

ペロブスカイト太陽光発電の開発の現状と可能性

桐蔭横浜大学医用工学部 教授

池上 和志

ikegami@toin.ac.jp

高効率・低コスト・軽量薄膜ペロブスカイト太陽電池の高耐久化開発

ペロブスカイト太陽電池とは？

桐蔭横浜大学で発明の
次世代型太陽電池

低コスト
簡易な製造方法、安価な材料

高効率(25%以上)

低照度でも高い効率

フレキシブル化

課題

温度・湿度・光耐久性

高耐久化 高効率化 モジュール化 高耐放射線化

高効率と高耐久性を有する
ペロブスカイト太陽電池モジュールの開発

IoT電源として事業化

宇宙用途への展開

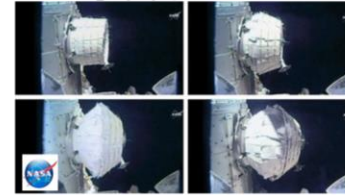
Internet of Things

ウェアラブル機器

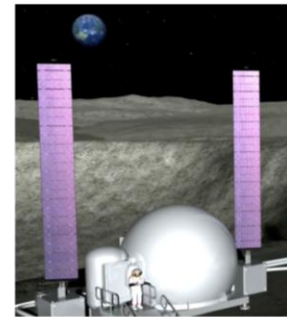
モニタ機器



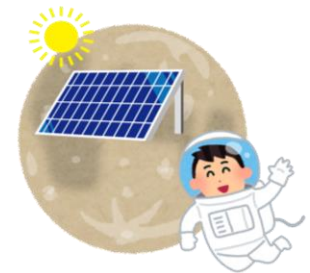
宇宙ホテル



月面利用



宇宙用太陽電池



2030年度における電源構成の目標

	分類	2019年時点	2030年 (目標)	2030年 (令和3年発表)
非化石	再生可能エネルギー	18%	22~24%	36~38%
	水素・アンモニア	0%	0%	1%
	原子力	6%	20~22%	20~22%
化石	LNG	37%	27%	20%
	石炭	32%	26%	19%
	石油など	7%	3%	2%

※「エネルギー基本計画(素案)の概要」(経済産業省)より作成

2030年度目標における再生可能エネルギー(36~38%)の内訳

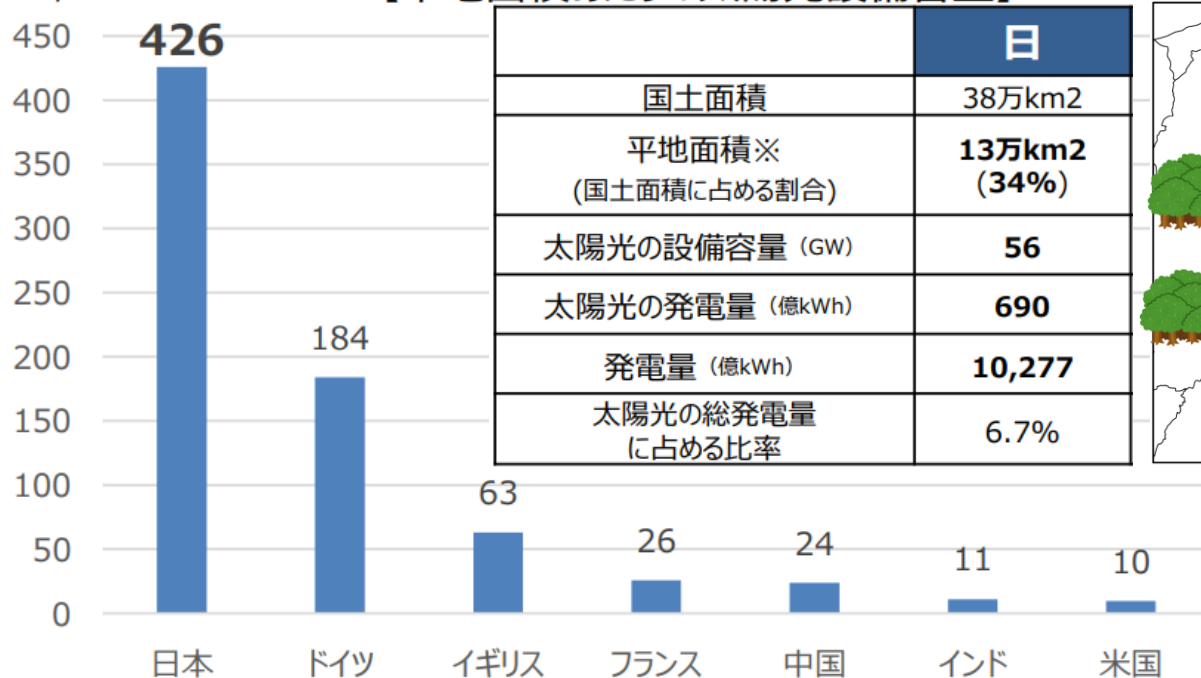
分類	電源構成の比率(2030年度の目標)
太陽光	約15%
風力	約6%
地熱	約1%
水力	約10%
バイオマス	約5%

※「エネルギー基本計画(素案)の概要」(経済産業省)より作成。

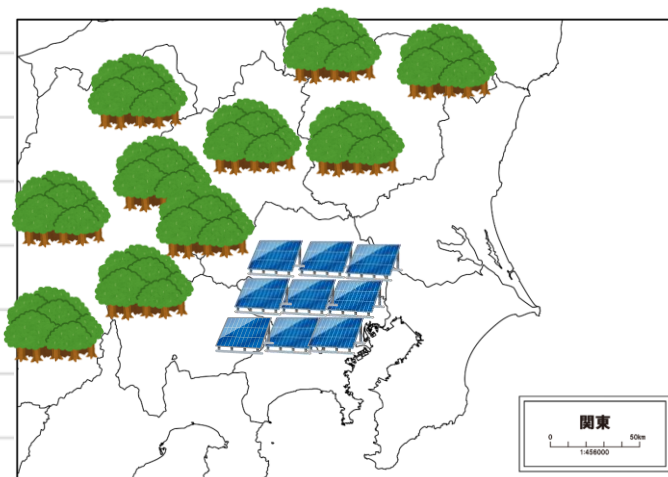
平地のみに限ると、高密度で設置されている

(kW/km²)

【平地面積あたりの太陽光設備容量】



	日
国土面積	38万km ²
平地面積※ (国土面積に占める割合)	13万km² (34%)
太陽光の設備容量 (GW)	56
太陽光の発電量 (億kWh)	690
発電量 (億kWh)	10,277
太陽光の総発電量 に占める比率	6.7%



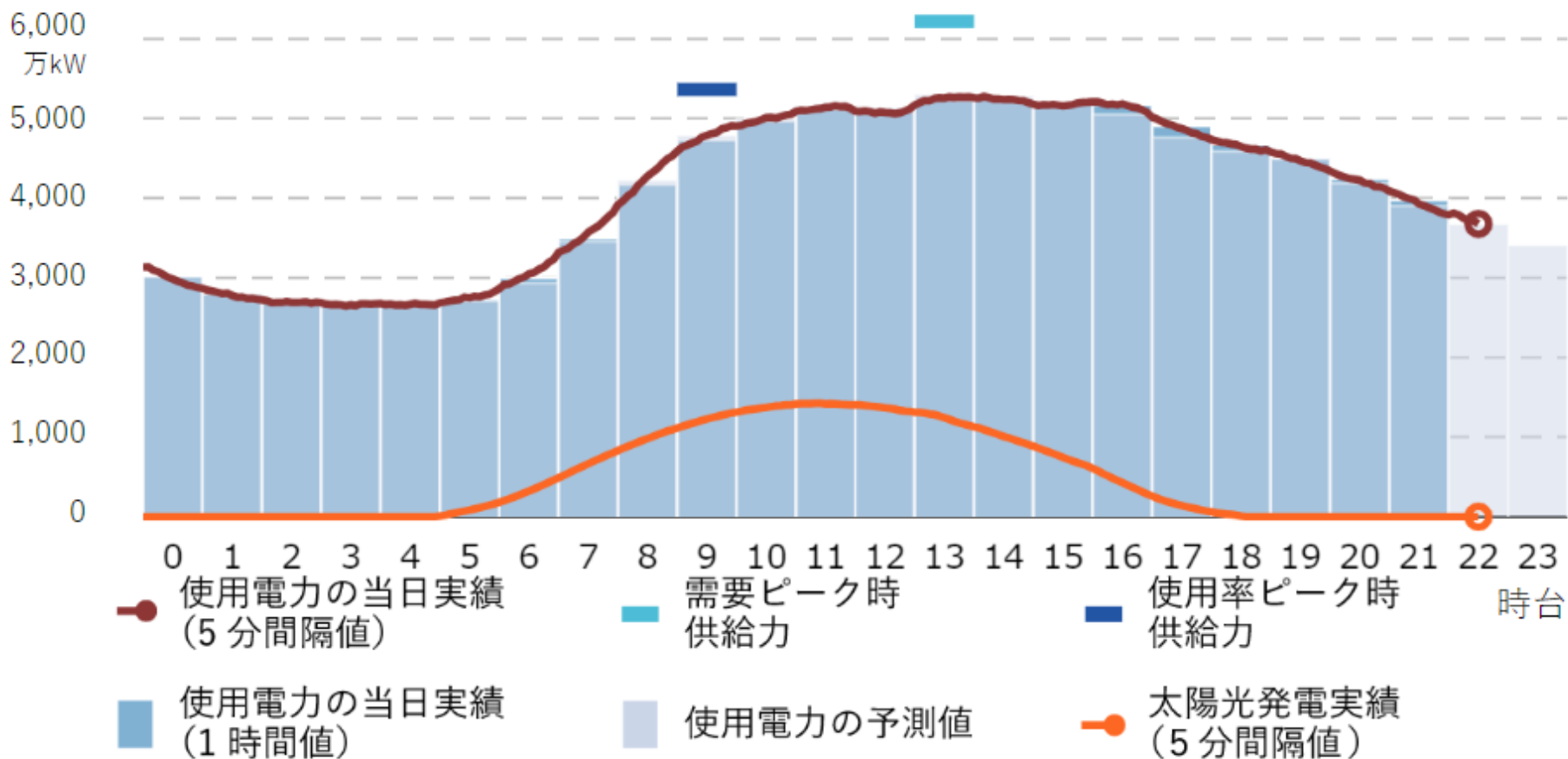
(出典) 外務省HP (<https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/index.html>)、
Global Forest Resources Assessment 2020
(<http://www.fao.org/3/ca9825en/CA9825EN.pdf>)
IEA Market Report Series - Renewables 2019 (各国2018年度時点の発電量)、
総合エネルギー統計(2019年度速報値)、FIT認定量等より作成

東京エリア 使用率 (東京電力パワーグリッド でんき予報より)

7/11 (TUE)

22:35更新・速報

[前日実績はこちら ▶](#)



- 高効率太陽電池の開発
- 曇り、雨天といった低照度環境で発電効率の高い太陽電池の開発
- これまでの未利用の場所へ設置できる太陽電池の開発

-
- 代表的な電気自動車 のバッテリー容量

40 kWh



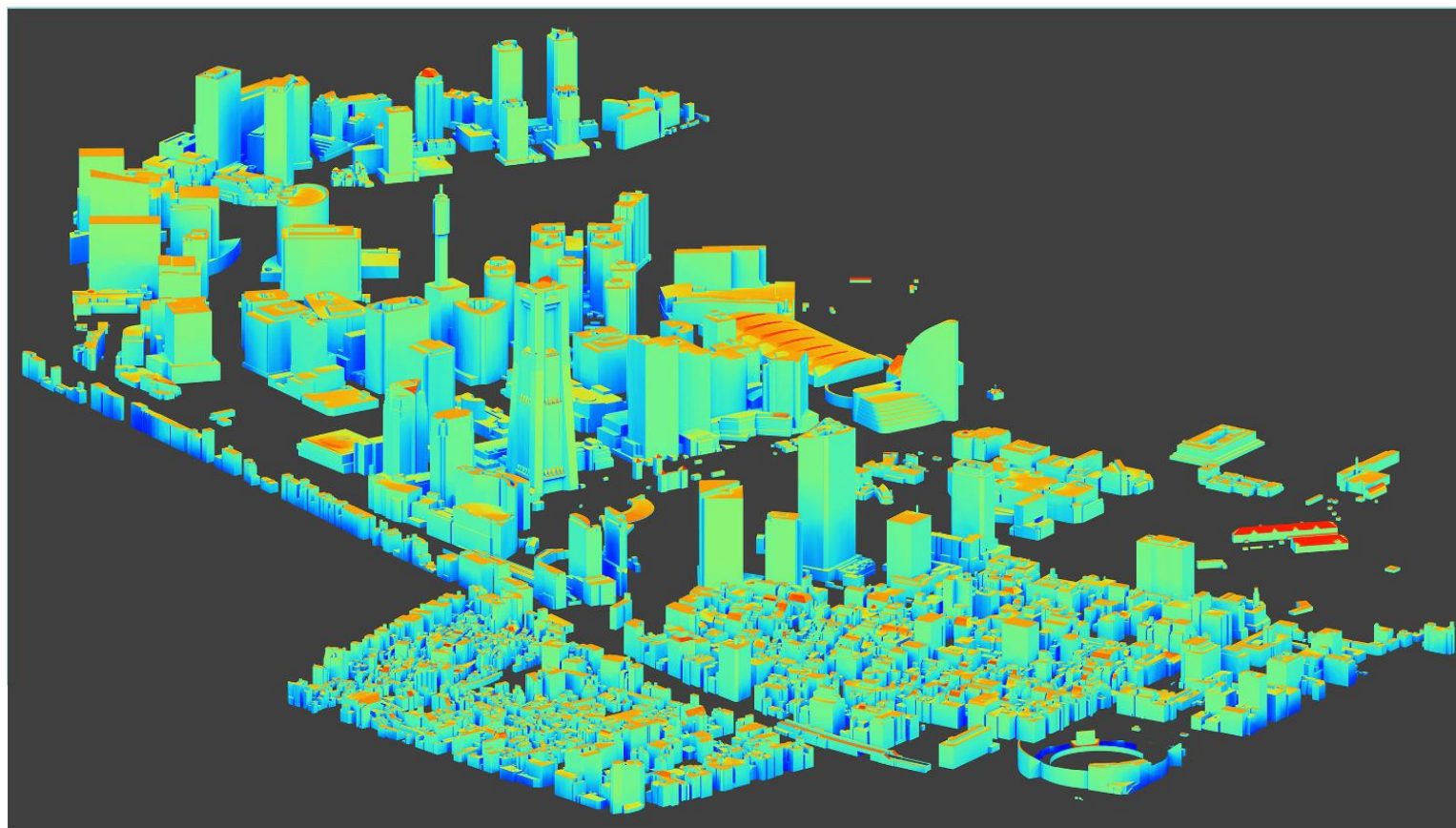
- 一般的な4人家族の1日の電力消費量
約10 kWh



壁面発電ポテンシャル推計

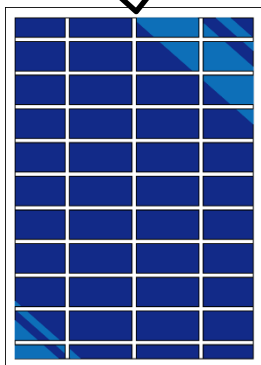
実施事業者
実施場所
実施期間

東急不動産株式会社 / 国際航業株式会社
神奈川県横浜市
2022年4月～2023年3月



100kWのソーラーパネル

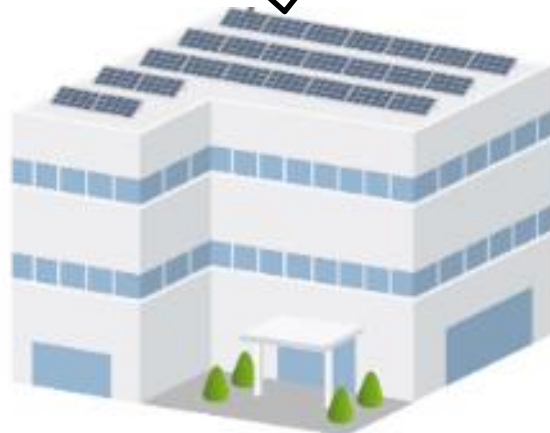
太陽電池一枚の出力
0.4kW



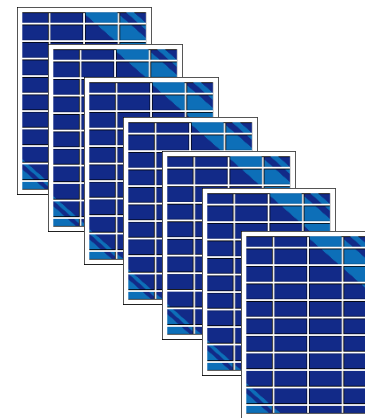
1700mm x
1100mm
= 1.9 m²



100kW

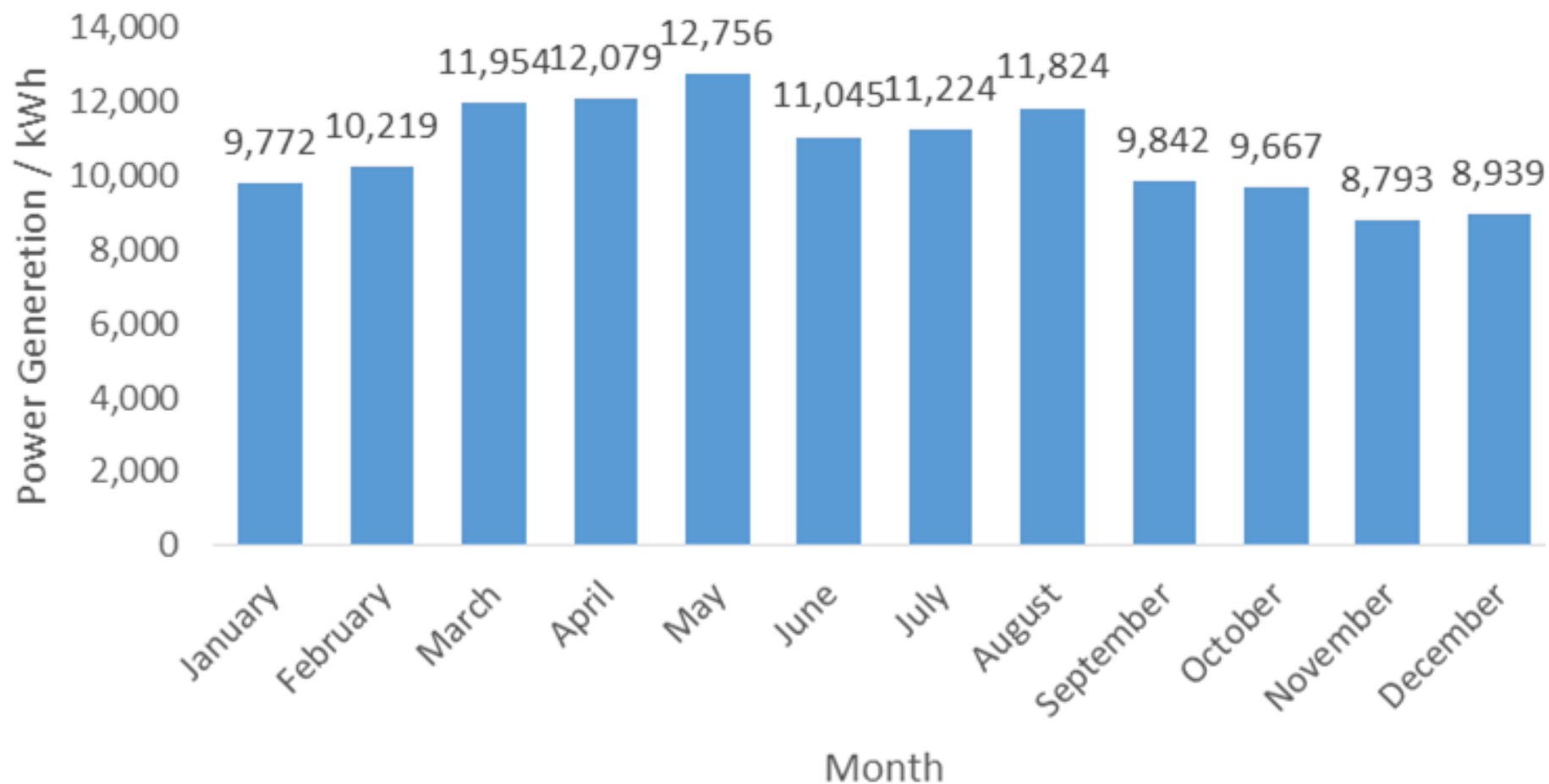


バレーコート 3面分



250枚分
475 m²

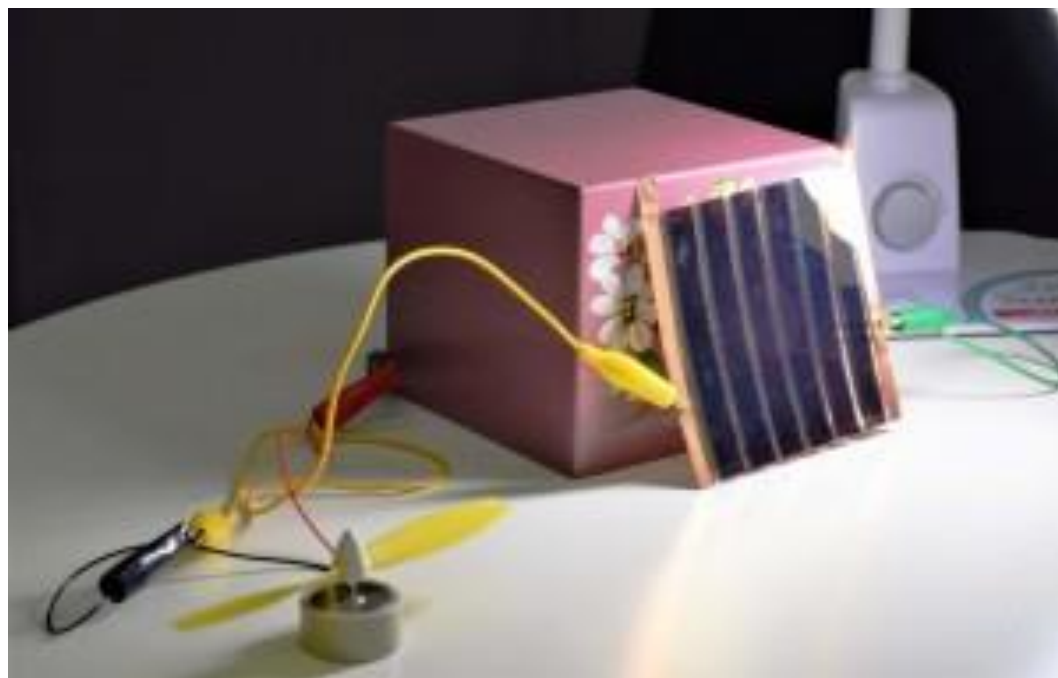
横浜市での太陽電池による発電量(100kWパネル)のシミュレーション



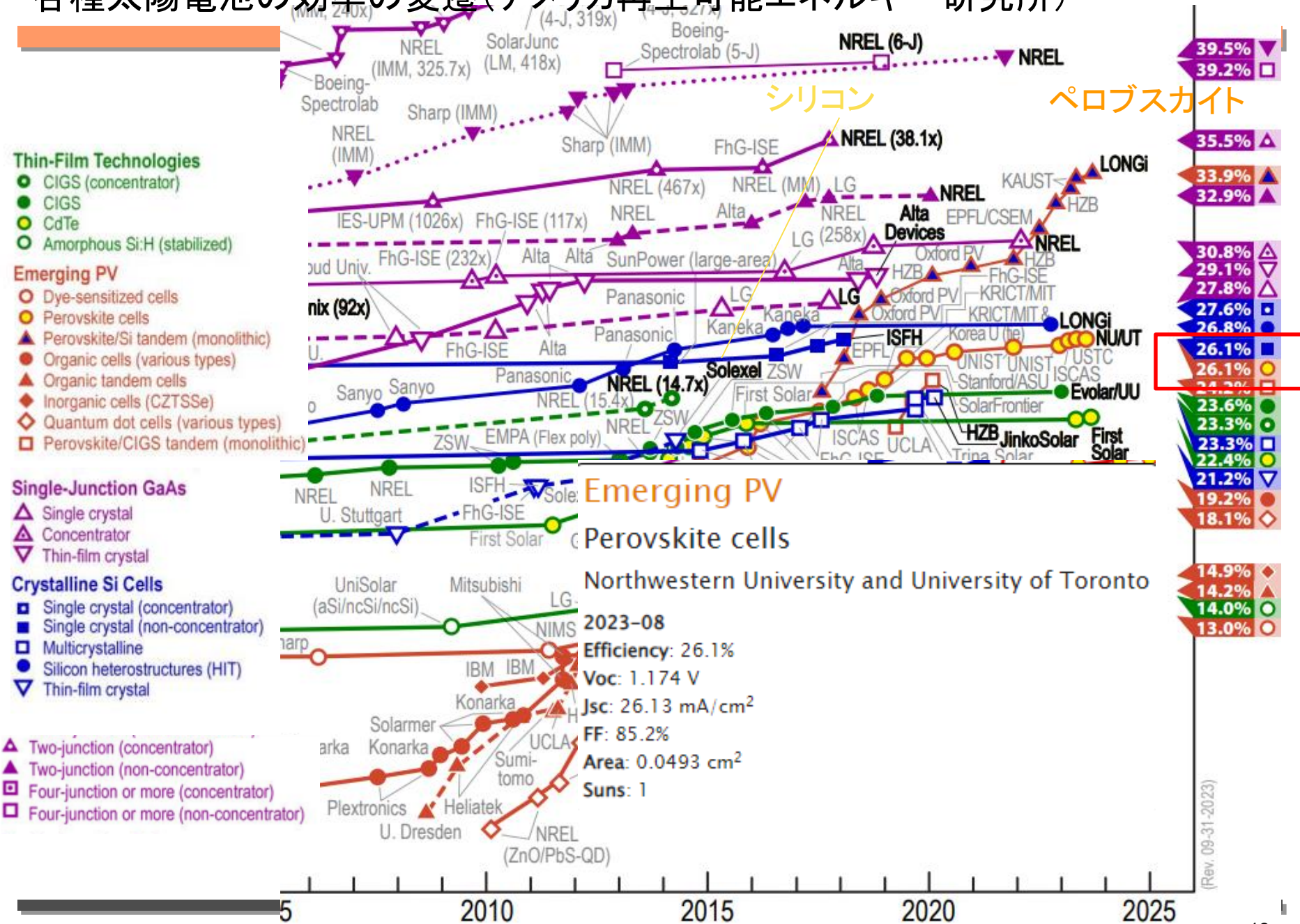
Estimated Power generation of a 100 kW solar panel in Yokohama area, according to METI solar panel simulation tool.

ペロブスカイト太陽電池、なぜ注目？

- 😊 簡易な製造プロセスで、高効率太陽電池を実現できる。
- 😊 プラスチック基板等、軽量フレキシブル基板への作製も可能
- 😊 既存のシリコン太陽電池との「タンデム化」も可能
- 😊 太陽電池の用途の拡大
→ 従来の未設置スペースへの太陽電池の設置



各種太陽電池の効率の変遷(アメリカ再生可能エネルギー研究所)



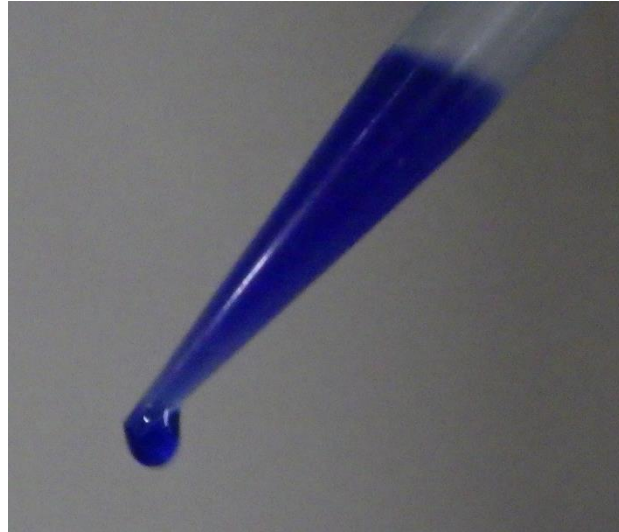
(Rev. 09-31-2023)

ペロブスカイト太陽電池の研究開発の課題

① 実験環境



② 滴下量・速度



③ 回転速度、乾燥



④ 膜厚・表面解析



⑤ 特性評価



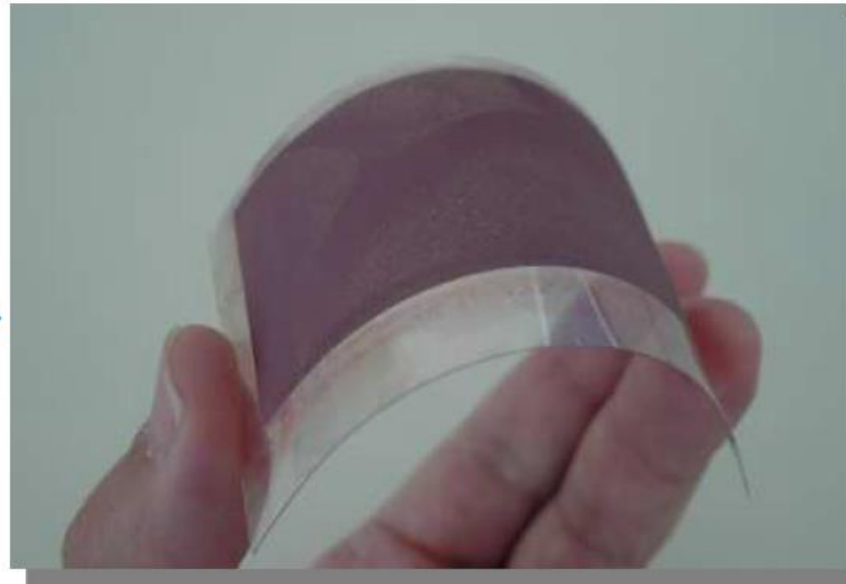
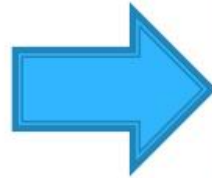
ペロブスカイト塗布の省力化・自動化
⇒塗布溶液の改良
⇒溶液供給を含めたシステム構築
⇒さらに作製した太陽電池の評価へ

- ☹ ペロブスカイト塗布工程の制御
→ 塗布、乾燥工程で、より均質な塗膜を作ることができるか。
厚み $1\mu\text{m}$
- ☹ 封止プロセスにおける耐熱性 → 既存プロセスが適用可能か
- ☹ 湿度に対する安定性

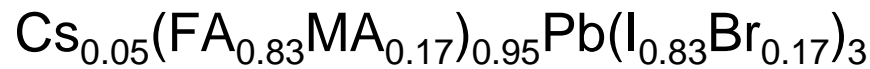
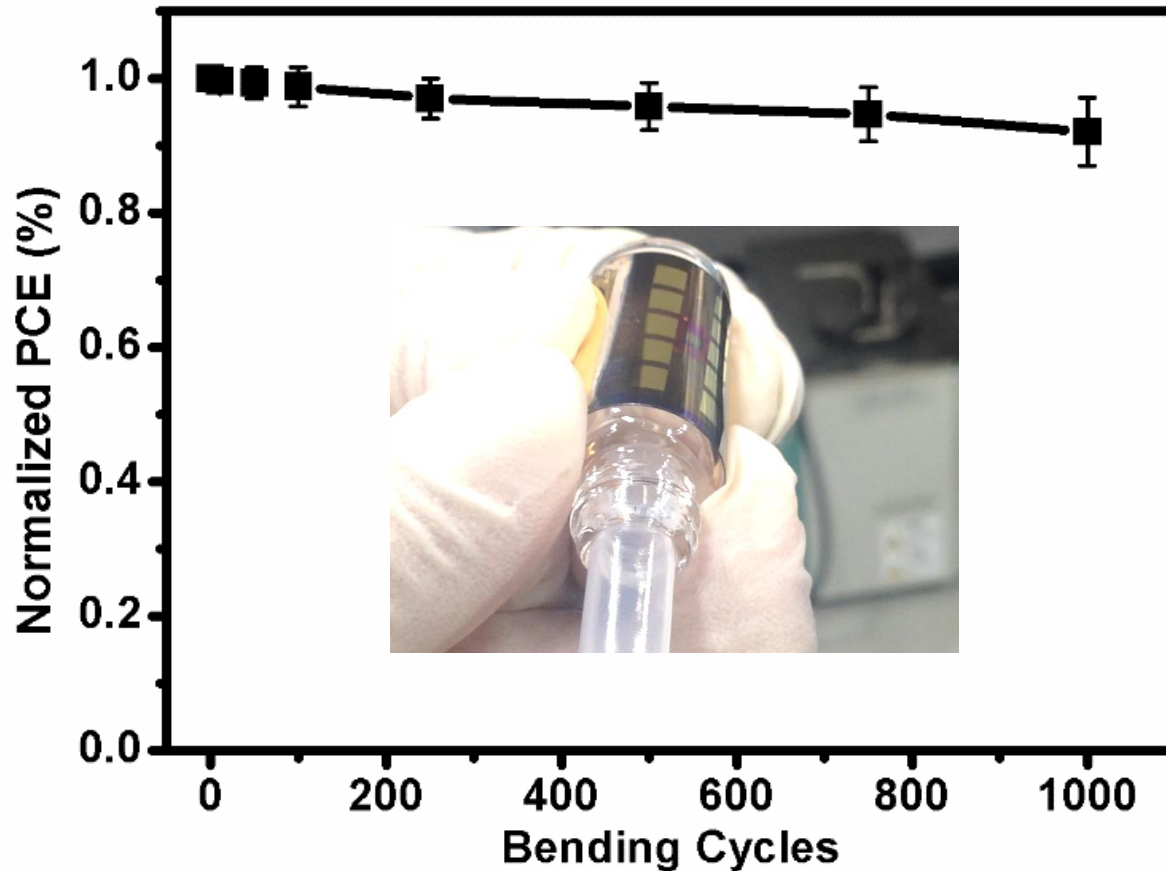
- ☹ 塗布溶液の安定性
- ☹ ペロブスカイト太陽電池の光劣化・回復の問題
- ☹ 性能評価法
- ☹ ホール輸送層

- ☹ 透明導電性基板等周辺材料

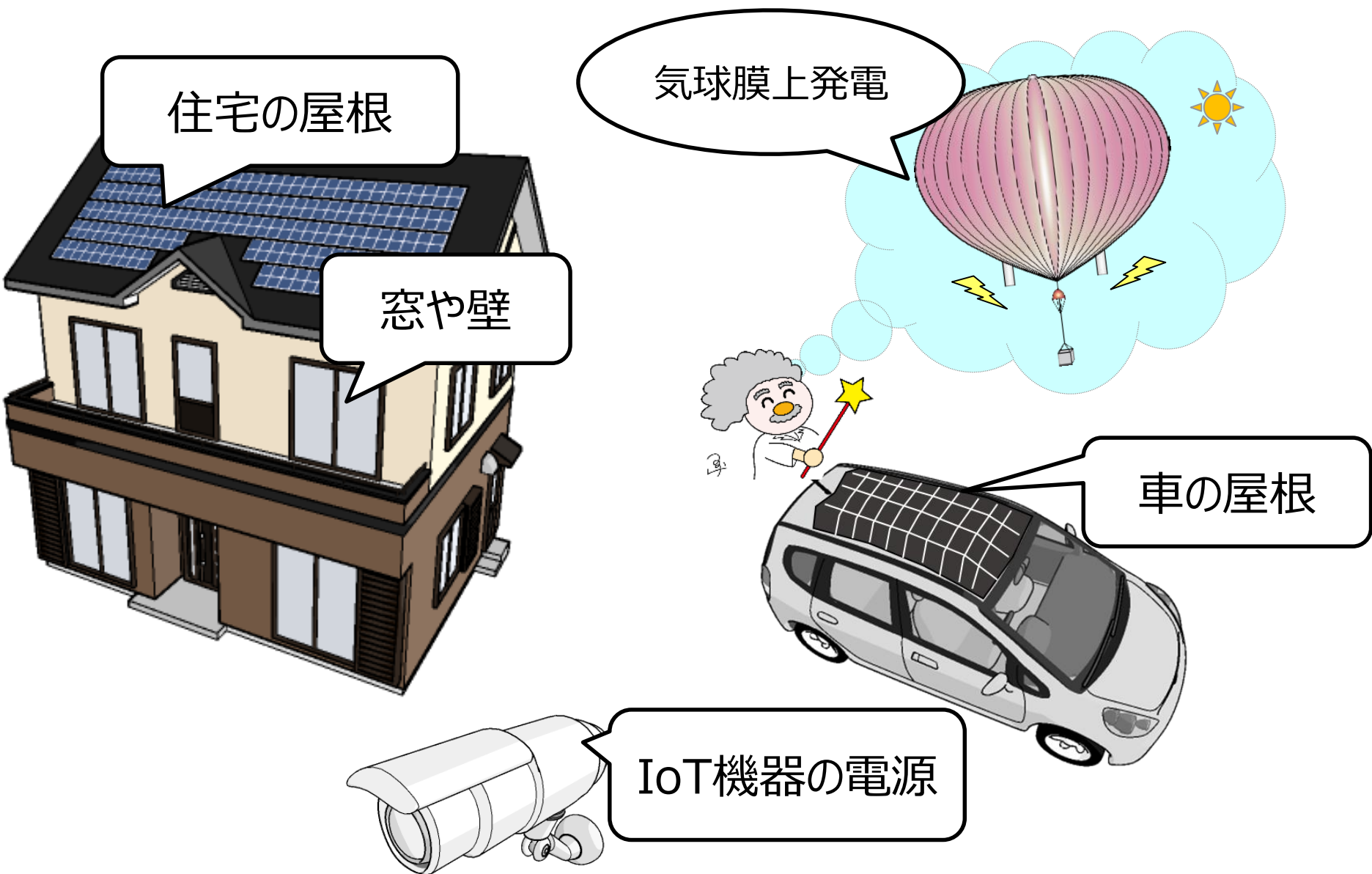
硬いガラス基板から、軽くて薄い樹脂基板へ



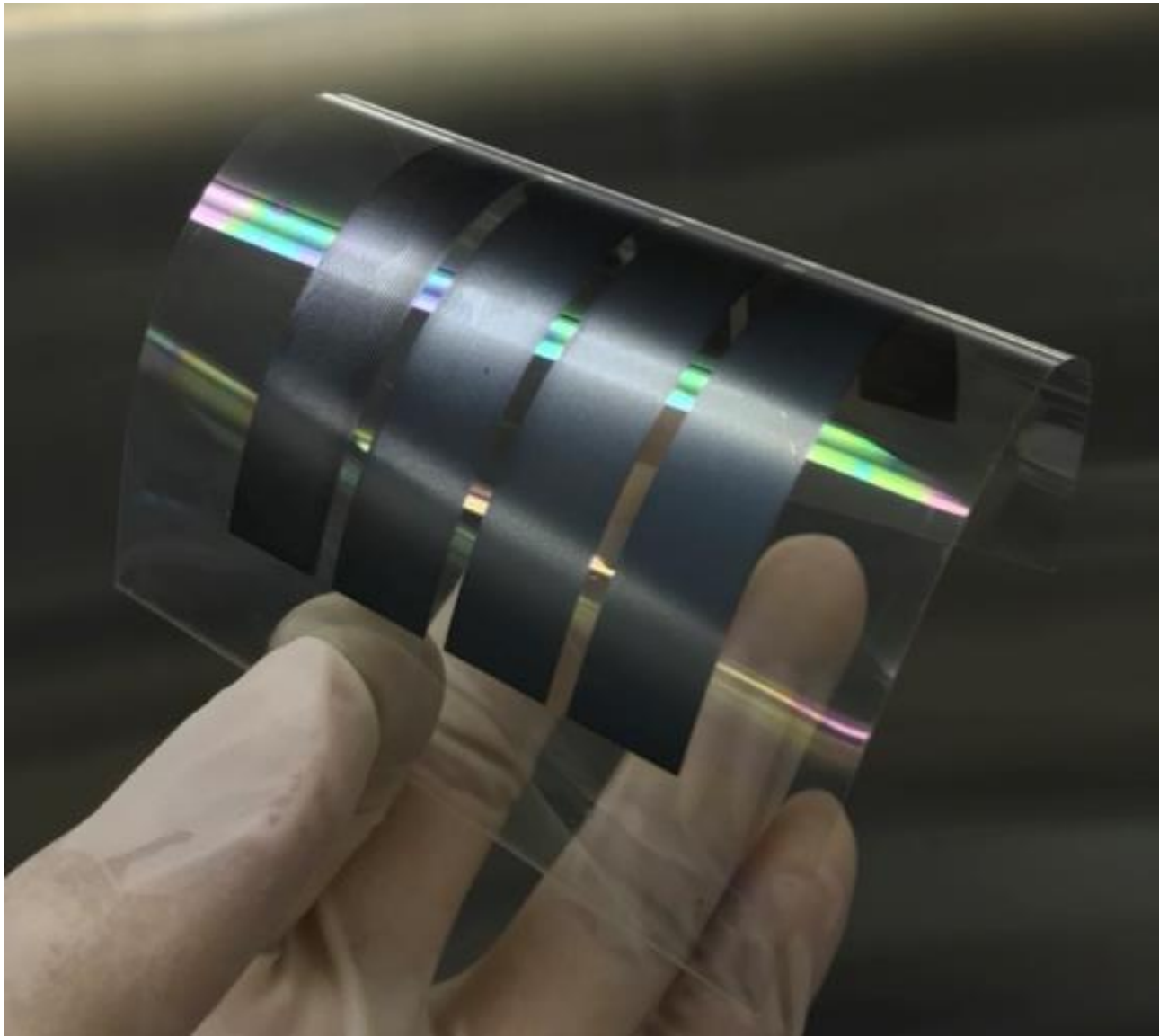
機械的な曲げ(半径5mm)に対しても高い耐久度を持つ
⇒ 設置場所を選ばない商品化



ペロブスカイト太陽電池の期待される用途



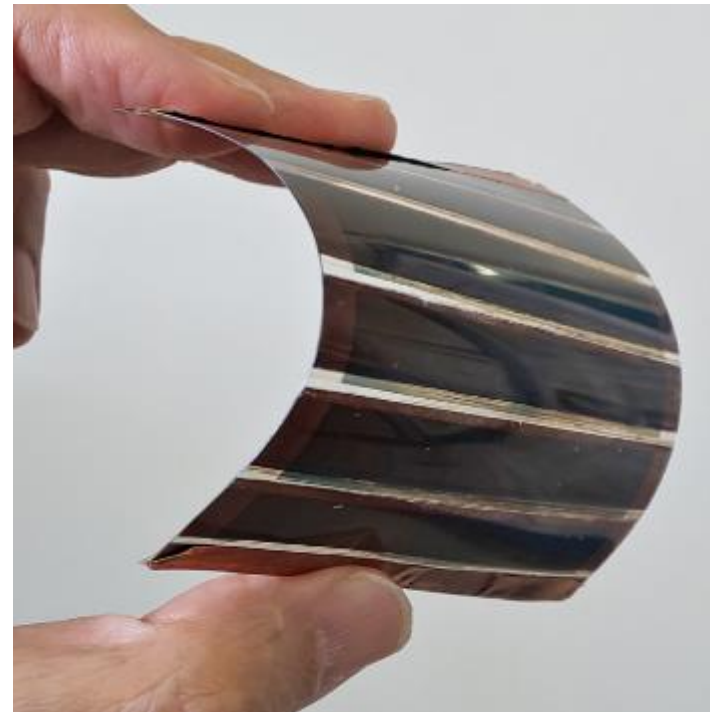
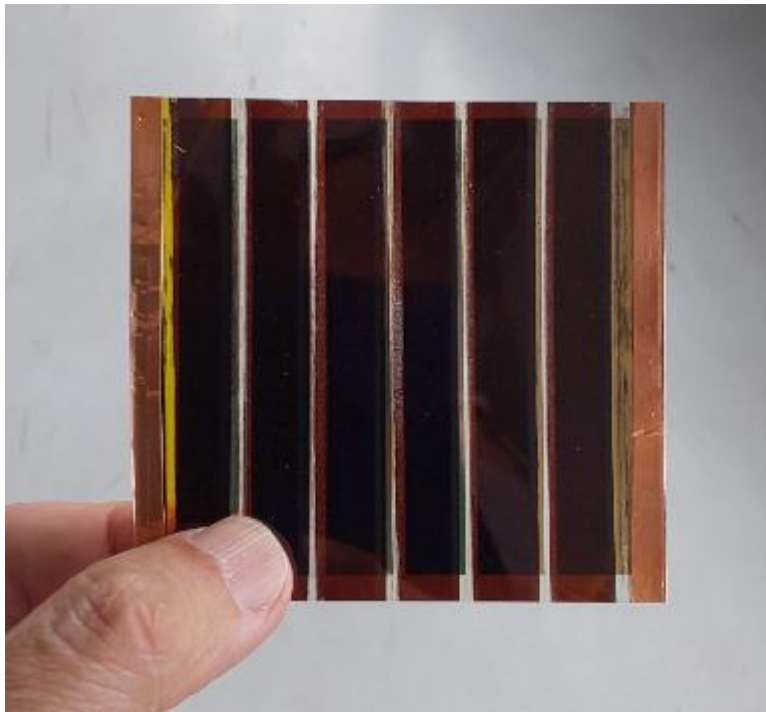
ペロブスカイト太陽電池



6セル直列ペロブスカイトフィルムモジュール、ラボ試作品

厚さ, $< 130 \mu\text{m}$

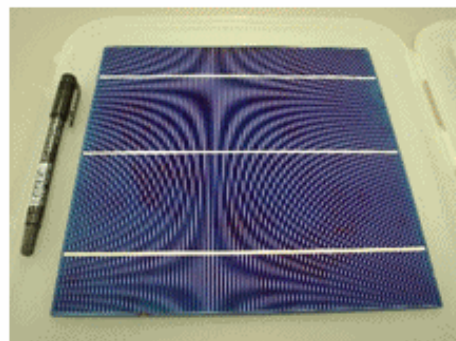
サイズ, 7x7cm; 重量 2.0g



ガスバリアフィルム封止品、製作：2021年10月6日

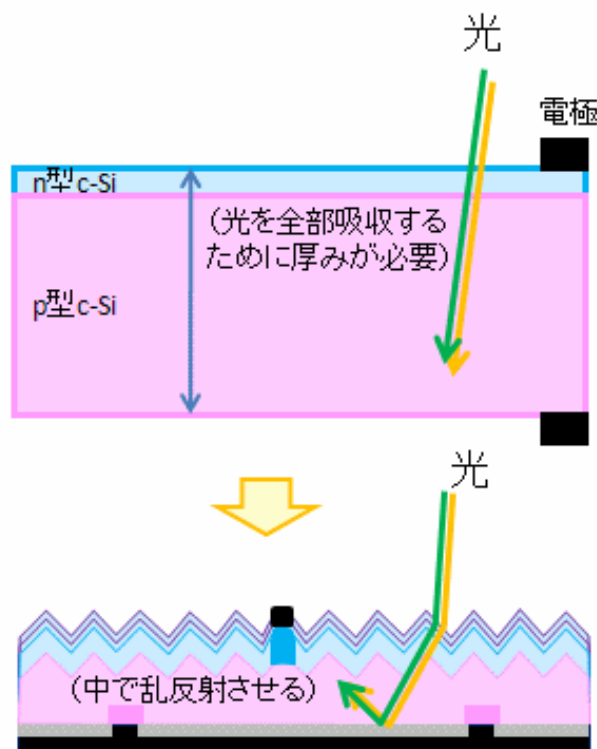
シリコン太陽電池は、厚みは $300\mu\text{m}$ (0.3mm)

ウエハの大型化
(10cm 前後 $\rightarrow 20\text{cm}$ 角以上)

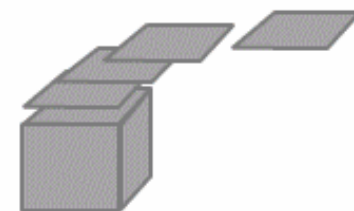


21cm角多結晶シリコン太陽電池
(提供: Q-Cells)

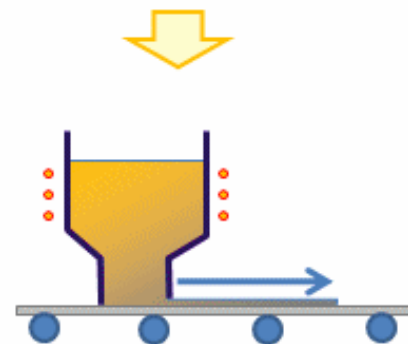
ウエハの薄型化
($300\mu\text{m}$ 以上 $\rightarrow 150\mu\text{m}$ 以下)



リボンシリコンウエハ



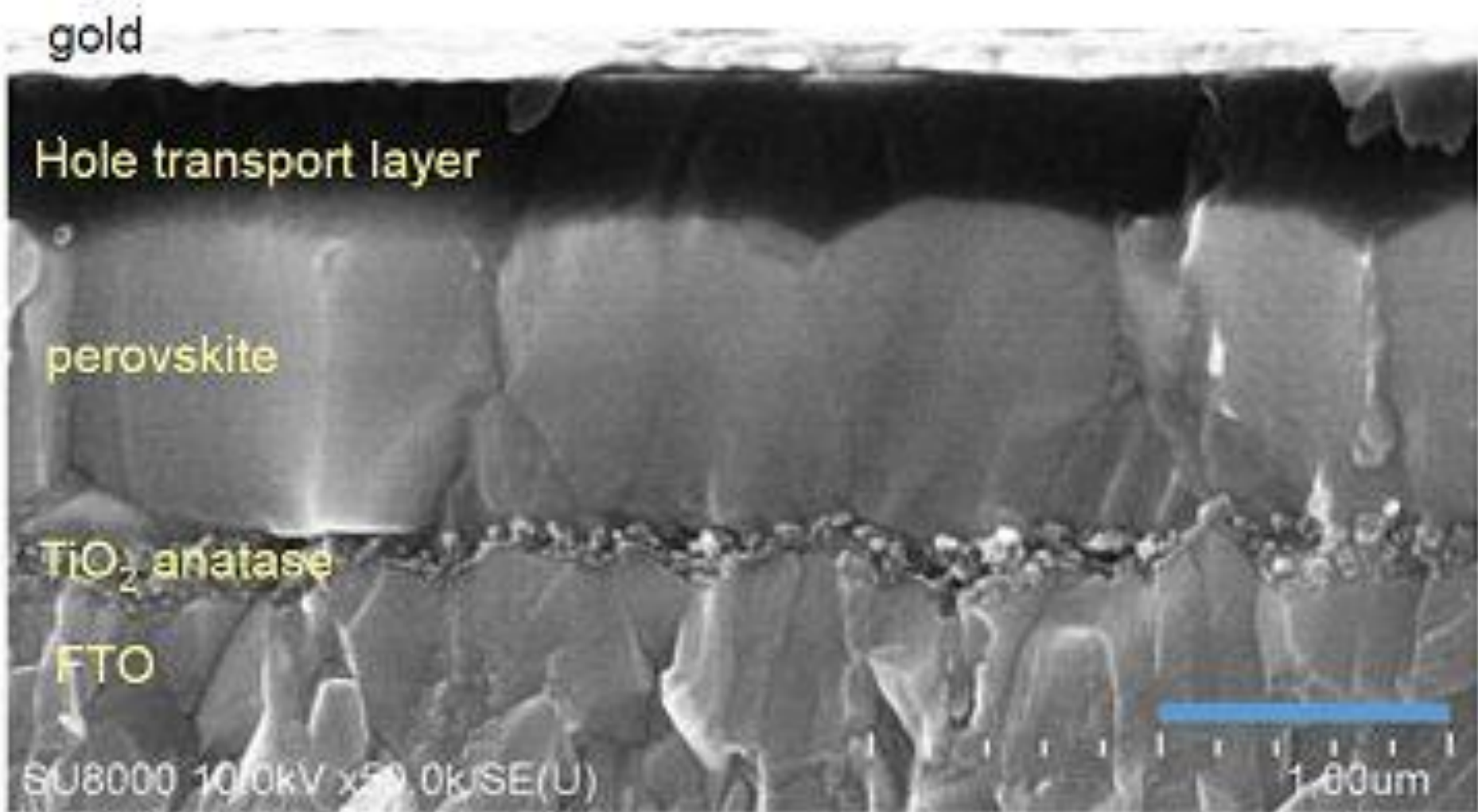
Siインゴット(塊)を
切断・研磨して
ウエハを作成
(一般的な手法)



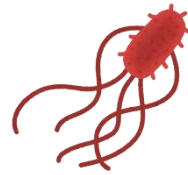
融けたシリコンを
直接シート状にする

出典:産総研 さまざまな太陽電池

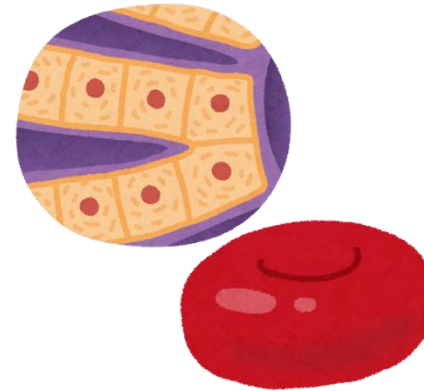
ペロブスカイト太陽電池の発電層は、 $1\mu\text{m}$ 以下



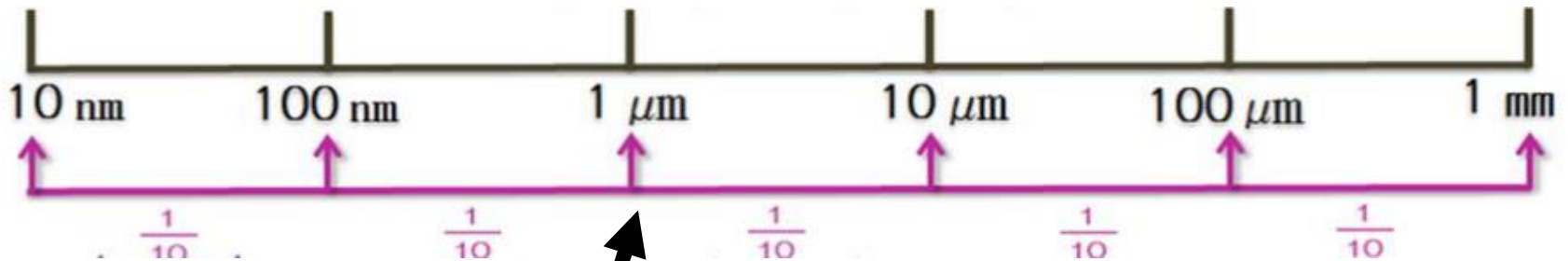
1 μ mがどれくらい薄いかな？



細菌



ヒトの細胞



ペロブスカイト
太陽電池の発電層の厚み



ペロブスカイト太陽電池の気球実験 成層圏プラットフォームでの利用可能性



大気球実験 大樹町北海道 © JAXA ISAS

2020年、2021年 桐蔭横浜大学 院生も実験
参加

宇宙用太陽電池としてのペロブスカイト太陽電池

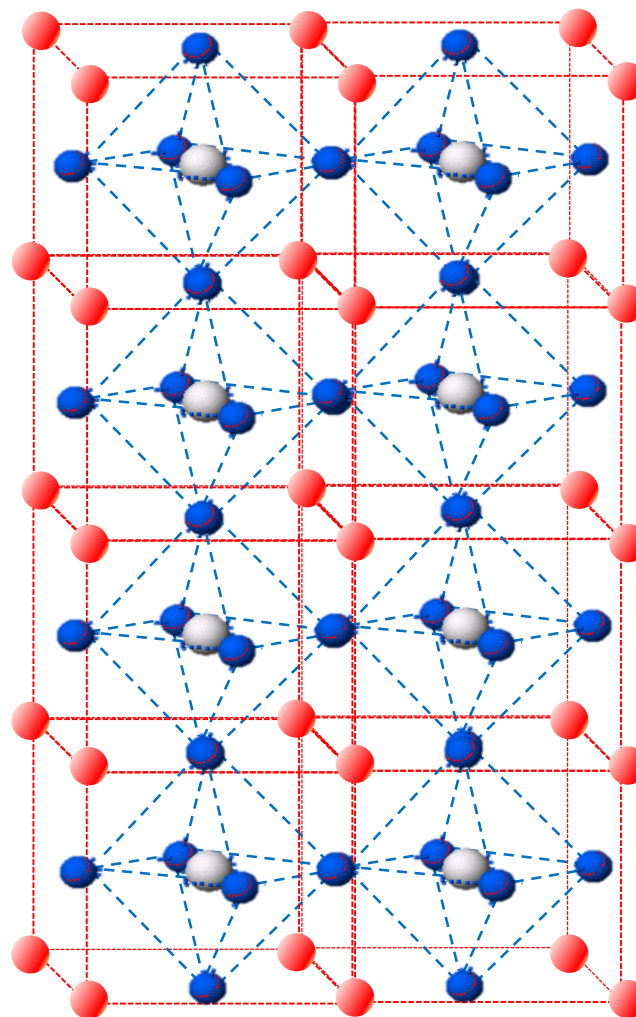
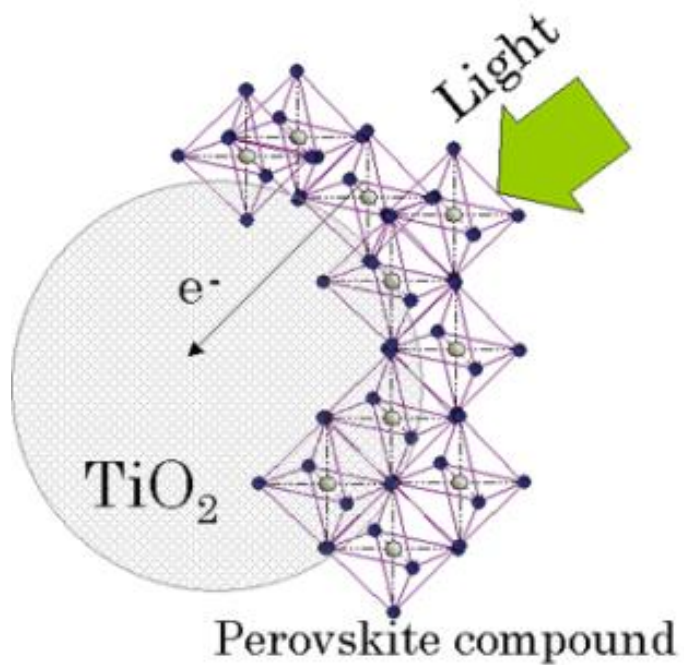
1MeV 電子線照射 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 照射	シリコン 太陽電池 Si	3 接合化合物 太陽電池 InGaP/GaAs/ Ge	ペロブスカイト 太陽電池 CH ₃ NH ₃ PbI ₃
Pmax 保存率	0.60	0.62	1.0
照射前変換効率	17.0%	28.5%	20.0% (仮定)
照射後変換効率	10.2%	17.7%	20.0%

出典 宇宙研の半導体デバイス研究
— 深宇宙探査船団を実現するために —
宇宙機応用工学研究系特任教授 廣瀬 和之

太陽電池の種類、効率、コスト

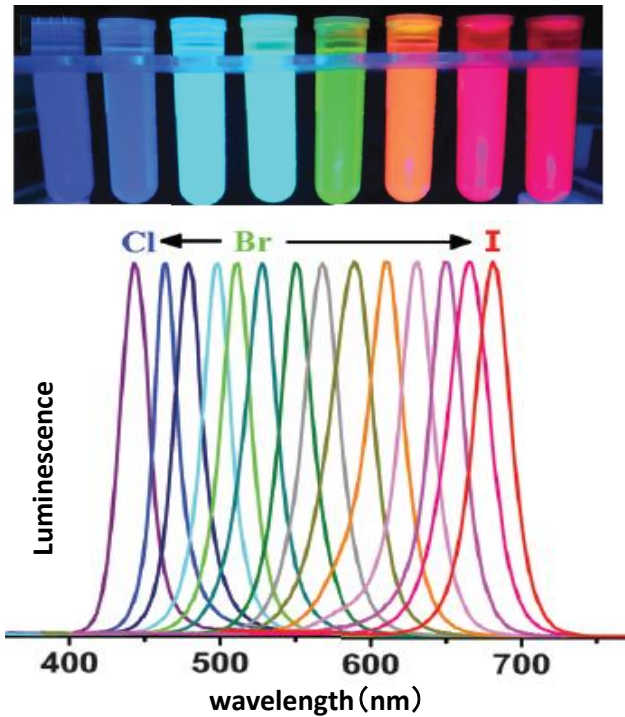
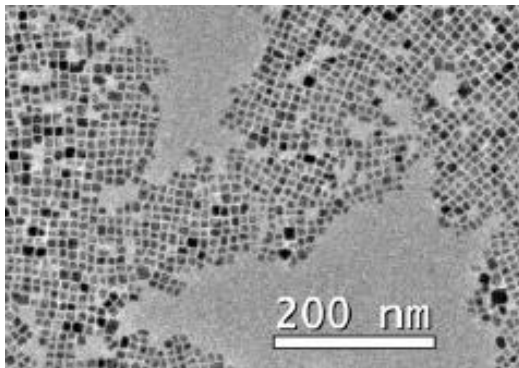
- 1. 結晶Si** セル効率**26.1%**(市販モジュール <20%)
インゴット原価 \$80/kg → \$30/kg まで価格破壊(中国)
現状のコスト <\$50/m² (工場出荷時)
- 2. 薄膜Si** セル効率**14.0%**(市販モジュール >12%)
現状のコスト: 結晶Siの数倍 → ほぼ撤退
- 3. CIGS** セル効率**23.4%**(市販モジュール 15~16%)
目標コスト: <\$100/m²
- 4. CdTe** セル効率**22.1%**(市販モジュール 18.2%)
目標コスト: <\$30/m² 太陽電池として最安値目指す(<0.6ドル/Wp)
- 5. 有機系** (有機材料を発電材料に用いるもの)
 - (1) 色素増感型(DSSC): 電解液使用、セル効率 **14%**(アデカ)
 - (2) 有機薄膜型(OPV): 全固体型、セル効率 **17%**(海外の大学)
 - (3) ペロブスカイト型: 全固体型、セル効率**26.1%**(韓国)
モジュール、**20.5%**

CH₃NH₃PbI₃ Structure





ハロゲン組成によって吸収特性が変わる



Quantum dots consisting of CsPbX_3 ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$)

2009年に最初の論文を発表(アメリカ化学会)

J|A|C|S
JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY

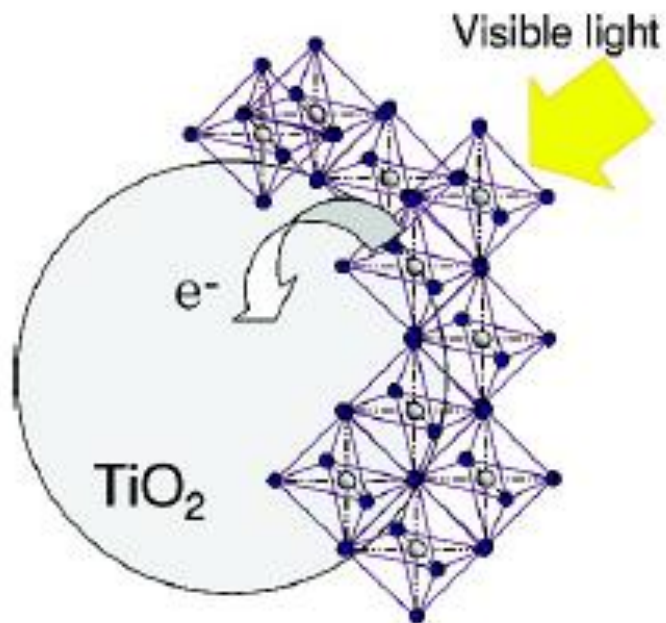
Communication

Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells

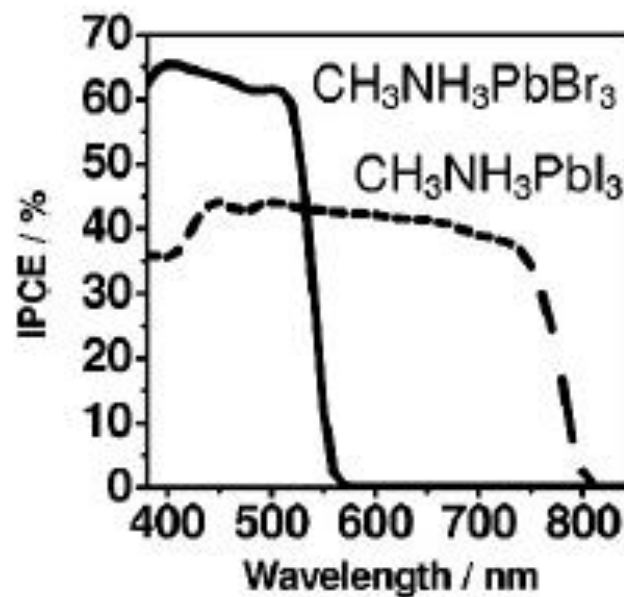
Akihiro Kojima, Kenjiro Teshima, Yasuo Shirai, and Tsutomu Miyasaka

J. Am. Chem. Soc., Article ASAP • DOI: 10.1021/ja809598r • Publication Date (Web): 14 April 2009

Downloaded from <http://pubs.acs.org> on April 14, 2009



Perovskite nanocrystalline sensitizers

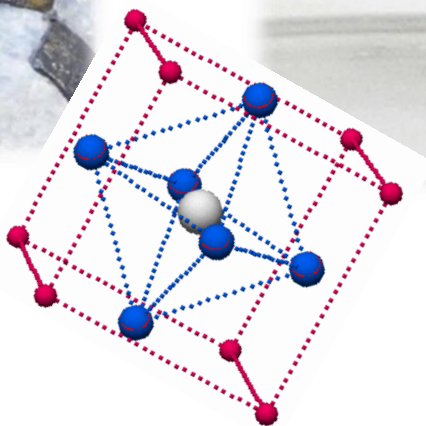


当時の効率は、3.8%

ペロブスカイト結晶の発見と、太陽電池への応用

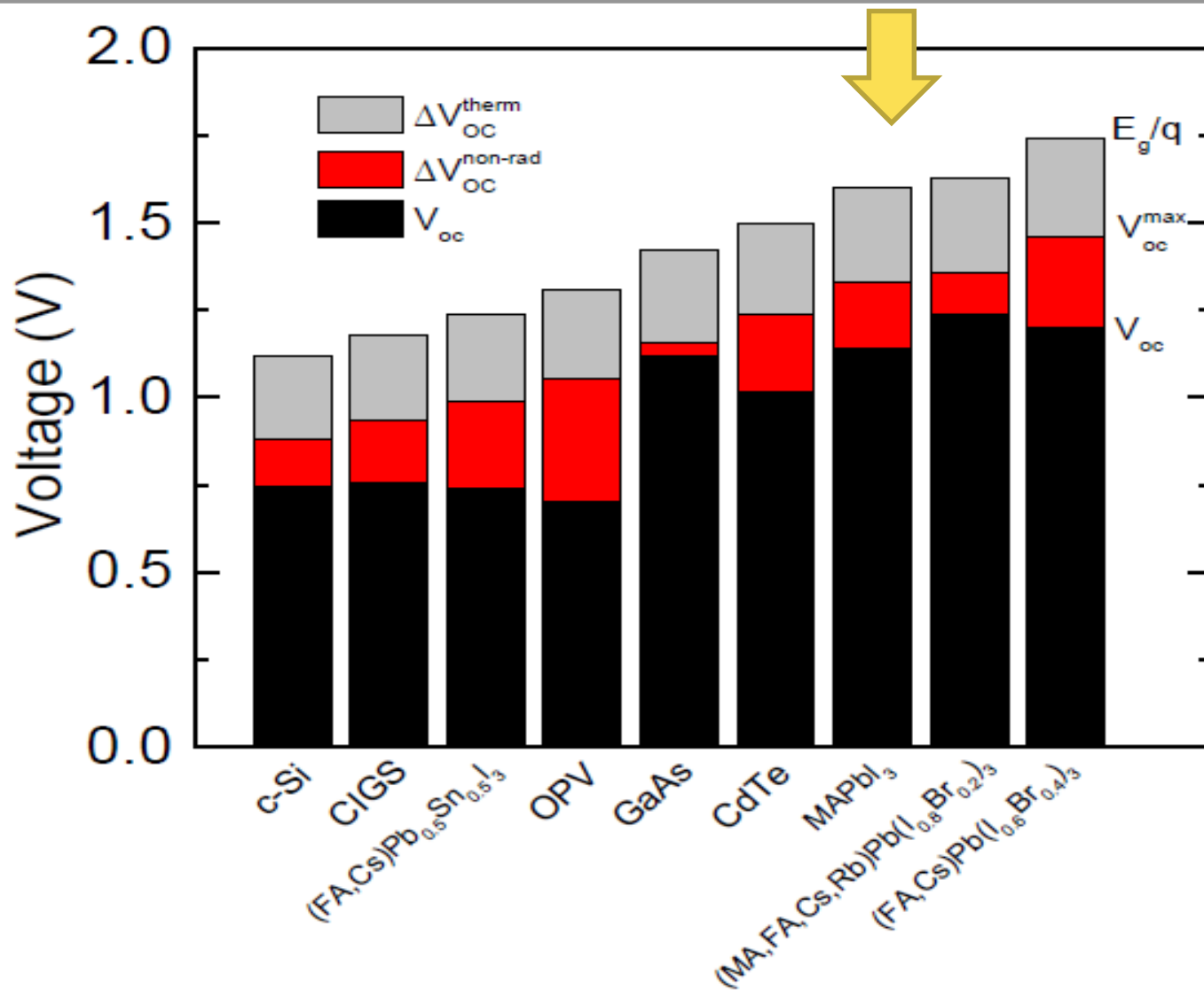


CaTiO_3
1850~



MAPbBr_3
1978~

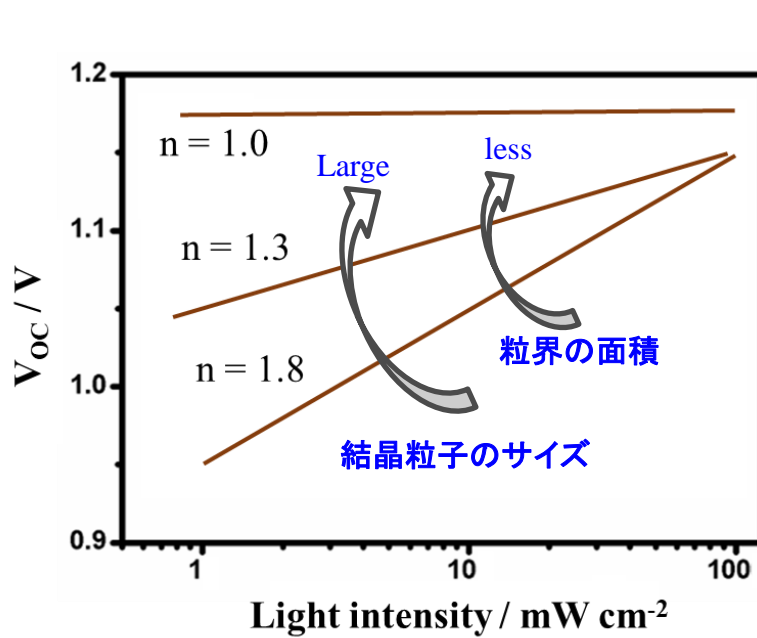
ペロブスカイトの発電 ⇒ 高電圧を出力する



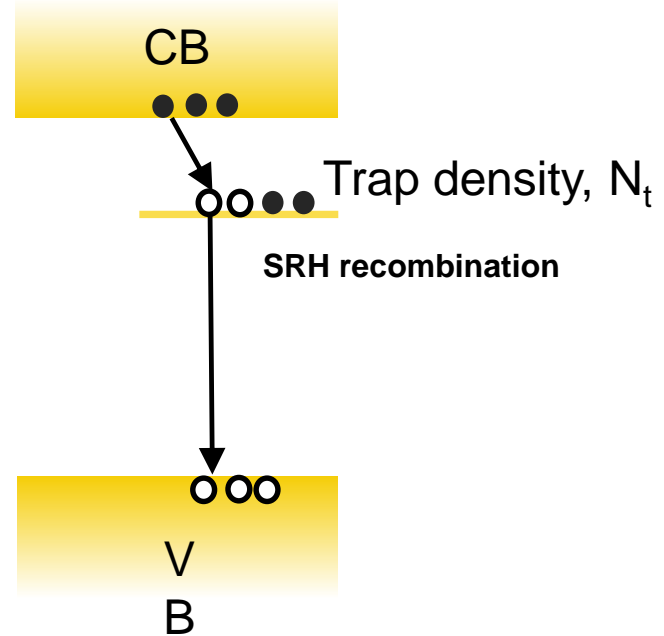
Stranks et al. *ACS Energy Letters* 2 (2017)



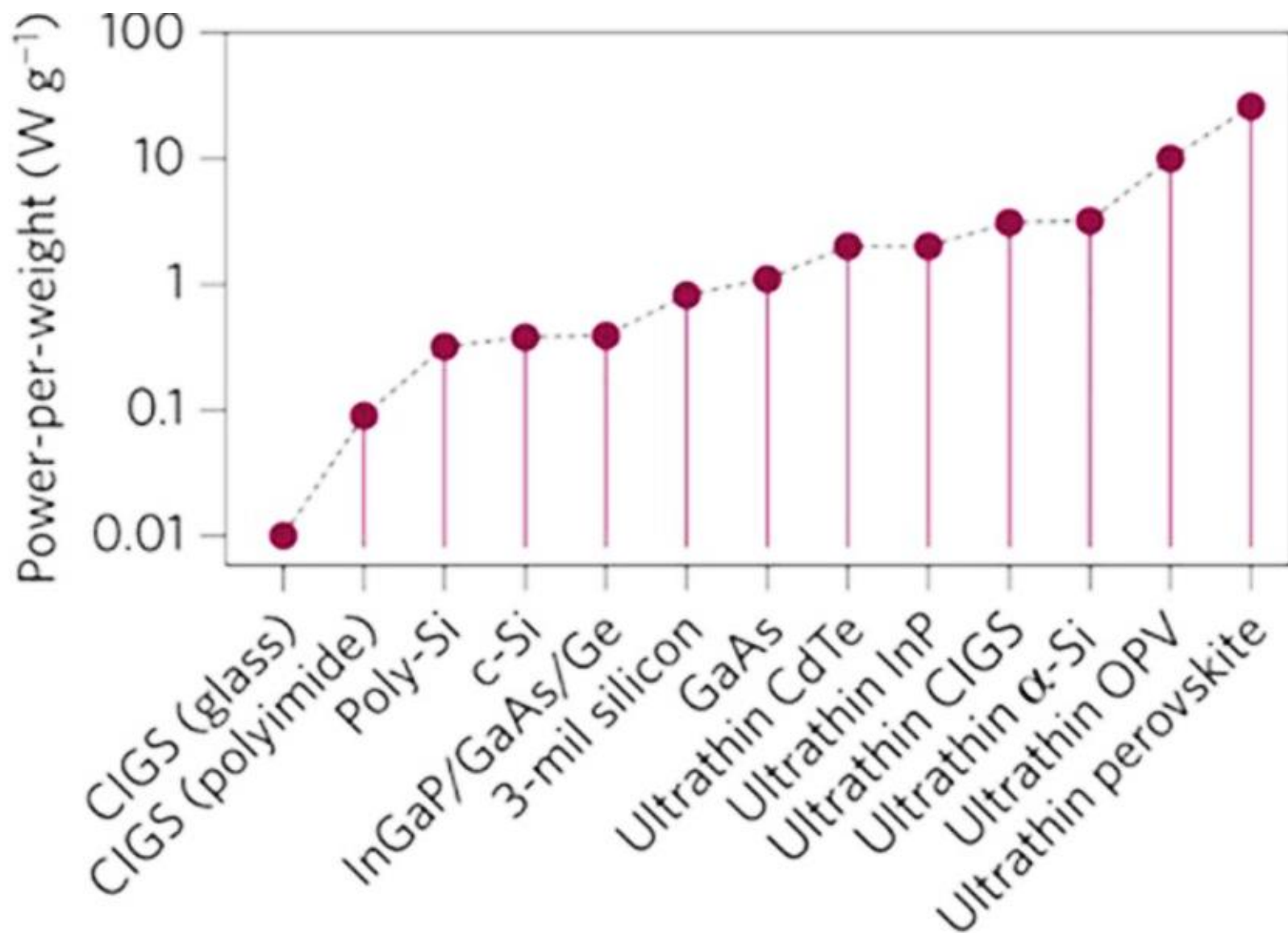
結晶粒子サイズを大きくすることで、再結合損失を小さくし、開回路電圧 V_{OC} を高める → エネルギー変換効率を高める



SRH recombination \propto Trap density, N_t



ペロブスカイト太陽電池は、軽量化が可能



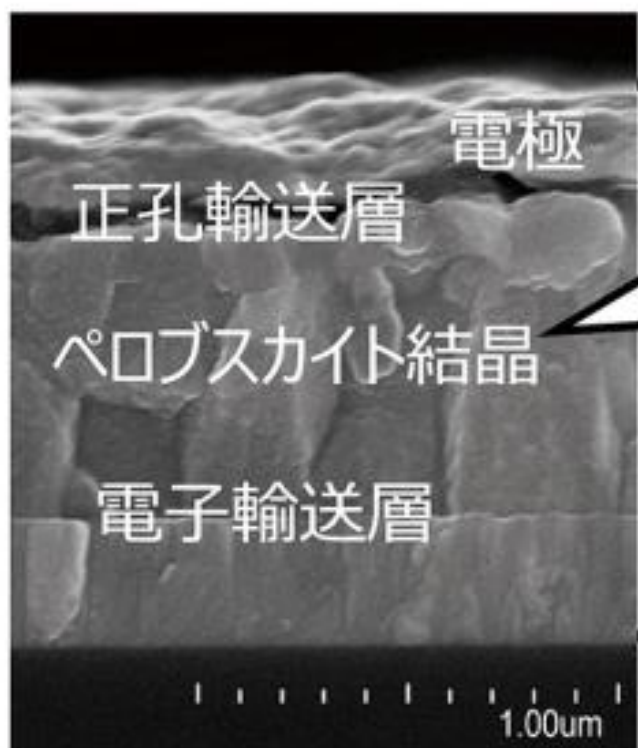
- 電荷の拡散長が大きい(>1 μm)
- 欠陥の生成に対して、寛容な発電性能 (defect tolerance)
- 光吸収層が薄い (<0.5 μm)

電子／正孔の再結合が少ない

開回路電圧 (V_{OC}) の増加

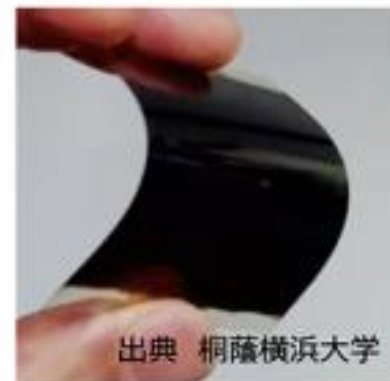
高い変換効率

ペロブスカイト太陽電池の特長

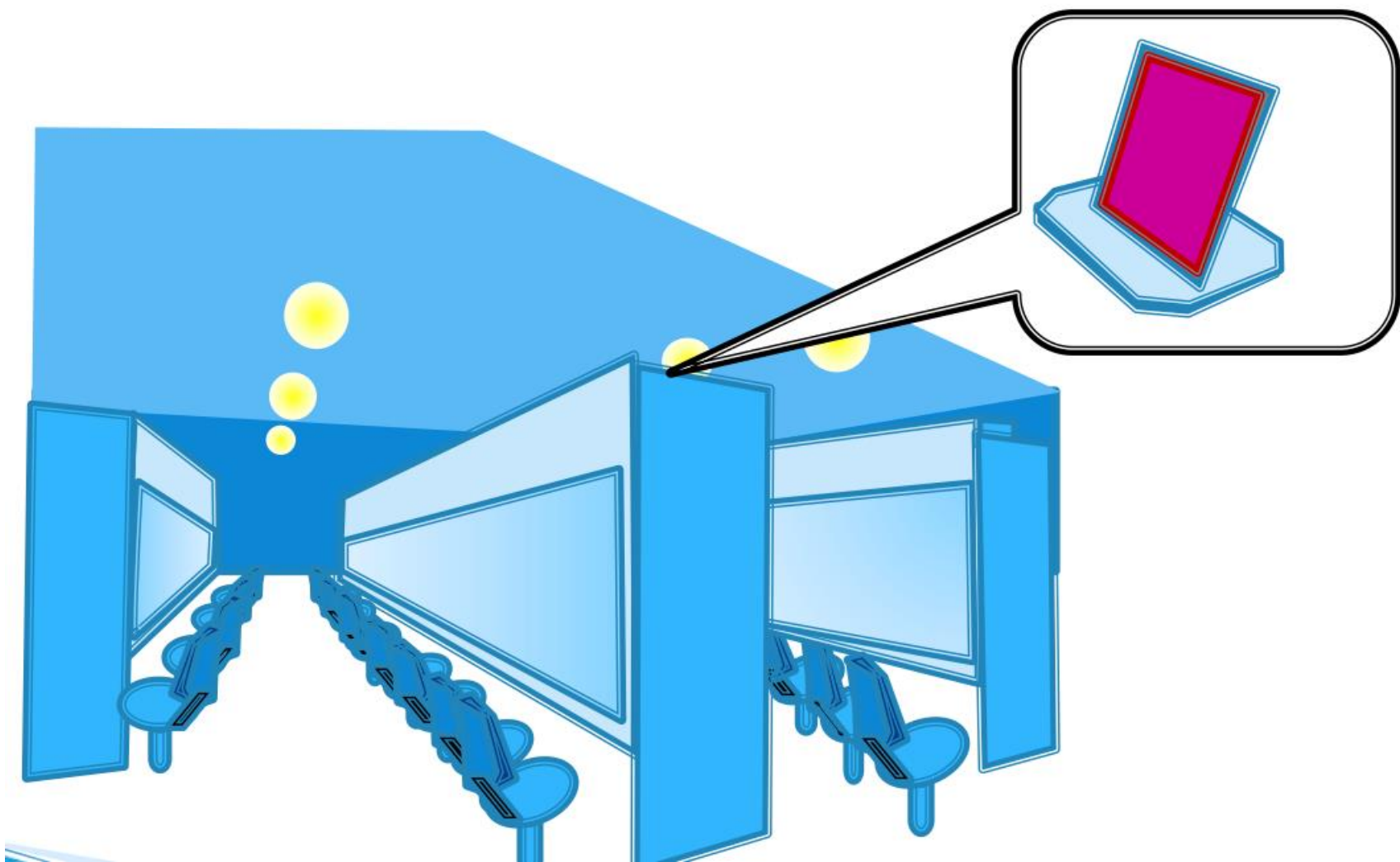


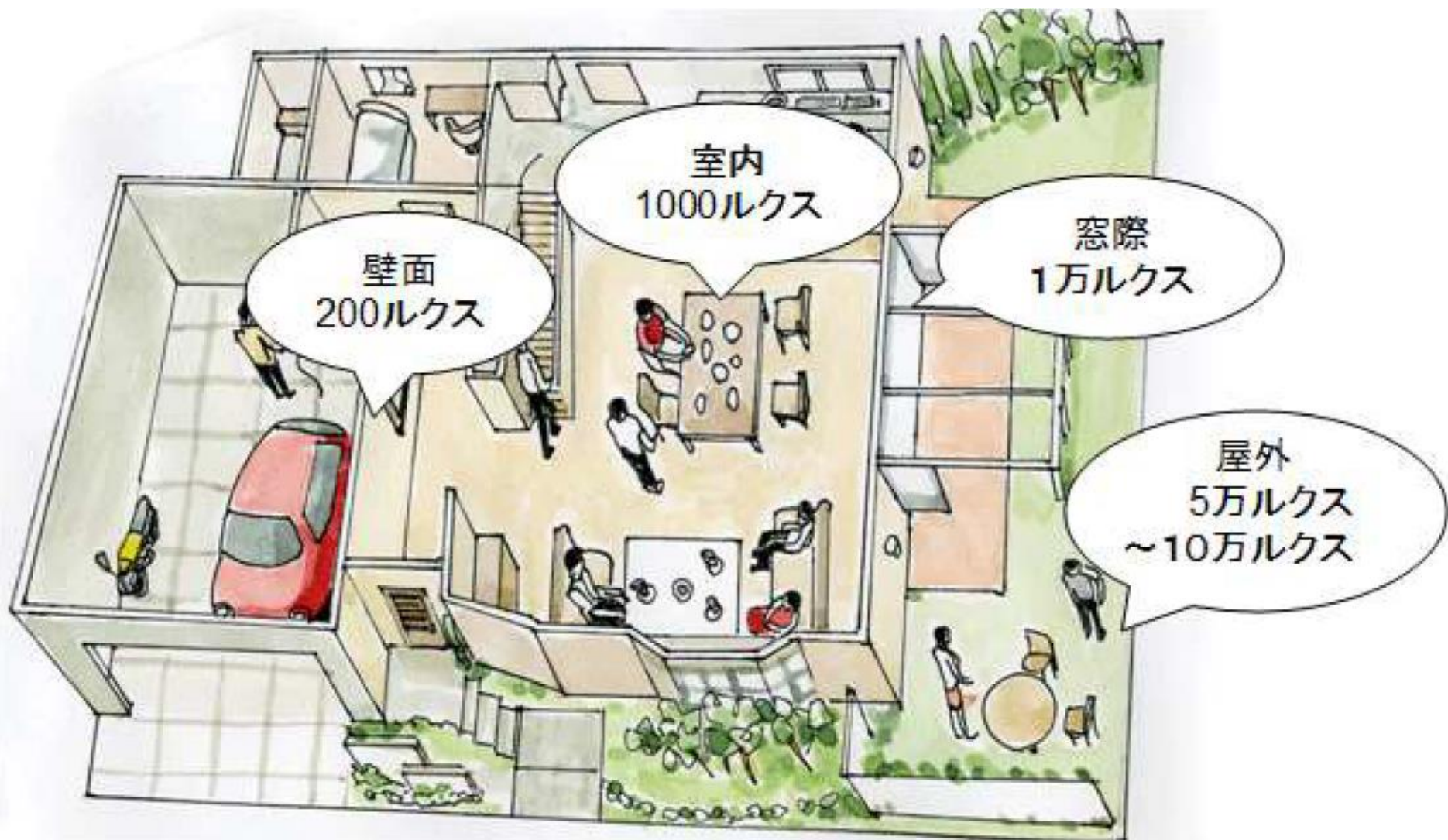
- 小さいキャリア有効質量
- 長い少数キャリア拡散長
- 太陽電池に適したバンドギャップ
- 大きい光吸収係数

- 1 μm 厚以下
- 低温成膜可能
- 溶液塗布法で製造可能



省エネを進めるためには？ 屋内でのセンサー用途





ペロブスカイト太陽電池 光発電素子商品としての提供価値

Dopant-Free Polymer HTM-Based CsPbI₂Br Solar Cells with Efficiency Over 17% in Sunlight and 34% in Indoor Light

Zhanglin Guo,* Ajay Kumar Jena, Izuru Takei, Masashi Ikegami, Ayumi Ishii,

Youhei Numata, Naoyuki Shibayama, and Tsutomu Miyasaka*

Adv. Func. Mat. 2021, 31, 2103614

屋外 1sunの光量

Perovskite	J _{SC} (mA cm ⁻²)	V _{OC} (V)	FF (%)	PCE (%)
CsPbI ₂ Br	15.0	1.42	81.3	17.4

1.42Vは太陽電池として最高電圧

屋内 1/500 sunの光量 屋内 LED照明光 (200 lux)

Perovskite	J _{SC} (μA cm ⁻²)	V _{OC} (V)	FF (%)	PCE (%)
CsPbI ₂ Br	21.0	1.14	86.0	34.2

>1.1Vは屋内素子として最高電圧

光環境を選ばず、屋外から屋内までの光量において1000W/m²~1W/m²の広い範囲で高効率の発電ができる。もちろん曇天/雨天も利用できる。

屋内 IoT デバイスの電源として最も有力 (照明 200 luxにおける発電能力)

Comparison of output power from PV cells				
PV cells	Crys. Si	Amorph. Si	DSSC	Perovskite
				 © Ricoh
Sunlight 100 mW/cm ² (100,000 Lux)	22mW/cm ²	10.3mW/cm ²	14 mW/cm ²	20~23mW/cm ²
Indoor light 77 μW/cm ² (200 Lux)	0.9μW/cm ²	6.5μW/cm ²	20μW/cm ²	22μW/cm ²

SMART R MOUSE
(光学センサー方式マウス)
RICOH EH DSSC2832搭載

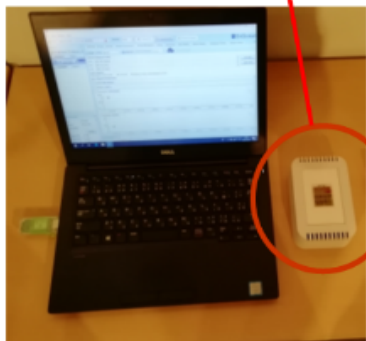


© Ricoh

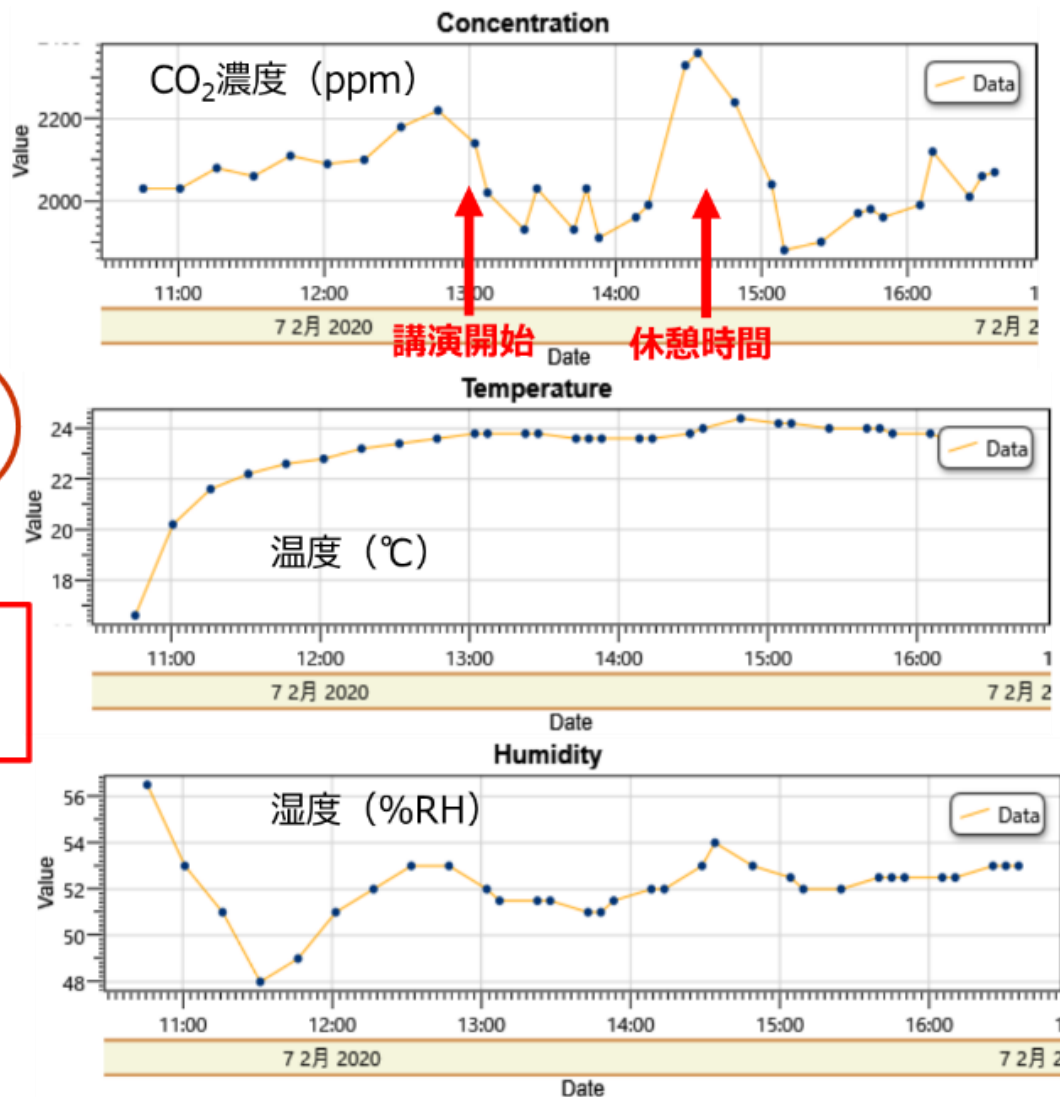
省エネに貢献する環境センサー ペロブスカイト太陽電池による駆動

<実証実験>

太陽電池搭載CO₂センサー



宇宙探査ハブ・イノベーション
フォーラム (2020.2.7)
会場でのCO₂濃度測定デモ



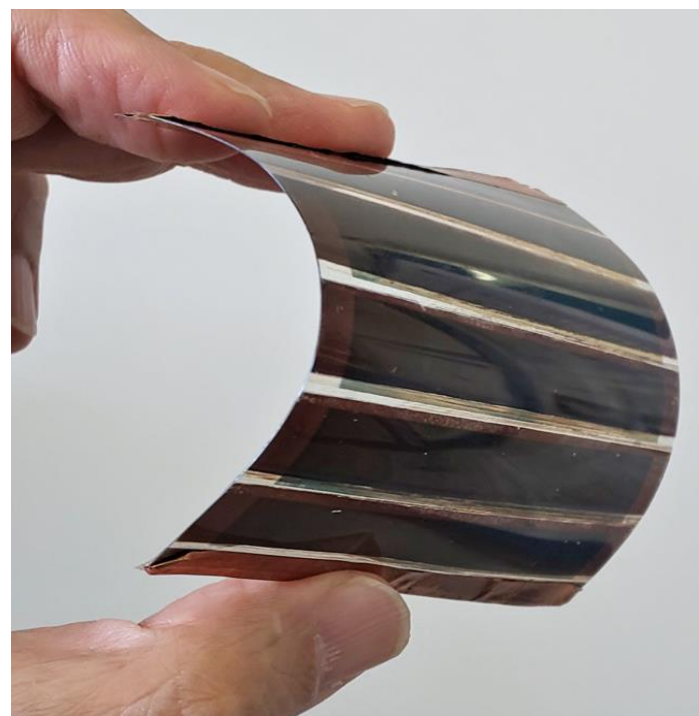
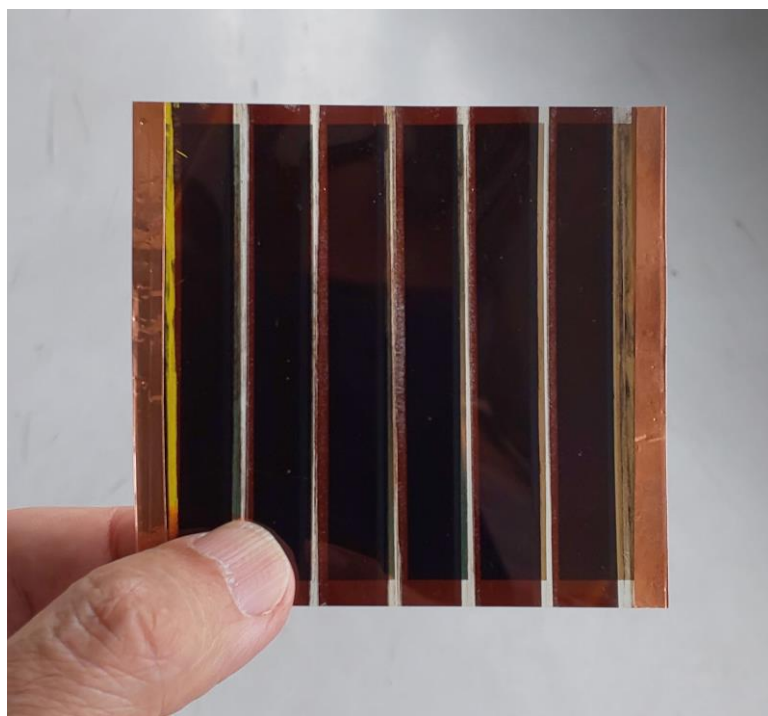
出典 JAXA 宇宙探査イノベーションハブ 成果報告より

6セル直列ペロブスカイトフィルムモジュール、ラボ試作品

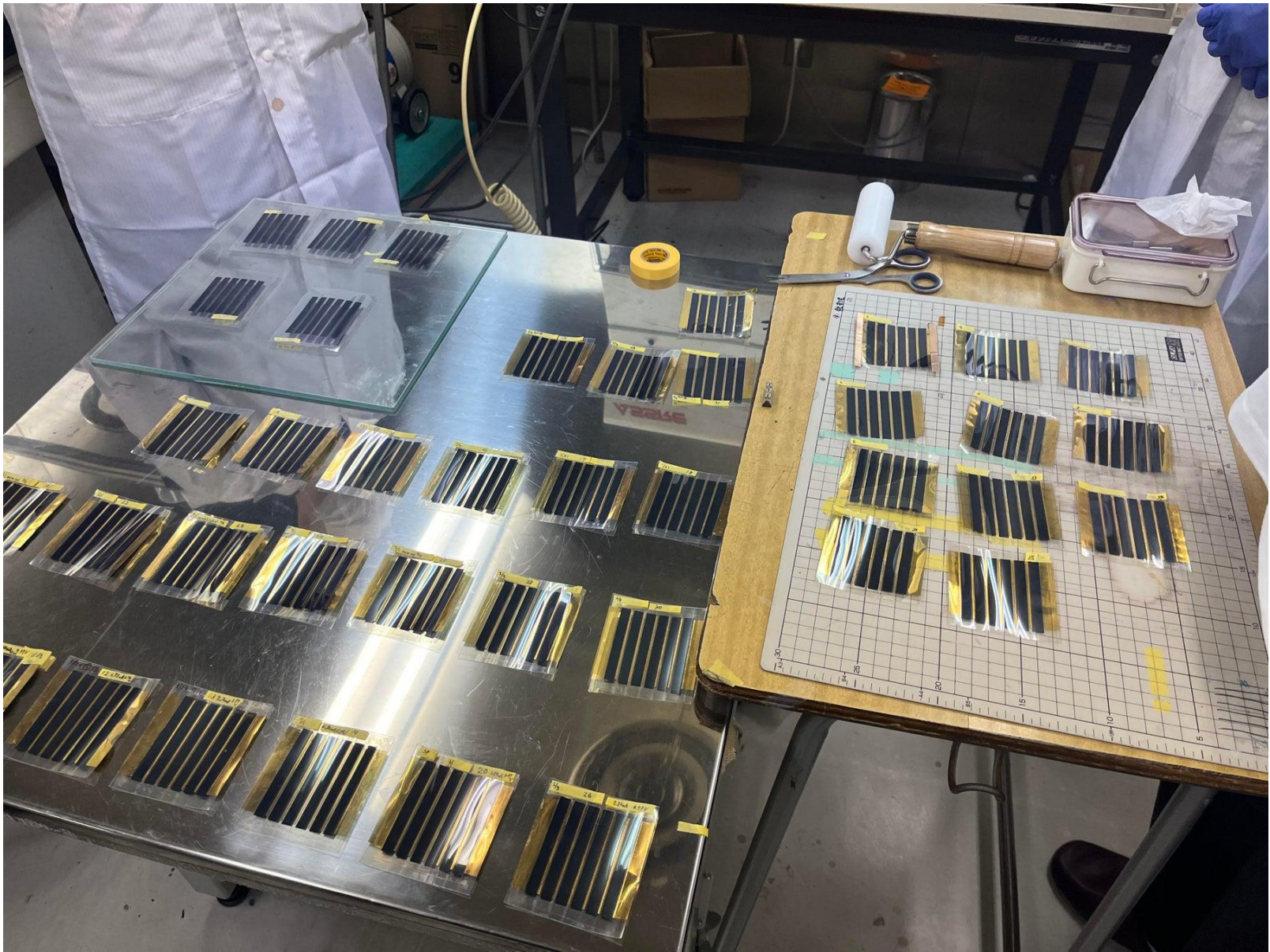
厚さ, $< 130 \mu\text{m}$

サイズ, 7x7cm; 重量 2.0g

原価: 約100円(うちペロブスカイト約2円)



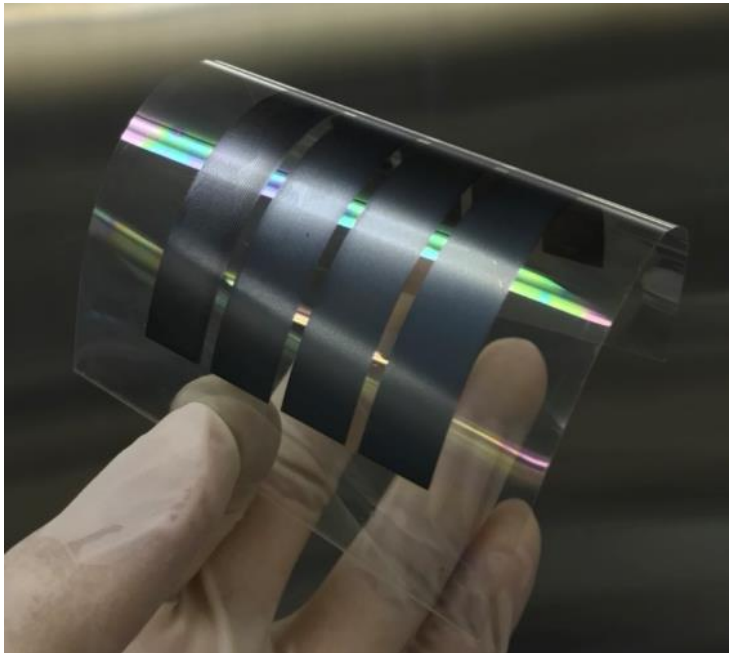
ガスバリアフィルム封止品、製作: 2021年10月6日



インクジェット法によるペロブスカイト太陽電池の作製

ペロブスカイト太陽電池モジュール

4直列モジュール



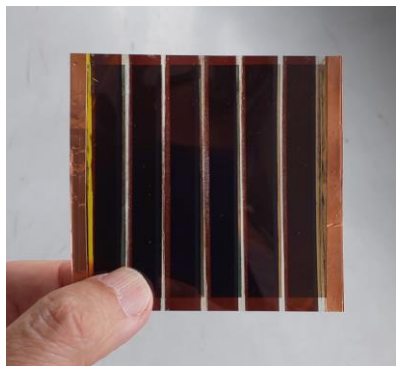
フレキシブル太陽電池モジュール

デザイン性のあるモジュール



ペロブスカイト太陽電池はどのような製品か？

ペロブスカイト太陽電池は、部品である。



プロダクト
+ デザイン = ペロブスカイト
プラットフォーム 太陽電池の
搭載製品

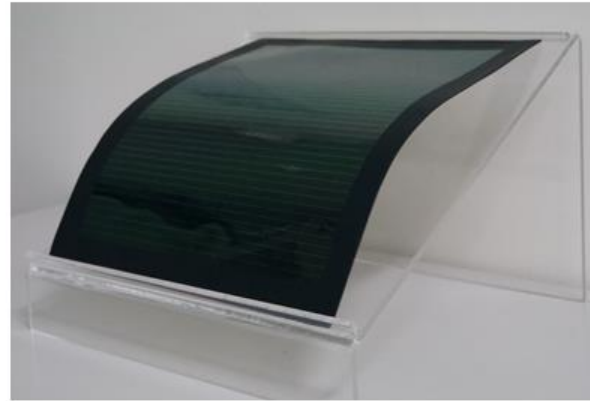
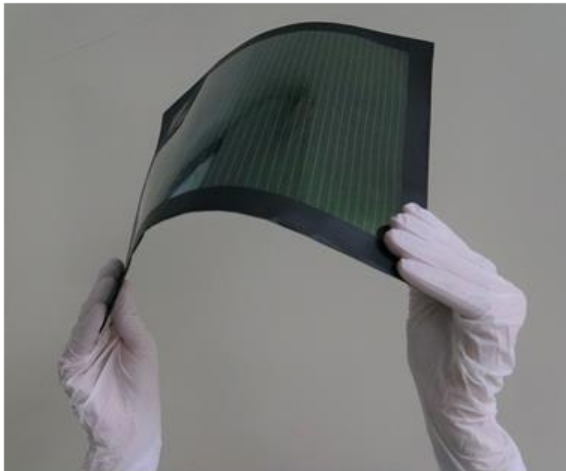
		製造設備	事業化
産	製品の信頼性・安全性を重視。	○	○
官	社会実装を進めたい。実証試験を進めたい。	×	×
学	性能を上げたい。効率をあげて論文を書きたい。	×	×

ペロブスカイト太陽電池の材料開発、製造プロセス開発の信頼性向上に
寄与する、小規模の実証試験、プラットフォームの構築



Toin University of Yokohama

東芝、フレキシブルモジュール
面積703cm²のモジュール、このサイズでは世界最高効率16.6%



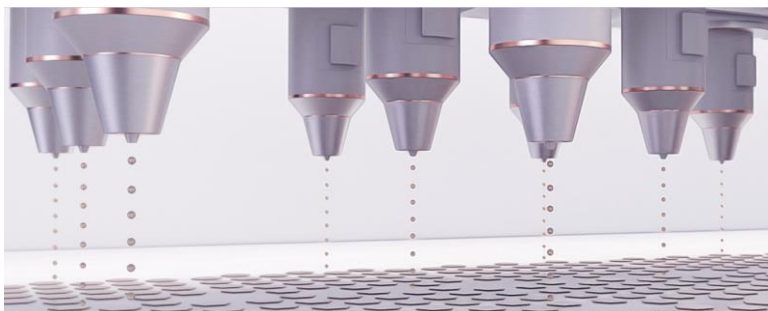
2023年2月11日、東急田園都市線青葉台駅、2023年8月1日桐蔭横
浜大学で展示、



Toin University of Yokohama



インクジェット印刷によるペロブスカイトの Fully Printed Solar Cells



Technology

Products

Blog

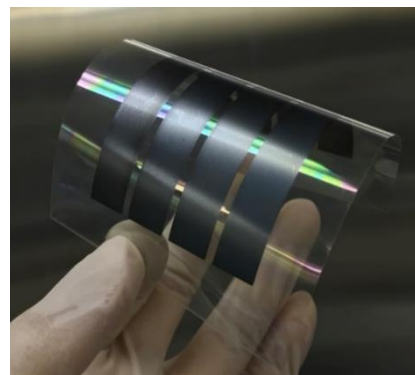
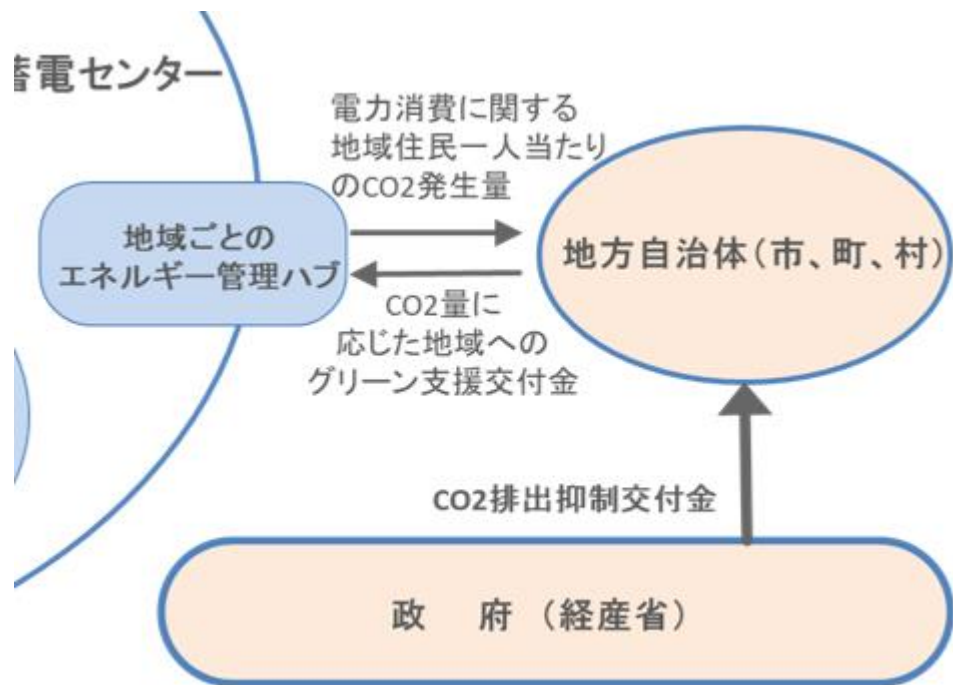
About

Press

Contact

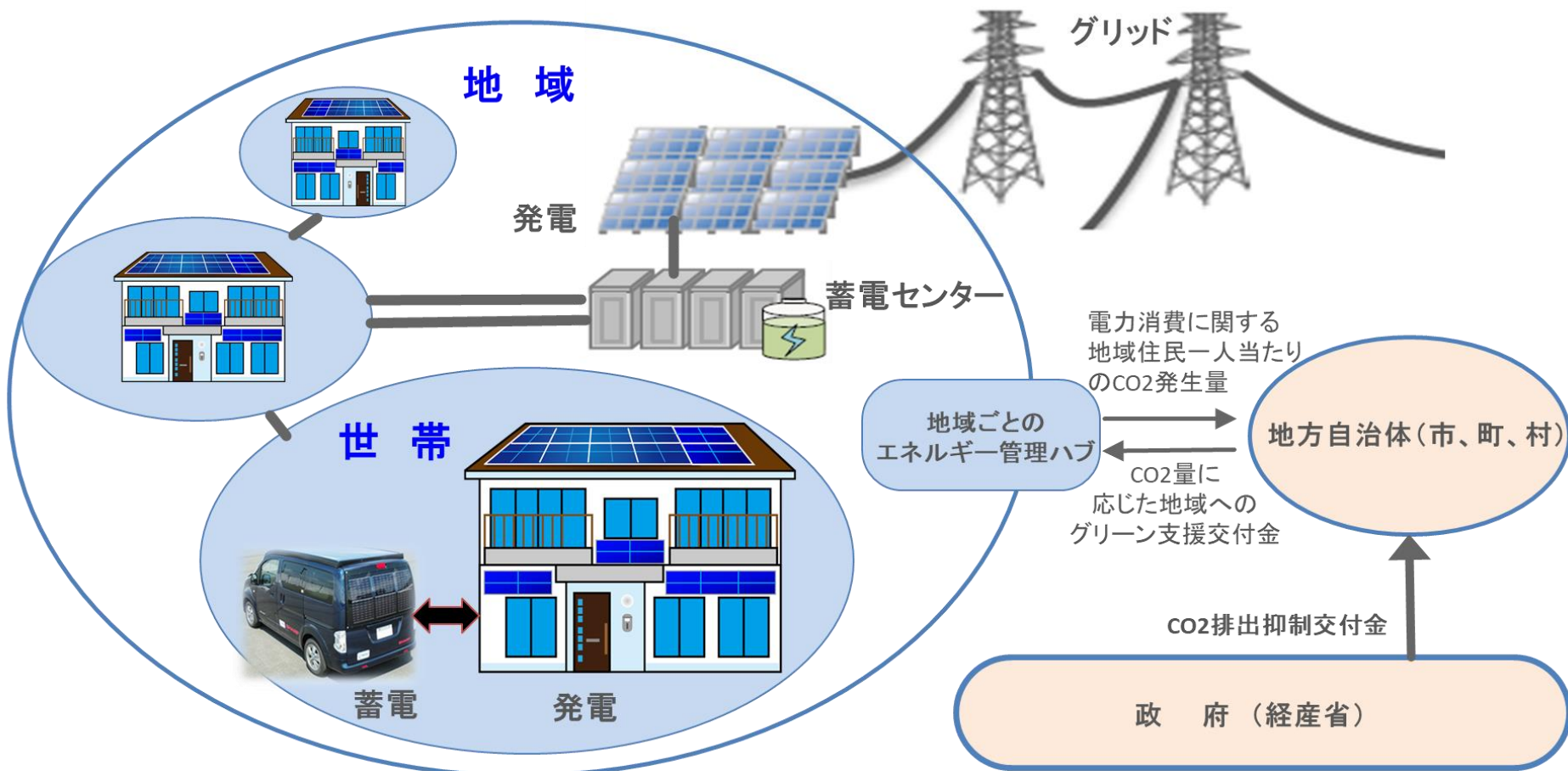


カーボンニュートラルを目指す、「プロダクトデザイン」



再生可能エネルギー開発の方向性 カーボンニュートラルを目指す

国民のすべてが、地域エネルギーコミュニティの住民として登録し、CO2排出の評価を受ける



地域エネルギー共有グリッドコミュニティ

横浜市内 区民まつりなどで、
ペロブスカイト太陽電池をご紹介します



