

公開用

終 了 報 告 書

S I P (戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「液化水素用ローディングシステム開発とルール整備」

H26年度～H30年度

研究責任者：一般財団法人日本船舶技術研究協会
審議役 千田 哲也

目次

1. 本研究の目的	1
2. 研究実施体制	1
3. 研究成果	1
3-1. ローディングシステムの開発（ハードウェアの開発）	
3-2. 安全対策とルール整備（ソフトウェアの開発）	
3-3. 国際規格化及び技術交流の推進	
3-4. まとめ	
3-5. 今後の課題	
4. 外部発表実績	7
5. 特許出願実績	7
6. 参考文献	7

別添：各研究機関終了報告書

- ・一般財団法人日本船舶技術研究協会
- ・川崎重工業株式会社
- ・東京貿易エンジニアリング株式会社
- ・国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
- ・株式会社日本海洋科学
- ・公益社団法人日本海難防止協会

1. 本研究の目的

水素は二酸化炭素の排出がないクリーンな燃料であり、化石燃料の3倍以上の燃焼エネルギーを持っており、今後、水素燃料自動車や定置型燃料電池の普及に加え、火力発電の燃料としての利用など、来る水素社会において大量の水素の消費が見込まれている。こうした大量の水素需要に対応するためには、海外の安価な褐炭や再生可能エネルギーから水素を製造し、輸送効率を高めるためにコンパクトに液化して日本に輸送し、水素燃料自動車や発電設備に供給する一連の水素サプライチェーンの確立が必要である。本研究開発の対象となっている液化水素ローディングシステムは、上記サプライチェーンのうち、海外の液化水素基地から液化水素運搬船への荷積み、また国内において運搬船から国内基地への荷揚げ作業において、陸側・海側双方の設備を結ぶ重要なインターフェースである。このため、本研究開発は、液化水素用ローディングシステムの実用化レベルの開発を行い、荷役手順を検討するとともにその運用上の安全対策の策定を目的とした。また、開発技術の国際規格化及び液化水素関連の研究者・技術者の技術交流の推進を実施した。

2. 研究実施体制

本研究は、図1に示すようにハードウェアの開発とソフトウェアの開発から構成され、液化水素用ローディングシステムの開発を目的とするハードウェアの開発研究を川崎重工業株式会社、東京貿易エンジニアリング株式会社及び国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構の連携により実施し、安全対策の策定を目的とするソフトウェアの開発を株式会社日本海洋科学及び公益社団法人日本海難防止協会の連携で実施した。一般財団法人日本船舶技術研究協会は、参加機関相互の連絡調整を行う液化水素ローディングシステム開発推進委員会を開催するとともに、プロジェクトを統括した。

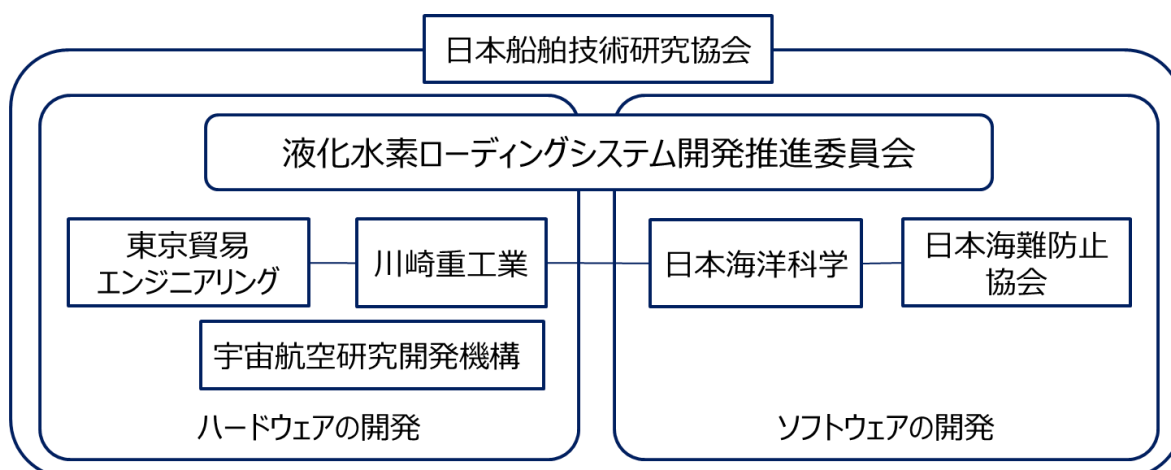


図1. 本プロジェクトの研究実施体制

3. 研究成果

3-1. ローディングシステムの開発（ハードウェアの開発）

3-1-1. 基本構想及び設計

液化水素は常圧で -253°C であり、液化酸素の沸点（ -183°C ）よりも低いため、断熱が不十分であると配管表面に液化空気が生成する。液化空気のうち液化酸素は、可燃物質と接

触すると発火の危険性があるため、液化水素用としては高度な断熱構造を有するシステムの開発が必要である。ローディングシステムにはアーム型（鋼管型）とフレキシブルホース型の2方式が考えられるが、ホースをクレーンで吊って動かすフレキシブルホース型は、大口径化すると曲げ半径が大きくなり、将来の大量需要時の商用化に適さない。一方、鋼管を用いたアーム型は、液化天然ガス（LNG）用として実績があり、運用の容易性や設置のコンパクト性を確保できる。このため、アーム型を採用することとし、真空二重管構造を適用することにより断熱性を確保したローディングシステム及び必要機器の開発を行うことにした。

3-1-2. 緊急離脱機構（ERS）の開発

LNGのような液体貨物の荷役においては、大地震や津波等の発生時に、運搬船が緊急に離岸出港するために配管を切離して離脱する機構（緊急離脱機構）が使用されている。液化水素用の緊急離脱機構について検討を行ったところ、弁軸がないため熱損失が小さく熱応力が比較的低いチェッキ弁（逆止弁）方式が適すると考えられ、図2に示す緊急離脱機構を考案した。2つの構造体がクランパーで接続されており、開弁状態では2つの弁体（ピストン）を突き合わせる形で流路が確保されている。離脱動作の際には、クランパーが外れて弁体がバネ力によって押し出され、切離し面側に移動することにより閉弁する。

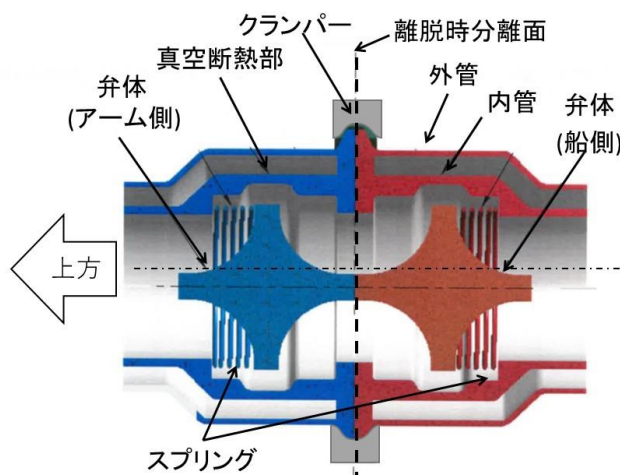


図2. チェッキ弁式緊急離脱機構

チェッキ弁方式では、切離し時に弁体が円滑に着座して確実に閉弁することが重要である。このため、シール部の構造及び材料を評価するために、シール部分の模擬試験体を作製して評価した結果、摺動抵抗が小さく極低温で有効な PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）をシール材とし、ジャケットの収縮を考慮した設計を採用したシールを選定した。真空二重構造の直管部に緊急離脱機構を組み込んだ試験体を製作し、液化水素を用いて性能試験を実施した。大量の液化水素の供給系が設備され、水素の大气放出を伴う試験を安全に実施できる試験施設として、宇宙航空研究開発機構（JAXA）能代ロケット実験場（秋田県能代市）で試験を実施した。図3に示す離脱動作の確認試験では、クランパーの解除後2秒以内に速やかに分離することを確認した。

切離し時に下部試験体の上面において発火することがあった。切離し後に上部試験体から液体の滴下がみられることから、液化水素温度に冷却されていた上部試験体の下面に生成する液化空気（特に液化酸素）が滴下し、液化水素及びその蒸気と反応したと推測された。発火は小規模で他への影響もないものではあるが、安全上の観点から対策を検討した。液化酸素の生成は不可避であることから、上部試験体下面に生成する液化空気が拡散しないよう、切離し後に液化空気を受けるトレイを挿入する機構を開発した。



図3. 液化水素を用いた ERS 性能確認試験（離脱試験）

3-1-3. スイベルジョイント（可動式継手）の開発

配管に回転機能を与えるためのスイベルジョイント（可動式継手）は、アーム型のローディングシステムが船舶の揺動に対応するために必要な構成要素であり、真空二重構造管に適用するために、図4に示す継手部に真空断熱を適用した新たな形式を考案した（VI（Vacuum Insulation）型とよぶ）。この形式は、従来形式と比べ表面温度、機能性、製作難易度、構造への負荷等で優れる。入熱量は大きくなるが、システム全体の熱損失に比較して小さいことからVI型を採用した。

液化水素を封止するシールの構造と材質の選定を目的に、シール挿入部を実機と同じ寸法・形状で作製した供試体に液化水素を充填し、JAXA 能代ロケット実験場で漏洩量の計

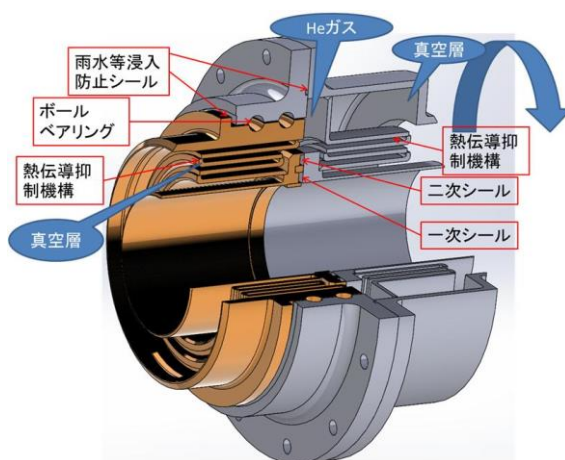


図4. VI型スイベルジョイントの概念図

測試験を行った。その結果、バネ材としてコバルト合金、樹脂として 3 種から耐摩耗性に優れる 1 種を選定した。次に、真空二重構造の管体に接続した試験体を作製し、液化水素条件下で耐久試験を実施した。試験は、首振り角 $6\sim 25^\circ$ の範囲で往復回転を与え、40 万往復（約 3 カ月）実施し、シール面とボールレースの摩耗及び試験中の回転抵抗の変化等を評価した。その結果、バネ力を強化したシールが長期の耐久性を保持する結果が得られ、これを採用することとして開発は完了した。

3-1-4. 全体設計・製作・動作試験

開発した緊急離脱機構及びスィベルジョイントを組み込んだローディングシステムの設計を行い、試作機を製作した。本体部では、内管に液化水素を通液した場合に生じる熱変形及び液化水素の圧力の影響等を考慮した設計を行った。設計を完了したローディングシステムは、東京貿易エンジニアリング長岡工場で製作して動作試験を行い、性能を確認した。試作ローディングシステムの概観を図 5 に示す。



図 5. 開発した液化水素用ローディングシステム

3-2. 安全対策とルール整備（ソフトウェアの開発）

世界初となる液化水素の荷役における安全性を確保するために、事故災害シナリオの策定とリスク評価、荷役手順の検討と船員向けマニュアルの作成、航行安全対策及び海上防災対策の検討と運用条件のとりまとめ等を行った。

3-2-1. 荷役・出入港のリスク評価

LNG 荷役に関する検討結果を参考に、出入港を含む液化水素荷役において想定しうる事故（ハザード）を抽出した。ハザード毎に影響度及び発生頻度の評価を行い、リスクマトリクスを用いた半定量的評価手法によるリスク評価を行った。リスクの評価にあたり、専門家のコンセンサスによりハザードを同定するための HAZID (Hazard Identification) 会議を開催した。各ハザードに対して影響度と発生頻度からリスク指標 (Risk Index, RI) を決定した。初期分析の結果に対して安全対策の導入を検討して再評価したところ、リスク低減策が必須となる高レベルのハザードはなく、合理的に実現可能な限りリスクの低減策を考慮すべきとされる中間レベルのハザードが 8 件となった。これらは、船一般に共通するハザードであり、許容できないリスクはないとの結論を得た。

3-2-2. 運用マニュアル

船陸間での液化水素荷役については、想定される船陸双方の荷役設備等を前提とした手順を策定した。LNG 荷役を参考に、液化水素の特性を考慮した荷役手順の検討を行った。その結果、LNG 荷役と比較して、シールガス配管の接続（LNG では窒素ガスを使用するが水素ガスを使用する）、窒素パージ（配管を窒素ガスで酸素パージをした後、水素ガスで窒素パージを行う）、タンク及びアームのクールダウン（発生する水素ガスを陸上基地で処理するため着岸後に行う）等が水素に特有であることがわかり、これらを含めた船員向けの運用マニュアルを作成した。

3-2-3. 航行安全対策

液化水素運搬船の航行安全対策として、航行中及び荷役中の検討を行い、以下の検討が必要であるとの結論を得た。検討にあたり、学識経験者、海事関係者及び関係官庁によって構成される検討委員会を組織した。

- 港湾事情調査、操船水域の検討、着岸時・係留中の安全性検証及び運用基準の策定
- 荷役安全管理体制、入出港時・着岸中の連絡体制の構築、荷役の安全対策、海難緊急時の初動対応及び地震・津波対策等の策定

航行安全対策は荷役を行う港湾の特徴を考慮する必要があるため、液化水素基地の建設が予定されている神戸港を対象にケーススタディを実施した。図6に示すように、自然環境・他船交通流等の環境条件、港内の操船環境及び液化水素運搬船の仕様等を反映した操船シミュレータ実験を実施した。タンク容量に対する貨物の重量が小さいという運搬船の特徴をふまえ、入出港、載荷状態、昼夜、風速・風向、波向・波高、潮流、タグボートの有無等で条件を設定し操船実験を行った。専門家の意見を含め、着岸を中止する基準、悪天候で離岸すべき基準、荷役を中止すべき基準、係留の限界等の運用条件を策定した。

3-2-4. 海上防災対策

液化水素運搬船を国内港湾に受け入れ、液化水素荷役を行う際の安全確保に向けて、海上防災対策に関して、港湾の環境等を問わない一般的に確認・検討すべき事項と、個別港湾を対象とした具体的な運用条件の事項について、有識者、海事関係者及び関係官庁によって構成される検討委員会を組織して検討を行った。



図6. シミュレータによる出入港の操船実験

液化水素運搬船の建造・運用及び液化水素基地の建設・運用に係る以下に示す国内の関係法令として、港則法、海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律、ガス事業法、高圧ガス保安法、消防法（危険物の規則に関する政令）、危険物船舶運送及び貯蔵規則及び船員労働安全衛生規則がある。これらに基づいた安全対策を検討した結果、新たな法令の整備は必要ないが、水素の特性に留意した安全対策を構築することが必要であると考えられ、安全・防災設備及び資機材や、液化水素運搬船の受け入れ及び液化水素の荷役の実施に必要な事前検討事項についてとりまとめた。

3-3. 国際規格化及び技術交流の推進

国際間の液化水素海上輸送を円滑に行うために、また開発された安全対策を普及させるため、以下の国際規格原案 2 件を作成し、a.については、本研究で技術的な検証ができたことから ISO TC8（船舶海洋技術委員会）に新規作業項目として提案した。

a. Design and testing of marine transfer arms for liquefied hydrogen

b. Ship-to-shore interface and operations for liquefied hydrogen

液化水素関連の研究者・技術者の技術交流、産学連携の強化、研究開発加速のため、内外の研究者及び政策担当者を招聘して液化水素技術国際ワークショップを 2 回開催した。第 1 回は、2015 年 3 月に京都で開催し約 150 名の参加があり、第 2 回は、2018 年 10 月に神戸で開催し約 160 名の参加者があった。

3-4. まとめ

来るべき水素社会において必要となる大量の水素を輸送する手段として、液化水素運搬船による海上輸送が想定されていることから、世界初となる船舶と陸上の間の荷役に用いるローディングシステムの開発を行った。ハードウェアの開発としては、まず方式を大容量化が可能なアーム式に決定し、荷役中にローディングシステムの表面に液化空気を生成させないための高度な断熱機構を有するシステムを開発した。主要な構成要素である緊急離脱機構とスィベルジョイントについては、液化水素を用いた試験で性能を確認した。これらを組み込んだローディングシステムについては、試作機を製作し動作試験により所期の性能が得られることを確認した。ソフトウェアの開発では、事故要因の分析とリスク評価、船員向けマニュアルの作成等を行い、航行安全と海上防災の両面から安全対策を検討し、運用条件としてまとめた。これらの成果をもとに、国際規格（ISO）の原案を 2 件作成して、技術的な実証がなされた 1 件については提案を行った。また、技術交流及び研究開発加速を推進するために、液化水素技術国際ワークショップを開催した。

3-5. 今後の課題

液化水素用ローディングシステムを製作し、主要要素の液化水素温度での試験及びシステムの液化窒素温度での作動試験を行ったが、実プラント設置時に液化水素を用いたシステムとしての実証が実施されることが期待される。液化水素の商用利用時には、システムの大口径化が必須である。基本的な課題は本研究で解決されているが、熱及び強度のバランスが変わることによる新たな設計や、液化水素ポンプ等の周辺機器の大型化が必要である。安全対策については、実運用が開始されたときに得られる実データをもとに、適宜見直すことが必要である。また、本研究開発のなかで提案した国際規格案については、制定に至るまで国際機関（ISO）における審議に対応することが必要である。

4. 外部発表実績

(単位：件数)

学会発表	講演	査読付論文	査読なし論文	取材	合計
4	3	2	0	0	9

5. 特許出願実績

	出願番号	発明の名称	出願年月日	出願人
1	特願2015-139092	流体荷役装置の緊急離脱装置	2015.7.10	東京貿易エンジニアリング 川崎重工業
2	特願2015-139136	液体水素用流体荷役装置	2015.7.10	東京貿易エンジニアリング 川崎重工業
3	特願2015-139821	液体水素用緊急離脱システム	2015.7.13	川崎重工業 東京貿易エンジニアリング
4	特願2015-140269	液化水素用緊急離脱システム	2015.7.14	川崎重工業 東京貿易エンジニアリング
5	特願2015-140972	液化水素用ローディングアーム	2015.7.15	川崎重工業
6	特願2015-140973	液化水素用ローディングアーム 及び液化水素移送方法	2015.7.15	川崎重工業
7	PCT/JP2016/070171 (特願2015-139092)	流体荷役装置の緊急離脱装置	2016.7.7	東京貿易エンジニアリング 川崎重工業
8	PCT/JP2016/070172 (特願2015-139136)	液体水素用流体荷役装置	2016.7.7	東京貿易エンジニアリング 川崎重工業
9	PCT/JP2016/003283 (特願2015-139821)	液体水素用緊急離脱システム	2016.7.11	川崎重工業 東京貿易エンジニアリング
10	PCT/JP2016/003284 (特願2015-140269)	液化水素用緊急離脱システム	2016.7.11	川崎重工業 東京貿易エンジニアリング
11	PCT/JP2016/003304 (特願2015-140972)	液化水素用ローディングアーム	2016.7.12	川崎重工業
12	PCT/JP2016/003305 (特願2015-140973)	液化水素用ローディングアーム 及び液化水素移送方法	2016.7.12	川崎重工業
13	特願2017-023081	流体荷役装置用の緊急離脱機構	2017.2.10	東京貿易エンジニアリング 川崎重工業
14	特願2017-254139	流体荷役継手および流体荷役装置	2017.12.28	川崎重工業 東京貿易エンジニアリング
15	特願2017-254140	流体荷役継手	2017.12.28	川崎重工業 東京貿易エンジニアリング
16	特願2018-204418	流体荷役装置用の緊急離脱機構	2018.10.30	川崎重工業 東京貿易エンジニアリング

6. 参考文献

なし