

若宮 淳志 Wakamiya Atsushi

京都大学 化学研究所 複合基盤化学研究系
分子集合解析研究領域 教授
2022年より未来社会創造事業 研究開発代表者

特集

OVERVIEW

ペロブスカイト太陽電池を高性能化 鉛フリーで環境・人体への影響少なく

材料となる溶液をフィルムなどに塗布することで、低温プロセスで作製できる上に軽量・柔軟な形状を実現できる次世代の「ペロブスカイト太陽電池」。社会実装に向けて多くの期待が寄せられる中、課題として浮上しているのが、環境・人体への影響の懸念を払拭した「鉛(Pb)フリー化」材料を用いたペロブスカイト太陽電池の高性能化だ。この難題に挑み、世界を主導する数々の成果を上げている京都大学化学研究所の若宮淳志教授に、開発までの道程と展望を聞いた。

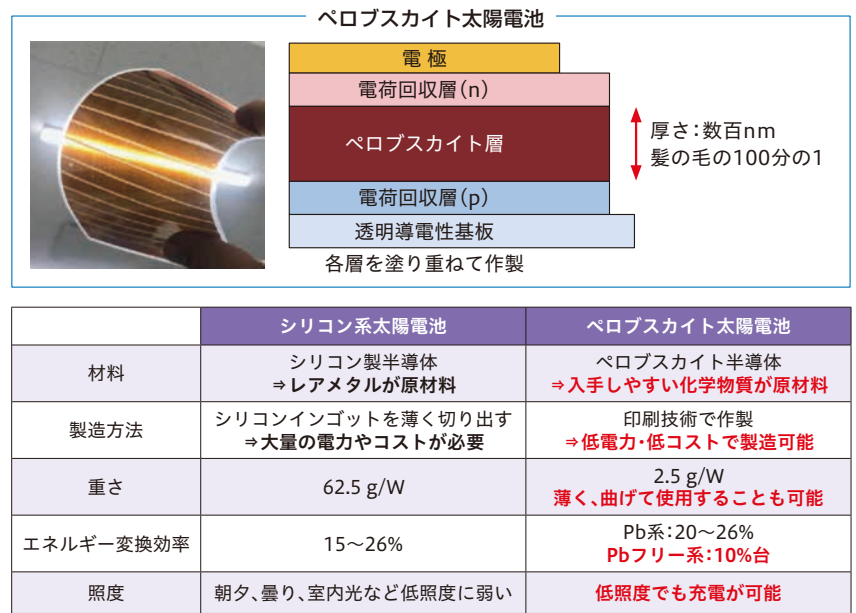
屋根や壁に導入可能で脚光 安価で軽量・柔軟に製造

現代社会においてエネルギー問題の解決は喫緊の課題であり、解決策の1つとして太陽電池が注目されている。2012年から始まった再生可能エネルギーの「固定価格買取制度」により、シリコン系太陽電池を中心に普及が進んだ。日本は、国土面積当たりの太陽電池導入量は主要国1位にも関わらず、カーボンニュートラルの実現には、電力の再生エネルギー比率がまだ小さい。平地が少ない日本は設置場所が限られているため、近年、建物の屋根や壁に導入可能な「ペロブスカイト太陽電池」が脚光を浴びている。

現在主流のシリコン系太陽電池は、発電効率がよく耐久年数も長いですが、材料のシリコンが厚いので曲げにくく、材料や製造コストが高いという問題があった。対して「ペロブスカイト」と呼ばれる結晶構造の材料を用いたペロブスカイト太陽電池は、髪の毛の100分の1程度の膜をフィルム上などに作ることで製造できるため、軽量で柔軟な形状を実現できる上に製造コストも抑えられる。また、屋内など低照度の環境でも高い発電効率が得られるので、さまざまなデバイス・場所で利用できる新たな再生可能電源技術として期待されている(図1)。

しかし、広く実用化されるためには解決すべき課題がある。現在、利用されているペロブスカイト太陽電池は半導体層にPbが多く含まれてお

図1 シリコン系太陽電池とペロブスカイト太陽電池の比較



り、RoHS(特定有害物質使用制限)指令によって規制対象となっているからだ。環境や人体への影響を抑えた太陽電池を社会実装するためには、Pbフリーな材料を用いたペロブスカイト太陽電池の高性能化が求められている。この難題に挑んでいるのが、京都大学化学研究所の若宮淳

志教授だ。

定年退職を迎えた自分を想像 貢献したと誇れる研究したい

「高校1年生の頃、科学雑誌で『景色は、光の波長で説明できる』という記事を読み、科学の言葉によって身

図2 Sn⁰ナノ粒子の発生を利用したSn⁴⁺スカベンジャー法

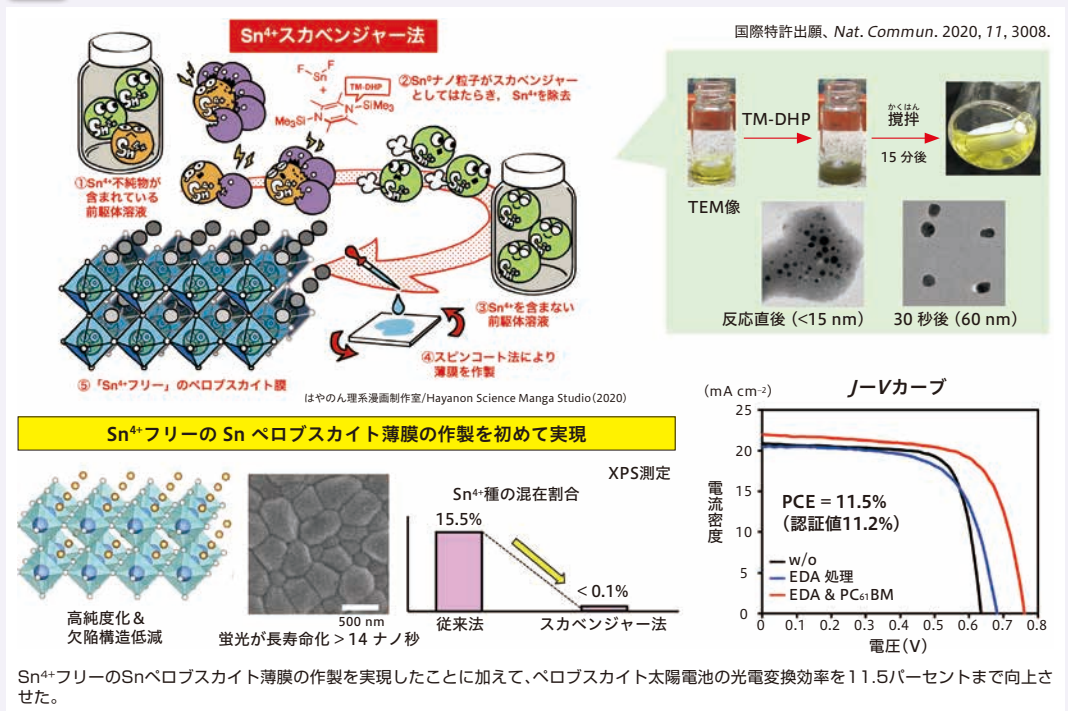
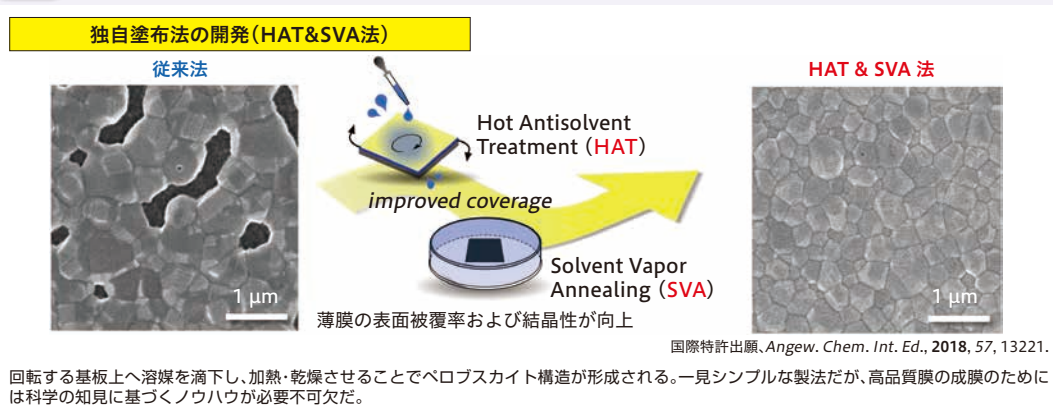


図3 高品質Snペロブスカイト薄膜の独自作製技術



合、太陽光を電気に変換した際の効率を示す「光電変換効率」はまだ低いのが現状だ。対して若宮さんは、Sn系ペロブスカイト半導体とその太陽電池の高性能化で、世界をリードする数々の成果を上げてきた。

の回りの現象を説明できることに深い感銘を受けたのです。次の日から、目に見える景色が一変しました」と若宮さんは振り返る。この出来事をきっかけに研究者を志した若宮さんは京都大学工学部に進学。以後、同大学大学院工学研究科物質エネルギー化学専攻を経て、03年より名古屋大学大学院理学研究科で助手、助教として研究生活を送った。

そして10年に京都大学へ戻り、化学研究所で准教授として基礎研究にまい進する中、現在に至る転機を迎えたという。「65歳で定年退職を迎えた自分の姿を思い浮かべ、残り30年の研究者生活を想像した時に、1人の研究者として人類や社会に貢献したいと誇れるような研究がしたいと考えたのです」。そこで、テーマとして思い浮かんだのがエネルギー問題だった。分子や材料を設計する知識や経験を有していたこと、これを生かしながら科学者としてエネルギー問題にどんな貢献ができるのか、熟考した末に行きついたのが太陽電池である。

本格的な研究に向けた第一歩を踏み出したのは、JSTのさきがけ「太陽光と光電変換機能」領域に採択されたことがきっかけだった。当時はまだ知名度の低かったペロブスカイトの可能性を目の当たりにした若宮さんは、この材

料に研究の軸足を置くことを決意。その後、COIでの「フィルム型太陽電池」、ALCA「環境負荷の少ない高性能ペロブスカイト系太陽電池の開発」研究代表を務め、未来社会創造事業「SnからなるPbフリーペロブスカイト太陽電池の開発」での探索研究を経て、22年4月からの本格研究では、ペロブスカイト太陽電池の高性能化に取り組んでいる。

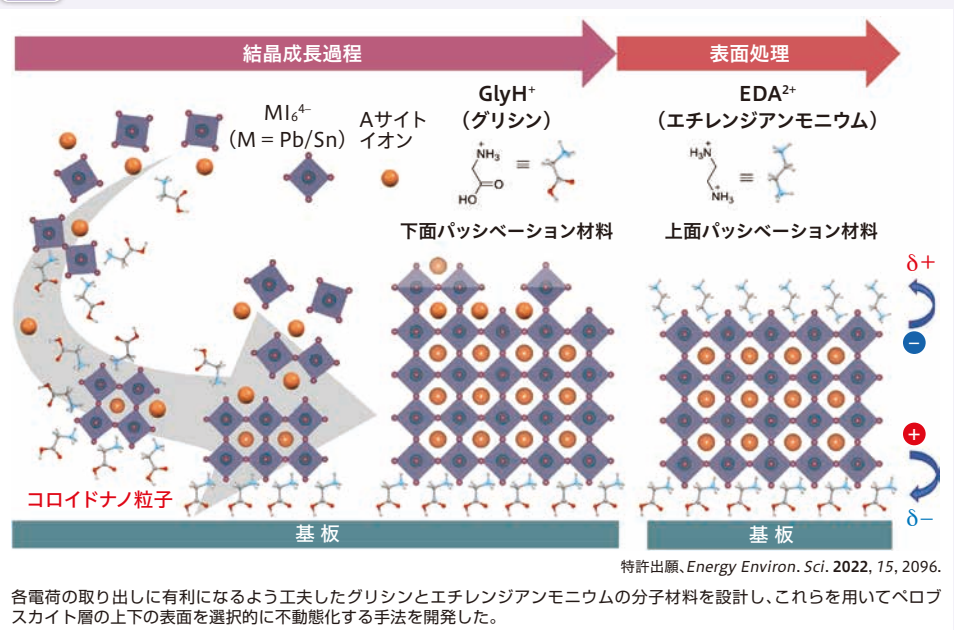
Pbフリー化材料を用いたペロブスカイト太陽電池の研究は、世界中で活発に行われており、中でもスズ(Sn)系材料を中心に高性能化が進んでいる。しかし、従来のPb系材料と比較して、Sn系材料を用いた場

材料・製造法を独自開発 高い光電変換効率を実現

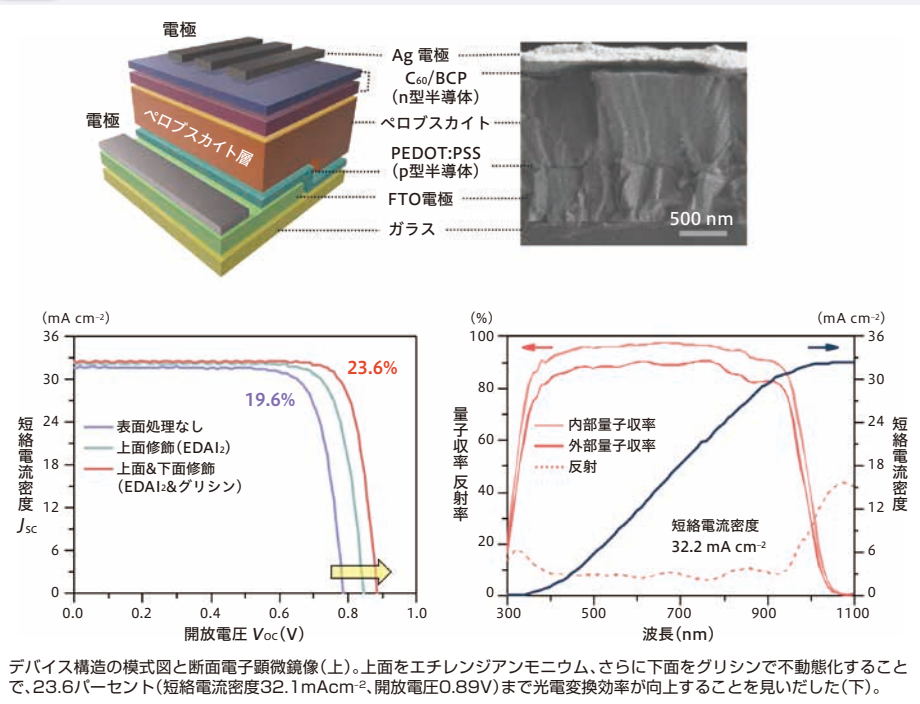
高性能化を実現する成果の1つが、使用する材料の高品質化である。材料に含まれる2価のSnイオン(Sn²⁺)は酸化されやすく、微量の4価のSnイオン(Sn⁴⁺)が混在し、半導体特性を低下させてしまう。そこで、材料の純度を徹底的に高めるというアプローチを採用した。「従来、材料に用いられていたヨウ化スズ(SnI₂)から、不純物となるSn⁴⁺種を完全に除去した材料を開発しました」と若宮さんは解説する。

さらに20年には、溶媒や作製環境

図4 ペロブスカイト薄膜の上下表面の構造修飾(パッシベーション)法



【図5】 パッシベーション法で作製したSn-Pb混合型ペロブスカイト太陽電池の光電変換効率向上



にも極微量の酸素が存在し、それと反応することでSn⁴⁺種が発生していることを突き止めた。そこで、ペロブスカイト膜を作製する直前に0価のSn⁰ナノ粒子を発生させることで、Sn⁴⁺種を食べるように取り除いてくれる「スカベンジャー法」を開発した。この手法により、従来は最大10パーセント程度にとどまっていたペロブスカイト太陽電池の光電変換効率を11.5パーセントまで高めている(図2)。

また、より高い光電変換効率を実現するため、ペロブスカイト半導体膜の成膜法も独自に開発した。光電変換効率を上げるためには、基板全体を隙間なく覆うような均一に整った結晶性の膜を生成する必要がある。Pb系の場合に比べてSnのペロブスカイト半導体は、塗布成膜時に結晶核の生成は遅いが、その後の結晶成長が早いので、基板上に穴が空いた膜ができてしまうことがわかった(図3)。

成膜の際に貧溶媒を滴下することで結晶核の生成を促して

いるが、基板上で2つの溶媒がもっと早く混ざれば、より多くの結晶核を一気に生成できるのではないかと考えた。「そこで思い付いたのが、貧溶媒であるクロロベンゼンを熱して滴下するHAT(Hot Antisolvent Treatment)法です。室温から徐々に

に温度を上げていくと、65度に温めた時が最も膜が均一になることがわかりました」。得られた膜を「SVA(Solvent Vapor Annealing)法」を用いて、溶媒の蒸気圧を制御しながらゆっくり加熱することで、より大きな結晶性の塊を持つ均一な半導体膜の作製に成功した。

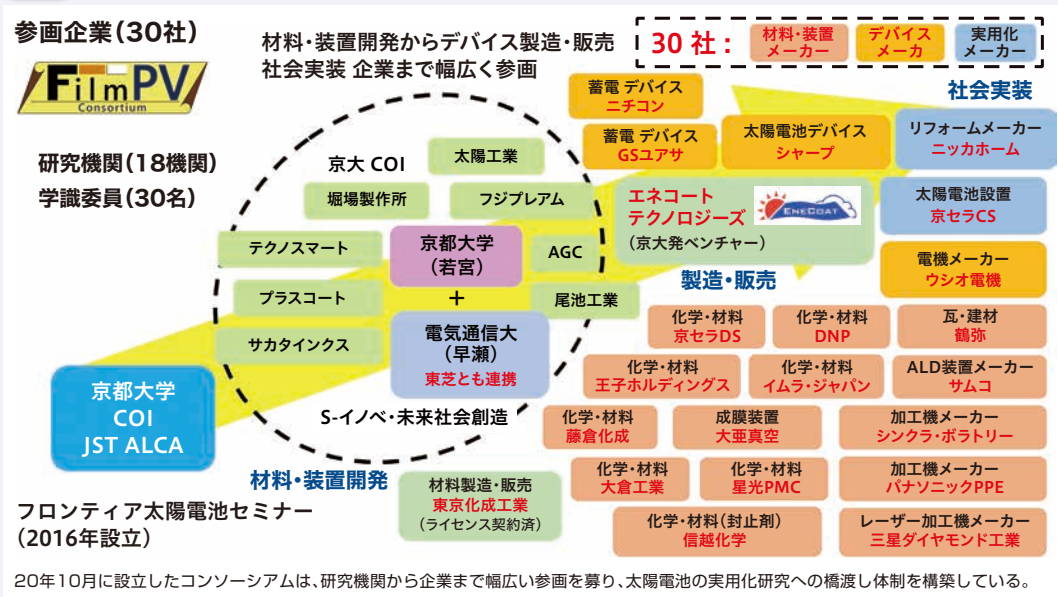
その後も若宮さんは、課題に挑み続け、数々の成果を上げてきた。22年4月には、ペロブスカイト太陽電池の光電変換効率を最大化するため、ペロブスカイト層から電荷を取り出す際の効率が向上するように表面構造の精密制御を行う「パッシベーション法」を新たに開発。これにより、電圧のロスを実論限界まで低減することに成功し、Snを含むペロブスカイト太陽電池で世界最高値となる23.6パーセントの光電変換効率を達成している(図4.5)。

さらに同年12月には、ペロブスカイト太陽電池の高性能化を可能にする三脚型の正孔回収単分子材料「PATAT(Phosphonic acid

【図6】 本研究が目指すペロブスカイト太陽電池の社会実装



図7 フィルム太陽電池研究コンソーシアム



世界的な要請も追い風となって、Pbフリー化による太陽電池の実用化への期待は大きい。しかし、Pbフリーの太陽電池の実現にはまだまだ数多くの難題が立ちはだかっている。課題解決のためには、小手先の修正などではなく、問題の本質を見抜き、抜本的な改善を図れるようなアプローチが必要だと述べる若宮さん。

ファンクショナルライズド トリアザトルクセン functionalized triazatruxene)を開発した。これを材料に用いたペロブスカイト太陽電池は、23パーセントの光電変換効率を達成。窒素ガス下で2000時間、空気中でも450時間後も90パーセントの出力を持つ高い耐久性を実現している。

「どこでも電源」実装に向け スタートアップ企業を設立

こうした研究開発と並行して、若宮さんは、18年1月に京都大学発のスタートアップ企業「エネコートテクノロジーズ(京都府久御山町)」を設立した。「起業したのは、世の中にペロブスカイト太陽電池の技術をさらに広めていくと共に、実用化に際して、最後まで責任を持ちたいと考えたからです」と若宮さん。同社の最大の強みは、材料から製造装置に至るまで、研究成果をすぐに改善に反映できる点にあるという。

軽量で容易に曲げることができ、低照度でも発電できるペロブスカイト太陽電池が実現する「どこでも電源」の実装イメージは、スマートフォンやウェアラブルデバイスをはじめ、各種IoTセンサーや電気自動車、ドローンなど、枚挙にいとまがない

(図6)。「既に試作した災害時用発電 tent は、特に大きな反響がありました。避難所のtentに複数のペロブスカイト太陽電池を貼り付け、連携させることで、災害による停電時にも、ライフラインとなるスマートフォンを一度に数十台充電することが可能となります」と若宮さんは展望を語る。

さらに、ペロブスカイト太陽電池を中心としたフィルム太陽電池の実用化を加速させるため、20年には産学連携による「フィルム太陽電池研究コンソーシアム」も設立。材料メーカー、デバイスメーカーなど、周辺分野も含めた幅広い分野から30社の企業が参画しており、情報共有だけでなく、技術協力や社会実装に向けた標準化など、さまざまな取り組みを加速させている(図7)。

カーボンニュートラルに対する

同時に「降水量が少なく天候が比較的安定した公海で、いかだのように太陽電池を並べて、そこで発電した電力を世界でシェアしたら、世界平和につながるんじゃないですかね」と目を輝かせながら壮大な夢を語る。自他共に認める「人たらし」の若宮さんは、今後も研究仲間と協力しながら、ペロブスカイト太陽電池の社会実装に向けて歩みを進める。若宮さんの今後の活躍からますます目が離せない。

(TEXT: 佐宗秀海, PHOTO: 石原秀樹)

