

太陽電池・燃料電池複合システムに関する研究

Study on photovoltaic and fuel cell hybrid system.

沖村 祐也 *1
Yuya OKIMURA

鮎澤 優輔 *2
Yusuke AIZAWA

田子好孝 *2
Yoshitaka TAGO

中村 雅 *2
Masashi NAKAMURA

原山直樹 *2
Naoki HARAYAMA

平田陽一 *3
Youichi HIRATA

谷辰夫 *4
Tatsuo TANI

Abstract

As a new energy supply system, authors advocate the hybrid system which combined the photovoltaic and the fuel cell, and are examining the profitability. In this Paper, the PV&FC system was used supposing the community. As energy supply system of PV&FC two kinds of housing models were considered and compared.

キーワード：太陽電池、燃料電池、複合システム

Keywords : photovoltaic, fuel cell, hybrid system

1. はじめに

我々の生活は石油に支えられている。しかし、エネルギー多消費による地球温暖化、新興諸国の発展に伴う原油の需要増加と枯渇化、原油価格高騰と価格不安定などの問題により、現在の石油をベースにした社会システムを見直す必要に迫られている。筆者らは新しいエネルギー供給システムとして、太陽電池（以下 PV という）と燃料電池（以下 FC という）を組み合わせた複合エネルギー供給システム（以下 PV&FC システムという）を提唱し、その有効性を検討している。

本論文では、電力系統から完全に独立した 10 軒の個人住宅から構成される小さなコミュニティを想定し、コミュニティの年間負荷電力量を PV&FC システムを用いて供給した際のシステム特性をシミュレーションし論述している。シミュレーションに当たっては、PV&FC システムの設置方式として集合型と分散型の 2 種類を想定した。また、個人住宅の負荷電力量はいずれも 4,000kWh/年一定とし、負荷形状率を定義するとともに年間の負荷電力パターンを 15 種類用意し 3 つのグループに分類した。ついで、15 種類の負荷電力パターンから 10 種類の負荷電力パターンを無作為に抽出して 1 つのコミュニティにおける負荷電力データとした。このときの組み合わせは 3,003 通りあり、すべての組み合わせについてシミュレーションを行い結果の精度を高めた。

システム特性は負荷形状率の変化に対する必要最小 PV アレイ面積、PV 最大出力、FC 最大出力、最大水素貯蔵量であり、いずれも 2 種類のシステム設置方式について比較している。また、既存の系統連系システムとの年間の CO₂ 排出量についても比較している。

システム設置方式である集合型と分散型は以下に示す。

集合型

このシステムは一ヶ所に設置した PV&FC で 10 軒の個人住宅に供給するシステムである。Fig.1 はシステムの概略図である。

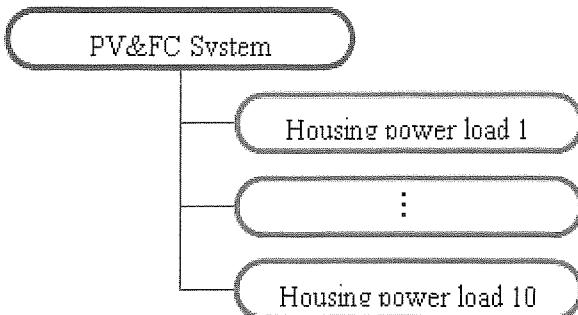


Fig.1 Condominium system

分散型

小規模な PV&FC システムを個人住宅 1 軒毎に設置し、個人住宅に供給するシステムである。Fig.2 はシステムの概略図である。

*1 講師東京理科大学院生(〒391-0292 長野県茅野市豊平5000-1)
e-mail : tani@rs.suwa.tus.ac.jp

*2 講師東京理科大学卒研究生

*3 講師東京理科大学講師

*4 講師東京理科大学教授

(原稿受付: 2007年3月5日)

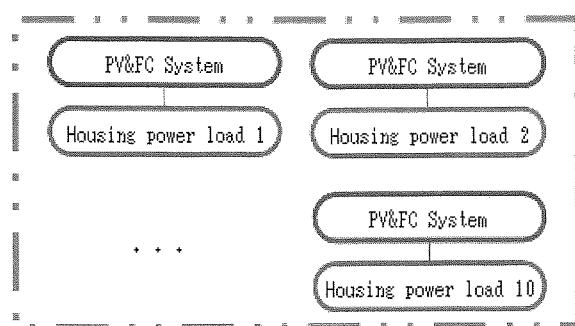


Fig.2 Distributed system

2. エネルギー供給システム

2.1 エネルギー供給システム構成図

エネルギー供給システムはFig.3に示すように太陽電池アレイ、インバータ、水素モジュールから構成されている。水素モジュールとはDC-DCコンバータ、水素発生器、水素吸蔵合金(MH)、燃料電池をまとめたものである。

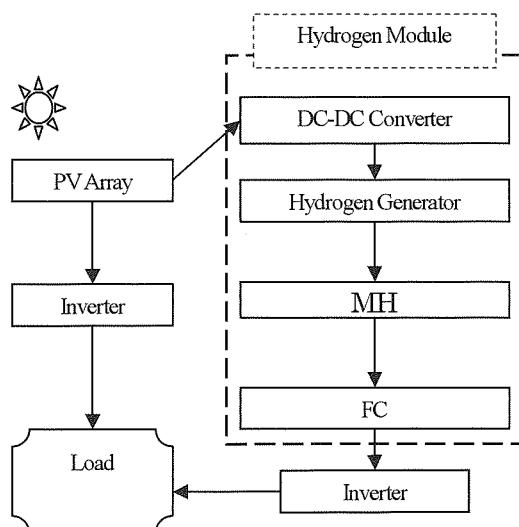


Fig.3 System architecture

2.2 システム動作

太陽電池アレイで発電された電力は、インバータを通して負荷に供給される。負荷電力に対して太陽電池アレイの出力が多い場合、余剰電力は水素モジュール内の水素発生器により水素に変換され水素吸蔵合金に蓄積される。負荷電力に対して、太陽電池アレイ出力が不足した場合には、水素モジュール内の水素吸蔵合金より水素を取り出し、燃料電池を用いて電力を取り出す。

2.3 太陽電池モジュール

PVシステムの出力算出には次式を用いる。

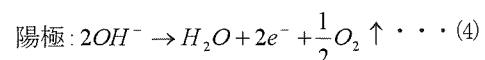
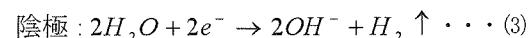
$$P(n) = P_0 \{1 + \alpha(T_c - T_0)\} \quad \dots \quad (1)$$

$$P_o = I \times S \times \eta_1 \times \eta_2 \quad \dots \quad (2)$$

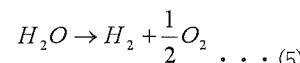
ここで、 $P(n)$:1月1日0時からn時間後の発電量 [kWh]、 P_0 :外気温度25°C時の発電量 [kW]、 $\alpha=0.005$:多結晶Si温度変化係数、 T_c :n時間後の外気温度+25 [°C]、 T_0 :基準温度25 [°C]、 I :1時間当たりの日射量 [kWh/m²]、 S :太陽電池アレイ面積 [m²]、 η_1 :太陽電池アレイの変換効率、 η_2 :パワーコンディショナの変換効率をあらわしている⁽¹⁾。

2.4 水素発生器

水素発生器は、固体高分子電解質水電解方式を想定した。水の電気分解において、陰極、陽極ではそれぞれ次のような反応が起こる。



この二つの反応式を辺々加算すると全体で以下のようになる。



陰極電圧 E_c 、陽極電圧 E_A とするとそれらの反応を右に進めるのに要する最小の電圧は $E_c - E_A$ で、溶液のpHに関係なく1.229V(論理電解電圧)である。

したがって、1molの水素と1/2molの酸素を発生させるのに要するエネルギーは反応式の電子数2e⁻によって、電気量2Fを要する。ファラデーの法則から、

$$2F \times 96,485C \times 1.229V = 27,160J = 65.9Wh$$

となる。すなわち、全体の反応は65.9Whに相当する電気エネルギーによって生じることになる。

ここで、水素発生器の効率を80%として、電気エネルギー73.2Whで水素を1mol発生させるとした。

2.5 水素吸蔵合金

水素吸蔵合金(LaNi₅)は水素発生器により生成された水素を貯蔵する。水素の貯蔵、放出には水を循環させ利用する。貯蔵は冷却水を用い、放出には燃料電池の排熱を利用した温水を循環させ水素吸蔵合金に熱量を与えるものとした。貯蔵、放出の速度は常温で十分速いものであり、水素吸蔵合金の変換効率を定格容量に対する負荷率に関係なく98%一定とした。

2.6 燃料電池

燃料電池は固体高分子方燃料電池を想定した。燃料電池の発電効率は、出力1kWのシステムを参考に40.0%と仮定した⁽²⁾。

燃料電池のシミュレーションにおいて、次の3つの条件の下で動作するものとする。(1)燃料電池の起動・停止は瞬時に行われるものとする(2)燃料電池の発電効率を定格容量に対する負荷率に関係なく40.0%一定とする(3)燃料電池の廃熱を水素貯蔵

容器で使用する。

燃料電池発電で必要な水素量は、燃料電池の変換効率 η を40.0%と仮定しているため、1molの水素量で33.0Whの電気エネルギーが発生するよう定義した。この仮定のもと水素エネルギーと水素量の変換時の係数として用いた。

2.7 DC-DCコンバータ

DC-DCコンバータは太陽電池アレイの発生電力を制御すると共に、DC-DCコンバータの変換効率を定格容量に対する負荷率に関係なく95.0%一定とした⁽³⁾。

3. シミュレーション

3.1 各要素の変換効率

Table 1は完全独立型の個人住宅負荷電力4000kWh/年に用いるエネルギー供給システムの仕様である。各項目は2章に示す効率を用いている。また、PVについては現在稼働中のPVを参考に近い将来の技術進展を考慮して効率15.0%と仮定した。

Table 1 Specifications

Subsystem	Conversion Efficiency [%]
PV Array (Polycrystalline Si)	15.0 (A.M=1.5, 1kW/m ²) Cell Temperature 25°C
DC-DC Converter	95.0
Hydrogen Generator	80.0
Metal Hydride	98.0 (Charging) 98.0 (Discharging)
Fuel Cell (Polymer Electrolyte)	40.0 (Electric Power) 40.0 (Heat)
Inverter	95.0

3.2 環境データ

PVアレイへの入力環境データには、METPVデータ(諏訪・真南・傾斜面30°・外気温度)より連続する1時間毎のデータ1年分(8,760時間)の傾斜面全天日射強度と外気温度を用いた⁽⁴⁾。

3.3 シミュレーション方法

PV&FCシステムシミュレーションフローチャートをFig.4に示す。このフローチャートは、コミュニティにおける電力の発電・消費を1時間ごとに1年間分計算するものである。

PV&FCシステムシミュレーションにおいて、PVアレイ面積を可変とし、PV&FCシステムが系統から独立して運用する事が出来る最小のPVアレイ面積を求めると共に、必要となるFC定格容量、最大水素貯蔵量を算出した。

3.4 負荷電力パターンと負荷形状率

負荷電力パターンは1年間を通して、消費電力の一時間毎の変化状況を示したものである。本論文では平均的な4人家族での住宅を想定し、実測値を元にモデル化した15種類の負荷電力パターンを用いた⁽⁴⁾。

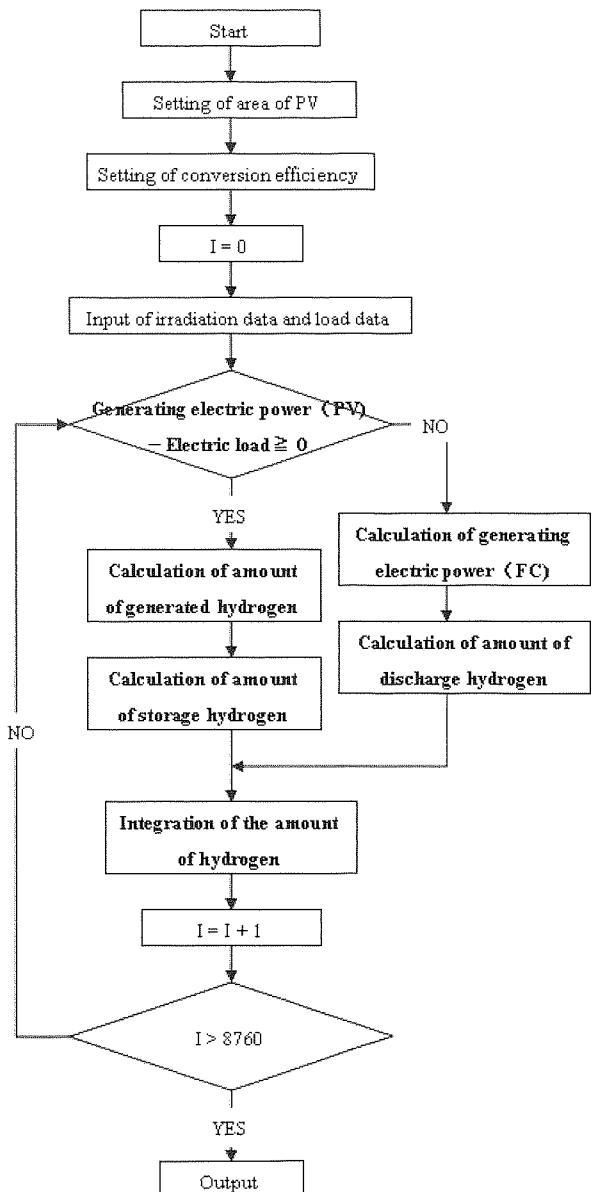


Fig.4 Flow chart

負荷電力パターンのモデル化にあたり、各個人住宅における年間総電力消費量にバラつきが無いように、1軒当たりの年間負荷電力量の積算量を4,000kWhに規格化した。負荷電力パターンは春期(3月～5月)、夏期(6月～8月)、秋期(9月～11月)、冬期(12月～2月)の4種類とし、各々の期間中はいずれも同一パターンとした。Fig.5は負荷電力パターンの一例で、横軸は時間であり縦軸は電力である。

また、負荷電力パターンを分類するために負荷形状率を定義した。Fig.5に対応した年間(8,760時間)を通して1時間毎の負荷電力量を降順に並べたものをFig.6に示す。

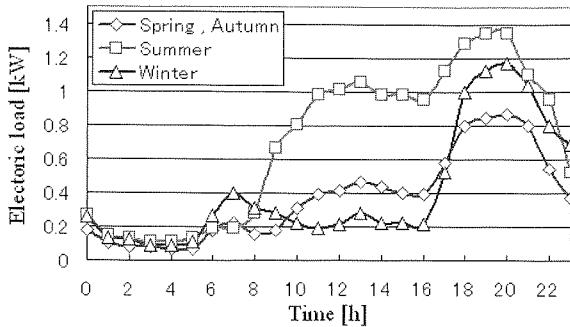


Fig.5 Daily electric load patterns

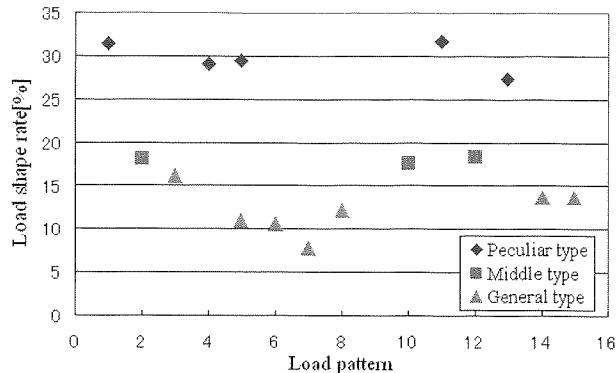


Fig.7 Classified load shape rate

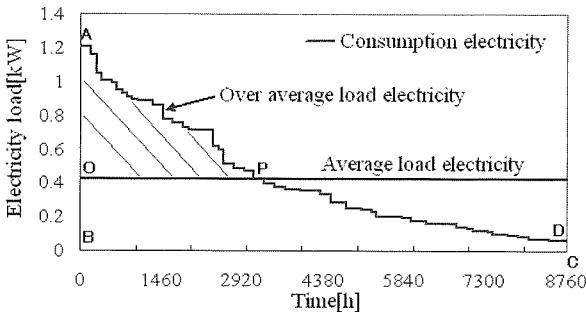


Fig.6 Load shape rate

負荷形状率は、年間の合計負荷電力量（ABCDに囲まれた面積4000kWh）に対する年間の負荷電力量平均値以上の合計負荷電力量（AOPに囲まれた面積1263.2kWh）の割合である。この値が大きいほど負荷電力の変動が激しいことを示す。負荷形状率は式(6)を用いている。

$$\text{負荷形状率} = \frac{\text{平均負荷レベル以上の 負荷電力量}}{\text{年間の負荷電力量}} \times 100 [\%] \quad \dots (6)$$

Fig.6における負荷形状率は、式(6)より、

$$\text{負荷形状率} = \frac{AOP}{ABCD} \times 100 = 31.58 \%$$

と求めることができる。

3.5 負荷電力パターンの特性分類

シミュレーションに用いた15種類の負荷電力パターンについて、式(6)を用いて負荷形状率を求めたものをFig.7に示す。Fig.7のうち、負荷形状率を用いて負荷を分類した結果、ひし形印で表された負荷形状率の大きいグループを特異型、四角印で表された負荷形状率が中くらいのグループを中間型、三角印で表された負荷形状率が低いグループを一般型とした。ここで、Fig.5の負荷電力パターンの負荷形状率は31.58%であるためFig.7より特異型に分類される。

3.6 CO₂換算

求めた余剰・不足電力量、負荷電力量をベースとし、パターン毎のCO₂排出量を算出した。CO₂排出量を計算する際、商用電源の1kWh当りのCO₂排出原単位は0.349kg-CO₂/kWh、太陽光発電0.053kg-CO₂/kWh、燃料電池0.064kg-CO₂/kWhとした⁽⁷⁾。

4. シミュレーション結果

集合型と分散型の負荷形状率に対するシステム特性の比較を行った。1つのコミュニティの負荷形状率は異なる負荷形状率10軒分の平均値である。なお、集合型と分散型において同じ負荷電力パターンの組み合わせを持つコミュニティにおける負荷形状率は同じ値である。また、本論文におけるFig.8～Fig.10に示す縦軸の値はコミュニティ内の1軒分の値である。集合型はシミュレーション結果をコミュニティ軒数である10軒で割り1軒分の値とした。分散型は負荷電力パターン10軒について、1軒ごと戸別にシミュレーションを行い、得られた値の平均値を1軒分の値とした。さらに、シミュレーションは3,003通りの結果である。

4.1 PVアレイ面積

Fig.8は最小PVアレイ面積について求めた集合型と分散型の結果である。Fig.8の横軸は負荷形状率であり縦軸は必要最小PVアレイ面積である。Fig.8のPVアレイ面積は提唱したPV&FCシステムを系統から独立して運用するために必要な最小の値である。Fig.8より、最小PVアレイ面積に関しては集合型と分散型で差が見られないことが分かった。

4.2 PV最大出力

PV最大出力とは、一年間のシミュレーションを行った場合に、PVが発電する最大の電力の事を示す。つまり、PV&FCシステムを設計する際は、この値以上の定格を持ったPVを選定すれば独立電源システムとしてPV&FCシステムを運用する事が出来る。PV最大出力はPVアレイ面積に比例するため、Fig.8と同様な傾向の図となり、集合型と分散型の差はほとんど見られない結果となった。

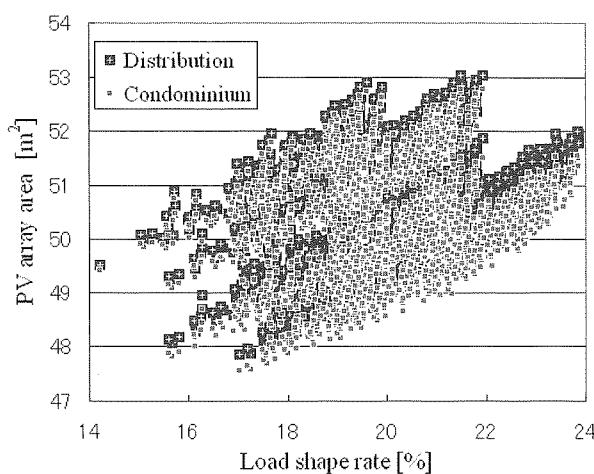


Fig.8 Load shape rate to PV array area

4.3 燃料電池最大出力

Fig.9 は FC 最大出力について求めた集合型と分散型の結果である。Fig.9 の横軸は負荷形状率であり縦軸は FC 最大出力である。Fig.9 より、分散型は負荷形状率が上がるにつれて FC 最大出力も上昇するが、集合型は負荷形状率が上昇しても FC 最大出力がそれほど上がらないことがわかる。集合型が分散型より負荷形状率に対する FC 最大出力の増加が少ないのは、負荷電力が平準化されているため全体的な電力を抑えることができ、FC 最大出力も抑えられたためである。

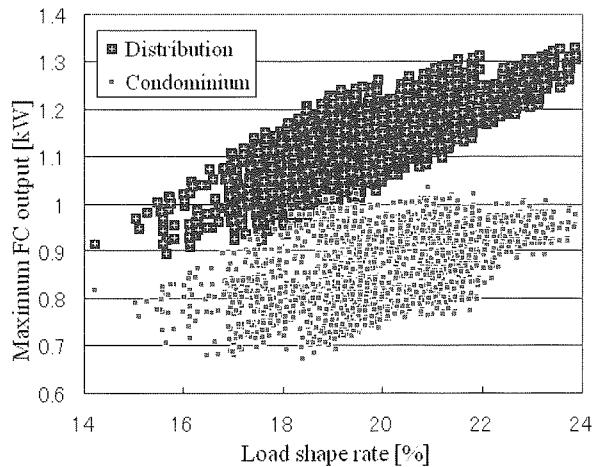


Fig.9 Load shape rate to maximum FC output

4.4 最大水素貯蔵量

Fig.10 は最大水素貯蔵量について求めた集合型と分散型の結果である。Fig.10 の横軸は負荷形状率であり縦軸は最大水素貯蔵量である。最大水素貯蔵量は水素吸収合金の重量の決定に重要な値である。集合型にすることで最大水素貯蔵量を減少させて

いる。しかし、負荷電力の平準化によって負荷形状率が同じであってもばらつきが分散型より大きい傾向を持つ結果となった。

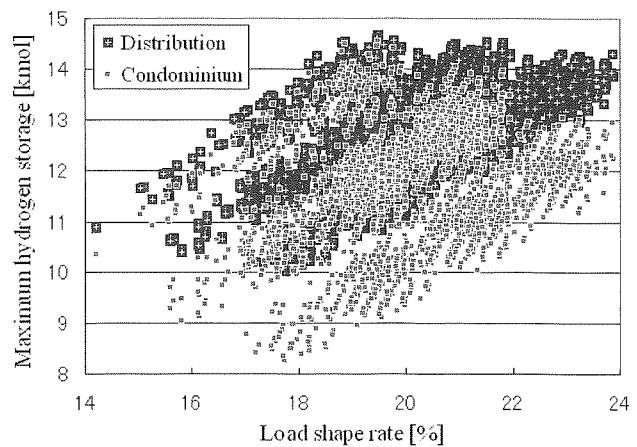
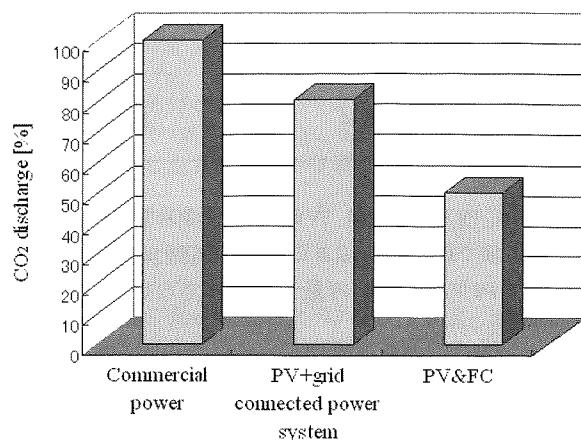


Fig.10 Load shape rate to maximum hydrogen storage

4.5 各システムにおける CO₂排出量

Fig.11 は商用電源のみと PV+系統連系システム、PV&FC システムの 3 種類の CO₂ 排出量について比較した。年間負荷電力量を 4,000kWh として、PV+系統連系システムの PV アレイ面積は本論文で用いた Table 1 の効率を使用して 20 m²とした。PV&FC システムは独立電源として運用可能な値を用いる必要がある。しかし、コミュニティの組み合わせが 3,003 通りあり、それぞれが異なる PV アレイ面積、FC 容量を持つためシミュレーション結果より得られた平均値である PV アレイ面積 50.5 m² と FC 容量 1.14kW を用いて PV&FC システムの CO₂ 排出量を算出した。

Fig.11 Comparison of CO₂ discharge

CO₂ の排出量は商用電源のみを 100%としたとき PV+系統連系システムでは 80.6% であり、PV&FC システムでは 49.9% となった。

PV+系統連系は、不足分を買電しなければならないため結果として、約20%削減するだけにとどまった。PV&FCシステムは、PVの発電電力を住宅負荷に供給すると共に余剰・不足電力が生じたときには水素モジュールを利用できるため、約50%の削減につながった。

5. まとめ

本論文では新しいエネルギー供給システムとして電力系統から完全に独立したPV&FCシステムを提唱し、個人住宅10軒の小コミュニティとして集合型と分散型の2種類にPV&FCシステムを設置した場合の比較を行い、システム特性の有効性を検討した。

3,003通りの集合型と分散型のPV&FCシステム設置方式についてシミュレーション結果より、Table 2はPVについて、Table 3は水素モジュールについて示す。

Table 2 Comparison of PV system

	PV array area [m ²]	Maximum PV output [kW]
Condominium System	50.15	6.25
Distributed System	50.49	6.29

Table 3 Comparison of Hydrogen Module

	Maximum FC output [kW]	Maximum hydrogen storage [kmol]
Condominium System	0.85	11.49
Distributed System	1.14	12.68

Table 2は、PVアレイ面積、PV最大出力の集合型と分散型それぞれの平均値である。Table 2より、PV&FCシステムの設置方式の違いによるPVアレイ面積、PV最大出力の大きな変化はみられないことが分かった。

Table 3は、FC最大出力、最大水素貯蔵量の集合型と分散型それぞれの平均値である。

Table 3より、FC最大出力について集合型は分散型の75%の値となった。つまりPV&FCシステムを集合型として設置した場合、分散型よりも25%小さい定格のFCでシステムを運用出来る事が分かった。また、最大水素貯蔵量について集合型は分散型より水素吸蔵合金内に貯蔵される最大水素量が約10%少なくできた。つまり水素吸蔵合金の容量を小さくすることが可能であると言える。したがって集合型と分散型のPV&FCシステムの水

素モジュールを比較した場合、集合型はFC定格容量と水素吸蔵合金を分散型より小さく出来る事がわかった。これは集合型を用いることで電力負荷が平準化され、電力不足時における水素モジュールへの依存度が低減されるためと考えられる。

以上の結果から、PV&FCシステムの設置方式は負荷電力を平準化できる集合型にすることで水素モジュールへの依存を少なくできることが分かった。

また、PV&FCシステムは独立電源で系統連系していないためエネルギーを無駄なくコミュニティに供給することができ、CO₂排出量を抑えることが分かった。

参考文献

- 1) 谷・安藤・平田・閑口；「太陽電池(原理から応用まで)」，パワーアーク，51-65，(2004.10)
- 2) 財団法人 エネルギー総合工学研究所；新エネルギーの展望 燃料電池-再改訂版-, P28(2006-3)
- 3) 星野正人・工藤公正・木村軍司・塩谷己津雄；「太陽光発電システムにおけるDC-DCコンバータおよびインバータに関する研究」，電気学会半導体電力変換資，SPC-88-36, p. 53～p. 60(1998)
- 4) NEDO ; NEDO 資料「標準気象データ(METPV-2)」
<http://www.nedo.go.jp/METPV2.exe>; 2006.5.16 取得
- 5) 大橋博之・田中昭雄・中上英俊；「家庭における待機時消費電力の実態調査」，エネルギー・資源学会 第17回エネルギー・システム・経済・環境コンフェレンス講演論文集，209-214 (2001.1)
- 6) (社)日本建築学会 住宅内のエネルギー消費量に関する調査研究委員会；住宅におけるエネルギー使用費データベース
<http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/database/index.htm>; 2006.8.19 取得
- 7) (財)電力中央研究所；「ライフサイクルのCO₂排出量を電源別に求める」，(財)電力中央研究所 広報部，(2000.10)
- 8) 閑口直俊；「太陽エネルギーによる水素製造・貯蔵・利用システムに関する研究」，東京理科大学学位論文，(1997.3)
- 9) 小林・下川・谷・平田；「太陽エネルギーによる水素利用システムに関する研究(2)」，H18電気学会全国大会論文集，7-030，(2006.3)
- 10) 沖村・鮎澤・田子・中村・原山・平田・谷；「太陽電池・燃料電池複合システムに関する研究」，日本太陽エネルギー学会，日本風力エネルギー協会論文集，No53, 265-268 (2006.10)