

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

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

中 沢 孝 治*
Koji NAKAZAWA
Frank MOBURG**

長 岡 久 史*
Hisashi NAGAOKA
山 下 郁 也**
Ikuya YAMASHITA

武 内 淳*
Jun TAKEUCHI
岡 部 昌 規*
Masanori OKABE

要 旨

一般家庭に設置することを想定した差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション (High differential pressure water electrolysis-type Solar Hydrogen Station: SHS2) を製作した。この SHS2 には、新たに開発した革新的技術である差圧式高圧水電解スタックを投入した。このスタックは、酸素極側と水素極側がともに高圧状態に保たれている一般的な高圧水電解スタックとは異なり、酸素極側は常圧であり水素極側のみ 35 MPa の高圧状態に維持されている。したがって、一般的な高圧水電解スタックに比べ、構造がシンプルであり小型化することが可能である。また、本スタックは水素発生機能と水素昇圧機能をあわせ持ったものであり、これを搭載した SHS2 では小型高効率で低騒音の家庭向け水素製造装置を実現することができた。

SHS2 は従来型ソーラー水素ステーション (Previous Solar Hydrogen Station: SHS1) と比較して、容積 60% の省スペース化とシステム効率 25% の向上を達成した。

ABSTRACT

A high differential pressure water electrolysis-type solar hydrogen station (SHS2) was built with installation in ordinary households in mind. This SHS2 was equipped with a newly developed high differential pressure electrolyzer, 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. Compared to the ordinary high-pressure electrolyzer, 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, so that the SHS2 with this stack mounted was made into a compact, highly efficient and low-noise, home-sized hydrogen refueling appliance.

Compared to the previous solar hydrogen station (SHS1), the SHS2 is 60% more compact and realizes an increase of 25% in system efficiency.

1. はじめに

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してとらえ、燃料電池電気自動車の開発に取り組んできた。

燃料電池電気自動車の燃料となる水素の製造プロセスに

* 四輪 R&D センター

** HONDA R&D AMERICAS, INC.

おいては、可能な限り化石燃料を使用せず、CO₂ 排出量が少なく持続可能なエネルギーから製造するのが望ましい。そのような観点から我々は将来の水素エネルギー社会の実現に向けて、太陽電池を入力電源に使ったソーラー水素ステーションについても研究開発に取り組んでいる。2001 年 7 月に市販の機器を組み合わせて米国カリフォルニア州ロスアンゼルス Honda R&D ロスアンゼルスセンタで

実験を開始し、2003 年 10 月に独自技術である常圧式水電解スタックとプロトタイプ of CIGS 薄膜太陽電池を投入し SHS1 の運用を開始した^{(1), (2)}。

これまでの SHS1 の実証試験の結果⁽³⁾から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。

SHS2 は、SHS1 の一般家庭に向けた進化型であり、SHS1 をリニューアルし米国カリフォルニア州の Honda R&D ロスアンゼルスセンタに設置し 2010 年 1 月から稼働開始した。本稿では、SHS2 のデザインとステーションの性能、差圧式高圧水電解スタックの技術的な内容について紹介する。

2. 差圧式高圧水電解型水素ステーション (SHS2) のコンセプトとデザイン

2.1. コンセプト

本稿で述べる SHS2 の外観を Fig. 1 に示す。

SHS2 のコンセプトは「Intuitive and Integrated」(直感と統合)とした。したがって、ユーザの水素充填操作に伴うディスペンサユニット (Dispenser unit) のデザインは、直感的で操作性にすぐれるものを目指した。また、電解ユニット (Electrolysis unit) では水素発生機能と昇圧機能を統合させ、よりコンパクトなサイズを目指した。

2.2. 家庭設置に向けて

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。

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 (Scoop) 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。

車の衝突からユニットを保護する対策として、従来はボラードと呼ばれる直径 150 mm で高さ 900 mm のコンクリート製の円柱がユニットの前に約 1600 mm 間隔で 7 本も設置されていた。しかし、今回はボラードの代替手段としてユニットの両側に湾曲した側壁 (Sidewalls) を配置させることと、ユニット設置部分を車道から約 150 mm (6 inches) 上げることで衝突保護の対策をおこなっている。そのため、SHS2 の概観は威圧感のないシンプルなものにすることができた。

2.3. パッケージング

Fig. 2 に電解ユニットの外観を示す。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。

Fig. 3 にディスペンサユニットとスクープの外観を示す。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



Fig. 1 External view of high differential pressure water electrolysis-type Solar Hydrogen Station (SHS2)

(Hose)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 (Nozzle)の収納方法やホースの長さについて事前に確認した。

2.4. ユーザーインターフェイス (UI)

Fig. 4にUIの画面表示を示すが、一般のユーザに受け入れられるように画面表示はシンプルで必要十分な情報を提供するように配慮されている。また画面構成は階層化しており、操作モード図も直感的でわかりやすいデザインとした。



Fig. 2 Electrolysis unit

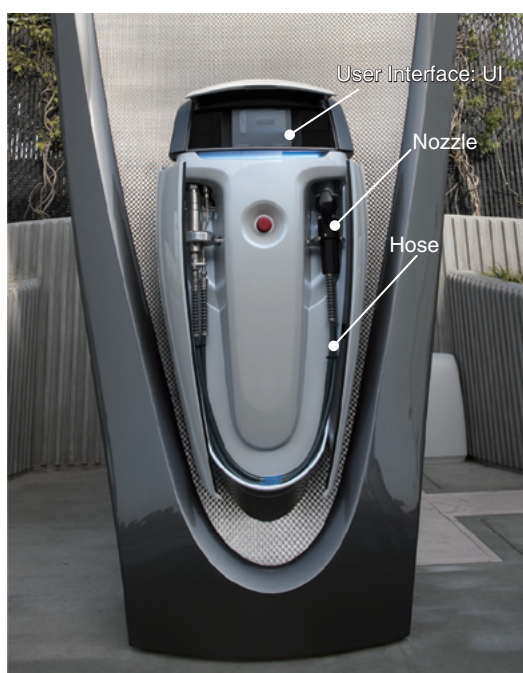


Fig. 3 Dispenser unit with User Interface

ディスペンサユニット内の水素充填ノズルを燃料電池電気自動車に接続し、画面のスタートボタン (Start Filling) をユーザが押すことにより水素充填が開始される。またストップボタン (Stop Filling) を押すか、燃料電池電気自動車のタンクが満タン状態 (35 MPa) になると自動的に水素充填が終了する。

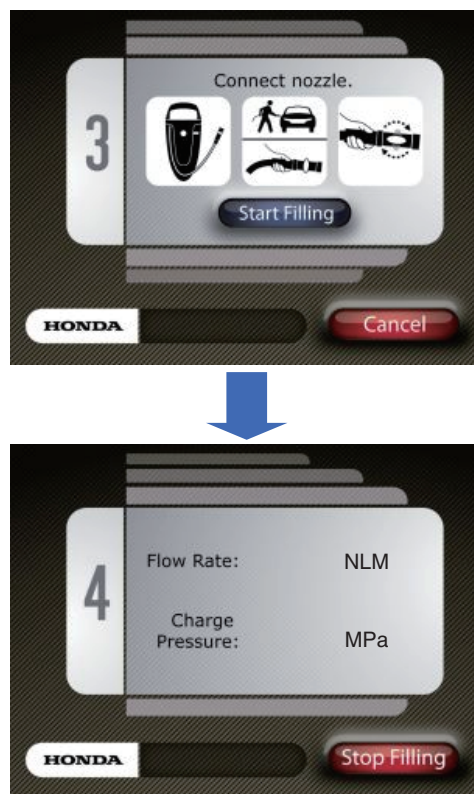


Fig. 4 UI screen

3. 差圧式高圧水電解型水素ステーション (SHS2) のシステム概要

3.1. システム構成

Fig. 5にSHS1とSHS2の水素ステーションのシステム構成比較を示す。

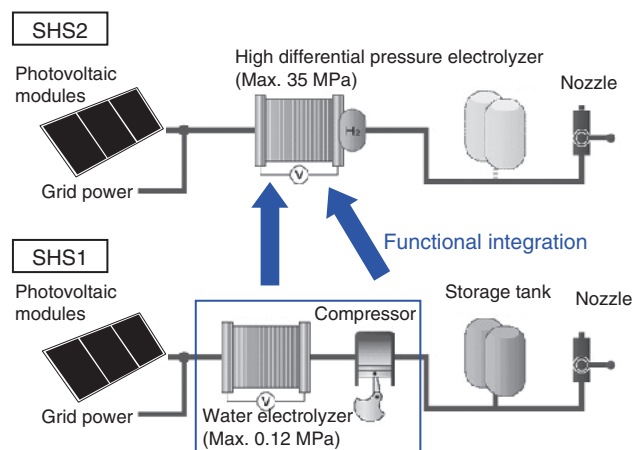


Fig. 5 Comparison of solar hydrogen stations

Table 1 Specifications of SHS2

Hydrogen production	Flow rate	0.7 Nm ³ /h (0.5kg/8h)
	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)

SHS1 では、常圧水電解スタック (Water electrolyzer) 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 (Compressor) 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 (High differential pressure electrolyzer) 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、電解ユニットの容積を 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。

3.2. 仕様

Table 1 に SHS2 の仕様を示す。

SHS2 は SHS1 と同様に、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で最大 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 30 miles⁽⁴⁾ (50 km) 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 90 miles (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になっている。

4. 差圧式高圧水電解型水素ステーション (SHS2) の初期性能評価

4.1. 燃料電池電気自動車への充填試験

Fig. 6 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結果を示す。

Fig. 6(a) に UI 画面のスタートボタンを押してから 20 分間のシステム起動時のデータ推移を示す。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、Fig. 6(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

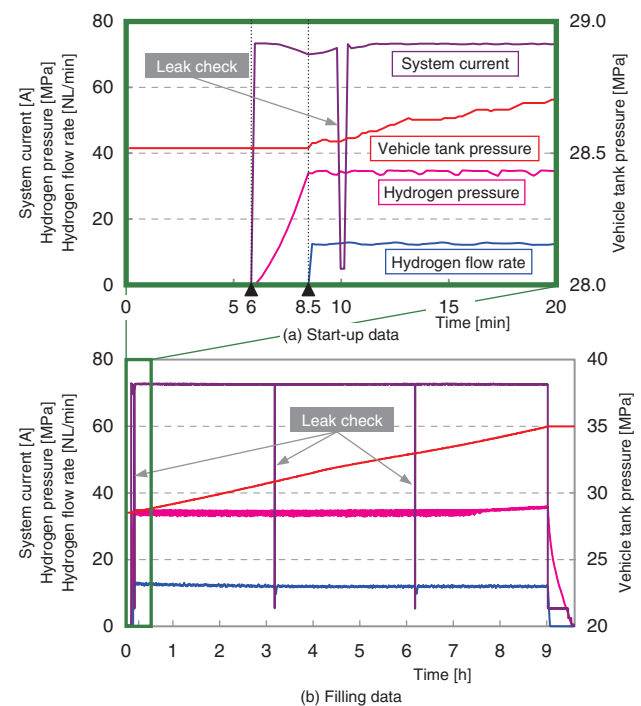


Fig. 6 System operating result for one day in January 2010

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 (Hydrogen pressure) 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 (Hydrogen flow rate), 燃料電池電気自動車への充填が開始されタンク圧力 (Vehicle tank pressure) 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 (Leak check) を約 20 秒間おこなっている。

Fig. 6(b) に今回おこなった一連の充填試験結果を示す。Fig. 6(a) に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、UI 画面の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。

4.2. 水素品質

燃料電池電気自動車に供給する水素の品質は、ISO14687 (Hydrogen fuel - Product specification)⁽⁵⁾ に規定されている。SHS2 を稼働させて得られた水素品質を Table 2 に示す。

SHS2 では純水から電気分解して水素を得ているため、水素中に含まれる不純物としては酸素と水分のみである。差圧式高圧水電解セルの特徴として、膜を介して水素極側が高圧に保たれており酸素が発生する酸素極側は大気圧となっている。そのため、酸素が高圧水素極側へと拡散移動する量は少ない。したがって、水素中の酸素濃度を低減するための処理をおこなうことなく、5 ppm 以下を達成している。また水分については差圧式高圧水電解スタックの後段に設置した吸着材により除去している。

水素品質の測定結果から SHS2 で製造した水素は、ISO 規格の基準をクリアしており燃料電池電気自動車用として十分な品質であった。

4.3. システム効率

Fig. 7 に SHS2 と SHS1 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を示す。

SHS1 に搭載されていた小型ステーション用の小流量機

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

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 (Compression energy) 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 (Proton Exchange Membranes: PEM) 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 (Cooling energy) 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 (Thermal Swing Adsorption: 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

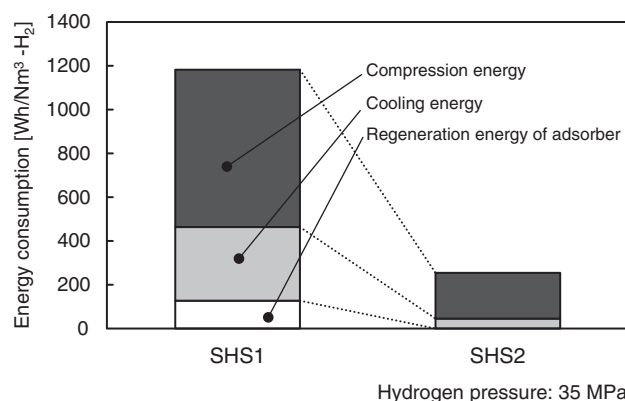


Fig. 7 Comparison of power consumption

(Regeneration energy of adsorber)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 (Cooling energy) 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、今回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。

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った。その結果、SHS2ではSHS1と比較してシステム効率を25%向上することができた。

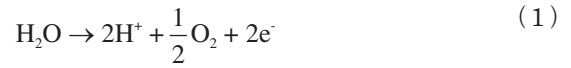
5. 差圧式高圧水電解スタック

5.1. 差圧式高圧水電解の原理

Fig. 8に差圧式高圧水電解の単セルの模式図を示す。

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 (Atmospheric pressure) 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す。



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} の式を示す。

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

R : 気体定数

T : 絶対温度

F : ファラデー定数

P_1 : 高圧側の水素分圧

P_2 : 低圧側の水素分圧

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⁽⁶⁾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。

5.2. 差圧式高圧水電解スタックの性能評価結果

差圧式高圧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まで昇圧したときの実測した消費エネルギー推移 (Measured Value) と式(3)から求めた計算値 (Calculated Value) をFig. 9に示す。

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

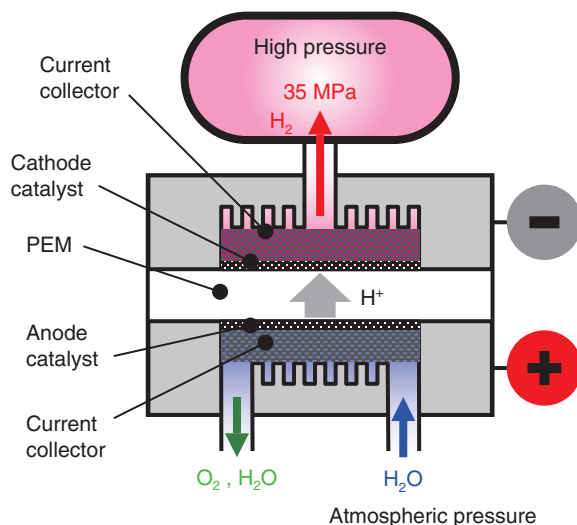


Fig. 8 Schematic of high differential pressure electrolysis cell

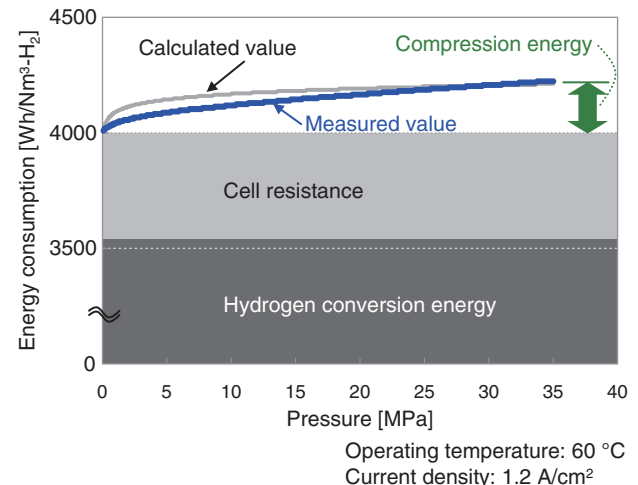


Fig. 9 Hydrogen compression curve of high differential pressure electrolyzer

解エネルギー (Hydrogen conversion energy) であり、残りがセル抵抗 (Cell resistance) 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 (Compression Energy) は約 200 Wh/Nm³ であり、Fig. 7 に示した SHS1 の機械式コンプレッサによる昇圧エネルギーの 700 Wh/Nm³ と比較して差圧式高圧水電解スタックの水素昇圧に必要なエネルギーは小さく、計算値とも一致した。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。

差圧式高圧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 (3544 Wh/Nm³) に対して約 84% の効率であり、高圧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。

5.3. 差圧式高圧水電解スタックの耐久性

水素圧力 35 MPa での差圧式高圧水電解スタック単体による耐久試験をおこなった。SHS2 では 1 日 8 時間運転を想定しているため、3000 時間では約 1 年相当となる。Fig.

10 に差圧式高圧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) を示す。

差圧式高圧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、3000 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、高圧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 3000 時間まで一定で推移しており、高圧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、差圧式高圧水電解に特有の耐久変化はなく効率の維持推移が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。

6. まとめ

CO₂ 排出量削減を目的とした差圧式高圧水電解型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により、以下の結果を得た。

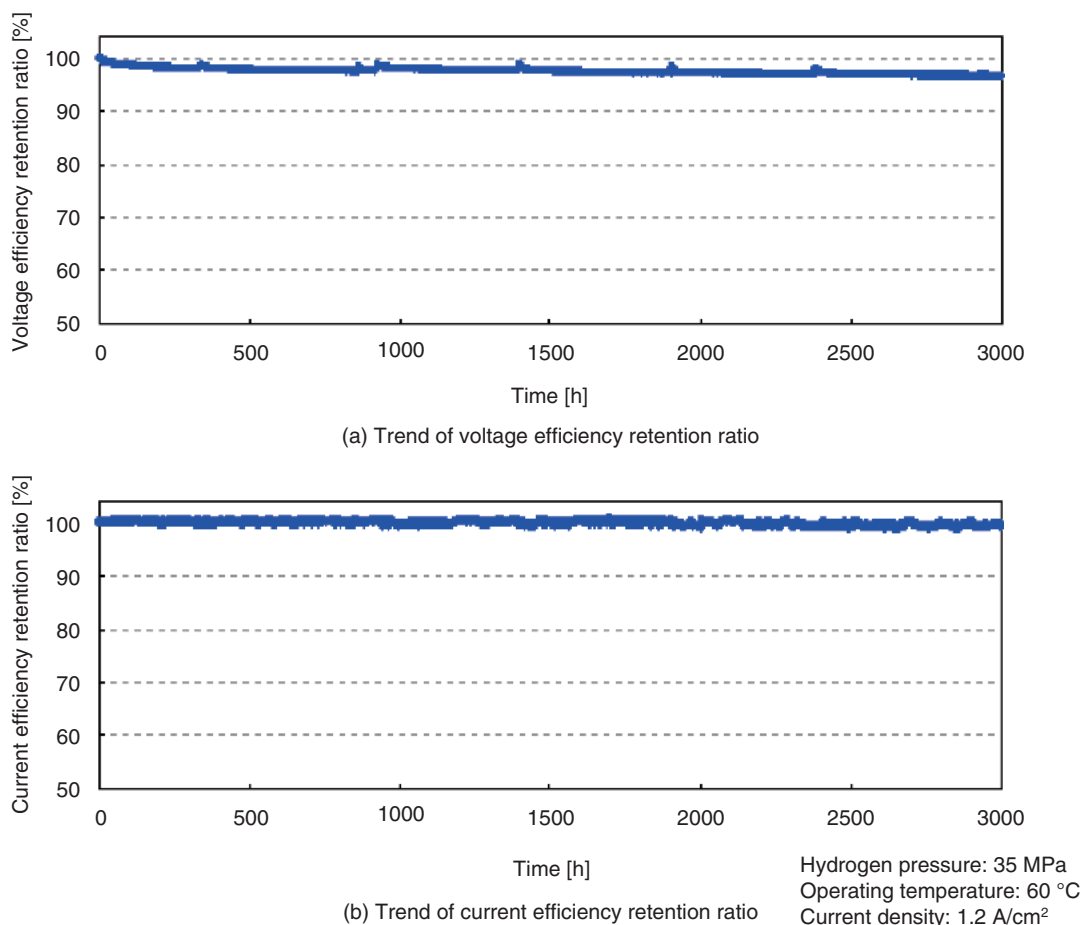


Fig. 10 Durability performance of high differential pressure electrolyzer

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。

今後は、差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション (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。

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) U.S. Department of Energy (DOE), Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), U.S. Environmental Protection Agency (EPA): Model year 2010 Fuel Economy Guide, p.22(2010)
- (5) ISO14687-2: Hydrogen fuel - Product specification - Part 2, Type 1, Grade D
- (6) 電気化学会編: 電気化学便覧, 第 5 版, p.155(2000)

■ 著 者 ■



中沢 孝治



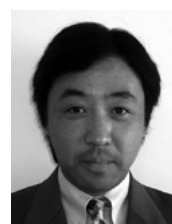
長岡 久史



武内 淳



Frank MOBURG



山下 郁也



岡部 昌規