

太陽エネルギー変換パネルの評価に関する研究

Study on the evaluation of solar energy conversion panels

谷 辰 夫*
T. TANI
山 村 達 幸**
T. YAMAMURA
井 上 均***
H. INOUE

Abstract

The use of solar energy will be important among various energy sources if we consider the possible shortage of fossil fuels. Solar energy is abundant in quantity, free from pollution and safe. At present, it is considered that solar systems are inferior to other energy systems, that is, conventional fossil fuel and nuclear plant have advantages in respect to the density of energy flux and energy cost.

Solar energy mainly has been used in two fields, such as solar thermal and photovoltaic generation systems. The hybrid photovoltaic / thermal solar module panel that produces both electricity and hot water at the same time is expected to be useful system in case of matching output and load pattern. The performance data, environmental conditions and cost models are used for evaluating the output ($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$) and energy cost index in this study. The maximum output is acquired with the hybrid panel with 40°C at outlet and about 30° in tilt angle. From the viewpoint of minimum energy cost, the cost of hybrid panel is 15 to 20 percent lower as compared with the solar collector and the photovoltaic module.

Key Words : Utilization of solar energy, solar collector, photovoltaic module, hybrid photovoltaic/ thermal solar module panel

1. 緒 言

近い将来のエネルギーの多様化に対応して、太陽エネルギーの利用が重要であると見なされており、そのための研究開発が進められている。太陽エネルギーの利用技術は、主として光利用と熱利用に大別されるが、太陽エネルギーの複合利用を目的とした光・熱ハイブリッドシステムは、出力特性と負荷特性の整合が取れば、総合的なエネルギー変換効率の向上が期待できるとともに、エネルギーコストの面からも有効なシステムであるとされている^{(1)・(2)}。

国内外で進められているこの分野の研究では、設計研究、運転研究に関する数多くの成果が報告されている^{(3)・(4)}。しかし、システムを構成する主要機器で

ある光・熱ハイブリッドパネルは、太陽電池モジュールやソーラコレクタを単独に使用する場合に比べ、特性的にも経済的にも有効とされているが、その有効性を定量的に評価したものは見当たらない状況にある。

本論文は、従来から開発が進められている太陽電池モジュール、ソーラコレクタ、さらにこれら両機能を併せもつ光・熱ハイブリッドパネルについて、エネル

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

** 東京理科大学工学部 元学生
Faculty of Engineering, Science University of Tokyo, ex-Undergraduate

*** 東京理科大学工学部 元学生
Faculty of Engineering, Science University of Tokyo, ex-Undergraduate

ギー供給量, エネルギーコストを比較することにより, 各々の有効性を定量的に比較したものである。これらのエネルギー変換装置は家庭用の小規模システムへの適用を想定している。すなわち, ソーラコレクタ, 光熱ハイブリッドパネルの集熱温度は給湯, 暖房用として 40°C , 50°C を選んだ。また, 太陽電池モジュール, 光・熱ハイブリッドパネルの太陽電池セルの種類は多結晶シリコン太陽電池とした。

本文では, 先ず, これら3種類の諸特性を, これまでの測定データなどに基づいて設定し, 設置場所の環境条件(傾斜面全天日射量, 日照時の平均外気温度)より年間のエネルギー供給量を求めた。次いで, 各々のコストモデル, コスト計算条件を設定して, 太陽電池モジュール, ソーラコレクタ, 光・熱ハイブリッドパネルのエネルギーコストを算出し, エネルギーコストの観点から, これら3種類の有効性を論述したものである。

2. 解析手法と計算条件

本論文で対象としたエネルギー変換装置は太陽電池モジュール, ソーラコレクタ, 光・熱ハイブリッドパネルの3種類である。解析は, これらエネルギー変換装置の年間エネルギー供給量($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$)を求め

るフローチャートとエネルギーコスト($\text{円}/\text{kWh}$)を求めるフローチャートの2つによっている。

解析に用いた傾斜面全天日射量のデータは東京におけるHASPデータである。なお, 計算を簡略化するため, 1月から12月までの各月の日平均水平面日射量($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)のデータをベースにして, 傾斜角度 L が 45° までの傾斜面全天日射量を求め使用した⁽⁵⁾。

また, 外気温度 T_a は日照時平均気温($^{\circ}\text{C}$)であるとした。さらに, 太陽電池モジュールの変換効率 η 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°C のとき, $10 \sim 18\%$ の範囲とした。

図1は, 年間エネルギー供給量を求めるフローチャートである。上述した諸条件のもとで, 3種類のエネルギー変換装置の特性モデルに従って, 年間エネルギー供給量($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$)を算出している。

一方, エネルギーコストの算定は図2のフローチャートによった。入力データは図1のフローチャートで求めた年間エネルギー供給量, 年間エネルギー供給量を定格出力で除した年間供給時間である。コストモデルI, II, IIIの建設コストを求めた後, コスト計算条件, エネルギーコスト算定式によって, 3種類のエネルギー変換装置のエネルギーコスト($\text{円}/\text{kWh}$)を求めている。

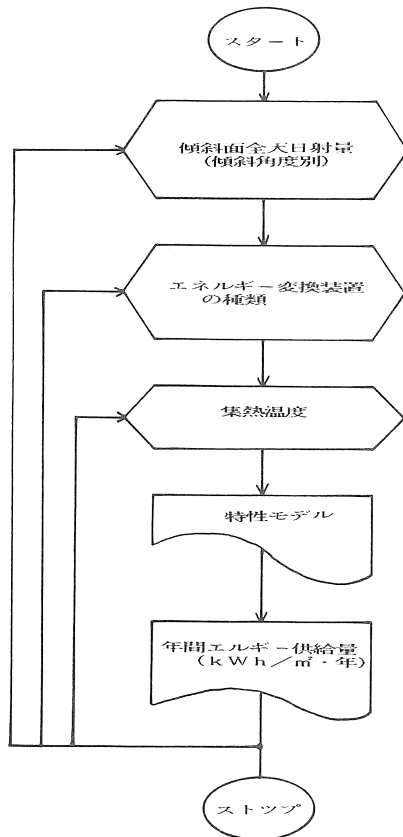


図1 フローチャート (年間エネルギー供給量)

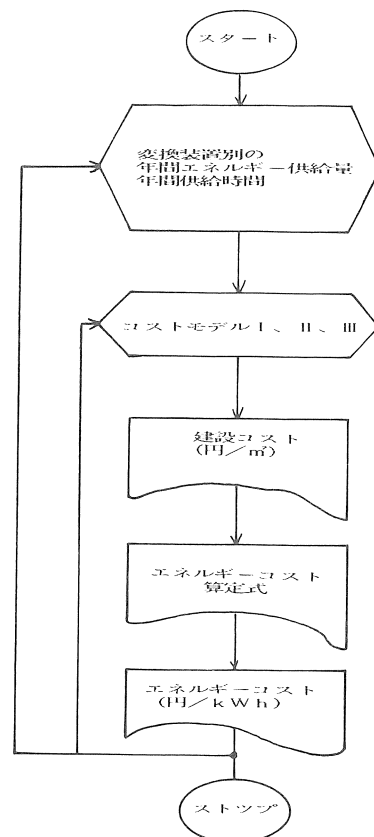


図2 フローチャート (エネルギーコスト)

2.1 太陽電池モジュール

太陽電池モジュールの大きさは1 m²であり、太陽電池セルとして多結晶シリコンセルを想定した。太陽電池モジュールの変換効率 η は日射強度が1.0kW/m²、セル温度が25℃のとき、10、13、15、18%の4種類とした。また、セル温度が25℃のとき、日射強度が変化しても変換効率は不変とした。

一方、セル温度の変化に対応して出力が変化することが知られている。本文では、これらの関係は次式に従うものとした⁽⁵⁾。

$$P(t) = P_0 \cdot [1 - 0.005(t - 25)] \quad (1)$$

$$\eta_0 = \frac{P_0}{I} \times 100 \quad (2)$$

$$\eta(t) = \eta_0 \times \frac{P(t)}{P_0} \quad (3)$$

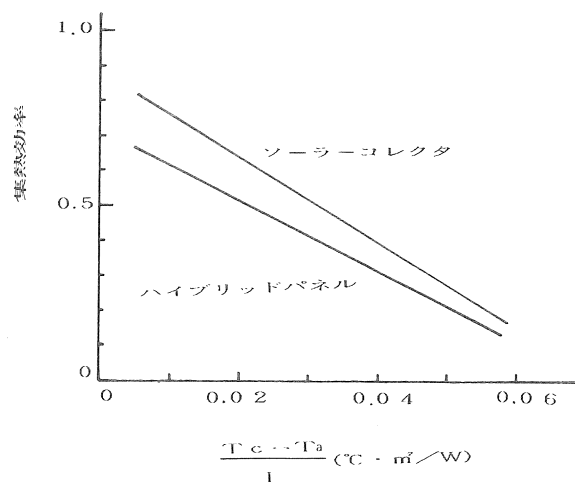


図3 集熱効率特性

表1 コストモデル

内訳	コストモデル	I	II	III
太陽電池モジュールの m ² 当りのコスト(円/m ²) C _{PS}		100000	50000	20000
ソーラコレクタの m ² 当りのコスト(円/m ²) C _{PC}		40000	30000	20000
ハイブリッドパネル 太陽電池モジュールの m ² 当りのコスト(円/m ²) C _{HPS}		80000	40000	15000
集熱部のm ² 当りの コスト(円/m ²)C _{HPC}		20000	20000	15000
共通部分のm ² 当りの コスト(円/m ²)C _{HCC}		20000	10000	5000
架台・取付費 (円/m ²) C _S		25000	20000	15000

ここで $P(t)$:セル温度 t ℃における最大出力(kW/m²)、 P_0 :25℃における最大出力(kW/m²)、 I :日射強度で1.0(kW/m²)、 η_0 :セル温度25℃における太陽電池モジュールの最大効率、 $\eta(t)$:セル温度 t ℃における太陽電池モジュールの最大効率

また、セル温度は日射強度、外気温度、風向、風速に関係するが、ここでは、日照時平均温度 T_a に30℃を加えた温度とした。

2.2 ソーラコレクタ

ソーラコレクタはいわゆる平板形集熱器である。このソーラコレクタの集熱効率は図3に示す通りである。図の横軸は $(T_c - T_a)/I$ (℃・m²/W)であり、縦軸は集熱効率 η_c である。図中の特性は次式で表わされる。

$$\eta_c = 0.88 - 12 \left(\frac{T_c - T_a}{I} \right) \quad (4)$$

なお、ここではソーラコレクタの面積は1 m²であるとし、集熱温度 T_c を40、50℃の2種類とした。

2.3 光・熱ハイブリッドパネル

光・熱ハイブリッドパネルは太陽電池モジュールの機能とソーラコレクタの機能を1体化したエネルギー変換装置であり、電気エネルギーと熱エネルギーを同時に供給することができる⁽⁷⁾。

その特徴を挙げると次のようになる。

- ① 熱媒体を流すことによって、太陽電池セルの温度上昇を抑え、温度上昇に伴う変換効率の低下が軽減できる。
- ② 太陽エネルギーの太陽電池セルに寄与しない波長領域を熱エネルギーに変換し利用できる。
- ③ 一体化することによって単位面積当りの電気エネルギーの供給量を増加させることが可能である。
- ④ 双方が共有するフレームなど構成部材を減少させることが可能であり、コンパクト化できるとともに設備費、設置費が軽減できる。

ハイブリッドパネルの集熱効率は図3に示すものとした⁽⁷⁾。図の特性は次式で表わされる。

$$\eta_H = 0.71 - 10 \left(\frac{T_c - T_a}{I} \right) \quad (5)$$

この値はソーラコレクタ単独のそれに比べ、20%効率が悪くなることを示している。

また、集熱温度はソーラコレクタと同様に40℃、50℃の2種類とした。

一方、太陽電池モジュールは熱媒体によって冷却されるため、太陽電池モジュールのみの場合に比べ、太陽電池セルの温度上昇は低くなる。ここでは、セル温度すなわち動作温度 t_c は集熱温度TCに等しいと仮定して解析を進めた。

2.4 エネルギーコスト

エネルギーコストを算定する際の基礎データであるコストモデルは表1に示す通りである。ケースⅠ、Ⅱ、Ⅲを想定したが、ケースⅠは、現在のコストに近い値であり、ケースⅡは近い将来の値、ケースⅢは研究開発が十分進んだ時点での値である。

架台・取付費を含む設備費 C_T は積上げ方式により、各々のコストを加算して求めた。

太陽電池モジュールに対しては、

$$C_T = C_{PS} + C_S \quad (6)$$

ソーラコレクタに対しては、

$$C_T = C_{PC} + C_S \quad (7)$$

ハイブリッドパネルに対しては、

$$C_T = C_{HPS} + C_{HPC} + C_{HCC} + C_S \quad (8)$$

ここで、 C_{PS} :太陽電池モジュールの単位面積当りのコスト(円/㎡)、 C_{PC} :ソーラコレクタの単位面積当りのコスト(円/㎡)、 C_{HPS} :ハイブリッドパネル太陽電池モジュール部の単位面積当りのコスト(円/㎡)、 C_{HPC} :ハイブリッドパネル集熱部の単位面積当りのコスト(円/㎡)、 C_{HCC} :ハイブリッドパネル共通部分の単位面積当りのコスト(円/㎡)、 C_S :架台・取付代の単位面積当りのコスト(円/㎡)

また、各々のエネルギー変換装置のエネルギーコストは次式によった⁽⁸⁾

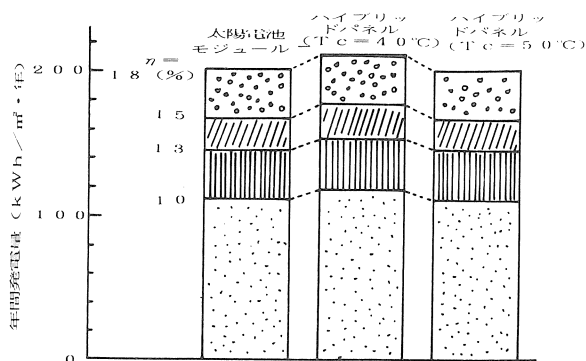


図4 年間発電量特性

表2 年経費率の内訳

項目	数 値
資本費	
・減価償却費	9.97% (金利8%、償却年数20年定率、残存率10%)
・固定資産税	1.4%
直接税	
・人件費	0.5%
・補修・修理費	2.0%
・諸経費	1.0%
その他	
・その他	0.1%
合 計	15.0%

$$E_e = \frac{\{V_e + V_c \left(\frac{t_e}{t_e + t_t} \right)\} r_a}{8,760 \times C_f \times P_r} \text{ (円/kWh)} \quad (9)$$

$$E_t = \frac{\{V_t + V_c \left(\frac{t_t}{t_e + t_t} \right)\} r_a}{8,760 \times C_f \times P_r} \text{ (円/kWh)} \quad (10)$$

ここで、 E_e :電気エネルギーコスト(円/kWh)、 E_t :熱エネルギーコスト(円/kWh)、 V_t :熱エネルギー発生に関するコスト(円/㎡)、 V_e :発電に関するコスト(円/㎡)、 V_c :双方に関する共通のコスト(円/㎡)、 t_e :年間発電時間(時間)を示し、年間発電量を最大出力で除した値、 t_t :年間熱エネルギー供給時間(時間)を示し、年間熱エネルギー発生量を定格出力で除した値、 r_a :年間固定費率、 C_f :年間設備利用率、 P_r :最大出力または定格出力(kW)

上式の P_r は電気出力に対しては、日射強度が1.0(kW/㎡)のときの発電量である。例えば、太陽電池モジュールの変換効率が10%のとき、この値は0.1kW/㎡となる。また、熱出力に対しても同様に日射

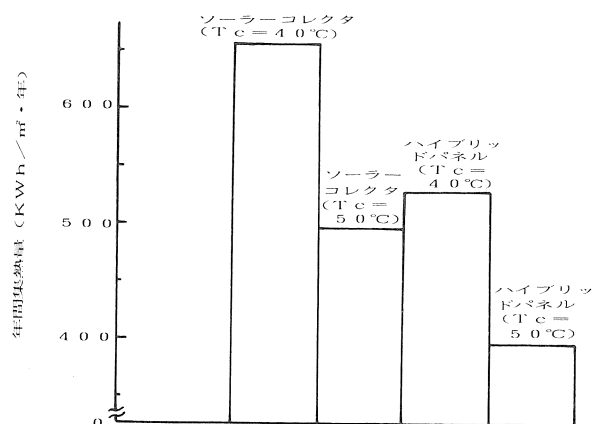


図5 年間集熱量特性

強度が kW/m^2 のときの集熱量である。例えば、ソーラコレクタの場合、集熱温度 T_c が 40°C で外気温度 T_a が 20°C のとき、 $0.54\text{kW}/\text{m}^2$ のときの集熱量である。

これらの装置の償却年数を20年と想定し、 r_a の値を0.15とした。その内訳を表2に示す。

一方、(6)式～(10)式の記号の関係については、太陽電池モジュールの場合は次のようになる。

$$V_e = C_{PS}, V_c = C_s, V_t = 0$$

また、ハイブリッドパネルについては、

$$V_e = C_{HPS}, V_t = C_{HPC}, V_c = C_{HCC} + C_s$$

である。

3. 結果と考察

図4、図5は3種類のエネルギー変換装置の単位面積当たりの年間発電量、集熱量($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$)特性である。年間発電量については、装置の傾斜角度 L が 30° 、日射強度 I が $1.0 (\text{kW}/\text{m}^2)$ 、セル温度 t が 25°C 、太陽電池モジュールの変換効率 η が10, 13, 15, 18%のときの値である。また、年間集熱量は、 L が 30° 、集熱温度 T_c が40, 50 $^\circ\text{C}$ の2例について示してある。

太陽電池モジュールで η が10%のとき、単位面積当たりの年間発電量は $112.3 (\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年})$ である。また、ハイブリッドパネルで η が10%、 T_c が 40°C のとき、熱媒体の冷却効果によって、年間発電量は太陽電池モジュール単独のそれに比べ約5.5%増加し、 $118.5 (\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年})$ となった。さらに、 T_c が 50°C のときの年間発電量は、太陽電池モジュール単独の発電量に比べ0.5%減少する程度で、ほぼ等しくなった。

一方、年間集熱量については、 T_c が 40°C であるソーラコレクタの集熱量が最も多く、 $659.6 (\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年})$ となった。また、 T_c が 50°C のとき、 $491.1 (\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年})$ である。なお、ハイブリッドパネルの年間集熱量は、いずれもソーラコレクタの80%であり、それぞれ527.7, 392.9($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$)となった。

図6、図7は各エネルギー変換装置の傾斜角度 L に対する出力特性である。図の横軸は L であり、縦軸は出力指数を示している。基準の出力指数1.0は電気出力、熱出力に対して、それぞれ112.3, 659.6($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$)である。これらの値は太陽電池モジュール($L=30^\circ$, $\eta=10\%$)、ソーラコレクタ($L=30^\circ$, $T_c=40^\circ\text{C}$)単独の値に相当する。いずれの特性とも、 L が 30° 附近に極大値をとり、東京地方では、設置角度 L を 30° 附近に設定することが望ましいことを示している。

図8は傾斜角度 L に対するエネルギーコスト指数特性である。基準のエネルギーコスト指数1.0は電気エ

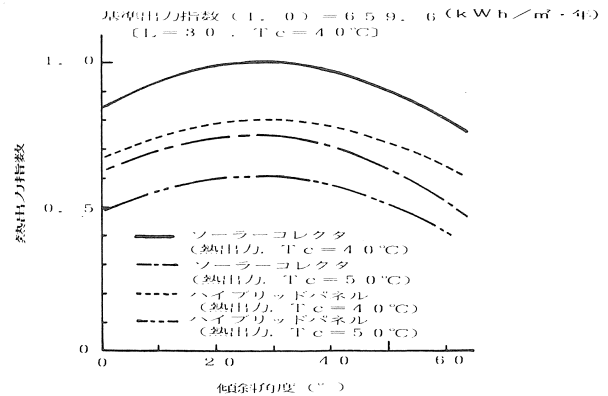


図6 傾斜角度に対する熱出力指数特性

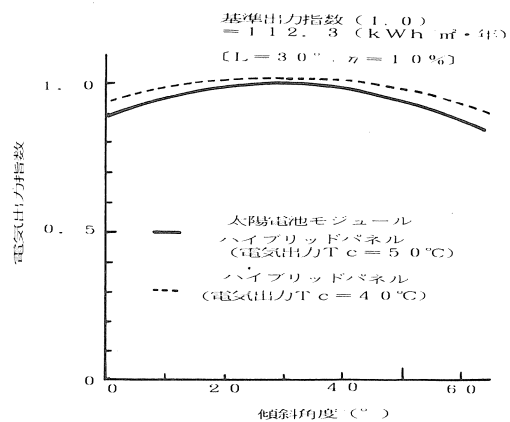


図7 傾斜角度に対する電気出力指数特性

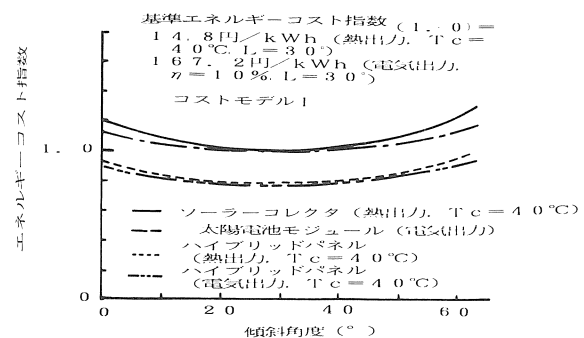


図8 傾斜角度に対するエネルギーコスト指数特性

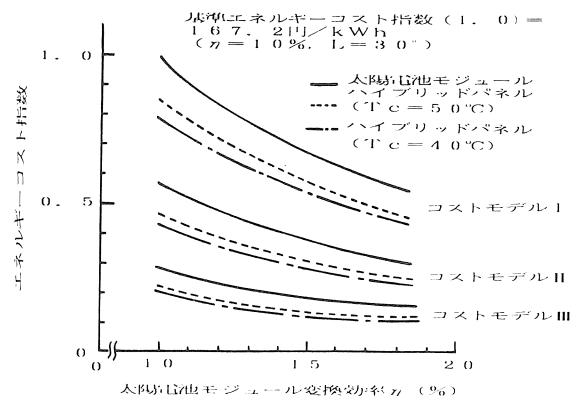


図9 変換効率に対するエネルギーコスト指数特性 (電気出力)

ネルギー、熱エネルギーに対して、それぞれ167.2、14.8 (円/kWh)である。これらの値は、コストモデルがIのときの値であり、前者については、 L が 30° 、 η が10%の太陽電池モジュール単独のときの値である。

また、後者については、 L が 30° 、 T_c が 40°C のソーラコレクタ単独のときの値である。いずれのエネルギー変換装置ともエネルギーコスト指数は L が 30° 付近で極小値となることが分かる。

一方、ハイブリッドパネルについてもこの傾向は変わらない。また、電気エネルギー、熱エネルギーのコスト指数は、他の2つのそれに比べて約20~22%小さくなり、エネルギーコストの観点からハイブリッドパネルが有利であることも分かる。

図9は太陽電池モジュールの変換効率 η に対するエネルギーコスト指数特性である。この図の基準のエネルギーコスト指数1.0は図8と同様であり、コストモデルI、II、IIIについて図示してある。

この図から太陽電池モジュールの変換効率が高くなるに従ってエネルギーコスト指数が小さくなることが分かる。例えば、 η が10%から15%へと50%高くなるとエネルギーコスト指数は約33%小さくなる。また、コストモデルが表1に示すようにIからIIへ、IIからIIIへとコストダウンが図れれば、エネルギーコスト指数はそれぞれ45%、49~52%小さくなる。

一方、ハイブリッドパネルの電気エネルギーのエネルギーコスト指数は T_c が 40°C のとき最も小さく、太陽電池モジュール単独のそれに比べ、いずれのコストモデルとも22~32%小さくなることが分かる。これらのことから、表1に示すようなコストとコスト内訳けが実現できれば、ハイブリッドパネルは最も有効なエネルギー変換装置であることも分かる。

既存の発電プラントによる電力コストを25.0 (円/kWh)とすれば、この値に対応するエネルギーコスト指数は0.15程度となる。この値以下を達成するには、コストモデルIIIを実現し、ハイブリッドパネルの太陽電池モジュールの η を13%以上にすることが必要であることが分かる。

図10はコストモデルに対する熱エネルギーのエネルギーコスト指数特性である。ソーラコレクタ、ハイブリッドパネルの L は 30° であり、縦軸の基準のエネルギーコスト指数1.0は、エネルギーコストモデルがI、 T_c が 40°C のときのソーラコレクタ単独の値14.8 (円/kWh)である。

いずれのコストモデルとも、ハイブリッドパネルのエネルギーコスト指数が最も小さい。既存の熱エネルギー

コストモデル	ソーラコレクタ ($T_c = 50^\circ\text{C}$)	ソーラコレクタ ($T_c = 40^\circ\text{C}$)	ハイブリッドパネル ($T_c = 50^\circ\text{C}$)	ハイブリッドパネル ($T_c = 40^\circ\text{C}$)
I	1.00	1.00	0.80	0.80
II	0.75	0.75	0.60	0.60
III	0.50	0.50	0.40	0.40

図10 コストモデルに対するエネルギーコスト指数特性 (熱出力)

ギー ($40\sim 50^\circ\text{C}$) コストを7~8 (円/kWh)とすれば、この値に対応するエネルギーコスト指数は0.5程度であり、この値を達成するにはコストモデルIIIのコストを実現する必要がある。

4. 結 言

太陽電池モジュール、ソーラコレクタ、ハイブリッドパネルについて、設置場所の環境条件、コストモデルなどを設定し、これら条件のもとでエネルギー供給量、エネルギーコストを比較検討した。これらの解析はかなり大胆なものであるが、解析の結果、次のことが明らかになった。

(1) 東京地方における出力量が最大となる各種エネルギー変換装置の傾斜角度は 30° 付近である。

(2) 家庭用の小規模システムへの適用を想定した集熱温度が 40°C 及び 50°C のソーラコレクタとハイブリッドパネル、太陽電池モジュールを比較した。その結果ハイブリッドパネルのエネルギーコストはソーラコレクタ、太陽電池モジュール単独のエネルギーコストに比べ20%程度安価となった。エネルギー変換装置にとって、重要な指標である経済性の観点から、ハイブリッドパネルが最も優れている。

(3) 既存の発電プラントによる電力コストを25.0 (円/kWh)、また、熱エネルギーコストを7~8 (円/kWh)とすれば、ハイブリッドパネルのみでこれらの値を達成するには、コストモデルIIIのコストを実現するとともに、太陽電池モジュールの変換効率を13%以上にすることが必要である。

本研究を遂行するに当り、(財)新エネルギー財団に設置されたアモルファス太陽電池技術調査委員会(浜川圭弘委員長)光・熱ハイブリッド調査分科会の委員方々に有益な御助言を頂いた。深謝する次第である。

Vol.15, No.5

- 59 -

太陽エネルギー

参考文献

- (1) B.D.Wood et al: Analytical and experimental system studies of combined thermal and photovoltaic systems, US DOE Report, ERC-83027, 1~139 p (1983)
- (2) A. Braunstein, A Kornfeld : On the development of the solar photovoltaic and thermal (PVT) collector, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 1 No. 4 31~33p (1986)
- (3) C.H. Cox III, P. Raghuraman : Design considerations for flat-plate-photovoltaic/thermal collectors, Solar Energy vol. 35 No. 3 227p (1985)
- (4) R.W.Herman, W.E. Schwinkendorf: Evaluation of actively cooled concentrating photovoltaic systems for combined photovoltaic-thermal applications, US DOE Report CONF-8306, 22-PT-4, 199~204p (1983)
- (5) 辻 高輝 : 太陽電池電源の設計法 太陽エネルギー 第9巻, 6号 31~36p (1983)
- (6) 小松ハウス(株) : コマツソーラシステム (パンフレット) (1986)
- (7) 中西 英介 : 光熱ハイブリッド型太陽光発電システムの研究開発, 新エネルギー総合開発機構 第7回事業報告分科会予稿集 121~139p (1986)
- (8) 谷 : 太陽熱発電システムの設計に関する研究, 電子技術総合研究所研究報告 第845号 64p (1984)
(平成元年4月21日 原稿受理)