

特集

太陽電池実用化の取り組み

総論—太陽電池の現状と今後の展望—

Recent Situation and Future of Solar Cells

中 川 興 史*

Koshi Nakagawa

はじめに

NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）は、我が国経済の石油に対する依存度の軽減を図ることを目的に、1980年10月に設立された。

以来、我が国は石油代替エネルギー技術開発の中核的推進母体として、各界、各方面の支援を受けながら、その責務を果たすべく努力してきた。

具体的には、太陽エネルギーを始めとして、石炭エネルギー、地熱エネルギー、燃料・貯蔵、アルコールバイオマスエネルギーなどの新エネルギーに関する技術開発を推進している。特に、太陽エネルギーに関しては、サンシャイン計画に基づき、太陽電池製造技術と太陽光発電システム技術の実用化に力を入れて取り組んできた。

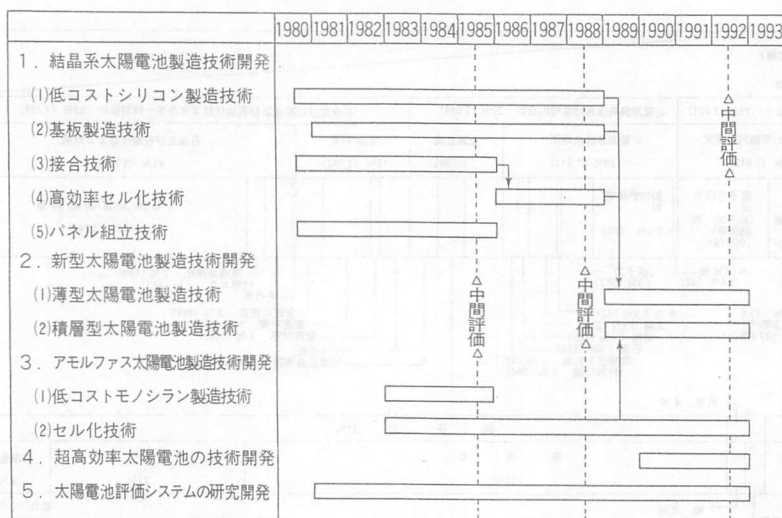
1. 太陽電池製造技術開発スケジュール

NEDOが発足した1980年から太陽電池の製造技術は、結晶系太陽電池とアモルファス太陽電池に分けて、開発を行ってきた。

1.1 結晶系太陽電池

結晶系太陽電池では第一ステップとして基礎的要素の研究開発に着手し、主に材料の開発と基板の製造技術の開発を行ってきた。材料の開発としては、低コストシリコンの製造技術としてNEDO流動床法が開発され、金属シリコンと四塩化硅素を原料としてトリクロルシランという中間化合物に変成し、これを流動床反応炉で水素還元し、太陽電池に適した品質の顆粒状シリコンを製造する技術開発を行った。また、基板の製造技術としてはキャスト法が開発され、NEDO流動床法で得られた顆粒状シリコンを原料として、半導

表1 太陽電池製造技術開発スケジュール



* 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）太陽技術開発室長

〒170 東京都豊島区東池袋3-1-1 サンシャイン60 29F



図-1 流動床法によりつくられた顆粒状多結晶シリコン

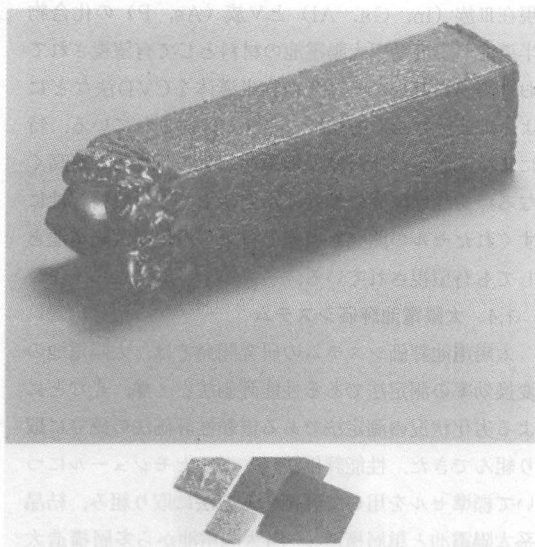


図-2 電磁鋳造法によるインゴットとウェーハ

続キャスト炉（1個の溶解用ルツボから5個以上のインゴットを製造）で30cm角のインゴットを製造し、このインゴットを10cm角に切断した後、マルチ・ワイヤーソーで450 μ mにスライスして太陽電池用基板（ウェーハ）を製造する技術開発を行った。

さらに高効率セル化技術として、MINPセル構造やBSNセル構造の技術開発を行い、 SiO_2 の絶縁層やSiNの反射防止膜などを採用して、変換効率15%を目指す高効率セルを開発してきた。

続いて、1989年から結晶系太陽電池では第二ステップとして、高純度基板の製造と電池構造の改良に着手し、新型太陽電池として、変換効率の改善に取り組んできた。

高純度基板の製造技術としては、世界で初めて電磁

キャスト法を開発し、引下げキャスト上にシリコンを追加しながら高周波で溶融させ、電磁力によってシリコンとルツボ壁との接触を防げ、ルツボからの不純物がシリコンに混入するのを防ぐ方法で高品質の材料が生産できる技術開発を行った。

電池製造の改良としては、NIP製造セルとしてP型多結晶基板のうえにi, n層を積層し、セル内で発生した電子が容易に電極へ移動できる構造を開発したり、ヘテロ構造セルとして表裏面両電極側へきたホールと電子pn接合へ押しもどし、発生したホールと電子を有効に取り出せる構造の技術開発も行った。

もう一つの電池構造の改良は積層型セルの開発である。本セルの特徴はa-siと多結晶薄膜又はa-Siと化合物半導体というそれぞれ異なった吸収波長特性をもった材料をダンデムに組み合わせることより、広帯域な波長を吸収させ、高い変換効率のセルを開発するという目標のもとに主としてボトムセルの開発に取り組んできた。

1.2 アモルファス太陽電池

アモルファス太陽電池では、材料ガスの製造技術とセルの製造技術に分けて取り組んできた。

材料ガスは低コストモノシラン製造技術として、水酸化リチウムと四塩化硅素を利用した「溶融塩電解を含むクローズサイクルシステム」による低コストモノシラン製造技術を実用化するため、10トン/年規模の実験装置の改良と電解に寄与しない迂回電流を少なくするなどの改良を行い、高いSHガス発生効率が維持できることを実証してきた。また、モノシラン発生試験装置で得られたガス中にはフォスフィン、クロルシラン、ジボランのいずれも検出されず、半導体級の高純度モノシランが得られることを確認した。

次にセルの高品質化技術としては、a-Siは500～600nmに光の感度のピークがあり、長波長側の光が有効に利用されていない。そこでセルを3層構造とし、それぞれの層のバンドギャップを変え、光の波長に対する吸収ピークを変えることにより、自然太陽光をできるだけ有効に吸収できるようにして、変換効率を向上させるための技術開発を行った。具体的にはステンレス基板及びガラス基板を用いた3重構造を考案し、キャリア（電子、正孔）の再結合を低減させる各接合界面形成技術の確立などの技術開発を行ってきた。続いて1988年から同じくセルの高品質化技術として、発電に寄与する有効日照面積を拡大させるためのスルーホール構造、狭バンドギャップ材料の高品質成膜のた

めの μ 波プラズマCVD技術などの開発にも取り組んできた。セルの大面积化技術は、電力用アモルファス太陽電池の実用化技術を確立するため、高効率の大面积モジュール製造技術を開発することを目的として進めてきた。具体的にはIVE (Interdigital Vertical Electrode) 型大面积a-Si成膜装置などを用いてシングル構造で $1,200\text{cm}^2$ のサブモジュールの開発を進めてきた。

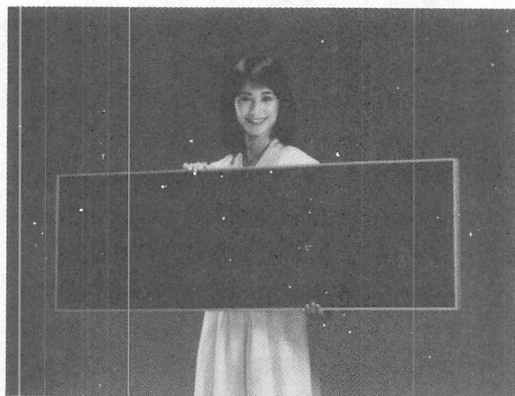


図-3 大面积 ($40\text{cm} \times 120\text{cm}$) アモルファス太陽電池

また、セルの高信頼化技術としては、a-Siは初期(1年間ぐらい)の効率低下が大きく、電力用としては使用が困難な状況にある。そこでa-Siセルの劣化機構の解明、劣化防止のためのセル構造などを検討し、防止のための技術開発に最重点を置いて取り組んできた。具体的には素子劣化機構の解明として、積層素子技術に取り組み、a-Si/a-Si/a-SiGe型3層構造セルを主体にセルの特性と光劣化特性の関係を検討し、a-Siセルの光劣化機構の解明を行うことにより、信頼性の向上を図ってきた。

また、素子界面形成技術として狭バンドギャップ材料の開発、拡散ブロック層として二層積層素子技術の開発などにも取り組んできた。さらに、アモルファス太陽電池の要素技術として、1つは複合透明導電膜を開発し、低抵抗で高透明度を有し、テクスチャー化による光閉じ込め効果のある透明導電膜を低コストで製造する技術に取り組んできた。具体的にはCVD法による成膜条件の最適化などによって低抵抗、高透過率で均質な膜の製造技術を開発した。さらにもう一つは狭バンドギャップ材料の開発でa-Siセルの高効率化の手法の1つとして μ 波プラズマCVD法をa-SiGeなどの狭バンドギャップ材料に適用し、高品質アロイ

成膜技術を開発してきた。

1.3 超高効率太陽電池

超高効率太陽電池の技術開発は1990年から新たに取り上げてきたテーマで、結晶系太陽電池と化合物系太陽電池に分けることができ、差し当たっては要素技術を中心に取り組んできた。結晶系では高品質単結晶シリコン基板の製造技術として、安価な原料から電磁鑄造法とFZ法の組み合わせによって安定した高品質単結晶を製造する技術や、単結晶径の大型化技術などに取り組みつづける。また、セル化技術の面では光の収集効率の向上、光閉込め構造と反射損失率の低減などの対策のもとに、開放電圧 V_{oc} 、短絡電流 I_{sc} 、曲線因子FFの向上などをはかりつつある。化合物系では現在Ⅲ族(In, Ga, Al)とⅤ族(As, P)の化合物半導体が超高効率太陽電池の材料として有望視されており、Siの基板の上に化合物半導体をCVD法などによって成膜させる方法でセル化が検討されている。特にⅢ-Ⅴ族系の化合物太陽電池はすこしコストが高くなる点を除けば高変換効率が期待でき、対放射線性にすぐれたセルの開発も可能で将来宇宙用の太陽電池としても有望視されている。

1.4 太陽電池評価システム

太陽電池評価システムの研究開発では、太陽電池の変換効率の測定法である性能評価法と、熱、光などによる劣化状況の測定法である信頼性評価法の確立に取り組んできた。性能評価法は、セルとモジュールについて標準セルを用いて評価する方法に取り組み、結晶系太陽電池と単層構造a-Si太陽電池から多層構造太陽電池に至るまでの評価方法を確立してきた。

2. 太陽電池製造技術の現状

2.1 結晶系太陽電池

結晶系太陽電池では、新型太陽電池の製造技術として大幅な高効率化が期待できる薄型と積層型の太陽電池の開発を進めてきた。

薄型太陽電池製造技術開発としては、高純度基板製造技術開発、高速基板製造技術開発、新接合・構造セル製造技術開発などに取り組んできた。高純度基板の製造技術開発では変換効率が18% (10cm角)を越える基板を開発するため、電磁鑄造法による高純度基板製造技術と、 $200\mu\text{m}$ 以下の薄板にスライスする技術に取り組むほぼ目標を達成させた。また、高速基板製造技術としては、スライスによるシリコンインゴットの切削ロスをなくすため、シート状の基板を高速に生

表2 新型太陽電池製造技術開発目標

項 目		平成4年度目標
薄 型 太 陽 電 池	1. 高純度基板製造技術開発	不純物濃度 酸素 2×10^{17} atm/cm ³ 以下 炭素 5×10^{18} atm/cm ³ 以下 拡散長 150 μ m 以上 インゴットサイズ 20cm×20cm 基板厚 200 μ m 以下 (セル変換効率(10cm角)18%以上)
	2. 高速基板製造技術開発	基板サイズ 20cm×20cm×0.1mm 製造速度 1枚/分以上 セル変換効率(10cm角)14%以上
	3. 新接合・構造セル技術開発	多結晶 セル変換効率(10cm角)18%以上 セル変換効率(15cm角)17%以上 単結晶 セル変換効率(2cm角)23%以上
積 層 型 太 陽 電 池	1. アモルファス/多結晶積層セル技術開発	セル変換効率(10cm角)14%以上
	2. アモルファス/化合物積層セル技術開発	セル変換効率 13%以上 (30cm×40cm)

産する技術(製造速度:1枚/分以上)に取り組んできたが、熔融シリコンの基礎的物性の克服が困難で目的達成には至らなかった。

また、積層型太陽電池の製造技術開発では、a-Siと多結晶薄膜の場合は14%の変換効率を目標に積層構造のセル開発に取り組んできたが、ボトムセルの薄膜多結晶セル単独で14.5%(2cm角)を達成し、目標変換効率達成のための技術開発成果が得られた。また、a-Siと化合物半導体の場合は、ボトムセルにCaTeを使った4端子積層構造セルに取り組んできたが、ボトムセルの目標変換効率を達成し、今後は効率を維持しながら低コスト化を目指して開発を進めてゆく。

2.2 アモルファス太陽電池

アモルファス太陽電池は量産化とシリコン使用量の

両面から考えて、将来飛躍的な需要の拡大に応じ得る有望な太陽電池である。しかし、一方では相対的に変換効率が低く光劣化の問題があるため、高変換効率と低劣化を目指して品質と信頼性の改善に取り組んできた。高品質製造技術開発では、変換効率は目標を達成したものの〔12%以上(10cm角)〕、劣化率は小面積基板(1cm²)のものについてのみ目標を達成しており、今後継続して技術開発に取り組んでゆく必要がある。また、高信頼性技術開発では、変換効率11%以上(10cm角)で劣化率5%以内(1年後)を目標に、光劣化に対応可能な積層素子構造の開発に取り組んできたが、変換効率は11.1%(10cm角)とその目標を達成したものの、劣化率は10%程度と低く成膜技術に更なる改良の課題が残された。

表3 アモルファス太陽電池製造技術開発目標

項 目	平成4年度目標
1. 高品質化	セル変換効率(10cm角)12%以上 劣化率(1年後)10%以内(1cm ² セル変換効率 13%以上)
2. 大面積化	30cm×40cmサブモジュール 変換効率 10%以上 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%以上(初期変換効率(1cm ²)12%以上)
4. 要素技術 (1)複合透明導電膜 (2)狭バンドギャップ材料	透過率 85%以上 抵抗率 5 Ω /□以内 プラズマ耐性 $\pm 10\%$ 以内(透過率,抵抗率の変化) ヘイズ率分布 $\pm 10\%$ 以内 基板サイズ 30cm×40cm コスト 50円/10cm角以下(1工場当たり年12万m ² 需要時,10MW規模相当) 変換効率(1cm ²)4%以上(5,000Åのアモルファスシリコンフィルタ使用下)

2.3 超高効率太陽電池

2000年以降を目指し、飛躍的な変換効率の向上による利用分野の拡大を図るため、新材料、新製造法などによる超高効率太陽電池の研究開発を進めてきた。結晶系シリコン太陽電池ではセル変換効率30%以上を目標に高品質単結晶シリコン製造のための基礎技術と、高効率セル化の要素技術に取り組んできたが、シミュレーションにより28%程度の変換効率も可能であるとの試算結果も得られており、今後の開発に大いに希望をもっている。

化合物半導体太陽電池ではⅢ－Ⅴ族半導体太陽電池でセル化要素技術に取り組んできたが、シミュレーションにより40%程度の変換効率が可能であるという試算結果も得ている。

2.4 太陽電池評価システムの研究開発

太陽電池の性能と信頼性を評価するための手法を開発し、その高精度化を図るための研究開発に取り組んできた。まず、性能評価法では、積層型太陽電池を層毎にわけて変換効率を測定するための方法を開発し、±2.5%の精度で測定が可能となった。今後は積層型太陽電池の更なる波長感度の高域化に対して研究開発を継続してゆく。

つぎに、信頼性評価法では、アモルファス太陽電池の初期劣化に関する研究を行い、初期劣化の加速試験を実施した。今後は長期耐久性を含めた統一的な加速劣化試験の確立に努めてゆく。

3. 技術開発の方向性

太陽光発電システムの本格的導入を可能とするためには、太陽光発電システムの低コスト化を図ることが最大の課題である。需要の拡大によって生産規模が増大し、量産効果により一層のコストダウンが期待されるという「良循環」の構図が浮かび上がってくる。技術開発の方向としては、このような「良循環」が始まるコスト水準及び量産規模達成のために次のような技術開発目標を設定して取り組んでゆく。

3.1 一定量産規模の下での低コスト製造技術開発目標の設定

「石油代替エネルギーの供給目標」（平成2年10月決定）では、新エネルギーなどによる供給は2000年に全体の3.0%、2010年に5.3%が見込まれており、また、太陽光発電については、電気事業審議会需給部会の「電力供給目標」において、2000年で25万kW、2010年で460万kWの供給力が計画されている。このような供給力見通しを踏まえ、かつ量産効果も考慮すると、概ね100MW/年・企業程度の生産規模が最適であると考えられるが、今後は、本格的導入を目指して低コスト化を中心とした具体的な目標と計画の策定および解決すべき技術的課題への取り組みが必要である。

3.2 一般家庭の電気料金に相当する発電コスト水準の実現

2000年に向けて、さらに太陽電池の技術開発が進展し、原材料からセル形成に至るまでの低コスト化技術

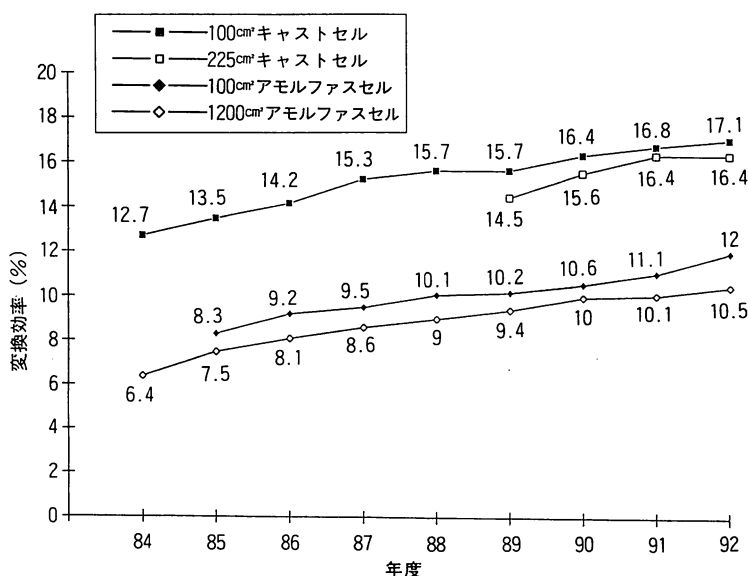


図-4 太陽電池変換効率の推移

表4 太陽光発電設置コストの試算例
(量産効果が最も期待できる年間100MW程度の生産を前提とした2000年における設置コストの試算)

	平成3年度 研究実績	平成4年度 達成技術	2000年目標	
			多結晶系	薄膜系
全システムコスト	1,310円/W	450円/W	320円/W	260円/W
太陽電池	635円/W	330円/W	210円/W	170円/W
周辺装置	675円/W	120円/W	110円/W	90円/W
前 提 条 件	システム利用率 12%程度			
発 電 コ ス ト	120円/kWh程度	40円/kWh程度	30円/kWh程度	25円/kWh程度

注1：発電規模3kW程度の太陽光発電システム（逆潮流有り、蓄電装置無し）を想定

注2：「平成4年度達成技術」とは、平成4年度の技術開発が終了し、その成果が生産に利用される状況を想定

や建材一体型などの新技術が開発され、これに加えて量産化による十分な低コストが図られたならば、現在の一般家庭での電気料金に相当する発電コスト水準（20～30円/kWh程度）を実現することは可能であり、経済性の確立を目指して技術開発を進める必要がある。

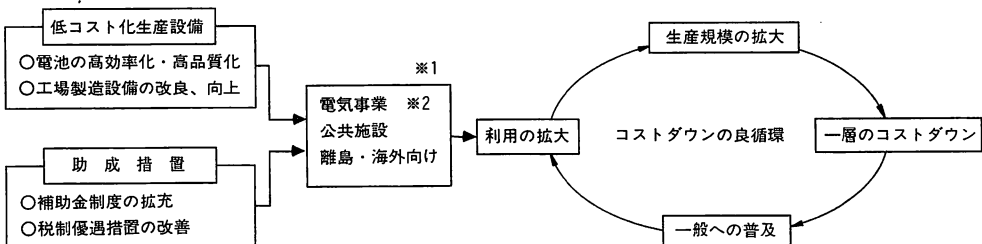
3.3 電気事業における太陽光発電の利用

これまで電気事業連合会を中心に新エネルギーの発電電力の買い上げ制度が検討され、1992年4月から新たに新エネルギーの余剰電力の買い上げ制度がスタートした。もとより自家用発電からの電力の買い上げは、電気事業者と自家用発電事業者の相互の合意によって買い上げ価格を含めた各種の条件について協定がなされるところであるが、新エネルギーの余剰電力の買い上げはこのエネルギーがやっと実用化されたばかりで充分な実績もなく、何よりも自家用発電事業者にとって経済的に相当の負担がある点を配慮して、電気事業者が所有する水力、火力、原子力などの発電コストを相当上回る価格で買い取ることが決定されている。

太陽光発電の利用の拡大を惹起し、コストの「良循環」に導く引き金はこの制度がどう生かされるかにかかっていると思う。すなわち従来型の水力、火力、原子力発電と太陽光発電の発電コストを比較した場合、現状では後者は前者に比べると相当割高である点是否

定できない。しかし一方では地球環境に与える負担やエネルギーとしての安全性などの面から、国民的コンセンサスのもとに太陽光発電を一部の電気事業用電源として政策的に導入することが考えられる。

この場合、依然として太陽光発電は希薄な光エネルギーの変換技術であるだけに、広大な太陽電池の設置面積を必要とする点は申すまでもない。従って、一ヶ所に集中して数万kWもの太陽光発電が出現することは将来的にも考え難く、やはり相当分散化された比較的小規模な太陽光発電設備が電気事業者の系統に連系されている姿が現実的である。太陽光発電設備は電気事業者からみると従来型の発電設備と同様に自らが所有しコントロールする発電設備ではなく、負荷側においてデマンド抑制の効果につながる自家用の発電設備と考えるべきである。従って、個々の太陽光発電設備の所有はこれを設置する事業者自らであって、太陽光発電設備の設置と保守は各事業者の役割となる。勿論個人が自分の住宅の屋根上に設置する場合も例外ではなく、設置と保守の負担は各個人の役割である。電力会社側の役割はこうして事業者が設置した太陽光発電設備を電力系統へ連系し、余剰電力ではなく、太陽光発電電力全体を適正な価格で買い上げることではないかと考える。



※1：コストダウンの良循環を引き起こすための起爆剤としての役割

※2：電力買い上げ制度を含めた電気事業用途

図-5 太陽電池コストダウン実現のための良循環

この場合国の助成策も含めて、太陽光発電設備を設置する場合の設備と金利、さらには設置スペース代なども評価の対象となることを期待する。

いずれにしても電気事業者は相当高額な現状の太陽光発電コストを政策的に良循環へ導いてゆく大きな役割を担っている。

3.4 技術開発の加速的推進の必要性

最近の太陽光発電コストは、主として太陽電池の変換効率の向上や若干の量産化によって急速に低コスト化が図られているものの、直接原価のみを対象としても太陽光発電コストは100円/kWh余りの水準にあると推定する。2000年に向けて、一般家庭での電気料金に相当する発電コスト水準を目指し、平成5年度から始まったニューサンシャイン計画のもとに内外の技術開発を加速的に推進することが必要である。

4. 技術開発の目標

4.1 短期的目標（2000年目標）

現状において低コスト化の目標を達成する可能性のある太陽電池は、多結晶、アモルファスの2種類の太陽電池がありそれぞれ技術開発を行いつつある。

多結晶太陽電池は、新型太陽電池製造技術開発（薄型太陽電池）の研究成果を受け、セル・モジュールの高効率を期待しつつ、基板およびセル・モジュールの低コスト化の技術開発を行う。

アモルファス太陽電池は、光劣化問題への対応と劣化後の効率向上を図るとともに、モジュールコスト低下のため、モジュールの建材一体化、大面積化などの技術開発を行うものとする。また、量産化のための高速成膜の技術開発も必要である。

4.2 中間的目標（2010年目標）

将来の飛躍的な太陽電池の市場拡大に対して、材料確保の面からも量産化の面からも、薄膜系太陽電池が期待できる。より高い変換効率（20%程度）の達成と量産化が可能と考えられる薄膜系シリコン太陽電池、アモルファス太陽電池およびCIS太陽電池は、2000年を超えた早い時期に量産化を目指して薄膜太陽電池の高品質化技術に取り組んでゆく。

変換効率の飛躍的向上（25～40%程度）を目指した超高効率太陽電池の開発については、これまでの研究開発成果を踏まえ、目標達成の可能性のある単結晶シリコン太陽電池および化合物半導体太陽電池（Ⅲ－Ⅴ族）に絞って開発を進めてゆく。また今後更に材料・構造の異なる超高効率太陽電池の出現の可能性もあり、そうした分野の基礎的研究も必要である。

おわりに

これまでの研究開発は、企業、大学・研究機関、NEDOの産、学、官の協力のもとに良好に推進してきた。今後も産、学、官の協調のとれた研究開発体制を維持し、効率的な研究開発を推進してゆく必要がある。太陽光発電に関する研究開発は海外でも急速に推進されつつあり、常に内外の最新技術動向を踏まえつつ、定期的に技術開発の推進状況および設定目標の妥当性について点検しながら機動的に対応してゆくことが必要である。また、技術開発が順調に進展した場合、2000年以降は本格導入が期待できる状況にあり、技術開発段階から導入普及段階に円滑に移行させてゆくために関係部門の一層の協力が必要である。

協賛行事ごあんない

「超高温材料シンポジウム'93 in たじみ」

- 開催日 平成5年12月2日(木) 10:00～19:00
12月3日(金) 9:30～15:00

- 場 所 多治見文化会館
(岐阜県多治見市十九田町2-8)

- 参加料 (交流会費を含む) 15,000円

- 問い合わせ先
株式会社 超高温材料研究センター
岐阜センター
岐阜県多治見東町3-1-8
TEL 0572-25-5380, FAX 0572-21-1045