

太陽電池・燃料電池複合システムに関する研究 (2)

Study on photovoltaic and fuel cell hybrid system (2)

沖村 祐也 *2
Yuya OKIMURA

鮎澤 優輔 *1
Yusuke AIZAWA

小林 哲也 *2
Tetsuya KOBAYASHI

島田 有宇斗 *2
Yuto SHIMADA

平田 陽一 *3
Youichi HIRATA

谷 辰夫 *4
Tatsuo TANI

Abstract

Our life is supported to oil. However, it is necessary for us to change the society system which depended on current oil by the problems such as the global warming. 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. I demanded it about a system characteristic when electricity and the heat supplied it by the simulation. In addition, I demanded it about the CO₂ discharge.

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

地球温暖化への対策は産業界を巻き込んだ大きなうねりとなりつつある。しかし、家庭部におけるCO₂の排出量は、減少するどころか増加の傾向にある。筆者らは、家庭部におけるCO₂排出量の削減対策の一つとして、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)を提案し、システムの有効性を報告している⁽¹⁾。

前報では電力系統から完全に独立した一般住宅へPV/FCシステムを用いて電力を供給する場合について考察した。PV/FCシステムの設置方式として、一台のシステムを集中設置し共同利用する方式と個々の住宅に個別設置する方式について、シミュレーションを用いて比較を行った。結果、個別設置方式に比べて、集中設置方式が、水素貯蔵容量と燃料電池定格を小さくできシステムの有効活用が可能であるとの結論を得た。

本論文は第二報として、熱供給まで含めた一般住宅用PV/FCシステムの諸特性について論じたものである。なお、本システムが実現される時期を2010年代後半と想定した。このため、現

状よりも高い効率を使用してシミュレーションしている個所が存在する。しかし、今後の技術進歩において十分到達可能な水準だと考えている。

2. 太陽電池・燃料電池複合システム

2.1 エネルギー供給システムの構成とその動作

筆者らが提案するPV/FCシステムとは電力系統、ガス供給網から切り離され、エネルギー的に独立して運用する事が可能なシステムである。

Fig.1にPV/FCシステムのブロック図を示す。PV/FCシステムは、太陽電池アレイ、インバーター、水素モジュール、貯湯槽、ヒートポンプ、そしてこれらの機器を統合して制御するコントローラーから構成される。このうち、太陽電池アレイ、インバーター、水素モジュールに関しては前回と同等のシステムを想定しており、本論文ではTable 1に示す定格と、Table 2に示す変換効率に関する記述のみに留めている。ここでは、本論文で新しく追加した要素である、ヒートポンプ、貯湯槽の詳細について述べる。

2.1.1 ヒートポンプ

ヒートポンプ(以下HPという)は自然冷媒ヒートポンプ式電気給湯機(エコキュート)型を想定した。HPを用いて給湯を行う場合の消費電力は次の式(1)より算出した。

$$L = \frac{Q}{APF} \cdots (1)$$

ここで、Q:必要熱量[kW]、L:消費電力量[kW]、APF:年間給湯効

*1 諏訪東京理科大学院生 (〒391-0292 長野県茅野市豊平5000-1)

E-mail: tani@rs.suwa.tus.ac.jp

*2 諏訪東京理科大学卒研究生

*3 諏訪東京理科大学準教授

*4 諏訪東京理科大学教授

(原稿受付: 2008年3月25日)

率である。APFはカタログより3.0と想定した⁽³⁾。

2.1.2 貯湯槽

貯湯槽内の温度変化は(2)式を用いて算出した。

$$T_s^+ = T_s + \frac{1}{(mC_n)} [Q_u - L_s - (UA)_s (T_s - T_a)] \cdots (2)$$

ここで、 T_s^+ :1時間後のタンク内の液体温度[°C]、 m :質量[kg]、 C_p :タンク内の液体の比熱[J/kg°C]、 T_s :タンク内の液体温度[°C]、 T_a :周囲温度[°C]、 Q_u :熱源からエネルギーを満たす率[W]、 L_s :負荷による熱除去率[W]、 U [W/m²°C]:タンクの中の液体と外気の間の総括伝熱係数、 A [m²]:貯蔵タンクの表面積である⁽⁴⁾。

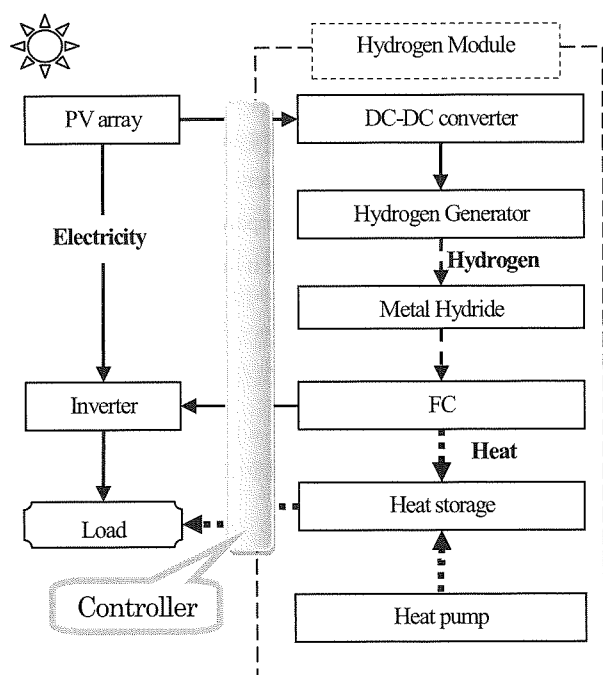


Fig.1 PV/FC System

システムの動作については以下の様である。PV/FC システム運転時の動作フローチャートを Fig2 に示す。PV/FC システムは完全独立型システムであるため、システムへのエネルギー入力は太陽電池アレイのみによる。電力負荷に対して太陽電池アレイの出力が多く、余剰電力が発生した場合、余剰電力で HP を定格出力までの間で駆動し、貯湯槽に温水を蓄える。HP を駆動した後、更に電力が余っている場合には、水素モジュール内の水素発生器により余剰電力を水素に変換し水素吸蔵合金に蓄積する。夜間や天候悪化により太陽電池アレイ出力が減少し、発電電力量が電力負荷に対して不足した場合には、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供給する。また、熱負荷に対して貯湯槽の残量が不足した場合には、FC と HP を稼働し必要な熱を供給する。このため、湯切れは無いとする。

3. システム設置方式

PV/FCシステムはたくさんの構成要素により構成されるシス

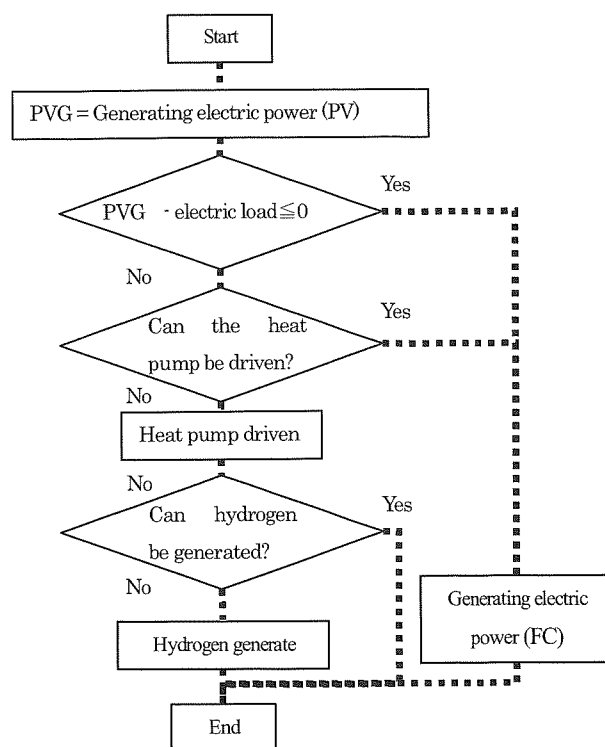


Fig.2 Flow chart

テムである。このため、出力の大きなシステムを一台設置し共有する事によりスケールメリットを生かして設置コストを低下させる可能性があると考えられる。また、PV/FC システムは大量の水素を貯蔵するシステムであり、その管理は正しい知識を持った者が行うことが望ましい。以上のような要件に基づき、筆者らは PV/FC システムの設置方式としては一台の PV/FC システムを何軒かの住宅で共同利用する設置方式が望ましいと考えている。本論文においては 10 軒の一般住宅から構成される小コミュニティを想定した。このコミュニティとは小規模な集合住宅やニュータウンを想定している。コミュニティに PV/FC システムを導入する場合における設置方式別の特徴を見出すために、集中設置方式と散設置方式という二種類の設置方式を定義する。

・集中設置方式

10軒の一般住宅から構成される小コミュニティにFig.1におけるHydrogen Moduleを一台設置する。各住宅にはPVシステムを設置し、それらのPVで発電された電力はコミュニティ内に敷設された自営電力線を通じて住宅間で相互融通される。この時、電力が余った場合には、Hydrogen Module内の水素発生器を用いて水素を生成し貯蔵する。なお、今回のシステムは狭い範囲にシステムと需要家が存在するものとした。このため、自営線による損失は考慮していない。

- ・分散設置方式

小コミュニティ内の住宅一軒毎に一台の PV/FC システムを設置しエネルギーを供給する設置方式である。

4. 負荷パターン

小コミュニティを構成する住宅における、エネルギーの消費パターンとして、電力負荷パターンと熱負荷パターンを一組とした、負荷パターンを15種類作成した。各パターンは1年間を通して、エネルギー消費の1時間毎の変化状況を保持したものである。

負荷パターンを作成するにあたって、エネルギーを消費する対象は平均的な4人家族の住宅を想定し、実測値を参考にした⁽⁵⁾。

4.1 電力負荷パターン

電力負荷パターンは1年間を通じての電力負荷をモデル化したものである。一つのパターン内において、春期(3月~5月)、夏期(6月~8月)、秋期(9月~11月)、冬期(12月~2月)の各々の期間中はいずれも同一パターンとした。電力負荷パターンのモデル化にあたり、1軒当たりの年間電力負荷量の積算量を4,000kWhに規格化した。

4.2 熱負荷パターン

熱負荷パターンは1年間を通じての給湯負荷(主に浴湯用)をモデル化したものである。一つのパターン内において、熱負荷の形状は1年間同一パターンとした。熱負荷パターンのモデル化にあたり、一年を通して、水道の入水温度を13.5℃、湯の出口温度を65℃、一日の消費量を250literとし、年間積算量を5475kWhとし規格化した⁽⁶⁾。

4.3 負荷形状率

負荷を分類する指標として式(3)に定義式を示す負荷形状率を定義した。この指標は、負荷の変動の大きさを表している指標であり、値が大きいほど負荷変動が激しいことを示す。

$$\text{負荷形状率} = \frac{\text{平均負荷レベル以上のエネルギー消費電力量}}{\text{年間積算のエネルギー消費量}} \times 100 \quad [\%] \dots (3)$$

Fig.3に、作成した15種類の負荷パターンの分布を示す。Fig.3において、縦軸は負荷パターンが持つ電力負荷の負荷形状率であり、横軸は熱負荷の負荷形状率である。

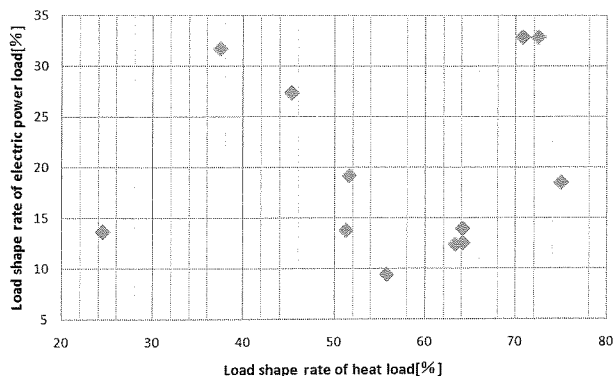


Fig.3 Distribution of load shape rate of electric power load and load shape rate of heat load

5. シミュレーション

本シミュレーションは、熱供給まで含めたPV/FCシステムに

おいて、エネルギー的に独立して一年間を運転できる、最小PVアレイ面積、燃料電池瞬時最大出力、最大水素貯蔵量を求めた。これらの項目に関するシミュレーションを分散設置方式と集中設置方式という二種類の設置方式にそれぞれについて行い結果を比較した。

5.1 負荷の設定

本論文では負荷パターンを15種類作成した。想定している小コミュニティは10軒で構成されるため、一つの小コミュニティにおける負荷の構成は作成した15種類の負荷パターンの中から10種類の負荷パターンを取り出して構成する事が出来る。小コミュニティのシミュレーションに使用することが出来る負荷パターンの全組み合わせ方法は ${}_{15}C_{10}$ より3003通りとなる。これにより様々な形状の負荷に対するPV/FCシステムの特性を解析する事が可能となった。

Fig.4に3003通り全組み合わせにおける、集中設置方式と分散設置方式の熱負荷と電力負荷の負荷形状率の分布を示す。なお、分散設置方式の値は10軒個々の負荷形状率の平均値である。

Fig.4において、集中設置方式における熱負荷の負荷形状率の平均値は38.3%、電力負荷の負荷形状率の平均値は10.6%である。これに対して、分散設置方式における熱負荷の負荷形状率の平均値は62.3%、電力負荷の負荷形状率の平均値は19.9%である。両者を比較すると、集中設置方式の熱負荷の負荷形状率の平均値は、分散型の熱負荷の負荷形状率の平均値に対して61.5%にまでなっている事がわかる。同様に、電力負荷の負荷形状率の平均を比較すると53.3%の大きさになっている事がわかる。これらの結果より、集中設置方式を採用すると分散設置方式と比べて負荷の変動を小さくする事が可能である。

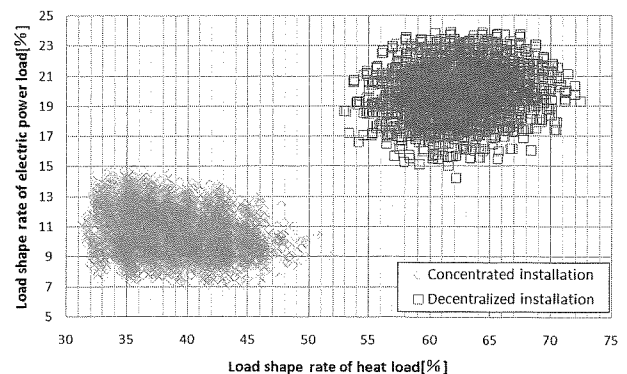


Fig.4 Distribution of load shape rate of each installation configuration

5.2 各要素の変換効率

シミュレーション時に想定した、エネルギー供給システムの仕様としてTable 1に機器の定格出力を、Table 2に機器の変換効率を示す。

5.3 環境データ

太陽電池アレイからの出力の算出、蓄湯槽の熱損算出には、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⁽⁷⁾。

Table 1 Ratings of apparatus

Apparatus	Rating
Heat storage	250[liter](Decentralized installation)
	2,500[liter](Concentrated installation)
	Heat loss Coefficient :
	11.1[W/m ² ・℃]
Heat pump	Tank surface area :
	3.0[m ²](Distribution)
	13.0[m ²](Condominium)
Heat pump	5[kW] (Decentralized installation)
	50[kW] (Concentrated installation)

Table 2 Specifications

Subsystem	Conversion Efficiency [%]
PV Array (Polycrystalline Si)	15.0 (A.M=1.5, Cell Temperature 25℃)
DC-DC converter	95.0
Hydrogen Generator	80.0
Metal Hydride (LaNi ₅)	80.0 (Charging)
	80.0 (Discharging)
Fuel Cell (Polymer Electrolyte)	40.0 (Electric Power)
	33.0 (Heat)
Inverter	95.0

6. 結果と考察

本章では、シミュレーション結果として、集中設置方式と分散設置方式における、電力負荷の負荷形状率に対するシステム特性を示す。ここでは、結果の表示方法について説明する。

Fig.5 に、HP が消費した電力量を含んだ電力負荷の負荷形状率と熱負荷の負荷形状率の関係を示す。Fig.5 において、縦軸は電力負荷の負荷形状率を示し、横軸は熱負荷の負荷形状率を示す。

Fig.6～Fig.8 に、システム構成要素の特性と電力負荷の負荷形状率の関係を示す。Fig.6～Fig.8 において、縦軸は構成要素の特性を示す。この値はコミュニティ内の 1 軒分の値である。集中設置方式の場合、この値は結果をシステム利用軒数(10 軒)で除した値である。分散設置方式の場合、この値はコミュニティを構成する個々の住宅における値の平均値である。Fig.6～Fig.8 において、横軸の値は 6.1 節にて詳細を述べる値である。

本論文は熱負荷を含んだシミュレーションを行っているが、結果表示に用いた負荷形状率は電力負荷の値である。これは、電力負荷の負荷形状率が等価的に熱負荷の負荷形状率を含んでいるからである。

6.1 ヒートポンプが使用する電力消費量を含んだ負荷形状率

PV/FC システムにおいて、熱負荷への熱供給は、FC と HP を用いて行われる。HP の稼働には電力が必要であるが、どのような時に稼働されるかは運転時に決定される。このため、HP が消費

した電力を含んだ電力負荷の負荷形状と、シミュレーション実施前に想定した電力負荷の負荷形状は異なってくる。

Fig.5 に HP が消費した電力量を含んだ、電力負荷の負荷形状率と熱負荷の負荷形状率に関して、集中設置方式と分散設置方式を比較した図を示す。シミュレーション実施前に想定した、電力負荷の負荷形状率と熱負荷の負荷形状率の関係を示す Fig.4 と Fig.5 を比較する。Fig.4 において、電力負荷の負荷形状率における最大値と最小値の幅は 16.74 である。これに対して、Fig.5 における、電力負荷の負荷形状率の最大と最小値の幅は 8.02 となり、Fig.5 のほうが電力負荷の負荷形状率の範囲が狭まっている事がわかる。これは、HP の運転制御方法が集中設置方式と分散設置方式で同様であるため、両設置方式で異なる形状であった電力負荷が両設置方式で似た形状の HP の電力消費に影響を受け、結果として両者の電力負荷が似た負荷形状となったためと考えられる。

Fig.4 と Fig.5 を比較した場合、Fig.4 に対して Fig.5 における電力負荷の負荷形状率が全体的に上昇している事もわかる。これは、消費電力量が多い HP を、PV 出力の変動に追従して運転した結果、負荷変動が大きくなったためと考えられる。

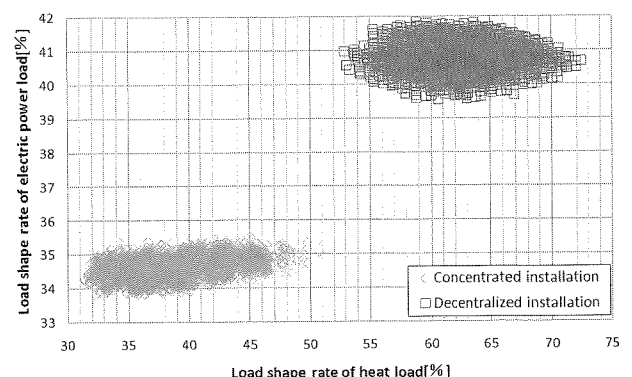


Fig.5 Distribution of load shape rate of each installation configuration when driving

6.2 最小PVアレイ面積

Fig.6 にシステムがエネルギー的に独立して運転できる最少のPVアレイ面積と電力負荷の負荷形状率の関係を、集中設置方式と分散設置方式について示す。Fig.6 より、集中設置方式と分散設置方式を比較した場合、設置方式の変化、負荷形状率の変化、の双方に対して、最少PVアレイ面積は影響を受けていない事がわかる。これは、PV/FC システムがエネルギー蓄積系を内在しており負荷変動への追従とPVアレイ面積が切り離されているためと考えられる。

6.3 燃料電池瞬時最大出力

Fig.7 に燃料電池瞬時最大出力と電力負荷の負荷形状率の関係を、集中設置方式と分散設置方式について示す。燃料電池瞬時最大出力とは、シミュレーションを一年間にわたり実行した結果の中で燃料電池出力が最大となった瞬時値である。

Fig.7 において、集中設置方式における燃料電池瞬時最大出力の平均値は 0.89kW、分散設置方式における燃料電池瞬時最大出

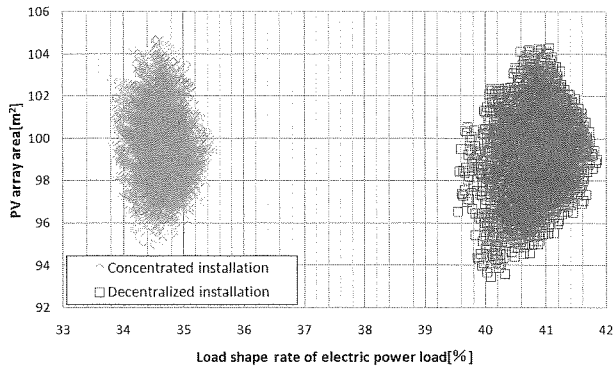


Fig.6 Load shape rate of electric power load to PV array area

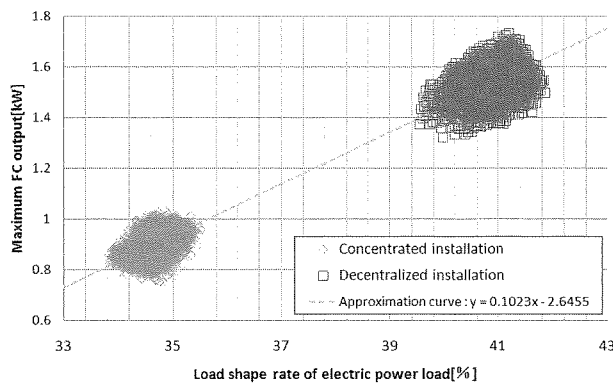


Fig.7 Load shape rate of electric power load to maximum FC output

力の平均値は 1.52kW となる。

結果より、集中設置方式は分散設置方式と比べ 58.6% 小さくなる事がわかる。これは、負荷形状の違いが反映された結果だと考えられる。5.1 節にて述べたように、集中設置方式と分散設置方式で負荷形状率を比較すると集中設置方式のほうが負荷が平準化され負荷形状率が小さくなる。このことが作用して、集中設置方式のほうが、燃料電池瞬時最大出力が小さい値となったと考えられる。

6.4 最大水素貯蔵量

Fig.8 にシステムを一年間運転する中で、水素吸蔵合金に蓄えられる水素の最大貯蔵量と電力負荷の負荷形状率の関係を、集中設置方式と分散設置方式について示す。Fig.8 において、集中設置方式における最大水素貯蔵量の平均値は 2.39kmol、分散設置方式における最大水素貯蔵量の平均値は 2.86kmol となる。結果より、集中設置方式の方が分散設置方式より、83.6% 小さくなる事がわかる。この理由も、前節で述べた理由と同様であると考えられる。

7. まとめ

本研究で行ったシミュレーション結果をまとめると以下のようになる。

1. 集中設置方式と分散設置方式で負荷形状率を比較する

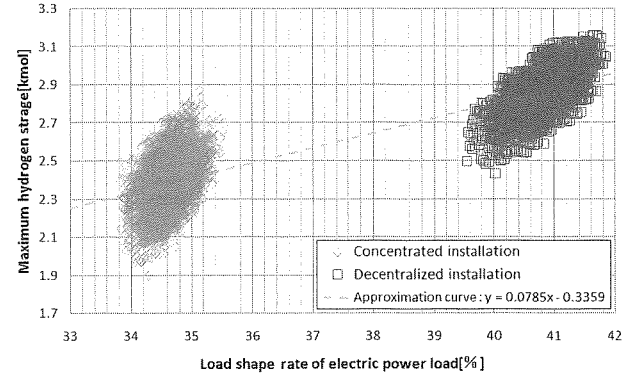


Fig.8 Load shape rate of electric power load to maximum hydrogen storage

と、集中設置方式の負荷形状率は分散設置型の負荷形状率より小さくなる。

2. 最少 PV アレイ面積と電力負荷の負荷形状率の増減との間に相関関係は無い。
3. 燃料電池瞬時最大出力と電力負荷の負荷形状率の間には相関関係がみられる。本論文にて想定した条件下では、集中設置型は分散設置型に対して 58.6% の大きさになることが判明した。
4. 最大水素貯蔵量と電力負荷の負荷形状率の間には相関関係がみられる。本論文にて想定した条件下では、集中設置型は分散設置型に対して 83.6% の大きさになることが判明した。

以上の結果を基にシステムを構成する機器の容量を小さくする事が出来る PV/FC システムの設置形態を考察すると、負荷形状率が小さくなる傾向のある集中設置方式が適していると考えられる。

本論文では、電力系統・ガス網から完全に独立したシステムについて検討を行った。結果として、一軒当たりが必要とされる太陽電池アレイ面積が 100 平方メートル以上となるという事が判明した。このような巨大な太陽電池アレイを設置する事は現実的では無く、完全独立型の PV/FC システムは必ずしも最適な設計では無いと考えられる。今後は、太陽熱を効率的に回収する事が可能なソーラーコレクターの併設や天然ガスを利用した燃料電池運転等を組み入れ、より現実的なシステム構成を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 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, 太陽エネルギー 180・Vol33・No. 4, p57 ~ p62(2007. 7)
- 2) 関口 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)
- 3) ダイキン工業株式会社;自然冷媒(CO2)・ヒートポンプ給湯機カタログ, 2008 年 4 月号, p43
- 4) JOHN A. DUFFIE, WILLIAM A. BECKMAN;「Solar engineering

of thermal processes」, A Wiley Interscience Publication, p385~p388

- 5) (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://tkkan.kyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/database/index.htm>;2006.8.19 取得
- 6) 松本市 ; 松本市ホームページ水道水の水温について 給水栓水温
<http://www.city.matsumoto.nagano.jp/kurasi/sumai/suidou/shisetsu/josui7/files/taptemp04.pdf> ;2008.6.21 取得
- 7) 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