An Operational Algorithm for Residential Cogeneration Systems based on the Monitored Daily-basis Energy Demand

Yuka Yamagishi Student Member (Osaka University)

Hideharu Sugihara Member (Osaka University)

Osamu Saeki Member (Osaka University)

Kiichiro Tsuji Member (Osaka University)

Keywords: residential fuel cell, residential energy demand, energy conservation, economic evaluation

Residential co-generation system (CGS) with PEFC is expected to become a promising technology as distributed resources of power systems in order to improve energy system efficiency. However, it is important to develop efficient algorithm for operation because the energy demand at each house is largely different every day and there are technical or space restrictions for introducing PEFC cogeneration. In this paper, we propose the operational algorithm to make effective use of this system by forecasting energy demand profile at that house in advance and evaluate the algorithm at the point of energy conservation and economic index.

In this algorithm, there are three algorithms, called as “learning algorithm”, “starting algorithm”, “stopping algorithm”. In the “learning algorithm”, hot water and electrical demand on a next day is estimated by using average of the past data. In the “starting algorithm”, we decide when we should start PEFC. First, we forecast three hot water demand at each time zone in a day by “learning algorithm”. When we decided that estimated storage level in the tank at each time at that day cannot satisfy forecasted hot water demand at each time zone if we did not start PEFC now, we decide to start PEFC. During PEFC is operated, PEFC generates electricity following electrical load at the households because of improving economic index. We also estimate available exhaust heat for hot water demand by estimated electrical demand. The estimated exhaust heat are used to calculate when we should start and stop PEFC. Figure 1 shows a case of operation in this algorithm.

We simulated this proposal algorithm by using annual energy demand data of 20 houses that are actually measured by the authors. The 20 houses have various energy demand characteristics.

First, in order to compare with the proposed algorithm, we supposed an operation called as maximum energy saving potential and maximum economic potential respectively. At the maximum energy saving potential, the operation of PEFC are optimized at the point of energy conservation. The reduction of primary energy consumption at maximum energy saving potential is compared with annual electrical and hot water demand at each households to evaluate an influence of energy demand characteristics at each household. In the result, the larger heat/electricity ratio the household has, the larger reduction of primary energy consumption. By the same method, we considered at the point of economic index. At the maximum economical potential, the operation of PEFC are optimized at the point of economical index. As a result, the larger hot water demand the households has, the larger running cost saving rate.

Next, we evaluated attainments of this proposal algorithm at the point of energy conservation and economic index by the same

Fig. 1. Example of proposal algorithm

Fig. 2. Distribution of attainments for maximum energy saving potential

method of comparing with energy demand characteristics at each households. In Fig. 2, we classified households into three grade by attainments for maximum energy saving potential. By the distribution of attainments for maximum energy saving potential, the larger electrical demand the household has and the smaller heat/electricity ratio the household has, the larger attainments at the point of energy conservation. On the other side, by the distribution of attainments for maximum economical potential, the larger hot water demand the household has, the larger attainments at the point of economical index.

At this PEFC CGS, it was confirmed that this proposal algorithm is better than the operation in which we always get PEFC follow electrical load of the households at the point of energy conservation.

日々のエネルギー需要実測データに基づく 住宅用コージェネレーションシステムの 運用手法に関する研究

学生員 山岸 由佳* 正員 杉原 英治*
正員 佐伯 修* 正員 辻 毅一郎*

An Operational Algorithm for Residential Cogeneration Systems based on the Monitored Daily-basis Energy Demand

Yuka Yamagishi*, Student Member, Hideharu Sugihara*, Member, Osamu Saeki*, Member, Kiichiro Tsuji*, Member

Residential cogeneration system with PEFC is expected to become a promising technology as distributed resources of power systems in order to improve energy system efficiency. However, it is important to develop efficient algorithm for operation because the energy demand at each house is largely different every day. In this paper, we propose the operational algorithm and evaluate algorithm from view point of energy conservation and economic index based on the energy demand characteristics. In this algorithm, hot water and electrical demand on the next day is estimated based on the average of the past data. By using actually monitored energy demand data, the simulation results indicate that 1) the larger electrical demand a household has, the more efficient this algorithm become at the point of energy conservation 2) the larger hot water demand a household has, the more efficient this algorithm become at the point of economic index.

キーワード：住宅用燃料電池，エネルギー需要，省エネルギー，経済性評価

Keywords: residential fuel cell, residential energy demand, energy conservation, economic evaluation

1. はじめに

近年，情報化や都市環境の高度化により都市部における電力需要の高密度化が進展してきている。現在行われている大規模集中型の電力システムの場合，立地場所の関係から発電所の排熱を有効に利用することは困難である。そこで，住宅に分散型電源として燃料電池を設置し，発電の際の排熱を暖房や給湯用などの熱エネルギーとして利用しようとするのが燃料電池コージェネレーションシステム（CGS）である。この燃料電池 CGS で用いられている固体高分子型燃料電池（PEFC）のセル本体は，低温度で運転し，起動停止が容易で，小型化も容易であるなど，様々な長所を持ち合わせているため，特に注目され開発が加速してきている。

一方，住宅におけるエネルギー需要は，業務用需要家とは異なり，時間的にも量的にも毎日変化していくため，このことを十分考慮した運用を行わなければならない。また，

PEFC を利用した住宅用 CGS の技術的な観点からは，改質器における起動停止エネルギーの消費や改質器の耐久性を考えると頻繁に起動停止を行うことは困難であり，併設される貯湯槽は，住宅における設置スペースの問題から，できるだけ小さくすることが望まれる。PEFC を用いた住宅用 CGS の普及に際して，世帯のエネルギー需要をまかないつつ，このような技術的・スペース的な制約を考慮した上での，効率的な運用アルゴリズムが必要不可欠である。

関連する既往の研究として文献(1)では，実需要データに基づいて提案運転手法を適用した場合において，省エネルギー性の面から導入効果を試算し，文献(3)では数種の運転方法を様々な世帯の実測データに適用しているが，両文献とも経済性の面からの評価は行われていない。その一方で，文献(5)では標準住宅モデルを用いた電力・給湯負荷データに対して数値シミュレーションプログラムを作成し，文献(6)では PEFC 連続運転のもと，実温水需要データに基づいたシミュレーションによって，省エネルギー性・経済性両方の面からの考察が行われている。但し，対象世帯が数世帯に限られているため，提案する運用アルゴリズムの一般的な結論が得られているとは言い難い。一般に経

* 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻
〒565-0871 吹田市山田丘 2-1
Dept. of electronic and information, Osaka University
2-1, Yamadaoka, Suita 565-0871

済性は導入に際して重要な指針となることが予想されるため、省エネルギー性を考慮しつつも、経済性も重視した運用アルゴリズムを提案し、シミュレーションによって評価することが望まれる。

本論文は、当日の電力負荷・給湯負荷を予測しながら運用する学習型運転を用いてシステムの機器構成を総合的に活かした運用アルゴリズムを提案し、実際に計測された 20 世帯分の日々の需要変動データに適用することで、各世帯のエネルギー需要特性と比較しながらどの程度の省エネルギー性を達成可能であるかを評価することが目的である。またそれと同時に、実際の導入に際して重要な経済性の面からも評価を行い、イニシャルコストも含めた PEFC-CGS の導入可能性について考察する。

2. 住宅用コージェネレーションの運用手法

〈2・1〉 想定する住宅用 CGS 今回想定する住宅用 PEFC-CGS の構成を図 1 に示す。図中の数字は効率 (LHV) である。PEFC-CGS は従来の給湯器の代わりに設置され、供給対象は給湯需要および電力需要のみとする。発電した電力が需要に対し余剰となる場合は電力系統に売電することが可能とし、貯湯槽に貯蔵されている温水が余剰となる場合は廃棄することが可能とする。PEFC 本体の運転については、基本的に起動と停止は一日に一回ずつ可能とする。しかし、提案アルゴリズムにより連続運転すべきと判断された場合や、追加条件が有効と判断された場合は例外もありうるとする。なお今回、補助熱源として従来の容量 30 kW のガス給湯器を設置するものとし、湯切れは発生しないものとする。

〈2・2〉 PEFC 運用アルゴリズム

(1) 起動停止アルゴリズム 基本的には文献 (1) の起動停止アルゴリズムの考え方をを用いる。まず、実際にシミュレーションを行った場合の運転の概念図を図 2 に示す。この提案アルゴリズムでは 1 日を午前・午後・夜間の 3 つの時間帯にわけるとする。

- 午前—7:00～12:00
- 午後—12:00～予想お湯張り開始時刻
- 夜間—予想お湯張り開始時刻～(翌) 2:00

なお、この時間帯の区切りとして使われている「予想お湯張り開始時刻」とは、過去の給湯需要データから、一日の

図 1 システム構成

Fig. 1. System configuration.

うちである一定以上の比較的大きな給湯需要が発生し始める時刻を記録し、その平均時刻をとることで当日のお湯張りが開始されると予想した時刻である。その他に、過去の給湯需要データから当日の給湯需要を予測することで、時間帯ごとの予想給湯需要量を決定し、アルゴリズムで使用する。

文献 (1) では給湯需要データに基づき省エネルギー性を評価しているが、本論文では世帯全体のエネルギー消費をもとに、経済性も併せて評価する。そこで今回提案するアルゴリズムにおいては経済性を考慮し、PEFC の運転中は電力を出来る限り需要家内で消費できるように電力負荷追従運転を行う。今回の対象データは 30 分おきのエネルギー需要データであるため、電力も過去の需要データから当日の 30 分おきごとの電力需要を予測し、当日の電力負荷追従運転によって各時点で給湯に利用できる排熱量の予測も行う。実際には PEFC は出力上昇時や下降時に出力変動速度が存在するが、今回は考慮しないこととする。

まず、午前の時間帯が始まる 7:00 よりも前の時点における起動条件としては、現時点で PEFC を起動しなければ、3 つの時間帯の開始時点 (7:00, 12:00, 予想お湯張り開始時刻) において予想される貯湯量が、各時間帯の予想給湯需要量を下回ると判断された場合に起動するものとする。例えば、2:00～7:00 までの時刻において、午前時間帯の開始時点 (7:00) に予想される貯湯量は、現時点の貯湯量と 7:00 までに PEFC から供給される給湯需要量の和から求めることができる。PEFC は電力負荷追従運転を行うことを考慮すると、7:00 時点に対する起動判定条件は、次式のように表すことができる。今回の対象データは 30 分おきのエネルギー需要データであるため、30 分おきに起動を確認することとする。

$$H_M \geq S(t) + \sum_{\tau=t}^{T_M} p(\tau) \dots\dots\dots (1)$$

但し、 H_M ：午前時間帯の予想給湯需要量、 $p(t)$ ：予想電力需要量から求められる時点 t における 30 分あたりの予想 PEFC 排熱量、 $S(t)$ ：時点 t にお

図 2 提案アルゴリズムの運用例

Fig. 2. Example of proposal algorithm.

ける貯湯量, T_M : 午前時間帯の開始時刻 (7:00)

午後および夜間の開始時刻の時点に対する起動判定条件も, 基本的には同様な考え方に基き求めることができる。但し, 例えば 7:00 よりも前の時点において夜間の開始時点の貯湯量を予想するためには, 午前および午後の給湯需要量を予想する必要がある, 今回は前述の予想給湯需要量を用いて夜間の開始時点の貯湯量を簡易的に予想するものとする。従って, 12:00 および予想お湯張り開始時刻に対する起動判定条件は, それぞれ以下のように表すことができる。

$$H_A \geq S(t) + \sum_{\tau=t}^{T_A} p(\tau) - H_M \dots\dots\dots (2)$$

$$H_N \geq S(t) + \sum_{\tau=t}^{T_N} p(\tau) - H_M - H_A \dots\dots\dots (3)$$

但し, H_A : 午後時間帯の予想給湯需要量, H_N : 夜間時間帯の予想給湯需要量, $p(\tau)$: 予想電力需要量から求める時刻 τ からの 30 分間あたりの予想 PEFC 供給熱量, $S(t)$: 時点 t における貯湯量, T_A : 午後時間帯の開始時刻 (12:00), T_N : 夜間時間帯の開始時刻 (予想お湯張り開始時刻)

言い換えると, (3) 式の意味としては, 午前と午後の給湯需要量へ供給しつつ夜間の予想給湯需要量を満たすため, 現時点 t において PEFC を起動すべきかを判断することを表している。

次に, 午前時間帯内における起動判定は, 7:00 以降のため (1) 式は用いず, 基本的に (2) 式および (3) 式を用いて判定する。但し, 起動判定をする時点において既に午前時間帯の給湯需要の一部は発生しているため, 残りの時間であとどれだけ給湯需要が発生するかを以下の式で予想し, (2) 式および (3) 式における H_M の代わりに代入することで, 起動判定を行うものとする。

$$H'_M(t) = \begin{cases} X(t) & \text{if } (X(t) \geq 0) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

$$X(t) = H_M - \sum_{\tau=T_M}^t h(\tau) \dots\dots\dots (5)$$

但し, $h(\tau)$: 時刻 τ の給湯需要, T_M : 午前の時間帯の開始時刻

さらに, 午後の時間帯における起動判定も同様に, (3) 式において, H_M を 0 とし, H_A を次式の H'_A に置き換えることにより行うことができる。

$$H'_A(t) = \begin{cases} Y(t) & \text{if } (Y(t) \geq 0) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

$$Y(t) = H_A - \sum_{\tau=T_A}^t h(\tau) \dots\dots\dots (7)$$

最後に, 予想お湯張り開始時刻以降の夜間時間帯における起動条件について, 夜間のような給湯需要の大きな時間

帯は給湯能力の高い補助熱源も併設しているため, このアルゴリズム内で停止中の PEFC を起動することは行わないこととする。但し, 夜間でも後述の追加条件によって特別に起動が行われることもある。

なお, 現実には貯湯槽に熱損失が存在するが, 本論文では, 単純かつロバストなアルゴリズムの開発を目的とするため, 本起動停止アルゴリズムには考慮しないものとする。但し, 後述のシミュレーション評価では, 貯湯槽における蓄熱ロスを考慮して評価を行っている。

予想給湯需要量を設定しているため, その日の全ての時間帯における予想給湯需要量を満たしたと判断したら PEFC を停止する。全ての給湯需要の発生をまたず先に PEFC を停止させることで排熱の廃棄を最小限に抑え, 省エネルギー性を高めることができる。

(2) 学習アルゴリズム 各時間帯の予想給湯需要量, 各時間の予想電力需要量を導き出すアルゴリズムを学習アルゴリズムとする。

今回は, 単純に当該日の過去ある一定期間内に測定された時間帯別の給湯需要量, 各時間の電力需要量の平均をとり, それをそれぞれの予想需要量とする。予想給湯需要量は著者らの研究結果である文献(4)より平均をとる日数を一週間にあたる 7 日間とし, 次式に示すように平均値の 1.5 倍を予想給湯需要量とする。係数 1.5 によってやや多めに予想給湯需要量を見積もることで, 実際の給湯需要量が予想給湯需要より多く見積もり, 出来る限り給湯需要を PEFC でまかない, 省エネルギー性を向上させる。

$$H_T = 1.5 \frac{m_{1,T} + m_{2,T} + \dots + m_{7,T}}{7} \dots\dots\dots (8)$$

但し, H_T : 時間帯 T の予想給湯需要量, $m_{n,T}$: n 日前の時間帯 T の給湯需要量とする。

予想電力需要量についても同様に文献(4)を参考にし, 平均をとる日数一週間にあたる 7 日間とし, 平均値の 1 倍を予想電力需要量とする。つまり, 予想電力需要量は次のように求めることとなる。

$$E_t = \frac{e_{1,t} + e_{2,t} + \dots + e_{7,t}}{7} \dots\dots\dots (9)$$

但し, E_t : 時間 t の予想電力需要量, $e_{n,t}$: n 日前の時間 t の電力需要量とする。

対象世帯では休日も含まれているため, 平日と休日を分けて平均をとることによって省エネルギー性や経済性が向上するかどうかを一戸建ての世帯を対象に検討した。しかし全ての世帯を平均して, 一次エネルギー削減率, 料金削減率ともにほとんど変化がなかったため, 平日・休日を区別せず平均した。

(3) 起動停止に関する追加条件 今回提案するアルゴリズムを適用するにあたって, 排熱を有効利用することを目的として, PEFC の起動停止に以下の追加条件を付加する。

(i) 貯湯槽の蓄熱量が満杯になったら, PEFC の運転

を停止する。

(ii) 貯湯槽が空になり、補助熱源が動き出した場合 PEFC を 1 日 1 回再起動する。

これらの条件はシミュレーションを通してその効果を実証した。その使用頻度は付録 2 に示す。これらの条件をつけるとほぼ全ての世帯で省エネルギー性がよくなり、同時に経済性は悪化した。これは排熱を有効に利用できている反面、満杯停止条件で PEFC を停止させてしまうため、経済性が悪化したことによる。今回は省エネルギー性を優先して全ての世帯において両追加条件を付加してシミュレーションを行うこととする。

3. 対象世帯のエネルギー需要特性

本研究は著者らの研究グループで実測してきたエネルギー消費データの中から、京阪奈地域において、日々のデータとして利用可能な戸建て住宅 8 軒、集合住宅 12 軒の計 20 軒を対象世帯とする。データは 30 分刻みで、年間 365 日分である。図 3 に対象世帯の年間エネルギー消費量を、表 1 に各世帯の属性を示す。戸建て、集合それぞれにわけて年間エネルギー消費量の多い順に世帯番号をつけ、戸建は①, ②, ③..., 集合は No. 1, No. 2, No. 3... のように表す。実際には集合住宅で灯油の消費も存在しているが、シミュレーション対象データとしていないため今回は省略する。図 3 より全体的に幅広い年間エネルギー消費量をもっ

図 3 対象世帯の年間総エネルギー消費量

Fig. 3. Annual energy consumption of households.

表 1 各対象世帯の属性

Table 1. Attributes of households.

	People	Floor space(m ²)		People	Floor space(m ²)
①	4	165	No.1	5	92
②	4	122	No.2	4	65
③	4	136	No.3	4	78
④	4	130	No.4	4	90
⑤	5	135	No.5	4	78
⑥	3	140	No.6	4	99
⑦	4	120	No.7	3	90
⑧	2	135	No.8	3	91
			No.9	4	84
			No.10	4	80
			No.11	3	85
			No.12	4	76

図 4 電力需要量と給湯需要量の相関

Fig. 4. Correlations of annual electrical demand and annual hot water demand.

た世帯のデータがあることがわかる。図 3 と表 1 を比較すると、延床面積が年間エネルギー消費量に大きく影響していることがわかる。また、実際のデータがどの程度の幅で日々変化するかを示すために、世帯①の 1 月と 2 月における電力と給湯のエネルギー消費量を付録として例示する。

対象世帯毎に電力需要量と給湯需要量それぞれの日平均の相関を図 4 に示す。この図の中の熱電比とは（給湯需要 ÷ 電力需要）であり、電力需要に対する給湯需要の割合である。多くの世帯は熱電比 0.5~1.0 に分布している。日本建築学会実態調査データの世帯人数別全国平均⁽²⁾ではほぼ熱電比 0.7 のラインに沿って世帯人数が増えるにしたがって、電力・給湯需要量がともに増加しているが、それに対して本研究の対象世帯データは 0.7 のラインを中心として幅広く分布していることがわかる。

4. 提案運用手法のシミュレーション

〈4・1〉シミュレーション条件 今回用いる電力・都市ガスの料金体系を表 2 と表 3 に示す。全ての値において消費税込みであるとする。都市ガス会社の都市ガスの料金体系に関して、CGS を導入しないときは、都市ガス会社の「一般ガス供給約款」の料金を参考にし、CGS を導入した場合は「家庭用コージェネレーションシステム契約」の料金を参考に設定した。なお現在、住宅 CGS から系統への売電は行われていないが、今回は現在行われている業務用 CGS から系統への売電価格を参考に、世帯から系統への売電価格と仮定した。

エネルギー機器に関する設定値を表 4 と表 5 に示す。ただし、PEFC や貯湯槽容量は文献(3)において同世帯に対して数々のシミュレーションを行った結果、高い省エネルギー性を示していた容量値を用いた。それによって PEFC 容量については、図 3 に示されているように他世帯と比べて年間総エネルギー消費量の多い 3 世帯に限り 1.0kW、他世帯は 0.7kW となる。また今回は PEFC の部分負荷運転も考慮しているため、各出力値に対する部分負荷効率（発電、排熱）を表 5 に示す。

表 2 電力価格に関する設定値

Table 2. Constants concerning with electricity.

	Jul-Sep 8:00~22:00	Oct-Jun 8:00~22:00	Jan-Dec 22:00~8:00
Unit cost, Monthly unit cost [Yen/kWh, Yen/kW, Yen/month]	23, 0, 0		
Selling price[Yen/kWh]	6.3	4.7	2.7

表 3 ガス価格に関する設定値

Table 3. Constants concerning with city gas.

		Apr-Nov	Dec-Mar
Unit cost, Monthly unit cost [Yen/m ³ , Yen/month]	before introducing CGS	110, 1200	
	after introducing CGS	64, 2000	80, 2500

表 4 エネルギー機器に関する設定値

Table 4. Constants concerning with energy equipments.

		①, No1, No.2	other
PEFC Unit	Capacity[kW]	1.0	0.7
	Temperature of heated water[°C]	70	
	Start up energy[Wh]	600	
	Shut down energy[Wh]	225	
	Waiting energy[W]	10	
Heated water Storage Tank	Capacity[L]	200	
	Efficiency[%/30min]	99.7	
Boiler	Capacity[kW]	30	
	Efficiency[%]	80	

表 5 PEFC の部分負荷効率 (LHV)

Table 5. Part-load efficiency of PEFC.

Rated Output[W]	Output[W]	Electrical Generating Efficiency[%]	Heat Recovery Efficiency[%]
1000	300	29	24
	500	31	33
	750	32	38
	1000	33	41
700	250	29	23
	500	32	34
	700	33	39

〈4・2〉 シミュレーション結果 今回の提案アルゴリズムの達成度を評価するため、比較対象として最大ポテンシャルを考える。最大ポテンシャルとはあらかじめ需要データが全て既知であり、一次エネルギー消費量やコストを最小化するように運転パターンを決定した場合を指す。提案アルゴリズムの評価に用いる世帯ごとの PEFC 容量、貯湯槽容量、熱損失を考慮した上で、最適化プログラムを用いて一次エネルギー削減量の最小化とコスト最小化の理想状態をそれぞれ求めた。このとき用いたモデルを定式化したものは付録 2 として記す。ただし最適化計算時間の関係から、この最大ポテンシャルにおいては、提案アルゴリズムのシミュレーションにおいて考慮されている部分負荷による効率低下と起動停止エネルギーは考慮していないため、現実の最大ポテンシャルよりもやや大きめの値として算出される。また、日々の起動停止回数に対する制約も考慮してい

図 5 最大省エネルギーポテンシャルにおける一次エネルギー削減率

Fig.5. Reduction of primary energy consumption at maximum energy saving potential.

図 6 最大省エネルギーポテンシャルにおける一次エネルギー削減率の分布

Fig.6. Distribution of energy saving rate at maximum energy saving potential.

ない。

(1) オフライン最適化による最大ポテンシャル評価 まず、今回は対象世帯が 20 軒あるため、その中でもどの世帯が住宅用 CGS に適しているかを最大ポテンシャルによって評価する。省エネルギー性を最適化した最大省エネルギーポテンシャルにおける一次エネルギー削減率を図 5 に示す。ここで削減率の高い世帯から 7 軒、低い世帯から 7 軒をそれぞれ good と bad とし、残り 6 軒を normal と呼ぶこととする。また、どのようなエネルギー需要特性をもつ世帯が省エネルギー性の面から優れているかを図 4 上でマーク分けしたものを図 6 に示す。図 6 からわかるように、熱電比が大きい世帯ほど一次エネルギー削減率がよくなる傾向がみられる。これは電力需要に対して給湯需要がある程度大きければ、排熱が有効利用され省エネルギー性がよくなることに起因している。

同様に、経済性を最適化した最大経済ポテンシャルにおける料金削減額を図 7 に示す。全体的にばらつきはあるものの、給湯需要が多い世帯において料金削減額が多い傾向がみられる。これは、最大経済ポテンシャルにおいて基本的に PEFC は電力需要に追従して運転を行うため、結果的

図 7 最大経済ポテンシャルにおける料金削減率の分布

Fig. 7. Distribution of running cost saving rate at maximum economical potential.

図 8 最大省エネポテンシャルに対する提案アルゴリズムの達成度の分布

Fig. 8. Distribution of attainments for maximum energy saving potential.

に排熱を有効利用できるかどうか料金が削減額に影響しているためと考えられる。また電力需要が多ければ定格出力の大きい PEFC を導入しても、その定格出力を十分に活かして発電できるため、料金削減額も大きくなる。

(2) 提案アルゴリズムの評価 次に最大ポテンシャルに対する本提案アルゴリズムの達成度を省エネルギー性・経済性の両面から評価する。まず、最大省エネルギーポテンシャルに対する提案アルゴリズムの一次エネルギー削減量における達成度がどのようなエネルギー需要特性の世帯で優れているかを図 8 に示す。分布からわかるように、達成度は電力需要量の大きさに依存している傾向がある。これは本提案アルゴリズムにおいては電力需要が多いと、給湯需要の多くに PEFC の排熱を利用できるためである。また給湯需要量に対して電力需要量が多い（熱電比が低い）方が達成度をよくしている。実際の運転に電力追従運転を用いているため、多くの排熱が発生する熱電比の低い世帯が提案アルゴリズムに適している。

最大経済ポテンシャルに対する提案アルゴリズムの料金削減額における達成度の分布を図 9 に示す。この図からわかるように、給湯需要量が多い世帯ほど達成度が高い傾向

図 9 最大経済ポテンシャルに対する提案アルゴリズムの達成度の分布

Fig. 9. Distribution of attainments for maximum economical potential.

が見られる。経済性は PEFC が電力需要量に追従して運転する時間が長いほどよくなるが、給湯需要量が多いとそれを満たそうとして PEFC が長い間発電するため経済性がよくなる。世帯の需要特性を考慮したこれらの分析は、省エネルギー性・経済性が低い世帯に対してその性質を補うように運用手法のきめ細かい条件を変更することなどに利用できる。

ここで提案アルゴリズムによる省エネルギー効果を明確にするため、「完全電力追従運転」との比較を行う。「完全電力追従運転」とは、予想給湯需要量に関係なく常に電力負荷追従運転を行う運転方法である。この「完全電力追従運転」と提案運用手法における省エネルギー削減率を図 10 に示す。グラフからわかるように全ての世帯において、単純に「完全電力追従運転」するだけでなく提案運用手法を用いることで省エネルギー性の向上に役立っていることがわかる。世帯によってその効果は異なり、世帯 No. 1 の 0.2% の向上から世帯 No. 8 のように省エネルギー削減率が 4.1% 向上する場合もある。この向上は世帯 No. 8 のように給湯需要量が少ない世帯で大きい傾向がある。これは「完全電力追従運転」を行うと、給湯需要量が少ない世帯においては特に多くの排熱が有効利用しきれず廃棄されてしまい、提案アルゴリズムのように PEFC の運転を制御することで省エネルギー性が大きく向上するということを示している。

(3) 提案アルゴリズムに基づくイニシャルコストの分析 次に実際の導入に際して重要である経済性の面でより現実的な評価を行うため、図 9 で用いられているものと同じ結果の際の年間ランニングコスト削減額と最大経済ポテンシャルに対する提案アルゴリズムの達成度を併せて図 11 に示す。最大経済ポテンシャルにおける達成度とは、各世帯の最大経済ポテンシャルにおける料金削減額に対する、各世帯に提案アルゴリズムを適用したときの料金削減額の割合を指す。

まず最大経済ポテンシャルに対する達成度をみると、最低でも世帯 No. 8 の約 52% で、ほとんどの世帯で 70% 以上の

図 10 一次エネルギー削減率の比較（完全電力追従運転からの改善率）

Fig. 10. Comparison at the point of energy-saving rate.

図 11 年間ランニングコスト削減額と最大経済ポテンシャルに対する達成度

Fig. 11. Cost reduction and attainment for maximum economical potential.

達成度を示している。次にイニシャルコストを含めた評価を行うため、PEFC-CGSの耐用年数を10年とすると、今回は総機器コストが（年間ランニングコスト削減額×10）円以下であれば経済性の面からメリットがあることとなる。燃料電池の実用化では50万円を目標としている⁽⁸⁾ため、年間ランニングコスト削減額が5万円を超えている上位7世帯以外の世帯への導入には更に機器コストの低減が求められる。逆に、機器コストの低減が見られないうちにPEFC-CGSを導入する場合は、経済性の面からメリットを出すために予想給湯需要量以上に電力負荷追従運転させることも考えられる。最後に、年間ランニングコスト削減額と比較して最大経済ポテンシャルに対する達成度をみると、世帯No. 10やNo. 9またはその他数世帯で80%以上の達成度を示しているにもかかわらず、年間ランニングコスト削減額は4万円以下となっており、システムの機器コストを含めた経済性の点からは導入の可能性が低いといえる。

5. むすび

本論文では、PEFCを用いた住宅用CGSにおいて、負荷予測を行う学習運転を用いた運用手法を提案し、20世帯で実測された日々のエネルギー需要データに適用したシミュ

レーションを行い、世帯のエネルギー需要特性と比較しながら省エネルギー性・経済性の面から評価、検討した。本論文によって得られた結論を以下にまとめる。

(1) 対象世帯のエネルギー需要特性と最大ポテンシャルにおける一次エネルギー削減率や料金削減率の関係を検討した結果、熱電比が高い世帯で省エネルギー性が高く、給湯需要量の多い世帯で経済性が高い傾向があることがわかった。

(2) 対象世帯のエネルギー需要特性と提案アルゴリズムの最大ポテンシャルに対する達成度の関係を検討すると、電力需要量が多い世帯で省エネルギー性の達成度が高く、給湯需要量の多い世帯で経済性の達成度が高くなることがわかった。

(3) 提案アルゴリズムは常に電力追従運転を行った場合と比べて、一次エネルギー削減率を0.2%～4.1%上昇させ、この運用手法を導入することで排熱がより有効利用されることがわかった。

(4) 提案アルゴリズムでは最大経済ポテンシャルの52%～90%を達成した。ただしエネルギー需要が比較的少ない世帯の中には、イニシャルコストも含めた場合実際にCGSの導入可能性が低い世帯があることが分かった。

謝 辞

本研究は阪大フロンティア研究機構の環境システムプロジェクト「環境低負荷型ユーティリティシステムの創生」（プロジェクトリーダー辻穀一郎教授）の一環として計測されたデータを用いている。計測調査に協力いただいた世帯、並びに京阪奈地区の関係各位に謝意を表する。

（平成19年3月13日受付，平成19年9月7日再受付）

文 献

- (1) H. Sugihara, T. Kato, Y. Suzuoki, and K. Tsuji: "A Daily Start and Stop Algorithm for Residential Fuel Cell Systems considering Information Setting of Day-ahead Hot Water Demand", *IEEE Trans. PE*, Vol.124, No.5, pp.705-713 (2004-5) (in Japanese)
杉原英治・加藤丈佳・鈴置保雄・辻穀一郎:「翌日給湯負荷の情報設定を考慮した住宅用燃料電池の起動停止アルゴリズム」, 電学論 B, **124**, 5, pp.705-713 (2004-5)
- (2) Institute for Building Environment and Energy Conservation: "Reports about the results of research on introducing residential fuel cells" (2006) (in Japanese)
(財) 建築環境・省エネルギー機構: 住宅用燃料電池の導入に関する技術研究成果報告会 (2006)
- (3) K. Masumoto, K. Maeda, H. Akihito, and K. Takimoto: "Operation Control of Residential Gas Cogeneration System", Proc. of the 23rd Annual Meeting of Japan Society of Energy and Resources, pp.9-12 (2004) (in Japanese)
榊本幸嗣・前田和茂・早野彰人・滝本桂嗣:「家庭用ガスコージェネレーションシステムの運転制御方法について」, 第23回エネルギー・資源学会研究発表会, pp.9-12 (2004)
- (4) R. Inada, H. Sugihara, O. Saeki, and K. Tsuji: "Evaluation of Introducing Micro-Cogeneration System to Residential Houses Based on the Monitored Daily-Basis Energy Demand Data", Proc. of the 22nd Conference on Energy, Economy, and Environment (2006) (in Japanese)
稲田 亮・杉原英治・佐伯 修・辻穀一郎:「実測データに基づく日々のエネルギー需要変化を考慮した住宅用コージェネレーションの導入評価」, 第22回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2006)
- (5) H. Kuroki, S. Shimizu, H. Takagushi, and T. Watanabe: "Effective Operation Methods and Energy Conservation Effect of Housing Polymer Electrolyte

Fuel Cell Co-generation Systems", *J. Environ. Eng., AIJ*, No.610, pp.67-73 (2006-12) (in Japanese)

黒木 洋・清水章太郎・高口洋人・渡辺俊行:「家庭用固体高分子型燃料電池 CGS の運転方法と導入効果」, 建築学環境系論文誌, No.610, pp.67-73 (2006-12)

- (6) T. Kato, N. Hino, S. Kasugai, and Y. Suzuoki: "Economic Assessment of Home Co-generation System with PEFC based on Survey of Hot-water Demand", *IEEE Trans. PE*, Vol.123-B, No.12, pp.1513-1520 (2003-12) (in Japanese)

加藤文佳・日野紀良・春日井志織・鈴置保雄:「温水需要の実測に基づく住宅用コージェネレーションシステムの経済性評価」, 電学論 B, 123, 12, pp.1513-1520 (2003-12)

- (7) Y. Yamagishi, H. Sugihara, O. Saeki, K. Tsuji, and S. Kawasaki: "An operational algorithm for Residential cogeneration system Based on the Monitored Daily-Basis Energy Demand", Proc. of the 25th Annual Meeting of Japan Society of Energy and Resources, pp.223-226 (2008) (in Japanese)
山岸由佳・杉原英治・佐伯 修・辻穀一郎:「日々のエネルギー需要実測データに基づく住宅用コージェネレーションシステムの運用手法」, 電力技術・電力系統技術合同研究会, pp.223-226 (2006)

- (8) A Study Group Working on Strategy for Fuel Cell Commercialization: A Report of Study Group Working on Strategy for Fuel Cell Commercialization (2001) (in Japanese)

燃料電池実用化戦略研究会: 燃料電池実用化戦略研究会報告 (2001)

付 録

1. 電力・給湯消費量の日毎の変化

付図 1 電力・給湯消費量における日毎の変化 (戸建①)
app. Fig. 1. Change in electricity and hot water consumption Day by day.

2. 最大ポテンシャルを求めるモデルの定式化

〈一次エネルギー消費量, ランニングコストの算出式〉

$$Y_{pri} = \sum_{d,t} (E_{d,t}^G \cdot p_{d,t} + G_{d,t}^P + G_{d,t}^B + G_{d,t}^C) \dots\dots\dots (付 1)$$

$$Y_{cost} = \sum_{d,t} \{E_{d,t}^G \cdot c_{d,t}^E + (G_{d,t}^P + G_{d,t}^B + G_{d,t}^C) \cdot c_{d,t}^G - E_{d,t}^{sell} \cdot c_{d,t}^{sell}\} \\ + C_m^E + C_m^G \dots\dots\dots (付 2)$$

[外生変数]

$c_{d,t}^E, c_{d,t}^G$: 電力・都市ガスの従量料金, C_m^E, C_m^G : 電力・都市ガスの基本料金, $p_{d,t}$: 一次エネルギー換算係数

[内生変数]

$E_{d,t}^G$: 系統からの発電量, $G_{d,t}^P, G_{d,t}^B, G_{d,t}^C$: PEFC, 補助ボイラ, 厨房での都市ガス消費量

[添字・肩字]

m : 月, d : 日, t : 時刻, E : 購入電力, G : 都市ガス,

E^{sell} : 販売電力, P : PEFC, B : 補助ボイラ, C : 厨房
〈本モデルの目的関数と制約条件〉

[目的関数]

$$\min Y_{pri} \text{ or } Y_{cost}$$

[制約条件]

$$E_{d,t} = \eta_{pe} \cdot G_{d,t}^P + E_{d,t}^G - E_{d,t}^{sell} \dots\dots\dots (付 3)$$

$$HW_{d,t} = \eta_{tank} \cdot T_{d,t-1} + \eta_{phw} \cdot G_{d,t}^P \\ - T_{d,t} - D_{d,t} + \eta_B \cdot G_{d,t}^B \dots\dots\dots (付 4)$$

$$G_{d,t}^P \cdot \eta_{pe} \leq Cap^P \dots\dots\dots (付 5)$$

$$G_{d,t}^B \cdot \eta_B \leq Cap^B \dots\dots\dots (付 6)$$

$$T_{d,t} \leq Cap^T \dots\dots\dots (付 7)$$

[外生変数]

η^* : 機器効率, $E_{d,t}$: 電力需要, $HW_{d,t}$: 給湯需要, Cap^* : 機器容量

[内生変数]

$T_{d,t}$: 貯湯量, $D_{d,t}$: 温水排水量

[添字・肩字]

P_e : PEFC の発電, P_{hw} : PEFC の排熱回収, T : 貯湯槽,

3. 追加条件の適用頻度

付図 2 追加条件の適用回数

app. Fig. 2. A number of applications of additional condition.

山 岸 由 佳 (学生員) 1983 年 11 月 14 日生。2006 年 3 月大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻入学, 現在に至る。主として, 住宅用コージェネレーションシステムの運用手法の研究に従事。

杉原英治（正員） 2000年3月北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年4月大阪大学大学院工学研究科リサーチアソシエイト，同助手を経て，2006年3月同助教授となり，現在に至る。博士（工学）。主に電力系統及びエネルギーシステムのモデル分析に関する研究に従事。エネルギー・資源学会会員。

佐伯修（正員） 1987年3月大阪大学工学部電気工学科卒業。1989年3月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。現在，大阪大学大学院工学研究科助手。主として電力・エネルギーシステムの最適化手法に関する研究に従事。システム制御情報学会，エネルギー・資源学会，IEEEなどの会員。

辻毅一郎（正員） 1968年3月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。1973年6月Case Western Reserve 大学大学院システム工学専攻博士課程修了。同年8月大阪大学工学部電気工学科助手，同講師，同助教授を経て，1988年12月同教授。2007年8月大阪大学理事となり，現在に至る。この間，一時国際応用システム解析研究所（IIASA）研究員。Ph.D.。主に応用システム分析に関する研究に従事。IEEE，エネルギー・資源学会，システム制御情報学会，計測自動制御学会会員。