

## 家庭用燃料電池（SOFC）導入効果に関する近似分析

金田 重郎\*・井上 怜\*\*・柴野 直人\*\*

### あらまし

燃料電池（FC: Fuel Cell）は、高い発電効率を有しており、その実用化・普及への期待が大きい。我が国では、世界に先駆けて、家庭用燃料電池「エネファーム」が2009年より市販され、既に多くの住戸に導入されつつある。しかし、燃料電池の動作は複雑であり、その導入効果は、簡単な方法では分からない。ガス会社が発行している家庭用燃料電池のパンフレットを見ても、二酸化炭素排出量の削減効果等は、国による社会実験の実測値をそのまま転載しているケースが多い。結果として、家庭用燃料電池の導入に際しては、販売側のハウスメーカー・ガス会社の担当も、導入している側の施主も、ムード的な判断を行う結果となっている。この状況は決して、望ましいものではない。各家庭に家庭用燃料電池を普及させる為にも、家庭用燃料電池を導入した小規模のCEMS（Community Energy Management System）を設計する上でも、燃料電池の導入効果を評価する簡明な手法が望まれる。そこで、本稿では、最新鋭の家庭用燃料電池である固体酸化物形燃料電池（SOFC）の動作特性に着目し、燃料電池の発電力と消費都市ガス量、あるいは、発電量と沸いたお湯の量の間の関係を、簡単な線形近似式で近似することを提案する。線形近似式で、発電力と消費都市ガス量との関係が分かることは、以下のことを意味する。（1）総都市ガス量消費量や総湯沸かし量は、総電力量だけから概算できる。時間的にどの時点で稼働を上げるとかという運転履歴は無関係である。（2）家庭用燃料電池では、出力電力が大きいほど、効率が上がる。家庭用燃料電池（SOFC）の運転戦略としては、電力優先の制御を行えば十分である。お湯は結果的に沸いたものを利用すれば良い。具体的には、市販の固体酸化物形燃料電池（SOFC）の実測データに基づいて、簡単な線形近似式を作成した。これにより、従来より、容易に家庭用燃料電池の実態を把握できる。その結果、家庭用燃料電池導入による光熱費削減効果は、ガス会社が設定している、家庭用燃料電池専用の都市ガス料金制度に依存していることが示された。また、年間1.3[トン]～1.4[トン]とされている、家庭用燃料電池による二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の削減効果についても、あくまでも石炭火力を含む、火力発電に伴う二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量を基準としたものであり、原子力発電が再稼働した状況では、必ずしも、成立しないことが示された。

\*同志社大学大学院・総合政策科学研究科/理工学研究科

\*\*同志社大学大学院・理工学研究科

## 1. はじめに

水素ガス ( $H_2$ )、一酸化炭素ガス ( $CO$ ) 等から直接に電力を生成する燃料電池 (FC: Fuel Cell) [1] は、ボイラー、タービン等の熱利用型機関が持っている「カルノーサイクルの制約」を受けないため、高い発電効率を有しており、その実用化・普及への期待は大きい。我が国では、世界に先駆けて、家庭用燃料電池「エネファーム<sup>1</sup>」が2009年より、多数の住宅に導入されつつある。例えば、最新鋭の固体酸化物形燃料電池 (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) は、700 [W] 出力時の発電効率 46.5%、副産物であるお湯の生成を含めると 90% の高い熱効率を誇っている [2]。

しかし、一方で、ガス会社が発行している家庭用燃料電池のパフレットを見ても、二酸化炭素排出量の削減効果等は、国による社会実験の実測値をそのまま利用しているケースが多い。家庭用燃料電池の動作が複雑で、その導入効果が、簡単な方法では計算できないためと思われる。結果として、家庭用燃料電池の導入に際しては、販売側のハウスメーカー・ガス会社の担当も、導入している側の施主も、ムード的な導入可否の判断を行っていると言わざるを得ない。しかし、この状況は決して、望ましいものではない。各家庭に家庭用燃料電池を普及させる為にも、家庭用燃料電池を導入した小規模の CEMS (Community Energy Management System) を設計する上でも、家庭用燃料電池の導入効果を評価する簡明な手法が望まれる。

上記の状況に鑑み、本稿では、最新鋭の家庭用燃料電池である固体酸化物形燃料電池 (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) の動作特性に着目し、家庭用燃料電池 (SOFC) の発電力と消費都市ガス量、あるいは、発電量と沸いたお湯の量の間の関係を、簡単な線型近似式で近似することを提案する。線形近似式で、発電力と消費都市ガス量との関係が分かることは、以下のことを意味する。

1. 都市ガス量消費量や湯沸かし量は、電力量の合計値だけから概算できる。都市ガス消費量算出に必要なのは、電力量の合計値 (総電力量) のみである。過去の稼働履歴や、発電量ピーク位置の制御等の運転制御は無関係である。
2. 家庭用燃料電池では、出力電力が大きいほど、効率が上がる。家庭用燃料電池の運転戦略としては、電力優先の制御を行えば十分である。お湯は沸いたものを利用すれば良い<sup>2</sup>。

具体的には、市販の固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の実測データに基づいて、簡単な線型近似式を作成した。これにより、容易に家庭用燃料電池の実態を把握できる。その結果、家庭用燃料電池導入による光熱費削減効果は、ガス会社の販売価格戦略に依存している要素が強く、また、年間 1.3 [トン] ~ 1.4 [トン] とされる二酸化炭素 ( $CO_2$ ) 排出量の削減効果についても、一定の前提が仮定されているため、現実の動作状況を必ずしも反映したものではないことが示される。

以下、第2章では、家庭用燃料電池の近似式について述べ、第3章では、エネファームの導入効果がガス会社の燃料代政策に大きく依存していることを示す。第4章では、4軒程度の小規模なコミュニティで、家庭用燃料電池からの出力を融通した場合のコストメリットについて、提案された線型近

<sup>1</sup> 「エネファーム」は東京ガス (株)、大阪ガス (株)、新日本石油 (株) の登録商標です。商標登録・第 5245352

<sup>2</sup> 実際に、SOFC の運転戦略は、電主熱従、すなわち、出来上がっているお湯の量には無関係に、700 [W] までは電力を生成し、お湯が満杯になっても、発電は続ける制御方式となっている。

似式を用いて予測できることを示す。第5章は今後の展望とまとめである。

## 2. 家庭用燃料電池と近似式

### 2.1 家庭用燃料電池（SOFC）

水素ガス ( $H_2$ )、一酸化炭素ガス ( $CO$ ) 等から直接に電力を生成する燃料電池 (FC: Fuel Cell) [1] は、火力発電等の熱利用型発電システムが抱えている「カルノーサイクル」の軛から逃れることが可能であり、理論的に高い発電効率が期待される。実際、本稿で対象とする最新鋭の家庭用・固体酸化物形燃料電池 [2] (SOFC) は、700 [W] 出力時で 46.5% の発電効率、副産物であるお湯の生成を含めると 90% の高い熱効率を誇っている [2]。家庭用燃料電池は、同時に電力とお湯を作る「コージェネレーション (Cogeneration)」の一種である。

ただし、都市ガスやプロパンガスが直接に電力に変換されるわけではない。家庭用燃料電池では、まず、都市ガスから水素ガス ( $H_2$ )、あるいは一酸化炭素ガス ( $CO$ ) を生成する。都市ガスのままでは燃料電池セルは動作しないからである。これを「改質」と呼ぶが、家庭用燃料電池でも、改質には一定以上の温度を保つ必要がある。さらに、燃料電池セルについても、固体酸化物型燃料電池の場合には、約 900 度程度の温度を常に保つ必要があり、原則として、スイッチは切れない。不必要にスイッチを切ると、セラミックス製の薄い燃料電池セルが熱サイクル破損するためである。

家庭用燃料電池は、都市ガスから発電を行い、副産した熱により、湯を沸かす。ただし、発生している電力に依存して、発電と熱生成の効率に大きな変化が生じる。図 1、図 2 は、新エネルギー財団 (NEF) 資料 [4] から引用した。家庭用燃料電池 (SOFC) の発電効率と発熱効率を示している。横軸は、燃料電池の稼働によって発電する電力である。縦軸は都市ガスのエネルギーから電力を発電する際の、発電効率 (図 1) と発熱効率 (図 2) である。

図 1 を見ると、SOFC の発電効率は、発生電力が大きな領域では高いが、出力が低下するとともに、急速に低下している。一方、お湯として取り出されるエネルギー (図 2) は、発電量にあまり依存せずに、一定の効率、即ち、投入した都市ガス量に応じた発熱を示している。

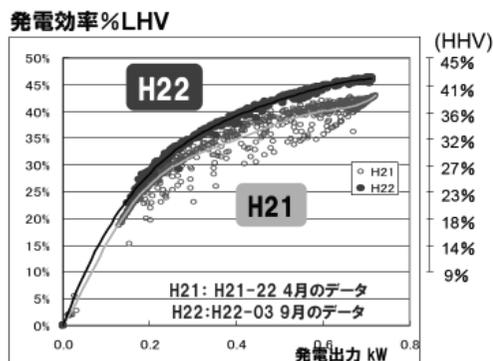


図 1 SOFC の発電効率 [4]

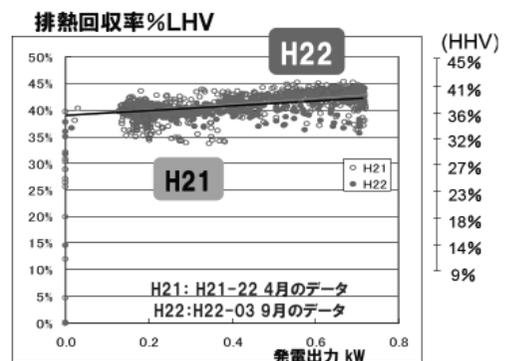


図 2 SOFC の発熱効率 [4]

## 2.2 線型近似式の提案

図1、図2を線型近似式(単回帰)に置き換える。図1におけるH22年度の発電効率、及び図2の発熱効率をデジタイザによって取得した。取得したデータを表1に示す。尚、以下の本稿の議論では、SOFCの発電効率と発熱効率の合計値を「総合効率」と表現する。

表1に基づいて、瞬間的な発電量と都市ガス量との線形近似式(線型単回帰)を導出する。但し、発電量を $P_{\text{電力}} [kW]$ 、消費する都市ガス量を $S_{\text{燃料電池}} [kW]$ とした。 $R^2$ は0.9968である。

$$S_{\text{燃料電池}} = 1.52 \times P_{\text{電力}} + 0.428 [kW] \quad (1)$$

副産物である熱と電力の関係は、熱量を $S_{\text{熱量}} [kW]$ として、以下の様になる。 $R^2$ は0.9946である。

$$S_{\text{熱量}} = 0.678 \times P_{\text{電力}} + 0.161 [kW] \quad (2)$$

都市ガスも電力も料金計算は基本的に月単位なので、上記の2式に24[時間]×30[日]を乗じ、1か月あたりの都市ガス量、及び発熱量を、電力の消費量との関係で、以下のように表現する。

$$S_{\text{燃料電池/月}} = 1.52 \times P_{\text{電力/月}} + 308 [kWh/月] \quad (3)$$

$$S_{\text{熱量/月}} = 0.678 \times P_{\text{電力/月}} + 116 [kWh/月] \quad (4)$$

表1 燃料電池の稼働効率

電気出力 (kW)	発電効率 (%)	発熱効率 (%)	総合効率 (%)
0.05	10.10	39.39	49.49
0.1	16.26	39.67	55.93
0.2	27.03	40.27	67.30
0.3	34.84	40.77	75.61
0.4	39.49	41.16	80.65
0.5	42.16	41.74	83.90
0.6	44.41	42.19	86.60
0.7	46.30	42.86	89.16

## 2.3 線形近似の持つ意味

前節の近似式(1)(2)は、電力と都市ガス消費量との関係である。これら2つの変数は比尺度であり、鷲尾のスケールタイプ制約[5]に従って、コブダグラスモデルによる関係式を導出すべきかもしれない。しかし、実際には、ここに示した様に、線型単回帰でも高い $R^2$ を有している。線型単回帰であるので、近似式は発電電力比例の部分と、固定値とから成っている。簡単なモデルではあるが、高い近似度を持つことは、実際の物理モデルが、それに合致している可能性がある。具体的には、SOFCは、都市ガスを水素、あるいは一酸化炭素に変換する改質器を持っている。この改質器は、常に一定の温度に保っておく必要がある。更に、セル自体も、900℃に保っておく必要がある。言い換えると、一定の加温ロス(=定数項)が存在する。そして、電池本体の機能としては、都市ガスの単位量を電力に変えることになる。これが、電力に対する比例項となっていると推定される。

線型単回帰で精度良く近似できることは、SOFCの導入効果の評価に大きな力を与える。具体的には、以下の点がある。

- 電力量と都市ガス量が比例することは、結果的に、電力の利用量さえわかれば、簡便な計算で、

必要都市ガス量や、お湯の加温量が算出できる。シミュレーションなど不要であり、実用上の利便性が高い。

- SOFC は、発生した電力量だけが問題でありで、発電量のピーク時刻を動かしたり、発電量を平準化しても、消費される燃料の量は変わらない。基本的には、発電量が多いほうが、効率があがる。SOFC の制御としては、電主熱従制御（必要な電力をとにかく発電し、お湯は結果として沸く）で十分である。実際、市販の SOFC はそうなっている。必要な電力をできるだけ(700 [W] 以下の部分のみではあるが) 発電し、たとえ、お湯が十分に沸いていてもお湯の量には無関係に発電する。

以下に近似式の利用例を示したい。たとえば、一般的に、1 戸建ての住宅の場合、年間の電力利用量は、5,000 [kWh] 程度と言われている。家庭用燃料電池は、この電力の 8 割程度をカバーできると言われる。したがって、 $5,000 \times 0.8 = 4,000$  を 12 で割って式 (3) (4) に代入すれば、1) 家庭用燃料電池が消費する都市ガスのカロリー量、及び 2) (有効利用されるかどうかは別にして) 家庭用燃料電池が副産出する湯のカロリー量、をそれぞれ算出できる。12 で割った 333.3 [kWh/月] を (3) (4) に代入すると、

$$S_{\text{燃料電池/月}} = 1.52 \times 333.3 + 308 = 814 \text{ [kWh/月]} \quad (5)$$

$$S_{\text{熱量/月}} = 0.678 \times 333.3 + 116 = 342 \text{ [kWh/月]} \quad (6)$$

となる。以下、近似式の簡便性を用いて、二酸化炭素の排出量の削減量や光熱費の観点から、家庭用燃料電池の有効性を検証してゆく。

### 3. 家庭用燃料電池 (SOFC) の有効性

ガス会社の家庭用燃料電池の Web サイトには、「家庭用燃料電池を入れると 7 万円程度もお得になる」という主旨の文字が躍っている。SOFC について、どの程度のコストメリットが得られるのかを、近似的に見て行きたい。

#### 3.1 家庭用燃料電池導入前

まず、家庭用燃料電池の導入前を考える。電力量は、前述の年間 5,000 [kWh/年] を利用する。月あたりでは、417 [kWh/月] である。電力料金は、関西電力・従量電灯 A [7] を適用し、以下の通りとなる。但し、第 1 項は基本料金、第 2 項は 15 [kWh/月] を越えて 120 [kWh/月] までの単価 20.27 円分、第 3 項は 120 [kWh/月] から 300 [kWh/月] の単価 26.51 円、最後の項は 300 [kWh/月] 以上の単価 30.23 円に相当する。

$$334.22 + 20.27 \times (120 - 15) + 26.51 \times (300 - 120) + 30.23 \times (417 - 300) = 10,771 \text{ (円/月)} \quad (7)$$

一方、分析には、都市ガス利用量の想定が必要である。大阪ガスは、平成 13 年 4 月～平成 18 年 3 月末の 5 年間の平均月間使用量調査に基づき、1 軒あたりでの平均的月間使用量を、都市ガス 33 [m<sup>3</sup>] としている [6]。大阪ガスの都市ガス (13A) の 1 m<sup>3</sup> 当たりのカロリー量は 45MJ とされるので、3.6MJ = 1kWh から、一月あたりの都市ガス利用量は、以下の通りとなる。

$$S_{\text{熱量/月}} = 33 \times \frac{45}{3.6} = 412.5 \text{ [kWh/月]} \quad (8)$$

年間で、4,950 [kWh] となる。以下、この値を典型的な一戸建て住戸の都市ガス利用量（家庭用燃料電池導入前）とする。都市ガスの料金は、大阪ガス [6] 「B 料金」が適用され、以下の様になる。

$$1,260 + 156.61 \times 33 = 6,428 \text{ (円/月)} \quad (9)$$

1 か月の光熱費は、10,771 + 6,428 = 17,199 (円/月) である。これが、家庭用燃料電池を導入する前の光熱費の合計値である。

### 3.2 家庭用燃料電池導入後

次に、(5) (6) 式に従って、家庭用燃料電池が導入されたとする。まず、電力 417 [kWh/月] の中の 8 割が家庭用燃料電池でカバーされるものとする、月当たりの電力消費は  $417 \times 0.2 = 83.4$  [kWh/月] である。都市ガスについては、式 (6) の 342 [kWh/月] の湯沸かし量の中でどの程度がカバーされるのかによって、コージェネの効果は異なる。本稿では、これを 8 割生かせるとする。その結果、もともとあった都市ガス利用量 412.5 [kWh/月] は、 $342 \times 0.8 = 273.6$  [kWh/月] 削減される。尚、本稿では、この有効利用された熱量は、そのまま都市ガスの削減につながるものとする。つまり、都市ガスの「湯沸かし効率」は 100% であるとする。エコジョーズの発熱効率が 95% であることを考えると、近似的には問題ないと考えている。一方、家庭用燃料電池による都市ガス消費量が 814 [kWh/月] 加味されて、合計  $814 + 412.5 - 273.6 = 952.9$  [kWh/月] となる。都市ガス  $1 \text{ m}^3$  は 12.5 [kWh] なので、これは、 $76.23 \text{ m}^3$  である。

次に、大阪ガスの料金について確認する。家庭用燃料電池が導入されている場合、料金は一般料金とは異なる。「マイホーム発電料金 [8]」となる。この特約料金は、冬期とそれ以外で料金が異なるが、本稿では、簡単化のために、4 月から 11 月に適用される夏期料金で計算する。結果は以下の通りである。尚、この特約はさらに床暖房等を入れると、9% 割引されるが、本稿では、考慮に入れていない。

$$2,584 + 77.57 \times 76.23 = 8,497 \text{ (円/月)} \quad (10)$$

一方、電力は、83.4 [kWh/月] であるので、以下の金額となる。

$$334.22 + 20.27 \times (83.4 - 15) = 1,719 \text{ (円/月)} \quad (11)$$

光熱費は、 $8,497 + 1,719 = 10,216$  (円/月) である。最終的に、光熱費は差引  $17,199 - 10,216 = 6,982$  (円/月) となり、年間 83,000 円程度のコストメリットがある。

### 3.3 導入効果の分析

本節では、上記 83,000 円/年の光熱費の削減効果が、そもそも何によってもたらされているか、を分析する。導入前と導入後のエネルギー内訳を表 2 に示す。ただし、ここで、「電力会社における発電用熱量」とは、電力会社の発電効率を 40% として、電力量の 2.5 倍の燃料発熱量を必要とした換算値である。家庭用燃料電池の省エネ効果では、電力の算定として、火力発電の平均効率を 40% 程度とすることが多い。そこで、本稿でもそれに従っている。「全燃料の発熱量合計値」は、電力を発電するための熱量と、都市ガスの熱量の合計である。但し、「( )」内に再掲した値は、家庭用燃料電池によって沸いたお湯を利活用できなかった場合の値である。

表 2 を見ると、家庭用燃料電池の大きな特徴が見える。導入後の総熱量は、副産物として生かされ

表2 導入前後のエネルギー消費

導入前後	都市ガス熱量 [kWh/月]	電力量 [kWh/月]	電力会社における発電用熱量 [kWh/月]	全燃料の発熱量合計値 [kWh/月]
導入前	412.5	417	1042.5	1,454.5
導入後	952.9	83.3	208.25	1,161.15 (1434.75)

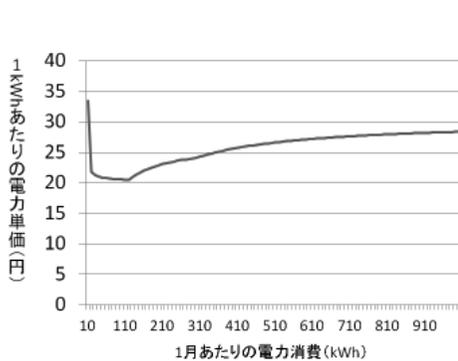


図3 電力単価（関西電力・従量電灯 A）

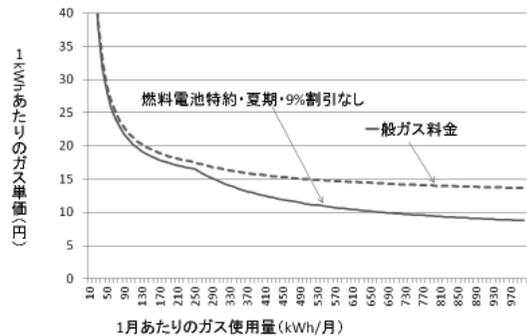


図4 都市ガス単価（大阪ガス・マイホーム発電料金（但し、9%割引なし））

たお湯相当部分の加熱用都市ガスが節約される点を除くと、化石燃料の熱量総体は、全く削減されない。家庭用燃料電池の導入によって、化石燃料が削減されるのは、副産物として生成されたお湯が生かされるか否かのみ依存している。しかし、現実には、月あたり7,000円も光熱費は下がっている。その背後には、都市ガス価格の設定における政策的誘導がある。以下、説明する。

図3は、関西電力の一般家庭向きの契約である「従量電灯 A」の kWh あたりの単価、図4は、同じく、大阪ガスのマイホーム発電料金における都市ガス kWh あたりの単価である。なお、大阪ガスでは、通常、この特約からさらに9%値引きされるが、図4では考慮していない。

図4を見ると、都市ガスのマイホーム発電料金は、単価が政策的に安く抑えられており、1 kWh あたり10円程度である。一方、図3から、電力は1 kWh あたり25円程度である。この数値だけを見ると、家庭用燃料電池の発電効率が40%程度に過ぎなければ、電力を都市ガスから生成しても、メリットは無いように思いがちである。現状の家庭用燃料電池（SOFC）では、最大でも45%がやっとである。

しかし、現実はそのようではない。図3と図4を見比べると、電力では「使えば使うほど、単価が上がる」のに対して、都市ガスでは「使えば使うほど単価が下がる」形をしている。家庭用燃料電池導入による光熱費の低下は、以下の3つの主因がある。

- 例えば、500 [kWh/月] の電力を都市ガスに置き換えた場合、電力の500 [kWh/月] の2.5倍程度の熱量を必要とする。結果として、「電力の500 [kWh/月]」の横軸方向の位置よりも、はるかに右側で、都市ガスの単価が決定される。つまり、電力と都市ガスの単価ギャップは、図3、図4の横軸上の500 [kWh/月] ポイントの価格差よりもより大きくなる。
- 当初から都市ガスとして消費していた500 [kWh/月] 部分についても、最初の単価の高い一般契約から、価格を抑えた「マイホーム発電料金（特約）」に変わり、しかも、全体の都市ガス

消費量が増えた結果、都市ガス単価がより低下する。

- 電力料金についても、利用量が大幅に削減され、電力単価の安い領域に移行している。このため、単価が安くなっている。

ただし、家庭用燃料電池の導入に伴う光熱費の低減額(月あたり 7,000 円弱)の中で、1,500 円～ 2,000 程度は、「副産物として沸いたお湯を有効利用して都市ガス消費量を節約した」部分である。したがって、家庭用燃料電池を導入しても、めったに風呂には入らないという状況では、家庭用燃料電池の光熱費削減効果が減少する<sup>3</sup>。

### 3.4 二酸化炭素排出量削減効果の分析

次に家庭用燃料電池の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の削減効果について分析する。一般に、家庭用燃料電池は、1年間で1.3トン～1.4トンの二酸化炭素排出量を削減するとされている[9]。一方、太陽光を利用してお湯を作る「太陽光ソーラーパネル」の場合には、およそ400[Kg]程度、二酸化炭素の排出量を削減できる[10]。この結果は不思議である。表2を見れば、副産物のお湯を生かした部分でしか、家庭用燃料電池は消費する化石燃料のカロリー量削減には寄与できていない。化石燃料のカロリー量に、家庭用燃料電池の導入前後で差がないからである。しかし、ガス会社等の発表はウソでは無い。1.3トン～1.4トンという削減量は、新エネルギー財団(NEF)による社会実験からベストデータを持ってきているものであり、実証されている。

この現象の原因は、新エネルギー財団(NEF)の社会実験における前提条件にある。たとえば、新エネルギー財団(NEF)報告書[4]の61ページにはその算出根拠が書かれているが、その主な前提は以下の通りである。

- 電力会社における発電時の二酸化炭素排出量として、 $0.69\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$ を用いている。これは、中央環境審議会地球環境部会目標達成シナリオ小委員会中間取りまとめ(平成13年7月)を根拠とする。
- 比較対象の従来システムでは、効率78%の旧式ガス湯沸かし器を前提とする。

上記0.69は、「火力発電の平均」である。(二酸化炭素の排出量がない)原子力や水力は含まれていない。原子力や水力を入れれば、この値は変わる。ヒートポンプ業界における二酸化炭素の排出量算定では、 $0.340\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$ (2012年値)を多用する。これは、電気事業連合会自主行動計画目標値<sup>[12]</sup>である。原子力、水力、火力のすべてを重み平均している。

我が国では、火力発電の約40%が石炭火力である。石炭火力は天然ガス火力の約1.8倍の二酸化炭素を出すために、環境保護団体から批判を受けている[13]。上記 $0.69\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$ は、そもそも、原子力・水力を含んでいないので、値が大きくなりがちである。しかも、火力発電には、二酸化炭素排出量の多い石炭火力を半分近く含んでいる。0.69は、火力発電所のエネルギー源を天然ガスに切り替えるだけで、確実に削減できる。

<sup>3</sup> 例えば、高齢者の単身世帯などに、家庭用燃料電池を売るべきではない。むしろ、お湯を頻繁に使う、複数の子どもと一緒に暮らす、若い夫婦をターゲットにすべきと思われる。

表2に上記数値をあてはめれば、容易に家庭用燃料電池の二酸化炭素排出量の削減への寄与が計算できる。尚、都市ガス(13A)の二酸化炭素排出量は、大阪ガスによれば、 $0.0509\text{kg-CO}_2/\text{MJ}$  ( $= 0.18324\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$ ) とされる。家庭用燃料電池によって、ガス会社からの都市ガス消費量は、 $952.9-412.5 = 540.4$  [ $\text{kWh}/\text{月}$ ] 増加している。一方、電力会社からの買電量は、 $417-83.3 = 333.7$  [ $\text{kWh}/\text{月}$ ] 削減されている。ここで、 $540.4$  [ $\text{kWh}$ ]の増加は「タチの良い」天然ガスである。一方、削減された $333$  [ $\text{kWh}$ ]は、「タチの悪い」石炭火力を含む。家庭用燃料電池の採用は、化石燃料種別の切り替えに相当する。

以上から、家庭用燃料電池の導入に伴う、二酸化炭素  $\text{CO}_2$  排出量の削減量は、以下の通り簡単に求めることができる。

$$333.7 \times 0.69 - 540.0 \times 0.18324 = 131.3 \text{ [kg-CO}_2/\text{月]} \quad (12)$$

1年間では、 $131.3 \times 12 = 1,575$  [ $\text{kg-CO}_2/\text{月}$ ] となり、約1.5トンとなり、大阪ガスの主張が裏付けられる。ただし、これは電力として  $0.69\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$  を前提としている。原子力や水力を含めた評価では0.34となるので、これを表2に適用すると、二酸化炭素排出量の削減は年間174kgに低下する。本稿の執筆時点では、福島第一原発の事故の影響で、ほとんどの原発が止まっている。したがって、0.69という数値にも一定量の説得性がある。しかし、原子力発電等が稼働すれば、0.34が妥当であろう。その場合、原子力を主体とする深夜時間帯に家庭用燃料電池を稼働させることが本当に良いことかどうかは検討の余地があることを、この近似式は示唆している。

#### 4. 小規模 CEMS の分析

本章では、実際の電力消費データに基づいて、家庭用燃料電池の導入効果を評価した例を示す。対象とするものは、規模の小さな CEMS (Community Energy Management System) である。CEMS 構成によって、光熱費がどの程度削減できるかを推定する。

##### 4.1 小規模 CEMS 構成

分析対象のイメージを図5に示す。4戸の戸建て住宅中の2軒が家庭用燃料電池を採用している。残り2戸は、家庭用燃料電池を持たない。余剰した家庭用燃料電池の発電能力は、住戸間の電力融通によって、隣戸の電力消費のために活用する。ただし、以下の実際分析では、1戸の余剰を他の1戸に送電する2軒単位で評価する。尚、図5では、電力会社の電力線を用いて電力を供給する「託送」をイメージしている。後述する様に、導入効果が小さいので、電力料金集金のために何らかの別組織を必要とする一括契約方式は難しいと判断したため、戸別契約方式の図とした。この託送方式は、少なくとも現行の電気事業法の下では、実現できない。



図5 小規模 CEMS のイメージ

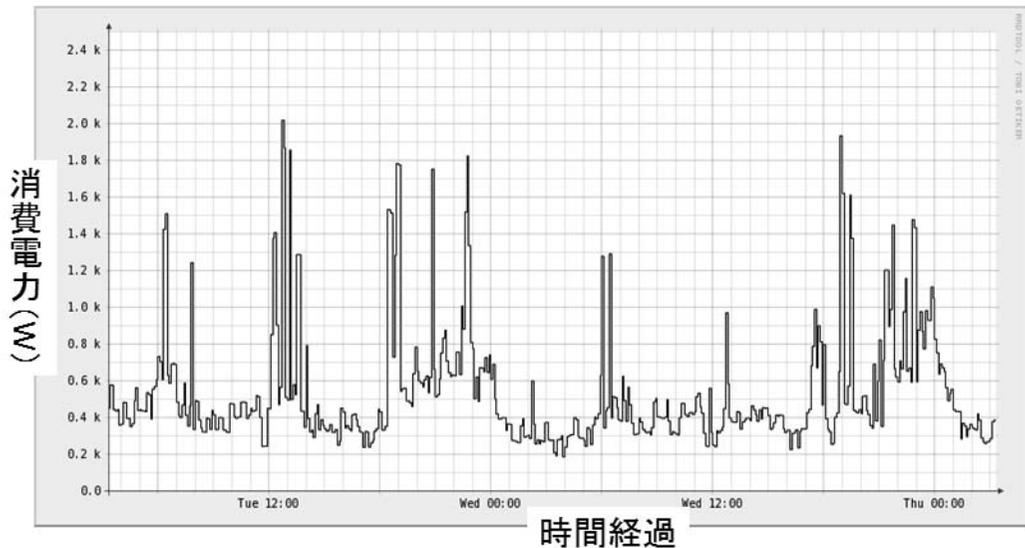


図6 実測された電力消費カーブ (例)

図6は、シミュレーションに用いる実際の電力消費データである。2日間のデータを示している。季節は春の中間期で、エアコンは稼働していない。月当たりの電力消費量は、ごく標準的なものであるが、このデータには、大きく2つの特徴がある。

- 深夜のベースラインが高い：図6では、夜間も250[W]を越える電力消費が立っている。これは、門灯などの常夜灯が白熱電球であったことがひとつの原因である。また、大型冷蔵庫の運転負荷も大きいと思われる。しかし、それでもベースラインの電力消費が大きい。ひとつの理由は、小型の海外製冷蔵庫のスイッチが入っていたことが原因と思われる。ヒートポンプを利用しない、安価な小型冷蔵庫は電力効率が極めて悪い。
- ピークが多数みられる：図6を見れば明らかに短時間でのピーク負荷が多数立っている。これは、オール電化キッチンとティファールのポットが原因である。ティファールのポットは小型であるが、AC100V 平行プラグの限界である1.5[kW]の電力消費量を持っている。尚、測定は約3分毎に行われているので、おそらくは、実際のピーク負荷は、図6に示した値より、更に大きな値となっていることも多いと思われる（短期間のピークが、約3分に準化されているため）。

図6の電力は波形の面積を求めればすぐに分かる。2日間で25.9 [kWh] であり、1日平均で12.95 [kWh/日] である。月単位では、 $30 \times 12.95 = 388.5$  [kWh/月] となる。電力料金（関西電力・従量電灯A）は以下の通り計算される。

$$334.22 + 20.27 \times 105 + 26.51 \times 180 + 30.23 \times 88.5 = 9,910 \text{ [円/月]} \quad (13)$$

尚、ここで、参考までに都市ガス料金を示しておく。図6からは都市ガス料金は分からない。そこで、前章で利用した大阪ガスの標準値（ $33\text{m}^3/\text{月} = 412.5$  [kWh/月]）を利用する。

表3 家庭用燃料電池による隣戸への電力供給（この結果は家庭用燃料電池に有利なものであり、ここまでの効果を出すには、通常は、バッテリーの利用が前提となる。）

区分	燃料電池導入前	燃料電池導入後 （隣戸供給なし）	燃料電池導入後 （隣戸供給あり）
燃料電池設置戸	電気代：9,910円 （388.5kWh/月） 都市ガス代：6,428円/月 （33m <sup>3</sup> /月） （合計：16,338円/月）	電気代：1,127円 （54kWh/月） 都市ガス代：8,510円/月 （76.4m <sup>3</sup> /月） （合計：9,637円/月）	電気代：1,127円 （54kWh/月） 都市ガス代：9,992円/月 （95.5m <sup>3</sup> /月） （合計：11,119円/月）
燃料電池非設置戸	電気代：9,910円/月 （388.5kWh/月） 都市ガス代：6,428円/月 （33m <sup>3</sup> /月） （合計：16,338円/月）	（同左） （同左） （同左）	電気代：5,405円/月 （231kWh/月） （同左） （合計：11,833円/月）
2軒一括受電の場合 （電気代のみ計算）			電気代：6,836円/月 （285kWh/月）

家庭用燃料電池が入っていない状態での都市ガス料金（一般料金・大阪ガス・B料金）を適用すると、一か月の都市ガス料金は、以下の値である。

$$1260 + 33 \times 156.61 = 6,428 \text{ [円/月]} \quad (14)$$

光熱費合計は、 $9,910 + 6,428 = 16,338$  [円/月] である。

## 4.2 家庭用燃料電池の稼働量

### 4.2.1 単独戸による家庭用燃料電池の導入

本節では、図6の実測データに基づき、家庭用燃料電池の導入効果を測定する。SOFCの最大出力は、700 [W] である。そこで、図6において、700W以下の部分を積分すると、11.15 [kWh/日] となる。月あたり 334.5 [kWh/月] である。結果的に、家庭用燃料電池によるカバー率は、 $(11.15/12.95) \times 100 = 86.1\%$  と極めて高い。これは、図6のベースラインが高いことが影響している。図6は、家庭用燃料電池に有利なデータである。

発電によって、都市ガスが消費され、お湯が生成される。都市ガスの量と、お湯の量は以下の通りである。

$$S_{\text{燃料電池/月}} = 1.52 \times 334.5 + 308 = 816.4 \text{ [kWh/月]} \quad (15)$$

$$S_{\text{熱量/月}} = 0.678 \times 334.5 + 116 = 342.8 \text{ [kWh/月]} \quad (16)$$

家庭量燃料電池に収容できなかった消費電力は、 $12.95 - 11.15 = 1.8$  [kWh/日] と少ない。月あたり、 $1.8 \times 30 = 54$  [kWh/月] となる。

この状態での光熱費を算出する。電気代は以下の通りである。

$$334.22 + 20.27 \times (54 - 15) = 1,127 \text{ [円/月]} \quad (17)$$

都市ガス代については、生成されたお湯の何%が利用されたかに依存する。ここでは、8割とする。 $342.8 \times 0.8 = 274$  [kWh/月] が有効利用されたとする。都市ガスは、 $412.5 + 816.4 - 274 = 954.9$  [kWh/月] となる。マイホーム発電料金（夏期）の場合の都市ガス代は以下の通り。ただし、954.9 [kWh/月] は 76.4 [m<sup>3</sup>] である。

$$2,584 + 77.57 \times 76.4 = 8,510 \text{ 円} \quad (18)$$

光熱費合計は、 $1,127+8,510=9,637$  円である。

#### 4.2.2 隣戸への家庭用燃料電池電力の供給

次に、隣戸に家庭用燃料電池の余力をどの程度、提供できるかを考える。例えば、隣の家が、図6と同じ電力消費カーブを持っているとする。この場合、出力が700Wに達していなかった深夜でも、2軒分の電力消費が行われるので、家庭用燃料電池の稼働率が上がり、効率的な運転ができる。そこで、図6の数値を2倍して、その中で、どこまでが家庭用燃料電池（最大700[W]）でカバーできるかを調べた。その結果、1日あたり16.4[kWh/日]をカバーできた。

上記の値は、ほぼ100%の稼働である。利用している電力カーブ図6が、ベースラインが高く、2倍すれば、ほとんどの時間帯で電力消費が700[W]を越えるためと思われる。最近のLED照明等を利用した新築の家では、深夜の利用電力のベースラインは100[W]以下と思われる。このため、16.4[kWh/日]の稼働を確保するには、バッテリーによる蓄電、ピークシフトが必須である。言い換えると、この稼働量は、高価なバッテリーを前提とする結果とも理解される。

1戸のみの利用時の家庭用燃料電池の発電量は11.15[kWh/日]であったので、差分は $16.4-11.15=5.25$  [kWh]。つまり、家庭用燃料電池の装着戸から隣戸への売電は、1日当たり5.25[kWh/日]であり、1か月では

$$5.25 \times 30 = 157.5 \text{ [kWh/月]} \quad (19)$$

となる。なお、家庭用燃料電池の都市ガス量は、それにより増加する。都市ガスの増加は、 $1.52 \times 157.5 = 239.4$  [kWh/月]である。都市ガス利用量は954.9[kWh/月]から1,194[kWh/月]に増加する。95.5[m<sup>3</sup>/月]である。ガス代は、以下の通りとなる。

$$2,584 + 77.57 \times 95.5 = 9,992 \text{ 円} \quad (20)$$

都市ガス代金は、隣戸への給電によって、1,482円増加している。尚、以上の議論では、生成されたお湯の有効利用は、増加していないものとして算定した。

家庭用燃料電池の余剰発電電力5.25[kWh]を受け取る隣戸側では、光熱費がどうなるだろうか。隣家の消費電力は、

$$388.5 - 157.5 = 231 \text{ [kWh/月]} \quad (21)$$

に減少する。電力料金は、以下の通りである。

$$334.22 + 20.27 \times 105 + 26.51 \times 111 = 5,405 \text{ [円/月]} \quad (22)$$

#### 4.3 小規模 CEMS の評価

以上の分析結果を表3にまとめて示す。表3では、併せて、2軒を一括拾段した場合の価格も示している。この表を見ても、家庭用燃料電池導入前と導入後のガス料金の違いが如実である。導入前にくらべて、ガス利用量は2倍以上に増加しているのに、ガス料金は、2～3割の増加に抑え込まれているからである。

本稿の目的は、家庭用燃料電池を1軒で利用した時と、隣にも余剰分を給電した際の違いである。家庭用燃料電池を設置している住戸の都市ガス代は、隣戸への電力供給を開始することにより、1,482円増加している。隣戸への供給「有り」と「無し」で、光熱費の低減は、2つの住戸を合わせて、以下の値となる。

$$(9,910 - 5,405) - 1,482 = 3,023 \text{ [円 / 月]} \quad (23)$$

2つの住戸を託送でつないで、やっと、月に3,000円である。このデータは、家庭用燃料電池の稼働率はほぼ100%の状態を前提としており、家庭用燃料電池に有利な値である。現実には、深夜にここまでの稼働率にはならないので、バッテリーを活用して、深夜の余剰発電能力を昼間の消費に回した場合の数値と見た方がよい。

但し、この数値は、悲観的予測とも思えない。たとえば、家庭用燃料電池は、1戸に導入した場合、4,000 [kWh/年] 程度の発電能力を持つが、それによるコストメリットは、年間8万円と甘めに見積もっても、20円/kWhである。一日あたりせいぜい5 [kWh] の電力融通なので、月あたり  $5 \times 20 \times 30 = 3,000$  円となる。数値は合致している。隣戸から給電された電力は、1 kWhあたり20円安くなっており、数値的には決して、小さなものではない。

実際、家庭用燃料電池の出力に余裕があって、倍の電力を隣戸に送信できれば、差額は、月に6,000円程度となる。これは、無視できる値ではない。我が国で市販されている家庭用燃料電池は、あくまでも、一戸の住戸への適用のみを考えているが、本稿で検討した、小規模なCEMSにも適用できるには、1.5 [kW] ~ 2.0 [kW] 程度の出力を持つ家庭用燃料電池 (SOFC) が望まれる<sup>4</sup>。

#### 4.4 小規模CEMSの実現可能性

最後に、上記の隣戸への電力融通が、技術的に可能か否か、そして、どの程度の回路規模になるかを検証する。

##### 4.4.1 共通電力負荷線を用いた燃料電池制御方式

前章の目的を達成するため、以下の3ステップからなる構成を提案する。

##### 【STEP 1：総電力量の取得】

第一のステップでは、系統全体の電力量を測定する。具体的には、例えば、各家庭からの電力を一本の電力に集約すればよい。一種の「バス」を4戸に貼りめぐらせて、そこに、それぞれの負荷をリンクさせる。この際の総電力量を、以下は「TP」として表現する。

尚、電力量の合計は、無理に1本の電力ケーブルに集約しなくても求められる。この種の電力機器では、電流の測定には、CT (変成器、あるいは、電力トランス) が用いられるが、たとえば、4戸分の電力は、それぞれの負荷線を4本束ねて、このCTに通しても求めることができる。

<sup>4</sup> ひとつの興味深いシステムがある。オーストラリアで開発され、ドイツで製造されている Ceramic Fuel Cells Ltd. (CFCL) の BlueGen [15] である。最大電力2 [kW] であるが、1.5 [kW] の時に最大効率も60%を示す。今回検討に用いたSOFC (46%) よりも高い。一般に燃料電池は、出力規模が大きいほど、効率が上がるとされる。BlueGenの熱出力は1.5 [kWh] 出力時で、0.54 [kW] とされる。24時間運転すると、12 [kWh/日] のお湯を作りだす。冬場のお風呂は、大凡10 [kWh] 必要なので、極端に大きな熱出力とも言えない。冬場でもゆっくりと風呂に入れる。近年、普及が進んでいる都市ガス床暖房を考えれば、冬場は、むしろ熱量が不足する。現状のSOFCのスペックは、個人の家で使う事を前提としているが、今回検討した様な、小規模CEMSを考えるなら、むしろ、BlueGen程度の仕様のSOFCを検討すべき様に考えられる。

### 【STEP 2：燃料電池分担部分の制御】

次に、並列に利用される燃料電池の数を  $K$  として、以下の計算式を実現する。ただし、「 $P_j$ 」は  $j$  番目 ( $j = 1, 2, \dots, K$ ) の燃料電池の発電量 [ $kW$ ] である。この式は、CT (変流器) を用いて、容易に実現できる (後述)。

$$TP - K \times P_j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, K) \quad (24)$$

### 【STEP 3：電力の供給制御】

上式不等式をそれぞれ正に保てば、CEMS 全体での、関西電力への逆潮流は生じない。 $K = 3$  を例として考える。但し、各燃料電池は同一出力をもつ同一機種であり、合計 3 台となる。式 (25) における燃料電池は 3 つある。以下の通りである。

$$TP - 3 \times P_1 \geq 0 \quad (25)$$

$$TP - 3 \times P_2 \geq 0 \quad (26)$$

$$TP - 3 \times P_3 \geq 0 \quad (27)$$

この 3 式を加算すると、以下の式を得る。

$$3 \times TP - 3 \times (P_1 + P_2 + P_3) \geq 0 \quad (28)$$

即ち、 $TP - (P_1 + P_2 + P_3) \geq 0$  となり、電力会社への逆潮流は生じない。

## 4.4.2 実際の回路構成

図 7 は 3 軒の住宅がそれぞれ家庭用燃料電池を持って、電力を融通する場合の具体的な CT 回路の構成例である。ただし、ここでは、各戸の各電力負荷量は、1 本のバスによって集約され、共通負荷電力線に流されて、その共通負荷電力線は、それぞれの燃料電池の CT を貫いている。この構成では、託送は実現できない。3 戸の一括契約である。

なお、各家庭用燃料電池からの給電は、共通負荷電力線よりも上流側の、電力会社に近いポイント

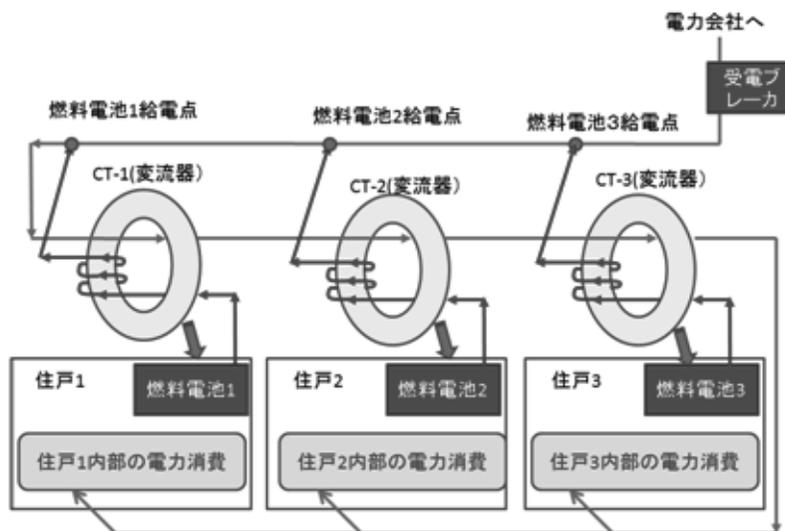


図 7 提案手法による回路構成例

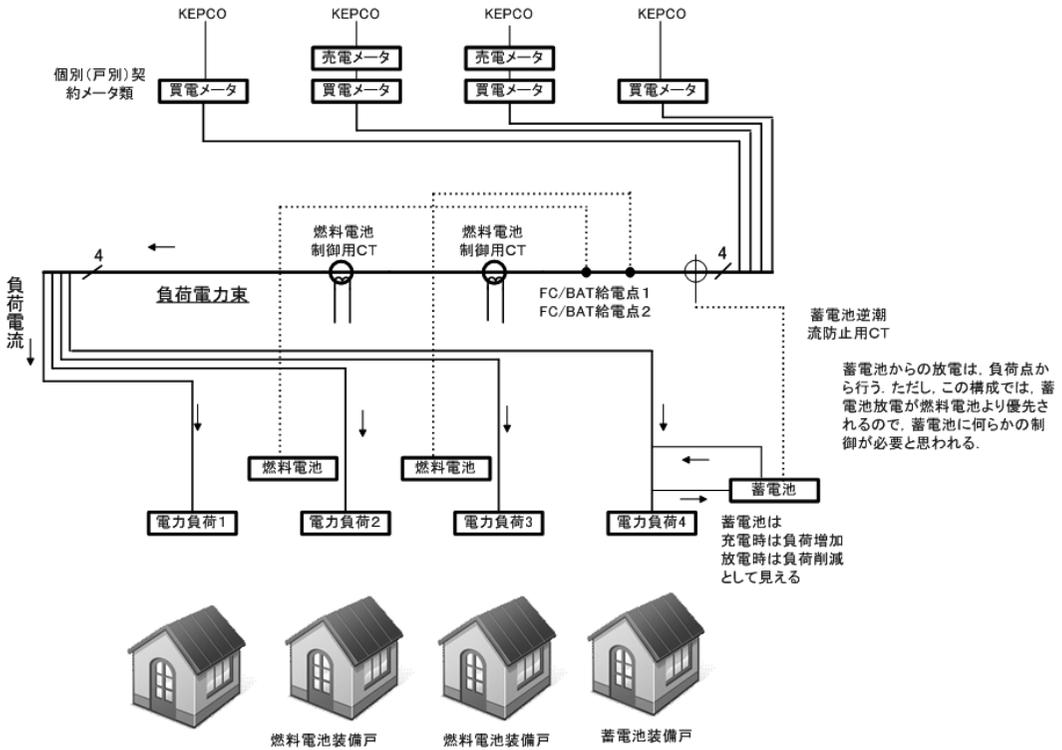


図8 実用イメージの小規模 CEMS 制御回路イメージ

に設定される。それぞれの燃料電池の出力は、負荷線とは別に、ひとつの配電線によって、それぞれのCTを3ターン経由したのち、CTよりもより上流側において、給電される。上記CT回路によって、提案手法が実現される原理は自明であろう。すべてのCTを通過している共通負荷電力線は、CTに上記(25)式のTPを流している。燃料電池の出力は、それぞれのCTを通過しているが3ターンしているため、実際の燃料電池出力の3倍が、全体の負荷量TPを越えることはない。結果的に、3台の燃料電池の出力は、常にバランスし、燃料電池発電量の合計が、総負荷量を越えることはない。つまり、電力会社への逆潮流は生じない。

図8は、電力の戸別契約を実現して、電力会社に、家庭用燃料電池の出力を逆潮流しつつ、この4戸の間では、どこかで消費して、電力会社への本質的な逆潮流は生じない構成である。図7では、一本の電力ケーブルに電氣的に集約されたそれぞれの家庭の負荷は、合計4本の電力ケーブルでCTの中を束ねて流れて行く。これによって、等価的にCTに対しては負荷の合計値TPが見えるようになる。それぞれの負荷線は、CTを通った後、家庭用燃料電池の給電点に至る。

この構成を見ても分かる様に、電力ケーブルの延長は長くなるが、特別な負荷回路なしに、複数の家庭用燃料電池をバランス運転することは可能である。ただし、本構成で、検討課題となるものに、課金の問題がある。家庭用燃料電池からの逆潮流については、当該住戸の「売電メーター」により把握できる。しかし、CEMSを構成する住戸が3軒以上ある場合、逆潮流した電力が「どの住戸で利用された」か分からない。柱上変圧器の方へと戻った電力に、「色」は付いていないからである。

ここで、注意が必要なのは、売電メーターの示す逆潮流は、かならず、当該住戸以外に供給されているはずである。なぜなら、逆潮流があるということは、逆潮流しているその瞬間に、当該住戸は電気を買い入れておらず、しかも、その瞬間の隣戸の電力消費は、買電メーターに記録されている数値の一部を構成しているはずだからである。従って、逆潮流している電力は、他拾戸の買電メーターの積算値に比例配分するのが、現実的と思われる。ただし、この方法に限定されるべきものではない。

## 5. おわりに

以上、分析したことをまとめると、以下ようになる。

- 家庭用燃料電池、特に、固体酸化物形燃料電池（SOFC）に着目し、その動作特性を、簡明な線形近似（単回帰）で表現することを提案した。この近似式を用いれば、当該家庭の電力消費カーブさえあれば、簡単な方法で、家庭用燃料電池を導入した際の光熱費の削減効果、二酸化炭素排出量の削減効果を算出できる。
- 提案された近似式を用いて、ある住戸から隣戸へ家庭用燃料電池の余剰発電力を融通する場合について、光熱費削減効果を簡単に計算できることを示した。但し、光熱費削減効果は、2戸併せて1か月3,000円程度であった。融通している電力から見ると、これは1[kWh]あたり20円の光熱費削減に相当する。もともと、電力は、1[kWh]あたり25円程度である。それにも関わらず、20円ものコストダウンを示していることは、（1）家庭用燃料電池の光熱費削減が政策的な都市ガス価格によるものであること、及び、（2）固体酸化物形燃料電池は、追加的な発電を行う際の変換効率が極めて高い、ことを意味している。
- 上記から、明らかに隣戸への電力供給力は十分ではない。家庭用燃料電池の電力出力がさらに大きいものが入手できれば、上記の3,000円は6,000円程度になることも考えられる。そうなれば、（燃料電池を隣戸に追加配備することなく）年間7万円～8万円の光熱費削減効果の追加となり、隣戸への電力託送も現実味を帯びたものとなる。この場合、2軒合計の光熱費削減効果は、1台の家庭用燃料電池に対して、年間15万円程度となる。ただし、そのためには、電力消費のピークシフトが必要となり、蓄電池の併用が必要となる可能性が高い。
- 複数戸間での電力融通のため、CT（変成器）を用いた家庭用燃料電池の発電量制御構成を提案した。本回路構成は、特別な部品等は不要で、簡明であり、十分に実用に耐えうると考える。ただし、現状の電力機器は、認定制度等があり、本提案の回路が既存の家庭用燃料電池にそのまま適用できるかどうかは、別途、検討が必要である。
- 近似式を用いて家庭用燃料電池（SOFC）が有する以下の特性を明らかにした。
  - － 家庭用燃料電池（SOFC）を導入したからと言っても、電力を発電した際の化石燃料まで考慮に入れると、化石燃料の燃焼量（総カロリー量）を大きく削減するものではない。化石燃料のカロリー量を削減できるのは、基本的に、家庭用燃料電池によって沸いたお湯をどこまで有効利用することができるかに依存する。その限りにおいては、化石燃料のカロリー量削減効果の点からは、太陽光ソーラーパネルと大差はない。
  - － 家庭用燃料電池の導入によって、年間8万円程度の光熱費の削減が実現できることが、近似式からも示された。ただし、これは「化石燃料が燃える量が減る」ことによって発生す

るものではない。コストダウンをもたらしているのは、「使えば使うほど単価が高くなる電力料金」と「使えば使うほど単価が安くなる都市ガス料金」との制度的な差異にある。「電気と都市ガスで対応していたエネルギー源を都市ガスに集約し、単価の安い『マイホーム発電料金』で対応する」ことが、家庭用燃料電池の光熱費削減の本質である。特に、ガス会社が設けている、家庭用燃料電池に対する割引幅の大きな、特約料金の寄与は大きい。

- 家庭用燃料電池の導入によって、1.3 [トン/年間] ~ 1.4 [トン/年間] 程度の二酸化炭素の排出削減が可能と言われている。上記の通り、家庭用燃料電池を導入したからと言って、化石燃料の総消費カロリー量は変わらない。この二酸化炭素排出量削減を生んでいるのは、比較対象の電力（火力発電）に石炭火力を含んでいるからである。つまり、1トン以上の二酸化炭素排出量の削減は、火力発電の燃料が、石炭から天然ガスに切り替わったことに起因する。比較対象を原子力等を含む電力会社が示している数値を用いると、二酸化炭素排出量の削減は、太陽光ソーラー温水パネルと大きく変わるものではない。家庭用燃料電池の稼働は、ピーク負荷を火力発電で行っている昼間を対象とするべきである。深夜電力の大半が原子力発電となった場合には、深夜に家庭用燃料電池をフル稼働させることは、疑念がある。

以上見て来たように、家庭用燃料電池の大きなコストダウンの背景には、電気と都市ガスの料金制度が横たわっている。現行の家庭用燃料電池（SOFC）は、化石燃料の消費カロリー量を削減するものではない。たとえば、家庭用燃料電池を複数の家庭と商店で共有するなどの小規模 CEMS を計画する場合には、燃料電池の本質が、「電気とガスをガスに集めて、料金体系の差を使って光熱費を下げる」であること、を忘れるべきではない。家庭用燃料電池のコストメリットは、正に「政策・制度設計」によって、もたらされている。

なお、本稿では、家庭用燃料電池として、現状一番効率がよい SOFC を対象とした。家庭用燃料電池には、もうひとつ、固体高分子形燃料電池（PEFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell）がある。PEFC の場合、SOFC とは異なり、（1）発電出力が電力需要の変化に即応できない、（2）燃料電池を OFF できる、と言った特性があり、本提案の手法の適用は難しいと思われる。ただし、PEFC の発電効率は、SOFC に比べると低く、本稿で述べた大まかな傾向は、PEFC でもあまり変わらないと思われる。この点の解明は、今後の検討課題である。

## 参考文献

- [1] 産業技術研究所、「きちんとわかる燃料電池」白日社、2011年3月
- [2] エネファーム、192AS01 取扱説明書、大阪ガス。
- [3] 大阪ガスの家庭用固体酸化物形燃料電池（SOFC）システム、  
<http://www.osakagas.co.jp/rd/fuelcell/sofc/index.html>
- [4] 新エネルギー財団（NEF）、平成 22 年度・固体酸化物形燃料電池実証研究成果報告会報告書、p.96、2011年3月
- [5] 鷲尾隆、元田浩、「スケールタイプ制約に基づく科学的法則式の発見（発見科学）」、人工知能学会誌、15（4）、pp.681-692、2000年7月
- [6] 大阪ガス、一般料金料金表、Web サイト  
<https://www5.osakagas.co.jp/custserv/ryokinhyo1001.html#keisan>

- [7] 関西電力、従量電灯 A、単価表、Web サイト  
<http://www1.kepco.co.jp/ryoukin/dentoa.html#anchor1>
- [8] 大阪ガス、マイホーム発電料金表、Web サイト  
<http://home.osakagas.co.jp/price/menu/protable/p01.html>  
(注：大阪ガス Web サイトの上記ページに書かれたマイホーム発電料金表と、以下の「最新の料金表」では価格が異なっている。本稿では、より安い、上記のページを利用した。以下は、最新の料金表とされていたリンクである。こちらの単価は高くなっている。  
<https://www5.osakagas.co.jp/custserv/ryokinhyo2501.html>  
ただし、どちらのデータを用いても、年間の光熱費削減数値には多少の変化が生じることはあっても、本稿における議論内容に影響はない。
- [9] 大阪ガス、「エネファームの環境性」、Web サイト  
<http://home.osakagas.co.jp/searchbuy/enefarm/about/environment.html>
- [10] 矢崎総業、エコソーラー II、Web サイト、  
<http://solar.yazaki-group.com/product/ecosolar2.html>
- [11] 中央環境審議会地球環境部会国内制度小委員会・中間取りまとめ  
平成 13 年 7 月 <http://www.env.go.jp/council/06earth/r061-01/01.pdf>
- [12] 電気事業連合会、「電気事業における環境行動計画」、2012 年 9 月  
<http://www.fepec.or.jp/environment/warming/environment/pdf/2012.pdf>
- [13] 特定非営利活動法人、気候ネットワーク、意見・プレスリリース、2012 年 12 月  
<http://www.kiconet.org/iken/kokunai/2012-11-07.html>
- [14] 大阪ガス、環境への取り組み、Web サイト  
<http://www.osakagas.co.jp/kankyo/gas/03.html>
- [15] BlueGen, Web サイト  
<http://www.bluegen.info/>