
液化水素輸送船の安全性評価に 関する研究開発

2013年9月

川崎重工業株式会社

岩谷産業株式会社

川崎汽船株式会社

1. 目的

・低炭素社会への移行

温室効果ガス削減目標「2050年に、1990年比で80%削減」



海外の未利用エネルギーを活用して水素を大量製造し、コンパクトに液化して輸送

液化水素の海上輸送が必須であるが規定がない。

安全性評価・規格化が必要

(本研究)

液化水素輸送船のリスク評価、安全性評価試験／解析を実施

- ・調査研究
- ・液化水素運搬船リスク評価
- ・漏洩シミュレーション
- ・安全性評価試験

2. 事業内容 (1)調査研究、(2)事故想定とリスク評価

・水素関連の事故事例調査(海外データベース)

→水素関連206件、うち液化水素関連は12件。

・液化水素 輸送事例調査

→鹿児島～種子島で、フェリーに液化水素コンテナ車を搭載
(ロケット燃料用) 他の事例はほぼない。

・液化水素運搬船のリスク評価

(独)海上技術安全研究所への委託研究

<HAZID検討において抽出された、主なハザード>

1. 不純物の混入

水素中に窒素等の不純物ガスが混入し、固化してバルブ等へ詰まる等のトラブル

・積荷、揚荷作業手順のミス、出渠時の作業手順のミス

→(対策)異常検知の方法検討、ストレーナの設置

2. 漏洩

・積荷、揚荷作業における意図しない漏洩による、低温脆化・着火

・航行中の閉鎖区画における水素漏洩

→(対策)立入制限、適切な材料選定／設計、水素が滞留しない構造／換気の実施

3. 非常時対応

・洋上投棄

・安全弁の吹き止まり失敗

→(対策)検知方法の検討、ヒューマンエラーを考慮した設計検討

2. 事業内容 (3)LH2漏洩シミュレーション、(4)LH2流出に関する要素試験

【目的】

HAZIDで抽出された、下記の現象を把握し、事故を防止するための情報を取得する。

- ・液化水素が漏洩した場合の、液化水素および水素ガス拡散挙動
- ・液化水素漏洩による、低温脆化の影響
- ・洋上投棄時の現象
- ・材料脆化等に伴う、真空断熱が劣化した場合の挙動 等

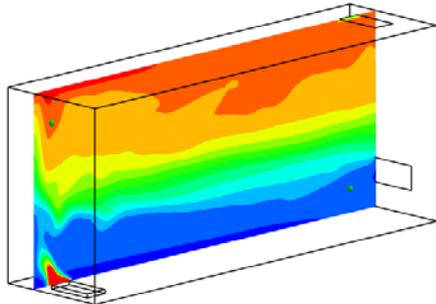
以上の情報を取得するため、下記の研究を実施した。

- ・水素ガス拡散シミュレーションモデルの妥当性検討
- ・液化水素漏洩試験(ガス種、漏洩受け面材質等の影響確認)
- ・低温での水素着火性測定
- ・液化水素容器の真空断熱劣化時の挙動確認試験

(3)LH2漏洩シミュレーション

【検討方針】

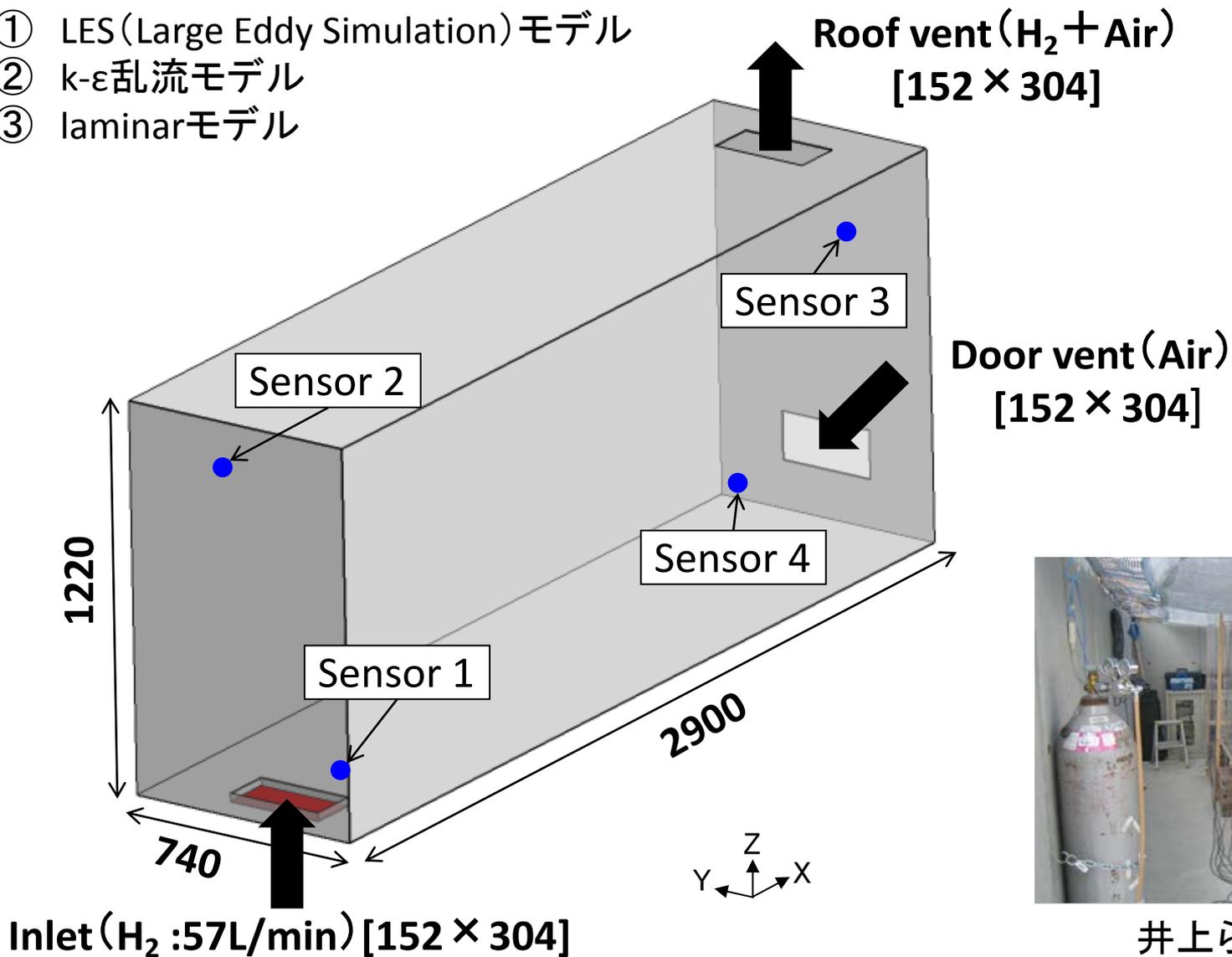
- ・現在開発を進めている液化水素輸送船は、2500m³級のカーゴタンクを有する。
- ・船舶のような大型構造物において、液化水素の漏洩を実験的に評価することは非常に困難。
- ・実験が困難な状況において、その安全性を評価する場合、CFD(Computational Fluid Dynamics)解析が有効な手段となる。
→液化水素を対象とした、CFD解析の研究は乏しい。

目標①	水素ガスを対象としたCFD解析モデルを構築する	
目標②	液化水素が漏洩した場合の蒸発拡散現象・爆発範囲等を調査する	

(3)LH2漏洩シミュレーション

【CFD解析モデルの構築 ～解析方法～】

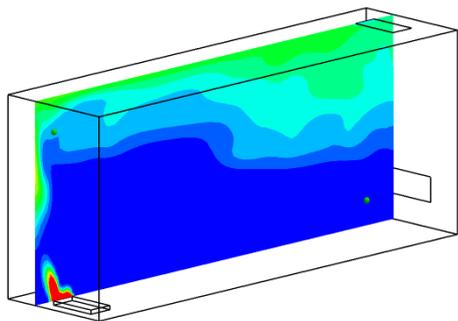
- ① LES (Large Eddy Simulation) モデル
- ② k-ε乱流モデル
- ③ laminarモデル



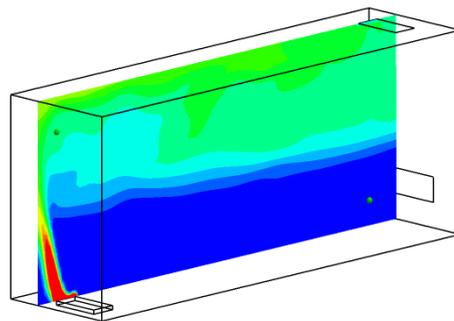
井上らの実験

(3)LH2漏洩シミュレーション

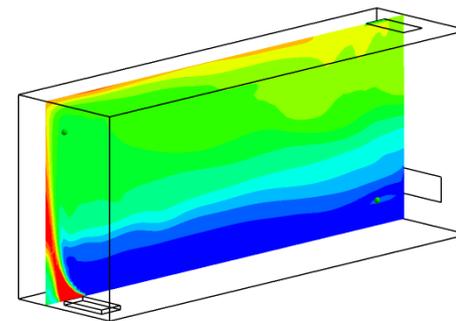
【CFD解析モデルの構築 ～解析結果～】



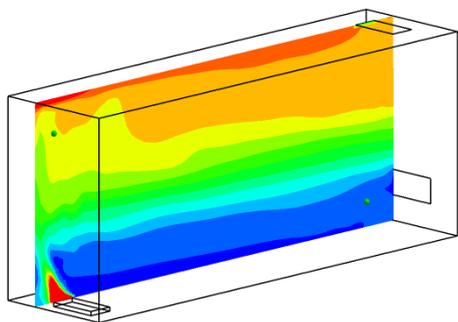
TIME=30s



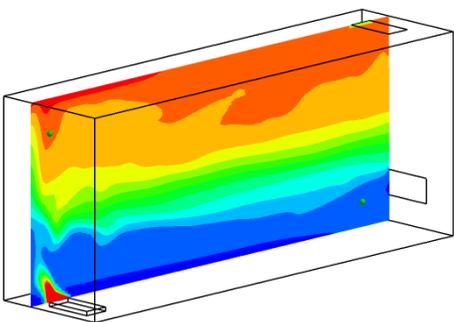
TIME=50s



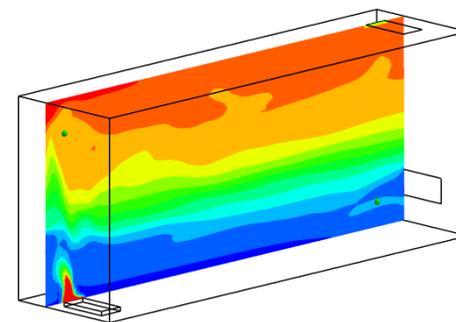
TIME=100s



TIME=200s



TIME=400s

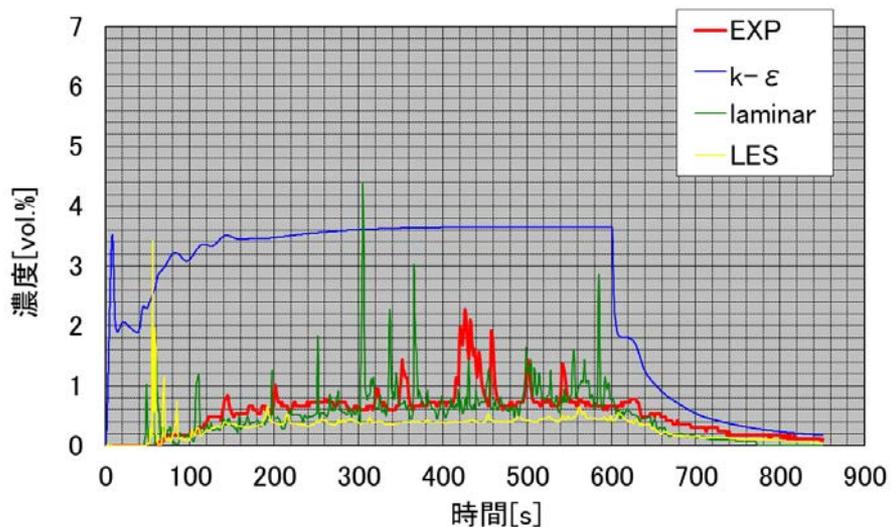


TIME=600s

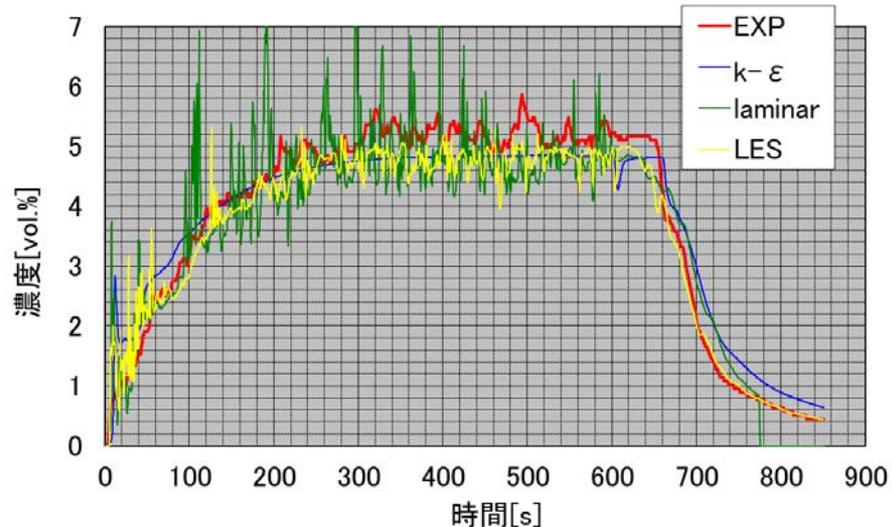
水素濃度の時間変化(乱流モデル:LES)

(3)LH2漏洩シミュレーション

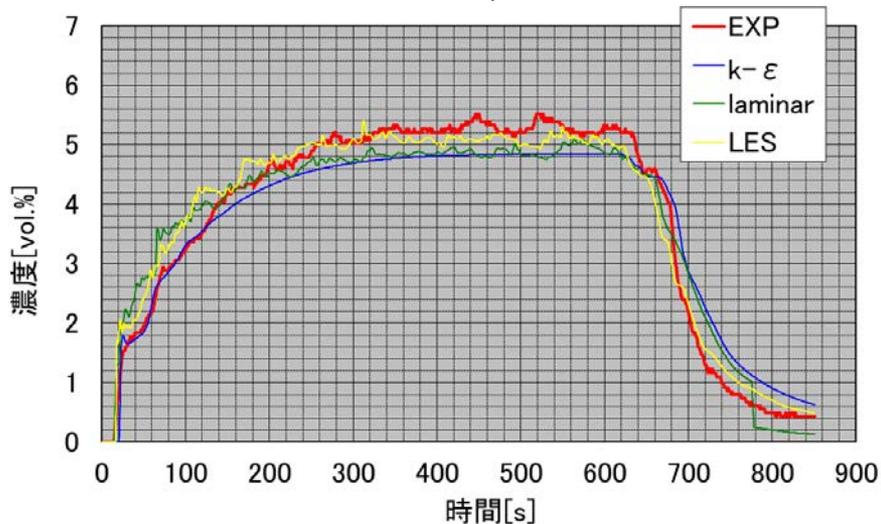
【CFD解析モデルの構築 ～解析結果～】



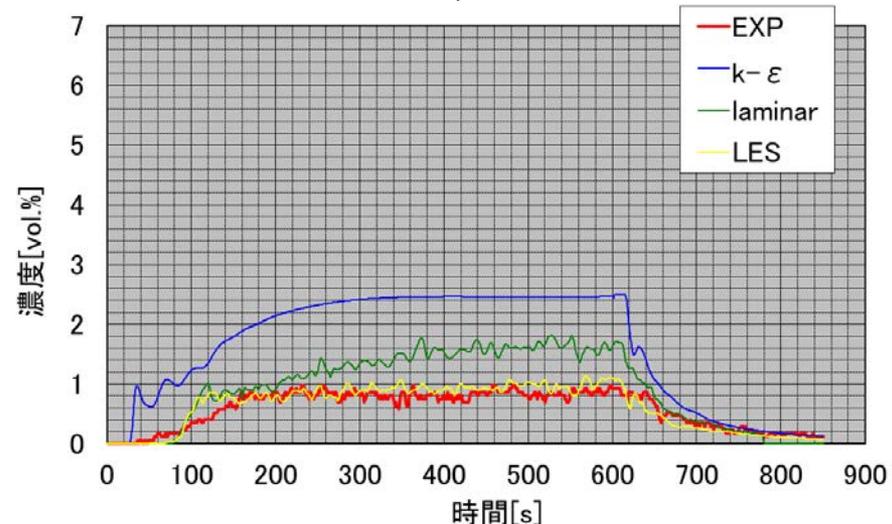
センサー1



センサー2



センサー3



センサー4

(3)LH2漏洩シミュレーション

【CFD解析モデルの構築 ～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CFD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水素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**の要素試験を実施し、CFD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】 要素試験を対象にCFD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し、実船の拡散挙動を予測できるCFD解析モデルを確立する。

(4)LH2流出に関する要素試験①少量液化水素の漏洩試験

【試験方法】

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

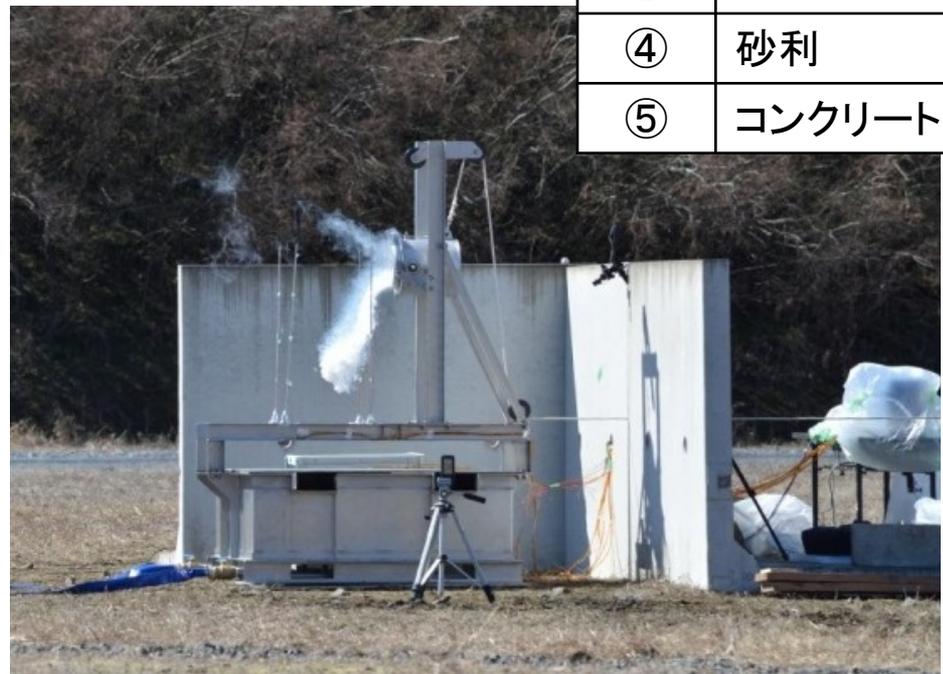
※比較検討のため、**LNGと液化窒素でも同様の試験を実施**

漏洩面	
①	SUS316L
②	軟鋼材
③	水面
④	砂利
⑤	コンクリート



試験風景①

日本自動車研究所にて試験を実施



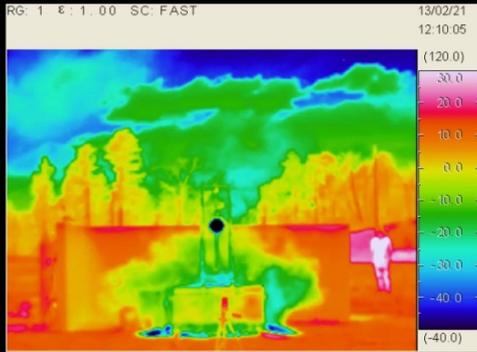
試験風景②

漏洩時の様子

(4)LH2流出に関する要素試験①少量液化水素の漏洩試験

【試験結果①】

◇ 漏洩面:コンクリート



液化水素



液化窒素



LNG

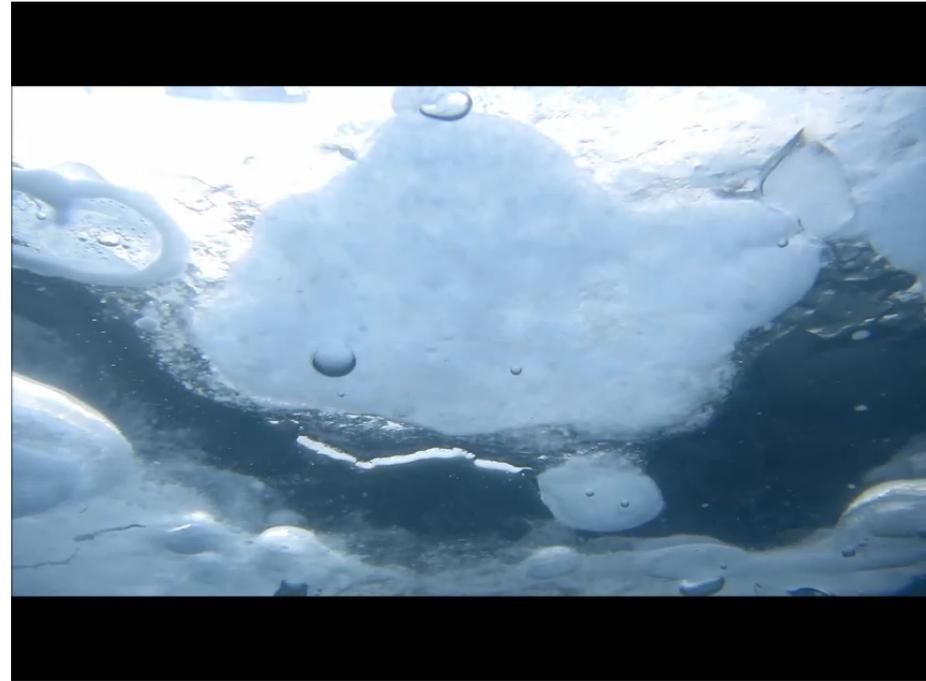
(4)LH2流出に関する要素試験①少量液化水素の漏洩試験

【試験結果②】

◇ 漏洩面：水面



液化水素

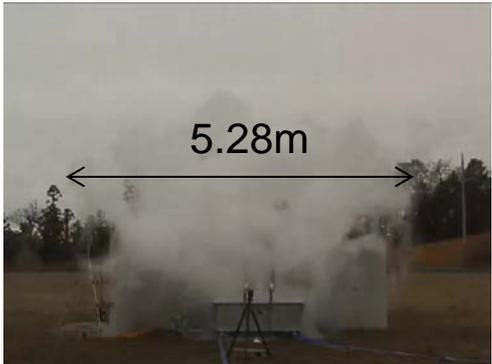
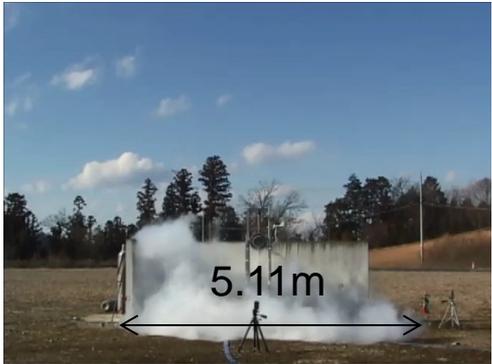


LNG

(4)LH2流出に関する要素試験①少量液化水素の漏洩試験

【試験結果③】

◇ 蒸気雲の水平拡散最大距離

	SUS316L	コンクリ	砂利
LH2			
LNG			

- ・天候、風除けの影響を考慮すると、LH2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

(4)LH2流出に関する要素試験①少量液化水素の漏洩試験

【まとめ】

少量の液化水素が漏洩した場合の蒸気拡散現象について、特に漏洩面に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。

- 1) 漏洩面の種類によって、液化水素の蒸気拡散現象は大きく異なる。
- 2) 目に見える蒸気雲の上昇速度はいずれの漏洩面についても他の液化ガスよりも速く、水平方向の拡散範囲も小さい。
したがって、LNGと同様に蒸気雲外が爆発下限界以下の濃度であれば、液化水素の方が危険範囲は狭いと考える。
- 3) 5つの漏洩面のうちでは、砂利面が蒸気雲の上昇速度、消散速度がともに速く、また、水平方向の拡散範囲も小さい。ただし、漏洩面周辺の温度はもっとも低い。
したがって、蒸気雲内は水素が高濃度で存在している可能性がある。
- 4) 蒸気雲輪郭部の温度は 0°C ～ -10°C であり、液化ガス種によらず、蒸気雲輪郭部付近の温度は同一である。
- 5) 6LのLNGが漏洩した場合、漏洩面は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。

【今後の予定】

液化水素漏洩時の蒸気雲内の液化水素濃度分布および温度分布の調査

(4)LH2流出に関する要素試験②低温水素ガスの爆発限界の検討

【背景・目的】

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。

【仮説】

爆発は反応速度が大きい燃焼反応である。燃焼反応の反応速度(k)は近似的に次の関係式が成り立つ。

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

A: 頻度因子 E: 活性化エネルギー
R: 気体定数 T: 温度

仮説 : 温度低下 → 燃焼反応速度低下 → 爆発範囲の縮小

(4)LH2流出に関する要素試験②低温水素ガスの爆発限界の検討

【試験結果】

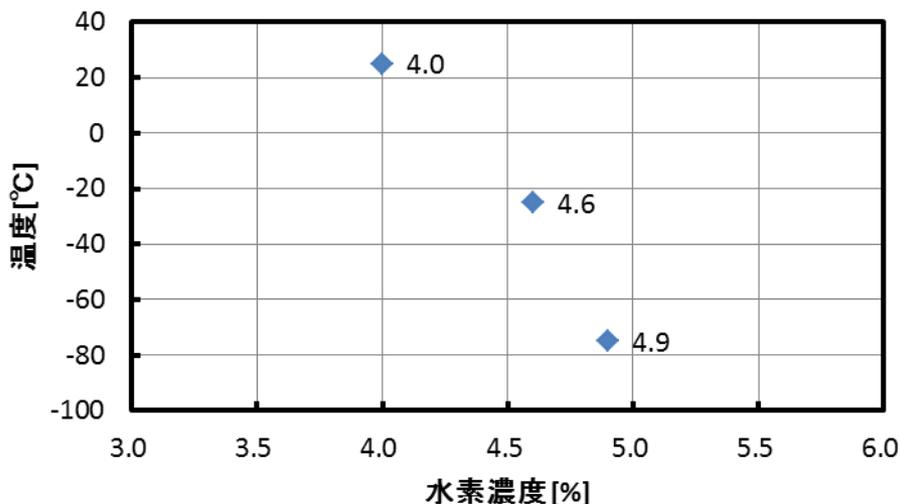


Fig. 下限界

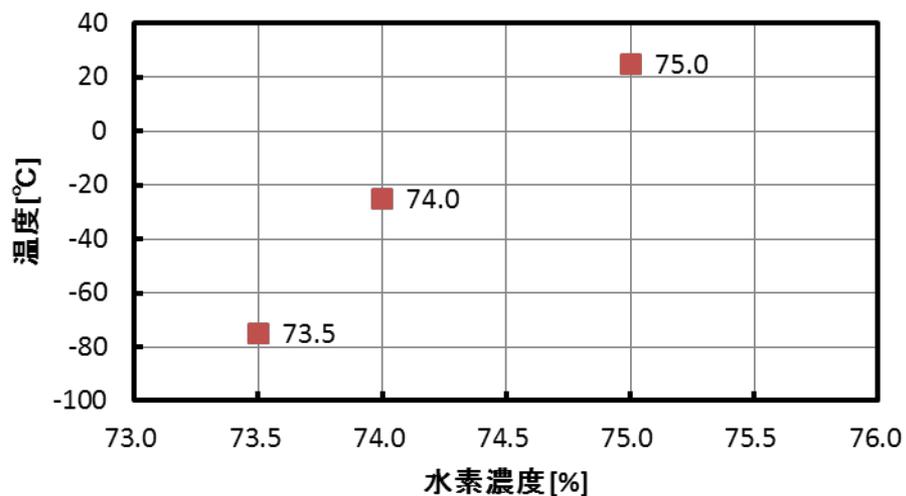


Fig. 上限界

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】

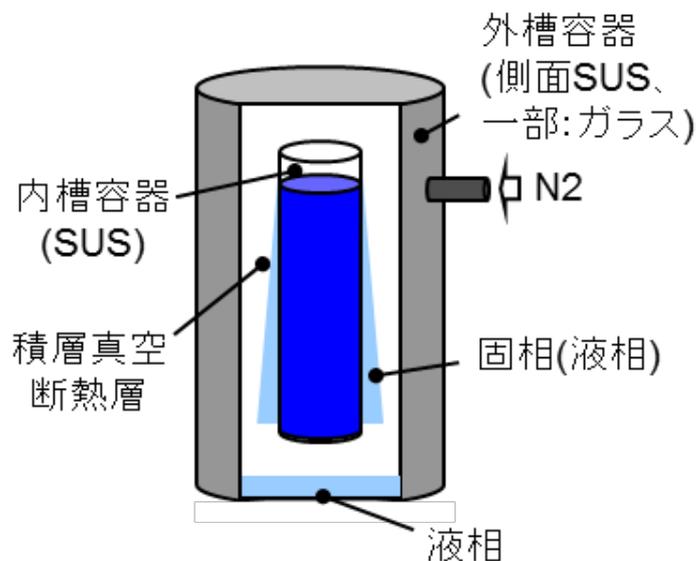
爆発範囲の温度依存性について、低温になると爆発範囲がやや小さくなったが、大きな範囲の変化はないことが確認できた。

(4)LH2流出に関する要素試験③真空劣化時の断熱容器の安全性検討

【目的】

真空断熱構造を採用している液化水素貯槽容器の外槽に何らかの理由によりリークが生じた場合、ホールド内の窒素が真空空間に侵入して真空劣化が生じる。真空劣化が生じると、その断熱性能は著しく劣化する。そこで、真空劣化が生じたときの断熱性能の変化と内槽の状態を調査する。

また、窒素の沸点は77K(大気圧下)であるため、真空空間の窒素は内槽壁によって冷却され、液化あるいは固化することが予想できる。これらの低温窒素ガス、液化あるいは固化窒素により、外槽壁も冷却され、人が接触した場合の安全面が懸念される。そこで、真空劣化が生じたときの、外槽壁温度および真空空間内の挙動を調査する。



(4)LH2流出に関する要素試験③真空劣化時の断熱容器の安全性検討

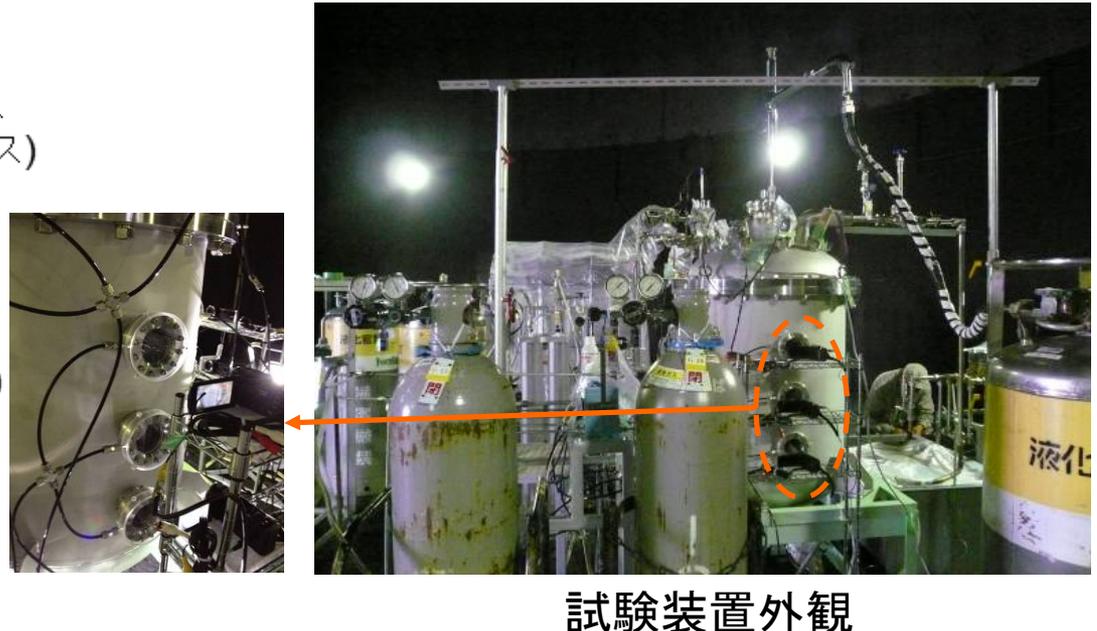
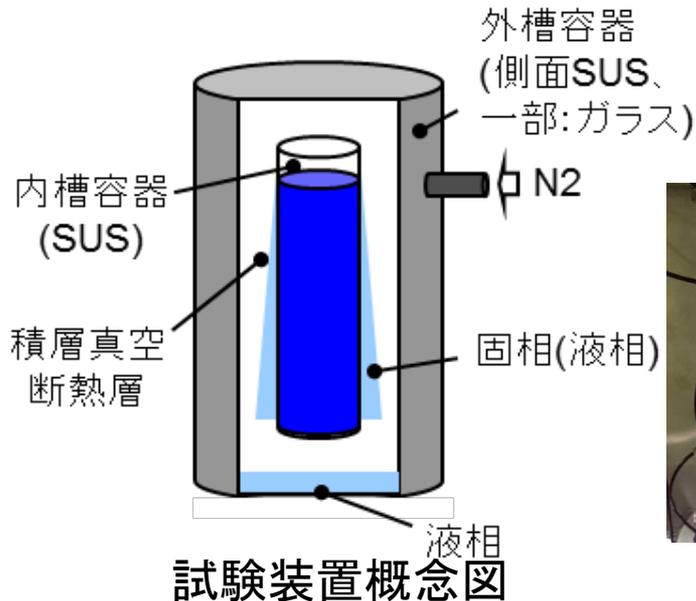
【目的】 真空断熱容器の真空劣化時の安全性を評価する。

【目標】 真空断熱容器の真空劣化時の断熱性能の低下度合い、外槽壁温度の低下度合いを調査する。

【方針】 安全性を考慮し、まずは液化窒素を充填した真空断熱容器において試験を実施し、その後、液化水素で試験を行う。

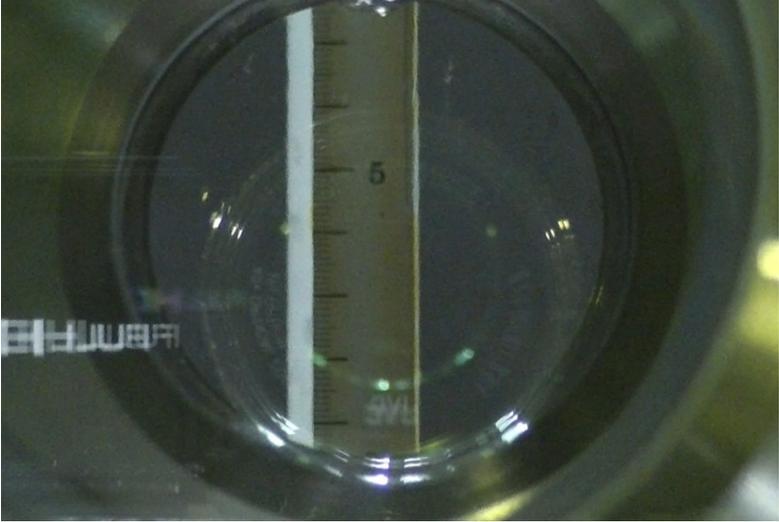
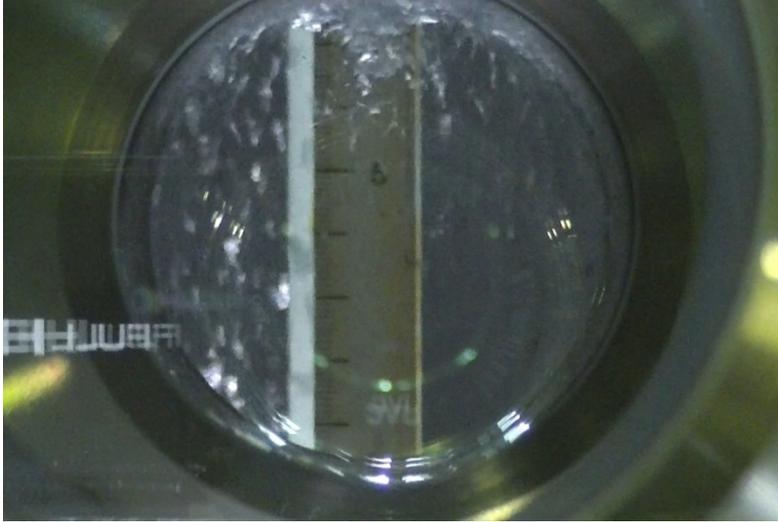
【試験方法】

真空二重殻容器に液化窒素を充填し、外槽から窒素ガスをリークさせた時のBOR(boil off rate)の変化や、外槽壁の温度変化を計測する。



(4)LH2流出に関する要素試験③真空劣化時の断熱容器の安全性検討

【試験結果】

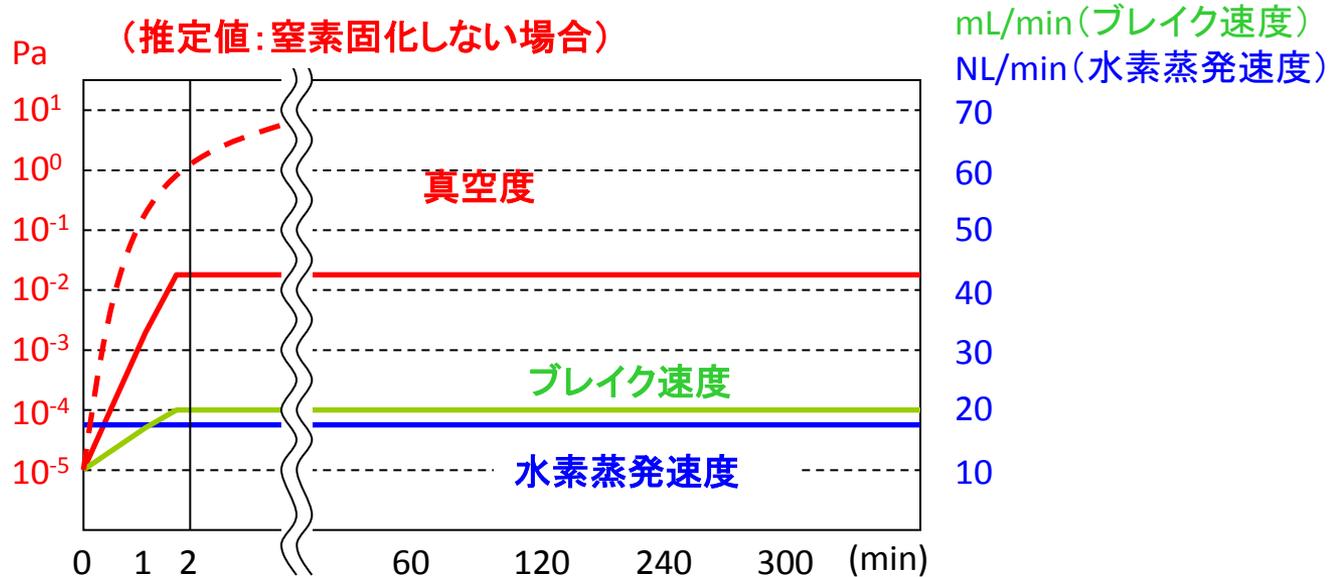
真空度	1.0E-1Pa	1.0E+4Pa
外壁温度	27.4°C	20.2°C
断熱性能	12.1W/m ²	87.6W/m ²
内槽の様子		

内槽内が液化窒素の場合、真空度の劣化に伴い断熱性能が悪化し、蒸発量が変化する。

(4)LH2流出に関する要素試験③真空劣化時の断熱容器の安全性検討

【液化水素充填時の、窒素ガスによる真空劣化試験】

時間	開始前	開始直後	5時間後
ブレイク速度	—	20mL/min	←
真空度	2×10^{-5} Pa	1.4×10^{-2} Pa	←
水素蒸発速度	17NL/min	←	←



真空層への窒素流入速度は、固化速度とバランスをとり一定圧力となる。

3. まとめ

本研究にて、液化水素運搬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。また、液化水素が漏洩した場合の挙動などをシミュレーションおよび試験により確認することができた。

加えてこれらの結果を用い、現行規格の一般要件、特別要件を検討し、追加項目の提案に反映させている。

今後は今回の安全性評価の調査結果を踏まえ、明らかとなった課題を解決するとともに、積荷・揚荷時などの運用時操作についても検討を広げていきたい。