

グリーンナノ企画特集<第8回>

# 革新型高効率第3世代太陽電池 を目指す国際拠点



東京大学 中野義昭教授に聞く

## 1. はじめに

平成19年6月にドイツのハイリゲンダムで開催されたサミットG8で、日本が提案した「Cool Earth 50」、即ち、「世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比して2050年までに半減する」という長期目標の設定が合意された。これに応じて経済産業省は2008年3月に「Cool Earth — エネルギー革新技術計画」を取り纏め、重点的に取り組むべき21の課題を定めた。その一つの革新的太陽光発電に対し、経済産業省資源エネルギー庁は平成20年7月に東京大学先端科学技術研究センターと産業技術総合研究所の2カ所を革新型太陽電池国際研究拠点に選定した。今回、2つの拠点のうち、新概念による高効率太陽電池の開発を目指す東京大学拠点のリーダーを務める同センター 情報デバイス分野 中野義昭（なかのよしあき）教授を訪ね、太陽電池を廻る動き、東大拠点の狙い、国際拠点の意味、開発内容と体制、高効率化技術についてうかがった。

## 2. 太陽電池を廻る動き

### 2.1 国際的な動き

日本は1973年に資源エネルギー庁が発足し、サンシャイン計画で太陽電池の開発を進めた結果、累積導入量で世界をリードして来たが、今世紀に入ってドイツが急激に導入量を伸ばし、2004年以降は累積、年間のいずれも日本を上回る。ヨーロッパではフィード・イン・タリフ\*のお蔭もあって太陽光発電が盛んになっている。太陽光発電の導入量はドイツとスペインが多い。ドイツは気候変動が大きいので日照時間に問題があり、スペインの方

\*：フィード・イン・タリフ：固定価格買取制度、ドイツでは電力料金より高くなる20年で設備償却可能な価格を設定。）

が気候的には恵まれている。

生産量でも日本のS社がトップだったが、ドイツのQ社にトップの座を奪われた。さらに2006年に日本のK社に次ぐ世界第4位だった中国のS社は最近3位に浮上した。太陽光発電がエネルギー供給の主役にならねばならない時代になって、日本は外国に遅れるようになってしまった。高純度Siの資源は海外に依存しているため原料供給を断たれる恐れもある。

地球環境・エネルギー問題が顕在化すると共に、海外の太陽光発電の研究開発も一層進展しつつあり、日本も国を挙げて取り組む必要に迫られている。

### 2.2 クールアース50における開発ロードマップ

G8の合意と上記の国際的な動きの下に経済産業省の「Cool Earth — エネルギー革新技術計画」は2008年3月に取り纏められた[1]。温室効果ガスの大幅削減の実現には既存技術の延長線上にない革新的な技術が必要であるとし、その一つに革新型太陽光発電が選ばれている。上記[1]に記された太陽光発電技術の現状と技術開発ロードマップは表1のよう纏められよう。技術の現状として既に実用化された第1世代は一層の効率向上・低コストを課題とする。技術開発ロードマップとして第2世代・第3世代の技術内容と目標が示され、中長期的視野に立った革新的進化の必要性が述べられている。

表1 太陽光発電技術の現状と技術開発ロードマップ

世代	太陽電池技術	現状/目標
第1	結晶系シリコン	実用化／一層の効率向上、低コスト化
第2	超薄型結晶シリコン、超高効率薄膜、有機薄膜、色素増感等	2030年において発電コスト7円/kWh、発電効率40%
第3	量子ナノ構造や新原理	2050年に向け、発電効率40%超

## 2.3 国際研究拠点の選定

開発の具体化のため、資源エネルギー庁は変換効率が40%（現在の3～4倍）、かつ発電コストが7円/kWh（現在の7分の1）の革新型太陽電池を2050年に向けて実用化することを目指した技術開発を平成20年度から7年間の予定で開始した。このため、2008年7月にその中心となる革新型太陽電池国際研究拠点として、東京大学先端科学技術研究センター（以下東大）及び産業技術総合研究所つくばセンター（以下産総研）の2箇所を選定した。両拠点を中心に、国内の大学・企業や、諸外国の世界トップレベルの研究機関とも連携しつつ技術開発を進めるとしている[2]。研究開発は長年、太陽光発電に力を入れ、指導的役割を果たして来た新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を通して実施される。各研究拠点の概要は表2に示した。

表2の開発内容にある量子ドット型及び多接合型太陽電池の概念図を図1に示した。量子ドット型は3次元に量子ドットを配列し、量子準位間の遷移、量子準位を基にできたミニバンド伝導を通じて太陽光発電を行う。多接合型は波長感度の異なるセルを積層して効率向上を図る。

表2 革新型太陽電池国際研究拠点の概要

No.	拠点	開発内容	参加連携	海外連携
①	東京大学先端科学技術センター	新概念を用いた量子ドット型（理論効率60%）等	シャープ、新日本石油等参加	米国エネルギー省傘下の研究機関等
②	産業技術総合研究所つくばセンター	・ 薄膜を積層した多接合型等 ・ 各層で異なる波長の光を吸収し、全体として効率向上	三菱重工等参加、東京工業大学のグループと連携	欧州の研究機関等

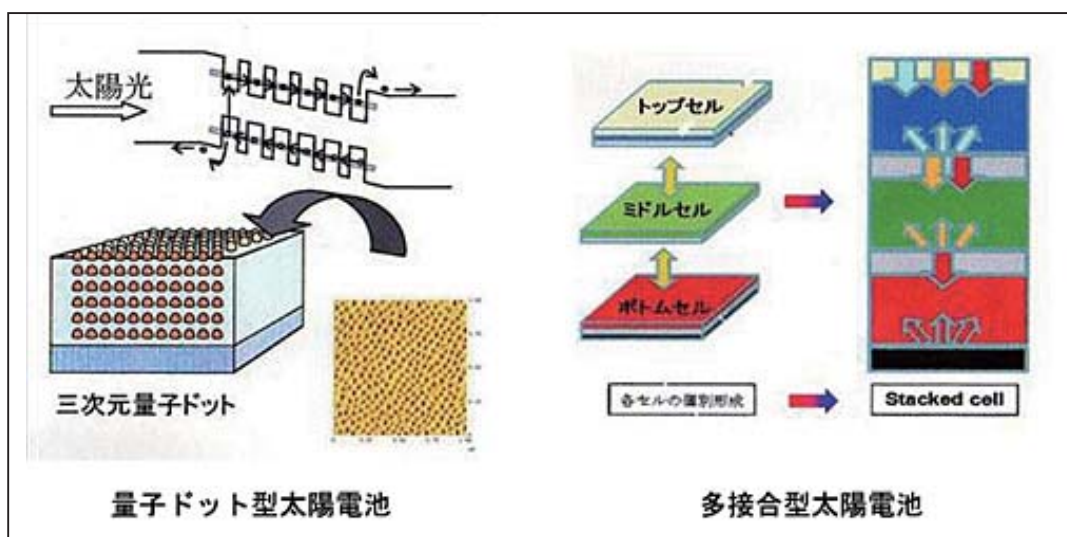


図1 各拠点で取り上げる太陽電池構造の概念図 [2]

## 3. 東大拠点の狙い

### 3.1 異分野からの参画

長年の研究開発から、日本では太陽光発電を手掛けて来た人々による技術の流れができてしまい、新しい人が入り難い状況もあった。このため、意外性のある爆発的な伸びが期待できなくなってしまった。このような日本の置かれた状況を打開するには研究開発に参加する人の幅を広げ、新しい考え方を加えることが必要と考えられた。

このような状況の下で、産総研中心に長年の経験、業績に基づいて革新を進めるのに加えて、オフロードの行き方が求められた。経済産業省は新しい人々の参加を募り、これまでは太陽光発電関係の研究が十分とはいえなかった東大がこれに応じた。幸い量子ドット太陽電池の研究者（岡田至崇准教授）が2008年春から東大先端研に加わった。一方、中野教授らは化合物半導体を用いた発光素子などの研究を行って来た。これまでの研究が電気から光への変換を基にするものであったのに対し、太陽光発電は光から電気への変換だから、逆の過程である。しかし原理は共通だからこれまでの技術を活用できると考えた。発想の不連続を逆に利用しようという考えである。

### 3.2 高効率をキーワードに

東大拠点での開発は高効率をキーワードにする。太陽光発電の開発目標は火力発電並みの発電コストの達成である。その目標を達成するにはコストと効率の改善が必要となる。従来の開発はセルコストの低減を主とするコスト重視の方向であった。東大拠点では効率を重視し、50%以上の高効率を目標とする。Siでは30%が限界であるが、化合物半導体はバンドギャップ制御ができるから60～70%を狙える技術となる。

高効率のために選んだ従来と異なるもう一つの視点は集光により、小面積で大電流発電を行うことである。高効率のパワーデバイスにし、大電力のダイナモを作る。小面積に集光するのでセルコストの重要性は低下する。セルコスト低減を重視する行き方は広い面積に降り注ぐ太陽光を使う塩田型である。これに対し効率を狙う行き方は一点集中型である。いわば弱電から強電の世界への転換に当る。発電においては効率こそが基本であることが最近認識されるようになった。発電機も最初はセルコストに相当する部分を問題にしたが、この部分のコストが下がって来たため、効率に重点が移って来ている。東大拠点の狙いは長い歴史を持つ重電の世界に倣ったアプローチに相当する。

### 3.3 東大拠点のターゲット

東大拠点のターゲットは表1の第3世代太陽電池である。図2は効率とコストを他の世代の太陽電池と比較し

ている。

緑で表された第一世代の太陽電池(領域)は単結晶から、多結晶Si, a-Si(アモルファスSi)へとコストを下げて来たが、効率は20%程度である。薄膜系の第二世代(ピンクの領域)ではSi系以上のコスト低減が期待される。これに対し、現在の化合物半導体のコストは図の右に飛び出してしまふ。これを5000倍の集光によって図中の左向き赤矢印のように、高効率を保ちながらコストを下げる。これを2030年に向けて赤の第三世代の領域に持って行くことを狙う。

薄膜型、CIGS(銅インジウムガリウムセレン)系は主にセルコストを下げることを狙い、効率追求は二義的になる。しかし、セルコストが下がると他のコストが見えてくる。そこで効率重視の重電的アプローチをとることにした。このアプローチは大電流密度型のデバイスを用いるから、信頼性や発熱の問題を解決しなければならない。

## 4. 国際拠点とは

### 4.1 世界を視野

従来、「国際」と名付けたものには国際連携が多い。今回の「国際」は連携に加えて、従来の国家プロジェクトと異なる狙いを示そうという考えが入っている。従来の国家プロジェクトは日本という国の競争力強化を狙った。適用対象もエネルギーなら国内の電力を補うことを目的としていた。これに対し、今回の太陽光発電プロジェクトでは世界を見る。

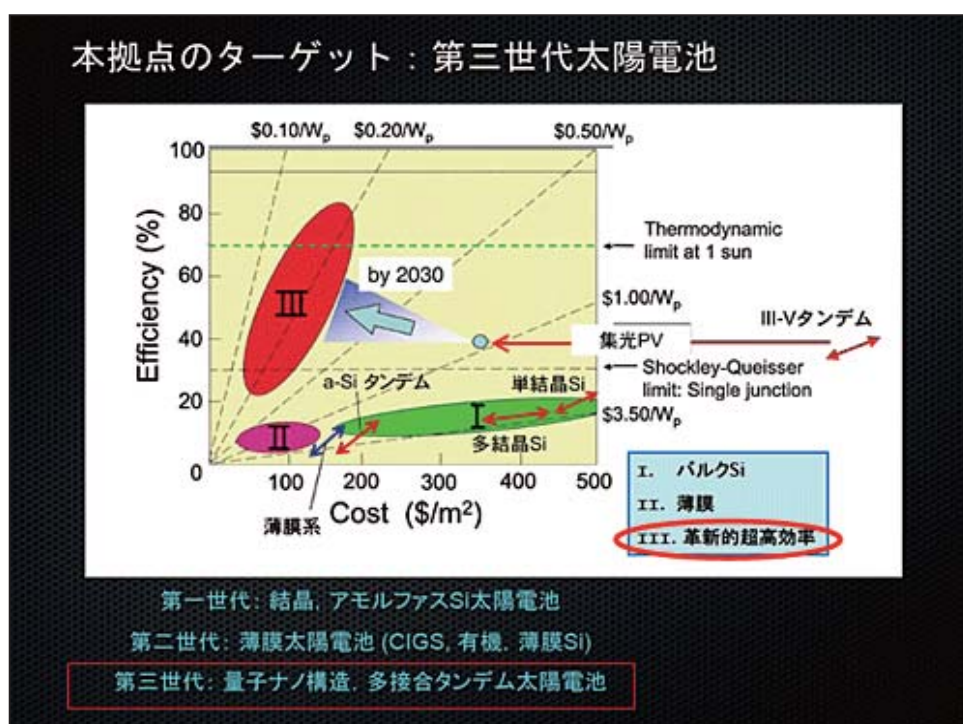


図2 東大拠点のターゲット (提供: 東京大学 中野義昭先生)

世界のエネルギー消費は発展途上国の経済成長に伴って急増が予想されるから、発展途上国の使うエネルギーを太陽光由来のものにしないとCO<sub>2</sub>が増えるだけでなく、エネルギー需要に供給が追いつかない。今回のプロジェクトでは将来エネルギーを消費するようになる国々を巻き込んで、その市場に適合するものを開発する。産油国やインドなどこれからエネルギーを消費する国と自然エネルギー供給で協力して行く。世界のCO<sub>2</sub>問題解決に貢献するのが最大の狙いである。

もう一つの国際化の狙いはヨーロッパやアメリカ、さらにはオーストラリアなど化合物半導体中心に太陽光発電開発に力を入れている国々と技術面で協力しあうことである。これは競争でもあるが、お互いに刺激しあうことにより、全体の技術が向上し持続可能な社会実現に貢献するというグローバルな考えである。

東大拠点で取り上げる太陽電池は集光技術を用い、大電流を小面積のセルで作出す。このようなデバイスは強い光を集め易い砂漠などに設置するのに適する。既に、光の強い宇宙空間に用いる太陽電池では化合物高効率主流になり、この考え方はイラクなどの砂漠での電力調達にも役だった。このため、アメリカは世界のトップを猛烈な勢いで走り、軍や航空機関係から太陽光発電に大きな投資がされている。このままだと日本は安いセルを作る流れに巻き込まれ、押し流されてしまう。高効率という大きな市場の期待されるところに乗り出し、強力に推進することで世界の開発競争に参加して行く。

## 4.2 国際連携強化へ

国際拠点事業の一つとして2009年3月2日～3月3日に「革新的太陽光発電国際シンポジウム2009」が開かれた。東大先端研が主催し、東工大、産総研の共催で、NEDOが後援した。シンポジウムの前に行ったこの記事のインタビューで、中野先生は次のように語られた。このシンポジウムは革新型太陽電池国際研究拠点の外向きのキックオフである。先進国と共に将来の消費国になる発展途上国もシンポジウムに参加する。オーラルセッションは招待講演が中心で、先進国が多い。NEDO研究開発の成果は主としてポスターセッションで発表する。国際拠点と謳った活動の一つであり、このシンポジウムを皮切りに外国とのネットワークを組織的なものにする。これまでの個人ベースのものを研究機関相互のもの、国家間の連携に広げる。2国間だったものを3国間に拡大する。シンポジウムの直後に日欧(EU)政府の専門家会議が開催され、欧州各国政府の支援方法が協議される予定である。この動きは今後、日米、日豪に展開する。

## 5. 開発内容と体制

### 5.1 開発内容

東大拠点で実施する超高効率太陽電池の研究開発の内容を図3に示した。

内容の第1(図中①)は集光型多接合太陽電池で、豊

## ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発 研究開発内容

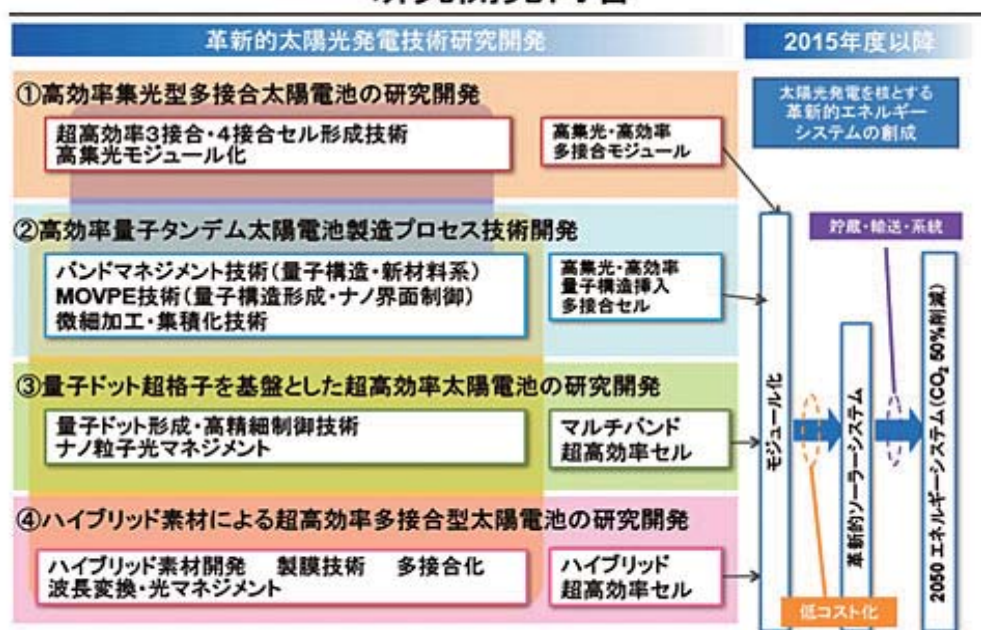


図3 超高効率太陽電池の研究開発の開発内容 (提供: 東京大学 中野義昭先生)

田工業大学の山口真史教授が手掛けて来たものを中心とする [3]。化合物半導体を用いて高集光・高効率の達成を図る。集光，多接合は Si 系でも可能だが，本拠点では材料自由度の高い化合物半導体を用いてその特徴を發揮させる。

第 2 (図中②) は製造技術を中心に，量子構造やバンドマネジメントで高効率構造のアイデアの具現化を図る。従来の電気から光への変換において培って来た化合物半導体製造技術の活きる開発内容である。

第 3 (図中③) は量子ドット超格子により，マルチバンド超高効率セルを開発する。

第 4 (図中④) はハイブリッド材料のアプローチであり，有機材料をホストにして，無機材料を組み合わせる。第 3，第 4 では波長変換，波長分割構造等の光マネジメントも取り上げる。

## 5.2 開発体制

東大拠点で実施する超高効率太陽電池の研究開発の体制を図 4 に示した。チームリーダーは中野教授，サブリーダーには集光型化合物太陽電池で世界を先導した山口教授と，元シャープ常務取締役の富田東大客員教授が当たる。

4 つの開発内容ごとにチームを組んでいる。チーム①は集光，多接合，チーム②は多接合に量子構造を導入し，化合物半導体プロセスを量産向けに進化させる。シャープはチーム②に参加し，チーム①をサポートする。チー

ム③は量子ドットを用いたマルチバンド構造を追求する。チーム④はナノ粒子の有機と無機を組合わせたハイブリッド材料のアプローチを採る。チームリーダーの瀬川教授は有機材料が専門で，色素増感太陽電池の研究も行って来た。光マネジメントも担当する。

チーム③，④には新日本石油が参加する。同社は 2008 年 1 月下旬に，サンヨーと折半出資で薄膜太陽電池開発の合弁会社を立ち上げた。新日本石油のこのプロジェクトへの参加はエネルギー事業者が太陽電池事業に乗り出し，太陽電池がエネルギーの主役になる前触れと見ることもできよう。昭和シェル石油は既に薄膜太陽電池を製品化している。化石資源はもとより，エネルギー供給を原子力だけには頼れなくなっていることの現れでもある。

## 6. 超高効率に向けて

### 6.1 高効率への道

図 5 には現状の太陽電池とその問題点を示した。太陽電池では太陽光によって価電子帯から伝導帯に電子を励起し，発生した電子・正孔が端子電極に到達することによって外部電流となる。単一接合を用い，一光子で一電子を生成している。太陽光スペクトルは波長 300nm (光子エネルギー約 4eV 相当) の紫外線領域から波長 2000nm (約 0.6eV) の赤外線まで広がり，可視光の 500 ~ 700nm (約 2.4 ~ 1.8eV) 付近にピークがある。エネルギーギャップ

## 研究開発体制

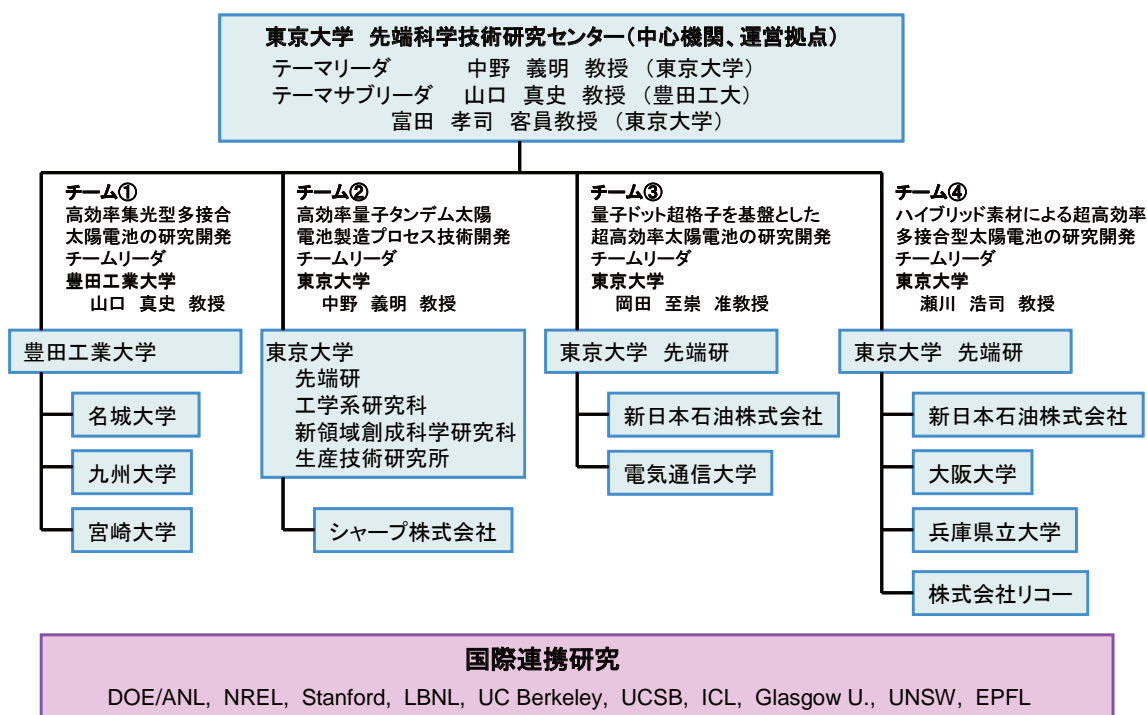


図 4 超高効率太陽電池の研究開発の開発体制 (提供：東京大学 中野義昭先生)

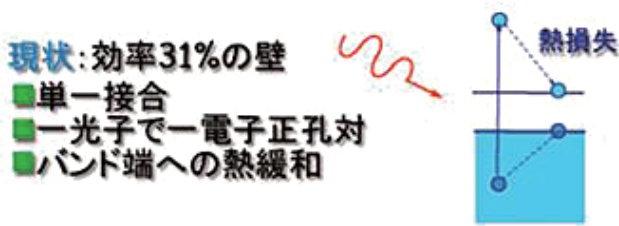


図5 太陽電池の現状 (提供: 中野先生)

より低いエネルギーの光は価電子帯から伝導帯に電子を励起せずに透過してしまい、効率を低下させる損失となる。Siのエネルギーギャップは室温で1.1eVだから、太陽光スペクトルのかなりの部分は透過してしまう。また、エネルギーギャップより高いエネルギーの光で励起された電子は伝導帯の高い位置にあり、熱緩和によりバンド端に移る。このときに失うエネルギーは損失になる。

太陽電池の動作から分かるように、高効率にはエネルギーギャップと光エネルギーの一致することが望ましい。化合物半導体のGaAsのエネルギーギャップはSiより太陽光スペクトルのピークに近い1.4eVのため、一つの半導体では最も高い効率が期待できる。化合物半導体はIII-V族だけでも10種以上あり、エネルギーギャップはInSbの0.15eVからGaNの3.5eVまで広がる。さらに、3元、4元の混晶にすることでエネルギーギャップを広範囲に制御できる。

種々のエネルギーギャップの材料を用意し、そのエネルギーギャップに合った光を当てるのが高効率化の一つの道である。多接合にし、各接合にその接合に適した光を当てる。それには波長分割のような光マネジメントや集光が加わると一層効果が上がる。

## 6.2 量子ドットとプラズモン

量子ドットのように物質の領域の幅が電子のド・ブロイ波長(10nmのオーダー)より短くなると、その領域内にある伝導電子のエネルギーは量子化して離散準位と

なり、電子は伝導帯の底より上の準位を占める。同様に、量子化した価電子帯の正孔は価電子帯の頂より低い準位にあるから、量子化された電子準位と正孔準位の間の遷移エネルギーはエネルギーギャップより大きい。この離散準位と伝導帯の底又は価電子帯の頂きとのエネルギー差は領域の幅(ドットサイズ)が小さいほど大きい。従って、ドットサイズによって光による電子の遷移エネルギーを制御できることになる。

量子ドットの配列した層を積層した太陽電池(図1)のエネルギーバンド図を図6に示した。図6(a)のように、エネルギーギャップの大きい中間層に挟まれたエネルギーギャップの小さい層に離散準位をもった量子井戸ができる。太陽光で電子・正孔は井戸内の量子準位間遷移によって励起され、熱励起などにより中間層のバンドに上がって移動する。励起された電子・正孔の一部は再結合によって失われる。しかしながら、図6(b)のように中間層が薄くなると井戸の間の相互作用によってミニバンドができ、電子・正孔はトンネル効果で中間層を通り抜け、ミニバンド間を高速で流れるようになるため、再結合による損失が抑えられる[4]。

太陽電池における損失の一つに光反射がある。光電気変換を行う薄膜に表面プラズモンを共鳴励起すると入射光はほとんど反射されず、薄膜に吸収される。表面プラズモンは光で励起された金属表面を伝搬する自由電子のプラズマ振動を量子化したものである。光応答電極の金属薄膜表面に光応答分子としてポルフィリン誘導体や、錫フタロシアニンなどの有機半導体を用い、高効率を目指した有機太陽電池の開発が行われている[5]。

## 6.3 効率50%超の革新的太陽電池を目指して

効率50%超の革新的太陽電池を目指すデバイス面のアプローチを図7に示した。

効率向上には(1)エネルギーギャップの違うものの積層である多接合と(2)一つのpn接合を使うマルチバンドの2つの方法がある。材料はInAs, Ge, AlGaAsPなど

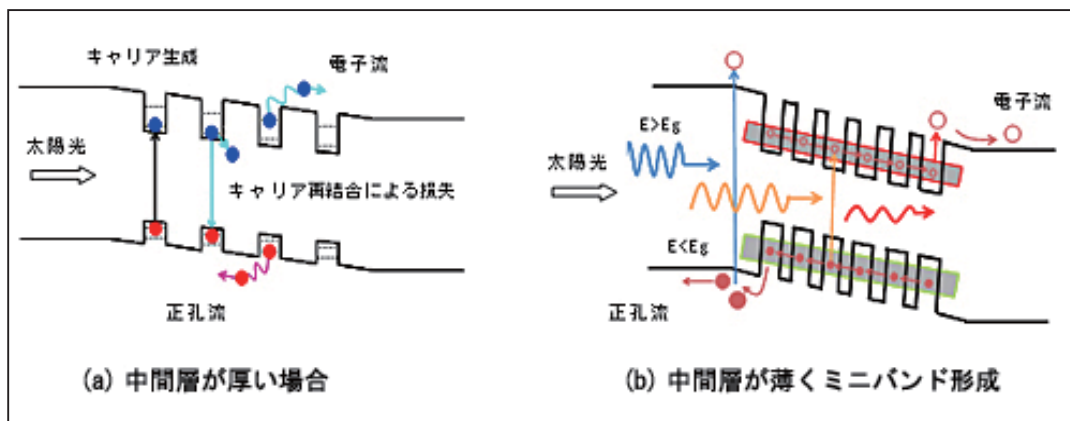


図6 量子ドット太陽電池のエネルギーバンド図 (提供: 東京大学 中野義昭先生)

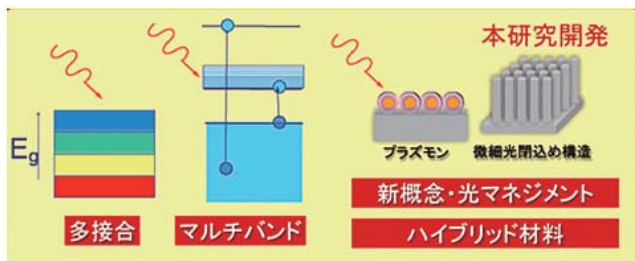


図7 効率50%超の革新的太陽電池技術 (提供: 中野先生)

化合物半導体を用い、多数のバンドギャップを持った材料の量子ドットを組合わせて多接合セルを作る。量子ドットの井戸層にはミニバンドが形成され、マルチバンドになる。このため、シングルバンドと違って、光励起による電子遷移はいくつもの経路が可能になる。光励起によって上のバンドに上がるのは一つの光子によるのでも良く、Two-photon Processによってもよい。従って、広い波長域において光励起が可能になる。

ハイブリッド材料のアプローチも計画に加えた。有機材料をホストにして、無機材料を組み合わせる。効率を上げるにはどこで光を失っているか知ることも必要である。エネルギーギャップより小さいエネルギーの光が透過してしまうことによる損失もあるが、反射の損失も大きい。表面プラズモン共鳴を利用すれば反射損失を抑えて、光子を電子に変えられる。このように取りこぼしをなくして、すべての光子を捕獲する。いわば完全黒体を作ることになる。構造的には微細光閉込め構造を作り、光の捕捉効率を上げて光から電気への変換を行うことを目指す。光を有効に利用するには波長分割などの光マネジメント技術も取り入れる。

デバイス面のアプローチはこれまでに提案された高効率化に有効とされるいろいろな手法を取り上げ、さらに新しい概念の創出を図る。これらのデバイス技術を集光技術と組合わせて、50%超の高効率化目標の達成を図って行く。

## 7. おわりに

エネルギーの確保、温室効果ガス削減による環境維持は人類にとって今世紀最大の課題である。自然エネルギー活用手段として太陽エネルギー利用への期待は大きい。サンシャイン計画以来30年を超える研究開発は変換効率向上に向け着実な歩みを続けて来た。その延長上の着実な研究開発に基づく革新が進む。この連続的な進歩の一方、新しい飛躍を求めた研究開発が東京大学先端科学技術研究センターを拠点に始まっている。集光によりセルコストにとらわれないで済むという新しい技術の発想と取り込みにより高効率を達成して発電効率向上を図る。国際的な視野の下に、目標とする成果が達成され、明るい未来の開かれることが期待される。

## 参考文献

- [1] 経済産業省, 「Cool Earth—エネルギー革新技術計画」(平成20年3月5日).
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁, “革新型太陽電池国際拠点について”(平成20年7月2日報道発表).
- [3] 山口真史, “新世代太陽電池の動向 集光型の高効率太陽電池”, エネルギー・資源 Vol. 29, No.3, pp.157—161 (2008年5月).
- [4] 岡田至崇, 大島隆治, “量子ナノ構造を導入した次世代太陽電池”, 応用物理 第76巻 第1号, pp.50—53 (2007年1月).
- [5] 伊原学, 伊藤理人, 井上志保, “色素増感太陽電池の動向 金属ナノ粒子の局在表面プラズモンを利用した色素増感太陽電池の高効率化”, 化学工学 Vol.71, No.7, pp.434-439 (2007年7月).

(古寺博)