

# 太陽光発電とアモルファスシリコン

— 誕生ま近い新エネルギー産業と新素材 —



夢はバラ色

浜川 圭 弘\*

## 1. 化石エネルギー汚染からの脱脚

われわれの住む地球が、太陽系の一つとして生れて以来、ほぼ45億年、天地創造をめぐるさまざまな地殻変動と造山活動、その間、絶え間なく降り注ぐ太陽エネルギーに育てられてきた生体系の循環サイクルが僅かづつ溜め続けた財産として、今日の化石エネルギー資源ができてきた。さて、こうして準備されてきた化石エネルギー資源が、1765年のジェムスワットの蒸気機関の発明以来、21世紀半ばまでの僅か300年ほどで、いよいよ底がついてしまうと予測されている。

こうした化石エネルギー資源の食い盡しを人生にたとえてみると、吾が国で産出する石炭が3.5億年かかって造られて、これを300年で消費したと仮定しても、大学を出て35年間淡々として蓄めこんできた貯金を僅か十数分のかけごと

で、すってんてんに使い盡してしまうのに相当するのである。ここで云う化石エネルギーの大量浪費は、地球が蓄めてきた貯金を一挙におろすと云う罪悪のほか、燃焼と云う化学反応を通して、地球をとり巻く空気を汚染し、酸性雨を降らせ、大気中のCO<sub>2</sub>濃度を増加させる。図1は、この事実を如実に示す実測データである<sup>1)</sup>。このCO<sub>2</sub>濃度の増加は、例え僅かであっても、莫大な太陽輻射エネルギーの吸収となり、大気の屈折率変化にともなう大気圏内の温室効果となって効いてきて、気象条件を変え、果ては延々と続けられてきた生体系の循環サイクルに大きな変調をきたす原因となる。この種の現象は、云わば、重金属やPCB汚染と同様、蓄積型症病であるため、まさに、じわじわとやってきて、気の付いた時には、手遅れ!となる種類の地球にとっての公害病なのである。

ところで、世界各国の人口一人当りのエネル

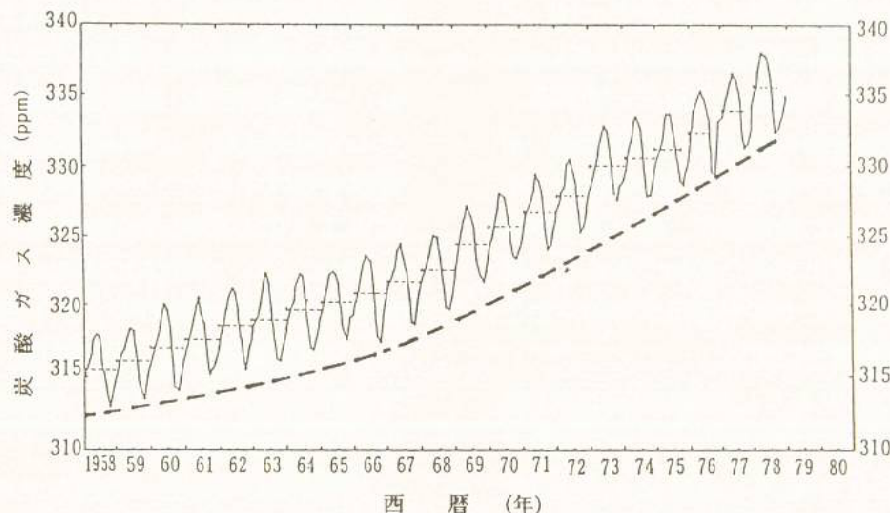


図1 ハワイマウナロア山観測点における大気中炭酸ガス濃度の年次推移工業地帯から隔離した太平洋の真中でさえが空気汚染は確実に進んでいる。とくに1965年以降その勾配が立ち上がっていることに注意。

\* 浜川圭弘 (Yoshihiro HAMAKAWA), 大阪大学基礎工学部, 電気工学科, 教授, 工学博士, 半導体電子工学



ギー消費量は、その国のGNPの順番と対応すると云われている。人類文明は時と共に進歩し、一方、世界の人口も時間とともに増えつづけている<sup>2)</sup>。従って、世界の総エネルギー需要は、この両者の相乗作用として効いてくるのである。この傾向は、今後、先進国の「省エネルギー政策」が多少とも効果を上げたとしても、それに倍する中進国や開発途上国の需要増が予測され、永い眼で見て総エネルギー需要の増加と化石エネルギー資源の枯渇は避けられないのが現実の動きである。

さて、それでは一体どうすればよいのか？数億年もかかって蓄積してきた地球規模的財産とも云える“化石資源”を、今まさに使い果さんとしていることに気付いたからには、そして人類文明が吾々の子孫の時代にも無事存続することを願うならば、「病める地球」の窮状を救う方法は、たった一つ、恒久的なクリーンエネルギー技術を、現代の科学技術と人類の英智をしぼって確立することこそ、「石油文明」の恩恵を享受している現代人に果せられた責務ではないでしょうか。

## 2. 太陽光発電

### —恒久的クリーンエネルギー技術—

人類が地表から採集できるエネルギーは、その99.98%までが太陽エネルギーによっている。そして残りの0.02%が地熱エネルギーである。現代の人類文明の活動に利用している石油、石炭および天然ガスなども元をただせば太陽エネルギーによって育った動植物が、数千万年から数億年もかけて造り出された産物であるし、また水力や風力発電にしても太陽エネルギーによる気象活動の副産物といえる。

さて、図2に示すように太陽からほぼ1億5000万km離れた地球に降り注がれている太陽エネルギーは、これを電力に直すと $1.77 \times 10^{14}$  [kWp]\*程度であり、この値は全世界の平均消費電力と比べて数10万倍も大きい<sup>3)</sup>。つまり

\*Wp. ピークワットと読み、太陽光線が垂直入射した状態で、1秒間に降り注がれるエネルギーをワット換算したもの。

文明活動に使用している総エネルギーは、これが今の10倍になったとしても、それは太陽の黒点の活動による地表到達エネルギーの変化より小さく、いかに太陽エネルギーが莫大であるかがわかる。

太陽放射エネルギーから直接電気を起こす太陽光発電は、燃料となる太陽光が、石油や石炭とは違って「地域偏在性がなく」、<sup>4)</sup>「無尽蔵」で、しかも「ただ」である…など、太陽エネルギー本来のメリットのほかに、半導体の量子光電効果を原理としていることから、「熱エネルギーや機械エネルギーを媒介としない」発電法、つまり、燃焼からくる空気汚染や熱公害もなく、「静か」で「クリーン」なエネルギーの発生法である<sup>5)</sup>。こうしたさまざまな特質をもちながら、太陽電池には何しろ高価なシリコン結晶を使うために、これまで発電コストが高いという大きな「泣きどころ」があった。

1970年代の初期、わが国は自由圏ではGNPともども米国に次ぐ大量石油消費国であり、しかもその石油の99%までを輸入にたよっていた。こうしたエネルギー事情を少しでも改善する目的から、1973年の6月、石油代替新エネルギー開発をめざしたサンシャイン計画の草案がつけられた。丁度、その年の10月に中東戦争が勃発したのである。サンシャイン計画は、この点で全く時機を得た国家プロジェクトと云える。「太陽光発電」技術も早速その中の一部門として組込まれ、この10年間、まさに目覚ましい進歩を遂げてきた。その成果は例えば、図3に示すようにわが国の太陽電池の年産量が年率2.3倍と言う、半導体ICをもしのぐ伸び率で成長し<sup>6)</sup>、また、本プロジェクトの鍵技術とされている太陽電池の低コスト化も、最近の数年間で一桁以上のコストダウンが達成された事実をみても明らかである。

太陽電池は1954年に米国のベル研究所で誕生して以来、ほぼ30年余りになる。その間、実用システムという観点からその生い立ちをふり返ってみると、最初の10年間はホトダイオードやホトトランジスタとしての光センサー時代、そして、1960年代の中頃からオイルショックま



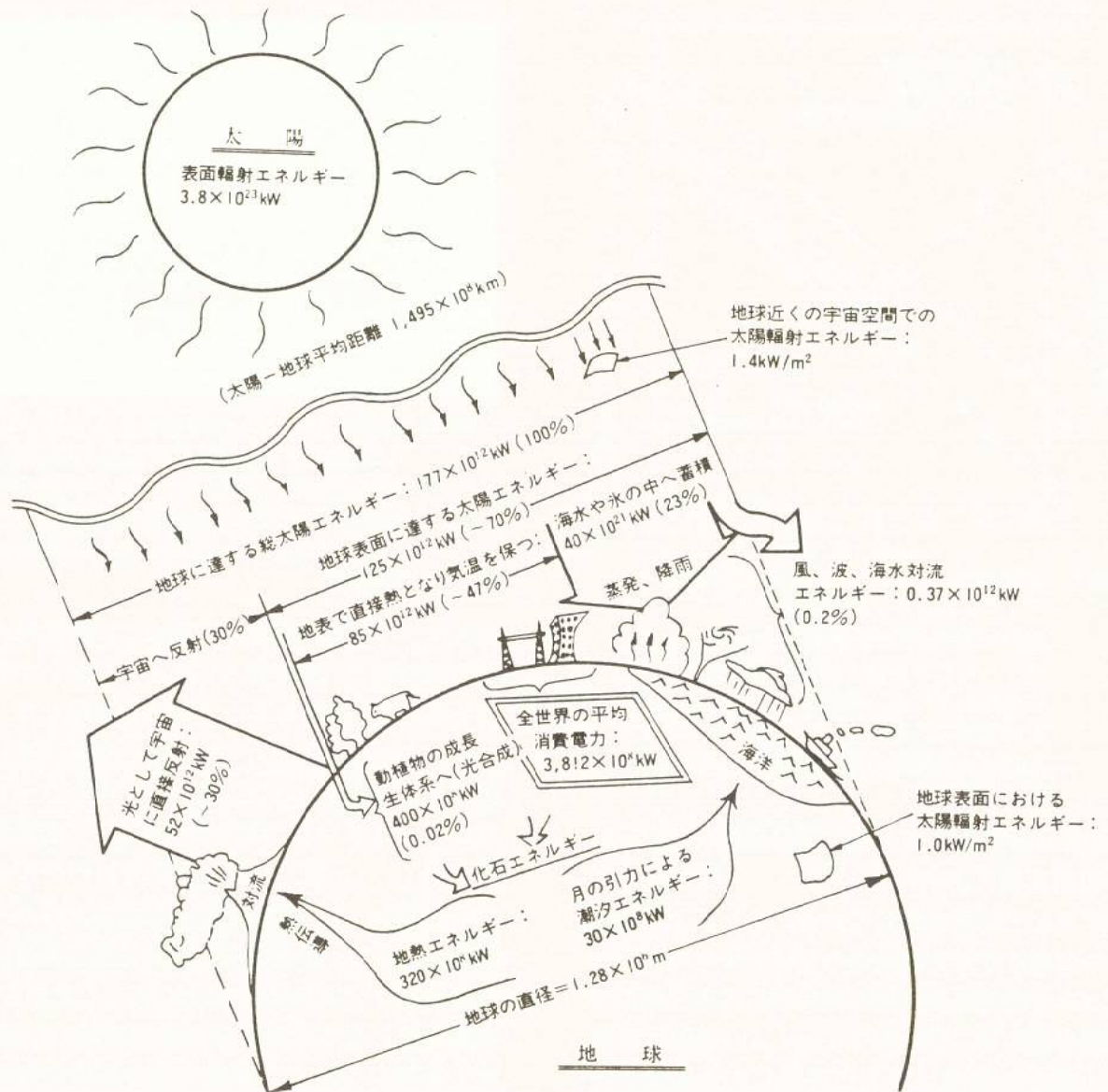


図2 地表で採集可能なエネルギーの99.98%までが太陽エネルギーによって出来たものである。風力、水力、波力は云うまでもなく、化石エネルギーも元をたせば太陽エネルギーの蓄積されたものである。そして、地球へ到達する1秒当りのエネルギーは、全世界の消費電力の数十万倍も大きい。これをクリーンな状態で電気エネルギーに変えようとするのが太陽光発電プロジェクトである。

での宇宙用電源を主流とする遠隔地用独立電源の時代を経て、ようやく地上用電源として実用の場を得るまでに成長してきた。つまり、光センサとして世に出た幼年期から、宇宙用電源中

心の少年期を経て、本格的な地上用電源をめざして一段と体力ができ上がった青年期を迎えたと言えることができる。図4は稼動しはじめた太陽房光発電所の一例を示したもので、吾が国でも



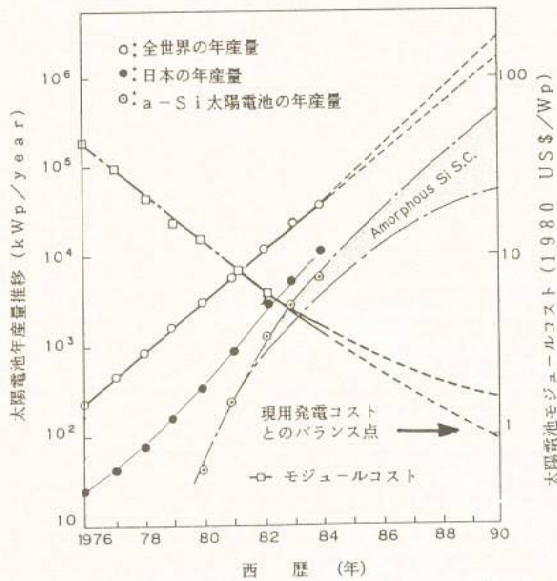


図3 全世界ならびにわが国の太陽電池モジュールコストの年次推移  
最近の数年間で年産量が2桁増し、モジュールコストは1桁以上の低コスト化に成功している。破線はいずれも近い将来の予測で、ちなみにモジュールコスト1\$/Wpで現在の電力用発電コストとの競合点を示す。

NEDO（新エネルギー総合開発機構）を中心に四国西条町のIMWpをはじめ、十数ヶ所の実験プラントが動き出している。そして、現在進みつつあるリボン結晶ならびにアモルファスシリコン太陽電池の技術が実用期に入る今後の10年間の間には、図3右下で示した1\$/Wpの原子力発電の発電コストに換算した太陽電池モジュール原価を軽くクリアーすると云う技術見通しがつけられて居る。また、米国の調査機関の調査結果によれば、現在の民生用マーケットから、今後、モジュールコストの低下とともに遠隔地用電源や充電器などの小規模分散型電源、そして、大規模発電所用えと、マーケットが拡大し、1990年代の中頃には現在のIC工業をしのぐ産業規模に成長すると予測されている。

### 3. 新素材—アモルファスシリコンの登場—

太陽光発電プロジェクトの中でも、太陽電池モジュールの低コスト化は、ボトルネック技術

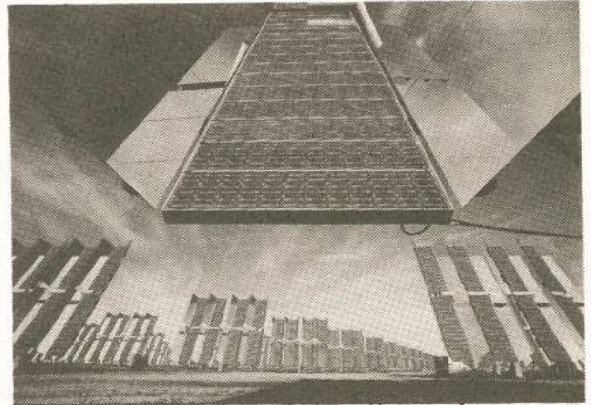


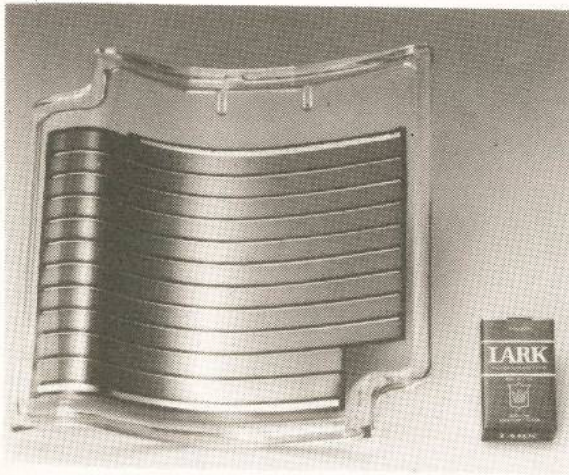
図4 1984年1月より営業運転に入っている7.2MWpカリサプレイン太陽光発電所、カリフォルニア州カリサプレインは日本の京都とほぼ同じ北緯35度に位置する（ARCO Solar社—Pacific Gas & Electric社提供）

とされ、リボン結晶や多結晶などの新材料の開発が進む中で、全く新しいチャンピオン半導体として、アモルファスシリコンが登場した。

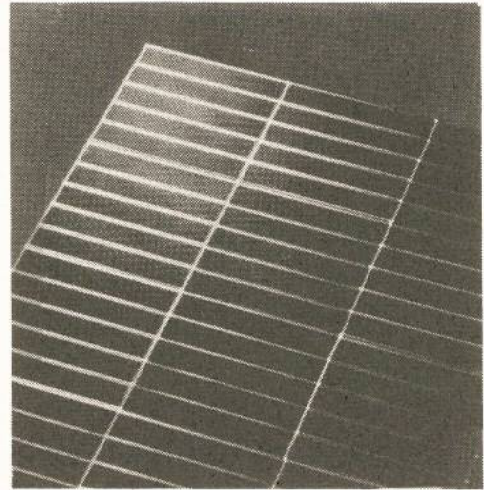
モノシラン（ $\text{SiH}_4$ ）をグロー放電分解して得られる水素またはフッ素入りアモルファスシリコン（以下 a-Si と略記する）は、価電子制御が効く、（P形、n形に染め分けができる）と云う従来、この種の材料では見られなかった特質に加えて、太陽光に対する光吸収係数が単結晶シリコンよりほぼ1桁大きい。したがって、太陽電池として必要なSiの量が結晶の1/800程度と極端に少なく、製膜や接合形成の温度が200~300℃程度と低く、連続自動化が容易である。さらに、アモルファス組織であるため図5に示すように、ガラスや金属板上に自由に、しかも大面積に堆積できるなど、太陽電池の低コスト化に適した多くの魅力を備えている<sup>6)</sup>。

こうした特質を生かした a-Si 太陽電池は100MWp/年という量産スケールでは、セルコストが50~70円/Wp、モジュールコストで100円/Wp以下でできると試算されている<sup>6)</sup>。この価額は同じ量産規模で試算した結晶太陽電池のコストより桁違いに安く、低コスト化へのチャンピオン材料として熱い注目をあびた。この分野の研究が、いかに急速に発展しているかを端的に表すデータとして、a-Si 太陽電池のエネ





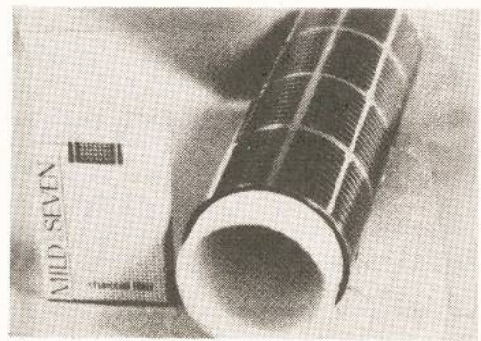
(a)ガラス基板を用いたa-Si 太陽電池瓦 (三洋電機提供)



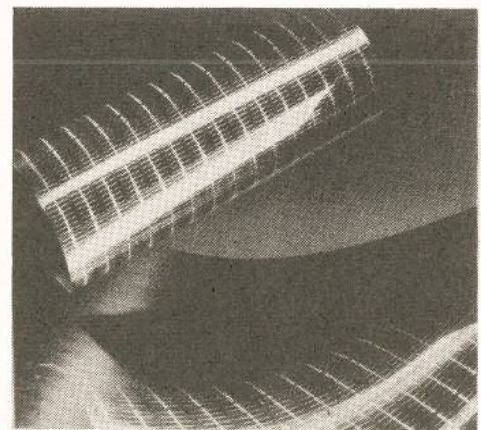
(b)セラミック基板を用いた太陽電池タイル (京セラ提供)



(c)NEDO サイズa-Si 太陽電池モジュール (三洋電機提供)



(d)ポリマーフィルム基板を用いたフレキシブル太陽電池 (帝人提供)



(e)ステンレス鋼を用いたフレキシブル太陽電池 (シャープE C Dソーラ提供)

図5 各種の低コスト基板に形成したa-Si 太陽電池 (ノンエピタキシャル成長, 大面積製膜, 低温気相成長などの特長をフルに生かした応用製品と云える)



ルギー変換効率の年次推移をプロットしてみたのが図6である。

a-Si 太陽電池は1976年に RCA 社からショットキーバリア形太陽電池が発明され、その翌年に、大阪大学から量産化に適した p-i-n 形構造で4.5%の効率達成が発表されて以来、全世界的な規模で研究開発が開始された。そして、その成果が実りはじめたのが1980年頃である。図6の変換効率の推移を見ても、1980~81年を境にしてきわ立った勾配の立ち上がりを示している。とくに、こうした効率の向上がアモルファスシリコンカーバイド (a-SiC:H)<sup>7)</sup>、アモル

ファスシリコンゲルマニウム (a-SiGe:H)、そして微結晶シリコン ( $\mu\text{c-Si}$ ) など、新素材の開発による新型太陽電池によって達成されたものであり、それらがすべて我国の技術で誕生したものであることも特記すべき事柄である<sup>8)</sup>。このほか、a-Si の堆積が低温成長できる特長を生かしたポリマーやステンレス薄膜を基板としたフレキシブル太陽電池、セラミックスを基板とした太陽電池タイルなどがサンシャイン計画の下で開発が進み、まさにこの分野では、吾が国が世界のリーダーシップを握っている<sup>4)</sup>。中でも、a-SiCを用いたヘテロ接合太陽電池は、

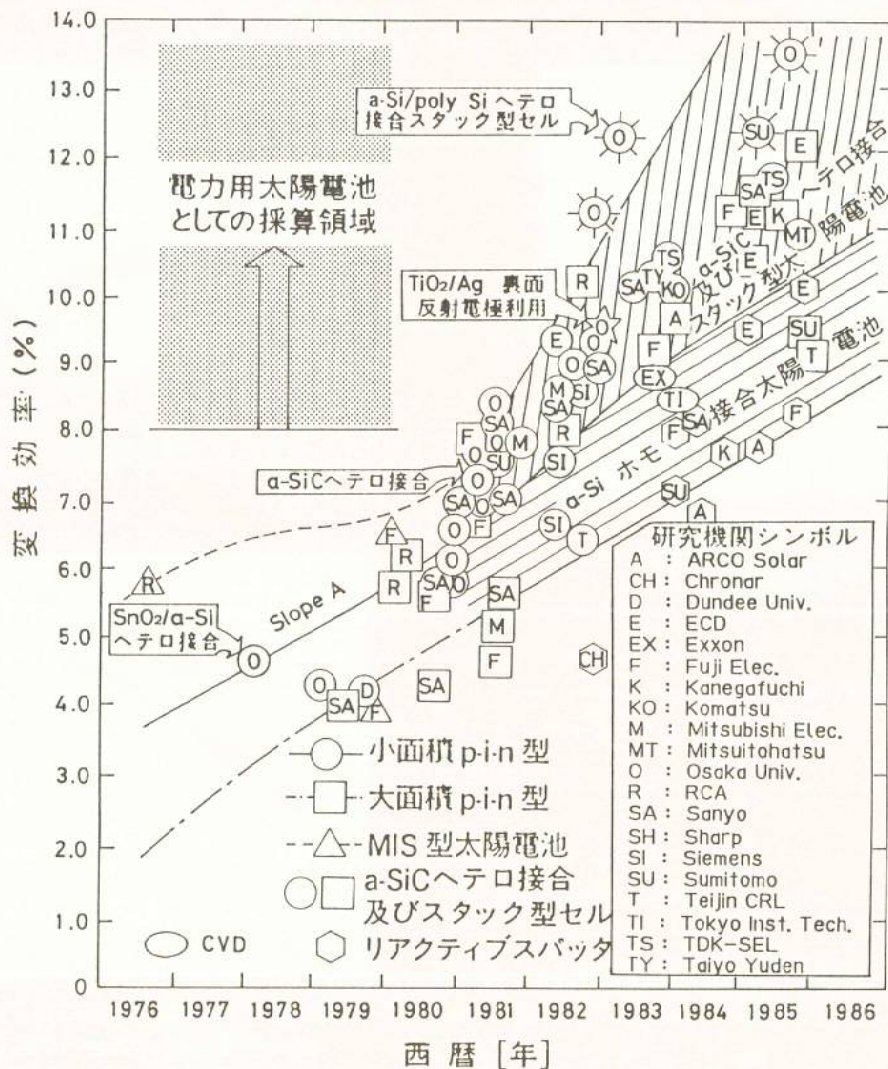


図6 アモルフィスシリコン太陽電池の変換効率の年次推移  
1980年を境としてa-SiC、 $\mu\text{c-Si}$ などの新材料の出現により効率改善が一段と進んだ。



電力応用を目指した採算効率とされていた8%の壁を1981年に世界最初に破り<sup>7)</sup>, a-Si 太陽電池を吾が国のサンシャイン計画をはじめ, 欧米諸国の国家プロジェクトへの組み込みへの動機づけに重要な役割りを果たした。

a-SiC/a-Si ヘテロ接合太陽電池をめぐる研究開発は, その後も順調に進み, 図6に示した通り, 1982年9月にはRCAが10.2%, 1983年に入って, 吾が国の三洋電機が11.5%, 富士電機が11.2%, TDK-SEL社が12.0%と時間とともに効率の記録が更新され, 吾が国で誕生しP型a-SiCを窓とするヘテロ接合が高効率のa-Si太陽電池の鍵技術として確固たる地位を占めるようになった<sup>4)</sup>. a-Si太陽電池の高効率化を目指した研究開発努力は, 現在でも引き続き新しい試みが重ねられ, これも1979年に大阪大学で発明されたスタック型太陽電池が, 全世界的規模で効率の記録が競われている. この分野では, 三菱電機, 住友電工, 米国ECD社などが, a-Si/a-SiGeスタック型の10cm<sup>2</sup>セルで9.6%以上, 小面積では12%以上(ECD社, 三菱電機, 住友電工など, a-Si/polyスタック型では13%以上(大阪大学)が得られ, 効率の点でも結晶シリコン太陽電池をしのぐ程度にまで技術が進んでいる<sup>8)</sup>.

a-Siをはじめ, a-SiC, a-SiGeなど, ここで述べた新しい半導体は, 先ず価電子制御が可能ならびに禁止帯幅の制御が自由に出来ると云う物性的特質に加えて, 製造技術上も結晶にはなかった数多くの特長をもつことから, カラーセ

ンサ, 撮像素子, TFT, 3次元デバイスなど, として広い応用分野が拓けつつある. そして, 21世紀の人類文明を背負う新エネルギー分野のチャンピオン材料としてなど, いま正に黎明期にあるオプトエレクトロニクスの将来にこの新素材にかける「夢はバラ色」である. 今後の成長を楽しみにして, 見守りたいものである.

#### 文 献

- 1) S. Manabe and R. J. Stouffer : J. of Geophysical Research, 85, No. 10 (1980) pp. 5529~5554
- 2) Y. Hamakawa : "Scientific American" in printing 255 No. 1 (1986)
- 3) たとえば, 浜川圭弘 "太陽エネルギーと応用物理", 応用物理44, No. 7 (1975) p. 713, 或いは, 浜川圭弘著 "太陽光発電入門" オーム社 (1980) p. 49
- 4) Hamakawa, Y. : "Recent Progress in Amorphous Silicon Solar Cells and Their Technologies", Proc. of MRS' 85 (San Francisco 1985). F\*-11, April
- 5) Ma Comber, H. L. : "Application Trends for Photovoltaics", 4th EC Photovoltaic Solar Energy Conf., Stresa (1982).  
・光産業振興協会 : 「太陽電池専門委員会報告書」(昭57-3).
- 6) 総合報告としては例えば浜川圭弘編著 "Amorphous Semiconductor-Technology & Devices" OHM/North Holland, Vol. 2 (1982), Vol. 6 (1983) Vol. 16 (1984)
- 7) Hamakawa, Y. and Y. Tawada : Int. J. Solar Energy, 1, (1982) 125.
- 8) Y. Kuwano : "Progress in a-s : Solarcells" Proc. of MRS' 86 (PabAlto) (1986) E-13.1