

ホンダのソーラー水素ステーション (SHS)開発の取り組み

岡部昌規、中沢孝治

株式会社 本田技術研究所 四輪R&Dセンター
〒321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢4630

Effort to Develop Honda Solar Hydrogen Station (SHS)

Masanori OKABE , Koji NAKAZAWA

Honda R&D Co., Ltd. Automobile R&D Center
4630 Shimotakanezawa, Haga-machi, Haga-gun, Tochigi

Honda has been developing an experimental solar hydrogen station (SHS) in order to propose a solution for energy and global environmental issues. The results from proving tests of the SHS1 suggest that a renewable hydrogen station of a size suitable for household use would require still greater compactness and higher efficiency. Therefore we developed high differential pressure electrolyzer stack, which is an innovative technology. The stack differs from the ordinary high pressure electrolyzer that keeps both the anode side and the cathode side in a high pressure state. Here, instead, the anode side is under normal pressure and only the cathode side is maintained under the high pressure of 35 MPa. Therefore, this one has a simpler structure and can be made compact. Furthermore, the stack here has the functions of both generating and compressing hydrogen. With this stack, SHS2 was made into a compact, highly efficient and low-noise, home-sized hydrogen refueling appliance.

Keywords: solar hydrogen station, high differential pressure electrolyzer

1. 緒言

Hondaはかねてより、化石燃料の代替、排出ガスの削減、地球温暖化への影響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クリーンパワープラントととらえ、燃料電池電気自動車の開発をおこなってきた。

燃料電池電気自動車を普及させるためには、水素供給インフラの整備という社会的な取り組みが必要である。近年、インフラ業界や官公庁主導でこれらの技術に関する研究開発がおこなわれ、水素ステーションの先行導入が進みつつある。しかしながら、導入の進む地域は限られており、またその数も将来の普及を見据えると十分とはいえない。

そこで我々は燃料電池電気自動車の早期普及に向けて、インフラ業界や官公庁主導の水素ステーションとは異なる、家庭に設置可能な小型水素供給システムの研究を進め

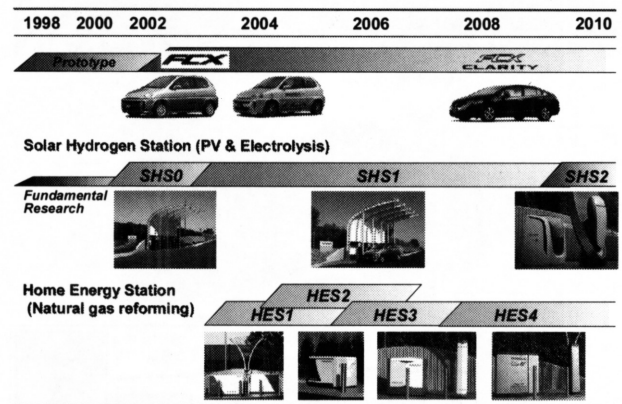


図1. ホンダの水素供給装置の研究開発経緯

てきた。まず2002年から太陽光由来の水素を供給するソーラー水素ステーションの研究をスタートし、2003年からは天然ガス由来の水素を燃料電池電気自動車に供給すると

ともにコージェネレーション機能で家庭に電力と熱を供給するホームエナジーステーション(Home Energy Station: HES)の研究をスタートして、現在までに様々な改良を行い進化させてきた[1-8]。

本稿では、Hondaがこれまでに取り組んできた、太陽光由来の水素を供給するソーラー水素ステーション (Solar Hydrogen Station: SHS)の開発に向けた取り組みについて紹介する。

2 初代ソーラー水素ステーションの実証試験結果

図2に初代ソーラー水素ステーション(SHS1)の構成とエネルギー収支を示した。

この水素ステーションを用いて、太陽光由来の水素製造について研究を進めてきたが、コンプレッサの起動時の消費電力割合が大きくなることがわかった。SHS1搭載のコンプレッサは、将来の家庭用水素供給装置をにらんで小型小流量タイプを採用したため、大流量コンプレッサに比較してフリクションロスが大きくなり効率の低下が起こった。

また水素精製 (除湿) のための吸着塔再生用ヒータの消費電力も大きく、効率低下を引き起こしていた。

家庭サイズの再生可能水素ステーションに向けては、さらなる小型高効率の水素ステーションが必要であり、攻めどころとしては水素の除湿エネルギーと水素コンプレッサのエネルギーを削減することが重要であることが明確になった。

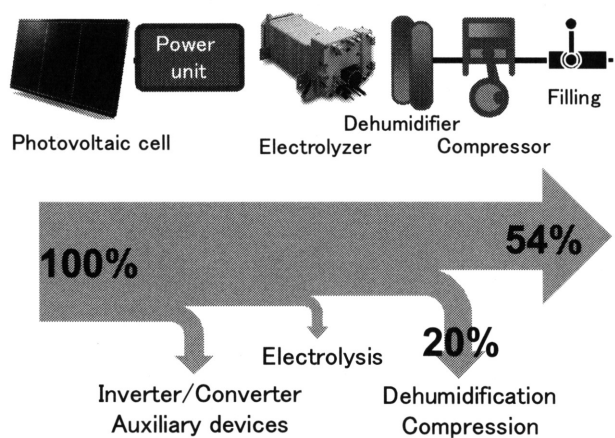


図2. SHS1の構成とエネルギー収支

3 差圧式高圧水電解スタックの開発

先に示したSHS1の実証試験結果から、家庭設置可能な小型で高効率の水素供給装置の実現のためには『差圧式高圧水電解システム』の開発が有効であると考え、以下の開発に取り組んだ。

3.1 差圧式高圧水電解スタックの原理

図3に差圧式高圧水電解の単セルの模式図を示した。

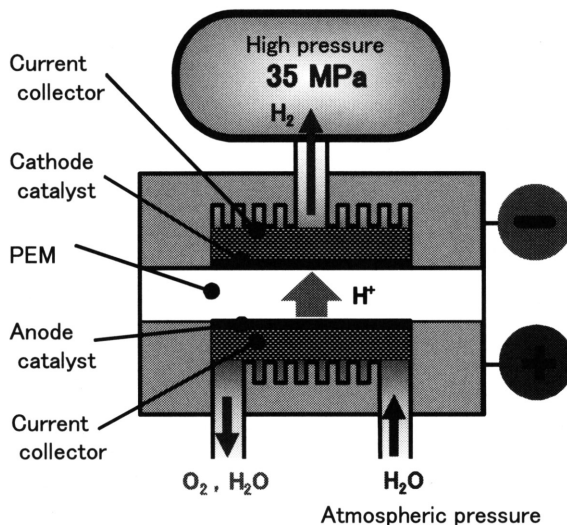
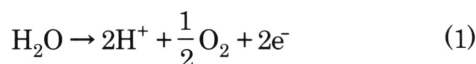


図3. 差圧式高圧水電解セルの模式図

固体高分子膜(PEM)を用いた水電解セルは、純水を供給してPEMに電圧を加え続けられれば酸素と水素を発生し続ける。したがって、水素出口側に高圧タンクを設置するとタンク内の圧力は徐々に上昇し続け、最終的には高圧水素を得ることができる。一方で酸素は大気圧にしているため、差圧式高圧水電解セルではPEMを介して圧力差が生じている。

式(1)と式(2)に差圧式高圧水電解の反応式を示した。



PEM間に電圧を加えると酸素極側で純水が酸素とプロトンH⁺になり、プロトンは対極へと移動し水素となる。この現象は一般的な常圧水電解と同じだが、プロトンが対極へと移動する際には、水素の分圧差による起電力を加える必要がある。

式(3)に差圧式高圧水電解に必要な電解電圧(E_{WE})の式を示した。

$$E_{WE} = E_1 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_1}{P_2} + ir \quad (3)$$

R: 気体定数
 T: 絶対温度
 F: ファラデー定数
 P_1 : 高压側の水素分圧
 P_2 : 低压側の水素分圧

常圧水電解の理論電解電圧(E_1)とセル抵抗(ir)に加え、ガス濃淡電池に必要な水素濃度差電位を印加することにより達成される。式(3)の第二項がネルンスト式の水素濃度差による起電力になる[9]。

3. 2 差圧式高压水電解スタックの性能評価結果

差圧式高压水電解スタックをもちいて水の電気分解をおこない、発生した水素の圧力を常圧から35 MPaまで昇圧したときに実測した消費エネルギー推移と式(3)から求めた計算値を図4に示した。

水素圧力が常圧のときの全消費エネルギーは約4000 Wh/Nm³であったが、そのうちの3544 Wh/Nm³が理論電解エネルギーであり、残りがセル抵抗である。なお、セル抵抗には、膜と電極間や電極と給電体間の接触抵抗や膜抵抗、酸素極や水素極の過電圧、オーム損がある。

水素圧力が35 MPaのときの昇圧エネルギーは約200 Wh/Nm³であり、ほぼ計算値と一致した。しかし圧力が低い領域では、計算値よりも実測値の消費エネルギーの方が低い値を示したが、これは圧力の上昇にともなってセル抵抗成分のうち主に膜と電極間の接触抵抗の減少と膜厚変化による膜抵抗の減少によると考えられる。

差圧式高压水電解スタックにおける水素圧力35 MPaでの全消費エネルギーは4200 Wh/Nm³であり、理論電解エネルギーに対して約84%の効率であり、高压水素発生装置としては省エネルギーなものであるといえる。

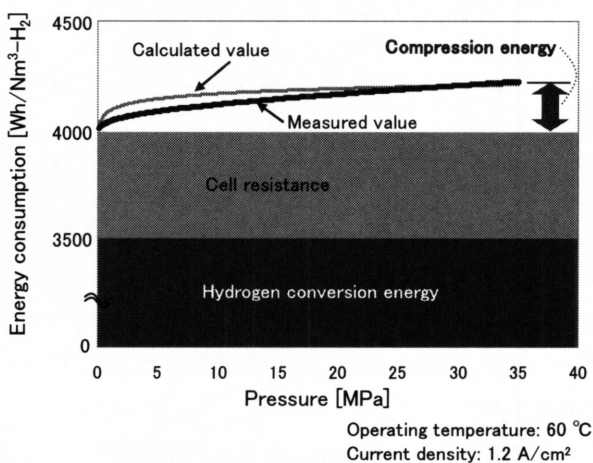
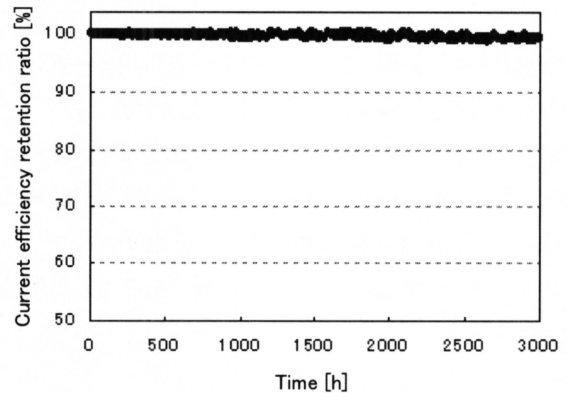
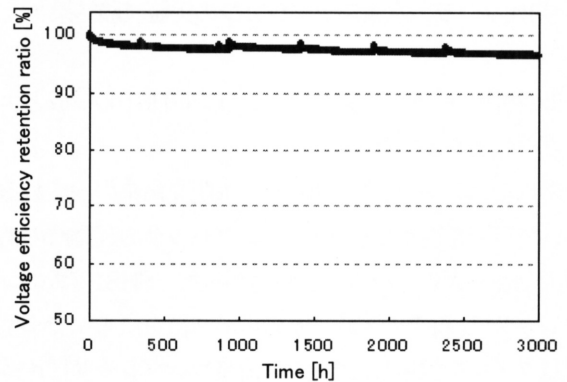


図4. 差圧式高压水電解スタックの昇圧曲線

3. 3 差圧式高压水電解スタックの耐久性

水素圧力35 MPaでの差圧式高压水電解スタック単体による耐久試験をおこなった。なお、本スタックを搭載させる家庭用ソーラー水素ステーション(SHS2)では1日8時間の運転を想定しているため、3,000時間では約1年相当となる。

図5に差圧式高压水電解スタックの電圧効率の維持率推移(a)と電流効率の維持率推移(b)を示した。



(b) Trend of current efficiency retention ratio

Hydrogen pressure: 35 MPa
 Operating temperature: 60 °C
 Current density: 1.2 A/cm²

図5. 差圧式高压水電解スタックの効率維持推移

差圧式高压水電解スタックにおける電圧効率の急激な低下は起きておらず、3,000時間後では約4%の変化であった。この性能低下は常圧水電解スタックの性能低下分とよく一致している。したがって、高压水素による膜抵抗の経時的な増加や触媒性能の低下、給電体などのスタック構成部品の変形による接触抵抗の増加は生じていないと考えられる。

電流効率については、初期から3,000時間まで一定で推移しており、高压水素を製造する機能は安定維持されてい

た。なお、スタック外部へのリークも本耐久試験をとおして観察されなかった。

以上のことから、電流効率と電圧効率を掛け合わせたスタック電力効率の変化は、差圧式高圧水電解に特有のものではなく、常圧水電解スタックと同等であったことから、SHS2に本スタックを投入しておこなう長期耐久実証試験の見通しを得た。

4. 家庭用ソーラー水素ステーション(SHS2)のシステム概要

4. 1. SHS2のシステム構成

図6にSHS1とSHS2の水素ステーションのシステム構成比較を示した。

SHS1では、常圧水電解スタックで常圧(Max 0.12 MPa)の水素を発生させ、水素昇圧を機械式コンプレッサでおこなっていた。一方、SHS2では水電解スタックに水素昇圧機能を統合させた差圧式高圧水電解スタックが搭載されている。

差圧式高圧水電解スタックは機械式コンプレッサとは異なり、水素昇圧の際の振動音やモータによる回転音などは一切なく静かである。また、電気化学的な水素昇圧方法であるため機械式コンプレッサのようなフリクションロスやモータ損失がなく、高効率である。さらに、機械式コンプレッサをなくしシステム構成を見直したことにより、ユニットの容積をSHS1と比較して約60%小型化することができた。したがって、差圧式高圧水電解スタックを搭載したSHS2は一般家庭への設置に対して有効である。

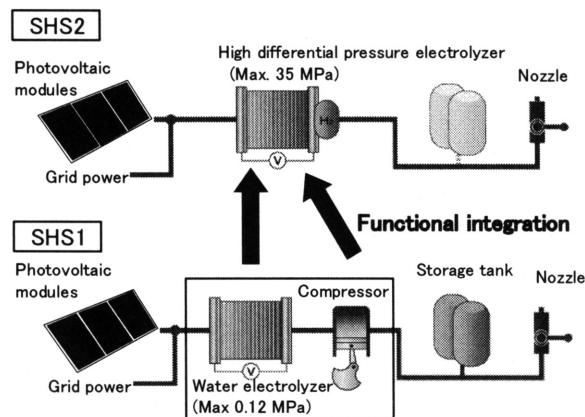


図6. SHS1とSHS2のシステム構成比較

4. 2. SHS2のシステム仕様

表1にSHS2の仕様を示した。

SHS2は株式会社ホンダソルテック製のCIGS薄膜太陽電池を6 kW搭載している。システムの入力電源は米国の多くの一般家庭に既設されている240 VACを採用しており、昼間の太陽電池から発電した電力はグリッドを介して売電し、夜間にグリッドから電力を買電してシステムを運転する。また、運転にあたっては水道水と電気を供給するだけで高純度な最大35 MPaの高圧水素を燃料電池電気自動車に充填することができる。水素製造量は1時間当たり約0.7 Nm³であり、夜間の安い深夜電力を使って8時間Honda FCXクラリティに水素を充填することにより翌日には約50 km[10]の走行が可能となる。なお、本システムにおいてはまだ定置型の高圧水素タンクを設置していないが、タンクを設置することにより燃料電池電気自動車への急速充填が可能となる。また、昼間の太陽電池からの電力で水素製造し、システムを24時間運転させタンクに貯めることが可能となるため、1日で約150 km走行可能な水素を製造することができるようになる。

実証試験の目的のひとつには、構成部品の長期間の耐久信頼性評価も含まれている。そのため差圧式高圧水電解システム内の水素圧力は燃料電池電気自動車のタンク圧力と連動するのではなく、35 MPaに保持するように設計されており、あえて圧力的に厳しい条件で耐久信頼性評価をおこなえるような仕様とした。

表1. SHS2の仕様

Hydrogen production	Flow rate	0.7 Nm ³ /h (0.5kg/8hr)
	Filling pressure	35 MPa (max.)
	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	

4. 3. 燃料電池電気自動車への充填試験

図7に燃料電池電気自動車に充填ノズルを接続して、水素充填試験を実施した試験結果を示した。

図7(a)にシステムのスタートボタンを押してから20分間

のデータ推移を示した。起動準備としてはじめに電解ユニットとディスペンサユニット内の換気をおこない、機器や配管などから水素の漏洩がないか確認する。その後システム起動が可能な状態になっているかセンサ類のイニシャルチェックを実施し、正常であれば純水製造装置の立上げをおこない純水循環ポンプを起動させ運転準備が完了する。運転準備完了までに要する時間は純水製造装置の立上げ時間が支配的であるが、図7(a)では約6分で運転準備が完了した。運転準備が完了すると差圧式高圧水電解スタックに電圧を加え、水の電気分解を開始する。差圧式高圧水電解スタックの水素圧力は、常圧の状態から始まり35 MPaに達するとシステム外へと水素が流れ、燃料電池電気自動車への充填が開始されタンク圧力が徐々に上昇する。本試験においては、スタートボタンを押してから約8.5分で燃料電池電気自動車への水素充填が開始されたが、差圧式水電解スタックの立ち上げはわずか2.5分で完了したことになる。また、一般のユーザを対象とした安全性についても考慮されており、充填ノズルが燃料電池電気自動車に確実に接続されているかチェックすることを目的として、燃料電池電気自動車への水素充填開始直後にいったん水素製造を止めてノズル接続部からの水素リークによる圧力の低下がないか確認するリークチェック動作を約20秒間おこなっている。

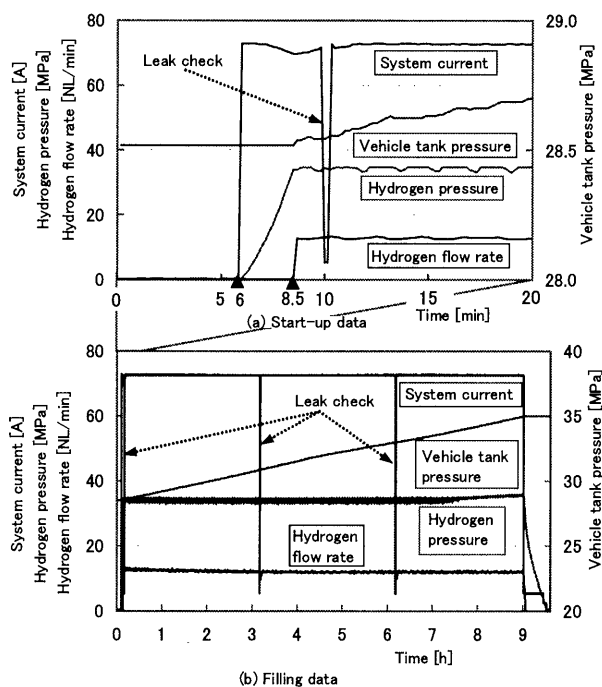


図7. 燃料電池電気自動車への水素充填試験結果

図7(b)に今回おこなった一連の充填試験結果を示した。図7(a)示した初期のリークチェック以外にも、水素充填中は3時間ごとにノズル接続部やホースからのリークがないか確認している。水素充填を停止する場合は、ストップボタンを押すか、燃料電池電気自動車のタンク圧力が35 MPaの満タン状態となるとシステムは自動的に運転を停止する。本試験においてはスタートボタンを押してから約9時間後に燃料電池電気自動車のタンク圧力が約28.5 MPaから約35 MPaになり、満タン停止を確認した。

4. 4. SHS2のシステム効率

図8にSHS1とSHS2の水素圧力35 MPaにおける昇圧と除湿に費やしたエネルギー量の比較を示した。

SHS1に搭載されていた小型ステーション用の小流量機械式コンプレッサの消費エネルギーは、大流量コンプレッサに比べてフリクションロスの影響が大きくなり水素昇圧エネルギーが大きい。一方でSHS2に搭載した差圧式高圧水電解スタックは、固体高分子膜による電気化学式の昇圧でありフリクションロスやモータ損失がないため水素昇圧エネルギーが少なく効率の良い水素昇圧手法である。またISO規格における燃料電池電気自動車用の水素中の水分許容量は5 ppm未満[1]であるため、製造した水素は除湿する必要がある。

SHS1では常圧水電解スタックで製造した水素圧力は約0.1 MPaになるので、水素中に含まれる水分量は約35800 ppmと多く存在していた。常圧水電解スタックの後段にはこの水分量を減らす目的で、水素を冷却し飽和水蒸気量を減らすペルチェ冷却装置が設置され、冷却エネルギーの多くは水蒸気の凝縮に使用されていた。さらに温度スイング吸着(TSA)式の吸着装置が昇圧コンプレッサの前段に配置されていたが、電気ヒータによる吸着材の再生エネルギーが必要であった。

一方、SHS2では差圧式高圧水電解スタックにより製造した水素圧力は35 MPaと高圧であるため、水素中に含まれる水分量は約100 ppmとなり、SHS1と比較して約350分の1以下になる。そのため、ペルチェ冷却のエネルギーが格段に少なくなる。また、ペルチェ冷却装置の後段に設置した吸着装置の内容積は約700 cm³あり、ここに吸着材を入れることにより半年以上の吸着性能が維持される。したがって、SHS2では再生式ではなく交換式の吸着装置を採用しており、再生エネルギーを必要としないシステムにすることができた。これらの結果、SHS1と比較して昇圧と除湿に必要なエネルギーが約4分の1になった。

SHS2は、差圧式高圧水電解スタックを搭載することにより、昇圧と除湿に必要なエネルギーが削減できたことに加えて、シンプルなシステムとなったことにより従来からもちいていた電磁弁などの補機動力の削減も可能となり、システム効率を25%向上することができた。

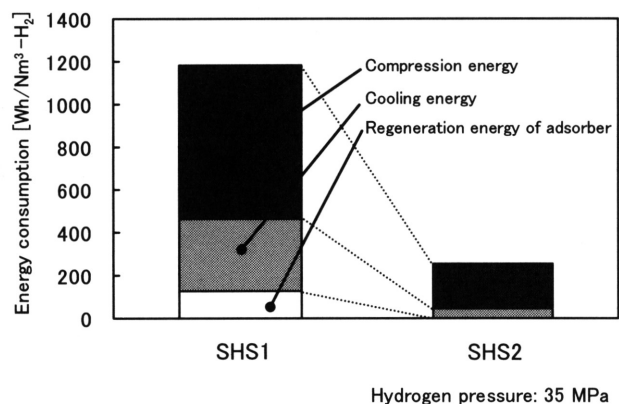


図8. 昇圧と除湿に必要なエネルギー比較

4. 5. SHS2の外観

図9に示すように、SHS2を家庭に設置するためにはユーザにとって親しみやすく、かつ威圧感のないものにする必要がある。これらを達成するためにステーション全体や各ユニットは、形として鋭利なラインを極力なくし丸みを帯びた曲線にすることにより親近感や安心感を表現した。また、各ユニットは人間の感覚に合うように小型化をおこない威圧感のない大きさにした。

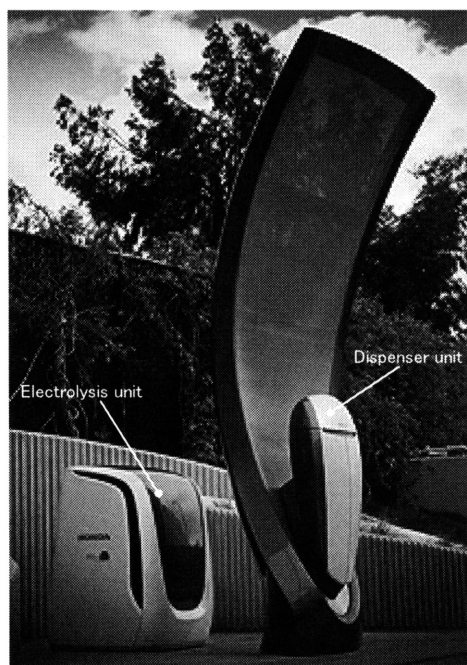


図9. SHS2の外観

SHS2を家庭のガレージに設置することを想定すると、ユーザがアクセスするディスペンサユニットはガレージ内に設置される。今回は、ガレージ内の壁に見立てたスクープ状の構造物をはさんでディスペンサユニットを前方に配置し、その後方に電解ユニットを配置した。

図10に電解ユニットの外観を示したが、電解ユニットは屋外設置を想定しているため、雨や風などの環境因子について考慮されている。また、形状的には単純で曲面形状になっており、威圧感を与えないスタイリングとした。

図11にディスペンサ棟とスクープの外観を示したが、ユニットの高さはユーザインターフェイス(User Interface: UI)の位置により決定され、幅は充填ホースの許容曲げ半径により決定された。操作性や使い勝手については実物大のモックアップを作成し、充填ノズルの収納方法やホースの長さについて事前に確認した。



図10. 電解棟

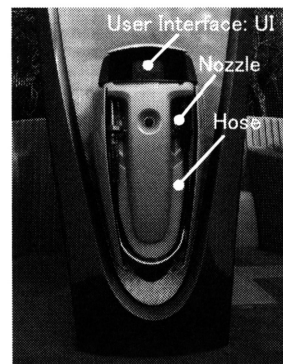


図11. ディスペンサ棟

6. まとめ

初代ソーラー水素ステーション(SHS1)の実証試験を通じて、明確になった課題を克服し、差圧式高圧水電解スタックの開発をおこなった。差圧式高圧水電解型スタックを搭載した家庭用ソーラー水素ステーション(SHS2)の設置および初期性能評価を行い、以下の結果を得た。

- (1) 差圧式高圧水電解スタックをもちいた場合の35 MPaの水素製造効率率は約84%であり、SHS1での常圧水電解スタック+機械式コンプレッサに比べて省エネルギーな高圧水素発生装置であることを示した。
- (2) 差圧式高圧水電解スタック単体での1年相当の耐久試験をおこなった結果、電力効率の変化が常圧水電解スタックの効率変化と同じであった。

- (3) 一般家庭への設置を想定して安全性や操作性を考慮したSHS2は、SHS1と比較して約60%小型化し、一般家庭に設置可能な大きさを実現した。
- (4) SHS2は、高効率の差圧式高圧水電解システムを開発したことにより、SHS1と比較してシステム効率25%の向上を達成した。

今後はSHS2の実証試験をおこない、実環境下での機能や性能の成立性を確認していく。

記 号

SHS1：初代ソーラー水素ステーション

SHS2：家庭用ソーラー水素ステーション

HES：ホームエナジーステーション

参考文献

1. 上山雅樹, 喜多真佐人, 田口聡, 中沢孝治, 長岡久史, 荒川慎一; 太陽電池を使った水素ステーションの紹介, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.2, p.31-38
2. Taguchi, S., Handa, K; Study of Hydrogen Refueling Station with Photovoltaic Modules, EVS-22 proceedings, p.350-357 (2006)
3. 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
4. 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, in press
5. Yamashita, I. Arai, T; Research of Home Energy Station, 2005 Fuel Cell Seminar Abstracts, p.238-240 (2005)
6. 山下郁也; ホームエナジーステーションの研究, 燃料電池開発情報センター機関誌「燃料電池」, Vol.6, No.4, p.36-38 (2007)
7. Nagaoka, H; Progress of Home Energy Station Phase4 System, National Hydrogen Association Annual Hydrogen Conference 2008 Proceedings, No.3795 (2008)
8. 吉田哲也, 倉品大輔, 山下郁也, 大高彰文; 天然ガス改質による家庭用水素供給システム(HES IV)の実証試験, Honda R&D Technical Review, Vol.22, No.1, p.35-41
9. 電気化学会編; 電気化学便覧, 第5版, p.155 (2000)
10. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Environmental Protection Agency; Model year 2010 Fuel Economy Guide, p.22 (2010)
11. ISO14687-2: Hydrogen fuel – Product specification – Part 2, Type 1, Grade D