ナノシリコンの薄膜太陽電池への応用と開発

特集 1

大阪大学　ナノサイエンスデザイン教育研究センター　特任教授・工学博士
株式会社 カネカ　シニアフェロー
太和田　善久 氏

●はじめに

私の話は中小企業向けではないかもしれませんが、産学連携でナノ技術が成功した1つの例ではないかと思います。後半は産官学連携で、NEDOに参加して屋外用太陽電池を開発した内容で、さらには今太陽電池の世界で起きている課題について少し話したいと思います。

私は1972年にカネカに入社し、80年から阪大基礎工学部の濱川研究室に派遣され、薄膜シリコン太陽電池の研究に携り、以降30年以上にわたりこの関係の仕事をしてきております。濱川先生は研究室のモチベーションとして、経済が活性化するとエネルギーが増え、結果として環境が破壊され、これをできるだけ早くクリーンなエネルギーに転換し、経済を再活性していくループを作っていかないといけない、だから再生可能エネルギーは重要な研究なのだ、と70年後半から強調されていました。このトリレンマを解決すると期待されているのが太陽電池です。

●太陽電池開発の歴史

日本の第1次、第2次石油ショックの後、サンシャインプロジェクトがスタートし、80年前後から太陽電池の研究が盛んになってきました。もともと太陽電池研究の歴史は古くて、1954年にベル研究所のシャピン、フーラー、ピアソンという3人の研究者が結晶シリコンを使って初めて太陽電池を作ったのが最初です。スタートは米国ですが、シャープが結晶太陽電池を使ってリモート用の太陽電池生産を始めます。結晶シリコンではコストが下がらないので、80年前後に濱川先生が中心となって薄膜シリコンの研究がやられたわけですが、いち早く三洋電機が世界で始めて民生用アモルファスシリコン太陽電池を作りだしました。80年代からつい最近まで太陽電池ビジネスは日本がずっと牽引してきました。昨年頃から中国が生産量で世界一になり、あっという間に価格が暴落しややこしくなってきました。

●太陽電池の種類と結晶Si、薄膜Si

太陽電池のことはご存知だと思いますが、シリコン系、III - V族、II - VI族、多元系、その他と分けられます。現在の主流は単結晶、多結晶シリコンです。そして薄膜系では薄膜シリコンでしたが、最近では、ファーストソーラー社のカドミュームテルル（CdTe）、昭和シェルのカッパー（銅）・インジウム・セレン（CIS）という化合物半導体で大規模に薄膜系太陽電池を作っています。

皆さんもご存知の結晶太陽電池は、p型のウエハーにn型のドーピング剤を塗り、熱拡散でpn接合を作ります。このpn接合の電界を使って電子をn型の方に、光度をp型の方に集めるとプラス・マイナスが分離して発電という簡単な原理です。結晶系のシリコンが使われていましたが、Si原子が整然と並んだ構造のために厚みが200ミクロン必要です。薄膜シリコンでは、原子の並びが乱れることで0.5ミクロン以下の厚みで性能が出るため安くできるというのが研究のモチベーションであります。

講師　太和田　善久 氏

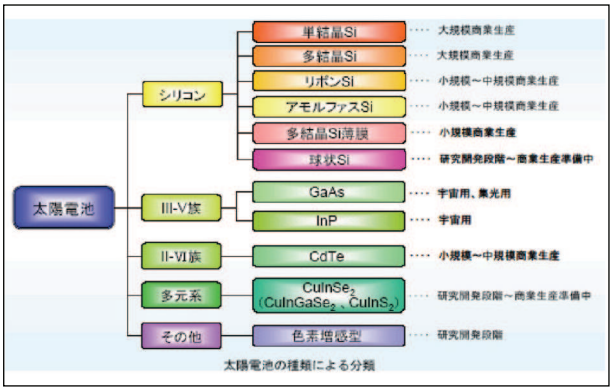

図1.　太陽電池の材料系と種類

●薄膜Si太陽電池のキー技術

アモルファスシリコンでは大雑把にいうと、5つの基本技術が中心になっています。シリコンを水素化することによって高光伝導率にして太陽電池を発明したのが1976年のRCAのカールソン博士。濱川先生の全てをアモルファスシリコンにしたpinアモルファスシリコン太陽電池が78年です。79年には三洋電機の桑野博士が集積型太陽電池を発明して、薄膜でコストを下げるという魅力のある取り組みをしました。そして81年に私がやりましたのが、シリコンカーバイトという新しい材料を窓側に持ってくることによって、変換効率を当時のほぼ2倍にするデバイスを発明しました。私の部下の山本博士が93年、薄膜多結晶シリコンが200℃以下の低温で作ることが判り、アモルファスシリコンの上に薄膜多結晶シリコンができるという画期的な技術ができました。このアモルファスと薄膜多結晶シリコンのタンデム太陽電池が主流の構造になっています。

私の最初の仕事がa-SiC/a-Siヘテロ接合太陽電池

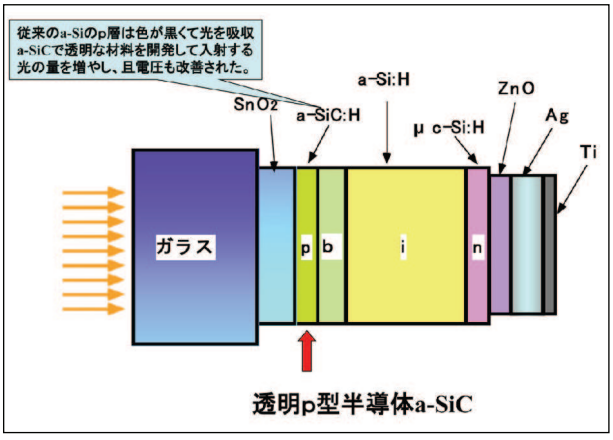

図2.　a-SiC/a-Siヘテロ接合セルの構造

です。pin太陽電池はガラス、透明電極、p・i・nと電極層からなる構造ですが、このp層にアモルファスシリコンを使っていたのでかなりの光が吸収されていました。透明にすれば効率があがるということで、透明にする材料としてシリコンカーバイドをうまく作ったら、電流が増え、なおかつ電圧も増えるという二重の効果で変換効率が大幅に上り、世界で初めて8%の高効率が出ました。

●民生用アモルファスSi太陽電池の開発

高効率アモルファスSi太陽電池ができましたが、すでにアモルファスシリコンは三洋電機が製品化していました。私たちがそこに真っ向勝負しても負けますから、少し工夫しフレキシブル太陽電池を作りました。カシオ計算機がクレジットカードサイズの電卓を企画した時に、電源用にポリイミドフィルムの上に太陽電池を作れないか打診があって、つくり出したものです。カシオではこの厚さ0.8mmの電卓を作るにあたり3つの要素技術を開発しました。1つは薄いフレキシブル液晶です。電池については薄くしようとしたのですが、それができなくて最終的にはフレキシブル太陽電池が採用されました。ICについてはカシオが自らベア実装技術を開発し0.8mmの厚みに納めることができました。この3つの技術ができて初めてカード電卓ができました。カシオはもともとこの技術をICカードに展開する計画だったのですが、残念ながら規格の統一問題がうまくいかず、あまり大きなビジネスにはなりませんでした。この太陽電池に関して言いますと、もともとポリイミド上に作ろうとしたのですが取扱いが難しくて、ステンレス箔の上にポリイミドで絶縁した基板を開発して作りました。この基板は自己支持性があるので、製造工程がガラス基板の太陽電池をつくるのと同じ工程でできるというメリットがあります。対抗他社はロール・ツー・ロールでやろうとしたのですが納期が間に合わず、カネカが受注に成功しました。化学会社だから発想できた仕事だろうと思います。

◆電力用薄膜Si太陽電池への開発

民生用で事業化しましたが、もともと私共は電力用の太陽電池をやろうとしていました。1990年代は電力用太陽電池の時代が来ると言われていたので

すが、残念ながら来そうもなかったのです。やむなく長期戦に備えてNEDOサンシャインプロジェクトに入り、研究費をもらいながら電力用太陽電池の研究を続けていくことになりました。90年の頃から経済産業省が電力用太陽電池普及への動きを始めます。90年4月に電気事業法を改正して太陽光発電の電気設備技術基準規定をつくり、その基準に合致すれば太陽光発電所が可能というガイドラインを出しました。92年に現在の普及促進の1つのポイントにもなっている太陽光発電での余剰電力購入メニューが合意され、93年に逆潮有り低圧系連系基準が制定されて家庭から100ボルトで発電して送電線に逆潮が可能になりました。これで屋根の上に太陽電池を置いて発電所として発電できる環境が整備されました。

94年に住宅用太陽光発電モニター制度という助成制度がスタートし、日本で住宅用太陽光発電がブームとなりましたが、現在は買取価格が42円/Whと高く改定され普及が一段と進んでいます。日本の太陽電池産業は8割が住宅用です。ヨーロッパのドイツやイタリアなどでは8割が発電用であり、日本とは大きく違っています。1990年代初期、アモルファスシリコン単層膜ではなかなか効率が出ないので、アモルファスSiの後ろにアモルファスSiGeという層を設けた2層型にすることが多かったのです。3層型というものもありました。多層構造はコストが高くなるので、私共は製品として8%あればよいという割り切りをして、シンプルな単層で製品化して行くことにしました。

単層の場合は、効率を維持したままいかに面積を増やすかということが課題となります。当初（1981年）面積は0.033 cm^2でしたが、今は1.4m×1.1mが中心です。2.6m×2.2mまで面積を増やし、当初に比べたら170万倍に拡大した技術も開発されましたが、このサイズは難しく生産は止まっています。面積を倍にするとたぶん2乗で難しくなり、大変な技術開発でした。ことだと思います。大面積化のもう1つの重要な技術は集積技術を使って、1mあるいは1.4mの間に1cm間隔で太陽電池を直列接続することです。理屈は簡単で、ガラス板に透明電極を全面に成膜し、1cm間隔でレーザーで切り分離します。その上にアモルファス薄膜シリコンを堆積して、少しずらしてレーザーで切ります。裏面電極も成膜後、同様にレーザーで切ってやると、左の太陽電池のマイナス側がその隣の太陽電池のプラスとつながります。成膜3回とレーザー加工3回で自動的に直列接続できるというものです。何が難しいかというと、1つの太陽電池ストリングが10mmくらいなので、いかにこの発電に寄与しない接続部分の面積を小さくするかということです。大体25 μm程度で切っていきます。1mもあると、端から端で1℃温度が違うだけで位置がずれてしまいます。それだけ精度のよい加工を要するということです。

1995年に、初期10%の効率で安定化後8%を超える大面積モジュールが公的機関で初めて確認できました。ただ大面積で安定な太陽電池ができても、いろいろ問題が残っていました。いちばん問題なのはStabler・Wronski効果といって、強い光が当たると効率が落ちることです。どんどん落ちていってゼロになると言う人がいて、そうではないことを確認しなければなりません。あるいは発電システムで10年保証をしなければならず、それをどのようにするかということも課題でした。あるいは日本の住宅用太陽電池市場に市民権があるのかどうか、はっきりしないということも心配ごとでした。

じつはもう1つ注目されたのは、ドイツでアーヘンモデルという普及策が日本の住宅用太陽電池と同じ時期にスタートしたことでした。これは太陽光で発電した電気を20年間アーヘン市が買い取り保証を行うもので、この制度がドイツ全土に広がりつつありました。今で言うフィード・イン・タリフという普及策が、ドイツ全土に普及するのではないかと言われていました。ここの見通しがまだはっきりしていない中で、例えば日本の住宅屋根発電で、もともと初期10%のモジュールが、初期低下した後安

定化するのか問題でしたが、初期低下の後は低下傾向はあっても、ほとんど落ちないということが当社で実証できました。

民生用太陽電池の時代の89年、私の家の屋根の部分に太陽電池を置き、家の床下や天井裏の換気扇を動かしております。約10年間、太陽電池としての実績を発揮しているという実績があって、住宅メーカーの承認が得られたので98年に兵庫県豊岡市にカネカソーラテックという製造会社を設立し、99年に20MWの装置を導入しました。2001年にはタンデム型の10%の太陽電池の生産を始め、その後の能力増強を通じて2009年には150MWの能力に拡充しました。

アモルファスシリコン太陽電池の安定化効率は8%なのですが、将来の競争力確保のために12%くらいに上げていたいのです。結晶シリコン太陽電池の厚みは200ミクロンなのですが、これを1/10以内の厚みで12%くらいにしていこうということで、1つのアイデアになったのが薄膜ダイヤモンドです。太陽電池を作る時と同じプラズマを使って、メタン等のカーボンを水素プラズマ分解で薄膜ダイヤモンドを作成する研究がロシアで行われていて、それを私の部下追試しておりました。カーボンで結晶ができるのなら、シリコンも同じIV族で化学的に同じだから、シリコンも結晶ができるはずと考えました。当初は薄膜多結晶シリコンをガラス基板の上に付けてウエハーと同じようにしようとして太陽電池を作ろうとしたのですが、10μmくらいの厚みがいることが判りました。ところが10μmくらいのシリコンを付けると空気に触れただけで、吹っ飛んで無くなってしまいます。厚くできないということで、アモルファスシリコンと2μm程度の薄膜シリコンを合体してタンデム型にしようとすることになりました。現在はタンデム型の間に透明中間層を入れ、さらに効率を上げた構造にしています。

太陽光のエネルギー分布のなかで、アモルファスシリコンですと可視光部分だけが吸収されます。これを薄膜多結晶シリコンとタンデム型にすると吸収スペクトルが赤外領域にまで拡大し、広範囲で太陽光を吸収することになります。実はこの技術が研究設備で出来たので、すぐに豊岡の工場で流しみると初期12%くらいのものが簡単にできることが分かりました。そこで急遽計画を変更して2001年から10%のタンデムを作ることになりました。写真はその時の製品なのですが、色が黒いことから見た目に違和感がなく、現在は住宅メーカーで採用されています。

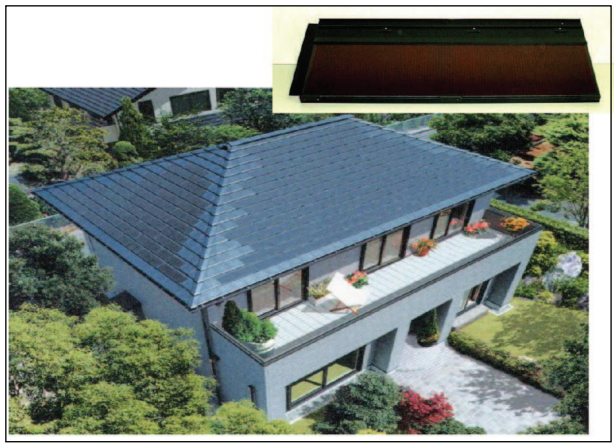

図3.　住宅用10%タンデム太陽電池

●太陽電池事業の現状と今後の見通し

太陽電池産業は、日本の住宅用市場に始まり、2001年以降に増えてきました。増えてきた理由は、ドイツのフィールド・イン・タリフ（FIT、固定買取制度）という制度によるもので、とくに2004年に耕作不適地で大規模な光発電所を作り発電した電気を全量買取できるように改定されたことから、発電事業としてドイツで急速に増えていきました。年率1.5倍～2倍の成長で、昨年は世界で24GWの太陽電池が生産されています。

実はその途中の2004年～2005年に原料の高純度シリコンがなくなりました。当時の原料シリコンはICを作った時のカスを使っていて、足らない部分は半導体用の高純度シリコンを使うのですが、それもなくなってきました。その為、一部の日本メーカーは原料シリコンの調達ができず生産が減ってしまうという状況になりました。その頃にヨーロッパでスイッチを入れれば誰でも作れるという結晶シリコン太陽電池のターンキー装置が開発されたため、それを買って中国・台湾で生産が開始されたわけです。その後驚異的な生産増強を続け、2009年から2010年に2倍になって中国・台湾が世界の60%の生産量を占めるまでになりました。そのほとんどが結晶シリコン太陽電池であります。

薄膜シリコンは10%程度のシェアーしかないの

ですが、ドイツでは日本と違ってメガソーラーに使われてきました。平成24年から日本でも同じような全量買取制度が始まります。まだ買取り価格と期間が決まっていませんが、当初は1kWhあたり40円、ひょっとすると36円くらいになるかもしれませんが、この価格が15年前後保証されます。太陽電池で電気を発電して全量売りますと大きなビジネスになります。これが平成24年7月にスタートします。ドイツのメガソーラーは大きな所では数十MWもあります。日本では稚内にある5MWがこれまで最も大きなものでした。たぶん来年以降、20MWくらいの発電所が日本でもつくられることになると思います。

世界の太陽電池メーカーのトップは、毎年入れ替わってきています。2006年まではシャープと京セラがトップを占めていたのですが、2007年には1位がQ-Cellsとなり、2位がシャープでしたが、3位に中国のサンテックというメーカーが入り、5位に米国のファーストソーラーが入りました。ファーストソーラーは2004年に40MWしかなかったのが、2009年には1,000MWという驚異的な生産の伸びを続けトップになりました。しかし2010年には3位に落ち、中国のサンテックがトップになり、2位JAソーラー、4位インリ、5位トリナというように、トップ5のうち4社が中国メーカーということになりました。このように激しい上位争いをしていて、これが来年にはまたガラッと変わってくると思います。

種類別に見ると、85%が結晶シリコンで、作りやすいという特徴があるからです。カドテルもものすごい勢いで伸びてきました。日本では、カドミウムはイタイイタイ病の原因物質ということから簡単

表1.　世界の太陽電池メーカートップ5の推移

	2007年	2008年	2009年	2010年
1位	Q-Cells 389MW	Q-Cells 574MW	First Solar 1,011MW	Suntech 1,572MW
2位	シャープ 363MW	First Solar 504MW	Suntech 704MW	JA Solar 1,464MW
3位	Suntech 327MW	Suntech 497.5MW	シャープ 595MW	First Solar 1,411MW
4位	京セラ 207MW	シャープ 473MW	Q-Cells 537MW	Yingtli 1,117MW
5位	First Solar 207MW	MOTECH 384MW	Yingli 525MW	Trina Solar 1,116MW

に売ることができませんが、これが海外では全く異なります。ファーストソーラーはCdTe太陽電池が将来不要になると全てを引き取る保証をしています。すでにファーストソーラーは時価総額を超えるだけ売っていて、果たしてこれをそのままこのビジネスモデルが継続できるかどうかは、難しいところであります。そうしたところに化合物半導体のCIGS太陽電池がソーラーフロンティア社によって約1,000MW規模で宮崎に工場を建設されるなど、対抗してきています。この先、CIGSが先行するのではないかと言われますが、時間がないため細かいことは省略させていただきますが、次のような課題があります。

カドテルはカドミウムの毒性問題があり、CIGSのインジウムは資源問題があります。インジウムの価格推移をみると、現在の主用途である液晶テレビの普及とともに、インジウム価格が10倍近くも高騰しました。現在は1kgあたり800ドル程度に落ち着いてきています。CIGSは1GWの生産で80トン程度のインジウムを使います。全体としては世界で1,200トンくらい供給されているのですが、その内一次地金がわずか600トン程度です。一次地金の中から使うことになるため600トンの中で、とりあえず80トン消費されます。さらに2倍に増えると160トンとなり、当然ながら価格は上がってきます。

そのような毒性や資源問題から切り札になるのは、原料がほぼ無尽蔵の薄膜シリコンだろうと思われます。薄膜シリコンは12%効率のものを豊岡で作っています。1cm角で15%に近いものが出来ていて、効率的には14%が作れると思います。コストと、圧倒的に資源の豊富なシリコンを原料にする薄膜シ

リコン太陽電池も課題はいくつかありますが、これが今後のが切り札になる技術と思います。

生産コストのことですが、じつは薄膜の製造というのは化学工場のようなもので、原料にシラン、ガラス基板、水素、窒素を大量に使います。こうした原料工場も太陽電池工場の周囲に建設して、まさにソーラーコンビナートのようなものがつくれます。1,000MW程度になると、かなりの新規雇用が期待できると思います。福島と仙台にこうした工場をつくったらどうかと私は思っています。製造した太陽電池で、福島なら高濃度汚染された水田・畑に供給してギガソーラーを、あるいは仙台平野の津波で冠水した水田や畑にもギガソーラーをつくれば震災地復興にも有効だと考えられます。3～4年程度生産を続ければ50円を割るコストが実現できると思っています。そうなれば十分に国際競争力がついて輸出産業が定着します。この太陽電池工場の採算性を推定すると、大体120円/W程度で売れれば、1,200億円の売上になり、総原価が970億円程度ですから230億円くらいの営業利益が出てきます。

最後になりますが、11月に福岡で第21回太陽光発電国際会議があり、幸いに私が特別賞を授与されることになりました。これまで述べた30年間の開発全体を表彰していただきました。ご清聴有難うございました。