

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

Verification Test of Home Energy Station IV System Using Natural Gas Reforming

吉田 哲也*
Tetsuya YOSHIDA

山下 郁也**
Ikuya YAMASHITA

倉品 大輔*
Daisuke KURASHINA

大高 彰文*
Akifumi OTAKA

要 旨

石油など他の化石燃料と比較して CO₂ 排出量が少なく、加えて家庭への供給インフラが整っている天然ガスを改質して、家庭で燃料電池電気自動車に水素を供給すると同時に、電力と熱の供給も可能とする小型水素供給システム Home Energy Station(HES)を開発した。その第4世代モデルである Home Energy Station IV(HES IV)を運用して Honda FCX への水素供給および商用電源との系統連系可能な発電を実証した。

一般家庭に HES IV と燃料電池電気自動車を合わせて導入することで、CO₂ 排出量で 30%、エネルギーコストで 54% の低減が可能であることがわかった。実証試験を通じて、環境負荷低減とユーザメリットを両立させる新しいエネルギー供給システムの形態を示すことができた。

ABSTRACT

A compact hydrogen supply system (Home Energy Station, HES) has been developed that reforms natural gas to supply hydrogen to fuel cell electric vehicles at households, while at the same time also enabling supply of electricity and heat. The Home Energy Station IV (HES IV) is the 4th-generation prototype model of this system, and was operated to verify both hydrogen supply to a Honda FCX and power generation that can be interconnected with the commercial power grid.

The results showed that introducing the HES IV together with a fuel cell electric vehicle to a typical household can reduce CO₂ emissions by 30% and energy costs by 54%. Verification tests demonstrated that this is a new energy supply system format that can simultaneously reduce the environmental load while providing merits to users.

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、家庭に設置可能な小型水素供給システムの研究を進めてきた。2003 年には、米国カリフォルニア州の Honda R&D アメリカズ ロサンゼルス研究所において、天然ガスから水素を生成し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の供給をおこなう HES の実験稼働を開始した^{(1)・(3)}。水素製造の原料として選択した天然ガスは、家庭への供給インフラがすでに存在しており、かつ他の化石燃料と比較して水素を製造するときに排出する CO₂ 量が少ないことから、早期の燃料電池電

* 四輪 R&D センター

** HONDA R&D AMERICAS, INC.



Fig. 1 External view of Home Energy Station IV

気自動車の普及を図るには最適な燃料だと考えられる。

2007年からは、一般家庭でのより現実的な使用を想定して、高効率化と小型化を実現した第4世代モデル HES IV (Fig. 1)の実証試験を続けている。本稿では、HES IV の紹介とともに、実証試験で得られた結果を基に算出した実用化した際のエネルギーコストメリット、CO₂ 削減効果について報告する。

2. HES IV 概要

2.1. 外観

HES IV の外観を Fig. 1 に示す。HES IV は、圧縮水素製造ならびに発電をおこなうメインユニット(Main unit)、燃料電池電気自動車に水素を充填するディスペンサユニット(Dispenser unit)、排熱を温水として蓄えておく簡易貯湯槽(Hot water tank)からなる。

一般家庭への設置を想定し、システム構成の見直しおよび補機類の小型化を通して、メインユニットを第1世代と比較して約70%小型化することができた。本システムの設置は屋外を想定しているが、充填作業は燃料電池電気自動車をガレージに駐車した状態でおこなうほうが現実的なため、ディスペンサユニットを独立させて自由に配置可能とする構成を採用している。

ディスペンサユニットにはタッチパネル式の操作用モニターを取り付け、ユーザが対話形式で簡単に取り扱いができ

るようにした(Fig. 2)。

メインユニットとディスペンサユニットの大きさを Fig. 3 に示す。

2.2. システムの構成と仕様

HES IV のシステム構成を Fig. 4 に示す。システムは主に、改質器(Fuel processor)、デュアルモードスタック(Dual



Fig. 2 Dispenser unit with touch panel controller

Mode Stack: DMS), 水素精製器(Pressure Swing Adsorption: PSA), 水素コンプレッサ(Compressor), 系統連系インバータ(Inverter)から構成されている。

改質器は、起動時間を短縮するために天然ガス改質法として改質触媒と酸化触媒を用いた自己熱改質法(Auto Thermal Reforming: ATR)を採用している。その後段には、改質ガス中の一酸化炭素(CO)濃度低減のために、水性ガスシフト(Water Gas Shift: WGS)反応器と CO 選択酸化(Preferential Oxidation: PROX)反応器を配置している。

DMSは固体高分子膜による水素ポンプ機能と燃料電池としての発電機能を併せもつデバイスである。Fig. 5に二つの機能を図示する。水素ポンプとして機能する時は、外部からの電力により改質ガス成分中の水素が選択的にカソード側に運ばれる [Fig. 5 (a)]。同時に水素ガスは PSA の作動に必要な圧力まで昇圧される。DMSから送出される水素ガスには水分と微量の不純ガスが含まれているため、PSA との組み合わせで燃料電池電気自動車に供給可能な水素純度を確保している。

一方 DMS が発電する際は、カソードには空気が供給され、燃料電池として機能する [Fig. 5 (b)]。従来のシステムでは、水素精製に必要な昇圧デバイスと発電のための燃料電池がそれぞれ独立したデバイスとして必要であった。しかし DMS の採用によって一つのデバイスで両機能を切り替えて使用することが可能となり、システムの小型化にもつながった。

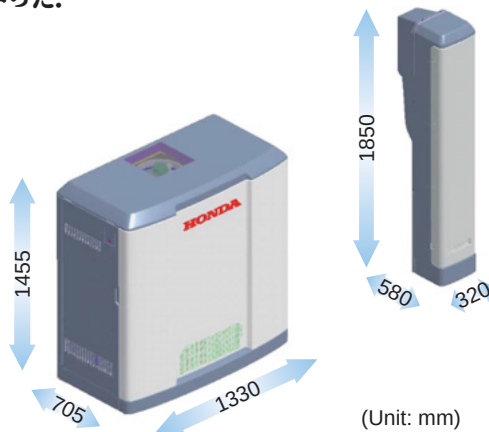


Fig. 3 Dimensions of HES IV

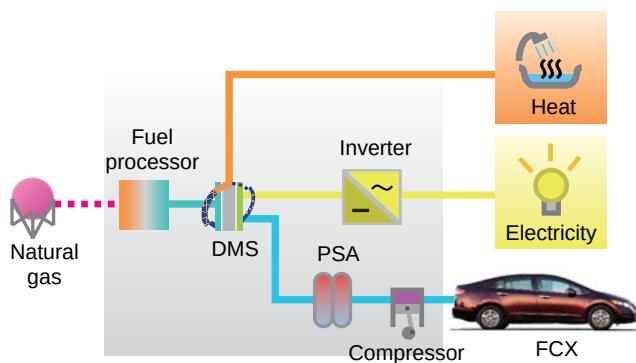


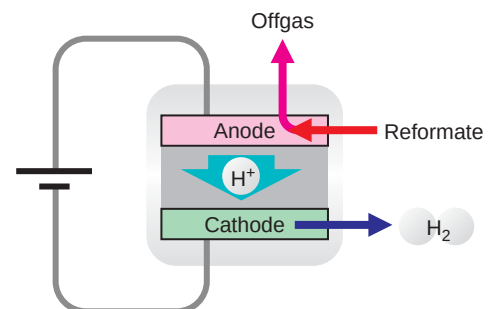
Fig. 4 System configuration of HES IV

Table 1 Specifications of HES IV

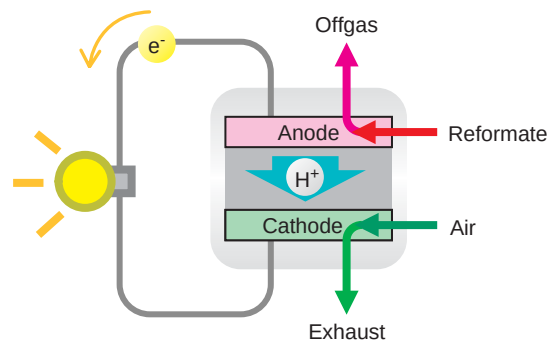
Hydrogen production	Flow rate	3 Nm ³ /h
	Filling pressure	35 MPa MAX
	Purity	> 99.99%
	Efficiency	40%
Power generation	Rated output	4 kW
	Voltage / Frequency	120/240 VAC / 60 Hz
	Efficiency	30%
Heat recovery		80°C hot water
Utility	Electricity	120/240 VAC
	Gas	Natural gas
	Water	City water
Fuel processor		ATR + WGS + PROX
Purifier		DMS + PSA
Compressor		4-stage piston compressor

水素製造能力は、FCX が 100 miles 走行可能な水素量を 6 時間以内で充填できる 3 Nm³/h に設定した。これは、夕方帰宅したユーザが燃料電池電気自動車へディスプレイを接続し、夜間を通して水素を充填したのち翌朝再び乗車することを想定している。このように、HES IVは水素貯蔵部を持っておらず、コンプレッサから直接車載水素タンクへ充填するスローフィルを採用している。

また、発電能力はロサンゼルス地区の平均的家庭に十分な電力を供給可能とする 4 kW に設定した。HES IV の主な仕様を Table 1 に示す。



(a) Hydrogen membrane pump



(b) Fuel cell

Fig. 5 Two functions of Dual Mode Stack

3. 運転モード

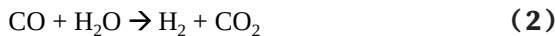
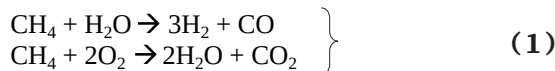
HES IV は二つの運転モードを切り替えながら運用する。一つは水素製造モードで、メインユニットで生成された圧縮水素はディスペンサユニットを経由して直接燃料電池電気自動車の水素タンクに充填される。もう一つは発電モードで、DMSで発電した電気はインバータで交流に変換されて電力として使用される。

3.1. 水素製造モード

水素製造モード時のシステムの動作は以下のとおりである。

(1) 改質器

改質器に供給された天然ガスは、同時に供給される水、酸素(空気)とともに ATR 触媒表面で式(1)に示す反応を起こし、水素リッチな改質ガスに変成される。その後、改質ガスは WGS 中のシフト触媒上で式(2)に示す CO 変成反応により水素濃度を高められる。さらに、式(3)による PROX 触媒の選択酸化作用で CO 濃度が 10 ppm 以下まで低減され、最終的には水素を約 40・50% 含んだ状態で DMS に供給される。



(2) DMS

DMSを水素ポンプとして機能させることで、固体高分子膜で選択的に水素を分離する。この段階で水素濃度は約 99%まで高められ、同時に 0.8 MPa まで昇圧されて PSA に送られる。

(3) PSA

PSA で水素以外のガスが取り除かれ、水素の純度が燃

料電池電気自動車に充填可能となる99.99%以上に高められる。

(4) コンプレッサ

水素コンプレッサで圧縮されて燃料電池電気自動車に充填される。

なお、水素製造モード運転時に必要な補機電力は商用電源から供給される。

ユーザは任意の時間にタッチパネルを操作して水素を車に充填できる。車載タンクの水素充填圧力が 35 MPa に到達すると自動的にシステムは停止するが、ユーザの指示により任意の圧力時に充填を止めることも可能である。

3.2. 発電モード

一方、発電モード時のシステムの動作は以下のとおりである。

(1) 改質器

水素製造モード時と同様に、改質器に供給された天然ガスは水素リッチな改質ガスに変成され、DMSに供給される。

(2) DMS

DMSは、アノード側に供給される改質ガスとカソード側に供給される空気で燃料電池として発電する。

(3) インバータ

DMSが発電した電力はインバータで交流に変換され商用電源と連系運用される。

発電モードは、各家庭での消費電力をもとに自動運転されるが、ユーザの指示によって起動および停止することも可能である。

4. HES IV 実証試験

4.1. 水素製造モード

本システムを稼働させて FCX に水素を充填した時の、水素製造量および車載水素タンクの圧力の変化の一例を Fig. 6 に示す。

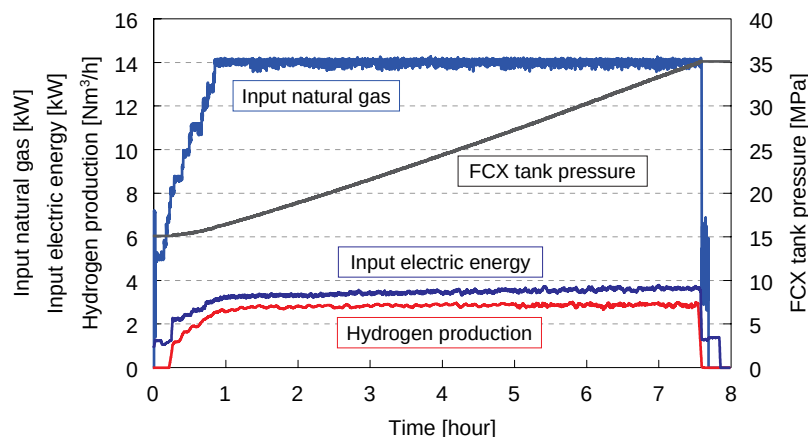


Fig. 6 Example of hydrogen production

システム起動後 10 分で車載水素タンクへ充填が開始され、50 分でシステム定格(水素製造量 = 3 Nm³/h)に到達した。本例の場合、水素タンク残圧 15 MPa からスローフィルによる充填を開始したが、起動から約 7 時間半で満充填に達し(Tank pressure = 35 MPa)、システムは自動的に運転を停止した。

また、本例における約 8 時間の水素製造モードの稼動中に、温水として回収した熱エネルギーは 27.2 kWh であった。このことから本システムの水素製造モードにおける熱回収能力が約 3.4 kW であることがわかった。

水素製造モード運転時のシステムフローと、定格時の水素製造効率および総合効率を Fig. 7 に示す。水素製造効率(η_{H_2})は、生成した水素のエネルギー(E_{H_2})を、投入した天然ガスのエネルギー(E_{NG})と投入電力(E_{elec})の和で割った値である。ただし、投入電力は発電所の発電効率と家庭までの送電ロス considering、家庭に届く時のエネルギー効率を 38% として計算した。同様に、総合効率(η_{H_2total})は E_{H_2} と回収した熱エネルギー(E_{heat})の和を投入エネルギーの和で割った値である。

$$\eta_{H_2} = E_{H_2} / (E_{NG} + E_{elec} / 0.38) \quad (4)$$

$$\eta_{H_2total} = (E_{H_2} + E_{heat}) / (E_{NG} + E_{elec} / 0.38) \quad (5)$$

4.2. 発電モード

次に本システムを発電モードで約 6 時間稼動させた時の発電量を Fig. 8 に示す。

システム起動後 10 分で DMS は燃料電池として発電を開始し、1 時間でシステム定格出力 4 kW に到達した。このときの DMS の発電量は 5.5 kW(DC)であった。DMS 発電量とシステム出力の差は、補機によって消費される電力とインバータにおける DC/AC 変換ロスによるものである。

ここに示す 6 時間の発電モードの稼動中に、温水として回収した熱エネルギーは 23.8 kWh であった。このことから本システムの発電モード時の熱回収能力は約 4 kW であることがわかった。

発電モード運転時のシステムフローと、定格時の発電効率および総合効率を Fig. 9 に示す。発電効率(η_{AC})はシステムからの出力電力(E_{AC})を、総合効率($\eta_{ACtotal}$)は E_{AC} と回

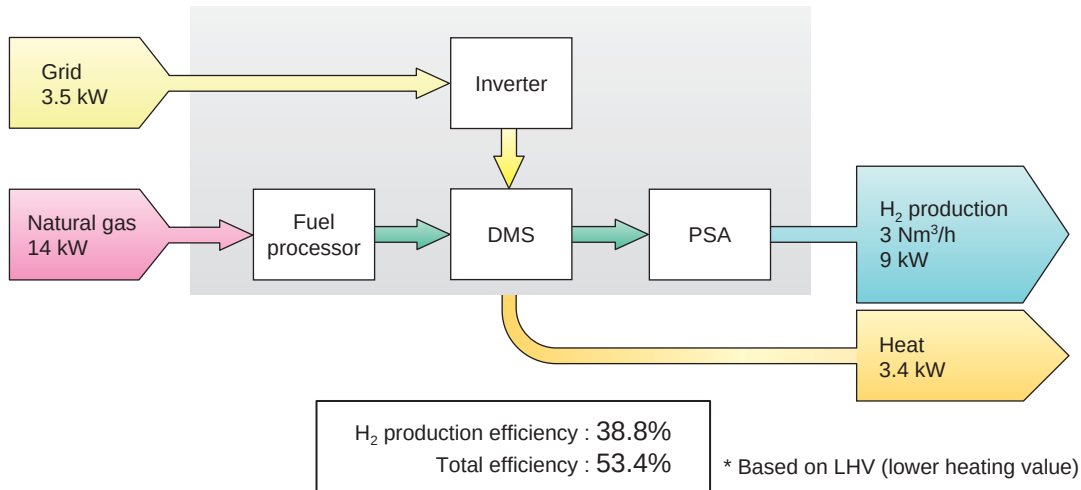


Fig. 7 System efficiency in hydrogen production mode

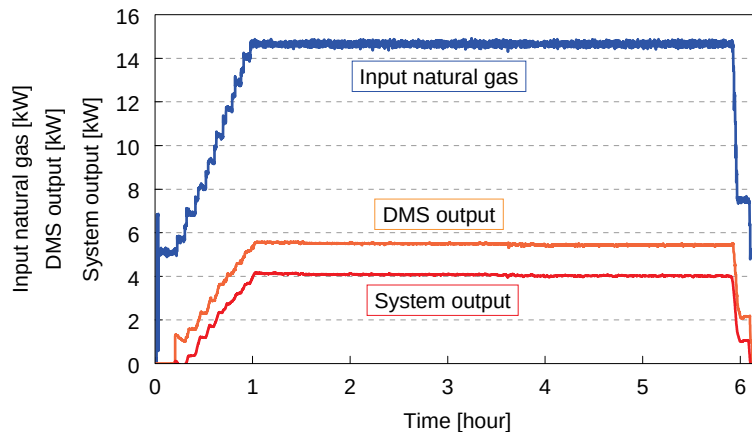


Fig. 8 Example of power generation

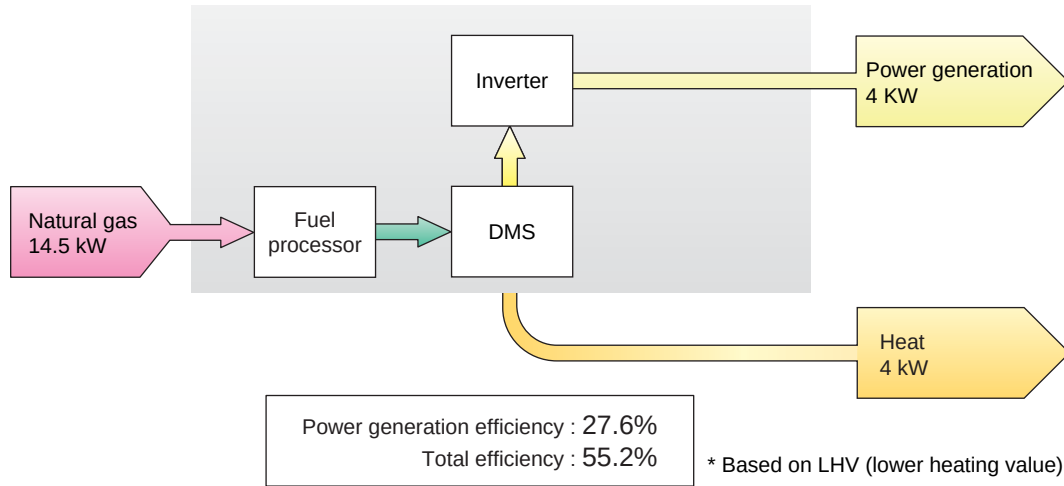


Fig. 9 System efficiency in hydrogen production mode

収した熱エネルギー(E_{heat})の和を、投入された天然ガスのエネルギー(E_{NG})でそれぞれ割った値である。

$$\eta_{AC} = E_{AC} / E_{NG} \quad (6)$$

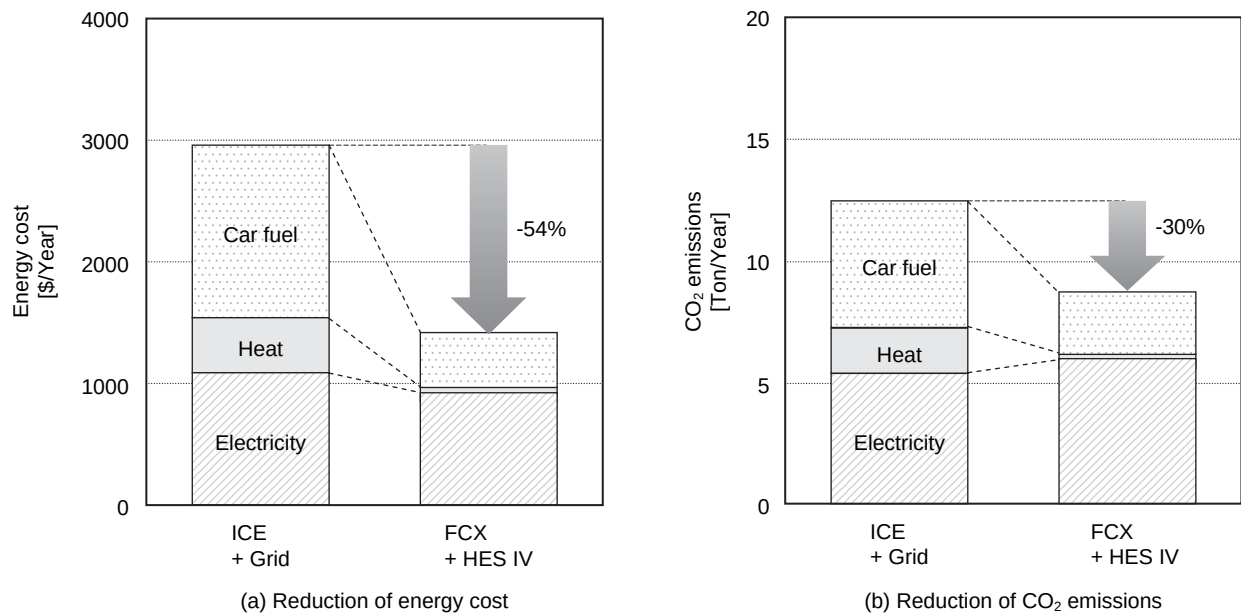
$$\eta_{ACtotal} = (E_{AC} + E_{heat}) / E_{NG} \quad (7)$$

5. 導入によるエネルギーコストとCO₂ 排出量削減効果

実証試験で得られた一連のデータを基に、HES IVを家庭に導入した場合のエネルギーコストと家庭からのCO₂ 排出量の削減効果を試算する。効果の見積は、従来のガソリンを燃料とするレシプロエンジン車と商用電源を利用した場合(ICE + Grid)と、HES IV と FCX を合わせて導入した場合

とを比較することでおこなう。計算の前提となる家庭で消費される電力と熱エネルギー量は、米国カリフォルニア州ロサンゼルス地区の一般家庭の平均年間エネルギー消費量およびエネルギーコストとした。また、自動車による年間走行距離は 10,000 miles とした。なお、自動車による CO₂ 排出量は燃料の採掘から走行による消費まで(Well-to-Wheel)の発生量で評価した。

Fig. 10に一般家庭における年間エネルギーコストとCO₂ 排出量の比較結果を示す。本システムを導入した場合、熱利用によるエネルギーコストとCO₂ 排出量がほぼゼロとなることが示された。このことから、水素製造と発電の両モードで回収できる熱エネルギーだけで、家庭で必要となる熱需要のほぼ全量を賄えることがわかる。自動車での移動によって排出するCO₂量に着目すると [Fig. 10 (b) Car Fuel],

Fig. 10 Reduction effects of energy cost and CO₂ emissions in typical household

天然ガスを改質して水素を生成していることから排出量をゼロにはできないものの、従来比で半減が可能となることが示された。

試算の結果、HES IV と FCX を合わせて利用することによって、家庭全体から排出される CO₂ 量を 30%低減しつつ、エネルギーコストも 54%低減可能であることが示された。HES IVは、環境負荷を軽減しながらもユーザがコストメリットを得られるエネルギー供給システムとして成立する見通しが得られた。

6. まとめ

エネルギー問題の解決と環境負荷低減を目的としたホームエネルギーステーションの実証試験を実施し、以下の結果を得た。

- (1) 家庭で燃料電池電気自動車への水素充填を可能とするだけでなく、必要となる電力と熱も合わせて供給できる新しいエネルギー供給システムの形態を示した。
- (2) 第1世代と比較して約70%小型化し、一般家庭に設置可能な大きさを実現した。
- (3) 家庭に HES IV と FCX を合わせて導入することにより、CO₂ 排出量を 30%低減しながら、エネルギーコストも 54%低減可能となることが示された。

参考文献

- (1) Yamashita, I., Arai, T.: Research of Home Energy Station, 2005 Fuel Cell Seminar Abstracts, p.238-240(2005)
- (2) 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)
- (3) Nagaoka, H.: Progress of Home Energy Station Phase4 System, National Hydrogen Association Annual Hydrogen Conference 2008 Proceedings, No.3795(2008)

■著 者■



吉田 哲也



倉品 大輔



山下 郁也



大高 彰文