

照明演出環境下におけるフィルム型ペロブスカイト太陽電池の発電特性と運用安定性の評価

Evaluation of Power Generation Efficiency and Operational Stability of Film-Based Perovskite PV Modules under Indoor Lighting

浅谷 剛 ASATANI Tsuyoshi 藤永 賢治 FUJINAGA Kenji

カーボンニュートラル実現への取り組みが進む中、軽量・柔軟な特長を持ち、高発電効率を実現できるポテンシャルもあるペロブスカイト太陽電池は、次世代太陽電池としての期待が高まっている。

東芝は、2025年日本国際博覧会（以下、大阪・関西万博と略記）において、“飯田グループ×大阪公立大学共同出展館”の屋内ジオラマ ウェルネススマートシティ[®]にフィルム型ペロブスカイト太陽電池（F-PVK）を設置し、照明演出環境下の発電特性や運用安定性などを評価した。朝・昼・夕・夜を模した色温度・照度条件下で発電特性を評価した結果、各照明条件下の発電効率の絶対値は異なるものの、照度依存性などは条件間でおおむね共通であった。同一照明条件下で評価した結晶シリコン太陽電池（以下、Si太陽電池と略記）と比較すると、F-PVKは低照度条件下で最大約3倍の発電効率を示した。また、大阪・関西万博開催期間を通じた連続運用において、発電特性の顕著な劣化や安全上の問題は確認されず、屋内環境下での安定な運用が可能であることが分かった。

Lightweight and flexible perovskite photovoltaic (PV) modules are attracting attention as next-generation PV modules with the potential to improve power generation efficiency and contribute to the achievement of carbon neutrality.

Toshiba Corporation installed film-based perovskite PV modules at Wellness Smart City, a diorama exhibited at the Expo 2025 Osaka, Kansai pavilion jointly created by Iida Group Holdings Company Ltd. and Osaka Metropolitan University, in order to evaluate power generation efficiency and operational stability under indoor lighting conditions. Tests were conducted on the PV modules under lighting environments simulating morning, daytime, evening, and night conditions with different color temperatures and illuminance levels. The results showed that, although the dependence of power generation efficiency on illuminance was generally similar across the test conditions, the absolute values of power generation efficiency differed for each lighting environment. Under low light conditions, the power generation efficiency of film-based perovskite PV modules was approximately three times higher than that of crystalline silicon PV module under the same conditions. We have also confirmed that no significant degradation in power generation performance occurred and that no safety-related issues arose during the exhibition period, demonstrating that film-based perovskite PV modules can operate stably under indoor lighting conditions.

1. まえがき

ペロブスカイト太陽電池は、軽量性や柔軟性といった特長に加え、Si太陽電池に匹敵する高い発電効率を持つ次世代太陽電池として注目されている。

東芝は、基材として柔軟なフィルムを用いたF-PVKの社会実装を目指し、各種評価及び実証を進めている^{(1), (2)}。その一環として、大阪・関西万博において、飯田グループ×大阪公立大学共同出展館のウェルネススマートシティ[®]にF-PVKを設置して、万博という長期・実環境・非理想光源下での実証を行った⁽³⁾。これは、屋内かつ照明演出を伴う低照度利用環境におけるF-PVKの発電特性を、実環境で体系的に評価した事例である。

ここでは、ウェルネススマートシティ[®]における朝・昼・夕・夜の四つの照明演出条件下で、色温度及び照度の違いがF-PVKの発電特性に与える影響を明らかにする。また、従

来型太陽電池であるSi太陽電池を同一環境下で測定し、F-PVKの特性を相対的に比較評価した結果を示す。更に、連続運用による発電特性の耐久性・運用安定性の評価結果について述べる。

2. 実証概要及び評価対象

ウェルネススマートシティ[®]は、二つのリングを連結した長径24 m、短径15 mの ∞ （無限）字状構造を持つ未来都市のジオラマである（図1）。この実証では、リング上の一部にF-PVKを設置し、ウェルネススマートシティ[®]内部の配線を通じて中央部に設置したLED（発光ダイオード）を点灯させる演出を行った。これは、屋内照明エネルギーを電力として再利用する2次利用の実証実験でもある。

F-PVKは、30×28 cmの発電面積のモジュールを10枚それぞれ2次曲面状の架台に機械的に固定し、その後、並列接続した（図2）。比較対象のSi太陽電池は、評価時に同様の



写真提供：飯田グループホールディングス(株)

図1. ウェルネススマートシティ®俯瞰(ふかん)イメージ

長径24 m, 短径15 mの未来都市のジオラマであり、リング上の四角部分の一部にF-PVKを設置した。

Overview of Wellness Smart City

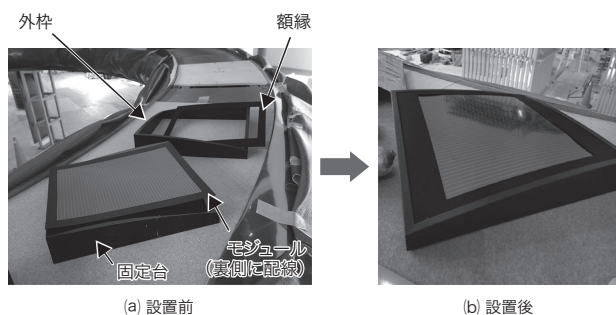


図2. F-PVKのモジュールの設置

2次曲面の固定台に対して、黒枠で押さえて機械的に固定した。

Installation of film-based perovskite PV modules on Wellness Smart City

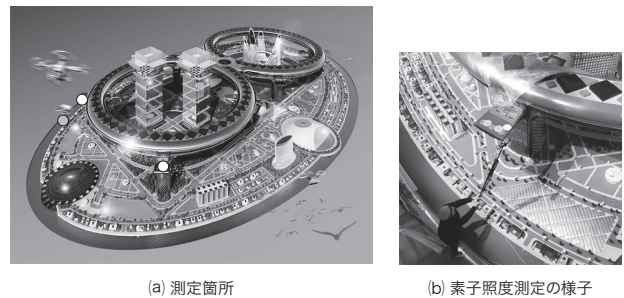
照度環境に配置して評価した。標準試験条件(STC)における変換効率は、F-PVKは11~12%, Si太陽電池は19%である。

この実証における屋内照度環境は約50~2,000 lxであり、一般的な屋外条件(1,000~100,000 lx)と比較して大幅に低い。このような低照度条件下での発電特性評価が、この実証の特徴である。

3. 照明演出環境と評価方法

ウェルネススマートシティ®では、来場者に1日の時間推移を表現するため、朝・昼・夕・夜に見立てた四つの照明演出条件が設定されている。

この実証では、四つの照明演出条件からそれぞれ代表的な照明パラメーター設定を抽出・固定し、評価中に照明条件が時間変化しないよう制御した。これにより、照度及び色



○：素子照度を測定した点
●：光源のスペクトル・Si太陽電池・検量線を測定した点
＊○, ●は、東芝が追記
写真提供：飯田グループホールディングス(株)

図3. ウェルネススマートシティ®における測定箇所と測定の様子

パビリオンの営業時間外に各種測定を実施した。

Measurement locations and illuminance measurement scene

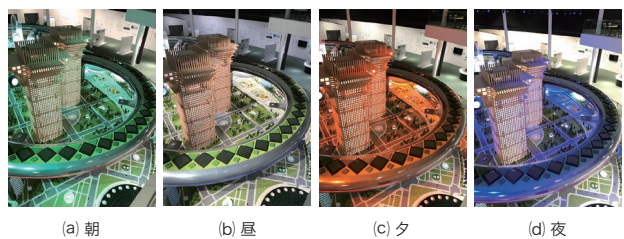


図4. ウェルネススマートシティ®の四つの照明演出効果

朝・昼・夕・夜に見立てた四つの照明演出で、1日の時間推移を表現している。

Four lighting effects in Wellness Smart City

温度差の影響を、条件間で相互に比較可能な形で評価できる。会期中の性能評価は、パビリオンの営業時間外に実施した(図3及び図4)。

照明条件の把握には、RGB(赤, 緑, 青)エネルギー強度計を用い、各照明条件における各色成分のスペクトル強度を測定した。また、ハンディー照度計を用いて照度を測定し、減光フィルターを併用して、照度(lx)とエネルギー強度(W/m²)の相関を示す検量線を作成し、以降の評価で用いた(図5)。

発電特性の評価では、10枚並列接続したF-PVKモジュールからの出力の電流-電圧(I-V)特性を測定した。I-V測定には、I-Vカーブトレーサー((株)システムハウス・サンライズ製 W32-2460SOL3-N)及びソースメーターを用いた。Si太陽電池についても、F-PVKと同一の照明演出条件下で測定を行った。なお、素子特性に応じて電圧の掃引条件は最適化しているが、相対的な特性比較では、評価結果の解釈に本質的な影響はないと考えられる。

4. 屋内照明環境下における発電特性

四つの照明演出条件下で測定したF-PVKの発電特性は、

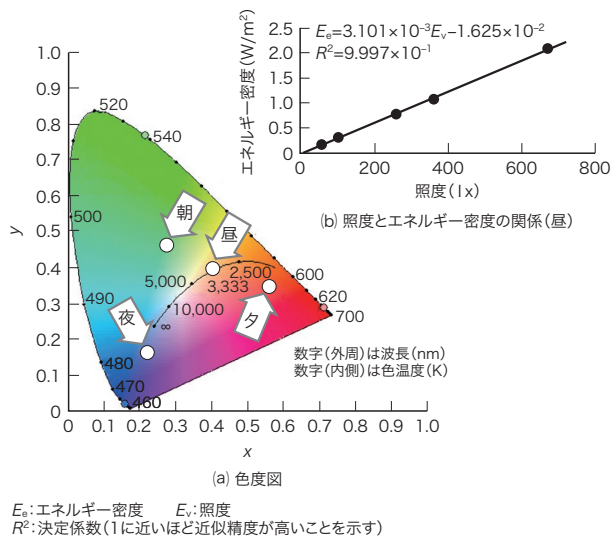


図5. 照明演出条件の色度図と照度に対するエネルギー密度変化の検量線の例(昼)

昼は白色光に近く、朝は緑系、夕は橙(だいだい)系、夜は青系の光である。検量線から、実証条件においては測定対象照度とエネルギー密度に良好な線形関係が確認された。

Chromaticity diagrams for each lighting condition and example relationship between illuminance and energy density under daytime lighting

表1. 各屋内照明条件におけるSi太陽電池に対するF-PVKの発電効率比(大阪・関西万博開催前に測定)

Power generation efficiency ratios of film-based perovskite and crystalline silicon PV modules under four indoor lighting conditions

照明条件	昼	朝	夕	夜
照度(lx)	1,735	283	265	66
発電効率比	1.61	2.07	2.33	3.11

照度が高い条件では、エネルギー密度の増加に伴い出力電流が増加し、照度が低い条件では、エネルギー密度の減少に伴い出力電流が低下する傾向が確認された。一方、出力電圧は、照度による変動は比較的小さく、安定した挙動を示した。また、色温度の異なる照明演出条件間では、同程度の照度であっても発電特性に差が生じる場合があり、照明スペクトルの違いが発電挙動に影響を与えていることが示唆された。ただし、いずれの照明演出条件でも、発電特性の基本的な挙動は共通しており、特定の条件下だけで異常な特性が現れるといった傾向は認められなかった。

発電効率の絶対値は照度及び色温度条件によって変化するものの、照度に対する依存性や特性の変化傾向は各条件間でおおむね共通していた。屋内照明演出環境下におけるF-PVKの発電特性は、照度及びスペクトル条件の影響を受

けるが、特定の照度演出条件に強く依存する不安定な挙動を示すものではなく、一定の再現性を持って評価可能であることが確認された。

同一の照明演出条件下での比較により、低照度条件では、F-PVKはSi太陽電池に比べて高い発電効率を示し、夜の照明条件では最大で約3倍の発電効率比(Si太陽電池の発電効率を1としたときのF-PVKの発電効率の比)が得られた(表1)。これは、分光感度や低照度領域での特性差に起因するものと考えられる。

5. 連続運用による耐久性・運用安定性評価

ウエルネススマートシティ®に設置したF-PVKは、大阪・関西万博開催期間を通じた連続運用において、会期前後及び会期中に実施した定期的な性能評価の結果、発電特性に大きな変化は認められず、出力電圧及び電流の挙動はおおむね初期状態と同様の傾向を維持していた。特に、屋内低照度環境で懸念される出力低下や不安定動作は確認されず、照明演出条件の切り替えを含む運用でも、発電特性は安定して推移した。また、F-PVK及び関連する配線・固定構造について、外観異常や電気的な不具合は認められなかった。更に、屋内設置特有の環境要因である温度変動や照明演出条件の変化に起因する安全性上の問題も確認されなかった。このように、屋内照明演出環境下でのF-PVKの実運用において、十分な信頼性及び安全性を確保できることを確認した。

この実証は、加速試験や標準化された耐久試験とは異なり、実環境における長期間の連続運用を通じてF-PVKの挙動を評価したものである。得られた結果は、屋内照明環境下における実使用条件での運用安定性を示す知見として位置付けられる。

6. 考察

この実証により、屋内照明演出環境という低照度かつ非理想光源条件下において、F-PVKが安定した発電特性を示すことが確認された。朝・昼・夕・夜に見立てた四つの照明演出条件下において、発電効率の絶対値は照度及び色温度の違いに応じて変化するものの、照度依存性や発電特性の基本的な挙動はおおむね共通しており、特定の照明演出条件に強く依存した不安定な挙動は認められなかった。このことは、屋内照明環境におけるF-PVKの発電挙動が、一定の再現性を持って評価可能であることを示している。

また、同一照明演出条件下で評価したSi太陽電池との比較から、低照度条件においてF-PVKが相対的に高い発電効率を示す傾向が確認された。これは、両者の分光感度や低照度領域における特性差に起因するものと考えられる。

表2. ほこり除去前後の各パラメーターの増減率(大阪・関西万博閉幕後に測定)

Percentage change of each parameter of film-based perovskite PV modules before and after dust removal under four indoor lighting conditions

照明条件	昼	朝	夕	夜
照度 (lx)	1,480	293	247	60
色温度 (K)	3,533	6,329	1,659	定義外
色座標 (x, y)	(0.405, 0.394)	(0.303, 0.443)	(0.568, 0.351)	(0.277, 0.173)
エネルギー密度 (W/m ²)	4.25	0.70	0.71	0.30
I_{sc} の増減率 (%)	10.9	9.2	9.3	7.7
V_{oc} の増減率 (%)	4.3	3.3	2.3	1.5
FF の増減率 (%)	-0.4	0.3	-0.5	-0.3
P_{max} の増減率 (%)	15.1	13.1	11.2	9.0

I_{sc} : 短絡電流 V_{oc} : 開放電圧 FF : 曲線因子 P_{max} : 最大出力

特に、可視光域を中心とした屋内照明スペクトルに対してF-PVKが比較的高い応答性を示す点は、屋内用途における特性上の優位性を示唆している。このような傾向は、実験室レベルで評価された、既に報告されている傾向と一致する⁽⁴⁾。

一方、屋内のF-PVKでは、ほこりの堆積により出力が低下する傾向が確認されており、屋内環境における表面汚れの影響は無視できない要因であることが明らかとなった。表2に、ほこり除去前後の各パラメーターの増減率(ほこり除去前を基準としたときの除去後の増減量の割合)を示す。この影響は照度条件によって現れ方が異なり、特に低照度環境では、入射光量が小さいため、ほこりによる透過損失の影響が相対的に大きく顕在化しやすいと考えられる。更に、ほこりの影響は照度だけでなく、色温度にも依存することが示唆された。低色温度側、すなわち夕の照明演出条件では、ほこり除去による出力回復率が相対的に小さく、表面汚れに対してロバストな傾向が示唆された。これは、長波長成分を多く含む光が短波長成分と比較して散乱されにくく、ほこりによる光学的損失の影響を受けにくいためと解釈される。これらの知見は、この実証条件と類似した照明スペクトルを持つ屋内施設など(例えば、博物館や植物工場)に適用できる。

ただし、この実証は屋内照明演出環境に限定された条件下での評価であり、照明方式やスペクトル構成が異なるほかの屋内環境に対して、同様の結果がそのまま適用できるとは限らない。また、ほこりの性状や、堆積状態、清掃頻度などと発電特性との関係は、今後更に詳細な検討が必要である。したがって、この実証結果は、屋内照明環境下におけるF-PVKの実使用条件での特性を示す知見として位置付けることが適切である。

7. あとがき

ここでは、大阪・関西万博の飯田グループ×大阪公立大学共同出展館に設置されたウエルネススマートシティ[®]を対象に、F-PVKの屋内照明演出環境下における発電特性及び運用安定性を述べた。

実環境における朝・昼・夕・夜に見立てた異なる照明演出条件下において、発電効率の絶対値は変化するものの、照度依存性や発電特性の基本的な挙動はおおむね共通しており、屋内低照度環境において安定した特性が確認された。また、Si太陽電池との比較から、低照度条件においてF-PVKが相対的に高い発電効率を示すことが改めて確認された。更に、ほこりの影響は照度だけでなく照明スペクトルにも依存し、低色温度側の照明条件では表面汚れの影響を受けにくい傾向が示唆されるという新しい知見も得られた。

当社は、今後も継続してF-PVKの特長を明らかにする技術開発をするとともに、社会実装するための課題解決に取り組んでいく。

謝 辞

この実証の実施にあたり、大阪・関西万博における実証機会をご提供いただくとともに、ジオラマ設計及び運用に関して多大なるご協力を賜りました飯田グループホールディングス(株)の関係各位に、深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 都島顕司, 宮内裕之, PVの多様な設置形態を可能にするフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュール, 東芝レビュー, 2021, **76**, 3, p.17-20.
- (2) 藤永賢治, 浅谷 剛, フィルム型ペロブスカイト太陽電池の設置方法及びシステム構築における課題, 電気設備学会誌, 2025, **45**, 2, p.93-96.
- (3) 飯田グループホールディングス, “Exhibition Contents”. <<https://www.ighd.co.jp/lp/contents.html>>, (参照 2026-04-02).
- (4) Chen, W. et al. Indoor light energy harvesting perovskite solar cells: from device physics to AI-driven strategies. Royal Society of Chemistry, 2025, **12**, p.3691-3711. <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/mh/d5mh00133a>>, (accessed 2026-04-02).

・ウエルネススマートシティは、飯田グループホールディングス(株)の登録商標。



浅谷 剛 ASATANI Tsuyoshi, D.Sci.
エネルギーアグリゲーション事業部 次世代太陽電池開発部
博士(理学)
日本化学会・電気学会会員
High-Performance Photovoltaics Development Dept.



藤永 賢治 FUJINAGA Kenji
エネルギーアグリゲーション事業部 次世代太陽電池開発部
High-Performance Photovoltaics Development Dept.