特 集
CO_2, H_2の圧縮液化による輸送・運搬技術動向

CCS普及に向けた液化CO_2船舶輸送の技術課題

尾崎 雅彦

Technological Issues in Liquefied CO_2 Transportation by Ships for Social Implementation of CCS

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルに向け，CO_2排出量の大幅削減の取組が広い分野で本格化しつつある。CCS（Carbon dioxide Capture and Storage；CO_2回収貯留）は，化石資源を用いた発電や各種製造の過程で発生するCO_2を排ガスから分離するなどして回収し，地下や海底下深くの地層中に圧入・貯留することによって大気中にほとんど排出させない，脱炭素化への橋渡し的な温暖化対策技術である。日本でも2024年8月にいわゆるCCS事業法が成立して2030年までの事業開始が目指されている[1)]。CO_2排出源は広く分布するにもかかわらず，それぞれが近くに適切な貯留地を確保できるとは限らないため，CCS事業にはCO_2の輸送手段が必要で，回収～輸送～貯留の一貫したバリューチェーンを構築しなければならない。そのようななか，船舶によるCO_2の長距離・大量輸送への関心が近年急速に高まり，日本では低温・低圧方式（後述）による液化CO_2船舶輸送技術開発のための実証船「えくすくぅる」が2023年11月に竣工し[2)]，習熟運転を経て実証試験での運用が始まっている[3)]。またノルウェーでは，他国を含めた複数多種の排出源で回収したCO_2を北海に面した受入基地まで船舶で輸送して沖合海底下に貯留するNorthern Lightsプロジェクト[4)]が開始され，第一船「Northern Pioneer」が2024年11月に，第二船「Northern Pathfinder」が同年12月に竣工し引き渡された。

本稿は，CCS事業のための液化CO_2船舶輸送の草創期にあたり，CO_2船舶輸送システムについて概説し，今後の技術課題や留意点を整理してみるものである。

Masahiko OZAKI
1983年 東京大学大学院工学系研究科 工学博士
現 在 東京大学名誉教授
E-mail ozakim@k.u-tokyo.ac.jp

2025年7月1日受理

2. CO_2船舶輸送システム

2.1 CO_2船舶輸送の現状

CO_2は気体状態では比容積が大きく，貨物としての輸送や一時的な貯蔵での取り扱いが不便なため，液化あるいは固化によって体積を減らす必要がある。

固化CO_2については，近年日本では原油精製施設の減少などに伴い炭酸ガス原料の供給が夏季を中心に不足し，年間1万～2.5万トンがドライアイスとして韓国等から船で輸入されている。しかしドライアイスを格納する容器は密閉されず昇華したCO_2ガスを逃がすことが安全上の要件となるため，大気中へのCO_2排出量を削減する策であるCCSのためのCO_2輸送には不向きであるといえる。

液化CO_2については，数は少ないが食品・飲料品製造向けに比較的小型のCO_2専用輸送船（積載容量1250～1800 m^3，いずれもノルウェー船籍）が現存し20年以上の運用実績がある[5)]。日本でも，現在は廃船されているものの「あまぎ丸」（365 m^3，1986年竣工）が液化CO_2の運搬用に用いられていたとの記録がある。1990年代からは，CCSのための液化CO_2輸送船の概念設計や経済性検討が行われるようになり，パリ協定締結を潮目に，2万～8万m^3級の大型液化CO_2輸送船のAiP（Approval in Principle；基本設計承認）取得のプレス発表が相次ぐとともに，「えくすくぅる」や「Northern Pioneer」などの実船の竣工に至っている。

液化CO_2輸送船の設計に対しては，LNG船やLPG船などと同じくIMO（International Maritime Organization；国際海事機関）の「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（IGCコード）」[6)]が適用される。同コードには2007年1月の改正時にCO_2の運送・設備要件が追加されている。また船の運用に関してはSIGTTO（Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Ltd；国際ガスタンカー運航者および基地操業者協会）が液化CO_2の船舶輸送について業界向けの安全ガイダンス[7)]をまとめている。

以上のように，船舶を用いたCO_2輸送技術は基本的には実用段階にある。CCSの普及という視座からは，①大量輸送に適したシステムの構築，②種類の異なる回収源から

著作権法により無断での転載等は禁止されています

のCO_2の輸送，③輸送システムを構成する製品や装置類の大型化や需要急増を満たすサプライチェーンの構築，④輸送システムから排出されるCO_2の削減からゼロエミ化，⑤経済性向上，などに関して課題を解決していく必要がある。

2.2　船舶を用いた液化CO_2輸送システムの概要

船舶を用いたCO_2の大量輸送は，液化CO_2輸送船（LCO_2船）だけでなく，**図1**に示すような，回収されたCO_2ガスの港付近への圧送 → 前処理（脱水・不純物除去）→ 液化 → 一時貯蔵 → 荷積み → 海上輸送 → 荷揚げ → 一時貯蔵 → 港から貯留施設への移送，の一連の流れ全体で検討しなければならない。

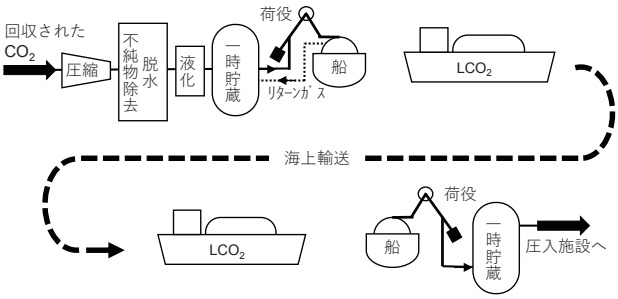

図1　船舶を用いた液化CO_2輸送システム

上図に示すような，受入基地まで船舶で長距離輸送して荷揚げした後，圧入井までCO_2をパイプライン等で移送する方式のほかに，一時貯蔵タンクを搭載した浮体式洋上施設に荷揚げして直下の海底下貯留層に圧入する方式や，輸送船が貯留海域に到着するたびに船から貯留層に向けて直接圧入する方式の技術構想も，日本からのもの[8]を含め各種提案されている。これらの方式では，浮体式洋上施設の沖合係留，輸送船から洋上施設への積み替え，船から直接圧入している間の船の位置保持，海面付近と海底を結ぶ海中導管（ライザー）など，必要な技術が海上輸送を超えて多岐に広がるので，本稿ではこれ以上の言及はしないものとするが，港から圧入井までの海底パイプラインの建設を省略することで経済性や社会受容性を向上できる可能性があり，重要な選択肢になりうる。

3.　CCS普及に向けた技術課題・留意点

3.1　大量輸送について

1か所から年間百万～数百万トンのCO_2を積み出すような液化CO_2船舶輸送システムの実現のためには，大流量化と大容量化のための技術開発や製品開発が鍵になる。システムにおいて，上流の回収から液化工程と下流の圧入工程は，保守点検などのための中断を除けば連続的なプロセスであり，大流量化は広い意味で輸送の大量化と同義であるが，狭い意味では圧縮機，液化装置，荷役用機器，弁・配管系などの最大能力の増強，さらに増数によって実現させなければならない。

一方，輸送船の航海や荷役は断続的なバッチ処理になるため，港や船上の液化CO_2貯蔵能力の増強（大容量化）が必要になる。後述するように液化CO_2のタンクは耐圧が要求されるので，圧力タンク単体の大型化のための技術開発，さらにタンクの増数によって，大容量化を実現させることが課題になる。なお輸送距離が同一の条件下で，輸送船の隻数を増やすことによって大容量化とのトレードオフが可能であるが，できるだけ大型の輸送船を用いるメリットとしては，①CO_2トン当たりのCAPEX（資本支出）の低減，②航海回数や荷役回数が減ることによるOPEX（運営費用）の低減，③必要な隻数を建造するために要する期間や船員数の低減などが考えられる。ただし回収・貯留量に見合わない過剰な大型化は設備利用率の低下を招き経済性を損なう。また，回収源によって港や航路の制約もある。プロジェクトに合った適正な大型船の運用計画が重要である。

3.2　貨物の温度・圧力条件について

大流量化や大容量化においては，貨物として取り扱う際の液化CO_2の温度・圧力条件が重要な検討項目になる。純粋なCO_2が，温度と圧力の組み合わせのもとでどのような状態であるかを示したのが，**図2**の相図である。

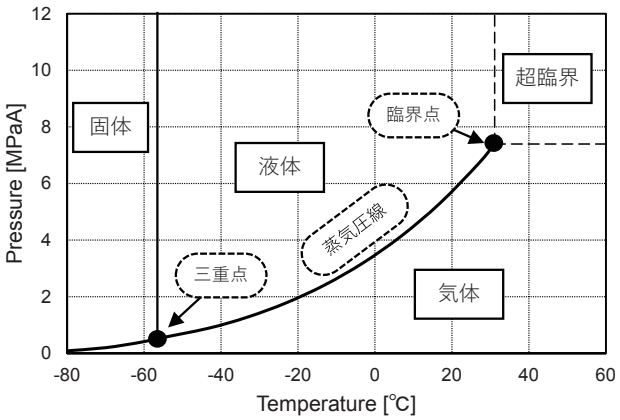

図2　純粋なCO_2の相図

臨界点の温度／圧力は31.0℃／7.38 MPaA，三重点は−56.6℃／0.52 MPaAであり，蒸気圧線（気液平衡線）のおもな通過点は，0℃／3.49 MPaA，−20℃／1.97 MPaA，−40℃／1.00 MPaAなどである。三重点の圧力が大気圧（0.10 MPaA）より高いことがCO_2の特徴の一つである。つまりCO_2は，大気圧下（常圧）では温度を下げていっても気相から固相へ変化するので，貨物として扱いやすい液体

著作権法により無断での転載等は禁止されています

状態を安定して維持するには少なくとも三重点の圧力以上が必要である。また，液化ガスを容器に入れて運搬ないし貯蔵する場合全般に共通することであるが，タンク内が液相のみで充満することは液の熱膨張に伴う内圧増大・破裂の危険があるため，必ず気相と併存させる必要があり，液面（気液境界面）付近は相図の蒸気圧線上の温度と圧力の組み合わせで推移する。外部から入熱があれば温度とともに圧力が上昇し，何らかの原因で減圧があれば温度も下がるわけである。一方，CO_2は気体と液体の相境界を越えると物性が大きく変化するので，フローアシュアランスの観点から配管内では気液二相流の発現を極力避けるのが通常である。

このようなCO_2の物性の特徴をふまえて，タンク内で生じる最大圧力に耐えられるよう，あるいは温度が降下しすぎてドライアイスが発生しないよう，また配管内で圧力損失等により気化が生じないよう，貨物タンクシステムの設計や荷役時・緊急時の操作手順，安全対策の検討が行われる。タンク内貨物の基準になる温度・圧力をどこに設定するかについては，「低温・低圧」「中温・中圧」「常温・昇圧」の3種類に区分するのが一般的になってきた。**表1**にそれぞれの特徴を比較して示す（ただし温度・圧力条件の範囲の境界はまだ明確には定まっていない）。利点・課題については，ISOのCCSに関する国際標準委員会TC265が開発した技術報告書[9]，欧州委員会の諮問組織ZEP（Zero Emissions Platform）等による報告書[10]などを参考におもな内容のみを記した。

表1　貨物の温度・圧力条件による区分（例）と特徴

方式	低温・低圧	中温・中圧	常温・昇圧
温度	−50〜−40°C	−30〜−20°C	0°C以上
圧力	0.7〜1.0 MPaA	1.4〜2.0 MPaA	3.5 MPaA以上
利点	• 設計圧が低いので1基のタンク容積を大きくできる • 他に比べ液化CO_2の密度が高いので同じ容積でより多く積める	• 陸上や小型CO_2輸送船で多くの実績がある • 操作中のドライアイス生成リスクは高くない	• 他に比べ液化に要する電力量が低い • 温度に対するタンク鋼材への要求が厳しくない • 断熱が不要もしくは低性能でよい
課題	• 三重点に近いのでドライアイス生成リスクがある • 液化に要する電力量や設備コストが比較的大きい • 低い設計温度に適合した高強度のタンク鋼材が必要	• タンクの最大容積が限定的 • 低温・低圧方式と同規模の貯蔵をするのにより広いタンク用地が必要 • 低い設計温度に適合した高強度のタンク鋼材が必要	• タンクの最大容積がかなり限定的 • 貨物量当たりのタンク鋼材重量が大きくなる • 同じ量のCO_2を輸送するのに他に比べて大きい船にする必要がある

現状の商業利用においては，小規模であることや陸上における流通（トラック輸送やタンク貯蔵等）との整合もあって，液化CO_2の船舶輸送は−20°C／2.0 MPaA程度の中温・中圧で行われている。Northern Lightsプロジェクトも，現フェーズでは中温・中圧での荷扱いになるようである。

一方，大量で長距離の船舶輸送では，液化を含めたシステム全体の経済性評価から低温・低圧が推奨されており[11]など，Northern Lightsプロジェクトの見通しでも1.5万ないし2万m^3以上の輸送船は低温・低圧が推奨されている[4]。また，日本の先進的CCS事業[1]に採択されたプロジェクトにおいても，低温・低圧が採用され，大型の液化CO_2輸送船とそれに対応する一時貯蔵タンク群の検討が行われている。

3.3　CO_2流中の不純物の影響について

実用段階のCCSにおいては，輸送や貯留で取り扱われるCO_2が不純物を含まない純粋なCO_2であることは現実的でない。漏洩時の環境保全の観点からは，ロンドン条約の1996年議定書で，きわめて高い割合でCO_2から構成されている場合に限り海底下への処分を検討することができるとされ，当該CO_2を含んだガス（CO_2流とよばれる）には，その起源となる物質ならびに利用される回収工程および隔離工程から生ずる付随的な関連物質が含まれうる，と併記されている。「きわめて高い割合」については，ISOのパイプライン輸送に関する規格[12]でCO_2濃度95％以上が目安とされ，日本の海洋汚染防止法の施行令では99％以上と定められている。

CO_2流中の不純物は，熱力学特性や化学反応特性を変えるため，技術や経済性にも影響を及ぼす。分離回収や液化のために必要な不純物除去は前提だとしても，可能性として，排出源の原燃料やプロセスに用いる媒体（吸収液や燃焼用の空気など）に由来する成分，稼働開始時や休止後の再開時あるいは開放点検後にパージしきれなかった空気や窒素や水分などが貨物に混在し，輸送システム全体さらには圧入施設や貯留層まで持ち込まれうる。欧州ではCCS普及に向けて，排出源の多様化（バイオ発電，ごみ焼却発電，セメント工場など）や，パイプライン網・船舶を用いることで輸送ルートが特定の回収源と貯留施設の間に限定されないことが想定されるので，不純物の種類や組み合わせ，許容濃度に関する議論が熱を帯びているのが現状である。

不純物によるリスクは，①漏洩時の安全衛生（大気中や海水中で毒性を有するもの），②腐食（CO_2と水分の反応による炭酸やSO_X, NO_X, H_2S, O_2などによる酸の形成），③固体の形成（氷，ハイドレート），④熱力学特性の変化（N_2，H_2，CH_4，Arなどの非凝縮性成分の影響），⑤水溶性成分によるCO_2からの水分析出，⑥金属材料の劣化要因（水素脆化，H_2Sによる応力割れ，水銀によるアマルガム化）などがあげられている[9, 12, 13, 14]。

Northern Lightsプロジェクトにおいては，同事業に持ち込まれる回収CO_2に限定されるとの注釈付きで，液化CO_2の要求品質仕様が公開されており，2024年2月にその

著作権法により無断での転載等は禁止されています

当初版を改正したと公表・説明があった[15]。もともと厳しい不純物濃度の上限値が盛り込まれていたが，最新の研究成果を取り込んだこと，より多様な排出者を対象にしたこと，船と陸上タンク間のリターンガスによる異種発生源からの不純物の複合を考慮に入れたこと，などを改正の理由としており，対象成分が増えるとともに，これまで明示されていなかったN_2，CH_4，Arについての数値が示され，NO_X，Hgの上限値が大幅に引き下げられた。おそらく世界中のCCS関係者が刮目したと思われるが，汎用性を有するわけではない。荷扱いが中温・中圧であり，低温・低圧でもそのまま適用できるかは不明瞭である。

当面は，回収源を特定し不純物の成分を限定・明確化する，厳しめの仕様にする，設計段階で不純物に関する最新情報を得る，運用中の監視を強化するなどが現実的な対策であろう。多数の不純物成分についてppmレベルの濃度測定を短時間で行う方法の実用化と標準化も重要課題である。

3.4 CO_2輸送船から排出されるCO_2の削減について

IMOは，国際海運の船舶から排出される温室効果ガスを2050年に半減する目標（2018年GHG削減戦略）を2050年実質ゼロに強化した[16]。従来の目標に対しては，船舶の稼働寿命も考慮に入れつつ，まずは重油焚きからLNG焚きへの転換，低速運航，風力アシスト等で達成を図るロードマップが描かれていたが，メタノール・アンモニア・水素等の次世代燃料への転換時期を早めざるをえない状況になったといえる。

CCS事業に用いる液化CO_2輸送船についても，用途に照らせば率先して低炭素化・脱炭素化を図っていく必要がある。ちなみにNorthern Lightsプロジェクトphase 1向けに建造されたNorthern Pioneerほかは，主燃料にLNGを用い，ローターセイル（風力推進補助装置）や空気潤滑システム（気泡による船体の摩擦抵抗低減技術）といった低炭素技術を採用している。しかし，将来の脱炭素化に向けた次世代燃料については需給見通しに不確実性があるため，新型船舶や舶用機器の市場投入あるいは設備投資の時期を判断することは，容易でないのが実情だろう。カーボンニュートラルに関する政策間のロードマップの共有，規制や支援制度の工夫，国際連携などによって，イノベーションの速度を緩めないことが肝要であると思われる。

4. おわりに

日本では，国内に大規模なCO_2貯留地を多数開発することは難しいと考えられるため，CO_2回収源から近距離でない海域に確保される貯留適地への輸送，あるいは海外での越境CCSの可能性を考えると，CCSを社会実装するうえでCO_2船舶輸送は重要な手段になる。大規模回収源からの経済的な長距離輸送には，大型の液化CO_2輸送船の開発が必要であることは前述した。一方で，国内に分散して所在するCO_2排出源は，おおむね臨海地域に立地されるものの，1か所での回収量が少なかったり変動したり，付近に大型船舶が入港可能な施設が無かったり，大容量の陸上一時貯蔵タンク群の建設が困難だったりする場合は，比較的小型の船舶での積み出しも現実的である。この事情は，LNGやLPGを大型の外航船で輸入し，一次基地で内航船やタンクローリーに積み替えて需要家の近くの二次基地に分配している実情に照らすと分かりやすい。したがって，Northern Lightsプロジェクトのような受入基地をハブとする輸送ネットワーク（ハブ＆クラスター）とは別に，出荷中継基地をハブとする事業モデルも有望だろう。

船舶によるCO_2の大量・長距離輸送技術が確立することで，多様な規模や所在地のCO_2排出源と貯留地のマッチングが可能となる。液化CO_2船舶輸送が早期のCO_2排出量大幅削減に貢献することを期待している。

参考文献

1) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 (https://www.jogmec.go.jp/ccs/advancedsupport_002.html)
2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101705.html)
3) 勝田悦功：日本船舶海洋工学会誌 第122号(2025)
4) Northern Lights JV(https://norlights.com/)
5) DNV：Vessel Register for DNV
6) IMO：International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk(IGC Code)
7) SIGTTO：Carbon Dioxide Cargo on Gas Carriers, Witherby Publishing, Scotland, UK(2024)
8) 環境省：環境配慮型CCS実証事業 (https://www.env.go.jp/content/900440487.pdf)
9) ISO：TR27929 Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage - Transportation of CO_2 by ship(2024)
10) CCSA /ZEP:Achieving a European market for CO_2 transport by ship, 28-29 (2024)
11) S. Roussanaly, *et al*：*Energies*, **14**(18), (2021)
12) ISO：ISO27913 Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage-Pipeline transportation systems(2024)
13) ZEP/CCSA：Network Technology Guidance for CO_2 transportation by ship (2022)
14) 神吉恭平ほか：日本製鉄技報 第422号 10-16(2023)
15) Northern Lights JV:Webinar (https://www.youtube.com/watch?v=fKaWTbgMmY0)
16) 国土交通省 (https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000289.html)

著作権法により無断での転載等は禁止されています