

国内仕様ソーラー水素ステーションの実証試験結果

Verification Test Results for Solar Hydrogen Station in Japan

吉田 喜祐*

Nobuyoshi YOSHIDA

三宅 葵*

Aoi MIYAKE

要 旨

差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーションを埼玉県庁の敷地内に設置し、2年間の実証試験をおこなった。差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーションを埼玉県庁などの公共機関に引渡して実証試験をおこなう試みは、Hondaとしては初めてである。本実証試験では、高圧水電解システムで製造した水素を、埼玉県の公用車に利用される燃料電池電気自動車、FCX クラリティの燃料として供給し、データの収集ならびに解析を実施した。2年間の実証試験において、屋外での環境適合性と高圧水電解スタックの性能推移を確認した。また、水素品質が保たれ、常に安定した水素供給をおこなえることが実証できた。FCX クラリティに供給した全ての水素は、太陽電池からの電力のみでまかなうことができた。埼玉県庁で1台のFCX クラリティを運用したことにより、FCX クラリティを管理している部署の全公用車から排出されるCO₂の削減効果は約16%となった。さらに太陽電池の電力を最大限活用することで、約41%のCO₂を削減できる見込みである。

ABSTRACT

A high differential pressure water electrolysis-type solar hydrogen station was installed on the grounds of the Saitama Prefectural Offices and a two-year verification test was carried out. This was the first time for Honda to hand over a high differential pressure water electrolysis-type solar hydrogen station to a public institution such as the Saitama Prefectural Offices for verification testing in this way. The verification test involved using hydrogen produced by a high-pressure water electrolysis system to supply as fuel for an FCX Clarity fuel cell electric vehicle used as an official vehicle by Saitama Prefecture, collecting data, and conducting analysis. During the two years of the verification test, the outdoor environmental suitability of the system and the changes in performance of the high differential pressure water electrolysis stack were confirmed. This also demonstrated the ability to maintain hydrogen quality and provide a constantly stable supply of hydrogen. All of the hydrogen supplied to the FCX Clarity automobile was provided entirely with the electric power from photovoltaic cells. Since the Saitama Prefectural Offices operated one FCX Clarity automobile, this had the reduction effect of approximately 16% on the CO₂ emitted by all the official Saitama Prefectural vehicles operated by the particular office that operated the FCX Clarity. There is a likelihood that a CO₂ reduction of approximately 41% can be further achieved by maximizing the use of electric power from photovoltaic cells.

1. はじめに

Honda はかねてより大気汚染、温暖化、エネルギー問題の3項目の対策に取り組んでいる。その3項目を同時に解決しうる次世代パワープラントとして、燃料電池電気自動車の開発をおこなっている。

それと同時に、水素製造技術開発も平行しており、太陽電池を電源とする高圧水電解技術を用いたソーラー水素ステーションの実証試験を実施している。

第一歩として、米国カリフォルニア州ロサンゼルス
Honda R&D ロサンゼルスセンタにて2001年7月から市
*四輪R&D センター

販の機器を組み合わせたソーラー水素ステーションの試験を開始した。2003年10月からは常圧水電解型ソーラー水素ステーション(Solar Hydrogen Station: SHS1)⁽¹⁾に独自技術である常圧式水電解スタックを投入した。2010年1月からはSHS1に代わり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)^{(2), (3)}の実証試験をおこなっている。

本稿では、2012年3月より埼玉県庁敷地内に設置して運用をおこなっている、国内仕様SHS2の実証試験結果を紹介する。なお、本稿の実証試験期間は、2012年3月から

2014年3月までの2年間である。

本実証試験では、主に下記3項目の確認をおこなうことを目的とした。

- (1) 環境適合性 (防水, 低温)
- (2) 高圧水電解スタックの性能推移
- (3) 高圧水電解システムの水素品質

なお、本システムは、環境省平成23年度地球温暖化対策技術等新規採択案件のうち「交通低炭素化技術開発分野の小型ソーラー水素ステーションと燃料電池車を組み合わせたCO₂排出ゼロシステム開発」の一環として埼玉県庁、岩谷産業株式会社、本田技研工業株式会社、株式会社本田技術研究所の四者により設置されたものである。

2. システム概要

2.1. 差圧式高圧水電解の原理

Fig. 1 に差圧式高圧水電解の単セルの模式図を示す。固体高分子電解質膜 (Proton Exchange Membranes: PEM) を用いた水電解セルは、純水を供給して PEM に電圧を加え続けることによって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る。

差圧式高圧水電解は、PEM の両端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 (1) に差圧式高圧水電解に必要な電解電圧 E_{WE} の式を示す。電解電圧 E_{WE} は、常圧水電解の理論電解電圧 E_1 とセル抵抗 Ir に加え、ガス濃度電池⁽⁴⁾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 (1) の第2項がネルンスト式の水素濃度差による起電力になる。

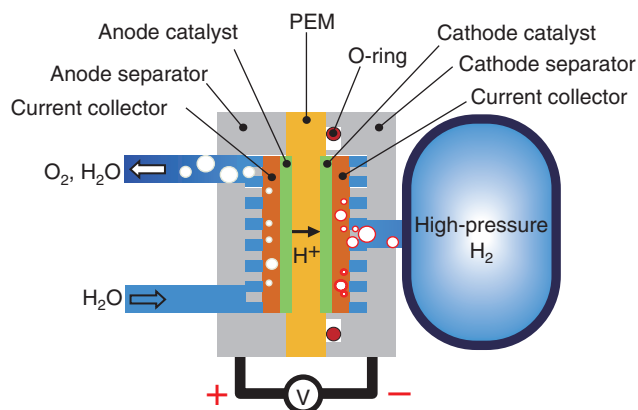


Fig. 1 Schematic of high-differential-pressure water electrolysis cell

$$E_{WE} = E_1 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_1}{P_2} + Ir \quad (1)$$

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

2.2. システム構成

Fig. 2 に国内仕様 SHS2 のシステム構成図を示す。本システムは、高圧水電解システムと太陽電池を組み合わせた構成となっており、水素を製造する過程において CO₂ を排出しないことが特徴である。太陽電池は株式会社ホンダソルテック製の CIGS 薄膜太陽電池⁽⁵⁾を 10.5 kW 搭載している。太陽電池の容量は、公用車としての FCX クラリティの走行距離を年間最大 20,000 km と想定し、その走行に必要な水素を、すべて太陽電池の電力を用いて製造が可能な容量とした。

また、商用電力を利用して、雨天時や夜間においても水素製造をすることが可能となっている。さらに、FCX クラリティの水素タンク容量 4 kg に対し、貯蔵量約 20 kg (35 MPa, 828 L) の水素タンクが備えられている。

2.3. 外観

本稿で述べる国内仕様 SHS2 の外観を Fig. 3 に示す。

本仕様は、太陽電池モジュール (Photovoltaic cell modules) と差圧式高圧水電解装置により高圧水素を発生させる電解ユニット (Electrolysis unit)、FCX クラリティに水素を充填するディスペンサユニット (Dispenser unit) および水素貯蔵タンクから構成されている。

各ユニットの配置は、埼玉県庁内の設置周辺環境に違和感なく融合するようにエリアを造作し、色彩の選択をおこなった。また、シンプルな曲線形にすることにより親近感や安全性、使いやすさを表現したデザインとした。

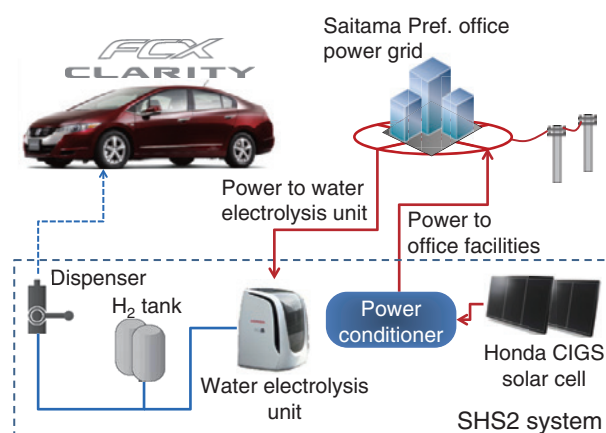


Fig. 2 System layout of SHS2

Table 1 Specifications of SHS2

Hydrogen production	Flow rate	0.7 Nm ³ /h
	Filling pressure	35 MPa
	Purity	>99.99%
	Storage	20 kg
Component	Photovoltaic module	CIGS 10.5 kW
	Electrolysis unit	High-differential-pressure electrolyzer
Utility	Electricity	200 VAC /50 Hz
	Water	Tap water
Unit volume		Approx. 0.33 m ³

2.4. 仕様

Table 1 に国内仕様 SHS2 の仕様を示す。

SHS2 は、水道水と電気を供給することによって最大 35 MPa の高圧水素を製造して貯蔵し、必要なときに FCX クラリティに充填することができる。水素製造量は 1 時間当たり 0.7 Nm³ であり、24 時間運転をおこなった場合、FCX クラリティが約 150 km 分走行できる水素を製造する。

なお、国内仕様 SHS2 は、Honda R&D ロサンゼルスセンタに設置したものとは異なり、氷点下での運用となることを予測し、電解ユニット内部の凍結防止対策をおこなった。

Fig. 4 に凍結防止対策の概要を示す。保温すべき部位は電解ユニット内部のみではなく、水供給配管や発生酸素を放出するベント配管など、電解ユニット外部にもおよぶため、それぞれの部位に合せた効果的な保温方法を採用した。電解ユニット内部は、外気を取り入れる吸気ダクトに空気加熱ヒータを連結させることによって、内部を全体的

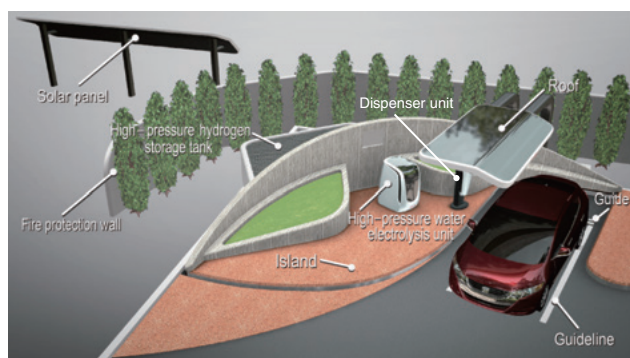


Fig. 3 External view of SHS2

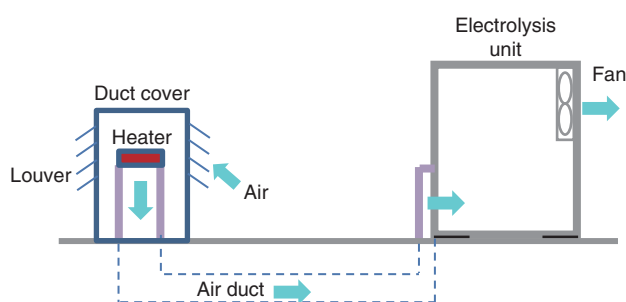


Fig. 4 Ventilation and heating system

に加熱した。一方、外気に直接さらされる水供給配管や酸素ベント配管は防爆仕様の配管ヒータと断熱材を用いて凍結防止対策とした。

3. 実証試験結果

3.1. 環境適合性

設置初期には、雨が多い時期、特に暴風雨の際に、電解ユニット内部に雨水の飛まつが換気ファンから吸い込まれ、内部の漏水センサが誤報を出すという不具合があった。これは Honda R&D ロサンゼルスセンタに設置したものでは経験したことがなかった。日本の気象条件がロサンゼルスと比較し多雨、多湿であること、および換気風量に関する日米の法規の違い⁽⁶⁾によって国内仕様の換気風量が米国仕様よりも増量されたことが、雨水の吸引の主な原因であったと考察される。雨水の浸入に関しては、換気風吸引部に Fig. 5 に示す防水カバーを追加することで対策をおこなった。

Fig. 6 は、冬期間における電解ユニット内部と、外気の温度を、1 日の温度推移として示したものである。2.4. 節で予測したとおり、外気温度が氷点下になることが実際にあったが、電解ユニット内部の温度は、外気温度よりも高



Fig. 5 Duct cover

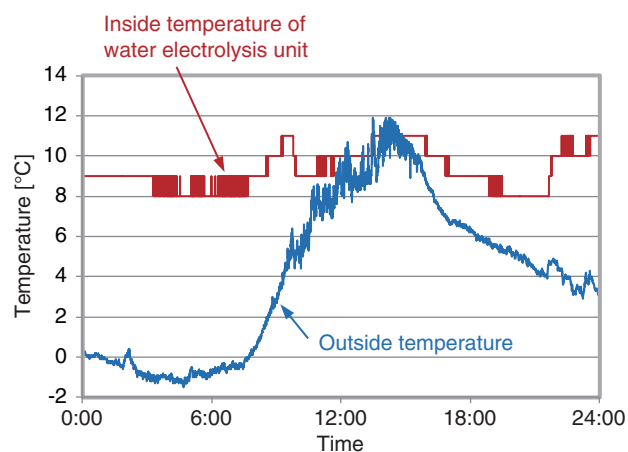


Fig. 6 Temperature change in a winter day (Jan. 16, 2014)

くなることがわかった。これは、電解ユニット内部に外気を取り入れる引き込み配管の一部が、地中に埋設されることにより、地中の保温効果で温められることが原因であることがわかった。したがって、実際に電解ユニット内部が氷点下になることはなかった。また、外部にさらされる配管類も、配管ヒータと断熱材の効果により凍結することはなかった。冬季は氷点下での運用をおこなったが、凍結による装置トラブルを回避することができた。

3.2. 高圧水電解スタックの性能推移

Fig. 7 は、高圧水電解スタック初期の性能を 100 とした場合、電解ユニットの運転時間に伴う効率の変化率をグラフで示したものである。Fig. 8 は、同じく効率の変化率を電解ユニットの起動回数に伴う変化として示したものである。電解ユニットは、同様のシステムを用いて弊社内のテストベンチにて埼玉県庁での実証試験に先駆けて耐久確認をおこなっている（弊社内で評価している機をプロト機と呼ぶ）。Fig. 7 および Fig. 8 で示すとおり、埼玉県庁で運用している高圧水電解スタックと、プロト機のスタック

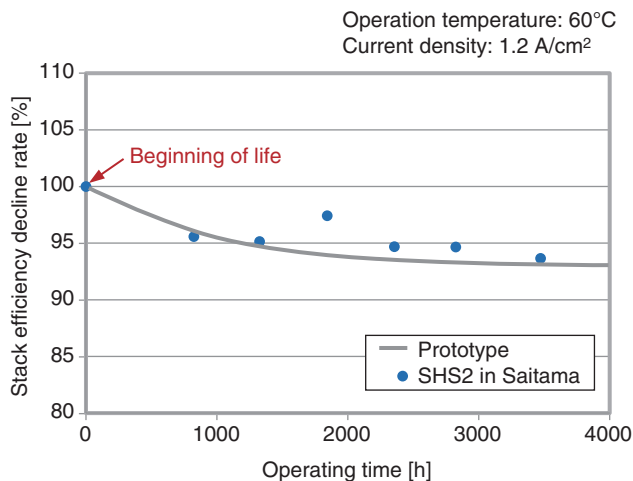


Fig. 7 Decline rate accompanied by operating time

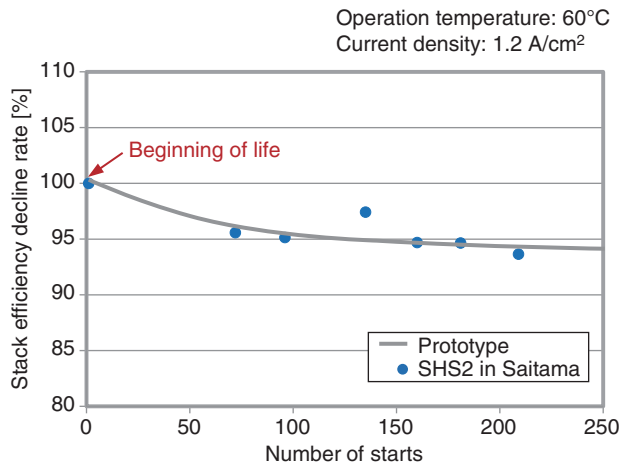


Fig. 8 Decline rate accompanied by number of starts

Table 2 Hydrogen quality of SHS2

	Sampling date		ISO 14687-2
	Feb. 16, 2012	Mar. 14, 2014	
H ₂ O (ppm)	< 5	< 5	< 5
O ₂ (ppm)	< 1	< 1	< 5
N ₂ (ppm)	4.7	< 1	< 100
CO (ppm)	< 0.1	< 0.1	< 0.2
CO ₂ (ppm)	< 0.1	< 0.1	< 2
HC (ppm)	< 0.1	< 0.1	< 2

の性能変化はおおむね一致する推移を示している。プロト機は、周囲温度が 25℃ の一定条件下で、9 時間に 1 回の決められたスケジュールに沿って、起動と停止を繰り返す耐久運転をおこなう。一方、埼玉県庁での実証試験では、周囲温度は季節や日中の温度変化により変動する。さらに、FCX クラリティへの充填量に応じて運転時間がランダムに変化し、運転の周期も不定期となる。Fig. 7 および Fig. 8 で示すとおり、運転の時間と頻度による性能の乖離がないことから、弊社内のプロト機と、埼玉県庁というリアルワールドでの設置環境違いによる性能差はないことが実証された。したがって、弊社内でおこなっている、プロト機の耐久試験の運転モードの妥当性も同時に確認することができた。

3.3. 水素品質

Table 2 は、電解ユニットから製造される水素中の主な不純物元素の分析結果である。設置初期の 2012 年 2 月、2 年後の 2014 年 3 月における水素品質に変化はなく、さらにいずれの値も ISO14687-2 Grade D⁽⁷⁾ に規定されている純度を満たしており、2 年間安定した品質の水素を供給できていることが実証された。したがって、FCX クラリティに燃料に起因する不具合などは発生させることはなく、埼玉県庁での実証試験を滞りなく実施することができた。電解ユニットにおいては、純水を電気分解して水素を得ているため、水素ガス中に含まれる主な不純物は酸素と水分のみである。酸素については膜間 35 MPa の圧力差が生じているため、酸素ガスが膜内を拡散して水素極側へと移動する量は極めて少ない。また水分については後段の吸着材で除去している。Fig. 9 は、電解ユニットから製造される 35 MPa の水素に含まれる水分濃度を、露点温度に換算して示したものである。ISO の基準値である 5 ppm を、35 MPa における露点温度に換算すると約 -16℃ となる。Fig. 9 に示すとおり、2 年間の全運用期間において基準値を下回っており、水分濃度が 5 ppm 以下を維持していることがわかった。なお、吸着材の容積は、電解ユニットの運転を 24 時間の連続運転とした場合、約 3 ヶ月分の交換インターバルとなるように設定した。

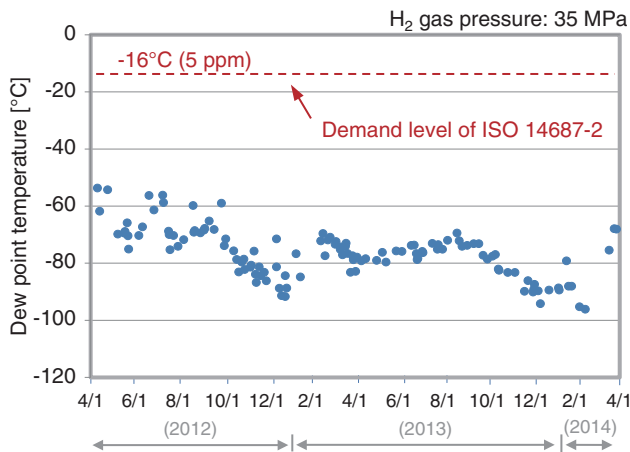


Fig. 9 Dew point temperature of hydrogen

4. 運用実績とCO₂削減量

4.1. 発生水素量と太陽電池発電量

Fig. 10 は、2年間の運用中に、太陽電池から発電された電力量を示す。積算すると約 28 MWh の電力量を発電した。Fig. 11 の実線は、同じく2年間の運用で電解ユニットから製造された水素の積算量を示している。電解ユニットで製造された水素は、タンクに貯蔵され、タンクが満充填となったところで電解ユニットは運転待機状態となる。その後、水素がタンクから FCX クラリティに充填され、タンクの圧力が低下した際に電解ユニットの運転が再開される。このような運転が繰り返されるため、電解ユニットの水素製造量は FCX クラリティの水素消費量と強い相関がある。したがって、Fig. 11 の実線に示す水素の積算量は、埼玉県庁での FCX クラリティの使用頻度に応じて変化することになる。一方で、Fig. 11 の点線は、太陽電池により発電された電力量が全て水素に変換されたと仮定した場合の水素量を示したものである。この点線のラインは、太陽電池で発電された電力量を元に計算した水素量であるが、

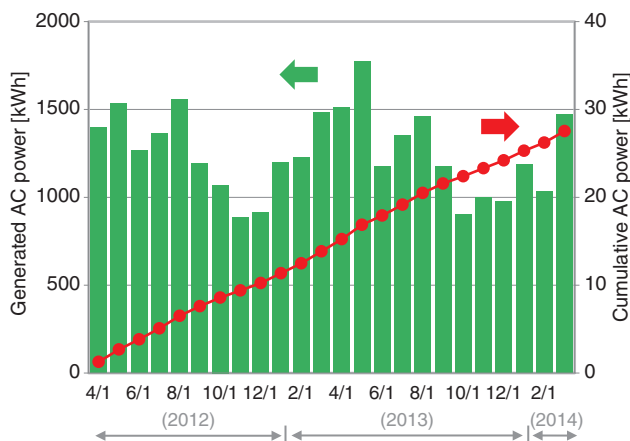


Fig. 10 Amount of AC power generated by photovoltaics

この水素量は、実際に電解ユニットで製造された水素量を上回っている。このことは、電解ユニットで製造された水素はすべて太陽電池の電力でまかなえたことを示している。2年間で、太陽電池から供給された電力のみで製造可能な水素量 486 kg に対して、実際の水素製造量は 190 kg であった。

4.2. FCX クラリティへの充填頻度

2年間の運用の結果、SHS2 から FCX クラリティに充填した回数は 165 回であった。Fig. 12 は、FCX クラリティが1回あたりに充填した水素量を度数分布図として示したものである。FCX クラリティの車載タンクには空の状態から約 4.0 kg の水素が充填可能である。図で示すとおり、本実証試験における1回あたりの水素充填量は、平均充填量 1.0 kg を中心に、9 割以上が 2.0 kg 以下の範囲に集中しており、燃料タンクの残量が 50% 以上の状況で充填されている。これに対して、ガソリン車の場合は一般的な平均値として、ガソリン残量が約 20% となった際に給油されるといわれている。

これは、FCX クラリティを埼玉県庁の公用車として運

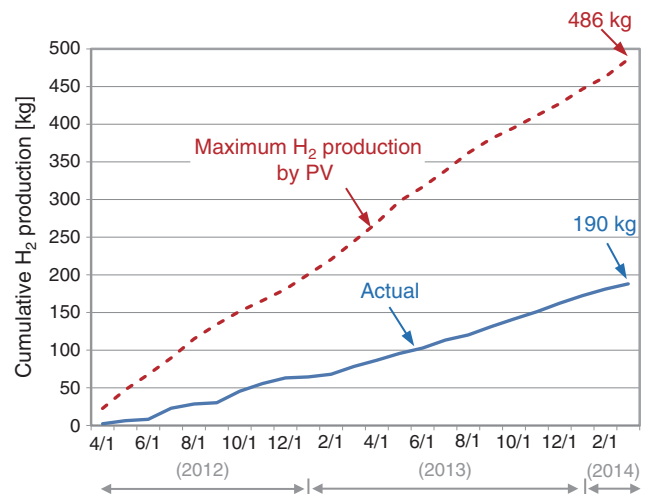
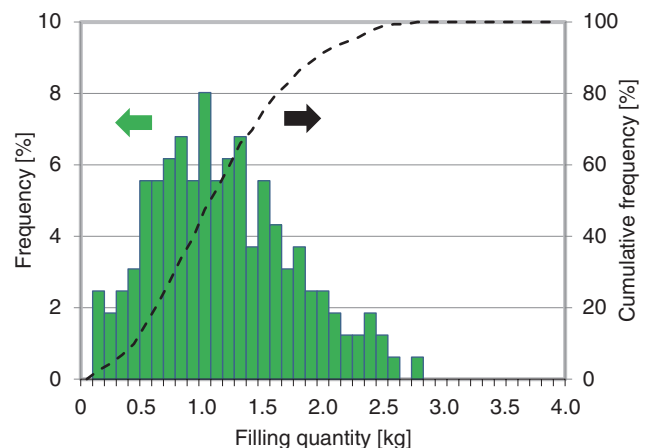
Fig. 11 Amount of H₂ production

Fig. 12 Histogram of filling quantity

用する上で、行先やその途中で水素ステーションが存在せず、燃料切れに対する心理的な不安があるためと考察される。

4.3. 埼玉県庁における CO₂ 削減の効果

埼玉県庁において1台のFCX クラリティを運用し、その結果、2年間で190 kgの水素を製造した。一方で、同2年間で太陽電池から発電された電力量は約28 MWhである。その28 MWhの電力からCO₂を排出することなく製造が可能な水素量は、Fig. 11から486 kgである。この水素量は、現状の稼働率を基準とした場合、約3台分のFCX クラリティを運用できるだけの水素量となる。Fig. 13は、埼玉県庁でFCX クラリティを管理している部署の全公用車から排出されたCO₂量をベースに、FCX クラリティを使用したことによるCO₂の削減効果を示したものである。製造された190 kgの水素を燃料にしてFCX クラリティを運用した結果、全公用車を使用したガソリン消費の約16%のCO₂削減効果となった。さらに、太陽電池の電力がすべて水素に変換され、FCX クラリティの燃料として使われたと仮定すると、約41%のCO₂を削減できる見込みとなる。なお、上記のCO₂削減量は、1台のFCX クラリティを運用した結果であり、FCX クラリティの運用台数を増やすことにより、さらにCO₂の削減効果を高めることが可能である。

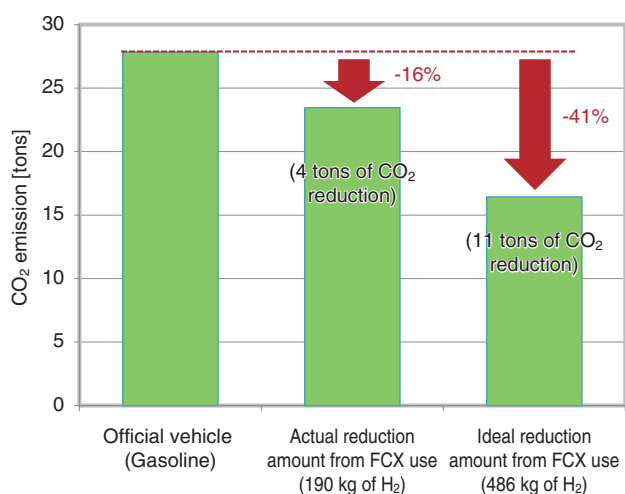


Fig. 13 CO₂ reduction effect by SHS2

5. まとめ

国内仕様 SHS2 の実証試験をおこなったことにより、以下の結果を得た。

- (1) 国内の環境適合性（防水、低温）の仕様に関する知見を得ることができた。
- (2) 高圧水電解スタックの性能は、弊社内のプロト機とほぼ同一の推移を示しており、リアルワールドとテストベンチの差異が小さいことが実証された。同時に弊社

内でおこなっている、プロト機の耐久試験の運転モードの妥当性も確認することができた。

- (3) 電解ユニットから製造される水素品質は、試験開始時に対し変化はなく、常に安定した品質の水素をFCX クラリティに供給できることが実証された。したがって、FCX クラリティに燃料に起因する不具合などは発生させることはなく、埼玉県庁での実証試験を滞りなく実施することができた。
- (4) 埼玉県庁で1台のFCX クラリティを運用したことにより、FCX クラリティを管理している部署の全公用車から排出されるCO₂の削減効果は約16%となった。さらに太陽電池の電力を全て水素に変換することができると仮定すると、約41%のCO₂を削減できる見通しを得た。

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) 長岡久史, 吉田喜祐, David Cun, 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) の実証試験, Honda R&D Technical Review, Vol.24, No.2, p.72-78
- (4) 電気化学会編: 電気化学便覧, 第5版, p.155(2000)
- (5) <http://www.honda.co.jp/soltec/cigs/index.html>, 2012/8/24
- (6) 武内淳, 中沢孝治, 吉田喜祐, 伊藤潤, 岡部昌規, 山下郁也: 国内仕様ソーラー水素ステーションの紹介, Honda R&D Technical Review, Vol.25, No.1, p.85-90
- (7) ISO14687-2: Hydrogen fuel – Product specification – Part 2, Type 1, Grade D

著者



吉田 喜祐



三宅 葵