

# 太陽電池モジュールによる水素製造に関する基礎研究 (直接接続時の動作点と Pmax 点の比較)

Fundamental Study on Production of Hydrogen with Photovoltaic Module  
(Comparison operational points of direct connection  
with maximum power point tracker (Pmax) )

太田 大介<sup>\*1</sup> 林 達也<sup>\*1</sup> 関口 直俊<sup>\*1</sup> 谷 卉夫<sup>\*2</sup>  
Daisuke OHTA Tatsuya HAYASHI Naotoshi SEKIGUTI Tatsuo TANI

## Abstract

Recently, hydrogen has attracted special interest as the clean energy carrier. One of production of hydrogen is the water electrolysis with solar energy. This has been called "Solar Hydrogen"<sup>(1)</sup>.

We have designed and constructed the experimental system which is constituted the hydrogen generator coupled the photovoltaic module with rated capacity of 90W directly, and measured and analyzed the various basic data such as production of hydrogen, I-V characteristics and cell temperature for photovoltaic module and water electrolysis cell.

In this paper, we calculated the annual production of hydrogen by the computer simulation, and analyzed various photovoltaic modules by UUF (useful utilization factor of photovoltaic module output). UUF is the ratio of operational point of direct connect to maximum power point tracker (Pmax).

As the result of the simulation, designed system is able to produce 14kℓ of Hydrogen per year, and as the result of optimization of photovoltaic module, it is found that optimum module is 5 cells in series and 11 strings in parallels. At this time annual production of hydrogen is 16kℓ and UUF is 96%.

**Key Words:** Photovoltaic module, Production of hydrogen, Useful utilization factor, Maximum power point tracker

## 1. はじめに

最近クリーンなエネルギー発生システムとして太陽電池と燃料電池を組み合わせた太陽水素エネルギー発生システムが提案されている<sup>(2)(3)</sup>。太陽水素エネルギー発生システムとは、太陽エネルギーにより水素を製造、貯蔵し必要に応じて燃料電池を介して発電するシステムである。

太陽電池アレイと水素発生機による水素製造では、両者の電流-電圧特性を整合させ、できるだけ水素を多量に発生するよう設計する必要がある。両者の特性を整合させる方法としては、太陽電池アレイと水素発生機との間に電流-電圧特性を調整するDC/DCコンバータを挿入する方法と、太陽電池アレイの構成を最適に設計し、できるだけ整合がとれるようにして両者を直接接続する方法がある。これまで、これらの方法についての詳細な特性や経済性を含めた定量的な比較研究は見あたらないのが実状である。

本論文は、この比較研究の第一段階として太陽電池モジュールと水素発生機とを直接接続した水素製造

サブシステムの最適な構成法について論述したものである。すなわち、単位出力当たりの年間水素発生量が最大となる太陽電池モジュールの構成を太陽電池出力利用率<sup>(4)</sup>UUF を評価指標として求めるシミュレーション手法を構築し、実験結果をベースにして考察したものである。ここで太陽電池出力利用率UUFとは式(1)に示すように直接接続した時の太陽電池モジュールの動作点出力と最大出力の比率である。

その結果、筆者らが設計試作し現在実験中の 7S-9P 型単結晶 Si 太陽電池モジュールの年間太陽電池出力利用率 UUF は 72% であり、5S-11P 型で太陽電池モジュールを構成すれば、この値は 96% に改善される。これより、太陽電池モジュールを最適に構成すれば年間を通じてほぼ最大発電量で水素を発生させることができることが分かった。

## 2. シミュレーション手法

### 2.1 フローチャート

図 1 に太陽電池出力利用率 UUF (Useful utilization factor) と年間水素発生量を求めるフローチャートを示す。この UUF とは式(1)で定義される。

原稿受付 平成 8 年 7 月 1 日

\*1 東京理科大学 工学部 大学院生

\*2 同大学教授

$$\text{太陽電池出力利用率 } UUF = \frac{\text{動作点出力}}{P_{\max} \text{ 点出力}} \quad (1)$$

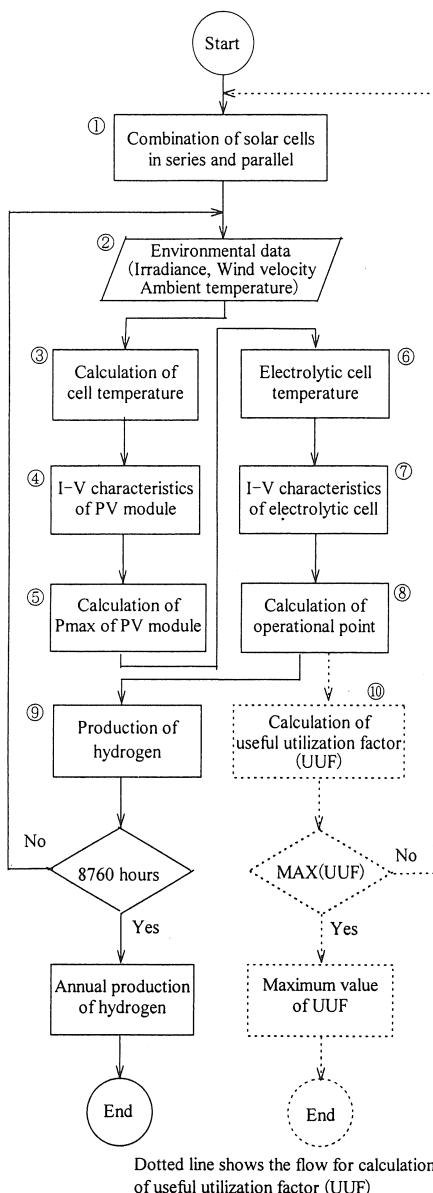


図1 UUFと水素発生量を求めるフローチャート

## 2.2 フロー各部の計算方法

図1の各部の計算方法は以下の方法で行った。

### ①太陽電池セルの組み合わせの設定

太陽電池セルの直列数は4枚から7枚、並列数は9枚から12枚の16通りで設定し計算を行った。

### ②気象データの読み込み

ここでは HASP 東京データを用いた。

### ③太陽電池セル温度の計算

太陽電池セル温度と外気温度との差  $\Delta T$  と日射強度の関係は式(2)で表され、実験データより定数を設定して計算した。

$$\Delta T = a_1 \times Irr \quad (2)$$

### ④太陽電池モジュール I-V 特性の計算

②で得た気象データと③で得た太陽電池セル温度から式(3)より I-V 特性を計算した。ただし、モジュールを組む際には太陽電池セルの特性は各セル同一とした。

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \frac{q(V + R_s I)}{n k T} - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$\text{ただし、飽和電流 } I_0 = C_0 T^3 \exp \left( -\frac{q E_g}{n k T} \right)$$

$$\text{光起電流 } I_L = 0.00345 I_{rr} \left\{ 1 + 0.001(T - 298) \right\}$$

### ⑤最大出力点 $P_{\max}$ の計算

④で求めた I-V 特性よりその時の  $P_{\max}$  を求めた。

### ⑥水素発生機電解セルの温度計算

式(4)を用いて電解セル温度の計算を行った。

$$\Delta T_H = a_2 \times Irr + b_3 \quad (4)$$

### ⑦電解セルの I-V 特性の計算

電解セルの I-V 特性は立ち上がりを除いて一次式で表すことができる。⑥で求めた電解セル温度を用いて式(5)により求めた

$$\left. \begin{array}{l} V \leq a_3 \\ a_3 < V \end{array} \quad \begin{array}{l} I = b_3 \times V^{c_3} \\ I = d_3 \times V - e_3 \end{array} \right\} \quad (5)$$

### ⑧太陽電池と電解セルの動作点の計算

④と⑦より二つの特性曲線の動作点を求めた。なお、水素発生機の定格電流は32Aであるが、動作電流が32Aを越えた場合は32A一定として考えた。

### ⑨水素発生量の計算

⑧で求めた動作電流より水素発生量を求めた<sup>(5)</sup>。

### ⑩太陽電池出力利用率 UUF の計算

⑤で求めた  $P_{\max}$  点と⑧で求めた動作点より式(1)より UUF を求めた。

なお、シミュレーションでは各年の偏りを避けるために HASP データ（東京）を用いることにした。

## 3. 実験システムの特性

### 3.1 システムの概要

図2に水素発生量測定システムの構成図を示す。

このシステムを本学神楽坂校舎 7 号館屋上(地上約 30m)に設置した。太陽電池モジュールは真南に向かう、35.5 度傾斜させ設置したおり、水素発生機と直接接続している。図中の点線は太陽電池モジュールの電流-電圧特性(以下、I-V 特性とする)測定時のシステムであり、実線は水素発生量測定時のシステムである。太陽電池モジュールの容量は、セル温度が上昇しても、水素発生量が日射強度に比例するよう、表 1 に示すような仕様とした。表 2 に水素発生機の主な仕様を示す。流量計は層流型流量計を用いた。図 3 に実験時の気象観測システムを示す。傾斜面全天日射強度は 5 分間隔で、風速と外気温度については 10 秒間隔で瞬時値を測定し、30 分ごとに平均して FD ライター(英弘精機製 MP-100)に転送される。

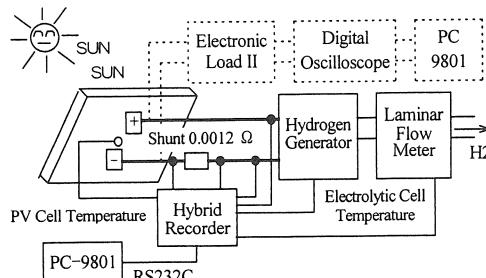


図 2 水素発生量測定システム構成図

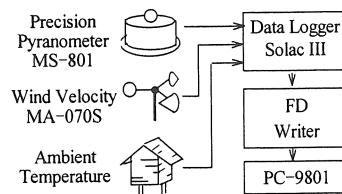


図 3 実験時の環境測定システム

表 1 太陽電池モジュールの主な仕様

Photovoltaic module type	Mono-Si
Cells combination	7 Series 9 Parallels
Module area	0.726 m <sup>2</sup>
Maximum power	93.3W
Operating voltage	3.4V
Operating current	27.45A
Efficiency	12.85%

Measuring conditions: 1kW/m<sup>2</sup>, Tc=25°C, A.M.1.5

表 2 水素発生機の主な仕様

Hydrogen generator type	OPGU-1500 (modification)
Method	Solid polymer electrolyte
Formation of gas	H <sub>2</sub> (above 99.99%)
Flow rate of H <sub>2</sub>	225mL/min
Maximum input	2.4V, 32A

### 3.2 太陽電池モジュールの諸特性

図 4 に 7S-9P 型太陽電池モジュールの I-V 特性を示す。図中の各点は図 2 に示した電子負荷装置 II の出力によるものである。この波形をもとに、この太陽電池セル 1 枚の I-V 特性を式(3)に基づきシミュレーションした。表 3 に式(3)で用いた係数を示す。

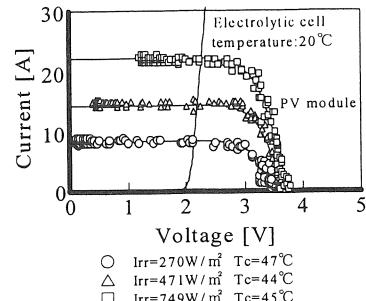


図 4 太陽電池モジュールの I-V 特性

表 3 I-V 特性シミュレーションに用いた定数<sup>(6)</sup>

Rs	Series resistance	0.011 Ω
Rsh	Parallel resistance	1950 Ω
n	Diode factor	1.15
Co	Temperature coefficient of saturation current	15.0
Eg	Energy gap	1.13 eV

図 5 に日射強度に対するセル温度と外気温度との差  $\Delta T$  の関係を示す。風速をパラメータとして式(2)を用いて近似した。表 4 に式(2)で用いた係数の一例を示す。なお、風速 1.5 m/s としたときには 1 m/s 以上 2 m/s 未満のデータを用いた。

表 4 太陽電池モジュール セル温度特性 係数

Wind velocity	a <sub>1</sub>
1.5m/s	0.0274
4.5m/s	0.0143

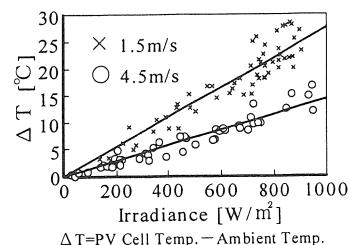


図 5 太陽電池モジュール セル温度特性

### 3.3 電解セルの諸特性

図 6 に水素発生機の電解セルの I-V 特性を示す。この近似式を式(5)に示す。式(5)の  $a_3, b_3, c_3, d_3, e_3$  は定数であり、電解セル温度 10°C おきに求めた。ここで、例え

ば電解セル温度  $30^{\circ}\text{C}$  とは  $25^{\circ}\text{C}$  以上  $35^{\circ}\text{C}$  未満を指す。用いた係数を表 5 に示す。

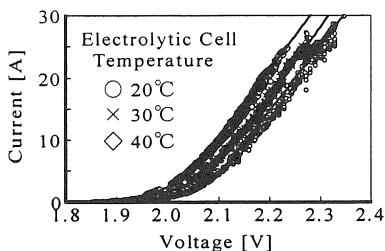


図 6 水素発生機 電解セル I-V 特性

表 5 電解セル I-V 特性 係数

Electrolytic cell temp.	$a_3$	$b_3$	$c_3$	$d_3$	$e_3$
$20^{\circ}\text{C}$	2.11	$9.41 \times 10^{-13}$	39.4	104	215
$30^{\circ}\text{C}$	2.11	$1.85 \times 10^{-9}$	29.7	109	223
$40^{\circ}\text{C}$	2.06	$1.25 \times 10^{-10}$	34.1	108	217

本実験は屋外で行っているため、電解セル温度は日射強度、外気温度及び風速の影響を受ける。風速をパラメータとして式(4)を用いて近似した。図 7 に日射強度と、電解セル温度と外気温度との差  $\Delta T_H$  の関係を示す。表 6 に式(4)で用いた係数の一例を示す。ここでも風速は前後  $0.5 \text{ m/s}$  で分類した。また、図 7 で関係式が原点を通らないのは、電解セルが外箱に覆われているために放熱が十分でないといった要因が考えられる。

表 6 電解セル温度特性

Wind velocity	$a_2$	$b_2$
$1.5 \text{ m/s}$	0.0114	2.21
$4.5 \text{ m/s}$	0.00609	1.70

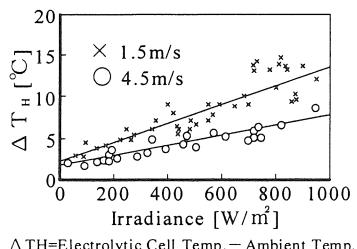


図 7 電解セルの温度特性

#### 4. シミュレーション結果

##### 4.1 水素発生量シミュレーション

3. 実験システムの特性より、本学の気象データ（日射強度、気温、風速）を用いて 5 分ごとの水素発生量をシミュレーションし、実際に得られた水素発生量と

比較した。図 8 に一例として 1994 年 5 月 24 日のデータを示す。これより実験結果とシミュレーションは、ほぼ一致していることが確認できた。また表 7 に 5 分毎の実測データから 1 時間毎の水素発生量へ拡張する際の誤差を示す。これより日射条件の良い時間帯の誤差は 1% 程度であることが分かった。また 16 時の誤差が 3% になっているが、これは日射強度が低くなつたため水素発生機への動作電流が低くなり、水素発生機の電流効率を求める際に誤差が生じたためである。

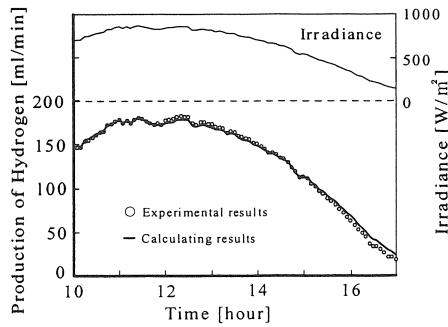


図 8 シミュレーション結果の一例(94/5/24)

表 7 シミュレーション 1 時間毎の誤差(94/5/24)

Time	Experimental results[ℓ]	5 min results[ℓ] (Relative error[%])	1 hour results[ℓ] (Relative error[%])
11	9.69	9.75 (0.62)	9.66 (-0.32)
12	10.49	10.47 (-0.20)	10.53 (0.35)
13	10.58	10.37 (-1.91)	10.43 (-1.41)
14	9.61	9.48 (-1.33)	9.56 (-0.53)
15	7.82	7.79 (-0.45)	7.89 (0.86)
16	5.17	5.27 (1.99)	5.32 (3.01)

##### 4.2 年間水素発生量シミュレーション

4.1 では 5 分当たりの水素発生量を求めたが、ここでは、このシステムを 1 年間動作させた時に得られる年間水素発生量についてシミュレーションしてみた。結果を表 8 に示す。() 内は太陽電池モジュールの定格である。現在使用している 7S-9P 型モジュールによる年間水素発生量は  $14.1 \text{ kL}$  であることが分かった。また、表 8 にモジュール単位出力当たりの水素発生量も示した。表 8 より水素発生機 電解セル 1 枚に対し最適モジュールは 5S-11P 型モジュールであることが分かった。ここで最適モジュールとは、単位出力当たりの年間水素発生量が最大となるモジュールとした。

## 5. 結果に対する考察

### 5.1 太陽電池出力利用率 UUF

水素発生量だけでは直接接続によって太陽電池出力をうまく利用できているか分かりにくいので、式(1)で定義される太陽電池出力利用率 (useful utilization factor) を用いて直列数、並列数の組み合わせを評価した。図 9 に I-V 特性上での太陽電池出力利用率を示す。ここでは最適モジュールとなった 5S-11P 型、及び現在使用している 7S-9P 型について太陽電池出力利用率を計算した。式(1)を用いて 1 時間ごとの太陽電池出力利用率を計算し、図 10(5S-11P)、図 11(7S-9P) に示した。図 11 から 5S-11P 型モジュールを使用し

たシステムでは、日射強度 200W/m<sup>2</sup>以上に対し常に Pmax の 90% 以上で動作していることが分かる。また、図 11 に示した 7S-9P 型モジュールを使用したシステムでは、常に Pmax の 60~80% 程度で動作し、前述の 5S-11P のシステムほど有効に利用できていないことが分かった。

表 9 に各組み合わせに対する年間太陽電池出力利用率を示す。この表より 5S-11P 型に限らず直列数 5 の組み合わせはどれも 95% 以上と高い利用率を示していることが分かる。これは水素発生機の特性と Pmax 点の特性が近いところにあるためで、5.2 で解析する。

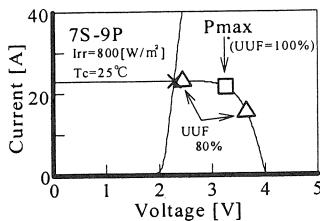


図 9 I-V 特性上の太陽電池出力利用率 UUF

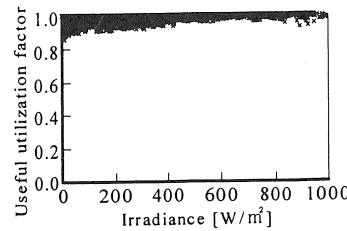


図 10 太陽電池出力利用率 UUF(5S-11P)

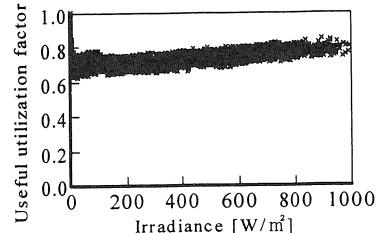


図 11 太陽電池出力利用率 UUF(7S-9P)

表 9 年間太陽電池出力利用率

Number of strings in parallel	Number of cells in series			
	4	5	6	7
9	51.9 %	95.7 %	83.5 %	71.8 %
10	50.0 %	95.8 %	84.0 %	72.2 %
11	48.3 %	95.9 %	84.3 %	72.5 %
12	46.7 %	95.8 %	84.0 %	72.2 %

表 8 年間水素発生量と単位出力当たりの年間水素発生量

Number of strings in parallel	Number of cells in series			
	4S (1.9V)	5S (2.4V)	6S (2.9V)	7S (3.4V)
9P (27.5A)	5.9kℓ* 110ℓ/W** (53.3W***)	13.3kℓ 199ℓ/W (66.7W)	14.1kℓ 176ℓ/W (80.0W)	14.1kℓ 152ℓ/W (93.3W)
10P (30.5A)	6.3kℓ 107ℓ/W (59.2W)	14.8kℓ 200ℓ/W (74.1W)	15.6kℓ 176ℓ/W (88.9W)	15.7kℓ 151ℓ/W (103.7W)
11P (33.6A)	6.7kℓ 103ℓ/W (65.1W)	16.3kℓ 201ℓ/W (81.5W)	17.2kℓ 176ℓ/W (97.8W)	17.3kℓ 151ℓ/W (114.1W)
12P (36.6A)	7.1kℓ 100ℓ/W (71.0W)	17.8kℓ 200ℓ/W (88.9W)	18.7kℓ 175ℓ/W (106.7W)	18.7kℓ 150ℓ/W (124.4W)

\* : Annual production of hydrogen, \*\* : Annual production of hydrogen per watt  
\*\*\*: Rated value of PV module (1kW/m<sup>2</sup>, Tc=25°C, A.M.1.5)

## 5.2 年間の Pmax 点

図 12 に HASP データにより求めた 1 時間ごとの Pmax 点(5S-11P, 7S-9P)を示す。

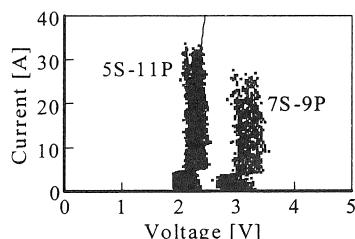


図 12 年間の Pmax 点(5S-11P, 7S-9P)

この図から 5S-11P 型モジュールの Pmax 点は水素発生機の I-V 特性付近にあり,Pmax の 90%以上を出力できることが理解される。なお、電流 5A 附近で不連続になっているが、これは日射強度  $100W/m^2$ 以下の気象データの偏りによるものである。また、直列数 5 の時の Pmax は図 13 に示すように、並列数が変わっても電流値が変わるものだけで、水素発生機の I-V 特性付近に Pmax がくることが分かる。これより、年間太陽電池利用率は 95%以上になることが理解される。

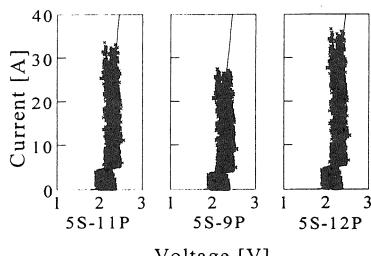


図 13 直列数 5 の時の Pmax

## 6.まとめ

筆者らは太陽水素エネルギーシステムの重要な要素である太陽電池モジュールと水素発生機による水素発生サブシステムの最適な構成法について太陽電池出力利用率 UUF を評価指標としたシミュレーションを構築し、実験データをベースにして考察した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 太陽電池出力利用率 UUF を評価指標としたシミュレーションを構築できた。これによれば現在実験中の UUF は 72%であり、最適化することで 96%まで改善できることが分かった。
- (2) 現在実験している 7S-9P 型太陽電池モジュールを

使用した際の年間水素発生量は  $14.1kl$  であることが分かった。また、最適化したモジュールを用いると枚数が 8 枚少ないのにも関わらず年間水素発生量は  $16.3kl$  と約 16%大きな値となった。

- (3) 水素発生機のような定電圧特性をもつ負荷と接続するのなら、太陽電池の直並列数を工夫することで直接接続でも年間を通じて最大発電能力に近い出力を引き出せることが分かった。一般に直流負荷用の DC/DC コンバータは市販品がそれほどないため、UUF を求めれば、直接接続でも十分に動作するかどうかを検討できる。
- (4) 今回は気象データに HASP 東京、太陽電池には単結晶 Si を用いたが、適用地域、太陽電池が変わっても本論文で示したフローチャートに基づき計算を行い UUF を用いて最適設計をすればよい。

### <謝辞>

本研究を進めるにあたり御支援を頂いたニシム電子工業株式会社の関係各位に深謝する次第である。

### <参考文献>

- (1) 例えば、Peter Lehman, Christine Parra: 「Hydrogen Fuel from the Sun」, SOLAR TODAY, September/October 1994
- (2) 関口、藤木、谷:「太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステムの特性」, 平成 6 年電学論 B, Vol.114-B, No.4(1994.4)
- (3) 酒井、関口、太田、谷:「太陽水素エネルギーシステムに関する基礎研究」, 平成 8 年電学論 D, Vol.116-D, No.4(1996.4)
- (4) 加藤、前沢、佐藤、小黒:「太陽電池による固体高分子電解質を用いた水電解」, 第 11 回エネルギー・経済コンファレンス講演論文集, P.485~P.490(1995.11)
- (5) 太田、林、谷:「太陽電池モジュールによる水素製造に関する基礎研究」, 平成 7 年太陽／風力エネルギー講演論文集(1995), P.89~P.92(1995.11)
- (6) 黒川、若松:「太陽光発電システムの設計ガイドブック」, オーム社, P.197(1994)