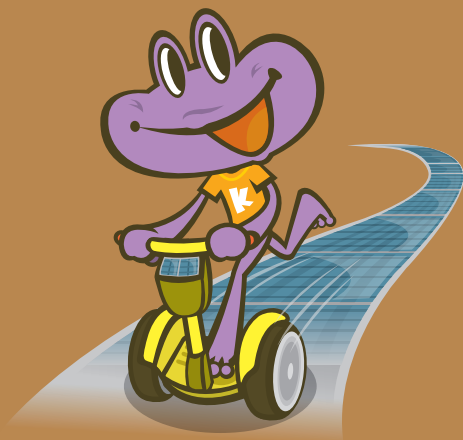


第 7 章

これからの太陽電池 (上級編)

太陽電池は、今後どのような方向に技術開発が向いていくのでしょうか。
この章では、トピックスをいくつか例示して、
これからの太陽電池の動向をイメージしていただきたいと思います。



低コストな太陽電池を目指して 材料・ウェハー化コストを下げるには

図1は、2007年における住宅用太陽光発電システム価格(46円/kWh)のコスト内訳を示したものです。このうち、工事費用が半分を占めていて、モジュールコストは20円/kWh程度になっています。NEDOの目標では、2020年度にシステム価格14円/kWhとなっていますから、46円を1/3にまで減らさなければなりません。したがって、2020年にはモジュールコストも1/3の7円/kWhにしなければならないのです。

結晶系シリコン太陽電池の場合、モジュールコストの半分以上をウェハーコスト(内訳は材料コストとウェハー化のコスト)が占めています。将来的には、(020)に書いたようなソーラーグレードシリコンによって、材料コストを下げられますが、当面はウェハーの厚さを現在の半分の100μmにすることが検討されています。このためには、ウェハー切断ロス(カーフロス)をどれだけ減らせるかが課題です。

薄膜系太陽電池材料の採用は、材料・ウェハー化コストの抜本的な解決策になります。薄膜系では、ガラスやプラスチックフィルムなどの安価な基板上に、スパッタ、真空蒸着、CVDなどで堆積させて、太陽電池材料薄膜を形成します。

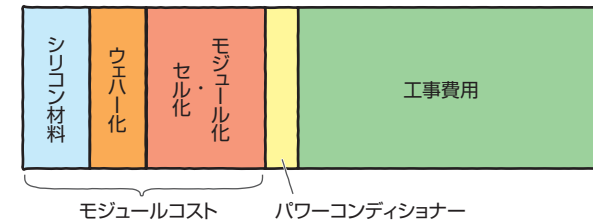
CIGS太陽電池は、安価な青板ガラス上に金属合金膜をスパッタし、この膜をチェンバ内でセレン化することで、低コストを実現しています。また、薄膜シリコン系やCIGS系では、フィルム基板を使った**ロール・ツー・ロール法**(図3)で高速に製膜できます。今後、さらに低コストで大面積の太陽電池膜を均一に作製するための方法として、**スプレー法**(図4)、塗布法、電気メッキ法なども研究されています。

セル化・モジュール化のコストについては、生産規模が大きくなれば必然的に低下すると考えられます。また、透明導電膜や配線に使うレアメタルを減らすことも、コスト削減には有効です。



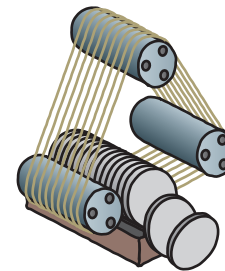
- 結晶系シリコン太陽電池はウェハー厚を半分にしてコスト削減を図る
- 抜本的には薄膜化によって材料節減と製造コスト低減を図る

図1 住宅用太陽光発電システム価格(46円/kWh)のコスト内訳(2007年)



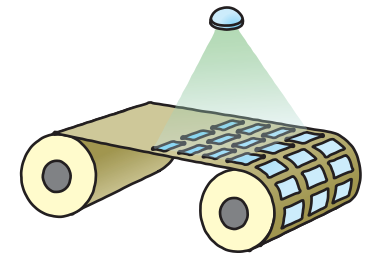
(出典: シャープ 総合資源エネルギー調査会第23回新エネルギー部会資料)

図2 ウェハーコストの低減



ウェハーの厚みを現行の200μmから半分の100μmにして、材料コストを低下させる。カーフロス(切りしろ)をいかに少なくするか課題

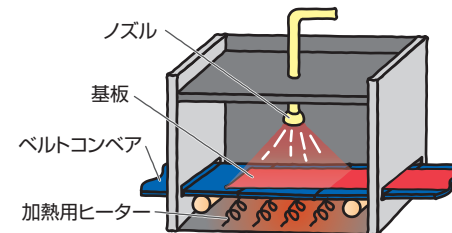
図3 ロール・ツー・ロール法



ロール・ツー・ロール法を使ってフィルム基板に太陽電池を高速でつける

図4 スプレー法

スプレー法製膜装置



低コストで大面積の太陽電池膜を均一に作製するための方法としてスプレー法、塗布法、電気メッキ法などが研究されている。図のスプレー法では、溶媒に溶解した原料を、ベルトコンベアに置いた基板上にノズルから噴射し、加熱して結晶化させ製膜する。塗布法では、チューブから塗りつけ、加熱して製膜する。電気メッキ法では、基板をメッキ液に漬けて通電し、基板上に堆積する

高効率の太陽電池を目指して

究極の低コスト化は高効率化です。なぜなら、変換効率が倍になれば、同じ電力を半分の面積で発電できるので、材料コストも設置コストも半分ですみます。(078)で述べたように、従来型の太陽電池シングルセルでは、変換効率30%を超えることは不可能です。したがって新しいコンセプトが必要です。それが**量子ドット**です。

ナノテクノロジーが進展して、半導体の微細な構造をつくるのが可能になり、**図1**に示すように、2次元、1次元、0次元と、**低次元化**できるようになりました。(a)に示した半導体2次元構造の**量子井戸**では、電子は1方向(膜厚方向)に閉じ込められ、膜厚に垂直な2方向にしか自由に動けません。この状態を**2次元電子ガス**といいます。(b)に示す1次元構造の**量子細線**では、電子は細線の長手方向に垂直な2方向に閉じ込められ、自由度は1になります。さらに、(c)に示すように、0次元構造にしたのが量子ドットです。

図2は、量子ドットの電子状態を示しています。量子ドットは(a)のように、バンドギャップの大きな半導体に囲まれた、バンドギャップの小さな半導体のナノサイズの箱です。電子の波は(b)のように、3方向に閉じ込められて運動の自由度がなくなるために、(c)エネルギー状態は幅のない**量子準位**になります。この量子準位のエネルギーは、量子ドットのサイズWを変えることによって制御できます。また、**図3**の(a)のように、**量子ドット超格子**(ナノサイズの間隔の配列)をつくると、(b)のような**ミニバンド**が生まれ、バンドギャップを人工的に制御することができます。

光をあてると、いくつかのミニバンド間の遷移が起きるので、広い波長範囲の光を吸収し、効率よく電気に変えることができます。理論的には60%を超える高効率期待されていますが、サイズのそろったドットを均一に並べるのが技術的に難しく、高効率を実現するまでの道のりはまだまだ長いようです。

要点 Check!

- 高効率化すれば、小面積で同じ発電量を得られ低コスト化できる
- 量子ドット太陽電池は高い変換効率が期待できるが道のりは長い

図1 半導体の低次元化の流れ

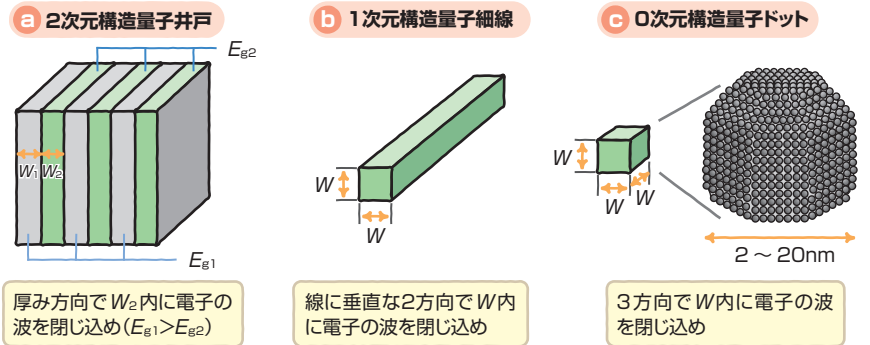


図2 量子ドットの電子状態

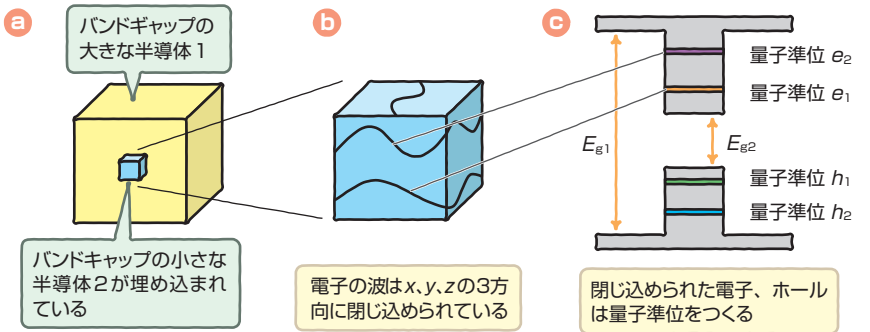
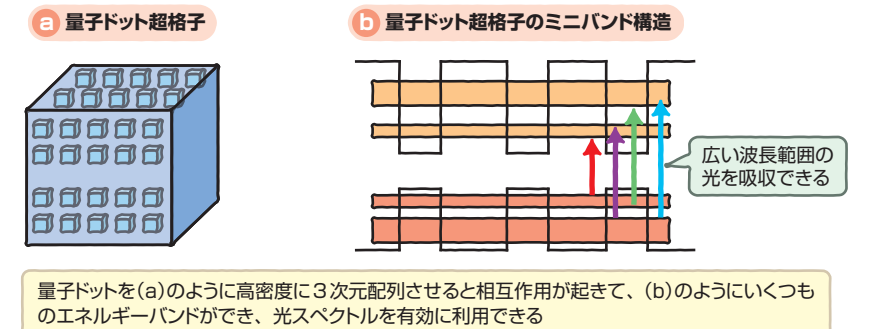


図3 量子ドット超格子の電子状態



ありふれた材料で環境にやさしく 太陽電池の元素戦略

表1に、**クラーク数**を30位まで掲げます。おおまかには、酸素(O)が半分、シリコン(Si)が1/4を占めています。クラーク数から見るかぎり、次世代においてもシリコンが最重要な太陽電池材料であり続けることは間違いないでしょう。太陽電池材料として研究されているガリウムヒ素(GaAs)、テルル化カドミウム(CdTe)は30位以内にありません。CIGS(CuIn_{1-x}Ga_xSe₂)についても、かろうじて銅(Cu)が25位に入っているだけなので、インジウム(In)に代えてスズ(Sn、30位)と亜鉛(Zn、31位)を使うCu₂ZnSnS₄という4元化合物に置き換える研究が始まっています。ここでは、クラーク数4位の鉄(Fe)を使った太陽電池について紹介しておきましょう。

鉄系太陽電池

鉄を使って太陽電池をつくる試みとしては、ベータ鉄シリサイド(β -FeSi:バンドギャップ0.85eV)と**黄鉄鉱**(FeS₂:バンドギャップ0.95eV)があります。

鉄シリサイドを使う太陽電池が実用化したという報告は、まだありません。実用化の段階にあるのは黄鉄鉱(パイライト)です。2009年5月にスウェーデンの自動車メーカーが開発したQuantaという自動車が、黄鉄鉱太陽電池を搭載していることで話題になりました。黄鉄鉱はありふれた金色の石(図1)です。金色の原因は、図2に示すように、吸収係数が $6 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$ に達する強い光吸収遷移が1~2.5eVに存在することによります。この強い吸収は、図3に示すように、価電子帯の頂と伝導帯の底がともにバンド幅の狭い鉄の3d電子軌道に由来しているため、状態密度が高いからと考えられます(注1)。このため、FeS₂薄膜の膜厚は20nm程度でよく、これをp型、n型のワイドギャップ半導体で挟んだ構造によって光起電力を取りだすので、一種の色素増感太陽電池となっています(注2)。集光型黄鉄鉱太陽電池は50%の変換効率が得られると報道されていますが、詳細は不明です。



- 次世代の太陽電池もクラーク数の大きいシリコンが主流になるだろう
- 黄鉄鉱は強い吸収帯があるので、太陽電池に利用できる

表1 クラーク数

順位	元素	クラーク数	順位	元素	クラーク数	順位	元素	クラーク数
1	酸素(O)	49.5	11	塩素(Cl)	0.19	21	クロム(Cr)	0.02
2	ケイ素(Si)	25.8	12	マンガン(Mn)	0.09	22	ストロンチウム(Sr)	0.02
3	アルミニウム(Al)	7.56	13	リン(P)	0.08	23	バナジウム(V)	0.015
4	鉄(Fe)	4.70	14	炭素(C)	0.08	24	ニッケル(Ni)	0.01
5	カルシウム(Ca)	3.39	15	硫黄(S)	0.06	25	銅(Cu)	0.01
6	ナトリウム(Na)	2.63	16	窒素(N)	0.03	26	タングステン(W)	0.006
7	カリウム(K)	2.40	17	フッ素(F)	0.03	27	リチウム(Li)	0.006
8	マグネシウム(Mg)	1.93	18	ルビジウム(Rb)	0.03	28	セリウム(Ce)	0.0045
9	水素(H)	0.87	19	バリウム(Ba)	0.023	29	コバルト(Co)	0.004
10	チタン(Ti)	0.46	20	ジルコニウム(Zr)	0.02	30	スズ(Sn)	0.004

アメリカの地質学者クラークが算出した、地球上の地殻表層部(地表部から海面下約16kmまでの岩石圏93.06%、水圏6.91%、気圏0.03%)に存在する元素の割合を質量パーセントで表した指数。この地殻表層部の質量は地球全質量の約0.7%にあたる

図1 金色の石「黄鉄鉱」

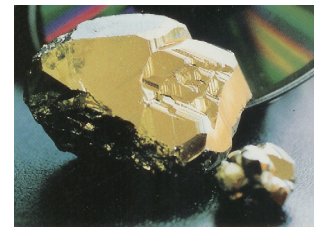
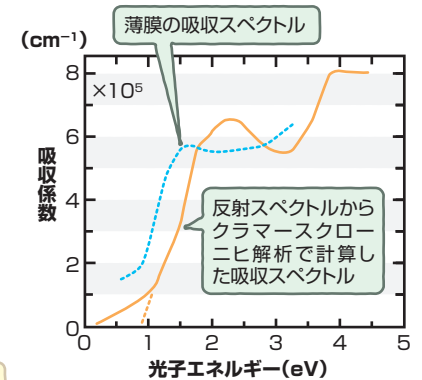
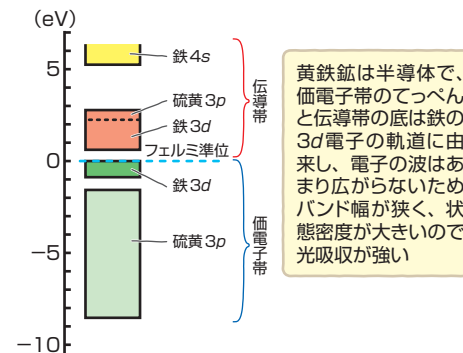


図2 黄鉄鉱の吸収スペクトル



黄鉄鉱の光吸収は、0.9eV付近で立ち上がり1.5~2eV付近にピークをもつ。1.5eV付近の吸収係数は $6 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$ におよび、CISよりも高い

図3 黄鉄鉱のバンド構造



黄鉄鉱は半導体で、価電子帯のてっぺんと伝導帯の底は鉄の3d電子の軌道に由来し、電子の波はあまり広がらないためバンド幅が狭く、状態密度が大きいので光吸収が強い

注1: 「金色の石に魅せられて」佐藤勝昭 著、裳華房、1990年
注2: A.Ennaoui et al., Solar Energy Materials and Solar Cells, 29.[4],289-370(1993)

ソーラーブリーダー計画 太陽電池でつくった電力を世界中に

1994年に桑野幸徳氏(元三洋電機社長)は、**図1**のように「**ジェネシス計画**」という壮大なプランを提唱しています(注1)。以下にその概略を記すと、2000年に必要とされる1次エネルギーの総量(140億石油換算トン)を太陽光発電でまかなうとすれば、65万km²で十分であり、これは地球上の全砂漠面積の約4%に相当します。サハラ砂漠の面積に太陽光発電所を設置すれば、変換効率10%として、必要な1次エネルギーの4倍を供給可能です。

そこで、地球上の各砂漠に太陽光発電所をつくり、超伝導ケーブルの送電網で世界中に配電すれば、昼の地域から夜の地域に電力を輸送できます。そのための第1ステップとして、国内に小規模の光発電システムを組み込んだ送電網を構築し、第2ステップとして、世界各地にローカルなエネルギーシステムを構築、第3ステップで各地の送電網を接続するというのです。

サハラ砂漠を利用して太陽光発電を行い、地域に電力を供給する「**サハラブリーダー計画(SSB)**」という構想が日本学術会議に提案され、推進されようとしています。サハラでつくった電力を使って、サハラの豊富な砂(SiO₂)からシリコン、および太陽電池をつくり、これによって太陽光発電所を増殖(ブリード)させるのです。つくられた電力は、現地のエネルギー供給や海水淡水化による水供給に使われ、余剰電力は超伝導ケーブルで地中海を越えてヨーロッパに供給されます。このために科学技術ODAによって、日本とサハラ諸国が共同研究するのを支援しようとしています。2010年に北澤宏一氏(科学技術振興機構前理事長)はその著書で、サハラブリーダー計画こそ、日本の科学技術の世界への貢献として国際的に評価されるものだと述べています(注2)。



- サハラ砂漠の太陽光発電所は、世界のエネルギーの4倍を供給可能
- サハラブリーダー計画にわが国は科学技術ODAで国際貢献できる

図1 桑野氏が提唱したジェネシス計画

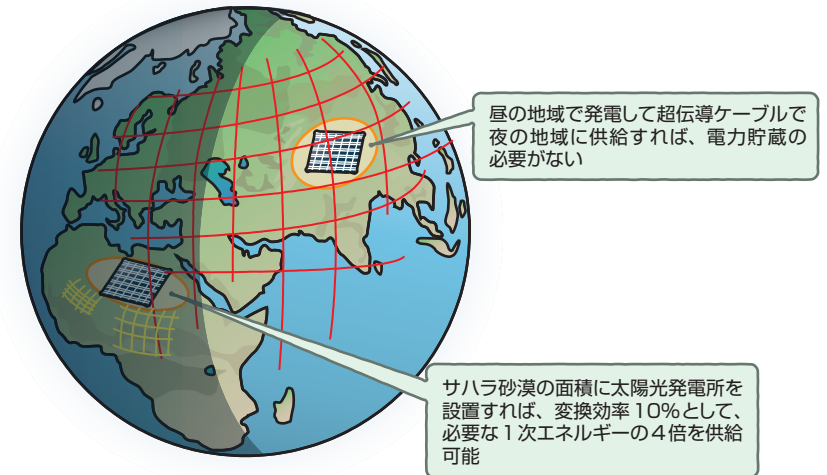
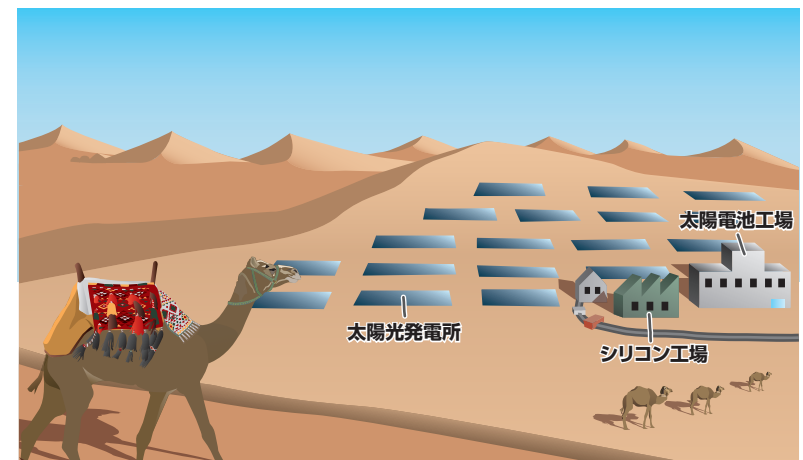


図2 科学技術ODAで推進を検討しているサハラブリーダー計画



サハラ砂漠に太陽光発電所を設置し、ここで発電した電力を使って、砂漠の豊富な砂(SiO₂)からシリコンを取りだし、これを用いて太陽電池をつくり、これによって太陽光発電所を増殖(ブリード)する計画。ここで発電された電力は、現地のエネルギー供給や海水淡水化による水供給に使われ、余剰電力は超伝導ケーブルで、地中海を越えてヨーロッパに供給される

注1:「太陽エネルギー工学」浜川圭弘、桑野幸徳 著、培風館、1994年 pp.300~306
注2:「科学技術は日本を救うのか」北澤宏一 著、ディスカバー21、2010年 pp.244~247

COLUMN

エコ住宅15年を振り返って

筆者は、1994年にエコ住宅を建てました。それから2008年までの14年間に、累計で約50MWhもの電力を発電し、日常生活に使いながら累計14MWhの余剰電力を系統に供給できました。余剰電力の買い取り、オール電化、強断熱・高気密のおかげもあって、快適な生活を送りながら、光熱費も建て替え前と比較して約15%減少しました。これから太陽電池の導入を考えておられる方々のためのアドバイスをまとめます。

- ①住宅新築時に太陽光発電を導入する場合は、強断熱・高気密のエコ住宅の一環として考えることが重要でしょう。その場合、屋根材として太陽電池パネルを導入することをお勧めします。
- ②太陽光発電パネルの出力の公称値は、あくまで25℃において標準太陽光(1kW/m²)が南中時にパネルに垂直に入射した場合の直流出力の値です。実際の出力は、公称値の7~8割であると考えましょう。また太陽光発電の出力は長期的には劣化します。
- ③最近の技術開発やコストダウン、国の補助金政策によって、いまでは180万円前後で4kWの太陽光発電の導入が可能になりました。すぐに元がとれるものではありませんが、自動車1台の出費で多少なりとも低炭素社会実現に寄与できれば、うれしいではありませんか。



筆者宅の外観