

# カーボンニュートラル社会の実現に向けた 液化 CO<sub>2</sub> 輸送船及び船上 CO<sub>2</sub> 回収装置の開発

Development of Liquefied CO<sub>2</sub> Carriers and Onboard CO<sub>2</sub> Capture Equipment  
to Realize a Carbon Neutral Society



田中 太一\*<sup>1</sup>  
Taichi Tanaka

寺田 伸\*<sup>2</sup>  
Shin Terada

田中 大士\*<sup>2</sup>  
Hiroshi Tanaka

川又 伸一\*<sup>3</sup>  
Shinichi Kawamata

安部 和也\*<sup>3</sup>  
Kazuya Abe

渡部 亨尚\*<sup>3</sup>  
Michihisa Watanabe

三菱造船株式会社(以下、当社)では、CCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)バリューチェーン構築におけるCO<sub>2</sub>輸送手段としての液化CO<sub>2</sub>輸送船と、船舶から排出されるCO<sub>2</sub>を削減する船上CO<sub>2</sub>回収装置の開発に取り組んでいる。液化CO<sub>2</sub>輸送船の開発では、CCUSバリューチェーン全体最適の観点からタンクシステムの材料選定や構造設計、オペレーションプロセスの構築を行い、今後は世界初となる実証船を建造することで技術を確立する。船上CO<sub>2</sub>回収装置では2021年度に実施した回収装置のデモプラント実証の結果に基づき、製品化に向けて更なる開発を継続する。これらの活動を通じ、カーボンニュートラル社会の実現を目指す事業者にとって最適なトータルソリューションを提供していく。

## 1. はじめに

温室効果ガス排出量実質ゼロとなるカーボンニュートラル社会実現に向け、三菱重工グループは“エナジートランジション”に向けて様々な取り組みをしている。既存技術の低炭素化、水素やアンモニアといった新エネルギーの活用と並び、CO<sub>2</sub>エコシステムの構築を目指し、CO<sub>2</sub>回収のみならず、CO<sub>2</sub>を貯留もしくは転換利用するCCUSバリューチェーンに係る技術の開発に取り組んでいる。カーボンニュートラル社会を実現するのに必要なCO<sub>2</sub>の回収量は2050年には年間43~130億トンにも達すると予想しており、この膨大なCO<sub>2</sub>を貯留もしくは転換利用される場所まで安価に輸送する手段として、液化CO<sub>2</sub>輸送船の需要の拡大を見込んでいる。本報では特にこの液化CO<sub>2</sub>輸送船に焦点をあて、これまでの技術開発状況や今後の展望について紹介する。

## 2. CO<sub>2</sub>の特徴と輸送船に求められる技術要件

CO<sub>2</sub>は常温・大気圧では空気よりやや重い、無色無臭の気体である。この海上輸送に際しては、LNG(Liquefied Natural Gas: 液化天然ガス)やLPG(Liquefied Petroleum Gas: 液化石油ガス)と同様に液化して体積を減少させることが望ましく、液化CO<sub>2</sub>の体積は気体の約1/500となる。ここで、CO<sub>2</sub>の状態図を図1に示すとおり、CO<sub>2</sub>を液体の状態にするためには低温状態にするとともに、更に圧力を0.52MPa-a以上にしなければならない。従って、海上輸送される液化CO<sub>2</sub>の状態としては、温度-55°Cから-20°C程度、圧力1.0MPa-a弱から2.0MPa-a程度の範囲内で考えるのが一般的である。このため、液化CO<sub>2</sub>を格納するカーゴタンクの材料には高強度で低温特性に優れた材料が適しており、タンク構造様式としては一般に、IGCコード(正式名称: The International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk)で規定される独立型タンク様式のうち、圧力容器の規格に準ずるType-Cが適用される。

\*1 三菱造船株式会社 事業戦略推進室 グループ長  
\*3 三菱造船株式会社 事業戦略推進室

\*2 三菱造船株式会社 事業戦略推進室 主席部員

また、輸送、荷役などのオペレーションにおいて、液化 CO<sub>2</sub> の圧力・温度が図1に示す三重点を下回った場合にはドライアイスを生成し、配管の閉塞等、オペレーションに不具合を起こす恐れがある。このため、前述した輸送される液化 CO<sub>2</sub> の圧力・温度条件範囲内においては、様々な要素を考慮して実際に設計する条件を選定する必要がある。

例えば、一般にオペレーション中のドライアイス生成リスクを軽減するためには、三重点に対して十分なマージンを持たせるべく、なるべく高い圧力で輸送することが望ましいが、この場合、カーゴタンクは相対的に高い圧力に耐える必要があり、構造強度的な観点からその大型化には限界がある。一方、輸送効率向上のためには圧力条件を極力低く抑え、カーゴタンクの容積を相対的に大きくすることが望まれるが、輸送、荷役中の液化 CO<sub>2</sub> はより三重点に近い条件となるため、各オペレーションにおいては、三重点を下回ってドライアイスが生成されないよう注意深く対応することが求められる。さらに、一般にこの三重点は CO<sub>2</sub> の性状（不純物組成）の影響を受けるため、純度の高い食品用 CO<sub>2</sub> と CCUS としてプラント等から回収された CO<sub>2</sub> とでは性状が異なることへも考慮が必要となる。

また、液化 CO<sub>2</sub> の密度は 1.1t/m<sup>3</sup> から 1.2t/m<sup>3</sup> 程度と他の液化ガスに比較して大きく、これを積載する輸送船の喫水は深くなる傾向があるので、既存ターミナルとの整合にも考慮した船型の開発が必要となるという側面もある。

このように液化 CO<sub>2</sub> 輸送船の開発においては、貨物である液化 CO<sub>2</sub> の条件、さらに言えば CCUS バリューチェーン全体を通して最適な船舶ならびに貨物の条件を選定し、それに相応しいカーゴタンクの材料や構造様式を考え、ドライアイス生成リスクを回避または軽減するプロセス設計やオペレーションプロセスの策定を行う必要がある。

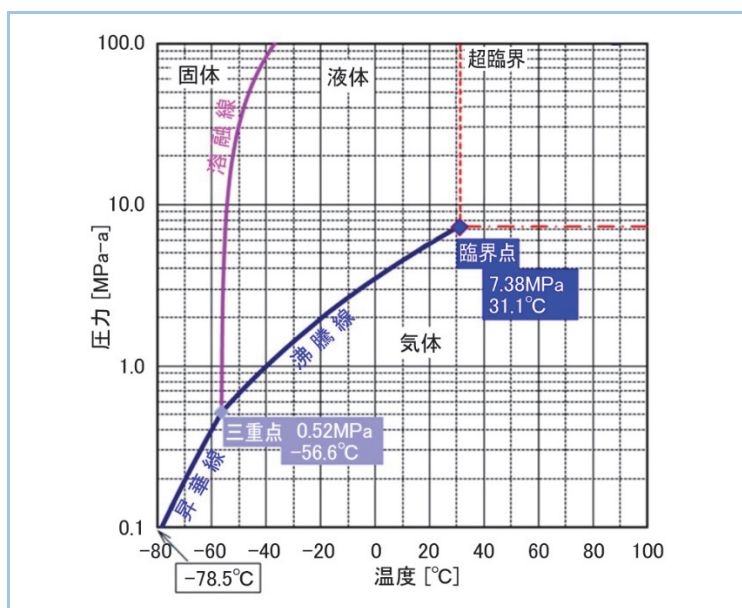


図1 CO<sub>2</sub> 状態図

CO<sub>2</sub> を液体状態にするには、低温且つ圧力を高い状態に保つ必要がある

### 3. 液化 CO<sub>2</sub> 輸送船の技術開発状況

これまでも当社は、液化ガス輸送船(LNG 輸送船や LPG 輸送船)の建造で培った高度な構造解析技術、材料評価技術、ガスハンドリング技術などに関する知見を生かし、2004 年には IEA (International Energy Agency) の Greenhouse R&D プログラムに参加して CO<sub>2</sub> の船舶輸送の検討を行うなど、時代の先を見越して液化 CO<sub>2</sub> 輸送船の検討を進めてきた。特に近年のカーボンニュートラル社会実現へ向けた CCUS バリューチェーンの期待の高まりを受け、液化 CO<sub>2</sub> 輸送船を早期に市場に投入すべく、各種技術開発を加速しているところである。以下にはその一例としてカーゴタンクシステムおよびカーゴハンドリングプロセスの開発状況を紹介する。

### 3.1 カーゴタンクシステムの開発

前述したとおり、液化CO<sub>2</sub>輸送船においては貨物であるCO<sub>2</sub>を低温かつ高い圧力状態に維持するため、カーゴタンクシステムには、強度が高く、低温特性に優れた材料が適用される。材料の候補としては、調質鋼、低温鋼、Ni鋼などが考えられるが、輸送される液化CO<sub>2</sub>や船舶に求められる条件により、安全性、経済性の観点から最適な材料の選択は異なってくる。当社ではこれまで、液化ガス船輸送船の開発を通じて得られた低温特性に優れた材料の知見、あるいは大型コンテナ運搬船の開発を通じて得られた高強度材料に関する知見など、船舶用の鋼材に関する豊富で広範な知見を有しており、液化CO<sub>2</sub>輸送船の開発においても、お客様や市場により異なる様々なニーズに対し、迅速かつ的確に最適なカーゴタンクシステムの材料選定を行っている。

また、液化CO<sub>2</sub>輸送船のカーゴタンクとして一般に採用される、IGCコード独立型タンク Type-Cの構造様式は小型のLPG輸送船などで十分実績のあるものであるが、これを液化CO<sub>2</sub>輸送船に対して採用するにあたっては、貨物である液体の比重が大きくなる(LPGに対しては2倍以上)影響を適切に考慮する必要がある。これに対し当社では、タンク支持構造を含めた詳細な構造強度数値解析を実施することで、カーゴタンクシステム全体の信頼性を確保している(図2)。

更に液体貨物の船舶輸送において十分な考慮が必要となる項目の一つとして、スロッシング対策が挙げられる。スロッシングとは、タンクなど内部に流体を格納する容器が外力により揺らされた際、内部の流体が大きく揺動する現象のことで、液体貨物を輸送する船舶では特に船体の動揺周期とタンク内の自由表面の固有周期が同調したときにスロッシングによる流体荷重が大きくなり、タンク内構造や艤装品の損傷が問題になることがある。このスロッシング発生時に生じる流体荷重(圧力)においても液体の比重が影響する為、当社ではCFD(Computational Fluid Dynamics)計算による詳細な数値シミュレーションを実施している(図3)。ここではまず様々な海象条件下で船舶の動揺を推定し、更にその船舶の動揺により励起されるカーゴタンク内のスロッシング挙動をCFD計算にて予測している。これによりタンク内の構造や艤装品に作用する液化CO<sub>2</sub>の圧力を適切に評価し、必要な対策を講じている。

上記は一例であるが、その他にも低温貨物による熱応力の影響を適切に評価するなどの包括的な技術検証を通じ、当社の開発した液化CO<sub>2</sub>輸送船カーゴタンクシステムは、船級協会ビューロベリタス(Bureau Veritas)から設計基本承認(Approval in Principle:AIP)を取得している。

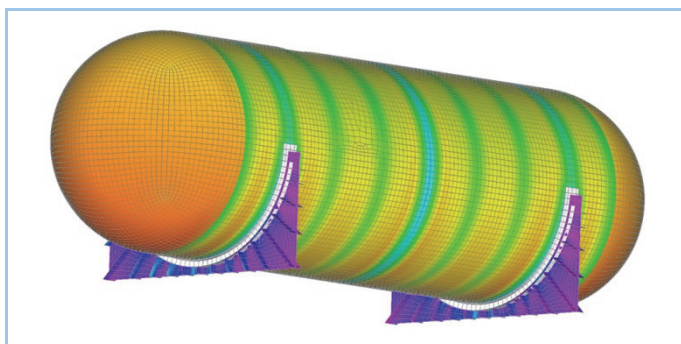


図2 液化CO<sub>2</sub>カーゴタンクの構造強度解析例  
タンク支持構造を含めた詳細な解析を実施し信頼性を確保している

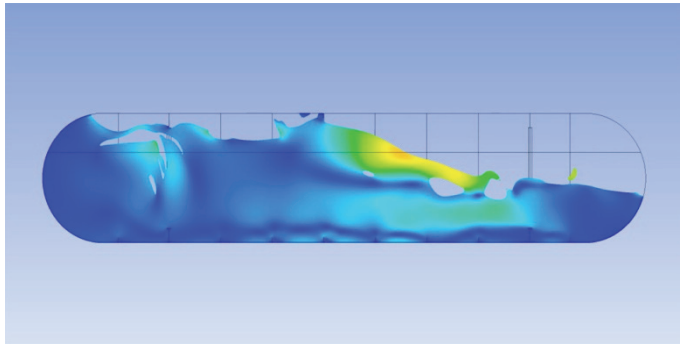


図3 液化 CO<sub>2</sub>カーゴタンクの CFD スロッシングシミュレーション  
船舶の動揺によるスロッシングの挙動を予測し、発生する圧力を評価する

### 3.2 カーゴハンドリングプロセスの開発

2章で説明したように、液化 CO<sub>2</sub> はその状態図における三重点に対し、一定のマージンを持たせた条件で船舶輸送される。但し輸送中や荷役中の液化 CO<sub>2</sub> はカーゴタンク、配管系統内で様々な条件(圧力及び温度)の変化にさらされることになる為、各種のオペレーションプロセスにおいては、状態の変化を適切に予想した上で、なおも三重点を下回ることなく輸送、荷役出来るような配慮が必要となる。

これに対し当社では各種オペレーションにおいてプロセス動的挙動シミュレーションを実施し、液化 CO<sub>2</sub> の圧力・温度が三重点を下回るリスクを抽出するとともにその対策を検討している。一例として、汎用プロセスシミュレーター ASPEN PLUS DYNAMICS を用いて実施したシミュレーションにより得られたカーゴ揚荷時の各種データの変位例を図4示す。このシミュレーションモデルは、タンク、配管、バルブ、カーゴポンプ、蒸発器といった要素から構成され、それぞれの要素がもつ特性を適切に考慮したものとなっている。

このように、各種オペレーションにおいて船体各部に発生する液化 CO<sub>2</sub> の挙動を詳細に予測し、プロセス設計やハンドリングオペレーションへ織り込む検討を引き続き実施しているところである。

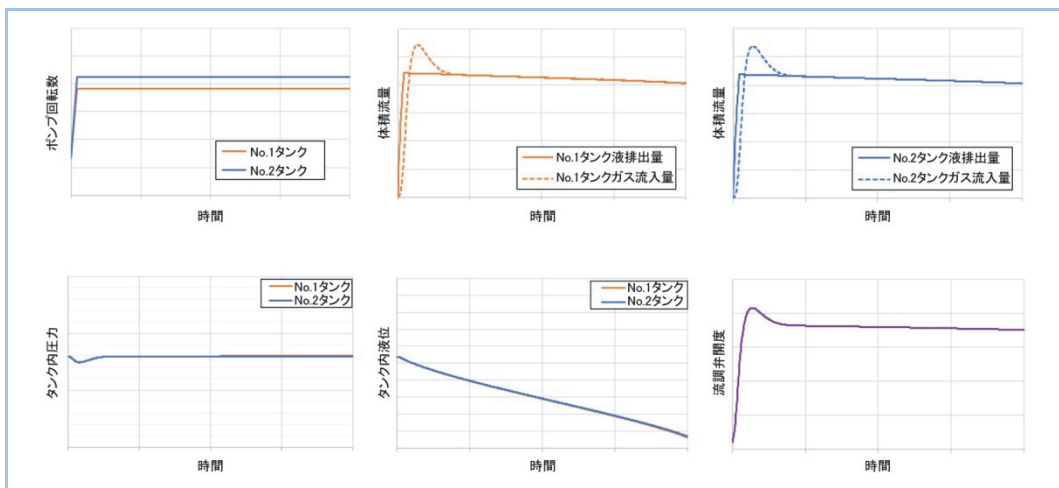


図4 液化 CO<sub>2</sub> 揚荷時の各種データ変位例  
オペレーションにおける圧力等の変化を予測し、ドライアイス生成のリスクを回避する

## 4. NEDO 向け液化 CO<sub>2</sub> 輸送実証事業での取り組み

当社は、NEDO の“CCUS 研究開発・実証関連事業／苫小牧における CCUS 大規模実証試験／CO<sub>2</sub> 輸送に関する実証試験”で活用する液化 CO<sub>2</sub> 輸送の実証試験船(本船)の建造契約を、内・外航船の船舶管理などを手掛ける山友汽船株式会社との間で締結した。本船の主要目を表1に、外観イメージを図5に示す。

NEDO 事業では、CO<sub>2</sub>の大容量・長距離輸送を実現するために、液化 CO<sub>2</sub>の船舶輸送技術の確立を目的としており、NEDO 事業の業務受託者の1者である一般財団法人エンジニアリング協会が、山友汽船株式会社から本船を備船し、同事業において液化 CO<sub>2</sub>を輸送する。

本船は、世界でも先行した CCS (CO<sub>2</sub>の回収・貯留)プロジェクトであるノルウェーの“ノーザンライツ・プロジェクト”向けに建造される液化 CO<sub>2</sub> 輸送船に先立って、2023 年度後半に竣工される。CCUS 向け液化 CO<sub>2</sub> 輸送船としてはこの日本の実証船が世界第一号となる見込みである。

当社は、これまで液化ガス輸送船建造で培った知見を活用し、本船に搭載されるカーゴタンクシステムを含む本船の設計から建造までを一貫して担う。

本船の開発においては、2章にて述べた技術課題、特に食品とは異なり CCS ならではの不純物を含む CO<sub>2</sub> 成分に対応したドライアイス生成の回避または生成に即応するカーゴマネジメントプロセスを開発し、本船に搭載する。その後の実証期間中は、その効果を検証することで、CO<sub>2</sub> 大容量・長距離輸送技術を世界に先駆けて確立することを目指している。

表1 NEDO 向け液化 CO<sub>2</sub> 輸送実証船主要目

船籍	日本
船長	72.0 m
船幅	12.5 m
喫水	4.55 m
カーゴタンク容積	1,450 m <sup>3</sup>



図5 NEDO 向け液化 CO<sub>2</sub> 輸送実証船外観イメージ

実証事業を通じ CO<sub>2</sub> 大容量・長距離輸送技術を世界に先駆けて確立する

## 5. 船上 CO<sub>2</sub> 回収装置の開発

また、前述した三菱重工グループが目指す CO<sub>2</sub> エコシステム構築の一環として当社では、船舶が排出する CO<sub>2</sub> を削減すべく船上 CO<sub>2</sub> 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、日本海事協会と共同で実施した、船上 CO<sub>2</sub> 回収装置の実証プロジェクト(“CC-Ocean (Carbon Capture on the Ocean)”<sup>※1</sup>)について紹介する。

本プロジェクトは洋上における CO<sub>2</sub> 回収技術の検証と船用化要件の整理のため、世界に先駆けて CO<sub>2</sub> 回収小型デモプラント(以下、デモプラント)を川崎汽船株式会社運航の石炭運搬船“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に於ける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 CO<sub>2</sub> 回収装置をベースに船上搭載へ転用したものである。デモプラントのイメージ図を図6に示す。

本実証試験において、CO<sub>2</sub>回収量、CO<sub>2</sub>回収率、回収CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>回収性能に及ぼす影響、排ガスがCO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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船用システムとしての最適化検討、船内貯蔵されたCO<sub>2</sub>の陸上への払い出しの検討などを行い船上CO<sub>2</sub>回収装置の製品化へ向けた取組みをすすめる。

※1 本プロジェクトは、国土交通省海事局の補助事業である“海洋資源開発関連技術高度化研究開発事業”の支援を受けて実施している。



図6 搭載したCO<sub>2</sub>回収装置小型デモプラントのイメージ図  
世界に先駆けて船上でのCO<sub>2</sub>回収を実証し性能確認を行った

## 6. まとめと今後の展望

カーボンニュートラル社会実現にむけて、液化CO<sub>2</sub>輸送船が果たす役割と、今後の需要について述べ、液化CO<sub>2</sub>輸送船に求められる技術要素や、その開発の取組、更には船舶からのCO<sub>2</sub>回収技術の取組みについて紹介した。

今後は世界初となるCCUS向け液化CO<sub>2</sub>輸送船の設計・建造の機会を活かし、CO<sub>2</sub>ハンドリング技術を世界に先駆けて開発・保有し、三菱重工グループの陸上製品とも連携することで、CCUSバリューチェーン全体を俯瞰して最適な輸送条件を選定するなど、事業者にとって最適なトータルソリューションを提供していく。

三菱重工グループが推進するエナジートランジション戦略の一翼を担う当社では、2022年2月1日付けで“海洋脱炭素グループ”を新設した。本組織に技術開発、市場調査、事業戦略の立案から実行までの機能を集約させることで、長い歴史を持つ造船事業で培った高度な技術を活用し、脱炭素分野の技術開発と新事業創出を加速させ、海洋分野のカーボンニュートラル社会実現に向けた世界の動向や市場ニーズに即応することを目指していく。