

## Study on Optimal Energy Application for Residence Town

### (Verification of environmental and economical evaluation using distributed power and effectively of micro grid)

Hajime SEKI\*<sup>1</sup>, Atsushi SAITO\*<sup>2</sup> and Jiro SENDA\*<sup>3</sup>

(Received September 16, 2008)

In this study it is proposed to comprehend environmental and economical evaluation in the energy saving devices and distributed powers, optimal combination of distributed powers with virtual-micro grid (MG) and utility of MG in three residences scale. In the analysis of CO<sub>2</sub> emissions, a running cost and a cost reduction term are selected as evaluation method in the stand-alone residence. As a result, stand-alone residence installed with Heat Pump (HP) and Photovoltaics (PV) is the most effective in the environmental and the economical terms. However the applying surplus power generated by Co-generation system (CGS) effectively is expected to reduce more the environmental load. In addition the stand-alone residence installed with HP, Fuel Cell CGS (FC-CGS) and gas fired water heater of latent heat recovery is the most effective in the virtual-MG introduction. Furthermore efficient use of energy was improved in the district because of in MG in three residences scale utilization ratio of FC-CGS improves as compared with virtual-MG.

**Key words** : Lower CO<sub>2</sub> emission in the town, Virtual-micro grid, distributed power, energy saving device, CO<sub>2</sub> emission, Stand-alone resistance

**キーワード** : 都市の低炭素化, 仮想マイクログリッド, 分散型電源, 省エネルギー機器, CO<sub>2</sub>排出量, 戸建住宅

## 環境共生型エネルギーシステムの住宅地適合研究

### —分散型電源の導入による環境・経済性評価およびマイクログリッドの有用性の検証—

関 元\*<sup>1</sup>, 齋藤 篤史\*<sup>2</sup>, 千田 二郎\*<sup>3</sup>

#### 1. 緒言

近年、環境問題に対して関心が高まる中、家庭・民生部門において省エネ機器や分散型電源の導入が促進されている。分散型電源には太陽光および風力といった自然エネルギー発電およびコージェネレーションシステム(以下:CGS)等が挙げられる。これらシステムを導入することで自然エネルギー発電においては発電時にCO<sub>2</sub>を排出せず、CGSにおいては総合効率向上によりCO<sub>2</sub>排出量削減が期待される。しかしながら、更なる環境負荷低減効果を求めるにはこれらシステムを

単独で用いるのではなく、ある地域内で熱や電力を総合的に有効利用することが重要である。

このようなことから、各種分散型電源、蓄電池および自営線等を統合し、一定地域内でエネルギー供給を行なうマイクログリッド(以下:MG)が注目されている<sup>1)</sup>。これにより、都市部全体としての環境負荷低減が可能となり、電力送電の損失が回避できエネルギーセキュリティが向上する。そのため本研究では、MGのような環境共生型エネルギーシステムを、最もCO<sub>2</sub>排出量の削減が困難とされている住宅地に適合されること

\*1 Department of Mechanical and Engineering, Graduate School of Doshisha University, Kyoto

\*2 TOYO Architects and Engineers office, Kyoto

\*3 Department of Mechanical and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Tatara Miyakodani 1-3, Kyotanabeshi, Kyoto, 610-0321 Japan E-mail: [jsenda@mail.doshisha.ac.jp](mailto:jsenda@mail.doshisha.ac.jp)

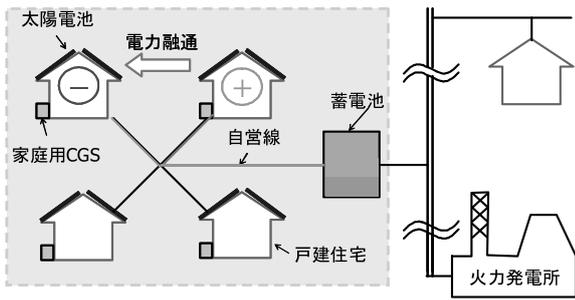


Fig.1 Schematic diagram of micro grid

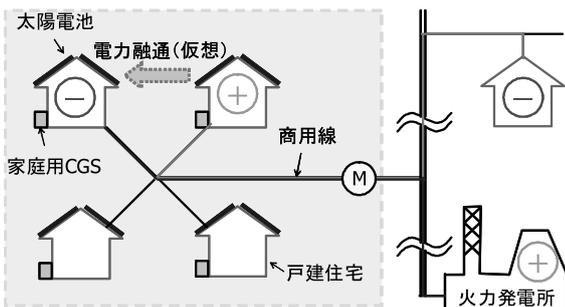


Fig.2 Schematic diagram of virtual-micro grid

を目的とする。これまで、著者らは MG の問題点として考えられる初期コスト低減を解決できる仮想 MG を提案した。また、電力および熱需要の変動が激しい戸建住宅に仮想 MG を導入することで及ぼす環境負荷低減効果を検証した。その結果、仮想 MG の導入により環境負荷低減効果が得られることが確認できた<sup>2)</sup>。

そこで本報では、まず戸建住宅における各種省エネ機器の組み合わせによる環境・経済性を検証する。それにより現状での戸建住宅における最適な省エネ機器の組み合わせを確認する。さらに、仮想 MG に適用可能な各種の電力・熱供給装置の組み合わせを検証する。次に検証された各種装置の組み合わせを用いて仮想 MG における最適な組み合わせを検証した。最後に電力および熱需要が異なる典型的な 3 種類の住宅間でエネルギー融通を行ない環境・経済性評価を仮想 MG の導入効果と比較する。それにより、現状における MG 導入の可能性を示す。

## 2. 仮想マイクログリッド

図 1 に示すように従来のマイクログリッドは複数の電力需要家が存在する一定地域内において太陽光発電システム(以下: PV)および CGS といった分散型電源、自営線および蓄電池等を組み合わせ、ネットワー

Table 1 Specifications of residence type

	Heat pump (HP)	Gas fired water heater of latent heat recovery (GWH)	Photovoltaics (PV)	Gas-CGS	FC-CGS
Standard	×	×	×	×	×
Type A	○	×	×	×	×
Type B	×	○	×	×	×
Type C	×	×	○	×	×
Type D	×	×	×	○	×
Type E	×	×	×	×	○
Type F	○	×	○	×	×
Type G	×	○	○	×	×
Type H	×	○	×	○	×
Type I	×	○	×	×	○
Type J	×	×	○	○	×
Type K	×	×	○	×	○
Type L	×	○	○	○	×
Type M	×	○	○	×	○

ク内で電力供給を行なうシステムである。また、マイクログリッドの導入により安定した電力供給、電力の地域自給や送電損失の回避が可能となる。しかしながら、省エネ機器の発電出力が低いことから、完全な電力自給には至らない。また、自営線、熱融通システムの構築および制御システムなどが要求されるため、マイクログリッドを導入する際に初期コストが莫大となる。さらに、住宅と公共・商業施設をネットワーク化することも初期コストが増大する要因となっている。そこで、本研究で提案する“仮想マイクログリッド”は各戸建住宅のみを対象とし、自営線の代わりに既存の商用電線を、蓄電池の代わりに既存の系統電力を活用する。これによって、電力供給の安定化を図ると同時に導入コストおよび環境負荷の低減効果を狙うシステムである。

図 2 に仮想 MG の模式図を示す。グリッドの対象は戸建住宅とし、各戸建住宅には CGS および太陽光発電のような分散型電源を設置し、既存の商用電線を用いて各戸建住宅をネットワーク化する。分散型電源から生じる余剰電力は既存の商用電線を使用して各家庭への電力融通を行なう。ネットワーク内で電力供給量が需要を超過した場合は各戸建住宅の余剰電力を系統電源へ逆潮流し、売電する。電力が不足した際には各戸建住宅に系統電源から電力を買電することにより、地域内で仮想的に電力を融通したことになる。なお、今回は電力融通のみを計算対象とし、熱融通は考慮していない。

Table 2 Specifications of energy system

	Heat pump (HP)	Gas fired water heater of latent heat recovery (GWH)	Photovoltaics (PV)	Gas-CGS	FC-CGS
Power [kW]			4.28	1.0	0.9
Generating efficiency [%]				22.5	33.0
Power [kW]				2.8	1.4
Heat recovery efficiency [%]		95		63.0	49.0
Total efficiency [%]	3.0(COP)			85.5	84.0
Initial Cost [yen]	635,250	451,500	2,446,500	757,800	
Grant [yen]	42,000	23,000		138,000	

### 3. 解析条件および手法

#### 3.1 住宅型式別におけるエネルギー供給システムの解析

表 1 に各種省エネ機器を組み合わせた住宅型式を示す。省エネ機器にはヒートポンプ(以下: HP), 潜熱回収型ガス給湯器(以下: GWH), PV, ガスエンジン型 CGS(以下: Gas-CGS)および燃料電池型 CGS(以下: FC-CGS)を採用した。これら機器を組み合わせて 14 種類の住宅型式を選定した。なお, PV から生じた余剰電力のみ電力会社へ売電される。また仮想 MG を導入した場合, 全ての分散型電源から生じた余剰電力を系統電源への逆潮流を行なう。

#### 3.2 各種省エネ機器の運用・解析方法

表 2 に各種省エネ機器の仕様, 初期コストおよび補助金を示す。ヒートポンプの効率はエネルギー消費効率 (Coefficient of Performance: COP) 3.0, GWH の効率は 95% である。PV は最大発電出力 4.28kW とし, Gas-CGS は発電電力 1.0kW, 発電効率および熱回収効率はそれぞれ 22.5%, 63%, 総合効率 85.5%, FC-CGS は最大発電出力 0.9kW, 発電効率 33%, 熱回収効率 51%, 総合効率 84% である。ここで, CGS の運転方法には熱主・一定負荷運転を採用した。熱主・一定負荷運転とは, 熱需要を基準として CGS を定格運転で稼働させ 1 日の総熱需要量を賄う運転方法である。なお, 余剰な熱が発生した際には温水タンクに一時的に蓄える。また, タンクでの熱保存による電力および熱損失は無視し, 熱需要が CGS のみで賄えない場合は一般的に使用されている効率 80% のガス給湯器もしくは GWH を使用する。

一戸当たりの太陽光発電量は太陽光発電システム評価技術の研究開発から 2 月, 5 月, 8 月の京都府南部にお

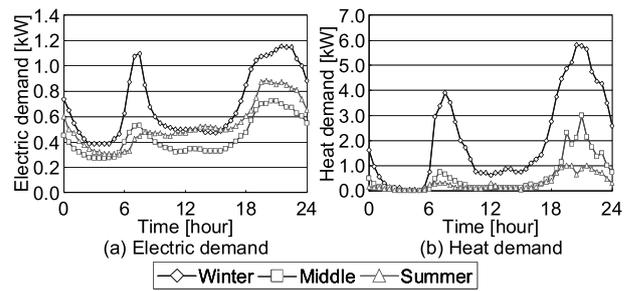


Fig.3 The season of electric and heat demand

ける各時間の日射量データを使用し<sup>3)</sup>, 以下の式より算出した。

$$E = \frac{H \times K \times P}{S} \quad (1)$$

$$K = (1 - \alpha_1) \times (1 - \alpha_2) \times (1 - \alpha_3) \quad (2)$$

ここで,  $E$  は発電量 [kWh],  $H$  は日射量 [kWh/m<sup>2</sup>],  $P$  はパネル容量 [kW] および  $S$  は日射強度とし値は 1 とした。また,  $K$  は設計係数を示しており, 一般的な太陽電池の損失データ<sup>4)</sup> を乗じることによって算出した。なお,  $\alpha_1$  はパワーコンディショナ損失,  $\alpha_2$  は温度上昇による損失,  $\alpha_3$  はそれ以外の損失である

#### 3.3 CO<sub>2</sub> 排出量, 運用コストおよび原価償却期間の算出方法

本研究で使用した 2 月, 5 月, 8 月における 1 日の電力および熱需要の計測値を図 3 に示す。これらの値は京都府南部に位置する関西文化学術研究都市内のニュータウンで行なわれた計測結果を適用している<sup>5)</sup>。なお, 冬期の代表月を 2 月, 中間期を 5 月, 夏期を 8 月とした。

CO<sub>2</sub> 排出量の算出には系統電力使用量および都市ガス使用量に CO<sub>2</sub> 排出源単位をそれぞれ乗じることにより求めた。系統電力の CO<sub>2</sub> 排出源単位には 0.41kg-CO<sub>2</sub>/kWh<sup>6)</sup>, 都市ガスの CO<sub>2</sub> 排出源単位には 2.29 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup><sup>7)</sup> をそれぞれ使用した。

運用コストの算出には各住宅型式の系統電力使用量と都市ガス使用量に電力料金および都市ガス料金をそれぞれ乗じて算出した。なお, 料金表は関西電力<sup>8)</sup>, 大阪ガス<sup>9)10)</sup> の料金表を参照した。CGS および PV から生じる余剰電力の売電価格は 23.3 円/kWh とした。

最後に原価償却期間の算出方法は, 省エネ機器および分散型電源の本体の価格から補助金を減算した金

Table 3 Effect of environmental and economical in distributed power and energy saving device combination

Distributed power	Initial Cost [yen]	Grant [yen]	Year			Cost refund[year]
			CO <sub>2</sub> emission[%]	Running Cost[%]	Reduction cost [yen]	
Standard	131460		100.00	100.00		
Type A	635250	42000	80.74	74.88	55,332	10.7
Type B	451500	23000	92.46	92.60	16,307	26.3
Type C	2446500		48.11	50.70	108,577	22.5
Type D	757800	138000	92.02	76.63	51,477	12.0
Type E			91.60	76.81	51,080	
Type F	3081750	42000	28.85	24.83	165,563	18.4
Type G	2898000	23000	40.57	43.30	124,884	23.0
Type H	1209300	161000	91.94	76.54	51,676	20.3
Type I			90.20	76.00	52,857	
Type J	3204300	138000	40.13	27.27	160,191	19.1
Type K			39.72	28.90	156,606	
Type L	3962100	161000	40.05	27.18	160,390	23.7
Type M			38.31	27.49	159,699	

額を、各種機器を設置したことによる年間の費用削減量で除することで算出している。なお、この原価償却期間の算出はライフサイクルアセスメント(LCA)評価の前半部分である Well to Tank<sup>11)</sup>に対応すると考えている。したがって、原価償却期間は各種機器の製造に必要なエネルギー量を機器の適用により還元できる期間だと間接的に定義した。

#### 4. 解析結果および考察

##### 4.1 各種省エネ機器の組み合わせによる環境・経済性評価

表 3 に各種省エネ機器の組み合わせによる CO<sub>2</sub> 排出量、運用コストおよび原価償却期間を示す。まず、CO<sub>2</sub> 排出量および運用コストに着目すると、表 3 よりいずれの省エネ機器を導入しても一般的な住宅と比較して環境・経済性の効果が得られた。また、いずれの機器においても太陽光発電を設置することで大幅な削減効果が得られた。これは発電時に CO<sub>2</sub> を発生しない上、余剰電力が発生した際には系統電源へ逆潮流可能なため CO<sub>2</sub> 排出量および運用コストが削減したと考えられる。特にオール電化である Type G が最も環境・経済性に優れていた。これは発電時に CO<sub>2</sub> を排出しない PV から発電した電力を HP で使用することが可能となる。そのため、熱供給においても CO<sub>2</sub> は大幅に削減することができたためだと考えられる。次に原価償却期間に

着目すると Type A が最も短い期間を有した。これは、HP を使用することで熱需要に要する投入熱量が少ない。そのためコスト削減効果に大きく起因した上、初期コストが比較的安価なことから最も原価償却期間が短くなったと考えられる。これらのことより環境・経済性の観点から HP および PV のようなオール電化製品を戸建住宅に設置することが最も有効だといえる。また、原価償却の観点では HP を設置することが有効である。しかしながら、Gas-CGS および FC-CGS のような分散型電源を戸建住宅に設置した際、余剰電力が発生する。これら余剰電力は系統電源に売電または地域間で電気融通といった有効利用がなされていない。そのため、このような余剰なエネルギーを有効利用することで更なる環境負荷低減が期待できる。

##### 4.2 仮想マイクログリッドによる環境経済性の評価

4.1 節の結果から仮想 MG には Gas-CGS および FC-CGS に PV および GWH を設置した住宅による仮想 MG の環境・経済性の検証を行なう。

図 4 に Gas および FC-CGS による環境・経済性の比較を行なうために年間の CO<sub>2</sub> 排出量および運用コストを示す。図 4 より、FC-CGS の方が Gas-CGS よりも CO<sub>2</sub> 排出量および運用コストは少ないことが分かった。この原因を調べるため、図 5 に年間の各 CGS における余剰熱量割合および余剰電力量を示す。なお、余剰

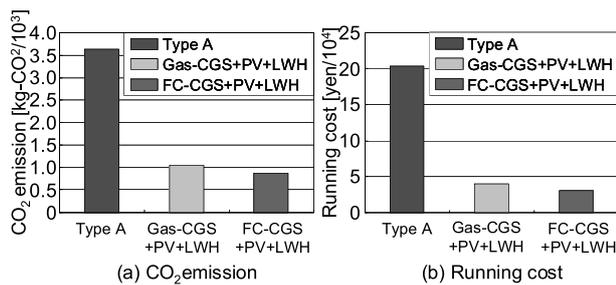


Fig.4 CO<sub>2</sub> emission and running cost of Gas-CGS and FC-CGS

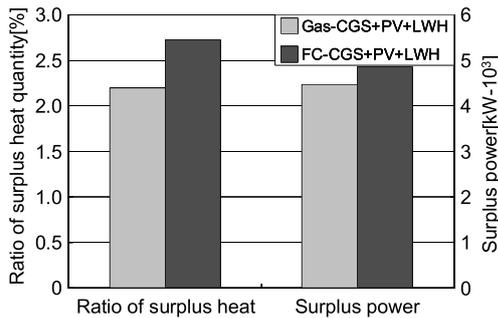


Fig.5 Ratio of surplus heat capacity and surplus power

熱量割合とは CGS から発生した熱量をタンクに蓄えられる最終熱量で除したものである。図 5 より余剰熱量割合および余剰電力両方において Gas-CGS のほうが FC-CGS よりも少ないことが分かる。このことから、余剰熱量による環境・経済性の負荷拡大効果より余剰電力による環境・経済性の負荷低減効果のほうが大きいと考えられる。

従って、余剰電力量が CO<sub>2</sub>排出量および運用コストの削減効果に大きく起因するため、CO<sub>2</sub>排出量および運用コストともに FC-CGSの方が Gas-CGS よりも少なくなったと考えられる。

### 5. 3 軒融通による MG の可能性を検証

4 章より仮想 MG を導入する際、戸建住宅における最適な省エネ機器の組み合わせおよび更なる環境・経済負荷低減効果を把握することが出来た。しかしながら現在、化石燃料を用いる分散型電源の余剰電力を系統電源に売電することは不可能である。そこで、自営線のみを用いて分散型電源の余剰電力を地域内に供給する MG を提案する。これにより、分散型電源から生じるエネルギーの有効利用を図ると同時に、MG の有用性および可能性を確認することが可能となる。本章で用いる需要データとして、本報で使用している電力・熱需要データを基準とし、8 時間ずつ時間を移動

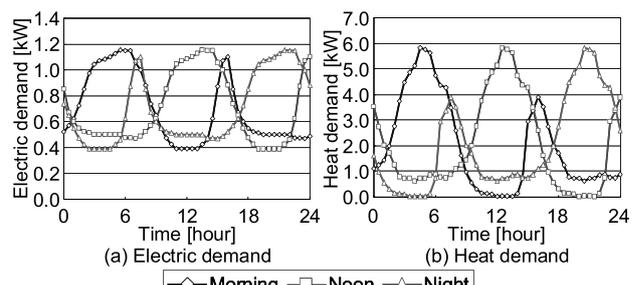


Fig.6 Changed time of electric and heat demand in winter

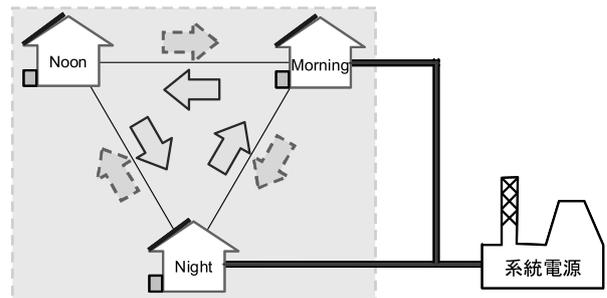
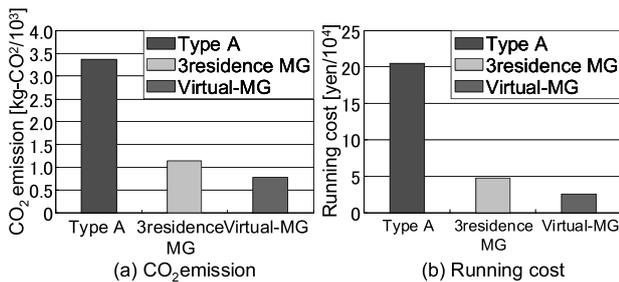


Fig.7 Schematic diagram of micro grid in three residence scale

させた異なる 3 種類のデータを用いる。図 6 に冬期における異なる 3 種類の電力・熱需要を示す。基準となる計測結果を用いた電力・熱需要データは共に夜間に需要のピークを有していることから夜型と定義し、8 時間毎移動させた需要データを朝型および昼型とそれぞれ定義している。

### 5.1 3 軒の電力融通方法および解析手法

図 7 に 3 軒規模の MG の概要を示す。3 軒の住宅間を自営線で結び、住宅間でエネルギー供給を行なう。なお、増大する初期コストを抑制するために蓄電池は設置していない。各住宅には FC-CGS, PV および GWH が設置されており、エネルギー供給を行なう。1 軒の住宅において、電力需要が FC-CGS および PV から発生した電力で賄いきれない場合、他の住宅に設置した FC-CGS および PV から発生した余剰電力が自営線を介して供給される。他の住宅からの電力供給は FC から発生した余剰電力を優先的に融通する。それでも不足した際には系統電源から電力が供給される。住宅間の電力融通方法として、朝型住宅に設置している FC-CGS および PV から発生した余剰電力は昼型住宅に優先的に電力融通を行う。それでも余剰電力が存在し、夜型住宅でも電力が不足した際には電力融通を行なう。同様に昼型住宅は夜型住宅を優先的に電力融通し、朝

Fig. 8 Effect of CO<sub>2</sub> emission and running cost in energy system change

型住宅にも融通する。夜型住宅は朝型住宅を優先的に電力融通し、昼型住宅にも融通する。この融通方法を採用した理由として、2軒の住宅間における融通電力量を検証した。その結果、最も電力融通が行なわれ、余剰電力の有効利用が図られた住宅配置であると考えたためである。太陽光発電の余剰電力は系統電源へ逆潮流可能とし、電力融通を行なった後にFC-CGSの余剰電力が存在する場合は破棄する。なお、熱融通は行なっておらず、熱需要がFC-CGSのみで賄えない場合はGWHを使用する。

解析方法としてはCO<sub>2</sub>排出量および運用コストを用いる。算出方法は本報で使用している電力および都市ガスのCO<sub>2</sub>排出係数および料金表を用いて算出する。また、各住宅間で電力融通される際に生じる融通価格はPVから生じる余剰電力の売電価格と同等の23.3円/kWhとしている。

## 5.2 解析結果および考察

図8に3軒規模のMGと仮想MGにおける年間のCO<sub>2</sub>排出量および運用コストを示す。図8より、各エネルギーシステムを導入することにより環境・経済性の効果は得られた。また、CO<sub>2</sub>排出量および運用コスト両方において仮想MGの方が3軒規模MGより環境・経済性に優れていた。この原因として、エネルギーシステムの違いによる余剰電力の差が考えられる。系統電源へ逆潮流する電力量は仮想MGでは年間4862.1kWhである一方、3軒規模MGでは3716.7kWhである。これは仮想MGにおいてFC-CGSおよびPVから発生した余剰電力は系統電源に売電でき、3軒規模MGではPVのみが系統電源に売電できるためこのような差が生じたと考えられる。従って、システム構成の違いにより余剰電力量の変化が大きく起因したため、CO<sub>2</sub>排

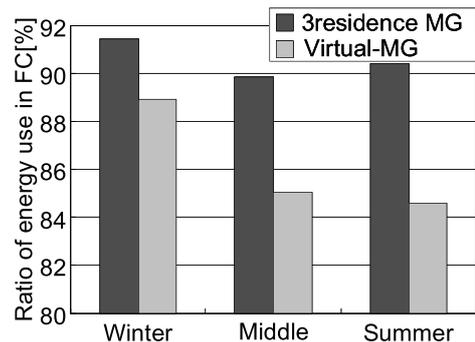


Fig.9 Utilization ratio of FC-CGS in energy system

出量および運用コストともに仮想MGの方が3軒規模MGよりも少なくなったと考えられる。しかしながら、地域内におけるエネルギー有効利用の観点では3軒規模MGの方が仮想MGより利用率は高いと考えられる。そこで、図9に季節別における各エネルギーシステムのFC-CGSの使用率を示す。なお、FC-CGSの使用率はFC-CGSから生成されたエネルギー量を実際に地域内で使用されたエネルギー消費量で除した値である。図9よりいずれの季節においても3軒規模MGの方が仮想MGよりFC-CGSの使用率が增加していることが分かる。このことから3軒規模MGの方が仮想MGより地域内で有効にエネルギー利用が行なわれていると考えられる。以上より、3軒規模MGは仮想MGに比べ、環境・経済性の効果は少ない一方、地域内のエネルギー利用率は向上した。このことから、MG内に蓄電池を導入することにより地域内における更なるエネルギー供給率の向上が期待できる。そして、蓄電池設置によるMG内におけるエネルギーの完全自給が実現する可能性を検証する必要がある。

## 結言

本報では、各種省エネ機器および分散型電源の組み合わせによる環境・経済性を評価した。また、仮想MGを導入した際によるエネルギー機器の最適な組み合わせを調べ、最後に3軒規模MGと仮想MGの比較を行なうことで現状におけるMGの有用性および可能性を検証した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 各種省エネルギーシステムを導入することで環境・経済性の効果を得ることが出来た。また、HPおよびPVの組み合わせが最も効果がある一方、Gas-CGSおよびFC-CGSからの余剰なエネルギーを

有効利用することで更なる環境および経済負荷低減が期待できる。

- (2) 仮想 MG の導入により更なる環境・経済性の効果が得られた。また、仮想 MG において FC-CGS, PV および GWH を導入することで環境・経済性における削減効果が最も期待できる。
- (3) 3 軒規模 MG を導入することで仮想 MG に比べ、環境・経済性の効果は少ない一方、地域内のエネルギー利用率は向上した。また、蓄電池導入によりエネルギー利用率向上の更なる効果が期待できると考えられる。

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業「次世代ゼロエミッション・エネルギー変換システム」の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 浅野浩志, “ホロニック・エネルギーシステム”, 日本機械学会誌, Vol.108, No.1045, pp.54-55, (2005)
- 2) 堀司, 関元, 藤川めぐみ, 千田二郎, “環境共生型エネルギーシステムの住宅地適合研究—同志社山手を対象とした仮想マイクログリッドの電力融通”, 同志社大学理工学研究報告, Vol.49, No.1, (2008)
- 3) 太陽光発電システム評価技術の研究開発, <http://www.pvsystem.net/>, (2007)
- 4) 太陽発電システム, 三洋電機 HP, <http://www.sanyo.co.jp/clean/solar/system/example/index.html>, (2008)
- 5) 佐野史典, “住宅用途別エネルギー消費日負荷曲線の推定—関西文化学術研究都市における計測調査報告(その 1)—”, エネルギー・資源, Vol.24, No.5, pp.50-56, (2003)
- 6) “エネルギーの基礎”, 電気事業連合会, p.28, (2008)
- 7) 東京ガスエネルギーフロンティア, [http://home.tokyo-gas.co.jp/usageguide/usageguide\\_06.html](http://home.tokyo-gas.co.jp/usageguide/usageguide_06.html)
- 8) 関西電力従量電灯 A 料金表, <http://www.kepco.co.jp/home/youkin2-6-h18.html>, (2006)
- 9) 大阪ガス一般ガス料金表, <http://www.kepco.co.jp/home/youkin2-6-h18.html>, (2006)
- 10) 大阪ガス家庭用 CGS 料金表, <http://home.osakagas.co.jp/price/ctoku/ctoku01-home-eco.html>
- 11) “輸送用燃料の Well-to-Wheel 評価 日本における輸送用燃料製造(Well-to-Tank)を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書”, トヨタ自動車株式会社, みずほ情報総研株式会社, (2004)