

# ペロブスカイト太陽電池導入に向けた 小型円筒形発電デバイスの開発取組み

## Development of Compact Cylindrical Photovoltaic Devices for Perovskite Solar Cells

技術開発センター  
第三開発室 技師  
博士 (工学) 廣谷 太佑  
Daisuke Hirotani

技術開発センター  
第三開発室 リーダー  
野村 大志郎  
Daishiro Nomura

技術開発センター  
開発管理室  
園 勇哉  
Yuya Sono

技術開発センター  
第三開発室 主任技師  
武谷 利広  
Toshihiro Takenoya

### 要 旨

ペロブスカイト太陽電池の登場により、太陽電池分野における封止技術の重要性が高まっている。なぜなら、これまで太陽電池に使われていたシリコン材料に比べて、有機・無機ハイブリッド型のペロブスカイトは大気安定性や熱安定性に乏しいためである。封止技術の重要性はペロブスカイト太陽電池だけでなく化合物系太陽電池、有機薄膜太陽電池、色素増感太陽電池などの次世代型太陽電池でも同様である。これらは、従来のフレキシブル太陽電池に比べ、変換効率が高い。従って、高耐久化が実現できれば、これまでにない軽くて曲げられる太陽電池が高性能で実現可能である。これまで著者らが開発を進めてきた小型円筒形発電デバイスは、高い封止性能を実現可能である。本紙では、当社における小型円筒形発電デバイスの高性能化に向けた取り組みと進捗について紹介する。

### Abstract:

Sealing technology has become a critical issue for achieving high stability in solar cells, with introduces of perovskite solar cells. This is because organic-inorganic hybrid type perovskite materials are more sensitive to factors such as air and high temperature compared to traditional silicon-based solar cell materials. Those issues are not limited to the perovskite solar cells; it also affects next-generation solar cells, including compound, organic, and dye-sensitized solar cells. Additionally, these new-generation solar cells generally demonstrate higher efficiency compared to traditional flexible solar cells (e.g., amorphous silicon). Therefore, achieving high performance and flexibility in solar cells depends on ensuring their stability. Our development of "compact Cylindrical Photovoltaics (Cylindrical PVs)" addresses this by providing high atmospheric barrier properties. This paper discusses our progress improvement for power in developing cylindrical PVs.

## 1. 緒言

太陽光発電設備の需要は、10 kW 未満の住宅用太陽光発電設備導入件数を見ると、2012 年では 426,868 件だったのに対し、2019 年では 151,644 件へと減少傾向にあり、加えて 10 kW 以上の事業用太陽光発電の導入量は、3.7 GW から 3.5 GW に減少している<sup>1),2)</sup>。減少の要因として、野立てのような広大な設置場所には限りがあった<sup>3)</sup>ことや、固定価格買取制 (FIT 制度) の終了が挙げられる。しかし、10 kW 未満の総導入数は先の文献<sup>1)</sup>を見ても増加していることは明らかである。平野が少ない日本国内だけで見ると、従来の平板太陽光発電設備とは異なった、新たな設置シーンへと変わ

りつつある<sup>4)-6)</sup>。例えば、建物の壁面、洋上、農地や荒廃農地、湾曲面などが新たな設置場所の候補である。現在、これらを設置シーンとした様々な実証実験が行われている。著者らが開発している小型円筒形発電デバイスも、従来の平板太陽電池では設置が難しかった場所を対象に、実証試験のための準備を鋭意進めている。

小型円筒形発電デバイスは、ガラス管両端を無機材料で封止するため、高い封止性能が得られる。また現在我々は、小型円筒形発電デバイスの評価を実施するために、変換効率 ( $\eta$ ) が  $\eta = 7\%$  のアモルファスシリコン ( $\alpha$ -Si) 太陽電池を利用している<sup>7)</sup>。今後、 $\eta > 20\%$

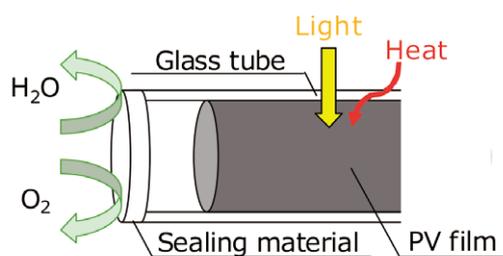


Fig.1 Schematic of feature of cylindrical PVs.

のフレキシブルな次世代太陽電池を用いて、小型円筒形発電デバイスの高出力化を目指していく。

その中でも特に、ペロブスカイト太陽電池に注目が集まっている。一般的にペロブスカイト太陽電池は曲げに強く、低コスト化が期待できるにも関わらず、実験室レベルでは $\eta$ が20%を超える太陽電池である<sup>8)-10)</sup>。一方で、ペロブスカイト太陽電池は大気中の水や酸素、熱、紫外線や赤外線に対し耐久性が低い材料であることも知られている。先行研究によれば、水や酸素に対する高バリア性能を持つシートや、一部の波長のみを遮蔽するフィルム等様々な対策が取られている。しかし、安定性の乏しいペロブスカイト太陽電池と組み合わせるシートは、不活性なシートの材質を用いる必要があり、その選択は容易ではない。

上述する通り、ペロブスカイト太陽電池の劣化機構は、複合的で劣化機構を一つひとつ分けて知ることは難しい。そこで、我々が持つガラス管封止を使用し、外気との接触を無視して評価することで、ファクターの一部に対し、切り分けが可能である。Fig.1に示す通り、ガラス管封止は外気をガラス管内部に通過させることはなくとも、熱や光はガラス管内部に到達する。これらの特徴を活かして様々な評価が可能だと考える。

本紙では、著者らがこれまでに実施してきた、ガラス管封止したペロブスカイト太陽電池の各種評価結果を例に、当社の取り組みについて報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 太陽電池のガラス管内への固定方法

太陽電池の種類により、ガラス管内での固定の方法は様々だが、一例として、ガラス基板に作製されたペロブスカイト太陽電池の固定方法について紹介する。特に、塗布によって形成されるペロブスカイト太陽電池等の場合、太陽電池のフレキシブル化にはいくつか大きな課題がある。従って、ガラス基板での小型サンプルを使って評価する方法はペロブスカイト太陽電池の耐久性を評価する上では、重要なステップの1つだと考えている。

Fig.2に固定方法に関する概念図を示す。小型円筒形発電デバイスはガラス管の両端から、ガラス管内部と外部をつなぐ電極が設けられている。当該電極のガラ

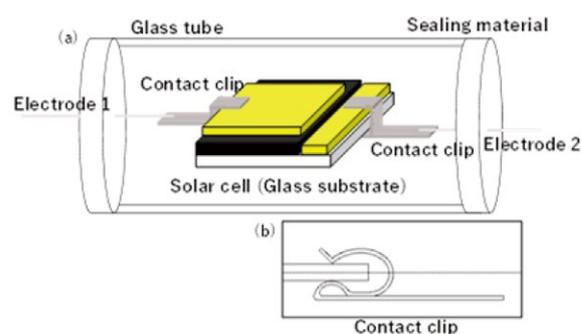


Fig.2 (a) Schematic for method of fixation in solar cells with glass substrate for the cylindrical PVs. (b) Detail of contact clip shape.

ス管内側に、チタンワイヤ（ニラコ社製）をスポット溶接により取り付け、スプリング形状にした。反対側に（ガラス管の内側を向いて）位置するチタンワイヤの先端に、チタン板（ニラコ社製）で作製したクリップ電極を取り付けた。取付方法にはスポット溶接を採用した。ここで、注意するのはガラス管内に使用する電極部に、有機材料を使用しないことで、加速試験等をする中で、太陽電池セル劣化の要因が、電極部材の劣化によらないようにしている。すなわち、各加速試験による劣化が、“純粋なガラス管内に封入した太陽電池の劣化”のみが観察できるようにしている。

また、すべてのサンプルに導入しているわけではないが、ガラス管の空間を活かして、乾燥剤やその他検出シートを入れることで、ガラス管内部のガスコントロールなどを可能としている。

## 2.2 評価方法

現在、弊社内で評価可能な内容について列記し、その方法の一例についてそれぞれ述べることとする。

### 2.2.1 電圧 - 電流特性を用いた性能評価

従来、電圧 - 電流特性を用いた測定法は、一般的に太陽電池の出力性能を評価するために測定する方法であり、ソーラシミュレータとソースメーター、ソースメーターの制御用コンピューターがあれば、測定可能である。電圧 - 電流特性評価は原理的には、式 (1)、(2) を用いる<sup>11)</sup>。

$$I = I_s \left\{ \exp \left( \frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right\} - I_0 \quad (1)$$

$$V_0 = \left( \frac{k_B T}{e} \right) \ln \left\{ \left( \frac{I_0}{I_s} \right) + 1 \right\} \quad (2)$$

ここで、 $I_s$  は逆方向飽和電流、 $I_0$  は短絡電流、 $V_0$  は開放電圧を指す。ただし、実際の測定では、電圧 - 電流曲線から曲線因子を求める方法が用いられる。弊社では、最大 100 mm 角まで測定可能なソーラシミュレー

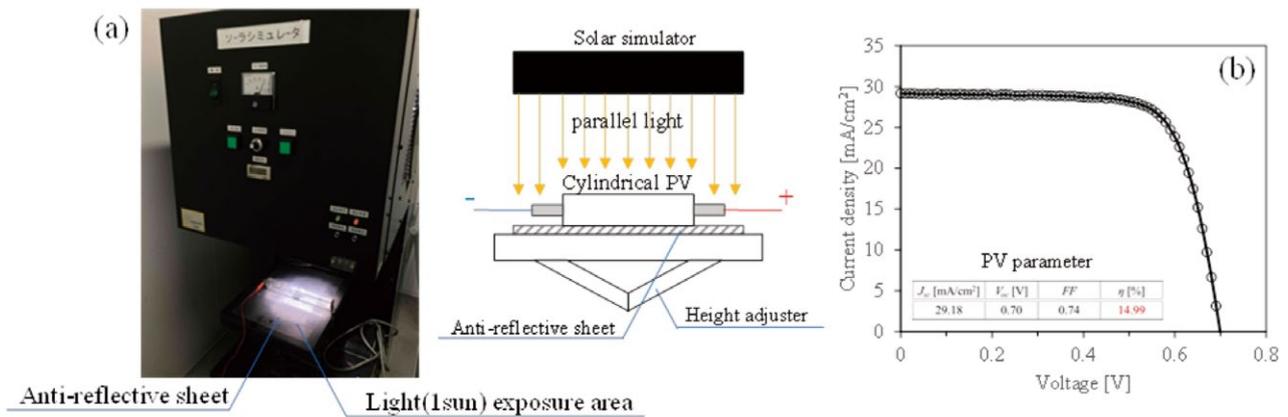


Fig.3 (a) Appearance and schematic of measurement in solar simulator. (b) I-V curve and PV parameters under 1SUN.

と 200 V (最大出力 20 W) まで掃引可能なソースメーターを設備として備えている。

電圧 - 電流特性評価に用いたソーラシミュレータの外観並びに、概念図を Fig.3(a) に示す。サンプルが円筒形状のため、サンプルの固定台からの反射光が光電変換性能に影響を与えかねないため、固定台には反射防止層を設けている。

### 2.2.2 高温高湿試験

JIS C 61215 地上設置の太陽電池 (PV) モジュール - 設計適格性確認及び型式認証 - に定められている MQT13 の高温高湿試験に概ね準拠した方法での試験を弊社内で評価可能である。ただし、高温高湿条件下は恒温恒湿槽で作られるが、当該環境中での 1SUN (光の強度 :1000 W/m<sup>2</sup>) 暴露による同時測定が実現できていない。そのため、一定時間終了後に恒温恒湿槽からサンプルを取り出し、室温下での性能評価を実施する他手立てが現状ない。また温度は 85°C で湿度は 85%RH 環境に調整する。現状、恒温恒湿槽は試験室寸法 500 W × 380 D × 630 H での試験が可能である。

### 2.2.3 熱サイクル試験

JIS C 61215 地上設置の太陽電池 (PV) モジュール - 設計適格性確認及び型式認証 - に定められている MQT11 の温度サイクル試験に概ね準拠した方法での試験を社内で評価可能である。この試験は前述の 2.2.2 節同様、当該環境中での 1SUN 暴露による同時測定が実現できていないため、一定サイクル後のサンプル取り出し後の性能評価ができるのみとなっている。温度は 85°C から -40°C まで 2 時間で降温し、-40°C を 10 分間保持する。保持時間終了後、-40°C から 85°C まで 2 時間で昇温し、85°C を 10 分間保持する、これを 1 サイクルとし、複数回実施する。恒温恒湿槽の試験室寸法は「2.2.2 高温高湿試験」と同じである。

### 2.2.4 光耐久性試験 (1SUN)

ソーラシミュレータで作りに出される 1SUN に調整された定常光を、太陽電池に照射し続ける。その間に電圧 - 電流特性測定を行うことで、太陽電池の出力性能を in-situ 測定で耐光性試験を行う。

### 2.2.5 屋外暴露試験

屋外に小型円筒形発電デバイスを設置し、一定の時間間隔毎に電圧 - 電流特性評価もしくは最大出力点測定を行う。太陽電池性能測定時には常に光量と温度を同時測定し、性能評価と同期するようにしている。

屋外暴露試験に使用したサンプルの配置と、センサー類の配置の様子を Fig.7(a) に示す。同図でガラス管の長手方向が南北を向き、ガラス管が地上に対し、水平になるように配置した。光量センサーは南向きに水平方向と垂直方向の両方に向け設置した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 電圧 - 電流特性を用いた性能評価

Fig.3(b) にペロブスカイト太陽電池セルの電圧 - 電流曲線を示す。本サンプルの測定結果は、短絡電流 ( $J_{sc}$ ) = 29.18 mA/cm<sup>2</sup>、開放電圧 ( $V_{oc}$ ) = 0.70V、曲線因子 (FF) = 0.74 であり、変換効率 ( $\eta$ ) はこれら 3 つの積により、得られるので、14.99 % であることが分かった。

### 3.2 高温高湿試験

Fig.4 に、温度 = 85°C、湿度 = 85 %RH に調整した恒温恒湿槽で、最長 2000 時間保管したペロブスカイト太陽電池の耐久性試験結果を示す。同図は、縦軸にそれぞれ (a) 効率、(b) 開放電圧、(c) 短絡電流、(d) 曲線因子を規格化したものを示し、横軸は保管時間である。同図 (a) から、初期性能に対し、2000 時間経過後の変換効率が 86 % まで減少していることが確認された。JIS C 61215 の定める試験は、同温度、湿度環境下で 1000 時間の耐久試験を設定している。1000 時間では初期性能からの劣化は見られなかった。一方で、

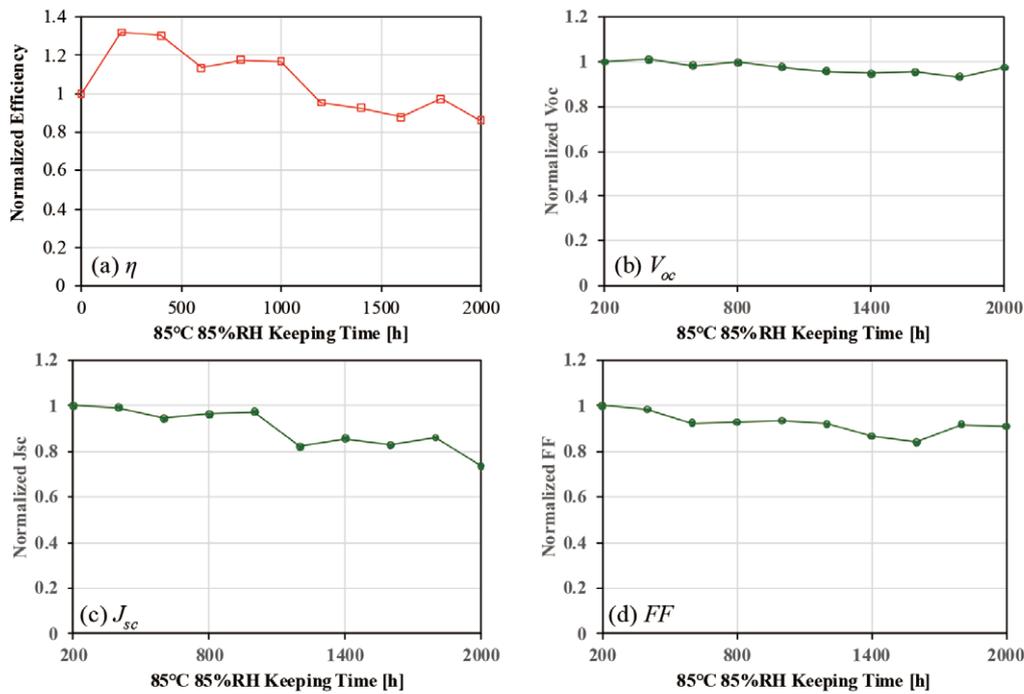


Fig.4 Results of stability under the 85°C 85%RH. (a)Normalized efficiency, (b)Normalized  $V_{oc}$ , (c)Normalized  $J_{sc}$ , (d)Normalized  $FF$

結晶シリコン太陽電池を見ると、同条件下で 3000 時間経過し、性能低下が 10 % 未満の耐久性を示した結果もある<sup>12)</sup>。ペロブスカイト太陽電池の熱耐久性向上に課題が残る結果となった。各種パラメータの特性を見てみると、 $V_{oc}$  は比較的安定しているのに対し、 $J_{sc}$ 、 $FF$  が不安定だった。本結果からペロブスカイト太陽電池の分解または直列抵抗の増加が変換効率低下の原因と考えられる。

### 3.3 熱サイクル試験

Fig.5 に、ペロブスカイト太陽電池の -40°C ⇄ +90°C 熱サイクル試験結果を示す。合計サイクル数は 200 サイクル実施した。今回は、途中の劣化状況も把握、観察する必要があると考え、50 サイクル毎にソーラシミュレー

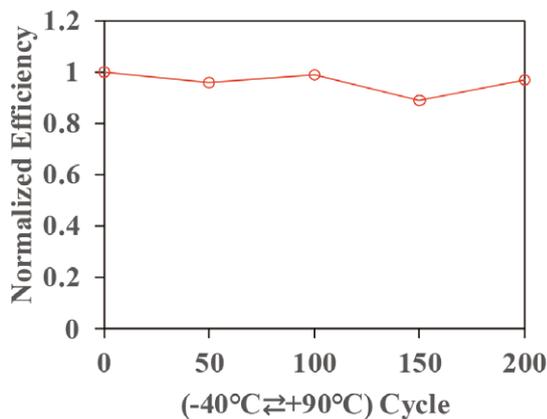


Fig.5 Result of thermal cycle test. (-40°C ⇄ +90°C)

タを用いた性能評価を実施した。同図を見ると、初期性能から 200 サイクル終了時は 96.85 % だった。本結果は JIS C 61215 の定める試験に合格する基準であった。一方、結晶シリコン太陽電池の先行文献を見ると、同試験条件下での 600 サイクル程で、はんだ部に不良が生じたことが報告されている<sup>13)</sup>。

### 3.4 光耐久性試験

Fig.6 に、ペロブスカイト太陽電池の 1SUN 下での光耐久性試験結果を示す。縦軸に最大出力点、横軸に時間を示している。また同図縦軸は、初期性能で規格化している。初期性能から 300 時間程で、20 % まで減衰する結果となった。これは、光を受けて発電する太陽電池にとって、重大な課題である。課題発見の方

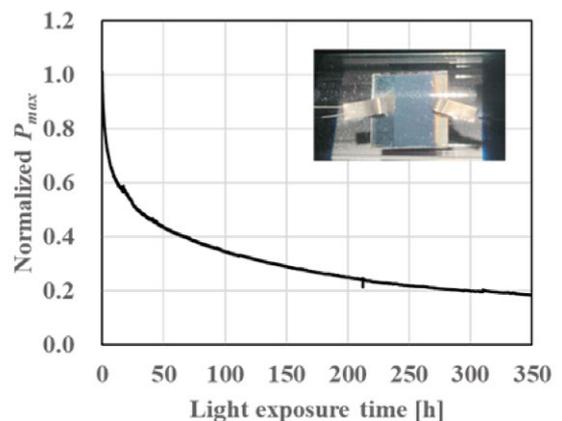


Fig.6 Result of 1SUN light exposure test.

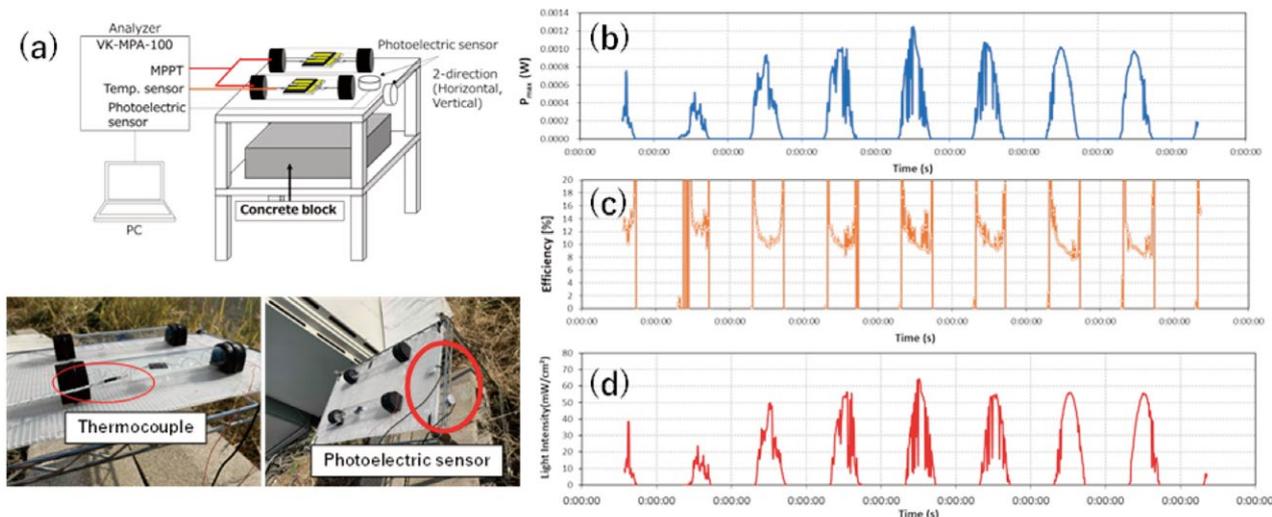


Fig.7 (a) Schematic and appearance of location for outdoor exposure test. Result of outdoor exposure test each of (b) $P_{max}$ , (c)Efficiency, (d) Light intensity. (Investigation period: from 6, Feb., 2024 to 14, Feb., 2024)

法として、ガラス管外側に特定波長を吸収、透過するフィルム等を貼り付ける等することで、太陽電池がどの波長で劣化が生じているか、区別可能である。

### 3.5 屋外暴露試験

Fig.7(b), (c), (d)に、2024年2月6日から2024年2月14日までの(b)最大出力、(c)変換効率、(d)光量の測定結果を示す。最大出力のプロットが光量のプロットに良く追従している。劣化率がFig.7だけでは、データを読み取ることが難しいため、1日毎の変換効率を式(3)から求めた。1日の総発電量( $P_{max}$ )を総日射量( $\phi_{day}$ )で割ったものを1日毎の変換効率( $\eta_{day}$ )とした。

$$\eta_{day} = \frac{\int_{t_{start}}^{t_{end}} P_{max}(t) dt}{\int_{t_{start}}^{t_{end}} \phi_{day}(t) dt} \quad (3)$$

式(3)で求めた1日毎の変換効率をTable 1に示す。

表中の変換効率を見ると日を追うごとに変換効率さが下がっていることが分かる。これは光耐久性試験で見られた減衰による劣化現象だと考えられる。

Table 1 Summary of efficiency for outdoor exposure each day.

	$\phi_{day}$ [mWh/cm <sup>2</sup> ·day]	$P_{max}$ [mWh/cm <sup>2</sup> ·day]	$\eta_{day}$ [%]
7 Feb., 2024	60.95	8.51	13.96
8 Feb.	223.68	24.36	10.89
9 Feb.	268.56	28.11	10.47
10 Feb.	289.92	31.00	10.69
11 Feb.	283.83	29.88	10.53
12 Feb.	335.06	32.41	9.67
13 Feb.	320.93	30.67	9.56

※Reference 1SUN = 100mW/cm<sup>2</sup>

### 4. 結論

これまでに得られた試験結果を要約すると、次の通りである。

- 1) ガラス管内の電極部材に完全無機な材料を使ったサンプルの固定方法によって、ガラス基板上に作製されたペロブスカイト太陽電池の評価が可能になった。
- 2) 太陽電池の物性に関わる部分の評価に関する設備を弊社内に備え、ガラス管封止後のサンプルの即時評価を実現し、ペロブスカイト太陽電池に対する測定パラメータや、環境暴露と測定間隔に関して、ノウハウを蓄えることができた。
- 3) 完全に外気と遮断されたガラス封止により、光、熱の影響だけの、太陽電池の劣化評価が可能であり、且つ、封止材を使用しないサンプルの封止方法のため、材料その物の評価を実現している。

今後も引き続き、ペロブスカイト太陽電池をガラス管内に封入した小型円筒形発電デバイスに関する開発を進めていく。太陽電池メーカーからのサンプル評価依頼等があれば積極的に取り組みを進めていきたい。

### 謝辞

本研究は、科学技術振興機構にて実施した研究成果展開事業・研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)の委託研究によって、得られた成果です。

また、本紙の実験でガラス管内に封入したペロブスカイト太陽電池は、電気通信大学早瀬研究室から提供いただいたサンプルです。

本研究に際し、ご協力いただいた皆様に心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 経済産業省 (METI) HP「なっとく再生可能エネルギー」設備導入状況資料 [https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/statistics/index.html](https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/statistics/index.html)
- 2) 一般社団法人 太陽光発電協会「太陽光発電の状況—主力電源化に必要な新規案件開発継続—調達価格等算定委員会資料」 [https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/062\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/062_01_00.pdf)
- 3) 環境省「太陽光発電の導入見込量と 関連情報について」 <https://www.env.go.jp/content/900449235.pdf>
- 4) 中村、市川、山本「ビル壁面設置太陽光発電システムの発電量評価」、Journal of Japan Solar Energy Society, 50(1), 2024, 23-28.
- 5) 柴田「営農型太陽光発電への期待と課題」、第 20 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(第 3 回日本太陽光発電学会学術講演会)講演予稿集(2023.6.29-30).
- 6) 小林 浮体式洋上太陽光発電と水素エネルギーキャリアを用いた カーボンフリーエネルギー供給システム —気温上昇 1.5°C未満のパリ協定目標達成を目指して— Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 43, No. 6 (2022).
- 7) 野村、廣谷、園、武谷:フジコー技報 No.30 (2022)
- 8) Martin A. Green et al., Solar cell efficiency tables (Version 63), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Volume 32, Issue 1, 3-13.
- 9) A kihiro Kojima, Kenjiro Teshima, Yasuo Shirai and Tsutomu Miyasaka, Organo Metal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizer for Photovoltaic Cells, J. Am. Chem. Soc., 2009, 131 (17), pp 6050-6051
- 10) NREL, Best Research-Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- 11) 柴田「太陽電池の基本等価回路と電流・電圧特性」AIST 太陽光発電研究成果報告会 (2017) [https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/results/2017/oral/tutorial\\_lecture.pdf](https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/results/2017/oral/tutorial_lecture.pdf)
- 12) 鈴木、棚橋、土井、増田「結晶 Si 太陽電池モジュールにおける高温高湿試験の加速方法の検討」エレクトロニクス実装学会誌 Vol. 18 No. 4 (2015).
- 13) S. Kawai, T. Tanahashi, Y. Fukumoto, F. Tamai, A. Masuda, M. Kondo, Causes of Degradation Identified by the Extended Thermal Cycling Test on Commercially Available Crystalline Silicon Photovoltaic Modules, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 7 Issue 6 (2017).