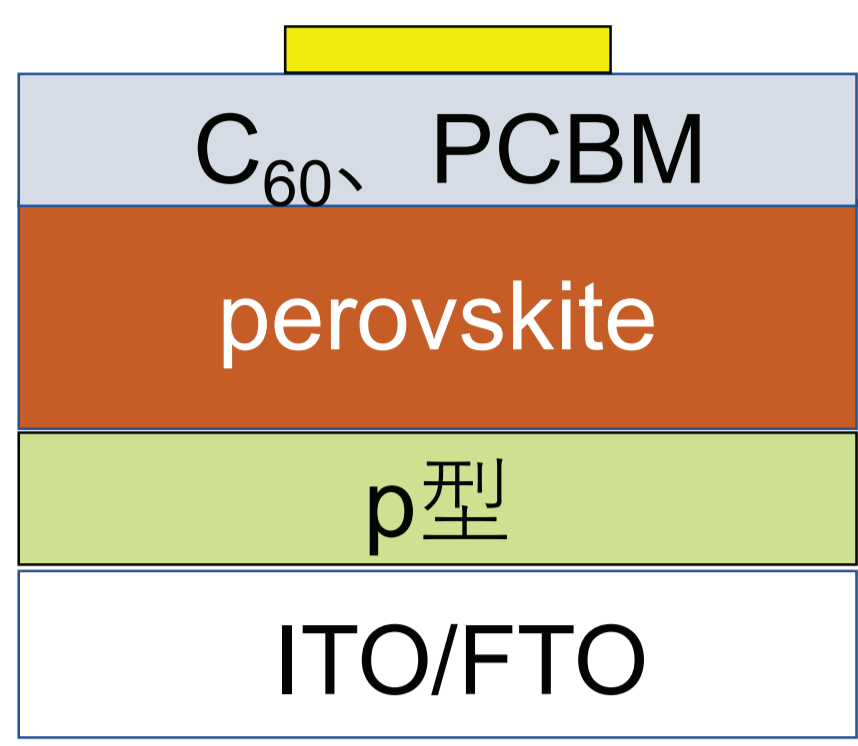


TiO₂の常温製膜技術と 逆構造ペロブスカイト太陽電池への応用

研究背景

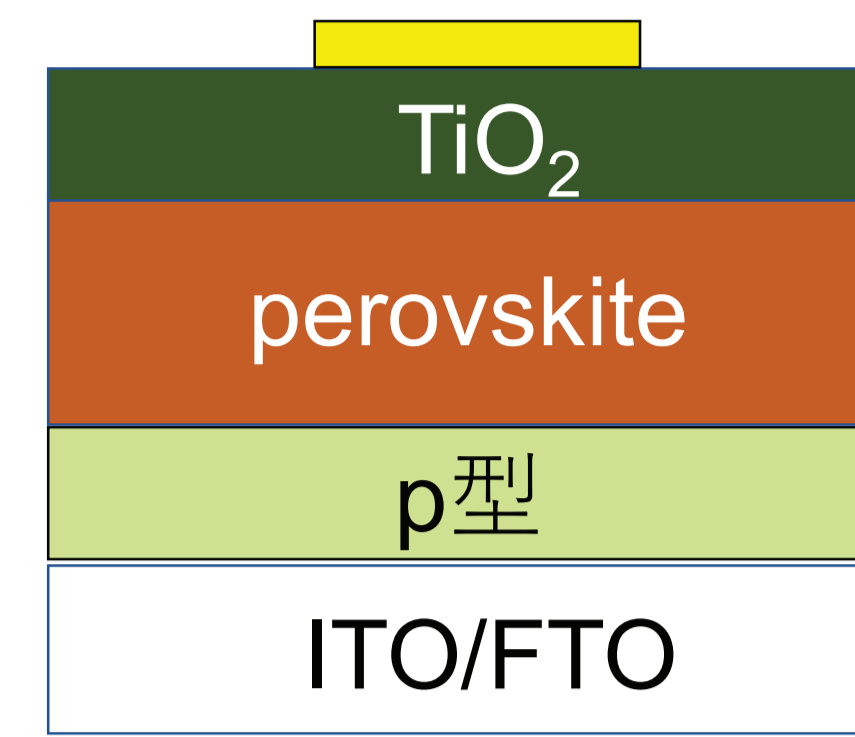
逆構造ペロブスカイト太陽電池



- <150 °C低温作製プロセス
- × C₆₀系材料が高価

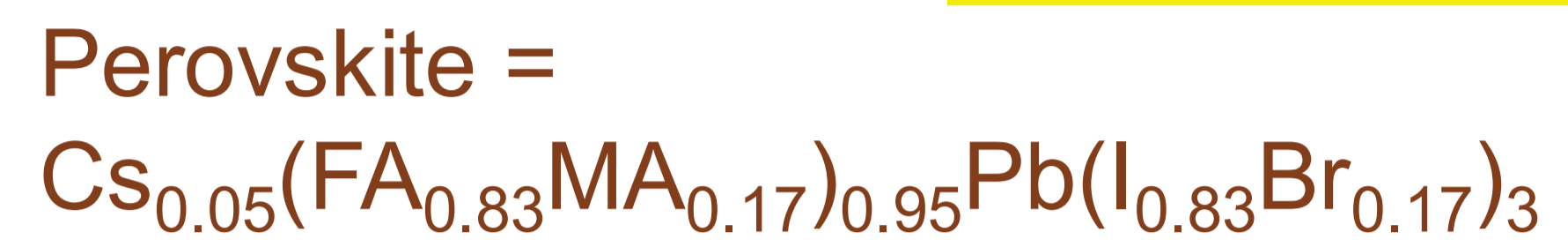
ペロブスカイト結晶の耐久性が低いため、
常温製膜できるC₆₀系材料が用いられる

本研究の目的

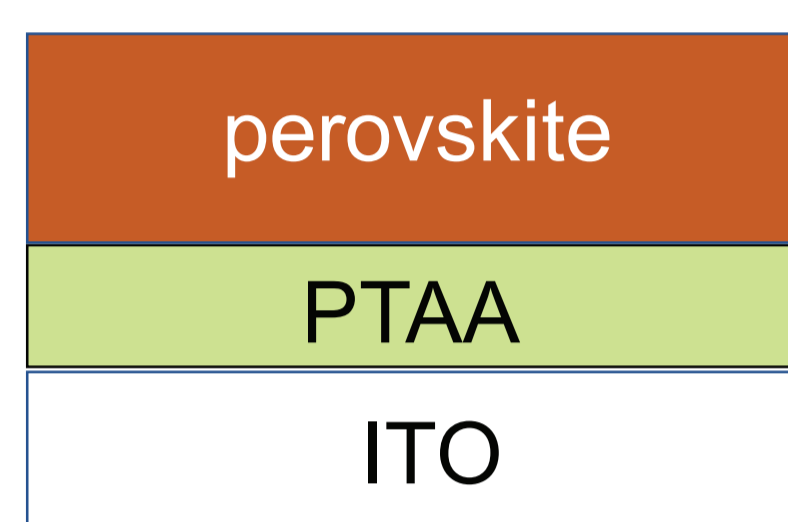
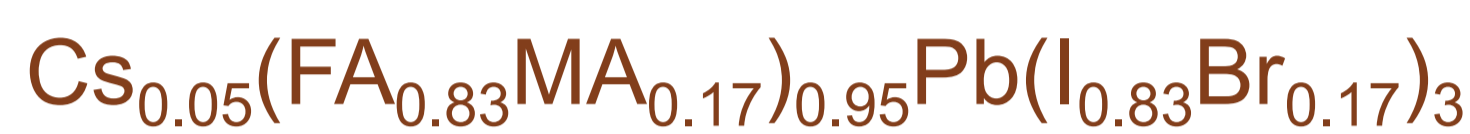


TiO₂を常温で製膜
する技術を開発
電子輸送層に応用

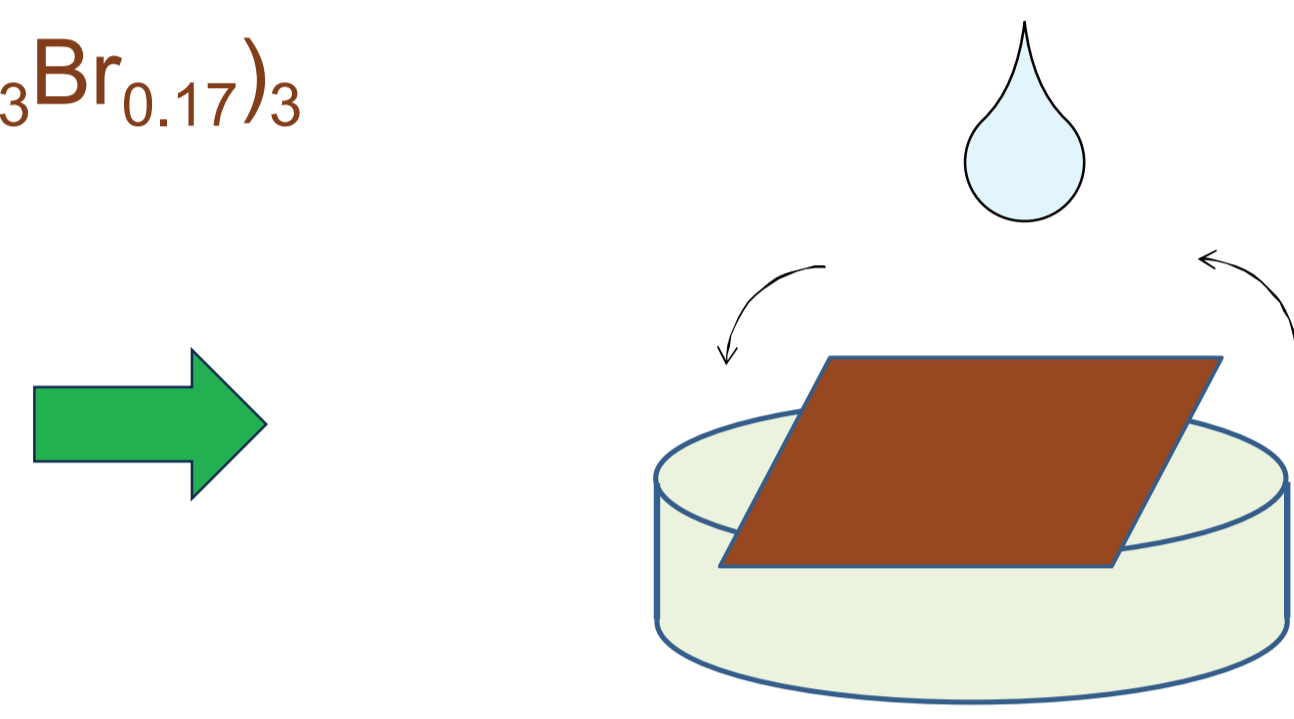
C₆₀系材料の代替材料
として用いる。



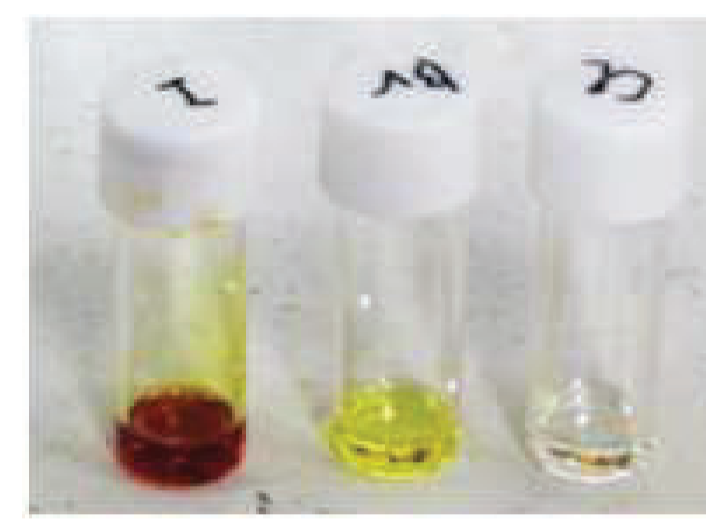
実験



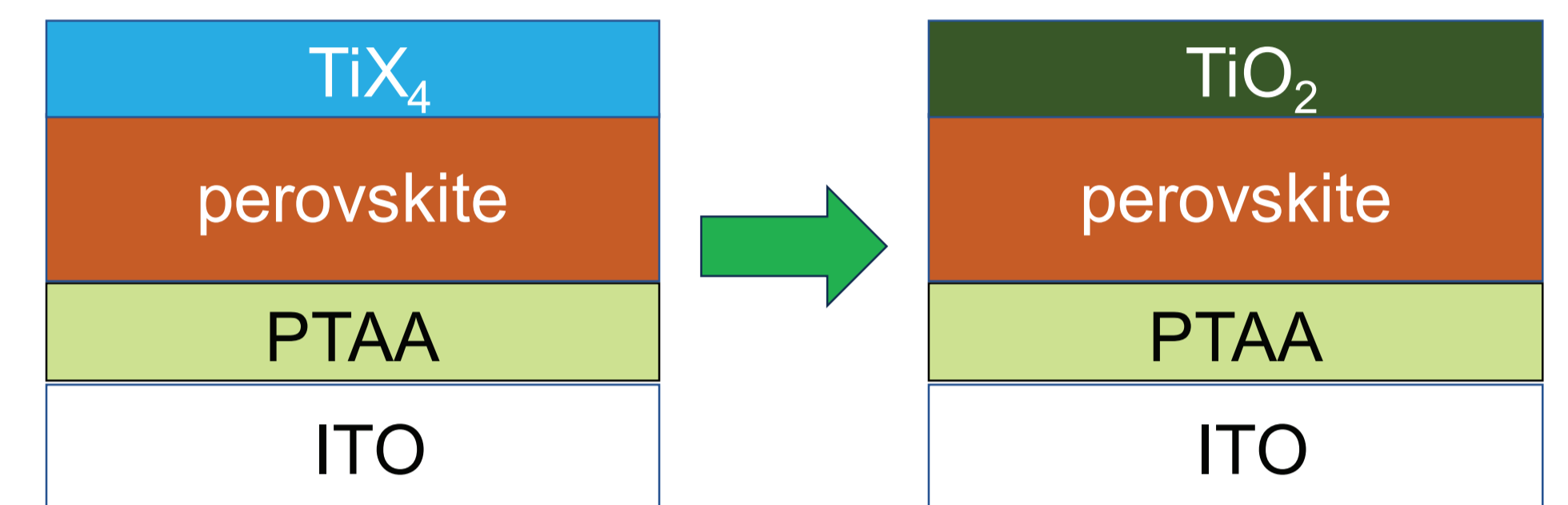
ITO/PTAA/Perovskite
基板



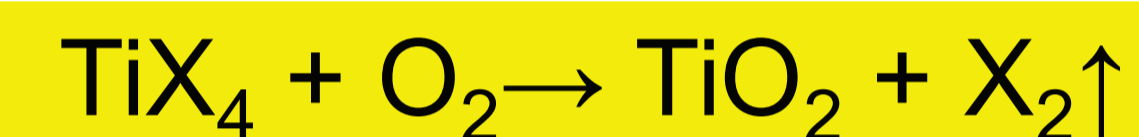
Perovskiteに塗布
N₂雰囲気



ハロゲン化チタン

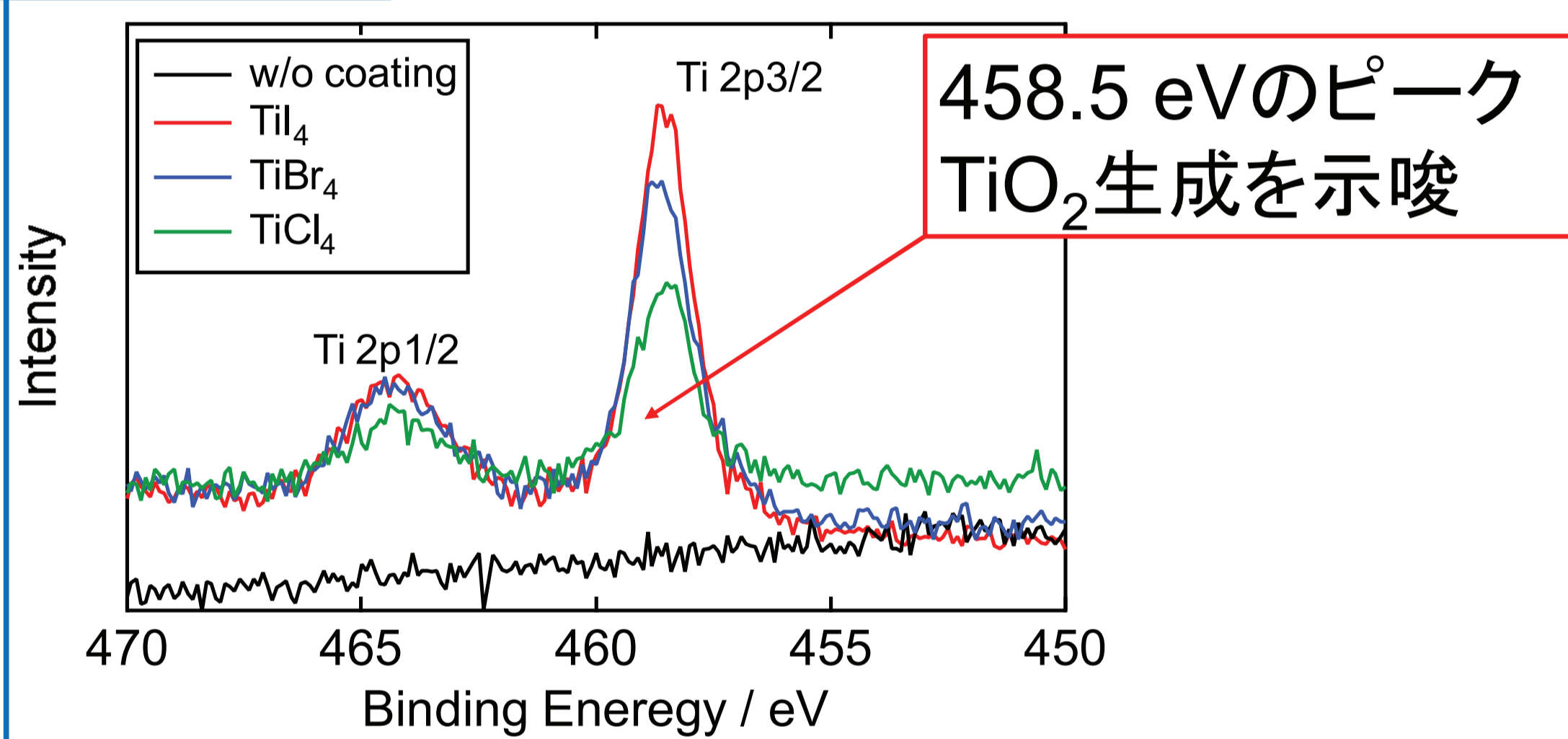


空気酸化
~25 °C, RH ~30%



結果と考察

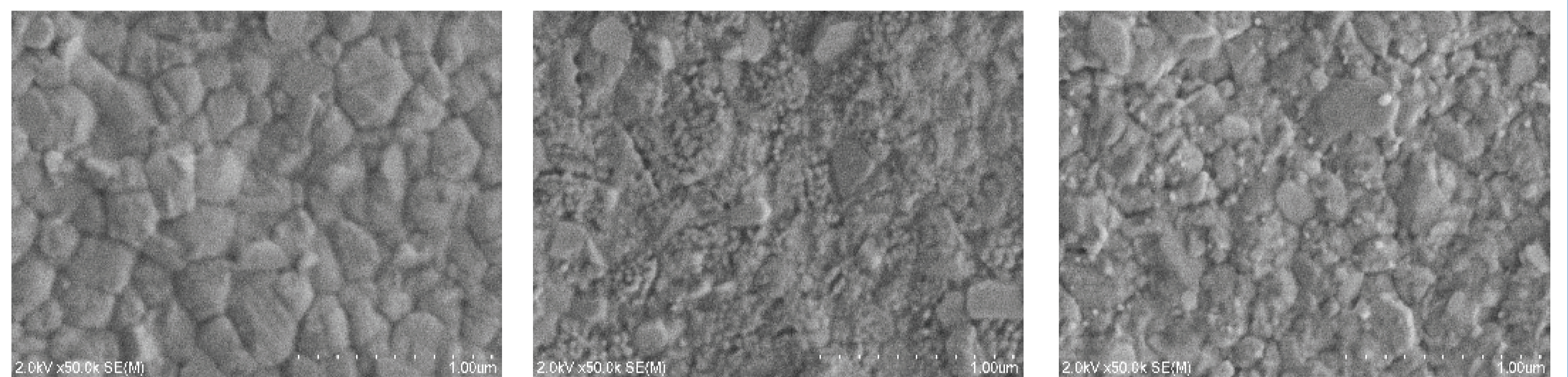
XPS解析



458.5 eVのピーク
TiO₂生成を示唆

TiI₄、TiBr₄、TiCl₄いずれを用いてもTiO₂生成
常温製膜に成功

電子顕微鏡(SEM)観察



前駆体: TiI₄

平坦な膜

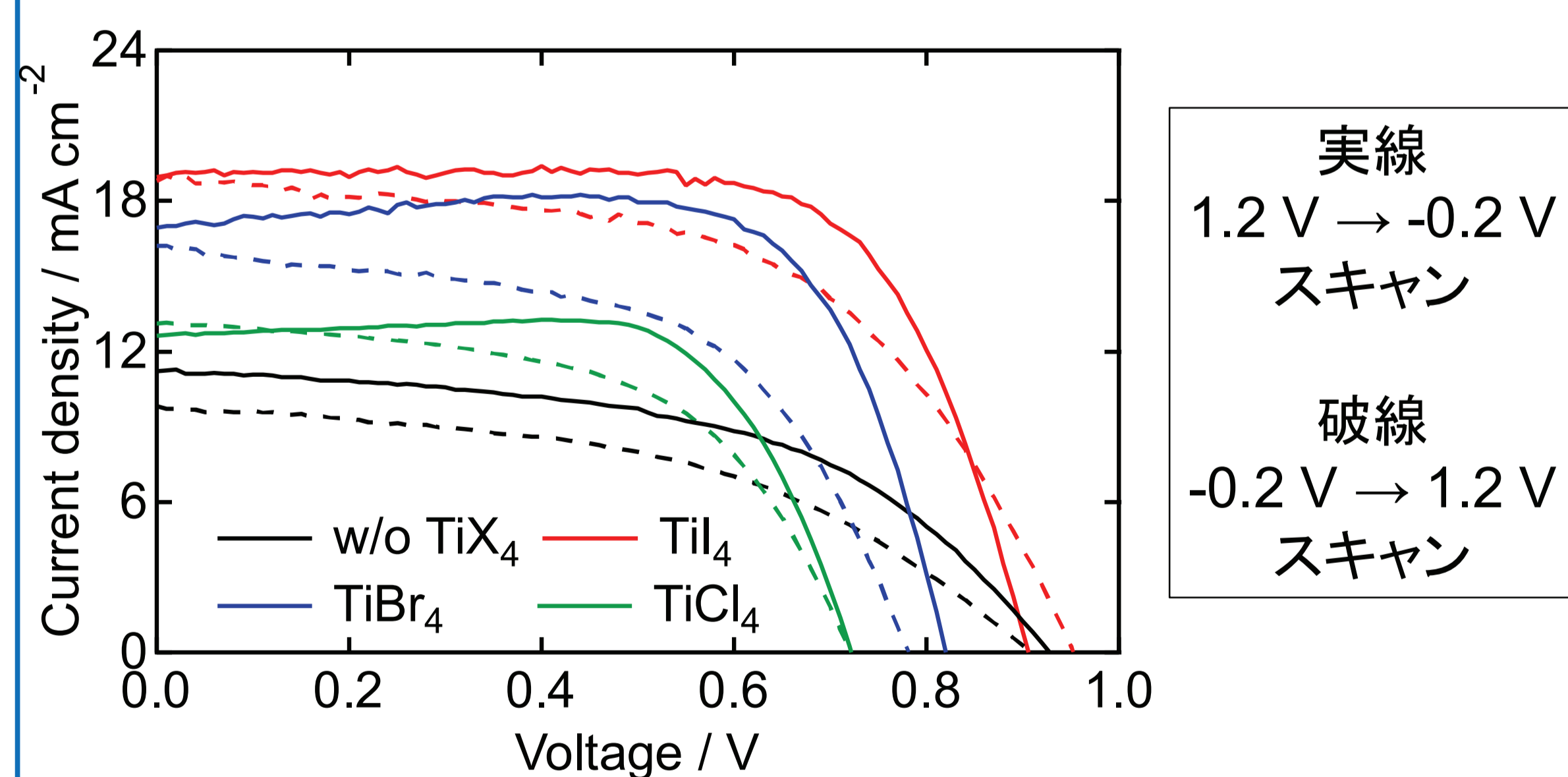
TiBr₄

TiO₂の凝集あり

TiCl₄

TiO₂の凝集あり

光電流密度-電圧(JV)測定



実線
1.2 V → -0.2 V
スキャン
破線
-0.2 V → 1.2 V
スキャン

光電変換特性 (1.2 V → -0.2 Vスキャン)

前駆体	J _{SC} / mA cm ⁻²	V _{OC} / V	FF	PCE / %
w/o TiX ₄	11.23	0.927	0.516	5.38
TiI ₄	18.94	0.906	0.704	12.08
TiBr ₄	16.92	0.820	0.754	10.47
TiCl ₄	12.62	0.722	0.723	6.58

- TiX₄塗布により、J_{SC}とFFが増加→生成したTiO₂が電子収集
- TiBr₄、TiCl₄はbumpyなJVカーブ→界面でのチャージングがある
- TiI₄塗布により、12.08%のエネルギー変換効率

結論

TiI₄、TiBr₄、TiCl₄前駆体を空気酸化することで、TiO₂を常温製膜できることを見出した。

TiI₄を用いた場合、平坦で均一なTiO₂膜を生成し、電子輸送層に用いると12.1%のエネルギー変換効率を得られた。

A. Kogo and T. N. Murakami, in preparation.

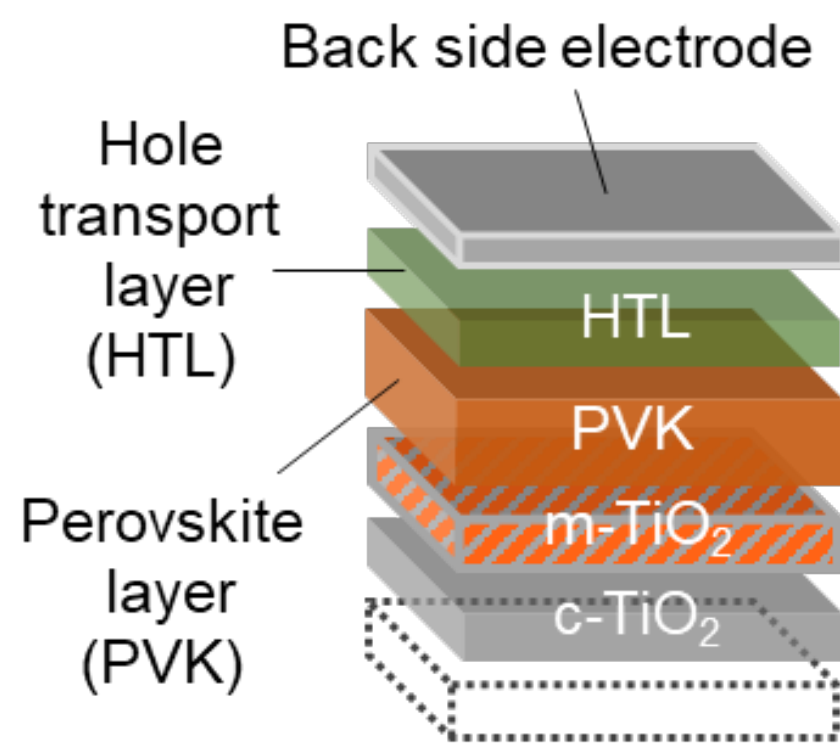
謝辞

NEDO: グリーンイノベーション基金事業 / 次世代型太陽電池の開発 (JPNP21016)

非ハロゲン系溶媒に可溶なドーパントフリーホール輸送材料を用いたペロブスカイト太陽電池

Introduction

Perovskite solar Cell (PSC)



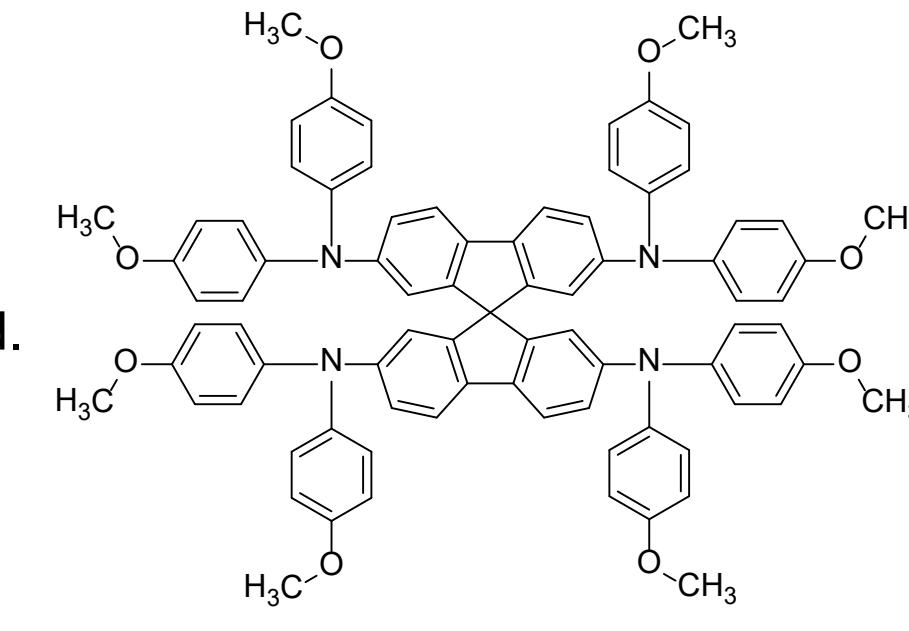
- High power conversion efficiency
- Easy fabrication
- Low cost

HTMs have been actively explored. The exploration mainly focused on the following three characteristics:

- 1) Long-term stability.
- 2) High hole mobility.
- 3) Suitable frontier energy levels matching that of perovskite layer.

Figure 1 Typical mesoporous-type device structure.

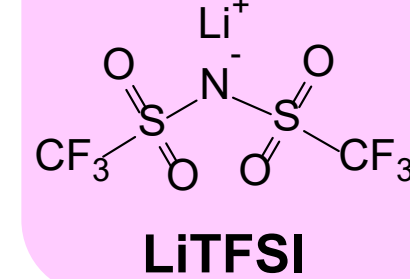
Typical organic HTM for PSC



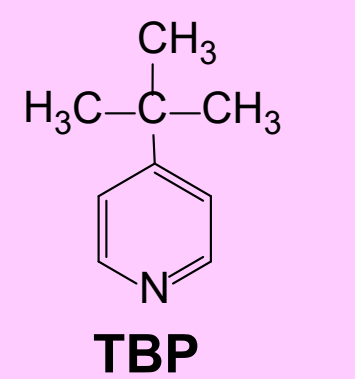
Spiro-OMeTAD

Some dopants (ionic compound, base etc.) are needed to introduce more charge carriers.

Dopants



LiTFSI



TBP

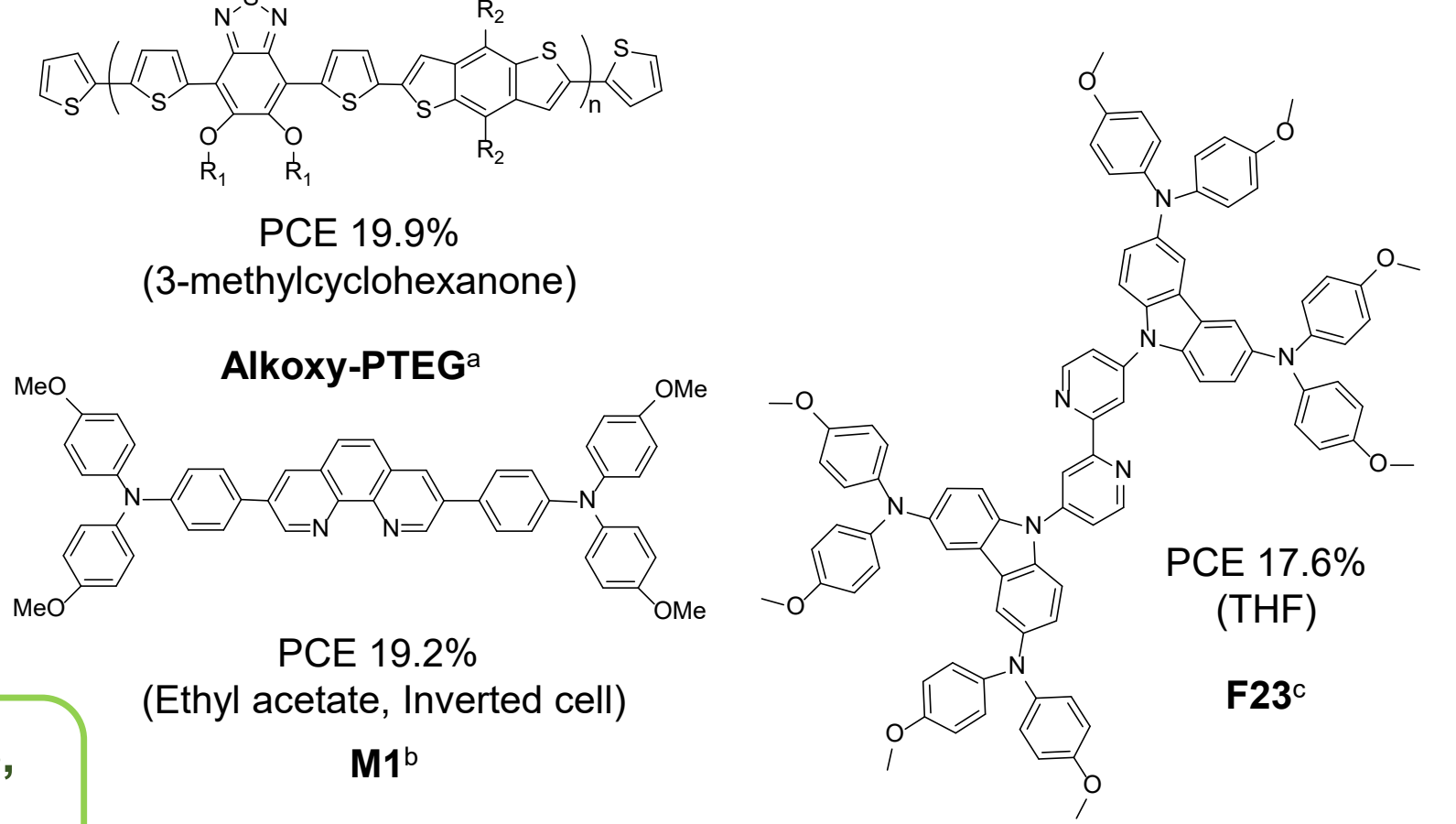
Hygroscopic, volatile

Device degradation

Most of organic HTMs are processed with chlorinated solvents such as chlorobenzene (CB).

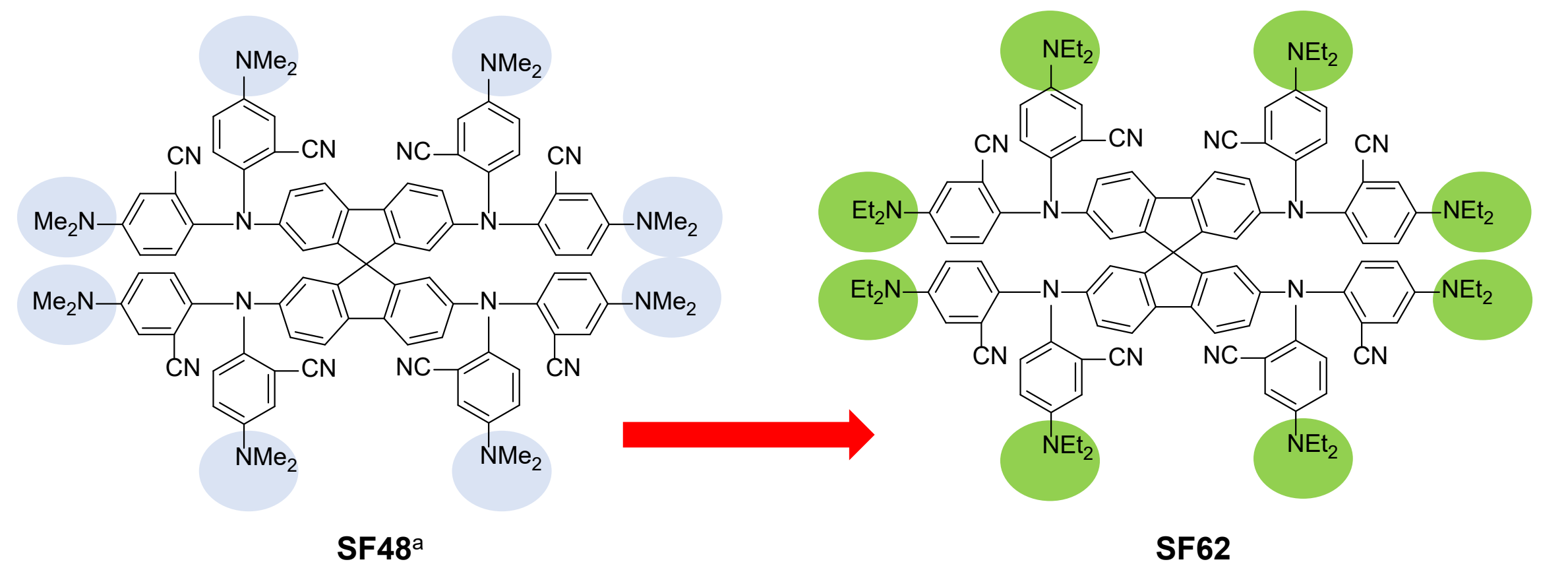
Nonhalogenated-solvent (green-solvent)-soluble, dopant-free HTMs are desirable for the practical application of PSCs.

Green-solvent-soluble dopant-free HTMs



- ^a J. Lee et al, *Adv. Energy Mater.*, 2020, 10, 1902662.
^b J. Huang et al, *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9, 8930.
^c H. Lu et al, *Energy Environ. Sci.*, 2020, 13, 123976.

Our Work



SF62 is soluble in green solvent such as AcOEt because of large hydrophobic groups.

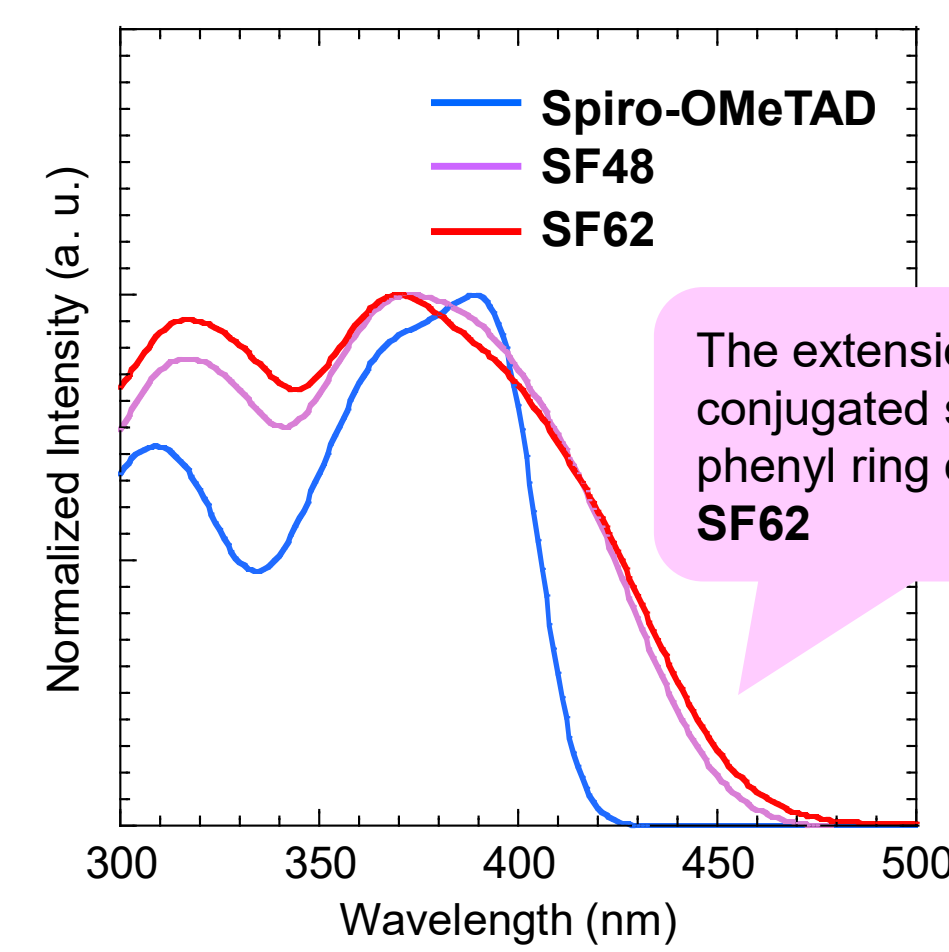
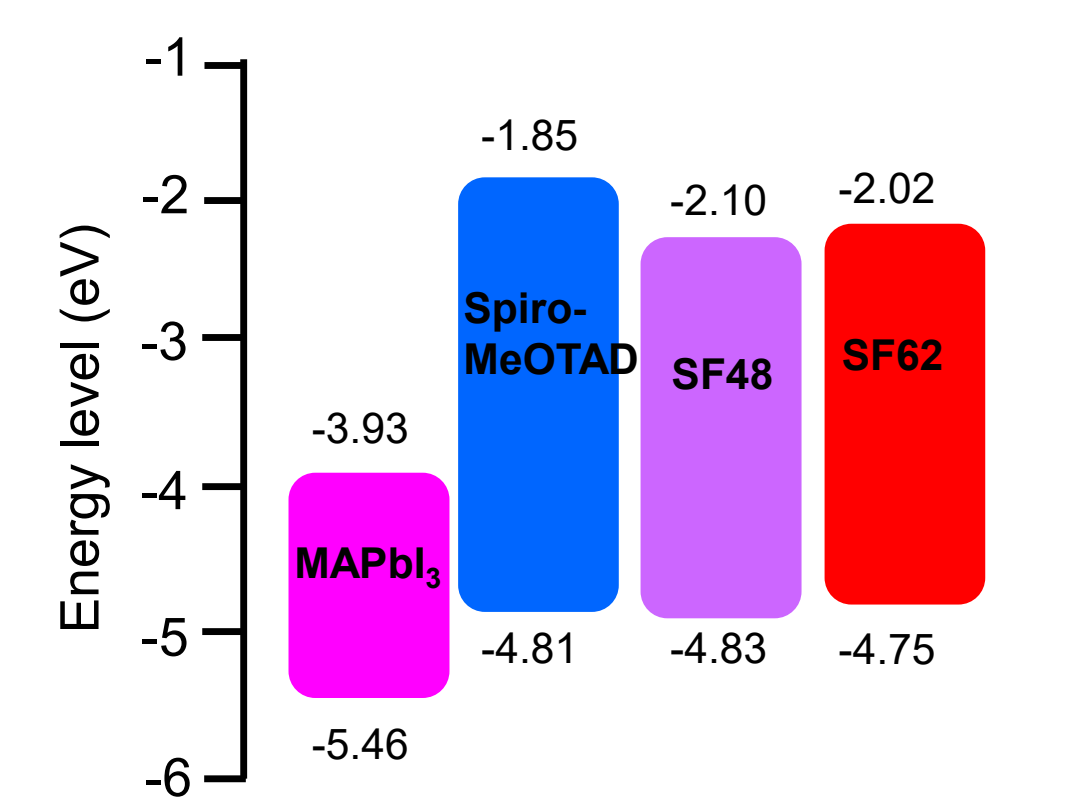


Figure 2 UV-vis spectra of the HTMs in solution (1×10^{-5} M in CB).

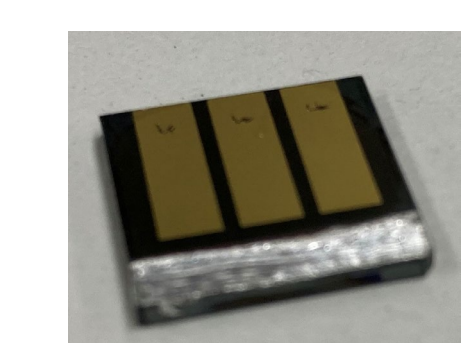


SF48 and SF62 have a suitable HOMO energy levels for hole extraction from perovskite.

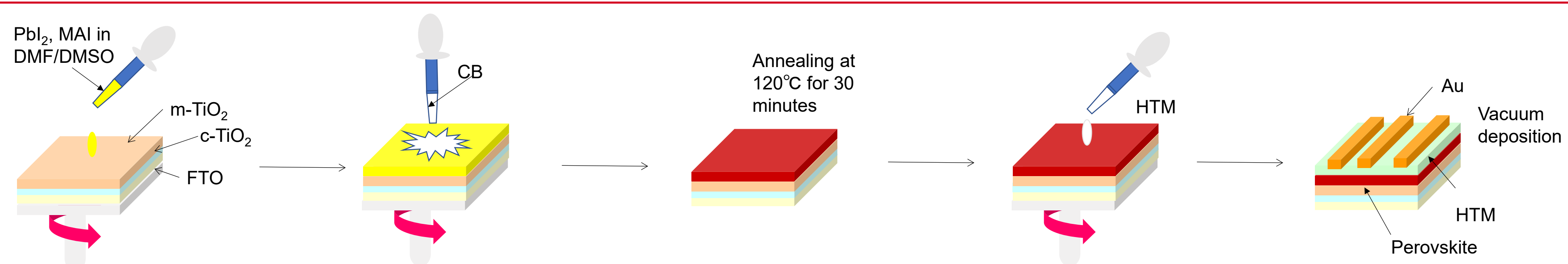
Figure 3 Energy diagram of the HTMs.

^a Nobuko Onozawa-Komatsuzaki et al, *ACS Appl. Energy Mater.*, 2022, 5, 6633

Device Fabrication



1.5 cm x 1.5 cm
Active area 0.119 cm²



Results and Discussion

1. The photovoltaic data of the PSCs based on non-doped HTMs

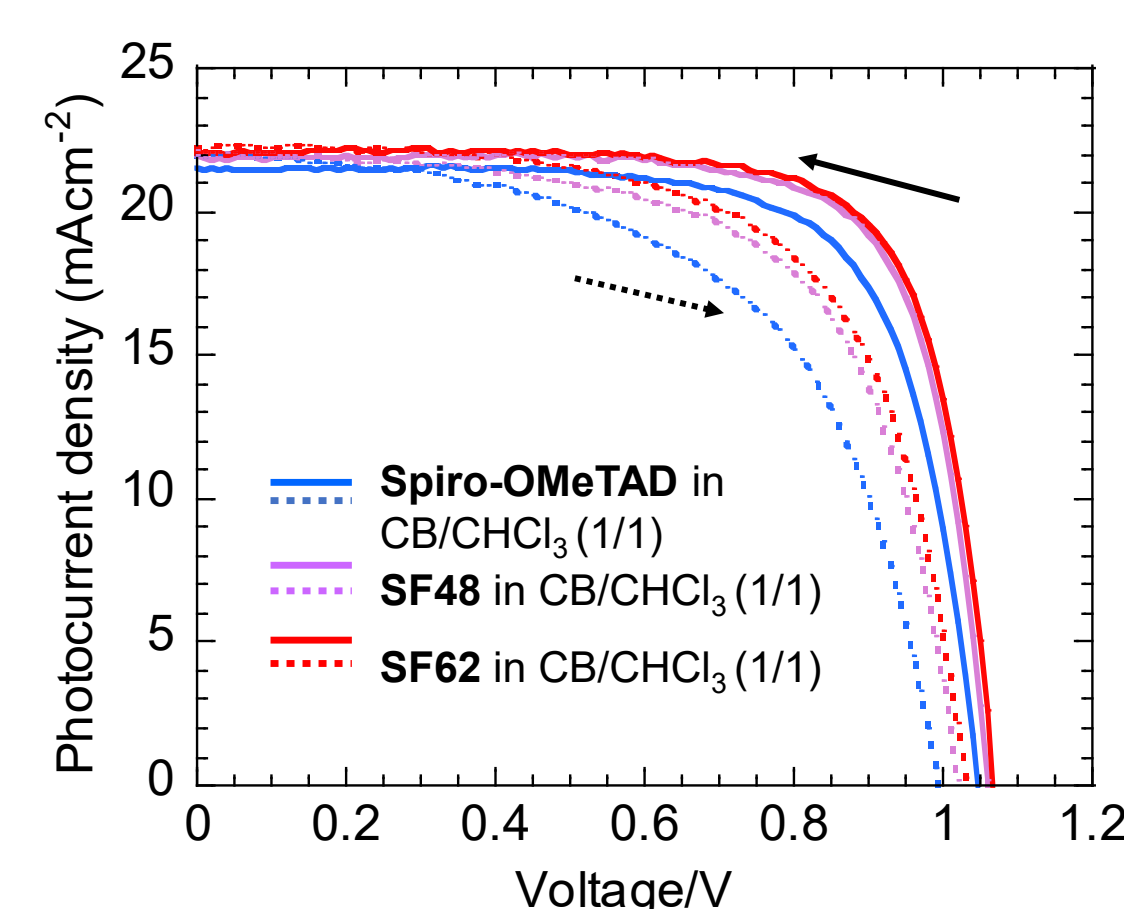


Figure 4 J-V curves for the PSCs with non-doped Spiro-OMeTAD, SF48, and SF62 using CB/CHCl₃ (1/1) as the solvent.

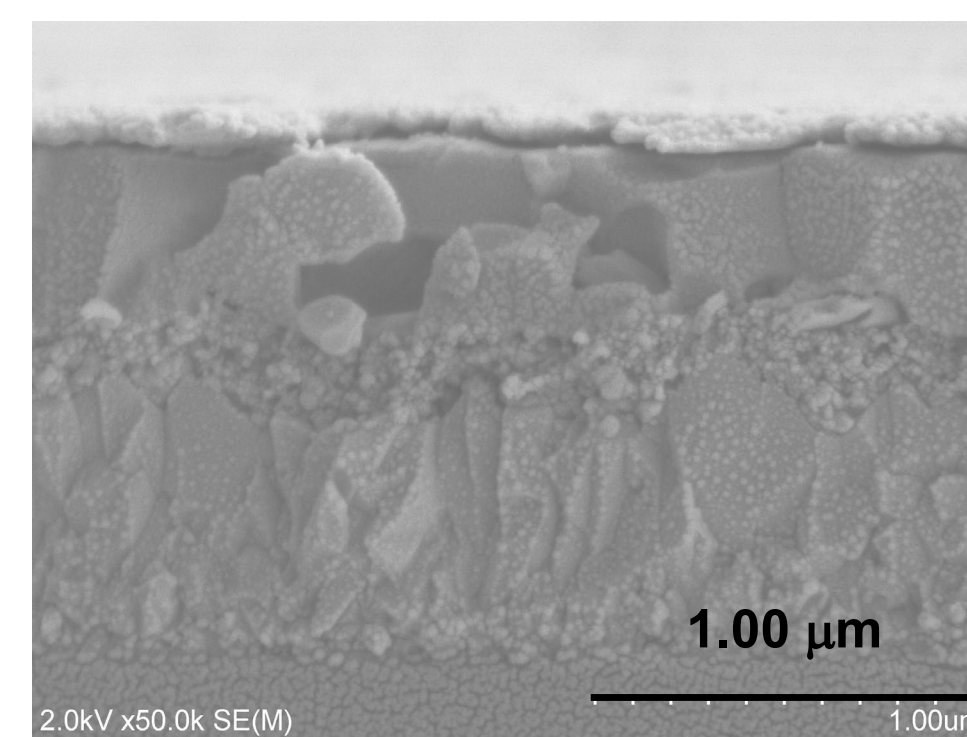
Table 1. Photovoltaic parameters of the PSCs for HTMs without dopants. (Thickness of HTMs; 20 nm)

	J_{sc} / mA cm ⁻²	V_{oc} / V	FF	PCE / %
Spiro-OMeTAD	21.9	1.01	0.67	12.5
SF48	22.4	1.01	0.67	15.2
SF62	21.8	1.03	0.67	15.1

The PSC based on non-doped SF48, 62 exhibited the higher PCE than that of Spiro-OMeTAD.

SF48, SF62 > Spiro-OMeTAD

2. SEM image



The optimal thickness of SF62 was only around 10%. SF62 is cost effective HTM.

Figure 5 Cross-sectional SEM image of SF62-based device.

3. Hole extraction ability

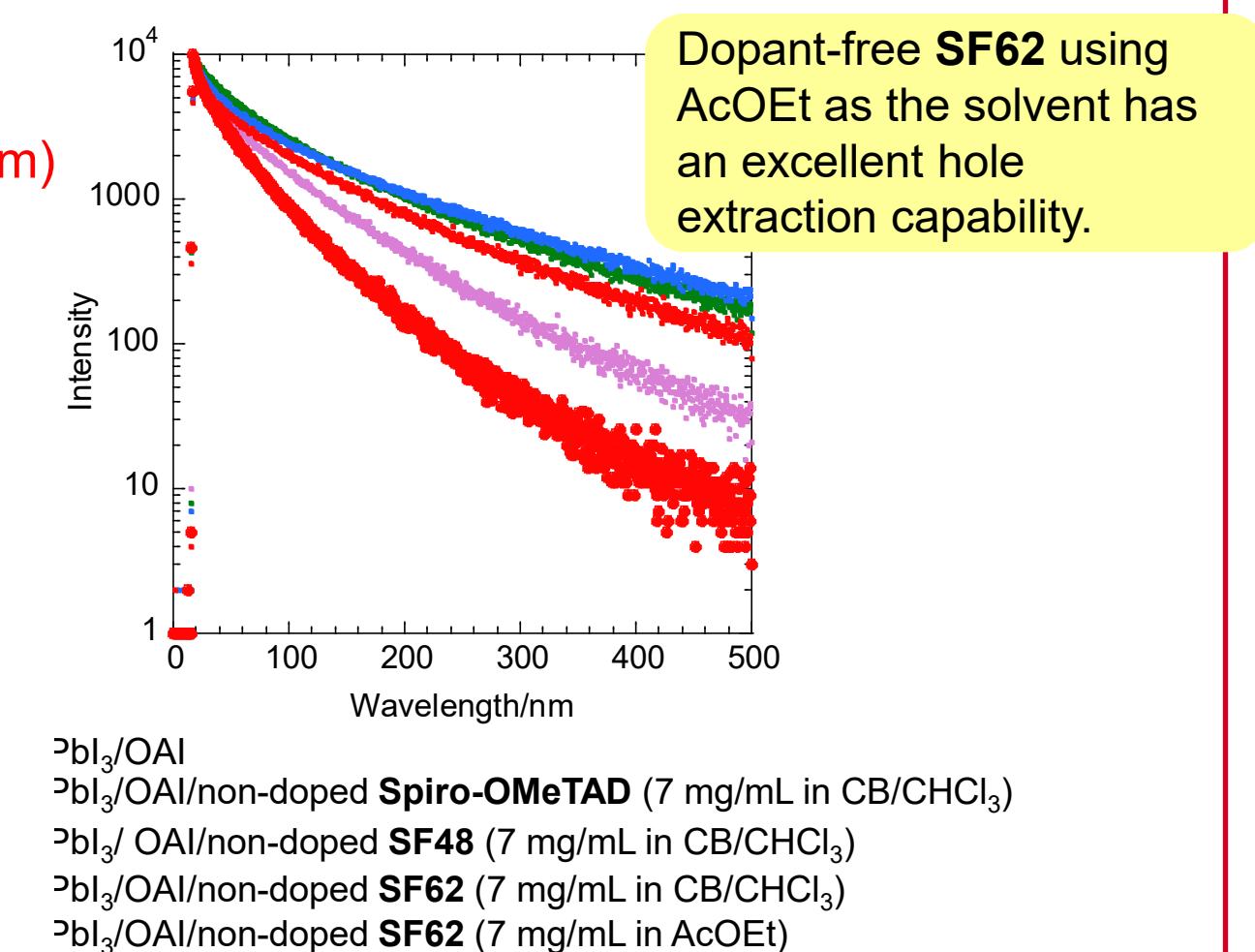


Figure 6 TRPL decay curves of the pristine perovskite and perovskite covered with non-doped HTM films excited at 532 nm.

4. The cell performance of the best PSC

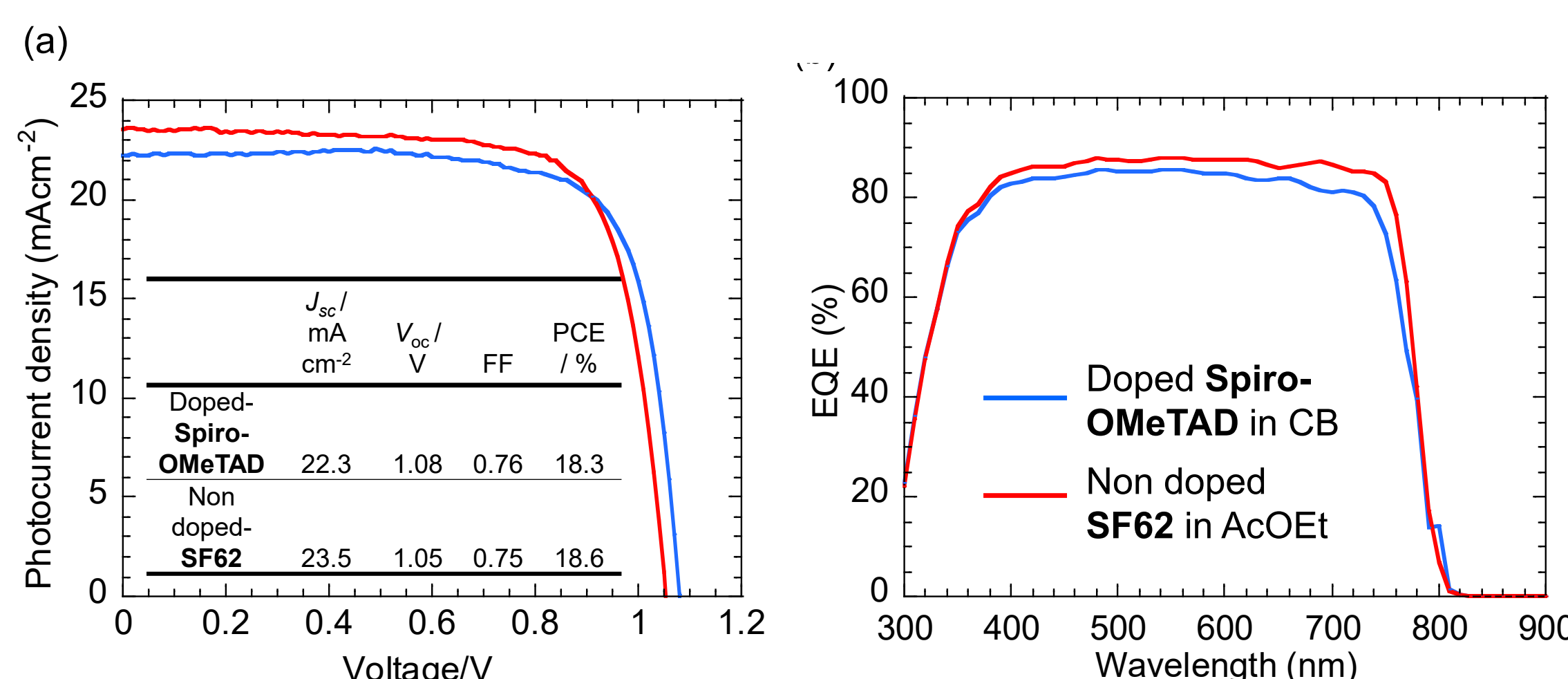


Figure 7. (a) J-V curves for the best-performing PSCs with non-doped SF62 using AcOEt as the solvent, along with doped Spiro-OMeTAD using CB as a reference and (b) EQE spectra of the same PSCs.

Table 2. Photovoltaic parameters of the PSCs with MAPbI₃ as the perovskite layer^a.

	J_{sc} / mA cm ⁻²	V_{oc} / V	FF	PCE / %
Spiro-OMeTAD with dopant (TBP, LiTFSI)				
FW	22.5 ± 0.5	1.02 ± 0.02	0.61 ± 0.02	14.0 ± 0.6
BW	22.0 ± 0.6	1.07 ± 0.02	0.73 ± 0.03	17.2 ± 0.9
SF62 without dopant				
FW	23.0 ± 0.3	0.99 ± 0.02	0.63 ± 0.04	14.2 ± 1.1
BW	22.9 ± 0.3	1.04 ± 0.01	0.74 ± 0.02	17.7 ± 0.6

^a Passivated with octylammonium iodide between the perovskite and HTL.

The PCE is higher than that for the doped Spiro-OMeTAD-based PSCs.

5. Thermal stability test

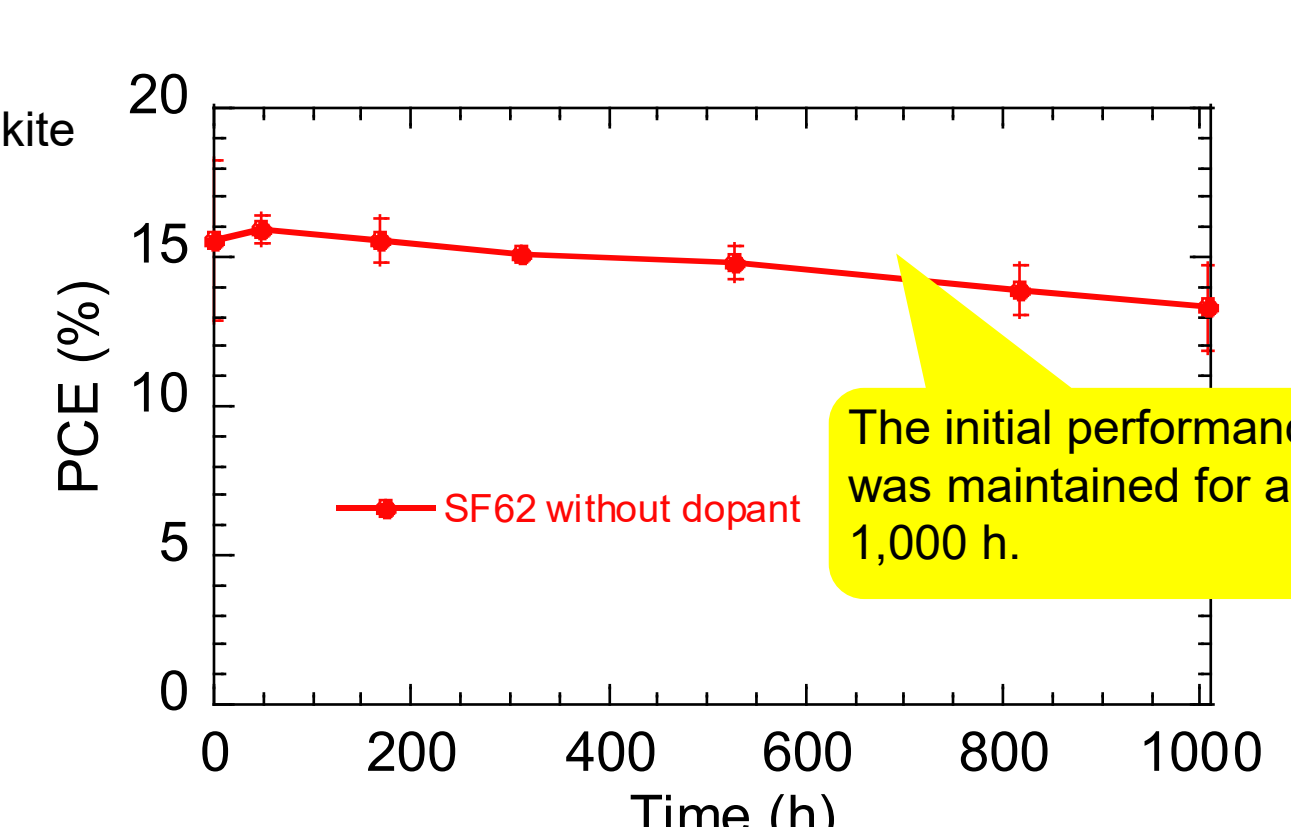


Figure 8 Change in the efficiencies of the solar cells based on non-doped SF62 at 85 °C in ambient air.

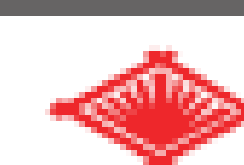
Summary

We developed a new compound SF62 and successfully applied it as a dopant-free HTM in PSCs. In particular, the HTL layer of SF62 was prepared using the nonhalogenated green solvent AcOEt. Consequently, the PCE of the device based on SF62 was 18.6%, comparable to that of the reference PSC with doped Spiro-OMeTAD (18.3%). Furthermore, the thermal stability of the PSC based on non-doped SF62 at 85 °C in ambient air was found to be superior to that of doped or non-doped Spiro-OMeTAD. [1]

[1] N. Onozawa-Komatsuzaki, D. Tsuchiya, S. Inoue, A. Kogo, T. Ueno and T. N. Murakami, *Appl. Phys. Express*, 2023, 16, 016502.

小野澤伸子¹、土屋大輔²、井上真一²、古郷敦史¹、村上拓郎¹

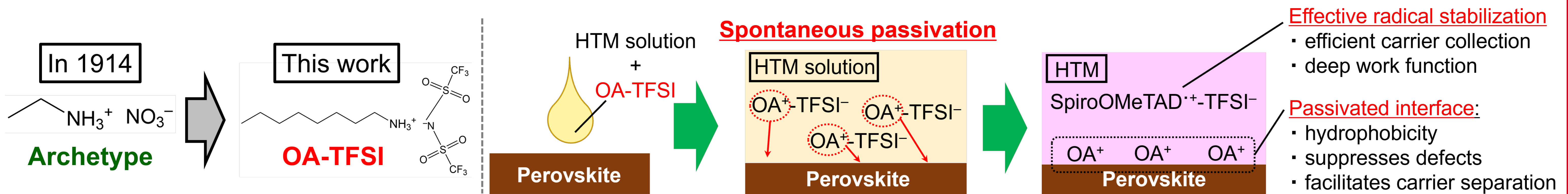
1. 産業技術総合研究所 ゼロエミッション国際共同研究センター, 2. 日本精化株式会社



Aliphatic Primary Ammonium Bis(trifluoromethylsulfonyl)imide as a Highly Functional Additive for Hole Transport Material Layer in Perovskite Solar Cells

Introduction

- Room-temperature ionic liquids (RTILs) based on bis(trifluoromethylsulfonyl)imide (TFSI) anion have been reported as promising Li-free additives for hole transport materials (HTMs) in perovskite solar cells (PSCs).
- However, cation designs of RTILs for PSC applications so far have been limited within currently major ones (e.g., imidazoles), so their functions have been confined particularly in controlling HTM/perovskite interface.
- In this work, an RTIL comprising an archetypal aliphatic primary ammonium (i.e., *n*-octylammonium: OA) and TFSI [1,2] is proposed and demonstrated as a highly functional additive for Spiro-OMeTAD HTM.



Methods

OA-TFSI

- Synthesized by an ion exchange method
- Melting point: < 190 K



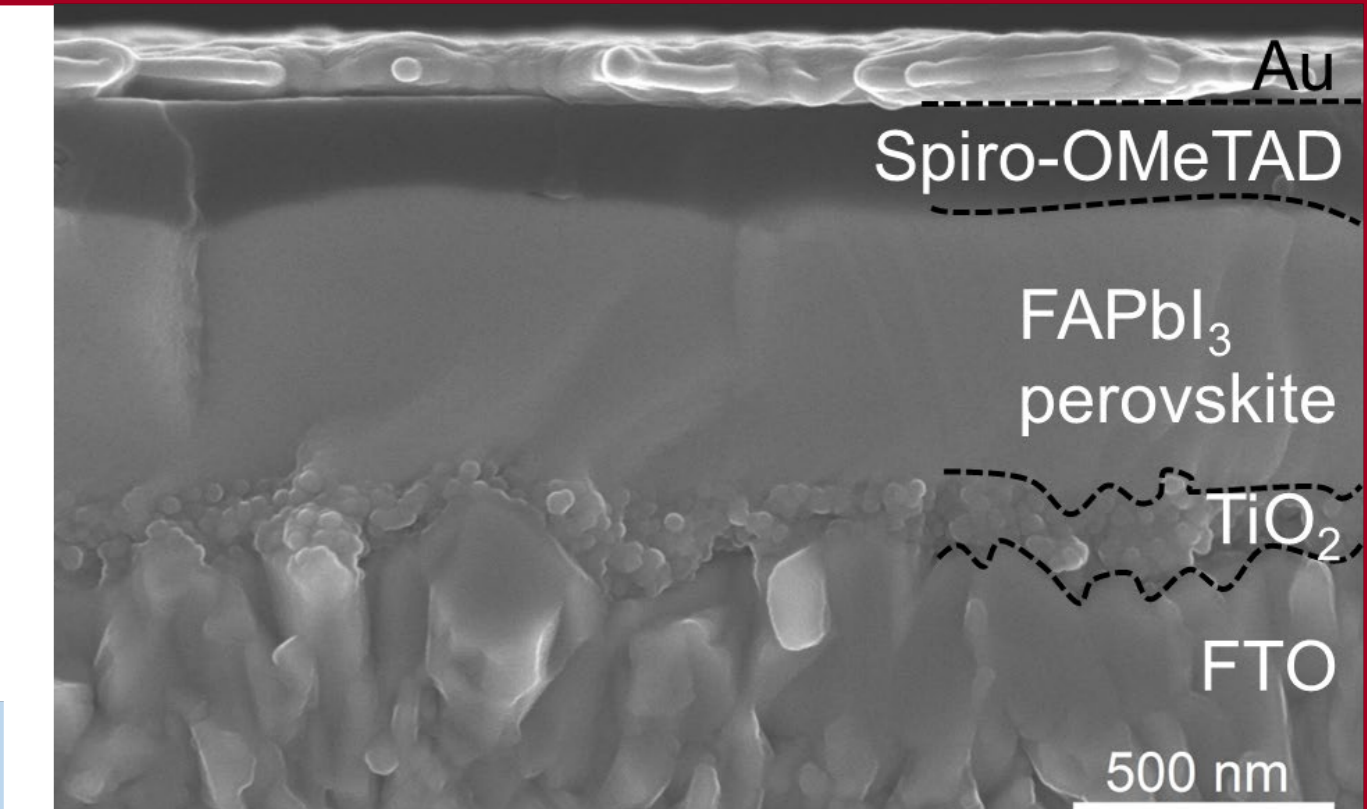
[Cell configuration]
FTO/TiO₂/FAPbI₃ perovskite / Spiro-OMeTAD/ Au
(active area: 0.12 cm²)

[Deposition method]
Spin-coating in dry air
(one-step for perovskite)

[HTM additive]

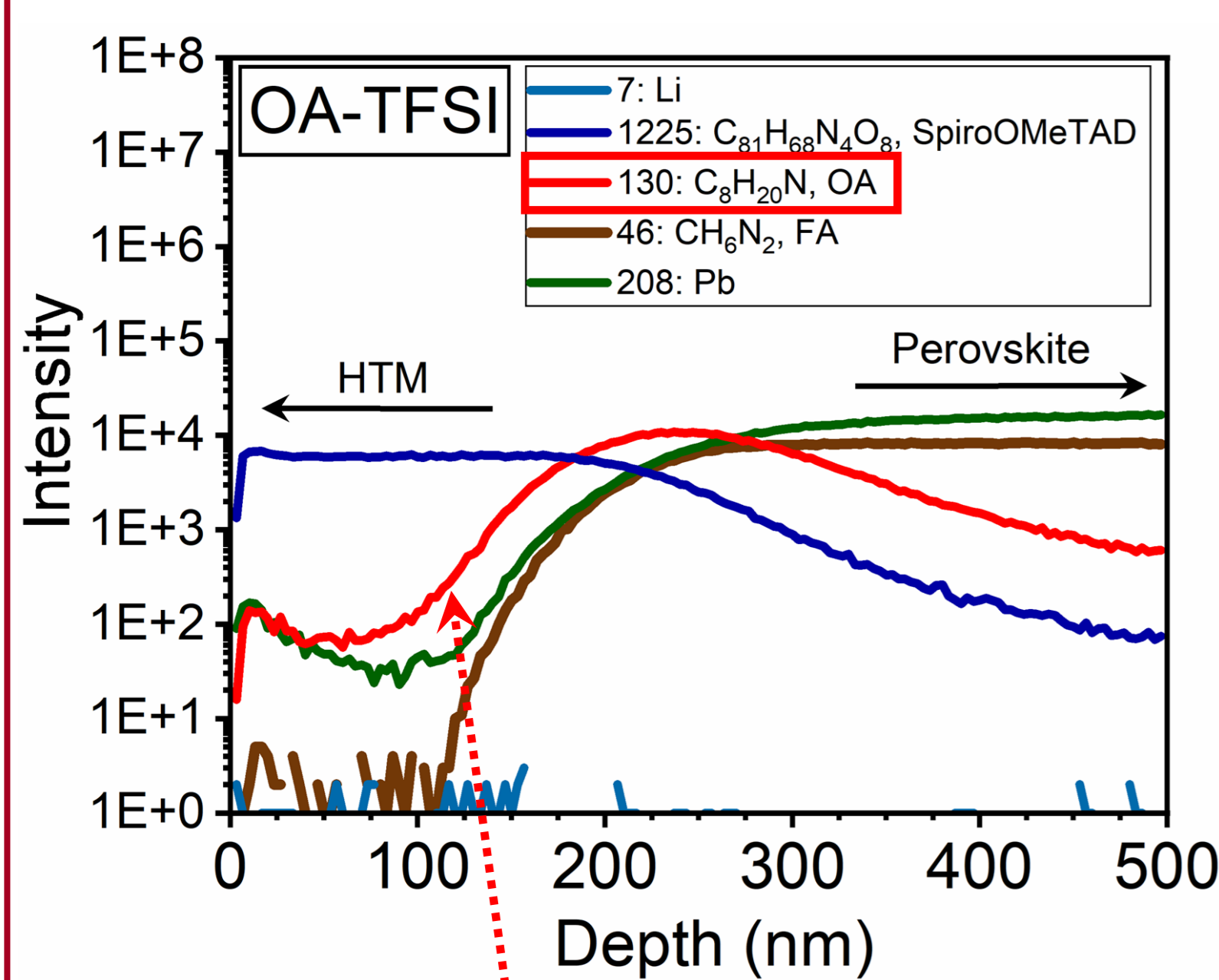
Li-TFSI or OA-TFSI

Au: Metal conductor
Spiro-OMeTAD: HTM
FAPbI₃: Perovskite
TiO₂: electron transport layer
FTO: Transparent conductor



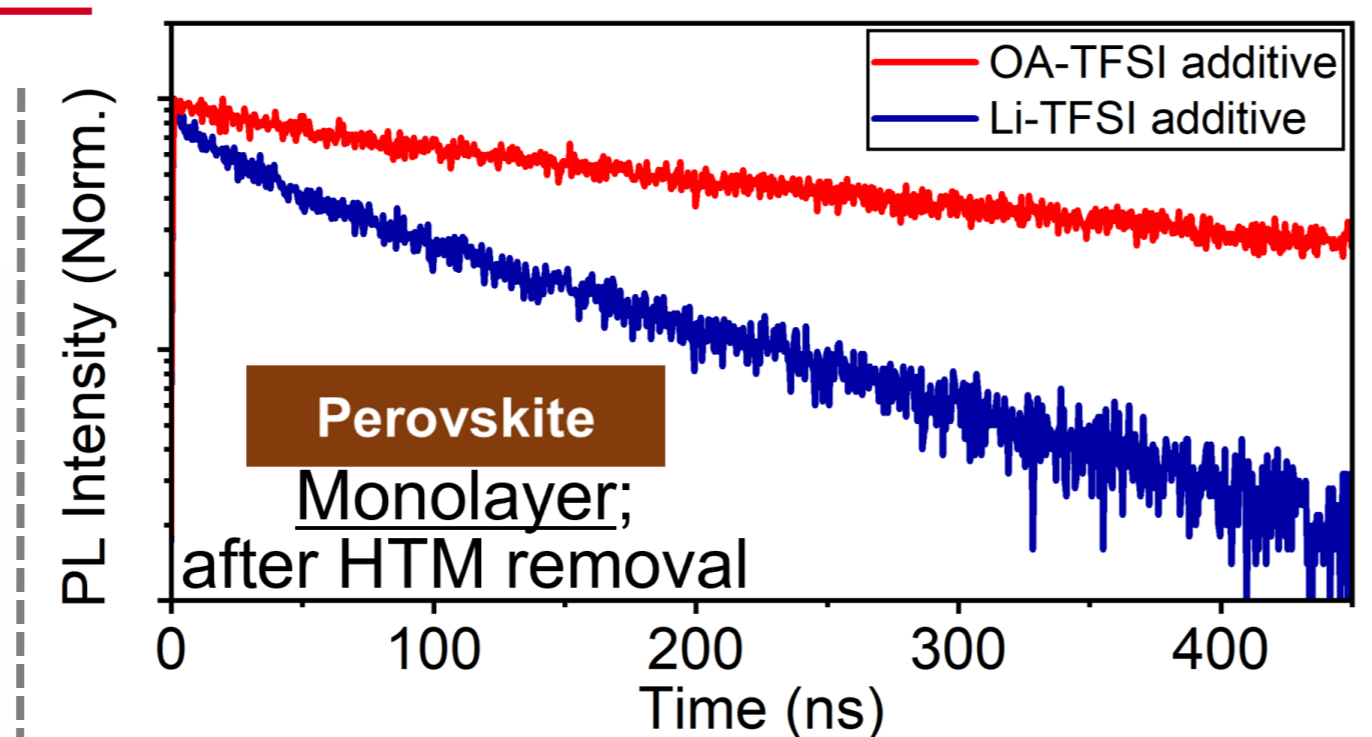
Results and discussion

[Compositional depth analysis]



OA cations spontaneously covered perovskite surface under the HTM deposition

[Carrier dynamics]



OA passivation suppressed defects over perovskite surface

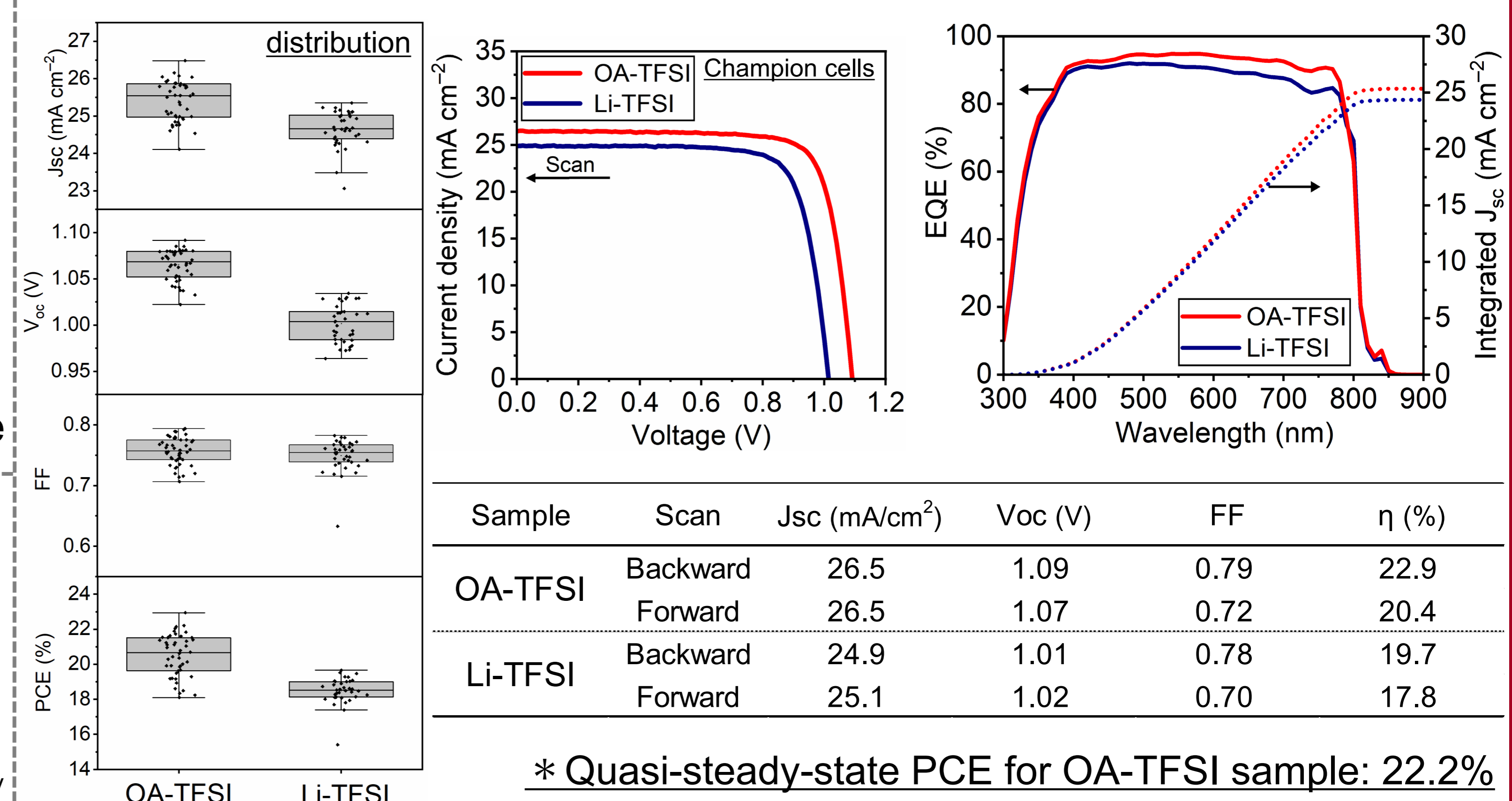
[HTM radical concentration]

Additive (optimal amount)	Work function (eV)
12 mM OA-TFSI	5.56
48 mM Li-TFSI	5.49

* measured by photoelectron yield spectroscopy

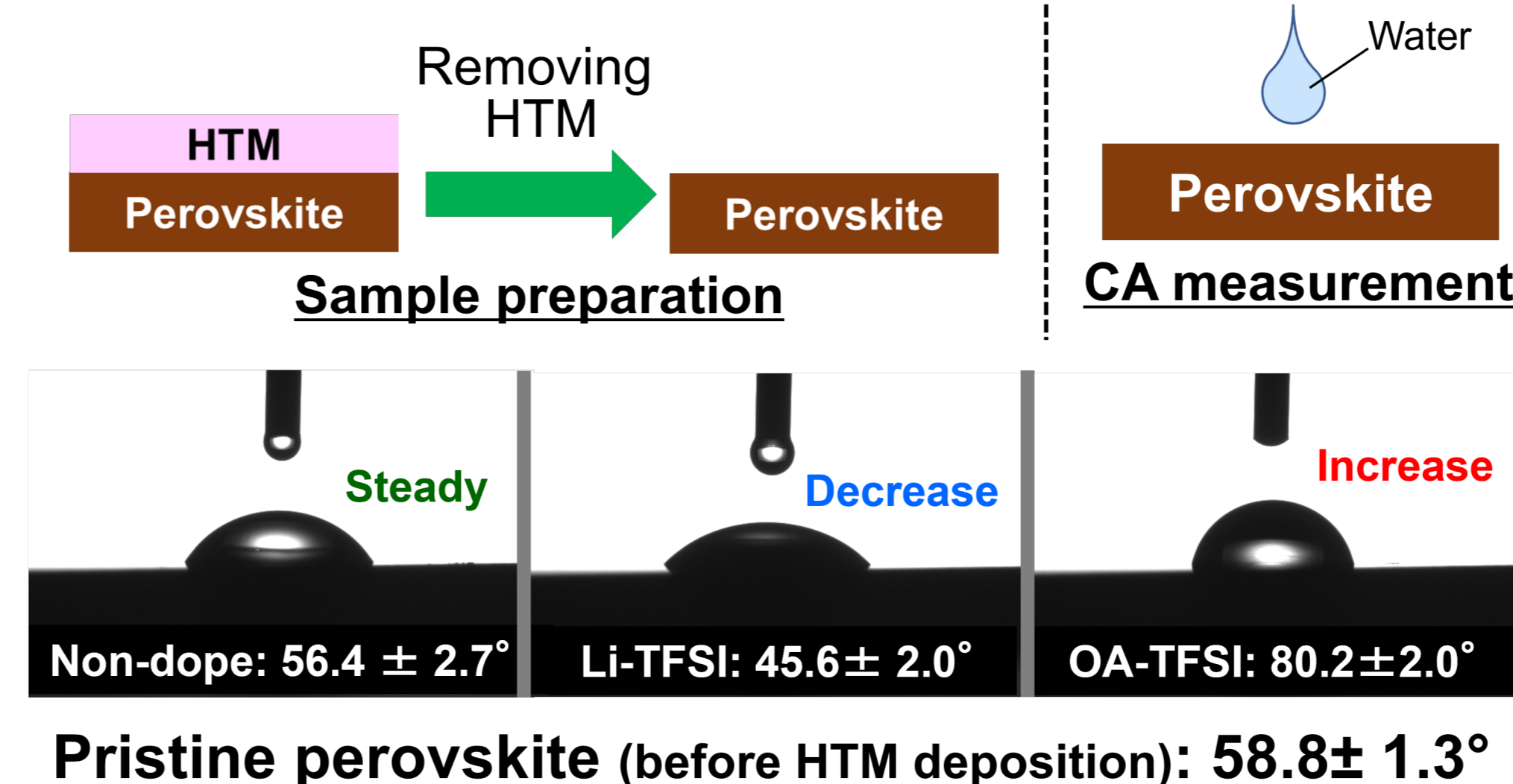
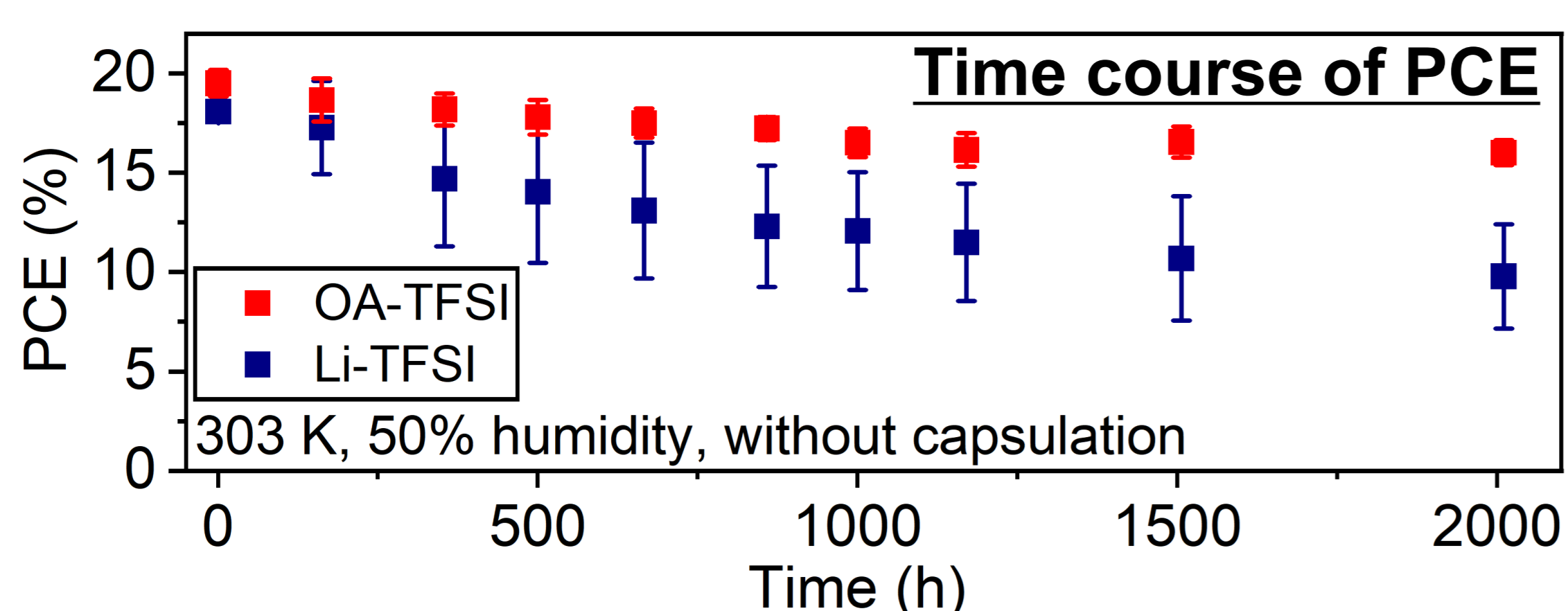
The deeper work function suggests higher HTM radical concentration

[Photovoltaic performances]



OA-TFSI additive enhanced initial photovoltaic performances owing to the improved hole collection and its passivation effects

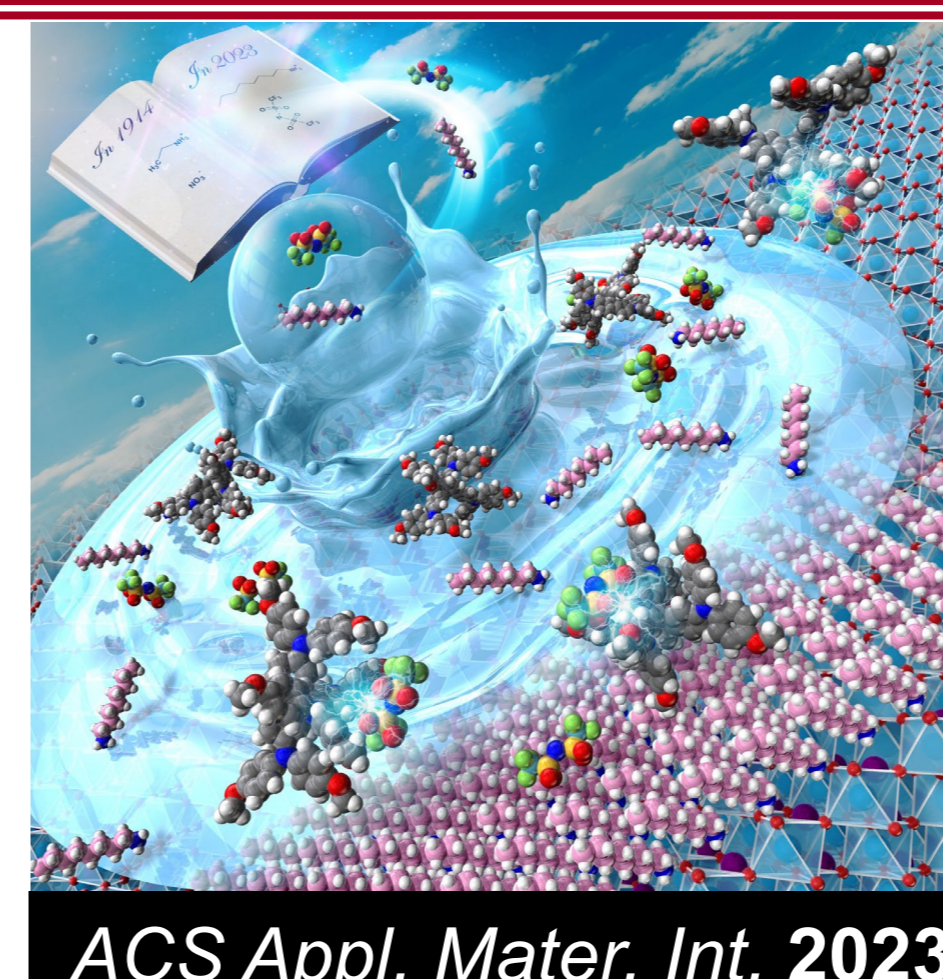
[Hydrophobicity of perovskite surface]



The spontaneous passivation by OA-TFSI rendered perovskite hydrophobic, and thereby improved long-time PCE stability in the presence of humidity

Conclusion

OA-TFSI exhibited crucial benefits simultaneously: (i) spontaneous perovskite passivation under HTM deposition process, and (ii) effective stabilization and generation of cationic Spiro-OMeTAD radicals, improving PCS performances involving their stability.



References

- N. Nishimura et al., *Chem Rxiv* **2023**, preprint, DOI: 10.26434/chemrxiv-2023-hsh8k.
- Y. Kim et al., *Energy Environ. Sci.* **2023**, *16*, 2226–2238.

Acknowledgment

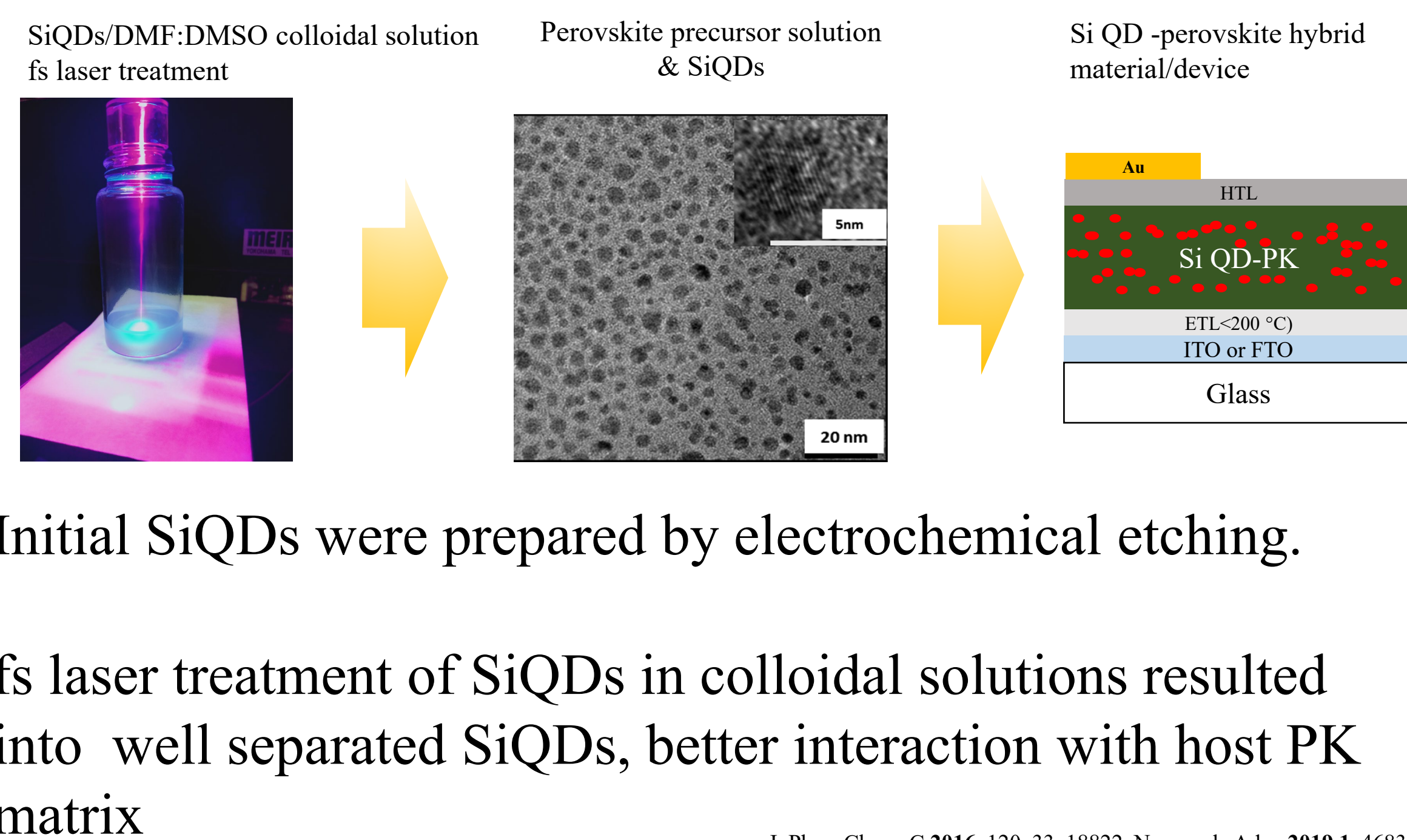
This work is based on results obtained from a project, JPNP21016, commissioned by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

Silicon quantum dots and perovskites hybrid solar cells

研究の目的

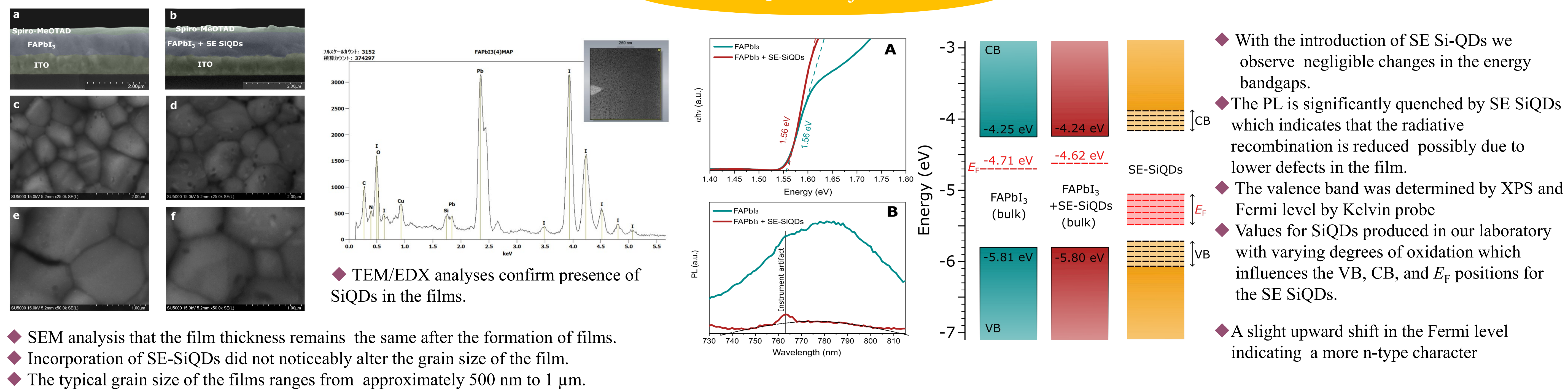
- ◆ Formamidinium Lead Iodide (FAPbI₃) perovskite (PK) limiting of thermally unstable methylammonium (MA).
- ◆ The performance of PK with FAPbI₃ the fs laser engineered silicon quantum dots (SiQDs) increased initial solar cell performance.
- ◆ The role of SiQDs in PK solar cell stability.

実験

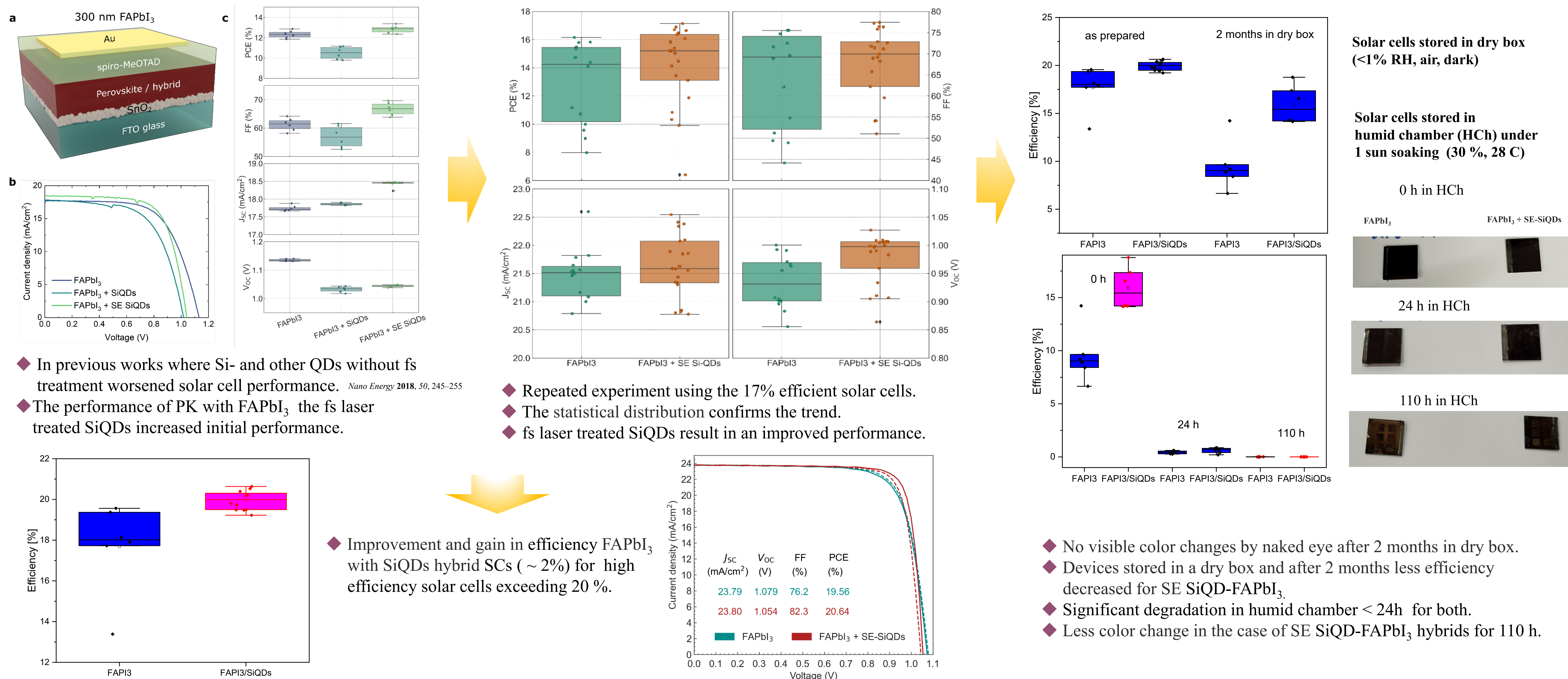


結果 & 考察

Si QDs/FAPbI₃ films



Si QDs/FAPbI₃ Solar cells



結論

- ◆ Hybrid solar cells based on SE SiQDs in limiting of thermally unstable methylammonium in formamidinium lead iodide (FAPbI₃) perovskites.
- ◆ Characteristics of SE SiQDs / FAPbI₃ hybrid films
 - * The introduction of the SE-SiQDs does not impact the morphology, film thickness, energy gap.
 - * The PL is quenched indicates that the radiative recombination is reduced possibly due to lower defects in the film.
 - * Fermi level shifts (n type, negative built-in charges in SE-SiQDs).
- ◆ Characteristics of SE SiQDs / FAPbI₃ hybrid solar cells (SCs)
 - * SE SiQDs increase the overall power conversion efficiency SCs (~2% in average).
 - * Improved device stability not enough (pronounced degradation in humid chamber)

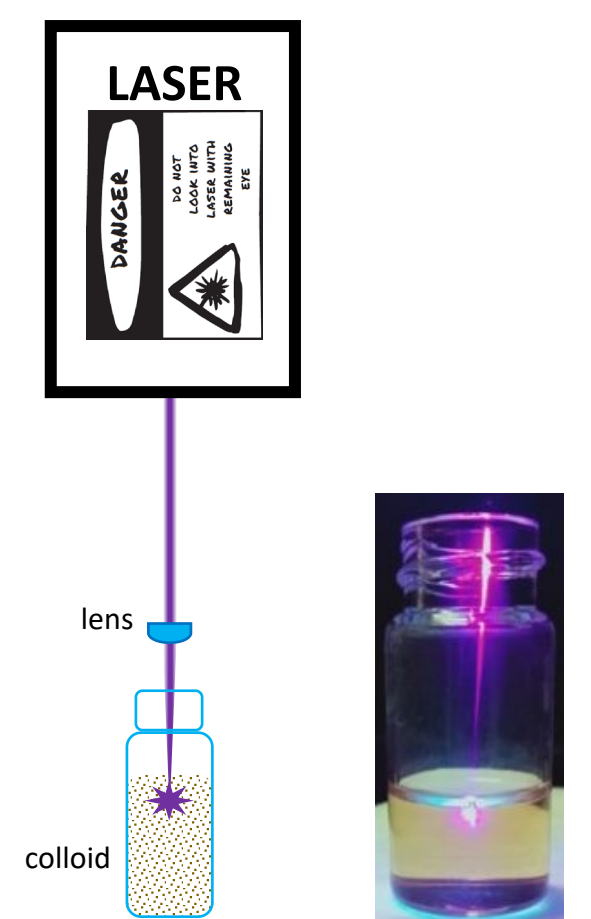
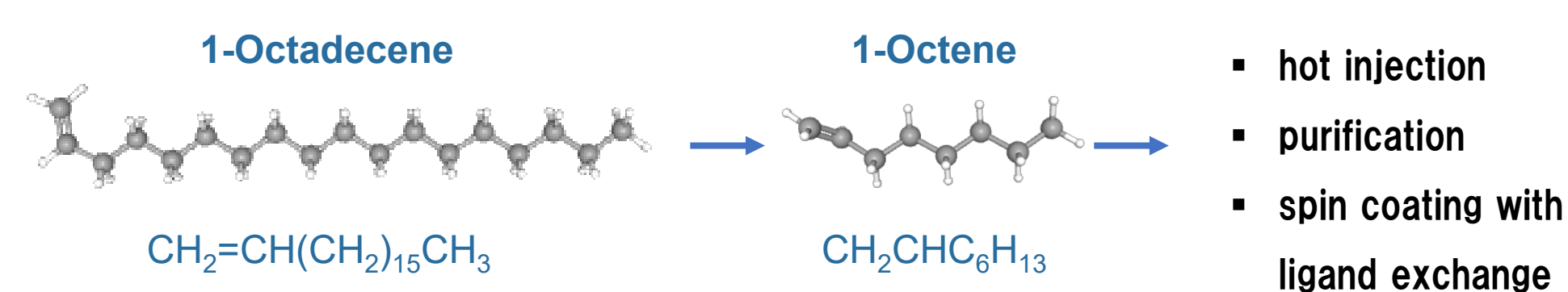
Surface engineering of FAPbI₃ hybrid perovskite quantum dots for photovoltaic applications

研究の目的 - Motivation

- Improve electronic coupling between FAPbI₃ quantum dots (QDs) through efficient ligand exchange¹
- Enhance photocarrier transport within spin-coated layers of QDs
- Push the efficiency of FAPbI₃ photovoltaic cells based on QDs-only and bulk/QD junctions²
- Study effect of FAPbI₃ QDs on the stability of bulk FAPbI₃ films²

実験 - Experiment

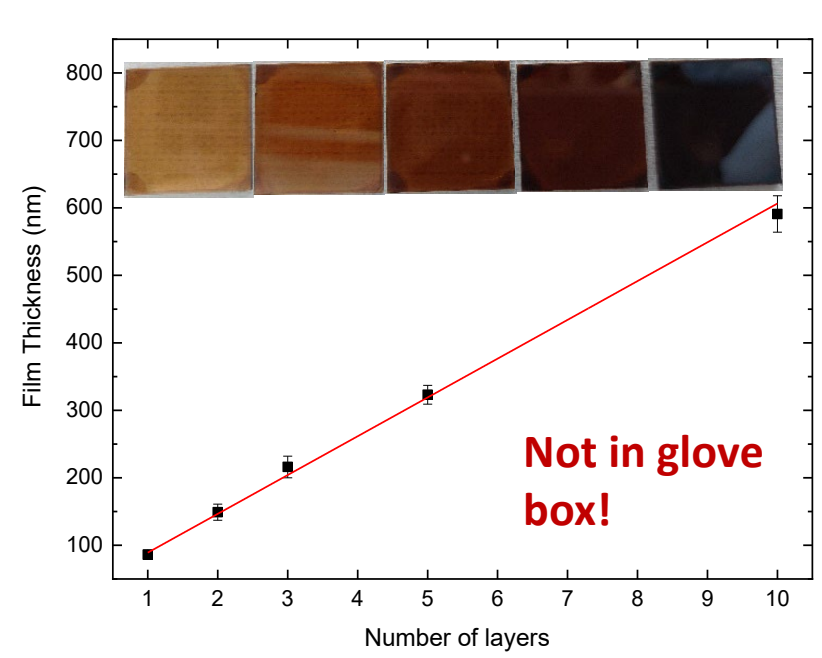
- I. Use of 1-Octene instead of 1-Octadecene during the hot injection synthesis



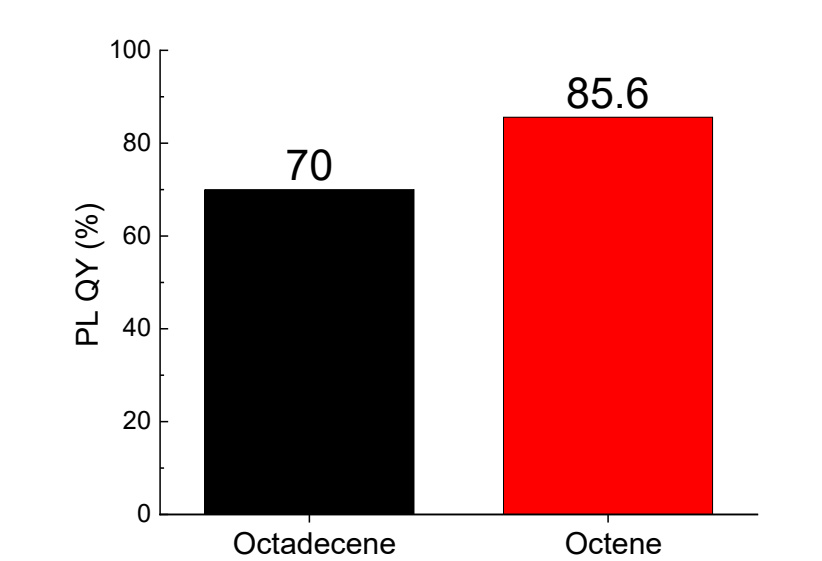
- II. Exposure of QD colloids to a fs-laser treatment³

結果 - Results I

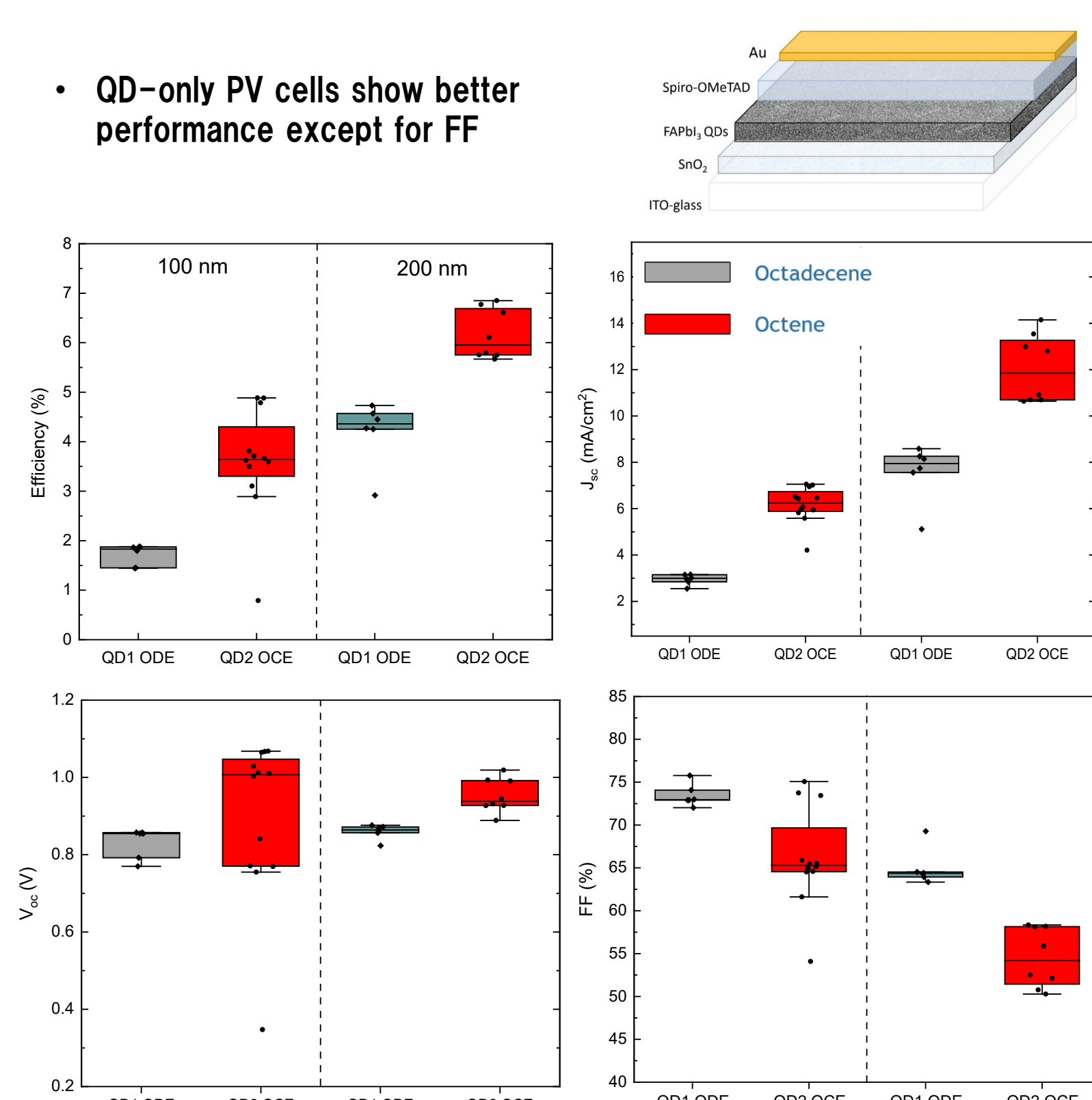
- Smooth films spin-coated in atmosphere



- Higher photoluminescence quantum yield

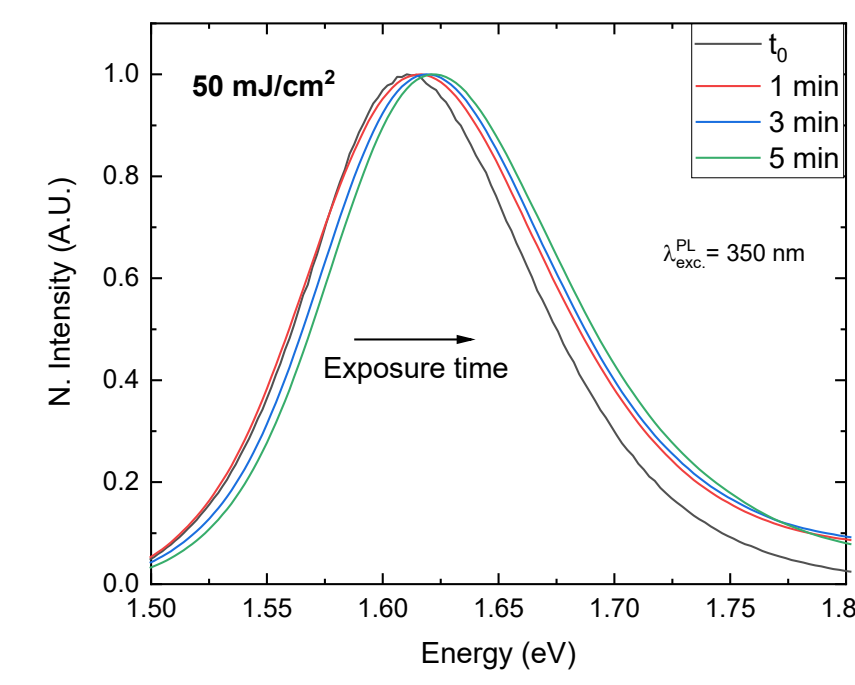


- QD-only PV cells show better performance except for FF

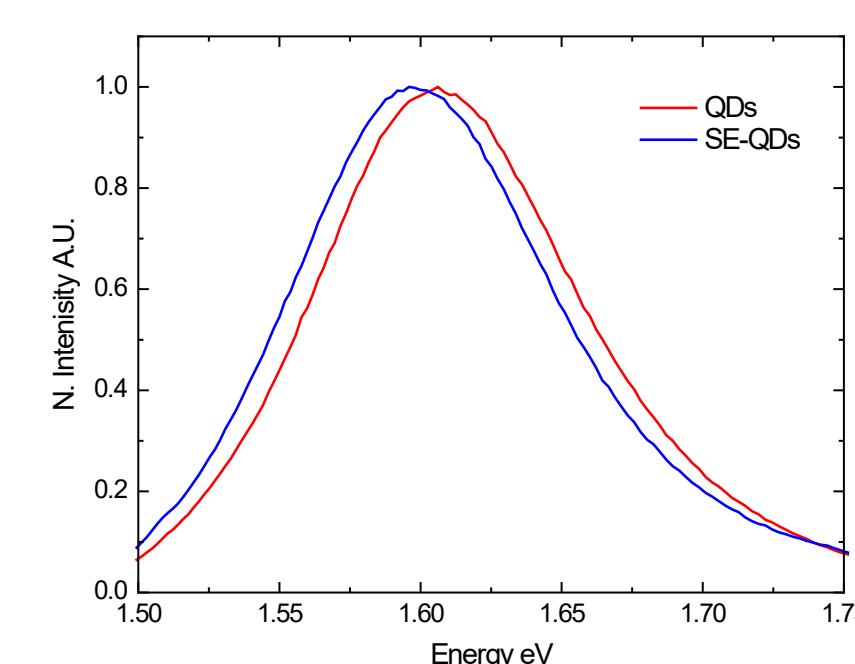


Results II

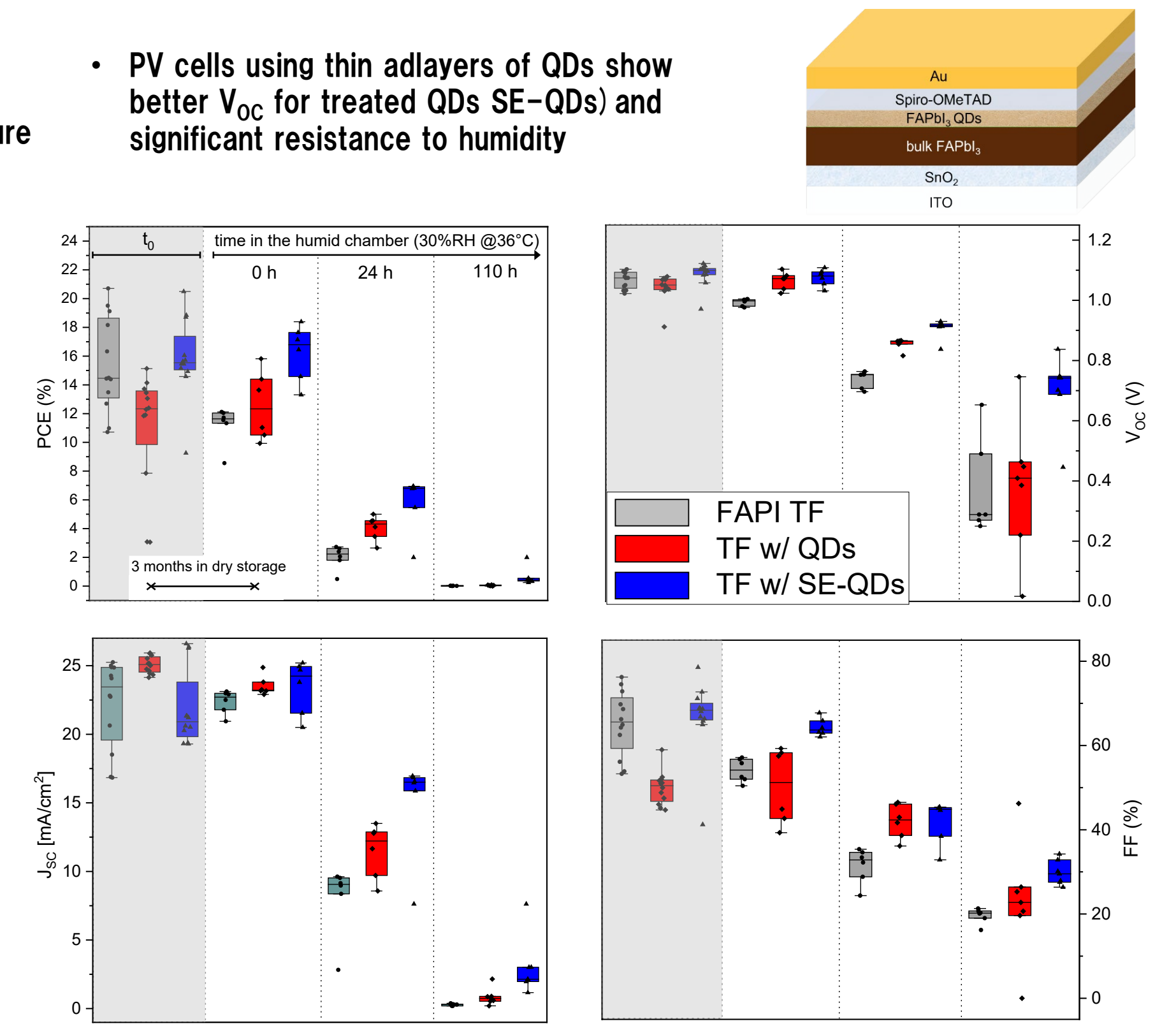
- Progressive PL blueshift for longer laser exposure



- Redshift when spin-coated

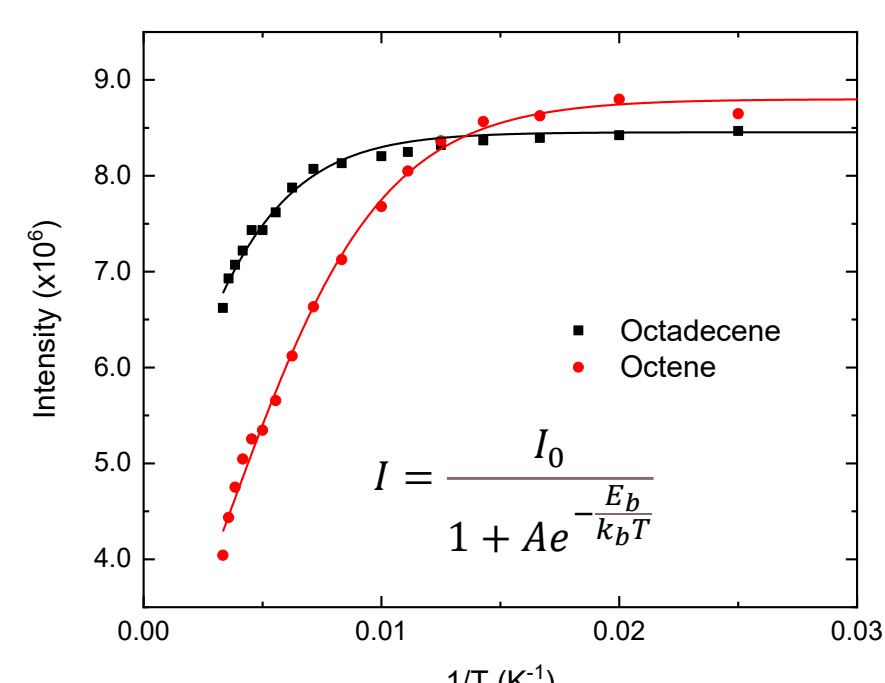


- PV cells using thin adlayers of QDs show better Voc for treated QDs SE-QDs and significant resistance to humidity

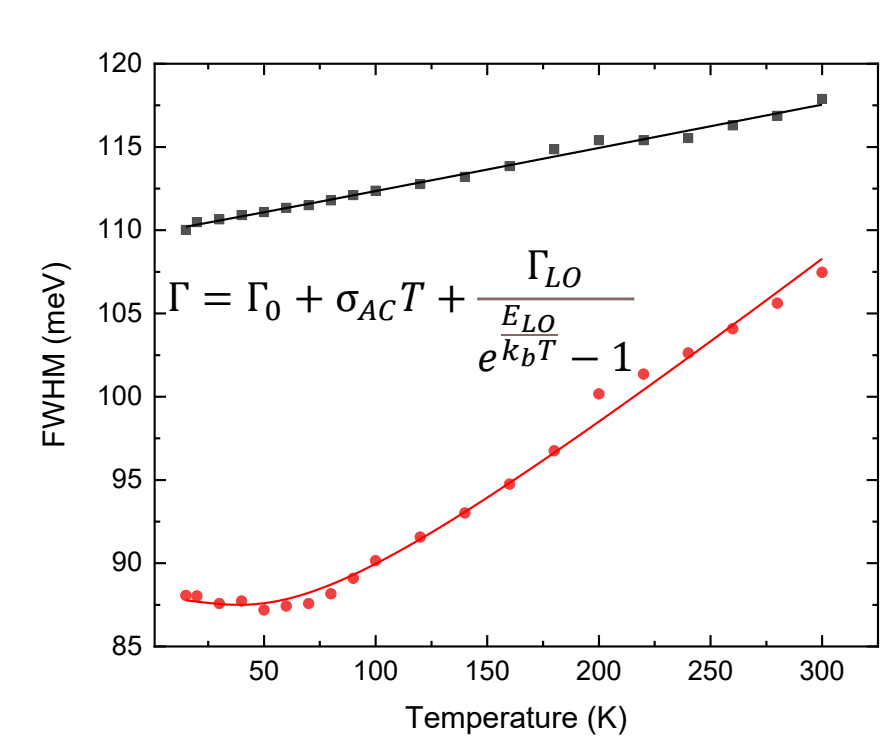


考察 - Analysis I

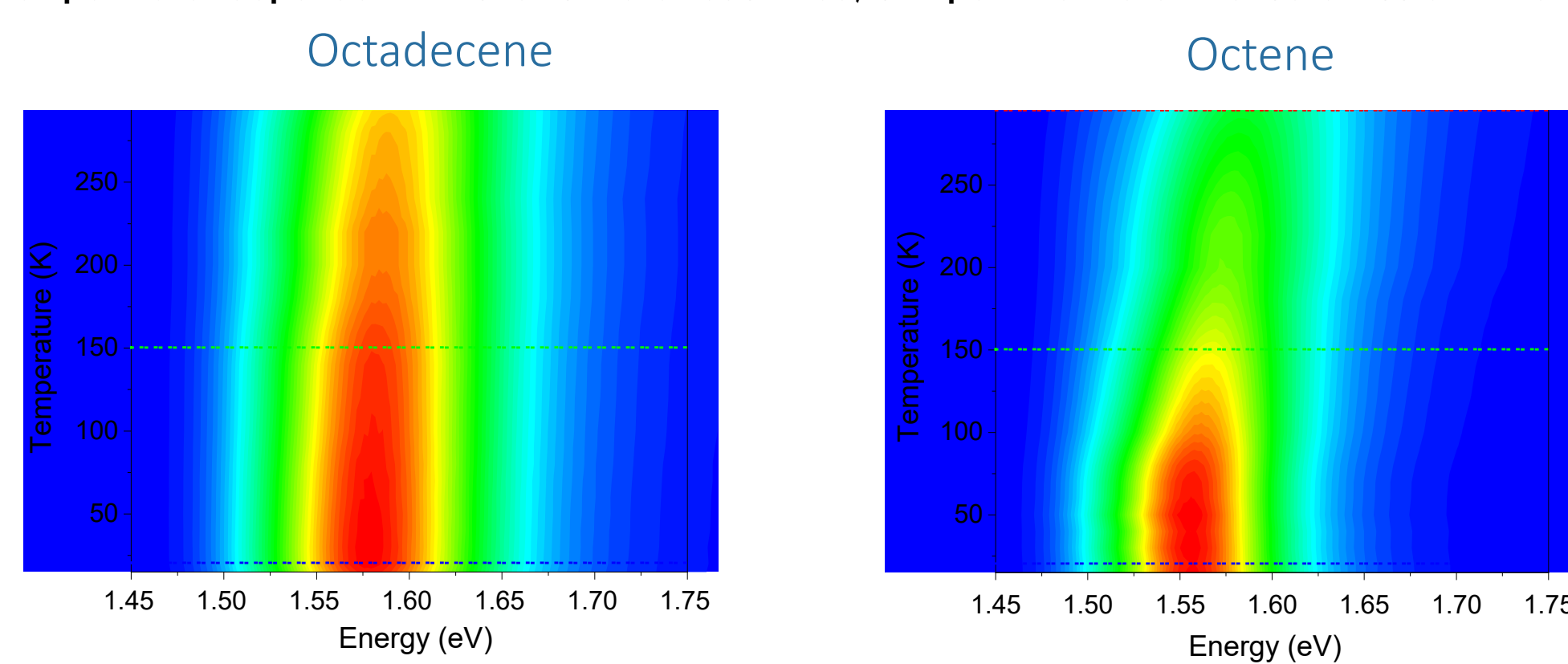
- Intensity T decay linked to exciton binding energy⁴



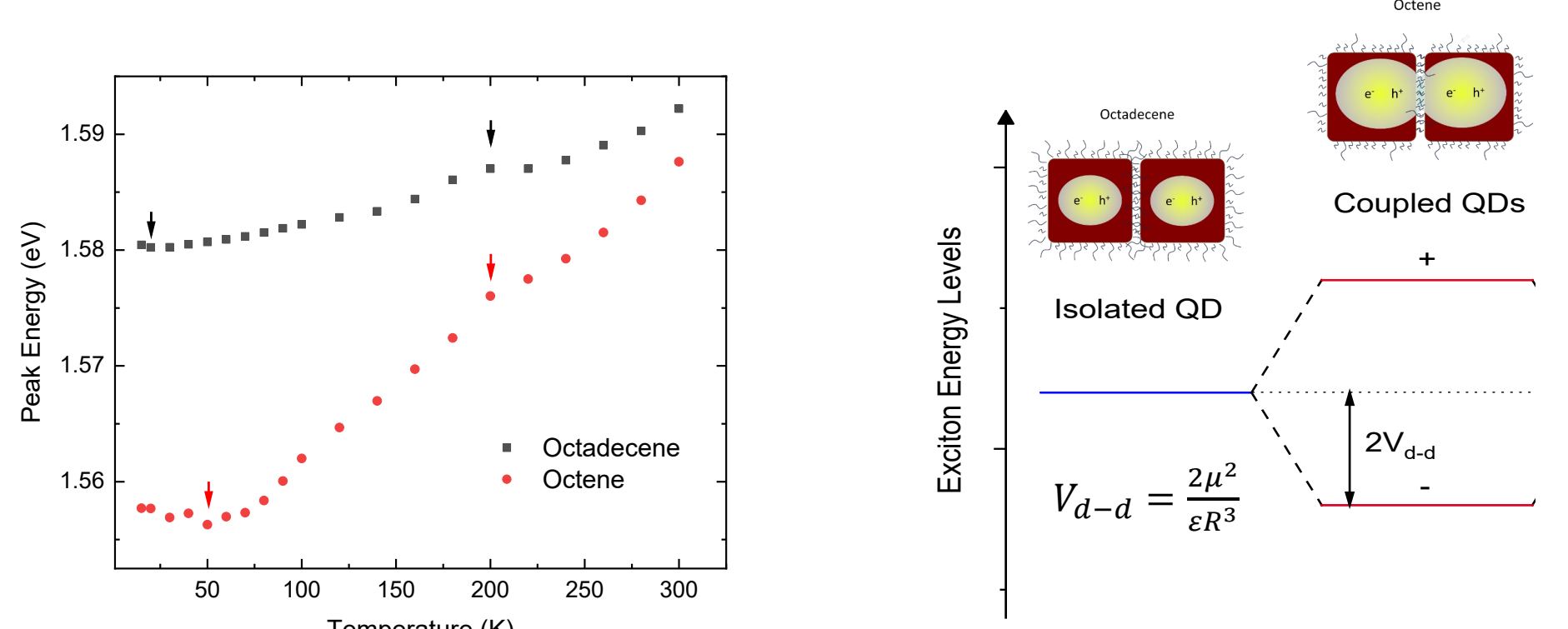
- Shaper emission and variation at low T depends on phonon scattering and film inhomogeneities⁵



- Temperature-dependent PL shows more redshifted, sharper and more intense emission at low T

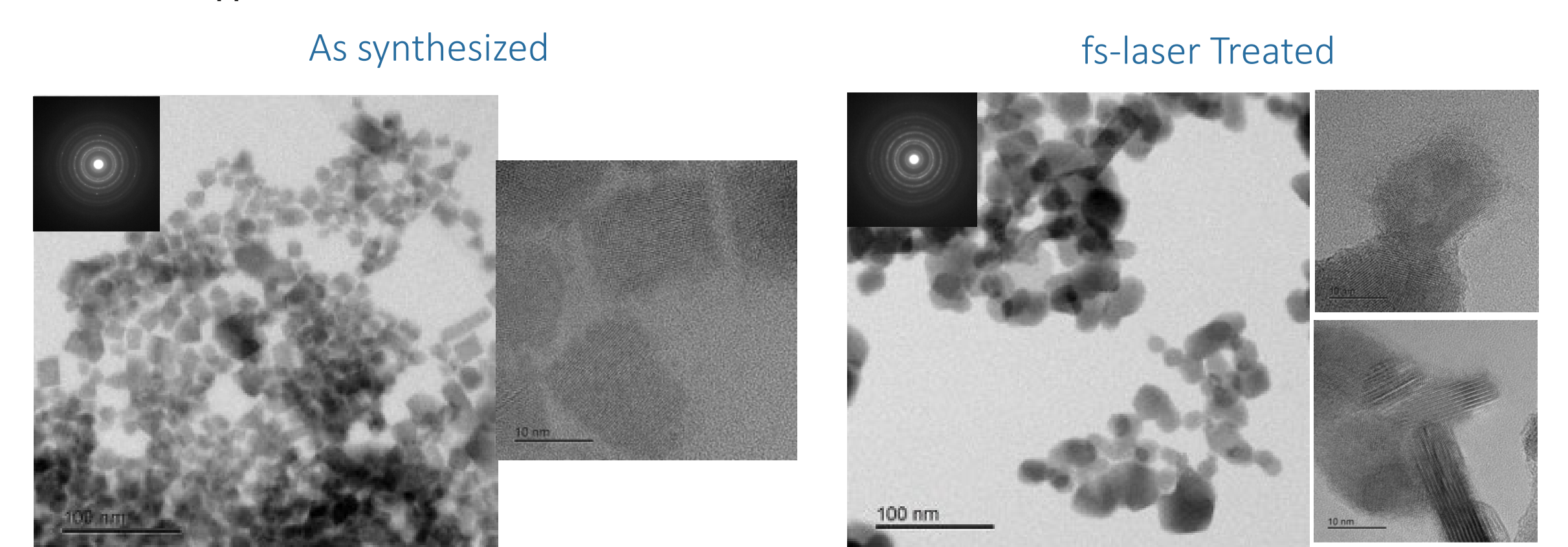


- Stronger redshift at low T can be explained by lowest energy exciton levels splitting due to dipole-dipole interaction between neighboring QDs⁶

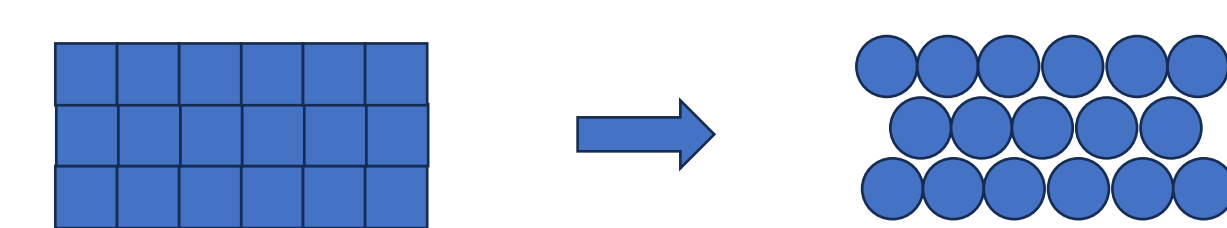


Analysis II

- TEM shows a mild treatment rounds up the particles with signs of amorphous surface, some elongated structures appear



- The stability to humid environment and PL of films can be explained by a resulting more compact QD film



.to be continued.

結論 - Conclusions

- a) Films of FAPbI₃ QDs synthesized with 1-Octene show higher PLQY, exciton delocalization and weaker phonon coupling
 - b) QDs-only PV cells show improved P_{CE}, V_{OC}, J_{SC} but worse FF than 1-Octadecene counterparts
- a) fs-laser treatment on FAPbI₃ QD colloids turns the particles rounder than the untreated.
 - b) Films of these SE-QDs are more compact and show signs of energy exchange.
 - c) SE-QDs as adlayers to bulk FAPbI₃ films improve slightly the V_{OC} of PV cells and significantly the resistance to exposure to humidity.

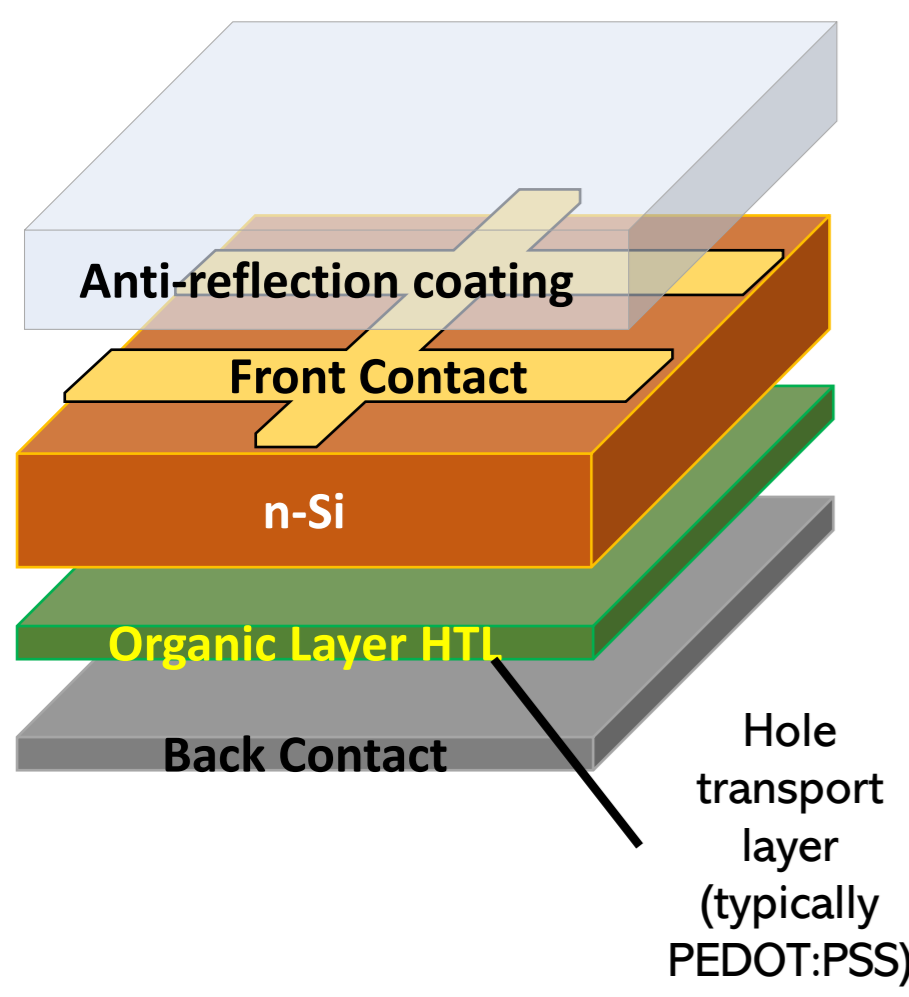
参考文献 - References

1. Xue et al. - *Joule* 2, 1866-1878 (2018)
2. Rocks, C. et al. - *Nano Energy* 50, 245-255 (2018)
3. Svrcek, V. et al. - *J. Phys. Chem. C* 120, 18822-18830 (2016)
4. Woo, H. C. et al - *J. Phys. Chem. Lett.* 9, 4066-4074 (2018)
5. Fu, M. et al - *Nat. Commun.* 9, 1-10 (2018)
6. Blach, D. D. et al. - *Nano Lett.* (2022)

Development of self-doped PEDOT/Si hybrid solar cells

Introduction

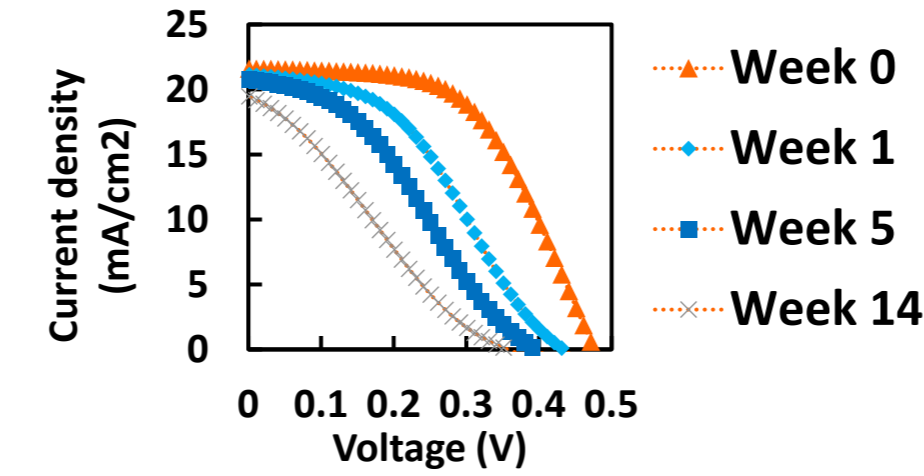
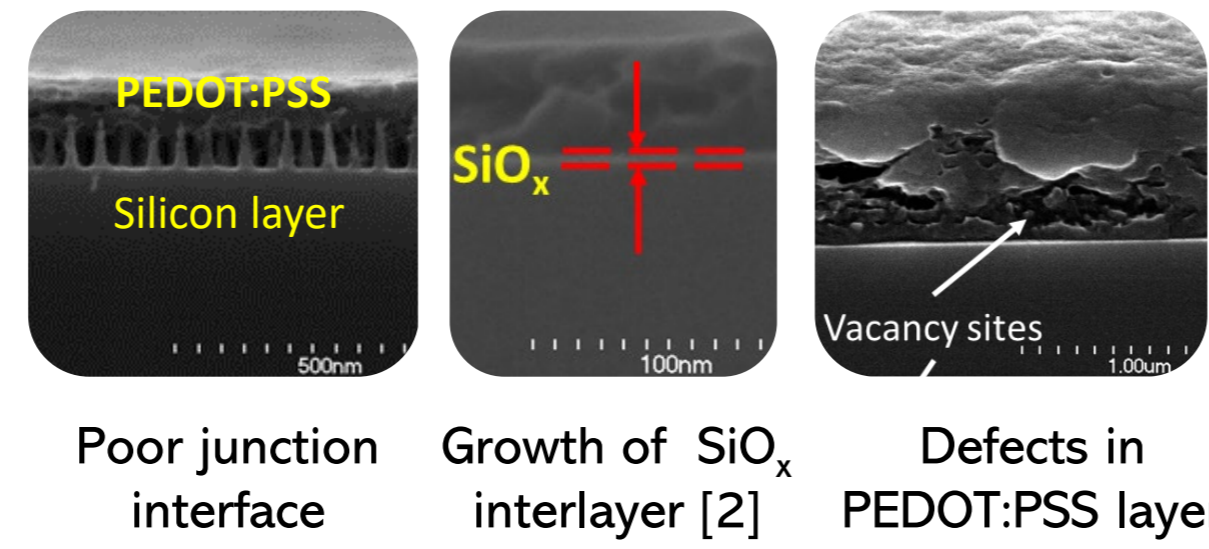
Silicon-Organic Hybrid Solar Cell (SOHC)



- High efficiency (~17%) [1]
- Low material cost
- Easy fabrication
- Low temperature processes (>300°C)
- Easy to recycle

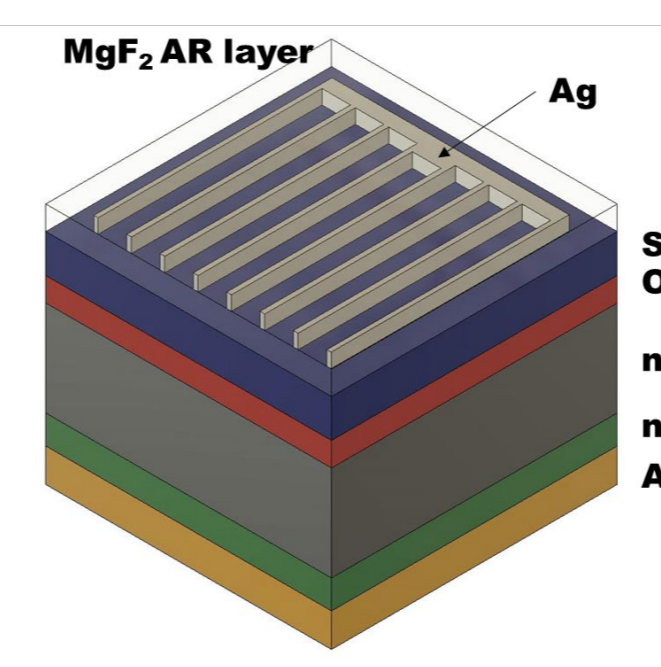
Schematic of a typical SOHC

Challenges



Degradation of J - V characteristics over time

This Work

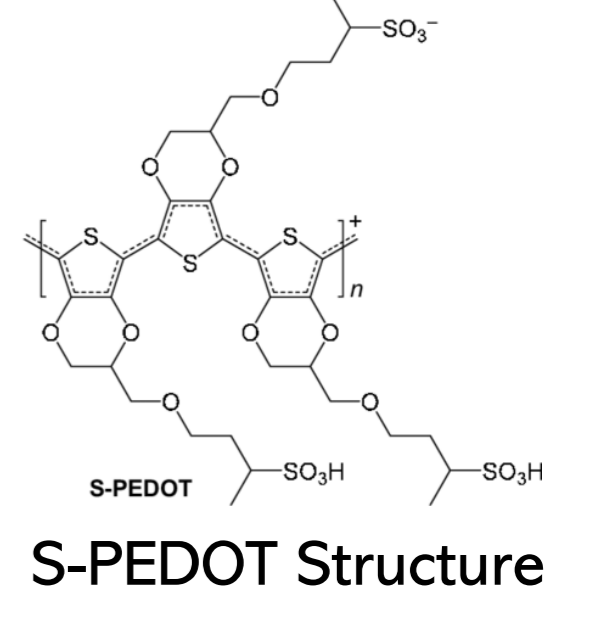


Schematic of SOHC fabricated in this study

Aim:
To improve the durability of SOHCs through a combination of high-quality passivation layer and a novel self-doped PEDOT

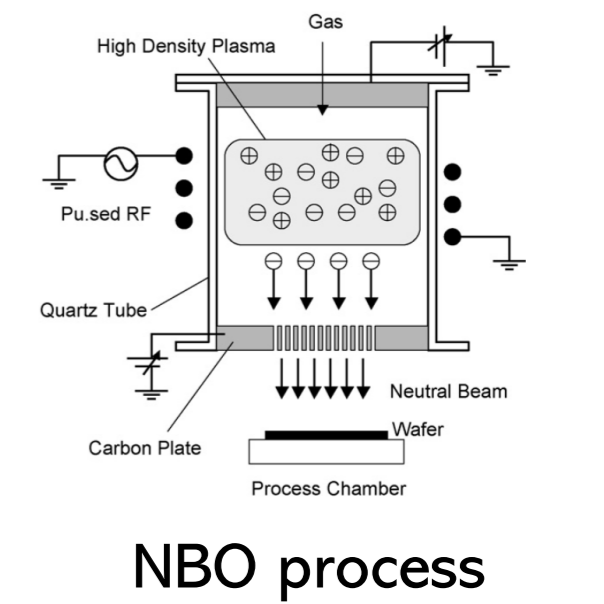
Self-doped PEDOT (S-PEDOT) [3]

- Soluble in water
- Better conformality to nano structures
- Less void defects in thin film
- Similar conductivity to PEDOT:PSS

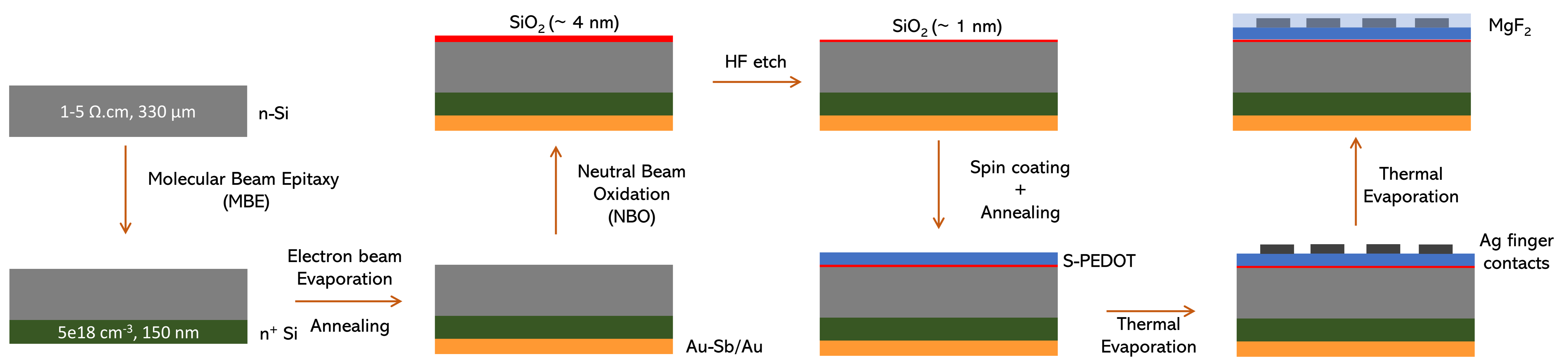


Neutral Beam Oxide (NBO) Layer [4]

- Room temperature process
- >95% pure SiO_2
- 3 nm thin layers in 300 s
- Defect free SiO_2 layer

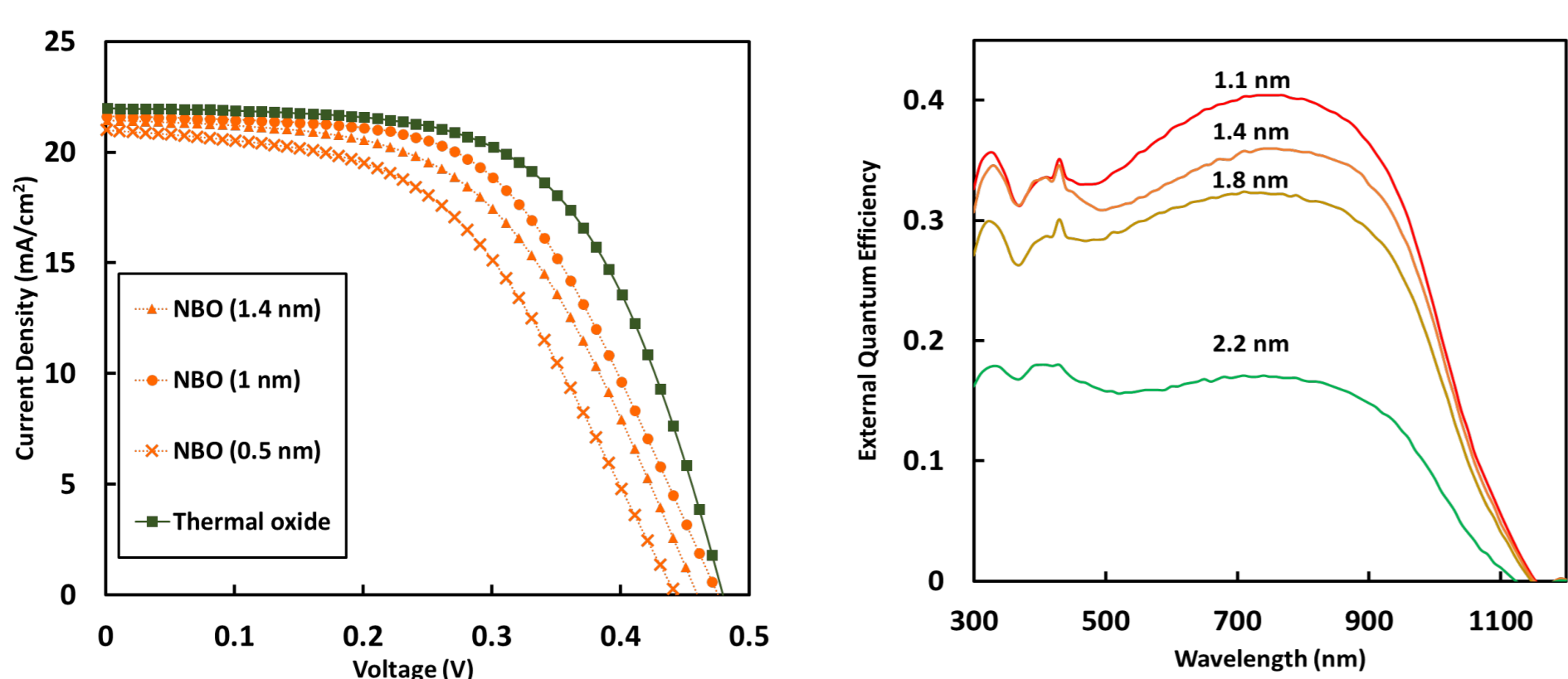


Device Fabrication



Results and Discussion

Dependence of PV characteristics on NBO film thickness



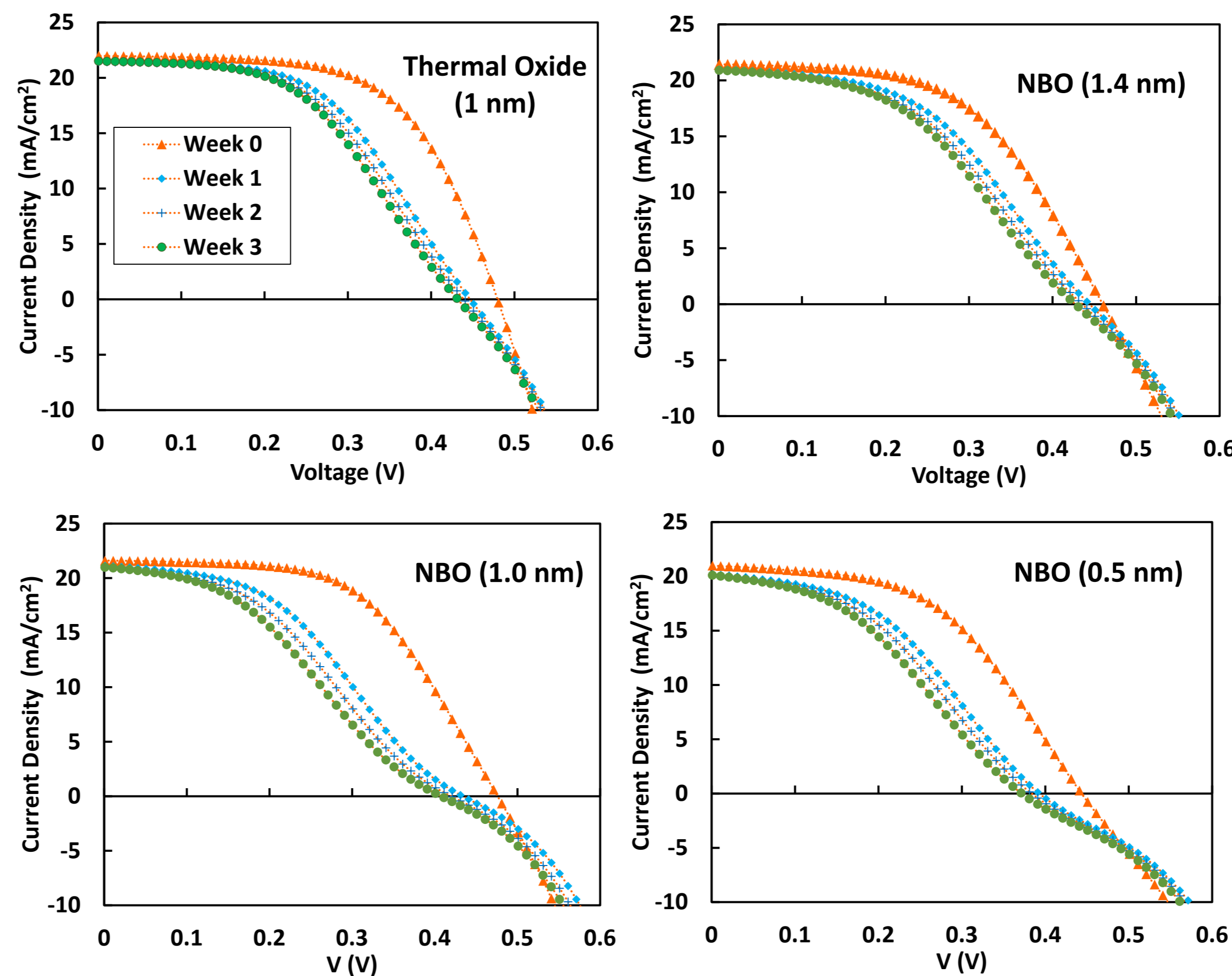
Illuminated J - V curves for each champion SOHC with different interfacial oxide layers.

EQE spectra for S-PEDOT/Si cells with different thicknesses of the neutral beam oxide (NO) inter-layer.

Table for the PV characteristics of the measured samples:

SOHC	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
NBO (1.4 nm)	453.25 ± 6.75	21.41 ± 0.28	50.25 ± 3	4.92 ± 0.33
NBO (1.0 nm)	474.25 ± 8.75	21.73 ± 0.45	54 ± 2	5.59 ± 0.10
NBO (0.5 nm)	419.5 ± 13.50	21.25 ± 0.70	49.5 ± 0.5	4.43 ± 0.2
Thermal oxide	460 ± 22.00	21.54 ± 0.45	55 ± 6	5.53 ± 0.82

Durability of measured solar cell samples



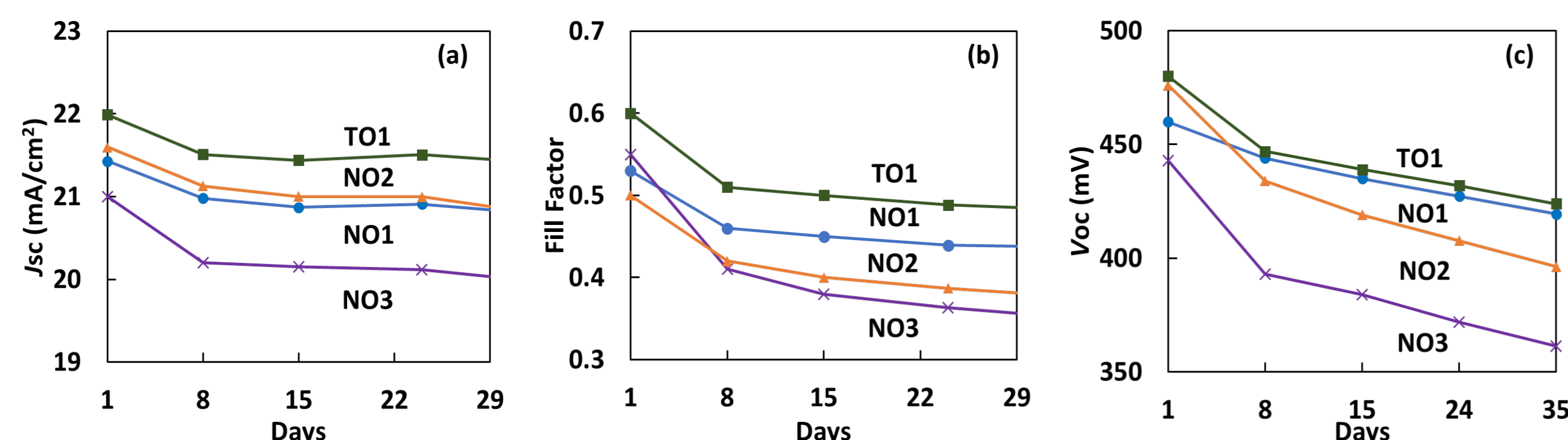
J - V curves for champion SOHCs with different oxide interlayers over 4 weeks

- 1 nm thermal oxide interlayer may perform better but NBO layers of the same thickness show better consistency over multiple samples.
- Oxide interlayers with the highest oxygen saturation (i.e. highest percentage of SiO_2) show the least degradation in photovoltaic performance.
- S-shaped J - V curve develops within the first week of storage pointing possible loss in PEDOT carrier concentration

Table for the thickness and saturation of the interlayers:

Preparation	Thickness (nm)	Oxygen Saturation (%)
NBO for 400 s	4.6	95
30 s HF etch after NBO	1.4	83
40 s HF etch after NBO	1.0	43
50 s HF etch after NBO	0.50	55
150 °C for 15 min	1.0	54

Results (contd.)



Durability of (a) J_{SC} , (b) FF , and (c) V_{OC} of the TO1 (thermal oxide), NO1 (NBO 1.4 nm), NO2 (NBO 1.0 nm), and NO3 (NBO 0.5 nm) samples over time.

Summary

- We fabricated simple planar silicon-organic hybrid solar cells (SOHCs) using a new self-doped PEDOT, which overcomes some of the limitations of PEDOT:PSS. The best performing cells achieved an efficiency of 6.35% with 482 mV in V_{OC} and 21.99 mA/cm² in J_{SC} for a cell with a 1 nm-thick interfacial oxide layer.
- Two probable degradation mechanisms caused the development of s-shaped J - V responses:
 - (i) reaction of S-PEDOT with unsaturated silicon sub-oxides
 - (ii) the degradation of S-PEDOT over time.
- The use of a thin, homogeneous, and highly saturated silicon oxide layer using neutral beam oxidation (NBO) proved effective against mitigating the first factor.

References:

1. D. Zielke et al., Solar Energy Materials & Solar Cells 2014, 131, 110–116.
2. Sara Jackle et al., ACS Appl. Mater. Interfaces 2016, 8, 8841–8848.
3. Hirokazu Yano et al., Sci. Adv., 2019, 5, eaav9492.
4. Seiji Samukawa, Jpn. J. Appl. Phys., 2006, 45, 2395.

貧溶媒法に代わる真空クエンチ法を用いたペロブスカイト太陽電池の作製

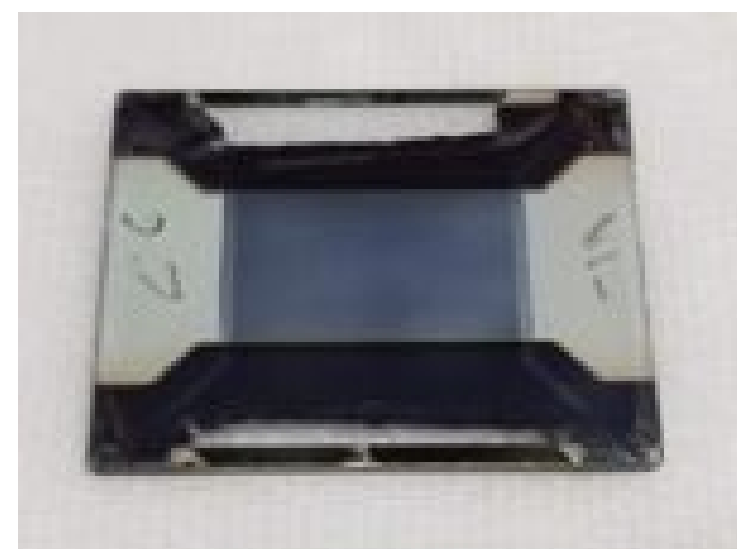
研究の概要

- ペロブスカイト/結晶シリコンタンデムセルを実用サイズ（シリコンウェハサイズ）で実現するための開発を進めている。
- トップセルとなるペロブスカイト太陽電池の作製方法・構造を検討
- 発表内容

- ① 貧溶媒法に代わる新規な真空クエンチ法を用いたペロブスカイト層の結晶化プロセスを開発（⇒本研究）
- ② 電子輸送層材料として、非フルーレン系材料（ペリレンジイミド（PDI）誘導体）を提案（⇒荒木らの発表）
- ③ 電子輸送層材料（コンタクト層）として、高耐熱性有機材料（NBPhen）を提案（⇒望月らの発表）
- ④ タンデムセルにおける電流整合設計を行い、トップセルとボトムセルの最適な組み合わせを考察。（⇒上出らの発表）

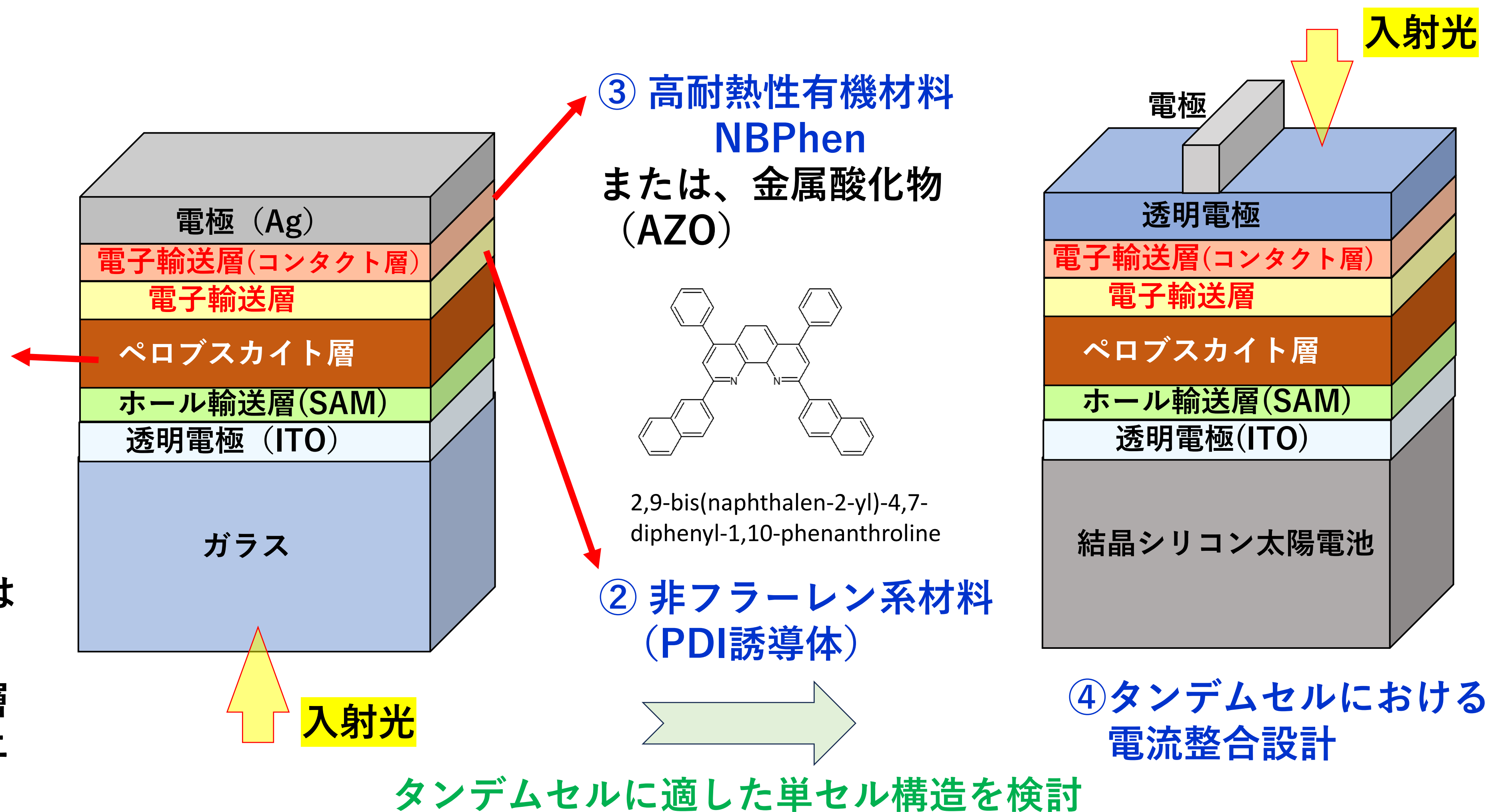
① ペロブスカイト層の作製方法の検討

- タンデムセルに適したトリプルカチオンペロブスカイト層を用いて検討を行っている。
- $\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.76}\text{MA}_{0.24})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.76}/\text{Br}_{0.24})_3$
バンドギャップ=1.69eV



1.04 cm²セル
(ガラス基板サイズ:
20 X 25 mm)

- スピンコートを用いた貧溶媒法は、小面積では非常に有効な手段（⇒大面積は困難）。
- 今回、ウェハサイズ基板へのペロブスカイト層の作製方法として、貧溶媒法に代わる真空クエンチ法の検討を行った。



真空クエンチ法によるペロブスカイト太陽電池の作製

1. ペロブスカイト溶液塗布

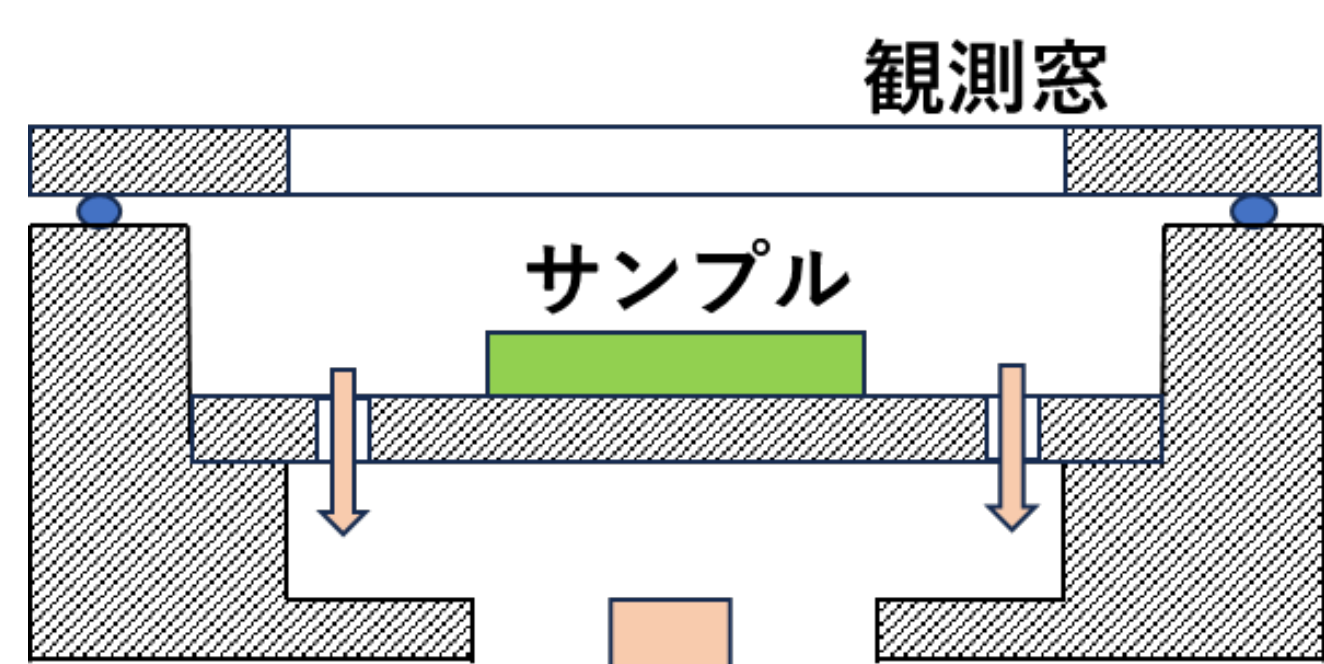
- 基板洗浄後、SAMを形成
- スピンコータまたは、スリットコータでペロブスカイト溶液を塗布



スリットコータの写真

2. 真空クエンチ法による前駆体形成 3. 熱アニールによる結晶化

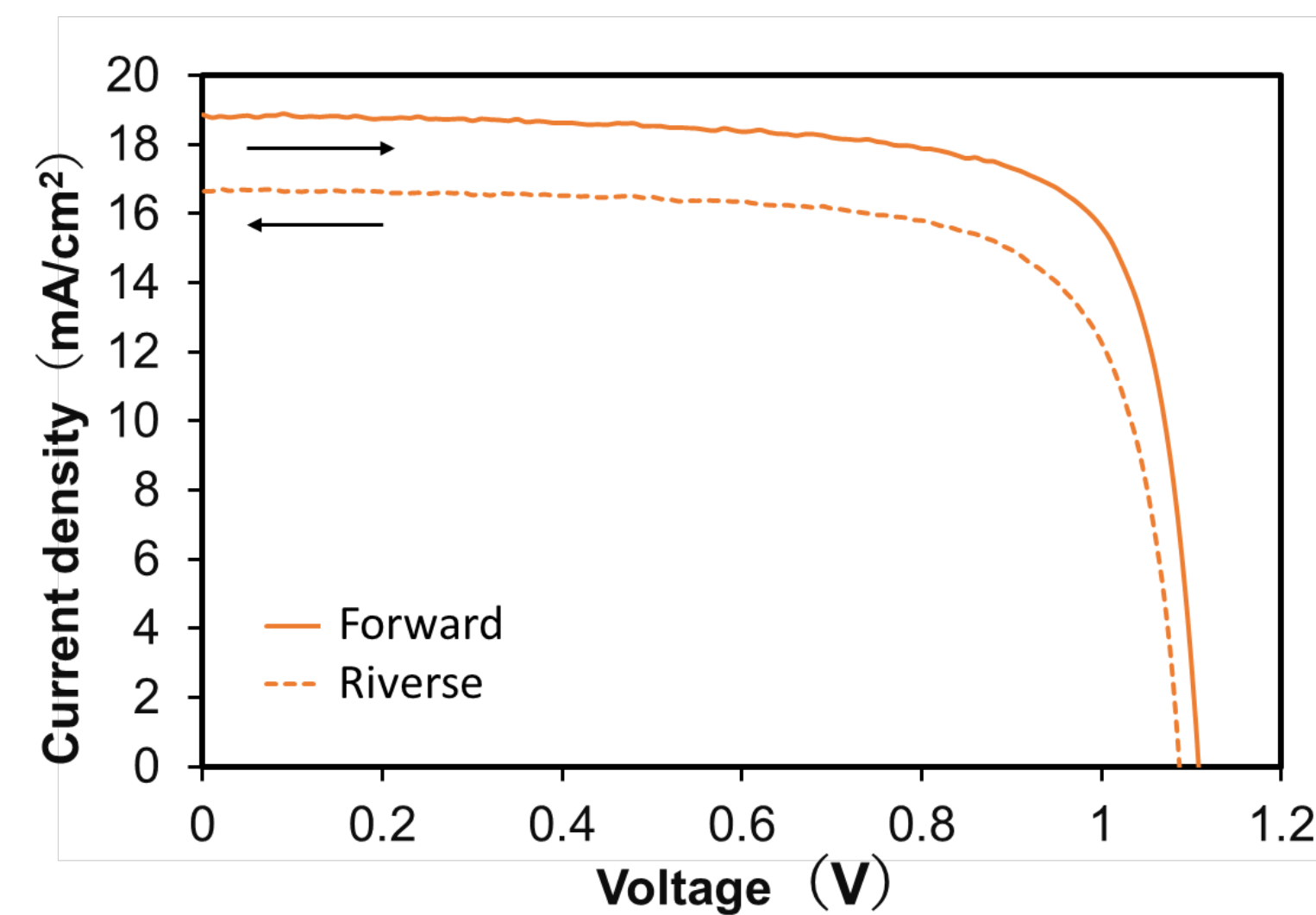
- チャンバ内の圧力を5 Pa程度以下まで急速に真空引きし、溶媒を素早く蒸発させることで、ペロブスカイト前駆体を形成（⇒結晶化開始）



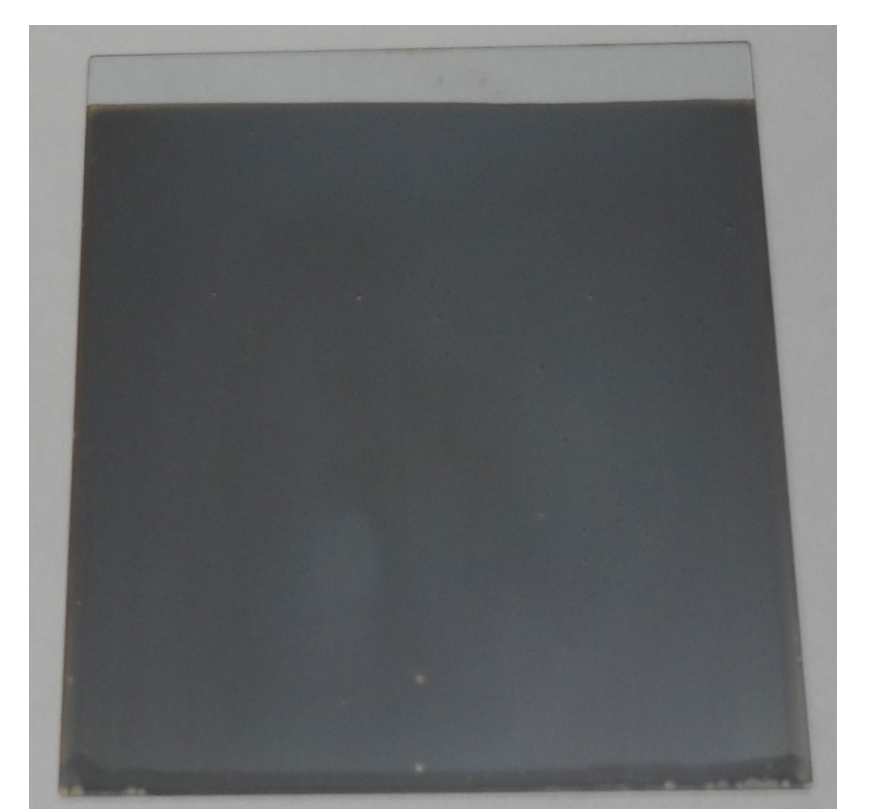
真空排気
真空クエンチ装置の概略図

- 真空クエンチ後、ホットプレート上で熱アニール（⇒結晶化完了）

作製したペロブスカイト太陽電池の特性



真空クエンチ法で作製した逆型ペロブスカイト太陽電池の電流-電圧特性例



10 cm角基板を用いて、スリットコータでペロブスカイト溶液を塗布後、真空クエンチ法により結晶化させたサンプルの写真

- スリットコータと真空クエンチ法を用いても貧溶媒法と同等の変換効率を得られるように作製条件の最適化を進めている。
 - ・IV曲線のヒステリシスの低減および変換効率の向上
 - ・基板面内で均一な膜厚になるような塗布条件の検討など

結論

- 貧溶媒法に代わる新規な真空クエンチ法を用いたペロブスカイト層の結晶化プロセスを開発した。
- 真空クエンチ法で作製したペロブスカイト太陽電池の変換効率として、15.9% (forward scan) を得た。
- 10 cm角ガラス基板上に、スリットコータでペロブスカイト溶液を塗布し、真空クエンチ法による結晶化を行うことができた。
- 現在、真空クエンチ法による最適な結晶化プロセス条件の探索を進めている。

参考

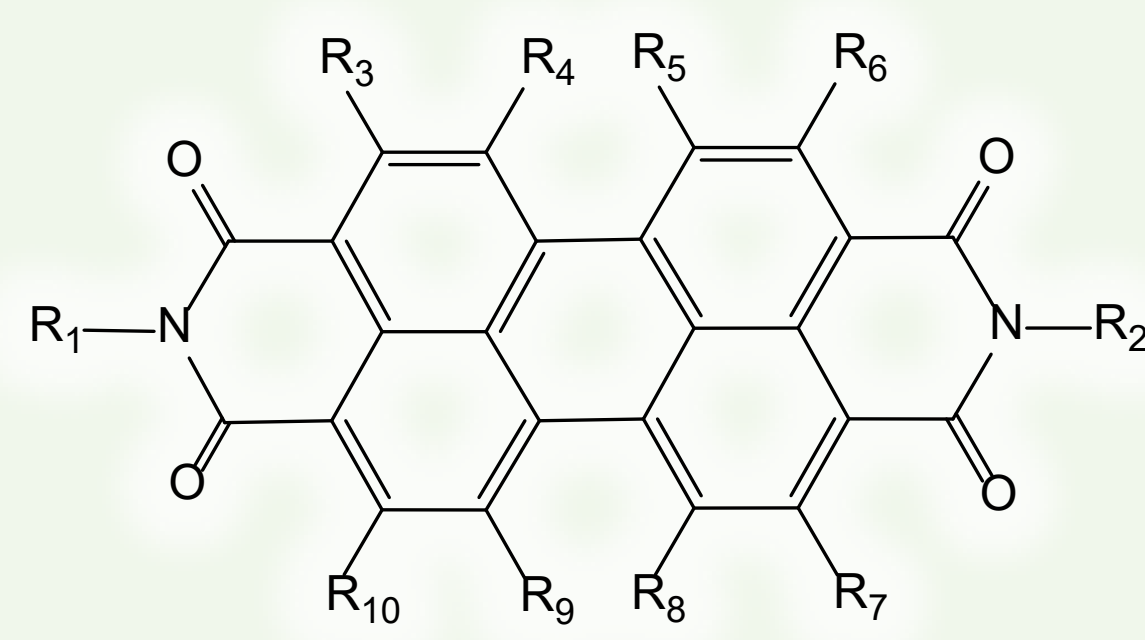
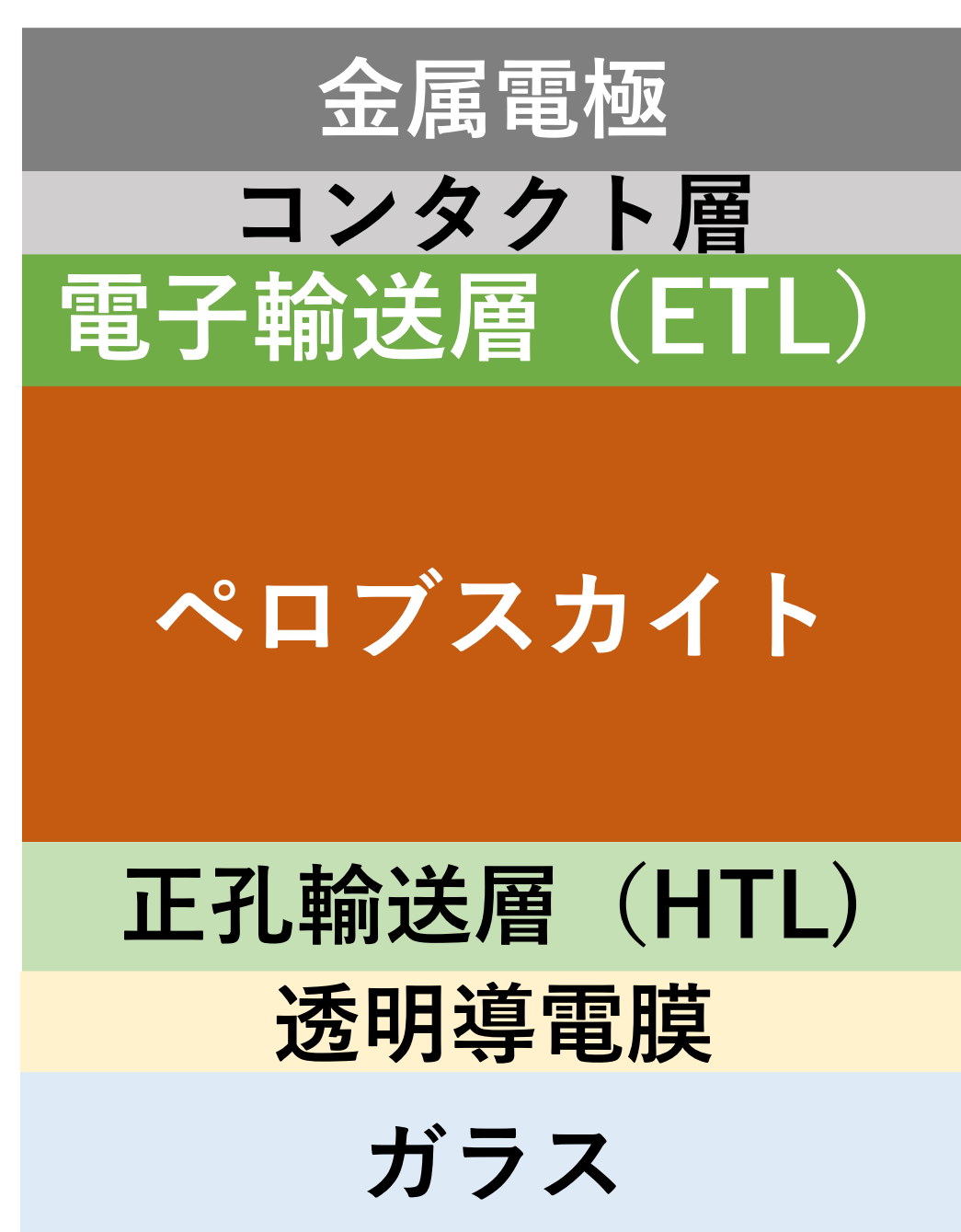
本研究の詳細は、2024年春季応用物理学会学術講演会にて発表予定。

謝辞

真空クエンチ法を用いたペロブスカイト太陽電池の作製方法に関する成果は、NEDOプロジェクトの委託業務（JPN20015）の結果得られたものです。関係各位に感謝いたします。

非フラーレン系電子輸送材料として ペリレンジイミド誘導体を使用した 逆型ペロブスカイト太陽電池

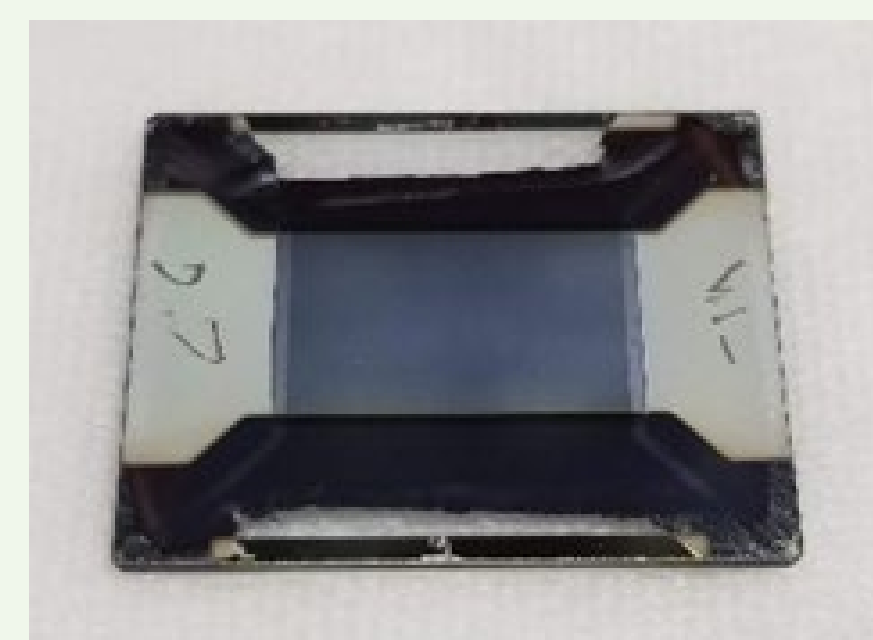
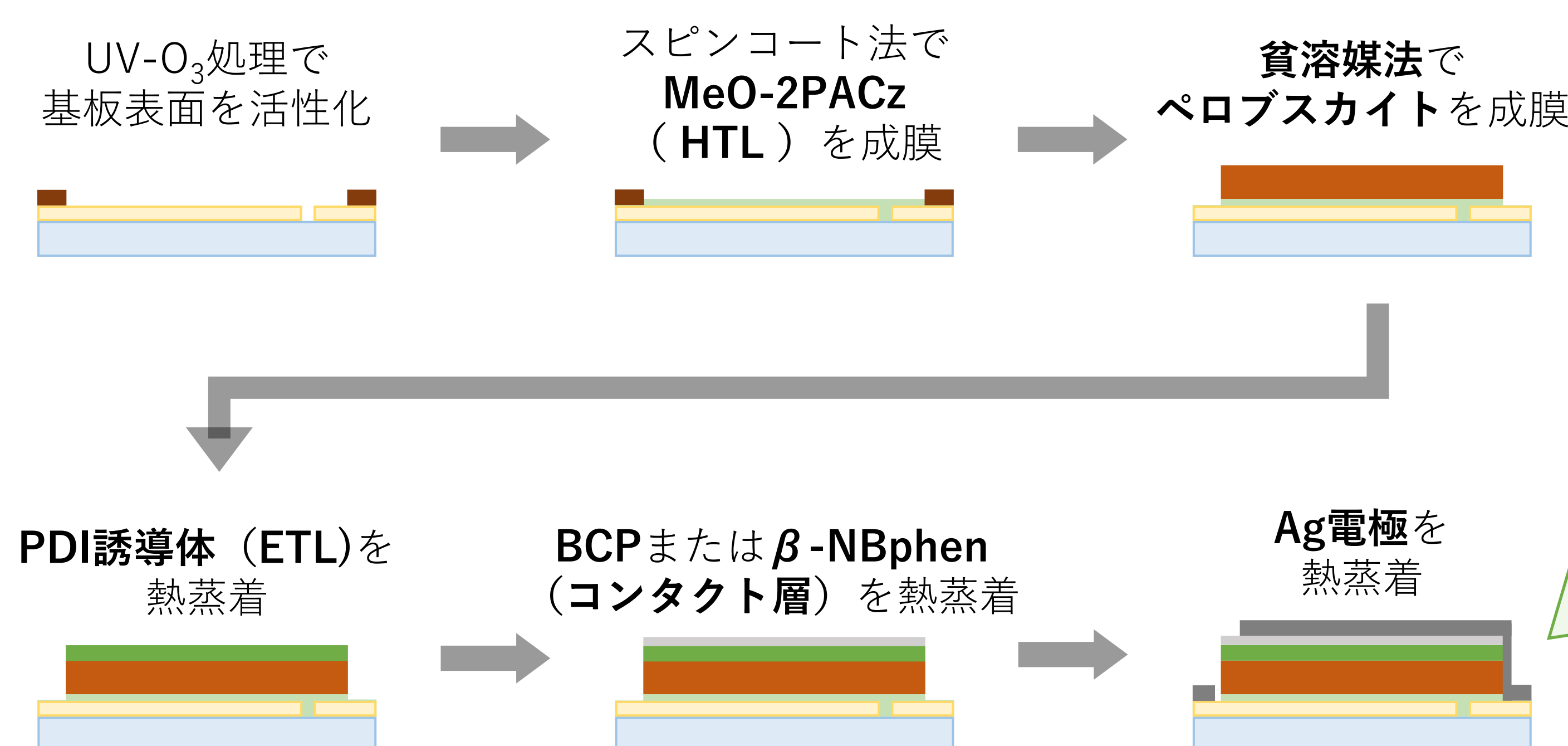
概要



- ✓非フラーレン系電子輸送材料
- ✓安価に合成可能
- ✓官能基の導入によって物性の調整が容易

現在、逆型ペロブスカイト太陽電池の電子輸送材料として、 C_{60} などのフラーレン系電子輸送材料が主流となっているが、高価かつ安定性に懸念がある等の理由から代替材料の開発が望まれる。本研究では、非フラーレン系電子輸送材料として、安価かつ物性調整が容易なペリレンジイミド (PDI) 誘導体¹⁾の利用を試みた。具体的にはPDI誘導体であるKHSET-02 (ケミプロ化成品) を電子輸送層に使用した逆型ペロブスカイト太陽電池を作製し、その発電特性について検討を行った²⁾。

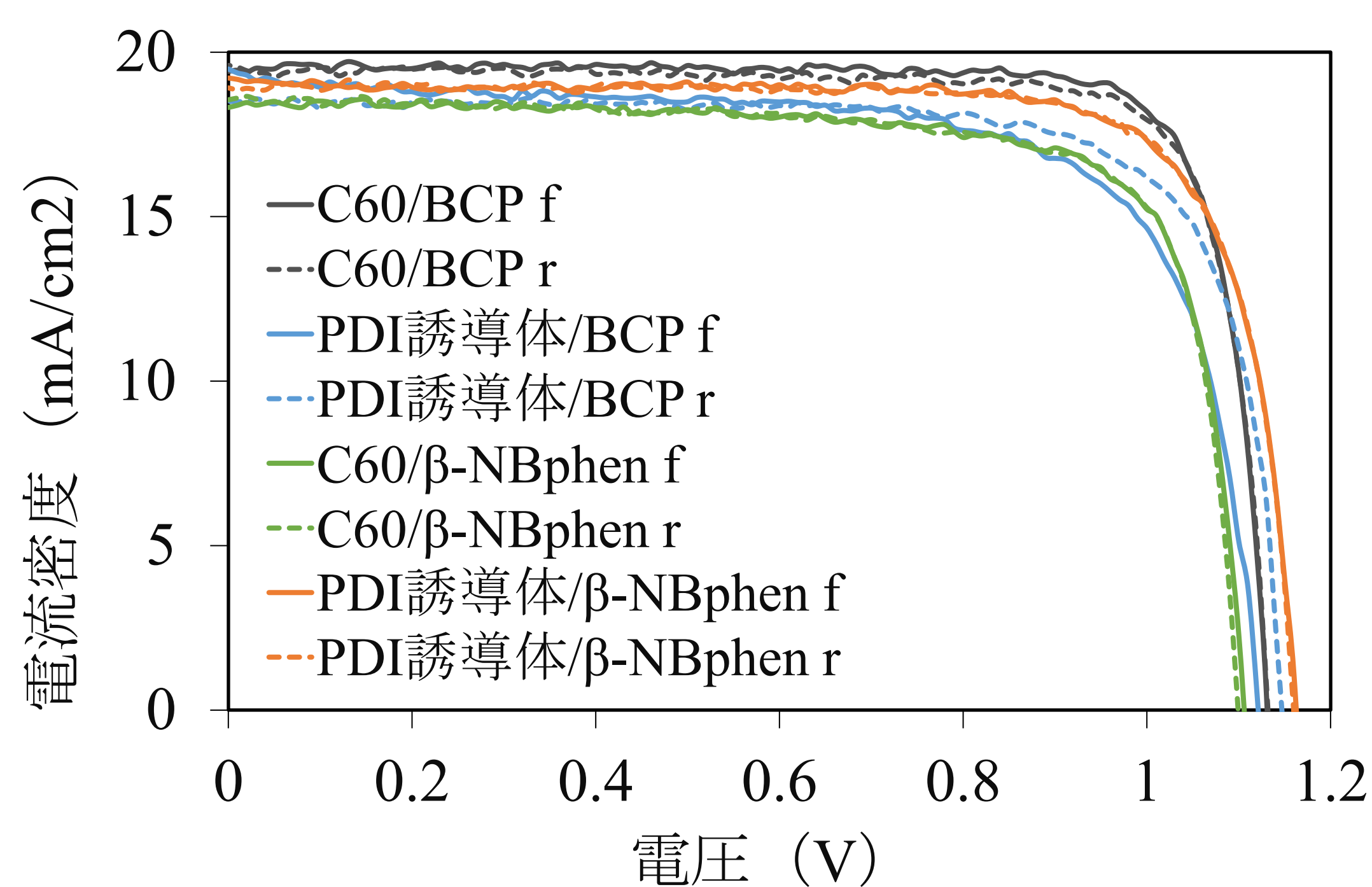
実験



完成した逆型ペロブスカイト太陽電池 (有効面積: 1.04cm²)

- 左の図に示す手順でPDI誘導体をETLに使用した逆型ペロブスカイト太陽電池を作製した。
- 完成したセルについて、疑似太陽光照射下でのJ-V測定を行い、 C_{60} を使用して同条件で作製したセルとの比較を行った。

結果と考察



- PDI誘導体を使用したセルが良好な発電特性を示したことから、今回使用したPDI誘導体は逆型ペロブスカイト太陽電池のETLとして機能していることが確認された。
- PDI誘導体/BCPではなくPDI誘導体/β-NBphenを使用したセルにおいて、より高い変換効率 (17.4%) と開放電圧 (1.16V) が得られた。
- PDI誘導体/β-NBphenを使用したセルは、従来の C_{60} /BCPには及ばないものの C_{60} /β-NBphenよりも変換効率が高く、また今回作製したセルの中で最も高い開放電圧を示した。

結論

今回使用したPDI誘導体 (KHSET-02) は逆型ペロブスカイト太陽電池のETLとして機能することが判明した。さらに従来の C_{60} を使用したセルと比較したところ、変換効率ではわずかに劣るものの、より高い開放電圧が得られた。以上のことから、PDI誘導体 KHSET-02は有望な非フラーレン系電子輸送材料であると考えられる。

参考文献

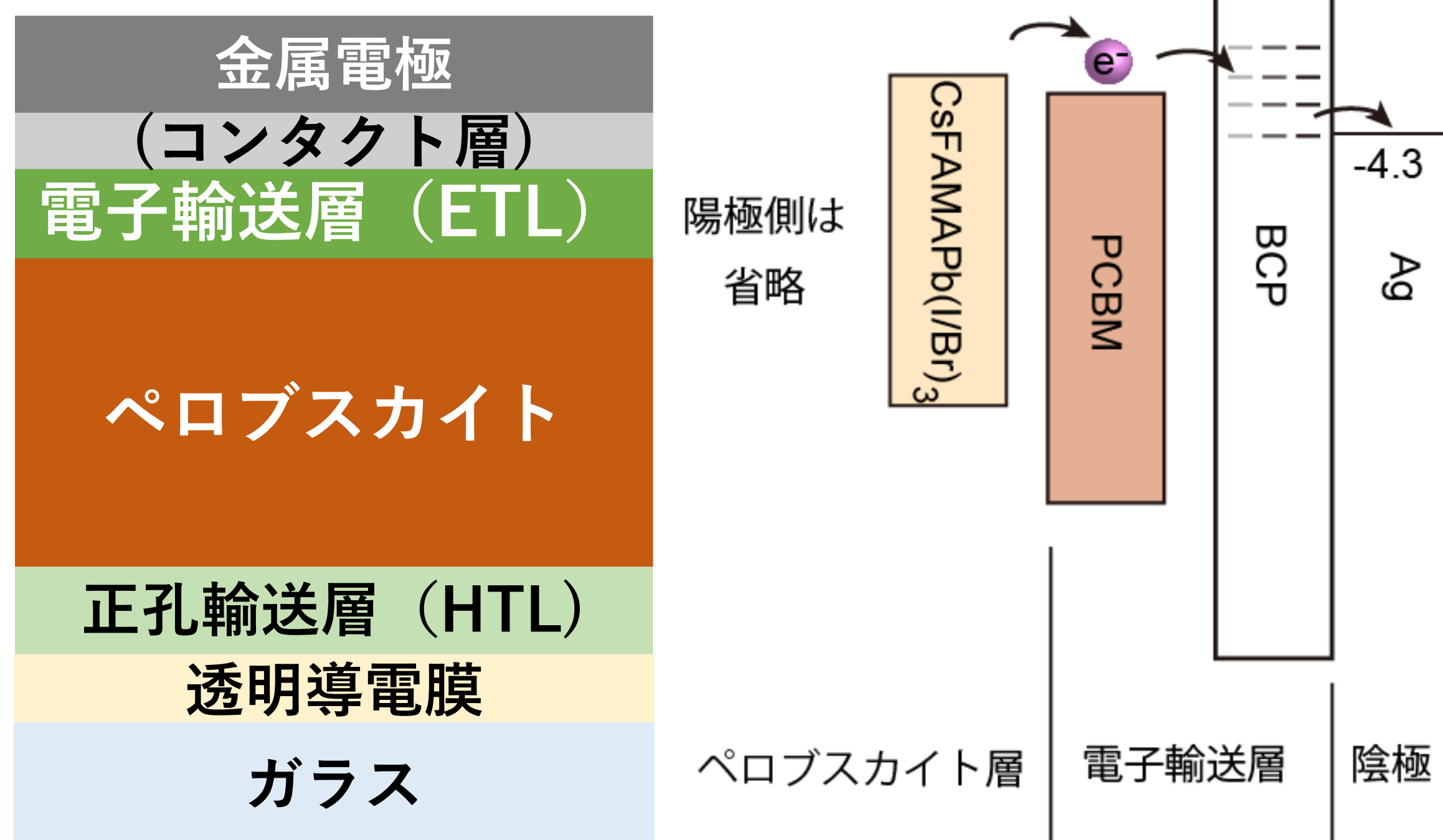
- 1) N. Zink-Lorre *et al.*, *Chem. Commun.*, 2020, **56**, 3824-3838.
- 2) 荒木他、第84回応用物理学会秋季講演会 22p-C601-20、2023年。

謝辞

この成果は令和4年度シーズ支援事業の結果得られたものです。関係各位に御礼申し上げます。

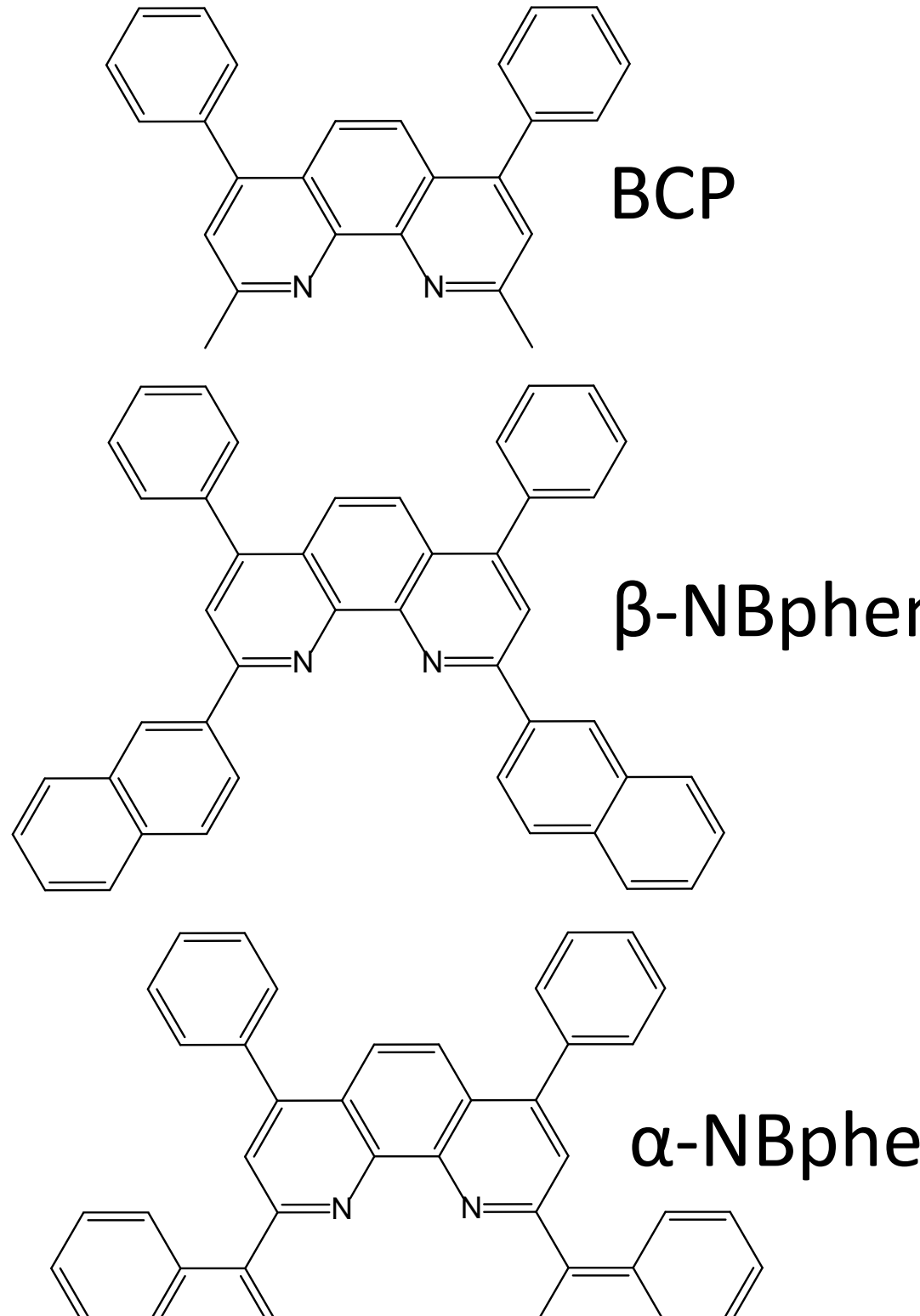
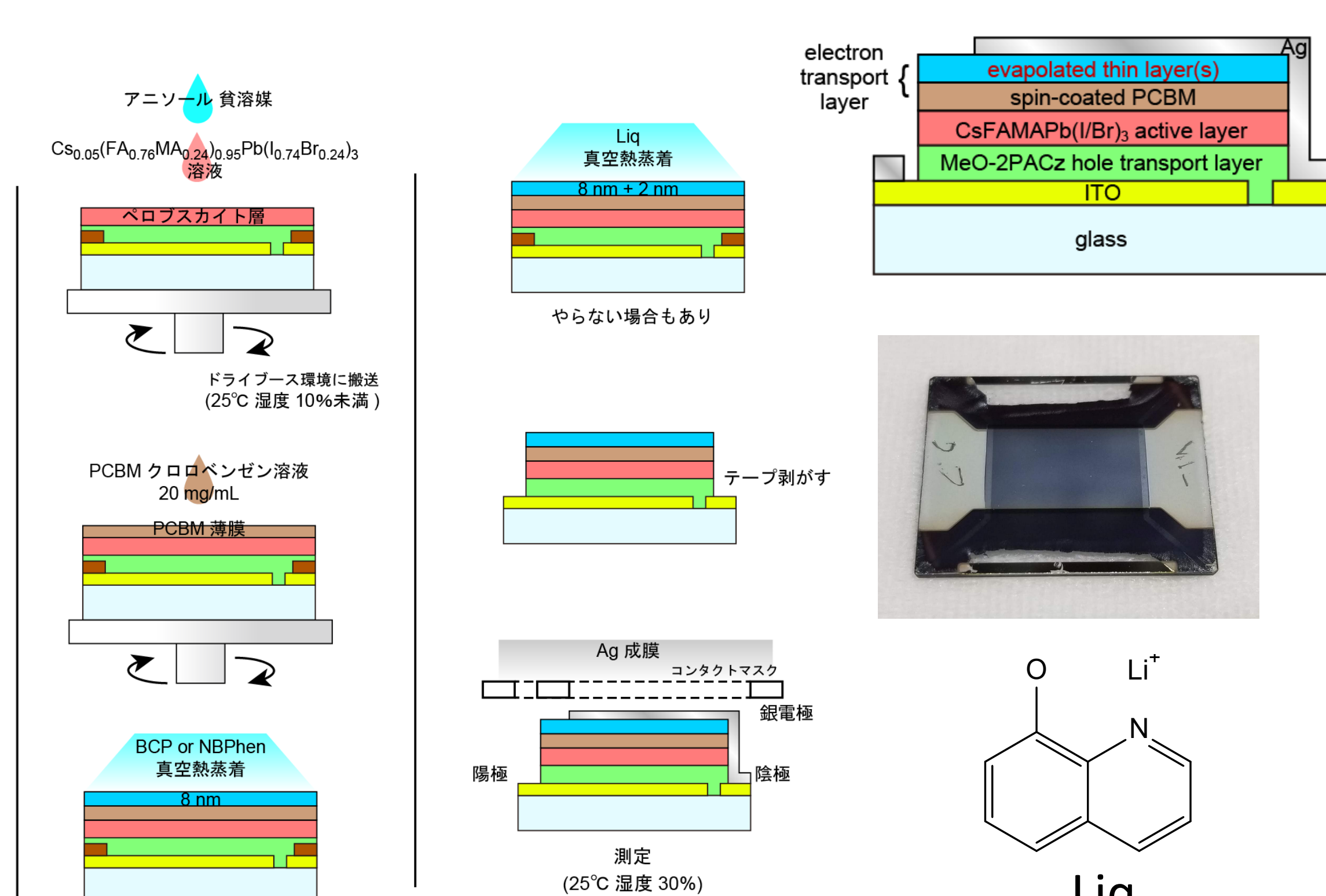
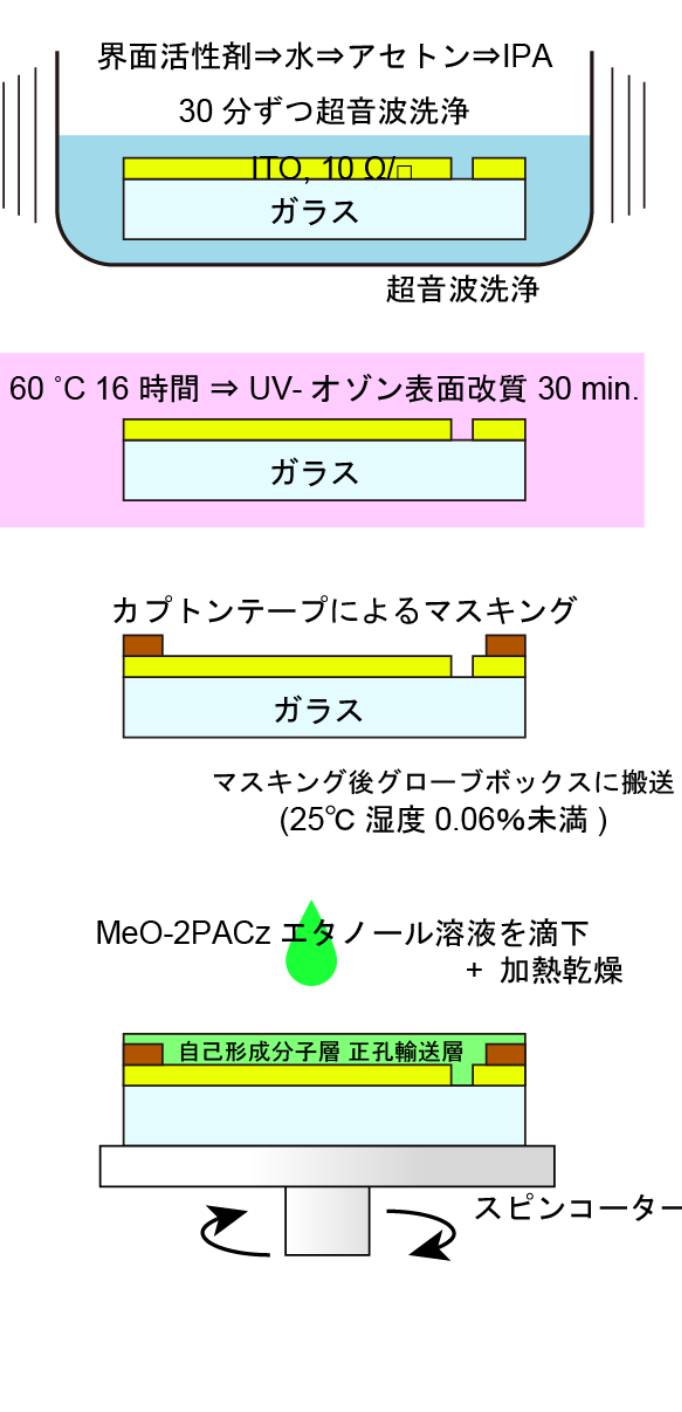
タンデム用ペロブスカイト太陽電池のための 高耐熱性電子輸送層

概要



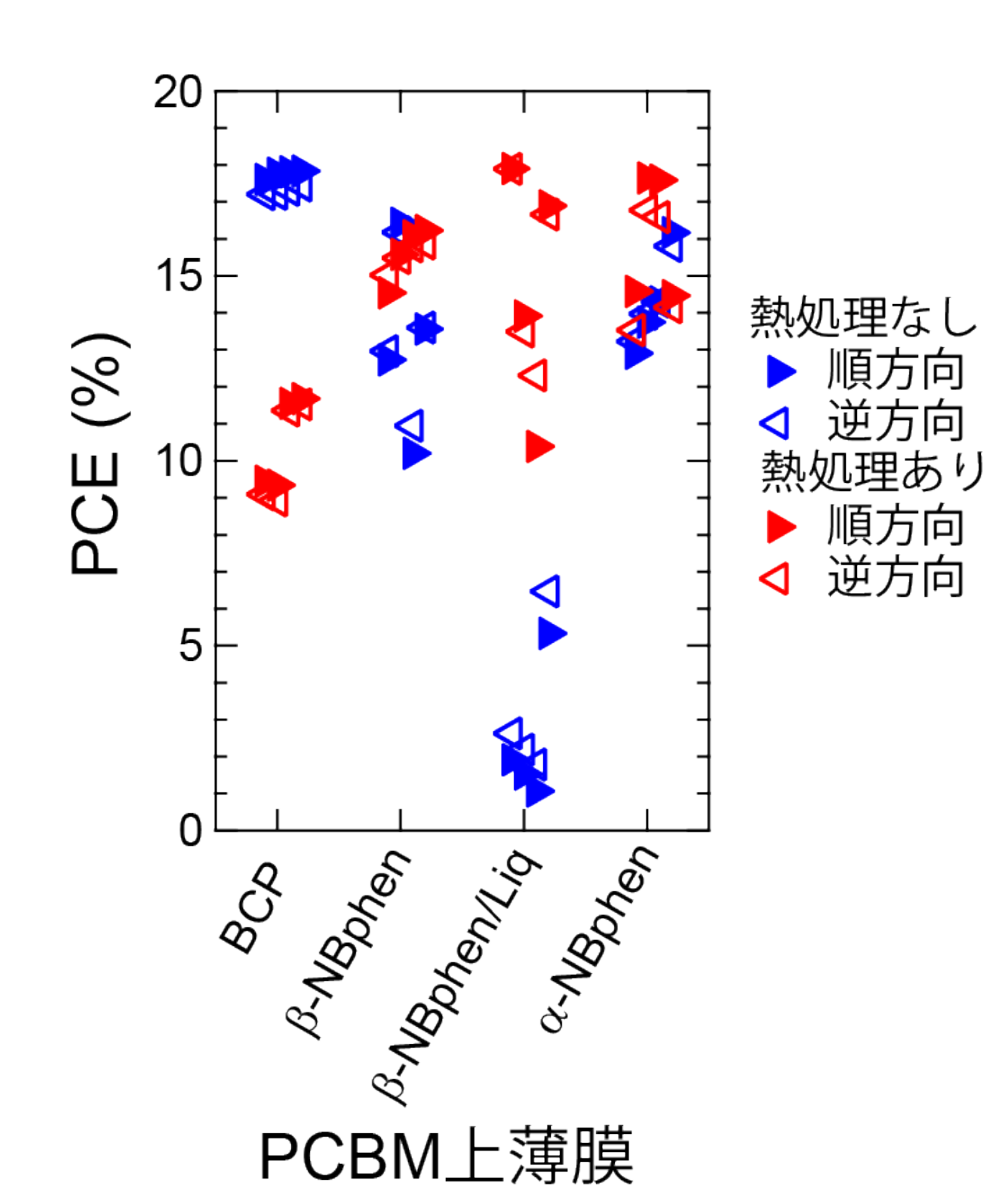
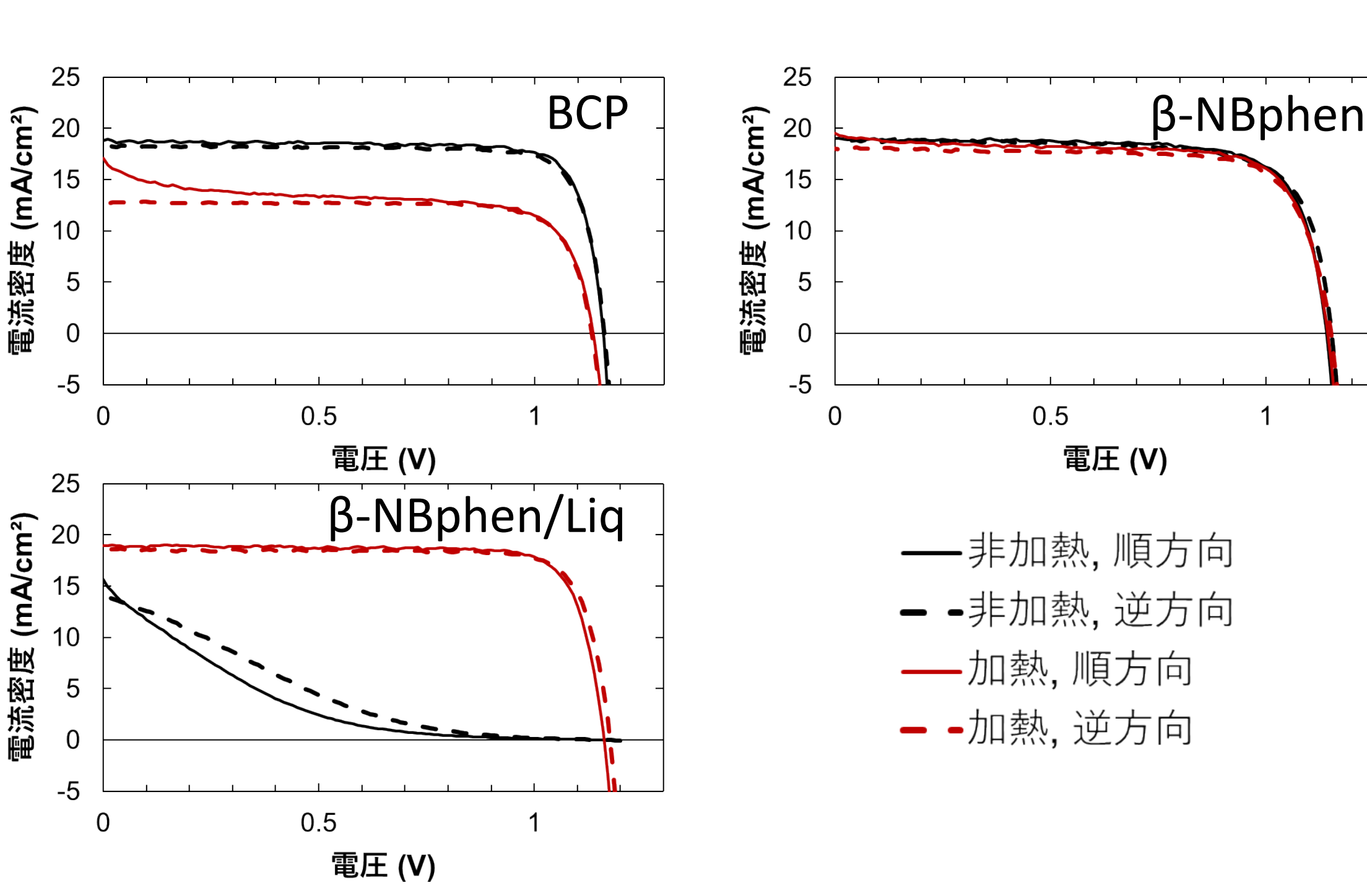
低温でプロセスがしやすいp-i-n型ペロブスカイト太陽電池では、電子輸送層にはペロブスカイト材料と良くコンタクトする層と金属電極と良くコンタクトする層の多層膜とする場合が多いが、後者で良く使われるフェナントロリン誘導体ワイドバンドギャップ半導体であるバソクプロイン (BCP)は室温で金属電極と良く相互作用¹⁾し金属電極と良好なコンタクトを形成するが、90°C未満でガラス転移してしまう。一方シリコンタンデムで想定されるセル作製時の透明電極成膜の成膜時には透明度と電気伝導度の両立のために基板を高温にしたい。そこでより耐熱性の高い材料²⁾として別の誘導体であるNBPhenを使う方法を確立した^{3,4)}。

実験



- 左の図に示す手順でコンタクト層を変えた逆型ペロブスカイト太陽電池を作製した。
- 銀成膜の後に中間準位を誘起するための熱処理を検討した
- NBPhenでは100°C10分の熱処理が良いことを発見

結果と考察



- NBPhenは熱処理無しではコンタクト層としての特性が悪いようで曲線因子(FF)が低くなり効率が低いですが、熱処理をすることでBCP並みのFFや効率が得られた
- BCPは非加熱の状態の高いFF,効率を示すが熱処理をするとガラス転移の影響で電子輸送層として用を成さず電流が取り出せない領域が発生したためと思われる電流値の大幅な低下を観測した

結論

フェナントロリン誘導体の有機半導体であるNBPhenを逆型ペロブスカイト太陽電池の電子輸送材料として機能させる手法を確立した。従来のバソクプロインに比べて耐熱性が高く、屋外での発電を行う上での信頼性や、タンデムセル作製時の受光面側透明電極の成膜時に許容される温度を上げることが出来るものと期待される。

参考文献

- 1) Huang, C.-J., Ke, J.-C., & Wang, Y.-H. (2012). ECS Solid State Letters,2(1), Q5–Q7.
- 2) H. Tsuneyama, et al., J. Mater. Chem. C, 2022, 10, 2073-2079.
- 3) 望月他、EU PVSEC 2023 2BV.2.11、2023年、
- 4) 特願2023-141299

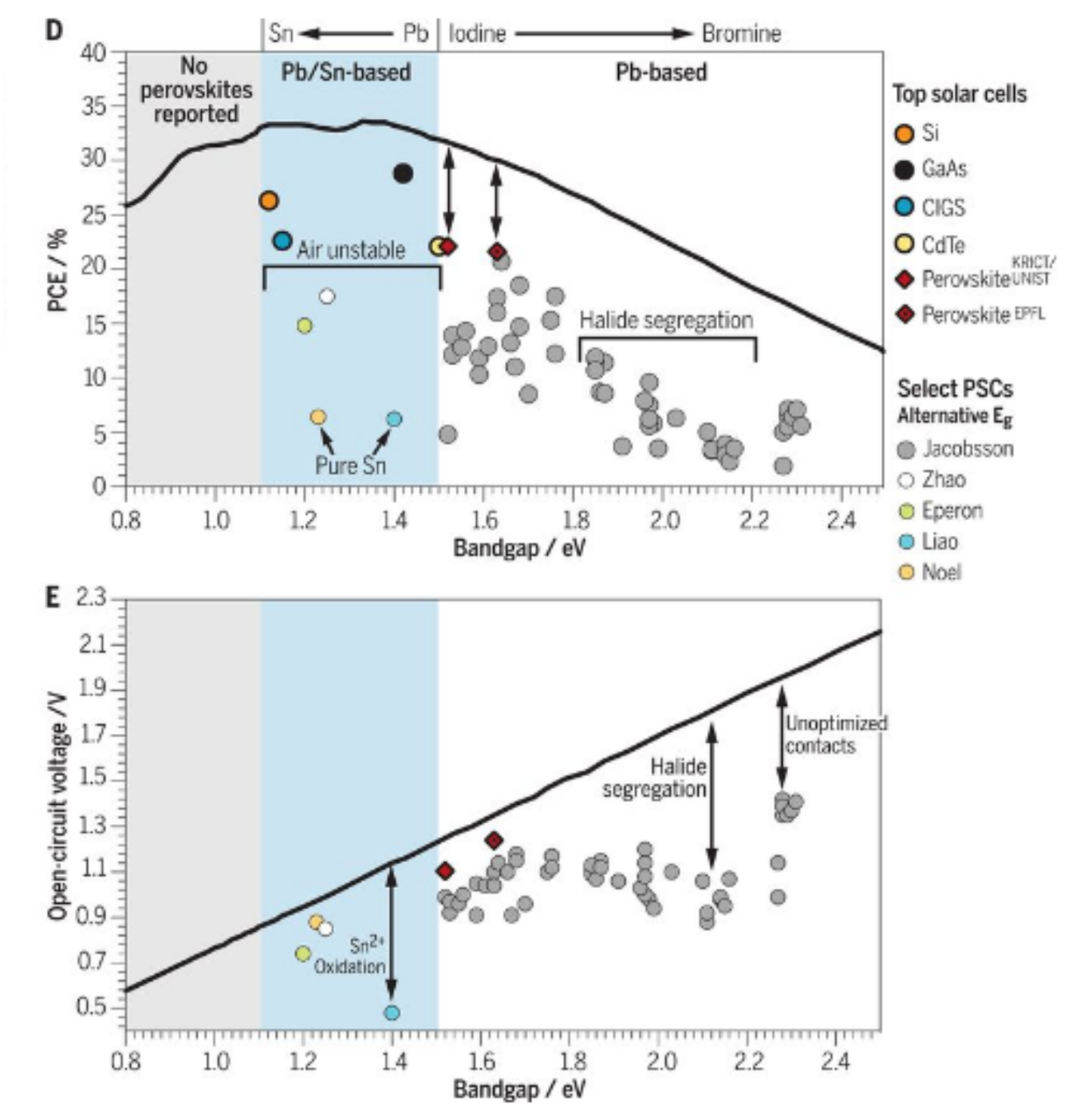
謝辞

本成果は令和4年度シーズ支援事業の成果として得られました。関係各位に感謝申し上げます。

ペロブスカイト/結晶シリコンタンデム太陽電池の電流整合設計

概要

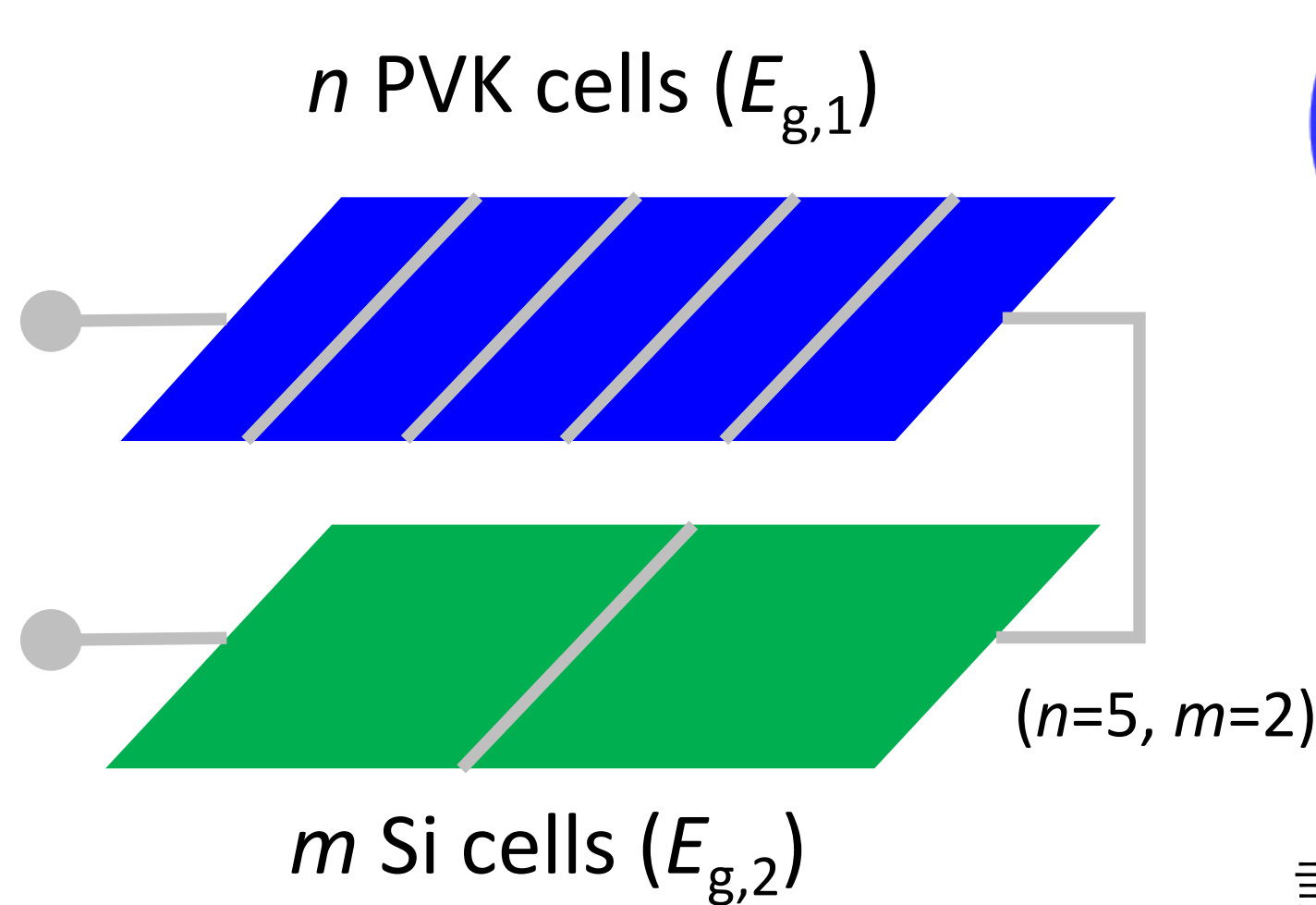
- 従来の2端子PVK/Siタンデム設計では、Siとの電流整合のためにペロブスカイト(PVK)のバンドギャップ(E_g)は1.7eV以上であることが望ましいが、現状では、単セルとして低Voc損失で高効率なPVKセルのバンドギャップは1.6eV以下と狭く、さらなる高効率化に必要な電流整合設計が難しい(右図)。
- このギャップを除去するために、トップ/ボトムセルを複数(nセルとmセル)に分割して直列接続した2端子直列PVK/Siタンデム太陽電池の設計の有効性について数値評価した。この設計では、m/nを最適化することで、任意の E_g のPVKセルで電流整合を実現できる。



From Juan-Pablo Correa-Baena et al., *Promises and challenges of perovskite solar cells*, Science 358, 739-744(2017). DOI:10.1126/science.aam6323. Reprinted with permission from AAAS.

電流整合の方法

n-PVK/m-Si による設計



電流整合条件

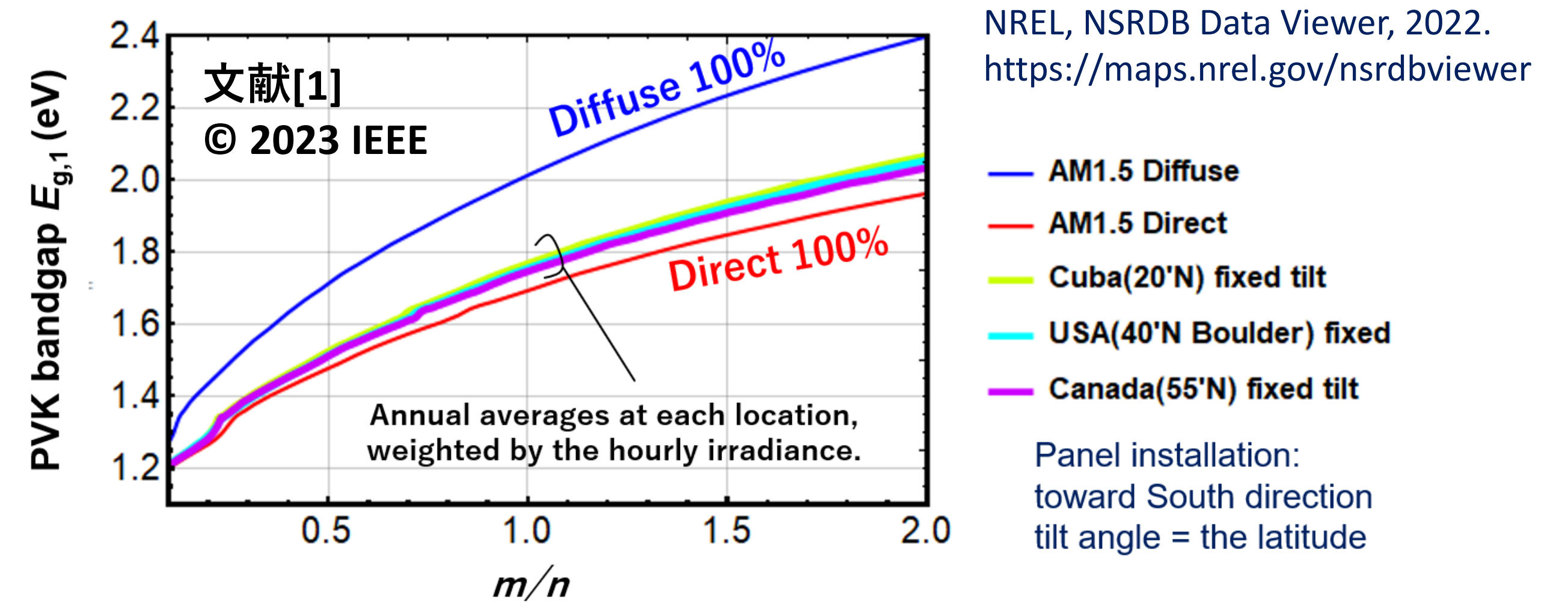
$$\left(\frac{S_{pv}}{n}\right) J_{sun}(PVK) = \left(\frac{S_{pv}}{m}\right) J_{sun}(Si)$$

$$\frac{m}{n} = \frac{J_{sun}(E_{g,2}, E_{g,1})}{J_{sun}(E_{g,1}, +\infty)}$$

$$= \frac{\int_{E_{g,2}}^{E_{g,1}} j_{sun}(E) dE}{\int_{E_{g,1}}^{+\infty} j_{sun}(E) dE}$$

設計パラメータ

最適な設計条件



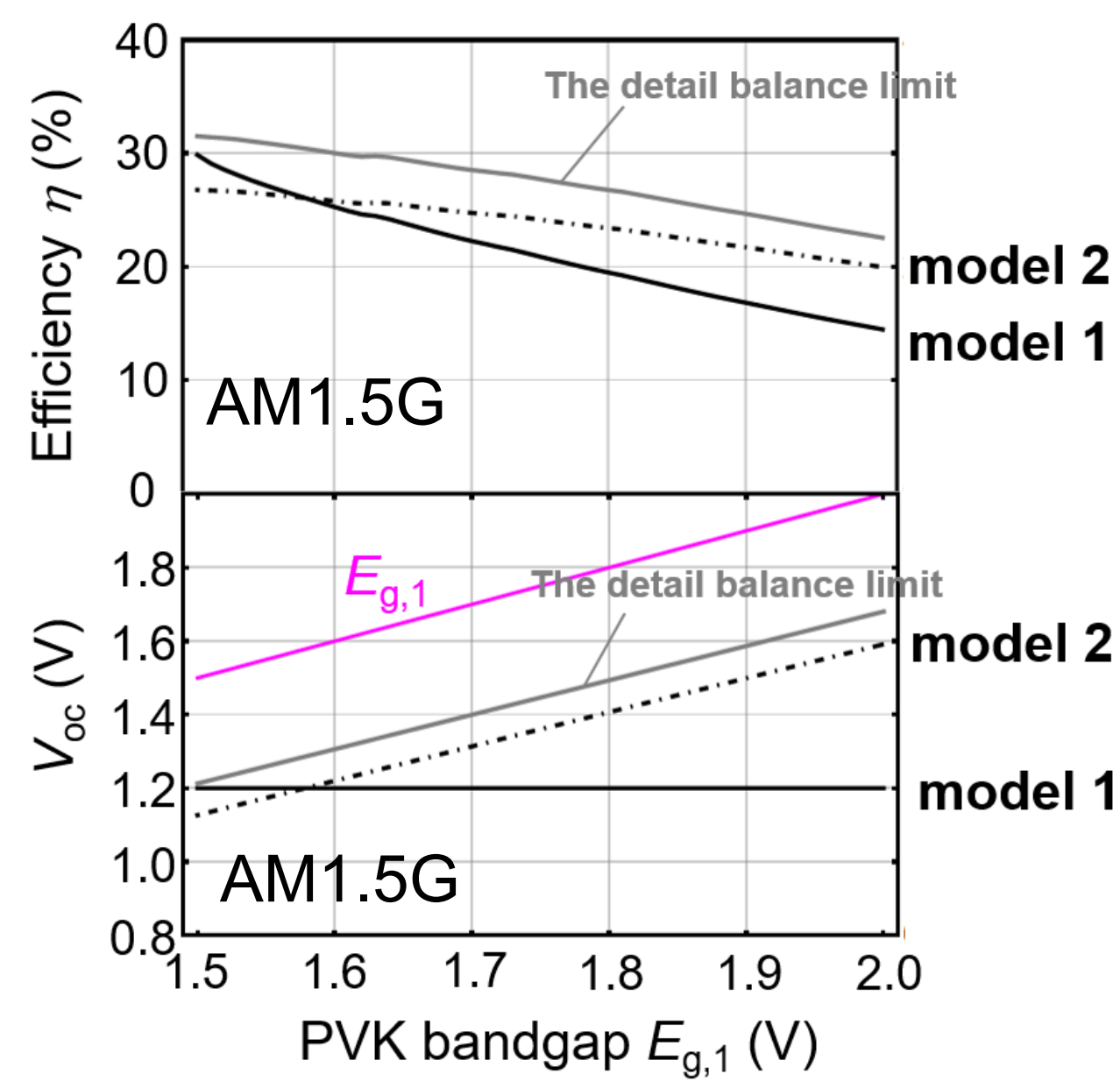
- 曇天時(拡散成分100%)は、最適バンドギャップは高エネルギー側にシフトする。
- 年間発電量を最大化する最適設計値に関して、場所による差は比較的小さい。

変換効率および年間平均効率への効果

単体セルのモデル

結晶シリコン:
 $\eta=25\%$ ($\tau_{eff}(Si)=0.9$ ms)
@AM1.5G 1sun

ペロブスカイト:
(model 1) バンドギャップに依らず
 $V_{oc}=1.2$ V \rightarrow 現在のR&D
(model 2) $\tau_{eff}(PVK)=1$ μ s、 V_{oc} 損失がバンドギャップに依らず一定 \rightarrow 理想

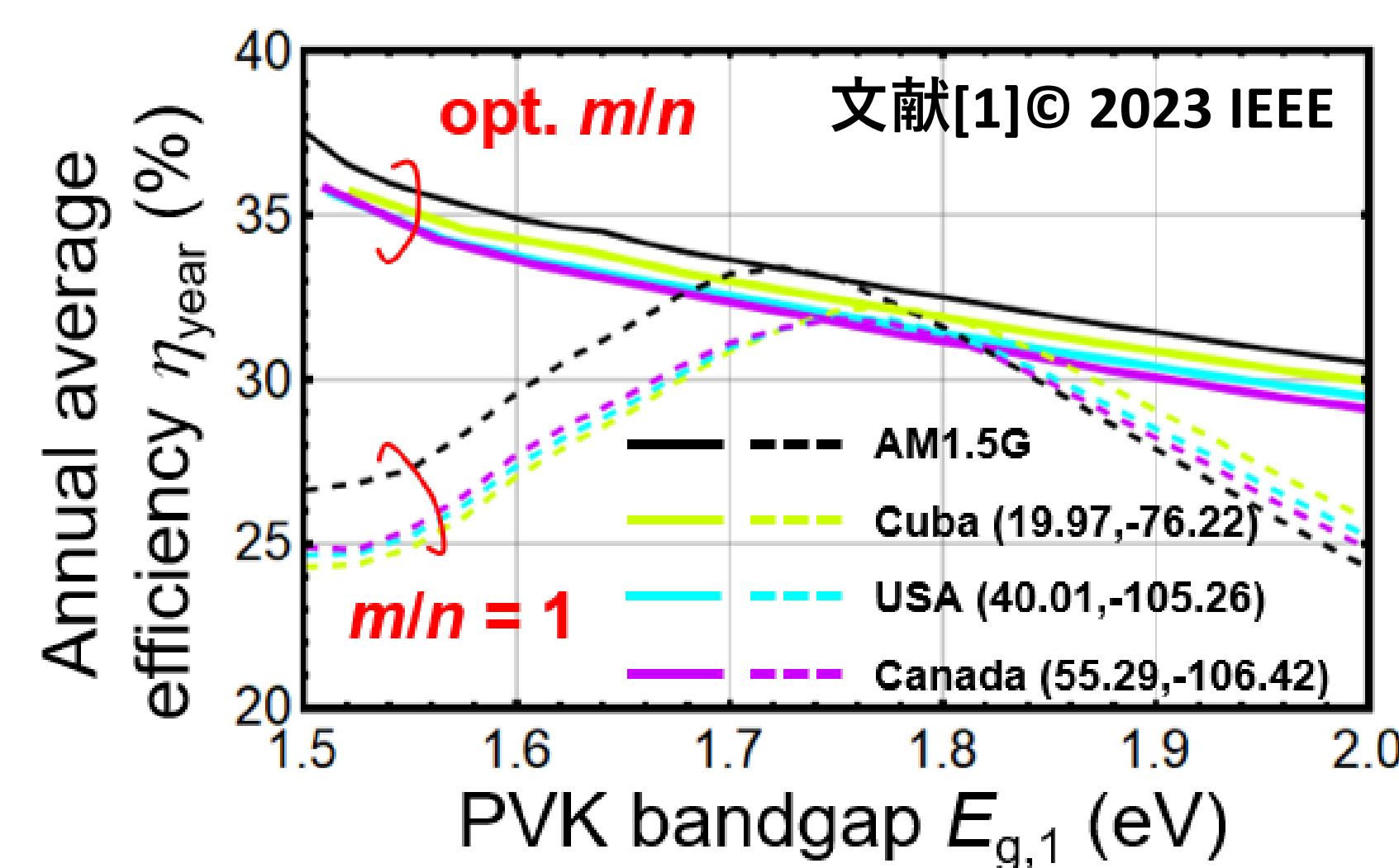


実スペクトルデータを用いた年間平均効率の計算

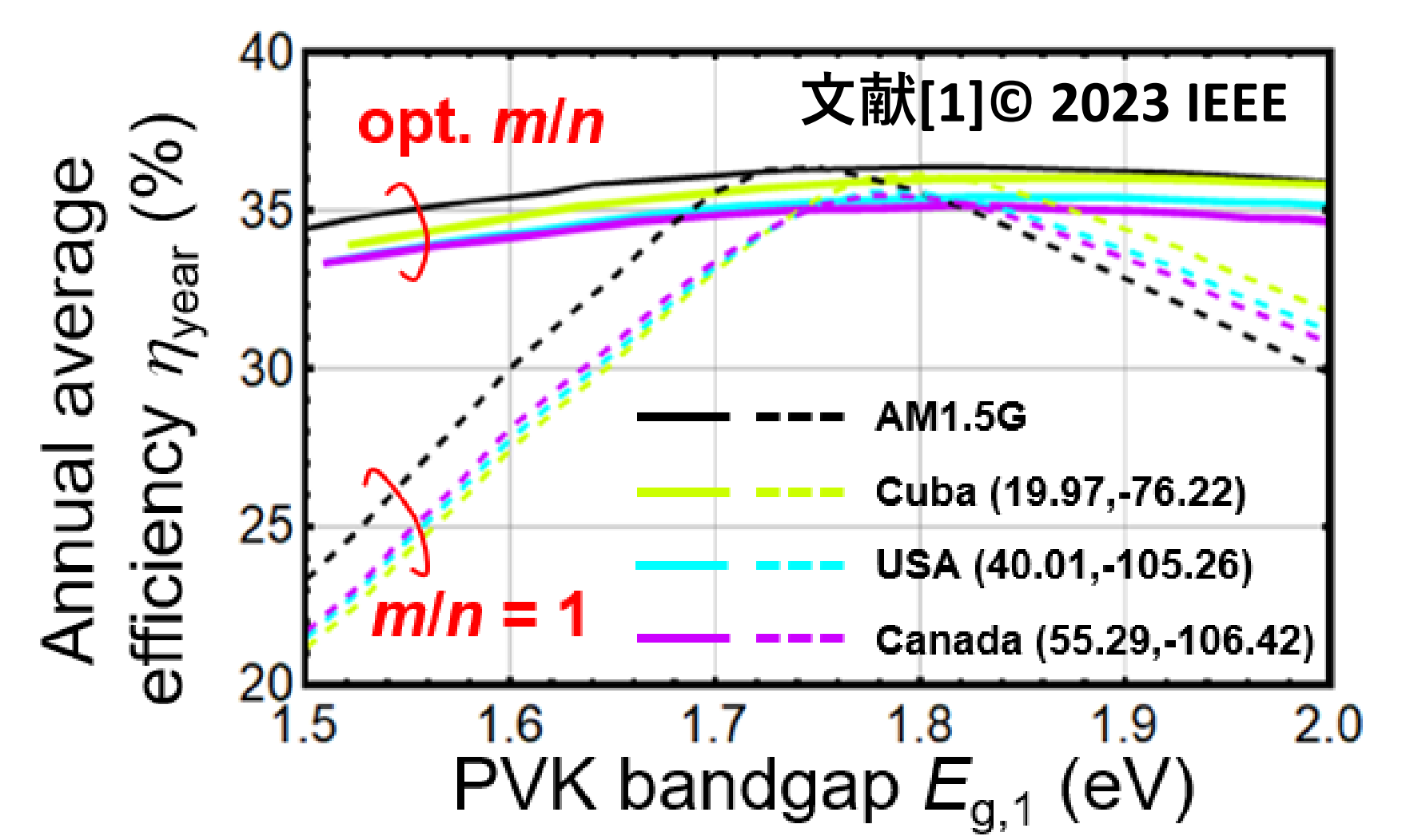
$$\eta_{year} = \frac{\sum_j P_{out,j}}{\sum_j P_{sun,j}} = \frac{\sum_j P_{sun,j} \eta_j}{\sum_j P_{sun,j}} = \sum_j \omega_j \eta_j$$

Solar spectra data from NREL, NSRDB Data Viewer, 2022. <https://maps.nrel.gov/nsrdbviewer>

model 1

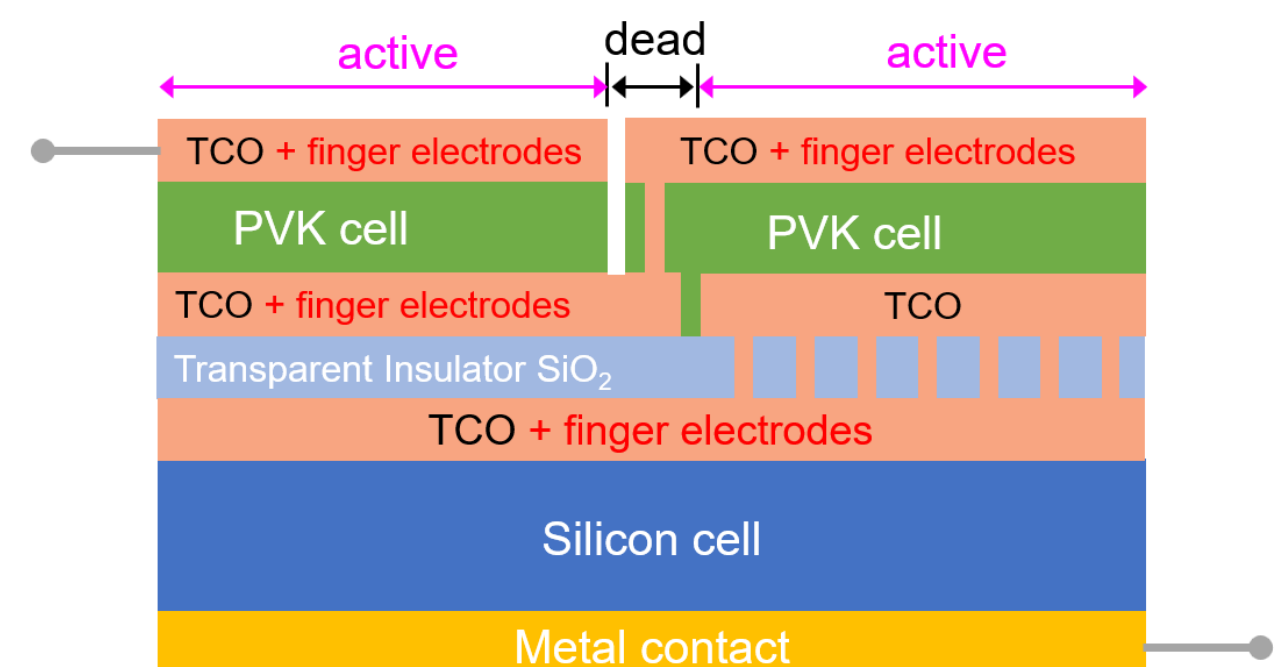


model 2

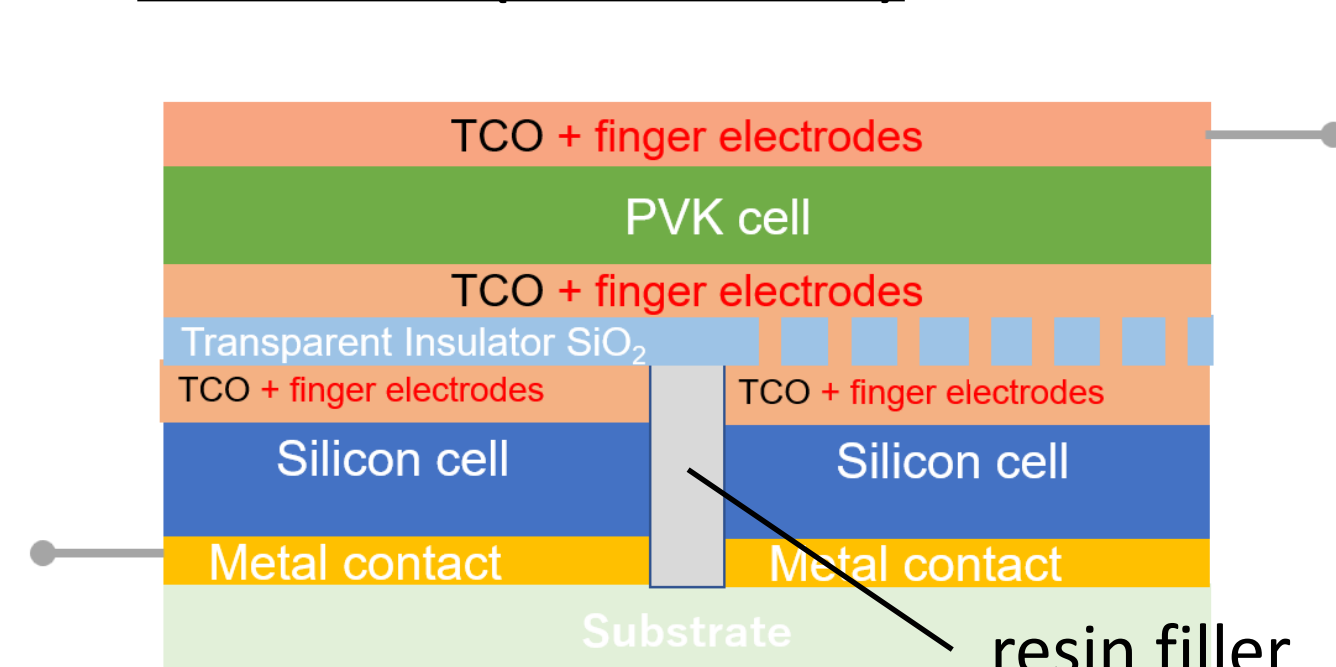


モノリシック構造の例

$m/n = 1/2$ ($n=1, m=2$)



$m/n = 2$ ($n=2, m=1$)



技術的課題: 中間導電層の最適化、および、トップPVK層の均一な成膜プロセスの開発が必要。

参考文献

- K. Kamide and H. Takato, "A Current Matching Design and Its Impact of High-Efficiency Two-Terminal Perovskite/Silicon Tandem Photovoltaics," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 13, no. 5, pp. 699-704, Sept. 2023, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3284588.
- K. Kamide and H. Takato, "A Current-Matching Approach and its Effectiveness for the Development of Highly Efficient Perovskite/Silicon Tandems," presented in EUPVSEC 2023 (Lisbon)

謝辞

この成果は、NEDOプロジェクトの委託業務(JPN20015)の結果得られたものです。

Si nanopyramid textures enabling solution-processed perovskite for tandem solar cell application

Motivation

Double-sided textured tandem solar cells

- ✓ EPFL: 31.25%^[1]
- ✓ Longi: 33.9%^[2]
- Micron-sized Si pyramids + evaporated perovskite
- ✓ HZB: 29.8%^[3]
- Si nanopyramids by nanoimprint lithography + spin-coated perovskite

Merits

- Reduced light reflection at the perovskite/Si interface.

Problems

- Technically complex/expensive methods for the conformal growth of perovskite on micrometer-sized Si pyramid texture.
- Complex fabrication process of nano-sized Si pyramid texture by lithography.

Aim of this work
Development of Si nanopyramids compatible with solution processed perovskite

Our technology
One step wet etching process to fabricate Si nanopyramids

We investigated the effect of varying Si texture size in nanoscale on the performance of perovskite/Si tandem cells.

Experiments

Ag-assisted one-step alkaline etching [4]

	A	B	C	D	E (Conventional)
TK81 concentration	TK81 50%	TK81 30%	TK81 10%	TK81 10%	TK81 10%
AgNO ₃ concentration	1.2mM	1.2mM	1.2mM	1.0mM	0mM
Temperature	70°C	70°C	70°C	70°C	80°C
Time	15min	5min	15min	15min	15min

TK81: moderate etching speed / H₂ bubbles detachment
AgNO₃: etching mask / H₂ bubbles detachment

Results (I)

Fabrication of Si nanopyramid texture [5]

A	B	C	D	E
TK81 50% AgNO ₃ 1.2mM	TK81 30% AgNO ₃ 1.2mM	TK81 10% AgNO ₃ 1.2mM	TK81 10% AgNO ₃ 1mM	Conventional

- The size of the Si pyramid texture gradually decreases as the concentration of surfactant TK81 and AgNO₃ increases.
- The size distribution also narrows with the reduction of texture size.

Performance of silicon heterojunction (SHJ) single-junction solar cells [5]

- Reflectivity increases with decreasing Si pyramid size.
- Nevertheless, nanometer-sized Si pyramids show effective anti-reflective properties in device structure (w. ITO), resulting in comparable cell performance with the reference cell.^[4,5]

Results (II)

Tandem cell performance [5]

- Low V_{OC} caused by electrical shunting due to the non-uniform perovskite layers on large Si texture.
- A substantial increase in V_{OC} from 0.89 to 1.75 V with decreasing the texture size from ~1000 to ~500 nm.
- B(530nm) shows both high V_{OC} and J_{SC} (0.8 mA cm⁻² higher compared to the reference cells).
- Degraded passivation quality of a-Si:H layers when deposited on small-sized Si texture (A(420nm)), strongly depending on the PECVD conditioning.

External quantum efficiency (EQE)

- The light in-coupling effect of the Si nanopyramid texture leads to a gain in the J_{bottom} by ~1 mA cm⁻².
- J_{SC} is further improved after applying the AR(MgF₂) layer, leading to a 22.1% efficient tandem solar cell (J_{SC}=18.8 mA cm⁻², V_{OC}=1.693 V, FF=0.692, area=1.0 cm²).
- J_{SC} is still limited by the large reflection loss caused by refractive index mismatching at the interface between the ITO (n~2.0) and the thick spiro-MeOTAD (n~1.6) layers.

Conclusions

- Double-sided Si nanopyramid textures with an average size of 400-900 nm and improved size distribution were fabricated using an original Ag-assisted alkaline etching method and applied in the bottom cell of perovskite/Si tandem cells.
- Excessive size of pyramid causes the severe shunting and thickness inhomogeneity in the perovskite absorber layer, resulting in the degradation in the performance of tandem cells.
- The optimum Si texture size is found to be 400-500 nm with perovskite layer thickness around 500 nm, by which the perovskite top cell can be processed entirely by the conventional spin-coating method.
- **The both-sided nanopyramid Si texture shows great potential for the cost-effective tandem cell manufacturing using the solution-based top cell process with enhanced J_{bottom} and efficiency compared with the commonly used single-sided textured Si.**

References

- [1] X. Y. Chin, D. Turkey, J. A. Steele, S. Tabean, S. Eswara, M. Mensi, P. Fiala, C. M. Wolff, A. Paracchino, K. Artuk, D. Jacobs, Q. Guesnay, F. Sahli, G. Andreata, M. Boccard, Q. Jeangros, C. Ballif *Science* **381**, 59 (2023).
- [2] <https://www.longi.com/en/news/new-world-record-for-the-efficiency-of-crystalline-silicon-perovskite-tandem-solar-cells/>
- [3] P. Tockhorn, J. Sutter, A. Cruz, P. Wagner, K. Jäger, D. Yoo, F. Lang, M. Griseck, B. Li, J. Li, O. Shargaleva, E. Unger, A. Al-Ashouri, E. Köhnen, M. Stolterfoht, D. Neher, R. Schlattmann, B. Rech, B. Stannowski, S. Albrecht, C. Becker *Nat. Nanotechnol.* **17**, 1214 (2022).
- [4] Y. Li, H. Sai, T. Matsui, Z. Xu, V. H. Nguyen, Y. Kurokawa, N. Usami *Sol. RRL* **6**, 2200707 (2022).
- [5] Y. Li, H. Sai, C. McDonald, Z. Xu, Y. Kurokawa, N. Usami, T. Matsui *Adv. Mater. Interfaces* **10**, 2300504 (2023).

Acknowledgements

The authors thank T. Oku, Y. Sato, M. Tanabe, and Y. Muto for their technical assistance, and M. Kimura and S. Ohnishi of Hayashi Pure Chemicals for fruitful discussion. This work was partly supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Japan, project code JPNP20005.

PECVD法を用いた高品質・フルサイズTOPCon構造の開発

研究の背景および目的

- TOPCon構造太陽電池は高いパッシベーション性能及び変換効率を示すことが知られている。
- PECVD法によるTOPCon構造の作製は製膜速度が速いことから高い生産性が期待され、今後の導入量の増加が予想される[1]。
- 課題の一つはブリストリングの抑制である[2]。

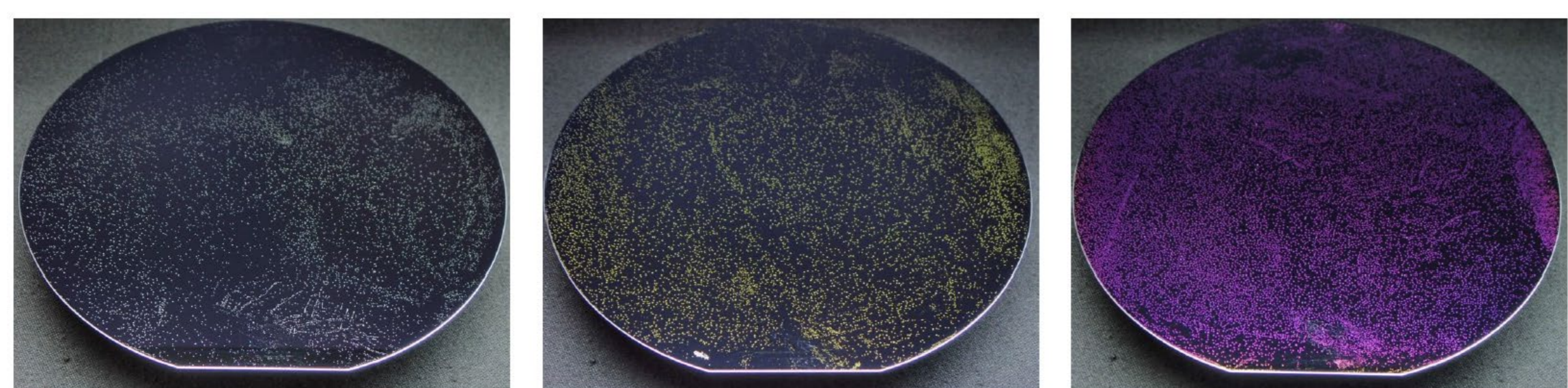
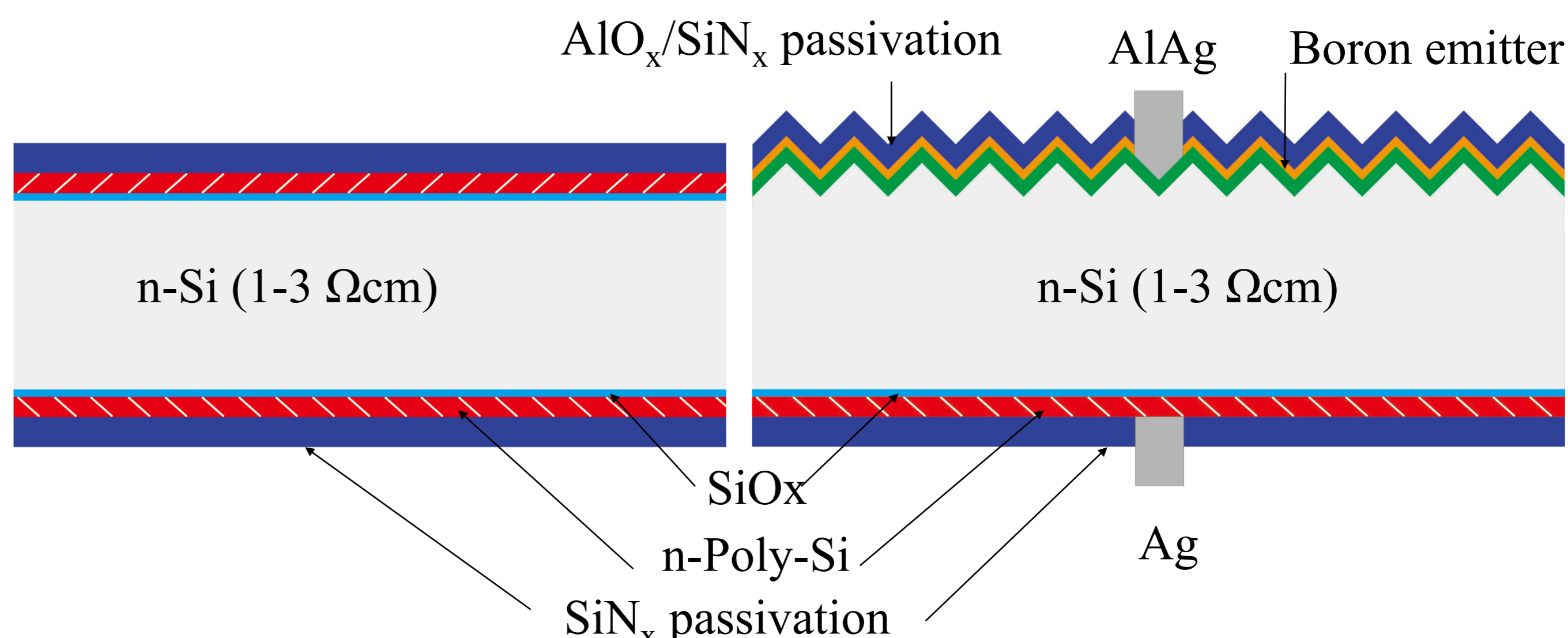


Fig. for example of blistering after TOPCon structure fabrication on mirror wafers (Poly-Si thickness is (a) 30 nm, (b), 45 nm, and (c) 60 nm).

- 本研究ではフルサイズのウェハを用いた高品質パッシベーション膜をPECVD法を用いて作製することを目的とした。
- 製膜条件および結晶化熱処理条件を制御することでブリストアの発生を完全に抑制することを試みた。

実験

- パッシベーション特性評価のため、N型156.75mm角ウェハに極薄酸化膜形成後、PECVD法によるn-a-Si:Hを両面に製膜した。その後、結晶化のための熱処理を750度から950度の間で施した。試料構造は両面对称構造とした(下記図左)。
- セル特性評価のため、受光面側にはエミッタ層を形成し、裏面側にSiO_x/n-Poly-Siを形成した(下記図右)。



結果と考察

● パッシベーション特性評価結果

- a-Siの製膜条件と結晶化温度制御によってブリストアを完全に抑制し、高い*iVoc*を示すことを確認した。
- シリコン基板とポリシリコン層の界面に形成した極薄酸化膜は硝酸酸化法および熱酸化法で作製した。
- 硝酸酸化法で酸化膜を作製した試料では、結晶化温度750度の際、*iVoc*=716 mVを示した。結晶化温度を上げると*iVoc*の値は上昇し、850度で最大となり*iVoc*=737 mVを示した。その後、*iVoc*の値は低下し、950度の際には*iVoc*=624 mVとなった。この*iVoc*の値の低下は酸化膜の破壊によって引き起こされたと考えられる[3]。
- 熱酸化法で酸化膜を作製した試料では、結晶化温度850度及び900度で同等の*iVoc*の値を示した。

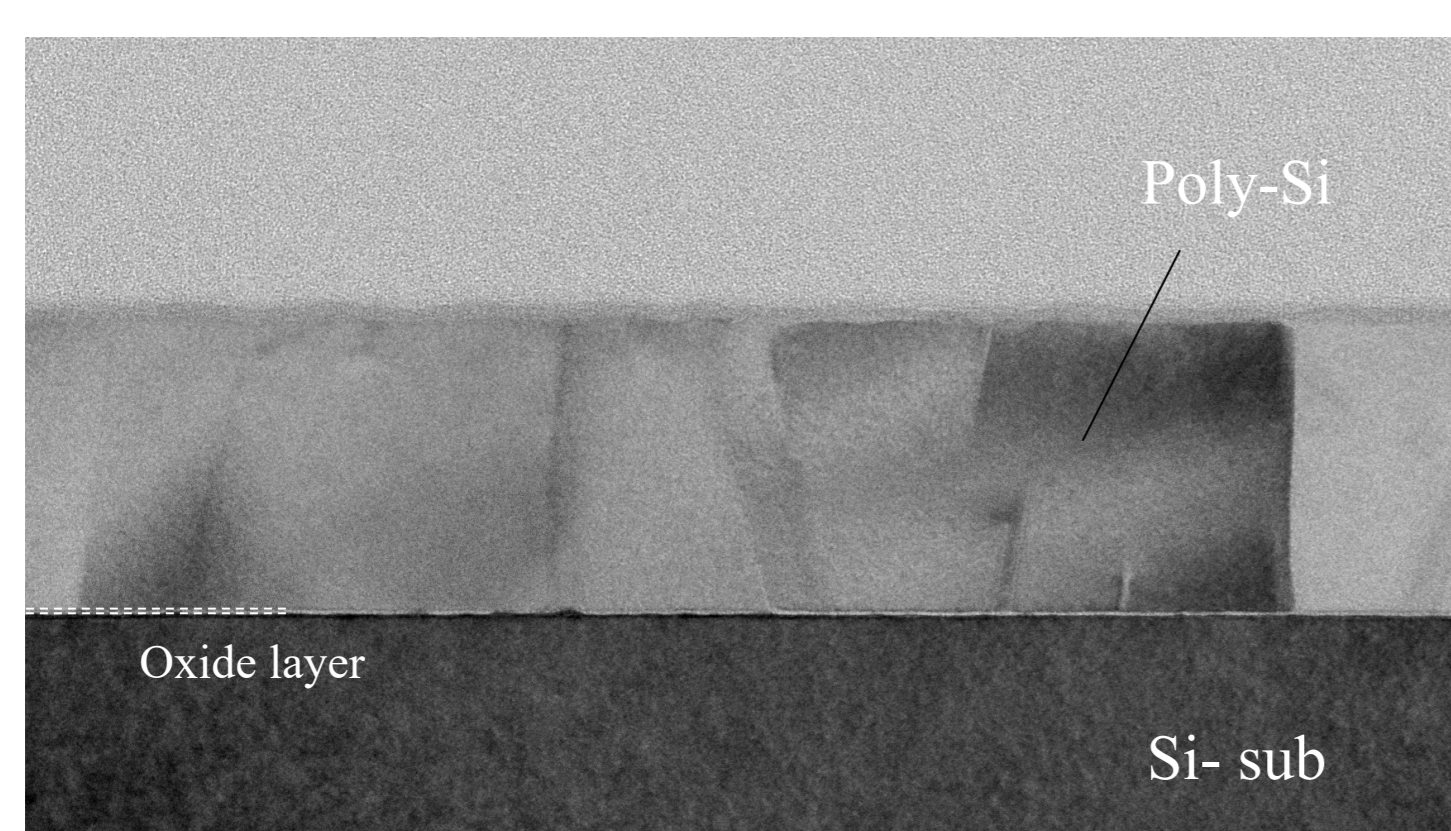
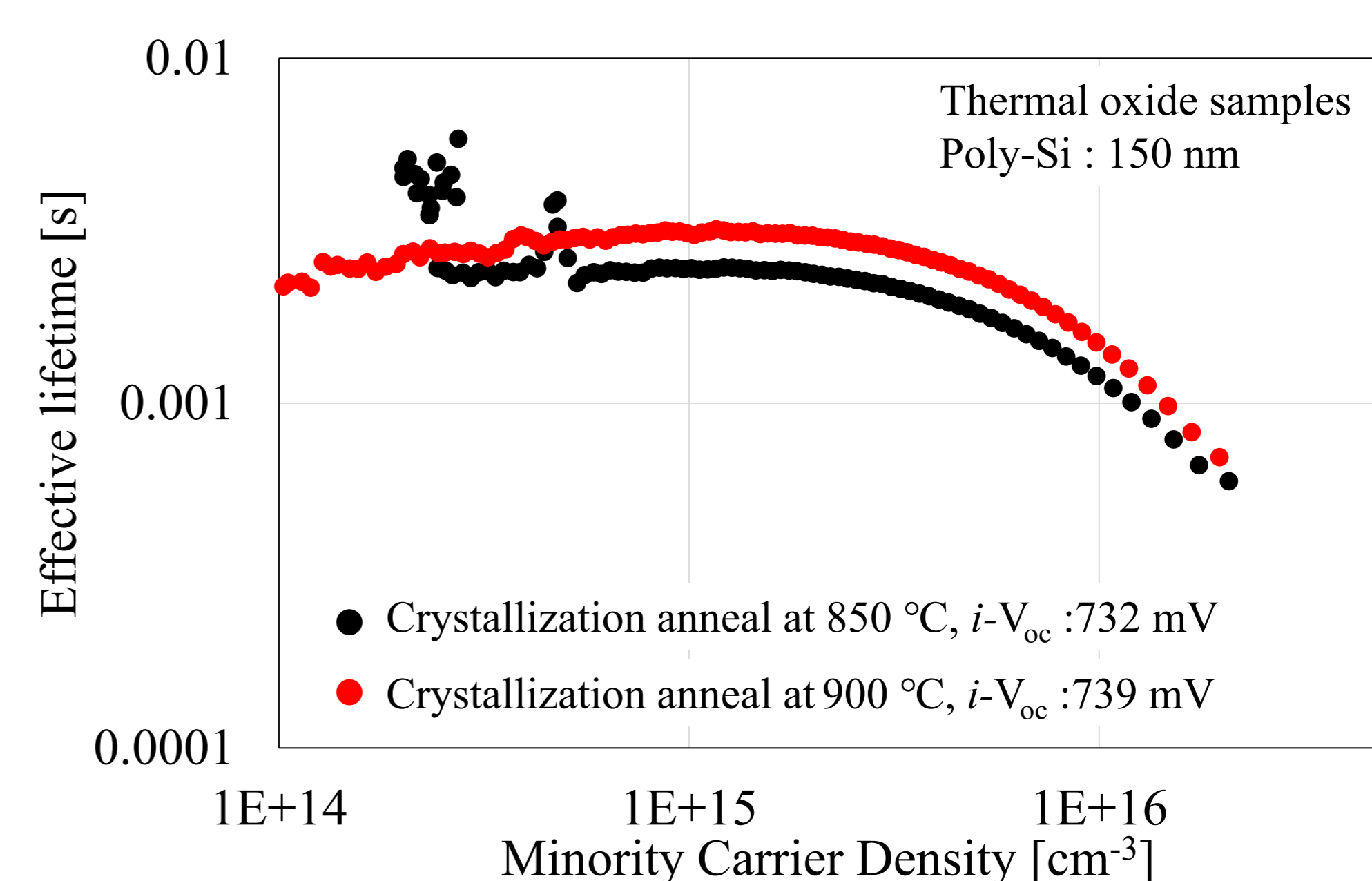
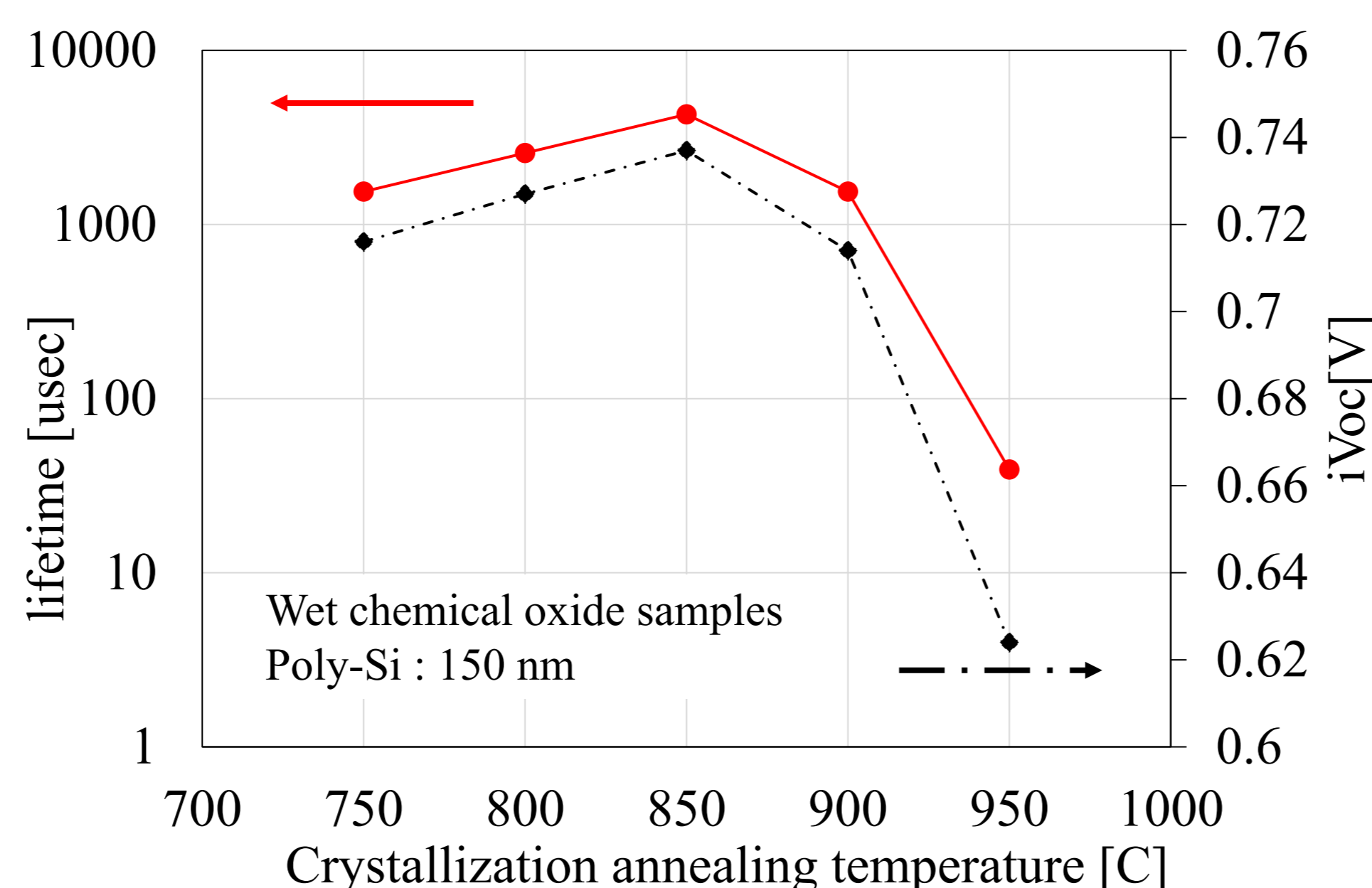
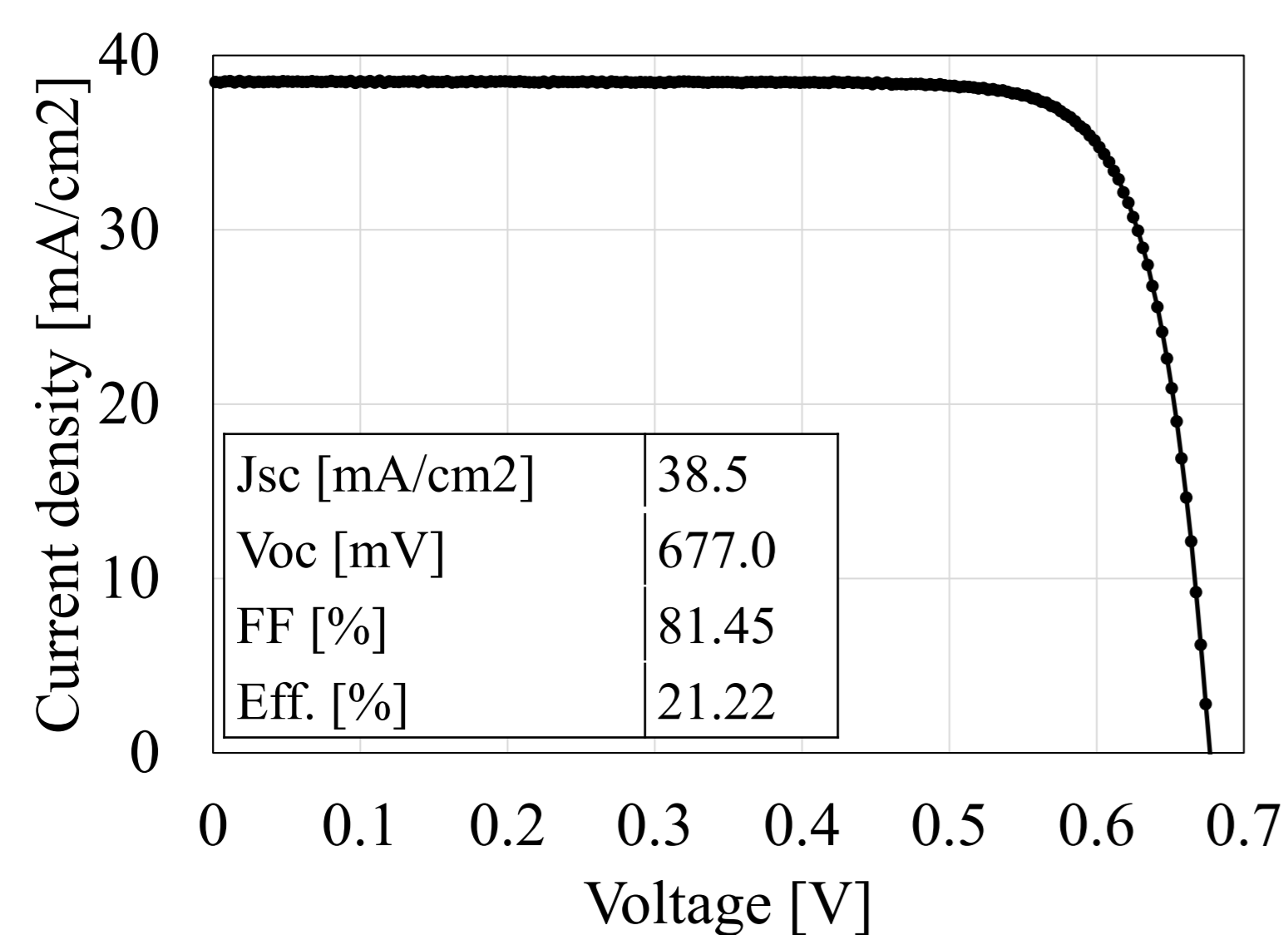


Fig. Cross sectional view of Si-sub/SiO_x/n-Poly-Si by TEM analysis. Thickness of n-Poly-Si is 50 nm.



● セル特性評価結果

- 電極形成前は*iVoc*=700 mVを示した。エミッタ側の再結合特性が十分に抑制されていないと考えられる。エミッタ層の不純物分布とパッシベーション膜の最適化が必要である。
- 電極形成後は*Voc*=677 mV、*FF*=81.5%を示した。電極形成時の焼成工程での特性劣化の抑制および電極部のキャリア再結合の抑制が更なる高効率化には重要である。



I-V properties of fabricated TOPCon cell.

まとめ

- フルサイズシリコン基板向けのn型TOPCon構造をPECVD法によるa-Siの製膜と結晶化温度の制御によりブリストアを完全に抑制して作製し、高いパッシベーション性能を示すことに成功した。
- 結晶化温度850度の際に得られた*iVoc*の値は737 mVであった。
- セル化の結果、*Voc*は677 mVを示し、また、*FF*は81.5%を示した。更なる高効率化のためにはエミッタ層形成の最適化および電極形成工程の改善が重要となる。

参考文献

[1] ITRPV 14 edition (2023), [2] S. Choi, *et al.*, Scientific reports 10 (2020) 9672., [3] A. Moldovan, *et al.* Sol. Energy Mater. Sol. Cells 142 (2015) 123.

TCOフリーシリコンヘテロ接合太陽電池の検討

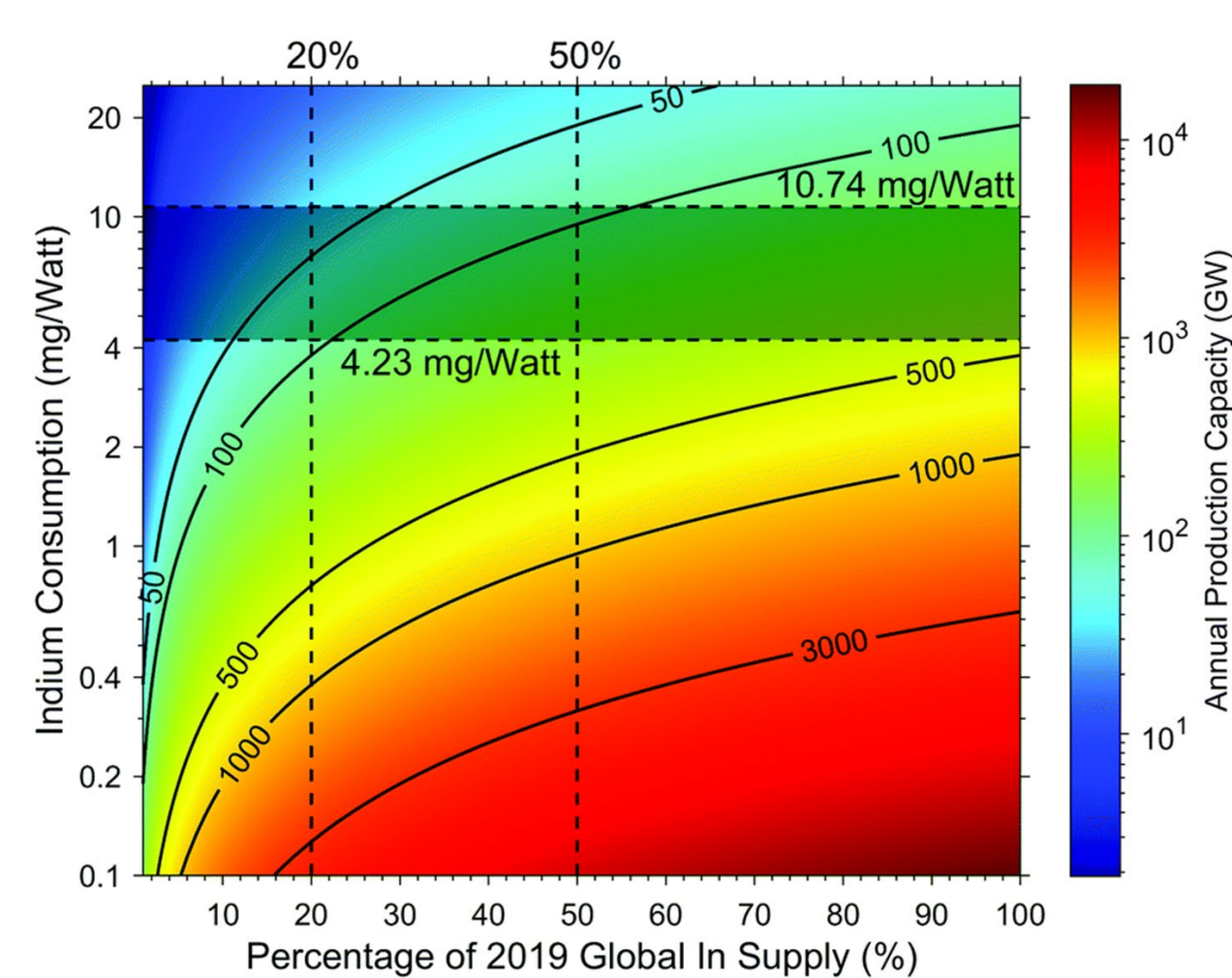
研究の目的

■ シリコンヘテロ接合太陽電池 (Silicon heterojunction; SHJ)

- 高効率: 26.8%(表裏電極型)^[1]
26.7%(裏面電極型)^[2]
- 高温環境下で高出力^[3]
- 両面受光が容易

■ 課題

- 装置コスト (CVD)
- 非シリコン材料のコスト^[4]:
Ag, In, Biなど
InはTCOの主要材料として使用



省インジウム、脱インジウムへの取り組み

■ 薄型In系TCO

- In-TCO + 誘電体薄膜, $\eta = 22.8\%$ [5]

■ In-free TCO

- ZnO:Al, $\eta = 23\%$ [6,7]

■ TCO-free

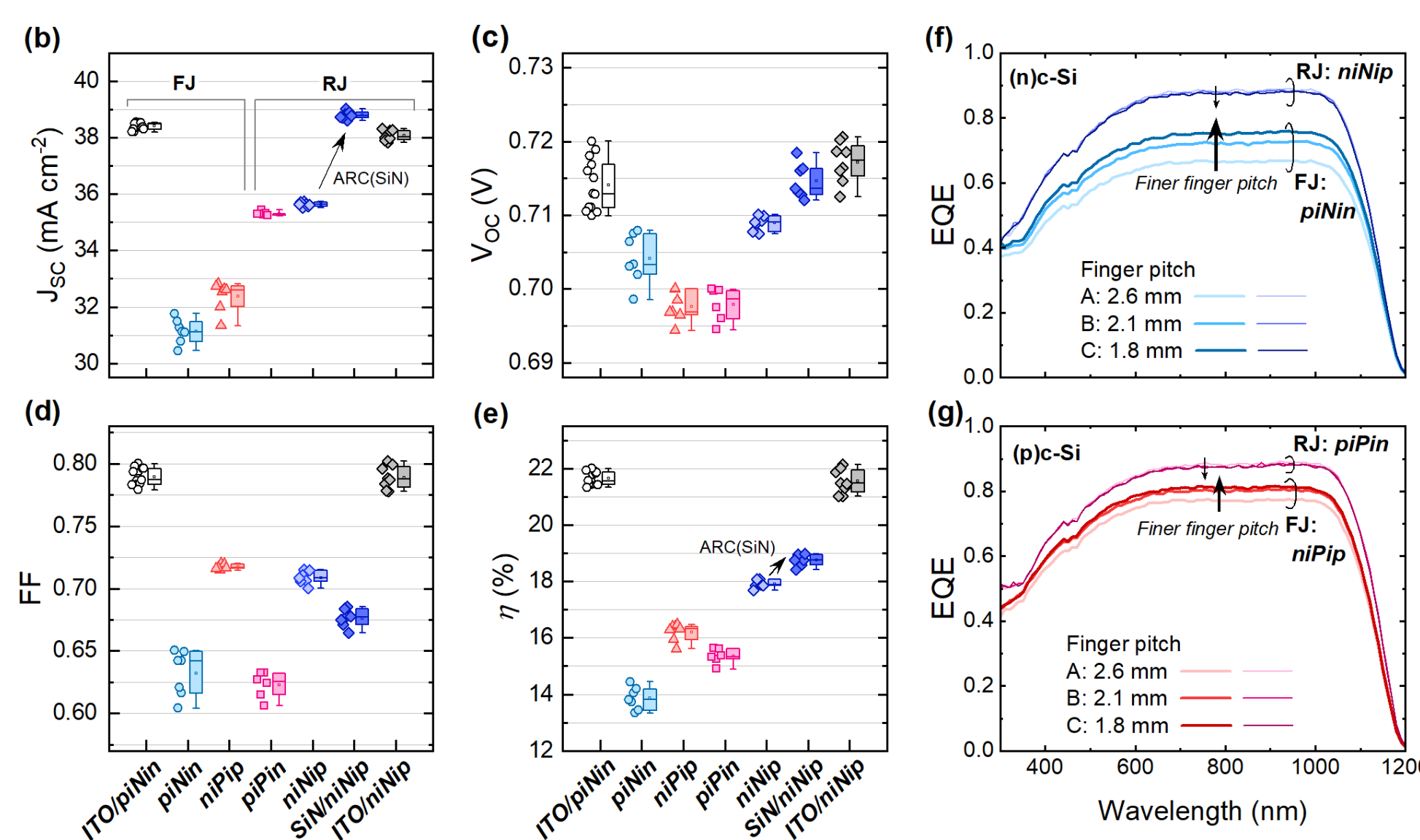
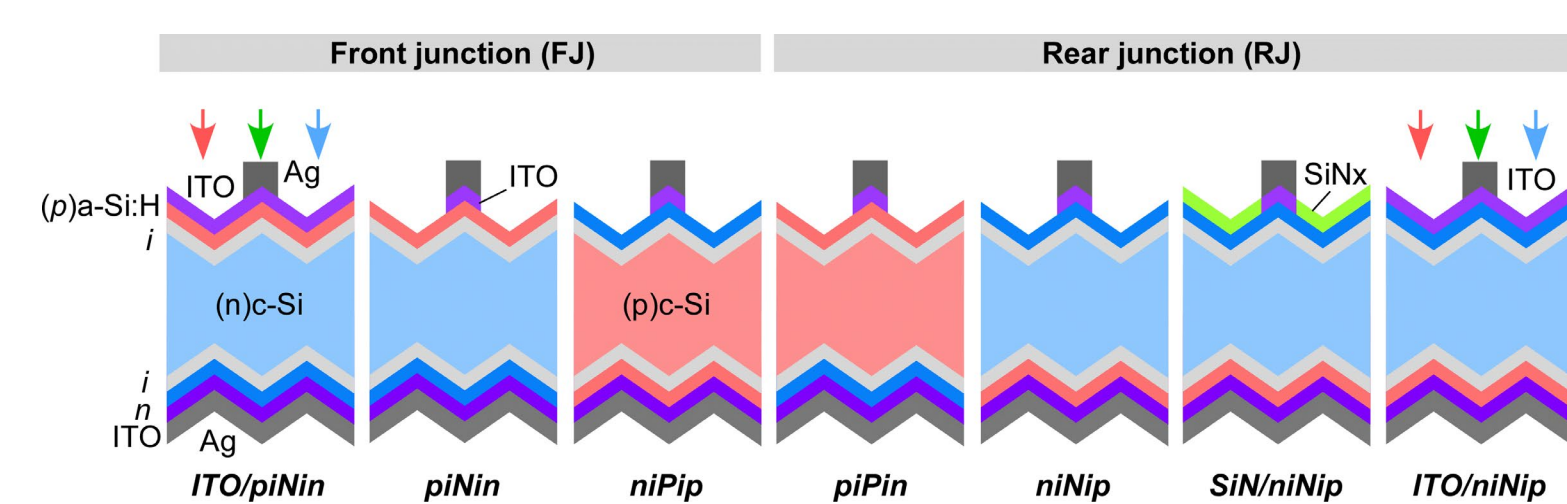
- TCOは使わず、Siウェーハ内でキャリア輸送 (高注入下) [8]

**本研究の目的：
TCOフリーSHJ太陽電池の可能性探索**

実験と結果 1 - 表側TCOフリーSHJセル

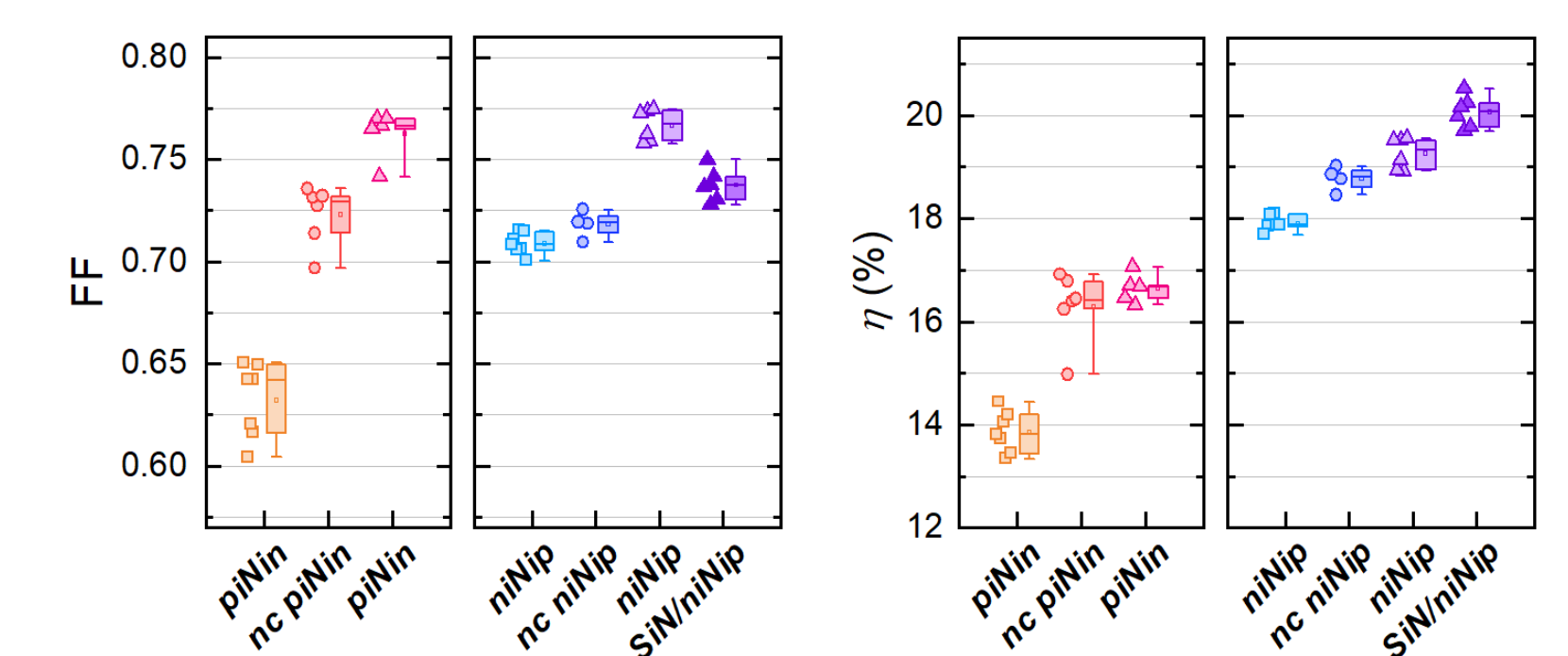
■ セル構造の影響 (片面受光SHJ)

- ラボサイズの小面積SHJセル [9,10]
- N型裏面接合型 (RJ) が高い効率
- 表面接合型 (FJ) はキャリア収集に課題 (J_{SC} およびEQEの低下)
- (p)a-Si:HコンタクトがFFを制約



■ キャリアコンタクト構造の影響

- 表面TCOフリーSHJセルのFFは、キャリアコンタクト構造の変更で大きく改善する (a-Si:H → nc-Si:H) [11]
- Ag/a-Si:H直接コンタクトで最大のFF

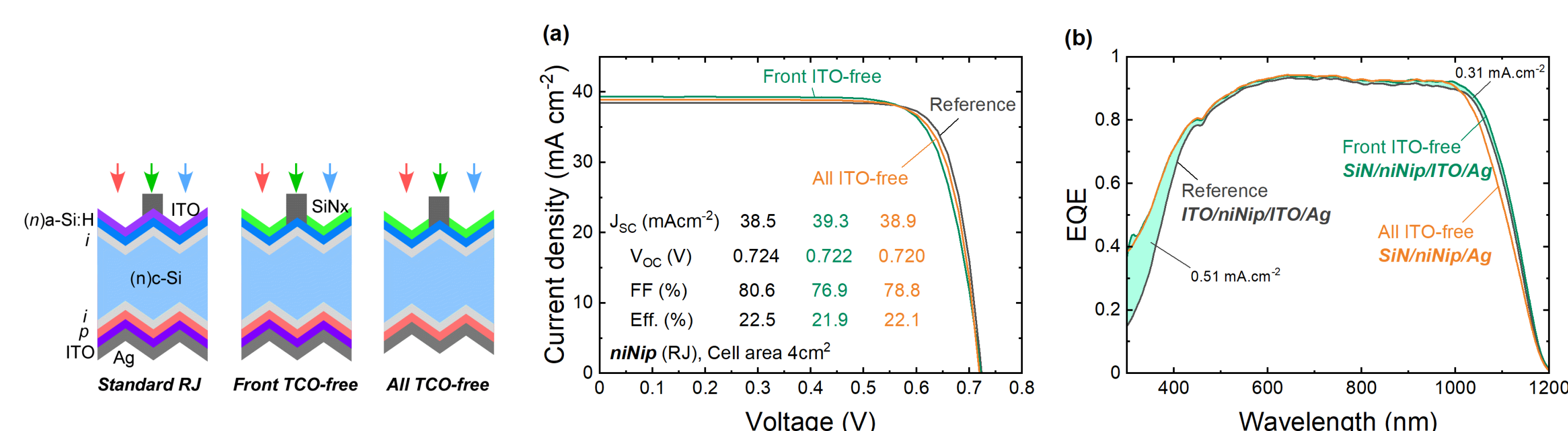


実験と結果 2 - 完全TCOフリーSHJセル

■ 完全TCOフリーセル

- niNip構造にて $\eta = 22.1\%$ (SiNx-AR, 4 cm²)
- ITO有りのniNip構造セルと同等の性能
- EQE 短波長側 ↑ ITOの吸収損失が削減
長波長側 ↓ 裏面側のTEX-Si/Agにおける吸収^[9]

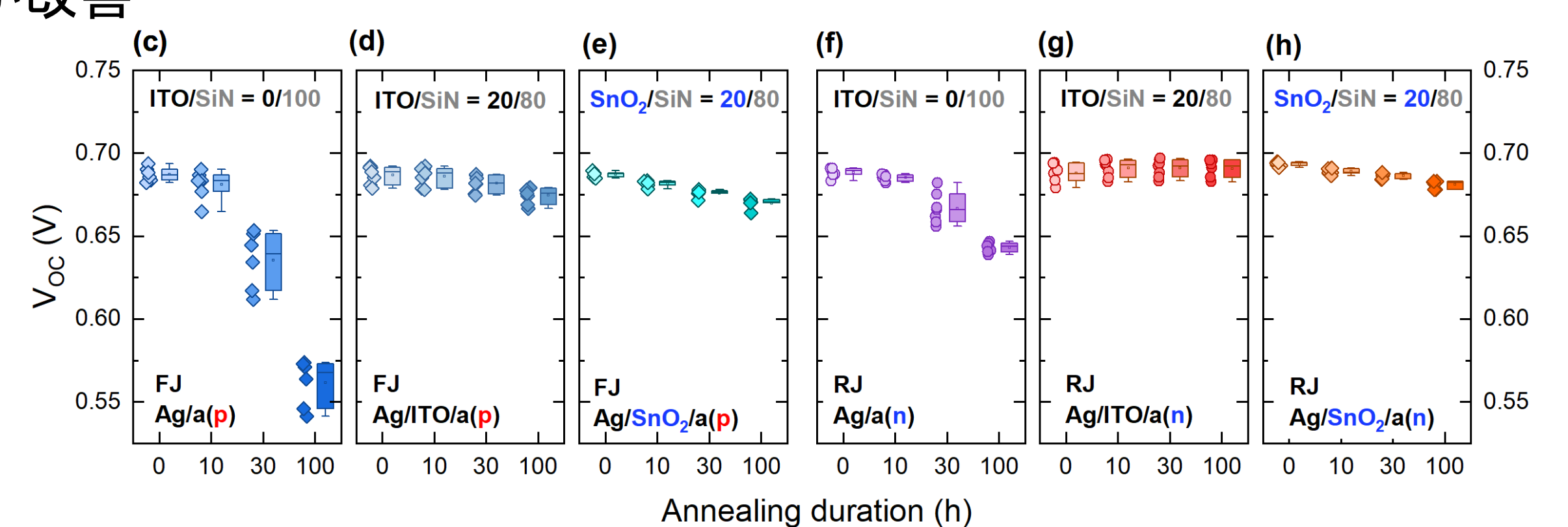
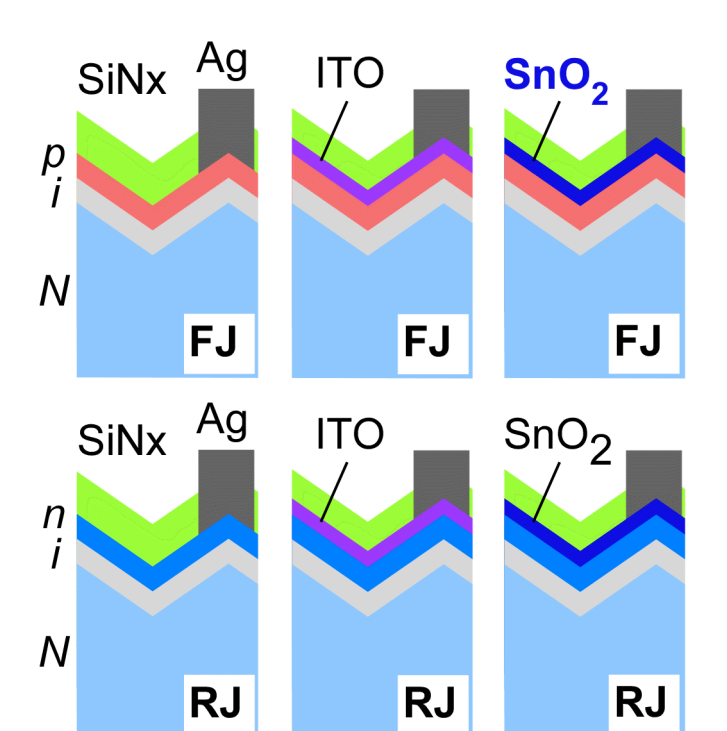
■ TCO無しでも高効率(初期特性)なSHJセルは実現可能



実験と結果 3 - 熱アニールに対する安定性

■ 熱アニールによる安定性評価 (160°C 100h)

- Ag/a-Si:H直接コンタクトを持つセルでは、 V_{OC} が顕著に減少
- FJ構造ではより大きな性能低下
→ p-コンタクトの方が不安定
- 薄いバリア層 (ITO, ALD-SnO₂)の挿入で安定性が改善



まとめ

- 完全TCOフリーSHJセルで高い初期効率(>22%)を実証
- TCOが無くても高効率なSHJセルは実現可能
- しかし、TCOは効率面でなくセルの安定性にも重要な役割を持つ
- TCOフリーSHJセルの応用には、長期安定性を担保する技術の開発が重要

参考文献

- [1] LONGi Solar, press release (2022). [2] Yoshikawa et al., SOLMAT **173** (2017) 37.
[3] Sai et al., PIP **29** (2021) 1093 and others. [4] Zhang et al., Energy Environ. Sci **14** (2021) 5587.
[5] Han et al., PIP **30** (2022) 750. [6] Morales-Viches et al., IEEE JPV **9** (2018) 34.
[7] Meza et al., Appl. Sci **9** (2019) 862. [8] Li et al., Joule **5** (2021) 1535.
[9] Sai et al., JAP **124** (2018) 103102 DOI10.1063/1.5045155 [10] Umishio et al., PIP **29**(2020) 344 DOI10.1002/pip.3368 [11] Haschke et al., JAP **127** (2020) 114501. doi.org/10.1063/1.5139416.

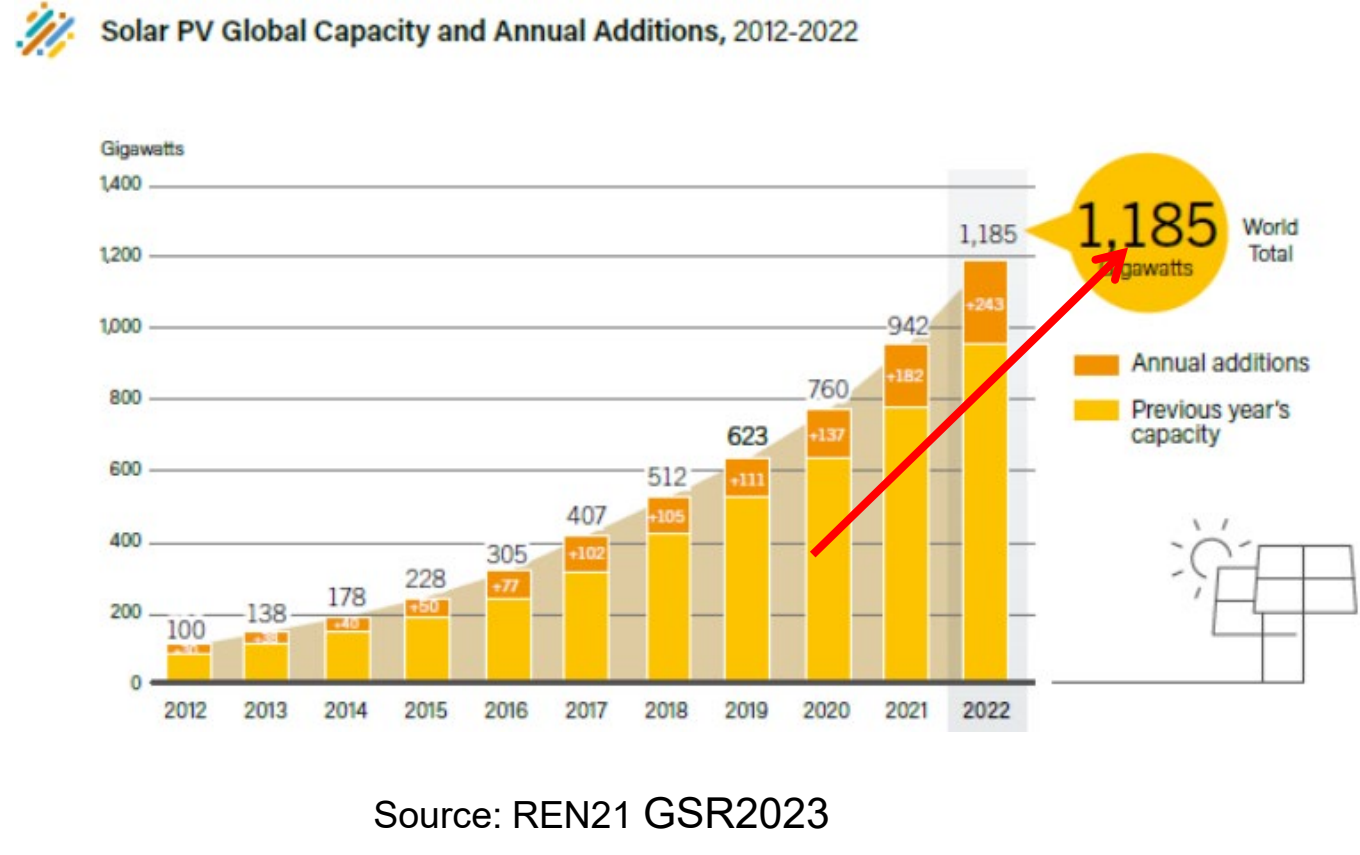
謝辞

以下の方々に感謝申し上げます。
産総研再生エネセンター: 奥登志喜、佐藤芳樹、田辺まゆみ、武藤由樹子
産総研NPF: 山崎将嗣
本研究の一部は 文科省“ナノテクプラットフォーム”の支援を受けて実施された。

希少金属In不使用の非晶質SnO₂透明導電膜の開発と太陽電池への展開

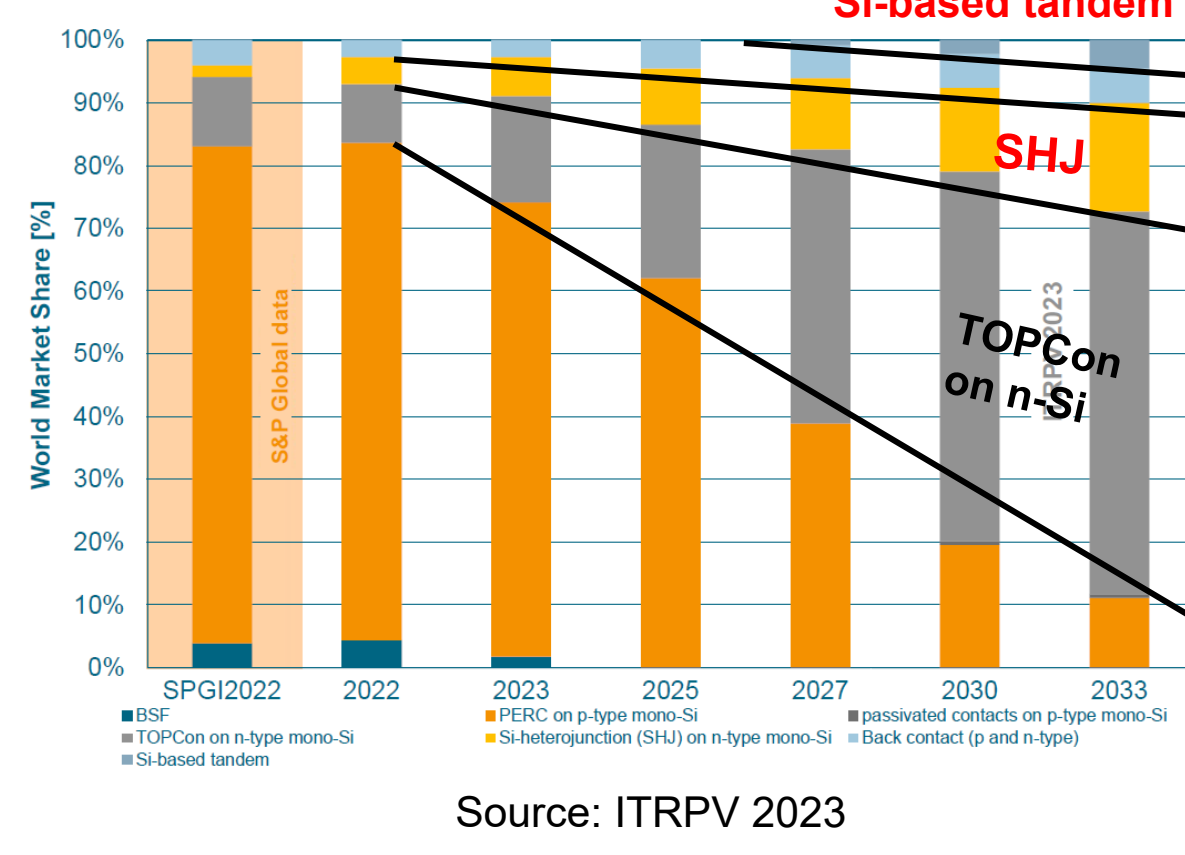
PVのトレンド・技術

PVの設備容量



年産240GW (2022年)
近い将来、年産1TWへ

Si-PVの種類 (実績と予測)

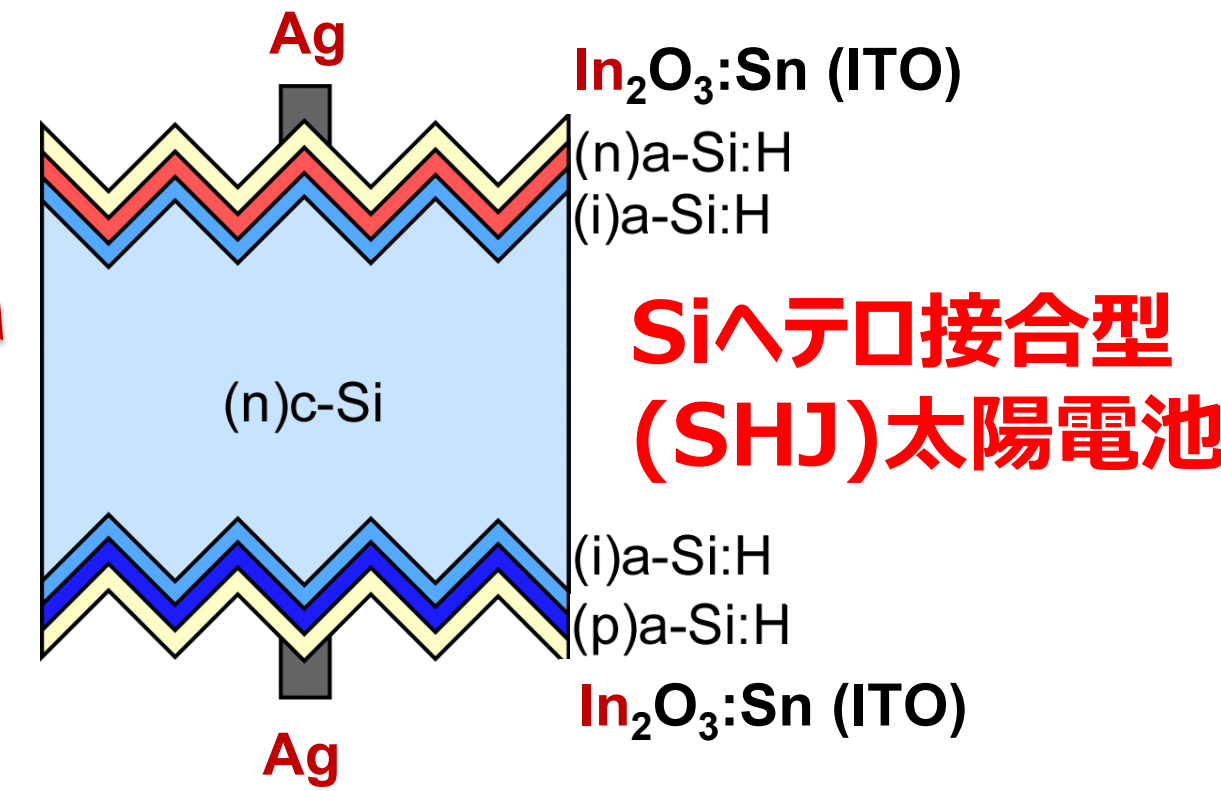


Si-PVでは従来のPERC (p型ウェハ使用) から高効率・高安定なTOPConやSHJ (n型ウェハ使用) へ段階的移行

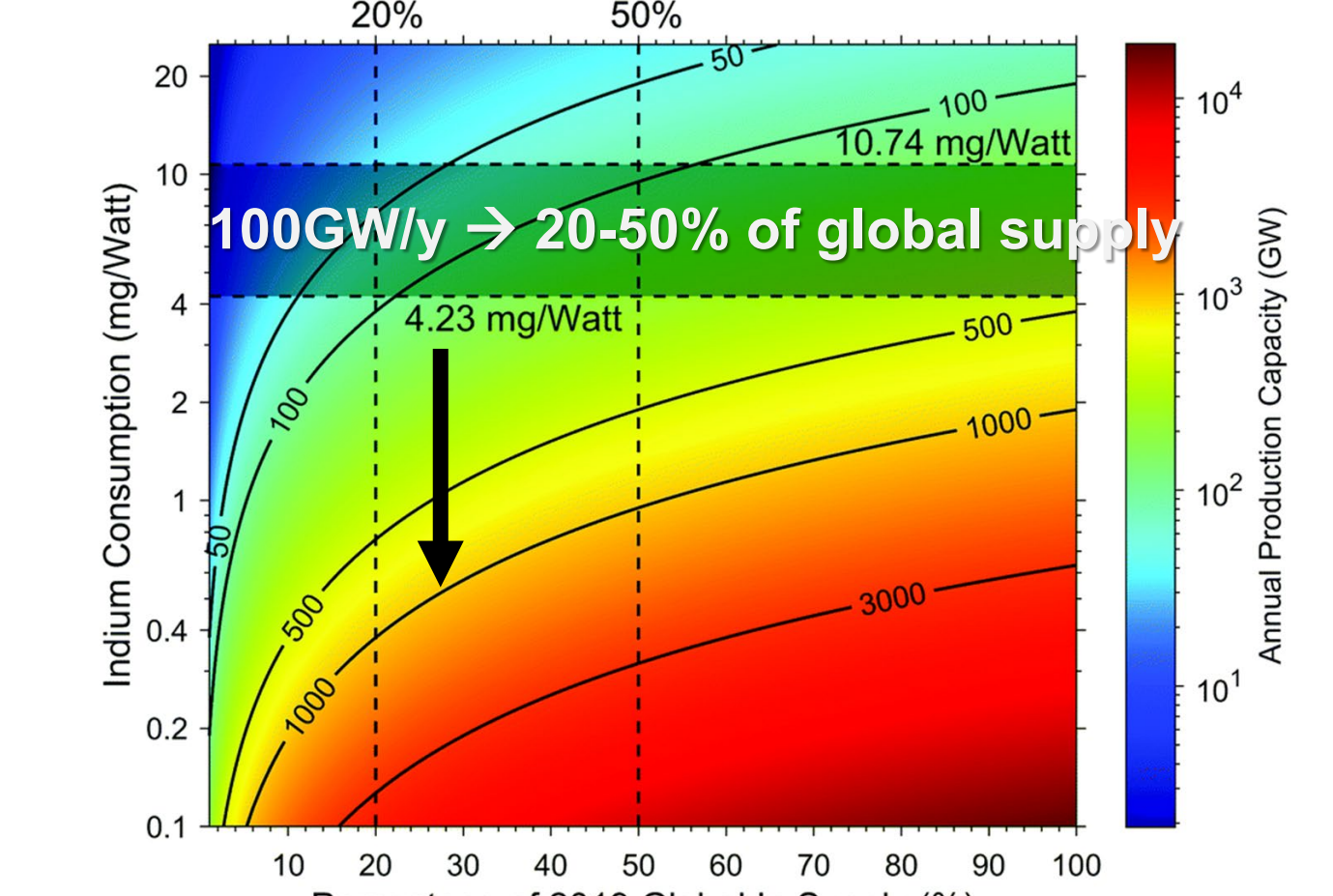
PV持続的発展には資源問題の解決が急務

Si-PV等で使用している希少金属

- In (ITO透明電極) : SHJ, perovskite, tandem
- Ag (集電極) : 全てのSi-PV
- Bi (Sn-Bi低温ハンダ) : Si-PV(特にSHJ)



SHJ太陽電池に必要なIn量 (試算)



現ITO使用量 (100nm厚) で年100GW生産するには、世界のIn供給量の20-50%が必要

これまでの業界での検討

省In

反射防止機能を持たせるために薄いITOと誘電体層 (SiN_x等) の積層膜
→製造コストの増大

脱In

ZnO系透明導電膜
→安定性・信頼性に課題

現在、PV業界では主に省Inの積層膜が検討されている

高導電率a-SnO₂透明電極の開発

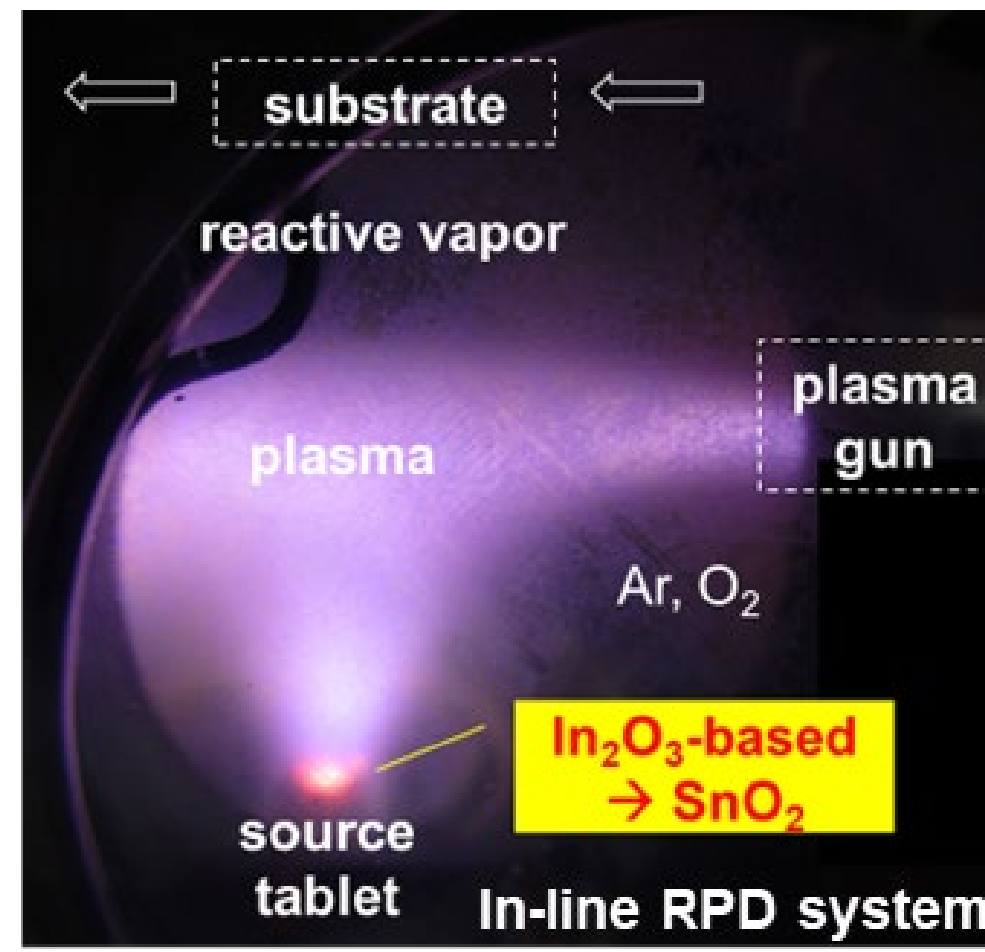
本研究の目的

材料/構造	多結晶 (高温製造)	非晶質 (低温製造)
In ₂ O ₃ 系	☑ ITO, IWOH	☑ a-IOH, a-IZO
SnO ₂ 系	☑ FTO, ATO	未開拓 (低導電率)

- SnO₂とIn₂O₃は類似の電子状態
- 透明電極として結晶質は共に広く普及
- 結晶質と非晶質は類似の電子状態
- 非晶質はIn₂O₃系のみ実用化

なぜ非晶質SnO₂は低導電率?
キャリアの生成・散乱機構に立ち返り、製造技術を見直す

薄膜製造

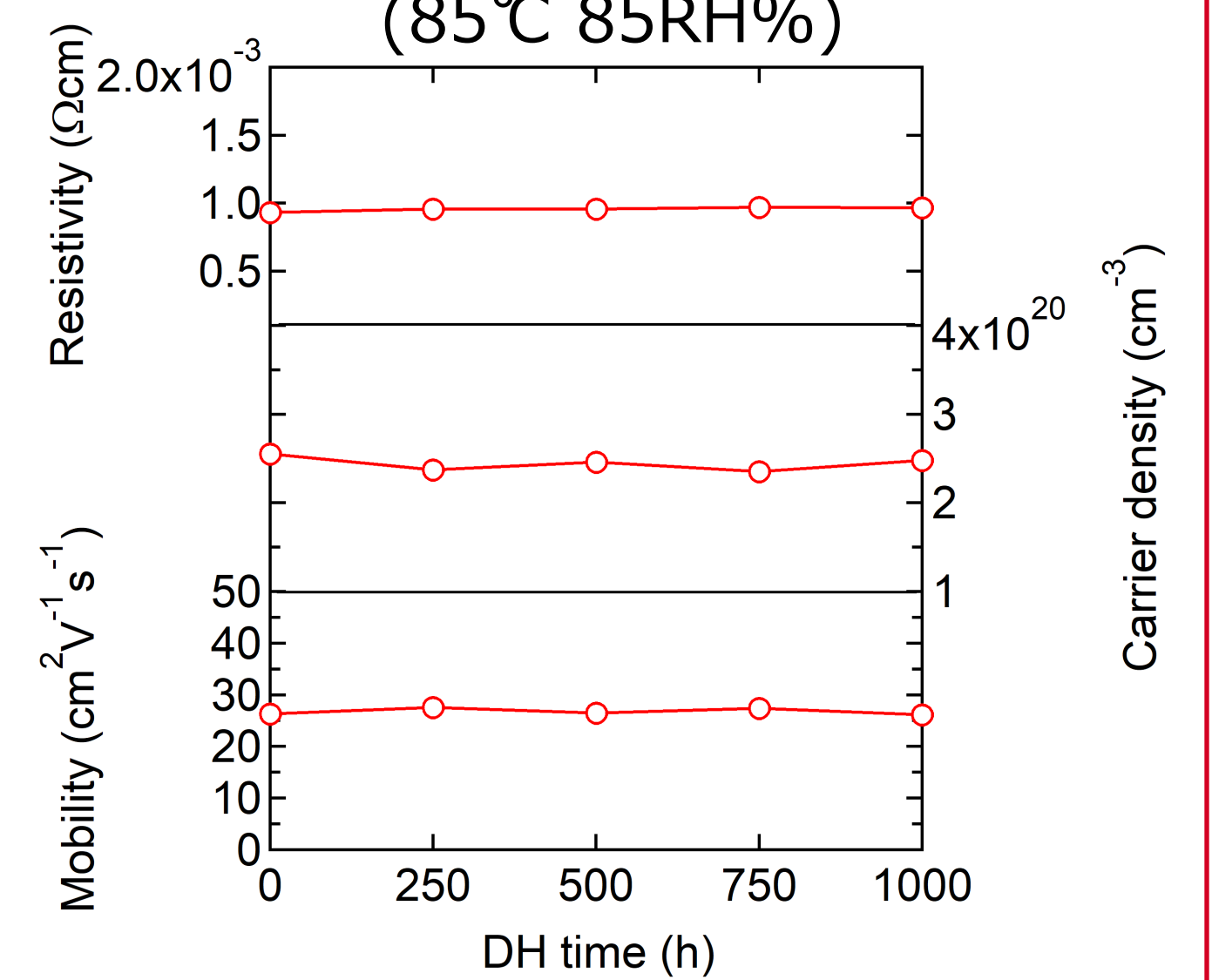


本RPD (反応性プラズマ堆積) 法はSHJ太陽電池の生産ラインでも使用
原料をIn₂O₃系からSnO₂に交換するだけ

光学特性

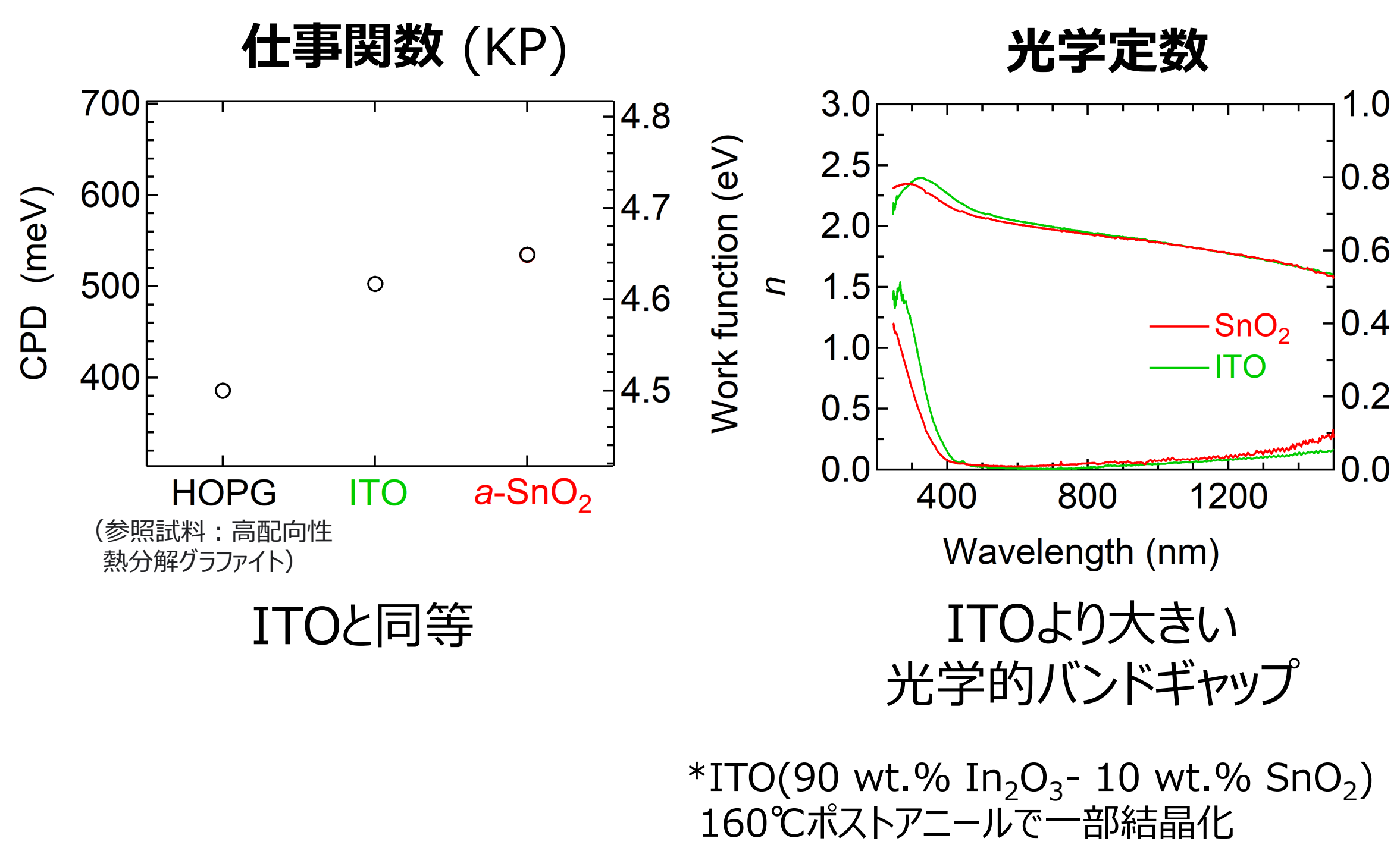


電気特性の安定性 (85°C 85RH%)



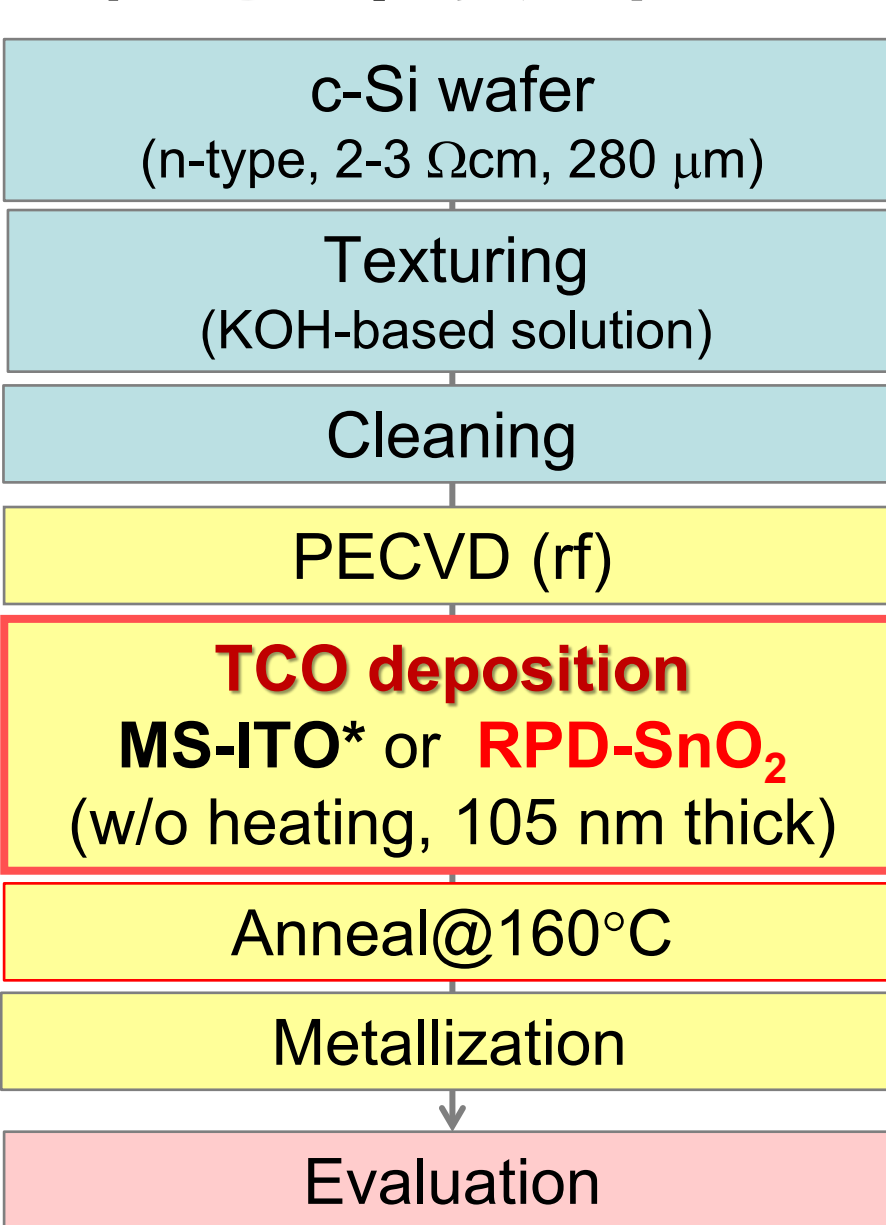
低抵抗率化に初めて成功 (<1E-3 Ωcm)
非晶質構造に由来し、高温高湿下安定

ITOと a-SnO₂ 薄膜の比較

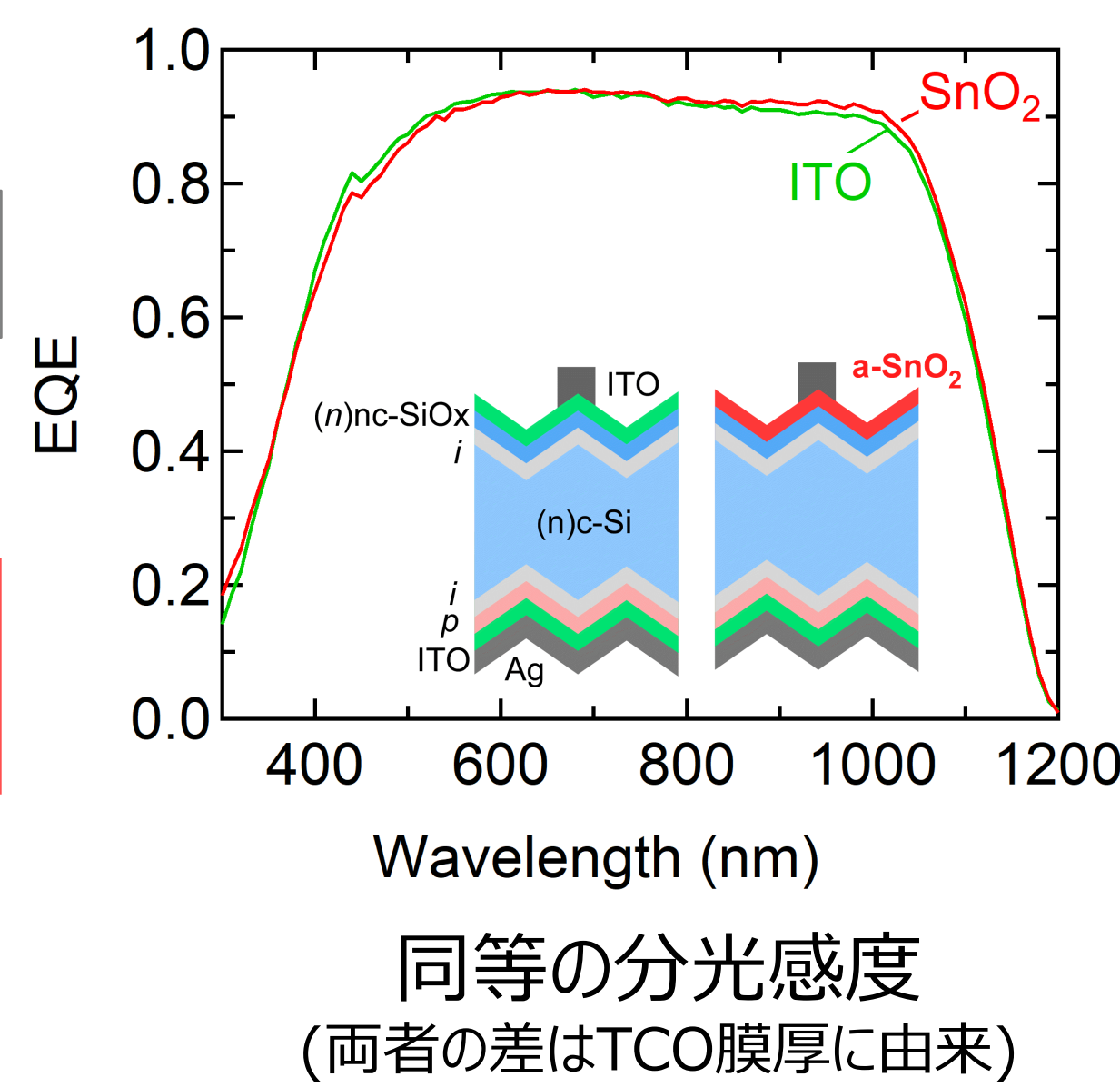


SHJ太陽電池特性比較 (窓電極にITOとa-SnO₂を使用)

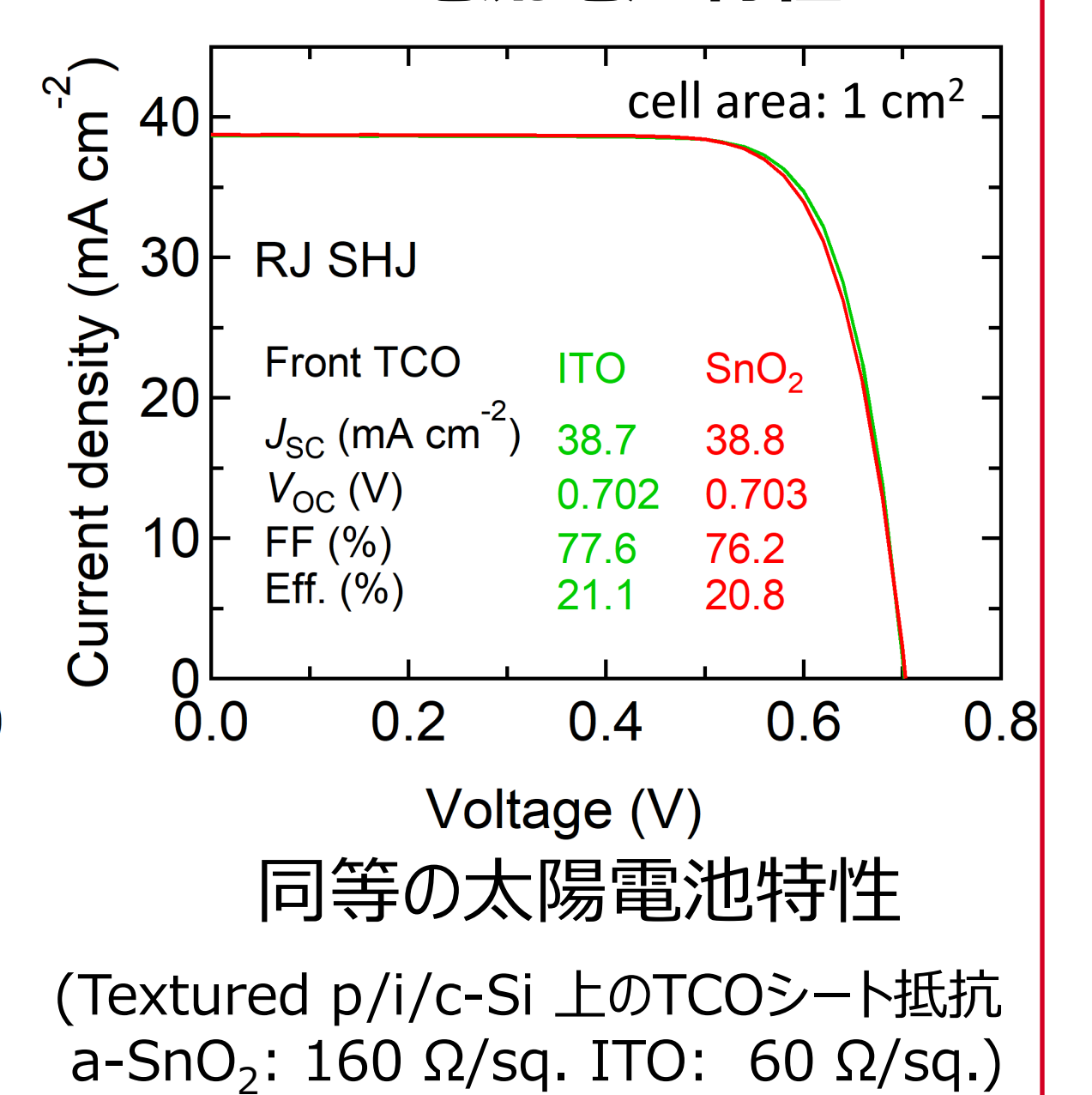
太陽電池作製工程



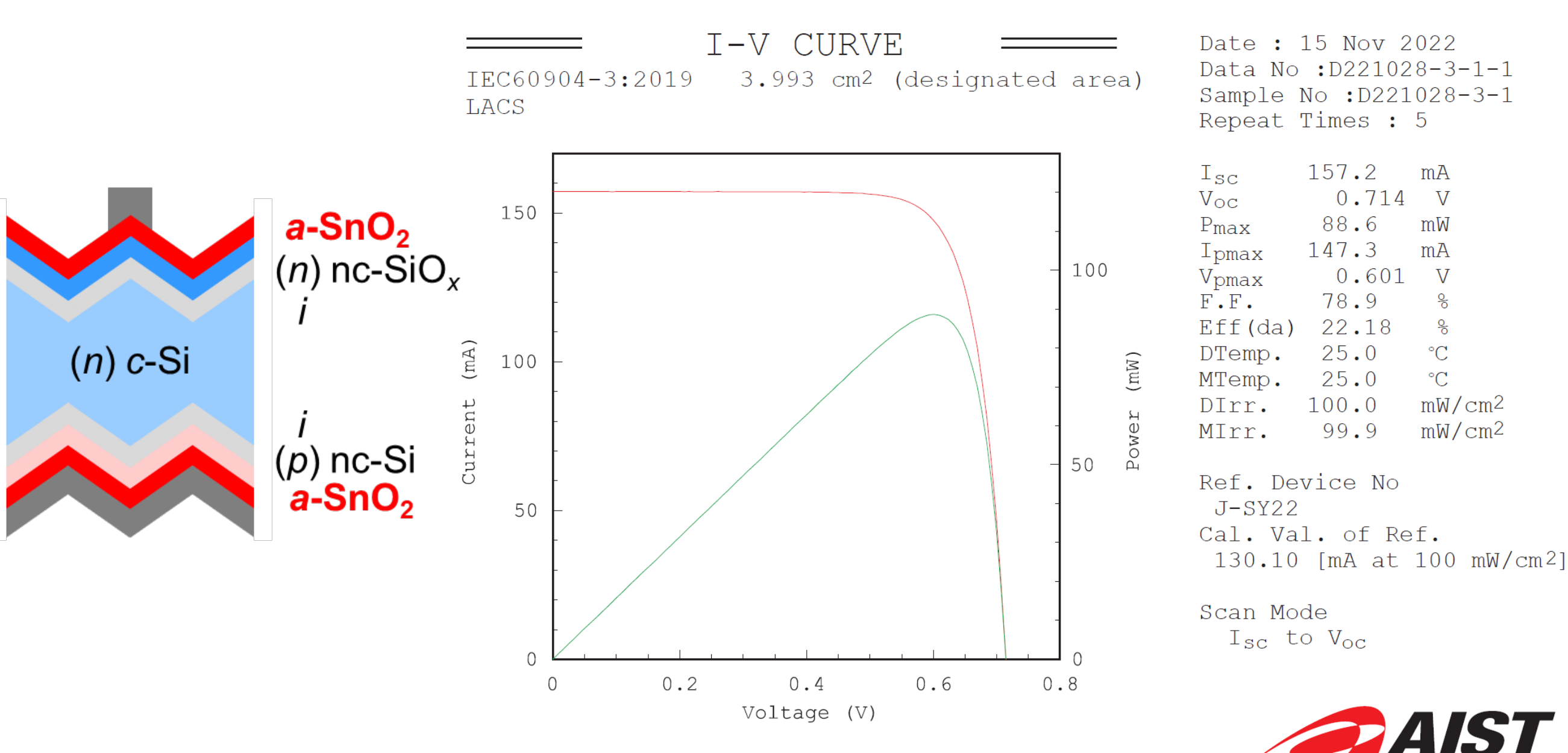
分光感度スペクトル



電流電圧特性



希少金属Inを使わない a-SnO₂を用いたSHJ 太陽電池



まとめ

- RPD法を用い、高導電率 (>1 × 10³ Scm⁻¹) a-SnO₂ TCO薄膜の製造に世界で初めて成功、高温高湿環境下で安定
- 光学的バンドギャップはa-In₂O₃系TCOより大きい
- 窓電極としてa-SnO₂を用いたSHJ太陽電池はITOを用いた太陽電池と同等の性能
- a-SnO₂を用いたリアジャンクションSHJ太陽電池において変換効率22.2%を達成
- a-SnO₂が従来のIn₂O₃系に代わるTCOとして、太陽電池に有用であることを実証

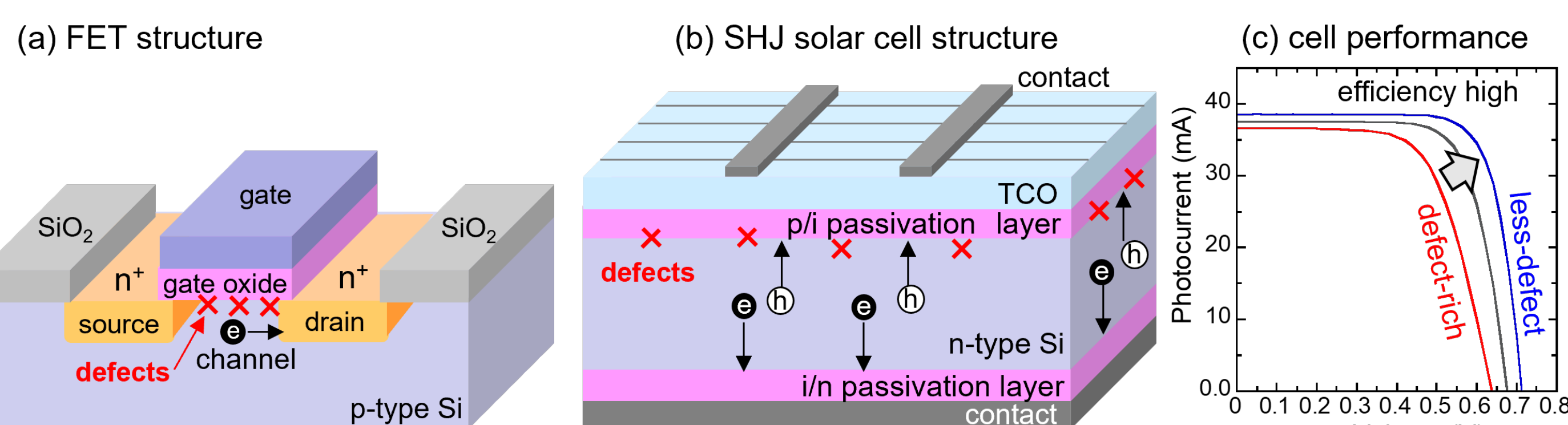
T. Koida, T. Matsui, H. Sai, Sol. RRL 7, 2300381 (2023) DOI: 10.1002/solr.202300381

太陽電池向けシリコンの表面パッシベーション： プラズマプロセスに伴うパッシベーション膜の構造変化と欠陥のその場評価

Abstract

- A beneficial effect of argon (Ar) ion bombardment for crystalline silicon (c-Si) surface passivation has been studied.
- Experiments of an Ar plasma treatment over a hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) layer on c-Si are performed.
- The c-Si surface passivation is improved by an Ar plasma treatment for a defect-rich, i.e., low-quality, a-Si:H layer, while it is deteriorated by the treatment for a low-defect, i.e., high-quality, a-Si:H layer.

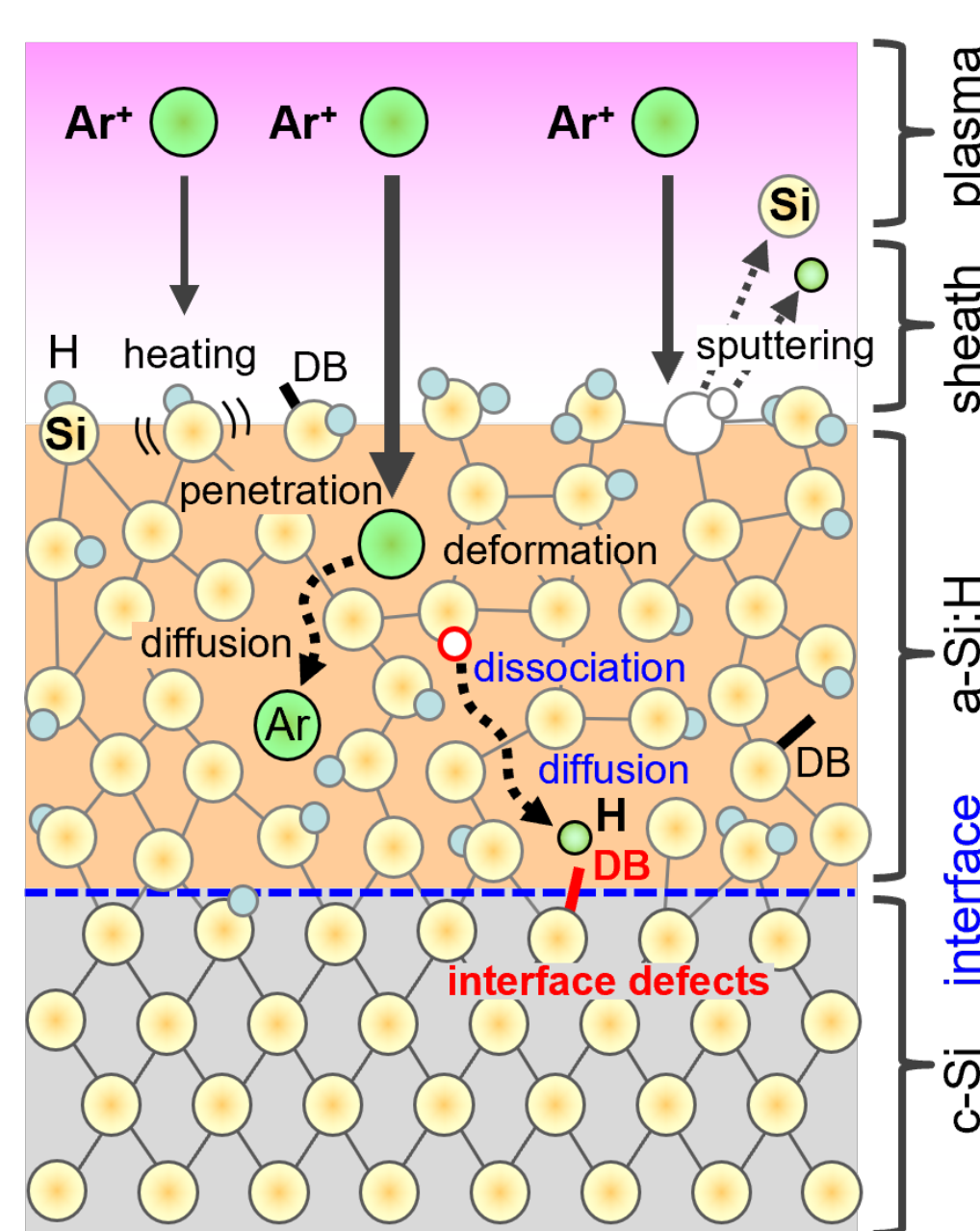
Introduction: Device, defects, and performance



- The defects in semiconductors impact on the device performance & reliability.
- In field-effect transistor (FET), defects at the channel-gate interface induce the deterioration of the carrier transport and current leakage.
- In solar cell based on silicon heterojunction (SHJ), defects formed at the heterointerface result in a decrease in the conversion efficiency via reductions in both the photocurrent and the output voltage.

S. Nunomura, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56**, 363002 (2023).

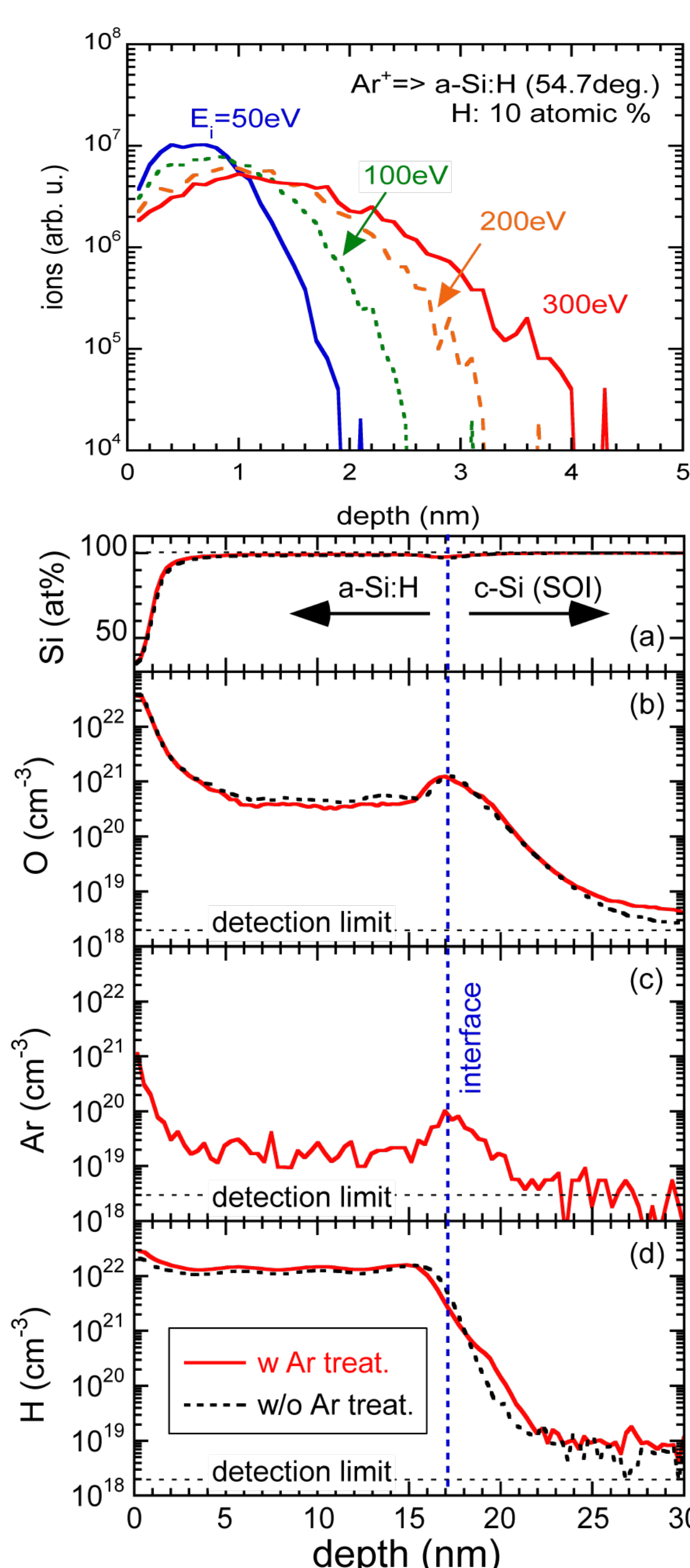
Ion-material interactions for a-Si:H/c-Si heterostructure



- The bombardments of Ar ions induce surface heating and deformation of local network structure.
- The heating and deformation result in the bond breaking of weak Si-Si and Si-H_x, which results in dangling bonds (DBs) and mobile hydrogen (H) atoms.
- The mobile H atoms diffuse deeper and arrive at the a-Si:H/c-Si interface, where they terminate the interface defects such as DBs.

S. Nunomura et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* **41**, 052202 (2023).

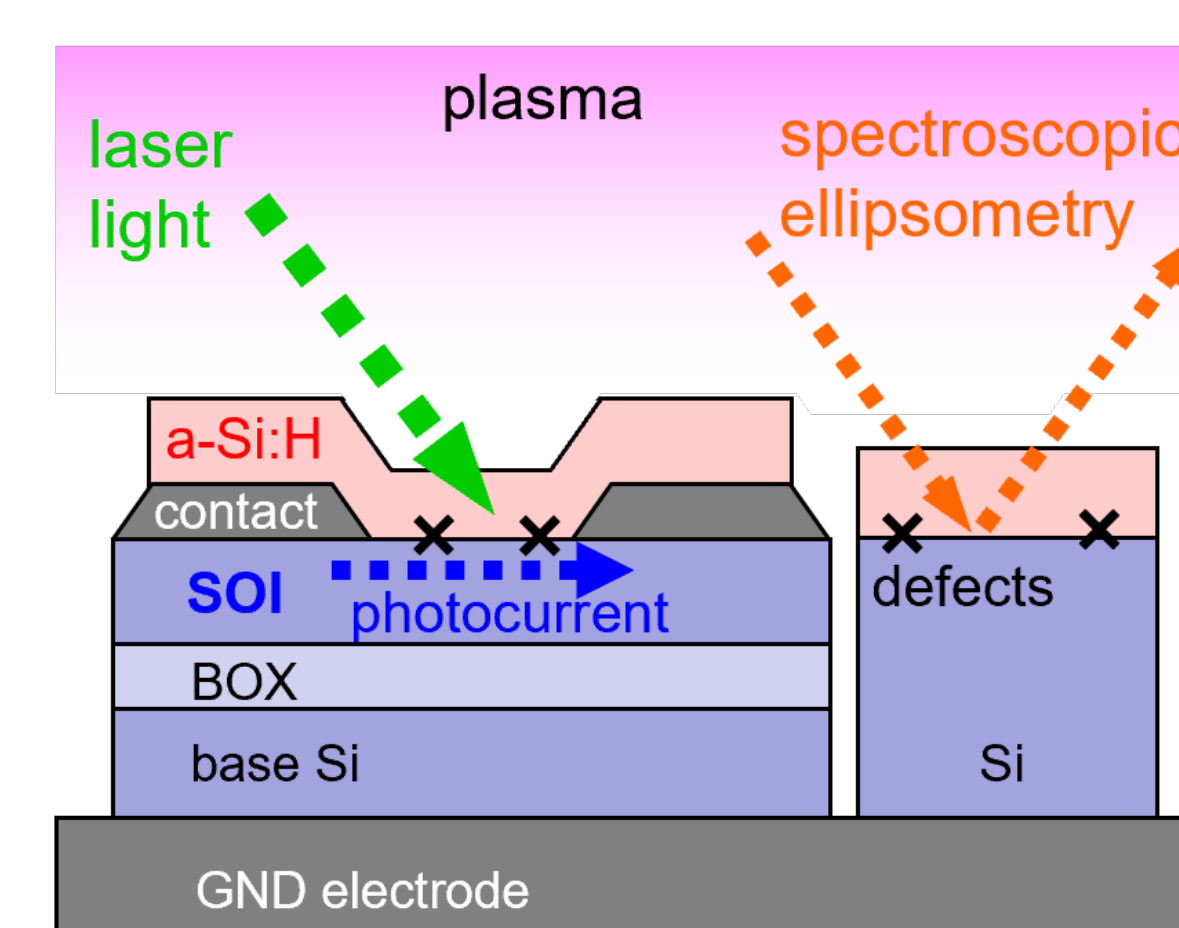
Results: TRIM & SIMS analysis



- Depth distribution of Ar⁺ implanted in a-Si:H (10 atomic percent H) for various incident energies.
- Ar ions are penetrated in a few nm.
- Depth distribution of Si, O, Ar and H elements in a-Si:H/SOI, obtained by SIMS measurements.
- A black broken line shows the distribution for a sample without an Ar plasma treatment. A red solid line shows the distribution for a sample with an Ar plasma treatment of $P = 50$ W and $t = 10$ s.
- The H distribution is broadened at the a-Si:H/SOI interface by an Ar plasma treatment for a defect-rich a-Si:H prepared at $T_s = 80$ °C.
- The decay length of the H concentration is 1.04 nm for a sample with the Ar treatment, while it is 0.57 nm for a sample without the treatment.

S. Nunomura and I. Sakata, *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, 106001 (2022).

Exp. setup: in-situ real-time characterization

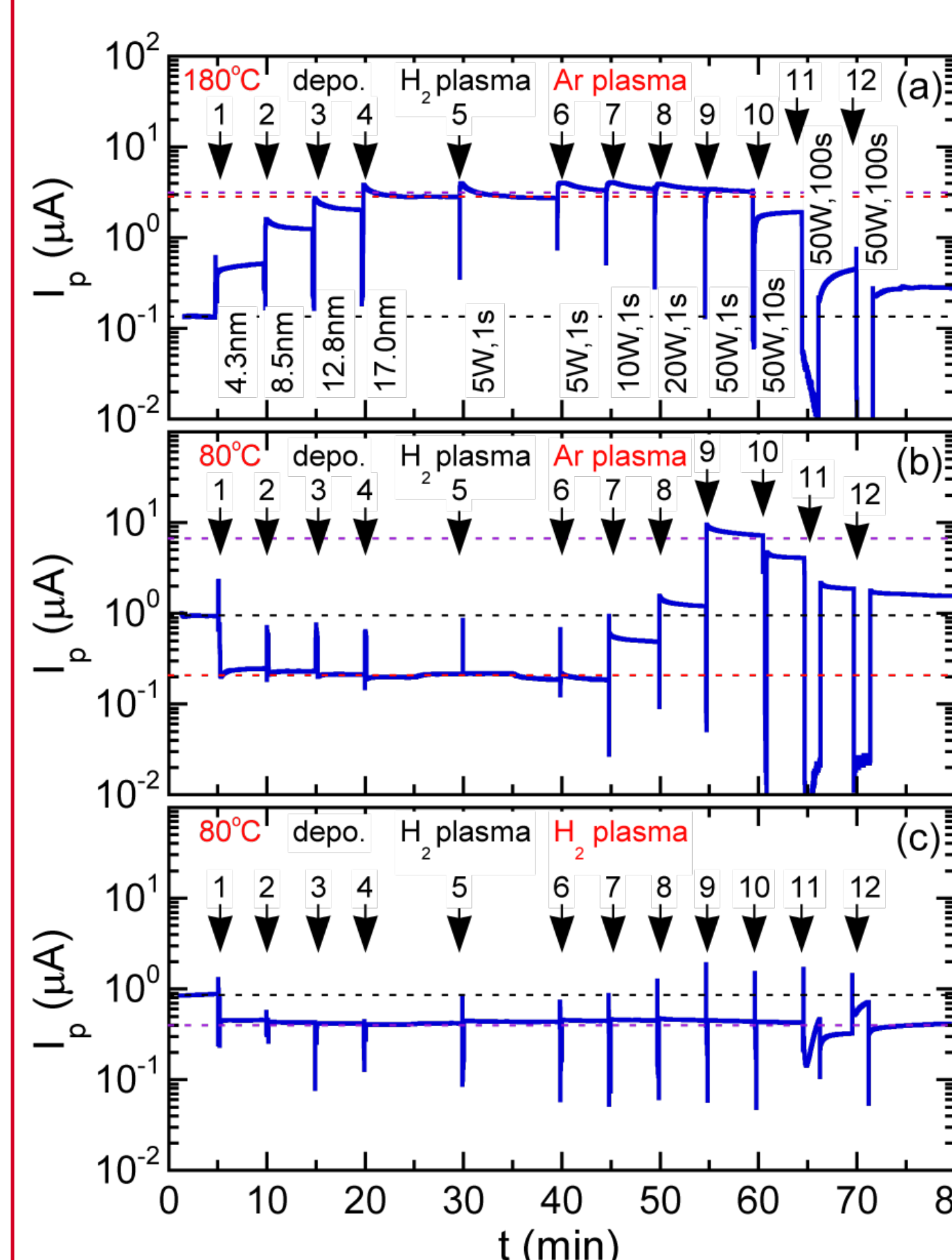


- Silicon on insulator (SOI) is used as a sample for the photocurrent measurement.
- SOI is illuminated with a visible light laser (520 nm, 1 mW).
- In-situ photocurrent measurement is performed to detect the defects at the a-Si:H/c-Si interface.
- Real-time spectroscopic ellipsometry is performed to obtain the thickness and optical parameters.

S. Nunomura et al., *Appl. Phys. Express* **12**, 051006 (2019).

Results: in-situ real-time characterization

In-situ photocurrent measurements



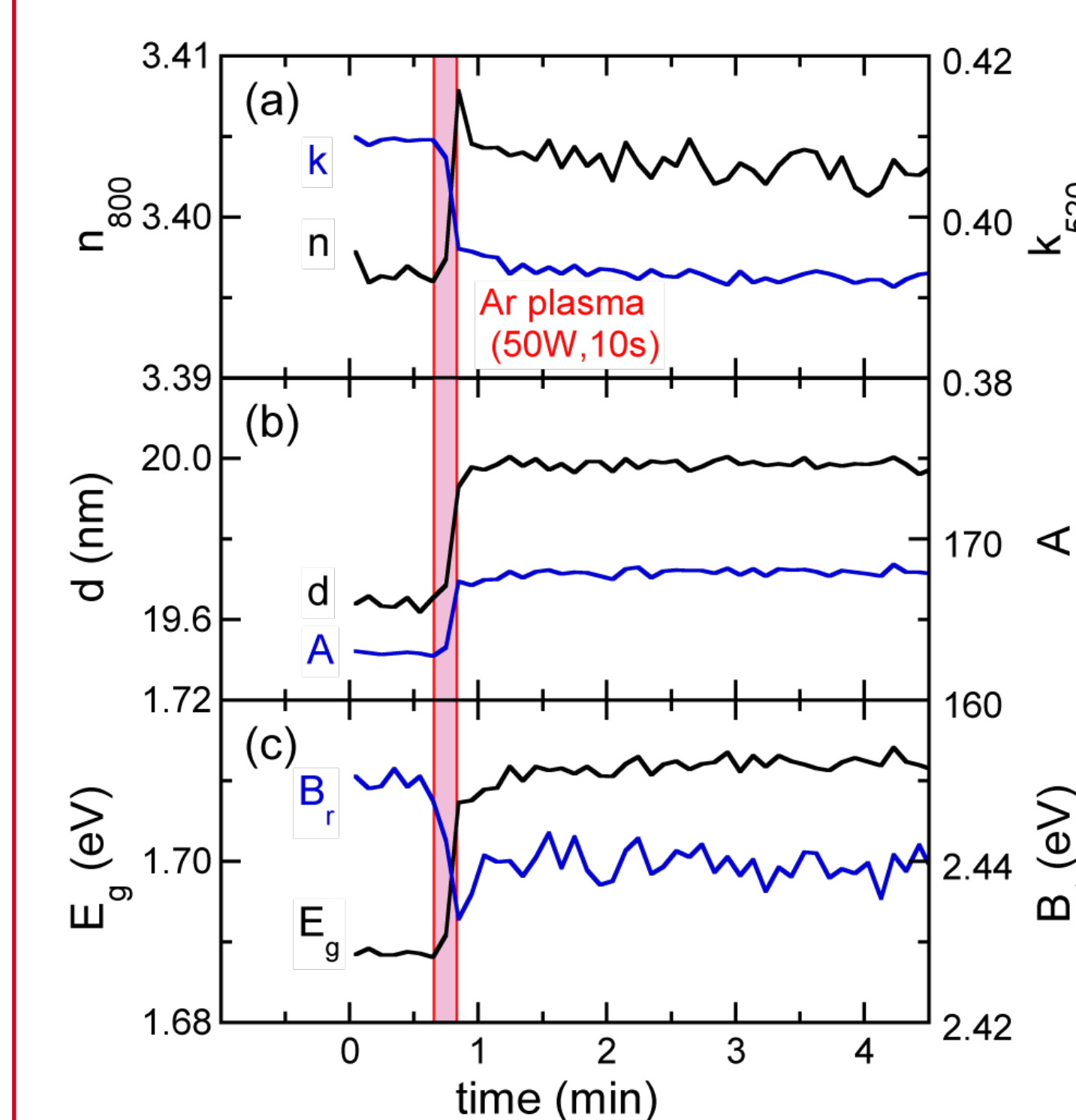
For low-defect a-Si:H (at 180°C)

- The photocurrent, I_p , is increased after the growth of a-Si:H, denoted by 1–4. This increase indicates a reduction of the interface defects, i.e., the c-Si surface passivation.
- Ar plasma treatments are performed, denoted by 6–12.
- The recovery of I_p is limited for a high-power (P) and long-period (t) treatment, denoted by 10–12, which indicates the formation of residual defects.

For defect-rich a-Si:H (at 80°C)

- I_p is increased drastically by an Ar plasma treatment, denoted by 7–9.
- A large improvement of surface passivation is confirmed.
- A further treatment under the high- P and long- t conditions causes a reduction in I_p (denoted by 10–12).
- For comparison, Ar plasma treatments are replaced with H₂ plasma treatments. An increase in I_p is not observed, and I_p stays low.

Real-time spectroscopic ellipsometry



- $n_{800\text{ nm}}$ is increased by the Ar plasma treatment, while $k_{520\text{ nm}}$ is decreased.
- An increase in $n_{800\text{ nm}}$ is related to an increase in the oscillator amplitude (A), implying the formation of a dense network structure.
- d is increased by the treatment, indicating the implantation of Ar ions into an a-Si:H layer.
- The broadening factor (B_r), i.e. the network disorder of a-Si:H is reduced by the treatment, reflecting the improvement of network disorder.
- E_g is increased by the treatment, suggesting the reorganization of the bond configurations of Si-H_x.

S. Nunomura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, 106001 (2022).

Summary

- A beneficial effect of Ar ion bombardments to the silicon surface passivation is experimentally studied.
- The passivation improvement is observed as an increase in the photocurrent, which is obtained under certain conditions of Ar plasma treatments at low- P and short- t .
- The mobile H atoms are considered to play important roles in the interface DB defect termination, i.e., the surface passivation, where the material densification and the improvement of the network disorder are also required to reorganize the local interface structure.

Acknowledgements

This work was supported by JSPS KAKENHI (Grant Numbers 18K03603 & 20H00142) and New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

BIPV応用に向けた高効率な着色PVモジュールの開発

研究の目的

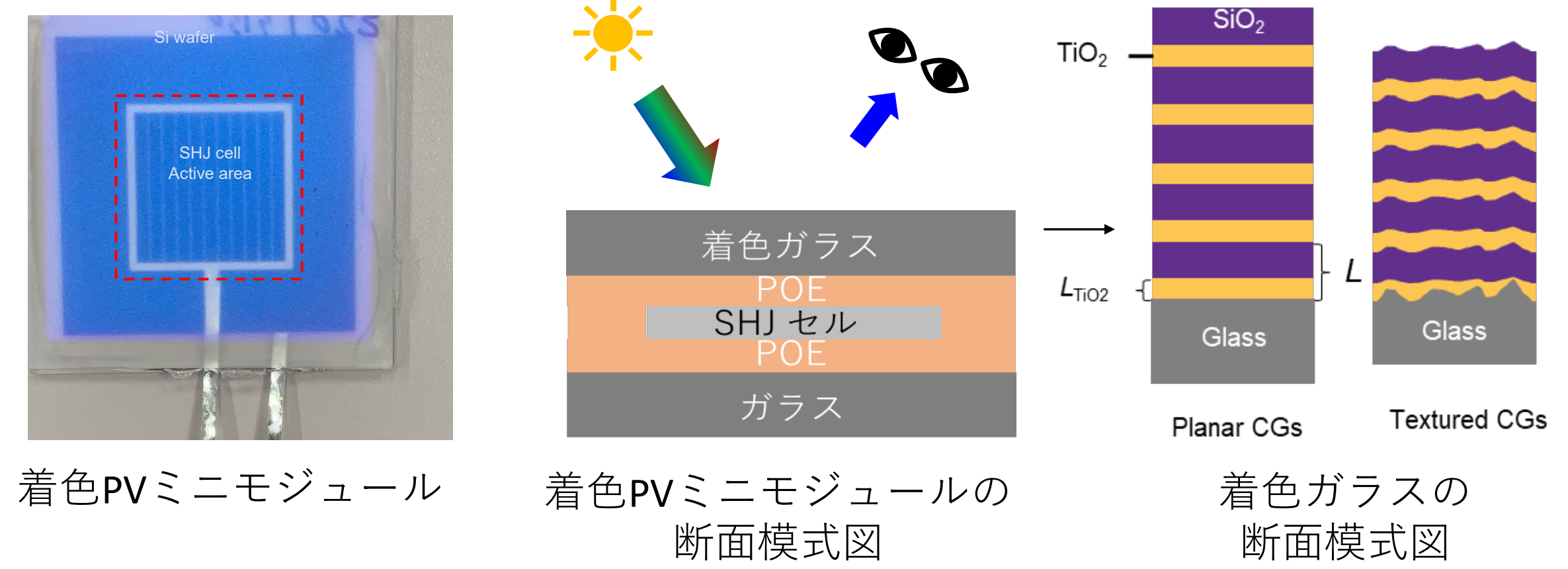


- BIPV に求められる機能:
 1. 建材機能: 構造材、外壁、窓等
 2. 発電機能
- 問題点:
 1. 黒色PVモジュールは建物に調和し難い
 2. 塗料を用いた着色PVモジュールは効率低下
- 解決策: 構造色の活用 [1,2] → 高効率
 - 誘電体多層膜の光学干渉により着色
 - 吸収損失が無い → 光学効率が低い
- 研究の目的:

高い効率 + 鮮やかな色の着色PVモジュール
 J_{SC} 低下量 < 10%

実験

- ミニモジュール: Lab-scaleのSHJセルをダブルガラスで封止・評価
- 構造色: SiO_2/TiO_2 積層*とテクスチャガラス**で発現



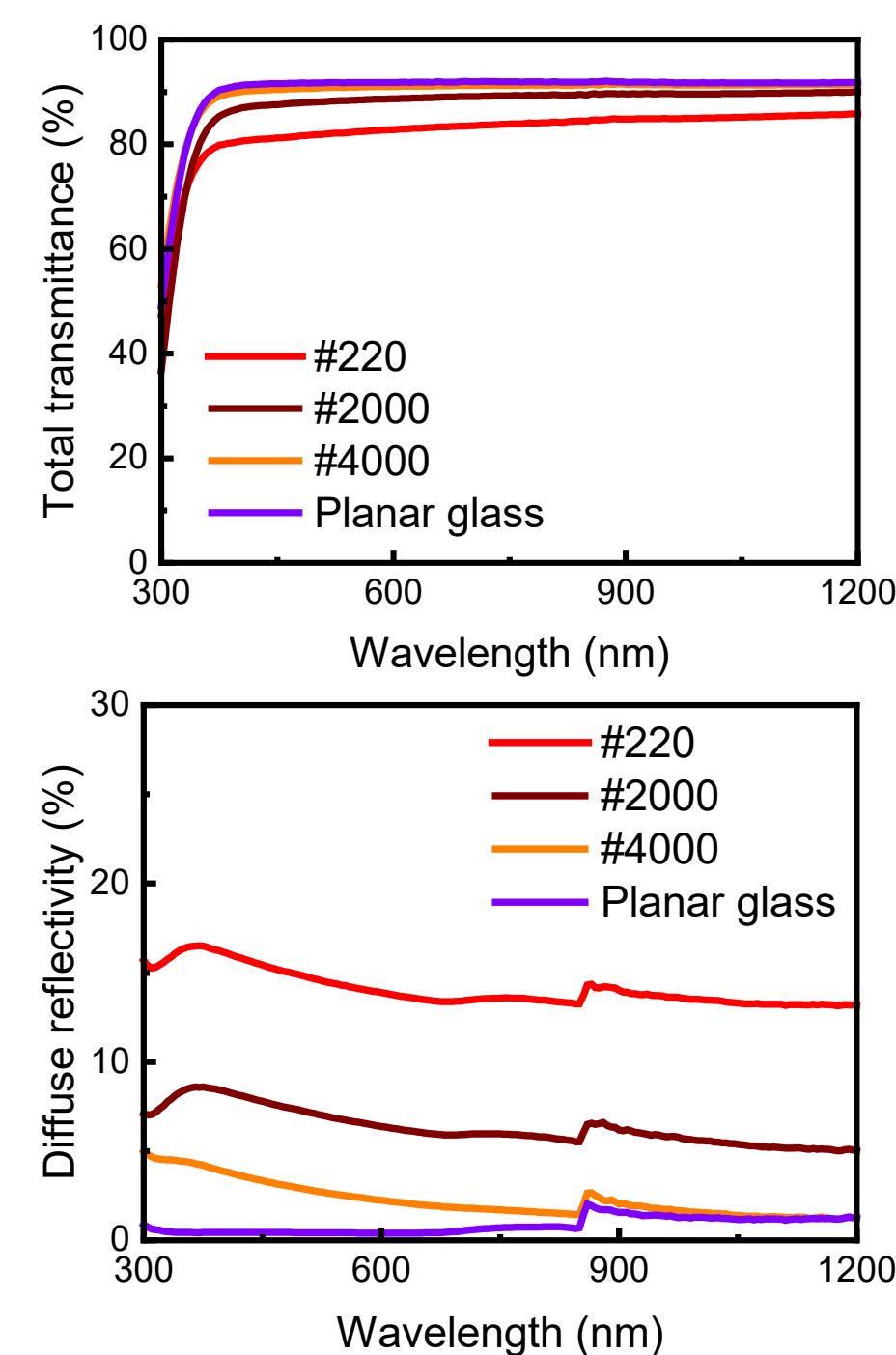
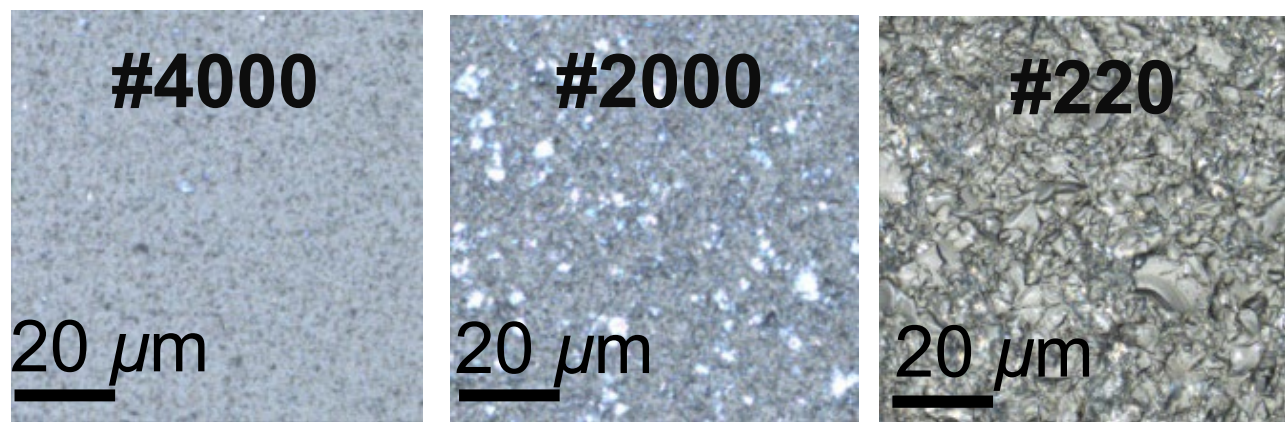
*: Sputtering system: RF
 **: Sandblasting glass.

結果1

■ テクスチャガラスの制御

ID	Average size of Al_2O_3 particles (μm)	S_q (μm)
#4000	3	0.062
#2000	6.7	0.110
#220	50	4.1

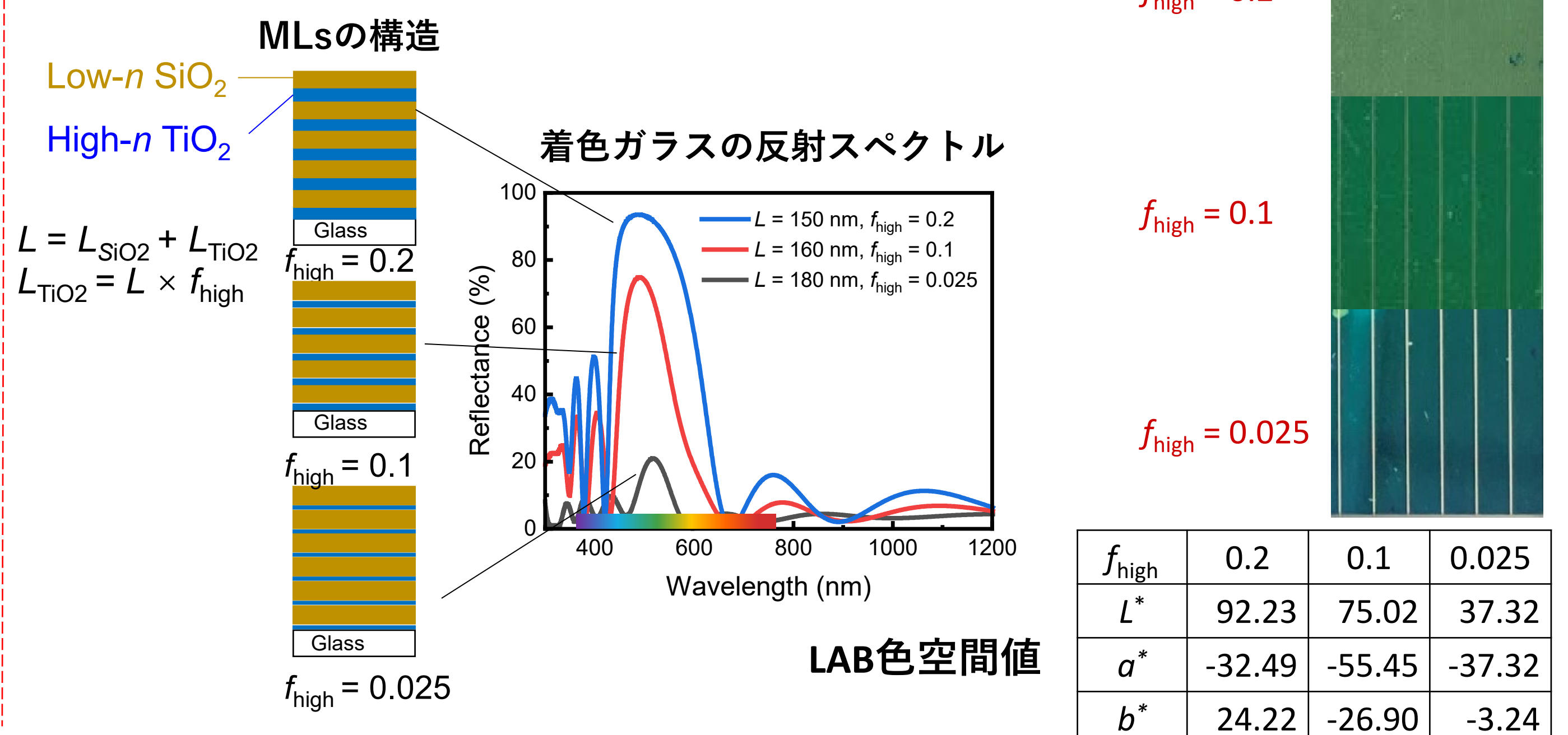
S_q ~ root means square height



- 透過率が高い順: Planar, #4000, #2000, #220
- 拡散反射が高い順: #220, #2000, #4000, Planar

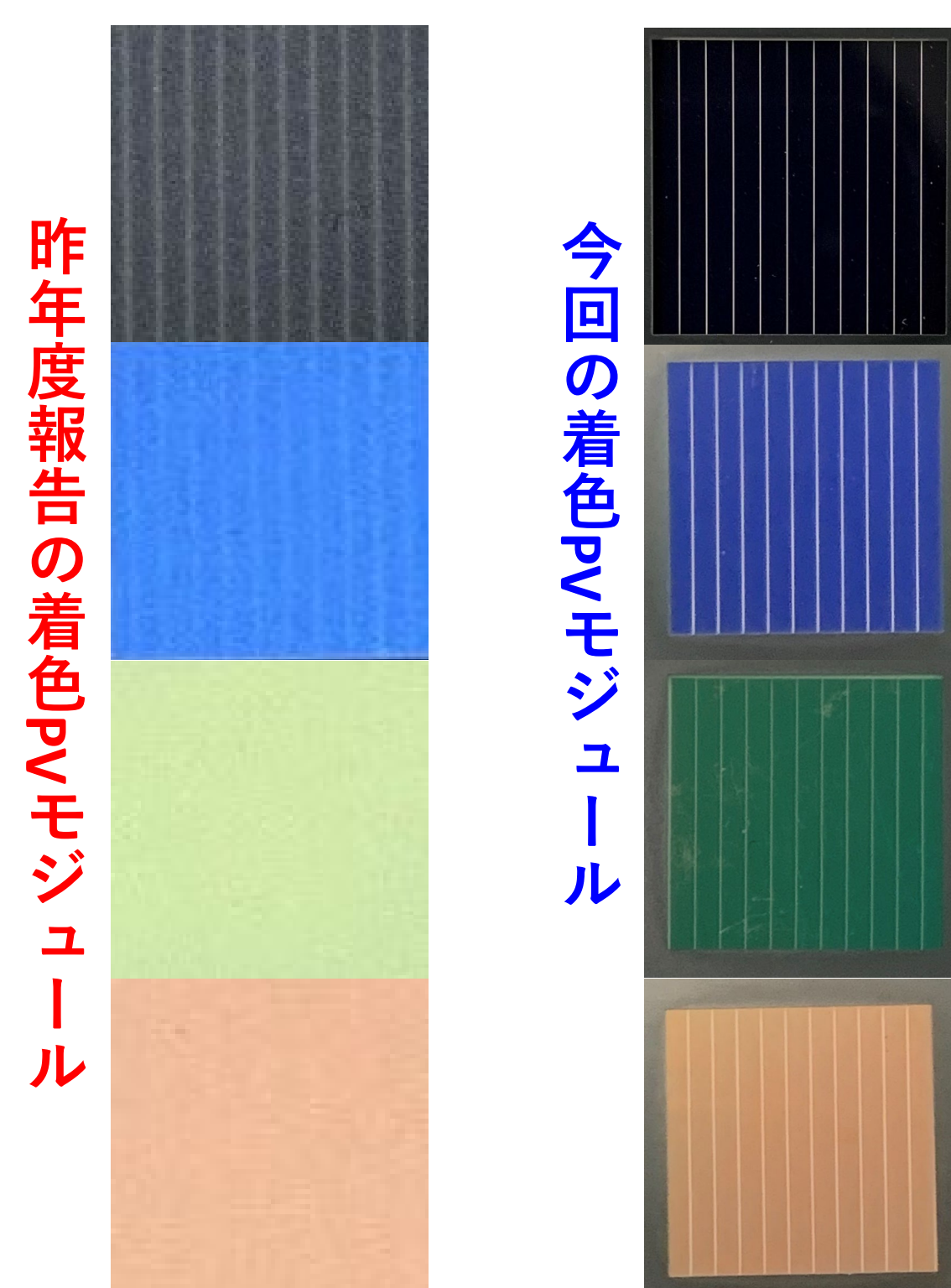
■ 反射スペクトルの制御

- 多層膜設計により反射強度を可変可能



結果2

■ 着色PVモジュールの作製と比較



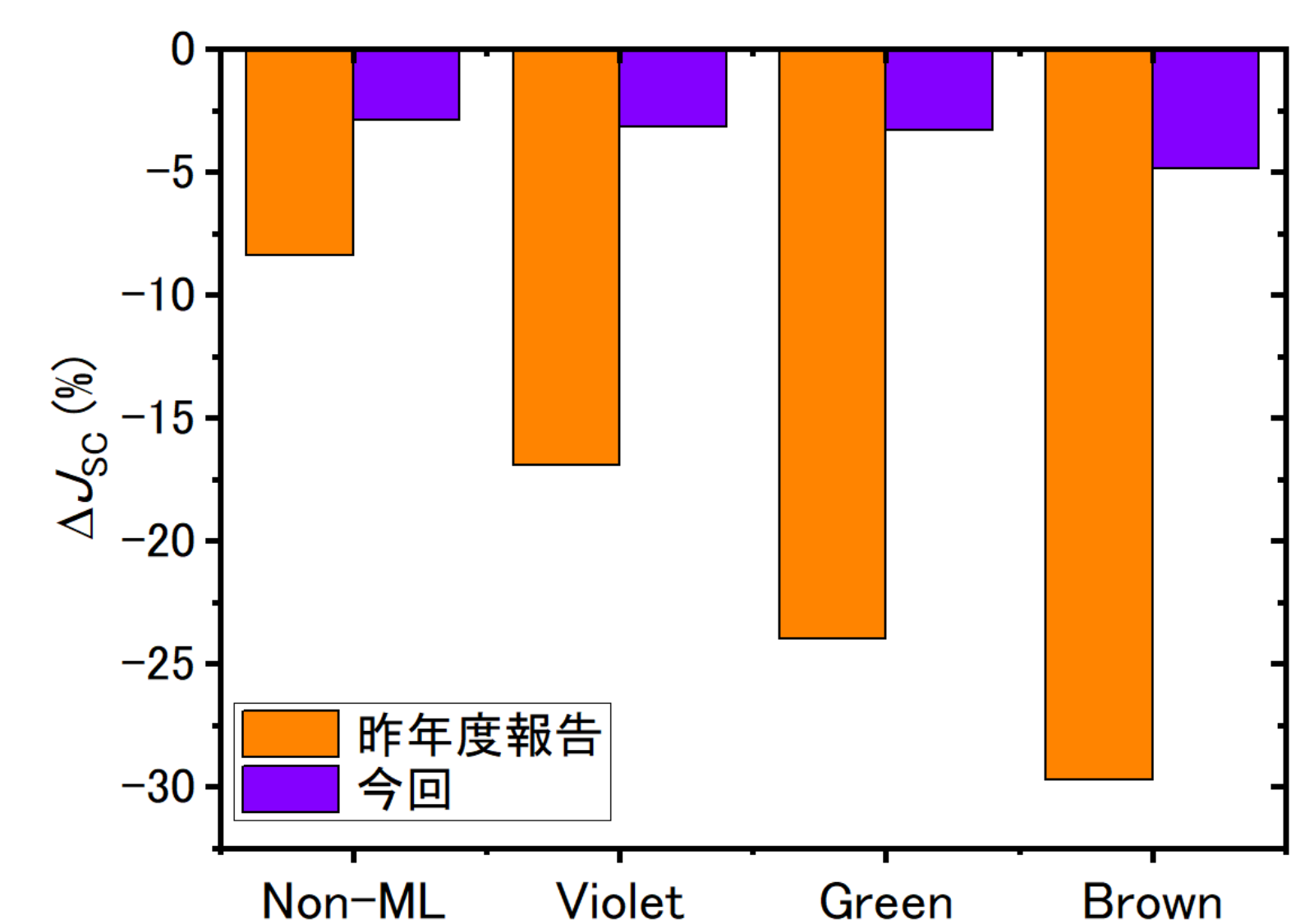
昨年度報告の着色PVモジュール^[3]

Color	J_{SC} (mA/cm^2)	V_{OC} (V)	FF	η (%)
Non-ML	35.8	0.713	0.801	20.6
Violet	32.5	0.712	0.804	18.1
Green	29.7	0.710	0.803	17.2
Brown	27.5	0.711	0.802	15.5

今回の着色PVモジュール

Color	J_{SC} (mA/cm^2)	V_{OC} (V)	FF	η (%)
Non-ML	37.8	0.711	0.799	21.5
Violet	37.2	0.715	0.797	21.2
Green	37.8	0.720	0.800	21.6
Brown	37.0	0.713	0.800	21.0

$$\Delta J_{SC}(\%) = \frac{J_{SC, module} - J_{SC, bare cell}}{J_{SC, bare cell}} \times 100$$



- 着色ガラスの設計最適化により光学損失 (J_{SC} 損失) を大幅に改善できる

結論

1. BIPV応用を念頭に、構造色を用いたPVモジュールの色調制御を検討した。
2. 誘電体多層膜により任意の色調が発現出来る。
3. 光学損失の低減を目指して、テクスチャガラスと誘電体多層膜の適切な制御を行った結果、発電効率21%以上の着色モジュールを実現した。着色に伴う J_{SC} 低下量は3%未満に抑制できた。

参考文献

1. B. Blasi et al., IEEE Journal of Photovoltaics 11, 5, 2021.
2. N. Jolissaint et al., Energy Procedia 122 (2017) 175-180.
3. Z. Xu et al., Solar Energy Material and Solar Cells 247 (2022) 111952.

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施された (JPNP20015)。

光学薄膜を用いた

建材一体型太陽電池における高効率加飾技術

研究の目的

建材一体型太陽電池(BIPV)^[1-3]

建材機能を有する太陽電池
壁面PV ⇒ 発電量の増大に期待

景観の観点
⇒ 白色・中間色等の
PVモジュールが望まれる



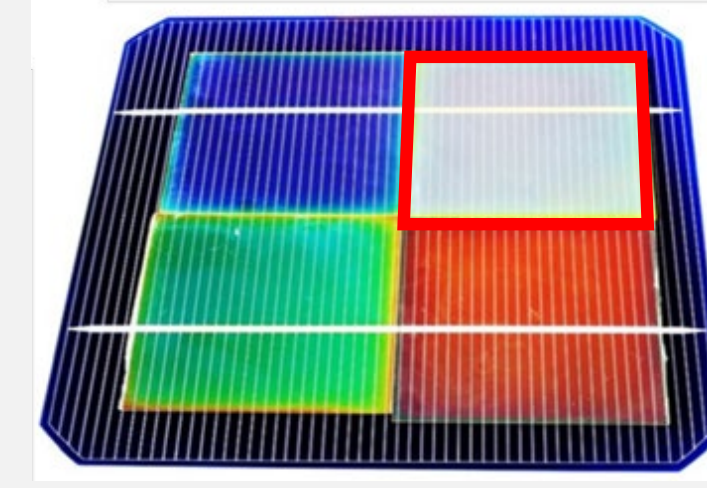
東京工業大学 EEI棟

光学薄膜 (誘電体多層膜)

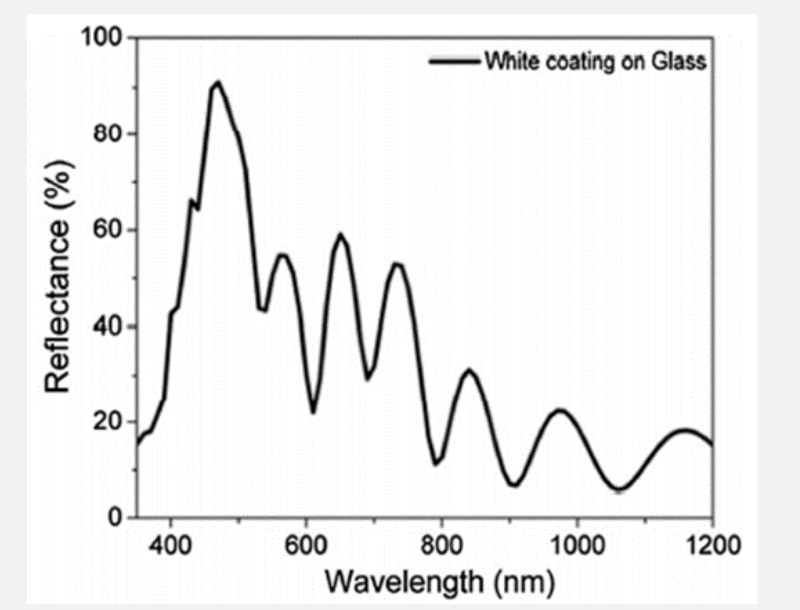
光の干渉による**構造着色**

- 吸収損失なし
- △ 角度によって色相が変化
- △ 白色: 発電効率低下

加飾太陽電池^[4]



光学特性 (白色)^[4]



多くの光を反射 ⇒ 効率低下 **40%**^[4]

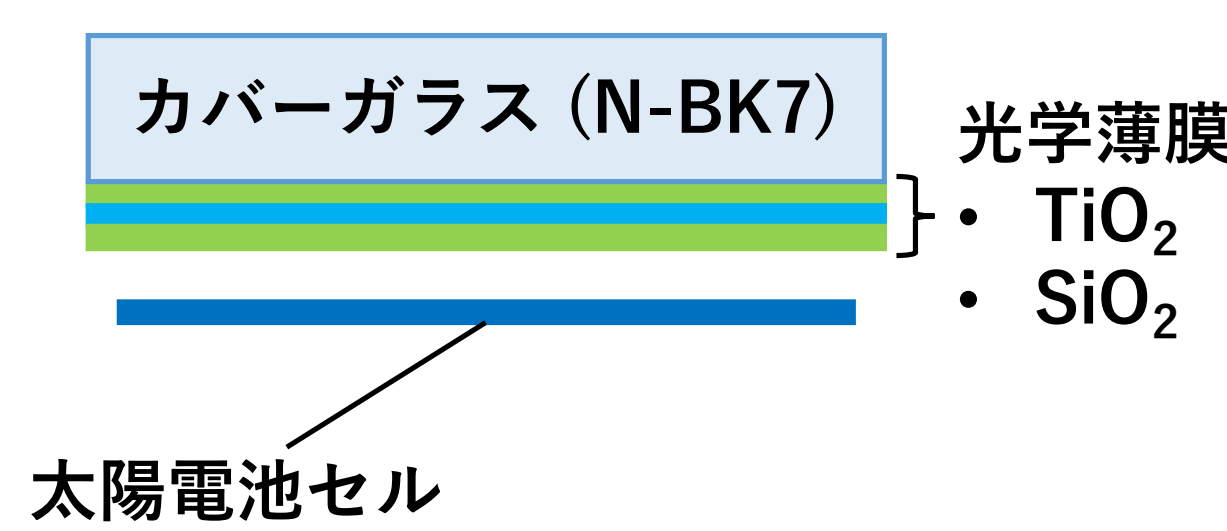
目的 低角度依存・高発電効率で白色の太陽電池加飾用光学薄膜を設計する

実験

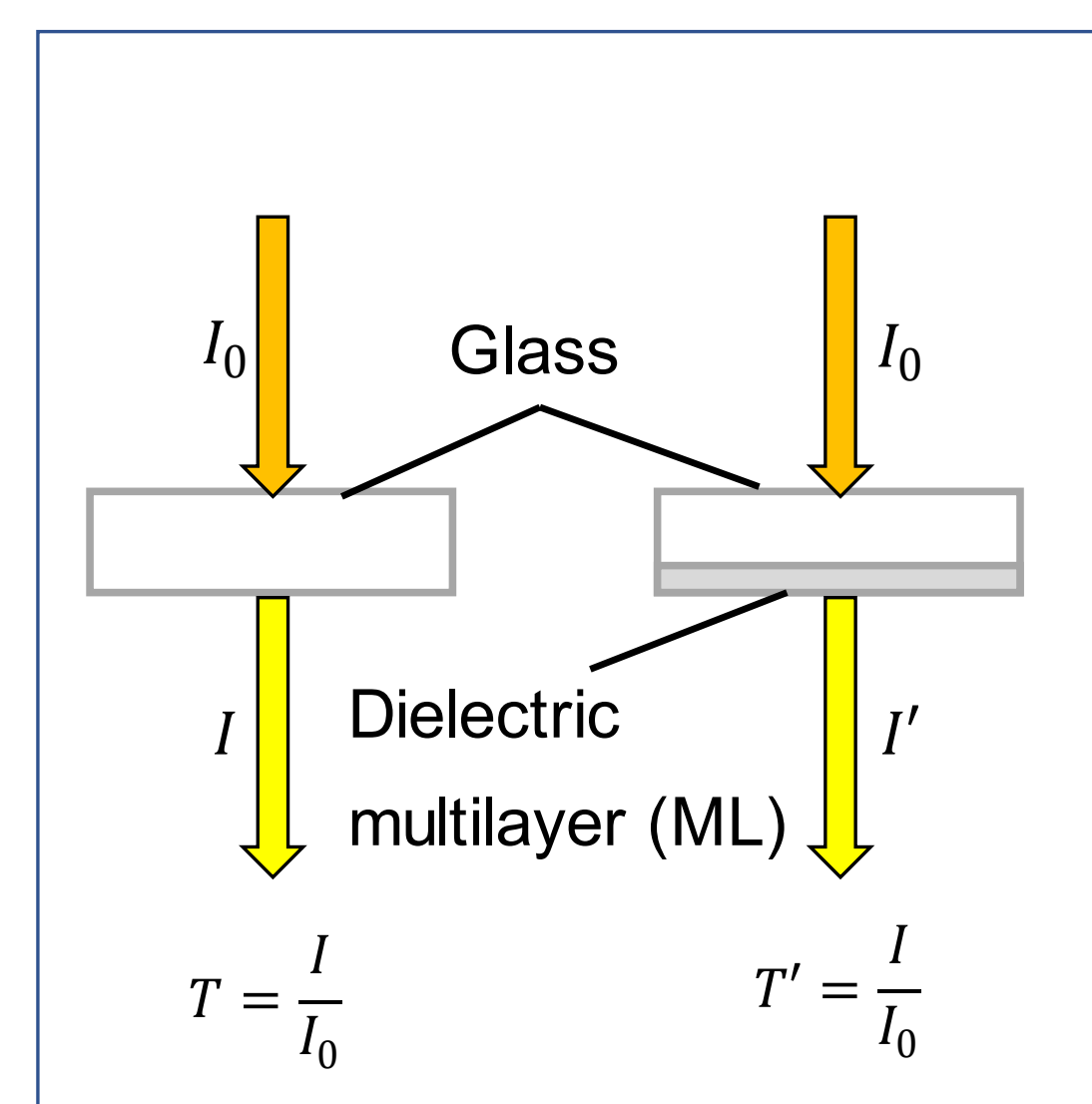
光学設計

1. 分光反射特性, 色相, 明度の目標値を設定
2. 層数, 膜厚のパラメータを変動
3. 所望の光学特性を持つ膜構造を取得

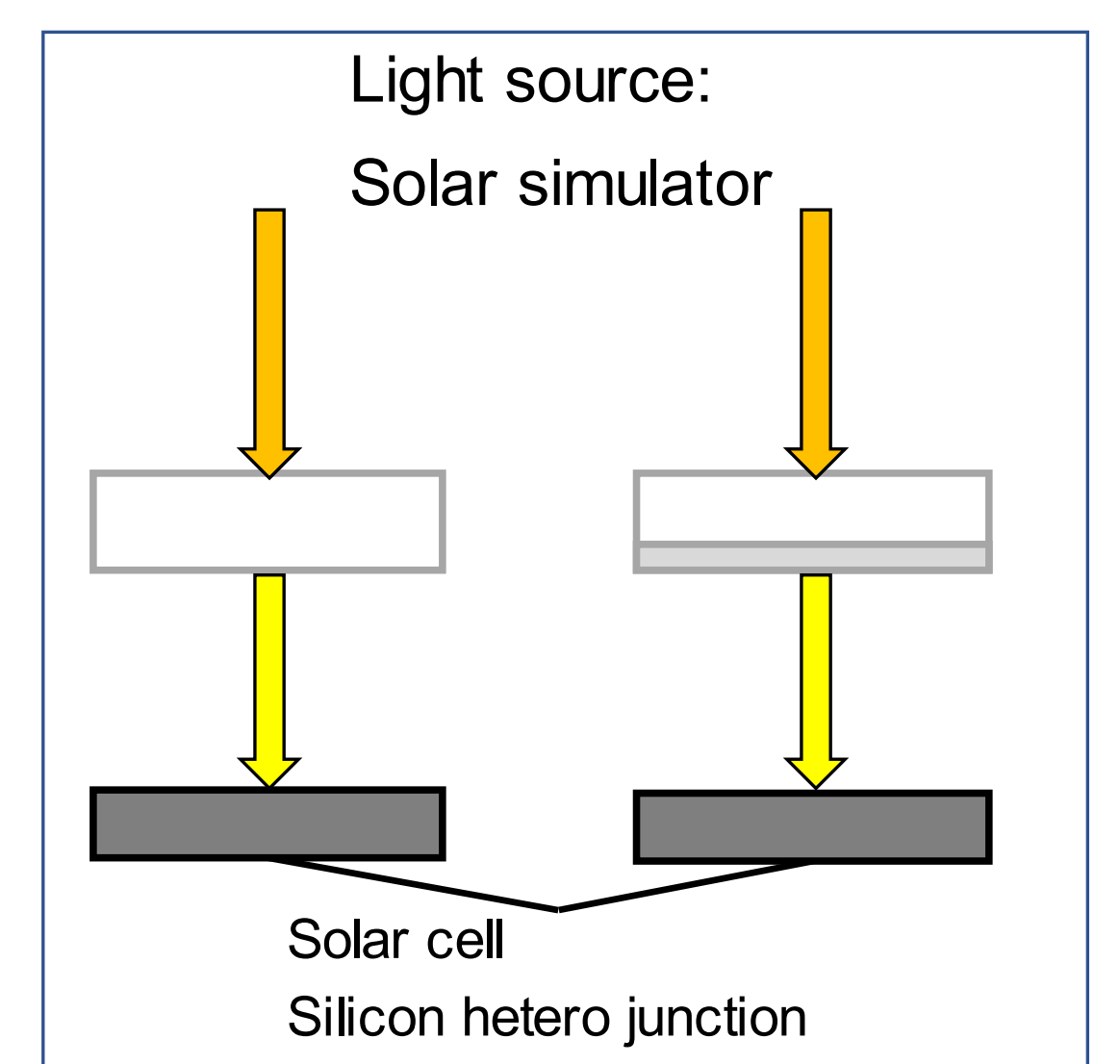
太陽電池モジュールの模式図



分光透過特性の測定



外部量子効率の測定

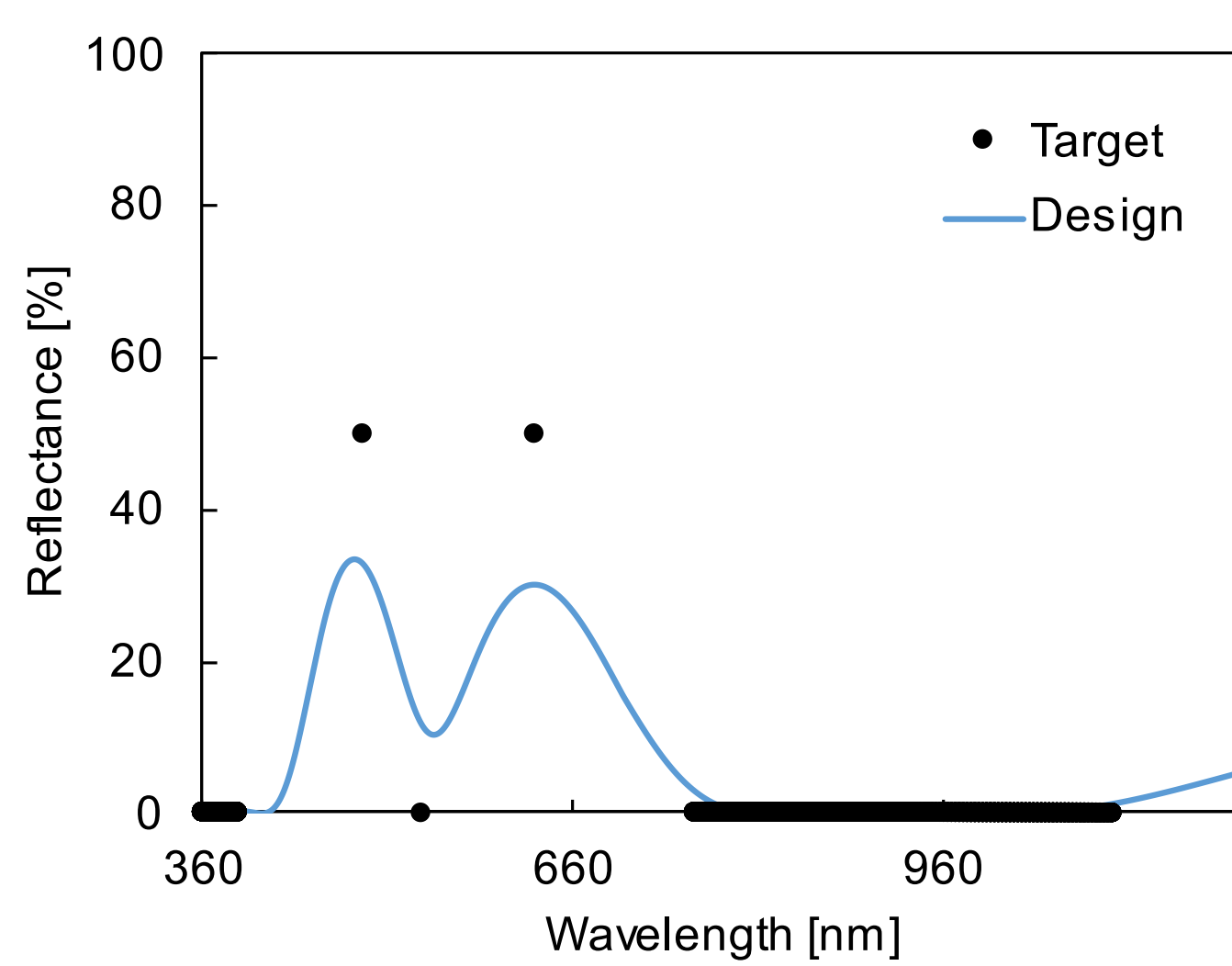


試作品の特性評価

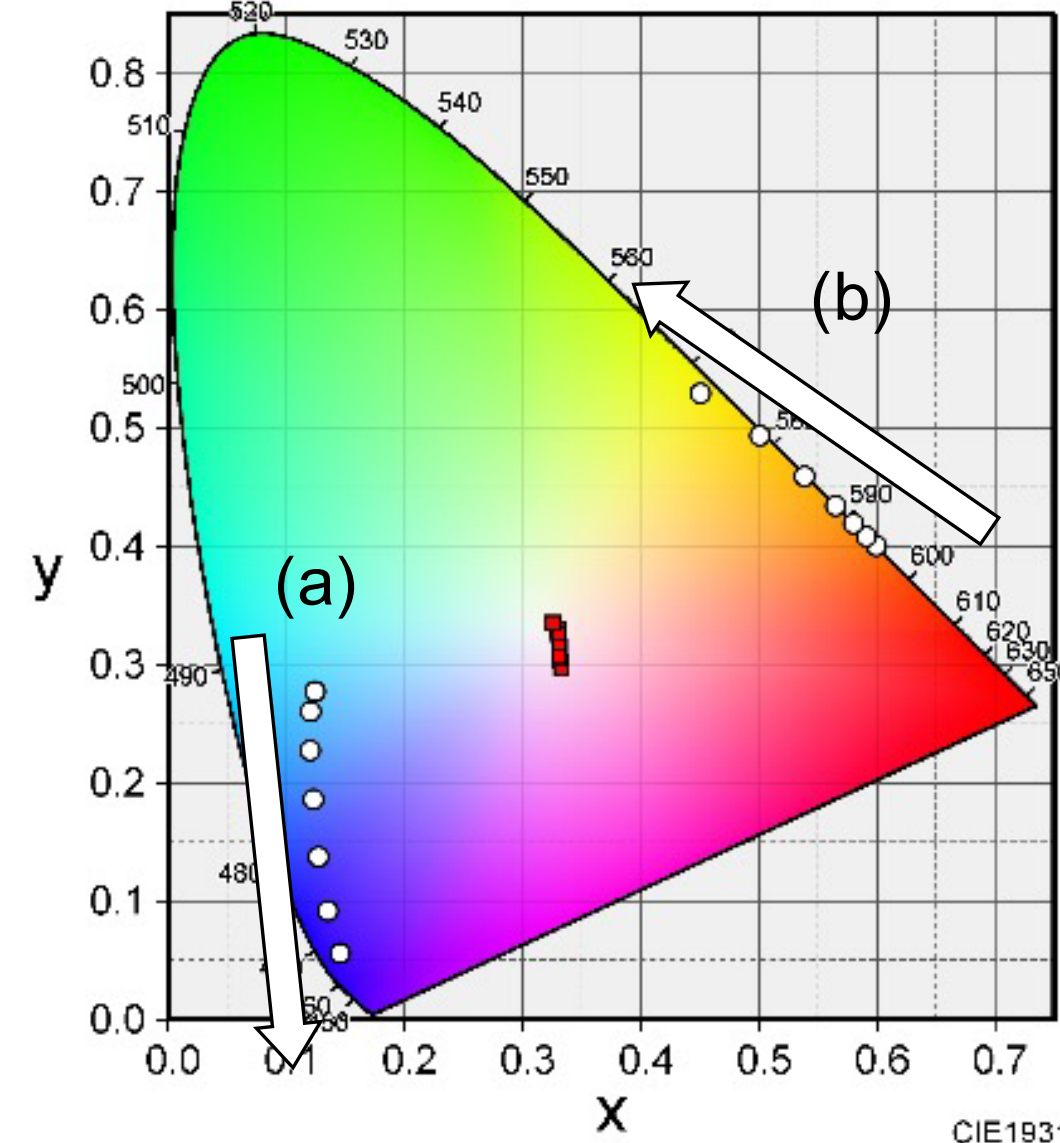
- 分光透過特性
- 太陽電池の外部量子効率

結果 反射ピークを490 nm, 630 nmに配置することで、入射角30°まで白色の反射光を維持

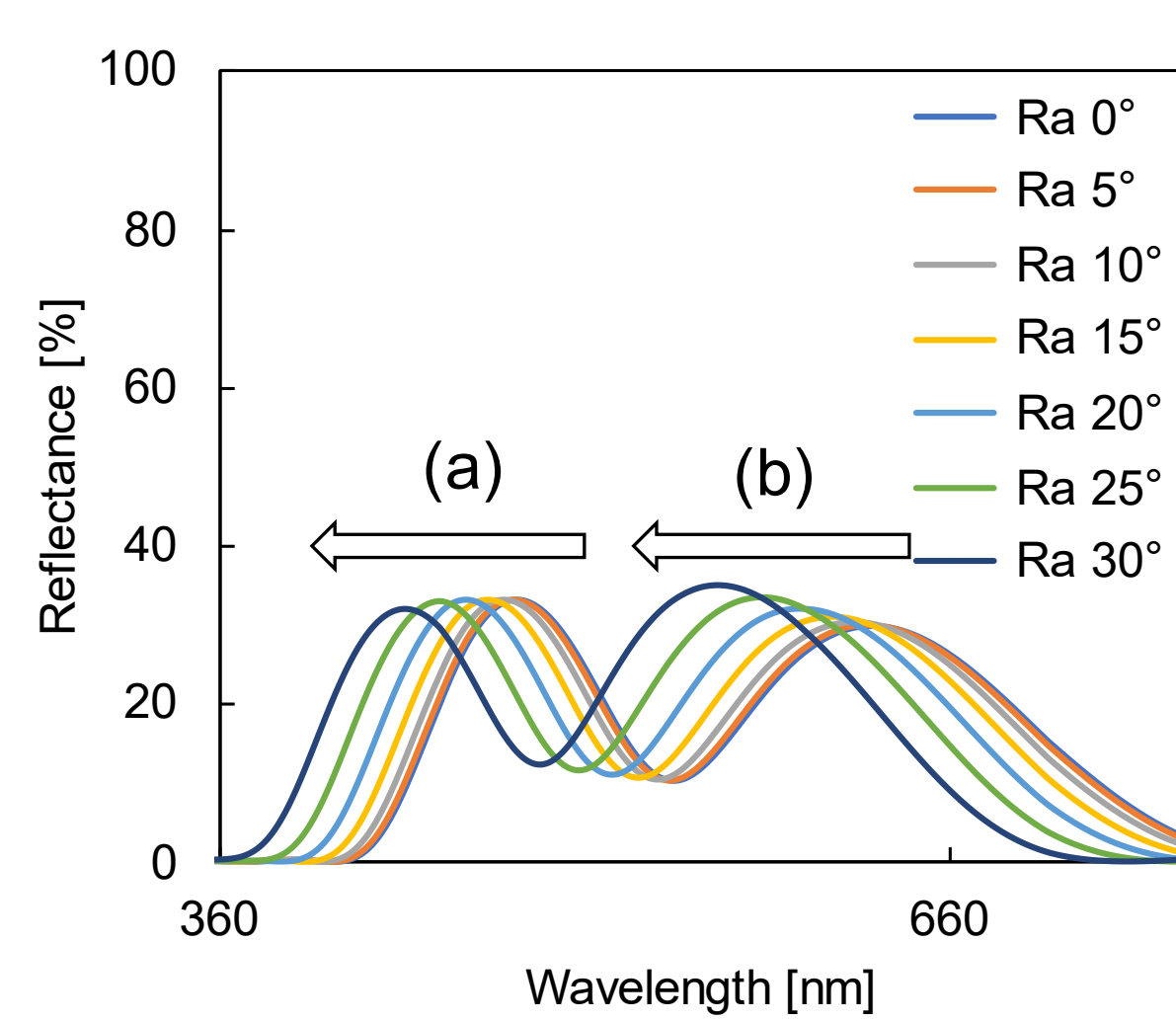
分光反射特性 (計算値)



色座標 (計算値)

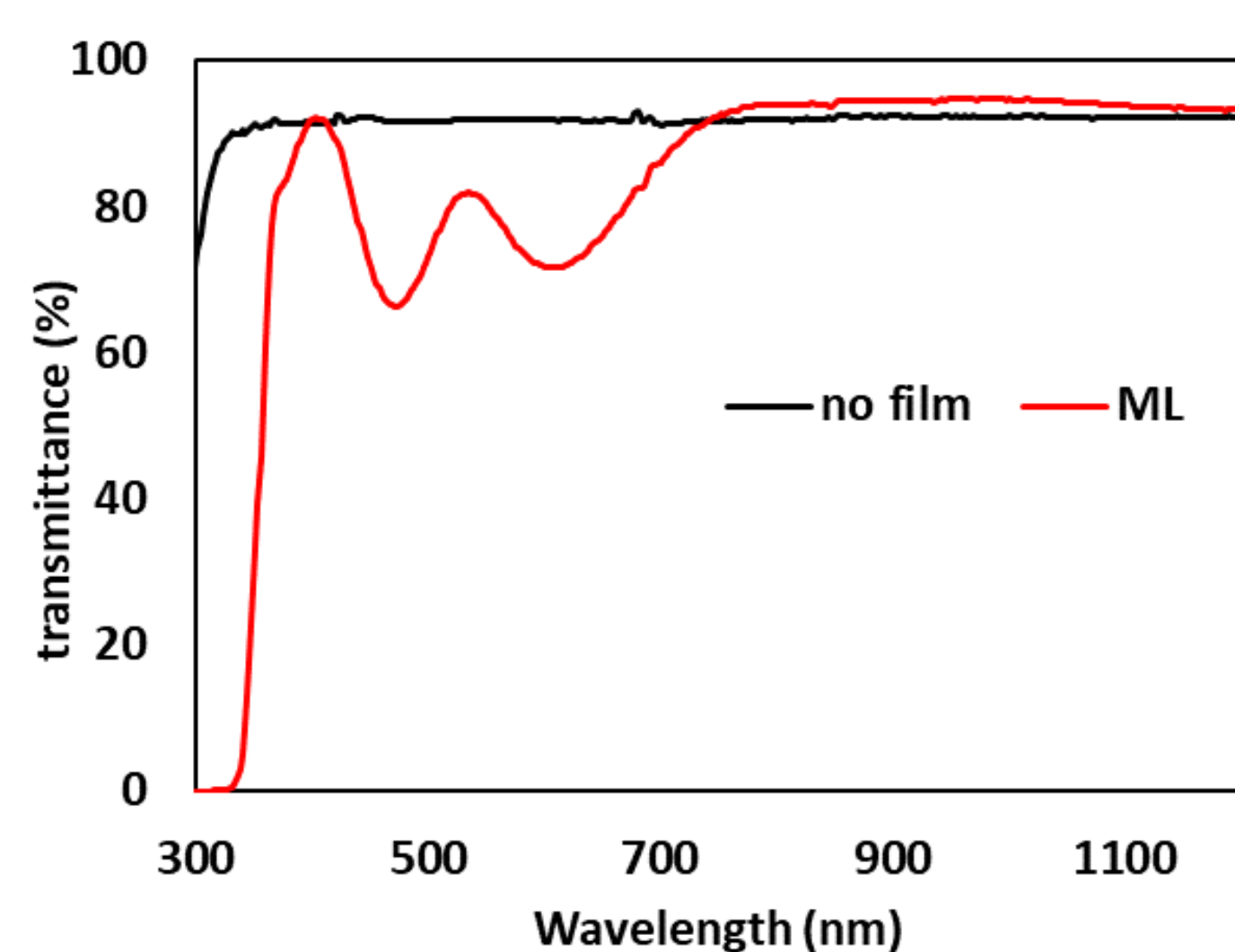


分光反射特性の角度依存性

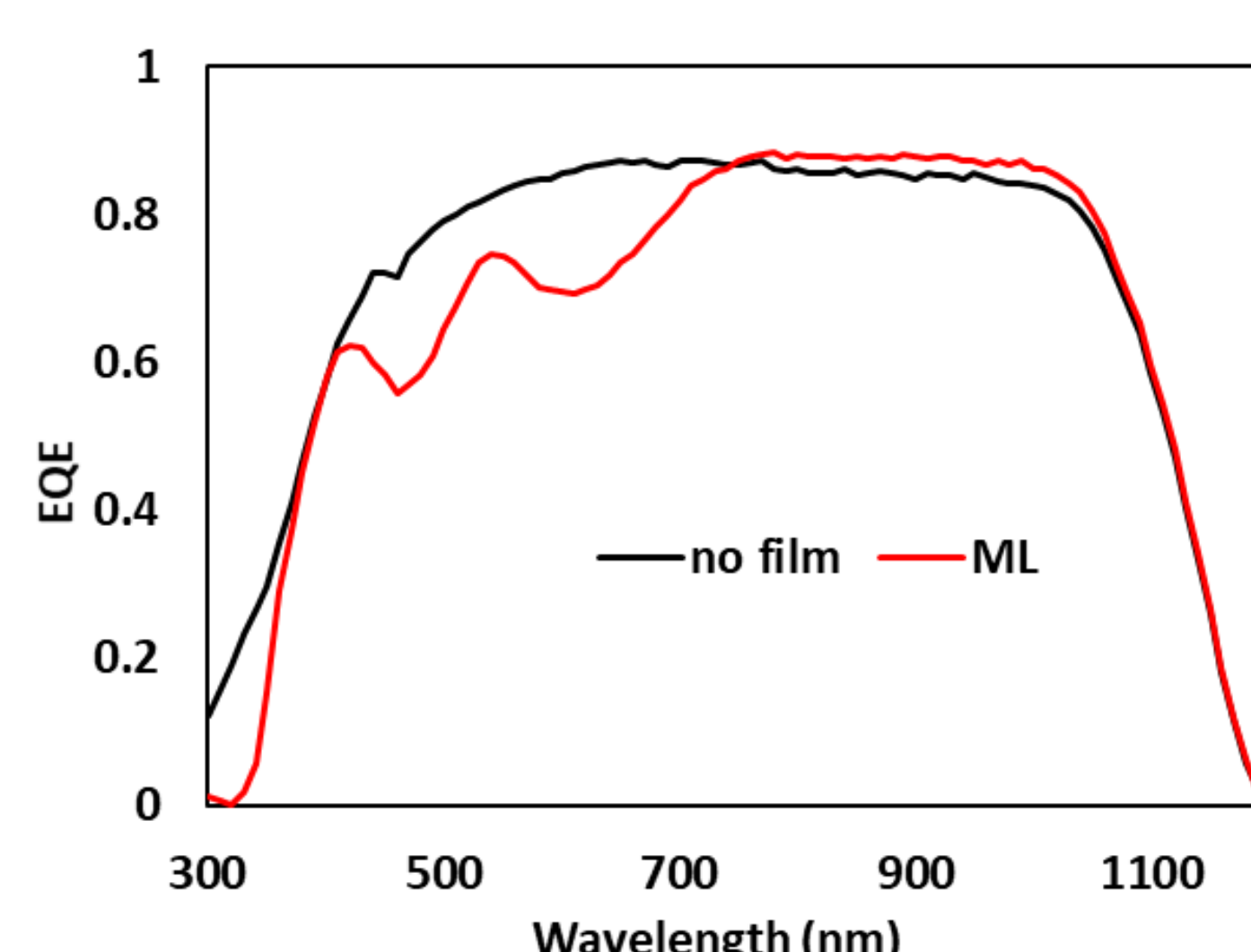


- 入射角が増加しても、2つのピークの補色関係を保ち、白色を維持
- ピーク以外での反射率を抑制 ⇒ 発電効率低下を低減

分光透過特性 (測定値)



外部量子効率 (測定値)



設計した光学薄膜をカバーガラスに成膜し、分光透過特性と太陽電池の外部量子効率を測定

- 反射率のピーク位置で透過率・外部量子効率が低下
- 外部量子効率変化から計算した効率低下量: **5.9%** ⇒ 先行研究と比べて効率低下を抑制

結論

- 490 nm, 630 nmに反射ピークをもつ光学薄膜の光学設計を行い、入射角30°まで白色の反射光を維持した。
- 設計した光学薄膜を成膜し、外部量子効率変化から求めた太陽電池の発電効率の低下量は5.9%であった。

参考文献

- [1] C. Ballif, et al., Nature Energy, 3, 438 (2018).
- [2] V. H. L. Caer, et al., International Patent 045141A2 (2013).
- [3] J. Escarre, et al., IEEE 42nd PVSC, 179 (2015).
- [4] A. Soman, et al., Solar Energy, 181 (2019) 1.

謝辞 本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施された (JPNP20015)。

久保田 聡^{1,2}, 足立 零生^{1,2}, 端無 元輝¹, 徐 志豪², 齋 均², 近藤 道雄^{1,3}, 和田 裕之¹
1. 東京工業大学, 2. 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター, 3. 早稲田大学



結晶シリコン太陽電池モジュールの劣化と寿命予測技術

研究の背景

- 第6次エネルギー基本計画において、2030年の電源構成比率として36~38%の再生可能エネルギーの導入目標が掲げられている。このうち太陽光発電は14~16%であり、再生可能エネルギーの主力電源化における役割は非常に大きい。
- 太陽光発電が主力電源として機能するためには、メガソーラーをはじめ、今後導入が見込まれる水上、空港、工場屋根、ビル壁面などの設置場所での長期安定稼働が求められる。
- 結晶シリコン太陽電池モジュール(パネル)は、初期劣化、経年劣化の順に劣化が進行し、最終的に寿命に至る。太陽電池モジュールの試験に関して、JIS61215では「JIS61215で実施する一連の試験の目的は、PVモジュールの電氣的及び熱的特性を決定し、かつ、費用及び時間の制約内で可能な限り、PVモジュールが一般の屋外の気候に長時間さらされても耐えることを確認することである。適格性が確認されたPVモジュールの実際の期待寿命は、PVモジュールの設計、使用環境及び運転される条件に影響を受ける。」¹⁾とされているところ、**太陽電池モジュールの寿命に関する規格がない**。太陽光発電が社会インフラとして機能するためにはモジュールの生涯発電量が重要であり、寿命の評価・予測が必要となる。

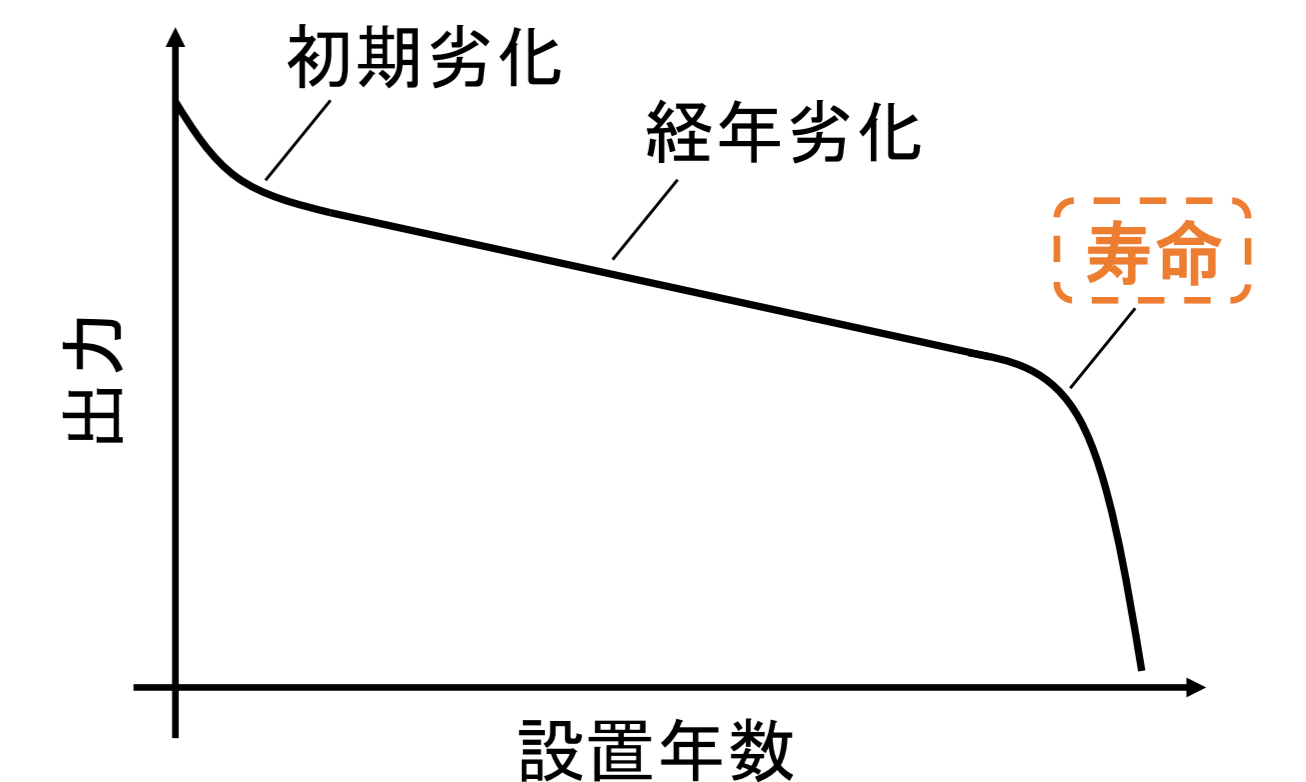


図1 結晶Si太陽電池モジュールの劣化挙動

結晶シリコン太陽電池の湿熱ストレス加速試験による寿命の評価

- 図2、図3は太陽電池モジュールの湿熱ストレスにともなうFF特性の推移である。モジュールは封止材EVAが異なる2種類を準備し、TypeAとTypeCが一般のEVAを、TypeBとTypeDが高耐久EVAを用いている。加速試験は図に示すストレス水準で行った。図2には、試験時間に対応したモジュールのEL像を示した。
- 湿熱ストレス寿命の評価は屈曲が現れる試験時間まで行う必要がある。**IEC規格試験²⁾の条件である85°C85%RH 1000時間(図2(b)のオレンジ矢印)を超えても屈曲劣化が観測できなかったTypeBにおいても、95°C95%RHでは屈曲変化が顕在化した。**
- 図2のEL像において、試験時間に伴いバスバー周辺に暗部が発生している。湿熱ストレスによる劣化は電極の腐食に起因することが多く、一度劣化が始まると急速に進行するのが特徴である。EVA中の酢酸によってAg電極/Si基板界面のガラス層が腐食され、FF特性が急激に低下することが報告されている³⁾。

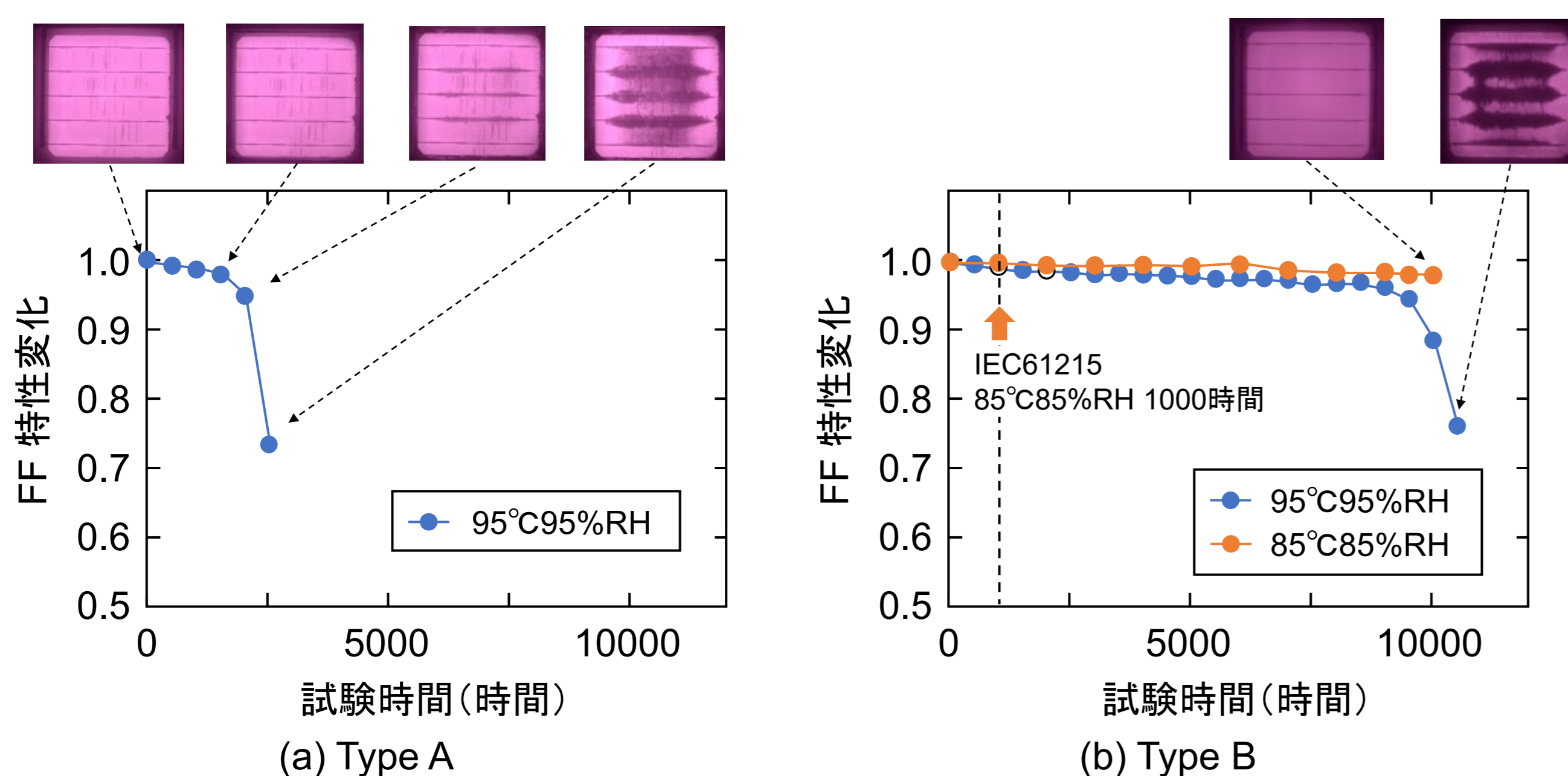


図2 太陽電池モジュール(PERC,1セル)の湿熱ストレスによるFFの変化率。縦軸は試験前のFFを1.0としている。

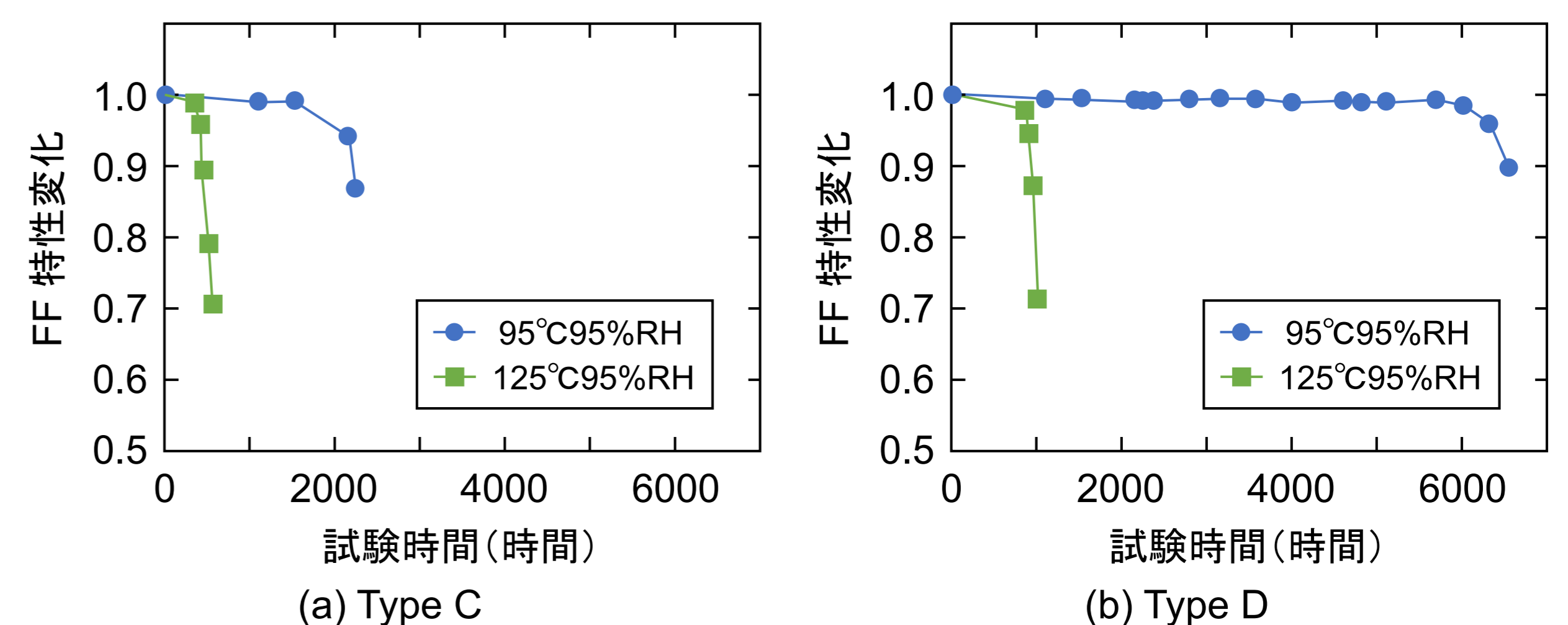


図3 太陽電池モジュール(AHBSF,1セル)の湿熱ストレスによるFFの変化率。縦軸は試験前のFFを1.0としている。

結晶シリコン太陽電池モジュールの寿命予測

- 加速試験の結果をもとに市場での太陽電池モジュールの寿命を予測する技術が開発されている⁴⁾。寿命の予測に用いる加速試験の必要条件として、図2と図3で示したように、**①寿命劣化が観測されるまで(屈曲が確認できるまで)実施すること、②2水準以上のストレス条件で実施すること**、が挙げられる。後者はアレニウス則に従い活性化エネルギーの算出に用いられ、劣化メカニズムの考察と寿命劣化予測の物理的根拠となる。さらに、**③複合ストレス試験を実施すること**が挙げられる。市場に設置するときの実環境では湿熱に加えてUV光など複数の環境ストレスが同時に掛かっているため、市場での寿命劣化の予測には不可欠である。
- 太陽光モジュール寿命予測の報告(図4)に図3の湿熱ストレスによる寿命の結果(FF10%低下する試験時間、図中の●および■)をプロットしたところ、従来の予測⁵⁾に整合する結果が得られた。図中×でIEC規格試験の条件を示す。

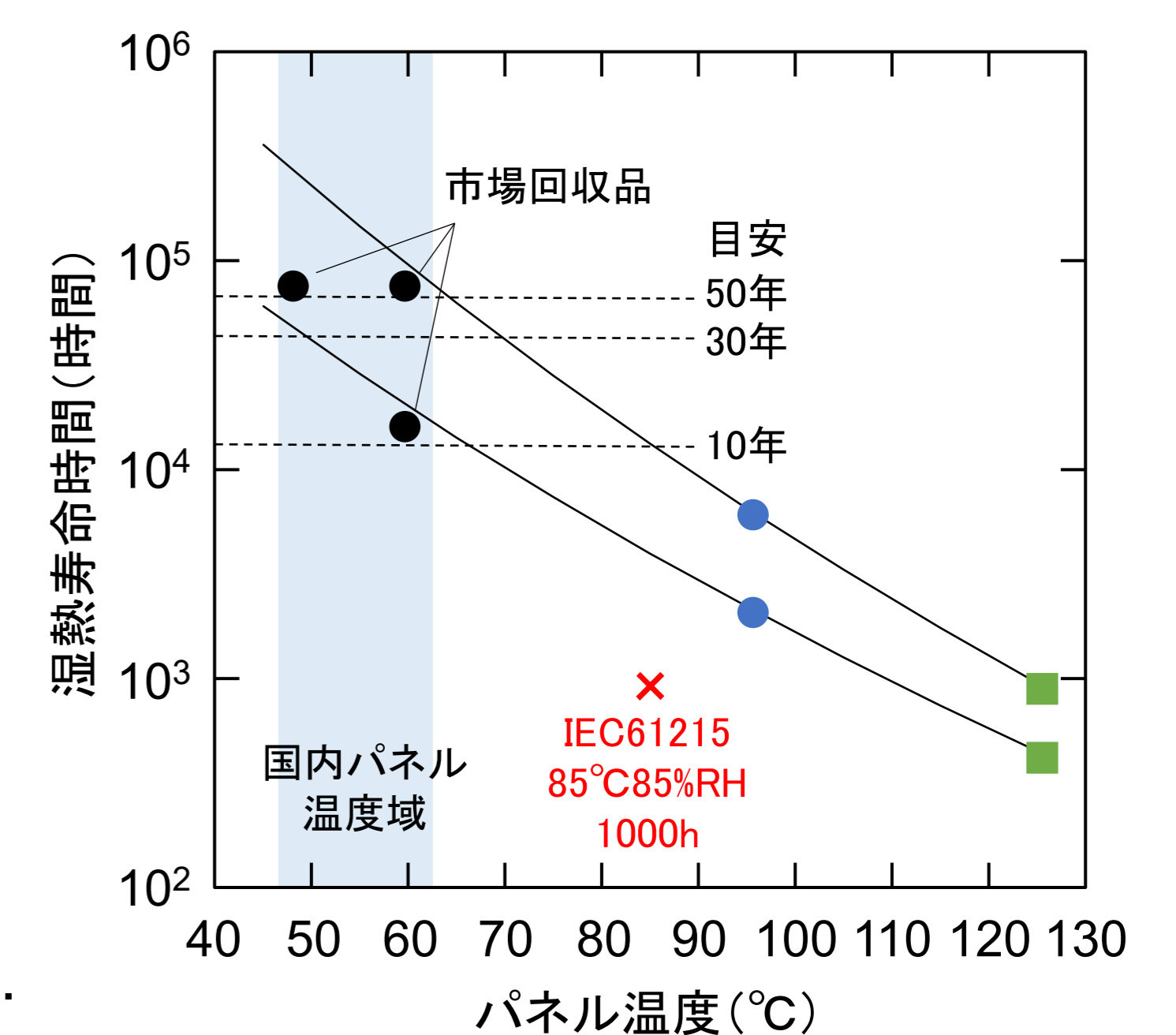


図4 加速試験にともなう太陽電池モジュールの寿命予測。参考文献5のFig.1を加工。

結論

- 太陽電池モジュールの湿熱ストレス加速試験によるFF特性変化の結果をもとに寿命について議論した。
- 寿命を定量的に議論するためには、FFの屈曲変化が現れる試験時間まで観測するなど、適正な加速試験が必要である。
- 長寿命で生涯発電量が多いパネルの開発には、適正な加速試験に基づく寿命の評価とメカニズムの議論が必要である。

謝辞

- 本研究において各種試験を行った伊野裕司氏(元産総研)に感謝する。

参考文献

- JIS C 61215-1:2020 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 — 第一部:試験要求事項(日本規格協会)。
- IEC61215-2 Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval- Parts: Test procedures (INTERNATIONAL ELECTROCHEMICAL COMMISSION)。
- 新楽浩一郎,「結晶シリコン太陽電池パネルの劣化寿命予測」(加速試験の実施とモデルを活用した製品寿命予測, 技術情報協会)p.145 (2023)。
- 特許6811974号, 特許6818307号, 特許6837649号
- 新楽ら, 第67回春季応用物理学学会, 14p-A402-7 (2020)。

再生可能エネルギー研究センター太陽光モジュールチーム: <https://www.aist.go.jp/fukushima/ja/unit/pmac.html>

棚橋克人¹, 白澤勝彦¹, 平藤駿介², 吉田篤司², 伊藤憲和², 立花福久¹, 高遠秀尚¹, 新楽浩一郎²
1. 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター, 2. 京セラ株式会社



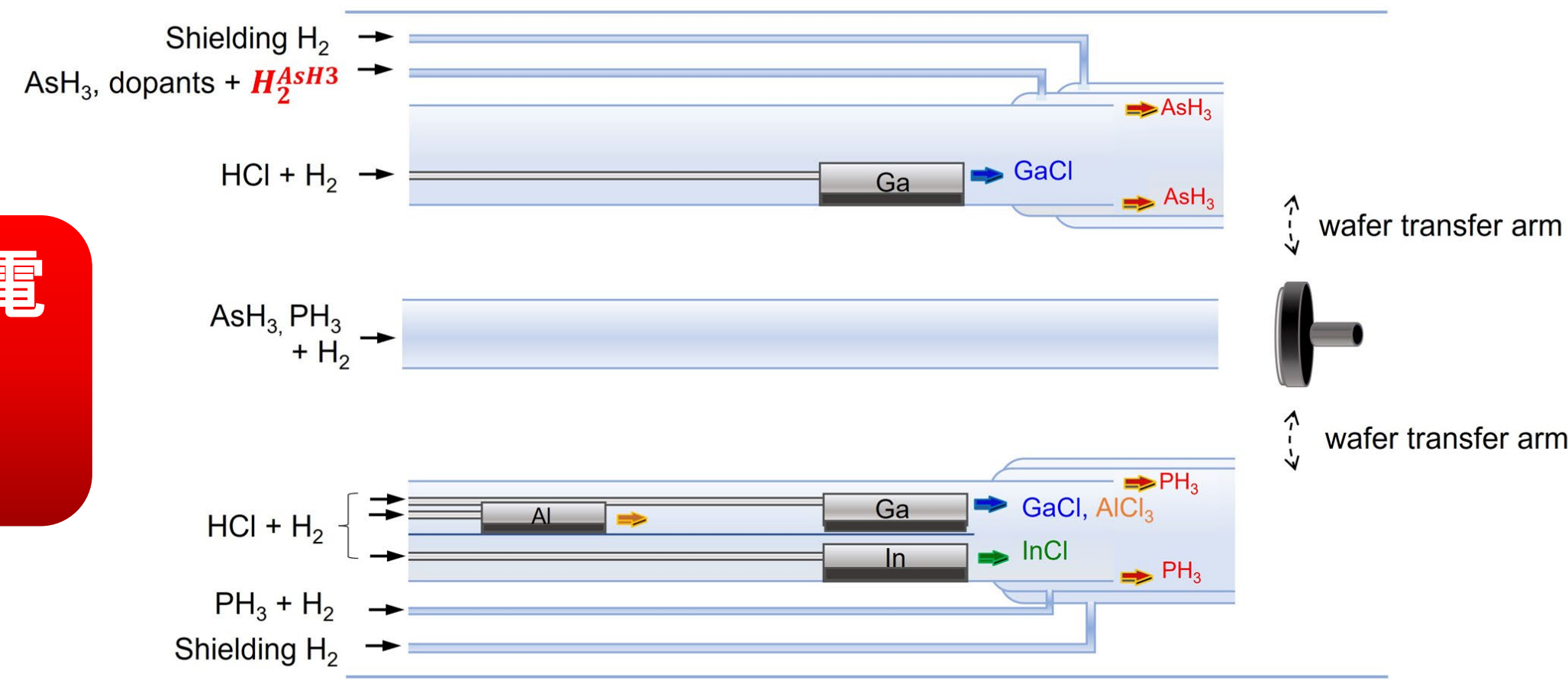
HVPE法によるInGaP太陽電池の超高速成長

研究の目的

ハイドライド気相成長(HVPE法) [1,2]

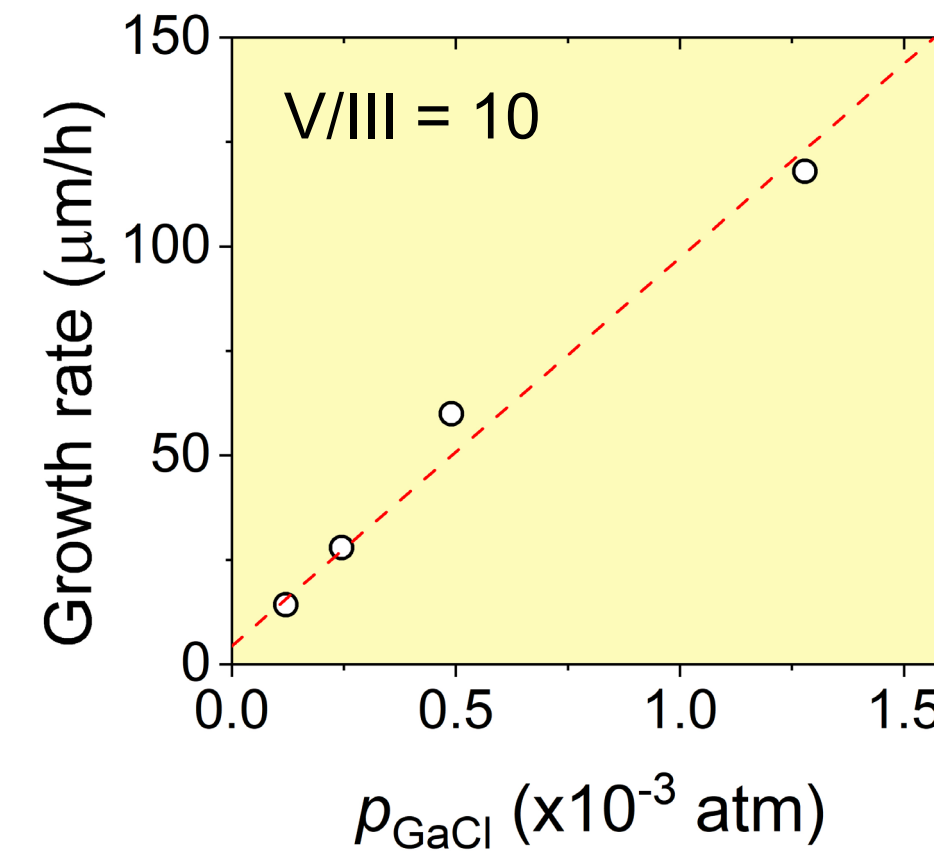
- III族の金属塩化物とV族の水素化物ガスを基板上で反応させることで、結晶成長を成膜する手法
- 従来の「有機金属気相成長(MOVPE)法」と比較して、原料コストの削減や成長の高速化が期待
- GaAs太陽電池では300 $\mu\text{m/h}$ までの高効率・超高速セルを実証[3]

今回、InGaP太陽電池[4]の超高速成長に取り組んだ

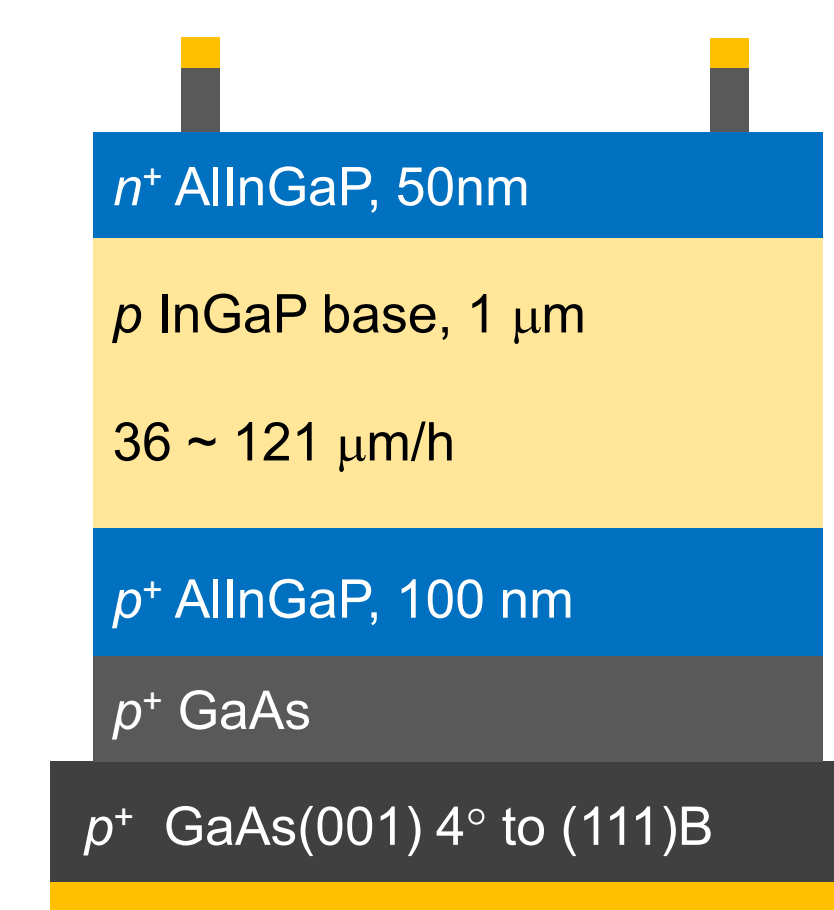


実験

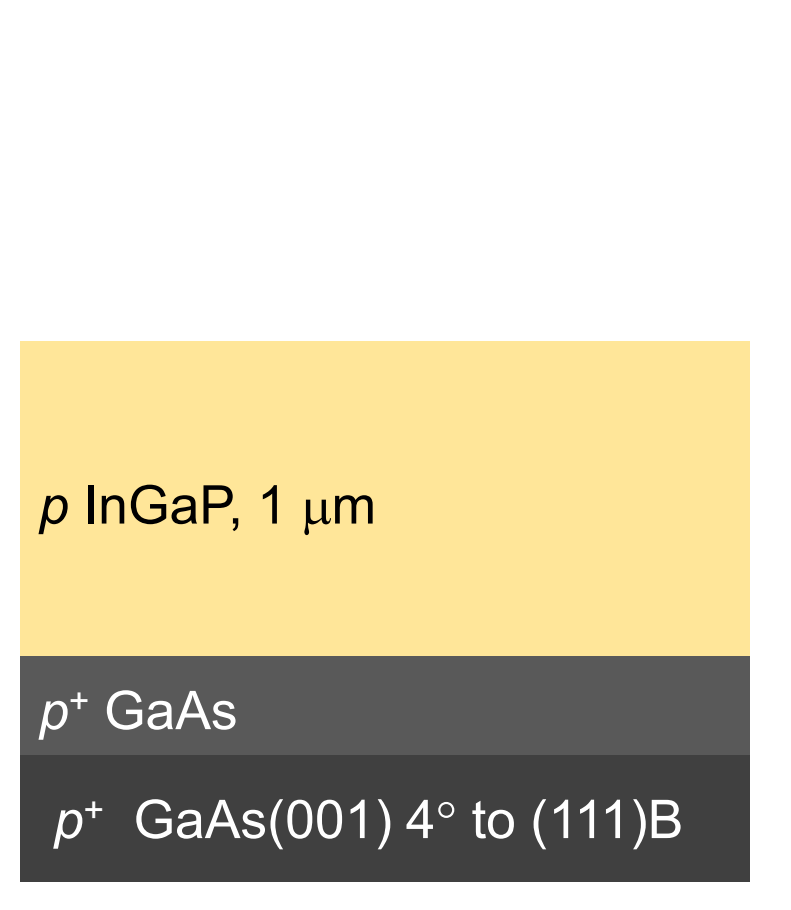
InGaPの成長速度



太陽電池評価用



表面観察用



- 異なる成長速度で作製したInGaP太陽電池の評価を行った。(p-InGaPベース層以外の成長条件は固定)

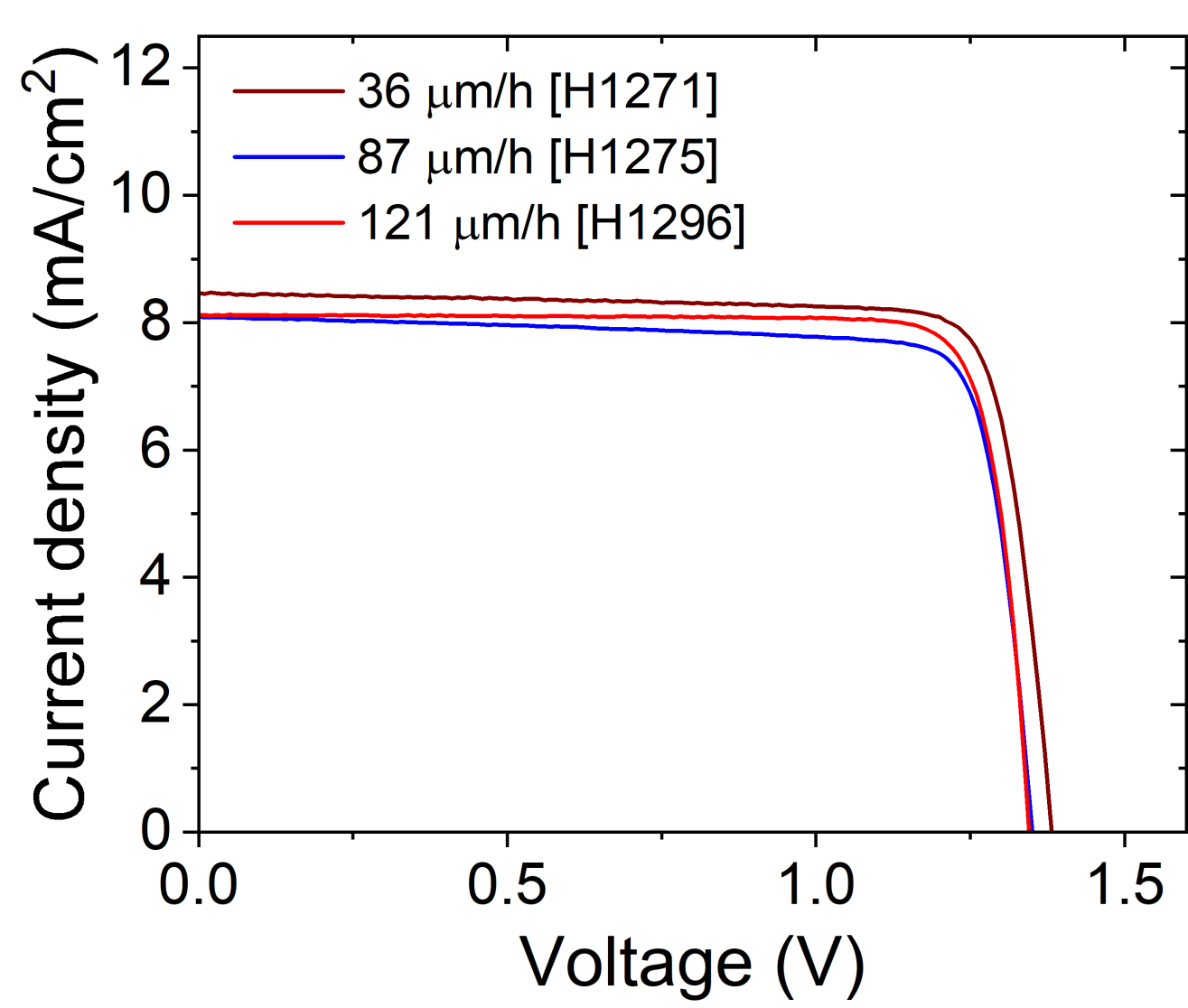
成長速度 ($\mu\text{m/h}$)	ベース層キャリア濃度 (C-V測定) (cm^{-3})
36 [H1271]	5.4×10^{16}
87 [H1275]	2.2×10^{16}
121 [H1296]	1.5×10^{16}

評価

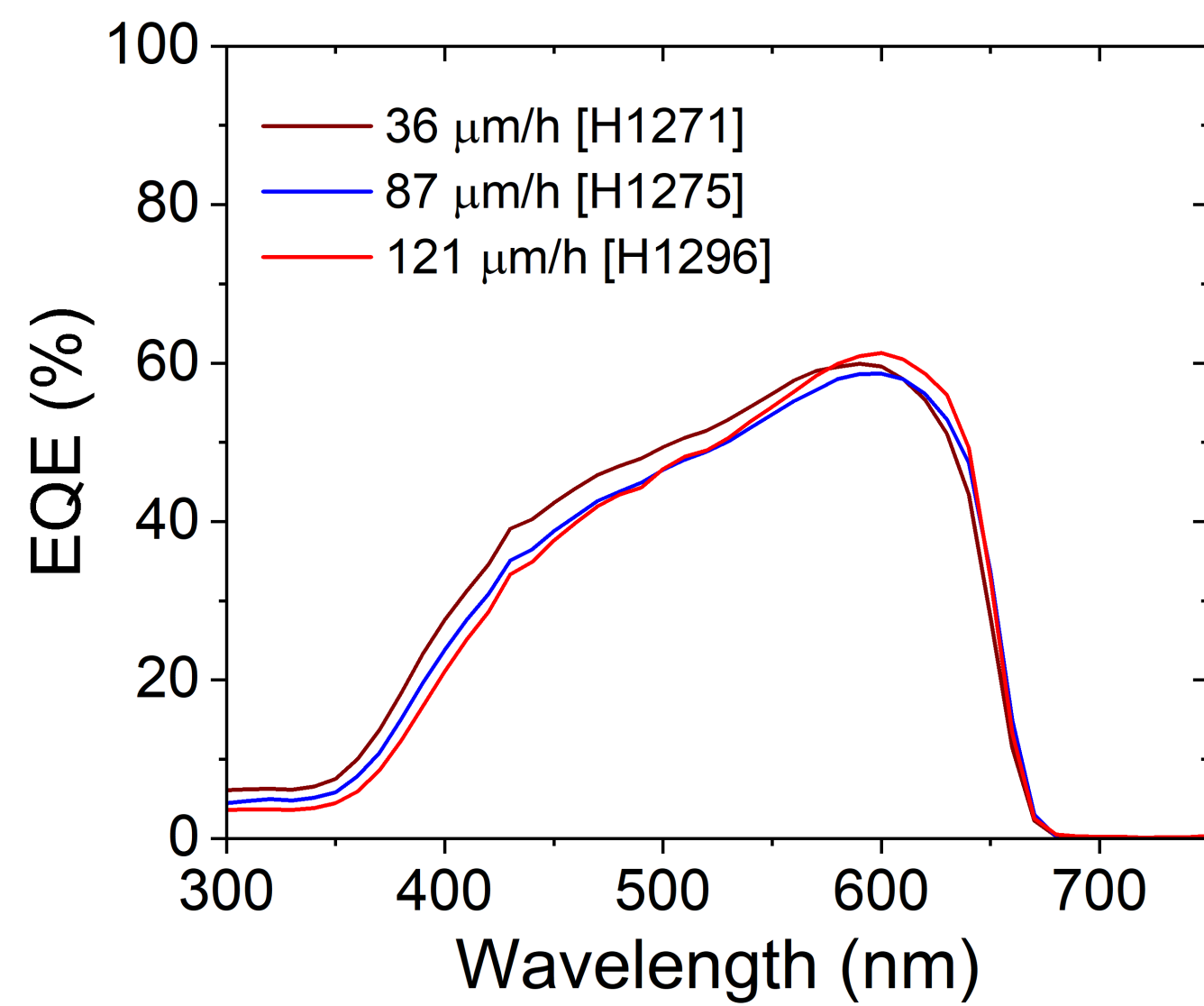
- I-V測定
- 外部量子効率測定(EQE)
- 原子間力顕微鏡(AFM)
- 室温フォトルミネッセンス(PL)

結果① 太陽電池特性

J-V (AM1.5G, 1sun)



EQE

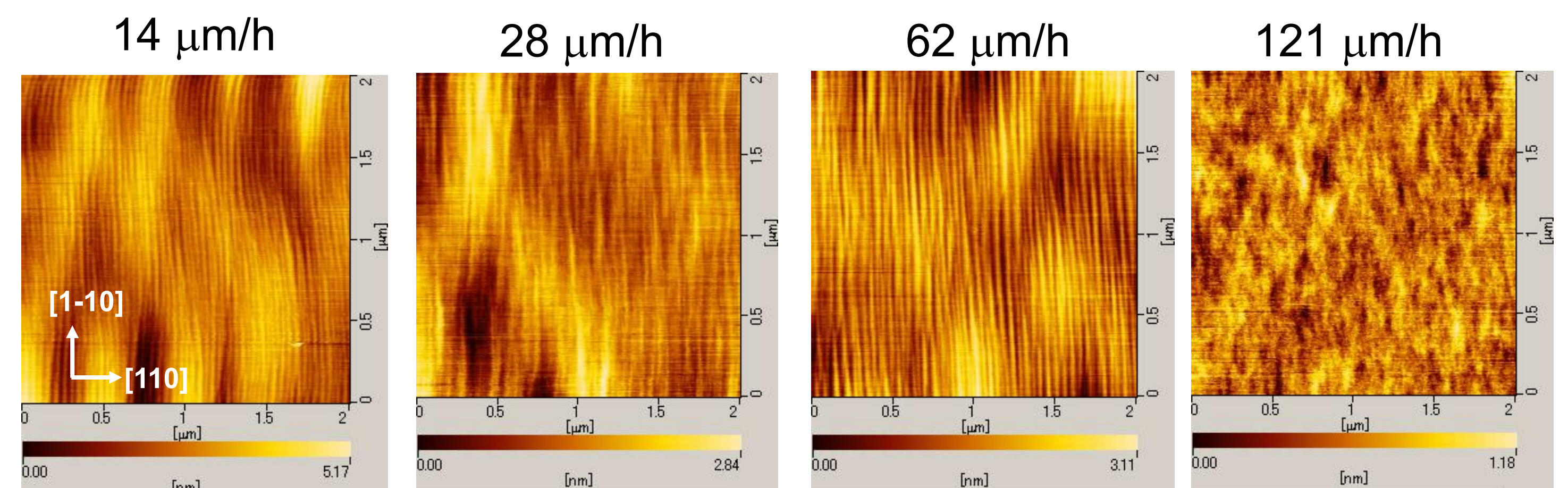


成長速度 ($\mu\text{m/h}$)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
36 [H1271]	8.46	1.38	0.834	9.76
87 [H1275]	8.38	1.35	0.829	9.38
121 [H1296]	8.11	1.34	0.855	9.29

- 36 ~ 121 $\mu\text{m/h}$ の成長速度でほぼ同等のEQE特性
- 一方で、高速成長に従って、 J_{sc} 、 V_{oc} が若干低下する傾向

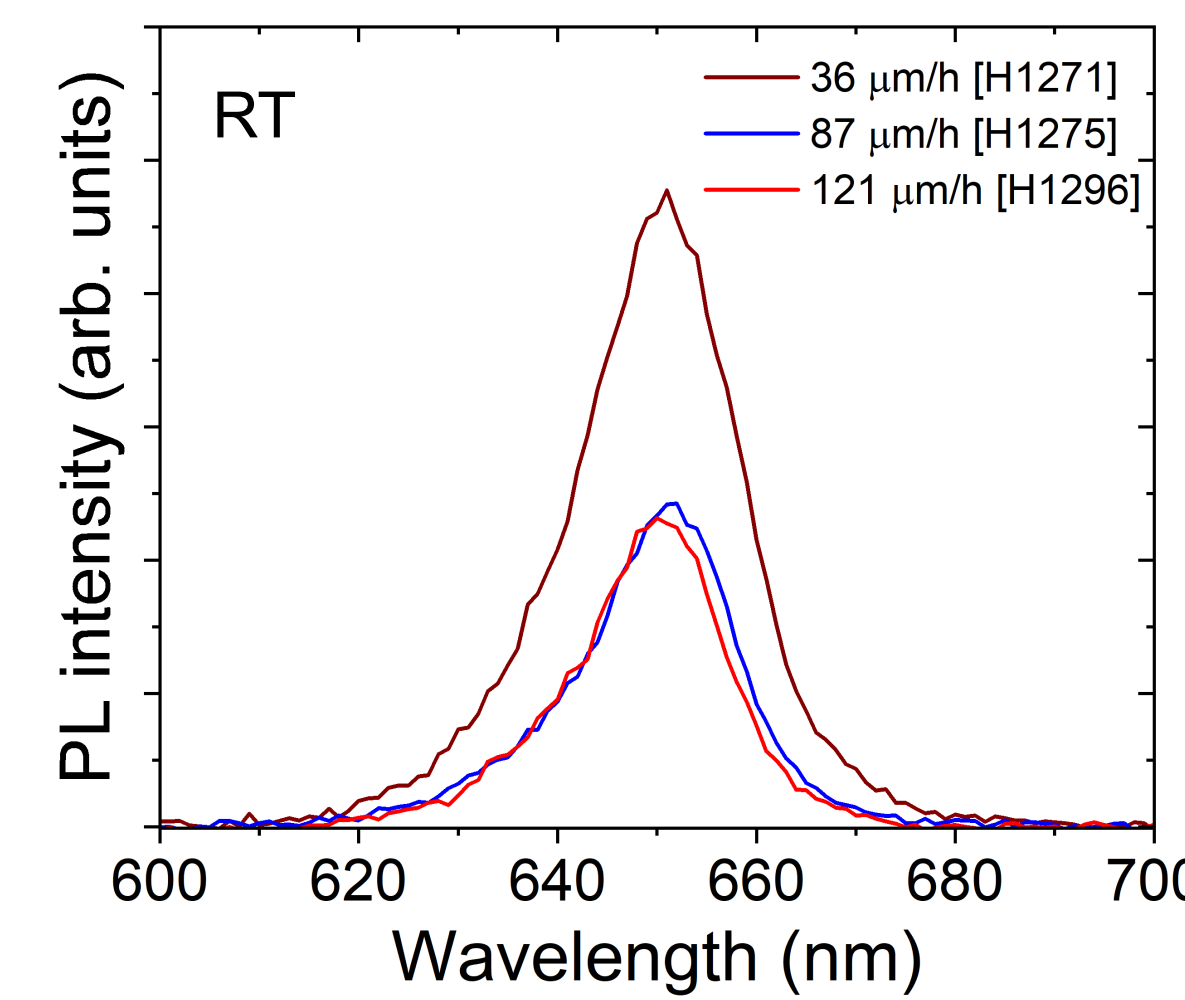
結果② 表面構造、発光特性

AFM(2 $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$)



- 最も高速な121 $\mu\text{m/h}$ では表面ステップが消失したが、高速成長による異常成長は見られない

室温PL



成長速度 ($\mu\text{m/h}$)	ピーク波長 (nm)	Bandgap (eV)	FWHM (meV)	Intensity ratio
36 [H1271]	651.0	1.892	44.34	1
87 [H1275]	652.0	1.889	42.07	0.489
121 [H1296]	650.0	1.895	41.48	0.465

- 全てのセルでバンドギャップ、半値幅に顕著な差はなかった。
- 一方で高速成長ほど発光強度が減少しており、結晶性が低下している可能性が考えられる

結論

HVPE法を用いたInGaP太陽電池の超高速成長技術を開発

- InGaPセルの報告として最も高速な121 $\mu\text{m/h}$ までの超高速成長を実現
- 表面構造解析からは高速化に伴う異常成長は見られないが、 J_{sc} 、 V_{oc} 、PL発光強度が低下しており、結晶性が低下している可能性が考えられる。
- 今後は、成長条件の更なる最適化による性能向上と結晶性が低下する要因について考察を深める。

参考文献

- R. Oshima, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **57** 08RD06 (2018).
- 大島隆治, 他, *応用物理* **89**, 333 (2020).
- R. Oshima, et al., *Crystals* **13** 370 (2023).
- Y. Shoji, et al., *Solar RRL* **6**, 2100948 (2022).

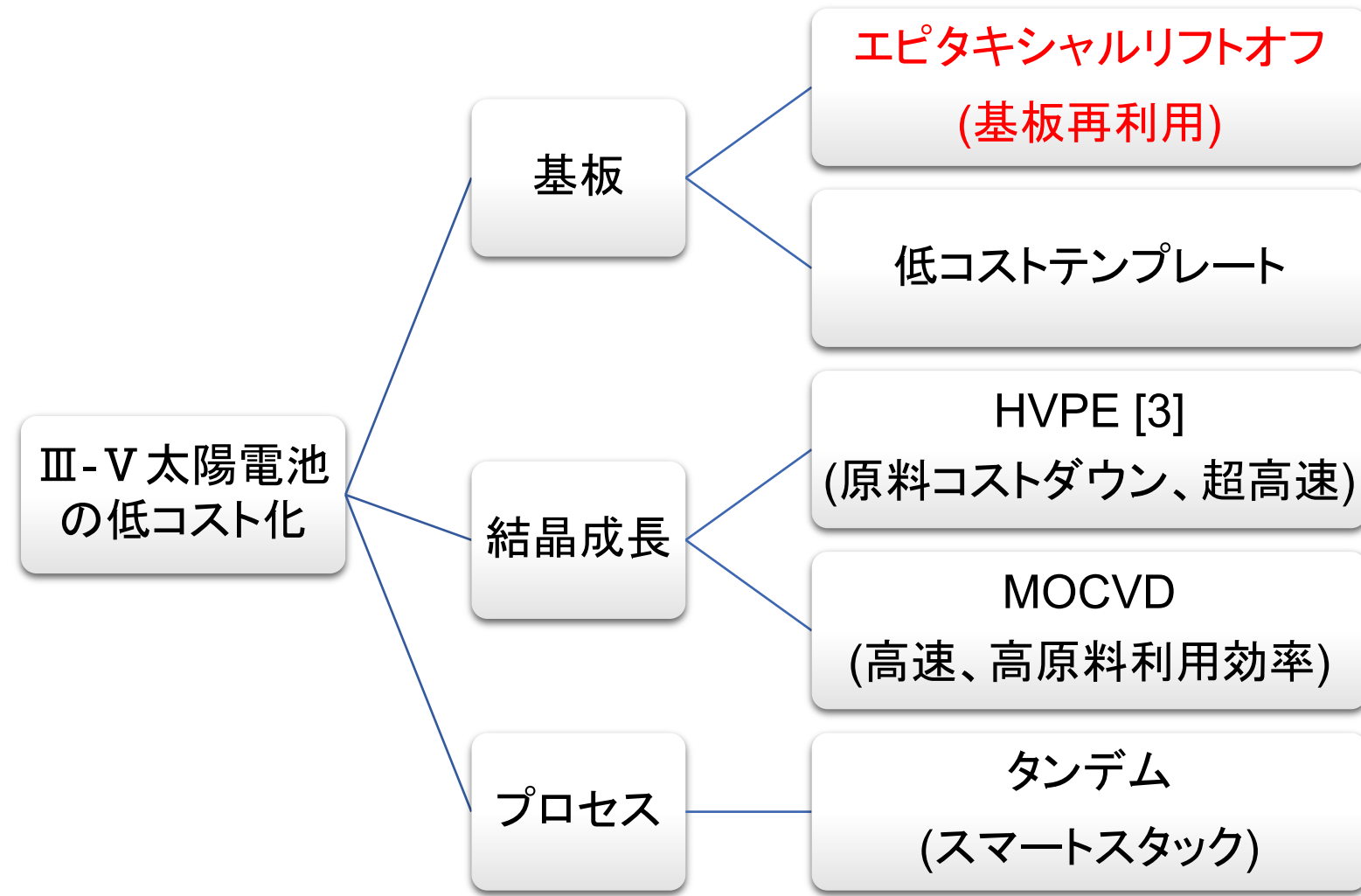
謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP20015)の結果得られたものである。

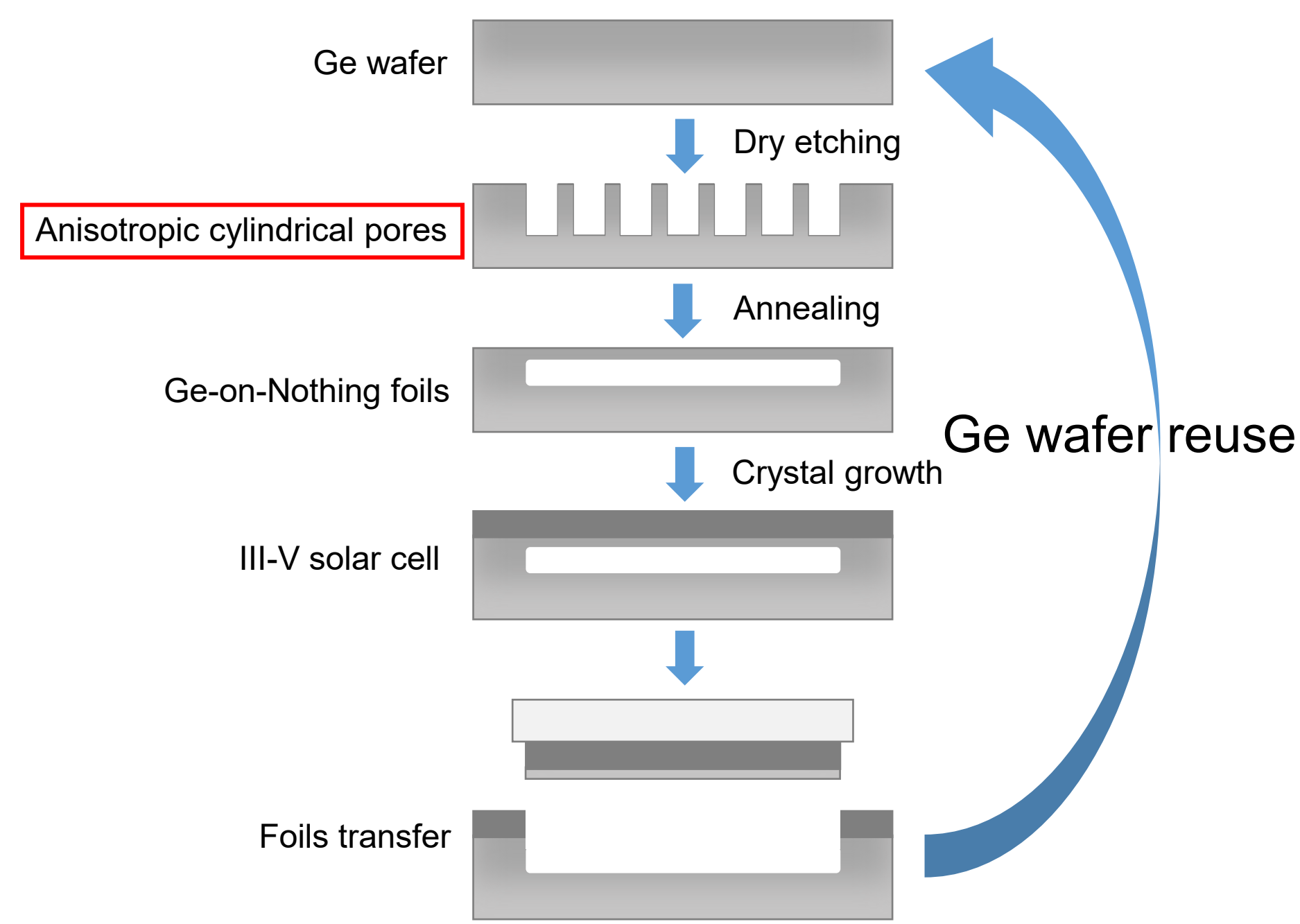
III-V太陽電池の低コスト化に向けた Ge基板再利用技術の開発

研究の目的

- III-V太陽電池では超高効率を実現されているが、**高い製造コスト**により応用先が限定的
- 製造コストのうちで基板コストは大きな割合を占めており、**基板再利用を通じた大幅なコストダウン**が必須
- Ge基板は大口徑ウエハへ展開が容易であり量産性に好適 [1] [2]
- 今回、Ge基板リサイクル技術の構築に向けて、報告例が少ないGeの**異方性エッチング**技術をICP-RIEで検討

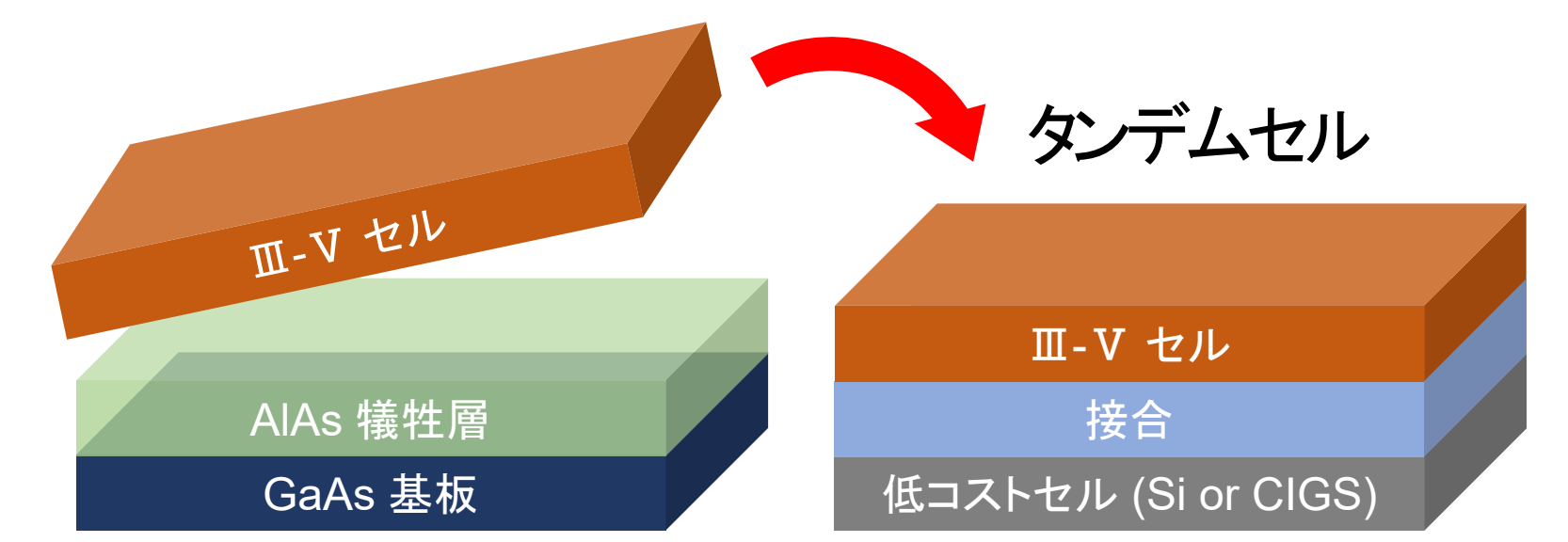


本研究のアプローチ Germanium-on-Nothing (GON)



- 既に電子デバイス応用されているSilicon-on-Nothing (SON) 技術をGeに適用 [4] [5]
- GON構造のために必要な**微細加工技術**を本研究で検討

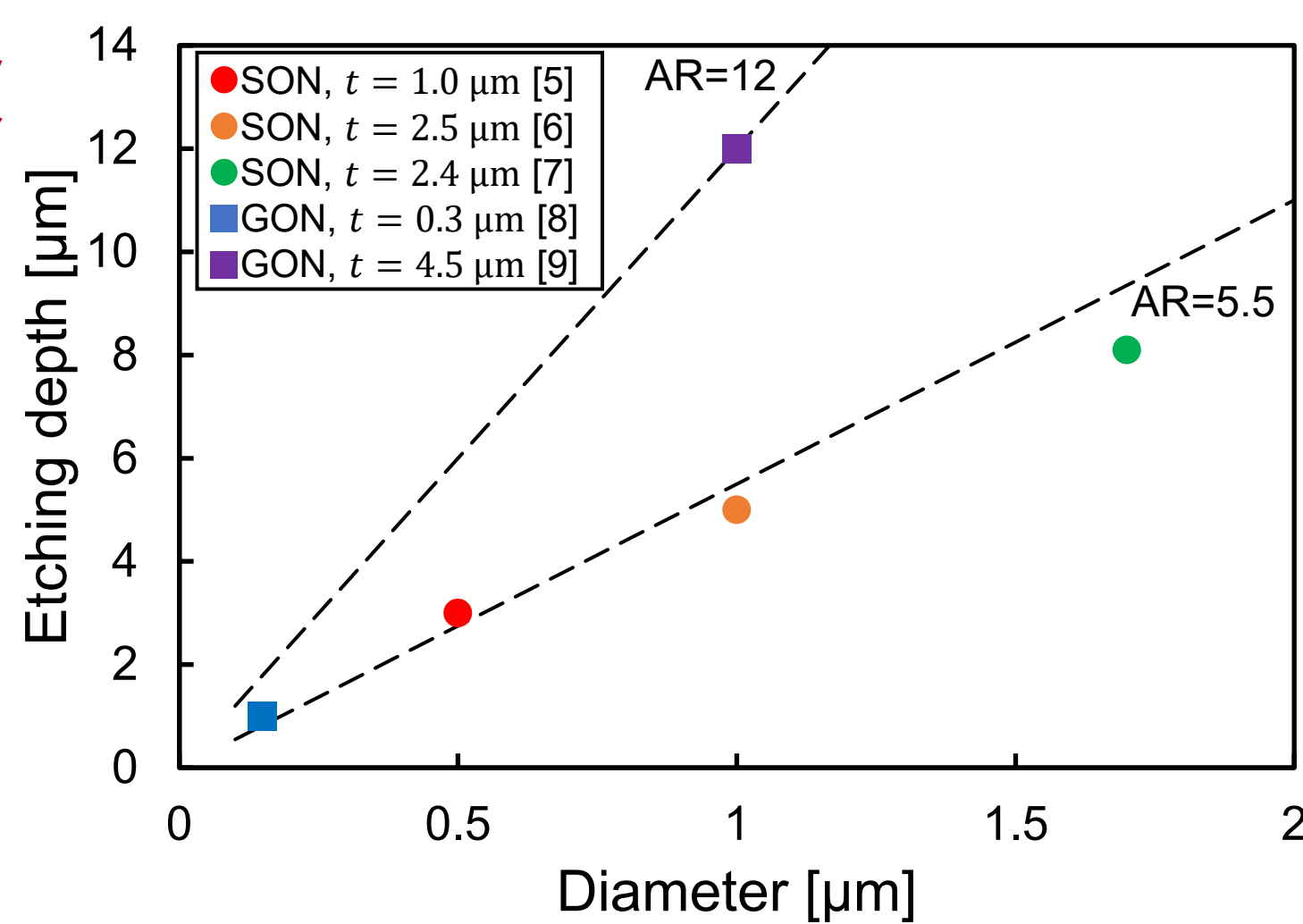
従来の方法 Epitaxial Lift-Off (ELO)



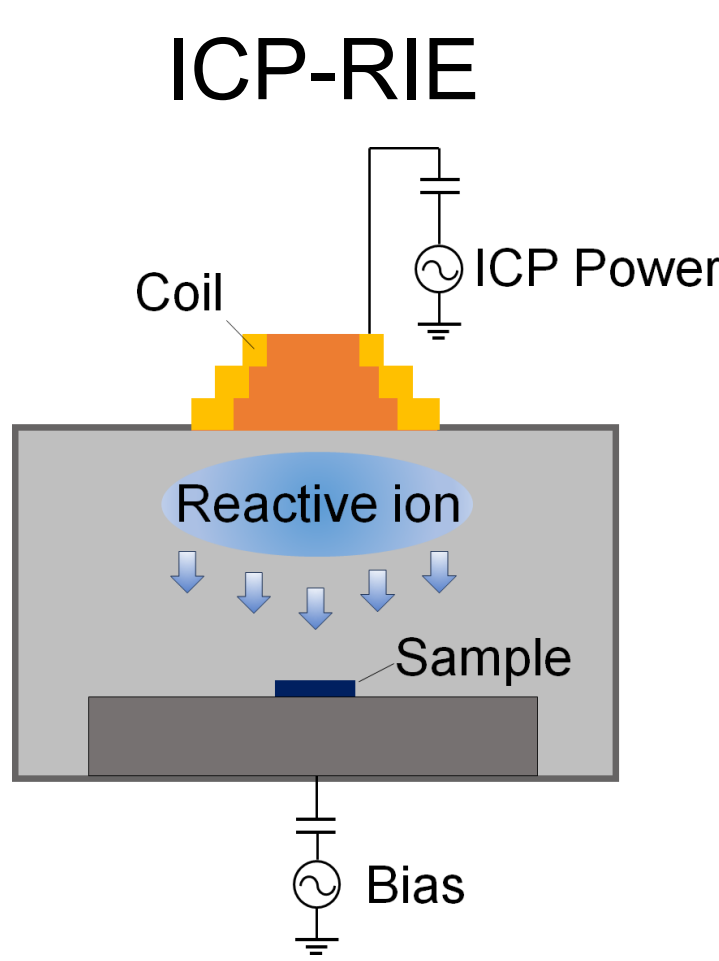
- エッチングが非効率的 (数時間要する)
- 大面積化が困難
- 反応選択性の問題
- HF溶液の危険性

GON技術により回避

実験

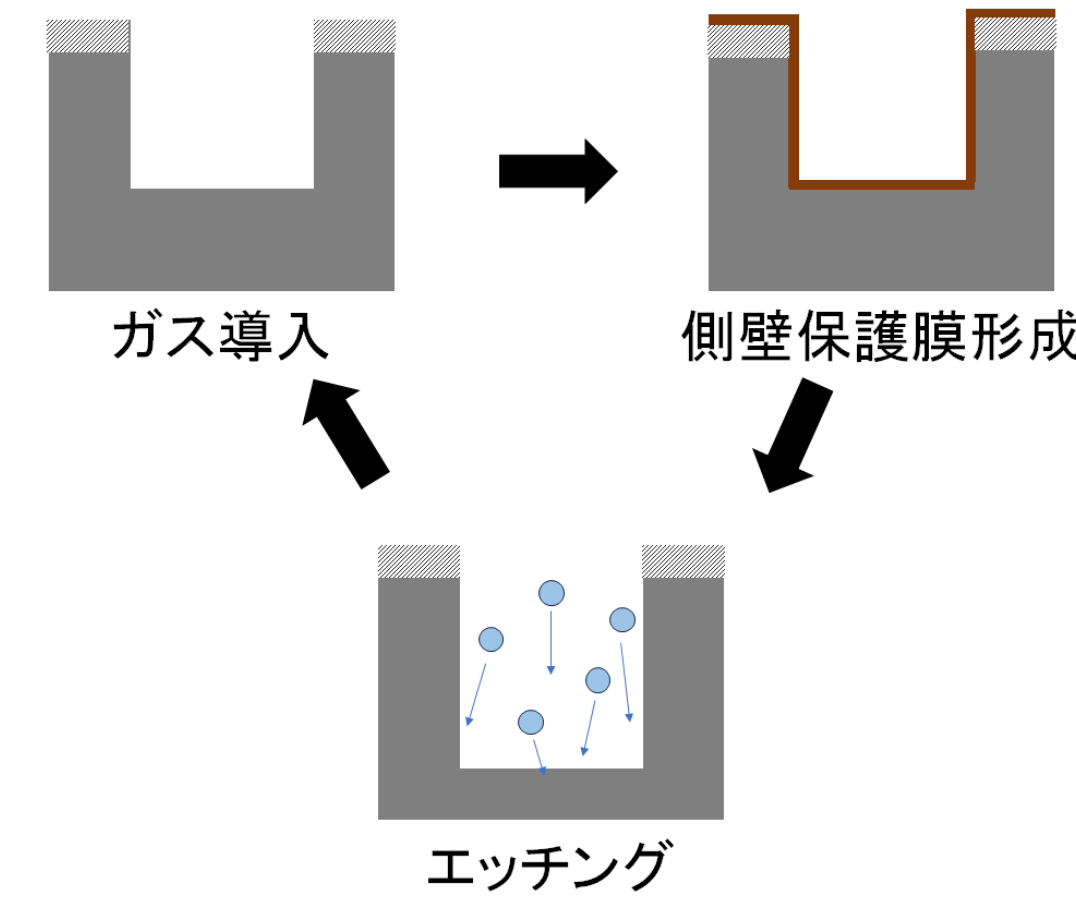


- 細孔占有率(35%~45% [8])・アスペクト比AR(5.5~12 [9])の調整によりGON膜厚(t)が制御可能
- SONよりも高アスペクト比が必要

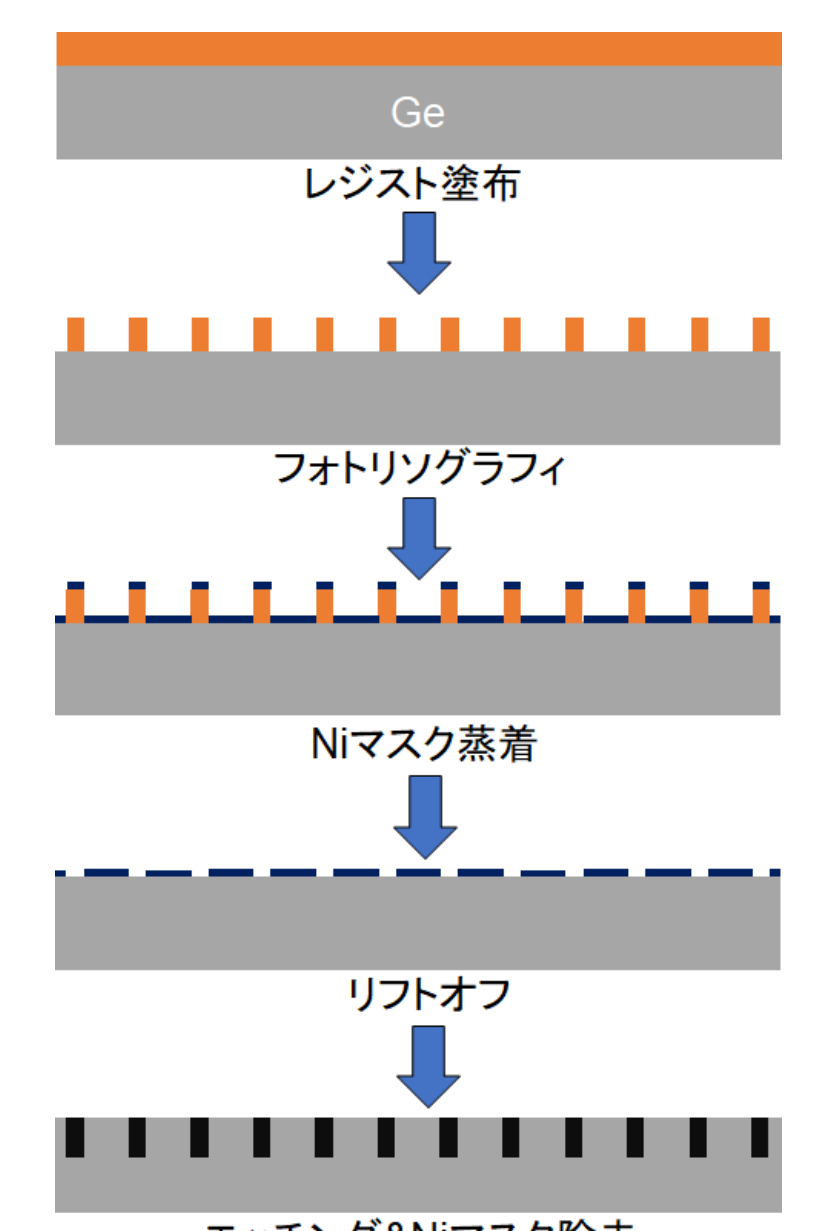


- 誘導結合プラズマ放電形式により安定した高密度プラズマを発生
- 高速、高アスペクト比の異方性エッチング

Bosch process

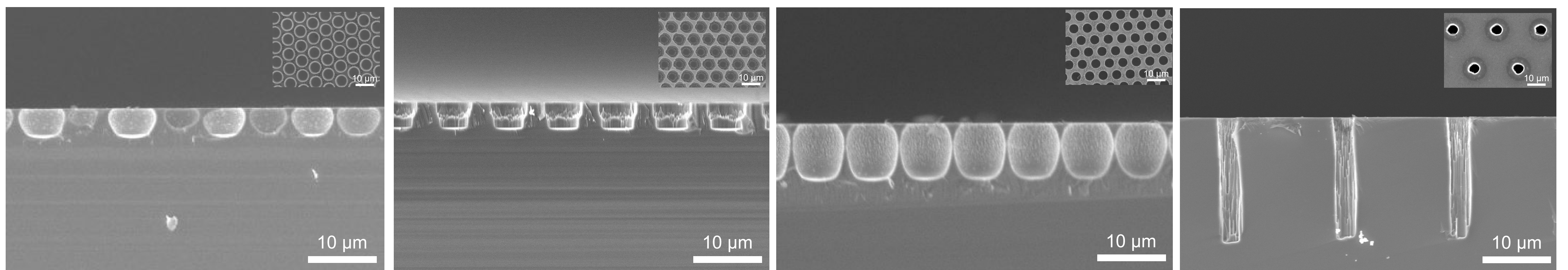


- 反応性イオンエッチングと側壁保護膜のデポを交互に実施 [10]
- 高アスペクト比の深掘りエッチング



本実験の流れ

結果



SF₆/C₄F₈混合ガス
ICP: 480 W, Pressure: 5 Pa
エッチングレート: 1.2 μm/min
AR=0.9

SF₆/C₄F₈混合ガス
ICP: 200 W, Pressure: 1 Pa
エッチングレート: 0.3 μm/min
AR=2.4

Bosch process
エッチングガス: SF₆/Ar
保護ガス: CHF₃
エッチングレート: 0.1 μm/cycle
AR=1.8

Bosch process
エッチングガス: SF₆/Ar
保護ガス: C₄F₈/Ar
エッチングレート: 0.1 μm/cycle
AR=4.5

- SF₆/C₄F₈混合ガスを用いたエッチングでは、**低パワー、低圧力下で異方性エッチング特性が向上**することを見出した
- Bosch processを用いたエッチングでは、保護ガスとして**C₄F₈/Ar**ガスを用いることでエッチングレートの低下なく異方性エッチングが可能だが、エッチング面の平滑性に課題が残った

まとめ&今後の方針

- Geウエハの微細加工プロセスでは、Bosch processを用いること、**ガス種・パワー・圧力**の最適化することで高アスペクト比の異方性エッチングが実現できた。
- 今回条件ではエッチング面の平滑性が低く、条件の更なる最適化が必要である。
- 今後はアニールによるGON薄膜の形成を試し、適切なパターンとエッチング深さを検討する。

謝辞

本研究(の一部)は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業(課題番号:JPMXP1223AT0352)の支援を受けた。

参考文献

- [1] M. Bosi, G. Attolini, *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* **56**, 146-174 (2010).
- [2] V. Depauw *et al.*, *Prog. Photovolt.* **31**, 1315-1328 (2022).
- [3] R. Oshima *et al.*, *Crystals* **13**, 370 (2023).
- [4] V. Depauw *et al.*, *MATER SCI ENG B-ADV.* **159-160**, 286-290 (2009).
- [5] M. Jurczak *et al.*, *IEEE Trans Electron Devices.* **47**, 2179-2187 (2000).
- [6] J. Kim *et al.*, *Nano Lett.* **16**, 1537-1545 (2016).
- [7] X. Hao *et al.*, *IEEE Sensors Journal.* **14**, 808-815 (2014).
- [8] S. Park *et al.*, *Joule* **3**, 1782-1793 (2019).
- [9] M. G. Jeong *et al.*, *J Microelectromech Syst.* **31**, 183-185 (2022).
- [10] V. J. Genova *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. B.* **36**, 011205 (2018).

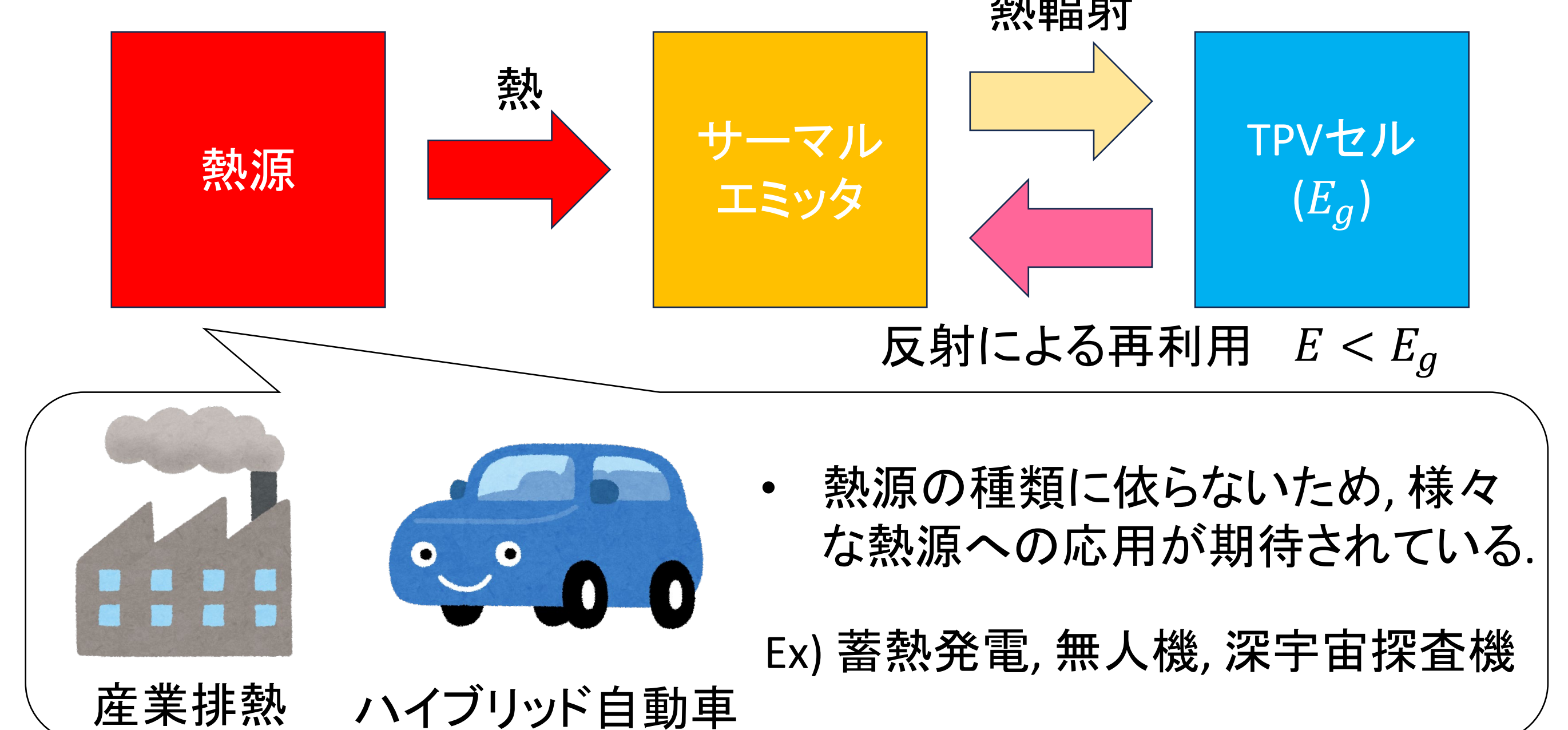
InGaAs熱光起電力セルに向けた表面電極の開発

研究の目的

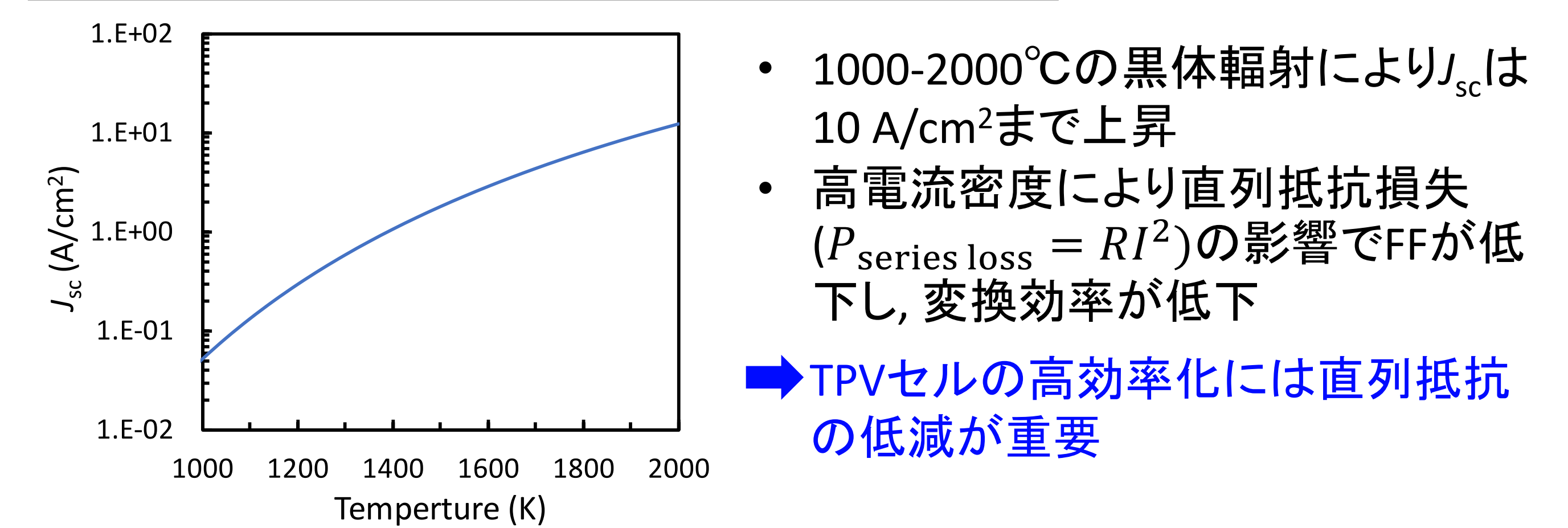
- 熱光起電力(TPV)は高温(1000-2000°C)のサーマルエミッタからの熱輻射を用いて太陽電池セルにより発電する技術である。
- 0.75 eV In_{0.53}Ga_{0.47}AsはTPVに適した材料として研究開発が進められている[1-3]。我々は、2022年 In_{0.53}Ga_{0.47}As逆積みリアヘテロ型セルにおいて、世界最高レベルの変換効率13.9%を達成した[4]。
- TPVの高効率化には、高電流密度動作により発生する直列抵抗損失の低減が重要となる[2,3]。
- 同じく高電流密度で動作する集光型太陽電池(CPV)では、表面電極の改善による直列抵抗の低減が行われてきた。
- 今回、直列抵抗低減を目的とし、InGaAs TPVセルに対しCPVで用いられている表面電極形状を採用し、集光測定による高電流密度での評価を行った。

熱光起電力 (TPV) [1-3]

TPVシステム構成図



黒体輻射温度とTPVセルの短絡電流密度J_{sc}の関係

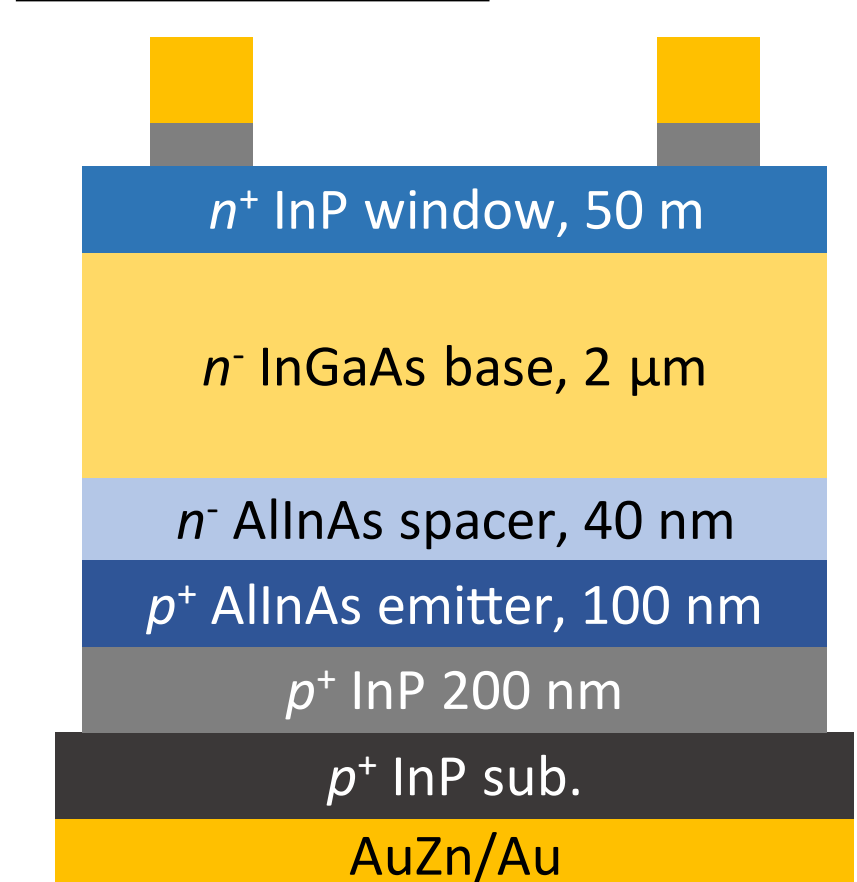


InGaAs TPVセルの作製

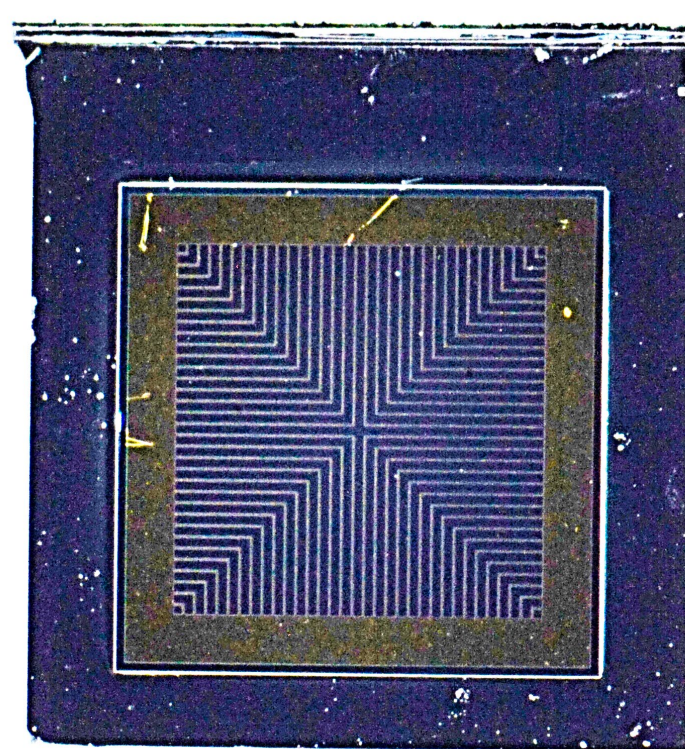
固体ソース分子線エピタキシー(MBE)法

- 2インチInP(001)オフ基板(2° to (111)A)上にセル構造を形成
- 直列抵抗を抑えた表面電極形状(格子状パターン)を採用[5]

TPVセル構造 5.0 mm□

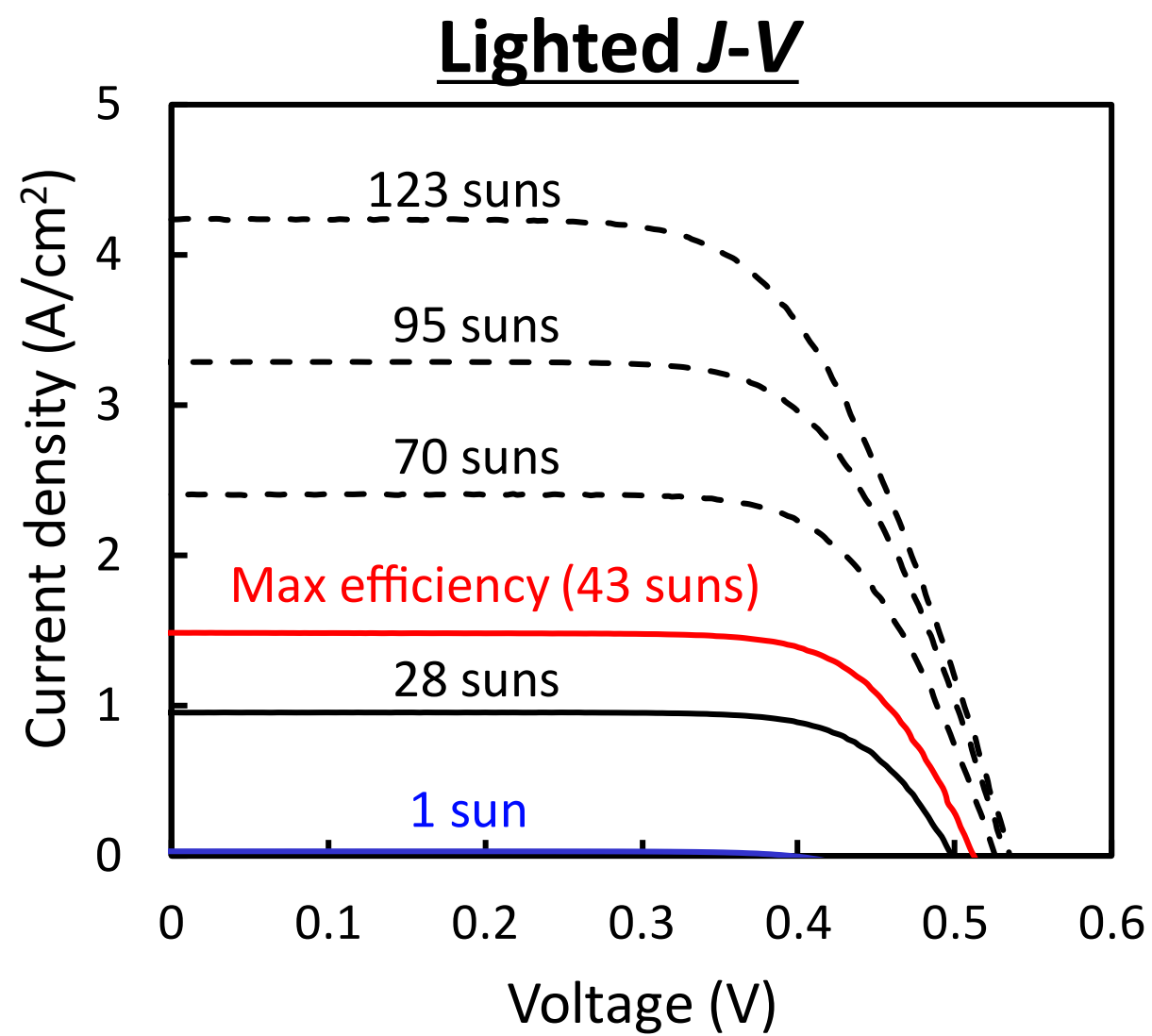


表面電極



TPVセルの集光測定

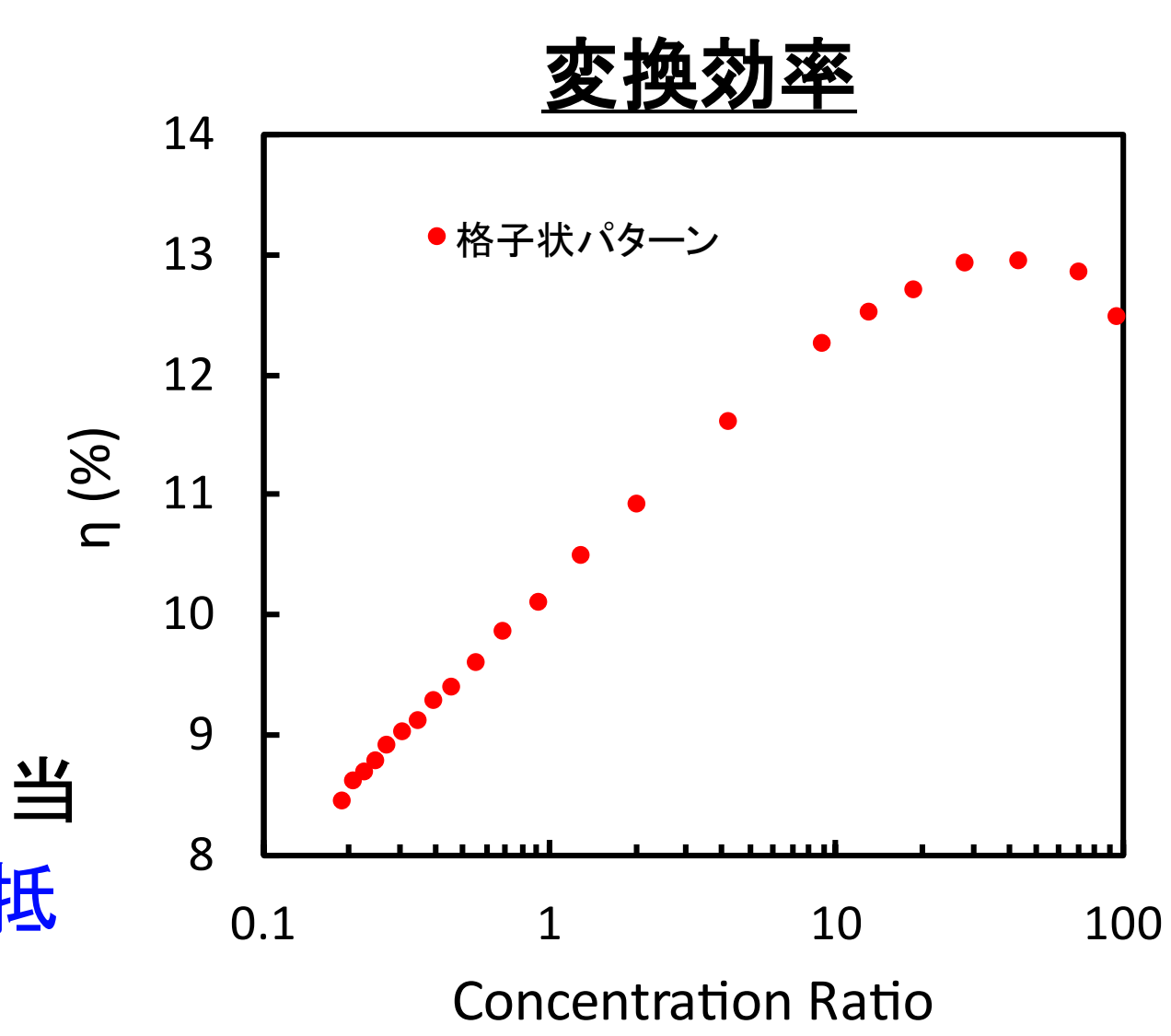
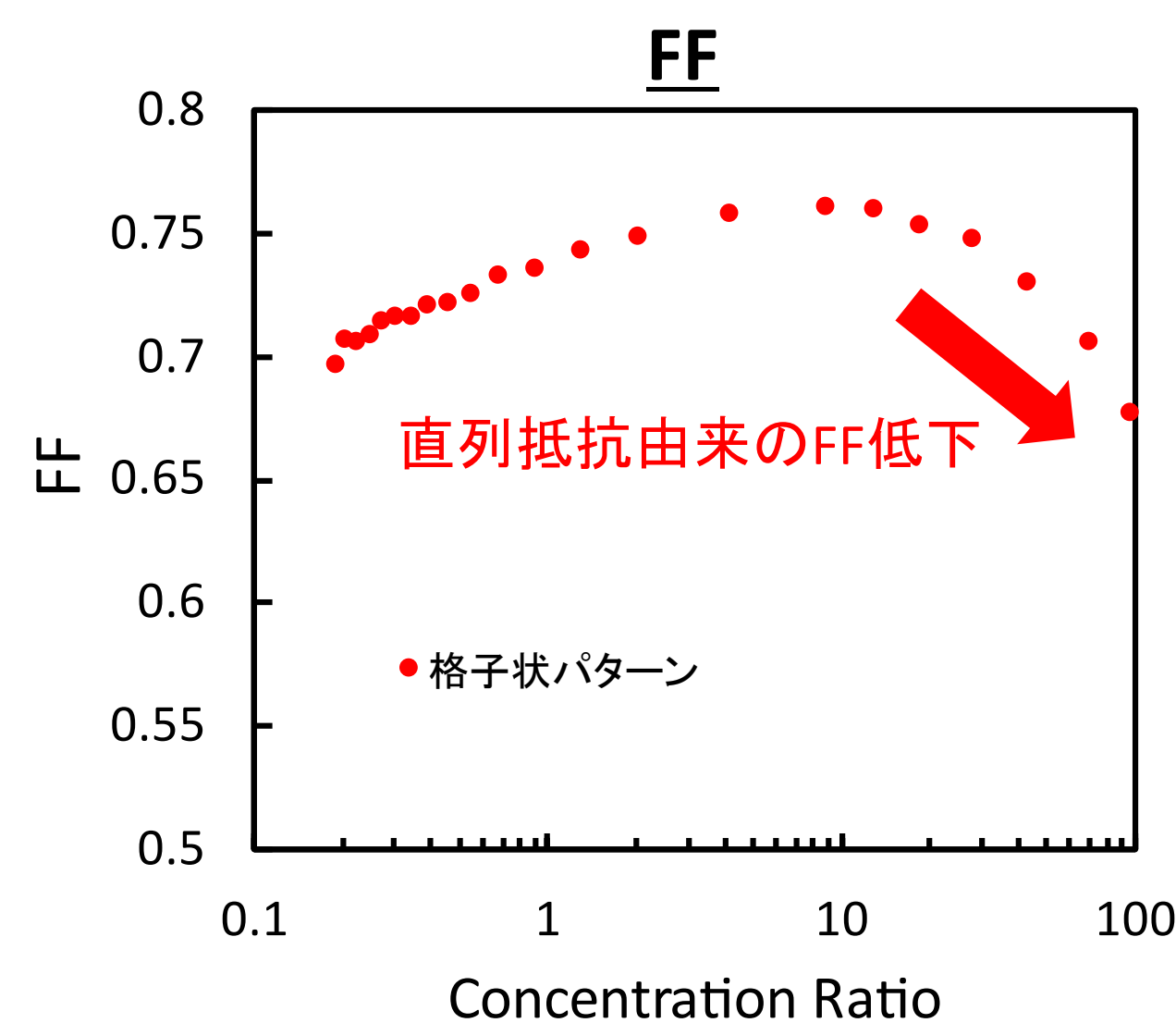
- AM 1.5 Gでの集光測定



最大変換効率 (43 suns)

	J _{sc} (A/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
格子状パターン	1.486	0.512	0.731	12.94

- J_{sc} 1.5 A/cm²は1450°Cの黒体輻射に相当 ⇒ <1450°Cの黒体輻射において、直列抵抗損失を抑えた動作が期待



直列抵抗成分

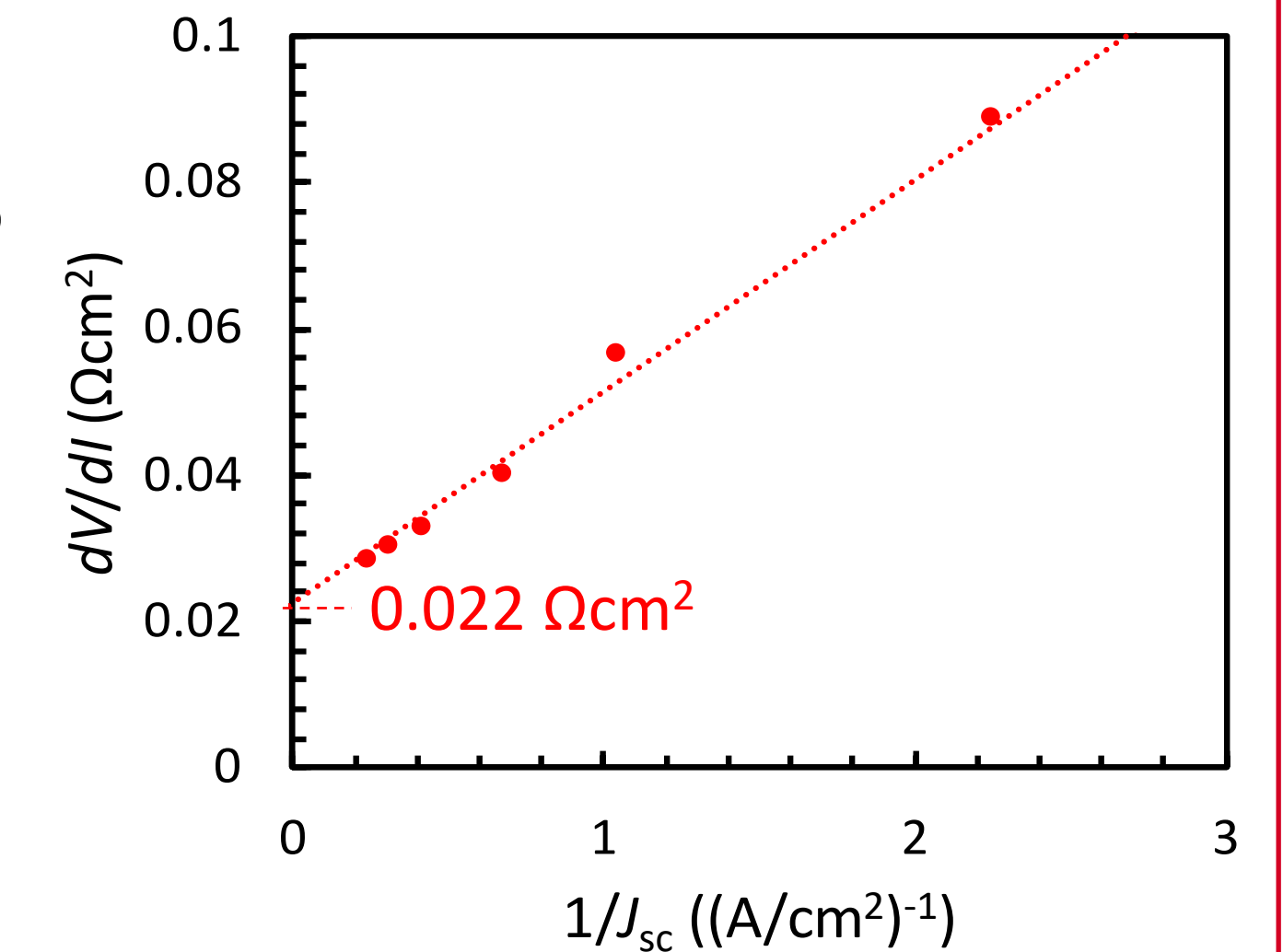
J-V特性から得た直列抵抗[6-8]

シャント抵抗が十分大きい場合、太陽電池のJ-V特性は以下の式で与えられる。

$$J = J_0 \left\{ \exp \left(\frac{q(V - JR_s)}{nkT} \right) - 1 \right\} - J_{sc}$$

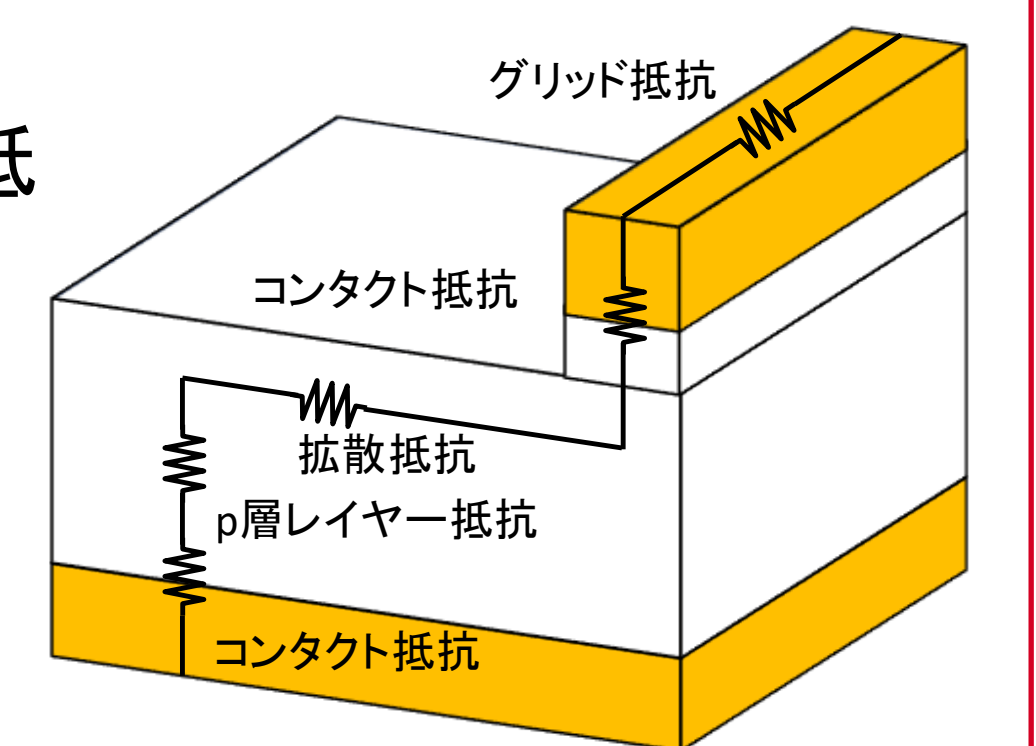
V = V_{oc}, J = 0の時

$$\frac{dV}{dJ} = R_s + \frac{nkT}{q} \frac{1}{J_{sc}} \quad \begin{matrix} J_{sc} \text{ が大きくなることで} \\ dV/dJ \text{ が } R_s \text{ に収束} \end{matrix}$$



モデルから算出した直列抵抗

- TLM法によりn,p層-金属接触抵抗, n層シート抵抗を測定
- グリッド抵抗を測定し、金属抵抗率を測定[6]
- モデルから表面電極の抵抗を算出[5]
- キャリア濃度, 移動度よりp層の抵抗を算出



直列抵抗成分

R _{front_grid} (Ωcm ²)	R _{spreading} (Ωcm ²)	R _{front_contact} (Ωcm ²)	R _{p-layer} (Ωcm ²)	R _{back_contact} (Ωcm ²)	R _{total} (Ωcm ²)
1.52×10 ⁻³	7.74×10 ⁻⁴	1.74×10 ⁻⁴	1.25×10 ⁻⁶	1.39×10 ⁻⁴	2.27×10 ⁻³

- J-V特性から得た抵抗値(2.2×10⁻² Ωcm²)はモデル値(2.3×10⁻³ Ωcm²)と比べて1桁大きい ⇒ モデルと実際の電流経路の違い、接触抵抗のばらつきが影響した可能性
- 表面電極のグリッド抵抗, グリッド間の拡散抵抗の割合が大きい ⇒ 直列抵抗の更なる低減には、グリッド間隔の狭小化, 電極の厚膜化が必要

結論

- InGaAs TPVセルの高効率化へ向け、CPVに用いられる表面電極形状を採用し、直列抵抗の低減に取り組んだ。
- 集光測定より、作製したTPVセルは<1450°Cの黒体輻射において直列抵抗損失を抑えた動作が行えることが期待される結果を得た。
- 直列抵抗を成分ごとに分けて解析した結果、更なる低抵抗化にはフィンガー電極間隔の狭小化, 電極の厚膜化が必要であることを明らかにした。今後はこれらの改善を図る予定である。

参考文献

- [1] M. W. Wanlass et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 1996, **41/42**, 405.
- [2] Z. Omair et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2019, **116**, 15356.
- [3] E. J. Tervo et al., Joule 2022, **6**, 2566.
- [4] 大島隆治 ほか, 「MBE法を用いたGaInAsヘテロ接合型セルの開発」(AIST 太陽光発電研究 成果報告2022)
- [5] A. R. Moore., RCA Rev. 1979, **40**, 140.
- [6] K. Nishioka et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2006, **90**, 1308.
- [7] K. Makita et al., IEEE J. Photovolt. 2023, **13**, 105.
- [8] M. Bashahu et al., Renew. Energ. 1995, **6**, 129.

低コストIII-V//Siタンデム太陽電池に向けた 1.5 eV帯GaInAsPセルの開発

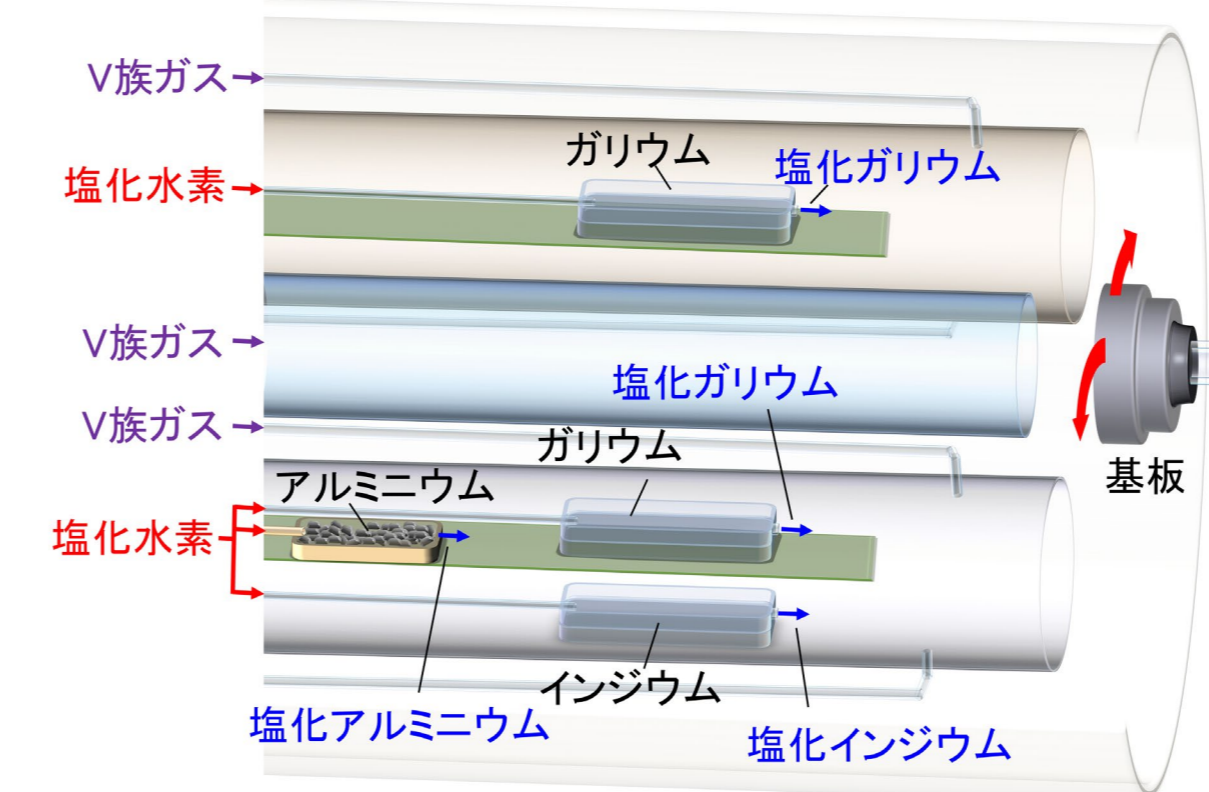
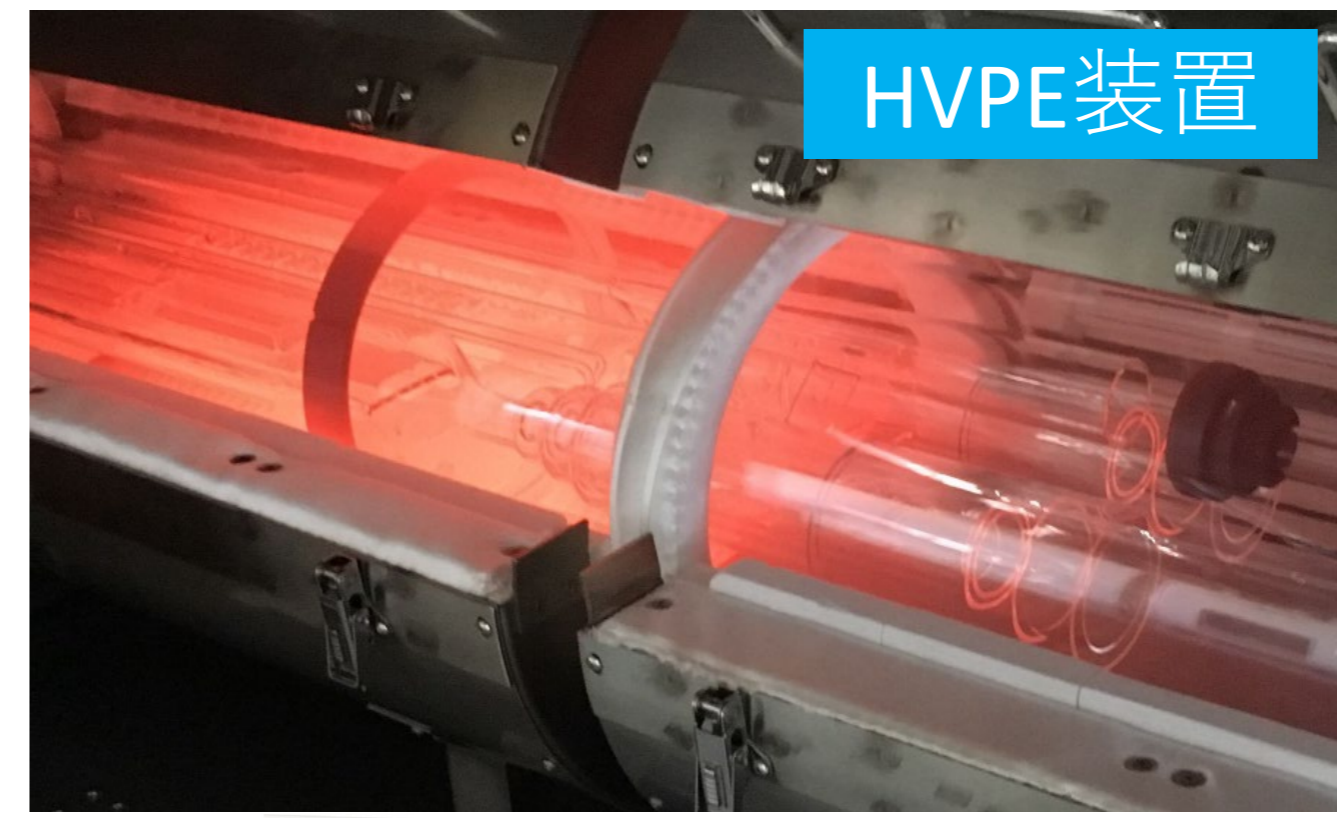
研究の目的

高効率と低コストを両立する太陽電池として、当グループではIII-V//Siタンデム太陽電池に注目している。エアマス1.5グローバル太陽光スペクトル照射下において、Siをボトムセルとした3接合構造のスペクトル整合性を良くするには、ミドルセルのバンドギャップを1.5 eVにすることが好ましい[1]。

Fraunhofer ISEではミドルセルに1.5 eV帯のGaInAsPセルを用いたIII-V//Siタンデム太陽電池において、36.1%の変換効率を達成している[2]。一方で、コスト面が課題であり、特にIII-V太陽電池を低コストで作ることが重要となる。本研究では、1.5 eV帯GaInAsPセルをハイドライド気相成長(HVPE)法で作製することにより、当該タンデム太陽電池の低コスト化を模索する。



HVPE法の特徴



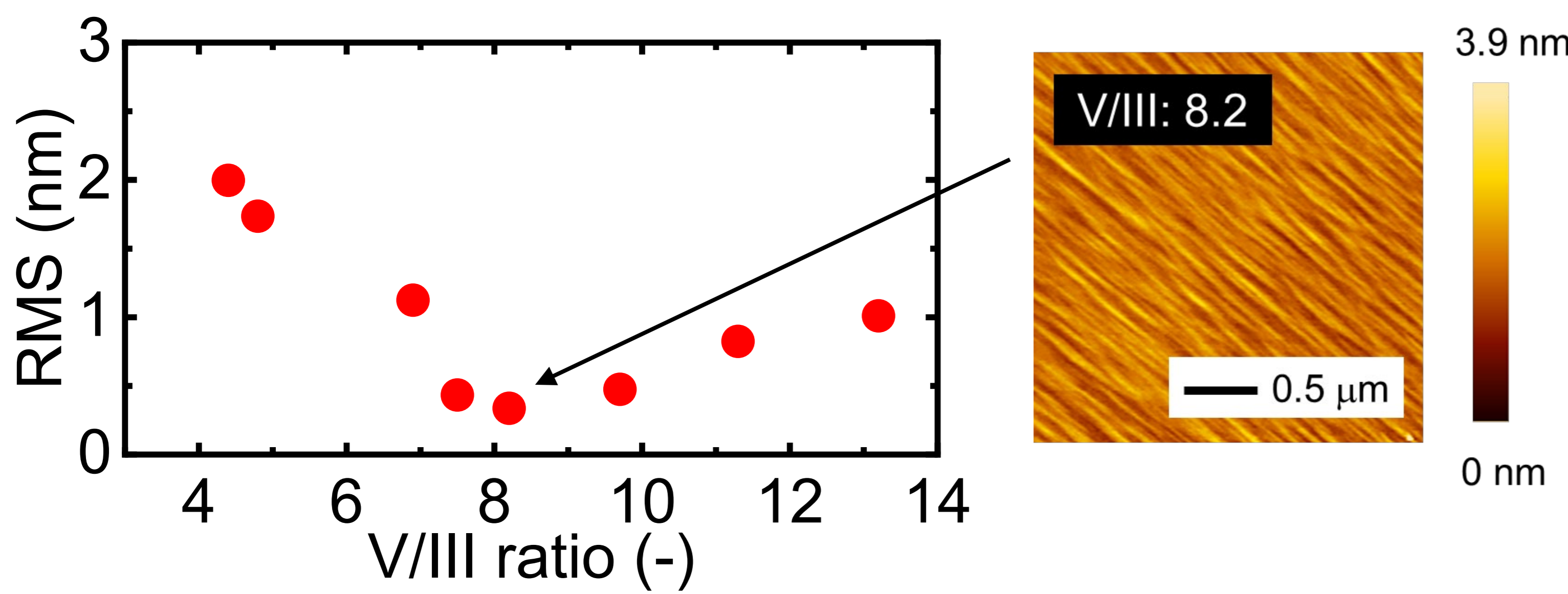
	MBE	MOVPE	HVPE ^[3,4]
III族原料	金属	有機金属	金属塩化物 ※1
V族原料	金属	水素化物	水素化物
V/III比	高い	やや高い	低い ※1
成長速度	×	○	◎ ※2
AI系材料	○	○	×

※1 従来に比べて結晶成長コストを90%ダウン
※2 装置償却コストダウン (高スループット)

III族原料に安価な金属塩化物を利用し、低V/III比での結晶成長もできるため、III-V族太陽電池の作製コストを低減可能

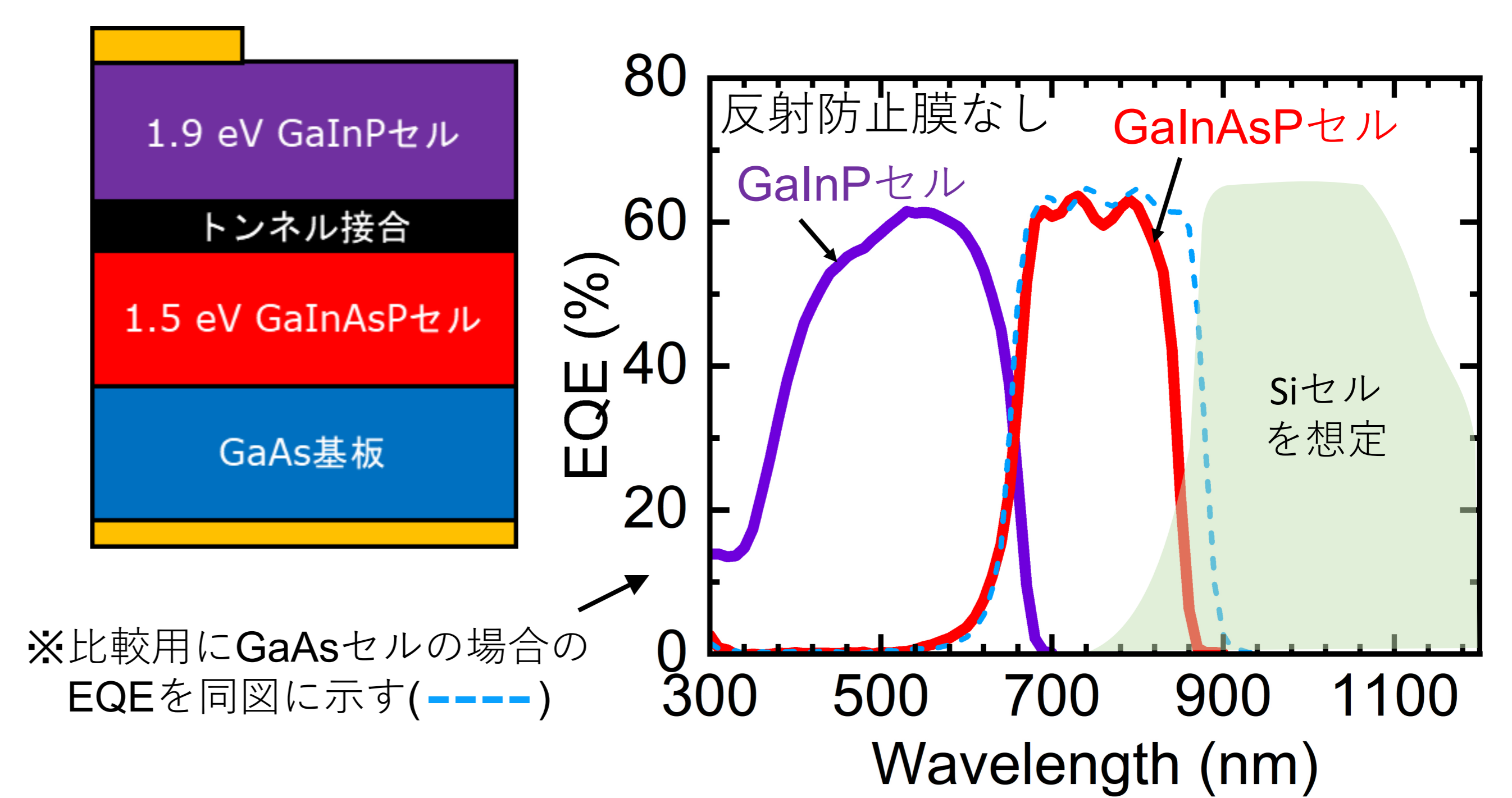
実験結果と今後の道筋

GaInAsPのHVPE成長と表面平坦性の評価



V/III比の調整により平坦なGaInAsP結晶が成長

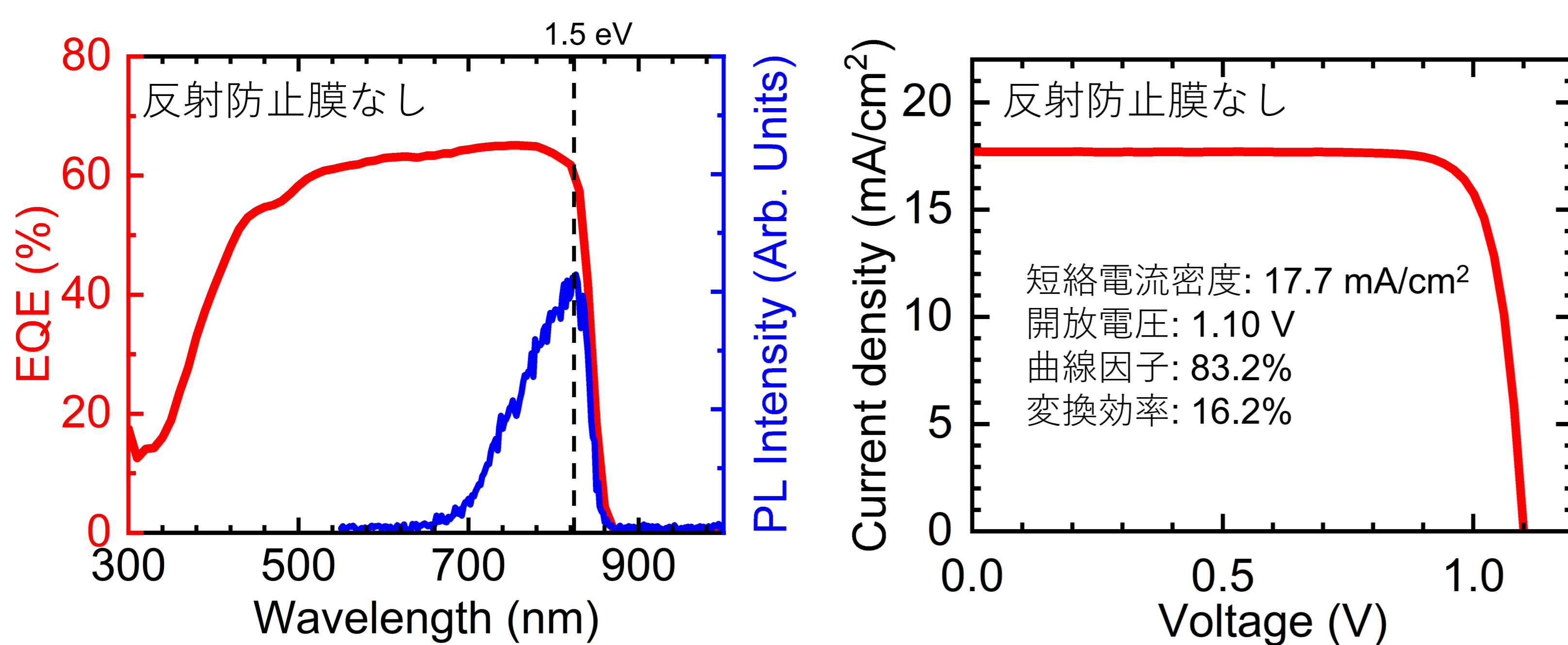
GaInP/GaInAsP 2接合セルの作製評価



※比較用にGaAsセルの場合のEQEを同図に示す(-----)

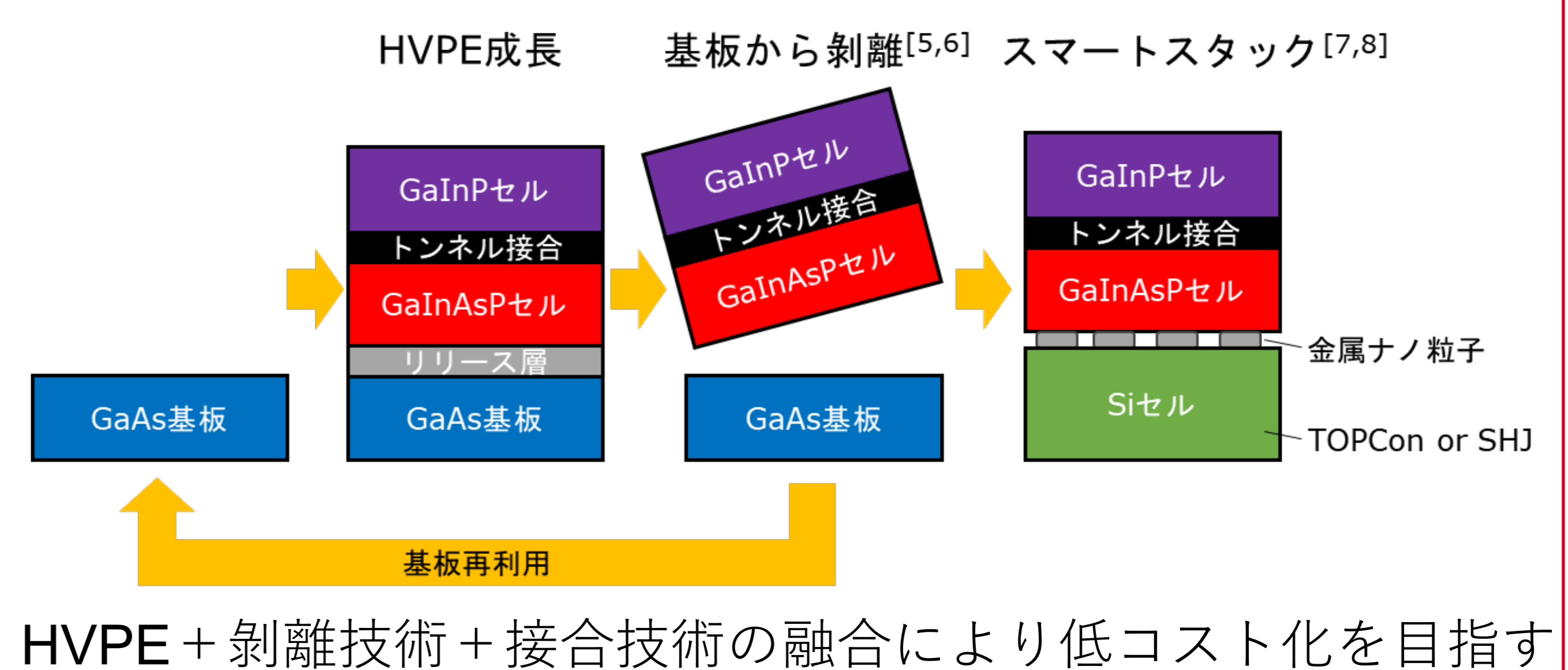
GaInAsPセルはGaAsセルよりも吸収端が短波長になる
→ 3接合構造作製時にボトムSiセルの電流量を増大可能 (ミドルセルがGaAsの場合はSiセルの電流が不足傾向)

1.5 eV帯GaInAsP単接合セルの作製評価



GaInAsP光吸収層の結晶成長速度は77.6 μm/hで作製
→ 結晶成長に要する時間はわずか51 sec

III-V//Siタンデム太陽電池の低コスト化の道筋



HVPE + 剥離技術 + 接合技術の融合により低コスト化を目指す

結論

- HVPE法において1.5 eV帯の高性能GaInAsPセルを77.6 μm/hの高速成長速度にて作製することに成功した
- 当該セルをIII-V//Si 3接合セルのミドルセルに利用することで、高効率・低コストIII-V//Siタンデムセルの実現が期待される

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP20015)によって得られた成果である。

参考文献

- [1] P. Schygulla et al., *Prog. Photovolt. Res. Appl.* vol. 30, 869 (2022).
- [2] P. Schygulla et al., *Proc. EUPVSEC* (2023).
- [3] R. Oshima et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 57, 08RD06 (2018).
- [4] Y. Shoji et al., *Sol. RRL* vol. 6, 2100948 (2021).
- [5] M. Konagai et al., *J. Cryst. Growth* vol. 45, 277 (1978).
- [6] Y. Shoji et al., *IEEE J. Photovolt.* vol. 11, 93 (2021).
- [7] H. Mizuno et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 55, 025001 (2016).
- [8] K. Makita et al., *Prog. Photovolt. Res. Appl.* vol. 28, 16 (2019).

高効率（～30%）GaAs//CIGSeタンデム太陽電池の開発

研究の背景

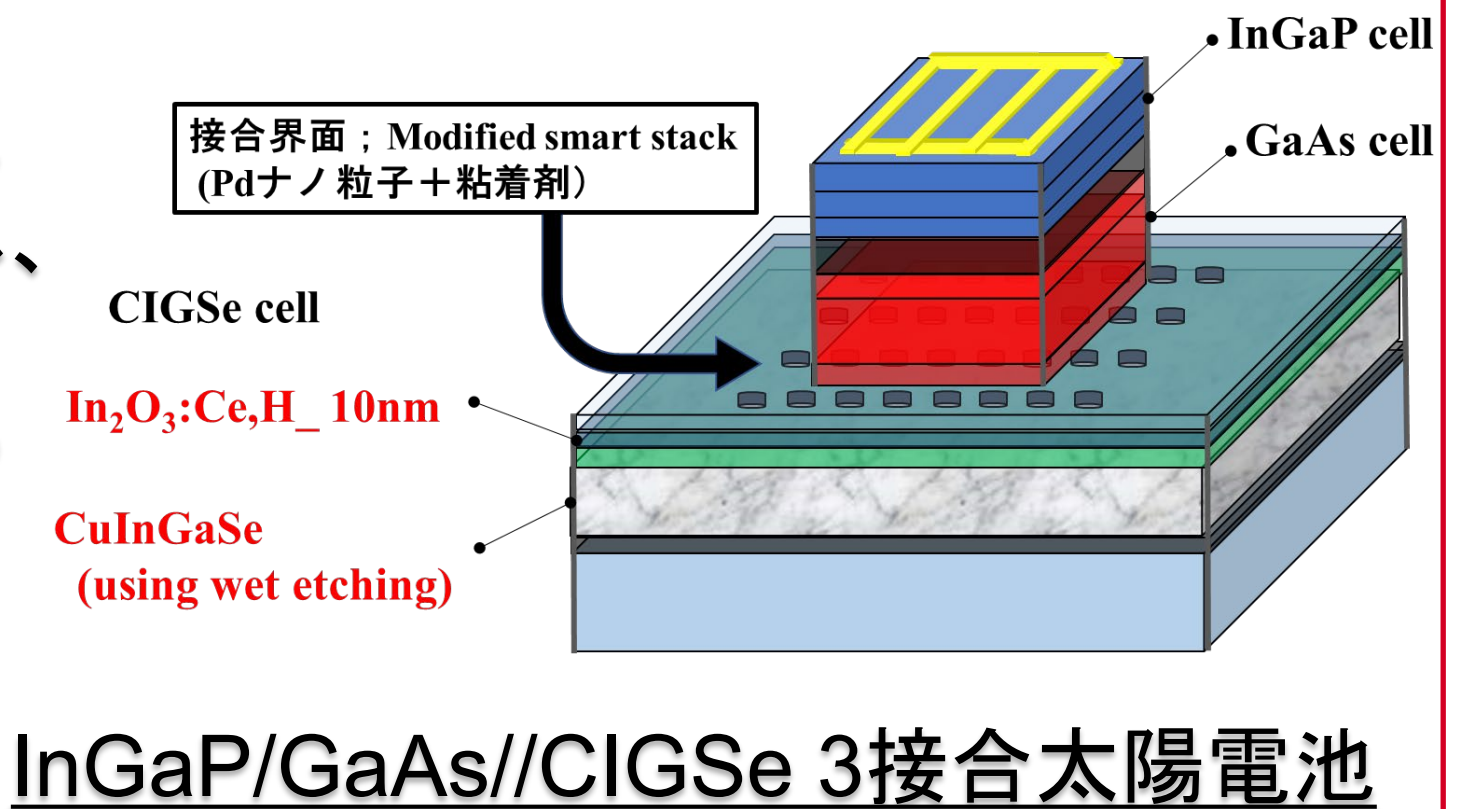
CO₂削減に向けて再生エネルギーの開発が進められており、特に次世代移動体等への太陽電池搭載を目指しNEDOプロジェクトが遂行されている。自動車の自立走行のためには発電効率30%、1kW以上が必要となり、該プロジェクトでの開発目標は2024年度までに発電効率33%かつ量産時のモジュールコスト200円/W以下の曲面モジュールを開発することが示されている。

本研究では、独自のスマートスタック(Smart stack)技術を用いたGaAs系タンデム太陽電池の開発を行ってきた。今回、接合技術の改善および構造最適化によりInGaP/GaAs//CIGSe 3接合太陽電池において、**効率～31%**(世界最高性能:in-house測定)を達成した。

素子構造

Modified smart stack(製造法参照)を適用し、InGaP/GaAsトップセル、CIGSeボトムセルからなる3接合構造を試作した。特に、高効率化のために、**タンデム用として適化した高性能CIGSeセル¹⁾**を適用した。

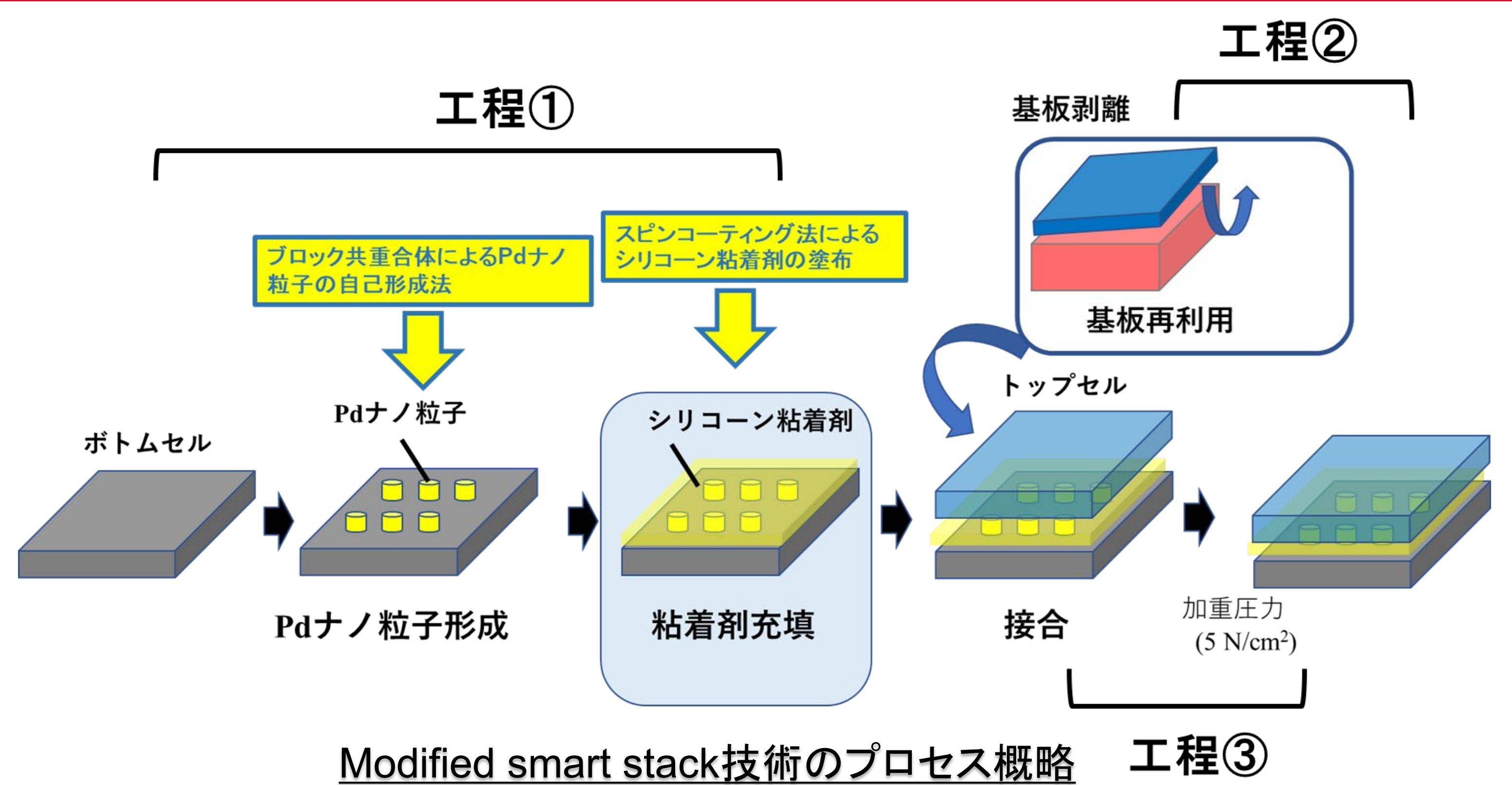
- 1) CIGSeセルは、以下の改善をした。
- ① Gaの分布(Ga-grading)を適化し、吸収層のEg～1.0eVを実現
 - ② 接合界面の反射損失低減のため下記の技術を適用、
 - ・エッチングによるCIGSe平滑化
 - ・TCO層の薄膜化(In₂O₃:Ce,H)



製造法

本研究では、Smart stack²⁾を改良し、Pdナノ粒子と粘着剤³⁾を接合界面に適用して、接合強度の改善を実現した(Modified smart stack技術)。工程は、①ボトムセル上へのPdナノ粒子配列および粘着剤塗布、②GaAsトップセルのエピタキシャルリフトオフ剥離(ELO)⁴⁾、③加重接合、からなる。

- 2) 産総研独自のPdナノ粒子を介在した半導体接合技術。
- 3) 粘着剤は、シリコン系粘着剤。信越シリコン(株)製X-40-3306。高温高湿耐性に優れる。
- 4) ELO法は、HF溶液等を用いて、GaAs基板からGaAsエピを剥離する技術。

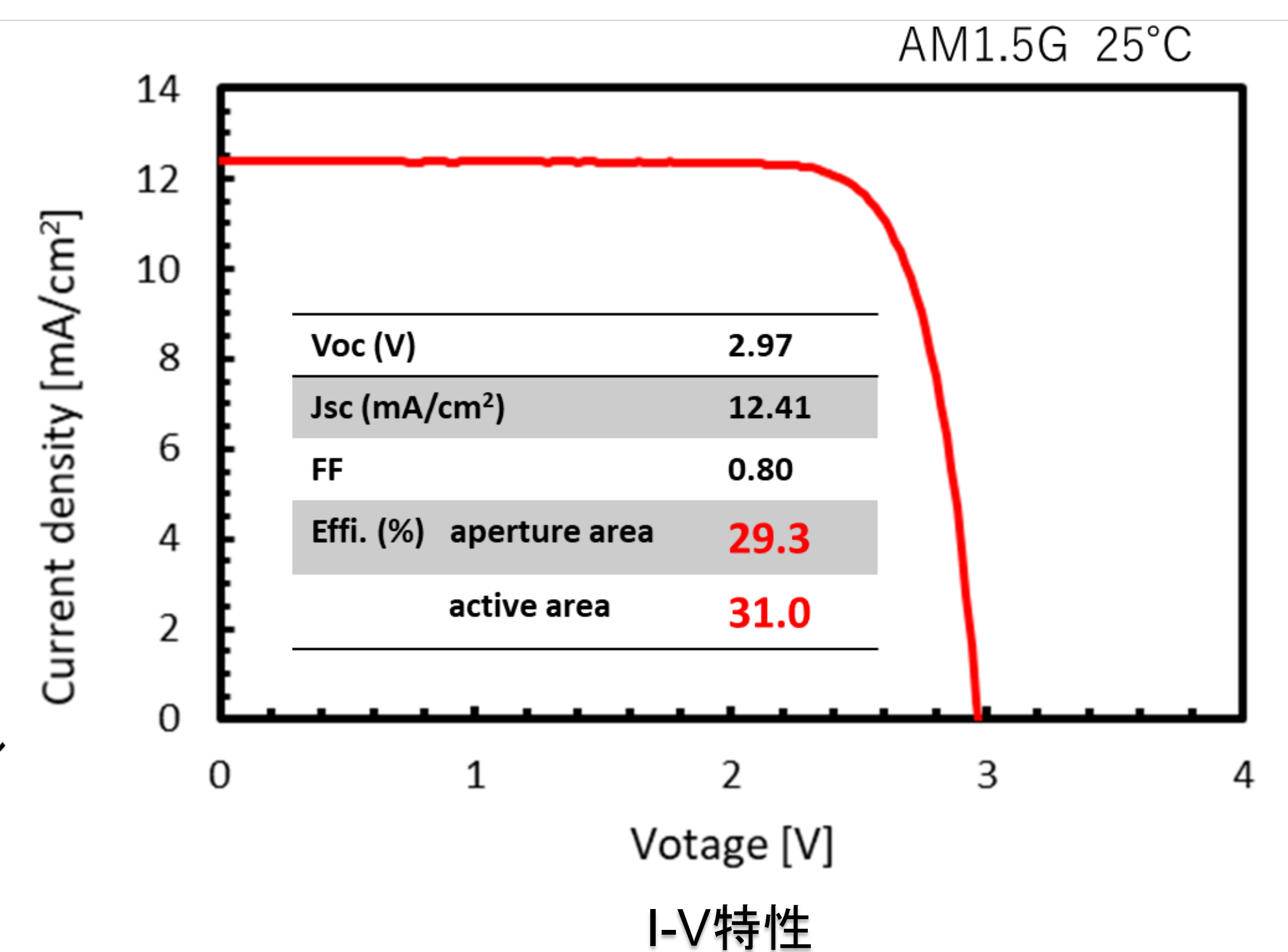
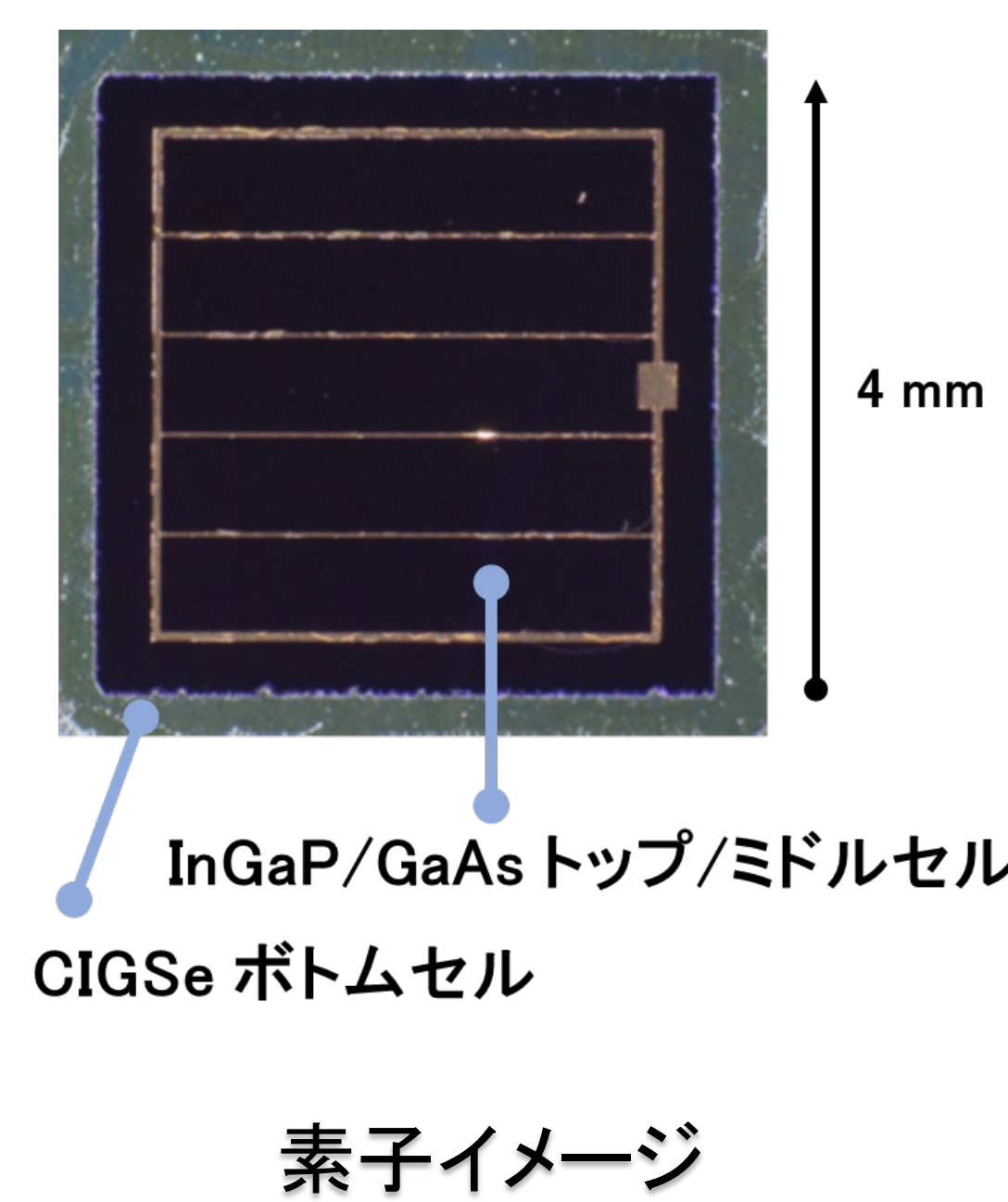


結果

InGaP/GaAs//CIGSe 3接合構造で、**発電効率～31.0%**を達成。2端子型GaAs//CIGSe系タンデムセルとして**世界最高性能**。

- ・ Modified smart stackにより、GaAs系セルとCIGSeセルとの安定接合を実現。
- ・ 高性能CIGSeセルにより、光電流を増大。
- ・ 面積電流整合法⁵⁾を適用し、効率を最大化。
- ・ 構造最適化等によりさらなる高効率化可能、予測最大効率～35%である。

- 5) 面積電流整合法(area current matching)は、電流不足しているセルの面積を拡大して電流補充をする方法。層構造制御による電流整合法に比較して、簡便に整合が得られる。本実験では、電流不足のCIGSeセルの面積を1.1倍に拡大したセル構成とした。



InGaP/GaAs//CIGSe 3接合太陽電池の特性

結論

- ・ Pdナノ粒子と粘着剤を介在したModified smart stack技術を開発。
 - ・ InGaP/GaAs//CIGSe 3接合太陽電池で、**発電効率～31.0%**を達成(世界最高性能)。
 - ・ 現在、実用化を目指し大面積化(4インチ化)⁶⁾に着手。
- 6) 現NEDOプロジェクトでは、接合セルの大面積化が目標(2024年度4インチ化)。現在、Modified smart stackと新たに開発した転写技術により大面積化が進展、実用化を加速させている。

謝辞: この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPN20015)の結果得られたものである。

参考文献等

- (参考文献)
- H. Mizuno *et al.*, Appl. Phys. Lett., 55, 025001 (2016).
 - Y. Kamikawa *et al.*, ACS Appl. Mater. Interfaces, 12, 45485 (2020).
 - K. Makita *et al.*, Progress in Photovoltaics, 29, 887 (2021).
 - K. Makita *et al.*, IEEE Journal of Photovoltaics, 12, 639 (2022).
 - K. Makita *et al.*, Progress in Photovoltaics, 31, 71 (2023).
- (関連特許)
- 水野等、特許5875124、「半導体素子の接合方法および接合構造」
 - 上川等、特許7272561、「太陽電池およびその製造方法」
 - 牧田等、特願2019-216602、「半導体素子の接合方法および接合構造」

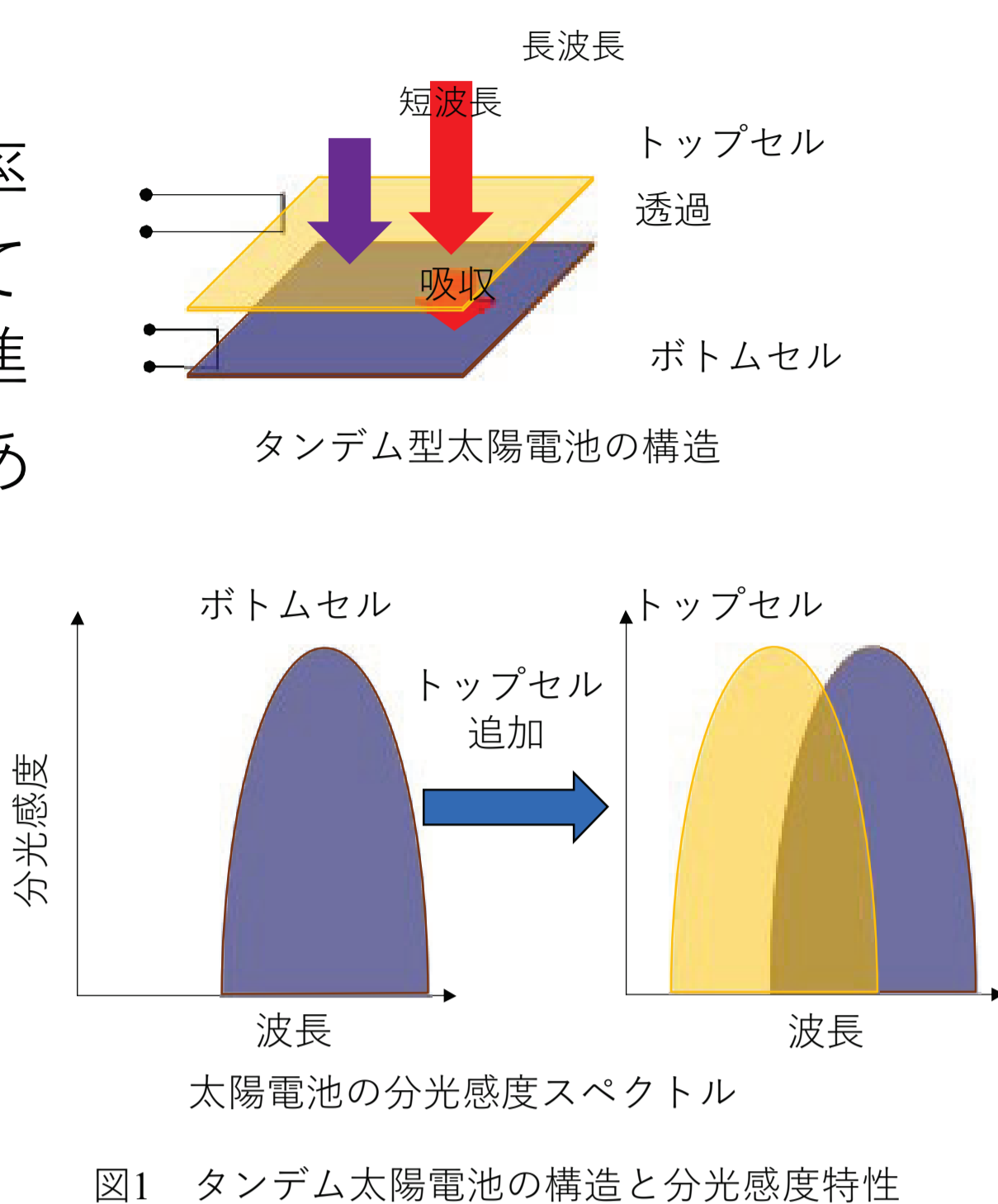
Cu₂OのRS-MBE成膜における異相制御

研究の目的

多接合太陽電池は、Si太陽電池単体では到達し得ない変換効率30%を超える可能性を有する。我々は、トップセルとしてSiと同様に低コスト、低環境負荷、長期安定性を高い水準で満たすCu₂Oに着目した。バンドギャップは2.1 eVであり、Si太陽電池と組み合わせた4端子構造では、理論的には40%を超える変換効率が期待される。

Cu₂O成膜時にCuやCuOなどの価数の異なる異相が析出し易く、その異相は太陽電池特性に悪影響を与えることが報告されている。[1]

本研究はその異相を精密に評価・制御する方法を検討。



実験

ガラス基板上にRS-MBE法(Radical Source-Molecular Beam Epitaxy)でCu₂O膜を成膜。

MBE：各原料の精密制御が可能。(図2)

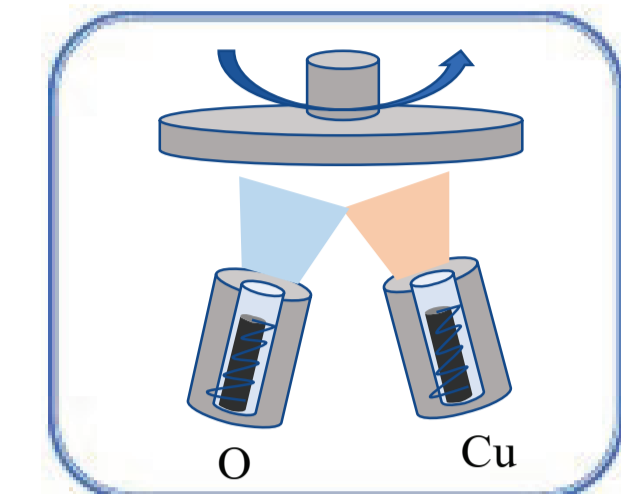


図2 RS-MBE装置でのCu₂O膜の成膜

Cuの分子線と酸素ラジカルを使用して成膜。

測定方法

X線回折法 (XRD法)
光学反射・透過測定法

Cu₂O 600~700nm
FTO or XG Sub.
測定試料概略図

結果と考察1

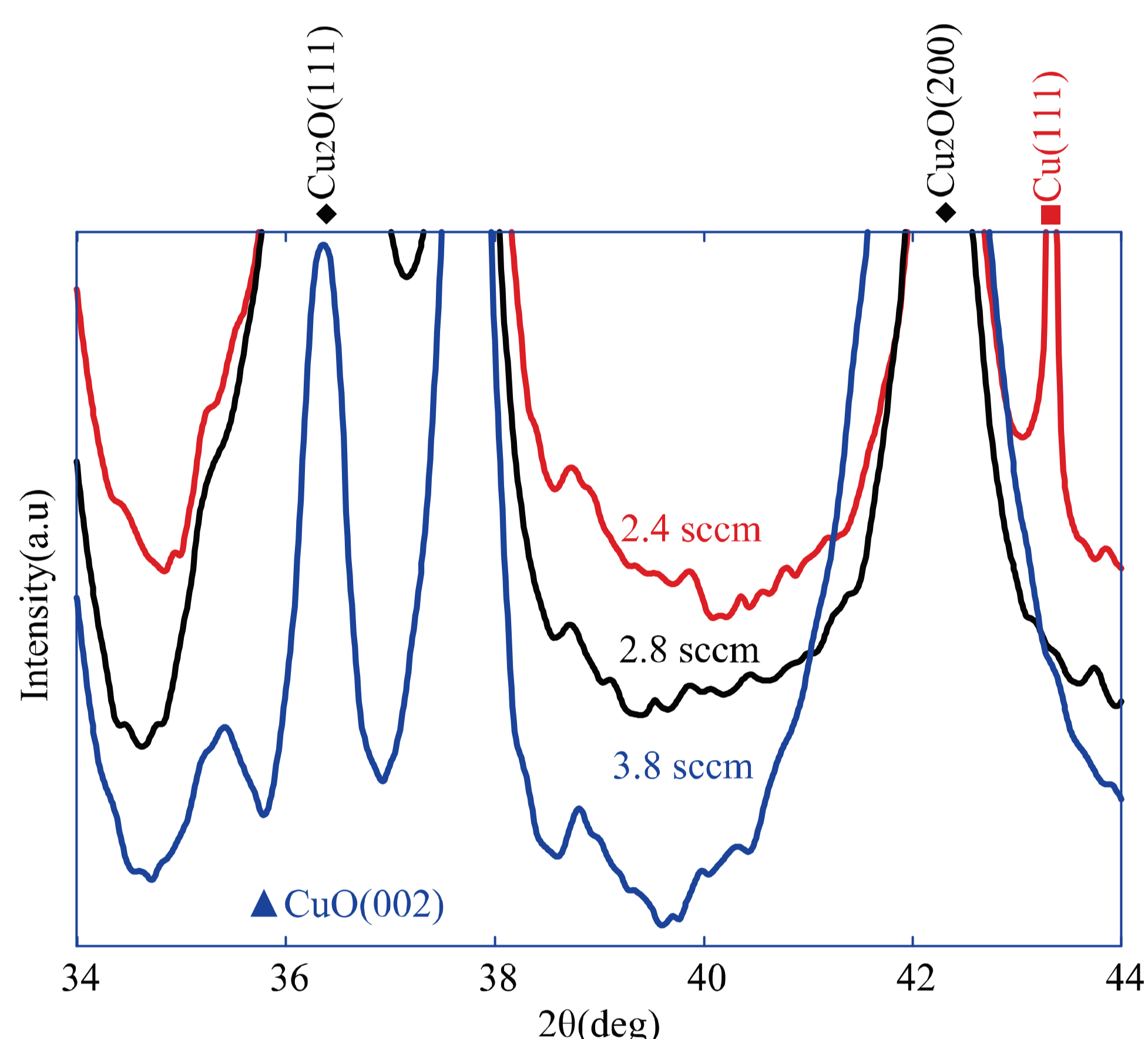


図3 FTO基板上的XRDパターンの変化と酸素ラジカル源供給量の関係

$$R_{Cu} = \frac{I_{Cu(111)}}{I_{Cu_2O(111)} + I_{Cu_2O(200)}} \quad R_{CuO} = \frac{I_{CuO(002)}}{I_{Cu_2O(111)} + I_{Cu_2O(200)}}$$

ピーク強度を用いた異相混入率の計算方法

$I_{Cu(111)}$ 、 $I_{CuO(002)}$ 、 $I_{Cu_2O(111)}$ 、 $I_{Cu_2O(200)}$ は、それぞれXRD測定で観測されたCu(111)、CuO(002)、Cu₂O(111)、Cu₂O(200)のピークの強度を示す。

Oリッチ領域 (3.8 sccm) ではCuOが析出し、Oプア領域(2.4 sccm)ではCuが析出することが確認された(図3)。しかしながら、微小な析出がある場合には、XRD法によってその異相を確認できないことがある。

結果と考察2

CuOの析出の有無によりCuOとCu₂OのE_gの中間のエネルギー領域 (1.3~2.1 eV) では光学吸収に大きな差が生じることに着目し、光学反射・透過測定により吸収係数を算出して、析出に関する評価を試みた。図4、図5に酸素供給量を変化させて(2.8~3.8 sccm)成膜したCu₂Oの吸収係数を示す。CuOのバンド変曲点の~1.73 eVを利用して、その吸収係数の差分よりCuO混入率を評価した。

一方、Cuの析出の有無はCuのバンド変曲点の~2.18 eVを利用して、その吸収係数の差分よりCuの混入率を評価した。

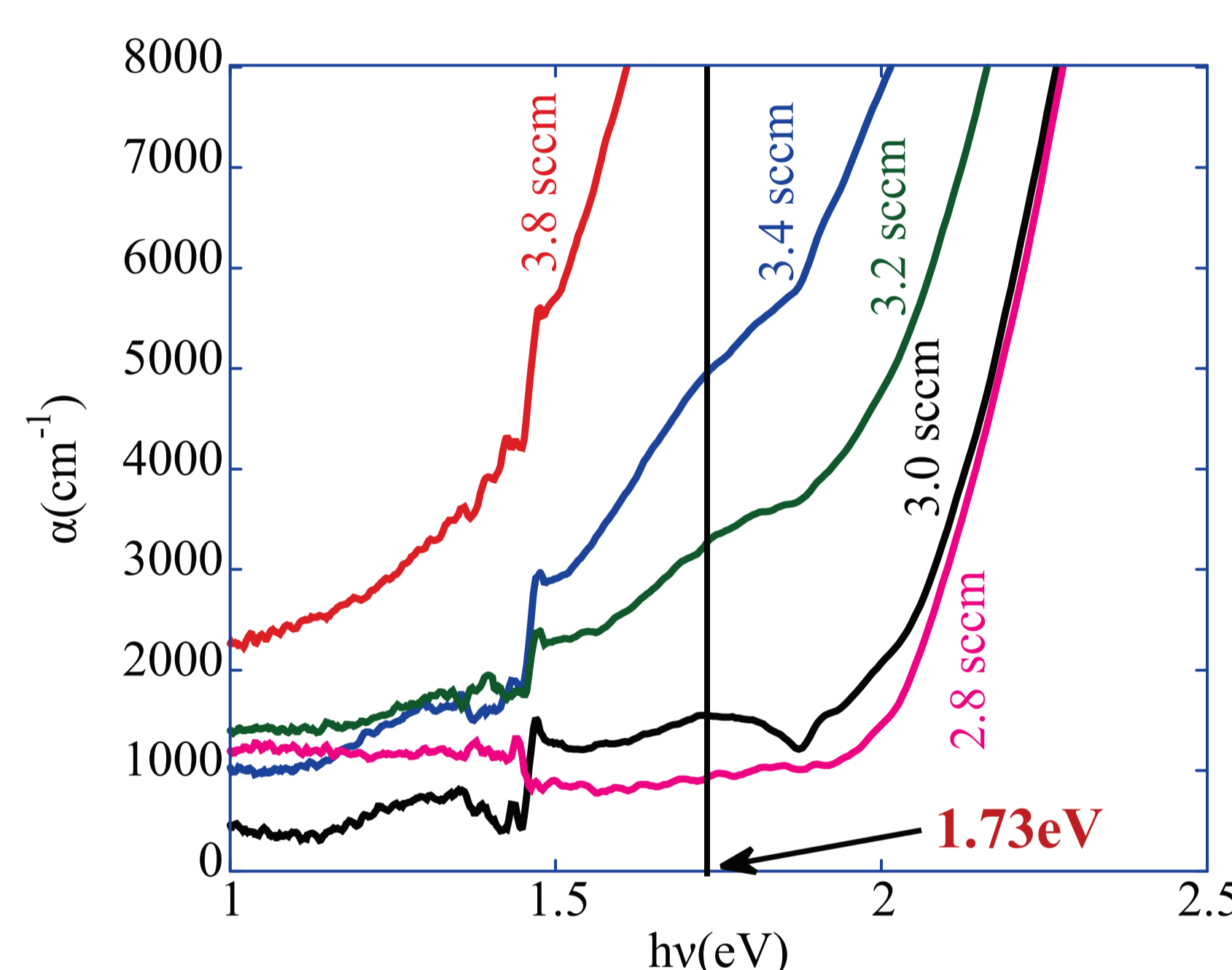


図4 ガラス基板上的吸収係数の変化と酸素ラジカル源供給量の関係 (Oリッチ領域)

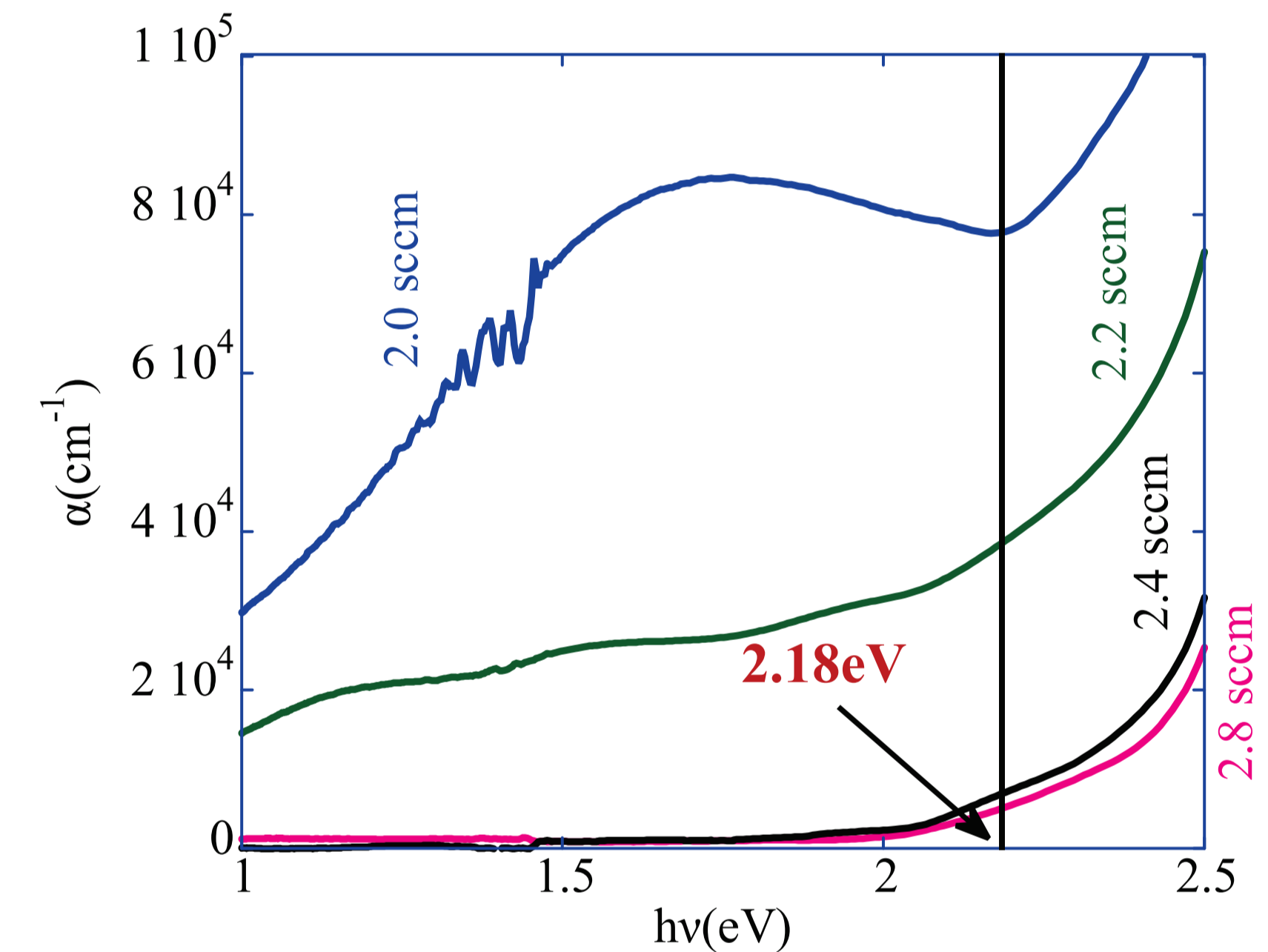


図5 ガラス基板上的吸収係数の変化と酸素ラジカル源供給量の関係 (Oプア領域)

$$r_{Cu} = \frac{\alpha_{x \text{ sccm}} - \alpha_{2.8 \text{ sccm}}}{\alpha_{CuO}} \quad r_{Cu} = \frac{\alpha_{x \text{ sccm}} - \alpha_{2.8 \text{ sccm}}}{\alpha_{Cu}}$$

吸収係数を用いた異相混入率 (体積%) の計算方法

その結果、XRD測定で異相が判別できない領域 (酸素流量: 3.0~3.4 sccm) においてもCuOが析出していることが判明した。一方で、Oプア領域 (酸素流量: 2.0~2.4 sccm) においてCuが析出していることが確認できた。しかし、XRD法のピーク強度を用いた評価法では、Cuの混入率を評価できる感度の面で優れた方法であることが分かった。

結論

採用した吸収係数を用いた評価法が1.0%以下のCuOの混入率が評価できる感度の面で優れた方法であることを示した。

一方で、Oプア領域ではXRD法のピーク強度を用いた評価法がCuの混入率を評価できる感度の面で優れた方法であり、Oリッチ領域かOプア領域かで評価方法の使い分けが必要であることが分かった。

また、以上の結果は、10%以下の酸素供給量変化でも異相であるCuOが生成することを意味しており、その精密制御がCu₂O単相膜の成膜に重要であることを示している。

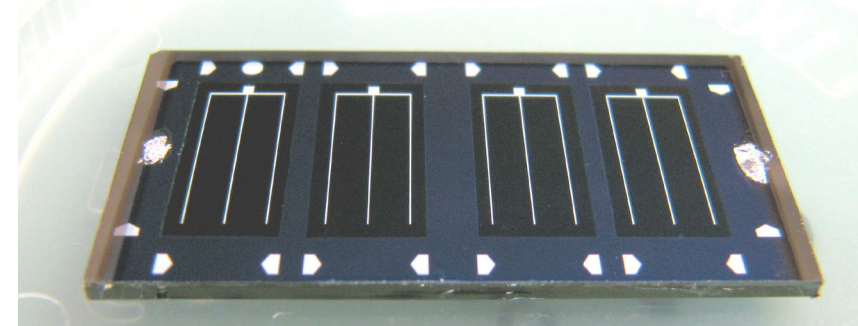
参考文献

- [1] S. Shibasaki *et al.*, "Highly transparent Cu₂O absorbing layer for thin film solar cells", *Appl. Phys. Lett.* **119**, 242102 (2021).
 - [2] Ito, Takayuki, *et al.* "Optical properties of CuO studied by spectroscopic ellipsometry." *J. Phys. Soc. Jpn.* 67.9 (1998): 3304-3309.
 - [3] PB Johnson, RW Christy, "Optical constants of the noble metals", *PRB*, 6.12 (1972): 4370.
- (謝辞) 本研究成果の一部は、NEDOの委託業務 (JPNP20015) の結果得られたものです。

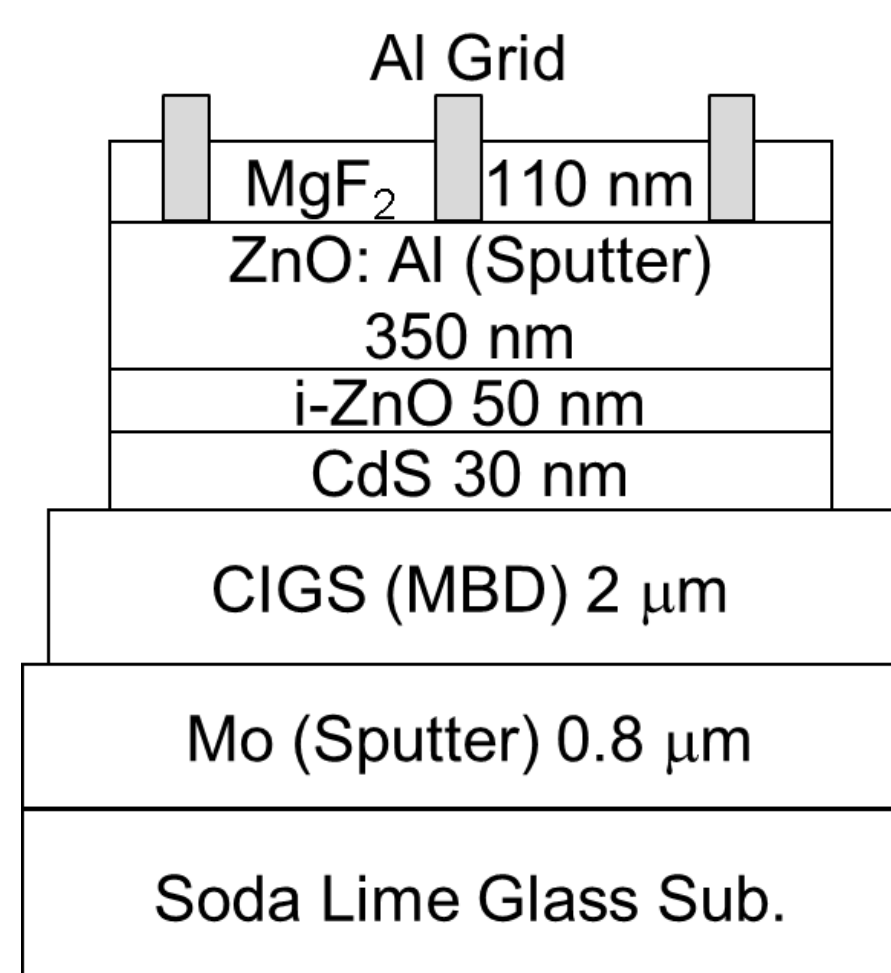
CIGS太陽電池のエッチング素子分離による高効率化

研究の目的

- Cu(In,Ga)Se₂太陽電池のさらなる高効率化技術の開発
- Photolithographic device isolationによる高効率化技術
 - ✓ NRELからFill Factor(FF): 81.2%が報告されている¹⁾
 - ✓ Mechanical Scribingによって、端面にリークパスが発生
- Ag添加高効率化技術²⁻⁴⁾と組み合わせて、高効率化を図る



実験



Mechanical Scribing: 0.52 cm²
Etching: 0.47 cm²

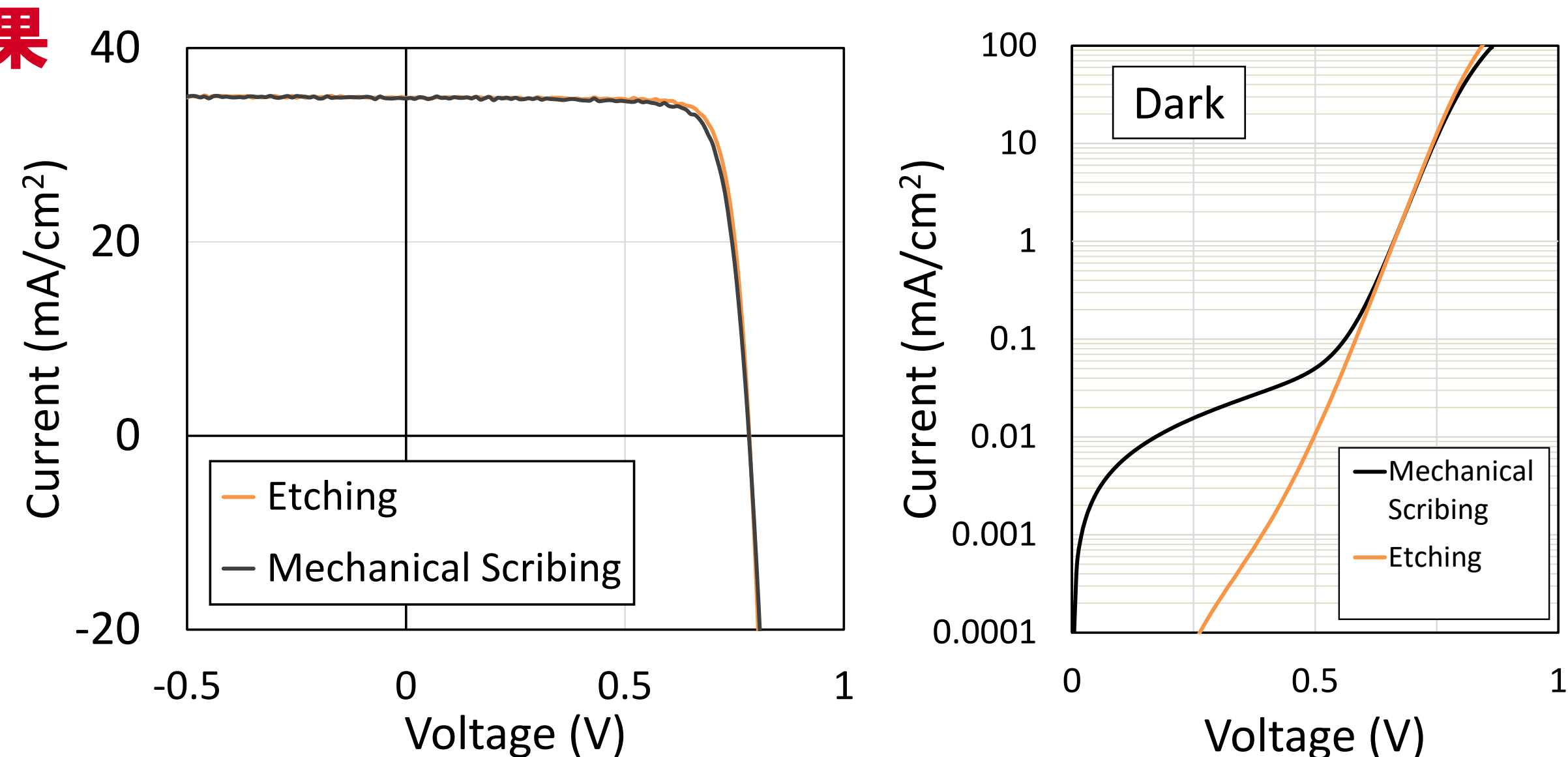
CIGS solar cells

- Three-stage processing (1st stage: 350°C 2nd, 3rd stage: 550°C)
- Ga/III flux: 0.4 (1st stage), 0.25 (3rd stage)
- Cu/III : 0.95, Ag: 1x 10¹⁹ cm⁻³ (2nd stage)
- KF, NaF-PDT (T_{sub.} = 350°C) (Na: <1 × 10¹⁹ cm⁻³, K: 2 × 10¹⁹ cm⁻³)
- 電子部品工程用熱剥離シール
- 酢酸(5wt%) (ZnO層のみ除去)

Measurements

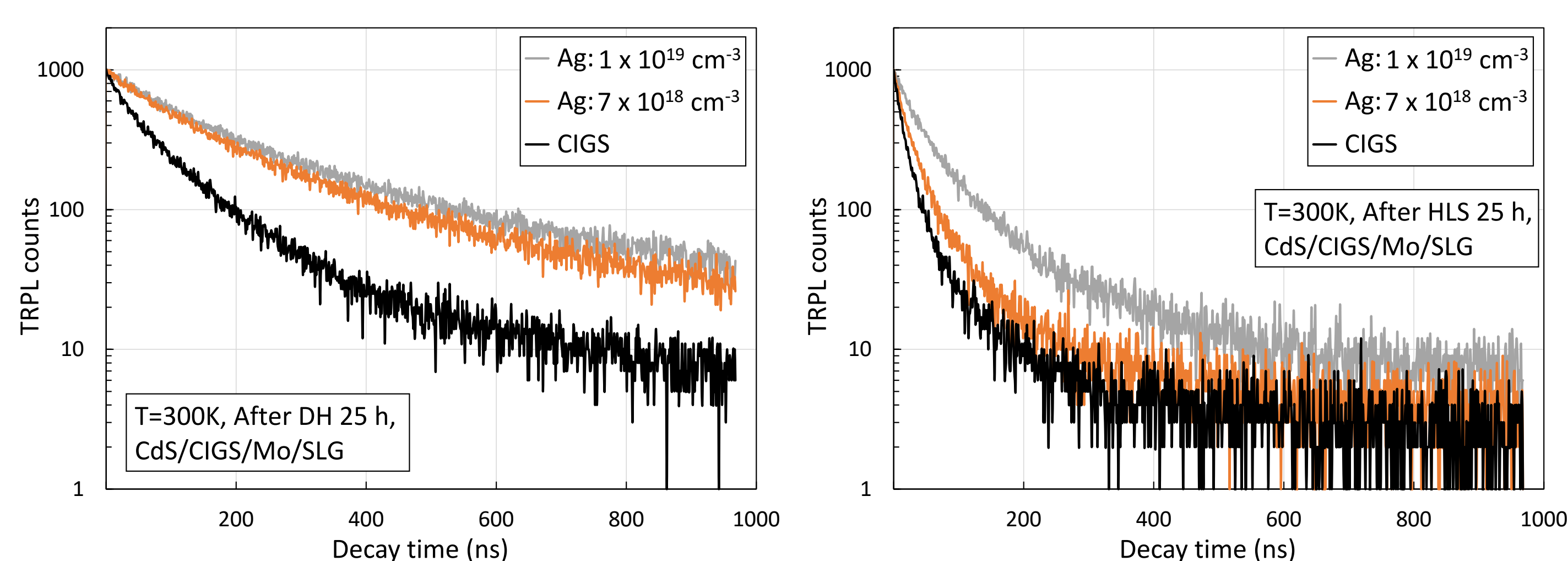
- I-V curves, C-V curves
- Time-resolved photoluminescence(TRPL)

結果



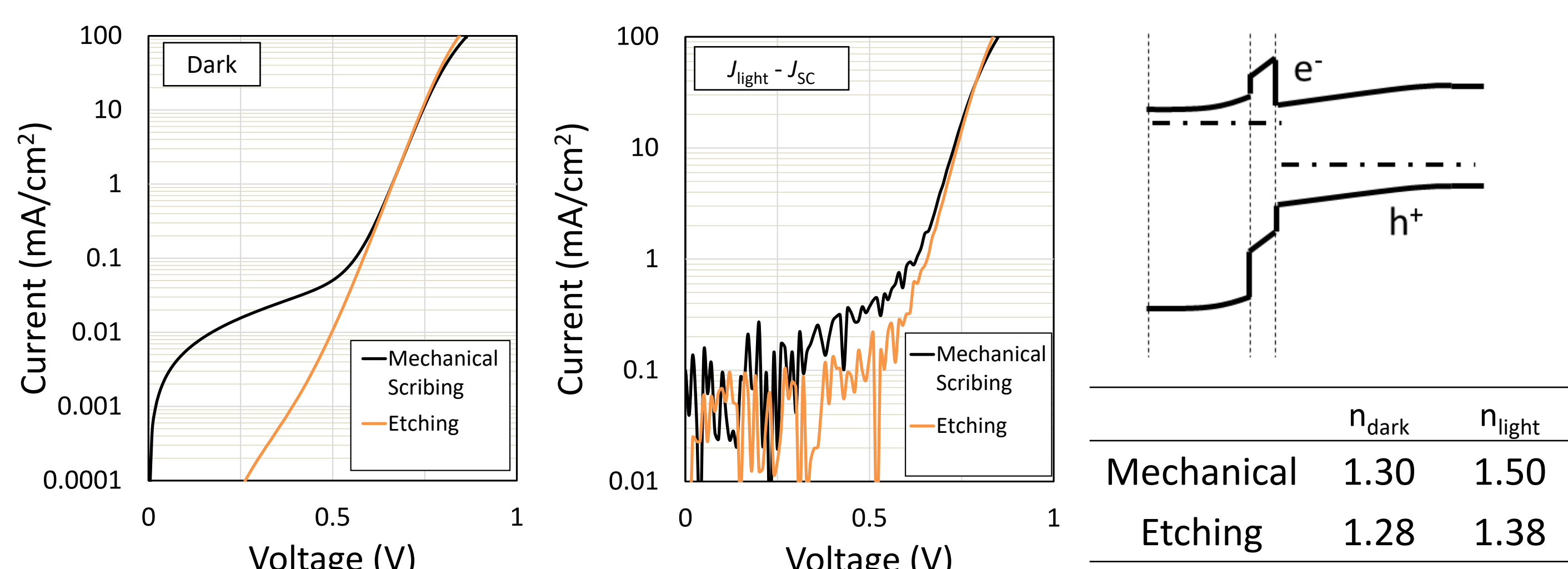
	Eff. (%)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	R _{sh, dark} (Ωcm ²)	R _{ser, dark} (Ωcm ²)	N _{cv,0V} (cm ⁻³)	J _{0, dark} (mA/cm ²)	n _{dark}
Mechanical Scribing	22.0	0.783	34.9	0.803	2x10 ⁴	0.4	1 × 10 ¹⁷	2.5 × 10 ⁻⁹	1.30
Etching	22.4	0.784	34.8	0.820	1x10 ⁷	0.3	1 × 10 ¹⁷	2.2 × 10 ⁻⁹	1.28

TRPL (C12132, Excitation: 532 nm, Emission: 1080 nm)

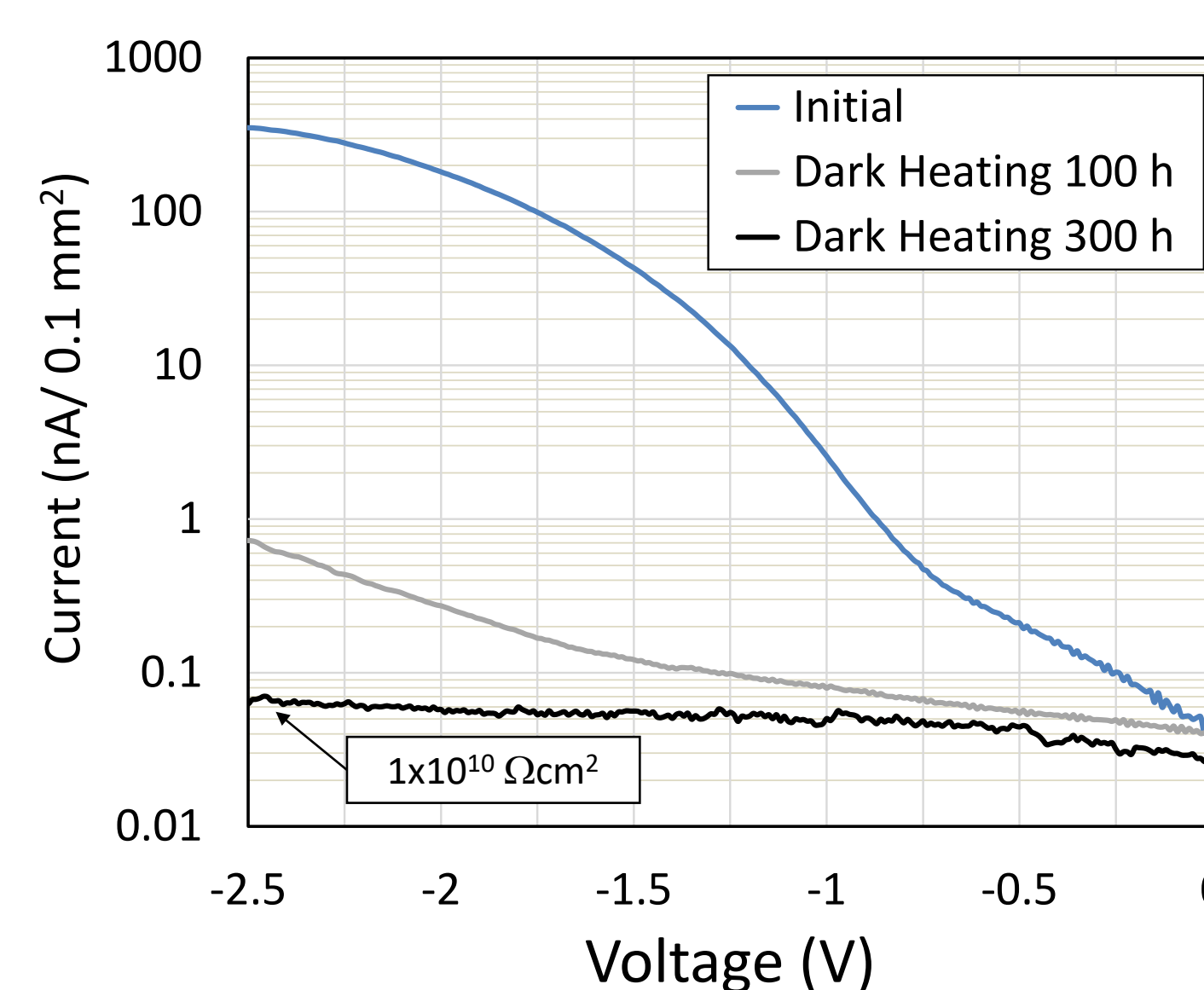


N _{cv} < 1x10 ¹⁶ cm ⁻³	CIGS	Ag: 7x10 ¹⁸	Ag: 1x10 ¹⁹	N _{cv} > 1x10 ¹⁷ cm ⁻³	CIGS	Ag: 7x10 ¹⁸	Ag: 1x10 ¹⁹
τ ₁ (ns)	45	97	108	τ ₁ (ns)	16	24	44
τ ₂ (ns)	146	297	347	τ ₂ (ns)	80	117	195

考察



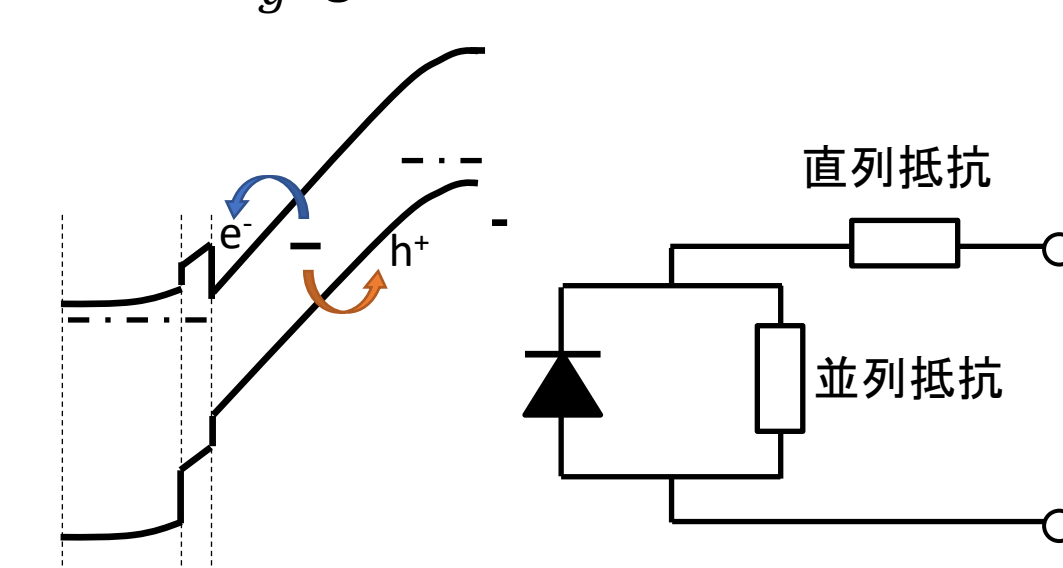
Etchingにより素子分離されたCIGS太陽電池は、ダイオード理想因子が優れる。特に光照射下において理想因子が優れ、FFが増大し、変換効率が高くなる。これらの結果はMechanical Scribingによって、太陽電池端面に再結合中心が発生していることを示唆している。



$$J_R = q \left[\frac{D_n n_i^2}{\tau_n N_A} + \frac{q n_i W_D}{\tau_g} \right]$$

Diffusion current + Generation current

W_D: depletion-layer width
τ_g: generation lifetime



Etchingにより素子分離されたCIGS太陽電池は、並列抵抗が飛躍的に増大する。暗状態加熱と組み合わせることで、高感度光検出器の応用が期待できる。

結論

→ CIGS太陽電池のEtching isolation

- 並列抵抗を飛躍的に向上させる
- 端面に再結合中心を作らず、ダイオード理想因子が改善
- FFを改善させ、変換効率22.4%を達成
- 暗状態加熱を行うことで、並列抵抗をさらに改善させる

謝辞: 本研究は(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援により実施されました。関係各位に感謝致します。

参考文献

- [1] I. Repins, et al., Prog. Photovolt: Res. Appl. 16, 235 (2008).
- [2] H. Sugimoto, et al., PVSEC-29, China (2019).
- [3] M. Nakamura, et al., IEEE J. Photovolt. 9, 1863 (2019).
- [4] M. Edoff, et al., IEEE J. Photovolt. 7, 1789 (2017).

高効率なCIGS太陽電池における相反定理の実験的な検証

1. はじめに

高性能な太陽電池を開発するためには、開放電圧 (V_{OC}) の改善の余地を正確に知ることが重要である。従って開発中の太陽電池の V_{OC} の理論限界値を知ることは不可欠である。

これまでに知られてきた V_{OC} の理論限界値の概念の中で最も先進的な概念は、放射限界値と呼ばれる概念であり、その概念の起源は、Shockley - Queisser理論である。但しここで放射限界とは、非輻射性再結合が皆無である状態を意味する。

$J_{nrad}(V) \equiv 0$ を意味する。 $\Leftrightarrow J_{dark}(V) \equiv J_{EL}(V)$ を意味する。 ← 3. を見よ。

V_{OC} の放射限界値を求める方法には、2種類 (4. のTABLE IのNo. 1とNo. 2) がある。

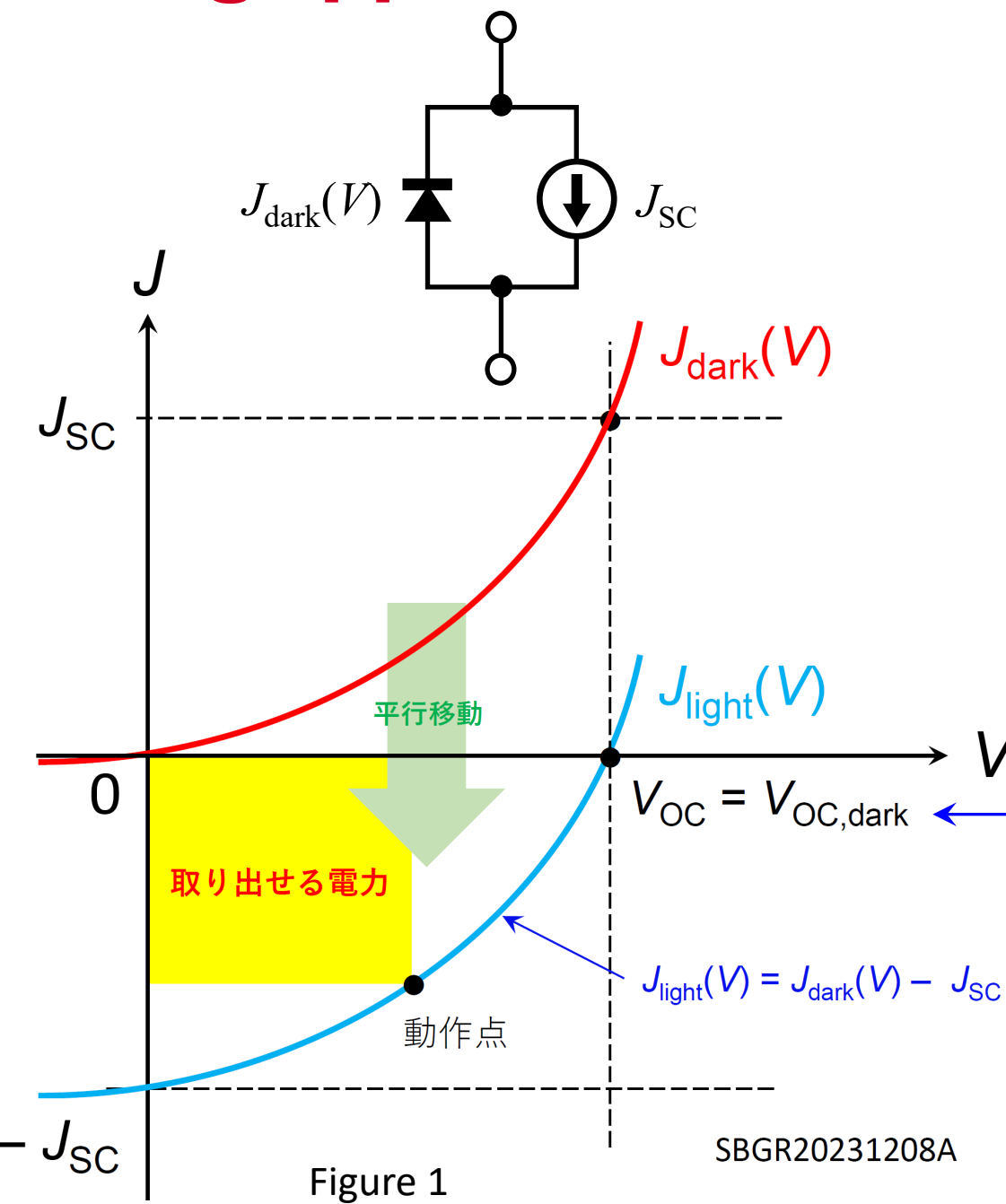
(2)式の相反定理を使う方法 ↑ EL発光強度の絶対値を測定する方法

本研究では、No. 1とNo. 2の両方の方法で V_{OC} の放射限界値 ($V_{OC,rad}$ と $V_{OC,em}$) を求め、両者を比較・検討した結果を報告する。

→ 実験の結果として、 $V_{OC,rad}$ と $V_{OC,em}$ は、我々の実験誤差の範囲内で整合していた。
($V_{OC,rad} = 0.91$ V, $V_{OC,em} = 0.90 \pm 0.47$ V)

→ V_{OC} の放射限界値を求める方法としては、No. 1とNo. 2のいずれもが正しい結果を与える。

2. Shifting approximation



$$J_{light}(V) = J_{dark}(V) - J_{SC}$$

Shifting approximationが成立するならば、 $J_{dark}(V)$ は小さいほど良い。

→ V_{OC} や FF が大きくなり、結果として変換効率も高くなる。

ここでは、shifting approximationが成立すると仮定する。

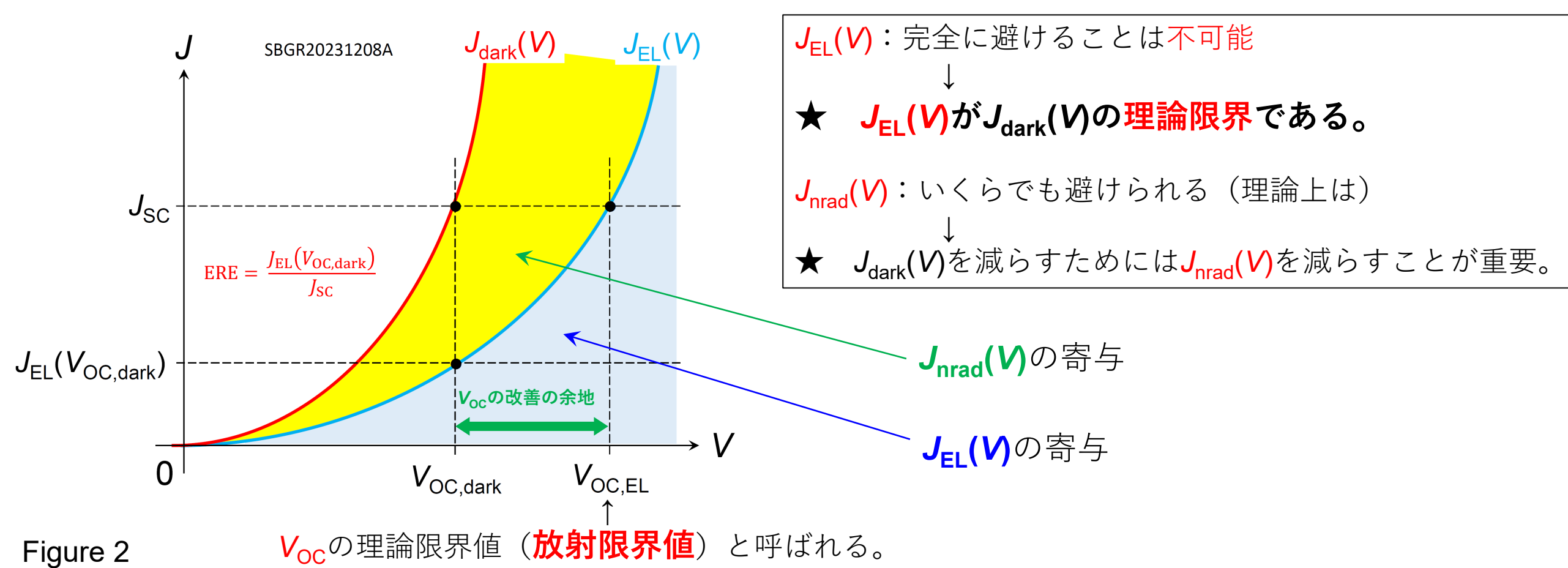
Shifting approximationが成立するならば、 $V_{OC,dark} = V_{OC}$ where $J_{dark}(V_{OC,dark}) = J_{SC}$

★ 結局は、 $J_{dark}(V)$ のみを考えれば良い。(それを減らすことを考えればよい。)

3. $J_{dark}(V)$ の起源

$J_{dark}(V)$ の起源は? $J_{dark}(V) = J_{EL}(V) + J_{nrad}(V)$ ← 2種類ある

輻射性再結合の寄与 (= $q \times$ EL発光強度) 非輻射性再結合の寄与



$J_{EL}(V)$: 完全に避けることは不可能
★ $J_{EL}(V)$ が $J_{dark}(V)$ の理論限界である。
 $J_{nrad}(V)$: いくらでも避けられる (理論上は)
★ $J_{dark}(V)$ を減らすためには $J_{nrad}(V)$ を減らすことが重要。

Figure 2 V_{OC} の理論限界値 (放射限界値) と呼ばれる。
これを知りたい → 結局は、 $J_{EL}(V)$ が分かれば良い。

4. $J_{EL}(V)$ を求める方法 (2種類)

$J_{EL}(V)$ は次式で与えられる。

$$J_{EL}(V) = q \times \text{EL発光強度} = q \int_0^\infty \phi_{EL}(E, V) dE \quad (1)$$

光子数 印加電圧がVのときのEL発光スペクトル

★ $J_{EL}(V)$ を求めることは、EL発光強度 (= 光子数) を求めることに他ならない。

EL発光強度を求める方法には、以下の2種類 (No. 1とNo. 2) がある。

No.	方法	$J_{EL}(V)$	$V_{OC,EL}$	過去の研究例
1	EQE(E)を測定し、下記の(2)式により $\phi_{EL}(E, V)$ を算出し、(1)式の第3式に代入する。	$J_{rad}(V)$	$V_{OC,rad}$	多い
2	EL発光強度の絶対値を測定し、(1)式の第2式に代入する。	$J_{em}(V)$	$V_{OC,em}$	3例

V_{OC} の放射限界値

$$\phi_{EL}(E, V) = \text{EQE}(E) \phi_{BB}(E) \exp(qV/k_B T) \quad (2)$$

EQEスペクトル 黒体輻射スペクトル

← 相反定理と呼ばれる。
optoelectronic reciprocity theorem

5. $V_{OC,EL}$ を求める方法 (2種類)

いずれの方法を用いても、次式が成立する。

$$J_{rad}(V) = J_{0,rad} \exp(qV/k_B T) \quad (3) \leftarrow \text{No. 1の方法}$$

$$J_{em}(V) = J_{0,em} \exp(qV/k_B T) \quad (4) \leftarrow \text{No. 2の方法}$$

where $J_{0,rad}$: EQE(E) から次式で決定される。

$$J_{0,rad} = q \int_0^\infty \text{EQE}(E) \phi_{BB}(E) dE \quad (5) \leftarrow \text{相反定理の帰結}$$

$J_{0,em}$: EL発光強度の実測値から決定される。

$$V_{OC,rad} = (k_B T/q) \ln(J_{SC}/J_{0,rad}) \quad (6) \leftarrow \text{No. 1の方法}$$

$$V_{OC,em} = (k_B T/q) \ln(J_{SC}/J_{0,em}) \quad (7) \leftarrow \text{No. 2の方法}$$

もし相反定理が実際のEL発光強度を正しく表現するならば、 $J_{em}(V) = J_{rad}(V) \Leftrightarrow J_{0,em} = J_{0,rad} \Leftrightarrow V_{OC,em} = V_{OC,rad}$ である。

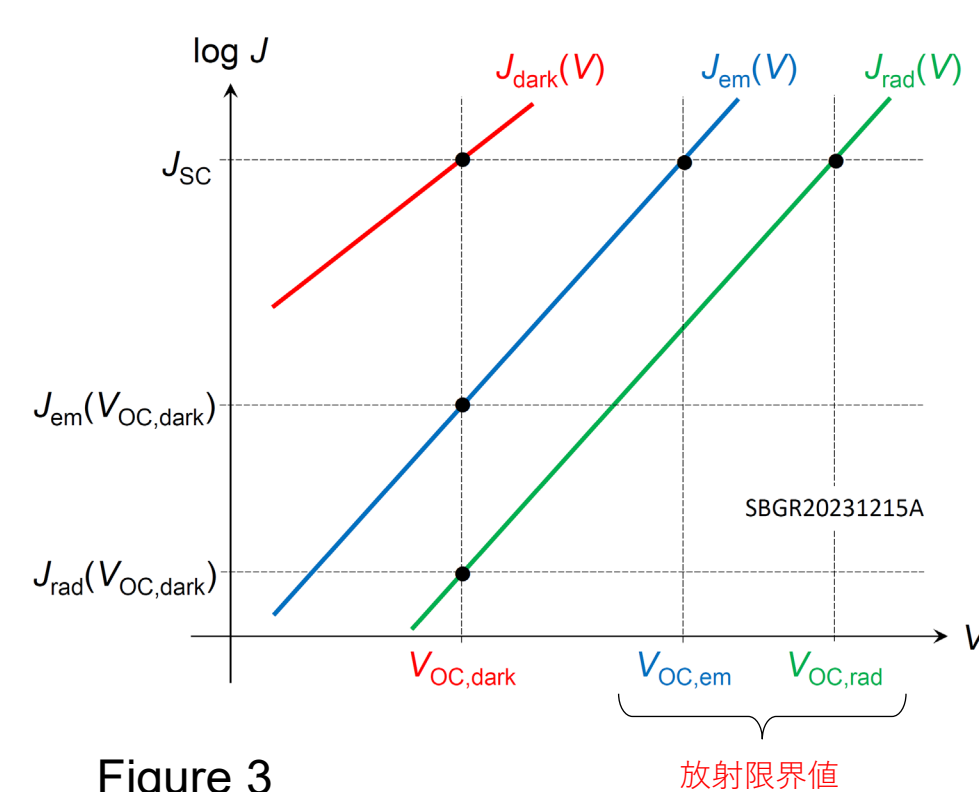
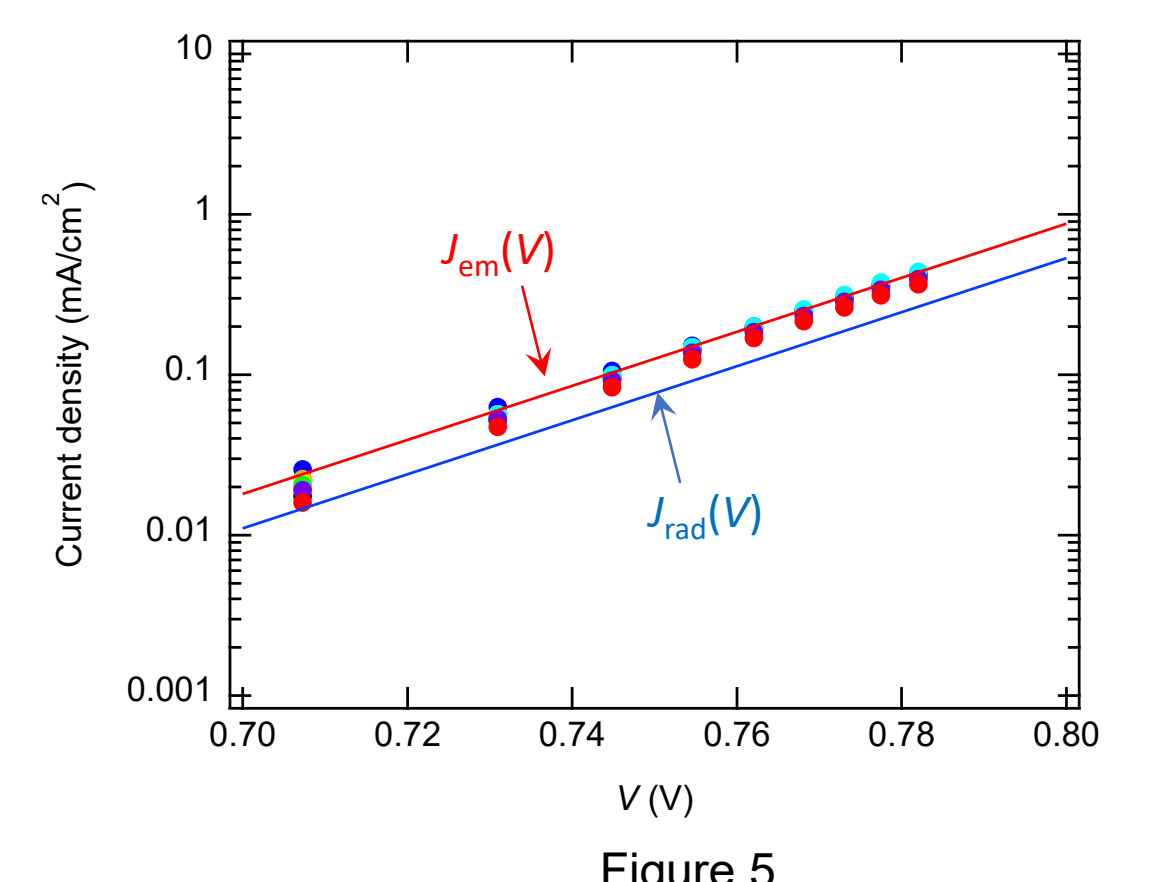
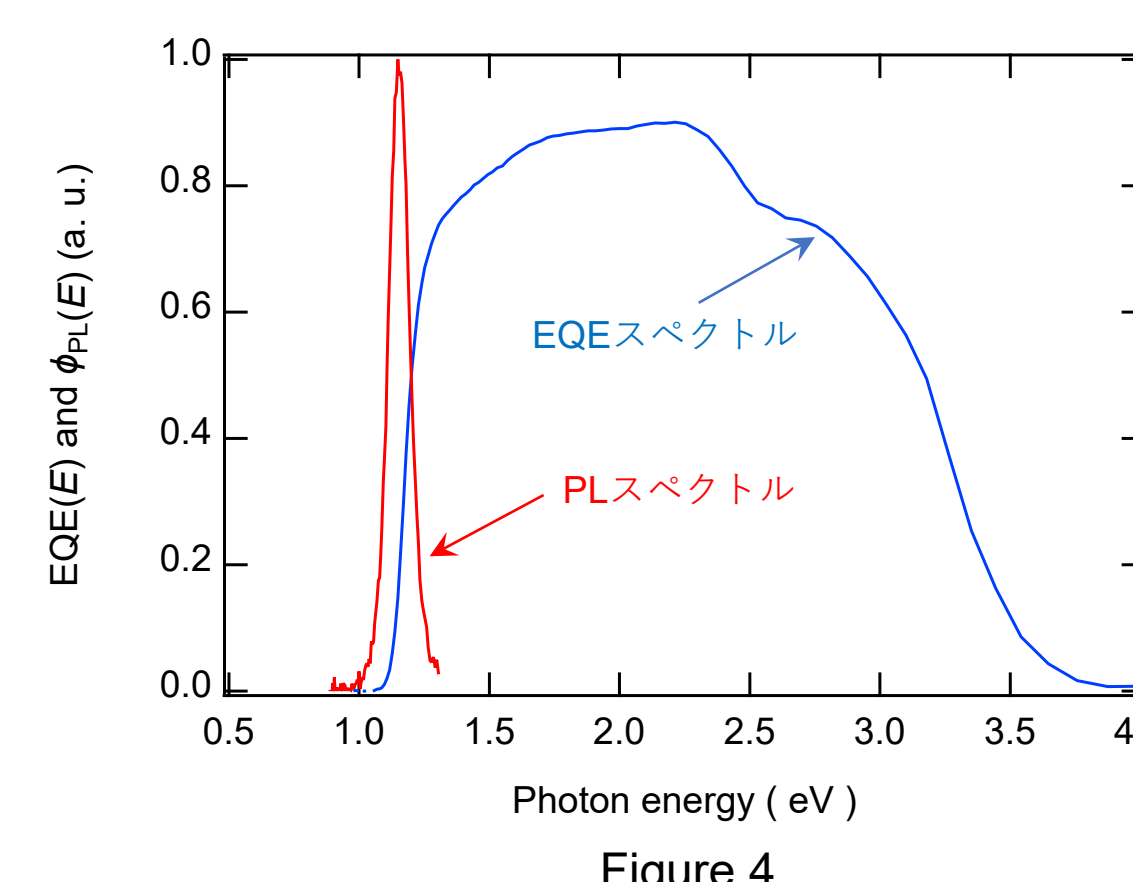


Figure 3 敢えて $J_{0,em} > J_{0,rad}$ と仮定したときの模式図

6. 実験結果1



・ Figure 5 の青色の直線は、No. 1の方法により求めた $J_{rad}(V)$ である。
すなわち、Fig. 4 のEQE(E) から(5)式により $J_{0,rad}$ を求め、それを(3)式に代入した結果である。
・ Figure 5 の丸印は、No. 2の方法により求めた $J_{em}(V)$ である。
すなわち、EL発光強度の絶対値を測定し、それを(1)式に代入した結果である。
・ Figure 5 の赤色の直線は、 $J_{em}(V)$ の測定結果に対して、(4)式をフィッティングした結果である。

7. 実験結果2

測定とフィッティングの結果:

$$J_{0,rad} = 1.8 \times 10^{-14} \text{ mA/cm}^2, J_{0,em} = (2.9 \pm 1.5) \times 10^{-14} \text{ mA/cm}^2 \rightarrow V_{OC,rad} = 0.91 \text{ V}, V_{OC,em} = 0.90 \pm 0.47 \text{ V}$$

$V_{OC,rad}$ と $V_{OC,em}$ は、我々の実験誤差の範囲内で整合している。

→ (2)式で与えられる相反定理は、実際のEL発光強度を正しく表現していることが、我々の実験誤差の範囲内で確認された。

→ V_{OC} の放射限界値を求める方法としては、No. 1とNo. 2のいずれもが正しい結果を与える。

★ 但し Fig. 5 を見ると、系統的に $J_{em}(V) > J_{rad}(V)$ であるように見える。

→ V_{OC} の放射限界値を求める方法としては、No. 2の方がNo. 1よりも正しい可能性がある。

この問題は、今後の詳しい検討が必要である。

8. 結論

V_{OC} の放射限界値を求める方法には、2種類 (4. のTABLE IのNo. 1とNo. 2) がある。

(2)式の相反定理を使う方法 ↑ EL発光強度の絶対値を測定する方法

本研究では、No. 1とNo. 2の両方の方法で V_{OC} の放射限界値 ($V_{OC,rad}$ と $V_{OC,em}$) を求め、両者を比較・検討した。

→ 実験の結果として、 $V_{OC,rad}$ と $V_{OC,em}$ は、我々の実験誤差の範囲内で整合していた。
($V_{OC,rad} = 0.91$ V, $V_{OC,em} = 0.90 \pm 0.47$ V)

→ V_{OC} の放射限界値を求める方法としては、No. 1とNo. 2のいずれもが正しい結果を与える。

★ 但し Fig. 5 を見ると、系統的に $J_{em}(V) > J_{rad}(V)$ であるように見える。

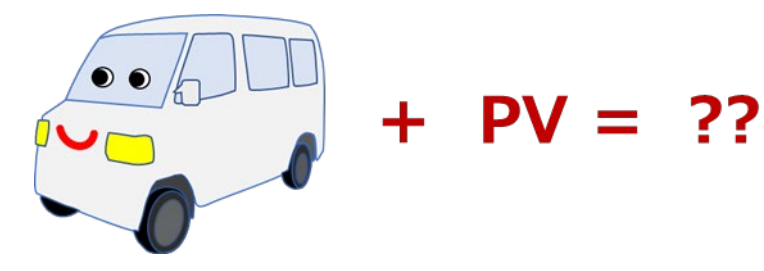
→ V_{OC} の放射限界値を求める方法としては、No. 2の方がNo. 1よりも正しい可能性がある。 → 今後の課題

参考文献

Hajime Shibata, Jiro Nishinaga, Yukiko Kamikawa, Hitoshi Tampo, Takehiko Nagai, Takashi Koida, Shogo Ishizuka, Toshimitsu Mochizuki, and Masafumi Yamaguchi, Experimental Confirmation of the Optoelectronic Reciprocity Theorem in High-Efficiency $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ Solar Cells, Physical Review Applied 19, 054072 (2023).

PVシステム搭載電気自動車の開発

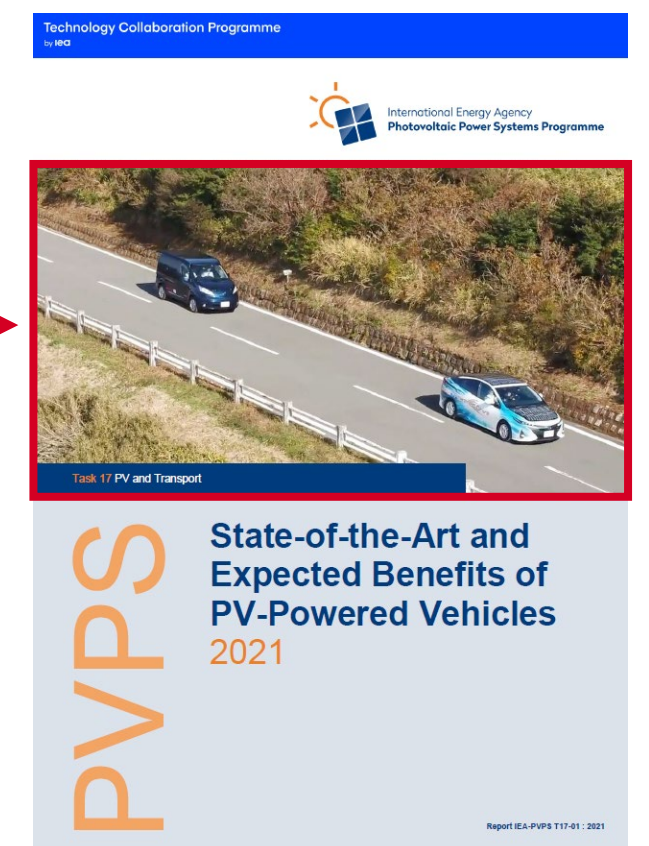
背景：車載PVの可能性



- ◆ 脱炭素社会に向けて
クルマの電動化とPV搭載は、運輸部門のCO₂排出量削減（⇒カーボンニュートラル社会の実現）に向けて親和性が高い。
- ◆ PV搭載EV（PVEV）
EVは動く蓄電池といわれており、PV（発電機）との一体化により効率の良い需給一体型システムとなりうる。
- 本研究の目的
産総研では、クルマの中でも商用車をターゲットにしたPV搭載を検討している。本研究では、コミュニティバス用途を想定したPVEVを開発し、初期性能評価を行った。

PVEVの研究開発・市場動向

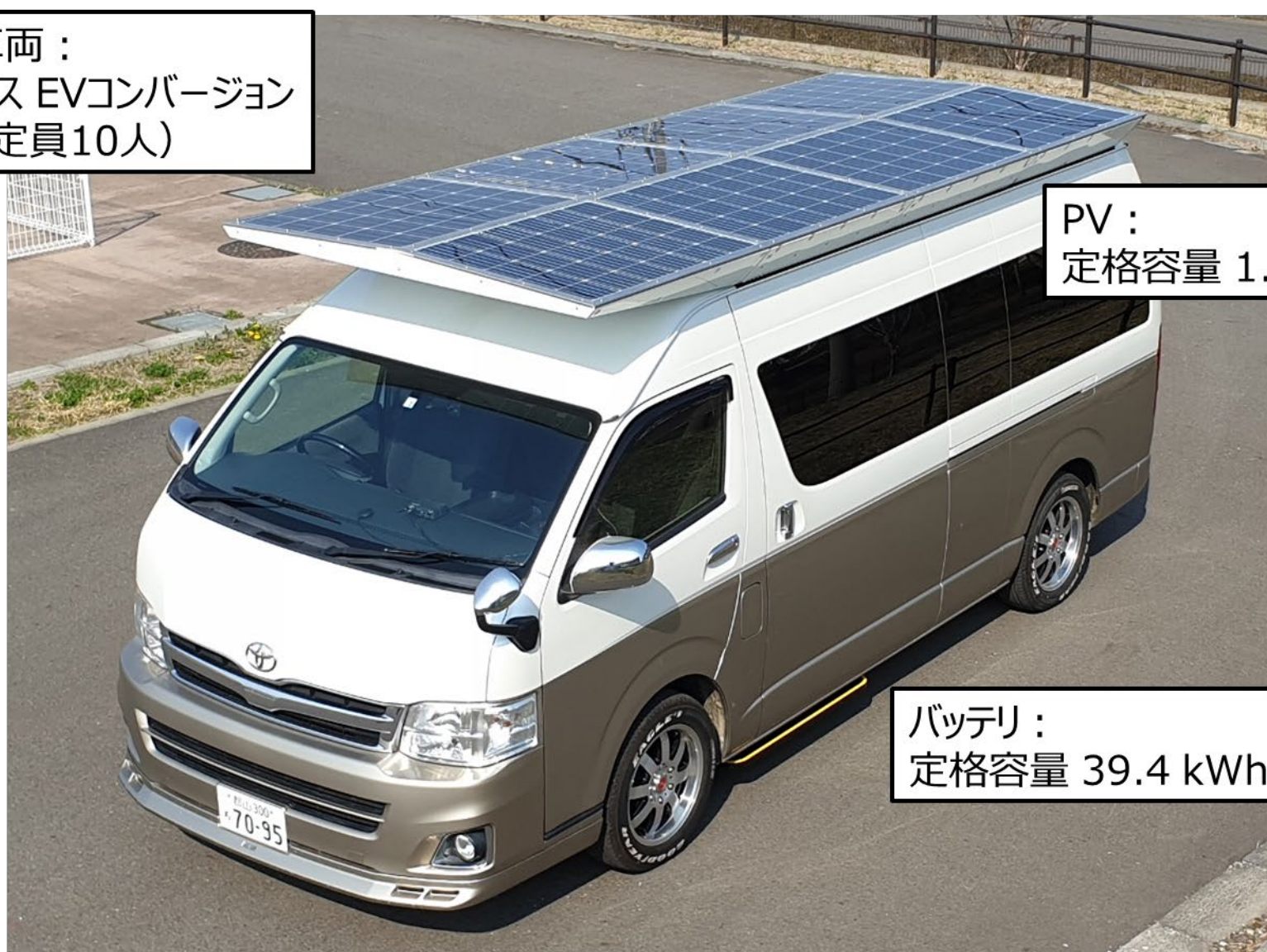
- ◆ 乗用車
 - ✓ 国内では、トヨタ自動車のプリウスPHV、bZ4xにはオプションとしてPV搭載仕様（～225W）がある。
 - ✓ 海外では、Sono Motors等スタートアップ系企業による開発・販売が推進されていたが、商用車向けに方針転換
 - ✓ NEDOとトヨタ自動車、日産自動車による大容量PV搭載車両（860、1150W）の開発、実証走行が進行中。
- ◆ 商用車
 - ✓ 独フラウンホーファーISEによる大型EVトラックでの実証等が進行中。



出所：IEA PVPS Task17

産総研のPVEV

ベース車両：
ハイエース EVコンバージョン
(乗車定員10人)

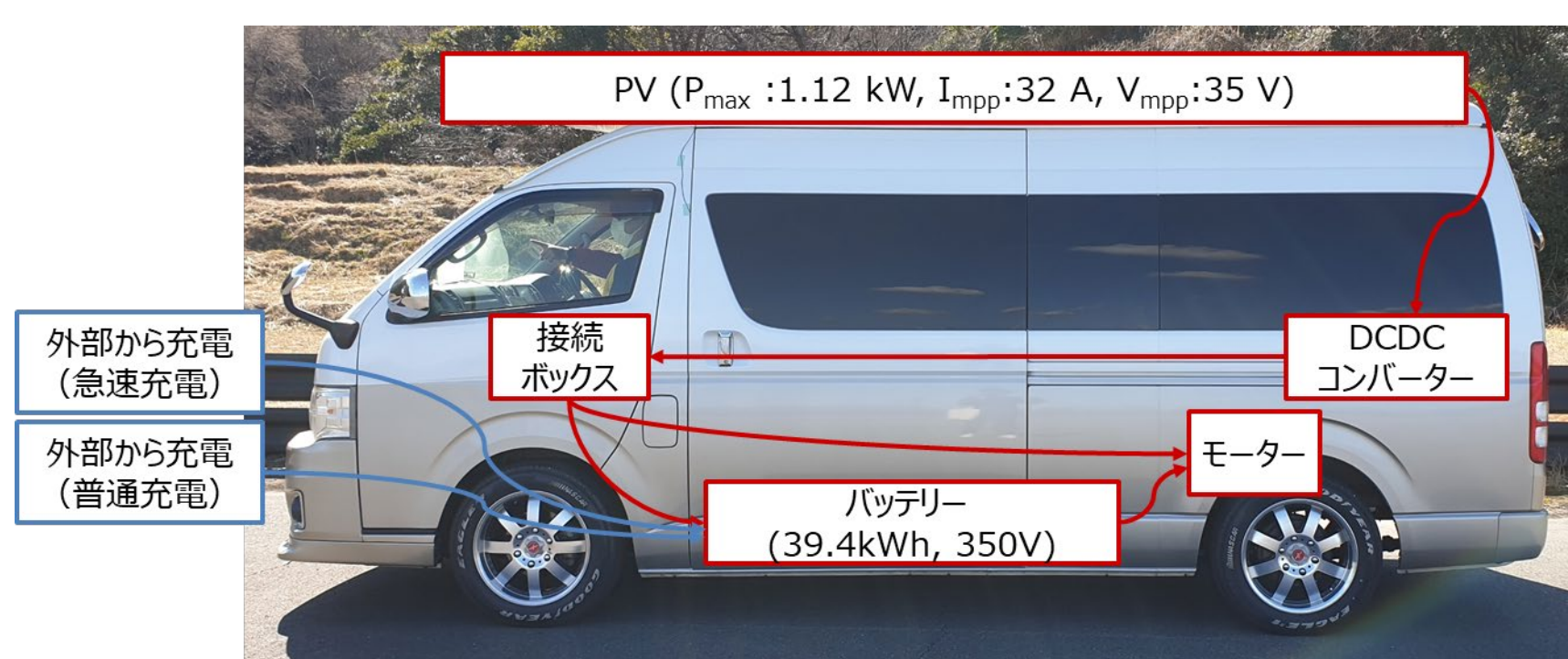


PV：
定格容量 1.12 kW

バッテリー：
定格容量 39.4 kWh

車体の特徴

- ✓ PVモジュールは結晶Siセルベース
- ✓ PV電力は走行中は直接モーターで利用、停車中はバッテリーに充電。
- ✓ バッテリーはPV充電と普通充電の同時実施可能。

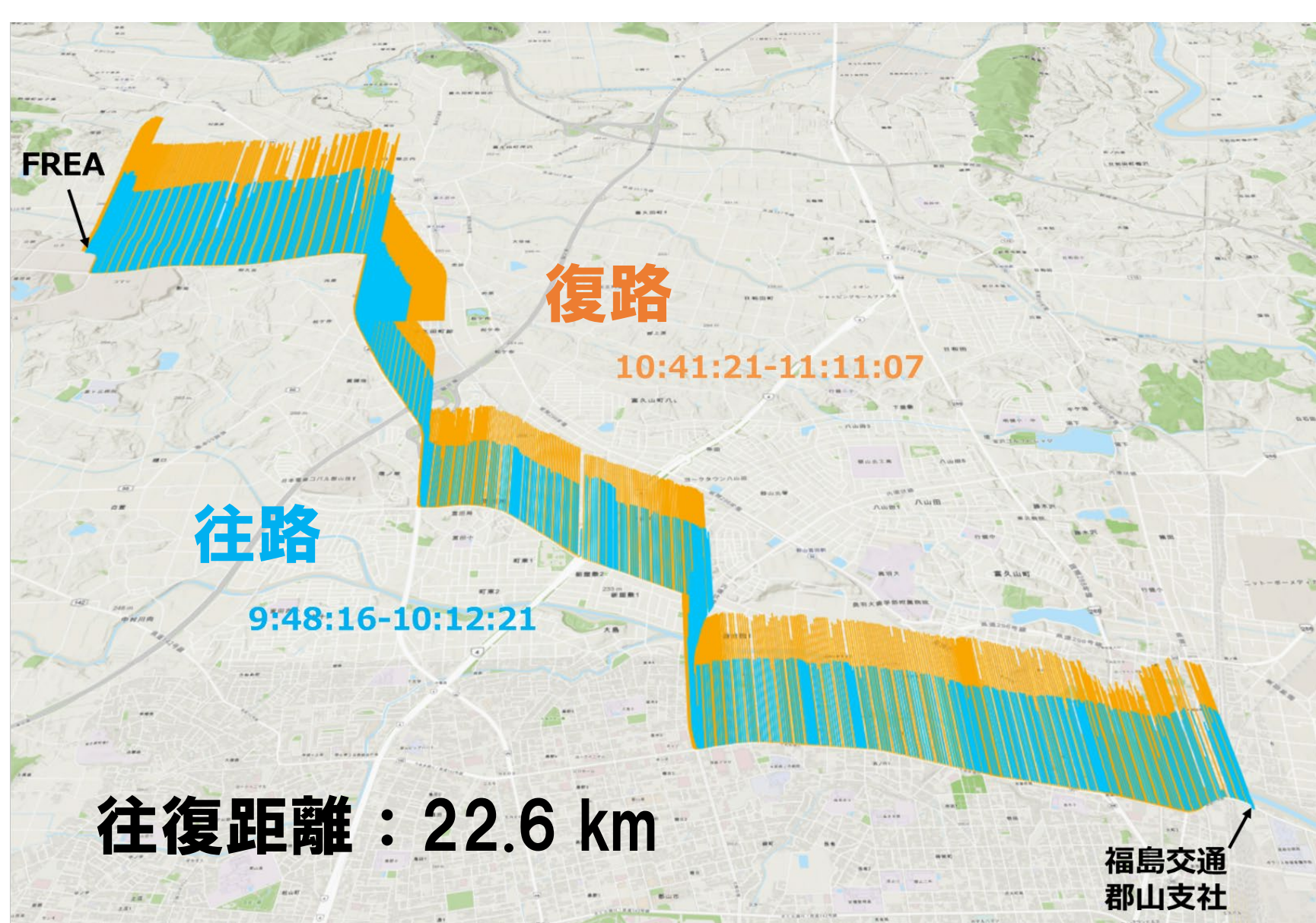


主な取得データ

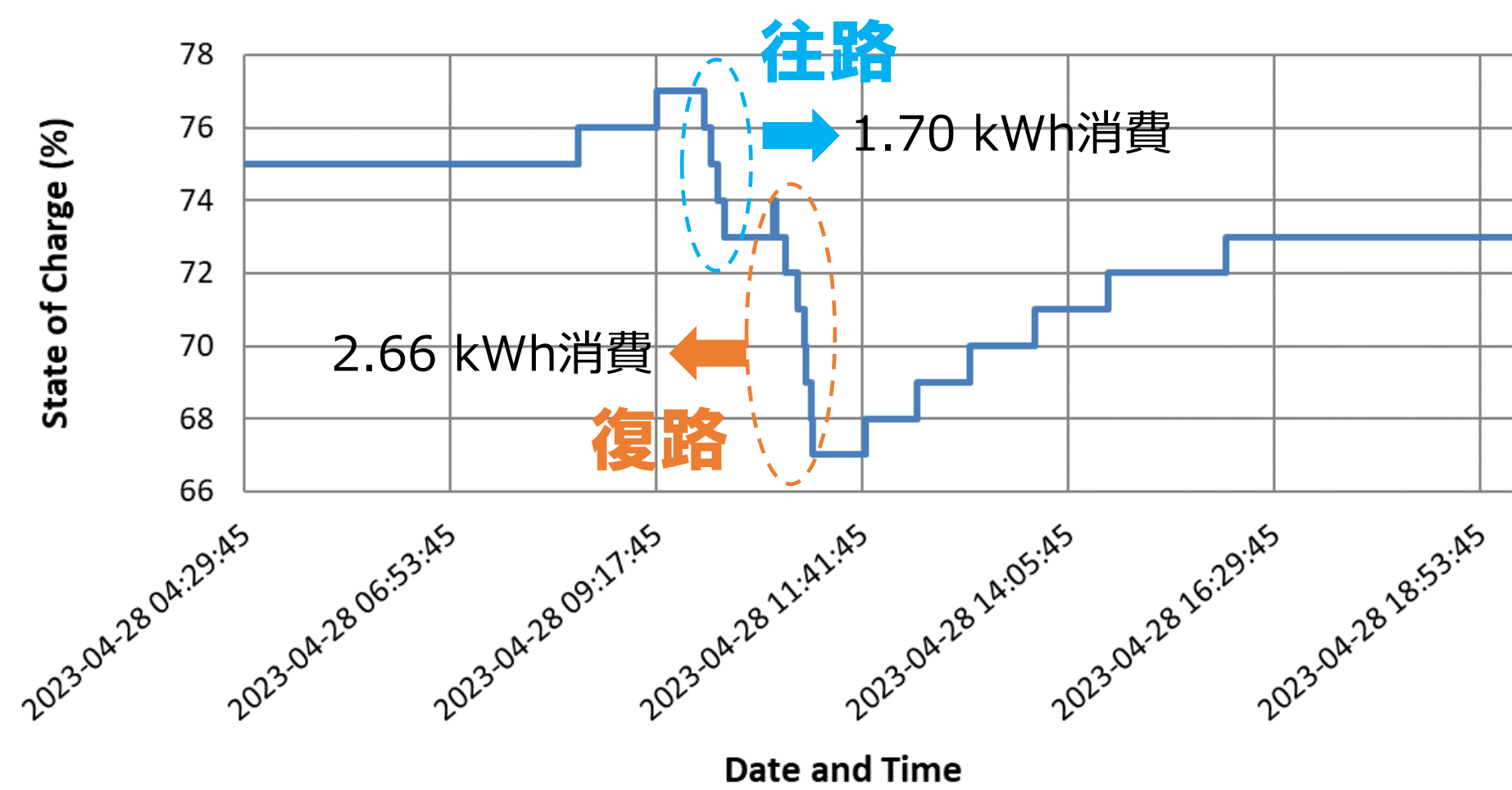
- 位置情報
 - ✓ 緯度、経度、高度
- 車両情報
 - ✓ 車速、シフト状態
 - ✓ モーター回転数、インバーター電流、電圧
 - ✓ バッテリー電流、電圧、SOC、温度
 - ✓ 車載充電器（普通充電、急速充電）
- PV情報
 - ✓ DDコンへの入力電流、電圧
 - ✓ DDコンからの出力電圧・電流
 - ✓ モジュール温度
 - ※ 日射計は常設していない

テスト走行（2023/4/28 快晴日の例）

発電の様子



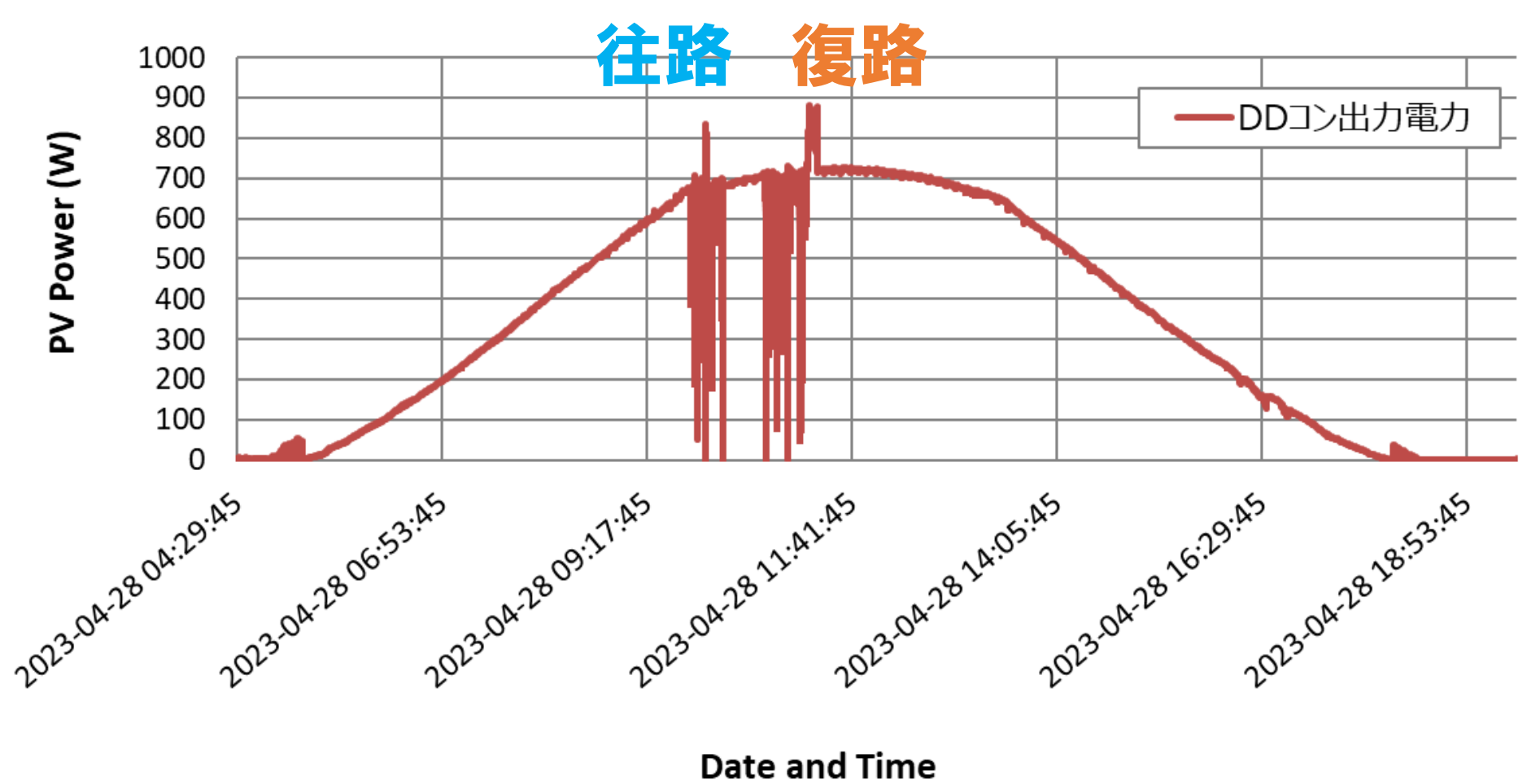
バッテリーデータ



✓ 走行に伴うバッテリー消費量は4.36 kWh

➢ この日の走行（距離22.6 km）に要した電力量は、搭載したPVにより全て賄えたことになる（ただしDDコン→バッテリー間の充電効率を無視した場合）

PVデータ



✓ 一日のPV電力量は5.18 kWh

PV搭載による電費向上

日付	2023/4/28		2023/4/26
	快晴		雨
時間	9:48:16-10:12:21	10:41:21-11:11:07	10:27:56-11:17:57
走行距離 (km)	11.1	11.5	31.3
バッテリー消費電力量 (kWh)	1.70	2.66	7.59
ベース電費(km/kWh)	6.5	4.3	4.1
PV発電量 (kWh)	0.26	0.35	0.05
PV発電を除外した電費 (km/kWh)	5.6	3.8	4.09
電費向上率 (%)	16	13	0.2

- ✓ 走行中の発電は、モーターや車両の制御系で100%使用されたと仮定することでPV発電を除外した電費を算出し、ベース電費と比較。

➢ 4/28のような快晴日の場合、13～16%の電費向上効果を確認。

今後の展開

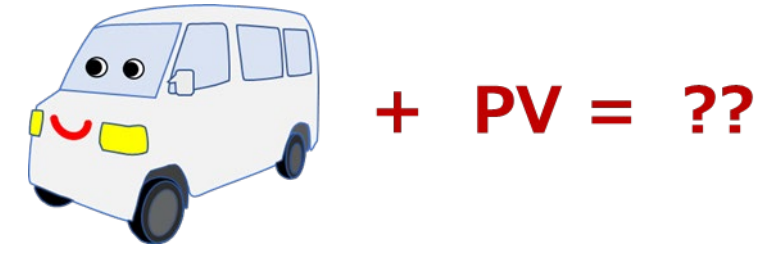


- ✓ 車両は2023年9月より福島市立子山地区においてコミュニティバス利用を想定したルートでデータ取得を実施中。
- ✓ 福島交通（株）との連携
- ✓ より長期的なデータを取得し、PVの搭載効果等を評価の予定。

謝辞：本研究は福島県における再生可能エネルギーの導入促進のための支援事業費補助金（福島再生可能エネルギー研究所最先端研究・拠点化支援事業）ならびに国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPN P20015）の一環として実施されたものです。

車載PVのポテンシャル検討： 商品配送車の場合 その2

背景：車載PVの可能性



- ◆ 脱炭素社会に向けて
クルマの電動化とPV搭載は、運輸部門のCO₂排出量削減（⇒カーボンニュートラル社会）の実現に向けて親和性が高い。
- ◆ PV搭載EV（PVEV）
EVは動く蓄電池といわれており、PV（発電機）との一体化により効率の良い需給一体型システムとなりうる。
- 本研究の目的
産総研では、クルマの中でも商用車をターゲットにしたPV搭載を検討している。本研究では、商品配送用車両としてPVEVを用いた際の効果を分析、課題抽出を行った。

実証車両

三菱自動車工業株式会社のminiCAB MiEVをベースとし、ルーフにPVモジュール型日射センサー・データロガー等を搭載したルーフボックスを取り付け、また車内に車両データ（バッテリー充放電量等）を取得する端末を取り付け。

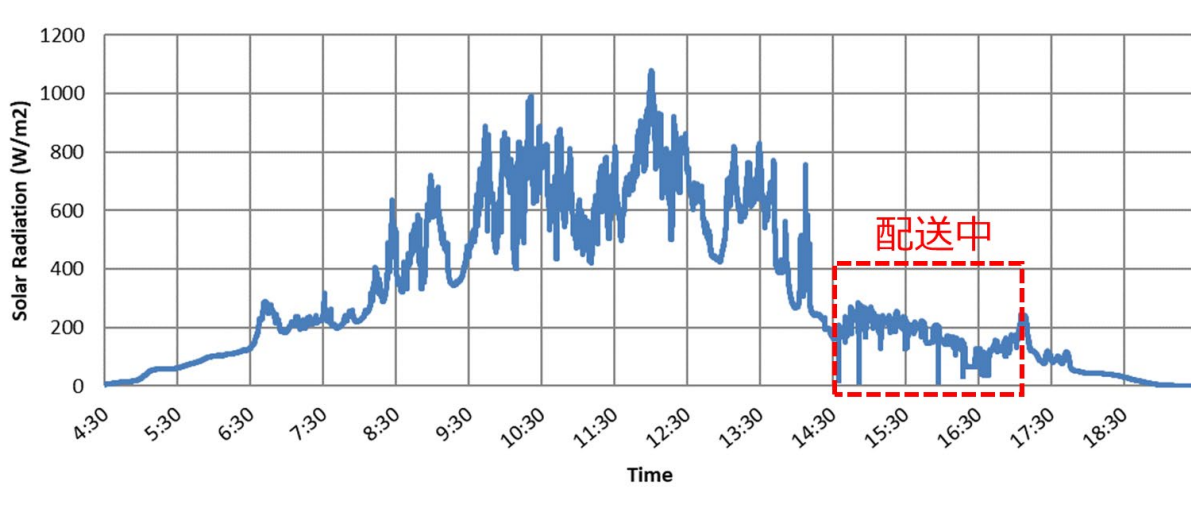


データ取得&ポテンシャル分析（PVからどの程度電力を賄うことが可能か？）

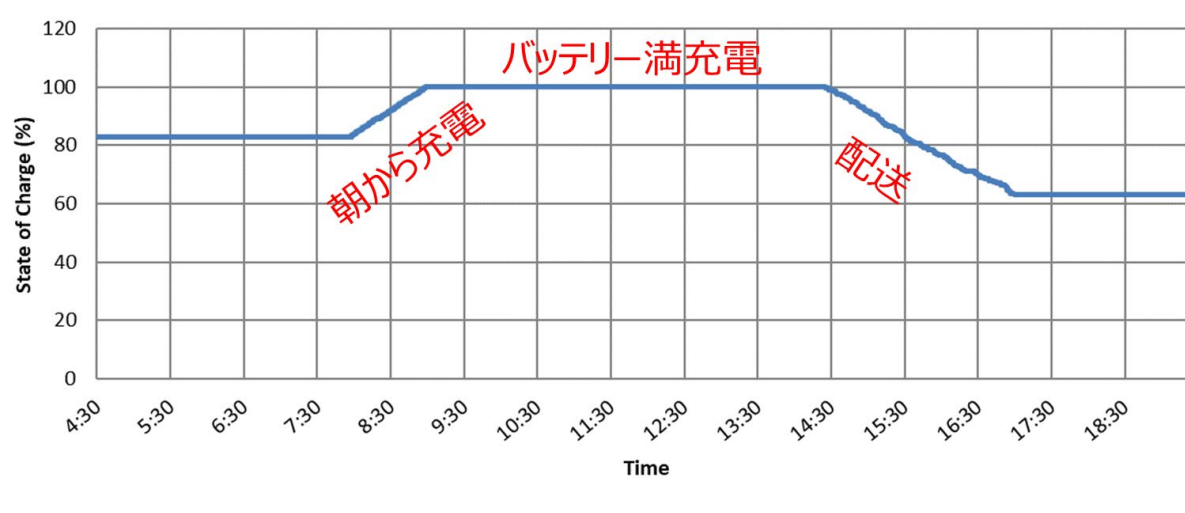
株式会社ヨークベニマル（本社：福島県郡山市）郡山台新店が実施している商品配送サービス用車両として実証車を導入。データ（走行ルート、日射強度、バッテリー充放電等）の取得を2022年2月より開始。



走行ルート例



実証車ルーフへの日射強度例



バッテリー充放電パターン例

日々の日射強度から見積もったPV発電電力量と実測のバッテリー消費量との単純な比較においては、右表の通り、月によって10~70%程度の電力を太陽光から賄える可能性を確認（ただし2022年2月から2023年1月の場合）。

年/月	EVバッテリー消費電力量に対するPV発電電力量*の比率 (%)
2022/02	17.6
2022/03	56.9
2022/04	71.4
2022/05	61.0
2022/06	54.8
2022/07	39.8
2022/08	46.0
2022/09	47.6
2022/10	54.7
2022/11	48.0
2022/12	11.4
2023/01	23.6

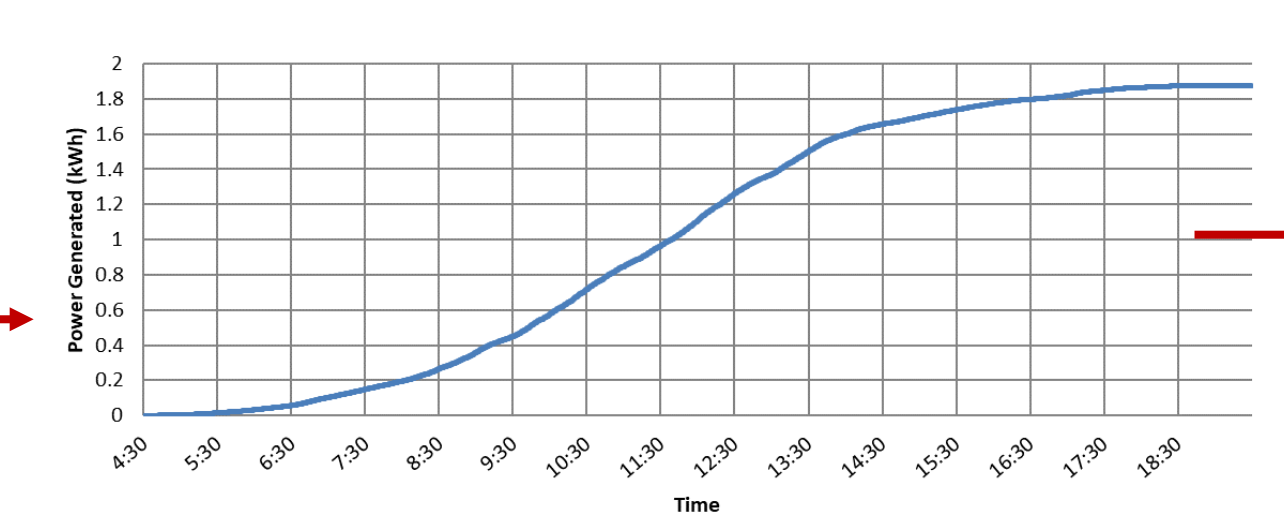
*日射実測データからの推定値

車両の充電時間・稼働時間等を考慮した詳細分析（実運用上の課題抽出）

- ヨークベニマル郡山台新店が行っている商品配送サービスは、
- ・平日（月～金）は実施
 - ・土日は実施していない（月～金の祝日は実施している）
 - ・午前中に客から電話で注文を受け、午後から配送に出かけるというスタイル

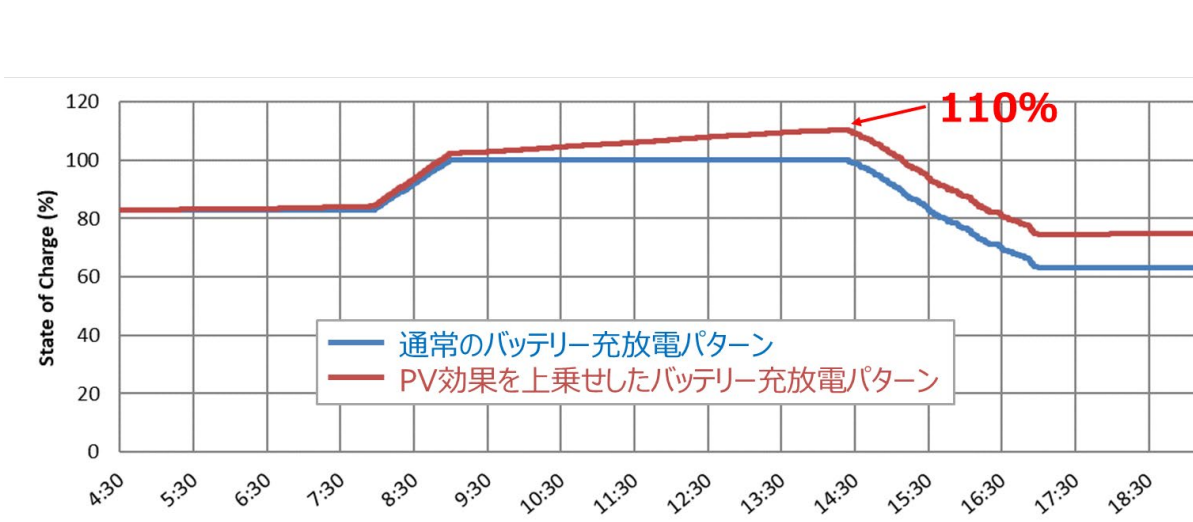
上に示した **バッテリー充放電パターン例** のように、「朝から普通充電を開始し、お昼にかけて満充電とし、午後の配送によりバッテリーを消費し、配送業務終了後は充電せず所定の店舗駐車場に戻す」といった充電操作が行われている。

上に示した **実証車ルーフへの日射強度例** から算出したPV電力量（積算）の時系列グラフは

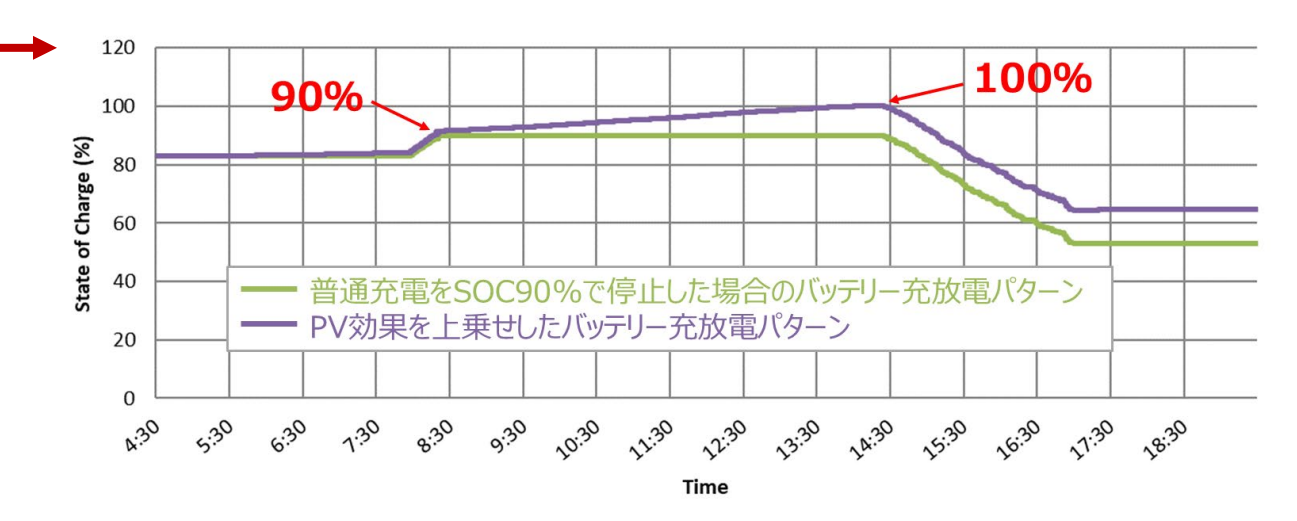


この発電分をに加算すると（この日は）バッテリー容量10%分の余剰（発電抑制）が発生する。

バッテリー充放電パターン例



発電抑制なくPVを活用するためには、



朝からの充電を（この日は）90%で止めることが必要！

ただし、配送出発前に得られるPV電力を見越して充電操作を行う場合でも、車載PVの抑制が避けられない日が発生することも判明。



例：2023年5月のPV抑制電力量の見積り

配送がない土日や平日注文が入らない日（⇒バッテリー消費がほとんどない日）にPV発電が多いと発電抑制が不可避に！

車載PV電力を無駄なく使いこなすためには、V2X等による車両以外への電力融通も必要！

まとめ

PVEVが社会実装された際、PV電力を最大限活用するためには、以下の技術（機能）の導入が必要と考えられる。

- ① 走行開始前までに得られる発電電力量の予測、予測に基づく充電制御
- ② 発電抑制を防ぐためのV2X（Vehicle to X, X = home, store等）

謝辞：本研究は福島県における再生可能エネルギーの導入促進のための支援事業費補助金（福島再生可能エネルギー研究所最先端研究・拠点化支援事業）ならびに国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPN P20015）の一環として実施されたものです。

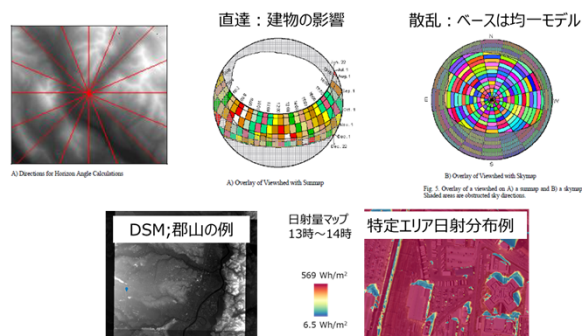
GIS を利用した車載PV システムの 発電電力量推定におけるDSMの解像度による影響評価

研究の目的

- 太陽光発電システム搭載電気自動車（PVEV, VIPV）のユーザーメリットは不明確な面も多く、市場開拓のハードルとなっている。
- 乗用車に関しては、各種分析なども行われているが、商用車はユースケースごとに分析が必要。また、EVの導入・設計支援や分析などはあるが、PVEV, VIPVに関するものがない。
- 本研究では、ターゲットは商用車（バス・配送車等）として、実証データに基づくPVEVシステム設計技術の開発を行い、商用車PVEVの普及に向けた取組を支援することを目標としている。
- これまでに、GISを利用したシステム設計に利用する発電電力量の推定技術の検討してきた。
- 利用するDSMデータの解像度の違いによる結果について報告する。

比較方法の概要

- 推定方法の概要：
 - ArcGIS Spatial Analyst:日射量解析を利用（5分平均）
 - 建物情報は、DSM (AW3D高精細版:0.5m、1m、2m解像度)を利用して比較
- 日影補正係数の計算方法：
 - 快晴日の散乱比を0.2と仮定
 - 直達分のみを減じる係数とする
 - その他の損失係数：KPOの計算（ピーク値で補正）
- 日射量推定：
 - 衛星観測データを入力とした放射モデルによる推定値（太陽放射コンソ：直達、散乱、全天日射のデータを利用、2.5分、1kmメッシュ）
- 実測データ
 - 福島交通の運行中のバスの屋根の上で測定してるデータを利用。
 - 期間：2021年1月～2021年12月
 - 1秒サンプリングを5分平均値として利用。



出典：The Solar Analyst 1.0 User Manual.



図 実測データ収集の概要

結果概要

- 2021年1月～2021年12月（合計309日）
- DSM+GISを利用した発電電力量推定手法について、DSMの解像度の違いによる影響を評価した。
- 0.5→1.0→2.0により建物の日影が粗くなることにより、日影の影響を小さく見積もる傾向を確認。日積算での誤差影響はケースバイケースであるが、年間のエネルギー量は2～7%。

表 DSMの解像度による推定結果

	Daily Yield [kWh/kW]	(推定-実測) 実測
	2.96	
0.5m	3.00	1.3%
1.0m	3.07	3.7%
2.0m	3.20	8.3%

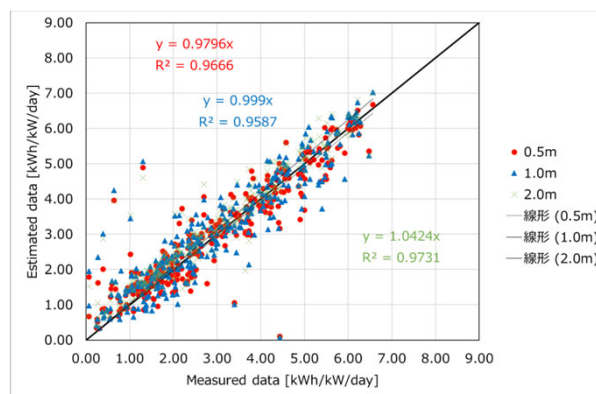


図 DSMの解像度による推定結果

謝辞：本研究は福島県における再生可能エネルギーの導入促進のための支援事業費補助金（福島再生可能エネルギー研究所最先端研究・拠点化支援事業）ならびに国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPN P20015）の一環として実施されたものです。また、太陽放射コンソーシアム提供のデータセット AMATERASSの日射量を利用した。関係者各位に感謝する。

ACインピーダンス測定を利用したモジュールリーク電流回路の性状解析とモデリング

背景と実験

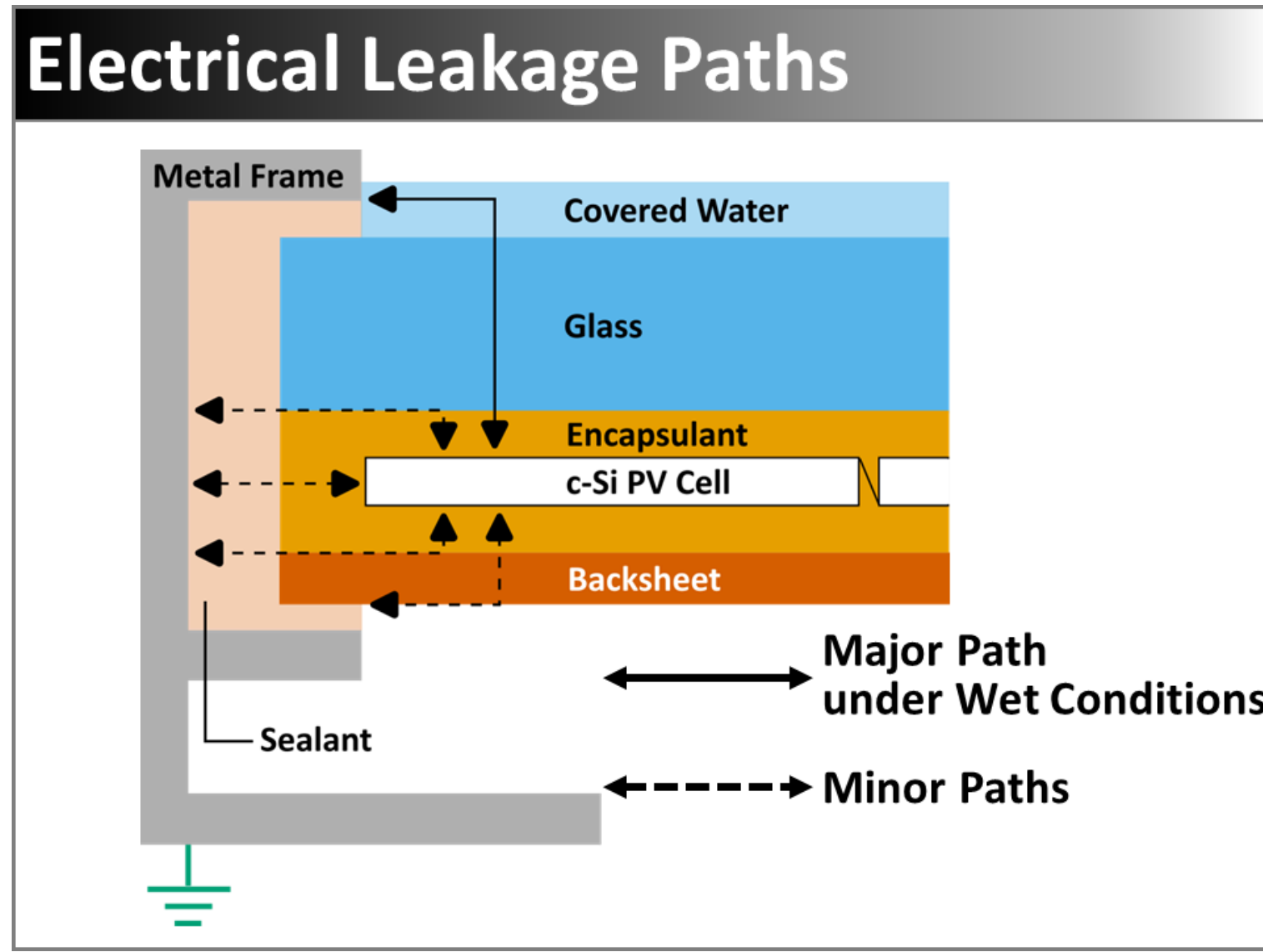
Motivation

Enhancement of Electrical Leakage Current within a PV Module

→ Insulation Breakdown in PV System

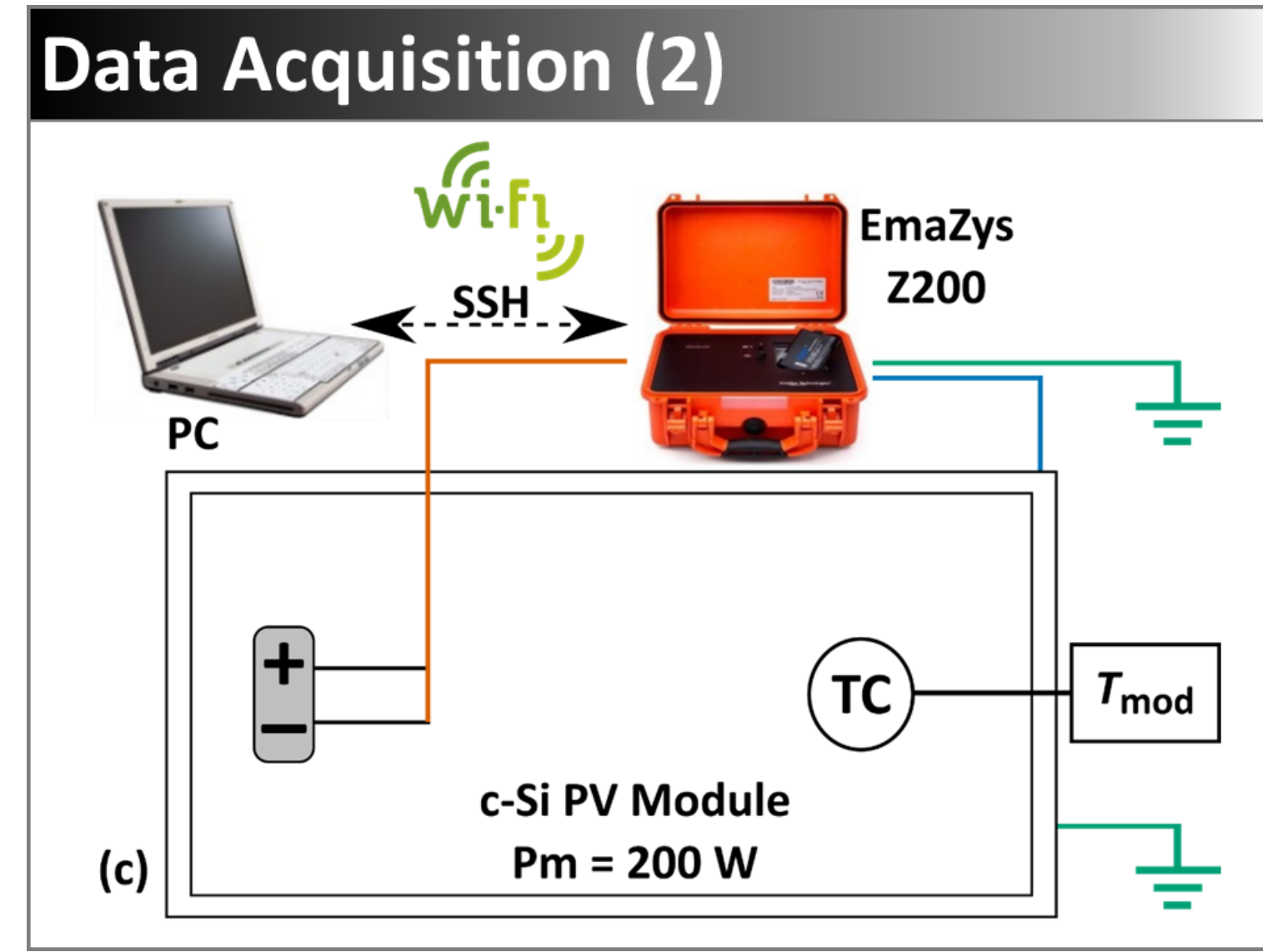
- Electrical Safety Hazard (Electric Shock / Arc Flash)
- Performance-Loss Risk
 - PID (Potential-Induced Degradation)
 - Inverter Tripping (like "Morning Dew")

We attempt to elucidate the mechanism of electrical leakage within a PV module, to identify the mitigation measures for these hazards.



Data Acquisition (1)

AC impedance spectral data (180 Hz to 95 kHz) were obtained every 10 min using the EmaZys Z200 PV Analyzer connected to the short-circuited PV cables and the grounded frame.



概要

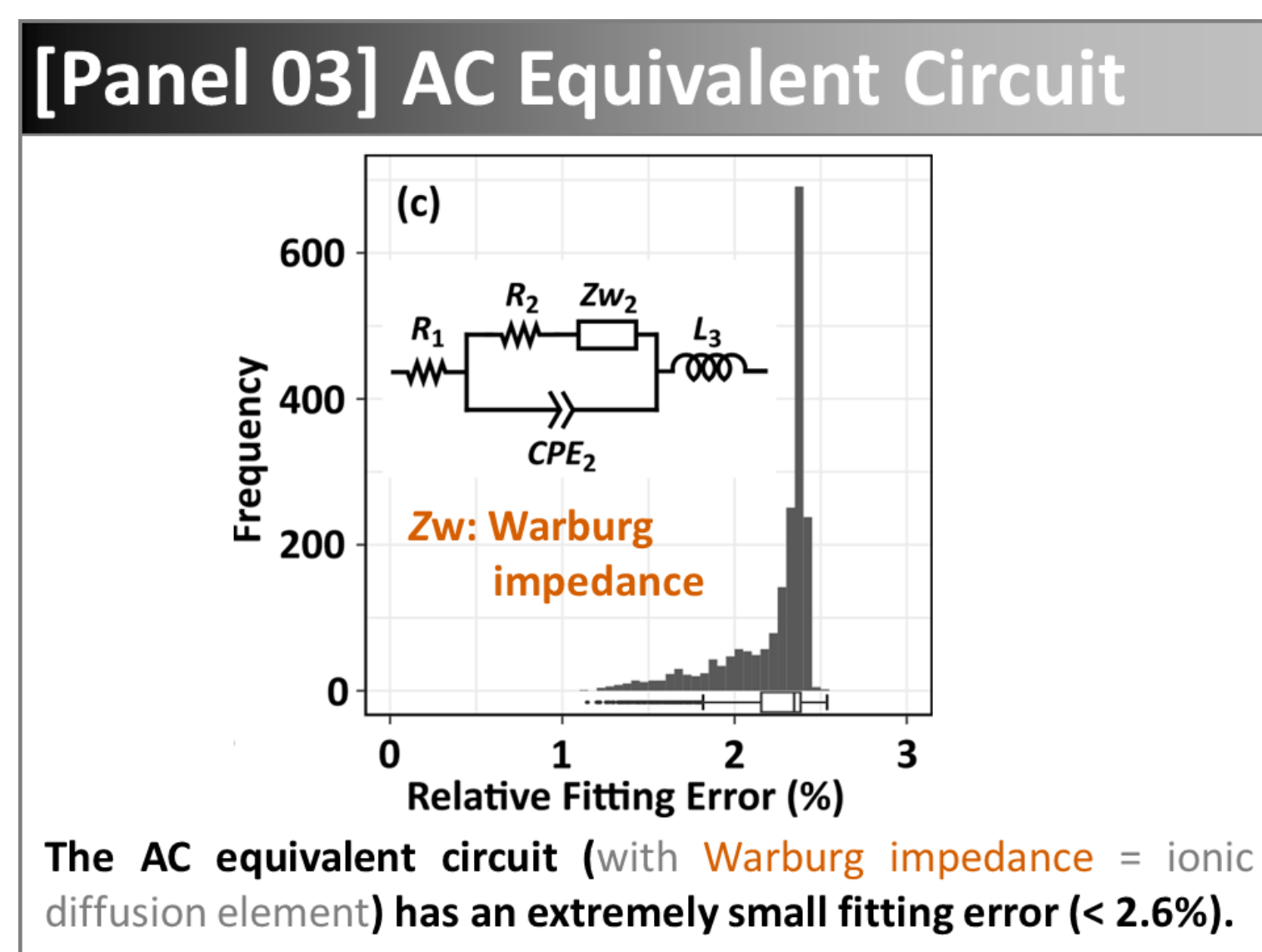
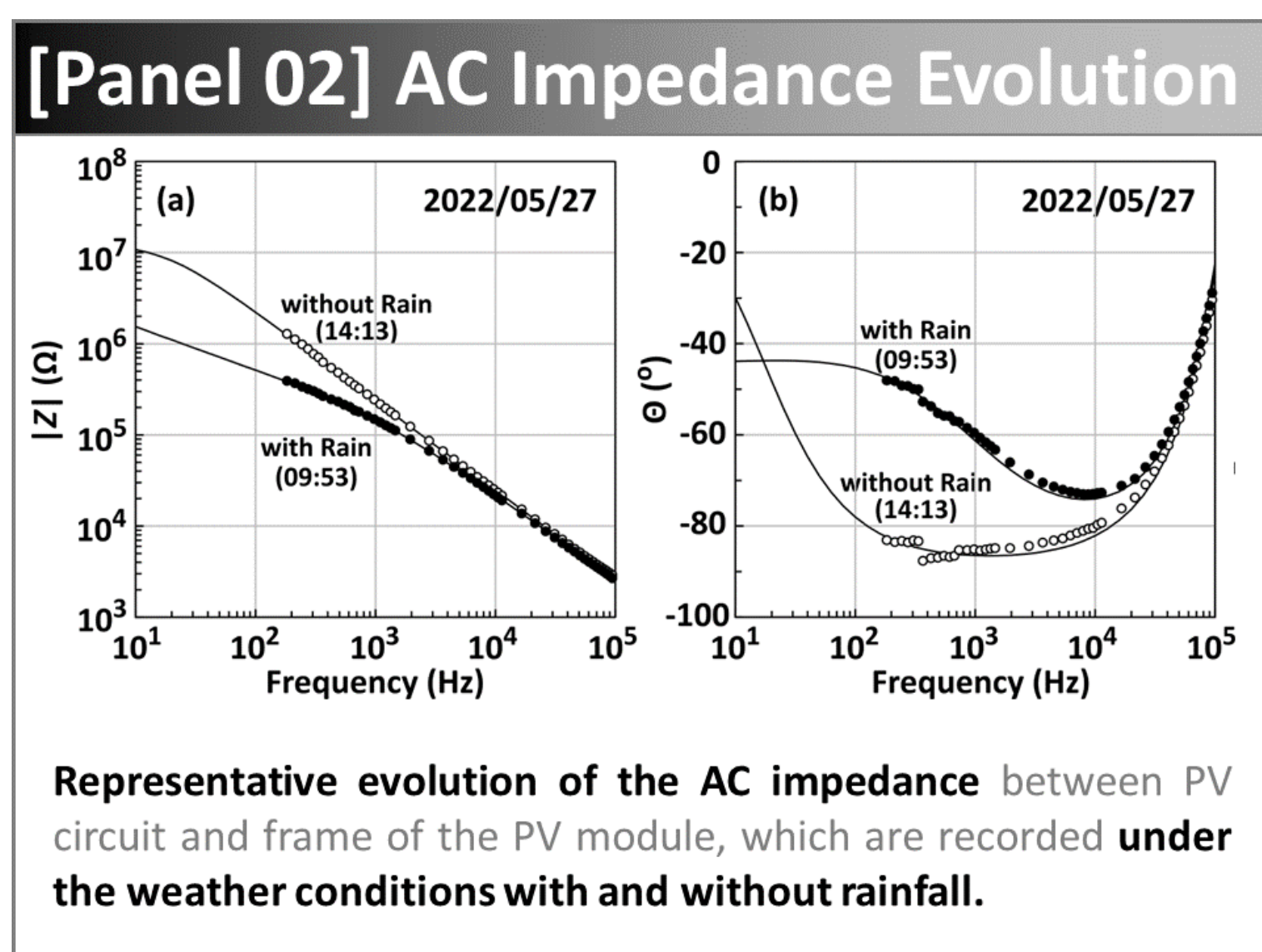
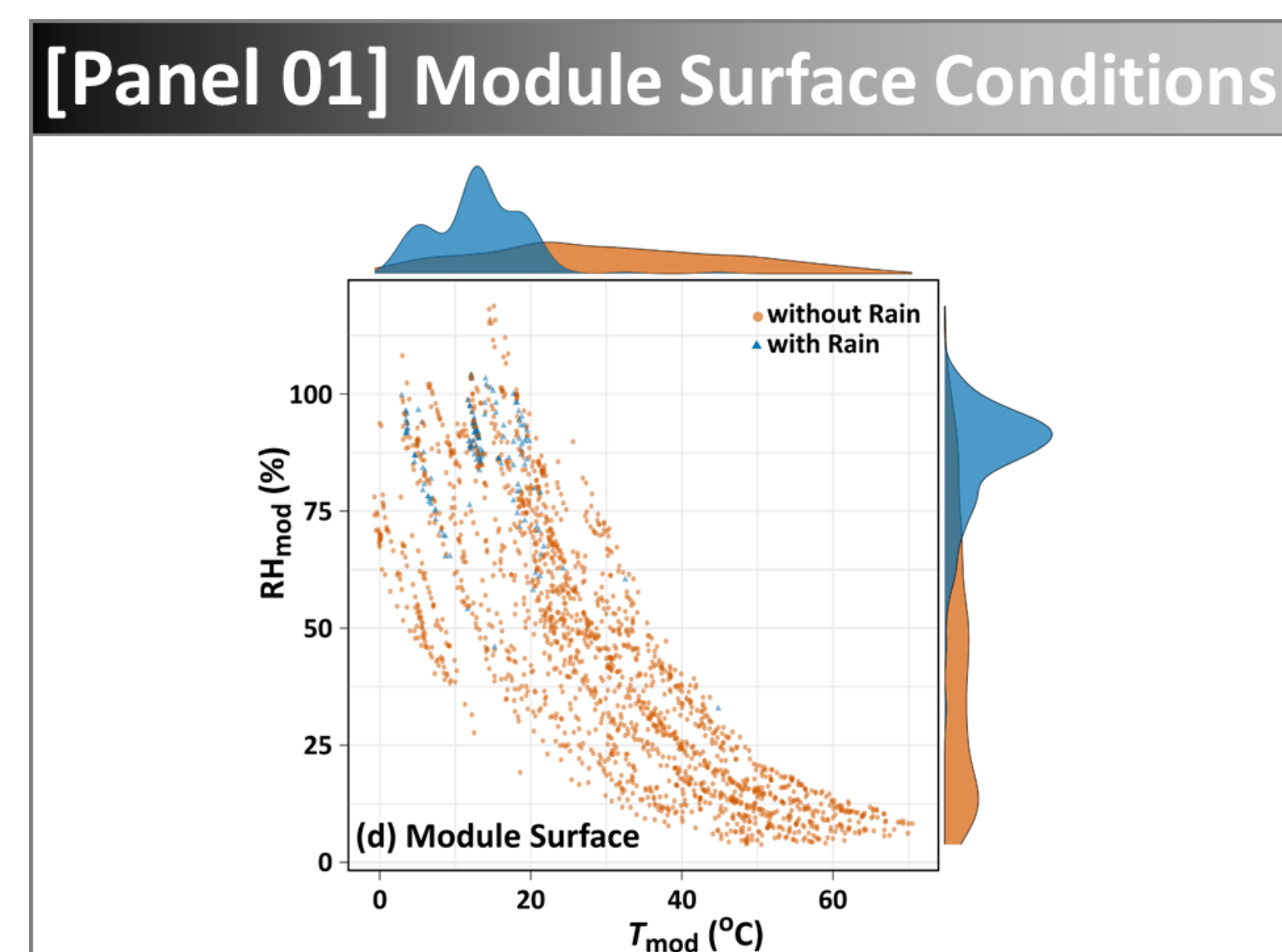
本検討では、交流インピーダンス分光法を用いて屋外設置PVモジュールのリーク電流回路を調査し、その電気絶縁回路特性を明らかにした。

多くの気象条件下で得たデータを解析した結果、交流等価回路モデルには、従来の単純並列回路（抵抗素子||コンデンサ素子）とともに、ワールブルグ・インピーダンス素子（イオン伝導素子）も存在することが明らかになった【パネル01~04】。

これらの素子特性の気象条件依存性は異なっており【パネル05~09】、抵抗特性はモジュール表面状態と深く関係するが、ワールブルグインピーダンスとコンデンサの特性にはPVモジュール内部構成材の湿潤状態も関係していた。これらから、乾湿両方の気象条件下におけるACインピーダンスパラメータ特性を予測することができた【パネル10~12】。

これらは、電気的絶縁抵抗低下が関連するPVモジュールの性能低下や安全リスクに関する懸念に対処する上での基盤的知見と考えられる。

結果



[Panel 04] AC Impedance Model

Warburg Constant (σ)

$$\sigma = \frac{RT}{n^2 F^2 \alpha \sqrt{2}} \left(\frac{1}{\beta \sqrt{D}} \right)$$

Warburg Impedance

$$Z_w = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} (1 - j)$$

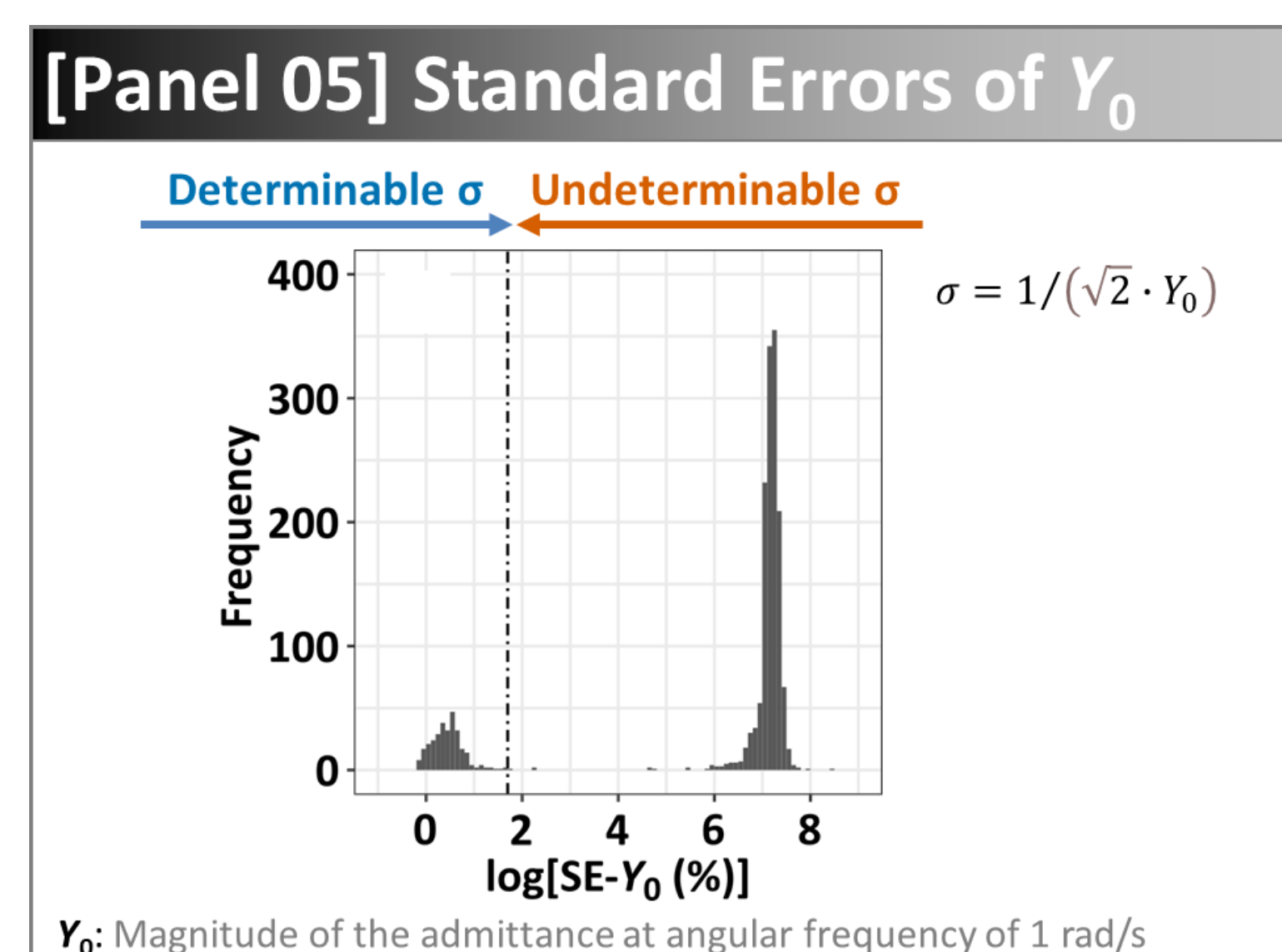
Full Impedance

$$Z = R_1 + \frac{R_2 + \frac{\sigma(1-j)}{\sqrt{\omega}}}{1 + j\omega C^* \left[R_2 + \frac{\sigma(1-j)}{\sqrt{\omega}} \right]} + j\omega L_3$$

Full Impedance (when $\sigma = 0$)

$$Z = R_1 + \frac{R_2}{1 + j\omega C^* R_2} + j\omega L_3$$

Legend:
 R: Ideal gas constant
 T: Absolute temperature
 F: Faraday constant
 ω : Angular frequency
 n: Valency
 α : Geometric area involving in the reaction
 β : Concentration of the electrolyte
 D: Diffusion coefficient



[Panel 06] Dew Point Depression (DPD)

Ambient Temperature: $T_{amb} \rightarrow$ Sat. Water Vapor Press.: $P_{s,amb}$
 Module Temperature: $T_{mod} \rightarrow$ Sat. Water Vapor Press.: $P_{s,mod}$

Relative Humidity on the Surface of Module: RH_{mod}

$$RH_{mod} = \frac{RH_{amb} \times P_{s,amb}}{P_{s,mod}}$$

Dew Point around Module: $T_{d,mod}$

$$T_{d,mod} = \left[1 - \frac{T_{mod} \cdot \ln(RH_{mod}/100)}{L/R_w} \right]$$

Dew Point Depression (DPD) = $T_{mod} - T_{d,mod}$
 DPD_{2.5} means the conditions with DPD < 2.5 K

[Panel 07] Confusion Matrix (1)

	Confusion Matrix			
	P	N	FN	TP+FN
Rainfall	P	N	FN	TP+FN
DPD _{2.5}	N	TP	TN	FP+TN
Sum	TP+FP	FN+TN	ALL	

Determinability of σ

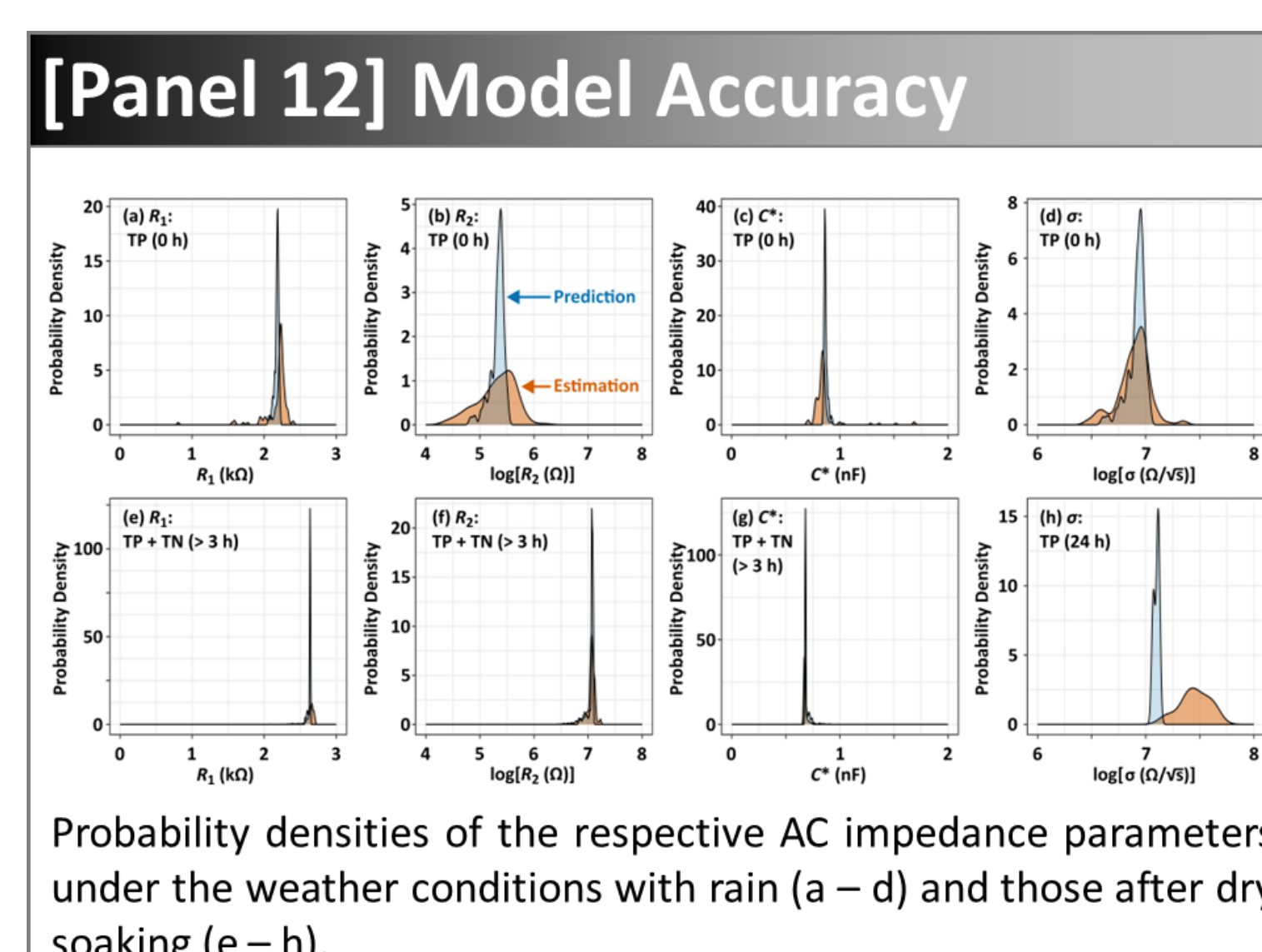
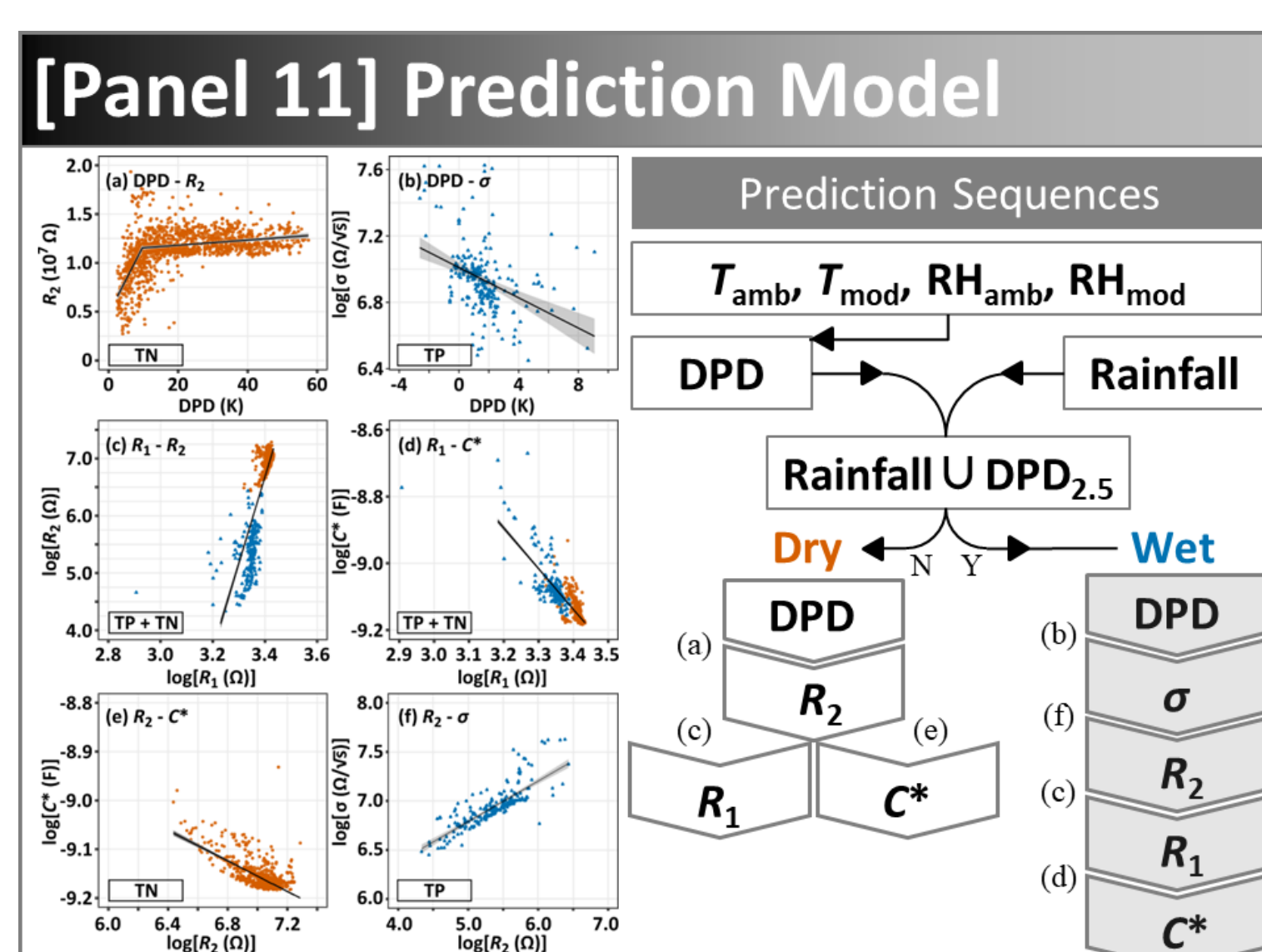
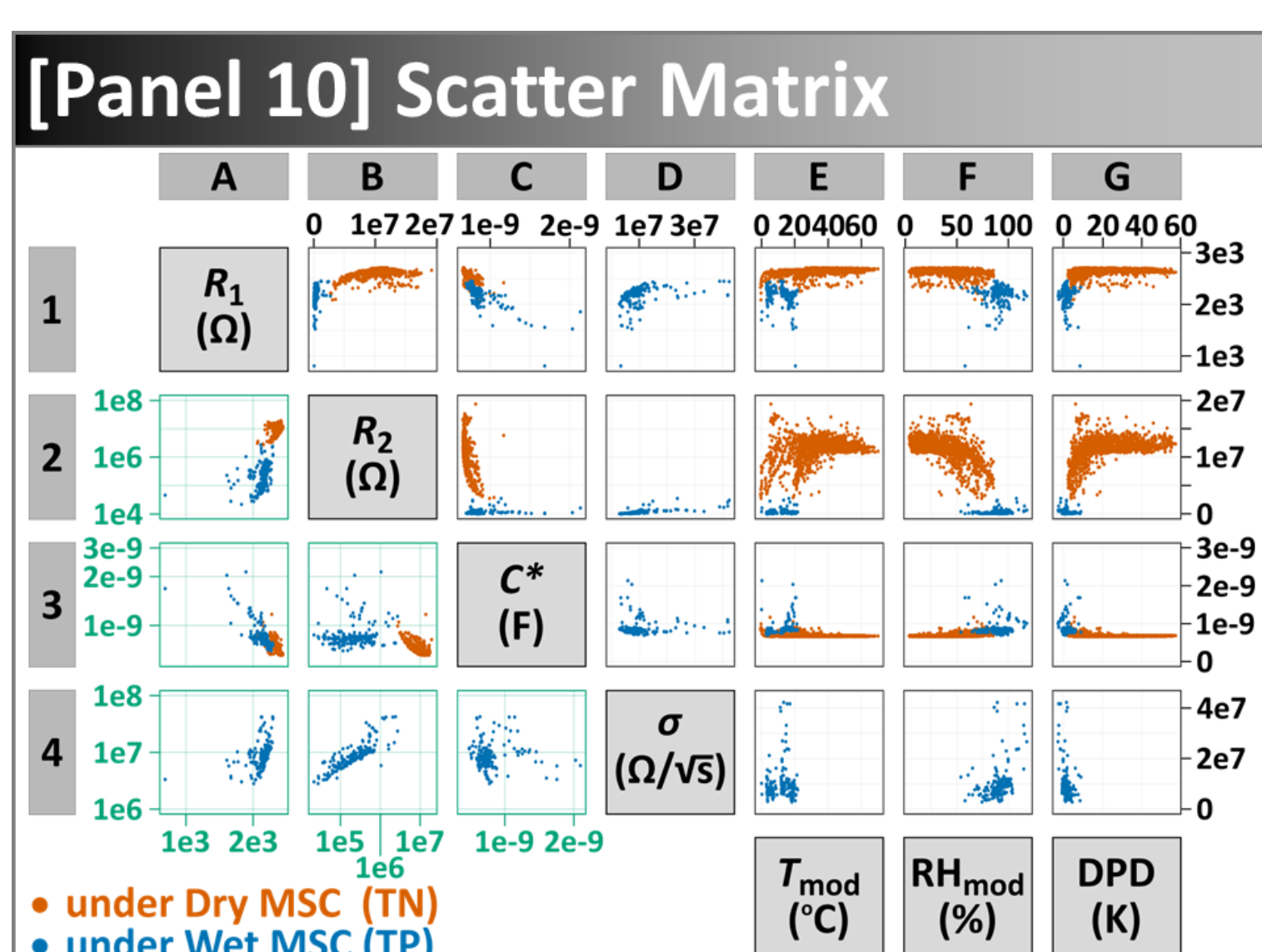
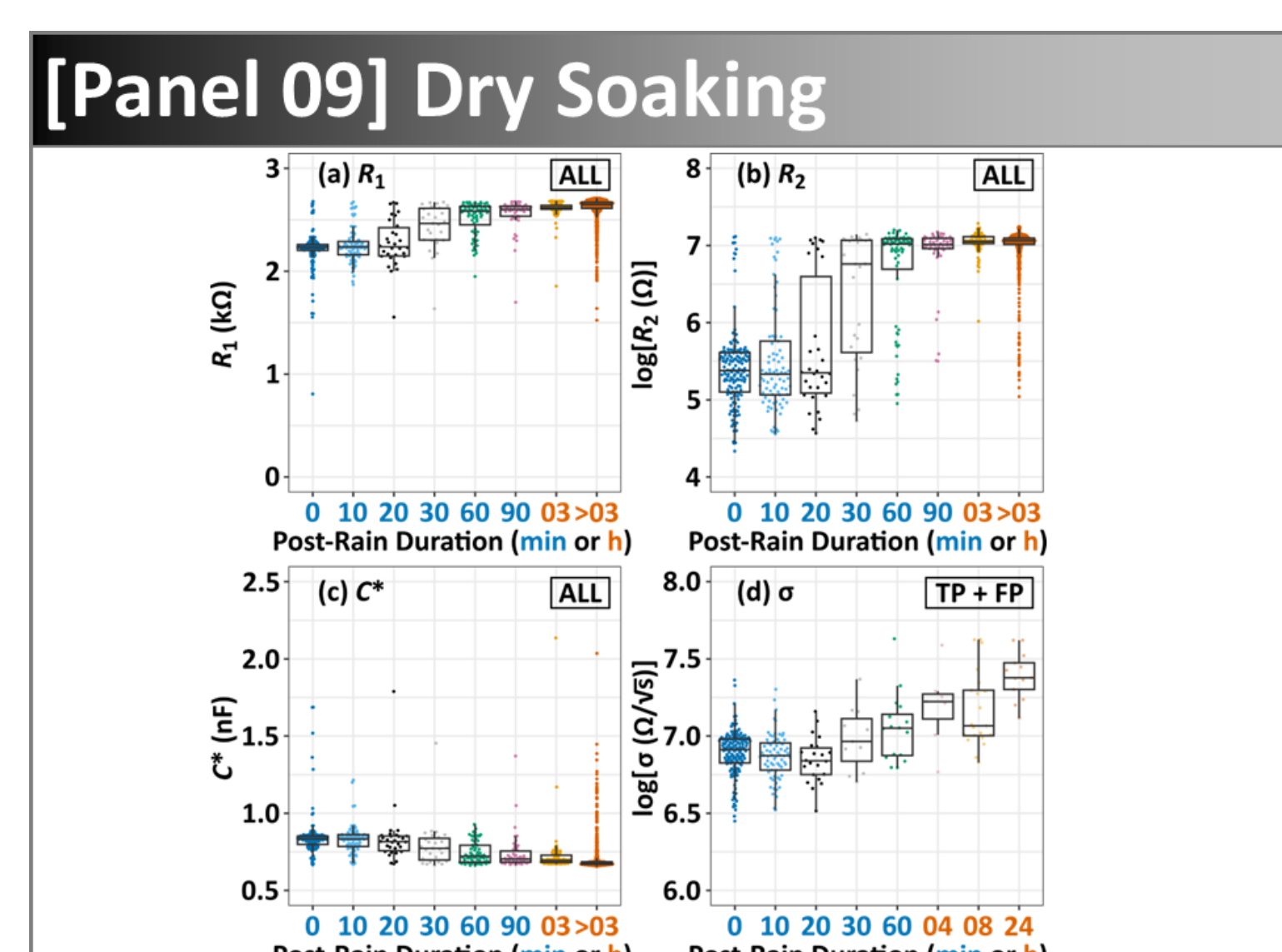
	P	N	Sum
Rainfall	232	64	296
U	65	1345	1410
DPD _{2.5}	297	1409	1706

[Panel 08] Confusion Matrix (2)

	Score Metrics		
	Rainfall	DPD _{2.5}	Rainfall U
Accuracy	0.902	0.909	0.924
Precision	0.465	0.663	0.781
Recall	0.939	0.779	0.784
f-measure	0.622	0.716	0.782

Accuracy = (TP + TN) / ALL
 Precision = TP / (TP + FN)
 Recall = TP / (TP + FP)
 f-measure = [2 × (Precision × Recall)] / (Precision + Recall)

Wet Module Surface Conditions: Rainfall U DPD_{2.5}
 Dry Module Surface Conditions: U \ (Rainfall U DPD_{2.5})



謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）の結果得られたものです。

棚橋 紀悟・大関 崇
 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター



水上設置型PVシステムの絶縁抵抗観測

はじめに 太陽光発電設備 (PVS) における対地絶縁抵抗 (以下、絶縁抵抗と称する) は、感電や火災等の事故防止の観点から観測すべき最重要項目のひとつであるが、設備の発電部である直流回路側の絶縁抵抗は、設備を構成する部材 (主に太陽電池モジュール) の数や量はもとより、設備を取り巻く気温や湿度等の環境条件によっても大きく変動することから、絶縁状況が良好か否かについて、測定された抵抗値のみから判断することは難しく、絶縁抵抗測定時には天候の記録や気温、湿度の測定は必須である¹⁾。本研究は、変動する絶縁抵抗値の妥当性の評価に環境値を有効活用するために、太陽光発電設備の絶縁抵抗と設備を取り巻く環境条件についてそれらの相関を明らかにすること、及び水上設置の特異性の調査を目的としている。

観測 女井間池水上太陽光発電所 (香川県木田郡三木町池戸) において、設備の絶縁抵抗およびその近傍の環境条件についての観測を2022年2月14日より行っている。設備全体の規模は太陽電池アレイ容量2822.4kW、太陽電池モジュール枚数9,408枚であるが、パワーコンディショナにより南北の2つのアイランドに2等分割されており、本測定の対象は南側のアイランドとした。絶縁抵抗観測装置 (BENDER社製 isoPV1685P-425) を設備内のある太陽電池モジュールストリングに挿入し、近傍の太陽電池モジュールの裏面 (裏面から約2cm隔離) に温度湿度プローブ (VAISALA社製HMP155) を設置した。また、温度湿度プローブを設置した太陽電池モジュールの表裏面に日射計 (英弘精機製ML-02) および熱電対をそれぞれ設置し、モジュール表裏の日射強度および表面温度の計測を行った。観測は現在も継続中であるが、本報では2022年2月14日から2023年10月19日までの測定について分析結果を示した。

結果 2023年5月16日の観測結果について、絶縁抵抗値 R_g [k Ω]、モジュール表面日射強度 G [W/m²]、モジュール裏面側の気温 T_a [°C] および相対湿度 RH [%] の経時変化をFig.1に示した (いずれも瞬時値)。絶縁抵抗値は1日のうちで58k Ω (6:47a.m.) から945k Ω (16:15p.m.) まで幅広く変動していた。夜間 (日出時刻の前および日没時刻の後) は気温が相対的に低く、相対湿度が概ね90%以上と高くなっており、この間の絶縁抵抗は概ね100k Ω 未満の相対的に低い値を示した。逆に、日中は気温が上昇し、相対湿度も低下し、この間の絶縁抵抗は概ね100k Ω よりも遙かに大きく、相対的に高い値を示した。天候が概ね良好な1日における絶縁抵抗値の変化の傾向は季節を問わず同様の傾向を示した。2022年2月14日から2023年10月19日まで絶縁抵抗値の経時変化について、相対湿度との相関をFig.2に示した (いずれも10分間平均値)。相対湿度 RH と気温 T_a を用いて、単位体積あたりの水分量を示す容積絶対湿度 VH (Volumetric Humidity) [g/m³] を近似的に算出し、絶縁抵抗値の経時変化について、気温および容積絶対湿度との相関をFig.3に示した。絶縁抵抗は1日のうちで大きく変化したが、気温の低下に伴って低下する傾向 (気温と正の相関) にあった。また、日毎の絶縁抵抗の最低値は、容積絶対湿度の増加に伴って減少する顕著な傾向 (容積絶対湿度と負の相関) にあり、容積絶対湿度が高くなる6月下旬から9月中旬において、気温が低下する早朝に絶縁抵抗の低下が顕著であった。

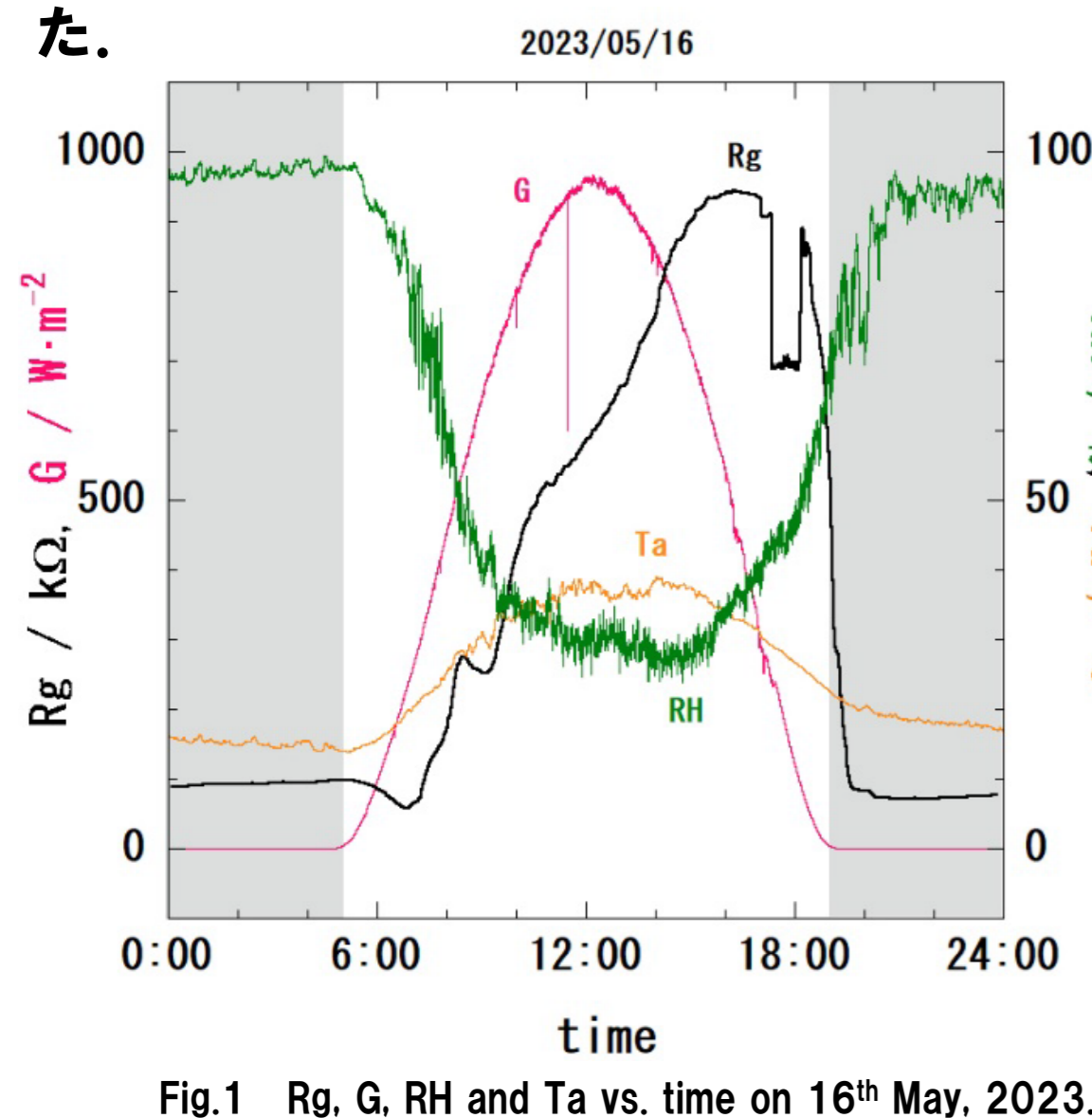


Fig.1 Rg, G, RH and Ta vs. time on 16th May, 2023.

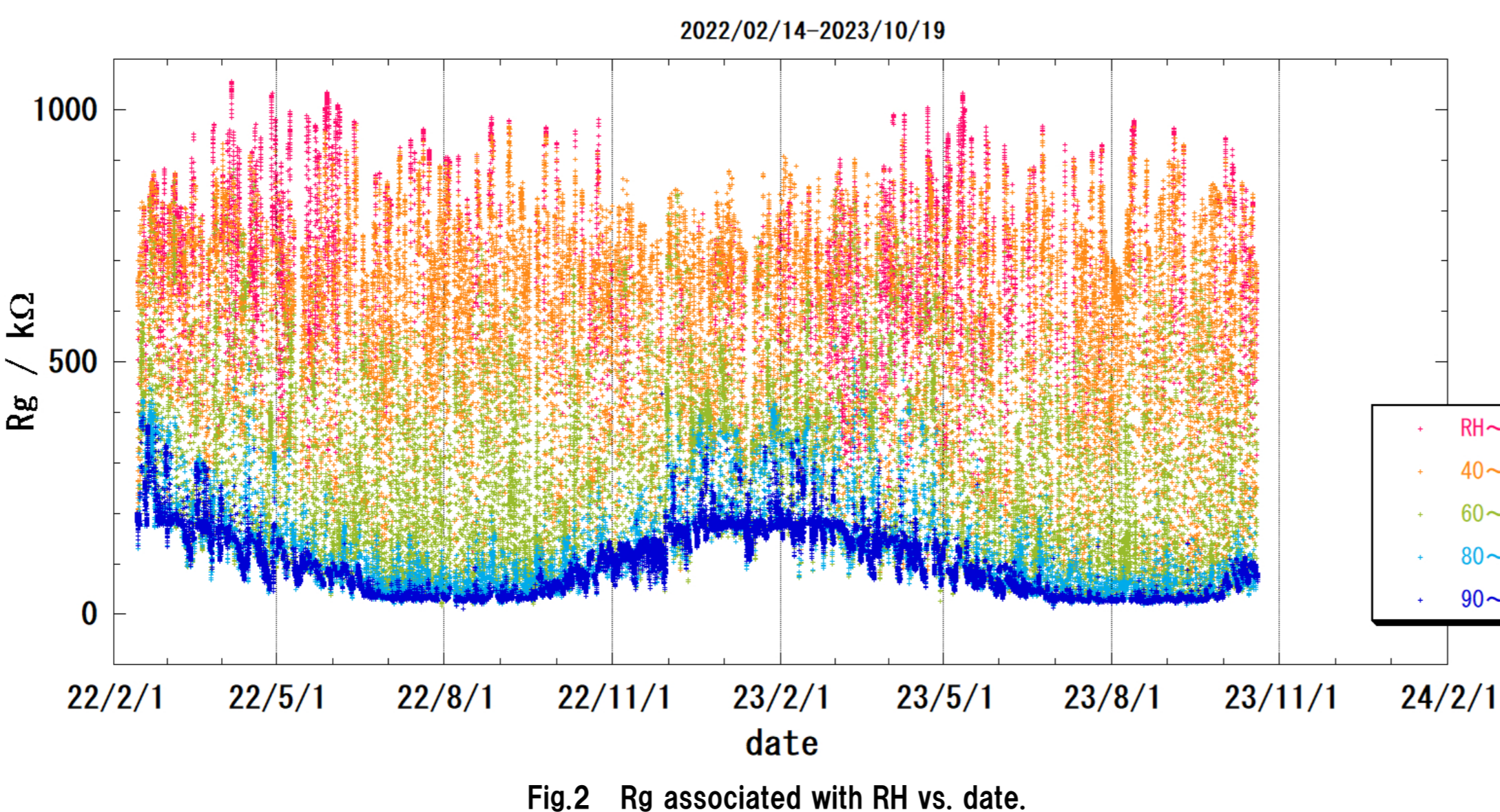


Fig.2 Rg associated with RH vs. date.

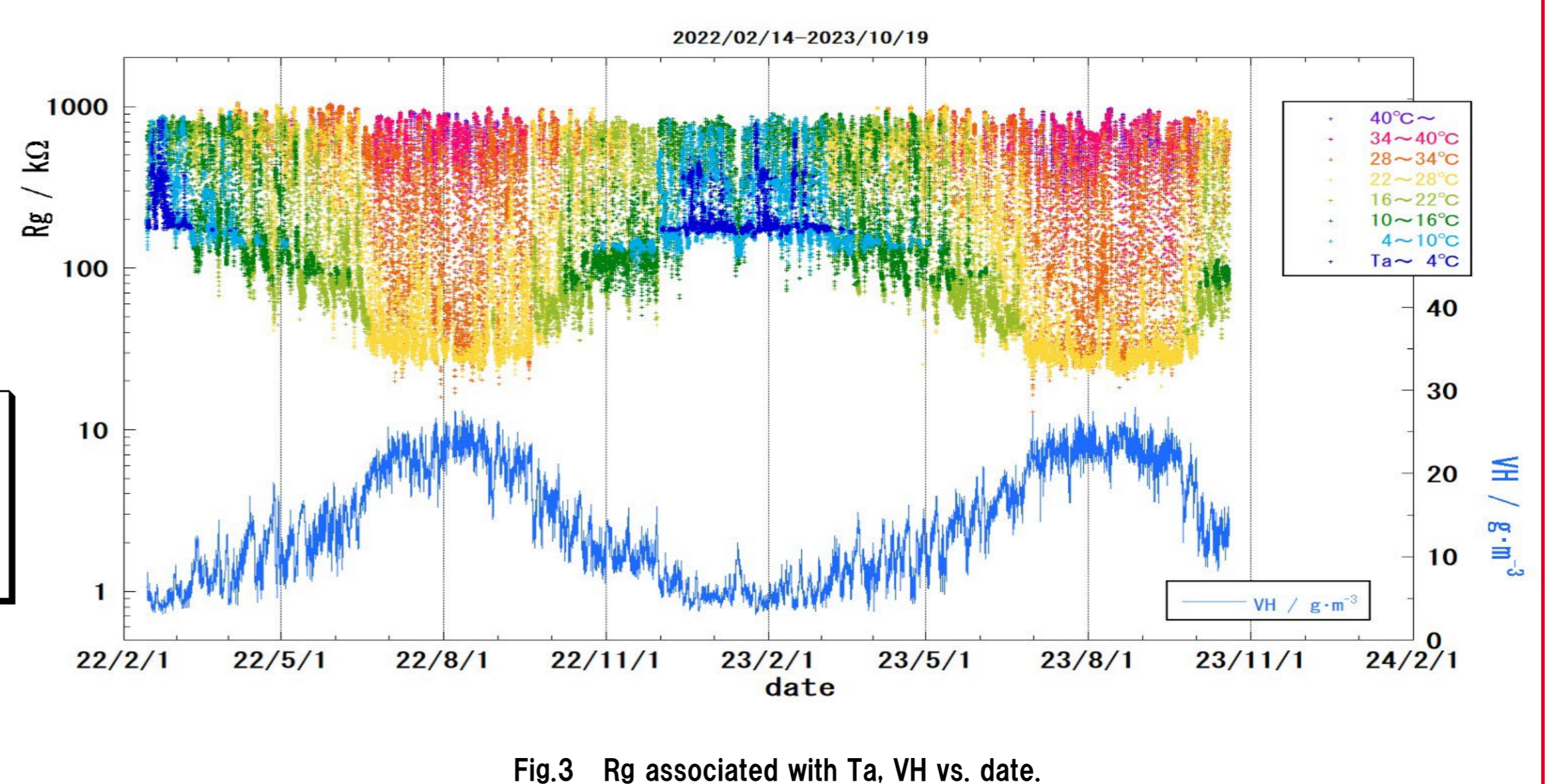


Fig.3 Rg associated with Ta, VH vs. date.

考察 絶縁抵抗値と容積絶対湿度、気温、および相対湿度の相関をFig.4に示した。容積絶対湿度、すなわち空気中の単位体積あたりの水分量が多いほど絶縁抵抗は低下し、さらに気温が下がるほど絶縁抵抗値が低下する傾向が見られる。この解釈より、今回の観測範囲を超えて容積絶対湿度が高い状態で気温が低下した場合、より低い絶縁抵抗が観測されることが予想される。換言すると、設備の絶縁抵抗値に真値や最低値などは存在せず、環境条件によって抵抗値は下がり得る余地が常に存在する。また、気候の温暖化等により容積絶対湿度が高くなる環境が徐々に増えるなどすると、絶縁抵抗低下における環境による効果と設備の経年劣化による効果との区別は甚だ困難と考えられる。観測値の適正な評価のために絶縁抵抗と環境条件の同時観測は必須である。

昼夜および晴雨の別による絶縁抵抗値の傾向をFig.5aおよびFig.5bに示した。昼夜については日出・日没の時刻で区別し、晴雨については日本気象協会の雨雲レーダー図²⁾において女井間池付近の雨雲の有無により区別した。雨雲がない場合の昼夜 (Fig.5a) では、夜間の方が気温の低下に起因して抵抗値が小さい頻度が高く、早朝にかけて更に気温が低下することによる抵抗値の低下が多く観測された。一方、日中は基本的に気温の上昇により抵抗値が大きい頻度が高かったが、好天の早朝 (日出後) において夜間よりも抵抗値が低下することが頻繁に観測された。この現象は春と秋に頻繁に観測されており (例えば Fig.1)、日射や日射によるモジュール温度の上昇により太陽電池モジュールに付着した露が蒸発する過程で、モジュール表面において容積絶対湿度が局所的に増大した状態が生じた効果と考えられる。Fig.1において早朝に抵抗値が低下した時刻 (Fig.6a) における容積絶対湿度と気温の変化をFig.6bに示した。同様の効果は、好天の日中に降雨が発生した場合あるいは日中の降雨後に日射が回復した場合にも生じており、Fig.5bの日中に見られるように一部では夜間に到達する値よりも低い値が観測されることもあった。また、日中に雨雲がある場合には夜間と同程度の抵抗値となった。夜間については概ね雨雲がある場合に抵抗値がやや低い傾向にあったが、日中ほど雨雲の有無による顕著な差は見られなかった。夜間はモジュールが結露する場合が多いことや降雨時における気温やモジュール温度の変化が小さいためと考えられる。

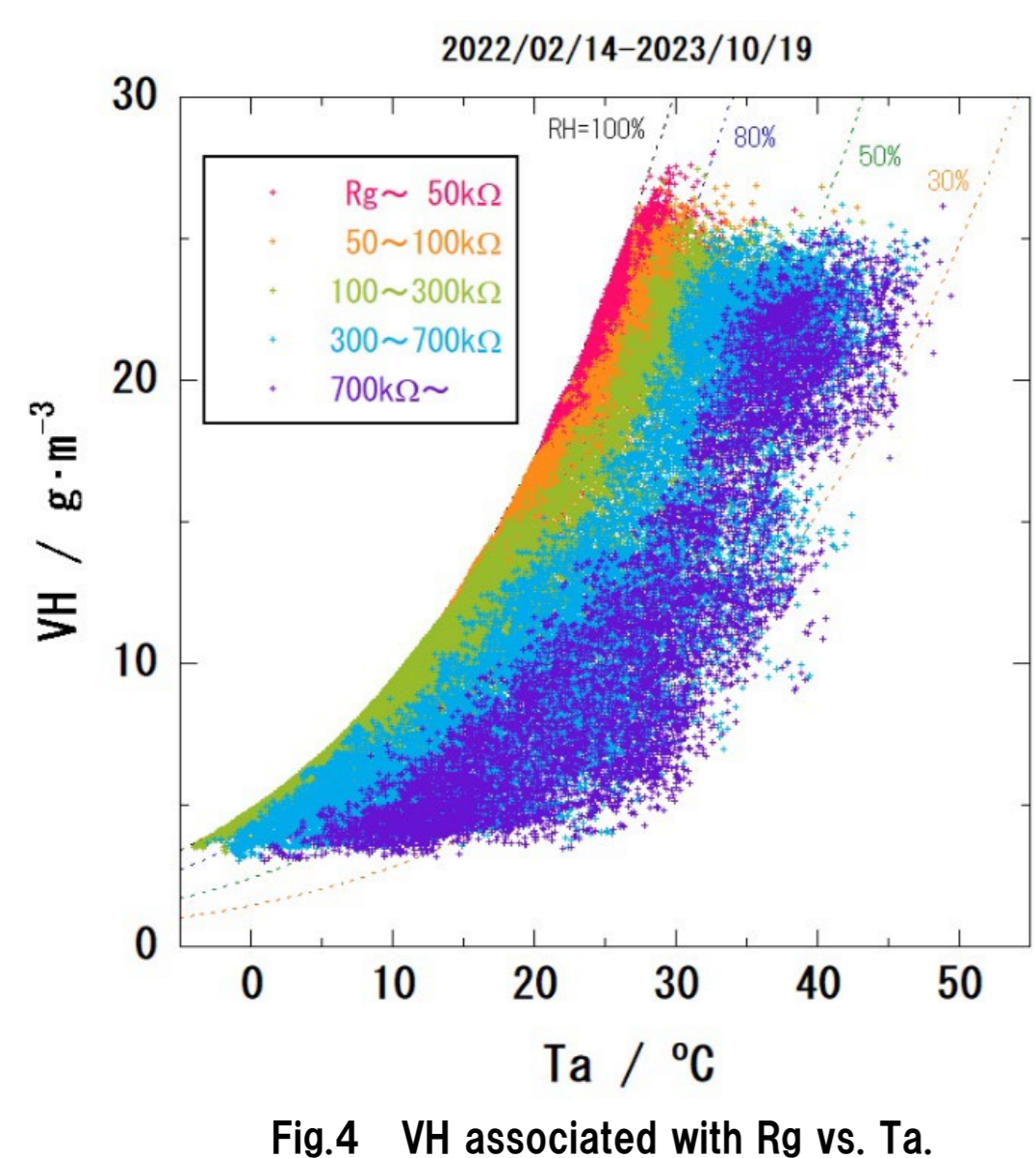


Fig.4 VH associated with Rg vs. Ta.

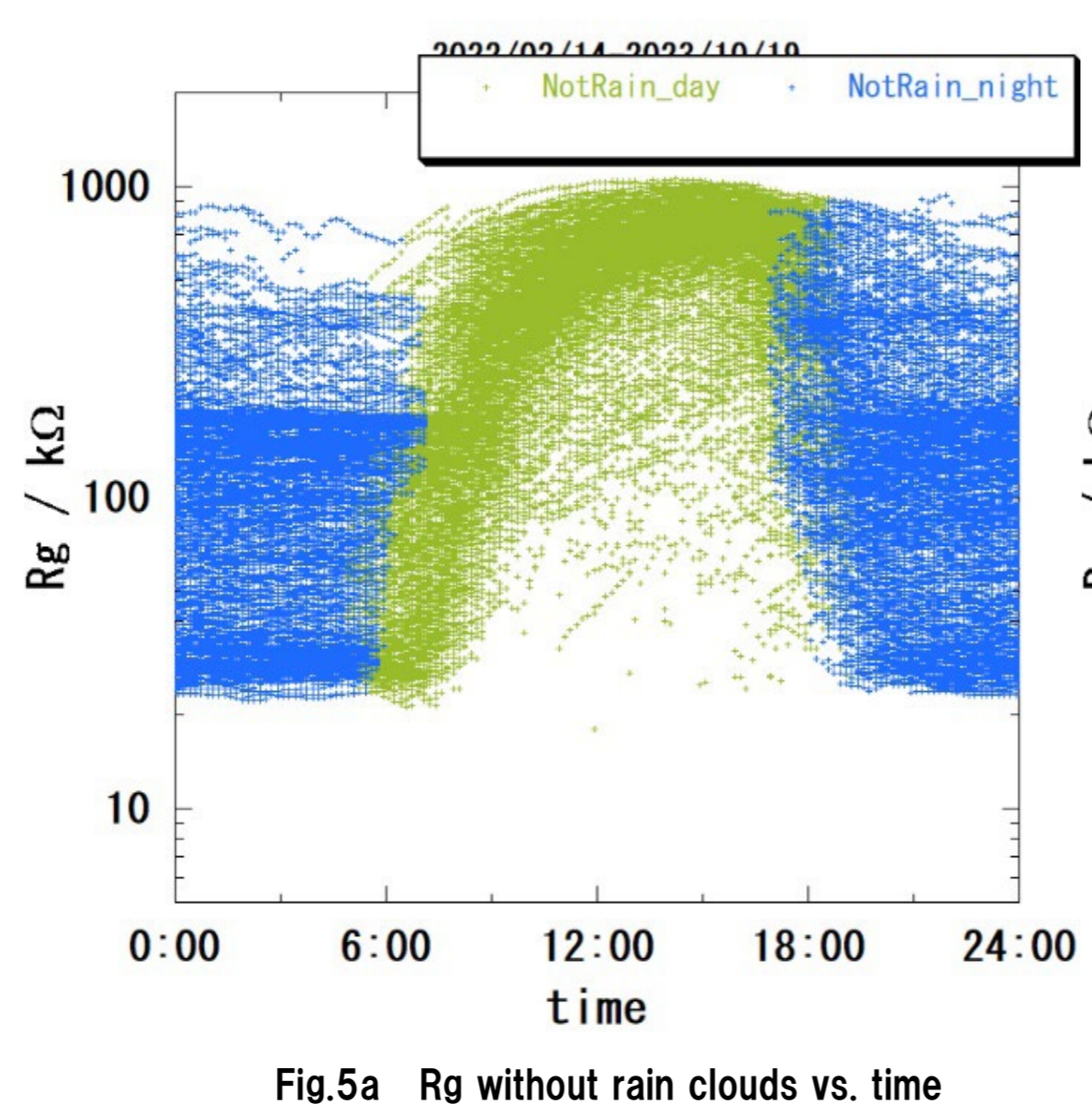


Fig.5a Rg without rain clouds vs. time

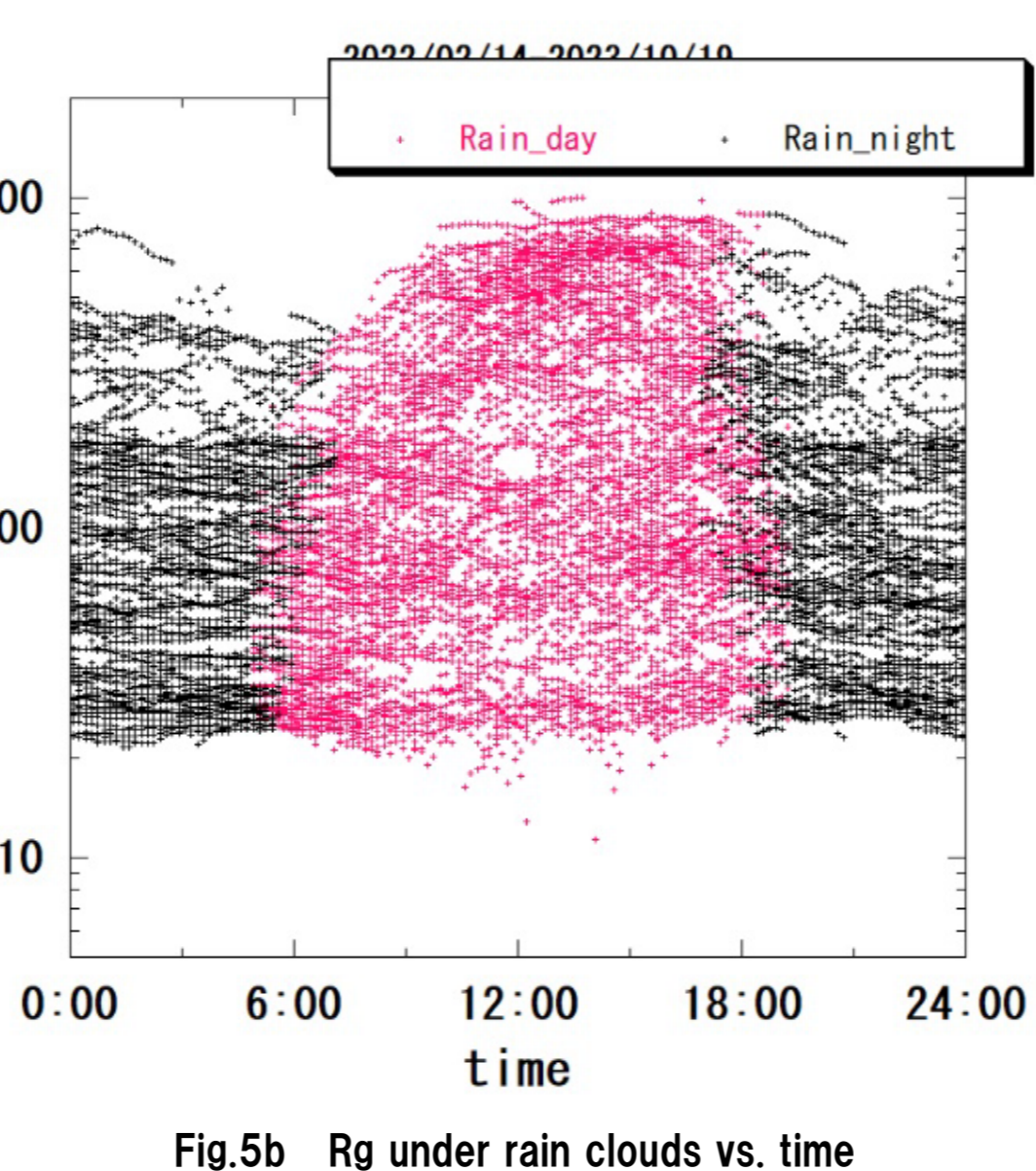


Fig.5b Rg under rain clouds vs. time

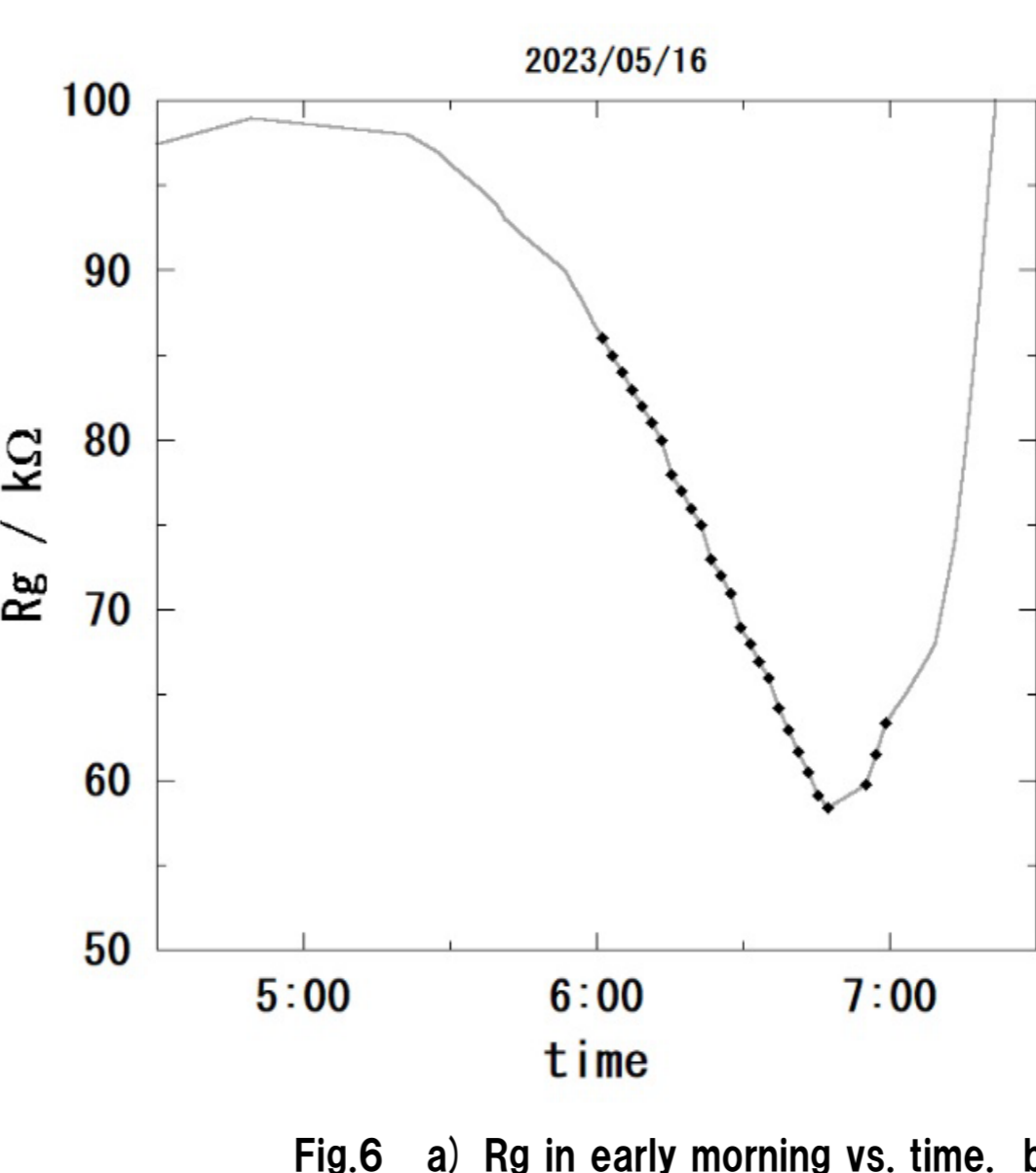
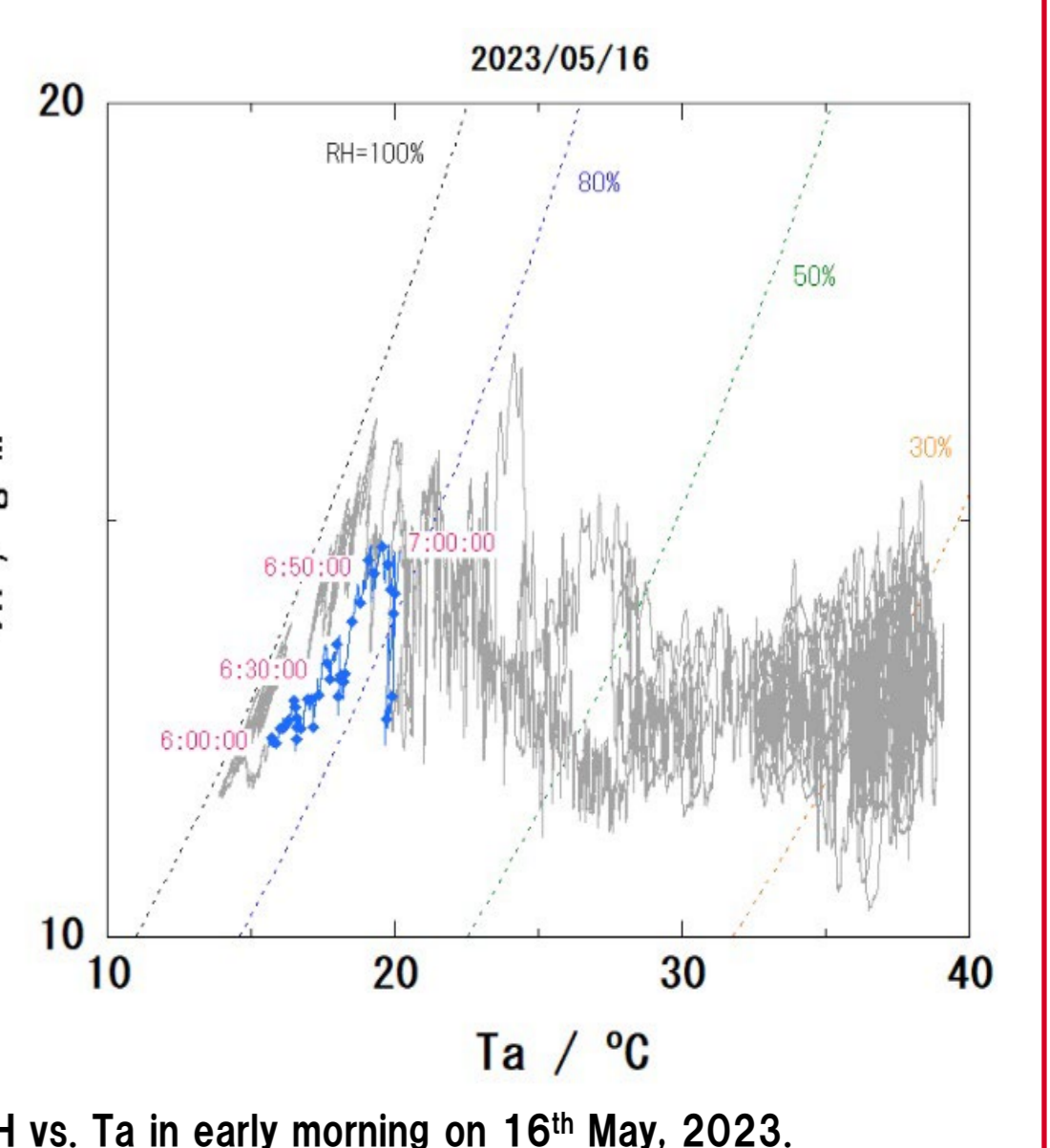


Fig.6 a) Rg in early morning vs. time. b) VH vs. Ta in early morning on 16th May, 2023.



まとめ 香川県のため池に設置された女井間池水上太陽光発電所において、絶縁抵抗および環境条件の観測を実施し、約1年8ヶ月分のデータ分析から、絶縁抵抗が気温と正の相関、容積絶対湿度と負の相関を示すことを明らかにした。絶縁抵抗値の季節変化では、容積絶対湿度が増加する夏季 (6月下旬から9月中旬) に最も低下した。また、絶縁抵抗値の日変化では、気温が低く相対湿度が高い夜間に低下し、日出後であっても気温が夜間よりも低下する早朝に低下する傾向にあった。更に、日中の降雨時や降雨後の日射の回復時にも極端に低下することを確認した。

参考文献

1. 日本電機工業会・太陽光発電協会 技術資料, 太陽光発電システム保守点検ガイドライン, 102, 123, 2019年12月.
2. 日本気象協会, ALINKインターネット, <https://tenki.jp/>

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP20015) の結果として得られました。また、実験場所を供与いただいた三井住友建設株式会社ならびに観測装置の取り付け及びメンテナンスにご協力いただいた三菱電機システムサービス株式会社の両社に深謝いたします。また、観測データの整理を担当いただいたFREA・横山陽ならびに高尾俊司の両氏に感謝いたします。

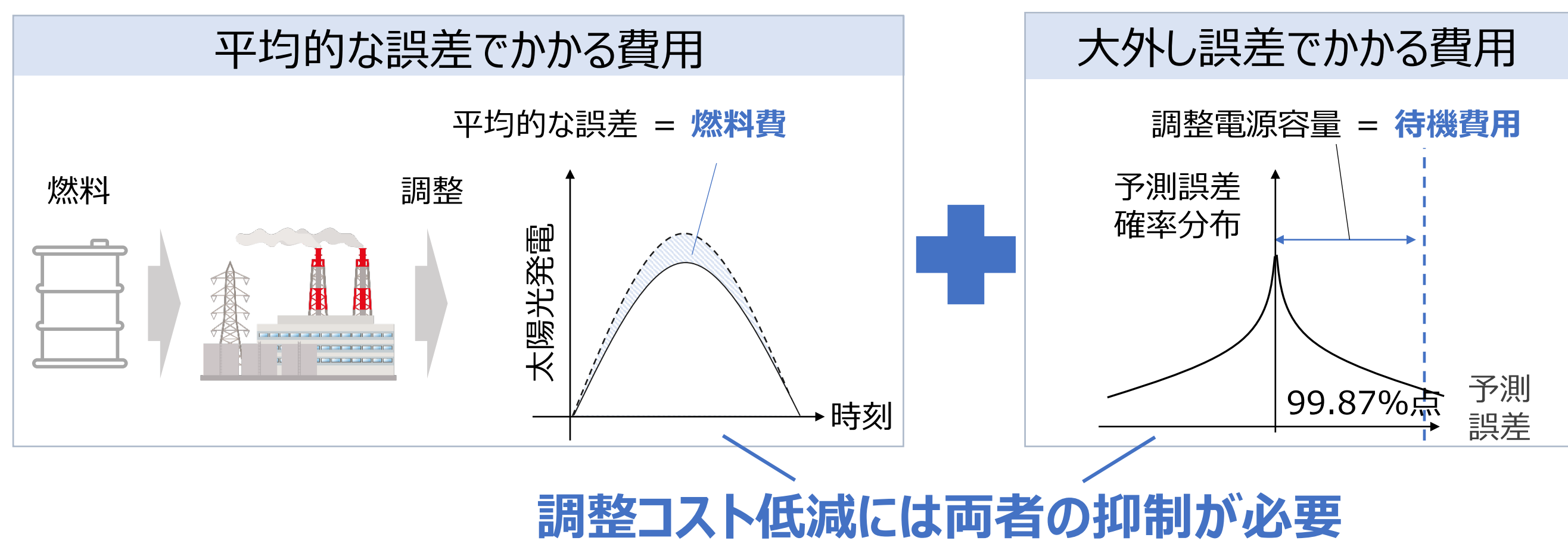
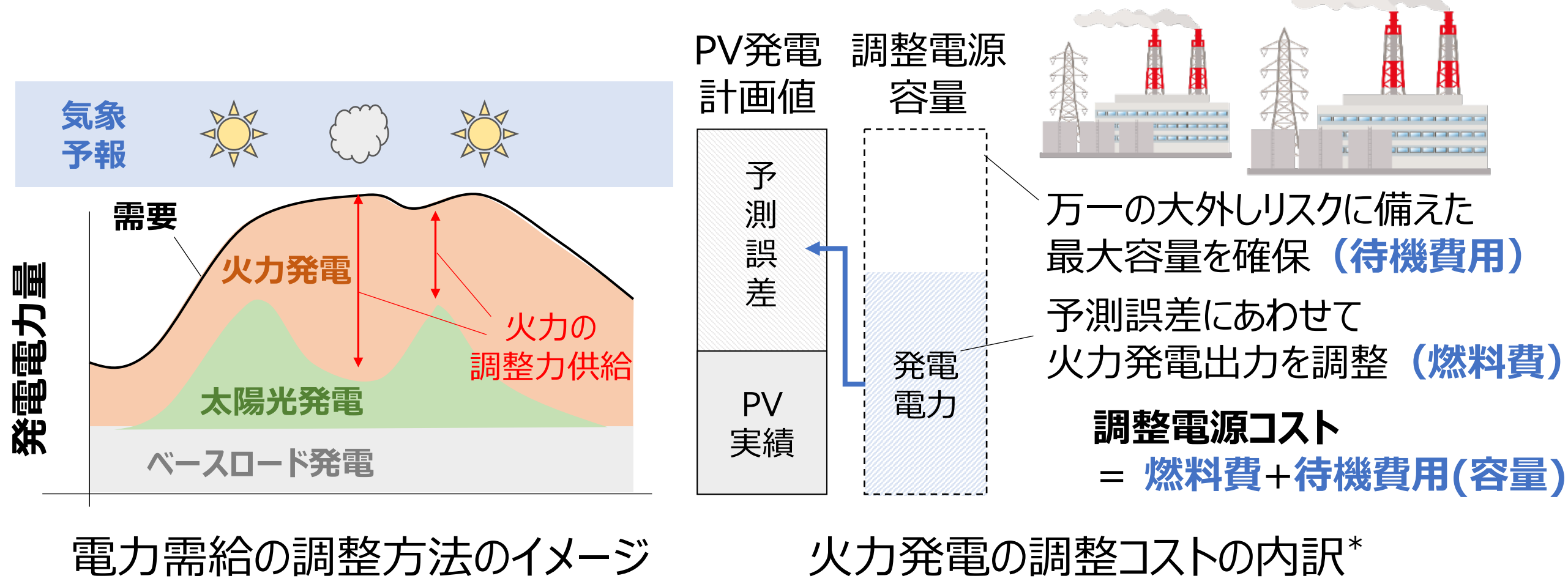
複数予報統合による エリア日射量予測の過大大外し抑制手法の検討

研究背景

電力系統と日射予報

- 電力の需要と供給を一致 = 火力等で調整
- 日射予報から、翌日の電力需給を計画：計画
- 調整用電源の確保(調整力)や電力系統の安定化：運用
- 火力発電の調整コストは電気料金に反映：社会コスト

複数の日射予報モデルを統合
✓平均精度向上
✓大外しリスク抑制

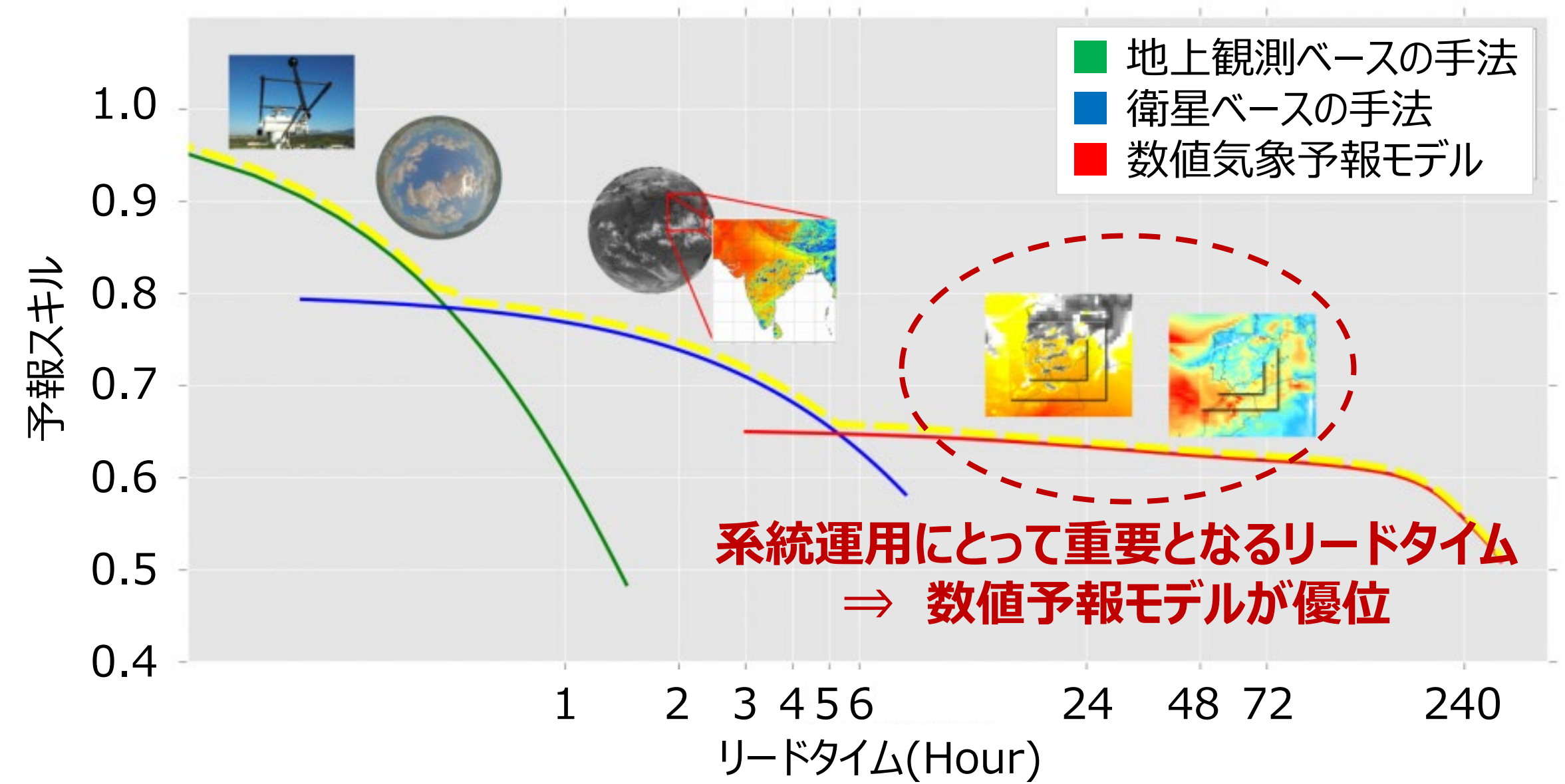


研究内容
複数の機械学習モデル統合によって
平均精度と大外し抑制を両立する予測モデルを構築

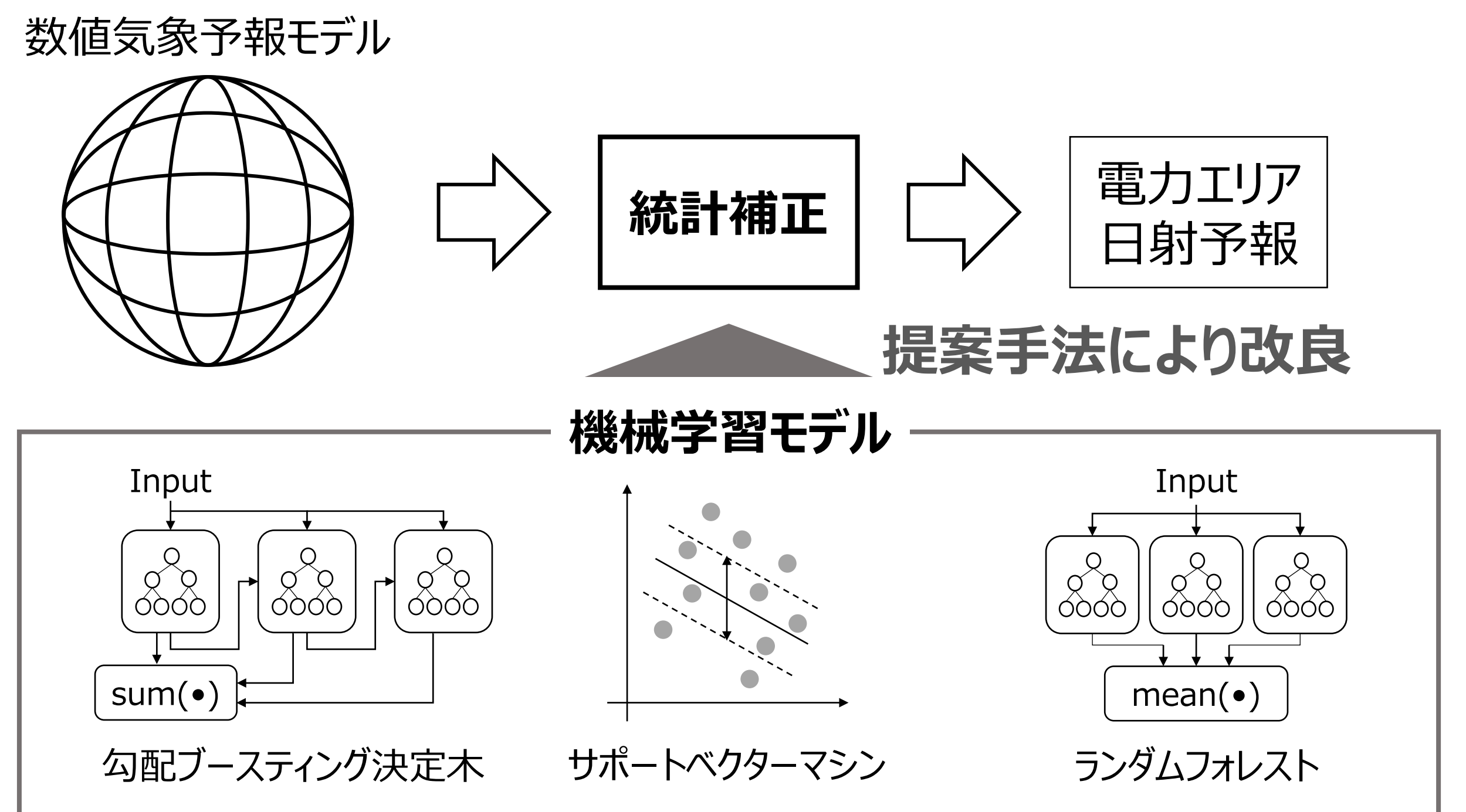
*実際の価格は、発電事業者の入札後に需給調整市場での取引によってそれぞれ決定される

数値気象予報モデルと機械学習

各気象予報手法のリードタイムと予報性能の関係[1]



数値気象予報モデルの統計補正と機械学習

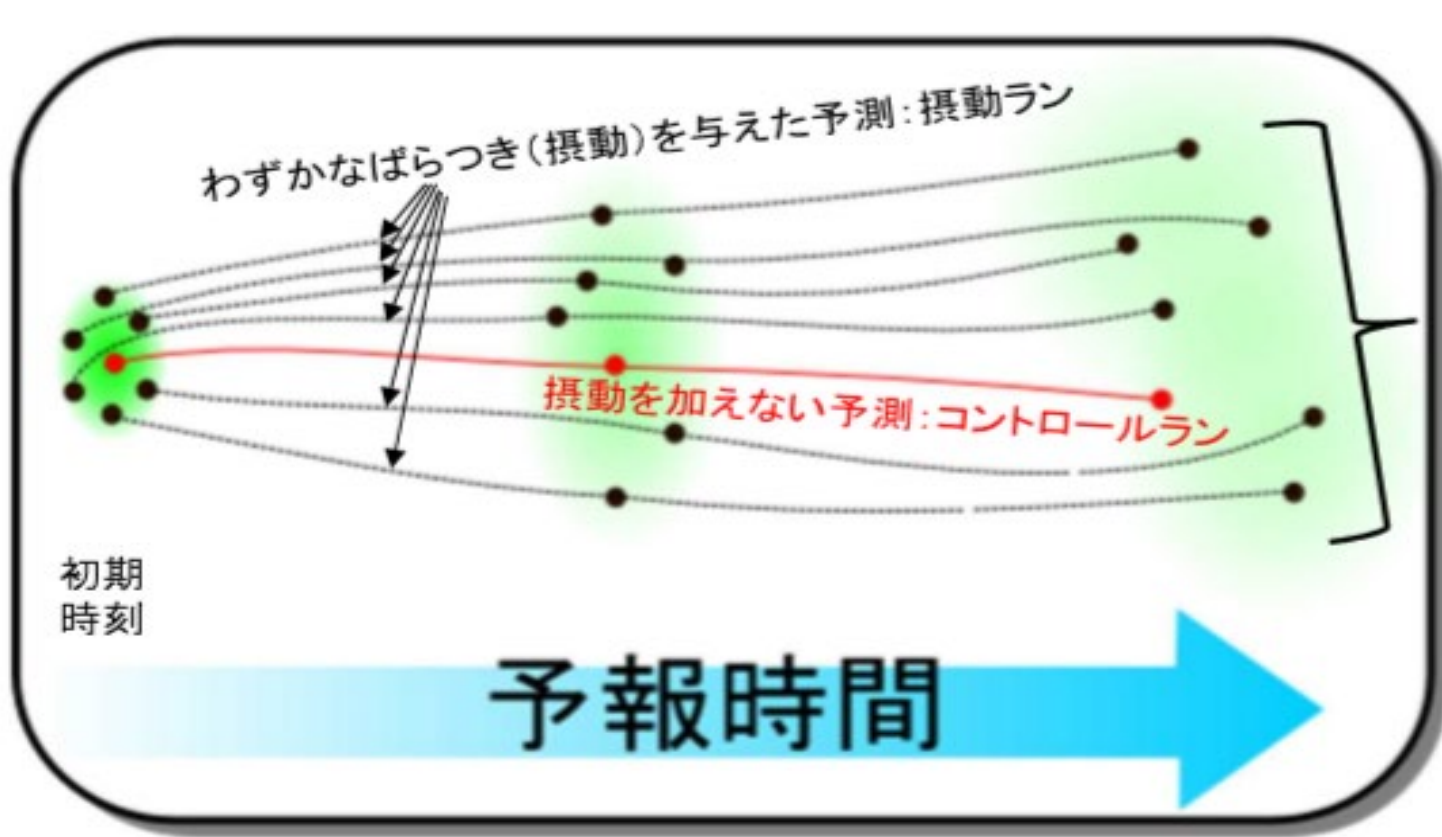


提案手法による日射予報の大外し低減

提案手法の特徴①

メソアンサンプル予報データの利用

- 気象庁が配信する複数数値予報データを機械学習モデルの入力として利用



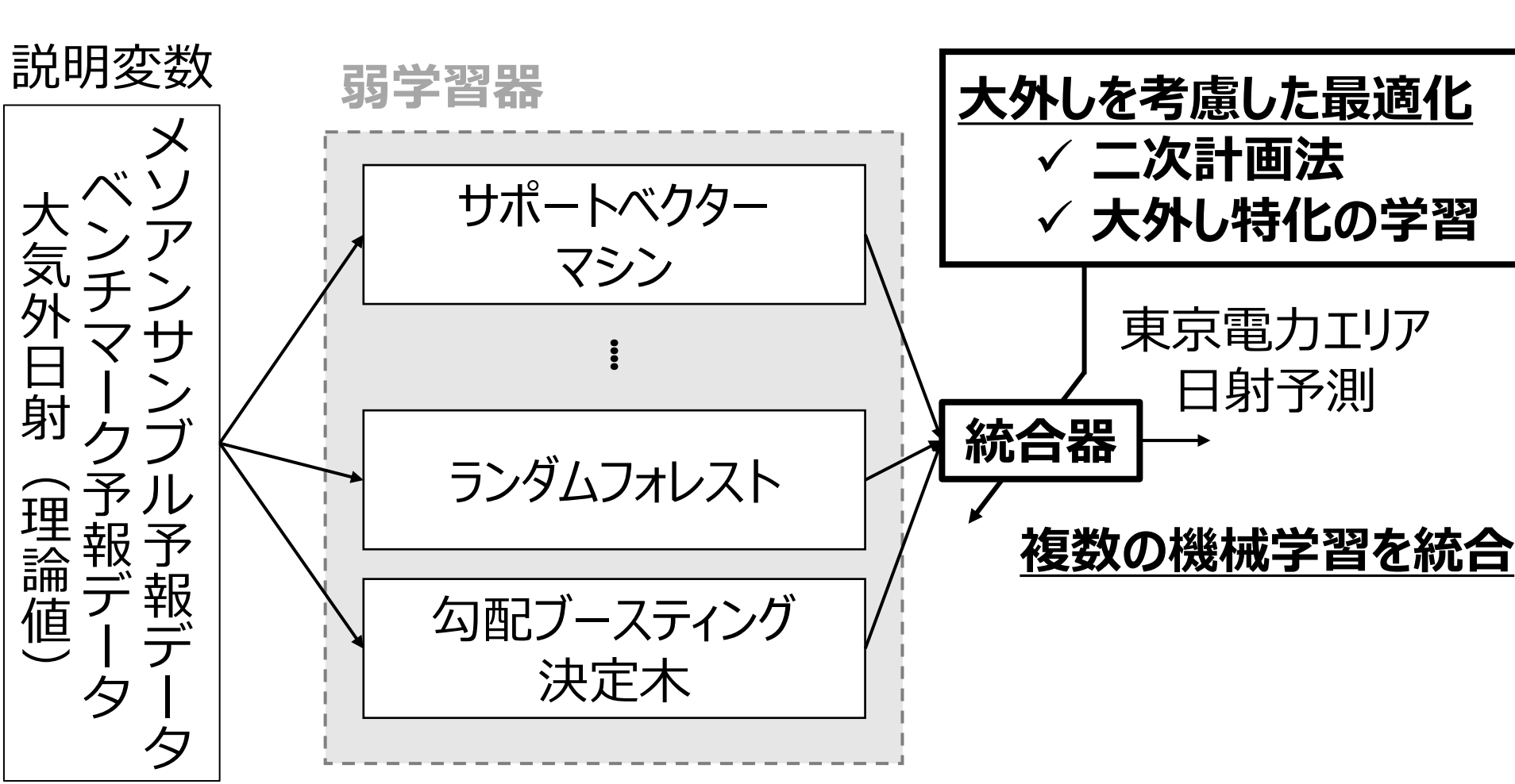
アンサンブル予報の概要[2]

— 複数の機械学習をつかった統合予報の適用 —

提案手法の特徴②

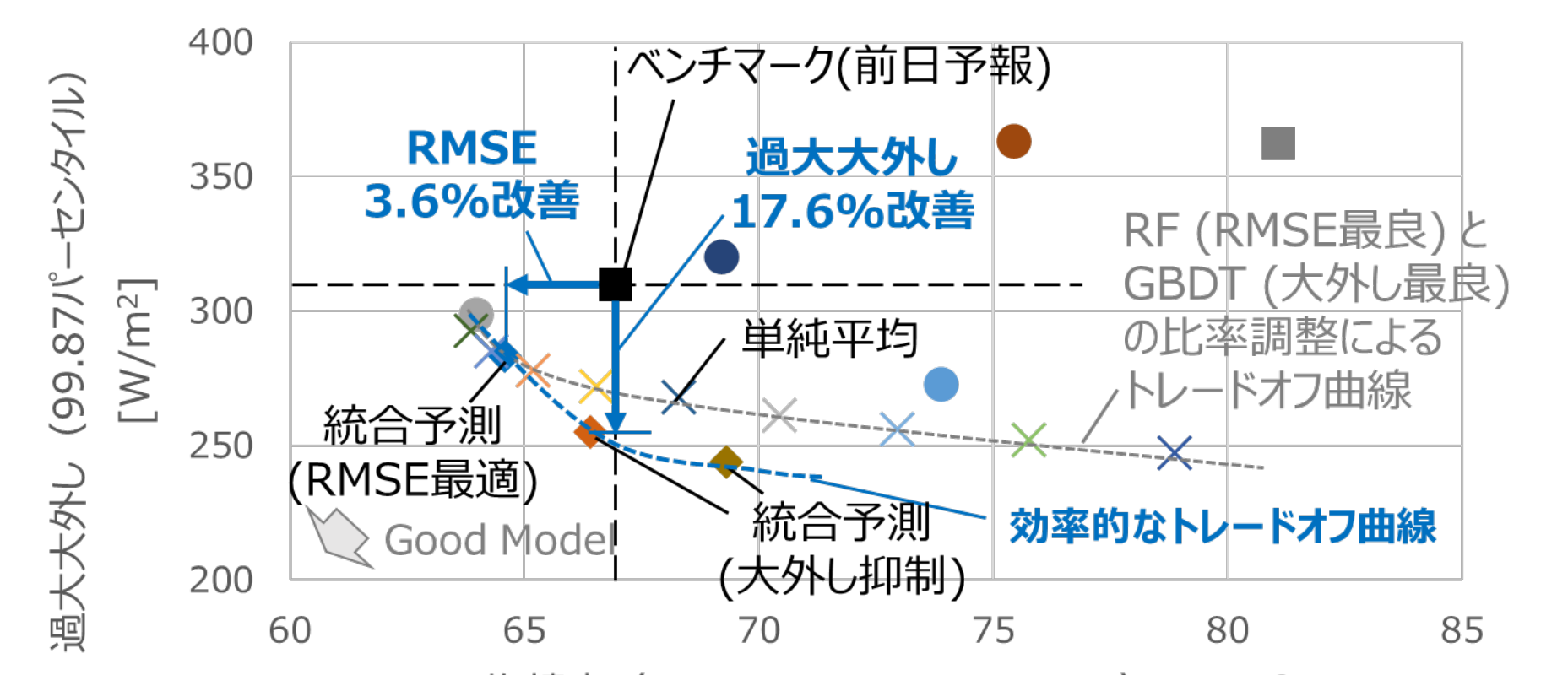
複数の機械学習モデルの出力を統合

- 複数の機械学習モデルを統合する統合器を予報モデルに追加
- 統合器の構成を大外しを考慮して最適化



提案手法を用いた日射予報モデルの構成

提案手法を用いた予報モデルの性能 (東京電力エリアの日射予報結果)



統合予報の平均精度と大外しリスク抑制の性能
統合予報の効果(平均精度を維持した大外し抑制最適化)

- 平均精度を維持(0.83%改善)
- 過大大外しを17.6%改善

平均精度と大外しリスク抑制を両立

補足：数値実験条件

- 予測対象
- エリア平均日射 (東京電力)
- 使用データ
- ベンチマーク予報データ (前日[BM1]、前々日[BM2])
- メソアンサンプル予報データ (前日JST09時を初期時刻)
- 大気外日射 (理論値)
- データ期間
- 訓練: 2019-04-01~2020-07-01
- テスト: 2020-07-02~2021-07-01
- 統合対象モデル
- ベンチマーク前日予測、前々日予測 (BM1、BM2)
- ランダムフォレスト (RF)
- 分位点サポートベクター回帰 (QSVM)
- 勾配ブースティング決定木 (GBDT)
- 統合方法
- 単純平均 (Stacking_mean)
+ 単純平均の微調整モデル (Stacking_a~h)
- 二次計画法 (QP)
通常分散最小化 (QP1)
条件付き分散最小化、MBE制約なし (QP2)
条件付き分散最小化、MBE下限制約付き (QP3)

参考文献

- [1] Diallo, Mouhamet. *Solar irradiance forecast and assesment in the intertropical zone*. Diss. Université de Guyane, 2018.
[2] 気象庁予報部予報課「メソアンサンプル予報の紹介」,
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/koushu190313/shiryou2.pdf>

謝辞

本研究は、NEDO委託事業「翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発」(JPNP20015)の一環で進められたものであり、気象庁および気象研究所からデータ提供を受けている。

Headroom 制御を利用した 太陽光発電による調整力創出のポテンシャル評価の検討

研究の目的

- PVの主力電源化実現のためには、持続的な発電事業の実現が必要。そのためには、O&Mの高度化などによる安全性確保しながらランニングコストを低減することに加えて、電源価値向上による便益の向上が重要。
- 将来のkWh価値低減も想定した場合、便益の向上のためには、エネルギーネットワークにおける柔軟性向上により、その価値（いわゆる Δ kWh）のマネタイズを実現する必要がある、PVの大量導入による系統影響の緩和とPV発電事業便益向上を両立することが必要。
- 本研究では、PVが自ら調整力（ Δ kWh価値）を創出する技術について研究している。
- 本稿では、調整力創出のポテンシャルについて試算した。

調整力創出方法の概要

- PVからの調整力の創出方法として、出力を意図的に下げて運転し、必要な時間帯に上げ調整力を創出することを想定する。
- 方法としてcase1~3までの方法がある。Headroom制御とは、case3で示す通り、一定のkW出力を下げて運転する方法である。どの程度まで出力可能であるかについては、PVアレイに設置された太陽電池式日射計によるリアルタイム計測および、日射データを利用して期待発電電力を推定する方法により実現する。

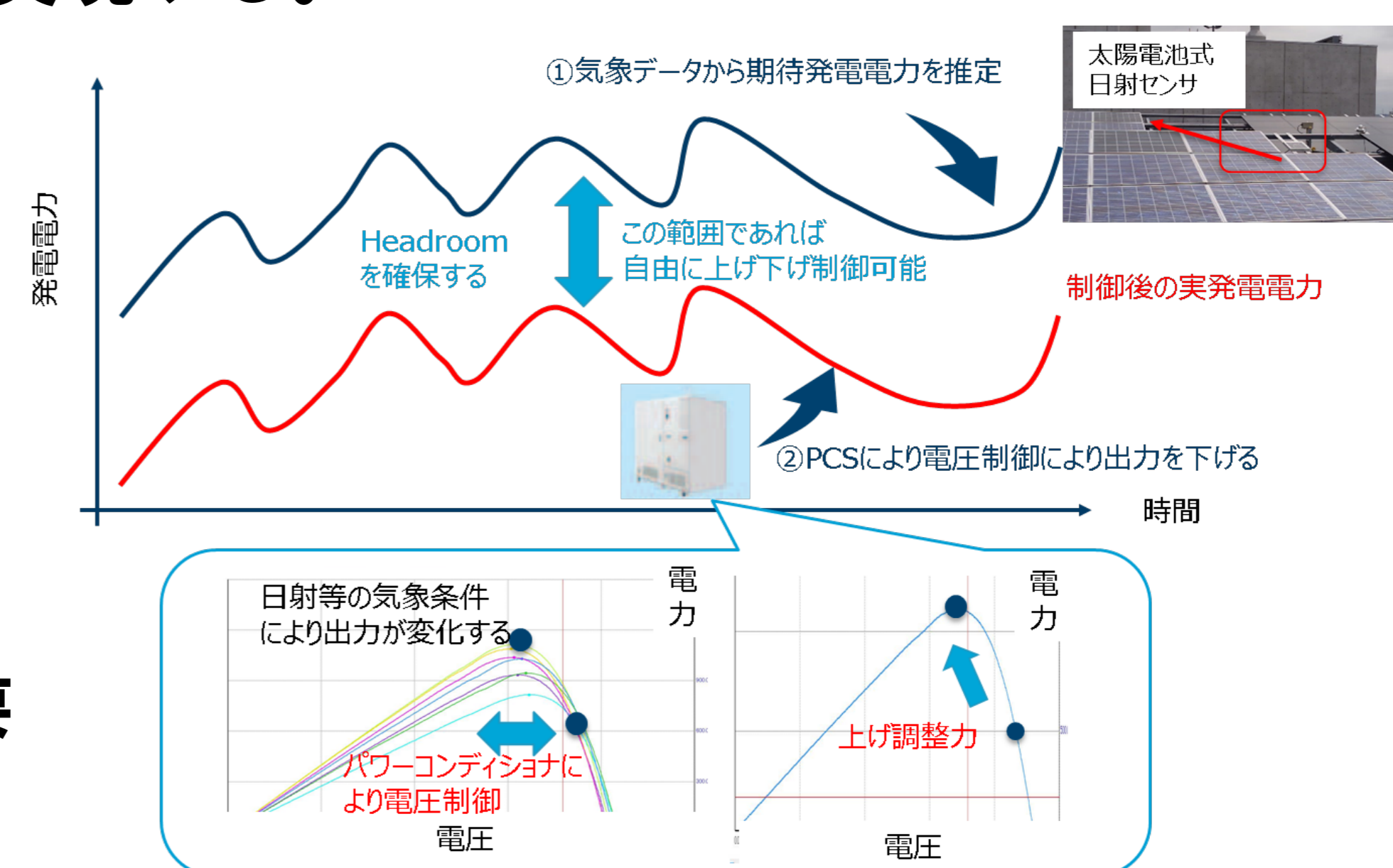
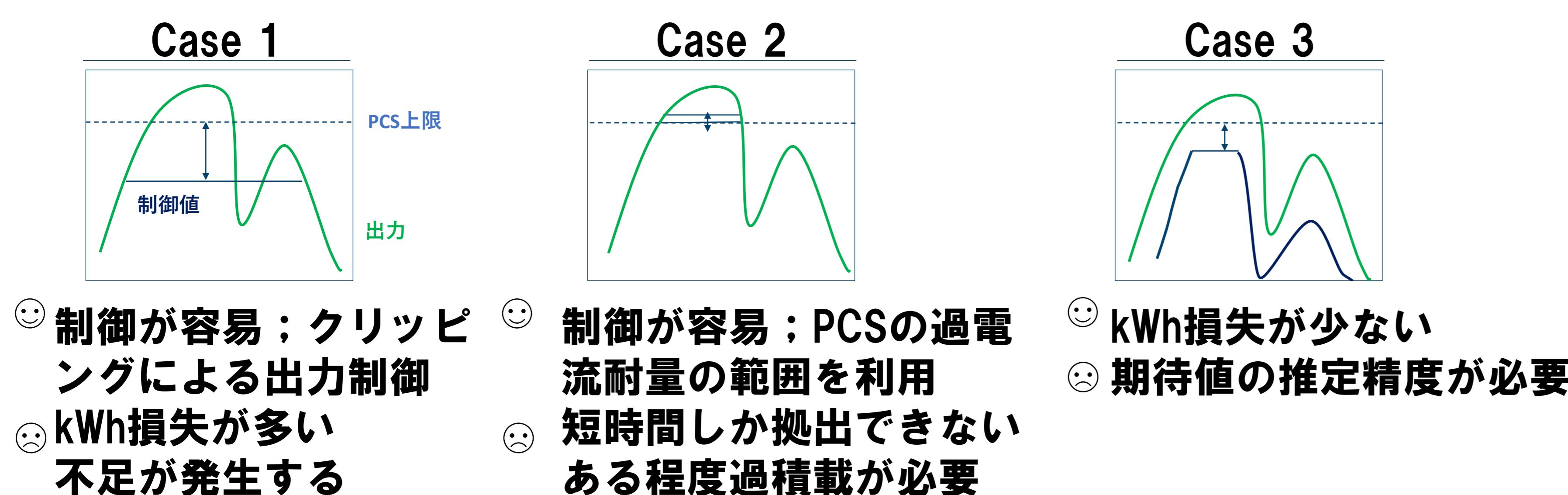


図 Headroom制御概要

評価方法と結果概要

- 評価方法の概要
 - データは、地上気象官署：1分値データを利用したシミュレーションデータを利用。
 - 需給調整市場を想定し、1分値データが30分連続で一定のkWを確保可能なコマ数をカウントすることで評価する。
 - シミュレーション条件：
 - 傾斜20：方位0、-90、90、傾斜30：方位0、-90、90
 - DC/AC比=1、1.25、1.5、1.75、2.0
 - データ期間：2019/9~2022/08
 - データ場所：宇都宮、前橋、甲府、館野、銚子、東京。
 ならし効果は単純平均値を利用
 - 予測誤差の効果をみるため、実測と前日予測データの小さい方を利用して、持続時間を評価
- 結果概要
 - 予測誤差の影響は大きくないことがわかる。
 - 0.2 p.u. (定格に対する割合) が吐出可能なコマ数は、一日あたり約9コマ。
 - DC/AC比により3~4コマ上昇、ならし効果によりさらに2コマ程度上昇することがわかる。

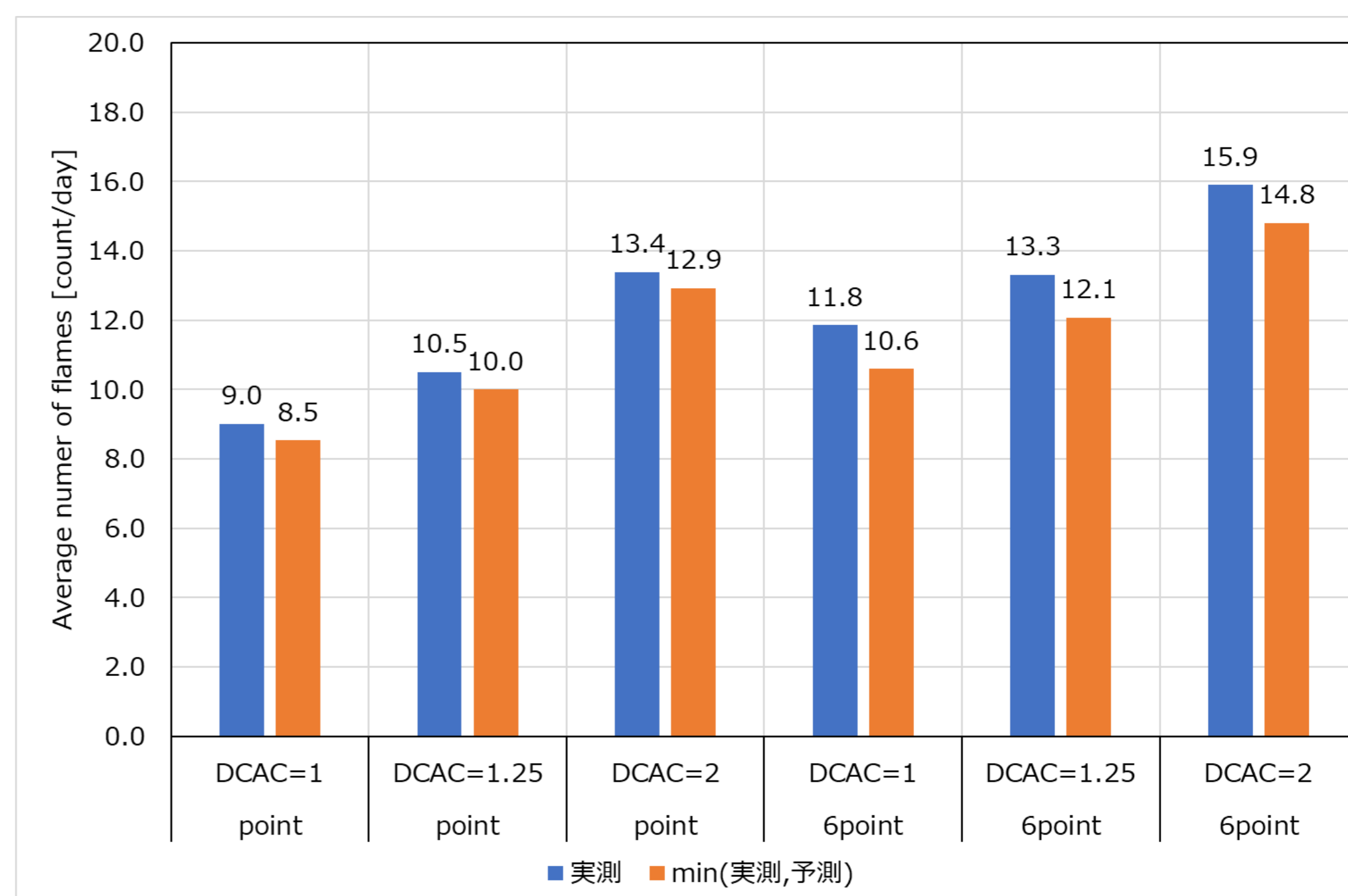


図 0.2p.u.を吐出可能なコマ数南20度の結果

結論

- 30分を一コマとして、吐出可能なポテンシャルについて評価を行った。
- 期待発電電力の推定誤差の影響は少ないが、予測誤差の影響は平均で1コマ/日程度。
- 感度分析として、ならし効果(2点以上)、DCAC比の増加がポテンシャルを増やすうえで有効。

謝辞：本研究は福島県における再生可能エネルギーの導入促進のための支援事業費補助金（福島再生可能エネルギー研究所最先端研究・拠点化支援事業）ならびに国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPN P20015）の一環として実施されたものです。関係者各位に感謝する。