

(技術資料)

水素充填シミュレーションを用いた水素ステーション設計技術

山下和宏*・鈴木文昭・福谷啓太・高島和郎・勝山 拓

Design Technologies for Hydrogen Refueling Station Using Hydrogen Filling Simulation

Kazuhiro YAMASHITA・Fumiaki SUZUKI・Keita FUKUTANI・Kazuo TAKAHATA・Taku KATSUYAMA

要旨

水素ステーションビジネスにおいては、今後の燃料電池自動車（FCV）の普及拡大に合わせて用途に合った充填能力と設備投資額のバランスを取った設備仕様の設計が望まれている。㈱神鋼エンジニアリング&メンテナンスプラント事業部が保有する水素充填非定常シミュレーション技術を活用することによって、充填設備の主要機器である圧縮機の能力と蓄圧器の容量の組み合わせを用途に合わせて最適化し、水素ステーションの建設コストを削減できる。本稿では、一般的なFCV向け水素ステーション、設備建設コストの削減をねらった廉価版水素ステーション、およびFCバス向け水素ステーションの3つのケースに関する水素充填シミュレーション検討事例を紹介する。シミュレーション検討の結果、それぞれの用途の水素ステーションにおける充填設備の基本仕様および充填能力を把握できる有用なデータが得られた。

Abstract

In the hydrogen refueling station business, it is desired to design equipment specifications balancing the filling capacity and capital investment in accordance with applications, in line with the future dissemination and expansion of fuel cell vehicles (FCVs). Shinko Engineering & Maintenance Co., Ltd. has developed a technology for dynamically simulating hydrogen filling. The utilization of this technology allows optimizing the capacity combination of the compressor and accumulator, the major apparatuses of filling equipment, in accordance with the application, and thus reduces the construction cost of a hydrogen refueling station. This paper introduces simulation studies done on three cases of hydrogen filling; namely, a general hydrogen refueling station for FCV, a low-cost hydrogen refueling station aimed at reducing equipment construction costs, and a hydrogen refueling station for FC buses. These studies have led to data that is useful for understanding the basic specifications and the filling capacity of the filling equipment at hydrogen stations for each application.

キーワード

水素ステーション、水素充填設備、非定常シミュレーション

まえがき＝㈱神鋼エンジニアリング&メンテナンス（以下、神鋼EN&Mという）プラント事業部は、プラント設備の基本設計・詳細設計・製作・調達・建設・試運転・メンテナンスの総合エンジニアリングを提供している。化学およびエネルギープラントエンジニアリングを基本に、石油化学・一般化学、樹脂・合成ゴム、ファインケミカル、空気分離・ガス精製、LNG関連プラントなどの幅広い分野で実績を有している。とくに、水素ステーション分野においては、2012年度に水素供給・利用技術研究組合（HySUT）の商用モデルステーションの計画段階において、当社が保有する水素充填（じゅうてん）非定常シミュレーション技術を活用いただいたことが契機となり、これまでに11箇所の水素ステーションの設計施工実績を有している。

水素ステーションは、燃料電池車（Fuel Cell Vehicle、以下FCVという）に対して、その燃料となる水素を供給する燃料供給設備であり、2019年9月末時点で109箇所が開所している。今後のさらなる水素ステーションの整備拡大に向けて設備仕様の見直しや整備費の削減が急

がれる。また一般的なFCV以外にも、FCバスやFCフォークリフトに対応した水素ステーションや、再生可能エネルギーを利用した水素ステーションの整備促進が重要視されている。

本稿では、一般的なFCV向け水素ステーションを含む3つのタイプの水素ステーションの充填設備仕様、および車両への水素充填能力に関する水素充填シミュレーション検討事例を紹介する。

1. 水素ステーション

1.1 水素ステーションの設置計画

2019年3月、産官学の有識者から成る水素・燃料電池戦略協議会により『水素・燃料電池戦略ロードマップ』¹⁾が策定された。本ロードマップでは水素社会実現に向けた方針が示されている。その中では、2018～2021年度にかけては四大都市圏を起点として主要都市および交通の要衝を重点に合計80箇所の水素ステーションを整備することが示されている。また、2022～2025年度は2021年度における整備状況などを踏まえて整備地点

* ㈱神鋼エンジニアリング&メンテナンス プラント事業部 エンジニアリング部

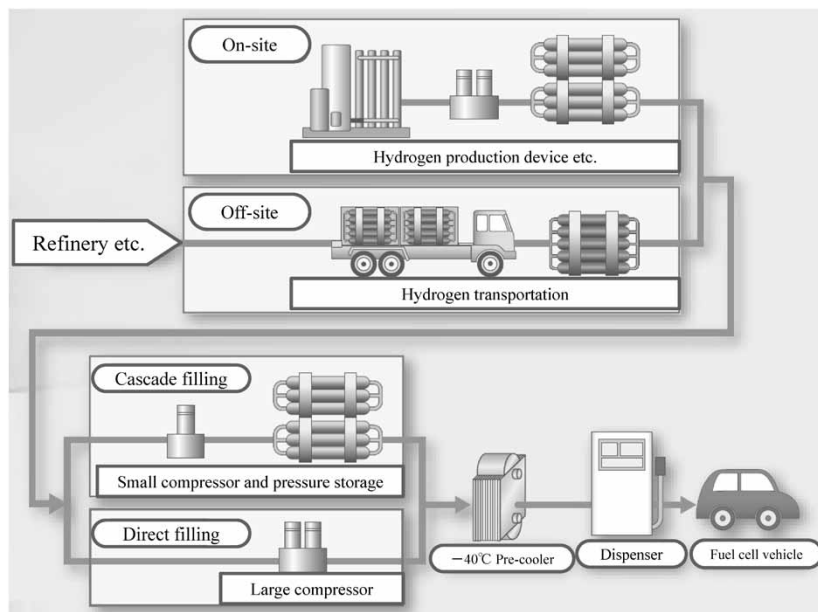


図1 水素ステーションの構成
Fig.1 Configuration of hydrogen refueling station

を検討しつつさらに水素ステーションの整備を進め、2025年度までに320箇所とすることを目指すとされている。また、既設の移動式水素ステーションを水素ステーション未整備地域で活用することや、省スペース・低コストで短工期が期待できるパッケージ型水素ステーションを採用し、効率的に水素ステーションを整備していくことなどがアクションプランに織り込まれている。

1.2 水素ステーションの構成

水素ステーションには、オンサイト型とオフサイト型の2種類が存在する。オンサイト型水素ステーションは敷地内に水素製造装置を有し、天然ガス・液化石油ガスを改質・精製するか、あるいは水を電気分解することにより自前で水素を作り出すことができる水素ステーションである。いっぽう、オフサイト型水素ステーションは、外部の水素製造基地などから数～数十MPaの高圧水素ガスあるいは液体水素を輸送し、それを受け入れる形式の水素ステーションである(図1)。自前で製造した水素あるいは外部から受け入れた水素は、FCVへの水素充填に備えて圧縮機により昇圧され、蓄圧器と称される水素タンクに高圧の状態での貯め置かれる。FCVへの水素充填は、圧縮機の能力と蓄圧器の容量の組み合わせに応じて以下の3つの方式により行われる。

- ①蓄圧器とFCVの燃料タンクとの圧力差を利用した差圧充填方式(Differential Pressure Filling)
- ②圧縮機と蓄圧器を併用しながら充填する圧縮機併用充填方式(Cascade Filling)
- ③圧縮機単独で高圧の水素ガスを充填する直接充填方式(Direct Filling)

神鋼EN&Mプラント事業部では、自社保有する水素充填シミュレーション技術を活用することにより、水素ステーションの充填能力の把握に加えて、主要機器である圧縮機の能力と蓄圧器の容量との組み合わせの最適化検討が可能である。

1.3 水素ステーションの充填技術基準

水素ステーションはFCVへの燃料水素供給設備である。このため、燃料水素1回充填することによる走行単価はガソリンを燃料とするハイブリッド車と同等程度であることが望まれる。日本国内におけるFCV向け定置式水素ステーションの多くは、1時間のうちにFCV5～6台に対して水素充填可能である。さらに、FCV1台に対して5kgの水素を3分程度で充填可能な設備として整備されてきた。設備は高圧ガス保安法の規制を受けるため、常用圧力82MPaを上限として設計される。また、高圧ガス保安法が引用する「圧縮水素充填技術基準(圧縮水素スタンド関係)JPEC-S 0003」(一般財団法人石油エネルギー技術センター)の規定などを順守した設備設計が求められる。本基準は、様々な条件での充填プロセスの検討および充填試験の結果に基づき、FCVへの水素充填に関する取り決めを記載したものである。水素ステーションで水素充填を受けるFCVの充填圧力、供給燃料温度、およびFCVが搭載する燃料タンクの容量の3つの項目の組み合わせごとに、外気温度に応じたFCVへの水素充填スピード(目標昇圧率)や充填終了圧力などが規定されている。燃料水素をマイナス数十℃まで予備冷却したうえでFCVへ充填する、いわゆるプレクール機能を有する水素ステーションについても、供給燃料温度を-40℃区分、-30℃区分、-20℃区分の3つに分類している。さらに、温度区分ごとに目標昇圧率や充填終了圧力などを規定している。日本国内においては-40℃区分での設備設計が基本とされており、水素充填時のFCV燃料タンクの温度上昇がマイルドであるため燃料水素の急速充填が可能となっている。

2. 水素充填シミュレーション

水素ステーションにおけるFCV充填性能は、圧縮機と蓄圧器の組み合わせによってほぼ決まってしまう。このため、所定の時間内に所定の量をFCVに充填できる

ことをシミュレーションを用いて事前に確認しておく必要がある。また、充填時の圧力、温度、および流量が、JPEC-S 0003で規定される圧力範囲および温度範囲(例えば-40℃区分の場合、-33℃~-40℃)にあることのほか、上限流量(3.6 kg/min.)を超えないことを把握しておくことが重要である。さらに、水素充填時にFCVの燃料タンクが断熱圧縮により昇温するため、タンク温度が設計温度を超えないことを把握しておくことも重要である。

2.1 シミュレータおよび高圧水素物性データ

シミュレータはSchneider Electric社製の汎用(はんよう)非定常シミュレータDYNASIM™を用いた。高圧水素物性データはシミュレータ保有の物性データでは誤差が大きい。このためシミュレータにおける水素物性データの使用にあたっては、NIST(National Institute of Standards and Technology,アメリカ国立標準技術研究所)およびAIST(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,国立研究開発法人産業技術総合研究所)のデータを補正する自社独自の物性式を組み込み、誤差数%以内の精度で表現できるように工夫した。

2.2 水素充填シミュレーションモデル

シミュレーションモデルには機器、配管、計装品などシミュレーションに影響を及ぼす全ての設備を組み込み、各部の圧力損失や設備の内容積、熱容量、放熱、入熱を考慮した。なお、実際の水素ステーションでの充填試験結果をシミュレーションモデルにて再現した結果からは、設備仕様を検討するのに十分な精度を有していることは検証済みである^{2), 3)}。

2.3 水素充填シミュレーション活用事例

2.3.1 FCV向け水素ステーションの仕様検討例

本項では、日本国内で一般的に求められると思われる定置式水素ステーションの要求仕様を満たすFCV向け水素ステーションの設備仕様に関する検討事例を紹介する。シミュレーション条件を表1に示す。

蓄圧器を300 L×3本(3バンク)構成とすることに

より、差圧充填方式によって充填率90%以上・充填時間160秒程度を達成できる結果が得られた(図2)。差圧充填方式は、圧縮機が予期せぬトラブルなどで運転困難な状態に陥った場合でも、圧縮機を使用しないで蓄圧器の水素残圧のみを用いてFCVへ水素を充填できる特長を持つ。

そのいっぽうで、充填終盤に蓄圧器とFCV燃料タンクが均圧化して所定の充填流量が確保されず、充填時間が長時間化したり目標とする充填率・充填量に到達しない場合がある。そのため実設備は、充填終盤における充填時間の短縮や所定の充填率・充填量を確保することを目的に、圧縮機併用充填方式にも対応可能な設備として設計しておくのが賢明である。

2.3.2 廉価版水素ステーションの仕様検討例

さらなる水素ステーションの整備拡大にあたっては建設費のコストダウンが急務であり、各要素技術についてコスト削減目標の達成が求められている。本項では、一般的なFCV向け水素ステーションの要求仕様を一部緩和して充填設備の低コスト化を目指した廉価版水素ステーションの設備仕様の検討事例を紹介する。このときのシミュレーション条件を表2に示す。

廉価版水素ステーションは、充填時間3分程度という急速充填の制約が必達条件ではないと考えられる地域へ

表1 FCV向け差圧充填シミュレーション条件

Table 1 Condition of differential pressure filling simulation for FCV

Initial condition / Boundary condition	Simulation specification
Fueling protocol	JPEC-S 0003
Dispenser pressure class	70 MPa
Pre-cool temperature category	-40℃
Capacity for average hydrogen supply	300 Nm ³ /h
Filling method	Differential pressure filling
Ambient temperature	20℃
Target average pressure ramp rate	28.5 MPa/min.
Volume of FCV tank	122.4 L
Initial pressure of FCV tank	10 MPa
Initial temperature of FCV tank	20℃
Final state of charge or fueling amount	Final state of charge : 90% (more)
Communication / Non-communication	Communication

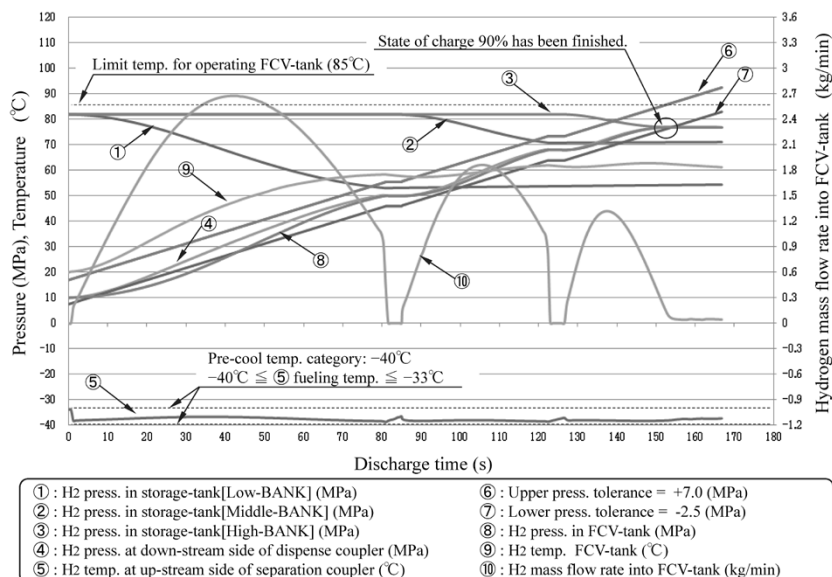


図2 FCV向け差圧充填シミュレーション結果(圧力、温度、流速の傾向)

Fig.2 Results of differential pressure filling simulation for FCV (trend chart of pressure, temperature, and flow rate)

表2 FCV向け併用充填シミュレーション条件
Table 2 Condition of cascade filling simulation for FCV

Initial condition / Boundary condition	Simulation specification
Fueling protocol	JPEC-S 0003
Pressure class	70 MPa
Pre-cool temperature category	-20°C
Capacity for average hydrogen supply	300 Nm ³ /h
Filling method	Cascade filling
Ambient temperature	20°C
Target average pressure ramp rate	JPEC-S 0003
Volume of FCV tank	122.4 L
Initial pressure of FCV tank	5 MPa
Initial temperature of FCV tank	20°C
Final state of charge or fueling amount	Final state of charge : 90% (more)
Communication / Non-communication	Communication

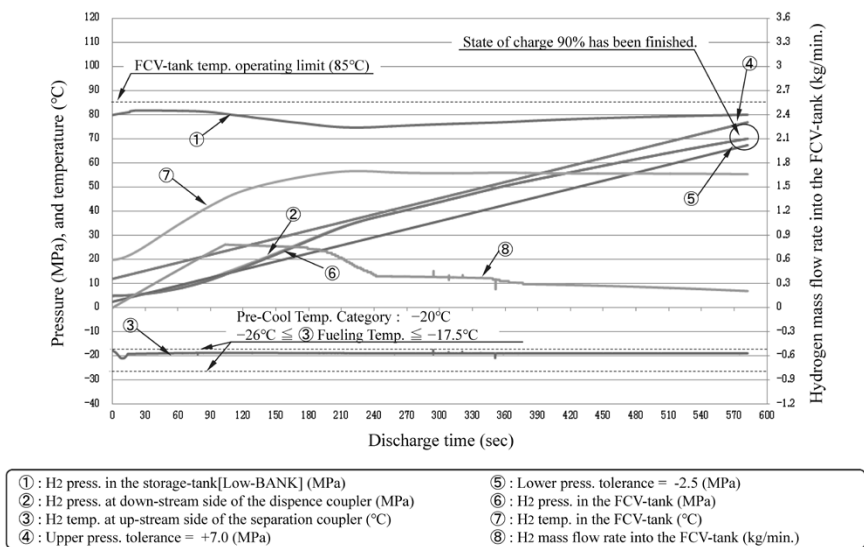


図3 FCV向け併用充填シミュレーション結果（圧力、温度、流速の傾向）
Fig.3 Results of cascade filling simulation for FCV (trend chart of pressure, temperature, and flow rate)

の整備を見据えたものである。そこで検討の前提として、FCV1台に対する充填時間は10分程度が許容されるものと考えた。また、プレクール設備の設計条件の緩和および低コスト化を図るため、FCVの供給燃料温度区分は-20°Cを採用した。水素ステーションの利便性が極端に低下してしまうことを避けるべく、FCVへの水素充填は圧縮機併用充填方式により行うこととした。また、充填1回あたりの燃料水素の充填量は一般的な水素ステーションにおける充填量（5 kg）と同等程度を確保できる条件として設定した。

圧縮機を340 Nm³/h × 82 MPa、蓄圧器を300 L × 1本構成として組み合わせることにより、圧縮機併用充填方式にて充填率90%以上・充填時間580秒程度を達成できる結果が得られた（図3）。廉価版水素ステーションは、前項の一般的なFCV向け水素ステーションと比較して蓄圧器本体（300 L × 2本分）および付属する配管・弁類などを不要とすることができ、建設・メンテナンス費を低く抑えられる。いっぽうで、供給燃料温度-20°C区分で設計する水素ステーションは、-40°C区分や-30°C区分での設計と比較して充填開始時に設定される目

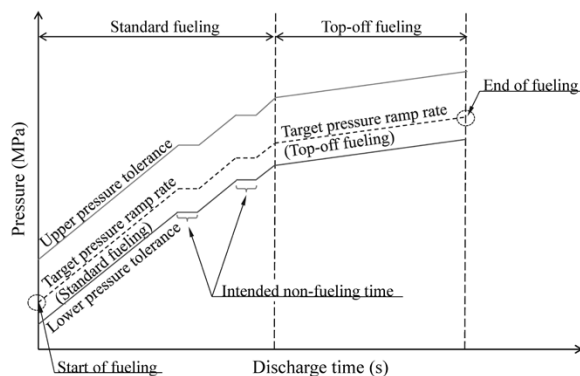


図4 トップオフ充填の図解
Fig.4 Illustration of top-off fueling procedure

標昇圧率が低い。このため、夏場などの外気温度が高い場合は目標昇圧率がさらに低下し、充填時間が10分を超えて長時間化することになる。また、JPEC-S 0003が規定するトップオフ充填⁴⁾およびフォールバック充填⁴⁾へ移行したときにも、充填時間が長くなったり、あるいは充填が中断するといった問題が発生する。

トップオフ充填は、充填の途中で初期目標昇圧率よりも低い目標昇圧率を新たに設定し直して継続して実施される充填をいう（図4）。充填前のFCV燃料タンクの初期圧力が極めて低いなどの一定条件を満たし、かつ、車両通信充填^{注1)}を実行中の場合に、FCV燃料タンクの設

脚注) 車両と水素ステーション間で車載容器容量信号や燃料温度信号、充填終了指示信号などを赤外線によって通信することにより、より多くの水素を安全に充填することをいう。

計温度の範囲内で充填量を増大させることができる。現実には、数百グラム程度の充填量の増大に対し充填時間が数分～十数分長くなってしまふ。

フォールバック充填とは、車両通信充填を実行中に供給燃料温度が上昇して充填開始時に設定された供給燃料温度区分を超えたとき、隣接する温度区分に応じて新たな充填目標圧力および新たな目標昇圧率を設定し直して継続して実施される充填をいう（図5）。つまり、車両通信充填を実行中であれば充填中1回に限りフォールバック充填へ移行でき、充填を継続させられる。しかし、供給燃料温度-20℃区分で車両通信充填を実行中に水素温度が上昇したときは、これより高温側の温度区分が存在しないためフォールバックによる充填継続措置が取れず充填が中断してしまう。

本項で紹介した廉価版水素ステーションは、建設・メンテナンス費の低減に期待できる。しかしそのいっぽうで、日本国内において主流とされている供給燃料温度-40℃区分で設計された水素ステーションと比較すると運用面での制約が多く、利便性も劣る。このため、あらかじめFCV普及拡大に合わせた拡張性を考慮して設備設計しておくことが望ましい。

2.3.3 FCバス向け水素ステーションの仕様検討例

モビリティ分野における水素利活用は、FCVと水素

ステーションの普及を中心に展開されてきた。日本国内においては、2017年からFCバスの運行が開始されており、今後はFCバスに対応した水素ステーションの整備拡大に向けた取り組みも加速していくと予想される。本項では、既存の水素ステーションに数多く採用された340 Nm³/h級の圧縮機を活用したFCバス向け水素ステーションの設備仕様に関する検討事例を紹介する。シミュレーション条件は表3に示すとおりである。

水素ステーションの基本仕様である水素供給能力は、FCVやFCバスなどに対する時間あたりの平均的な水素充填能力を意味しており、これは圧縮機的能力と直接的に関係している。いっぽう、ピーク時の水素充填能力は、水素ステーションがある限定された1時間内に発揮し得る水素充填能力のポテンシャルを指す。これは単に圧縮機的能力だけでなく、圧縮機と組み合わせる蓄圧器の容量やFCVへの水素充填方式とも関係している。本事例検討においては、水素充填方式は圧縮機併用充填方式を採用した。通常時およびピーク時の水素充填能力をチェックするため、FCバス3台に対して合計45 kgの水素を1時間で充填可能であることをシミュレーションにより確認し、圧縮機的能力と蓄圧器の容量との組み合わせを検討した。

水素充填シミュレーション結果を図6に示す。圧縮

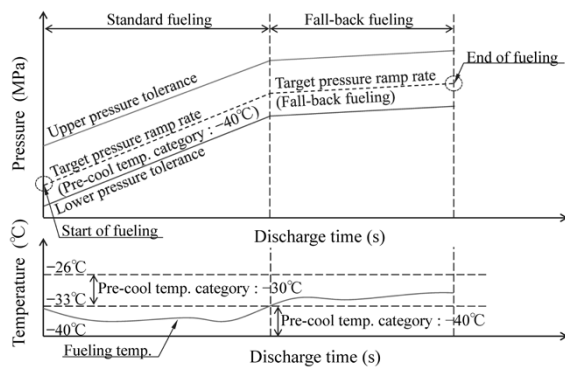


図5 フォールバック充填の図解
Fig.5 Illustration of fall-back fueling procedure

表3 FCバス向け併用充填シミュレーション条件
Table 3 Condition of cascade filling simulation for FCBus

Initial condition / Boundary condition	Simulation specification
Fueling protocol	JPEC-S 0003
Pressure class	70 MPa
Pre-cool temperature category	-40℃
Capacity for average hydrogen supply	300 Nm ³ /h
Filling method	Cascade filling
Ambient temperature	30℃
Target average pressure ramp rate	JPEC-S 0003
Volume of FCV tank	600.0 L
Initial pressure of FCV tank	10 MPa
Initial temperature of FCV tank	30℃
Final state of charge or fueling amount	Final fueling amount : 15 kg (more)
Communication / Non-communication	Communication
Max. capacity for hydrogen filling	500 Nm ³ /h

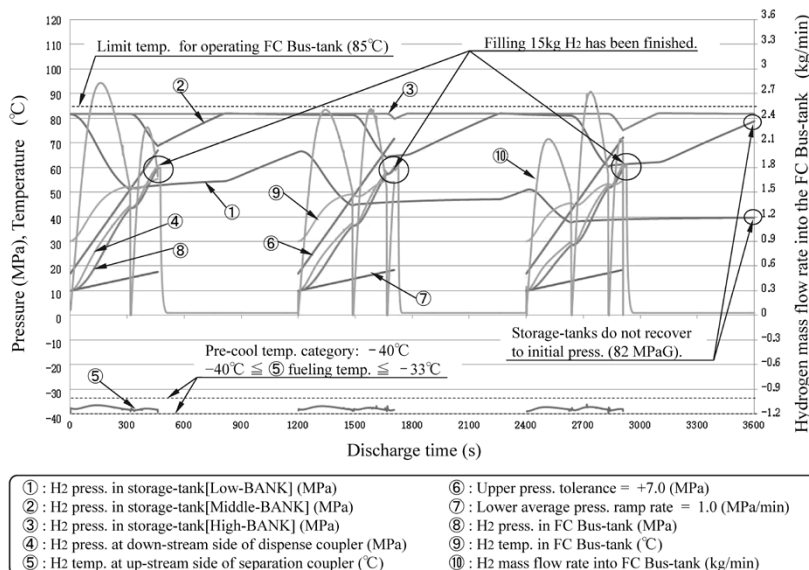


図6 FCバス向け圧縮機併用充填シミュレーション例（圧力、温度、流速の傾向）

Fig.6 Example of cascade filling simulation results for fuel cell bus in peak period (trend chart of pressure, temperature, and flow rate)

機を $340 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 82 \text{ MPaG}$ 、蓄圧器を $300 \text{ L} \times 9$ 本（3バンク）構成として組み合わせることにより、圧縮機併用充填方式にてFCバス1台に対して水素充填量 15 kg ・充填時間10分以内を達成できた。さらに、ピーク時にはFCバス3台に対して水素充填量合計 45 kg ・充填時間1時間以内を達成できる結果が得られた。

この結果におけるピーク時対応の1時間経過時点に着目すると、蓄圧器の圧力が最初の圧力の状態まで回復していないことが分かる。この結果は、ピーク時対応の直後は水素ステーションが所定の充填性能を発揮できずにFCバスへの水素充填量が減少すること、あるいは充填時間が長時間化してしまうことを示唆している。実際の設備設計においては、FCバスの充填頻度や運用の考え方などについても十分検討のうえ配慮することが必要と考える。

本項で示したように、神鋼EN&Mプラント事業部が保有する水素充填非定常シミュレーション技術を活用することによって、水素ステーションにおける圧縮機と蓄圧器の組み合わせを用途に合わせて最適化可能である。さらに、FCバス向け水素ステーションにおけるピーク時の水素充填能力チェックも可能である。

むすび = 水素充填シミュレーションは、水素ステーションが所定の充填性能を有しているかどうかを確認するための手段として有用である。本稿で紹介した水素充填シミュレーション活用事例は一部汎用的なデータを使用しているものの、設備規模・能力を把握するのに役立つデータといえる。水素ステーションの基本計画段階において充填設備の基本仕様や充填能力を把握できることの意味は大きい。このため、これまでに他社から数十件を超える水素充填シミュレーションを受注している。今後も水素充填シミュレーションの活用を通して水素ステーション設備提案に貢献し、水素社会実現に向けた取り組みを継続していく。

参 考 文 献

- 1) 水素・燃料電池戦略協議会. 水素・燃料電池戦略ロードマップ. 平成31年3月12日改訂.
- 2) 三浦真一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2014, Vol.64, No.1, p.52-53.
- 3) 山下和宏ほか. 第20回燃料電池シンポジウム講演予稿集. p.113-116.
- 4) 高圧ガス保安協会. 圧縮水素充填技術基準の検討報告書. p.15.



山下和宏

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 エンジニアリング部



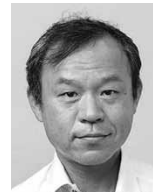
鈴木文昭

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 エンジニアリング部



福谷啓太

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 エンジニアリング部



高島和郎

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 プロジェクト部



勝山 拓

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 プロジェクト部