

# 化合物薄膜太陽電池の将来展望

太陽光発電は、再生可能エネルギーの中でも主力としての役割が期待されています。今日では街のいたる所で見ることができ、普及も進んでいるのが実感できます。ところで、太陽光発電を構成する太陽電池には様々な種類があり、それぞれに異なる特徴や性能を有しています。ここでは、現在太陽光発電市場のほとんどを占めている結晶シリコン系とは異なる、化合物薄膜系と呼ばれる太陽電池に目を向け、その特徴や利点、将来展望について紹介します。最近ではペロブスカイト太陽電池という言葉をよく耳にするようになりましたが、ペロブスカイト太陽電池の他にも沢山の種類の化合物薄膜太陽電池が存在します。化合物薄膜系とは、まだ見ぬ性能や機能を持った新材料候補群でもあり、これまでにない機能性材料が突然現れる可能性も秘めています。今回は、新材料そのものではありませんが、新材料の起点となる無機化合物薄膜太陽電池を中心に取り上げます。



国立研究開発法人  
産業技術総合研究所  
エネルギー・環境領域  
ゼロエミッション  
国際共同研究センター  
首席研究員

石塚 尚吾  
(いしづか しょうご)

## はじめに

近年の日本のエネルギー構成として、化石エネルギーに大きく依存している現状があります(図1a)<sup>(1)</sup>。それでも、発電電力量における再生可能エネルギー(太陽光や風力など新エネルギーと呼ばれるものと水力を合わせた)比率は、2021年にはおよそ20%と、東日本大震災以降はその割合を大きく増加させ今日に至っています。また日本に限らず、世界で太陽光発電の導入は拡大し続けており、その累積導入量はすでに世界全体で1000 GWを超えています(図1b)<sup>(2)</sup>。日本国内の太陽電池メーカーはここ十数年で市場シェアの縮小を余儀なくさ

れていますが、それでも日本国内における導入量自体は世界的に見ても決して少なくないことがわかります。

2022年における太陽電池モジュール生産量は、世界全体で350-400 GWほどであったと見積もられています。その97%が結晶シリコン系で、残りの3%が薄膜系、特にテルル化カドミウム(CdTe)やCIS系(銅・インジウム・セレンから成るCuInSe<sub>2</sub>を主成分とし、これにガリウムや硫黄などを含有するカルコパイライト型化合物の総称)などのカルコゲナイド系化合物薄膜膜となります。そういうわけで、現時点では普段街中で目にする太陽光発電システムのほとんどは結晶シリコン系ということになります(図2)。

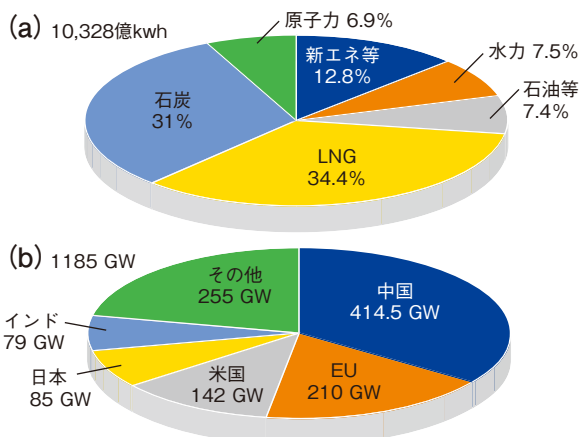


図1 (a) 日本の発電電力量 (2021年度)。 (b) 世界の太陽光発電累積導入量 (2022年)



図2 結晶シリコン系太陽電池の太陽光発電システム

## Information

カーボンニュートラル実現に向けて、再生可能エネルギーの普及は必須であり、研究開発および普及が進んできましたが、まだまだ推進が必要です。普及が進むと高機能化や新たな使用形態の開拓が必要であり、また環境問題への配慮なども重要になってきます。太陽光発電は再生可能エネルギーの中心的な役割が期待されますが、従来の結晶シリコン系だけでは機能や設置形態にも限界があるため、他にも様々なものが研究開発され、一部は商用化されています。

本稿の主題である化合物薄膜系は、軽くて曲げることもできるフレキシブル型太陽電池の作製が可能になることや、結晶シリコンよりも優れたエネルギーバックタイム、耐放射線性などの特長を有するものがあります。重量や形状特性などの要因でこれまで太陽光発電の設置が困難であった場所への導入も可能となるため、これからの研究開発の進展に益々関心が高まっています。従来の結晶シリコン系太陽電池を上回る光電変換効率を有しながら価格的にも民生普及を期待できる多接合型太陽電池の実現に向けて、化合物薄膜系

材料に大きな期待が寄せられます。

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (AIST) は日本最大級の公的研究機関として、産業や社会に役立つ技術の創出とその実用化や、革新的な技術シーズを事業化に繋げるための橋渡しや社会実装機能に注力されています。太陽光発電関連の研究は主につくばと郡山の2つの拠点で実施されており、再生可能エネルギー研究センターとゼロエミッション国際共同研究センターが中心的な役割を担っています。本稿で紹介されているセル・モジュールの研究開発 (各種太陽電池の高性能高機能化、モジュール信頼性) はもちろんのこと、計測・評価 (発電特性の精密計測や発電量評価、国際標準化に資する標準や計測)、システムに関わる領域 (発電量予測やエネルギーマネジメント、故障診断など)、普及・政策に必要な領域 (安全性や各種ガイドライン作成など) に至るまで、太陽光発電に関して幅広く取り組まれています。

ナビゲーター つくばサイエンス・アカデミー  
コーディネータ 渡辺 正信

一昔前、太陽光発電はクリーンエネルギーの代名詞でした (今もそうかもしれませんが)。しかし、近年は太陽光発電の導入による景観悪化や環境破壊などが問題となる事例もあり、必ずしも良い印象ばかりを持たれなくなってきた感があります。従来の結晶シリコン系太陽電池モジュールは、大きさにもよりますがパネル1枚で大体15 kgほどの重さがあります。実際の設置はパネルを何枚も敷き詰めることになるので、場所や架台には耐荷重性などの仕様も求められます。つまり、設置場所には制約があります。今よりもさらに太陽光発電の普及を促進し、エネルギー構成における再生可能エネルギー比率を増加させるには、従来の結晶シリコン系太陽電池では形状や景観、耐荷重性などの観点から導入が困難であった場所への設置も可能な太陽電池が必要です。また、性能面においてもより光電変換効率に優れる太陽電池が望まれます。そこで今、化合物薄膜太陽電池の可能性に注目が集まっています。

### 化合物薄膜系の利点

太陽電池材料は、大まかに図3のように分類されます。少し前であれば、化合物薄膜系とは狭義的に「化

合物-無機系-多結晶系」のCdTeやCIS系などを指しましたが、元々その言葉の定義は曖昧で多様性を持ち、字面から有機薄膜やペロブスカイト、GaAs薄膜なども含められるように思われます。太陽光発電分野における世界三大国際会議の一つに数えられる欧州太陽光発電会議及び展示会の2023年開催会 (EUPVSEC 2023、ポルトガル・リスボン、2023年9月18-22日) では、ペロブスカイトや有機系、III-V族系、CIS系などがまとめて「薄膜と新概念 (Thin Films and New Concepts)」という同じ大分類の枠内でプログラム編成が組まれていました。しかし、「化合物薄膜系」の語意範囲を、非シリコン系材料のほとんどを表すまでに広げるのはさすがに用語として意味を成さなくなるので、ここでは、従前のCdTeやCIS系にペロブスカイトを加えた程度の範囲の意味で用いたいと思います。

すでに市場の大部分を占めている結晶シリコン系と比較した場合に、化合物薄膜系に求められる性能や特徴として、光電変換効率以外に軽量性や曲面追従性 (柔軟性)、低コスト化などが挙げられます。まず、薄膜系の特長を活かした軽くて柔軟性のある軽量フレキシブル型太陽電池の製造が可能になるのは大きな利点です。もちろん、薄膜系は軽量フレキシブル型にしか応用で

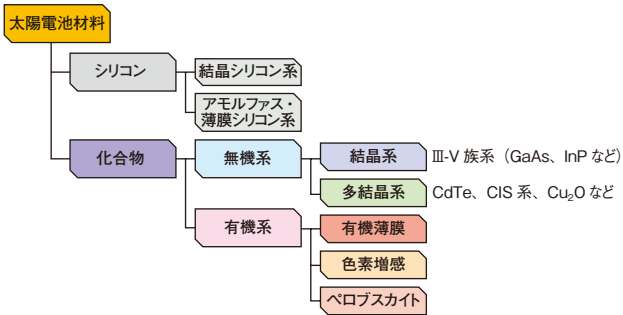


図3 太陽電池材料の分類

きないわけではなく、ガラス基板を用いることで従来のパネル型形状の太陽電池モジュールも製造できます。実際にCdTeやCIS系ではガラス基板製品がすでに上市されています。また、コストメリットも重要です。例えばCdTeではガラス基板から太陽電池モジュール製品の完成まで一つの工場ですべての工程が完了します。他方、結晶シリコン系太陽電池モジュールの製造では、インゴットからウェハ加工、セル化、モジュール化に至るまで通常3から4の工場を経由し3日以上かかります。太陽電池の優位性の議論によく用いられる指標としてエネルギーペイバックタイム（その太陽電池を製造するのに消費したエネルギーを、製造した太陽電池を稼働することにより何年で回収できるか）というものがあります。従来の結晶シリコン系は1～2年と言われますが、CdTeやCIS系では1年以下であり、薄膜太陽電池の優位性が示されます。

特殊用途をも考えた場合、例えば、結晶シリコン系太陽電池は耐放射線性が弱く、宇宙空間での使用において顕著な劣化が見られることが知られています。これに対し、CIS系は優れた耐放射線性を有することが知られており、宇宙空間での使用に適しています。またそのような特長から、CIS系材料は太陽電池だけでなく放射線検出器などへの応用も有望視されています。

ここまで、結晶シリコン系の不利な点、化合物薄膜系の有利な点を述べましたが、逆に結晶シリコン系の有利な点、化合物薄膜系の不利な点もあります。結晶シリコン系の有利な点は、まず何といても原料シリコンの豊富さです。地殻中の元素存在度は、酸素の46%に次ぐ2位の27%であり、人類の生活空間スケールから見ればほぼ無尽蔵と言えます（ちなみに3位はアルミニウムで8%、4位は鉄で6%と続きます）。他方、化合物薄膜系では希少金属や重金属を主成分とする材料系もあります（それでも「薄膜」であるため原料使用量は

は少ないのですが）。また、結晶シリコン系は1 m<sup>2</sup>を超える大面積モジュールサイズにおいても24%を超える光電変換効率を得られており、対してCdTeやCIS系では、1 m<sup>2</sup>超サイズモジュールの光電変換効率は18～20%にとどまっています。最近注目されているペロブスカイト太陽電池は、小さい（1 cm<sup>2</sup>程度）デバイスにおいては25%を超える光電変換効率が報告されていますが（2023年12月時点）、大面積化に伴う変換効率の低下が大きく、また経時劣化の問題も抱えているため、本格的な社会実装に至るかどうかは現時点においてまだ不透明な状況です。それでも化合物薄膜系太陽電池の研究開発を継続し、車載や屋外設置または屋内使用など用途に応じて、様々な種類の太陽電池を適材適所に充てていくのが普及促進に繋がると考えられます。後述の多接合型太陽電池の研究開発では、様々な種類の太陽電池を組み合わせてデバイスを構成します。それぞれに異なる太陽電池が個々のポテンシャルをさらに高めていくことで、太陽光発電全体のポテンシャルをさらに伸ばすことに繋がります。

### 軽量フレキシブル型CIS系太陽電池の研究開発

CIS系は、CdTeと同様にすでに製品化もされている化合物薄膜太陽電池の一つです。小さいデバイス（1 cm<sup>2</sup>程度）では24%近い光電変換効率を得られており、500 cm<sup>2</sup>サイズのガラス基板モジュールでも20%を超える変換効率が報告されています。前述の通り、結晶シリコン系よりも短いエネルギーペイバックタイムや耐放射線性に優れるという特長もあります。CIS系太陽電池のモジュール構造は、結晶シリコン系とは異なり、一枚の基板上に複数の短冊状太陽電池セルを直列に集積させるので、小面積でも高い電圧を得ることができます（図4a）。電気の流れをせき止めたり、発熱の原因となる部分陰の影響を受けにくく、多くの実発電量を生み出せるのも特長の一つです。耐放射線性に優れることからわかるように環境耐性や長期信頼性に優れるため、当然屋外使用に適しているのですが、光量の少ない屋内においても十分に使用できる特長もあります（図4b）<sup>(3)</sup>。CIS系太陽電池は薄膜系ですが、これまではガラス基板製品の開発や製品化が先行していました。薄膜系の特長を活かした軽量フレキシブル型の太陽電池開発は重要課題でしたが、ガラス基板製品と比べる

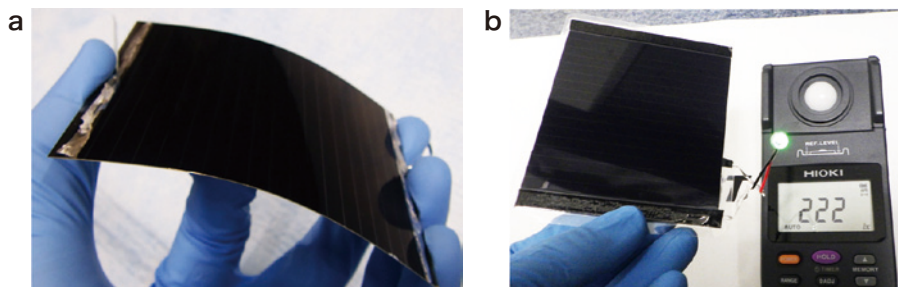
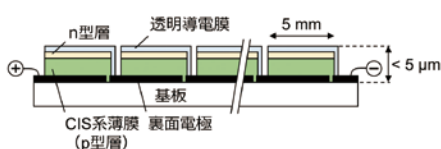


図4 (a) 軽量フレキシブル型 CIS 系太陽電池ミニモジュール。1 枚のフレキシブル基板上に 17 個の太陽電池セルが直列接続した集積構造になっている。(b) 200 lx 程度の照度下 (筆者オフィスの床付近) で、CIS 系太陽電池ミニモジュールによる電力で緑色 LED を発光させている様子 (室内照明は蛍光灯)。



と金属箔や樹脂フィルムなどのフレキシブル基板上で高い変換効率を得るのは難しく、またガラス基板上とは異なるプロセス開発も必要となるため、その研究開発はガラス基板製品ほど進んでいませんでした。それでも最近、筆者の研究グループでは、CIS系薄膜の組成制御や添加剤の検討など改良を重ね、軽量フレキシブル型 CIS 系太陽電池ミニモジュールでは世界最高となる光電変換効率 18.7% の達成に成功しています (67.9  $\text{cm}^2$ 、17セル直列接続)。

また、CIS系材料は太陽電池だけでなく、水分解水素生成デバイスの光カソード (光を当てると水素を発生する光電極) にも応用できます。CIS系材料の一つであり、短波長光吸収に適した三元系  $\text{CuGaSe}_2$  (禁制帯幅 1.7 eV) 薄膜を光カソードに用いた水分解セルで、高いオンセット電位 ( $\sim 0.9 \text{ V}$ ) を有しながら 8% を超える水素生成能 HC-STH (Half-Cell Solar-to-Hydrogen) 効率も得られています<sup>(4)</sup>。このように、CIS系材料は太陽電池をはじめ水素エネルギー分野など様々なエネルギー変換デバイスに応用展開が期待できます。

### 多接合型太陽電池への展開

太陽電池の光電変換効率を高める技術として、多接合化があります。太陽電池材料には、赤色の光 (長波長光) の吸収能力に優れたものや青色の光 (短波長光) の吸収能力に優れたものなどがあり、これら種類の異なる複数の光吸収層を重ねて太陽電池を構成するのが多接合化です。例えば、結晶シリコン太陽電池単体では最高で 27% 程度の光電変換効率を得られていますが、ペロブスカイトと結晶シリコンの組み合わせによって、小

面積 (1  $\text{cm}^2$ ) ではありますが、33% を超える高い変換効率を得られています。多接合化の技術は III-V 族系化合物太陽電池では以前から使われており、GaAs や InGaAs、InGaP などの組み合わせで変換効率は 38% (太陽電池性能評価の標準条件とされる 1 sun, AM 1.5G, 25°C 条件下において) の域まで達成されています。

しかし、III-V 族系はコストが高く、民生用太陽電池としての普及は現実的に難しい側面があります。そこで、コスト的にもより安価な結晶シリコン系や化合物薄膜系材料を用いた多接合型太陽電池の研究開発が進められています。ペロブスカイト/結晶シリコンだけでなく、ペロブスカイト/CIS系、III-V 族系/CIS系、 $\text{Cu}_2\text{O}$ /結晶シリコンなど、様々な組み合わせが試され、より高性能な太陽電池の実現を目指して研究開発が世界中で進められています。

### おわりに

太陽電池材料には様々な種類があり、個々の材料の性能をさらに高める研究開発と、それらを組み合わせた多接合化やフレキシブル型太陽電池応用などの研究開発があります。その中で、従来結晶シリコン系に代わる、もしくは結晶シリコン系と組み合わせる化合物薄膜系は有望な太陽電池材料群であり、物理や化学だけでなく、情報科学やシステムなども含め様々な専門分野の方が協奏的に関わっていくことで、太陽光発電分野の成長と発展が期待できます。

### <参考文献>

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書 2023, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/2\\_1.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/2_1.pdf)
- 2) Report IEA-PVPS T1-44:2023, [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA\\_PVPS\\_Snapshot\\_2023.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA_PVPS_Snapshot_2023.pdf)
- 3) S. Ishizuka, Y. Kamikawa, J. Nishinaga, npj Flex. Electron. 6, 90 (2022).
- 4) S. Ishizuka, R. Okamoto, S. Ikeda, Adv. Mater. Interfaces 9, 2201266 (2022).