

充填時間短縮のための FCV 用新水素充填方式の開発

Development of New H₂ Refueling Method for FCV to Reduce Refueling Time

判 田 圭*
Kiyoshi HANDA*

Steve MATHISON**

要 旨

FCV の水素充填時間短縮のために、新充填方式を開発した。従来は外気温に応じて昇圧率を決定していた。充填中のオーバーヒートを防止するための供給水素プレクールの温度は、昇圧率には影響しなかった。新方式ではプレクー ル水素温度に応じた昇圧率のリアルタイム制御を追加した。互換性も配慮し、水素ステーション側は温度センサ追加とソフトウェア変更のみで対応し、車側の制御やハードウェアは変更不要とした。以上より、General Motors 社と Mercedes-Benz 社の協力を得て、実車テストをおこなったところ、プレクー ル水素温度を下げずに、夏場では充填時間を従来の 3 割以上短縮できた。米国ロサンゼルス地区なら、年間を通じてほぼ 3 分台で充填できる。また従来と同等の充填率も確保した。

ABSTRACT

A new refueling method was developed to shorten the hydrogen refueling time of FCV. The conventional method determined the pressure ramp rate according to the ambient temperature, and the temperature to which the supplied hydrogen is precooled to prevent overheating when refueling did not influence the pressure ramp rate. The new method added real-time control of the pressure ramp rate according to the precooled hydrogen temperature. Consideration was also given to compatibility, so the only changes to the hydrogen refueling station side were the addition of a temperature sensor and software changes, and no changes to the control and hardware on the vehicle side are needed. Under the conditions above, vehicle tests were performed with the cooperation of General Motors and Mercedes-Benz, with the result that the new refueling method enabled shortening of the refueling time in the summer by 30% or more compared to the conventional method and without lowering the precooled hydrogen temperature. This enables refueling in less than four minutes in most cases year-round in the Los Angeles district, United States. In addition, a State of Charge equivalent to that of the conventional method was also secured.

1. まえがき

自動車の動力源として燃料は、石炭に始まり、石油、天然ガス、水素へと変遷してきた。これは低炭素化の歴史であり、同時に低分子化の歴史でもある。最も小さい分子の水素に至って、走行時のカーボンフリーを達成した。

その反面で、従来の燃料より高い貯蔵圧が必要となった。ガソリン車並の航続距離を求めた結果、燃料電池自動車 (FCV) のタンク圧力は、70 MPa に至った。この高圧水素を安全に充填するために、SAE を中心に規格の策定がおこなわれた。水素充填特有の課題に、車両タンク内の発熱がある。充填システムは、おおむね直列接続された四つの伝熱系になる (Fig. 1)。車両のタンク内でのオーバーヒートを防ぐために、水素を -40℃ 程度に冷却 (プレクー ル) する (I)。冷やされた水素は、ブレイクアウェイ、ホース、ノズ

ル等 (II) と、車両の配管 (III) の持つヒートマスによって温度が上昇する。タンク内に入ると水素の圧縮のため発熱する (IV)。その温度は、ANSI 規格⁽¹⁾等の要件から 85℃ 以下でなければならない。

外気温 (T_{amb}) が高いときは、充填時間を延ばし、タンク本体への熱の拡散を促進する。数百回におよぶシミュレーションでオーバーヒートが発生しない昇圧率を求め、結果は、データ表 (テーブル) にして水素ステーションの制御装置に記憶させている。これを参照して、充填をおこなうことから、ルックアップテーブル (L/T) 充填方式と呼ばれている。

実際の制御ではまず外気温を測定し、テーブルから昇圧率を読み、充填中は一定の昇圧率を保つよう、流量調整弁を制御する。SAE の標準条件 (外気温 T_{amb} 20℃、残圧 P_0 10 MPa) であれば、3 分半程度で充填が完了する (Fig. 2、図中の黒丸)。

* 四輪 R&D センター

** HONDA R&D AMERICAS, INC.

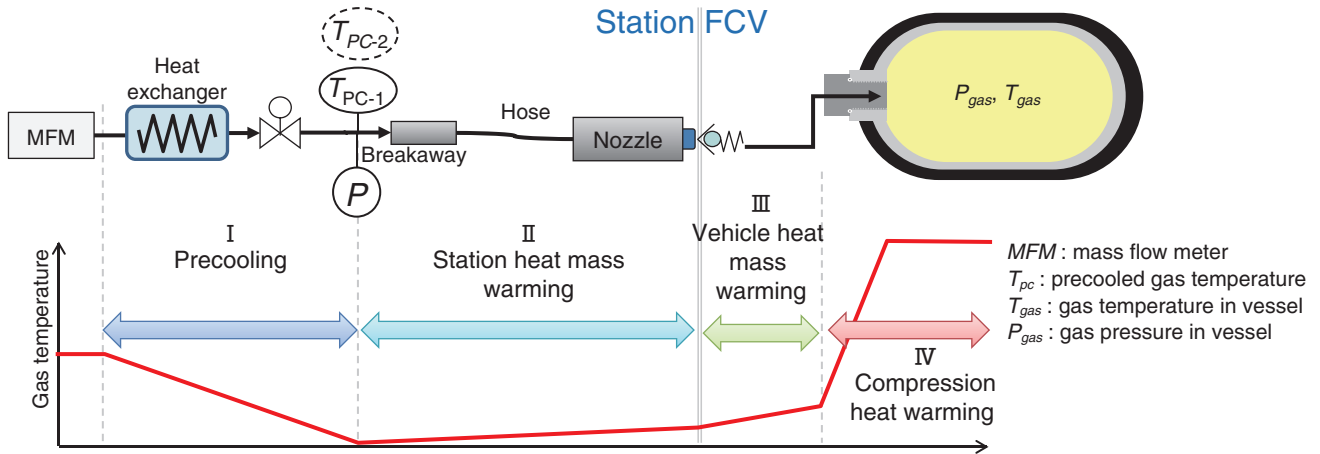


Fig. 1 Overall refueling system

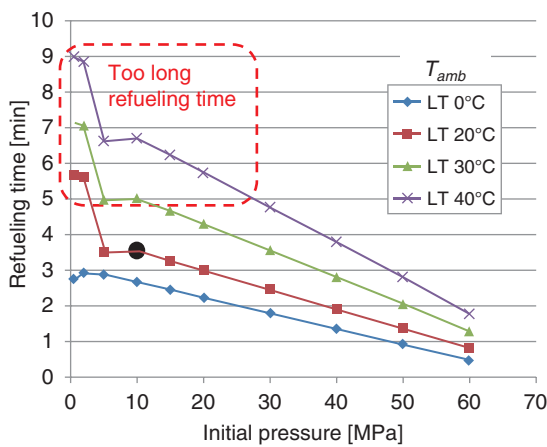


Fig. 2 Effect of ambient temperature

L/T 充填方式の課題は、外気温の高い時である。主要マーケットの一つである米国ロサンゼルス (LA) 地区の最高気温を分析したところ、累積頻度が 98% となるのは 35°C であった。35°C では充填時間が 5 分以上も要してしまうため、お客様の満足は得られないと考えた。このため、Honda では独自に水素充填技術の研究^{(2), (3)}をおこなった。今回開発した新しい充填方式を、MC-Formula 充填方式と名付けた。ここで M はタンク内の質量の Mass から、C はタンクの熱容量の Heat Capacity から、Formula は数式を用いてリアルタイムに昇圧率を計算していることに由来する。本稿では MC-Formula 充填方式について紹介する。

2. 開発のねらい

今回は、以下を目標に新しい充填方式を開発した。

- (1) LA 地区の夏季においても 3 分間で充填が完了する
- (2) 安全上の考え方は、L/T 充填方式から継続し変更しない
- (3) FCV システムは変更しない

(4) 水素ステーションのハードウェアは極力変更しない。ソフトウェア変更は、下位互換性のあるバージョンアップに留める。

L/T 充填方式は、常に一定の昇圧率である。昇圧率は、プレクール水素温度が規格公差の上限 -33°C の場合で設定しているが、実際には公差上限を下回っている (Fig. 3)。実際に温度が -33°C より低くても、充填時間は同じになる。

しかし本来はプレクール水素温度が低ければ、タンク内の温度が下がる分、より速く充填することができる (Fig. 4)。

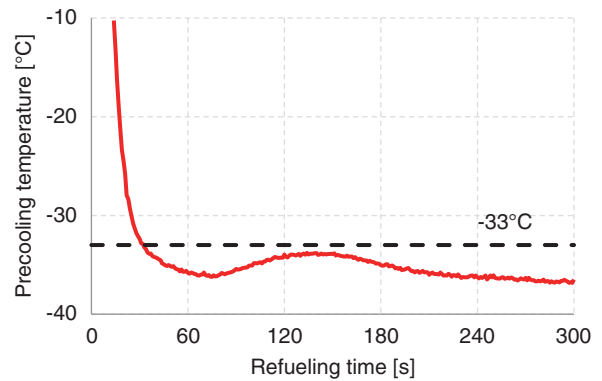


Fig. 3 Example of precooling temperature

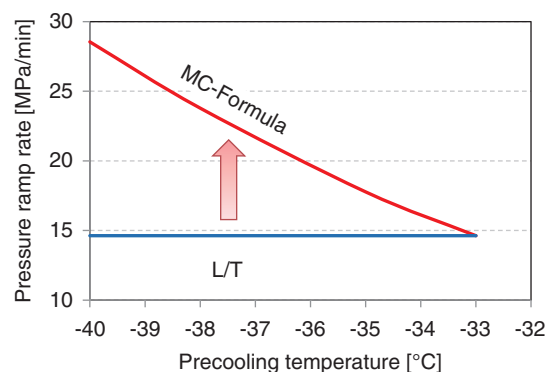


Fig. 4 Effect of precooling temperature

実際のプレクール水素温度に応じて、昇圧率をリアルタイムに決めることができれば、プレクール水素温度が同じでも充填を早くできると考えた。

3. システムの構築

制御ソフトでは、実測したプレクール水素温度からリアルタイムに昇圧率を計算する手法を作成した。

3.1. プレクール水素温度の質量平均処理

Fig. 1 中のプレクール水素温度センサ値 (T_{PC}) をもとに昇圧率を決める。式 (1) では質量流量センサの値 m を用いて、プレクール水素温度を質量平均処理した。ここで i は制御タイムステップである。

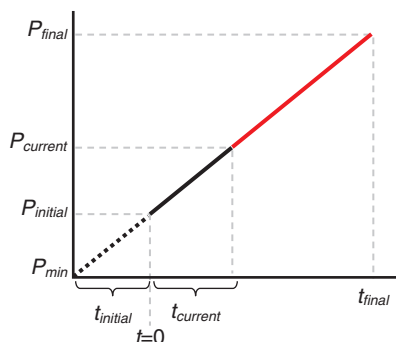
$$MATC(i) = \frac{\sum_1^i [(m(i) - m(i-1)) \times 0.5(T_{PC(i)} + T_{PC(i-1)})]}{\sum_1^i (m(i) - m(i-1))} \quad (1)$$

3.2. 充填時間パラメータの導入

プレクール水素温度のフィードバック制御追加のため、充填時間 t_{final} をパラメータにした (Fig. 5)。

これは、規定の初期圧力 (P_{min} 0.5 または 5 MPa) から充填を始めて、規定の終了圧力 (83.5 MPa) で終了するまでの充填時間である。たとえば車両タンクの残圧が $P_{initial}$ から充填を始める場合、 P_{min} からスタートした充填の途中から始まるとみなす。車両の残圧: $P_{initial}$ が P_{min} より高いと、タンク内の発熱量が減る。よって一番発熱量が多い P_{min} のケースだけを考慮すればよい。

P_{min} を二つ用意したのは、実用的な充填時間を短縮するためである。 $P_{initial}$ が 5 MPa 以下となるのは、ガス欠直前の稀なケースである。このとき圧縮比が増えて発熱量が増



t_{final} : time required to refuel from P_{min} to P_{final}

$t_{current}$: time measured since refueling began

$t_{initial}$: imaginal time before refueling began

P_{final} : maximum allowed dispenser pressure

$P_{current}$: current dispenser pressure

$P_{initial}$: initial pressure when refueling began

P_{min} : minimum allowed starting pressure

Fig. 5 Pressure ramp rate control methodology

すため、充填時間がとても長くなる。これを前提にすると、一部の稀なケースのために、他の一般的なケースまで充填時間が長くなる。よって 5 MPa 以下のケースは、制御上別扱いにした。

3.3. プレクール水素温度に応じた昇圧率の算出

L/T 充填方式では外気温に応じた固定値であった昇圧率を、MC-Formula 充填方式では変動させて充填する。

Fig. 5 において、実際の充填は $P_{initial}$ から始まるので、ここが実時間での $t=0$ になる。ここで P_{min} から $P_{initial}$ までの時間 $t_{initial}$ は、実在しない仮想の充填時間である。 $t_{initial}$ は圧力の比例配分から、式 (2) で求められる。

$$t_{initial} = \left(\frac{P_{initial} - P_{min}}{P_{final} - P_{min}} \right) \times t_{final} \quad (2)$$

t_{final} は、仮想時間 $t_{initial}$ も含めた値である。これを外気温別に加えて、プレクール水素温度別に計算しておく。条件は、タンク内水素温度が上限の 85℃ になる t_{final} である。この t_{final} より早く充填すると、オーバヒートする。よって t_{final} が最も短い充填時間になる。配管やタンク内の複雑な伝熱現象を模擬するこの t_{final} 計算を、プレクール水素温度 6 パターン × 外気温 15 パターン = 90 パターン、シミュレーションによってあらかじめ計算した。ここでシミュレーションにおける境界条件やタンク等は、従来の L/T 充填方式と同じものを用いた。

ある外気温のとき、プレクール水素温度と t_{final} の関係を連続化するため 3 次式で近似した。

$$t_{initial}(T_{amb}) = a(T_{amb}) \times MATC^3 + b(T_{amb}) \times MATC^2 + c(T_{amb}) \times MATC + d(T_{amb}) \quad (3)$$

係数 a, b, c, d は、外気温別に 15 組できる。これを表にしたものを、MC-Formula 充填方式ではマップと呼んでいる。このマップは、初期圧 2 パターン × タンク容量 4 パターンで、八つのマップがあり水素ステーションの制御装置に記憶させている。

具体的には、タンク容量と初期圧でマップを選択し、次に外気温で係数 a, b, c, d を決める。中間の気温では線形補間する。そして実測した質量平均プレクール水素温度 $MATC$ を代入すると、 t_{final} が算出できる。

次に、 t_{final} から昇圧率 Ramp Rate (RR) を算出する。

Fig. 5 から、実現在の時刻 $t_{current}$ において充填終了までに必要な圧力差は、 $P_{final} - P_{current}$ である。これに要する時間は、式 (2) を用いて式 (4) になる。

$$t_{final} - t_{initial} - t_{current} = t_{final} - \left(\frac{P_{initial} - P_{min}}{P_{final} - P_{min}} \right) \times t_{final} - t_{current} \\ = \left(\frac{P_{final} - P_{initial}}{P_{final} - P_{min}} \right) \times t_{final} - t_{current} \quad (4)$$

よって $t_{current}$ における充填終了までの昇圧率は、圧力差と時間の比になるので式 (5) で表せる。

$$RR = \frac{P_{final} - P_{current}}{t_{final} \left(\frac{P_{final} - P_{initial}}{P_{final} - P_{min}} \right) - t_{current}} \quad (5)$$

RR が与えられた時、次の制御ステップ (i) で目標にすべき圧力は、式 (6) で与えられる。

$$P_{(i+1)} = P_{(i)} + RR_{(i)} \times (t_{(i+1)} - t_{(i)}) \quad (6)$$

目標圧力になるように、水素ステーションの流量調整をおこなう制御は、L/T 充填方式と全く同じである。これらによって、オーバーヒートせずに実際のプレクール水素温度を充填時間に反映できるようになった。

3.4. 終了圧の設定

ガソリンは油面の高さだけで満タンを検出できる。水素の圧力は、温度によって変化するため、満タンの指標にできない。このため満タンは密度で定義される。温度 15℃ で 70 MPa における水素の密度 40.2 kg/m³ を、充填率 (State Of Charge: SOC) が 100% と、SAE J2601⁽⁴⁾ では定義している。

しかし水素の密度は、直接測定できないため、圧力と温度から算出する必要がある。そこで SAE J2799⁽⁵⁾ では、車のタンク内の温度情報を、赤外線通信でステーションに送る通信充填システム (IR communication system) を制定した。これにより水素の密度をリアルタイムに算出して、高い精度での満タン判定が可能になった。

充填の終了方法は、L/T 充填方式と基本的には同様である。車両からの赤外線通信により、タンク内の温度を受け取り、水素密度を計算して充填を止める。

制御の全体像を、Fig. 6 に示す。

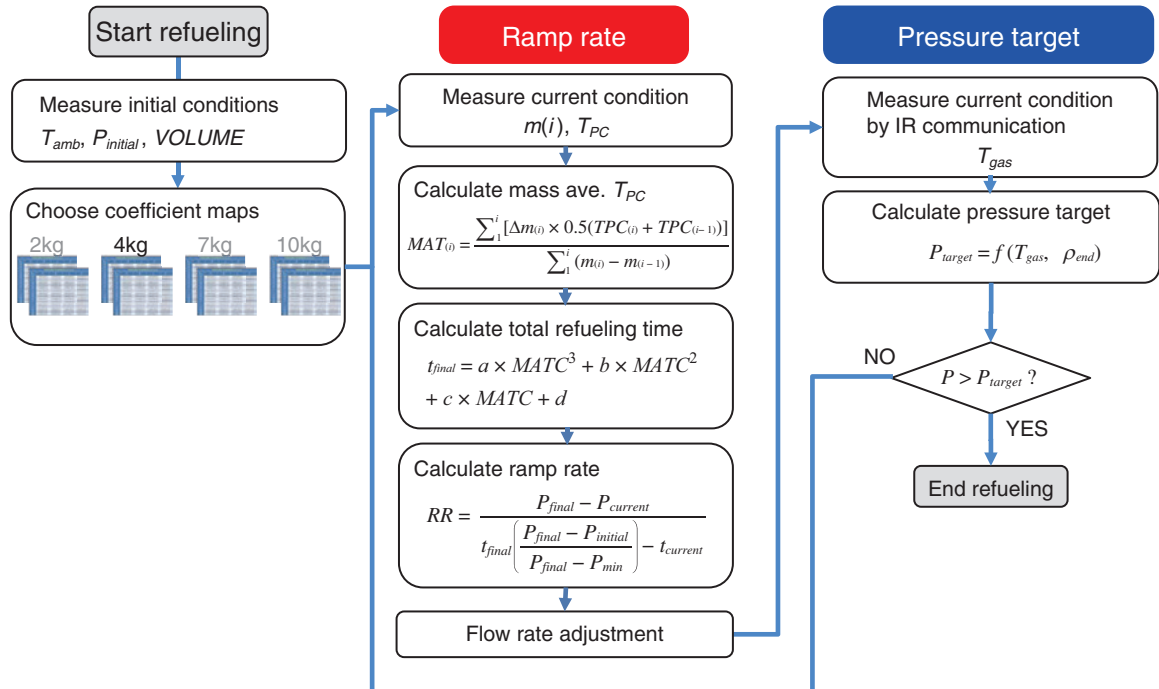


Fig. 6 MC-Formula refueling control structure

3.5. ハードウェアの構成

3.5.1. プレクール水素温度センサの追加

L/T 充填方式からの変化点は、Fig. 1 のプレクール水素温度センサ T_{PC-2} の追加だけである。 T_{PC-1} と T_{PC-2} は、同じ箇所の温度を測っており、相互に値の比較をおこなう。どちらかに異常が生じた時、両者の値はかい離し、故障検知が可能になる。なお最大水素流量に変更はないので、水素配管等の変更も不要である。

3.5.2. 制御装置

L/T 充填方式と比較して、MC-Formula 充填方式の計算量は増えている。1360 回の浮動小数点計算が、数秒に 1 サイクル程度しかいらないので、一般の設備等の制御でよく用いられる小型コンピュータのプログラムロジックコントローラ (PLC) で、対応可能である。浮動小数点演算に 125μsec/回を要する旧世代の PLC でも、実際に問題なく動いている。

4. 実証試験

米国内で最も普及しているエアプロダクツ社製の商用水素ステーションへ MC-Formula 充填方式を導入し、実際の FCV と単体タンクを用いて、さまざまな条件で充填試験をおこなった。

4.1. 水素ステーション

米国カリフォルニア州トランス市にある、Honda R&D ロサンゼルスセンタの水素ステーションで、テストを実施した。この水素ステーションは、L/T 充填方式と、MC-Formula 充填方式の両方が使用できる (Fig. 7)。

4.2. テストタンクと車両

3種類のタンクシステムを用いた。うち二つは実際のFCVである。General Motors 社と Mercedes-Benz 社のご協力を頂いた。

General Motors 社の Equinox FCV は、三つのタンクを持ち、総容量は 114 リットルである (Fig. 8)。

Mercedes-Benz 社の B-Class F-CELL FCV は、三つのタンクを持ち、総容量は 95 リットルである (Fig. 9)。

温度計測用タンクシステムでは、内容量が 105 リットルのアルミライナタンクを使用した (Fig. 10)。タンク内部の水素温度を測るために、二つの熱電対を挿入した。配管等(管, 弁, その他)の熱容量は, SAE J2601 に記載されている最大の熱容量に設定した。配管での圧力低下も, SAE J2601 の最大値にニードル弁を用いて調整した。



Fig. 7 Hydrogen refueling station at which MC-Formula was applied



Fig. 8 Photo of General Motors Equinox FCV



Fig. 9 Photo of Mercedes-Benz F-CELL FCV

4.3. テスト結果

タンク内水素温度の上限を守りつつ、充填時間を短縮し、SOC は従来の L/T 充填方式と同等という結果が得られた。

4.3.1. 充填時間

外気温の高い日にテストし、気温 30℃ 半ばまでのテストデータが得られた。これを超える気温でのデータは、得られなかった。そこで実際とは異なる気温を、一部マニュアル入力して試験した。なお、実車テストはマニュアル入力なしに実際の気温でおこなった。Fig. 11 に充填時間を示す。データがばらつく原因は、初期圧の違いや、米国独自の法規による充填中のリークチェック等である。

外気温が低い時は、オーバヒートの恐れがなくなり、昇圧率の上限値で律速されるため、両者の差がなくなる。外気温が高くなるにつれて、両者の差が広がる。プレクール水素温度を、温度公差の上限値と想定している L/T 充填方式に対し、実際の水素温度を使用しているので充填時間が 3 割程度短くなった。これにより、LA 地区であれば、おおむね 3 分台で充填可能となった。

4.3.2. タンク内の水素温度

Fig. 12 に、General Motors 社の Equinox FCV の充填終了時におけるタンク内水素温度を示す。昇圧率の上昇により、水素温度は平均で 8℃ ほど上昇したが 70℃ 以下であり、上限値の 85℃ に対して十分に余裕のある結果となった。

これは、三本タンクシステムのため、水素に対してタン



Fig. 10 Photo of single vessel test rig

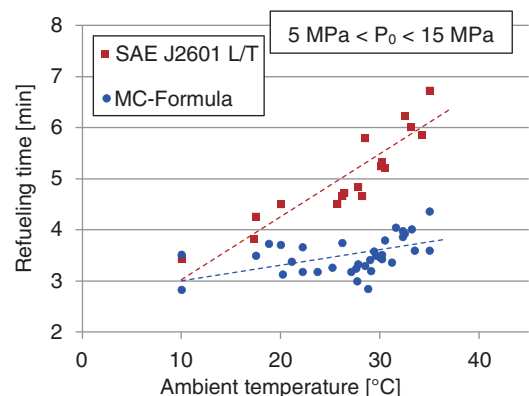


Fig. 11 Refueling time on ambient temperature

ク壁面の割合が大きく、タンク本体のヒートマスにより冷却され水素温度が上がりにくい等の理由が考えられる。

4.3.3. SOC

通信充填時の SOC を Fig. 13 に示す。

このステーションは、SOC が 98% から 100% を終了目標としている。両充填方式ともに、通信充填の温度を用いて密度計算をして、終了制御している。制御手法が同じなので、実際の SOC に差は見られなかった。

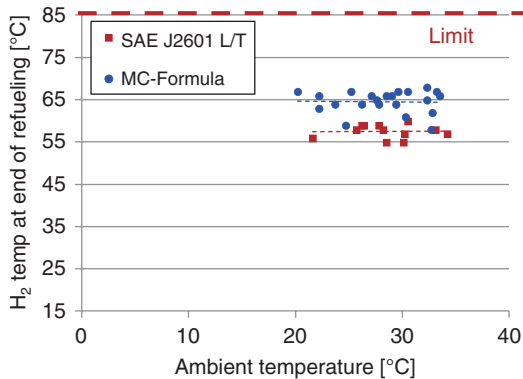


Fig. 12 Ending H₂ temperature in vessel

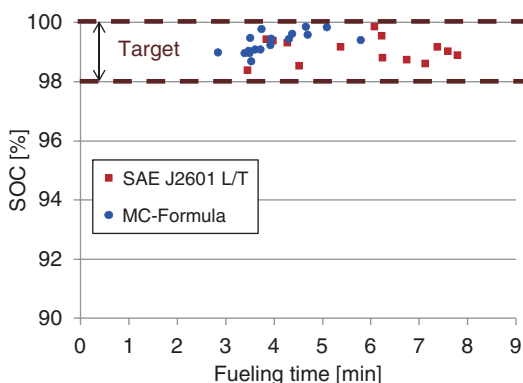


Fig. 13 Ending SOC of communication refueling on test vessel

5. まとめ

FCV の水素充填時間短縮のために、MC-Formula 充填方式を開発した。

- (1) プレクール水素温度に応じた昇圧率のリアルタイム制御を追加した。プレクール水素温度を下げずに、夏場では 3 割以上の充填時間短縮が可能であった。LA 地区なら、年間を通じてほぼ 3 分台で充填できる。
- (2) 昇圧率を決める t_{final} のシミュレーションにおける境界条件やタンク等は、L/T 充填方式と同じものを用いて安全上の考え方を継続した。充填終了方法も同じで、従来の L/T 充填方式と同等の SOC を確保した。
- (3) 車側はハードウェアとソフトウェアともに何も変更しなかった。

- (4) 水素ステーションのハードウェアは、温度センサ追加のみに留めた。水素ステーションのソフトウェアは、計算量が増えたが、旧世代 PLC で動作できた。既存のステーションへも、本方式はインストール可能である。

6. あとがき

MC-Formula 充填方式は、SAE J2601 規格の改定案として、現在審議中である (2015 年 7 月時点)。

参考文献

- (1) ANSI HGV 2-2014: Compressed hydrogen gas vehicle fuel containers (2014)
- (2) Harty, R., Mathison, S.: Improving Hydrogen Tank Refueling Performance Through The Use Of An Advanced Fueling Algorithm - The MC Method, Proceedings of the National Hydrogen Association Conference (2010)
- (3) Mathison, S., Handa, K., Mcguir, T., Brown, T., Goldstein, T., Johnston, M.: Field Validation of the MC Default Fill Hydrogen Fueling Protocol, SAE Technical Paper, 2015-01-1177 (2015)
- (4) SAE J2601: Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles (2014)
- (5) SAE J2799: Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software (2014)

著者



判田 圭



Steve MATHISON