

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

団体名：一般財団法人日本自動車研究所、琉球大学、東京大学、神戸大学

発表日：2024年7月18日

背景

大型FCV（特に長距離用）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。

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の把握を行い、液体水素貯蔵・供給システムの開発促進に資する。

**液体水素の差圧充填**

フラッシュガス：排気による圧力低下に伴う蒸発ガス  
液相 (容器内よりやや高い圧力・やや高い温度)  
液面上昇分のガス相  
ガス相  
排気ロス  
液面上昇分のガス・フラッシュガスを排気しながら充填（差圧の確保）

**FCへの水素供給制御**

対流  
スロッシング  
蒸発/沸騰  
FCへの水素供給

1充填（100kg水素）で30kg水素の排気ロスが発生

**subcooled LH2 (sLH2) 充填**

冷たい液体 (sLH2) (容器内より高い圧力・低い温度)  
液面上昇分のガス相  
排気ロス  
液面上昇分のガスを液化

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

走行中の燃料として使用するため、取り出しのための圧力・温度制御と走行中の振動の影響を複合的に検討する必要がある  
⇒物理的挙動の把握が必要

① 水素の凝縮／蒸発の物理的挙動の把握（琉球大学）

目的：水素の充填時の凝縮または供給時の蒸発に関わる物理現象の解明。  
目標：幅広い熱力学的条件下における水素の凝縮及び蒸発速度を分子動力学法により算出し、得られた結果より数値実験式を構築する。  
成果：飽和蒸気圧下の気液平衡状態における水素の凝縮速度を算出しその結果に基づいて数値実験式を構築した（図1）。温度が上昇するにしたがって、指数関数的に凝縮速度が増加していることが分かる。また凝縮係数についても先行研究を参考に数値実験式を構築した（図2）。これらの結果を②-2の充填シミュレーションに適用し解析精度を向上させる。

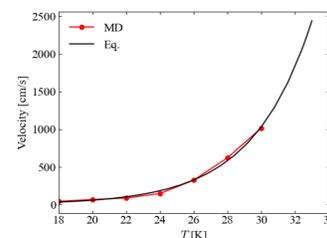


図1 分子動力学 (MD) 計算の凝縮速度と構築した数値実験式の比較

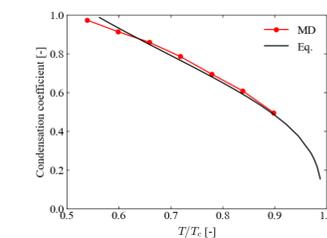


図2 分子動力学 (MD) 計算の凝縮係数と構築した数値実験式の比較

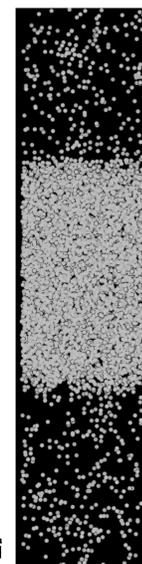


図3 計算系

② 液体水素充填・供給技術に係る物理的挙動の把握 ③ 液体水素充填・供給時のハザードの把握

①の成果を適用予定

②-3 気体／液体共存三次元シミュレーション解析による物理的挙動の把握 ③-2 三次元シミュレーション解析によるハザード現象の把握と対策

(東京大学)

目的：加振を受ける容器内の液面揺動(スロッシング)により促進される気液間の熱伝達と相変化を実験的に確認する。

目標：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、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。

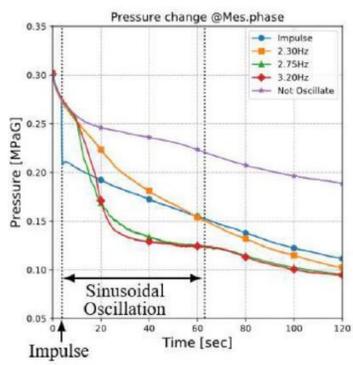
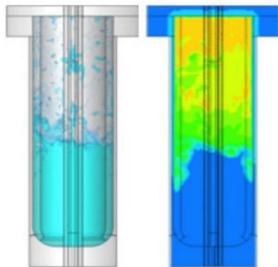


図6 スロッシングに誘起された圧力降下



図7 スロッシング実験と数値解析



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）

目的：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。

目標：液体水素の0次元の充填シミュレーションを開発し、充填時の効率を検証する。

成果：sLH2充填（6kg/min）を定性的に模擬した。充填される液体の温度（ $T_{in}$ ）に依存して容器内の気体圧力（ $p_g$ ）の上昇が抑制される。1MPa以上で排気される気体水素の量（ $M_{out}$ ）は、 $T_{in}$ が低温（24K）で、より少なくなる。

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（ $M_c, M_e$ ）の精度向上に寄与する。

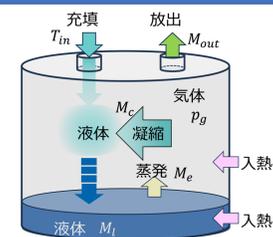


図4 モデル概要

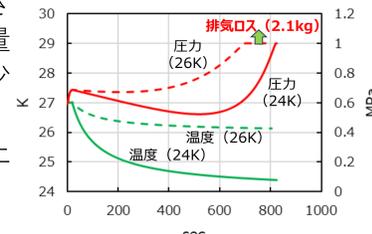


図5 液体温度と気体圧力

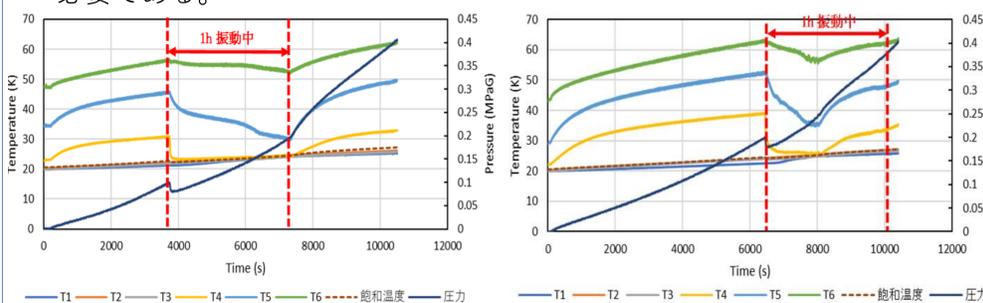
②-4 液体水素を用いた容器内気体／液体挙動把握（神戸大学）

目的：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。

目標：0.4 MPaGまでの圧力下での実験データを取得する。

成果：横振動試験装置を用いた振動蓄圧実験では、振幅±100 mm、最大加速度0.1 G、周期2.4 sとした。この実験は、入熱量が比較的多い状態に設定した。図8に充填率と振動開始圧力が異なる、1h振動における振動蓄圧実験結果を示す。振動開始直後における圧力ドロップ、気体水素温度の降下が明らかになるとともに、温度と圧力の時間変化率が逆転する現象等が明らかになった。

課題：これらの現象に対して、入熱量や充填率との関連性を調べる必要がある。



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 図8 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い方を把握し、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分かった。

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。

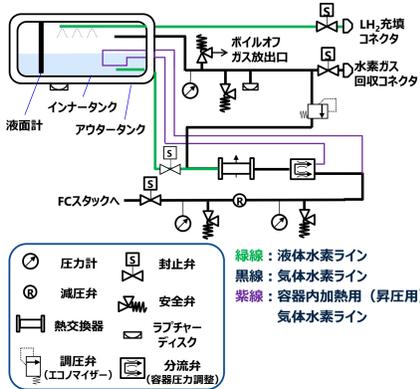


図8 想定した液体水素貯蔵・供給システム（液取り・差圧供給）

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。

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