

2015 ClassNK 春季技術セミナー

液化水素輸送船の安全性評価に関する 研究開発

2015/6/12(東京) 16(神戸) 18(尾道)

川崎重工業株式会社

 **Kawasaki**
Powering your potential

会社概要



精密機械事業
9.1%



船舶海洋事業
6.1%

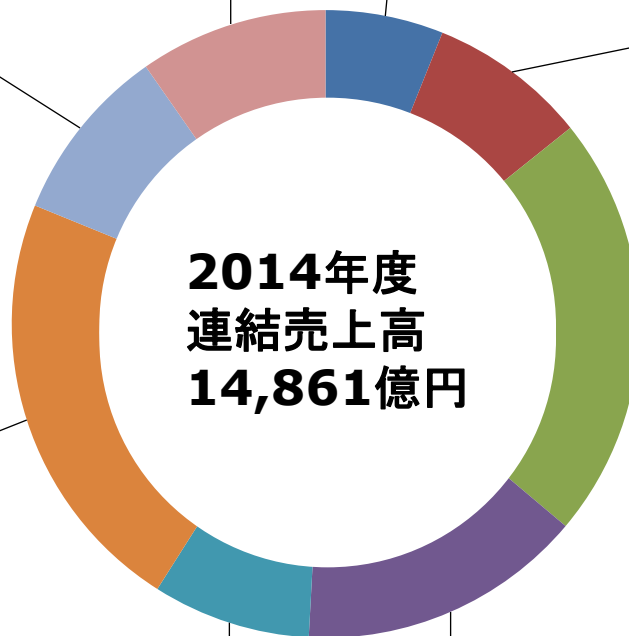
車両事業 8.2%



航空宇宙事業
21.9%



モーターサイクル
& エンジン事業
22.2%



プラント・環境事業
8.2%

ガスタービン
・機械事業
14.7%



Today's Agenda



1. 水素利用への動き
2. 水素サプライチェーンのコンセプト
3. 液化水素輸送船の安全性評価に関する取組み
 - ・リスク評価
 - ・安全評価要素試験および数値解析

水素利用が国の成長戦略に

- 「エネルギー基本計画」が2014年4月に閣議決定：
水素利用が初めて大きく記載
- 経産省は、水素戦略ロードマップを策定、
「未利用資源褐炭からの水素製造」、
「水素発電」が明記

水素・燃料電池戦略ロードマップ

フェーズ1

FCV（燃料電池自動車）
水素インフラ

2015年

- ・FCV市場投入

2020年頃

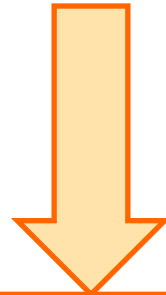
- ・経済的水素価格実現

2025年頃

- ・FCV低価格化
（自立化）

フェーズ2

水素発電の実現
大規模水素の導入



2020年代半ば

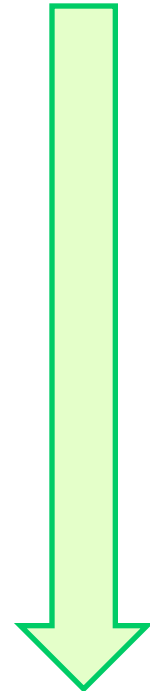
- ・海外からの水素導入

2030年頃

- ・海外からの未利用
エネ由来水素の
大量導入

フェーズ3

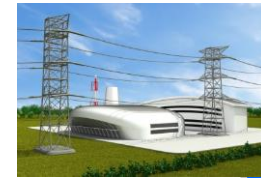
CO2フリー水素の導入



CCS等による
CO2フリー水素の
本格化

水素需要の拡大 “FCVからオリンピックへ”

「プロセス用」⇒「FCV」⇒「発電用」
の順に需要が進展



水素大量導入



水素発電の本格化
FCVの普及



TOKYO ● 2020

東京オリンピック
「水素オリンピックに」



燃料電池自動車
(FCV)
販売開始

【発電用途】

【輸送機器用途】

【プロセス用途の水素需要】

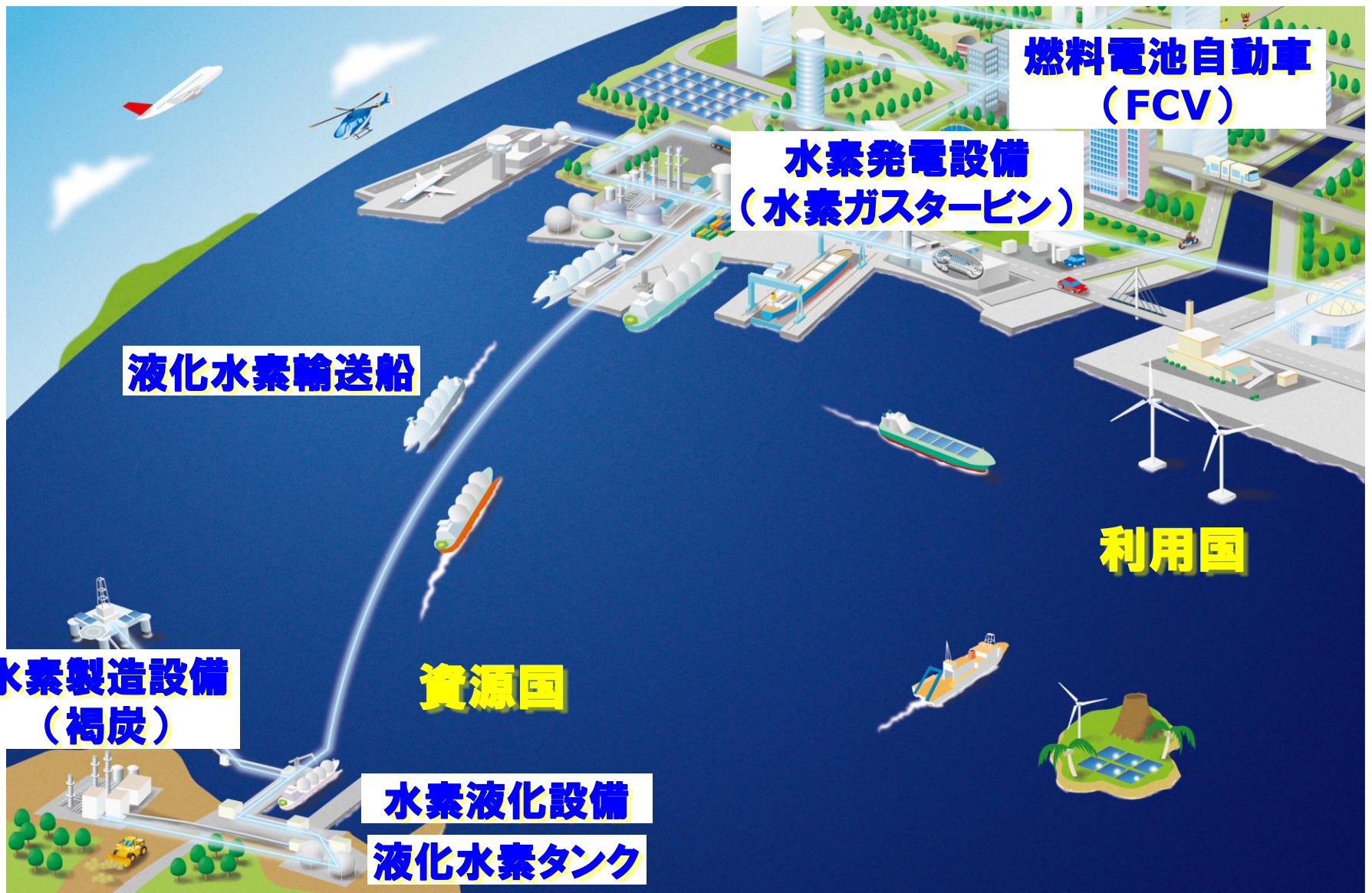
2014

2020

2025

2030

CO2フリー水素チェーンのイメージ

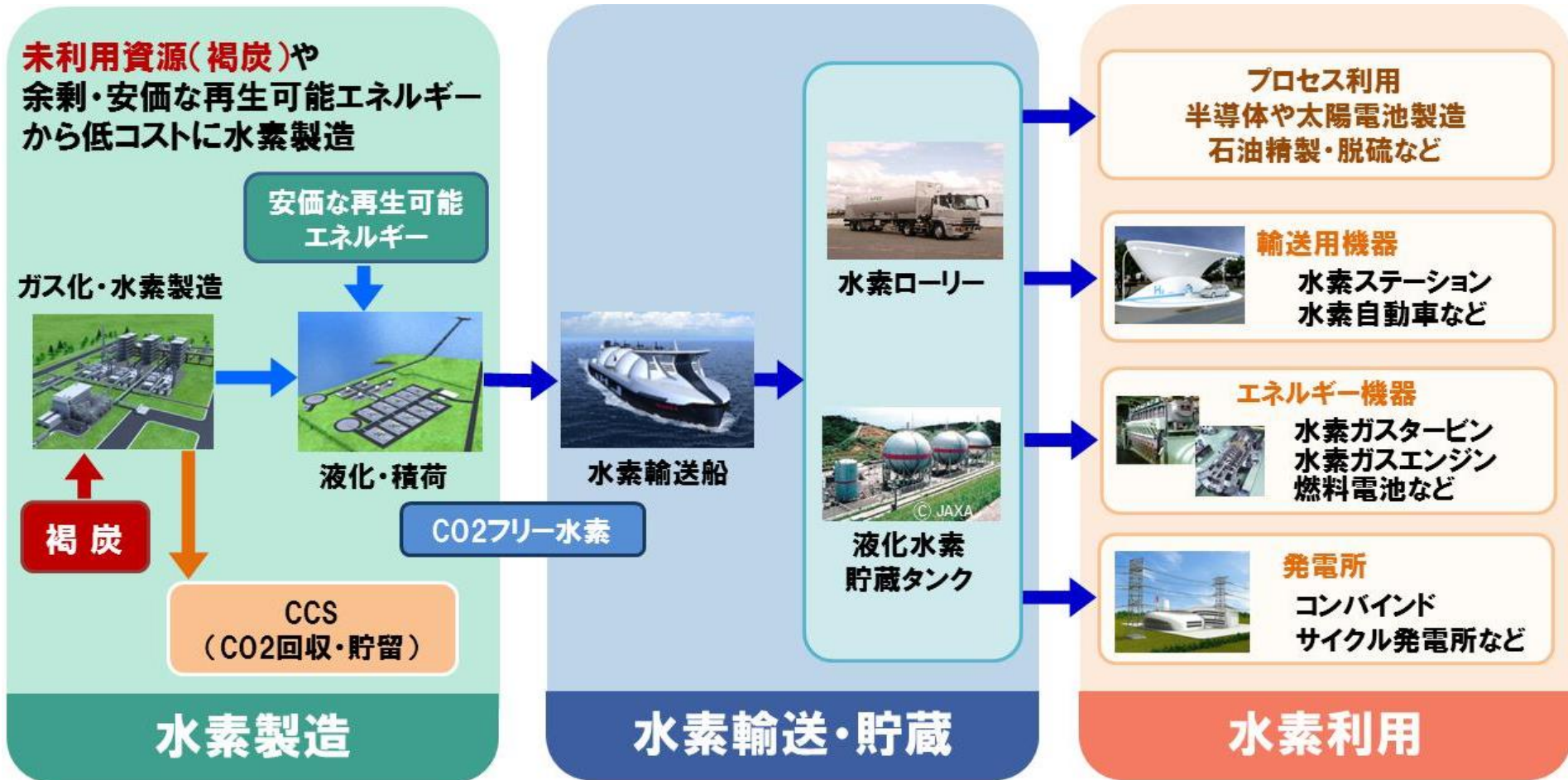


CO2フリー水素チェーンのコンセプト

- CO₂の排出を抑制しながらエネルギーを安定供給

資源国（豪州）

利用国（日本）



液化水素・水素の大量輸送手段

液化水素の特徴

- 極低温（ -253°C ）
- 気体の1/800の体積
- 産業利用やロケット燃料として**実用化済**の輸送媒体
- 高純度=**精製不要**（蒸発させるだけで燃料電池に供給可能）



国内最大 液化水素タンク
（種子島ロケット基地）



LNG船
（エネルギー大量輸送）



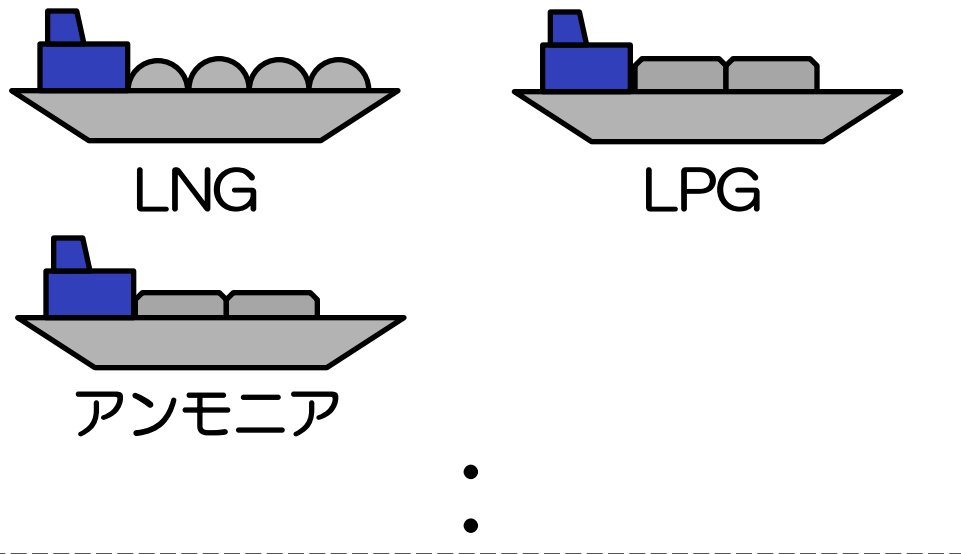
液化水素輸送船

液化水素輸送船に関する国際規則

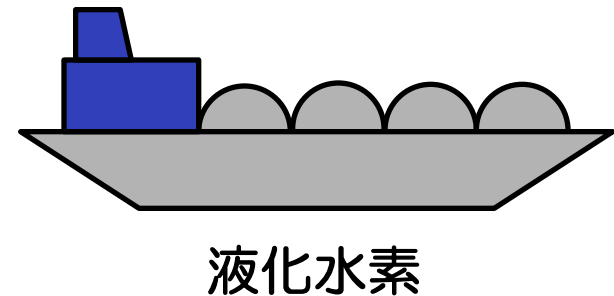
- IGC-Code : 液化ガスのばら積み運送のための船舶の構造及び設備に関する国際規則

IGC-Codeに基づく安全要件

○ IGC-Codeの対象貨物



× 対象貨物外



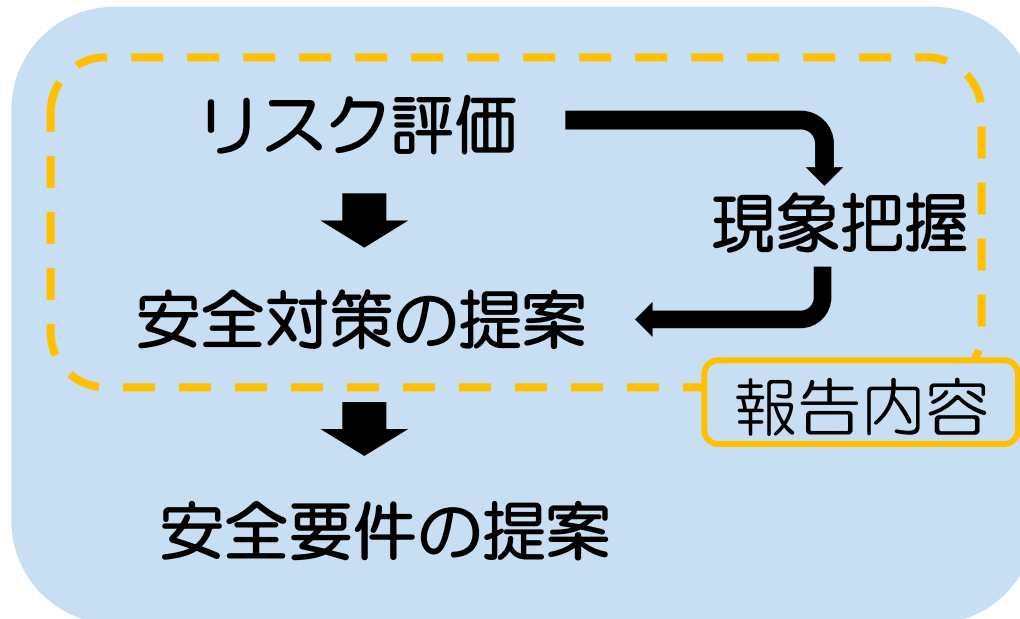
運航にあたり、液化水素輸送船に関わる**安全要件の提案**が必要

液化水素輸送船の安全性評価に関する取組み



本研究開発は、「**液化水素輸送船が満たすべき安全要件の提案**」を目的とし、岩谷産業株式会社、川崎汽船株式会社、一般財団法人日本海事協会との共同研究体制により実施するとともに、同協会の「業界要望による共同研究スキーム」による支援を受けて実施。

共同研究の流れ



リスク評価の方針

STEP1 ハザードの網羅的抽出



STEP2 ハザードの集約および各フェーズへの振り分け



STEP3 リスクの準定量評価



STEP4 想定されるハザードへの対策

STEP1：ハザードの網羅的抽出

• 以下の方針でハザードを網羅的に抽出

1. 規格・標準、ガイドラインからのハザードの抽出

物性の近いLNG等や陸上の液化水素の規格や、標準を参考とすることによってハザードを抽出

2. FTA(Fault Tree Analysis)によるハザードの抽出

荷役・出入渠作業については、手順が入り組んでいるため、各オペレーション手順を失敗した際の影響を検討する簡易的なFTA手法を基にハザードを抽出

STEP1：ハザードの網羅的抽出

- ・ハザードの抽出に使用した規格、ガイドライン等の例

国際規則	IGC Code[MSC 220 (82)]
規格・標準	ISO/TR 15916 水素システムの安全性の基本考察
	ISO 13984 液体水素－陸上車両給油システムインタフェース
	EN1474-1（欧州規格：LNG のローディングアームによる移送）
	EN1474-2（欧州規格：LNG のローディングホースによる移送）
ガイドライン等	NEDO 水素の有効利用ガイドブック
	EIGA06 02 液化水素の安全な保存、取扱い、分配
	EIGA75 07 安全距離の決め方
	EIGA121 04 水素輸送パイプライン など
統計・事例	SAFEDOR “HAZID for LNG Tankers D4.3.1” LNG 船のHazId
	IHS Fairplay, Bespoke Data, 2011（船の事故統計）
	Offshore Reliability Data (OREDA, 石油産業の信頼性統計)

STEP2：ハザードの集約および各フェーズへの振り分け

積み荷役・揚げ荷役中

- ・作業手順のミス
- ・ERS作動に伴う漏洩による、低温脆化・着火
- ・意図しない漏洩
- ・液化酸素の生成(低温脆化を含む)
- ・タンク、配管の圧力変化(サージ圧を含む)
- ・整備ミス等によるカーゴポンプ2 基とも動作不能

非常時

- ・入熱の増加(浸水、火災、真空破断)
- ・海上投棄
- ・安全弁の吹き止まり失敗

航行

- ・閉鎖区画における水素漏洩
- ・開放区画への水素漏洩
- ・水素探知機の検知失敗(航行時以外も含む)
- ・温度の監視失敗
- ・圧力の監視失敗
- ・停電

入出渠

- ・出渠時の作業手順のミス

検討対象外

- ・追加対策不要
- ・物性の違いによらないもの

STEP3：リスクの準定量評価

- リスクの大きさを準定量的にランキングする
SWIFT のワークシートを各ハザードに対して作成

SWIFTワークシートの項目

ハザード名

ハザードの定義

ハザードの特徴

ハザードの原因

想定されるシナリオ

結果

リスクの大きさ評価

STEP3：リスクの準定量評価

- リスクの大きさを以下の式により定義

$$\text{リスク指標 (RI)} = \text{被害の深刻度 (SI)} + \text{頻度 (FI)}$$

SIの定義

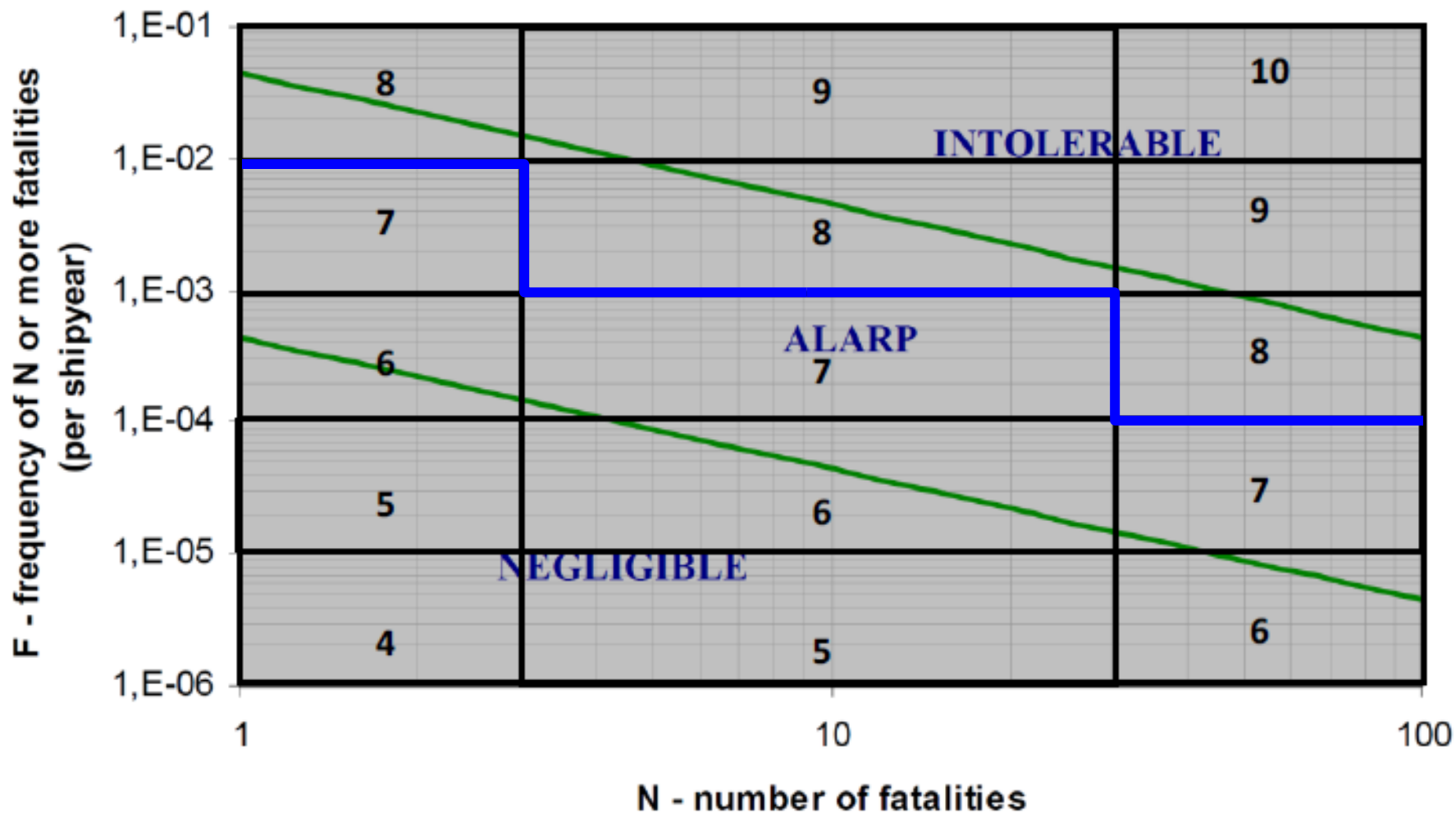
SI	人への影響	船への影響
5	多数の死者	全損
4	複数の死者	全損
3	死者1名または複数の重傷者	重大な損傷
2	複数または重傷者	軽微な損傷
1	1名または軽傷者	局所的
0	被害なし	被害なし

FIの定義

FI	発生頻度
8	1隻で週に1~2回
7	1隻で月に1回
6	1隻で年に1回
5	1隻で船の寿命中に数回
4	1隻で船の寿命中に1回
3	同型船数隻の集団で船の寿命中に1回
2	10000隻の集団で1年に1回
1	5000隻の集団で寿命中に1回

STEP3 : リスクの準定量評価

- LNG船の総合安全評価と本研究の相関



STEP3：リスクの準定量評価

- 液化水素輸送船をLNG船と同程度の安全性とするためには、リスク指標（RI）を7以下とすることが必要

(例) SAFEDOR によるLNG 船の高ランクハザード	RI
Faults in navigation equipment(in coastal waters)	7.0
Crew falls or slips onboard	7.0
Shortage of crew when LNG trade is increasing	6.8
Rudder failure (in coastal waters)	6.8
Rudder failure (in manoeuvring)	6.8
Steering and propulsion failure (in manoeuvring)	6.6
Steering and propulsion failure (in coastal waters)	6.6
Faults in navigation equipment (in manoeuvring)	6.6

STEP3：リスクの準定量評価

- 各フェーズのハザードに対するSWIFTワークシートを作成した結果、リスク指標(RI)が7以上となった事象

1. 不純物の混入

- 積荷、揚荷作業手順のミス、出渠時の作業手順のミス
(例) 出渠後、空気のパーシ不足により、空気が固化
→ 貨物タンク内に不純物として残留

2. 漏洩

- 積荷、揚荷作業における意図しない漏洩
- 航行中の閉鎖区画における水素漏洩

3. 非常時対応

- 海上投棄
- 安全弁の吹き止まり失敗

4. その他

- 液化酸素の生成

STEP4：想定されるハザードへの対策

- リスク指標 (RI) が7 以上のハザードに対して被害の深刻度 (SI) および頻度 (FI) の低減を検討

例) 海上投棄

【被害の深刻度 (SI)】

$$SI = 4$$

※火災・低温脆化等により船体の全損も考えられるため。

【頻度 (FI)】

$$FI = 3$$

※SAFEDOR “HAZID for LNG Tankers” (Table 4)によると
海上投棄の実施例はなし。ただし、船舶間移送は2件実施例あり。

【安全対策】

全損を避ける手順を策定することによりRI=6となる(SI=4→3)

適切な対策を講じることで、
すべてのハザードのリスク指標を低減できることを確認

まとめ

液化水素輸送船のリスク評価を実施した。
想定された船舶に対してハザードを網羅的に抽出し、
それらへの対策を列挙した。

その結果、適切な安全対策を講じることで、
すべてのハザードのリスクがLNG船と同程度まで
低減できることを確認した。

安全評価要素試験および数値解析

【目的】

リスク評価において抽出された、液化水素および水素ガスの漏洩・放出に関するハザードは以下の通り。

- 積荷、揚荷作業における意図しない漏洩
- 航行中の閉鎖区画における水素漏洩
- 海上投棄

上記のハザードに対して適切な安全対策を講じるためには、液化水素および水素ガスの特性(拡散性・着火性)を十分に把握する必要があるため、以下の研究を実施した。

- 液化水素漏洩試験（ガス種、漏洩受け面材質等の影響確認）
- 水素ガス拡散シミュレーションモデルの構築
- 低温での水素着火性測定

液化水素漏洩試験（ガス種、漏洩受け面材質等の影響確認）

【試験方法】

約6Lの液化水素を、漏洩面上、ある高さから面の中心に向けて、瞬間的に放出し蒸発・拡散現象を調査

※比較検討のため、LNGと液化窒素でも同様の試験を実施

漏洩面	狙い
SUS	デッキ上を模擬
水面	海上投棄を模擬
コンクリート	--
砂利	--



漏洩試験の様子

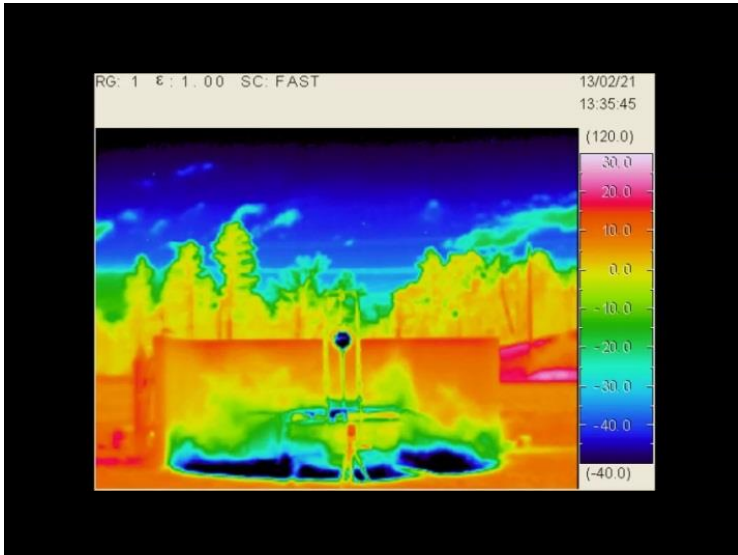
液化水素漏洩試験（ガス種、漏洩受け面材質等の影響確認）



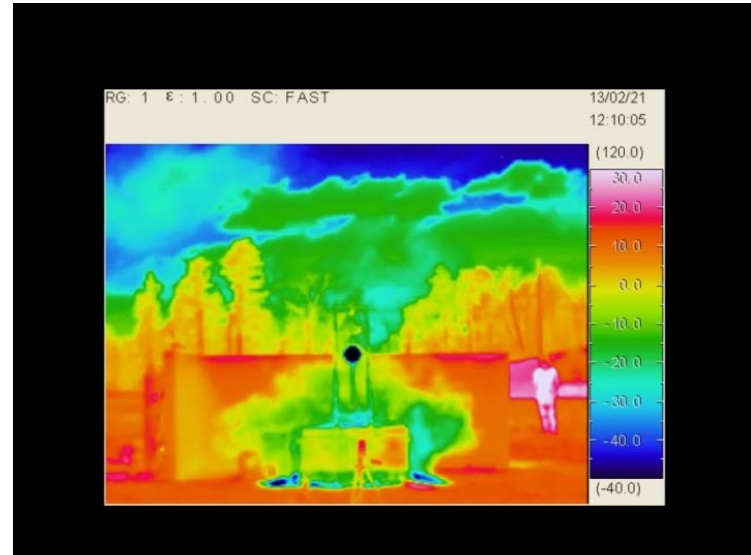
試験風景：日本自動車研究所にて試験を実施

試験結果①

◇ 漏洩面：コンクリート



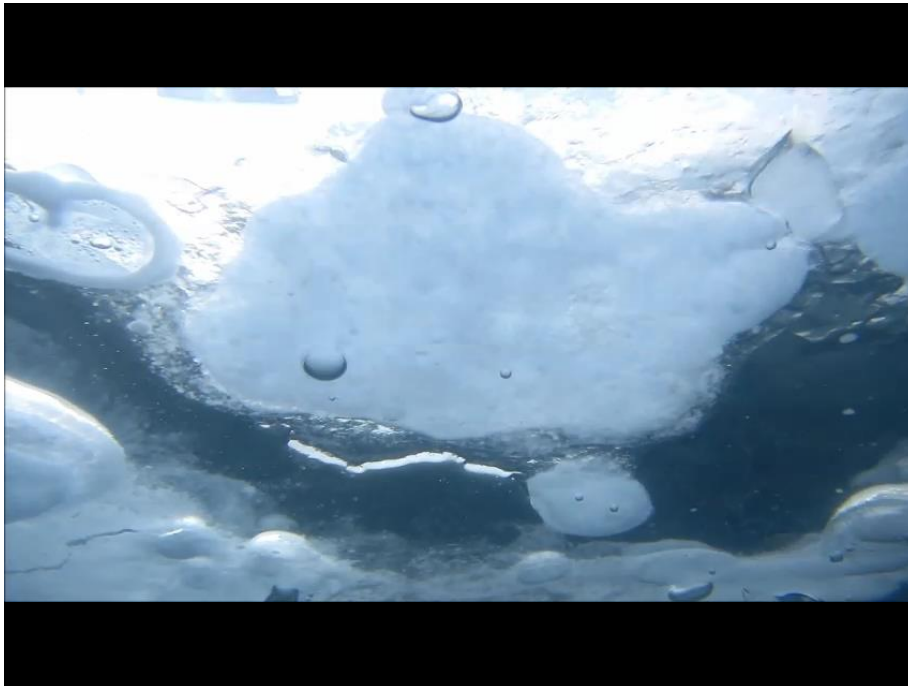
LNG



液化水素

試験結果②

◇ 漏洩面：水面



LNG



液化水素

試験結果③

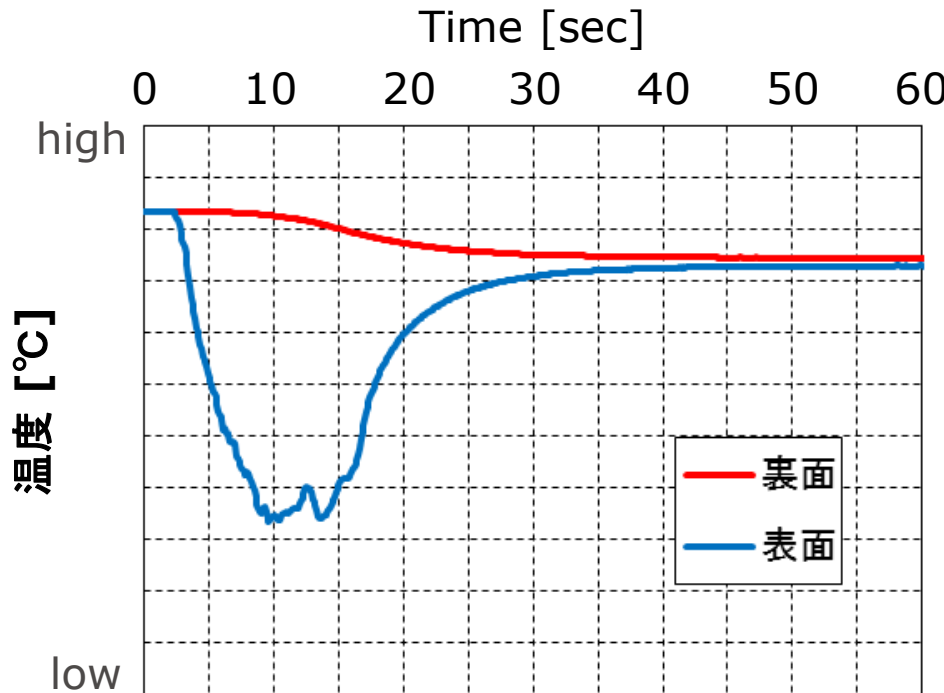
◇ 蒸気雲の水平拡散最大距離

	SUS	コンクリ	砂利
LH2			
LNG			

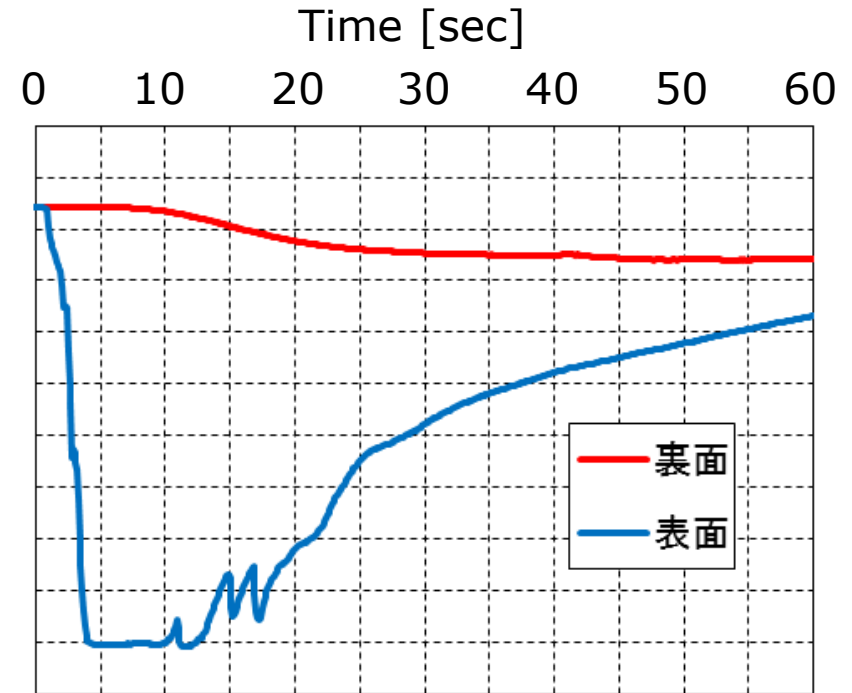
- 天候、風除けの影響を考慮すると、
液化水素の方が水平方向への拡散距離は短くなる傾向
- 砂利面の場合は、水平拡散距離がコンクリートの場合の1/4以下

漏洩面の温度低下

◇ SUS面の温度低下



液化水素



LNG

漏洩面の温度低下

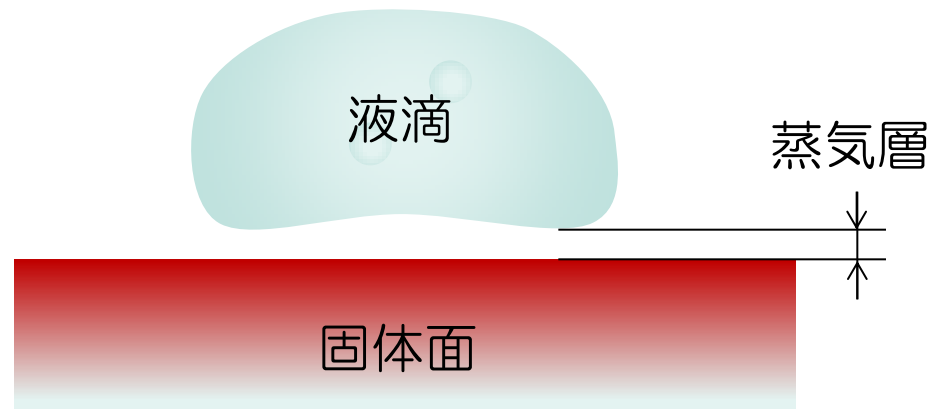
- 漏洩面の温度を計測した結果、
LNGよりも液化水素の方が漏洩面の冷却度合いが小さい



- ライデンフロスト効果の影響のため液滴と漏洩面との接触が小さい

ライデンフロスト効果

蒸気層が液体の下に生じ、熱伝導を阻害する



まとめ

まとめ

少量の液化水素が漏洩した場合の蒸発拡散現象について、液化ガス種および漏洩面の違いによる差異を定性的に明らかとすることができた。

本試験で得られた知見は以下の通り。

- 目に見える蒸気雲の水平方向の拡散範囲は、液化ガス種では「**液化水素**」が、漏洩面では「**砂利面**」が狭い。
- 6LのLNGが漏洩した場合、漏洩面(SUS)はLNG温度まで低下する。一方、6Lの液化水素が漏洩しても、漏洩面は液化水素温度まで低下しない。

今後の展開

- 液化水素漏洩時の蒸気雲内の**水素濃度分布**の調査する。

水素ガス拡散シミュレーションモデルの構築

【背景】

- 船舶のような大型構造物において、水素ガスや液化水素の漏洩を実験的に評価することは非常に困難。
- 実験が困難な状況において、その現象を把握する場合、CFD(Computational Fluid Dynamics)解析が有効な手段となる。

【目的】

- 実験結果を用い、**水素ガスの漏洩拡散**を対象とした解析モデルを構築する。

水素ガス拡散シミュレーションモデルの構築

【解析方針】

- 実験結果と解析結果の比較を実施
- 汎用解析ソフトウェア, FLUENTを使用

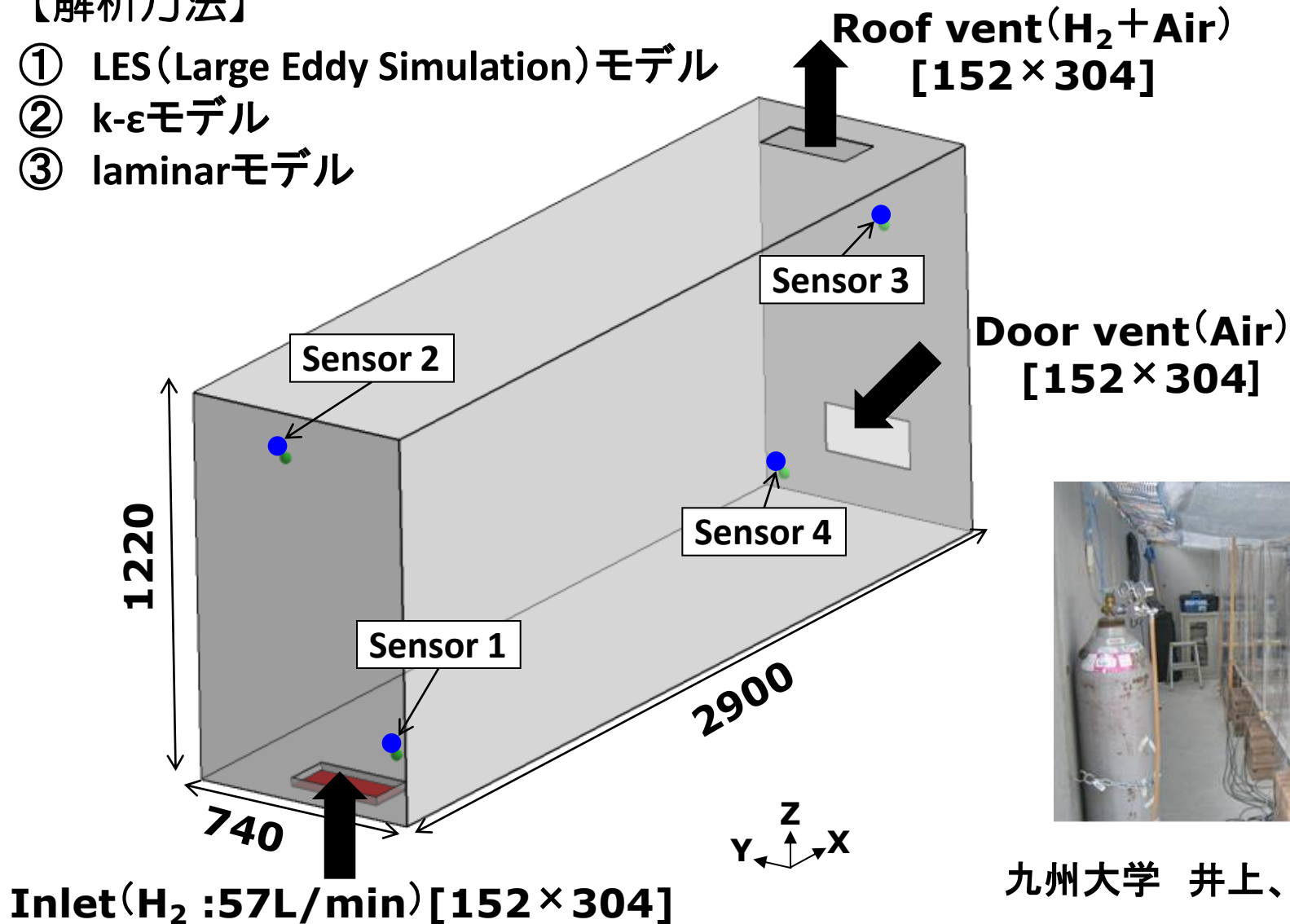


九州大学 井上、月川らの実験

水素ガス拡散シミュレーションモデルの構築

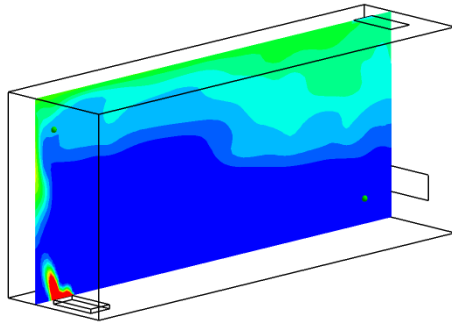
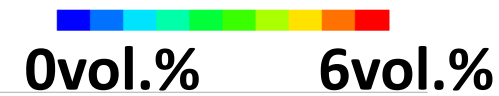
【解析方法】

- ① LES (Large Eddy Simulation) モデル
- ② k-εモデル
- ③ laminarモデル

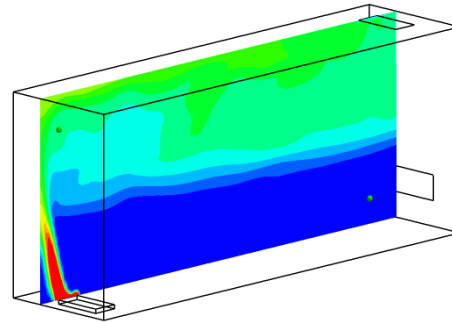


九州大学 井上、月川らの実験

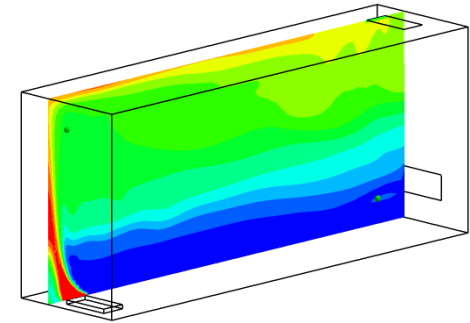
解析結果



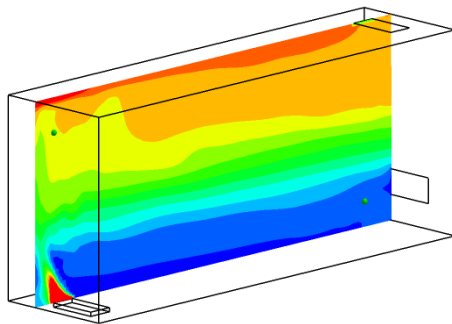
TIME=30s



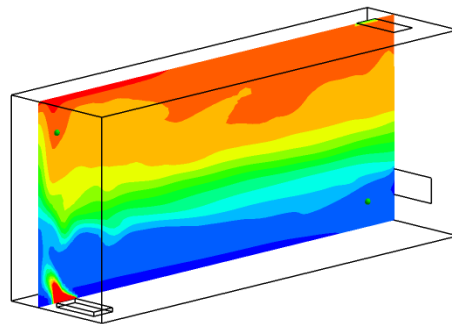
TIME=50s



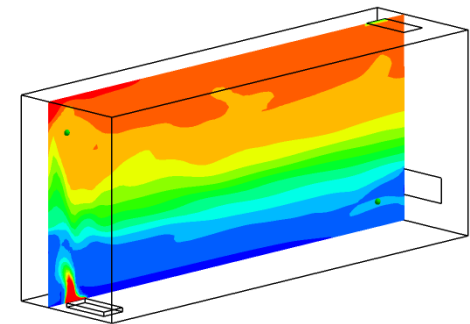
TIME=100s



TIME=200s



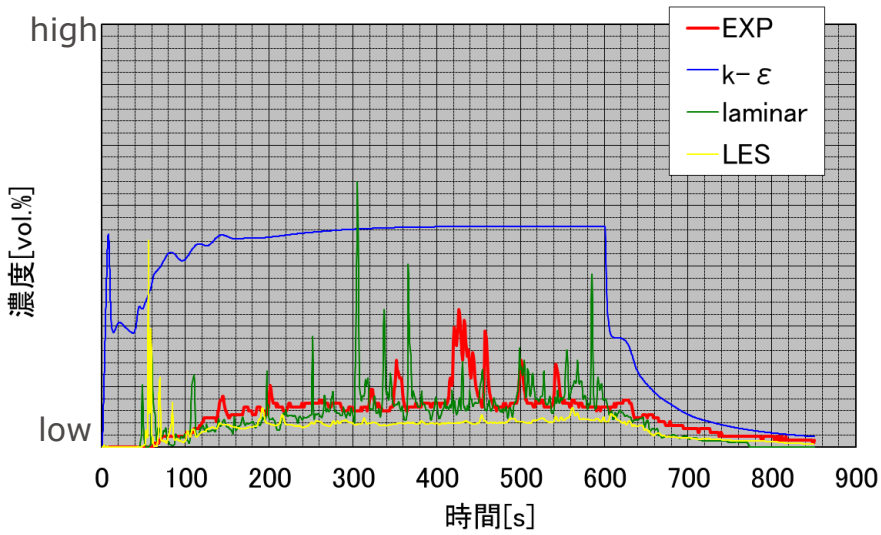
TIME=400s



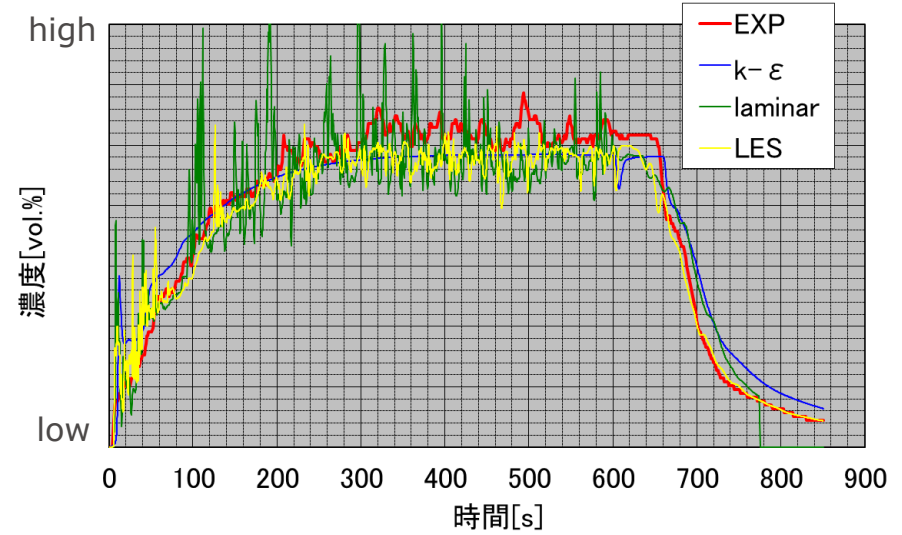
TIME=600s

水素濃度の時間変化（乱流モデル：LES）

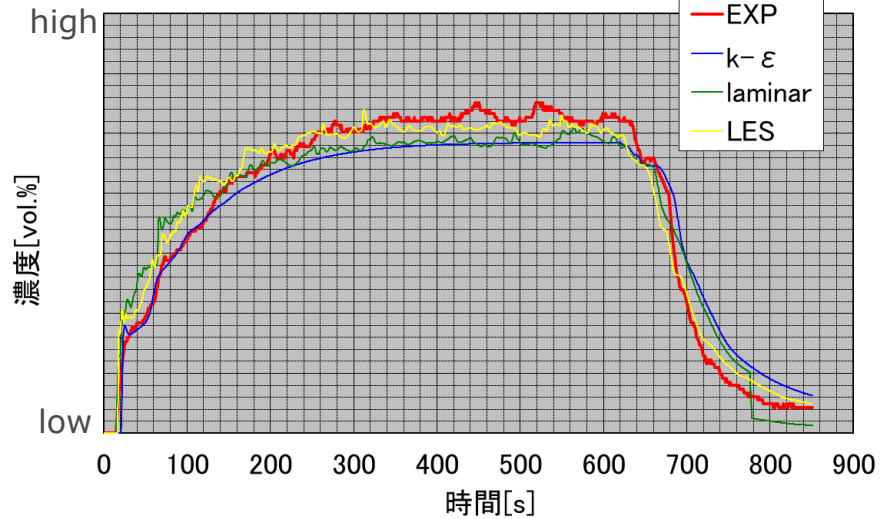
解析結果



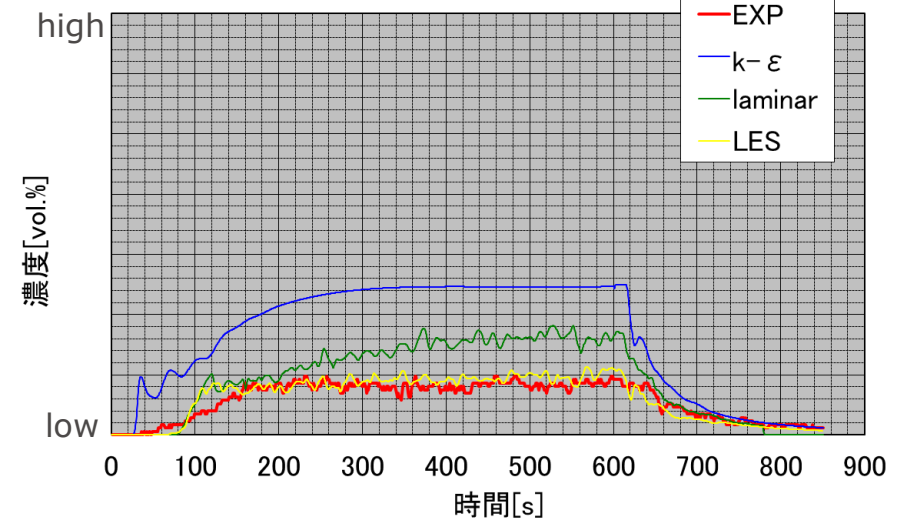
センサー1



センサー2



センサー3



センサー4

～まとめと今後の展開～

まとめ

- **水素ガスの漏洩**に関して、実験データと解析結果の比較検討を実施した。
- 妥当な境界条件、要素分割、乱流モデル等を選択することで、市販の解析ツールにより水素ガスの漏洩挙動をシミュレートできることを確認できた。

今後の展開

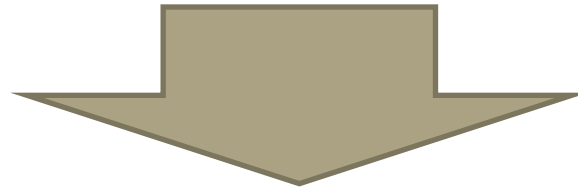
以下のステップにより**液化水素漏洩**時の拡散挙動を評価できるCFD解析モデルを確立する。

- 【STEP1】 **液化水素漏洩**実験を実施し、解析結果との比較検討用のデータ（濃度分布、温度分布等）を取得する。
- 【STEP2】 実験を対象に解析を実施し、実験結果との比較を通して最適な計算モデルを構築する。

低温での水素着火性測定

水素の空気中での爆発範囲は一般に水素濃度4-75%とされている。これは常温・常圧での爆発範囲であり、爆発範囲は温度依存性および圧力依存性があることが知られている。

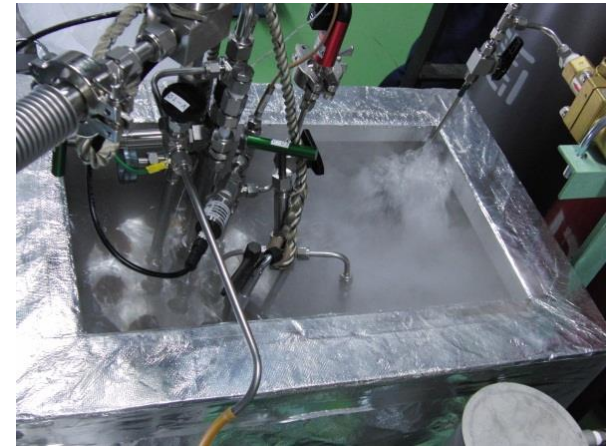
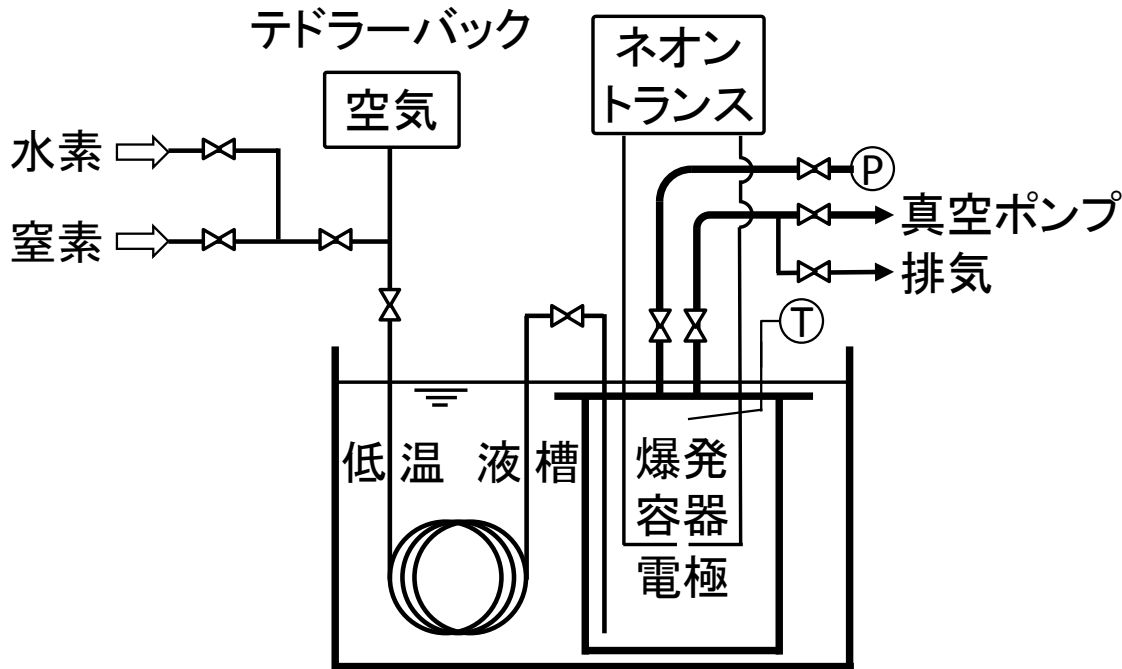
液化水素の漏洩を考えた場合、低温雰囲気になることが予想される。



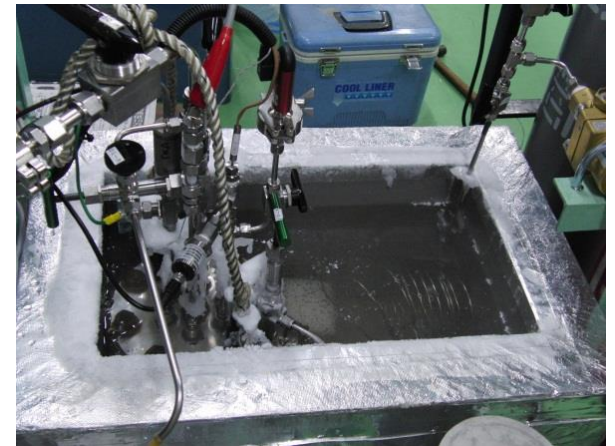
本研究では低温雰囲気下での水素の爆発範囲を調査する。

試験方法

【試験装置概略】



-25°Cの試験の様子



-75°Cの試験の様子

【試験条件】

試験条件	常温	0°C	-25°C	-75°C
寒剤	--	氷	ドライアイス + エタノール	

試験結果

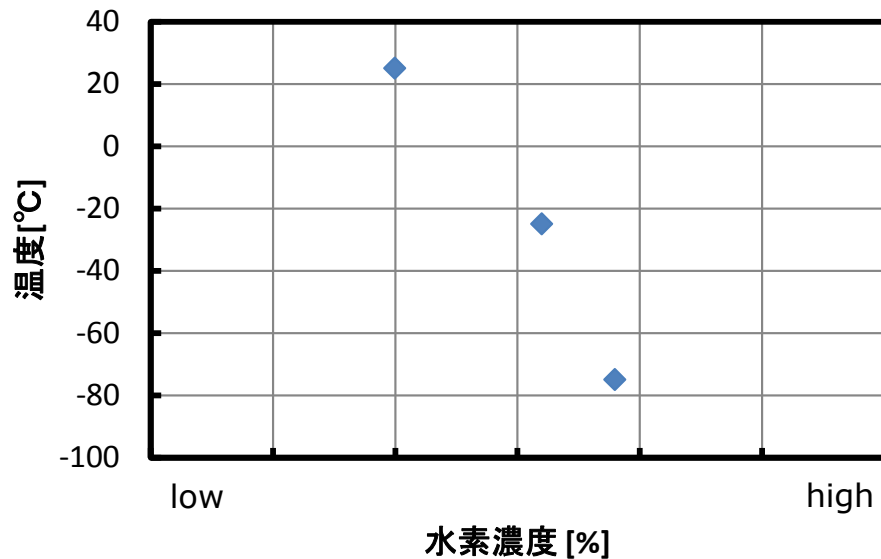


Fig. 爆発下限界

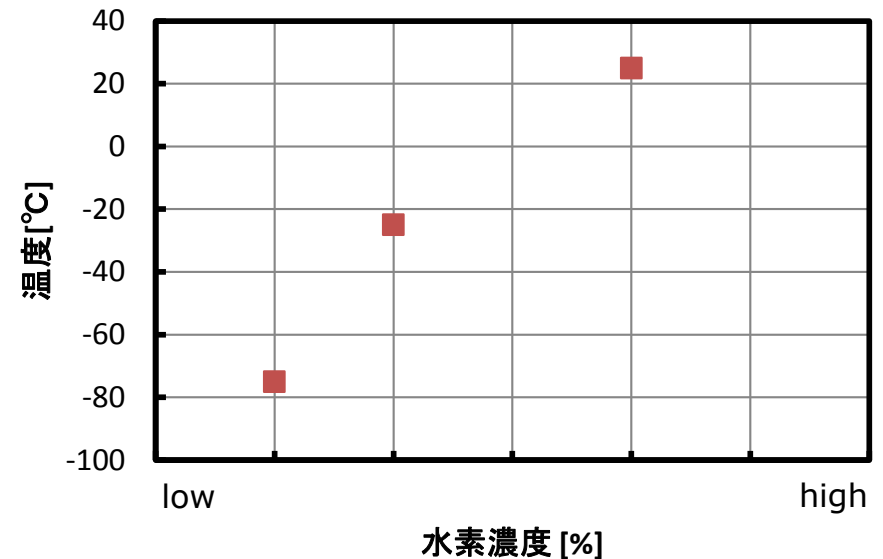


Fig. 爆発上限界

下限界： 温度の低下とともに増加
 上限界： 温度の低下とともに減少



爆発範囲はやや縮小

【まとめ】

爆発範囲の温度依存性について、低温になると爆発範囲がやや小さくなったが、大きな範囲の変化はないことが確認できた。

まとめ

本研究にて、液化水素輸送船の概念設計とリスク評価を実施し、設計において考慮すべき項目を抽出した。

また、液化水素が漏洩した場合の挙動などを試験およびシミュレーションにより確認することができた。

今後は本調査結果を踏まえ、明らかとなった課題を解決するとともに、液化水素輸送船の設計開発に反映することで、液化水素の海上輸送の安全に貢献していく所存である。



Powering your potential