

太陽光発電 (PV) - 電気分解 (EL) - 燃料電池発電 (FC) 組み合わせシステムの最大出力運転方法

熊谷 広一¹⁾・房野 俊夫²⁾・渡辺 和也³⁾・大塚 馨象⁴⁾

The study of maximum power output operation method of the PV-EL-FC hybrid system

Kouichi KUMAGAE, Toshio BOUNO, Kazuya WATANABE, Keizou OHTSUKA

Abstract

Since the power output of photovoltaics (PV) is affected by natural conditions, a constant power output can not be obtained. So we have studied the PV-EL-FC hybrid system. We can generate and store hydrogen by electrolysis (EL) with the direct-current from a photovoltaic cell, and then supply the stored hydrogen to fuel cells (FCs) whenever the electric power needed.

In this research, we examined the operation method for the maximum power output of the system.

The results are as follows:

- (1) We studied the fundamental characteristics of the PV-EL-FC hybrid system with the solar simulator and sunlight.
- (2) In this system, the maximum power output could be obtained by controlling the resistivity of the electrolysis cells.
- (3) In the case of the amount of insolation change, the value of load resistivity of electrolysis cells is also followed to the insolation change.
- (4) The empirical formula of load resistivity of electrolysis cells could be derived, and the index of the optimal connection method of photovoltaics and electrolysis cells was obtained.

Key Words:

Photovoltaic, Electrolysis cell, Fuel cell, Hybrid system, Maximum power output operation, Amount of insolation, Hydrogen

1. はじめに

太陽光発電 (PV) や風力発電などの自然エネルギーは天候に左右され、一定の出力が得られにくい。そこで、太陽電池の直流電流で水の電気分解 (EL) を行って

水素を生成・貯蔵し、その水素を必要時に燃料電池 (FC) に供給して発電を行う PV-EL-FC 組み合わせシステムを検討している¹⁾。このシステムの総合効率は、各要素の性能はもとより、各要素間の連系の状態によって左右される。

本研究では PV-EL-FC の組み合わせシステムを構築し、そのシステムの出力を最大とする運転方法を確立することを目的とした。

1) 電気電子工学専攻大学院生

2) 佐土原高校教諭

3) 電気電子工学科技官

4) 電気電子工学科教授

システムの総合効率を向上させる課題の一つに、常に太陽電池をその最大出力点付近で運転することが挙げられる。そこで日射量に対する太陽電池の最大出力動作点となる負荷抵抗を求め、その負荷抵抗に電解セルの内部抵抗を合致させることを検討した。

2. 太陽電池の最大出力の負荷抵抗の導出

単結晶Si太陽電池の最大出力動作点の負荷抵抗の実験式を導出した。

これまでに、単結晶Si結晶太陽電池の短絡電流(I_{sc})は日射量に比例していること、 I_{sc} と最大出力動作点の電流(I_{pmax})は太陽電池の温度の影響をほとんど受けず、 I_{pmax}/I_{sc} は日射量の変化に対して一定であることを明らかにしている²⁾ ((2-1)式, K: 短絡電流係数, A: 日射量(W/m^2))。

単結晶Si太陽電池の最大出力特性式³⁾を(2-2)式に示す。(P_{max} : 最大出力(W/m^2), T: 電池温度($^{\circ}C$), A: 日射量(W/m^2), η : 使用する太陽電池の変換効率(%))

よって、最大出力動作点の負荷抵抗 R_{pmax} ($\Omega \cdot m^2$)は、(2-3)式となり、 R_{pmax} は I_{pmax} , Aに反比例する(図2-1)。

$$I_{pmax} = 0.9 \times I_{sc} = 0.9 \times K \times A \tag{2-1}$$

$$P_{max} = \{ \eta - (\eta/10)^2 \times 0.05 \times (T - 25) \} \times A / 100 \tag{2-2}$$

$$R_{pmax} = \frac{ \{ \eta - (\eta/10)^2 \times 0.05 \times (T - 25) \} }{ 90 \times K } \times \frac{ 1 }{ I_{pmax} } \tag{2-3}$$

$$= \frac{ \{ \eta - (\eta/10)^2 \times 0.05 \times (T - 25) \} }{ 100 \times (0.9 \times K)^2 } \times \frac{ 1 }{ A }$$

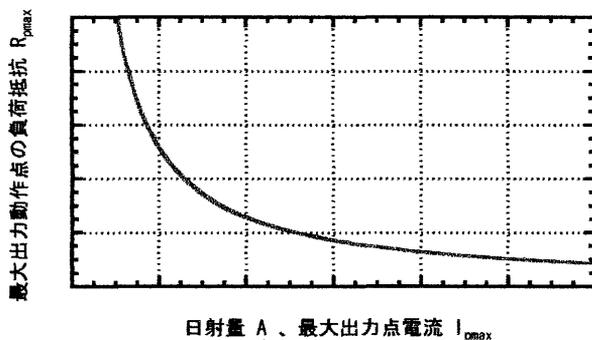


図2-1 最大出力動作点の負荷抵抗 R_{pmax}

3. 電解セルの出力特性と内部抵抗の導出

実際に太陽電池に対して負荷となる電解セルを接続、運転し、PV-EL間における太陽電池の動作点、電解セルの特性について検討した。

また、この検討から、電解セルの内部抵抗の実験式を導出した。

3.1 実験方法

図3-1に実験フロー図、図3-2に実験状況の一例を示す。複数台の電解セルを太陽電池に対して直、並列接続し、その接続方法を変えることで太陽電池の負荷を変化させ、各接続方法における太陽電池動作点を測定した。

また、日射量及び太陽電池温度、周辺温度を測定するために全天日射量計、熱電対を用いて、その出力をデータロガーで計測した。

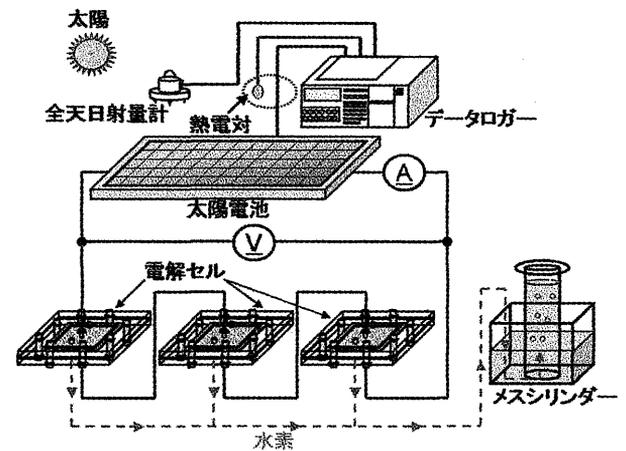


図3-1 実験フロー図

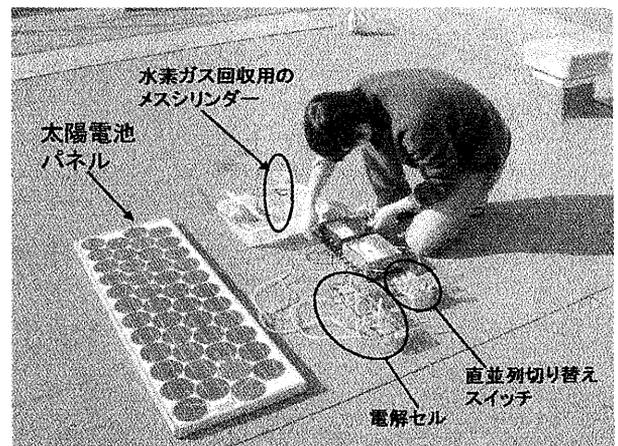


図3-2 実験状況

表3-1に検討に用いた太陽電池, 表3-2に電解セルの仕様を示す。用いた太陽電池はすべて単結晶Si太陽電池であり, それぞれ1型, 2型, 3型と称した。

また, 電解セルは電極面積や電極間隔, 抵抗係数(電解セルの見かけの抵抗)の異なる2種類のものを用いており, それぞれI型, II型と称した。

表3-1 太陽電池の仕様

名称	電極面積(m ²)	パネル枚数
1型	0.011	1
2型	0.239	1
3型	0.033	1型を3直列接続

表3-2 電解セルの仕様

	I型	II型
電極面積(cm ²)	40	25
電極間隔(μm)	100	50
抵抗係数	0.19	0.4
製造元	h-tec	当研究室

3.2 太陽電池1型を用いた検討

太陽電池1型に電解セルI型を1~3台直, 並列接続し太陽電池動作点を測定した。各接続方法における太陽電池1型のI-V, I-P動作点を図3-3に示す。

複数の電解セルを並列接続した場合, 並列接続台数の増加により電解セルの合成抵抗が若干低下し, 電流がわずかに増加した。いずれも太陽電池の最大出力点近傍で運転できた。

また, 複数の電解セルを直列接続した場合, 太陽電池1型のセル電圧が小さいため, 太陽電池動作点は開放電圧での運転となった。

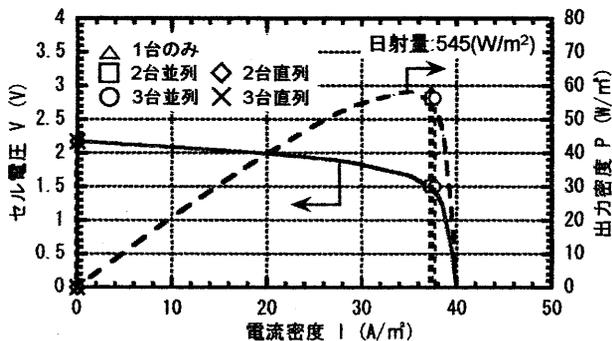


図3-3 太陽電池1型のI-V, I-P動作点

3.3 太陽電池2型を用いた検討

太陽電池1型よりも容量の大きい太陽電池2型に対して, 電解セルI型を1~3台直, 並列接続し, 太陽電池動作点を測定した。図3-4に各接続方法における太陽電池2型のI-V, I-P動作点を示す。

複数の電解セルを並列接続した場合, 太陽電池動作点は1台のみ接続した場合に比べてほとんど変化はなかった。

また, 複数の電解セルを直列接続した場合, 太陽電池動作点は, 接続台数を増やす度にセル電圧は増大したが, 電流密度はほとんど変化しなかった。

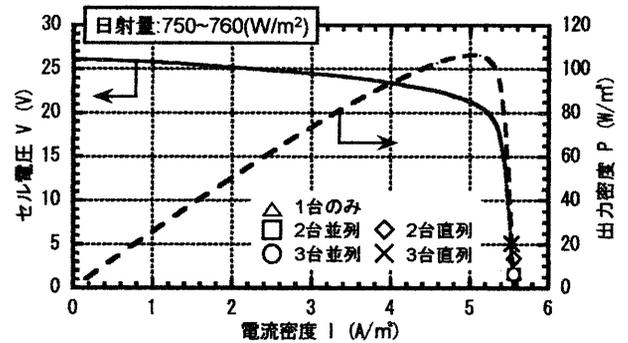


図3-4 太陽電池2型のI-V, I-P動作点

以上の結果を考慮して, 太陽電池2型に対してさらに電解セルの直列接続台数を増やして太陽電池動作点の測定を行った。

表3-3に太陽電池に直列接続した電解セルを示す。

表3-3 直列接続した電解セル

直列接続台数	接続した電解セル
1~3台目	I型
4~7台目	II型

図3-5に太陽電池2型のI-V, I-P動作点を示す。太陽電池動作点は, 電解セルの直列接続台数を増加させる度に, セル電圧が増加し, 電流密度が減少した。また, 電解セルを6台直列接続した場合に最大出力付近で運転することができた。

このように太陽電池と電解セルの接続方法によって, 太陽電池を最大出力付近で運転できることが確認できた。

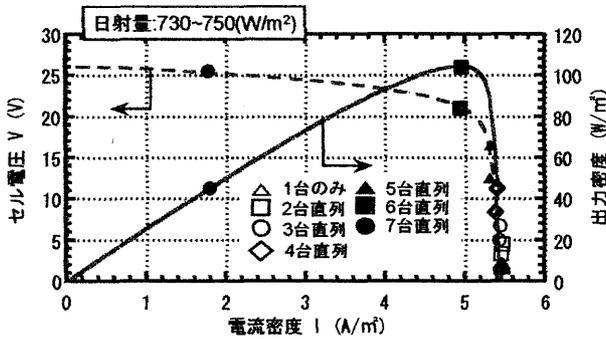


図3-5 太陽電池2型のI-V, I-P動作点

3.4 太陽電池3型を用いた電解セル特性の検討

太陽電池3型(太陽電池1型の3直列)に対して, 3.4で用いた1~4台の電解セル(太陽電池3型の定格を考慮して電解セルの直列接続台数を4台までに留めた)を直列接続して運転を行い, 各接続台数において太陽電池電流(日射量)に対する電解セルの電流-電圧特性を測定した。図3-6に日射量に対する太陽電池と電解セルのI-V特性, 図3-7に日射量に対する太陽電池と電解セルのI-P特性を示す。

図3-6から, 1~4台の電解セルを直列接続したそれぞれの電解セル特性は, 電流密度(日射量)に対して線形性を持っており, セル電圧は電流密度の増加に対してわずかに上昇していることがわかった。

また, 図3-7から, 電解セルを3台直列接続した電解セルのI-P特性は電流密度(日射量)にかかわらず太陽電池の最大出力に近い値で運転できた。このことから, 太陽電池3型に対して電解セル2型を3台直列接続した場合に, 日射量に左右されることなく太陽電池の最大出力付近で運転できるものと考えられる。

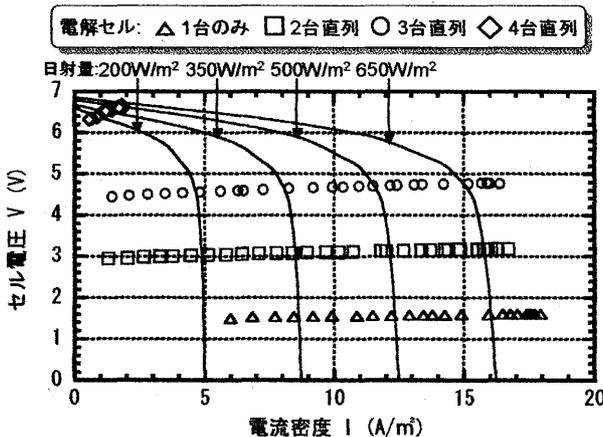


図3-6 日射量に対する太陽電池と電解セルのI-V特性

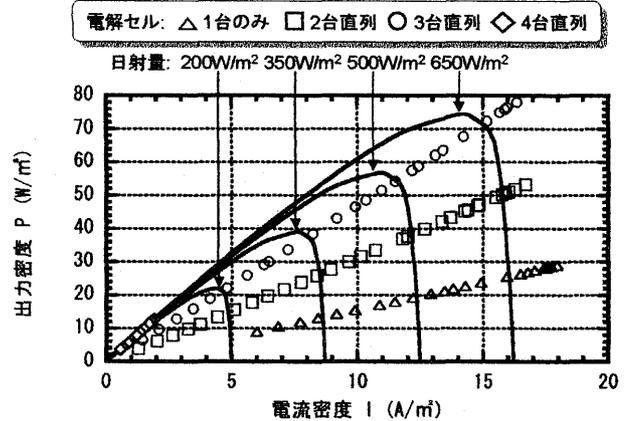


図3-7 日射量に対する太陽電池と電解セルのI-P特性

3.5 異なる太陽電池における電解セル特性の比較

太陽電池2型と3型の容量の異なる太陽電池の電解セル特性を比較し, 太陽電池の容量の違いが電解セル特性に及ぼす影響を検討した。ここで, 太陽電池に接続した電解セルはすべてI型である。図3-8に各接続台数における電解セル特性を示す。なお, 図3-8は太陽電池の電極面積の異なる太陽電池1型, 2型の比較を行うため, 横軸を電流密度I(A/m²)ではなく太陽電池から得られる電流i(A)とした($i=I \times S$, S:電極面積(m²))。

図3-8から, 太陽電池2型, 3型における電解セル特性は電解セル1台のみ接続, 2台直列接続, 3台直列接続それぞれにおいて, 同一線上に位置していることが分かった。

よって, 電解セル特性は太陽電池のメーカーや容量に関わらず, 一定の傾きを持ったものであるといえる。

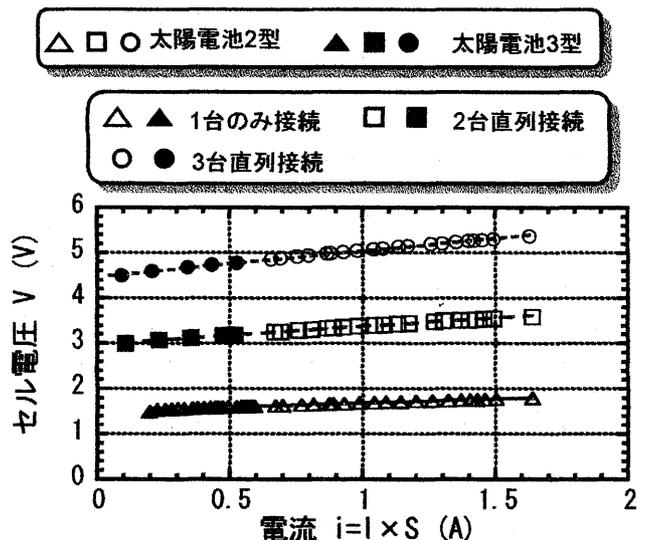


図3-8 各接続台数における電解セルi-V特性

3.6 電解セルの内部抵抗の導出

これまでの検討から、電解セルのI-V特性は太陽電池のメーカーや容量にかかわらず、電流密度(日射量)に対して線形性を持っており、電解セルのI-V特性は電流密度の増加に対してわずかに上昇することが分かった。以上のことと、前出の図3-8から、電解セルの直列接続における合成抵抗を導出した[(3-1)式]。

$$R_L = M \times \left(\frac{b}{I} + a \times S \right) \quad (3-1)$$

ここで、 R_L :電解セルの負荷抵抗($\Omega \cdot m^2$), M :電解セルの直列接続台数, I :電流密度(A/m^2), S :太陽電池の電極面積(m^2), a :電解セルの電圧係数, b :分解電圧(V)。

4. R_{pmax} に R_L を合致させる検討

太陽電池の最大出力で電解セルを運転するため、本研究で導出した太陽電池の最大出力動作点の負荷抵抗 R_{pmax} [(2-3)式]に電解セルの内部抵抗 R_L [(3-1)式]を合致させる検討を行った。

検討に用いた太陽電池は太陽電池2型1枚、電解セルは電解セルI型である。表4-1に太陽電池2型の条件、表4-2に電解セルI型の条件を示す。表4-1,表4-2の条件を(2-3)式,(3-1)式に代入して $R_{pmax}=R_L$ となる条件を検討した。図4-1に R_{pmax} を基準とした場合の日射量に対する R_L を示す。

図4-1から、 R_L は日射量に対して線形性を持っており、日射量によって電解セルの最適な接続台数がわずかに異なることがわかる。ここで、日中では200~700(W/m^2)程度の日射量が多く得られるものと考え、太陽電池2型1枚と電解セルI型の組み合わせでは太陽電池に電解セルの12台の直列接続が最適であることが分かった。

表4-1 太陽電池2型の条件

変換効率 η (%)	11.7
短絡電流係数 X	0.0067
電極面積 (m^2)	0.293
運転温度 ($^{\circ}C$)	25

表4-2 電解セルI型の条件

電解セルの抵抗係数	0.19
分解電圧 (V)	1.45

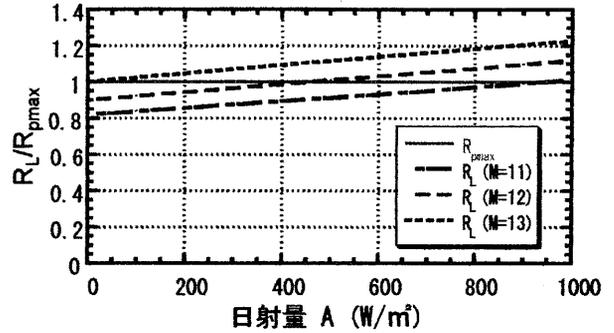


図4-1 最大出力となる負荷の決定

5. 水素貯蔵を組み込んだシステムの検討

ここでは、水素を貯蔵できるように電解セル—燃料電池間に水素貯蔵器具を設置し、PV—EL—FCの組み合わせシステムを運転した。

5.1 実験方法

図5-1に実験フロー図を、表5-1に固体高分子形燃料電池の仕様を示す。太陽電池2型2枚を並列に接続したのに対して4台の電解セル(I型3台、II型1台)を直列接続した。ここで、水電解によって発生した水素は、水上置換法でメスシリンダーに蓄えられ、発電に必要な水素量を本研究室で製作した固体高分子形燃料電池(以降PEFC)に供給した。また、PEFCの酸素はエアープンプにより空気を供給し、PEFCの負荷には可変抵抗を接続した。なおPEFCを最大出力付近で運転できるように負荷(可変抵抗)を調整した。

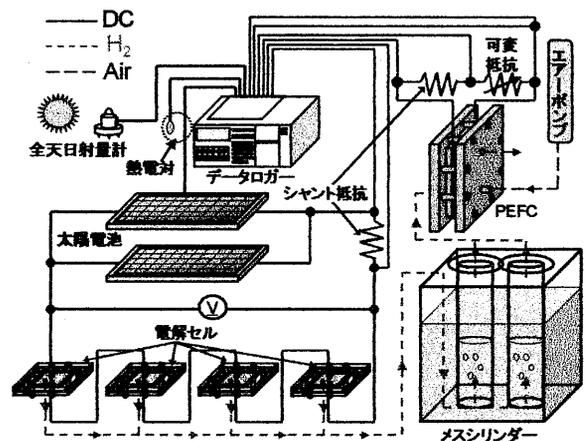


図5-1 実験フロー図

表5-1 固体高分子形燃料電池の仕様

セル数	1
電極面積 (cm^2)	25

5.2 実験結果

本研究に用いたPEFCの最大出力は約45(mW/cm²)で、最大出力時の電流密度は115(mA/cm²)である(図5-2)。115(mA/cm²)の電流密度を得るために必要な水素流量は燃料利用率を80%としたとき、25.2(ml/min)である。

また、水電解における水素発生量は日射量に対して線形性を持っている。ここでは、電解セルを4台直列に接続しており、25.2(ml/min)の水素発生量を得るための日射量は183(W/m²)である(図5-3)。

以上のことを考慮して、システムの検討を行った。図5-4に日射量とPEFC出力の推移を示す。

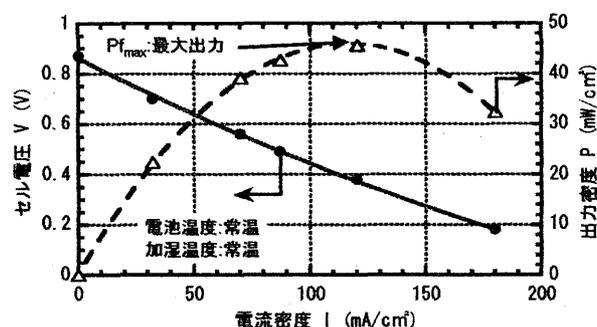


図5-2 PEFCのI-V, I-P特性

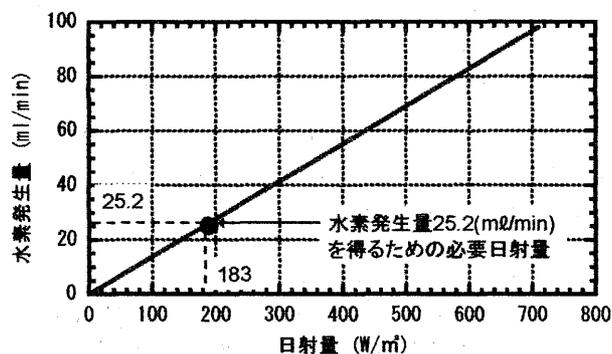


図5-3 日射量に対する水素発生量

図5-4より、日射量は実験開始から上昇し、12:00に最大値、約730(W/m²)となり、12:00以降は減少し、15:50には、日射量はほとんど得られなかった。

一方、PEFCの出力は運転を始めてから17:20まで一定の値を示した。

PEFCの最大出力を得るために必要な日射量は183(W/m²)であることを考慮すると、システムの運転開始直後から、日射量がPEFCの最大出力を得ることができる日射量よりも高いことから、電気分解で発生した水素量が燃料電池反応に必要な流量を維持できたことによる。また、15:00から日射量が低下し、15:50に

は0に近い状態であったが、PEFCは17:20まで、最大出力で運転できた。これは、反応に寄与しない水素がメスシリンダーに貯蔵されて、日射量の低下時に必要水素流量を補ったためであると考えられる。

以上の結果より、燃料電池反応に必要な流量以上の過剰な量の水素を貯蔵し、水素発生量の低下時に反応に寄与させることができた。

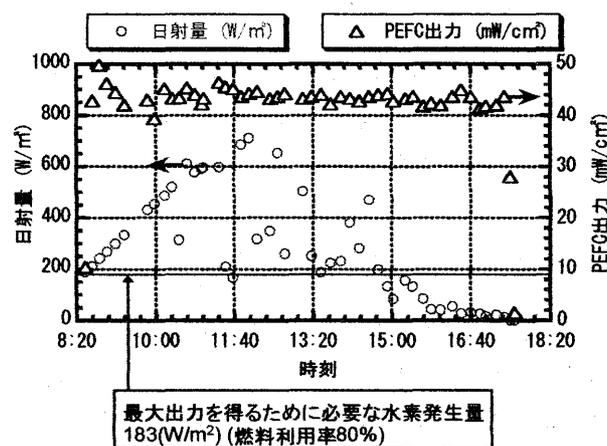


図5-4 日射量とPEFC出力の推移

6. まとめ

本研究を総括すると以下のようにまとめられる。

- (1) 太陽電池の出力を最大とする動作点における負荷抵抗を導出することができた。
- (2) 太陽電池に複数の電解セルを直列及び並列接続を行うことにより、負荷としての特性を明らかにすることができ、電解セルの内部抵抗を導出できた。
- (3) 太陽電池の最大出力動作点の負荷抵抗に、電解セルの内部抵抗値を合致させることで太陽電池の出力と最大とすることができた。
- (4) 燃料電池反応に必要な量以上に発生した過剰な水素を貯蔵し、水素発生量の低下時、あるいは夜間など電力が必要な時に利用するシステムとすることができ、これを明らかにした。

参考文献

- 1) 森園竜浩 他:宮崎大学工学部紀要 第31号 2002, 7
- 2) 大塚馨象 他:平成14年度電気学会電力・エネルギー部門大会論文集193
- 3) 和田大毅 他:宮崎大学工学部紀要 第32号 2003, 7