

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」

研究題目「液化水素ローディングシステムの開発及びルールの整備」

研究開発期間：平成 26 年 10 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日
研究担当者： 千田 哲也
所属研究機関：一般財団法人日本船舶技術研究協会

目次

1. 本研究の目的	1
2. 研究開発目標とマイルストーン	1
3. 研究実施内容	2
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	17
5. 特許出願実績	18
6. 参考文献	18

図表一覧

図1. 緊急離脱機構（ERS）の基本構造	
図2. 緊急離脱機構試験体の設置図	
図3. 液化水素充填による緊急離脱機構の切離し動作試験	
図4. 液化空気回収トレイ	
図5. VI型スィベルジョイント	
図6. スィベルジョイント耐久試験	
図7. 製作した液化水素用ローディングシステム	
図8. 対象とした海域（神戸港）の概況図	
図9. シミュレータによる操船実験	
図10. 第2回液化水素技術国際ワークショップ	
表1. 製作した液化水素用ローディングシステムの概要	
表2. 液化水素荷役に関連して想定される事故（ハザード）	
表3. 船員向け運用マニュアルの構成	
表4. ISO原案（ローディングシステムの設計と試験）の目次	

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、液化水素ローディングシステムの実用化レベルの開発及びその運用上の安全対策の策定を目的とするとともに、開発した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する。

2. 研究開発目標とマイルストーン

液化水素のローディングシステムを実用化するために克服すべき課題とその開発目標は、以下の通りである。

① 液化水素用の緊急離脱機構（ERS）の開発

液化天然ガス（LNG）のような液体貨物の荷役においては、荷役時の大地震や津波・大波の発生時に、船陸間に一定以上の変位が発生した際に、自動的に特定の部位で配管の両末端を閉止してから離脱する機構（緊急離脱機構）が使用されている。液化水素は常圧で -253°C であり、液化酸素の沸点（ -183°C ）よりも高いため、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、アスファルトなどの可燃物質と接触すると発火する危険性がある。液化空気の発生を抑制する断熱構造を適用した緊急離脱機構を開発し、液化水素の存在下で作動することを確認した後、本研究開発で開発を行うローディングシステムに取り付けて試験を行い、問題なく作動することを確認する。

② 液化水素用の可動式継手（スィベルジョイント）の開発

ローディングシステムには、荷役前後および荷役中の船体の揺動に対応できる機能が要求される。全鋼製のローディングアームでは、エルボの両端が回転する継手（スィベルジョイント）を複数設けて、船体の揺動に対応している。そこで、液化空気の発生を抑制できるよう、空気と接する部分の温度が -183°C 以上となるような断熱構造を有するスィベルジョイントを開発する。開発したスィベルジョイントの試験体を試作し、液化水素の存在下で作動することを確認する。

③ ローディングシステムの開発

液化水素用へ適用するローディングシステムには、フレキシブルホース型とアーム型の2方式がある。両形式について基本検討を行い、断熱性能、移送能力、接続容易性、設置条件などの面から将来の大量輸送を見越した適性を検討して選定し、①②で開発され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を開発し、プロトタイプを製作して問題なく作動することを確認する。

④ 運用上の安全対策の策定

液化水素の荷役については、その物性を踏まえた安全性の確保が必要となるが、これま

で具体的な検討は行われていない。したがって、液化水素運搬船の入出港、荷役作業等を通じて、さまざまなリスクを考慮したうえで荷役作業の手順整理、事故災害シナリオの策定、事故発生要因の特定及び荷役運用マニュアルの策定を行い、運用条件をとりまとめる。

⑤ 技術交流の推進及び国際規格化

液化水素は、これまでに荷役経験のない物質であることから、我が国が来る水素社会において主導的役割を果たすために、また諸外国における液化水素荷役の円滑化を図るために、開発された技術及び検討された安全対策について国際規格の原案を作成し ISO 等を通じた規格化の提案を行う。また、関連研究を加速する観点からも液化水素関連の研究者・技術者の技術交流や産学連携を推進することが重要であり、このために、液化水素技術に関する国際的なワークショップを開催する。

これらの目標に対して、各年度に以下のマイルストーンを設定した。

- ・ 初年度：ローディング方式の決定
- ・ 2年度：緊急離脱機構、スィベルジョイントの熱・強度解析の完了
- ・ 3年度：船員向けマニュアルの作成、ローディングシステムの基本設計の完了
- ・ 4年度：緊急離脱機構、スィベルジョイントの性能試験の完了
- ・ 5年度：ローディングシステムの組み上げ、動作試験、ISO 規格原案の作成

参加機関の緊密な連携により、これらの研究開発を円滑かつ着実に進めるため、チームメンバー等により構成される「液化水素ローディングシステム開発推進委員会」を設置・運営し、ハード面（ローディングシステムの開発）とソフト面（安全対策、基準・規則の策定）の両面の研究開発の推進及び事業の全体調整・とりまとめを行う。

3. 研究実施内容

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

（1）基本構想

液化水素用ローディングシステムの基本構想として、アーム型（鋼管型）とフレキシブルホース型の2方式があり、それぞれの特徴・問題点を調査・検討した。

フレキシブルホース型は、フレキシブル（可撓性）ホースをクレーンで吊って動かすタイプで、シンプルではあるが、配管口径 150mm 程度までしか実績がない。大口径化すると曲げ半径が大きくなることから、機器の設置面積が大きくなるとともに、運用が難しくなる。このことから、将来の大量需要時の商用化に適さないと考えられる。

一方、アーム型は、鋼管を用いた形式で、LNG 等で主に採用されているシステムであるため、システムとしての実績があるうえ、運用の容易性や設置のコンパクト性を確保できる。一方、断熱性を有する緊急離脱機構及びスィベルジョイントなどの主要構成機器が存在しない。そこで将来の大量輸送への適正からアーム型を採用することとし、重量及びサイズの増大を抑制した機器の開発とともに、鋼管部は真空二重管を適用して断熱性を確保したローディングシステムの開発を行うこととした。

(2) 設計

既に実用化されている LNG 用ローディングシステムをベースとして、高度な断熱構造を適用した設計を行う。真空断熱構造は、発泡断熱構造（非真空断熱構造）と比較して、固体熱伝導と対流伝熱が抑制され断熱性能に優れるため、配管の保温層の厚みを LNG の場合と同等、もしくはそれ以下に抑えることが可能となる。このため、液化水素ローディングシステムの配管には高断熱性を有する真空二重管構造（送液する内管と強度部材の外管の二重構造とし、中間層を真空にして外管表面を常温近くに保持する）を適用することにした。真空二重管構造を完全には適用できない接続部や可動部を有する緊急離脱機構・スィベルジョイントについては、特別な構造を開発・設計することにした。

3-1-2. 緊急離脱機構（ERS）の開発

(1) 基本設計

LNG 用ローディングアームで使われるボール弁式緊急離脱機構について検討を行ったところ、液化水素と大気の温度差のために弁軸（ステム）に生じる熱応力が過大となり、また弁軸を経由した入熱が大きく熱損失が大きくなることが推定された。このため、弁軸をもたないチェック弁（逆止弁）方式の緊急離脱機構を考案した。この方式では、図 1 に示すように通常の開弁状態では、2 つの構造体をクランパーで固定しており、それぞれの構造体の弁体（ピストン）は突き合わせる形で止まっている。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。

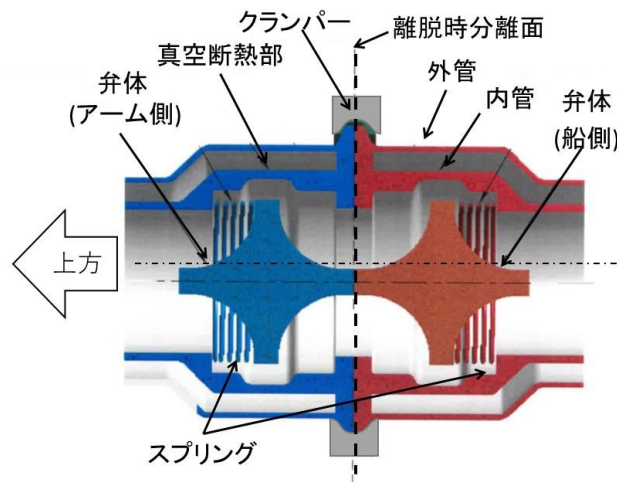


図 1. 緊急離脱機構（ERS）の基本構造

(2) シール材質・構造試験

チェック弁式 ERS 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、液化水素環境下でバネ力により弁体を弁座に着座させる動作を行って、閉弁状態及びシール部からのリーク量を測定した。

バネ力で弁体を正規位置へ着座させ、かつリーク量が設定した許容値（1,500cc/min）以下であるために、摺動抵抗が小さく極低温で有効なシール構造・材料の選定を行った。低温で低摩擦係数が得られる PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）をシール材に選定し、

極低温でのジャケットの収縮を考慮した設計を採用した。液化水素を使った試験の結果、弁体は円滑に着座しリーク量は規定を大幅に下回った。

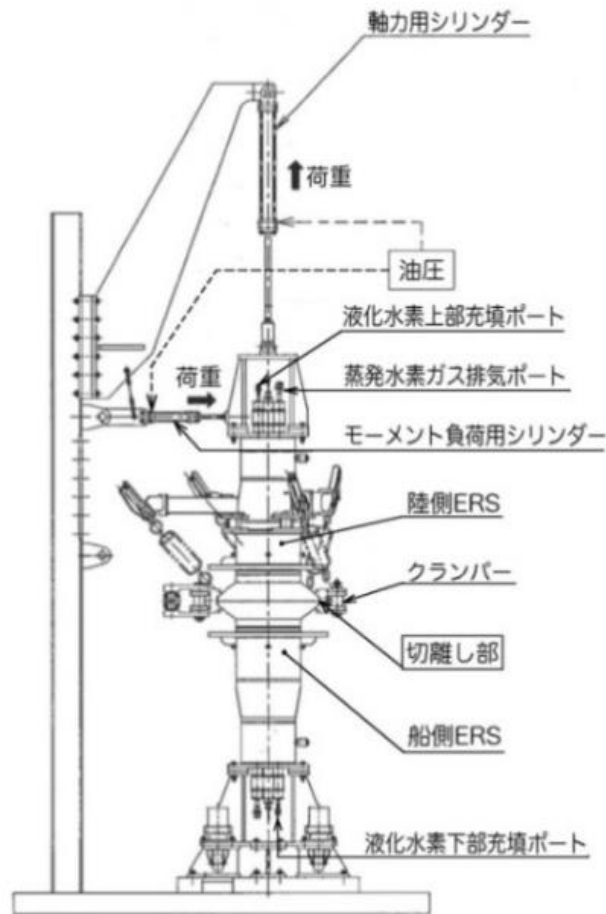


図2. 緊急離脱機構試験体の設置図

(3) 性能試験（液化水素）

図2に示すように、真空二重管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。少量ではあるが液化水素を外部に放出する試験となることから、大量（30 m³）の液化水素の供給系が設備され、大気放出を伴う試験を安全に実施できる十分な保安距離を確保できる試験施設である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。

試験体内部をヘリウムガスで置換した後、試験体下部から液化水素を供給し、蒸発したガスをベントスタックから大気に放出した。液化水素の満充を確認した後、ヘリウムガスで試験体内部を1.0MPaに加圧し、モーメント付加用油圧シリンダーで負荷を与えて荷重試験を行った。その後、試験体内を大気圧状態に戻し、ERS内に液化水素が十分残っていることを確認し、離脱の動作確認試験を実施した。切離し動作の様子を図3に示す。切離し後、下部試験体にリークガス回収容器を取付け、閉弁時のリーク量を測定した。

主な試験項目の結果は以下の通りである。

- 低温荷重試験・・・曲げ・せん断の外力（最大設計荷重×安全係数）と内部圧力（1.0MPaG）を負荷した状態で 10 分間保持し、目視による漏洩のないこと及び永久変形を生じないことを確認した。
- 動作確認試験・・・内圧相当の軸力を負荷して、油圧シリンダーによりクランパーの解除を行い、解除後、2 秒以内に速やかに分離することを確認した。図 3 に、動作確認試験における切離し動作実施時の写真を示す。
- シール性能試験・・・2 水準の内圧（0.3MPa, 1.0MPa）で弁体シール部からの水素のリーク量を 1 分間測定し、許容値以下であることを確認した。

設計された緊急離脱機構の、液化水素充填時の温度分布を計算したところ、表面温度がすべての領域で液化空気生成温度以上であることが推定できた。また、得られた温度分布をもとに熱応力を評価したところ、許容値以下であると推定された。液化水素による性能試験において、液化水素充填時における表面温度を計測したところ、実測値は最も低い温度となった箇所で -30°C 程度であり、推定値が高い精度で得られていることが確認できた。



図 3．液化水素充填による緊急離脱機構の切離し動作試験

（４）液化酸素生成対策

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。発火は切離し後約 10 秒で起きており、切離し後 4 秒程度から、上部試験体下面からの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が滴下し、窒素が蒸発した後に酸素濃度の高い液体が残し、下部試験体表面に残る油分および反応性の高い樹脂等と反応するためであると推測された。発火自体は小規模であり、他への影響のないものではあるが、安全上は防止すべきとの考えから、その対策を検討した。

発火に至る要件と考えられるもののうち、液化酸素の生成は防止できないことから、酸素と反応する材料の除去、酸素濃度の高い液体と水素の接触の極小化、着火源の除去等の

観点から検討し、以下の対策をとることにした。

弁体（GFRP 製）を、液化酸素適合性の材料（LO_x compatible）に変更した。具体的には、弁体を液化酸素適合性の高い樹脂である PCTFE（ポリクロロトリフルオロエチレン）で作製し、表面を金属（銅合金 C3771）被覆した。この被覆は、弁体表面に生じる可能性のある静電気の滞留を除去する効果も期待できる。ただ、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（液化酸素）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 4）。この機構の採用は、実運用時に、液化酸素が他の物質と反応する可能性を除去するためには、滴下部直下で回収することが根本的な対策になると考えられるためである。

一方、今回の現象では明確な着火源が見当たらないことから、液化酸素の液化水素への滴下に伴うキャビテーション現象による可能性を検討した。液相の中に生じた気泡が崩壊するときに衝撃波が生じ、局所的な高温場が形成されるとの仮説によるもので、極低温における液体中の気泡の挙動を調べた。現状では明確な高温場の形成は確認できなかったが、その可能性を示唆する現象はみられた。今後の課題として検討が必要である。



図 4．液化空気回収トレイ

3-1-3. スイベルジョイントの開発

(1) 基本設計（方式の検討）

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）として、断熱性を有する方式として、一方を他方に差し込むタイプ（バイヨネット型）が考えられる。しかし、液化水素のような極低温の流体用で表面温度を高く保持するためには固体伝熱部の長さを長くする必要から差込量が大きくなり、メンテナンスが困難になる。この問題を解決するために、図 5 に示すように、継ぎ手部に真空断熱を適用することにより嵌合部が短くて済むタイプを考案した（VI（Vacuum Insulation）型とよぶ）。双方の特徴を比較検討した結果、表面温度、機能性、製作難易度、構造への負荷などで VI 型が優れ、入熱量は VI 型の方が大きくなると評価された。入熱量の差はシステム全体の熱損失に比較して小さいことから、総合的な判断として VI 型スイベルジョイントを採用することにした。

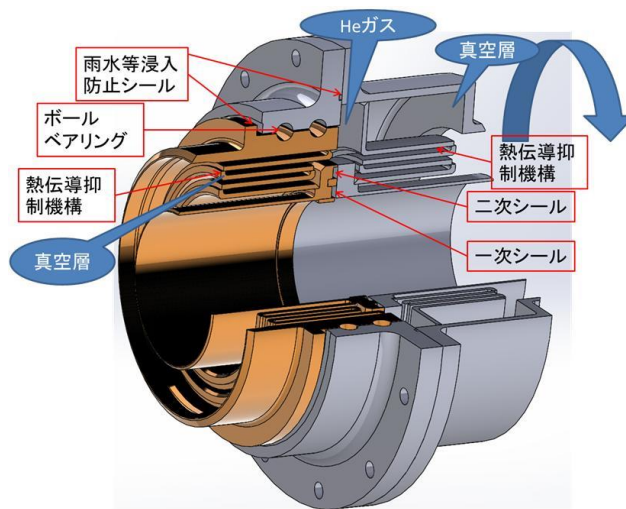


図 5. VI 型スイベルジョイント

(2) シール材質・構造試験

シールの構造と材質の選定を目的に、シール挿入部だけを VI 型スイベルジョイントの寸法・形状で作製した供試体を用いて、JAXA 能代ロケット実験場で液化水素を用いた漏洩量確認試験を行った。バネ材質としてコバルト合金（厚手及び薄手）、ステンレス鋼（この順にバネ力は弱くなる）の 3 種、樹脂として低温での耐摩耗性の期待できる樹脂 3 種を対象として、これらの組み合わせを評価した。

液化水素を試験体内に封入し、固定状態で圧力をかけて液化水素漏洩量を測定する低温漏洩確認試験、試験容器に液化水素を導入し、静止状態で加圧しながらスイベルジョイントのシール部（1 次シール）からの水素ガスのリーク量を測定するシール性能確認試験、液化水素中でスイベルジョイントを回転させた状態で加圧し、シール部からの水素リーク量を測定する低温回転漏洩確認試験を実施し、バネ材としてはコバルト合金を、また樹脂では 1 種が選定された。

(3) 液化水素性能評価試験

選定されたコバルト合金－選定樹脂シールを用いて、図 6 に示すような真空二重管に接続されたスイベルジョイントの試験体を作製し、液化水素条件下で耐久試験を実施した。試験は、首振り角 $6 \sim 25^\circ$ の範囲で往復回転運動を与え、40 万往復（約 3 カ月）実施したが、途中、12 万往復及び 24 万往復で試験を中断して分解し、摩耗等の点検を行い、ボールレースの圧痕幅がボール径の 8% 以下であること、シール面とボールレースに著しい摩耗のないこと、及び試験中は回転抵抗が著しく増加しないことを確認した。

コバルト合金を厚くすることでバネ力を強化したシールが、1 次シールからの漏洩量で、最大値、平均値ともに良好な結果を得られた。全試験時間約 1,111 時間の内、2 分間だけ目標値（1,500cc/min）を超えた期間があったが、ただちに復旧したこと、外部漏洩はなかったことから、総合的には問題ないと判断できた。原因は、摩耗粉が一時的にシール面に滞留したため凹凸が生じてリークが増大したが、その後、摩耗分が脱落してシール性が復旧したものと判断された。これらの試験により、バネ力を強化したシールを採用することと

し、液化水素用スィベルジョイントの開発は完了した。



図 6．スィベルジョイント耐久試験

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の、内管と外管の温度差によ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、熱応力解析、改良案の検討、再解析といったプロセスをローディングシステム全体に対して行い、最終的に熱応力が許容範囲内に収まることを確認し、ローディングシステム全体の設計を完了させた。

設計を完了したローディングシステムは、動作試験のために東京貿易エンジニアリング長岡工場で製作した。試作ローディングシステムの概観を図 7 に、主な仕様を表 1 にそれぞれ示す。試作した液化水素用ローディングシステムを用いて、液化水素基地での作動範囲を想定した性能確認試験を行った。その結果、作動範囲、バランス、警報装置の作動、ERS 切離しのいずれも所定の仕様を満足し、性能が確認された。最後に液化窒素を充填した低温試験を実施し、液化水素用ローディングシステムの開発は完了した。



図 7．製作した液化水素用ローディングシステム

表 1．製作した液化水素用ローディングシステムの概要

アーム長さ		11.5m
ベースライザー高さ		5.5m
管部	材質	SUS316L
	構造	真空二重構造。外力は外管で受け、内圧は内管で保持
液化水素移送時の推定温度		内管20K、外管300K
移送能力		400m ³ /h、1MPa
主要要素		アーム駆動装置、スィベルジョイント、緊急離脱機構

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．液化水素の特性の把握

液化水素の特性について、文献等より調査をして整理した。文献で得られなかった液化水素の蒸発速度、蒸発時の水素濃度の変化、水素ガス火炎の放射発散度、水素火炎の消火特性等は実験により求めた。

火災に関しては、船上で液化水素が送液される配管系統はすべて二重配管となっているため、外部に液化水素または水素ガスが漏洩する可能性は極めて低く、水素火災は想定し

にくい。また、漏洩した水素ガスに着火した場合、消火しても未燃水素ガスへの再着火の危険性があることから、一般的には、積極的に消火することはせず、漏洩箇所至近の弁を閉止した後、水噴霧による延焼回避に努めることにより燃焼させる対応がとられる。しかしながら、大洋航海中の船上にあっては逃げ場がないことから、想定外の水素火災に対して消火という選択肢の有無を把握しておくことは必要であると考え、水素火災の消火特性を確認した。

水素ガスの漏洩の場合、ピンホールから漏洩したことを想定すると、小型の粉末消火器又は射水により消火可能なことを確認した。液化水素については、一定時間継続して液化水素が流出し、プールした状態で液体表面から気化する水素ガスに着火することを想定した。大型の粉末消火器から供給される消火剤を水平方向に噴射可能な特殊ノズルを活用したところ、一部の条件下であれば消火可能であることを確認した。

3-2-2. 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。その結果を、作業フェーズで分類したものを表2に示す。

表2. 液化水素荷役に関連して想定される事故（ハザード）

フェーズ	ハザード
航行、着栈準備、着栈	衝突、電源喪失、座礁、荒天、通信の途絶、着栈システムの故障、接岸操作の失敗
荷役準備	ギャングウェイの故障、光ケーブルの接続不良、通信機器の故障、ローディングアーム(ホース)の接続不良、配管の過圧(リークテスト時、酸素パージ時)、パージ不足、配管の過圧(窒素パージ時)、H ₂ ガス漏えい、ウォーターカーテン装置の不具合、ESDテストの失敗(ホット時)、タンクの減圧失敗、LH ₂ 供給速度の異常による熱応力、ESDテストの失敗(コールド時)
荷役	バラスト調整の失敗、ベーパーラインの閉塞(積荷役時、揚荷役時)、リキッドラインの閉塞(積荷役時、揚荷役時)、過積載(積荷役時)、ESD作動(配管液封)、陸側送液システムの停止(積荷役時)、カーゴポンプの停止(揚荷役時)、火災(非カーゴ)、陸側BOG処理システム故障、船体移動、小規模漏えい、中規模漏えい、大規模漏えい
荷役後処理	残液押し込み失敗、配管の過圧(水素パージ時、窒素パージ時)、ローディングアーム(ホース)切り離しに失敗、ギャングウェイの切り離しに失敗、ケーブルの切り離しに失敗、ウォーターカーテンの停止に失敗
離栈	離栈失敗

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。リスクが大きいハザードについては、リスクを低減するために必要となる安全対策の検討を行い、対策が適切に実施された場合のリスクを再評

価した。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。専門家として液化水素運搬船及びローディングアーム設計担当者、船舶の荷役・運航、海上防災、航行安全に係る有識者及び実務者、関係官庁担当官（国土交通省、海上保安庁、経済産業省、総務省）、リスク評価専門家を招聘した。

各ハザードに対して影響度 (Severity Index, SI) と発生頻度 (Frequency Index, FI) からリスク指標 (Risk Index, RI) を決定し、3 つのリスククライテリアを設けて検討した。RI が高レベル (H) にあるものは、費用対効果に関わらずリスク低減策を考えるべきハザード、中間レベル (M) にあるハザードは、合理的に実現可能な限りリスクの低減策を考慮すべきものとした。RI が低レベル (L) である場合、本件では特に対策が必要なハザードとしては扱わない。

分析の結果、リスクレベルが H となる受容できないハザードは存在せず、RI が M レベルのリスク指標が推定されたハザードは 16 件あった。これらについて、水素の特性を考慮した安全対策の検討を行い、安全対策が適切に導入された場合のリスク指標を再評価した結果、RI が M のハザードは 8 件となった。それらについては、オペレーションの遅れに結び付くなどの軽微な影響に留まるか、水素によらない火災等、船一般に共通するハザードであり、更なるリスクの低減を図ることのできる有効な対策が見当たらないハザードや、事故統計上、液化水素運搬船に限らず一定の頻度で発生するハザードであった。このため、これらはいずれも許容できないリスクとは判断されず、許容できないリスクがあるシナリオはないことが確認された。

3-2-3. 運用マニュアル

船陸間での液化水素荷役については、現状で想定されている船陸双方の荷役設備等を前提とした手順を策定した。荷役手順の策定にあたっては、LNG 荷役手順をベースとして、液化水素の特性を考慮した検討を行った。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液化水素では水素ガスを使用する)、窒素パージ (同様に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)、カーゴコンプレッサー準備 (カーゴコンプレッサーでは水素ガスをシールガスとして使用する)、タンク／アーム／ラインのクールダウン (発生する水素ガスを陸上基地で処理する必要があるためタンククールダウンは着岸後に行う) 等で変更が必要であることがわかった。これらを含め、船員向けの運用マニュアルを作成した。表 3 にマニュアルの構成を示す。

表 3. 船員向け運用マニュアルの構成

1 章	液化水素の性質	8 章	遠隔／自動／監視／制御システム
2 章	低温材料	9 章	安全計装
3 章	液化水素運搬船の概要	10 章	検尺
4 章	液化水素運搬船の断熱対策	11 章	カーゴオペレーション
5 章	液化水素運搬船の荷役機器	12 章	健康障害、流出及び非常装置
6 章	液化水素運搬船の配管・各種バルブ	13 章	液化水素火災
7 章	ボイルオフガス		

3-2-4. 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。検討にあたって、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。その結果、液化水素運搬船の入出港を安全に行うためには、以下の調査・検討が必要であるとの結論を得た。

- 港湾事情調査…バースの位置する港湾の特徴を確認するため、風・波・潮流などの外力特性や、船舶の輻輳状況、海難の発生状況などについて情報を収集・整理する。
- 操船水域に係る検討…港内における本船の操船に係る水域のうち、航路幅員、水深等を調査し、回頭水域が確保できることを確認する。
- 着岸時及び係留中の安全性検証…本船が計画された位置からずれて着岸した場合であっても、特定の防舷材に過度な荷重がかからないことを確認する。
- 運用基準の策定…上の検証結果を受け、運用基準を策定する。

また、荷役安全管理体制、入出港時・着岸中の連絡体制の構築が必要であり、荷役の安全対策とともに、海難緊急時の初動対応及び地震・津波対策の策定しておくことが必要である。

航行安全対策では、港湾ごとの特性・事情を考慮した対策が必要であるため、本研究では、ケーススタディを実施して安全性を確認した。対象は、現在開発が進む液化水素運搬船と、基地建設予定地である神戸港とした。一例として、船間保安距離についての検討結果を示す。船間保安距離は荷役船舶から他の停泊船舶や付近航行船舶までの距離のことであり、法令により距離が 30m 以上であること、及び付近航行船舶が 30m 以上離れて航行する余地が十分あることが規定されている。このため、液化水素運搬船が係留・荷役する岸壁において水素ガスを放出する条件（ガスベントの高さ、放出口の径など）から、放出された水素ガスの拡散についてシミュレーションを行い、風速条件が最悪の場合でも LEL（爆発下限界）以上の水素ガスが最も遠方に到達する距離が 30m 未満であることが確認され、現行の規定で安全が確保されることを確認した。

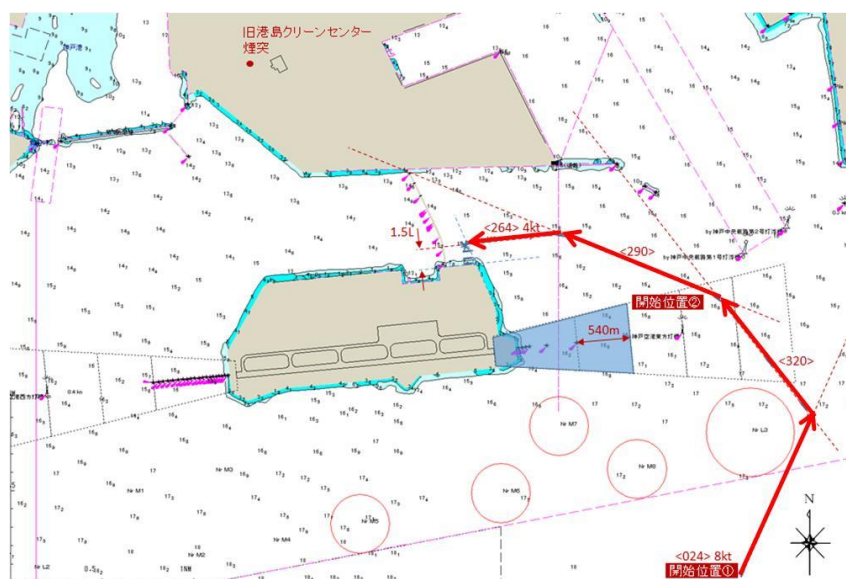


図 8. 対象とした海域（神戸港）の概況図



図 9. シミュレータによる操船実験

また、神戸港の環境条件（自然環境・他船交通流等）、港内の操船環境や、検討対象とする液化水素運搬船の仕様等を踏まえた操船シミュレータ実験を実施し、入港着岸及び離岸出港時における運用条件と、その安全性（制御余裕）を確認した。日本海洋科学が所有する操船シミュレータに、液化水素運搬船の諸元及び操船特性、神戸港における地理的条件や気象海象等による外力条件及びタグボートの隻数・馬力等を入力し、操船者がシミュレータ上で本船及びタグボートを制御することにより、入出港操船時における安全性を検証した。操船は、この海域での経験の深い水先人に依頼した。シミュレータ実験には、学識経験者、運航実務者（水先人、船長等）、関係官公庁が立ち会った。図 8 に検討対象の海域の図を、図 9 に専門家によるシミュレータ実験の様子をそれぞれ示す。

操船シミュレータ実験では、貨物タンク容量に対する載貨重量が小さいという液化水素運搬船の特徴をふまえ、入出港、載荷（積載）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設定を行い、実験時の状況に応じて、操船者及び海技免状を有する評価者により設定条件の変更・省略・追加を行った。その結果、合計 17 ケースの条件設定を行い、操船シミュレーションを実施した。設定条件には、入港及び出港のそれぞれのケースについて入船左舷着け及び出船右舷着けが含まれ、夜間の入港及び出港、緊急時を想定したタグボートの支援を受けない出港も含めた。実験の結果及び操船者を含む専門家の意見により、神戸港における運用条件として以下のような運用条件を得た。

- 着岸中止基準：平均風速 10m/sec 以上、有義波高 0.5m 以上、視程 1,000m 未満
- 離岸基準：平均風速が 15m/sec を超えることが予想された場合
- 荷役中止基準：平均風速 10m/sec 以上、有義波高 0.5m 以上
- 係留限界基準：平均風速 15m/sec 以上、有義波高 0.5m 以上

また、緊急時にタグボートの支援を受けずに出港することを想定した場合、右舷着け出船着棧が望ましいとの結論も得た。

3-2-5. 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。

液化水素運搬船の建造・運用及び液化水素基地の建設・運用に関係す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、以下の点に留意した安全対策を構築することが必要であることがわかった。

液化水素を取り扱う上で留意すべき水素の特性は以下の通りである。

- 最小着火エネルギーが小さく、静電気でも引火することがある。
- 水素ガスの漏洩の検知には水素専用のガス検知器が必要である。
- 水素ガスの炎は無色であるため、肉眼では視認できない。
- 水素ガスの炎は輻射熱が小さいため、赤外線センサーでは検知できず、紫外線センサーが必要となる。

以下の安全・防災設備及び資機材を設置することが必要である。

- ESDS（緊急遮断システム）
- ERS（緊急離脱機構）
- 水素ガス用漏洩検知警報設備
- 除電棒
- 水素火炎を検知可能な紫外線検知センサー
- 水幕設備
- 消火設備（水素ガス火災への対策が主となる）
- 防火設備

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は以下の通りである。

- 異常気象・海象対策…地震及び津波に対する安全対策、荷役中止基準及び緊急離棧基準等
- 防災組織…休日・夜間を含む防災組織の構成と作業分担
- 緊急通報体制…船陸両側の緊急通報体制
- 応援協力体制…災害状況等の関係官庁への報告と関係官庁の指示を受ける体制。消防設備船を有する運航会社と災害時の事故処理体制の確立。
- 教育訓練…防災組織の要員の災害発生・拡大の防止に関する技術知識・技能の取得
- 栈橋又は岸壁上の安全・防災設備の配置

3－3．国際規格化及び技術交流の推進

（1）国際規格化

液化水素の輸送は国際間で行われることが想定されており、各港湾での荷役を円滑に行うために、ローディングシステムには何らかの標準化が必要である。また、開発された技

術及び検討された安全対策は、規格化することにより普及を図ることができる。このため、本プロジェクトでは2件の国際規格の原案作成に着手した。

低温液体移送用のローディングアームの技術規格として、LNG用ローディングアームの規格であるISO 16904 (Design and testing of LNG marine transfer arms for conventional onshore terminals) がすでに広く利用されている。これをベースとして、液化水素用のローディングアームのISO規格の原案を作成した。作成した原案「Ships and marine technology — Design and testing of marine transfer arms for liquefied hydrogen」は、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。表4にISO規格原案の目次を示す。

表4．ISO 原案（ローディングシステムの設計と試験）の目次

1. Scope	7. Connection with the ship
2. Normative references	7.1 General
3. Terms and definitions	7.2 Flange cover
4. Abbreviated terms	8. Hydraulic and electric control systems
5. Design of the arms	8.1 General
5.1 Definition of the length and the configuration of the arms, arms description	8.2 Arms operations
5.2 Design basis	8.3 Hydraulic components
5.3 Swivel joints	8.4 Electric components
5.4 Structural bearings	8.5 Testing of control systems
5.5 Accessories	8.6 Remote control
5.6 Pipework and fitting	8.7 Transfer arms jetty control console
5.7 Welding	9. Inspection and tests
5.9 Maintenance	9.1 General
6. Safety systems	9.2 Prototype test
6.1 General	9.3 Manufacturing inspection and tests
6.2 Two stage alarm and shutdown system	9.4 Factory acceptance tests
6.3 Monitoring and alarm systems	9.5 Site acceptance tests
6.4 ERS	10. Quality assurance and control
6.5 Safety devices	11. Required documentation
	Annex A (informative) Design data sheets
	Annex B (informative) Reference table and figures

また、LNGの荷役オペレーションに係る国際標準規格であるISO 28460（船舶と陸側のインターフェースと港湾オペレーション）をベースに、LNGを液化水素荷役に置き換えた場合の課題を整理した。国際規格化に向けた課題について検討を行い、原案（Ship-to-shore interface and operations for liquefied hydrogen）を作成した。本規格案に関しては、液化水素運搬船の実証事業が研究開発途上にあり実用段階までに更なるハードウェアの開発が見込まれることから、現時点で国際的合意を視野にいたした標準化を推進することは時期尚早と考えられることから、実証試験等を行ったうえで国際提案を行うことが適当と考えられる。

（２）液化水素技術国際ワークショップ

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、国内外の主要な企業の技術者や研究者を招き、液化水素分野に関する包括的な議論や意見交換を行う機会の提供と、多くの知見と最新情報を関係者間で共有する場としての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２日に、京都市のリーガロイヤルホテル京都で開催し、講演者18名を含み、約150名の参加があった。基調講演として、わが国の水素事業における研究開発の概要、水素に関する米国の活動概要、欧州における国際的水素動向、国際エネルギー機関（IEA）の水素技術ロードマップ及びわが国の液化水素の最近の動向と将来ビジョンが講演された。「技術ワークショップ１：世界の主要プレーヤーの動向」として、リンデ社、エアリキードアドバンスドテクノロジーズ社、プラクスエア社及びエアープロダクツジャパン社から、各社の取り組みの紹介と液化水素利用・研究開発における課題についての話題提供があった。「技術ワークショップ２：液化水素の先端技術」では、ドレスデン工科大学、東京大学、米国航空宇宙局（NASA）から研究機関における最新技術の紹介があった。「技術ワークショップ３：液化水素の新しい利用」では、LBST社、川崎重工業、岩谷産業から大規模水素利用への取り組み状況が紹介された。その後、講演者を主なメンバーとして、「液化水素利用・研究技術開発の促進に向けて」というテーマでパネルディスカッションが開催され、液化水素技術開発のオープンイノベーション化の可能性と課題についての討論が行われた。



図10．第2回液化水素技術国際ワークショップ

第2回液化水素技術国際ワークショップは、2018年10月24日に神戸市のホテルクラウンパレス神戸で開催し、講演者を含め約160名の参加者があった（図10）。基調講演として、本田技術研究所（Hydrogen Councilの代表）、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）、ゼロ・カーボン・エナジー・ソリューションズ（米国）、ノルウェー産業科学技術研究所から液化水素に関するプロジェクトと技術動向に関するトピックスが紹介された。「液化水素関連技術の開発状況」のセッションでは、エア・リキード社、岩谷産業、リンデ・クライオテクニク・プロセスエンジニアリング社から最新技術の紹介があった。「液化水素の海上輸送」のセッションでは、技術研究組合CO₂フリー水素サプライチェーン推進機構（HySTRA）から国際液化水素サプライチェーンの紹介があ

り、国土交通省から液化水素の海上輸送に係る国際基準の説明があった。その後、本プロジェクトの成果として、「液化水素船舶輸送用アームの開発」及び「液化水素タンカー運航における安全性評価」について報告した。

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、海上輸送に必要な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、まずローディング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の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イベルジョイントについて、熱・強度解析を実施し、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、基本設計・詳細設計を行って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）の原案を作成し提案を行った。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室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、適宜見直す必要がある。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

（1）論文発表

＜査読付き＞ 2件

- 猪股昭彦、梅村友章、河合務、成尾芳博、丸祐介、千田哲也、武田実：「液化水素用緊急離脱機構の熱応力特性」、日本マリンエンジニアリング学会誌、54 巻第 1 号 97-102 (2019)
- A Inomata, T Umemura, J Kawaguchi, T Kawai, Y Naruo, Y Maru, T Senda and M Takeda: “Performance test and analysis of the developed emergency release system for liquefied hydrogen installed in loading systems”, Proceedings of 27th International Cryogenic Engineering Conference (2018) 掲載予定

（2）学会等発表 国内 2 件

- 猪股昭彦、梅村友章、河合務、成尾芳博、丸祐介、武田実、千田哲也：「液化水素用緊

急離脱機構の熱応力特性」、日本マリンエンジニアリング学会第 88 回学術講演会、岡山市（2018 年 10 月 30 日）

- 青山憲之、米原章浩、今井尚義、山本一、向井英之、千田哲也、猪股昭彦：「液化水素運搬船の運用に係る安全対策」、日本マリンエンジニアリング学会第 88 回学術講演会、岡山市（2018 年 10 月 30 日）

（3）プレス発表

なし

（4）マスメディア等取材による公表

なし

5．特許出願実績

なし

6．参考文献

なし