

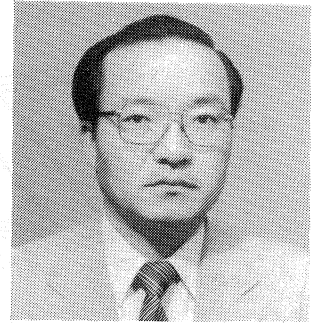
■ 解 説 ■

太陽電池の現状と将来展望

R & D Status and Future Prospects in Solar Cells

武 田 行 弘*

Yukihiro Takeda



1. はじめに

太陽電池は、太陽エネルギーを直接電気に変換する半導体素子である。太陽電池が最初に作られたのは1954年であり、すでに30年以上の歴史を有する。しかし、非常に高価なことから、1973年の第一次オイルショックまではあまり我々の身近なものではなく、灯台、気象観測用テレメータ、無線中継基地などの電源や人工衛星への搭載など特殊用途にしか使われてこなかった。しかし、前述のオイルショックが契機となり、石油代替エネルギー源として注目され、低コスト太陽電池の開発が各国で国家プロジェクトとして行われるようになった。

我が国では、昭和49年7月にサンシャイン計画が発足し、この中で当時1ワット当たり2～3万円と非常に高価で、前述のような特殊用途にしか利用されていなかった太陽電池を一般電力用の発電設備として既存のエネルギー源と競合できるレベルまでコストダウンし、かつ信頼性の確保を図るべく太陽電池の製造技術の開発に取りくむようになった。

サンシャイン計画では、電力用太陽電池としての実用化を目指し、結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池各々について国立研究所、大学、企業の研究所が一丸となって基礎研究、応用研究、実用化研究の有機的連携を保ちつつ研究開発を実施している。具体的には、結晶系太陽電池においては、基礎研究として薄膜シリコン太陽電池、酸化すず(SnO₂)太陽電池の研究を進めるとともに、実用化研究として、太陽電池用シリコン製造技術、シリコン基板製造技術、PN接合・電極形成技術、連続自動化によるパネル作成工程からなる年産500kW級の連続一貫生産技術の開発が進められてきた。一方、結晶系に比し、研究開発の歴史が浅いアモルファス系太陽電池については、

昭和53年度より技術開発を加速化させ、アモルファスシリコンの諸物性、理論などの基礎研究分野から、モノシランガスの低コスト製造技術やアモルファス太陽電池の高品質製造技術、大面積製造技術、高能率製造技術、高信頼度製造技術などの実用化研究分野まで、大学、国立研究所、民間企業の総力を結集した研究体制をとって、研究開発を推し進めている¹⁾。

これらの結果、結晶シリコン太陽電池については、サンシャイン計画発足当時2～3万円/Wであったものが、現在は1,000円/Wを下廻るところまで開発が進み、発展途上国等における独立電源システム用としては、ある程度実用化に供せるような段階になって来た。また、アモルファスシリコン太陽電池については、我が国は世界的に最高の技術水準にあり、民生用としてはすでに実用化されるとともに、電力用としても多くのモジュールが実験用発電システムに使用されるようになり、効率や信頼度の面で飛躍的な進歩がみられるようになった。

2. 結晶シリコン太陽電池

2.1 開発の現状

太陽電池が最初に作られたのは1954年で、シリコンの単結晶ウエハを基板としたシリコンPN接合によるものであった。現在、電力用として使用されているものはほとんどこの接合型結晶シリコン太陽電池である。図-1および図-2に最も一般的なPN接合型太陽電池の構造と製造工程の例を示す。

太陽電池を作るには、厚さ0.3～0.4mmの表面活性化処理されたP型結晶ウエハを熱拡散法等の方法により、その表面に非常にうすい0.3～0.4μmのn層とさらに反射防止膜を設けた後、表面のn層には光をあたえるよう格子状電極、裏面のP型基板には全面電極を印刷、焼成によって施している。太陽光発電システムではこのようにして作られた太陽電池素子(セル)を数十枚まとめてパッケージ組み立てして太陽電池モジュール

* (財)電力中央研究所電力システム部情報制御研究室室長

〒201 東京都狛江市市岩戸北2-11-1

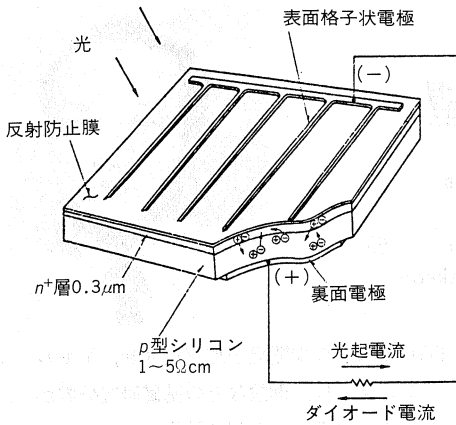


図-1 PN接合太陽電池の構造の一例とその動作

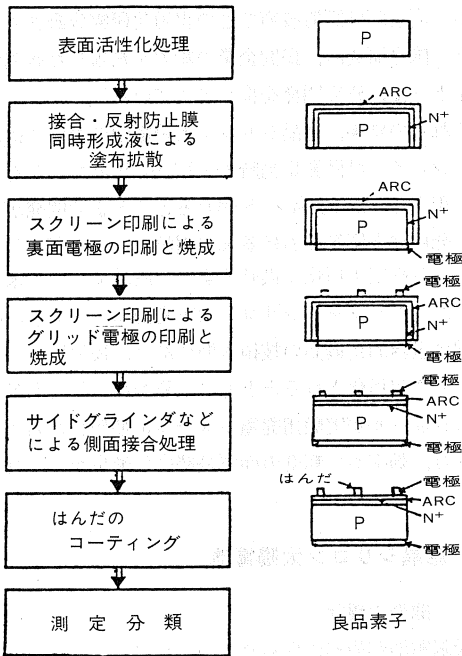


図-2 シリコン太陽電池の製造工程の一例

ルとしたものを単位として使用される。

このようにして作られる太陽電池は、サンシャイン計画の発足時(1974年)は、1ワットあたり2~3万円もしていた。しかしながら、石油代替エネルギー源として、太陽電池を電力用に実用化するためには、少なくとも1ワットあたり数百円程度までに下げる必要があった。

太陽電池の低コスト化のためには、太陽電池用シリコン原材料、太陽電池基板、セル製造プロセスおよびモジュール用材料とモジュール製造システムなど太陽電池製造をめぐる全技術分野にわたる研究開発が必要

である。結晶系太陽電池モジュールのコスト構成は、モジュール価格の約50%がシリコン原材料とウエハ加工費で占められているといわれており、太陽電池の低コスト化には、原料シリコンおよび基板加工工程における低コスト化技術の開発が重要な要素である。PN接合形成にはコストの約20%、残りはパネル組立費、間接費などであるが、PN接合形成およびパネル組立工程においては、製造工程の連続自動化技術を開発することによって低コスト化を図る必要がある。

サンシャイン計画では太陽電池の低コスト化技術の開発を目指し、基礎研究として薄膜シリコン太陽電池の研究を進めるとともに、実用化研究として、図-3のように太陽電池用シリコン製造技術、シリコン基板製造技術、PN接合・電極形成技術および連続自動化によるパネル作成技術工程から成る年産500kW級の連続一貫生産技術の開発研究を進めてきた。

その結果、原料工程でのトリクロロシラン製造では、トリクロロシラン年産200t(SOGシリコンか粒10t相当)規模の実験装置が開発され、これにより後工程である水素還元工程で発生する副生塩素をリサイクルしつつ、トリクロロシランを製造する技術の有効性やトリクロロシラン精製原単位の向上による低コスト化条件などが確認された。また次段階のトリクロロシラン水素還元工程については、SOGシリコンか粒年産10t規模の試験装置の開発が行われ、これにより流動床下でトリクロロシランを水素還元する技術の有効性が検証されるとともに、得られたシリコンか粒は、表1に示すように比抵抗、ライフタイム、精製シリコン直径とも、サンシャイン計画でかかげた昭和60年度中間目標を達成するものとなった。

次に基板工程であるが、太陽電池基板は従来チョコラスキー(CZ)法で得られた単結晶インゴットを厚さ0.5mm程度の薄板にスライスしたものが用いられている。CZ法では、石英ルツボ中に熔融されたシリコン融液の液面へ種結晶シリコンを浸して、ゆっくり回転しながら徐々に引き上げ円柱状の単結晶を得るものである。したがって、この方法では結晶成長速度に限界があることや円形基板であるためパネルにする場合の面積利用率に制限があること等の問題点が指摘されている。サンシャイン計画では、これら問題点を解決するためCZ法に代わって、キャスト法とリボン法(どちらも年産250kW相当規模)の開発研究を進めている。具体的には、キャスト法による基板製造技術開発については、熔融したシリコンを石英等のルツボの中

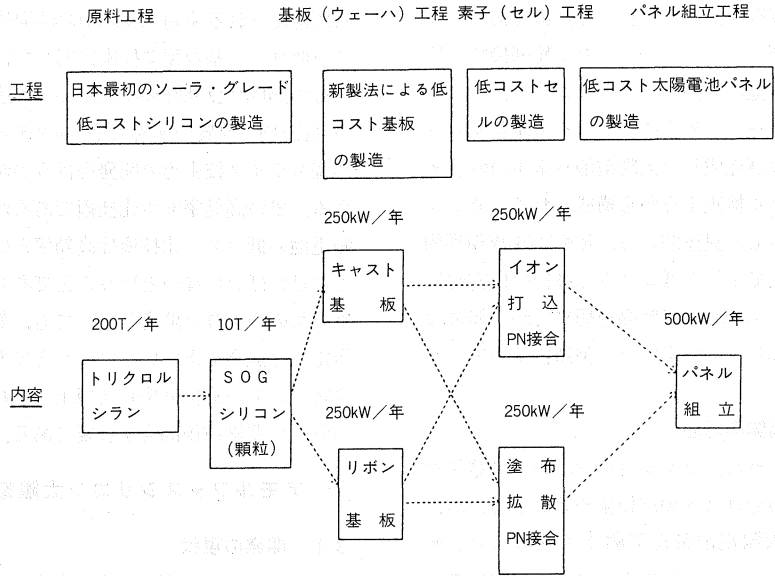


図-3 太陽電池製造実験ラインの工程概要(規模500kW/年)

表1 SOG シリコンか粒の昭和60年度中間目標の達成度合

	目 標	達 成
比抵抗	(P型) 30 Ω cm (N型) 10 Ω cm	30~40 Ω cm 10~20 Ω cm
ライフタイム	10マイクロ秒程度	10~20マイクロ秒
精製シリコン直径	0.8~1.5 mmのか粒	0.8~1.5 mmの丸味を持つ 安定した粒径分布のか粒

で固化させるキャスト技術、およびこれを切断するスライス技術の研究が行われ、キャスト技術では開発目標である10cm角基板に対して、19cm角の基板を製造する技術が開発された。また、スライス技術では従来のIDソーに比べ生産性が高く、寸法精度も優れたマルチワイヤーソーによるスライス技術を開発中である。一方、リボン法による基板製造技術開発については、溶融シリコンをキャピラリダイを用いて連続して引き上げながら固化させる技術、およびこれらを切断する高速切断技術の開発が行われた。この結果、リボン法による技術開発では、キャピラリダイ周辺の温度分布制御およびアニール機構の開発により幅10cmの連続引き上げが可能となるとともに、振動フィーダによる原料シリコンの連続供給により2cm/分の高速引き上げが可能となった。また、スライス技術開発では、レーザー光による基板切断技術が開発された。

第3のセル化技術であるが、本技術は、前工程で製作されたキャストおよびリボン基板にPN接合形成、電極形成等をほどこし、太陽電池セルとして仕上げる

技術であり、PN接合形成工程、電極・反射防止膜形成工程から構成される。具体的には、セル量産化技術の確立を目標にイオン打ち込み法による乾式PN接合法および塗布拡散法による湿式PN接合法(どちらも年産250kW相当規模)の2方式の開発が行われた。その結果、乾式PN接合法においては、低温でよくドーピングできるイオン打ち込み装置を開発するとともに、Ti/Sn系金属錯体塗布とAg印刷により電極形成の連続自動化を図る技術が開発された。また、湿式PN接合法においては、高速塗布拡散装置と金属ベルト式熱処理炉の開発により連続自動化を達成するとともに、スクリーン印刷法と赤外線焼成法とにより短時間電極形成技術が開発された。以上により、2方式各々のセル量産化技術が確立され、乾式法ではキャスト基板で最高11.2%(平均9.8%)、リボン基板で最高9.6%、湿式法ではキャスト基板で最高11.2%(平均9.6%)、リボン基板で9.0%の変換効率が達成された。

最後のパネル組み立て技術であるが、本技術は前工程(乾式PN接合法、湿式PN接合法)で製造された

太陽電池セルを接続し、パネル化する技術であり、太陽電池セルを直列にリード接合するセル配列接続工程、接続された太陽電池に表面ガラス、フレーム、テトラシーラ（防水シーラ）等を取り付けパネル化するパッケージ工程および完成した太陽電池パネルの性能チェックを行うパネル検査工程から構成される。サンシャイン計画において、具体的には、年産500kW規模相当のパネル組み立て工程の低コスト化技術の研究が行われ、10分/パネルの連続自動高速組立てが可能になるとともに、約95%の高い歩留りの製造技術が確立された。

2.2 今後の技術開発課題

前項で述べたように、サンシャイン計画では結晶シリコン太陽電池の低コスト製造技術を確立するため、年産500kW級の太陽電池製造実験ラインにより、原料、基板、セル化、パネル組み立ての各工程毎に低コスト化のための技術開発の努力を行ってきた。その結果、各々について前述のような開発成果が得られるとともに、その技術が商用モジュールにも反映され、サンシャイン計画発足当時2~3万円/Wであったものが、現在では1,000円/Wを下回るものも出現するような状況になってきた。しかしながら、実際に太陽電池を一般電力用の発電設備として既存のエネルギー源と競合できるようになるには、さらに1桁程度のコストダウンが必要である。このためには、前述の500kW級太陽電池製造技術開発の成果に加え、さらに以下に示すような技術開発が必要不可欠である。

- (1) 低コストシリコン製造技術
- (2) 低コスト基板製造技術
- (3) 高効率セル化技術

(1)については、500kW級太陽電池製造技術開発において、トリクロロシラン年産200t規模の製造実験装置とSOGか粒年産10t規模のトリクロロシラン水素還元実験装置により、各々の技術が低コストシリコン製造技術の実用技術として有効であることが実証された。すなわち、本技術が比較的高い純度の多結晶シリコンを流動床下で少ない原単位で製造する技術であること、およびトリクロロシランの水素還元工程で多量に副生する四塩化けい素のリサイクル化を行い得る技術であることを確認し、将来、本技術が低コストシリコン製造技術の主体と成り得る可能性がある見通しを得ている。しかしながら、本技術を実用レベルに引き上げるためには、トリクロロシラン製造工程と水素還元工程とを連結するとともに、大口径かつ長期連続運

転に耐えられる流動床反応炉の開発等が必要である。(2)の低コスト基板製造技術に関しては、今後一層の高品質化、量産化が期待されるキャスト法に重点を置いて、高品質・均一品質の連続大型キャスト技術、および連続スライス技術等の開発を行うのが適当であると考えられる。(3)の高効率セル化技術であるが、これからは太陽電池の低コスト化技術は高効率ということと共に考えなければいけないということであり、低コスト化プロセスのつもりで開発していても、効率が低ければ商用電源と競合できないということである。したがって、今後は、セル変換効率15%以上（多結晶）を目標とする所要の要素技術開発が肝要である。

3. アモルファスシリコン太陽電池

3.1 開発の現状

アモルファスはガラス等で古くからなじみの深い物質であるが、1975年にグロー放電によるアモルファスシリコン（a-Si）においてPN接合が可能であるという発表がなされたのを契機として、これが結晶系シリコンと同様にa-Siが半導体としての働きをすることが確認された。それからわずか5年でa-Si太陽電池は民生用として生産が開始され、現在、電卓、時計およびラジオ等で広く利用されている。

a-Si膜の形成には、減圧気相法、プラズマグロー放電法、光CVD法、およびプラズマ気相法等がある。現在、一般的な方法であるプラズマグロー放電法は通常低真空にした図-4のような分解形成装置に原料であるモノシランガス（SiH₄）を導入し、外部からの直流あるいは高周波電力を印加することにより励起された高エネルギーの電子が原料ガスに衝突し、原料ガスの分解と活性化されたガス間の反応によって基板上にa-Si膜が形成される。このとき原料のSiH₄中にドーピング材としてジボラン（B₂H₆）を添加すればp形に、ホスフィン（PH₃）を添加すればn形にa-Siを変換ことができ、太陽電池に必要なPN接合を添加ガスの切り換えによって作成することができる。

アモルファス系太陽電池の主要工程は、このa-Si膜の形成であるが、全体のプロセスは図-5の通り基板（ガラス）の上にもず透明電極を形成し、パターンニングを施した後、a-Siをその上に形成する。裏面に再び電極を付けて完成する。

アモルファスシリコン太陽電池は、結晶シリコン太陽電池に比べ、可視光領域の吸収係数が大きいこと（結晶シリコンの厚みは1μm程度で十分であること（結

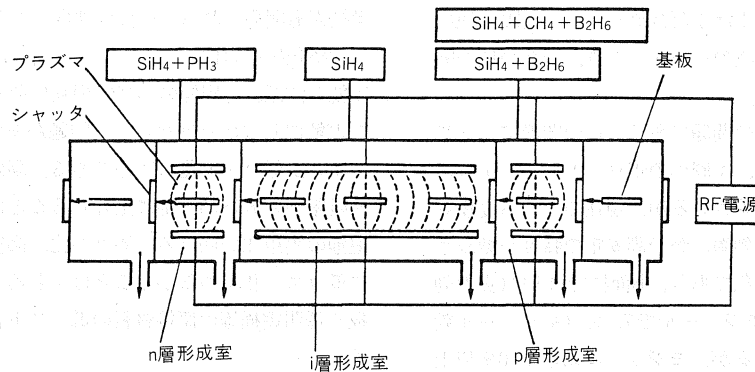


図-4 アモルファス膜形成装置の一例

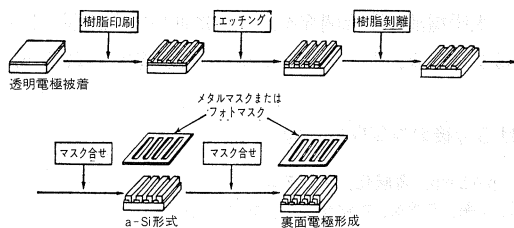


図-5 アモルファス系太陽電池製造プロセスの一例

晶系の場合数百 μm), 膜形成が比較的低い温度で行えるため消費電力が少なくすむこと, 製造工程が簡単で大面積化, 連続自動化が容易であることなどの特長を有している. このため民生用としてのみならず電力用低コスト太陽電池として大きな期待がかけられている. しかしながら, アモルファスシリコン太陽電池は, 一方では結晶系に比較して, 変換効率が低いことや光劣化現象が存在するなどの太陽電池として好ましくない点も有している.

サンシャイン計画においては, このような利点, 欠点を併せ有するアモルファスシリコン太陽電池について, 変換効率の向上, 信頼性の向上, 量産性の拡大を目指して, 大学, 国立研究所および企業の研究所の3者が協力して研究開発に取り組んでいる. 大学においては, 電子状態の解明・膜構造の解析等理論的研究が, また, 国立研究所においては, 新材料の開発・セル構成等の基礎的研究がそれぞれ進められている. 企業の研究所においては, 原料であるモノシランガスの低コスト製造方法の開発, 太陽電池を高効率かつ高速度で製造することを旨とした高能率製造技術, 均一性の良い大面積セルの開発を目指した大面積製造技術, 太陽光に対する感度特性に優れている多層の構造を有する太陽電池の製造技術などの研究開発が進められている. その結果, a-Siに関する諸物性, 理論に関する数多

くの解明, 成果を得るとともに, 実用化研究の分野でも以下のような多くの成果を得ている.

(1)アモルファスシリコンの原料であるモノシランガスの製造技術に関しては, 水素化リチウムと四塩化珪素との反応を利用した溶融塩電解を含むクロズドサイクルシステムの開発により純度99.9995%以上でかつ約3円/g(量産時)のモノシランガスを作り得ることが検証された.

(2)変換効率向上のための高効率化技術に関しては, シングルセルについて, セル面積100 cm^2 で9.3%が達成されるとともに, 小面積1 cm^2 では11.5%の高効率が達成された. また, 将来一層の効率向上が期待されるタンデムセルにおいても, セル面積100 cm^2 で8.6%の変換効率が達成された.

(3)大面積化技術に関しては, 均一で欠陥の少ない大面積アモルファス膜成膜技術, 大面積透明導電膜形成およびパターニング技術が開発され, 一枚基板で1,200 cm^2 以上の大面積化が達成された.

(4)高速成膜技術に関しては, モノシランガスで5 \AA /秒, ジシランガスで20 \AA /秒の成膜速度で変換効率8%台(小面積1 cm^2)の太陽電池を製造し得る技術が開発されるとともに, レーザ光を使用した高速パターニング技術が開発された.

以上のように, アモルファス太陽電池製造技術の実用化研究は, 昭和60年度現在, 世界的に最高の技術水準にある. ただ, これらの成果は, いずれも実験室規模でのデータであること, および光劣化機構, 接合界面状態, 不純物の状態など完全に解明されていない事項も多いことから, 今後解決すべき課題は数多い.

3.2 今後の技術開発課題

アモルファスシリコン太陽電池は, 最終的な電力用低コスト太陽電池の本命として大きな期待をかけられ

ているが、現状ではまだまだ結晶シリコン太陽電池に比べて技術的に未完成の点が多々あり、今後の技術開発が必要である。

先ず第1が安定化の問題である。この問題では光劣化対策が最も重要で、i層へのボロンドープ、i層の薄膜化等によって改善されるが、現在のところ変換効率は低く、さらに高効率、かつ高安定の特性が要求される。第2は高効率化であり、小面積で11.5% (真性効率)、30cm×40cmのモジュールで7.1% (モジュール効率) が実現されているが、モジュール効率で10%以上の変換効率が将来要求されることが予測され表2に示す各要素技術の中で特に狭光学ギャップ材料の開発に最重点に取り組むべきである。狭光学ギャップ材料とa-Si:Hを用いたタンデム太陽電池のデバイス化要

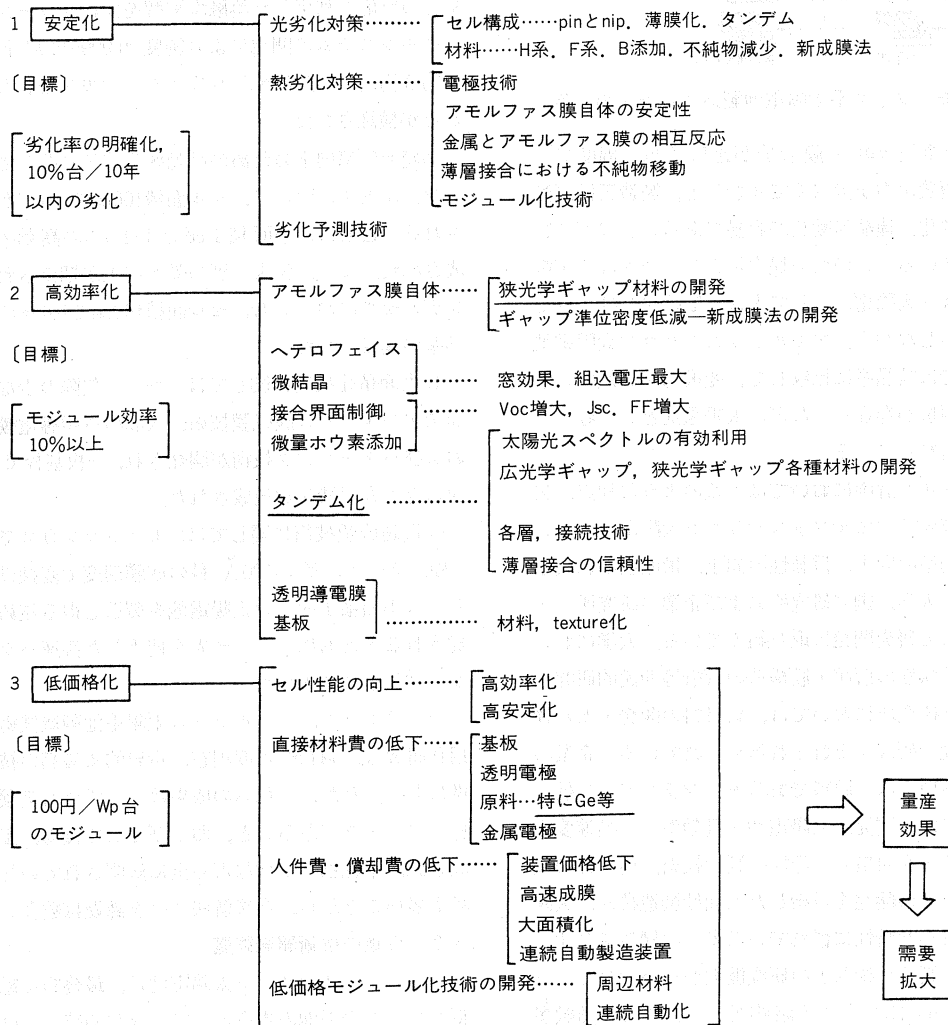
素技術も開発されるべき重要課題である。単層セルの高効率化技術の他に、タンデム化特有の各層セル間の接続の問題、薄層間の不純物相互拡散と信頼性の問題など解決しなければならない問題が多い。

第3が低コスト化の問題である。高効率化のために太陽電池の価格が大幅に上昇することはかえって太陽電池の実用化を妨げる。高効率化、高安定化が結果的に低コスト化につながることはもちろんであるが、基板や透明電極等の直接材料の低コスト化も不可欠である。

4. 海外における開発動向¹⁾

太陽電池の研究開発を意欲的に進めている国としてはアメリカ、西ドイツ、フランス等が挙げられるが、

表2 アモルファスシリコン太陽電池における今後の技術開発課題



中でも、アメリカが予算および研究人員の規模とも他を圧倒している。アメリカにおける研究はエネルギー省の計画を中心に進められており、昭和58年秋からスタートした新5ヶ年計画（1984～1988年、総額3.2億ドルを予定）において、薄膜太陽電池（結晶シリコン、アモルファスシリコンの区別はない）を中心として、特に変換効率の向上（平板式太陽電池モジュール効率15%以上、平板式薄膜太陽電池同12%以上、集光式太陽電池同22%以上）と長寿命（30年以上）の太陽電池を低コストで製造することを目標としている。

また、ヨーロッパ諸国では、西ドイツ、フランスの2ヶ国が研究開発に積極的である。このうち西ドイツでは、1976年に代替エネルギー開発に関する国家プロジェクトが発足し、5ヶ年間で一期とする単位で研究開発が推進されている。現在はその第2次5ヶ年計画の段階にあり、国立研究機関であるブラウンホッファー太陽エネルギーシステム研究所がリードセンターとして特に低コスト太陽電池基板材料についての研究を積極的に進めている。一方、フランスにおいては、エネルギー管理庁（AFME）が太陽光発電開発のコーディネーターとして、溶融シリコンの高速引き上げ技術等、シリコン基板の低価格化を目指した研究等を進めている。

5. 今後の展望

石油代替エネルギー源の開発を目的として昭和49年より始まったサンシャイン計画において太陽光発電プロジェクトは、この10年間に目覚ましい研究開発の進歩がみられた。すなわち、このプロジェクトの成功の鍵をにぎるとされていた太陽電池の低コスト化については、発足当時の2～3万円/Wが、現在では1,000円/Wを下廻るところまで到達するとともに、生産量についてもサンシャイン計画が軌道に乗りはじめて以来、この数年間にほぼ2桁の伸びを示している。そして、その応用分野も従来は遠隔地用電源を主体とした特殊用途に限られていたものが、電卓や時計などの民生用、そして街路灯や揚水ポンプなど我々の身近なところにも利用されるようになった。また、電力用としてのシステム開発の研究も進み、小容量の独立型はもちろん、系統と連系するタイプでも3kW級の個人住宅システムから1,000kW級の発電所システムまで幾つかの利用システムが完成あるいは建設中であり、それぞれについて運転研究が進められており、着々と実用化が近づいているといえる。

しかしながら、太陽電池が一般電力用の発電設備として既存のエネルギー源と競合できるようになるには、現状よりもさらに1桁程度のコスト低減が必要であることは衆目の一致するところである。サンシャイン計画発足より現在まで、太陽電池の低コスト化に向けてリボン結晶や多結晶シリコンを基板とした第1次技術革新ならびにアモルファスシリコン太陽電池を中心とした薄膜太陽電池による第2次技術革新が為されてきたわけであるが、従来はどちらかというコスト低減を最優先に技術開発の方向性が決定されてきたが、今後は低コストと同時に高効率をも目指した技術開発が必要である。すなわち、最終的なコスト目標である100～200円/Wに到達するには原料、基板、セル化およびパネル化の各製造工程において新技術の開発を行うつつ総合的な低価格化を行わなければならないことはもちろんであるが、同時に薄膜・タンデム構造太陽電池やシリコン系以外のⅢ～Ⅴ系やⅡ～Ⅵ系太陽電池の検討など、低コストかつ高効率な太陽電池開発を目指した第3次技術革新を行わなければならない。

また、太陽電池コストの低減には、量産効果すなわち需要の拡大も一つの重要な要素となっている。最近のエネルギー情勢の変化（石油価格の下落）にともない、太陽電池をはじめとする新エネルギー技術開発に対して非常につらい状況下となっており、民間の努力だけでは太陽電池の需要を大きく開拓して行くのは困難となっている。本格的な太陽電池の普及の前に政府資金援助による発展途上国向けシステム建設等の中間需要開拓の必要性は従来よりいわれられてきた²⁾ところであるが、その必要性はますます強まったと言わざるをえない。この施策の有無が太陽電池産業が将来、大きく飛躍するか否かの鍵をにぎっていると言えよう。

参 考 文 献

- 1) 通産省工技院；新エネルギー技術開発ビジョン，通産産業調査会，（昭60-10）
- 2) 武田；太陽光発電，エネルギー・資源，Vol. 6，No. 6（1985）