

# NEDO水素・燃料電池成果報告会2024

発表No.A2-18

## 競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業 ／水素ステーションの低コスト化・高度化に係る技術開発 ／HDV用水素充填プロトコルの研究開発

発表者 吉田 剛

一般社団法人水素利用供給技術協会  
株式会社本田技術研究所  
トキコシステムソリューションズ株式会社  
一般財団法人日本自動車研究所  
国立大学法人九州大学  
一般財団法人カーボンニュートラル燃料技術センター（再委託）  
三菱化工機株式会社（分室）

2024年 7月19日

連絡先：  
一般社団法人 水素供給利用技術協会  
(<http://hysut.or.jp/>)

## 1. 期間

開始 : 2023年6月

終了（予定） : 2028年3月

## 2. 最終目標

HDV (Heavy Duty Vehicle)への大流量水素充填時のプロトコル向けに、LDV (Light Duty Vehicle)用に開発した充填プロトコル (MC-MM : MCマルチマップ) を拡張する技術開発とその基準化

## 3. 成果・進捗概要

- HDV 実車への大流量水素充填プロトコル試験を夏・冬2週間ずつ実施
- 新水素充填方式 (タンク一定昇圧/Constant Tank Pressure Ramp rate : cTPR)を開発し、論文投稿
- 車両サイズ、充填ノズル、流量等の分類・境界条件を整理し、充填プロトコルマップ作成に着手
- HDV搭載容器の充填時の容器内温度分布等を模擬する3次元数値シミュレーション解析を実施
- HDV-MCMM用充填プロトコルの開発に向けて水素充填シミュレーションソフト開発を推進

# 1. 事業の位置付け・必要性

- カーボンニュートラル社会の実現に向けては、運輸部門が日本国内のCO2排出量の2割近くを占める中、そのうち4割の貨物輸送部門（トラック、船舶、鉄道等）の脱炭素化が不可欠である。
- 日本は、世界に先駆けて、2014年に燃料電池自動車（FCV）を市場投入、2017年に水素基本戦略を策定するなど、技術及び政策の両面にわたり水素・燃料電池分野で世界をリードしている。
- FCV及び水素ステーションの本格普及に向け、規制適正化、国際標準化や水素ステーションのコスト低減に関する研究開発を行うなど、今後も、国際産業競争力を強化し、早期に世界市場を獲得することが求められる。
- 2023年6月に改定された水素基本戦略にても、「大型バス・トラック等では、各国で燃料電池化が急速に進展しているため、より多くの水素需要が見込まれFCVの利点が発揮されやすい商用車に対する支援を重点化していく。・・・（水素ステーションの）技術開発については、商用車の普及に向け、（略）大流量水素の充てん技術確立するべく、開発、実証を加速させる。」と記されている等、2020年代後半から運用開始が計画されている燃料電池商用車(大型トラック)に対応した水素充填プロトコルの開発及び基準化が求められている。

## FC商用車の普及（グリーン成長戦略）

- ✓ 8トン超の大型の商用車
  - ◆ 2020年代に5,000台の先行導入
  - ◆ 2030年までに、2040年の電動車の普及目標



大型FCトラック（イメージ）

（引用：モビリティ水素官民協議会 中間とりまとめ、2023年7月）

## 2. 研究開発マネジメントについて

### 研究開発の目標

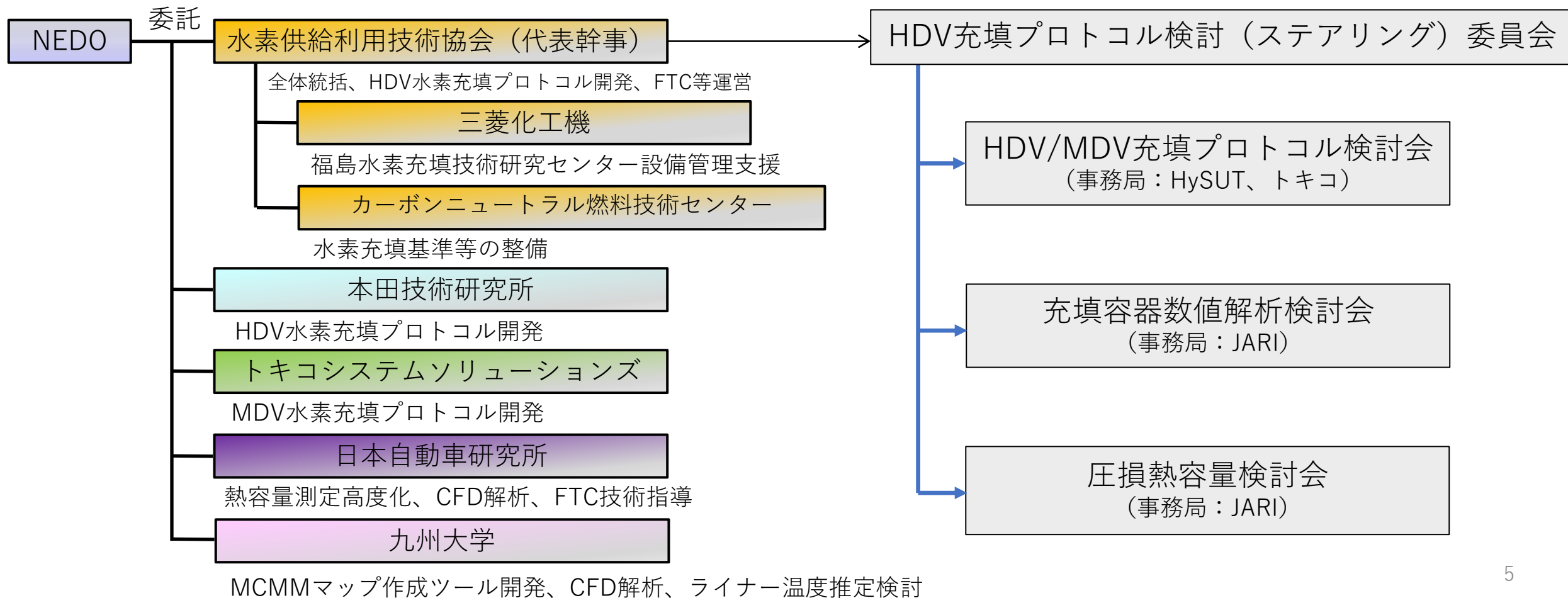
- 鉄道や船舶への展開可能性も含めて様々な燃料電池モビリティ、特にHDV (Heavy Duty Vehicle) への大流量水素充填時における充填プロトコルとして、LDV用に開発した充填プロトコル (MC-MM: MCマルチマップ) をHDV用に拡張する技術開発とその基準化を目標とする。

### 目標設定の考え方

- 過去のNEDO委託事業においてLDV用に開発した「水素充填プロトコルMCMM方式」と「水素充填シミュレーションプログラム」をHDV用に開発・促進することにより、プレクール温度の緩和や充填速度の向上など、水素ステーションの運営費低減を図る。
- HDVに関する各種技術課題を検証するため、欧米の国際機関保有の試験設備に匹敵する福島水素充填技術研究センター (FTC) 等を活用して、我が国が世界を先導して国際基準に資するデータ取得や技術的検証を実施する。

## 2. 研究開発マネジメントについて

- ステアリング委員会の下、各課題毎の検討会を設定。検討会決議事項を委員会にて審議。  
(原則として、ステアリング委員会は半年ごと、検討会は4半期ごとに開催)
- 毎月末、代表幹事の主催のもと、実施者7者間で進捗会議を実施。



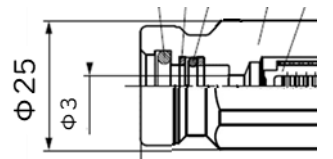
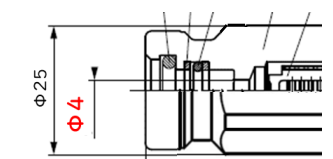
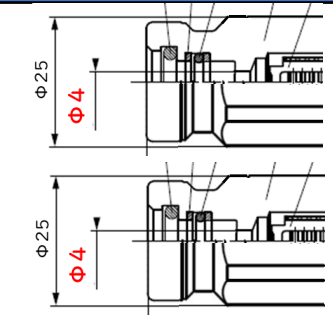



## 2. 研究開発マネジメントについて

### 研究開発スケジュール

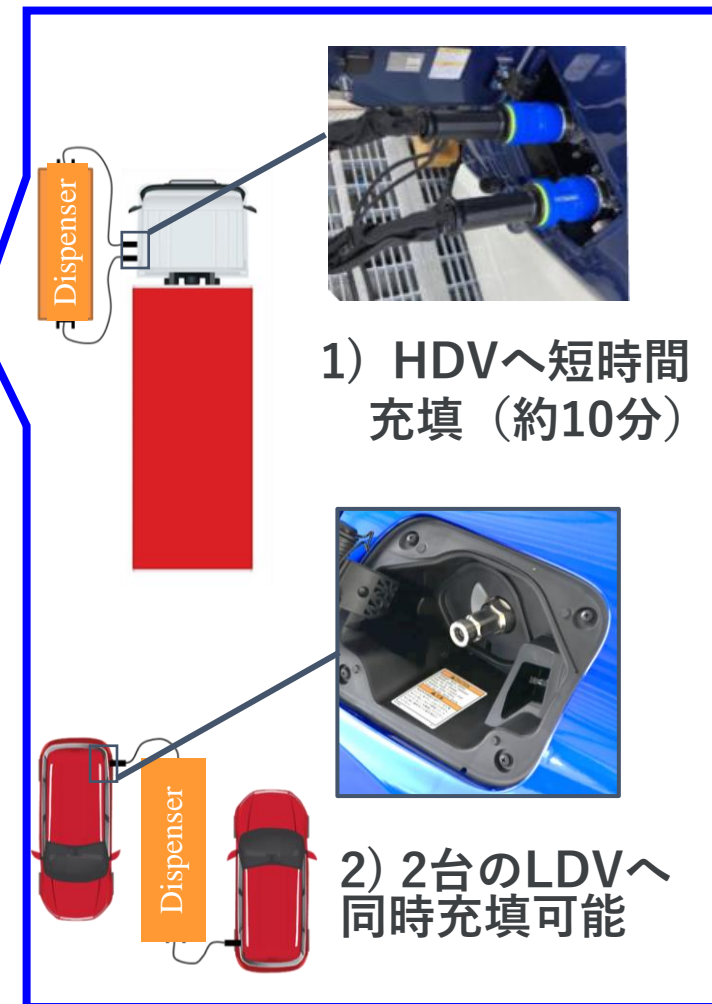
| 開発項目   | 参考       |              |               |         |        |
|--|----------|--------------|---------------|---------|--------|
|  | 2023年度   | 2024年度       | 2025年度        | 2026年度  | 2027年度 |
| <b>1. HDV用水素充填プロトコル</b>                        |          | ステージゲート<br>▼ |               |         |        |
| (i) MF充填プロトコルの基本構成                             | マップ作成    | 検証試験         | プロトコル改良       | 規格化対応   |        |
| (ii) 大流量対応MCOMM充填プロトコルの基本構成<br>(新規 cTPR充填方式含む) | ミニスケール試験 | フルサイズ試験      | 最終マップ評価       | 規格化対応   |        |
| (iii) MCOMMマップ用シミュレーション                        | 大容量      |              | MF            |         |        |
| (iv) HDV水素充填時の容器内数値解析                          |          |              |               |         |        |
| (v) HDV充填プロトコルの検証                              | 検証試験、解析  | プロトコル検証ツール開発 |               | プロトコル反映 |        |
| (vi) HDV用充填プロトコル基準整備                           |          | 規格化対応        |               |         |        |
| <b>2. MDV用水素充填プロトコル</b>                        | マップ作成    | 検証試験         |               | プロトコル反映 |        |
| <b>3. MCOMM方式に用いる機器熱容量測定等の高度化</b>              | 測定装置製作   | 測定法の高精度化     | 各種機器の熱容量・圧損測定 |         |        |
| 4. 水素充填時の容器内挙動の研究開発                            |          |              |               |         |        |
| 5. 国際標準化に関する事業との連携                             |          |              |               |         |        |
| 6. HDV水素ステーション設備海外調査                           |          |              |               |         |        |

### 3. 研究開発成果について

幅広いFCEVに対応するMFツインノズルシステムに主に注力・開発中

| 導入時期                                 | ～ 2024  | 2025 ～   |  |
|--------------------------------------|---|--|--|
| 燃料供給法                                | Normal Flow (NF)  | Medium Flow (MF)   | MF-Twin (MFT)  |
| レセプタクル形状                             |    |    |   |
| 最大流量                                 | 60g/sec   | 90g/sec  | 180g/sec   |
| 既存の水素ステーションで水素充填可能 / 既存のFCEVsが水素充填可能 | Yes/Yes   | Yes/Yes  | Yes/Yes  |
| 適応可能な車両                              |  |  |  |

メリット



(出典: Toyota)

#### MFツイン水素充填システムの利点

1. 既存の水素ステーションインフラを有効利用可能
2. 社会インフラの追加コストを最小化可能
3. 既存技術の延長としてコンポーネントの（外挿）設計が可能

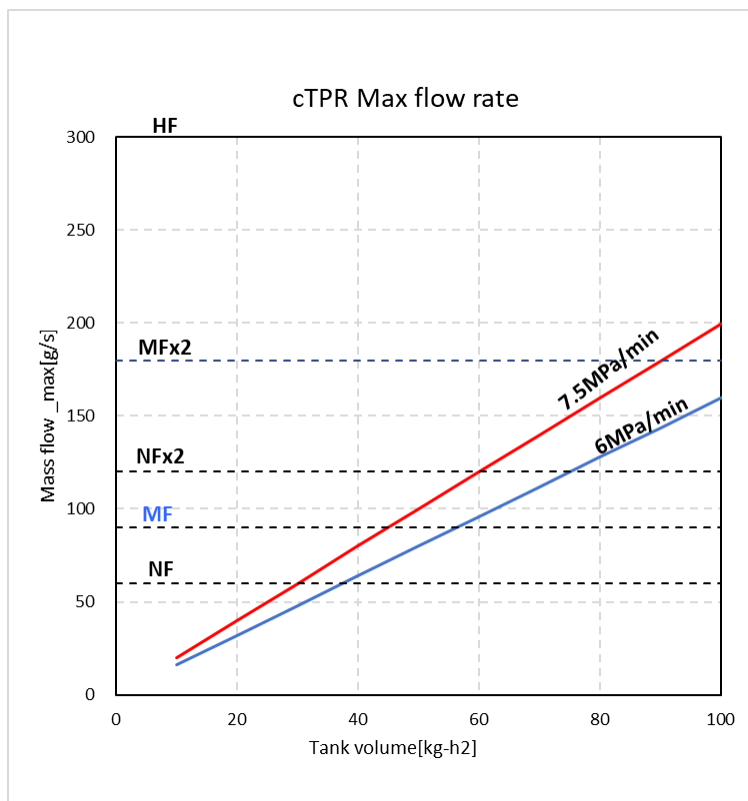


### 3. 研究開発成果について

【境界条件の検討】プロトコルはコネクタ仕様で分類（MF-Single/MF-Twin/HF-Single）

- ・MF-Single (MDV) の基本範囲を10~30/40kgとする 但しMF-Twinのバックアップが必要
- ・MF-Twinディスプレイには、MF-Singleプロトコルも必要（Single充填時に使用）

詳細なシミュレーションを行い、区分やマップ構成を最終決定する ⇒ 本年度、新マップでの基本動作の確認



— 5~80MPa/10min=7.5MPa/min

— 20~80MPa/10min=6MPa/min

| H70                | LDV                         | HDV  |  |                                  |
|--------------------|-----------------------------|--|--|----------------------------------|
|                    |                             | MDV  | HDV'                                   |                                  |
| TV                 | 2kg~10kg<br>(TVL=250L)      | 10kg~30/40kg<br>(TVL=250/250,800L)         | 30/40kg~100kg<br>(TVL=200,250,350,800) | 100kg~200kg<br>(TVL=200,350,800) |
| Nozzle             |                             |  |  |                                  |
| H70 NF             |                             | (J2601 D category)                         |  |                                  |
| H70 MF             | MCMM-NF<br>JPEC S0003(2023) | L/T-MF<br>MCF-MF<br>MCMM-MF                | MF-Twin Backup<br>(L/T,MCF,MCMM)       |                                  |
| H70 MF×2<br>(Twin) |                             | L/T-MF-Twin<br>MCF-MF-Twin<br>MCMM-MF-Twin |  |                                  |
| H70HF              |                             |  | MCMM-HF<br>(MCF-G-HF : SAE J2601/5)    |                                  |

青字：APRRテーブル完成、今後目標圧力を計算予定。



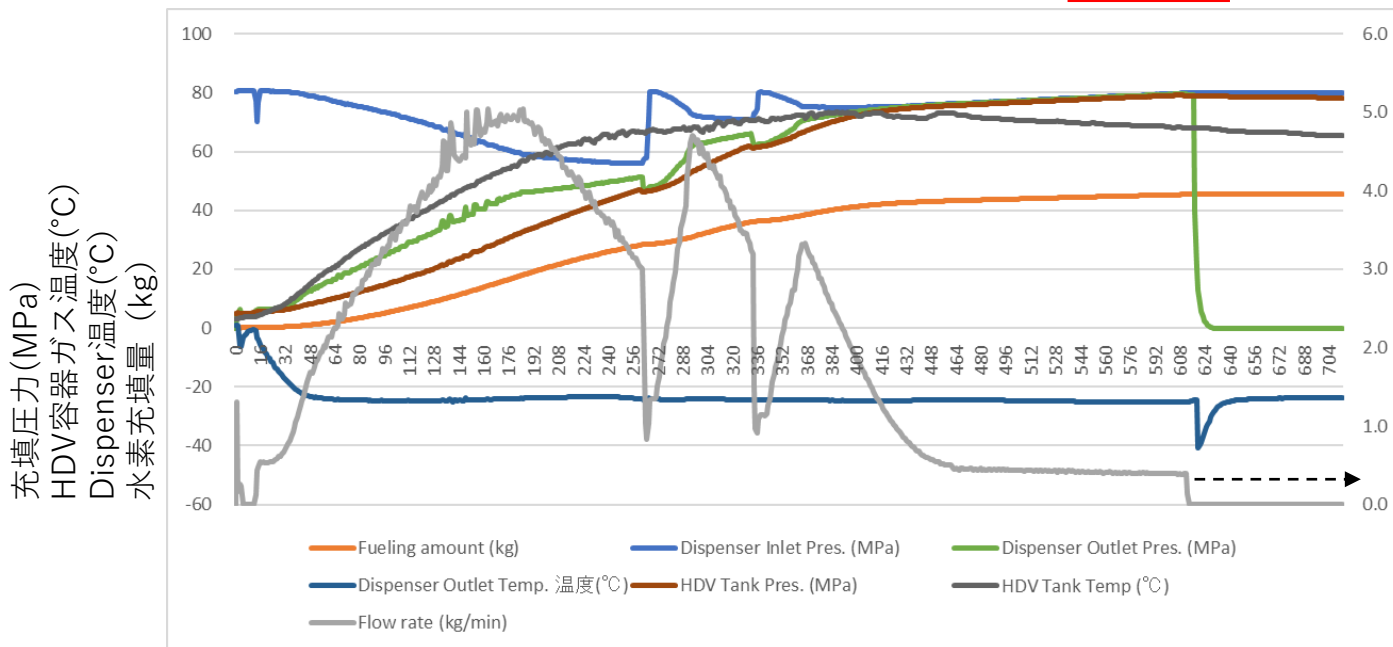
### 3. 研究開発成果について

HDV実車を使用した水素充填プロトコル試験例（2024冬、2週間）：ISO197/WG24（2024.05.15）で発表

| No                    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9       |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Fueling approach      | MF x 2 | MF x 2 | MF x 2 | MF x 2 | MF x 2 | NF x 2 | NF x 2 | NF x 2 | NF x 2  |
| Precool Category      | T30    | T20    | T30    | T20    | T30    | T30    | T30    | T30    | T20     |
| Ambient temp. (deg C) | 20     | 7      | 2      | 2      | 9.7    | 8.3    | 6.5    | 5.8    | 8.3     |
| Target APRR (MPa/min) | 11.7   | 10.9   | 8      | 15     | 13.4   | 8.3    | 9.2    | 7.4    | 8.3     |
| Chiller gas temp.     | -26°C  | -25°C  | -26°C  | -25°C  | -26°C  | -26°C  | -26°C  | -26°C  | -17.5°C |



FTCでのHDV実車試験



水素充填プロファイル例（上表No.4 試験条件）

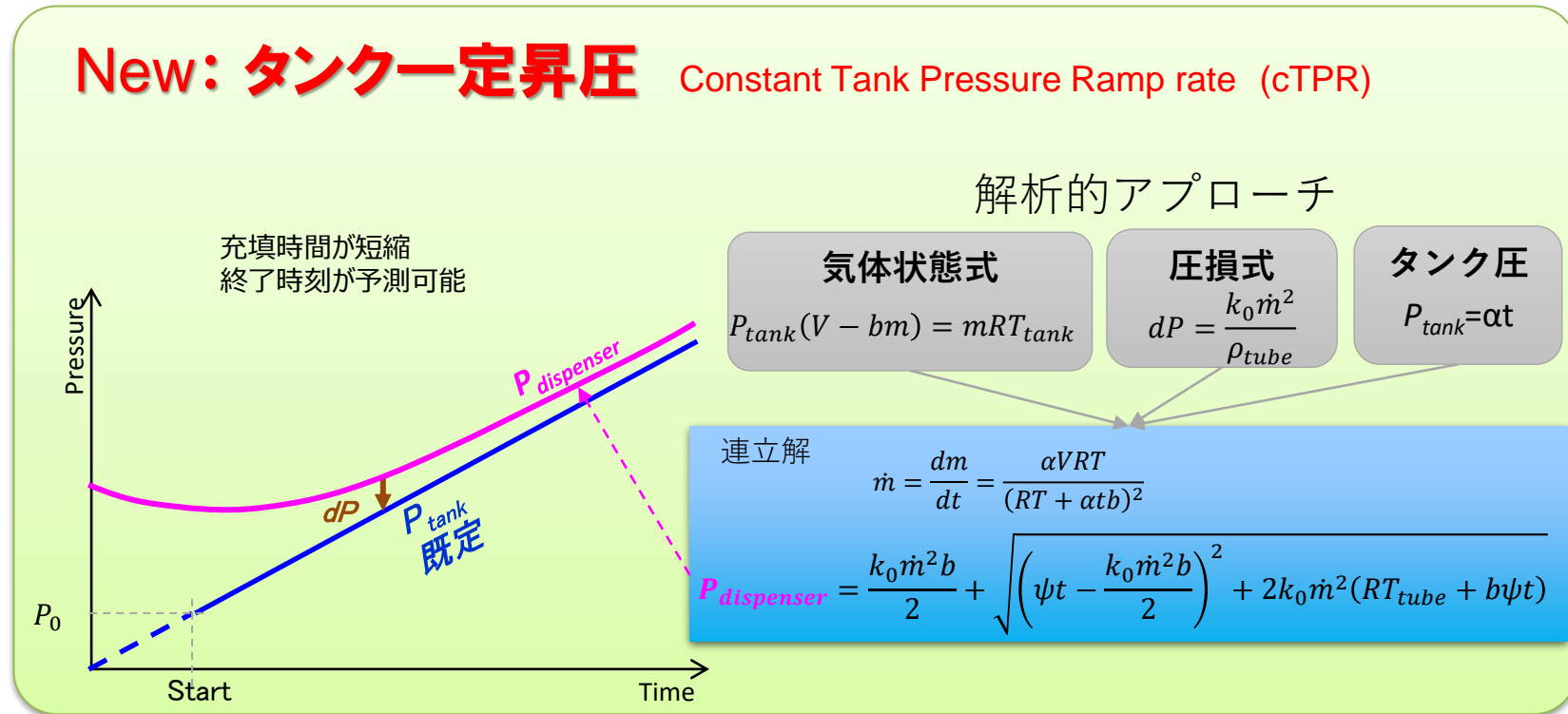
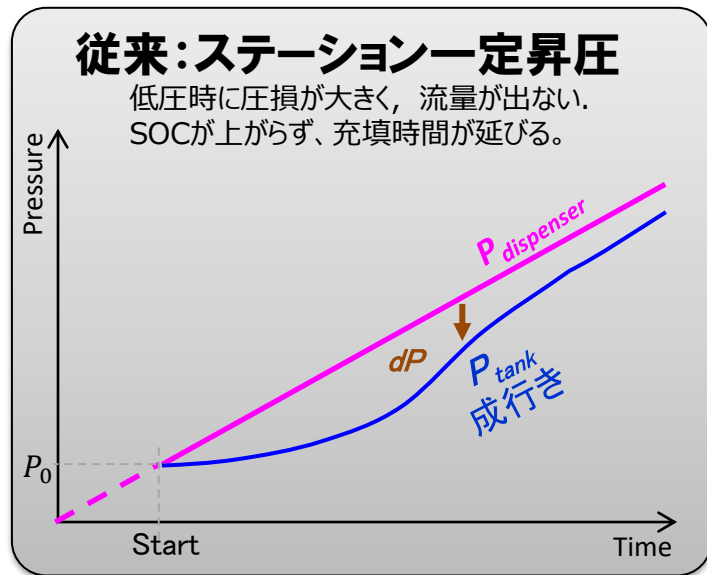
#### Test conditions & results

- Fueling: MF x 2
- Precool: T20
- Storage Capacity: ±1,200 L (H70 type IV tank)
- Ambient Temperature: 2 deg C
- Target APRR: 15MPa
- Initial Pressure: 5.0 MPa
- Max. Pressure: 79.1 MPa
- Max. Temperature: 73.5 deg C
- Fueling Time: 10 min 15 s (Truck SOC reached 97%)
- Refueling amount: 45.4kg

### 3. 研究開発成果について

研究開発の目標及び進捗状況、目標達成に向けたアプローチ

課題：車両信号を昇圧率制御に使用せずに、HDVの大流量（圧損）対策する。



- FCV水素充填制御の解析解は世界初。
- FCVのコストを上げることなく、水素ステーションのみの制御で圧損対策が可能。

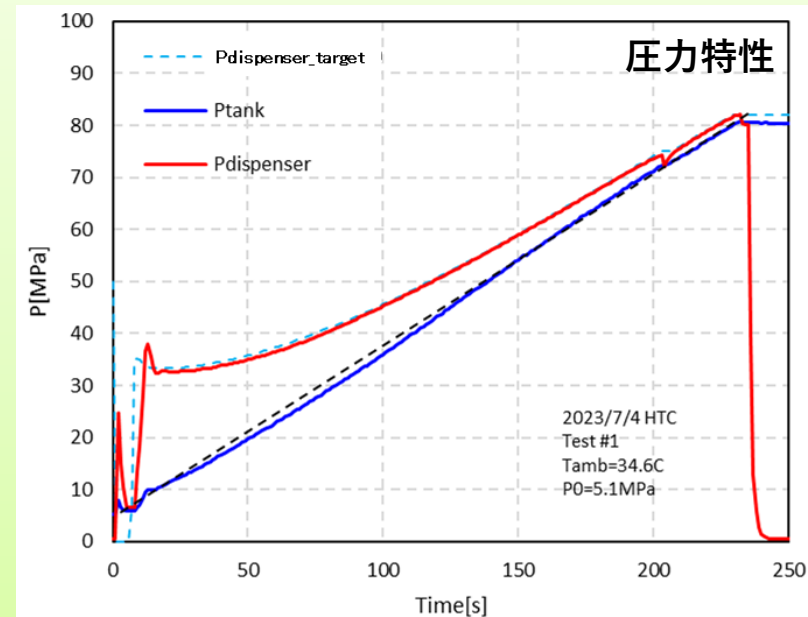
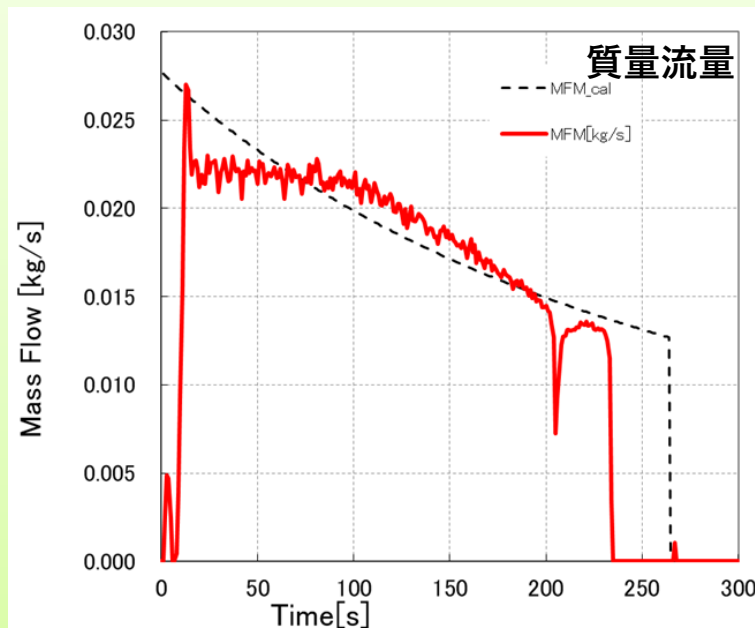
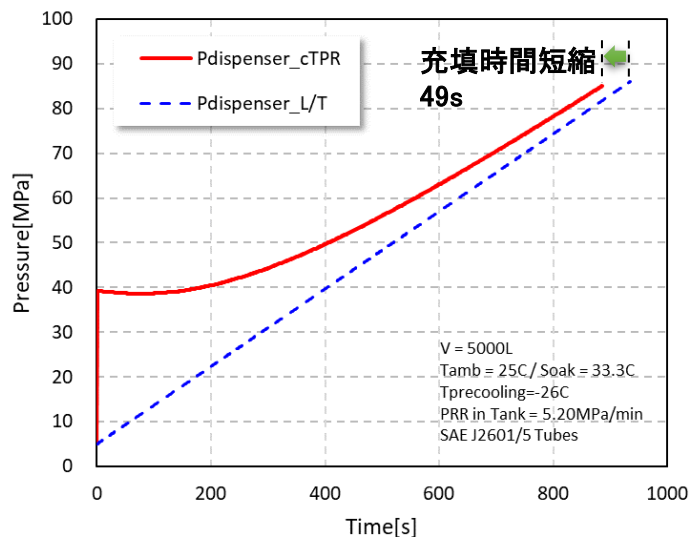
# 3. 研究開発成果について

## 研究開発の成果と意義

### ミニスケール(LDV)・テスト結果

ほぼ理論通りの質量流量と、圧力特性が得られた。

#### シミュレーション結果



- cTPR方式は充填時間を短縮できる。充填の終了時刻が常に一定になる。
- 車両信号を昇圧率制御に（基本的に）使用しないので、FCVのコストを従来同等に維持できる。

### 3. 研究開発成果について

#### MCMM方式に用いる機器熱容量測定等の高度化

##### 目標：

熱容量測定の精度向上。大流量に対応した専用の測定装置（圧損熱容量測定検査装置）を製作する。

##### 進捗状況：

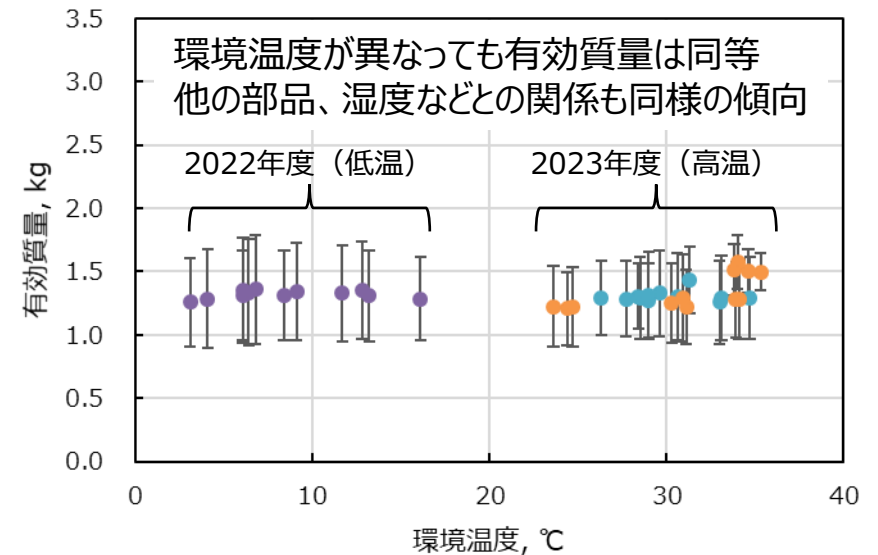
LDV用機器の熱容量測定を行い、測定手法の高精度化の検証を行った。B/A、ホース、ノズルの主要3部品の測定に対して、環境温度、湿度、流量、温度差は有効質量に影響を与える因子とは言えないことが統計学的に示された。また、圧損熱容量測定検査装置の設計を行った。

##### 目標達成に向けたアプローチ：

圧損熱容量測定検査装置は2024年度に完成を予定しており、本装置を用いてHDV規模の大流量の依存性を検証する。

##### 研究開発の成果と意義：

測定時の環境温度などが結果に影響を及ぼさない測定手法であることが確認された。



ノズルの有効質量と環境温度の関係

### 3. 研究開発成果について

#### HDV水素充填における容器内数値解析

##### 目標：

3次元の数値シミュレーション（Computational Fluid Dynamics：CFD）により、水素充填時の容器内の熱流動挙動の傾向を把握する。特に、充填速度や容器形状などの温度層の発達への依存性を解明する。

##### 進捗状況：

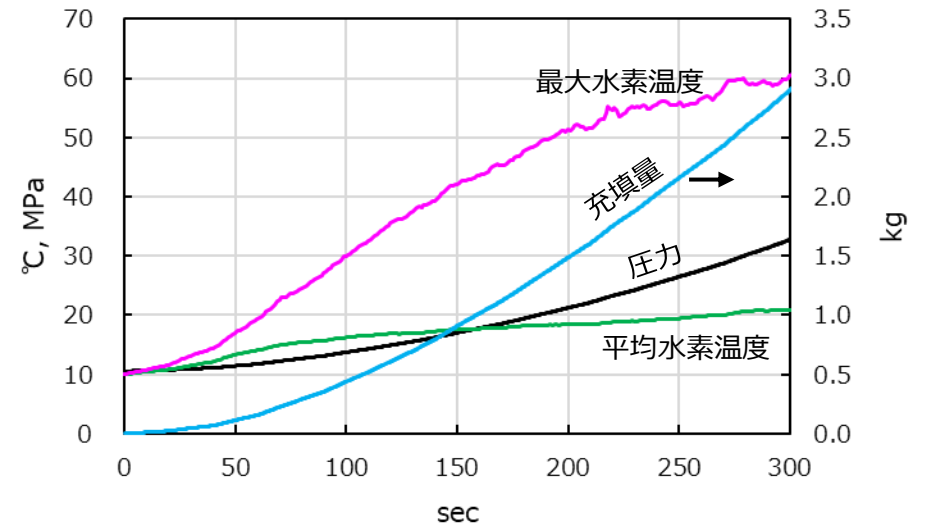
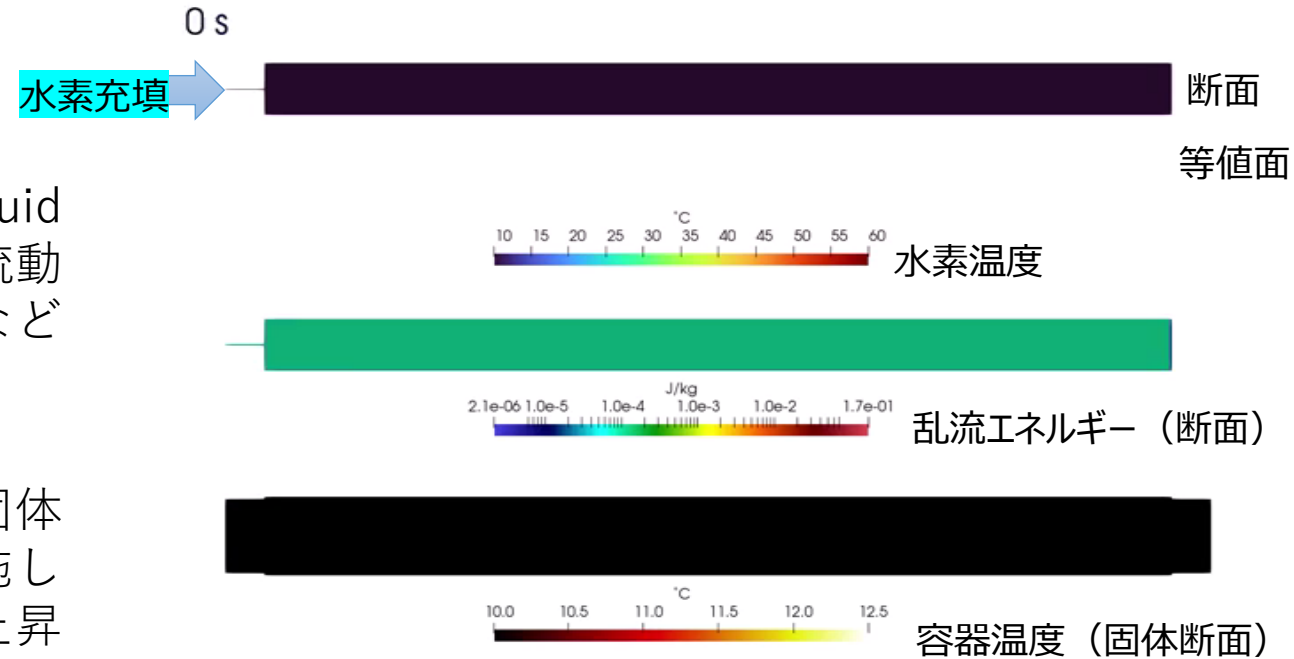
充填試験を模擬する数値シミュレーション（容器の固体熱伝導と容器内高圧水素の流体との連成解析）を実施した。充填口と反対側の容器奥側において顕著な温度上昇が確認でき、物理的に妥当な温度分布を模擬できた。

##### 目標達成に向けたアプローチ：

温度層の発達には、浮力（重力）と乱流の影響が大きく関与すると考えられる。これらのモデルを検討し、再現性の高い数値シミュレーションモデルを開発する。

##### 研究開発の成果と意義：

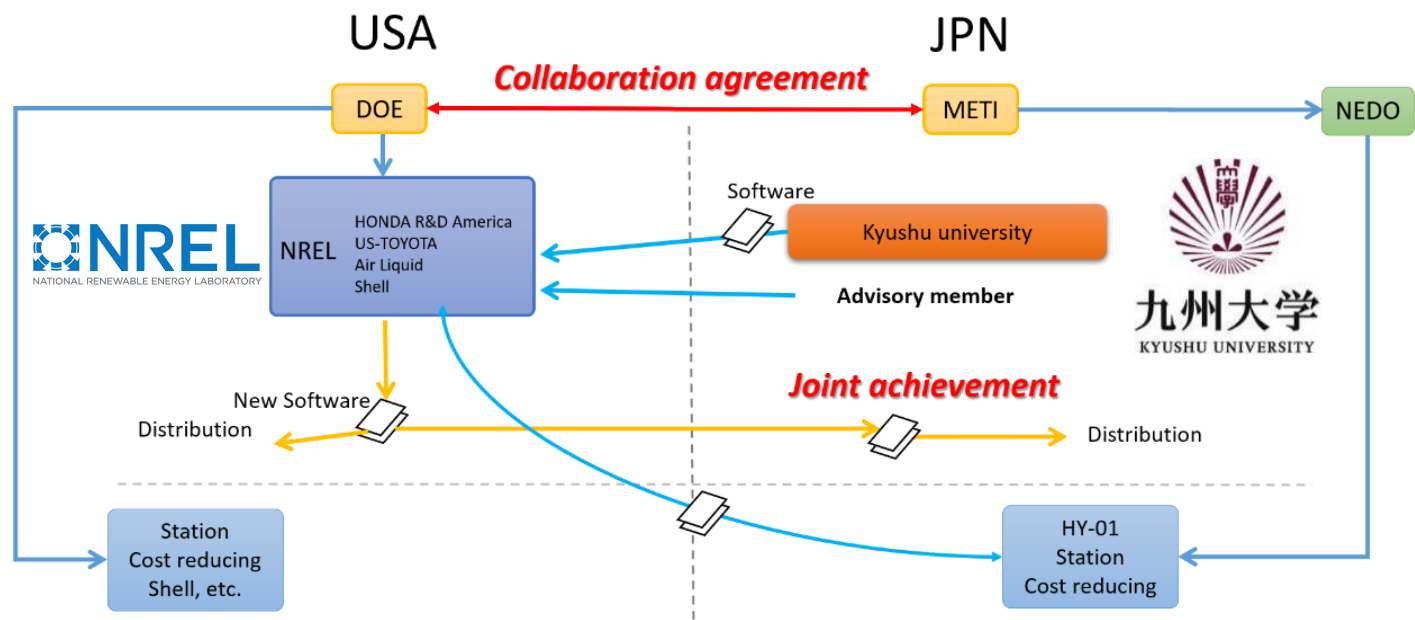
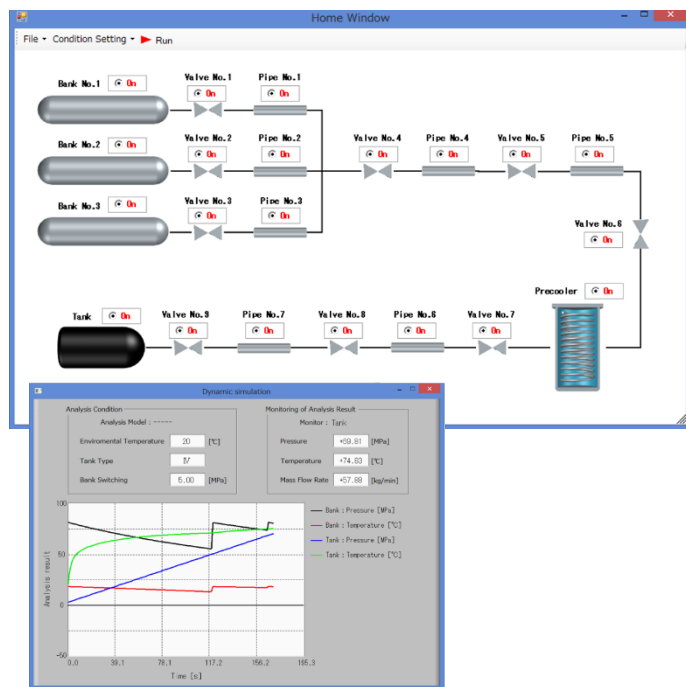
3次元の数値シミュレーションで得られる温度層と充填速度や容器形状の関係を、九大で開発している充填シミュレーション（DS）へ反映することで、安全なHDV用の水素充填プロトコルの開発につながる。



### 3. 研究開発成果について

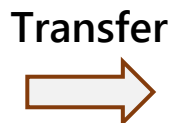
水素充填シミュレーションソフト（Dynamic Simulation, DS）を用いたHDV用充填プロトコルの開発に向けて、LDV用シミュレーションソフトを拡張開発中

## Light-Duty Vehicles (LDV)用シミュレーションソフトウェア



九州大学にてHDV用MCMMSソフトウェアの開発中

九州大学のDSシミュレーションソフトウェア

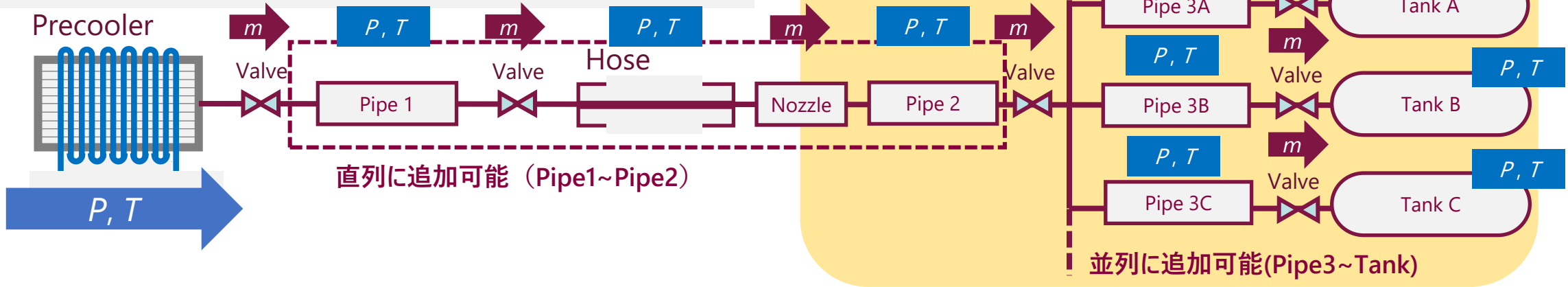


NRELのH2FillSシミュレーションソフトウェア

### 3. 研究開発成果について

#### HDV用の熱力学モデルの開発

Precoolerから車載Tankまでのマルチコンポーネントを含む熱力学モデルの開発中



質量保存

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}$$

エネルギー保存

$$\frac{d(mu)}{dt} = \dot{m}_{in}h_{in} - \dot{m}_{out}h_{out} + q_{in}A_{wall}$$

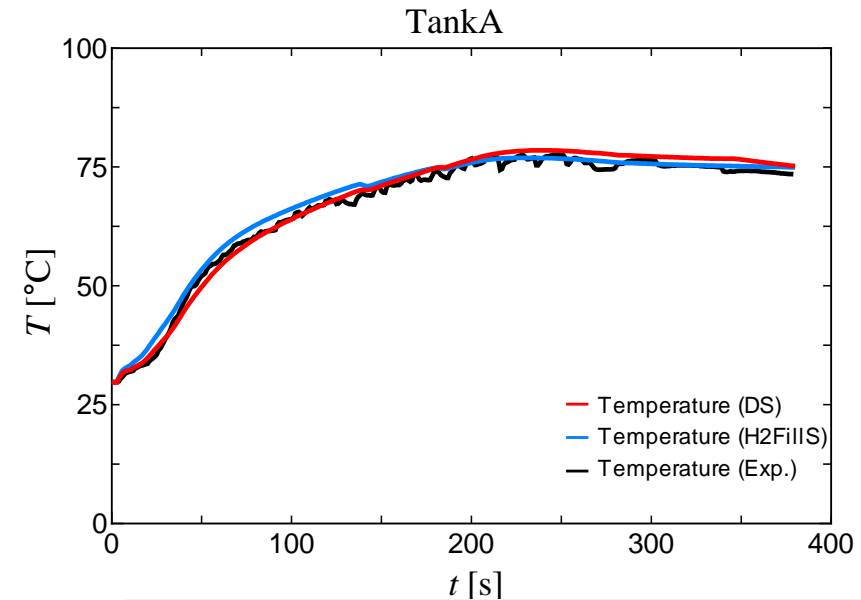
配管熱伝導モデル

非定常一次元熱伝導方程式  $\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$

↓ 離散化

$$\frac{\rho c (y_{i+1} - y_{i-1})}{2\Delta t} (T_i - \hat{T}_i) - \frac{2\lambda}{y_i - y_{i-1}} (T_i - T_{i-1}) = 0$$

[  $\Delta t$ : タイムステップ  $\hat{T}_i$ : 次回タイムステップの温度 ]



車載Tank内の温度（実験値、シミュレーション値）を極めて良好に再現



## 4. 今後の見通しについて

実用化・事業化のイメージ（成果がどのように使われるか）

本事業で開発した水素充填プロトコルが基準化され、2020年代に導入されるHDVに実装される

### 今後の課題と方針

- 各研究開発テーマの前進が、全体の研究開発の成果最大化・効率化に繋がる仕組みを構築する。
- 研究開発結果を踏まえて、国内技術基準（JPEC-S 0003等）やISO等国际標準への提案対応も行う。

