

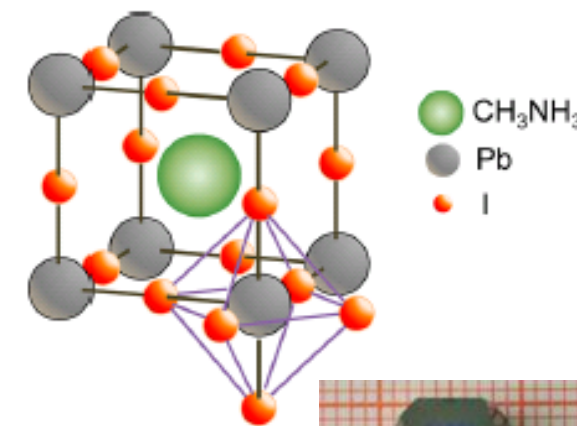
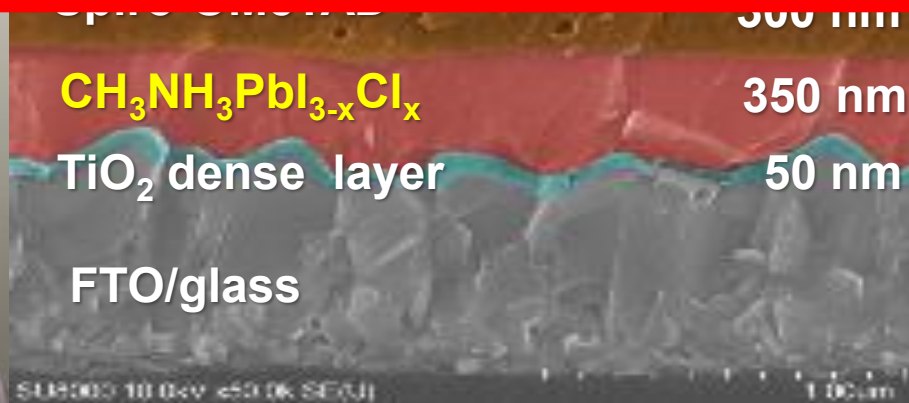
# ペロブスカイト太陽電池が拓く未来 — 技術開発の現状と展望

東京大学 名誉教授・客員教授・先端科学技術研究センター シニアリサーチフェロー  
有機系太陽電池技術研究組合(RATO) 理事長 **瀬川 浩 司**

軽量・フレキシブル・高効率・低コスト・省資源で次世代の太陽光発電の本命

有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池

**マテリアルリサイクルが容易で廃棄コストも低減できる！**



本日の講演内容

1. 第7次エネルギー基本計画に位置付けられたペロブスカイト太陽電池
2. ペロブスカイト太陽電池セル・モジュールの最新技術開発動向

# 菅総理所信表明演説「2050年までに脱炭素社会を実現」 2020年10月26日第203回国会

菅政権では、成長戦略の柱に経済と環境の好循環を掲げて、グリーン社会の実現に最大限注力してまいります。**わが国は、2050年までに「温室効果ガスの排出」を全体としてゼロにするすなわち2050年カーボンニュートラル脱炭素社会の実現を目指すことをここに宣言致します。**

もはや温暖化への対応は経済成長の制約ではありません。

積極的に温暖化対策を行うことが、産業構造や経済社会の変革をもたらし、大きな成長につながるという発想の転換が必要です。

鍵となるのは、**次世代型太陽電池**、カーボンリサイクルをはじめとした、革新的なイノベーションです。

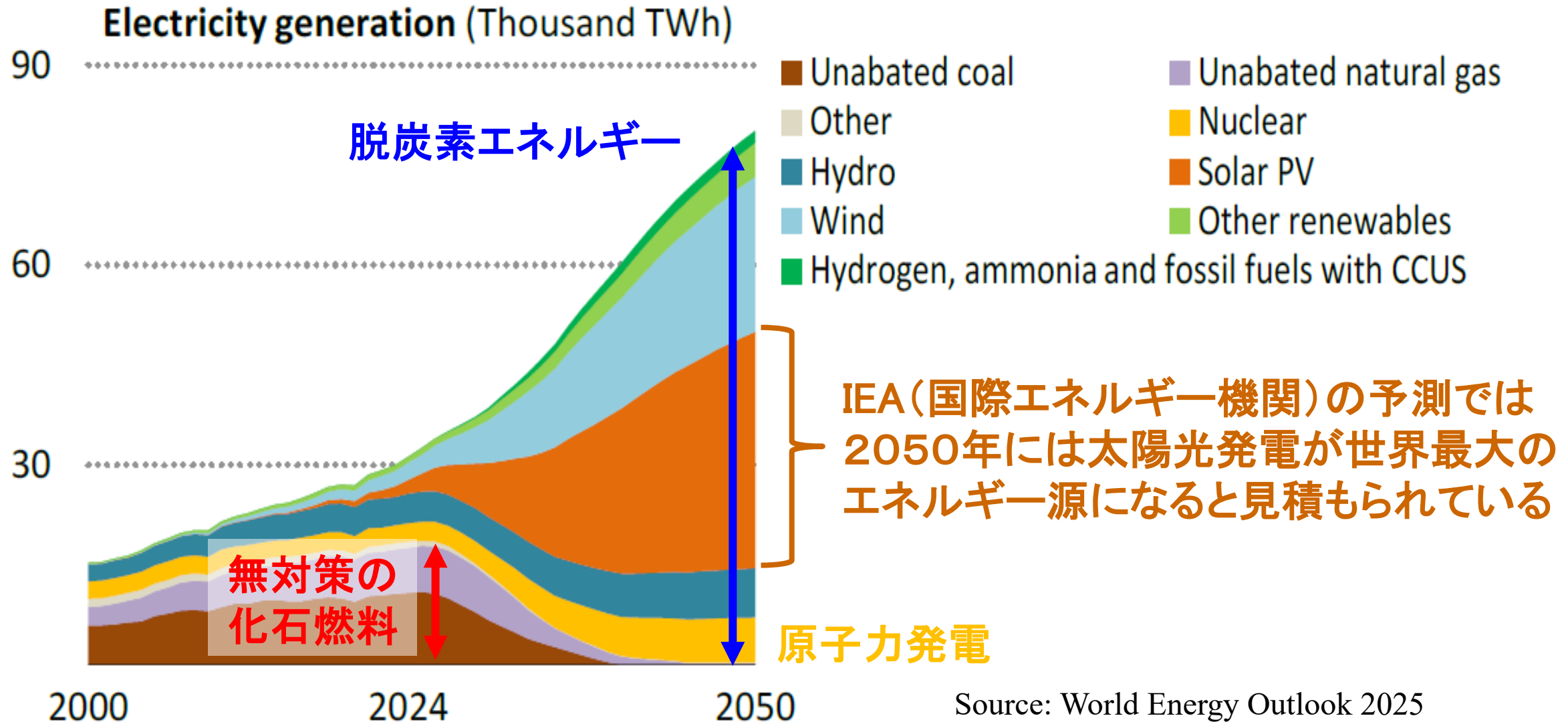
実用化を見据えた研究開発を加速度的に促進します。

積水化学工業のペロブスカイト太陽電池  
(G7広島サミットにて展示)



# エネルギーの脱炭素化のシナリオは世界ではどのように考えられているのか？

NZE (Net Zero Emissions: 温室効果ガス排出実質ゼロ) シナリオにおける発電量の推移と、電力部門を支える主要な一次エネルギー(2000～2050年)



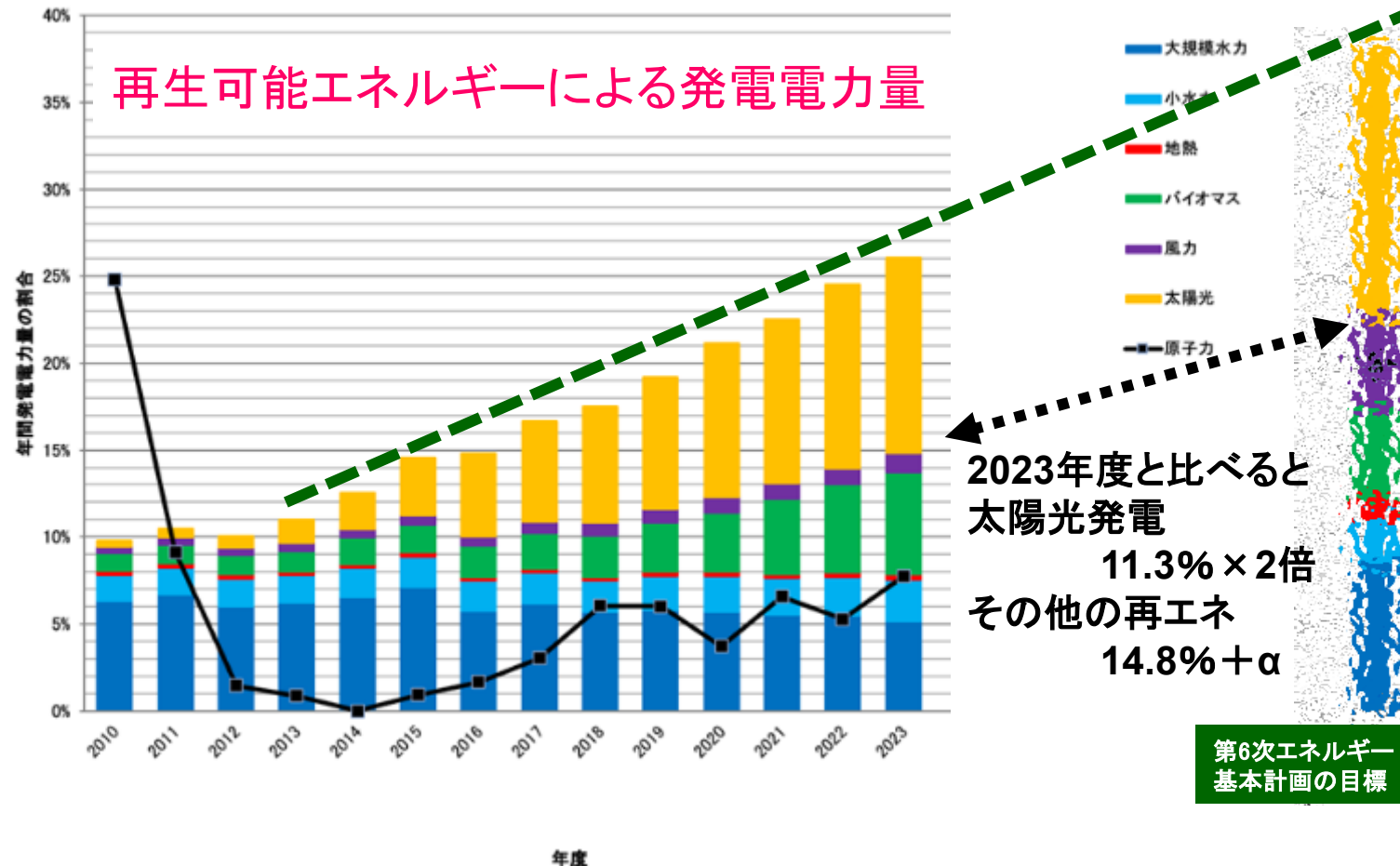
# 日本の再生可能エネルギー電力導入状況と目標値

2040年の目標値

日本:FIT導入で太陽光発電とバイオマス発電は伸びたが、その他の再エネは伸びていない。

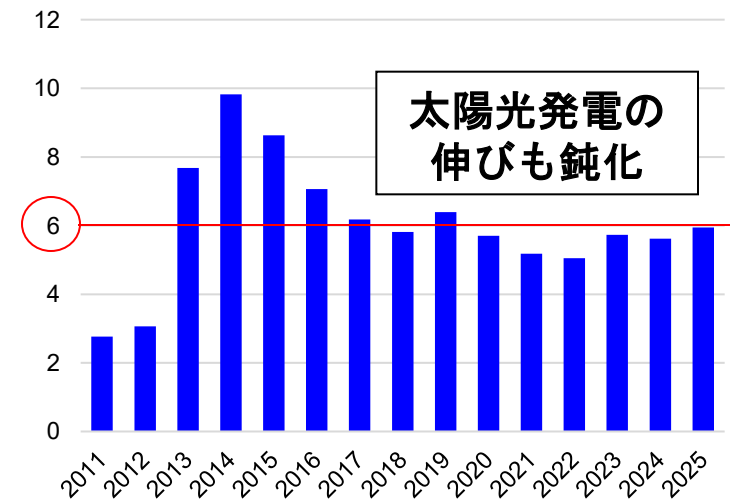
第6次エネルギー基本計画  
(2021年10月22日閣議決定)  
再生可能エネルギー導入目標  
36~38%

4割~5割を  
再エネでまかなう



2023年度と比べると  
太陽光発電 11.3% × 3倍  
その他の再エネ 14.8% + α  
(これは相当難しい状況)

## 国内太陽電池出荷量





# 既存の太陽光発電の問題点

土地代が安く電力需要地から遠い地域にメガソーラー(FIT制度の問題)

⇒電力需要地から遠い⇒系統整備経費・系統用蓄電池などの経費負担／出力抑制問題

⇒環境破壊の問題、防災上の課題、盗難等の問題

⇒そもそも適地が少ない

＜解決策＞電力需要地にオンサイトで太陽光発電を置けないか？

結晶Si太陽電池は殆ど外国製(経済安全保障、エネルギー安全保障の懸念)

⇒せっかくの再エネが国産ではなくなる

⇒輸入に頼ると為替レートの影響も

⇒調達が困難になる可能性もある

⇒化石資源同様に海外に国富流出

＜解決策＞原料や生産拠点を国内回帰できないか？

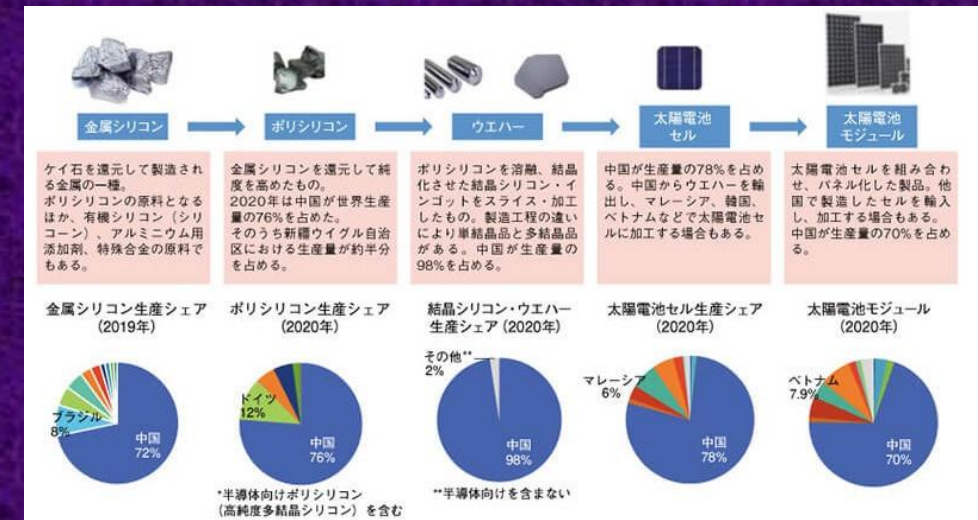
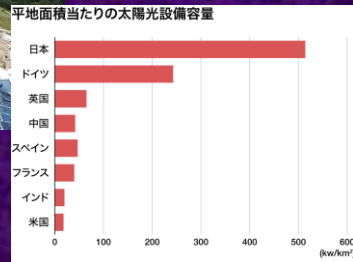
2032年以降の問題

⇒FIT終了で事業撤退の可能性(特に外資)

⇒大量の廃棄物が出る可能性

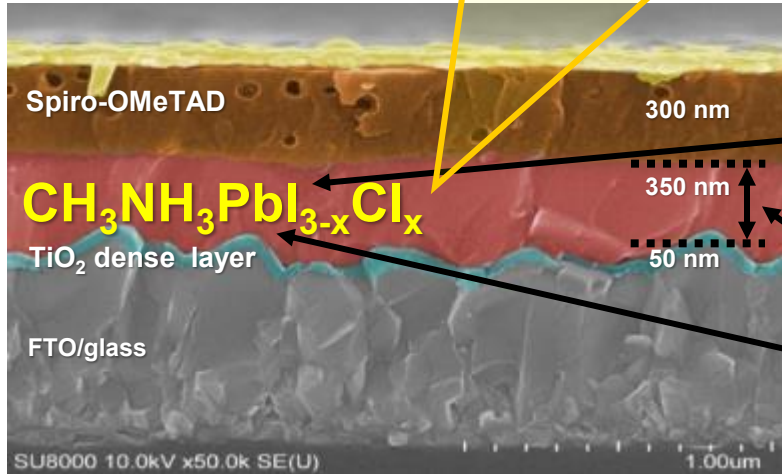
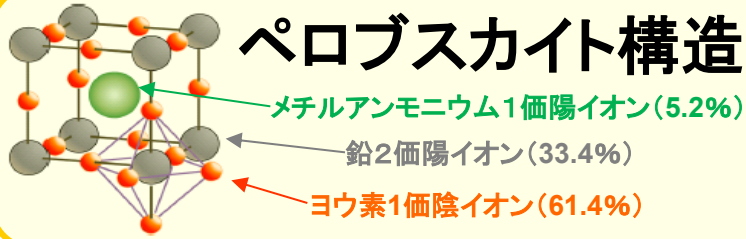
＜解決策＞電力の必要な事業者が設置(税控除等の政策誘導)できて、

真にマテリアルリサイクルが可能な次世代太陽電池ができないか？



# 国産再生可能エネルギーとして期待される「ペロブスカイト太陽電池」

## ペロブスカイト構造



## ペロブスカイト太陽電池のアドバンテージ

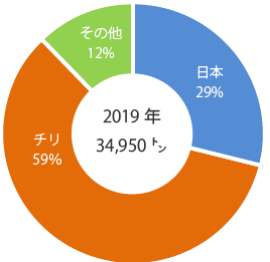
- (1)「軽量」「フレキシブル」⇒設置場所の多様化で再エネ拡大
- (2)「高性能」⇒将来的に電動航空機、ドローン、EVへ利用も
- (3)「省資源」「塗布製造可能」⇒将来的には劇的低コスト化も
- (4)「国産原料で製造可能」⇒為替リスク原料調達リスクは低
- (5)「マテリアルリサイクル」⇒サーキュラーエコノミー対応

●光吸収層の重量の6割を占めるヨウ素は  
日本が生産量世界2位でシェアは約3割

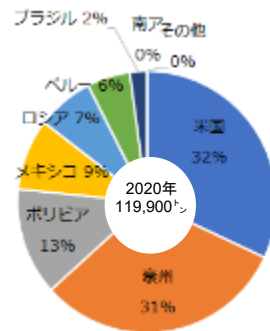
●光吸収層の厚さは一般的なシリコン太陽電池 **1/200以下**

●鉛は極めて少量。鉛蓄電池1個分の鉛(約8kg)で  
**1ha(100m×100m)のペロブスカイト太陽電池ができる！**

## ヨウ素の生産



## 鉛の輸入



●「塗って作れる」と言っても塗布プロセスには  
高度な技術が必要(数nm精度で1m幅！)

## ●周辺材料

ポリイミドフィルム・ガスバリアフィルム・封止材料・高強度薄膜ガラス・透明導電フィルム・反射防止フィルム等

## ●加工装置

各種印刷塗布装置・レーザースクライブ装置・ラミネート装置・張り合わせ装置・スパッタ装置・蒸着装置等

## ●性能評価

初期は性能向上と耐久性向上、製品化後は加速試験や耐環境試験

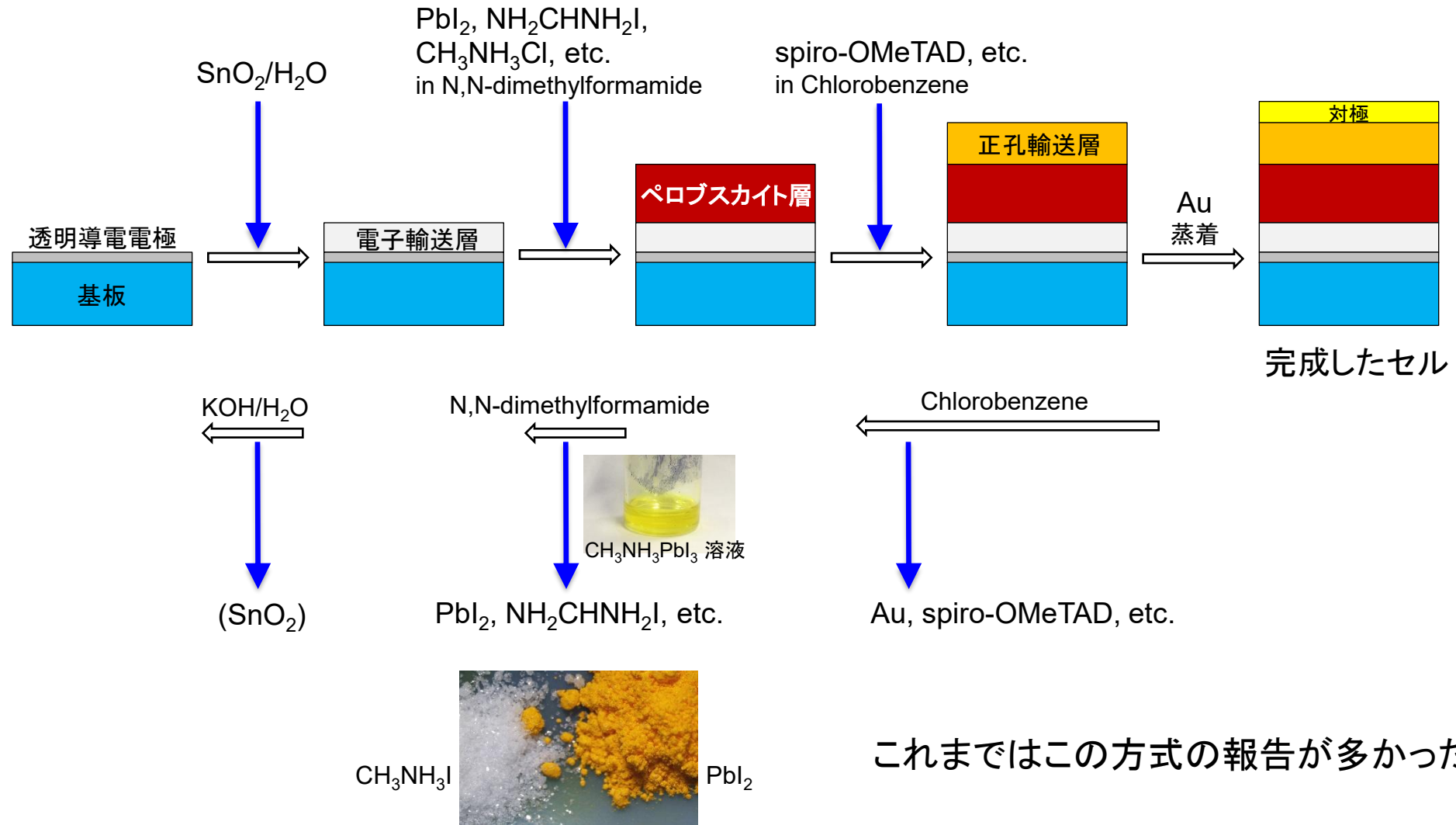
日本の強みを発揮できる



# 一般的な結晶シリコン太陽電池とペロブスカイト太陽電池の比較

| 評価項目                    | 一般的な結晶シリコン太陽電池               | ペロブスカイト太陽電池                          |
|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 10m <sup>2</sup> あたりの重量 | 約115kg                       | 約10kg / 約10分の1                       |
| 1kWあたりの重量               | 約60kg                        | 約7kg / 約10分の1                        |
| 耐久性                     | ○20年以上？                      | △まだ10年程度の耐久性                         |
| 新築戸建住宅                  | ○屋根置き、平均4kW                  | ○屋根置き、壁、窓、4kW以上可能                    |
| 既築戸建住宅                  | △屋根の耐荷重に依存                   | ◎古い住宅も屋根置き可能                         |
| メガソーラー（日本は高効率RP）        | ○ただし立地制約、系統制約                | △大量生産は未達、効率⇔面積                       |
| 駅・工場・体育館などの屋根           | ×屋根の耐荷重に依存                   | ◎耐荷重問題なし、簡易施工                        |
| 荒廃農地の利用                 | △農地復活ができない                   | ◎農地に再利用するのが容易                        |
| アグリPV（ソーラーシェアリング）       | △堅牢なアルミ架台、コスト↑               | ◎非耕作時に簡易施工、耕作時撤収                     |
| 空港や道路鉄道法面など             | ○安全性の確保（被害大）                 | ○安全性の確保（被害小）                         |
| 未利用工業用地（RE100企業対応）      | ○設置後撤去不可                     | ◎設置後配置や位置変更可能                        |
| ビルの壁面                   | △施工コストが高く景観も悪い<br>既存太陽電池では限界 | ○建築基準法等の制約に注意<br>ガラス型利用（都市部ビル壁面はガラス） |
| EV、ドローン、電動航空機           | ×重量が過大、薄型は量産不可               | ○今後、高効率化が必要                          |
| 原料調達                    | × Si: 2t～10t/MW              | ◎ I: 16 kg/MW 国内調達可能                 |
| 原料価格                    | × 100万円～600万円/t              | ◎ 太陽電池グレード高品質価格                      |
| 施工コスト／施工期間              | 高／長                          | 低／短                                  |
| 立地／系統接続／事業形態            | 低土地価格地域／系統脆弱地域／売り切り          | どこでも／オンサイト・非系統接続／オンサイトPPA            |

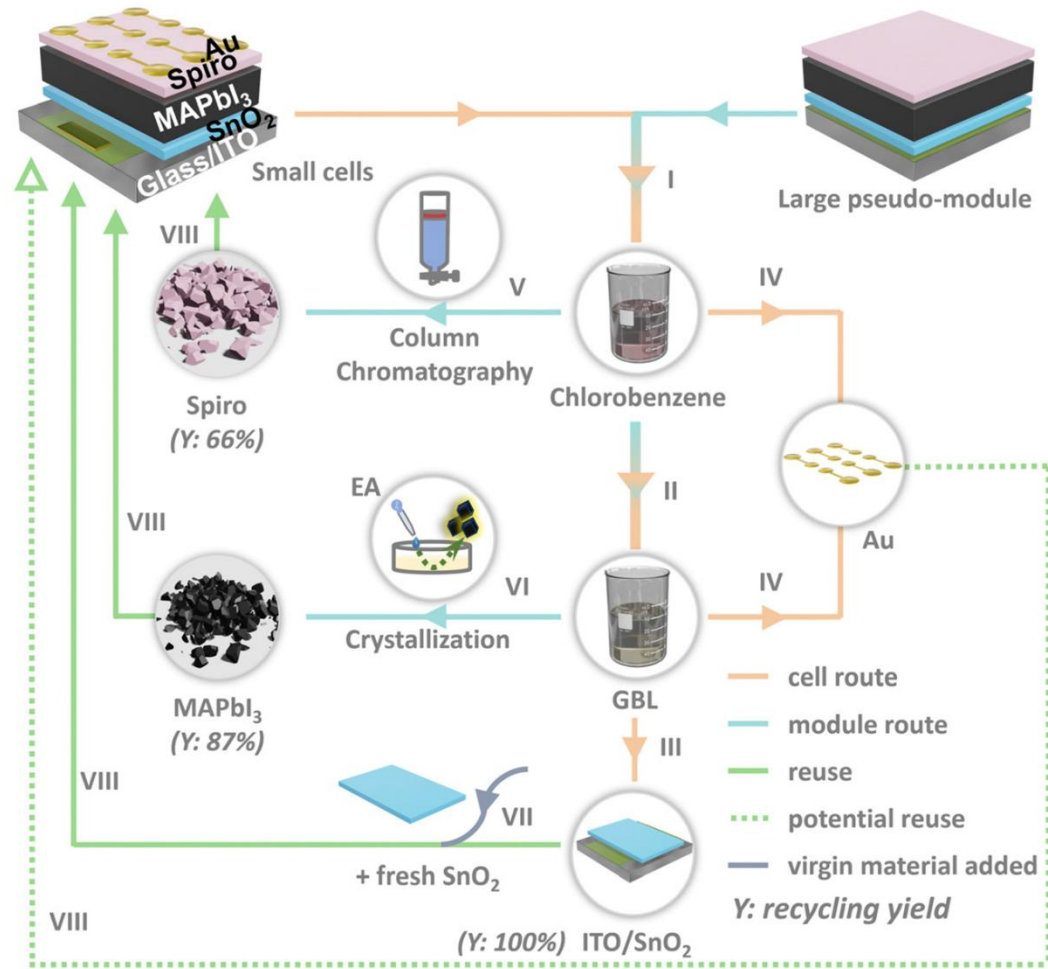
# ペロブスカイト太陽電池の作製手順と逆方向手順による原料回収のイメージ





原料回収した場合のコストを見積もった例

**Closing the loop: recycling of MAPbI<sub>3</sub> perovskite solar cells**  
[Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nuremberg (FAU) and Helmholtz Institute Erlangen-Nürnberg for Renewable Energies (HI ERN), Germany]  
Z. Wu, M. Sytnyk, J. Zhang, G. Babayeva, C. Kupfer, J. Hu, S. Arnold, J. Hauch, C. Brabec, I. M. Peters,  
*Energy Environ. Sci.* **2024**, 17, 4248. DOI:10.1039/d4ee01071j 2024/05/21



**Fig. 2** Schematic diagram of closed-loop recycling of perovskite solar devices. (I) Immersion of small cells or a large pseudo-module in chlorobenzene. (II) Immersion of cell/module without spiro-OMeTAD in  $\gamma$ -butyrolactone (GBL). (III) Extraction of ITO/SnO<sub>2</sub>. (IV) Filtration of Au. (V) Purification of collected spiro-OMeTAD via column chromatography. (VI) Purification of collected MAPbI<sub>3</sub> via anti-solvent crystallization, with ethyl acetate (EA) as the anti-solvent. (VII) Deposition of fresh SnO<sub>2</sub> on recovered ITO/SnO<sub>2</sub>. (VIII) Cell fabrication using recycled materials. The cell route signals materials derived from cells, while the module route indicates materials derived from modules.

**Table 2** Mass and value inventory scaled for a perovskite module with 1 m<sup>2</sup> area based on our fabrication sequence with an active area of 70%. Usage number was adapted from lit.<sup>47,48</sup> it is assumed that 3 mL 2.5% SnO<sub>2</sub> is required (3 mL is the overall volume for the solvent of perovskite solution in ref. 47). The pricing was derived from our laboratory's procurement data (the source of the materials can be found in the ESI), with the exchange rate of 1 euro equivalent to 1.08 dollars, with an exception of the price of H<sub>2</sub>O<sup>25</sup> and the price of Au (market price on June 10, 2023). NMP: N-methyl-2-pyrrolidone

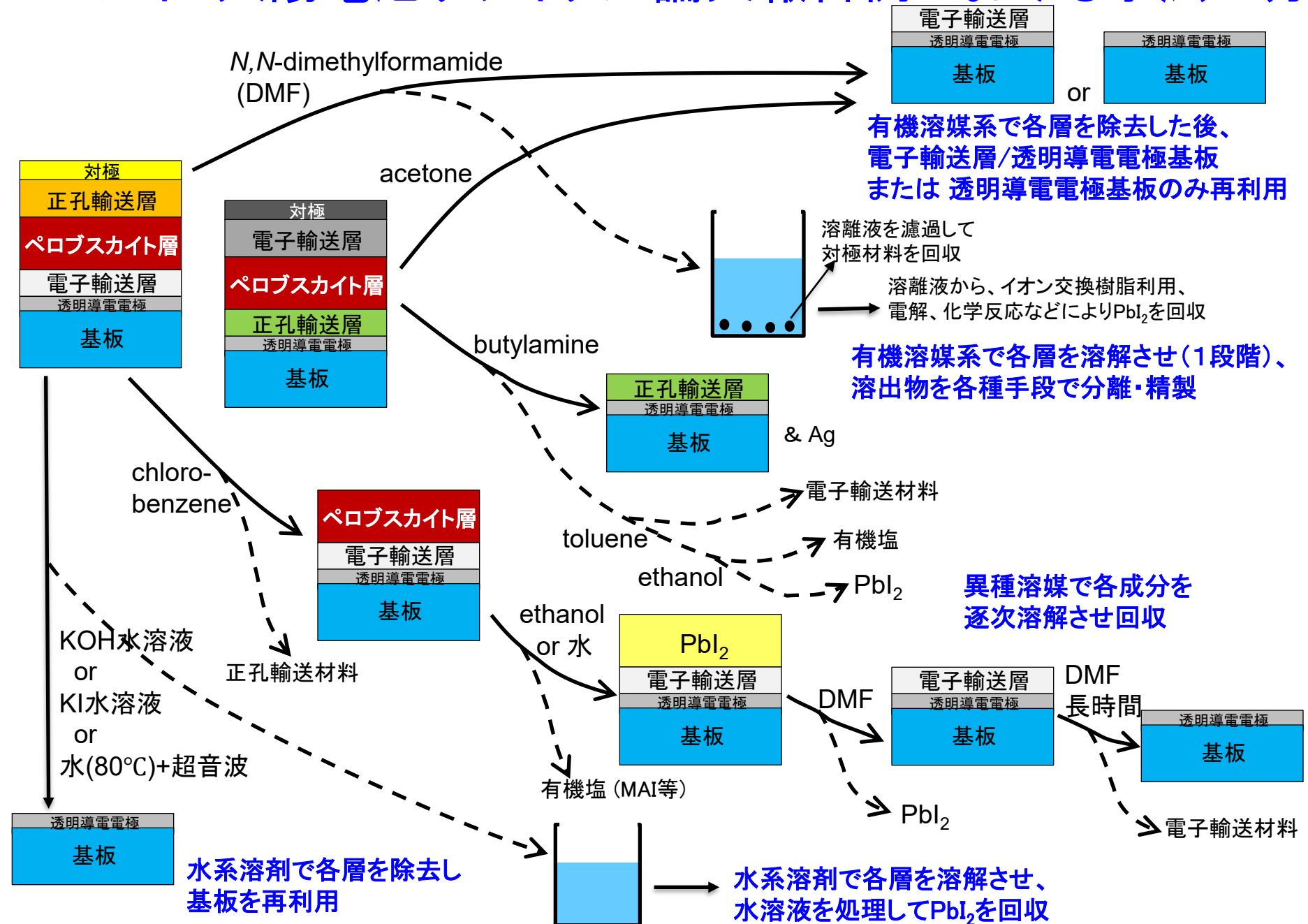
| Layer              | Material               | Usage <sup>47,48</sup> | Price (\$) [P <sub>v</sub> ] | Subtotal cost (\$) [C <sub>v</sub> ] | Total cost per layer (\$) [C <sub>vd</sub> ] | Density (g mL <sup>-1</sup> ) | Subtotal mass (g) [M <sub>d</sub> ] | Total mass per layer (g) |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| ITO glass          | ITO glass              | 1 m <sup>2</sup>       | 243.74                       | 243.74                               | 244.30                                       | —                             | 5000                                | 5084.57                  |
|                    | Deionized water        | 33 mL                  | 0.012/L <sup>35</sup>        | 0.0004                               | —                                            | 0.997                         | 32.90                               | —                        |
|                    | Acetone                | 33 mL                  | 83.88/10 L                   | 0.28                                 | —                                            | 0.7844                        | 25.89                               | —                        |
|                    | Isopropanol            | 33 mL                  | 85.17/10 L                   | 0.28                                 | —                                            | 0.7812                        | 25.78                               | —                        |
|                    | SnO <sub>2</sub> (15%) | 0.58 g                 | 88.29/500 g                  | 0.10                                 | 0.17                                         | 1.153                         | 0.58                                | 2.81                     |
| SnO <sub>2</sub>   | Deionized water        | 1.25 mL                | 0.012/L <sup>35</sup>        | 0.00002                              | —                                            | 0.997                         | 1.25                                | —                        |
|                    | Isopropanol            | 1.25 mL                | 28.78/500 mL                 | 0.072                                | —                                            | 0.7812                        | 0.98                                | —                        |
|                    | MAI                    | 0.14 g                 | 75/10 g                      | 1.05                                 | 7.62                                         | —                             | 0.14                                | 4.56                     |
|                    | PbI <sub>2</sub>       | 1.38 g                 | 359/100 g                    | 4.95                                 | —                                            | —                             | 1.38                                | —                        |
|                    | DMF                    | 2.4 mL                 | 126.13/250 mL                | 1.21                                 | —                                            | 1.028                         | 2.47                                | —                        |
| MAPbI <sub>3</sub> | NMP                    | 0.6 mL                 | 169.25/250 mL                | 0.41                                 | —                                            | 0.9415                        | 0.57                                | —                        |
|                    | Spiro-OMeTAD           | 0.774 g                | 83/1 g                       | 64.24                                | 79.01                                        | —                             | 0.77                                | 13.47                    |
|                    | LiTFSI                 | 0.097 g                | 49.91/5 g                    | 0.97                                 | —                                            | —                             | 0.10                                | —                        |
|                    | FK 209 Co(n) TFSI      | 0.092 g                | 306.15/5 g                   | 5.63                                 | —                                            | —                             | 0.09                                | —                        |
|                    | Acetonitrile           | 0.495 mL               | 152/250 mL                   | 0.30                                 | —                                            | 0.786                         | 0.39                                | —                        |
| Spiro-OMeTAD       | Chlorobenzene          | 10.7 mL                | 137.98/250 mL                | 5.91                                 | —                                            | 1.106                         | 11.83                               | —                        |
|                    | tBP                    | 0.284 g                | 172.48/25 g                  | 1.96                                 | —                                            | —                             | 0.28                                | —                        |
|                    | Au                     | 1.65 g                 | 63.04/g                      | 104.02                               | 104.02                                       | —                             | 1.65                                | 1.65                     |
|                    | Au                     | 1.65 g                 | 63.04/g                      | 104.02                               | 104.02                                       | —                             | 1.65                                | 1.65                     |
|                    | Au                     | 1.65 g                 | 63.04/g                      | 104.02                               | 104.02                                       | —                             | 1.65                                | 1.65                     |

**Table 3** Chemical consumption and costs during the recycling process scaled for a perovskite module with 1 m<sup>2</sup> area based on our fabrication sequence with an active area of 70%. The solvent consumption for MAPbI<sub>3</sub> and spiro-OMeTAD was determined by their respective solubility, about 500 mg mL<sup>-1</sup>. MAPbI<sub>3</sub> in GBL<sup>36</sup> and 367 mg mL<sup>-1</sup> spiro-OMeTAD in chlorobenzene.<sup>36</sup> A 10% material loss during device fabrication is assumed. Each gram of material requires 20 g silica and 200 mL eluent during column chromatography. The amount of ethyl acetate should be about 3 times greater than that of GBL (as described in the ESI). The pricing was derived from our laboratory's procurement data (the source of the materials can be found in the ESI), with the exchange rate of 1 euro equivalent to 1.08 dollars, with an exception of the price of H<sub>2</sub>O.<sup>25</sup> We are utilizing the yield data collected in our experiments for the 1 m<sup>2</sup> module

| Target material              | Material on stack | Chemical               | Usage   | Virgin material price (\$) | Subtotal cost (\$) | Total cost (\$) [C <sub>v</sub> ] | Yield [%] |
|------------------------------|-------------------|------------------------|---------|----------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------|
| SnO <sub>2</sub> + ITO glass | 0.078 g + 5 kg    | Ethanol                | 33 mL   | 27.97/2.5 L                | 0.37               | 0.54                              | 100%      |
|                              |                   | SnO <sub>2</sub> (15%) | 0.58 g  | 88.29/500 g                | 0.10               | —                                 | —         |
|                              |                   | Deionized water        | 1.25 mL | 0.012/L                    | 0.00002            | —                                 | —         |
|                              |                   | Isopropanol            | 1.25 mL | 28.78/500 mL               | 0.072              | —                                 | —         |
|                              |                   | GBL                    | 3.05 g  | 38.45/500 g                | 0.23               | 1.22                              | 87%       |
| MAPbI <sub>3</sub>           | 1.368 g           | Ethyl acetate          | 8.2 mL  | 120.96/1 L                 | 0.99               | —                                 | —         |
|                              |                   | Chlorobenzene          | 1.9 mL  | 137.98/250 mL              | 1.05               | 5.93                              | 66%       |
| Spiro-OMeTAD                 | 0.697 g           | Silica gel             | 14 g    | 83.16/1 kg                 | 1.16               | —                                 | —         |
|                              |                   | Dichloromethane        | 133 mL  | 64.15/2.5 L                | 3.44               | —                                 | —         |
|                              |                   | Ethyl acetate          | 7 mL    | 117.72/2.5 L               | 0.33               | —                                 | —         |
|                              |                   | Ethyl acetate          | 7 mL    | 117.72/2.5 L               | 0.33               | —                                 | —         |

物質コストは評価されているが、それ以外にもコストがかかるはず。

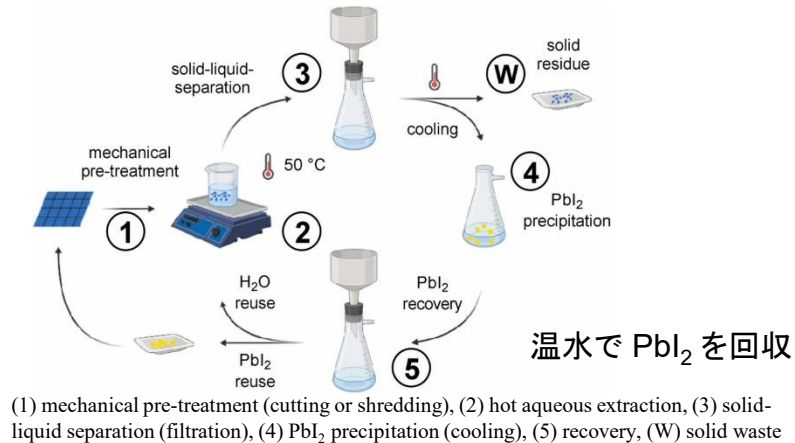
# ペロブスカイト太陽電池リサイクル論文報告例における手法の分類



## 水系でのリサイクル例

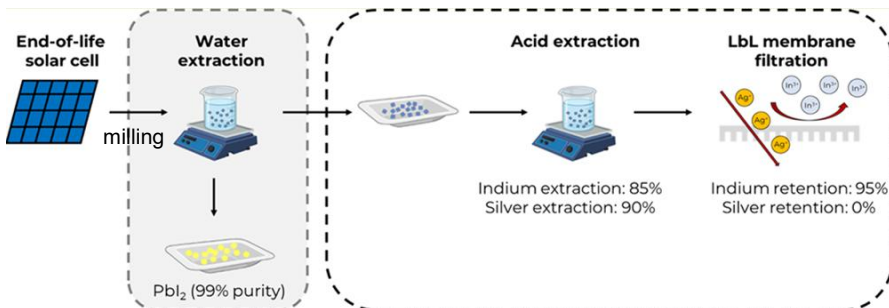
### Organic solvent free $\text{PbI}_2$ recycling from perovskite solar cells using hot water [Univ. Appl. Sci. Arts Northwestern Switzerland]

F. Schmidt, M. Amrein, S. Hedwig, M. Kober-Czerny, A. Paracchino, V. Holappa, R. Suhonen, A. Schäffer, E. C. Constable, H. J. Snaith, M. Lenz, *J. Hazardous Mater.* **2023**, *447*, 130829.  
DOI:10.1016/j.jhazmat.2023.130829 2023/01/18



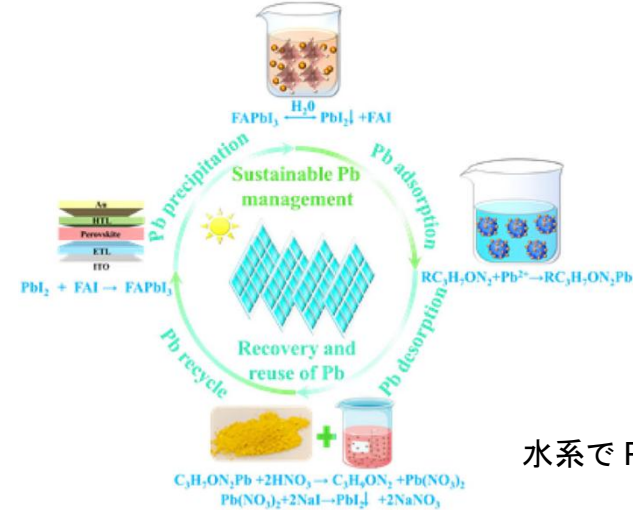
### Indium and silver recovery from perovskite thin film solar cell waste by means of nanofiltration [Univ. Appl. Sci. Arts Northwestern Switzerland]

M. Amrein, K. Rohrer, D. Hengevoss, H. Jin, H. J. Snaith, M. Thomann, F. Nüesch, M. Lenz, *ACS Sustainable Resource Management.*  
DOI:10.1021/acssusresmg.5c00109 2025/05/16



### Bioinspired “cage traps” for closed-loop lead management of perovskite solar cells under real-world contamination assessment [Zhengzhou Univ. (鄭州大), China]

H. Luo, P. Li, J. Ma, X. Li, H. Zhu, Y. Cheng, Q. Li, Q. Xu, Y. Zhang, Y. Song, *Nature Commun.* **2023**, *14*, 4730.  
DOI:10.1038/s41467-023-40421-8 2023/08/07



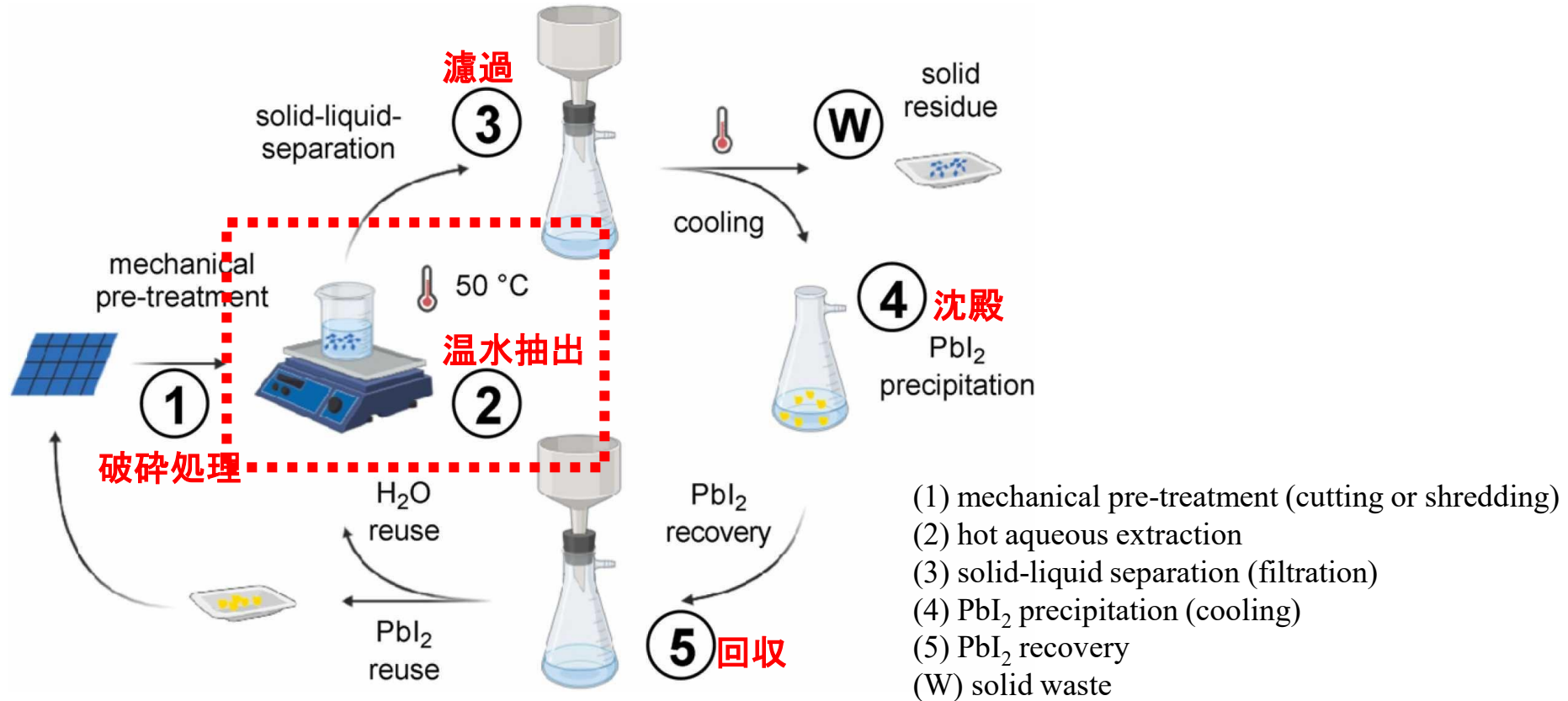
### Facile recovery of lead in discarded perovskite solar cells via ultrasonic water leaching [Huazhong Univ. Sci. Tech. (华中科技大学: 武漢), China]

G. Hu, Z. Li, Q. Zou, S. Zhou, S. Liang, L. Huang, H. Duan, J. Hu, H. Hou, L. Xu, C. Chen, J. Tang, J. Yang, *Environ. Sci. Technol. Lett.* DOI:10.1021/acs.estlett.4c00735  
2025/01/05





# 既報論文※のうち、デバイスを破砕しているのは、この例のみ※※



## Organic solvent free PbI<sub>2</sub> recycling from perovskite solar cells using hot water

F. Schmidt, M. Amrein, S. Hedwig, M. Kober-Czerny, A. Paracchino, V. Holappa, R. Suhonen, A. Schäffer, E. C. Constable, H. J. Snaith, M. Lenz,

*J. Hazardous Mater.* **2023**, 447, 130829. DOI:10.1016/j.jhazmat.2023.130829

※「Web of Science」で、「recycle of perovskite solar cell」をキーワードとして検索して出てきた全論文

※※同グループによる、ほぼ同内容のものがもう一報ある

事業テーマ：太陽光発電導入拡大等技術開発事業／循環型社会構築リサイクル技術開発／  
ペロブスカイト太陽電池の大量導入を見据えたマテリアルリサイクル技術の開発

実施者：国立大学法人東京大学

事業の目的

第7次エネルギー基本計画にはペロブスカイト太陽電池の2040年の導入目標を20GWとする高い目標が明記された。このため市場創出期からその適切な管理に加え、環境基準に適合する廃棄やマテリアルリサイクルの技術を開発することが必要である。本事業では、廃棄処理におけるコストや環境負荷を可能な限り抑制し、循環型社会やサーキュラーエコノミーにも対応するシステムを早期に構築することを目的とする。

事業期間

2025年度～2029年度（予定）

事業内容概略

ペロブスカイト太陽電池の適切な廃棄とマテリアルリサイクルのプロセス開発を行う。ペロブスカイト太陽電池は、材料組成を調整することで特性を制御できる一方、多様な材料組成の製品が現れるため、廃棄・リサイクルはそれらの組成分析を的確に行いながら進める必要がある。また、より低コストでより低環境負荷の廃棄・マテリアルリサイクルを実現する技術が必要である。本事業では、循環型社会やサーキュラーエコノミーにも対応するシステムの早期構築に向けた技術開発を行うと共に、作業が簡便になるセル・モジュール構造などを設計し、製品の標準化にもフィードバックする。ペロブスカイト太陽電池モジュールは有機系太陽電池技術研究組合を通じて製造メーカーから提供を受け、各種プロセスの検討を行い、大量処理を見据えてモデルプロセスの確立を行う。

事業イメージ

東京大学（研究開発統括）

- ①実験室レベルでの原料回収プロセスの検討
- ②リサイクル原料を用いたデバイス作製
- ③処理中試料に含まれる各種元素等の分析
- ⑨ライフサイクルアセスメントによる効果分析

再委託：有機系太陽電池技術研究組合（RATO）

- ④各種製品の試行材料としての提供

組合員企業の中の協力企業（NEDOプロ外）からペロブスカイト太陽電池モジュールの廃棄品を回収し分別し一次処理を行った後に二次処理事業者（（株）浜田）へ作業しやすい形で送付する

再委託：株式会社浜田

- ⑤受入試料の処理プロセスの検討
- ⑧試験プラントの設計・開発に向けたプロセス最適化

分解・破碎

溶剤処理

残渣は廃棄

再委託：関東化学株式会社

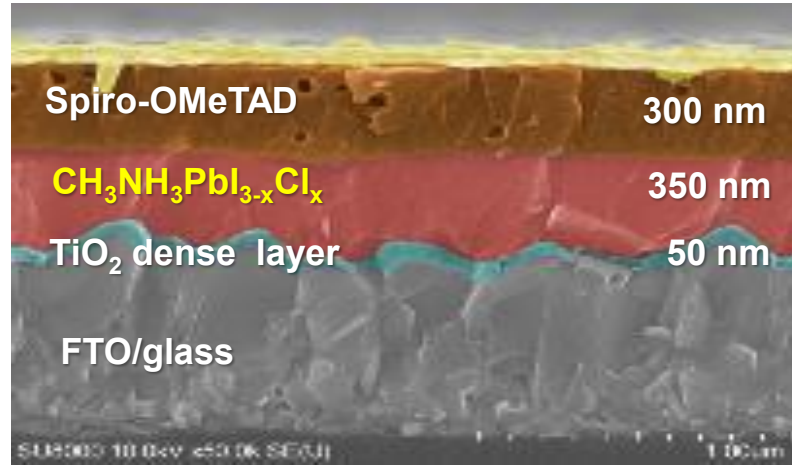
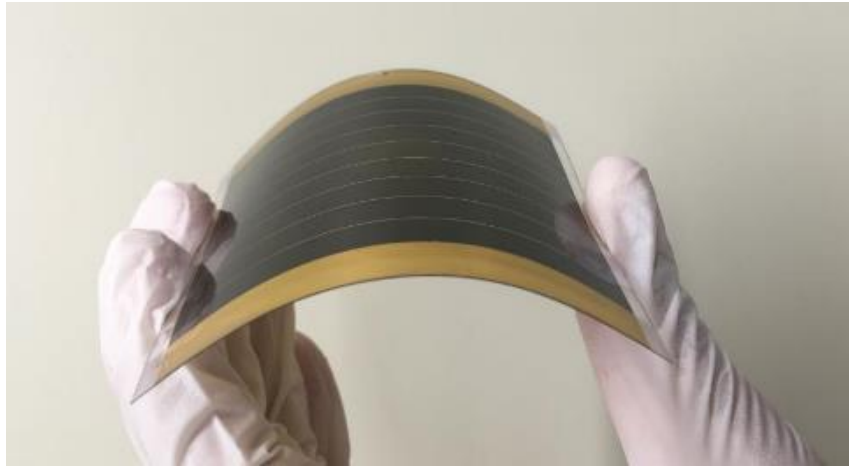
- ⑥溶液処理プロセスの検討
- 役割：溶媒処理技術開発、溶剤提供

再委託：株式会社合同資源

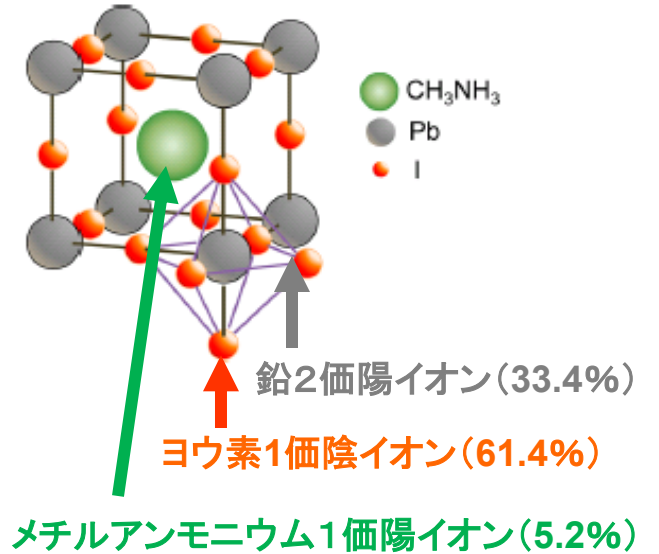
- ⑦回収元素精製プロセスの開発
- 役割：ヨウ素リサイクル、鉛の処理



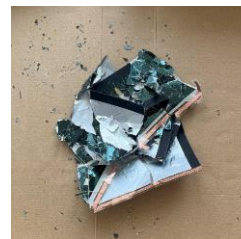
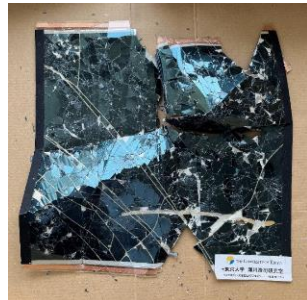
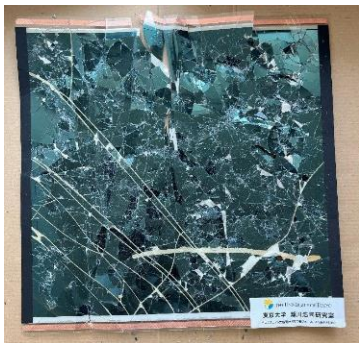
# リサイクルに関するペロブスカイト太陽電池の特徴



## ABX<sub>3</sub>ペロブスカイト



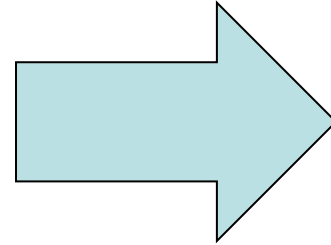
| 評価項目                    | 一般的結晶シリコン太陽電池    | ペロブスカイト太陽電池             |
|-------------------------|------------------|-------------------------|
| 10m <sup>2</sup> あたりの重量 | 約115kg           | 約10kg / 約10分の1          |
| 1kWあたりの重量               | 約60kg            | 約7kg / 約10分の1           |
| 回収対象                    | ガラス、アルミフレーム、銀... | ヨウ素、鉛、銀、銅、錫、その他の希少金属... |



ポイント: 加熱を使わない室温溶媒処理、元素の分別、固体は比重で分別

ヨウ素  
 鉛  
 銀  
 銅  
 錫  
 ガラス  
 カーボン  
 樹脂





2000円／kWを目指す！



# ペロブスカイト太陽電池は既存の太陽光発電の問題点を克服

軽量・フレキシブル・高効率・低コスト・省資源で次世代の太陽光発電の本命

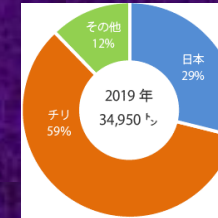
＜解決策＞ペロブスカイト太陽電池は電力需要地にオンサイトで設置できる

- ⇒工場や体育館の屋根、都市部の高層ビル、鉄道インフラ、道路インフラ、空港インフラ
- ⇒電力系統に余計な負担をかけないので経済的
- ⇒環境破壊の低減、防災上も有益、盗難も回避
- ⇒設置可能な場所は格段に増えるため日本の再エネ導入拡大に貢献



＜解決策＞ペロブスカイト太陽電池の原料や生産拠点は国内で賄える

- ⇒主要原料のヨウ素は世界生産2位
- ⇒経済安全保障、エネルギー安全保障に貢献
- ⇒純国産エネルギーで原料も含めて輸入に頼らない



← 日本が世界生産シェア約3割

＜解決策＞電力の必要な事業者が設置(税控除等の政策誘導)して卒FIT、卒FIP

ペロブスカイト太陽電池は真にマテリアルリサイクルが可能

- ⇒税控除ならFIT終了でも事業撤退は無い
- ⇒いったん導入すれば再エネ発電量は維持される
- ⇒重量は結晶シリコン太陽電池の十分の一で、原料のリサイクルルートも確立している



← ヨウ素と鉛の再利用は確立している

# 第7次エネルギー基本計画における再生可能エネルギー電力導入目標

## 6. 脱炭素電源の拡大と系統整備

2024年12月17日原案公表 2025年2月18日閣議決定

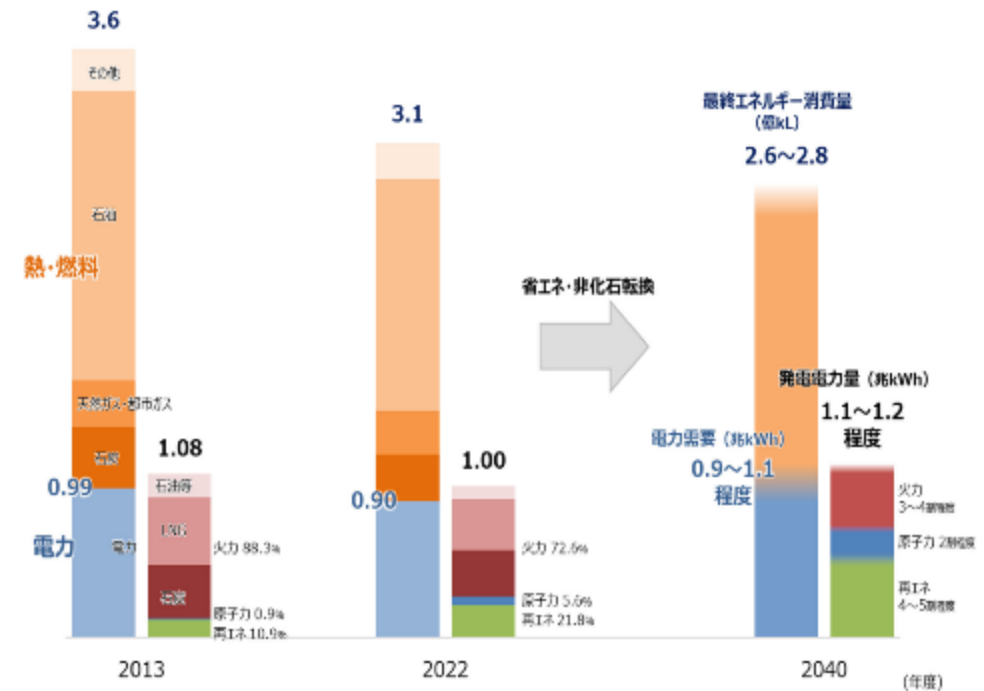
### <総論>

- DXやGXの進展に伴い、電力需要の増加が見込まれる中、それに見合った脱炭素電源の確保ができなかったために、国内産業立地の投資が行われず、日本経済が成長機会を失うことは、決してあってはならない。
- 再生可能エネルギーが原子力かといった二項対立的な議論ではなく、脱炭素電源を最大限活用すべき。
- こうした中で、脱炭素電源への投資回収の予見性を高め、事業者の積極的な新規投資を促進する事業環境整備及び、電源や系統整備といった大規模かつ長期の投資に必要な資金を安定的に確保していくためのファイナンス環境の整備に取り組むことで、脱炭素電源の供給力を抜本的に強化していく必要がある。

### <再生可能エネルギー>

- S+3Eを大前提に、電力部門の脱炭素化に向けて、再生可能エネルギーの主力電源化を徹底し、関係省庁が連携して施策を強化することで、地域との共生と国民負担の抑制を図りながら最大限の導入を促す。
- 国産再生可能エネルギーの普及拡大を図り、技術自給率の向上を図ることは、脱炭素化に加え、我が国の産業競争力の強化に資するものであり、こうした観点からも次世代再生可能エネルギー技術の開発・社会実装を進めていく必要がある。
- 再生可能エネルギー導入にあたっては、①地域との共生、②国民負担の抑制、③出力変動への対応、④インベーションの加速とサプライチェーン構築、⑤使用済太陽光パネルへの対応といった課題がある。
- これらの課題に対して、①事業規律の強化、②FIT制度や入札制度の活用、③地域間連系線の整備・蓄電池の導入等、④ペロブスカイト太陽電池（2040年までに20GWの導入目標）や、EEZ等での浮体式洋上風力、国の掘削調査や「フロンティア」での計認可フロンティアによる地熱発電の導入拡大、次世代型地熱の社会実装加速化、自治体が主導する中小水力の促進、⑤適切な廃棄・リサイクルが実施される制度整備等の対応。
- 再生可能エネルギーの主力電源化に当たっては、電力市場への統合に取り組み、系統整備や調整力の確保に伴う社会全体での統合コストの最小化を図るとともに、次世代にわたり事業継続されるよう、再生可能エネルギーの長期安定電源化に取り組む。

【参考】エネルギー需給の見通し（イメージ）※数値は暫定値であり、今後変動し得る。



(注) 左のグラフは最終エネルギー消費量、右のグラフは発電電力量であり、送配電損失量と所内電力量を差し引いたものが電力需要。

ペロブスカイト太陽電池の  
導入目標は2040年に20GW

# 2040年までに20GWのペロブスカイト太陽電池を導入するためには

メガワット(MW)

予測生産量と予測廃棄量

宇宙用途  
新規事業

年間生産量見込み

3GW: 6000億円

160W / m<sup>2</sup> (変換効率約16%)とすると

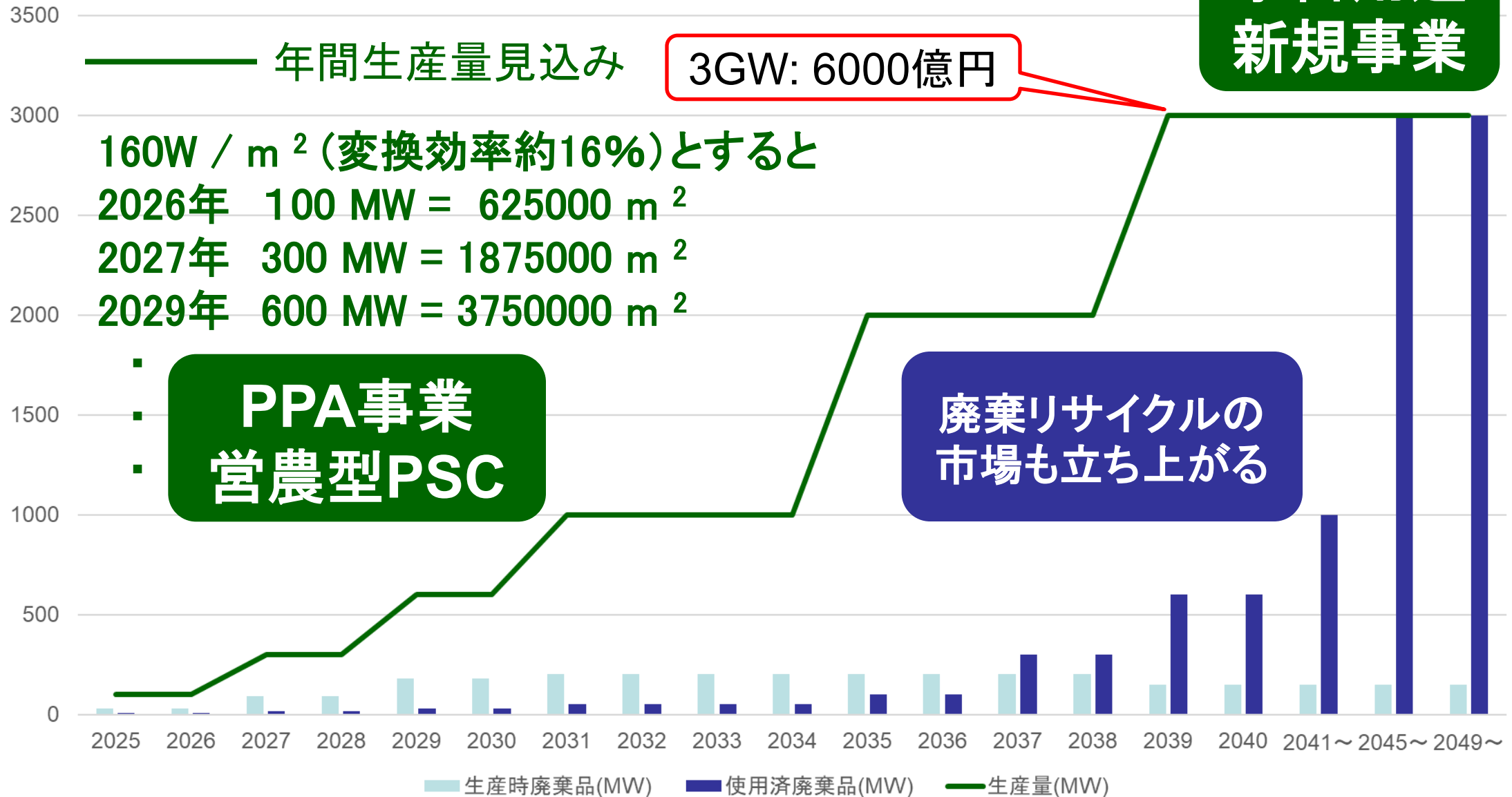
2026年 100 MW = 625000 m<sup>2</sup>

2027年 300 MW = 1875000 m<sup>2</sup>

2029年 600 MW = 3750000 m<sup>2</sup>

PPA事業  
営農型PSC

廃棄リサイクルの  
市場も立ち上がる





## 高市総理所信表明演説「夢の太陽電池―国産再エネ」 令和7年10月24日第219回国会

国民生活及び国内産業を持続させ、更に立地競争力を強化していくために、エネルギーの安定的で安価な供給が不可欠です。特に、原子力やペロブスカイト太陽電池を始めとする国産エネルギーは重要です。GX予算を用いながら、地域の理解や環境への配慮を前提に、脱炭素電源を最大限活用するとともに、光電融合技術等による徹底した省エネや燃料転換を進めます。また、次世代革新炉やフュージョンエネルギーの早期の社会実装を目指します。こうした施策を直ちに具体化させてまいります。我が国の総力を挙げて、強い経済を実現していこうではありませんか。

ペロブスカイト太陽電池は、ヨウ素や鉛などの結晶でできた膜を使って発電する新しい太陽電池。現在普及しているシリコン製パネルよりも軽量で薄いため設置場所を選ばない。主原料のヨウ素は日本が世界2位の生産国のため安全保障の観点からも注目されている。

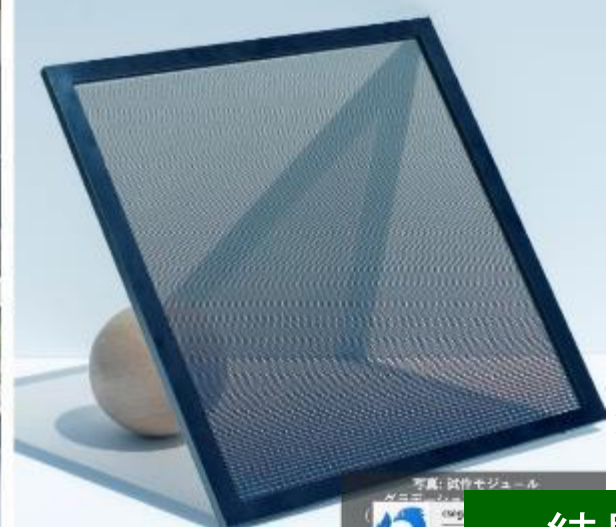


超軽量・薄型で様々な場所に設置できる

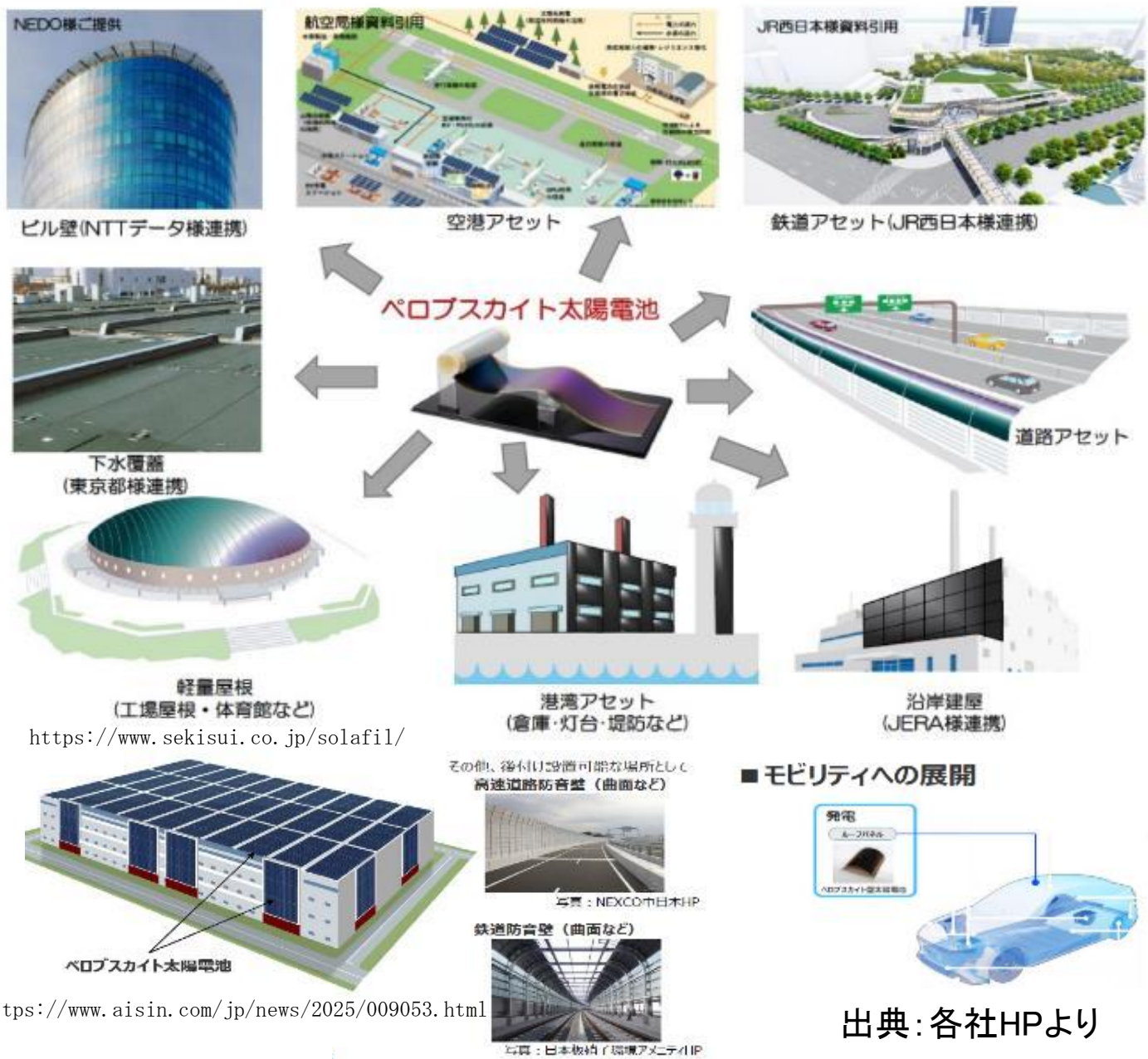
●太陽電池の従来型と次世代型の比較

|                  | 結晶シリコン型<br>太陽電池 | ペロブスカイト型<br>太陽電池※ |
|------------------|-----------------|-------------------|
| 発電効率             | 14～20%          | 15%(20%を目指す)      |
| 耐久年数             | 20～30年          | 10年(20年以上を目指す)    |
| 生産・輸送などの<br>環境負荷 | 高い              | 低い                |
| 原料の主な生産国         | 中国(シリコン)        | チリ、日本(ヨウ素)        |
| 国内の市場規模          | 70GW            | 105～140GW         |

※積水化学のペロブスカイト型太陽電池の場合



ペロブスカイト太陽電池は軽量で柔軟。様々な場所への設置が可能



結晶シリコン太陽電池とペロブスカイト太陽電池の違いは多様性



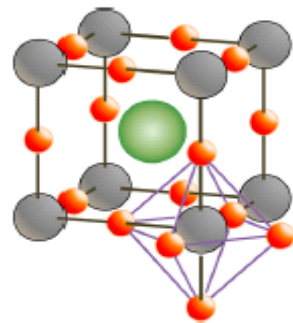
# 有機金属ハライドペロブスカイトは電子も正孔も流す(2013年)

G. Giorgi, J. Fujisawa, H. Segawa, K. Yamashita

*J. Phys. Chem. Lett.*, 2013, 4, 4213–4216, DOI: 10.1021/jz4023865



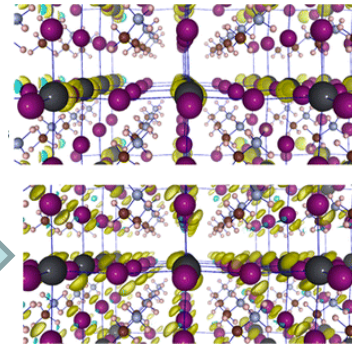
THE UNIVERSITY OF TOKYO



● CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>  
● Pb  
● I

Electron on CB

Hole on VB



CB: Pb 6p + I 5s electron  
VB: Pb 6s + I 5p hole

Good separation of pathway

At DFT+SOC  $m_e^* = 0.228m_0$   
 $m_h^* = 0.293m_0$

励起子の結合は弱くすぐに  
電子と正孔に解離(2015年)

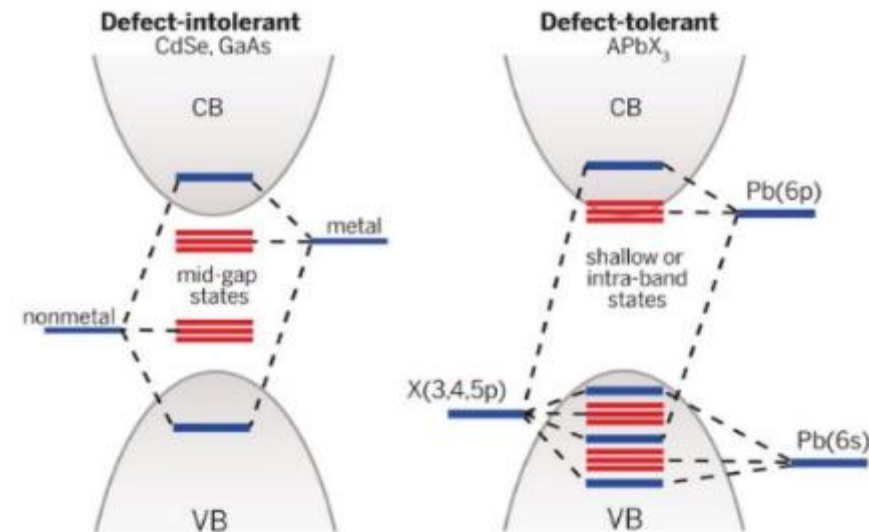
物理的欠陥ができてても  
再結合準位にならない(2017年)



## Direct measurement of the exciton binding energy and effective masses for charge carriers in organic-inorganic tri-halide perovskites

Atsuhiko Miyata<sup>1†</sup>, Anatolie Mitioglu<sup>1†</sup>, Paulina Plochocka<sup>1</sup>, Oliver Portugall<sup>1</sup>, Jacob Tse-Wei Wang<sup>2</sup>, Samuel D. Stranks<sup>2</sup>, Henry J. Snaith<sup>2</sup> and Robin J. Nicholas<sup>2\*</sup>

Solar cells based on the organic-inorganic tri-halide perovskite family of materials have shown significant progress recently, offering the prospect of low-cost solar energy from devices that are very simple to process. Fundamental to understanding the operation of these devices is the exciton binding energy, which has proved both difficult to measure directly and controversial. We demonstrate that by using very high magnetic fields it is possible to make an accurate and direct spectroscopic measurement of the exciton binding energy, which we find to be only 16 meV at low temperatures, over three times smaller than has been previously assumed. In the room-temperature phase we show that the binding energy falls to even smaller values of only a few millielectronvolts, which explains their excellent device performance as being due to spontaneous free-carrier generation following light absorption. Additionally, we determine the excitonic reduced effective mass to be  $0.104m_0$  (where  $m_0$  is the electron mass), significantly smaller than previously estimated experimentally but in good agreement with recent calculations. Our work provides crucial information about the photophysics of these materials, which will in turn allow improved optoelectronic device operation and better understanding of their electronic properties.



塗って作って物理的な欠陥だらけでも高性能材料になる！！！！(従来の常識を覆す)



# 有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池は塗布で製造

SCIENCE ADVANCES | RESEARCH ARTICLE

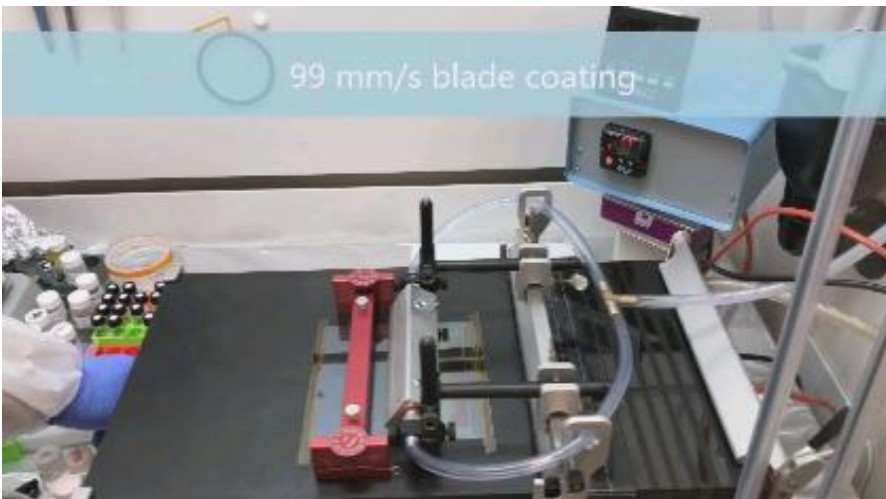
APPLIED SCIENCES AND ENGINEERING

## Tailoring solvent coordination for high-speed, room-temperature blading of perovskite photovoltaic films

Yehao Deng<sup>1</sup>, Charles H. Van Brackle<sup>1</sup>, Xuezeng Dai<sup>1</sup>, Jingjing Zhao<sup>2</sup>, Bo Chen<sup>1</sup>, Jinsong Huang<sup>1,2\*</sup>

The efficiencies of small-pixel perovskite photovoltaics have increased to above 24%, while most reported fabrication methods cannot be transferred to scalable manufacturing process. Here, we report a method of fast blading large-area perovskite films at an unprecedented speed of 99 mm/s under ambient conditions by tailoring solvent coordination capability. Combining volatile noncoordinating solvents to  $\text{Pb}^{2+}$  and low-volatile, coordinating solvents achieves both fast drying and large perovskite grains at room temperature. The reproducible fabrication yields a certified module efficiency of 16.4%, with an aperture area of 63.7  $\text{cm}^2$ . This method can be applied for various perovskite compositions. The perovskite modules also show a small temperature coefficient of  $-0.13\%/^{\circ}\text{C}$  and nearly fully recoverable efficiency after 58 cycles of shading, much better than commercial silicon and thin-film solar modules.

*Science Advances* 2019, 5, eaax7537.



ARTICLE

<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18940-6>

OPEN

Check for updates

## Roll-to-roll gravure-printed flexible perovskite solar cells using eco-friendly antisolvent bathing with wide processing window

Young Yun Kim<sup>1</sup>, Tae-Youl Yang<sup>1,2</sup>, Riikka Suhonen<sup>3</sup>, Antti Kemppainen<sup>3</sup>, Kyeongil Hwang<sup>1</sup>, Nam Joong Jeon<sup>1</sup> & Jangwon Seo<sup>1,4\*</sup>

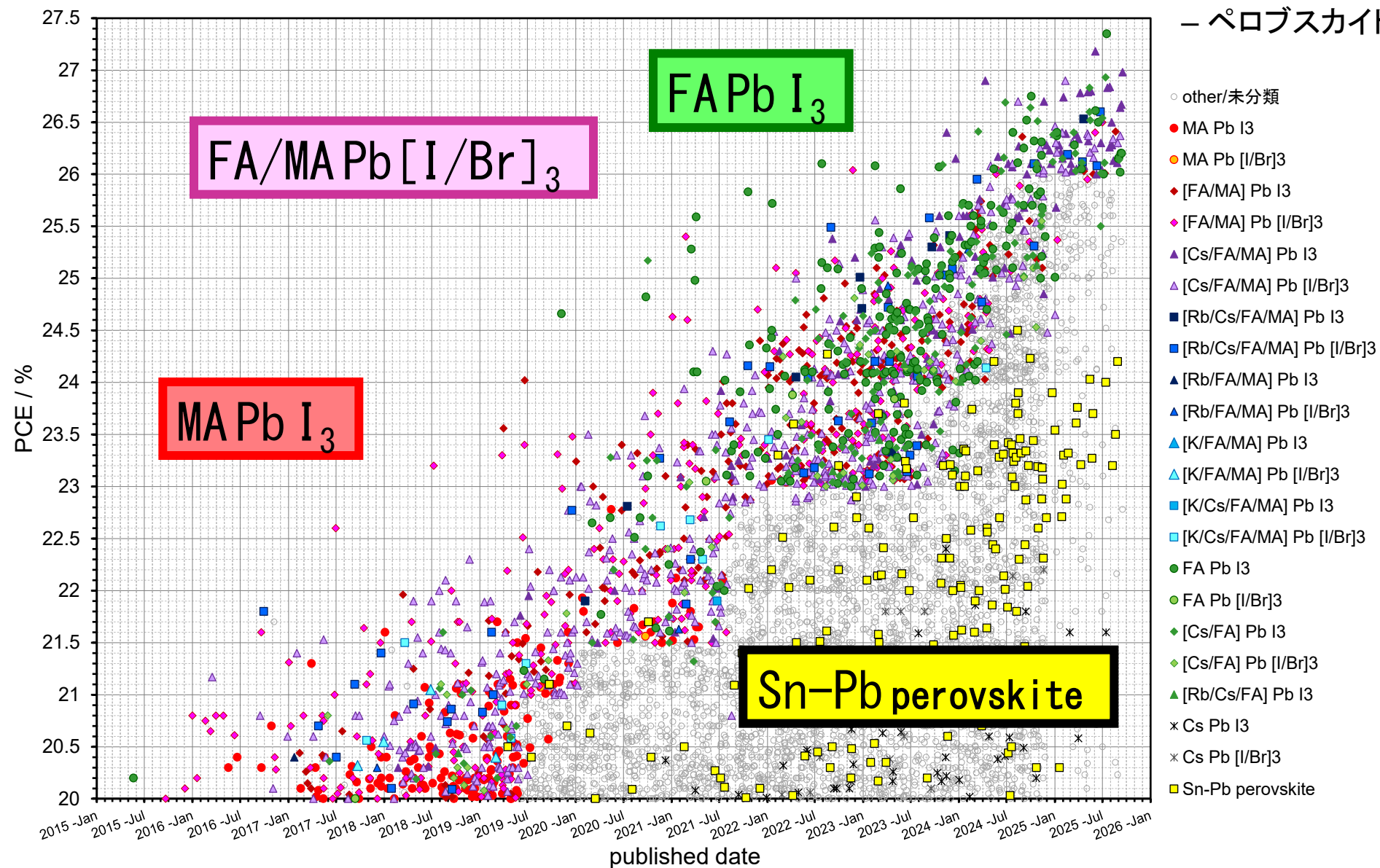
Driven by recent improvements in efficiency and stability of perovskite solar cells (PSCs), upscaling of PSCs has come to be regarded as the next step. Specifically, a high-throughput, low-cost roll-to-roll (R2R) processes would be a breakthrough to realize the commercialization of PSCs, with uniform formation of precursor wet film and complete conversion to perovskite phase via R2R-compatible processes necessary to accomplish this goal. Herein, we demonstrate the pilot-scale, fully R2R manufacturing of all the layers except for electrodes in PSCs. Tert-butyl alcohol (tBuOH) is introduced as an eco-friendly antisolvent with a wide processing window. Highly crystalline, uniform formamidinium (FA)-based perovskite formation via tBuOH:EA bathing was confirmed by achieving high power conversion efficiencies (PCEs) of 23.5% for glass-based spin-coated PSCs, and 19.1% for gravure-printed flexible PSCs. As an extended work, R2R gravure-printing and tBuOH:EA bathing resulted in the highest PCE reported for R2R-processed PSCs, 16.7% for PSCs with R2R-processed  $\text{SnO}_2$ /FA-perovskite, and 13.8% for fully R2R-produced PSCs.



塗布方法は  
さまざま

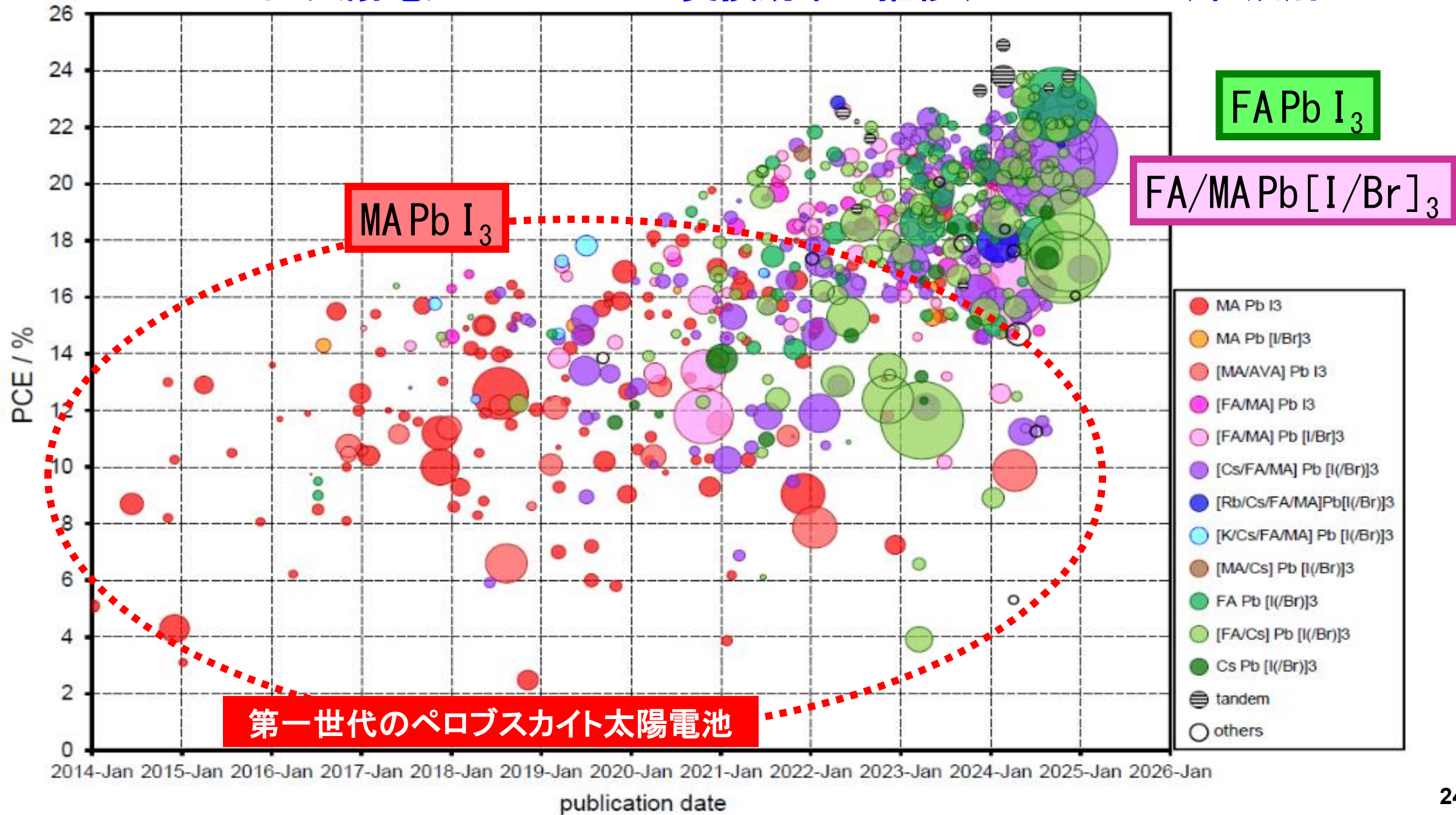
印刷工程は  
改善の余地あり

# 論文発表されたペロブスカイト太陽電池の変換効率の推移





# ペロブスカイト太陽電池モジュールの変換効率の推移(2014~2026)組成別





# ペロブスカイト太陽電池の研究開発フェーズ

## 第一世代ペロブスカイト太陽電池

変換効率～15% 耐久性10年 複数社が実用化

## 第二世代ペロブスカイト太陽電池

変換効率～20%超 耐久性20年 技術開発中

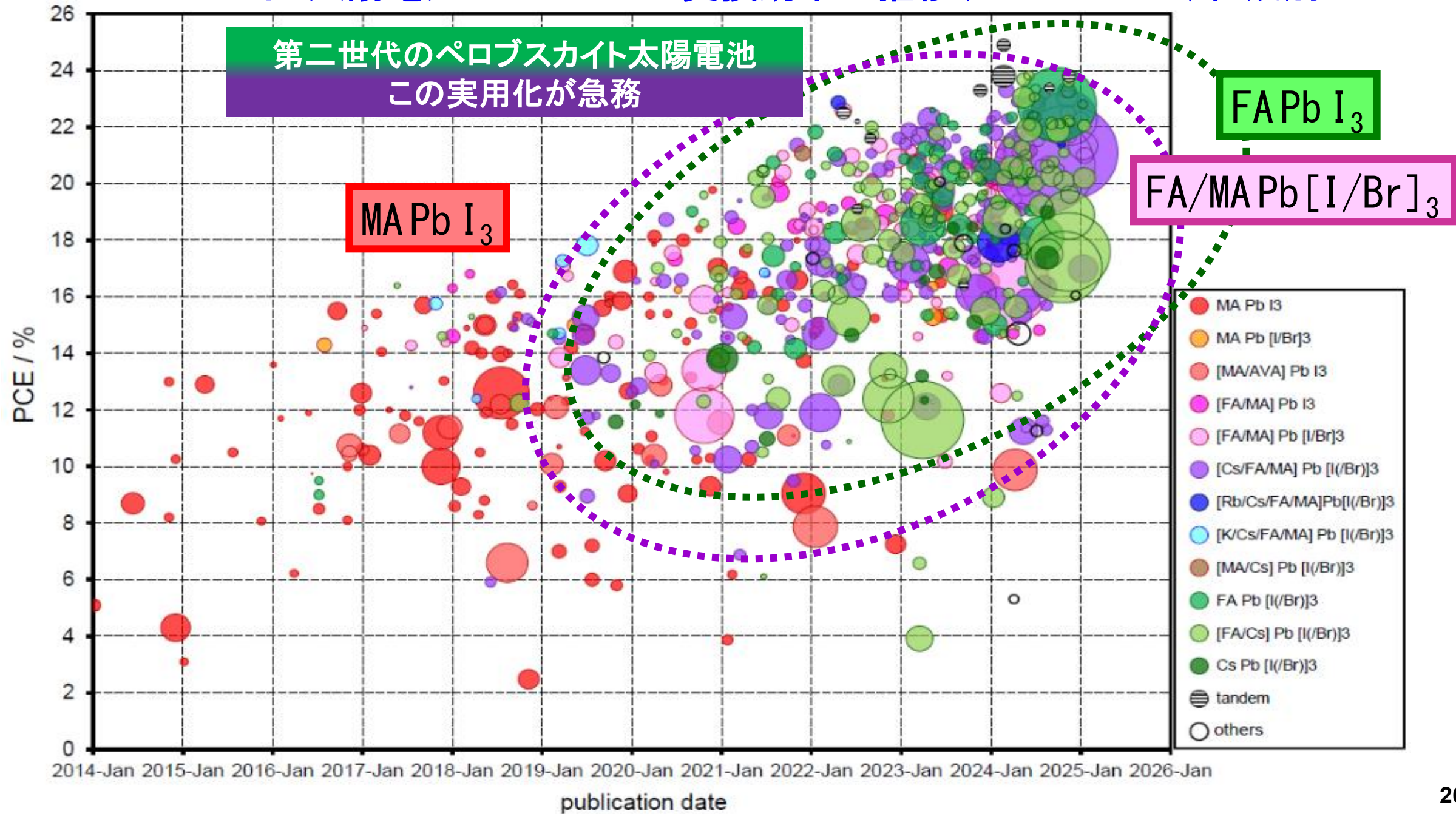
## 第三世代ペロブスカイト太陽電池

オールペロブスカイトタンデム（軽量フレキシブル）

変換効率～30% 耐久性20年超 基礎研究開発中

日本のモジュールはまだ第一世代のペロブスカイト太陽電池

# ペロブスカイト太陽電池モジュールの変換効率の推移(2014~2026)組成別



# ペロブスカイト太陽電池の研究開発フェーズ

## 第一世代ペロブスカイト太陽電池

変換効率～15% 耐久性10年 複数社が実用化

## 第二世代ペロブスカイト太陽電池

変換効率～20%超 耐久性20年 技術開発中

## 第三世代ペロブスカイト太陽電池

オールペロブスカイトタンデム（軽量フレキシブル）

変換効率～30% 耐久性20年超 基礎研究開発中

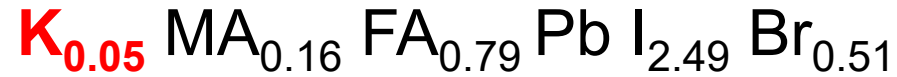
世界に打ち勝つには第二第三世代のペロブスカイト太陽電池が必須  
工場建設サポートだけでなく基礎研究や技術開発への支援が不可欠



# カリウムドーピングによるペロブスカイトの熱的安定性の改善



THE UNIVERSITY OF TOKYO



ACS **APPLIED**  
ENERGY MATERIALS

ACS Applied Energy Materials 2022, 5(9), 10409-10414.  
DOI: 10.1021/acsaem.2c00225

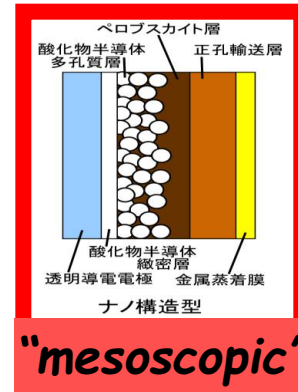
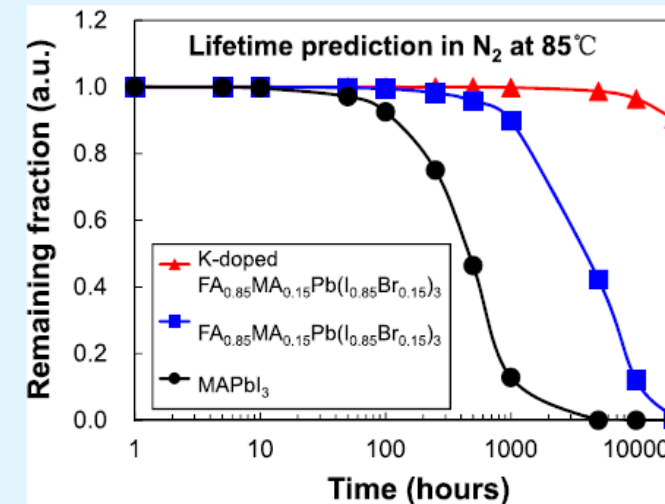
www.acsaem.org

Article

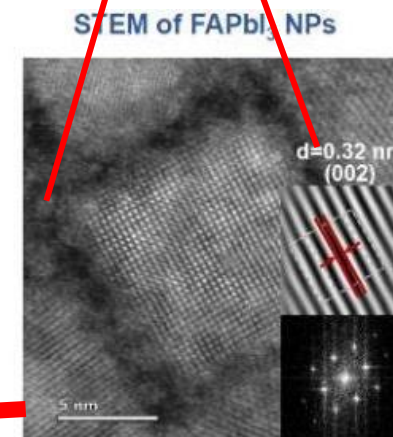
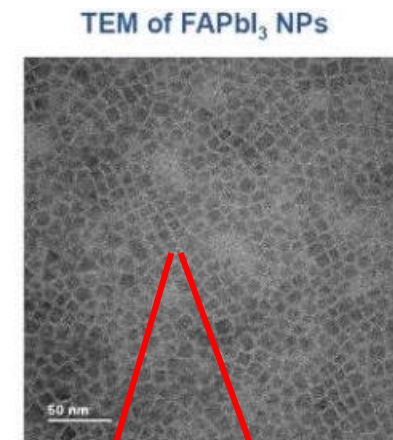
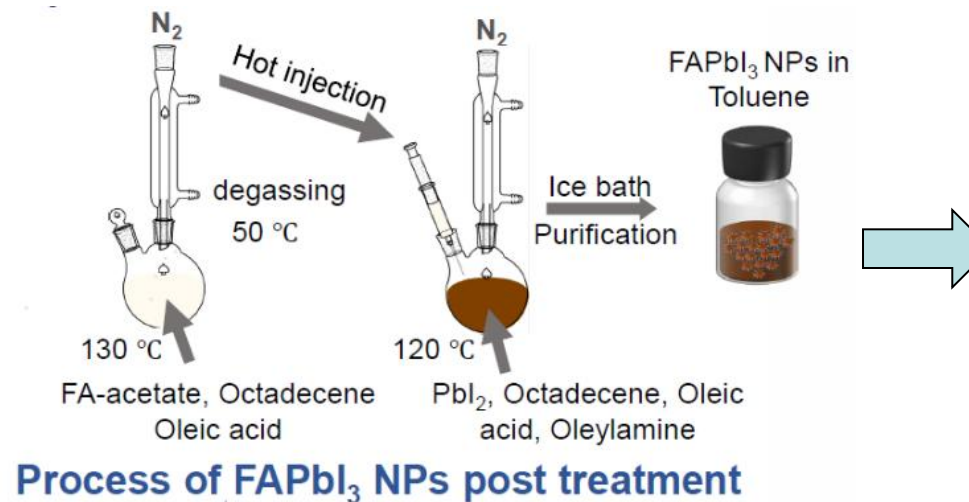
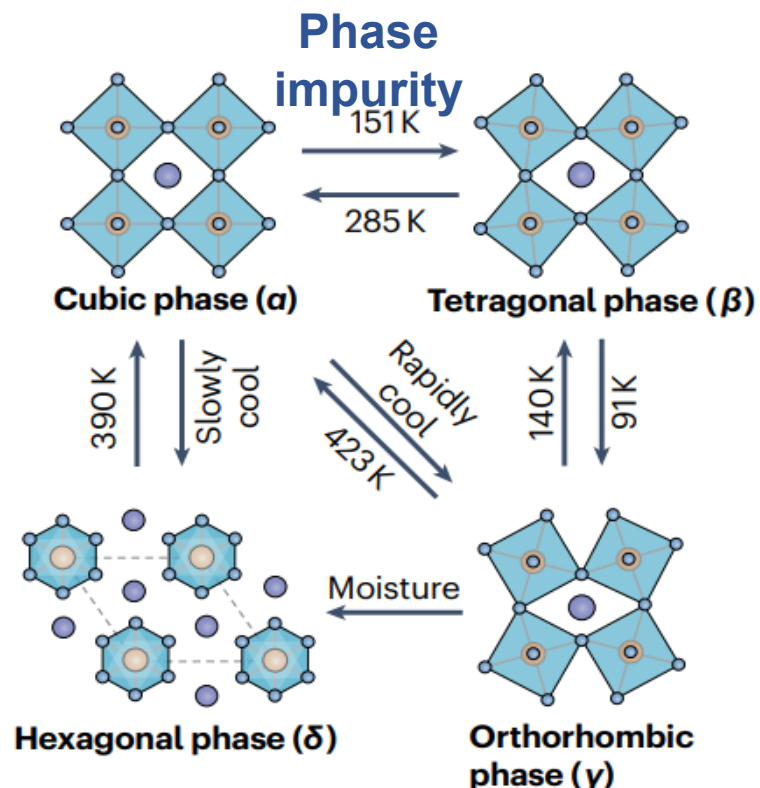
## Thermal Stability of K-Doped Organometal Halide Perovskite for Photovoltaic Materials

Motoshi Nakamura, Issei Takenaka, Takashi Mabuchi, Chie Nishiyama, Keishi Tada, Takeru Bessho, and Hiroshi Segawa\*

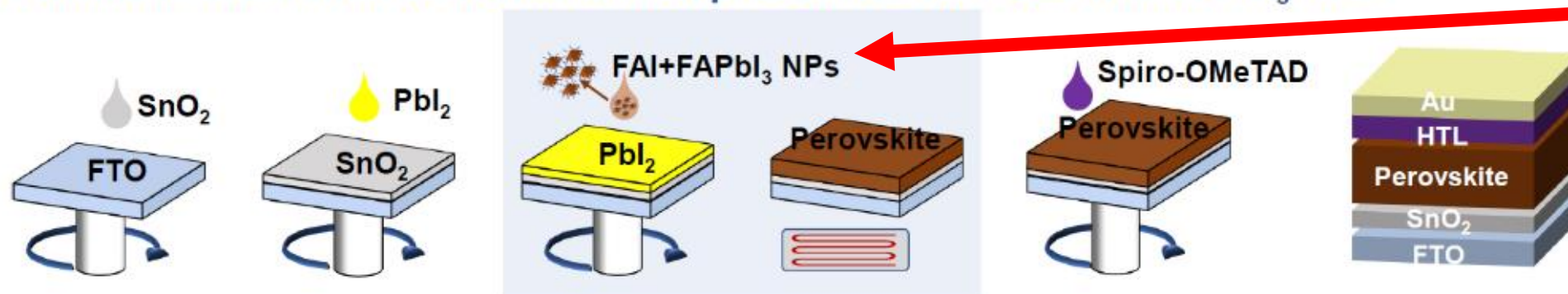
**ABSTRACT:** Organometal halide perovskites (OHPs) have garnered considerable attention as materials for next-generation solar cells. Although the power conversion efficiencies of solar cells with OHPs are comparable to those of the existing solar cells, their durability must be improved for practical use based on a deep understanding of their basic properties. During the last decade, various methods, such as composition control, alkali metal doping, and surface passivation, were used to increase the durability of OHPs. In this study, the effects of K-doping on the thermal stability of mixed OHPs are investigated. The activation energies of the mixed OHPs with and without K-doping are found to be  $128.4 \pm 5.2$  and  $92.9 \pm 9.8$  kJ/mol, respectively. Furthermore, the Johnson–Mehl–Avrami model is adopted to the in situ X-ray diffraction measurement data, the results of which indicate that K-doped OHPs can be stabilized to such an extent that they do not decompose after 10,000 h of heating at 85 °C.



# FAPbI<sub>3</sub>は高効率だが扱いが難しい(結晶の多形性)



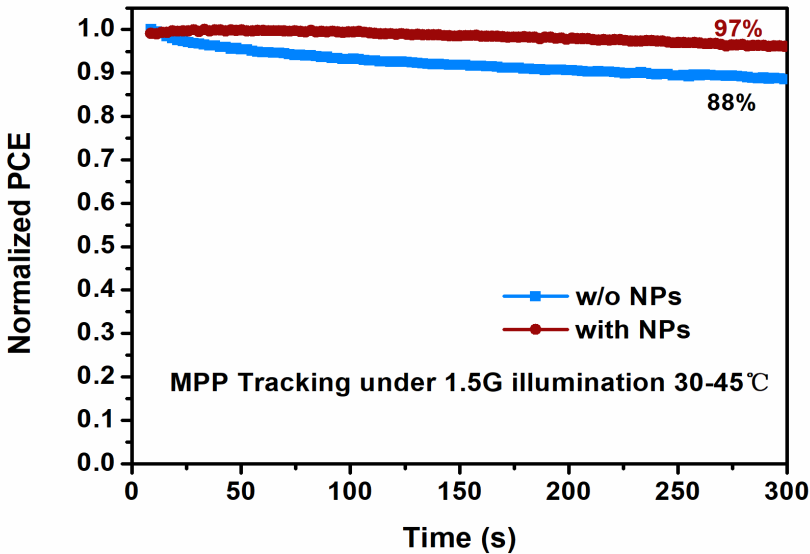
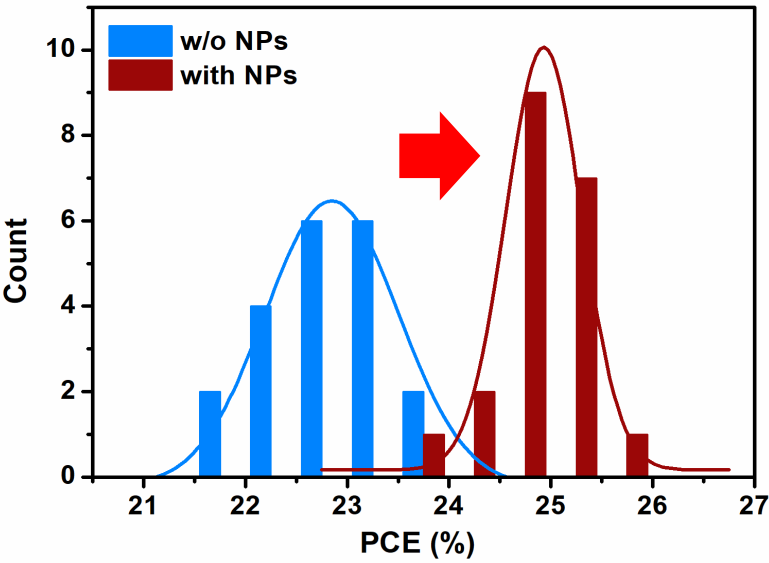
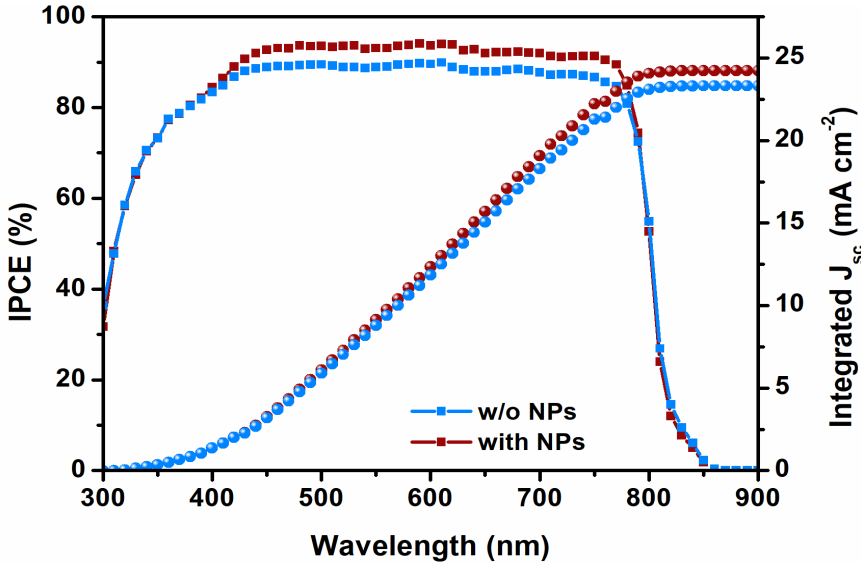
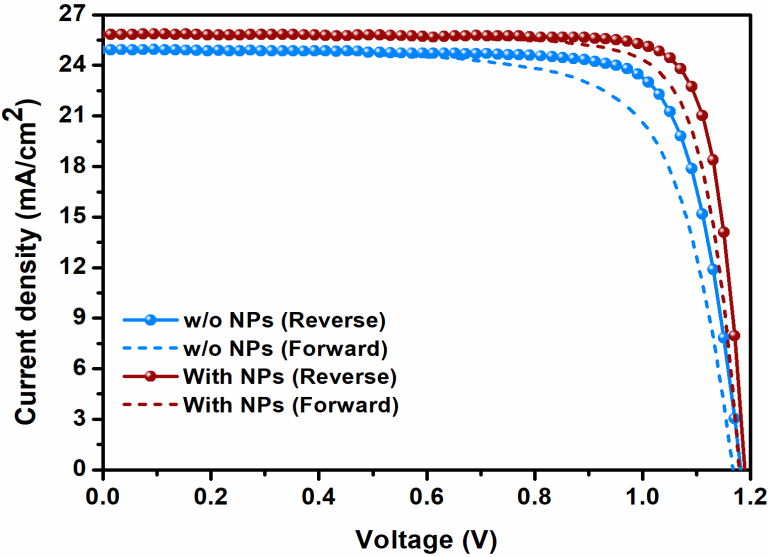
## Schematic illustration of the fabrication procedures for PSCs with FAPbI<sub>3</sub> NPs



**FAPbI<sub>3</sub>**

# 高性能のメチルアンモニウムフリーペロブスカイト太陽電池

順構造酸化スズETLを用いて2段階法でFAPbI<sub>3</sub>ペロブスカイトナノ粒子を添加したセルで効率25.7%を達成



➤ FAPbI<sub>3</sub> ナノ粒子を添加したセルでは明らかに変換効率が向上した。

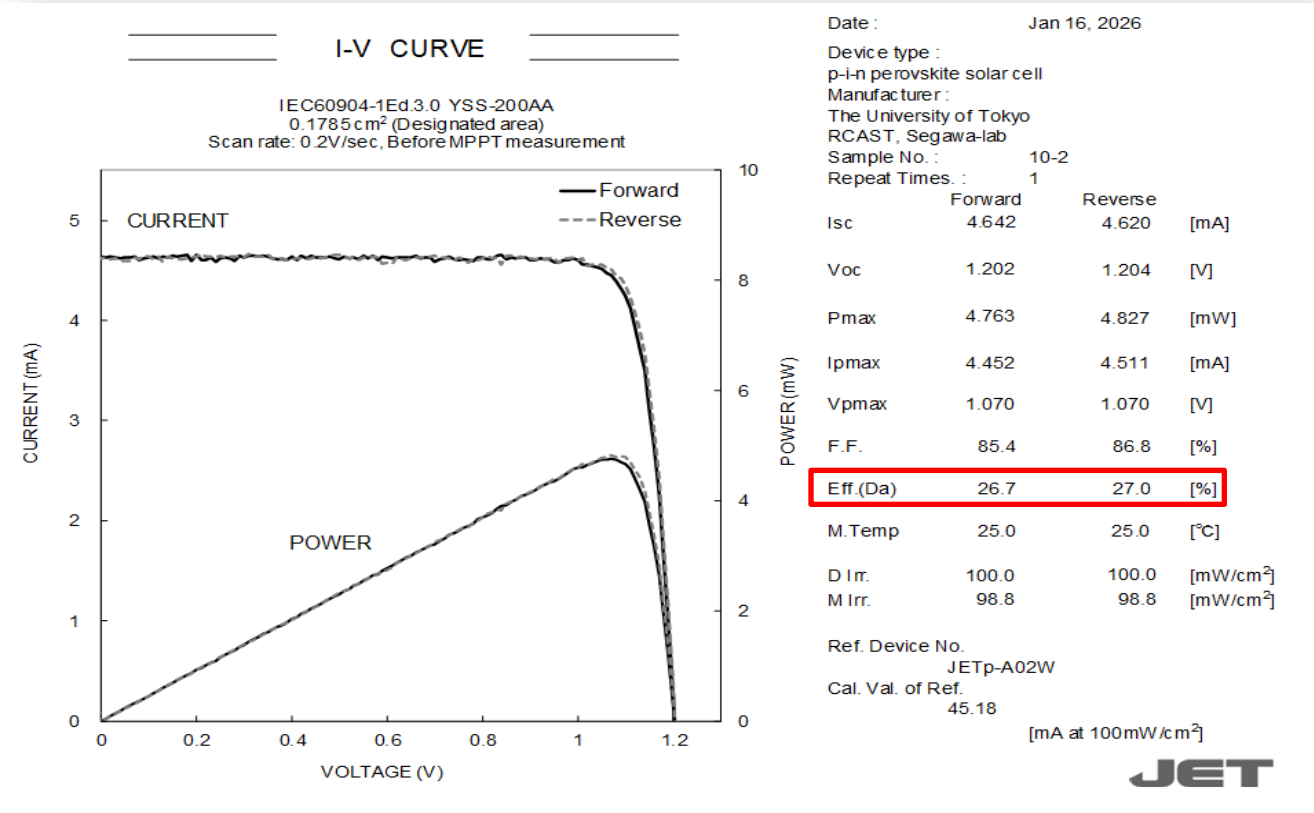
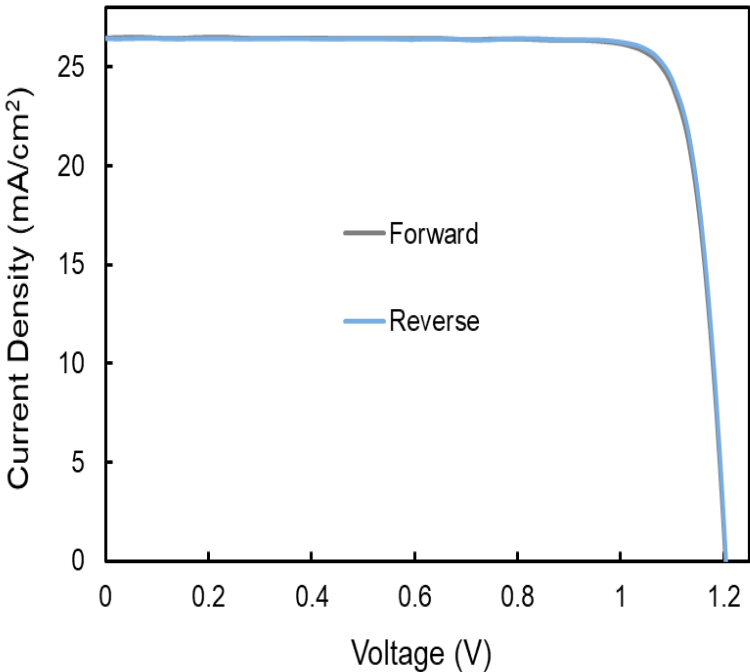
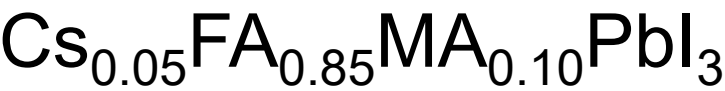
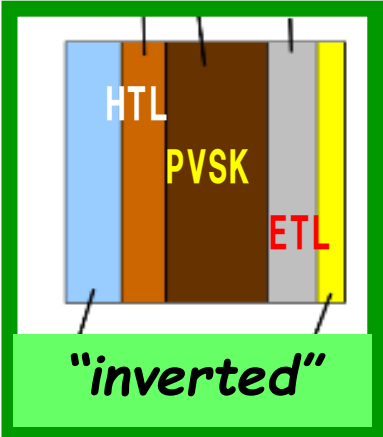
➤ FAPbI<sub>3</sub> ナノ粒子を添加したセルでは変換効率が高く、ばらつきも小さい。

➤ 耐久性 **FAPbI<sub>3</sub>**



東京大学瀬川研究室では逆構造ペロブスカイト太陽電池で27%超の変換効率達成

|         | $V_{oc}$ (V) | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF   | PCE (%) |
|---------|--------------|--------------------------------|------|---------|
| Forward | 1.202        | 26.47                          | 0.85 | 27.04   |
| Reverse | 1.203        | 26.43                          | 0.86 | 27.27   |



# ペロブスカイト太陽電池の研究開発フェーズ

## 第一世代ペロブスカイト太陽電池

変換効率～15% 耐久性10年 複数社が実用化

## 第二世代ペロブスカイト太陽電池

変換効率～20%超 耐久性20年 技術開発中

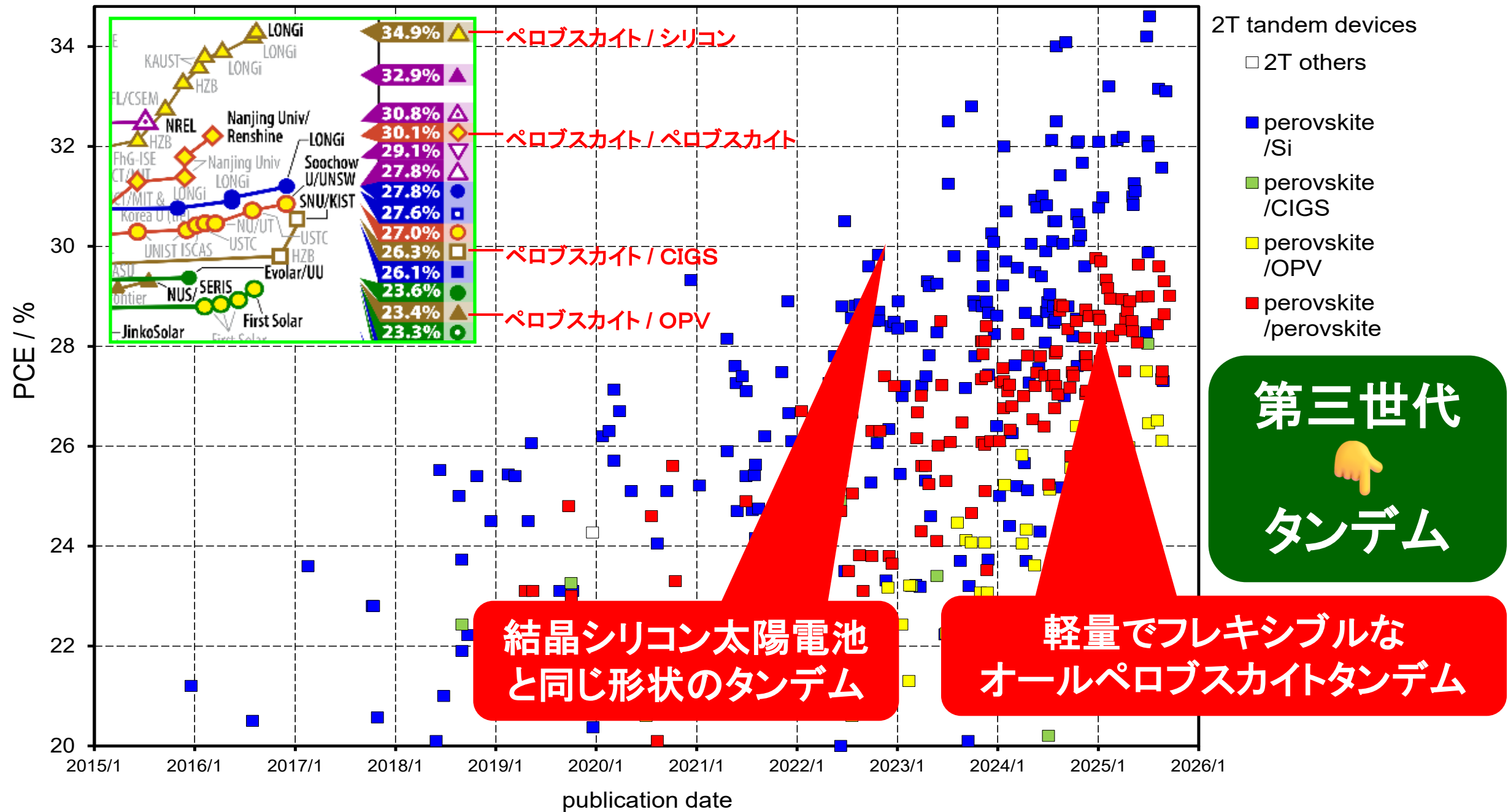
## 第三世代ペロブスカイト太陽電池

オールペロブスカイトタンデム（軽量フレキシブル）

変換効率～30% 耐久性20年超 基礎研究開発中

世界に打ち勝つには第二第三世代のペロブスカイト太陽電池が必須  
工場建設サポートだけでなく基礎研究や技術開発への支援が不可欠

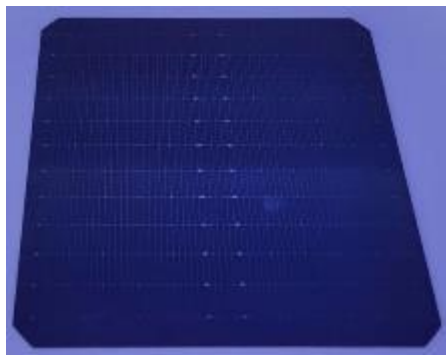
# ペロブスカイト太陽電池をトップセルに用いた各種2端子タンデム太陽電池







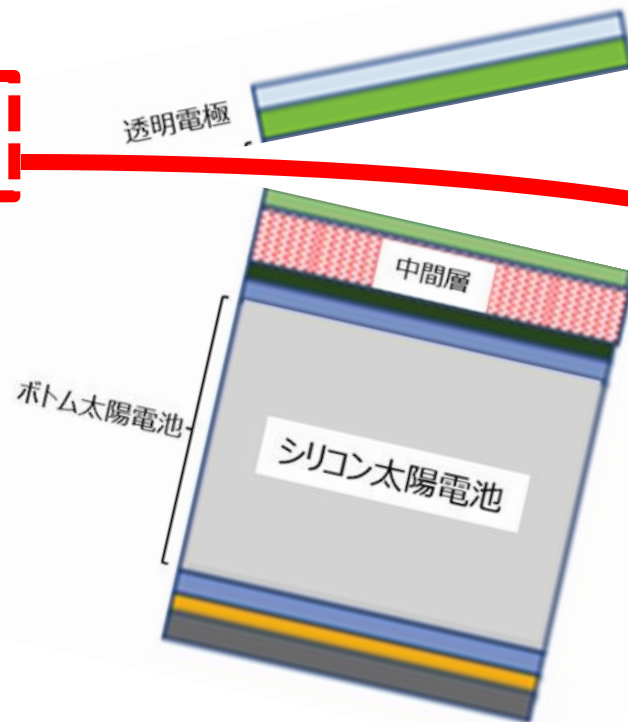
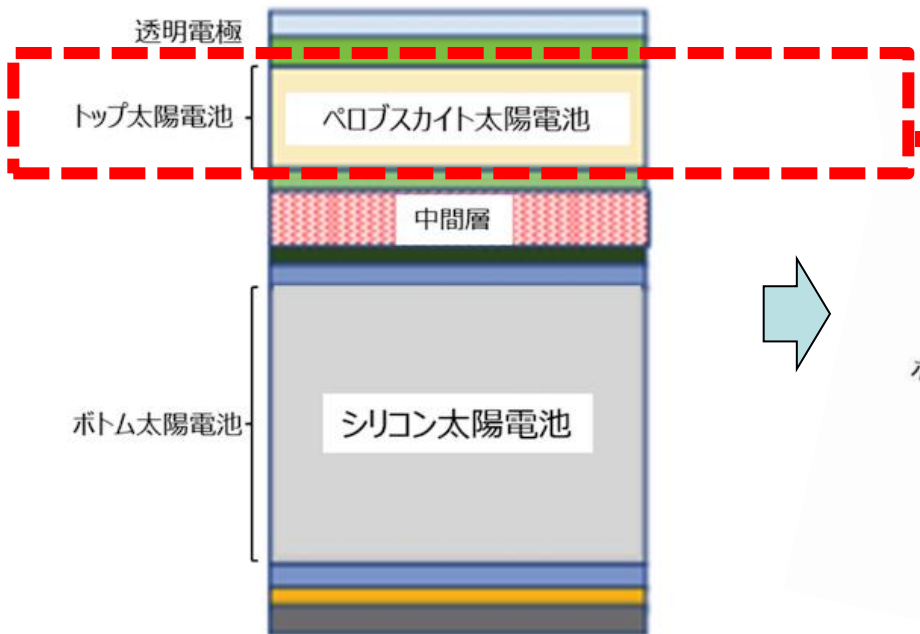
テストセル



ペロブスカイト／結晶シリコン  
タンデム太陽電池セル



ペロブスカイト／結晶シリコンタンデムモジュール  
Oxford PV



ペロブスカイトは  
剥離剤になる！

破損してしまった  
太陽電池パネル  
もリサイクル可能！

# ペロブスカイト太陽電池の出口戦略

| 用途拡大と新市場                                                                                          | 系統連携<br>vs<br>オフグリッド     | 要求項目                                  | 単セル                                     | タンデム                                                | 競合技術                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| メガソーラー向けPV<br>   | 系統連系                     | 低価格高効率<br>長寿命(耐久性、<br>耐環境性)           | 既存太陽光発電<br>のリプレイス、<br>ポストFIT・FIP        | シリコンとの<br>タンデムで<br>30%超も                            | 既存の結晶シリコンPV<br>変換効率30%以上<br>耐久性20年以上        |
| 住宅向けPV・BIPV<br>  | 系統連系<br>オフグリッド<br>調整電源機能 | 施工の容易さ<br>軽量性、曲面<br>安全性、耐火<br>低入射高効率  | 非シリコン<br>建築との親和性、<br>建築基準法適合、<br>垂直設置可能 | 既存の結晶シリコンが設置できなかった場所<br>軽量でフレキシ<br>ブルなタンデム<br>セルも可能 | 薄膜PV<br>軽量・高効率、かつ優<br>れたデザインで新市場<br>開拓      |
| 車載・移動体PV<br>    | オフグリッド<br>調整電源機能         | 強度、耐久性、耐<br>環境性、<br>安全性、高効率、<br>デザイン、 | デザイン性もある<br>側面の高効率発<br>電、高温下での高<br>効率発電 | フレキシブルな<br>高効率タンデム<br>非結晶シリコン                       | 高性能蓄電池<br>無線充電など<br>軽量レンジエクステンダ<br>追加インフラ不要 |
| IoT向け超小型PV<br> | オフグリッド                   | ICチップサイズ<br>(超小型)<br>形状自由度の高さ         | デバイスとの親和<br>性、軽量フレキシ<br>ブル<br>使い捨て用途も   | 小さな面積でも<br>高効率発電<br>充電設備が無く<br>ても自己発電               | 振動発電・温度差発<br>電・DSC<br>利用範囲の広さ、価格、<br>性能で対抗  |

第二世代



高効率長寿命  
単セル

第三世代



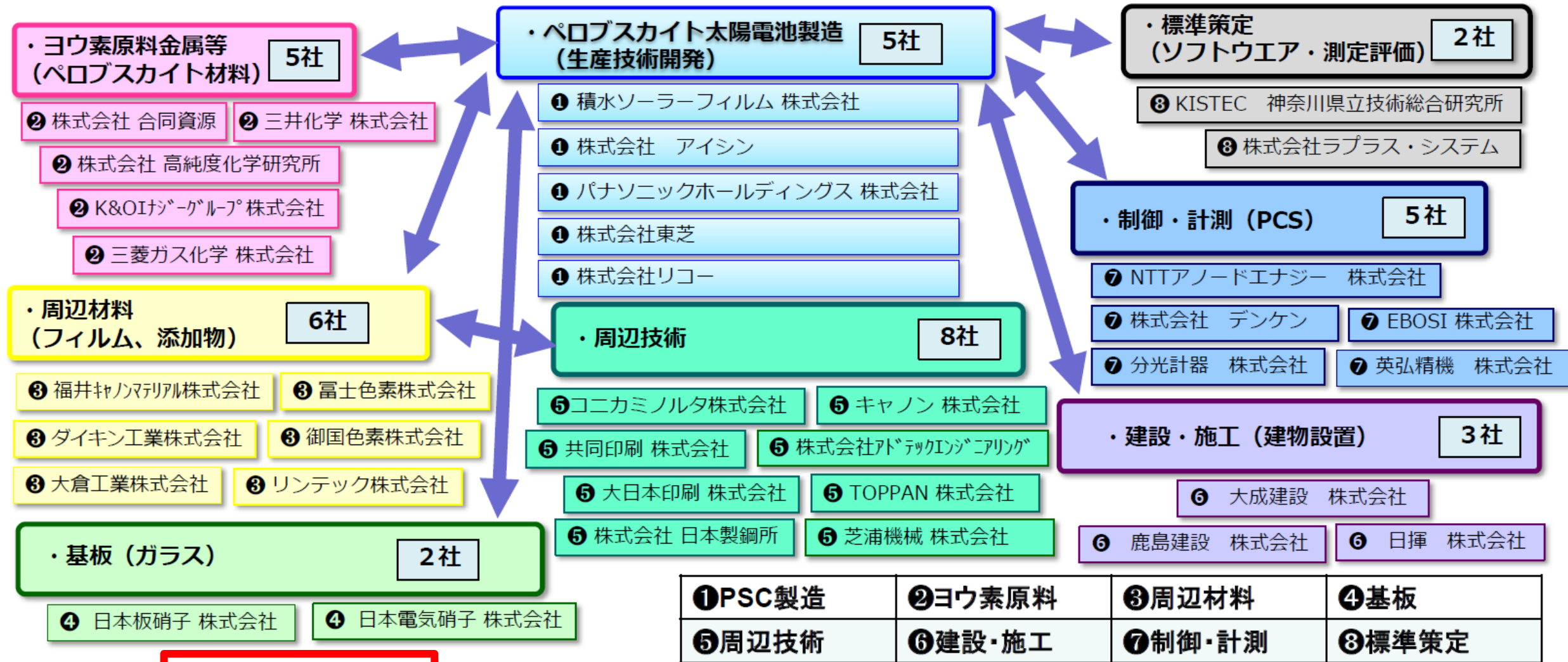
タンデム

# 有機系太陽電池技術研究組合(RATO)



理事長 瀬川 浩 司(東京大学先端科学技術研究センターシニアリサーチフェロー)

2012年2月22日経済産業大臣認可設立 2026年6月現在36の企業・団体が参画





# 一般社団法人 日本ペロブスカイト太陽電池普及促進協議会

Japan association for the promotion of Perovskite Solar Cells (JPSC)

## 【活動内容・運営体制・連携機関(予定)】

### 連携機関 (予定)



運営体制

JPSC

理事会

運営委員会

技術委員会

製品登録

製品認証試験等規格策定

製品試験・認証



情報提供・助言

官公庁  
(地方公共団体)

提言

政府機関  
(経産省、環境省、農水省、国交省等)

情報提供

施工事業者

PPA事業者

保険事業者

金融機関

### 主な活動内容

- 普及拡大に向けた政策提言
- ペロブスカイト太陽電池の普及促進に必要な調査
- 施工、PPA、保険、金融、官公庁等への情報公開
- 製品規格の登録に関する業務
- 品質性能や製品安全についてのガイドライン策定
- 国内および国際標準化に向けた活動の推進
- 製造から廃棄まで含めたサプライチェーン構築
- 製造技術や設置・施工の人材育成、利用技術啓蒙
- 海外への事業展開の促進
- その他、普及促進に必要となる活動

真珠の成分の95%は炭酸カルシウムで約5%がコンキオリンというタンパク質



| 管理レベル  | 期待寿命   | 維持される品質   |
|--------|--------|-----------|
| 専門的管理  | 30年以上  | 購入時の90%以上 |
| 適切な管理  | 20-30年 | 購入時の80%以上 |
| 一般的管理  | 15-20年 | 購入時の70%以上 |
| 不適切な管理 | 5-10年  | 購入時の50%以下 |

正しい管理によって70年から100年もつ場合もある

謝辞：東京大学 内田聡特任教授、中崎城太郎特任教授、近藤高志教授、  
別所毅隆特任講師（現：積水化学工業株）、栗井文康助教（現EBOSI株）、  
唐澤国特任助教、多田圭志研究員、古江美和子研究員、ほか  
電気通信大学 早瀬修二特任教授、Gaurav Kapil博士、ほか  
東京都市大学 石川亮佑准教授、小長井誠特別教授、ほか  
出光興産株：中村元志氏、馬淵隆氏、加藤拓也氏、ほか  
積水化学工業株の皆様、株東芝の皆様、アイシン株の皆様、京セラ株の皆様  
有機系太陽電池技術研究組合（RATO）都鳥顕司氏、瓦家正英氏、馬飼野信一氏



**NEDO**

超軽量ペロブスカイト系太陽電池

電気通信大学、東京都市大学

**NEDO**

グリーンイノベーション基金事業

積水化学工業株連携

株東芝連携

アイシン株連携

社会連携講座（東京大学）

京セラ株



ご清聴ありがとうございました