

NEDO水素・燃料電池成果報告会2024

発表No.P2-68

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

団体名：HySUT、本田技術研究所、トキコシステムソリューションズ、JARI、九州大学、JPEC、三菱化工機

発表日：2024年7月19日

【事業概要】

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
・ 車両サイズ、充填ノズル、流量等の分類・境界条件を整理。充填プロトコルマップ作成着手
・ HDV搭載容器の充填時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

【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**貨物輸送部門（トラック等）の脱炭素化が不可欠**
・日本は、世界に先駆けて燃料電池自動車（FCV）を市場投入、水素基本戦略を策定
・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**
・FCV及び水素ステーションの本格普及に向け、今後も**産業競争力を強化し、世界市場を獲得**

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を確立**するべく、開発、実証を加速させる。

水素基本戦略（2023年6月に改定）

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）

【研究開発目的】

研究開発の目標
LDV用に開発した充填プロトコル（MC-MM）を、HDVへの大流量水素充填時用のプロトコル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事業においてLDV用に開発した「**水素充填プロトコル(MCMM)**」と「**水素充填シミュレーションプログラム**」をHDV用に拡張・開発することにより、**プレクール温度の緩和や充填速度の向上**など、HDV用水素ステーションの運営費低減を図る。
・**HDV水素充填プロトコル開発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、日本が世界を先導して**国際基準に資するデータ取得や技術的検証**を実施する。

【実施体制図】

NEDO

委託

水素供給利用技術協会（代表幹事）
全体統括、HDV水素充填プロトコル開発、FTC等運営

三菱化工機
福島水素充填技術研究センター設備管理支援

カーボンニュートラル燃料技術センター(JPEC)
水素充填基準等の整備

本田技術研究所
HDV水素充填プロトコル開発

トキコシステムソリューションズ
MDV水素充填プロトコル開発

日本自動車研究所(JARI)
熱容量測定高度化、CFD解析、FTC技術指導

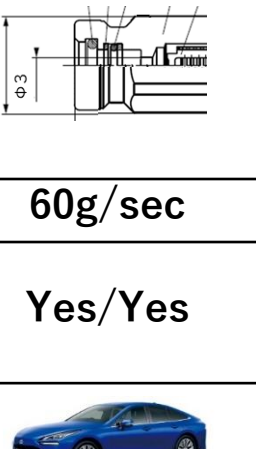
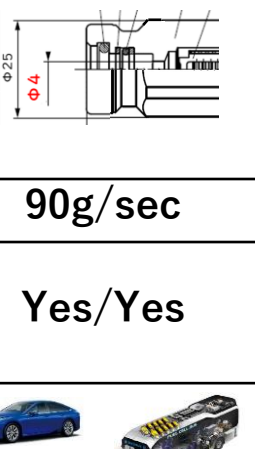
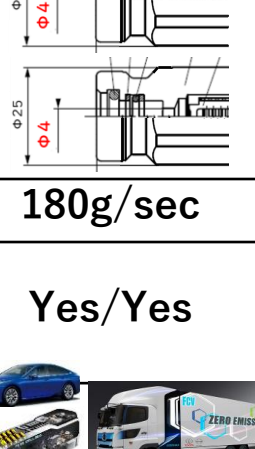
九州大学
MCMMマップ作成ツール開発、CFD解析、ライナー温度推定検討

【開発スケジュール】

開発項目	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度
1. HDV用水素充填プロトコル		スタート			
(i)MF充填プロトコルの基本構成	マップ作成	検証試験	燃焼化対応		
(ii)大流量対応MCMM充填プロトコルの基本構成(新規cTPR充填方式含む)	ミニスケール試験	フルサイズ試験	燃焼化対応		
(iii)MCMMマップ用シミュレーション	大容量		MF		燃焼化対応
(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 燃焼化対応		プロトコル反映	
(vi)HDV用充填プロトコル基準整備					
2. MDV用水素充填プロトコル	マップ作成	検証試験		プロトコル反映	
3. MCMM方式に用いる機器熱容量測定等の高度化	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移動の研究開発					
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					

【開発ターゲット】

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			

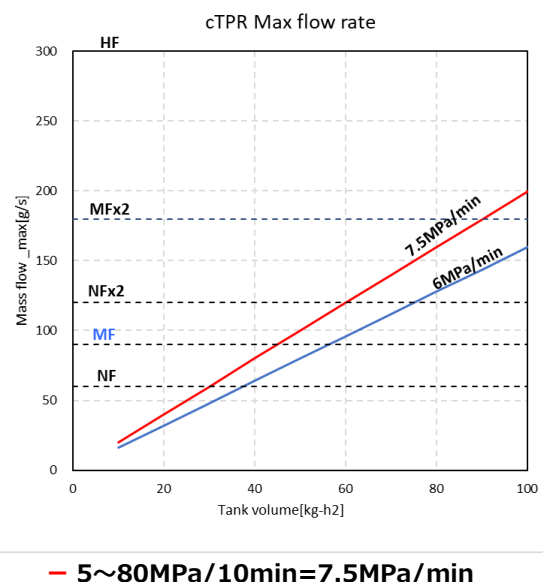
メリット

1) HDVへ短時間充填（約10分）
2) 2台のLDVへ同時充填可能
（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

【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ディスペンサには、**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	MDV	HDV	HDV
TV		2kg～10kg (TVL≒550L)	10kg～30/40kg (TVL≒250/250,800L)	30/40kg～100kg (TVL≒200,250,350,800)	100kg～200kg (TVL≒200,350,800)
Nozzle					
H70 NF			MCMM-NF JPEC 30003(2023)		
H70 MF			LJT-MF MCF-MF MCMM-MF (LJ/MCMMCM)	MF-Twin Backup (LJ/MCMMCM)	
H70 MF×2 (Twin)				LJT-MF-Twin MCF-MF-Twin MCMM-MF-Twin	
H70HF				MCMM-HF (MCF-G-HF：SAE J2601/5)	

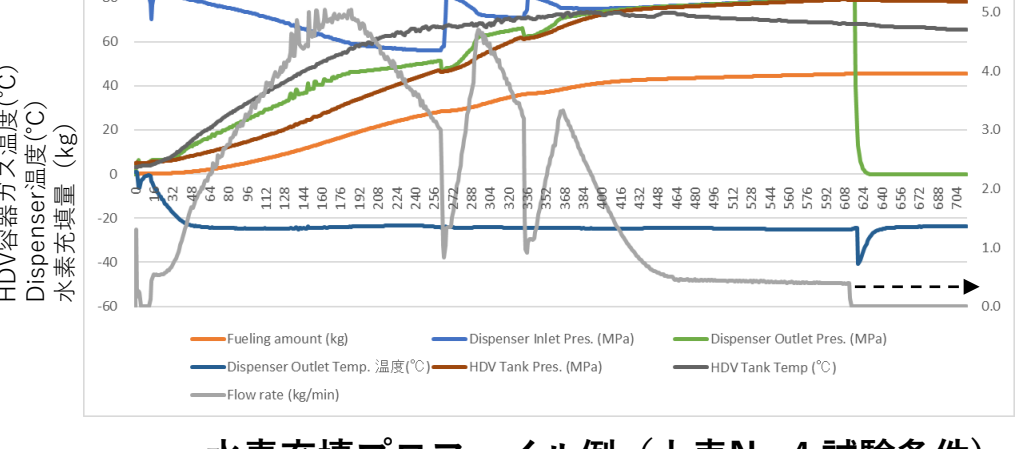
青字：APRRテーブル完成、今後目標圧力を計算予定

【HDV実車充填試験】

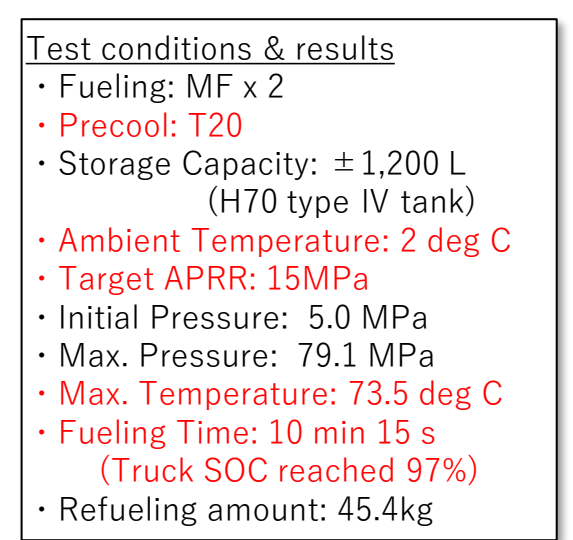
HDV実車を使用した水素充填プロトコル試験例（2024冬、2週間）：ISO197/WG24（2024.05.15）で発表

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	-26°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
・Fueled: 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
・Fueled Time: 10 min 15 s (Truck SOC reached 97%)
・Refueling amount: 45.4kg

【HDV新充填方式開発】

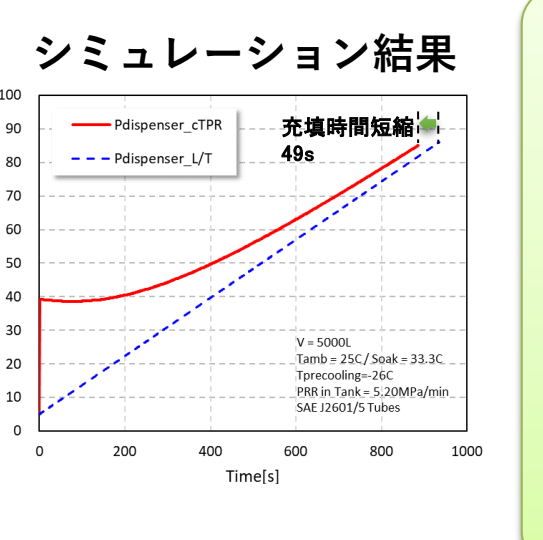
研究開発の目標及び進捗状況、目標達成に向けたアプローチ
課題：車両信号を昇圧率制御に使用せずに、HDVの大流量（圧損）対策する。

従来：ステーション一定昇圧
（定昇圧昇圧率、流量が低い、SOCが上がる、充填時間が延びる）

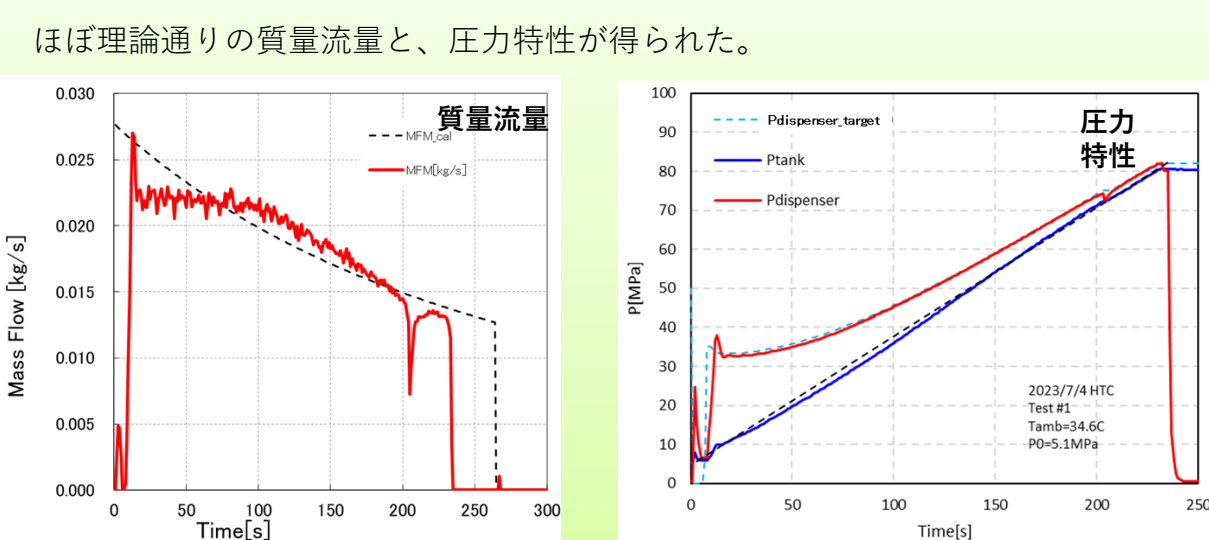
New: タンク一定昇圧
Constant Tank Pressure Ramp rate（cTPR）
充填時間が短縮
終了時刻が予測可能
解析のアプローチ
気体状態式
 $P_{\text{tanks}}(V - b_m) = mRT_{\text{tanks}}$
圧損式
 $\Delta P = \frac{k_a \eta^2}{P_{\text{inlet}}}$
タンク圧
 $P_{\text{tanks}} = P_{\text{at}}$
連立解
 $m = \frac{dP}{dt} = \frac{aV}{RT} \frac{dT}{dt}$
 $\frac{dP}{dt} = \frac{k_a \eta^2}{2} \left(\frac{P_{\text{inlet}}}{P_{\text{tanks}}} \right)^2 = 2k_a \eta^2 (RT_{\text{tanks}} + b_m V)$

・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。

【新充填方式検証結果】

シミュレーション結果


充填時間短縮率 45%

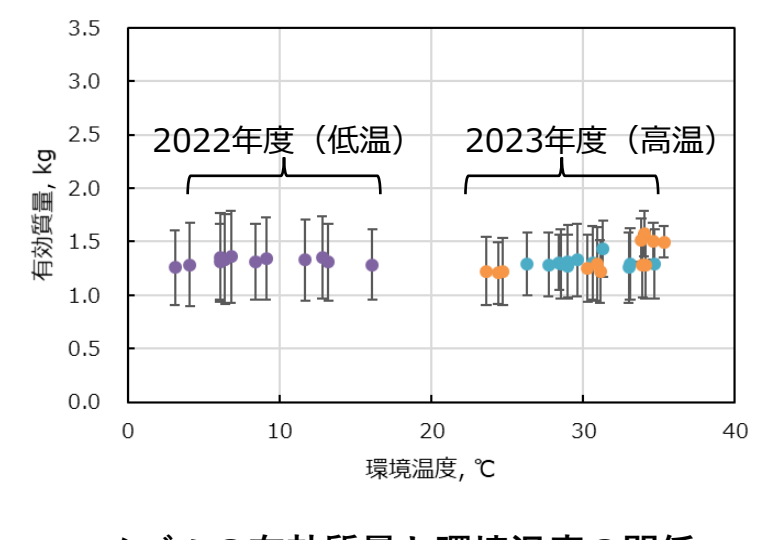
ミニスケール(LDV)・テスト結果
ほぼ理論通りの質量流量と、圧力特性が得られた。


1

・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。

【MCMM方式に用いる機器熱容量測定等の高度化】

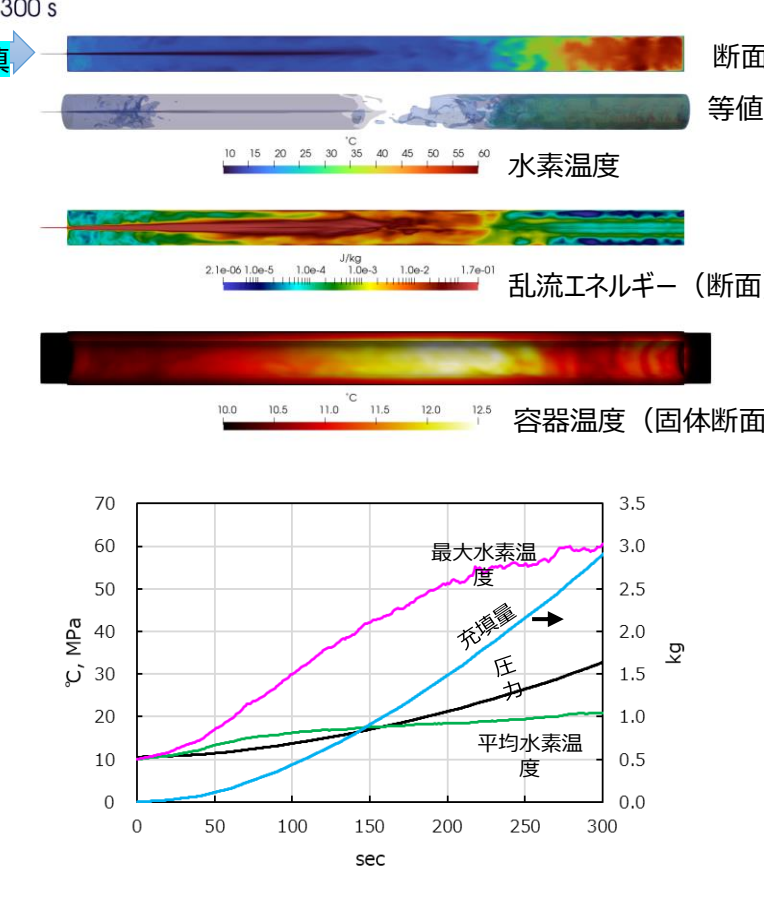
目標：
熱容量測定の精度向上。大流量に対応した専用の測定装置（圧損熱容量測定検査装置）を製作する。
進捗状況：
LDV用機器の熱容量測定を行い、測定手法の高精度化の検証を行った。B/A、ホース、ノズルの主要3部品の測定に対して、環境温度、湿度、流量、温度差は有効質量に影響を与える因子とは言えないことが統計学的に示された。また、圧損熱容量測定検査装置の設計を行った。
目標達成に向けたアプローチ：
圧損熱容量測定検査装置は2024年度に完成を予定しており、本装置を用いてHDV規模の大流量の依存性を検証する。
研究開発の成果と意義：
測定時の環境温度などが結果に影響を及ぼさない測定手法であることが確認された。

環境温度が異なっても有効質量は同等
他の部品、湿度などとの関係も同様の傾向


ノズルの有効質量と環境温度の関係

【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。

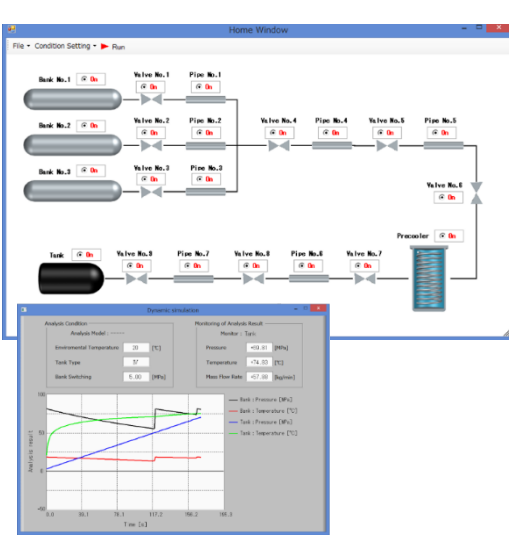


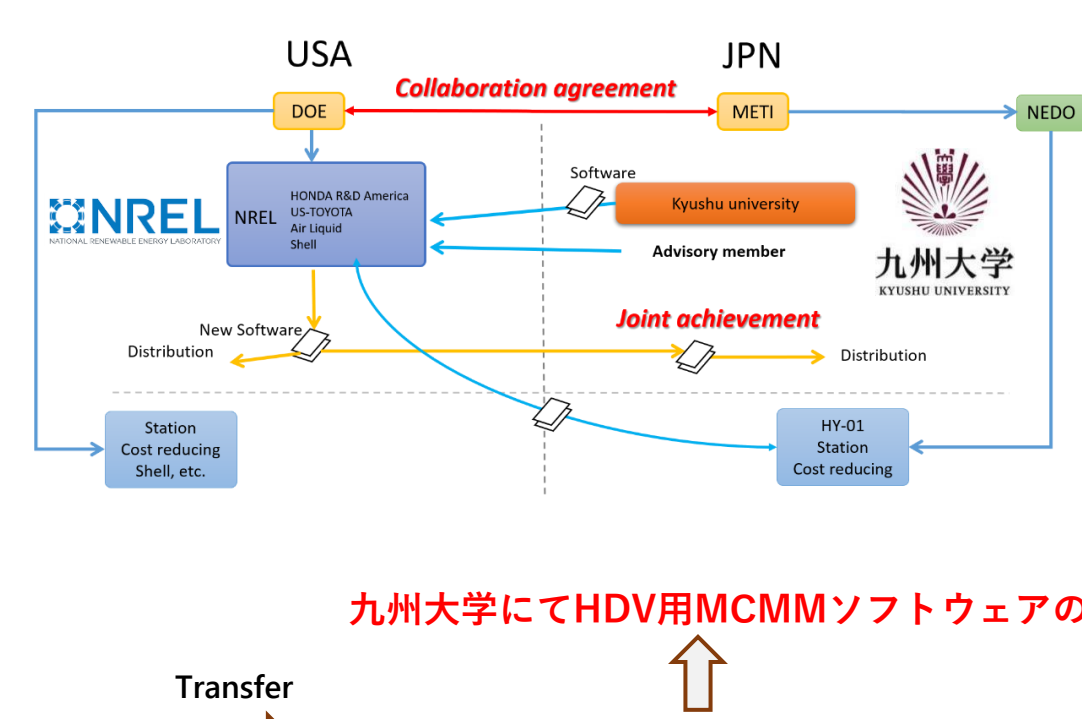
水素充填
断面
等価面
水素温度
乱流エネルギー（断面）
容器温度（固体断面）

【HDV用MCMMソフトウェアの開発】

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

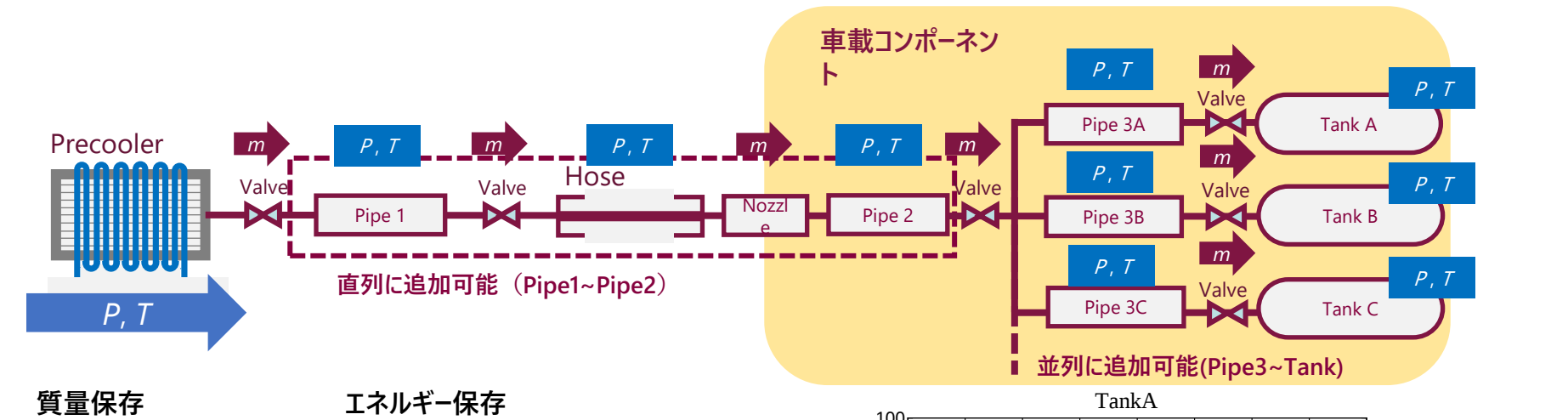
Light-Duty Vehicles (LDV)用シミュレーションソフトウェア


九州大学のDSシミュレーションソフトウェア


九州大学にてHDV用MCMM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H2FIIISシミュレーションソフトウェア

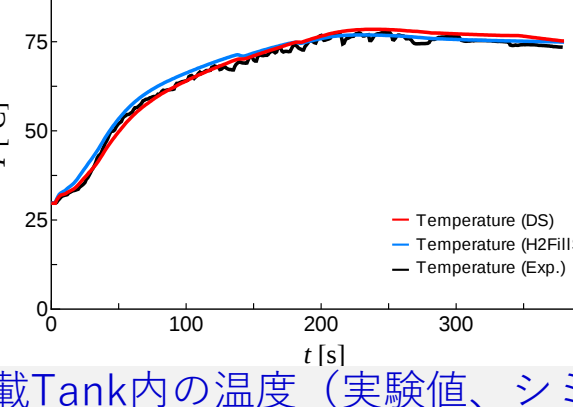
【HDV用の熱力学モデルの開発】

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



直列に追加可能（Pipe1～Pipe2）
並列に追加可能（Pipe3～Tank）

質量保存
 $\frac{dm}{dt} = m_{in} - m_{out}$
エネルギー保存
 $\frac{d(mh)}{dt} = m_{in}h_{in} - m_{out}h_{out} + \dot{q}_{in} + \dot{q}_{wall}$
配管熱伝導モデル
非定常一次元熱伝導方程式
 $\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$
離散化
 $\rho C_p (y_{i+1} - y_i) = \frac{2\lambda}{\Delta x} (T_i - T_{i-1}) = 0$
〔Δx:タイムステップ t_i : 次回タイムステップの直前〕

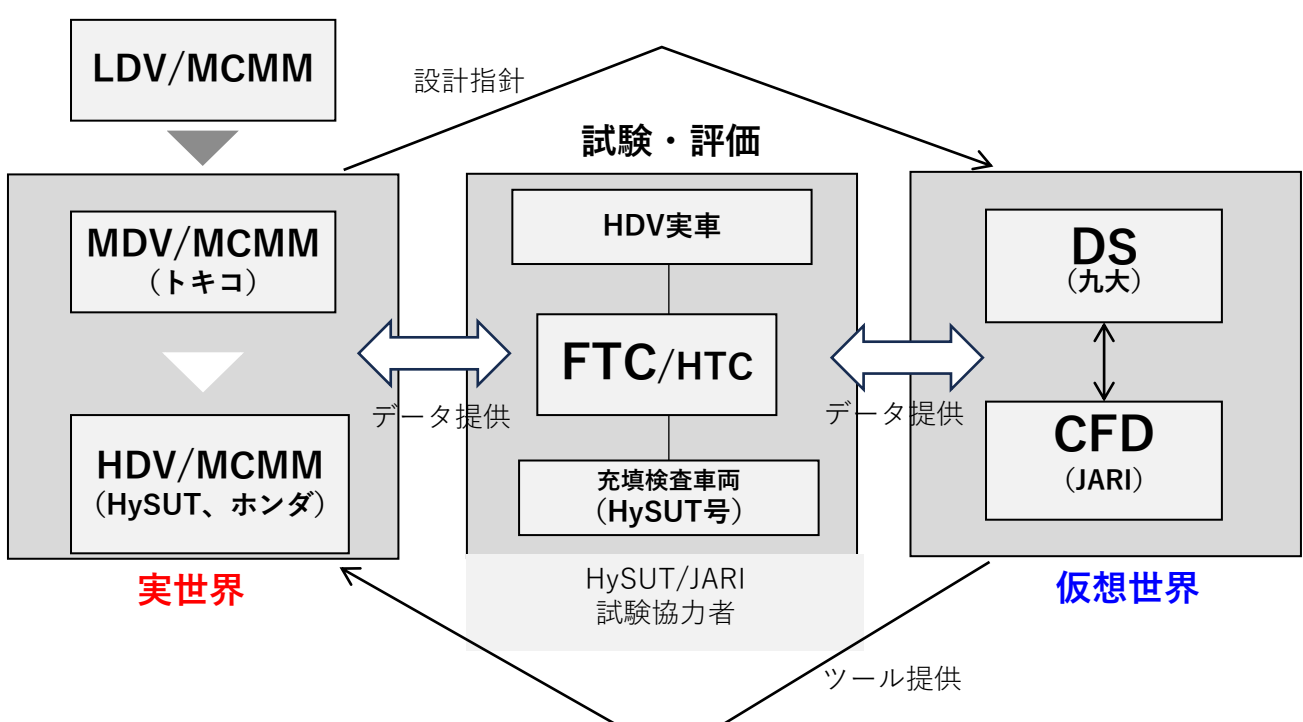


車載Tank内の温度（実験値、シミュレーション値）を極めて良好に再現

【今後の展望】

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、**国内技術基準**（JPEC-S 0003等）や**ISO等国際標準**への提案対応も行う。



LDV/MCMM
MDV/MCMM (トキコ)
HDV/MCMM (HySUT、ホンダ)
試験・評価
HDV実車
FTC/HTC
充換機実車 (HySUT等)
DS (九大)
CFD (JARI)
実世界
仮想世界
データ提供
ツール提供
HySUT/JARI 試験協力者

連絡先：一般社団法人 水素供給利用技術協会

(<http://hysut.or.jp/>)