Bulletin of the JSME
日本機械学会論文集
Transactions of the JSME (in Japanese)
Vol.81, No.821, 2015

集合住宅を対象とした燃料電池コージェネレーションシステム普及シナリオの作成

木下 裕介[*1], 中村 恭明[*2], 毛笠 明志[*3], 久角 喜徳[*4]
堀 司[*3], 福重 真一[*5], 梅田 靖[*6]

Scenario building on the diffusion of fuel cell cogeneration systems for apartment houses

Yusuke KISHITA[*1], Yasuaki NAKAMURA[*2], Akeshi KEGASA[*3], Yoshinori HISAZUMI[*4], Tsukasa HORI[*3], Shinichi FUKUSHIGE[*5] and Yasushi UMEDA[*6]

[*1] Center for Environmental Innovation Design for Sustainability (CEIDS), Osaka University
2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan
[*2,*5] Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan
[*3,*4] Osaka Gas Joint Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan
[*6] Department of Precision Engineering, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Received 10 October 2014

Abstract

Fuel cell cogeneration is one of promising energy-saving technologies in pursuit of a sustainable society. However, it is unpredictable how many fuel cell cogeneration systems will be diffused since there are many future uncertainties, such as people's lifestyles and national energy policies. As an approach to tackling with this problem, this paper proposes a method for describing scenarios to analyze the diffusion of residential energy systems, such as fuel cell cogeneration systems. We develop a simulation model for estimating the diffusion of residential energy systems, in which conjoint analysis is undertaken to analyze consumers' preferences. In a case study, several scenarios are described for analyzing the diffusion of solid oxide fuel cell (SOFC) cogeneration systems for apartment houses, where the region of interest is Kansai Area, Japan from 2013-2030. The described scenarios differ in terms of nuclear energy policies. The results show that the number of fuel cell cogeneration systems in 2030 reaches 147-157 thousands depending on the share of nuclear power. In addition, it is revealed that monthly utility cost has a much larger impact on SOFC diffusion than CO_2 emissions. Future work includes further what-if analyses of the scenarios to identify factors that would give a significant influence on SOFC diffusion.

Key words : Residential energy system, Scenario, Fuel cell cogeneration, Product diffusion, Conjoint analysis

1. 緒　　言

低炭素社会の実現のためには集中型エネルギーと分散型エネルギーを適切に組み合わせたエネルギーシステムの構築が必要とされているが（エネルギー・資源学会，2010），特に排熱の有効利用による省エネ性の向上と非常時における自家発電能力の観点からは，家庭用燃料電池コージェネレーションシステムが有望な分散型エネルギー機器のひとつであると言われている．これまでに，家庭用燃料電池の導入によるエネルギーシステム全体の

No.14-00250 [DOI: 10.1299/transjsme.14-00250], J-STAGE Advance Publication date : 10 December, 2014
[*1] 正員，大阪大学環境イノベーションデザインセンター（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）
[*2] 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻
[*3] 正員，大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻大阪ガス共同研究講座
[*4] 正員，フェロー，大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻大阪ガス共同研究講座
[*5] 正員，大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻
[*6] 正員，フェロー，東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1）
E-mail of corresponding author: kishita@ceids.osaka-u.ac.jp

© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

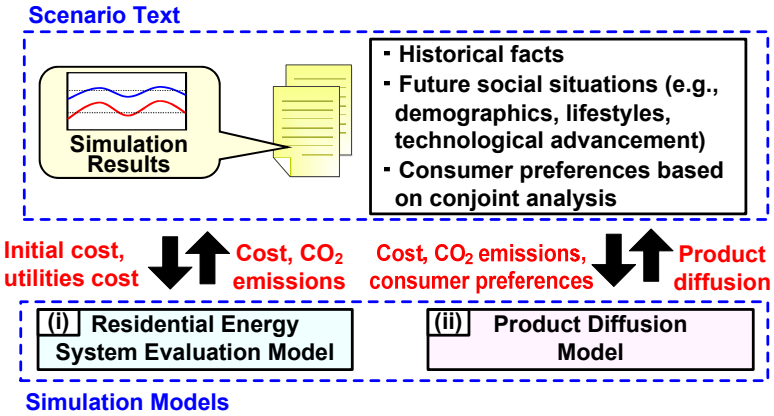


Fig. 1　Approach to describing diffusion scenarios of residential energy systems

省エネ効果を評価した既存研究は数多く存在する（山口他，2011，涌井，横山，2012）．しかしながら，現在のところ普及の初期段階にあると考えられる家庭用燃料電池コージェネレーションシステムが，将来的に社会でどの程度普及しうるかを分析した研究はほとんど行われていない．

製品の普及推計に関しては，これまでに数多くの研究が行われてきた．Bass（1969）は，耐久消費財の将来普及量を過去の販売実績に基づいて予測するための汎用的な計算式を提案した．松本他（2008）は Bass のモデルを拡張する形で，消費者選好の影響を考慮した新製品の普及モデルを提案した．そのほかにも，省エネ製品や太陽光発電パネル（photovoltaics; PV）を対象とした普及推計のために様々な数理モデルが提案されている（Kemp and Volpi，2008，Kim and Kara，2014，Zhai and Williams，2012）．Kemp and Volpi（2008）は省エネ製品に着目して普及分析に関する様々な既存文献を調査し，省エネ製品の普及は一般的な他の製品と同様に S 字曲線に従うであろう点を指摘した．Kim and Kara（2014）は，S 字曲線を描くロジスティックス関数を用いた製品普及予測と製品設計の環境影響評価を統合化することにより，製品の普及が社会の環境性に及ぼす影響を評価するための手法を提案した．Zhai and Williams（2012）はファジィロジック（fuzzy logic）モデルを用いて，消費者が家庭用太陽光発電パネル（PV）を購入する確率を予測する手法を提案している．その一方で，一般に燃料電池のような新しい製品の普及を予測するときの課題として，普及に影響を与える様々な要因（例えば，初期費用や性能向上に関する技術進歩，消費者のライフスタイル，経済情勢，法制度など）の将来変化が予測困難であることが挙げられる．しかし，このような予測困難な要因と新しい製品の普及の関係を分析するための手法は，既存研究において十分に形式化されているとは言えない．

この課題に対して，本論文では起こりうる複数の将来社会を想定することにより，家庭用エネルギーシステムの普及を分析するためのシナリオ（普及シナリオ）の作成手法を提案する．普及シナリオの作成においては，消費者選好に基づいて製品普及量を推計するために製品普及予測モデル（松本他，2008）を利用する．消費者ごとに異なる選好データを取得するために，各種の家庭用エネルギーシステム（例えば，燃料電池コージェネレーションやオール電化など）の選好に関する消費者アンケート調査を実施する．ケーススタディでは，これまでにあまり燃料電池が普及しておらず，将来的に普及の可能性がある集合住宅を対象とする．具体的には，2030 年の関西地域の新設分譲マンションを対象として，家庭用固体酸化物形燃料電池（SOFC）の普及シナリオを作成する．

2.　家庭用エネルギーシステム普及シナリオの作成

2・1　アプローチ

本論文では家庭用エネルギーシステムの普及シナリオを作成するためのアプローチを図 1 のとおり提案する．つまり，ライフスタイルの変化や技術進歩といった将来社会の想定に基づいて家庭用エネルギーシステムの普及量を推計するために，(i) 家庭用エネルギーシステム評価モデル，(ii) 製品普及予測モデル（松本他，2008）を利用する．モデル (ii) では，2.2 節で述べるように，アンケート調査を利用したコンジョイント分析（君山，2010）

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

に基づいて家庭用エネルギーシステムの選択に関する消費者選好を定量化することにより，家庭用エネルギーシステムの長期的な普及量を計算する．一般にコンジョイント分析では，いくつかの属性（例えば，イニシャルコスト，ランニングコストなど）と各属性に対する重み係数を用いて消費者選好を表現する．本論文では，属性として各種のエネルギーシステムの経済性と環境性を取り上げ，それらの評価値はモデル（i）を用いて計算する．本論文では経済性の代表指標としてイニシャルコストとランニングコストを，環境性の代表指標として CO_2 排出量を用いる．図 1 に示すとおり，モデル（i）の出力結果（システムのランニングコスト，イニシャルコストと CO_2 排出量）は，モデル（ii）で消費者選好が普及に与える影響を評価するための入力条件として利用する．さらに，図 1 のアプローチに基づいて家庭用エネルギーシステムの普及シナリオを作成するための手順を提案する．

2・2　製品普及予測モデル（松本他，2008）

製品の将来普及に関するモデルはこれまでに数多く提案されているが，本論文では，長期的な製品普及を計算するためによく用いられる Bass モデルに，消費者選好モデルを統合した製品普及予測モデルを利用する．Bass モデルは，製品の未購入者のうちで t 年に新製品を購入する者を，自らの意思で購入する「革新者」と，普及の様子を見ながら購入を決定する「模倣者」に分類する．いま，Bass モデルで普及計算の対象とする新製品（対象製品）の最終的な普及量を一定値 N^{sat}，革新者係数と模倣者係数をそれぞれ p，r，シミュレーションの初期年を t_0 とすると，製品普及予測モデルでは，N^{sat} に対する t 年時点の普及率 $n(t)$を次式で表す．

$$dn(t)/dt = \{(p + r \cdot n(t)) \cdot (1 - n(t))\} \cdot H(t)/H(t_0) \tag{1}$$

ただし，t 年時点の普及率 $n(t)$は，t_0〜t 年までの対象製品の累積普及量 $S(t)$を用いて次式で定義される．

$$n(t) = S(t)/N^{sat} \tag{2}$$

文献（松本他，2008）にあるように，式（1）のパラメータ p，r は，同一製品もしくは類似製品の過去の普及実績に基づいて同定する．式（1）の $H(t)/H(t_0)$は消費者選好が普及に及ぼす影響を表現する項であり，$H(t)$を以下の手順により計算する．

1.　対象製品と競合製品に対する消費者選好 $U_i(k)$の計算

製品種類を k としたとき，対象製品（$k=k_0$）とそれに競合する製品（群）（$k\neq k_0$）の両方に対して，消費者 i の選好（効用）$U_i(k)$を次式により計算する．

$$U_i(k) = \sum_j w_{ij} \cdot s_j(k) \tag{3}$$

ここで，$s_j(k)$は製品種類 k に対する属性（選好要素）j の水準，w_{ij} は消費者 i の属性 j に対する重み係数である．式（3）の属性の水準 $s_j(k)$は 2・3 節で述べる家庭用エネルギーシステム評価モデルを用いて，重み係数 w_{ij} はアンケート調査を通したコンジョイント分析により同定する．

2.　消費者選好の分布に基づく $H(t)$の計算

コンジョイント分析の結果に基づき，$U_i(k_0) > U_i(k\neq k_0)$を満足するような消費者の割合（つまり，対象製品の購入意向がある消費者の割合）を式（3）により計算する．この割合を t 年と t_0 年について計算した結果を，それぞれ $H(t)$，$H(t_0)$と定義する．

2・3　家庭用エネルギーシステム評価モデル

本モデルでは，様々な種類の家庭用エネルギーシステムの経済性と環境性を評価するために，家庭のエネルギーシステムの要素機器を空調，給湯，厨房，発電機器，その他の 5 種類に分類し，それらの要素機器間の関係を

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

Table 1　Alternative elements of residential energy systems

Category	Alternative element equipment	Reference
Air-conditioning system	Air-conditioner	Hirano, et al. (2011), Goto, et al. (2013)
	Desiccant ventilation system	
Water heater	Gas water heater	Kishita, et al. (2011)
	CO_2 heat pump water heater	
	Solar water heater	The Japan Gas Association (2010)
Cooking stove	Gas cooking stove	n/a
	IH cooking stove	
Power-generating product	Photovoltaics (PV)	Tsuchiya (2012)
	Solid oxide fuel cell (SOFC)	Hori, et al. (2013)
Others	Other home appliances	n/a

汎用的なプロセスシミュレータである VMGSim（Virtual Materials Group Inc., 2013）を用いて表現する．本研究で対象とする要素機器を表 1 に示す．VMGSim 上で任意の要素機器を組み合わせたシステムを構築することによって，システム全体の物質およびエネルギーのバランスに基づいてそのシステムの性能を評価する．本論文では，各要素機器を表 1 に示した文献に基づいてモデル化し，それらのモデル式から得られたシステム全体の電力（ガス）消費量に単位電力（ガス）消費量あたりの価格と CO_2 排出量を掛け合わせることによって，システム全体のランニングコストと CO_2 排出量を評価する．ただし，ガスコンロと IH クッキングヒータのガス消費量および電気消費量は，厨房需要を機器効率で除して得る．また，本研究ではその他家電についてはモデル化せず，その電力消費量を外生的に与える．

要素機器間の制約条件式は VMGSim 上に記述可能である. 例えば, 太陽熱温水器による給湯が存在する場合に, ある世帯の温水需要をちょうど満足させるようにガス給湯器を運転させる場合が挙げられる.

2・4　家庭用エネルギーシステム普及シナリオの作成手順

本論文では，以上で述べた 2 つのモデル，すなわち，製品普及予測モデルと家庭用エネルギーシステム評価モデルを用いることにより, 家庭用エネルギーシステム普及シナリオの作成手順を次の 6 つのステップで定義する.

1. 問題設定: 普及シナリオの作成目的，普及推計の対象とする家庭用エネルギーシステム（以下，対象システムと呼ぶ）の種類（例えば，ガスコージェネレーションシステム，オール電化システムなど），時間軸，対象地域を設定する.
2. アンケート調査の実施: 製品普及予測モデルで用いる消費者選好データを収集するために，アンケート調査を実施し，その結果をコンジョイント分析することにより式（3）を決定する.
3. Bass モデルのパラメータ設定: 製品普及予測モデルを用いて対象システムの普及量を推計するために，Bass モデルの 3 つのパラメータ（最終普及台数 N^{sat}，革新者係数 p，模倣者係数 r）の値を設定する.
4. 将来社会状況の想定: 家庭用エネルギーシステムの普及に大きな影響を及ぼしうる要因に基づいて，複数の将来社会状況を想定する．ここで想定した将来の社会状況の一単位をサブシナリオと呼ぶ.
5. 家庭用エネルギーシステムの評価: 対象システム，および，消費者にとって対象システムの比較対象となりうる家庭用エネルギーシステムの種類をいくつか想定する．各サブシナリオにおいて，想定した各システムの経済性と環境性を評価する.
6. 家庭用エネルギーシステムの普及推計: ステップ 2～5 の結果に基づいて, 各サブシナリオにおける対象システムの普及量を推計する.

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

Table 2　Number of respondents according to acceptable initial cost and cost payback time (792 samples)

Acceptable initial cost (thousand JPY)	Acceptable cost payback time (year)							
	1	3	5	7	10	12	15	20
Consumers who will not buy energy-saving products	108							
250	30	15	16	14	10	5	0	4
500	1	14	48	18	33	7	0	1
750	0	3	23	26	26	13	4	6
1,000	1	6	41	27	86	15	10	1
1,500	1	0	16	15	27	27	8	4
2,000	1	0	3	6	15	14	5	2
2,500	0	0	1	2	6	4	3	2
3,000	0	0	0	1	5	3	2	7

Table 3　Conjoint analysis results based on the questionnaire survey (792 samples)

Attribute j		Weighting factor w_{ij}	
		Mean value of respondents	Unit
Type of residential energy system	BaU	0.680	point
	Cogeneration	-0.288	point
	All-electric	-0.392	point
Initial costs		-0.0150	point/10k JPY
Monthly running costs (utility and maintenance costs)		-0.2824	point /thousand JPY
Area required for installation		-0.0971	point/m^2
Daily CO_2 emissions		-0.0035	point/kgCO_2

3.　家庭用エネルギーシステム導入に関する消費者アンケート調査

本アンケート調査では，消費者が集合住宅を購入する場合の家庭用エネルギーシステムに対する選好を調査することを目的とした．調査にはインターネットを利用し，集合住宅の購入意向を持った関西 2 府 4 県に在住の 20～60 歳代の一般消費者を対象とした．ここでは，調査対象者を絞り込むためのスクリーニング調査（調査期間は 2013 年 1 月 4 日～8 日，有効回答数は 41,661）と本調査（同 2013 年 1 月 15 日～17 日，有効回答数は 792）をそれぞれ実施した．本調査において現在利用中の家庭用エネルギーシステムを尋ねたところ，全体の 82.4%に相当する 653 人が従来システム（電力とガスの併用），全体の 10.9%に相当する 86 人がオール電化システムを利用しており，その他のシステムを利用または不明と回答した消費者が 53 人（6.7%）であった．以下では，本調査で得られた 792 件のサンプルを対象とした分析結果を示す．一般に回答者の属性（性別，年齢，収入等）に応じて選好特性は異なるが, 本分析では簡単のため, 本調査で回収した 792 件のサンプルを等質な母集団として扱った．

消費者意識調査として，省エネルギー機器を購入する際の初期費用に対する支払意思額と投資回収年数の最大許容年数を尋ねた結果を表 2 に示す．例えば，本論文のケーススタディで対象とする家庭用固体酸化物形燃料電池（SOFC）のシステム全体の初期費用が 100 万円まで下がり，かつ，投資回収年数が 5 年まで短くなると仮定した場合，全消費者のうち最大で 45.2%（=358/792，表 2 の赤枠で囲まれた範囲に対応する）が潜在的に SOFC システムを購入する可能性がある．一方で，全体の 13.6%（=108/792）の消費者には省エネルギー機器の購入意向が無いことも明らかとなった．

アンケート調査では，付録 A に示した設問を用いてコンジョイント分析を実施した．コンジョイント分析から得られた効用値の重み係数 w_{ij} の全サンプル 792 件に対する平均値を表 3 に示す．式 (3) との対応関係で言えば，

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

Table 4　Components of residential energy systems (Nakamura, et al., 2013)

Type	Constituent elements and their performance in 2030 assumed in the case study
(a)BaU system	• Air-conditioning Equipment: Air-conditioner (cooling & heating duty: 2.2kW, COP: 4.2-4.9) • Water heater: Gas water heater (maximum heating duty: 42kW, conversion efficiency: 95%HHV) • Cooking stove: Gas cooking stove (3.0kW×2) • Other home appliances
(b)SOFC system	• Air-conditioning equipment: Desiccant ventilation system (ventilation capacity: 100m^3/h), air-conditioner (cooling & heating duty: 2.2kW, COP: 4.2-4.9) • Water heater: Gas water heater (maximum heating duty: 42kW, conversion efficiency: 95%HHV), solar water heater: (hot water flow: 25L/day/household, conversion efficiency: ~60%) • Cooking stove: Gas cooking stove (3.0kW×2) • Power-generating products: SOFC (rated output: 700W, conversion efficiency: 50%HHV), photovoltaics (PV) (installed capacity: 0.5kW/household, conversion efficiency: 25%) • Other home appliances
(c)All-electric system	• Air-conditioning Equipment: Air-conditioner (cooling & heating duty: 2.2kW, COP: 4.2-4.9) • Water heater: CO_2 heat pump water heater (heating duty: 4.5kW, COP: 3.0-4.8) • Cooking stove: IH cooking stove (2.5kW×2) • Power-generating products: PV (0.7kW/household, conversion efficiency: 25%) • Other home appliances

消費者 i は回答者 792 名の個々のサンプルを表し，属性 j は表 3 に示した 5 つの属性，すなわち，家庭用エネルギーシステムの種類，同システムの導入に必要となる初期費用，同システムの月々の光熱費と維持費，同システムの導入に必要な面積，同システムの 1 日当たり CO_2 排出量を表す．属性の中に CO_2 排出量を加えた理由は，消費者の環境意識が家庭用エネルギーシステムの選択に及ぼす影響を分析するためである．また，回答者が選択可能な家庭用エネルギーシステムは，表 3 および付録 A の図 A に示した 3 種類（従来（BaU; Business as Usual）システム，ガスコージェネレーション，オール電化）を設定した．

式（3）を用いた効用値の計算例を以下で述べる．説明のために，ある一人の消費者 i が持つ重み係数 w_{ij} が表 3 に示した平均値だと仮定する．さらに，5 つの属性に対する水準として，家庭用エネルギーシステムの種類をガスコージェネレーションシステム（k=k_1 とおく），初期費用を 300 万円，月々の光熱費・維持費を 10.0 千円，導入に必要な面積を 2.0m^2，1 日当たり CO_2 排出量を 6.0kgCO_2 と仮定する．この場合，その消費者 i のガスコージェネレーションシステム k_1 に対する効用値は以下になる．

$$U_i(k_1) = -0.288 - 0.0150 \times 300 - 0.2824 \times 10.0 - 0.0971 \times 2.0 - 0.0035 \times 6.0 = -7.83 \tag{4}$$

式（4）の例では，効用値に対する寄与度が最も大きな属性は初期費用，二番目に大きな属性は月々の光熱費・維持費となる．

4.　関西地域の集合住宅を対象とした SOFC 普及シナリオの作成

4・1　シナリオの問題設定

ケーススタディとして，2013～2030 年度の期間において，関西 2 府 4 県の新設分譲マンションに導入されうる SOFC 普及台数を分析するためのシナリオを描いた．シナリオの作成手順は 2・4 節に従ったが，ステップ 2 のアンケート調査には 3 節で示した結果を利用した．本シナリオでは，消費者は新設分譲マンションを購入する際に表 4 に示した代表的な 3 種類の家庭用エネルギーシステム，すなわち，(a) 従来（BaU）システム，(b) SOFC システム，(c) オール電化システムのうちいずれかひとつを選択するものと想定した．各消費者は 3 節で述べた 5 つの属性のもとで計算した効用値に基づいて，システム（a）～（c）のいずれかを選択することを仮定した．このとき，システム（a）～（c）に対応する「家庭用エネルギーシステムの種類」は，それぞれ 3 節のアンケート調査（図 A 参照）における従来システム，ガスコージェネレーションシステム，オール電化システムとした．つまり, 本ケーススタディではガスコージェネレーションシステムの一種として (b) SOFC システムに着目した．本シナリオでは簡単のために，一旦（b）SOFC システムを選択した消費者による機器の更新，および，システム（a）または（c）への乗り換えを考慮しないものとした．

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

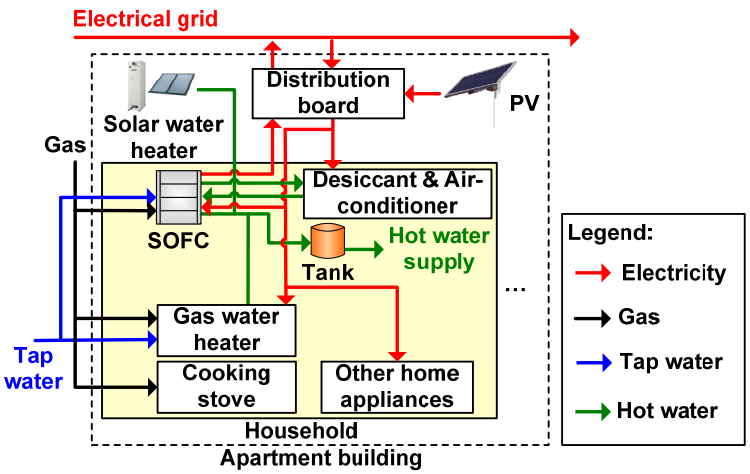


Fig. 2　Configuration of SOFC system

先行研究（中村他，2013）において，著者らは集合住宅向け家庭用エネルギーシステムの代表例として表 4 に示す 3 種類のシステム（a）～（c）の各モデルを VMGSim 上に構築した．各システム要素の 2030 年時点の性能は，先行研究（中村他，2013）で設定した表 4 の条件を利用した．モデル化の例として，図 2 にシステム（b）の機器構成図を示す．システム（b）では，系統電力とガスを併用する（a）従来システムの構成要素に加えて，発電機器として SOFC と PV を設置するとともに，省エネ性向上のために太陽熱温水器と貯湯タンクを導入している．システム（b）では夏期でも SOFC の排熱を有効利用するために，換気および除湿用のデシカント空調システムを導入することを想定した．

4・2　Bass モデルのパラメータ設定

本節では，各種の統計データに基づいて式（1），（2）のパラメータ N^{sat}，p，r の値を設定する．

（1）　SOFC の最終普及台数 N^{sat} の設定

本ケーススタディでは，式（2）における SOFC の最終普及量 N^{sat} を，2050 年時点の SOFC 累積普及台数と想定した．すなわち，2050 年には SOFC の市場がすでに飽和していると仮定した．このとき，N^{sat} を決定するために，関西 2 府 4 県の新設分譲マンションの累積着工戸数（2013～2050 年度）を以下のように推計した．

1970～2012 年度の世帯数と新設分譲マンション着工戸数（国土交通省，2013）の統計データより，世帯数 x（千世帯）と新設分譲マンションの市中ストック（=累積着工戸数-累積喪失ストック戸数）y（千戸）の間には次の相関関係がある（図 3 参照）．

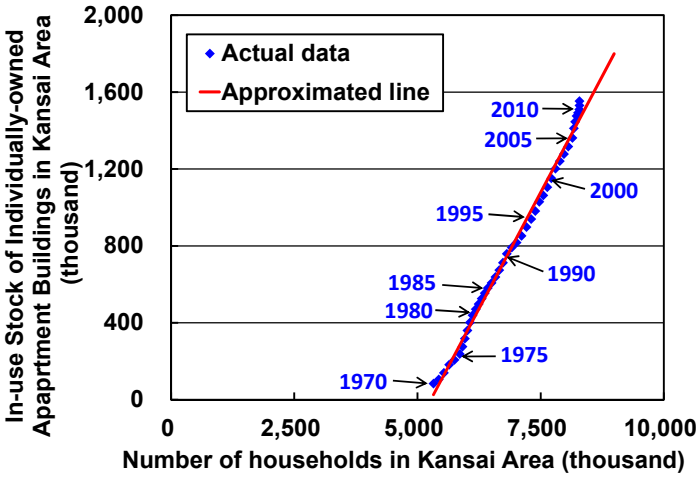


Fig. 3　Historical data of in-use stocks of apartment buildings in the Kansai area

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

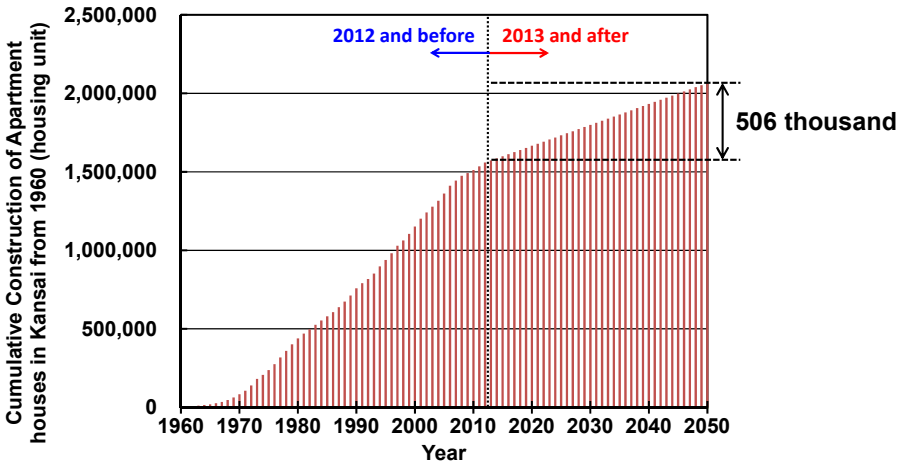


Fig. 4　Projection of the cumulative construction of apartment houses in the Kansai area from 1960-2050

$$y = 0.480x - 2530 \tag{5}$$

式（5）と将来世帯数の推計（国立社会保障・人口問題研究所，2009）から，図 4 のとおり 2013～2050 年度の累積着工戸数を予測した．ここで，2050 年の関西 2 府 4 県の世帯数は 673 万世帯である（国立社会保障・人口問題研究所，2009）．また，小松（2008）によると 2005 年時点で共同住宅の平均寿命は 43～51 年であることから，本論文では分譲マンションの平均寿命を 45 年と想定して喪失ストック戸数を計算した．図 4 によると，2013～2050 年度の新設分譲マンション累積着工戸数は 50.6 万戸（=206.5 万戸-155.9 万戸）である．ここで，本ケーススタディでは簡単化のために，2013～2050 年度における毎年の新設分譲マンション着工戸数は一定であると仮定した．

仮に 2050 年までに，SOFC システムの初期費用が 100 万円まで下がり，かつ，投資回収年数が 5 年まで短くなる場合を想定すると，3 節の結果より全消費者の 45.2%が潜在的に SOFC を購入しうる．これらの初期費用や投資回収年数は，著者らが技術ロードマップ（NEDO，2009，2010）における想定を 2050 年まで外挿することによって想定した．この前提のもとで，N^{sat} を 22.9 万台（=50.6 万台×45.2%）と設定した．また，各年における SOFC の普及台数は，その年の新設分譲マンション着工戸数を超えないという制約条件を与えた．

（2）　革新者係数 p と模倣者係数 r の設定

2013 年時点では，家庭用 SOFC の販売実績データはほとんど取得できない．そのため，類似製品として（I）潜熱回収型高効率ガス給湯器と（II）CO_2 ヒートポンプ給湯器の 2 通りの普及実績に基づいて，p と r の係数をそれぞれ推定した．本ケーススタディでは，(I)と(II)の 2 つのケースに対してそれぞれ SOFC の普及台数を推計する．それぞれの製品の普及実績に沿って回帰分析を実施した結果，以下の値を得た．

- ケース（I）潜熱回収型高効率ガス給湯器: $p = 0.0111, r = 0.154$
- ケース（II）CO_2 ヒートポンプ給湯器: $p = 0.00536, r = 0.294$

4・3　SOFC 普及シナリオの前提条件

4・3・1　社会状況の想定

SOFC 普及シナリオを作成するために，2030 年の社会状況を想定した．家庭用エネルギーシステムの普及には様々な要因が関係するが，その中で最も影響を及ぼす要因のひとつが国のエネルギー政策である．本ケーススタディでは，国のエネルギー政策と関連が深い原発依存率を軸としてエネルギー・環境会議（2012a）が立案したシナリオに基づき，表 5 のように 2030 年の社会状況を想定した 3 本のシナリオ（A）～（C）を作成した．本シナリオでは，電源構成と化石燃料の輸入価格はエネルギー・環境会議（2012a）の想定をそのまま利用した．一方で，家庭で発電した電力の系統への逆潮については著者らが独自に設定し，PV 余剰電力の売電価格は 2013 年時点と

© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

Table 5　Three energy scenarios depending on differences in nuclear power development in 2030

Item	(A) Zero Scenario	(B) 15 Scenario	(C) 25 Scenario	Reference
Share of nuclear power	0%	15%	25%	Energy and Environment Council (2012a).
Composition of electricity generation	All nuclear plants will be shut down, while more natural gas thermal plants and renewable energy will be introduced instead.	No more nuclear power plants will be constructed.	Nuclear power plants will be renewed and newly constructed, aiming to reducing CO_2 emissions.	

Table 6　Assumptions for evaluating residential energy systems

Item	Value				References
	2013	2030			
		(A) Zero Scenario	(B) 15 Scenario	(C) 25 Scenario	
Price of grid electricity (JPY/kWh)	26.3	38.1	35.6		The data in 2013 is obtained from power/gas company websites, while the data in 2030 is calculated based on the future fuel costs that are assumed in Energy and Environment Council (2012a).
Gas price (JPY/Nm^3)	183	160			
CO_2 intensity of grid electricity generation ($kgCO_2$/kWh)	0.450	0.455	0.394	0.366	The data in 2013 is obtained from power/gas company websites (KEPCO, 2014, Osaka Gas Co., Ltd., 2014). The CO_2 intensity of electricity generation in 2030 is calculated based on the energy mix in 2030 that is assumed in Energy and Environment Council (2012a), while we assume that the CO_2 intensity of gas combustion remains the same from 2013-2030.
CO_2 intensity of gas combustion ($kgCO_2/Nm^3$)	2.29				
Electricity conversion efficiency of SOFC (%HHV)	42	50			The data in 2013 comes from product catalogues, while the data in 2030 is obtained from technology roadmaps (NEDO, 2009, 2010).
Conversion efficiency of PV (%)	18	25			

同じ 38 円/kWh（経済産業省，2013）とした．さらに，SOFC から発電された電力の余剰分は，SOFC 普及促進の観点から系統への逆潮が可能となると想定し，その売電価格は系統電力価格に等しいと仮定した．

4・3・2　家庭用エネルギーシステムの評価

家庭用エネルギーシステムモデルを用いて，表 5 の各シナリオに対するシステム（a）～（c）のランニングコストと CO_2 排出量を算出した．簡単のために，ランニングコストは光熱費のみを考慮し，それ以外の維持費（メンテナンスコスト）を無視した．表 6 にシステム評価のための前提条件を示す．2030 年の電力料金と系統電力の CO_2 排出係数は，エネルギー・環境会議（2012a）が想定した電源構成と燃料費に基づいて算出した．また，2030 年の SOFC と PV の発電効率は技術ロードマップ（NEDO，2009，2010）から得た．各システムの 2030 年の機器性能は表 4 に示したものを使用した．本論文ではシステムの年間平均のランニングコストと CO_2 排出量を評価するため，夏期，冬期，中間期から代表日をそれぞれ 1 日ずつ抽出して消費者の機器使用パターン（ある時間帯に各機器を使用する頻度の分布）と気象条件を想定し，各日に対して得られた評価結果を 1 年間に拡大した．ここで，代表日の天候はいずれも晴天である場合を想定し，その条件に合致する代表日として，2011 年 8 月 10 日（夏期），2011 年 5 月 11 日（中間期），2012 年 2 月 10 日（冬期）を抽出した．これらの代表日における気温や PV の発電量計算に用いる日射量は，気象庁のデータ（気象庁，2013）を参照した．晴天日のみを対象としたことにより PV の発電量は過大評価となっており，結果として，システム（b）および（c）のランニングコストと CO_2 排出量はともに過小評価となっている．これらの誤差の検証は，今後の課題として残されている．

© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

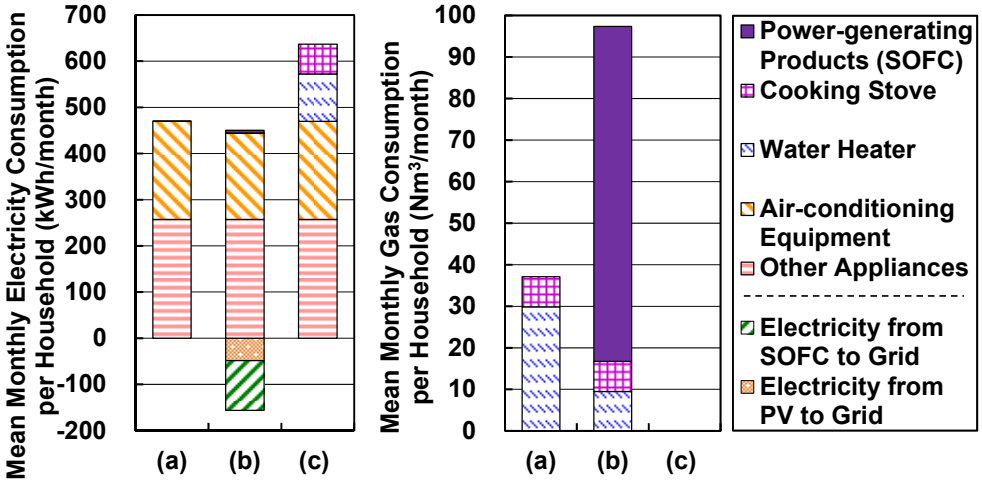


Fig. 5　Mean monthly electricity & gas consumption per household in 2030

消費者の機器使用パターンは，既存研究（Shimoda, et al., 2010，山口他，2011）で想定されている条件を参照し，2013～2030 年度の間で変化しないものと仮定した．基本的に，機器使用による電力消費量およびガス消費量は，2013～2030 年度にかけての機器性能の向上に伴って減少する．ただし，その他家電の使用による電力消費量は既存研究（Kishita, et al., 2013）のデータを使用し，2013～2030 年度にわたって一定であることを仮定した．

図5に2030年の性能を想定した各システムに対する世帯平均かつ月平均の電力消費量とガス消費量の計算結果を示す．システム（b）では SOFC の余剰電力も逆潮流が可能なため，SOFC は 1 日 24 時間にわたって定格運転させる．このとき，SOFC で発電した電力を優先的に世帯内で消費し，続いて PV の発電電力を消費する．それでも電力が不足する場合には系統電力網から購入し，逆に発電電力が世帯内の消費電力を上回る場合にのみ，PV，SOFC の順で余剰電力を系統電力網へと逆潮流させる．その他家電機器は 3 種類のシステム間で共通であり，その電力消費量はいずれも 257kWh/月である．システム（b）のみ空調の消費電力が少ない理由はデシカント空調を導入したためであり，デシカント空調の運転の際には，主として SOFC の排熱を利用している．その結果，システム（b）の空調による電力消費量（187kWh/月）をシステム（a），（c）の空調による電力消費量（213kWh/月）と比較すると，12%（=100-187/213×100）だけ消費電力を低減できている．家庭から系統電力網に逆潮流される電力は，システム（b）では PV と SOFC 合わせて 157kWh/月であるのに対して，システム（c）では昼間に使用する空調やその他家電の用途で PV による発電電力をすべて自家消費することにより余剰電力が発生しない．また，システム（a）と（b）のガス消費量を比較すると，システム（a）（37.1Nm^3/月）に対してシステム（b）（97.3Nm^3/月）は約 2.6 倍である．この主な理由は，システム（b）で SOFC を定格運転させたことによる．ただし，SOFC の排熱および太陽熱温水器の温水を給湯へと利用することによって，システム（b）のガス給湯器によるガス消費量（9.5Nm^3/月）はシステム（a）（29.9Nm^3/月）の 32%となる．

表 6 の条件と図 5 の結果を用いて 2030 年のシステム（a）～（c）を評価した結果を表 7 に示す．ただし，その他家電機器はすべてのシステムで同一のため，その電力消費量による影響は表 7 から除外した．光熱費の計算では，PV と SOFC の売電による売り上げを差し引いた．CO_2 排出量の計算では，PV と SOFC の売電量に表 6 で示した系統電力 CO_2 排出係数を乗じた分を控除した．一般に，CO_2 削減効果の計算方法には様々な考え方がありうるが（環境省，2013），本論文では PV と SOFC の導入時でもエネルギー・環境会議（2012a）が想定した電源構成比率が維持されることを仮定した．このとき，(b)SOFC システムの CO_2 排出量は原発依存率が高くなるシナリオほど多くなる結果となったが，これは SOFC や PV の発電電力を系統電力網に逆潮流させた際に起こりうる火力発電の稼働率低下を考慮せず，シナリオごとに表 6 に示した CO_2 排出係数の値（0.366kgCO_2/日（シナリオ C）～0.455kgCO_2/日（シナリオ A））を用いたことによる．結果として，PV と SOFC の売電量は 3 本のシナリオ（A）～（C）で等しいにも関わらず，原発依存率が高いシナリオほど見かけ上の CO_2 削減効果が小さくなる．初期費用と設置スペースは各機器のカタログのデータをもとに積み上げ計算したものであり，SOFC，PV，CO_2 ヒートポンプ給湯器の 2030 年の初期費用は技術ロードマップ（METI，2008，NEDO，2009，2010）に沿って低減する

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

Table 7　Evaluation results of residential energy systems per household

Item		Value				References
		2013	2030			
			(A) Zero Scenario	(B) 15 Scenario	(C) 25 Scenario	
(a) BaU System	Initial cost (thousand JPY)	550				Obtained from product catalogues.
	Installation area (m^2)	0.5				
	Utility cost (thousand JPY/month)	17.0	23.8	22.7		Calculated by the Residential Energy System Evaluation Model.
	CO_2 emissions ($kgCO_2$/day)	10.9	10.0	9.0	8.6	
(b) SOFC System	Initial cost (thousand JPY)	3,670	1,340			Obtained from product catalogues. The prices of an SOFC unit and a PV system in 2030 are calculated based on NEDO (2009, 2010).
	Installation area (m^2)	2.4				
	Utility cost (thousand JPY/month)	9.3	11.1	11.3		Calculated by the Residential Energy System Evaluation Model.
	CO_2 emissions ($kgCO_2$/day)	6.7	5.9	6.1	6.2	
(c) All-electric System	Initial cost (thousand JPY)	1,460	1,070			Obtained from product catalogues. The prices of a PV system and a heat pump water heater in 2030 are calculated based on METI (2008) and NEDO (2009).
	Installation area (m^2)	1.1				
	Utility cost (thousand JPY/month)	14.7	20.1	18.8		Calculated by the Residential Energy System Evaluation Model.
	CO_2 emissions ($kgCO_2$/day)	9.6	8.0	6.9	6.4	

ことを想定した．結果として，2030 年には定格出力 700W の SOFC 本体を含む SOFC システム全体の初期費用が 367 万円から 134 万円まで低下する．

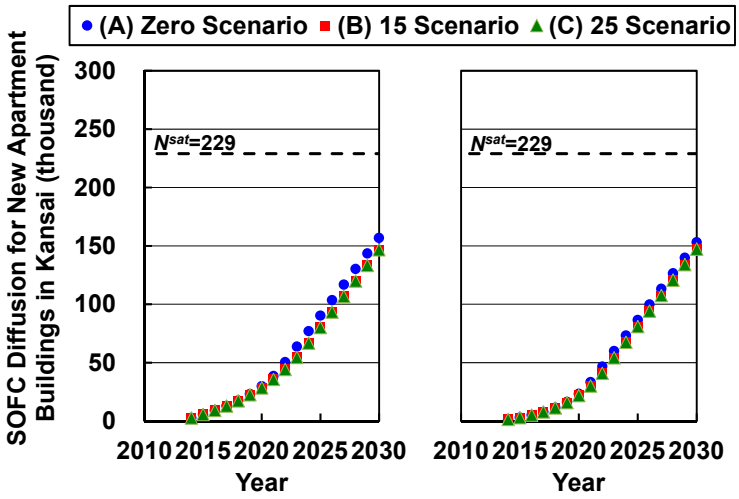
4・4　SOFC 普及シミュレーション結果

式（1）を用いて 2030 年の SOFC 普及台数を計算する際，N^{sat}，p，r は 4・2 節で示した値を利用した．$H(t)$の計算には，3 節のアンケートで得た 792 サンプルの重み係数 w_{ij} を用いた．つまり，792 世帯から構成される小さな社会を想定し，その中で（b）SOFC システムに対する効用が（a）従来システムおよび（c）オール電化システムよりも大きな世帯の割合に基づいて $H(t)$を計算した（計算手順は 2.2 節参照）．表 7 の光熱費と CO_2 排出量は全世帯平均の値であるが，SOFC の普及計算には世帯による生活パターンの違いを反映させる必要がある．そのため，本ケーススタディでは 3 節のアンケート調査において 792 世帯から聞き取った実際の月々光熱費のデータを用いて，世帯ごとの光熱費・CO_2 排出量の分布を以下の方法により得た．まず全 792 世帯を，現在（c）オール電化システムを使用している 86 世帯（10.9%）とそれ以外の 706 世帯（89.1%）の 2 つのグループに分け（3 節のアンケート結果を参照），後者のグループは現在（a）従来システムを使用しているものと想定した．次に，各世帯が現在と異なるシステムを選択した場合の光熱費・CO_2 排出量は，表 7 に示したシステム（a）～（c）間の光熱費・CO_2 排出量の比率に基づいて計算した．例えば，シナリオ（A）において現在（a）従来システムを使用している世帯が（b）SOFC システムを選択した場合の月々光熱費は，元データの 0.47（=11.1/23.8）倍になるとした．

シミュレーション結果を図 6 に示す．Bass モデルのパラメータ p，r の設定根拠に用いた類似製品によって結果は異なるが，2030 年時点の新設分譲マンションに対する SOFC 普及台数は，（I）潜熱回収型高効率ガス給湯器を基準とした場合で 14.7 万台（最終普及台数 N^{sat}=22.9 万台に対して 64.0%）～15.7 万台（同 68.5%），（II）CO_2 ヒートポンプ給湯器を基準とした場合で 14.7 万台（同 64.3%）～15.3 万台（同 66.8%）となった．

ケース（I）でシナリオ（A）～（C）を比較したとき，（A）で SOFC が 15.7 万台と最も普及した理由はシステム間の光熱費の違いにある．シナリオ（B）または（C）と比べて，シナリオ（A）ではシステム(a)，(c)の光熱費

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers



(I) Highly-efficient Gas Water Heater (II) CO_2 Heat Pump Water Heater

Fig. 6 Simulation results

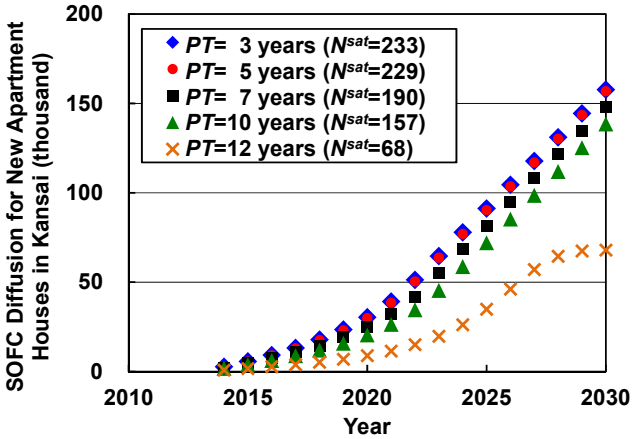


Fig. 7 Sensitivity analysis in payback time (*PT*) of the SOFC system (Case (I), Scenario (A))

は世帯平均でそれぞれ 1,100 円/月，1,300/月だけ高くなるが，システム（b）の光熱費はむしろ 200 円/月だけ安くなる（表 7 参照）．対照的に，シナリオ（B）と（C）の SOFC 普及にほとんど違いがないことから，システム（a）～（c）の CO_2 排出量の違いが SOFC の普及に及ぼす影響は相対的に小さい．一方で，シナリオ（A）でケース（I）と（II）を比較すると，SOFC 普及台数の違いは 0.4 万台（N^{sat}=22.9 万台に対して 1.7%）である．これは，普及曲線の基になる類似製品のケース（I），（II）の選択が SOFC の普及に与える影響は，シナリオ（A）～（C）の結果の幅と比べて小さいことを意味する．

4・5 感度分析：SOFC システムの投資回収年数変化による影響分析

図 6 では，表 6 で示したようにシナリオ（A）～（C）の系統電力価格の違いが SOFC の普及台数に与える影響を示したが，本節では SOFC の普及に大きな影響を与える要因のひとつとして，（b）SOFC システムの投資回収年数を変化させた場合の影響を分析する．ここでの投資回収年数は，（a）従来システムを基準としたときに，（b）SOFC システムを導入した場合の光熱費削減効果が追加の初期費用をちょうど上回る年数と定義する．ケース（I）のシナリオ（A）において，（b）SOFC システムの投資回収年数（*PT*; payback time）が 5 年の場合を基準として，3～12 年まで変化させた場合の結果を図 7 に示す．このとき，変化させた投資回収年数の値に応じて N^{sat} の値を表 2 の結果に基づいて設定した．

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

図 7 の結果より 2030 年の SOFC 普及台数は 6.8～15.8 万台となり，投資回収年数が 5 年より短くなったとしても SOFC 普及台数は増えない．その一方で，投資回収年数が 10 年のとき 2030 年の SOFC 普及台数は 13.9 万台なのに対して，12 年まで延びると普及台数が約半分の 6.8 万台まで少なくなる．

5. 考　　察

本論文では，将来起こりうる様々な社会状況のもとで家庭用エネルギーシステムの普及を分析するための新たなアプローチとして，家庭用エネルギーシステム普及シナリオの作成手法を提案した．ケーススタディの結果に着目すると，図 7 の結果より，SOFC システムの投資回収年数が 10 年と 12 年で SOFC の普及に大きな違いが生じることが明らかとなった．その理由は，4・2 節（1）と同様の考え方を表 2 の結果に適用したとき，投資回収年数が 10 年，12 年の場合の潜在的な購入者割合はそれぞれ 31.1%（=246/792），13.5%（=107/792）であり，結果としてその際の N^{sat} がそれぞれ 15.7 万台（=50.6 万台×31.1%），6.8 万台（=50.6 万台×13.5%）と大きく異なるためである．一方で，投資回収年数が 5 年より短くなった場合でも SOFC の普及台数に違いは見られない．その理由は，投資回収年数が 3 年，5 年の場合の潜在的な購入者割合はそれぞれ 46.0%（=364/792），45.2%（=358/792）であり，両者の間にほとんど差が無いためである．

本論文における SOFC 普及台数の推計の妥当性を評価するために，図 6 で導出した結果と外部の文献による結果を比較する．革新的エネルギー・環境戦略（エネルギー・環境会議，2012b）では，2030 年家庭用燃料電池普及目標を 530 万台と設定している．この目標値から関西の新設分譲マンション向け SOFC 普及目標を導出する．関西の世帯数は日本全体の 16%，新設住宅販売のうち分譲マンションの戸数割合は約 30%であることから（国土交通省，2013，国立社会保障・人口問題研究所，2009），その普及目標は以下のように計算できる．

$$530\text{ 万台}\times 16\%\times 30\% = 25\text{ 万台} \tag{6}$$

図 6 より 2030 年の SOFC 普及台数は 14.7～15.7 万台であり，本論文の推計結果の上限値（15.7 万台）は目標値の 62.8%（=（15.7/25.0）×100）である．ただし，式（6）の目標値には SOFC の機器更新による販売台数も含まれているものと考えられる．いま，SOFC の耐用年数を 10 年と仮定し，一旦 SOFC を購入した消費者全員が 10 年後に再度 SOFC を購入することを想定すると，2030 年までの SOFC の累積販売台数は 18.7 台と計算できる．その後も順次買い替えが進むと，2033 年に累積販売台数が 26.0 万台となり，式（6）の目標値に到達するとの計算結果を得た．

次に，SOFC システムの初期費用が 100 万円よりも安くなった場合を想定してみる．仮に，SOFC システムの初期費用が 50 万円，投資回収年数が 5 年の場合を想定すると，表 2 より潜在的な購入者割合は 71.1%（=563/792），N^{sat} は 36.0 万台（=50.6 万台×71.1%）となる．この条件をケース（I）のシナリオ（A）に適用すると，2030 年時点の SOFC 普及台数は 18.0 万台，耐用年数を 10 年として機器更新を想定した場合の累積販売台数は 22.7 万台となった．また，その後も機器更新が続くと 2031 年に SOFC の累積販売台数が 25.3 万台となり，式（6）の目標値に到達した．この結果を初期費用が 100 万円の場合（2033 年に累積販売台数が 26.0 万台）と比較すると，累積販売台数が 25 万台を超える時期が 2 年だけ早まった．したがって，SOFC システムの投資回収年数が 5 年という条件のもとでは，初期費用をさらに下げることによる効果はそれほど大きいわけではない．

ケーススタディでは，家庭用エネルギーシステムとして表 4 で示した（a）～（c）の 3 種類のみを想定したが，機器構成を変化させればその経済性・環境性は変化しうる．これらの機器構成や，電力・ガス価格，あるいは機器の購入時補助金などの要因を様々に変化させた場合の分析は，本研究の今後の課題である．また，4・4 節で述べたように，Bass モデルのパラメータ p，r を決定するために用いる類似製品の選択は，SOFC の普及結果に対して必ずしも大きな影響を与えなかった．しかし，類似製品の選択の仕方には自由度があるため，SOFC が将来普及しうる幅をさらに分析するためには，他の類似製品を用いた場合の普及計算も必要である．本論文では新設分譲マンションのみを対象として SOFC の普及を推計したが，既設住宅や戸建住宅についても関連データを入手すれば，同様の方法で SOFC 普及台数の分析が可能である．

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

6. 結　　言

本論文では，製品普及予測モデルと家庭用エネルギーシステム評価モデルを用いて，家庭用エネルギーシステム普及シナリオを作成するための手法を提案した．この手法を用いて，関西の新設集合住宅向けに SOFC 普及シナリオを作成し，電源構成の原発依存度が異なる 3 種類のシナリオに対して SOFC 普及台数を推計した．その結果，2030 年の SOFC 普及台数を 14.7～15.7 万台と推計した．このとき，SOFC の普及に最も影響を与える要因のひとつが投資回収年数であることが明らかとなった. このような普及シナリオを描くことの利点のひとつは, 様々な将来状況を想定することによって普及に大きな影響を及ぼす要因を明確化できることである．仮に対象システムの普及目標を設定した場合には，普及シナリオの作成を通じて目標を達成するために必要な政策・制度や技術開発を検討することができる．つまり，本手法は実社会と従来の機械工学が得意としてきた技術開発の両者をつなぐためのツールとして利用できる．本論文で提案した手法自体は，任意の家庭用エネルギーシステムを対象とした普及シナリオに適用可能である．

しかし，本手法が抱える課題として，2・4 節ステップ 4 の将来社会状況の想定における支援が十分でない点が挙げられる．この課題に対しては，既存研究で提案されている将来社会シナリオの作成支援手法（Wada, et al., 2011）を本手法に統合化することが考えられる．さらに今後の課題として，家庭用エネルギーシステムの機器構成を様々に変化させた場合の SOFC 普及台数に対する影響を分析することが挙げられる．

謝　　辞

本論文の執筆にあたっては，大阪ガス(株)エネルギー技術部の若林努氏より有益なコメントを頂いた. ここに記して謝意を表する.

文　　献

Bass, F.M., A new product growth for model consumer durables, Management Science, Vol. 15, No. 5 (1969), pp. 215-227.

エネルギー・環境会議, エネルギー環境に関する選択肢 (2012a), available from <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120629/20120629_1.pdf> (参照日 2012 年 12 月 23 日).

エネルギー・環境会議, 革新的エネルギー・環境戦略 (平成 24 年 9 月 14 日) (2012b), available from <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120914/20120914_1.pdf> (参照日 2013 年 8 月 15 日).

Goto, M., Hori, T., Kegasa, A. and Hisazumi, Y., Proposal of an innovative home energy system that comprises SOFC, heat pump, desiccant air conditioner and solar water heater, proceedings of the 8th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing: EcoDesign 2013 (2013), O-N-1, 6 pages.

Hirano, S., Park, C., Hori, T., Hisazumi, Y., Wakabayashi, T. and Kishimoto, A., Energy saving effect of novel desiccant air conditioner for zero emission house, proceedings of the 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing: EcoDesign 2011 (2011), A5-03, 6 pages.

Hori, T., Goto, M., Hisazumi, Y. and Kegasa, A., Exergy design for residential fuel cell cogeneration, proceedings of the 8th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing: EcoDesign 2013 (2013), O-N-3, 5 pages.

気象庁, 気象統計情報 (2013), available from <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> (参照日 2013 年 8 月 15 日).

エネルギー・資源学会, 低炭素社会への挑戦 (2010), オーム社.

関西電力, 平成 24 年度の CO2 排出係数の報告について (2014), available from <http://www.kepco.co.jp/pressre/2013/0729-1j.html> (参照日 2014 年 4 月 16 日).

Kemp, R. and Volpi, M., The diffusion of clean technologies: A review with suggestions for future diffusion analysis, Journal of Cleaner Production, Vol. 16, No. 1 (2008), pp. S14-S21.

Kim, S.J. and Kara, S., Predicting the total environmental impact of product technologies, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 63, No. 1 (2014), pp. 25-28.

君山由良, 第 3 版コンジョイント分析 (2010), データ分析研究所.

Kishita, Y., Hisazumi, Y., Bezerra, G., Hori, T., Fukushige, S., Umeda, Y., Niwa, T., Yamaguchi, H., Wakabayashi, T. and

 © 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

Morita, H., Describing scenarios of introducing highly-efficient gas cogeneration systems to next-generation apartment buildings, proceedings of the 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing: EcoDesign 2011 (2011), A5-04, 6 pages.

Kishita, Y., Kurahashi, N., Yamaguchi, Y., Shimoda, Y., Fukushige S. and Umeda, Y., Scenario design approach to envisioning regional electricity networks with photovoltaics and electric vehicles, proceedings of the International Conference on Engineering Design 2013 (2013), paper #492, 10 pages.

小松幸夫, 1997 年と 2005 年における家屋の寿命推計, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 72, No. 632 (2008), pp. 2197-2205.

松本光崇, 近藤伸亮, 藤本淳, 梅田靖, 槌屋治紀, 増井慶次郎, 李賢映, クリーンエネルギー自動車の普及評価モデルの構築, エネルギー・資源, Vol. 29, No. 3 (2008), pp. 49-55.

経済産業省, Cool Earth－エネルギー革新技術: 技術開発ロードマップ (2008), available from <http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/for_energy_technology/pdf/coolearth-roadmap.pdf> (参照日 2013 年 8 月 15 日).

経済産業省, なっとく!再生可能エネルギー: 固定買取価格制度 (平成 25 年度) (2013), available from <http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/kakaku.html> (参照日 2013 年 8 月 15 日).

環境省, 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル: 第 III 編温室効果ガス排出量の報告方法 (2013), available from <http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual> (参照日 2013 年 8 月 30 日).

国土交通省, 建築・住宅関係統計: 建築着工統計調査 (年度計) (2013).

中村恭明, 木下裕介, 久角喜徳, 堀司, 福重真一, 梅田靖, 若林努, 集合住宅向け家庭用エネルギーシステムの将来シナリオ作成 (第 1 報)—将来の社会状況の変化を考慮したコージェネレーション機器の優位性評価—, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2013), pp. 419-420.

国立社会保障・人口問題研究所, 日本の世帯数の将来推計 (都道府県別推計): 2009 年 12 月推計 (2009).

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 太陽光発電ロードマップ (PV2030＋) (2009), available from <http://www.nedo.go.jp/content/100116421.pdf> (参照日 2013 年 8 月 15 日).

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 固体酸化物形燃料電池 (SOFC) ロードマップ (2010), available from <http://www.nedo.go.jp/content/100086291.pdf> (参照日 2013 年 8 月 15 日).

大阪ガス, CO2 排出量の計算方法 (2014), available from <http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/eco/co2discharge/index.html> (参照日 2014 年 4 月 16 日).

Shimoda, S., Yamaguchi, Y., Okamura, T., Taniguchi, A. and Yamaguchi, Y., Prediction of greenhouse gas reduction potential in Japanese residential sector by residential energy end-use model, Applied Energy, Vol. 87, No. 6 (2010), pp. 1944-1952.

日本ガス協会, 平成 21 年度天然ガス化導入促進基盤調査 (ガス冷暖房技術を応用した太陽熱高度利用技術に関する調査) 調査報告書 (2010), available from <http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2010fy01/E000934.pdf> (参照日 2014 年 9 月 26 日).

Tsuchiya, H., Electricity supply largely from solar and wind resources in Japan, Renewable Energy, Vol. 48, December 2012 (2012), pp. 318-325.

Virtual Materials Group Inc., VMGSim (2013).

Wada, H., Kishita, Y., Mizuno, Y., Hirosaki, M., Fukushige, S. and Umeda, Y., Proposal of a design support method for sustainability scenarios - 1st report: Designing forecasting scenarios, proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering 2011 (2011), pp. 189-194.

涌井徹也, 横山良平, 家庭用コージェネレーションシステムの最適機器構成計画, 第 28 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 (2012), pp. 259-262.

山口秀樹, 森田輝, 浅野等, 久角喜徳, 分散蓄熱技術を利用した集合住宅用コージェネレーションシステムへの太陽熱の導入効果, エネルギー・資源, Vol. 32, No. 6 (2011), pp. 7-13.

Zhai, P. and Williams, E.D., Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model, Renewable Energy, Vol. 41, May 2012 (2012), pp. 350-357.

References

Bass, F.M., A new product growth for model consumer durables, Management Science, Vol. 15, No. 5 (1969), pp. 215-227.

Energy and Environment Council, Options for Energy and Environment (2012a),

 © 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

available from <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120629/20120629_1.pdf> (accessed on 23 December, 2012) (in Japanese).

Energy and Environment Council, Innovative Strategy for Energy and the Environment (2012b), available from <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120914/20120914_1.pdf> (accessed on 15 August, 2013) (in Japanese).

Goto, M., Hori, T., Kegasa, A. and Hisazumi, Y., Proposal of an innovative home energy system that comprises SOFC, heat pump, desiccant air conditioner and solar water heater, proceedings of the 8th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing: EcoDesign 2013 (2013), O-N-1, 6 pages.

Hirano, S., Park, C., Hori, T., Hisazumi, Y., Wakabayashi, T. and Kishimoto, A., Energy saving effect of novel desiccant air conditioner for zero emission house, proceedings of the 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing: EcoDesign 2011 (2011), A5-03, 6 pages.

Hori, T., Goto, M., Hisazumi, Y. and Kegasa, A., Exergy design for residential fuel cell cogeneration, proceedings of the 8th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing: EcoDesign 2013 (2013), O-N-3, 5 pages.

Japan Meteorological Agency, Meteorological Statistics (2013), available from <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> (accessed on 15 August, 2013) (in Japanese).

Japan Society of Energy and Resources, Challenges toward a Low-carbon Society (2010), Ohmsha (in Japanese).

Kansai Electric Power Co. Inc. (KEPCO), Report on CO_2 Intensity of Electricity Generation in 2012 FY (2014), available from <http://www.kepco.co.jp/pressre/2013/0729-1j.html> (accessed on 16 April, 2014) (in Japanese).

Kemp, R. and Volpi, M., The diffusion of clean technologies: A review with suggestions for future diffusion analysis, Journal of Cleaner Production, Vol. 16, No. 1 (2008), pp. S14-S21.

Kim, S.J. and Kara, S., Predicting the total environmental impact of product technologies, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 63, No. 1 (2014), pp. 25-28.

Kimiyama, Y., Conjoint Analysis (3rd Edition) (2010), Data Analysis Institute, Inc. (in Japanese).

Kishita, Y., Hisazumi, Y., Bezerra, G., Hori, T., Fukushige, S., Umeda, Y., Niwa, T., Yamaguchi, H., Wakabayashi, T. and Morita, H., Describing scenarios of introducing highly-efficient gas cogeneration systems to next-generation apartment buildings, proceedings of the 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing: EcoDesign 2011 (2011), A5-04, 6 pages.

Kishita, Y., Kurahashi, N., Yamaguchi, Y., Shimoda, Y., Fukushige S. and Umeda, Y., Scenario design approach to envisioning regional electricity networks with photovoltaics and electric vehicles, proceedings of the International Conference on Engineering Design 2013 (2013), paper #492, 10 pages.

Komatsu, Y., Life time estimations of Japanese buildings and houses at the years of 1997 and 2005, Journal of Architecture and Planning, Vol. 73, No.632 (2008), pp. 2197-2205 (in Japanese).

Matsumoto, M., Kondoh, S., Fujimoto, J., Umeda, Y., Tsuchiya, H., Masui, K. and Lee, H.Y., A diffusion model for clean energy vehicles, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 29, No. 3 (2008), pp. 49-55 (in Japanese).

Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan (METI), Cool Earth: Energy Innovation Technology (2008), available from <http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/for_energy_technology/pdf/coolearth-roadmap.pdf> (accessed on 15 August, 2013) (in Japanese).

Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan (METI), Settlement of FY2013 Purchase Prices for Newcomers and FY2013 Surcharge Rates under the Feed-in Tariff Scheme for Renewable Energy (2013), available from <http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/kakaku.html> (accessed on 15 August, 2013) (in Japanese).

Ministry of the Environment, Japan (MOE), Instruction for Calculating and Reporting Greenhouse Gas Emissions: Part III Instruction on Reporting Greenhouse Gas Emissions (2013), available from <http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual> (accessed on 30 August, 2013) (in Japanese).

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan (MLIT), Housing Starts (Yearly): New Construction Starts of Dwellings by Owner Occupant Relation, by Construction Method, by Prefabricated, by Two-by-Four (2013).

Nakamura, Y., Kishita, Y., Hisazumi, Y., Hori, T., Fukushige, S., Umeda, Y. and Wakabayashi, T., Describing future scenarios of energy supply systems for apartment buildings (1st report) – Assessment of co-generation systems considering future social changes –, proceedings of 2013 Japan Society for Precision Engineering Spring Meeting (2013), pp. 419-420 (in Japanese).

National Institute of Population and Social Security Research, Japan, Household Projection for Japan by Prefectures (2009)

 © 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

(in Japanese).

New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Photovoltaic Technology Roadmap (PV 2030+) (2009), available from <http://www.nedo.go.jp/content/100116421.pdf> (accessed on 15 August, 2013) (in Japanese).

New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Solid Oxide Fuel Cell Technology Roadmap (2010) available from <http://www.nedo.go.jp/content/100086291.pdf> (accessed on 15 August, 2013) (in Japanese).

Osaka Gas Co. Ltd., Method for Calculating CO_2 Emissions (2014), available from <http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/eco/co2discharge/index.html> (accessed on 16 April, 2014) (in Japanese).

Shimoda, S., Yamaguchi, Y., Okamura, T., Taniguchi, A. and Yamaguchi, Y., Prediction of greenhouse gas reduction potential in Japanese residential sector by residential energy end-use model, Applied Energy, Vol. 87, No. 6 (2010), pp. 1944-1952.

The Japan Gas Association, Fundamental report on the promotion of natural gas in 2009 FY: Surveillance Report (2010), available from <http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2010fy01/E000934.pdf> (accessed on 26 September, 2014) (in Japanese).

Tsuchiya, H., Electricity supply largely from solar and wind resources in Japan, Renewable Energy, Vol. 48, December 2012 (2012), pp. 318-325.

Virtual Materials Group Inc., VMGSim (2013).

Wada, H., Kishita, Y., Mizuno, Y., Hirosaki, M., Fukushige, S. and Umeda, Y., Proposal of a design support method for sustainability scenarios - 1st report: Designing forecasting scenarios, proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering 2011 (2011), pp. 189-194.

Wakui, T. and Yokoyama, R., Optimal structural design of residential cogeneration systems, Proceedings of the 28th Conference on Energy System, Economy and Environment (2012), pp. 259-262 (in Japanese).

Yamaguchi, H., Morita, H., Asano, H. and Hisazumi, Y., Effect of solar heat utilization in a cogeneration system with distributed heat storage for an apartment building, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 32, No. 6 (2011), pp. 7-13 (in Japanese).

Zhai, P. and Williams, E.D., Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model, Renewable Energy, Vol. 41, May 2012 (2012), pp. 350-357.

[DOI: 10.1299/transjsme.14-00250]
© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers

付　　録

A　コンジョイント分析の設問

3 節のアンケート調査において実施したコンジョイント分析の設問を図 A に示す.

【説明文】
近年，環境に優しいエネルギー供給システム（住宅への電力や熱の供給システム）を持つ住宅として，オール電化やガスコージェネレーションを導入した住宅が注目されています．これらのシステムは一般的に月々の光熱費が安いことに加えて，システムの特性を利用したさまざまな付加価値があります．その一方で，これらのシステムを導入するには追加の初期費用が必要となります．住宅に導入されるエネルギー供給システムには，大きく分けて以下の3種類があります(表1参照).

表1: エネルギー供給システムの特徴

種類	説明	システムを構成する機器	長所	短所
1. 従来システム(電力とガスの併用)	もっとも普及している一般的なエネルギー供給システム．給湯や厨房など熱を必要とする部分にはガス会社(例えば，大阪ガスなど)から購入したガスを用い，電化製品を稼働させるためには電力会社(例えば，関西電力など)から購入した電力を使用する．	・空調：エアコン ・給湯：ガス給湯器 ・厨房：ガスコンロ ・自家発電：なし	他のシステムに比べ，特別な機器を設置するための追加費用やスペースが不要である．	他のシステム(オール電化，ガスコージェネレーション)に比べ，省エネ性や月々の光熱費は劣る．
2. ガスコージェネレーション	住宅にコージェネレーションシステム(*)を置くことで，ガス会社から購入したガスを使って自家発電を行う．給湯には自家発電時に発生する排熱を利用することで，エネルギーの利用効率を向上させ，ガス給湯器を動かすためのガス使用量を節約することができる． (*)コージェネレーションシステム：天然ガスを用いて発電し，その際に発生する排熱を冷暖房や給湯などに利用するシステム．	・空調：エアコン ・給湯：ガス給湯器+コージェネレーションシステム ・厨房：ガスコンロ ・自家発電：コージェネレーションシステム	自家発電時の排熱を利用するため省エネとなり，光熱費を節約することができる．また，ガス会社から購入したガスを使って自家発電するため，停電時でも家庭に必要な電力を得ることができる．	発電用の機器や貯湯器を導入するために，従来システムと比べて追加の初期費用と設置スペースが必要となる．
3. オール電化	住宅にある生活家電をすべて電力によりまかうシステム．給湯器や厨房など熱を必要とする部分のすべてを電力でまかなう．そのため，ガスコンロはIHクッキングヒーターに，ガス給湯器は電気温水器(エコキュート)に交換する．	・空調：エアコン ・給湯：電気温水器（エコキュート） ・厨房：IHクッキングヒーター ・自家発電：なし	電気温水器を利用するため省エネとなり，電力価格の安い夜間にお湯を沸かすことで給湯にかかる費用を節約できる．また，ガスコンロをIHに交換することでキッチンの掃除がしやすくなる．	電気温水器（エコキュート）や貯湯器を設置するために，従来システムと比べて追加の初期費用と設置スペースが必要となる．

【質問】
あなたが集合住宅を購入する際，以下の16種類のエネルギー供給システムを導入した集合住宅のうち購入したいと思う順番を1～16で順位付けしてください(最も購入したいと思う集合住宅を1位とします)．数値はすべて，1世帯(住宅1戸)当たりとします．
なお，2人以上世帯の光熱費の平均額(水道代除く)は1ヶ月当たり15,964円です(総務省統計局による).

番号	エネルギー供給方式	エネルギー供給システムの導入に必要となる初期費用	月々の光熱費・維持費(※)	【参考】投資回収年数(※※)	導入に必要となるスペース	1日あたりCO_2排出量(※※※)
1	従来システム	350万円	16,000円	投資回収できない	2.5㎡	25kg
2	従来システム	250万円	12,000円	41.7年	1.5㎡	20kg
3	従来システム	100万円	8,000円	5.2年	1.0㎡	15kg
4	オール電化	350万円	12,000円	62.5年	1.0㎡	10kg
5	従来システム	50万円	16,000円	0.0年	1.0㎡	20kg
6	ガスコージェネレーション	250万円	4,000円	13.9年	1.0㎡	25kg
7	オール電化	50万円	8,000円	0.0年	1.5㎡	25kg
8	オール電化	100万円	4,000円	3.5年	2.5㎡	20kg
9	従来システム	250万円	8,000円	20.8年	2.5㎡	10kg
10	ガスコージェネレーション	100万円	16,000円	投資回収できない	1.5㎡	10kg
11	ガスコージェネレーション	350万円	8,000円	31.3年	0.5㎡	20kg
12	ガスコージェネレーション	50万円	12,000円	0.0年	2.5㎡	15kg
13	従来システム	350万円	4,000円	20.8年	1.5㎡	15kg
14	従来システム	100万円	12,000円	10.4年	0.5㎡	25kg
15	オール電化	250万円	16,000円	投資回収できない	0.5㎡	15kg
16	従来システム	50万円	4,000円	0.0年	0.5㎡	10kg

(※)月々の光熱費・維持費は，光熱費（電気代とガス代）に加えて，機器の修理費なども含めたエネルギー供給システムにかかる月当たり平均の諸経費を指します．
(※※)【参考】投資回収年数：標準的な従来システム(初期費用を50万円，月々の維持費を16,000円と仮定)と比較したときに，追加の初期費用の回収に要する年数(年).
(※※※)世帯当たりの1日の平均CO_2排出量は約20kg，8～12畳用のエアコン暖房を1日8時間使用したときのCO_2排出量は約2kgです．

Fig. A　Question of conjoint analysis on residential energy systems

© 2015 The Japan Society of Mechanical Engineers