

将来の家庭用エネルギー機器選択に与える 技術経済要因分析

—固体高分子燃料電池・電気温水器間の競合条件—

Analysis of Technology Choice between a Distributed Power System and an Electric Water Heater of Residential Customers

キーワード:最適計画、電気温水器、コーチェネレーション、技術間競合、固体高分子燃料電池

今 村 栄 一 浅 野 浩 志

近年、小型コジェネレーションシステム(CGS)開発の進展に伴い、家庭や小規模業務部門需要家におけるマイクロコージェネレーション(μ -CGS)の導入が進みつつある。本論文では、開発の進む固体高分子燃料電池コージェネレーション(PEFC-CGS)と電気温水器を対象に、家庭部門需要家の最適計画モデルおよび電力需要・給湯需要の実測データを用いて、技術b経済的な観点からPEFCの導入可能性を分析した。あわせて、PEFC 発電効率・排熱回収効率及びコスト条件に対する感度解析により技術選択要因の分析を行った。分析の結果、以下の事などが明らかとなった。

- (1) PEFC-CGS が電気温水器に対して価格競争力を持つためには 30 万円/kW 程度以下の価格水準を達成することが必要となる。
- (2) 不足熱量の追焚用としてはガスよりも電気によって行うことが年経費の点からは需要家メリットにつながる。
- (3) 発電効率の向上による排熱回収効率の低下は需要家のコストメリットを縮小させるため、発電効率の向上だけでなく熱利用を含むシステム効率の向上が不可欠となる。
- (4) 時間帯別電灯を選択した需要家において、PEFC-CGS が電気温水器に対して価格競争力を持つためには機器価格条件として 25 万円/kW 程度を達成する必要がある。また、部分負荷運転が難しい場合においても PEFC-CGS の機器価格は 25 万円/kW 程度を達成する必要がある。

| | |
|---------------------|---------------------------|
| 1.はじめに | (2) 構成機器特性と価格条件 |
| 2.モデルの定式化と前提条件 | (3) エネルギーコスト想定 |
| 2.1.検討対象システムの想定 | 3.分析結果 |
| 2.2.モデルの定式化 | 3.1. PEFC-CGS 価格低減による影響分析 |
| (1) 目的関数 | 3.2. PEFC-CGS の最適運用方策 |
| (2) 制約条件 | 3.3. PEFC-CGS 効率向上による影響分析 |
| 2.3.分析の前提条件 | 3.4. 電気料金選択による年間総経費低減効果 |
| (1) 家庭における電力・給湯負荷特性 | 4.おわりに |

1. はじめに

近年、小型コジェネレーションシステム(CGS)開発の進展に伴い、中小規模民生部門需要家においてマイクロコージェネレーション(μ -CGS)の導入が進みつつある^[1]。また、固体高分子型燃料

電池(PEFC)の開発の進展に伴い、家庭部門における PEFC を用いた μ -CGS の導入が進展する可能性がある。このような状況の中、家庭部門における PEFC コージェネレーション(PEFC-CGS)システムの設置可能性や運用・設計に対する検討事例^{[2][3]}はあるものの、これらの検討事例では

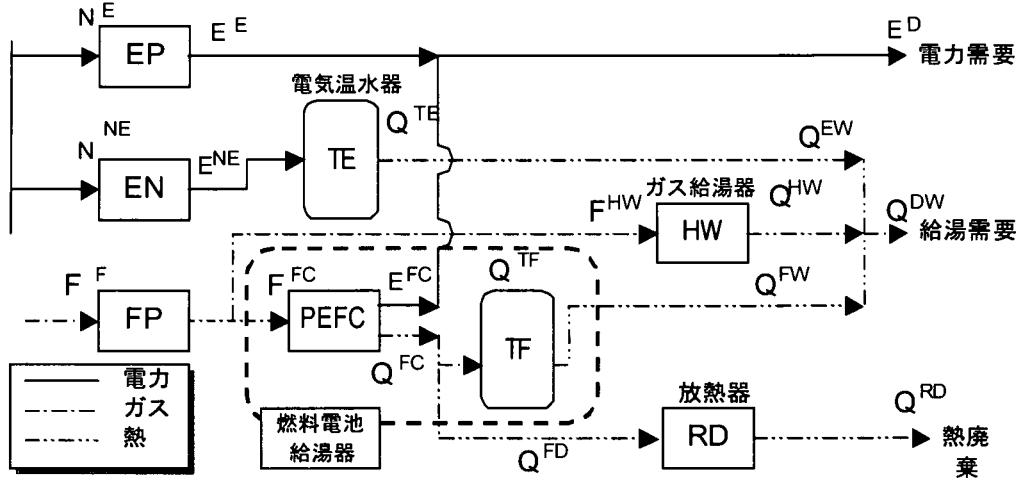


図 1 PEFC 導入可能性の検討システムフロー

PEFC-CGS のみを取り扱っており、電気温水器等のほかのエネルギー機器との技術間競合についての分析は十分に行われてはいない。

著者らは、これまでに中小規模業務部門需要家における CGS システムの検討^[4]や CGS と蓄熱空調システム間の技術間競合に関する分析^[5]を行ってきた。

本論文では、PEFC-CGS と電気温水器を対象に家庭部門需要家にコストメリットが生じる技術選択について事例研究を行う。あわせて、PEFC 発電効率・排熱回収効率及びコスト条件に対する感度解析を行う。

2. モデルの定式化と前提条件

2.1 検討対象システムの想定

家庭で用いられる各種エネルギー機器類を組み合わせた検討対象システムとして図1に示す構成を想定する。システムは需要家における電力と熱を考慮したエネルギープロセスを表したものである。

ここで、主として 3 つの機器類の技術間競合を明らかにする。対象とする機器類はガス給湯器、電気温水器および固体高分子型燃料電池(PEFC)コードジェネレーションシステムである。PEFC から供給される電力は逆潮流することなく

家屋内で消費されるものとし、家屋内の電灯需要やエアコンの動力源等として利用される。PEFC 排熱は貯湯タンクに溜められるが、給湯需要に利用されるものとした。また、エネルギーバランスを保つために、PEFC 余剰排熱については放熱器を通じて廃棄できるものとした。

このシステムにおいて年間の総エネルギーコスト(固定費および可変費)を最小化する最適化問題として、各機器の規模を求ることにより PEFC の需要家における導入可能性の評価を行う。なお、分析に際して各給湯器に対する給水温度は年間で一定とし、15°Cを仮定する。

2.2 モデルの定式化

(1) 目的関数

最適化モデルにおける目的関数は(1)式で表され、年間の総経費(C)を最小化する線形計画問題として定式化される。

$$\begin{aligned}
 C = & \sum_{j=\{E, NE, TE, FC, HW\}} \tau_j N_j r_j^{EX} \\
 & + \Theta_E \sum E^E + \Theta_{NE} \sum E^{NE} + \Theta_F \sum F^F \\
 \rightarrow & \min
 \end{aligned} \quad \dots(1)$$

ここで、エネルギーコスト Θ_i 、エネルギー使用量 E^E (電力)、 F^F (ガス)、各機器の規模 N_j 、

年経費率 r^{EX} 、機器単価 τ_j を表す。(1)式の右辺の第1項は資本費を表し、第2、3項は運転費を表す。ここで、水道使用量は各技術間で差が無いため、年間コストに水道使用料金は含めずに検討を行う。

(2) 制約条件

機器の運転およびエネルギーバランスに関する制約条件を定義する。電気温水器に対する制約条件は焚き上げ運転時の消費電力量を E_i^{ET} 、効率を r^{ET} とすると、電気温水器内に蓄熱される熱量は $r^{ET} E_i^{ET}$ とあらわされる。また、蓄熱量と給湯消費量をそれぞれ Q_i^{TE} , Q_i^{EW} とすると、電気温水器に関するエネルギーバランス制約条件は(2)式のように表される。

$$\left. \begin{array}{l} Q_i^{TE} = r^{TE} Q_{i-1}^{TE} + r^{ET} E_i^{ET} - Q_i^{EW} \\ N^{TE} \geq E_i^{ET} \end{array} \right\} \dots\dots (2)$$

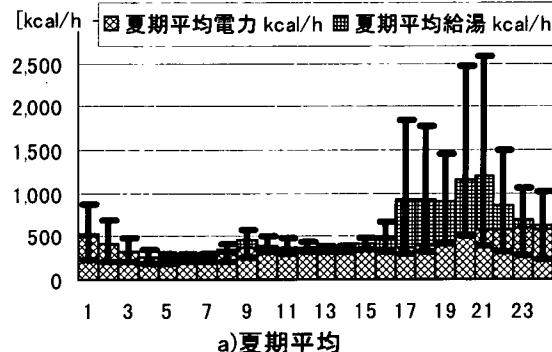
ガス給湯器で作られる熱量 Q_i^{HW} は、ガス給湯器の効率、消費ガス量をそれぞれ r^{HW} , F_i^{HW} とすると、(3)式に示す制約条件が定義される。

$$N^{HW} \geq Q_i^{HW} = r^{HW} F_i^{HW} \dots\dots (3)$$

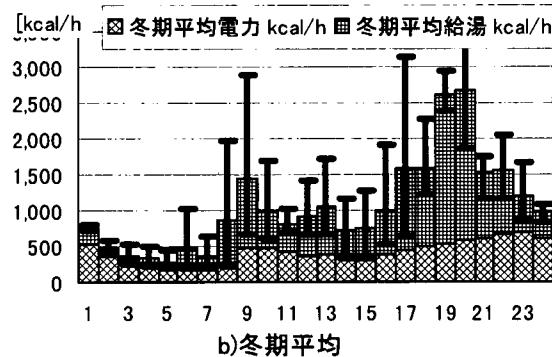
また、PEFC-CGS の給湯槽の蓄熱効率、燃料電池の発電効率と廃熱回収効率をそれぞれ、 r^{TF} , r^{FCE} , r^{FCQ} とすると、PEFC-CGS に関する制約条件は式(4)に示すように定義される。なお、本論分では燃料電池の部分負荷特性と負荷追従性能については考慮せずに分析を行う。ただし、部分負荷運転が行えないとした場合の DSS 運転については感度解析で検討を行うこととする。

$$\left. \begin{array}{l} N^{FC} \geq E_i^{FC} = r^{FCE} F_i^{FC} \\ r^{FCQ} F_i^{FC} = Q_i^{FT} + Q_i^{RD} \\ Q_i^{TF} = r^{TF} Q_{i-1}^{TF} + Q_i^{FT} - Q_i^{FW} \end{array} \right\} \dots\dots (4)$$

ここで Q_i^{TF} , Q_i^{FT} , Q_i^{FW} は 燃料電池給湯器の貯湯槽への蓄熱熱量、供給熱量、消費熱量をあらわす。また、 Q_i^{RD} は PEFC-CGS の熱バランスを維持するために燃料電池排熱のうち、熱廃棄される



a) 夏期平均



b) 冬期平均

図 2 モデル需要家電力・給湯日負荷特性

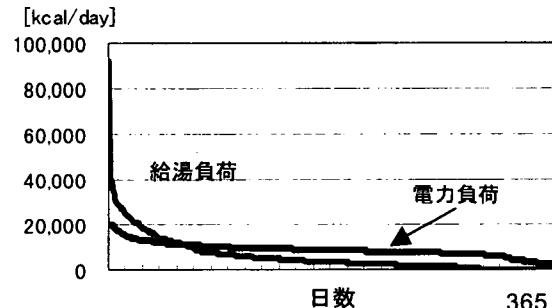


図 3 家庭部門における日負荷年間持続曲線

量を表す。あわせて熱廃棄バランスのために(5)式が定義される。

$$N^{RD} \geq Q_i^{RD} \dots\dots (5)$$

2.3 分析の前提条件

(1) 家庭における電力・給湯負荷特性

分析に際して用いた負荷特性データは電気温水器が設置された集合住宅 3 軒における給湯需要及び電力需要の実測調査結果をもとに推定した負荷特性を用いた。世帯属性としては平均延床面積 76 m²、平均世帯人数は 3.3 人、世帯内成

表 1 構成機器の特性および価格条件

| 機器 | 価格 | 発電効率 | 熱(回収)効率 |
|------------|-------------|-------|---------|
| TE 電気温水器 | 110,000円/kW | - | 80.0% |
| HW ガス給湯器 | 9,940円/kW | - | 80.5% |
| FC 燃料電池給湯器 | 500,000円/kW | 28.0% | 33.0% |

表 2 想定エネルギー価格条件

| | 電気料金 家庭用電灯 | 深夜電力 | ガス料金 一般料金 |
|------|--|-----------|-----------------|
| | 従量料金 | | 基本料金 |
| 従量料金 | 15.58円/kWh (~120kWh) 20.67円/kWh (~300kWh) 22.43円/kWh (300kWh~) | 5.59円/kWh | 109.50円/m3 |
| 基本料金 | 26円/A 3段階アンペア契約 | 300円/kW | 1040円/月 料金表B |

人の平均年齢は 35.2 才となっている。従って、PEFC-CGS の普及初期段階における導入先として考えられている建物に比べると、エネルギー需要は小さいと考えることが出来る。

なお、推定結果から得られた給湯量は他の測定事例^{[6][7]}に比べると 2/3 程度の需要量となっている。この理由としては他の実測事例が主として戸建住宅において測定を行っているのに対して、本測定では高気密高断熱型の集合住宅において実測を行ったことが影響しているものと考えられる。

図 2 に夏期・冬期の日負荷特性を示す。図中に示す誤差棒は季節内における全需要(電力需要および給湯需要の合計)の最大と最小の幅をあらわしている。日負荷特性においても電力需要と給湯需要の間には発生時刻に時間的乖離が 1~3 時間程度発生している。また、夏期には 17 時以降の負荷に大きな変動が生じやすいが冬期においては変動の大きくなる時間帯が朝と夕刻に表れている。

図 3 には日負荷の年間持続曲線を示す。電力需要において需要が大きく発生するのは年間の内、2~3 週間程度となっており、45 週間程度は日負荷量の変動は小さい。一方、給湯需要については、年間の内 1 週間程度に大きな負荷が発生する一方、年間を通じて負荷が安定する日数は少ない。

電力需要は年間で 4,810kWh となっている。電力負荷の特徴としては、7 月に約 35Mcal/日(約 40 kWh/日)の負荷が生じ、2 月に同程度の需要が発生している夏・冬ピーク型である。また、電力需要と給湯需要の発生に月オーダーの乖離が生じている。

(2) 構成機器特性と価格条件

検討対象とする、機器の価格ならびに効率を表 1 に示す。電気温水器ならびにガス給湯器については、インターネット上に公開されている各メーカーの電子カタログを参考にして平均的な価格を求めた。PEFC-CGS については他の給湯機器に対して価格競争力を持つと考えられている価格として 50 万円/kW を想定した。PEFC-CGS 価格については感度解析において価格を変化させることによって PEFC-CGS の価格条件による影響分析とブレークリープンコストの探索を行うこととした。

また、各機器の年経費率の算出においては耐用年数を 5 年とし、長期割引率として 3%を想定し、分析を行うこととした。

(3) エネルギーコスト想定

電気料金とガス料金については表 2 に示す前提の下で分析を行った。電気料金については電気温水器については深夜電力を想定し、その他の電灯については 3 段階アンペア契約乙を想定

し分析を行うこととした。また、時間帯別電灯料金についても検討を行うこととし、電気料金体系に対する反応解析もあわせて行う。

ガス料金については、検討対象としたモデル需要家における給湯需要の月平均から、PEFC-CGS またはガス給湯器で利用される各月のガス使用量から料金表 B の価格水準を想定した。なお、今回は電力料金水準と機器特性を感度解析の対象として取り扱い、ガス料金水準についての感度解析は行わず、今後の課題とした。

3. 分析結果

3.1 PEFC-CGS 価格低減による影響分析

図 4 に PEFC-CGS の機器価格を変化させた場合に、各機器価格と年間経費低減効果を示す。

基準ケースとして想定した PEFC-CGS 価格 50 万円/kW の場合、需要家にコストメリットが生じる機器選択は電気温水器となり、年間経費は約 16.9 万円となった。

PEFC-CGS が電気温水器に価格競争力を持つためには 30 万円/kW 程度の価格水準を達成することが必要となる。このとき、年間電力需要 4,810 kWh の内、1,301kWh が燃料電池によってまかなわれる。また、放熱器容量は 0[kcal/h] とすることが最適となり、燃料電池排熱はすべて給湯の用に供されている。ただし、30.4 万円/kW の場合における年間総経費の低減効果は 2%以下であり、需要家にとってコストメリットが大きく出るためにには 20 万円/kW 台程度以下を達成する必要があると考えられる。また、PEFC-CGS が電気温水器に対して価格競争力を持つ場合でも電気温水器と協調運転を行うことが需要家のメリットとなる。これは PEFC-CGS の価格水準が高いことに加え、燃料電池だけではすべての給湯需要を賄うことが出来ないためである。

今回は電気温水器と PEFC-CGS の他にガス給湯器を検討対象として機器選択問題を解いているが、いずれのケースでも PEFC-CGS の不足する

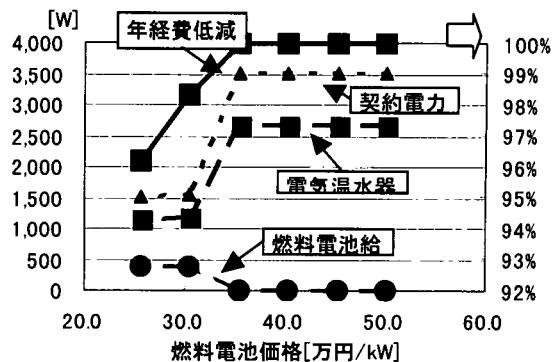


図 4 燃料電池価格低減による影響

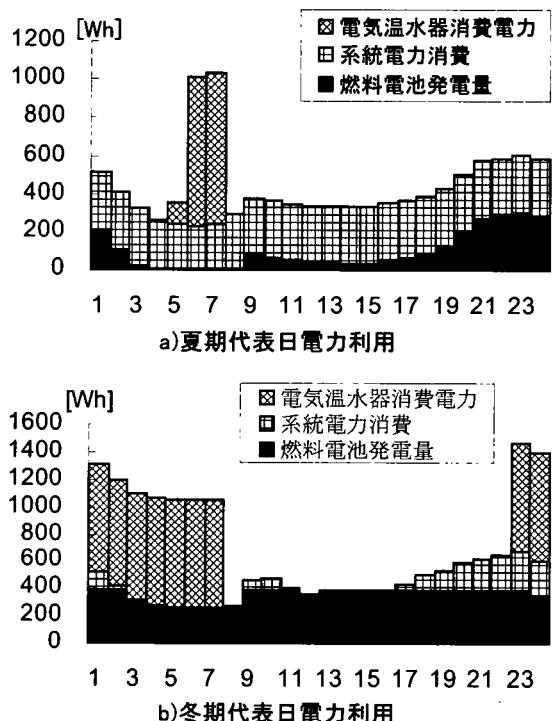


図 5 PEFC-CGS ブレークイーブン時における最適電力供給方策
(PEFC 価格 30.4 万円/kW)

熱量を補うために必要となる追焚用の機器としてはガスよりも電気によって行なうことが年間経費の点からは需要家メリットにつながる。

3.2 PEFC-CGS の最適運用方策

図 5 には PEFC-CGS がブレークイーブン(PEFC 価格 30.4 万円/kW)の場合における最適運用を示す。夏期においては系統からの購入電力をほぼ一定として、PEFC の運転を追従させることが最適となっている。これは電力需要のピークが夏期

に発生するため、余剰熱量を発生させない範囲で PEFC 容量を決定し、可能な限り一定電力を系統から購入し、契約電力を下げる事が年間総経費の低減において有利となっているためである。また、夏期の給湯需要は冬期に比べて小さいものの、不足する熱量を安価な電気温水器によって補うことが年間総経費の圧縮につながる。

一方、冬期においては燃料電池を可能な限り一定負荷運転することが最適な運用となる。これは冬期に給湯需要のピークが発生するため、可能な限り燃料電池排熱を有効に利用することで年間の総経費を圧縮することが可能となるためである。また、不足する熱量については電気温水器で夜間に蓄熱された温水を用いて補うことで最適運用を行い、年間総経費の低減を図ることが出来る。

PEFC-CGS ブレークイーブン時における最適な給湯供給方策を図 6 に示す。夏期には夕刻に給湯需要と共に電力需要も増えるため、燃料電池による電力供給の増加にあわせて、燃料電池排熱が生じる。夕刻時の給湯はこの排熱を利用して賄われるが、燃料電池排熱だけではすべての給湯需要を賄うことが出来ないため、19 時以前の給湯需要に対しては夜間に蓄熱された温水で不足分を補う。

冬期においては、給湯需要量が多いことから燃料電池排熱だけでは全ての給湯需要を賄うことが出来ない。このため、夕刻時の給湯需要に対しては電気温水器からの給湯と PEFC-CGS からの給湯とを組み合わせて供給し、両者の協調運転を行うことが最適となる。基本的に PEFC 排熱からの供給熱量は可能な限り発生にあわせて消費し、給湯需要が急激に増える夕刻の時間帯には電気温水器から供給することが最適となる。

3.3 PEFC-CGS 効率向上による影響分析

図 4 に PEFC-CGS の発電効率を変化させた場合の影響を示す。システム全体の総合効率は 61% とし、発電効率を上げた場合には排熱回収

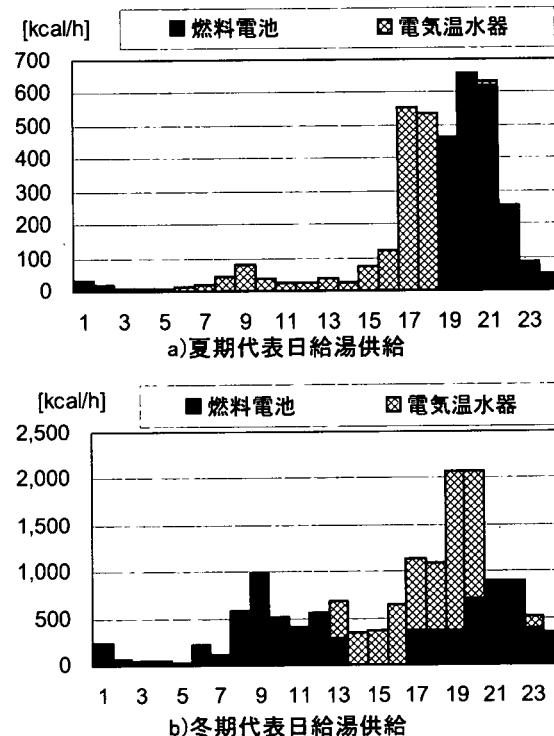


図 6 PEFC-CGS ブレークイーブン時における最適給湯供給方策
(PEFC 価格 30.4 万/kW)

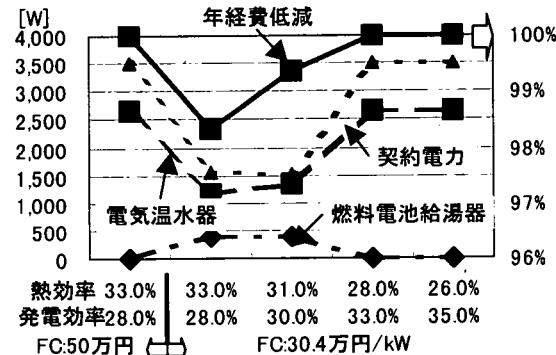


図 7 燃料電池効率向上による影響

効率が下がるものとして分析を行った。また、PEFC-CGS の価格水準については前節の分析の結果を踏まえて、電気温水器に価格競争力を持つ 30.4 万円/kW を想定して分析を行った。なお、図には前節において PEFC-CGS の価格を 50 万円/kW として場合の分析結果も合わせて図示すると共に、年間総経費の低減効果は基準ケースに対しての低減効果として表した。

家庭部門においては電力需要に比べて給湯需

要が比較的多いため、発電効率の向上により排熱回収効率が低下した場合、コストメリットが縮小する。特に排熱回収効率が30%を下回った場合(発電効率33%以上)の場合、PEFC-CGSは電気温水器に対して価格競争力を失う。本検討ではガス料金単価として一般料金を仮定してため、ガス料金単価が比較的高い。このため、発電コストは系統電力価格に比べて割高となり、単に発電コストが下がるだけでは需要家における年間総経費の低減につながらない。また、発電効率30%の場合にはPEFC-CGSの導入により年間経費の低減が見込めるものの、年経費低減割合は基準ケースに比べて1%以下にとどまる。

のことから、PEFC-CGSの導入により需要家メリットを確保するためには発電効率の向上だけでなくシステム全体の効率向上が不可欠となる。

3.4 部分負荷特性による影響分析

部分負荷運転を行わない様に制約を与えた場合、燃料電池価格の違いによって最適機器規模に与える影響を図8に示す。なお、本感度解析では燃料電池改質器の待機に伴うエネルギー消費は考慮に入れていない。

部分負荷運転が可能であり、部分負荷運転によって発電効率に影響がない場合のPEFC-CGSのブレークイーブンコストはおよそ30.4万円/kWであった(図4)。これに対して、部分負荷運転が行えない場合にはPEFC-CGSのブレークイーブンコストはおよそ25.6万円/kWとなり、導入条件は厳しくなる。このため、部分負荷運転がある程度可能であるとした場合には、PEFC-CGSのブレークイーブン

ンコストは30.4万円/kW～25.6万円/kWの間にあると考えることが出来る。

また、部分負荷運転が出来ず、余剰電力の逆潮流が行えないにより、燃料電池の最適規模も小さくなり、260Wが最適となった。

3.5 電気料金選択による年間総経費低減効果

部分負荷運転に対する制約を与えずに、電気料金を時間帯別電灯(深夜帯8時間)と時間帯別電灯(深夜帯10時間)とした場合の分析結果を図9に示す。分析に際しては表3に示す料金を想定して分析を行った。

いずれの場合においても電気料金の低減効果が大きくPEFC-CGS価格が30.4万円/kWの場合時間帯別電灯(深夜帯8時間)の場合には電気温水器価格に対して価格競争力を持つが、時間帯別電灯(深夜帯10時間)に対しては価格競争力を持つことが出来ない。また、時間帯別電灯を選択した場合においてもPEFC-CGSでは不足する給湯熱量はガス給湯による追焚を選択するよりも電気温水器を組み合わせることが需要家にとってコ

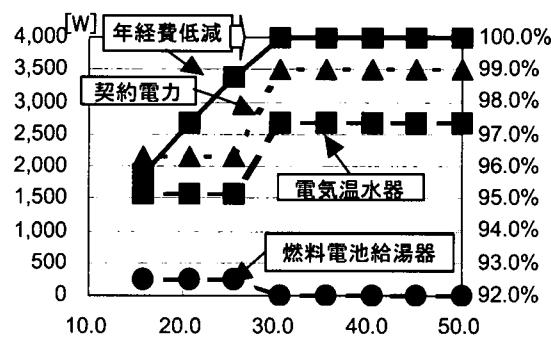


図8 部分負荷特性制約時の最適計画

表3 時間帯別電灯想定料金

| | 電気料金 | |
|------|--|--|
| | 時間帯別電灯(深夜帯8h) | 時間帯別電灯(深夜帯10h) |
| 従量料金 | 5.98円/kWh(深夜帯) 19.95円/kWh(～90kWh) 26.45円/kWh(～230kWh) 28.70円/kWh(230kWh～) | 6.25円/kWh(深夜帯) 22.2(～80kWh) 29.45(～200kWh) 31.95(200kWh～) |
| 基本料金 | 260円/kVA | 260円/kVA |

ストメリットを大きくなる。

なお、PEFC-CGS の機器価格がブレークイーブン以下となり、PEFC-CGS が選択されている場合であっても、電気温水器と組み合わせると共に、時間帯別電灯(深夜帯 8 時間)を料金メニューとして選択することで需要家におけるコストメリットは高まる。

時間帯別電灯(深夜帯 10 時間)の選択によって需要家における年経費低減率が 12%程度あることから、PEFC-CGS が電気温水器に対して価格競争力を持つためには機器価格条件として 25 万円/kW 程度を達成する必要があると考えられる。

図 10 には時間帯別電灯(深夜帯 8 時間)選択時の最適給湯供給方策を示す。時間帯別電灯(深夜帯 8 時間)の選択によって昼間の電力料金が上昇することから、昼間の電力供給に対しては PEFC の価格競争力が高まる。この結果、発電電力量が増えるために PEFC 排熱量も増加する。この結果、夏期においては PEFC からの熱量によりほとんどの給湯需要を賄うことが出来る。ただし、わずかに熱量が足りなくなるため、電気温水器での給湯供給が行われる。

一方、冬期には PEFC の発電電力量が増えたとして、PEFC 排熱量だけでは大きな日給湯需要量を賄うことが出来ないため、電気温水器による給湯供給が必要となる。特に 19 時前後の大きな給湯需要を PEFC からの熱量だけでは賄うことが出来ないため、深夜帯に蓄熱した温水を用いて不足する給湯量を賄うことが不可欠となる。

4. おわりに

家庭部門需要家の最適計画モデルおよび使用実態データを用いて経済的な観点から PEFC の導入可能性を分析を行った結果、以下の事な

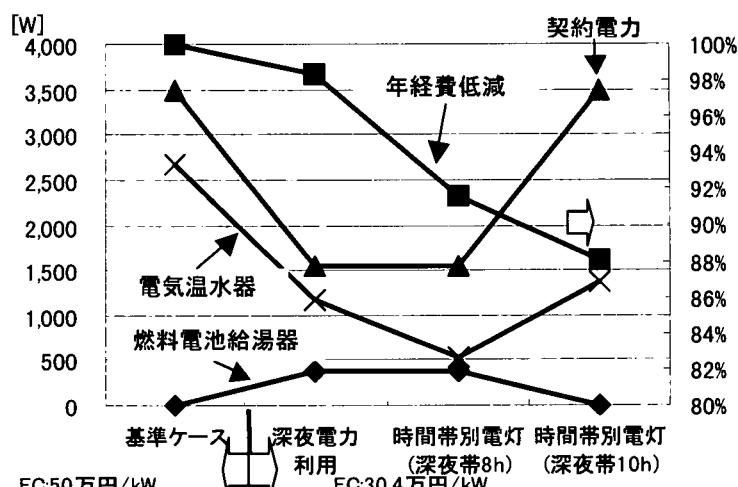


図 9 電気料金選択による影響

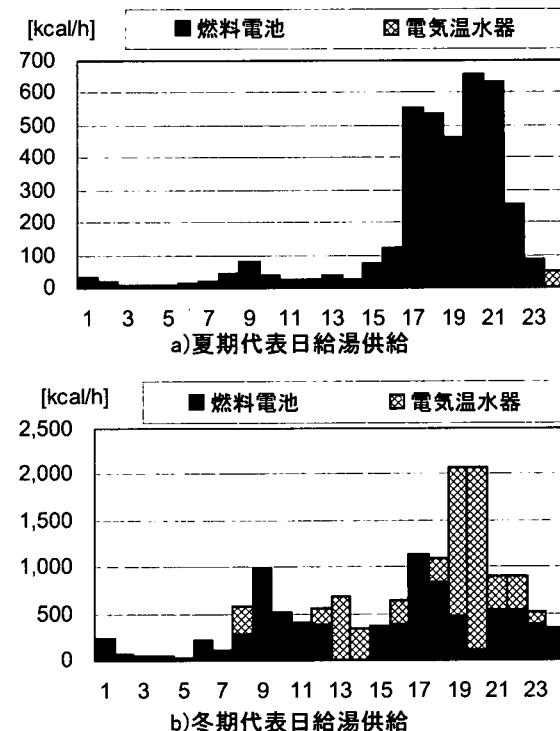


図 10 時間帯別電灯(深夜帯 8 時間)選択時の最適給湯供給方策

どが明らかとなった。

- (1) PEFC-CGS が電気温水器に価格競争力を持つためには 30 万円/kW 程度以下の価格水準を達成することが必要となる。
- (2) 不足熱量の追焚用としてはガスよりも電気によって行うことが年経費の点からは需要家メリ

ットにつながる。

- (3) 発電効率の向上による排熱回収効率の低下は需要家のコストメリットを縮小させるため、発電効率の向上だけでなくシステム効率の向上が不可欠となる。
- (4) 時間帯別電灯を選択した需要家において、PEFC-CGS が電気温水器に対して価格競争力を持つためには機器価格条件として 25 万円/kW 程度を達成する必要がある

今後は床暖房や CO₂ ヒートポンプなど、電気温水器・ガス給湯器以外の機器や燃料電池給湯器の導入初期段階に導入対象と考えられているエネルギー需要の大きな世帯も検討対象に加えた分析や、燃料電池の負荷追従性能などの技術的特性をより考慮した分析を行っていく予定である。また、感度解析の対象としていない、ガス料金水準に対する感度解析についても今後は検討を行っていく予定である。

【参考引用文献】

- [1] 今村、「自家用発電設備の設置動向」、OHM 第 89 卷第 6 号、2002 年 6 月
- [2] 蒲生、伊東、横山、「エネルギー需要量の不確実性を考慮した家庭用コーチェネレーションの導入可能性分析」、第 18 回エネルギー・システム・経済・コンファレンス、2002 年 1 月
- [3] 春日井、飯田、加藤、呉、鈴置、「給湯負荷の実測に基づく住宅用マイクロコジェネの評価」、第 18 回エネルギー・システム・経済・コンファレンス、2002 年 1 月
- [4] 今村、浅野、「中小規模業務用需要家におけるマイクロガスタービンの最適導入計画」、電中研報告 Y00003、2000 年 6 月
- [5] 今村、浅野、「業務用需要家の分散型電源・蓄熱空調機器間の技術選択要因分析」、電気学会電力・エネルギー部門大会、2002 年 8 月
- [6] 鈴東、佐野、上野、佐伯、辻、「自動計測に基づく住宅のエネルギー需要の現状分析(2)」、第 16 回エネルギー・システム・経済・コンファレンス、2000 年 1 月
- [7] 若園、加藤、横水、岡本、鈴置、「住宅用マイクロコジェネの運転方法・蓄熱容量に関する検討」、第 16 回エネルギー・システム・経済・コンファレンス、2000 年 1 月

いまむら えいいち
あさの ひろし
電力中央研究所 経済社会研究所