

発表No.A1-12

燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業／  
水素利用等高度化先端技術開発／

# 大型FCV用液体水素貯蔵システム開発に向けた 容器内液体水素挙動解明に関する研究開発

富岡 純一

一般財団法人日本自動車研究所

国立大学法人琉球大学

国立大学法人東京大学

国立大学法人神戸大学

2024年6月18日

連絡先：

一般財団法人日本自動車研究所

富岡 純一

jtomioka@jari.or.jp

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2022年7月

終了（予定） : 2025年3月

## 2. 最終目標

- 燃料タンク内で起こる**液体水素の物理的現象の把握**
- 液体水素貯蔵の現象予測に活用できる、実験データに基づく**CFDモデルの構築**
- **実機では検証できない**、温度分布、ハザード条件等の**現象予測**

## 3. 成果・進捗概要

### ① 水素の凝縮／蒸発の物理的挙動の把握（琉球大）

水素の臨界温度（32.9K）以下の飽和圧力における**水素の凝縮速度および蒸発速度**を特定

### ② 液体水素充填・供給技術に係る**物理的挙動の把握**

②-1 容器内の気体水素が蒸気圧曲線付近で**液化することを可視化実験**により確認

②-2 液体水素充填を模擬する簡略化した数値モデルを構築し、**充填シミュレーション**のプログラムを作成

②-3 液体窒素を用いた正弦波加振印加による**スロッシング実験**を実施

②-4 0.4 MPaGまでの圧力で、**液体水素を用いた**静止蓄圧実験、振動蓄圧実験、加圧実験等を実施

### ③ 液体水素充填・供給時のハザードの把握

車載用液水貯蔵システムの理解（システム図の作成）を実施

望ましくない現象とその要因の関係の検討結果より、**現象予測が必要な項目を識別**

# 1. 事業の位置付け・必要性

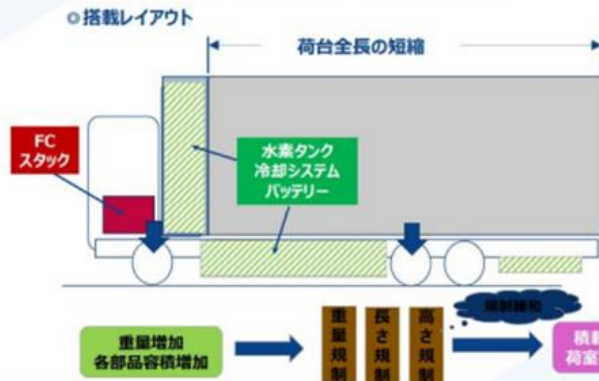
- 大型トラックの航続距離は1000km以上が目標
- 搭載スペースには限りがあり、体積貯蔵密度の向上が必須 ≡ 液水の適用

## HDV製品目標(44トン大型トラック)

4/19

<2040年頃の目標>  
幅広いアプリケーションにFCを適用しCNに対応  
⇒44トン大型トラックまでは対応できていない  
例)事業性、搭載性、出力など

大型FCトラックを普及させるための課題1



・積み荷が減少  
・大型トラック用の各部品は生産台数も少ないため高価

Copyright © Hino Motors, Ltd. All rights reserved.

Zero Emission for sustainable society

出展：経産省HP 2021年3月18日 資料5 日野自動車株式会社説明資料

<44トン大型トラックの主な製品目標>

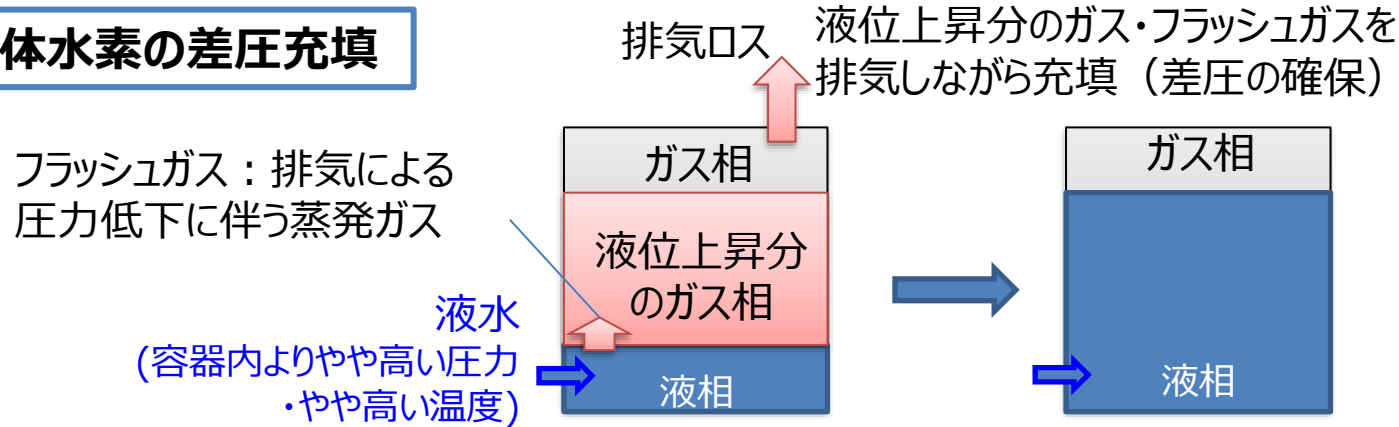
項目	目標値
システム最大出力	450kW(うちFC最大400kW)
FCシステム許容体積	502L
FCシステム許容重量	460kg
FCシステム体積出力密度	0.8kW/L(=400kW/502L)
1充填あたりの航続距離	1000km以上
水素貯蔵許容搭載スペース	2000L
水素貯蔵許容搭載重量	400kg
ラジエータ冷却能力	210kW(3.5kW/℃)
耐久時間	50,000h

44トン大型トラックを対象にディーゼルパリティと規制緩和の観点から製品目標を決定

# 1. 事業の位置付け・必要性

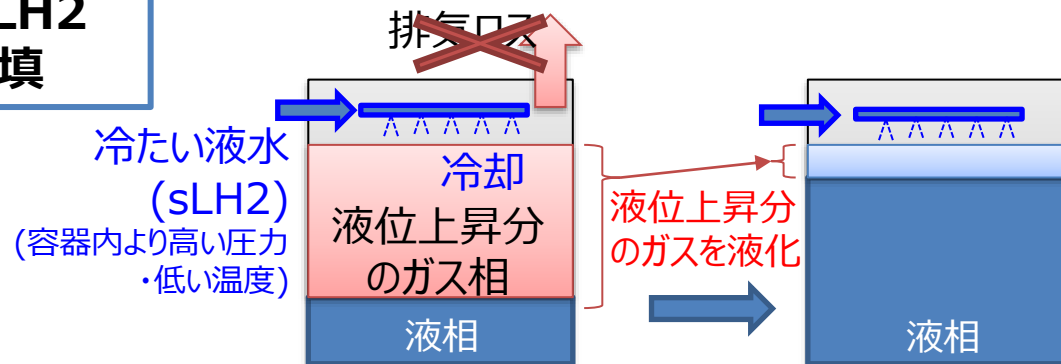
## 課題：充填時の水素排気ロスの削減：sLH2充填技術

### 液体水素の差圧充填



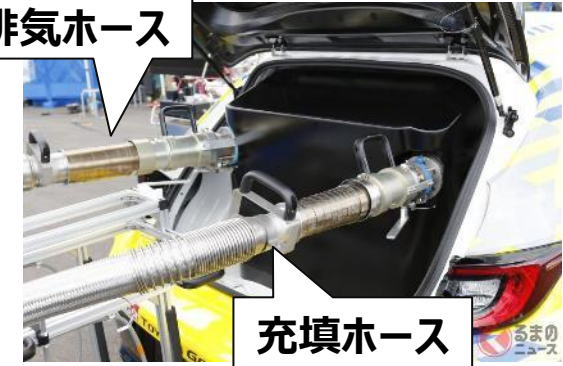
・1充填 (100kg水素) で30kg水素の排気ロスが発生

### subcooled LH2 (sLH2) 充填



・sLH2充填により、排気ロスをゼロに、排気ホースを不要にすることが可能  
課題：sLH2充填の最適化のため、再液化の物理現象を理解することが必要

排気ホース



充填ホース

液体水素貯蔵 水素エンジンレース車  
<https://carview.yahoo.co.jp/news/detail/f5431aca069324f3fcf14a61bdf480e35800d5f1/photo/?page=9>

充填ホースのみ (LNGトラックのsLNG充填)



LNGトラックの充填  
<https://www.wsj.com/articles/big-oils-new-focus-on-natural-gas-1473818521>

# 1. 事業の位置付け・必要性

## 関心表明企業の要望・課題認識

太字：大型車メーカーのニーズ  
赤文字：本研究開発で解析中

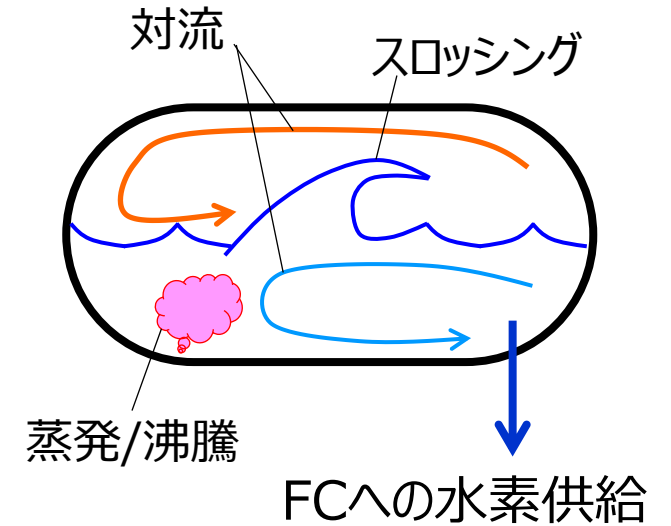
### ■ 挙動解明に係るニーズ

- 物理的挙動：スロッシング(走行時、急制動時)、衝突時(10~50G)
- 熱力学的挙動：温度分布、突沸等
- スロッシングによる熱の発生、その防止策
- 長期駐車時の挙動、および貯蔵期間の延長策
- ハザードの把握
  - 不適切なボイルオフガス管理によるタンク破壊
  - 衝突や火災時の挙動（真空破壊、貫通、安全弁からの噴出、動作不良等）

### ■ 液水の取扱に関する課題認識

- 液水タンクの国内技術基準がない（GTR13にオプションとして規定あり） ⇒基準整備
- 国内に液水ステーションがない（欧米では実証試験中）
- 液水充填の標準がない ⇒標準化：ISO/TC197/WG35（液水充填プロトコル） 審議開始
- 液水用機器・部品（特に小型）がない（液水ポンプ、カップリング、ホース等） ⇒液水機器開発
- 液水を用いた性能評価設備、安全性評価設備が非常に少ない ⇒評価設備の整備
- 導入コスト、運用コスト、水素コスト

## FCへの水素供給制御

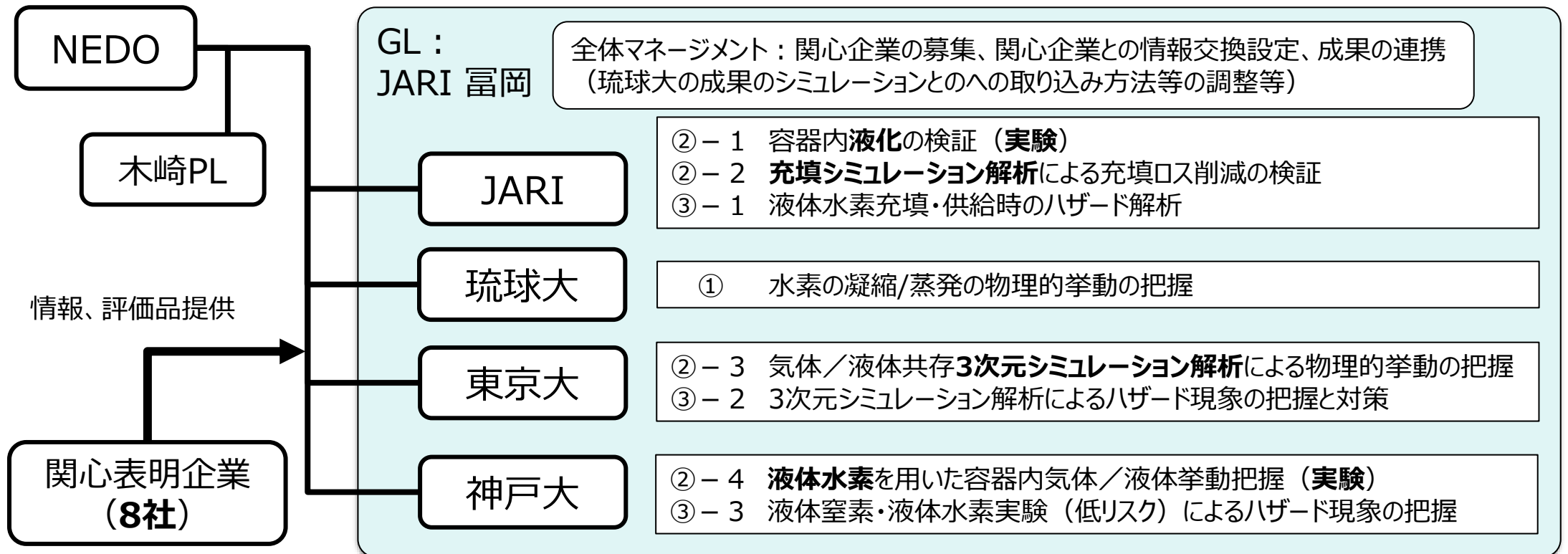


⇒物理的挙動の把握が必要

## 2. 研究開発マネジメントについて

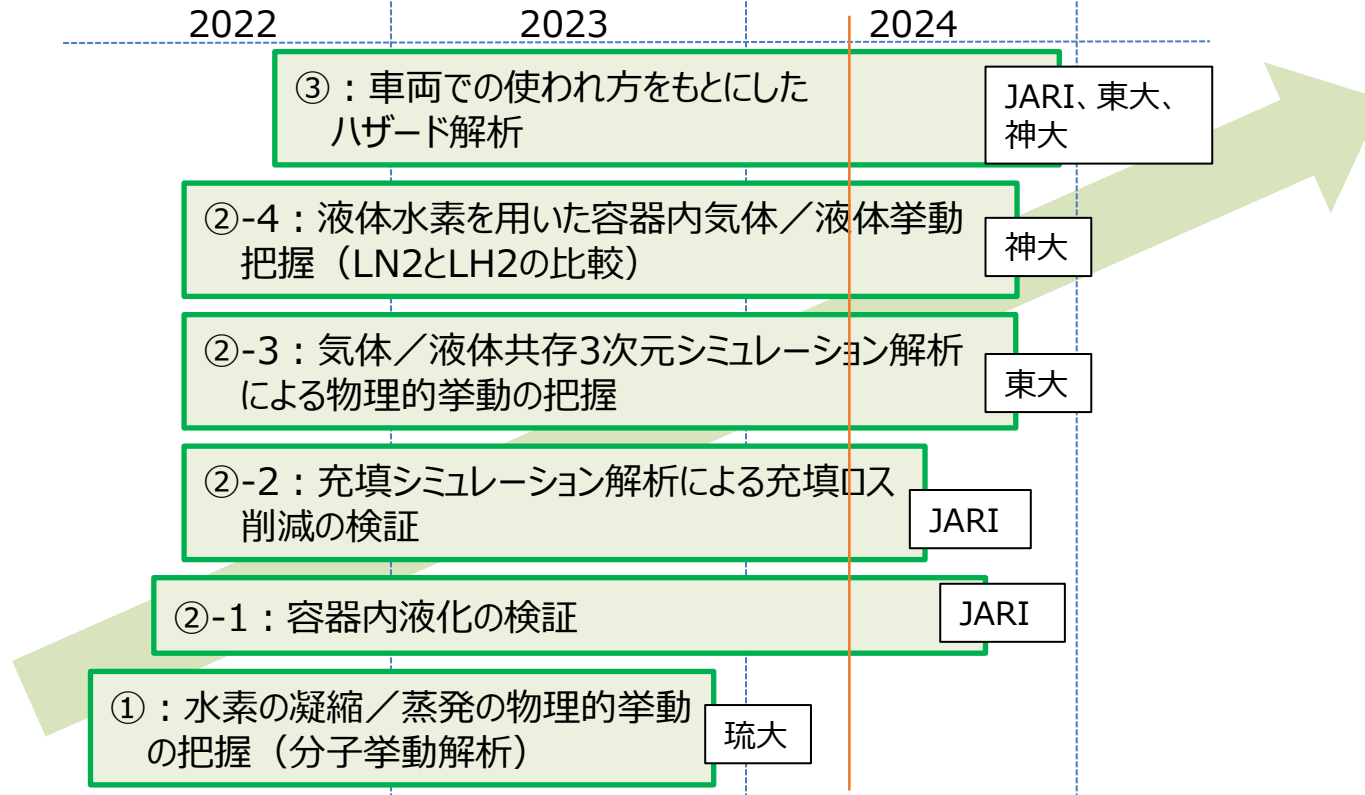
**背景**：CO2排出量削減のため、大型・商用モビリティのFC化は重要な要素となる。今後、開発の加速が見込まれる大型・長距離用トラック・バス等へは、貯蔵密度が高い液体水素貯蔵システムの搭載が期待される。ただし、液体水素貯蔵を実現するためには、**充填時の水素排気ロス削減**や**水素供給制御**等の課題を解決する必要がある。

**目的**：本研究開発では、これらの課題解決のための基盤研究として、**液体水素の充填・供給技術に係る物理的挙動を把握**することで、液体水素貯蔵・供給システムの開発促進に資することを目的とする。

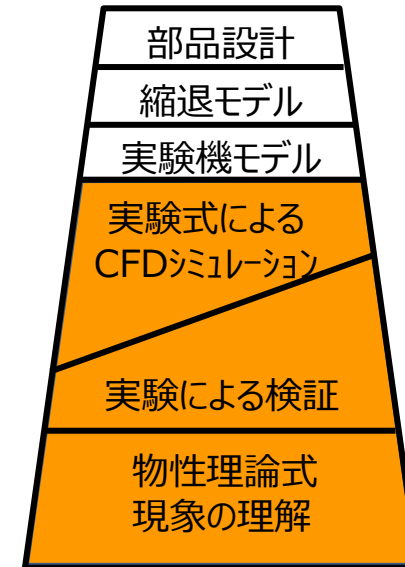


### 3. 研究開発成果について

**目的：**液体水素の充填・供給に係る物理的挙動を解明することで、大型FCV用の液体水素貯蔵・供給システムの開発促進に資する。



**成果の活用**  
液体水素タンクシステムの開発  
(実験機モデル、縮退モデル開発)に活用



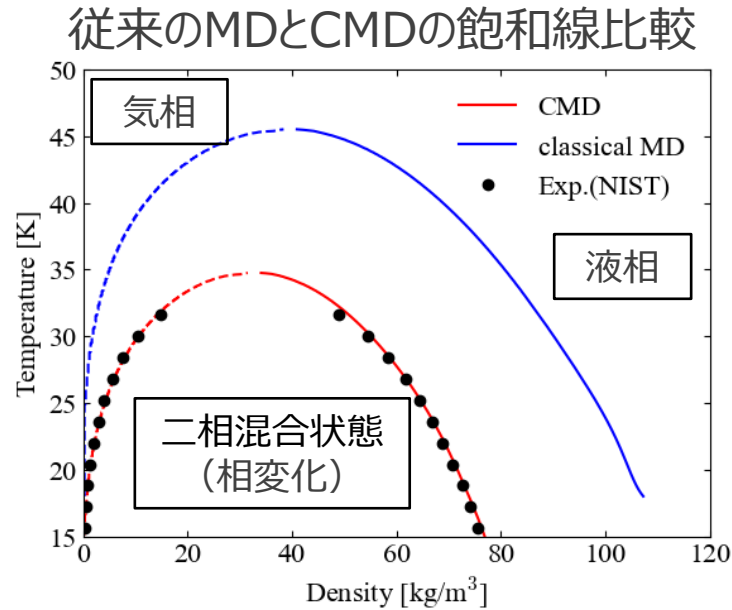
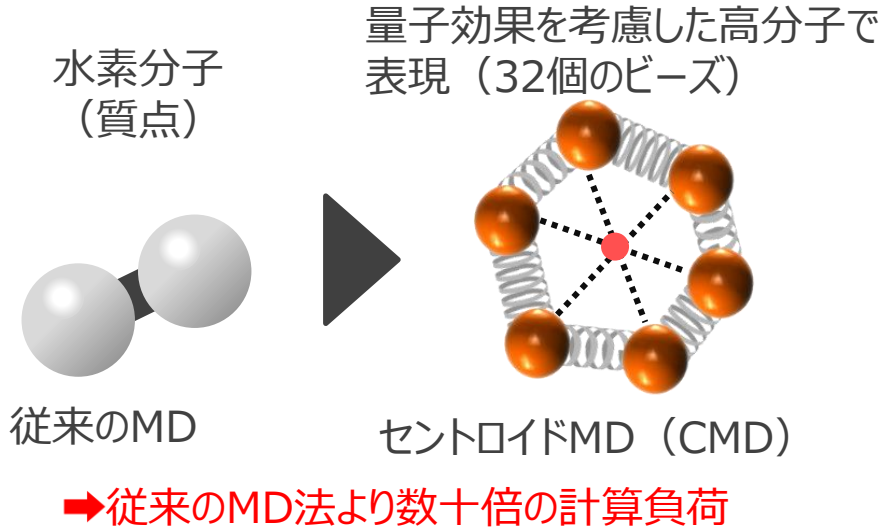
#### 研究開発の目標

- ①燃料タンク内で起こる液体水素の物理的現象の把握
- ②液体水素貯蔵の現象予測に活用できる、実験データに基づくCFDモデルの構築
- ③実機では検証できない、温度分布、ハザード条件等の現象予測

### 3. 研究開発成果について

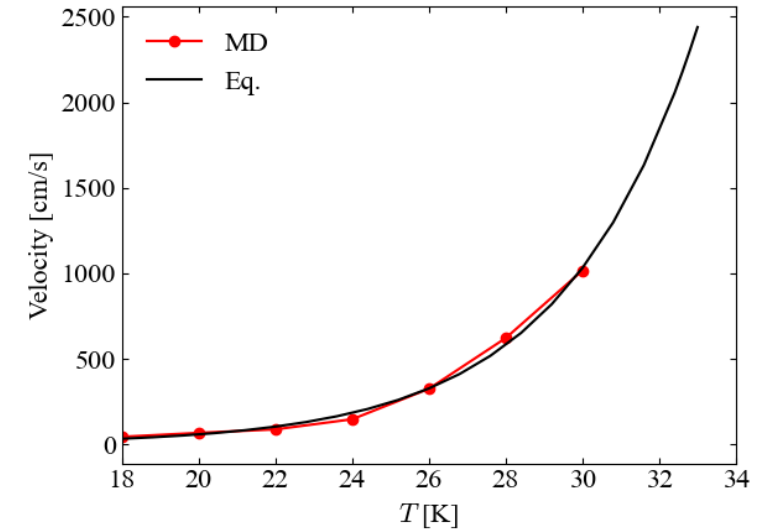
### 研究項目① 水素の凝縮／蒸発の物理的挙動の把握（琉球大）

目標：水素の凝縮及び蒸発速度を分子動力学法（MD）により算出し、得られた結果より数値実験式を構築する。



→量子効果を考慮することで実験値と一致

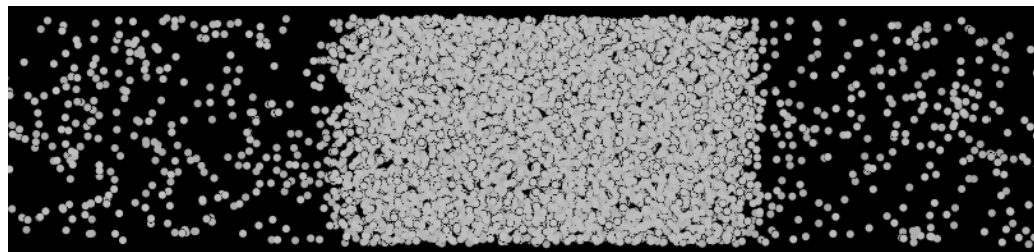
### 凝縮／蒸発速度の結果



→気液平衡状態での凝縮／蒸発速度を特定

### CMDを用いた計算系

気相                      液相                      気相



$$\text{凝縮係数理論式} : \alpha_c = \left( 1.0 - \sqrt[3]{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \right) \exp \left( -\frac{E_0}{k_B T} \right)$$

$\rho_g$  : 飽和気体密度     $\rho_l$  : 飽和液体密度     $T$  : 温度     $E_0$  : パラメータ

凝縮係数 : $\alpha_c = \frac{J_{\text{cod}}}{J_{\text{col}}}$	蒸発係数 : $\alpha_e = \frac{J_{\text{evp}}}{J_{\text{out}}}$	平衡状態では $\alpha_c = \alpha_e$
---	---	------------------------------

→凝縮係数を算出する実験式を構築

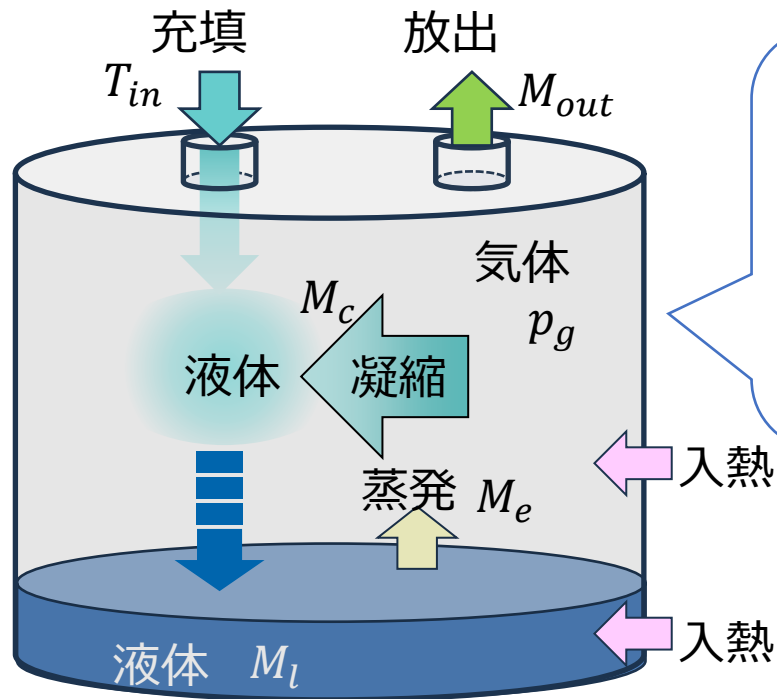


### ②-2 充填シミュレーション解析による充填ロス削減の検証 (JARI)

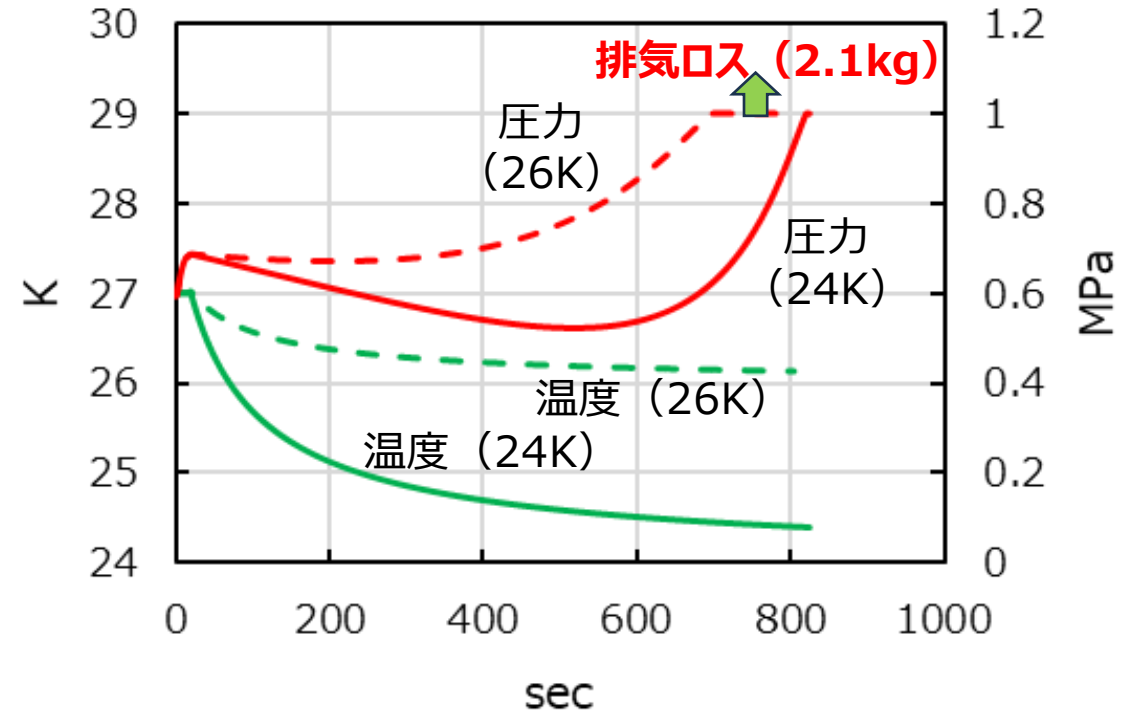
目標：充填シミュレーションにより効率的な充填方法を提案するため、液体水素の0次元の充填シミュレーションを開発し、充填時の効率を検討する。

成果：充填時の現象をモデル化した充填シミュレーションにより、sLH2充填 (6kg/min) を定性的に模擬した。

課題：sLH2充填シミュレーションの精度向上のため、①の成果を適切に導入する。凝縮・蒸発量 ( $M_c, M_e$ ) に反映。



容器内の気体と液体、容器（固体）と充填水素を0次元モデル化し、質量とエネルギーの保存方程式により解析



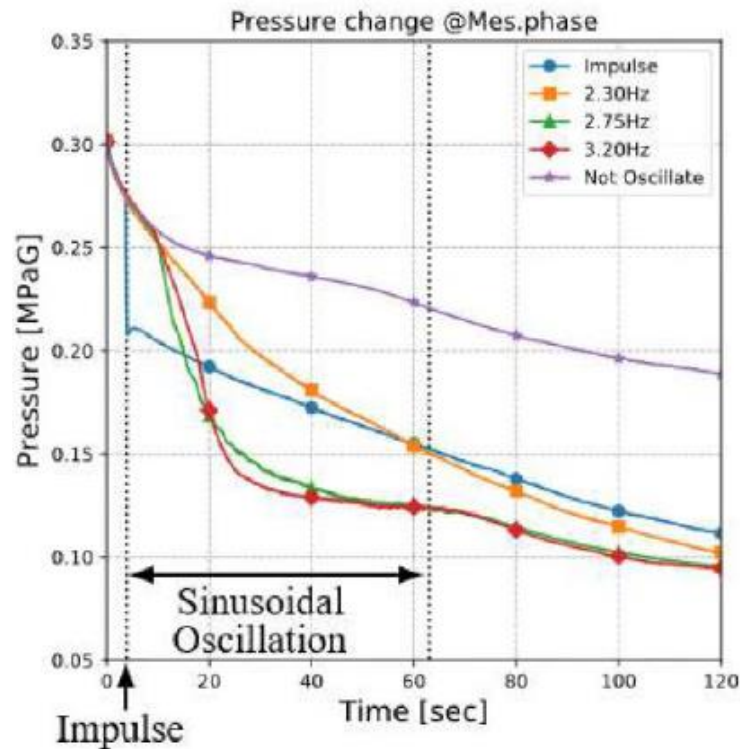
sLH2充填シミュレーション結果

### ②-3 気体/液体共存3次元シミュレーション解析による物理的挙動の把握（東京大）

目標：3次元シミュレーション解析に向けて、気体窒素とサブクール温度（飽和温度よりも低い温度）の液体窒素を封入した密閉容器について、液面揺動（スロッシング）発生時の圧力降下を確認する。

成果：様々な周波数での加振条件により、液面変形や砕波発生に違いが生じ、液面付近の飽和温度層が破壊されることにより、圧力降下が促進されることが確認できた。数値解析の検証評価に有効な、再現性のあるデータを取得できた。

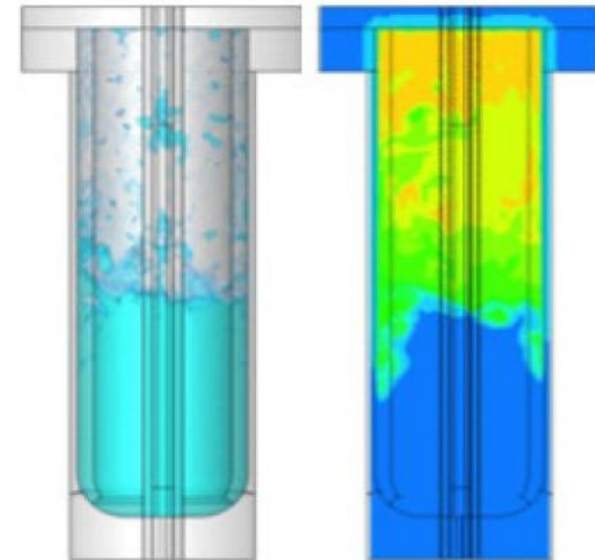
課題：容器固体壁の温度分布も含めた実験条件の管理が必要。



スロッシングに誘起された圧力降下



衝撃加振実験



衝撃加振シミュレーション

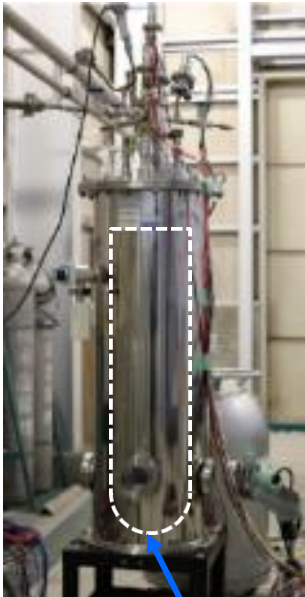
スロッシング実験と数値解析

### ②-4 液体水素を用いた容器内気体/液体挙動把握 (神戸大)

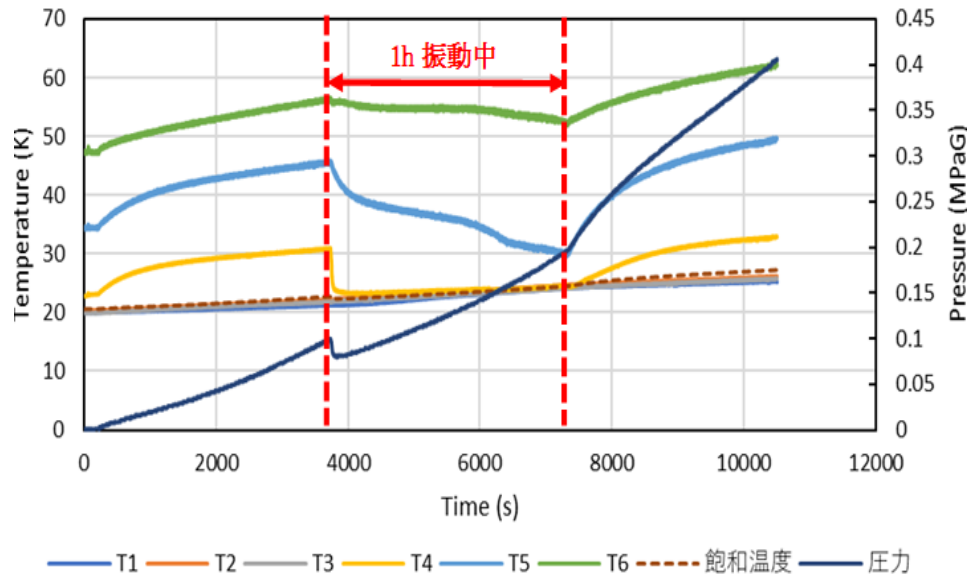
目標：液体水素貯蔵実験（蓄圧・振動）等を行い、容器内の気体水素および液体水素の挙動を明らかにする。

成果：既存の実験装置を用いて、0.4 MPaGまでの圧力下で振動蓄圧実験を行い、振動開始直後の圧力ドロップおよび気体水素温度の降下が明らかになるとともに、振動開始圧力によっては、振動中に気体水素温度が上昇に転じる現象も発生した。

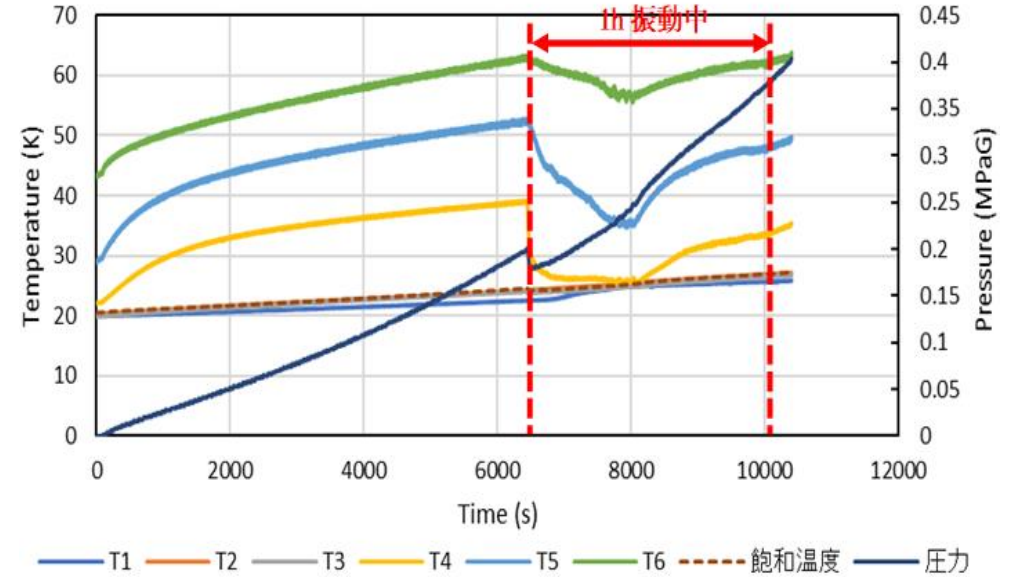
課題：これらの現象に対して、入熱量や充填率との関連性の調査が必要。



LH2 cryostat



充填率48.5%、振動開始圧力0.1 MPaG



充填率40.6%、振動開始圧力0.2 MPaG

温度と圧力の時間変化

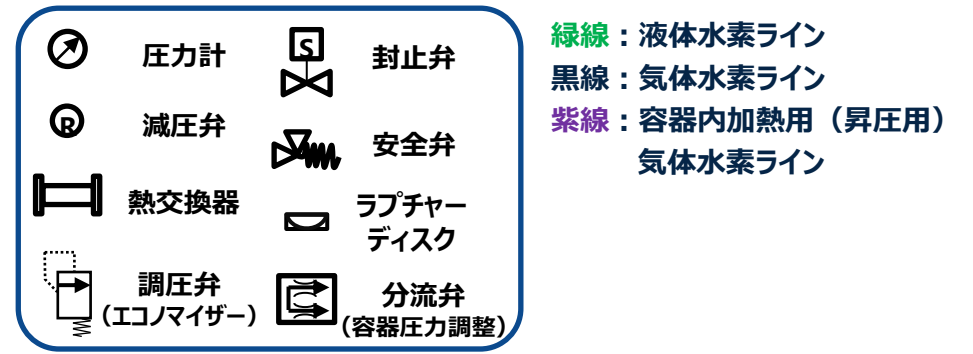
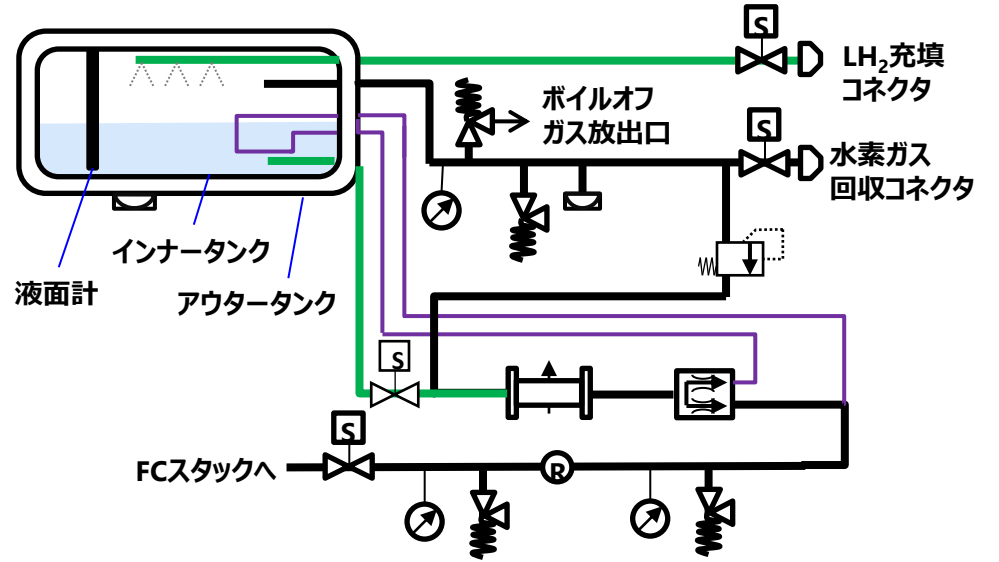
### ③-1 液体水素充填・供給時のハザード解析 (JARI)

目的：液体水素の充填時 (sLH2充填時) およびFCへの供給時のハザードとなる現象を把握し、対策につなげる。

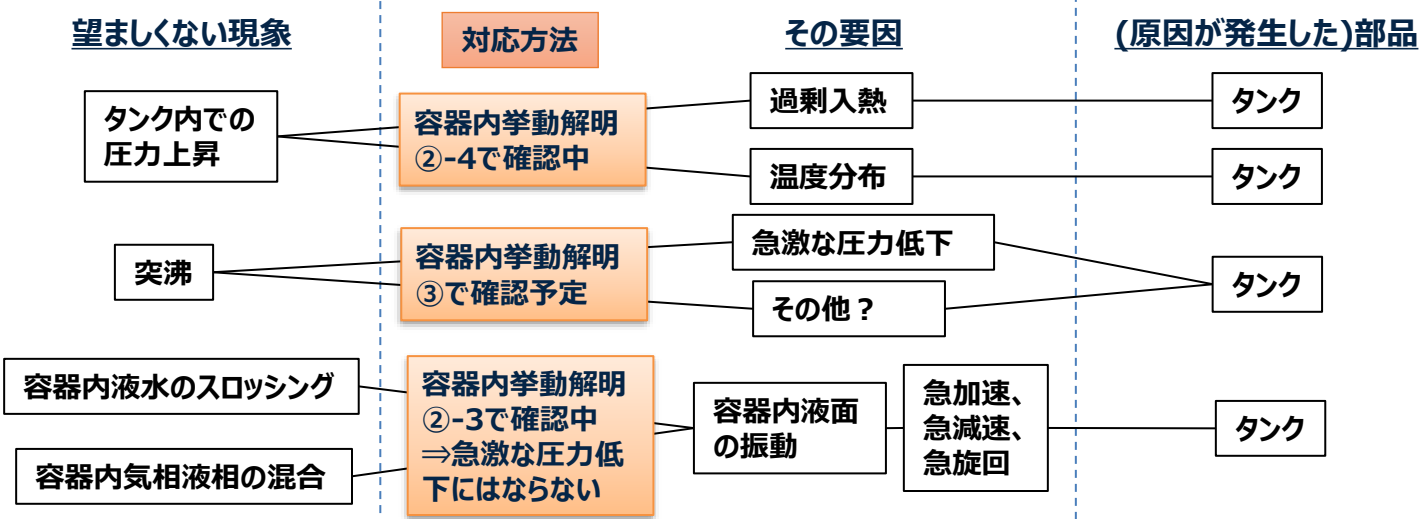
目標：車両用燃料としての液体水素の使われ方を把握し、想定したシステムにおける液体水素充填・供給時の望ましくない現象およびその要因を明確化する。

成果：タンク内の温度・圧力上昇および容器内液のスロッシングによる圧力低下の挙動解明が必要ながかった。

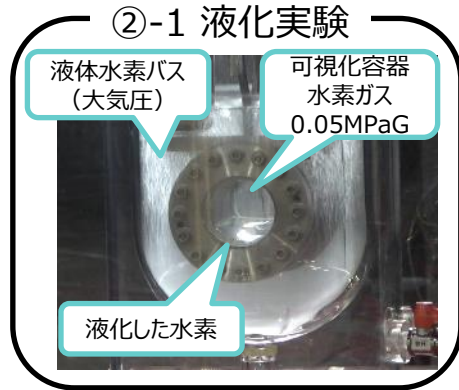
課題：挙動解明の成果を活用し、ハザードとなる現象の影響を明確化する。



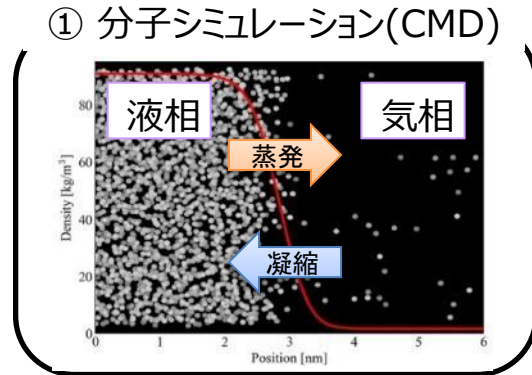
想定した液体水素貯蔵・供給システム (液取り・差圧供給)



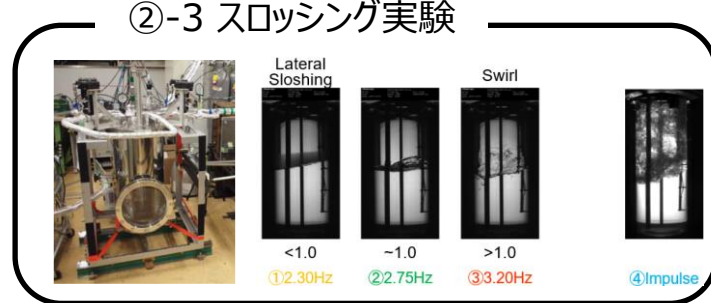
# 4. 今後の見通しについて



【実施項目②-1】蒸気圧曲線上での水素の液化を可視化(済)。



【実施項目①】水素の凝縮／蒸発係数を特定(済)。



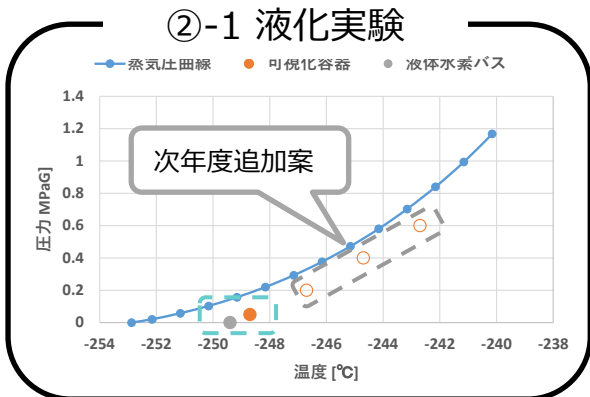
【実施項目②-3】壁面での液化を考慮する必要があることが判明(済)。

要追加データ

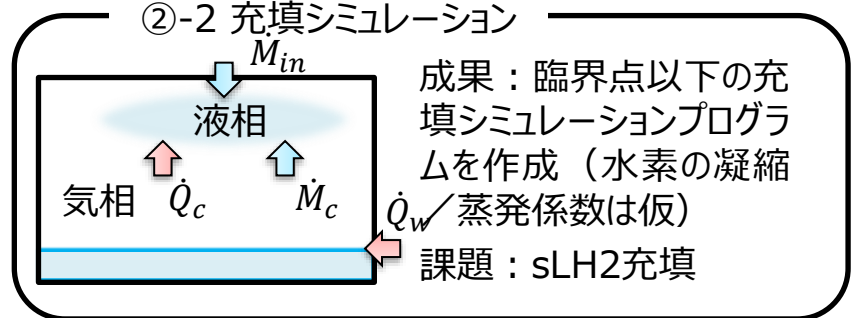
水素の凝縮／蒸発係数

壁面での液化の考慮

## 今後

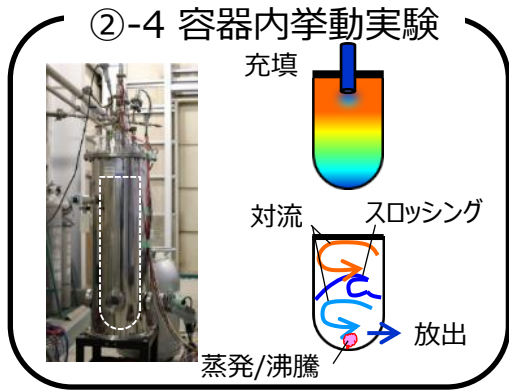


【実施項目②-1】蒸気圧曲線上（高圧側）での追加データ取得

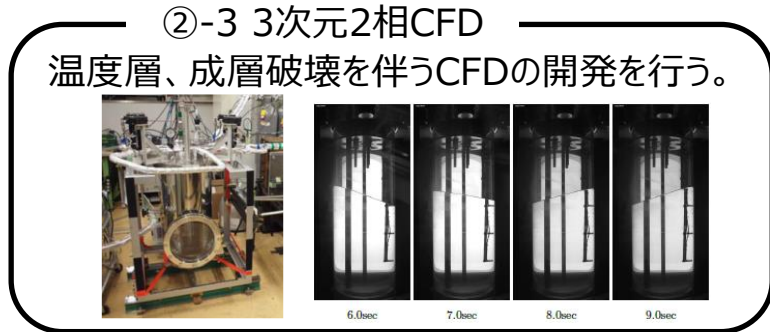


【実施項目②-2】sLH2充填シミュレーションプログラムの高精度化(水素の凝縮／蒸発係数の適用、超臨界圧力まで拡張、壁面での液化のモデル化等) ⇒効率的なsLH2充填の傾向を把握。

# 4. 今後の見通しについて

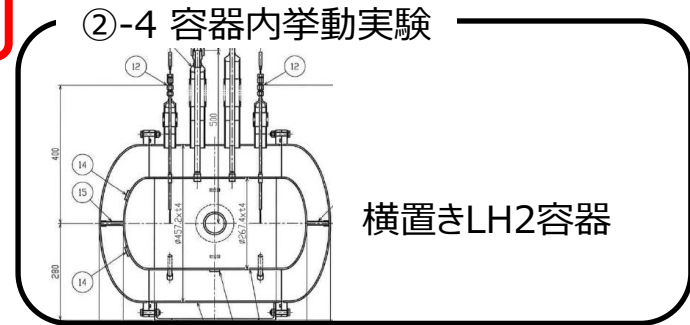


【実施項目②-4 (中間目標)】  
0.4MPaGまでの液体水素および液体窒素の容器内の挙動に関する実験データを得る(済)。



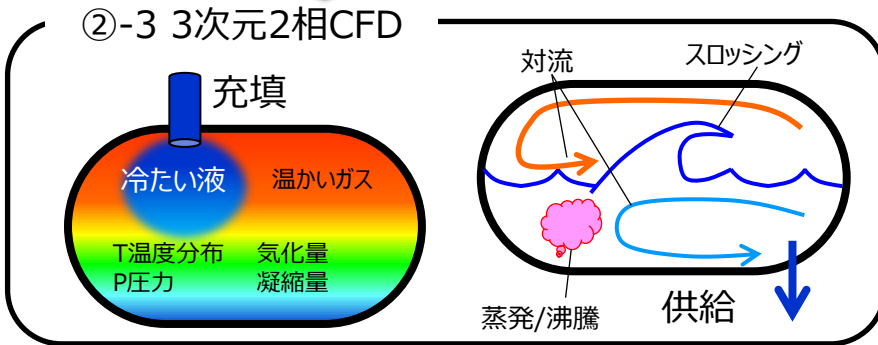
【実施項目②-3 (中間目標)】  
スロッシング実験およびスロッシングCFDモデル開発(済)。

## 今後



【実施項目②-4】**臨界点を超える圧力**での追加データを得る。温度・圧力・相変化量を予測する実験式を導く。

実験データ、実験式



【実施項目②-スロッシング等による圧力変化を予測できる数値流体解析手法と相変化モデルを構築する。  
⇒**容器内での挙動把握に基づく容器開発に資する。**】

## 4. 今後の見通しについて

当研究で得られた知見を液体水素モビリティ（トラック、港湾機械、船舶、航空機等）にご活用いただきたく、ご興味ある企業（団体）はぜひご連絡ください。  
（下図は想定）

年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度	2031年度	2032年度
液体水素貯蔵・供給システムに関連する要素技術の開発		部品メーカーにて、液面計・温度計・ヒーター・継手・ポンプ等を開発							
液体水素貯蔵・供給システムの開発			自動車メーカー、部品メーカーにて、貯蔵・供給システムを開発						
液体水素貯蔵・供給システム搭載車両の開発				自動車メーカーにて、車両を開発・実証					
液体水素貯蔵に関する技術基準の開発・国際基準調和		技術基準開発			国際基準調和				
液体水素充填プロトコルの開発・標準化	標準化 (sLH2充填)			充填実証試験					

液体水素  
トラック・バスの  
実用化  
(航続距離  
1000km以上)