

触媒懇談会ニュース

触媒学会シニア懇談会

期待される太陽光パネル：タンデム型

中條哲夫

1、はじめに

太陽光パネルに関して 2025 年 10 月 1 日 (203 号) に廃棄物のリサイクルの必要性を 11 月 1 日 (204 号) には宮坂先生の発見したペロブスカイトを書いた。今回はペロブスカイトとシリコンを駆使したタンデムを取り上げた。シリコン単独では光から電気に変える効率が限界で、タンデムに期待が集まっている。技術課題は複雑な内容だが出来るだけ分かりやすくした。一つの見方を示したものである。また本来の応用・利用を考えた。

2-1、タンデムの組合せ

先ずタンデム開発の進捗を示す。

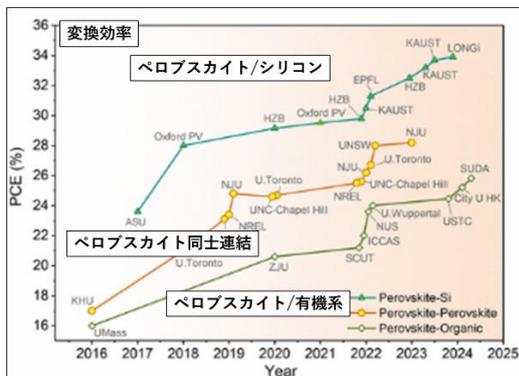


図1 タンデムの性能開発推移

Chem. Rev. 2024, 124, 10623-10700

図1の縦軸 PCE は光電変換効率で通常のシリコン太陽光発電より相当高い。タンデムは2つを連結して性能を高めるが、ペロブスカイトとシリコンからなる組み合わせが総合的に優れている。

2-2、タンデムの構成

単純に連結すれば出来ると考えてしまうが、技術的課題が満載である。

(1) 二つのつなぎ方 「2T」を選択

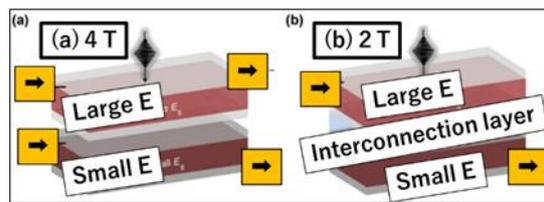


図29 タンデムの構造として(a)4T (4つのターミナルを持つ構造)と(b)2Tを示している。4Tは上下独立で環境変化、一日の気温変化にも優位で部分置き換えも容易。しかし、構成する機材やインバータもそれぞれ必要、コスト高である。現実には2Tを選択している。

Chem. Rev. 2024, 124, 10623-10700

図2 2T(ターミナル)

タンデムとしてつなぎ方は「2T」と呼ばれる二つのターミナルで構成されるのが一般的でコストパフォーマンスも良い。

次に上下のセルであるペロブスカイトと

シリコンは機能を分担している。図に表示されている Large E(又は wide と同言う)と Small E(narrow)は文字通りエネルギーの生み出す度合いが異なる。通常ペロブスカイトが上部でシリコンは下部になる。タンデムの作り方からそうなる。更に二つを繋ぐ機能層が必要である。

(2) エネルギー バンド ダイアグラム

この図が重要である。タンデムを構成するのに必要な設計図である。

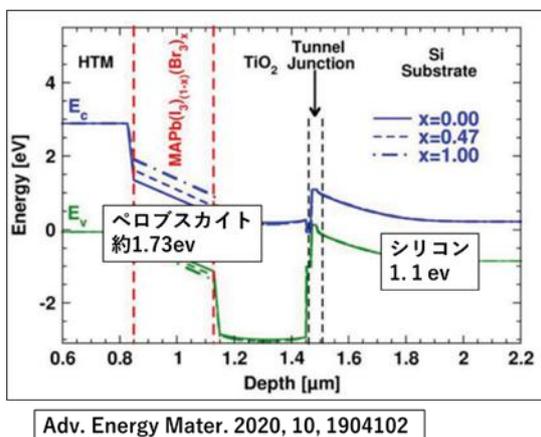


図3 エネルギーバンドダイアグラム

タンデムのセルは一定のエネルギーを生み出す能力が必要である。上部のペロブスカイトと下部のシリコンの例を計算した結果である。フィルム厚みに対しエネルギーをプロットしている。最も重要な事は、記載されたエネルギーバンドギャップの能力を持っている事が要求される。繰り返すとペロブスカイトはバンドギャップ 1.73eV の光エネルギーを受け取り発電し、シリコンはバンドギャップ 1.1eV で発電して理想的なタンデム発電になる。エネルギー損失を最小に抑えることが技術課題だ。

図4はペロブスカイトで太陽光(水道水)を受け取れずエネルギー損失(水漏れ)を表現している。光を受け取る受光部、光電変換後の電子移動層、タンデム間の接続部などでバンドギャップ<1.73eVになる。

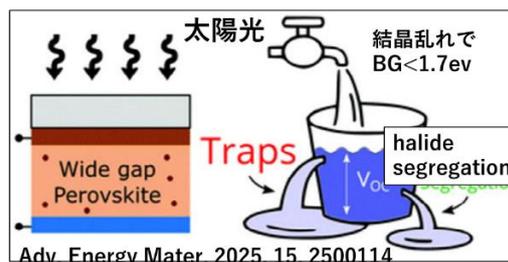


図4 受光したエネルギーが低い例

(3) 本来のタンデムであれば

相対効率を波長(数値が小さい程エネルギーが高い)依存性で表示した。

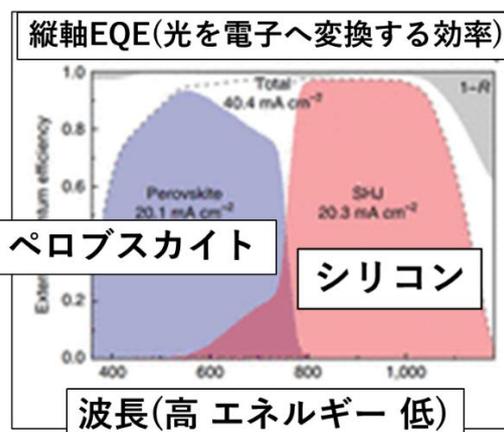


図5 タンデムの相対的変換効率

Nat. Mater. 2018, 17, 820-826

本文にはナノサイズの単結晶シリコンの上に、各種の機能を持った構成物質に挟まれたペロブスカイトが形成され、更に上部の受光層はトップセルのスピノコートの上

うな沈着手法も可能なタンデムを開発した。要するに欠陥のないシリコン(1)、機能を発揮するペロブスカイト(2)で受光出来る層(3)を要求している。実は図2に表示されている interconnection layer(4)も必要である。これらは図3にあるバンドギャップがどれほど達成できたかである。

(4) 層構造の配置の違い

これも如何にバンドギャップを整えるか、欠陥を減少出来るかの闘いである。ペロブスカイトを挟んだ「HTL」と「ETL」の並べ方で性能が異なる。開発当初は(b)で組み立てた。その後課題が持ち上がり現在では(c)が安定で高性能とされている。構成する有機化合物の調製時の不安定性などが原因でもある。無機物への置き換えも含め改善した。

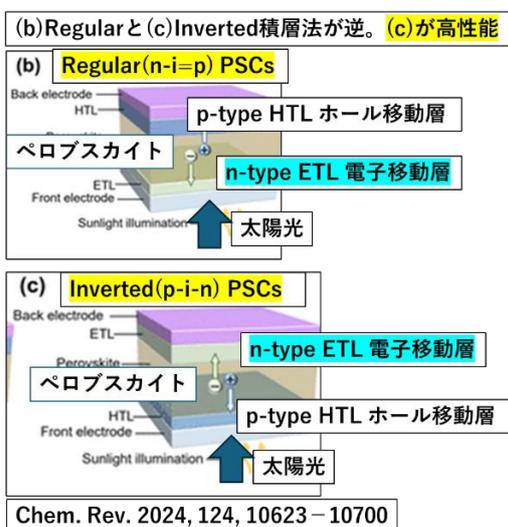


図6 配置の違い (c)が主流

(5) タンデムの受光部

タンデムの受光部の表面エンジニアリングもある(図7)。ペロブスカイトの鉛を硫黄と結合させ安定化させている。本文では鉛と硫黄の強い結合で heterojunction(つ

なぎ)が安定化し、ペロブスカイトの構造も強固になった。エネルギー準位でも安定化を示している。ここでは省略している。安定性の試験に関しても記載があり 85°C2200hsの強制エイジング試験で光電変換効率が90%以上を保持した。

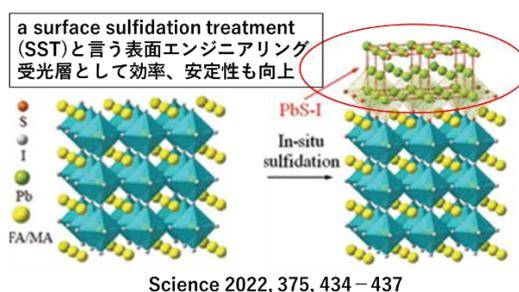


図7 受光部の高性能化(SST)

(6) 安定化させる成分、不安性成分

タンデムの構成は複雑に見える。これも性能向上のためと、バンドギャップを維持するためでもある。

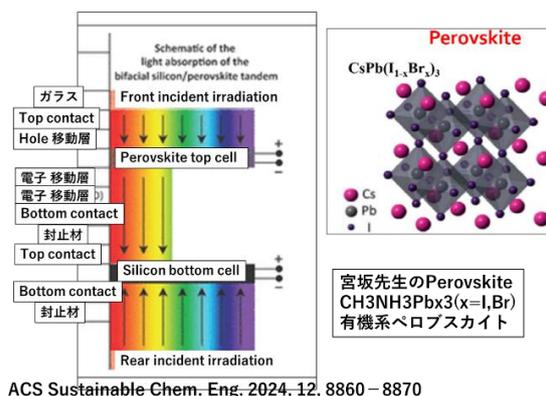


図8 タンデム構築の実際

オクタヘドラルの錯体構造をとることで無機の鉛は安定化する。実はペロブスカイトの発見者、宮坂先生の有機系は安定ではなく CsPbx_3 (I or Br)の形で使われている

(図8の右の構造)。

2-3 リサイクルなど

リサイクルに関しては11月1日(204号)で鉛を中心としたペロブスカイトの回収を記載した。同様な内容を紹介している。

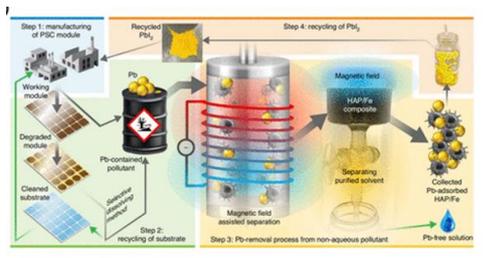


図9 ペロブスカイトのリサイクル

Chem. Rev. 2024, 124, 10623-10700

図10では多くの課題があり、それらを克服してきた結果を示している。

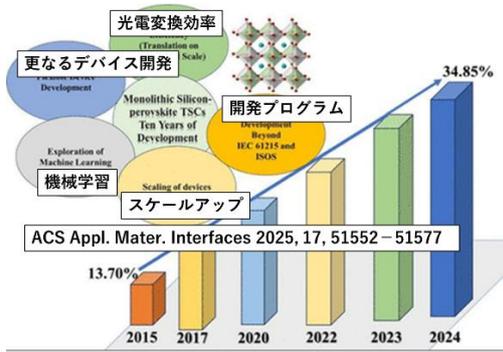


図10 タンデム開発

3 まとめと個人的思い

太陽光発電はほとんどがシリコンを使用しているが光電変換効率が限界でタンデムに期待が集まっている。変換効率が30%を越える報告もある。

全体を理解するのに相当時間がかかった。構成する材料構成物質は丁寧に説明をしていない。概念としてはエネルギーを期待されるレベルで伝達できるか、長期に安定性を保てるかで理解してもらいたい。

大量の総説がここ数年続出しているが、課題の列挙が目につく。典型的な例を図11に示す。

ACS Appl. Mater. Interfaces 2025, 17, 51552-51577

表3	Scaling Up of Silicon-Perovskite TSCs	高い効率の報告 技術開示がない
	Device structure not disclosed 効率34.6%	
	device structure not disclosed 効率30.1%	タンデム構成 極めて複雑
表4	タンデムの安定性 2024年	
	SHJ/ITO/NiO/SAM/FA0.8Cs0.15MA0.05(I0.82Br0.18)3/C60/SnOx/IZO/MgF _x /Ag	効率96.8%保持 780h後
コスト	タンデムの市場予測 >\$10billion by 1032	具体的コストの 言及がない
9. EVALUATION OF INDUSTRIALLY COMPATIBLE TECHNOLOGIES		今後の飛躍に 期待し協力を 要請。
学際的協力でタンデム組立が飛躍するかもしれない。循環経済を受けて、エコ材料で、コストが合う組立、門戸を開いてやり取りをやりましょう。and may open the doors of environmentally friendly manufacturing of 2T タンデムのcommercialization.		

図11 タンデムの総説一例

この報告は幾つかの疑問を抱かせる；
安価で製法が容易のメリットは失われている。(1)タンデムは安価か？(2)工業的製法は容易か？(3)経済性あるリサイクルは可能か？(4)長期安定性はあるのか？フィルターテストは？

学術的意味合いが多いにしても「原理原則」の飛躍も今後の期待のままだし、だからと言って工業的視点はかけ声が聞こえるだけ、と感じた。(誤解なら良いが)。

最後に太陽光発電の利用について

補助金に頼らない形では中々コストが合わず成立しないのが現状である。産業用として使用するには困難である。しかし、離島とか長距離送電を必要な地域では成立するだろう。政策として都会で使うこともあるだろう。災害発生時緊急対応に準備することもあるかもしれない。

(日付) 2026年1月13日