

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「運用上の安全対策の策定、安全確保に向けた基準規則の整備」

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：中村 紳也

所属研究機関：株式会社日本海洋科学

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. 豪州の動向・法制度に係る調査	
3-2. 液化水素の特性の把握	
3-3. 液化水素の荷役手順の策定	
3-4. 事故発生要因と事故シナリオ	
3-5. リスク分析とリスク低減措置の検討	
3-6. 船員向け運用マニュアルの策定	
3-7. 航行安全面における運用条件の取りまとめ	
3-8. 海上防災面における運用条件の取りまとめ	
3-9. 安全基準の整備	
3-10. 国際規格案の策定	
3-11. 今後の課題	
4. 外部発表実績	28
5. 特許出願実績	28
6. 参考文献	28

図表一覧

図1. 液化水素の蒸発速度測定実験の概要
図2. 液化水素の海上流出を想定したガス濃度測定実験の概要
図3. 水素ガス燃焼炎の放射発散度の測定実験
図4. 粉末消火器による水素ガス火災の消火実験
図5. 射水による水素ガス火災の消火実験
図6. 持ち運び式消火器による液化水素火災の消火実験
図7. 液化水素の揚荷役の手順
図8. 液化水素の積荷役の手順
図9. リスク分析とリスク低減措置の流れ
図10. リスクマトリクス例
図11. 船間保安距離の概要
図12. ベントマストからの水素ガスの拡散シミュレーション結果
図13. 操船シミュレータ実験における着岸局面例
図14. 神戸港における液化水素運搬船の配索例
図15. 一般要件と個別港湾において必要となる安全性検証のイメージ

- 表 1. 豪州における液化水素の取り扱いに係る法制度及び規制に係る調査
- 表 2. 液化水素荷役等で想定される事故
- 表 3. 液化水素荷役で想定される事故シナリオ
- 表 4. 液化水素荷役で想定される事故シナリオ（続き）
- 表 5. 抽出されたハザードの一覧
- 表 6. 液化水素運搬船に乗り組む船員向けの運用マニュアルの章立て
- 表 7. 神戸港の液化水素基地に整備すべき安全防災設備と設置場所等
- 表 8. 神戸港の液化水素基地に整備すべき防災設備と設置場所等

1. 本研究の目的

水素は燃焼時に二酸化炭素を排出し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有していることから、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、来たる水素社会においては大量の消費が見込まれている。

水素社会で見込まれる大量の水素需要に対応するためには、国内での製造のみならず、海外で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することにより日本へ海上輸送する一連の水素サプライチェーンの確立が必要となる。

本研究開発の対象である液化水素ローディングシステムの開発と、それに関係するルール整備については、上記水素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と、国内の液化水素基地における液化水素運搬船からの荷揚げの作業において、船陸双方の設備を結ぶ重要なインターフェースとなるものであり、水素の安定供給の観点から欠くことができない。しかしながら、液化水素用ローディングシステムは未だ世の中に存在しておらず、また、関連する安全対策や安全基準も整備されていない状況にある。

そのような状況の中、本研究開発においては、実用化レベルの液化水素ローディングシステムを開発することと並行して、液化水素運搬船の入出港、荷役作業の全般を通じた様々なリスクを考慮・検討した安全なオペレーションを実現するため、液化水素荷役の安全対策及び手順書を策定した。

また、液化水素荷役は前例がないことから、関係する国内法令等への整合を確認するとともに、来たる水素社会において我が国及び日本企業が世界で優位性を持って主導的役割を果たすこと目指し、それらの基準の国際規格化の基礎を策定した。

2. 研究開発目標とマイルストーン

研究開発目標の達成に向けた5年間にわたる研究開発の経過を以下に示す。

【平成26年度】

マイルストーン：海外調査報告書の作成

- ✓ LNG（液化天然ガス）の荷役手順を基に、液化水素の特性及び関連機器の使用を考慮した荷役手順の策定に着手
- ✓ 液化水素の荷役及び海上輸送について関係国（特に豪州）の動向や法制度の整備状況を調査

【平成27年度】

マイルストーン：事故発生要因・事故シナリオの取りまとめ

- ✓ 液化水素の荷役作業を分析し、発生し得る事故とその発生要因を精査
- ✓ 他船の異常接近、液化水素運搬船のブラックアウト（電源喪失）、液化水素漏洩・引火等、考え得る主要な事故シナリオを精査
- ✓ 液化水素の特性及び関連機器の使用を考慮した荷役作業の手順を策定
- ✓ 策定した荷役手順を評価し、安全性を高められるよう必要に応じて修正した上で、船員向けの運用マニュアルの策定に着手

- ✓ 精査した事故シナリオを基に、各リスクの発生可能性と重篤度を分析し、リスク低減措置を検討（Pre-HAZID 会議を開催）

【平成 28 年度】

マイルストーン：リスク低減措置を考慮した上で許容できないリスクとなるシナリオが 0 件、及び、船員向けマニュアル案の作成・取りまとめ

- ✓ 策定した事故シナリオを基に、各リスクの発生可能性と重篤度を分析し、リスク低減措置を検討（HAZID 会議を開催）
- ✓ 船員向けの運用マニュアルを策定
- ✓ 液化水素の荷役・係留の限界条件や入出港等の運用の条件について検討するための係留動揺シミュレーション及び操船シミュレーションを実施
- ✓ 安全基準の整備に向け、高圧ガス保安法、消防法及び船舶安全法等の関係法令への対応について関係当局と調整

【平成 29 年度】

マイルストーン：運用条件の取りまとめ

- ✓ 関係法令に基づく安全基準を整備
- ✓ 公益社団法人 日本海難防止協会と連携し、運用の安全を示すために荷役・係留の限界条件や入出港等の運用条件等を検討

【平成 30 年度】

マイルストーン：安全基準の整備

- ✓ 関係法令に基づく安全基準を整備
- ✓ 策定された安全対策を国際規格化するため、一般財団法人 日本船舶技術研究協会と協力し、液化水素荷役に係る国際標準（ISO）のドラフトを作成

3. 研究実施内容

3-1. 豪州の動向・法制度に係る調査

(1) 調査の概要

本調査では、豪州における液化水素積み出し基地建設が予定されているビクトリア州における船舶側及び陸上側の法制度及び規制等に関し、表 1 に示す調査項目について机上調査及び現地調査を実施した。

現地調査では、以下の機関を訪問し、情報を収集した。

【中央政府機関】

- ✓ Australian Maritime Safety Authority（海事安全局）
- ✓ Environment Protection Authority（環境保護局）

【地方政府機関】

- ✓ Transport Safety Victoria（交通安全局）
- ✓ Victoria Work Cover Safety（労災関係局）
- ✓ Port Authority（港湾管理者）

表 1. 豪州における液化水素の取り扱いに係る法制度及び規制に係る調査

No.	調査項目	備考
1	積込基地設計	法規制
2		タンク、建屋、可燃物、火気、電気品、公道、保安距離など
3	基本運転条件	防災設備
4		防災、消防、耐風など
5		操作・監視方法
6		防災、消防、耐風など
7	積込時	体制、資格(スキル)、人数など
8	防災要件(基準)・設備	荷役(積荷)時間
9		時間的制約の有無など
10		港湾内航行
11		時間的制約、気象・海象に係る制約の有無など
12		荷役・港内航行の安全対策
13		安全確保の所管長や手続きなど
14		消防
15		防災の要件・基準、設備の要否・要件
16	防爆	
17	耐風	
18	防災の要件・基準、設備の要否・要件	
19	接地	
20	防災の要件・基準、設備の要否・要件	
21	対雷	
22	防災の要件・基準、設備の要否・要件	
23	耐震	
24	防災の要件・基準、設備の要否・要件	
25	津波対策	
26	防災の要件・基準、設備の要否・要件	
27	保安距離	
28	基地内の設備・施設間	
29	保安距離	
30	基地周辺の設備・施設間	
31	安全要件	許容漏洩量(一時的な作業向け)
32		ローリー・タンク間、ローディングアーム・本船マニホールド間の作業向け
33		許容漏洩量(恒常的な設備向け)
34		バルブや配管など
35	緊急離脱装置の要否	
36	緊急離脱の許容時間	
37	作業時安全要求	
38	危険ガスの取扱い等	
39	信頼要件	定期点検
40		点検の項目・内容・方法や、インターバルなど
41	非常時用電源の要否	
42	無停電電源の設置など	
43	標準検査要領の策定	
44	溶接、耐圧・気密、低温、強度、絶縁、導通などの共通検査基準	
45	環境対策	環境規制
46		緑地規制の有無、排水・廃液・廃棄規制の有無など
47		環境規制(建設時)
48	騒音、塵埃、残土処理、廃棄物処理に係る規制など	
49	GH2廃棄条件	
50	廃棄に対する条件や制約、焼却設備の有無(ベントスタックかフレアスタック)など	

(2) 調査結果の概要

本調査の結果、液化水素の積出基地に適用され得る安全・環境規制全体を俯瞰すると、いずれも実績型・目標設定型の規制体系を採っており、個別具体的な要件が規定されているものではないことが明らかとなった。

そのため、安全確保・環境保護に関しては、液化水素の積出基地の建設・運用を計画する事業者による主体的・積極的な取組(安全対策・環境保護対策の検討、採用、効果の検証・証明等)が求められる。その際には、該当港の港湾当局およびハーバースターと協議しながら検討していくことが必要となる。

3-2. 液化水素の特性の把握

(1) 文献による調査

液化水素の特性について、文献等より以下の項目を中心に整理した。

- ✓ 物性
- ✓ 基本性質(無色、無味、無臭、無毒性)
- ✓ 温度
- ✓ 容積(気体・液体容積、熱膨張)
- ✓ 重量
- ✓ 燃焼特性(火炎の色・温度、発火エネルギー、可燃範囲、火炎伝搬速度、消炎距離)

(2) 実験による気化特性の調査

液化水素が気化する際の特性及び海上に流出した際の特性について、情報を収集するため、以下の実験を実施し、特性を把握した。

なお、下記実験については、安全上の観点より、船上及び港湾内における荷役時の緊急対応に係る知見と実績を有し、また、海上における消火活動に必要な機材及び要員を手配

するため、一般財団法人 海上災害防止センターの協力を得て、東京湾の第二海堡及び一般財団法人 日本自動車研究所の城里テストセンターにて実施した。

- ✓ 液化水素の蒸発速度測定実験：
後述する水素ガス拡散シミュレーションを実施する際の蒸発速度のパラメータを取得することを目的に、図1に示す測定実験を実施した。

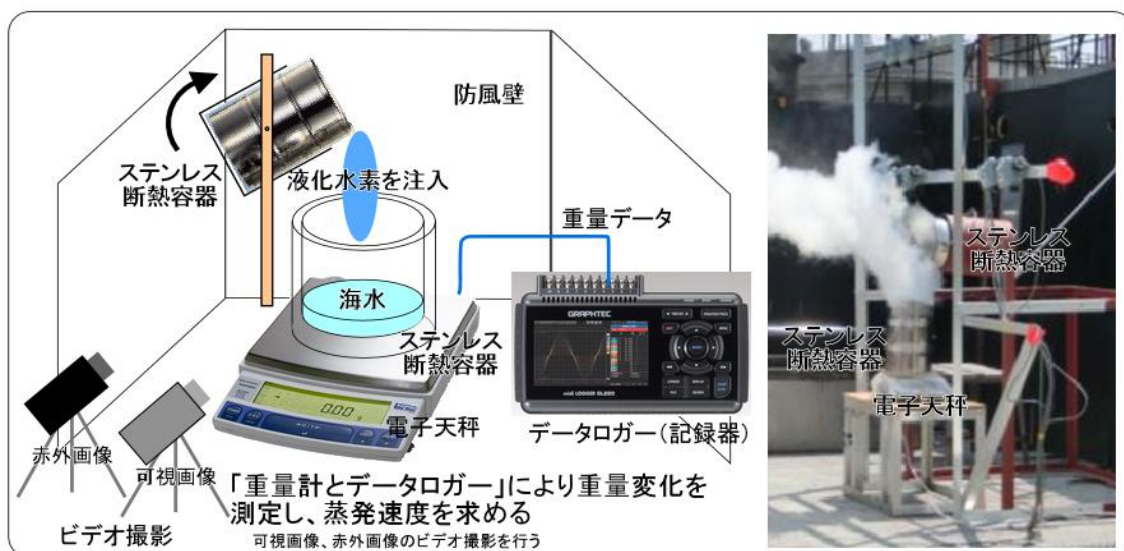


図1. 液化水素の蒸発速度測定実験の概要

- ✓ 開放大気中における水素ガス濃度の測定実験：
液化水素が海水に流出した後の蒸発・拡散の特性を把握するため、図2に示すとおり、海水を張ったプールに液化水素を投入し、その気化した水素ガスの拡散による濃度を水素ガスセンサーで測定する実験を実施した。

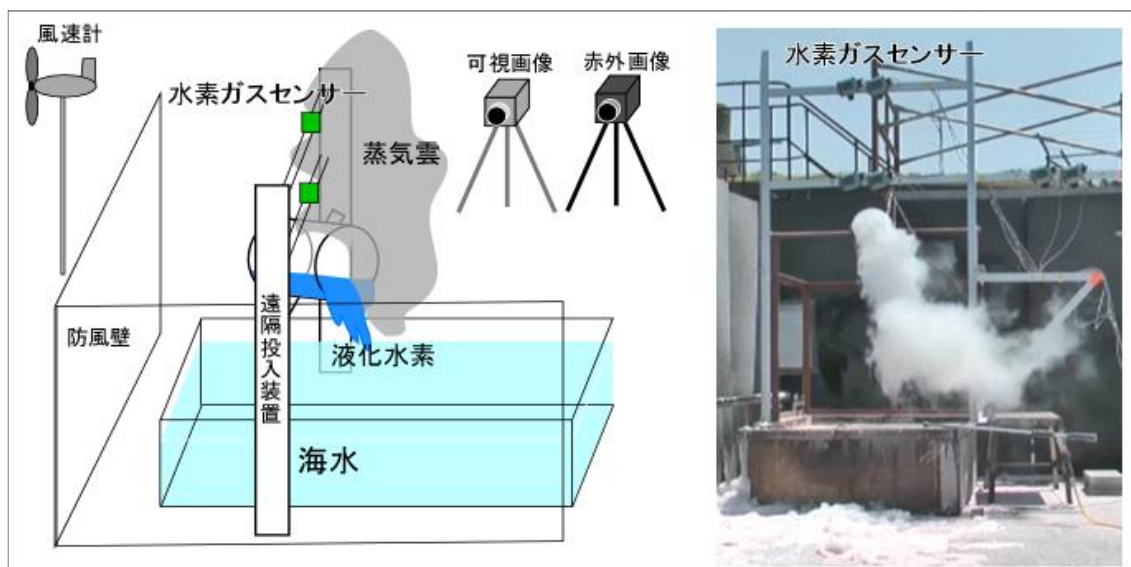


図2. 液化水素の海上流出を想定したガス濃度測定実験の概要

- ✓ 水素ガス燃焼炎の放射発散度の測定実験：
水素ガスに着火した際の炎の放射発散度を測定するため、液化水素から発生する水素ガスを燃焼させ、図3に示す熱流速計により放射発散度の測定実験を実施した。

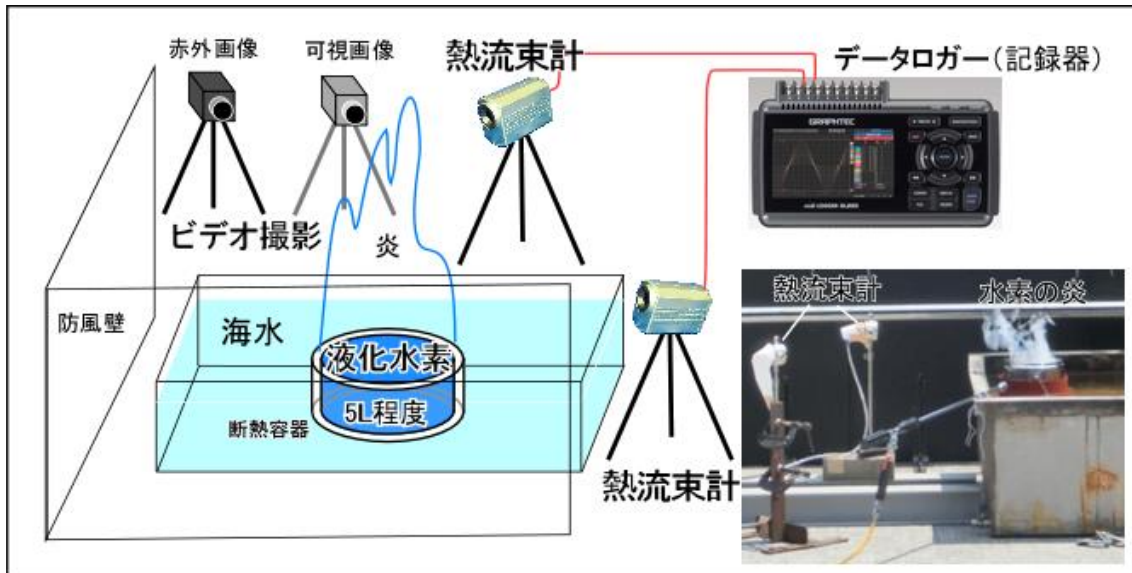


図3. 水素ガス燃焼炎の放射発散度の測定実験

(3) 実験による消火特性の調査

船上で液化水素が送液される配管系統は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い。万が一、甲板上に設置された二重配管の内管・外管ともにピンホールが生じた場合には、液化水素漏洩の可能性はあるが、内管ピンホールから出た液化水素はただちに蒸発し、水素ガスとなる。また、漏洩した水素ガスに着火した場合、強制的に消火を行うと、残留する未燃水素ガスに再着火する危険性がある。このため、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つつ、漏洩する水素ガスを燃焼させる対応が一般的である。しかしながら、大洋航海中の船上にあっては船員の逃げ場も限定されることから、事態の改善を図るために消火という選択肢の有無を把握することは有用と考えた。

以上より、以下に示す各種実験を実施し、水素ガス及び液化水素に着火した場合の消火可否及び有効な消火方法を実験で確認した。

1) 水素ガス火災に対する消火

ピンホールから漏洩した水素ガスに着火することを想定し、図4に示すとおり、小型の粉末消火器で消火可能なことを実験から確認した。

また、同様の条件に対して、図5に示すとおり、1条または2条での射水により消火可能なことも実験から確認した。



図4. 粉末消火器による水素ガス火災の消火実験



図5. 射水による水素ガス火災の消火実験

2) 液化水素火災に対する消火

液化水素の沸点は -253°C であり、流出した液化水素は急激に蒸発するため、液化水素が液のまま溜まることはないことから、想定し難い状況ではあるものの、液化水素が一定時間継続して流出し、プールした状態で気化する水素ガスに着火するという状況を想定した。図6に示すとおり、真空二重容器に液化水素を充填し、気化する水素ガスに着火した火炎に対して、粉末や泡、二酸化炭素などの持ち運び式消火器では消火が困難なことを確認した。

一方、既知の知見を基に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、短時間で大量の粉末消火剤を放射すれば消火可能であることを確認した。



(リン酸アンモニウム粉末)



(二酸化炭素)

図6. 持ち運び式消火器による液化水素火災の消火実験

3-3. 液化水素の荷役手順の策定

(1) 策定の概要

船陸間での液化水素荷役については前例がなく、荷役手順が確立されていないことから、現状想定される船陸双方の荷役設備等を前提とした荷役手順を策定した。

荷役手順の策定にあたっては、LNG 荷役との相違点のほか、以下に示す課題を中心に整理した。

- ✓ 液化水素に関する物性
- ✓ 液化水素の取り扱い
 - ・ 液化水素の温度を考慮した窒素と水素ガス（常温）の2段階パージの必要性
 - ・ 配管等設備の熱応力を考慮した冷却及び加温の速度
 - ・ 液化水素及び水素ガスの火災
- ✓ 液化水素運搬船の荷役機器等の整理
 - ・ 液化水素の温度を考慮した2重配管の必要性
 - ・ カーゴコンプレッサーのシールガスを窒素と水素ガス（常温）とする必要性
 - ・ 液化水素基地から水素シールガスの供給を受ける配管系統
- ✓ 液化水素基地の設備等の整理
 - ・ 液化水素の物性（温度等）を考慮したローディングシステム
 - ・ 液化水素の温度を考慮した2重配管の必要性
 - ・ 液化水素運搬船のカーゴコンプレッサーで使用する水素シールガスを供給するための配管系統
 - ・ 荷役の前後で水素ガス混じりの混合ガスの処理方法
- ✓ 液化水素の海上流出時の対策（防災体制を含む）
 - ・ 液化水素が海上流出した際の振る舞い
 - ・ 液化水素が気化する際の振る舞い
 - ・ 火災発生時の対応

(2) 荷役手順

上記を踏まえ策定した液化水素荷役の手順について、揚荷役を図7に、積荷役を図8に、それぞれ示す。

ここで、LNG 荷役との主な差異を以下に示す。

- ✓ シールガス配管の接続
本船カーゴコンプレッサーのシールガスに LNG 荷役と同様に窒素ガスを使用した場合、温度低下で固化することから、シールガスには水素ガスを使用する。当該水素ガスは陸上基地より供給するため、供給に必要な配管を接続する。
- ✓ N₂ パージ：
LNG 荷役と同様に配管を窒素ガスで O₂ パージしただけでは、高純度の液化水素に窒素が混入するだけでなく、配管内の窒素が荷役時の温度低下で固化し、機器設備を損傷させる可能性があることから、水素ガスで N₂ パージする作業を追加する。
- ✓ カーゴコンプレッサー準備：
積荷役で使用するため、カーゴコンプレッサーを準備する。この時、陸上基地から供給を受けた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：
液化水素運搬船ではクールダウン時に発生する水素ガスを陸上基地で処理する仕様となることから、タンククールダウンは着棧後に行うこととなる。
- ✓ H₂ パージ①：
荷役後、LNG 荷役と同様に窒素ガスでパージすると窒素が固化する可能性があるため、配管系統の昇温を目的に常温の水素ガスでパージを実施する。
- ✓ H₂ パージ②：
前項の H₂ パージ①を実施後、配管内の水素ガスを窒素ガスでパージする。当該窒素ガスは、LNG 荷役では本船タンクに戻すのに対して、高純度が求められる液化水素では、本船タンクに戻さずに陸上基地で処理する。
- ✓ シールガス配管の切り離し：
荷役開始前に接続したシールガス配管を切り離す。

	液化水素荷役	LNG荷役
	入港・着棧	
準備	<ul style="list-style-type: none"> 液ノリターンガスのアーム(ホース)接続 シールガス配管の接続 O₂パージ(N₂を利用) N₂パージ(H₂ガスを利用) 荷役前検尺 緊急遮断(ESDS)テスト カーゴコンプレッサー準備 (シールガスは陸上供給のH₂ガスも利用) アームノラインのクールダウン 	<ul style="list-style-type: none"> 液ノリターンガスのアーム接続 O₂パージ(N₂を利用) 荷役前検尺 緊急遮断(ESDS)テスト アームノラインのクールダウン
液移送	<ul style="list-style-type: none"> 揚荷役開始 レートアップ 定常荷役(フルレート) レートダウン 揚荷役終了 	<ul style="list-style-type: none"> 揚荷役開始 レートアップ 定常荷役(フルレート) レートダウン 揚荷役終了
手仕舞い	<ul style="list-style-type: none"> ライン残液処理(ドレインング) H₂パージ①(常温H₂ガスを利用) マニフォールド昇温 H₂パージ②(N₂を利用) (パージガスは陸上ベントスタック使用) 荷役後検尺 アーム(ホース)切離し シールガス配管の切り離し 	<ul style="list-style-type: none"> ライン残液処理(ドレインング) メタンパージ(N₂を利用) (パージガスは本船カーゴタンクへ) 荷役後検尺 アーム切離し
	離棧・出港	

注：黄色文字は液化水素荷役と LNG 荷役との相違点

図 7. 液化水素の揚荷役の手順

	液化水素荷役	LNG荷役
	入港・着棧	
準備	<ul style="list-style-type: none"> 液ノリターンガスのアーム(ホース)接続 シールガス配管の接続 O₂パージ(N₂を利用) N₂パージ(H₂ガスを利用) 荷役前検尺 緊急遮断(ESDS)テスト カーゴコンプレッサー準備 (シールガスは陸上供給のH₂ガスも利用) タンクノアームノラインのクールダウン 	<ul style="list-style-type: none"> 液ノリターンガスのアーム接続 O₂パージ(N₂を利用) 荷役前検尺 緊急遮断(ESDS)テスト アームノラインのクールダウン カーゴコンプレッサー準備 (シールガスは船内のN₂を利用)
液移送	<ul style="list-style-type: none"> 積荷役開始 レートアップ 定常荷役(フルレート) レートダウン 積荷役終了 	<ul style="list-style-type: none"> 積荷役開始 レートアップ 定常荷役(フルレート) レートダウン 積荷役終了
手仕舞い	<ul style="list-style-type: none"> ライン残液処理(ドレインング) H₂パージ①(常温H₂ガスを利用) マニフォールド昇温 H₂パージ②(N₂を利用) (パージガスは陸上ベントスタック使用) 荷役後検尺 アーム(ホース)切離し シールガス配管の切り離し 	<ul style="list-style-type: none"> ライン残液処理(ドレインング) メタンパージ(N₂を利用) (パージガスは本船カーゴタンクへ) 荷役後検尺 アーム切離し
	離棧・出港	

注：黄色文字は液化水素荷役と LNG 荷役との相違点

図 8. 液化水素の積荷役の手順

3-4. 事故発生要因と事故シナリオ

(1) 液化水素荷役等で想定される事故

液化水素運搬船の入出港や荷役作業については、既に知見が蓄積されている LNG の荷役とは異なる作業で事故が発生する可能性があり、液化水素の特性を考慮することが必要となる。

そのため、LNG 荷役における知見を踏まえつつ、前節にて策定した液化水素の荷役手順で想定される事故を洗い出し、精査した。液化水素荷役等において想定される事故について、作業フェーズ毎に精査した結果を表 2 に示す。

表 2. 液化水素荷役等で想定される事故

作業フェーズ	想定される事故	作業フェーズ	想定される事故	
航行	他船の衝突 航行不能	移送	バラスト水の放出停止	
着棧	接岸操作の失敗		ベーパーラインの閉塞	
通信接続	ニューマチックラインの接続不良		リキッドラインの閉塞	
通信テスト	機器の故障		陸側圧送システムの停止(積荷時)	
アーム接続	接続不良		カーゴポンプの停止(揚荷時)	
リークテスト(GN ₂ 供給)	配管の過圧		外部火災	
O ₂ パージ(N ₂ 置換)	配管の過圧 パージ不足		ESDの失敗	
N ₂ パージ(常温H ₂ 置換)	配管の過圧		ERSの失敗	
ウォーターカーテン開始	装置の不具合		陸側BOG処理システム故障	
ESDテスト(ホット時)	ESDの失敗		他船の進入・衝突	
タンク内槽圧力減圧	減圧失敗		H ₂ パージ(常温H ₂ 置換)	配管の過圧
アーム/ライン冷却	供給速度の異常による熱応力		H ₂ パージ(N ₂ 置換)	配管の過圧
ESDテスト(コールド時)	ESDの失敗		アーム切り離し	切り離しに失敗
		ウォーターカーテン停止	停止しない	
		ギヤングウェイ撤去	切り離しに失敗	
		ケーブル切り離し	切り離しに失敗	
		離棧	離棧失敗	

※ESD：緊急遮断（貨物移送の緊急的な停止・遮断）

※ERS：緊急離脱システム（ローディングシステムの緊急的な切り離し）

(2) 事故発生要因と事故シナリオ

前項の液化水素荷役で想定される事故について、それに至る経緯や原因を精査し、シナリオを取りまとめた。事故シナリオの精査により、液化水素の物性に起因する事項、液化水素の取扱いに特有な設備に起因にする事項、液化水素荷役オペレーションに特有な操作に起因する事項を整理することができた。

精査した事故シナリオを表 3 及び表 4 に示す。表中に赤字で示した項目は、液化水素荷役特有の要因・シナリオとなる。

表 3. 液化水素荷役で想定される事故シナリオ

作業フェーズ	想定される事故等	原因	想定される結果
航行	他船の衝突	他船の進入 見張り不十分 他船とのコミュニケーション不足	船体損傷 オペレーションに遅れ
	航行不能	停電	オペレーションの中止
着棧準備	荒天	天候の急変	オペレーションの中止
	通信の途絶	通信機器の劣化・故障	オペレーションに遅れ
	着棧システムの故障(陸)	劣化、故障	オペレーションに遅れ
着棧	接岸操作の失敗	操舵装置・機関の故障 出船着棧の経験不足	船体損傷 オペレーションの中止
ギャングウェイ設置	ギャングウェイの故障	経年劣化	オペレーションの中止
通信接続	ニューマチックラインの 接続不良	船体動揺 コネクターの劣化・故障	オペレーションの中止
通信テスト	機器の故障	経年劣化	オペレーションの中止
アーム接続	接続不良	スイベルの故障・劣化 フランジの故障・劣化 カップリングの故障・劣化 ヒューマンエラー 船体動揺 パッキン・シールの劣化・不良	オペレーションの遅れ
		フランジ面接触による損傷	オペレーションの中止
リークテスト(GN ₂ 供給)	配管の過圧	ヒューマンエラー 圧力計の故障 陸側設備の故障	配管損傷
O ₂ パージ(N ₂ 置換)	配管の過圧	ヒューマンエラー 圧力計の故障 陸側設備の故障	配管損傷
	パージ不足	ヒューマンエラー 陸側設備の故障	空気の残留 常温GH ₂ 供給による可燃性 混合ガスの形成
N ₂ パージ(常温H ₂ 置換)	配管の過圧	ヒューマンエラー 圧力サージ 陸側設備の故障 圧力計の故障	配管損傷 GH ₂ 漏えい
ウォーターカーテン開始	装置の不具合	経年劣化 配管等の損傷	オペレーションの中止
ESDテスト(ホット時)	ESDの失敗	劣化・故障	オペレーションの中止
タンク内槽圧力減圧	減圧失敗	カーゴコンプレッサの故障 ヒューマンエラー 圧力計の故障 ラインアップ(バルブ操作)の失敗	タンク過圧 オペレーションの遅れ

表 4. 液化水素荷役で想定される事故シナリオ (続き)

作業フェーズ	想定される事故等	原因	想定される結果
アーム/ライン冷却	供給速度の異常による熱応力	ヒューマンエラー カーゴコンプレッサの故障 バルブの故障 スプレーポンプの故障	配管損傷 GH ₂ 漏えい LH ₂ の小規模漏えい
ESDテスト(コールド時)	ESDの失敗	劣化・故障	オペレーションの中止
移送	天候の急変		船体動揺 ESDの実施 オペレーションの中止
	バラスト水の放出停止	ポンプ等設備の故障	船体動揺 オペレーションの中止
	ベーパーラインの閉塞	陸側プラントのトラブル	タンク内過圧
	リキッドラインの閉塞	異物混入	ポンプの損傷
	陸側圧送システムの停止(積荷時)	劣化・故障 停電	荷役停止 荷役停止
	カーゴポンプの停止(揚荷時)	劣化・故障 停電	荷役停止 荷役停止
	外部火災	居住区火災 陸側プラント火災	居住区損傷(ESDの実施) プラントの損傷(ESDの実施)
	ESDの失敗	劣化・故障	船側タンクの過充填 タンクの過圧 ベーパーラインへのLH ₂ 流入
	ERSの失敗	劣化・故障	ローディングアームの損傷 中規模漏えい
	陸側BOG処理システム故障	劣化・故障	オペレーションの中止
	他船の進入・衝突	漂流船 見張り不十分 他船とのコミュニケーション不足	船体損傷 ローディングアームの損傷 中規模漏えい タンク損傷の場合大規模漏えい
H ₂ パージ(常温H ₂ 置換)	配管の過圧	ヒューマンエラー 圧力計の故障 陸側設備の故障	配管の損傷 GH ₂ 漏えい
H ₂ パージ(N ₂ 置換)	配管の過圧	ヒューマンエラー 圧力計の故障 陸側設備の故障	配管の損傷 H ₂ を含むGN ₂ 漏えい
アーム切り離し	切り離しに失敗	カップリングの故障 アームの可動性の喪失 荒天 フランジ面接触による損傷	オペレーションに遅れ
ウォーターカーテン停止	停止しない	設備の劣化・故障	オペレーションに遅れ
ギャングウェイ撤去	切り離しに失敗	設備の劣化・故障 荒天	オペレーションに遅れ
ケーブル切り離し	切り離しに失敗	接続部の故障 荒天	オペレーションに遅れ
離棧	離棧失敗	荒天 機関故障	船体損傷 棧橋損傷 オペレーションに遅れ

3-5. リスク分析とリスク低減措置の検討

(1) リスク評価の概要

液化水素運搬船の運航と液化水素の荷役については、実績がなく、十分な知見が蓄積されていないことから、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所の協力を得てリスク評価を実施し、リスクの分析に基づいた低減措置の検討を行った。

(2) リスク評価の流れ

本研究においては、専門家による HAZID 会議の開催にあたり、事前にリスクの洗い出しを目的とした PreHAZID 会議を開催した。リスク評価の流れを図9に示す。

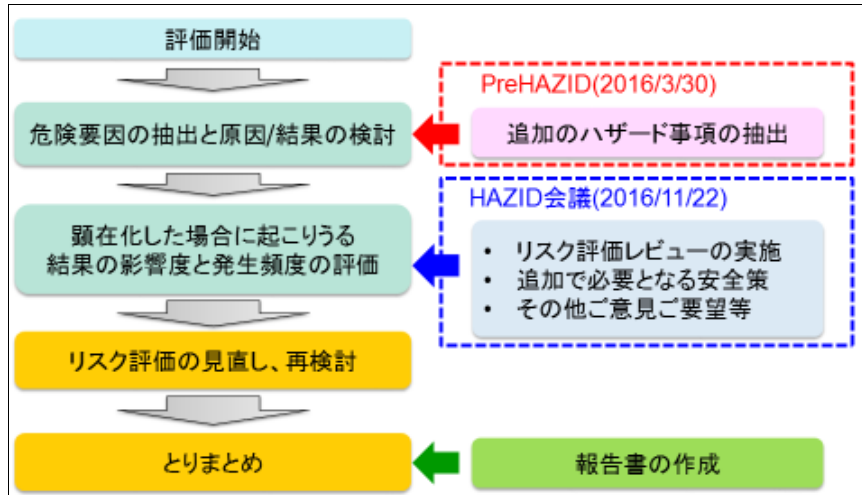


図9. リスク分析とリスク低減措置の流れ

(3) PreHAZID 会議及び HAZID 会議の開催

PreHAZID 会議及び HAZID 会議は以下のメンバーで開催された。

- ✓ ファシリテーター：
（国研）海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所
- ✓ 出席者：
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

(4) 抽出されたハザード

PreHAZID 会議及び HAZID 会議におけるハザードの洗い出しは、「航行、着積準備、着積」、「荷役準備」、「荷役」、「荷役後処理」、「離積」の5つのフェーズ毎に、以下に示す文献や海上技術安全研究所が過去に参画した LNG や液化水素関連のリスク評価事業の結果を参考とし、想定される荷役オペレーション手順をフェーズごとに分解し、ハザードの洗い出しを行った。ハザードの洗い出し方法として、What-if (SWIFT) 手法を用いた。PreHAZID 会議及び HAZID 会議を通して抽出されたハザードの一覧を表5に示す。

- ✓ SAFEDOR HAZID for LNG Tanker
- ✓ FORMAL SAFETY ASSESSMENT, FSA – Liquefied Natural Gas (LNG) Carriers, Details of the Formal Safety Assessment(MSC83/INF.3)
- ✓ SAFETY REQUIREMENTS FOR CARRIAGE OF LIQUEFIED HYDROGEN IN BULK, Risk assessment of liquefied hydrogen carriers (CCC 3/INF.20)
- ✓ ISO/DTS 16901:2015 Guidance on performing risk assessment in the design of onshore LNG installations including the ship/shore interface

表 5. 抽出されたハザードの一覧

フェーズ	ハザード
航行、着棧準備、着棧	衝突、電源喪失、座礁、荒天、通信の途絶、着棧システムの故障、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
離棧	離棧失敗

(5) リスク評価の方法

各ハザードに対するリスク評価は、4段階の深刻度：SI (Severity Index) と、6段階の頻度：FI (Frequency Index) について半定量的に評価し、最終的なリスク：RI (Risk Index) は図10に示すリスクマトリクスで評価した。

RIの評価は、リスクマトリクス内の領域でH：High、M：Medium、L：Lowで評価し、以下のように扱った。

- ✓ **High** :
主にハード面について更なる安全対策を講じることにより、リスクを「M」以下のレベルに低減する。
- ✓ **Medium** :
合理的に実行可能な安全対策を施し、リスクの低減が求められる（最終的に「M」に残る場合あり）。
- ✓ **Low** :
可能な限り安全対策を講じることにより、リスクの低減に努める。

		Severity Index (SI)			
		1	2	3	4
Frequency Index (FI)	6	M	H	H	H
	5	M	M	H	H
	4	L	M	M	H
	3	L	L	M	M
	2	L	L	L	M
	1	L	L	L	L

H : High、M : Medium、L : Low

図10. リスクマトリクスの例

(6) リスク評価の結果

HAZID 会議において、リスク低減措置の検討を含むリスク評価の結果、RI が「H(High)」と評価されたハザードは存在しなかったものの、「M(Medium)」と評価されたハザードは16件であった。

それらに対して、更に水素の特性を考慮した安全対策の検討を行い、安全対策が導入された場合の RI を再評価した結果、8件が「M(Medium)」の領域に残った。しかしながら、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が可能と考えられ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。

本調査の実施にあたっては、IGC コード等の規則要件（液化水素運搬船用暫定基準を含む）及び真空二重配管などの既に採用が決定している安全対策により、液化水素運搬船の運航及び液化水素の荷役に特有なリスクは十分低減されているものと結論付けた。

3-6. 船員向け運用マニュアルの策定

(1) 運用マニュアルの概要

液化水素運搬船は運航実績がないことから、本研究で得られた知見を活かして、同船に乗り組む船員の教育・訓練に活用可能な運用マニュアルを作成した。同マニュアルの章立てを表6に示す。

なお、同マニュアルの作成にあたっては、液化水素運搬船と神戸港で計画されている液化水素基地の機器・設備及び仕様を基に作成したため、仕様が異なる場合などには適宜加筆修正を要することが留意される。

表 6. 液化水素運搬船に乗り組む船員向けの運用マニュアルの章立て

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		

(2) 運用マニュアルの要点

作成した運用マニュアルについて、液化水素特有な事象の絡む要点を以下に示す。

- ✓ 真空断熱：

熱伝導、対流、放射（輻射）を断つことを目的に真空断熱方式をカーゴタンクや配管システムに採用している。また、フランジ接続は避けることを原則としており、バルブについてもバルブ全体を真空ジャケットで覆うような製品を採用している。
- ✓ 配管システム：

配管システムには、LNG 運搬船と同様にタンクや配管内に空気の進入を防ぎ、且つ、水素が大気中に放出されることがないように液ライン・ガスラインともにクロズドシステムが採用される。真空断熱対策が講じられているため、液化水素が配管内に存在していても外管は常温に近く、霜の付着状況から管内の液化水素の存在を容易に確認することは困難である。
- ✓ BOG の処理：

液化水素運搬船では、真空断熱構造の蓄圧式タンクが採用されるものの、LNG と比較して気化し易いため、注意を要する。しかしながら、余剰な BOG は船上に設置された GCU（Gas Combustion Unit）で焼却処理可能である。
- ✓ ローディングアームの接続：

本船マニホールドとローディングアームの接続は、LNG のような一般的なフランジのボルト締めではなく、断熱性を向上させるため双方の接続部を差し込む方式を採用する。ローディングアームを接続する際、ラジオコントロール方式で遠隔操作されるため、接続時は差し込み部同士が接触することがないように細心の注意を要する。
- ✓ ローディングアームの切り離し：

ローディングアームを切り離す際は、前述のとおり LNG のパーズ作業とは異なり、①常温水素ガスによる液押し、②常温水素ガスによる昇温、③窒素ガスによる水素ガスパーズの 3 段階が必要となる。各段階における配管温度や水素ガス濃度に確認には細心の注意を要する。
- ✓ 水素ガス火災の消火方法：

水素ガス火災は再着火の可能性が残ることから、原則として、積極的な消火作業は行わず、散水により延焼の防止と隣接部の機器設備の温度上昇を防ぐ。基本的な手順は以下のとおり。

 - ① 防火部署に人員を配置する。
 - ② 散水を開始し、隣接部の温度上昇を防ぐと共に輻射熱による被害を防ぐ。
 - ③ 火災発生部を特定し、水素ガスの供給を断つ。

- ④ 居住区内への水素ガス及び熱風の流入を防ぐ。
- ⑤ 居住区を風上（船首方位を風下）とするよう留意する。
- ⑥ 火災の状況により一時退船し火勢の衰える、または、風向が変わるのを待つ。

3-7. 航行安全面における運用条件の取りまとめ

(1) 運用条件の策定に向けた検討

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は、航行安全対策に関して、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、検討を行い精査した。

なお、航行安全対策の策定及び運用条件の策定にあっては、(公社)日本海難防止協会と協力し、対応した。

(2) 航行安全対策の策定に係る方法と経過

液化水素運搬船の運用に係る航行安全対策の策定にあたっては、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、検討にあたった。

検討にあたっては、平成29年2月から平成30年6月の期間に計6回の委員会を開催した。また、操船面に係る検討のため、平成29年10月には関係者立ち合いの下、操船シミュレータ実験を実施し、操船局面に係る安全性の検証及び運用条件の策定を行った。

(3) 航行安全に係る検討事項

液化水素運搬船を新規に受け入れる際に検討すべき事項は以下のとおりとなる。但し、港内航行について、輻輳海域等、航行安全の観点より懸念される点がある場合にあっては、追加の検討事項の必要性について、本船の運航に関わる関係者と協議することが望ましい。

特に、緊急時に備え、出船着棧（入港時に回頭し船首方位を港外に向け着棧）を検討する場合にあっては、港湾の環境条件、港内の操船環境や、検討対象とする本船の仕様等を踏まえ、操船シミュレータ実験を実施するなどし、本船の運航に関わる関係者と検討することが望ましい。

① 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。

② 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、回頭水域が確保できることを確認する。航路幅員等については、「港湾の施設の技術上の基準（日本港湾協会）」の定める規定に沿って、検証を行う。

③ 着棧時・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棧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。一般的に本船とバースが±6度の角度を持って、且つ、前後方向に±15mずれて着棧した場合を想定し、その際の本船着棧エネルギーが防舷材の許容吸収エネルギーを下回ることを検証する。

また、本船係留中に本船マニホールド・陸側ローディングアームの接続位置における本船満載状態・低潮時及び本船バラスト状態・高潮時において、本船の平行ボディ（船体中央付近の平行部）と防舷材の接触状況を図面上で確認する。

更に、風圧力と係留力に基づく係留限界風速について確認を行う。

④ 運用基準の策定

上記①～③の検証結果を受け、運用基準の策定と防災対策を策定する。この時、別途策定される海上防災対策とも乖離が生じることがないように留意する。

(4) 荷役の安全性に係る検討事項

液化水素運搬船の荷役を新規に行う際に検討すべき事項は以下のとおりとなる。

- ① 荷役設備の安全性の確認
- ② 荷役作業手順の安全性の確認
- ③ 船間保安距離に係る検討
- ④ 運用基準の策定
- ⑤ 荷役安全管理体制の構築
- ⑥ 入出港時・着棧中の連絡体制の構築（緊急時を含む）
- ⑦ 荷役の安全対策の策定
- ⑧ 海難緊急時の初動対応の構築
- ⑨ 地震・津波対策の策定
- ⑩ ニアミス事例の収集・活用

ここで、③の船間保安距離に係る検討は、特定港における危険物の取り扱い及び危険物積載船（液化水素運搬船は危険物積載船に該当）に対して規定した港則法に関する検証となる。引火性危険物の荷役を行う場合には、荷役船舶から他の停泊船舶や付近航行船舶までの距離（引火性危険物荷役時の船間保安距離）について、図11に示すとおり、港則法第二十三条に基づく「危険物積載船舶の停泊場所指定及び危険物荷役許可の基準について」の一部改正について（保交航第76号、平成28年12月21日）において、危険物専用岸壁の基準として、立地条件として、荷役船舶から他の船舶までの距離が30m以上あり、また、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を規定されている。

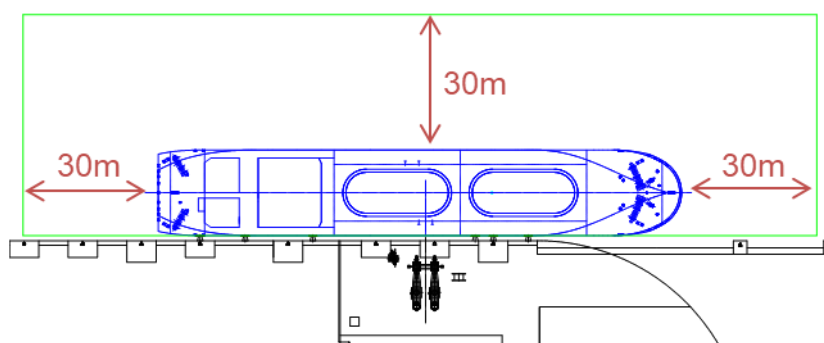


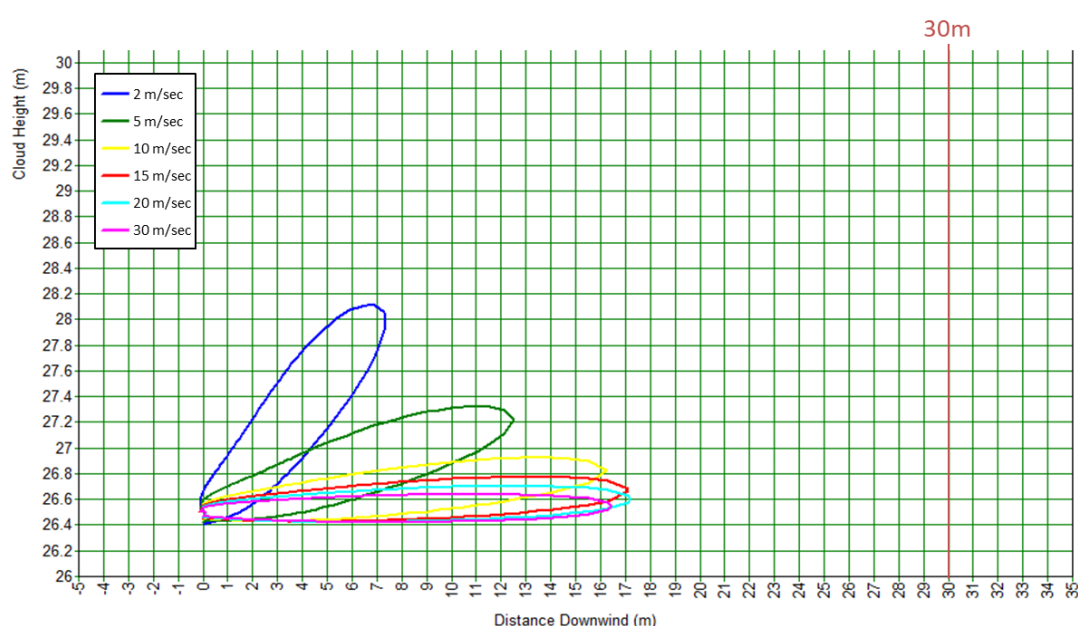
図11. 船間保安距離の概要

一方で、「危険物積載船舶の停泊場所指定及び危険物荷役許可の基準」で想定している可燃性ガスは石油由来のものであり、ガスの比重が空気よりも重く、その振る舞いは水素ガスとは大きく異なる。従って、液化水素運搬船が係留・荷役する岸壁については、想定される水素ガスの放出条件（ガスベントの高さ、放出口の径など）から、「危険物積載船舶の停

泊場所指定及び危険物荷役許可の基準」で求められる 30m の船間保安距離で安全確保可能なことを DNV GL 社のソフトウェア「Phast」によるシミュレーションで確認した。

その結果、放出された水素ガスは、図 1 2 に示すとおり、低風速の条件下においては上方へ拡散するものの、風速が高まるにつれ、風下側へ流される傾向が認められた。また、LEL（爆発下限界）以上の水素ガスが最も遠方に到達したのは風速 20m/sec の条件であった。風速 20m/sec では港外退避が想定されるものの、当該条件下であってもベントマストから放出される水素ガスの広がり、30m に達しないことが確認された。

以上より、現行で可燃性液化ガスを積載する危険物積載船で適用されている船間保安距離 30m を本検討で対象とした液化水素運搬船に対しても準用可能なことが確認された。但し、より大型の船型などでベントマストからの水素ガス放出量が増大する場合には、あらためて同様な検討が必要となる。



注 1：各風速条件において LEL の及ぶ範囲を示す。

注 2：横軸はベントマスト先端部を 0m とし、正值は風下を、負値は風上を示す。

図 1 2. ベントマストからの水素ガスの拡散シミュレーション結果

(5) 神戸港を対象とした操船性面の運用条件

実際に液化水素基地が建設される神戸港をモデル港としたケーススタディを実施し、操船面に係る検討を実施した。

液化水素運搬船については、同船型の LNG 運搬船と比較して以下のような特徴があり、且つ、神戸港での運用時には出船右舷着けとする計画であったことから、操船シミュレータ実験も実施した。液化水素の比重はメタンの約 20% と非常に小さく、貨物タンク容量に対する載貨重量が小さい。

- ✓ 載貨重量が小さいため、満載喫水とバラスト喫水の差が小さい。
- ✓ 貨物タンクに真空二重構造を採用しているため、同貨物容量に対する貨物タンクのサイズが大型化することに伴い、船型も大型化する。
- ✓ 船型の大型化に伴い、操船性に影響を及ぼす正面及び側面の受風面積が増大する。

操船シミュレータ実験は、(株)日本海洋科学の操船シミュレーションセンターにて委員会関係者立ち合いの下、実施した。操船シミュレータ実験では、大阪湾水先区水先人会の協力を得て行った。着岸局面の概要を図13に示す。

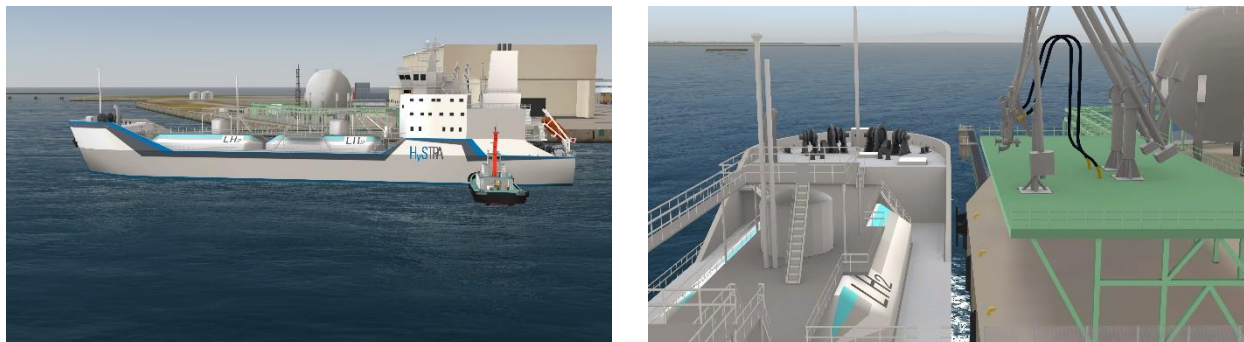
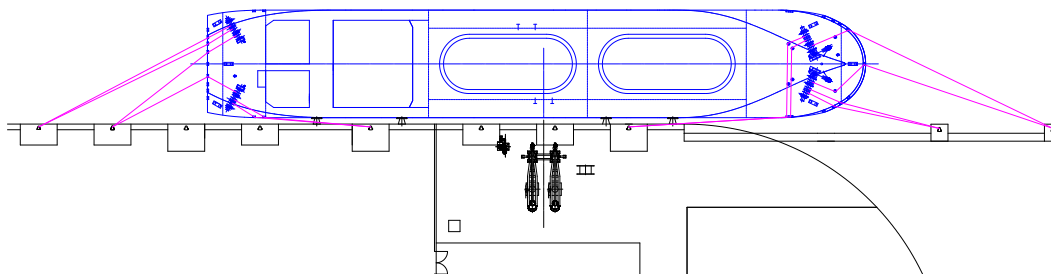


図13. 操船シミュレータ実験における着岸局面の例

(6) 神戸港を対象とした係留面の運用条件

係留面の安全性を検証するため、係留動揺シミュレーションを実施した。ここでは、図14に示す配索を想定した係留動揺シミュレーション結果から、安全に荷役可能な運用条件となる「荷役中止基準」と、ローディングシステムは接続していない状態で安全に係留可能な運用条件となる「係留限界基準」の2つを策定した。



(ヘッド/スターンライン：2本、船首/船尾プレストライン：2本、船首/船尾スプリングライン：2本)

図14. 神戸港における液化水素運搬船の配索例

(7) 神戸港における運用条件

上記を含む総合的な航行安全面に係る検討から、運用条件として以下が定められた。ここで、「着岸中止基準」は入港可能な環境条件の上限を、「離岸基準」は離岸する必要がある環境条件の上限を、それぞれ示す。

- ✓ 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

3-8. 海上防災面における運用条件の取りまとめ

(1) 運用条件の策定に向けた検討

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は、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、検討を行い精査した。

なお、海上防災対策の策定及び運用条件の策定にあつては、(一財)海上災害防止センターの協力を得て、対応した。

(2) 海上防災対策の策定に係る方法と経過

液化水素運搬船の運用に係る海上防災対策の策定にあつては、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、検討にあつた。

検討にあつては、平成28年2月から平成30年6月の期間に計5回の委員会を開催した。

(3) 海上防災対策の基本的な考え方

海上防災対策に係る安全・防災設備について、液化水素を取り扱う上では、水素ガスや液化水素の特性を十分に認識し、適切な装備と心得をもって作業に従事する必要がある。特に以下に示す液化水素の特性にあつては、LNGのそれと大きく異なることに留意しなければならない。

- ✓ 燃焼範囲が4%~75%と広く、最小着火エネルギーが小さいため、静電気などでも引火することがある。
- ✓ 水素専用のガス検知器でなければ水素ガスの漏洩を検知することはできない。
- ✓ メタンの炎はオレンジ色で視認可能であるが、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、LNG用の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。

(4) 主要な防災設備及び資機材

液化水素運搬船の運航にあつては、関係法令に準拠するほか、以下に示す安全・防災設備及び資機材を設置することが肝要となる。

- ✓ ESDシステム(緊急遮断システム)
- ✓ ERS(緊急切り離しシステム)
- ✓ 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
- ✓ 防火設備

(5) 運用開始前に整備すべき体制等

液化水素運搬船の受け入れ及び液化水素の荷役を実施する前には、以下に示す事項について検討する必要がある。

① 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について検討する。

② 防災組織

非常事態に際して防災組織が十分に機能を発揮するため、防災組織の構成と、主な作業分担を決める。また、平日の場合のみならず、休日・夜間の緊急体制についても検討する。

③ 緊急通報体制

船陸両側の緊急通報体制について、予め決めておき、船陸双方が相互に事故発生の緊急連絡を行えるようにする。また、外部の関係先に通報し、指示・協力を求められる体制を予め構築する。

④ 応援協力体制

関係官庁に対し災害状況等の必要な情報を報告するとともに、関係官庁の指示を受ける体制をとる。また、消防設備船を有する運航会社と災害時の事故処理体制を確立しておくとともに、関係機関、関係企業等との連携強化を図る。

⑤ 教育訓練

災害の発生または拡大を防止するため、防災組織の要員に対して必要な技術知識・技能を取得させる。

⑥ 棧橋または岸壁上の安全・防災設備の配置

安全・防災上、必要な設備の配置を検討し、配置図として示す。

(6) 神戸港を対象とした安全防災設備

実際に液化水素基地が建設される神戸港をモデル港としたケーススタディを実施し、整備すべき安全防災設備に係る検討を実施した。

その結果、神戸港の液化水素基地に整備すべき安全防災設備とその設置場所等を表7に示す。

表 7. 神戸港の液化水素基地に整備すべき安全防災設備と設置場所等

設備	設置場所等
緊急遮断 (ESD) システム	荷役の継続が危険であると予測させる事態を検知し、速やかに自動的または人為的に荷役を中止し、事故による影響を最小限に抑えるため、液化水素の送液を停止させる緊急遮断システムを設置する。
緊急切離しシステム (ERS)	緊急遮断弁2個とその間を切離すカップラーで構成された緊急切離しシステムを各ローディングシステムに設置する。ERSは、荷役中の液化水素運搬船が何らかの原因でアームの許容量以上移動した場合にアームの損傷を防止し、液化水素の漏洩を防ぐためのものであり、また、緊急離棧が必要な場合に短時間でアームを切離すことを可能とするものである。
アーム角度異常警報設備	荷役中の液化水素運搬船が何らかの理由で移動した場合、アーム角度の異常により、異常移動警報を発し、ESDの作動を促すためのアーム角度異常警報設備を設置する。
風向風速計	液化水素運搬船の着離棧または荷役作業継続の是非を判断するため、風向風速計を設置する。
絶縁フランジ	ローディングアームと船側マニホールドとの接続や切り離し時に火花発生を防止するため、ローディングアームに絶縁フランジを設置する。設置した絶縁フランジは定期的に機能を点検し、パイプとアーム先端のフランジ抵抗値を1,000Ω以上確保する。
通信連絡設備	液化水素運搬船の着離棧、荷役作業等の安全確保及び効率化のための情報・指令の伝達及び緊急事態の通報等を行うため、防爆型トランシーバー及びページング (防爆型PHS及びスピーカー) を設置する。
電気照明設備	付近を航行する船舶の障害にならず、且つ、夜間作業に支障のないよう、液化水素運搬船バースの要所に電気照明設備を設置する。なお、危険場所に設置する電気照明設備は、すべて防爆構造とする。
監視設備	液化水素運搬船バースにおける荷役状況の監視及び火災等を早期発見し、適切な防災活動が行えるよう、バース部を監視できるITVを設置する。
待機所	荷役を監視する要員のための待機所をバースに設置する。

(7) 神戸港を対象とした防災設備

実際に液化水素基地が建設される神戸港をモデル港としたケーススタディを実施し、整備すべき防災設備に係る検討を実施した。

その結果、神戸港の液化水素基地に整備すべき防災設備とその設置場所等を表 8 に示す。

表 8. 神戸港の液化水素基地に整備すべき防災設備と設置場所等

設備	設置場所等
ガス検知警報設備	水素は無臭のガスであるため、係留及び荷役中の事故の未然防止及び早期発見を図るために、水素専用のガス検知警報装置を設置する。
火炎検知警報設備	水素が仮に引火しても、その火炎が無色透明であるため、目視で火炎を発見することができない。また水素の火炎は輻射熱が小さいため通常の赤外線センサーでは検知し難い。そのため水素の火炎を検知できる紫外線を検知する火炎検知センサーを設置し、火炎の早期発見を行う。
被害極小化対策	液化水素配管については、弁と配管の接続部を含めて極力溶接構造にする等の被害極小化対策を講ずる。
粉末消火器	ローディングシステムの付近には粉末小型消火器を設置する。
水消火栓	ローディングシステムの付近には水消火栓を設置する。
消火ポンプ	必要な放水量及び散水量を確保するため消火ポンプを設置する。
周辺設備の防御設備	ローディングシステムの架台海側に液化水素漏洩時の気化促進及び火災時の輻射熱を軽減し、施設を保護するため、水幕設備を設置する。
静電気対策設備	岸壁または棧橋にアースをとり、静電気が溜まらない構造とし、荷役作業を行う前に作業員から静電気を除去するための除電棒を設置する。

また、地震により陸上の電源が停電した場合、陸上側の ESD システムには「停電」が作動条件として組み込まれており、停電によって ESD システムが作動するものの、陸側に無停電電源装置（通信設備、ESD、ERS の作動用）及び非常用発電機（消火用ポンプ、通信設備、ESD 及び ERS の作動用）を設置することにより、陸上電源が停電した場合に備えることとしている。

船側は、船の発電機が停止し、停電状態となった場合でもアキュムレータ内に蓄圧された油圧により ESD 弁は自動的に閉止する。また、液化水素運搬船の ESD 弁は手動で閉止することも可能である。

(8) 神戸港を対象とした異常気象・海象等への対策

想定される異常気象・海象への対策は以下のとおり。

① 台風来襲時の対策

台風等による強風については、気象予報システムの発達に伴いある程度の進路等の予測が可能であり、事前準備を行うとともに、接近が予測される場合には、必要に応じて荷役を中止し、ローディングシステムの切り離しを行う。また、状況に応じて液化水素運搬船の離棧準備を行う。

阪神港神戸区に影響を与える台風の来襲が予想される場合、または、その来襲が確実と判断された場合は、阪神港長より発出される在泊船舶に対する避難勧告等に基づき、適切に対応する。当該避難勧告は、その状況により 3 段階に分類されることから、「阪神港神戸区及び尼崎西宮芦屋区台風災害防止要綱」に基づき、適切な措置を取る。

② 地震対策

地震の発生場所（震央）、地震規模及び津波の発生の有無等については気象庁が地震発生後 3 分程度で発表し、NHK 等の速報で放送されることから、地震を感じたら直ち

に地震情報の収集に努める。液化水素の荷役中に地震が発生し、津波の襲来が予想される場合、荷役中止基準に従い直ちに荷役を中止し、ローディングシステムを切り離す。また、状況に応じて液化水素運搬船の離岸準備を行う。

③ 津波対策

荷役管理責任者の責務として以下の事項について準備をしておく。

1) 作業時間と津波到達予想時間を常に念頭に入れる

液化水素荷役状態からカーゴポンプの停止、液アーム及びラインパージ、バルブ閉及びローディングシステムの切り離し作業等を安全、且つ、正確に行えるよう訓練するとともに、一連の作業に要する時間を把握し、緊急時に適切な判断を下す必要がある。また、状況によっては ESD を作動させ、ローディングシステムを切り離す事態も想定されることからこれらに対する訓練を平素から行い、作業に係る練度の向上を図るとともに、それに要する時間を把握しておく。

2) 船陸間の緊密な連携

津波に関する対策としては、津波到達予想時間と津波の高さが重要な要素であるから、十分な情報収集のネットワークを確立しておくこと、また、緊急時に対応する船陸間の綿密な作業区分を確立しておくことが必要である。

3) 作業時間等の把握

液化水素荷役中止の際、ローディングシステムの切り離し作業に至る手順についてはケースバイケースで検討し、且つ、作業時間を把握しておくこと、船陸間に連結されているニューマチックホースの切り離しに至る作業手順を船陸間で充分協議し確立しておくこと、液化水素運搬船の避難場所までの航行時間等を把握しておくこと等が必要である。

4) 訓練の実施

荷役管理責任者は、上述の内容を十分に把握するとともに、ケースバイケースによる訓練を実施して荷役関係者の練熟度を高めるとともに作業時間を把握し、緊急時における適切な判断力を養うことが必要である。

④ 荷役中止基準及び緊急離岸基準の遵守

1) 荷役中止基準

以下に示す場合は荷役を中止する。その際、原則としてローディングシステムを切り離し、港長に報告する。

- ・平均風速が 10m/sec 以上場合
- ・有義波高が 0.5m 以上の場合
- ・落雷域の接近が予測される場合
- ・液化水素または水素ガスの漏洩があった場合
- ・付近に火災等の事故が発生した場合
- ・暴風または波浪に関する警報、津波注意報、津波警報、大津波警報が発表された場合
- ・荷役設備、機器等に異常が認められた場合
- ・港長から指示された場合
- ・その他、荷役作業の継続に危険が予測される場合

2) 緊急離岸基準

船長は緊急離岸を行おうとする場合、陸側荷役管理責任者と協議の上、出港し、安全な海域に適宜避難する。止むを得ない事情により離岸できない場合は、必要に応じて

タグボートの手配等適切な処置を講じるものとする。

また、緊急時に水先人の嚮導、タグボートの支援を受けることができない場合、気象・海象等の状況を考慮し、本船船長の操船による緊急出港も検討する。

この他、以下に示す場合には緊急離岸を行い、安全な海域に避難する。

- ・平均風速 15m/sec を超える強風が予測された場合は、直ちに荷役を中止し、十分余裕のある時機に離岸出港の上、安全な海域に避難する
- ・荷役中止基準によって荷役を中止した場合で、直ちに離岸する必要があると判断された場合
- ・台風の接近が予想され、港長から避難勧告等が発令された場合
- ・大規模地震対策特別措置法に基づく警戒宣言が発せられた場合
- ・阪神港神戸区に津波警報、大津波警報が発表された場合
- ・港長から指示された場合
- ・その他、係留の継続に危険が予測される場合

⑤ 地震及び津波に対する安全対策

地震及び津波に対する安全対策を以下に示す。

- ・地震が発生した場合には、船長は船体の点検を行い、荷役管理責任者（陸側）は陸上設備を点検し、異常の有無を確認する。
- ・荷役中に地震が発生した場合は、船長及び荷役管理責任者（陸側）は、状況に応じて荷役を中断（送液停止）し、異常の有無を確認する。荷役開始以前の場合は、開始を見合わせる。
- ・津波警報が発令された場合は、船長及び荷役管理責任者（陸側）は、荷役中止基準に従い荷役を中止し、係留強化若しくは避難準備を行う。
- ・船長及び荷役管理責任者（陸）は、地震、津波等の情報の収集に努め、津波の来襲が予想される場合には、船長は状況に応じて避難を行う。

また、地震が発生し、兵庫県瀬戸内海沿岸に津波に関する注意報や警報が発表された場合、「神戸港入港マニュアル」（平成 27 年 4 月、神戸港港湾管理者）の「阪神港神戸区在港船舶の津波避難について」に基づき、迅速かつ適切に対応する。同様に、平成 29 年 12 月 15 日には、第五管区海上保安本部より「大津波警報・津波警報発表時の船舶交通の規制について」が公表されており、船舶交通の規制及び推奨避難海域が示されていることから、適切に対応する。

更に、津波来襲時に備え、日頃より本船のみならず、陸上関係者を含めた関係者での訓練を実施し、備える。

3-9. 安全基準の整備

本研究においては、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について精査した。

- ✓ 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
- ✓ 船員労働安全衛生規則

その結果、本研究の過程においては、これらの諸基準・規則に従うことで十分な安全が確保されるものと考えられ、新たに整備すべき安全基準等については、認められなかった。

3-10. 国際規格案の策定

本研究の成果を基に我が国が海外において主導的な立場をとることを目的とし、本研究の成果を基にした液化水素運搬船の運航及び液化水素荷役の運用に関する国際標準の案として「Ship-to-shore Interface and Operations for Liquefied Hydrogen」（仮称）を作成した。作成にあたっては、LNG 運搬船及び LNG 荷役に関して ISO28460:2010「Petroleum and natural gas industries — Installation and equipment for liquefied natural gas - Ship-to-shore interface and port operations」を参考にした。

同国際標準案については、実際の運用を経ずに作成していることから、今後、具体的な ISO 化に向けては、将来の実運用を経て蓄積した知見を基に記載内容を検討することが肝要である。

3-11. 今後の課題

本研究においては、国内港湾に液化水素運搬船を受け入れるための一般的な要件について以下に関する検討を実施し、要件を策定した。

- ✓ 岸壁における液化水素荷役に係る安全対策
- ✓ 液化水素運搬船の航行時における安全対策
- ✓ 液化水素運搬船の係留・荷役時における安全対策
- ✓ リスク評価

同一般要件については、個別港湾の環境・条件に依らないものであることから、液化水素運搬船を受け入れる港湾にあつては、以下に示すような確認・検討を実施するとともに、関係官庁（港湾管理者や海上保安部など）との事前の相談が必要となる。そのイメージを図 15 に示す。

- ✓ 個別港湾・岸壁の特性（自然環境や周囲の他船航行の状況など）の確認
- ✓ 海上防災対策の確認
- ✓ 自然災害（地震、津波、台風など）への安全対策
- ✓ 緊急時における安全管理体制の構築

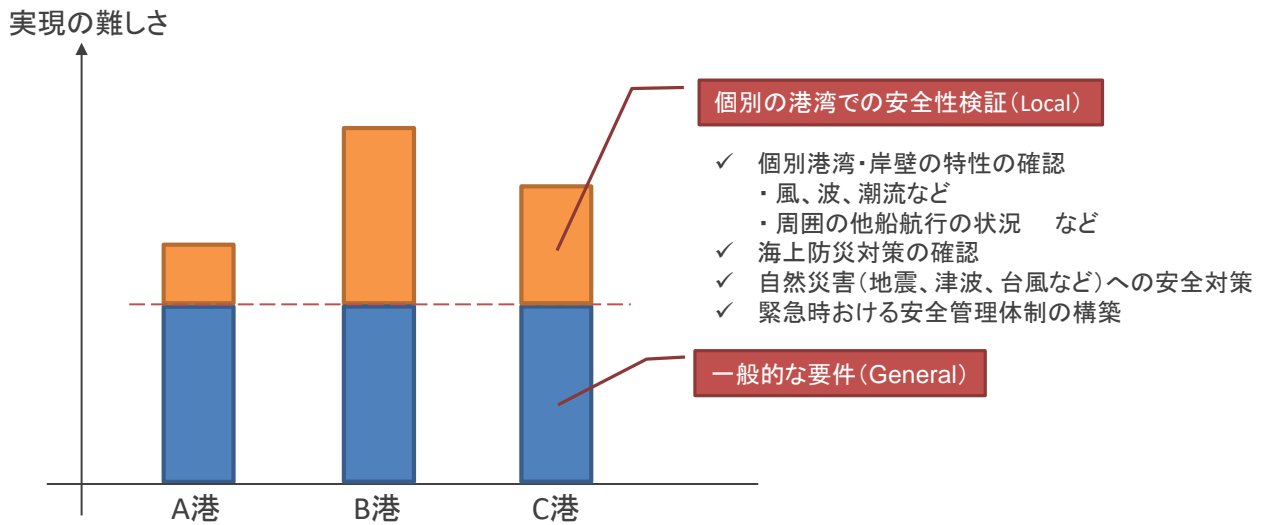


図 1 5. 一般要件と個別港湾において必要となる安全性検証のイメージ

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

0件

(2) 学会、展示会等発表

<口頭発表> 国内1件

- 青山憲之（日本海洋科学）、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）

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> 国内1件

- 青山憲之（日本海洋科学）：「Safety assessment of LH₂ cargo handling operation」第2回液化水素技術国際ワークショップ、神戸市（2018年10月24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

- ✓ Flemish Government, Background Information Appendix to Handbook Failure Frequencies 2009, 2009
- ✓ International Association of Oil & Gas Producers, Human factors in QRA, Risk

- Assessment Data Directory. Report No. 434 -5, 2010
- ✓ ISO28460:2010, Petroleum and natural gas industries - Installation and equipment for liquefied natural gas - Ship-to-shore interface and port operations
 - ✓ ISO/DTS 16901, Guidance on performing risk assessment in the design of onshore LNG installations including the ship/shore interface, 2013
 - ✓ IMO, MSC 83/INF.3, Formal Safety Assessment – Liquefied Natural Gas (LNG) Carriers, Details of the Formal Safety Assessment, 2007
 - ✓ IMO, MSC.1/Circ.1315, Guidelines for the Approval of Fixed Dry Chemical Powder Fire-Extinguishing Systems for the Protection of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, 2009
 - ✓ SAFEDOR, HAZID for LNG Tankers, SAFEDOR-D-4.3.1-2005-11-29-LMG-HAZID LNG Tankers–rev-03, 2005
 - ✓ 高圧ガス保安協会、70MPa 水素スタンド技術基準検討委員会報告書(平成 24 年 2 月)
 - ✓ 財団法人日本自動車研究所、燃料電池自動車に係る規制再点検および標準化のための研究開発 (水素社会構築共通基盤整備事業事後評価分科会 資料 7-1、平成 22 年 12 月 3 日)
 - ✓ 総務省消防庁、基準の特例を適用した検定対象機械器具等の取扱いについて (通知) (総務省消防庁 消防予第 48 号 平成 12 年 2 月 18 日)
 - ✓ 田村賜介ほか、圧縮水素容器搭載車両の火災対応に関する一考察 (自動車技術会論文集、Vol.41, No.3, May 2010)
 - ✓ 通商産業省工業技術院科学技術研究所、水素の爆発災害防止の研究 (昭和 49 年～58 年度) (昭和 59 年 3 月)
 - ✓ 堀口貞茲ほか、液体水素の燃焼火炎の危険性 (1) 定常燃焼火炎 (高圧ガス、Vol.22 No.3(1985))
 - ✓ 堀口貞茲ほか、液体水素の燃焼火炎の危険性 (2) 異常燃焼火炎 (高圧ガス、Vol.22 No.4(1985))
 - ✓ 堀口貞茲ほか、液体水素の火災の消火 (高圧ガス、Vol.22 No.6(1985))
 - ✓ 堀口貞茲、水素の危険性と爆発防止対策 (水素エネルギーシステム Vol.14, No.2 (1989))
 - ✓ 山本勲、カップバーナ法による消炎濃度 (消防研究所報告 第 57 号 1984 年 3 月)