

水素をはこぶ – 液化水素運搬船の開発 –

Hydrogen Transportation – Development of Liquefied Hydrogen Carrier



村岸	治①**	Osamu Muragishi
稲津	晶平②	Shohei Inatsu
浦口	良介③	Ryosuke Uraguchi
山城	一藤④	Kazuto Yamashiro
今井	達也⑤**	Tatsuya Imai
大橋	徹也⑥	Tetsuya Ohashi
下垣	貴志⑦	Takashi Shimogaki
吉田	巧⑧	Takumi Yoshida
河本	孝⑨	Takashi Koumoto

水素サプライチェーンにおいて、水素を大量に輸送するための液化水素運搬船を開発・建造した。液化水素用大型タンクは真空断熱方式を採用し、世界最高レベルの断熱性能の実現に取り組んでいる。2020年度より日本と豪州間の輸送航行実証を行い、安全性を確保した大量輸送を目指す。

Kawasaki has developed and built a liquefied hydrogen carrier to transport a large volume of hydrogen in the hydrogen energy supply chain. The carrier's large-sized tank for liquefied hydrogen employs a vacuum insulation system and will have come to realize the world's best level of thermal insulation performance. Through the demonstration of marine transportation between Japan and Australia starting in fiscal 2020, we aim to achieve large-volume transportation while ensuring safety.

まえがき

水素サプライチェーンの実現のため、海外で豊富な資源から製造された水素を安全かつ効率的に日本へ大量輸送することが水素流通に不可欠な基礎基盤となる。

1 背景

水素の輸送形態には高圧ガスや液体などがある。高圧ガスは燃料電池車用の水素ステーションなどに、比較的少量を運ぶ場合に用いられる。圧縮した状態の水素ガスを安全に貯槽する上で高圧化には限度があるものの、需要サイトでは比較的簡単な装置と操作で利用できるというメリットがある。一方、大量輸送には液体が有利である。水素は液化すると大気圧で体積が気体の800分の1と非常にコンパクトになる。しかし、液化水素はLNGよりも低い-253度となり、貯蔵や取扱いには特殊な装置や対策が必要となる。そのため、液化水素の海上輸送はこれまでほとんど行われていなかった。また水素を輸送する方法として、アンモニアやメチルシクロヘキサンなどの有機化合物に変換する手法も研究や検討がなされている。化合物の状態であれば極低温での取扱いは不要になるが、毒物としての取扱いや水素を取り出す際にエネルギーが必要になるなどの課題がある。

当社はこれまでに、水素を陸上輸送するための高圧ガス水素輸送トレーラや液化水素輸送コンテナを開発・実用化

している。トレーラは45MPaの耐圧複合容器を採用して、燃料電池車72台分となる360kgの高圧水素ガスを運搬することができる。コンテナはISO40フィート規格の真空積層断熱方式の容器により、2.8トンの液化水素を運搬することができる。

当社が保有するLNG運搬船および陸上用液化水素貯蔵タンクの設計製造技術を基盤に、現在、CO₂フリー水素サプライチェーン構想での「はこぶ」を担う、世界で初となる液化水素運搬船の設計・製造技術の構築を目指している。2016年度までのFEEDフェーズにおいて要素試験と仕様検討を行い、2017年度からの建造フェーズにおいて設計・製作を実施してきた。2020年度には、豪州の褐炭由来の液化水素を日本へ輸送する荷役・輸送技術の実証を目的としてパイロット実証船の建造を進めている。

2 パイロット実証船の課題

液化ガスを輸送する船舶の設計製造には、国際海事機関IMO (International Maritime Organization) により採択された「液化ガスのばら積運送のための船舶の構造および設備に関する国際規則 (通称IGCコード¹⁾)」に準拠することが要求されている。しかし、現用のIGCコードはLPGやLNGなどを対象としており、液化水素は対象とされていない。このため、IMOでは日豪による共同提案を承認する形で日豪間の液化水素の海上輸送に対する「暫定勧告²⁾」

を発行した。さらに、(財)日本海事協会 (ClassNK) がIMO 暫定勧告をベースに、各項目をより具体的な要件として規定して、思想および事故シナリオからの要件を補完した「液化水素運搬船ガイドライン³⁾」を発行しており、これにも準拠することで高い安全性を確保する。

パイロット実証船の完成イメージを図1に示す。建造実績のある内航用LNG運搬船をベースに船型を設計し、液化水素専用の貨物タンクを搭載する。液化水素はLNGに比べ侵入熱により気化しやすく、極低温のため構造に大きな熱収縮を発生させるなど、液化水素運搬船の実用化には解決すべき課題がある。

(1) 貨物タンクCCS (Cargo Containment System)

規則要件により、侵入熱に対してCCSの圧力や温度を制御する必要がある。侵入熱によるボイルオフガスをCCS外に放出せずに蓄圧する場合、圧力を安全に保持して目的地までの航海が可能でなければならない。タンク壁およびCCSを支持する構造や配管などへの外部からの侵入熱を最小限に抑制する必要がある。

また、波浪航行中の船体の動揺に対してCCSは構造上健全である必要がある。

(2) 貨物配管

液化水素移送中の気化による荷役効率低下の抑制、配管表面の液化空気生成による高濃度酸素雰囲気形成の排除、液化空気の滴下による船体構造の損傷危険の排除のために、貨物配管には高い断熱性が必要である。

また、液化水素荷役中の熱伸縮による大きな内力および陸上用配管とは異なる船体変形による強制変位が配管に作用するため、それらから保護する必要がある。

(3) 貨物機器

液化水素はLNGに比べ90度も低温であるため、貨物機器はLNGに使用される機器よりもさらに高い断熱性能が要求される。水素物性への耐性と高い断熱性や水素の漏洩対策など、適切な材料選定と耐久性の確認が必要である。

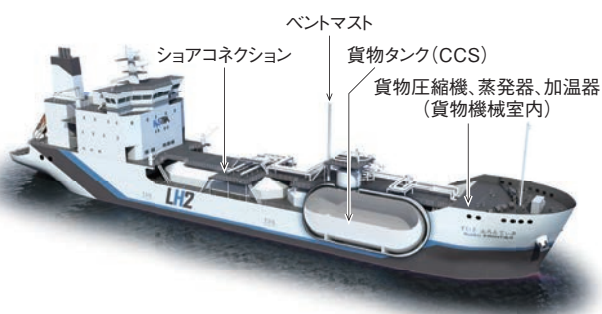


図1 パイロット実証船
Fig. 1 Pilot demonstration carrier

3 開発設計と要素技術

(1) CCS

CCSは船体構造と独立した蓄圧式横置円筒型タンクとした。これはIGCコードおよびClassNK鋼船規則⁴⁾で定義されている圧力容器の基準に適合するタンクタイプCに相当している。パイロット実証船は容積1,250m³のCCS2基を搭載可能な船型で、船首側にCCS1基を搭載している。

(i) CCS防熱システム

液化水素用CCSではLNG用よりも約10倍高い断熱性能が必要である。熱の伝わり方には、対流・熱伝導・ふく射の3種類がある。対流と熱伝導によるCCSの表面からの侵入熱を抑制するため、図2に示すような内外槽からなる真空二重殻構造を採用している。

内外槽間を連結する支持構造・配管・計器類は熱伝導による侵入熱経路となる。これを低減する対策として、熱伝導率の低い材料を使う、構造材料の断面積を小さくする、伝達経路を長くするなどの措置を講じた。ふく射による熱伝達を軽減する方法として、二重殻の真空槽内に反射率の高い金属蒸着フィルム積層した積層真空断熱材を採用した。CCSは通常航海中に内部で生じる温度と圧力の上昇に対して十分な余裕を見込んだ設計とし、発生するボイルオフガスをCCS外に放出することなく豪州と日本間の航海を可能とした。また、CCS内槽内に液化水素を充填しても外槽表面では常温が維持され、液化空気や液化窒素などは生成されない。

さらに、運搬中の安全な航行を保証するためのツールとして「真空防熱性能劣化監視システムVIPDM (Vacuum Insulation Performance Deterioration Monitoring System)」を搭載している。これは真空劣化速度を常に監視して断熱性能が悪化するリスクを十分に早い段階で予知することで、断熱性能の持続と航海の安全を確認するものである。

(ii) CCS支持構造

CCSの内外槽には、極低温環境での使用に適した材料と

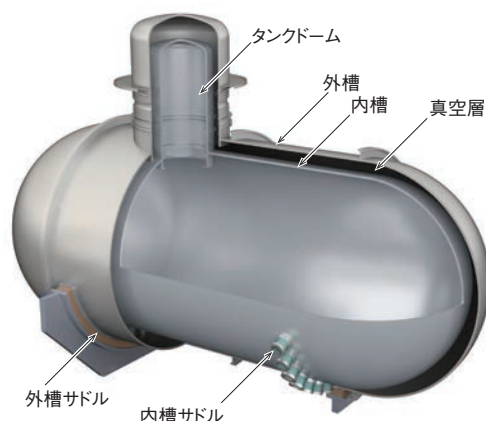


図2 CCSの二重殻構造
Fig. 2 CCS's double-shell structure

してオーステナイト系ステンレス鋼を採用した。航行中動揺する船体内で内槽を外槽内に接触させずに安定して保持する支持構造では、特に熱伝導による侵入熱量が大きくなる。このため、CCS内槽の支持には断熱性能および強度に優れたガラス繊維強化プラスチックGFRP製サドル構造を採用した。真空状態および極低温状態でのGFRP支持構造の強度・熱伝導・アウトガスなどの諸特性を取得して、運用年数を耐用する設計とした。

CCS内部は建造中や定期検査時は常温であるが、満載状態では極低温になる。また、バラスト航海時や荷役中の液位の状態によってもCCS内の温度分布が変化する。このように内槽は温度変化に対して伸縮するのにに対し、外槽は常温を維持するため内外槽間での温度差による相対変位が生じる。そこで、内槽を前後2カ所の円弧状サドル構造で支持し、サドルが外槽内面上をスライドすることで相対変位を吸収する構造とした。

(iii) タンクドーム

温度差による内外槽間の相対変位が大きいため、CCSを貫通する配管類をCCSの頂部に設けたタンクドームに集約した。タンクドームには貨物配管・電線管・アクセス用マンホールを配置している。

(iv) CCS製造技術

当社は、ロケット射点設備の球形液化水素タンクを始め、陸上用液化水素タンクやトレラなどの二重構造真空断熱タンクを製造してきた。また、船用LNG大型タンクも製造しており、これらの技術シナジーによりCCSを製造した。

(2) 真空二重配管

貨物配管では高い断熱性能を確保するためCCSと同様に二重構造の真空断熱方式を採用した。内管は外管に接触させずに安定して保持させる必要がある。また、内管と外管には熱伸縮による長さの差が発生する。そこで、陸上用の水素設備で実績のある真空二重管の仕様を基に、荷役中の熱伸縮や船体の静的および動的な変位を考慮し、船用真空二重管を開発した。低温用弁についても断熱性能の高い真空ジャケット付ロングボンネット型の弁を採用した。

(3) 貨物機器

貨物機器の水素物性への耐性については、LNG船で実績がある船用機器や陸上で水素用として実績のある機器を基本に、水素の特性や船上での使用環境に対応すべく材料や仕様をすべて見直した。主要な機器については開発段階において液化水素を使用した試験を実施し、操作上のリスクアセスメントを行い課題の洗い出しと対策を施した。

高い断熱性や漏洩のリスク低減への対応として、荷役基地のローディングアームシステムLASとの接続部となるショアコネクション部には、液化水素用の断熱継手として多くの実績がある図3に示すバイヨネット継手を採用し

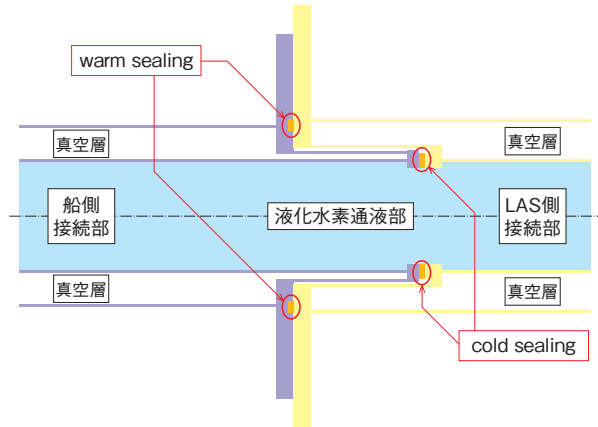


図3 バイヨネット継手
Fig.3 Bayonet joint

た。その他の貨物ハンドリング用機器としては、水素ガスを加圧するための圧縮機・液化水素を気化させる蒸発器・極低温の水素ガスを温める加温器などがある。

4 建造および実証

2017年度にCCSの設計製造に着手し、2019年1月に船体の起工、12月に進水した(図4)。

(1) 船体

パイロット実証船の主要寸法などの概要を表1に示す。蓄圧式CCSを採用しているため航海中に船内でボイルオフガスを処理する必要がない。推進方式として3台の主ディーゼル発電機から2台の推進モータに電力を供給し減速機を介してプロペラを駆動するディーゼル電気推進を採用した。船体には、バウスラスタ、シリング舵(高揚力・大舵角舵)および4翼可変ピッチプロペラを装備し、離着岸時における操船性の向上を図っている。



図4 パイロット実証船の進水式
Fig.4 Launching ceremony of pilot demonstration carrier

表1 実証船の概要
Table 1 Outline of pilot demonstration carrier

主要寸法	全長 [m]	116
	型幅 [m]	19
	型深さ [m]	10.6
総トン数		約8,000
推進方式		ディーゼル電気推進
航海速度 [ノット]		約13
航続距離 [海里]		約11,300
最大乗船定員 [名]		25
船籍/船級		日本/日本海事協会



図5 貨物タンク (CCS)
Fig. 5 Cargo containment system (CCS)

(2) CCS

2020年3月に完成したCCS (図5) の内部には、サブマージ型モータ駆動ポンプ、配管系を固定するパイプサポーター、CCS内部を効率的に冷却するための装備がある。

(3) 実証試験

2020年の液化水素運搬船完成後に実証フェーズに移行する。実証フェーズIでは、液化水素運搬船のCCSや配管および貨物機器の機能・性能・安全性を確認することを目的として、神戸市沖合の神戸空港島北東部に建設中の貯蔵・荷役基地において以下の試験項目を順次実施する。

- ・ CCS内ガス置換 (効率的なガス置換法)
- ・ CCSのクールダウン (効率的なCCS冷却法)
- ・ 貨物液の積み込み (基地からの液化水素充填)
- ・ 貨物ポンプの作動 (極低温環境下での作動)
- ・ その他貨物装置の作動 (機能・性能)
- ・ 防熱性能確認 (CCSおよび配管の断熱性)
- ・ 貨物満載試験 (近海満載航行と揚荷手順)

続く実証フェーズIIでは、日本と豪州間の満載航行試験を実施する。

あ と が き

パイロット実証では、液化水素の荷役操作の実証および実海域でのCCSの防熱貯蔵性能の確認を行い、将来の大量輸送技術の構築を目指す。さらに、今後は液化水素運搬船のさらなる大型化に向け開発を進める。

最後に、当実証事業は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) 助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」の一環として実施しており、ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Resolution MSC.370 (93) Amendments to the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, IMO (IGC Code) (2014)
- 2) Resolution MSC.420 (97) Interim Recommendations for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk, IMO (2016)
- 3) 液化水素運搬船ガイドライン, 日本海事協会 (2017)
- 4) 鋼船規則 N編 液化ガスばら積船, 日本海事協会 (2019)



村 岸 治



稲 津 晶 平



浦 口 良 介



山 城 一 藤



今 井 達 也



大 橋 徹 也



下 垣 貴 志



吉 田 巧



河 本 孝