

太陽電池はここまできている



鯉 沼 秀 臣*

Recent Status and Problems of Solar Cell Research

Hideomi KOINUMA

1. はじめに

1次エネルギーの主役が、薪炭から石炭へ、石炭から石油へ移り変わるのに要したタイムスケールは30~50年であるという。1973年のオイルショックによつて、石油の枯渇と供給体制に対する不安が顕在化し、多種多様な代替エネルギー開発プロジェクトがスタートした。以来10年、恐らくは一時的にすぎない昨今の石油事情の鎮静化に伴い、プロジェクト全体は縮小される傾向にある。原因の一つは、当初提案された研究計画の多くが、技術的にも経済的にも現実性に乏しいことが明らかになってきたことにある。このような情勢の中で、太陽電池による発電は、アモルファスシリコンという画期的な新素材の登場もあつて比較的順調に技術開発が進展し、将来のエネルギー需要の一部を担うのも夢ではない状況が生じつつある。

ここではまず、現在までの太陽電池開発の歴史をふり返り、各種太陽電池の発展状況をシリコン太陽電池を中心に述べる。さらに、1990年以降のエネルギー需要の相当部分をクリーンで無限の太陽エネルギーで賄うためのキーポイントとなる低コスト・高効率太陽電池の開発において何が問題になっているかを、半導体素材別にまとめてみる。

2. 太陽電池のあゆみ

2.1 開発の歴史

1984年9月、スペースシャトル“ディスカバリー”は、31×4mの巨大な太陽電池板を宇宙空間に広げた。この13kWの電源は、84枚のプラスチック製パネルからなり、折り畳むと10cm足らずの厚みになるという。

Table 1に太陽電池と関連技術の歴史を示す。半導体の光起電力効果は、湿式光電池の原型ともいふべき1839年のBECQUERELの発見にさかのぼることができるが、実質的な太陽電池の開発は、1954年のCHAPINらによるpn接合型シリコン太陽電池の発明からスタートし

た。

1973年を境に、太陽電池の開発姿勢には基本的な変化が生じた。それ以前の20年間、太陽電池は高価であり続け、人工衛星や遠隔地の独立電源、玩具などの特殊用途にシリコン単結晶セルが細々と実用化されているに過ぎなかつた。1973年以来、2度にわたる石油危機は、石油価格を10倍以上に押し上げたばかりでなく、化石燃料全体の資源量や供給体制に不安をもたらした。現在の全世界の消費エネルギーの1万倍を超えて地上に到達している太陽エネルギーを有効に利用する研究開発を促した。電力用をめざす太陽電池開発の大型プロジェクトは、1974年に各国で相次いでスタートしている。目標は、現行の商用電力に対抗できる光発電システムを1990~2000年までに開発することであり、太陽電池とBOS (balance of system: パネル組み立てや電力系統への連結に要する費用)の低コスト化が最大の課題である。エネルギーは相互に変換しうるものであるから、クリー

Table 1. History of solar cells and related technology.

Year	Solar cell	Related technology or discovery
1839		Becquerel effect
1877	Photovoltaic effect in Se ($\eta < 1\%$, Adams, Day)	
1941		Si pn junction (Ohl)
1948		Transistor (Shockley)
1954	Si solar cell ($\eta \sim 6\%$, Bell Lab.)	
1958		Vanguard I (NASA)
1962	GaAs homojunction cell ($\eta \sim 13\%$, RCA)	Semiconductor laser
1966	CdS heterojunction cell ($\eta \sim 6\%$)	
1972		Photoelectrochemical cell (Fujishima, Honda)
1973	-----Oil Crisis-----	
1974		Polyacetylene film (Shirakawa et al.)
1975		Valence control in a-Si:H (Spear et al.)
1976	a-Si solar cell (RCA)	
1978	Polyacetylene solar cell (Penn. U.)	
1980	Industrialization of a-Si solar cell (Sanyo)	
1982	1 MW solar power station (ARCO solar)	Concept of plasmon solar cell (Anderson)

η : conversion efficiency

昭和59年10月1日受付 (Received Oct. 1, 1984) (依頼解説)

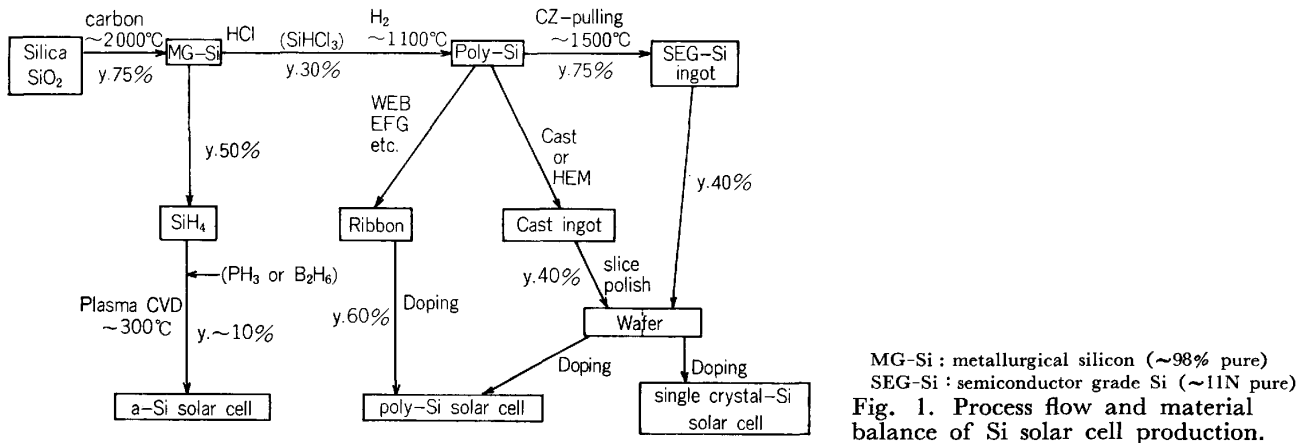
* 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku 113)

Table 2. Comparison of properties of various types of solar cells.
(Revised from ref. 1, Tab. 4. 1-6)

◎ excellent ○ good △ passable × poor

Type of Cell (semiconductor)	a-Si : H	sc-Si ^{a)}	poly-Si	III-V (sc) ^{a)}	Thin film compound	Organic	Wet type compound
Junction structure (typical cell)	pin	pn	pn	pn (hetero)	pn (hetero)	Schottky	Liquid ^{b)}
Technical maturity	△	◎	○	◎	△	×	×
Production cost & energy Energy payback time (yr.)	◎ 0.5~5	△ 12~23	○ 6~9	△ ?	○ 1.5	◎ ?	○ ?
Conv. eff. Theoretical (%)	○ 12~14 (22~24) ^{c)}	◎ 24~26	○ 20	◎ 28~30	△ —	×	○ —
Best at present (%)	11.6 (12.3)	19	14	24	10	5	11
Product level (%)	5~6	12~14	9~11	17~18	—	—	—
Durability	△	◎	○	◎	△	△~×	△~×
Polution problem	◎	◎	◎	△	△	◎	△
Resources availability	◎	◎	◎	○~△	△	◎	△

a) sc: single crystal, b) a sort of Schottky barrier formed at the interface of semiconductor and solution, c) for tandem type cell

MG-Si : metallurgical silicon (~98% pure)
SEG-Si : semiconductor grade Si (~11N pure)
Fig. 1. Process flow and material balance of Si solar cell production.

ンな太陽電池による電力であろうと火力、原子力による電力であろうと、利用上は区別できず、経済原則が優先するからである。

2.2 太陽電池の種類と材料

太陽電池は、太陽光を有効に吸収し、光励起によって半導体内部に生成するキャリア（電子とホール）を分離して速やかに電極に到達させる電子デバイスであり、(1) 適当なバンドギャップ ($E_g = 1 \sim 3 \text{ eV}$) を有し、欠陥の少ない高品質の半導体素材と (2) 半導体内部に電界を形成する接合構造、とが必須の要件である。

各種太陽電池の材料と現状レベルの性能を Table 2 に¹⁾、中でも代表的なシリコン系太陽電池の原料からセルに至る材料の流れを Fig. 1 に示す²⁾。1950 年代に実用化の始まった Si 単結晶セルに加えて、1980 年以降アモルファスシリコン (a-Si) および多結晶シリコンを用いる太陽電池の生産が行われ、電卓などの民生品や太陽光発電の実用化を目指す大型プロジェクトの試験設備などに使用され始めた。

AlGaAs/GaAs ヘテロフェイス型太陽電池とスクリーン印刷・焼結法による CdS/CdTe 薄膜太陽電池も最近

一部商品化されている。湿式光電池と有機太陽電池は、効率や耐久性に問題があり、基礎研究の段階にある。

変換効率を見ると、太陽光スペクトルに対して最大収集効率を与える E_g (1.4~1.5 eV) を有し、直接遷移型で光の吸収係数も大きい GaAs 系のセルが最もすぐれている。しかし製造技術、原料の資源量、製造原価などを総合するとシリコン系のセルが地上用太陽光発電には圧倒的な優位を保っている。ただし、欧米では結晶型 Si 太陽電池が主体で、a-Si 太陽電池ははまだ商品化されていないのに対し、わが国では a-Si 太陽電池が健闘しており、太陽電池の開発方針に微妙な差異が見られる。

2.3 生産量、コスト、用途

世界の太陽電池生産量と製造コストの推移を Fig. 2 に示す。1977 年までは生産量も少なく、伸びもわずかであったのに対し、1978 年以降は毎年 2 倍以上の急速な伸びを示している。モジュール価格も 1974 年には 3 万円/Wp であつたのが、昨年には 1500 円/Wp 程度となり、この 10 年間に 1/10 以下に低下した。しかも、このコストダウンには 1974 年以降の光発電プロジェクト

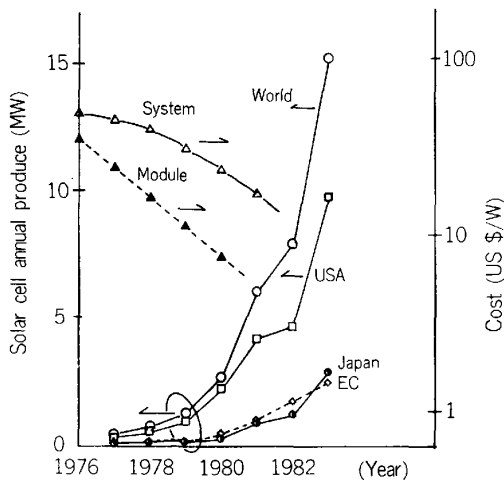


Fig. 2. Recent trends in production scale expansion and cost reduction of solar cells.

Table 3. Recent solar cell production in Japan.

Type	1981	1982	1982/1981
	kW _p (%)	kW _p (%)	
Single cryst.	641 (62.5)	624 (29.4)	0.97
Poly cryst.	187 (18.3)	280 (13.2)	1.50
a-Si	187 (18.3)	1 193 (56.2)	6.4
Others (GaAs etc.)	9 (0.9)	26 (1.2)	2.9
Total	1 024 (100)	2 123 (100)	2.07

トの研究成果は、まだほとんど取り込まれていない。主な要因は、チョクラルスキー (CZ) 法による Si 単結晶の大量生産に伴うスケールメリットによる。現在の Si 太陽電池価格は、単結晶、多結晶、アモルファスともほぼ同じ水準にあるが、技術完成度の高い前者については今後の大幅なコスト低下は見込めないのに対し、後 2 者の価格は、今後の研究と生産量の増大によつてさらに低下することが期待される。実際、Table 3 に示すように、我が国では単結晶 Si 太陽電池の生産は頭打ちとなり、多結晶とアモルファス Si のセルのみが生産を拡大する傾向が顕著になつてきている。

a-Si 太陽電池の急増は特に目覚ましいが、これは電卓用電源という新しい需要を開拓し、普及したことによる。1982 年の日本の太陽電池生産量 2 123 kW_p を用途別に見ると、電力用は 24.6%、民生用 73.8%、研究用 1.6% であり、特に電卓用が全体の 70.7% (1 500 kW_p) を占めているのが目立つ³⁾。商用電力に対抗できる太陽電池開発の目安は、\$1/W_p のシステム価格 (モジュールでは \$0.5/W_p) であり、これは年間 1 400 h のピーク発電を 10 年間行ふとして、240 円/1.4×10kWh=17 円/kWh の電力原価に相当している。現在のシステムコストを更に 1 桁低下させる必要があるわけで、後述する低コスト化の技術開発ばかりでなく、生産の増大をもたらす中間需要の開拓も重要である。

Table 4. Forecast of world demand (or supply) and price of solar cell modules.

		1982	1984	1986	1990
Maycock (1982)	Demand (MW)	9	30	100	500
	Price (¥/W) Production in Japan (MW)	2 300 1.7	1 500 —	900 30	700 175
DOE (1979)	Demand except Japan (MW)	32	125	500	(1988) 2 000
	Demand in Japan (MW)	—	125	370	500
DOE/JPL (1983)	Demand (MW)	9	20	40	100
	Price (\$/W _p) Solar Cell/ Si Device (%)	7.2 0.34	5.5 —	4.5 0.36	3.5 —
Chronar (1982)	Demand (MW) (10 ³ kWh/y)	—	—	2.0	30
	(MW/y)			>1 400	>20 000
NEF (1983)	Supply (MW/y) in Japan				
	Case 1 Case 2	2.0 2.0	6.4 6.4	7.9 20.5	23.5 2 810

2.4 需給予測

今後、太陽電池の生産がどのくらいのペースで伸びていくかについての予測は、Table 4 に例示するように発表機関や時期によつてかなりのばらつきがある。技術開発の進行状況のほかに、石油事情や政府援助などの政治的、経済的要因も大きな影響を及ぼすからである。ただし、いずれも太陽電池が引き続き順調に発展していくことを予測しており、ばらつきは電力用としての需要の立ち上り時期の設定にある。

新エネルギー財団 (NEF) では、2 種の前提条件のもとに太陽電池需給のケーススタディーを行つている⁴⁾。今年から 1988 年までの 5 年間に、現状レベルの 70 億円/年の政府助成を続けるケース-1 と、同じ 5 年間に 2 500 億円の助成を集中するケース-2 では、Table 4 に示すような大きな違いが生じる。ケース-2 では、1988 年頃より電力用需要が急速に立ち上り、1990 年には 2 800 MW/年 (うち海外援助 500 MW_p/年) に達し、市場規模 1 兆 5 千億円の太陽電池産業が出現するとしている。

3. 研究開発の焦点

結晶系にしるアモルファスにしる、Si 太陽電池のワット当たりのモジュール価格はすでに乾電池を下回り、ディーゼル自家発電をしのぐ水準に達してきた。民生品やへき地での独立電源としての需要だけを考えれば、現状の太陽電池でも満足すべきものといえる。しかし、上述のように、太陽電池のコストをもう一桁下げることができれば、電力用として大規模な実用化が期待できる。それは技術的に不可能なことではないし、将来のエネルギー需給や環境保全の観点からも十分意義深いものとなる。太陽電池の低コスト・高効率化に関連する技術改良の要点を Table 5 にまとめた。半導体材料、特に低コストの太陽電池用シリコン (SOG-Si) の開発、および a-Si 太陽電池の高性能化をめぐる問題を中心

Table 5. Principles for the production of low cost, high efficiency solar cells.

Task	Process or material	Type of cell ^{a)}
1. Process automation and simplification	Larger CZ ingot Ribbon Plasma process Screen printing	c-Si p-Si a-Si compd.
2. Material cost reduction	Cast ingot Thin film New material	p-Si a-Si, compd. a-Si, organic p-Si
3. New junction structure or process	MIS, Schottky Liquid junction Wet pn process Hetero junction Tandem	compd. compd. s-Si, p-Si compd., a-Si a-Si
4. Concentrator	Mirror, Fresnel lens Tracking system	Compd. (GaAs) c-Si

a) c-: crystal, p-: polycrystal, a-: amorphous, compd.: III-V and II-VI compounds

に、研究開発の状況を眺めてみよう。

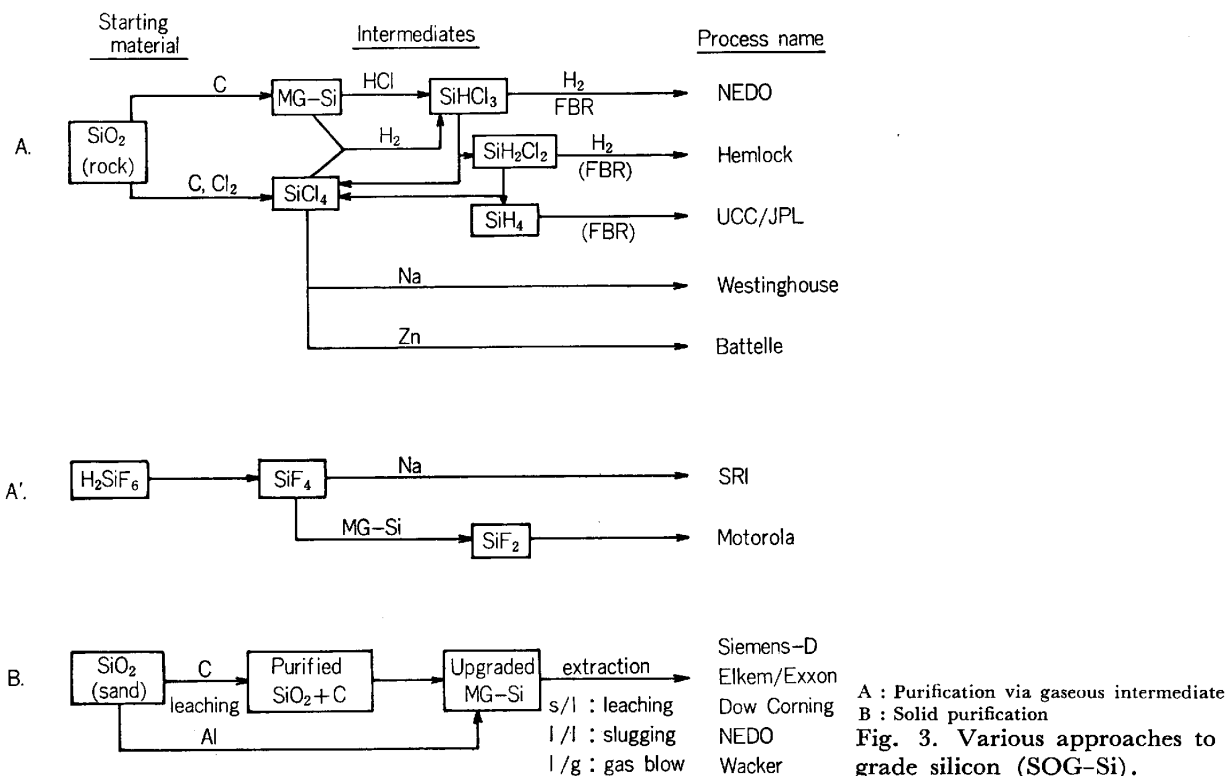
3.1 結晶系 Si 太陽電池

モジュール価格に占める Si 原料 (高純度 Si ウェーハまで) コストの割合が、単結晶型で約 60%, 多結晶リボン型でも 40% 以上となり、Si 原料の低コスト製造法の開発が最大の課題である。半導体用の高純度 Si (SEG-Si) は、現在全世界で約 4000 t/年生産されているが、太陽電池に消費される量は数%に過ぎず、¥8000/kg 程度の“規格落ち”で間に合う状況にある。しかし、NEF の case-2 による予測のように、1990 年に 280 万 kW の光発電を可能にするには、発電量の 70% を原料使用量の少ない a-Si 太陽電池に頼るとしても、日本だけで年間 15000 t の Si を必要とすることになる²⁾。

単結晶 Si を用いるセルの製造技術はほぼ完成されており、エネルギー消費の大きいクロシランの水素還元や単結晶への引き上げを始めとする多数の工程を含むため、今後の大幅なコストダウンは望み難い (Fig. 1)。太陽電池用 Si は、IC などの半導体デバイス用ほどの高純度 (~11 N=99.99999999%) を必ずしも必要としないので、純度は 5~6 N で低コスト化に重点を置いた太陽電池級シリコン (SOG-Si) の製造技術が検討されている⁵⁾。SEG-Si プロセスの改良を含め、SOG-Si にアプローチする種々の方法を Fig. 3 に示す。

大別して、低沸点中間化合物を経るガス化精製法(A)と冶金的な固体精製法(B)とがある。前者は高純化に適しているが、2段の還元過程を含み低コスト化に限界がある。SOG-Si に期待される \$10~15/kg-Si の原価水準を達成することは困難と見られる。たとえば、クロシランを経るユニオンカーバイド (UCC) 法と新エネルギー総合開発機構 (NEDO) 法による 1000 t/年プラントの化学工学的評価に基づく総原価は、エネルギー効率の高い流動床 (FBR) プロセスを採用しても、それぞれ kg-Si 当たり 4827 円, 5398 円 (在来シーメンス法は 10698 円, いずれも 1984 年ベース) と見積もられている²⁾。

1段の還元と固体精製による SOG-Si の製造は、海砂に Na₂CO₃, MgO などを加えてガラス繊維とし、リーチング効果を高めて精製したシリカを原料とする Siemens 社の方法はじめ、世界最大の MG-Si メーカーである Elkem 社、あるいは Dow Corning 社、NEDO



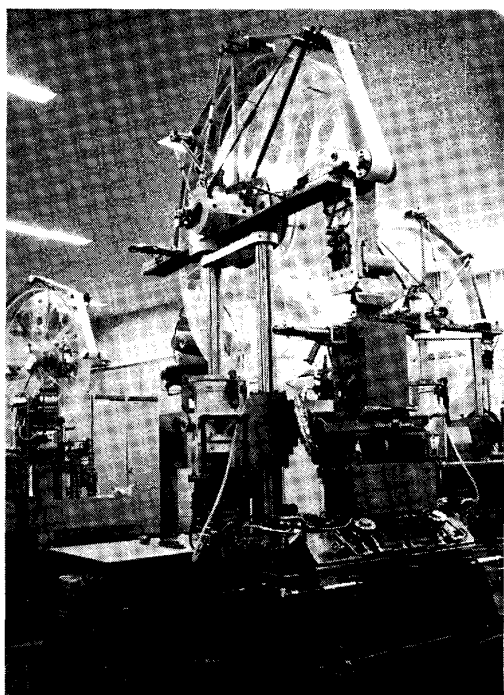


Photo. 1. A 100 mm-wide silicon ribbon growth system.

などで種々の方法に関する基礎研究が行われている²⁾⁵⁾。

多結晶 Si 基板の作製工程では、鋳造または熱交換法 (HEM) による大型インゴット、およびスライス工程を必要とせず、面積効率の高いリボン Si を作製する技術が追求されている。鋳造法では、偏析による不純物の除去が期待できるのに対し、リボンの原料にはかなり純度の高い Si を必要とする⁶⁾。Photo. 1 に示す装置では、幅 10 cm、厚み 300~400 μm の Si リボンが作られ、これを用いて $\eta = 10\%$ 程度のセルが試作されている。

最近では、セラミックスやカーボンのシート上に熔融 Si を付けて薄膜多結晶化する SOC (Si on ceramics) や RAD (Ribbon against drop)、これをレーザーで結晶化させる RTR (Ribbon to Ribbon) といわれる技術も注目されている。

3.2 アモルファスシリコン太陽電池

半導体素材となる水素化アモルファスシリコン (a-Si:H) の薄膜は、一般にモノシラン SiH_4 のプラズマ CVD によつて作られる。これは電界 (通常 13.56 MHz の高周波) の中に、低圧 (0.1~1 Torr) の SiH_4 ガスを導入してグロー放電分解し、生成する活性種を 300°C 程度に加熱した基板上で重合・堆積させる方法である。最初に SiH_4 に B_2H_6 を少量添加し、無添加、 PH_3 添加の順にグロー放電分解を行うことによつて pin (i=intrinsic) 接合も容易に形成できる。a-Si:H は従来の半導体の常識、すなわち長距離秩序を持った結晶性物質だけが電子状態のバンド構造を有し、pn 制御が可能であるという考えを根底から覆した新材料であり、英国の SPEAR による発見 (1975年) 後、直ちに太陽電池への応用が試み

られた。最初の a-Si 太陽電池は RCA 社 (米) で作られたが、その後の技術開発では日本が主導権をとり、国内の太陽電池生産の過半を占めるに至っている。この間の経緯については、多数の解説⁷⁾があるので、結晶系に比較した特徴のみを以下に記す。

- (1) 原料: $1 W_p$ の発電能力の作製に要する Si 量は約 1/100
- (2) 基板: ガラス, ステンレス, 高分子など多種多様
- (3) 製造プロセス: 簡単で低温 ($\sim 300^\circ\text{C}$) \rightarrow エネルギー消費少ない. 自動化も容易
- (4) セルのサイズ: 太面積 ($> 1000 \text{ cm}^2$) の薄膜形成が容易
- (5) セル構造: ヘテロ結合, タンデム型, 集積型など種々の構造がガスの切り替えやマスクパターニングによつて作製できる.
- (6) 変換効率: 小面積 ($\leq 1 \text{ cm}^2$) で 11%, 商品化したセルで 5% 程度と結晶型の約 1/2
- (7) 耐久性: 強い光の照射による劣化 (STAEBLER-WRONSKI 効果) が問題

上記 (1)~(5) の利点は、a-Si 太陽電池が電力用としてもすぐれた素質を有し、(6), (7) の弱点を改善する技術開発によつて飛躍的な需要の拡大が期待できることを示唆している。Photo. 2 に家庭用光発電を考えた太陽電池瓦の試作品を示す。

a-Si 太陽電池の理論変換効率は、単層で 12~14%, タンデム (積層) 型で 18~24% と見積もられている。この限界を目指す効率向上には、図 6 に示すような種々の損失を少なくするくふうが必要である。光の入射側に、バンドギャップ (E_g) が大きく光透過性のよい p 型 a-SiC:H 層、あるいは光透過性と電導度にすぐれた n 型微結晶層を用いることの有効性が確かめられている。種々の E_g を有するシリコンアロイ (SiC , SiN_x , SiGe , SiSn など) を組み合わせ、太陽光の有効利用を図るタンデム型も活発な研究が行われている。現状は a-Si:

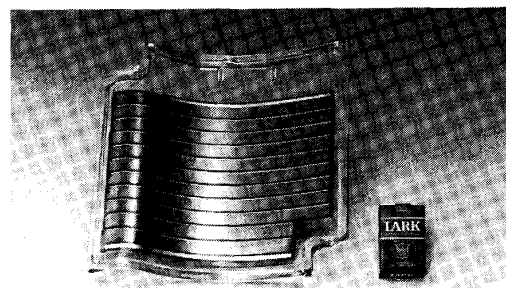


Photo. 2. $2 W_p$ a-Si solar cell shielded in a glass roof tile. (Prototype made by Sanyo electric Co. Ltd.)

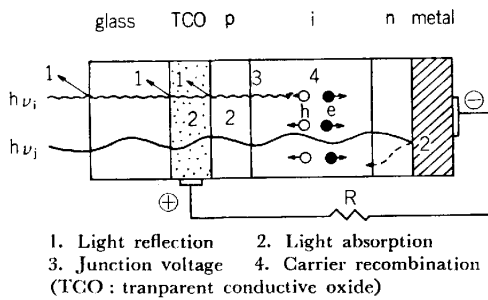


Fig. 4. Some origins of efficiency loss in solar cell.

H と a-SiGe:H を組み合わせた 100 cm^2 の 3 層のセルで 8.5%, a-Si:H と p-多結晶 Si を組み合わせた 0.25 cm^2 の 2 層セルで 12.3% であり, 理論効率よりかなり低い (Table 2).

応用物理と電子工学の研究者を主体に進められてきたデバイス技術の改良によつて上昇を続けてきた a-Si 太陽電池の変換効率も, 最近では飽和気味である. 今後の breakthrough にとつて本質的な点は, a-Si:H 膜における再結合を低減させ, キャリヤーの生成・収集効率を上げること, すなわち再結合中心となる局在準位 (不純物や不対電子による) 密度を下げることにあろう. また実プロセスでは, 成膜の高速化, 歩留り向上, 連続自動化などが求められる. 光劣化 (STAEBLER-WRONSKI 効果) の解明と対策を含めて, 背景には原料ガスの化学構造と反応性, プラズマ反応の機構, 光 CVD などの新しい反応法の開発, 膜のより詳細なキャラクタリゼーションなど, 化学や金属にも関連する問題が多い.

3.3 化合物半導体太陽電池⁹⁾

GaAs は太陽電池に適した E_g を有し, p 型, n 型への価電子制御ができ, AlAs との固溶によつて E_g の制御も可能である. 20% 以上の高い変換効率 (η) と耐放射線を有する GaAs ホモ接合および AlGaAs とのヘテロ接合セルは宇宙用, 集光用に適しているが, 単結晶基板が高価なため地上用平板型電源には Si に劣る. しかし, GaAs 自体は直接遷移型の半導体で, $1 \mu\text{m}$ の厚みで十分太陽光を吸収できるので, 薄膜型にして低コスト化を図る方法が検討された. Mo, W, カーボンなどの

安価な基板上に形成した GaAs 多結晶薄膜のセルでは $\eta < 10\%$ であつた. GaAs 基板上に HF 可溶の $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ 層, あるいは炭化ホトレジスト層を部分的につけ, さらに GaAs のセルを形成した後, 中間層をエッチングまたはへき開して GaAs 基板を回収し, セルを分離する剝離薄膜法では, $\eta = 15 \sim 19\%$ が得られている. 薄膜成長法としては, $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ と AsH_3 , AsCl_3 などをガス化し, 加熱基板上で熱分解・エピタキシャル成長を行う MOCVD (有機金属 CVD) が注目される. III-V 族化合物半導体では, 他に InP ($E_g = 1.27 \text{ eV}$) などが検討されている.

化合物半導体の中で Si に対抗できる地上用太陽電池材料があるとすれば, 安価な CdS を主体とするものであろう. 真空蒸着やスプレー法で作られる CdS/Cu₂S は古くから研究されているが, Cu⁺ イオンの拡散による接合の劣化に問題があり, p 層に CuInSe₂ や CdTe を用いるセルが作られている. 大面積の薄膜形成に適したスクリーン印刷・焼結法により, 変換効率 8.5% の CdS/CdTe 多結晶太陽電池が作られ⁹⁾, 最近パネルが市販され始めたようである. ただし, 化合物半導体は, それ自体または原料物質に毒性の強いものが多く, 大規模実用化へのネックになる恐れがある.

3.4 湿式光電池, 有機太陽電池, その他

電解液に半導体を浸すと界面に一種の Schottky 障壁が生じ, 対極となる金属電極を組み合わせて光を半導体電極に照射すると光起電力が生じる (BECQUEREL 効果). 適当な半導体と電解液の組み合わせでは, 水の光分解による光→化学エネルギー (水素+酸素) への直接変換が起こる (本多・藤嶋効果). これを光化学電池と称し, 電気エネルギーのみ得られる場合を狭義の湿式光電池として区別することもある¹⁰⁾.

原理的には効率良く水を光分解するはずの n-CdS などでは, 実際には電極表面での溶解 ($\text{CdS} + 2\text{h} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + \text{S}$) や酸化被膜 (絶縁物) の形成などによる劣化が起こる. 溶液に S/Na₂S などの酸化還元系を加えたり, 半導体表面を高分子や金属の薄膜などで保護する試みが行われている.

Table 6. Research and development tasks of DOE (USA) photovoltaic project for 1984-1988.

Research phase/Task	Five year goal*
Materials research	
1. Single junction thin films	Increase the efficiency of large area (>50 cm ²) single junction thin film cells to 15% using polycrystalline materials and 12% using amorphous materials and extend cell life-expectancy to 30 years.
2. High efficiency multi-junction concepts	Increase the efficiency of small area (1 cm ²) multi-junction crystalline cells to 35% under concentrated sunlight and multi-junction thin film cells to 18%.
3. Innovative concepts	Conduct research on promising new cell materials, devices, and conversion concepts.
4. Silicon materials	Determine the feasibility of processes which can reduce the cost of semiconductor grade silicon to \$16/kg.
5. Advanced silicon sheet	Increase the efficiency of small area (1 cm ²) silicon ribbon cells to 20% and increase their growth rates to levels needed to be cost competitive.

Table 7. Representative solar photovoltaic power systems in the world.

Location	Scale (kW)	Builder	Remarks
USA			
Hesperia, CA	1 000	ARCO Solar	Operating since 1982
Carria Plain, CA	16 500	ARCO Solar	Phase 1: 6 MW, 1984. 3 Phase 2: 10 MW 1986
Sacrament, CA (SMUD)	1 000 (100 000)	ARCO Solar	Under construction
Borrego Springs, CA	4 800	United energy Corp.	Ultimate supply Under construction
EC			
Pellworm Island, W. Ger.	300	AEG	Recreation center
Kythnos Island, Greece	100	Siemens	Island grid
Chevetogne, Bel.	63	IDE/ACEC	Pumps and lighting
Mont Bouquet, Fr.	50	Photowatt	TV emitter
Terscelling Island, Holland	50	Holec	Marine school
Japan ^{a)}			
Saijo	1 000	NEDO	Central power station
Tsukuba	200	NEDO	School
Ichihara	200	NEDO	Distributed type power station
Hamamatsu	200	NEDO	Factory

a) Construction started in 1981 FY.

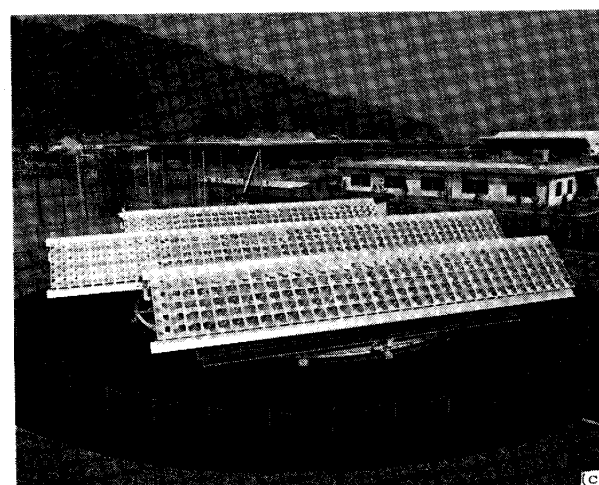
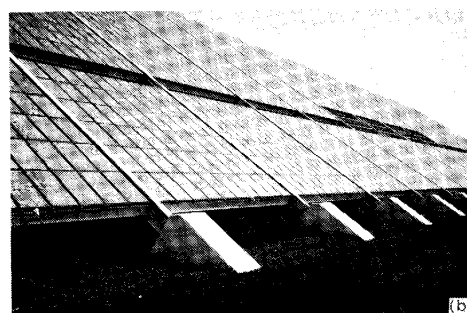
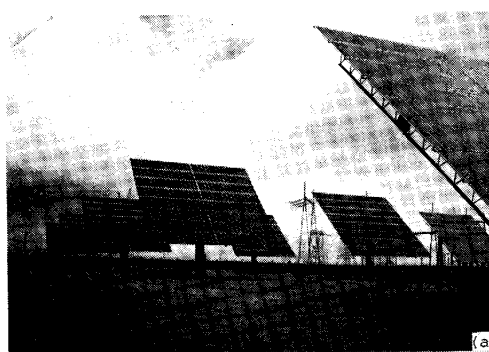
長所として、(1) pn 接合の形成工程が不要、(2) 表面の粗い多結晶でも単結晶半導体とあまり変わらない効率が得られ、(3) 場合によっては貯蔵可能な化学エネルギーに直接変換できる、などの点が強調されている。ただし、少量ずつ発生する水素を捕集するための余分の装置の必要性や効率の良い半導体では耐久性に乏しいことは、利点(3)を通常の太陽電池に水の電解を組み合わせた系に比べて、むしろ欠点にする可能性が大きい。GaAs 電極に酸化・還元系を加えた溶液からなる湿式光電池などで 10% 以上の初期変換効率が得られ、多くの化学者の注目を集めているが、総体的には基礎研究の域を出ていない。

有機物とくに高分子は加工性に富み、大面積の薄膜を容易に作製できる安価な材料である。ポリアセチレン膜とその導電性制御の発見以来、他の導電性ポリマーや有機色素類をベースにした Schottky 型や MIS 型の光起電力素子の可能性がいくつか見出されている¹¹⁾。しかし、いずれも変換効率は低く、実用にはほど遠い状況にある。

最近、ANDERSON によつてプラズモン太陽電池という全く新しい太陽電池の原理が提案されている¹²⁾。Al などの金属薄膜とトンネルダイオードを組み合わせ、表面プラズモンを介したエネルギー変換で 50% 以上の効率が可能であるとしているが、いまだ机上の産物と思われる。

4. 世界の太陽光発電の状況

アメリカ¹³⁾および EC¹⁴⁾における太陽光発電システムの開発と普及の状況を概観してみよう。一般的にみて、欧米では単結晶および多結晶シリコン太陽電池とシステ



(a) 1 MW power station at Hesperia CA (ARCO Solar)
 (b) 200 kW 'Solar Breeder' (Solarex)
 (c) 5kW Photo+25kW thermal hybrid solar power system at Sakamachi, Hiroshima

Photo. 3. Appearance of some photovoltaic power facilities.

ム化技術の開発が中心的課題であり、化合物半導体薄膜にも相当の関心が持たれてきた。これに対し、日本では a-Si 太陽電池の高効率化と民生品への応用に、電力用多結晶太陽電池に劣らぬ活発な研究が行われてきた。

政府関係の研究開発予算規模は、1983 年に日本は 66 億円 (29 M\$) でアメリカの 58 M\$ の約半分であつた。1984 年には同じサンシャイン計画に属している太陽熱発電プロジェクトの縮小に伴い、79 億円 (34 M\$) に増加したが、アメリカの予算も増加したので対比はほとんど変わらない。EC では EC 全体のプロジェクトとして 1979 年から 1982 年に、総経費の 40% に当たる約 23 M\$ の助成が行われ、他にフランス、ドイツをはじめ

各国独自の研究開発も行われている。

米国エネルギー省の太陽光発電プログラムは、SERI (Solar Energy Research Institute), JPL (Jet Propulsion Lab.), Sandia National Lab. の3研究所を主体に、それぞれ太陽電池、Si 原料、システム技術を中心にした研究が進められている。1984~1988年の5ヶ年計画の目標を Table 6 に示す¹⁵⁾。日本でも1990年頃までにモジュール $\epsilon 20/W_p$ 以下、システム $\$1/W_p$ 以下の価格目標が設定されていた。

アメリカでは、世界一の太陽電池生産を誇る ARCO ソーラー社、RCA 社の技術陣を引き抜いた Solarex 社はじめ、民間独自の研究も活発に行われている。日欧でも a-Si:H を主体とする企業研究が盛んになっている。

最後に、日米欧で建設された、あるいは建設中の太陽光発電所の例を Table 7 および Photo. 3 にピックアップしておく。(写真を提供いただいた新エネルギー総合開発機構の横江弘二、越前谷義博氏、および三洋電機の桑野幸徳氏に感謝する)

文 献

- 1) 日本電子工業振興協会: 電子材料総合計画Ⅱ (59-M-213) (1984), p. 132
- 2) 日本電子工業振興協会: シリコン原料調査研究成果報告書Ⅱ (59-M-230) (1984), p. 20
鯉沼秀臣, 小沢丈夫, 電子工業月報, 26 (1984) 8, p. 37
- 3) 桑野幸徳: 太陽光発電システムシンポジウムテキスト (日本能率協会編) (1984), p. 2-25
- 4) 新エネルギー財団: 太陽エネルギー産業調査 (1983-3)
- 5) J. DIETL: Proc. Symp. Mat. and New Proc. Techn. for Photovoltaics, ed. by J. A. AMICK et al., The Electrochem. Soc. Inc., Pennington (1983), p. 52
- J. A. AMICK et al.: 同上, p. 67
- S. PIZZINI: Solar Energy Materials, 6 (1982), p. 253
- R. LUTWACK, A Review of Silicon Material Task (DOE/JPL-1012-96, JPL Publication 84-24) など
- 6) 新エネルギー総合開発機構: 太陽光発電システム実用化技術開発 (1984-3), p. II-9
- 7) 高橋 清, 小長井誠: アモルファス太陽電池 (1983) [昭晃堂]
アモルファス半導体の基礎 (菊池 誠・田中一宜編) (1982) [オーム社] など
- 8) 行本善則, 吉田 進: 太陽光発電システムシンポジウムテキスト (1984), p. 4-1 [日本能率協会]
C. F. GAY and V. K. KAPUR: Proc. Symp. Mat. and New Proc. Techn. for Photovoltaics, ed. by J. A. AMICK et al., The Electrochem. Soc. Inc., Pennington (1983), p. 43
- 9) 池上清治: 電子技術, 22 (1981) 8, p. 22
- 10) 本多健一, 藤嶋 昭: 応用物理, 50 (1981), p. 401
機能材料 (1982) 8, 9, p. 97
坪村 宏: 光電気化学とエネルギー変換 (1979) [東京化学同人] など
- 11) 白川英樹, 山辺時雄編: 化学増刊 87「合成金属」, (1980) [東京化学同人]
雀部博之: 第 31 回高分子夏季大学テキスト (1983), p. 41
- 12) L. M. ANDERSON: IEEE Photovoltaic Specialists Conf., San Diego (1982)
- 13) 石田 寛, 横江英二, 神本正行編著: ここまで来た太陽光発電-米国編 (1984) [電力新報社];
H. EHRENREICH: Proc. Symp. Mat. and New Proc. Techn. for Photovoltaics, ed. by J. A. AMICK et al. The Electrochem. Soc. Inc., Pennington (1983), p. 35
- 14) R. J. Van OVERSTRAETEN: 同上, p. 27