

太陽電池モジュールによる 水素製造に関する基礎研究 (太陽電池モジュールによる特性)

The Fundamental Study on Producing Hydrogen with Photovoltaic Module
(Characteristics of Photovoltaic Module Supplied)

中 村 孝 司*¹
Kouji NAKAMURA

小 林 誠*²
Makoto KOBAYASHI

谷 辰 夫*³
Tatsuo TANI

Abstract

The fundamental study on hydrogen which is consumed by fuel cell power system, has been done using the electrolysis of water with solar energy. The poly-crystalline PV module with operating voltage of 2.4V and operating current of 39A is directly supplied to the hydrogen generator.

In this paper, we describe an experimental study of the relationship between solar radiation in inclined plane and flow rate of hydrogen. In order to vary I-V curve of PV module for raising solar cell temperature, flow rate of hydrogen has direct effects upon solar cell temperature. Then, flow rate of hydrogen was calculated by simulation, when output of photovoltaic module is supplied to hydrogen generator through DC-DC converter. As a result, it was very useful to apply DC-DC Converter.

Key Words: Photovoltaic module, Hydrogen generator, Solar radiation in inclined plane, Cell temperature, Flow rate of hydrogen

1. はじめに

クリーンで高効率な燃料電池システムは新しい発電システムとして実用化が期待されている。最近、燃料電池の燃料である水素を自然界に無尽蔵に存在する太陽エネルギーを使って製造しようという研究が国内外で行われている¹⁾²⁾³⁾。

筆者らは既に、太陽電池モジュールによる水素製造に関する基礎研究(直流模擬電源による特性)として、直流模擬電源による水素製造に関する特性を報告している⁴⁾。その内容は、水素発生機の電力効率は供給電力が12.4~77.6Wの範囲で50~52%であり、約17Wの電力を供給したとき電力効率が最大52%である。また、水素発生機の連続電力、1~60秒の断続電力を供給したとき、両者の供給電力量が等しければ、発生する水素発生量が等しいことなどである。さらに、水素発生機のI-V特性を太陽電池モジュールのI-V特性の最大出力点に一致させて使用すれば、太陽電池モジュールによる水素製造は利用方法によっては有効であることを明らかにしたものであった。

本論文は、多結晶シリコン太陽電池モジュールの出力を固体高分子電解質水電解方式の水素発生機に供給した際の、水素発生に関する諸特性を論述したもので

ある。すなわち、先ず太陽電池モジュールの出力を水素発生機に直接供給し、水素が発生することを確認した。次いで、水素発生量はセル温度上昇による太陽電池モジュールのI-V特性の変化に大きく影響することを測定データとシミュレーションから明らかにしている。また、傾斜面日射強度、セル温度の変化に拘らず、太陽電池モジュールの最大出力を水素発生機に供給させる機能を有するDC-DCコンバータを挿入することによって、水素発生量が大幅に増加することも示している。

*原稿受付 平成5年3月31日

- *1 東京理科大学工学部 卒業研究生
Faculty of Engineering, Science University
of Tokyo, Bachelor of Engineering
- *2 東京理科大学工学部 大学院生
Faculty of Engineering, Science University
of Tokyo, Master of Engineering
- *3 東京理科大学工学部 教授
Faculty of Engineering, Science University
of Tokyo, Professor

2. 測定装置と実験方法

2-1. 太陽電池モジュールの I-V 特性

まず太陽電池モジュールの I-V 特性を求めた。実験システムの構成図を図 1 に示す。

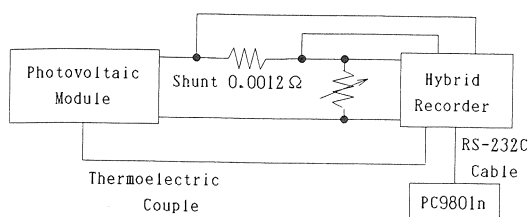


図 1. I-V 特性測定時のシステム構成図

使用した太陽電池モジュールは K 社製の多結晶シリコン太陽電池モジュールである。その仕様は表 1 に示すように、日射強度が 1.0 kW/m^2 、A.M. が 1.5、セル温度が 25°C のとき、最大出力が 93.5 W 、動作電圧が 2.4 V 、動作電流が 38.9 A である。シャント抵抗は $0.2 \text{ } \Omega$ (50A, 60 mV) のものであり、セル温度を測定する熱電対は銅-コンスタンタンである。また、ハイブリッドレコーダーは横河電機製 HR-1300 である。

表 1. 太陽電池モジュールの仕様

Photovoltaic module type	Poly Silicon
Photovoltaic module area	0.699 m^2
Maximum power	93.5 W
Operating voltage	2.4 V
Operating current	38.9 A
Photovoltaic module efficiency	13.4%

(測定条件, 1.0 kW/m^2 , A.M. 1.5, 25°C)

これらを組み合わせた測定装置を地上約 30 m の本学 7 号館屋上に設置した。太陽電池モジュールは傾斜角 35.5° で真南向きに置いている。太陽電池モジュールの電流、電圧、開放電圧、短絡電流のデータはホーク抵抗を組み合わせた可変抵抗器 ($0.06 \sim 0.40 \text{ } \Omega$) を変化させて求めた。また、太陽電池モジュールの裏面に熱電対 (銅-コンスタンタン) を配置しセル温度とした。さらに、既に設置してある全天日射計 (英弘精機製 MS-801) によって、必要な傾斜面日射強度は連続測定されている。

2-2. 水素製造

水素製造の実験を行なった。図 2 に実験システムの構成図を示す。このシステムは太陽電池モジュール、ハイブリッド・レコーダー、シャント抵抗、熱電対、水素発生機、流量計などで構成されている。

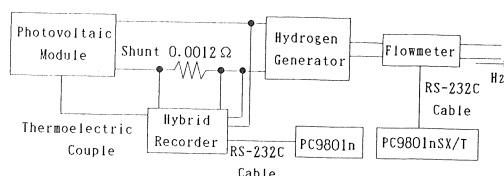


図 2. 水素発生量測定時のシステム構成図

水素発生機は、STEC 社製 OPGU-1500 を太陽電池モジュールが接続できるように改造してある³⁾。その仕様を表 2 に示す。この水素発生機は固体高分子電解膜を使用しており、水素発生流量は最大電流、温度、圧力がそれぞれ 35 A 、 25°C 、 1 atm のとき毎分 225 ml である。この時の水素の純度は 99.99% 以上であり、水素発生圧力は $0.2 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で可変できる。

表 2. 水素発生機の仕様

Type	Hydrogen Generator
	OPGU-1500(modification)
Manufacturer	STEC Co.
Method	Solid Polymer Electrolyte
Formation of gas	H_2 (above 99.99%)
Flow rate of H_2	225 ml/min (at 25°C , 1 atm)
Maximum input current	35 A

この水素発生機は電解セルとして固体高分子電解膜を使用していることにより、アルカリ電解液が不要であることに特徴がある。また、電解膜にカチオン交換膜が使用されており、この膜の両面に接合されている触媒電極に直流電圧をかけると、陰極から水素、陽極から酸素が発生することになる。ただし、ここでは水素のみを回収している。

一方、電気分解に用いた水溶液は水道水をイオン交換樹脂を介して得られた純水 ($10 \text{ M}\Omega \text{ cm}$) である。この水溶液をそのまま約 2 l のポリビニールタンクに入れ室温 ($20 \sim 25^\circ\text{C}$) で反応させた。純水の消費量は水素発生流量 225 ml/min の時、 10 ml/h である。

精密膜流量計 (STEC 社製 SF-1100) の仕様を表 3 に示

す。測定開始と同時に体積管の入口に石鹼膜がつけられ、入り口から入ってきたガスにより石鹼膜が押し上げられる。一定区間に設けられたこのディテクタ間を通過する時間が測定される。この時の温度、大気圧を読みとり、25℃、760mmHg換算の流量を表示する。

傾斜面日射強度、電流、電圧、セル温度は1分間隔で測定し、水素発生量も同時にパソコンに取り込んで記録した。

表3. 精密膜流量計の仕様

Type	Flowmeter in Membrane
	SF-1100
Manufacturer	STEC Co.
Measuring range	20~1000ml/min
Measuring time	60~1.2sec
Measured gas	N ₂ , O ₂ , H ₂ , Ar, Co

3. 太陽電池モジュールのI-V特性の解析

一般に太陽電池の光照射状態で電流-電圧特性は次式で表される。

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

$$I_0 = C_0 T^3 \exp \left(-\frac{q E_g}{n k T} \right)$$

I : 出力電流 (A) V : 出力電圧 (V)

I_L : 光起電流 (A) I₀ : 飽和電流 (A)

R_s : 直列抵抗 (Ω) R_{sh} : 並列抵抗 (Ω)

n : 接合定数 C₀ : 飽和電流温度係数

E_g : エネルギーギャップ (eV)

T : 素子絶対温度 (K)

k : ボルツマン定数 q : 電子の電荷量 (C)

4. 実験結果と考察

4-1. 太陽電池モジュールのI-V特性

太陽電池モジュールの傾斜面日射強度に対する電流、電圧の関係を図3、図4に示す。図のパラメータは負荷抵抗の値である。これらの図には短絡電流、開放電圧のおおのの値がプロットされている。これらのデータや縄田氏の式を参考にして①式のI_Lを求めると②式となる。⁵⁾①式を用いて、使用した太陽電池モジュールのI-V特性を求めた。I_Lは、太陽電池パネル入射日射強度に比例していることが分かる。

$$I_L = 0.000546 I_{rr} \{1 + 0.001 (T - 301)\} \quad \textcircled{2}$$

ここで、I_{rr} : パネル面に入射する全天日射強度

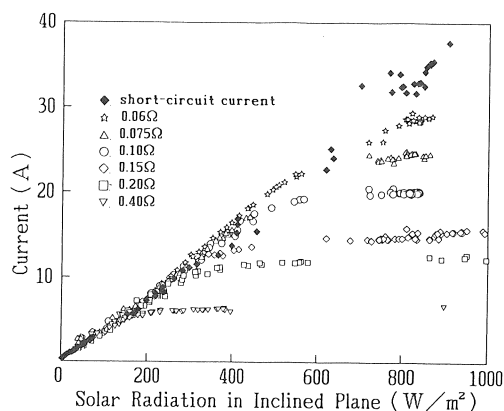


図3. 傾斜面日射強度に対する
太陽電池モジュールの電流値

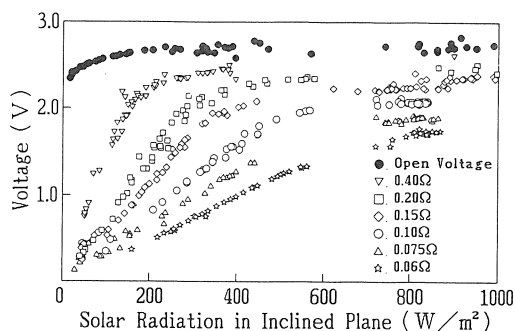


図4. 傾斜面日射強度に対する
太陽電池モジュールの電圧値

図5はセル温度25℃における太陽電池モジュールの傾斜面日射強度と電流-電圧の関係の測定値と①、②式によるシミュレーション結果を図示したものである。図のパラメータは傾斜面日射強度 (200~1000W/m²) である。なお、図中の直線は次に述べる水素発生機のI-V特性の近似直線である。

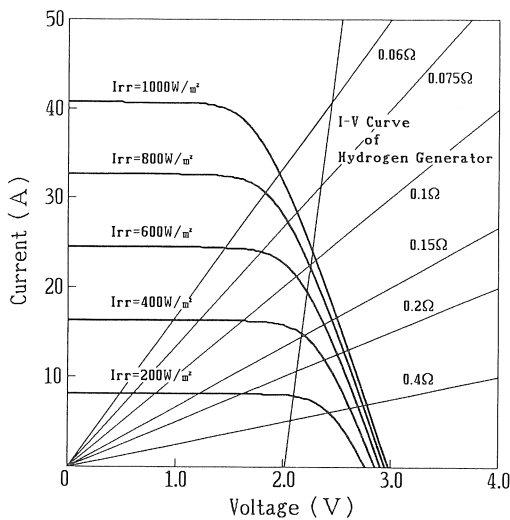


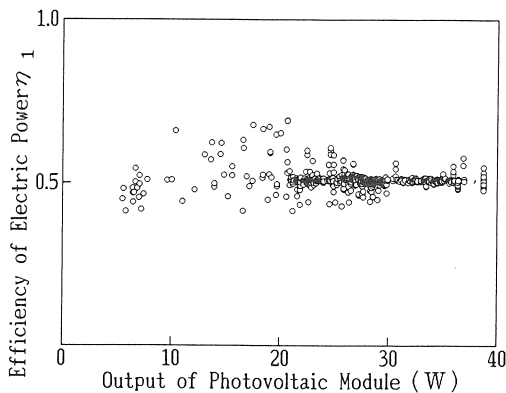
図5. 太陽電池モジュールの I-V 特性

4-2. 水素発生機の特性^{3) 4)}

本実験で用いた水素発生機の電力効率を図6に示す。図の横軸は太陽電池モジュールから水素発生機に供給される電力であり、図の縦軸は電力効率 η_1 である。水の電気分解で起こる反応は $H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$ であり、1 molの水素を発生するのに要する電気量は2Fとなる。したがって、電気量はファラデーの法則から69.7Whである。この値は理論値であり、効率100%として測定データがプロットされている。

$$\eta_1 = 0.0018 \cdot P_o + 0.4382 \quad (3)$$

ここで P_o : 水素発生機に供給される電力


 図6. 水素発生機の電力効率
(太陽電池モジュール出力供給時)

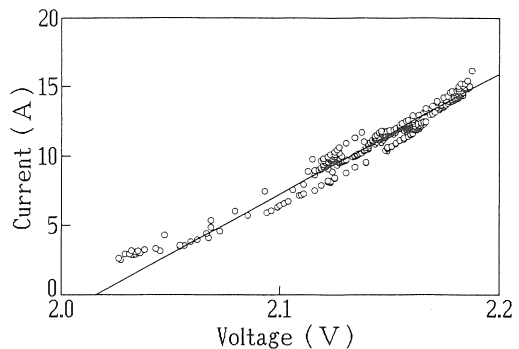
水素発生機の電力効率は供給電力が20W以下の比較的小さい範囲では、ばらつきが見られる。これは使用した膜流量計によるものと思われる。すなわち、既に記述したように、この膜流量計は細管の中の石鹼膜が一定区間内を通過する通過時間を測定して流量を求めるものであるため、水素発生量の少ない範囲ではデータがばらつくことによる。

③式と水素発生に必要な電流、電圧の関係より1分間当たりの水素発生量 X (ml/min)は次式で表される³⁾。

$$X = 6.18 \cdot P_o \cdot \eta_1 \quad (4)$$

図7は太陽電池モジュールの電力を供給した際の水素発生機のI-V特性である。横軸は水素発生機の電解セルにかかる電圧 V_c であり、縦軸は電解セルを流れる電流 I である。これらの間には、直線近似が可能であり、⑤式となる。なお、 V_c の最低値は2.02Vである。

$$I = 85.87 V_c - 173.1 \quad (5)$$


 図7. 水素発生機の I-V 特性
(太陽電池モジュール出力供給時)

4-3. 水素製造

図8は1992年11月5日の午前7時37分から午前11時51分までの傾斜面日射強度、セル温度、水素発生量の変化を示したものである。当日は部分的に雲があるものの晴天日であった。測定開始の7時37分の外気温度はセル温度に等しく15℃であったが、傾斜面日射強度が強くなるに従いセル温度が上昇した。一方、水素発生量は傾斜面日射強度が強くなるに従って増加するが、8時頃よりほぼ一定となっていることがわかる。

図9は傾斜面日射強度に対する水素発生量とセル温度の関係である。図から明らかなように水素発生量は太陽電池モジュールのセル温度に大きく影響を受けていることがわかる。

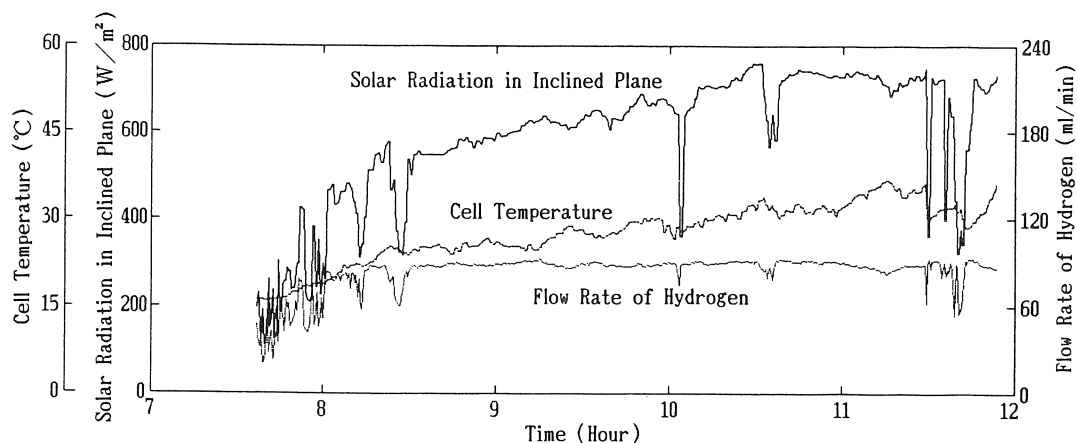
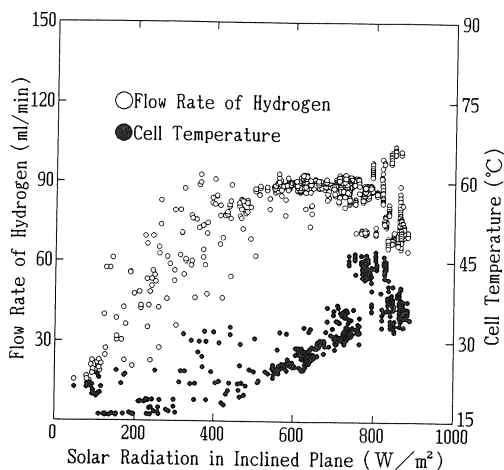
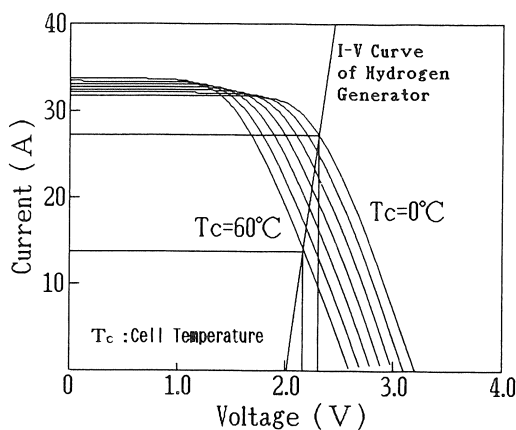


図8. 傾斜面日射強度とセル温度と水素発生量の時間的変化(1992年11月5日)

図9. 傾斜面日射強度に対する
水素発生量とセル温度図10. セル温度による太陽電池モジュールの
I-V特性への影響(800W/m²)

セル温度が水素発生量に与える影響を定量的に求めた。図10は式①、②によって求めた太陽電池モジュールのI-V特性である。図のパラメータはセル温度であり、0℃から60℃まで10℃毎に示してある。また、傾斜面日射強度は800W/m²一定である。図中の直線は水素発生機のI-V特性である。太陽電池モジュールのI-V特性と水素発生機のそれとの交点が水素発生機に供給される電力である。今、セル温度60℃と0℃の両者について、水素発生機に供給される電力を比較すると約2倍異なっており、同一の傾斜面日射強度においても、セル温度によって水素発生量が大きく変化することが分かる。

図11は傾斜面日射強度に対する水素発生量の関係である。図のパラメータは太陽電池モジュールのセル温度である。この図からもセル温度が水素発生量に影響を与えていることが理解される。

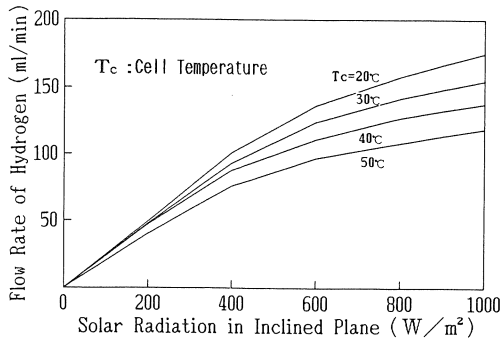


図 1.1. 傾斜面日射強度に対する水素発生量
(計算値)

5. DC-DCコンバータ挿入による水素発生量

当初、太陽電池モジュールの $P_{\max}$ が水素発生機の電解セルの入力電流-セル電圧特性の直線上に来るように設計した。しかし、上述したようにセル温度の変化により太陽電池モジュールの $I-V$ 特性が変化し、必ずしも $P_{\max}$ はこの直線上には乗っていない。そこで、太陽電池モジュールと水素発生機に間にDC-DCコンバータを入れ、モジュールの出力が最大出力 $P_{\max}$ で水素発生機の電解セルに入力できるように制御した時の水素発生量を求めた。

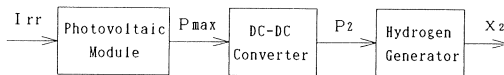


図 1.2. 水素製造にDC-DCコンバータを用いたシミュレーションモデル

図 1.2 にシミュレーションモデルを示す。図中の $P_{\max}$ は太陽電池モジュールの最大出力である。DC-DCコンバータにより水素発生機の電解セルの電流-電圧特性に合致する電力 P_2 に変換される。この電力が水素発生機供給され水素発生量 X_2 を得る。太陽光発電システム用の小形DC-DCコンバータの研究が行われている。今後高効率のDC-DCコンバータの開発が期待されるが、ここではその変換効率 η_3 を90%と仮定した⁶⁾⁷⁾。式④より得られる水素発生量 X_2 は次式により表される。

$$X_2 = 6.18 \cdot \eta_3 \cdot P_{\max} \cdot \eta_1 \quad (6)$$

ただし、

$$P_{\max} = I_{rr} \cdot S \cdot \eta_2 \{1 - 0.005 (T_c - 25)\}$$

図 1.3 は1992年11月5日の測定値と式⑥による計算結果である。また、図 1.4 はセル温度が25°Cの時の測定値と、25°Cの時の計算結果 X_2 を図示したものである。

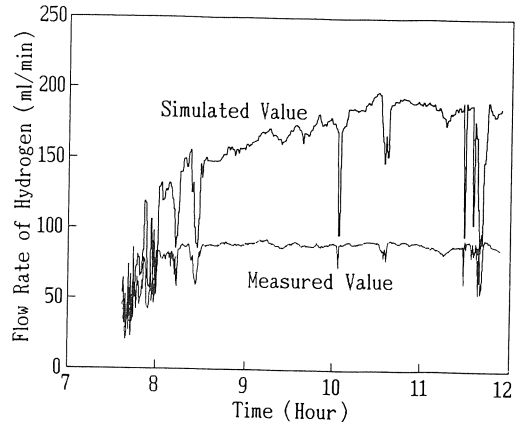


図 1.3. 水素発生量の測定データとシミュレーション結果との比較 (1992年11月5日)

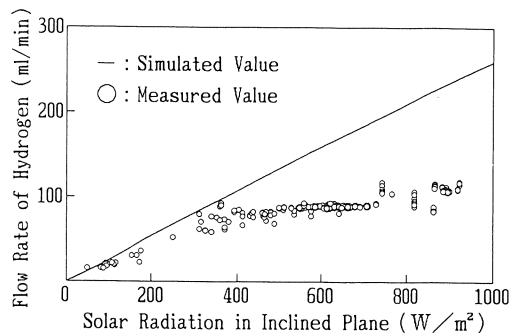


図 1.4. 傾斜面日射強度に対する水素発生量

図 1.3 は図 8 に対応し、図 1.4 は図 9 に対応している。図 1.4 の横軸は傾斜面日射強度であり、縦軸は1分間あたりの水素発生量である。図の測定値は、DC-DCコンバータの挿入がない場合、セル温度の上昇に伴って $I-V$ 特性が変化し、傾斜面日射強度と水素発生量は必ずしも比例しないことを示している。一方、計算値は、DC-DCコンバータを挿入することによって傾斜面日射強度と水素発生量が比例し、直線で近似できることを示している。また、図 1.0 より、各セル温度におけるモジュールの $P_{\max}$ は多少変化するがDC-DCコンバータを挿入することにより水素発生機は常に太陽電池

の P_{max} を供給することになるので、DC-DCコンバータを挿入することで、セル温度による影響も多少改善されることが期待できる。

6. まとめ

以上の結果より以下のことが明らかになった。

- ① 太陽電池モジュールの出力により直接水素発生機を駆動し水素を発生することができた。このとき傾斜面日射強度が $400\text{W}/\text{m}^2$ 以上では水素発生量は約 $90\text{ml}/\text{min}$ であった。。
- ② 太陽電池モジュールの $I-V$ 特性は、日射強度、セル温度によって変化し、水素発生量に大きな影響を与える。例えば、本実験では同一日射強度($800\text{W}/\text{m}^2$)において水素発生量が2倍程度異なることが分かった。
- ③ DC-DCコンバータを介し太陽電池モジュールと水素発生機、両者の整合性をとれば、太陽電池モジュールの最大出力が利用できて、セル温度による $I-V$ 特性への影響も少なくできる。

参考文献

- 1) 例えば、M.Al-Garni, et al: 「Solar Hydrogen in Saudi Arabia」: A Long-Term Outlook, 1991 Solar World Congress Vol.1 Part II p.735~740 (1991.8)
- 2) 鈴木大志、岩城力、谷辰夫: 「太陽エネルギーによる水素製造の基礎研究」: 太陽エネルギーVol. 17 No.6 p.23~28 (1991.11)
- 3) 広岩暁、波田秀才、小林誠、谷辰夫: 「太陽電池モジュールによる水素製造に関する基礎研究」: 太陽エネルギーVol18 No.5 p.26~31(1992.9)
- 4) 大田洋充、青木幸広、谷辰夫: 「太陽エネルギーによる水素製造に関する基礎研究」: 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 p.17~20 (1990.12)
- 5) 縄田豊: 「系統連系型太陽光発電システムの年間発生量の予測」: 太陽エネルギーVol.16 No.6 (1990.11)
- 6) 磯田浩他: 「共振絶縁DC-DCコンバータを用いた太陽電池から蓄電池への充電特性」: 平成2年度電気学会全国大会No.498 (1990.4)
- 7) 星野洋他: 「太陽光発電システムにおけるDC-DCコンバータ及びインバータに関する研究」: 電気学会半導体電力変換研究会spc-88-36 (1988.3)