Original Paper

Potential of Producing Hydrogen for Fuel-Cell Vehicles by Residential Fuel Cell Co-generation Utilizing Idle Capacity

Yusuke ONO, Takahide HANEDA, Takashi Ikegami, and Atsushi AKISAWA[†]

(Received April 5, 2017)

家庭用燃料電池システムの水素製造余力を用いた燃料電池自動車用水素製造可能性の評価

小野優輔, 羽田貴英, 池上貴志, 秋澤 淳[†]

Widespread of fuel-cell vehicles (FCV) is one of the essential solutions to CO₂ emission mitigation. However there were only 81 working hydrogen stations distributed in Japan in January 2017. Therefore, it has become increasingly necessary to establish the hydrogen stations. In this study, we focus on the unutilized hydrogen production capacity of a fuel processor system (FPS) incorporated in a residential fuel cell co-generation system. We proposed a system which the FPS and fuel cell stacks are operated independently at their respective efficient load factors, and which can produce hydrogen for the FCV using the unutilized capabilities of the FPS. An optimum scheduling model for the operation of the FPS and the fuel cell stacks was developed to evaluate annual hydrogen production for the FCV for 24 households. As the results, it was found that all households have the capacity to produce at least 1,040 Nm³/year of hydrogen, which a FCV can run 8,000 km in a year. Furthermore, we evaluated the hydrogen supply potential of collective housings installed this system to each household through the case study in Tama region, Tokyo. In the case where this system was introduced to 10 collective housings in Tama region, it was found that 80.9% of hydrogen demand for FCV in this region in 2025 in this region could be supplied.

Key Words

Fuel-cell, Fuel processor system, hydrogen production

CO₂の排出削減に必要な解決策の一つとして、燃料電池自動車(FCV)の普及が期待されている。しかし、2017年1月現在、全国の水素ステーションは81ヶ所のみであり、水素供給インフラ建設の必要性が増してきている。本研究では、家庭用燃料電池内部に組み込まれている改質器が持つ未活用の水素製造能力に注目した。改質器と燃料電池スタックがそれぞれの効率の良い部分負荷率で独立に運転され、改質器の余力を用いてFCV用水素を製造するシステムを提案した。改質器と燃料電池スタックの最適運転計画モデルを構築し、24世帯を対象にFCV用水素製造可能量を計算した。24世帯すべてにおいて少なくとも年間8,000 km走行分の水素1,040 Nm³を製造可能であることが分かった。さらに、東京都多摩地区を対象としたケーススタディにより、集合住宅の各世帯に本システムを導入した場合の水素供給ポテンシャルを評価した。多摩地区内の10ヶ所の集合住宅に本システムを導入した場合、2025年のFCVの普及目標に対して80.9%のFCVの水素需要を満たすことができることが示された。

キーワード

燃料電池, 燃料改質器, 水素製造

Graduate School of Bio-Applications and Systems Engineering (BASE), Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo 184-8588, Japan

[†] Corresponding author: akisawa@cc.tuat.ac.jp

東京農工大学大学院生物システム応用科学府
〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

1. 緒言

地球温暖化問題が懸念される近年、二酸化炭素を排出しないエコカーの一つである燃料電池自動車（以下、FCV）が注目を集めており、2020年までに4万台、2025年までに25万台、2030年までに80万台のFCVの普及が目標として掲げられている¹⁾。FCVの燃料として用いる高圧水素を供給する水素ステーションは、一定の品質で²⁾、安全で確実に数分程度で水素を充填するための設備³⁾が必要であり、2017年1月現在、全国で81ヶ所⁴⁾のみである。2020年までに160ヶ所、2025年度までに320ヶ所の水素ステーションの導入という目標¹⁾の達成に向けて、水素供給インフラの充実が喫緊の課題である。現状では水素は天然ガス等の炭化水素の改質や副生水素によって賄われており、2030年頃までは化石燃料起源の水素がFCVに供給される見通しである¹⁾。

また、家庭用の燃料電池コージェネレーションシステムは、燃料電池スタックによる発電時の排熱を給湯に活用することにより高い総合エネルギー効率が得られ、低炭素な熱電併給システムとして期待されている⁵⁾。家庭用燃料電池については2020年に140万台、2030年に530万台という普及目標が掲げられている¹⁾。

現在普及が進んでいる固体高分子形燃料電池（PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell、以下、燃料電池）は、都市ガスを燃料とし、水蒸気改質法により水素を製造する改質器（FPS：Fuel Processing System）が内部に組み込まれている。燃料電池は給湯負荷に追従して運転するため、特に給湯需要が少ない夏期及び深夜では運転を停止している時間が長いことが知られており⁶⁾、運転していない時間帯は改質器も停止している。本研究では、この改質器が停止している時間帯や、燃料電池が部分負荷運転をしている際の改質器が定格運転していない時間帯に注目し、燃料電池内部の改質器が持つ未活用の水素製造能力を利用してFCV用の水素を製造するシステムを提案する。家庭用燃料電池に付属の改質器の余力を活用して水素製造を行うことにより、水素ステーションの普及が拡大するまでのFCV用水素供給に一定の役割を果たすことが期待できる。また、集合住宅等の多数の世帯に設置された燃料電池が持つ水素製造能力を統合することにより、地域内の多数のFCVに水素を供給することができ、水素ステーションの役割を担うことも期待できる。なお、固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）についても既に普及が始まっているが、PEFCとは異なり、一酸化炭素（CO）も燃料として利用できることから、SOFCに付属する改質器にはCO除去装置が含まれていない。そのため、その改質器で製造された水素には多量のCOが含まれ、この水素をFCV用燃料としてそのまま使用することは困難となる。そこで本研究では、改質器に予めCO除去装置が備わっているPEFCを対象とした。

これまで、家庭用燃料電池の導入効果を解析した研究として、熱電併給運転における経済性および環境性を定量的に評価した研究は多数存在する^{5)～7)}。また、電気自動車が入居された住宅を対象にした燃料電池の導入効果の解析⁸⁾

や、複数の住宅を対象に、大規模な水素製造装置と各々の住宅に純水素燃料電池が配置するシステムの最適化運用及び導入効果を解析した研究も存在する^{9) 10)}。しかしながら、いずれの研究も固体高分子形燃料電池の機能は熱電併給に限定されており、家庭用燃料電池によってFCV用水素を製造し、供給する、すなわち水素ステーション代替として機能させることは検討されていない。

そこで本研究では、固体高分子形燃料電池内部の改質器の余力としての水素製造可能量を定量的に評価することを目的とした。多様な給湯負荷特性を持つ複数の世帯を対象にしたエネルギー需給シミュレーションを行い、固体高分子形燃料電池の本来の利用目的である給湯との両立を図った最適な改質器の運用手法を検討した。得られた世帯あたりの年間水素製造可能量をもとに、集合住宅の各世帯に設置されている固体高分子形燃料電池に本システムを導入した場合の、地域のFCV用水素需要に対する供給地域やFCV台数のカバー率について東京都多摩地区を対象に分析を行い、水素ステーションの役割を担う能力を簡易的に評価した。

2. 家庭用燃料電池による水素供給システム

2.1 提案する改質器独立型燃料電池システム

燃料電池は、発電を行うと同時に、燃料電池スタックで生じる熱を利用して温水を製造するシステムである。都市ガスを改質して水素を製造する改質器、燃料電池スタック、温水を蓄える貯湯槽で構成されている。燃料電池からの熱のみでは給湯需要を賄えない時に備え、ガス給湯器も付属している¹¹⁾。通常、家庭用の燃料電池は、燃料電池スタックで必要となる分だけの水素を改質器で生成するため、改質器と燃料電池スタックは連動した負荷率で運転している。燃料電池スタックは負荷率が低いほど発電効率がよく¹²⁾、反対に、改質器は負荷率が高いほど改質効率が高い¹³⁾ことが知られている。そのため、燃料電池スタックは低負荷率で、改質器は高負荷率で独立して運転することで、これまでより効率的な運用が可能となると考えられる。

本研究では、燃料電池スタックと改質器の負荷率を独立に設定できるシステムを提案し、改質器で製造された水素は一旦貯蔵タンクに蓄えられ、燃料電池スタックやFCVに充填して用いるシステムについて検討した。

2.2 FCV用水素製造可能量の定量的評価

本研究ではまず、家庭用燃料電池の改質器の余力を用いたFCV用水素の製造可能量を定量的に評価するため、燃料電池と改質器を独立に運転する最適運転計画モデルを開発し、エネルギー需給シミュレーションを行った。

作成したエネルギー需給シミュレーションモデルの詳細は第3章で述べるが、FCV用の水素需要を与えることで、それを賄うように改質器の運用手法が決定される。FCV用の水素需要が多いと、本来の燃料電池用の水素がFCV用に回されるため不足してしまい、燃料電池の設備利用率が低下すると考えられる。そこで、FCV用水素需要量をパラメータ

として計算を行い、需要家ごとに燃料電池の設備利用率が低下しない範囲での、つまり燃料電池本来の利用に影響を与えない範囲でのFCV用水素需要量の上限値を水素製造可能量として評価することとした。

FCV用水素需要量は、FCVの市販車である「MIRAI」諸元表¹⁴⁾より水素消費率 $0.13 \text{ Nm}^3/\text{km}$ 、および、パラメータとして設定した年間自動車走行距離を用いて年間の水素需要量を算出して365で割ることにより、1日あたりの水素需要量とした。またこの水素は毎朝6:00に一度に充填されると想定した。本研究では、年間自動車走行距離のパラメータを0 km, 8,000 km, 12,000 km, 16,000 km, 20,000 km, 24,000 kmと変えて計算を行い、燃料電池の本来の運転に影響を与えないFCV用水素製造可能量を求めた。

2.3 計算条件

2.3.1 対象システムの設備構成

本研究では、燃料電池スタック、改質器、貯湯槽、水素貯蔵タンク、バックアップ用のガス給湯器で構成されるシステムを各世帯が所有することを想定した。本研究の対象とした設備とエネルギーや水素、都市ガスのフローをFig. 1に示す。電力需要に対しては系統電力および燃料電池から、給湯需要に対しては燃料電池の排熱が蓄えられた貯湯槽とバックアップ用ガス給湯器から供給されるものとした。改質器によって都市ガスから水素が製造されて水素貯蔵タンクに蓄えられ、燃料電池やFCV用燃料として活用される。通常の燃料電池において、燃料電池スタックに余剰に供給された水素は、改質器に戻されて改質のための反応熱として利用されている。本研究では、燃料電池スタックでの発電に用いる

以外の水素をできるだけFCV用の燃料として活用することを想定するため、燃料電池スタックに余剰に供給される水素は水素貯蔵タンクに戻され、改質のための反応熱は都市ガスによって供給されるものとした。

燃料電池の定格出力は 0.7 kW ¹⁵⁾とした。燃料電池スタックの発電効率についてはインバータ効率及び補機損を含めた部分負荷効率¹²⁾を考慮し、本研究では簡単のためFig. 2に示す線形で近似した部分負荷時の水素必要量を用いて計算を行った。また、燃料電池の排熱利用可能量¹²⁾についても部分負荷効率の影響を受けるため、Fig. 3に示す線形近似を用いた。改質器の定格水素製造能力については、燃料電池の定格 0.7 kW での発電時の水素必要量である $0.56 \text{ Nm}^3/\text{h}$ とした¹⁵⁾。改質器についても部分負荷効率¹³⁾を考慮し、Fig. 4に示す線形近似した都市ガス消費量を用いた。貯湯槽については簡単のため、季節によらず 44°C の温度差で140 L貯

Fig. 2 Hydrogen requirement of fuel cell at partial load

Fig. 3 Thermal output from fuel cell at partial load

Fig. 1 Schematic diagram of energy flows

Fig. 4 City gas consumption of FPS at partial load

湯¹⁵⁾できると想定して、一律で 25.8 MJ の熱エネルギーを蓄えられるものとした。なお、水素貯蔵タンクやバックアップ用ガス給湯器については、本研究では必要な容量を準備できるものとした。

なお、固体高分子膜を用いた水素の圧縮・精製技術が研究されており^{16)~19)}、民生用への応用が期待される状況にあるが、本研究では FCV に水素を充填するための圧縮機は評価に含めていない。また、本研究のシステムは、水素ステーションが普及するまでの中継ぎの役割を目的としており、水素ステーションが少ない状況においては、FCV の初期ユーザーは燃料充填の利便性を優先して近隣で製造される水素の利用を選択することを想定している。

2.3.2 エネルギー需要データ

本研究では、1~12月の各月代表日1日、計12日を計算対象とし、それぞれの計算結果に各月の日数を乗じることによって年間量に換算して評価を行うこととした。エネルギー需要データとして、東京・神奈川の24世帯において計測された電力消費量およびガス消費量を利用した。この24世帯の世帯人員は3~7人で、住宅の延床面積は92~330 m²であった。世帯ごとに各月の電力需要量、給湯需要量のデータを時刻別に平均値を算出して代表日として用いた。年間電力消費量の24世帯の平均は9,771 kWh、最大世帯で21,058 kWh、最小世帯で5,330 kWhであった。需要最大最小世帯および24世帯平均の各月毎時の電力消費量を Fig. 5 に示す。また、年間給湯需要量の24世帯平均は23.4 GJ、最大世帯で51.5 GJ、最小世帯で10.5 GJであった。貯湯槽を用いたシステムを検討するため、給湯需要の日量が運用に影響を与える重要なパラメータとなる。需要最大最小世帯および24世帯平均の各月の給湯需要量の日量を Fig. 6 に示す。

Fig. 5 Hourly electricity demand data and its range

Fig. 6 Daily hot water demand data and its range

3. 改質器・燃料電池の最適運転計画モデル

3.1 モデルの定式化

本研究で作成したモデルは、混合整数線形計画法 (MILP: Mixed Integer Linear Programming) を用いており、与えられた各時刻の電力、給湯、水素需要を満たしながら、運転コストが最小となる燃料電池スタックおよび改質器の独立した運転スケジュールを決定するものである。

以下に目的関数および制約条件について詳述する。大文字で始まる変数は決定変数、小文字で始まる変数は入力データとなる定数である。なお、決定変数は非負数とした。なお、エネルギー量や都市ガス、水素の量を表す決定変数については、Fig. 1 中の対応するフローにも合わせて示した。

3.2 目的関数

本研究では、固定費は一定として目的関数には固定費は含めず、式 (1) に示す年間運転コスト C_{OPR} [円/年] を目的関数とした。これが最小となるように、改質器および燃料電池スタックの最適な運用方法を決定するものとした。

$$C_{OPR} = \sum_{m=1}^{12} \left(days_m \cdot \sum_{t=1}^{24} (gcst_{m,t} \cdot GAS_{m,t} + pcst_{m,t} \cdot PWR_{m,t}) \right) \quad (1)$$

ここで、添字の m は 1~12 月、 t は 1~24 時を表す。また、 $days$ は日数、 GAS は都市ガスの消費量 [Nm³]、 PWR は系統電力から購入する電力量 [kWh]、 $gcst$ はガス料金単価 [円/Nm³]、 $pcst$ は電気料金単価 [円/kWh] を表す。本研究では、2014 年~2015 年までの単価の調査結果より中央値を用い、電気料金は 29.3 円/kWh、ガス料金は 175 円/Nm³ で一定とした⁶⁾。

3.3 制約条件

電力、給湯、水素の需給に関する制約式を以下に示す。

$$PWR_{m,t} + EX_{FC,m,t} = dem_{PWR,m,t} \quad (2)$$

$$QX_{WT,m,t} + QX_{GB,m,t} = dem_{HTW,m,t} \quad (3)$$

$$HX_{HT,m,t} - HX_{RQ,m,t} = dem_{HYD,m,t} \quad (4)$$

ここで、 dem_{PWR} 、 dem_{HTW} 、 dem_{HYD} はそれぞれ電力需要量 [kWh]、給湯需要量 [MJ]、水素需要量 [Nm³] を表す。 EX 、 QX 、 HX は各設備からの出力量で、それぞれ電力量 [kWh]、熱量 [MJ]、水素量 [Nm³] を表す。添字は設備を表し、 FC は燃料電池スタック、 WT は貯湯槽、 GB はバックアップ用ガス給湯器、 RQ は水素貯蔵タンクを意味する。また HX_{RQ} は、水素貯蔵タンクから供給される燃料電池スタックが発電時に必要とする水素量 [Nm³] を表す。

貯湯槽内の蓄熱量に関する制約を式 (5) に、水素貯蔵タンク内の貯蔵量に関する制約を式 (6) に示す。

$$Q_{m,t} = (1 - ls) \cdot Q_{m,t-1} + QX_{FC,m,t} - QX_{WT,m,t} \quad (5)$$

$$H_{m,t} = H_{m,t-1} + HX_{FP,m,t} + HX_{FC,m,t} - HX_{HT,m,t} \quad (6)$$

添字の FP は改質器を表し、 Q は貯湯槽内の蓄熱量 [MJ]、 H は水素貯蔵タンク内の水素貯蔵量 [Nm³] を表す。 QX_{FC} は燃料電池による発電時の排熱利用量 [MJ] を、 HX_{FC} は使用されずに水素貯蔵タンクに戻される余剰の水素量 [Nm³] を表す。 ls は 1 時間あたりの貯湯槽からの放熱ロス率 [-] を表し、本

研究では1日約20%の放熱ロスを想定し $ls = 0.01$ とした。

燃料電池スタックの水素必要量 HX_{RQ} [Nm³]、および、排熱利用量 QX_{FC} [MJ] は、Fig. 2 および Fig. 3 に示す部分負荷特性より燃料電池スタックの発電量 EX_{FC} の1次式で近似し、それぞれ式 (7) および式 (8) の制約条件を加えた。また、燃料電池スタックでは水素必要量 HX_{RQ} [Nm³] の80%が消費され、20%は余剰水素として水素貯蔵タンクに戻されるものとした。

$$HX_{RQ,m,t} = ah \cdot EX_{FC,m,t} + bh \cdot U_{FC,m,t} \quad (7)$$

$$QX_{FC,m,t} = aq \cdot EX_{FC,m,t} + bq \cdot U_{FC,m,t} \quad (8)$$

$$HX_{FC,m,t} = 0.2 \cdot HX_{RQ,m,t} \quad (9)$$

ここで U は起動停止を表し、0 または 1 のみを取る (起動時 = 1, 停止時 = 0) バイナリ変数である。本研究では係数は、 $ah = 0.8856$, $bh = -0.0684$, $aq = 5.8744$, $bq = -0.5707$ を用いた。

目的関数で用いた都市ガス消費量 GAS や各設備の都市ガス消費量に関しては、以下の制約条件を用いた。

$$GAS_{m,t} = GX_{FP,m,t} + GX_{GB,m,t} \quad (10)$$

$$GX_{FP,m,t} = ag \cdot HX_{FP,m,t} + bg \cdot U_{FP,m,t} \quad (11)$$

$$GX_{GB,m,t} = (1/ene_{GAS}) \cdot (1/eff_{GB}) \cdot QX_{GB,m,t} \quad (12)$$

は都市ガス消費量 [Nm³] を表し、式 (11) は改質器の、式 (12) はバックアップ用ガス給湯器による消費量に関する式である。改質器の都市ガス使用量は、部分負荷効率を考慮して Fig. 4 で示した線形近似式を用い、 $ag = 0.3068$, $bg = 0.0202$ とした。ガス給湯器の都市ガス消費量は、ガス給湯器の効率を $eff_{GB} = 0.95$ ¹¹⁾、都市ガスの発熱量を $ene_{GAS} = 45$ [MJ/Nm³] とし求めた。

各設備の出力量や蓄熱量、水素貯蔵量の上下制限として、式 (13)～式 (16) を用いた。

$$\min_{FC} \cdot U_{FC,m,t} \leq EX_{FC,m,t} \leq \max_{FC} \cdot U_{FC,m,t} \quad (13)$$

$$\min_{FP} \cdot U_{FP,m,t} \leq HX_{FP,m,t} \leq \max_{FP} \cdot U_{FP,m,t} \quad (14)$$

$$0 \leq Q_{m,t} \leq cap_{WT} \quad (15)$$

$$0 \leq H_{m,t} \leq cap_{HT} \quad (16)$$

ここで $\max$, $\min$ はそれぞれ1時間あたりの最大、最小出力量を表し、燃料電池に関してはそれぞれ 0.7, 0.2 kWh, 改質器に関しては 0.56, 0.12 Nm³ とした¹⁵⁾。また、貯湯槽の熱容量 cap_{WT} は 25.8 MJ とし、水素貯蔵タンクの貯蔵容量 cap_{HT} については本研究では上限を設けなかった。

本研究では、運転開始および運転終了を示す 0 または 1 をとる決定変数 A および B を式 (17)～式 (19) を用いて定義し、燃料電池スタックを起動できる回数は式 (20) により1日に1回のみとした。また式 (21) により、燃料電池スタックの1日の運転時間は最大で22時間¹⁵⁾とした。

$$U_{FC,m,t} - U_{FC,m,t-1} = A_{FC,m,t} - B_{FC,m,t} \quad (17)$$

$$A_{FC,m,t} \leq U_{FC,m,t} \quad (18)$$

$$B_{FC,m,t} \leq 1 - U_{FC,m,t} \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^{24} A_{FC,m,t} \leq 1 \quad (20)$$

$$\sum_{t=1}^{24} U_{FC,m,t} \leq 22 \quad (21)$$

本研究では各月の代表日を用いた年間の評価を行うため、熱や水素の製造量が過大や過小にならないよう、1日ごとに熱や水素の製造量と放熱等によるロス、需要量がバランスしている必要がある。各月の代表日の計算において、貯湯槽内の蓄熱量、水素貯蔵タンク内の水素貯蔵量、および、燃料電池の起動状態に関して、周期境界条件を用いることとし、以下の条件を加えた。

$$Q_{m,0} = Q_{m,24}, H_{m,0} = H_{m,24}, U_{FC,m,0} = U_{FC,m,24} \quad (22)$$

4. FCV 用水素製造可能量の評価結果

4.1 モデルによる燃料電池・改質器の運用結果

24 世帯の需要データのうち、年間給湯需要量が関東地方の戸建住宅の平均に近い 22.4 GJ/year である世帯 X に関してシミュレーションした8月の結果を例として Fig. 7 に示す。(a) には燃料電池による発電量、(b) には改質器による水素製造量、(c) には貯湯槽内の蓄熱量を示した。比較のため、提案するシステムを用いた年間 1,040 Nm³ (8,000 km 走行分) の FCV 用水素需要がある場合の計算結果だけでなく、既存の燃料電池スタックと改質器が同負荷率で運転されるシステ

(a) PEFC power generation

(b) FPS hydrogen production

(c) Stored energy in the hot water storage tank

Fig. 7 Simulation results in August

ムによる FCV 用水素需要がない場合の結果も合わせて示した。

既存のシステムでは燃料電池は、スタック効率と改質器効率を合わせた総合効率が高い高負荷率での運転が行われ、改質器と燃料電池は連動して 15 時から 23 時に運転されている。一方、提案するシステムでは、燃料電池の運転は大部分が効率の良い低負荷で行われ、改質器は FCV 用水素需要のため運転時間が延びているが、運転時にはこれまで通り効率の良い高負荷率での運転が行われていることが分かる。改質器の運転量の増加から余力を用いて FCV 用の水素製造が行われていることも確認できる。既存のシステムとは異なり、早朝から夜にかけて 1 日を通して燃料電池を運転しており、貯湯槽への蓄熱パターンも大きく変化していることが分かる。

世帯ごとの余力を用いた水素製造可能性を評価するため、FCV 用水素需要量を、0 km, 8,000 km, 12,000 km, 16,000 km, 20,000 km, 24,000 km 走行分と変えて計算を行った。それぞれの計算結果より燃料電池と改質器の設備利用率を算出した。世帯 X の例を Fig. 8 に示す。水素需要量を大きくするにつれて改質器の設備利用率は増加しており、燃料電池の設備利用率は、0 km の場合と比較すると 16,000 km 走行分以上の水素需要量で低下していることが分かる。水素需要量が 0 km の場合は、燃料電池は本来の目的である給湯需要を賄うための運転を最大限行い、不足分はガス給湯器により供給されている。一方、水素需要量が増加すると、燃料電池で用いる水素が不足して燃料電池の稼働率が低下し、ガス給湯器による熱供給量が増加する。そこで、燃料電池の稼働率が低下しない範囲を燃料電池本来の運転に影響を与えていない状況と考え、そのときの最大水素製造量を水素製造可能性とした。Fig. 8 で示した世帯 X については、余力を用いた水素製造可能性は 12,000 km 走行分であることが分かった。

4.2 世帯による水素製造可能性の分布

24 世帯すべてに関して計算を行い、FCV 用水素製造可能性の計算結果とその世帯の年間給湯需要量を比較した結果を Fig. 9 に示す。給湯需要量が多い世帯では燃料電池の本

Fig. 8 Annual capacity factors of the PEFC and the FPS by hydrogen demand for the FCV

Fig. 9 Relation between hydrogen production potential and annual hot water demand

来の利用による設備利用率が高いため、FCV 用水素製造余力が少ないことが見て取れるが、24 世帯すべてにおいて少なくとも年間 8,000 km 走行分の水素 1,040 Nm³ を製造可能であり、世帯によっては最大で 2,600 Nm³ (20,000 km 走行分) の水素を製造可能であることが分かった。1 台あたりの自家用普通車の年間走行距離は全国平均で 8,000 km 程度である²⁰⁾ことを考えると、1 世帯あたり 1 台の FCV のための燃料を家庭用燃料電池で自家生産可能であると言える。

提案したシステムでは、改質器は多くの時間において最大の改質効率となる負荷率で運転され、24 世帯の計算結果より、1 Nm³ の水素の製造にかかる都市ガス消費量は 0.33 ~ 0.36 Nm³ であり、水素製造にかかるランニングコストは 58.0 ~ 62.7 円 / Nm³ となった。

5. 多摩地域を対象とした水素供給可能範囲の分析

5.1 分析目的

家庭用燃料電池を用いた FCV 用水素製造可能性の分析により、1 世帯あたりの水素製造可能性を求めた。その結果を用いると、提案するシステムを集合住宅の全世帯に導入した場合の水素製造可能性から、地域内の FCV のどの程度の割合の水素需要を満たすことができるかを評価することができ、集合住宅に導入した本システムの FCV 用水素ステーションとしての可能性を検討した。

5.2 対象地域の集合住宅と水素需要量の設定

東京都の多摩地域の市町村のうち、都市計画区域ごとの市街化区域の面積割合が 70% を上回る、立川市、武蔵野市、三鷹市、府中市、昭島市、調布市、町田市、小金井市、小平市、日野市、東村山市、国分寺市、国立市、狛江市、東大和市、清瀬市、東久留米市、武蔵村山市、多摩市、稲城市、西東京市の計 21 市 401 km² を供給対象地域とした。

本研究では、建築後 30 年を経過した共同住宅の建て替えによる燃料電池を用いた給湯システムへの転換を想定し、水素ステーションの設置を検討する集合住宅は、住宅地図データベースより対象地域の 100 世帯以上の集合住宅の中から、2020 年時点で築 30 年以上となる 159 の集合住宅を対象とした。4 章の結果より、少なくとも FCV 8,000 km 分の水素はどの世帯でも余力で製造可能であることから、簡単のため 1

Table 1 Supply area cover ration and FCV cover ratio

Number of Stations	Area Cover Ratio by Circles	FCV Cover Ratio by Voronoi Diagram
5	42.4%	56.3%
10	59.0%	80.9%
15	71.9%	81.6%
20	81.5%	79.6%
25	83.9%	78.2%
30	85.8%	77.7%

集合住宅が10ヶ所の場合の自治体別のFCV台数カバー率をFig. 12に示す。対象地域全体のFCV台数カバー率は、80.9%であった。集合住宅数を5, 10, 15, 20, 25, 30ヶ所としたそれぞれの場合、面積カバー率およびFCV台数カバー率をTable 1に示す。

15ヶ所の集合住宅を水素ステーションとした場合がFCVの台数カバー率が最大となり、集合住宅数をさらに増やすと、水素供給量の少ない集合住宅による水素ステーションが増えるため、最寄りの水素ステーションの水素供給量では不足するFCVが増加し、FCVカバー率は低下していくことが分かる。集合住宅数が10ヶ所の場合ですでにFCVカバー率は80%を超えており、10ヶ所程度であっても余力の水素製造能力を用いた本システムを導入した集合住宅により、水素ステーションの役割の一部を担うことができると考えられる。

6. 結 言

本論文では、家庭用燃料電池に付属の改質器の余力を活用したFCV用水素製造システムを提案した。多様な給湯負荷を持つ24世帯を対象としたエネルギー需給シミュレーションを行い、燃料電池本来の給湯機能に影響を与えない範囲でのFCV用水素製造可能量を定量的に評価した。

シミュレーション結果より、24世帯すべてにおいて少なくとも年間8,000 km走行分の水素製造が可能であり、世帯によっては最大で20,000 km走行分の水素を製造可能であることが分かった。平均的な自動車の年間走行距離に対するFCV用水素は本システムで賄うことができることが示された。

また、本システムを各家庭に導入した集合住宅が水素ステーションの代替となる可能性を、東京都多摩地区を対象として評価した。多摩地区内の10ヶ所の集合住宅に本システムを導入した場合、2025年のFCVの普及目標に対して80.9%のFCVの水素需要を満たすことができることが示された。

以上より、提案したシステムは、水素ステーションの導入が拡大するまでの中継ぎ的な役割として十分に期待できる。今後の課題として、水素充填用圧縮機を含む提案したシステムの初期コストも考慮した経済性の評価が必要である。

文 献：References

- 1) Ministry of Council for a Strategy for Hydrogen and Fuel Cells, <http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009-c.pdf> (Last access: 2017.3.4): 水素・燃料電池戦略協議会, <http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009-c.pdf> (Last access: 2017.3.4)
- 2) Tomioka, H., *JARI Research Journal*, JRJ20130806, 1-5 (2013): 富岡秀徳, *JARI Research Journal*, 20130806, 1-5 (2013)
- 3) Oomori, K.; Kuwano, T.; Kojima, N., *Hydrogen Energy System*, **30**(2), 41-45 (2005): 大盛幹士, 久和野敏明, 児島伸之, 水素エネルギーシステム, **30**(2), 41-45 (2005)
- 4) Fuel Cell Commercialization Conference of Japan, <http://fccj.jp/hystation/> (Last access: 2017.3.4): 燃料電池実用化推進協議会, <http://fccj.jp/hystation/> (Last access: 2017.3.4)
- 5) Maeda, K.; Masumoto, K.; Hayato, A., *J. Power Sources*, **195**, 3779-3784 (2010)
- 6) Ito, H., *Int. J. Hydrogen Energy*, **41**(34), 15111-15123 (2016)
- 7) Aoki, T.; Habara, H.; Shimoda, Y., *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, **37**, 9-11 (2015): 青木拓也, 羽原宏美, 下田吉之, エネルギー・資源学会論文誌, **37**, 9-11 (2015)
- 8) Wakui, T.; Wada, N.; Yokoyama, R., *Energy Convers. Manage.*, **77** 40-51 (2014)
- 9) Aki, H.; Yamamoto, S.; Kondoh, J.; Maeda, T.; Yamaguchi, H.; Murata, A.; Ishii, I., *Int. J. Hydrogen Energy*, **31**(8), 967-980 (2006)
- 10) Aki, H.; Taniguchi, Y.; Tamura, I.; Kegasa, A.; Hayakawa, H.; Ishikawa, Y.; Yamamoto, S.; Sugimoto, I., *Int. J. Hydrogen Energy*, **37**(2), 1204-1213 (2012)
- 11) Kobayashi, K., *Hydrogen Energy System*, **36**(3), 51-54 (2011): 小林広介, 水素エネルギーシステム, **36**(3), 51-54 (2011)
- 12) Wallmark, C.; Alvfors, P., *J. Power Sources*, **106**, 83-92 (2002)
- 13) Aki, H.; Kondoh, J.; Ishii, I.; Yamamoto, S., Proc. of the 19th Conference on Energy, Economy, and Environment, 1-3, 1-6 (2003): 安芸裕久, 近藤潤次, 石井格, 山本重, 第19回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 1-3, 1-6 (2003)
- 14) Toyota Motor Corporation, Specification table of Toyota MIRAI, http://toyota.jp/pages/contents/mirai/001_p_001/pdf/spec/mirai_spec_201508.pdf (Last access: 2017.3.4): トヨタ自動車株式会社, トヨタ MIRAI 主要諸元表, http://toyota.jp/pages/contents/mirai/001_p_001/pdf/spec/mirai_spec_201508.pdf (Last access: 2017.3.4)
- 15) Tokyo Gas Co., Ltd., Specifications of ENE FARM,

- http://home.tokyo-gas.co.jp/enefarm_special/enefarm/specific.html (Last access: 2017.3.4): 東京ガス株式会社, エネファーム製品仕様, http://home.tokyo-gas.co.jp/enefarm_special/enefarm/specific.html (Last access: 2017.3.4)
- 16) Rohland, B.; Eberle, K.; Ströbel, R.; Scholta, J.; Garche, J., *Electrochim. Acta*, **43**(24), 3841-3846 (1998)
- 17) Strobel, R.; Oszcipok, M.; Fasil, M., *J. Power Sources*, **105**, 208-215 (2002)
- 18) Casati, C.; Longhi, P.; Zanderighi, L.; Bianchi, F., *J. Power Sources*, **180**, 103-113 (2008)
- 19) Grigoriev, S. A.; Shtatniy, I. G.; Millet, P.; Porembsky, V. I.; Fateev, V. N., *Int. J. Hydrogen Energy*, **36**(6), 4148-4155 (2011)
- 20) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Statistical Yearbook on Motor Vehicle Fuel Consumption (2015): 国土交通省, 自動車燃料消費量統計年報 平成 27 年度 第9表 (2015)
- 21) Tokyo Strategic Council for the Realization of a hydrogen Society, <http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/energy/hydrogen/26torimatome.pdf> (Last access: 2016.10.12): 水素社会実現に向けた東京戦略会議, <http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/energy/hydrogen/26torimatome.pdf> (Last access: 2016.10.12).
- 22) Statistics Division, Bureau of General Affair, Tokyo Metropolitan Government, Tokyo Statistical Yearbook, <http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tnenkan/2014/tn14qa040600.xls> (Last access: 2017.3.24): 東京都総務局統計部, 東京都統計年鑑, <http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tnenkan/2014/tn14qa040600.xls> (Last access: 2017.3.24)
-