられる。

LCO₂に微量の上記の非凝結成分が含まれる場合、純粋LCO₂よりも蒸気圧が上昇する傾向があるため、貨物タンクの設計圧力を越える可能性がある。よって少なくとも船舶の貨物タンクの運用圧力範囲0.58MPaG～0.76MPaGを越えないように非凝結性不純物の許容濃度を個別に検討する必要がある。また非凝結成分はBOGを再液化する場合に障害となり再液化が困難になる場合がある。

(2) 腐食性物質を生成する成分

水分 (H₂O) はCO₂と反応して炭酸を生じ、炭素鋼を腐食させる。

同様に水分 (H₂O) は、酸素 (O₂)・硫黄酸化物 (SO_x)・窒素酸化物 (NO_x)・硫化水素 (H₂S)・一酸化炭素 (CO) と反応して腐食性化合物を生成する。水銀 (Hg) はアルミニウムと反応してアマルガムを生成する。

見方を変えれば水分値をできるだけ下げることによって腐食に関する問題は大幅に緩和できる可能性がある。

また、極低温のLNGの液中に水分 (H₂O) は液体では存在せず、酸が生成されないため腐食は発生しないという情報もあり、-50℃のLCO₂についても同様であるかどうか今後のさらなる研究・確認が必要である。

(3) 人体・環境に影響がある成分

これまで大気中に排出されてきたCO₂を含む排気ガスの排出基準は大気汚染防止法に基づき管理されてきた。そしてCO₂に含まれる不純物を規定している法令・規則は以下のようなものがある。

- ・大気汚染防止法
- ・JIS規格K-1106
- ・食品衛生法 食品添加物規格

漏洩時にこれらの規制値を超えないように許容濃度に留意しておく必要があるだろう。

5.3 今後の研究課題

今回「CCSの社会実装に向けたLCO₂船舶輸送バリューチェーン共通化ガイドライン」初版が発行されたが、未だ十分に確定できていない問題が2件あり、今後の協議会での研究課題となっている。

(1) 制限すべき不純物の種類と最大許容濃度の確定

LCO₂から不純物を取除く工程は分離回収のCAPEXに影響があり、製品ではなく一義的には地下貯留される廃棄物であるLCO₂をどこまでクリーンにする必要があるのか判断が難しい。先に述べたように船舶輸送されるLCO₂に含まれる不純物の種類と許容濃度の表を公表しているのはNorthern Lights (中温中圧方式) のものだけであり、他の多くのプロジェクトではそれに準拠するような形で検討がなされている傾向がある。また、ある欧州の研究グループによる腐食実験はLCO₂の液中ではなくガス環境下での実験であり、反応式を見ると不純物ガスに先ず水 (H₂O) を反応させて酸性物質を生成してから鋼材の腐食実験を行っていると考えられ、これらを直接的に参考にするのは難しい。

よって日本標準の低温低压方式として、リストアップする不純物の種類と許容濃度を確定するためには、十分な科学的根拠とコンピューターシミュレーションによる不純物を含むCO₂の相図作成、そして実際に-50℃のLCO₂による実験、さらに経済的合理性の裏付け等が必要になる。

加えて不純物の種類と最大許容濃度が確定し一覧表ができたとしても、そもそも個別の物質をppmオーダーで精密に連続計測する手段が存在するのか、バリューチェーンのどのポイントでどのような頻度で、それらを全て計測し確認すべきなのか、さらに責任範囲や運用手順についても研究していく必要があるだろう。ちなみにNorthern Lightsのプロジェクトでは受入用貯蔵タンクに入る直前で、O₂・H₂O・H₂Sの3種類のインライン計測を実施している。

(2) 荷役時の安全な最大流速の確定

流速の増加は荷役効率を上昇させ、あるいは配管の条数を減らせるメリットがある一方で、異常振動やドライアイス化のリスクも増大させると考えられている。純粋LCO₂を前提とした船舶荷役時の配管内の数値流体力学シミュレーションCFD (Computational Fluid Dynamics) は既にいくつか事例があり、技術的に大きな問題

は報告されていない。また先述したNEDOの実証事業では2025年7月から苫小牧基地において液化CO₂高流速液送技術検証設備の建設に着手し高流速の試験も計画されている。ただ(1)で検討している不純物の存在による挙動（圧力の変動等）が未だ十分に解明されておらず，特に非凝結成分の存在が流速を上げた場合にどのような影響があるのか，今後さらなる研究と確定が必要である。

6. まとめ

以上JOGMECの先進的CCS事業に伴う「CCSの社会実装に向けたLCO₂船舶輸送バリューチェーン共通化ガイドライン」をベースにLCO₂低温低压船舶輸送についての概要説明を行った。日本におけるCCS事業の社会実装に向けて，船舶によるLCO₂の長距離・大量輸送は必須の技術でありその研究は着実に進められている。そして低温低压方式については世界初で実際に-50℃の純粋LCO₂と低温低压輸送用の実証試験船を使い，航海・荷役実証試験を継続実施し相当の知見と技術的アドバンテージを持っている。しかしながら海外勢も急速に追い上げてくるものと推測され，今後もさらに（特に上記5.3章の2つの課題）研究を進め，可能な限り早期に本邦におけるLCO₂低温低压輸送方式を確立していくべきと思料する。

参考文献

- 1) JOGMEC：CCSの社会実装に向けたLCO₂船舶輸送バリューチェーン共通化ガイドライン
- 2) ClassNK：NK鋼船規則
- 3) ABS：CO₂ Impurities and LCO₂ Carrier Design：Practical Considerations
- 4) ZEP：Guidance for CO₂ transport by ship 2022
- 5) ZEP：Achieving a European market for CO₂ transport by ship
- 6) SINTEF：“At what pressure shall CO₂ be transported by ship? An in-depth cost comparison of 7 and 15 Barg Shipping” 2021
- 7) CCUS Projects Network：Briefing on carbon dioxide specifications for transport 2019
- 8) SIGTTO：Carbon Dioxide Cargo on Gas Carriers - First Edition 2024
- 9) 高圧ガス保安協会：高圧ガスLNG協会資料「天然ガス中の不純物が設備に与える影響について」
- 10) Equinor：Northern Lights Project Concept report – RE-PM673-00001

NEDOが取り組む液化CO₂船舶輸送の技術開発

布川 信*, 川北 千春**

1. はじめに

温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルの実現に向け、その大半を占める二酸化炭素（CO₂）を資源と捉えて再利用するカーボンリサイクルや、CO₂を回収して地中に貯留するCCS（Carbon dioxide Capture and Storage）の取り組みが行なわれている。2023年7月に閣議決定された「脱炭素成長型経済構造移行推進戦略（GX推進戦略）」には、エネルギー安定供給の確保を大前提とした脱炭素の取り組みとしてこれらの技術を追求し、GXの社会実装を推進する方針が示されている¹⁾。大量のCO₂を直接的に固定化できるCCSに関しては、2030年までの事業開始に向けた事業環境を整備するとしており、2024年5月に貯留事業の許可制度等を定めた「二酸化炭素の貯留事業に関する法律（CCS事業法）」が成立・公布され、CCS長期ロードマップを踏まえた「先進的CCS事業」が推進されている^{2) 3)}。

CCSの社会実装においては、産業活動で排出されるCO₂を回収・輸送・貯留する一連の流れである「CCSバリューチェーン」の構築が重要となる。我が国ではCO₂の排出地と貯留地が異なる場合が多く、規模の異なる複数の排出源で分離回収されたCO₂を集約し、離れた地点に効率的かつ低コストに集約して輸送する技術が必要となる。そこで、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）では、CO₂排出源から回収されるCO₂を貯留・利用地点に輸送する手段の取り組みとして、NEDO事業「CO₂船舶輸送に関する技術開発および実証試験」を2021年に開始した。大量輸送に適した液化CO₂の温度・圧力条件での輸送が可能なカーゴタンクシステムを開発し、CO₂の液化、貯蔵、荷役、海上輸送する船舶一貫輸送システムの技術検討を進めている。本稿では、様々な温度・圧力条件の液化CO₂を積載できるタンクシステムを搭載した実証試験船「えくすくうる」と、陸上設備（舞鶴および苫小牧）と連携した船舶輸送実証試験の概要を紹介する。

2. プロジェクトの概要

2.1 技術開発の狙い

液化CO₂は、溶接、飲料、冷却、製鋼、化学など幅広い用途で使用されており、その国内需要は年間70万トン程度である。石油化学プラントや製鉄所から発生する原料炭酸ガスを精製して製造した液化CO₂は、中温中圧と称する-20℃、2.0MPa(abs)程度の状態でタンクローリーや高压ガス容器に充填し陸上輸送で出荷されている。CCSの社会実装に向けては、大容量の液化CO₂を国内外の貯留地に低コストに輸送することが求められ、船舶を活用した液化CO₂輸送に期待が寄せられている。

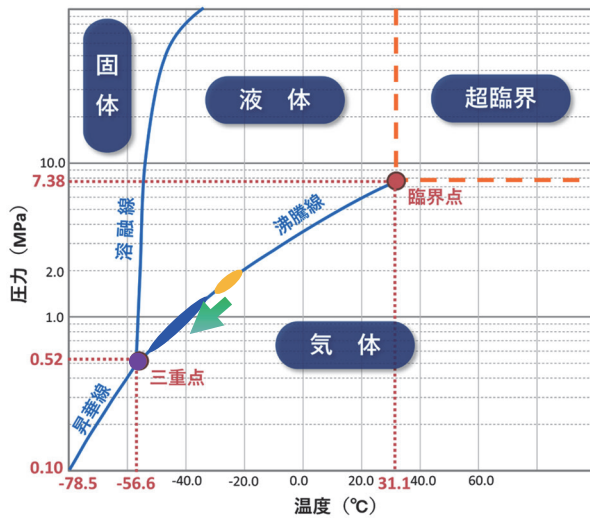
大規模な船舶輸送を実施する有効な手段として、液化CO₂の条件を低温低压と称する-50℃、0.7MPa(abs)近傍とすることが挙げられる。液化CO₂タンクの設計圧力を低減できることで、CO₂タンクの大容量化や軽量化が可能となる。一隻当たりの貨物容量が増加されるため、必要船舶数や輸送回数の低減が可能となり、CO₂重量当たり輸送コストの低減が期待される。

一方で、CO₂はドライアイス化するというリスクがある。CO₂の状態図を図1に示す。タンク内では液化CO₂とCO₂ガスの二相状態となるため、その界面は液体と気体の境界である「沸騰線」の温度圧力となる。温度圧力を下げていくと、-56.6℃、0.52MPa(abs)において固体、液体、気体が共存して平衡状態となる「三重点」に到達し、それ以下では液体CO₂としては存在できずに固体のドライアイスに相転移することとなる。タンクや配管の内部でドライアイス化すると、CO₂の移送は困難となり、場合によっては機器類の損傷を引き起こす懸念がある。そのため、低温低压の液化CO₂船舶輸送の実現には、液化CO₂を積載するタンクを備えた輸送船舶を開発するとともに、温度圧力条件を整えて貯蔵して荷役する陸上設備を用いたCO₂挙動の把握が不可欠である。

* 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO） サークュラーエコノミー部

** 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO） 水素・アンモニア部

本プロジェクトでは、液化、貯蔵、荷役、輸送という一連の工程での液化CO₂船舶輸送の実証試験を通して、安全かつ効率的な海上輸送に向けたハンドリング技術確立することも重要な狙いとしている。



状態	温度/圧力	特記事項
● 中温中圧	-20°C/2.0 MPa 程度	現在の液化CO ₂ 輸送・貯蔵 条件
● 低温低圧	-30°C/1.5 MPa ～ -50°C/0.7 MPa	大量輸送に期待される条件 CO ₂ の三重点に近い
● CO ₂ 三重点	-56.6°C/0.52 MPa	気相、液相、固相の3相が共 存して平衡にある状態

図1 CO₂状態図と輸送条件

2.2 実施方法

液化CO₂の船舶輸送の技術確立には、「液化CO₂輸送船用のカーゴタンクの開発」「液化CO₂の安定状態の確保」「船舶運航および設備運用の安全性」がポイントとなる。これらの課題に向けた取り組みとして、NEDOでは最適な温度・圧力条件で液化したCO₂を出荷・輸送から受け入れまで行う一貫輸送システムにかかる「CO₂船舶輸送に関する技術開発および実証試験」事業を2021年6月に開始した。本事業の委託事業者と実施項目を表1に示す。液化CO₂輸送におけるハンドリングを想定した物性や安定性に関して検討するとともに、様々な温度・圧力条件の液化CO₂を積載する船用カーゴタンクシステムを備えた液化CO₂輸送実証試験船「えくすくうる」を2023年11月に建造し⁴⁾、クルートレーニングおよび液化CO₂ハンドリングの取り組みを開始した。さらに、2024年11月には液化CO₂の温度・圧力条件を調整して「えくすくうる」に積み下ろしする陸上設備を舞鶴および苫小牧に竣工させた。

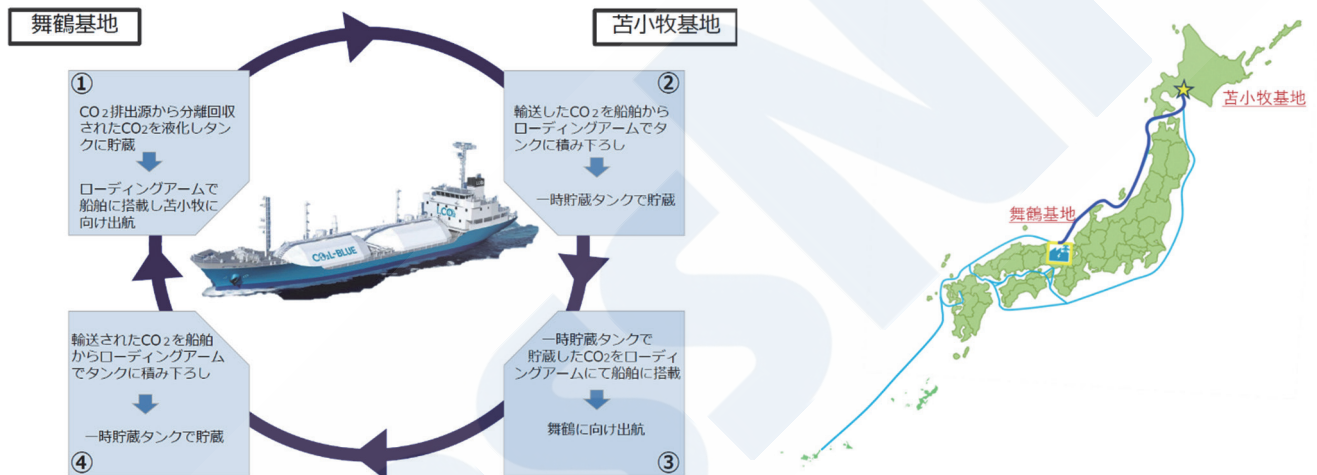
これら一連の設備を連携させた液化CO₂船舶輸送の実証試験概要を図2に示す。様々な液化条件、環境での液化CO₂船舶輸送ならびに荷役技術を効率的に検討し、併せて船舶運航にかかるノウハウを着実に蓄積するため、往路復路の両行程で液化CO₂を積載した船舶輸送試験を実施することとしている。舞鶴および苫小牧の陸上基地には、液化CO₂の積み込みと積み下ろしの両操作を実施できるよう、ローディングアーム、液送機器類、およびCO₂貯蔵タンクを設けている。また、試験項目に応じた液化CO₂条件を調整できるよう、舞鶴基地には様々な温度・圧力条件の液化CO₂を製造する液化設備を設置している。液化CO₂輸送試験における主な航路は、両陸上基地を結ぶ日本海から津軽海峡を抜ける往復約1,100マイル(2,000km)となるが、そのルートに限らず、太平洋沖、瀬戸内海、東シナ海など日本沿海全域での船舶輸送実証試験を実施する計画である。

表1 事業者と実施項目

事業者	実施項目
日本CCS調査株式会社（JCCS） 株式会社商船三井 株式会社関電パワーテック 三菱重工業株式会社	CO ₂ 液化システムに関する技術開発 液化CO ₂ 大量貯蔵システムに関する技術開発 大型液化CO ₂ 輸送船の概念設計 出荷基地/受入基地の陸上設備建設 実証試験の計画・実施
一般財団法人エンジニアリング協会（ENAA） 国立大学法人お茶の水女子大学 日本液炭株式会社 日本ガスライン株式会社（NGL） ^{*1} 川崎汽船株式会社	CO ₂ 船舶輸送における安定性に関する検討 液化ガス兼用船の仕様検討 船用タンクシステムの開発 船舶輸送の実証試験の計画・実施 運航・荷役における安全管理手法の確立
伊藤忠商事株式会社	国内のCO ₂ 排出源ならびに国内外のCO ₂ 輸送事業の動向調査 CO ₂ 輸送事業のビジネスモデルの検討
日本製鉄株式会社 ^{*2}	CO ₂ 輸送事業のビジネスモデルの検討（国内鉄鋼業）

*1：～2023.11 ENAAの再委託、2023.11～委託

*2：～2024.3

図2 液化CO₂船舶輸送試験概要と主な航路

2.3 液化CO₂輸送実証試験船「えくすくうる」

本事業のために建造した液化CO₂輸送実証試験船「えくすくうる」は、船首楼、船尾楼付き加圧式液化ガスばら積船である。本船の外観、概略配置図および主要目を図3、表2に示す。主船体はシングルハル構造で2つの貨物ホールドを有しており、各ホールドに1基の横置円筒型のカーゴタンク（容量725m³）を搭載している。推進方式は1機1軸、可変ピッチプロペラを採用し、船首部には離着岸用のサイドスラスターを有している。航行区域は沿海としており、必要に応じて近海（非国際）に変更可能な実証試験海域の航行制限が少ない仕様となっている。比重や温度・圧力の異なる-20℃～-50℃の液化CO₂（最大積載量850トン）のみならず、プロパンやブタンなどのLPGも積載できることを特長としており、特に本事業の技術開発目的である低温低圧の液化CO₂を積載できる船舶は世界初となる⁵⁾。

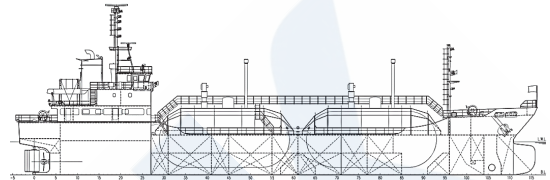
本船はNEDOおよび山友汽船株式会社が船主となり、日本ガスライン株式会社（以下、NGL）が裸備船し、配乗と船舶管理を行うことにより運航されている。NGLは本船の運航と並行して、液化CO₂の海上輸送における安全かつ効率的な荷役手法の確立や、輸送中貨物の管理等の課題解決に向けて、海運会社の目線で実証試験計画の検討や運航計画を策定・実行することで、本事業における確実な運航管理を担っている。



図3 えくすくうるの外観と概略配置図

表2 船舶主要目

全長・全幅・喫水	72m・12.5m・4.5m
総トン数・積貨重量トン数	997トン・1,261トン
船級	Class NK
貨物タンク形式・容量	独立式Type-C・1,450m ³
設計温度・圧力	-50℃～+45℃・1.9MPaG
主要荷役機器	ディーゼルポンプ コンプレッサー
その他	ガス検知器 センサーおよびデータ収録機器



3. 船舶輸送試験実施状況

3.1 液化CO₂条件を変化させた積載試験

「えくすくうる」による液化CO₂輸送試験は、液化CO₂の積載方法、荷役量、温度、圧力などの船舶輸送条件を段階的に変えながら実施している。竣工後に進めてきた船舶輸送試験での主な液化CO₂積載条件を表3に示す。

最初の「えくすくうる」への液化CO₂荷役は陸上輸送用のローリー車から行った。このTruck to Ship試験では、液化CO₂に対するカーゴタンクの機能健全性および荷役操作性が確認されたとともに、大規模液化CO₂の出荷受入基地でなくても船舶に液化CO₂を積載できることが技術的に検証された。液化CO₂荷役にかかる港湾関係等の調整が整えば、複数のCO₂排出源から回収される液化CO₂を船舶によって収集できると考えられ、CCUSの拡張に必要なCO₂ネットワークにおけるハブ&クラスターの役割を担うことが期待できる。

液化CO₂の荷役は、他の液化ガスの荷役と同様、船陸の圧力を均衡させるため、液配管のみではなく気相を返送する配管も船陸で結着して実施する。液化CO₂のドライアイス化を懸念し、陸上基地からのローディングアームを介した荷役試験は、積載量と温度圧力条件を段階的に調整して行った。船舶および陸上基地の健全性を確認しつつ液化CO₂の低温低圧化を進め、2025年1月には目標とする-50℃、-0.7MPa(abs)(0.6MPaG)近傍の液化CO₂を舞鶴基地から苫小牧基地に輸送することに成功している。

液化CO₂の温度圧力調整、カーゴタンクへの大量積載（港湾制約上限の750トン）、追い積みなどを実施するとともに、船舶のカーゴタンクで気化したCO₂ガス（BOG：Boil Off Gas）を陸上基地にて再液化することで液化CO₂条件を低温低圧化させる船陸設備を連携した試験も実施している。これらの様々な条件で積載した液化CO₂の輸送航海においては、船舶に設置した計測機器で液化CO₂の温度、圧力、液面などの変化を常時モニタリングするとともに、比較的比重の大きな液化CO₂の輸送航海における船体動揺値の測定などを実施しており、その試験成果を液化CO₂船舶輸送にかかるオペレーションマニュアル等に反映させていく。

表3 主な液化CO₂積載試験条件

	試験項目	積載方法	積載数量(トン)	温度(℃)	圧力(MPaG)
2024年 7月	初荷役・Truck to Ship	Truck to Ship	85.3	-35.3	1.11
2024年11月	陸上基地からの荷役	舞鶴基地 L/A	424.4	-46.4	0.68
2025年 1月	-50℃域の荷役	舞鶴基地 L/A	422.9	-49.3	0.60
2025年 4月	-35℃域の荷役	苫小牧基地 L/A	446.7	-36.0	1.04
2025年 6月	大量積載	苫小牧基地 L/A	750.0	-41.1	0.88
2025年 6月	貨物タンクへの追い積み	舞鶴基地 L/A	743.2	-45.6	0.73
2025年 7月	陸上液化設備と連携した冷却	舞鶴基地 L/A	496.8	-47.8	0.64

L/A: ローディングアーム

数量、温度、圧力は荷役終了時点

3.2 液化CO₂/LPG兼用船

液化CO₂輸送のカーゴタンクは構造や仕様、付帯機器構成がLPG輸送のものと類似することから、「えくすくうる」に組み込まれたカーゴタンクは液化CO₂とLPGのどちらも輸送可能な兼用仕様として設計、建造している。本事業では、液化CO₂/LPG兼用船としての運用性を明らかにするため、液化CO₂とLPGの積み替え試験を実施した。LPG荷役実施中のローディングアーム接合部の状況を図4に示す。

積み替え試験は、液化CO₂を揚げきり空気およびN₂でガス置換を行った後に、LPGのガス置換、積荷役、積状態での航行、揚荷役をし、N₂ガス置換を経て再び液化CO₂積載の状態に戻す操作をした。船舶に積荷したLPG量はカーゴタンクの満載量である約660トンで、短距離短時間ではあるが輸送航行試験を行った。着岸後にカーゴタンクから揚荷したLPGの濃度は保たれており、その後のCO₂へのガス置換も支障なく実施されたことから、液化CO₂/LPG兼用船としての運用性を検証することができた。この成果により、液化CO₂/LPGを往路復路で積載する船舶運航の可能性が明らかとなり、総括的な船舶輸送コストの低減が期待される。

液化CO₂/LPG兼用船にかかる技術課題としては、ガス置換にかかる調整および監視（流量、温度、圧力、濃度）に時間と費用を要し、現場での専門性を持った作業員による操作も必要となる。また、ガス置換に際するCO₂およびLPGのロスが生じることも挙げられ、本事業では液化CO₂とLPGの積み替え手法の効率化を図るとともに、液化CO₂/LPG兼用船としてのカーゴタンクおよび付帯設備の健全性、LPG船舶輸送時の船体バランスなどの検討を実施する予定である。



図4 LPG荷役時のローディングアーム接合部
(引火性危険物積載中と揭示)

3.3 航行中の液化CO₂状態変化

液化CO₂輸送船のカーゴタンクは断熱構造としているが、外気や海水からの熱伝導や船体動揺の影響でCO₂の一部が気化することとなる。「えくすくうる」は小型の実証試験船であることから再液化設備は備えていないが、カーゴタンクの設計圧力（1.9MPaG）以下であれば、BOGを放散させずにガス相として蓄圧して輸送することができる。

液化CO₂輸送時のカーゴタンクの圧力上昇、液化CO₂の温度上昇の計測結果の一例を図5に示す。この輸送試験では、厳しい気象条件での長距離輸送を想定し、2025年7月に京都府舞鶴港と沖縄県宮古島平良港の往復約1,900マイル（3,500km）を航行した。平良港には約50時間着岸したが液化CO₂の荷役はしておらず、航行中を含めてBOGの放散も行っていない。そのため、CO₂の積載量（496トン）に変化はなく、全量をカーゴタンクに貯蔵した状態のままで輸送試験を実施した。

往路の舞鶴出港時の液化CO₂の温度、圧力は、-47.8℃、0.64MPaGであった。沖錨泊を含む約90時間後の平良港着岸時の温度、圧力は、-44.9℃、0.74MPaGとなり、それぞれの上昇速度は0.032℃/h、0.0011MPaG/hであった。一方、復路の平良港出港時の温度、圧力は、-43.5℃、0.79MPaG、約73時間後の舞鶴港着岸時の温度、圧力は、-41.1℃、0.86MPaGとなり、それぞれの上昇速度は0.033℃/h、0.0010MPaG/hであった。これらの変化は、カーゴタンクの断熱設計の想定範囲内であり、また平良港停泊の約50時間における温度、圧力の上昇速度（0.028℃/h、0.0010MPaG/h）と同程度であることから、今回の航行での船体動揺が液化CO₂の気化（BOG

の増加)に及ぼす影響は小さいと推測された。

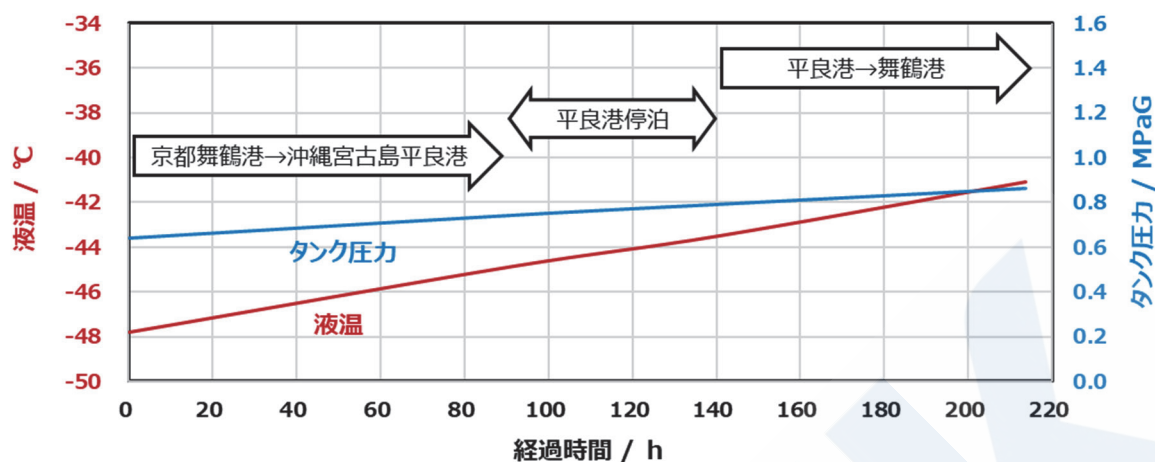


図5 液化CO₂輸送時のカーゴタンクの温度、圧力経時変化

4. 今後の実証試験計画

本事業では、船舶と陸上設備を連携した実証試験を実施して、液化CO₂の取扱いにかかる知見を得るとともに、船舶輸送技術に繋がるデータを取得する計画である。そのため、「えくすくうる」のカーゴタンク内には液面による温度勾配を考慮して異なる高さに複数の温度計が装備されており、タンク表面やサドル部の温度を計測するための表面温度計を備えている。また、荷役配管には、圧力損失が想定される場所の前後に温度計と圧力計を多数配置しており、荷役中には流量やカーゴポンプの負荷状況、配管の振動やひずみも計測することができる。さらに、船体重心の中心付近に加速度や角速度を計測する機材が設置されている。様々な運用を想定した船舶データを収集し、その解析評価を進めることで、安全かつ効率的な液化CO₂船舶輸送を低コストに実施するための技術開発、実証を進めていく。

また、CCSの社会実装においては、大型船型により大量の液化CO₂を一度に輸送することとなる。その際の荷役作業を効率的かつ経済的に実施できるよう、荷役配管の大口径化と液化CO₂の高流速化により、液化CO₂を高流量で取り扱えることが求められる。特に液化CO₂の流速を高めることができれば、荷役時間の短縮のみならずマニホールドおよびローディングアームの条数等の設備側の軽減が可能となり、液化CO₂船舶輸送のトータルコストを低減できると期待される。そこで、本事業では、液化CO₂輸送にかかる運用性検討の一環として、船舶および陸上基地にて低温低压条件の液化CO₂を高流速液送の検証を実施する計画である。「えくすくうる」に搭載している2つのカーゴタンクとそれを繋ぐ船上配管、カーゴポンプを用いた高流速(4m/s)の移送試験に着手し⁶⁾、併せて苫小牧基地に液化CO₂高流速液送を評価する設備の設置を進めており⁷⁾、これらの実験的な技術検討を踏まえ、安全確実な船陸間の荷役技術を高めていく計画である。

5. おわりに

CCSは、電化や水素等を活用した非化石転換ではCO₂の排出が避けられない分野においても脱炭素化を実現できるため、エネルギー安定供給、経済成長、脱炭素の同時実現に不可欠となっている。その社会実装においては、CO₂を効率的かつ低コストに集約することが求められるところ、液化CO₂船舶輸送はその一翼を担う技術となる。国際的に大きく取り上げられている地球温暖化と温室効果ガス排出削減への対応を「課題」と捉えるのではなく、将来の「技術革新」を図るための契機と考え、幅広い技術・社会視野に基づいたイノベーションとして、カーボンニュートラル実現に向けた実効的な取り組みを推進していくことが重要となる。

NEDO事業「CO₂船舶輸送に関する技術開発および実証試験」は、関係官公庁、自治体、船舶や港湾、地元の関係各位のご理解ご協力のもと、事業者の知識と経験に基づいた高い技術力を駆使して安全着実に推進している。本事業の技術成果と液化CO₂船舶を活用したCCSの取り組みにご期待頂きたい。

参考文献

- 1) 経済産業省；脱炭素成長型経済構造移行推進戦略（GX推進戦略），<https://www.meti.go.jp/press/2023/07/20230728002/20230728002.html>（アクセス日2025.10.1）
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁；CCS事業法関係について，https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/carbondioxidecaptureandstorage/CCS_business.html（アクセス日2025.10.1）
- 3) 経済産業省；CCS事業化に向けた先進的取組，<https://www.meti.go.jp/press/2024/06/20240628011/20240628011.html>（アクセス日2025.10.1）
- 4) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構；世界初，低温・低圧の液化CO₂大量輸送に向けた実証試験船「えくすくうる」が完成，https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101705.html（アクセス日2025.10.1）
- 5) S&P Global Commodity Insights；Japan set for world's first transport of liquefied CO₂, <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/energy-transition/042624-japan-set-for-worlds-first-transport-of-liquefied-co2>（アクセス日2025.10.1）
- 6) 日本ガスライン株式会社；船上CO₂ハンドリング実証の開始，<https://ngl.co.jp/wordpress/wp-content/uploads/2025/06/20250630船上高流速PR-和文.pdf>（アクセス日2025.10.1）
- 7) 日本CCS調査株式会社；CO₂輸送実証試験における液化CO₂高流速液送技術検証設備の建設工事の着手について，https://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2025/07/20250728_CO2yusou_oshirase.pdf（アクセス日2025.10.1）

三菱重工業のCO₂回収技術

— これまでの実績と船舶への適用 —

仙波 範明*, 米川 隆仁**

1. はじめに

2023年7月、国際海事機関（以下、IMO）は“GHG 削減戦略”を大幅に見直し、2050年の目標をこれまでの50%から強化しネットゼロとした¹⁾。

海運は、いわゆるhard to abateセクターと呼ばれ脱炭素化が容易ではない分野であるが、一方で海運の温室効果ガス（GHG）排出量は、総排出量の約3%を占めており無視することはできない。

当社は、1990年から関西電力株式会社（以下、関西電力）と共同で燃焼排ガスからのCO₂回収技術の開発に着手し、1999年マレーシア向けに初の商用機を納入して以降、2025年8月現在、合計18基のCO₂回収装置が世界各地で稼働している。当社CO₂回収装置は、重油、石炭、天然ガスといった広範囲な燃焼排ガスを対象とし、回収したCO₂の用途は肥料・メタノール増産といった化学用途、冷却用ドライアイス等の一般用途、原油増産を目的としたEOR（Enhanced Oil Recovery）用途など多岐にわたっている。米国Petra Nova社に納入したCO₂回収装置は、世界最大のCO₂回収量（4776トン／日）を有し、2016年12月末より商業運転が行われている。当社はCO₂回収装置の更なる信頼性・経済性向上を最大のテーマに掲げ、現在も積極的に研究開発を推進している。

2. 当社の実証試験／商用機納入実績

当社は、関西電力と共同でCO₂回収技術を開発し、独自のアミン吸収液KS-1™を用いたCO₂回収プロセスKM CDR Process™を商業化している²⁾。このプロセスの特徴は、対象ガスに含まれるCO₂を90%以上回収（純度99.9%以上）することができ、さらに独自の省エネ再生システムにより蒸気消費量の低減を実現していることである。図1に当社CO₂回収装置の概略フローを示す。

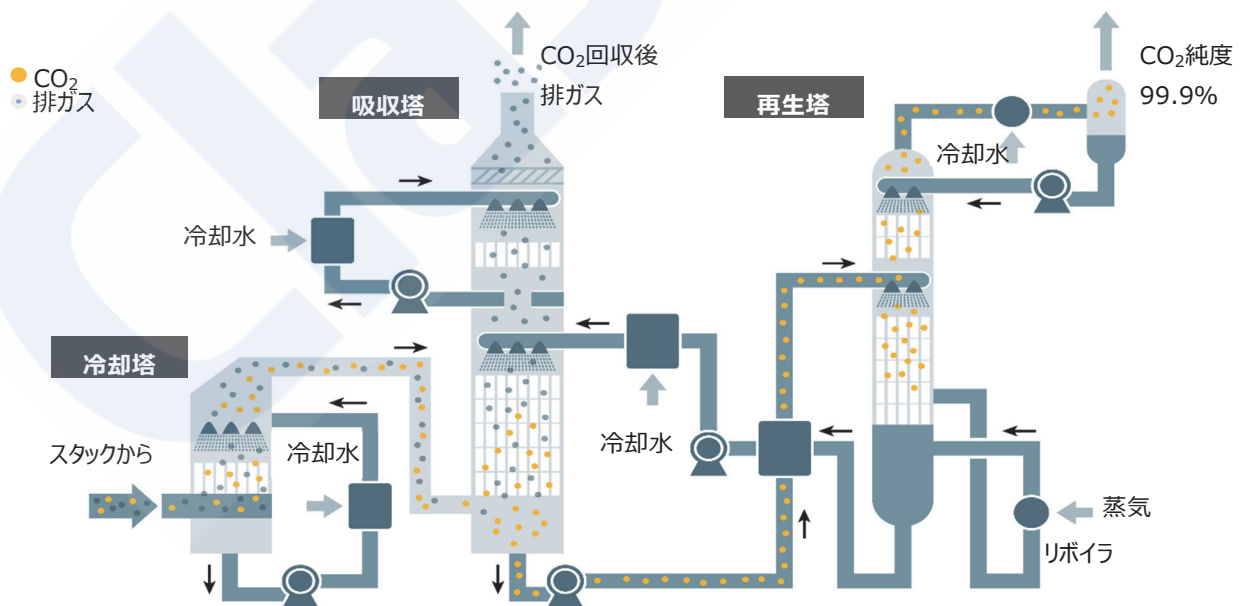


図1 当社CO₂回収プロセス（KM CDR Process™）

* 三菱重工業株式会社 総合研究所エコシステム研究推進室

** 三菱重工業株式会社 GXセグメントCCUS技術開発部

CO₂を含む排ガスは冷却塔に送られ冷却された後、冷却塔後流に設置されたブロワにより、吸収塔に送られる。吸収塔に送られた排ガスは、吸収塔下部で当社が関西電力と共同開発したアルカリ性の吸収液と接触し、CO₂が吸収液に吸収される。CO₂が吸収された後の排ガスはクリーンな排ガスとして、大気に放出される。一方、CO₂を多く含む吸収液は再生塔に送られ、蒸気により加熱することでCO₂を放出し、吸収液は再生される。この再生プロセスに当社が開発した最新の省エネプロセスを採用することで、大幅な蒸気使用量の低減が可能である。また、再生した吸収液は吸収塔に戻し、再利用される。

JX石油開発株式会社（現：ENEOS Xplora）及び米国独立系発電事業者のNRGエナジー社が共同で推進している大型原油増進回収（EOR）プロジェクト（2022年以降はJX石油開発が100%出資）向けに、世界最大となるCO₂回収装置（4776トン／日）を納入し、2016年12月末に商業運転が開始された。プラント概要を表1に、完成写真を図2に示す。発電出力240MWに相当する排ガスから回収したCO₂は、CO₂圧縮機により圧縮された後、約130kmのパイプラインを通じて油田に輸送・圧入される。これにより、油田の生産量は従来の約300バレル／日から大きく増産される見込みであり、2017年10月時点で約4000バレル／日の生産量が確認されている³⁾。

表1 米国テキサス州EORプロジェクト向けプラント概要

項目	内容
プラント場所	Thompsons（米国テキサス州）
ガス源	NRG WA Parish 発電所 610MW 石炭焚火力発電設備
プロセス	KM CDR Process™
吸収液	アミン吸収液KS-1™
プラント規模	240MW相当
CO ₂ 回収率	90%
CO ₂ 回収量	4776トン／日



図2 米国テキサス州EORプロジェクト向けプラント外観

このCO₂回収装置及び周辺設備のシステム構成を図3に示す。CO₂回収装置の運転に必要な電気及び蒸気は、付帯するガスタービン及び廃熱回収ボイラから供給されており、既設発電設備の出力を低下させることなくCO₂回収を行うことが可能である。また、CO₂圧縮機は、世界最大級の8段ギアドコンプレッサ（三菱重工コンプレッサ株式会社製）を採用し、CO₂圧縮工程には、パイプライン輸送時の水分濃度規定をクリアするため、脱水機を設置している。

石炭火力発電所では、日々の電力需要に応じて運転負荷が調整される。ボイラの運転状態は常時変化し、それに伴い燃焼排ガス中のCO₂濃度などのガス性状や排ガス流量が変動する。そのため、当社では、ボイラの運転状態に追従するCO₂回収装置の自動負荷追従システムを開発した。このシステムの導入により、CO₂回収装置の最適運転維持及び運転人員の負荷低減を達成した⁴⁾。

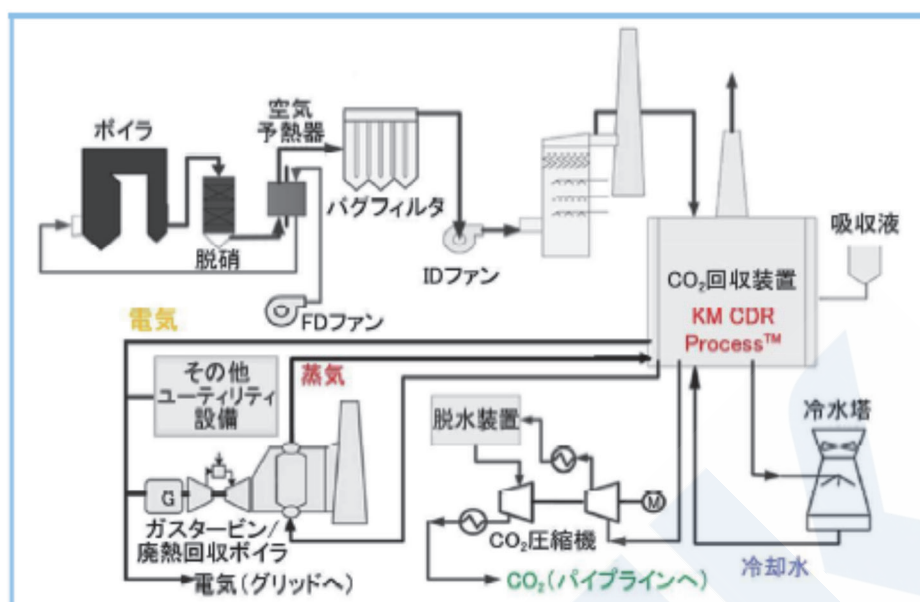


図3 米国テキサス州EORプロジェクト向けCO₂回収装置および周辺設備のシステム構成

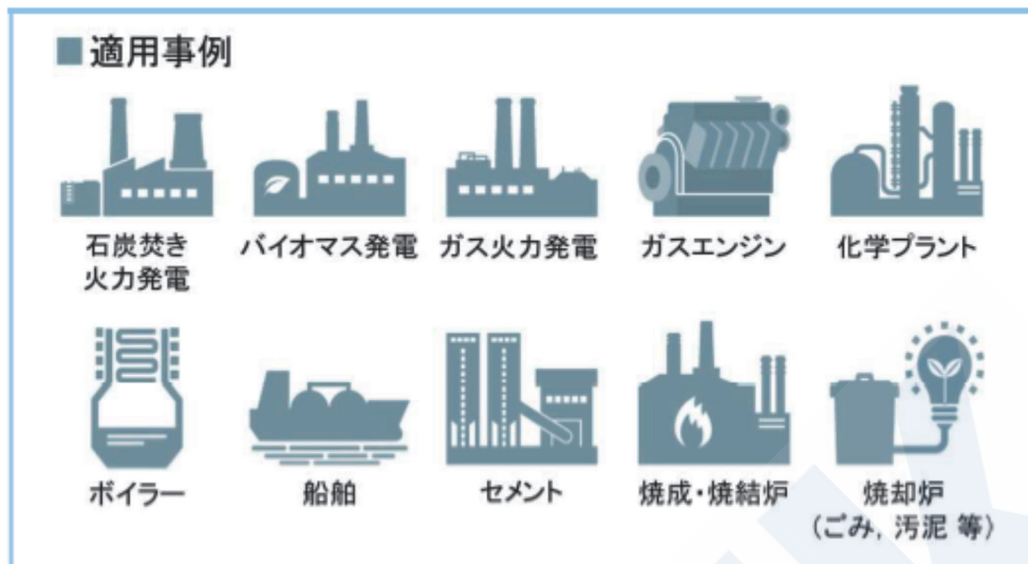
3. 小型CO₂回収装置の特徴

当社では、石炭火力発電所や化学プラントに対して、独自のCO₂回収プロセスKM CDR Process™を納入してきました。これまで納入してきた装置規模はおおよそ500t-CO₂/日以上である。この技術をベースに、同時並行的なCO₂削減を実現すべく、また小規模CO₂発生源での削減ニーズに対応すべく、小型のCO₂回収装置の開発を進めている。CO₂回収のベースとなるプロセスは大型機と同様であるが、小型装置で求められる特徴としては、以下の項目が挙げられる。

- (1) 設置対象排出源の数が多い。
- (2) 設置面積が限られている場合が多い。
- (3) 専任の運転人員を置くことが難しい。

多くの問合せに対応するため、従来の大型機とは異なり、客先仕様ごとの都度設計ではなく、標準設計を採用した。また、モジュール化によるコンパクトな設計を実現し、より小さな面積で設置できる装置とした。モジュール化の効果として、現地工事が減少し、運転開始時期を早めることができる。また、工事用の資材置き場等が不要となる。運転人員については、自動運転及び遠隔監視システムを搭載することにより、専任の運転人員を設ける必要なく、運用可能な装置とした。

また、今まで納入してきた火力発電所や化学プラントだけでなく、今後CO₂削減への取組みが加速すると思われるバイオマス発電所、セメント工場、製鉄工場、ガスエンジン、ごみ焼却炉等様々な産業分野への適用が期待される（図4）⁵⁾。

図4 小型CO₂回収装置の適用事例

4. 船上CO₂回収装置の開発

また、当社では、船舶が排出するCO₂を削減すべく船上CO₂回収装置の開発にも取り組んでいる。この最新の取り組みとして、川崎汽船株式会社（以下、川崎汽船）、一般財団法人日本海事協会（以下、日本海事協会）と共同で実施した、船上CO₂回収装置の実証プロジェクト（“CC-Ocean（Carbon Capture on the Ocean）”）について紹介する⁶⁾。

本プロジェクトは洋上におけるCO₂回収技術の検証と舶用化要件の整理のため、世界に先駆けてCO₂回収小型デモプラント（以下、デモプラント）を川崎汽船運航の石炭運搬船“CORONA UTILITY”（以下、供試船）に搭載し、商用運航条件で実証試験を実施したものである。

プロジェクト実施期間は2カ年であり、日本海事協会によるデモプラントのHAZID評価と装置・システムの安全性評価の後にデモプラントを製作し供試船に搭載、約6カ月間の洋上環境下での運転と性能確認計測を実施した。供試船に搭載したデモプラントは化学吸収法を採用した陸上プラント排ガス処理用のCO₂回収装置をベースに船上搭載へ転用したものである（図5）。



図5 供試船“CORONA UTILITY”およびデモプラント（白色コンテナ部）

本実証試験において、CO₂回収量、CO₂回収率、回収CO₂純度は計画値以上の性能を達成するとともに、供試船乗組員にて装置の操作・整備を問題無く実施した。また、機関負荷変動や船体動揺がCO₂回収性能に及ぼす影響、排ガスがCO₂吸収液に及ぼす影響などの検証も実施した。海上環境下で稼働させるための要件として、CO₂吸収液の漏洩対策、装置設置区画の換気思想、等々の運航に伴う安全措置に関する要領などを取り纏めた。

今後は本実証試験で得られた知見と技術課題を踏まえ、液化・船内貯蔵を含めた装置全体コンセプトの確立や舶用システムとしての最適化検討、船内貯蔵されたCO₂の陸上への払い出しの検討などを行い船上CO₂回収装置の製品化へ向けた取り組みをすすめる。

5. まとめ

IMOは“GHG 削減戦略”を大幅に見直し、2050年の目標をこれまでの50%からネットゼロに強化した。GHG排出削減は大きな課題であり、自社のみならず三菱重工グループ内及び外部団体とも連携して推進する。当社の持つ技術で国際海運のゼロエミッション化を推進する所存である。

参考文献

- 1) 一般財団法人日本海事協会，国際海運ゼロエミッションへの道筋（2023），<https://www.classnk.or.jp/>
- 2) 上條孝ほか，三菱重工技報Vol.50, No.1（2013）p.27-32
- 3) 米国エネルギー省 プレスリリース <https://energy.gov/fe/articles/doe-supported-petra-nova-captures-more-1-million-tons-co2>
- 4) 平田琢也ほか，三菱重工技報Vol.55, No.1（2018）p.42-47
- 5) 小久保美乃里ほか，日本ガスタービン学会誌Vol.53, No.1（2025）p.2-7
- 6) 田中太一ほか，三菱重工技報Vol.59, No.2（2022）p.1-6

洋上風力の展望と関連する作業船の安全に関する本会の取り組み

認証本部 再生可能エネルギー部

1. 国内の洋上風力発電の展望

現在、世界はエネルギー供給の8割強を化石燃料に依存しているが、近年の地球温暖化に端を発すると思われる異常な集中豪雨等、苛烈な気象事象の頻発を背景として、温室効果ガスの排出を削減する為、先進国等においては、再生可能エネルギーへのシフトが喫緊の課題となっている。

欧州諸国の中には再生可能エネルギー発電（水力を除く）の比率が既に電源構成の40%前後に達している国も複数ある（図1）。風力発電は欧米諸国において最も普及している再生可能エネルギーであり、イギリス、ドイツ等では、発電電力量に占める風力の割合が2割を超えるところまでに達している。

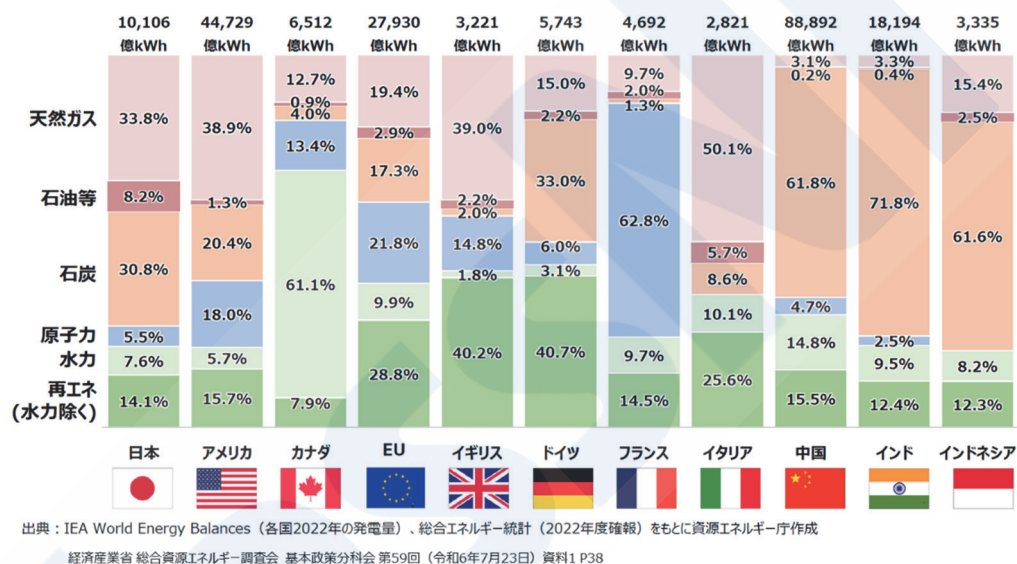


図1 各国の電源構成の比較（2022年）

一方、2023年度における日本の再生可能エネルギー発電（水力を除く）の比率（速報値）は総発電量の15.3%であった。一般に新エネルギーと呼ばれる太陽光、風力、バイオマス等については、太陽光発電が9.8%、バイオマスが4.1%、風力は1.1%にとどまっている。

こうした状況に鑑み、2025年2月に、政府においてまとめられた第7次エネルギー基本計画においては、水力も含めた再生可能エネルギーの比率を2040年度に4～5割程度に引き上げる方針が示され、風力についても4～8%程度まで比率を高めることとされている（表1）。これまで、日本における再生可能エネルギー普及の先陣をきってきた太陽光については、引き続き、ペロブスカイトの様な新形式の発電手段導入により発電能力引上げが期待されているが、これとともに大きな期待が寄せられているのが洋上風力である。

表1 第7次エネルギー基本計画に基づく再生可能エネルギーの導入見込み

		2023年度 (速報値)	2040年度 (見通し)
エネルギー自給率		15.2%	3～4割程度
発電電力量		9854億kWh	1.1～1.2兆 kWh程度
電源構成	再エネ	22.9%	4～5割程度
	太陽光	9.8%	23～29%程度
	風力	1.1%	4～8%程度
	水力	7.6%	8～10%程度
	地熱	0.3%	1～2%程度
	バイオマス	4.1%	5～6%程度
	原子力	8.5%	2割程度
	火力	68.6%	3～4割程度
最終エネルギー消費量		3.0億kL	2.6～2.7億kL程度
温室効果ガス削減割合 (2013年度比)		22.9% ※2022年度実績	73%

出典：第7次エネルギー基本計画の概要 p.9

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_02.pdf

日本における本格的な洋上風力開発は、漁業権との関係が既に整理されている港湾区域からスタートし、現在は一般海域に開発の中心が移りつつある。また、これらを洋上風車の基礎の形式で分類すると、風車支持構造物が直接海底に固定される着床式となっている。しかしながら、日本沿岸はこの分野で先行する北欧の海域と比べて、沖に出ると水深が急に深くなり、着床式の設置海域は限定されるため、2030年代以降においては、浮体構造物上に風車を搭載し、チェーン等でこれを係留する浮体式の開発に大きな期待が寄せられている（図2）。

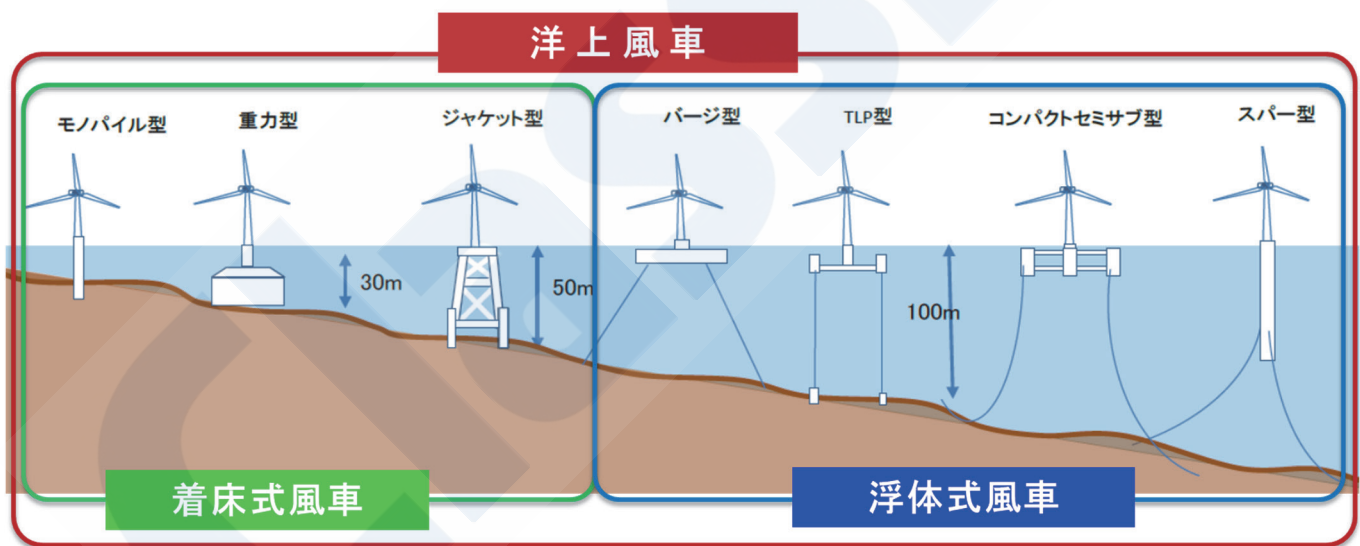


図2 洋上風車の設置方式

ちなみに、日本が風力開発等の権利を有する排他的経済水域（EEZ）は、約450万平方キロメートルと世界第6位の広さであり、国土面積（陸地）の11倍以上に相当し、その洋上空間には膨大な風力エネルギーが賦存している（図3）。日本のエネルギー安全保障の観点からも、こうした国産エネルギーの開発は重要であり、このため、排他的経済水域に洋上風力発電施設の設置を可能とする再生可能エネルギー海域利用法の改正法が2025年6月3日に国会で成立した。

さらに、同年8月には、経済産業省・国土交通省が中心となってまとめられた「洋上風力産業ビジョン（第2次）（洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会）」においては、2040年までに30～45GWの洋上風力案件形成を行うこと、うち、15GW以上を浮体式とすること、これらに向けて2029年度中を目途に大規模浮体式洋上風力の案件を形成すること等が、目標として掲げられている。

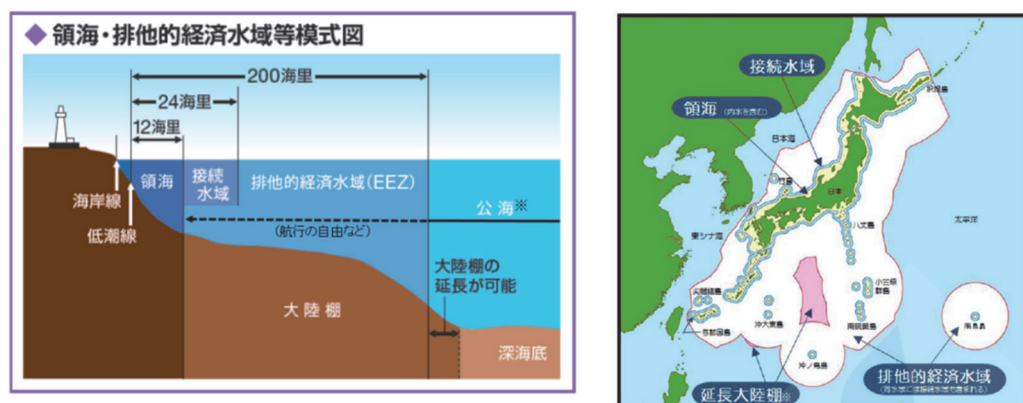


図3 日本の排他的経済水域（EEZ）

一方、洋上風力発電所の設置工事には、風車部品や支持構造物の輸送、基地港湾での仮組み立て、基礎の設置工事、ケーブルの敷設工事、風車の搭載工事など様々なステージがあり、これらの作業に対応した様々な船舶が必要となる。洋上風力発電所の主な建設工程、作業船の種類と用途をそれぞれ図4及び図5に示す。



図4 洋上風力発電所の建設工程

作業船名称	用途	
SEP (Self Elevating Platform)	洋上風車の基礎部品や風車部品の据付作業等を洋上で行う自己昇降式作業台船	
CTV (Crew Transfer Vessel)	洋上風車に作業員や資材を輸送する通船	
SOV (Service Operation Vessel)	メンテナンス技術者を複数の洋上風車に派遣するために、多数の宿泊設備を持ち、一定期間洋上での活動が可能なオフショア支援船	
CLV (Cable Laying Vessel)	洋上風力発電所内の風車間やそれらと洋上変電所、陸上を繋ぐ電力ケーブルの敷設及び埋設作業を行う作業船	
AHTSV (Anchor Handling Tug Supply Vessel)	浮体式洋上風車の曳航・設置、係留設備の敷設、資材輸送を行う多目的船	

(写真出典) 以下の各社HP等より。

SEP: 清水建設、CTV: NYK、東京汽船、SOV: 商船三井、CLV: 東洋建設、AHTSV: KLINE Offshore

図5 作業船の種類と用途

2. 作業船安全対策の必要性の高まり

前章で述べたとおり、国のエネルギー政策に基づき洋上風力の建設が本格化しつつあり、実際の建設工事にあたっては多くの作業船が使用され、長期間にわたって重量物や長尺物の洋上での取り扱いが必要になる。また、今後は排他的経済水域にまで建設工事のエリアが拡大し、より遠い、より水深の深い海域での作業が増えていく見込みである。既に、これまでの洋上風力開発関連の工事において、重大事故やインシデントが散見されていることを勘案すると、今後、作業船の安全対策は、これまでも増して重要になると考えられる。

なお、日本の洋上風力開発には、欧州で実績のある海外の開発事業者、コンストラクターなども関わっており、これらの企業の中には、オイルアンドガス産業の経験を踏まえた国際的な安全管理手法の導入を望む声や、国際的な安全基準や自社の安全基準に照らして、日本で使用する作業船の安全レベルを評価したいとの要望もある。これに対して、日本の作業船関係者の間では、安全管理はそもそも請負側の責任で行うものであり、慣れない国際的な管理手法での評価に対して戸惑いを示す意見もある（図6）。

国内企業	海外企業
<ul style="list-style-type: none"> ■ 今まで大きな事故は無かったし、安全管理は工事側のマター。 ■ 余計な手間はなるべくかけたくない。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 発注者も安全管理の責任を負う。 ■ 日本の船舶関連法規に慣れていない。 (非自航船は、検査非適用で、船員の配乗要求も無いなど)
<ul style="list-style-type: none"> ■ 国際的な管理手法で要求される項目に慣れていない。 ■ 海外方式の検査を受けたことがなく、不安。言葉の壁もある。 ■ 海外の企業の要求が高く、対応に苦慮。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 日本の作業船（台船含む）の安全性・健全性の評価が難しい。 ■ 国際基準や自社基準との相違点を確認したい。

図6 安全管理に対する国内及び海外関係者の考え方

船舶の安全向上への貢献を第一の使命とする本会としては、海外事業者の意図するところを理解する一方で、日本の作業船関係者の意見にも配慮しつつ、両者の考え方のギャップを埋めて、日本の作業船の安全管理向上に寄与するとともに、国内の洋上風力工事における傭船を円滑化していくことが必要と考えている。

船級登録船の場合は、船級検査により、船体・機関・船上機器の健全性を確認するとともに、ISMコード適用船の場合は、運航管理についても本会が審査を行っているが、内航の作業船の場合は、船級登録船であってもISM認証を取得していない船や、そもそも非自航の起重機船等のように船舶検査非適用の船が多いのが実態である。

こうした実情に鑑み、本会においては、昨年より、「マリン・アシュアランスサービス」と称する新しい業務サービスに取り組んでいる。本サービスは、船体などの構造・設備等全般を主な対象とする船級検査と異なり、作業手順や作業判断基準を対象として、操縦者などの経験・資格の確認や搭載設備の管理・運用の状態などを、プロジェクトごとの傭船契約の前に傭船する者の目線で評価するものである。次章において、新サービスの概要をご説明する。

3. 本会のマリン・アシュアランスサービスについて

3.1 概要

マリン・アシュアランスサービスには、General Ship InspectionとDP Operation Assessmentの二種類の業務がある。

①General Ship Inspection

【目的】

作業船の安全管理・運用状況を一定の基準に照らして第三者評価し、傭船者の判断に資する。

【業務内容】

特定の作業に従事することを前提に、操船者の資格や履歴、作業マニュアル、搭載設備の管理・運用の状況を、傭船者の目線（作業の確実な実施、潜在的な事故リスクの有無）で評価する。使用する基準の違いにより、以下の三つに分類される。

1) International Marine Contractors Association（以下、IMCA）eCMID検査

2) 依頼事業者の社内基準等への適合性評価

3) 国際規格等を基にした本会独自の評価

なお、IMCA eCMID検査は、石油ガス、再生可能エネルギー業界のコンストラクター、事業会社、教育機関、船級協会など約700社で構成される国際団体IMCAが運用する船舶安全管理システムの検査制度であり、図7の流れに沿って行われる。

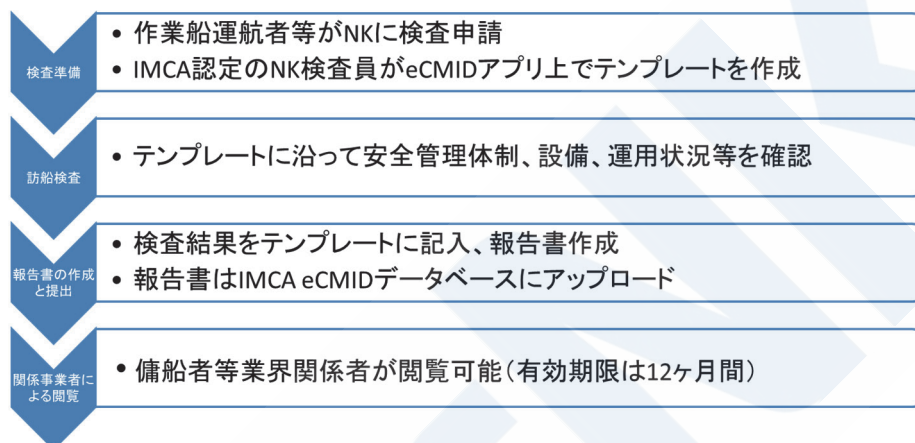


図7 IMCA eCMID検査の流れ

なお、IMCA eCMID検査は、IMCAが業務経験等を審査し認定した検査員のみが行うことが可能となっており、現在、本会にはIMCAの認定を受けた検査員が2名在籍している。日本語及び英語での対応が可能である。

作業船運航者等の方から本会に検査の申請を頂くと、認定審査員がeCMIDアプリケーション上で当該船舶の船種等の情報を入力しテンプレートを作成する。そのうえで、申請者の方と日程を調整、訪船して船舶の安全管理体制、設備を確認し、報告書を作成する。報告書はIMCA eCMIDデータベースにアップロードされ、関係者はこれを閲覧することが可能である。有効期限は12ヶ月となっている。IMCA eCMIDの確認項目は図8のとおりである。

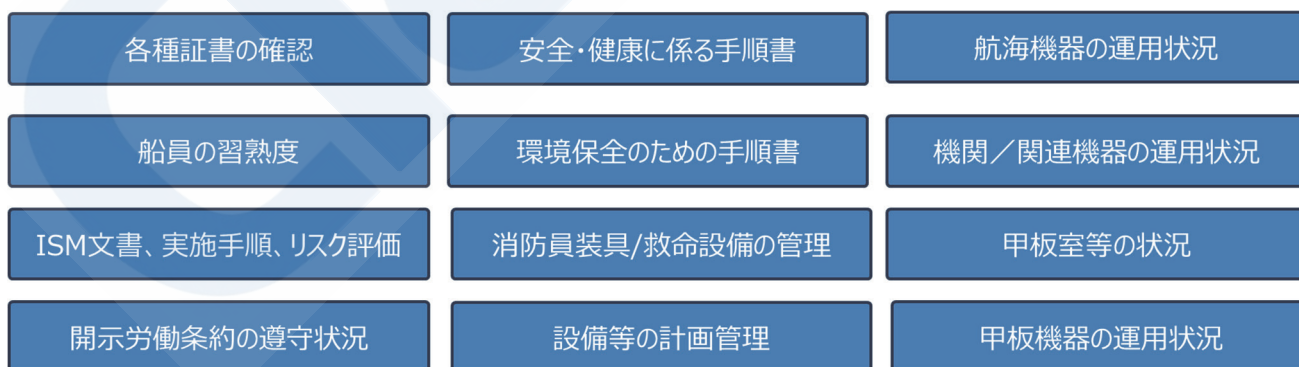


図8 IMCA eCMID 検査の確認項目

②DP Operation Assessment

【目的】

ダイナミックポジショニングシステム（DPS：船位保持装置）は建設対象物との適切な離隔距離を保ちつつ工事を行ったり、ケーブル敷設作業においてはケーブルに過度な張力をかけることなく定められたルートに敷設したりするため、洋上工事において極めて重要な機能である。万一、DPSに異常が発生し、船位保持

が正確に行えなくなると、施工中の風車基礎に作業船が衝突したり、人員が他船等への移動中の場合には、最悪の場合は落水事故や挟まれ事故にもつながるおそれがある。

DPSについては、船級登録船の場合、検査にて確認しているが、検査は一定の間隔で定期的に行うものであるため、検査後、機器の状態に変更が生じていたりすることもありうる。DP Operation AssessmentではDPSの運用・管理体制を第三者評価し、備船者の判断に資する。

【業務内容】

DPSの運用管理体制や対象作業に対して十分な検討・対策が講じられていることを確認する。例えば、万一、設備に不具合が生じた場合の対応を意識した運用・管理がなされているか等について確認する。

3.2 マリン・アシュアランスサービス実施状況と結果に基づくフィードバック

昨年来、本会では洋上風力関連工事における備船候補の船舶に対するマリン・アシュアランスサービスを実施してきた。本稿では、その実施結果を踏まえて、国内の関係者の方々に、安全向上の参考に資すると思われる事項をフィードバックすることとしたい。

3.2.1 General Ship Inspection結果の全般的な傾向

本稿執筆時点までに、本会は10隻の船のGeneral Ship Inspectionを行っており、その結果、フィードバックした方がよいと思われる点は以下の通り。

- ◆ 当該船舶の運航実態、作業内容を勘案した安全運航管理体制が整った方がよい（非自航船の場合）。
- ◆ 作業実施記録を適切に作成し、それを確実に保管した方がよい。
- ◆ 機器の保守・整備を計画的に行い、その記録を適切に残した方がよい。

以下に、審査項目毎に典型的な事例を述べる。

①リスク評価の実施

作業の安全確保のためには、危険を伴う個々の作業について、万一作業中に何らかの予期せぬトラブル等が生じた場合、その結果、どのようなリスクが連鎖的に起こりうるかを想定したうえで、リスクの連鎖を断ち切るための対策を講じることが重要である。

このため、General Ship Inspectionでは、「個々の作業時のトラブルに起因して発生する事故の影響や対策の検討（＝リスク評価）が行われているか」を確認することとしており、具体的には、以下の項目をチェックしている。

- ✓ リスク評価が必要となる作業の定義、リスク評価の記録。
- ✓ 実際に作業を行う者が参加しているか（署名）。
- ✓ 危険因子特定、危険度評価、対策実施後の危険度再評価の有無。

その結果、今まで検査した中で、約80%（10件中8件）の事例に基づくフィードバック事項は、以下のとおりである。

- ◆ 当該船のリスク評価のFormを定めておくこと。
- ◆ リスク評価に関する手順書のみならず、作業員への教育資料及び教育の記録も定めておくこと。
- ◆ 各作業について危険度評価及びリスク低減策の立案を行った場合、対策実施後の再評価も行うこと。

日本では、安全対策というと、資格の保持や、過去の事例に基づいて策定された安全ルールの遵守といった観点から考える傾向があるが、実際の作業実施環境や手順等に即してフレキシブルに未然予防策を検討し、潜在的なリスクを下げることが重要である。

②緊急時対応手順書

万一、重大な事故、火災、爆発、座礁、海洋汚染事故等が起きてしまった場合に、慌てずに本船のおかれた状況や設備を活用して速やかに災害の拡大防止を図るため、緊急時対応手順書を策定しておく必要がある。本会は、検査に際して、以下の項目をチェックすることとしている。

- ✓ 本船に特化したEmergency Procedureを準備しているか。
- ✓ 乗組員は内容を確認・理解しているか。

その結果、今まで検査した中で、約80%（10件中8件）の事例に基づくフィードバック事項は、以下のとおりである。



- ◆ Emergency Procedureを定めるとともに、手順の有効性を確認する観点からも緊急対応訓練を行うこと。
- ◆ 乗組員がEmergency Procedureを確認した際には、記録（署名）を残しておくこと。
- ◆ 消防員装具やその他の救命設備は、すぐ使用できる状態にて保管しておくこと。
- ◆ 消防員装具／救命設備の手引書は、常に船上に備え置きしておくこと。

全般的な傾向としても述べた通り、当該船舶の実態に即して、具体的なイメージを持ちつつ、これを緊急時対応手順書に取り込めるかが重要となる。また、手順書作成という行為そのものの完了で良しとすることなく、これを緊急事態下で如何に確実、速やかに実施していくかを考慮しておくことが重要である。

③作業許可システム（Permit to Work）

作業を行う際には、万一の事態に備えて組織として十分な対策が講じられていることを確保するとともに、状況を共有し、同時並行的に行う作業が潜在的なリスクを増大するような場合には、全体の作業を俯瞰できる立場にある者がこうした事態を回避する必要がある。このような観点から、導入が必要とされているのが作業許可システムである。本件については、検査に際して、以下の項目をチェックすることとしている。

- ✓ 作業許可システムが本船にあるか。
- ✓ 作業許可システムを必要とする作業が明記されているか。
- ✓ 各作業許可システムの記載項目は妥当か。
- ✓ 作業許可システムの運用記録が管理されているか。

その結果、今まで検査した中で、約80%（10件中8件）の事例に基づくフィードバック事項は、以下のとおりである。

- ◆ 当該船の実態に即した作業許可システムを設定しておくこと。
- ◆ 作業許可申請書には作業の内容に加えて、安全確保に係る対策を記載しておくこと（例えば、火気作業で見張りを立てておくこと等）
- ◆ 作業許可申請書に記載された事項が確実に行われたことを記録として残しておくこと。

日本では、施工を担当する人が施工安全確保にも責任を持ち、施工現場の判断で工事着手を決める場合もある。こうした運用がなされ、これまで大きな問題が生じていなければ、別途、安全管理担当セクションの承認を必要とすることを煩雑に感じられる場合もあると思うが、洋上風力建設工事の様な大規模プロジェクトになればなるほど、工事の安全確保を現場対応も含めて専門のラインで管理していくことが重要になると考える。

④ロックアウト／タグアウトシステム

ロックアウト／タグアウトシステムとは、作業中に、行ってはいけない操作がなされないように物理的な防止措置や、誰にでもわかる視覚的な措置を講じるという意味であり、一般に、作業許可システムと併用する。

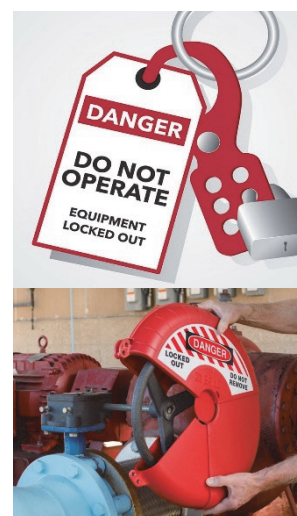
例えば、「中間弁交換」作業に際して、仕切弁が操作できないように施錠（ロックアウト）したり、「電気工事」作業に際して、ブレーカーを遮断し、“工事中につきブレーカーを入れてはいけない”旨の、タグの貼り付け（タグアウト）をしたりすることである。本件については、検査に際して、以下の項目をチェックすることとしている。

- ✓ ロックアウト／タグアウトシステムが導入されているか。
- ✓ ロックアウト／タグアウトの記録が残っているか。
- ✓ ロックアウト／タグアウトと、作業許可システムがリンクして運用されているか。

その結果、今まで検査した中で、約90%（10件中9件）の事例に基づくフィードバック事項は、以下のとおりである。

- ◆ ロックアウト／タグアウトシステムをヒューマンエラー抑止のために有効活用すること。
- ◆ ロックアウト対象の物の管理者を定めておくとともに、管理の記録を残しておくこと。

ロックアウト／タグアウトシステムは、人が誤りを犯しやすいものであるということを前提としたシステ



ムであり、洋上風力の建設工事のように大規模化し、工事に従事する人が増えれば増えるほど、その重要性は高くなる。

3.2.2 DP operation Assessment Service結果の全般的な傾向

本稿執筆時点までに、本会は4隻の船のDP operation Assessment Serviceを行い、乗組員の資格・経験の確認、書類審査として、DPオペレーションマニュアル、DPチェックリスト、Activity Specific Operating Guideline (ASOG)、緊急時対応手順書等が作成・使用されていることの確認、また、要望に応じDP Trialへの立会を実施し、本船の冗長性・乗組員のパフォーマンスをTrialにて評価、レポートにて報告を行った。その結果及びこれらに基づくフィードバック事項は以下のとおりである。

- ◆ 書類審査で、過去12ヶ月以内のDP Trial実施記録を確認できなかった船について、洋上DP Trialに立会し、各機器の冗長性、乗組員の習熟度を確認した。
- ◆ DPオペレーターの資格がIMCAガイドラインの要求〔Nautical Institute又はDNV認証のDP Certificateを必要とする〕を満たしていないケースが多かった。しかしながら、日本における本格的なオフショア工事の実績が未だ少なく、オペレーターの操縦実績時間をNautical Instituteの要件に適合させることは難しい場合が多いと考えられる。このため、本会としてはIMCAガイドラインとは別基準を設定し、本会が認証したトレーニングコースの修了証明書やDPメーカー発行のオペレーター証明書等も資格として認めている。
- ◆ 1当直中のDPオペレーターは、不測の事態等に備えて複数名を配置すること。

4. おわりに

本稿では、具体的な事例も交えてマリン・アシュアランスサービスの概要と実施結果の一端をご紹介した。当該サービスを受検された方から、

- ・国際的な安全管理基準・規則の考え方と照らし合わせて、本船が改善すべき点が具体的に明らかになった。
- ・今まで使用していなかった“作業許可システム”，“ロックアウト／タグアウト”，“リスク評価”等，安全運航につながるツールの有用性を知ることができた。

との感想も頂いている。また、本会が審査したことで、海外企業が日本の作業船の傭船に至ったケースもあった。

今後も、マリン・アシュアランスサービスを通じて、欧州の事業者が考える国際作業船のスタンダードと日本の沿岸作業船のギャップを埋め、傭船者と作業船所有者、オペレーター間の意思疎通と安全向上に努めていきたい。

以上

自動運航船の動向と本会の取り組み

伊藤 誠*

1. はじめに

国際海事機関（IMO：International Maritime Organization）が自動運航船（MASS：Maritime Autonomous Surface Ships）の検討を本格的に開始してから、すでに10年近い歳月が経過している。その間に国際的な議論が進展し、各国では自動運航船の実証試験や商業運航が始まっており、社会実装は段階的に進展している。例えば、公益財団法人日本財団（以下、日本財団）によるMEGURI2040プロジェクトでは、2022年の第1フェーズにおける実証試験が成功し、現在第2フェーズの実証試験が進められている。

自動運航船が注目される背景には、海難事故要因の約7割を占める¹⁾ヒューマンエラーの低減と、高齢化・人材不足²⁾への対応がある。船員のタスクを自動化・遠隔化することにより、人間の判断負荷を減らし、運航の安全性を高めることが期待されている。船員のタスクが自動化または遠隔化されることで負担が軽減され、労働環境が改善される結果、安全性の向上と持続可能な物流の維持が期待されている。こうした状況を踏まえ、各国では様々な自動運航船の運用方法（ユースケース）が検討されている。

自動運航船のユースケースは、運用形態（MoO：Mode of Operation）と、どのような環境下で自動化・遠隔化を利用するか（フェーズ）という二軸で整理する必要がある³⁾。MoOには、自動運航システムに操船を委ね、船員は船上で監視と緊急対応を担う場合や、陸上の遠隔制御施設（ROC：Remote Operation Centre）から人間が遠隔操船する場合がある。また、MoOは航行の全区間で一様である必要はないため、外洋では自動運航システムが操船し、ROCとの通信が安定する沿岸域では遠隔操船を行うといった例が考えられる。

こうしたユースケースは、法令・制度と整合してはじめて社会に受け入れられる。そのため、各国では技術開発の進捗や実証実験の成果を踏まえて、国内の法令・制度整備が進んでいる。例えば、IMOが策定作業を進める国際規則MASS Codeは、まずは強制力を持たせない形での策定を進めており、その作業は大詰めを迎えている。しかし、MASS Codeは機能要件までを規定するにとどまるため、社会実装を確実なものとするには、より詳細な技術要件を確立することが不可欠である。

本会では、これらの動向に早期から対応してきた。第三者機関という立場から実証プロジェクトにおける安全性評価を担ってきたのに加え、これらで得られた知見をガイドラインに取りまとめて公表することによって、技術要件の確立にも積極的に取り組んでいる。これらの取り組みは、自動運航船の技術開発の安全性確保と法令・制度整備に対して、船級協会の立場から貢献するものと考えている。

本稿では、まず各国の自動運航船の開発と法令・制度整備の動向を概観した上で、本会が進めている取り組みとその成果を紹介する。

2. 自動運航船の開発

各国では、自動運航船の開発と実運用が急速に進んでいる。各国の取り組みは地域の事情や目的に応じて異なるが、共通して、自動運航技術を段階的に検証しながら、実用化に向けた運航形態やシステム構成の確立を目指している。

ノルウェーでは、フィヨルド沿岸域を航行し、離れから着岸までを船上無人（システム操船）と遠隔による人間の関与（監視・緊急対応）で運用することを想定した開発が進められている。例えば、Moss港とHorten港を結ぶ約10.5kmの航路で運航されている電気推進RO-RO船ASKO Marit（図1）が挙げられる。ただし、検証は段階的に進められており、現時点ではシステムが操船しつつ、遠隔監視に加えて緊急時のための船員が乗船する体制で運航されている。また、ASKO Maritは湾側の自動化も特徴であり、自動離着岸用の船体固定装置や自動給電システムなど、船上無人化に必要なインフラ開発が進められている。

* 開発本部 技術研究所（自動運航船対応プロジェクトチーム）



図1 ASKO Maritの自動着栈の様子（後進接岸）

ベルギーでは、Seafarによる運河での遠隔操船が特徴的である。自社のROCから自動運航船の運航・管理を行い、アントワープ（ベルギー）のROC（図2）ではすでに商業運航を実施している。さらに、アムステルダム港（オランダ）やデュイスブルク（ドイツ）のROCを拠点に実証実験を進め、ベルギー以外での商業運航も目指している。将来的には船上無人での運用も目指しているが、現在の商業運航では乗組員の数を減らした有人船であるため、通信途絶などの事態にも対応可能である。ROCでは1名のRemote Operatorが1隻を担当し、上位権限を持つSupervisorがフリート全体を監視して異常時に対応する仕組みとなっている。



図2 Seafarの遠隔オペレーション用ブース

韓国では、操船の自動化による船員支援システムの開発が行われている。例えば、Samsung Heavy Industries（以下、SHI）ではSAS（Samsung Autonomous Ship）と呼ばれるシステムを開発し、本会のAiPおよび技術認証の証明書を受けている。また、Hyundai Heavy Industries（以下、HHI）の子会社であるAvikusは、自動運航システムHiNAS Controlを開発し、すでに製品として展開している。一方、遠隔化技術については、HHIがスマートシップ実証船Ulsan Taehwaを建造し、Avikusのシステムが搭載されるとともに、UIPA（Ulsan ICT Promotion Agency）にShip Integrated Data Centreと呼ばれるROCが設置された（図3）。これにより、同船の運航状況を遠隔で監視することが可能となっている。



図3 Ship Integrated Data Centre

日本では、日本財団によるMEGURI2040プロジェクト第2フェーズが進められている。図4に示すように、実証試験は、離島航路船・コンテナ船・RO-RO船への自動運航システムのレトロフィットと、新造コンテナ船1隻の合計4隻で行っている。例えば、新造コンテナ船では、離棧から着棧までの操船の自動化と機関の遠隔監視をMoOとして想定しており、その実現のために様々な要素技術の開発が進められている。本会も船級の立場から安全性評価を実施しており、NK船級船の審査および要素技術の評価を進めている。

図4 MEGURI2040実証プロジェクト第2フェーズの概要⁴⁾

このように、各国は、自動運航船の社会実装を目指して、運航環境や目的に応じた段階的な検証を進めており、実証から商業運航への移行が現実的な段階に入りつつある。

3. 各国の法令・制度整備

技術開発の進展に合わせて、それを支える法令や制度の整備も各国で進められている。自動運航船は、従来船の運航の枠組みでは想定されていない運用を含むため、技術実証で得られた知見を踏まえて、安全性や運用体制を制度面から裏付ける仕組みが求められている。こうした背景のもと、各国では既存法体系の活用や新法の制定など、それぞれのアプローチで環境整備が進められている。

ノルウェーでは、自動運航船に関するガイダンスRSV 12-2020（無人または部分的な無人運航を目的とした自動化機能の構築または設置に関するガイダンス）を2020年に発行した。既存の法令を基に審査を行うこととした上で、自動運航船が従来船と同等の安全性を有することを、リスクベースの評価手法であるIMO MSC.1/Circ.1455（代替・同等設計に関するガイドライン）を用いて示すことが求められている。

ベルギーでは、実証実験の成果を踏まえて2021年6月に法令改正が行われた点が特徴である。その法律（ベルギー海域での無人航行に関する王令）では、無人船を「航海の一部または全部において、人間の介入なしに航行できる船舶または遠隔操作で航行できる船舶」とであると定義した。また、「遠隔制御施設は無人船の不可欠

な構成要素であるとみなされる」として、船上での人間の介入なしに陸上から遠隔操船するユースケースが、法律の中で認められるようになった。

韓国では、2025年1月に「自動運航船の開発および事業促進に関する法律」が施行された。同法の「自動運航船の試験運行および特別規定」では、試験運行や実証試験には認可が必要であること、また認可を受けた場合には指定航行海域において一部の法規制が適用除外となることが定められている。これは、開発技術の実証と実績の積み重ねを促すための、国による環境整備の一環と位置付けられる。

日本では、2024年6月から開催された自動運航船検討会の議論結果を踏まえて省令が改正され、2025年6月に施行された。自動運航船（自動運航システムを有する船舶）は、船舶安全法の体系上、特殊船として検査される仕組みに位置付けられた。主な改正内容を以下に示す。

- 船舶安全法施行規則において、「自動運航システムを有する船舶」を特殊船として分類
- 船舶自動化設備特殊規則において、自動運航システムの機能要件を規定
- 船舶検査心得および船舶検査の方法において、自動運航システムを有する船舶の具体的な検査の流れ、船舶検査証書発行の時期等を規定

今後は、配乗人員や責任の在り方について、実証試験の結果を踏まえた議論が行われる見通しである。

IMOでは、自動運航船の利用のための論点整理（RSE：Regulatory Scoping Exercise）にて特定された課題に対して、条約を個別に改正するのではなく、目標指向型（GBS：Goal-Based Standards）の新たな規則としてMASS Codeを策定することが合意された。MASS Codeは以下に示す3つのPARTに分かれており、PART 2では自動化・遠隔化されるタスクに依らない全てのMASSに適用される要件、一方、PART 3はタスクごとの要件となっており、旗国によって適用可否が判断される。

■ PART 1 (Introduction)

適用範囲等を定義。非義務的Codeでは貨物船に適用されることになっている。

■ PART 2 (Main Principles)

全ての自動運航船に共通する要件を規定。ConOpsベースの承認プロセスなどが記載されている。

■ PART 3 (Goal, Functional Requirements and Expected Performance)

自動化・遠隔化されるタスクごとの機能要件を規定。ConOpsに応じて旗国が要件の適用可否を判断する。

また、MASS Codeは、暫定的な指針として非義務的Codeを策定して早期に方向性を示すことが適当とされた。そのため、まずは2026年に非義務的Codeを採択した上で、経験蓄積フェーズ（EBP：Experience Building Phase）を通じてフィードバックを行い、2032年の義務的Code発効を目指すことになっている。

このように、ユースケースの実現を見据えた法令・制度整備が各国およびIMOで進められているが、安全に技術を活用するためには、これらと並行して具体的な技術要件を策定することが重要である。例えば、MASS CodeはGBSの体系（図5）におけるTier I（目標）およびTier II（機能要件）で構成されており、その実効性を担保するためには、より詳細な技術要件に当たるTier IV（船級規則等）やTier V（産業規格等）の整備が求められる。特にTier IVは、本会をはじめとする船級協会が中心となって整備されることが期待されている。

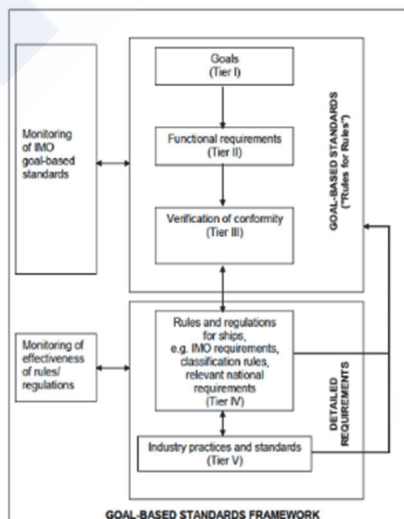


図5 Goal-Based Standards framework (MSC.1/Circ.1394)

4. 本会の取り組み

4.1 概要

本会は、自動運航船に関する動向に対して、自動運航船プロジェクトチームを立ち上げて安全性評価および規則開発を積極的に進めてきた。安全性評価では、実証プロジェクト等に対して第三者の立場から審査・評価を行い、本会のガイドライン等の要求を満足することを確認している。そして、これらの知見を基にガイドラインの改定を行い、技術要件の確立に貢献している。さらに、これらの取り組みを下支えする基盤として、評価手法の高度化やシミュレーション技術の活用に関する研究を国内外のフロントランナーと実施している。以下では、それぞれの取り組みについて説明する。

4.2 安全性評価の取り組み

本会では、2020年に「自動運航船、自律運航に関するガイドライン（以下、ガイドライン）⁵⁾」を発行して以来、国内外の自動運航船および搭載されるシステムに対する審査を行ってきた。

操船を自動化するシステムに対しては、日本郵船株式会社・株式会社MTI・株式会社日本海洋科学（以下、日本海洋科学）によるAPEX^S-auto、川崎汽船株式会社・川崎近海汽船株式会社・日本無線株式会社・株式会社YDKテクノロジーによる統合操船者支援システム、海外ではSHIのSASに対してそれぞれAiPを発行している。さらに、要素技術に対してもガイドラインに基づく審査を行い、技術認証の証明書を発行している。例えば、避航操船機能に対しては、複数の避航シナリオに対するシミュレーション結果等を審査して、日本海洋科学のARS（Advanced Routing Simulation and planning）やSHIのSAS-IBSに対して証明書を発行している。

一方、遠隔技術に対しても、SHIのROCであるSROC（Samsung Remote Operation Centre）に対するAiPを発行している。これらの安全性評価を通じて、本会は自動運航船の主要な機能に関する安全性の確認と、今後の技術要件の構築に向けた知見を蓄積している。

4.3 規則開発の取り組み

ここでは、2025年に発行されたガイドラインver. 2.0⁶⁾について、主な変更点である船級符号の新設と附属書の新規策定の詳細を説明する。

4.3.1 船級符号への付記

本会が承認した自動運航システムを搭載した船舶には、船級符号「Autonomous-XY(Z)（略号AUTO-XY(Z)）」を付記する。X、Y、Zの項目はそれぞれ、自動化される機能、自動化レベル、航海フェーズを意味する。

自動化される機能（項目X）は、どのタスクを自動化するかを明示するために用いられ、Navigation (Nav), Engineering (Eng), Safety (Saf), Operation (Ops)のいずれかとする。自動化レベル（項目Y）は、自動化される機能に対して人間の関与の程度を表現する以下に示す数字が用いられる。

- 1：（支援）部分的自動化、意思決定は人間が実施。
- 2：（条件付き自律）人間の監視下で使用。
- 3：（高度自律）人間の介入は原則不要。ただし、人間の判断でいつでもオーバーライドできる状態。

さらに、航海フェーズ（項目Z）は自動運航システムが利用される海域等を表現するものであり、Navigationが自動化される場合には以下の4つの全てが該当すればAllとし、それ以外は該当するものを記載することにする。

- Berth/unberth (Be)：離着岸
- Harbor (Ha)：港内
- Coastal (Co)：沿岸域
- Open sea (Os)：外洋

例えば、人間の監視下において自動航行可能な機能を有し、外洋においてのみ作動可能なシステムを搭載した船舶には、AUTO-Nav2 (Os)が付与される。

4.3.2 附属書の新設

本会では、Tier IVに該当する規則として、これまでの知見を附属書の形で具体化することとした。附属書は大きく2つに分けることができ、Navigationの自動化をする自動運航システムに関する要件（附属書I）と遠隔制御システムによる遠隔機関監視・操作に関する要件（附属書II）で構成される。

附属書Iでは、通則において共通要件、定義、承認プロセス等を規定した上で、自動運航システムの重要な機能である状況認識機能、衝突・座礁回避機能、操船制御機能のそれぞれに対する詳細な要件を規定している。

特に、シミュレーションを用いた評価では、シミュレーションシナリオや操縦運動モデルについて言及しており、後述する研究活動の成果が反映されている。

附属書IIでは、遠隔制御施設からの機関監視および機関操作を行うための安全要件として、適用範囲や具体的な機能要件が規定されている。例えば、遠隔機関監視において、複数隻を監視する場合の要件や警報・表示すべき情報について記載している。

4.4 研究活動

本会では、安全性評価および規則開発に資する研究を国内外の研究機関・企業と連携して実施している。本節では、ガイドラインの開発の基礎となる研究活動についてその概要を示す。

4.4.1 操縦運動モデルに関する研究

自動運航船の操船制御機能では、自動離着岸を含む港内操船の自動化が新規性の高い技術とされる。安全性評価の観点からは、シミュレーション評価に用いる操縦運動モデルの妥当性が重要である。理想的には、シミュレーションで使用する操縦運動モデルを標準化することが望ましいが、港内操船は低速域における複雑な運動を伴うため、モデルの標準化に向けた取り組みは依然として進行中である。

このような状況を踏まえ、安全性評価の観点からは、単一の標準モデルを規定するのではなく、操縦運動モデルが満たすべき要件を定め、その要件を満足するモデルを用いたシミュレーションを評価時に要求することが現実的である。すなわち、港内操船を再現するシミュレータの運動計算部に求められる要件を整備する必要がある。

そこで本会は、2023年に国内の大学、研究機関、造船所、メーカーから操縦運動および操船制御の専門家を招き、操縦運動モデルの要件を検討する場を設置した。そして、操縦運動モデルの要件とその確認方法の検討を目的として議論を進め、その成果を本会ホームページ上に公開した⁷⁾。一例として、図6にスラスト操船の確認用シナリオを示す。また、関連する国内外の学術会議において、検討内容を発表している^{8) 9)}。

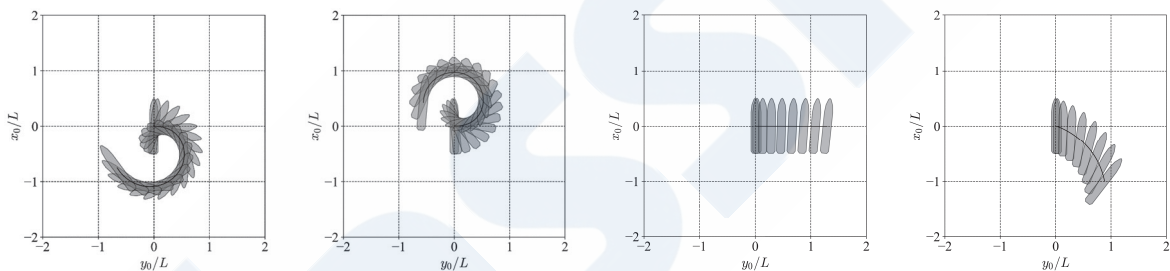


図6 スラスト操船の確認用シナリオ（抜粋）

4.4.2 衝突・座礁回避機能の検証のための研究

操船を自動化するにあたり、衝突・座礁回避機能は重要である。特に、COLREG条約で他船との見合い関係に応じた操船が規定されており、自動運航船においても遵守が求められる。そのため、COLREG条約を遵守しつつ、適切に他船を避航し、座礁を回避することを検証する必要がある。

そこで本会では、国内研究機関等との共同研究を通じて、シミュレーションによる検証方法について検討を進めてきた。例えば、避航操船をシミュレーションする際のシナリオについては、図7に示す見合い関係の分類¹⁰⁾に基づいて、1対1または2の見合い関係を持つ基本シナリオ（図8）を検討した。また、操船結果の評価方法の一つとして、図9に示す評価領域図に関する検討および実験^{11) 12)}を行った。さらに、COLREG条約に記載されている「good seamanship」は、数値的に表現することが困難なものも含まれるため、専門家評価と呼ばれる海技者等による主観評価の方法について検討し、具体的な避航アルゴリズムを対象とした実験を実施している¹³⁾。

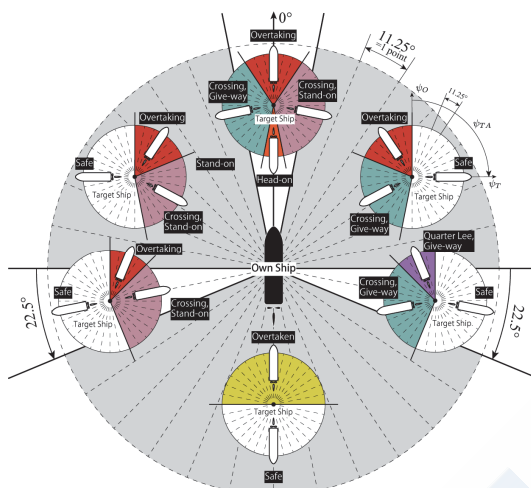


図7 見合い関係の分類

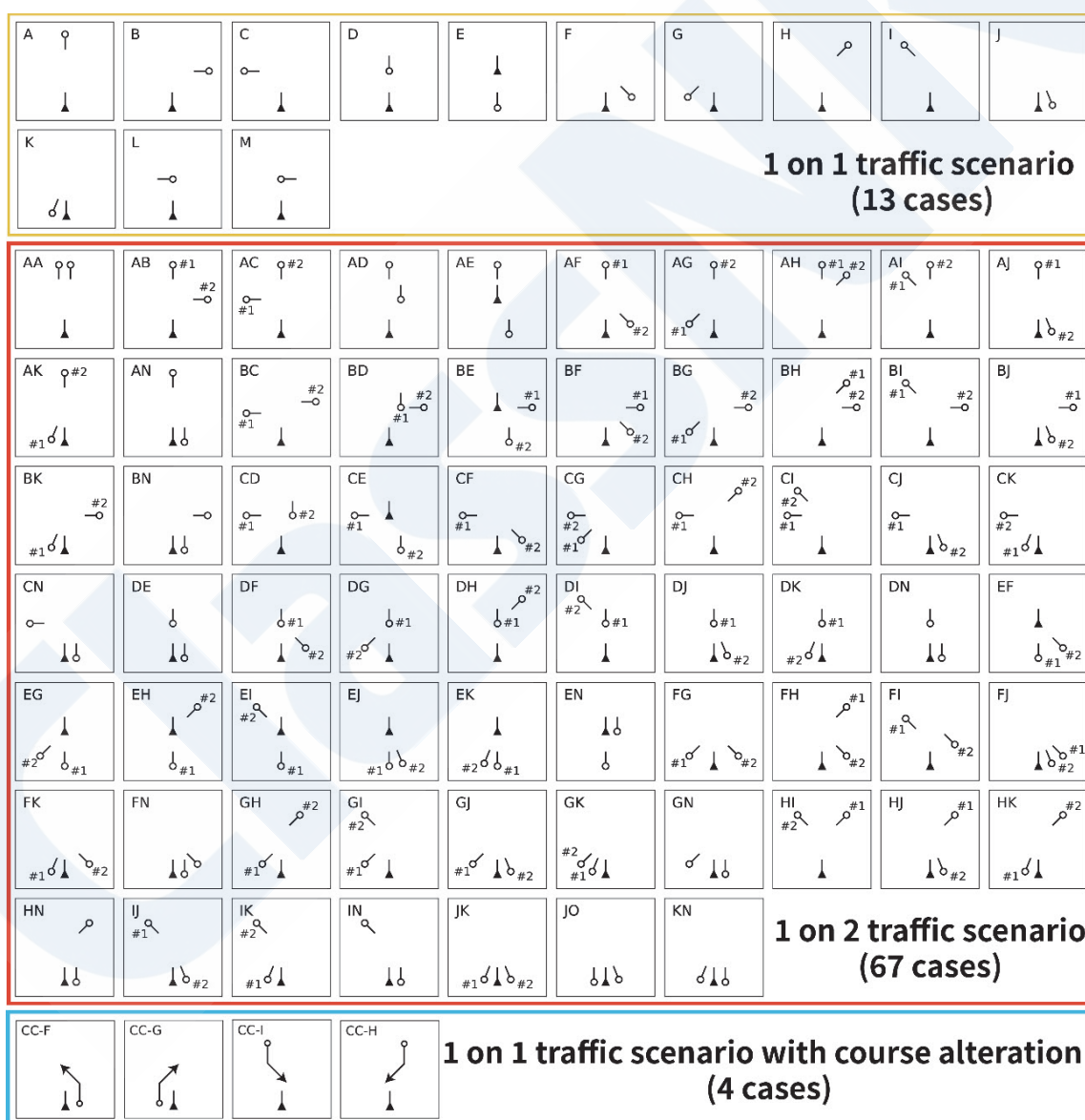


図8 基本シナリオ

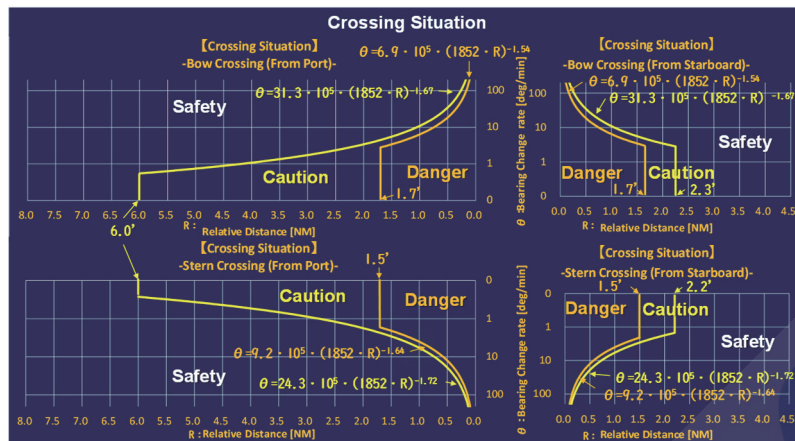


図9 評価領域図

4.4.3 遠隔化技術に関連する研究

遠隔監視や遠隔操船において、陸上の人間がリアルタイムで映像を確認するといったオペレーションが想定される。そのとき、ROCでの状況認識において重要となる技術の一つが映像伝送である¹⁴⁾。そこで本会では、ROCの状況認識に必要な映像伝送要件と遠距離・広視野映像の技術的実現可能性の検証を進めている。その取り組みの一環として、実験船からのライブビデオ伝送をスターリンクとセルラー（LTE）通信で受信・再生する実証実験を行い、遅延、画質、再生安定性の相互トレードオフ関係を定量的に示し、航海フェーズや遠隔操作レベルに応じて動的にバランスを取る必要性を示した¹⁵⁾。

加えて、遠隔化を実現するために重要な通信に関連する最新動向を調査し、その結果は随時本会のHPにて公開している。例えば、研究報告書¹⁶⁾では、限られた電波資源を補完する技術として注目を集めている「光による無線通信」について、その現状や船舶分野への応用可能性について検討している。このように最新動向を整理し、技術成熟度を把握することで、公平かつ客観的な要件の策定に貢献している。

5. おわりに

本稿では、各国における自動運航船の開発と法令・制度整備の動向を整理し、本会が進める安全性評価や規則開発、研究活動の取り組みを紹介した。自動運航船の開発と法令・制度整備の動向では、各国が法令・制度の枠組みの中で段階的な開発を進めていること、IMOにおいてMASS Codeの策定作業が進められていることを紹介した。MASS CodeがGBSの体系に基づいて機能要件までを整理するものであることから、より具体的なTier IVは、本会をはじめとする船級協会が中心となって整備されることが期待されている。このような動向に対し、本会は早くから安全性評価、ガイドライン開発、研究活動を通じて対応してきた。今後も、これまでの知見を活かして、自動運航船の社会実装に向けた取り組みを船級協会の立場から支援していく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和7年版国土交通白書，2025
- 2) 国土交通省：令和2年度船員需給総合調査結果報告書，2021
- 3) 一般財団法人日本海事協会：自動運航船の社会実装へ向けて，2023
- 4) 日本財団：無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」未来の海を支える「無人運航船」の実用化を目指す，<https://www.nippon-foundation.or.jp/what/projects/meguri2040>
- 5) 一般財団法人日本海事協会：自動運航船，自律運航に関するガイドライン ver. 1.0，2020
- 6) 一般財団法人日本海事協会：自動運航船，自律運航に関するガイドライン ver. 2.0，2025
- 7) 一般財団法人日本海事協会：自動運航船の操船制御システム評価用操縦運動モデルに関する研究会完了報告，<https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/news/2025/0526.html>
- 8) 伊藤誠，高品純志：操船制御システム評価用操縦運動モデルの要件検討，日本船舶海洋工学会講演会論文集，Vol. 39，2024

- 9) M. Ito et al., Development of Validation Methods for Manoeuvring Models in Safety Evaluation of Automatic Berthing and Unberthing for MASS, Journal of Physics: Conference Series(accepted).
- 10) R. Sawada et al., Framework of safety evaluation and scenarios for automatic collision avoidance algorithm, Ocean Engineering, Vol. 300, 117506, 2024.
- 11) 日本海事協会：自動避航システムの認証（安全性評価）に向けた検証実験,
<https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/report/2023/001.html>
- 12) S. Nakamura et al., Objective evaluation criteria for the safety certification of autonomous navigation system, Journal of Physics: Conference Series(accepted).
- 13) T. Hirose et al., Verification and Validation of Autonomous Collision Avoidance System Developed based on Functional Task Analysis of Ship Operation by Ship Maneuvering Experts, Journal of Physics: Conference Series(accepted).
- 14) 塚越郁夫：船陸間通信の大容量・低遅延化技術に関する調査研究,
<https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/report/2025/003.html>
- 15) I. Tsukagoshi et al., High-Quality Video Transmission for Ship Remote Operation, Journal of Physics: Conference Series(accepted).
- 16) 安立恭晴：光無線通信の現状と可能性に関する研究報告,
<https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/report/2025/006.html>

揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチ

開発本部 開発部

1. はじめに

国際海事機関（IMO）では、船上揚貨装置における事故を減らすべく、国際的な安全基準の策定について検討を行ってきた。

船上揚貨装置の国際的な安全基準としては、従来、港湾労働者に対する安全基準であるILO 152号条約（ILO C152, International Labour Organization Convention No.152）が業界関係者の中で広く認知されており、ILO C152の批准国の港湾や非批准国の一部の港湾において既に適用されている。また、各船級協会の技術規則もこれを考慮した要件としている。

しかしながら、機関室天井クレーンや食糧庫用クレーンなどの港湾労働者が関与しない船上揚貨装置については、ILO C152が適用されないことから、船上揚貨装置に対して一様に適用できる国際基準の不足が懸念されており、ILO C152とは別に国際基準の策定の必要性が認識されていた。

2011年5月に開催されたIMO第89回海上安全委員会（MSC89）において、日本をはじめとした関係国政府からの提案文書MSC89/22/12（船上揚貨装置に対する安全基準をSOLAS条約に取り込むことの提案）が提出され、船上揚貨装置に対する国際的に統一された安全基準の策定の議論が開始された。アンカーハンドリングウインチについては、2012年2月に開催された第56回設計設備小委員会（DE56）でのノルウェーからの提案文書DE56/22/4（曳航、アンカーハンドリング及び船尾吊上げウインチに関する要件の策定）により、揚貨装置と並行して議論が行われるようになった。

そして、2023年6月に開催されたMSC107において、揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチに関するSOLAS条約改正案がIMO決議MSC.532(107)¹⁾として採択された。また、具体的な安全要件についてはガイドラインに規定することとして、同じくMSC107においてMSC.1/Circ.1662²⁾及びMSC.1/Circ.1663³⁾として承認された。

本会においては、当該SOLAS条約改正及びガイドラインを本会規則に取り入れ、「揚貨設備規則」を「揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチ規則」に改めて、2026年1月からの適用とし、揚貨装置関連については弊社材料艀装部、アンカーハンドリングウインチ関連については弊社機関部、検査関連については弊社検査部において、当該規則に基づく運用を開始した。

本稿では、IMOでの審議経緯、ILO C152及び揚貨設備規則の改正について紹介する。

2. IMOでの審議経緯

IMOでは、実質的に2011年から2023年の12年間もの長期にわたり、船上揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチの国際的な安全基準の策定について議論を交わしてきた。関係国政府、業界団体等からの提案文書、委員会や小委員会、関連する作業部会や通信部会、IMO事務局からの報告なども含めると、100通弱もの関連文書が作成されている（表1）。このことから、揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチに対する統一された国際基準を策定することが如何に困難であったか、また、利害関係者の関心の高さも窺える。

これらの関連文書はIMOでの審議内容を把握するうえで、何れも重要な文書となるが、とりわけSOLAS条約改正及びガイドライン作成の契機となった文書については、以下に概要を記載する。なお、各文書中のすべての内容を網羅する意図では記載していないので、参考程度のものとしてご理解いただきたい。

2.1 MSC 89/22/12

2008年9月に日本の京浜港において貨物船“M.V. RICKMERS JAKARTA”とはしけ“18新栄丸”間の荷役作業で生じた重大事故、日本国内で生じた少なくとも18件の荷役用揚貨装置に関わる事故（前述の重大事故を含む）、ニュージーランドから報告されている64件の船上揚貨装置の故障による安全上の懸念事項を背景に、船上揚貨装置の製造、搭載に関わる安全要件をSOLAS条約に取り入れる必要性について提案が行われた。

2.2 DSC 16/5/5及びDE 56/22/3 (ICHCA : International Cargo Handling Coordination Association)

危険物・個体貨物・コンテナ小委員会 (DSC) 及び設計設備小委員会 (DE) における、揚貨装置の事故に関する事前調査結果の報告。ある1つの旗国の船舶において、2001年以降で非貨物用途の揚貨装置に29件の事故が生じており、何れもメンテナンス不良が要因とされている。この結果、ILO C152は貨物用途の揚貨装置のみに適用されることを踏まえて、非貨物用途の揚貨装置に対しても対策の必要性が示唆された。また、SOLAS条約のもとで旗国主管庁の関与の必要性も示唆されている。DE 56/INF.12 (日本) では、非貨物用途の揚貨装置として、タンカーに備えるホースハンドリングクレーン、食糧揚収用の小型クレーン、機関室天井クレーン、救命設備進水用のダビットクレーンが例示された。

2.3 DE 56/22/4 (ノルウェー)

アンカーハンドリング船“M.V. BOURBON DOLPHIN”の転覆事故を受けて、曳航、アンカーハンドリング、船尾吊上げウインチの緊急離脱、張力制御に関わる技術的要件の策定の必要性が提案された。

2.4 DE 57/18/1 (韓国) 及びDE 57/18/2 (ICHCA)

SOLAS条約のもとで国際的に統一された義務的要件の策定の必要性が示され、具体的な改正内容として、SOLAS条約第II-1章第3-13規則を追加する提案が行われた。DE57/18/3 (日本) では、SOLAS条約改正案が、また、それによる改正後のSOLAS条約から参照するガイドラインの内容について、構造及び強度、搭載、保守、点検、認証並びにオペレーションマニュアルを含めたものとするのが提案された。

2.5 DE 57/18/4 (ニュージーランド)

現存船の揚貨装置についても適用対象とすることや、すべての船種の倉庫用クレーンや機関室天井クレーンにも適用することが提案された。

2.6 SSE 1/WP.5 (SSE1のWG議長) 及びSSE 1/21 (IMO事務局)

船舶設備小委員会 (SSE, 旧DE等が再編されたもの) において、適用対象について、荷役用の揚貨装置に限定しないこと、人員用エレベータ及びエスカレータ、国際救命設備コード (LSAコード) 関連設備、オフショアユニット (MODUコード適用) や漁船には適用しないことが示された。また、要件の内容において、操作、保守、訓練、点検、試験、認証に関わる事項は、新造船及び現存船の何れも適用とし、設計、製造に関わる事項は、新規搭載 (新造船及び現存船) の場合に適用することが示された。

2.7 SSE 2/8/3 (日本)

揚貨装置についての明確化として、適用対象は動力駆動の揚貨装置とすることが提案された。また、人員／乗客／備用品用エレベータ (リフト)、エスカレータ及び取り外し可能なホイスト並びにアコモデーションラダー、パイロットラダー、スラッジウインチなどの特定の目的に特化したものや、LSAコードで規制される装置は適用対象から除く旨が提案された。ただし、SSE 2/WP.5 (SSE2のWG議長) 及びSSE 2/20 (IMO事務局) において、人員／乗客用エレベータ (リフト)、非動力駆動の揚貨装置、取り外し可能なホイスト、スラッジウインチについては、適用対象外とすることができる旨の見解に留められた。

2.8 MSC 95/22 (IMO事務局)

目標及び機能要件ベースのSOLAS条約改正案を開発すること、改正後のSOLAS条約はガイドラインにより補完すること、また、ガイドラインの内容については、新規搭載の揚貨装置及びウインチの設計及び製造に関わる事項／すべての揚貨装置及びウインチの検査、保守及び操作に関わる事項／船員及び陸上要員の訓練に関わる事項を踏まえたものとするについて合意。さらに、日本をコーディネータとする通信部会の設立を要請した。

2.9 SSE 3/8 (日本)

SOLAS条約第II-1章の改正案及びガイドライン案の雛形が提出され、SOLAS条約改正案では、揚貨装置の定義、適用対象外となる揚貨装置の制限荷重 (SWL) の閾値など、ガイドライン案では、設計、製造に関わる要件は船級規則を参照する取扱いなどが規定された。アンカーハンドリングウインチについても、ガイドライン案に具体的な安全要件が規定された。

2.10 SSE 3/8/1 (ノルウェー)

SSE 3/8のガイドライン案中のアンカーハンドリングウインチの安全要件について、補足説明が行われた。

2.11 SSE 4/8/2 (アンティグア・バーブーダ, ニュージーランド, ICHCA, IHMA : International Harbour Masters' Association) 及びSSE 4/8/3 (中国, 香港)

作動不能又は故障中の揚貨装置については、船舶又は乗員に危険を及ぼさない場合に、SOLAS条約証書の有

効性が保持される取扱いが提案された。

2.12 SSE 4/WP. 4 (SSE4のWG議長)

定義（揚貨装置、アンカーハンドリングウインチ、揚貨装具）、適用（適用対象外の記載も含む）、目標及び機能要件で構成されたSOLAS条約改正案について検討が行われた。手動操作の揚貨装置については、適用対象外とすべきではないとする見解を受けて、適用対象外として明記しないこととした。ただし、SWLの閾値により、必然的に適用対象外となる可能性が留意された。

2.13 MSC 98/23 (IMO事務局)

SOLAS条約改正案へのアンカーハンドリングウインチに関する要件の取入れに伴い、議題を「船上揚貨装置及びウインチ」から「船上揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチ」に変更することが承認され、また、当該SOLAS条約改正案及びガイドライン案については、MSC.1/Circ.1394/Rev.1に規定される目標指向型基準（GBS: Goal-Based Standards）の一般ガイドラインに従って作業を行うことが指示された。

2.14 SSE 5/10 (日本)

MSC 98/23の要請を踏まえて通信部会においてSOLAS条約改正案の修正を検討。適用対象の明確化のため、適用対象外となる揚貨装置の他に適用対象となる揚貨装置の具体例も記載する方針が示された。

2.15 SSE 5/10/5 (日本)

手動操作の揚貨装置が適用対象外になっていないことを踏まえて、そのような小型の揚貨装置が適用対象となることを避けるべく、適用についてのSWLの閾値を1000kg以上とすることを提案。また、小型の揚貨装置などで製造者が既に存在しない場合を想定し、設計情報が入手できないことへの対処として、船主又は船舶管理会社の指定したSWLも認める手順を取り入れることが提案された。

2.16 MSC 100/9/5 (IMCA: International Marine Contractors Association)

洋上施設の建設作業に従事する船舶に搭載される揚貨装置は、船舶の目的そのものとなり、既に厳格な国際基準に基づき設計、維持されていることから、改正後のSOLAS条約の適用対象から除外すべき旨の提案が行われた。

2.17 SSE 6/9/1 (日本, ICS: International Chamber of Shipping) 及びSSE 6/9/2 (日本, ICS)

SOLAS条約改正の検討に多くの時間を費やしていること、ILO C152は通常型の規範的要件に基づいた内容で様々な利害関係者の間で広く使用されていることなどから、MSC.1/Circ.1394/Rev.1に規定される目標指向型基準（GBS）に基づくSOLAS条約改正ではなく、これまで検討してきた通常型の規範的要件に基づいた内容とするものの提案が行われた。また、設計、建造、搭載については、適用についてのSWLの閾値を設け、保守、点検、検査に関わる事項については、適用についてのSWLの閾値を設けないことが提案された。

2.18 SSE 6/9/4 (ドイツ)

SWLの小さな揚貨装置は、不注意な操作、無許可者による操作、検査及び保守の不備などによる危険性の増大が懸念されることから、すべての揚貨装置及び揚貨装具に適用できる要件とすべく、適用についてのSWLの閾値の導入を反対する提案が行われた。

2.19 SSE 6/WP. 5 (SSE6のWG議長) 及びSSE 6/18 (IMO事務局)

目標指向型基準（GBS）に基づくSOLAS条約改正ではなく、これまで検討してきた通常型の規範的要件に基づいた内容とすることを合意し、また、適用についてのSWLの閾値については1000kg以上とし、新規搭載の揚貨装置の設計、建造、搭載及び荷重試験並びに既存の揚貨装置の荷重試験に対しては、SWLが1000kg未満の場合は適用対象外とする方針が決定された。

定義の改正（揚貨装置、アンカーハンドリングウインチ、揚貨装具等）、当該SWLの閾値はアンカーハンドリングウインチには適用しないこと、MODUコードを参照する規定の削除、オフショア建設船は適用対象外とすること、ILO C152に準拠する場合にはSOLAS条約適用上の追加的要件が生じないようにすること、作動不能又は故障中の揚貨装置の取扱いについてもSOLAS条約改正に取り入れること、さらに、これまで、1つの文書で検討してきた揚貨装置とアンカーハンドリングウインチに関するガイドラインを、2つに分離して作成することが合意された。

2.20 SSE 7/9 (日本)

揚貨装置のガイドライン案の他、新たに策定したアンカーハンドリングウインチのガイドライン案についての報告が行われた。アンカーハンドリングウインチのガイドライン案では、ウインチ保持能力、ブレーキ保持能力、安全係数等のウインチ自体の基本設計に関する要件については、具体的な提案がなかったことを踏まえ

て、当該事項に関する検討は行わないこととする方針が示された。

2.21 SSE 7/9/3 (中国)

SOLAS条約とILO C152とで2つの異なる検査間隔及び認証制度が調和せずに共存すると、保守や試験の増加や、船舶管理の困難さ、業界や主管庁による検査実施の混乱や不確実性が生じることを指摘し、MSCからの更なる指示を仰ぐよう問題提起が行われた。

2.22 SSE 7/WP.5 (SSE7のWG議長) 及びSSE 7/21 (IMO事務局)

体裁上の修正を加えたうえ、SOLAS条約改正案の最終化が行われた。また、揚貨装置のガイドライン案については、引き続き検討が行われ、定義の修正、荷重試験における試験荷重の追記、荷重試験及び詳細検査の証明書の雛形、SSE 7/9/3を考慮し、SOLAS条約及びILO C152間の詳細検査の検査間隔が異なることへの対応(旗国主管庁の判断に基づき、SOLAS条約に基づく年次検査及び更新検査において、ILO C152に基づく詳細検査が適切に実施されたことを確認する、又は、詳細検査の期限に3ヵ月の猶予期間を設ける)、標示、保守、点検、作動試験、操作などについて、全体的な修正が行われた。アンカーハンドリングウインチのガイドライン案については、SSE 7/9/4 (ノルウェー) での“automatic spooling devices”を“remotely operated spooling devices”に変更することが合意された。

2.23 MSC 102/24 (IMO事務局)

SSE 7で最終化されたSOLAS条約改正案が原則承認され、また、アンカーハンドリングウインチのガイドラインが最終化された際にSOLAS条約改正の採択を行う方針が示された。しかしながら、コロナウイルス感染拡大の影響により、2024年1月1日発効に向けての採択は困難であることから(2021年にはSSEが開催されないため)、例外的な措置として4年サイクル以外の可能な限り早いタイミングで発効するものとして採択する方針が示された(つまり、2026年1月1日発効)。

2.24 SSE 8/9 (日本)

アンカーハンドリングウインチのガイドライン案について、適用、定義、設計、建造、搭載、試験及び詳細検査(コミッショニング試験、定期的試験、詳細検査、及びそれらの記録)、適合の認証、銘板、保守、点検、運転試験、操作、装具、作動不能のアンカーハンドリングウインチ等に関わる規定の修正について報告が行われた。

2.25 SSE 8/9/2 (日本)

SOLAS条約改正案とILO C152とで揚貨装置に対する詳細検査の検査間隔が異なることについて、港湾当局などの利害関係者の間で混乱を引き起こす可能性があることに触れ、IMO事務局に対して、ILOへのSOLAS条約改正案の報告と適切な措置を講じることを要請するよう提案が行われた。

2.26 SSE 8/9/3 (日本)

アンカーハンドリングウインチのガイドライン案について、5年に一度実施が要求される荷重試験は、巨大な試験重量物が必要となり、安全上のリスクが高く、かつ試験場所が限られるなどのことから、適切な試験基準がなければ安全に統一的に実施することは困難とし、5年に一度の荷重試験の要件を削除する提案が行われた。

2.27 SSE 8/WP.5 (SSE8のWG議長) 及びSSE 8/20 (IMO事務局)

アンカーハンドリングウインチのガイドライン案について、定期的な荷重試験は安全に試験を実施することが困難であるとのことから削除され、代わりに5年に一度の定期的試験(作動試験)には、旗国主管庁又は船級協会の立会が必要となる旨の規定を追加したうえで、最終化が行われた。揚貨装置のガイドライン案では、詳細検査の3ヵ月の延期が旗国主管庁により認められる旨の記述について、既に旗国主管庁の裁量による旨の記述があり、不要な懸念を生じることから削除された。

2.28 MSC 106/19 (IMO事務局)

MSC 106/11/4 (ドイツ, IACS: International Association of Classification Societies) 及びMSC 106/11/7 (日本)における明確化のための修正提案を反映させたうえで、揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチのそれぞれに関するガイドラインについて、MSC107での最終承認を見据えて原則承認が行われた。また、IMO事務局に対して、SOLAS条約改正案をILO事務局に報告すること、ILOに対して、ILO C152における検査との重複を避けるため、適切な措置を講じるよう要請を行うことが依頼された。

2.29 MSC 107/20 (IMO事務局)

船上揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチに関するSOLAS条約改正が採択され、また、関連ガイドラインも最終承認され、いずれも2026年1月1日に発効することが合意された。

2.30 SSE 10/12/6 (ドイツ, IACS)

ILO C152といった国際規則に基づく有効な証明書のない既存の揚貨装置に対して、設計段階から安全上の審査が行われてきたSOLAS条約第II-1章第3-13規則第1項及び第3項に適合した揚貨装置と区別するため、事実宣誓書 (Factual Statement) を発行する提案が行われた。SSE10において一部修正と次回会合 (SSE11) に提出することが指示され、その後、SSE 11/10/5として再提出された後、同年のMSC 110/21において、MSC.1/Circ.1696として承認された。

表1 関係国政府、業界団体等からの提案文書及びIMO議事録

文書	委員会	小委員会	開催年
MSC 83/20/2 (ニュージーランド)	MSC 83	-	2005
MSC 89/22/12 (チリ, 日本, ニュージーランド, ノルウェー, 韓国)	MSC 89	-	2011
DSC 16/5/5 (ICHCA)	-	DSC 16	2011
DE 56/2 (IMO事務局)	-	DE 56	2012
DE 56/22/2 (IMO事務局)	-	〃	〃
DE 56/22/3 (ICHCA)	-	〃	〃
DE 56/22/4 (ノルウェー)	-	〃	〃
DE 56/22/6 (ISO)	-	〃	〃
DE 56/INF.12 (日本)	-	〃	〃
DE 56/INF.13 (日本)	-	〃	〃
DE 57/18 (リベリア, バヌアツ, IADC: International Association of Drilling Contractors)	-	DE 57	2013
DE 57/18/1 (韓国)	-	〃	〃
DE 57/18/2 (ICHCA)	-	〃	〃
DE 57/18/3 (日本)	-	〃	〃
DE 57/18/4 (ニュージーランド)	-	〃	〃
DE 57/INF.5 (ニュージーランド)	-	〃	〃
DE 57/18/5 (IMCA)	-	〃	〃
SSE 1/13 (ニュージーランド)	-	SSE 1	2014
SSE 1/INF.3 (ニュージーランド)	-	〃	〃
SSE 1/13/1 (ドイツ)	-	〃	〃
SSE 1/INF.4 (ドイツ)	-	〃	〃
SSE 1/13/2 (ニュージーランド)	-	〃	〃
SSE 1/13/3 (ニュージーランド)	-	〃	〃
SSE 1/WP.5 (SSE1のWG議長)	-	〃	〃
SSE 1/21 (IMO事務局)	-	〃	〃
SSE 2/8 (ニュージーランド)	-	SSE 2	2015
SSE 2/INF.2 (ニュージーランド)	-	〃	〃
SSE 2/8/1 (バヌアツ, IMCA)	-	〃	〃
SSE 2/8/1/Corr.1 (バヌアツ, IMCA)	-	〃	〃
SSE 2/INF.5 (バヌアツ, IMCA)	-	〃	〃
SSE 2/8/2 (アンティグア・バーブーダ, ニュージーランド, ICHCA)	-	〃	〃
SSE 2/8/3 (日本)	-	〃	〃
SSE 2/8/4 (ICHCA)	-	〃	〃
SSE 2/WP.5 (SSE2のWG議長)	-	〃	〃
SSE 2/20 (IMO事務局)	-	〃	〃
MSC 95/12/1 (アンティグア・バーブーダ, オーストラリア, オランダ, ニュージーランド, ノルウェー, ICHCA, IHMA, ITF: International Transport Workers' Federation, Nautical Institute)	MSC 95	-	〃

文書	委員会	小委員会	開催年
MSC 95/12/2 (ICS)	〃	-	〃
MSC 95/12/3 (バヌアツ)	〃	-	〃
MSC 95/22 (IMO事務局)	〃	-	〃
SSE 3/8 (日本)	-	SSE 3	2016
SSE 3/8/1 (ノルウェー)	-	〃	〃
SSE 3/8/2 (中国)	-	〃	〃
SSE 3/INF.5 (OCIMF: Oil Companies International Marine Forum)	-	〃	〃
SSE 3/16 (IMO事務局)	-	〃	〃
SSE 4/8 (SSE3のWG議長)	-	SSE 4	2017
SSE 4/8/1 (日本)	-	〃	〃
SSE 4/8/2 (アンティグア・バーブーダ, ニュージーランド, ICHCA, IHMA)	-	〃	〃
SSE 4/8/3 (中国, 香港)	-	〃	〃
SSE 4/8/4 (中国)	-	〃	〃
SSE 4/8/5 (日本)	-	〃	〃
SSE 4/WP.4 (SSE4のWG議長)	-	〃	〃
SSE 4/19 (IMO事務局)	-	〃	〃
MSC 98/12/5 (ドイツ)	MSC 98	-	〃
MSC 98/23 (IMO事務局)	〃	-	〃
SSE 5/2 (IMO事務局)	-	SSE 5	2018
SSE 5/10 (日本)	-	〃	〃
SSE 5/10/1 (ドイツ)	-	〃	〃
SSE 5/10/2 (中国)	-	〃	〃
SSE 5/10/3 (IACS)	-	〃	〃
SSE 5/10/4 (ICS)	-	〃	〃
SSE 5/10/5 (日本)	-	〃	〃
SSE 5/WP.5 (SSE5のWG議長)	-	〃	〃
SSE 5/17 (IMO事務局)	-	〃	〃
MSC 100/9/1 (日本, ニュージーランド, ICHCA)	MSC 100	-	〃
MSC 100/9/5 (IMCA)	〃	-	〃
MSC 100/20 (IMO事務局)	〃	-	〃
SSE 6/9 (日本)	-	SSE 6	2019
SSE 6/9/1 (日本, ICS)	-	〃	〃
SSE 6/9/2 (日本, ICS)	-	〃	〃
SSE 6/9/3 (カナダ)	-	〃	〃
SSE 6/9/4 (ドイツ)	-	〃	〃
SSE 6/9/5 (ドイツ)	-	〃	〃
SSE 6/WP.5 (SSE6のWG議長)	-	〃	〃
SSE 6/18 (IMO事務局)	-	〃	〃
SSE 7/2 (IMO事務局)	-	SSE 7	2020
SSE 7/9 (日本)	-	〃	〃
SSE 7/9/1 (中国)	-	〃	〃
SSE 7/9/2 (IACS)	-	〃	〃
SSE 7/9/3 (中国)	-	〃	〃
SSE 7/9/4 (ノルウェー)	-	〃	〃
SSE 7/WP.5 (SSE7のWG議長)	-	〃	〃
SSE 7/21 (IMO事務局)	-	〃	〃

文書	委員会	小委員会	開催年
MSC 102/24 (IMO事務局)	MSC 102	-	〃
SSE 8/9 (日本)	-	SSE 8	2022
SSE 8/9/1 (IACS)	-	〃	〃
SSE 8/9/2 (日本)	-	〃	〃
SSE 8/9/3 (日本)	-	〃	〃
SSE 8/WP.5 (SSE8のWG議長)	-	〃	〃
SSE 8/20 (IMO事務局)	-	〃	〃
MSC 106/11/4 (ドイツ, IACS)	MSC 106	-	〃
MSC 106/11/7 (日本)	〃	-	〃
MSC 106/19 (IMO事務局)	〃	-	〃
MSC 107/3/6 (中国)	MSC 107	-	2023
MSC 107/20 (IMO事務局)	〃	-	〃
SSE 10/12/6 (ドイツ, IACS)	-	SSE 10	2024
SSE 11/10/5 (ドイツ, ニュージーランド, ノルウェー, IACS)	-	SSE 11	2025
MSC 110/21 (IMO事務局)	MSC 110	-	〃

3. ILO 152号条約 (C152) について

船上揚貨装置に関わる要件がSOLAS条約に規定される運びとなったが、従来、利害関係者に広く認知されているILO 152号条約 (C152) との兼ね合いが懸念されるため、改めてILO C152について整理したい。

ILO C152は、港湾労働（船舶の荷積みもしくは荷卸しの作業の全部又は一部及びそれらに付随する作業）に関する安全と衛生の基準を定めた条約であるが、船上揚貨装置（港湾労働者が使用しない非貨物用途の機関室天井クレーン、食糧庫用クレーン等は除く）に適用する国際的な安全基準として広く認知されている。当該条約の具体的な実施要領については、ILO 160号勧告 (R160) により補完されており、さらにILO R160では、ILOによって刊行された“Code of practice on safety and health in dock work”の最新版における技術的提言を考慮することが規定されている。なお、2005年に“Code of practice on safety and health in ports”として書き改められており、2025年11月時点では、IMOのウェブサイトにも掲載されている⁴⁾。

すなわち、ILO C152の技術的要求事項は、“Code of practice on safety and health in ports”を引用することになるのだが、ILO R160及び“Code of Practice on safety and health in ports”については、あくまで指針であり、法的拘束力を持たないことから、実施にあたっては、当該条約の批准国の裁量に委ねられることになる。

なお、これらの文章の構成は表2に記す通りとなっている。とりわけ、船上揚貨装置に関する主要な技術的要件については、“Code of practice on safety and health in ports”の4.Lifting appliances and loose gearにおいて、4.1 一般要件、4.2 揚貨装置及び揚貨装具の試験、詳細検査、表示、点検、4.3.1 船上揚貨装置（4.3中の規定）、4.4 揚貨装具、4.5 荷重の一部分を形成する揚貨機器、として規定されており、本会規則にも、当該規定を一部取り入れている。

ILO C152の実施義務については、原則的に当該条約の批准国が負うことになる。ただし、同条約の第2条第1項では、安全な労働条件が維持されることなどを条件に、港湾の交通が不定期的であり、かつ、小型船舶に限定される港湾労働や漁船又は特定の種類の漁船に関わる港湾労働に対しては、適用の除外や例外を認めている。また、同第2条第2項では、権限のある機関が関係のある使用者団体及び労働者団体等と協議のうえ、全体として同条約の規定の完全な適用から生ずるものにおとらない場合に、第3部に規定する特定の要件の修正を認めている。このことから、厳密には、批准国が管轄する港湾であっても、各港湾により取扱いが異なる場合がある。さらに、ILO C152は批准していないものの、国内法において、ILO C152と同等の独自規制を定めている国も存在する（例えば、オーストラリアや米国ではILO C152の検査要件を準用している）。

このように、ILO C152が適用されるか否かは、批准国に限らず、また、港湾ごとにも異なることから、とりわけ船舶の運航を業務とする関係者においては、就航する港湾ごとにどのような安全衛生管理のもと港湾労働が行われているのかについて十分に留意する必要がある。

なお、2025年11月時点では、ILO C152を批准した国は、表3に記す通り27カ国のみとなっている⁵⁾。批准国

の少なさについては、当該SOLAS条約改正案が検討された当初から指摘されており、ILO C152の適用が港湾労働者の使用する貨物用途の揚貨装置に限定されていることと併せて、船上揚貨装置に一様に適用できる国際基準が不足していることの理由となっている（DSC 16/5/5（ICHCA））。

さて、船上揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチに関する安全要件がSOLAS条約第II-1章第3-13規則として規定され、その発効後は、船上揚貨装置に要求される詳細検査及び荷重試験は、SOLAS条約第II-1章体制下での検査スケジュールに移行する。つまり、ILO C152では、12ヵ月を超えない間隔での詳細検査の実施と、5年に一度の荷重試験の実施を規定しているのに対して、SOLAS条約第II-1章体制下では、Safety Construction検査のスケジュールとなり、とりわけ、詳細検査については年次検査及び中間検査の検査基準日の前後3ヵ月の猶予期間も考慮されることになる。

ILO C152とSOLAS条約第II-1章第3-13規則とで2つの異なる検査スケジュールが共存することについては、当該SOLAS条約改正案の検討においても懸念が示されていたが（SSE 7/9/3（中国））、IMOの対処としては、ILO C152に基づく検査スケジュールも受け入れつつ、Safety Construction検査の定期的検査において、詳細検査が適切に実施されていることを記録確認により担保する取扱いの導入（SSE 7/21（IMO事務局））や、ILOに対してSOLAS条約改正案を報告するとともに、適切な措置を講じることの要請（MSC 106/19（IMO事務局））となっている。

なお、2025年11月時点では、ILOへの要請の結果については、追加情報が得られていない。このため、ILO C152に基づく検査スケジュールを適用する船舶にあっては、Safety Construction検査の際に詳細検査の実施記録を確認する、又は、必要であれば詳細検査を改めて実施することでの対処となる。

表2 ILO C152, ILO R160, Code of practice on safety and health in portsの構成

ILO C152	ILO R160
Preamble	Preamble
Part I. Scope and Definitions (Articles 1 to 3)	I. Scope and Definitions (Paragraphs 1 and 2)
Part II. General Provisions (Articles 4 to 7)	II. General Provisions (Paragraphs 3 to 6)
Part III. Technical Measures (Articles 8 to 40)	III. Technical Measures (Paragraphs 7 to 27)
Part IV. Implementation (Articles 41 and 42)	
Part V. Final Provisions (Articles 43 to 51)	

Code of practice on safety and health in ports
Preface
List of abbreviations and acronyms
1. Introduction, scope, implementation and definitions (Paragraphs 1.1 to 1.5)
2. General provisions (Paragraphs 2.1 to 2.8)
3. Port infrastructure, plant and equipment (Paragraphs 3.1 to 3.15)
4. Lifting appliances and loose gear (Paragraphs 4.1 to 4.5)
5. Safe use of lifting appliances and loose gear (Paragraphs 5.1 to 5.4)
6. Operations on shore (Paragraphs 6.1 to 6.25)
7. Operations afloat (Paragraphs 7.1 to 7.11)
8. Dangerous goods (Paragraphs 8.1 to 8.4)
9. Health (Paragraphs 9.1 and 9.2)
10. Personnel welfare facilities (Paragraphs 10.1 to 10.7)
11. Emergency arrangements (Paragraphs 11.1 to 11.3)
12. Other relevant safety matters (Paragraphs 12.1 and 12.2)
References
Appendices (Appendix A to H)
List of figures

表3 ILO C152の批准国（27ヵ国，2025年11時点）

国	批准日
Brazil	18 May 1990
Congo	24 Jun 1986
Cuba	15 Oct 1982
Cyprus	13 Nov 1987
Denmark	22 Dec 1989
Ecuador	20 May 1988
Egypt	03 Aug 1988
Finland	03 Jul 1981
France	30 Jul 1985
Germany	17 Dec 1982
Guinea	08 Jun 1982
Iraq	17 Apr 1985
Italy	07 Jun 2000
Jamaica	04 Nov 2005
Lebanon	06 Sep 2004
Mexico	10 Feb 1982
Montenegro	27 Apr 2017
Netherlands(Kingdom of the)	13 May 1998
Norway	05 Dec 1980
Peru	19 Apr 1988
Republic of Moldova	22 Jan 2007
Russian Federation	14 Jul 2004
Seychelles	28 Oct 2005
Spain	03 Mar 1982
Sweden	13 Jun 1980
Türkiye	17 Mar 2005
United Republic of Tanzania	30 May 1983

4. 揚貨設備規則の改正について

SOLAS条約第II-1章第3-13規則及び関連ガイドラインの制定に伴い，その内容を取り入れるべく，本会の揚貨設備規則の改正を実施した。暫定的な内容を含むものもあるが，ここでは，規則改正の内容について紹介する。

従来，鋼船規則は，船体，機関，材料，溶接といった第一義的に船舶の構造的安全性や堪航性に関わる要件を定めているのに対して，設備規則は，鋼船規則では取り扱われない，船舶の運航上必要となる各種設備であって特に安全性の確保が求められる救命設備，無線設備，居住衛生設備，海洋汚染防止設備，揚貨設備などの技術的要件を定めている。このことも踏まえて，アンカーハンドリングウインチに関する要件を設備規則に規定することとし，「揚貨設備規則」を「揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチ規則」に改めた。

なお，「揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチ規則」の構成は，表4に記す通りとし，1編に揚貨装置，2編にアンカーハンドリングウインチに関わる技術要件を定めた。以下では，各編について紹介する。

表4 揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチ規則及び同検査要領の構成

改正後		改正前	
揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチ規則		揚貨設備規則	
1編 揚貨装置	1章 総則 (一部改正)	1章 総則	
	2章 試験及び検査 (一部改正)	2章 試験及び検査	
	3章 デリック装置 (主要改正なし)	3章 デリック装置	
	4章 クレーン装置 (主要改正なし)	4章 クレーン装置	
	5章 荷役金物 (主要改正なし)	5章 荷役金物	
	6章 揚貨装具 (主要改正なし)	6章 揚貨装具	
	7章 揚貨装置駆動システム (主要改正なし)	7章 揚貨装置駆動システム	
	8章 荷役用リフト及び荷役用ランプウェイ装置 (主要改正なし)	8章 荷役用リフト及び荷役用ランプウェイ装置	
	9章 制限荷重等の指定及び標示並びに証明書等 (一部改正)	9章 制限荷重等の指定及び標示並びに証明書等	
	10章 操作, 保守, 点検及び運転試験 (新規)		
2編 アンカーハンドリングウインチ (新規)	1章 総則		
	2章 試験及び検査		
	3章 設計, 建造, 搭載		
	4章 操作, 保守, 点検及び運転試験		

改正後		改正前	
揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチ規則検査要領		揚貨設備規則検査要領	
1編 揚貨装置	1章 総則 (主要改正なし)	1章 総則	
	2章 試験及び検査 (主要改正なし)	2章 試験及び検査	
	3章 デリック装置 (主要改正なし)	3章 デリック装置	
	4章 クレーン装置 (主要改正なし)	4章 クレーン装置	
	6章 揚貨装具 (主要改正なし)	6章 揚貨装具	
	7章 揚貨装置駆動システム (主要改正なし)	7章 揚貨装置駆動システム	
	8章 荷役用リフト及び荷役用ランプウェイ装置 (主要改正なし)	8章 荷役用リフト及び荷役用ランプウェイ装置	
	(外国籍船舶用) 附属書1.1.1-9 人員乗降に使用するクレーンの追加要件 (主要改正なし)	(外国籍船舶用) 附属書1.1.1-3 人員乗降に使用するクレーンの追加要件	
	(日本籍船舶用) 附属書1.1.1-10 人員乗降に使用するクレーンの追加要件 (新規)		
2編 アンカーハンドリングウインチ (新規)	1章 総則		

4.1 揚貨装置 (1編)

4.1.1 適用, 定義 (1章)

適用対象については, SOLAS条約第II-1章第3-13規則に揃えるべく, 表5に記す通り改正し, 動力駆動に限定する取扱いは削除した。なお, 日本籍船舶用規則については, 国内法令との兼ね合いから, 外国籍船舶用規則とは対象となる船舶が異なる。

ここでは, SOLAS条約第II-1章第3-13規則に倣い, 適用対象外である揚貨装置についても明記した。なお, 艀口蓋の開閉のための統合された機械装置とは, フォールディング式やサイドローリング式の艀口蓋といった機械構造を有する装置を指している。また, LSAコードに適合した救命設備用進水装置については, 荷物の揚

収用と兼用される場合にあつては、適用対象となるので留意する必要がある。

SOLAS条約第II-1章第3-13規則では、揚貨装置の搭載日により適用要件と適用期日が異なることから、本会規則においても、規定本文中に表6の棲み分けの通り規定し、設計、建造及び搭載に関わる要件は、2026年1月1日以降に搭載される揚貨装置（表6の注2参照）に適用することとした。ここで、揚貨装置の搭載日に関わらず、2026年1月1日から、運転試験、詳細検査、点検、オペレーション、保守に関わる要件が適用となり、とりわけ、詳細検査については、competent person（例えば、本会の検査員）の立会を伴うため、留意する必要がある。また、制限荷重（SWL）が1トン未満の揚貨装置については、旗国主管庁の判断により、設計、建造及び搭載並びに荷重試験に関わる規定の適用の程度が判断されることになる。旗国主管庁の判断については、本会からも各主管庁に確認を行っており、本会ウェブサイトに掲載しているので、ご参考にしていただけると幸甚である⁶⁾。なお、運転試験、詳細検査、点検、オペレーション、保守に関わる要件については、旗国主管庁判断によらず適用されることにも留意する必要がある。

定義については、SOLAS条約第II-1章第2規則及び関連ガイドラインMSC.1/Circ.1663に揃えるべく、改正を行った。改正前の揚貨設備規則では、揚貨設備、揚貨装置、荷役装置（外国籍船舶用のみ）の用語を使用し、荷役用ランプウェイ装置の取扱いなどが外国籍船舶用規則と日本籍船舶用規則とで異なっていたが、SOLAS条約第II-1章第3-13規則に倣って上述の用語を揚貨装置に統一し、また、荷役用ランプウェイ装置については、貨物を積載した状態で開閉又は旋回を行うものに限って揚貨装置に含まれることとした。その他、MSC.1/Circ.1663等に記載される定義（例えば、competent person／適格者など）についても取り入れている。

表5 適用対象の改正

改正後	改正前
<p>（外国籍船舶用）</p> <p>次に掲げる船舶に施設される揚貨装置及び揚貨装具に適用</p> <p>(1) 国際航海に従事する旅客船（高速船含む）</p> <p>(2) 国際航海に従事する総トン数500トン以上の貨物船（同上）</p>	<p>（外国籍船舶用）</p> <p>動力駆動の揚貨設備に適用</p>
<p>（日本籍船舶用）</p> <p>旅客船を除く総トン数300トン以上の船舶に施設する揚貨装置及び揚貨装具に適用</p>	<p>（日本籍船舶用）</p> <p>次に掲げる動力駆動の揚貨設備に適用</p> <p>(1) 旅客船を除く総トン数300トン以上の船舶に施設する制限荷重1トン以上の揚貨装置及び揚貨装具</p> <p>(2) 荷役用ランプウェイ装置</p>
<p>（外国籍船舶用及び日本籍船舶用）</p> <p>次に掲げる揚貨装置等は適用対象外</p> <p>(1) MODUとして承認された船舶に搭載される揚貨装置</p> <p>(2) 主管庁の認める基準に適合する、洋上において建設に従事する船舶で使用される揚貨装置</p> <p>(3) 艙口蓋の開閉のための統合された機械装置</p> <p>(4) LSAコードに適合した救命設備用進水装置</p>	<p>（外国籍船舶用及び日本籍船舶用）</p> <p>（新規）</p>

表6 揚貨装置の搭載日による適用要件の違い

搭載日	要件	適用期日
2026年1月1日より前 ¹⁾	1編に基づく, 荷重試験, 詳細検査, 制限荷重の標示 (証拠書類の船上保管)	2026年1月1日以降の 最初の定期検査まで
	1編に基づく, 運転試験, 詳細検査, 点検, オペレーション, 保守	2026年1月1日以降
2026年1月1日以降 ¹⁾²⁾	1編に基づく, 設計, 建造, 搭載, 荷重試験, 詳細検査, 制限荷重の標示 (証拠書類の船上保管)	初回の使用前まで
	1編に基づく, 運転試験, 詳細検査, 点検, オペレーション, 保守	2026年1月1日以降

- 1) 制限荷重が1トン未満の揚貨装置については、旗国主管庁の判断により、設計、建造及び搭載並びに荷重試験に関わる規定の適用の程度を決定
- 2) 2026年1月1日以降に搭載される揚貨装置とは
- 2026年1月1日以降に起工又はこれと同等の建造段階にある船舶に搭載される揚貨装置
 - 前a)以外の船舶（2009年1月1日より前に建造された船舶を含む）については、契約上の納入日（或いは契約上の納入日がない場合には実際の納入日）が2026年1月1日以降の揚貨装置

4.1.2 検査の時期（2章）

SOLAS条約第II-1章第3-13規則及びMSC.1/Circ.1663の規定に倣い、「年次詳細検査」から「詳細検査」に表現を改めた。詳細検査の時期については、SOLAS条約第II-1章の体制下になったことを踏まえ、従来はILO C152に従った検査の時期（前回の年次詳細検査終了の日から12ヵ月を超えない時期）としていたのを、Safety Construction検査の年次検査及び中間検査（実務上これと同じになる船舶に対する船級の年次検査及び中間検査）の時期に改め、また、荷重試験後についても明記した。荷重試験の時期については、実質的な変更はない。

MSC.1/Circ.1663では、SOLAS条約及びILO C152に基づき詳細検査が二重で実施される可能性を避けるべく、ILO C152に従った時期に実施する場合には、船舶の年次検査又は中間検査の時期に、詳細検査が適切に実施及び完了していることを記録確認により検証することを認めている。このため、本会規則でも、申込みに基づきこれに対応ができるよう、関連規定を取り入れた。

詳細検査の延期については、詳細検査を船舶の年次検査及び中間検査の時期に実施する場合は、原則認められなくなる。これは、船舶の年次検査及び中間検査は、延期が認められていないことによる。ただし、詳細検査の実施時期が、船舶の年次検査及び中間検査の時期になることにより、検査基準日の後3ヵ月のウインドウは考慮されることになるため、実質的に差は生じないと考えている。なお、申込みによりILO C152に従った時期に詳細検査を実施する場合は、従来通り3ヵ月の延期を認める場合がある。一方、荷重試験については、前回の荷重試験終了の日から5年を超えない時期に実施することが要求されるため、船級の定期検査の時期に揃えて実施すると、5年を超過しうる。この場合の延期の申込みにについては、主管庁の承認が必要となるので、十分に留意しなければならない。

4.1.3 作動不能の揚貨装置及び揚貨装具、休止（2章）

MSC.1/Circ.1663の規定に倣い、詳細検査により、揚貨装置及び揚貨装具に操作上の安全性に影響を及ぼす欠陥が確認された場合、是正が確認されるまで、当該揚貨装置及び揚貨装具の使用を禁止する取扱いを規定した（使用禁止の標示、検査記録書等への記載）。また、作動不能の揚貨装置及び揚貨装具によるリスクを低減するため、船長によって講じられるべき事項（固縛、作動不能であることの標示、記録）についても規定した。

4.1.4 荷重試験（2章）

揚貨装置及び揚貨装具の荷重試験について、試験荷重の規定をMSC.1/Circ.1663の規定に倣い改めた。揚貨装置の荷重試験に用いる荷重は、制限荷重（SWL）が100トン以上の場合について、従来の「本会の適用と認める荷重」から「制限荷重の1.1倍」に変更となる。ただし、実状においては改正前も制限荷重の1.1倍を適用しているため違いは生じない。一方で、揚貨装具の荷重試験については、単滑車の取扱いについて、従来、JIS F3421に倣いベケットの有無により試験荷重を分けていたものを、国際基準との整合化や取扱いの明確化のため、MSC.1/Circ.1663に倣い、ベケットの有無によらず同一の試験荷重に改めた。

また、外洋での操作を意図する揚貨装置及び揚貨装具にあっては、船体の揺れ（ローリング、ピッチング）や波浪といった動的荷重を考慮して、試験荷重は旗国主管庁が適用と認めるところによらなければならない旨規定した。これは、より過酷な環境での使用に耐えられるよう設計が行われることを考慮したものとなる（例

えば、EN 13852-2、API Spec 2Cなどの規格に基づく設計)。

また、既存の揚貨装置(2026年1月1日より前に搭載されたもの)であって製造者が既に存在していない場合などで、制限荷重に関する情報が文書化されておらず、設計情報が利用できない場合、主管庁が適当と認めるところにより船主又は船舶管理会社が宣言した制限荷重に基づき試験荷重を決定する取扱いを規定した。

4.1.5 制限荷重等の指定及び標示並びに証明書等(9章)

MSC.1/Circ.1663の規定に倣い、操作範囲全体における制限荷重のダイアグラムを、操作者が明確に視認できる位置に掲示する旨規定した。例えば、クレーン装置であれば、X軸に作業半径(アウトリーチ)、Y軸に制限荷重を示す性能曲線のことであり(補助情報として、ブーム長さ、ブーム角度なども含む場合がある)、操作パネルや操作キャビン内の視界に入る位置に掲示することを想定している。

また、MSC.1/Circ.1663と直接は関係ないが、制限荷重の打刻について、従来、溶接ビード及びペイント又は本会がこれと同等と認める方法とすることを規定していたが、ポンチマークによる標示も認められることが明確となるよう、溶接ビード及びペイントという表現を削除した。また、揚貨装置及び揚貨装具に標示する文字の高さを77mm以上とする要件についても、ILO C152ではデリック装置のみに対する規定であることを考慮し、デリック装置に限定する規定に改めた。さらに、揚貨装具の標示については、種類に応じた標示内容に改めた。

前4.1.4の末尾に示す通り、船主又は船舶管理会社が宣言した制限荷重に基づき試験荷重を決定する揚貨装置については、設計、建造、搭載のフェーズで図面審査等により検証が行われてきた揚貨装置とは潜在的な安全性(材料、設計強度など)が異なることを踏まえ、通常の荷重試験証明書に代わり、揚貨装置荷重試験等宣誓書を発行する取扱いをMSC.1/Circ.1696に基づいて規定した。

4.1.6 操作、保守、点検及び運転試験(10章)

操作、保守、点検、運転試験の適切な実施が揚貨装置で生じる事故を低減するために重要であることは、揚貨装置に関する国際基準の策定が検討された当初から関係国政府や業界団体によって指摘されている。このため、その重要性に鑑み、船舶の管理者又は操作責任者等が遵守すべき事項として、MSC.1/Circ.1663をそのまま取り入れて規定した。

操作保守マニュアルについては、従来、9章に規定していたものを、10章の新設に伴い移設し規定した。

4.2 アンカーハンドリングウインチ(2編)

4.2.1 適用、定義(1章)

適用対象については、日本籍船舶用規則及び外国籍船舶用規則ともに、SOLAS条約第II-1章第3-13規則に揃えるべく、国際航海に従事する総トン数500トン以上の船舶に施設されるアンカーハンドリングウインチ及び装具とした。また、揚貨装置と同様にSOLAS条約第II-1章第3-13規則では、アンカーハンドリングウインチの搭載日により適用要件と適用期日が異なることから、本会規則においてもこの点について表7の棲み分けの通り規定した。ここで、アンカーハンドリングウインチの搭載日に関わらず、2026年1月1日から、運転試験、詳細検査、点検、オペレーション及び保守に関する要件が適用となる点については、揚貨装置と同様に留意する必要がある。

定義については、SOLAS条約第II-1章第2規則及び関連ガイドラインMSC.1/Circ.1662に揃えるべく改正を行った。アンカーハンドリングウインチの定義については、「海中作業におけるアンカー及び係船索の配置、回収及び再配置の目的のためのあらゆるウインチ」であり、これは自船の係留目的に使用するウインドラスやムアリングウインチとは異なり、他船のアンカー及び係船索の配置等に使用されるウインチをいう。一般的に、アンカーハンドリング船の後部作業甲板前部に搭載される作業用ウインチがこれに該当する(図1)。なお、アンカーの種類(ドラッグ、パイル、サクション等)での棲み分けは想定していない。

表7 アンカーハンドリングウインチの搭載日による適用要件の違い

搭載日	要件	適用期日
2026年1月1日より前	2編に基づく, 定期的試験（機能確認）、詳細検査	2026年1月1日以降の 最初の定期検査まで
	2編に基づく, 運転試験, 詳細検査, 点検, オペレーション, 保守	2026年1月1日以降
2026年1月1日以降 ¹⁾	2編及び主管庁が適用と認めるところによる設計, 建造, 搭載, 試験, 詳細検査	初回の使用前まで
	2編に基づく, 運転試験, 詳細検査, 点検, オペレーション, 保守	2026年1月1日以降

1) 2026年1月1日以降に搭載されるアンカーハンドリングウインチとは

- a) 2026年1月1日以降に起工又はこれと同等の建造段階にある船舶に搭載されるアンカーハンドリングウインチ
- b) 前a)以外の船舶（2009年1月1日より前に建造された船舶を含む）については、契約上の納入日（或いは契約上の納入日がない場合には実際の納入日）が2026年1月1日以降のアンカーハンドリングウインチ

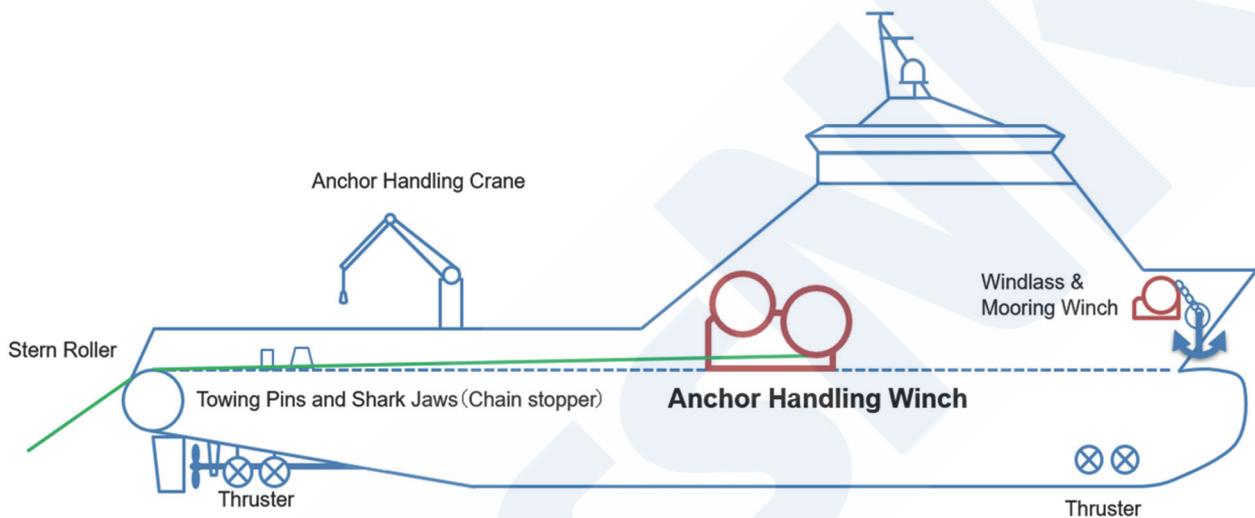


図1 アンカーハンドリングウインチの配置イメージ

4.2.2 配置、構造、材料（1章）

鋼船規則O編8章では、揚錨船に関する要件を定めているが、アンカーハンドリングウインチの配置や構造に関わる要件については、本規則2編に移設して規定した。また、材料に関わる要件は、従来明確な規定はなかったものの、1編「揚貨装置」の要件に倣い、安全上必要と考えられる最低限の範囲で規定した。

4.2.3 試験及び検査（2章）

1編「揚貨装置」の規定に倣い、検査の準備等に関わる一般要件を規定した。また、MSC.1/Circ.1662に倣い、1編「揚貨装置」の規定と同様の内容で、アンカーハンドリングウインチ及び装具の休止や、作動不能のアンカーハンドリングウインチ、関連装置、装具の取扱いを規定した。

検査の種類については、登録検査（製造中登録検査、製造後登録検査）と登録維持検査（詳細検査、定期的試験、臨時検査、不定期検査）とし、登録検査及び登録維持検査のうち詳細検査及び定期的試験の時期については表8に記す通りとした。臨時検査及び不定期検査については、1編「揚貨装置」と同等の時期となる。

また、検査の内容については、1編「揚貨装置」の規定及びMSC.1/Circ.1662に倣い、登録検査、詳細検査、定期的試験について、表9の通り規定した。なお、コミッショニング試験は、アンカーハンドリングウインチの船上搭載後に実施する試験のことであるが、このうちの荷重試験については、最大牽引力を超える荷重での試験を想定している。ただし、アンカーハンドリングウインチによっては、最大牽引力が400トンを超えるものもあり、試験環境が準備できない等の理由で、試験が実施できない場合が想定される。このことから、当該荷重試験の取扱いについては、今後、実行可能性を踏まえて、明確化の必要性があると考えている。

表8 登録検査，登録維持検査（詳細検査，定期的試験）の時期

検査区分1	検査区分2	時期
登録検査	製造中登録検査	登録申込みのあった時
	製造後登録検査	
登録維持検査	詳細検査	下記の船級検査の時期（鋼船規則B編） ・ 登録検査 ・ 年次検査 ¹⁾ ，中間検査 ¹⁾ ，定期検査
	定期的試験	下記の船級検査の時期（鋼船規則B編） ・ 年次検査，中間検査，定期検査

1) 検査に代えて，運転試験の記録確認でもよい

表9 登録検査，登録維持検査（詳細検査，定期的試験）の内容

検査区分1	検査区分2	図面審査	検査
登録検査	製造中登録検査	承認用提出図面 <ul style="list-style-type: none"> ・ アンカーハンドリングウインチの全体配置図 ・ アンカーハンドリングウインチの構造図 ・ 金物図 ・ 装具配置図 ・ 装具一覧表 ・ 駆動装置構造図 ・ 動力系統図 ・ 作動及び制御機構図 ・ 安全装置図 ・ 保護装置図 ・ その他本会が必要と認める図面及び書類 参考用提出図面 <ul style="list-style-type: none"> ・ アンカーハンドリングウインチの仕様書 ・ 承認用図面及び書類についての計算書又は検討書 ・ アンカーハンドリングウインチの操作保守手引書 ・ コミッショニング試験要領書 ・ アスベストを含む材料を使用していない旨の宣言書及び必要な補足資料 ・ その他本会が必要と認める図面及び書類 	工事の検査 <ul style="list-style-type: none"> ・ アンカーハンドリングウインチの構造及び工事の施工状態の検査 ・ 鋼船規則K編に定める試験（必要な場合） ・ 鋼船規則M編に定める試験（必要な場合） ・ 非破壊試験（必要な場合） ・ 駆動装置の陸上試運転 ・ 各種安全装置及び保護装置の作動試験（制動試験及び電源遮断試験を含む。） ・ その他本会が必要と認める試験 コミッショニング試験 <ul style="list-style-type: none"> ・ 軽荷重による機能試験，作動試験 ・ 荷重試験 ・ 緊急離脱及び残存保持力試験 ・ 静的ボラードブル試験（曳航用の場合のみ） ・ ブレーキ保持試験（計算による実証も可） ・ システム全体の機能試験 詳細検査 <ul style="list-style-type: none"> ・ 登録維持検査の内容による
	製造後登録検査	原則は製造中登録検査に同じ	原則は製造中登録検査に同じ
登録維持検査	詳細検査	なし	アンカーハンドリングウインチ <ul style="list-style-type: none"> ・ 目視による詳細な検査 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 主要構造部 ➢ 船体構造との固着部 ➢ 駆動装置 ➢ 各種安全装置及び保護装置 ➢ 標示及び関連証明書の有効性 ➢ 操作保守手引書の船内保管 ・ 検査員が必要と認めた場合の検査 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 板厚計測，非破壊試験，開放検査 ➢ 各種安全装置及び保護装置の作動試験

検査区分1	検査区分2	図面審査	検査
			装具 <ul style="list-style-type: none"> ・ 目視による詳細な検査 <ul style="list-style-type: none"> ➢ ワイヤ全長 ➢ チェーン、リング、フック、シャックル、スイベル、クランプ等 ➢ 装具の制限荷重及び識別記号の標示並びに関連証書の有効性 ・ 検査員が必要と認めた場合の開放検査
	定期的試験	なし	・ 製造者の推奨に従う作動試験及びすべての装置の機能試験

4.2.4 アンカーハンドリングウインチの設計（3章）

アンカーハンドリングウインチ及び関連装置の設計要件（一部点検事項）について、MSC.1/Circ.1662の要件に倣い規定した。また、鋼船規則O編8章の規定を一部移設し取り入れている。主要要件は表10に記す通りである。

表10 アンカーハンドリングウインチ及び関連装置の設計要件（一部点検事項）

要件項目	要件内容	補足
速度制御 及びハンドリング	<ul style="list-style-type: none"> ・ 制御された方法による巻き上げ巻き下げが可能であること ・ 最小速度及び最大速度の間で速度制御が行えること ・ 制御レバーを操作者から遠ざけることでワイヤを繰り出し、引くことで巻き上げること ・ 操作方向を恒久的に標示すること ・ 操作レバーは自動中立位置復帰型とすること 	MSC.1/Circ.1662 Para.3.1.2
張力制御	<ul style="list-style-type: none"> ・ 過負荷防止のための張力制御機能を備えること ・ 張力を制御場所に表示するための張力計測手段を備えること 	MSC.1/Circ.1662 Para.3.1.3
過負荷警報 及び監視	<ul style="list-style-type: none"> ・ 継続的な荷重監視及び可視可聴過負荷警報を備えること ・ 過負荷警報は低レベルの不可にもプログラム可能とすること（過負荷前の事前警報） 	MSC.1/Circ.1662 Para.3.1.4
制御場所	<ul style="list-style-type: none"> ・ 主制御場所は船橋の甲板エリアが明瞭に見渡せる場所とすること ・ 視覚が遮られる場合は、カメラ、映像監視装置により補完すること ・ 制御場所が複数箇所ある場合は、同時制御を防止する措置を講じること ・ 各制御場所に対して、下記事項を満足すること <ul style="list-style-type: none"> ➢ 主制御場所との双方向通信 ➢ 不用意な作動の防止 ➢ 人員の保護 ➢ 320Lux以上の照明 	MSC.1/Circ.1662 Para.3.1.5
スプーリング装置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔操作が可能なスプーリング装置を備えること 	MSC.1/Circ.1662 Para.3.1.6
緊急離脱	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通常及びデッドシップ状態において、安全かつ制御された方法で緊急離脱が行えること ・ 緊急離脱の作動制御は主制御場所から行えること（緊急離脱機能は機側制御場所からも利用可能） ・ 意図しない始動に対して保護すること ・ 慣性によるワイヤの繰り出し速度の制限、船上の配置によるいかなる制限も考慮した設計とすること ・ 緊急離脱の操作、指示事項は船橋及びウインチ側に明確に掲示すること ・ 緊急離脱後の点検を実施し、損傷があれば修復すること 	MSC.1/Circ.1662 Para.3.1.7
チェーン ストッパー	<ul style="list-style-type: none"> ・ チェーンストッパー（ワイヤストッパ含む）を備えること ・ ストッパーの掛かりに対する可聴警報を備えること 	MSC.1/Circ.1662 Para.3.1.8.1

要件項目	要件内容	補足
	<ul style="list-style-type: none"> ・ デッドシブ状態を含むすべての状態において緊急離脱が行えること（ワイヤの絡まりを引き起こしえるピン等の離脱も含む） ・ 緊急離脱は遠隔操作が行えること ・ 意図しない始動に対して保護すること ・ 緊急離脱の操作のための指示は、船橋及び緊急離脱制御機側に明確に表示すること ・ 緊急離脱後の点検を実施し、損傷があれば修復すること 	
ウインチブレーキ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低速で制御が可能な動力制御のブレーキ（回生ブレーキ、ダイナミックブレーキなど）を備えること ・ ブレーキは動力損失時及びウインチレバーの中立位置で自動作動すること 	鋼 船 規 則 O 編 8.5.3より移設
動力供給源	<ul style="list-style-type: none"> ・ 推進と同じ動力からアンカーハンドリングウインチの動力を供給する場合（軸発、PTOなど）は、独立した冗長性のある動力源とすること ・ アンカーハンドリングウインチの動作に十分な容量を有し、ウインチ操作中も船舶の操縦性能が低下しないものとする 	鋼 船 規 則 O 編 8.5.4より移設

4.2.5 操作、保守、点検及び運転試験（4章）

1章「揚貨装置」と同様に、船舶の管理者又は操作責任者等が遵守すべき事項として規定した。規定内容については、MSC.1/Circ.1662をそのまま取り入れたものとなっている。

4.2.6 設備符号

設備規則にアンカーハンドリングウインチに関する要件を新設したことに伴い、新たに設備符号として“AHW”を登録規則3章に追加した。

5. おわりに

船上揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチの事故防止及び船員の安全性向上のため、長きにわたり国際的な統一基準の策定について検討が行われ、漸くSOLAS条約第II-1章第3-13規則及び関連ガイドラインとして制定された。今後は、旗国主管庁関与による義務的要件のもと、船上揚貨装置及びアンカーハンドリングウインチに対する一層の安全性の向上が期待される。一方で、適用対象、適用時期、既存のILO C152への対応、試験条件等、規制を実運用するうえで不明確な点も存在する。本会としては、該当する装置が当該SOLAS条約に円滑に適合できるよう、今後も本会規則改正を通じて要件の明確化に努める所存である。また、本会規則改正に限らず、テクニカルインフォメーション⁷⁾⁸⁾⁹⁾や本会ウェブサイトの特設ページ⁶⁾を通じて、適宜情報共有も行っており、今後も旗国主管庁、IMO、IACS等から追加の情報が得られた際は迅速に情報共有を行う所存である。なお、弊会規則の運用に関するご質問については、引き続き、弊会材料艀装部（揚貨装置の規則関連）、機関部（アンカーハンドリングウインチの規則関連）、検査部（検査関連）にて承っているため、忌憚なくご相談いただけると幸甚である。

参考文献

- 1) IMO: RESOLUTION MSC.532(107), AMENDMENT TO THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE SAFETY OF LIFE AT SEA, 1974, 2023, P1~P4
- 2) IMO: MSC.1/Circ1662, GUIDELINES FOR ANCHOR HANDLING WINCHES, 2023
- 3) IMO: MSC.1/Circ1663, GUIDELINES FOR LIFTING APPLIANCES, 2023
- 4) IMO: ILO Code of practice on safety and health in ports, IMOウェブサイト,
<https://www.imo.org/en/ourwork/facilitation/pages/ilocode-default.aspx>,（参照2025-10）
- 5) ILO: Ratifications of C152 - Occupational Safety and Health (Dock Work) Convention, 1979 (No. 152), ILO NORMLEX,
https://normlex.ilo.org/dyn/nrmlx_en/f?p=1000:11300:0::NO:11300:P11300_INSTRUMENT_ID:312297,（参照2025-10）

- 6) 一般財団法人日本海事協会：SOLAS条約II-1章3-13規則及びMSC.1/Circ.1663, 本会ウェブサイト,
https://www.classnk.or.jp/hp/ja/activities/statutory/solas/solas_treaty/lifting/, (参照2025-10)
- 7) 一般財団法人日本海事協会：SOLAS II-1章改正による揚貨装置の新要件について, ClassNKテクニカルインフォメーション No. TEC-1340
- 8) 一般財団法人日本海事協会：SOLAS II-1章改正によるアンカーハンドリングウインチの新要件について, ClassNKテクニカルインフォメーション No. TEC-1359
- 9) 一般財団法人日本海事協会：SOLAS II-1章改正に伴う揚貨装置の新要件への対応について, ClassNKテクニカルインフォメーション No. TEC-1361

IMO GHG削減中期対策を踏まえたコストシミュレーション

企画本部 グリーントランスフォーメーションセンター

1. はじめに

現在、国際海運は国際海事機関（IMO）や欧州連合（EU）が主導する温室効果ガス（GHG）排出削減規制の強化という、極めて大きな転換点に直面している。これらの規制は単に国際的な環境目標を達成するための枠組みにとどまらず、海運会社の経営戦略や船舶のライフサイクル全体に直接的な影響を及ぼす要素となっている。船舶が使用する燃料の選択や運航コスト、さらには新造船の導入や改造のための投資判断基準がこれら規制の動向に大きく左右されることになる。現在IMOで議論が進められているGHG削減に向けた中期対策案（以下、「中期対策」という）では、燃料のGHG強度を段階的に削減することが義務付けられる。

この中期対策については、2025年10月に開催された臨時MEPC（MEPC/ES.2）において、加盟国間の意見の隔たりを理由に採択に関する審議が1年間延期され、合意には至らなかったものの、IMOが示す脱炭素化の方向性自体は維持されており、今後も国際的な枠組みのもとで燃料転換を含む包括的なGHG削減対策が求められることに変わりはない。このため、今後はこれまでの効率改善を中心とした対策のみでは規制対応が難しくなり、燃料そのものの転換など中長期的な準備が必要となってくる。

このような背景のもと、今後の海運業界では、燃料の選択と規制対応コストを総合的に考慮した経済的評価が不可欠となる。この新たな枠組みのもとで、燃料転換が経済性に与える影響を事前に把握することは、今後の戦略立案において極めて重要となる。

本稿では、IMOで検討されている中期対策について、本会のコストシミュレーションツールを用い、主として規制コストの影響を評価し、戦略的判断の基礎となる考え方を示す。なお、今後のIMOの議論の進展によっては、コストへの影響度合いが大きく変化する可能性がある。本稿で示す試算結果は、現時点で入手可能な情報に基づき、本会が設定した前提条件により算出したものであり、燃料価格や供給量、GHG強度などの前提条件が変われば試算結果も変動し得る。したがって、本稿は本会のシミュレーションツールを用いたシナリオ分析の一例として参照されたい。

2. 規制コストの算定

IMOの中期対策は、燃料転換を促すだけでなく、燃料の製造段階から使用までを含めたライフサイクル全体の排出量を考慮する点に特徴がある。従来のように燃焼段階のみを対象とするのではなく、燃料の製造・輸送・貯蔵・使用を通じた実質的な排出削減を目指すものであり、船上の効率改善にとどまらず燃料サプライチェーン全体の脱炭素化を促す包括的な枠組みといえる。したがって、中期対策における規制コストを正しく理解するためには、この新たな評価の枠組みである「Well-to-Wake (WtW)」の考え方を把握することが重要である。以下では、その具体的な評価範囲と算定方法について述べる。

(1) Well-to-Wake排出量の考え方

従来のIMOのCO₂排出削減規制では、主として船上燃焼に伴う直接排出「Tank-to-Wake (TtW)」のみを対象としてきた。しかし、IMOの中期対策では、燃料の製造段階（Well）から燃焼段階（Wake）までの全工程におけるGHG排出量を統合的に評価する。このため、たとえ燃焼時にGHGを排出しない燃料であっても、製造過程で原料を含む化石エネルギーを用いていれば依然として高い排出量を有することになる。一方、再生可能エネルギー由来の電力とDAC（直接空気回収）などで回収されたCO₂を利用して製造されたe-fuelのような燃料は、ライフサイクル全体での排出量を大幅に低減できる。このように、燃料の「製造経路」が規制コストに直結する点が中期対策の大きな特徴である。

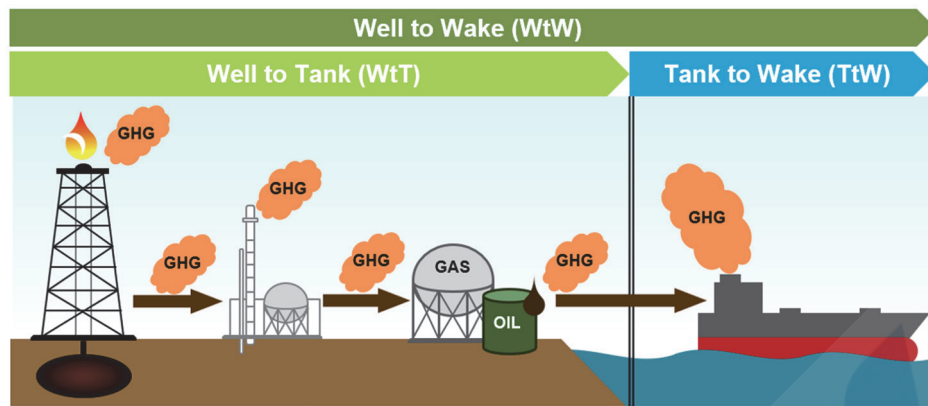


図1 船用燃料のライフサイクルにおけるGHG排出のイメージ

(2) GHG強度の算定

燃料の環境性能を表す代表的な指標が「GHG強度」であり、これは燃料のエネルギー当たりのライフサイクルGHG排出量として定義される。図2は、単一の燃料を使用する場合のGHG強度の考え方を示したものであり、燃料のGHG強度はその燃料の「排出係数」と「発熱量」によって計算することができる。



図2 GHG強度の計算

実際の運航においては、単一の燃料のみを使用するとは限らず、複数の燃料を併用するケースも想定される。この場合、燃料ごとに異なるGHG強度を適切に評価するためには、各燃料の使用割合、すなわちエネルギー消費量に応じて平均値を算出する必要がある。例えば、図3に示すように重油（HFO）とバイオ燃料（B100）をそれぞれ同量使用した場合を考える。HFOのGHG強度を95.48、B100のGHG強度を22.12とする場合、両者のエネルギー消費量で加重平均することにより、全体の平均GHG強度は約60.22となる。

このため、主燃料として重油を用いながらも、一部に低炭素燃料（B30、B100、e-fuelなど）を導入することで、全体のGHG強度を目標値以下に抑えることが可能である。この低炭素燃料の部分的導入によるアプローチは、燃料供給の不確実性や価格変動に対応しやすく、現実的で中期的な選択肢として注目される。

GHG強度：複数の燃料を使用した場合

- 各燃料の使用割合（エネルギー消費量）に応じてGHG強度平均値を算出する

Heavy Fuel Oil バイオディーゼル（100%）

例：「HFO」と「B100」を1tonずつ使用した場合

$$\begin{array}{c}
 \text{Well-to-Wake (WtW) GHG排出量} \\
 \begin{array}{|c|c|c|c|}
 \hline
 \text{HFO WtW GHG強度} & \times & \text{HFO エネルギー消費量} & + \\
 \hline
 95.48 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ} & & 40,200 \text{ MJ} & + \\
 \hline
 \text{B100 WtW GHG強度} & \times & \text{B100 エネルギー消費量} & \\
 \hline
 22.12 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ}^* & & 37,200 \text{ MJ} & \\
 \hline
 \end{array} \\
 \hline
 \begin{array}{|c|c|}
 \hline
 \text{HFO エネルギー消費量} & + \\
 \hline
 40,200 \text{ MJ} & + \\
 \hline
 \text{B100 エネルギー消費量} & \\
 \hline
 37,200 \text{ MJ} & \\
 \hline
 \end{array} \\
 \hline
 \text{エネルギー消費量}
 \end{array}
 = 60.22 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ}$$

*B100のGHG強度はNK仮定値

図3 複数の燃料を使用した場合のGHG強度の計算

(3) 各燃料のGHG強度

IMOが策定したLCAガイドラインでは、合計128種類の燃料供給経路（fuel pathways）が定義されており、それぞれについてGHG強度のデフォルト値が算出可能となる。もっとも、現時点では多くの燃料についてデフォルト値がまだ確定していない状況にある。図4は、あくまで参考値として主要な燃料のWell-to-WakeベースのGHG強度の目安を示している。この図に示すように、各燃料のGHG強度には大きな差がある。例えば、重油（LSHFO）は約95gCO₂eq/MJ、LNG（燃焼方式：Diesel slow）は約77gCO₂eq/MJ、バイオ燃料B30では約76gCO₂eq/MJ、B100では約22gCO₂eq/MJ、さらにe-メタノールやe-アンモニアは10～13gCO₂eq/MJ程度まで低い値となることが想定される。一方で、化石由来のグレーメタノールは約103gCO₂eq/MJと重油よりも高い。このように、同じ燃料であっても、製造過程で用いられるエネルギー源や原料の由来によって、Well-to-WakeベースでのGHG強度は大きく異なる。

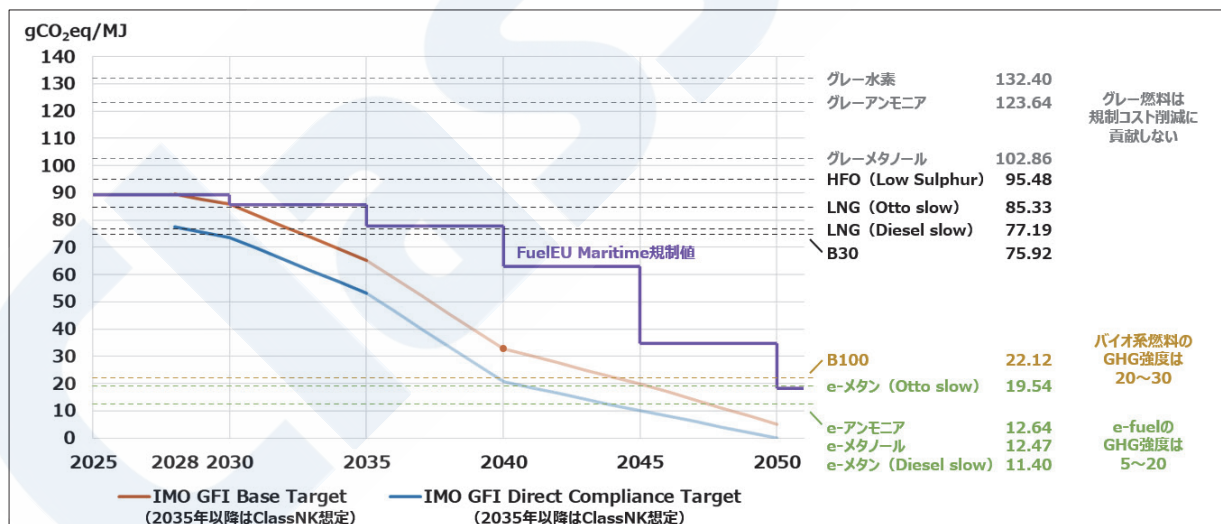


図4 各燃料のWell-to-Wake GHG強度の目安と規制値

(4) 規制コスト構造と最適化

IMO中期対策の中核をなすのが拠出金制度である。これは、船舶の実績GHG強度が上限値を上回った場合に、その差分に応じて拠出金を支払う仕組みであり、拠出金額は図5のように計算される。2030年までの拠出金単価は、ダイレクト・コンプライアンス・ターゲット超過分（Tier 1）に対して100USD/t-CO₂eq、ベース・ターゲット超過分（Tier 2）に対して380USD/t-CO₂eqが提案されている。

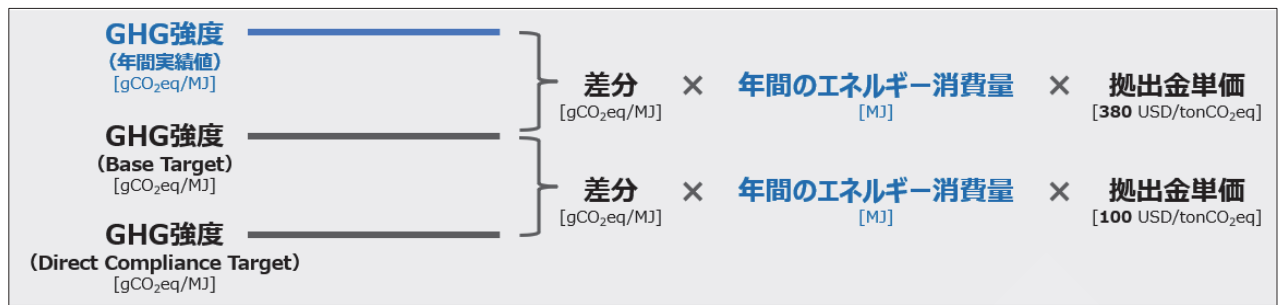


図5 排出金の計算方法

この制度のもとで、自主的な取組みにより排出金の負担を低減できる要素は、主として次の二点である。

(a) GHG強度の年間実績値の低減（低炭素燃料の使用）

(b) 年間のエネルギー消費量の削減（燃費改善）

このように、今後はこれらの最適化がコストの抑制と競争力確保の鍵となる。規制への対応策として、低炭素燃料の導入が注目されているが、実際に船舶が取り得る手段には一定の制約がある。このため、燃料転換だけでなく、船舶の運航効率やエネルギー利用効率の向上、すなわち「燃費改善」もこれまで以上に重要な要素となる。

3. 中期対策のコストインパクト

本章では中期対策によって発生するコストがどの程度になるかを把握するため、代表的な64,000DWTのばら積み貨物船を想定し、将来にわたって従来燃料の使用を継続する場合に想定されるコストの推移を試算した。当該試算における前提条件（全て2050年まで一定）は以下のとおりである。

- ・ 年間の燃料消費量：HFO5,000 ton
- ・ 燃料価格：500USD/ton
- ・ 排出金：(Tier 1) 100USD/tonCO₂eq, (Tier 2) 380USD/tonCO₂eq
- ・ 想定期間：2025～2050年

図6に示すとおり、燃料価格を一定と仮定した場合、2025年時点の年間コストはおよそ250万USD規模となる。一方、IMO中期対策の段階的強化により、規制コストが年々増加し、2030年代前半には燃料費を上回る水準に達する。特にベース・ターゲット超過分（Tier 2）の排出金の影響は大きく、2035年時点で2025年比+102%、2040年には+202%、最終的に2050年には+280%に達すると試算される。すなわち、重油を使い続ける場合、規制コストが船舶の運航費全体を大きく押し上げ、燃料費構造を根本的に変える可能性がある。この結果は、IMOの中期対策が低炭素燃料への移行を促すための強力な価格シグナルとして機能することを示している。燃料転換を行わない限り、GHG排出量に比例した規制コストの増大により、既存の燃料経済性の優位性は急速に失われる。特に、燃料費と中期対策の排出金の合計が運航コストの大半を占めるバルカーやタンカー等のセグメントでは、船主・運航者の収益構造に直接的な影響を与える。結果として、代替燃料導入、燃費改善対策、排出金の支払いや還付金の有無などを含むコスト管理戦略の再構築が不可欠となる。

また、図7に示すように、規制コストは、燃料消費量に概ね比例して増加する傾向がある。2028年時点の試算では、燃料を重油のまま使用し続けた場合、大型コンテナ船やVLOC（Very Large Ore Carrier）など燃料消費量の多い船舶ほど負担が大きく、最大で年間1,500万USDを超える水準に達する。一方、燃料消費量の少ない中小型船（例：ハンディサイズバルカーや小型コンテナ船）では、規制コストの絶対額は比較的限定的であるが、運航採算上は依然として無視できない水準となる。

このことから、中期対策コストの影響は船種やサイズによって異なるものの、燃費性能や運航効率の改善が全ての船舶で共通の課題であることが分かる。特に燃料消費量の多い船舶については、代替燃料の導入や運航の最適化といった優先的な対応策の検討が急務となる。

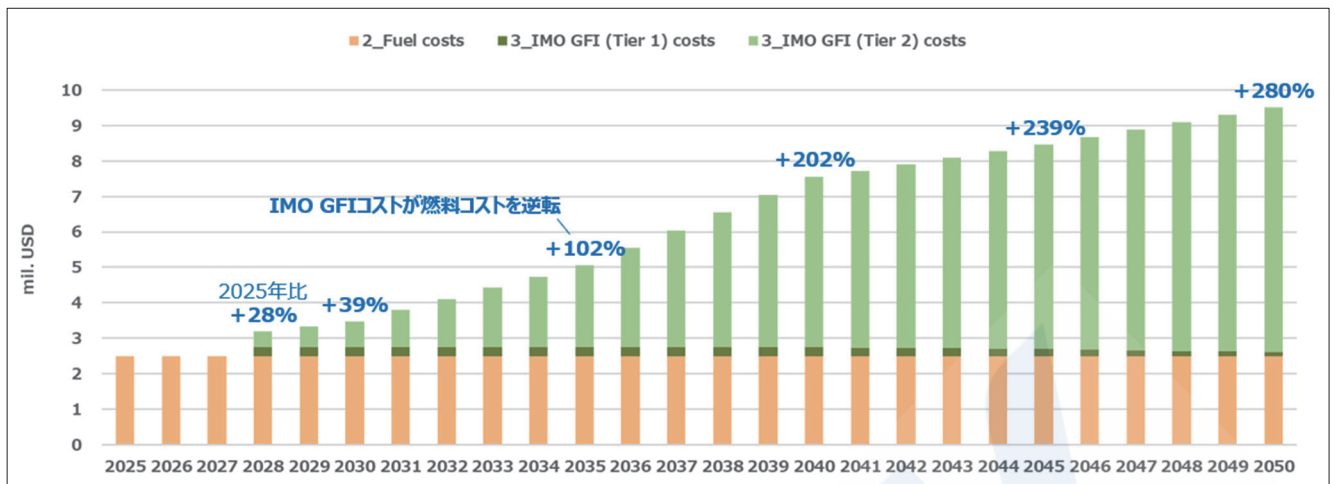


図6 重油の使用を継続した場合のコスト

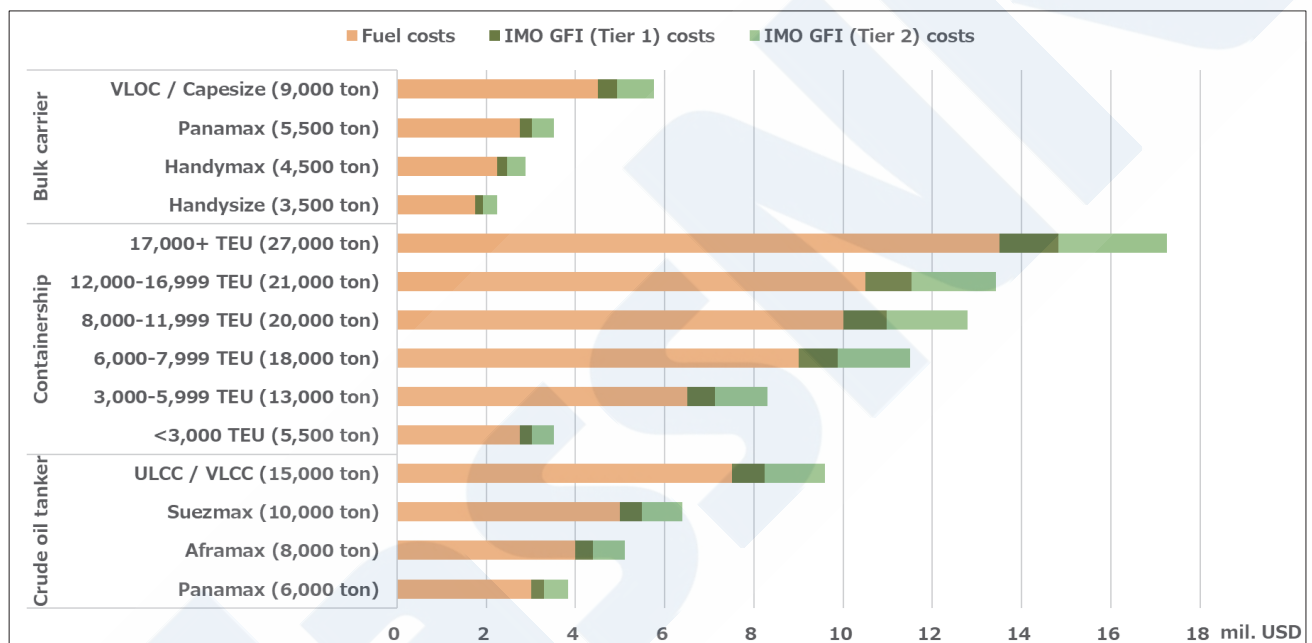


図7 2028年時点での船種／サイズ別のコスト

4. コスト削減に向けた対策

本章では、規制コストの削減を目的とした各種対策について、その考え方や効果を具体的な事例に基づき検討する。IMO中期対策では、燃料のGHG強度に応じた拠出金負担が新たなコスト要素として加わるため、運航効率の改善や低炭素燃料の導入など、経済性と環境性を両立する取組みが一層重要となる。本章では、燃費改善、減速運航、および燃料併用を代表例として取り上げ、それぞれの対策が運航コスト構造に与える影響についてケーススタディを通じて明らかにする。

4.1 燃費改善

中期対策においてコスト上昇を抑制する上で、まず取り組むべきは燃費改善である。燃料転換や代替燃料船への改造などと比較して、燃費改善は初期投資を抑えつつ即効性のある削減効果を発揮できる。本ケースでは、年間の燃料消費量5,000ton (HFO)の船舶を対象とし、燃費を5%改善して年間消費量4,750tonとした場合の影響を試算した。その結果を図8に示す。燃費を5%改善することにより、燃料使用量の減少に伴って燃料費が直接的に低減するほか、GHG排出量に比例して課される規制コストも同時に削減される。すなわち、燃費改善は燃料費の削減効果と規制対応効果を同時に得られる点で、極めて費用対効果の高い対策である。2040年までの13年間の累計でみると、燃費5%改善によって得られる削減効果は以下のとおりである。

- ・ 燃料費削減額： 約1,625,000USD
- ・ 規制コスト削減額： 約1,617,042USD

これらを合計すると、2040年までに約324万USDのコスト削減が見込まれる。すなわち、燃費改善による効果は、燃料費削減分とほぼ同額の規制コスト削減をもたらすことが確認できる。

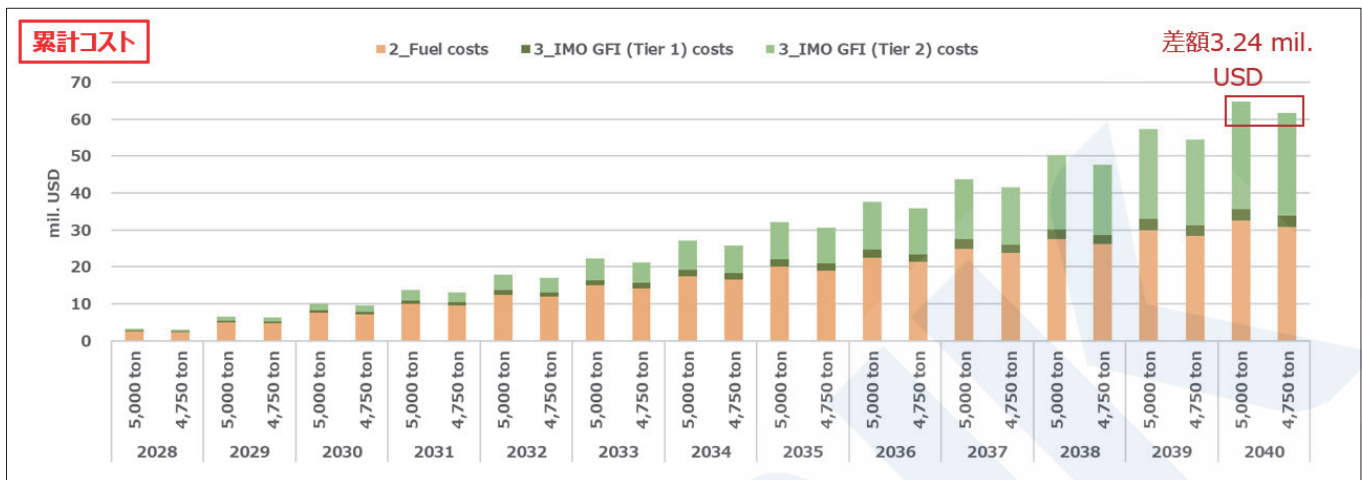


図8 燃費改善によるコスト削減効果

4.2 減速運航

燃費改善の具体的な取組みとして、即時に実施可能である減速運航について検討する。船速を低下させることで燃料消費量を抑制できるとともに、GHG排出量および規制コストの低減にも寄与する点から、短期的又は中期的な対応策として有効かつ実用的な手段として注目される。

本ケースでは、フリート全体（ばら積み貨物船10隻）を対象に、2028年から2035年までの8年間、11.5knotからの減速運航を実施した場合の効果を比較した。ここでは燃料価格を500USD/tonとし、航行日数および消費燃料量の差を考慮して試算を行った。10.45knotに減速運航した場合、フリート全体の燃料コストおよび規制コストは最も低減する結果となった。

- ・ 通常運航（11.5knot × 10隻）： 8年間合計コスト＝約7.04億USD
- ・ 減速運航（10.45knot × 11隻）： 8年間合計コスト＝約6.75億USD

減速により運航効率が低下するため、同一期間において同等の輸送量を維持するためには1隻の追加投入が必要となるが、ここではフリート全体の船価も加味されており、上述のとおり総コストで約2,900万USDの削減効果が確認された。すなわち、燃料消費削減による経済的・環境的効果が、一定の運航効率の低下を上回る結果である。



図9 フリート全体の減速運転によるコスト削減

4.3 燃料の併用

IMO中期対策のもとでは、燃料のライフサイクルGHG強度が規制対象となり、重油などのGHG強度の高い燃料を使用し続ける場合、燃料価格に加えて規制コストが累積的に増大する。一方で、GHG強度の低い燃料を部分的に併用することで、排出コストを抑制しつつ、全体の運航コストを最適化することが可能である。本ケースでは、年間の燃料消費量5,000ton・HFOの船舶を想定し、IMOのベース・ターゲットを達成するよう、重油（HFO）に対してバイオディーゼル（B30）を段階的に混合・併用した場合のコスト推移を試算した。前提条件は以下のとおりとした。

- ・ 年間燃料消費量：5,000ton
- ・ 燃料価格：HFO = 500USD/ton, B30 = 746.7USD/ton
- ・ 想定期間：2028～2040年

2028年時点ではB30の混合比30%から開始し、以降段階的に比率を増加させ、2033年以降にはB30を主体とする構成とした。図10の試算結果は、低炭素燃料の導入が単なる環境対応策にとどまらず、中長期的には経済的合理性を持つ選択肢であることを示している。とりわけ、バイオディーゼルなど既存インフラを活用できる燃料は、重油との併用によりスムーズな移行が可能であり、規制対応コストの抑制に寄与する。また、バイオ燃料価格が今後低下するような場合には、重油単独での運航よりも明確なコスト削減効果を発揮する可能性がある。したがって、燃料の併用は中期対策のもとで現実的かつ実効性の高い移行ステップとして位置付けられる。

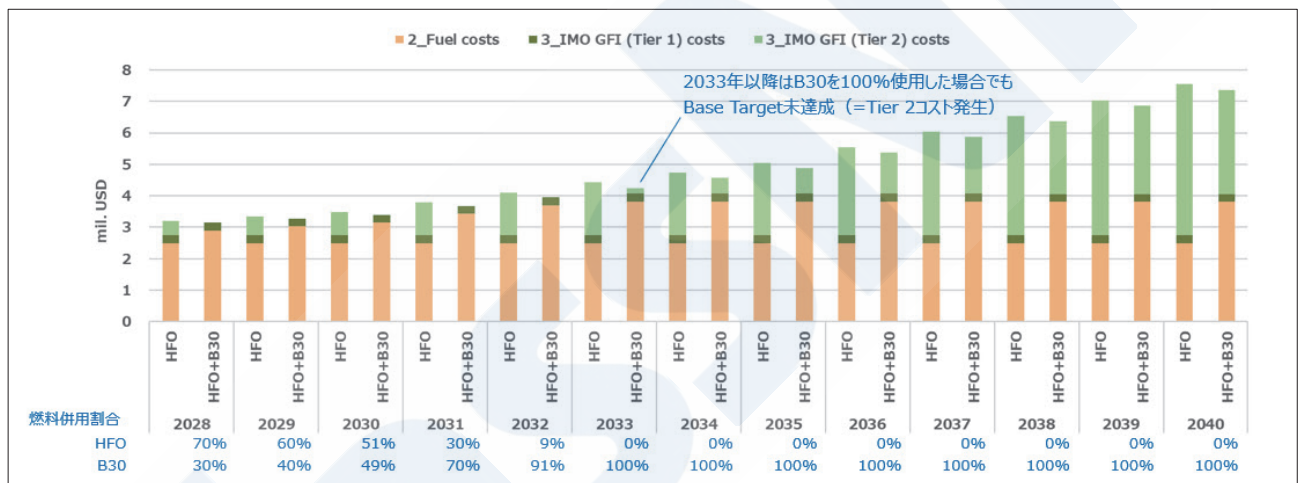


図10 燃料の併用によるコスト削減（毎年のベース・ターゲットを達成するように燃料を併用）

5. 本会のサービス

IMO中期対策やEU-ETS, FuelEU MaritimeといったGHG排出削減規制へ適切に対応するためには、これらの規制に伴うコストの把握だけでなく、燃料転換に伴う建造コストや燃料コストの変化も考慮した包括的なコストシミュレーションが不可欠である。本会では、こうした複雑化するコスト評価を顧客に代わって実施するため、「ClassNK フリート コスト シミュレーション」サービスを提供している。本サービスでは、将来的な燃料転換によるコスト変動を算出できる計算ツール“ClassNK Fleet Cost Calculator”に加え、フリート全体のコスト見通しをグラフや表で分かりやすく提示する試算レポートを提供する。計算ツールは、IMO中期対策やEU-ETS, FuelEU Maritimeといった規制対応コストのみならず、船舶の建造費や燃料費を含む包括的な試算に対応しており、将来のフリート戦略立案に幅広く活用できる。さらに、燃料価格、リプレース時期、燃費改善率、排出係数など、利用者のニーズに応じて前提条件を柔軟に設定することが可能である。燃料転換を考慮したシミュレーションや計算支援を通じて、企業が実効性の高い脱炭素戦略を策定し、将来の投資判断に資するよう支援している。



図11 ClassNK Fleet Cost Calculatorの画面イメージ

6. まとめ

IMO中期対策の導入により、燃料の選択や燃費性能が船舶の資産価値や投資判断に直接影響を及ぼす可能性がある。今後は「どの燃料を使用できるか」や「燃費性能の優劣」といった要素が、船舶の市場価値を左右することが想定される。投資判断においても、企業が明確な脱炭素戦略を有しているかどうかが評価対象となり、その結果が船価や資金調達条件に反映される可能性がある。

一方、運航面では配船計画やコスト管理がこれまで以上に複雑化し、最適運航や燃料調達、バンカリング戦略の有無が収益性に直結するようになる。トータルコストを抑制するためには、関係者を含めたサプライチェーン全体での協調的な対応が求められる。

今後の準備としては、まずは規制の動向を継続的に注視することが重要である。また、従来燃料船と代替燃料船の採算性、さらには用船料や運賃への影響を見据えたシミュレーションを実施し、関係者間で将来像の共通認識を形成しておくことが求められる。これらの取組みが中期対策の導入後における円滑な移行と競争力維持に寄与すると考えられる。

本会は、今後も最新の国際動向を踏まえた情報発信やコストシミュレーションサービスなどを通じて関係者の実務的な対応を支援していくとともに、海運業界全体の脱炭素化推進を後押ししていく。

参考文献

- 1) 2024 Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (2024 LCA Guidelines) (Resolution MEPC.391(81))

Research on Carbon Reduction Strategies for Operating Small-and Medium-Sized Bulk Carriers

Wenyu XU*, Nan WANG**

1. INTRODUCTION

The shipping industry, although responsible for less than approximately 3% of global CO₂ emissions¹⁾, faces mounting pressure to decarbonize. In June 2021, the International Maritime Organization (IMO) introduced a mandatory Carbon Intensity Indicator (CII) rating requirement for existing vessels. Ships receiving lower ratings must implement improvements or risk operational restrictions. In July 2023, the 80th session of the IMO's Marine Environment Protection Committee (MEPC) revised its greenhouse gas (GHG) reduction strategy, setting a net-zero emissions target for around 2050²⁾. In April 2025, MEPC 83 approved the IMO Net-Zero Framework draft, establishing basic and direct compliance objectives. Should a vessel's annual GHG Fuel Intensity (GFI) exceed targets, shipowners must purchase remedial units to offset the compliance deficit³⁾. This creates dual compliance obligations, CII and GFI, for operational vessels.

Bulk carriers constitute over 40% of the global commercial fleet by deadweight. Small-and medium-sized bulk carriers represent nearly 80% of the bulk fleet by vessel count, with over 99% reliant upon conventional fuels. The fleet's average age is at its eldest since 2010, with more than two-thirds of bulkers aged over 10 years old. Clarksons forecasts a rise in bulk carriers with D/E CII ratings—from 31% today to over 40% by 2026. That would downgrade over 1,000 vessels in just one year. Whilst mature energy-saving technologies (e.g., energy-saving appendages, low-friction coatings, propeller retrofits) are widely adopted, newer solutions such as wind-assisted propulsion, air lubrication systems, and carbon capture are being trialed on some bulk carriers⁴⁾.

Retrofitting for alternative fuels remains challenging for small/medium bulkers due to their variable, unscheduled “tramp” routes. Without the magic of the ever-scaling Hammer of Thor, at this moment, it is “mission impossible” for alternative fuel storage capacity planning, unlike container ships which have fixed port rotations and established retrofit precedents. Bunkering infrastructure for alternative fuels is still under-developed and unevenly distributed. Despite years of LNG dual-fuel vessels operations, only around 210 ports worldwide currently offer LNG bunkering, over 50% of which are in Europe, while Africa, South America, and Oceania collectively account for less than 5%. Methanol and ammonia bunkering capabilities are even scarcer. Even with ample affordable green fuel supplies, global bunkering accessibility remains limited at this moment. Additionally, concerns over fuel system reliability and operational management persist. No operational bulk carrier has undergone dual-fuel retrofitting to date. Thus, there is significant market demand for reliable, cost-effective decarbonization pathways for aging small/medium bulk carriers without resorting to alternative fuel retrofits.

2. IMO REGULATORY FRAMEWORK FOR CARBON EMISSIONS FROM OPERATIONS

The operational carbon intensity rating system, effective January 2023, calculates annual attained CII for vessels >5,000 GT as:

$$\text{Attained CII} = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{\text{DWT} \times D} \quad (1)$$

where:

j is the fuel type;

FC_j is the consumption of fuel j in ton;

* COSCO Shipping Heavy Industry CO., LTD.

** Nantong COSCO KHI Ship Engineering CO., LTD.

CF_j is the carbon conversion factor for fuel j in $\text{tonCO}_2 / \text{tonFuel}$;

DWT is the deadweight of the bulk carrier at full load draft in ton;

D is the sailing distance in the reporting period in nautical miles.

The required annual operation CII value for ships to be reduced against the CII reference line, and the formulas are calculated as:

$$\text{CII reference line} = a \times \text{DWT}^{-c} \quad (2)$$

$$\text{Required annual operation CII} = \left(1 - \frac{z}{100}\right) \times \text{CII reference} \quad (3)$$

where: $a = 4745$, $c = 0.622$ for bulk carriers;

z is a general reference to the reduction factors for the required annual operational CII of ship types from year 2023 to 2030, as specified in Table 1.

Table 1 Reduction factor for the CII relative to the reference line

Year	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Reduction factor	5%	7%	9%	11%	13.625%	16.25%	18.875%	21.5%

Based on a comparison between the attained CII values and the required annual operation CII values, vessels will be assigned ratings from A to E. A ship rated as D for three consecutive years or rated as E in one year shall duly undertake the planned corrective actions in accordance with the revised Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP).

To achieve the target of net-zero greenhouse gas (GHG) emissions around 2050, the draft “IMO Net-Zero Framework” was proposed at MEPC 81 in March 2024, and approved at MEPC 83 in April 2025. This framework will require ships to progressively reduce their Greenhouse Gas Fuel Intensity (GFI) value, over the full life-cycle of fuels, each year. Vessels failing to meet GFI targets will incur compliance deficits, necessitating economic measures to balance these deficits. The attained annual GFI of a ship in a given year shall be calculated as follows:

$$\text{GFI}_{\text{attained}} = \frac{\sum_j \text{GFI}_j \times \text{Energy}_j}{\text{Energy}_{\text{total}}} \quad (4)$$

where:

GFI_j , expressed in $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$, is the GHG intensity, expressed on a well-to-wake basis of a fuel type j ;

Energy_j , expressed in MJ, refers to the energy consumption of fuel type j by the ship in the reporting period;

$\text{Energy}_{\text{total}}$ expressed in MJ, refers to the total amount of energy used by the ship in the reporting period.

The target annual GFI (GFI_T) of a ship shall consist of two tiers: a basic target annual GFI and a direct compliance target annual GFI. The GFI_T shall be calculated as follows:

$$\text{GFI}_T = \left(1 - \frac{Z_T}{100}\right) \times \text{GFI}_{2008} \quad (5)$$

where:

GFI_{2008} is the GFI reference value equivalent to $93.3 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ (well-to-wake), representing the average GFI of international shipping in the year 2008;

Z_T is the annual GFI reduction factors to ensure continuous improvement of the ship's GFI, consisting of both an annual reduction factor for the base target and for the direct compliance target, the values of which are shown in Fig. 1. The 2040 Z_T for the Base target shall be set at 65%.

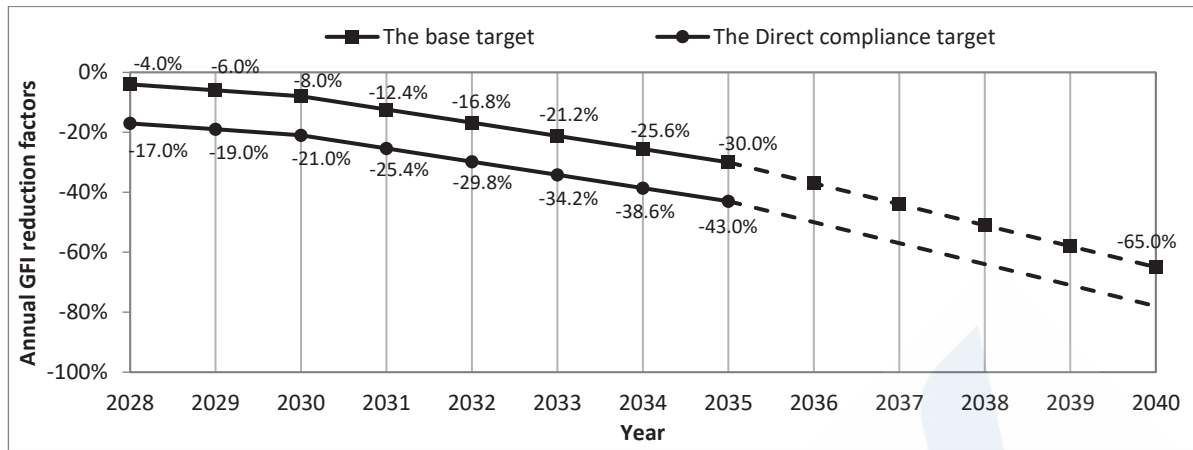


Fig. 1 Annual GFI reduction factors for the target annual GFI relative to the GFI reference value

Fig. 1 shows that the direct compliance target consistently requires a reduction 13% greater than the base target in the same year, through to 2035. If this differential persists from 2035 to 2040, the GFI compliance targets exhibit a “first accelerating, then decelerating” trend: from 2028 to 2030, the GFI annual reduction rate is 2.0%; from 2031 to 2035, the reduction increases to 4.4%; from 2036 to 2040, the figure will rise to 7.0% to achieve the base target of a 65% reduction by 2040. Beyond 2040, it would slow to approximately 2.2–3.5% annually, aligning with the IMO’s net-zero goal for year 2050.

At the end of each reporting period, if the attained annual GFI is below the Direct Compliance Target, the ship shall be considered in direct compliance and be eligible to receive Surplus Units (SUs). These SUs may be transferred to other vessels, banked for use in the following two calendar year reporting periods, or voluntarily cancelled. If the attained annual GFI is below the Base Target but above the Direct Compliance Target, the ship shall balance the Tier 1 compliance deficit by purchasing Tier 1 Remedial Units (RUs). If the attained annual GFI is greater than the Base Target, a Tier 2 compliance deficit arises in addition to that of the Tier 1. The ship can balance its Tier 2 compliance deficit through one of three approaches: transferring SUs from other vessels, using banked SUs from the vessel’s previous two years, or purchasing Tier 2 Remedial Units.

3. EMISSION REDUCTION MEASURES FOR EXISTING BULK CARRIERS

By the end of 2024, approximately 40% of global ocean-going vessels have been equipped with at least one kind of energy-saving device⁵⁾. The authors categorize the primary energy-saving and emission-reduction measures for mainstream ship types into the following six categories, as demonstrated in Table 2⁶⁾⁻¹¹⁾.

Table 2 Energy saving and emission reduction measures for medium/small bulk carriers

Pathways	Energy Saving Measures	Energy Saving Effect
Hydrodynamic Energy Saving	Energy-saving devices before/after propeller	~2~9%
	Low - Resistance Coatings	~2~5%
	Optimize the propeller	~2~7%
Operations Management	Speed and Route Optimization	Less than 5%
	Trim Optimization	Less than 2%
Clean Energy	Install Wind Power System	~3% for A Single Rotor
Machinery	Install Shaft Generators	~3%
Onboard carbon capture	Install Carbon Capture System (CCS)	Depending on capture rate
Alternative Fuels	Blended Biofuels	Depending on blending rate of Biofuels
	Retrofit LNG, Methanol, Ammonia fuel system	Depending on the proportion of available and affordable renewable fuels used.

On bulk carriers currently in service, the most widely applied measures primarily include low-friction antifouling paints, and energy-saving devices (ESDs) installed both fore and aft of propellers. In addition, propeller retrofitting also produces a significant reduction in emissions. Since 2008, the global commercial fleet has progressively reduced operating speeds, in order to reduce costs and as a mechanism to control supply-side capacity. By 2014, the average speed of bulk carriers had dropped below 11.5 knots. Although there was a brief, minor rebound in 2021, 11.5 knots was still the ceiling for the average sailing speed of bulk carriers. Subsequently the average speed has continued to decline to just above 10.7 knots recently. To achieve better ship performance, in the past three years, over 1,000 bulk carriers have undergone propeller replacements during dry-docking.

Other measures such as machinery optimization, installation of CCS, and software-based energy efficiency monitoring solutions have reportedly been explored by manufacturers. However, authenticated performance data remains scarce, with limited implementation track records observed on operational bulk carriers to date.

Among alternative fuels, biofuels have garnered significant attention from ship owners. However, according to DNV's 2025 Biofuels Whitepaper, over 99% of global biofuel production is allocated to road transportation. The remaining supply must also accommodate the larger appetite of the aviation industry, which generates higher CO₂ emissions, leaving a severely limited supply for shipping. Currently, biofuel bunkering is available at just 24 ports worldwide, with none in Africa or South America.

Therefore, energy-efficient solutions for currently operational bulk carriers remain severely constrained.

4. TECHNICAL ASSESSMENT OF CII-COMPLIANT CARBON-CUTTING SOLUTIONS FOR 10-YEAR-OLD KAMSARMAX BULK CARRIERS

4.1 Calculation Examples

We undertake our investigation based on a 2016-delivered KAMSARMAX bulk carrier as the case vessel, for which the shipowner has kindly shared its 2024 operational results as shown in Table 3.

Table 3 Annual operation statistic for target vessel

Average Speed (kn)	Cruise Range (nm)	LSHFOC (t)	MDOC (t)	CII Rating
12.5	62700	5840	540	C

Based on the operational data above, it can be found that without implementing emission reduction measures, the CII rating of this ship will decline in the coming years. Since the IMO has not specified future reduction factors for CII and GFI, in order to estimate the CII rating and GFI compliance costs for the target ship over the course of its remaining operational life cycle, whilst also controlling variables, the following assumptions provided in Table 4 were adopted for our analysis.

Table 4 The calculation assumptions and definitions in entire operational lifecycle of the target vessel

Parameters	Assumptions
Ship Operation Cycle	The vessel has an operational life of 25 years and will operate until 2040.
CII reduction factor	From 2031 to 2040, the CII requirements become more stringent, decreasing by 3.5% annually.
GFI reduction factor	From 2035 to 2040, the difference between the direct compliance target and the basic compliance target is 13%. From 2035 to 2040, the annual reduction factor for both direct compliance and basic compliance is 7%.
Cost of fuel	Low-sulfur heavy fuel oil: \$520 per ton; Diesel: \$600 per ton; 100% biodiesel: \$1500 per ton. Assumption: Fuel prices remain unchanged from 2025 to 2040.
GFI fee	The price for Tier 1 Remediation Units is \$100/tonCO _{2eq} , and for Tier 2 Remediation Units the price is \$380/ton CO _{2eq} .
Energy Saving Effect	Silicone-based low-friction paint: 5%; Propeller retrofit: 6%; Single wind rotor: 3%
GFI Value	LSHFO: 95.48 gCO _{2eq} /MJ; MGO: 93.93 gCO _{2eq} /MJ; Biofuel: 15 gCO _{2eq} /MJ (assumed)
Direct Extra Cost	Organic silicone paint addition: USD 0.3 million; Propeller modification: USD 0.4 million; Single wind rotor: USD 1.5 million; Carbon capture retrofit: USD 6 million.
Annual Cost	Annual costs cover the initial equipment investment, yearly fuel costs, GFI compliance fees, and similar expenses, and excluding the costs of equipment maintenance, the cost of after CO ₂ captured off-hire losses during retrofitting, freight revenue losses due to speed reduction. Neglect the influences on DWT (equipment number, if any) when installation of CCS or Wind rotors.
Total Cumulative Cost	Accumulated annual cost from 2025 to the statistical year.

The GFI compliance costs of this ship are shown in Fig. 2, on the basis of the above assumptions, maintaining unchanged fuel consumption while continuing to use Low Sulphur Heavy Fuel Oil (LSHFO). From 2028, payments for both Tier-1 and Tier-2 deficits will be required. Among these, Tier-1 deficit costs are relatively lower, with cumulative payments of around USD 4 million from 2028 to 2040. Meanwhile Tier-2 deficit costs are significantly higher and increase annually, accounting for about 95% of the total GFI compliance costs in 2040. The combined Tier-1 and Tier-2 deficit costs during the 2028–2040 period will substantially exceed the vessel’s original newbuilding price.

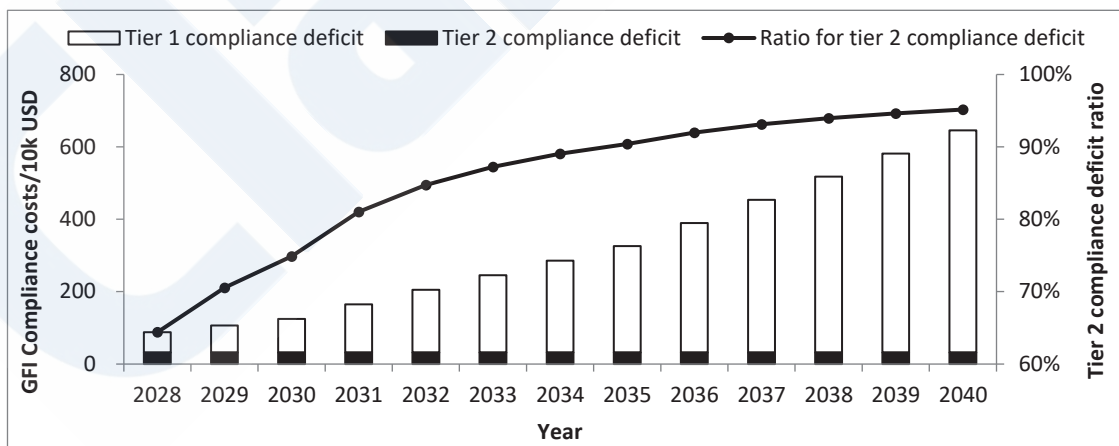


Fig. 2 IMO fuel compliance costs for the target vessel from 2028 to 2035

Fig. 3 illustrates the required reduction in fuel consumption ratio for this vessel to maintain a CII rating of Class C throughout its operational cycle. In 2030, the vessel needs to reduce its fuel consumption by approximately 10%, compared to 2024. By 2035, this fall in annual fuel consumption needs to reach 30% compared to 2024, and by 2040 reach 50% below levels. Therefore, to satisfy the CII rating requirements in different phases, a staged approach implementing various measures is necessary to achieve compliance. We adopt a three-phase “progressive” retrofit strategy for this vessel, based on the CII reduction factor and

GFI annual reduction rate, as well as the availability of biofuels in the market and the maturity of carbon capture technologies: Phase 1 retrofit measures are implemented from 2025 to 2030, Phase 2 from 2031 to 2035, and from 2036 to 2040 for Phase 3.

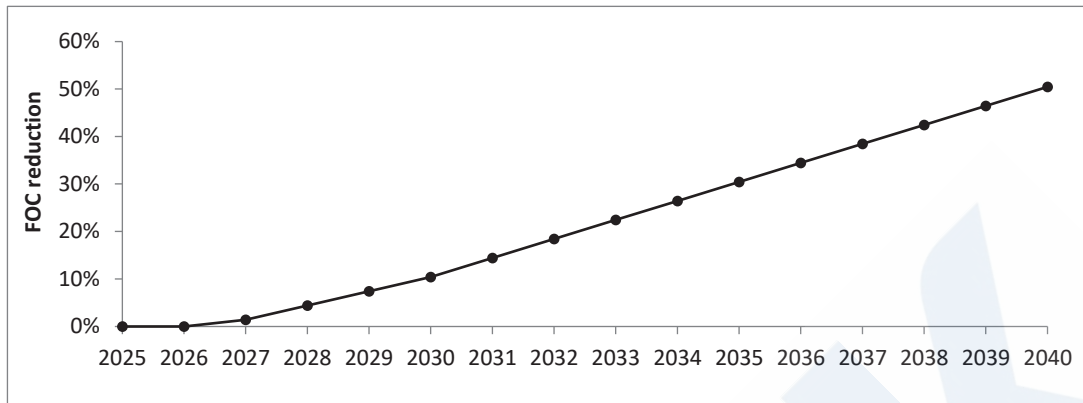


Fig. 3 The proportion of fuel consumption reduction to meet CII Class C requirements for the target vessel

4.2 Retrofit Plans for Phase I

Phase I, the reduction factors for CII and GFI are relatively small, offering a wider range of feasible emission reduction solutions. Priority in this phase is given to speed reduction as the mitigation strategy. As shown in Table 3, the vessel's average speed in 2024 is approximately 12.5 knots. Considering that the main engine requires a minimum load over 40% for prolonged continuous operation, the minimum average operational speed after slow steaming is about 11.5 knots. Table 5 compares the CII ratings under reduced speed scenarios for 2025–2030.

Table 5 Comparison of CII ratings after Phase I speed reduction

Year	Keep original speed		Case 0-Reduced Speed	
	Average Speed/kn	CII rating	Average Speed/kn	CII rating
2025	12.5	C	12.5	C
2026	12.5	C	12.5	C
2027	12.5	D	12.3	C
2028	12.5	D	11.9	C
2029	12.5	D	11.5	C
2030	12.5	D	11.5	D

By slowing down, our vessel will maintain a C rating from 2025 to 2029. However the CII rating will drop to D in 2030 as any further reduction in speed is no longer possible. Whilst reduced speed can cut down fuel consumption and GFI compliance deficit costs, if port time and other non-sailing periods are not shortened, the reduction in average speed will reduce the annual sailing distance and consequently reduce the revenue of the vessel.

Based on speed reduction, other emission reduction measures can be combined to lessen the GFI compliance costs. Given that energy-saving devices, such as a Semi-duct system and a Rudder bulb system have already been installed on this vessel during the newbuilding stage, Table 6 selects emission reduction measures suitable for this vessel. While not covering all optional measures, the analytical approach applies equally to other reduction solutions.

Table 6 Comparison of emission reduction measures in Phase 1 for the target vessel

Case	Measures of Emission Reduction	Emission Reduction Effect	Initial Investment
Case 1	Silicone Based Low Resistance Paints together with Optimization of Propeller	Comprehensive Energy Saving Achievement: 11%	~USD 0.7million
Case 2	Install 3 rotor sails and take advantage of meteorological Navigation.	Comprehensive Energy Saving Achievement: 9%	~USD 5 million
Case 3	Install a Carbon Capture and Storage System	Maximum Carbon Capture Rate of 30%	~USD 6 million
Case 4	Blended Biofuels	Depends on Biofuel Blending Ratio	The retrofitting costs are negligible

In Table 6, Case 1 assumes a speed reduction with a dry docking commencing at the beginning of 2026, including silicone antifouling, repainted every 5 years; Case 2 assumes a speed reduction, with dry docking and rotor sail retrofitting commencing in early 2026; Case 3 and Case 4 are both based on a speed reduction and aim to reduce GFI compliance deficit costs, with retrofits beginning in 2028. In Case 3, the annual carbon capture rate is fixed at 30%. In Case 4, a mix of biofuels is used to ensure the annual attained GFI meets the GFI base target line, avoiding the Tier 2 compliance deficit. Table 7 compares the CII ratings under different cases, and Fig. 4 shows the comparison of annual cumulative costs for each of the cases.

Table 7 The comparison of CII ratings in Phase 1 for the target vessel

Year	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
	CII rating	CII rating	CII rating	CII rating	CII rating	Biofuel blending Ratio
2025	C	C	C	C	C	0%
2026	C	C	C	A	C	0%
2027	C	C	C	A	C	0%
2028	C	C	C	A	C	8%
2029	C	C	C	A	C	10%
2030	D	C	C	A	C	13%

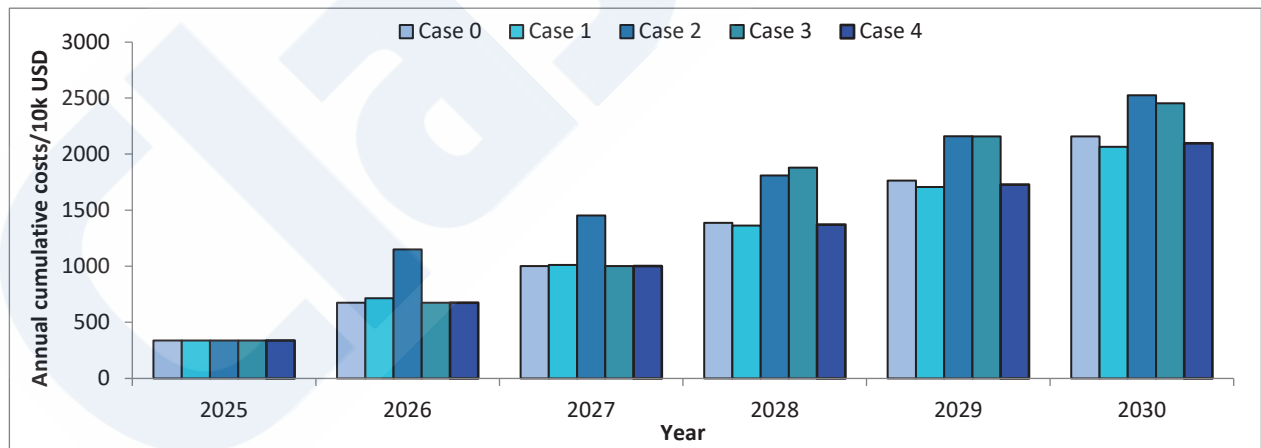


Fig. 4 Comparison of total cumulative costs in Phase 1 for different cases

Combining Table 7 and Fig. 4, it can be observed that in terms of CII ratings, implementing nothing but a speed reduction, will see the CII rating will drop to Class D in 2030. In contrast, the CII rating for Case 1 to 4 can all meet the Class C criteria. Among them, after the installation of CCS, the CII ratings are Class A every year.

Regarding the total cumulative costs, Case 1 is implemented from 2026 to 2028, which has an total cumulative cost lower than Case 0 by 2028, indicating that the static payback period of Case 1 is less than three years. By 2030, the total cumulative cost of Case 3 (the installation of CCS), is less than Case 2 (the installation of three sets of Rotor sails). This indicates that, under the given assumptions, a carbon capture system (CCS) is more cost-effective than wind-assisted technology. Additionally,

Case 4 has the lowest operational cost in Phase 1.

4.3 Retrofit Plans for Phase II

In the second phase, CII ratings and GFI compliance requirements become even stricter, with the annual reduction rate of the CII reduction factor increasing from 2.65% to 3.5% and the annual rate of the GFI reduction factor increasing from 2.0% to 4.4%. Table 8 compares the CII ratings for all cases in this phase.

Table 8 The comparison of CII ratings in Phase II for the target vessel

Year	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
	CII rating	CII rating	CII rating	CII rating	CII rating	Biofuel blending Ratio
2031	D	C	D	A	C	18%
2032	E	D	D	B	C	23%
2033	E	D	D	C	C	29%
2034	E	E	E	C	C	34%
2035	E	E	E	C	C	39%

Table 8 indicates that conventional energy-saving methods cannot enable compliance with a CII Rating of C. Only adopting a carbon capture system (CCS) or using biofuels can guarantee compliance. Among these cases, Case 4 meets the GFI basic target while still achieving a CII Rating of C. However, the bio-fuel blending ratio progressively increases, rising to 39% in the year 2035.

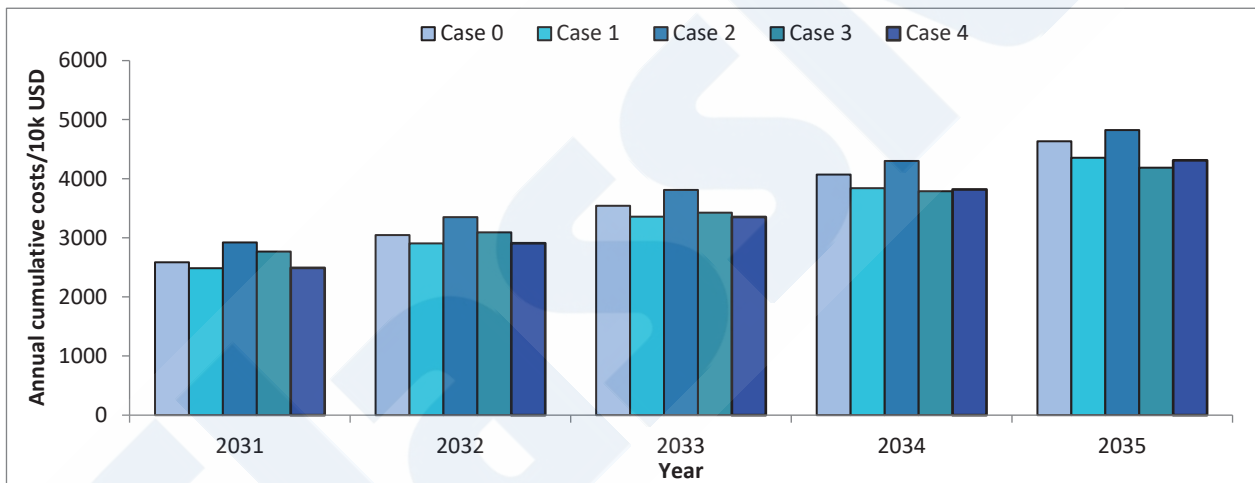


Fig. 5 Comparison of total cumulative costs in Phase II for different cases

Fig. 5 presents a comparison of the annual cumulative costs under different cases from 2031 to 2035. The results indicate that prior to 2034, of all of the energy conservation and emission reduction measures, Case 4 always enjoys the lowest total cumulative cost. After 2034, however, the cost advantage of installing CCS starts to be realized, emerging as the plan with the lowest total cumulative cost amongst these cases.

4.4 Retrofit Plans for Phase III

The compliance requirements for Phase III of GFI become more stringent, with the annual reduction rate of 7%, which is higher than the annual reduction rate for CII. Table 9 compares the CII ratings of different cases within this phase. Due to the configuration of auxiliary engines and boilers in the subject vessel, the maximum possible carbon capture rate for Case 3 is 30%, while Case 4 meets the basic target requirements of GFI by blending a certain proportion of biofuel. Fig. 7 compares the annual costs in different cases.

Table 9 The comparison of CII ratings in Phase III for the target vessel

Year	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
	CII rating	CII rating	CII rating	CII rating	CII rating	Biofuel blending Ratio
2031	E	E	E	D	C	48%
2032	E	E	E	E	B	57%
2033	E	E	E	E	A	65%
2034	E	E	E	E	A	74%
2035	E	E	E	E	A	82%

Table 9 shows that only Case 4 can maintain the CII rating requirements, but the biofuel blending ratio at this stage is extremely high. Furthermore, since the GFI reduction rate is significantly higher than the CII reduction rate, Case 4 could achieve a B or even an A CII rating while meeting the basic GFI compliance target. Case 3 has a carbon capture rate capped at 30%, so it cannot further improve its CII rating. In terms of total cumulative costs, the results in Fig. 6 show that installing a carbon capture system is the most economically beneficial option at this stage.

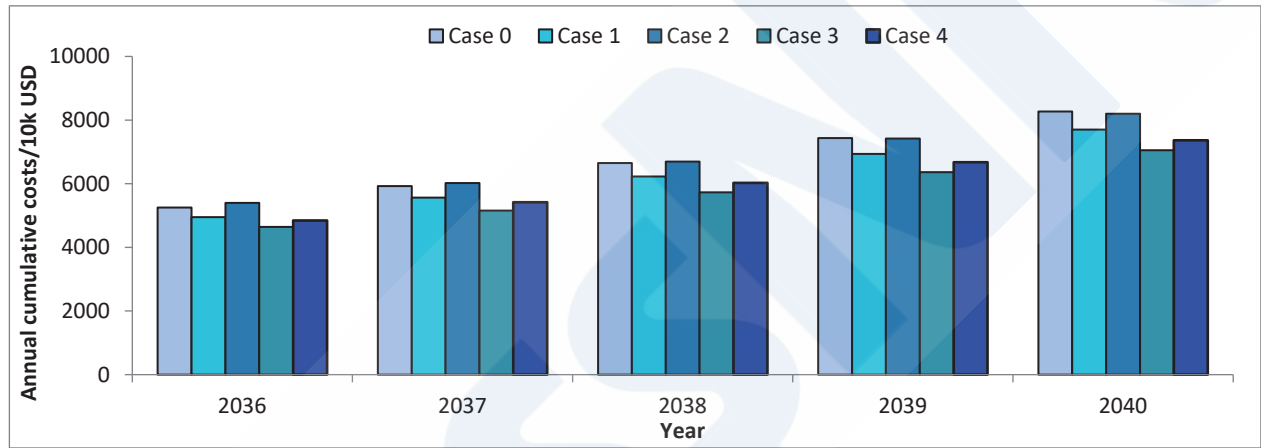


Fig. 6 Comparison of total cumulative costs in Phase III for different cases

4.5 Combined Emission Reduction Solution

Based on the segmented analysis of the previous three phases, we have consolidated the emission reduction pathways from all stages to determine a solution that technically maintains a CII rating Class C, while minimizing total cumulative costs throughout the vessel's operational life cycle. In the Combined Solution, based on the application of silicone anti-fouling paint during the dry docking period, the limitation of the CCS system's capture rate at 30%, and the B24 Biofuel blend currently most popular (24% biofuel blend ratio) as the calculation conditions. Table 10 presents the emission reduction measures and CII rating of the Combined Solution and compares it with the solution that involves a conversion to renewable methanol (Case 5).

Table 10 Comparison of Combined Solutions for emission reduction measures and CII ratings for the target vessel

Year	Combined Solution 1		Combined Solution 2		Case 5	
	Measures	CII	Measures	CII	Measures	CII
2025	No retrofit	C	No retrofit	C	No retrofit	C
2026	Speed Reduction + Silicone anti-fouling paint + Propeller Optimization	C	Speed Reduction + Silicone anti-fouling paint + Propeller Optimization	C	Speed Reduction	C
2027		C		C		C
2028		C		C		C
2029		C		C		C
2030		C		C		C
2031	Speed Reduction + Silicone anti-fouling paint + Propeller Optimization + CCS (Capture rate:30%)	A	Speed Reduction + Silicone anti-fouling paint + Propeller Optimization + Blended Biofuel (B24)	C	Speed Reduction + Renewable Methanol	C
2032		A		C		C
2033		B		C		C
2034		B		C		C
2035		C		C		C
2036	Speed Reduction + Silicone anti-fouling paint + Propeller Optimization + CCS (Capture rate:30%) + Blended Biofuel (B24)	C	Speed Reduction + Silicone anti-fouling paint + Propeller Optimization + Blended Biofuel (B24) + CCS (Capture rate:30%)	A		C
2037		C		B		B
2038		C		C		A
2039		C		C		A
2040		D		D		A

In Table 10, the primary distinction between Combined Solution 1 and Combined Solution 2 lies in their implementation sequence: Combined Solution 1 prioritizes installing the carbon capture system before adopting biofuel, whereas Combined Solution 2 employs biofuel first, followed by the installation of a carbon capture system. Case 5 performs a methanol dual-fuel retrofit in 2028 to reduce GFI compliance deficit costs, with the renewable methanol usage ratio set so as to satisfy the annual GFI base compliance target. Results indicate that under a 30% carbon capture rate and maximum 24% biofuel blend ratio, both Combined Solutions 1 and 2 achieve CII ratings of C or higher in all years except 2040 (rated D), which satisfy the IMO's CII rating requirements. Case 5, utilizing renewable methanol at GFI base compliance target, which meets CII requirements (C or higher). However, Case 5 requires the proportion of renewable methanol to surge dramatically from 7% in 2028 to 80% by 2040!

Fig. 7 compares the annual cumulative costs of the two Combined Solutions. Case 0 represents the scenario considering only a speed reduction without other emission reduction measures. The results show that by 2040, the total cumulative costs of both Combined Solutions are lower than Case 0. Specifically, the total cumulative cost of Combined Solution 1 is over \$5 million lower than that of Combined Solution 2. However, prior to 2035, the total cumulative cost of Combined Solution 1 consistently remains higher than that of Combined Solution 2. Therefore, if the vessel operates for 25 years, installing a carbon capture system early in the period could be considered to reduce annual costs. Conversely, if the owner plans to sell the vessel at 20 years of age, or if the vessel will not engage in ocean-going transport, just using biofuel without installing the CCS system can allow the ship to meet the CII rating requirements and reduce operating costs. Case 5, which uses renewable methanol and results in total cumulative costs by 2040 that are not only higher than Case 0, but also higher than the two Combined Solutions. This indicates that under current assumptions, using renewable methanol on operational vessels is not economically viable.

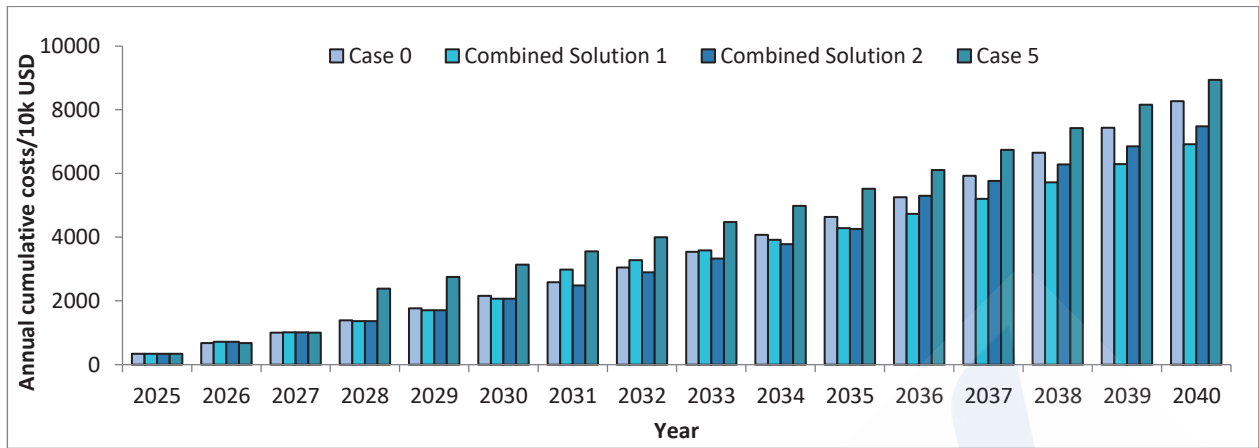


Fig. 7 Comparison of total cumulative costs for the target vessel within her operational lifecycle

5. EMISSION REDUCTION PLANS FOR MEDIUM/SMALL BULK CARRIERS IN OPERATION LIFECYCLE

Based on the analysis of retrofit schemes for the 10-year-old KAMSARMAX bulk carrier with a current CII rating of C, a feasible “step-by-step” retrofit solution has been developed, as illustrated in Fig. 8. The horizontal axis represents the retrofit measures applicable at each year in the process. The corresponding research methodology has also been validated on an 11-year-old ULTRAMAX bulker.

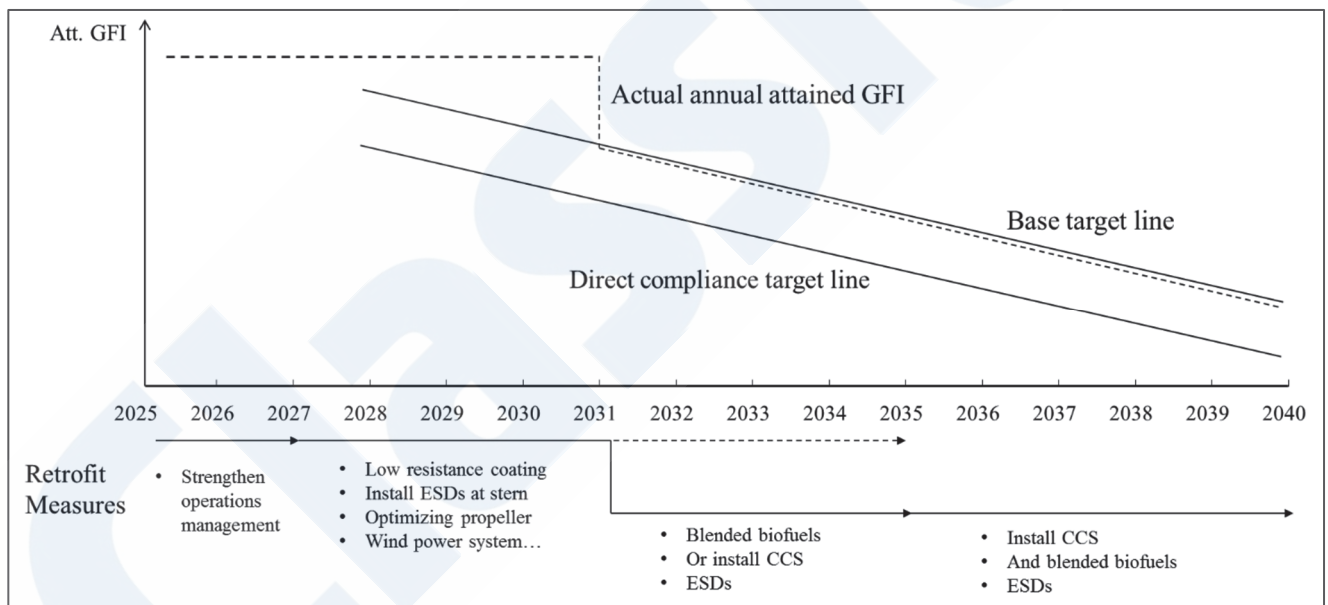


Fig. 8 ‘Gradual’ retrofit plan for medium/small bulk carriers within their operation lifecycle

6. CONCLUSIONS

Currently, no single measure can perfectly meet IMO decarbonization requirements both technically and commercially. This study also validates its approach based on numerous assumptions. Although many boundary conditions of these assumptions may change in the coming future, the “step-by-step” emission reduction approach can be extended to other existing Bulk carriers. The conclusions are found to be as follows:

- (1) Medium and small bulk carriers of a certain age can achieve lifecycle compliance without converting to a new source of propulsion.
- (2) Operational vessels should prioritize emission reduction technologies with identifiable effects and affordable costs.
- (3) Improving the “inherent” energy efficiency of the vessel outperforms adopting alternative clean energy sources.

REFERENCES

- 1) IMO, 2020. Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020: Safe, secure and efficient shipping on clean ocean, London: International Maritime Organization (IMO).
- 2) IMO. 2023 IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships [S]. MEPC.377(80), July, 2023.
- 3) Zhang Shuang. Overview of the IMO Net Zero Framework [R]. Dalian: Dalian Maritime University Shipping Development Research Institute, 2025.
- 4) Xu Wanying, Li Renke, Rao Guanglong, et al. Application Status and Prospects of Ship Energy Saving and Emission Reduction Technologies [J]. Ship Engineering, 2024(4): Front Insert 16-Front Insert 31.
- 5) Clarkson Research. Fuelling Transition: Tracking the Economic Impact of Emission Reductions & Fuel Changes [R].2025.3
- 6) DNV, Energy-Efficiency Measures AND Technologies: Key solutions and strategies for Maritime's decarbonization journey [R]. DNV:2025
- 7) Mu Yadi, Chen Weimin, Dong Guoxiang. Review of Research on Energy-Saving Technologies Based on Ship Hydrodynamic Performance [J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2022, 45(3): 14-19, 24.
- 8) Lu Mingjian, Dong Shengjie, Yan Xinping, et al. Overview of Ship Carbon Capture, Utilization, and Storage Technology [J].
- 9) Chou T, Kosmas V, Acciaro M, et al. A Comeback of Wind Power in Shipping: An Economic and Operational Review on the Wind-Assisted Ship Propulsion Technology. Sustainability. 2021; 13(4):1880.
- 10) Sun Miao, Cai Zhiyuan, Yu Long, et al. Research and Application Status of Ship Energy Efficiency Intelligent Management Systems [J]. Ship Engineering, 2025, 47(2): 13-22, 37.
- 11) ABS, Beyond the Horizon: Carbon neutral fuel pathways and transformational technologies [R]. ABS:2024

IMOの動向

— IMOでの主な審議内容・結果の紹介 —

開発本部 国際部

本稿においては、国際海事機関（IMO）における国際条約等の審議動向を紹介している。

前号では、2024年10月に開催された第82回海洋環境保護委員会（MEPC 82）及び2024年12月に開催された第109回海上安全委員会（MSC 109）の審議内容を紹介した。

前号以降、2025年4月7日から4月11日に第83回海洋環境保護委員会（MEPC 83）、2025年10月14日から10月17日に海洋環境保護委員会の臨時会合（MEPC ES.2）及び2025年6月18日から6月27日に第110回海上安全委員会（MSC 110）が開催された。これらの審議結果は本会ウェブサイトで紹介しているため、以下のリンクより確認されたい。

第83回海洋環境保護委員会（MEPC 83）	https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/tech_info/tech_img/T1354j.pdf
海洋環境保護委員会の臨時会合（MEPC ES.2）	https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/info_service/imo_and_iacs/MEPC%20ES2_sum.pdf
第110回海上安全委員会（MSC 110）	https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/tech_info/tech_img/T1363j.pdf

上記の審議結果を含む過去のIMO会合における審議結果も本会ウェブサイトで紹介している。必要に応じて適宜参照されたい。 : https://www.classnk.or.jp/hp/ja/info_service/imo_and_iacs/topics_imo.html

ClassNK 技報

No.12(2026 年(I))

編集: 石橋 公也

発行: 一般財団法人 日本海事協会 技術研究所
〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町 3 番 3 号

TEL: 03-5226-2737

E-mail: ri@classnk.or.jp

印刷: 大日本印刷株式会社
〒162-8001 東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 1 番 1 号
03-3266-2111

本誌に掲載された全ての記事内容は、一般財団法人 日本海事協会の許可なく転載・複写することはできません。
記事の転載をご希望の方は、上記までご連絡ください。

© 2026 ClassNK



一般財団法人 日本海事協会
技術研究所

〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町 3 番 3 号

Tel : 03-5226-2737

Fax : 03-5226-2736

E-mail : ri@classnk.or.jp

www.classnk.or.jp