

研究論文

太陽光発電・燃料電池ハイブリッド システムの稼動シミュレーション

Study on Operational Simulation of PV/Fuel Cell Power Hybrid System

原口隆文^{*1}
Takafumi HARAGUCHI

相羽 宏^{*1}
Hiroshi AIBA

野中光大^{*1}
Mitsuhiro NONAKA

谷 辰夫^{*2}
Tatsuo TANI

Abstract

The photovoltaic power system has a great future as clean energy instead of fossil fuel. For it has many environmental problems such as exhausted gas or air pollution. Sunlight, a source of energy for this system, is greatly influenced by the weather conditions, seasons and times of a day, therefore it can not supply constant electric power.

As one solution of this problem, the hybrid system is assumed, it combines a PV array and the fuel cells by using hydrogen for an auxiliary source of electricity. This system can supply constant electric power even in such place as a solitary island and use of clean energy exclude the pollution of air and the energy is inexhaustible.

Then the possibility of this system is examined by computer simulation. Input data includes sunlight, called HASP, temperature, demanded electric power of year and efficiency of each module. As a result of simulation it was revealed an area of PV array of 3930m² and hydrogen of 2.25×10⁴kl is the optimum value for a yearly power demand.

Key Words: Photovoltaic power system, Hydrogen generator, Hydrogen production, Fuel cell system, PV/Fuel cell power hybrid system

1 はじめに

太陽光発電システムは、大気汚染や枯渇化などの問題を抱える化石燃料に代わり、無尽蔵でクリーンな太陽エネルギー源とした将来の発電システムとして有望視されている。しかし、そのエネルギー源である太陽光は、気象条件、季節、時刻などにより大きく変化し、それ自体では定常的に電力を供給することは困難である。そこで筆者らは、太陽光発電システムと水素をエネルギー源とする燃料電池を組み合わせて、定常的に電力を供給する太陽光発電・燃料電池 ハイブリッドシステムの可能性を検討した。このハイブリッドシステムでは、太陽電池により水素を製造する。太陽電池による太陽光発電は、小形分散形電源としてその実用化が期待されており、燃料電池も同様に研究開発が積極的に進められている^{1), 2)}。また太陽電池による水素製造に関する研究では、広大な計画から基礎研究のものまで国内外で報告されている^{3), 4)}。

本システムは完全自立形の独立システムであり、類

似システムとしては、蓄電池を有する太陽光発電システムがある。このシステムでは、蓄電池の充・放電効率、自己放電率、さらに、日射強度の変化による太陽電池の出力電圧変化と蓄電池の充電電圧との整合性などを考慮する必要があり、必ずしも太陽エネルギーを有効に利用しているとは言い難いシステムである⁵⁾。

一方、設置場所に制約のあるわが国で、本システムを構成する場合、単位面積当たりの発電量、電力需要量に対するシステム容量などを求め、本システムが過大な空間を必要とするのか否かを明確にする必要もある。

本論文は、関東地方の業務用電力負荷（最大負荷電

原稿受付 平成4年3月25日

^{*1} 東京理科大学工学部 学生
Faculty of Engineering, Science University
of Tokyo, Student of Engineering

^{*2} 東京理科大学工学部 教授
Faculty of Engineering, Science University
of Tokyo, Professor

力75kW、年間電力量300MWh)を太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステムによって供給した際の諸特性を論述したものである。すなわち本システムで負荷に電力を供給するとき、年間の水素貯蔵量が最小となる太陽電池アレイ容量と各種日射条件での稼働状況を明らかにしている。また、本システムのシステム効率についても考察し、本システムの有効性を明確にしている。

なお、ここで用いた業務用電力負荷の容量は、調査データより求めた1事業所当たりの使用量の平均値である。

2 システム条件

2.1 システムの構成と特徴

システム構成を図1に示す。このシステムは、昼間太陽電池アレイで発生した電力を負荷に供給しつつ、余剰電力を使用して、水素発生機により水の電気分解を行い、水素を発生させ貯蔵する。夕方から夜間にかけて、太陽電池アレイのみで定常的な電力供給が困難となった時に、水素を燃料電池に送り、燃料電池を介して負荷に継続的に電力を供給することができる。

このシステムの特徴は以下の通りである。

- (1) 系統から電力供給を受ける必要が無いため、独立電源として使用できる。
- (2) 発電に伴い有害物質を排出しないので、環境にやさしい。
- (3) 燃料電池では発電と同時に、熱エネルギーを発生するため、熱エネルギーの有効利用が可能である。

2.2 環境データ

太陽電池アレイの入力データとして、年平均気象データ(HASP)東京を用いた。HASPデータには全天日射量、外気温、湿度、風速などが含まれるが、ここでは傾斜面全天日射量と外気温の連続する1時間毎の1年分(8760時間)を用いた。なお、本論文での傾斜面全天日射量 $\Phi(i)$ [kWh/m²h]の計算は次式によった⁶⁾。

$$\Phi(i) = \Phi_d(i) \cos \delta \cos t + \Phi_g(i) (1 + \cos L) / 2 \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで、 $\Phi_d(i)$:法線面直達日射量[kWh/m²h]、 Φ_g (i):水平面天空日射量[kWh/m²h]、 δ :太陽赤緯[°]、 t :時角[°]、 L :太陽電池アレイの設置傾斜角度[°]。

2.3 太陽電池アレイの出力

太陽電池セルの負荷電流 I と負荷両端電圧 V との間には一般に次式の関係がある。

$$I = I_{sc} + I_0 [1 - \exp\{q(V + IR_s) / kT_c\}] \quad \dots \textcircled{2}$$

ここで、 I_{sc} :短絡電流、 I_0 :飽和電流、 R_s :直列抵抗、 q :電荷、 k :ボルツマン定数、 T_c :太陽電池セル温度。

また、 I_{sc} 、 I_0 は日射量 $\Phi(i)$ と T_c の関数として次のように表示できる。

$$I_{sc} = I_{sc}(T_{c0}, \Phi_0) \{1 + h_t(T_c - T_{c0})\} \times \Phi(i) / \Phi_0 \quad \dots \textcircled{3}$$

$$I_0 = b T_c^3 \exp(-a / T_c) \quad \dots \textcircled{4}$$

ここで、 $T_{c0} = 298$ [K]、 $\Phi_0 = 1$ [kW/m²]、 h_t 、 a 、 b はそれぞれ定数。これらの式から太陽電池セルの出力は、 T_c と $\Phi(i)$ に大きく関係する事が分かる。

したがって本論文では、使用する太陽電池セルは多結晶シリコン太陽電池で太陽電池セルの出力は次式で表せると仮定した⁶⁾。

$$P_c = P_0 \{1 - 0.005(T_c - 25)\} \quad \dots \textcircled{5}$$

ここで、 P_c :セル温度 T_c における最大出力、 P_0 : $T_c = 25^\circ\text{C}$ のときの最大出力。

また変換効率 η_1 は、日射強度が基準日射スペクトルで1kW/m²、セル温度が25°Cのとき16.5%とし、日射強度が変化してもその効率は変わらないとした。なお、セル温度は風向き、風速によっても変化し、これらの環境因子に変化に対する太陽電池の特性が取得されつつある⁷⁾。しかし、本論文では外気温に30°Cを加えた温度がセル温度になると仮定した。以上の事から太陽電池アレイの単位面積、単位時間当りの発生電力量 P_1 [kWh/m²・h]は次式で表される。

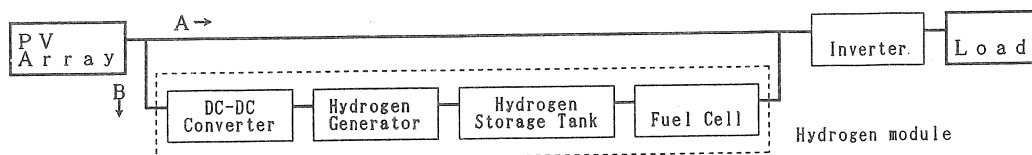


図1 システム構成図

$$P_1 = \eta_1 \Phi(i) [1 - 0.005 \{T_c(i) + 5\}] \quad \dots\dots ⑥$$

ここで、 $T_c(i)$: $\Phi(i)$ に対応した外気温度[℃]。

2.4 DC-DCコンバータ

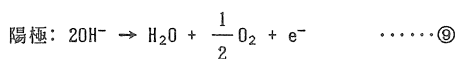
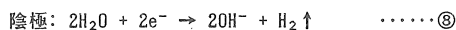
DC-DCコンバータは、太陽電池アレイの出力を制御する機能を有し、特に太陽電池アレイの出力電圧を水素発生機の所定の入力電圧に調整する働きがある。

DC-DCコンバータの効率 η_2 は負荷の軽重に関係なく一定で90%であるとした。DC-DCコンバータの出力を P_2 [kWh/m²・h]とすると次式となる。

$$P_2 = \eta_2 \times P_1 \quad \dots\dots ⑦$$

2.5 水素発生機

水素発生機は固体高分子電解質水電解方式を想定した。現在この水素発生機は小型機に限られているが、将来技術開発が進み大型化の要請があれば、充分対応が可能と考えた。この水素発生機の動作は次のようである。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。



⑧、⑨式より、水の電気分解で起こる反応は、次の式で表されている。



1molの水素を発生するのに要するエネルギーは、⑩、⑨式より電子数 2e^- であるから、電気量 $2F$ を要するのでファラデーの法則から 69.7Wh となる。

今水素の理論分解電圧を 1.3V とすると、1molの水素を発生するのに要する電流は 53.6A となる⁴⁾。

本論文では、固体高分子電解質膜を用いた水素発生機の変換効率を $\eta_3=90\%$ とした。

2.6 水素貯蔵タンク

水素発生機で作られた水素を貯蔵するタンクで、燃料電池の稼働時に、水素を燃料電池本体へ供給する。

2.7 燃料電池

燃料電池は、水素と酸素の化学反応により電気エネルギーを得る直接発電変換の発電システムである。発

表1 システム各部の変換効率

Items	Efficiency	
PV Array (Poly-crystalline Si)	η_1	16.5% (A.M.=1.5, 1kW/m^2)
DC-DC Converter	η_2	90%
Hydrogen Generator (Solid polyelectrolyte)	η_3	90%
Fuel Cell (Phosphoric-acid)	η_4	40%(Electric) 40%(Thermal)
Inverter	η_5	92%

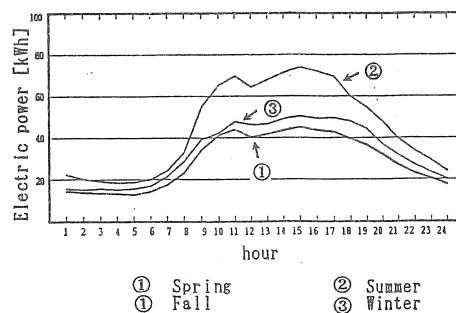


図2 日負荷パターン(四季別平均値)

生電力は直流であるので、インバータを介して交流電力に変換される。本論文では燃料電池として、リン酸塩燃料電池を想定して、その効率を $\eta_4=40\%$ とした。

2.8 インバータ

インバータは、太陽電池アレイや燃料電池からの直流電力を、交流電力に変換するものである。インバータの効率を、 $\eta_5=92\%$ とした。

これらのシステム各部の変換効率を表1に示す。

3 負荷条件と計算手順

負荷データは図2に示すように、関東地方にある10例の業務用の日負荷パターン(1日あたり約400~1300 kWh)を平均して用いた⁵⁾。このパターンは、春期(3~5月)、夏期(6~8月)、秋期(9~11月)、冬期(12~2月)の各四季の平均した1日であり、各々の期間ではいずれも同一とした。

また、この負荷の年間総需要電力量は約300MWhであり、春期、夏期、秋期、冬期の1日当りの需要電力量は次のようである。

春期: 694kWh/日 , 夏期: 1074kWh/日 ,

秋期: 698kWh/日 , 冬期: 797kWh/日

さらに、このシステムは図1に示すように次の3つ

のモードで稼働するものとした。

(1) 直接電力路……Aのモードである。余剰電力は水素モジュールへ送られ、水素発生機により水素として貯蔵しておく。この場合には、燃料電池からの出力はない。

{PV7レによる発電電力量-需要電力量>0}

(2) 間接電力路……Bのモードである。全ての需要電力を燃料電池で電力に変換し、負荷へ供給する。この場合には、水素モジュールへの入力電力はない。

{PV7レによる発電電力量=0}

(3) 併用路……おもに明け方、夕方の場合でAとBを併用するモードである。この場合には、水素モジュールへの入力電力はない。

{PV7レによる発電電力量-需要電力量<0}

図3は稼働シミュレーションに用いたフローチャートである。初期条件はシステムの種類、表1に示した各部の変換効率などである。入力データは環境条件である傾斜面全天日射量と外気温度である。日負荷パターンとして図2を用い、連続する365日分の1時間毎の計算を繰り返し、Aモード、Bモード、AとBの併用モードについての電力供給量、水素発生量などを求めている。

4 結果と考察

年間の負荷電力量を供給するのに必要な本システムの太陽電池アレイ面積を求めた。図4は太陽電池アレイ面積と水素発生機によって製造された年間水素量 H_g と燃料電池に供給された年間水素量 H_c の差の関係である。図4の横軸は太陽電池アレイの面積 $[m^2]$ であり、縦軸は $(H_g - H_c)[kl/年]$ である。図より太陽電池アレイ面積を3900 m^2 とすると、年間の負荷電力量をまかなうには、水素量が約 $1.58 \times 10^3 kl$ 不足することがわかる。

また、太陽電池アレイ面積を4000 m^2 とすると、水素量が約 $3.58 \times 10^3 kl$ 余ることになる。

今、年間の負荷電力量を太陽電池アレイから直接供給する電力と、燃料電池から供給する電力でまかなうことにする。このとき、年間を通じて発生した水素量をすべて燃料電池で電力に変換するシステム（すなわち $H_g - H_c = 0$)を、最適なシステムであると定義すると、本システムの最適な太陽電池アレイ面積は3930 m^2 となった。

貯蔵タンクに貯蔵される水素量を求めた。図5は年

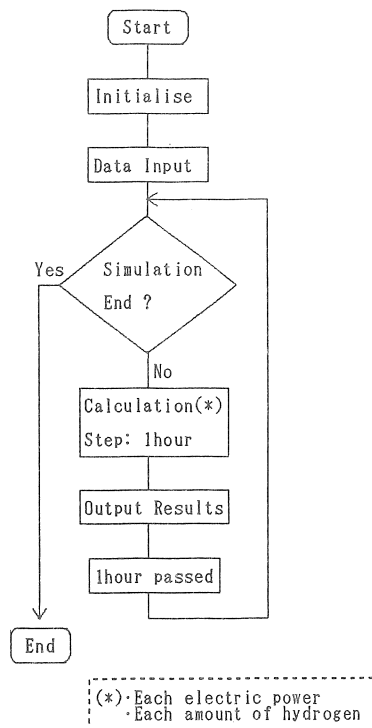


図3 フローチャート

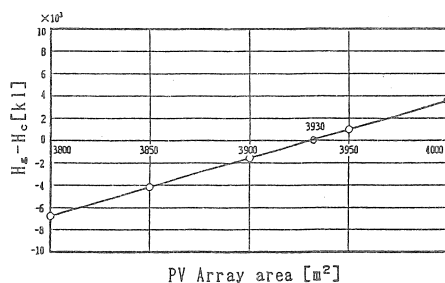


図4 負荷(平均)の充足率

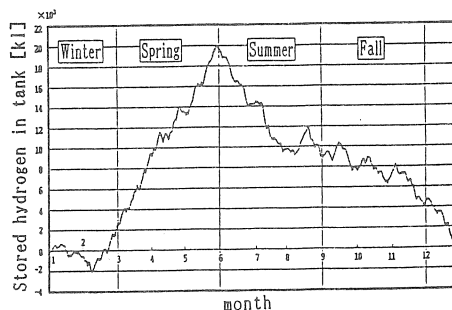


図5 水素貯蔵タンク内の貯蔵量

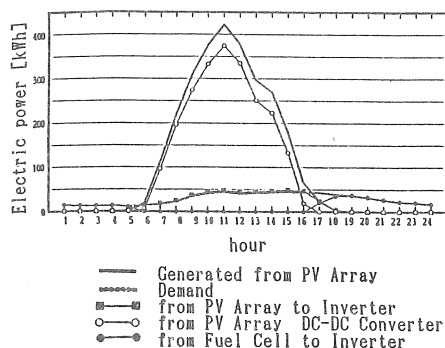


図 6-(a) 快晴日(9月13日)1日の稼働状況

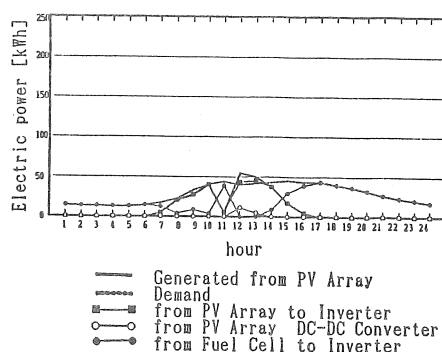


図 6-(c) 雨天日(9月10日)1日の稼働状況

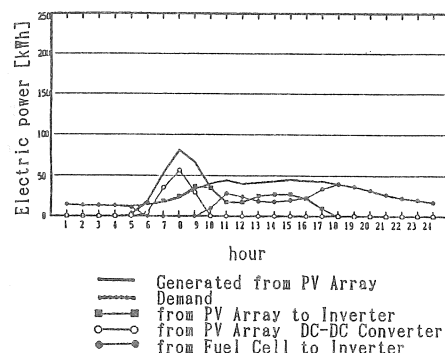


図 6-(b) 曇天日(9月8日)1日の稼働状況

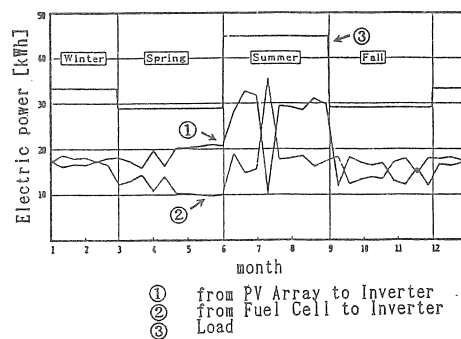


図 7 負荷に対する本システムの稼働状況

間を通してタンクに貯蔵される水素量を示したものである。この図の太陽電池アレイの面積は 3930m^2 である。

図の横軸は 1 月から 12 月までの各月であり、図の縦軸は、連続する 365 日の各日の最大水素貯蔵量である。

図より、貯蔵タンクは 1 月 1 日零時で完全に空であり、12 月 31 日 24 時で再び空になっていることが分かる。水素貯蔵量は、春期の 3 月から 5 月にかけて増加し、5 月末にその量が最大となり、約 $2.02 \times 10^4 \text{kl}$ の水素を貯蔵する必要があることが分かる。また、夏期から秋期にかけて貯蔵した水素を使用しながら電力を供給している。ここで 2 月上旬、水素量が約 $2.25 \times 10^3 \text{kl}$ 不足しているが、予めこの量に相当する水素を貯蔵タンクに充てんさせておくことにより、負荷に電力を安定的に供給できる。

なお、4 月 1 日零時から 3 月 31 日 24 時までの連続する 8760 時間についても最大水素貯蔵量を求めた。その結果、予め貯蔵タンクに充てんさせておく水素量は変化しただけで、最大水素貯蔵量 ($2.25 \times 10^4 \text{kl}$) と、最大貯蔵量となる時期 (5 月末) は変わらなかった。

図 6 は本システムの 1 日の稼働状況を示したものである。図 6-(a) は快晴日 (9 月 13 日) の状況である。零時から 5 時までは、前日までに貯蔵してある水素を用

いて B のモードで電力を供給するが、5 時から 7 時、15 時から 19 時にかけて、A と B の併用モードで稼働し、7 時から 15 時までは A のモード、19 時以降は B のモードで稼働することを示している。なお、日中の余剰電力は水素に換えられ、他日に備えてタンクに貯蔵される。

図 6-(b)、図 6-(c) は、それぞれ曇天日 (9 月 8 日)、雨天日 (9 月 10 日) の稼働状況である。いずれも図 6-(a) の快晴日と同様に、A のモード、B のモード、A と B の併用モードでシステムが稼働していることが分かる。

各月の需要電力量に対する太陽電池アレイと燃料電池による電力分担を求めた。図 7 は各月に対する需要電力量の分担の様子を示したものである。図の特性は連続する 365 日 (1 年間) を 10 日毎に区切り、各区間の最初の 1 日の平均値をプロットしたものである。図の点線 (太線) は四季の需要電力量であり、実線は太陽電池アレイから直接負荷に供給される電力量である。また、点線 (細線) は燃料電池モジュールより負荷に供給される電力量である。

次に、システム全体の効率と太陽電池アレイ 1m^2 当りの発生電力量を求めると次式となった。

$$\text{システム全体の効率} = \frac{\text{年間総需要電力量}}{\text{年間総日射量}} \times 100$$

$$= \frac{2.98 \times 10^5 \text{ [kWh]}}{3.91 \times 10^6 \text{ [kWh]}} \times 100 \approx 7.6\% \quad \dots \textcircled{11}$$

$$1\text{m}^2\text{当りの発生電力量} = \frac{\text{年間総需要電力量}}{\text{PVアレイの面積}}$$

$$= \frac{2.98 \times 10^5 \text{ [kWh]}}{3930.0 \text{ [m}^2\text{]}} = 75.8 \text{ [kWh/m}^2\text{]} \quad \dots \textcircled{12}$$

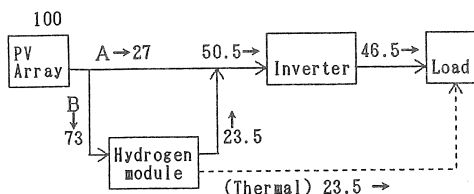


図8 年間需要電力量のバランス
(基準:太陽電池アレイの出力)

図8は、太陽電池アレイの出力を基準にした年間需要電力量のバランスである。太陽電池アレイの出力が直接インバータに供給される量と、水素モジュールに供給される量は27対73であり、太陽電池アレイ出力の46.5の電気エネルギーが負荷に供給されることになる。

さらに燃料電池(リン酸形)の発電後の反応熱(170℃程度)を有効に利用すれば、さらにシステム利用率が上昇する。すなわち、熱エネルギーの利用効率を入力エネルギーの40%であるとする、図8に示すように23.5の熱エネルギーが利用でき、負荷に供給される量は70になることが分かる。一方、本システムと類似の蓄電池を有する太陽光発電システムでは、蓄電池の充電・放電効率をそれぞれ80%、自己放電率、太陽電池の出力電圧と充電電圧のミスマッチングを10%とすると、蓄電池を使用することによるこの系の効率は54%となる⁵⁾。したがって、水素モジュールと同じ量のエネルギーを蓄電池に供給するものとすれば、61の電気エネルギーが負荷に加えられることになる。両システムを比較すると、エネルギーの有効利用の観点から本システムが有効であることが分かる。また、エネルギーの有効利用がなされていることから、他のシステムに比べて本システムは過大な太陽電池アレイを必要としないことも分かった。

5 おわりに

業務用電力負荷(最大負荷電力80kW、年間電力量300MW)を太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステムで供

給するシステムについて稼働シミュレーションを用い考察した。その結果次のことが明らかになった。

- (1) 負荷に安定して電力を供給する事が出来ることが分かった。
- (2) 年間の需要電力量をすべて供給する本システムの太陽電池アレイの面積は3930m²(変換効率16.5%のとき)であり、貯蔵タンクの最大水素貯蔵量は2.02×10⁴kl(5月下旬に発生)である。
- (3) 年間のシステム全体効率(電気エネルギー)は7.6%であり、太陽電池アレイ出力を基準にした電気エネルギーの利用効率は46.5%となった。また、燃料電池システムの発電に伴う熱エネルギーをも併せて利用すればこの値は70%に上昇する。この値は蓄電池を有する太陽光発電システムの61%より良好で、本システムは太陽エネルギーの有効利用の点で優れている。さらに、本システムは他のシステムに比べて過大な太陽電池アレイを必要としないことも分かった。

本システムは、離島、ホテル、集合住宅、製造業等の産業分野などへの適用が十分考えられる。

参考文献

- 1) 例えば 滝川 清・小林広武・橋本栄二・北村章夫・松田 弘、平成3年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会、合同研究発表会講演論文集(1991-9), 8, 北見
- 2) 例えば 岡本経宏・板倉祐司・永田裕二・渡辺政人、平成3年度電気学会全国大会講演論文集、(1991-4), 1, 565, 金沢
- 3) M. Al-Garni, Proc. 1991 ISES Cong. (1991-8), 735-740, Denver, Colorado, USA
- 4) 鈴木大志・岩城 力・谷 辰夫、太陽エネルギー、17-6 (1991) 23-28
- 5) 谷 辰夫、電子技術総合研究所彙報, 51-12 (1987) 16-25
- 6) 谷 辰夫・横内博之、電気学会論文誌, D-111-6 (1991) 475-481
- 7) 小林 誠・谷 辰夫、平成3年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会 合同研究発表会講演論文集(1991-9), 15, 北見
- 8) 新エネルギー総合開発機構(委託先 財団法人電力中央研究所), 昭和60年度調査報告書 NEDO-P-8527 (1986) 72-91