

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。

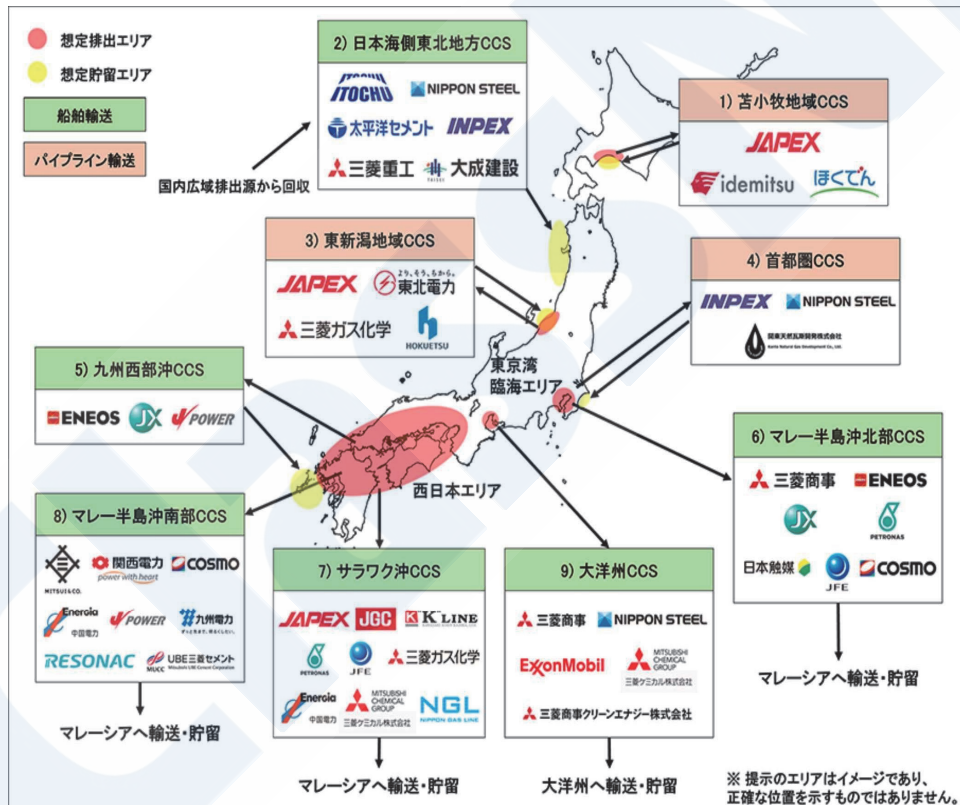


図1 JOGMEC 先進的CCS事業 https://www.jogmec.go.jp/ccs/advancedsupport_002.html（2024年6月時点）

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。

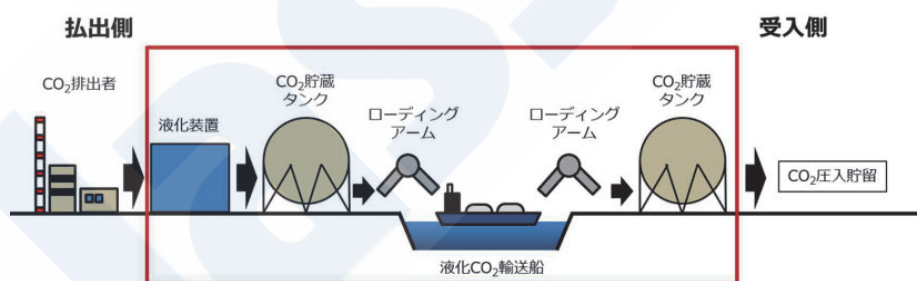


図2 LCO₂船舶輸送によるCCSの一般的な流れ／共通化ガイドライン P. 3

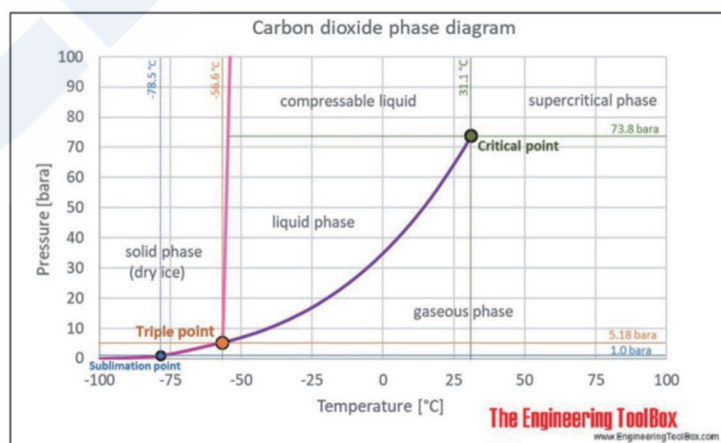


図3 LCO₂フェーズ表

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°C ・ 0.58MPaG ）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。

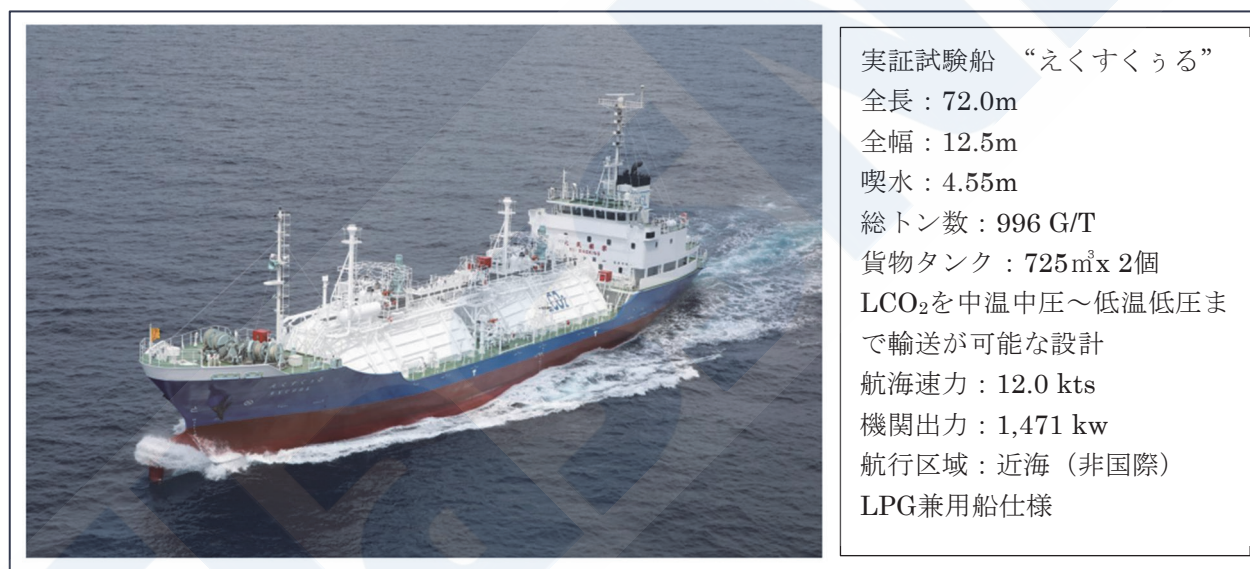


図6 えくすくうる^{*5} 日本ガスライン株式会社ホームページNEWS 2023.11 <https://ngl.co.jp/news/>

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*⁷Report

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压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 大型の低温低压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、低温低压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 日本ガスの最新の实証試験の報告では、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低温低圧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。そして低温低圧方式については世界初で実際に-50℃の純粋LCO₂と低温低圧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低温低圧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