

# 代替燃料・新貨物輸送の安全性評価

柳本 史教\*

## 1. はじめに

本稿は2025年1月28日に開催された、ClassNK R&D Forum 2025における講演「代替燃料・新貨物輸送の安全性評価」の概要を紹介するものである。海運ゼロエミッションに向けて、種々の代替燃料が提案されているほか、産業・社会の脱炭素化のために液化水素の大量輸送をはじめ、輸送される貨物も変わろうとしている。船舶の安全性は、長い船舶の歴史の中で発達してきた。これは、新たな概念の船舶の設計を規定する規則が、これまでは必ずしもその船舶の設計以前に成立してこなかった、つまり新概念船の設計と承認プロセスを通じて得られた知識を蓄積していくことで規則が開発されてきた面があることに裏付けられている。しかし、船舶上での利用実績に乏しい、あるいは使用されてこなかったシステムが急速に実用化されようとしている現代においては、スピード感を持った安全要件の策定が、新システムの社会実装を加速するためにも必要となる。

そこで、本会は、ファーストペンギンたるフロントランナーとの連携による安全要件の開発という、従来のアプローチに加え、研究開発の強化によるプロアクティブなアプローチを行っている。中でも、「代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化」と「貨物・燃料格納設備の健全性評価技術」をコア技術として研究開発を推進している。この二つが選定された理由として、リスク評価が代替燃料船の設計においては求められることから、多様なステークホルダー間で共通認識を醸成するためにはリスク評価の定量化が必要不可欠であること、また、リスク評価は万一の漏洩を考慮するものであるが、そもそも漏洩（損傷）が生じないよう努めることこそが必要と考えたこと、が挙げられる。これら2点のアプローチに基づき、研究開発を行ってきている。

本会技術研究所が上記のアプローチに基づき実施している研究は多岐にわたるが、時間的制約から、当該講演では以下の研究を取り上げた。

代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化：

- ・ アンモニア燃料船におけるアンモニア漏洩頻度推定
- ・ アンモニアガス拡散試験
- ・ 代替燃料船の定量的リスク評価・リスク評価手法の高度化

貨物・燃料格納設備の健全性評価技術：

- ・ 材料のアンモニア応力腐食割れ感受性の評価手法検討
- ・ 材料の液化酸素（LOX）適合性評価手法検討

これらに加え、「代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化」については、水素微小液滴漏洩・拡散試験の分析や、ガス拡散解析の妥当性検証（Verification & Validation, V&V）の推進等を行っている。また、「貨物・燃料格納設備の健全性評価技術」では材料の極低温環境における破壊挙動の研究や、液化CO<sub>2</sub>タンクを想定した溶接後熱処理（Post Weld Heat Treatment, PWHT）による破壊靱性への影響評価、低温用材料の延性破壊シミュレーションによる大型試験省略可否検討等を行っている。これらの結果は、順次規則やガイドラインに取り込まれているほか、本会技術研究所ウェブサイトにて報告書を掲載している。ご関心のある方は参照されたい。

本稿では、「代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化」と「貨物・燃料格納設備の健全性評価技術」の研究開発の概略を述べたうえで、R&D Forumにおいて取り上げた5つの研究プロジェクトについてこれまでの成果や現在の状況を解説する。

## 2. 代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化

一般に、リスク評価は図1のように、ハザードの同定から始まるフローで行われる。とあるシナリオが選定されると、その発生頻度と影響度をそれぞれ評価、掛け合わせることでリスクを求めることができる。そのため、

\* 開発本部 技術研究所 安全性評価部門

リスク評価の高度化・定量化のためには、発生頻度及び影響度の評価をそれぞれ定量化することが必要となる。また、船舶分野では、HAZID等を除いて、必ずしも定量的なリスク評価が一般的ではないことから、リスク評価フロー全体の高度化、定量化の検討が必要となる。そこで、次に説明する「アンモニア燃料船におけるアンモニア漏洩頻度推定」「アンモニアガス拡散試験」「リスク評価の定量化・プロセス安全概念の代替燃料船への適用」の検討を行っている。

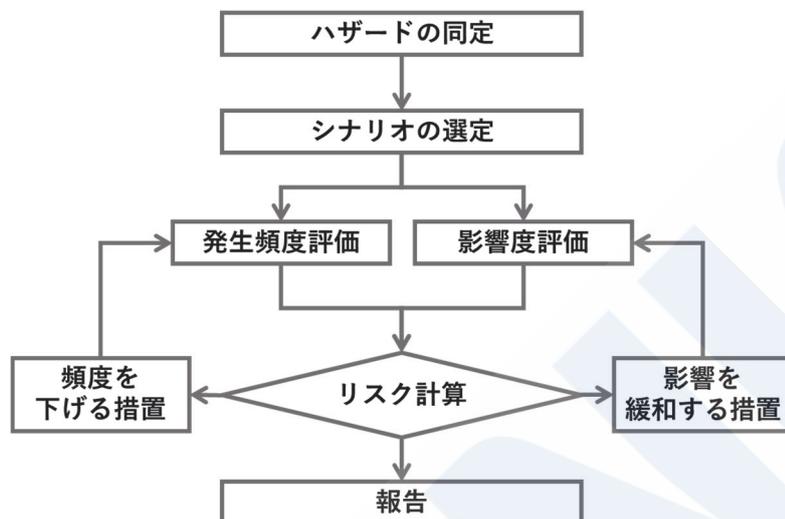


図1 リスク評価フロー

## 2.1 アンモニア燃料船におけるアンモニア漏洩頻度推定

代替燃料船特有のリスクとは、格納、利用している燃料の漏洩に起因するものである。そのため、代替燃料船のリスク評価を行うにあたり、漏洩頻度の正確な推定が重要である。炭化水素（石油、天然ガス）プラントでは、これまでの膨大な操業実績から、どの程度の規模の漏洩が、どのような確率で生じるのか、整理がなされており、例えばIOGP Risk Assessment Directory<sup>1)</sup>にまとめられている。過去の研究で、こうした炭化水素プラントの漏洩頻度統計値を用いてアンモニア燃料船のリスク評価を行っている例<sup>2)</sup>や、IOGPの頻度を用いることでアンモニア燃料船リスクの安全側の評価が可能である旨述べられている例<sup>3)</sup>がある。

しかし、アンモニアは炭化水素とは異なる性質を有しており、発生するハザードも異なることから、アンモニアの漏洩頻度をアンモニア燃料船のリスク評価に適用することが望ましいが、アンモニアの漏洩事例の統計値が存在していなかった。そこで、アメリカSandia国立研究所が水素ステーションのリスク評価に活用するべく実施した手法<sup>4)</sup>であるベイズ更新技術により、限られた陸上アンモニア利用設備のアンモニア漏洩データベースを用いて船上アンモニア燃料機器からの漏洩頻度を推定した。尚、本研究は、国立研究開発法人 産業技術総合研究所（以下、産総研）安全科学研究部門との協業である。

本研究については、Forumにおいて産総研小島博士より報告されたこと、まだ本稿執筆現在（2025/2）において査読付き論文を投稿中であることから、ここで詳細を記述することは差し控える。本研究で得られた成果は、様々な仮定を置いたものではあるものの、現状世界で唯一存在するアンモニアに特化した漏洩頻度推定値であることから、不確実性の高いアンモニア燃料機器の安全性担保に有益なものであることと考えられる。

## 2.2 アンモニアガス拡散試験

図1に示した影響度評価を定量的に行うにあたり、代替燃料船では燃料の漏洩後のガス拡散評価が行われる。一般にはすべてのケースに対し実験を行うことは不可能であることから、プルームモデルのような拡散式や、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）が利用される。当然、これらの評価手法の妥当性は、V&Vの観点から検討されていることが望ましい。

ここでいうV&Vとは、一つ目のVは、作成した数値計算が、概念モデルを正しく実装できているかどうか、そして二つ目のVはその数値計算が、現象を正しく再現できているかを問うものである<sup>5)</sup>。研究レベルにおいて、アンモニア燃料船を想定した拡散評価が少なからず実施されているものの、その妥当性検証が十分実施されていないことが指摘できる。

特に二つ目のVは、比較対象としての実験データが必要になるが、信頼できるアンモニアガス漏洩拡散試験は、

Tan et al.(2017)<sup>6)</sup>, RED SQUIRREL TEST<sup>7)</sup>, Fladis Field Experiments<sup>8)</sup>といった研究に限られている。これらはいずれも開放空間あるいは風洞中における拡散挙動を対象としている。一方で、アンモニア燃料船では、燃料調整室や機関室等、アンモニアの漏洩がありえる閉囲空間が存在する。そこで、以上の背景を踏まえ、閉囲空間におけるアンモニア漏洩・拡散実験を行い、数値解析の妥当性検証に資することとした。

実験は図2に示すおおよそ1m立方の亚克力容器に、下方からアンモニア窒素混合ガスを放出することで実施した。図2では省略しているが、容器上部からホースにてアンモニアを排出している。この時、放出前にアンモニアを除草するようにしている。また、アンモニア窒素混合ガスにおけるアンモニア濃度は、最大でも5vol%とした。

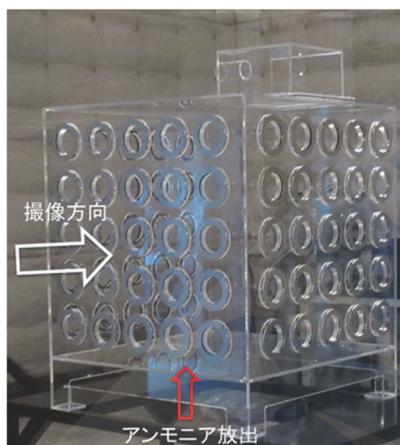


図2 アンモニア放出空間

本実験の最大の特徴は、ラマン散乱法を用いた2次元イメージングによるアンモニア濃度計測を行った点である。例えばTan et al.<sup>6)</sup>ではアンモニア濃度の計測に、接触式のガス濃度計を用いているが、実験のスケールが小さい場合、このような濃度計自体が流場に影響する恐れがある。また、市販されているアンモニアガス検知器は応答時間も長く、このような実験用途に適していない。そこで、株式会社四国総合研究所が開発したレーザーラマン分光法を用いることで、流場に影響を与えず、かつ面的な濃度評価が可能なシステムを採用した。本手法は水素を対象に多数の実績が存在するものであり、詳細は、朝日ら(2021)<sup>9)</sup>を参照されたい。図2で亚克力容器に多数設けられている円孔は石英ガラス製窓を差し込む。これはレーザーラマン分光法のレーザー及びガス分子の散乱光の撮影を可能にするための仕組みである。理想的には撮像面を全て石英ガラスにすることが望ましいが、大型の石英ガラスを作成することが困難であったため、覗き窓として石英ガラスを用いることとした。

今回の実験では、図2の「撮像方向」の向きにCCDカメラでラマン散乱光を撮影している。図3にアンモニア濃度撮像例を示す。これはアンモニアの放出開始直後の状況であるため、放出孔に近い位置では高輝度（赤コンター）となっており、放出孔から遠い容器上部ではアンモニアが計測されていない。ここで計測された輝度を参照セル（既知濃度のアンモニアを充てんした小型容器）の輝度を用いて濃度に換算する。計測したアンモニア濃度推移の一例を図4に示す。アンモニアの放出開始～放出停止に伴う濃度推移が計測できていることがわかる。

今後の課題として、計測精度の向上に加え、容器内への障害物の設置、アンモニアの放出方法の多様化（例えばピンホール放出）、そしてCFDとの比較による妥当性検証が挙げられる。このような閉囲空間におけるアンモニア濃度計測は世界に他に例がない試みであることから、引き続き共同研究者（公立諏訪東京理科大学今村教授、九州大学篠田名誉教授）と連携のうえ、研究を推進する予定である。

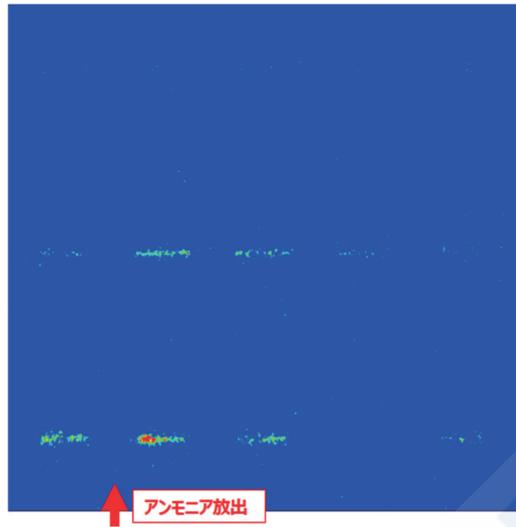


図3 アンモニア濃度イメージング例

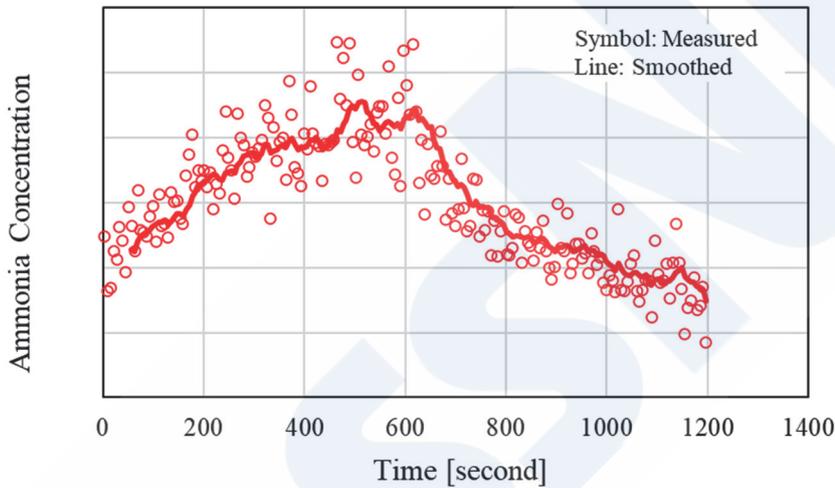


図4 噴出孔付近のアンモニア濃度推移例

### 2.3 代替燃料船の定量的リスク評価・リスク評価手法の高度化

代替燃料船の設計時，リスク評価が要求される。このリスク評価としてHAZIDやHAZOPが行われることが多いものの，例えば水素ステーションを対象に行われている<sup>10)</sup>ような，狭義の定量的リスク評価(Quantitative Risk Assessment, QRA)は船舶分野では一般的ではない。QRAは評価されたリスクを可視化することが容易であることから，ステークホルダー間で共通の認識が醸成しやすく，またリスクを低減する措置の効果を定量的に評価することができるため，特にこれまで実績に乏しいシステムを評価することに適している一方で，代替燃料船への適用実績はまだ少ない。そこで，本研究では，水素燃料モデルシップを対象に，QRAを行うべく，研究開発を行っている。これまでは同モデルシップを対象にHAZID，HAZOP，Bow-tie分析を行った。Bow-tie分析の結果の一例を図5に示す。

こうしたリスク評価の結果を用いて，QRAに用いるだけでなく，リスク評価結果のオペレーションにおける活用を目指した研究を行っている。船舶の特性として，設計者，運用者，船主が異なり，また配乗される船員も比較的高頻度に入れ替わる。中古売船も一般的であり，船主が入れ替わって運用されていくことも少なくない。そのため，本船にどのようなリスクが存在しており，どのように対処していくべきか，設計時のリスク評価結果を生かして管理していくことで，実績に乏しい代替燃料船の安全性向上に繋がるものと考えられる。

尚，これらの研究は，横浜国立大学伊里准教授との共同研究として実施している。

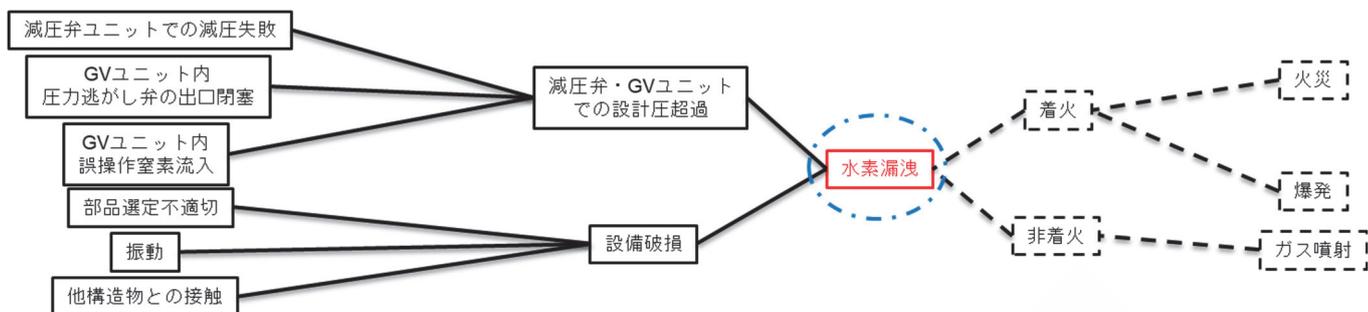


図5 水素燃料モデルシップのBow-tie分析例

### 3. 貨物・燃料格納設備損傷の防止

リスク評価は、万一の漏洩を加味したうえでシステム全体の安全性を確保した設計を行うために必要であるが、一方で漏洩や損傷は統計的にのみ処理される。つまり、実績のないシステムでは、当然これまで経験のない損傷が生じる可能性があり、リスク評価に基づく設計だけではこのような損傷そのものを防止できない。そこで、燃料・貨物格納設備自体の損傷を防止するために、これらの設備の健全性を評価する手法、またその健全性を脅かすような事象への対応策を検討する必要がある。これまでは、発生した損傷を踏まえたルール形成が行われてきたものの、技術革新の進む時代の中では、1章で述べた通りプロアクティブな研究開発が望ましい。本会では、構造健全性（“Structural integrity”）及び材料適合性（“Material compatibility”）の観点から研究開発を行っている。

構造健全性評価は、一般には破壊を起こす駆動力と、破壊に抵抗する抵抗力それぞれを適切に評価することが求められる。本会が実施している研究の例として以下のものが挙げられる。Forumでは、このうち、破壊を生じる駆動力の例として材料のアンモニア応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking, SCC）評価手法の検討について報告した。また、Forumでは合わせて、火災発生源になりうる、液化酸素（LOX）に対する材料適合性の研究開発を報告した。本章ではそれぞれ3.1節及び3.2節で、これらの内容を紹介する。

#### 3.1 材料のアンモニア応力腐食割れ感受性の評価手法検討

液化アンモニアタンクの貯蔵・利用において、アンモニアSCCが損傷の原因となってきた。現代では、IGCコード17.12にあるように、使用する鋼材の強度制限や、水の添加、PWHTの実施等の対策が取られているものの、1970年代までの知見に依拠しており、今後のアンモニア輸送船の大型化やアンモニア燃料船の普及の障害になる可能性がある。そこで、アンモニアSCCを考慮した材料のアンモニア貯蔵供用可能性を評価する手法を検討している。

アンモニアSCCは時間依存型の破壊現象であるため、材料のアンモニアSCC感受性は加速試験により評価されることが望ましい。また、アンモニアSCC感受性は一般に材料の硬さと相関することが知られており、過去の研究では高強度鋼を対象にして実験が行われており、船用タンクに使用されるような降伏応力がそれほど高くない鋼材が評価されていないことが多かった。そこで、本会では、1980年代の中井らの研究<sup>11)</sup>を参考にして試験条件を設定し、広い範囲の強度レベルの鋼材でも割れが発生するかどうか検証した。試験は4点曲げで行った。

図6に、5%二酸化炭素と1000ppm酸素を加えたアンモニアに降伏応力相当のひずみを付与かつ2.0V vs Ptの電位を印加して2週間浸漬したHT80クラスの鋼材の浸漬後の状態を示す。顕著な割れが発生していることがわかる。同様の実験を規格最小降伏応力325MPaの鋼材に対して行うと200 $\mu$ m程度の微細なクラックが確認された。このことから、この試験条件では現在実用的に使用されている鋼材であれば、軟鋼を除いてはアンモニアSCC試験により有意な結果が得られることが示唆された。

一方で、同じHT80クラス鋼材を同じ実験系に136h浸漬した結果を図7に示す。浸漬期間は短いと、亀裂が発生するものの微小な長さにとどまっている。また、最小降伏応力325MPaの鋼材では亀裂が発生していない。これらのことから、材料のアンモニアSCC感受性を評価するためには、試験条件に応じた適切な浸漬期間を設定する必要があるといえる。



図6 HT80のSCC破面（浸漬期間：2週間）



図7 HT80のSCC破面（浸漬期間：136時間）

アンモニアSCC加速試験を行うにあたり、適切な加速条件の設定が不可欠である。アンモニアSCCには酸素や二酸化炭素、水といった不純物が影響することが知られているものの、どのような機構でアンモニアSCC挙動が変化するかは明らかではない。また、腐食反応が寄与することもあり、実験の成功率も必ずしも高くないのが現状である。そのため、今後引き続き、安定的な実験実施条件の設定、ばらつきの確認を目指して研究を行う予定である。

### 3.2 材料の液化酸素（LOX）適合性評価手法検討

次世代のクリーンエネルギーとして注目されている水素は、 $-253$ 度という極低温で液化される。この温度は酸素の液化温度より低いことから、防熱の状態によっては、空気中の酸素が液化する可能性がある。そのため、本会液化水素運搬船ガイドライン<sup>12)</sup>では、単一損傷シナリオにおいて空気が液化温度以下にまで冷却される場合、液化酸素（LOX）による発火リスクへの配慮、すなわち、液化酸素の発生が安全上の問題を発生しないこと、あるいはLOXに接触する材料が、LOX適合性を有していることを要求している。

ここでいう材料のLOX適合性とは、その材料が液化酸素に触れた状態で機械的衝撃を受けても発火しないことを指している。ASTM規格にてLOX適合性評価を規定するものはあるものの、これまで主に宇宙分野で活用されており、船用分野ではLOX適合性が問題になることはほとんどなかった。そのため、本会では、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）との共同研究を通じて、LOX適合性評価に関する知見の蓄積に努めている。

LOX適合性試験は、図8に示すアルミカップに試験体を設置し、LOXを浸漬、ストライカーピンを通じて打撃を与えることで行う。この時、一切の発火がみられず、また試験後の供試体に着火した痕跡がみられなければLOX適合性があると判断されるが、図9のように着火した場合、LOX適合性がないとみなされる。尚、着火の形態は様々であり、図9のように比較的穏やかなこともあれば、Guo et al.<sup>13)</sup>にてExplosionに分類されるような爆発的な着火も見られる。本会では、JAXAとの共同研究を通じて、炭素鋼（SM400C）、塗料付き炭素鋼、アルミ合金（A5083-O）、PEEK樹脂、断熱材（MLI）、エポキシ系構造用接着剤を対象に実験を行った。

これまでの試験状況を表1に示す。ASTM規格では打撃エネルギーは98Jと規定されているが、本研究では、船用分野に適した打撃エネルギー量が必ずしも明らかではないため、打撃エネルギーに応じてLOX適合性が変化するかどうか検討するため、49J、25Jにおいても試験した。また、着火ナシとしたものは、10体以上試験を行い、1回も着火しなかったものを指す。また、複数回試験を行い、1回でも着火とみなされた場合に着火アリとしている。この結果から、材料によりばらつきはあるもののLOX適合性は打撃エネルギー依存性があることが示された。このことは、船舶におけるLOXに対する安全性を考える際に、一概に既存規格通りに適合、不適合を判定するのではなく、その部材が受ける着火要因の度合いに応じて適合判定を行うことが可能であることを示唆している。

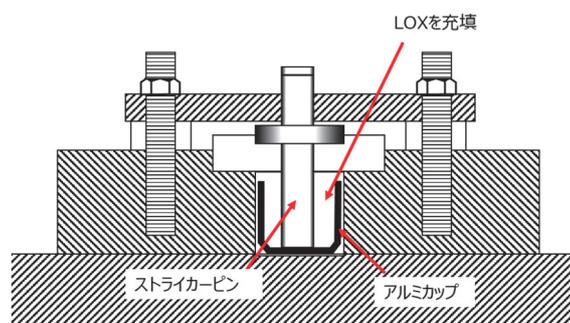


図8 打撃試験機

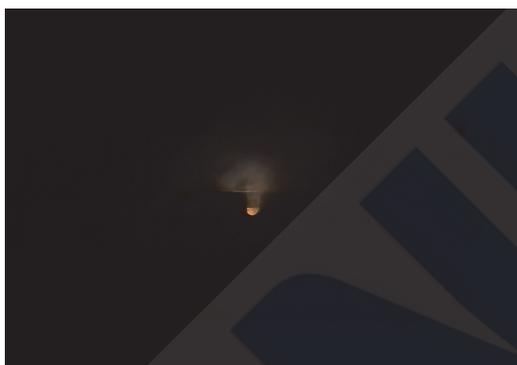


図9 LOX試験結果

表1 LOX適合性試験実施状況

供試体	打撃エネルギー [J]		
	98	49	25
SM400C	非着火		
塗装済みSM400C	着火アリ	着火アリ	非着火
A5083-O	非着火		
PEEK樹脂	着火アリ	非着火	
断熱材 (MLI)	着火アリ	着火アリ	
エポキシ系構造用接着剤	着火アリ	着火アリ	着火アリ

LOX適合性はこれまで宇宙分野で主に評価されてきたことから、海事分野に適した評価法、評価基準を検討することは、液化水素運用の合理化に寄与するものである。本研究はJAXA殿のご協力の下、推進しているが、引き続き宇宙・船舶の連携を行い、液化水素利用の安全性向上に貢献していく。

#### 4. 総括

海事産業の脱炭素化が急激に進んでおり、代替燃料船や新貨物輸送船の設計が行われている。一方で安全要件はこれまでの規則の延長線上であるか、あるいはそれらの設計の承認プロセスの中で得られた知見を反映する形で開発されており、場合によっては安全要件の開発に対して設計が先行している部分もある。そのため、プロアクティブな研究開発の実施が、一層重要となる。本会では、「代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化」と「貨物・燃料格納設備の健全性評価技術」の二点のアプローチで研究開発を推進し、安全かつ効率的な代替燃料船、新貨物輸送船の実現・運航に必要な知見の蓄積を行っている。

本会では、要素技術研究、安全要件策定／規則開発、実プロジェクトそれぞれのステージにおいて研究開発を行っている。技術研究所が要素技術研究と、安全要件策定／規則開発の段階での研究開発に主に従事してい

るが、要素技術研究で得られた最先端の知見を実プロジェクトに提供するとともに、実プロジェクトからのニーズのフィードバックを得ることで、有機的に連携した研究開発体制を敷いている。また、従来の船舶海洋工学分野に縛られず、必要な知見獲得のために、様々な分野との連携体制を構築している。これらのオープンイノベーション体制を維持・推進していくことで、タイムリーな研究開発を実現していく。

## 謝辞

本会で実施している研究開発の多くは、大学、企業、研究機関との連携によって実施している。この場を借りてお礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) International Association of Oil & Gas Producers: Risk Assessment Data Directory Process Release Frequencies, Report 434-01, 2019
- 2) A. Franks et al.: Use of quantitative risk assessment to enhance the safety of ships using ammonia as fuel, Journal of Safety and Sustainability, Vol. 1, pp.127-140, 2024
- 3) KT Moon et al., Ammonia as a marine fuel: likelihood of ammonia releases, Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 47(6), pp. 447-454, 2023
- 4) B. D. Ehrhart and E. S. Hecht: Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 4.1 Technical Reference Manual. SAND2022-5649, 2022
- 5) 中村：シミュレーションのV&Vの現状と課題 第3回（最終回）V&Vに関わる技術標準の動向「モデルV&Vと品質V&V」, 日本原子力学会誌, 57巻, 2号, pp.99-103, 2015
- 6) W. Tan et al.: Experimental and numerical study of ammonia leakage and dispersion in a food factory, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 47, pp. 129-139, 2017
- 7) S. Dharmavaram et al.: RED SQUIRREL Tests – Air Products Ammonia Field Experiments, 19th Global Congress on Process Safety, 2023
- 8) M. Nielsen et al.: Field experiments with dispersion of pressure liquefied ammonia, Journal of Hazardous Materials, Vol. 56, pp.59-105, 1997
- 9) 朝日ら：レーザラマン分光法による局所ガス濃度非接触連続計測技術の開発, 四国電力, 四国電力送配電, 四国総合研究所研究期報, Vol.114, pp.21-27, 2021
- 10) T. Suzuki et al.: Quantitative risk assessment of a hydrogen refueling station by using a dynamic physical model based on multi-physics system-level modeling, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46(78), pp. 38923-38933, 2021
- 11) 中井ら：液体アンモニア中における応力腐食割れ促進試験法の開発, 鉄と鋼, Vol.67(14), pp.2226-2233, 1981
- 12) 日本海事協会：液化水素運搬船ガイドライン（第3.0版）, 2024
- 13) Guo et al.: Experimental characterization and molecular dynamics simulation of thermal stability, mechanical properties and liquid oxygen compatibility of multiple epoxy systems for cryotank applications, Extreme Mechanics Letters, Vol. 44, 101227, 2021