

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026 プログラムNo.602-2-15

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

(一社) 水素利用供給技術協会

(株) 本田技術研究所

トキコシステムソリューションズ (株)

(一財) 日本自動車研究所

(国) 九州大学

(私) 埼玉工業大学

(国) 明石工業高等専門学校

(一財) カーボンニュートラル燃料技術センター
三菱化工機 (株)

発表： 2026年7月22日

問い合わせ先 (一社) 水素利用供給技術協会 <http://hysut.or.jp/>

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)へ大流量水素を安全に短時間で充填するため、Lookup Table、MCフォーミュラ、MCマルチマップ及びcTPRの各方式によるMF(Medium Flow)充填プロトコルを開発する技術開発とその基準化(Single Nozzle:90g/sec Twin Nozzle:180g/sec)

3.成果・進捗概要

- HDV 実車及び模擬容器搭載車両(HySUT4号)への水素充填試験を様々な条件で実施
- 新水素充填方式（タンク一定昇圧/Constant Tank Pressure Ramp rate : cTPR)を開発
- MF Single/Twin Lookup Tableの各種マップを作成、MCフォーミュラのマップ作成に着手
- 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
- 各種充填方式の開発に向けて水素充填シミュレーションソフトの改造/開発を推進
- ISO 19885-3(水素充填プロトコル)のNormative Standardに採用された。

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**貨物輸送部門(トラック等)の脱炭素化が不可欠**
- FCV(LDV, HDV)の本格普及及び水素ステーション(MF Twin ステーション)の整備に向け、まずはMF充填プロトコルを開発し、**世界市場の獲得に寄与**することが期待されている。

大型バス・トラック等(HDV)では、各国で燃料電池化が急速に進展しているため、更なる水素需要が見込まれる。

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、**大流量水素の充填技術**を確立するべく、開発、実証を加速させる。

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、2023年7月）

2. 研究開発マネジメントについて

【研究開発目的】

研究開発の目標

HDV(Heavy Duty Vehicle)へ大流量水素を安全に短時間で充填するため、**Lookup Table、MCフォーミュラ、cTPRの各方式によるMF(Medium Flow)充填プロトコル**を開発する技術開発とその基準化(**Single Nozzle:90g/sec,Twin Nozzle:180g/sec**)

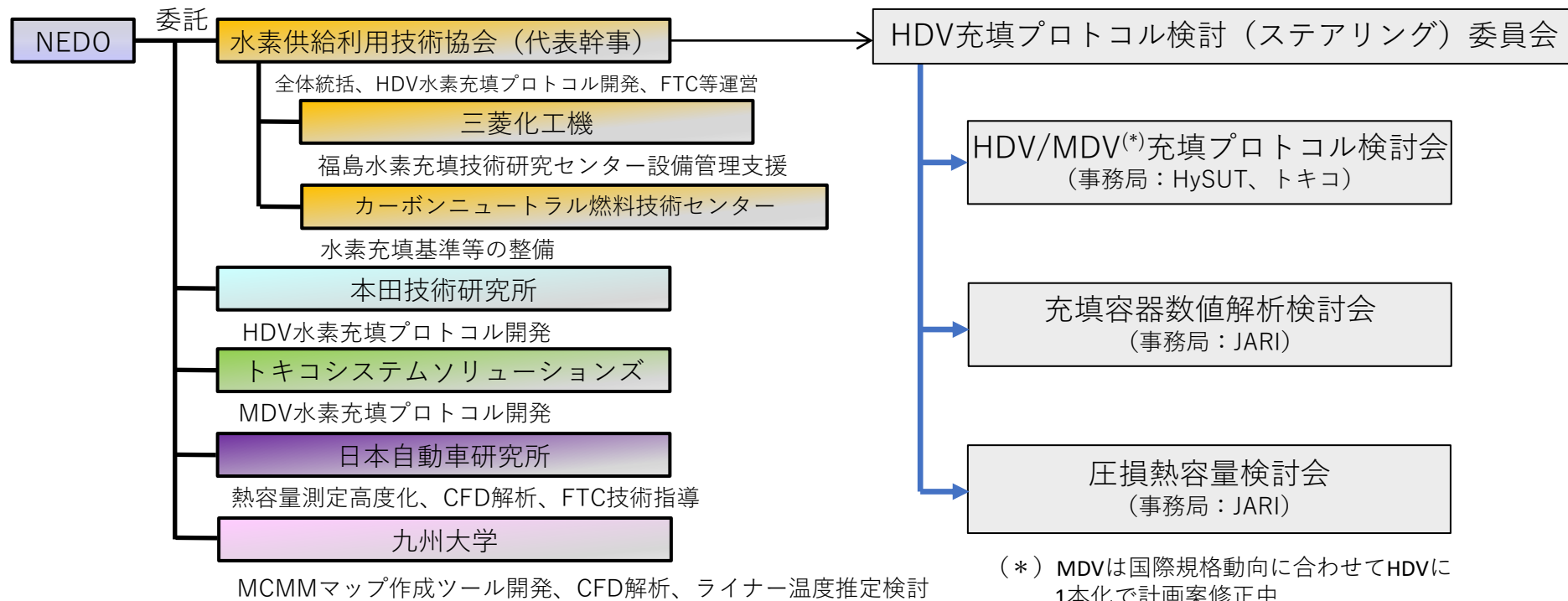
目標設定の考え方

- 新たに開発した「**タンク一定昇圧方式(cTPR)**」と「**水素充填シミュレーションプログラム**」をHDV用に開発・適用、想定以上に圧損が大きい場合や2台目以降の効率的な充填を可能とする「**Optimal PRR**」を適用することにより、蓄圧器の効率的使用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。

2. 研究開発マネジメントについて

【実施体制図】

- ・ 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者間で会議を実施し、進捗を管理。



2. 研究開発マネジメントについて

【開発スケジュール】

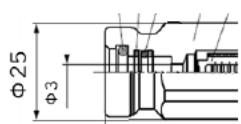
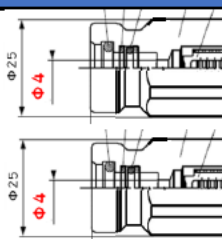
→ 実績
--> 計画

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の研究開発		ステージゲート ▼	委員会 ▼	▼	▼
(i) MF-MCMM充填プロトコルに関する研究開発 (LT、MCF含む)	L/Tマップ作成	MCFマップ作成	MCMMマップ作成	検証試験	
(ii) 大流量充填制御技術(cTPR)と充填プロトコルに関する研究開発	スモールスケール 充填試験	フルスケール充填試験	マップ評価	検証試験	
(iii) MCMMマップ作成用DSプログラムの研究開発	MF Twin Sim、Pcc & cTPR	MF Twin MCMM Sim			
(iv) MCMM方式に用いる機器熱容量測定等の高度化		各種機器の熱容量(MCMM)・圧損(cTPR)の測定			
(v) HDV水素充填における容器内数値解析 (CFD)	CFD解析手法の検討／ラウンドロビン開始 ISO WG24 TF(CFD)への参加	測定容器製作	CFDの検証とDSへの組込		
(vi) HDV充填プロトコルの検証		FTCによるプロトコルの妥当性／ロバスト性の検証			
(vii) HDV用充填プロトコル／バリデーションソフト開発		ステーション用プロトコル検証ツール開発			
(viii) HDV用充填プロトコル基準整備		規格化対応 (L/T,MCF,MCMM,cTPR)			
2. 国際標準化に関する事業との連携					
3. HDV水素ステーション設備海外調査					

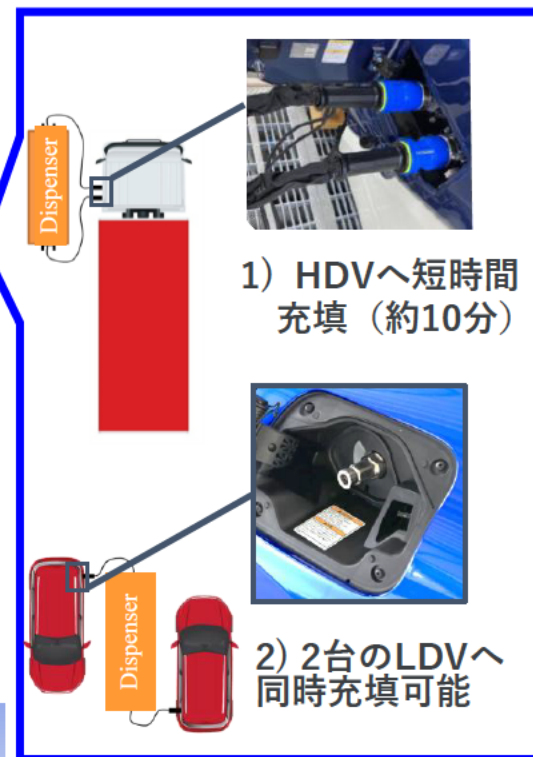
3. 研究開発成果について

【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注力して開発中

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】

- ・ プロトコルはレセプタクル仕様で分類（**NF-Single**／**MF-Single**／**MF-Twin**）
- ・ ノズルが2基あるため、LDV2台、LDV+HDV、マニホールドHDV、セパレートHDV、マニホールドHDV+マニホールドHDVなど複雑な組み合わせに対応したマップ選択のためのフローチャートを検討した。
- ・ 新マップでのISO19885-1に準じたVerification Testを実施した。

H70	LDV	HDV	
Total Volume Nozzle	2kg-10kg (A:2-4kg VFS:50-100L) (B:4-7kg VFS:100-174L) (C:7-10kg VFS:174-248.6L) (TVL=99,174,248.6L)	10kg-200kg (VFS=248.6-5,000L) (TVL=200,250,350,500,799L)	
		10kg-30kg (VFS=248.6-750L) (TVL=250L)	10kg-200kg (VFS=248.6-5,000L) (TVL=200,250,350,500,799L)
H70 NF	L/T, MCF A,B,C MCMM B,C JPEC-S 0003(2023)	L/T D MCF D JPEC-S 0003(2023)	L/T D MCF D SAE J2601
H70 MF (Single)	NF Single A,B,C L/T NF Single A,B,C MCF NF Single B,C MCMM MF Fueling Protocol	MF Single L/T MF Single MCF MF Single MCMM MF Fueling Protocol	
H70 MF X 2 (Twin)		MF Twin L/T MF Twin MCF MF Twin MCMM MF Fueling Protocol	
H70 HF		MCF-HF-G SAE J2601/5	

青字：APRRテーブル、目標圧力テーブル完成

H70HFについては、国内要望が少なく、開発を中断

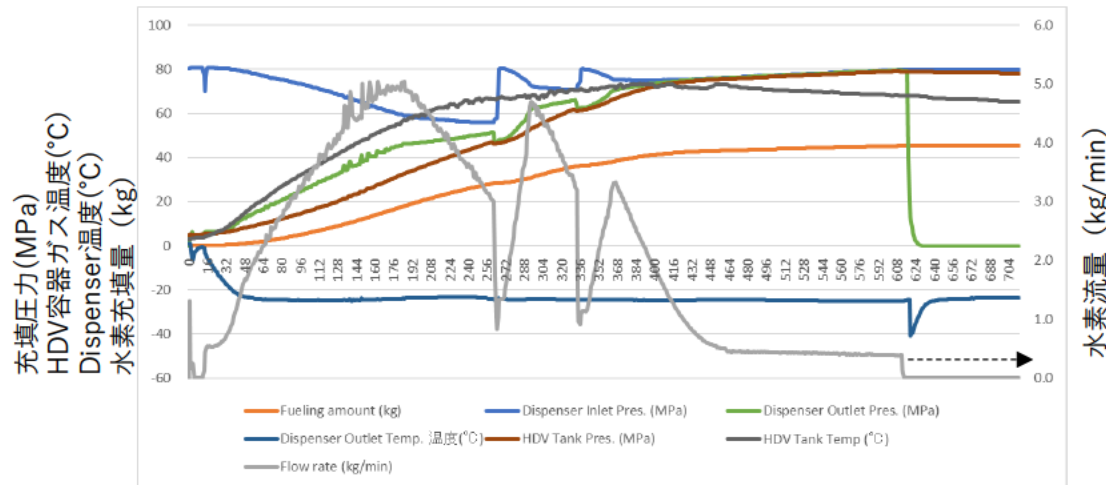
3. 研究開発成果について

HDV実車を使用した水素充填プロトコル試験例

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



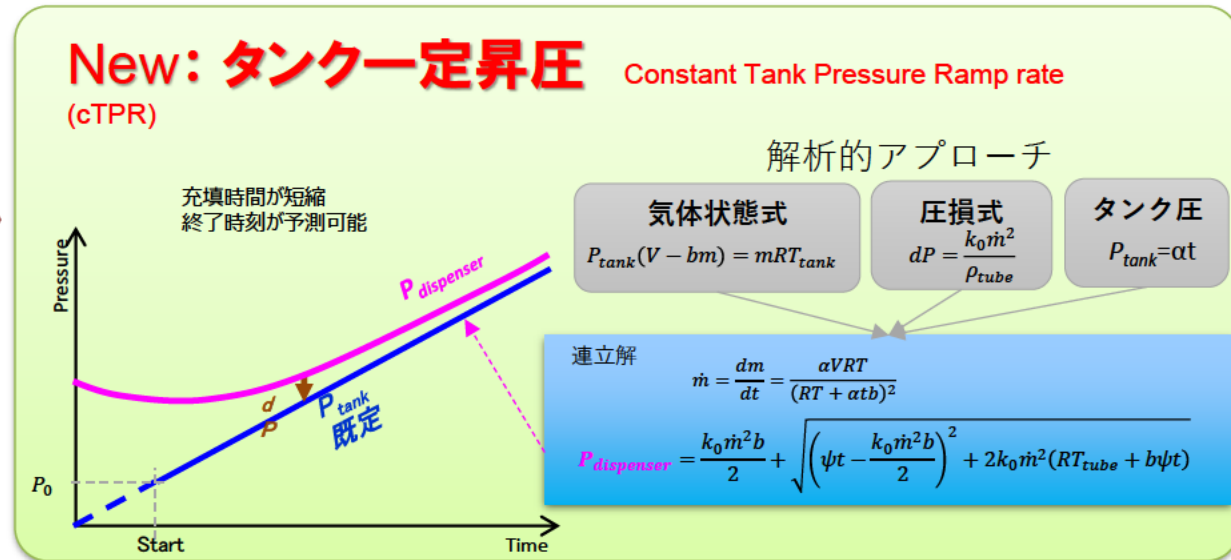
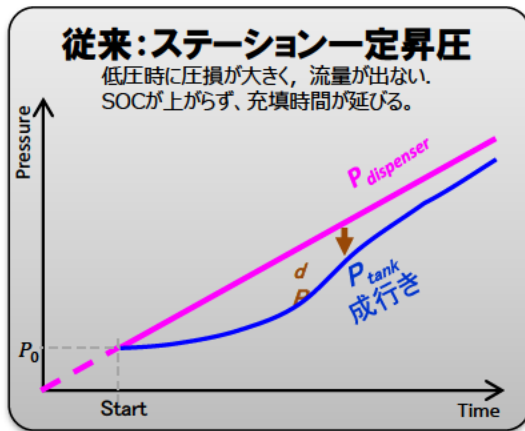
水素充填プロファイル例（上表No.4 試験条件）

Test conditions & results

- MFツイン充填
- プレクール: T20
- 車載容器 ≒ 1,200 L
(H70 type IV tank)
- 外気温: 2 °C
- 昇圧率: 15MPa/min
- 初期圧: 5.0 MPa
- 終了圧: 79.1 MPa
- 最高温度: 73.5 °C
- 充填時間: 10 分15 秒
(車両SOC: 97%)
- 充填量: 45.4kg

3. 研究開発成果について

課題：車両信号を昇圧率制御に使用せずに、HDVの大流量に対する圧損対策を行う。



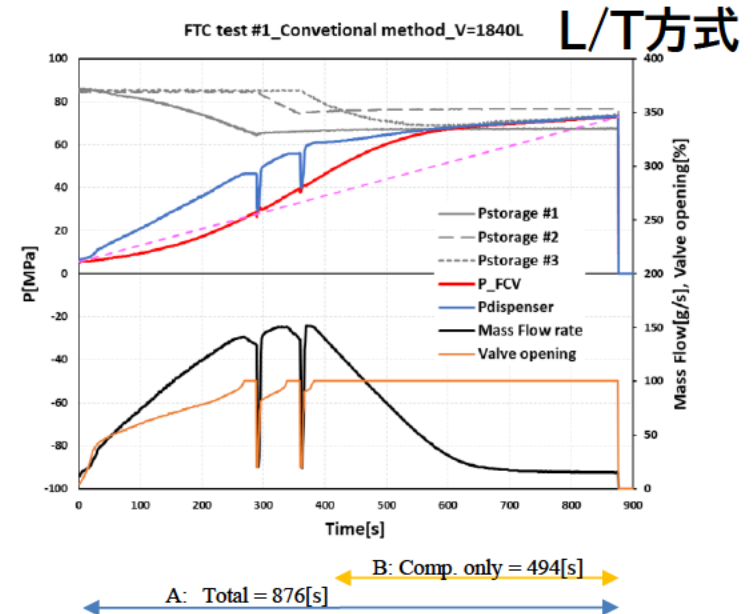
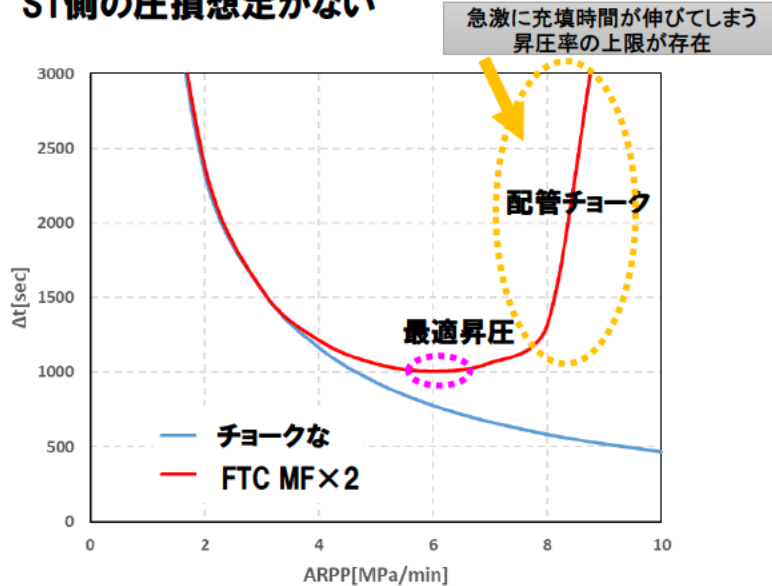
- ・FCV水素充填制御の解析解は世界初。
- ・FCVのコストを上げることなく、水素ステーションのみの制御で圧損対策が可能。
- ・水素ステーション設備の蓄圧器の削減が可能

3. 研究開発成果について

配管チョークによる昇圧率異常



現在の昇圧率テーブルには
ST側の圧損想定がない



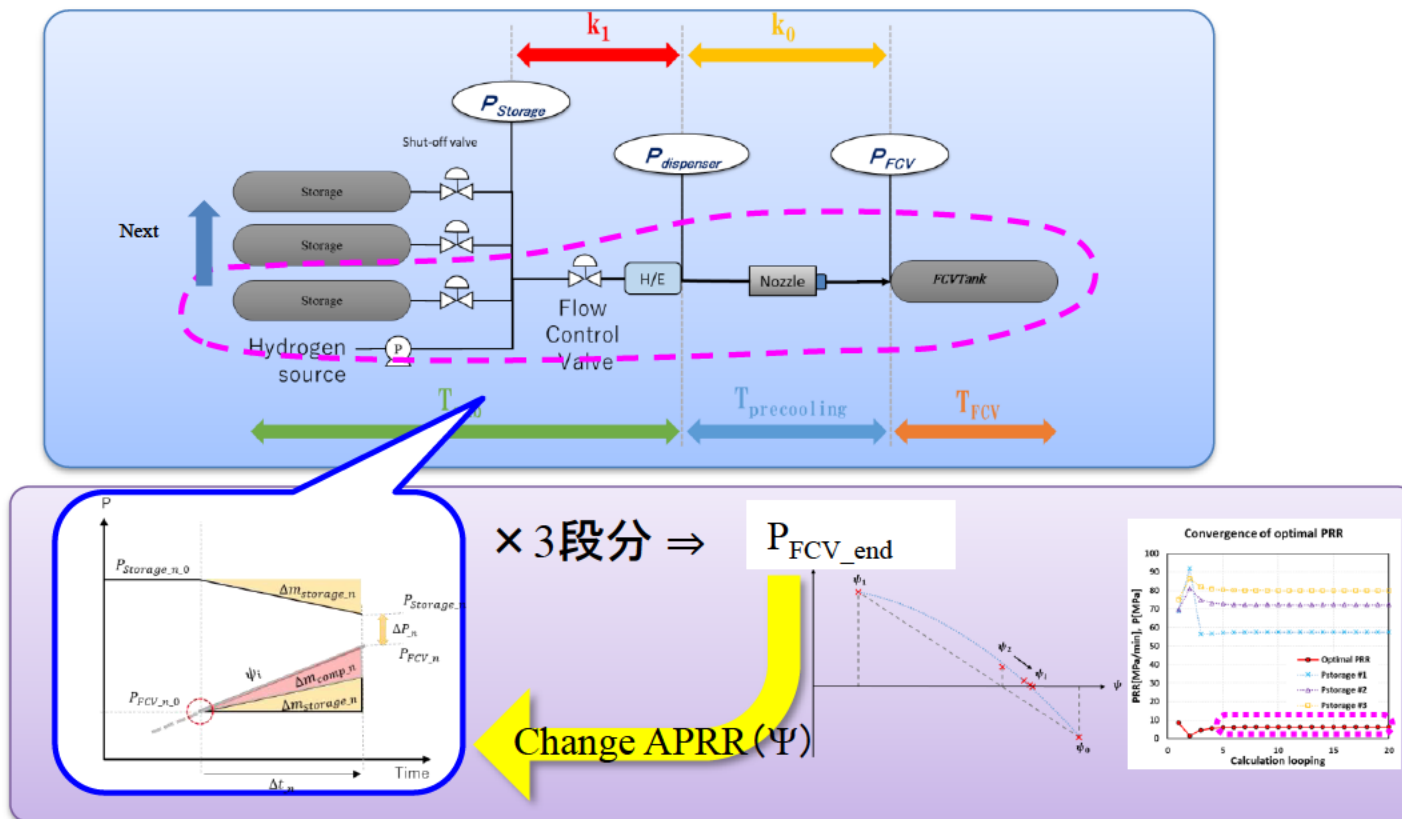
規格の昇圧率 = 8.9MPa/min

実際の昇圧率 = 4.6MPa/min

ST側の圧損により現行プロトコルが期待する充填時間で完了できないことがある

3. 研究開発成果について

最適昇圧率探索方法



cTPR式を応用し、充填直前の圧力で最適な昇圧率を探索計算する

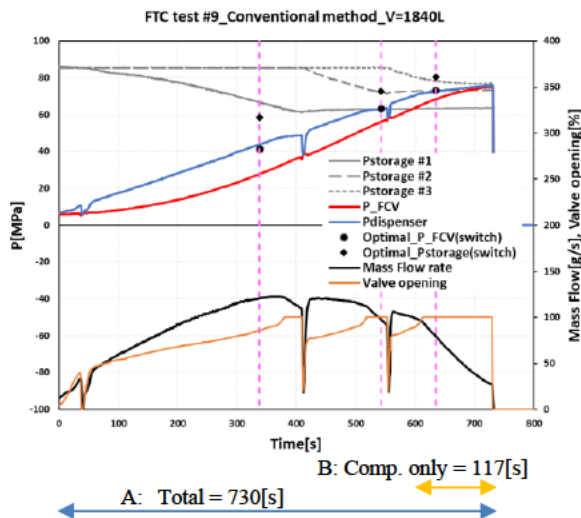
3. 研究開発成果について

最適昇圧率の効果

L/T方式

対策前 4.6MPa/min

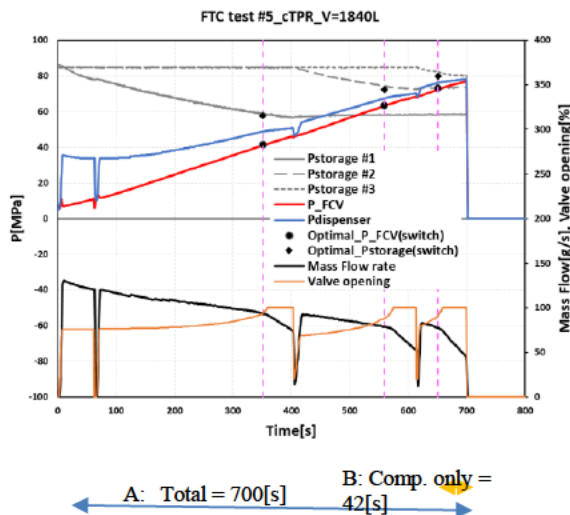
対策後 5.7 MPa/min



cTPR方式

対策前 5.7MPa/min

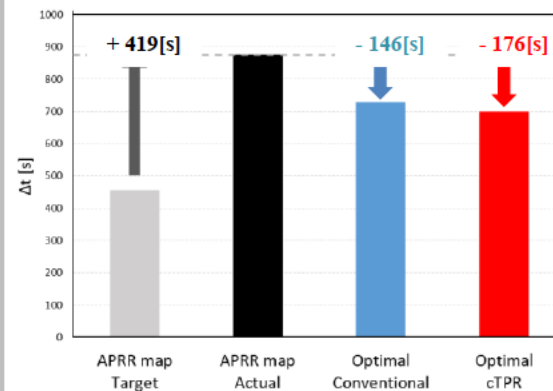
対策後 6.1MPa/min



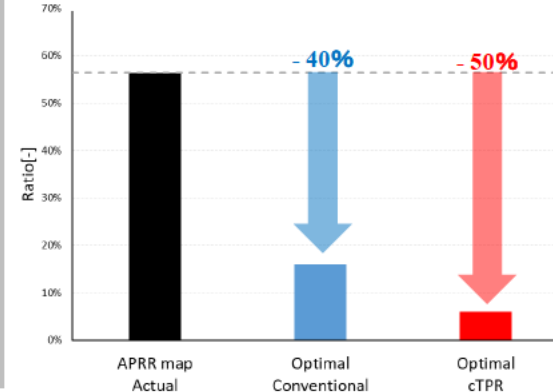
最適昇圧率により充填時間で-3分、直充時間を大幅短縮

充填時間

Effect of Optimal PRR



直充填の時間割合 (B/A)



3. 研究開発成果について

【HDV水素充填における国際標準化活動との連携】

目標：

当事業で開発しているMF-Twin充填プロトコル(**ALUT-G;Advanced Lookup Table General**)を国際標準化チームと連携して、**ISOやSAEの規格に提案し、日本が開発した充填プロトコルを世界中で活用してもらう。**

進捗状況：

2025.12に米国カルフォルニアで開催されたISO/TC197 WG24において、**Normative Standard**として承認された。

CD2(Committee Draft 2)にドキュメントを提供し、IS化に向け協議を継続する。

目標達成に向けたアプローチ：

多様な接続形態に対応するために複雑化したマップ選択フローチャートへの各国の懸念に対しては、要素別に簡潔に示し、かつ、もう一つのNormative規格のMCF-Gと構成を揃える方式に変更した。

研究開発の成果と意義：

Normative Standardとして、国内のみならず特に期待されている欧州での**MF Twin System**の実用化が促進される。

ISO 19885-3:20XX

10.2 Advanced Look-Up Table General (ALUT-G)

10.2.1 Introduction

Clause 10.2 defines a set of table-based fuelling protocols, including their process limits for fuelling of compressed gaseous hydrogen vehicles at maximum flow rates 60, 90 and 180 g/sec using one or two nozzles with vehicle fuel system (VFS) volume capacities between 49.7 and 5000 L. Computer modelling has been used to derive the parameters utilized by the ALUT-G protocol to optimize fuelling performance while ensuring that the general process requirements of Clause 8 and ALUT-G specific process requirements of D.3.4.12 are always satisfied.

For non-communications fuelling, the dispenser will stop fuelling when the calculated non-communications fuelling target pressure is reached. For communications fuelling, the dispenser will stop fuelling at a pressure corresponding to a SOC of 95 to 100%. The dispenser may use vehicle data, including the communicated VFS temperature, to calculate the communications fuelling target pressure corresponding to the target SOC.

However, the ALUT-G protocol also calculates a limit pressure to ensure that the VFS stays within its operational boundaries. The communications fuelling protocol requirements are defined in 10.2.3.13.

The requirements for the application of the ALUT-G fuelling protocol are contained in 10.2 and Annex D. The flow charts and order of operations are detailed in D.2. The subroutines containing the control algorithms, formulas and coefficients utilized are detailed in D.3. D.4 contains the APRR_{TC} tables and P_{limit,comm} tables, which are used to calculate the control parameters.

10.2.2 Classification

Table 24 provides an overview of the ALUT-G fuelling protocol classification. The ALUT-G fuelling protocols are applicable to the 70 MPa pressure class (H70). There are three sets of fuelling protocols; FM60 S, FM90 S, and FM180 T. FM60 S means flow rate maximum of 60 g/s with a single nozzle, FM90 S means flow rate maximum of 90 g/s with a single nozzle and FM180 T means flow rate maximum of 180 g/s with twin nozzles. FM 60S allows fuelling with communications (communication fuelling), without communications (non-communication fuelling), or with loss of communications (comm-loss fuelling) and provides end-of-fill pressure targets. As a rule, non-communication fuelling is used only when communication between the vehicle and the dispenser is not possible. FM90 S and FM180 T allow for fuelling with communications (communication fuelling) or with loss of communications (comm-loss fuelling) and provides end-of-fill pressure targets. As a rule, loss of communications fuelling can be used in case all mandatory static data has been received at the start of the fuelling.

These fuelling protocols utilize numerous process limits on control parameters such as the maximum fuel flow rate, the rate of pressure increase, and the ending pressure. The control parameters and associated process limits are affected by factors such as ambient temperature, fuel delivery temperature, initial pressure, and the vehicle's VFS capacity.

An important factor in the performance of hydrogen fuelling is the station's dispensing equipment cooling capability and the resultant fuel delivery temperature. The fuelling protocols utilize fuel delivery temperatures in the range of -40 °C to -17.5 °C. There are three fuel delivery temperature categories denoted by a "T" rating - T40D, T30D, T20D, where T40D is the coldest. Fuelling times are a function of the fuel delivery temperature, ambient temperature, initial pressure, VFS volume, and the largest tank or CHSS volume.

Table 24 ALUT-G fuelling protocol classification

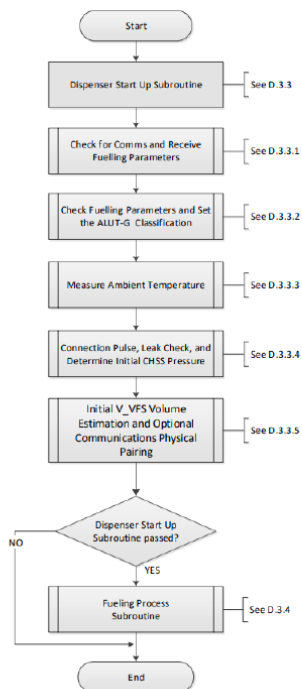
Pressure Class	H70		
	FM60 S	FM90 S	FM180 T
Map Category	(Comm. Non-comm & Loss of comm.)	(Comm. & Loss of comm.)	(Comm. & Loss of comm.)
Maximum Flow Rate (g/sec)	60	90	180

3. 研究開発成果について

【ISO 19885-3 ドキュメント抜粋】

- MF Single/Twin充填プロトコルとして、まずは、MF Single/Twin **L/T**を作成 (MF-Single/MF-Twin/NF-Single) ※容器構成：TVL=200~800/VFS~5000(L)
- NEDO国際標準事業と連携して、**ALUT-G**プロトコルとして、これを**ISO-19885-3**向けに、提案。
- 過渡期にあつては、**HDV用ステーション**でも**LDV(ミライ、クラリティ等)**にも充填できることが重要。
MFノズル/レセプタクルがLDVにも嵌合するように設計されていることから、**Single充填モード**も必要。
- **HRS**と**LDV&HDV**のあらゆる**充填パターン(Manifold/Separate、2台充填等)**を想定、RA結果をを反映した充填フローチャートを考案 ※構成は、もう一方のNormative規格のMCF-Gとあわせた

【ALUT-Gの基本フローチャート】



【詳細フローチャート】

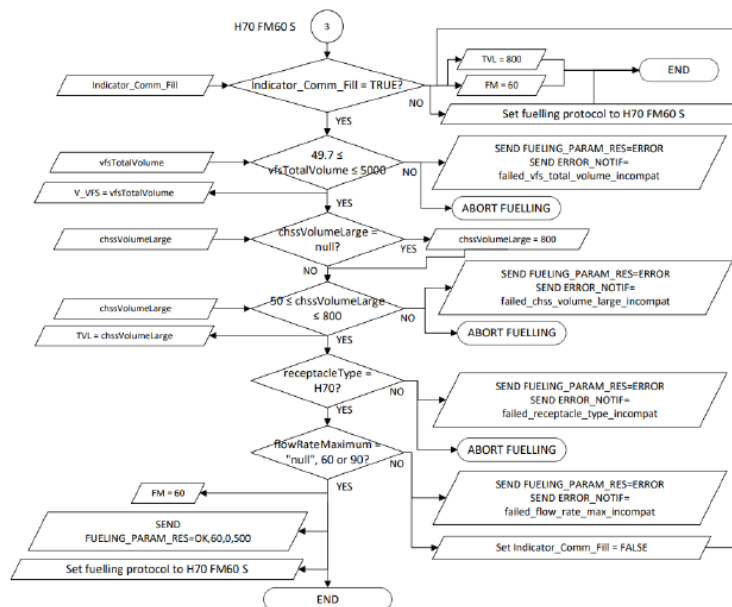


Figure D.9 Check Fuelling Parameters and Set the ALUT-G Classification - part 3

(seeD.3.3.2)

【APRRマップ(充填速度)】

D.4.4 H70 FM60 S Tables

D.4.4.1 APRRc value for FM60 S

Table D.8 APRRc value for FM60 S for TVL ≤ 250

T400	APRRc Values (MPa/min)										
TVL ≤ 250	V _{FS} (L)										
T _{amb} (°C)	49.7	99.4	174	248.6	500	1000	1500	2000	2500	3000	5000
50	4.25	7.36	8.62	8.10	6.85	4.74	3.62	3.10	2.69	2.41	1.51
45	7.46	11.35	12.07	10.65	8.24	5.60	4.26	3.66	3.03	2.52	1.51
40	11.41	15.70	15.30	13.00	9.77	6.47	4.80	3.79	3.03	2.52	1.51
35	12.75	16.80	16.02	13.38	9.94	6.54	4.84	3.79	3.03	2.52	1.51
30	16.61	20.21	18.37	15.03	10.86	7.15	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51
25	20.84	23.63	20.69	16.64	11.81	7.57	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51
20	25.28	27.06	23.03	18.31	12.78	7.57	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51
15	29.23	30.00	25.01	19.69	13.55	7.57	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51
10	32.50	32.50	27.06	21.13	14.34	7.57	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51
5	32.50	32.50	30.00	23.64	15.13	7.57	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51
0	32.50	32.50	32.50	26.28	15.13	7.57	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51
-10	32.50	32.50	32.50	27.30	15.13	7.57	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51
-20	32.50	32.50	32.50	28.87	15.13	7.57	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51
-30	32.50	32.50	32.50	29.48	15.13	7.57	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51
-40	32.50	32.50	32.50	30.44	15.13	7.57	5.04	3.79	3.03	2.52	1.51

【終了圧カマップ(目標)】

D.4.4.2 P_{limit,comm} value for FM60 S

H70 FM60S Comm		Communications Fuelling Pressure Limit, P _{limit,comm} [MPa]										
		Initial Tank Pressure, P _{initial} [MPa]										
		≤5	10	15	20	30	40	50	60	70	>70	
Ambient Temperature, T _{amb} [°C]	>50	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling
	50				86.2	85.4	84.5	83.4	82.2	80.9		
	45				86.2	85.2	84.1	82.8	81.4	79.6		no fuelling
	40				85.9	84.6	83.3	81.8	80.2	78.1		no fuelling
	35				85.9	84.6	83.2	81.7	80.1	78.1		no fuelling
	30				85.6	84.2	82.6	81.0	79.2	77.1		no fuelling
	25				85.3	83.7	82.0	80.2	78.3	76.0		no fuelling
	20		81.2		84.7	83.0	81.2	79.3	77.4	75.0		no fuelling
	10				83.9	82.0	80.0	78.0	75.9	73.4		no fuelling
	0				82.3	80.0	77.7	75.4	72.9		no fuelling	no fuelling
	-10				82.1	79.8	77.5	75.2	72.8		no fuelling	no fuelling
	-20				81.9	79.6	77.3	75.0	72.6		no fuelling	no fuelling
-30				81.7	79.4	77.1	74.8	72.4		no fuelling	no fuelling	
-40				81.4	79.2	76.9	74.6	72.3		no fuelling	no fuelling	
-40				no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	no fuelling	

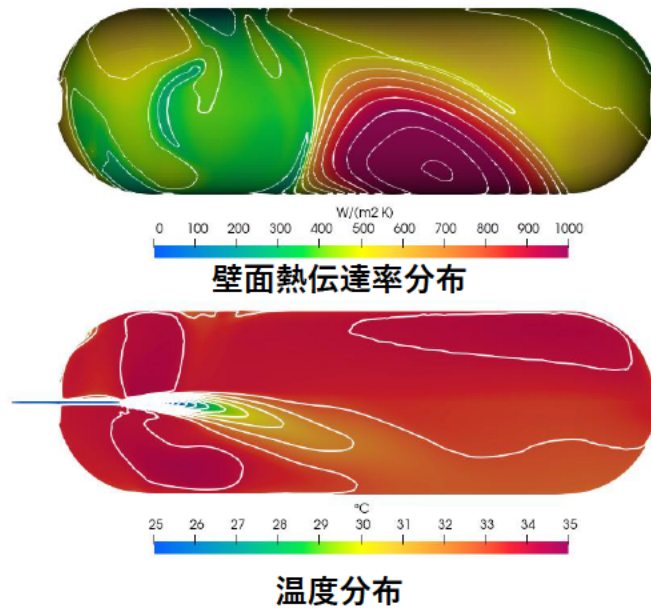
Figure D.1 High-level flow chart for the ALUT-G fuelling protocol

3. 研究開発成果について

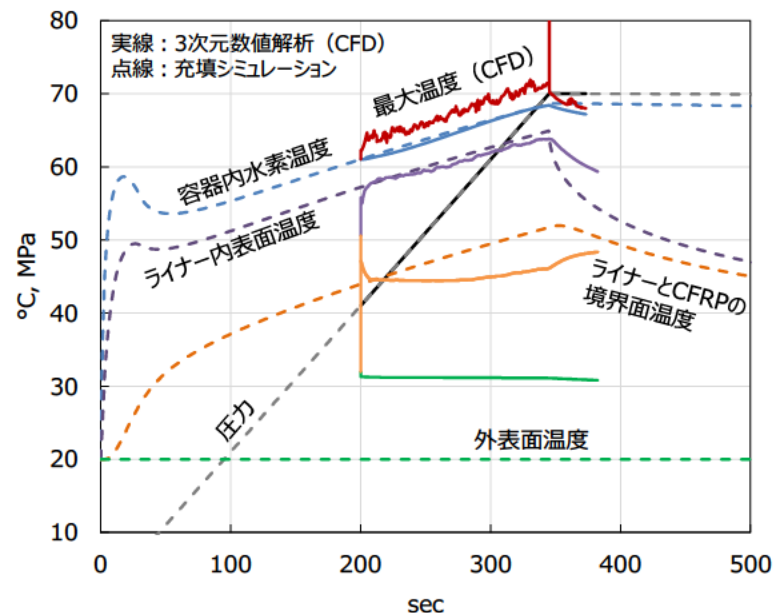
【HDV水素充填時の容器内数値解析】

課題：容器内の温度成層の発達条件のモデル化

3次元数値解析（CFD）の結果より、温度成層が発達する法則性をRi数などによるモデル化をする。モデル式を水素充填シミュレーション（DS）に導入することで、充填プロトコルの開発において、温度成層を考慮することが可能となる。



CFDの一例



CFD（200秒スタート）とDSの比較

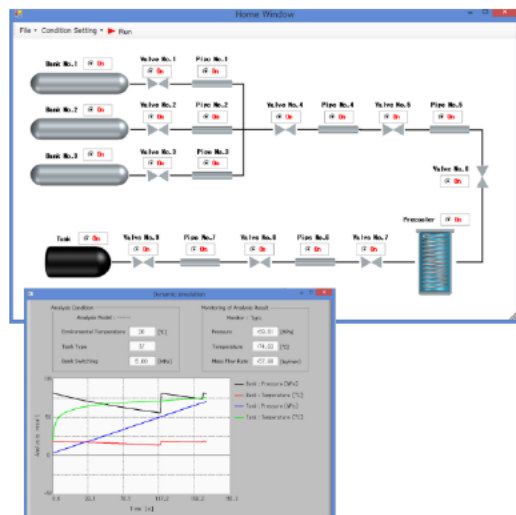
容器内の平均温度は、CFDとDSで同等の変化を示している。CFDでは熱伝達率と温度の分布が得られる。熱伝達率の高い領域と高温領域が異なることが確認できる。これらをモデル式で表現し、DSに導入することで温度成層の考慮が可能となる。また、CFDを充填途中から開始して妥当な結果が得られることを確認し、計算負荷低減の効果が得られている。

3. 研究開発成果について

【HDV用ソフトウェアの開発】

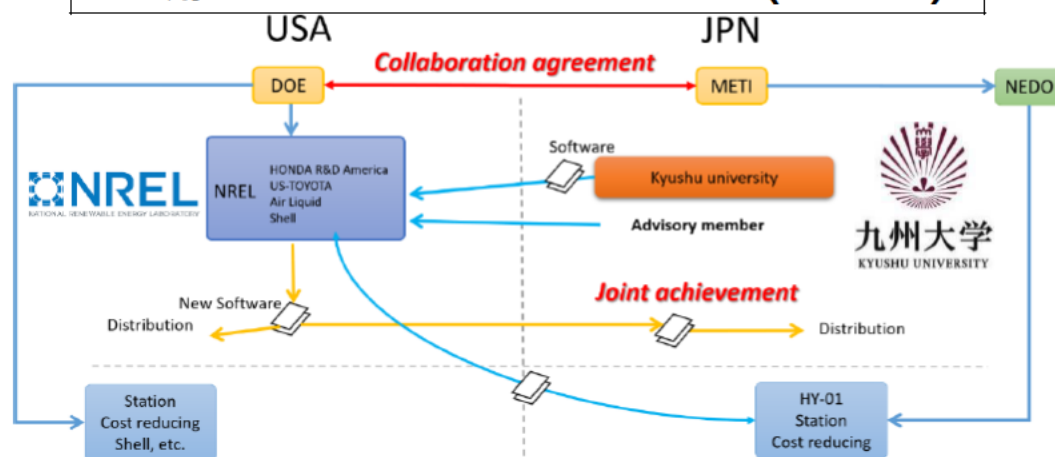
課題：シミュレーションソフトの高度化

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、HDV用シミュレーションソフトを拡張開発中



九州大学のDSシミュレーションソフトウェア

LDV用シミュレーションソフトウェア(H2FILLS)



NRELのH2FillSシミュレーションソフトウェア
(MF L/T & MC-フォーミュラの作成)

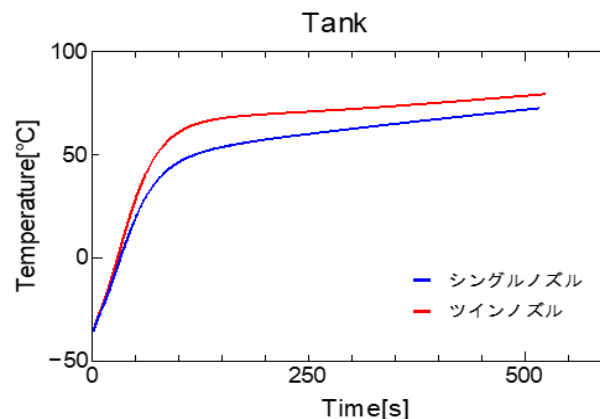
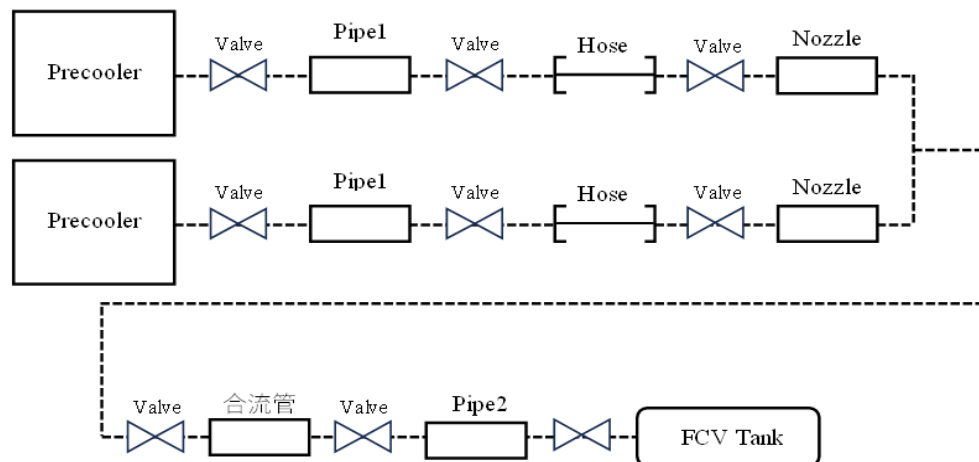
Transfer

九州大学にてHDV用cTPRソフトウェア等を開発中
(脱圧シミュレーション & cTPRの作成)

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までのツインノズル
充填における熱力学モデルを開発中



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

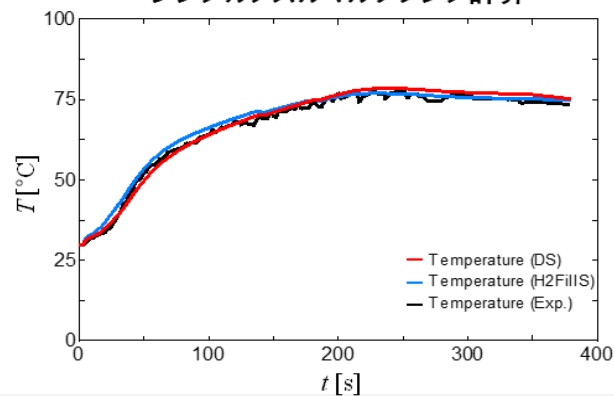
非定常一次元熱伝導方程式 $\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$

↓ 離散化

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

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

シングルノズルマルチタンク計算



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年代後半**に導入される**HDV ST**に実装され、**FCトラック実証走行**に供される。

今後の課題と方針

- 国内規制基準等の制約により、実水素ステーションでのトラブル回避のための充填方法(Optimal PRR)の開発や最適ステーション仕様の設定に寄与する情報の発信により、円滑なHDV市場の拡大を目指す。
- 研究開発結果を**国内技術基準**（JPEC-S 0003-3等）や**ISO等国際標準**への提案対応も行う。

