

太陽光発電の問題点と将来展望

Recent Progress in Solar Cells

高橋 清*

Kiyoshi Takahashi

1. はじめに

最近、原子力発電の問題点、及び化石燃料の燃焼による炭酸ガスの増大による地球の温室(Green House)化現象が騒がれているなかで、クリーン並びに無限エネルギーの太陽光発電は、自然エネルギーの筆頭として、再認識され、改めてその重要性が注目され始めている。

太陽光発電用の電子デバイスが太陽電池であり、太陽電池は既に電卓、腕時計などの民生用品の電源として、我々の生活の一部に入り込んでいる。

太陽電池の基本原理が発見されたのは、今から100年以上も前の事であるが、現在のSi太陽電池の基本構造が開発されたのは1954年のことであり、すでに変換効率6%が得られていた。ところが当時は、太陽電池はほとんど注目されず、変換効率の向上など、性能向上の努力は全くと言ってよいほどされていなかった。

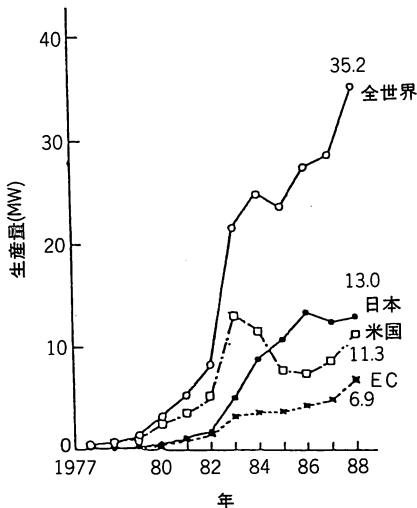


図-1 世界の太陽電池生産量推移 (フォトボルテック・エナジー・システムズ社による)

* 東京工業大学工学部電気・電子工学科教授
〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1

それから20年後の1973年に起った石油危機を契機に、新エネルギー源としての太陽光発電が注目を集め、1974年にはわが国のサンシャインプロジェクトを初めとして、世界各国で国家的プロジェクトとして急速に技術開発が進められた。これらの技術開発の大部分は、

☆ 太陽電池による発電コストの低減

に関するものであった。その結果当時は数万円/Wとした太陽電池も、現在は500円/W前後となり、民生用機器を初めとして、一部実用化され始めており、その生産量も図-1¹⁾に示すように年とともに増大の一途をたどり、昨年の世界総生産量は35MWに達し、所期の目的は一応達成された。

これまでの太陽光発電を中心とした新エネルギー開発は、石油価格の高騰に伴う石油代替エネルギーとしての色彩が濃かったが、先にも述べたように、最近では、CO₂などによる地球温室化現象を防ぐためのクリーンなエネルギー源としての期待が更に高まっている。

太陽電池をより広く電力用として利用されるようにするためには、更なる太陽電池の低価格化が必要である。これからの低価格化にはコストの低廉のみではそろそろ不可能のところまで来ており、マーケット(生産量)の拡大変換効率の向上が必要である。

太陽電池の価格は、他の電子デバイスと同様、生産規模に大きく依存する。現状では、まだ太陽電池の総生産量があまり多くないので(1988年の世界の総生産量は約35MWである)、コストは500円/W前後となっているが、将来は商用電源と競合できる水準(～100円/Wp)まで低コスト化が必要である。

また太陽光発電として捉えたとき、いわゆるシステムとしての価格の問題・発電電力の質の問題なども考える必要がある。

2. 太陽電池の種類とその特徴

太陽電池には、色々な種類がある。まず、太陽電池に用いる半導体材料の厚さにより

- ① バルク形
- ② 薄膜形

に分類される。

前者には、単結晶Siや高効率GaAs太陽電池などがある。薄膜の代表がアモルファスSi(a-Si)やCuInSe₂(CIS)太陽電池などである。薄膜形が可能かどうかは、用いる半導体材料の吸収係数に依存する。a-Siや、CISは可視域での吸収係数が大きいので、薄膜化に適した材料と言うことが出来る。

このように色々な太陽電池が開発されているのは、用いられる分野がそれぞれ異なるためである。

現在の技術レベルで応用を考えると、

- ☆ 単結晶, 多結晶Si太陽電池
 - : 主に高効率, 高信頼性が要求される独立電源システムや中規模の発電所
- ☆ アモルファスSi太陽電池
 - : 低コストが重要な民生機器用電源
- ☆ 化合物半導体
 - : 集光用システムや宇宙用電源

として適しており、この方面への研究開発がそれぞれ精力的に進められている。

3. 太陽電池の研究・開発目標

太陽電池技術開発の最終目標は、現在の商用電源との代替である。太陽光発電による発電コストは、セル製造コストと変換効率に大きく依存する。効率が低いと周辺コストが高くつくため、発電コストは高くなる。米国では、集中発電所を建設した場合の2000年の目標を

- ☆ モジュール効率: 15~20%

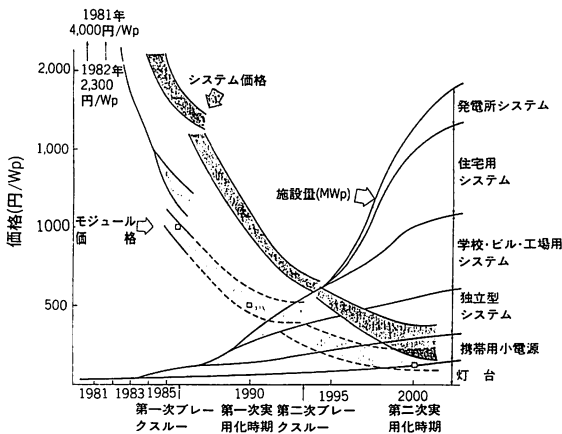


図-2 太陽電池の価格と普及の見通し (サンシャイン計画推進本部による)

☆ モジュール価格: \$45-80/m² においている。このレベルにまで開発が進めば、商用電源との競合が可能となろう。

わが国のような、屋根瓦発電などへの応用となると、米国の目標はそのまま適用できない。例えばモジュール効率10%の太陽電池を100円/Wpで作れば、商用電源と競合できる。従って国内では、低コスト化が期待される

- ☆ 薄膜太陽電池モジュールで10%以上 (100円/Wp),

また高効率を得られ易い

- ☆ 結晶系太陽電池モジュール効率20%以上 (150円/Wp)

の効率を得ることが、当面の大きな技術課題となろう。図-2²⁾に太陽電池の価格と普及の見通しを示す。

4. 結晶系Si太陽電池

この2~3年間に、Si太陽電池の変換効率は急速に向上した。小面積では22%以上、集光時には、28% (140倍集光) が得られている。

最近のSi太陽電池の高効率化の試みの多くは、電極構造や表面のパッシベーションを工夫し、さらに表面反射減少のための凹凸構造を採用することによって性能向上を図ったものである。

一方、結晶系Si太陽電池の低コスト化のための様々な新技術も開発されつつある。その一つが製造コストが安い多結晶Siウエハの開発である。現在、鋳造法による多結晶Si太陽電池でセル効率15% (10cm角) が得られている。また、多結晶Siウエハを高速で安価に製造する技術としてスピニングなどが開発されつつある。

結晶系Si太陽電池は効率が高く、しかも信頼性が高い (20年の寿命が保証されている) ため、現在、小規模システムから数100kWp程度の中規模システムに用いられている。

5. アモルファスSi太陽電池

効率面では、単結晶太陽電池ほどの性能が得られなくても、低コストで量産可能な太陽電池として薄膜構造のものが開発されつつある。薄膜の代表例がアモルファス太陽電池である。a-Si太陽電池は、1976年に提案されて以来、精力的に研究開発が進められており、すでに電卓、腕時計、ラジオなどの民生機器の電源として用いられている。しかし、a-Si太陽電池を電力用

表1 アモルファス太陽電池製造技術開発の目標

開発項目	1992年度目標
①高品質化	セル変換効率(10cm角) 12% 劣化率(1年後) 10%以内 (1cm角セル変換効率 13%)
②大面積化	30cm×40cmサブモジュール 変換効率 10% 劣化率(1年後) 15%以内
③高信頼性化	劣化率(1年後) 5%以内 初期変換効率(10cm角) 11% (初期変換効率(1cm角)12%)
④要素技術 i 複合透明導電膜	抵抗率 5Ω/□以内 透過率 85% プラズマ耐性 ±10%以内 (抵抗率, 透過率の変化) ヘイズ率分布 ±10%以内 基板サイズ 30cm×40cm コスト 50円/10cm角以下 (一工場当たり12万㎡ 需要時, 10MW 規模相当)
ii 狭バンド ギャップ材料	変換効率(1cm角) 4%以上 (5000Aのアモルファス シリコンフィルタ使用下)

但し、目標値は再現性を有する技術により達成すること。

に用いるには、

- ☆ 変換効率の向上、
- ☆ 信頼性の向上、
- ☆ 低コスト量産化技術の開発

など課題は多い。

表1³⁾にわが国のサンシャインプロジェクトにおけるa-Si太陽電池の1992年度の開発目標を示す。

高効率化は、ヘテロ接合の採用、凹凸透明導電膜基板の採用、i層の高品質化、p/i界面制御技術の進展などにより達成されたものである。

今後、a-Si太陽電池の変換効率を一層向上させるために、タンデム太陽電池が研究されている。タンデム化により小面積で15%以上の効率が得られるものと期待されている。現状では、a-Si/a-Si/a-SiGe 3層タンデム太陽電池で13.7%の効率が得られている。

アモルファス太陽電池実用化への大きな問題は、経年変化、すなわち劣化である。a-Si太陽電池に光照射すると、2～3月で1～2割の出力低下を生じ、以後安定化する。これを初期劣化という。現在、初期劣化の原因を解明している状態であり、アモルファス固有の問題であるとする説、不純物が劣化に関係しているなど、活発に議論されている。一方、初期劣化が起きないようにデバイス構造を工夫する研究も数多く行われている。特に、タンデム化により光劣化が著しく減少することが明かとなっている。これまでにa-Si/

a-Si 2層タンデム構造により初期劣化が数%のセルが得られている。

6. CuInSe₂ 薄膜太陽電池

アモルファスSiに次ぐ新しい薄膜太陽電池材料としてCuInSe₂ (略してCIS) が注目を集めている。最近、この材料が注目され始めたのは以下の理由による。

- ①アモルファスSiのような光劣化がなく安定な材料である。
- ②吸収係数が大きく、しかも、禁制帯幅が1.0eVと小さいため、タンデム太陽電池のボトムセルとして適している。

これまでに、CIS太陽電池は、スパッタ法、蒸着法、メッキ法などの手法で形成されており、3.5cm²のセルで14.1%の変換効率が得られている。

アモルファス太陽電池とCIS太陽電池を組み合わせるタンデム太陽電池を構成する例がARCO Solarから報告されており、約900cm²の大面積モジュールで12.3%の変換効率が得られている。この値は、薄膜太陽電池の中で最も高い値である。

アモルファスSiとこれら多結晶薄膜とのタンデムセルの変換効率のサンシャインプロジェクトにおける1992年目標値は

アモルファス/多結晶積層セル(10cm角)	14%
同上(30×40cm ²)	13%

である。

7. 化合物半導体高効率太陽電池

高効率という点では、GaAsならびにInP太陽電池が有望である。GaAsを用いた場合、集光用としては、206倍集光で29.2%が、また、宇宙用としても22.5%が得られている。

この分野における最近の話題は、Si基板上に形成したGaAs薄膜太陽電池とInPバルク形太陽電池である。前者では、18%の効率が得られており、軽量、低コスト化という点で注目を集めている。一方、後者は、耐放射線性がSiやGaAsよりも格段に強く、しかも20%以上の高効率が得られるということで注目を集めている。

この分野での最近の話題は、タンデム化による高効率化である。シングル接合形太陽電池の効率限界は、1 sunで25%程度と考えられる。

また、GaAs太陽電池と、Si太陽電池を機械的に張り合わせ、タンデム構造としたもので31% (347倍集

光)と、これまでのあらゆる太陽電池の中で最高の変換効率が得られている。

8. 太陽電池の高効率化

以上太陽電池の現状について一瞥したが、今後の太陽電池の実用化のためには、「変換効率の向上」がきわめて重要な研究課題である。そこで文部省科学研究費「エネルギー重点領域研究」では、物理の原点に遡ったアカデミックな立場にたつて、この太陽電池の高効率化に焦点を絞って1986年から研究を行っている。

エネルギー重点領域研究の高効率化の目標値は

- ☆ バルク型太陽電池 30%
- ☆ 薄膜型太陽電池 20%

である。

高効率化には、

- ① 太陽光を無駄なく吸収する――材料の選択
- ② 効率よく電子・正孔対を発生させる
――接合構造の最適化
- ③ 電子・正孔対を能率よく分離・取り出す
――電池構造の最適化

ことが必要である。

エネルギー重点領域研究でも、この3本柱で研究を進めている。またこれらの高効率化を実現すべく、新材料の探索、新プロセスの開発、ならびに接合構造の理論解析・最適設計等について精力的な研究を行っている。

以下エネルギー重点領域研究の現況等の概要を示す。

[バルク型]

高効率太陽電池用材料としては、III-V族化合物半導体、特にGaAsが有望であるが、現時点では、コストが高すぎる。そこでより安価なSi基板上に、有機金属気相成長法(MOCVD)で、GaAs等の化合物半導体太陽電池の形成を試みている。

また太陽光を広範囲のスペクトルにわたって能率よく吸収できるようにするため、波長分割型の多層構造として、AlInAs/InGaAs/InPを提案し、この組み合わせで30%の変換効率が得られることを理論的に明かにし、現在その実験的検証が進んでいる。

[薄膜型]

薄膜のタンデム構造として、a-Si/a-SiGeならびにCuInSe₂系太陽電池が有望であることを明らかにし、かつそれら薄膜の生成法として光CVD法が、従来型技術よりも有望であることが明らかにされている。

またa-Si/poly-c-Siのタンデム構造で、20%の変

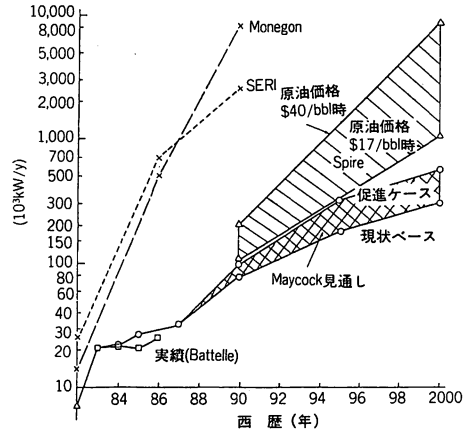


図-3 世界の太陽電池需要予測

換効率の達成が可能であることを理論解析の結果明らかにし、その実現のためにグラフィオエビタキシーの導入が提案されている。

今後の本研究の目標は、最適材料の設計・創製を行い、変換効率を

- ☆ バルク型太陽電池 35%
- ☆ 薄膜型太陽電池 25%

を目標に研究を断続する予定である。

すなわち、これまでの新材料の探索は、既存の材料を用いて行っており、従って、最適材料の選択の自由度には限度があり、必ずしも最適材料の組み合わせが出来ない。そこで今後は、固体物理の基本に立ち戻って、人工格子(超格子)の思想を取り入れた最適材料の創製を行い、変換効率をより一層向上させようとするものである。

9. 太陽光発電システム

以上のように最近の太陽電池の変換効率も向上し価格も500円/Wと、電力用としての実用化も近いことが伺える。既に米国では1984年に7 MWの太陽光発電システムが、わが国でも1986年には、1 MWの太陽光発電システムが稼働している。

太陽光発電システムとしての問題点は、太陽電池モジュール以外のコストである。このモジュール以外のコストをBOS (Balance of System) コストと呼んでいる。太陽光発電システムが商用電力として競合できるのは、勿論発電規模によって大きく変わるが、一つの目安としてシステム全体のコストは500円/W前後であると言われている。BOSコストがその内の半分を占めるとすると、太陽電池のモジュールコストは、

250円/Wになり、現在の価格を半分にする必要が
ある。

今後の太陽光発電の将来を展望した場合、太陽電池のマーケットサイズが100MW_pに達する1990年前半までは、独立分散型システムが応用の中心になると思われる。この目的のためには、信頼性が高く、しかも比較的高効率が得られる単結晶Si、多結晶Si太陽電池が多用されるものと考えられる。一方、1990年の後半に中規模～大規模発電システムに太陽電池が用いられる頃になると、アモルファスを中心とした薄膜太陽電池が急速にのびてくると考えられる。

さらにマーケットサイズが増大し、個人住宅用電源として用いられるようになると、価格も100-200円/W_pまで低下し、現在の商用電源と競合するようになると期待される。2000年を過ぎた頃には、新築住宅の何%かに薄膜太陽電池が設置されていると思われる。

最後に、太陽電池の世界における需要予測を図-3⁴⁾に示す。

10. 今後の展望

太陽電池の低コスト化は、技術的にはそろそろ限界

が見えてきたようにも思われる。これからの低コスト化は、マーケットの拡大化が必要であろう。しかし太陽光発電の大きなマーケットは、赤道直下あたりの開発途上国が多く、それには更に低コスト化が必要である。これがコンピュータなどとの開発の本質的な違いで、太陽光発電のマーケット拡大・ひいては太陽電池の低コスト化の大きな障壁となっている。

尚太陽光発電は電力としての「質」は決してよいとはいえない。今後は太陽光発電・風力発電・波力発電など各種自然エネルギーとのハイブリッド発電を積極的に利用すべきではなからうか。この地球を「Green House化」ではなく「Green Earth化」にするためにも。

参考文献

- 1) 桑野幸徳：太陽エネルギー，15巻，5号，p.24，(1989)
- 2) 電気学会技術報告「薄膜太陽電池の開発動向」(II部) 第285号，p.5，(1988)
- 3) 斉藤俊樹：サンシャインジャーナル，10巻，2号，p.14，(1989)
- 4) [2]，p. 51
- 5) [3]，p. 71

資料頒布について

下記の資料の在庫がございますので、御希望の方は事務局までハガキかTELにてお申し込み下さい。

- * 研究資料No. 25「地球環境問題とエネルギー・資源」(平成元年2月15日講習会)
.....東大 茅 陽一，京大 山元 龍三郎ほか.....B5判 59頁，2,000円(送料共)
 - * 国際エネルギーシステム・経済シンポジウム前刷集(平成元年10月25日(水)～27日(金))
.....内外の研究発表約90件収録.....A5判 489頁(英文)，10,000円(送料共)
 - * エネルギー貯蔵システムに関するヨーロッパ調査報告書..... B5判 93頁，5,000円(送料共)
- (申込先) 〒550 大阪市西区京町堀1-9-10(帽子会館) エネルギー・資源研究会宛
TEL 06-446-0537. FAX 06-446-0559
- (払込方法) 1. 現金送金， 2. 郵便振替.....大阪3-302948
3. 銀行振込.....大阪銀行御堂筋支店(普) No. 1024046 エネルギー・資源研究会名義

(注) 払込みの際、消費税3%を加算して下さい。