

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)

Fundamental Study on Produce Hydrogen with Photovoltaic Modules
(Characteristics of DC power source simulated)

広 岩 晓^{*1}
S.HIROIWA

波 田 秀 才^{*1}
S.H ADA

小 林 誠^{*2}
M.KOBAYASHI

谷 卯 辰 夫^{*3}
T.TANIGUCHI

Abstract

The fundamental study on hydrogen which is consumed by fuel cell power system, has been started using the electrolysis of water with solar energy.

In this paper, DC power source is used for the simulator of photovoltaic modules. DC power source which could produce electricity continuously and intermittently was supplied to the hydrogen generator. The conversion efficiency and production of Hydrogen are measured in various conditions. On the basis of these data, the production of hydrogen from March to November in 1991 are calculated by using computer simulation program developed. Then it was found that the conversion efficiency of hydrogen generator was 52% at the input power of 17 watt and hydrogen production with photovoltaic modules was useful.

Key Words: photovoltaic module, Hydrogen generator, Fuel cell power system, Hydrogen production, Optimum design

1. はじめに

将来のエネルギー問題を解決するために新しいエネルギー・システムの研究開発がさかんに行われている。実用化が期待されている新発電システムのひとつに、クリーンで高効率な燃料電池がある。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行われておらず、筆者らは、太陽電池モジュールによる水素製造を目的として研究に着手している^{1), 2), 3)}。これらの研究の主な課題は、システムを構成する要素機器の効率を向上させ、コスト低減を図ることである。

本論文では先ず、太陽電池モジュールの出力を想定した直流模擬電源と固体高分子電解質水分解による水素発生機を組み合わせて諸特性を取得した。ついで、これらのデータ(1991年3月~11月)をベースにして太陽電池モジュールによる水素発生機の水素発生量をシミュレーションで求めた。その結果、水素発生機の負荷特性を太陽電池モジュールの最大出力特性に適合させるシステムを構成することが可能であり、太陽電池モジュールによる水素製造は有効であることを明らかにした。

2. 実験

2-1. 実験システムの概要

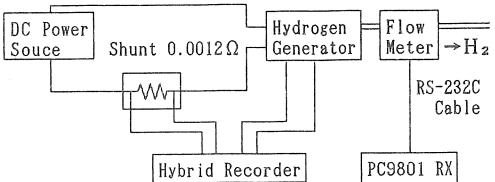


図1 実験機器のシステム構成図

実験システムの構成図を図1に示す。

原稿受付 平成4年3月2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

直流模擬電源により、連続および断続電力を水素発生機に供給し、水素発生流量を精密膜流量計で測定した。この直流模擬電源は、時間的に変化する太陽電池モジュールの出力を模擬するため筆者らが設計試作したものである。原理的には、2個の直流電源から構成されており、1個の直流電源でベースになる電流を、他の直流電源とタイミングで断続電流を発生させ、重畠させている。この電源の最大電流、最大電圧、最大電力はそれぞれ40A、5V、200Wであり、この範囲で連続して変化させることができる。

水素発生機は、STEC社製OPGU-1500を太陽電池モジュールあるいは上記の直流電源が接続できるように改造したものである。その仕様を表1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35A、25°C、1atmのとき毎分255ml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0.2~4kgf/cm²の範囲で可変できる。

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源から電力を供給すると、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。

表1 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	255ml/min(at 25°C, 1atm)
Maximum input current	35A

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(10MΩcm)である。この水溶液をそのまま約2lのポリビニールタンクに入れ室温(20~25°C)で反応させた。純水の消費量は水素発生流量225ml/minの時、10ml/hである。使用した流量計はSTEC社製の膜流量計(SF-1100)である。その仕様を表2に示す。流量範囲は毎分20~1000mlである。この膜流量計の測定時間は60~1.2秒であり、流量範囲が20~200ml/minのときの測定精度は±0.5%である。

また、水素発生機の電解セルを流れる電流、電解セルにかかる電圧はハイブリッドレコーダー(横河電機製HR-1300)で記録した。

表2 流量計の仕様

Type	Flowmeter in Membrane
Measuring range	20~1000ml/min
Measuring time	60~1.2sec
Measured gas	N ₂ , O ₂ , H ₂ , Ar

2-2. 実験方法

まず、水素発生機の基本的な特性を把握するために、図2のような一定電力(0~80W)を連続して水素発生機の時定数に比べ十分長い時間(一点のデータ当たり3分程度)供給して水素発生量、電力効率を求めた。電解セルを流れる電流はシャント抵抗(0.0012Ω、0.2級)の両端子電圧を測定して求め、電解セル電圧はセル両端の電圧を直接測定しハイブリッド記録計で記録した。また、水素発生流量は先に述べた精密膜流量計で測定し、その値はパソコン(PC-9801RX)に記録される。測定した電流の範囲は4Aから34Aであり、それらに対応した電圧は2.04Vから2.30Vであった。

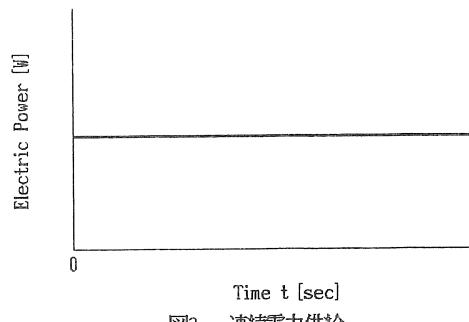


図2 連続電力供給

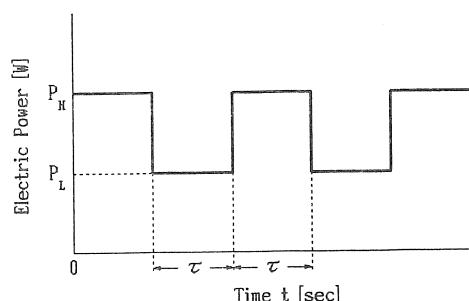


図3 断続電力供給

電力効率は、理論的には1molの水素を発生させるに必要なエネルギーが65.9Whであることから、これらの

値と(電解セル電圧) × (電解セル電流)、上記流量計で計測した水素発生流量との割合で求めた。

次に、太陽電池モジュールの出力を模擬して図3に示すような断続電力を供給した。図のベース電力 P_L は20W一定であり、印加電力 P_H は24Wから40Wまで変化させ、一定周期 2τ で断続的に供給した。ここでは、 τ の値として2.5秒、5秒、10秒、60秒の4通りとし、断続電力の通電時間は1測定点当たり、4分程度とした。断続電力供給時の水素発生流量の測定、電力効率の算定は連続電力供給時と同様である。

2-3. 実験結果と考察

2-3-1. 電解セルの I-V 特性

図4に水素発生機に組み込まれている電解セルの電解セルを流れる電流 I と電解セルにかかる電圧 V_c 特性を示す。これらの関係を回帰計算で求めると次式となった。

$$I = 131.1 V_c - 265.8 \quad \dots\dots(1)$$

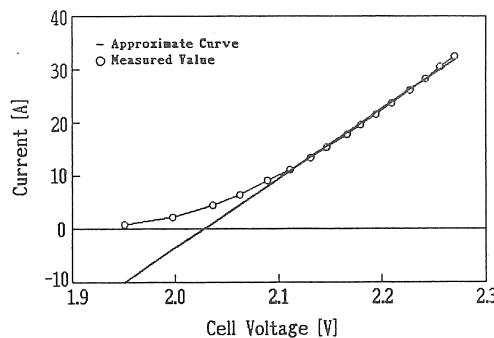


図4 入力電流-セル電圧特性

2-3-2. 連続電力を供給した場合

連続電力を供給した際の水素発生流量特性を図5に示す。図の横軸は供給電力 [W]、縦軸は水素発生流量 [ml/min] である。電解セルに供給した電力は8.15~77.55 Wで、これに対応するセル電圧は2.04~2.28V、電流は4~34Aであった。電流値の変化に比べて、電圧の変化は僅かなので、水素発生流量は供給する電力に比例することがわかる。

太陽電池モジュールの出力を供給する際には、水素発生機が広い電力範囲で高い効率を保つ必要がある。ここでは、水素発生機の供給電力の変化に対する電力効率の関係を求めた。電解セルに印加される電圧に対する理論水素分解電圧で表される電圧効率は、電解セル電圧が2.05Vの時60%、2.09V、2.18Vの時それぞれ5.8.7%、56.4%であった。また、一定時間内に電解セルに流れる電流によって発生する理論的な水素量と実際

の水素量で表される電流効率は、電流が5Aの時80.7%、10A、20Aの時、それぞれ87.9%、90.8%であった。

図6に連続電力の電力効率を示す。図より電力効率は約17Wで最大値(52%)を取る。その後、電力を増加させると電力効率は徐々に低下する傾向にある。これは、すでに述べたように、電圧効率は電圧の増加に伴って直線的に低下するのに対し、電流効率は電流の増加に比例して上昇するため、両者の積である電力効率に極大値(最大値)ができることがある。本論文の水素発生機は、電力が12.36~77.55Wの範囲で変換効率が50%以上となった。

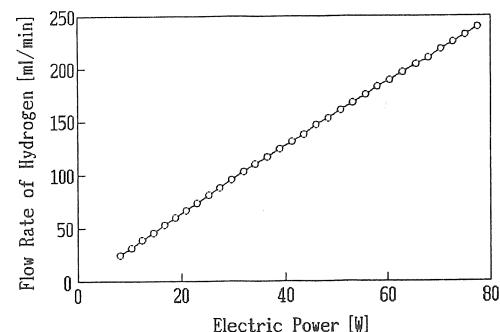


図5 連続電力時の発生流量-電力特性

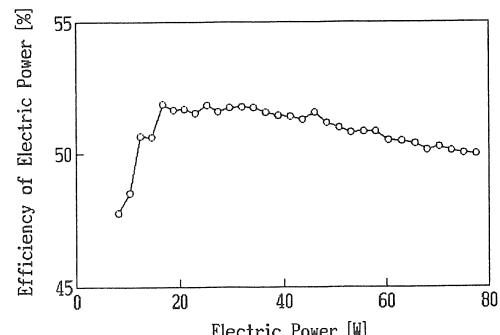


図6 連続電力時の電力効率

2-3-3. 断続電力を供給した場合

供給電力と発生流量との関係を図7に、電力効率を図8に示す。両図の断続時の電力はその平均値であり、連続電力供給の結果も実線で併せて表示した。

連続電力と断続電力を供給したときを比較すると、図7、図8から分かるように、断続電力供給時の $\tau=2.5$ 、5、10秒の場合、連続電力供給時の近似直線との差は1%以内であり、両者の特性はほぼ一致している。 $\tau=1$ 秒の場合、断続電力供給時の水素発生流量は、連続電力供給時のそれより増加しているが、これは流量計の測定誤差に起因する。すなわち流量の測定にかかる時

間（約15秒）と、周期 2τ （20秒）の値が近いため、測定誤差が増大するからである。

これらの結果から、20~40Wの電力供給範囲では、連続電力供給、断続電力供給とも両者の平均値が等しければ発生する水素の量も等しいことがわかる。

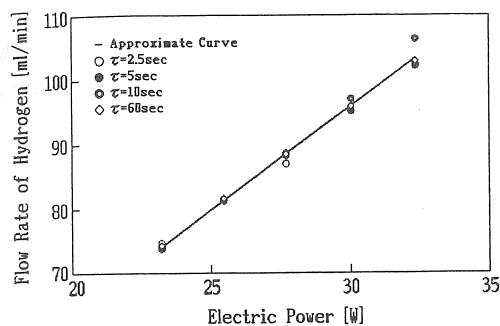


図7 断続電力時の発生流量-電力特性

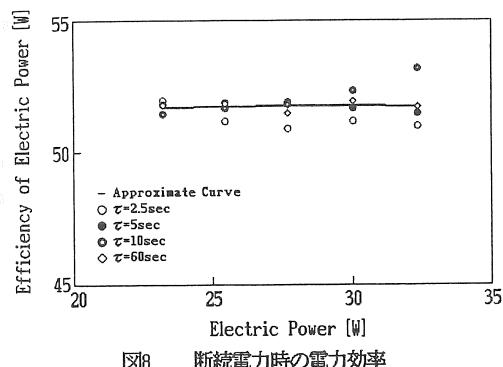


図8 断続電力時の電力効率

3. 電解法による水素発生シミュレーション

3-1. シミュレーションモデル

電解法による水素発生量のシミュレーションを次のA、B両方式について行った。A方式は太陽電池モジュールの直流出力を直接水素発生機に供給するものである。B方式は太陽電池モジュールの直流出力を直接水素発生機に供給せず、DC-DCコンバータを介して水素発生機に供給する方式である。B方式では、常時水素を発生させるために必要な約2.1Vの電圧を電解

セルに印加するように太陽電池モジュールの出力を調整している。

図9は両方式のシミュレーションモデルである。A方式では太陽電池モジュールの直流出力が直接水素発生機に供給されており、また、B方式ではDC-DCコンバータが太陽電池モジュールと水素発生機の間に挿入されている。ここでは、A、B両方式の出力特性を比較した。

3-2. 計算条件

3-2-1. A方式の場合

水素発生機に接続する太陽電池モジュールの設計条件を次のようにした。

- 1) 日射強度に対する太陽電池モジュールのI-V特性の最大電力 P_{max} が(1)式の直線上あるいはその付近にあること。
- 2) 動作点の電流 I_p が35A以下になること。
- 3) 電解セルに供給する電圧が約2.1Vであること

本論文では、太陽電池モジュールは多結晶シリコン太陽電池で構成するものとした。現在、筆者らが測定中の多結晶シリコン太陽電池モジュール（開放電圧25.8V、短絡電流3.1A、最大出力59.3W）のI-V特性を図10に示す⁶⁾。

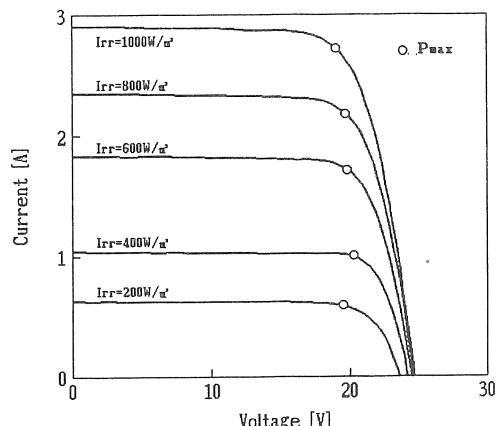


図10 現在使用中の太陽電池モジュールのI-V特性

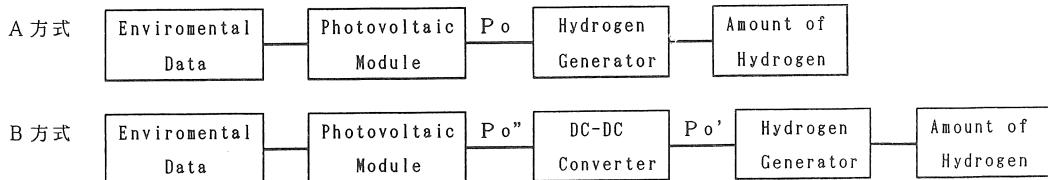


図9 シミュレーションモデル

このモジュールは図11に示すように太陽電池セル44個が直列に配線されている。今ある最大電力 P_{max} での最適動作電圧を $v[V]$ 、最適動作電流を $i[A]$ とする。このセルを図12のように直列にS個、並列にP列並べたときに同じ P_{max} での最適動作電圧を $V[V]$ 、最適動作電流を $I[A]$ とする。 I 、 V を i 、 v の式で表すと

$$I = P \cdot i \quad \dots \dots (2)$$

$$V = S \cdot v / 44 \quad \dots \dots (3)$$

となる。前述の3つの条件を満たすS及びPを求めるところ $S=5$ 、 $P=12$ となる。

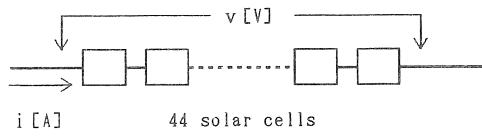
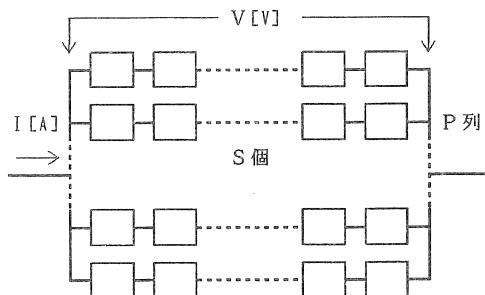


図11 使用中の太陽電池モデル



S : Number of series in solar cells

P : Number of parallel in solar cells

図12 設計した太陽電池モデル

図10のI-V特性をベースにして設計した太陽電池モジュールのI-V特性及び、水素発生機の負荷特性を図13に示す。

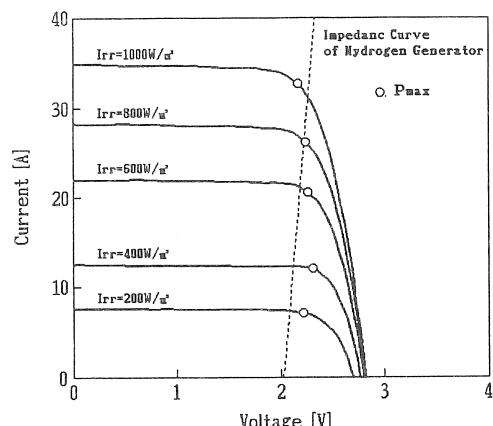


図13 設計した太陽電池モジュールのI-V特性

図13より、日射量 Irr に対する太陽電池モジュールのI-V特性と水素発生機の負荷特性との交点を電圧 $V_p[V]$ 、電流 $I_p[A]$ としたときの太陽電池からの出力 $P_o[W]$ は次式となる。

$$P_o = V_p \cdot I_p \{1 - \alpha (T_c - 25)\} \dots \dots (4)$$

ここで、 α ：温度変化係数、 T_c ：セル温度[°C]

水素発生機の電力効率を η_2 、日射データの測定間隔を Δt とすると水素発生量 $X[1]$ は次式で表される⁴⁾。

$$X = 6180 \cdot P_o \cdot \eta_2 \cdot \Delta t \dots \dots (5)$$

ここで η_2 は、図5より次の近似式で表せる。

1) $P_o < 16.63W$ のとき

$$\eta_2 = -0.0029 \cdot P_o^2 + 0.7737 \cdot P_o + 0.0052 \dots \dots (6)$$

2) $P_o > 16.63W$ のとき

$$\eta_2 = -0.0003 \cdot P_o + 0.5262 \dots \dots (7)$$

3-2-2. B方式の場合

日射データより日射量 $Irr[W/m^2]$ に対する太陽電池モジュールの電力 $P_o''[W]$ は次式で表される。

$$P_o'' = \eta_1 \cdot Irr \cdot S \{1 - \alpha (T_c - 25)\} \dots \dots (8)$$

ここで、 η_1 ：太陽電池モジュール効率、 S ：太陽電池モジュール面積[m²]、 α ：温度変化係数、 T_c ：セル温度[°C]

DC-DCコンバータの出力 $P_o'[W]$ は、

$$P_o' = \eta_3 \cdot P_o'' \dots \dots (9)$$

ここで、 η_3 ：DC-DCコンバータの効率

よって、出力 P_o' に対する水素発生量 $X'[1]$ は日射データの測定間隔を Δt とすると

$$X' = 6180 \cdot P_o' \cdot \eta_2 \cdot \Delta t [1] \dots \dots (10)$$

となる。計算するにあたって表3の数値を用いた³⁾。

表3 計算に用いた数値

Photovoltaic module efficiency: η_1	0.109
DC-DC converter efficiency : η_3	0.9
Temperature coefficient : α	0.005
Photovoltaic module area : S	0.742

3-3. 水素発生効率

太陽電池モジュールの出力を基準(100%)としたときの、水素発生効率をAとB、2つの方針について求めた。水素1molを発生させるのに必要な電力は、65.9Whである。また、気温を25°Cとすると発生する水素は24.5lである。ここで、太陽電池モジュールの出力を P [Wh]、そのときの理論発生水素量を $X'[1]$ とすると、

$$X' = 24.5 \cdot P / 65.9 [1] \dots \dots (11)$$

となる。シュミレーションで求めた水素の量を $X[1]$ とすると、水素発生機の電力効率 η_p は次式となる。

$$\eta_p = X / X' = 2.69 \cdot X / P \quad \dots \dots (12)$$

3-4. 結果および考察

神楽坂校舎屋上で測定中の傾斜面全天日射量(1991年3月~11月)を用いて水素発生量、太陽電池モジュールの出力に対する水素発生効率を求めた。

月別水素発生量の結果を図14に示す。全体として、水素発生量は日射量に対応して増減しており、また、A、B両方式における水素発生量の差異はごく僅かであることが分かる。これは、A方式では太陽電池モジュールの日射量の変化に対する各最大電力 P_{max} での電流、電圧値と水素発生機の負荷の電流、電圧値が整合していること、B方式ではDC-DCコンバータを備えることによる水素発生量の増加(約10%)がDC-DCコンバータの効率90%によって相殺されたことが原因である。

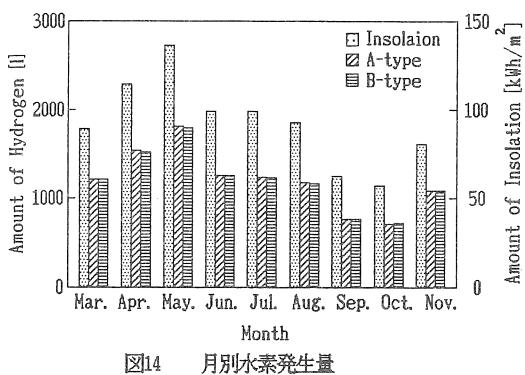


図14 月別水素発生量

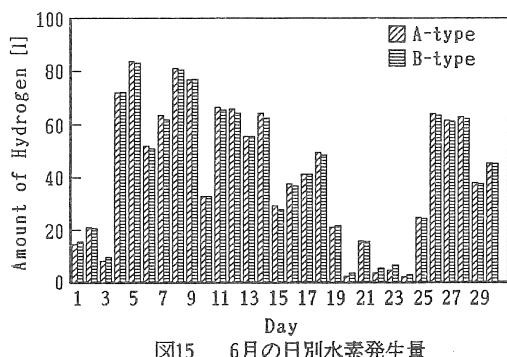


図15 6月の日別水素発生量

図15は1991年6月1ヶ月間の1日当たりの両方式の水素発生量を比較して示したものである。図から分かるように日射量の少ない日では、B方式の水素発生量はA方式のそれに比べて多い。これは図13より分かるよう

に、水素発生機の負荷特性を日射量が800W/m²以上の太陽電池モジュールの最大電力 P_{max} に合わせたことに起因している。

太陽電池モジュールの出力に対する月別の水素発生効率を図16に示す。水素発生効率はA方式で48~50%程度、B方式で43~45%程度となった。これは、太陽電池モジュールの出力を基準(100%)としたため、B方式の水素発生効率はDC-DCコンバータの効率(90%)を含むからである。

9月、10月の効率はそれぞれ、A方式で48.4%、47.7%、B方式で43.5%、42.9%と低い値になった。これは、9月と10月の日射量が少なく、長時間、水素発生機効率の低い電力範囲において、水素発生機が動作したためである。効率が最も高かったのは5月で、A方式で49.9%、B方式で44.9%となった。

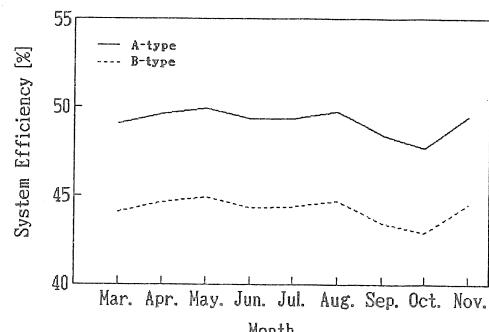


図16 月別水素発生率

4. まとめ

直流模擬電源から水素発生機に連続電力と断続電力を供給し、水素発生機に関する諸特性を測定した。また、これらのデータと神楽坂校舎で測定した1991年3月~11月までの日射データを用いて太陽電池モジュールによる水素発生量などをシュミレーションで求めた。その結果次のことが分かった。

- 1) 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%となった。また、約17Wの電力を供給したとき最高効率52%をとる。
- 2) 水素発生機に連続電力を供給しても、断続電力を供給しても両者の平均値が等しければ、発生する水素の量も等しい。
- 3) 太陽電池モジュールの出力を基準(100%)とした各月の水素発生効率は、A方式で約48~50%、B方式で約43~45%である。
- 4) A方式とB方式における各月の水素発生量はほぼ等しい。従って、水素発生機の負荷特性が太陽電

池モジュールの最大出力 P_{max} の特性にはほぼ一致させることができれば、DC-DCコンバータを設置する必要が無い。

参考文献

- 1) 例えは、M.Al-Garni, etal: 「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、波田、小林、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」: エネルギー・資源学会第8回エネルギー・システム・経済カンファレンス 7-4 p.201~206 (1992.2)
- 4) 米山宏: 日本化学会編 新化学ライブラリー 「電気化学」 大日本図書 p.122~124 (1986)
- 5) 川口信一、西本吉助: 「物理化学序論」 化学同人 p.120 (1985)
- 6) 古屋耕一、谷辰夫: 「太陽電池モジュールのエネルギー的評価」: 太陽エネルギー Vol.17 No.6 p.29~35 (1991.11)