アモルファスシリコン太陽電池開発ストーリー

桑野 幸徳[†]

1. ま え が き

クリーンで限りない太陽エネルギーを直接電気に変える太陽電池は、地球環境に優しい、新しいエネルギー源として注目を集めている。そして、いよいよ個人住宅の屋根に設置した太陽光発電による生活が国の補助政策とともに広まりつつある。

ここでは、筆者が関わりあったアモルファスシリコン(a-Si)太陽電池を通して太陽電池開発の足跡を振り返るとともに、その将来を展望する。

2. 太陽電池開発の道のり

2.1 太陽電池の誕生

現在のシリコン(Si)太陽電池は1954年に米国のベル研究所のピアソンにより開発された。当時はショックレーらによって接合型トランジスタが発明された直後であり、半導体技術の飛躍的な進歩の始まりが背景にあった。3年後には、太陽電池は人工衛星用の電源として使用されたが、非常に高価で、一般ユーザには手の届かないものであった。

ところがその後、世界中で大混乱させた問題が起こった。1973年のオイルショックである。石油の価格が約7倍にも跳ね上がり、石油などの化石燃料によるエネルギー源に生活基盤を依存することには限界があることを思い知らされたのである。オイルショックを契機に、石油に代わる「代替エネルギー」の開発が世界各国で始まった。日本では通産省を中心とする「サンシャイン計画」がスタートした。太陽電池はその素質の素晴らしさから、代替エネルギーの中心的開発テーマに取り上げられ、大きな成果を上げてきた。

2.2 アモルファスシリコン太陽電池の登場

オイルショックの頃、筆者は三洋電機に入社してか

ら約10年が過ぎており、アモルファス半導体の研究を行っていた。

当時は、原子が整然と並んでいる単結晶シリコンを用いたトランジスタの全盛期で、原子が無秩序に並ぶアモルファスは学問的にも「よくわからないもの」、「得体の知れないもの」といわれていた。そのため、学問的研究や技術開発がなかなかうまく行かなかった時期でもあった。筆者は、何とかこの新素材を用いて新しいデバイスの開発をと思い、アモルファス材料を用いたスイッチング素子や不揮発性メモリーを開発したが、いずれも商品化には至らず、失敗の連続であった。技術的に良いものができても、使う側のニーズにマッチしないものは商品化は難しいためであった。

すでにアモルファス半導体の研究を始めて十数年が過ぎようとしていた。民間企業で十数年もの期間を費やして未だ何ら商品には生かされていない…。毎年2回行われる研究所長ヒアリングは、筆者にとってまさに針の筵であった。当時の所長(現 三洋電機(株)山野副会長)は私の顔をジロリと見て、「君、何年アモルファスの研究をやっているのかね。人のやらないことをするのは良いけれども、成果も大切だよ! オイルショックで会社の経営も苦しいので、的を絞った研究に向かわなければ…予算が絞られているからね」「君は、もう10年近くそんなことを言い続けてきた」「まだ続けるのか、もうやめたらどうだ…」と厳しく叱られた。

事実、我々の予算は風前の灯のようになっていた。グループのメンバー(当時3人)とも相談した結論は“中断”であった。止めはしない。一時、中断しよう。研究所長室に相談に行った。少し震える声で、「所長、アモルファスの研究は中断しようと思います」

山野所長は私に背を向けて外を眺めていたが、突然振り返り、「止めへんで! 桑野君」と叫んだ。さらに続けて、「これからはエネルギーの時代やで。君はエレクトロニクス材料としてアモルファスシリコンを見てきたが、エネルギー素材として見直したらどう

[†] 三洋電機株式会社 研究開発本部

“Invention of Amorphous Silicon Solar Cells” by Yukinori Kuwano (R & D Headquarters, Sanyo Electric Co., Ltd., Osaka)

や」と言われたのである。オイルショックの直後であったために、所長の頭の中には、これからはエネルギーが大変重要なテーマになるという予感があったのだと思う。

アモルファス材料をエネルギー分野に応用する。新しいテーマだけに何を目標にするか、まず文献調査から始めた。

エネルギー源は太陽である。地表に届く太陽のエネルギーは、わずか1時間で世界の人類が1年間に消費する全エネルギーを賄うことができるほど膨大である。これを直接電気に変換できる太陽電池は有望である。それまでは結晶Siが中心に研究開発されていたが、①Si原材料を多く必要とする、②製造工程が複雑で製造エネルギーが大きい等の課題がある。アモルファスで太陽電池ができないだろうか。夢はだんだん広がっていった。

1975年2月頃、ある論文を発見した。スコットランドのダンディー大のスピア教授がプラズマ反応で形成したa-Siに不純物を入れることで、結晶Siと同様にp、n制御ができるという報告である。私は「これだ！これで太陽電池ができる…」と思った。早速、昔使っていた古いプラズマ反応装置を引っ張り出して研究を始めた。a-Siのpn接合を作れば太陽電池ができるはずだ。しかし何度やってもできない。5カ月たっても太陽電池はできなかった。そうこうしているうち、1976年にRCAのカーソン博士らが世界初のアモルファス太陽電池を報告した。予測されたようにa-Si太陽電池は、①厚さわずか1 μm （結晶Si系は約300 μm ）、②製造温度300 $^{\circ}\text{C}$ （結晶Si系は1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上を数回必要）、③pn接合はガスの切り替えて簡単にできる、という特長を持っていた。ただし、変換効率は小面積で約2%と結晶系の当時10%に比べてまだ不十分であった。筆者らがうまくいかなかったのは、後でわかったことだが、真空装置が古くて真空度が不十分（空気漏れが大きい）ためであった。

世界初のアモルファス太陽電池は先を越されたが、カーソン博士らのニュースは実は内心すごくうれしいことであった。当時の筆者らにとって、15年間やっても何も出てこないアモルファスは、依然として泥沼であり、太陽電池といっても結局何も出てこないのではないかと、という不安にさいなまれることがあったからである。しかし、RCAという世界の超一流の企業の研究所でアモルファス太陽電池を開発したのだから、我々の道は間違っていないと、むしろ安心したのである。世界初のa-Si太陽電池はRCAのグループに先を越されたが、民間企業としての勝負は工

業化である。われわれのグループは以前にも増して激しく研究を進めた。

3. 成長しつづける太陽電池

3.1 世界で最初に工業化に成功

変換効率の向上と量産性の向上、これが最大の開発のポイントであった。a-Si太陽電池もサンシャイン計画に組み込まれ、大学、公立研究機関、民間企業での研究開発が進められた。その結果、日本で開発され、現在では世界の共通技術になっている基本技術がいくつかある。幸いに筆者が開発した2つの技術がその中に含まれているので紹介する。まず第1は形成法である。

太陽電池はp、i、nと異なった伝導形式の半導体層を積層して形成するが、当初は1つの炉内でドーピング材料である B_2H_6 や PH_3 ガスを切り換えて導入してp層、n層を形成していた。しかし、これでは不純物の相互拡散が起これ、太陽電池特性を著しく低下させることがSIMS(2次イオン質量分析)で精密な分析を行うことにより判明した。そこで、筆者らはp、i、n各層に対して専用の炉を用意し、基板が炉から炉へと連続的に移動する連続分離形成法(図1(a))を開発した。これにより不純物の混入が減少し、太陽電池の性能を飛躍的に向上させることができた。また、この方式はa-Si太陽電池を連続的に形成できるため、量産にも適したものであった。この技術や大阪大学の浜川教授(現立命館大学教授)等が開発したp型a-SiC材料等の多くの技術開発により、1993年には10

図1 a-Si太陽電池の連続分離形成方式(a)と集積型a-Si太陽電池構造(b)

写真 1 集積型 a-Si 太陽電池内蔵の各種応用機器

cm 角で世界最高の変換効率 12% を実現している。

もうひとつの重要な技術は集積型 a-Si 太陽電池である。太陽電池が広く使われるには、使いやすいものでなければならない。1 個の太陽電池から得られる電圧は高々 0.8 V であった。それに対して民生機器用電源としては当時最低 3~24 V の電圧が必要であった。そこで筆者は 1 枚の基板から任意の電圧がとれる太陽電池を開発した。これは簡単にいうと、形成工程で電極や a-Si を加工し、絶縁体の上に太陽電池が直列につながるように工夫したものである(図 1(b))。この構造を用いれば、形成過程において、容易に幾つでも直列または並列に太陽電池を接続することができ、従来のように太陽電池をリード線で 1 個 1 個つなぐ必要はない。

これらの技術開発により、1980 年には a-Si 太陽電池の量産をスタートさせることができた。a-Si 太陽電池の工業化に世界に先駆けて成功したのである。

3.2 エレクトロニクス製品への応用

最初の実用製品はカード型電卓であった。電気回路の LSI 化が電卓の消費電力を数 μ W まで低下させていた。当初は a-Si 太陽電池の変換効率はそれほど高いものではなかったが、オフィスでの使用にも充分耐えるものができた。電卓の商品化以降、集積型 a-Si 太陽電池を応用したラジオ、充電器など続々と製品化を進めていった(写真 1)。また、少し大きめの電源としてはテレビ、ポンプ、冷蔵庫、エアコンや照明装置などの電源として、太陽電池の応用展開も進められている。

3.3 太陽電池時代の到来

各種の太陽電池搭載の電気製品が開発、発売される中で、1980 年代の後半から地球環境問題が大きくクローズアップされてきた。化石燃料を使うことによる

写真 2 日本初の逆潮流ありの太陽光発電システムを設置した個人住宅

地球温暖化や酸性雨で地球環境が破壊されつつあることが明らかになり、クリーンエネルギー源としての太陽電池が一層注目され始めた。そしていよいよ、一般電力用としての太陽光発電システムが現実のものとなってきた。

1990~1993 年にかけて大幅な法制度の見直しが行われてきた。1992 年には個人でも太陽光発電システムを設置して電力会社の送電線に接続し、余剰電力を電力会社に売電できるようになった。

この方式では、従来の蓄電池が不要で設置コストも低減できる。しかも、電力会社の英断で電力会社に売るときの電力代は、電力会社が一般の家庭に売るときの電力代と同じに決まった。クリーンエネルギー源としての太陽電池の開発に長年携わってきた筆者にとって、待ちに待った時がやってきたのである。早速 1992 年 7 月、筆者の自宅に逆潮流ありの個人住宅用太陽光発電システムとしては日本初のシステムを設置した(写真 2)。現在では、太陽エネルギーで自宅の電力を賄い、余った電力を電力会社に供給し、快適な生活を営んでいる。これまでの実績について一例を述べると、1993 年の 5 月の 1 カ月間では 175 kWh を発電し、そのうち実に 60% 以上の電力を売電するなど順調に運転している。

太陽電池の現状の最大の課題はコストであり、これを解決するために、1993 年にスタートしたニューサンシャイン計画では、西暦 2010 年頃までに通常の電力料金と同程度である 25~30 円/kWh 程度の発電コストの実現を目指した開発が進められている。また、早くから筆者らは国に対して太陽光発電システムの導入助成について強く要望してきたが、同年から地方公共団体等が太陽光発電システムを導入する場合、2/3 (1997 年度は 1/2、ただし防災型システムは 2/3) を国

GENESIS (Global Energy Network Equipped with Solar Cells and International Superconductor Grids)

図 2 GENESIS 計画

が補助する制度が発足し、1996 年度までに全国で 112 か所に太陽光発電システムが設置されてきた。さらに、1994 年からは個人住宅に対しても太陽光発電システムを導入する場合、国が 1/2(1997 年度は約 1/3)を補助する制度(フィールドテスト事業)が実施され、しかも年々予算、件数が増加し、1997 年には約 1 万戸の個人住宅用太陽光発電システムが助成されることになり、いよいよ個人住宅での太陽光発電が普及する時代がやってきた。

4. 人類を救うグローバルエネルギーシステム： GENESIS 計画

エネルギー問題と環境問題を解決する新しいエネルギーシステムとして、筆者は GENESIS (Global Energy Network Equipped with Solar Cells and International Superconductor Grids) 計画(図 2)を提案している。これは、太陽光発電所を地球の各地に分散配置し、その間を高温超伝導材料を用いた電力ケーブルで結び、地球規模のエネルギー供給システムを作ろうというものである。

筆者らの計算では、西暦 2000 年の全世界の 1 次エネルギーは原油換算で 140 億 kJ/年となる。これをシステム変換効率 10%の太陽光発電システムで賄うとすると、その面積はわずか約 800 km×800 km になる。それは全世界の砂漠の面積の 4%に過ぎない。この計画が実現すれば、人類を環境問題とエネルギー問題から解放することができる。すでに始まった個人住宅での発電や、フィールドテスト事業は、その第 1 ステップである。そして第 2 ステップとして、日本に隣接する韓国、中国などの国々とカントリーネットワークを構築する。これについては、すでにシルクロードジェネシス研究会が東急建設(株)を幹事会社として前田建設工業(株)、(株)竹中工務店、三洋電機(株)、(株)東芝、(株)富士総合研究所の 6 社により発足さ

れ、モンゴルの砂漠地帯に太陽光発電システムを設置し、砂漠の緑化を進めながら、周辺地域の開発に利用しようとする案が提案されている。

このようなカントリーネットワークを徐々に広げていくことで、最終的にグローバルネットワークが実現できるのであるが、そのためにはまだ解決すべき多くの課題が山積しており、多くの科学分野の人たちの協力、参加が求められている。今後は世界規模で、国、自治体、民間企業などが一層協力し合って、このクリーンで膨大なエネルギーを有効利用する時代が一日も早く来ることを願っている。

5. む す び

筆者のアモルファス材料研究における前半の 15 年間は失敗の連続であり、研究の中断まで考えた末の開発であった。すんなりと成功したわけではなかっただけに、その過程において実に多くのことを学んだ。「利用者のニーズを知ること」はその中のひとつであり、利用者の立場に立って太陽電池をいかに使いやすくするかと考えることで、集積型の太陽電池を開発できたのであった。このような商品開発における「戦略の大切さ」「極限の状態でいかに戦うか」といったことはもちろん重要であるが、筆者がもっと大切であると考えているのは「何事にも哲学が必要である」ということである。筆者は技術というものは「抜けガラ」だと思っている。科学者にとっても、技術者にとっても、企業にとっても、その時の技術というものはその時点では大切であり、役立つものである。しかし、時とともにそれは必ず陳腐化する。だから、「抜けガラ」にすぎないのである。しかし、その開発のバックグラウンドになった考え方、「哲学」というものは永遠だと思う。わたしはこの開発を通して、その「哲学」をつかめたような気がする。その後の太陽電池の開発においては、文字どおり寝食を忘れて開発に没頭した。それを支えたのが太陽電池に対する情熱と、この「哲学」であったと思っている。若い研究者たちには、ぜひこの「哲学」を持って日々の研究に取り組んでいただきたいと考える次第である。(1997 年 7 月 28 日受付)

くわの ゆきのり
桑野 幸徳 1963 年、熊本大学理学部卒業。同年、三洋電機(株)入社。太陽電池に関する研究開発業績で科学技術庁長官賞、米国セラミックス学会フルラス賞など受賞。現在、三洋電機(株)常務取締役、研究開発本部長、大阪大学客員教授。著者に「太陽電池を使いこなす」など、工学博士。