

太陽電池を使った水素ステーションの紹介

Introduction of Hydrogen Refueling Station with Photovoltaic Modules

上 山 雅 樹*
Masaki UYAMA
中 沢 孝 治*
Koji NAKAZAWA

喜 多 真佐人*
Masato KITA
長 岡 久 史*
Hisashi NAGAOKA

田 口 聡*
Satoshi TAGUCHI
荒 川 慎 一*
Shinichi ARAKAWA

要 旨

エネルギーと地球環境問題の解決をめざし、太陽光エネルギーを使って水素を製造し燃料電池自動車に供給する水素ステーションを製作し運用実験を行った。新組成の触媒を適用した水電解装置などを新たに開発し、6.5%のシステム総合効率を実現した。その結果、8 kW の太陽電池で1年間に燃料電池自動車一台が1万マイルを走行できる水素を供給できる見通しを得た。また、より少ない電力で製造が可能なCIGS薄膜化合物系太陽電池を導入することで、シリコン単結晶型太陽電池を使用する場合と比較して単位水素量製造時のCO₂排出量を1/5に削減できる見通しを得た。機器の小型化により、水素社会の到来を身近に感じられるようなデザインが実現したこととあわせ、水素製造のありかたを示すことができた。

ABSTRACT

An experimental hydrogen refueling station using solar radiation has been built in order to propose a solution for energy and global environmental issues. The system total efficiency of 6.5% is achieved by using an electrolyzer with a newly composed catalyst. As a result, it is predicted that this would produce enough hydrogen to drive a fuel cell vehicle for 10 000 miles per year with 8kW capacity from photovoltaic modules. Also, CO₂ emissions for production of hydrogen per unit were reduced to one-fifth by employing a CIGS thin film compound photovoltaic module, as compared with a single-crystalline Si photovoltaic module. The hydrogen refueling station has enabled to demonstrate a form in which future hydrogen production may appear, as well as a design indicating the hydrogen society is coming closer.

1. はじめに

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、燃料電池自動車の開発を行ってきた。さらに、水素の製造から、貯蔵、供給までのプロセスにおいてもCO₂を排出しないことが重要であるとの認識から、将来の水素社会の実現に向け、必要な技術開発に取り組んでいる。

水素を製造するエネルギー源には、石油のように偏在することなく世界中どこでも容易に得られ、十分な量を確保できる非枯渇な自然エネルギーを活用することが望ましいと考え、太陽光を利用するシステムの検討を開始した。しかし太陽光は地球規模の視点からは十分な量があるものの、単位面積あたりに得られるエネルギーが少なく、さらに時刻・天候・季節により変動するため、エネルギーの密度を高め、かつ安定化させることが必要である。

近年の燃料電池自動車の研究開発の進展に合わせ、インフラ業界や官公庁主導の大規模な水素製造の研究開発が行われており、そのなかで太陽光を利用した水素製造の研究も取り組まれている⁽¹⁾。しかしながら燃料電池自動車1台あたりに必要とされる水素を製造するためにどれだけの太陽電池を必要とするのか、さらにその装置を作るためにどれだけのCO₂が排出されるのかを研究している例はない。以上の理由から、Hondaは1998年に市販の機器を組み合わせて太陽電池をつかった水素製造システムのプロトタイプをつくり、水素製造実験を行いエネルギー収支を測定した。この結果、機器の補機類が多くのエネルギーを消費するため、実際に得られる水素の量ははわずかであり、システムの高効率化の研究が必要であることがわかった。

2001年には高効率化の研究の為に、第一世代の水素製造供給ステーションを、米国カリフォルニア州ロスアンゼルスに設置し、実験を開始した。燃料電池自動車には、現地にて既に公道走行テストを行っていたHonda FCXを用い



Fig. 1 External view of Hydrogen Refueling Station

た。この自然エネルギーから水素を製造し利用するまでの一貫した実験は、自動車メーカーとして世界で初めてのところであり、2001年7月に公表している。

本稿では、この第一世代のステーションで得られた知見をもちいて、より効率を向上し、かつ小型化し、2002年の7月から稼働を開始した第二世代のステーション(Fig. 1)を紹介するとともに、水素製造量と単位水素あたりに排出されるCO₂を推定したので報告する。

2. 水素ステーションの概要

2.1. 外観

本稿で述べる水素ステーションの外観を Fig. 1 に示す。一般の人が近寄りやすいイメージを持つことなく、水素社会を身近なものとして感じられるように、徹底した安全対策を行った上で従来の工場設備とは異なった意匠とした。

自然エネルギーを味方にし、未来へ船出するヨットをイメージして、光と水をつかって生み出される水素のクリーンさと未来感を表現した(Fig. 2)。

2.2. 仕様諸元

水素製造量は、過去の日射量のデータ⁽²⁾と全米の自家用乗用車1台あたりの年間平均走行距離⁽³⁾を参考に、年間1万マイル程度の走行が可能と量とした。そのために必要なエネルギーは太陽光だけでまかなえることを目標とした。

また、予測のつかない天候や走行距離の変動に対応するために、商用電力を利用して水素を製造することもできるようにした。主な仕様を Table 1 に示す。



Fig. 2 Design image sketch

Table 1 Major specifications

Item	Specification
Hydrogen generation	2Nm ³ /h (Max.) 2 278Nm ³ /year
System efficiency	6.5%
Unit size (L × W × H)	600 × 600 × 1 200 (Electrolysis unit & Dispenser unit)
Storage volume	110 Nm ³
Charge pressure	35 MPa (Max.)
Charge system	Pressure gap
Energy source	Photovoltaic modules 8.4kW Grid power (aux.)
Type of electrolysis	Solid polymer electrolysis membrane
Input material	Tap water
Purity of hydrogen	99.9999% (without water)

2.3. 全体構成

このステーションは、太陽電池(Photovoltaic modules)、水素をつくる水電解ユニット(Electrolysis unit)、水素を貯蔵しておく高圧タンクユニット(Storage tank unit)、燃料電池自動車に水素を充填するためのディスペンサユニット(Dispenser unit)からなる(Fig. 3)。

各ユニットは、身近にあっても威圧感のない大きさとするために、横幅は人の肩幅、高さは胸の高さを基準に、一辺の長さが2フィートの箱を基本単位として、それを複数組み合わせ構成した(Fig. 4)。構成する機器は、小型化し機能ごとに一つのユニットにまとめた形状とした。このことにより太陽電池をのぞく全ての機器は、ヨットの帆をイメージさせた屋根の下に配置することができ、デザインイメージに近いものが実現できた。

操作系についても、タッチパネルの画面を使い、対話形式で簡単に操作できるようにした(Fig. 5)。これらの配置図を Fig. 6 に示す。

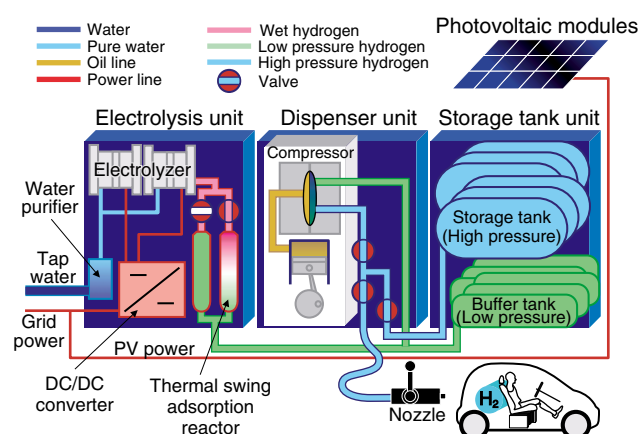


Fig. 3 Schematic illustration of Hydrogen Refueling Station

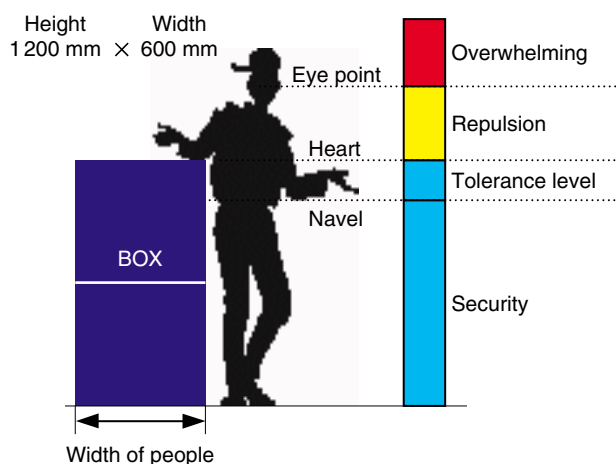


Fig. 4 Concept of unit size



Fig. 5 Scene of refueling for FCX

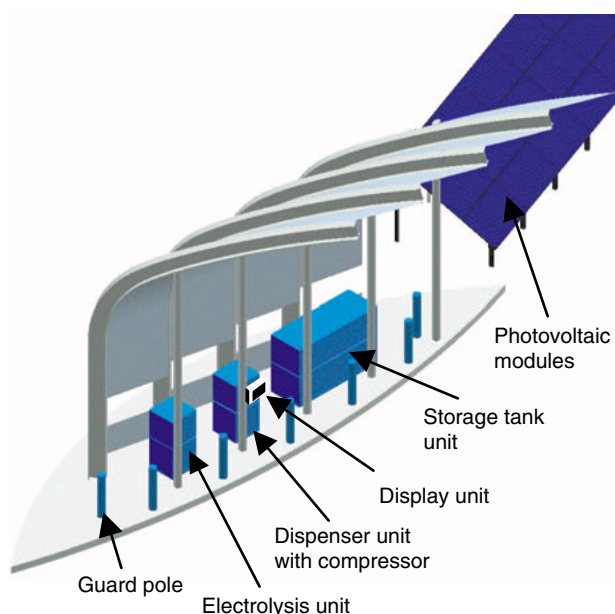


Fig. 6 Station layout

3. 太陽電池

太陽電池は一般に用いられている太陽電池の中で最も効率の優れたシリコン単結晶タイプで、公称出力 140W のものを 10 直列×6 並列で合計 8.4kW 分使用している。一年間の発電電力を最大にするためには、地面に対する太陽電池の設置角度を緯度と同程度にすることが望ましく、ロスアンゼルスに合わせて約 35 度としている(Fig. 7)。



Fig. 7 External view of photovoltaic modules

4. 水素製造ユニット

4.1. 構成

水素製造ユニットは、水道水から純水を取り出す純水製造装置(Water purifier)、純水を電気分解することにより水素を製造する水電解装置(Electrolyzer)、純水と混合状態で水電解装置から取り出した水素から水分を分離する水素気液分離器(H₂ gas-liquid separator)、分離した水素ガスに含まれている水蒸気と微量の酸素を除去する水素精製器(Hydrogen purifier)からなる(Fig. 8)。

この水素製造ユニットでは、製造する純水を削減するための純水循環システムと、水素精製器を再生する際に水素を再利用し水素製造量を削減する水素循環再生システムを用いて、消費する電力を少なくする工夫をしている。Fig. 9に、これらの水と水素の循環システムを示す。

製造する純水を削減するための純水循環システムでは、純水製造装置でつくった純水を酸素気液分離器(O₂ gas-liquid separator)及びイオン交換樹脂(Ion exchanger)を通し水電解装置に送る。電解されなかった純水には酸素が混入しているために、前述の酸素気液分離器を使って酸素を分離し再び利用する。一方製造した水素には純水が混入しているため、水素気液分離器(H₂ gas-liquid separator)にて純水を分離

し循環系に戻す。このように純水を再利用することにより、純水製造に伴う電力を減らすことができた。

製造した水素には微量の酸素と水蒸気が含まれているため水素精製器で除去する。この装置は、酸化触媒と熱再生型吸着剤(Thermal swing adsorption reactor)からなる2本の吸着筒(Molecular sieve)を持ち、触媒を使って酸素を水に変え、とともに吸着筒の一方を用いて水分を吸着除去する。一定量を吸着した後に別の筒に切り替え、吸着が終了した筒は、加熱をした状態で水素を供給することによって内部の吸着剤の再生を行う。再生に使用した水素は、冷却除湿を行って再利用している。

4.2. 水電解装置

水電解装置(Electrolyzer)の基本原理解を Fig. 10 に示す。純水を酸素極(Anode electrode)に供給し水素極(Cathode electrode)との間に電圧をかけると、純水は水素イオンと酸素に分かれ、酸素は使われなかった純水とともに排出される。水素イオンはイオン交換膜(Proton exchange membrane)を通り、水素極で気体の水素となる。この水素イオンの移動にともない純水の一部も水素極側に移動する。水を電気分解する場合は、生成水素1分子当たり移動する電子数は2個であり、製造できる水素の理論量は通電する電流量で決まる。電流とその電流を得るために必要な電圧との関係を示したものが水電解装置の電流電圧特性(I-V特性)である(Fig. 11)。

高い効率、即ち少ない電力で水素を得るためには、電気分解に必要な電圧を低減する必要がある。電圧は触媒、膜、イオン供給の主に3つの因子に影響される。触媒によって決まる電圧成分は、電極で水の平衡状態を崩して分解反応を進めるために必要なものである。これは主に酸素極側の触媒の種類で決まり、I-V特性上の電流密度がゼロ付近の電圧がこれに相当する。膜によって決まる電圧成分は、電流が構成部材を流れるときや水素がイオン交換膜を移動するときの抵抗に左右され、I-V特性の傾きとして表われる。イオ

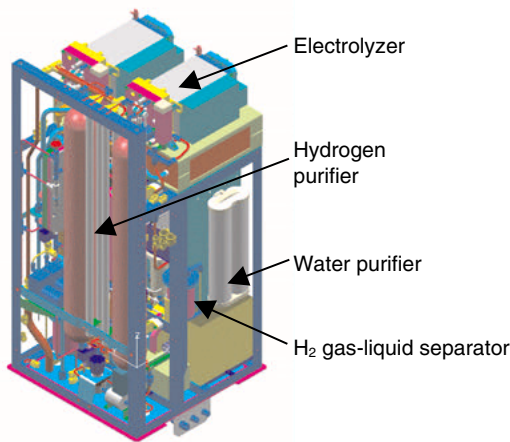


Fig. 8 Assembly of electrolysis unit

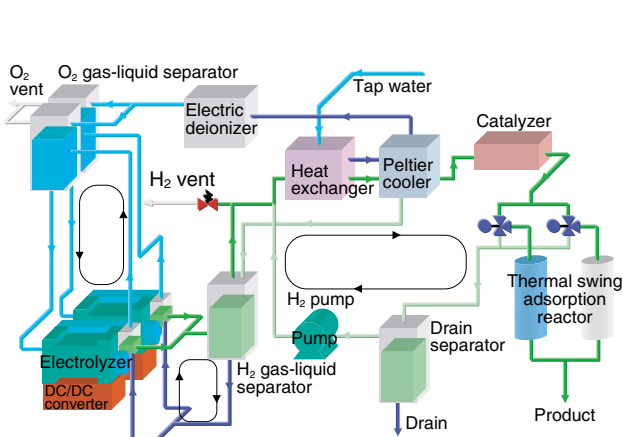


Fig. 9 Water and hydrogen recycle system

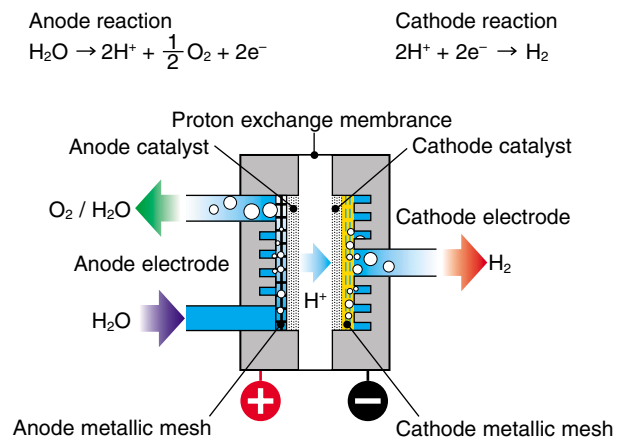


Fig. 10 Schematic illustration of electrolyzer

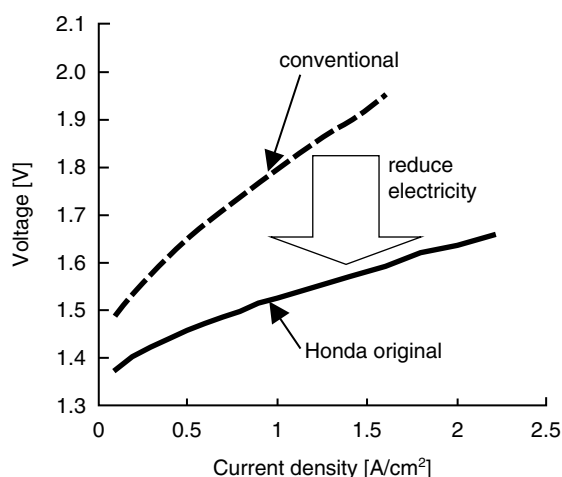


Fig. 11 Characteristics of electrolysis cell

ン供給によって決まる電圧成分は、Fig. 11にはあらわれないが、イオン供給が不足することによって発生するのであり、電流密度が高い領域での急激な電圧上昇としてあらわれる。これらの各電圧の総和により電解電圧が決まる。この電解電圧を下げるために、イオン交換膜を薄くして抵抗成分を低減するとともに、今まで一般的につかわれていた白金系の触媒に対して、より低い電圧での分解反応が可能な Ru-Ir-Fe 系酸化物触媒を新たに開発した。これらを組みこんで、80°C、大気圧条件で測定した結果、Fig. 11に示す電解電圧の低減効果が得られた。

Fig. 12に水電解装置のレイアウトを示す。単一の水電解セルは動作電圧が低い一方、電流が大きいので、安定かつ高効率な制御が困難である。このような特性に対応するため、水電解装置では、この酸素極・イオン交換膜・水素極の組み合わせから成るセルを積層している。これを水電解スタック (Electrolysis stack) と呼ぶ。スタックの各セルを締め付けているエンドプレートは、面圧を均一かつ適正にするために剛性が必要とされ厚く重くなるのが一般的である。この水電解装置では、小型化と軽量化のために、エンドプレートの

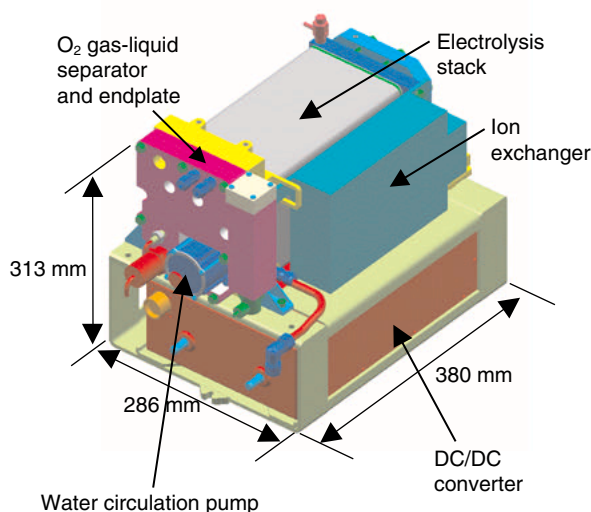


Fig. 12 Assembly of electrolyzer

肉抜きをかねて、純水循環用ポンプと酸素気液分離器を全てこの電解スタックのエンドプレート内に通路と共に一体に作りこみ、外側に配管のない構成とした。さらに電解スタック内に純水の流路を形成することにより、イオン交換樹脂などの補機類の配管を極力短くした。配管が短くなったことによりイオンの溶出が低減され、イオン交換樹脂 (Ion exchanger) を少なくすることができた。さらに配管を短くしたこととイオン交換樹脂を小型化したことにより、純水循環系の圧力損失が削減され、水循環ポンプの動力を削減することができた結果、小型化と高効率化が両立できた。

4.3. 電力変換装置

一般に市販されている水素製造装置は、商用電力から買電し一定電力で動作させる方式を採用している。本システムの特徴は、商用電力系統にたよることなく、太陽電池の変動する電力においても高い効率で水素を製造し供給することを可能にしたことにある。

このステーションは屋外に設置されるため、砂埃や雨水が侵入しない構造と湿度変化による結露防止が求められる。本ステーションで使用する 100A、5kW 級の電力機器で屋外環境で使用できるものは一般には市販されていない。本ステーションに用いるために、電気自動車やハイブリッド車の電装系の技術を応用して、砂埃と雨水を侵入させず、結露を生じさせないための密閉構造の電力系を開発した。密閉状態で電力デバイスを使用する場合、放熱が課題となるが、純水製造の際に発生する排水を利用して水冷式とすることで信頼性を確保しつつ、機器自体の小型化を実現した。この結果、電源装置を水電解スタックの直下に設置することが可能となり、電解装置特有の 100A 近い大電流の配線を極めて短くすることができ送電損失を削減することができた。

太陽電池は、Fig. 13に示すように、電圧電流カーブ上のいかなる点でも動作させることができるが、その動作点によって取り出せる電力が変化する。さらに日射量と太陽電池の温度の変化に伴い、最大の電力 (Peak power) を発生する電圧 (V_{Pmax}) が変化するので、常に太陽電池を最も効率の

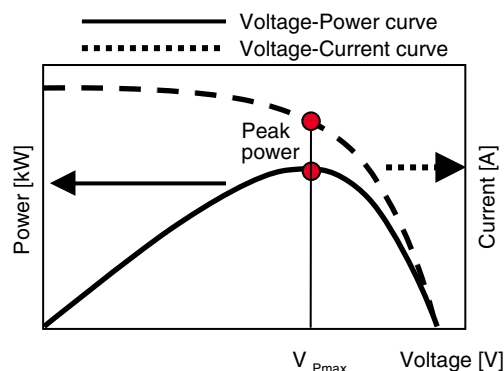


Fig. 13 Characteristic of photovoltaic modules

良い状態で動作させるための装置である PPT(Peak power tracker)を用いるのが一般的である。しかし本システムでは、電解用 DC/DC コンバータ(DC/DC converter)の負荷を制御することでこの機能を実現しており、その装置を省くことができた。

また、商用電力を使用する場合はアクティブフィルタ付きの整流部を用い、太陽電池使用時にはこの整流部をバイパスして、それぞれ各電力機器に直流電力を供給する構成とした。この方式を採用することにより、電力変換機器の構成を大幅に簡素化することができた。

5. タンクユニット

タンクユニットは、高圧水素を貯蔵するための高圧タンク(High pressure tank) 6本(合計 390Liter)と、圧縮前の低圧水素を一時的に貯蔵して電解ユニットにコンプレッサーの動作にともなう圧力変動を与えないためのバッファタンク(Buffer tank) 6本(合計 125Liter)で構成した。Fig. 14 に示すように、高圧タンクを横向きに配置し、その隙間にバッファタンクを配置することにより、空間の無駄を省きタンクユニットの小型化をはかった。

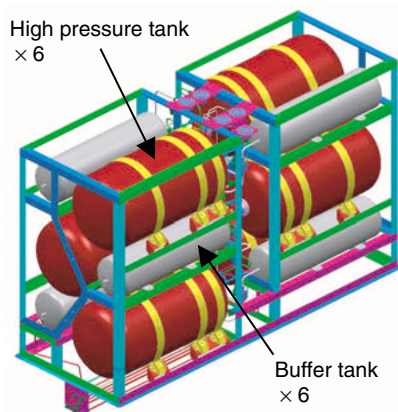


Fig. 14 Assembly of storage tank unit

6. ディスペンサユニット

ディスペンサユニットは、35MPa の水素を $2 \text{ Nm}^3/\text{h}$ の流量で吐出可能なダイヤフラム2段圧縮式のコンプレッサ(Compressor)と、ホース(Hose)、ノズル(Nozzle)、ブレークアウェイ(Breakaway)をそなえている(Fig. 15)。ブレークアウェイは、万が一ノズルを車からはずさない状態で走り出してしまった場合でも、ホースが破損して水素ガスが外に漏洩することを防ぐため、引っ張られることにより切り離される部分を持ち、水素を遮断する弁をそなえている。

充填方法として、ステーションの高圧タンクと車載タンクの差圧をもちいたファストフィルと、製造する水素を貯

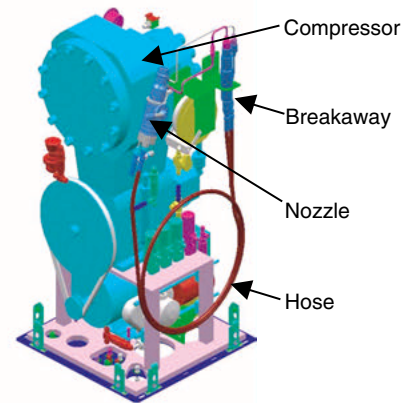


Fig. 15 Assembly of dispenser unit

蔵することなくコンプレッサーから直接充填するスローフィルの2つを採用していることが本ステーションの特徴である。

ファストフィルでは、6本ある高圧タンクのうち、低い圧力のタンクから順次供給するカスケード接続供給方式を採用し、より多くの水素を車側に供給する工夫を行っている(Fig. 16)。ファストフィルでは充填はおおむね5分以内に完了するが、車載タンクの中は急激な断熱圧縮により温度が上昇しているため満充填ができない。これは水素に限らず高圧気体燃料を短時間で充填する場合に共通する事象である。

スローフィルでは、充填時間が長いので車載タンクから十分に放熱されることにより、満充填が可能である。

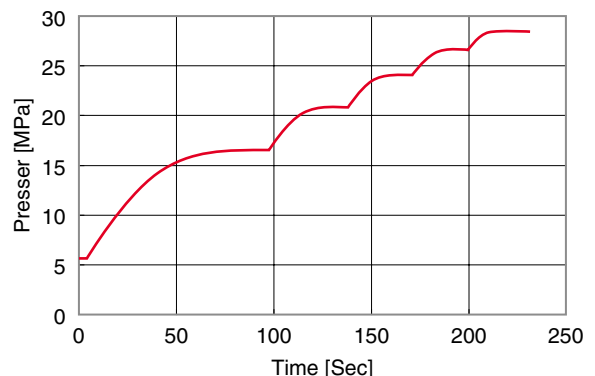


Fig. 16 Example of hydrogen refueling for on-board tank

7. 水素製造量、効率および CO_2 排出量

本システムを稼働させて一日間の日射量、発電量、水素製造量を測定した結果の一例を Fig. 17 に、エネルギー消費分析結果を Fig. 18 に示す。太陽電池を使用して得られた電力が水素として車に供給された効率は、プロトタイプでは 21.6%であったものが 57.6%に向上できた。なお水素のエネルギー換算には高位発熱量(HHV)を使用した。

システム各部での損失の割合を Table 2 に示す。特に、新

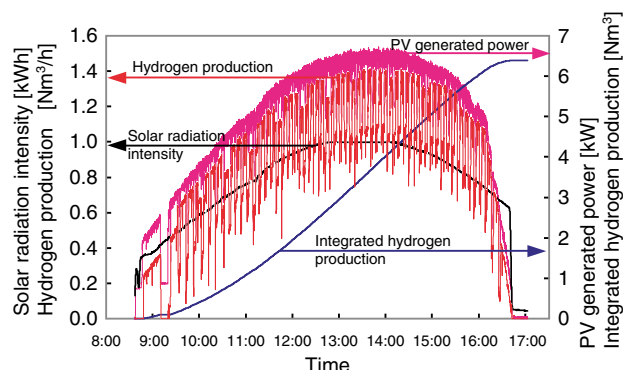


Fig. 17 Example of hydrogen generation

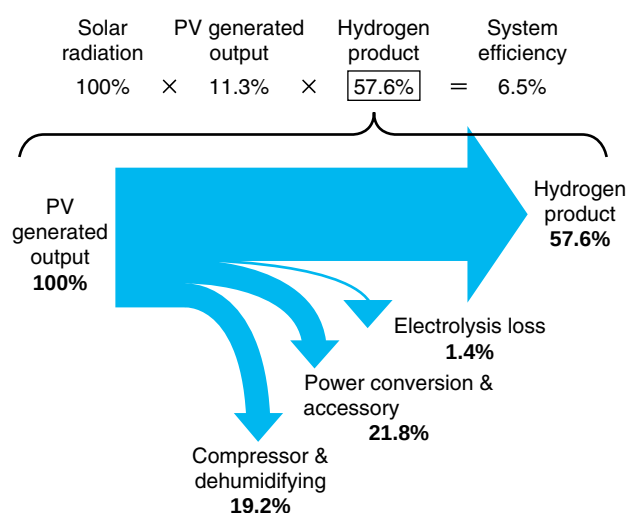


Fig. 18 Energy flow

Table 2 Improvement of energy consumption

	prototype	current
Electrolysis loss	15.8 %	1.4 %
Power conversion & accessory	38.4 %	21.8 %
Compressor & dehumidifying	24.2 %	19.2 %

組成の水電解触媒の開発をはじめ動作温度や電解電流密度の最適化、精製器の再生に使用する水素の再利用などの改善をしてきた結果、水電解装置の損失は太陽電池で得られた電力全体の 1.4%にまで削減できた。

以上述べたように、各機器の大幅な効率向上ができたため、太陽電池に降り注ぐ日射エネルギーから水素として車に供給された割合(システム総合効率)は、プロトタイプの 2.4%から約 3 倍の 6.5%へと、飛躍的に向上した。

この結果をもとに 1961 年から 1990 年までのロスアンゼルス市の日射量をつかって推定すると、1 年間に 2278Nm³の水素を製造できる見通しが得られた。これはすでに 2002 年 12 月に市販した Honda FCX の、EPA(米国

環境保護庁)と CARB(カリフォルニア大気資源局)の CITY モードの燃費ラベル値⁽⁴⁾をつかって計算すると約 1 万マイル(16 000km)に相当し、太陽の光のみをエネルギー源として年間 1 万マイル分の水素を供給するという目標を達成することが確認できた。

燃料電池自動車の社会的意義には、化石燃料の代替、排出ガスの削減と同時に CO₂ 削減も挙げられる。従って水素製造システムには、効率向上のみならずシステムを構成する機器を製造する時に排出される CO₂ の削減が求められる。

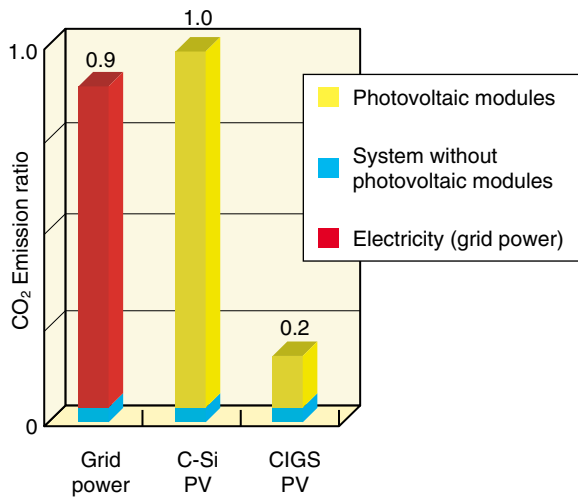
水素を使用する燃料電池自動車の場合、走行する際には CO₂ を排出しないが、水素を製造する方法によっては使用するエネルギー源から CO₂ が排出される。これは火力発電では化石燃料の燃焼により CO₂ が排出されるためである。従って商用電力を使って水電解を行った場合は、主に火力発電の電力に占める割合に応じて、CO₂ が排出されることになる。

これに対し、太陽電池を使った水素製造の場合、水素製造時には CO₂ は排出されないが、太陽電池を製造する際に使用する電力の中の、火力発電の割合に応じて排出される CO₂ を考慮しなければならない。シリコン単結晶太陽電池は製造時に多量のエネルギーを消費する⁽⁵⁾ため、この水素ステーションの機器を製造する時に排出される CO₂ の大半は、太陽電池が占める。製造する単位水素量あたりの CO₂ を削減するためには、システムの効率を改善することとあわせて太陽電池製造時の消費電力の低減を欠くことができない。

以上の理由から、このステーションでは、Hondaが開発した製造時のエネルギー消費の少ない CIGS(銅-インジウム-ガリウム-セレン)系薄膜太陽電池の採用により、CO₂ 排出量にどの程度の効果があるかを検証した。尚、評価には、燃料の製造から走行中の燃料消費までを含めた CO₂ の排出量(Well To Wheels CO₂ 排出量)を用いた。商用電力を用いた場合と、シリコン単結晶太陽電池を用いた場合、および CIGS 化合物薄膜系太陽電池を用いた場合の水電解水素製造により、水素 1 Nm³ を得る際の CO₂ 排出量を下記の条件で比較した(Fig. 19)。

- ・商用電力からの CO₂ 排出量 : 0.40 [kg-CO₂/kWh]
地域・時期による違いが大きいため、米国と日本の値をもとに設定⁽⁶⁾
- ・太陽電池製造エネルギー
シリコン結晶系 : 2 550 [kWh/m²]
CIGS 化合物薄膜系 : 400 [kWh/m²]
- ・償却年数 : 10 [年]
- ・水素圧縮を含むシステム消費電力 : 6.2 [kWh/Nm³]
- ・走行距離 : 10 000 [mile/年]

シリコン単結晶太陽電池を基準にすると、商用電力を用いた場合は大きな差がないが、CIGS薄膜化合物太陽電池を用いた場合は、単位水素あたり 1/5 程度まで削減できる見

Fig. 19 Estimate result of CO₂ emission

通しが得られた。これはCO₂排出量を削減するという目的に対し、自然エネルギーを利用した水素製造の有効性を示唆したものと言える。

8. まとめ

エネルギーと地球環境問題の解決をめざして、太陽電池を使った水素ステーションの性能向上と小型化の研究を行い、以下の成果を得た。

- (1) 新組成の触媒を適用した水電解装置の開発などにより、機器の効率を向上させ、6.5%のシステム総合効率を達成した。
- (2) 約8 kWの太陽電池で得られる電力により、Honda FCXで年間1万マイル以上の走行に必要な水素を供給できる見通しを得た。
- (3) CIGS化合物薄膜系太陽電池の適用により、シリコン単結晶太陽電池に比べCO₂排出量を1/5に低減できる見通しを得た。
- (4) 機器の小型化により、将来の水素社会をクリーンかつ未来感のあるかたちとして表現できた。

今後は、このような技術がさらに身近なものになるように、研究に邁進してゆく所存である。

9. 謝辞

本研究にあたり、世界でも例のないデザインのパーソナルサイズの水素ステーションを実現するために多くの方々から御協力を頂きました。とりわけカリフォルニア州トランス市にはとっては初めての水素ステーションであり、市役所ならびに消防署の方々には多大なる御協力をいただきました。社内外の関係者の方々には紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

10. 参考文献

- (1) <http://www.enea.or.jp/WE-NET/database/kaigai.html>
- (2) <http://rredc.nrel.gov/solar/>「Typical Meteorological Year 2 (TMY2)」
- (3) Energy Information Administration U.S. Department of Energy: Household Vehicles Energy Consumption 1991, U.S. DOE Reports, p.50 (1993)
- (4) 小川隆之, 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.11(2003)
- (5) 電気学会太陽電池調査専門委員会編: 第9章経済性の検討, 太陽電池ハンドブック, 東京, コロナ社, 1985, p.302-305
- (6) <http://www.tepco.co.jp/env/environment/siryou/kankyou/2002/index-j.html>「第一部 本編1. 環境編 環境保全 地球環境」

■ 著 者 ■



上山 雅 樹



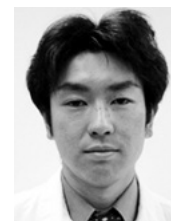
喜多 真 佐 人



田 口 聡



中 沢 孝 治



長 岡 久 史



荒 川 慎 一