

触媒懇談会ニュース

触媒学会シニア懇談会

ペロブスカイト太陽電池の最近の進歩：2026 年春

中條哲夫

1、はじめに

2026 年 4 月現在、原油の問題で日本は対応に追われている。資源のない国は海外依存しかなく安定供給の外交努力に尽きる。代替エネルギーとして再生可能エネルギーも重要になってくる。その中で太陽光発電は色々問題を抱えてはいるが、考えておくべき対象である。本シニア懇談会ニュースでは 1) シリコンの太陽光発電、2) ペロブスカイト、3) タンデム型、をみてきた。最近、ペロブスカイトの進歩が著しいので、今回はそれを取り上げた。

にかけてペロブスカイトの著しい進展があったことがわかる。

2、ペロブスカイトの進歩の中身

元々は 2009 年に宮坂力先生の報告したペロブスカイトが発端であり、光電変換効率は 9% であった。それが 27% まで進歩した。その理由は 7 つの設計ルールとしてまとめられてあるが、ポイントは丁寧な調製にあるようだ。

Key Strategy	PCE (Certified) (%)	Area (cm ²)	Stability (Headline)	Ref (Date)
Perovskite crystallization control	27.02 (26.88)	0.0536	T98.2 at 2000 h MPPT	⁴ (2025/10)
MAcI perovskite control	光電変換効率 27.0-27.3%		T86.3 a	論文掲載年月 2025/10-2026/1
Multistep interfacial passivation			T100 at	¹
Ion-defect dual management in perovskite	27.1 (27.1)	0.0535	T98.1 at 1200 h MPPT	¹ (2026/1)
Donor-acceptor interface engineering	27.28 (27.19)			²⁶ /1)
Coulomb-stabilized SAM	27.3 (27.32)	0.0535	T93 at 2000 h at 65-85 °C, MPPT	⁶ (preprint 2026/1)

図 1 最近のペロブスカイトの性能

ACS ENERGY Lett. 2026, 11 2378-2381
 Entering the 27% Era: Practical Design Rules for Single-Junction Perovskite Solar Cells

この論文によれば、昨年末から今年初め

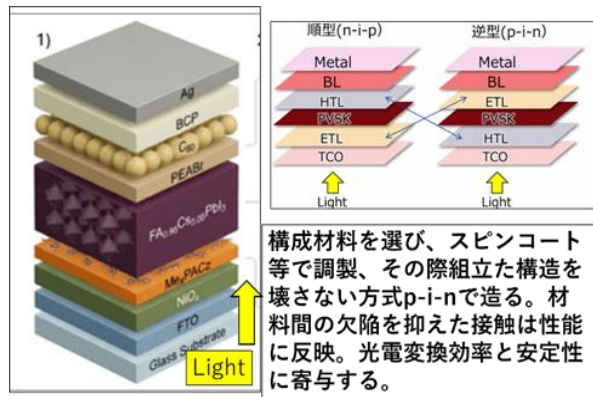


図 2 欠陥を極力抑えたペロブスカイト

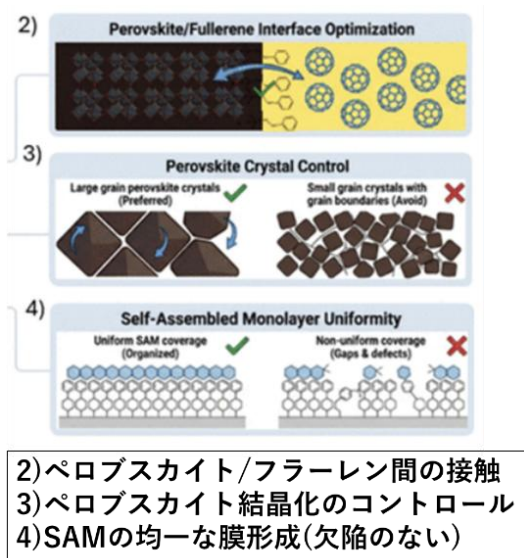


図3 構成材料の高性能化

図2と図3には高性能ペロブスカイトにするためのポイントを示した。もう少し説明をシリコンの場合と比べて加える。

2-1 シリコンの準備とペロブスカイト調製

シリコンを太陽光発電用に準備するには、高純度化が必要で、少なくとも不純物を0.1ppm以下に抑えないと性能が出ない。これは99.99999%(セブーンナイン)である。例えば、高純度シリカ(SiO₂)を炭素で還元、熔融塩中で電解還元などの方法がとられる。エネルギー多消費であり、単結晶化には更なる高温熔融引き上げも必要となるので、簡単には製造出来ない。出来たインゴットは太陽電池用のウエハーまではスライスしてポリシング、というように工程も長い。元々シリカから熱還元でシリコンにするためにはエンタルピーとして217kcal/mol程度の熱量が必要になる。

一方、ペロブスカイトはハロゲン化鉛化合物なので調製に注力できる。文献には

1) 図3の3にある結晶化は使用する溶媒

の制御を厳格に行い、ハロゲン効果を出す。
 2) ペロブスカイトのハロゲンをきれいに分散させる様に結晶の核までコントロール。
 3) まだらにならないように溶媒を飛ばす際も加熱を制御する。
 これは界面コンタクトを強固し、再結合やはがれを防止する方法である。実際は分析モリタリングを行って結晶を制御している。

real-time monitoring of halide distribution during crystallization using in situ spectroscopic techniques, computational prediction of additive-halide interaction energetics to guide precursor design, and vapor-phase halide delivery methods that decouple nucleation from compositional control.

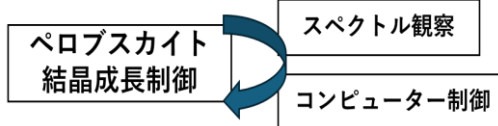


図4 緻密な結晶成長の制御

2-2 SAM(自立アセンブリ膜)

SAM(self-assembled monolayers)はペロブスカイトとNiO_xの間をつなぐ位置で、hole側のエネルギーを伝達する。①SAM自身をコンパクトに配列する、②酸化物と強固に結合する、③材料との間での表面の副反応(interfacial recombination)や局所で発生する遮断ルートを防止する。欠陥のない膜形成が重要で、これにより耐久性が増すことになる。(図3の4)

2-3 フラーレン/ペロブスカイト

電子輸送層としての役割がある。表面においてイオンのマイグレーションが起これやすい、電荷の再結合が生じやすいがフラーレンが組み込まれると防止できる。真空蒸着プロセスでも加熱しても形態が変わらないので安定した薄膜を形成する(図3の2)。

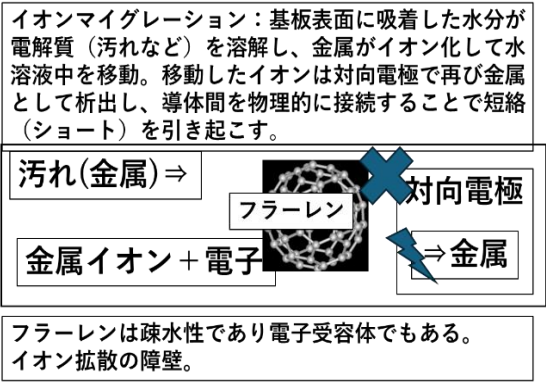


図5 フラレーンの役割

3. ペロブスカイトの利点

安価な材料で作り易さにも特徴がある。鉛の環境に配慮した回収も出来る。この事はこれまでの記事で既に報告済みである。スピコートでの手軽な調製も組立を p-i-e にすれば性能を損なわれずに作れることができる。光電変換効率が 27% になり安定性も増せば、シリコンやタンデムよりも魅力的である。詳細なデータを持ち合わせてはいないが、インターネットでの情報をベースに基本的な考え方を示す：

シリコン(Si)の生成エンタルピーは、 860kJ/mol ($=217\text{kcal/mol}$) であり、一方、鉛は硫化物として 100kJ/mol ハロゲン化物、例えば塩化物は 360kJ/mol なので $100-360=260\text{kJ/mol}$ のエネルギーが必要である。シリコンの 1/3 以下である。

これらのことから乱暴な考察だが、エネルギーに対応してコストも定性的にはペロブスカイトが優位である。タンデムは特にペロブスカイトとシリコンの組み合わせが最も性能が高いが、二つの材料を用いるので不利となる。

一方、タンデムの公開情報(データ未公開の約 35%を除く)とシリコンの最大の文献値

は 26% であることを考え合わせると、ペロブスカイトの 27% は見劣りしない値である。

軽量であることも魅力だ。インターネットを見ると応用例がイメージされていて期待も大きいようだ。



図6 政府部門の期待

(環境省の取り組み 2026 年 3 月 30 日)

4. リサイクル

ペロブスカイトのリサイクルに関しても文献上に報告はある。その一部である鉛回収は既に環境影響を最小にして出来るようだ。勿論ハロゲンについても同様である。安定性のフィールドテストも、量産技術も、大面積化でも性能維持する技術も重要であり、必須であるが、リサイクルに関しても同様の位置づけで取り組んでもらいたい。

5. 「まとめ」と「SAM」

シリコン太陽光発電は実績があり信頼性も高いが日本ではコストでは勝てない。その分、宮坂力先生の研究が発端であり、シリコン太陽光発電の代替以上に応用展開が期待できるペロブスカイトだけに今後が楽しみである。

シリコン太陽光発電の調査で、リサイクルの義務化は避けられており、民間任せに

なっていた。今年4月3日付けで「太陽電池廃棄物の再資源化等の推進に関する法律案」が閣議決定とあるが、中身は本質的に変わっていない。附則に、状況を見て必要と認めるとき義務付け、とある。これではリサイクルをやらないと言っているようなものである。付加価値のある回収物だけ取り出し、後は法律に抵触しない範囲で廃棄処分になるようなもの。本格回収には開発投資と設備投資が要る。

「SAM」について

本文でも触れたが別の文献を引用する。この種のインターフェースをコントロールする機能材に注目した。

1) Nature volume 646, 95-101 (2025)

SAMの形状を工夫して、欠陥やボイドを出ないようにした。その結果、外部のストレスに対抗出来るようになり安定性を保てるようになった。アンカーと言われる部分がクロスリンクにした。

2) Interdisciplinary Materials. 2024 3 203-244

この総説は「SAMがペロブスカイト太陽電池に画期的な高性能デバイスと安定性をもたらした」と記載。図5にある「イオンマイグレーション」と同じ「チャージ再結合によるロス」を分子同士の相互緊密な繋がりによりロスを無くした。図6に原文を記載する。

SAMの役割を記載
This is achieved by understanding how interfacial molecular interactions can be finely tuned to mitigate charge recombination losses in inverted PSCs.

図6 SAMが不要な損失を削減する

また、図7にSAMの構造を示す。

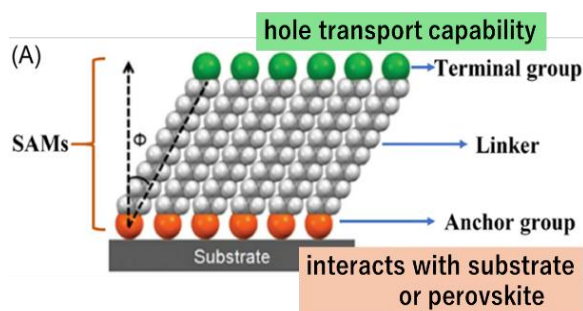


図7 SAMの一般的構造

図8にはスピコートとアニーリング。

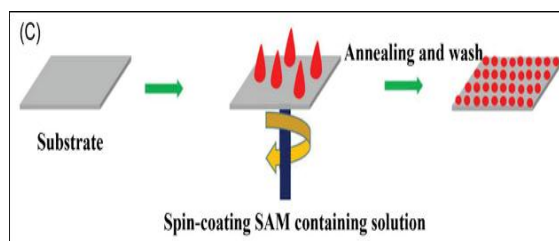


図8 SAMをデバイスに載せる方法

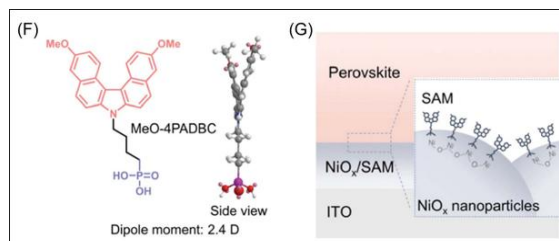


図9にデバイスのSAMを含めた構造を示す。

図9 相互作用するSAM

これらはSAMが、デバイス性能の発揮に寄与し、尚且つ安定性を増す役割であることを示している。繰り返しになるが、欠陥、ボイドを作らせないことが重要な役割になっている。

(日付) 2026年5月1日