

太陽光・熱ハイブリッドパネルのエネルギー分析

ENERGY ANALYSIS OF THERMAL/PHOTOVOLTAIC MODULE

長谷部 努*¹ 亀谷 美 明*² 谷 辰 夫*³
Tsutomu HASEBE Yoshiaki KAMEYA Tatsuo TANI

Abstract

In the future, solar power system will provide one of available solutions to energy problems such as exhaustion of energy resources, environmental pollutions and so on. However, in such effective power system, considerably more energy than that introduced into the system should be recovered from the same, i. e. the power system should show a high energy efficiency. The efficiency of the power system can be evaluated by energy pay back time(EPT).

Generally, there are two methods to obtain input energy to a system; summation method and input-output analysis. The input energy can be found by studying production processing steps of the system in the former, or by using input-output table in the latter. We calculated the input energy of solar cell modules (monocrystal, polycrystal and amorphous modules) by the summation method and solar collectors (type I, type II and type III) by the input-output analysis, respectively. Further we analyzed thermal/photovoltaic modules, i. e. hybrid panels according to the obtained values.

As a result, EPT of each module is within each range of durable years thereof and thus all modules are available as future power system. EPT's of the solar cell modules considerably decrease by combining with solar collector. On the other hand, while EPT's of the solar collectors increase, the unit area generating energy increases by combining with monocrystal or polycrystal solar cell module.

Key words : Energy analysis, Energy pay back time, The summation method, The input-output analysis, Solar cell module, Solar collector, Thermal/photovoltaic module

1. はじめに

近い将来のエネルギーシステムとして、原子力発電、また人工太陽の利用ともいうべき核融合等の核反応によるエネルギー源が注目されてきた。しかし、前者は、その核反応による核廃棄物あるいは汚染物質の処理、さらには原子炉そのものもつ欠陥等の問題をかかえており、また、後者は、数多くの困難な開発課題から、実用化のめどもついていない状況である。

このような中で太陽エネルギー利用システムは、環境汚染問題やエネルギー資源の枯渇化問題に対する有効な解決方法の一つであると考えられ、現在、最も実用化への最短距離に位置するものと考えられる。太陽エネルギーの利用方法として、現在主に光利用（太陽電池モジュール）と熱利用（集熱器など）の2つに大別されるが、それらの両方を利用した光・熱ハイブリッドパネルも考えられている。

しかし、そのシステムへの投入エネルギーが発生エネルギーより大きい場合には、真のエネルギー発生源にならずエネルギー問題の解決にならないことにな

る。この評価を、エネルギーペイバックタイム（EPT）を求めることによって行い、光エネルギーや熱エネルギーの単独利用に対し、光・熱ハイブリッドパネルの有効性を定量的に検討した。

ただし、投入エネルギー算出方法として太陽電池モジュールは積み上げ法、集熱器は産業連関分析法により求め、この値を基に、光・熱ハイブリッドパネルについて同レベルに取り扱い分析を行なった。ここで注意することは、このような分析では、産業技術の向上やバラツキ、物価の変動などの影響を受けるので非常に複雑で、絶対量を求めることは不可能と言わざるを得ず相対量として扱わざるを得ない。

原稿受付 平成3年4月9日

- *1 東京理科大学工学部 学生（現 東京都水道局）
Faculty of Engineering, Science University of Tokyo,
Undergraduate
- *2 東京理科大学工学部 学生（現 古谷特許事務所）
Faculty of Engineering, Science University of Tokyo,
Undergraduate
- *3 東京理科大学工学部 教授
Faculty of Engineering, Science University of Tokyo,
Professor

2. 分析手法

投入エネルギーを求めるための方法には、大きく分けて2つの方法がある。その一つは積み上げ法と呼ばれるものであり、もう一つは産業連関分析法と呼ばれる方法である。前者をミクロ的方法とすれば、後者はマクロ的方法である。

2.1 積み上げ法⁽¹⁾

一般に本方式は、対象とするシステムを構成する機器について生産工程を明らかにして、各工程における物量(重量)を算定し、それにエネルギー原単位を掛け投入エネルギーを算出し、その総和を求めるものである。

積み上げ法による算出手順は以下のようになる。

- I 対象システムの生産工程を明確にする。
- II 求めるべき投入エネルギーの範囲を設定する。
ただし実際は非常に複雑なので単純化する必要がある。
- III システムに使用される物量(主に重量)の算定を行なう。
- IV 機器の生産に投入される原材料のエネルギー原単位を統計資料等により得る。
- V IIIとIVから投入エネルギーを算出する。
- VI IIに基づいてVで算出していない投入エネルギーを算出する。
- VII VとVIの総和を算出する。

以上の手順を見ても分かるように、この方式による問題点は以下の通りである。

- I 求めるべき投入エネルギーの範囲の設定を行なう際に、機器を生産するための原材料や設備の間での因果関係を定めなければならないが、一般にどのような生産工程であれ予想以上に複雑多様であり、現実の生産工程に対して忠実なエネルギー分析を行なうことは究めて困難である。従ってかなり単純化したモデルを用いざるをえない。
- II 対象とするシステムにおいて、特殊な材料が用いられている場合、その材料についてのエネルギー原単位を得ることが難しい。

上記のような問題点が解決できれば、この方式による投入エネルギーの算出は生産工程に沿って行なうことができるので、その算出手順は明快であり、最も基本的な方法といえる。

ここで、問題点Iの原材料や設備の間での因果関係は後述の取率に含ませることにより解決し、問題点IIは、特殊な材料が微量であり無視できる程度であった。

2.2 産業連関分析法⁽¹⁾

一般に本方式は、産業連関表をベースにして算出された各産業部門の生産物一円当りの投入エネルギー(エネルギー含有率)と、システムを構成する各機器の価格とからシステムに投入されたエネルギーを算出するものである。産業連関分析法による算出手順は以下ようになる。

- I システムを構成する各機器の価格を得る。
- II 各機器を、産業連関表の該当する部門に割り当て、そのエネルギー含有率を得る。
- III IとIIの数値の積として、機器毎に投入エネルギーを算出する。
- IV 部門毎に求めた機器の投入エネルギーの総和を算出する。

以上の手順を見ても分かるようにこの方式による問題点は以下の通りである。

- I エネルギー含有率は、一部門の生産物に関する平均的な値として得られ、部門内の生産物の質や種類の違いを無視している。
- II エネルギー含有率を算出するデータバンクである産業連関表は産業間の取引額で表示されているため、価格変動を考慮しなければならない。
- III 対象とするシステムを構成機器別に分解したとき、これをどの程度的確に関連する部門に割り当てることが可能であるかが問題である。
- IV 輸入品のエネルギー含有率を国内でつくられたものと同じと仮定している。
- V 生産設備をつくるために投入されるエネルギーは、エネルギー含有率の中には考慮されていない。
- VI 機器の価格は大量生産となったと仮定した場合の値しか得られない。

この方式には上記のような問題点はあるが、比較的容易に投入エネルギーを算出できる。一国の産業構造をベースにしているため、データの整合性がよく、近似的に投入エネルギーを算出するのに適しているといった利点も有する。

2.3 光・熱ハイブリッドパネル

ハイブリッドパネルの投入エネルギー E_H は次式によった。

$$E_H = C \cdot S (E_{PS} - E_{PM}) + E_{PC} + E_S \quad (\text{kWh/台})$$

ここで、

C ; 集熱面積に対する太陽電池面積比率

S ; 集熱面積 (m²)

E_{PS} ; 太陽電池モジュール単位面積当りの
投入エネルギー (kWh/m²)

E_{PM} ; 太陽電池単位面積当りのモジュール化工
程投入エネルギー (kWh/m²)

E_{PC} ; 集熱器の投入エネルギー (kWh/台)

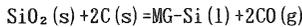
E_S ; 接着剤等の投入エネルギー (kWh/台)

3. 対象モデルと計算条件

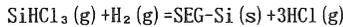
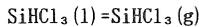
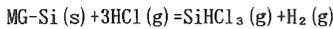
3.1 太陽電池モジュール

本稿では、1 m² の基板を得ることを基準とし、基板化工程を中心にそれ以前の工程は逆算して求めることとした。

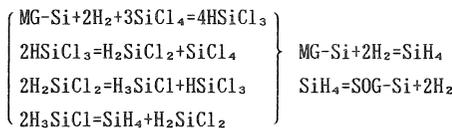
表1, 表2は単結晶型, 多結晶型太陽電池モジュールの各工程のエネルギー原単位 (kWh/kg) または (kWh/m²) および収率 (%) を示したものである⁽²⁾。これにより各工程での必要量 (kg/m²) および投入エネルギー (kWh/m²) が求められこれも合わせて示した。ここで、輸送や採掘の投入エネルギーは非常に小さいので無視した。また、MG-Siを生産するとき必要なエネルギー資源であるコークスの取り扱い、MG-Si 1 kgを得るのに必要な量を求め発熱量を掛けてエネルギー原単位として、MG-Si工程におけるエネルギー原単位に加えた。



a 単結晶型太陽電池は、ジメンス法による半導体級シリコン (SEG-Si) をCZ法により結晶化したものとした。



b 多結晶型太陽電池は、UCCプロセスによる太陽電池級シリコン (SOG-Si) をキャストイングしたものとした。



c アモルファス型太陽電池は、ガラス基板 (3 mm厚) とし、モジュール化と兼用とした。

a, bはワイヤーソーによる切断によって、0.3 mm厚の4インチウエハーを得るものとした。

モジュール化のエネルギー原単位は産業連関分析法により求めた。

表1 単結晶型太陽電池モジュール

Process	Unit energy (kWh/kg)	Yield (%)	Needful weight (kg/m ²)	Energy kWh/m ²
SiO ₂	—	—	28.97	—
MG-Si	25	71	9.60	240
SEG-Si	300	27	2.59	776
Crystallization	125	90	2.33	291
For substrate	109kwh/m ²	30	0.70	109
For element	160kwh/m ²			160
Modulazation	543kwh/m ²			543

表2 多結晶型太陽電池モジュール

Process	Unit energy (kWh/kg)	Yield (%)	Needful weight (kg/m ²)	Energy kWh/m ²
SiO ₂	—	—	9.75	—
MG-Si	25	71	3.23	81
SiH ₄	30	55	2.03	61
SOG-Si	10	95	1.69	17
Crystallization	76	90	1.52	116
For substrate	90kwh/m ²	46	0.70	90
For element	160kwh/m ²			160
Modulazation	543kwh/m ²			543

ワイヤーソーの仕様⁽³⁾

切断損失	0.2 mm
切断速度	0.1 mm/min
1回の加工枚数	200枚
使用電力	10.39 kW

またa, bは単独利用で変換効率15%とし、年間発生エネルギーQ_{PS}は186.7 kWh/m²・年、cは10%で124.4 kWh/m²・年とした。ただし全天日射量1244.7 kWh/m²・年、傾斜角30度、東京とした⁽⁴⁾。

3.2 集熱器

集熱器は、タイプI (集熱板 アルミ板)、タイプII (ステンレス鋼板)、タイプIII (アルミ板)⁽⁵⁾の集熱面積を1×2 m²に換算した。

本稿では、産業部門を54部門とし、エネルギー含有率 (kcal/円)⁽⁶⁾は御売物価指数に基づく補正より1989年に換算したのものを使った。また構成要素を集熱板、集熱媒体流路、透過体、断熱材、外箱、シーリング材、その他の部材に分け分析を行なった。

表3, 表4, 表5は各タイプの部材を各部門に割り当て重量 (kg) および単価 (円/kg)⁽⁷⁾、エネルギー含有率を示したものである。

また上述までの投入エネルギーは資材段階の投入エネルギーであり、実際の投入エネルギーは補正係数 $\alpha = 1.2$ 倍することにより求めた。また、今回は家庭用の小規模システムへの適用を想定し給湯、暖房用として集熱温度 $T_c = 40^\circ\text{C}$ として年間発生エネルギー Q_{PC} は、 $1319.2 \text{ kWh/台}\cdot\text{年}$ である⁽⁸⁾。

3.3 光・熱ハイブリッドパネル

図1は光・熱ハイブリッドパネルの構造図を示す。谷、山村、井上による研究⁽⁸⁾におけるモデルにより、集熱面積に対する太陽電池面積比率を75%とし、接着剤により集熱板に貼るものとした。この時、

集熱器は単独利用に比べ、発生エネルギーが20%減少し、集熱温度を 40°C としたとき太陽電池は、5.5%増加する⁽⁸⁾。また、アモルファス太陽電池の基板はモジュール化と兼用する必要はないので 1 mm 厚とした。年間発生エネルギー Q_H は次式によった

$$Q_{H40} = C \cdot S (1 + 0.055) Q_{PS} + (1 - 0.2) \cdot Q_{PC} \quad (\text{kWh/台}\cdot\text{年})$$

ここで、

C ; 集熱面積に対する太陽電池面積比率 (0.75)

S ; 集熱面積 (m^2)

表3 タイプI

Member	Matl	Section	Weight (kg)	Unit price (¥/kg)	Energy content (kcal/¥)	Energy (kcal)	(kWh)
Collector plate	Al plate	Nonferrous metal	2.17	665	6.3653×10	91854	107.2
Fluid path	Cu tube	Nonferrous metal	5.7	770	6.3653×10	279373	325.9
Transparent plate	Tempered glass	Ceramic	15	724	5.5269×10	600221	700.3
Heat insulator	Glass wool	Ceramic	1.39	500	5.5269×10	39208	45.7
Housing	Al plate (flame)	Nonferrous metal	1.46	645	6.3653×10	59942	69.9
	Steel plate (base)	Iron & steel	5.50	90	1.0780×10^2	53361	
Sealing matl	Silicon resing	Petrochemical product	0.5	400	4.6070×10^2	92140	107.5
Others		Nonferrous metal	0.04	655	6.3653×10	1668	1.9
			31.76			1217767	

表4 タイプII

Member	Matl	Section	Weight (kg)	Unit price (¥/kg)	Energy content (kcal/¥)	Energy (kcal)	(kWh)
Collector plate	Stainless steel	Iron & steel	6.34	370	1.0780×10^2	252877	295.0
Fluid path	Stainless steel	Iron & steel	3.5	1038	1.0780×10^2	391637	456.9
Transparent plate	Tempered glass	Ceramic	15	724	5.5269×10	600221	700.3
Heat insulator	Glass wool	Ceramic	1.20	500	5.5269×10	33161	38.7
Housing	Galvanized steel	Nonferrous metal	11.12	128	6.3653×10	90691	105.7
Sealing matl	Silicon resing	Petrochemical product	0.5	400	4.6070×10^2	92140	107.5
Others		Chemical	0.02	1000	5.2021×10	1040	1.2
			37.76			1461767	

表5 タイプIII

Member	Matl	Section	Weight (kg)	Unit price (¥/kg)	Energy content (kcal/¥)	Energy (kcal)	(kWh)
Collector plate	Al plate	Nonferrous metal	2.9	665	6.3653×10	121832	142.1
Fluid path	Cu tube	Nonferrous metal	2.8	770	6.3653×10	137236	160.1
Transparent plate	Tempered glass	Ceramic	15	724	5.5269×10	600221	700.3
Heat insulator	Glass wool	Ceramic	0.5	500	5.5269×10	13817	16.1
Housing	Galvanized steel	Nonferrous metal	16	125	6.3653×10	127306	148.5
Sealing matl	Silicon resing	Petrochemical product	0.5	400	4.6070×10^2	92140	107.5
Others		Nonferrous metal	1.5	370	1.0780×10^2	59829	69.8
			39.2			1152381	

4. 結果と考察

図2は太陽電池モジュールの単結晶型、多結晶型、アモルファス型の単位面積当りの投入エネルギーを示したものである。

ここで、特に単結晶型のSEG-Si工程の投入エネルギーの大きさが目立つが、これはエネルギー原単位が大きくインゴットの切断時の切り代などによる無駄が多いためであり、スライス技術の向上により大幅に減じることが別の計算により明らかになった。この関係を図3に横軸に基板厚/基板化収率をとり、縦軸はEPTをとってその減少の様子を示した。また基板化エネルギー原単位の減少により塗りをほどこした範囲の値を動くことを意味し、図上の点は今回の分析で使われたものである。

図4は集熱器のタイプI、タイプII、タイプIIIの1台当りの投入エネルギーを示したものである。ここでは透過体(ガラス)の占める割合が特に大きい、ガラスの普及性や一般性から、これが減じることが考えられず、これ以上の向上は余り考えられないと思われる。

図5は集熱器を各3タイプの内、図面など最も詳しい情報を得られたタイプIとし、太陽電池を単結晶型、多結晶型、アモルファス型との組み合わせによる投入エネルギーを示したものである。

表6は各機器のEPTを示しており、モジュールの強度などから機器寿命を15~20年とすると全てそれ以内であるので真のエネルギー発生源となる。

またハイブリッドパネルのEPTは太陽電池モジュールから見ると、単独利用に対し、ハイブリッド化する効果が大きく1/3~1/4に短縮され、単位面積当りの発生エネルギーも3~5倍に増加する。集熱器から見ると、ハイブリッド化するとEPTは最大で2倍程度増加するが、いずれも実用の範囲内である。また、単結晶型、多結晶型とのハイブリッド化では単位面積当りの発生エネルギーがわずかに増加する利点があるが、アモルファス型とはこの利点がない。これは、変換効率が低いためでありこの利点の境界は太陽電池モジュール単独利用での変換効率が13.4%の点である。これらの様子を図6の縦軸にEPT、図7の縦軸に発生エネルギーをとり、横軸は共に単独利用時の太陽電池モジュール変換効率をとり示した。変換効率20%で発生エネルギーは集熱器単独利用時と比べ10%程度増加するが、EPTは改善されない。変換効率の向上によるEPTの改善は期待できないが、ハイブリッドパネルとしては10%程度短縮される。

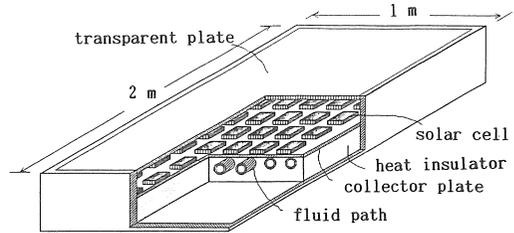


図1 光・熱ハイブリッドパネル

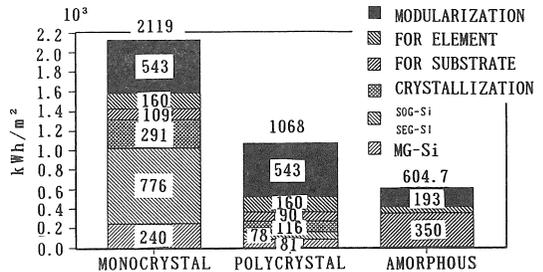


図2 太陽電池モジュールの投入エネルギー

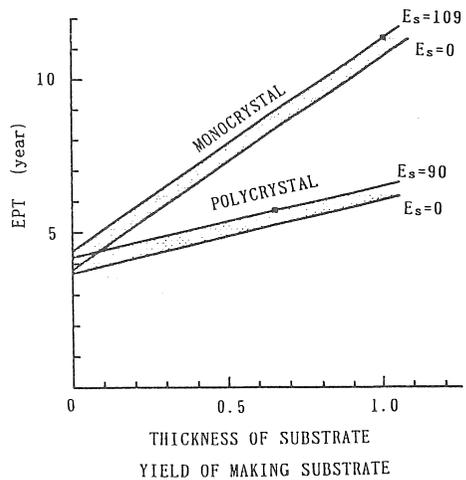


図3 太陽電池モジュールのEPT

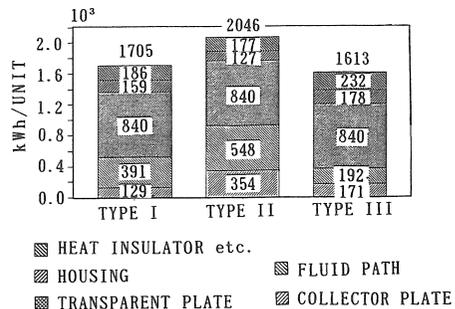


図4 集熱器の投入エネルギー

表6 エネルギーペイバックタイム (EPT)

	Solar cell module			Solar collector			Hybrid panel		Type+
	Monocrystal	Polycrystal	Amorphous	Type I	Type II	Type III	Monocrystal	Polycrystal	Amorphous
Input energy	2119	1068	604.7	1705	2046	1613	4092	2516	1990
Output energy	186.7	186.7	124.4	1319.2	1319.2	1319.2	1351	1351	1252
EPT (year)	11.35	5.72	4.86	1.29	1.55	1.22	3.03	1.86	1.59

Note) Unit of input energy; solar cell module, kWh/m², others, kWh/unit
 Unit of output energy; solar cell module, kWh/m²·year, others, kWh/unit·year

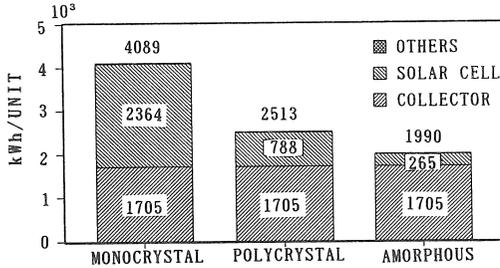


図5 光熱ハイブリッドパネルの投入エネルギー

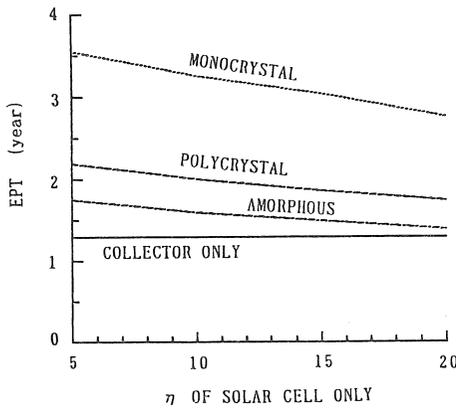


図6 光・熱ハイブリッドパネルのEPT

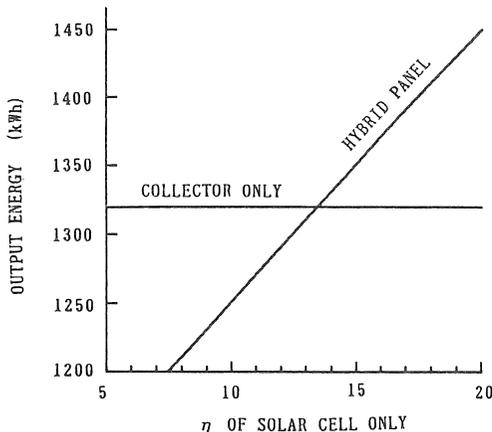


図7 光・熱ハイブリッドパネルの発生エネルギー

5. まとめ

今回対象とした太陽エネルギー利用システムはいづれも真のエネルギー発生源となった。光・熱ハイブリッドパネルは太陽電池モジュール側からは、EPTおよび単位面積当りの発生エネルギーが共に大幅に改善される。集熱器側からは、単位面積当りの発生エネルギーのみが改善されるが、太陽電池変換効率が単独で13.4%以上必要である。

本稿のモデルは、エネルギー発生装置本体のみのエネルギー分析であるが、今後は周辺装置も含めたエネルギー分析が必要である。また、ハイブリッドパネルにおいて集熱面積に対する太陽電池面積比率をパラメータとして最適設計する必要があるため、これに対するエネルギー分析が必要である。

最後に各種集熱器の詳細なデータを提供して頂いた(財)ソーラシステム振興協会服部技術部長並びに関係各位に深謝する次第である。

文献

- (1) 早稲田大学理工学研究所, 昭和53年度(社)ソーラシステム振興協会委託研究報告書「住宅の消費エネルギー及びソーラー機器の生産エネルギーに関するデータの集約とその検討」, pp.2-15 (1978-3)
- (2) 例えば, (財)新エネルギー財団, 太陽エネルギー技術の実用化と普及促進に関する調査, pp.119-132 (1984.3)
- (3) 「先端材料応用辞典」編集委員会, 先端材料応用辞典, p.1126 (1990)
- (4) 辻高輝, 太陽電池電源の設計法, 太陽エネルギー, Vol.9, No.6, p.34 (1983)
- (5) (社)ソーラシステム振興協会からの私信による
- (6) 日本電機工業会, 昭和52年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書「太陽エネルギー利用システム調査研究」, p.30 (1978-3)
- (7) (財)経済調査会, 積算資料, No.766 (1990, 11)
- (8) 谷・山村・井上, 太陽エネルギー変換パネルの評価に関する研究, 太陽エネルギー, Vol.15, No.5, pp.54-60 (1989.9)