

水素社会の実現に向けた製品安全性評価の取組み

Product Safety Assessment Initiatives for Achieving a Hydrogen-based Society



神戸 勝 啓①# Katsuhiro Kanbe
 神谷 祥 二②** Shoji Kamiya
 小村 淳③ Atsushi Komura
 石垣 寿 久④ Toshihisa Ishigaki

水素製品を安全に運用できるようにするために、水素サプライチェーンパイロットプロジェクトにおいて、水素挙動の特性把握試験や数値解析技術の適用を行っている。また、製品に内在する危険性を分析するリスクアセスメントおよび安全衛生や環境配慮を考慮したマネジメントシステムの運用を進めている。

In our hydrogen supply chain pilot project, for safer use of hydrogen products, we had many phenomenological experiments and numerical analysis based on risk assessments to clarify the hydrogen behavior. And we are also developing management systems for health, safety, and environment in our project.

まえがき

水素社会の実現を支える水素サプライチェーンの構築に向けて、技術面に加え製品のライフサイクル全体における安全性に対する評価技術を確立するとともに、水素製品が安全に運用できることを広く社会に示す必要がある。

1 背景

クリーンなエネルギーとして利用されているLNGは、1950年代以降、輸送・貯蔵・利用に関するさまざまな技術開発が進展し、広く社会で活用されるようになった。

水素は、1970年代に当社が開発したJAXA（宇宙航空研究開発機構）種子島宇宙センターの液化水素タンクのような特殊用途への適用以降、燃料電池自動車向けの水素ステーションの運用が広まるなど、本格的な水素活用に向けた動きが活発化しつつある。

水素を安全に取り扱うためには、実験を通して得られる現象論や数値解析を用いた各種検討および適切な安全性評価を経た開発と検証といった包括的な取組みが必要である。さらに、初期の構想段階から運用にわたるすべての製品ライフサイクルにおいて、製品を提供する企業として組織的な安全活動を推進する必要がある。

2 水素とは¹⁾

(1) 水素の特性

水素の物性値をLNGの主成分であるメタンと対比して

表1に示す。輸送効率向上のために水素を液化するが、液化水素の沸点はLNGより約90℃低く、体積当たりの潜熱が小さいため、LNGより高度な断熱技術が必要となる。ガス化した水素はメタンに比べ着火しやすく、また着火した後の燃焼速度も非常に速いため、漏洩防止だけでなく着火防止に対する配慮も必要となる。したがって、水素ガスを漏洩させないこと、燃焼範囲内の可燃性雰囲気を作らないこと、着火源を排除するといった基本対策が重要となる。

(2) 水素事業に適用される法規・ガイドライン

陸上の設備は建設場所の国内法に従って建造される。水素供給設備に適用される高圧ガス保安法などがそれに該当し、陸上設備についての法規整備が進んでいる。

一方で液化水素運搬船は、船籍国および寄港国の法規とともに国際海事機関（IMO）で定められた国際条約に適合する必要がある。しかし、液化ガスばら積み輸送に対する現行規則のIGCコードでは液化水素に適合する規定は存在していない。このため、2013年に国土交通省が国内有識者によるワーキンググループを設立して安全基準の検討を

表1 液化水素とLNGの物性比較

Table 1 Physical properties between liquefied hydrogen and LNG

物性	水素	LNG (メタン)
沸点 [°C]	-252.85	-161.45
ガス密度 [kg/m ³]	0.0899	0.717
液密度 [kg/m ³]	70.8	422.4
潜熱 [kJ/L]	31.4	246
燃焼濃度 (空気中) [vol%]	4-75	5-15
最小着火エネルギー [10 ³ J]	1.6	28

表2 参考規格およびガイドライン
Table 2 Standards and guide lines for hydrogen safety

適用	参考規格・ガイドライン
液化水素運搬船全般	日本海事協会、液化水素運搬船ガイドライン (2017)
水素安全	ISO/TR 15916 : Basic considerations for the safety of hydrogen system (2016)
水素安全	AIAA G-095 : Guide to Safety and Hydrogen and Hydrogen Systems (2014)
水素設備	NFPA 2 : Hydrogen Technologies Code (2016)

開始し、IMOへの日本提案を経て2016年に液化水素の輸送を対象としたIMO暫定勧告が採択された²⁾。この暫定勧告では、リスク評価による安全対策の検討が要求されており、当社の設計するパイロット船の基本設計について実施した結果はIMOから公開されている³⁾。その後、暫定勧告に対応する液化水素運搬船のガイドラインが日本海事協会から制定されるなど、安全基準の整備が進みつつある。主要な参考規格・ガイドラインを表2に示す。

3 安全性を確保するために

システムの複雑化が加速している現在、過去の経験や設計実績あるいは既存の法規に適合することだけでは製品の安全性を確保することが困難になってきている。

欧米を中心とするエネルギー・化学プラント業界では、法規や業界基準に適合することに加え、それらを上回る自主基準を設定するとともに、製造者または運用者が自主的に行うリスクアセスメントに基づく製品開発を行う仕組みが定着している。また国内の法規においても、クリアすべき具体的な数値を示す仕様規定の考え方から、達成すべき性能のみを規定して実現手法は製造者に任せる性能規定の考えが広まっており、説明責任を果たすための手段としてリスクアセスメントは有効な手段となる。リスクアセスメントは、システムに内在するリスクを抽出・評価し、結果に応じて適切な対策を立案するための一連の手続きを指す。

安全性が確保された水素製品を提供するためには、技術面では適切なリスクアセスメント結果に基づく設計を行う必要があり、それを支える挙動確認試験や検証された手法による数値解析技術の適用が求められる。また実行体制面では組織として労働安全衛生や環境配慮の考えを統合した取組みが必要となる。

4 取組事例

リスクアセスメントの実施に当たり、最も重要なポイントの1つはリスクの抽出漏れを無くすことである。リスクアセスメントには複数の手法があるが、それぞれの特徴を踏まえて適用している。水素サプライチェーンパイロットプロジェクトで採用している主要な評価手法を表3に示す。

表3 採用した主要なリスクアセスメント手法
Table 3 Risk assessment methods in our pilot project

評価手法	特徴
HAZID (Hazard Identification)	対象に内在する重大ハザードを包括的に評価
HAZOP (Hazard and Operability Studies)	配管系統図を用い、運用に潜在するハザードを抽出
FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)	機器の故障とその影響および検出方法を評価
Bowtie Analysis	想定事象を中心に原因と結果および安全対策を評価

多様な視点から対象を捉えるため社外の有識者に参加いただくとともに、液化水素運搬船と荷役基地の設計者が互いのアセスメントに参加することでインターフェース部分の検討漏れを無くすようにした。本プロジェクトに対して社外で実施された主要な安全審査の状況を表4に、アセスメント手法であるHAZOPスタディの様子を図1に示す。

(1) 水素挙動確認試験

事故に起因して生じるさまざまな水素の挙動を把握するため、外部機関と連携して各種の試験を実施している。2013年に実施した液化水素とLNGの蒸発・拡散試験の結果を図2に示す。ここでは、約0.9mの高さから約6リットルの液化水素とLNGをステンレス鋼材の上に放出した後蒸発・拡散する現象について、漏洩速度や漏洩面の材

表4 パイロット実証に対する主要な安全審査状況
Table 4 Safety review in our pilot project

名称	対象	実施年	社外有識者
ばら積み液体危険物運送要件検討WG	液化水素運搬船	2013年～2019年	東京大学、海洋技術安全研究所、国土交通省ほか
海上防災委員会	神戸荷役基地、液化水素運搬船	～2019年	東京大学、海上保安大学校、国土交通省、海上災害防止センターほか
航行安全委員会	神戸荷役基地、液化水素運搬船	2018年	東京海洋大学、神戸大学、総務省、国土交通省、日本海洋科学ほか



図1 HAZOPスタディの様子
Fig. 1 HAZOP study meeting

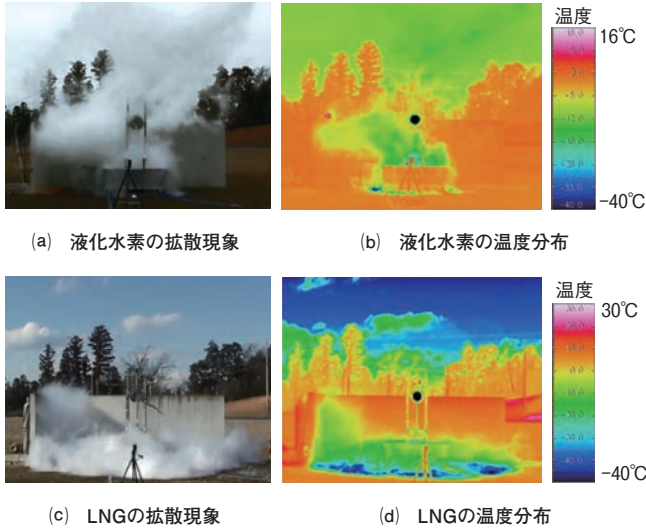


図2 蒸発・拡散試験
Fig.2 Dispersion tests

質による影響を評価した。蒸発の過程でそれぞれの低温流体は周囲の空気を冷却して蒸気雲を形成しているが、その上昇速度は水素ガスの方が早く、水平方向の拡散範囲も小さくなっている様子を確認した。またLNGは地表部分に低温状態の気体が存在しているが、水素漏洩時にはそれがないことを温度分布から確認した。

(2) 数値解析による分析

(i) 水素漏洩解析

機器が搭載できる空間や環境に制約のある船上では、一部の水素貨物配管や貨物機器を閉囲区画に配置せざるを得ない状況がある。このような状況では、万一水素漏洩事象が発生した際に、速やかな漏洩検知と漏洩気体の排気を可能とする閉囲区画内の換気流れを形成する必要がある。

そこで、想定される漏洩シナリオに基づいて漏洩部位やそれに対応する物性値・漏洩面積・方向などの漏洩条件を設定した後、CFD解析を活用した閉囲区画換気の設計を行っている。貨物機器室の常温空気の流れ場解析と極低温の水素ガスが5 mm²の微小孔から漏洩した場合の挙動解析例をそれぞれ図3、図4に示す。図3に示す線色は吸気口から取り込まれた空気が排気口から排出されるまでの時間を示しており、吸気口から取り入れられた空気がよどみなく排出されている。また、図4では様子や配管接続部から漏洩した水素（水色部分）が速やかに排気口に到達している様子が確認できる。

(ii) 液化水素貯蔵タンクの急減圧時の挙動分析

液化水素貯蔵タンクは最新の断熱技術を採用して設計しているが、運用中のタンクへの入熱による液化水素のガス化を完全に避けることはできない。入熱によるガス化でタンク内圧は上昇するが、荷役基地の液化水素タンクはボイロフガスを排気設備から放出することで内圧が一定値以

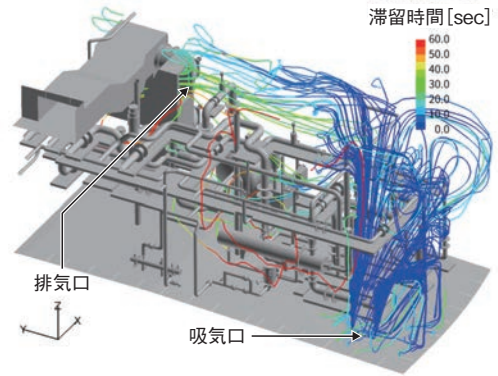


図3 貨物機器室における換気の流れ場解析
Fig.3 Ventilation flow analysis for cargo machinery room

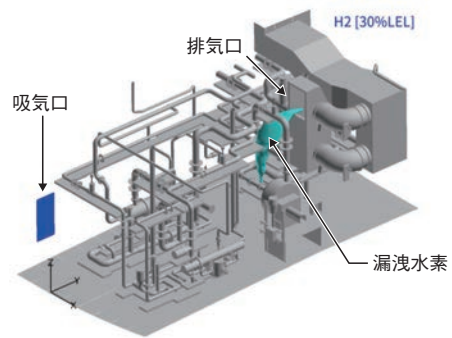


図4 貨物機器室における水素の漏洩挙動解析
Fig.4 Hydrogen leaking behavior analysis for cargo machinery room

上に上がらないようにしている。一方パイロットプロジェクトの液化水素運搬船は、航海中にはボイロフガスを排出せず、圧力上昇を許容する蓄圧式タンクを採用している。そのため、航海後に荷役操作を行う前には加圧状態にあるタンク圧力を常圧まで下げる必要がある。このとき、急激な減圧操作を行うと気液の熱的平衡状態が崩れ加熱液状態が発生するため、液化水素が急激にガス化する事象が発生する可能性がある。

このような複雑なタンク内の水素挙動を把握するため東京大学とともに、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の容積30m³の円筒型液化水素実験タンクを対象としたタンク内圧力急減圧試験とその現象解析を実施して、タンク内の圧力や温度変化の検証および液相部分からガスが生成される様子の分析を進めている⁴⁾。試験対象のタンクと急減圧時のタンク内の圧力変化の実験および解析例をそれぞれ図5、図6に示す。これらの結果から減圧操作後にタンク内圧力が下降した後圧力上昇する現象が確認できたが、ここでの操作ではその変化は比較的穏やかであることがわかった。この圧力変化は液相内に発生する気相の挙動に深く関連するため、同図に示すような泡の発生モデルの高度化に取り組んでいる。ここで得られた成果は、実証の運用方法に反映していく予定である。



図5 解析対象とした液化水素タンク (JAXA)
Fig. 5 Liquefied hydrogen storage tank (JAXA)

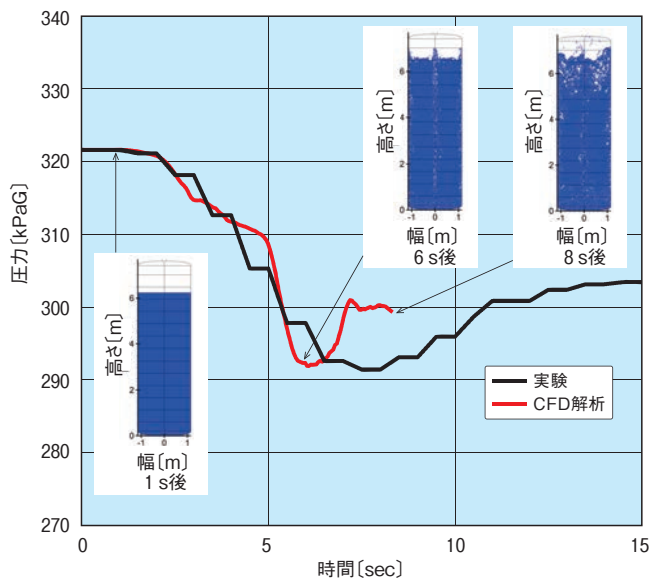


図6 急減圧時のタンク内圧力変化の実験、解析
Fig. 6 Pressure behavior in the tank by rapid pressure releasing

(3) HSEマネジメントシステム

海外のエネルギー・化学プラント業界では、労働安全衛生や環境配慮の考えを統合したHSE (Health, Safety and Environment) と呼ばれる体系的なマネジメントシステムに基づいて製品開発を行うことが標準となってきた。HSEでは、製造者の自主的なリスクアセスメントの実施とそれを効果的に運用するためのマネジメント体系の構築が求められている。HSEを適用する業界は増えており、発注時の仕様でその適用が求められるなど、HSEに基づくマネジメントはグローバル標準となってきた。

日豪パイロットプロジェクトを推進している技術研究組合CO₂フリー水素サプライチェーン推進機構HySTRAは、その設立に際してHSEの概念に保安 (Security) の視点を加えたHSSE方針 (Policy on Health, Safety, Security and Environment) を掲げている。当社はこのポリシーに

基づき、液化水素運搬船と液化水素用タンクを設計製造する当社の神戸工場と播磨工場を対象に、その活動を具体的に記したHSSEプランを作成して、PDCAサイクルに基づく運用を実施中である。

また本プロジェクトで運用しているプランをベースに、水素以外のプロジェクトでも適用可能なHSEプランとそのマネジメントシステムの構築を進めている。ここでは共通部分と対象プロジェクト固有の部分に分けることで汎用性と拡張の柔軟性を持たせた標準体系を目指しており、実プロジェクトへの適用結果を踏まえながら、継続的改善を進めていくこととしている。

あとがき

2020年には神戸荷役基地や液化水素運搬船および豪州荷役基地の実証が順次実施される予定であり、すべての試験を無事故・無災害で終わるために、対応を進めている。

最後に、本プロジェクトの安全性評価の取組みに多大な貢献をいただいたシェルジャパン(株)のテクニカルチームに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) S. Unno, Y. Takaoka, S. Kamiya, A study on dispersion resulting from liquefied hydrogen spilling, IHCS 2015
- 2) IMO MSC.420 (97), Interim recommendations for carriage of liquefied hydrogen in bulk
- 3) IMO CCC3/INF.20, Safety requirements for carriage of liquefied hydrogen in bulk
- 4) K. Tani, T. Himeno et.al, Prediction of pressure reduction rate in 30m3 liquid hydrogen tank based on experimental and numerical analysis, IHCS 2019



神戸 勝啓



神戸 祥二



小村 淳



石垣 寿久