

差圧式高压水電解型ソーラー水素ステーション (SHS2) の実証試験

Verification Test of High Differential Pressure Water Electrolysis-type Solar Hydrogen Station (SHS2)

長岡 久史*
Hisashi NAGAOKA
山下 郁也*
Ikuya YAMASHITA

吉田 喜祐*
Nobuyoshi YOSHIDA
岡部 昌規*
Masanori OKABE

David CUN**

要 旨

一般家庭に設置することを想定した差圧式高压水電解型ソーラー水素ステーションを開発し、燃料電池電気自動車が必要とする水素を継続的に製造し充填する実証試験を約1年間おこなった。このソーラー水素ステーションでは、ユニット内部に搭載した差圧式高压水電解スタックによって、水の電気分解で製造した水素を35 MPaの圧力まで昇圧し、燃料電池電気自動車に供給することが可能である。この技術により圧縮のための機械式コンプレッサが不要になり、低騒音、高効率、小型化を実現することができた。

実証試験の結果、1年間で製造した水素量は約120 kgであり、製造に必要な電力量は太陽電池による発電量で全て賄えることがわかった。システム初期効率は55.5%であり、水素1 Nm³あたり6.38 kWhの電力消費であった。今後スタックおよびデバイスの効率向上等をおこなうことで、システム効率を約70%まで向上できる見通しがある。また実証試験で得られたデータを利用した運用シミュレーションにより、貯蔵タンクを併設することで多くのユーザーの利便性が向上することがわかった。

ABSTRACT

A high differential pressure water electrolysis-type solar hydrogen station (SHS2) was developed, envisioned for household use, and verification tests were conducted for approximately one year with production of hydrogen used by fuel cell electric vehicles. This SHS2 unit is equipped with a high differential pressure water electrolysis stack that raises the pressure of the hydrogen produced by water electrolysis to 35 MPa, enabling supply of the hydrogen to fuel cell electric vehicles. This technology has obviated the need for a mechanical compressor to compress the hydrogen, and has achieved low noise, high efficiency, and compactness.

As a result of the verification tests, it was found that the amount of hydrogen produced in one year was approximately 120 kg, and the amount of electric power needed for production was fully supplied by solar cells. The initial system efficiency was 55.5%, and 6.38 kWh of electric power was consumed per 1 Nm³ of hydrogen. Increased efficiency and other such work on the stack and device is anticipated to allow system efficiency to be raised to as much as approximately 70%. Operation simulation using data obtained in verification tests showed that the convenience for most users could be increased by installing a storage tank together with the SHS2.

1. 緒言

Honda はこれまで化石燃料の代替、排出ガスの削減、地球温暖化への影響の低減という観点から、水素を用いた燃料電池を次世代の究極的なパワープラントと捉え、燃料電池電気自動車の開発に取り組んできた。

この燃料電池電気自動車の燃料は圧縮された水素が主流

* 四輪 R&D センター

** HONDA R&D AMERICAS, INC.

であるが、この圧縮水素を供給するインフラは、いまだ十分とは言えない状況である。このため Honda では、車両開発と並行して燃料電池電気自動車に供給する水素の製造方法に関する研究にも取り組んでいる。

これまで、2001年に常圧水電解型ソーラー水素ステーション (Solar Hydrogen Station 1: SHS1) を米国カリフォルニア州ロサンゼルスに Honda R&D ロサンゼルスセンタに設

置し、燃料電池電気自動車が必要とする水素を継続的に製造し充填する実証試験を実施した。2003 年にはシステムの高効率化をおこなった後、4 年以上の実証試験をおこなった⁽¹⁾。2010 年 1 月には SHS1 を、差圧式高圧水電解技術を利用したソーラー水素ステーション SHS2 へと更新⁽²⁾⁻⁽⁴⁾し、約 1 年間の実証試験をおこなってきた。長期に渡って高圧水電解技術のステーションを試験した例はなく、実証試験を通して社会への受容性の確認を目的としている。

本稿では、SHS2 のシステム構成と動作の詳細を述べた後、1 年間の実証試験結果と初期のシステム効率を示し、今後の見通しについて述べる。また、実証試験結果を利用したシミュレーションによって、SHS2 の有無および貯蔵タンクの有無がユーザの利便性に与える効果を検証した。

2. SHS2 の詳細説明

2.1. システムコンセプト

SHS2 システムの全体像を Fig. 1 に示す。本システムは、機械式コンプレッサなしで燃料電池電気自動車用の水素規格を満たす圧縮水素を製造する能力を有しており、太陽電池と組み合わせることによって水素製造過程において全く CO₂ を出さないことが可能になる。

システムの仕様を Table 1 に示す。SHS2 の仕様は、将来一般家庭へ設置することを想定した仕様としている。日々の通勤での使用を想定し、燃料電池電気自動車で 1 日 40 mile 走行可能な量の水素を夜間に製造し充填するというコンセプトで製造水素流量等の仕様を設定している。差圧式高圧水電解スタックの吐出圧力は、車載タンクの充填最大圧力と同じ 35 MPa としている。

併設している出力 6 kW の株式会社ホンダソルテック製 CIGS 薄膜太陽電池⁽⁵⁾とは、電力系統を介して接続する形となっている。これは、太陽電池で昼間発電した電力は電力系統で利用し、車両帰宅後の夜間に電力系統からの電力で水素製造をおこなうことによって、電力系統全体で CO₂



Fig. 1 External view of Solar Hydrogen Station (SHS2)

Table 1 Specifications of SHS2

Hydrogen production	Flow rate	0.7 Nm ³ /hr (0.5 kg/8 hr)
	Filling pressure	35 MPa (max.) (approx. 5000 psi)
	Purity	> 99.99%
Component	Photovoltaic modules	CIGS thin-film solar cell 6 kW system (approx. 53 m ²)
	Electrolysis unit	High differential pressure electrolyzer
Utility	Electricity	240 VAC
	Water	Tap water
Unit volume		Approx. 0.33 m ³ (approx. 12 cf)

を削減するというコンセプトとしているためである。

また、ユーザの利便性向上やシステム稼働率向上の検討をおこなうために、当初の計画通り 2010 年 9 月に水素貯蔵用タンクを設置した。

2.2. システム構成

2.2.1. 電解ユニット

電解ユニットは、差圧式高圧水電解スタックで水を電気分解し水素を発生させると同時に昇圧し、精製する装置である。Fig. 2 は電解ユニット内部の構成を、高圧水電解スタックを中心に、周辺デバイスの接続状態を模式的に表したものである。高圧水電解スタックは、水の電気分解によって閉ざされた空間に水素を発生させ続け、設定された圧力まで昇圧した水素を外部に供給する⁽⁶⁾。

電気分解に必要な純水は純水製造装置で水道水から製造され、純水循環系へ供給される。循環水ポンプでスタックへ供給された純水は、純度維持用のイオン交換樹脂を経由してスタック内各セルのアノード側に供給される。スタック内では純水が電気分解され、水素と酸素に分解される。電気分解の結果発生した酸素は、余剰の純水と共にスタックから排出され、酸素気液分離器へと送られる。純水と酸素の混合流体は、酸素気液分離器で分離され、酸素はブロワからの空気で希釈後、逆火防止機器を経由して大気に放出される。純水は循環系を通して再びスタックへ供給される。

一方、電気分解によってスタックのカソード側で発生した水素は、下流に設置された背圧弁の設定圧力 (35 MPa) になるまで昇圧されていく。昇圧された水素は、高圧水素気液分離器、熱交換器、ペルチェ冷却器、吸着剤を通過することによって水分が除去され、水分濃度 5 ppm 以下のドライ水素に精製される。ここで、高圧水素気液分離器、熱交換器、ペルチェ冷却器においては、水素に含まれる液体の水分が重力によって落とされ、高圧気液分離器内に溜

まってい。よってある決められた水量に達した時に排水しなくてはならないため、高圧気液分離器下部に設置された高圧排水ラインを適宜開放することにより排水をおこなっている。システムは排水と注水を繰り返しながら運転しており、Fig. 3はこの排水サイクルを示したものである。

Fig. 3より排水サイクルに連動して、製品水素流量が変動していることがわかる。高圧気液分離器への注水中は、溜まっていく水の体積分だけ水素が押し出されるため、見かけ上の製品水素の量が多くなる。一方で排水中は、排水された水の体積分だけ気相の水素が膨張し、気液分離器内の圧力が低下するため、製造した水素は圧力低下分の補充に使われて、製品水素の吐出量が減少したり、完全になくなったたりする。これにより、排水サイクルに伴って水素の製造と停止が繰り返されているように見えるが、平均すればスタックを流れた電流値に依存した一定量の水素が出ていることになる。吸着材による除湿は、露点の低い35 MPaの高圧状態のまま吸着材を通すため、吸着材容量が少なく済み、約半年で定期的に変換することとしている。

常圧水電解においてはアノード側で発生した酸素がカソード側の水素に不純物として混入するが、差圧式高圧水電解ではアノードとカソードの間の差圧が1 MPa以上あれば、水素中の酸素濃度を5 ppm以下にできることが確認されている。これにより、燃料電池電気自動車用水素燃料規格SAE J2719⁽⁷⁾およびISO14687-2⁽⁸⁾を満たす純度の製品水素が得られる。製品水素が規格を満たしていることは、Table 2に示すように、不純物分析によっても確認している。

このようにして製造された水素は、充填用ノズルを通じて燃料電池電気自動車のタンクに直接供給されるか、貯蔵用タンクがある場合には、貯蔵用タンクに充填され、貯蔵される。

2.2.2. タンクユニット

本システムの設置当初のコンセプトは、車両を使用していない夜間に、押し込み充填によって高圧水素を充填する

Table 2 Hydrogen quality of SHS2

	ISO14687-2	SHS2
H ₂	>99.99%	>99.99%
H ₂ O	<5 ppm	<1 ppm
Hydrocarbon	<2 ppm	<0.1 ppm
O ₂	<5 ppm	1 ppm
He, Ar, N ₂	<100 ppm	<16 ppm
CO ₂	<1 ppm	<0.1 ppm
CO	<0.2 ppm	<0.001 ppm
Sulfur	<0.004 ppm	<0.0008 ppm
HCHO	<0.01 ppm	<0.001 ppm
HCOOH	<0.2 ppm	<0.001 ppm
NH ₃	<0.1 ppm	<0.02 ppm
Halogenates	<0.05 ppm	<0.004 ppm

というものであった。この方式であれば、高圧タンクを持つ必要がなく、システムの簡素化ができるため省スペースであり、水素の貯蔵に関する規格および法規を満たす必要がなくなり、家庭設置が容易となる。

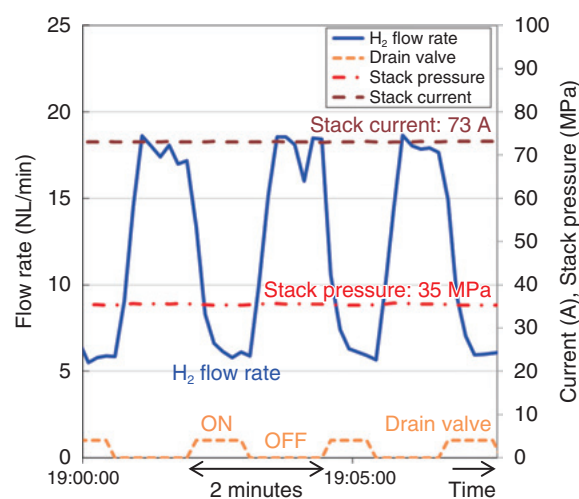


Fig. 3 High-pressure water drain cycle

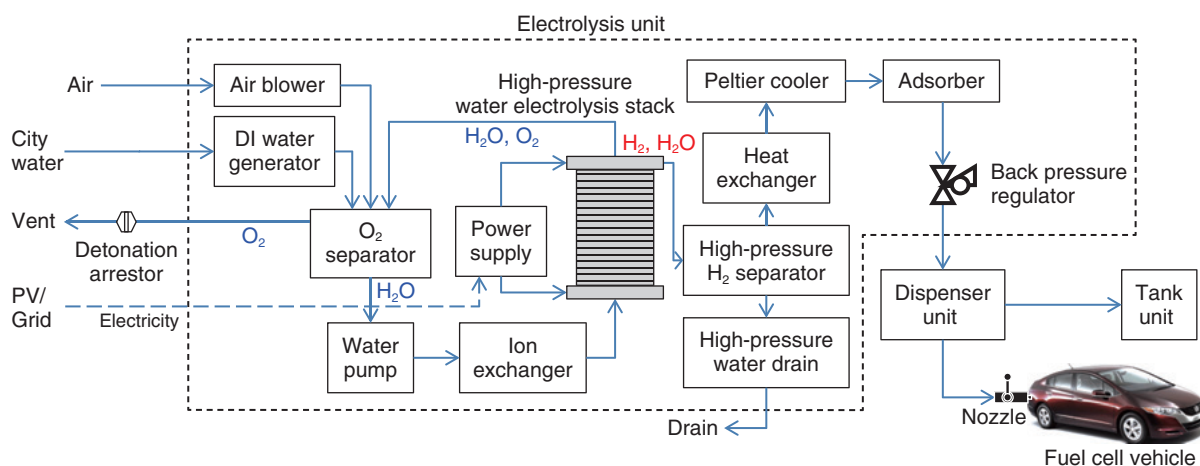


Fig. 2 Electrolysis unit configuration diagram

押し込み充填では、昇圧しながら充填するため満充填することができるが、充填に要する時間が長いというデメリットがある。一方、貯蔵用タンクを持つ場合は、タンク間の圧力差を利用した短時間の急速充填が可能になり、ユーザの利便性が向上すると共に、車両不在時にも水素製造および貯蔵ができるため稼働率が向上するというメリットがある。しかしながら、圧力差を利用するため満充填することはできないというデメリットがある。

このように貯蔵用タンクを併設して急速充填を可能にすることには一長一短があるが、今回はユーザの利便性向上やシステム稼働率向上の検討をおこなうために貯蔵用タンクを2010年9月に追加設置した。容量は167 Lであり、35 MPaの水素約4 kgを貯蔵可能である。

2.2.3. ディスペンサユニット

Fig. 4 に示すディスペンサユニットには、ユーザがシステムを操作する操作画面や非常停止ボタン、充填用ノズル、非常時の離脱用ブレイクアウェイを装備している。

ユーザが車両に水素を充填する場合、操作画面の表示に従って車両にノズルを接続し、画面上の充填開始ボタンを押すことで充填が開始される。Fig. 5 に充填の進行を模式的に表したものを示す。貯蔵用タンクを有している場合は、まず貯蔵用タンクからの急速充填 (Fast fill) が実施され、急速充填終了後に、電解ユニットで製造した水素を直接車載タンクに充填する押し込み充填 (Slow fill) が開始される。



Fig. 4 Dispenser unit

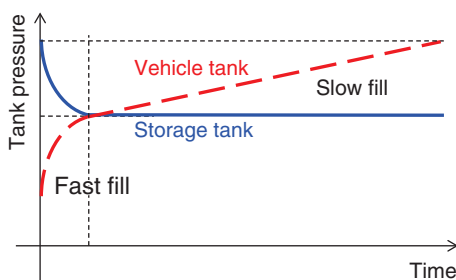


Fig. 5 Hydrogen charging sequence

3. 初期性能

3.1. 効率分析

初期のシステム性能を確認するため、スタック循環水温度を定格の 60℃ 一定として運転をおこない、システム効率を測定した。効率計算に必要な水素の高位発熱量は 3.54 kWh/Nm³ とした。製造水素流量は 2.2.1. 項で述べたように高圧気液分離器の排水サイクルにより変動するため、十分長い時間の平均値をとる必要がある。今回は 45 サイクル分 (約 1 時間 20 分) の平均値を求めた (Fig. 6)。この結果、計算区間での水素製造量は 0.93 Nm³ (=3.31 kWh)、消費電力は 5.96 kWh であったため、定常状態におけるシステム効率は 55.5% であった。この値は、既存の大型水素ステーションの効率とほぼ同等である⁽¹⁾。

スタックの効率には、電流効率、電圧効率、スタック効率 (電力効率) の 3 種類があり、電流効率は理論水素発生量に対する得られた水素の割合、電圧効率は理論稼働電圧と実電圧の比率、電力効率はスタックでの水素製造効率 (電流効率×電圧効率) を示している。測定および計算の結果、電流効率は 96.1%、電圧効率は 73.6%、電力効率は 70.7% であり、これらの値はスタック単体で初期に測定した値と同等であることが確認された。

差圧式高圧水電解では、発生させた水素が酸素側に膜透過することによって、得られる水素量が減少することが挙げられる。ソーラー水素ステーション SHS2 では、機能を確実に維持するために、電解質膜の強度確保に必要な厚さに対して 2 倍の厚さの電解質膜を用いた。これにより、膜透過の量が少なくなり、水素の損失が減少することで、電流効率は良好な値が得られている。一方、電解質膜の厚さによる電気抵抗成分の増大により、電圧効率は低めの値となっている。

3.2. 消費電力分析

システム効率を算出する際、定格時の消費電力を測定し

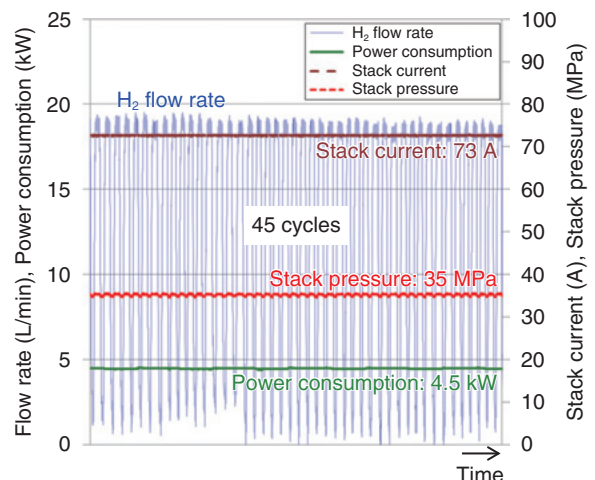


Fig. 6 Operation for efficiency analysis

ており、その内訳を Fig. 7 に示す。測定の結果 35 MPa の高圧水素を 1 Nm³ 製造するのに 6.38 kWh の電力量を必要とした。その内訳としては、水素に変換されるエネルギー量 55.5% 以外に、昇圧に必要なエネルギーが約 2.7%、スタックでの電力損失が 20.2%、電解電源の電力変換による損失が約 9.3%、補機類の消費電力総和が 12.2% となっている。項目別ではスタックでの損失が大きく、次いで電解電源の損失が大きくなっている。これより、スタック効率向上、電解電源変換効率の向上がシステム効率改善に有効であることがわかる。

3.3. 効率向上案

スタックの損失が大きき原因は、3.1. 節でも述べたように厚い電解質膜を使用していることによる抵抗増大のためと考えられる。電解質膜の厚みと種類の違いによる効率向上効果に関しては基礎的な検討をすでにおこなっており、以下に簡単に述べる。

現行の電解質膜に対して、現在検討している他の電解質膜の性能を示したものが Fig. 8 である。これより、現行の電解膜を、材質を変えることなく膜厚のみを半分とした場合、電解質膜の電気抵抗を減少させて電圧効率を向上させることができる。しかし、電解質膜が薄くなることで膜透

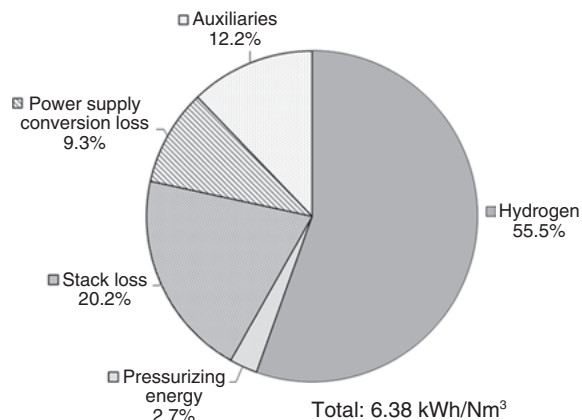


Fig. 7 Power consumption of SHS2

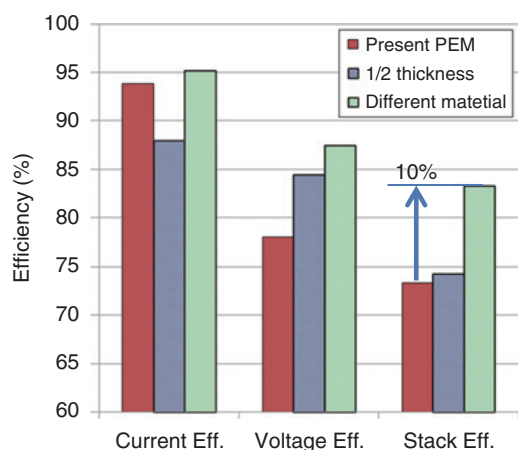


Fig. 8 Efficiency difference of alternative PEMs

過量が増大するため、電流効率が低下し、結果として電力効率の向上効果は少ないことがわかる。そこで、水素透過性が低く高強度の材料による電解質膜を検討している。この材質違いの電解質膜を用いた場合、膜透過量が減り電流効率が改善すると共に、高強度のため膜厚を薄くすることにより電圧効率も改善し、電力効率は約 10% 向上することがわかっている。この材質違いの電解膜については、初期テストが完了して効果を確認しており、現在耐久性の確認をおこなっているところである。

一方、システムでの効率向上案としては、大電力を変換している電解電源における損失が高いことから、変換効率を向上させた電源の開発が最も効果的と考えられる。その他各補機類の消費電力低減、運転方法の最適化等をおこなう必要がある。

これらの方策により、Fig. 9 に示すように将来的にシステム効率は約 70% が得られる見通しがあり、この値は小型水素ステーションとしては世界最高レベルである⁽¹⁾。

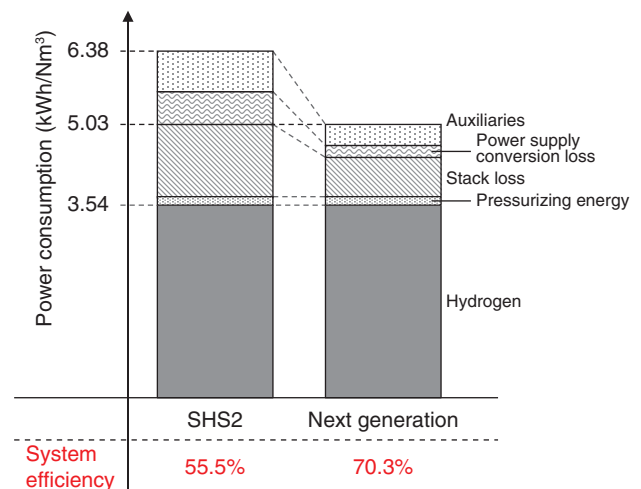


Fig. 9 Expected efficiency

4. 実証試験

4.1. SHS2 の実証試験結果

今回の実証試験は、通勤を模擬した運用をおこなう燃料電池電気自動車に対して、必要とする水素を継続的にソーラー水素ステーションで製造し充填する試験である。現地の実証試験実施者が、実際に通勤や外出等に使用している燃料電池電気自動車を用いて実施した。

Fig. 10 に 2010 年 2 月の稼働開始から 1 年間の、SHS2 による水素製造量および太陽電池による発電量の積算値を示す。本システムは 1 日 8 時間の運転で約 0.5 kg の水素を製造することができるので、参考に毎日 0.5 kg の水素を製造した場合の積算水素量を示した仮想線を引いている。すなわち、SHS2 が順調に稼働していれば、水素製造量積算値の傾きがこのラインの傾きと一致することになる。また 2010 年 9 月には、貯蔵タンクを追加設置することに

よって、24 時間稼働することが可能となった。つまり 1 日 1.5 kg の水素を製造できるようになったため、9 月以降は 1.5 kg/day の仮想線を引いている。このグラフより、事業所の長期休暇やメンテナンスの時を除いて、1 年間大きなトラブルなく稼働できたことがわかる。

1 年間の運用の結果、35 MPa での高圧水電解をおこなった時間は 1260 時間であった。起動停止は 267 回おこない、製造した水素の量は 120 kg となった。燃料電池電気自動車への充填は 268 回となり、貯蔵タンクを設置したのちは急速充填を 107 回おこなった。

太陽電池の 1 年間の総発電量は 8.82 MWh であった。本システムが前述の消費電力 6.38 kWh/Nm³ で水素を製造したと仮定すると、1 年間の水素製造量 120 kg (1344 Nm³) に必要な電力量は 8.57 MWh であるため、製造した水素全量分の電力量を太陽電池で賄えたことになり、システムコンセプトを実証することができた。

4.2. 実験結果を利用した運用シミュレーション

当初 SHS2 のシステムコンセプトとしては、夜間自宅での押し込み充填を基本として仕様を設定した。一方、SHS2 に貯蔵タンクを併設し急速充填を可能とすることは、2.3. 節で述べたようなデメリットもあるが、ユーザーの使用状況によっては利便性が向上する可能性がある。このコンセプトを検証する手段として、実証試験結果を用いた SHS2 の運用シミュレーションをおこなった。ホームリフューエリングシステムの最大のメリットは自宅で車の燃料を充填できることと考えられることから、ユーザーの利便性を測る指標として、自宅出発時の燃料レベル (Fuel level)、すなわち自宅で供給した水素の量の目安と、SHS2 の稼働率、および外部ステーションでの充填回数を設定した。

シミュレーションでは、燃料電池電気自動車の使用頻度を低 (Low)、中 (Middle)、高 (High) と仮定した運用パター

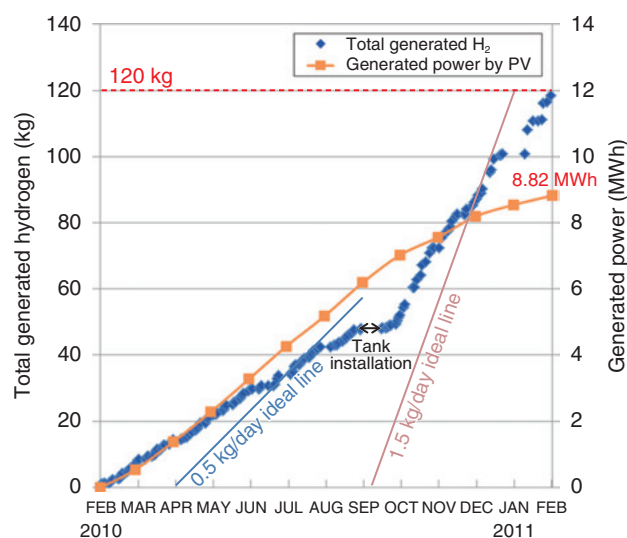


Fig. 10 Total generated hydrogen by SHS2 and power by PV

Table 3 Refueling frequency at public stations

	Current	With SHS2
High	111	52
Mid	101	31
Low	61	2

を設定し、各ユーザーの運用パターンに沿って SHS2 と燃料電池電気自動車を 1 年間運用するシミュレーションをおこなった。シミュレーションに使用した数値 (車の燃費や SHS2 の水素製造効率など) は実際に運用によって得られた値を用いている。

はじめに、SHS2 の有無の効果をシミュレーションした場合の、日々の自宅出発時における Fuel level の頻度分布と外部充填回数の変化を、それぞれ Fig. 11 および Table 3 に示す。Fig. 11 より当初のターゲットユーザーである使用頻度低 (Low: 通勤使用を想定) のユーザーに関しては、SHS2 を持つことによって、Fuel level を高く保持できるようになり、必要な水素を十分供給できていることがわかる。また Table 3 より、SHS2 なしでは外部充填回数が 61 回のところを、SHS2 を持つことで 2 回まで減らせることがわかる。しかし、頻度高 (High) のユーザーに対しては、夜間不在時や長距離の使用も多いため、自宅で水素を十分に供給することができず、SHS2 を保有しているメリットが少ないことがわかる。

次に、SHS2 の保有を前提として、貯蔵タンクの有無の効果をシミュレーションによって検証した。シミュレーションにより得られた Fuel level を Fig. 12 に示し、システム稼働率を Table 4、外部充填回数の変化を Table 5 に示す。ここで、想定した貯蔵タンクの容量は車のタンクと同等とした。Table 4 より、貯蔵タンクを併設することによって、頻度高 (High) のユーザーに対してもシステム稼働率を向上させられる。また Fig. 12 より、Fuel level の低い状態をほぼなくすることが可能になり、Table 5 に示す外部充填回数も 52 回から 15 回に減らせることから、貯蔵タンクの追加によって水素が自宅で十分供給でき、ユーザーの利便性が向上することがわかる。

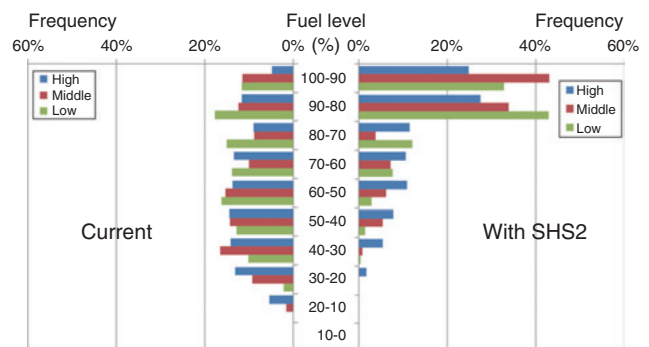


Fig. 11 SHS2 contribution for user

Table 4 System utilization rate

	No tank	With tank
High	32%	79%
Mid	44%	68%
Low	32%	52%

Table 5 Refueling frequency at public stations

	No tank	With tank
High	52	15
Mid	31	26
Low	2	0

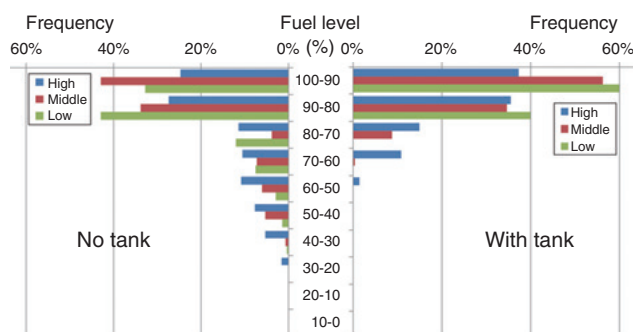


Fig. 12 Storage contribution for user

よって SHS2 に貯蔵タンクをオプションとして用意することで、さまざまな使用パターンのユーザのニーズに応えることができると考えられる。

5. 結論

差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション SHS2 を開発、設置し、以下の結論を得た。

- (1) 高圧水電解システムとして約 1 年間の実証試験を実施し、燃料電池電気自動車への水素供給を継続的にこなうことができた。これにより、システム全体での耐久信頼性が実証できた。
- (2) 1 年間の水素製造量は 120 kg であり、製造に必要な電力量は全て太陽電池による発電量で賄えることがわかった。これにより、システムコンセプトを実証することができた。
- (3) 運用を通じて得られたデータを利用して、仮想の運転モードを設定し、運用シミュレーションをおこなった結果、車載タンクと同等の容量を持つ貯蔵タンクを併設することで多くのユーザの利便性を向上させることができることがわかった。
- (4) 設置当初の初期性能を測定したところ、システム効率は 55.5% であり、水素 1 Nm³ あたり 6.38 kWh の電力消費であった。今後膜種の変更やデバイスの効率向上

等をおこなうことによって、システム効率を約 70% まで向上できる見通しがある。

SHS2 については引き続き運用をおこない、長期間に渡る性能および耐久データを蓄積していく計画である。

参考文献

- (1) 岡部昌規, 中沢孝治, 樽家憲司, 判田圭: 太陽電池を使った水素ステーション (SHS) の実証試験, Honda R&D Technical Review, Vol.20, No.1, p.67-73
- (2) 中沢孝治, 長岡久史, 武内淳, Frank MOBURG, 山下郁也, 岡部昌規: 差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション (SHS2) の紹介, Honda R&D Technical Review, Vol.22, No.2, p.28-35
- (3) 岡部昌規, 中沢孝治: ホンダのソーラー水素ステーション (SHS) 開発の取り組み, 水素エネルギーシステム, Vol.35, No.3, p.22-28(2010)
- (4) 岡部昌規: 差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション (SHS2) の開発, 燃料電池, Vol.11, No.2, p.30-36(2011)
- (5) <http://www.honda.co.jp/soltec/cigs/index.html>, 2012/5/23
- (6) 針生栄次, 中沢孝治, 樽家憲司, 石川博之, 岡部昌規: 差圧式高圧水電解セルの構造とその性能評価, Honda R&D Technical Review, Vol.23, No.2, p.90-97
- (7) SAE J2719: 2011. Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles
- (8) ISO/TS 14687-2: 2008. Hydrogen fuel - Product Specification - Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles

■ 著 者 ■



長岡久史



吉田喜祐



David CUN



山下郁也



岡部昌規