

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(CCС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°C、2.0MPa(abs)程度の状態でタンクローリーや高圧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。

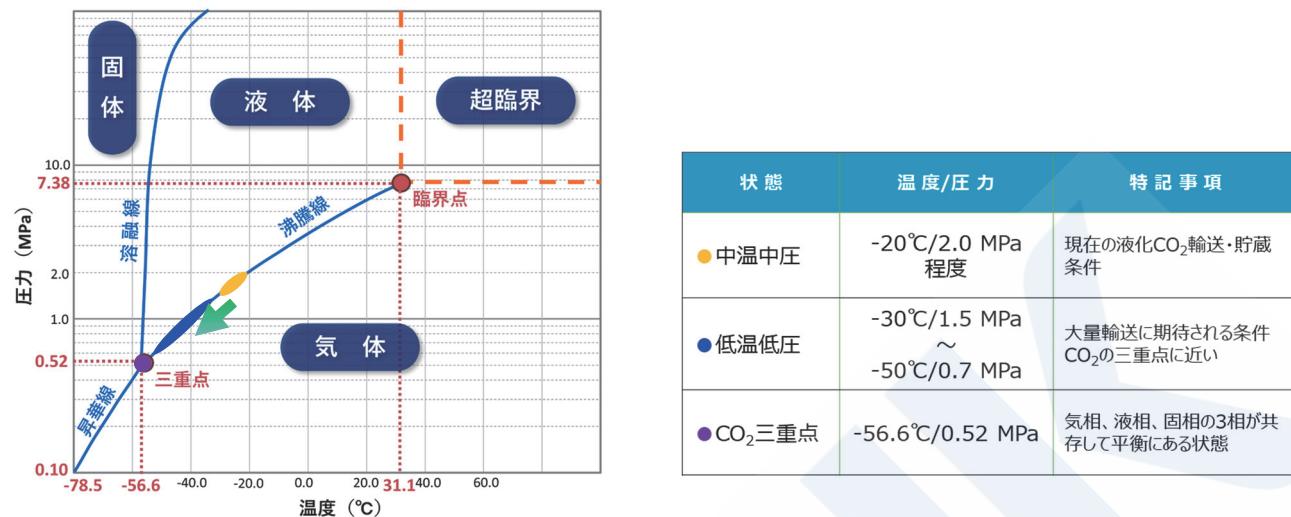
大規模な船舶輸送を実施する有効な手段として、液化CO₂の条件を低温低圧と称する-50°C、0.7MPa(abs)近傍とすることが挙げられる。液化CO₂タンクの設計圧力を低減できることで、CO₂タンクの大容量化や軽量化が可能となる。一隻当たりの貨物容量が増加されるため、必要船舶数や輸送回数の低減が可能となり、CO₂重量当たり輸送コストの低減が期待される。

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°C、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、低温低圧の液化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) サーキ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を確立することも重要な狙いとしている。

図1 CO₂状態図と輸送条件

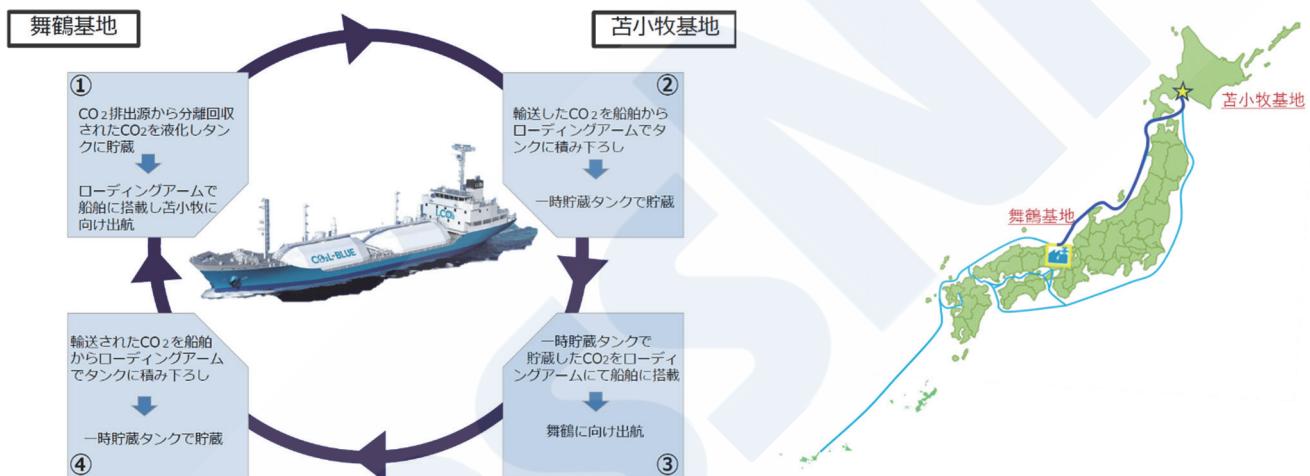
2.2 実施方法

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 舶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

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°C~-50°C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）が裸傭船し、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。



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°C～+45°C・1.9MPaG
主要荷役機器	ディープウェルポンプ 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

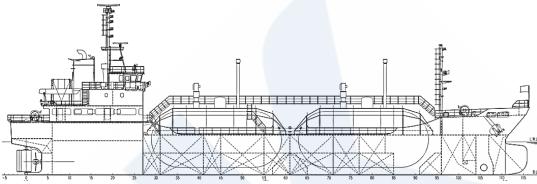


図3 えくすくうるの外観と概略配置図

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とも船舶に液化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°C、-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積（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(°C)	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°C域の荷役	舞鶴基地 L/A	422.9	-49.3	0.60
2025年4月	-35°C域の荷役	苫小牧基地 L/A	446.7	-36.0	1.04
2025年6月	大量積積	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掲示)

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搖の影響で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、航行中に含めて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°C、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°C、0.74MPaGとなり、それぞれの上昇速度は0.032°C/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°C、0.79MPaG、約73時間後の舞鶴港着岸時の温度、圧力は、-41.1°C、0.86MPaGとなり、それぞれの上昇速度は0.033°C/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°C/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搖が液化CO₂の気化(BOG

の増加)に及ぼす影響は小さいと推測された。

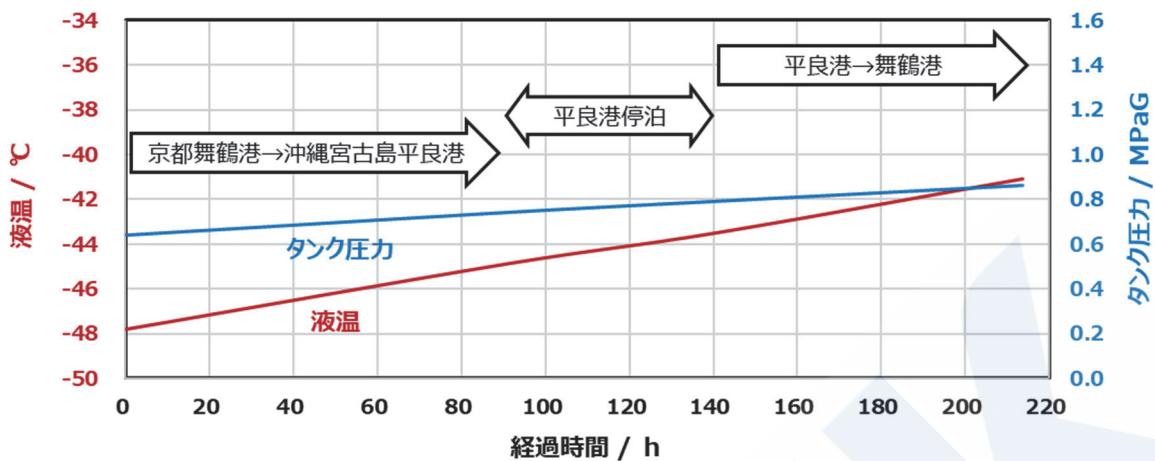


図5 液化CO₂輸送時のカーゴタンクの温度、圧力経時変化

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、「えくすぐうる」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を大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圧条件の液化CO₂を高流速液送の検証を実施する計画である。「えくすぐうる」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/carbon dioxide capture and storage/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）