

人類を救う太陽光発電はどの様に研究開発され、普及し、その将来の展望は

熊本大学フェロー、工学博士 桑野 幸徳

1. はじめに

太陽光から直接電気を得ることが出来る太陽電池を使った太陽光発電が新しい電力源として注目されている。筆者は熊本大学で、学んだ物理学の基礎技術を基にして、約 60 年間この太陽光発電の研究開発に係わってきた。太陽電池の開発事始めから、どの様に研究開発され、実用化されたか？また、その将来はどの様に展望されるかを述べる。

2. 量子力学の誕生が半導体・太陽電池の原点

従来のニュートン力学に替わる新しい物理法則、量子力学の基礎となる方程式がオーストリアの物理学者 E・シュレディンガーによって 1926 年に生み出された (1933 年にノーベル物理学賞を受賞)。これは量子と呼ばれる電子や光子のような小さな物体は、粒子としての性質と波としての性質の両方を持ち合わせている。

その波を波動関数と呼ばれる関数で表し、その関数が従うべき物理学上のルールをエネルギーや運動量という粒子の性質と共通する属性を介して数学的に記述したのがシュレディンガーの方程式である。

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} + V\psi(x,t)$$

図 1. シュレディンガーの方程式

3. トランジスタの誕生

第二次世界大戦直後の 1940 年始めに米国ベル研究所では、新しい電話通信網の開発が進められていた。従来の真空管による制御から電子的な個体デバイスを用いた制御装置を開発する計画であった。1947 年にベル研究所で、ジョン・バーディーン (理論物理学者)、ウォルター・ブラッテン (実験物理学者)、ウィリアム・ショックレー (物理学者) の 3 人が前述の量子力学に基づく原理を用いて固体増幅素子 (トランジスタ) の開発に成功した (3 人は 1956 年にノーベル物理学賞を受賞)。このグループの中には後に Si 太陽電池を開発した G・L・ピアソンも加わっていた。

4. 筆者と異端の物質アモルファス材料

筆者は化学者を志し、1953 年に熊本大学理学部化学科に入学した。専門課程でプラズマ反応による新物質の創成を選んだ。

大学の 4 年の時、同級生は専門である化学系の会社を選んだ。私は幼少の時から電気に興味を持っていたので、その時代、創業まもない新興電気メーカーであった三洋電機を選んだ。

1) 入社後の配属は思いもよらない研究所

1963 年 4 月、入社式後、配属先が告げられた。自分の配属先を知らされた瞬間、思わず耳を疑った。実習をした洗濯機部門ではなく、中央研究所だったからだ。当時の研究所長は、山野 大氏だった。山野所長は、京都大学大学院理学研究科博士課程 (湯川秀樹博士の後輩) を修了後、三洋電機に入社した経歴を持つ人物であった。その山野所長は、若い研究員と対話し、世の中にないものを生み出せと言っていた。

当時のエレクトロニクス技術は、結晶シリコン (Si) を用いてトランジスタが開発され、さらに IC (集積回路) の開発へと発展していた時代であった。三洋電機の研究員も、単結晶 Si デバイスの開発に着手するものが多かった。

2) 異端の物質アモルファスへの挑戦

筆者は、多くの人が研究していた結晶 Si 材料ではなく、当時としては異端の物質である非結晶材料、すなわちアモルファス材料で何か新しいものがないかと考えた (図 2)。黄 (S) やセレン (Se)、テルル (Te) といった材料を用いたアモルファス半導体物質で、電子デバイスをつくる研究を始めた。当時の蛍光灯を瞬時に点灯するスイッチング素子を開発したが、実用化までは至らなかった。

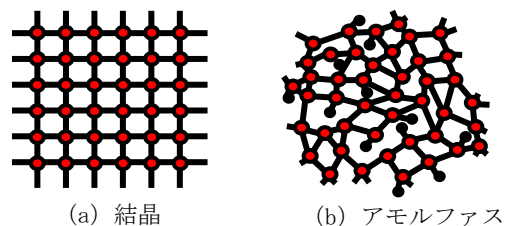


図 2. 結晶状態とアモルファス状態

5. アモルファス Si を用いた太陽電池の開発に着手

1973 年、第四次中東戦争の勃発を契機に起こったオイルショックで石油の価格が約 4 倍になり、新エネルギーの開発が必要になり、我が国は 1974 年に膨大な太陽のエネルギーを活用した新エネルギーの技術開発するための長期計画、「サンシャイン計画」を発足させた (図 3)。これを契機に筆者はアモルファス材料を用いた太陽電池の開発テーマを変更した。

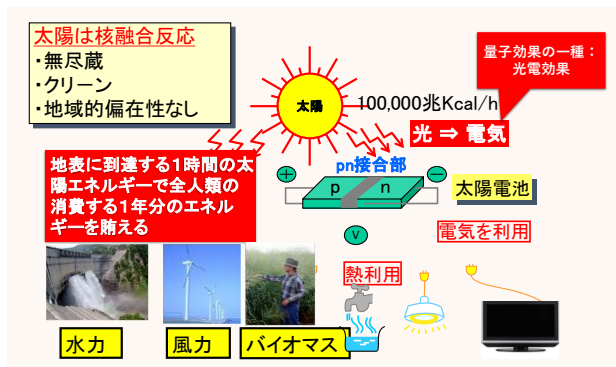


図3. 膨大な太陽エネルギーの活用と太陽電池での発電

この時期に英国ダンディー大学のスピーア教授が、アモルファスシリコン（a-Si）半導体でもpn制御できるという論文を発表した（それまではアモルファス材料で半導体デバイスの基本構造であるpn制御が報告されていなかった）¹⁾。

この論文を見つけたとき、私の直感が働いた。pn制御できるということは、a-Si半導体を太陽電池（太陽電池はpn接合から構成される）に応用できるのではないかと。そこで筆者は、大学時代のプラズマ反応の経験を生かし、a-Si半導体を用いて太陽電池をつくるという研究を開始した。

1) 手づくりの装置で苦戦

a-Si太陽電池は、図3に示す様に、従来の結晶Si太陽電池とは大きく異なる、薄膜太陽電池で、その作成工程も低温（100℃程度）で真空装置の中でのプラズマ反応により薄膜のa-Siを、透明電極のついたガラス基板に形成する方式である。材料が少なく（約1/100）、製造エネルギーも少なく（従来は1,000℃程度が100℃程度）、画期的な低コスト太陽電池ができると考えられた。

筆者がa-Si太陽電池の開発を始めて、2年後の1976年、エレクトロニクス業界の世界の大手の米・RCA社が、世界で初めてa-Si太陽電池を開発したと発表した。

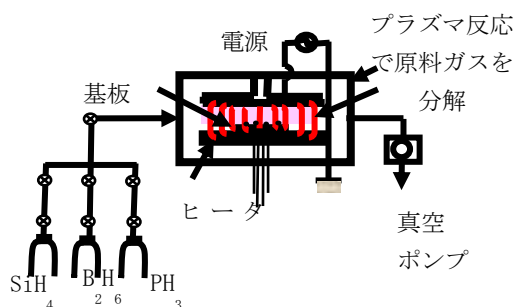


図3. a-Si太陽電池の反応装置

私たちのグループも、ほぼ同じ方式であるプラズマ反応による太陽電池の開発を行っていた。私達が実験用に使って

いた反応炉は、予算も少なかったもので、古いスチールロッカーを改造した手製のものを使っていたので、プラズマ反応に不可欠な高い真空状態を保つことができなかった。

2) 世界初の工業化への挑戦

アメリカのRCAのカールソンのグループがa-Si太陽電池を作製に成功したのは仕方がないが、民間企業の研究部門であるから世界最初の工業化をしようと目標を変えた。

3) 人類のエネルギーを賄うことは簡単ではなかった 一状況は悪化してきた一

前述のように、日本ではサンシャイン計画に基づき太陽電池を始めとする再生可能エネルギーの開発が活発に推進されたが、オイルショック時の石油価格の高騰も徐々に収まってきた。それまで中心的に推進してきた関東メーカーは脱落していった。

筆者は太陽電池の電力用への応用は価格的に難しいけれど、中間需要として、民生用の電気製品の電源として応用できないかと考えた。当時、トランジスタや液晶ディスプレイの進歩により、電卓や腕時計の小型化、省電力化が進んで来た。これらの民生用エレクトロニクス製品は一般の化学電池が電源として使われていた。この化学電池は寿命があり、時々電池切れする。それで太陽電池をエレクトロニクス製品の電源に使えないかと考えた。

6. 新型太陽電池の発明

1) 集積型アモルファスシリコン太陽電池の発明へ

従来の結晶Si太陽電池は、発電素子（セル）から得られる電圧（0.5V程度）は低い。実使用では、セルとセルを複数直列に繋いで電圧を上げなければならなかった。当時の結晶Si太陽電池は、これを銅線のワイヤーで多段に繋ぐ煩雑な手法を使っていた（図3）。そこで新製法を考案した。

新製法とは、a-Si太陽電池の形成法は材料を真空装置で、気相で形成するので、金属製の穴の開いた薄いマスク板を用いてそれをうまくデザインすることにより、直列接合を形成する方法である。このマスク方法を使い、発電

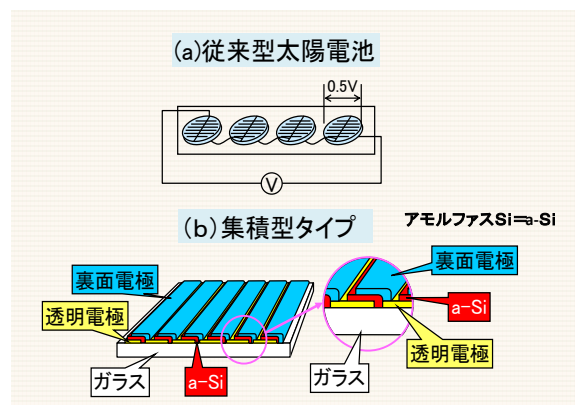


図3 従来の結晶Si型太陽電池の接続方法（上段）と集積型a-Si太陽電池の接続法（下段）

層と電極層を形成するマスクの位置を少しずらして設計して、a-Si 太陽電池を直列接続する工程を考え出した（カスケード型太陽電池）。これにより a-Si 太陽電池は製造工程で直列接続が可能になる、つまり、モジュール化が実現した。これを『集積型 a-Si 太陽電池』と名づけた²⁾。

この太陽電池を水平方向に多段に接続する方式はその後に開発される薄膜型太陽電池（カドミウム・テルル太陽電池や有機系太陽電池、ペロブスカイト太陽電池など）にとってなくてはならない方式となった（この発明で科学技術長官賞受賞や各種の国際賞を受賞）。

2) ソーラー電卓で躍進

1980 年 5 月、筆者らは集積型 a-Si 太陽電池の量産化を実現し、電卓の電源として世に送り出した。いくつかの困難を乗り越えて発売した a-Si 太陽電池搭載のソーラー電卓であったが、発売後は順調に販売が伸びていった（図 4）。



図 4. 世界で最初に工業化された集積型 a-Si 太陽電池搭載ソーラー電卓

7. 世界最高変換効率を有する高性能新型太陽電池（HIT 太陽電池）の開発

筆者等は電力用 a-Si 太陽電池の開発にはこだわり、課題である変換効率の向上に挑み続けた。しかし、なかなか成果が上らない。そこで、私達は発想を転換した。a-Si 層と結晶 Si 層を組み合わせる 2 層タイプの太陽電池の開発を考案した。a-Si はバンドギャップが 1.7eV で結晶 Si バンドギャップは 1.1eV なので、これを組み合わせたら高効率の太陽電池が出来るかもしれないと考えた。異なる物質を組み合わせる、つまり「ヘテロ接合」太陽電池である。

1) 難産で生まれた「HIT 太陽電池」

a-Si 層と結晶 Si 層の組み合わせは例がない。同種の物質の結合であるホモ接合に対し、異なる物質を重ねるヘテロ接合とは、「木に竹を接ぐ」ように、当時としては物性科学の領域でも常識外の開発だった。p 型 a-Si/n 型単結晶 Si の構造で太陽電池を形成すが特性はでなかった。その原因を追求し、a-Si 層には p 型にするため不純物としてボロンを添加しているので結晶が乱れていると考えた。それを回避するため、結晶 Si 層と a-Si 層の間にボロンを入れないノンドープの i 型 a-Si 層を、緩衝層として

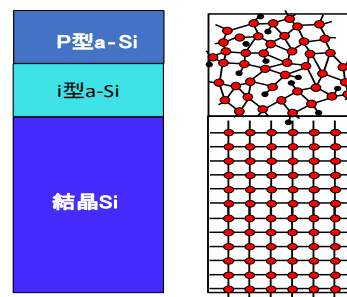


図 5. HIT 太陽電池の構造

入れてみてはどうだろうかと考えた。すなわち、p 型 a-Si/i 型 a-Si/n 型単結晶 Si の構造で実験した（図 5）。すると、突然驚くべき太陽電池の特性を示す高い特性が出た。解放電圧が 0.598V を示し、曲線因子は 0.8 という非常に高い数値だった、変換効率を求めると 14.5% であった。これまで a-Si 太陽電池では 10% 以下の変換効率しか出せなかったことを考えると、驚異的な発電特性が得られた。

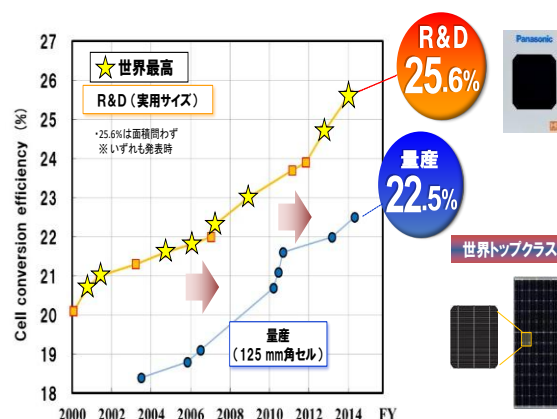


図 7. HIT 太陽電池の変換効率向上の推移

この新型太陽電池を「Heterojunction with Intrinsic Thin-layer Solar Cell」の頭文字をとって『HIT』と名付けた³⁾。その後の HIT 太陽電池の変換効率の向上の推移を図 7 に示す。この新構造太陽電池は、現在でも Si 系太陽電池の最高変換効率を実現している。

8. 国内の電力系統改革へ向かう

筆者等は、1979 年に a-Si 太陽電池の世界初の工業化を成し遂げ、翌年にソーラー電卓を商品化した。しかし、筆者の目標は人類のための新しいエネルギー源として太陽電池を用いた太陽光発電の世界的普及であった。

1990 年代に入ると、太陽電池の発電性能は飛躍的に向上した。モジュール変換効率にして 10% を超え始めた。コスト低減も進み、太陽光パネルを住宅の屋根に寄せ、家庭用の電力供給設備として利用できる技術水準に達して

いた。ただ、当時は現在の様な電力会社の電力線に太陽光発電システムの系統連系（接続）は許されてなく、太陽電池で発電した電気を一旦高額な蓄電池に貯めてその電力を家庭の電力に使用する方法しかなかった。しかし、蓄電池を備えると、家庭用の太陽光発電システムの価格は高価になった。

1) 業界団体太陽電池懇話会の設立

筆者等は 1990 年始めに太陽光発電システムと電力会社の電力線を系統連系し、太陽電池で発電した余剰の電力を送電線に流し、電力会社を買取ってもらい、夜間は電力会社から電気を買う方式を考えた（このシステムを逆潮流ありと呼ぶ）。こうすれば蓄電池は不要になる。この「電力会社から売電を認めてもらう」事は社会システムの変革である。太陽光発電の業界がまとまって、その普及拡大を推進するための団体太陽電池懇話会（現一般社団法人 太陽光発電協会：JPEA）を設立して、通産省や電力業界に働きかけた。難航の末、1992 年 4 月、ついにこの改革が実現した。電力会社の社長会で太陽光発電からの逆潮流電力の買取りを電力業界は認めた。

9. 初めての逆潮流ありの桑野太陽光発電所はこうして実現した

今まで、逆潮流式の太陽光発電システムを住宅の屋根に設置した例はない。様々なトラブルも予想された。筆者は自宅にこの逆潮流ありの太陽光発電システムを設置することにした。

1) 通常の火力発電所など同じよう設立許可が必要

当時は家庭での発電を前提とした制度がなく、**通常の発電所を建設する制度を援用して**関係官庁に申請書を提出するしか方法がなかった。つまり、私の家での発電所は電力会社の大規模発電所扱いであった。何回も関西電力と折衝してやっと、交渉がまとまった。

2) 桑野太陽光発電所竣工

そして 1992 年 7 月 31 日ついに日本初の逆潮流式の太陽光発電住宅、『桑野太陽光発電所』が竣工した（図 8）。



図 8. 最初の実生活逆潮流有り太陽光発電システム（桑野太陽光発電所）

この住宅に設置した太陽光発電所で発電した電気を電力会社に売電するシステムは図 9 示すように、昼間の太陽光で発電した電気は家庭の電気製品の電力を賄い、余れば電力会社送電線に逆送し、売電する。夜は太陽光がないので、電力会社の送電線から電力を供給してもらうシステムである。

その後、この制度を改革することにより、太陽光発電を一般のテレビや冷蔵庫の様に誰でも、自分の家の屋根に取り付けられるようになった。

3) 高価な住宅用太陽光発電に国の助成制度を創設

筆者は自宅に太陽光発電システムを設置したとき、その価格は大変高価であった。そこで、国に働きかけ、1994 年に国は個人住宅への太陽光発電設備設置に対して助成する制度を開始した（～2005 年）。この助成制度により、多くの太陽光発電住宅が日本に設置され、海外でも同様な動きが始まり、日本の太陽電池の生産量は 2005 年まで世界一になった。

ただし、日本の太陽電池の生産量はその後の国の産業政策の違いで、残念ながら中国に抜かれることになる。

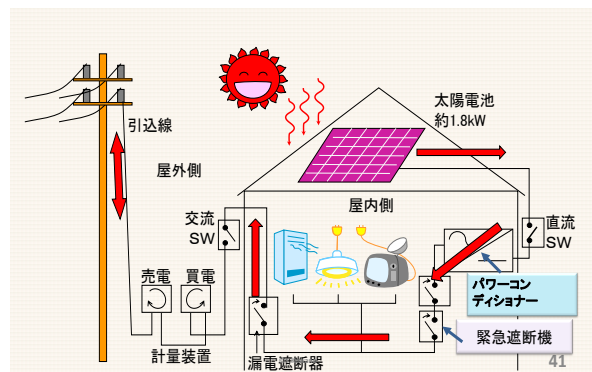


図 9. 逆潮流ありの太陽光発電システム

4) 桑野太陽光発電所 20 年、25 年、30 周年記念開催

自宅に太陽光発電所を開設したとき、密かに、30 周年間このシステムが稼働することを祈っていた。そこで、桑野太陽光発電所開設 20 周年、25 周年、30 周年に見学会と記念会を開催した。多くの方が見学会と記念パーティーに参加してくれた（図 10）。

5) 太陽光発電は 25～30 年間発電できる

2022 年 10 月に盛大に 30 周年記念見学会とパーティーを開始し、30 年間の桑野太陽光発電所の発電データを公表した。1912 年から 2015 年までの 23 年間はほとんど劣化していない。1992 年から 2012 年の 20 年間の発電量の年平均劣化率は 0.44%であった。さらに、2017 年、つまり、25 年を過ぎると、かなり出力が低下して、2015 年から 2022 年比での年平均劣化率は 5.96%であった（図 11）。



図 10. 桑野太陽光発電所開設 25、30 周年記念会

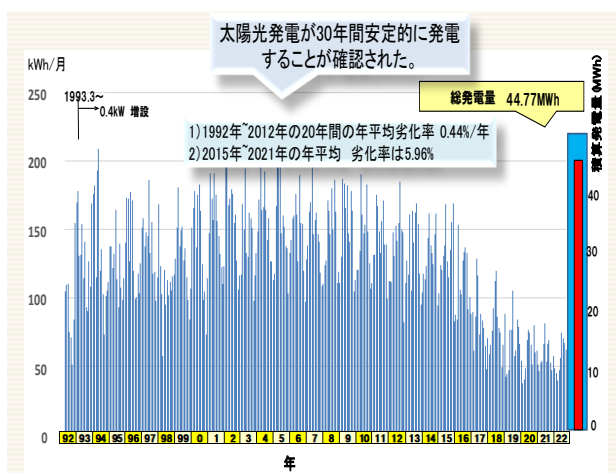


図 11. 桑野太陽光発電所の 30 年間の発電実績

逆潮流ありの太陽光発電システムの実使用実績として、20 年～30 年が証明されたことになる。このデータから太陽光発電は 25 年から 30 年間働き続けることが実証された⁴⁾。電力系統に接続された太陽光発電システムとしては多分、世界最長の運転期間であろう。

10. 世界的太陽光発電普及の時代が到来

2000 年頃になると、地球環境、特に温暖化が進み、CO₂削減が国際的なテーマとなってきた。

1) ドイツで再生可能エネルギー法制定

2001 年にドイツで画期的な法制度が制定された「フィードイン・タリフ (F I T)」という制度で、通常の電力価格の約 3 倍程度の高い価格で、太陽光発電によって発電した電力を電力会社が買う制度ができた。この F I T 制度はその後、全世界へ広がった。

2) 日本でも急拡大

2011 年 3 月 11 日に起こった東日本大震災に伴う地震、津波で福島第一原子力発電所の事故は、大変深刻な事態を引き起した。これを受けて、日本政府もドイツで制度化された再生エネルギー普及のための制度、フィードイン・タ

リフ (F I T) という制度の日本版として「固定買い取り制度」を新たに発足させた。2012 年 7 月から日本版 F I T が導入されると、日本の太陽光発電の普及は急速に拡大した。そして日本の太陽光発電の導入量は毎年 5～7 GW に達して、2023 年には 99GW に達した (図 12)。

また世界では 2,247GW (2 テラワット超) となった⁵⁾。これは、世界の総発電量の約 10% を賅っていることになる。

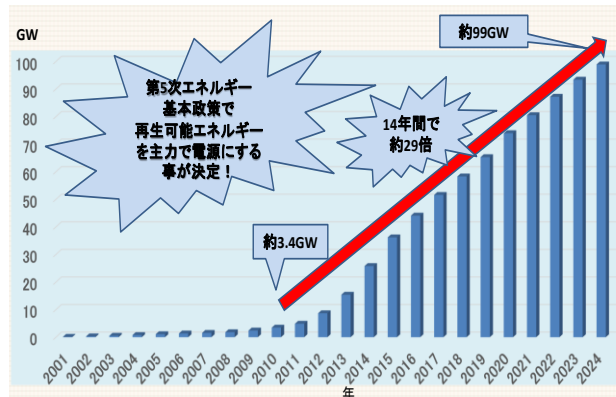


図 12. 日本の累積太陽光発電システム設置量

11 太陽光発電の輝ける将来—世界のエネルギーを太陽光発電で賅うジェネシス計画～

1989 年に筆者が提唱した地球規模の太陽光発電による世界的エネルギーシステムについて付記しておこう。ジェネシス計画 (GENESIS 計画) は (ジェネシスは旧約聖書の出てくる言葉で創世記という意味である)、1989 年 (36 年前) のオーストラリアのシドニーで開催された太陽光発電国際会議で筆者が発表したものである⁶⁾。世界砂漠の 4% に太陽電池を敷き詰めると、全人類のすべてのエネルギーを賅えると言うものである (図 14)。

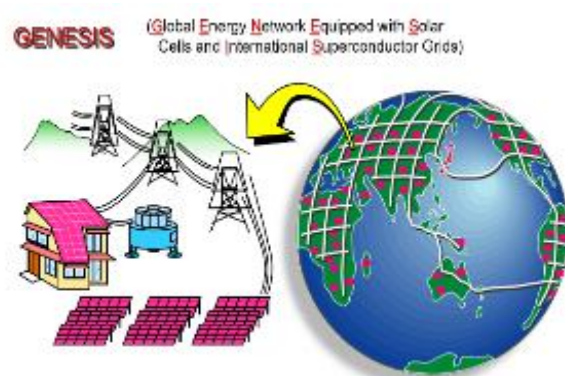


図 14. 世界のエネルギーを太陽光発電で賅う GENESIS 計画

世界の各地の砂漠に大規模な太陽光発電システムを設置し、その間を電気抵抗ゼロの超電導送電線で連系し、昼の世界で発電した電気を夜の世界に電力の形でエネルギーを輸送しようというものである。つまり、日本が夜の場

合、アフリカ西海岸が昼間の時間帯になるアフリカの砂漠に設置した大規模太陽光発電システムで発電した電力を国際送電網で、日本に持ってこようというものである。

太陽電池パネルの必要面積は、図 15 に示す様に世界の砂漠の面積のわずか 4 % (約 8 0 0 km×8 0 0 km) に過ぎない。つまり、東京一広島間を正方形にした面積で十分なのである。

	2000	2010	2050	2100
全世界のエネルギー消費予測量 (原油換算×億kl/年)	110	140	350	1,110
太陽電池システム変換効率(%)	10	10	15	15
太陽電池システムエリア (広さkm ²)	729	802 (全砂漠面積の4%)	1,030	1,850

図 15. 世界のエネルギー消費量とそれを賄う為に必要とする太陽電池パネルの面積 (1989 年に計算)

私の家に太陽光発電を設置したのは、この構想を発表した 3 年後である。その一歩を私自身が踏み出したいと思っていた。それがその後、全世界に広がり、本年は太陽光発電システムの累積量は約 2, 200GW になった。

「人類は将来、太陽光発電での電力か、その電力を使って製造した水素もしくはアンモニアを使う時代、つまり、化石燃料に頼らない時代に向かうであろう」その実現のため、今後も寄与したいと思う。

まとめと謝辞

熊本大学理学部同窓会 75 周年記念大会の記念講演で、筆者が経験した太陽電池の研究開発と実用化について、講演する機会を与えて頂いた熊本大学理学部同窓会会長西野宏名誉教授を始め、熊本大学学長の小川久雄先生、同理学部部長の磯部博志先生や関係者の皆様に感謝します。

振り返ると、筆者の研究開発の原点は、熊本大学が掲げる「創造する森、挑戦する炎」を基に、理学部で学んだ基礎科学を基に研究開発をしてきたように思います。筆者はその研究成果を基に、経歴に記載したように会社経営も経験し、天災の試練も受けました。しかし、多くのことを経験し、それを基に、現在でも社会的活動を行っています。これらの基礎を学んだ熊本大学、特に理学部に感謝しています。今後とも熊本大学理学部が基礎科学の分野で活躍すると共に学生に対する教育を通じて、世界に通用する人材の育成も行うことを心から期待しています。

参考文献

- 1) P.G. Le Comber, W.E. Spear, Electronic Transport in Amorphous Silicon Films, *Phys. Rev. Lett.* **25**, 509 (1970).
- 2) Y. Kuwano, et al., Amorphous Si Photovoltaic Cell Module (Integrated Cell Module), *Proceeding of the 1st Photovoltaic. Sci. & Eng. Conf. in Japan*, 137-141 (1979) .
- 3) M. Tanaka, M. Taguchi et. al., Development of New a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells, *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, 3518-3522 (1992).
- 4) Y. Kuwano, M. Taguchi 30-year-old Japan's first private residential photovoltaic system with reverse -power flow, *Journal of Japan Solar Energy Society*, **50**(2), 75-82 (2024).
- 5) Report IEA-PVPS Snapshot of Global PV Markets 2024 Snapshot_2024.pdf.
- 6) Y. Kuwano, Progress of Amorphous Silicon Solar Cells, *Proc. 4th. Int. Photovol. Science and Engineering Conf. Sydney*, 557-564 (1989).

筆者略歴

桑野 幸徳
工学博士 (大阪大学) 、
元三洋電機 (株) 代表取締役
社長 CEO
大和ハウス工業 (株) 社外取
締役、
太陽光発電技術研究組合名
誉顧問
熊本大学フェロー、太陽エネルギー学会フェロー



1941 年生まれ、熊本大学理学部化学科卒業、大阪大学工学博士。1963 年三洋電機 (株) に入社以来、太陽電池の研究開発に従事、その後、三洋電機 (株) 取締役、研究開発本部長、情報通信事業本部長、半導体カンパニー社社長を歴任し、三洋電機 (株) 代表取締役社長 CEO に就任。この間、集積型アモルファスシリコン太陽電池を発明し、世界で最初にアモルファスシリコン太陽電池を工業化した。又、太陽光発電技術研究組合理事長、大阪大学客員教授を歴任。

太陽電池の研究開発に関する業績で科学技術長官賞、PVSEC AWARD、化学技術賞 (太陽電池と化学電池で受賞) 等受賞。

著書：不可思議な物質アモルファス (講談社)、太陽電池とその応用 (パワー社)、太陽電池を使いこなす (講談社)、光が創るマルチメディア新時代 (三田出版会)、デジタル革命新時代 (オーム社)、太陽電池開発の歴史 (オーム社)、人類を救う太陽光発電に人生をかけた男 (22 世紀出版社) など多数。