

高効率フレキシブル光電変換層を用いた新太陽電池の研究開発動向

理学博士 早瀬 修二

Shuzi Hayase

Research Trend of New Solar Cells Consisting of Flexible
Photoconversion Layer with High Efficiency

1. はじめに

現在の電力供給システムは大規模発電・集中型エネルギーシステムと呼ばれ、原子力、火力、水力、風力、メガソーラー発電所から送電網を通して需要家に届けられる。今後需要と供給の最適化を図り、電力を効率よく利用する事を目的として、スマートグリッド、地産地消を目指したマイクログリッドシステムに移行すると考えられる。これに伴い再生可能エネルギーの一つである太陽光発電も小規模・分散的発電となる。つまり居住地に近いところでの小規模発電ができる太陽光発電システムが求められる。

大規模太陽光発電所として米国カルフォルニアの砂漠地帯に Sun Star と呼ばれる 0.8GW¹⁾、Topaz Solar と呼ばれる 0.55GW の大規模太陽光発電所が建設されている。また Dubai の砂漠には 1GW の大規模太陽電池が建設されており、2030 年までに 5GW まで増設されるという報道がある。ちなみに火力発電所や原子量発電所のタービン発電容量は 0.5-1.0GW であり、上記の大規模太陽光発電所は大型タービン発電機の発電容量に相当する。一方日本では 0.26GW の発電容量を有するパシフィコ・エナジー作東（さくとう）メガソーラー発電所（美作市（みまさか）岡山県）²⁾が最大規模であり、海外に比較して小規模でありかつ丘陵地帯に設置されている。資源エネルギー庁資料によると³⁾、日本の累積太陽光発電容量は 56GW(2019 年)であり、中国の 175GW には及ばないものの米国の 63GW、ドイツの 45GW とほぼ同等である。一方、日本の国土面積当たりの発電容量は 147kW/km² であり、ドイツの 126kW/km²、中国の 18kW/km²、米国の 6kW/km² を上回り世界一の設置容量密度である。さらに平地に

限定すると日本の設置容量密度は 426kW/km² と、ドイツの 184kW/km²、中国の 24kW/km²、米国の 10kW/km² を大きく上回る。日本では大規模太陽光発電所を設置する面積が少なくなっており、これが上記のスマートグリッド、マイクログリッドを利用して、居住地に近いところでの分散型太陽光発電システムが求められている理由である。

内閣府が主催する統合イノベーション戦略推進会議が 2020 年 1 月 21 日に策定した“地球温暖化等問題に対応する課題やニーズ”の一つとして、太陽光発電には従来の平板型シリコン太陽電池が設置しにくい場所に設置できる新しい太陽電池を開発することが求められている⁴⁾。すなわち、“設置場所の制約を克服する柔軟・軽量・高効率な太陽光発電”を実現することであり、菅元総理が表明した 2050 年温室効果ガス排出量ゼロ実現に貢献できる技術であると期待されている。これを実現するために今後 10 年間に 2 兆円規模のグリーンイノベーション基金が設置された⁵⁾。この中で 5 年間で 200 億円の予算規模で高効率、フレキシブル、軽量化を達成できるペロブスカイト太陽電池（鉛系）の開発が進んでいる⁶⁾。

NEDO の調査資料によると集合住宅のビルの壁面で 30GW、屋上で 15GW、民生業務でも壁面で 17GW、屋上で 12GW の潜在的太陽電池設置容量があるとされる⁷⁾。両者を合わせると壁面で 47GW、屋上で 27GW の潜在発電能力がある。一方ビル以外では耕作地があり 380GW、農作放置地で 34GW、湖、沼等の水面設置で 40GW、河川敷等で 34GW、駐車場で 23GW 等の潜在発電能力があるとされる。このように都市部、居住地の近くに設置でき、自然を破壊せず環境に調和した新しい太陽電池の出現

が待たれていた。

2. 高効率フレキシブル光電変換層

上記の目的に合致した太陽電池として、塗布で作製できるフレキシブルペロブスカイト太陽電池が検討されている⁸⁾。図1に一般的な太陽電池の構成を示す。太陽電池はホール（プラス電荷）を集めるホール輸送層、電子（マイナス電荷）を収集する電子輸送層、および光を吸収して電子とホールを発生する光吸収層からなる。太陽電池は光吸収層の材料名により単結晶シリコン太陽電池、多結晶シリコン太陽電池、CIGS(CuInGaSe(S))太陽電池、CdTe太陽電池、色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池等に分類される。ペロブスカイト太陽電池とは光吸収層がハロゲン化ペロブスカイト（一般式 $APbI_3$ 、Aは一価のカチオン）からなる太陽電池である。表1に現在よく用いられているシリコン単結晶太陽電池とハロゲン化ペロブスカイト太陽電池性能を比較して示す。ハロゲン化ペロブスカイト太陽電池はハロゲン化ペロブスカイトインク（黒色）を塗布した後に100°C程度で加熱することにより作製することができる。

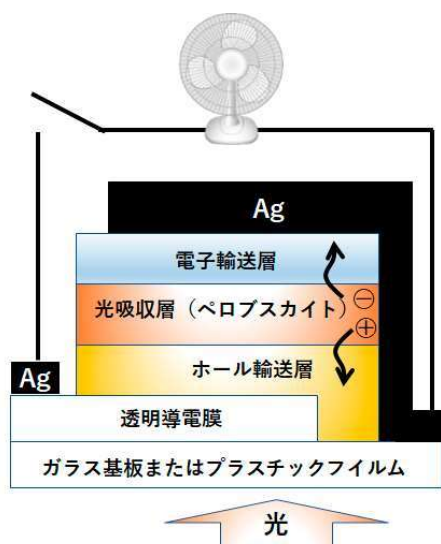


図1 太陽電池の構造

一方、単結晶シリコン太陽電池は高純度化するために1500°C程度の高温で結晶化する必要がある。ハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の公認効率は低温塗布プロセスにもかかわらず25.7%と報告されており、単結晶シリコン太陽電池の公認効率の26.7%に肉薄している。単結晶シリコンは間接遷移型であるため吸光度が小さく光を有効に吸収するためには200-300ミクロンの厚みが必要である。一方ハロゲン化ペロブスカイト層は直接遷移型であるため吸光度が大きく、0.5ミクロン程度の膜厚で光を有効に吸収することができる。ペロブスカイト太陽電池は低温塗布プロセスで作製できるために、プラスチック基板上に形成することができ、1-4 kg/m²と軽量化することが可能である。一方単結晶シリコン太陽電池は12-15 kg/m²の重量がある。このようにハロゲン化ペロブスカイト太陽電池は“地球温暖化等問題に対応する課題やニーズ”の中の、太陽電池に関する課題を解決するポテンシャルを有している。ここで注意したいのは表1のハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の25.7%の効率は0.096 cm²の小面積の太陽電池で測定されている。一方単結晶シリコン太陽電池の太陽電池サイズは79 cm²である。面積が1 cm²のハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の公認効率は23.7%であり大面積化により効率は低下する。現在、大面積化しても効率が低下しないプロセスの開発に焦点が絞られている。同じ程度の面積で比較すると他の市販多結晶太陽電池であるCIGS太陽電池の公認効率である23.35% (1 cm²)、CdTe太陽電池の公認効率である21.0% (1.06 cm²)と同程度の公認効率であり、低温塗布プロセスで高効率が達成されていることは驚きである。これらの公認効率の詳細は参照文献9)にまとめられているので参照いただきたい。これまでもフレキシブル太陽電池は報告されていたが、高効率とフレキシブル化を両立した太陽電池は知られていなかった。

表1 単結晶シリコン太陽電池とハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の比較

種類溶液	光吸収層	効率	プロセス温度	基板
ペロブスカイト太陽電池 (含鉛)	ペロブスカイト (インキ) (0.5 μm)	25.7% (0.096 cm ²)	100°C (溶液塗布)	プラスチック基板 (軽量・フレキシブル) (1-4kg/m ²)
シリコン太陽電池	シリコン (200-300 μm)	26.7% (79 cm ²)	1500°C (熔融)	ガラス基板 (12-15kg/m ²)

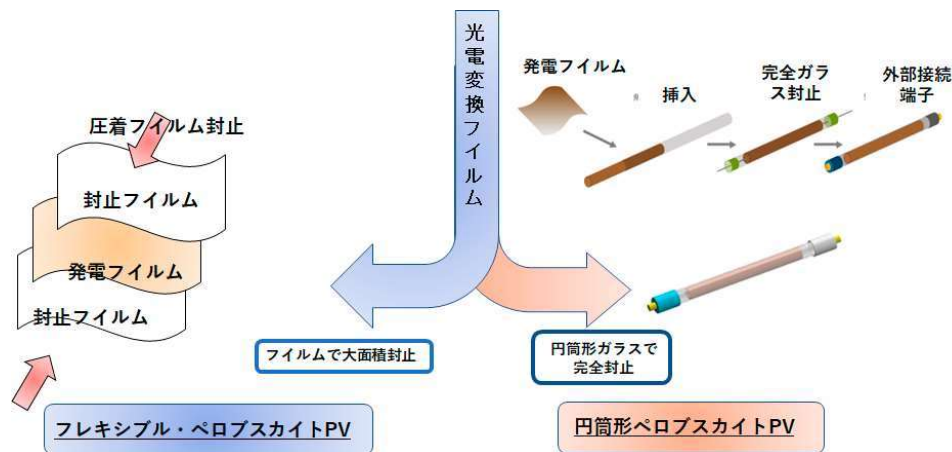


図2 フレキシブル光電変換層の封止

図作製協力：株式会社フジコー、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社

3. フレキシブル光電変換層の封止とフレキシブル太陽電池および円筒形太陽電池

ハロゲン化ペロブスカイト層は低温で結晶化して得られるため、水分、酸素の影響により分解が進みやすいという欠点があった。このため、図2に示すように光電変換フィルムを外部雰囲気から保護する必要がある。両面からプラスチックフィルムで保護する方法が一般的であり、これにより軽量フレキシブルペロブスカイト太陽電池が作製できる。重量制限のためこれまで平板型シリコン太陽電池が設置できなかった体育館の屋根等に設置できる。一方、プラスチックフィルムによる封止よりも有効に外部からの水分、酸素の侵入を防ぐことができる円筒形太陽電池を電通大、九州工業大学、株式会社フジコー、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社が共同提案してきた。フレキシブル発電フィルムを円筒形ガラスに挿入し、両端をガラスで封止するため完全封止できる。このため外部からの水分、酸素の侵入を完全に遮断することができ高い耐久性が期待できる。

4. 円筒形太陽電池の利点

フィルムで封止したフレキシブル太陽電池はよく知られており、利点などは容易に推定できると思われるためここでは説明を省略する。図3に円筒形太陽電池の利点を列挙した。我々技術サイドからは容易に簡単に完璧に封止が可能になり、耐久性の高い太陽電池を作製することができる。一方消費者側

には、一日の総発電量が多い、狭い場所でも縦型に設置できる、風圧が小さく固定台の軽量化が可能である、軽量であり運搬・設置が容易である、交換・修理・リサイクル・廃棄が容易である等の利点がある。

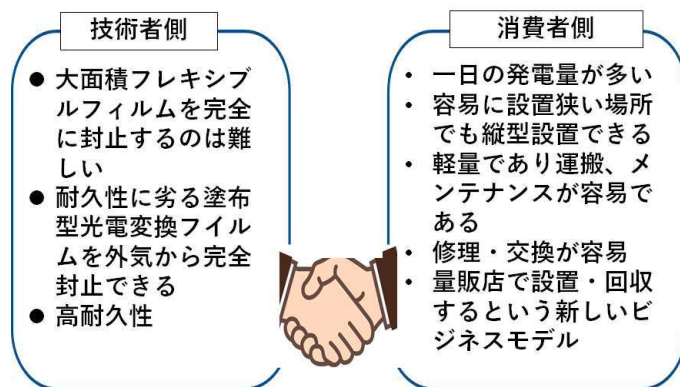


図3 技術者側、消費者側から見た円筒形太陽電池の利点

図4には株式会社フジコー、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社により実施されたソーラーシェアリングの実証実験、およびIoTセンサーネットワーク用電源実証実験の写真を示す。ソーラーシェアリングは和製英語であり、最近では *agrivotovoltaics*、*agrisolar* と呼ばれ注目を集めている。Dual-use solar の別名もある。太陽光エネルギーを植物育成と太陽光発電の両方に使うもので、隙間を空けて植物棚の上部に太陽電池を設置する。太陽電池で発電し、隙間から入射する光で植物を育成する。これまでは隙間を空けて小型の平板型単結晶シリコン太陽電池

を設置した実証実験が行われてきたが、光の照射が均一ではない、雨のしずくが落ちて植物育成に障害が起こる等の問題点が指摘されていた。円筒形太陽電池を設置すると太陽光の陰になる部分が少なく均一に植物に光が照射されるため、円筒形太陽電池はこれらの問題点を解決するあたらしい dual-use の太陽電池として期待できる。



図4 円筒形太陽電池の実証実験風景

(株式会社フジコー、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社共同)

5. 理論限界効率を超える新ペロブスカイト太陽電池

図1に示す単層太陽電池には 33%という理論限界(Shockley-Queisser limit)がある¹⁰⁾。効率が 35%を超えれば電気自動車への車載用途が開けてくる。そこで検討されているのがタンデム太陽電池である。タンデムというのはもともと縦に二頭を配置した馬車の意味である。

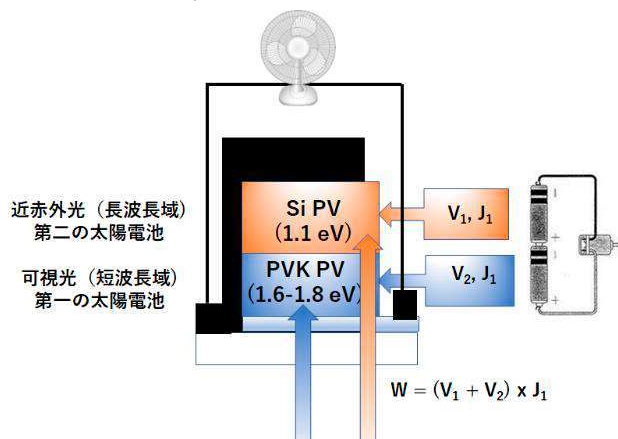


図5 タンデム太陽電池の構造

PVK PV: ペロブスカイト太陽電池

図5に示すように太陽電池を二層構造にする。可

視光領域の短波長領域の光を吸収し光電変換する第一の太陽電池と、第一の太陽電池をすり抜けてきた近赤外域(長波長域)の光を光電変換する第二の太陽電池からなる。詳細は省略するが、SQ limitによれば理論効率は光吸収層のバンドギャップと関係があり 1.4eV程度のバンドギャップの光吸収層を用いると 33%の最高効率が得られる。太陽電池を二階建てにすると第一の太陽電池で電圧 V_1 、電流 J_1 が得られ、第二の太陽電池で電圧 V_2 、電流 J_1 が得られる。得られる電力は $W = (V_1 + V_2) \times J_1$ となり高い効率が得られる。これは 1.5 V の乾電池を直列に二本つないで 3 V の電圧が得られることと同じである。第一の太陽電池の電流と第二の太陽電池の電流を一致させないと、タンデム太陽電池の電流は低い太陽電池の電流に一致し、電流のロスが起こる。図5は例として第一の太陽電池にペロブスカイト太陽電池、第二の太陽電池にシリコン太陽電池を使った例を示す。結晶性シリコンのバンドギャップが 1.1eV であり、第一の電池と第二の電池の電流を一致させるためには、ペロブスカイトのバンドギャップが 1.6-1.8eV である必要がある。研究開発は第一の電池と第二の電池を結合し、電荷を有効に運ぶ中間層の開発、およびペロブスカイト層のバンドギャップの最適化に主眼が置かれている。表2にこれまでに報告された二層タンデムペロブスカイト太陽電池の公認最高効率をまとめて示す。ペロブスカイトタンデム太陽電池の最高効率は Pb-PVK と Si 単結晶を組み合わせたペロブスカイト/単結晶シリコン太陽電池で報告されており、効率は 31%を超えている。単結晶シリコン太陽電池の公認最高効率は 26.7%であり、この値よりも効率が 4-5%向上している。ペロブスカイト太陽電池を第一の太陽電池、第二の太陽電池に使ったペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池で、公認効率は 28%に達している。単接合ペロブスカイト太陽電池の最高公認記録は 25.8%でありタンデム化することにより 2.2%の効率向上が確認されている。

第一の可視光吸収ペロブスカイト太陽電池には可視光を吸収する鉛系ペロブスカイト太陽電池(バンドギャップ 1.77eV、 $\text{FA}_{0.8}\text{Cs}_{0.2}\text{Pb}(\text{I}_{0.6}\text{Br}_{0.4})_3$)、第二の太陽電池には近赤外域を光電変換する錫鉛系ペロ

ブスカイト太陽電池(バンドギャップ 1.22eV、 $\text{FA}_{0.7}\text{MA}_{0.3}\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{I}_3$)を用いている。ペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池はすべてのプロセスが低温プロセスで作製されるため、プラスチック基板上にフレキシブルなタンデム太陽電池を作製することができる⁹⁾。

表2 ペロブスカイトタンデム太陽電池の公認最高記録

Tandem	Efficiency	Area	Institute
	%		
Pb-PVK/Si (2-terminal)	31.25		CSEM/EPFL
Pb-PVK/CIGS	24.2	1.045	HZB
Pb-PVK/SnPb-PVK	24.2	1.04	Nanjin Univ.
Pb-PVK/SnPb-PVK	28.0	0.0495	Nanjin Univ.
Si(single) PV	26.7	79	
Pb-PVK PV	25.8		UNIST

Pb-PVK: 鉛系ペロブスカイト太陽電池、Si:単結晶シリコン太陽電池、CIGS:CuInGaSe(S) 化合物半導体太陽電、CSEM/EPFL:スイスの大学、HZB:ドイツ Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB), UNIST: 韓国 The Ulsan National Institute of Science and Technology.

ペロブスカイトタンデム太陽電池ではないが、30%を超えるタンデム太陽電池を使った車載実証実験が NEDO—シャープ—トヨタの共同プロジェクトとして行われその結果が公表されている¹¹⁾。車載用太陽電池は三層(トリプルジャンクション)であり InGaP/GaSS/InGaAs の構造を有している。これまでソーラー充填システム装着車としてプリウス PHV が市販されているがこの太陽電池セル効率は 22.5% (おそらくシリコン系太陽電池) であり定格発電電力は 180W であったと報告されている。この系ではカーナビに使用する補機バッテリー系統のみに電力を供給していた。一方、今回実証した太陽電池セル効率は 34%以上であり、定格発電容量は約 860W とされる。このため起動用バッテリーへの充電が可能になり、一日の発電で 44-56km に相当する電力量が得られると説明されている。このように 30%を超える太陽電池はカーボンニュートラル社会実現に大きく貢献できるが、上記トリプルジャンクション太陽電池はコストが高いと言われており、

低コスト化への検討が行われている。一方、ペロブスカイトタンデム太陽電池は低温塗布プロセスで作製できるためコスト面でも利点があると考えられており、世界中で開発競争が激化している。

6. 高効率大面積化に対する進捗状況

表1で説明した通り、小さい面積では鉛系ペロブスカイト太陽電池の効率は単結晶シリコン太陽電池の効率に肉薄している。小面積でさらに高効率化する試みも続けられているが、実用化に向けて高効率を維持しながら大面積化する応用研究も競争が激しくなっている。小面積セルのペロブスカイト層は半導体デバイスを作製するとき使用するスピンドコーターを用いて形成されているが、大面積化するためにはメニスカスコーター、インクジェットプリンターのような大面積塗布に有利な塗布装置を使わなければならない。ペロブスカイト層作製の難しさは、塗布しながら結晶化し、平坦な結晶面を作製しなければならないというプロセスにある。大面積で均一・平坦な結晶面を有するペロブスカイト作製プロセス開発が必要である。現状の公認最高効率はガラス基板上にパナソニックが作製したペロブスカイト太陽電池で 17.9%である。面積は 804cm²でモノリシック型であり 55 セルが直列に接続されている⁹⁾。

7. 鉛系ペロブスカイト太陽電池の後に期待される次世代ペロブスカイト太陽電池

ペロブスカイト太陽電池は鉛イオンを含んでいる。管理された設置条件で実用が進むと考えられるが、居住地近く、農業分野に使用するためには、鉛フリー化が必要である。これまで多くの鉛フリーペロブスカイト太陽電池が報告されてきたが、鉛系ペロブスカイト太陽電池ほどの高効率化は達成されていない。鉛フリーペロブスカイト太陽電池の中では錫系ペロブスカイト太陽電池で比較的高い効率が報告されており、効率競争研究が激しくなってきた。図6に種々の太陽電池の中で鉛フリー錫ペロブスカイト太陽電池の効率の位置づけを示す。現状ではその効率は 15%程度であり鉛系ペロブスカイト太陽電池の効率に比較するとまだまだ低い、

2015 年当時の錫系ペロブスカイト太陽電池の効率が数パーセントであったことを考えると確実に効率が向上している。錫ペロブスカイト層の結晶欠陥が鉛系ペロブスカイト層よりも多いことが前者の効率向上を妨げている。現在結晶欠陥を少なくするプロセス、ドーピング等が見出されており、今後の効率向上に期待したい。ちなみに我々の研究チームは 14%を超える効率を達成しており世界最高効率を目指して研究を進めている¹²⁾。錫系ペロブスカイト太陽電池は鉛系ペロブスカイト太陽電池よりも外部から侵入する水分、酸素に弱く劣化しやすいため、円筒形太陽電池は錫ペロブスカイト太陽電池の高耐久性を実現するためにも必須の技術であり、大きな期待を寄せている。

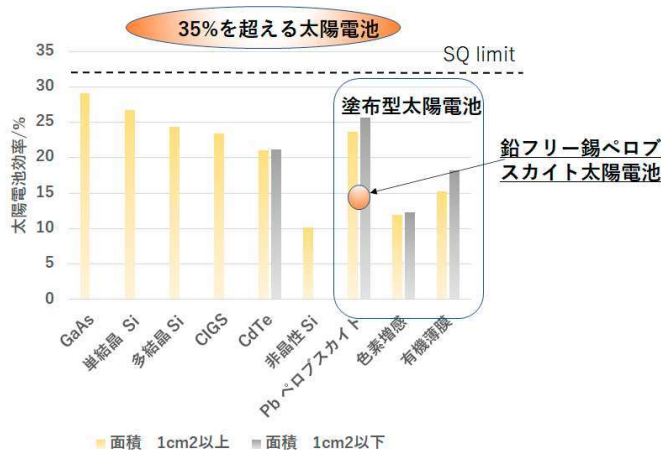


図6 太陽電池の中での錫ペロブスカイト太陽電池の効率の現状

8. まとめ

シリコン太陽電池は低コスト高効率化が達成できている素晴らしい太陽電池であるが、平地の少ない日本では設置しにくい状況になっている。軽量、高効率なフレキシブル光電変換層を使ったペロブスカイト太陽電池が期待されており、円筒形ペロブスカイト太陽電池の利点を説明してきた。鉛系ペロブスカイト太陽電池は量産化プロセス開発で競争が激化している。一方、ポスト鉛ペロブスカイト太陽電池として錫系ペロブスカイト太陽電池が注目を集めつつある。鉛フリーペロブスカイト太陽電池として円筒形錫ペロブスカイト太陽電池は高効率、高耐久性を持ち合わせた太陽電池として、居住地近

くに設置できる都会型太陽電池であり、また dual use の太陽電池としても優れている。我々は agriphotovoltaic に加えて dual use solar cell である図7のような採光性、デザイン性に優れたデザインルーバー型太陽電池の普及を目指している。これらの技術が将来のカーボンニュートラル社会の実現に大きく貢献できることを確信している。



図7 都会型太陽電池の設置イメージ (写真の円筒形部分を円筒形太陽電池で置換した設置イメージ)

参考文献

- 1) <http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/article/COLUMN/20150630/425664/?P=2>
- 2) <https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/feature/00001/00053/?ST=msb>
- 3) https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/070_01_00.pdf
- 4) <https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/kankyoo.pdf>
- 5) https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html
- 6) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101501.html

- 7) https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/wg_nano/7kai/nano07_sankou2_10.pdf
- 8) Jin Young Kim, Jin-Wook Lee, Jin-Wook Lee, More by Jin-Wook Lee, Hyun Suk Jung, Hyunjung Shin, and Nam-Gyu Park, *Chem. Rev.* 2020, 120, 15, 7867–7918.
- 9) Martin Green, Ewan Dunlop, Jochen Hohl-Ebinger, Masahiro Yoshita, Nikos Kopidakis, Xiaojing Hao, *Prog Photovolt Res Appl*, 2022;30:687–701.. Efficiency Table 60.
- 10) Shockley W., Queisser, H., *Journal of Applied Physics*, 1961, 32, 510–519.
- 11) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101150.html
- 12) Wang, Liang; Chen, Mengmeng; Yang, Shuzhang; Uezono, Namiki; Miao, Qingqing; Kapil, Gaurav; Baranwal, Ajay; Sanehira, Yoshitaka; Wang, Dandan; Liu, Dong; Ma, Tingli; Ozawa, Kenichi ; Sakurai, Takeaki; Zhang, Zheng; Shen, Qing; Hayase, Shuzi, "SnO_x as Bottom Hole Extraction Layer and Top In-situ Protection Layer Yields over 14% Efficiency in Sn-based Perovskite Solar Cells" *ACS Energy Letters*, accepted.