

# 太陽エネルギーによる水素製造の基礎研究

FUNDAMENTAL STUDY ON HYDROGEN PRODUCED BY SOLAR ENERGY

鈴木 大志<sup>\*1</sup>  
Hiroshi SUZUKI

岩城 力<sup>\*1</sup>  
Tsutomu IWAKI

谷辰夫<sup>\*2</sup>  
Tatsuo TANI

## Abstract

Many environmental problems, for example, the crisis of the fossil fuels' exhaustion, the warmth of the earth caused by the increase of CO<sub>2</sub> and the environmental destruction on it, actually exists now. The time has come when these problems have to be considered and solved seriously. Having devised many prospective energy systems, one of them is fuel cell systems. They generate electricity electrochemically, at a very high efficiency level, and with virtually no loss. The fundamental study on hydrogen produced by solar energy, or the fuel for fuel cells, has been started employing the electrolysis of water with solar energy.

In this paper, the optimum design method of photovoltaic power system for hydrogen production is described by using the various system performance models, the cost models, and fuel cell energy system models. The fuel cell system with capacities of 3 kW as small type auxiliary power source is assumed, and is generated 7,200kWh per year.

With due consideration to the basis of environment data, it was found that the optimum solar array area was estimated 154m<sup>2</sup> for 18% of solar array efficiency, 80% of hydrogen production equipment efficiency and 40% of fuel cell conversion efficiency, hydrogen cost is estimated to be 360–640yen/m<sup>3</sup>.

**Key Words :** Solar array, Photovoltaic power system, Hydrogen production, Fuel cell System Hydrogen generator, Hydrogen cost.

## 1. はじめに

太陽光発電システムは将来の電力需要を担う発電システムの一つであり、地球環境汚染問題や化石燃料枯渇化問題の視点からも有望な電力供給手段と考えられている。しかし、その電力は気象条件、季節、時刻に大きく左右される。また、発生電力のピークと需要のピークが必ずしも一致しないと言う欠点もある。

一方、燃料電池システムは近い将来の発電システムとしてその実用化が期待されており、各種の燃料電池システムの研究開発が行われている。<sup>(1)</sup>また、その燃料としての水素製造の研究も進められている。<sup>(2), (3), (4)</sup>

本論文は太陽光発電システムの発生電力で水の電気分解を行って水素を発生させるシステムのシミュレーションに関するものである。すなわち、レストラン、ホテルなどの補助電源として使用することを想定した

原稿受付、平成3年4月9日

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

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

業務用小型燃料電池システム（リン酸型、定格出力3kW、年間発生電力量 $3\text{kW} \times 8\text{h} \times 300\text{日} = 7200\text{kWh}/\text{年}$ ）に必要な水素を太陽光発電システムによって供給する際に必要な太陽電池アレイ面積と太陽電池アレイ変換効率、水素発生機の効率の関係を検討したものである。また、併せて太陽光発電システムで製造した水素のコストについても考察し、その可能性についても論述している。

## 2. システム構成

### 2. 1 システム構成

このシステムは図1のように太陽エネルギーを電気エネルギーに変換する太陽電池アレイの出力を常に最大出力に制御し、しかも水素発生機の所定の入力電圧に整合させるためのDC-D Cコンバータ、水素発生機から成り立っている。

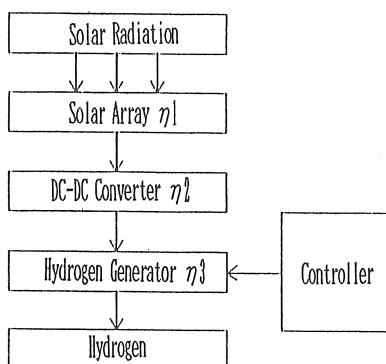


図1. システム構成図

### 2. 2 システム条件

#### (1) 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(H A S P)東京を用いた。H A S Pデータには全天日射量、外気温度、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度の連続する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 $\Phi(i)[\text{kWh}/\text{m}^2\text{h}]$ の計算は次式によった。

$$\Phi(i) = \Phi_a(i) \cos \delta \cos t + \Phi_g(i) (1 + \cos L) / 2 \quad (1)$$

ここで、 $\Phi_a(i)$ : 法線面直達日射量 [ $\text{kWh}/\text{m}^2\text{h}$ ]、 $\Phi_g(i)$ : 水平面天空日射量 [ $\text{kWh}/\text{m}^2\text{h}$ ]、 $\delta$ : 太陽赤緯 [°]、 $t$ : 時角 [°]、 $L$ : 太陽電池アレイの設置傾斜角度 [°] で本論文では $35.5^\circ$ 。

#### (2) 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 $V$ との間に一般に次式の関係がある。

$$I = I_{sc} + I_o [1 - \exp \{ q (V + I R_s) / k T_c \}] \quad (2)$$

ここで、 $I_{sc}$ : 短絡電流、 $I_o$ : 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、 $I_{sc}$ 、 $I_o$ 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。

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

$$I_o = b T_c^3 \exp(-a/T_c) \quad (4)$$

ここで、 $T_{co} = 298 [\text{K}]$ 、 $\Phi_0 = 1 [\text{kW}/\text{m}^2]$ 、 $h_t$ 、 $a$ 、 $b$ 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、本論文では太陽電池セルの出力は次式で表されると仮定した。なお、太陽電池セルは多結晶シリコン太陽電池とした。

$$P_c = P_o \{ 1 - 0.005 (T_c - 25) \} \quad (5)$$

ここで $P_c$ はセル温度 $T_c$ における最大出力であり $P_o$ は $T_c = 25 [\text{C}]$ のときの最大出力である。

また、変換効率 $\eta_1$ は日射強度が基準日射スペクトルで $1 [\text{kW}/\text{m}^2]$ 、セル温度が $25 [\text{C}]$ のとき $10$ から $18$ [%]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。<sup>(5)</sup>しかし、本論文では外気温度に $30 [\text{C}]$ を加えた温度がセル温度になると仮定した。

(6)

以上の事から太陽電池アレイの単位面積、単位時間当たりの発生電力量 $P_1[W]$ は次式で表される。

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

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

#### (3) D C - D C コンバータ

D C - D C コンバータは太陽電池アレイの出力を最大に制御する機能を有し、しかも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させる働きがある。D C - D C コンバータの効率 $\eta_2$ は負荷の軽重に関係なく一定で $90\%$ であるとした。

D C - D C コンバータの出力を $P_2[W]$ とすると $P_2$ は次式となる。

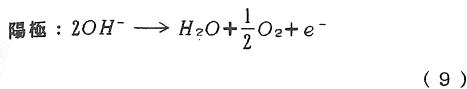
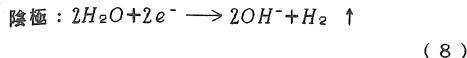
$$P_2 = \eta_2 \times P_1 \quad (7)$$

#### (4) 水素発生機

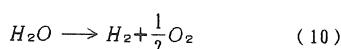
水素発生機は固体高分子電解質水電解方式を想定している。<sup>(7)</sup>現在この水素発生機は小型機に限られて

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。



1 molの水素を発生するのに要するエネルギーは(8)、(9)式より電子数2e<sup>-</sup>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次のような値となる。

$$2[F] \times 9.6485 \times 10^4 [C] \times 1.3[V] = 250861[J] = 69.7[Wh] \quad (11)$$

ここで1.3Vは理論分解電圧である。

よって、DC-DCコンバータの出力電圧が常に1.3Vに保たれているとすると、1 molの水素を発生するのに要するDC-DCコンバータからの電気量は次式より53.6Ahとなる。

$$69.7[Wh] \div 1.3[V] = 53.6[Ah] \quad (12)$$

単位面積当たりの太陽電池アレイによって発生する年間の水素量V<sub>T</sub>[m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>・年]は1時間毎の傾斜面全天日射量、外気温度などの環境データ、η<sub>1</sub>、η<sub>2</sub>などで計算される1時間毎の水素発生量の年間の積算量である。水素の体積が外気温度によって変化することを考慮するとともに、(12)式より1 molの水素は理論分解電圧が1.3V一定の時、53.6Ahの電気量を必要とするから、V<sub>T</sub>は次式で表される。

$$V_T = \frac{\eta_3}{1000} \sum_{i=1}^{8760} \left( \frac{T_i}{T_0} I(i) \times \frac{22.4}{53.6} \right) \quad (13)$$

ここで、η<sub>3</sub>：水素発生機の変換効率、本論文ではこの値を40から80%とした。なお、本文では、分解電圧として理論分解電圧に近い1.3Vを選んだ。実際、分解電圧はこの値より高いが、この違いは変換効率η<sub>3</sub>に含めてある。

T<sub>0</sub>: 273[K]、T<sub>i</sub>: 外気温度[K]、I(i): 単位面積当たりの太陽電池アレイ出力を1.3[V]で除いた値

### 3. 計算手順

図2に計算に用いたフローチャートを示す。システムの入力データは、環境条件である傾斜面全天日射量と外気温度である。これらの値は連続する365日分の1時間毎の値をデータベースとしている。太陽電池アレイの出力は刻々と変化するがDC-DCコンバータで水の理論分解電圧Vに調整された後、水素発生機に供給し水素発生量を計算する。この計算を8760時間繰り返し、年間水素発生量を積算集計する。一方、燃料電池の年間電力量(3kW × 8h × 300日 = 7200kWh/年)を発電するのに必要な太陽電池アレイ面積を計算するとともに、システムコストモデルによる水素コストを計算している。

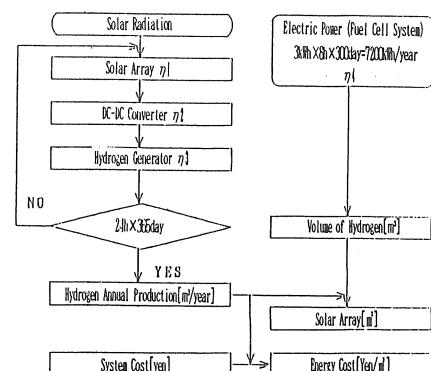


図2. フローチャート

#### 3. 1 太陽電池アレイ面積

小型燃料電池システムに必要な水素を太陽光発電システムによって供給する際の太陽電池アレイ面積は次の過程で求めることができる。

業務用小型燃料電池システム(定格出力3kW)の年間電力量は7200[kWh/年]となる。

小型燃料電池システムをリン酸型とし、その変換効率η<sub>4</sub>を40%とすると18000[kWh/年]の電力量に相当する水素量を求める必要がある。今、燃料電池の電池反応のギブスの標準自由エネルギー変化△G°[kJ/mol]は、絶対温度T[K]の関数として

$$\Delta G^\circ = -248.6 + 0.0537T \quad (14)$$

で与えられる。<sup>(7)</sup>

今、燃料電池システムの反応温度を170°Cとすると、(14)式より水素1mol当たりの△G°は約-53.8kcalとなる。このエネルギーが燃料電池システムを通して電気エネルギーに変換される。したがって、18

000 [kWh/年]の電気量に相当する水素量は6450 [m<sup>3</sup>]となる。よって、必要な太陽電池アレイの面積S [m<sup>2</sup>]は、(13)式より次式で表される。

$$S = 6480 / V_T \quad (15)$$

### 3.2 水素エネルギーコスト

水素の単位体積当たりのコストE [円/m<sup>3</sup>]は次式で表される。

$$E = \frac{M \times r}{V_T} (1+Q) \quad (16)$$

ここで、M：設備費で太陽電池モジュール価格M<sub>1</sub>、DC-D Cコンバータ価格M<sub>2</sub>、水素発生機価格M<sub>3</sub>、コントローラ価格M<sub>4</sub>の和、r：年間固定費率、Q：運転保守費率

### 4. 結果と考察

図3は各月の傾斜面全天日射量、水素発生量を正規化して示したものである。図の横軸は1月から2月までの各月であり、縦軸は各月の傾斜面全天日射量、水素発生量を正規化したものである。いずれも8月に最大値を取った。それぞれの値は傾斜面全天日射量については161 kWh/m<sup>2</sup>、水素発生量については3.7 m<sup>3</sup>である。図から明らかな事は、冬期に日射量に対する水素発生量の割合が大きくなる傾向がみられる事である。これは、外気温度が他の月に比べ低く、したがって、セル温度T<sub>c</sub>とT<sub>co</sub>との温度差が小さい事に起因している。

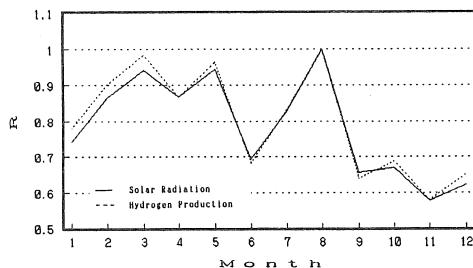


図3. 各月の傾斜面全天日射量と水素発生量

図4は、太陽電池アレイの変換効率η<sub>1</sub>に対するアレイ面積の関係である。ここでアレイ面積とは小型燃料電池システム（定格出力3 kW、年間発電量7200 kWh/年）が年間稼働するのに必要な水素量を製造する事が可能なアレイの面積を言う。図中のパラメータη<sub>3</sub>は水素発生機の効率であり、40～80%である。また、この特性は、DC-DCコンバータの変換効率

η<sub>2</sub>が90%、燃料電池システムの効率η<sub>4</sub>が40%であるとした。

例えば、この条件の下で太陽電池アレイの変換効率η<sub>1</sub>が15%で、水素発生機の変換効率η<sub>3</sub>が80%のとき、必要太陽電池アレイ面積は約179 m<sup>2</sup>である事が分かる。

図5は水素発生機の効率η<sub>3</sub>に対する太陽電池アレイ面積の関係である。図中のパラメータは太陽電池アレイの変換効率η<sub>1</sub>であり、その値は10～18%である。また、この特性は図5と同様にη<sub>2</sub>が90%、η<sub>4</sub>が40%の時の特性である。

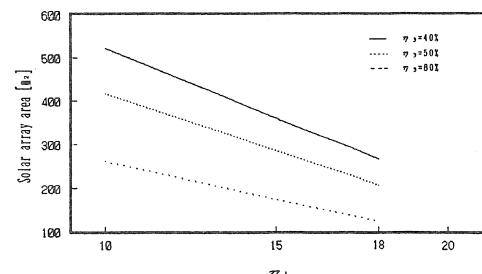


図4. 太陽電池アレイ変換効率η<sub>1</sub>に対する太陽電池アレイ面積(η<sub>2</sub>=90%、η<sub>4</sub>=40%一定)

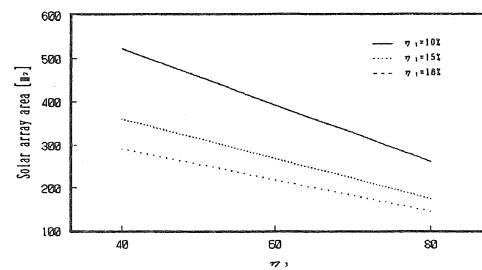


図5. 水素発生機効率η<sub>3</sub>に対する太陽電池アレイ面積(η<sub>2</sub>=90%、η<sub>4</sub>=40%一定)

図4、図5よりη<sub>1</sub>、η<sub>3</sub>に対する必要太陽電池アレイ面積を求める事が可能である。

太陽光発電システムによる水素コストは(16)式によって求めた。この式で、太陽電池モジュール価格M<sub>1</sub>を120円/W、DC-DCコンバータ価格M<sub>2</sub>を40円/W、1時間当たり50lの水素を発生する水素発生機価格M<sub>3</sub>を50,000円/台、コントローラ価格M<sub>4</sub>を30円/Wとした。但し、水素発生機の容量は将来さらに大容量化することが十分想定できる。また、システムの耐用年数を15年と仮定し、年間固定比率（資本費、直接費などの年経費率）rを0.14

5とした。さらに、運転保守費率Qを0.015とした。これらの値は、システムを構成する各要素機器の開発が充分進んだ時点の価格を想定している。<sup>(8)</sup>

図6は太陽電池アレイ変換効率 $\eta_1$ 、水素発生機効率 $\eta_3$ 、水素コストの関係を示したものである。図のX軸は $\eta_1$ 、Y軸は $\eta_3$ 、Z軸は水素コスト[円/ $m^3$ ]である。図から明らかのように、 $\eta_1$ 、 $\eta_3$ が大きい程水素コストが安価になる事が分かる。

図7は、水素発生機の価格に対する水素コストの関係である。図の横軸は水素発生機の価格[円]であり、縦軸は水素コスト[円/ $m^3$ ]である。この特性は $\eta_1=15\%$ 、 $\eta_2=90\%$ 、 $\eta_3=80\%$ 、 $\eta_4=40\%$ のときの場合であり、この条件の下では水素コストを300円/ $m^3$ 以下にするには年間50 $m^3$ の水素を製造する水素発生機の価格は32,000円以下にする必要がある事が分かる。なお、最近の市販水素コストは約300円/ $m^3$ 程度である。<sup>(9)</sup>

## 5. まとめ

大胆な仮定の下でレストランやホテルなどの補助電源としての小型燃料電池システム（定格出力3kW、年間電力量7200kWh）に必要な水素製造のための太陽電池アレイの面積は145m<sup>2</sup>～522m<sup>2</sup>となつた。これらの面積はレストランやホテルなどの屋上や駐車場など未利用空間を有効利用すれば充分設置可能な面積である事が分かった。

また、水素発生機の年間最大水素発生量を50m<sup>3</sup>とし、太陽光発電システムを構成する各要素の価格を充分技術開発が進んだ時点を想定して水素コストを試算した。その結果、太陽電池モジュールの変換効率が15%、水素発生機の効率が80%のとき、水素コストを300円/ $m^3$ 以下にするには、水素発生機の価格を32,000円以下にする必要がある事が分かった。

今後、さらに水素発生機の大型化や太陽電池などの高効率化、低コスト化が進めば太陽エネルギーによって水素製造を行い燃料電池を駆動するシステムは、クリーンなエネルギーとして、将来の電力供給システムの多様化に対応できるシステムとして有効である。

また、燃料電池システムの発電に伴って生ずる熱エネルギーを含めた複合利用を行う事により、より一層有効なシステムになるものと考えられる。

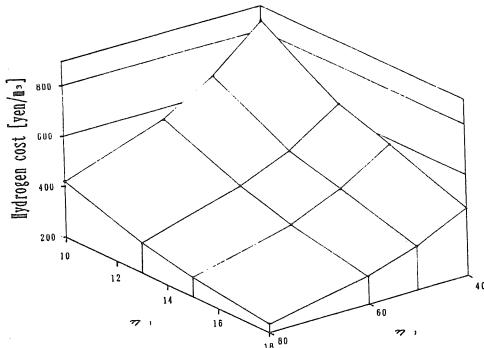


図6. 太陽電池アレイ変換効率 $\eta_1$ 、水素発生機 $\eta_3$ 、水素コストの関係 ( $\eta_2=90\%$ 、 $\eta_4=40\%$ 一定)

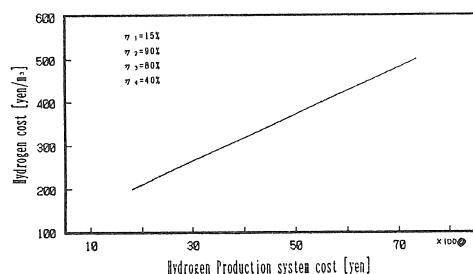


図7. 水素発生機コストに対する水素コストの関係 ( $\eta_1=15\%$ 、 $\eta_2=90\%$ 、 $\eta_4=90\%$ 一定)

## 文献

- (1) 山口雅教他、平成2年電気学会全国大会(1990-3) 1460, 東京
- (2) 岩城 力、鈴木 大志、谷 辰夫、平成3年電気学会全国大会(1991-4) 1537, 金沢
- (3) E.N.Costogue・R.K.Yasui, Solar Energy(1977)19-2, 205～210
- (4) 大田 洋充・青木 幸広・谷 辰夫、平成2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(1990-12) 5, 川崎
- (5) 小林 誠・平田 陽一・古屋 耕一・谷 辰夫、同上 10, 川崎
- (6) 谷 辰夫・横内 博之、電気学会論文誌D(1991-6) 111-6, 111～106

- (7) 竹中 啓恭他、D E N K I K A G A K U(1989-2) 145  
(8) エネルギー変換懇談会編、エネルギー変換技術 東京電気大学出版(1987-1) 100  
(9) 通産省産業技術審議会新エネルギー技術開発部会政策分科会太陽光発電システム評価小委員会、太陽光発電システムのコスト見直し(1989-8)  
(10) (財) 経済調査会、積算資料 766号(1990-11) 626

### 関連行事案内

#### ●「太陽の日」キャンペーン事業でソーラーエネルギー「夢世界」アイデア募集

自然でクリーンな太陽エネルギーを生かした「快適な生活」や「環境にやさしいソーラー社会」など、生活から農・漁業、宇宙利用まで幅広いアイデアを、(社)ソーラーシステム振興協会が募集している。

これは同協会が毎年行っている「太陽の日」キャンペーン事業の一環として募集するもので、ソーラーエネルギー活用体験コンテスト、小・中学生絵画コンクールも同時に行われる。それぞれの募集要項は下記のとおり。

- “ソーラーエネルギー「夢世界」アイデアコンクール”募集要領
- (1) 応募資格 高校生以上社会人一般まで  
(2) テーマ ソーラーエネルギー“夢世界”  
(3) 用紙 400字詰め原稿用紙5~15枚  
(ワープロ可)  
(4) 締切日 平成4年1月20日(月)  
(当日消印有効)  
(5) 表彰 【最優秀賞】1点(賞状と副賞30万円相当の賞品)  
【努力賞】1点(賞状と副賞10万円相当の賞品)  
【奨励賞】8点(賞状と副賞5万円相当の賞品)

#### “「われら太陽家族」ソーラーエネルギー活用体験コンテスト”募集要項

- (1) 応募資格 平成3年12月31日(火)においてソーラーシステムを主として住宅用に設置後2年以上(本年度末にて)経過し、現在活用している家族、研究施設や同

協会関係者、過去に同協会の表彰を受けた者を除く。

- (2) テーマ 「われら太陽家族」ソーラーエネルギーの活用体験  
(3) 締切日 平成4年1月20日(月)(当日消印有効)  
(4) 表彰 【ソーラーエネルギー環境賞】  
10点以内(賞状と副賞10万円相当の賞品)  
“ソーラーエネルギー「夢世界」小・中学生絵画コンクール”募集要項  
(1) 応募資格 小学生と中学生  
(2) テーマ 「ソーラーエネルギー“夢世界”」  
(3) 用紙・画材  
1) 用紙/B3画用紙(364mm×515mm)  
2) クレヨン、パス、色鉛筆、水彩画のいずれか。  
3) 未発表の作品で本人が描いたものに限る。  
(4) 締切日 平成4年1月20日(月)(当日消印有効)  
(5) 表彰 【通商産業大臣賞】1点(賞状と図書券5万円)  
【通商産業省生活産業局長賞】1点(賞状と図書券3万円)  
【ソーラーシステム振興協会長賞】1点(賞状と図書券3万円)  
【入選】7点(賞状と図書券1万円)  
【学校賞】3校以内(賞状と図書券5万円)

#### ●提出方法等、詳細問合せ先

〒104 東京都中央区新川12-13-11 内田ビル6階  
「太陽の日」キャンペーン事務局 電話 03-3563-7929