

特集

エネルギー・資源の将来展望

太陽光発電の現状と展望

Recent Status of Solar Photovoltaic Generator

高橋 清*

Kiyoshi Takahashi

1. はじめに

最近、代替エネルギーの筆頭として太陽光発電が注目されている。本稿では太陽光発電の開発の現状、ならびに最近の進歩について触れてみたい。

2. 太陽光発電の特徴

代替エネルギーとしては、いろいろ考えられるが、太陽光発電は、エネルギー供給面で表1のような特長ならびに問題点がある。

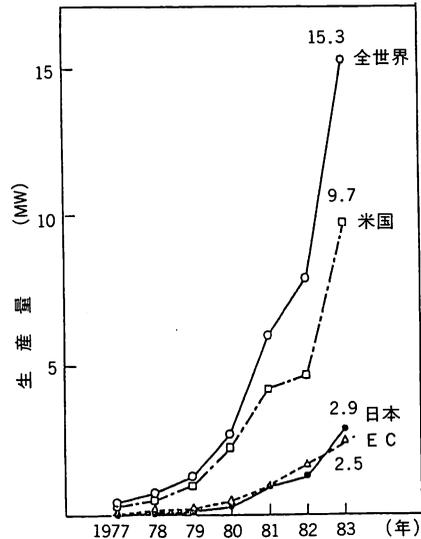
表1 太陽光発電の特長ならびに問題点

特長	① 可動部分がなく、無公害発電器
	② 保守が容易で、自動化、無人化が可能
	③ 必要な電力が、その場で発電可能で、送電線フリーのオンサイト発電器
	④ デッドスペースを利用して発電可能
	⑤ 寿命が半永久的
問題点	① 光の当たっているときのみ発電
	② 大電力には大面積が必要
	③ 現時点では発電コストが高価

太陽光発電の実用化に大きく立ちはだかっていたのが“発電コストが高価である”ことであった。しかし1974年にスタートした我国のナショナルプロジェクト——サンシャインプロジェクトの、官・民・学一体の研究開発をはじめ、世界各国の開発プロジェクトの成果として、現在はその価格も1,000~1,500円/W_pで、10年前の1/10以下になった。その結果として太陽電池の生産量（需要）も図-1に示すように、急増の一途をたどり、1983年には、全世界で15MW_pに達している。

3. 我国の太陽光発電開発状況

太陽光発電の開発は、米国をはじめ各国でナショナルプロジェクトとして行われている。我国でも、1974

図-1 世界の太陽電池生産量推移¹⁾

年から、サンシャインプロジェクトの一環として充足した。

図-2に、我国のサンシャインプロジェクトにおける太陽光発電実用化のための長期計画を示す。この開発目標にしたがって現在、官・民・学一体の開発が行われている。

以下では、太陽光発電素子である太陽電池について

- ① 結晶形Si太陽電池
- ② アモルファス太陽電池
- ③ 化合物半導体新形太陽電池

にわけて、現在の開発状況に触れてみたい。

4. 結晶形Si太陽電池

現在実用化されている単結晶Si太陽電池の製造工程は、次の4工程に大別できる。

- ① Siの精製
- ② Siの薄板形成
- ③ 素子形成
- ④ パネル形成

* 東京工業大学工学部電子物理工学科教授

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1

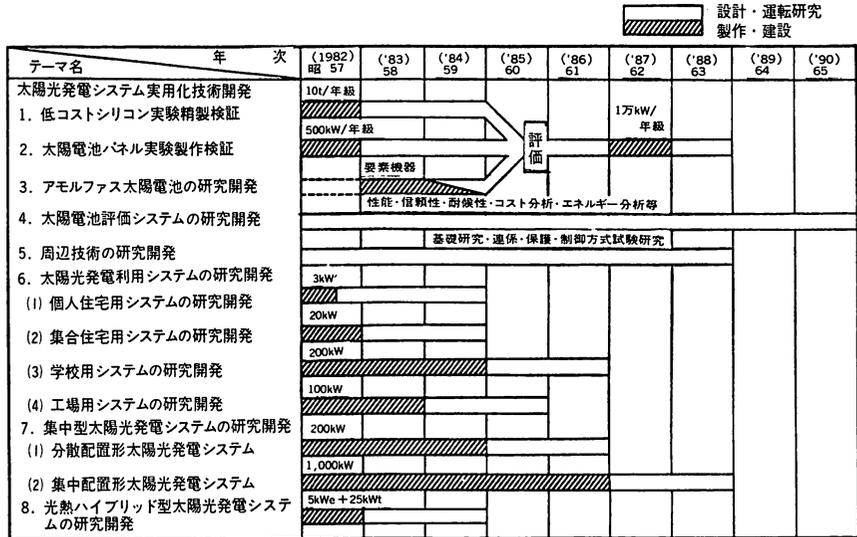


図-2 長期研究開発計画図(サンシャイン計画)²⁾

1) 珪石を純度98%の金属Siに還元し、その後何回となく溶解・凝固をくりかえして高純度化されて (Siの融点: 1,412°C), 最終的に 99.9999%以上の純度をもつ多結晶Siにする。金属Siは 1 kg当たり数 100 円であるが、精製後に高純度多結晶Siでは数万円となる。

2) 高純度多結晶Siは、再び溶かされて、引上げ法によって長さ 1 m, 直径10cm程度の単結晶Siが引き上げられ、これから厚さ 300 μmのSi薄板が切り出される。この場合切りくずが多く、単結晶インゴットの 1/2程度しか利用できない。

3) 切り出されたSi薄板に、熱拡散法などによってpn接合が形成される。表面、裏面に電極をつけて、さらに表面反射防止膜をつけ、太陽電池素子が完成する。

4) この太陽電池素子を、数10枚直列に接続して、パッケージに封入し、太陽電池パネルが完成する。

これらの製造プロセスは、手間ひまがかかり、加えて電力を多量に消費するプロセスを含んでいる。また材料の利用効率も 1/2と極めて低いため、コスト高になってしまう。

低コスト化として、

- ① キャスティング法による多結晶Si
- ② リボン結晶

が、結晶形Siには行われており、図-2に示したサンシャイン計画のテーマ名 2 項の500kW/年のパネル実験製作検証は、これらの結晶形で行われている。

5. アモルファスSi太陽電池

アモルファスSi太陽電池の代表的構造を図-3に示す

が、全体で 1 μm 以下の薄膜形である。現在電卓にしている太陽電池は、大部分がこのアモルファスSi太陽電池である。

5.1. アモルファス太陽電池の特長

単結晶Siと比較して、アモルファスSi太陽電池が期待されるのは、以下の理由による。

- (1) 薄くてよい——材料の量が少ない。

光吸収係数が大きいので、Siの厚さが極端に薄くできる。例えば単結晶を用いて太陽光を十分吸収させるには、約200 μmの厚さが必要である。ところがアモルファス状態になると、わずか1 μmの厚さで十分である。

- (2) 製造工程が単純である。

アモルファスSiは、通常プラズマCVD法によって形成される。真空排気装置のついた反応器にSiH₄ガスを流して、SiH₄を高周波グロー放電などによって分解して、Siを基板上に堆積させる。SiH₄中にPH₃のガスを混合してn形が、B₂H₆のガスを混合するとp形アモルファスSiが得られる。

このように製造工程が極めて単純である。

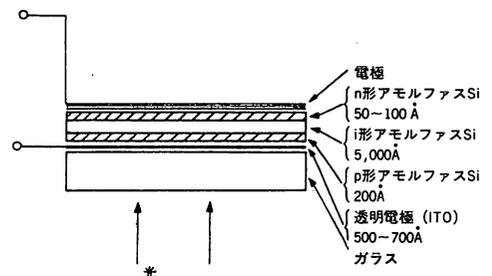


図-3 アモルファスSi太陽電池の構造

(3) 材料の量が極めて少ない。

すでに述べたように、太陽電池に必要な材料の厚さも1 μ m前後と薄くことはもちろん、結晶のように切り出す必要がなく、材料のロスが極めて少ない。図-4は

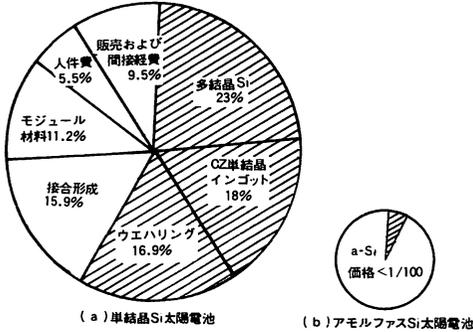


図-4 Si太陽電池モジュールの原価構成

このようすを単結晶Si太陽電池と比較して、概念的に示したものである。

(4) 製造に要する電力が少ない。

前述のように、ガス分解のみでアモルファスSiが形成でき、分解に要する放電電力は、電極10cm程度の大きさでも、わずか数Wである。基板温度も250～300℃である。結晶Siの場合の1,412℃以上にして何回も溶かすことと比較すると、必要電力は極めて少ない。

製造に要した電力を太陽電池から得られる電力でまかなうとした場合、何年で元を取るかを“energy pay back time”という。図-5に示すように、単結晶Siでは、10～15年かかるが、アモルファスSiでは、わずか1年たらずである。これは極めて重要な事柄である。いくら低コストになっても、太陽電池の発電電力のほとんどが太陽電池製造のために使われたのでは、何の救いにもならないからである。

(5) 基板の種類を選ばない。

アモルファスSiは、基板の種類にかかわらず、300℃までの温度に耐えるものならば、どんな基板材料の上にも堆積させることができる。現在よく用いられているのは、ステンレス板とITO (Indium Tin Oxide: 酸化インジウムスズ—透明導電膜) ガラス板である。セラミックス板、あるいは高分子薄板が用いられる場合もある。ガラス板を用いた場合、このガラスをパネルのパッケージの保護ガラスとしてそのまま使える。またステンレス板やセラミックスも、ハウジングの一部として利用できる。すでに屋根ガワラ状のアモルファスSi太陽電池や、セラミック上につけた発電タイルなどの試作も行われている。

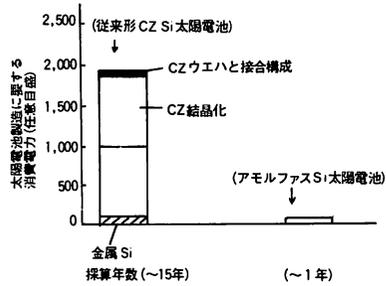


図-5 太陽電池製造に要する消費電力

5.2 アモルファス太陽電池の高効率化

アモルファスSi太陽電池は、前述のような利点がある反面、当初エネルギー変換効率が低く、実用化に耐えるか否か疑問視された。ところが最近では、受光面積1.0cm²で約11.5%、10cm角で9.5%の変換効率を得られ、実用化に十分耐え得る特性が得られている。図-6に変換効率の年次推移を示す。

現在は、更に高効率化を目指して、タンデム構造形が研究されている。タンデムセルでは、数多くの薄層を重ね合わせるという技術的難しさは残るが、今後の開発により、15%の変換効率が期待されている。

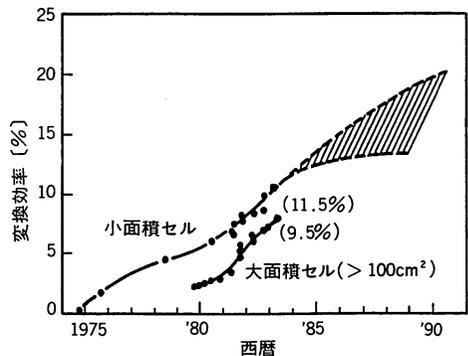


図-6 アモルファス太陽電池の変換効率の推移

5.3 アモルファスSi太陽電池の今後の課題

(1) 変換効率の向上

いままではアモルファスSiの実用化に対する最大の障壁になっていたのが、この効率であった。ところが図-6でも示したように、どうやらこの問題はクリアしつつあり、今後の課題は次の事項に移行しつつある。

(2) 寿命

現段階では、アモルファスSi太陽電池の寿命が本当にどれほどか？ということに対しては明確な返答が得られていない。

アモルファスSiには水素が10～20%含まれており、

Siと水素の結合がアモルファスらしからぬ優れた性質を引き出している。ところが、このSiと水素の結合は300°Cを超えると壊れてしまう。夏の日射しの強い炎天下には、モジュールの温度は70°Cを超える場合がある。このような高温下で長年月さらされたときのデータが今のところない。しかし実験室的には、寿命に関しては楽観的な見通しが得られている。

(3) 堆積速度

アモルファスSi太陽電池の将来を左右するものに、堆積速度がある。たとえば1年間で100万kw = 10^9 Wの発電所を建設すると考える。これに必要なアモルファスSiの面積は、変換効率10%と見積り、単位面積あたりの発電能力 = 100 W/㎡とすると、 10^7 ㎡となる。ここで1年間毎日24時間製作し続けると、1時間当たりの処理面積は約1,100 ㎡となる。1台の装置で1時間1㎡処理すると仮定すると、製造装置がなんと1,100台必要になる。これからは変換効率を高く保ちつつ、堆積スピードのアップが大きな課題となろう。

(4) 基板の低価格下

アモルファスSi太陽電池の価格は、基板に用いるITOガラスの値段で決まるといわれている。今後はこの基板をいかに安価に提供できるかが重要なカギになる。

6. 化合物半導体新形太陽電池

この分野は主に米国を中心にして研究が進められている。化合物半導体太陽電池はII-VI系およびIII-V系に分類される。II-VI系太陽電池の目標はアモルファスSi系と同様、高効率薄膜太陽電池の実現であるが、III-V系の場合は、集光用あるいは宇宙用を目指した効率30%のタンデムセルの実現が目標となっている。

6.1 II-VI系薄膜太陽電池

現在、II-VI系薄膜太陽電池開発の主力は、CuInSe₂およびCdTeに注がれている。CdS/Cu₂S系と異なり、これらの薄膜太陽電池は信頼性の問題がないといわれており、主に膜形成法や高効率化技術が研究対象となっている。これまでにCuInSe₂で11%、CdTe系でも10%を超す効率が得られている。CuInSe₂、CdTeいずれも将来の~100円/Wpのモジュール価格を目指す材料であるが、いわゆるsingle junctionのみでは、効率の限界は12%と見られている。CdS/CdTeとCdS/CuInSe₂などから成るmulti-junction 1cm²のセルで15%の効率が期待される。

6.2 III-V系高効率太陽電池

GaAs系太陽電池で、20%を超す高効率を得られる事は良く知られており、従来の液相成長技術はすでに完成の域にある。この分野における課題は、主に集光動作を目指した変換効率30%のタンデム太陽電池の実現である。この目的のために有機金属熱分解法などの気相成長法が開発されつつある。

結晶材料でタンデム化するには二つの考え方がある。第一は、禁制帯幅の異なる材料で別々に太陽電池をつくり、後で貼り合わせる方法である。

第二にはモノリシックに材料の異なる太陽電池を積層する方法である。しかしこのような場合、格子定数の違いから多くの欠陥が発生し、素子特性の劣化をまねくのが普通であり、欠陥発生をいかに迎えるかが課題となる。Si上にGaAs太陽電池を形成する場合には、界面にGeの中間層を設けると欠陥密度が 10^{10} から 10^7 /cm²まで減少する。Si上に形成したGaAs np形太陽電池で14%の効率が得られている。また格子不整合による欠陥を防ぐため歪超格子を導入することも提案されている。

7. 太陽光発電システム

以上太陽光発電素子である太陽電池について述べたが、発電システムとしてとらえた場合、残された問題がないわけではない。例えばエネルギー貯蔵の問題、直流—交流変換などである。

本稿では、これらシステムについては、紙数の関係で割愛するが、今や太陽光発電は、電力用として大きくはばたきつつあり、すでに米国では数10MWの太陽光発電システムが完成している。

太陽光発電は、“価格が高い。新しい技術革新がないと実用化は無理であろう。”と考えられていた。しかし今やこの表現は過去形になりつつある。さらにこの表現が過去完了になる日も、間もないことと信じたい。

引用文献

- 1) Strategies Unlimited社の調査による。
- 2) 高橋清, 小長井誠, “アモルファス太陽電池” 昭晃堂, p. 8, (1983)