

4.2 エネルギーを作る

4.2.1 太陽電池：太陽電池開発の現状と課題

(1) はじめに一太陽電池開発の必要性一

人類の持続的発展のために解決すべき最大の問題は何であろうか。1996年にC₆₀ フラーレンの発見でノーベル賞を受賞したリチャード・スモーリー (Richard Smalley) 博士は、21世紀のこれから50年の間に人類が遭遇する解決すべきトップ10の課題について講演し、最も重要な課題としてエネルギー問題を挙げている[1]。現在65億の地球人口が2050年には100億近くに増加すると予想されていることや、現在の主要なエネルギー源である石油資源の枯渇を考えれば納得できる。さらに、最近発表された第4次IPCCの報告によれば、気温の上昇は95%以上の確率で人為起源による炭酸ガス濃度の上昇の結果と報告している[2]。もはや、地球温暖化は過去100年に人類が急速かつ膨大に消費した化石燃料由来の大気中の炭酸ガス濃度の増加によるものであることは間違いない。このような背景から、炭酸ガスを排出しないクリーンエネルギーの開発が強く望まれている。

炭酸ガスを排出しない1次エネルギーは再生可能エネルギーと原子力エネルギーであり、資源的制約の無いエネルギーとしては、再生可能エネルギーのみである。地熱エネルギーを除くすべての再生可能エネルギーの源は太陽エネルギーである。地上に公平に降り注ぐ無尽蔵な、“ただ”の太陽エネルギーをどのように使いこなすかが21世紀の最大の課題といっても過言ではないであろう。ドイツの気候変化諮問会議 (WBGU) の報告した、今後100年の世界の1次エネルギー供給予想によれば、現在、世界の1次エネルギー供給の1%にも満たないバイオマスを除く再生可能エネルギーが、50年後の2050年には約50%、100年後には約80%を占めるとしている[3]。しかも、その50%以上のエネルギーは太陽光発電による電気エネルギーであり、太陽電池の普及に大きな期待を寄せている。

本稿では、太陽光さえ当てれば、静かにクリーンな電気エネルギーを発生し、その維持も簡単でかつ無人で、規模の大小によらず、どこでもいつでも

一定効率で発電できるという有利な特長をもつ太陽光発電、なかでもその中心技術である太陽電池の現状について紹介する。

(2) 太陽電池の基礎

(2.1) 発電原理

太陽電池の構造はどのようなになっているのだろうか。最初の太陽電池は、1954年に米国のベル研究所のピアソン (Pearson) らにより開発された。当時ベル研究所ではトランジスタの開発を行っており、ショックレー (Shockley) らはp-n接合型のシリコントランジスタを開発した。Pearsonはこのp-n接合型シリコンデバイスに光を当て、光起電力があることを初めて見出した。これが太陽電池の始まりである。最初の太陽電池は砒素 (As) をド

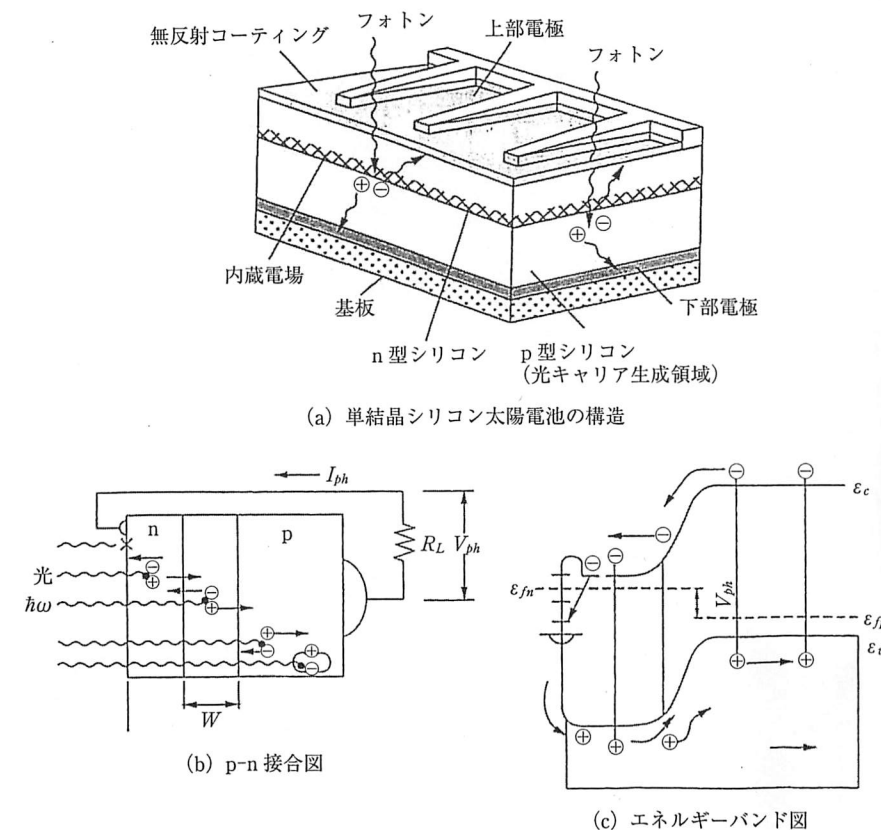


図 4.2.1 p-n 接合型単結晶シリコン太陽電池の構造と発電原理[5]

ープした n 型シリコン基板と、その表面にホウ素 (B) を拡散させた p 型シリコン薄膜で構成され、6% の太陽エネルギー変換効率が報告された[4]。4 年後の 1958 年には実用化され米国の人工衛星バンガード 1 号に機器の電源として搭載されている。それ以後、太陽電池の基本構造は変わっていない。

図 4.2.1 に p-n 接合型単結晶シリコン太陽電池の構造(a)と p-n 接合図(b)、エネルギーバンド図(c)を示す[5]。(b)(c)に示されるように光照射により n 型、p 型シリコン半導体内部にバンドギャップ励起により生成した電子-正孔対 ($\ominus\text{-}\oplus$) が生成する。電子-正孔対は p-n 接合界面 (W) の内部電界により $\oplus$ と $\ominus$ に分離され両端の電極に集まり、光起電力 V_{ph} が生成する。 ε_{fn} は n 型半導体のフェルミレベルを表し、n 型シリコンの伝導帯近くに位置する。 ε_{fp} は p 型半導体のフェルミレベルを表し、p 型シリコンの価電子帯近くに位置する。光起電力 V_{ph} は ε_{fn} と ε_{fp} の差として表される。太陽電池に負荷 R_L が接続され、両電極が接続されると p 型シリコンから n 型シリコンへ外部結線を通して光電流 I_{ph} が流れる。シリコン系太陽電池、CIGS 系太陽電池、CdTe 太陽電池、GaAs 系太陽電池、有機薄膜太陽電池など、ほとんどの太陽電池はこのような p-n 接合型機構で発電する。有機

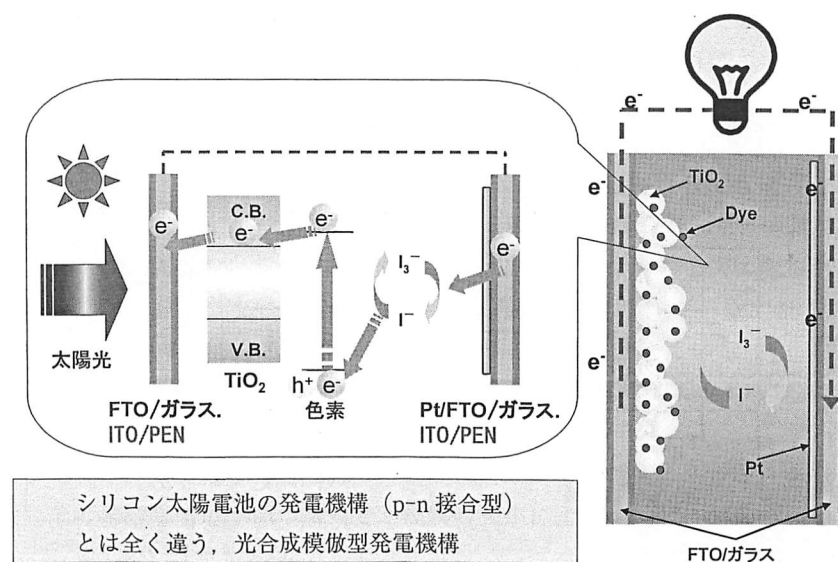


図 4.2.2 色素増感太陽電池の構造と発電原理

薄膜太陽電池ではドナー-アクセプター機構で説明することもあるが、P3 HT のようなドナーは p 型半導体であり、C₆₀ のようなアクセプターは n 型半導体と考えられる。

一方、色素増感太陽電池は、図 4.2.2 に示すように、従来の太陽電池と異なり発電機構や太陽電池の構成部材が異なっている。すなわち色素は、光吸収相と電荷分離相としての役割を果たす。色素が固定されている光電極の TiO₂ 薄膜は電子キャリア相として働き、色素と接触する電解質溶液に含まれる I^-/I_3^- レドックス成分は正孔キャリア相としての役割を果たす。光吸収相と電荷キャリア相が異なる材料で構成されているところが、従来の太陽電池と異なる。光誘起電子移動過程を色素が行う点は、天然の光合成の電子移動機構と類似していることから色素増感太陽電池は光合成模倣型発電機構ともよばれている。

では、太陽電池の性能はどのように表されるのだろうか。太陽電池のエネルギー変換効率 (η) は式 (4.2.1) で示される。すなわち太陽電池からの電気出力エネルギーを太陽電池に入った太陽エネルギーで割った値となる。太陽電池の性能を測定する場合は、ソーラーシミュレーターから照射する擬太陽光エネルギーを AM-1.5, 100 mW/cm² に設定する。AM (エア・マス, 通過空気量) とは太陽光が太陽電池に到達するまでに通過する空気量をいう。太陽光は通過する空気量により、その波長分布が異なってくる。したがって、AM-0 は大気圏外を意味し、AM-1.0 は直達光 (真上からの光) を意味する。AM-1.5 は天頂角 45° からの入射光を示す。

$$\eta = \frac{\text{太陽電池からの電気出力エネルギー}}{\text{太陽電池に入った太陽エネルギー}} \times 100 (\%) \quad (4.2.1)$$

$$\eta = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times ff}{P_{inj}} \times 100 = \frac{I_{sc}/S \times V_{oc} \times ff}{P_{inj}} \times 100 (\%) \quad (4.2.2)$$

$$ff = \frac{I_{MAX} \times V_{MAX}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (4.2.3)$$

具体的に変換効率は式 (4.2.2) のようになる。 J_{sc} は短絡電流密度 (mA/cm²)、 I_{sc} は短絡電流 (mA)、 V_{oc} は開放電圧 (V)、 S は光電極セル面積 (cm²)、 P_{inj} は入射光量で 100 mW/cm² である。 ff はフィルファクターとよばれる係数で、曲線因子ともよばれる。図 4.2.3 に太陽電池の電流-電圧曲線 (I-V 曲線) を示す。太陽電池の両極を結線接続したときに得られる電流

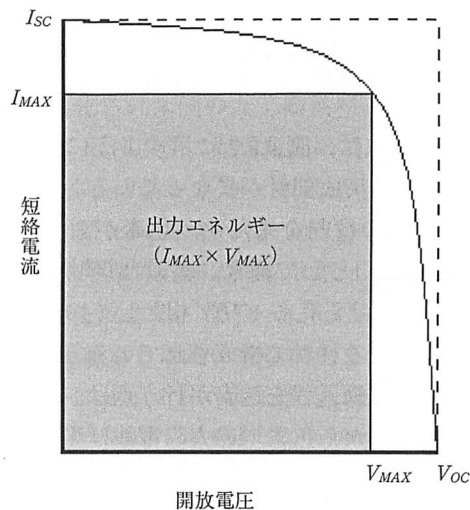


図 4.2.3 電流-電圧 (I-V) 曲線

は、最大電流であり I_{SC} となる。接続を切ったとき、抵抗が無限大となり電流は流れず、最大電圧である開放電圧 V_{OC} が得られる。また I-V 曲線で最大出力が得られる点 P の電圧は最大出力電圧 V_{MAX} となり、電流を最大出力電流 I_{MAX} となる。したがって、 ff は式 (4.2.3) で定義される。このように太陽電池の性能は、 J_{sc} と V_{oc} と ff の積で表されるので、太陽電池を高性能にするには、 J_{sc} 、 V_{oc} 、 ff の各々を最適化すればよいことになる。

(2.2) 太陽電池の現状と課題

・太陽電池の種類、生産量、性能

太陽電池にはどのようなものがあるだろうか。図 4.2.4 に太陽電池の種類を示す[6]。大きく分けてシリコン系太陽電池、化合物太陽電池、有機系太陽電池、その他の4つに分類できる。シリコン系と化合物太陽電池は実用化されているが、有機系太陽電池とその他の太陽電池は研究開発段階である。シリコン系太陽電池にも単結晶、多結晶、アモルファス、薄膜系タンデム太陽電池等、多くの種類がある。世界で生産される太陽電池の約 85% はシリコン系太陽電池である。また化合物太陽電池には CuIn(Ga)Se_2 (略称 CIGS) や CdTe などの II-VI 族系太陽電池があり、世界で生産される太陽電池の約 15% はこれらの太陽電池である。また、宇宙用等の特殊用途に使用される

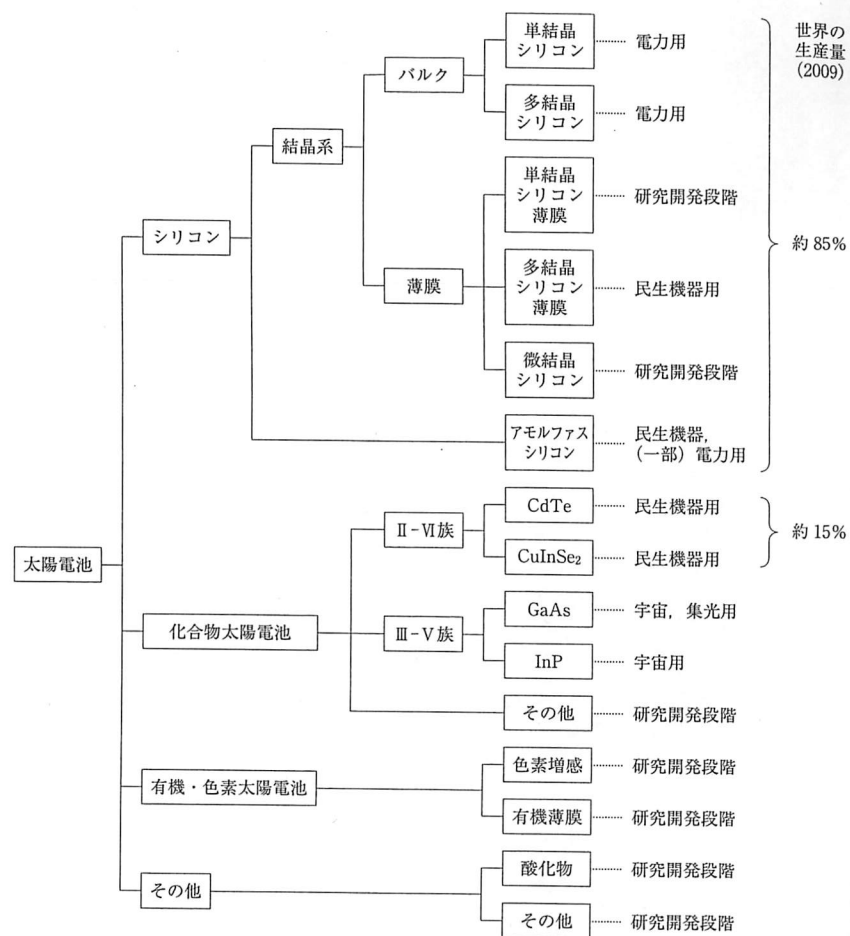


図 4.2.4 太陽電池の種類

GaAs や InP などの III-V 族系太陽電池がある。有機系太陽電池には色素増感太陽電池と有機薄膜太陽電池があり、まだ実用化されていない。その他の太陽電池としては、量子ドット太陽電池や中間バンド型太陽電池、マルチエキシトン型太陽電池などが挙げられる。変換効率 40% 以上の超高効率をねらう未来型太陽電池である。

太陽電池の生産量はどうか。地球温暖化問題の解決意識の高まりもあるせいか、太陽電池へのニーズは高く、ここ数年で世界の生産量は約 5 倍

表 4.2.1 研究室レベルの各種太陽電池の達成された最高性能 (2010),

太陽電池の種類	変換効率 (%)
単結晶シリコン	24.8
多結晶シリコン	20.3
アモルファスシリコン	14.5
薄膜多結晶シリコン	16.0
GIGS	20.0
CdTe	16.0
GaAs	26.0
InP	22.0
化合物半導体多接合	35.8
色素増感	11.3
有機薄膜	8.3
集光型多接合	41.6

評価された太陽電池のサイズは1 cm 角程度

に急増している。各国政府は、補助金や余剰電力購入制度、フィード・イン・タリフ制度のような普及支援体制を構築したことも生産量の急激な増加につながっている。2005年の全世界の太陽電池の生産量は2 GW (GW = ギガワット = 10^9 ワット) 弱であったが、2007年には約3.5 GW、2009年には約10.5 GWの太陽電池が生産されている。国別生産量では、中国、ドイツ、日本、台湾、米国と続く。日本は2005年には世界の生産量の約半分を生産していたが、今や約15%を占めるに過ぎない。中国、台湾などの新興国での生産の伸びが著しい。種類別の生産量では、多結晶シリコン、単結晶シリコン、CdTe、アモルファスシリコン、タンデムシリコン、CIGSと続く。太陽電池の使い方は、日本では屋根の乗せるような個別住宅用太陽電池が主であったが、近年ヨーロッパやアメリカを中心としてメガワット (10^6 W) 級の太陽光発電所 (メガソーラーシステム) 用のパネルとしての使われ方が多くなってきている。

太陽電池の性能 (変換効率) はどうか。表 4.2.1 に1 cm 角程度の研究室レベルの小さな太陽電池の現在の最高性能を示す。シリコン系太陽電池では、単結晶シリコンで約25%、多結晶シリコンで20%、薄膜多結晶シリコンで16%、アモルファスシリコンで約15%である。化合物半導体太陽電池ではCIGSが20%、CdTeが16%、GaAsで26%、タンデム型で35%、集光型タンデムで41%である。研究開発段階の色素増感太陽電池では11%、

有機薄膜太陽電池では8%となっている。一方、市販されている太陽電池の性能は結晶シリコン、多結晶シリコンで15~16%、薄膜多結晶タンデムでは19%、アモルファスシリコンでは8~10%、CIGSでは13~15%、安価なCdTeでは8~10%程度である。

・太陽電池の課題と研究開発

近年、太陽電池の生産量は急激に伸びているとはいうものの、人類のエネルギー需要に比べれば微々たる生産量であり、太陽電池が地球温暖化問題の解決に貢献するためには、累積生産量としてテラワット (TW = 10^{12} ワット) 級の導入が必要とされている。日本では2030年代には100 GWの導入を目指している。これにより2.5%のCO₂の削減が可能という。また2050年には全世界で10 TWの導入が必要とされており、それによるCO₂の削減量は30億トンとなり、全世界のCO₂の排出量の10%に相当するという。しかし、大幅な普及・導入には、太陽電池の低コスト化が必須である。近年の太陽電池の生産量の伸びは、上述した政策的な普及支援体制に支えられているものである。たとえば、市販の太陽電池を用いて生産される電力のコストは約45円/kWhであり、これは一般家庭が電力会社から購入している電力の料金、約23円/kWhの約2倍に相当する。また一般家庭において必要とする電力を供給できる太陽光発電システムの規模は3~4 kW程度とされており、このサイズの太陽電池システムの購入価格は150~200万円である。日本における平均日照時間を年間1000時間として、3 kWの太陽光発電システムで発電できる電力のコストは23円/kWhとして6.9万円/年となる。3 kWの太陽光発電システムを150万で購入したとすると $150 \text{ 万} \div 6.9 \text{ 万/年} = 21.7$ 年となり、太陽電池システム購入の減価償却に約22年かかることになる。したがって、低コストな太陽電池を開発することが太陽電池開発の最も重要な目標である。また、より高性能な太陽電池を開発できれば、単位面積・時間あたりの発電量が増えるので、当然太陽電池の低コスト化にもつながる。

このような背景から安価で高性能な太陽電池の開発が全世界で進められているが、日本では政府が中心となり太陽電池研究開発のロードマップ (PV 2030+) を作成している[7]。最終目標は2030年までに、太陽光発電による電力コストを、現行の電力の生産コスト並みの7円/kWhまで下げることである。中間目標として2020年までに14円/kWhすることを掲げている。い

わゆる“Grid Parity”の実現である。この目標実現に向けて、現在、産官学で研究開発が積極的に行われている。

・太陽電池と表面科学

高性能な太陽電池を作製するためには、太陽電池構成材料の表面や接合界面の制御が非常に重要となる。すなわち、入射光や生成する電子のエネルギー損失を避ける表面・界面作製技術、制御技術が必須である。したがって、それらの技術を支える表面科学は、太陽電池の高性能化にとっても重要な学問領域である。p-n 接合型太陽電池として結晶シリコン太陽電池と色素増感太陽電池における表面・界面制御について説明する。

結晶シリコンの理論的最大変換効率は、28% から 29.8% といわれている[8]。市販されている結晶シリコンの変換効率は 15~18% 程度である。その差のエネルギー損失には、

- ・発電に有効な光の電池表面での反射により失われる反射損失
- ・光吸収により生成された電荷キャリアが太陽電池の表面や背面電極との界面での再結合により失われる表面再結合損失
- ・生成された電荷キャリアが半導体バルクで再結合して失われるバルク再結合損失
- ・電流が流れる際に電極ならびに半導体バルク内の電気抵抗により熱となり損失される直列抵抗損失

などが考えられる。このうち、反射損失や表面再結合損失は表面、界面の制御により防ぐことができる。たとえば太陽電池表面に MgF_2 や TiO_2 、 CeF_3 などの反射防止 (anti reflecting, AR) 膜を装着することにより反射損失を低下させることができる。また、テクスチャー構造を形成することにより、入射光をバルク内で乱反射させる光閉じ込め効果や光の有効浸透深さの増大を図り、性能を向上させることができる。同様に裏面電極にも乱反射処理 (back surface reflection, BSR) を行い、光閉じ込め効果を発現させることができる。一方、表面再結合損失を低下させるためには、シリコン結晶表面に SiO_2 膜や SiN_x 膜を形成したり、水素処理をしたりして不動態化処理 (パッシベーション) を行うことが有効とされている。

図 4.2.5 にはオーストラリアのニューサウスウェールズ大学が試作した変換効率が世界最高の 24.5% である太陽電池 (PERL 型太陽電池) の構造を示す[9]。表面リソグラフィーにより、逆ピラミッド型構造を作製し、その

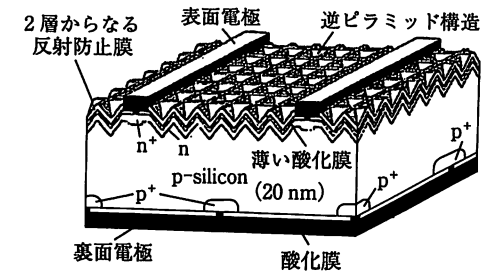


図 4.2.5 オーストラリアのニューサウスウェールズ大学が試作した世界最高性能の単結晶シリコン太陽電池 (PERL 型太陽電池) の構造[9]

表面を酸化して SiO_2 膜を形成し、表面には 2 層の反射防止膜を装着している。裏面も酸化して、全面に光反射用の金属膜を蒸着している。さらに電極付近のシリコンはドーパ量を多くして、ハイドロ型 (n^+ 型や p^+ 型) にすることにより低抵抗化と再結合低減を実現している。その結果、変換効率 24.5% を達成した。このように太陽電池の表面・界面制御は高性能化に必須な技術となっている。

色素増感太陽電池 (図 4.2.2) においても、性能向上のための表面・界面の制御は重要である。たとえば Balck dye という光吸収端が 850 nm で可視光領域全域に光吸収をもつ色素を用いた色素増感太陽電池では、理論変換効率は約 18% と見積もることができる。しかし、通常の作製法で得られる変換効率は 8~9% であり、両者に大きな開きがある。考えられる変換効率低下の主要因子を図 4.2.6 に示す。まず (1) 光透過ロスがある。入射した光を色素が十分に吸収しきれない場合である。この場合、直径 20 nm 程度の TiO_2 ナノ粒子の焼結体からなるメソポーラス TiO_2 光電極の表面に直径 400 nm 程度の TiO_2 大粒子を配置することにより、入射して色素に吸収されない光を散乱させて、色素による光吸収率を向上させる工夫がされている。これにより性能は 1% 以上向上する。次に (2) 副反応が考えられる、すなわち、光励起色素から TiO_2 の伝導帯に注入された電子が電極方向に移動するのではなく、電解質溶液方向に移動して TiO_2 光電極表面から電子が漏れ出し、電解質溶液中の電子アクセプターである I_3^- と反応して、電子のロスにつながる反応である。この副反応を抑制するためには、 TiO_2 表面の色素の固定されていない表面を、デオキシコール酸 (DCA) や、強塩基のターシ

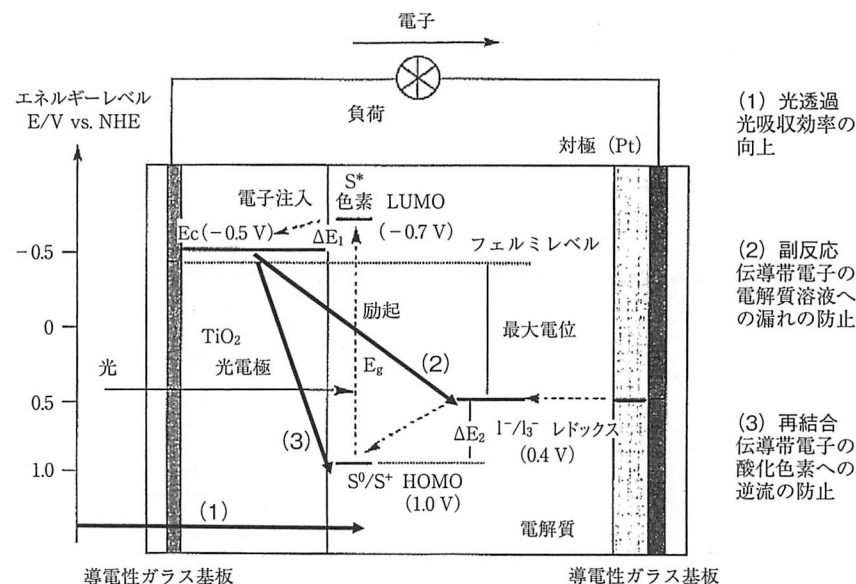


図 4.2.6 色素増感太陽電池の性能を低下させる主要因子

ャリーブチルピリジン (TBP) で修飾することにより, TiO_2 表面からの電子の漏れを抑制し, J_{sc} のみならず V_{oc} や ff も向上させ, 性能を向上させることができる。これにより変換効率を 1% 以上向上させることができる。その他, 光電極基板には反射防止膜を装着することにより 0.2~0.3% 性能が向上する。その結果, 変換効率は 11~12% まで向上するが, 依然として理論効率 18% とのギャップは大きく, その最適化が今後の課題となっている。

(3) 様々な太陽電池

図 4.2.4 に示すように様々な太陽電池が実用化されたり, 研究開発が行われたりしているが, 代表的なものについて紹介しよう。

(3.1) シリコン太陽電池

シリコン太陽電池は結晶系シリコン太陽電池と薄膜系シリコン太陽電池に分類される。結晶系シリコン太陽電池には単結晶シリコン太陽電池と多結晶シリコン太陽電池がある。いずれも結晶シリコンを使用した太陽電池であり, 熔融した高純度のシリコンから単結晶シリコンインゴットや, キャスト法により多結晶シリコンインゴットを作る。次に, それを 200 μm 程度の膜厚にスライスしたウエハーを用いてユニットセルを作製し, それらをつなぎ

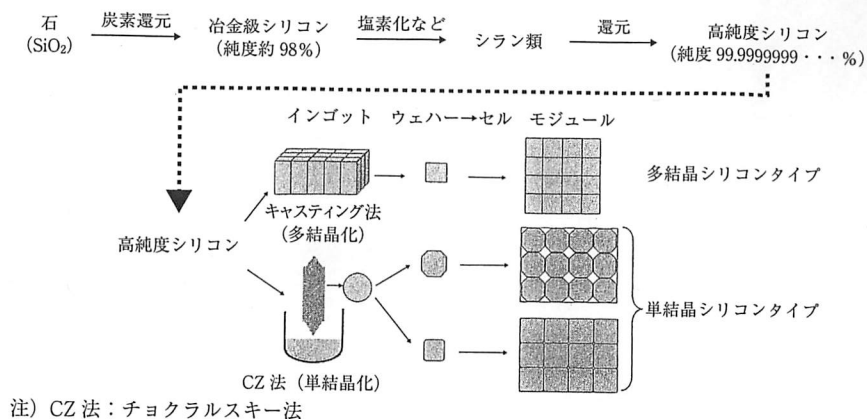


図 4.2.7 結晶シリコン太陽電池の製造工程[10]

合わせて太陽電池モジュールとする。図 4.2.7 に結晶シリコン太陽電池の製造工程を示す[10]。日本では, シャープ, 京セラ, 三洋電機, 三菱電機[11] 等が製造販売している。性能は, 単結晶シリコン太陽電池で 13~18%, 多結晶シリコン電池で 12~17% 程度である。また, 三洋電機では n 型単結晶シリコンの両面をプラズマ CVD 法で n 型および p 型のアモルファスシリコン薄膜で処理した高性能シリコンヘテロ接合太陽電池 (HIT 太陽電池) を販売している[12]。性能は結晶シリコン太陽電池よりも高く, 10 cm 角サブモジュールで 23%, モジュールで 20% 程度の性能が出る。

薄膜系シリコン太陽電池にはアモルファスシリコン (a-Si) 太陽電池と多結晶シリコン (poly-Si) 太陽電池がある。多結晶シリコン太陽電池は微結晶シリコン ($\mu\text{C-Si}$) 太陽電池とも呼称される。シラン (SiH_4) を原料としてプラズマ CVD 法で, ガラス基板等の基板上的に作製される 1~3 μm 程度のシリコン薄膜である。アモルファスシリコン太陽電池では性能を上げるため p-n 型ではなく, ドープを行わないシリコン層 (真性層, i 層) を p と n の間に挟んだ p-i-n 型で作製され膜厚は 1 μm 以下である。性能は市販モジュールで 8~10% である。三洋電機, カネカ, 富士電機総研が製造を行っている。図 4.2.8 に薄膜系シリコン太陽電池のモジュール作製工程を示す[13]。基板上に形成された透明導電膜やシリコン薄膜をレーザースクライブ加工することにより集積型モジュールを作製する。多結晶シリコン太陽電池のシリコン膜厚は 2 μm 程度で, 性能は 10% 程度である。アモルファスシリコン

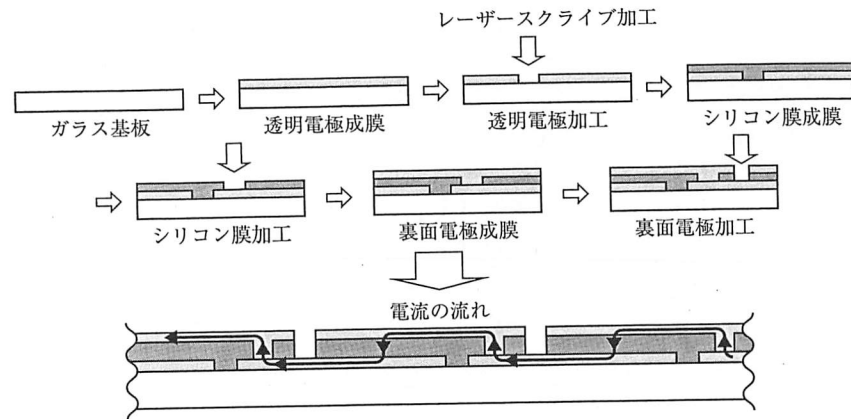


図 4.2.8 薄膜系シリコン太陽電池のモジュール作製工程[13]

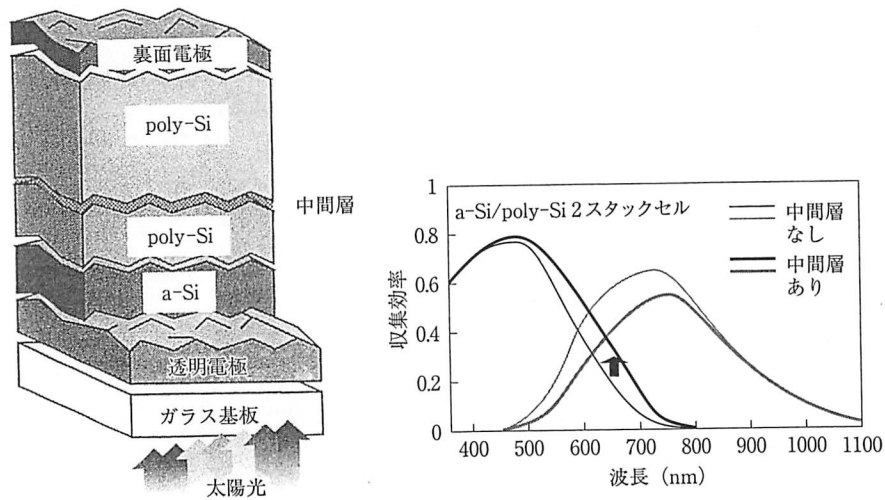


図 4.2.9 2 接合タンデムセル（ハイブリッドセル）の構造と分光感度特性（収集効率）[14]

太陽電池も多結晶シリコン太陽電池もシリコン使用量が少なく、低温で安価に作製できるが、性能はそれほど高くないので、両者を重ねた多接合（タンデム）型太陽電池の作製が行われている。アモルファスシリコンの光吸収領域は 400 nm から 800 nm 程度で最大吸収波長は 500 nm 前後である。多結晶シリコンの光吸収領域は 500 nm から 1100 nm 程度で、最大吸収波長は

750 nm 前後である。両者の光吸収領域を重ね合わせることで、幅広い分光感度特性を達成できるからである。図 4.2.9 にカネカが発表した 2 接合タンデムセル（ハイブリッドセル）の構造と分光感度特性（収集効率）を示す[14]。屈折率の最適化された透明中間層を 2 つのセルの間に挿入することにより性能が向上し、45 cm × 91 cm サイズの太陽電池モジュールで 2 接合薄膜シリコン太陽電池としては世界最高の変換効率 13.5% が達成されている。表面、界面の光マネージメントが重要であることを示している。

(3.2) CIGS 太陽電池

CIGS 太陽電池はシリコン太陽電池に次いで、一般向けに販売された太陽電池で第 2 世代の太陽電池ともいわれる。1974 年に米国ベル研究所で初めて太陽電池性能が確認された。日本では、昭和シェル石油系のソーラーフロンティアと本田技研工業系のホンダソルテックが販売している。CIGS 太陽電池は基本骨格である CuInSe_2 の In の一部を Ga に置換した構造をもつ。約 20% の Ga 置換で、変換効率が高い太陽電池となる。たとえば $\text{Cu}(\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25})\text{Se}_2$ の構造で、変換効率 17.2% と報告されている[15]。研究室レベルのミニセルの世界最高性能は NREL が報告した 20% である。図 4.2.10 に CIGS 太陽電池の構造を示す[16]。Na を含む青板ガラス基板に Mo 電極が形成され、その上に p 型の CIGS 層（1~2 μm ）が積層され、さらに n 型の CdS 層（70 nm）、透明導電層の n 型 ZnO が積層されている。膜厚は全体でわずか数 μm であり非常に薄い太陽電池となる。光吸収層の CIGS 層が高い光吸収係数をもっているため、薄くても十分に太陽光を吸収するからである。

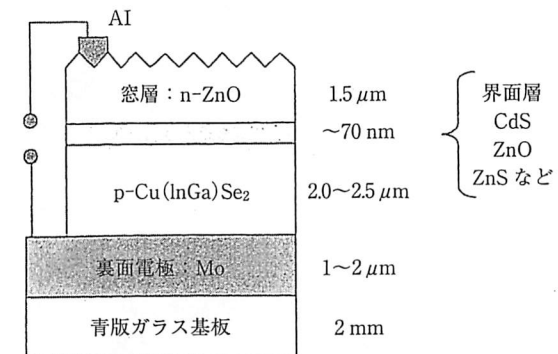


図 4.2.10 CIGS 太陽電池の構造[16]

このようにごく薄い CIGS 太陽電池は、多元蒸着法やセレン化法によって作製されている[17]。多元蒸着法は In, Ga, Cu, Se を多段階に分けて蒸着する方法である。まず 400℃ 程度で In + Ga + Se を蒸着する、次に温度を 600℃ まで上げて Cu + Se を蒸着し、最後に In + Ga + Se を温度を微妙に制御しながら蒸着する方法である。セレン化法は、スパッタ法により Cu-Ga 合金を Mo 基板に着け、さらに In をスパッタ法で、その上に着ける。次に H_2Se ガスを用いてセレン化を行い CIGS 層を形成し、さらに H_2S ガスで CIGS の表面を硫化する。モジュールの作製にはメカニカルスクライブによりパターン化、集積化を行っている。モノリシックなモジュールの性能は 13~16% であり、2009 年にソーラーフロンティアが宮崎県で年産 1 GW の生産（2011 年に生産）可能な工場建設を発表して注目されている[18]。また、フレキシブル基板を使用した CIGS 太陽電池や CIGS が、耐放射線特性も良いことから宇宙用太陽電池にも使用される可能性がある。

(3.3) 色素増感太陽電池

色素増感太陽電池（DSC）は 1990 年にスイスのローザンヌ工科大学（EPFL）のグレッツェル（Graetzel）が変換効率 7% の DSC を発表して以来、世界各地で精力的に研究開発が行われている[19, 20]。DSC の特徴は、材料がシリコン等に比べて安価な酸化物や色素、電解質溶液を使用すること、真空装置を用いることなく大気下で 500℃ 程度の焼成過程を経て作製することができるため、従来の太陽電池より安価製造できる点である。現在、

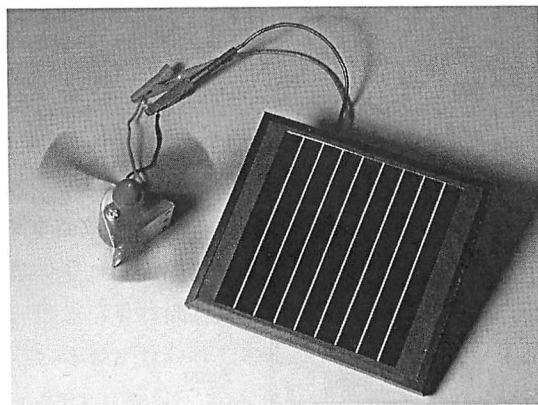


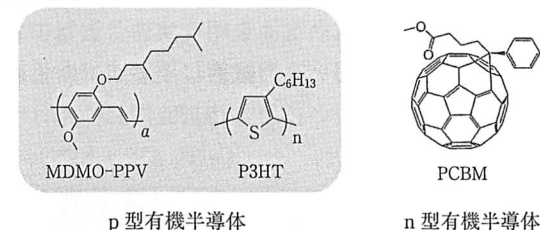
図 4.2.11 東京理科大学が開発した 10 cm 角色素増感太陽電池モジュール[21]

モジュール作製技術や屋外実証試験が行われている。5~6 年で実用化されると見られる。図 4.2.11 は東京理科大が作製した 10 cm 角サブモジュール DSC で、変換効率 9~10% 程度が達成されている[21]。国内では、ソニーやフジクラ、アイシン精機—豊田中研がモジュール開発をリードしている。フジクラは DSC の実用化に向けて屋外実証試験を行っている[21]。

(3.4) 有機薄膜太陽電池

1992 年にオーストリアのリンツ大のサリチフチ（Sariciftci）らが p 型ポリマー有機半導体 MDMO-PPV と n 型有機半導体 PCBM を混合したバルクヘテロ接合型有機薄膜太陽電池で変換効率 2% を報告して注目された[22]。それ以来、有機薄膜太陽電池（OPV）は、実用化に向けて世界的に精力的に研究開発されている。OPV の特徴は、その構成材料がポリマーや C_{60} 誘導体などで安価なこと、DSC と同様に、その作製に真空装置を必要としないこと、低温で P 型材料と n 型材料の混合物を基板に塗布するだけで作製できるため安価なことである。また、フレキシブルな透明プラスチック基板を用いることにより、軽量・フレキシブルな太陽電池がロール・ツー・ロールで高速に作製できることが魅力である。OPV の構成材料、構造、発電機構を図 4.2.12 に示す[22]。OPV に入射した太陽光は、p 型半導体である

(a) 代表的有機半導体



(b) OPV の素子構成と発電機構

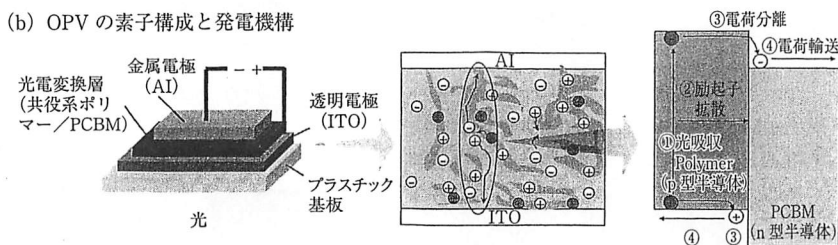


図 4.2.12 有機薄膜太陽電池（OPV）の材料構成、構造、発電機構[22]

MDMO-PPV や P3HT により吸収され、 $\oplus$ と $\ominus$ が対となっている励起子が発生する。その励起子が p-n 接合界面まで拡散移動して、電荷分離される。分離された電荷 $\oplus$ と $\ominus$ は、それぞれの対極へ電荷輸送される。これが発電メカニズムである。現在、研究室レベルの性能で米国ベンチャー企業の Konarka から 8.3% の性能 (米国 NREL で評価) が報告されている[23]。日本でも、三菱化学、住友化学、東レ、パナソニック、産総研など多くの研究機関が研究開発を進めている。

まだ性能は低いが、Konarka 社は世界に先駆けて、フレキシブル OPV の販売を行っている[23]。フレキシブル・軽量で安価、かつ 10% 程度の性能が発揮できれば、パソコンや携帯電話、テント等、太陽電池の使用場所は大幅に拡大され、大きな市場が生まれよう。これからの発展が楽しみな太陽電池である。

(4) おわりに

太陽電池の現状について紹介した。太陽電池はクリーンなエネルギーの生産という立場から、その重要性は、これからもますます大きくなると思われる。その太陽電池の性能向上には、表面や界面の物性や化学特性の制御が重要であり、表面科学が大きな役割を果たすことができる領域であることも明らかである。多くの表面科学研究者が太陽電池開発に参加することを期待したい。

紙面の都合で、すべての種類の太陽電池を紹介することはできなかった。太陽電池については、基礎から応用・専門技術に至るまで多くの書籍が発行されているのでそれらを参照されたい[5, 10, 19, 25, 26]。

においては様々なミクロな現象をどのようにしてマクロな系に応用するかという別の次元のテーマも存在し、面白くも悩ましい。

引用・参考文献

- [1] R. Smalley: MRS Bulletin **30**, 412 (2005).
- [2] 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第4次評価報告書統合報告書 (http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/syr_spm.pdf).
- [3] WBGU ウェブサイト (http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003engl.pdf).
- [4] D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson: J. Appl. Phys. **25**, 676 (1954).
- [5] 濱川圭弘編: “太陽電池” (コロナ社, 2004) p. 29, 30.
- [6] NEDO ウェブサイト (<http://app2.infoc.nedo.go.jp/kaisetsu/neg/neg01/index.html>).
- [7] NEDO ウェブサイト (<http://www.nedo.go.jp/library/pv2030/pv2030+.pdf>).
- [8] T. Tiedje et al.: IEEE Trans. on Electron Devices **31**, 711 (1984).
- [9] M. Green et al.: Progress in Photovoltaics, Research and Applications **13**, 387 (2005).
- [10] 小長井誠, 山口真史, 近藤道雄編: “太陽電池の基礎と応用” (培風館, 2010) p. 51.
- [11] 三菱電機ウェブサイト (<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2010/0804.html>).
- [12] 小長井誠, 山口真史, 近藤道雄編: “太陽電池の基礎と応用” (培風館, 2010) p. 86.
- [13] 小長井誠, 山口真史, 近藤道雄編: “太陽電池の基礎と応用” (培風館, 2010) p. 120.
- [14] 小長井誠, 山口真史, 近藤道雄編: “太陽電池の基礎と応用” (培風館, 2010) p. 114.
- [15] 濱川圭弘編: “太陽電池” (コロナ社, 2004) p. 150.
- [16] 濱川圭弘編: “太陽電池” (コロナ社, 2004) p. 141.
- [17] 小長井誠, 山口真史, 近藤道雄編: “太陽電池の基礎と応用” (培風館, 2010) p. 155.
- [18] ソーラーフロンティアウェブサイト (<http://www.solar-frontier.com/jp/family/solacis/result/index.html>).
- [19] 荒川裕則企画監修: “色素増感太陽電池” (シーエムシー出版, 2001).
- [20] 荒川裕則編著: “色素増感太陽電池の最新技術 II” (シーエムシー出版, 2007).
- [21] 荒川裕則: 電子情報通信学会誌 **93**, 198 (2010).
- [22] 小長井誠, 山口真史, 近藤道雄編: “太陽電池の基礎と応用” (培風館, 2010) p. 300.
- [23] Konarka 社ウェブサイト (http://www.konarka.com/index.php/site/pressreleasedetail/konarkas_power_plastic_achieves_world_record_83_efficiency_certification_fr).
- [24] Konarka 社ウェブサイト (<http://www.konarka.com/index.php/power-plastic/about-power-plastic/>).
- [25] 日本セラミックス協会編: “太陽電池材料” (日刊工業新聞社, 2006).
- [26] 産総研 太陽光発電研究センター編: “とことんやさしい太陽電池の本” (日刊工業新聞社, 2007).
- [27] W. Vielstich, A. Lamm and H. Gasteiger (Eds): “Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology, and Applications” (Wiley, 2003).
- [28] 犬飼潤治: “ナノテクのための物理入門” 日本表面科学会編 (共立出版, 2007) p.