家庭用固体高分子形燃料電池導入モデルの検討

正員 小川 賢 正員 内田 堅二 非会員 橋野 幸次 (関西電力株式会社)

非会員 久保田康幹 非会員 大賀 俊輔 (富士電機株式会社)

Study of PEFC Commercial Model for Residential Use

Masaru Ogawa, Member, Kenji Uchida, Member, Kouji Hashino, Non-member, (Kansai Electric Power Co., Inc)

Kokan Kubota, Non-member, Shunsuke Oga, Non-member, (Fuji Electric Co.,)

PEFC is expected to be the new generation system for residential use. This system supplies electricity and hot water, so this system has capability of energy use saving. In order to introduce this system, however, several conditions must be overcome, for example, equipment cost, gas cost, electric selling and buying cost, and optimum operation pattern etc.

In this paper, we discuss optimum operation pattern for residential heat and electrical demand, energy cost in a year, and economical evaluation of PEFC system. As results of the study, the most economical output is 500W~1.2kW for residence. For the 1.0~1.2kW PEFC system, load following operation is the most economical, and for the 0.5~1.0kW PEFC system, constant rated output operation is the most economical. Key points to pervade PEFC system is that gas cost needs to be reduced to 70~90yen/Nm³ and that PEFC system price must be reduced to 300,000~500,000yen/kW.

キーワード：固体高分子形燃料電池、家庭用燃料電池、導入条件、エネルギーコスト、ガス単価

keywords: PEFC, fuel cell for residential use, introduce condition, energy cost, gas cost

1. まえがき

固体高分子形燃料電池は電気と熱を発生するため、省エネルギー機器として期待されている。家庭用は数百W~数kW、業務用には数十kW級の開発が進められており、将来の家庭用や業務用電源の一部は固体高分子形燃料電池に代わる可能性がある。現在、高分子膜の薄膜化や低コスト化および電極触媒量低減等のハード面の研究が進められている。しかし、家庭用固体高分子形燃料電池(以後、家庭用PEFCと省略する)をどのように運用すればよいか、また、導入する場合の最適なシステムはどのようなかについては様々な見解がある。本論文は、1kW級の家庭用PEFCが実用化した場合に、PEFCシステムをどのように運用すれば電気と排熱を有効利用できるか、また、ガス単価、電気代、設備コスト等を考慮して、家庭用PEFCの導入可能性の評価方法と経済性について検討したものである。

2. 家庭用の電力・ガス供給方式

(2-1) ガス・電力併用方式 図1に、現在の家庭の一般的なエネルギー利用形態であるガス・電力併用方式を示す。この方式では、家庭用電源としては電力会社の配電

図1 従来の家庭用電力・ガス供給システム

Fig. 1. Conventional electric and gas supply system for residence.

線から供給される商用系統電力を使用し、台所や風呂用の熱(給湯)には、ガス給湯器や灯油給湯器等、あるいは深夜電力利用の電気温水器から供給する方式が普及している。

これらの設備は単機能として動作するため、エネルギー総合利用の面では限界がある。例えば商用系統電力の場合、電力会社の全電源の平均発電端効率は38.8%程度であるが、送電線や配電線で損失が発生するために、需要家末端での効率は35.2%程度となる⁽¹⁾。また、ガス給湯器の効率は75

～80%程度であるが、エネルギーとして質の高い電気を発生せず、排気ガスは環境面でも問題がある。

〈2・2〉 家庭用PEFC方式 最近、家庭用電源として家庭用PEFCを設置して、電気と熱の双方を利用することによりエネルギーの総合効率を向上させる動きがある。図2に家庭用PEFCの電力・熱供給システムを示す。ガス配管から都市ガスの供給を受け、燃料電池で発電した電気を家庭内のテレビ、エアコン、TV、照明等に供給する。家庭用PEFCの送電端効率は28～33%であるが、同時に60℃程度の排熱が得られ、この熱を有効利用することにより総合効率を高くすることができる。このため、家庭用PEFC導入のメリットを得るには効率的な排熱利用技術が不可欠である。排熱を有効利用する一般的な方法としては、図2に示すように排熱を一度貯湯槽に蓄え、必要に応じて給湯、風呂等に供給する方式がある。熱と電気を利用するために、総合効率は58～70%と高くなり、省エネルギー効果が期待される。

図2 家庭用PEFCによる電力・熱供給システム
Fig. 2. Electric and heat supply system for residential use PEFC.

3. 家庭用PEFC仕様と運用方法

〈3・1〉 家庭の熱と電気負荷 本研究の目的は、家庭用PEFCとして最適な発電容量や運用方法を見出すことであり、検討条件として下記に示す家庭を想定した。

地 域：関東、東海、関西、四国を想定
住 宅：一戸建て、延べ床面積 150m²
家族構成：4人（親2人、子供2人）

上記条件と同じ住宅と家族構成でも、家族の年齢構成、男女比率、生活スタイルにより各家庭の電力・熱負荷パターンはさまざまな形態をとる。各家庭毎に異なる多様な電・熱負荷に対して、PEFCをどのような負荷モードで運用するかは重要な課題であるが、ここでは検討を簡素にするために比較的標準と考えられるモデルを選定した。

図3に本検討で使用する、一般家庭の標準的な電力・熱負荷パターン（基本負荷モデル）を四季別に示す。家庭の熱負荷は給湯のみで、電力負荷、熱負荷ともに1時間平均値を示す。

図3 標準的な家庭での一日の電・熱負荷モデル
Fig. 3. Daily electric and heat demand at typical residence.

〈3・2〉 家庭用PEFCの仕様 図3から、家庭用PEFCの定格電気出力は、商用電力系統への逆潮流を少なくするには0.5kW～1.5kWとなり、代表として1kWPEFCを選定してシステムの概念設計を行った。表1に送電端発電効率(HHV)が30%の場合のシステム仕様を示す。

また、家庭用PEFCの発電効率は今後向上すると予想されるので、送電端発電効率28,30,33%の3ケースについて検討し、表2に発電効率別の定格負荷での排熱量を示す。

表1 家庭用1kW PEFCの性能仕様

Table 1. Specification of residential use 1kW PEFC.

形 式 : PEFC	燃 料 : 都市ガス
電気出力(AC) : 1.0kW	直 流 電 圧 : 100 V
動作温度 : 80 ℃	動作圧力 : 常 圧
送電端効率 : 30.3%(HHV)	総合効率 : 57.9%
燃料使用量 : 0.258Nm ³ /h[燃料発熱量 46,050kJ/Nm ³ (HHV)]	
排熱入口水温 : 夏期 15℃, 中間期 13℃, 冬期 10℃	
排熱出口水温 : 各季節とも 60℃	

表2 1kW PEFC の効率に対する排熱量

Table 2. 1kW PEFC exhaust heat for electric efficiency.

発電効率 (送電端効率)	排熱量(L/h)		
	夏期	中間期	冬期
28% (HHV)	20.6	19.8	18.6
30% (HHV)	17.4	16.7	15.7
33% (HHV)	13.4	12.8	12.0

〈3・3〉 家庭用PEFCの運転パターン 図3に示す負荷モデルに対して、家庭用PEFCの運転パターンの影響を評価するために、下記の3ケースの運転パターンについてエネルギー料金を比較検討した。

Aパターン：一定負荷連続運転

Bパターン：昼・夜間100%、深夜50%負荷のパターン運転

Cパターン：負荷追従運転(時間毎の電力あるいは熱負荷に追従させて、電気出力を100%あるいは50%負荷で変化させて運転する。電力負荷に追従する場合を「電主熱従」、熱負荷に追従する場合を「熱主電従」運用と呼ぶ)

A パターンは昼夜を問わず一定負荷での連続運転のため、PEFC の定格出力をいくらにするかが重要である。図 3 より一日の最低負荷に合わせた出力を選定すると、設備利用率は非常に高くなる。しかし、最高負荷に合わすと、夏期 1.2kW、冬期 1kW、中間期 800W と季節により最高負荷に差があり、年間を通した最適な設備容量を選定する必要がある。また、余剰電力の売電価格が経済性に与える影響を評価する必要がある。

B パターンは、深夜は最低負荷、昼・夜間は定格負荷で運転する。季節により最高負荷に差が生じるために、昼・夜間負荷をいくらに選定するかが重要である。

C パターンは家庭の実負荷に追従させる運転であり、余剰電力の買電や不足電力の購入が少なくなるために経済性が高くなると考えられる。しかし、1kW 程度の小容量機では細かい負荷制御は難しいので、定格負荷の 50%、あるいは 100% 負荷で運転するものと仮定した。

上記運転パターンでは深夜は PEFC を運転するとしているが、深夜料金が適用される午後 11 時から翌日の午前 7 時迄は商用電力システムの電力が余剰となり、電力系統に逆潮流しても売電価格はゼロとなり、経済性の面から不利となる。このため、深夜は PEFC を停止するパターンが考えられる。しかし、DSS(毎日起動・停止)運用は、都市ガス(天然ガス)や LPG 等を燃料として使用する家庭用 PEFC では、起動時間が長く起動損失が大きくなり、また改質管熱疲労の寿命面からも難しい面がある。しかし、この技術課題が解決できれば、家庭の深夜電力の使用量は少ないため、深夜は家庭用 PEFC を停止する方が経済的とも考えられ、深夜停止と深夜最低負荷運転の経済性を比較検討した。

〈3・4〉 深夜停止と深夜最低負荷運転 表 3 に 1kWPEFC で、ガス料金が 50,90,120 円/Nm³ の場合、家庭用 PEFC の起動(停止時の費用は微小につき無視する)に必要な費用と、最低負荷運転時のガス料金を示す。検討条件として一般電気料金は 24.48 円/kWh、家庭用 PEFC の起動時間 30 分、起動時の電力消費量は 0.5kWh、PEFC の深夜最低負荷は 250W とした。図 4 に 1kWPEFC の夜間停止と深夜最低負荷運転時のガス単価とエネルギーの夜間費用を示す。

計算の結果、ガス料金が 120 円/Nm³ と高価な場合は深夜停止が経済的である。しかし、ガス料金が 105 円/Nm³ 以下になると深夜は最低負荷運転にしたほうが経済的である。また、今回は深夜使用電力を 250W×8h として計算しているが、深夜使用電力量が多い家庭では、深夜は最低負荷運転にした方が経済的になると予想される。このため、深夜停止にするか、最低負荷運転にするかはガス単価と深夜の電力消費量から決まり、各家庭で選択すべきものと考ええる。

商用電力を深夜電力料金(7 円/kWh)で契約できれば、深夜停止の場合は 20~23 円/回(深夜電力量は 14 円/日、起動用ガス 2.25~5.4 円/回、起動用電気 3.5 円/回)となり、深夜停止の方が有利となる。しかし、家庭用 PEFC を設置

表 3 深夜停止と深夜最低負荷運転のエネルギーコスト
Table 3. 1kWPEFC energy cost for midnight stop and minimum load operation pattern.

ガス単価 (円/Nm ³)	50	90	120
[深夜停止]	円	円	円
起動用ガス (起動 1 回)	2.25	4.05	5.4
起動用電気 (起動 1 回)	12.2	12.2	12.2
小計	14.45	16.25	17.6
深夜使用電力 (250W×8h)	49	49	49
合計	63.45	65.25	66.6
[深夜最低負荷 (8 時間)]	円	円	円
最低負荷ガス料金	31.0	55.7	74.3

注) 1kWPEFC を 250W で発電時には、利用可能な排熱は発生しないため、排熱の評価は無視する。

図 4 1kWPEFC 深夜停止と深夜最低負荷運転の夜間費用
Fig. 4. 1kWPEFC energy cost for midnight stop and minimum load operation pattern.

した場合の商用電力の供給契約形態は、現在は未定である。

以下の議論は、家庭用 PEFC 普及期の条件を検討するもので、ガス料金としては 100 円/Nm³ 以下 (PEFC 発電効率 30% で電気料金 24.48 円/kWh に相当するガス料金は 95 円/Nm³) となり、多くの家庭の深夜電力負荷は小さいと想定し、深夜は最低負荷運転として検討した。

〈3・5〉 運用モード 図 3 の負荷モデルに対して、3 種類の運転パターンの年間エネルギー料金を検討した。その結果、後述の図 8 に示すように、C パターンは燃料電池出力の広い領域でエネルギー料金面が低く、広い範囲での適用性が優れていたため、以下、C パターンについて運用モードの検討を実施した。

図 3 の電・熱負荷に対して、C パターン(負荷追従パターン)で、電主熱従と熱主電従の 2 種類の運用モードについて検討した。「電主熱従」は家庭の時間毎の電力需要にあわせて PEFC の発電をする方式で、PEFC からの熱供給量の不足分はガス給湯器から供給する。一方、「熱主電従」は家庭の時間毎の熱需要にあわせて PEFC の発電をする方式で、PEFC からの電力供給量の不足分は商用系統から買電する。

電気負荷は 100% 定格負荷か 50% 負荷を選択でき、PEFC は 50~100% 負荷間の発電効率はほとんど一定のため、同一とした。また、50% 負荷間の排熱量は定格負荷時の 1/2 とした。

図 5 に定格出力 1kW の、各季節での電主熱従と熱主電従の燃料電池電気出力の変化を示す。

図5 基本負荷モデルでのCパターン時の1kWPEFC電気出力
Fig. 5. 1kW PEFC electric output of C operation pattern for basic load model.

電主熱従の場合、夏冬ともに定格出力での発電時間が長く、中間期は17時～23時の間で定格負荷運転となる。熱主電従の場合は冬期のみ定格出力の発電時間が長く、夏期は500W一定、中間期も20～21時に定格負荷となるのみである。

図6に電主熱従、熱主電従運用の燃料電池出力と定格負荷発電時間との関係を、発電効率(η)28%,30%のケースに対して示す。電主熱従では発電効率の差による定格運転時間は変化しないため、効率28%,30%とも同じ図となる。

電主熱従の運用で、定格負荷運転時間が長くなるのは燃料電池出力として0.5～1kWであり、それを越えると中間期の100%負荷運転はほとんどなくなる。

熱主電従の場合は、1kWを越えると冬期以外では100%負荷の運転はなくなる。発電効率の影響は、燃料電池出力が同一であれば発電効率が高い方が定格負荷での運転時間が長くなる。これは、燃料電池の発電効率が高くなると排熱量が減少するために、定格負荷での発電時間が長くなることによる。

以上より、電主熱従と熱主電従の運用パターンを比較す

図6 一日における定格負荷でのPEFC運転時間
Fig. 6. PEFC operating hours at rated load in a day.

ると、定格負荷運転時間が長いのは電主熱従の運用である。このため、比較的大きい出力のPEFC設備を設置する場合は、定格での発電時間を長くして設備利用率を高くできる電主熱従運用が好ましいと考えられる。

一方、熱主電従の運用は、出力が小さければ定格負荷での発電時間が長くなるので、500W程度の小容量機に適していると考えられる。しかし、設備利用率では経済性を評価できないために、年間を通した電気と熱のエネルギーコストの検討を行った。その結果を4章に示す。

〈3・6〉 家庭用PEFCの排熱量 図3に示す負荷モデルの、電力あるいは熱負荷に追従させて運転した場合の家庭用PEFCシステムから発生する排熱量を計算した。図7にその結果を示す。貯湯容量はPEFCの全ての排熱量を貯蔵するのに必要な容量である。

発電効率30%の1kWPEFC発電システムを、電主熱従で運転した場合に排出する熱量は200～300L/日となる。同規模の家庭に深夜電力利用の電気温水器(貯湯温度90℃)を設置した場合の貯湯槽容量は350～450Lであり、家庭用PEFCで同程度の湯量を生じさせるには、発電効率28%では1kW以上、30%では1.2kW以上の発電容量が必要である。

熱主電従の場合は1.5kW以上の発電容量が必要となるが、日本の家庭の消費電力は、瞬間的(数分間)には3kW程

度になっても、図3に示すように1時間平均の最高値は1.5kW未満である。家庭用PEFCによる発電コストが安く、余剰電力の電力会社への売電価格が高い場合は1.5～3kW級システムの設置も考えられるが、現在の売電価格、ガス単価、機器コストでは売電による経済的なメリットはなく、過剰設備になる。このため、不足する熱は補助用ガス給湯器から供給して、PEFC設備は小容量機を選択することとなる。

家庭用PEFCの場合、台所や洗面所で使用する給湯は、使用する時に燃料電池から直接供給できるため、貯湯槽容量を小さくすることができる。しかし、排熱温度は60℃と低いので、一旦貯湯槽に貯蔵した後、約90℃に加熱して貯蔵することにより、風呂への給湯量(40℃で約300L)と同程度の150～200Lの貯湯槽を設置すれば供給可能となる。

図7 PEFCからの一日の排熱量

Fig. 7. PEFC total exhaust heat in a day.

4. 経済性検討

〈4・1〉 検討目的と条件 家庭の電・熱需要に対して最も経済的な設備容量と、設備費を回収可能なガス単価を求めるためにエネルギー料金を計算した。エネルギー料金は(1)式により定義する。

$$\text{エネルギー料金} = \text{電気料金} + \text{ガス料金} \cdots \cdots (1)$$

なお検討条件は以下の通りである。

(1) 電気料金 電力会社の平均的な一般家庭向け従量料金Aを採用

最低料金(15kWh まで)	301 円
15kWh を越え、120kWh までの kWh あたり	18.48 円/kWh
120kWh を越え、280kWh までの kWh あたり	24.48 円/kWh
280kWh を越え、kWh あたり	26.79 円/kWh

(2) PEFC の余剰電力 余剰電力は電力会社が購入するものとして、購入料金は以下のケースを想定した。

重負荷時間帯(10:00～17:00)	8.3 円/kWh
昼負荷時間帯(7:00～10:00, 17:00～23:00)	6.2 円/kWh
深夜時間帯 (00:00～7:00, 23:00～24:00)	0.0 円/kWh

(3) 熱利用 給湯負荷が不足する場合は、ガス給湯器でバックアップすることとし、給湯器効率を80%とした。PEFCの余剰排熱は大气へ放出することとした。

(4) ガス料金をパラメータとして、50～120 円/Nm³の範囲で検討した

〈4・2〉 燃料電池出力とエネルギー料金 検討の第一ステップとして、図3に示す基本負荷パターンに対して、A,B,C パターンを電主熱従で運用した場合の燃料電池出力とエネルギー料金の関係を検討した。検討結果を図8に示す。

- (1) Aパターンの一定負荷連続運転の場合、燃料電池出力が0.5kW付近で最もエネルギー料金がすくなくなる。これは家庭の最低負荷相当で連続運転することであり、図7より排熱量が不足するので、ボイラーによる追い焚が必要となる。
- (2) Bパターンの燃料電池負荷をパターン変化(昼間100%,夜間50%)する場合、ガス単価に依存するが、エネルギー料金が最低になる燃料電池出力は0.5～0.8kWの範囲となる。
- (3) Cパターンの燃料電池負荷を追従させる場合、燃料電池出力の広い範囲でエネルギーコストが下がり、0.5～1.2kWの範囲でエネルギー料金が最も下がる。

エネルギー料金が最も低くなる燃料電池出力は各ケースとも500W近辺でほとんど変わらない。しかし、出力1kWのPEFCを導入する場合、PEFC導入前とほぼ同程度になるガス単価は、Aパターン80円/Nm³、Bパターン90円/Nm³、Cパターン100円/Nm³と、Cパターンはガス単価が最も高くても導入可能となり、電力負荷に対して負荷追従運転の方が実用化の可能性が高いと考えられる。

〈4・3〉 運用モードとエネルギー料金 次に、電主熱従と熱主電従運用についての経済性を比較する。図9に負

図8 A,B,C運転でのPEFC出力と年間エネルギー料金
Fig. 8. Relation of PEFC output and yearly energy cost for A,B,C operation patterns.

荷追従パターン、ガス料金 90 ¥/Nm³ の場合で、発電効率 28%,30%,33%を変数として、燃料電池出力に対する年間エネルギー料金(電気料金+ガス料金)を示す。

図9より、電主熱従運用の場合は、燃料電池出力が1kW以上では発電効率が高くなるとエネルギー料金の低下が若干認められる。熱主電従の場合は発電効率の影響はほとんどなく、これは、余剰電力を売電しても、売電価格が低いためと考えられる。このように、電主熱従、熱主電従ともに発電効率がエネルギー料金に与える影響は小さく、発電効率向上の効果はガス単価や設備コストと比較して小さいと推定される。

図10に、家庭用PEFC出力とガス単価に対して、エネルギー料金が低くなる運用モードを発電効率別に整理して示す。

発電効率が30%の場合、電主熱従の運転は、発電出力0.5~1.2kWの範囲で、ガス単価が安いとエネルギー料金が低い。一方、熱主電従運用はガス単価が高いときには、燃料電池出力が比較的大きい範囲でエネルギー料金が低くなる。

図9 運用モードでのPEFC出力と年間エネルギー料金
Fig. 9. Relation of PEFC output and yearly energy cost for operation mode.

図10 PEFC出力とガス料金に対する最適運用モード
Fig. 10. Optimum operation mode for PEFC output and gas cost.

初期導入期には発電効率が低く、ガス単価も高いために熱主電従の運用が適していると考えられる。普及期には発電効率も 33%程度に向上し、電主熱従運用の方がエネルギー料金が低くなるために、電主熱従運用が中心になると予想される。

(4・4) 経済性検討(設備コストとガス単価) 以上の検討をベースにして家庭用 PEFC の経済性を検討した。

(電主熱従) 設備 30 万円/kW、ガス単価 50 円/Nm³

(電主熱従) 設備 30 万円/kW、ガス単価 90 円/Nm³

(熱主電従) 設備 30 万円/kW、ガス単価 50 円/Nm³

(熱主電従) 設備 30 万円/kW、ガス単価 90 円/Nm³

図 11 ガス単価に対する年間メリット金額

Fig. 11. Total yearly cost merit for gas cost.

検討条件を以下に示す。オーバーホールは電池スタックの交換や改質器等の触媒交換を想定し、オーバーホール期間は 5 年毎とした。また、家庭用 PEFC の耐用年数はガス給湯器と同レベルの 10 年として設定し、毎年均等に償却するとし、計算した。

燃料電池設備費	30 万円/kW、50 万円/kW
メンテナンス費用	1 万円/年
オーバーホール費用	10 万円/回(5 年に 1 回)
設備償却期間	10 年
金利	3%/年

出力が PkW の燃料電池設備費については式(2)により計算した。

$$C_p = C_{1kW} \times (P_{kW}/1kW)^{0.7} \quad (2)$$

C_p : 出力 PkW の燃料電池設備費

C_{1kW} : 出力 1 kW の燃料電池設備費

図 11 にガス単価に対する年間利益を示す。年間利益は式(3)で定義する。

$$\begin{aligned} \text{年間利益} = & \text{PEFC 設置時の年間エネルギー料金} - \\ & \text{PEFC 設置なし時の年間エネルギー料金} - \text{設備費} \\ & \text{年間償却費(メンテナンス費用、オーバーホール費用、} \\ & \text{金利を含む)} \quad (3) \end{aligned}$$

図 11 に各運用モードとガス単価に対する年間利益を示す。図より、ガス単価が 90 円/Nm³ では、年間利益が生じるのは、運用モードや発電効率の影響は少なく、PEFC 出力 500W 級でも年間数千円以下となり、家庭用 PEFC 導入メリットはない。しかし、ガス単価が 50 円/Nm³ 迄低下すると 500W~1.2kW 級を導入すれば年間利益が生じ、年間利益は最大 3 万円程度となる。

5. 導入評価方法の標準化

(5・1) 運用モードの複合化モデル 以上の検討では電主熱従と熱主電従について検討した。しかし、実運用では季節により電・熱負荷が異なるために、季節毎に運用モードを変更する方が年間エネルギー料金を低下できる可能性がある。図 12 にガス単価 70 円/Nm³ 時の、季節毎の電主熱従と熱主電従運用の月間運用エネルギー料金差を示す。月間運用エネルギー料金差は式(4)で定義する。

$$\begin{aligned} \text{月間運用エネルギー料金差} = & \text{電主熱従月間エネルギー} \\ & \text{料金} - \text{熱主電従月間エネルギー料金} \quad (4) \end{aligned}$$

図 12 より 7~9 月の夏期には 0.5~0.8kW 級では電主熱従運用のエネルギー料金が低くなる。しかし、1.0~1.5kW 級は熱主電従の方がエネルギー料金は低くなる。この理由は、夏季は熱需要が少ないために、1kW を越える電力負荷にあわせた運用をすれば熱が余り、大部分の熱を捨てることになるためである。1~3 月の冬期は、0.5~1.2kW 級では電主熱従運用の方がエネルギー料金が低くなる。これは、冬期は電力需要に合わせて運用すれば熱が不足するが、不足する熱のみであればボイラーから供給の方が経済的であることによる。4~6 月の春期や 10~12 月の秋期には燃料電池出力が 0.8~1.2kW では熱主電従運用の方が、0.5kW

では電主熱従運用の方が若干エネルギー料金が低くなる傾向にある。発電効率28%、33%でもほぼ同様な傾向を示す。

このように、実際の運用では各家庭の季節(月毎)による電・熱負荷から、季節毎(月毎)に電主熱従か熱主電従運用かを選定して複合運用をすればメリットが大きくなる。

図3の負荷モデルに対して、電主熱従、熱主電従や複合運用をした場合の年間エネルギー料金を図13に示す。ガス単価が120円/Nm³の場合、燃料電池出力が0.5~1.2kWの領域で複合運転の効果が現れる。ガス単価が70円/Nm³の場合も、燃料電池出力が0.5~1.2kWの領域で複合運用によるメリットが生じているが、ガス単価が120円/Nm³の場合よりも影響は小さい。このように、季節毎の電主熱従か熱主電従かの最適運用は、ガス単価の影響も受けている。

図12 季節毎の電主熱従と熱主電従運用の月間エネルギー料金差 (発電効率30%、ガス単価70円/Nm³)

Fig. 12. Monthly energy cost difference of electric load following between heat load following operation for seasons (electric efficiency 30%, gas cost 70yen/Nm³).

図13 複合運用時の年間エネルギー料金

Fig. 13. Yearly energy cost of mixed operation mode.

図14に季節別に複合運用をした場合の年間利益を示す。年間利益が最大になるのはPEFC出力0.5kWであり、利益額は設備コストにより年間数千円から2万円程度となる。

〈5・2〉 家庭用PEFC導入評価の標準化 以上の検討を通して家庭用PEFCを導入する場合の評価方法は表4のように標準化することができる。変数のガス単価、売電価格、買電価格、燃料電池発電効率、燃料電池排熱量については事前に決定し、表4のステップで検討すれば良い。

図14 基本負荷モデルに対する家庭用PEFC導入評価 (ガス単価70円/Nm³、複合運用)

Fig. 14. Evaluation of residential use PEFC for basic load model (gas cost 70yen/Nm³ mixed operation mode).

表4 家庭用PEFC導入の評価方法

Table 4. Evaluation method of residential use PEFC.

6. 二酸化炭素削減効果

家庭用 PEFC を導入した場合の二酸化炭素排出量の削減効果について試算を行った。

燃料電池システムを導入した場合の CO_2 排出量は、燃料電池と補助用ガス給湯器のガス消費量に都市ガスの CO_2 排出原単位を乗じた値と、購入電力の CO_2 排出原単位を乗じた値の合計値となる。購入電力の CO_2 排出量の評価は、商用電力システムの電源を何にするかにより異なる。例えば、原子力発電、水力発電、太陽光や風力の自然エネルギーによる電力は CO_2 を発生しない。本研究では PEFC と同じ天然ガスを燃料とする火力発電所からの電気を使用するとして、 CO_2 削減率は火力発電の値を採用した。

二酸化炭素の試算条件は以下の通りである。

① PEFC の CO_2 排出原単位は、都市ガス燃焼の場合、以下の値から燃料使用量と運転時間から CO_2 (炭素換算) を算出する。

$$\text{CO}_2 : 2.354\text{kg}-\text{CO}_2/\text{Nm}^3-13\text{A}$$

$$\text{C} : 0.643\text{kg}-\text{C}/\text{Nm}^3-13\text{A}$$

② 商用電力システムから購入する電力量に見合う CO_2 排出量の炭素換算は火力発電所の CO_2 排出原単位 $0.185\text{kg}-\text{C}/\text{kWh}$ (1)から計算する。

③ 給湯用の都市ガスは上記①の原単位から計算する。

図 15 に電主熱従、熱主電従の CO_2 排出量と削減率を示す。

(電主熱従)

(熱主電従)

図 15 二酸化炭素排出量と削減率

Fig.15. Exhaust CO_2 quantity and decreased CO_2 percentage.

電主熱従運用の場合、燃料電池出力が $0.5 \sim 1.3\text{kW}$ の範囲であれば発電効率が 28%でも CO_2 削減効果がある。最適容量を選定すれば CO_2 削減率は約 20%であり、電主熱従運用では発電効率の影響が大きい。

熱主電従運用の場合は、発電効率に関係なく CO_2 削減効果があり、最適容量は $0.5 \sim 1.3\text{kW}$ 程度である。

7. 適用例—異なる負荷モデルでの検討—

〈7・1〉 負荷モデル(ケース 1) 異なる負荷モデルとして、一戸建て 6 人家族 (以下 世帯 A) の電力・給湯実測データに基づいて、家庭用 PEFC システムの導入可能性を評価した。図 16 に世帯 A の電力、給湯負荷のパターン (季節別) を示す。なお、世帯 A は家族数が多く、老人夫婦も含むために電力、給湯とも前節で使用したモデルよりも消費量が多く、昼間時間帯でも熱消費があるケースである。

電主熱従運用で、PEFC の発電効率は 30%とし、ガス単価 $50, 70, 90, 120 \text{ 円}/\text{Nm}^3$ について、定格出力に対する年間エネルギーメリット金額を計算した。その結果を図 17 に示す。

図 16 一日の電・熱負荷実測モデル(ケース 1)

Fig.16. Measured daily electric and heat demand (case 1).

図 17 家庭用 PEFC 導入時の年間エネルギーメリット (ケース 1.電主熱従、 $\eta = 30\%$)

Fig. 17. Energy merit during a year by residential use of PEFC (Case 1. Electric following operation, $\eta = 30\%$).

図 18 家庭用 PEFC 導入の経済性評価
(ケース 1. ガス単価 70/Nm³、複合運用、 $\eta=30\%$)
Fig. 18. Economic evaluation of residential use PEFC
(Case 1. Optimum mixed operation mode, $\eta=30\%$).

図 19 一日の電・熱負荷モデル (ケース 2)
Fig. 19. Measured daily electric and heat demand (Case 2).

年間エネルギーメリット金額は式(5)で定義する。

$$\text{年間エネルギーメリット金額} = \text{PEFC 設置時の年間エネルギー料金} - \text{PEFC 設置なし時の年間エネルギー料金} \quad (5)$$

図中には機器コスト 30 万円/kW の場合の年間償却費用を併記するが、ガス単価が 90 円/Nm³以下に下がれば、0.5~1.5kW と比較的大きい PEFC 設備を導入しても採算性があることが分かる。複合運用をすれば年間メリット金額は最も大きくなり、図 18 にガス単価 70 円/Nm³ の場合の複合運用での年間利益を示す。

0.5~1.5kW 容量機では、ガス単価が 70 円/Nm³であれば設備コストが 50 万円/kW のものを導入しても経済的なメリットが生じる。設備コストが 30 万円/kW になると従来方式と比較して年間 35~40 千円程度の節約となる。

〈7.2〉 負荷モデル (ケース 2) 図 19 に世帯 B の電力・給湯負荷のパターン (季節別) を示す。なお、世帯 B は一戸建て 4 人家族である。

図 20 に電主熱従運用時の年間エネルギーメリット金額と燃料電池出力の関係を示す。図中には機器コスト 30 万円/kW の場合の年間償却費用を併記するが、ガス単価が 70~90 円/Nm³ 以下に下がれば 0.5~1.2kW の PEFC を導入し

図 20 家庭用 PEFC 導入時の年間エネルギーメリット
(ケース 2. 電主熱従、 $\eta=30\%$)
Fig. 20. Energy merit during a year by residential use PEFC (Case 2. electric following operation, $\eta=30\%$).

図 21 家庭用 PEFC 導入の経済性評価
(ケース 2、ガス単価 70 円/Nm³、 $\eta=30\%$ 、複合運用)
Fig. 21. Economic evaluation of residential use PEFC
(Case 2. Optimum mixed operation mode, $\eta=30\%$).

ても採算性があることが分かる。図 21 にガス単価 70 円/Nm³ の場合の複合運用での年間利益を示す。

ガス単価が 70 円/Nm³ レベルになると、設備コストが 50 万円/kW のものを導入しても 0.5~1.2kW 容量のものを導入するとメリットが生じる。設備コストが 30 万円/kW になると家庭用 PEFC 導入により年間 25~33 千円の経済的なメリットが生じることが分かる。

8. まとめ

家庭用 PEFC の導入可能性を検討した結果、500W 程度の小容量機を設置する場合、運転パターンや運用モードはほとんど影響しないが、1kW 機程度の PEFC を設置した場合は、電気や熱負荷に対して負荷追従運転をした場合にエネルギー料金が低くなることが判明した。

季節により熱負荷や電力負荷には差があるために、夏期のような熱需要が少ない時期は熱主電従、冬期は電主熱従運転にすることが年間エネルギー料金の低減に効果的であった。このため、年間の経済性を高めるには、季節間毎(月毎)に電主熱従あるいは熱主電従運用を選定した複合運用が好ましいことがわかった。

経済性に影響を与えるのは設備コスト、ガス単価と余剰電力の販売価格や不足電力の購入価格である。特に、ガス価格は最も影響が大きく、ガス単価が 70~90 円/Nm³ 以下になることが家庭用 PEFC を導入するために必要であることがわかった。PEFC の発電効率の影響については、発電効率が高くなると電主熱従運転が適していることが判明したが、負荷追従運転では、PEFC の発電効率が経済性に与える影響はガス代や設備コストと比較して小さいことが分かった。

家庭用 PEFC の導入可能性評価では、基本負荷モデルのケースでの最適容量は 800W、ガス単価は 70 円/Nm³ 程度であったが、負荷モデルケース 1、2 ではガス単価 90 円/Nm³ でも経済性が生じ、燃料電池容量は 500W~1.2kW、設備コストは 50 万円/kW 程度であれば導入可能と推定された。このように家庭用 PEFC の導入可能性は各家庭の負荷分布により大きい差があることが分かった。

このため、各家庭での家庭用 PEFC 導入可能性を評価する手法の確立が重要であり、各家庭毎に表 4 に示すステップに従って、家庭用 PEFC の導入可否を評価できることが分かった。今後、この評価方法により多くの負荷モデルの評価を行い、データを蓄積することが必要と考えている。

(平成 13 年 12 月 19 日受付, 平成 14 年 4 月 12 日再受付)

文 献

- (1) 「民生用小型分散型エネルギーシステムに関する調査成果報告書」, 日本電気工業会 (1999-6)
- (2) 蒲生恵司・伊東弘一・横山良平:「固体高分子形燃料電池コージェネレーション・システムの最適導入計画」, エネルギー資源学会第 17 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 (2001-1)
- (3) 蒲生恵司・伊東弘一・横山良平:「最適化手法に基づく家庭用固体高分子形燃料電池コージェネレーション・システムの経済的導入可能性分析」, FCDIC 第 8 回燃料電池シンポジウム講演予稿集 (2001-5)
- (4) 加藤丈佳・飯田哲久・横水康伸・岡本達希・鈴置保雄:「給湯負荷の実測に基づく住宅マイクロコージェネの評価」, エネルギー資源学会第 17 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 (2001-1)
- (5) 鈴木将大・加藤丈佳・Wu Kai・横水康伸・岡本達希・鈴置保雄:「住宅用 PEFC システムの熱電比可変運用に関する検討」, エネルギー資源学会第 20 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 (2001-6)
- (6) Y. Wakazono, T. Kato, K. Wu, Y. Yokomizu, T. Okamoto, and Y. Suzuoki: "A Study on Operational Pattern and Heat-storage Capacity of Micro Co-generation System for House Use Based on Minute-order Hot Water Load", *TJEE Japan*, Vol.121-B, No.8, pp.973-981 (2001-8) (in Japanese)
若園芳嗣・加藤丈佳・ウ カイ・横水康伸・岡本達希・鈴置保雄:「分オーダーの給湯負荷データを用いた住宅用マイクロコージェネの運転方法・蓄熱容量の検討」, 電学論 B, 121, 8, pp.973-981 (2001-8)
- (7) 竹内弘明・相川 進・高橋三・長谷川裕夫・倉田 修:「住宅におけるエネルギー消費パターンの測定および考察」, エネルギー資源学会第 17 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 (2001-1)

(8) 島崎大輔・上野 剛・佐野史典・佐伯 修・辻穀一郎:「自動計測結果に基づく住宅のエネルギー需要の現状分析(その 4)」, エネルギー資源学会第 17 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 (2001-1)

(9) 佐伯 修・佐野史典・辻穀一郎:「住宅用日負荷曲線推計のためのボトムアップシミュレーションモデルの評価」, エネルギー資源学会第 16 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 (2000-1)

小 川 賢

(正員) 1949 年 3 月 9 日生。72 年 3 月大阪府立大学機械工学科卒業。同年 4 月関西電力(株)入社。82 年より総合技術研究所で燃料電池開発研究に従事。りん酸形、固体高分子形燃料電池研究を担当。博士(工学)

内 田 堅二

(正員) 1965 年 2 月 18 日生。89 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻終了。同年 4 月関西電力(株)入社。2000 年より総合技術研究所エネルギー利用技術研究所でエネルギー関係の研究開発に従事。

橋野 幸次

(非会員) 1950 年 9 月 14 日生。69 年 3 月関西電力学園卒業。同年 4 月 関西電力(株)入社。1992 年より総合技術研究所で燃料電池開発に従事。りん酸形、溶融炭酸塩形、固体高分子形研究を担当。

久保田 康幹

(非会員) 1954 年 1 月 31 日生。81 年 3 月岩手大学大学院工学研究科応用化学専攻終了。85 年 5 月富士電機(株)入社。85 年より燃料電池発電装置の開発に従事。りん酸形、固体高分子形を担当。

大賀 俊輔

(非会員) 1957 年 5 月 12 日生。80 年 3 月埼玉大学機械工学科卒業。同年 4 月富士電機(株)入社。82 年より燃料電池発電装置の開発に従事。りん酸形、固体高分子形を担当。