

太陽電池を使った水素ステーション(SHS)の実証試験

Verification Test of Solar-powered Hydrogen Station (SHS) with Photovoltaic Modules

岡 部 昌 規*
Masanori OKABE
樽 家 憲 司*
Kenji TARUYA

中 沢 孝 治*
Koji NAKAZAWA
判 田 圭 圭*
Kiyoshi HANDA

要 旨

太陽電池の電力から CO₂ 排出量ゼロの水素を製造する太陽電池水素ステーション Solar-Powered Hydrogen Station (SHS)を製作し、約4年間安定して水素製造し続け、燃料電池乗用車Honda FCX への水素供給を実証した。これにより再生可能エネルギーを用いた安定した水素製造を証明した。太陽電池で発電した変動電力のみを用いたSHSのシステム効率は約53%であり、年間水素製造量は約1500 Nm³であった。これは FCX が約 8000 miles を走行可能とする量である。また定格電力を用いた SHS のシステム効率は 66%であり、開発した水電解スタックの高効率化により、小型ステーションにもかかわらず大規模ステーションの効率と同等となった。実証試験を通して、将来の水素供給装置の普及形態のひとつである家庭サイズの再生可能水素ステーションのフィジビリティスタディを完了した。

ABSTRACT

A solar-powered hydrogen station (SHS) with photovoltaic modules has been established to produce hydrogen with zero CO₂ emissions. The SHS has been stably producing hydrogen for almost four years, and also, the hydrogen supply for the Honda FCX fuel cell vehicle has been demonstrated. This operational status has demonstrated that stable hydrogen production can be achieved using a renewable energy source. Using only the variable power generated by the photovoltaic modules, the SHS system operates at an efficiency of approximately 53%, and produces approximately 1500 Nm³ of hydrogen per year, equivalent to 8000 miles-run by the FCX. Using verification tests, feasibility studies of a household renewable hydrogen station, projected as a future mode of hydrogen supply, have been completed.

1. はじめに

Hondaでは化石燃料の代替、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、次世代の究極クリーンパワープラントとして燃料電池の開発に取り組んできた。その燃料電池車に用いる水素は、製造、貯蔵、供給プロセスにおいて可能な限り化石燃料を使わないで製造することが好ましい。言い換えれば、将来の水素製造は地球環境に影響を与えない再生可能エネルギー(例えば太陽電池電力など)を利用することが望まれている。

しかしながら入力が再生可能エネルギーを単独で用いた場合、その特徴から変動電力となるため、大規模ステーションシステムではあらかじめ運転モードの予想が困難になり実運転時の高効率化が期待できない。現在の太陽電池

は電力系統に接続されるのが一般的であるが、さらに太陽電池が普及拡大すると電力系統に接続できない変動電力が増大する可能性がある。このような変動電力のみを使って燃料電池用の水素を製造することは再生可能エネルギーの利用だけでなく電力平準化の観点からも有効である。従って再生可能エネルギーを使って水素供給する装置は、入力電力の変動に対応し高効率運転できるシステムが要求されている。

そこで我々は将来の水素供給装置を考えて、太陽電池の電力を直接水素製造システムに供給する、変動電力に対応できる小型水素ステーションの開発に取り組んできた。2002年7月に米国カリフォルニア州ロサンゼルスに独自技術を盛り込んだ第二世代の太陽電池水素ステーション(SHS)を設置し⁽¹⁾、2003年にはSHSの実証試験を通して抽出し

*四輪開発センター

た弱点を改善し、さらに高効率水素ステーションへと技術進化させた⁽²⁾。このSHSは現在も太陽電池の電力だけで水素を製造する実証試験を継続している。

太陽電池の変動電力だけから高効率で水素を得ようとするこの考え方は、将来の水素供給形態としての家庭用水素ステーションのあり方にも通じる。SHSは小型、高効率の水電解ステーションのあり方を考えるために、以下のふたつの目標を掲げて設置されている。

- (1)再生可能エネルギーから水素を安定して製造すること。
- (2)年間 10000 miles FCX 走行分の水素を製造すること。

本報ではSHSの約4年間の実証試験から、上記目標に対して得られた結果を報告する。

2. 太陽電池水素ステーション(SHS)

Fig. 1 に実証試験した SHS の構成を示した。SHS は発電部の太陽電池と、水素を製造する水電解ユニット、製造した水素を圧縮してかつFCXに水素を充填するディスペンサユニット、高圧水素を貯蔵する高圧タンクユニットの三つのユニットで構成されている。

太陽電池は製造時CO₂排出量低減の観点から、銅、インジウム、ガリウム、セレン(CIGS)薄膜太陽電池が好ましいので、2003年秋にシリコン単結晶からCIGS薄膜太陽電池に変更した。Fig. 2 に太陽電池の設置状態を示す。

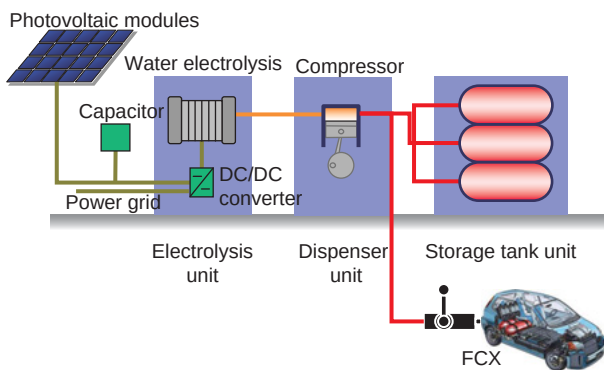


Fig. 1 Schematic diagram of SHS



Fig. 2 CIGS thin-film photovoltaic modules (prototype; manufactured by Honda Engineering Co.,Ltd.)

水電解ユニットには小型、高効率を目指した Fig. 3 に示す水電解スタックが搭載されており、そのスタックには新開発アノード触媒である高活性、高耐久性のルテニウム(Ru)系触媒が用いられている。

太陽電池で発電された電力は、すべてシステムに供給され水素に変換される。SHSの水素製造量はFCX年間10000 miles 走行を可能とする量をFCXの燃費⁽³⁾から2000 Nm³と設定し、これを達成するために約6kWシステムの太陽電池を搭載している。

SHSは、実際にはFCXの走行テストのための水素供給ステーションであるので、天候や走行距離への変動対応として、商用電力を利用して水素を製造し貯蔵することも可能になっている。



Fig. 3 Water electrolysis stack using newly developed Ru-based catalyst

3. SHS を用いた水素製造の実証試験

3.1. 太陽電池を用いた水素製造

3.1.1. 太陽電池を用いた一日の水素製造

Fig. 4 に典型的な一日の水素製造量とシステム効率の変化を示した。システム効率は生成した水素のエネルギーを全投入電力(エネルギー)で割った値であり、水素へのエネルギー変換効率を示している。

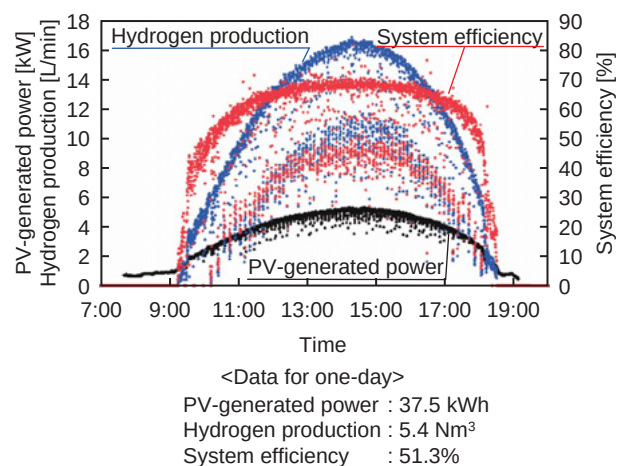


Fig. 4 Operating results for one-day in August 2006

一日の中では時刻と共に変化する発電量の増大に伴い水素製造量, システム効率が增大する傾向にあった。この一日の全水素製造量は 5.4 Nm^3 であり, 約 27 miles の FCX 走行を可能にする。年間を通して安定的にこの量の水素製造ができれば目標値を達成することになる。

システム効率は発電量の増大に伴い日中ピーク時に瞬時効率が約 70% まで到達したが, 断続的なコンプレッサの起動に伴いコンプレッサ起動時の瞬時効率は約 20% 低下した。また朝晩や発電量の低い時間帯では, 補機電力の割合が増大するため水素製造に使われる電力量が減少し効率低下が起こった。そして一日の全発電量と全水素製造量とから計算したシステム平均効率は約 51.3% となった。

Fig. 5 に瞬時の太陽電池の発電量(システム入力電力)に対するシステム効率の関係を示した。システム効率は入力電力の上昇に伴い効率向上の傾向を示し, さらに入力電力を増やすことにより効率が向上する可能性を示した。その理由は, 定格出力 $2 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ (入力電力約 10-12kW) に対して, 太陽電池運転が最大約 $1.2 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ (最大電力約 5.2kW) であるため, 入力電力の増大が可能であり, 補機電力割合を小さくできるからである。またコンプレッサ起動による電力消費のため瞬時システム効率が約 20% 低下した部分にも曲線が現れた。補機デバイスの中ではコンプレッサ起動時の消費電力割合が大きかった。

3.1.2. 太陽電池を用いた 1 ヶ月間の水素製造

Fig. 6 に 2006 年 8 月の 1 ヶ月間の発電量, 水素製造量, システム効率を示した。8 月 3 日以外はほぼ快晴で安定した発電量を示し, ほとんどの日が 35 kWh/day 以上であった。水素製造量も 1 日あたり約 5.2 Nm^3 で最大で 6.2 Nm^3 となった。実際のこの月の水素製造は 160 Nm^3 であり, これは約 800 miles の FCX 走行を可能にする。この 1 ヶ月間の水素製造量についても年間を通して安定すれば, FCX が年間 10000 miles 走行分の目標値を達成することになる。

しかし安定した水素製造が実証されたひと月の間でも日々のシステム効率は 48-56% と変動した。この理由のひとつはタンク圧力の違いによりコンプレッサの消費電力が

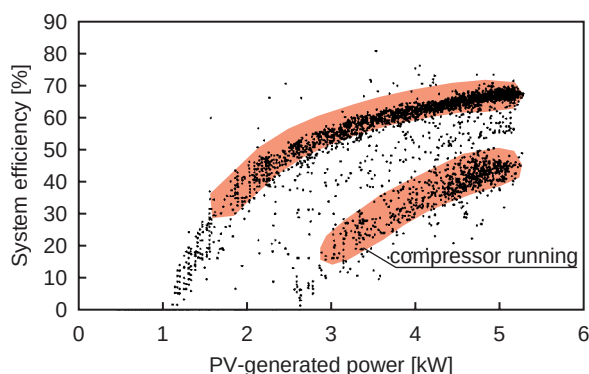


Fig. 5 Operating result for one-day in August 2006 (PV-generated power versus system efficiency)

異なることによる。

Fig. 7 に各タンク圧力におけるコンプレッサの消費電力を示した。コンプレッサの吐出圧力 7 MPa と 35 MPa の違いにより消費電力約 200 W/Nm^3 の差があり, 効率換算すると約 2-3% の差となる。またもうひとつの理由は外気温度上昇のため冷却(ペルチェ素子など)に必要な電力が増大することや水素精製の吸着塔再生用ヒータなどの補機デバイスが起動することである。

以上の結果から日々のシステム効率の変化は一日あたりの発電量(入力電力)の増減よりも, 変動する補機デバイスの起動停止に影響するといえる。このことから変動電力を用いた水素製造システム効率は, 補機デバイスの起動停止

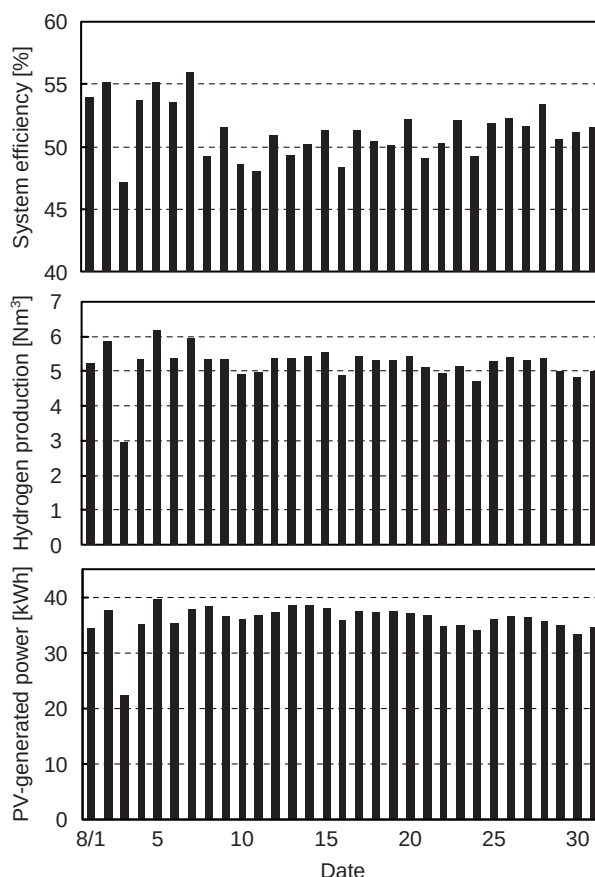


Fig. 6 Data for whole month of August 2006

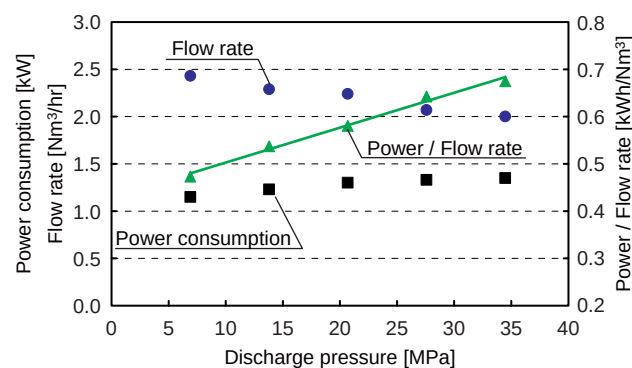


Fig. 7 Power consumption of compressor versus discharge pressure

Table 1 Comparison of annual SHS performance

Year	2004	2005	2006	2007*
PV-generated power [kWh/day]	26.7	26.2	28.2	28.3
Hydrogen production [Nm ³ /day]	4.1	3.9	4.2	4.1
System efficiency [%]	54.1	52.2	53.2	52.3
Amount of produced hydrogen* [Nm ³]	1485	1400	1550	1520

*Data from January to July, 2007

の影響を小さい小型デバイスの使用により効率低下を抑制できるといえる。

3.1.3. 太陽電池を用いた年間の水素製造量

太陽電池を用いた SHS の効率を評価するには、ステーションの水素製造効率が時間、天候、季節などの影響を受けて変わるため、一年を通した水素製造量を計測して効率比較することが有効である。

Table 1 に過去 4 年間の水素製造量とシステム効率を示した。年間の水素製造効率の変化は $53 \pm 1\%$ であり、前述した日々の効率と比較してばらつきが小さく安定している。この結果から SHS では太陽電池の変動電力を用いて 4 年間安定して水素製造ができていることが実証され、目標のひとつである再生可能エネルギーを用いて安定して水素製造することが達成できた。これらの効率から年間の水素製造量を推定すると約 1500 Nm³/year となる。これは FCX 走行距離約 8000 miles に相当する。

これまでに SHS を使って約百数十回の FCX への水素充填をおこなっており、今後も引き続き水素供給実証を継続する予定である。

3.2. 商用電力を用いた水素製造

商用電力を用いた定格電力での水素製造では補機電力が設計値どおりとなるので、SHS 効率は高効率となることが予想される。さらに太陽電池電力のような低電力の場合には低電流密度電解となり抵抗損失が小さくなるので、効率低下は起こらないとも考えられる。そこで一定電力で SHS を運転したときの効率と水素を 1 Nm³ 製造するのに要する消費電力を比較し Fig. 8 に示した。

太陽電池を用いた時の電力量に近い 50 A で運転したときの効率は 60.9% となった。これに対してシステム定格の 90 A で運転したときの効率は 66.3% であった。この効率の詳細を比較すると、システム定格 90 A 運転時は補機の消費電力割合の効果および DC/DC コンバータの高効率点での運転による変換損失の低減が寄与している。これに対して 50 A 運転時は水電解スタックの損失低減が予想さ

れたが、実際には電解スタック温度低下により電解損失電力は逆に多くなった。これは純水製造量が電力に関係なく一定なので温められた水の排水が多くなること、また低出力時の損失エネルギーが少なく水温が十分に上がらないことによる。

先述した太陽電池からの年間水素製造量の当初計画に対する未達分は、試験結果から以下の二点であることが判明した。

- (1) 電力変換器(DC/DC コンバータ)の実使用域と高効率ポイントの不整合
- (2) 水電解スタックの最多運転電流密度域での温度上昇不足による水電解効率低下(スタック保温不足)

以上の結果から、太陽電池を用いた低出力時の運転でも電解水温保持の対策をすればスタック効率を上げられる可能性が示唆され、システム効率向上の見通しも得られた。またこれらの対策を実施することにより、太陽電池を用いた場合 SHS のシステム効率向上が見込まれることから、FCX 年間 10000 miles 走行分の 2000 Nm³ 水素製造の達成見通しが得られた。

3.3. 他の水素ステーションとの比較

Fig. 9 に現在公表されている水電解型水素ステーションの効率とコンプレッサの効率比較を示した⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

SHS の効率は中規模ステーションの効率と同等である。また水素製造量の少ない小型ステーションと比較すると効率がより良くなっている。一般的にコンプレッサの効率は水素製造量に依存し、小型ステーションでは効率が低くなることが予想されているが、SHS ではその効率低下を抑制し高効率化が達成されている。

またコンプレッサの効率は摩擦損失が影響するので水素製造量に依存して変化する。水素製造量が大きくなるほど水素ステーションの効率は高くなる可能性を有し、この点では大規模ステーションの方が有利である。

Table 2 に各ステーションの水素製造時の消費電力の内訳を示した。どのステーションも 70% 弱の効率を示している

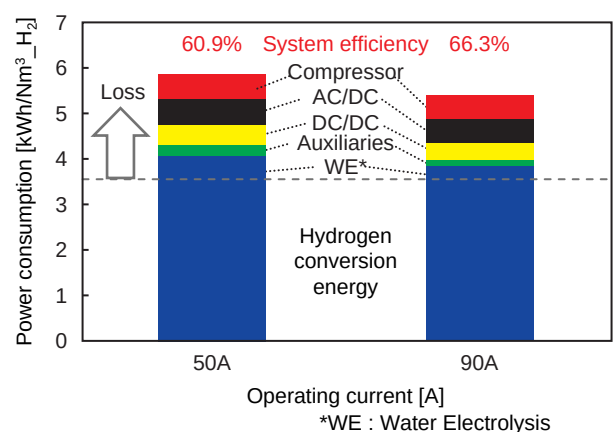


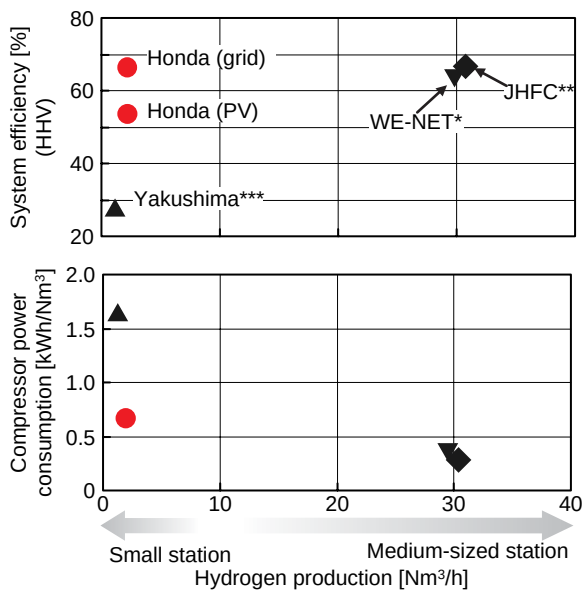
Fig. 8 Power consumption in power grid operation

Table 2 Comparison of hydrogen refueling stations

Manufacturer (Location)	WE* efficiency** (HHV)	Power consumption [kWh/Nm ³]	
		WE*	Compressor
Honda (Los Angeles)	95.1%	4.749	0.675
WE-NET (Takamatsu)	90.6%	5.165	0.308
JHFC (Sagamihara)	—	4.940	0.275
Yakushima project	—	5.769	1.638

* WE : Water Electrolysis

** Operating temperature : 80 °C

 Current density : 1 A/cm²


* WE-NET : World Energy NETWORK project (Japan)

** JHFC : Japan Hydrogen and Fuel Cell demonstration project

*** Yakushima : Yakushima zero emission project

Fig. 9 Performance comparison of hydrogen refueling stations

がその効率の中身には差がある。SHS のコンプレッサの単位水素あたりの消費電力は中規模コンプレッサに比較して大きく、コンプレッサの電力損失分を水電解スタックの高効率運転で補填している。SHS のコンプレッサは市販品の流用のため、システム適合性が充分ではない。水素ステーションの高効率化のためには、昇圧部の制御方法やシステムの改善が求められており、家庭用水素供給装置としてまだ開発の余地を残している。またSHSの水電解スタックの効率は他に比較して高いことが明確になった。

4. 新規 Ru 触媒を搭載した水電解スタック

前項までにSHSの水電解スタックの効率が低いことを示したが、それはセル抵抗を低減したスタック構造と新規触媒を適用したことによる。本章ではその水電解スタックの詳細について紹介する。

4.1. スタック構造の特徴

Fig. 10 に水電解スタックの展開図を示す。開発した水電解スタックの特徴は、電気分解に必要な供給水の循環ラインと補機をすべてスタックと一体化したことである。これにより小型化を達成するとともにスタックの温度制御を容易にした。供給水である純水は、純水製造装置からアノードエンドプレート一体型の酸素気液分離器に供給され、アノードエンドプレート一体型の水ポンプによりセルへと導入され電解される。アノード触媒面では、酸素が発生し純水と共にアノードエンドプレート一体型酸素気液分離器に戻る。このように循環ラインと補機をスタックと一体化したことにより、通水経路が短くなり水ポンプ動力の削減が可能となり、省スペース化と高効率化を達成した。

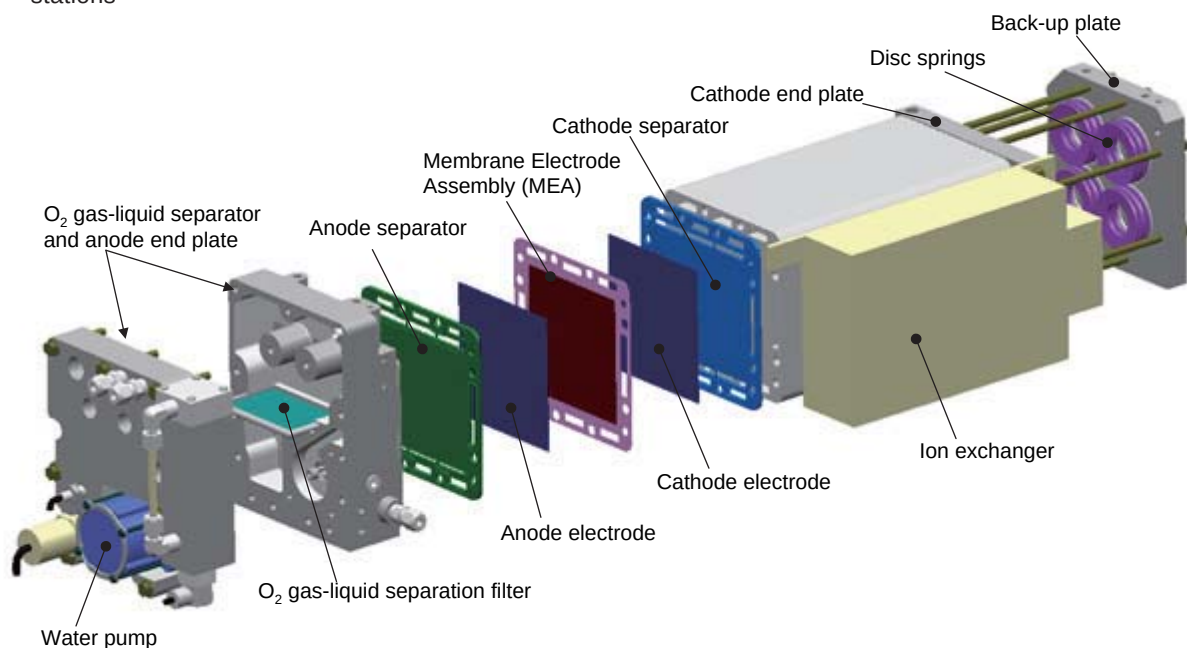


Fig. 10 Expanded view of water electrolysis stack

セル部は、膜電極接合体(MEA)の両極にチタン繊維焼結体から成る給電体を配置させ、その外側にチタン製のセパレータを設置する構造である。給電体とセパレータの接触部はチタン酸化物被膜による接触抵抗の増大を抑制するために、セパレータと給電体の表面に白金めっきをした。スタックの積層数は電源電圧(48 V)から27セルとして、触媒面積は水素製造量(1 Nm³/hr)から 100 cm²(100 × 100 mm)と決定した。このスタックを2台搭載し定格水素製造量 2 Nm³/hr としている。また給電体と MEA との押付け荷重には最適荷重がある。本スタックでは、MEA と給電体の押付け荷重が最適値になるようにカソードエンドプレートとバックアッププレートに間に配置した皿ばねによって、この最適荷重を加える構造とした。

4.2. 新開発アノード触媒の特徴

Fig. 11 に新開発のアノード触媒の TEM 写真を示した。この触媒の一次粒子径は数ナノメートルであり高活性を示すことが裏付けられる。この触媒組成はルテニウム・イリジウム・鉄の3元素からなる複合酸化物(RuIrFeOx)である。一般的に RuO₂ は水電解のアノード触媒として高活性を示すが耐久性に問題があることが知られている。しかしながら本触媒は高活性な Ru が Ir や Fe と複合酸化物を形成することにより Ru の溶出抑制に成功している。

この触媒は単セルテストにおいて高活性かつ長寿命を示すことが確認されている。触媒活性は単セルの電解試験において 1 A/cm² の電流密度で電力効率が 97% であった。また単セルの耐久性能としては一万時間後の効率低下が 3% 以内であることも確認されている。

4.3. スタック単体性能評価

Fig. 12 に SHS に搭載した水電解スタック単体の初期電流-電圧曲線を示した。運転温度の上昇とともに効率は上昇する傾向を示し、スタックの温度制御は水電解効率向上

に有効である。本スタックの初期効率は 78℃ で 94.1% であり、単セル性能をスタック化後も保持している。

また Fig. 13 に示すようにセル間の性能ばらつきも直列に配置した 27 セルで 93.8 - 94.4% と 1% 以内であることから、スタック内の 27 セルにわたり押付け面圧や水の供給が均等となっていることが証明された。

また Fig. 14 に SHS に搭載したスタック単体の初期性能および経時変化を示した。スタックは 2004 年から約 4 年間、メンテナンスなしで稼動し続けた。比較として単セル耐

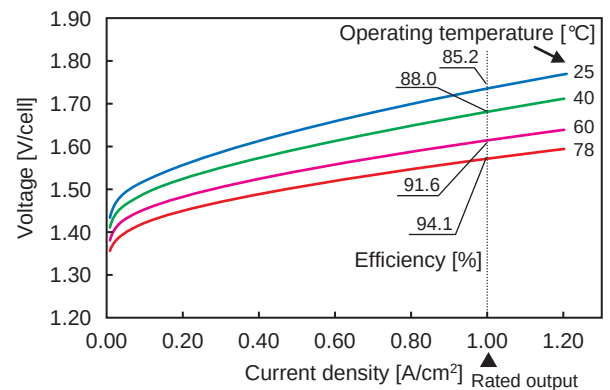


Fig. 12 I-V curve of water electrolysis stack

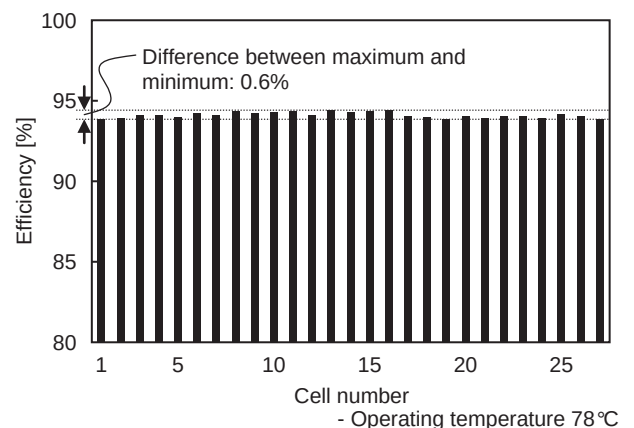


Fig. 13 Efficiency of water electrolysis cells

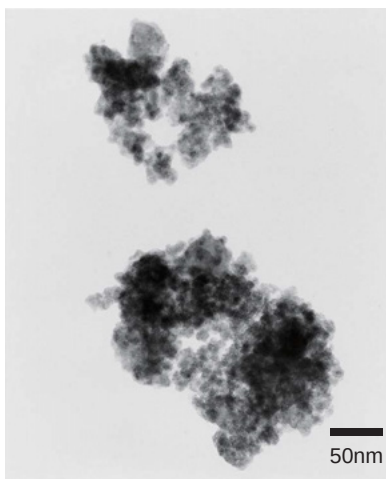


Fig. 11 TEM image of RuIrFeOx catalysts

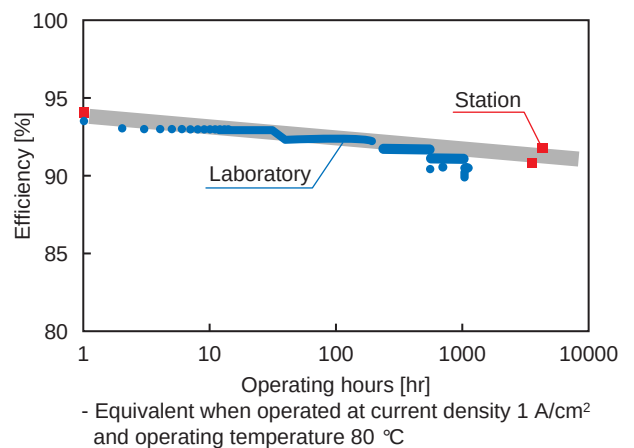


Fig. 14 Durability performance of water electrolysis stack (comparison of laboratory and station results)

久試験結果を示した。SHS に搭載したスタックの性能は単セル試験の延長線上にあり、スタック耐久性は予想と一致した。また膜劣化による電流効率の低下なども認められず、耐久性の実証ができた。SHS に搭載されたスタックは屋外での使用および変動電力での使用に対しても極端な性能低下を起こすことがなく、実験室で得られた結果と同等の性能変化を示すことから、家庭サイズの水素ステーション用の水電解スタックとして有用であることが証明された。

5. まとめ

CO₂ 排出量削減を目的とする太陽電池を用いた水素ステーションの実証試験を4年間実施し、以下の結果を得た。

- (1) システムは約4年間安定して稼働し、CO₂ を発生させることなく水素を生成し続けた。
- (2) 太陽電池電力のみを用いた4年間を通しての年間水素製造効率は 53 ± 1% となった。
- (3) それぞれ年間の水素製造量は約 1500 Nm³ で、FCX の走行距離 8000 miles に相当する。
- (4) 定格電力での水素製造効率は、小型ステーションでも 66.3% に達した。スタックの高効率化で大中規模ステーションと同等の効率を達成した。
- (5) 水電解スタックは他に比較して高効率となったが、そのキー技術は RuIrFeOx 触媒を用いたことである。本水電解スタックは水素ステーションの水電解スタックとして有用であることが証明された。

実証試験を通して、将来の水素供給装置の普及形態のひとつである家庭サイズの再生可能水素ステーションのフィジビリティスタディを完了した。

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) 小川隆行, 木村顕一郎, 内堀憲治, 藤本幸人, 清水潔: 燃料電池乗用車 Honda FCX 用パワートレインの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p.7-12
- (4) 日本自動車研究所, エンジニアリング振興協会: 「固体高分子形燃料電池システム実証等研究」, 水素・燃料電池実証プロジェクト(JHFC プロジェクト)第1期報告書, p.159-162(2006)
- (5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 水素安全利用等基盤技術開発, 水素インフラに関する研究開発, 水電解型水素スタンドの運転技術開発, 平成15年度~平

成16年度成果報告書, p.50-54(2005)

- (6) Kai, T., Uemura, Y., Takanashi, H., Tsutsui, T., Takahashi, T., Matsumoto, Y., Fujie, K., Suzuki, M.: A Demonstration Project of the Hydrogen Station Located on Yakushima Island - Operation and analysis of the station, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 15, p. 3519-3525 (2007)

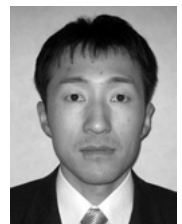
■著 者■



岡部 昌規



中沢 孝治



樽家 憲司



判田 圭