

新規シアノ置換スピロ型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

小野澤 伸子¹、土屋 大輔²、井上 真一²、古郷 敦史¹、船木 敬³、近松 真之¹、上野 敏哉²、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、³産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門

Introduction

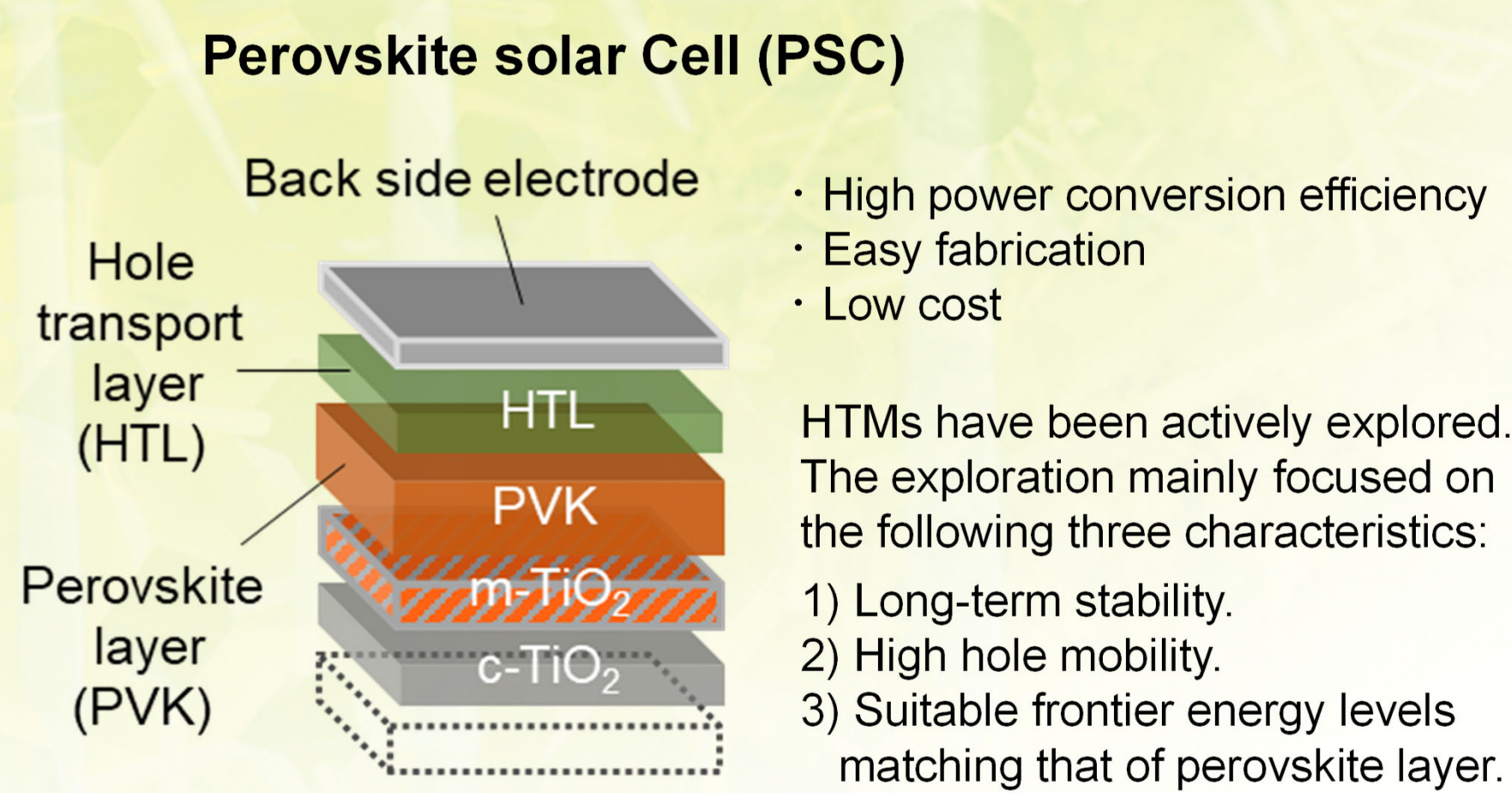
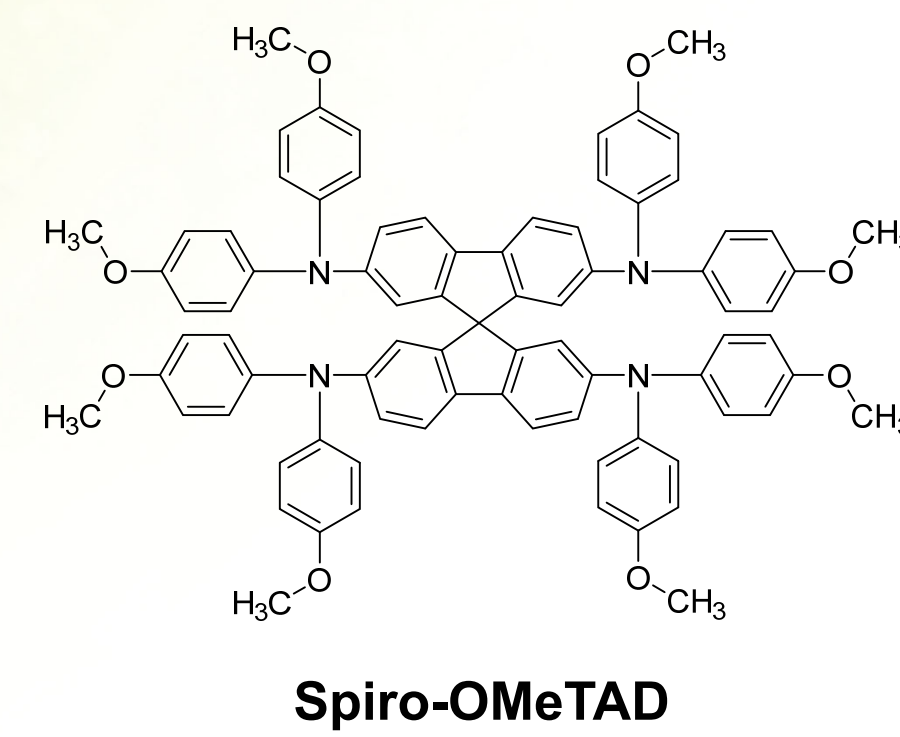


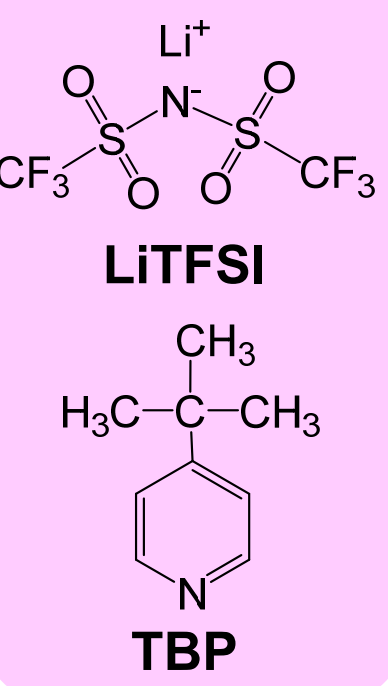
Figure 1 Typical mesoporous-type device structure.

Typical organic HTM for PSC



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

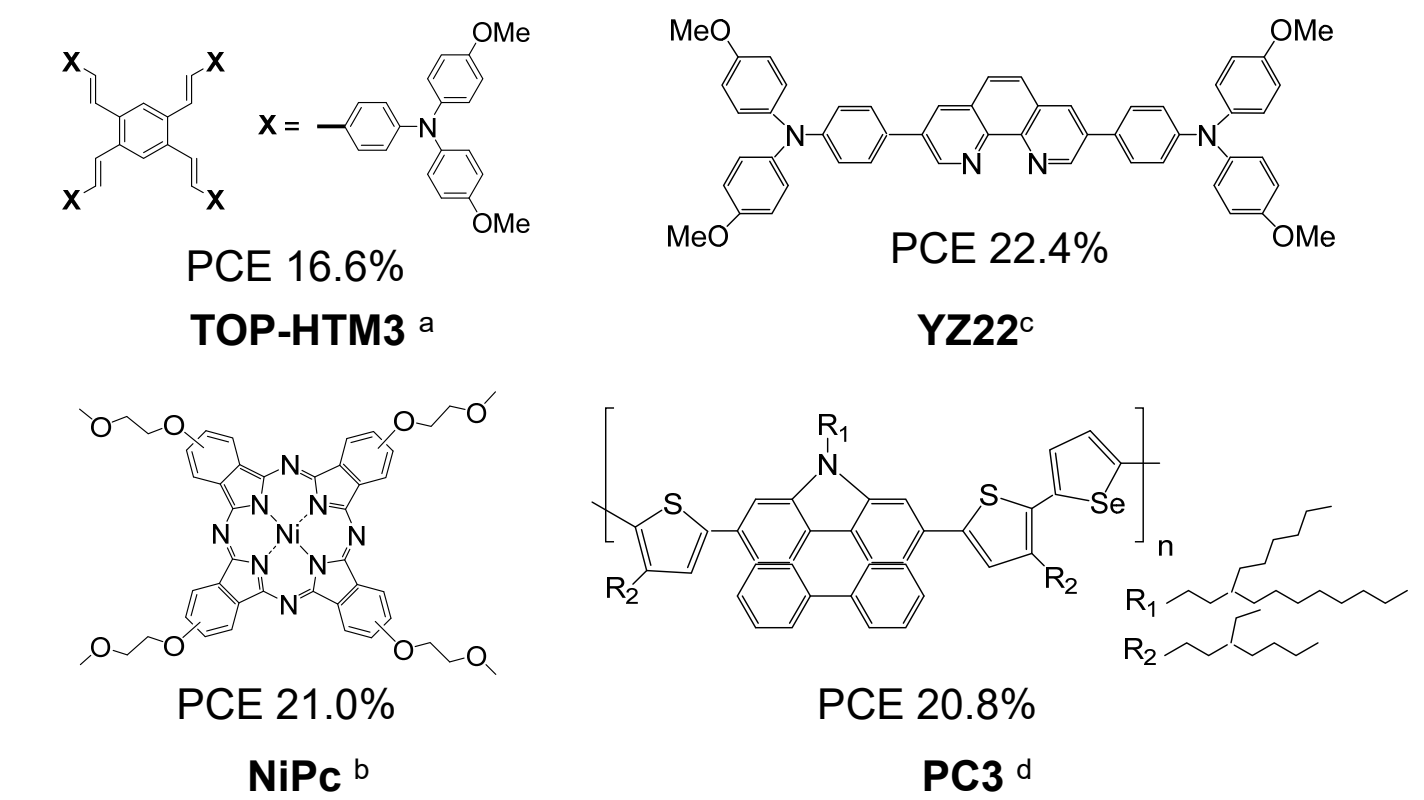
Dopants



Hygroscopic, volatile
 Device degradation

Previous Work

Dopant-free HTMs



^a Hidetaka Nishiura, et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, 12, 32994.
^b Zefeng Yu, et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, 60, 6294.
^c By Xiaomin Zhao, et al., *Energy Environ. Sci.* **2020**, 13, 4334.
^d Zhaoyang Yao, et al., *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, 142, 17681.

This Work

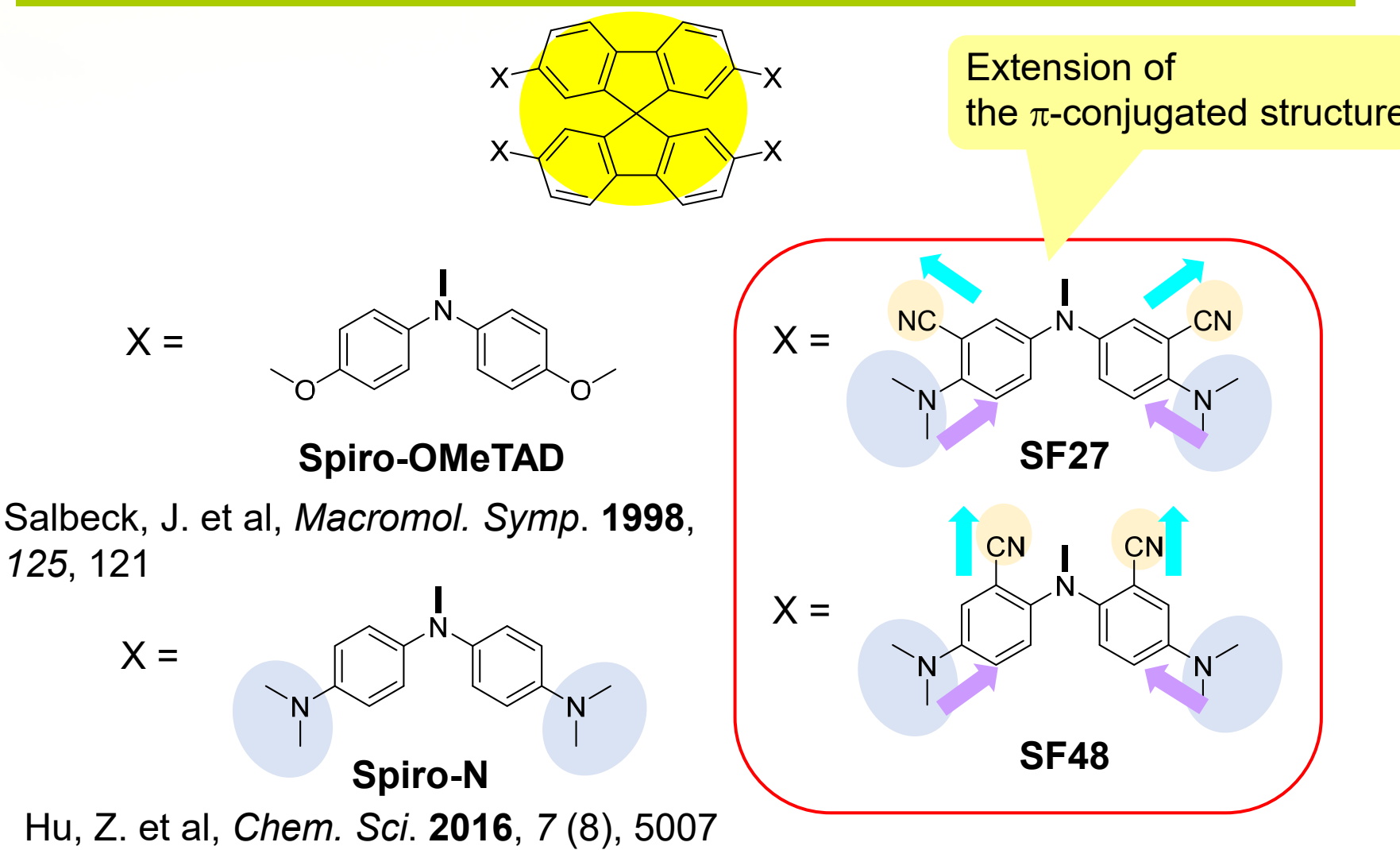


Figure 2. Chemical structures of Spiro-OMeTAD, reference compound Spiro-N, SF27 and SF48.

Chemical Properties

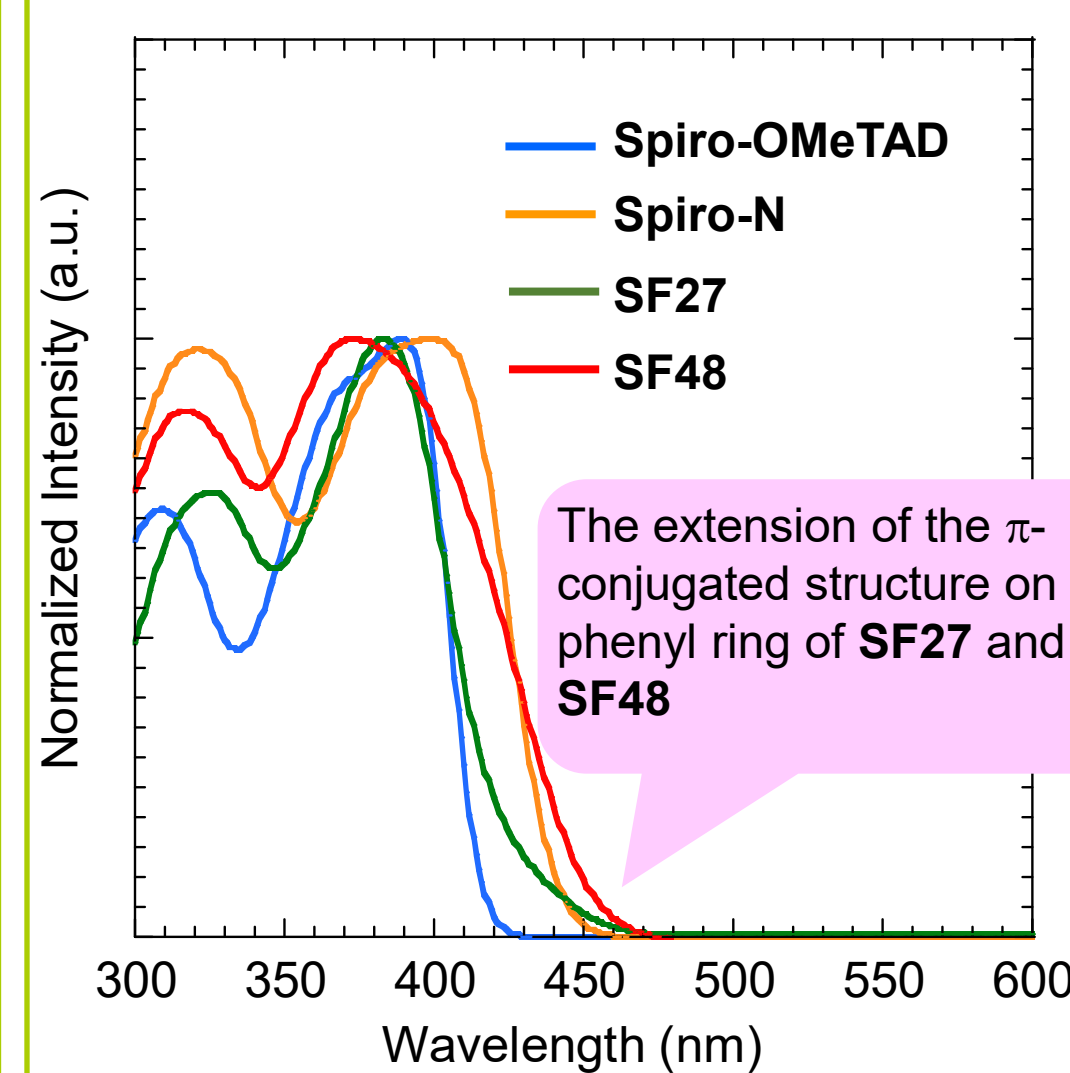


Figure 3. UV-vis spectra of the HTMs in solution (1×10^{-5} M in CB).

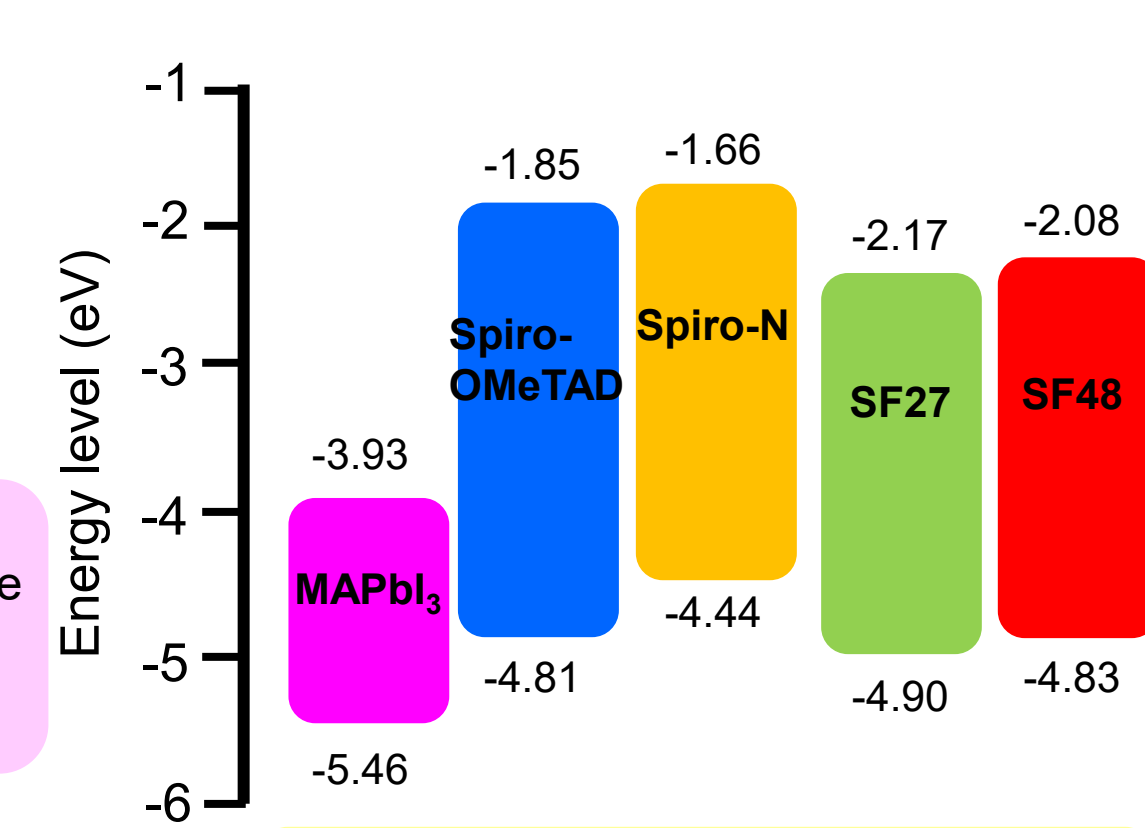


Figure 4. Energy diagram of the HTMs.

Table 1. Hole mobility^a of the HTMs.

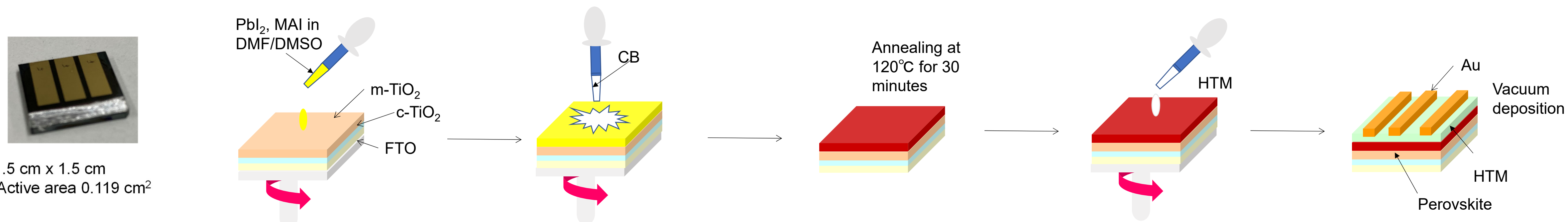
HTM	μ_h ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)
Spiro-OMeTAD	11.9×10^{-5}
Spiro-N	21.4×10^{-5}
SF27	0.5×10^{-5}
SF48	1.7×10^{-5}

^aThe hole mobilities of spin-coated films of the HTMs were estimated via SCLC measurements on an ITO/PEDOT:PSS/HTMs/Au devices.

The hole mobility of SF48 was higher than that of SF27, although it was lower than that of Spiro-OMeTAD.

It is necessary to deposit a thin HTL on the perovskite film.

Device Fabrication



Results and Discussion

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

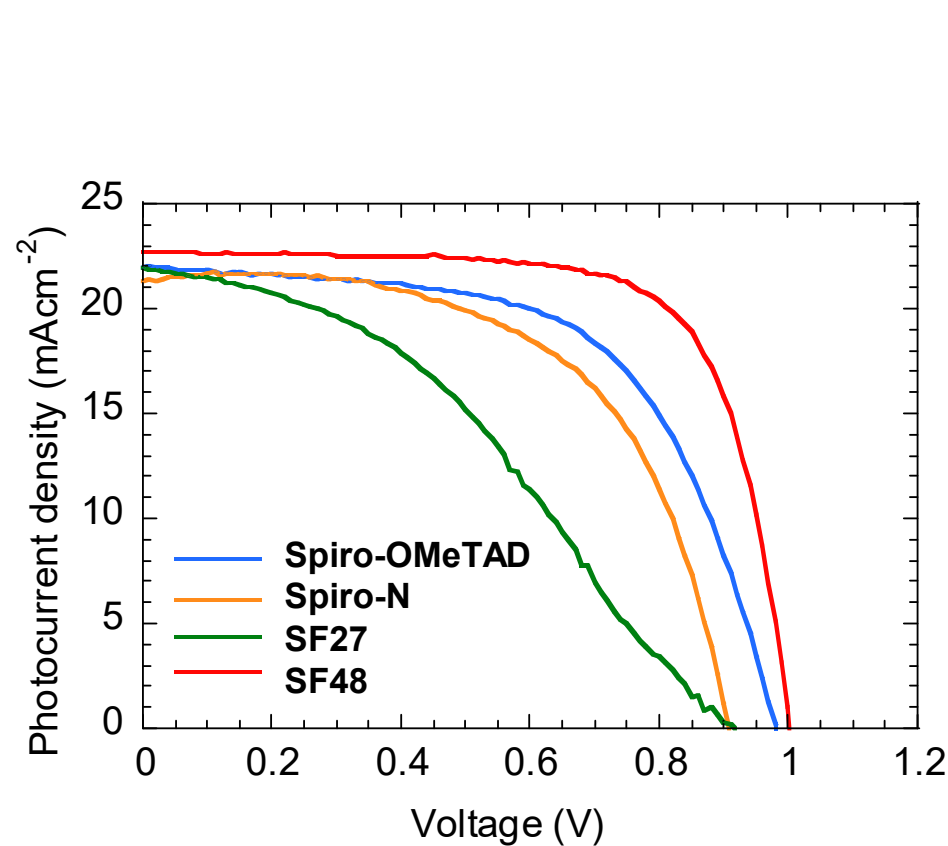


Figure 5. J-V curves for the PSCs based on non-doped HTMs as measured under AM 1.5G solar irradiance (100 mW/cm^2) by a backward scan.

Table 2. Photovoltaic parameters of the PSCs for HTMs without dopants. (Thickness of HTMs; 50 nm)

	$J_{sc}/\text{mA cm}^{-2}$	V_{oc}/V	FF	PCE / %
Spiro-OMeTAD	22.0	0.98	0.60	12.9
Spiro-N	20.0	0.92	0.66	12.1
SF27	21.9	0.92	0.38	7.6
SF48	22.7	1.00	0.72	16.3

The PSC based on non-doped SF48 exhibited the best PCE.

SF48>Spiro-OMeTAD, Spiro-N>SF27

2. Dependence on the film thickness of SF48

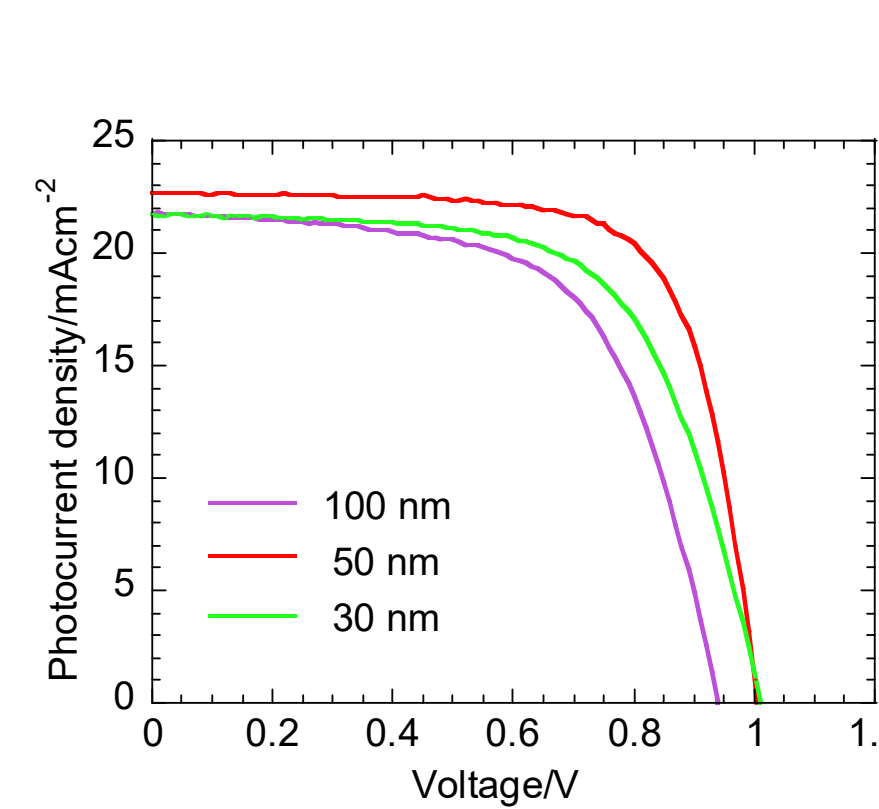


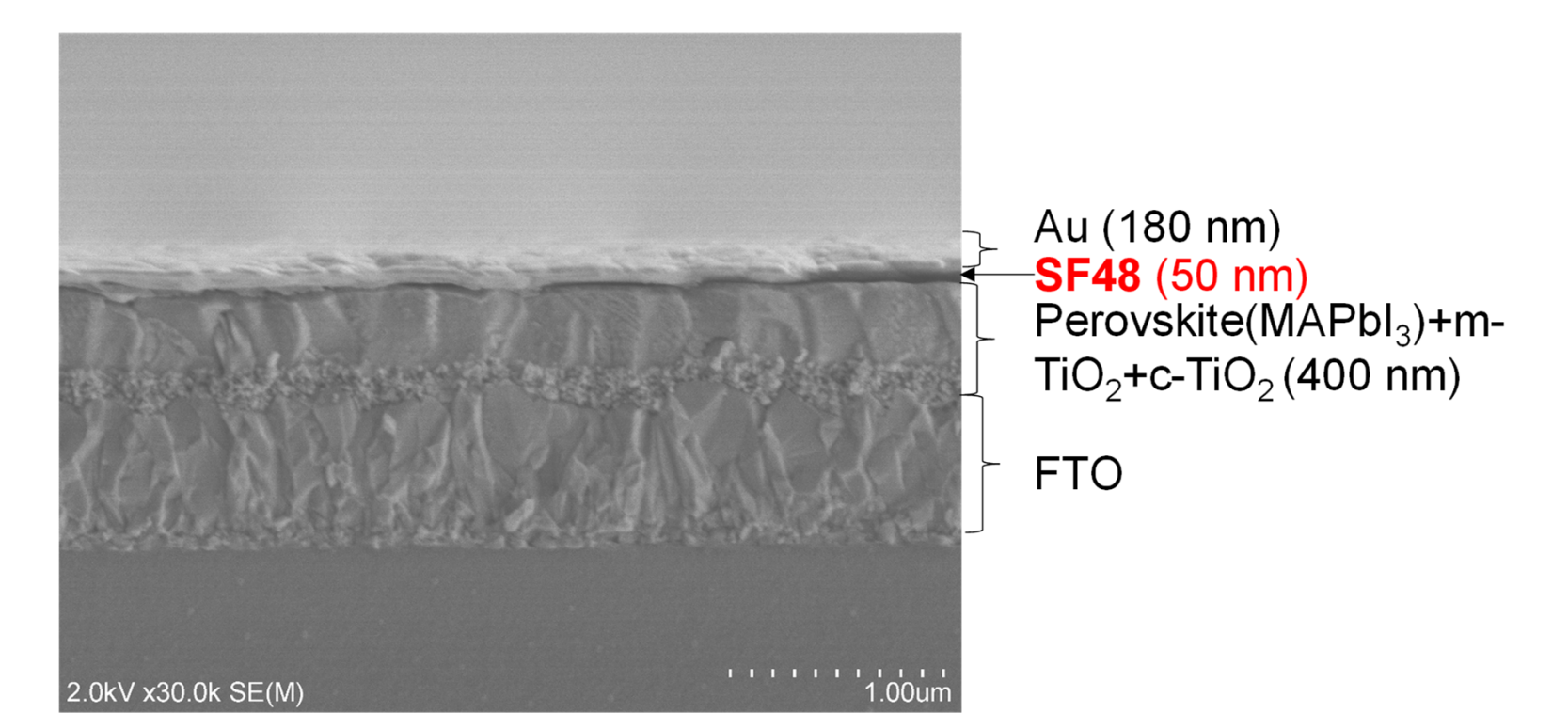
Figure 6. J-V curves for the PSCs based on non-doped SF48 with various thicknesses of SF48 as measured by a backward scan.

Table 3. Photovoltaic parameters of the PSCs based on non-doped SF48 with various thicknesses of the HTM.

膜厚/nm	$J_{sc}/\text{mA cm}^{-2}$	V_{oc}/V	FF	PCE / %
100	21.7	0.94	0.62	12.6
50	22.7	1.00	0.72	16.3
30	21.7	1.01	0.64	14.0

The PSCs with a 50 nm HTL layer showed the best PCE.

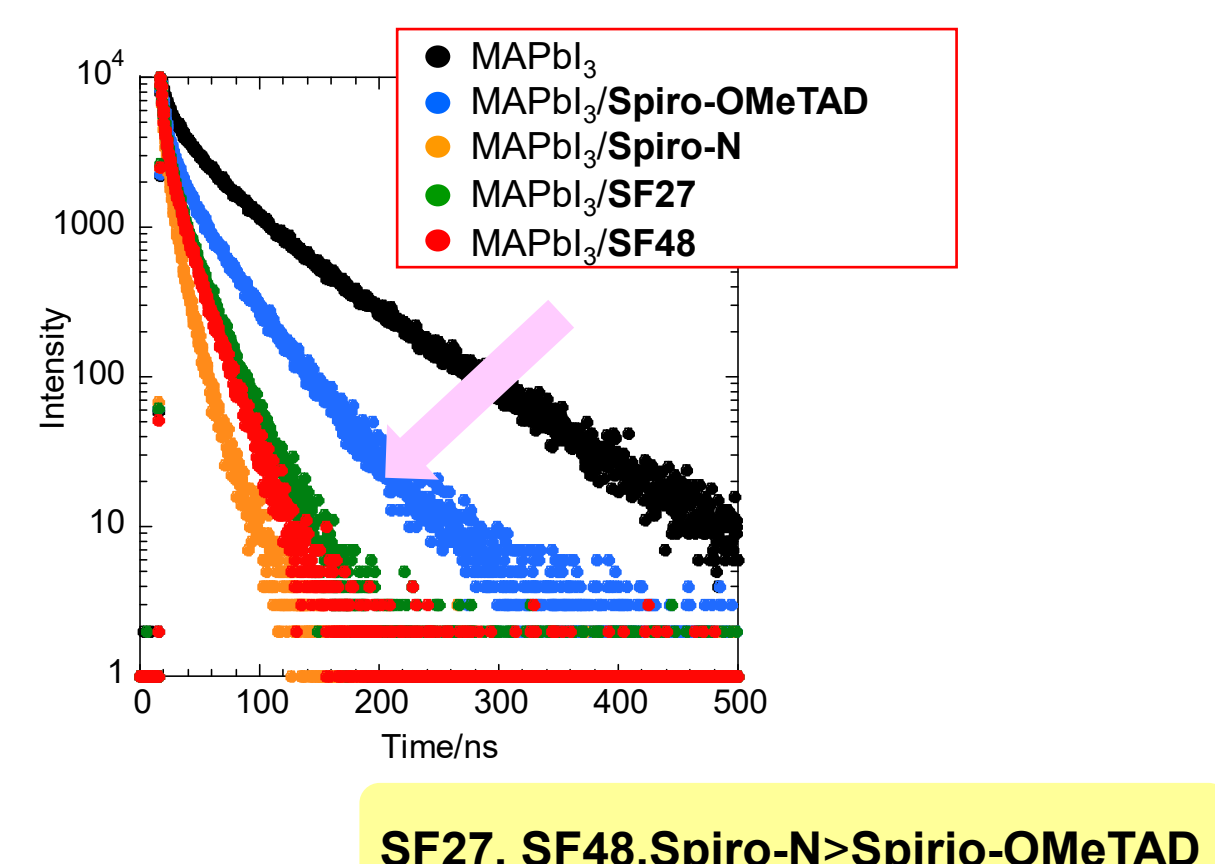
3. SEM image



The optimal thickness of SF48 was only around 20%. SF48 is cost effective HTM.

Figure 7. Cross-sectional SEM image of SF48-based device.

4. Hole extraction ability



SF27, SF48, Spiro-N>Spiro-OMeTAD

Figure 8. TRPL decay curves of the pristine perovskite and perovskite covered with non-doped HTM films excited at 532 nm.

5. The cell performance of the best PSC

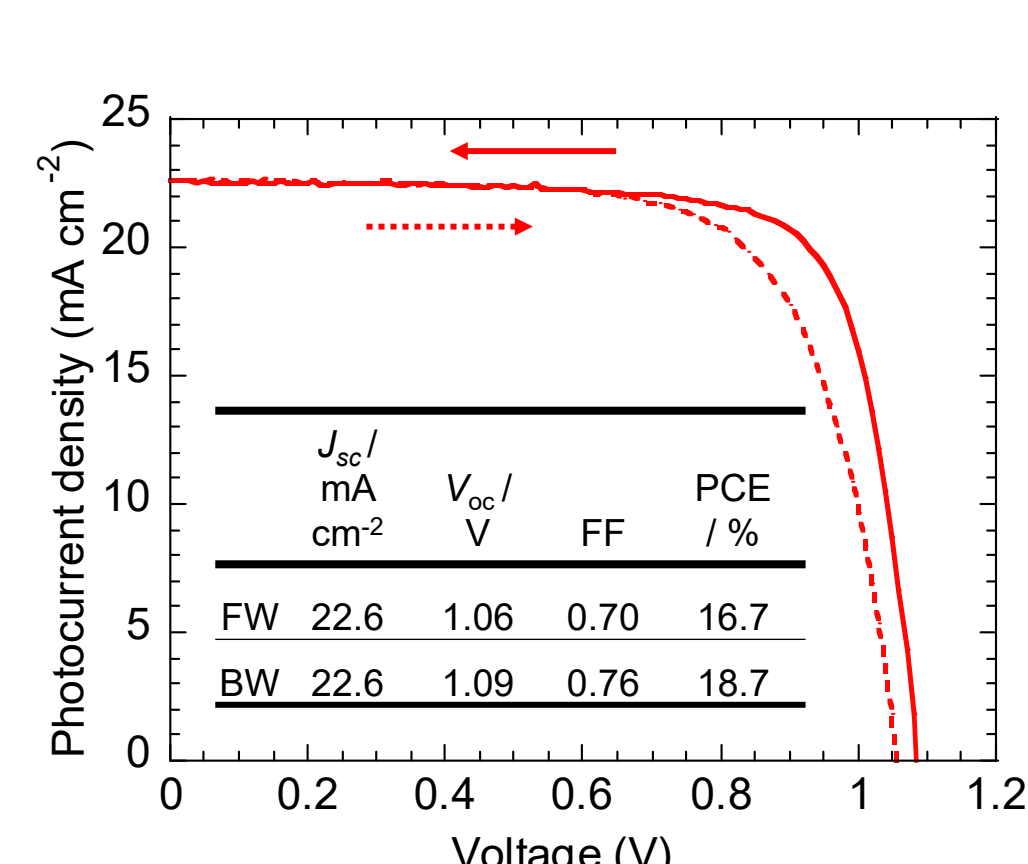


Figure 9. J-V curve for the highest efficiency solar cell based on non-doped SF48.

Table 4. Photovoltaic parameters of the PSCs with CS_{0.05}(FA_{0.85}MA_{0.15})_{0.95}Pb_{(0.85}Br_{0.11})₃ as the perovskite layer^a.

	$J_{sc}/\text{mA cm}^{-2}$	V_{oc}/V	FF	PCE / %
Spiro-OMeTAD with dopant (TBP, LiTFSI)				
FW	22.2±0.4	1.13±0.01	0.68±0.04	17.1±1.1
BW	20.7±1.3	1.10±0.03	0.71±0.03	16.1±1.5
SF48 without dopant				
FW	22.5±0.4	1.05±0.02	0.65±0.03	15.3±0.9
BW	22.4±0.4	1.08±0.01	0.73±0.02	17.6±0.6

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

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

6. Thermal stability test

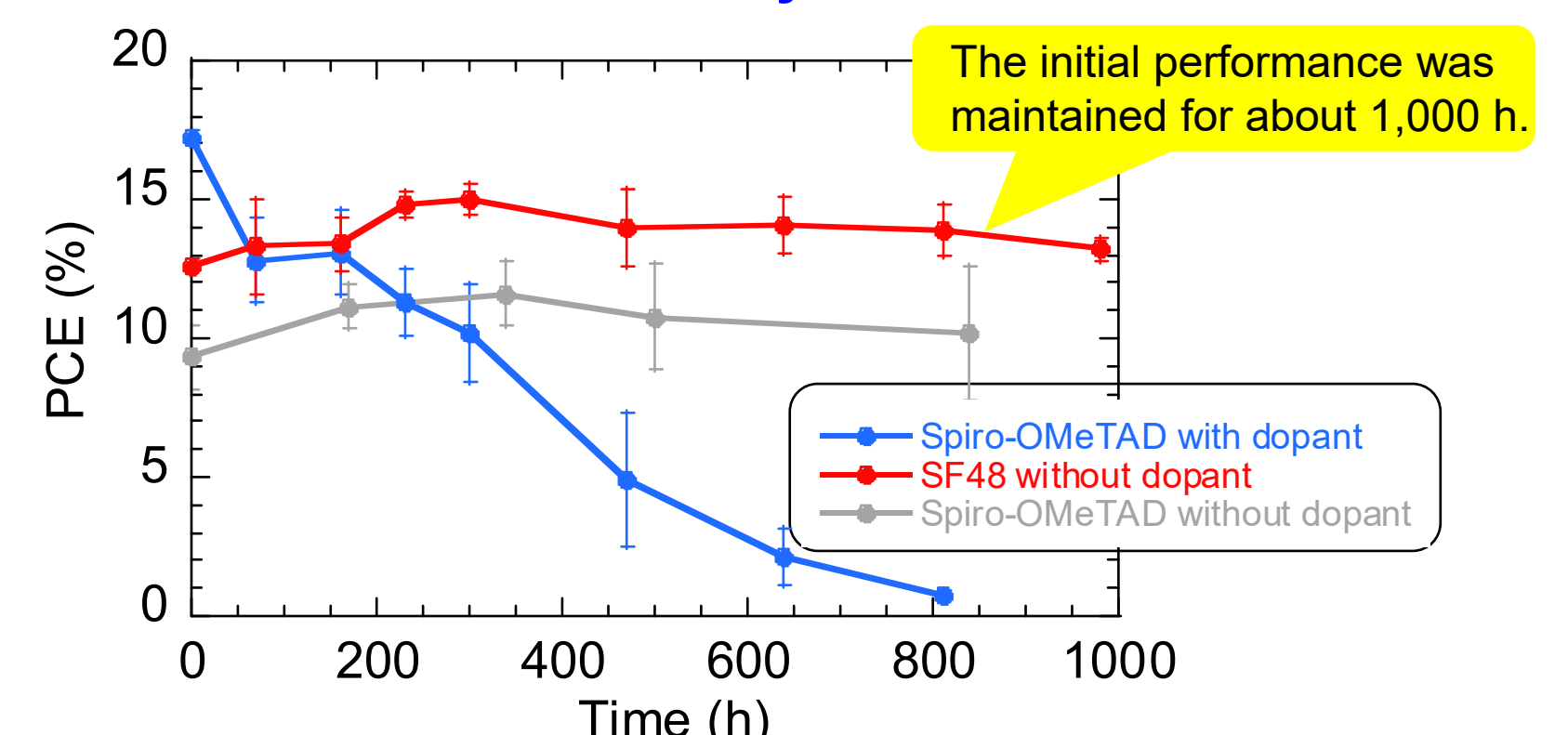


Figure 10. Change in the efficiencies of the solar cells based on doped (blue) and non-doped Spiro-OMeTAD (grey), and non-doped SF48 (red) at 85 °C in ambient air. The PCEs were provided by backward scans.

Summary

We have successfully synthesized and characterized cyano-substituted spiro-typed compounds, SF27 and SF48, for use as HTMs in PSCs. PSCs with non-doped SF48 exhibited a high PCE of 18.7%, which was comparable to the reference PSC with doped Spiro-OMeTAD (18.6%). In addition, the thermal stability of SF48 at 85 °C in ambient air was superior to Spiro-OMeTAD, both with and without dopants.[1] Therefore, the SF48 spirobifluorene-based compound is determined to be quite effective as a high-performance dopant-free HTM for PSCs.

[1] N. Onozawa-Komatsuzaki, D. Tsuchiya, S. Inoue, A. Kogo, T. Funaki, M. Chikamatsu, T. Ueno and T. N. Murakami, *ACS Appl. Energy Mater.* **5**, 6633 (2022).

CuSCN 正孔輸送層 ペロブスカイト太陽電池へのアミン処理効果

駒澤雄飛¹、内田史朗¹、村上拓郎²、古郷敦史²

千葉工業大学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

背景

ペロブスカイト太陽電池(Perovskite Solar Cell)

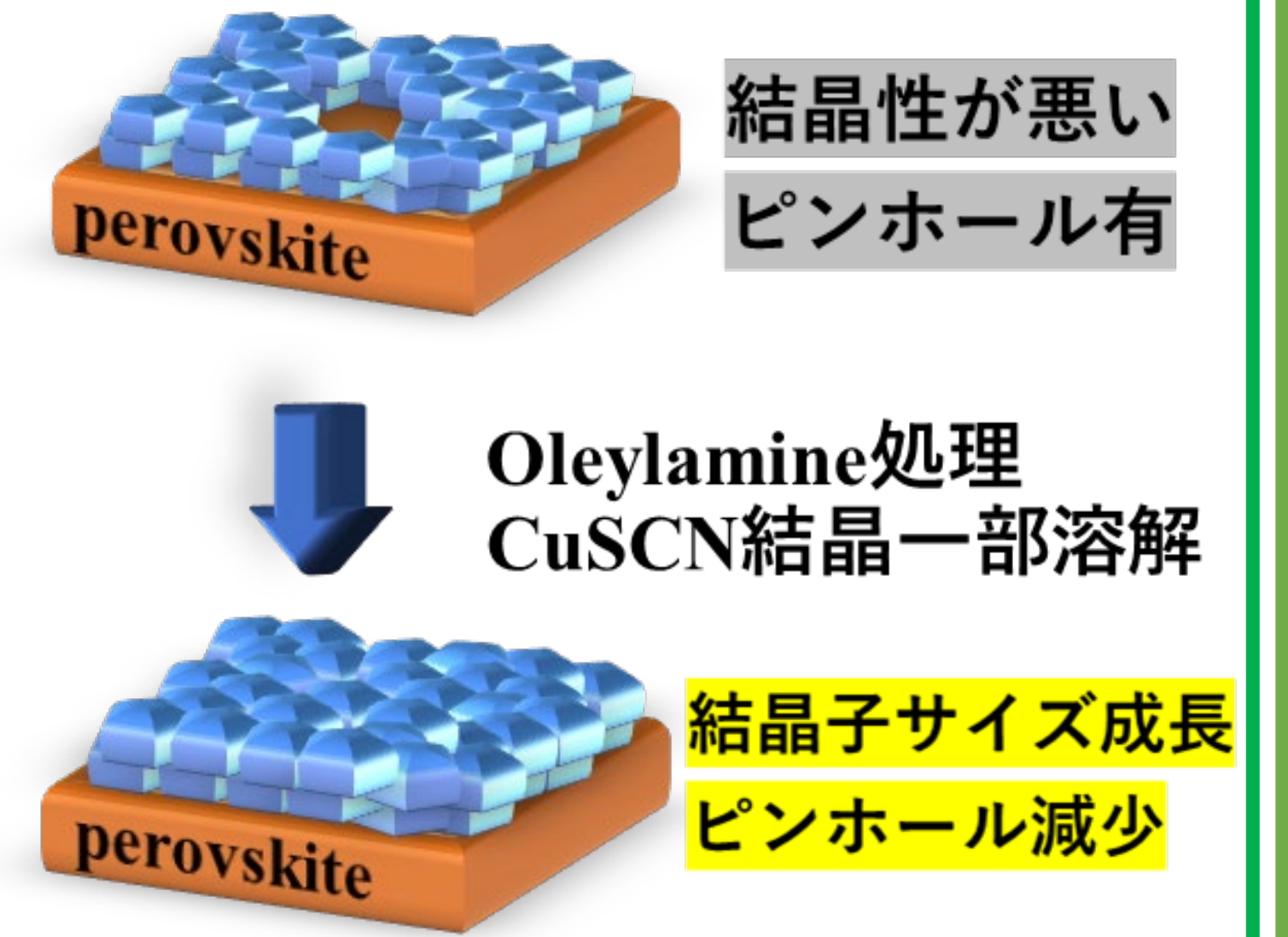
- エネルギー変換効率(PCE)が高い(25.7%)^[1]
- 塗布法で容易に作製が可能(低コスト)
- × 一般的な正孔輸送材
Spiro-OMeTAD 高価・低耐久

本研究の目的

CuSCN (チオシアン酸銅)^[2] を Spiro-OMeTADの代替材料として検討した

- 低コスト, 高耐久
- × 結晶性が悪く, PCEが低い

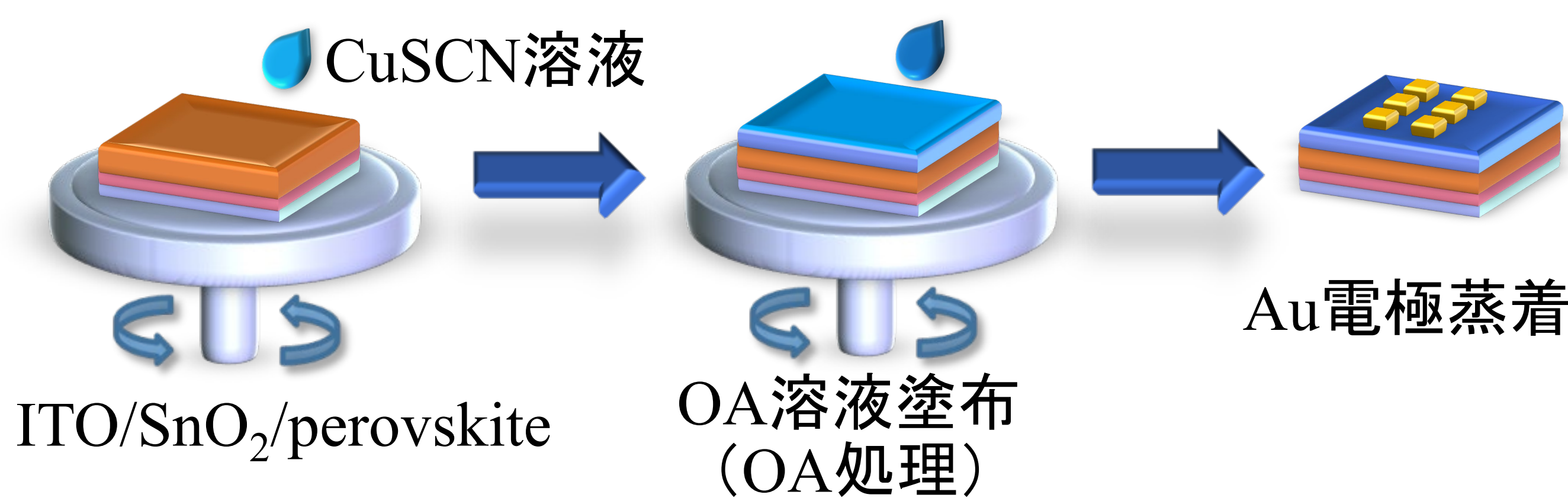
CuSCN膜上にオレイルアミン(OA)を塗布し結晶性と電子物性の制御によりPCEを改善



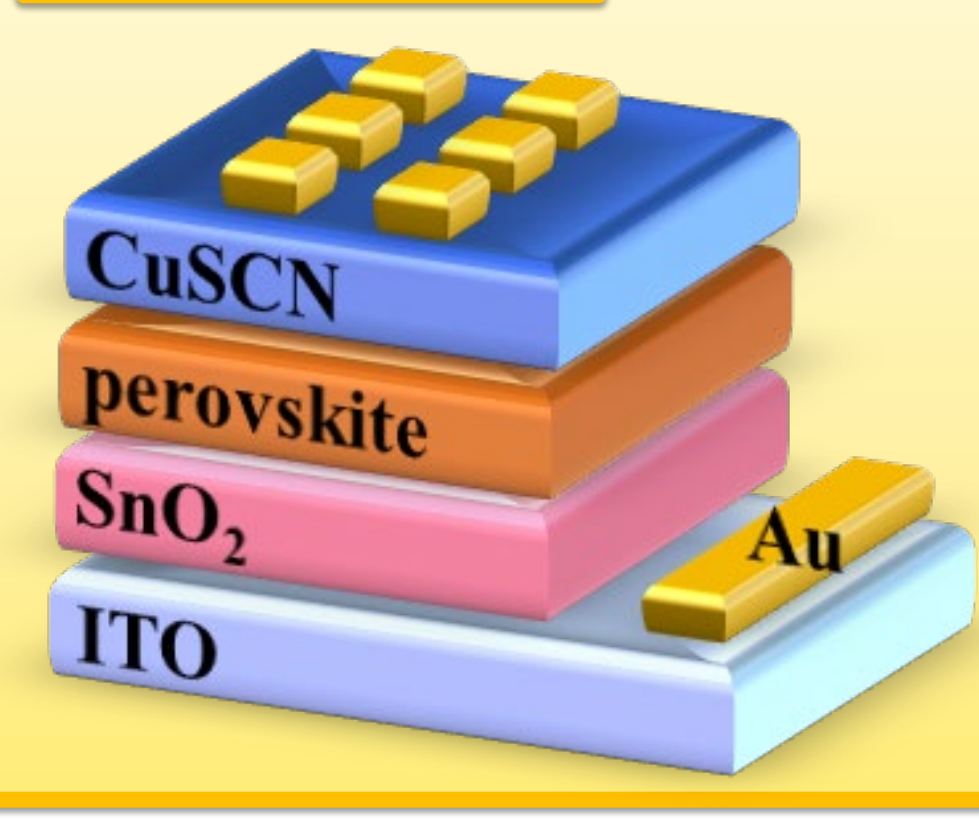
結果と考察

実験方法

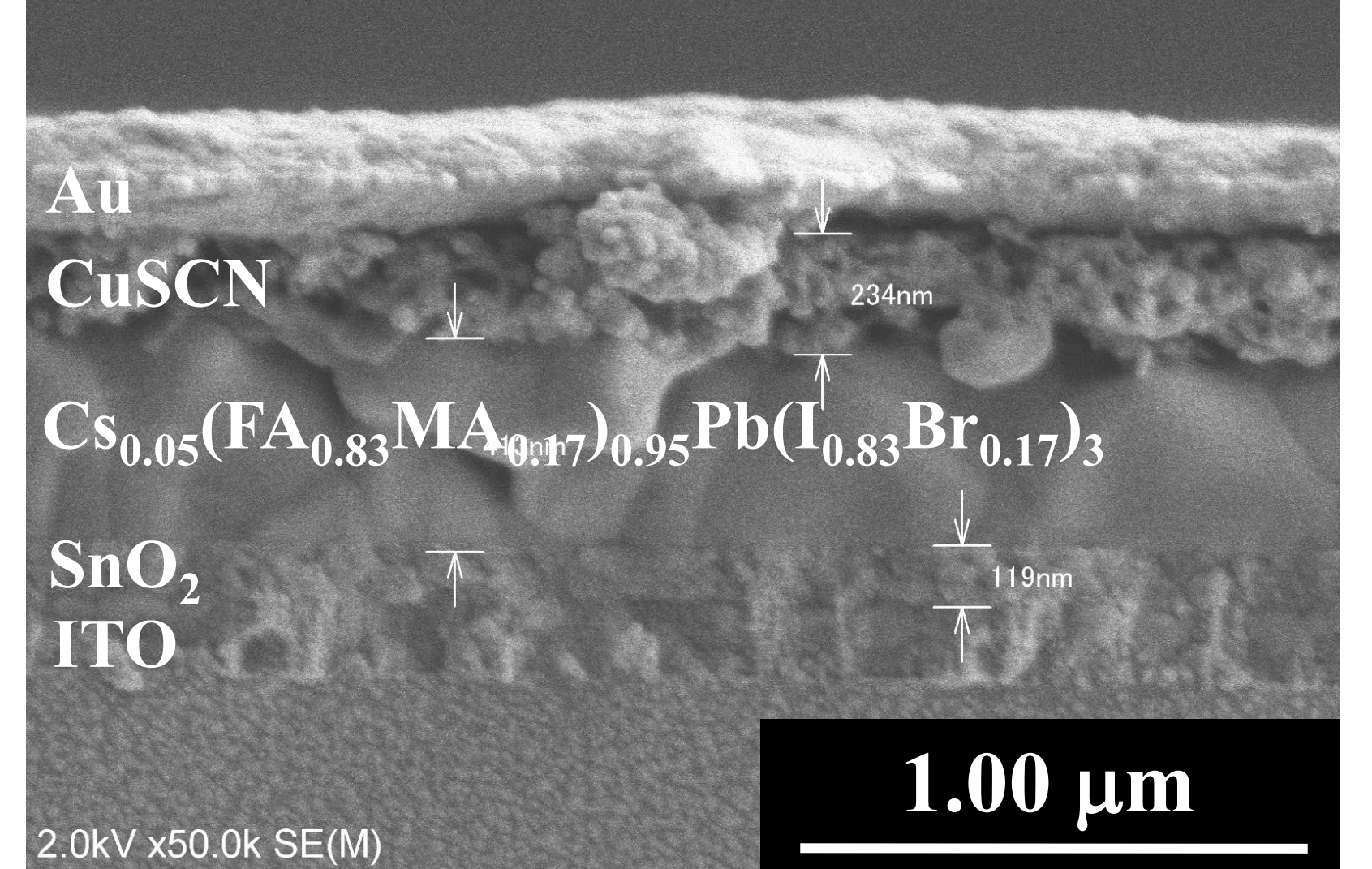
製膜方法: スピンコート法



PSC断面図

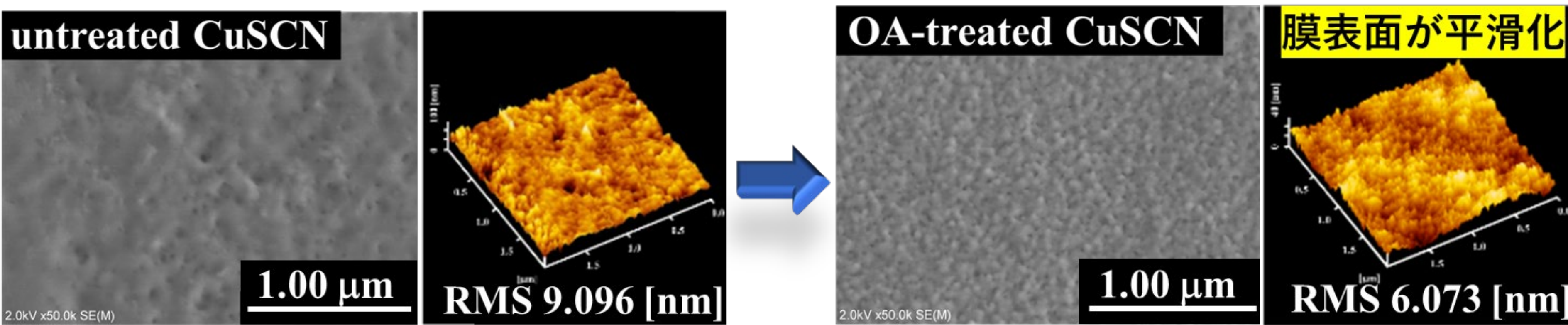


顕微鏡観察画像(SEM像)

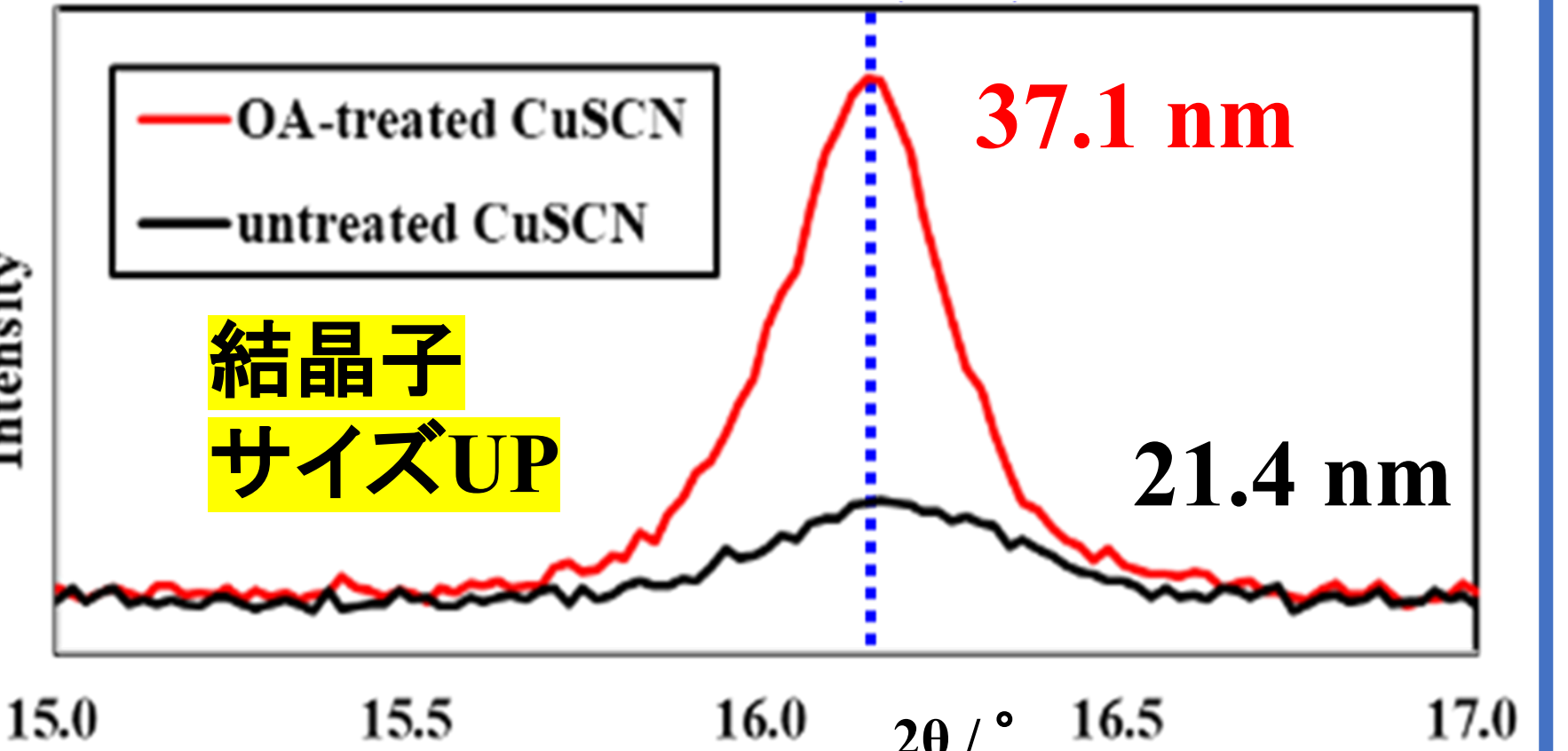


ピンホールの減少, 結晶子サイズの成長

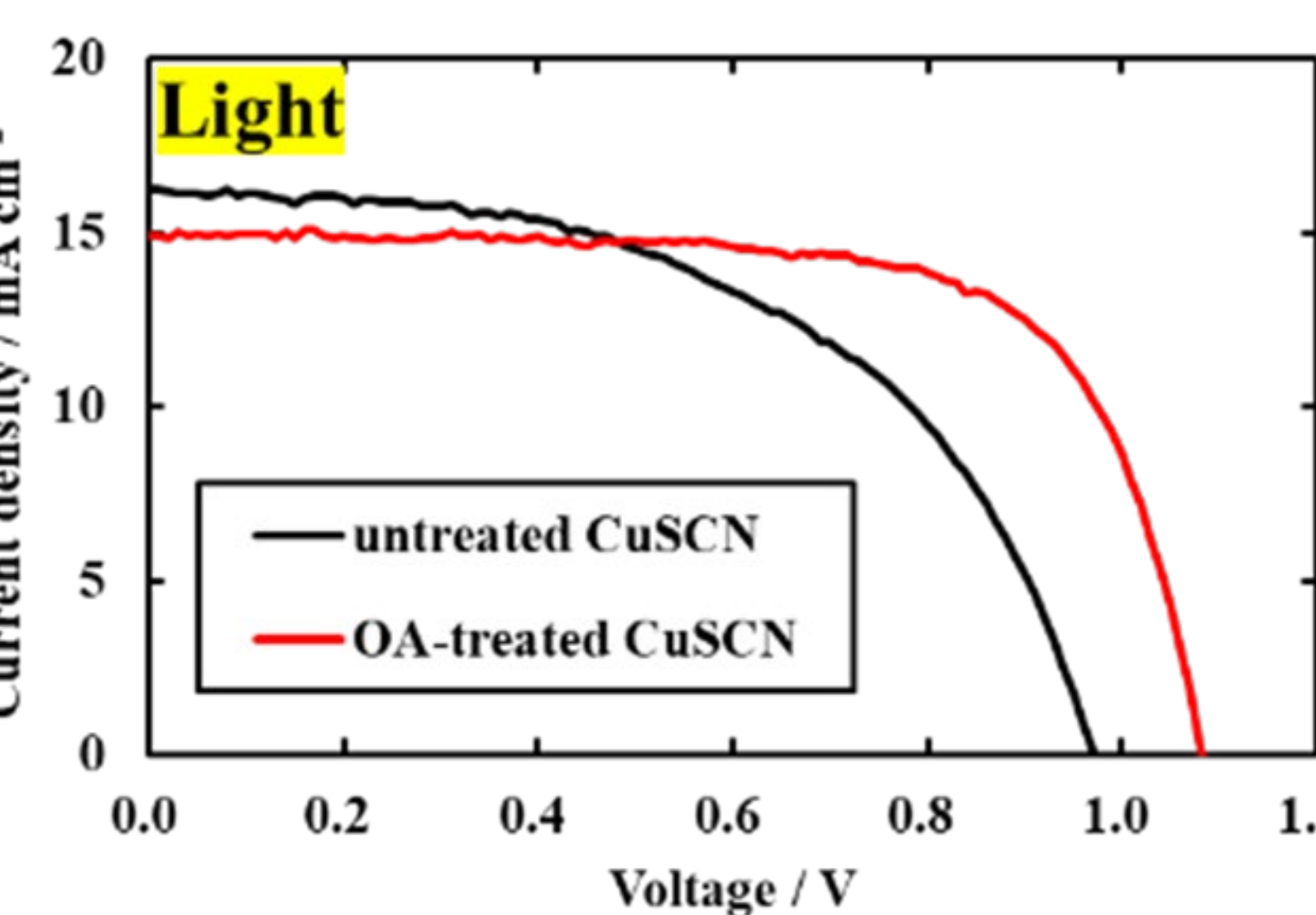
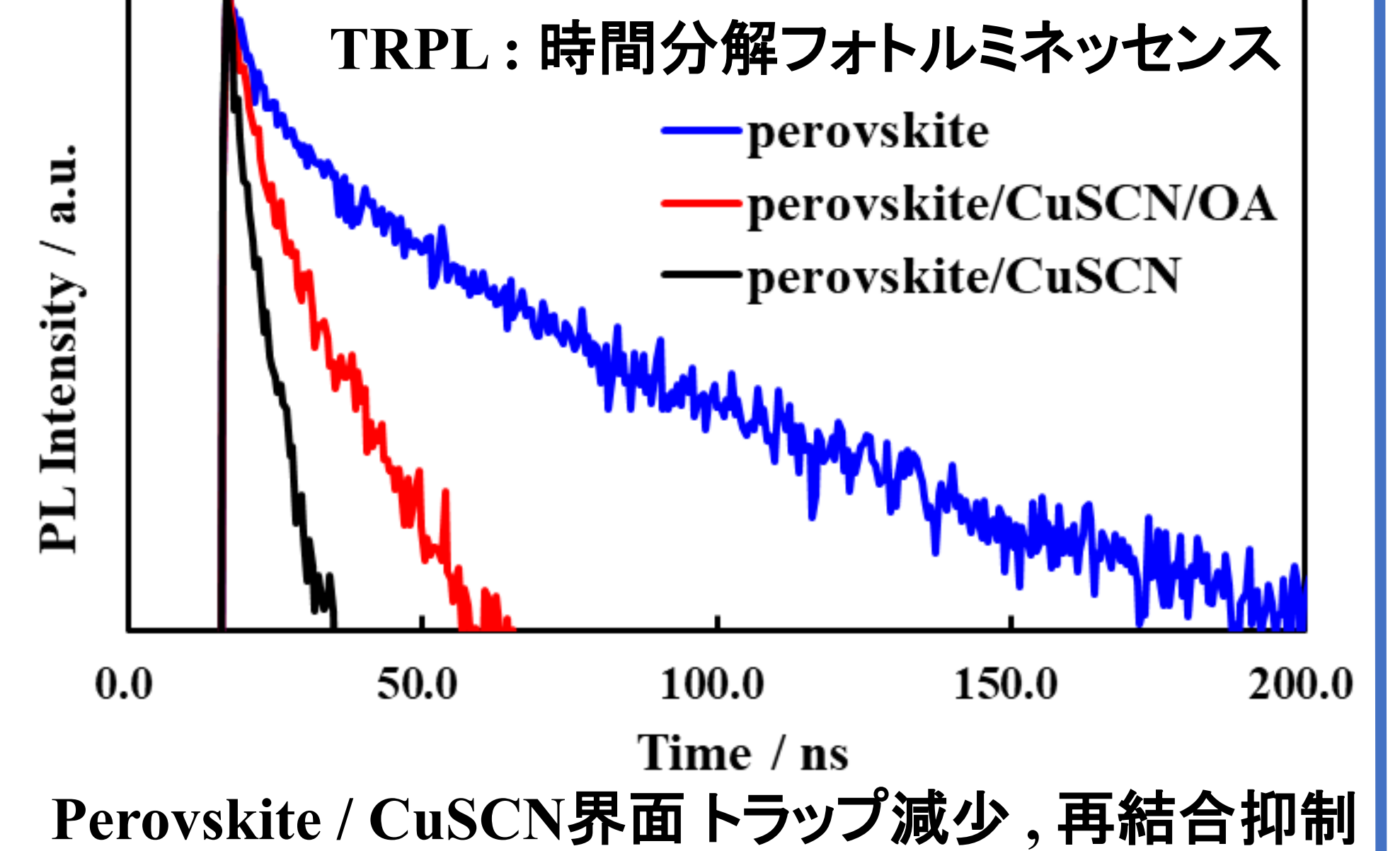
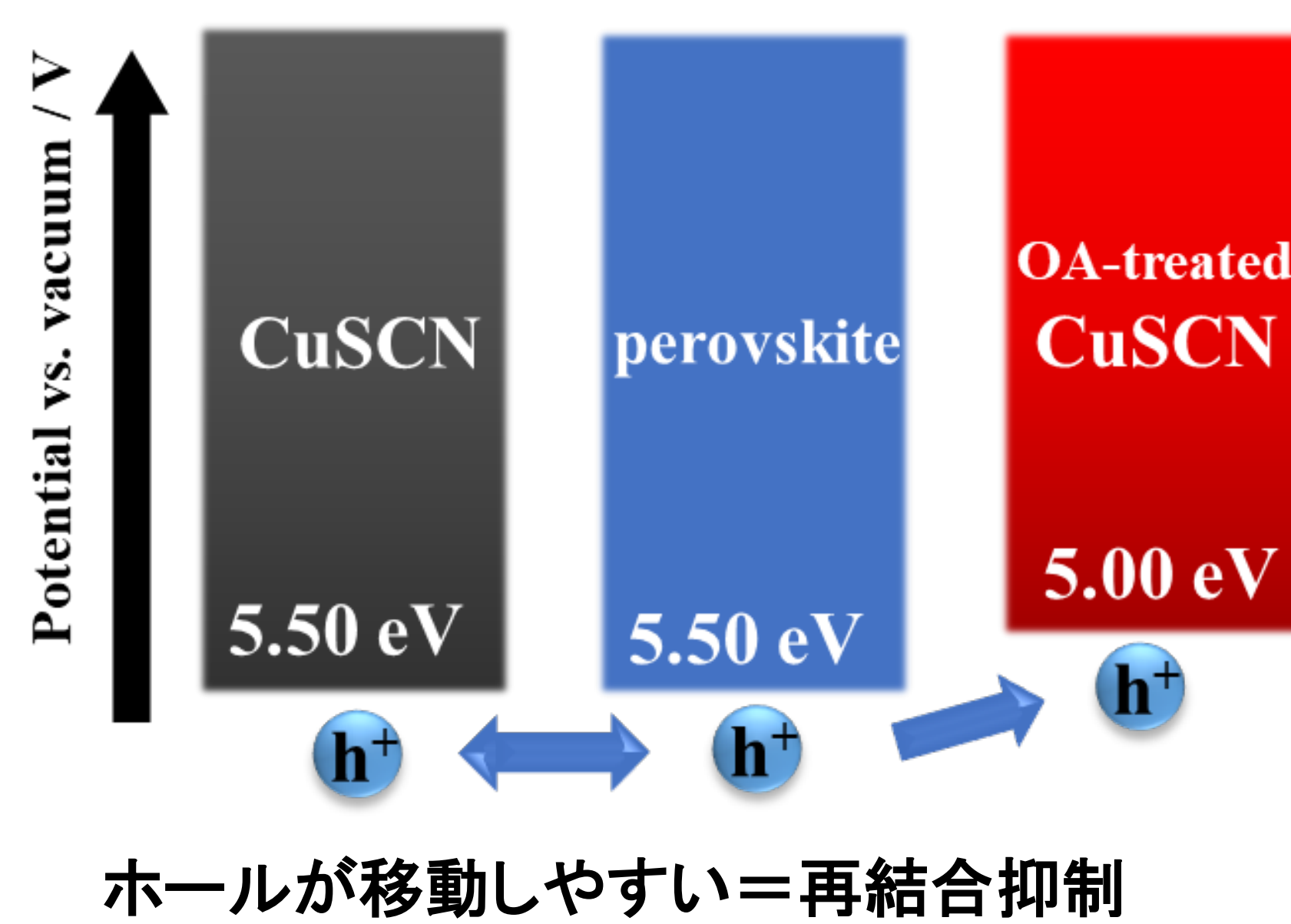
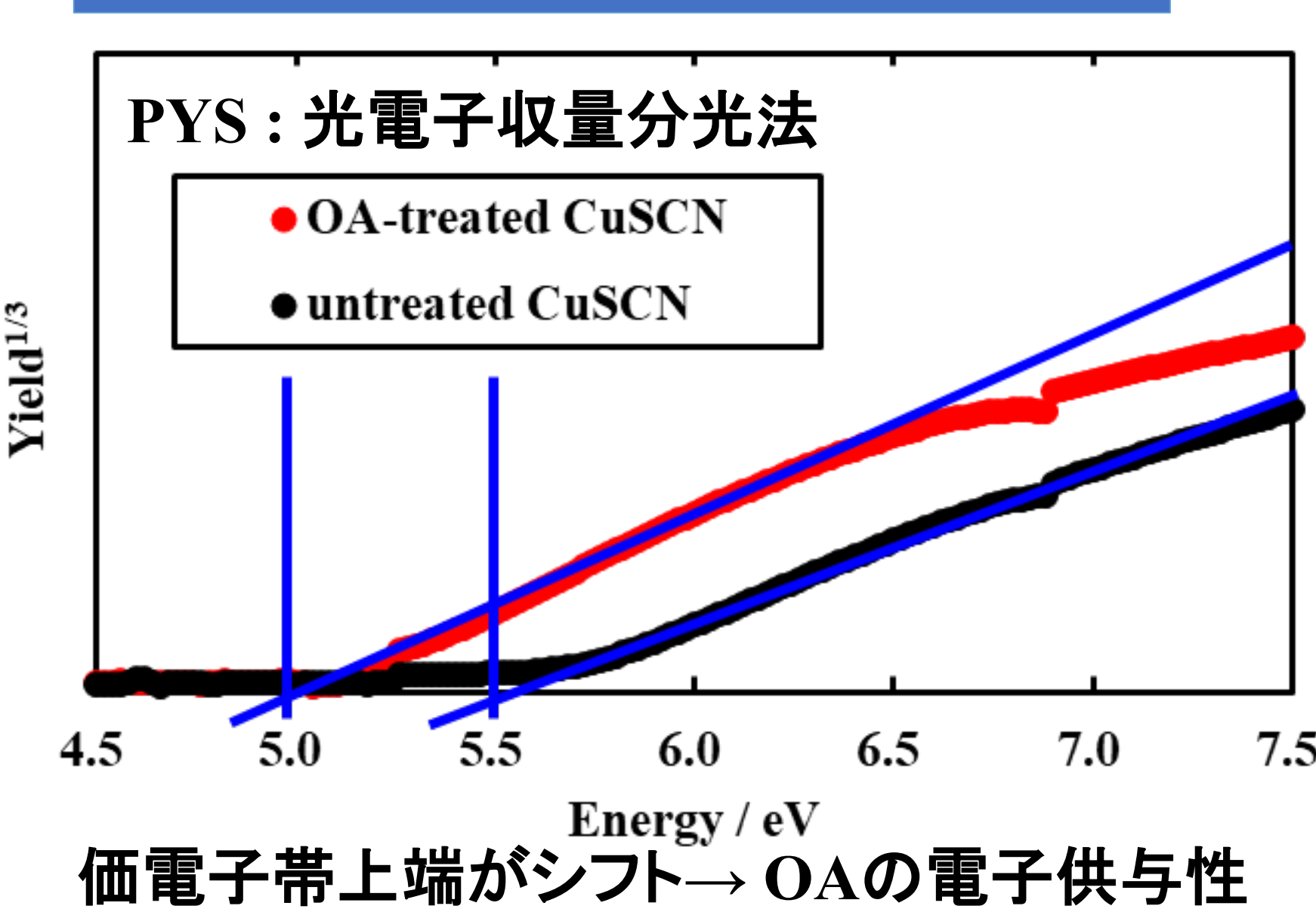
SEM, AFM



XRD CuSCN(001)

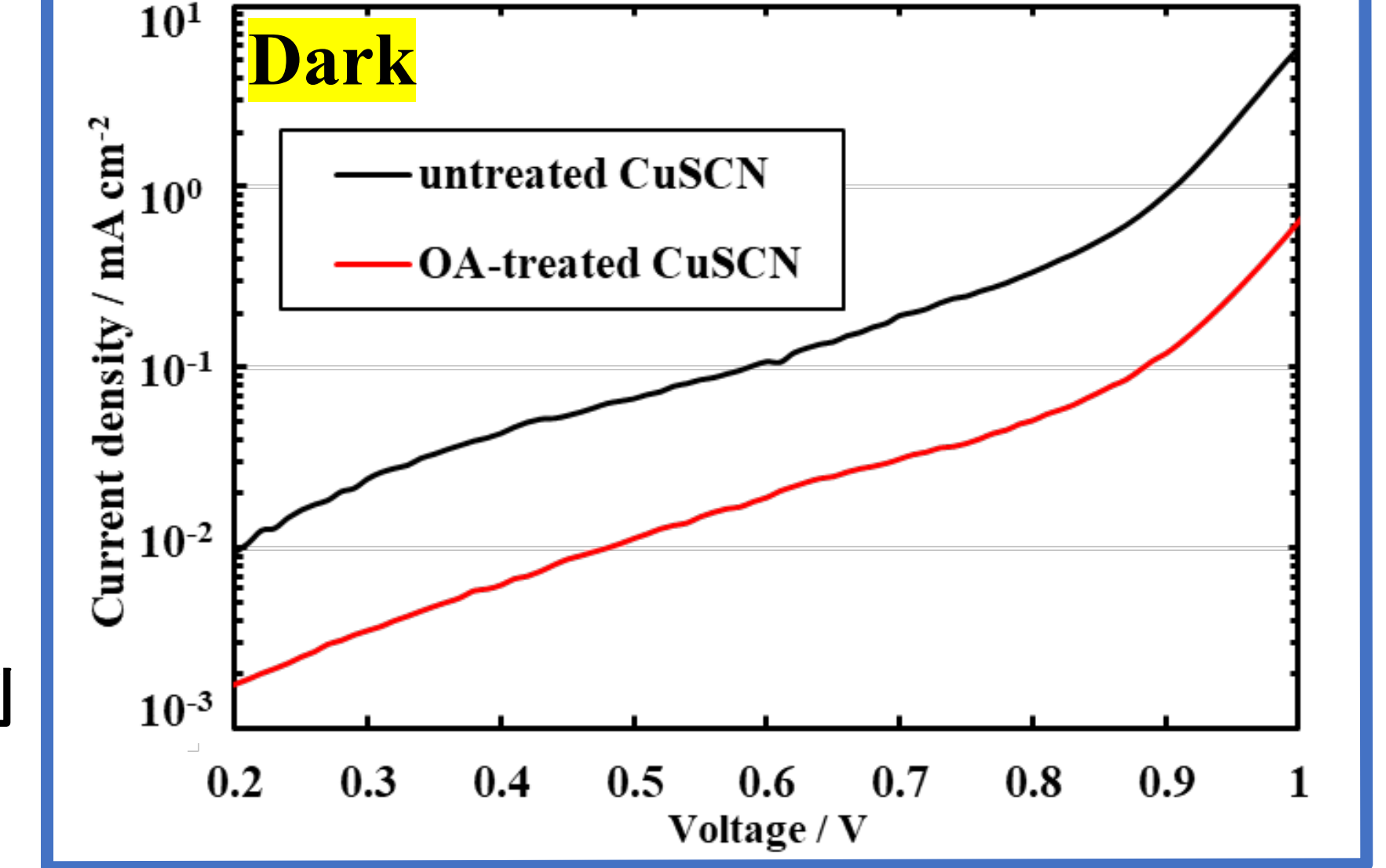


電子物性制御, 再結合の抑制



HTL	$J_{sc} / \text{mA cm}^{-2}$	V_{oc} / V	FF	PCE / %
untreated CuSCN	16.34 ± 0.11	0.955 ± 0.014	0.549 ± 0.023	8.58 ± 0.27
OA-treated CuSCN	14.94 ± 0.25	1.083 ± 0.012	0.704 ± 0.013	11.40 ± 0.24

Voc改善: CuSCN界面減少によりトラップ減少→再結合抑制
FF改善: CuSCN膜が高結晶化, 直列抵抗が減少



結論と今後の展望

CuSCN正孔輸送層ペロブスカイト太陽電池にOA処理すると結晶子サイズが向上し、再結合が抑制されPCEが8.6%から11.4%まで向上した。今後、耐久性の検証を行う。

参考文献

- [1] National Renewable Energy Lab. Best Research-Cell Efficiencies, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [2] Nilushi Wijeyasinghe and Thomas D Anthopoulos. Semicond. Sci. Technol. 30 (2015) 104002 (21pp)

CuSCN正孔輸送層ペロブスカイト太陽電池への高湿度エイジングの効果

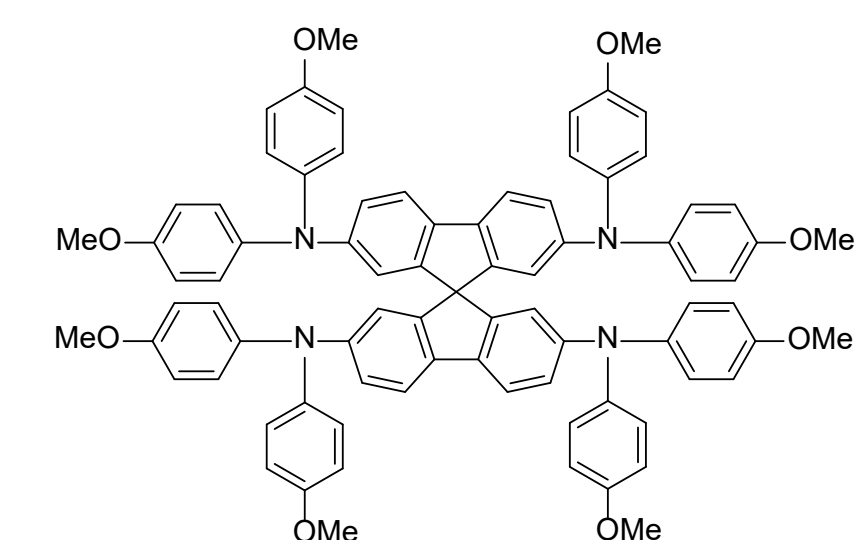
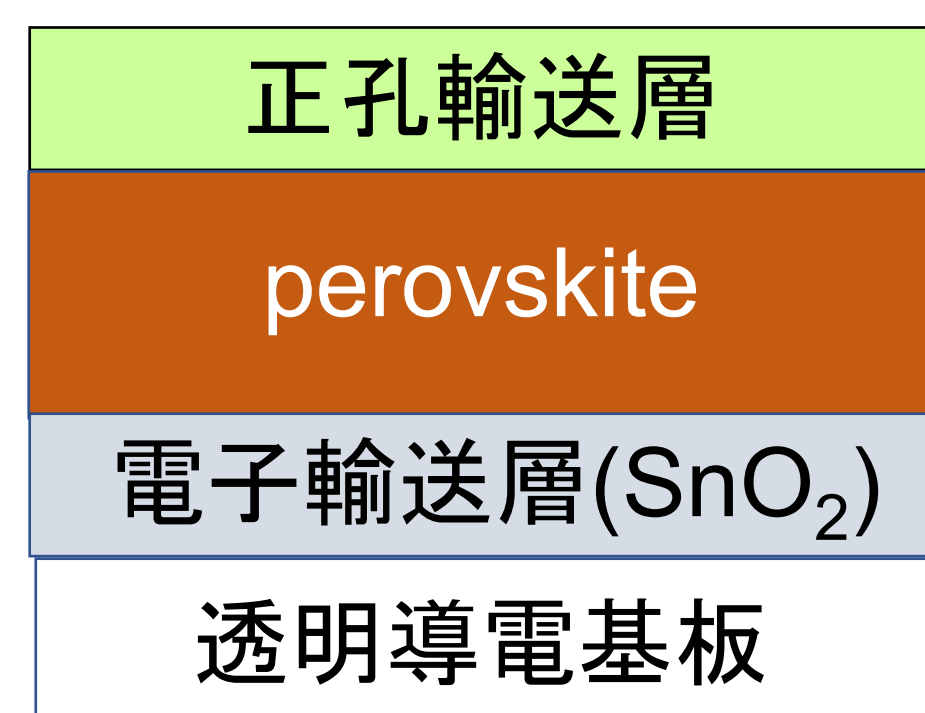
古郷敦史、村上拓郎

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

背景

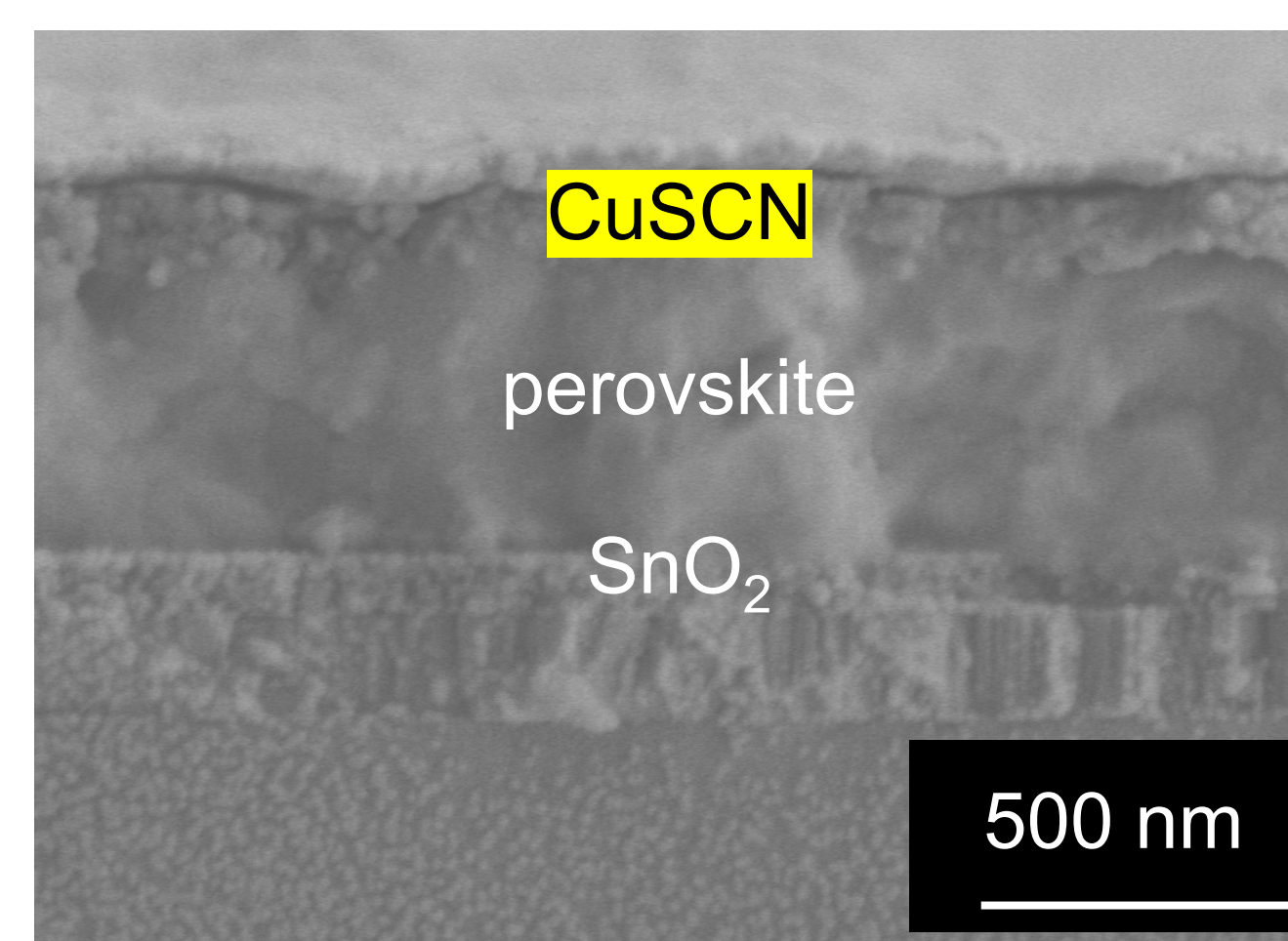
ペロブスカイト太陽電池

低コスト、>25%の高い発電効率



Spiro-OMeTADなどの有機正孔輸送材料
× 高価で耐久性低い

CuSCN正孔輸送層

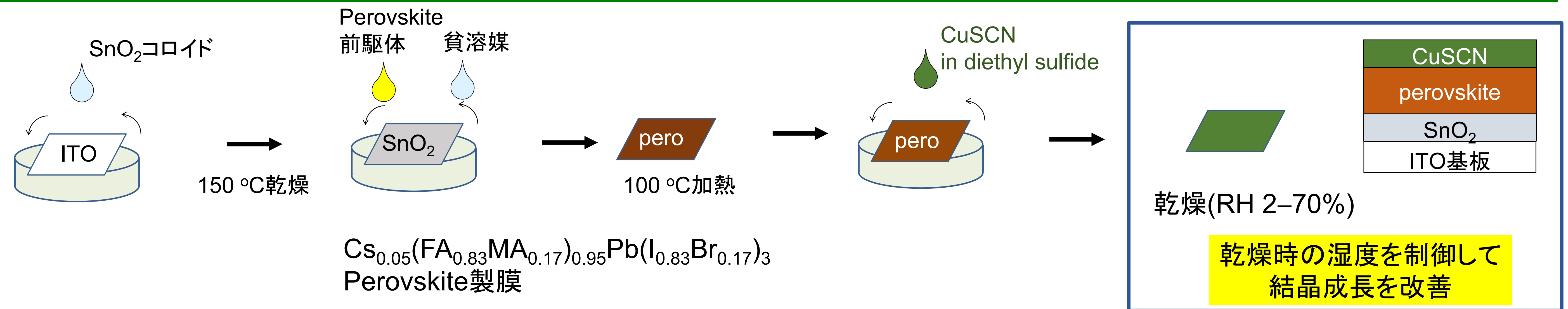


Perovskiteの上に製膜可能(低温製膜)
○ 水分に対して高耐久
× 結晶性、膜の均一性悪い
→ 性能ロスにつながる

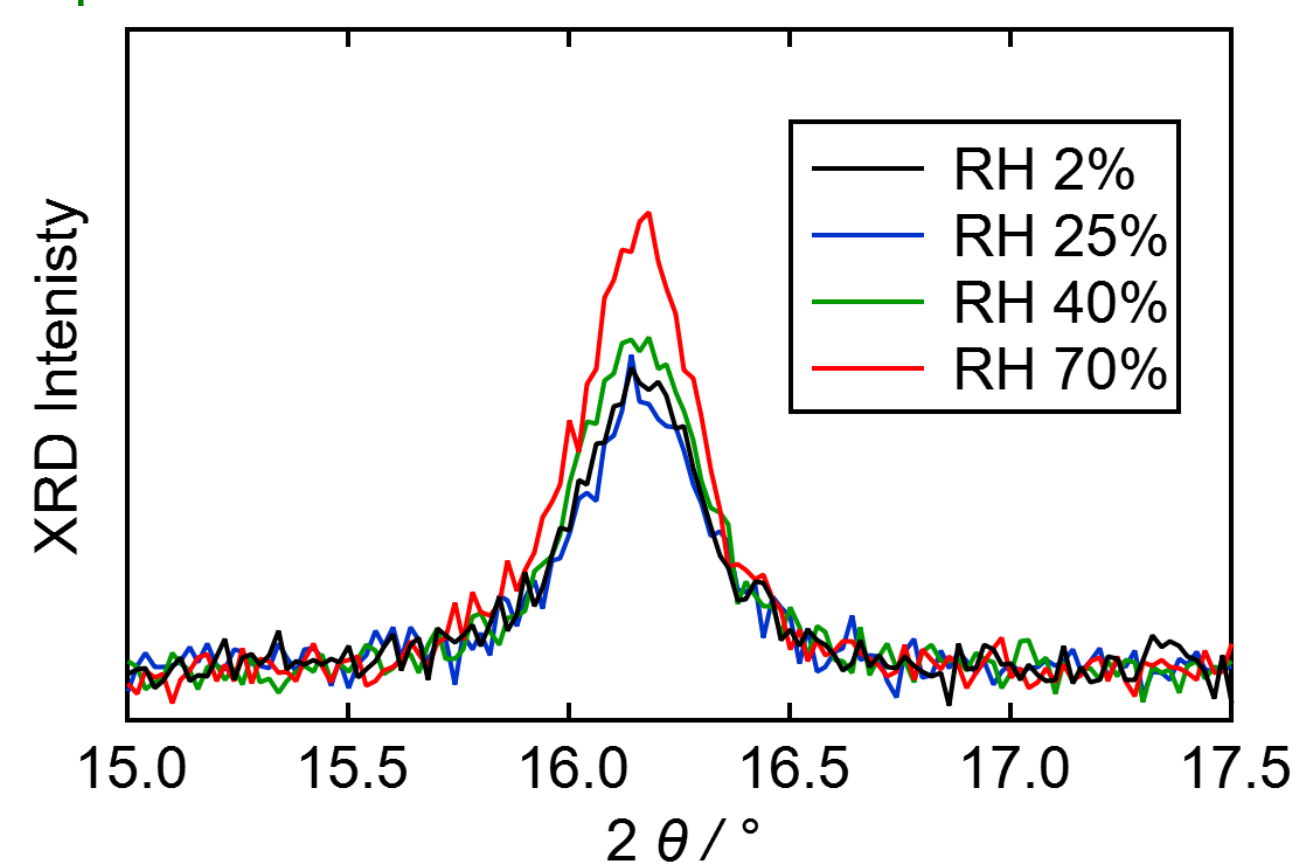
本研究の目的

高結晶CuSCNの製膜方法の開発
CuSCN-ペロブスカイト太陽電池を高性能化

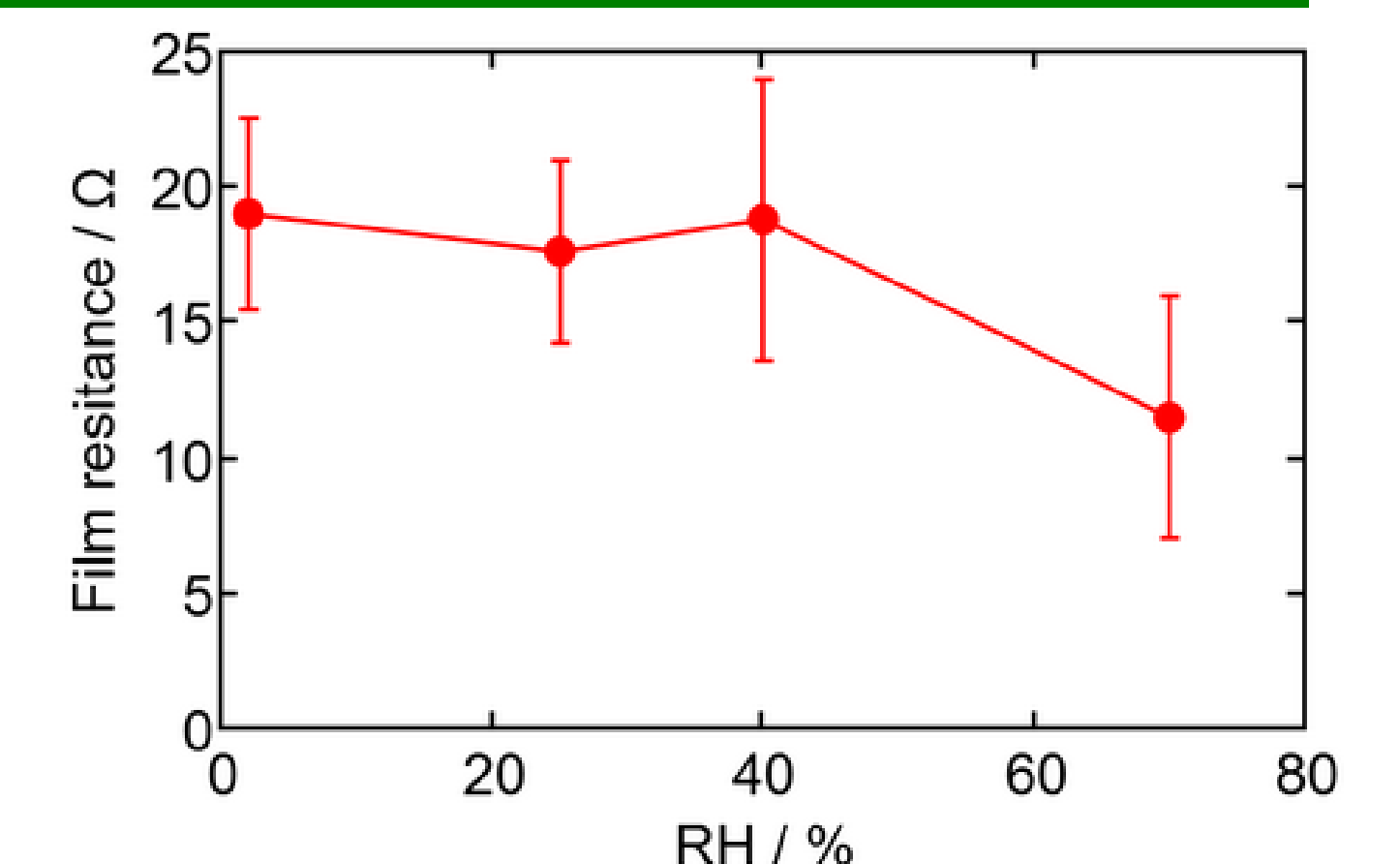
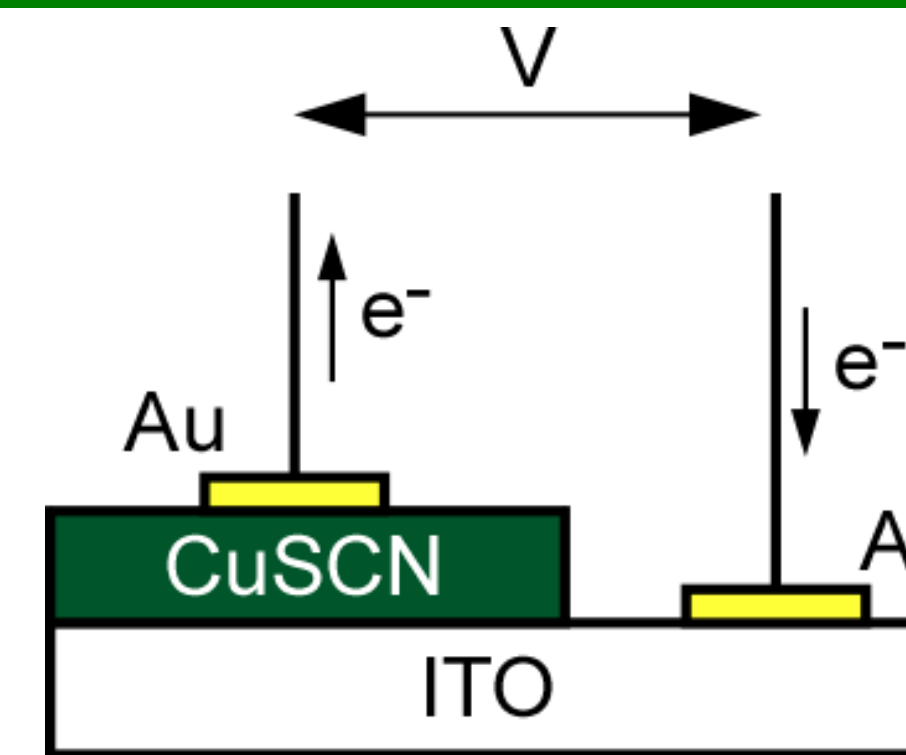
実験



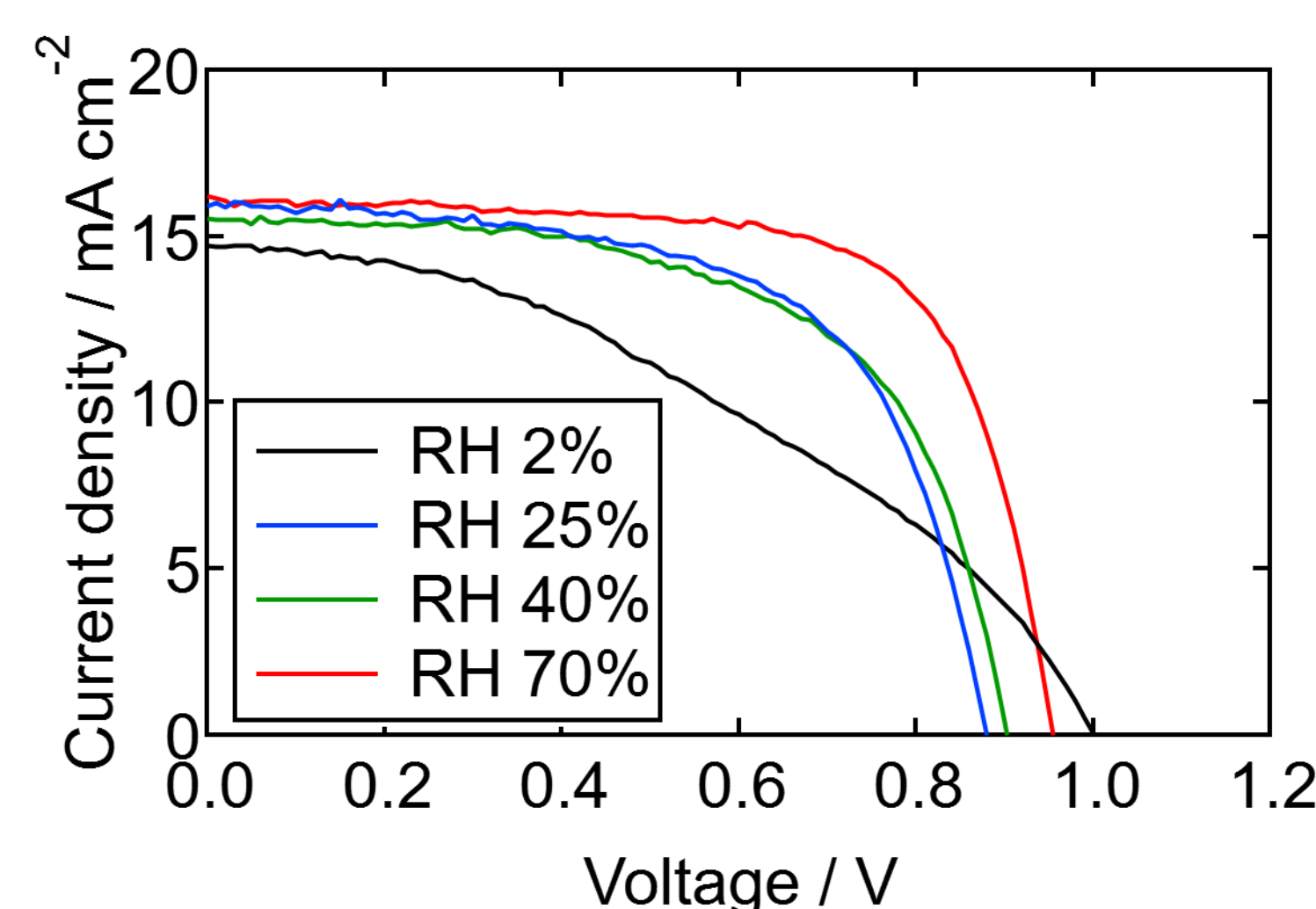
結果と考察



乾燥時の湿度	結晶サイズ
2%	26.6 nm
25%	26.8 nm
40%	27.9 nm
70%	29.9 nm



湿度が高いほどCuSCNの結晶性改善

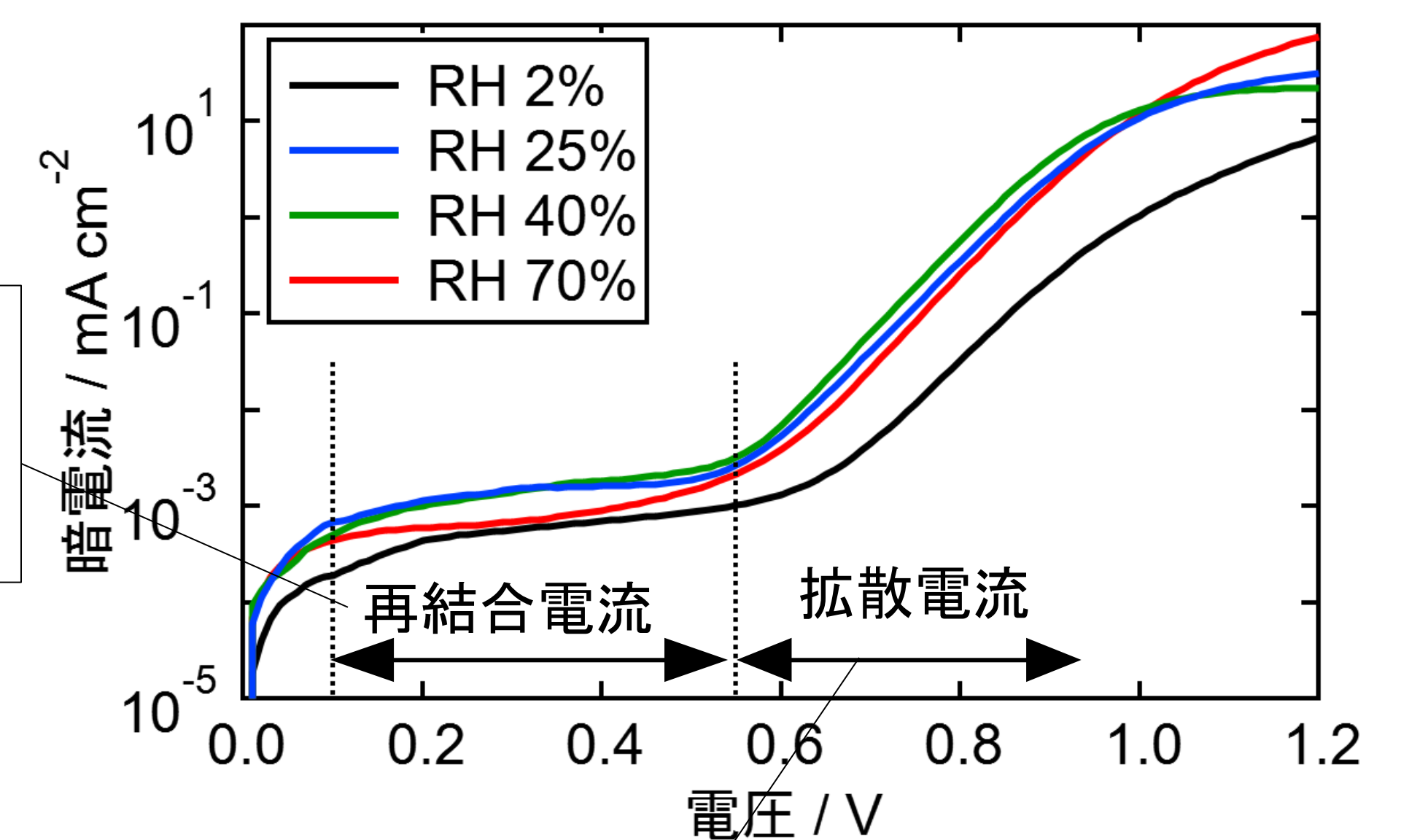


乾燥湿度	$J_{SC} / \text{mA cm}^{-2}$	V_{OC} / V	FF	PCE / %
2%	16.06	0.952	0.390	6.01
25%	14.50	0.914	0.601	7.96
40%	14.46	0.896	0.565	7.33
70%	16.13	1.005	0.633	10.26

湿度が高いほどPCE改善

RH70%で乾燥するとCuSCNの抵抗軽減

トラップ密度は
RH 40% > 25% > 70% > 2%
の順に多い



抵抗は
RH 2%が大きい

RH70%では、CuSCN層のトラップ密度、抵抗が小さい

結論

- CuSCNの結晶成長が湿度条件で変化することを見出した
- 高湿度雰囲気中でエイジングしたCuSCNは結晶性が高いため、導電性が高く、トラップ密度が低い。
- RH70%でエイジングしたCuSCN-ペロブスカイト太陽電池は最大11.3%のエネルギー変換効率を示した。

A. Kogo and T. N. Murakami, *ChemPhysChem* DOI: 10.1002/cphc.202200832.

謝辞

NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」

ペロブスカイト・シリコンタンデム 太陽電池用トップセル開発の進捗

望月 敏光¹、荒木 祥太¹、高遠 秀尚¹、奥山 豊²、佐野 健志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 山形大学

研究の概要

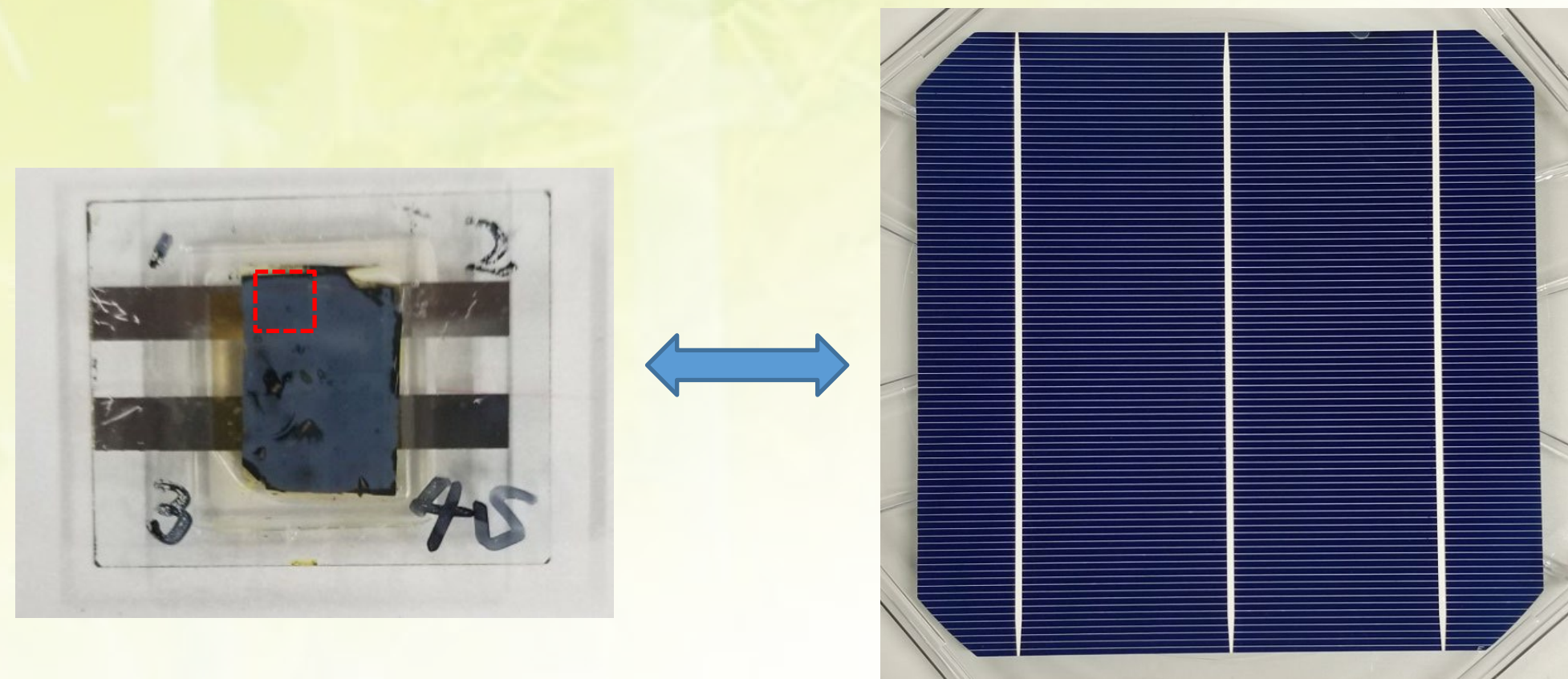


図1: ペロブスカイトセルと結晶シリコンセル

- これまで小面積で研究されてきたペロブスカイト太陽電池を、効率を維持しつつ結晶シリコン太陽電池と同程度のスケール(>10 cm)で作製したい

試料作製プロセス

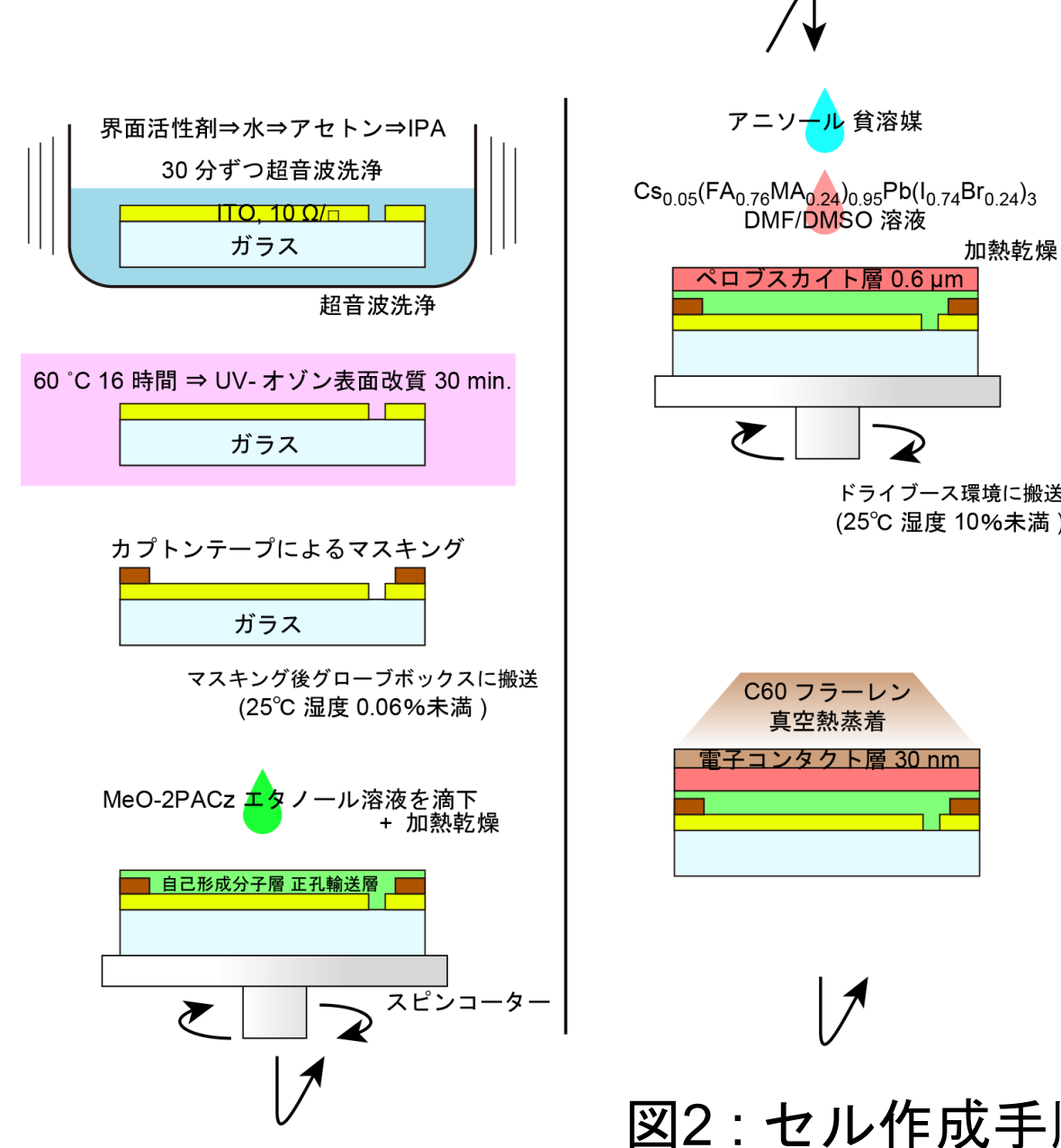


図2: セル作成手順

- 大面積化に適したプロセスの範囲内での最適化になるため、独自の進化をしていくことになる
- 大面積での特性をパッシベーションの影響を含め知りたい

作製した試料・測定手法

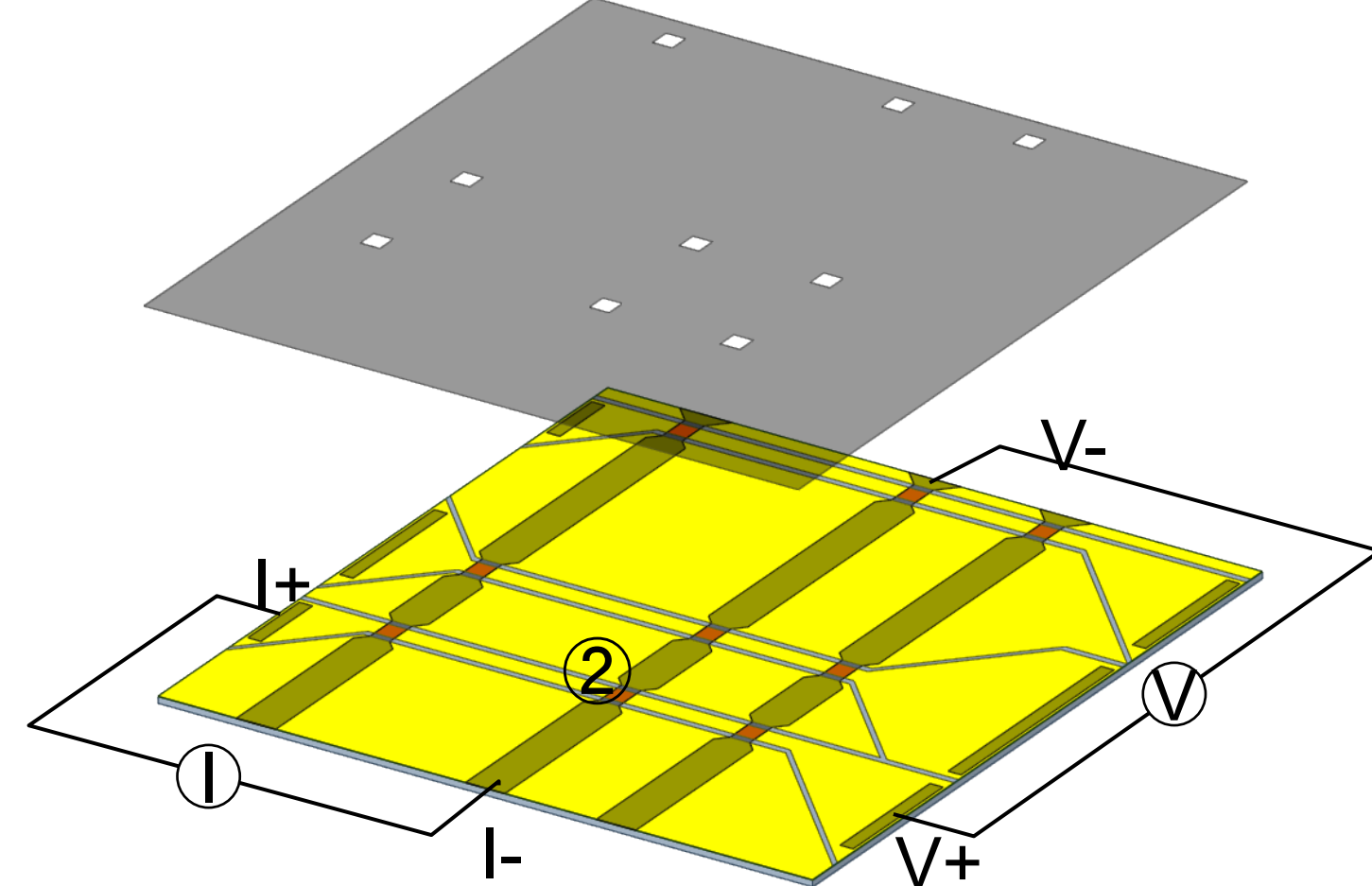
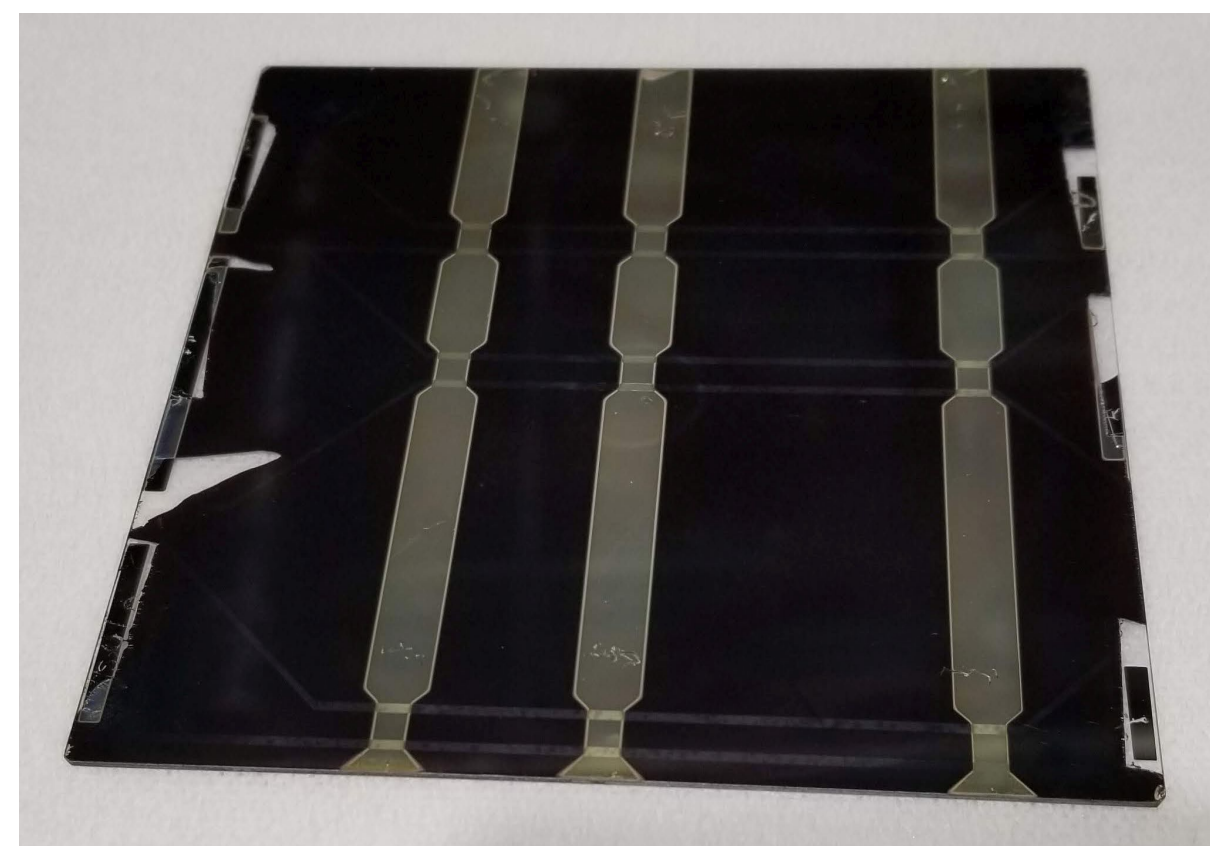


図3: (左上) 10 cm角基板上に作製した試料セルを銀電極側から撮影したもの (右上) 試料中に作製された小セルの概略図 (下) セルを4端子測定する際の接続例

- 10cm角上に製膜1回で9セルを定義し特性を個別に測定し、比較

光学的に表れるパッシベーションの影響

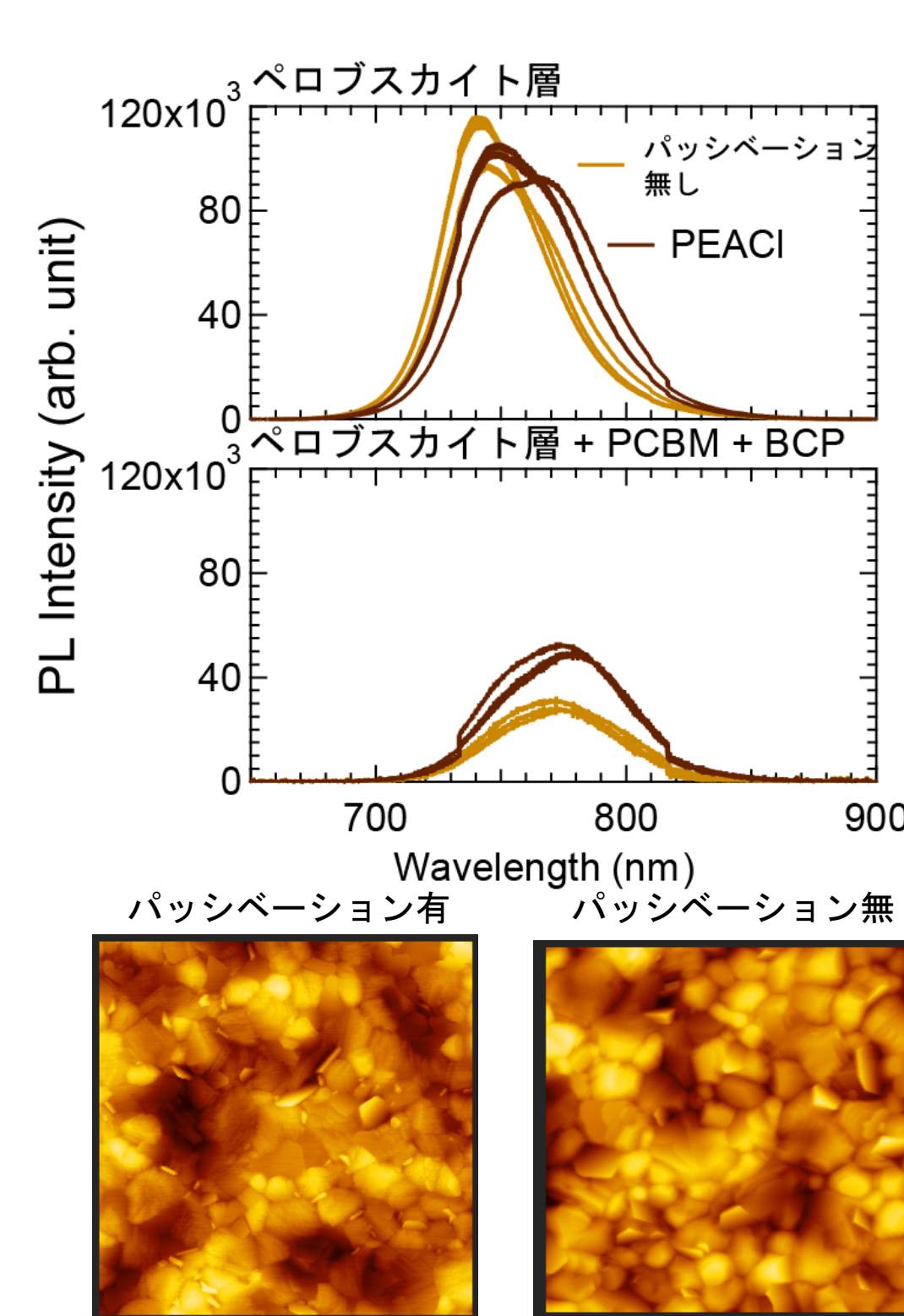
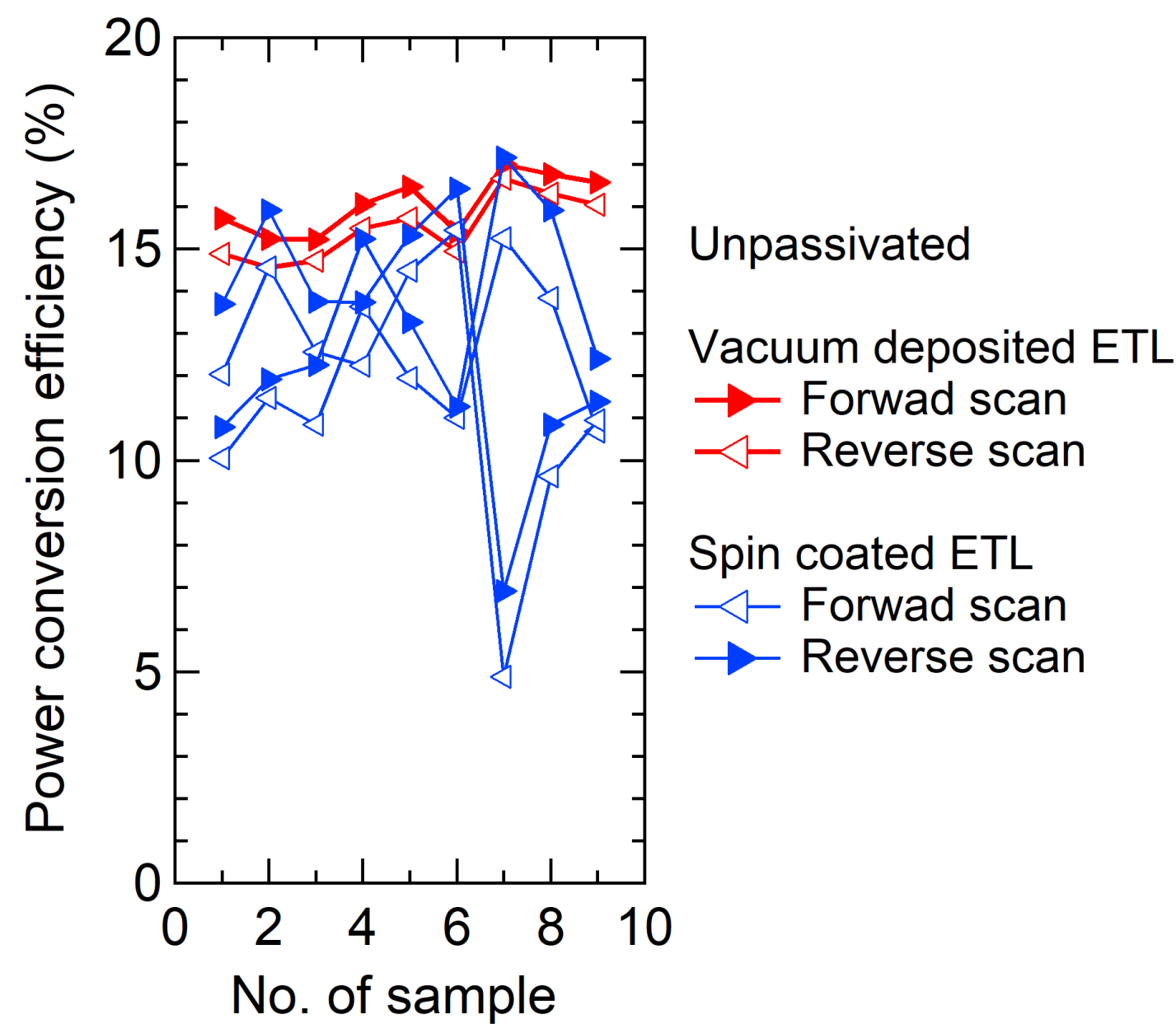


図4: (上) パッシベーションの有無とPLスペクトル (下) 及びペロブスカイト表面のAFM像

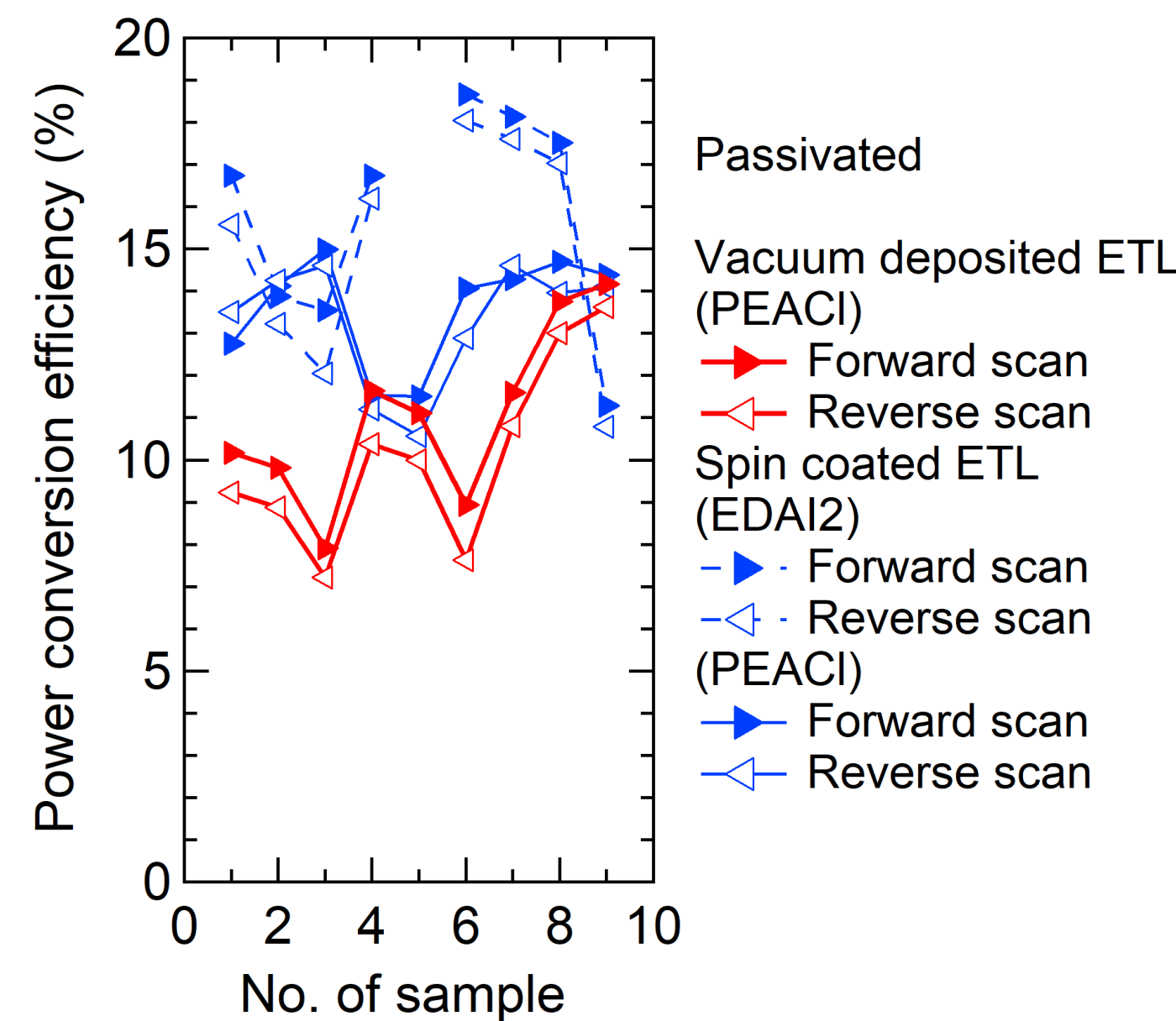
- パッシベーションプロセスは10mm程度の小面積では効率が顕著に良くなるが、PLやAFMで表面をいくらか荒らす効果が見える
- 電子輸送層成膜後の発光特性はパッシベーションした方が顕著に良くなり、これが小面積での高効率と関係が深い

大面積セルにおける均一性とパッシベーション

パッシベーションなし



パッシベーションあり



- 電子輸送層を真空蒸着するとかかなり均一性の良いセルが出来る
- 電子輸送層を溶液で成膜すると均一性の低下が見える→クロロベンゼンのせい?
- 大面積の場合でもピーク効率を見ればパッシベーションは有用で局所的には19%近い効率が得られる
- 但し、パッシベーションのプロセスが表面を荒らす効果が均一性に悪影響として表れているように見受けられる
- 均一性と高効率の両立を目指し検討を続けている

まとめ

- FREAでは単体大面積ではなくシリコンタンデムに特化したペロブスカイト太陽電池の開発を進めている
- ペロブスカイト太陽電池はシリコンに比べレシピが大胆に変更できるので、大面積化に向いている範囲でも最適化の余地が非常に多い
- 現状小面積でのピーク効率は20%程度であるのに対し、大面積ではピーク性能のみ19%出るレシピと16%程度で高均一性のレシピを得た
- 10cm角基板でも高効率を得られるが均一性との両立が可能な条件を引き続き探索中
- スリットコーティングや貧溶媒に頼らない結晶化手法なども検討中

謝辞

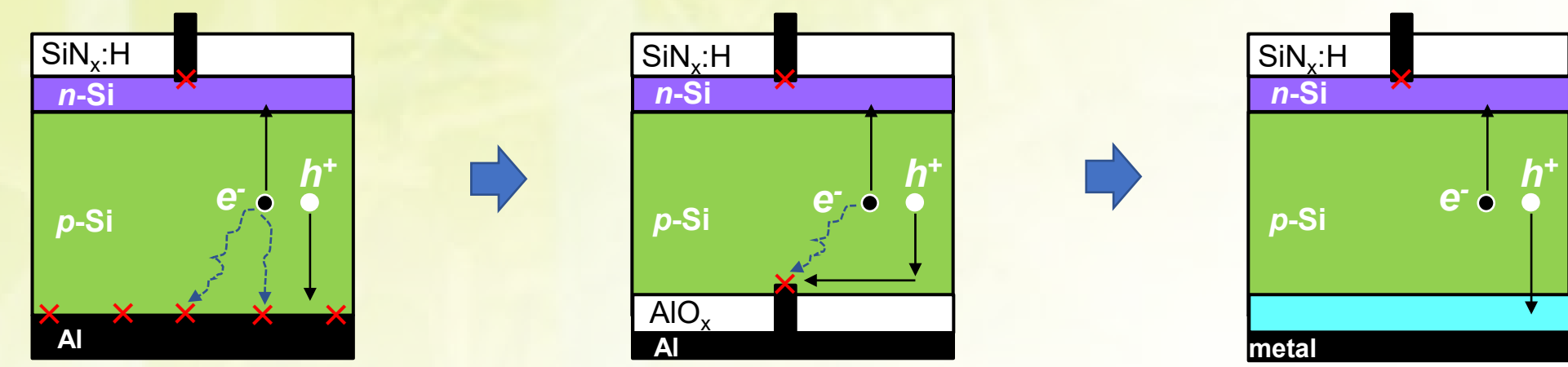
- この成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP20015)の結果得られたものです。関係各位に御礼申し上げます。

Application of TiO_x /metal bilayer as hole-selective passivating contact in crystalline silicon solar cells

Takuya Matsui¹, Shona McNab², Ruy Sebastian Bonilla² and Hitoshi Sai¹
 1 Global Zero Emission Research Center (GZR), AIST, Japan
 2 University of Oxford, Department of Materials

Introduction

Al-BSF (Back Surface Field) PERC Passivating contact



- Simplest process
- $\eta < 20\%$
- Rear passivation with partial Si/metal contact
- $\eta \sim 24\%$
- No direct Si/metal contact
- $\eta > 25\%$

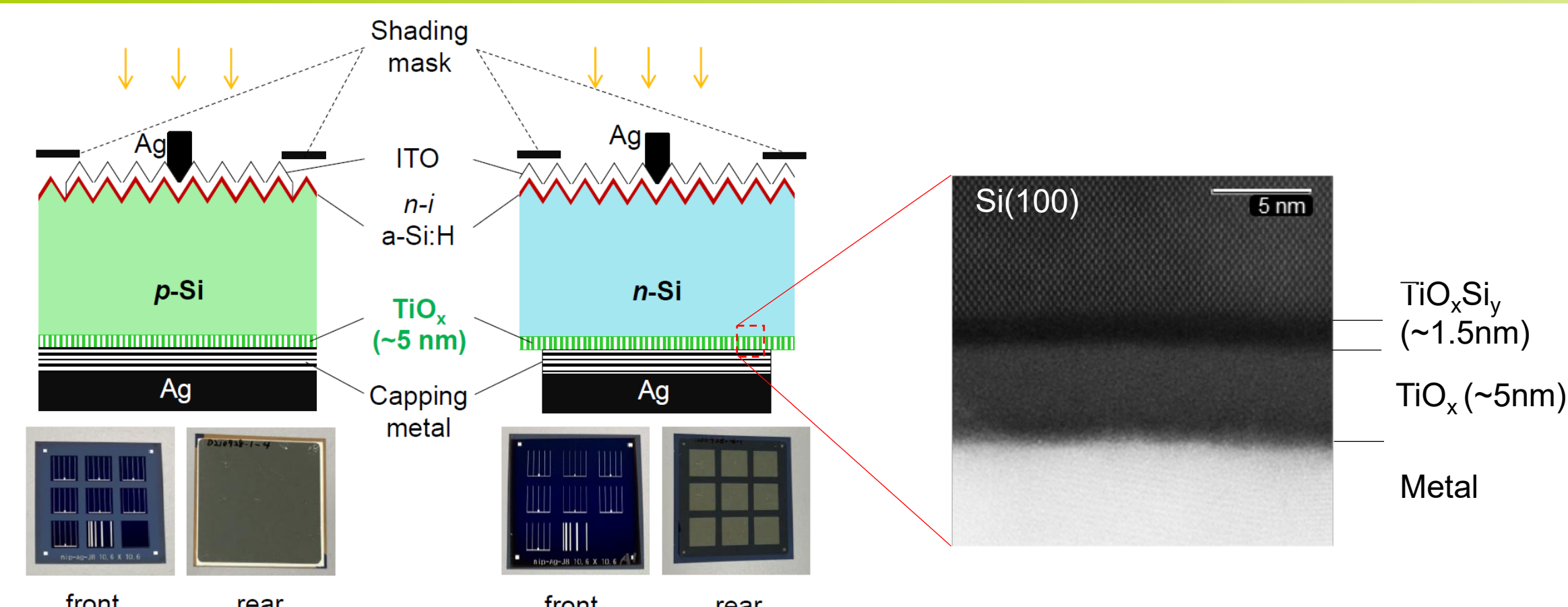
Requirements of passivating contact [1]

1. Surface passivation
2. Carrier selectivity
3. Low contact resistivity
4. Low optical loss

- Materials fulfilling these requirements are generally rare.
- Currently, Si-based contact materials are available (SHJ, TOPCon).
- Any non-Si material as good as Si-based contacts?

We have developed ALD- TiO_x nanolayer that uniquely functions as an efficient hole-selective passivating contact [2]

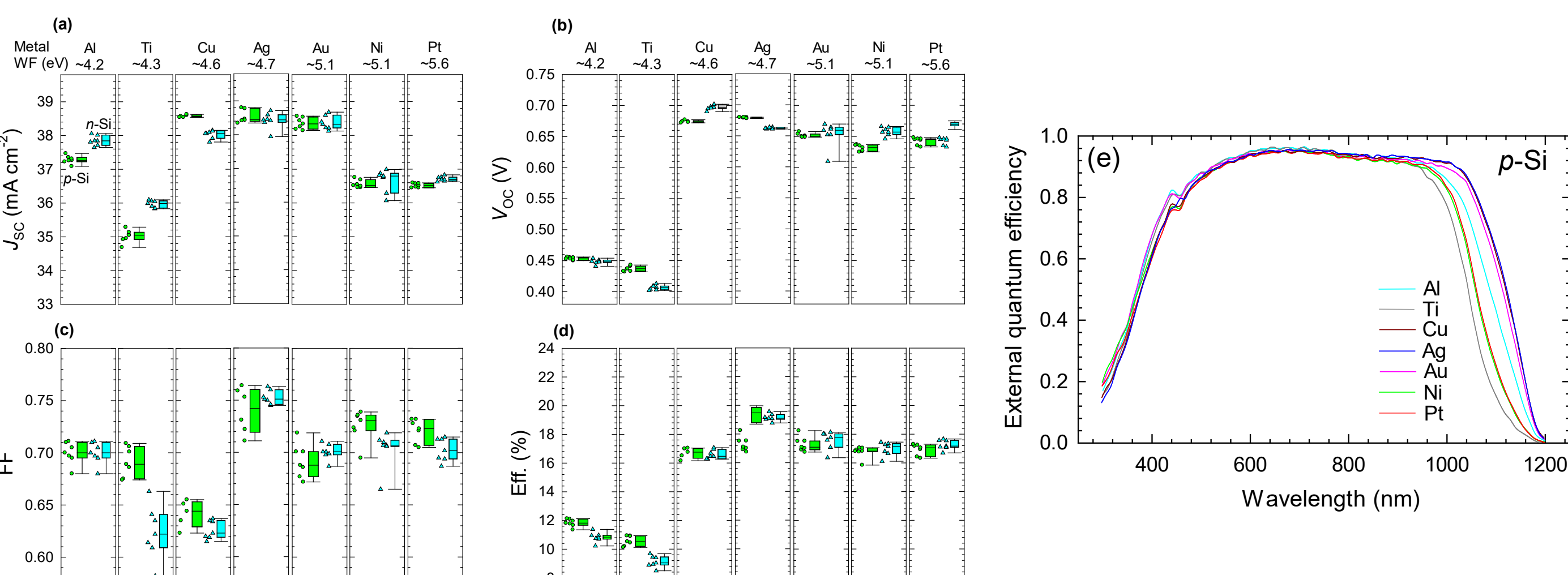
Experiment



- Front texture and rear planar cells were fabricated (FJ for p-Si and RJ for n-Si) [3].
- ALD- TiO_x hole contact layer (~5 nm) was deposited at the rear surface of p- and n-Si.
- TiO_x was capped with 7 different metals (Al, Ti, Cu, Ag, Au, Ni, Pt) having a range of work functions (WF: ~4.2-5.6 eV), by DC sputtering or e-beam evaporation.
- No metal penetration through TiO_x layer is observed.

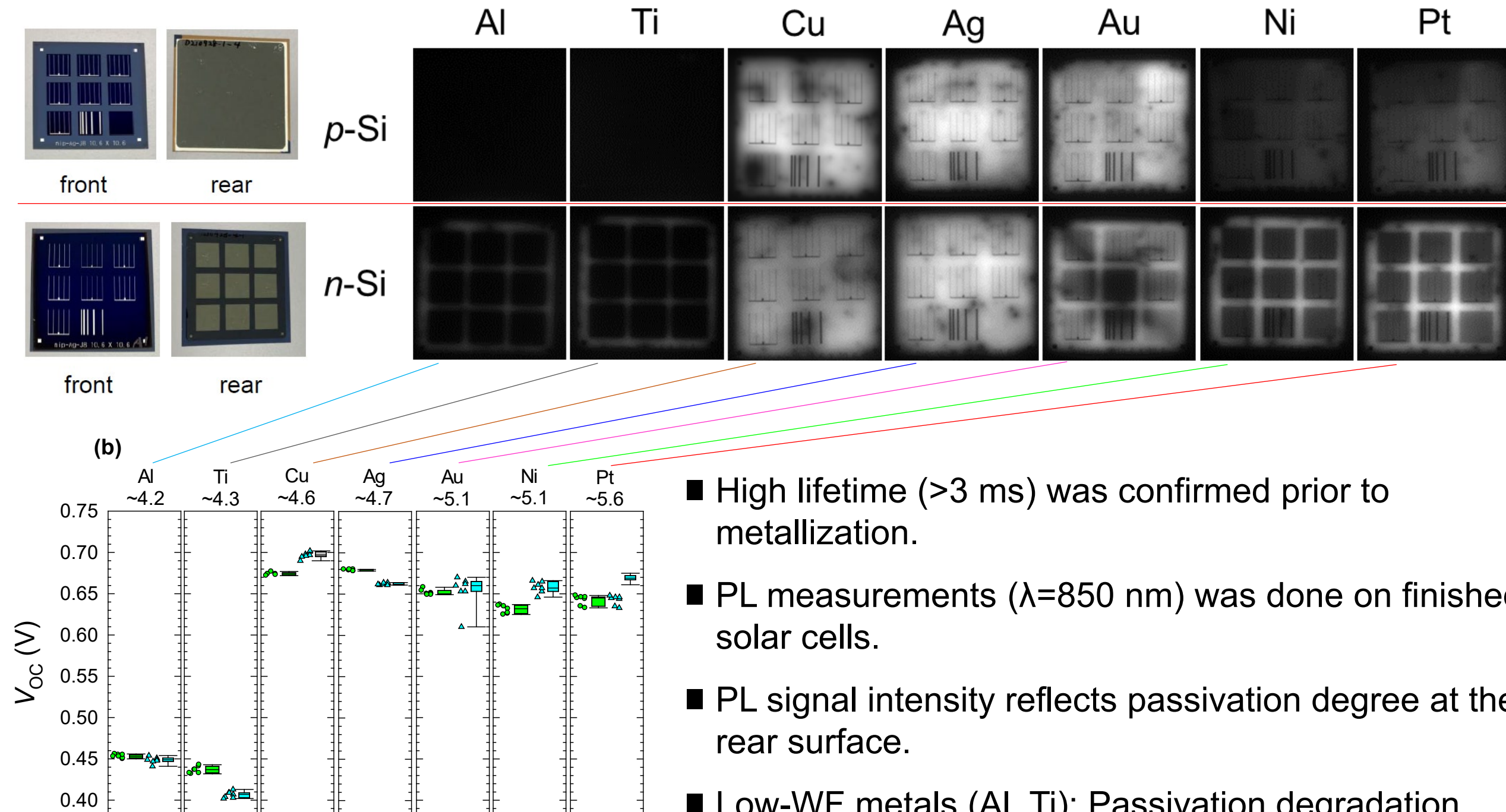
Results and discussion I

Impact of capping metal



- High J_{sc} is obtained when using metals exhibiting high infrared reflectivity (e.g. Al, Cu, Ag, Au).
- Abrupt change occurs in V_{oc} at WF ~4.3-4.6 eV.
- FF is less dependent on WF but some metal results in high and low FF.
- Efficiency is mostly determined by V_{oc} . Ag provides the best performing device.

PL measurements on device



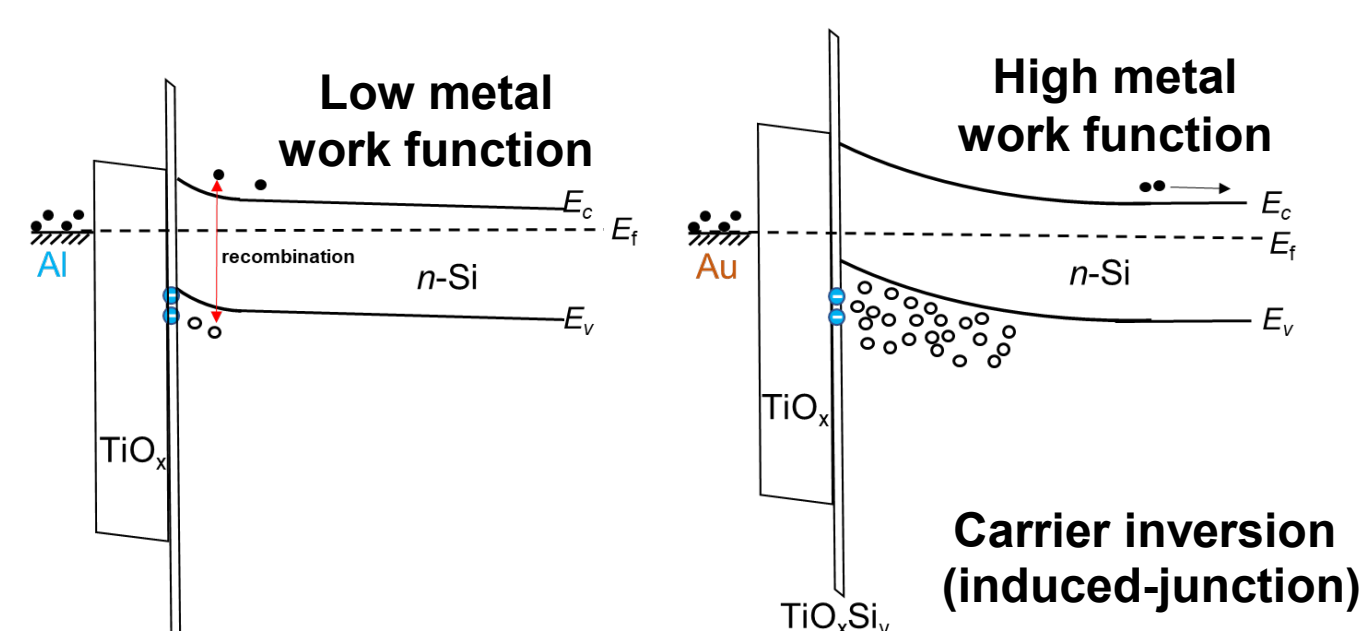
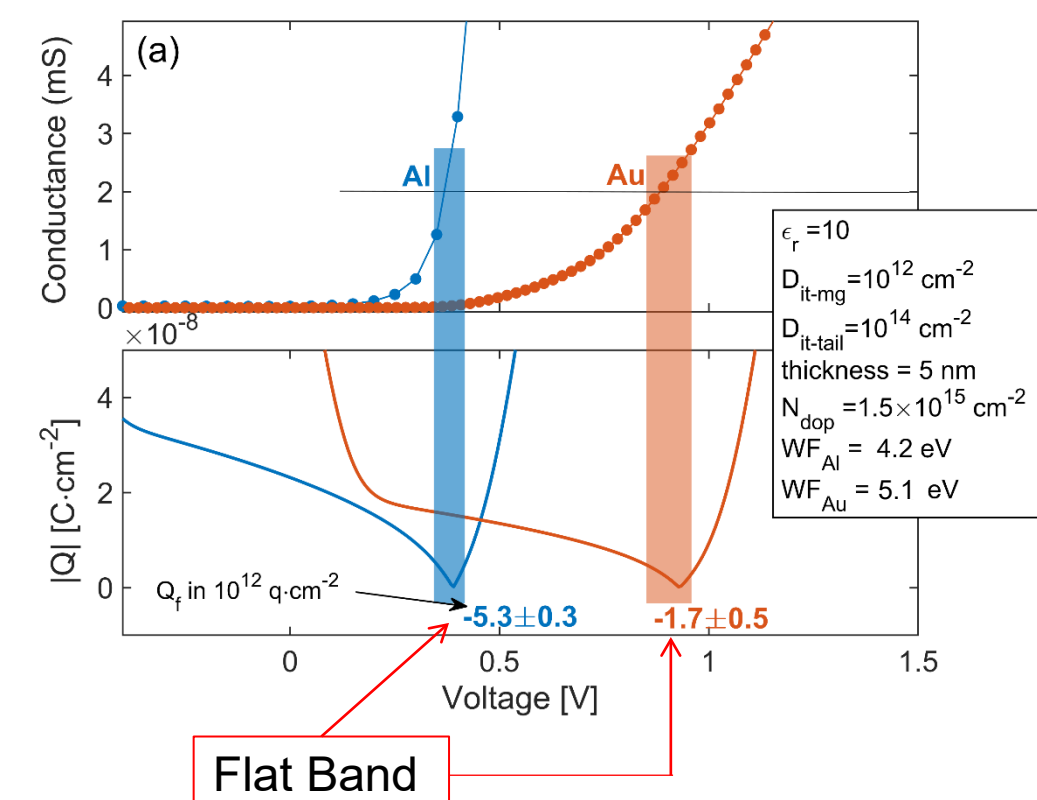
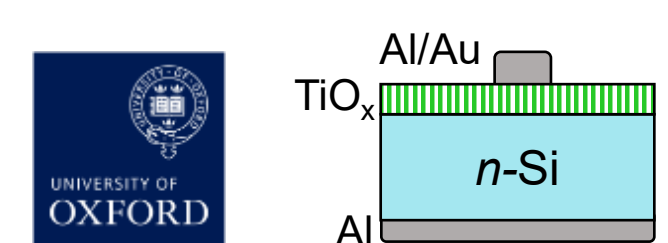
- High lifetime (>3 ms) was confirmed prior to metallization.
- PL measurements ($\lambda = 850$ nm) was done on finished solar cells.
- PL signal intensity reflects passivation degree at the rear surface.
- Low-WF metals (Al, Ti): Passivation degradation occurs only for metallized area.
- High-WF metals: Relatively, high passivation performance obtained. PL reflected by the rear metal contributes to enhancing PL signal (Cu, Ag, Au).

PL signal intensity correlates well with V_{oc} .

Results and discussion II

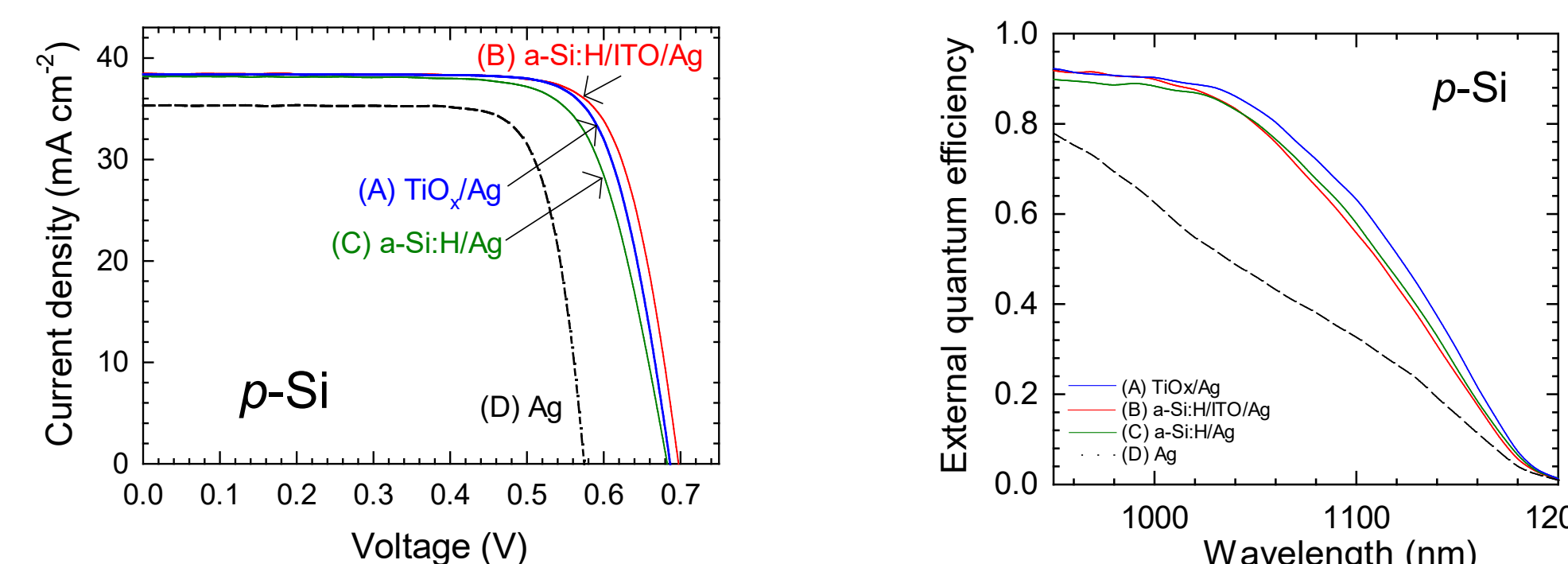
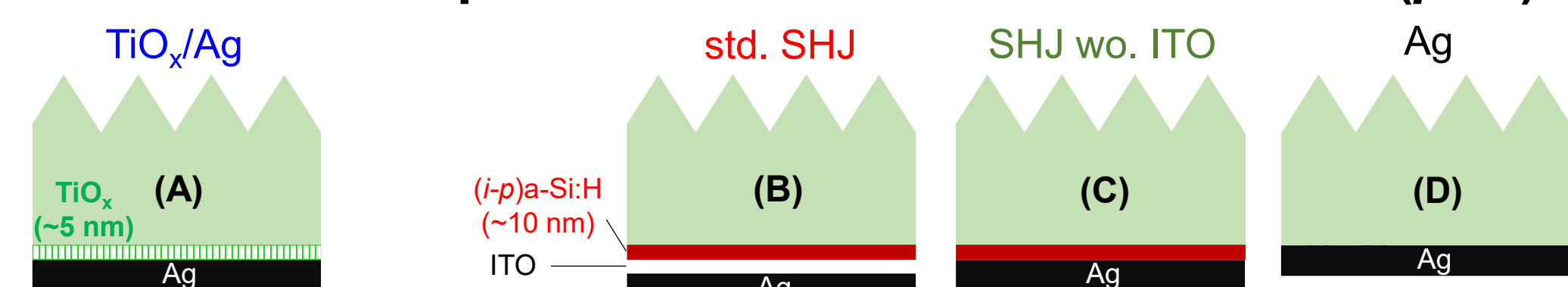
Conductance-Voltage (G-V) measurements (conducted at Univ. Oxford)

Al and Au contacts on TiO_x



- G-V: flat band occurs at higher voltages for high-WF metal ($V_{FB}(\text{Al})$: ~-0.4 V, $V_{FB}(\text{Au})$: ~-0.9 V).
- Analysis [4] indicates the presence of negative fixed charge ($>10^{12} \text{ cm}^{-2}$) in the TiO_x , independent of the capping metal.
- Field-effect passivation is a major mechanism.
- High-WF metal is important to retain carrier inversion for n-Si (carrier accumulation for p-Si).

Comparison with various rear contacts (p-Si)



- Comparable IV performance (20.3%, p-Si) with the conventional SHJ (a-Si:H i-p/ITO/Ag) rear contact.
- Similar result obtained for n-Si (rear junction) cell.
- Highest IR response.
- Efficiency is limited by the low J_{sc} due to parasitic absorption of front layers (ITO, a-Si:H i-n).

Conclusion & Next plan

- ALD- TiO_x is applied to the rear of Si solar cells as a full-area hole-selective passivating contact.
- Passivation is greatly influenced by the WF of capping metal. WF > 4.6 eV is essential to retain field-effect passivation and hole selectivity.
- TiO_x/Ag contact performs as high as SHJ with an improved infrared reflectivity. Proof-of-concept devices show 20% efficiency for both p-Si and n-Si solar cells.
- $\text{TiO}_x/\text{metal}$ as an alternative contact in PERC is proposed, which is expected to provide less process complexity and improved performance (e.g., from 2D to 1D carrier transport and higher infrared reflectivity).

References

- [1] T.G. Allen *et al.*, *Nat. Energy* **4**, 914 (2019).
- [2] T. Matsui *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12**, 49777 (2020).
- [3] T. Matsui *et al.*, *ACS Appl. Energy Mater.* **5**, 12782 (2022).
- [4] R.S. Bonilla *et al.*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* **215**, 110649 (2020).

Acknowledgement

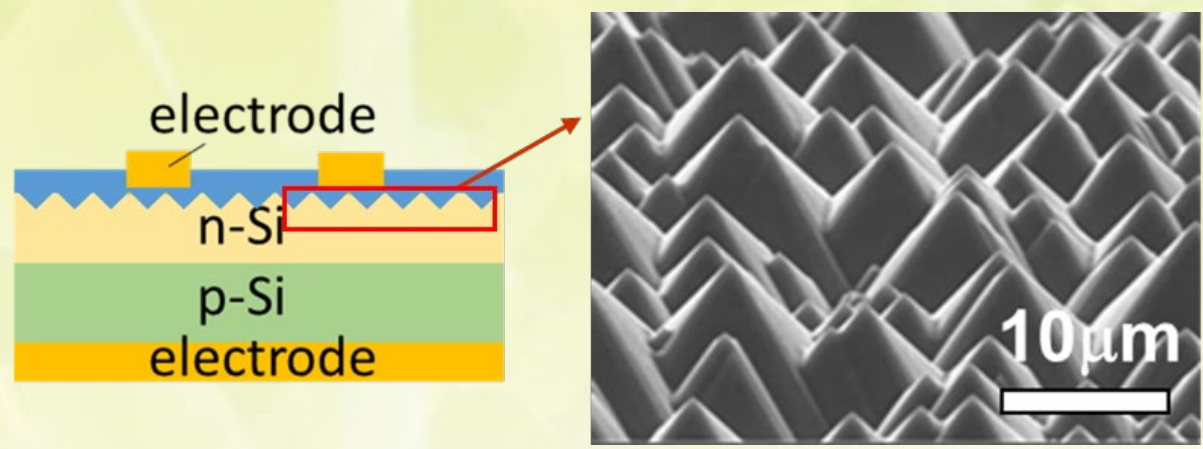
This work was financially supported by NEDO under "Research and Development Program for Promoting Innovative Clean Energy Technologies Through International Collaboration". This work was in part by Royal Academy of Engineering under the Research Fellowship scheme, UK Engineering and Physical Sciences Research Council grant number EP/V038605/1, and John Fell Fund at Oxford University. The authors would like to thank AIST staff: T. Oku, Y. Sato, Y. Muto, M. Tanabe, M. Yamazaki (NPF), T. Kaku (NPF) for sample preparation and technical support.

An original one-step solution method to fabricate silicon nanopyramid texture and its application to crystalline silicon heterojunction solar cells

(D) Yuqing Li^{1,2}, Hitoshi Sai¹, Takuya Matsui^{1,2} and Noritaka Usami²
 1: Global Zero Emission Research Center (GZR), AIST, 2: Nagoya Univ.
 E-mail: hitoshi-sai@aist.go.jp

Purpose

The needs to reduce texture size



Si nano-pyramids

- Si pyramid < 1 μm
- Small texture size and low etching margin
- Suitable for developed c-Si PV devices.
- Thinner Si solar cells.
- Finer screen printing.^[1]
- Perovskite/silicon tandem solar cell.
- Uncontrollable masking effect.
- Complicated process
- High cost

One step wet etching process to fabricate Si nanopyramids

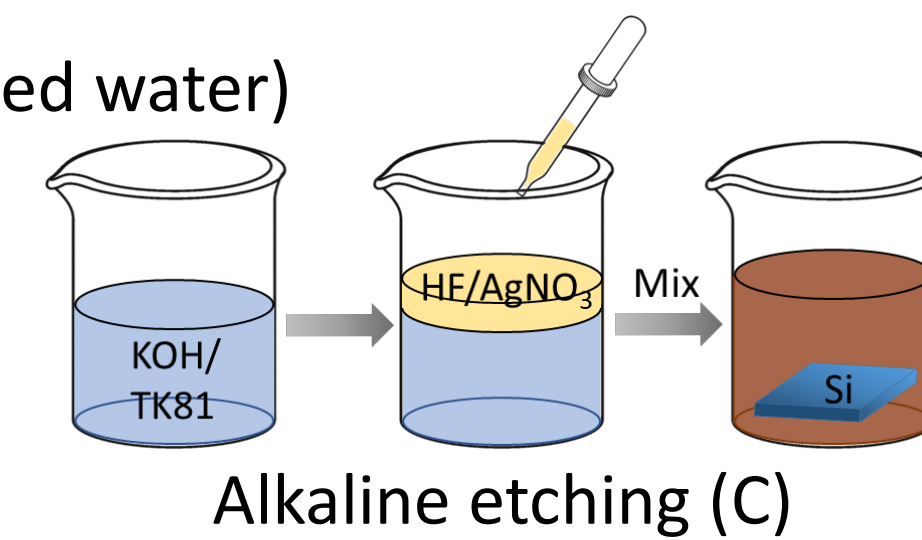
Purpose Small texture size + low fabrication cost

Experimental

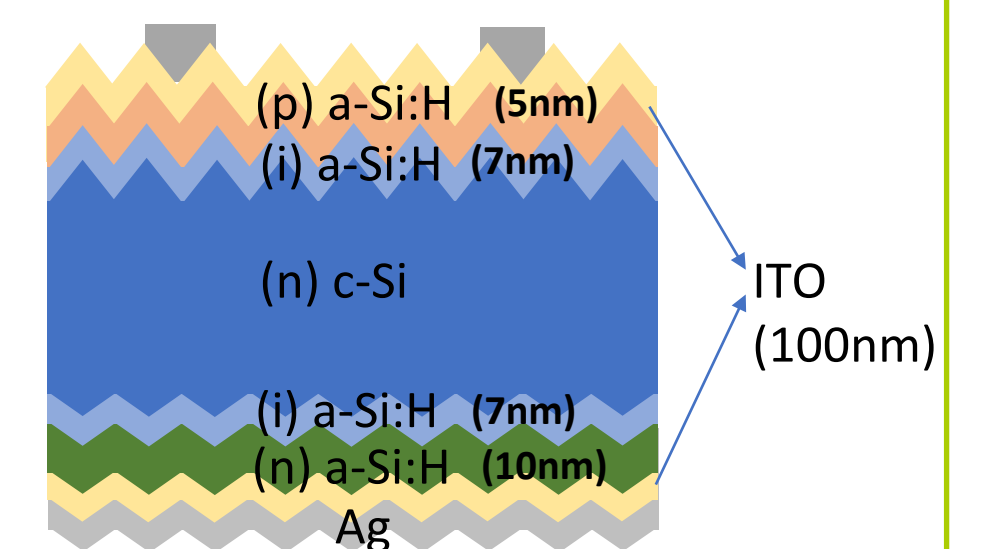
AgNO₃-assisted alkaline etching

- Substrates preparation
 n-type c-Si <100> 5cm x 5cm
 Acetone by supersonic cleaning
- Alkaline etching (condition A,B,C)
 - KOH solution(48%)
 - Surfactant (Pure EtchTK81 Hayashi Pure Chemicals Ltd.)
 - AgNO₃ solution (AgNO₃: HF: deionized water)
- Ag removal
 - HNO₃ solution
 - Etching time: 15min
 - Temperature: 70°C

	A	B	C
Substrates preparation	KOH only	Reference (conventional micro-TEX ^[8])	AgNO ₃ -assisted etching
Etchant	KOH	KOH	KOH
Surfactant	×	TK81	TK81
Masking	×	TT72	AgNO ₃ solution

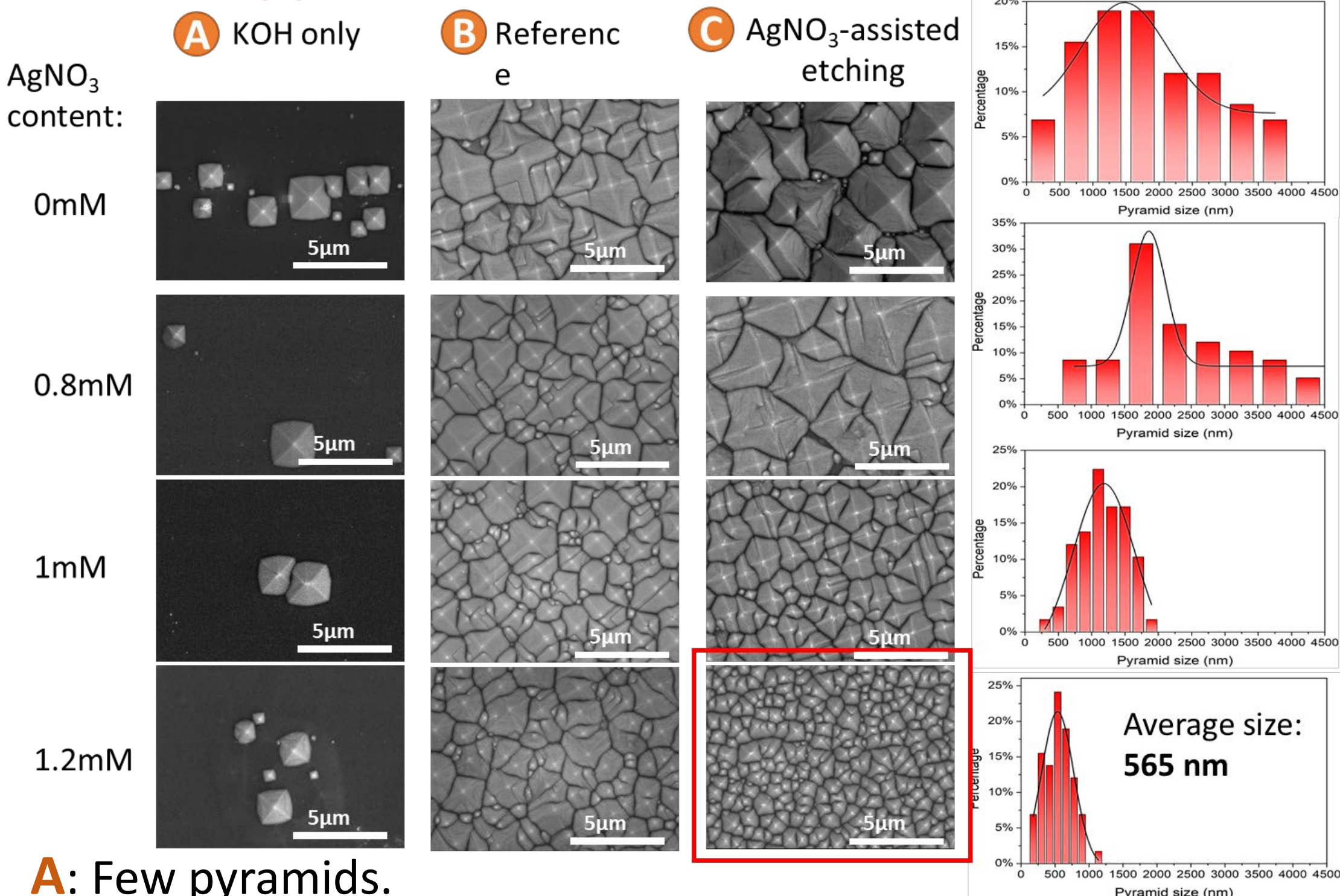


c-Si heterojunction solar cell^[6,7]



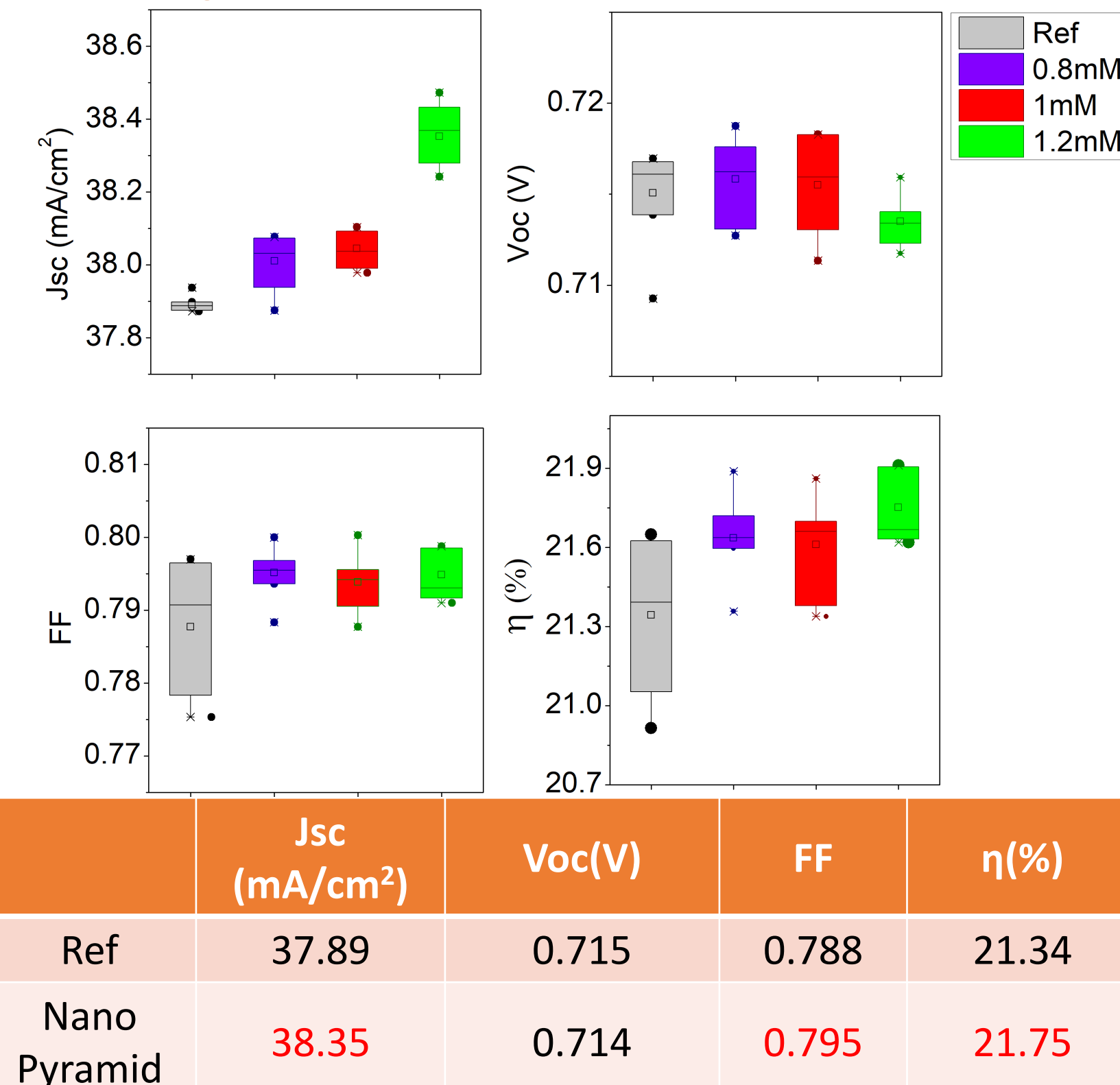
Results

Si nanopyramids



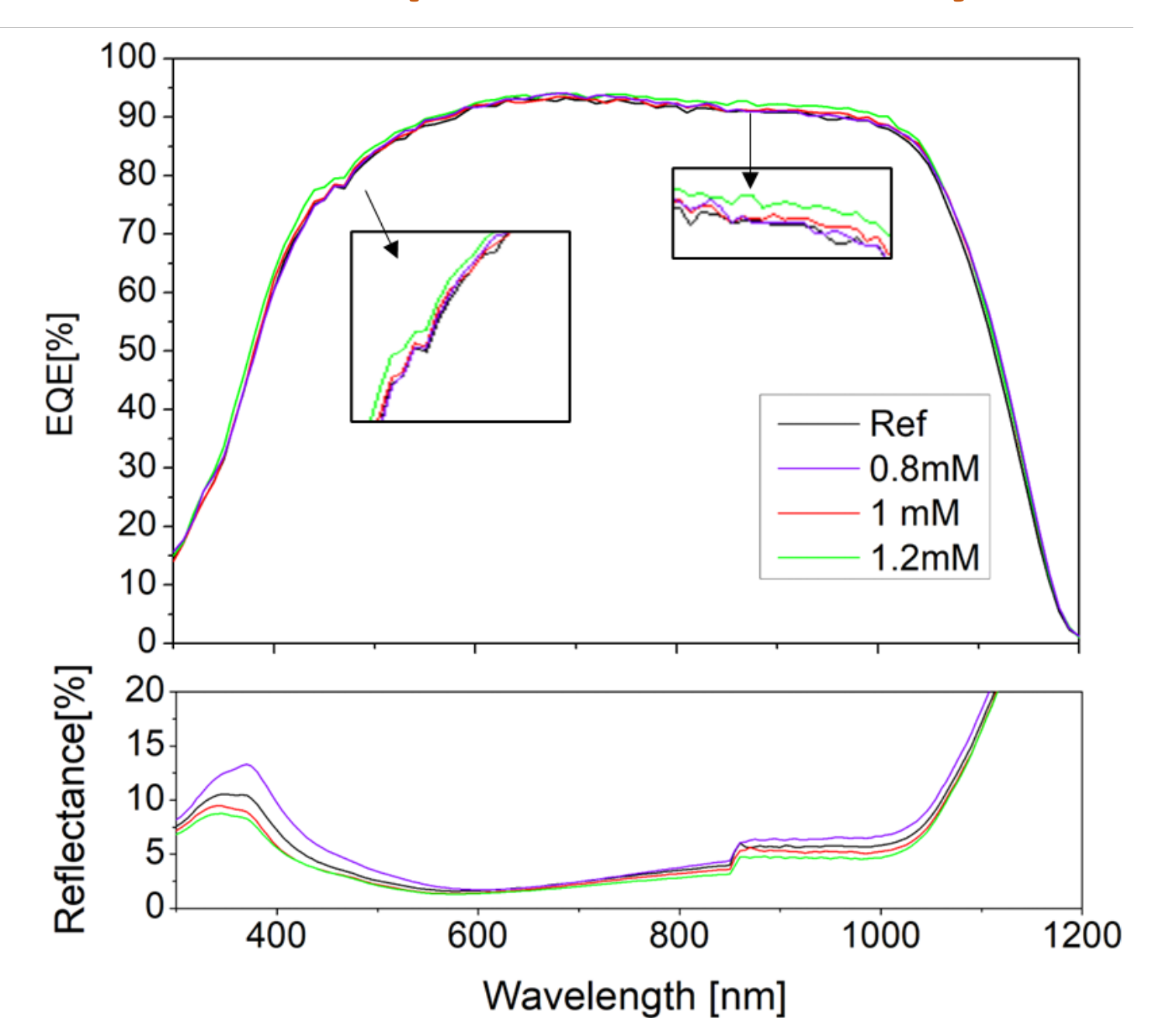
- A:** Few pyramids.
 ➢ etching masks are removed quickly due to high etching speed.
- B:** Uniform pyramids with almost unchanged size.
 ➢ The masking effect is not enough for nanopyramid formation.
- C:** Si nano-pyramid formation.
 ➢ Controllable size by the amount of AgNO₃ additive.

Cell performance from I-V curve



- Advantage in J_{sc}.
 ✓ Improved light absorption.
- Acceptable change in V_{oc} and FF.
- Improved conversion efficiency than reference.

External quantum efficiency (EQE)



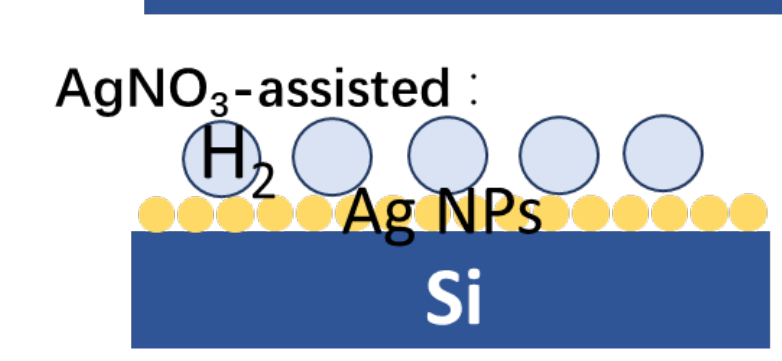
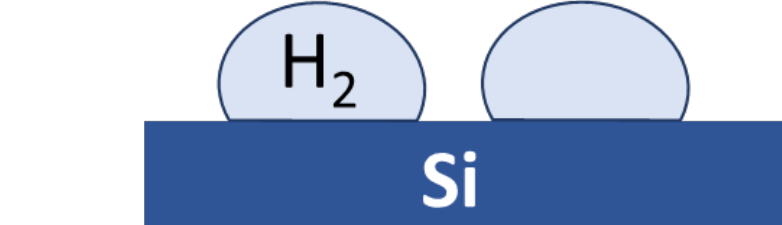
- Si nanopyramids fabricated by AgNO₃-assisted alkaline etching method exceeding the EQE of that of industry-standard Si solar cells.
- Great potential for the application in thin Si solar devices.

Discussion



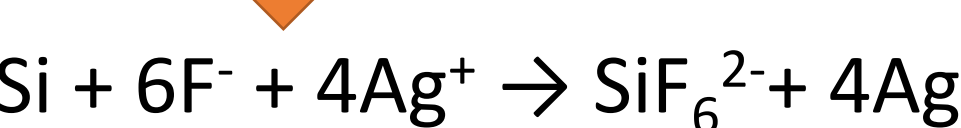
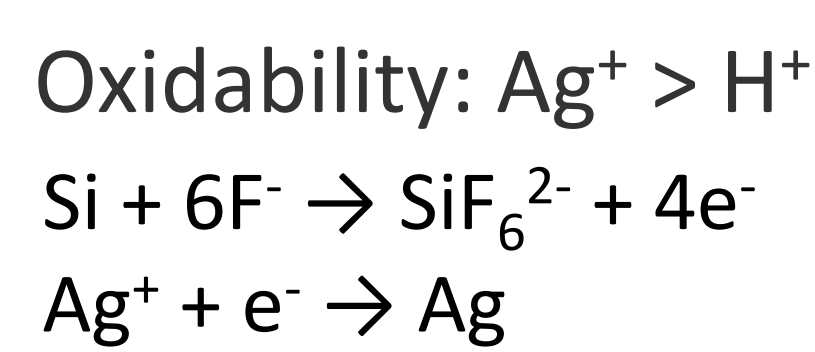
- Medium etching rate, large bubbles
- High etching rate, small bubbles
- Medium etching rate, tiny bubbles

Without AgNO₃:

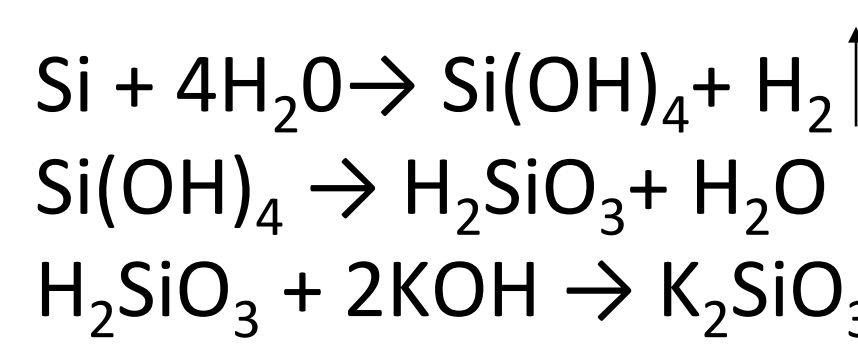


- Etchant:** Anisotropic etching with H₂ bubbles generation, resulting in pyramidal textures.
- Surfactant:** Removing H₂ bubbles, slowing down the etching reaction.
- Ag nanoparticles:** Etching mask, removing H₂ bubbles, accelerating etching reaction.

Step 1- Ag plating



Step 2-Alkaline etching



- Effective **masking effect** and low **etching rate** is the key to obtain uniformly distributed and better texture control.
- The **equilibrium between AgNO₃ and TK81** was achieved at the appropriate ratio, resulting in dense nanoscale pyramid textures.

Conclusion

- A simple one-step method to fabricate Si nanopyramid is developed.
- Uniform pyramid texture with an average size of 300-500 nm are formed, with **low reflectance** and **low etching margin**.
- J_{sc} of c-Si heterojunction solar cells is increased even with submicron textures **without loss of V_{oc} or FF**.^[9]

Texture size can be further controlled by adjusting the concentration of AgNO₃ and surfactant.

The small etching margin and unique optical performance of textures makes it promising to be applied to **thin Si devices**, and show interesting prospect to be applied as the bottom cell in **perovskite/Si tandem solar cells**.^[10]

References

- M. Ju *et al.*, Mater Sci Semicond Process 85, 68 (2018).
- C. Nguyen *et al.*, J. Mater. Res 33, 1515 (2018).
- Y. Ota *et al.*, J. Appl. Phys 58, 045505 (2019).
- S. Zhong *et al.*, Adv. Funct. Mater 26.26, 4768 (2016).
- AP. Amalathas *et al.*, J Micro Nanolithogr MEMS MOEMS. IntechOpen, (2018).
- H. Sai *et al.*, J. Appl. Phys 124, 103102 (2018).
- H. Sai *et al.*, Prog Photovolt 27, 1061 (2019).
- J. Wang *et al.*, Sol Energy. 221, 114 (2021).
- Y. Li, H. Sai, T. Matsui, Z. Xu, V. H. Nguyen, Y. Kurokawa, and N. Usami. Solar RRL 6, 2200707 (2022).
- C. McDonald *et al.* ACS Appl. Mater. Interfaces 14, 29, 33505 (2022).

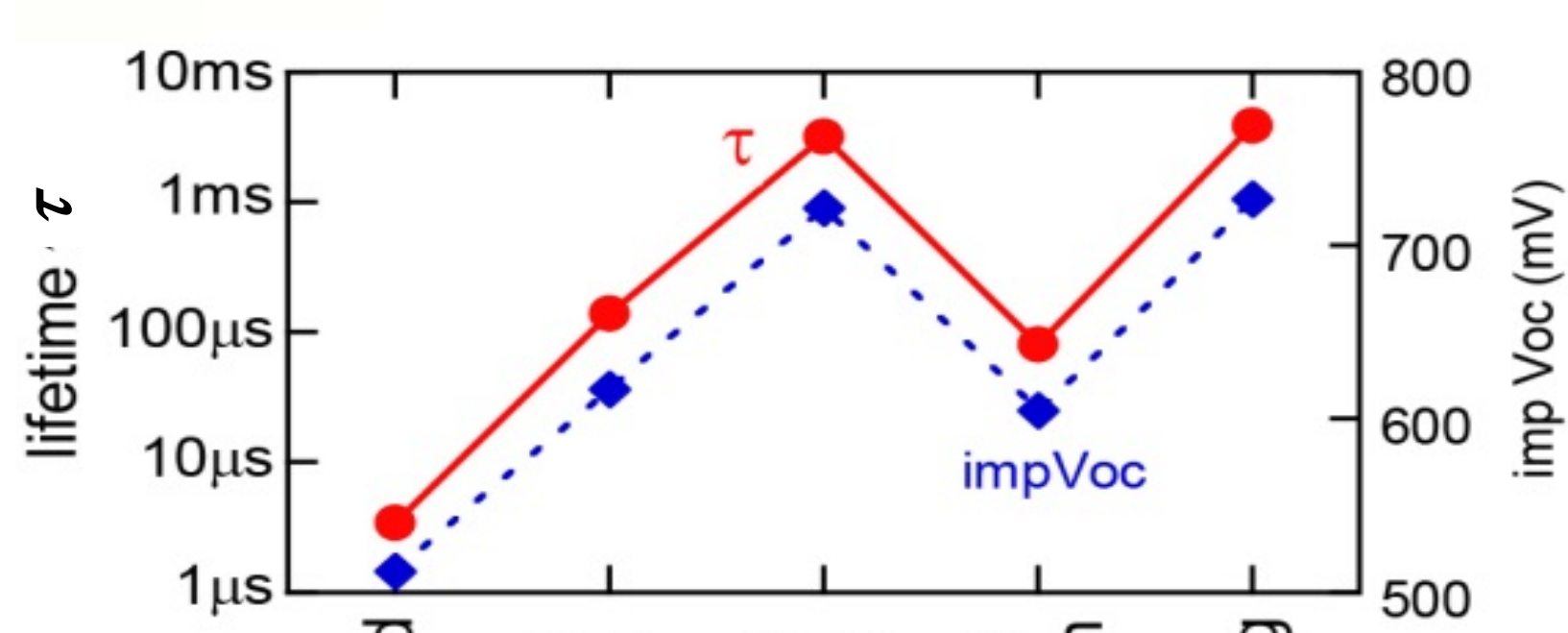
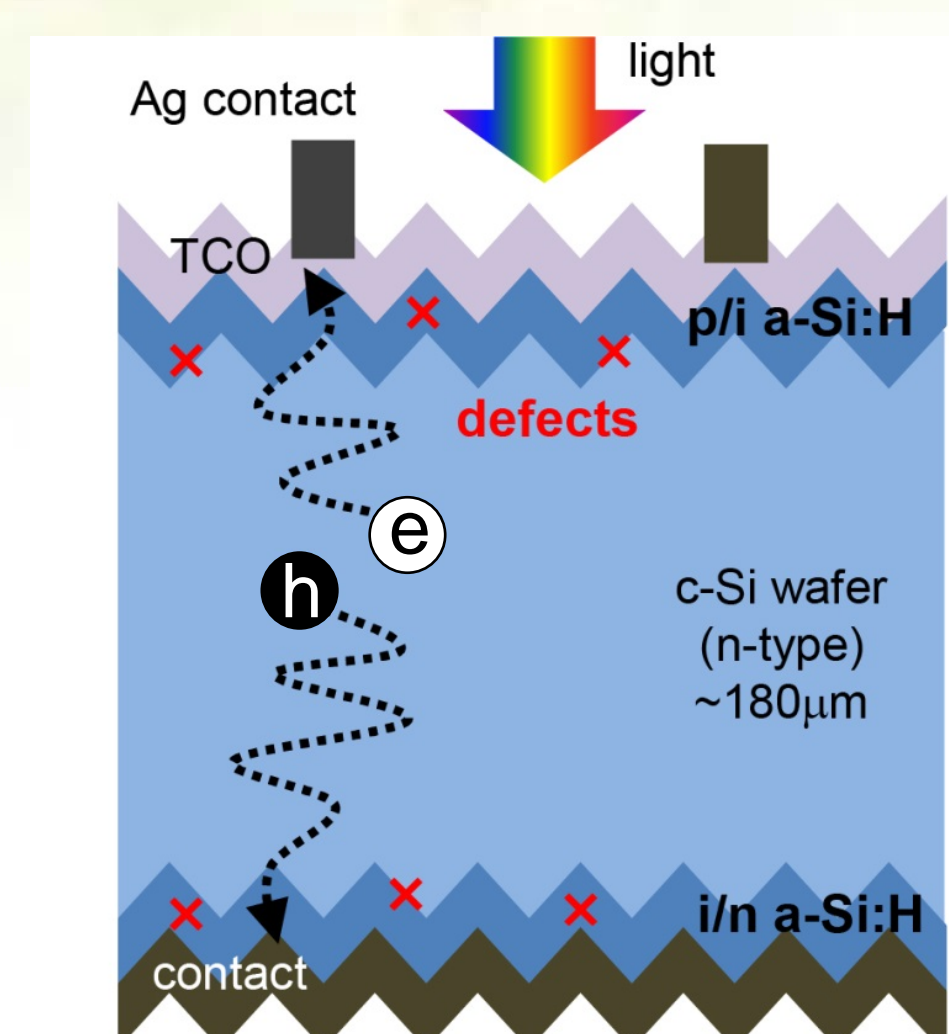
シリコン表面パッシベーションの実時間観察 ～欠陥とバンドオフセットの効果～

布村正太、坂田功
産業技術総合研究所 電子光基礎技術研究部門

Abstract

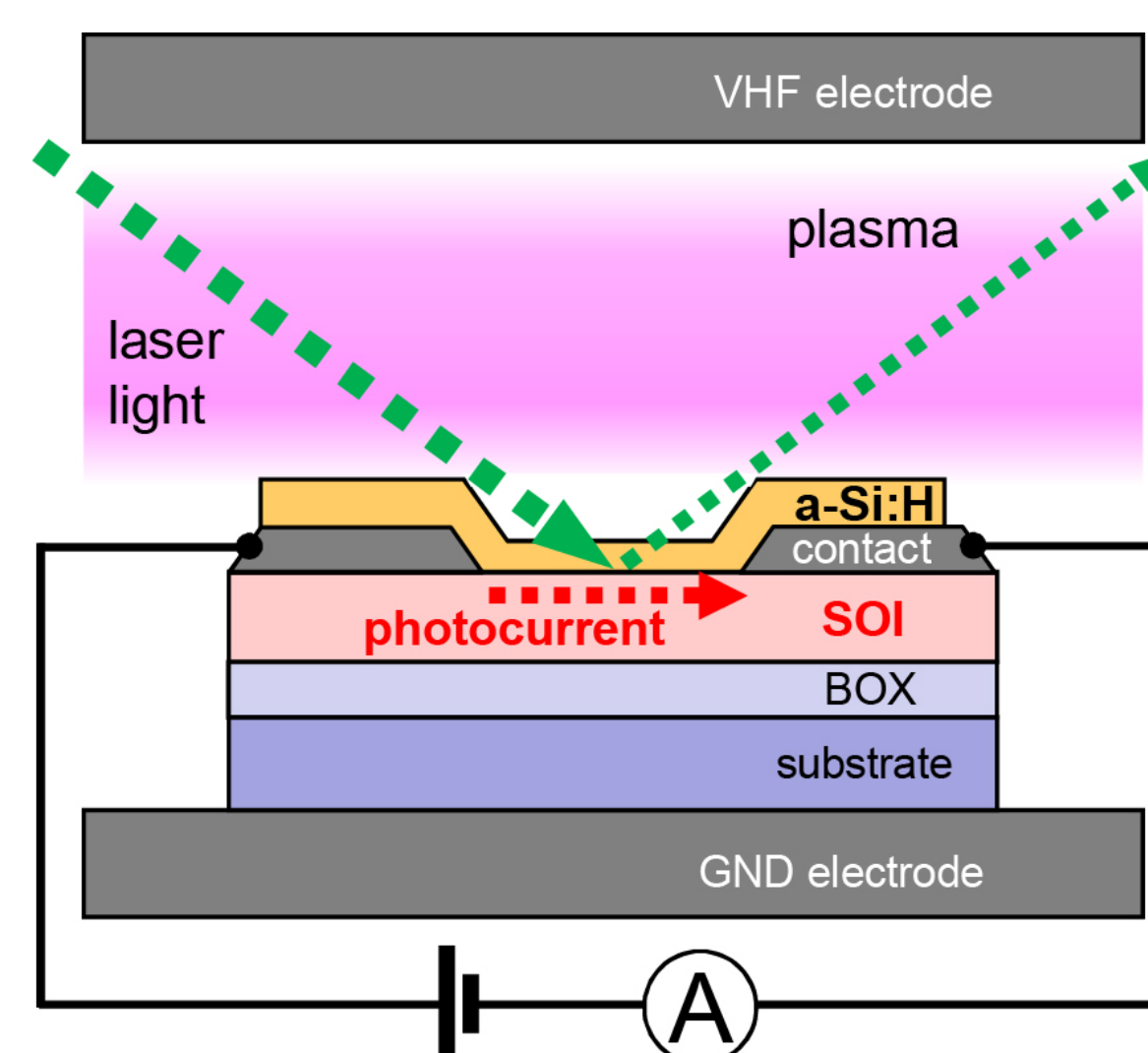
- **Surface passivation of crystalline silicon (c-Si)** is studied during growth of a hydrogenated amorphous silicon (**a-Si:H**) and epitaxial silicon (**epi-Si**) passivation layer at subnanometer to nanometer scale.
- The passivation is improved by the growth of an a-Si:H layer, where a **large band offset** is formed at the a-Si:H/c-Si interface.
- The passivation is deteriorated with the growth of an epi-Si, because the band offset is not formed at the interface, and **plasma-induced defects** are created in c-Si.

SHJ solar cell, interface defects and carrier lifetime



- In silicon heterojunction (SHJ) solar cells, a-Si:H layer plays important roles in surface passivation & carrier selection.
- The carrier lifetime, i.e., a measure for the surface passivation, varies throughout the fabrication process of SHJ solar cells.

Exp. setup: in-situ real-time photocurrent measurement

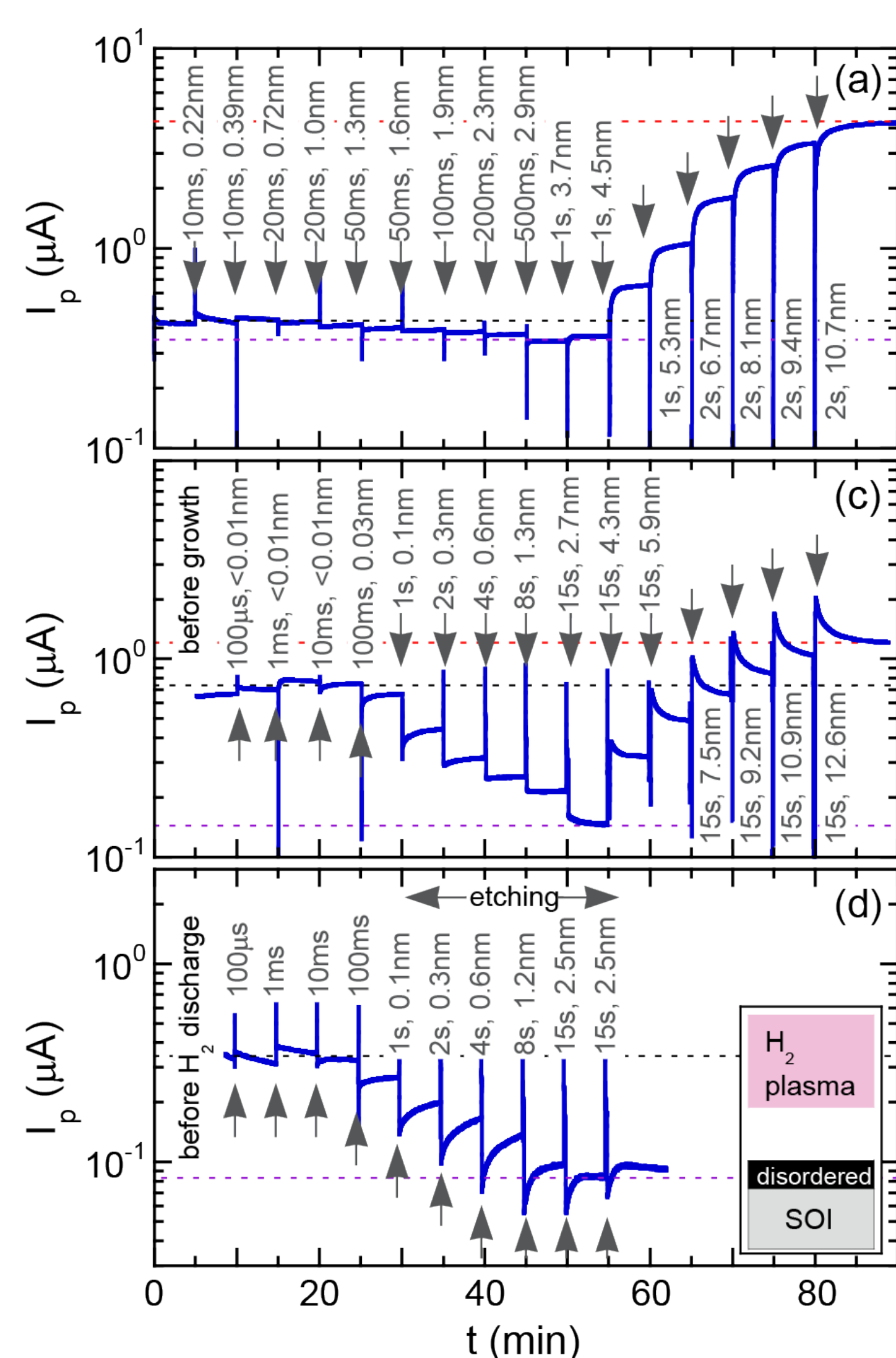


- **Silicon on insulator (SOI)** is used as a sample for the photocurrent measurement.
- SOI is illuminated with a **semiconductor laser** (520nm, 1mW).
- The **photocurrent** is measured during plasma processing and subsequent postannealing.
- In experiments, the **treatment time (Δt)** and **temperature (T)** are varied.

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

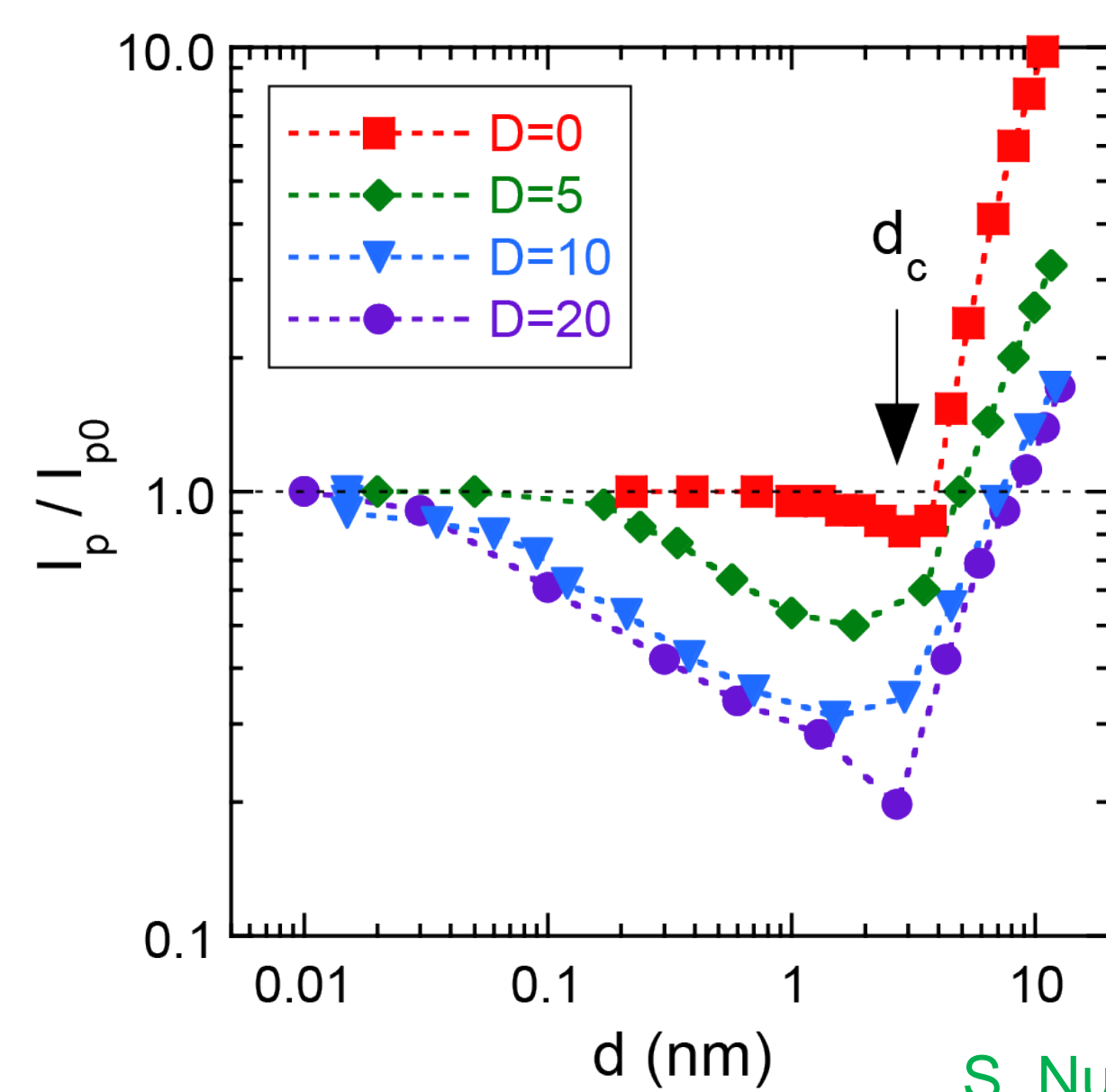
Experimental results

Time evolution of photocurrents



- Time evolutions of photocurrents, I_p , in SOI during growth and consecutive annealing at (a) $D = 0$ and (c) $D = 20$. For comparison, the time evolution of I_p for H_2 plasma treatments is shown in (d).
- I_p initially exhibits a **decreasing tendency** for a series of growth of an ultrathin, and then **it exhibits an increasing tendency** for growth of a relatively-thick layer.
- The **decreasing tendency** reflects the **deterioration of the passivation**.
=> "defect formation"
- The **increasing tendency** reflects the **improvement of the passivation**.
=> "defect annihilation"

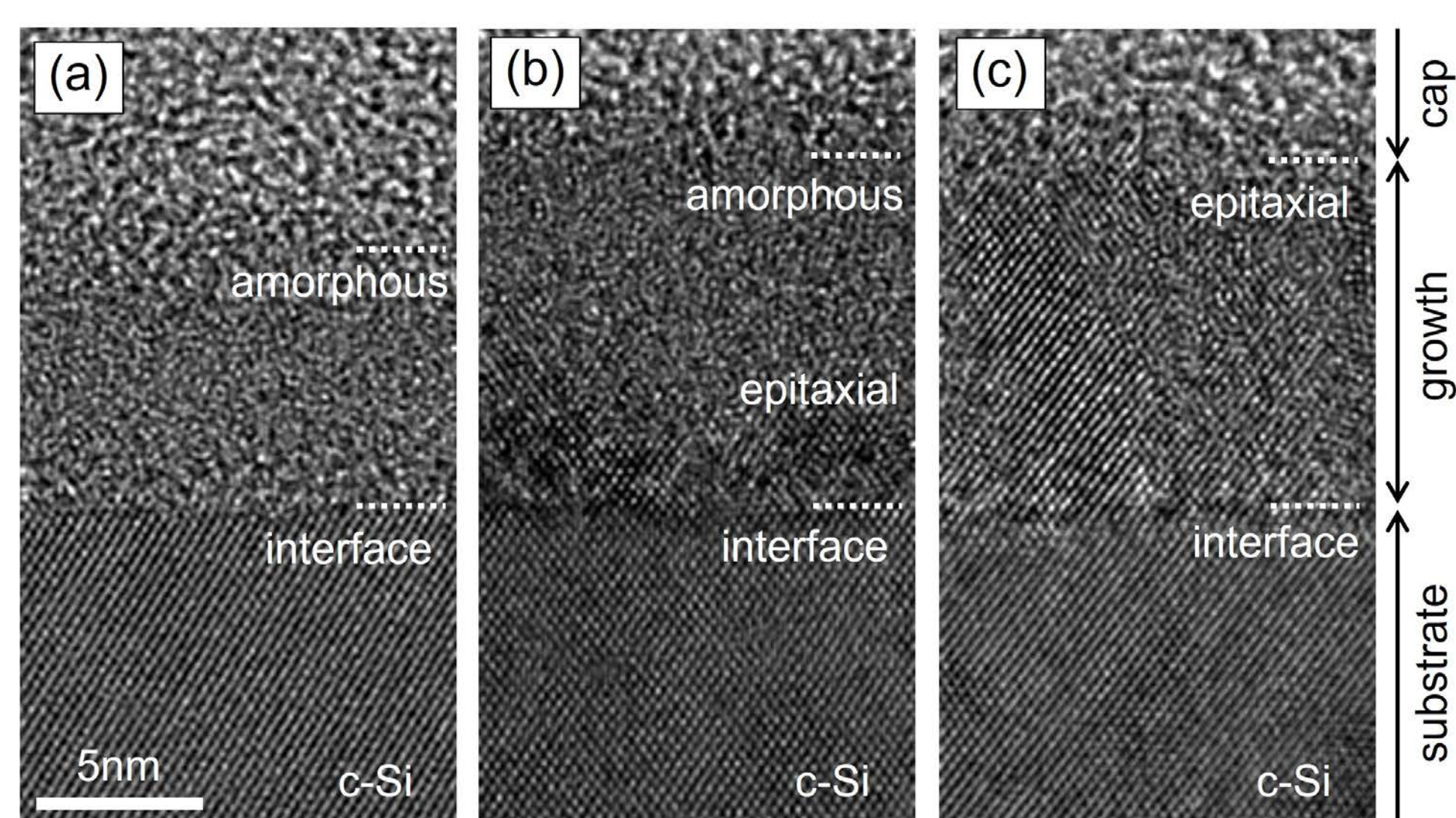
Photocurrent & passivation / deterioration



- I_p/I_{p0} is reduced with d for an ultrathin layer ($d < 2.5$ nm), whereas it is increased with d for a thick ($d > 2.5$ nm).
- The **reduction in I_p/I_{p0}** is enhanced for a high- D case.
- The change from the decreasing to the increasing tendency of I_p/I_{p0} takes place in a range of ~ 2.5 nm, implying the carrier diffusion length.

S. Nunomura et al., *J. Appl. Phys.* **128**, 033302 (2020).

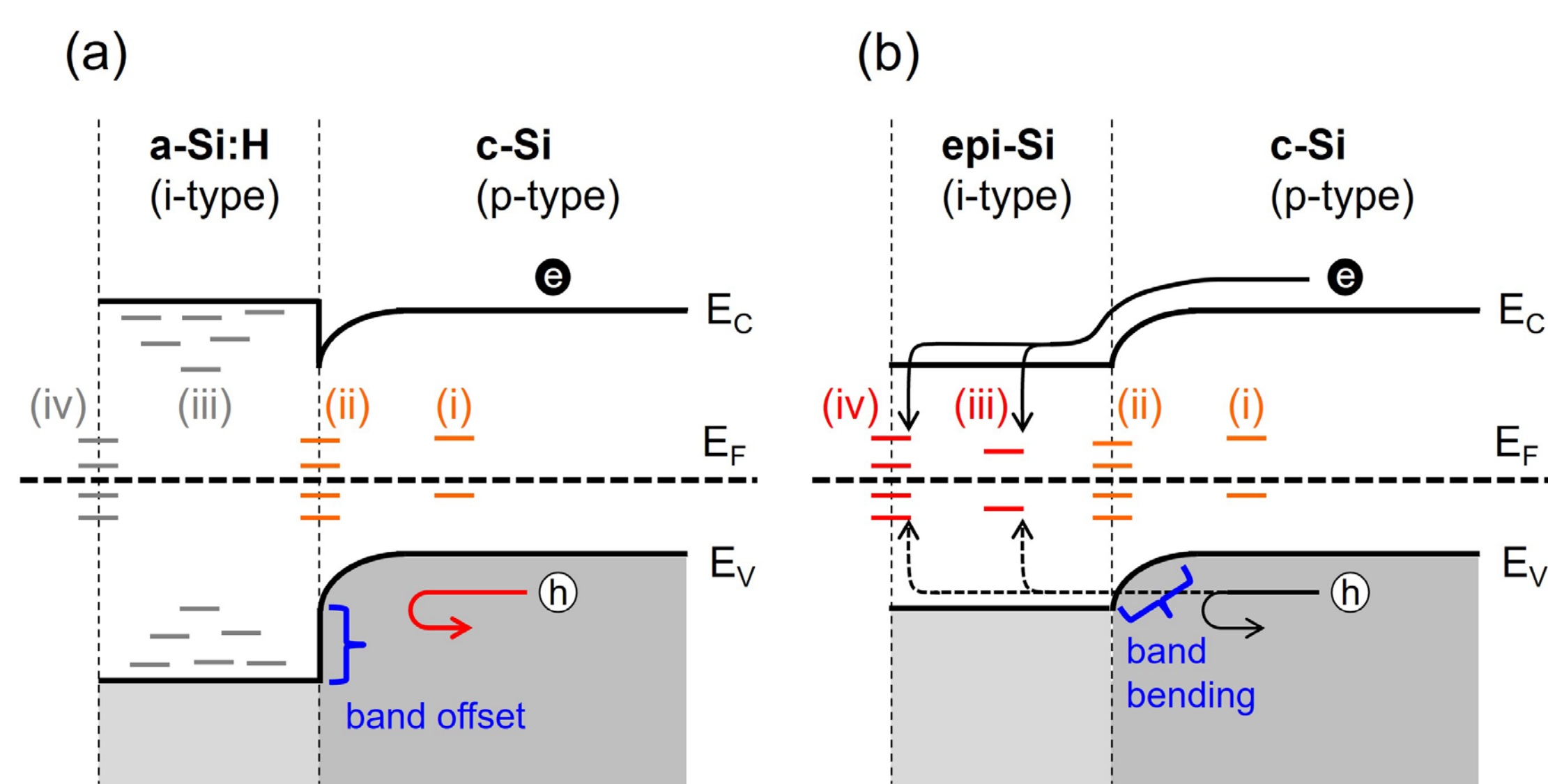
a-Si:H and epi-Si growth on SOI



- Cross-sectional TEM images of passivation layers grown over SOI at different hydrogen (H_2)-dilution of (a) $D = 0$, (b) $D = 5$, and (c) $D = 20$.
- (a) An **a-Si:H layer** is grown over the SOI. (b) An **epi-Si layer** is initially grown in a few nm, and then an a-Si:H layer is grown over the epi-Si layer. (c) An epi-Si layer is grown from the bottom to the top of the passivation layer.

S. Nunomura et al., *J. Appl. Phys.* **128**, 033302 (2020).

Model: band diagram, defect levels & carrier dynamics



- (a) a-Si:H / p-type c-Si and (b) i-type epi-Si / p-type c-Si.
- The **recombination centers** are classified into four groups, depending on the location of defects: (i) **bulk Si defects**, (ii) **interface defects**, (iii) **bulk a-Si:H or epi-Si defects**, and (iv) **surface defects**.
- In the a-Si:H/c-Si stack, the carrier recombination is dominated by the recombination centers located at the interface and in bulk Si, denoted by (ii) and (i) respectively. In the epi-Si/c-Si stack, the carrier recombination comes from not only at above two centers, but also the recombination centers located in the epi-Si bulk and surface, denoted by (iii) and (iv).

Summary

- The **surface passivation of c-Si** is experimentally studied during growth of an a-Si:H and epi-Si layer by using in-situ real-time photocurrent measurement technique.
- The passivation is maximized for an a-Si:H layer growth, due to the formation of a **large valence band offset** and **band bending** near the interface between the a-Si:H layer and the SOI. The field effect plays an important role in the passivation.
- The passivation is deteriorated with an epi-Si layer growth, because the **H-mediated bulk Si defects** are formed. Besides, the **band bending is not fully formed** near the epi-Si/SOI interface.

Acknowledgements

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

Nanocrystalline Si as a Recombination Junction Layer in Perovskite-Si Tandem Solar Cells

Calum McDonald, Hitoshi Sai, Vladimir Svrcek, Atsushi Kogo, Tetsuhiko Miyadera, Takuro N. Murakami, Masayuki Chikamatsu, Yuji Yoshida, Takuya Matsui
Global Zero Emission Research Center (GZR), AIST

Recombination Junction (RJ)

- Essential to collect charges generated in the top/bottom cells - electrons (from the top cell) recombine with holes (from the bottom cell).
- Usually ITO is used, however, there are several disadvantages:
 - Optical losses (reflection and parasitic absorption).
 - Necessitates additional physical vapor deposition (PVD) process between the top and bottom cell fabrication.
 - Contains **indium** - price is volatile in the supply chain and thus the amount of consumption should be as low as possible.
- In this study we replace ITO with an in-situ deposited (n) nc-Si:H by PECVD.
- Study the effect on device performance and contact properties at the RJ, and the evolution of the RJ properties as the (n) nc-Si:H thickness is varied.

Tandem Device Structure

Top cell (n-i-p configuration)

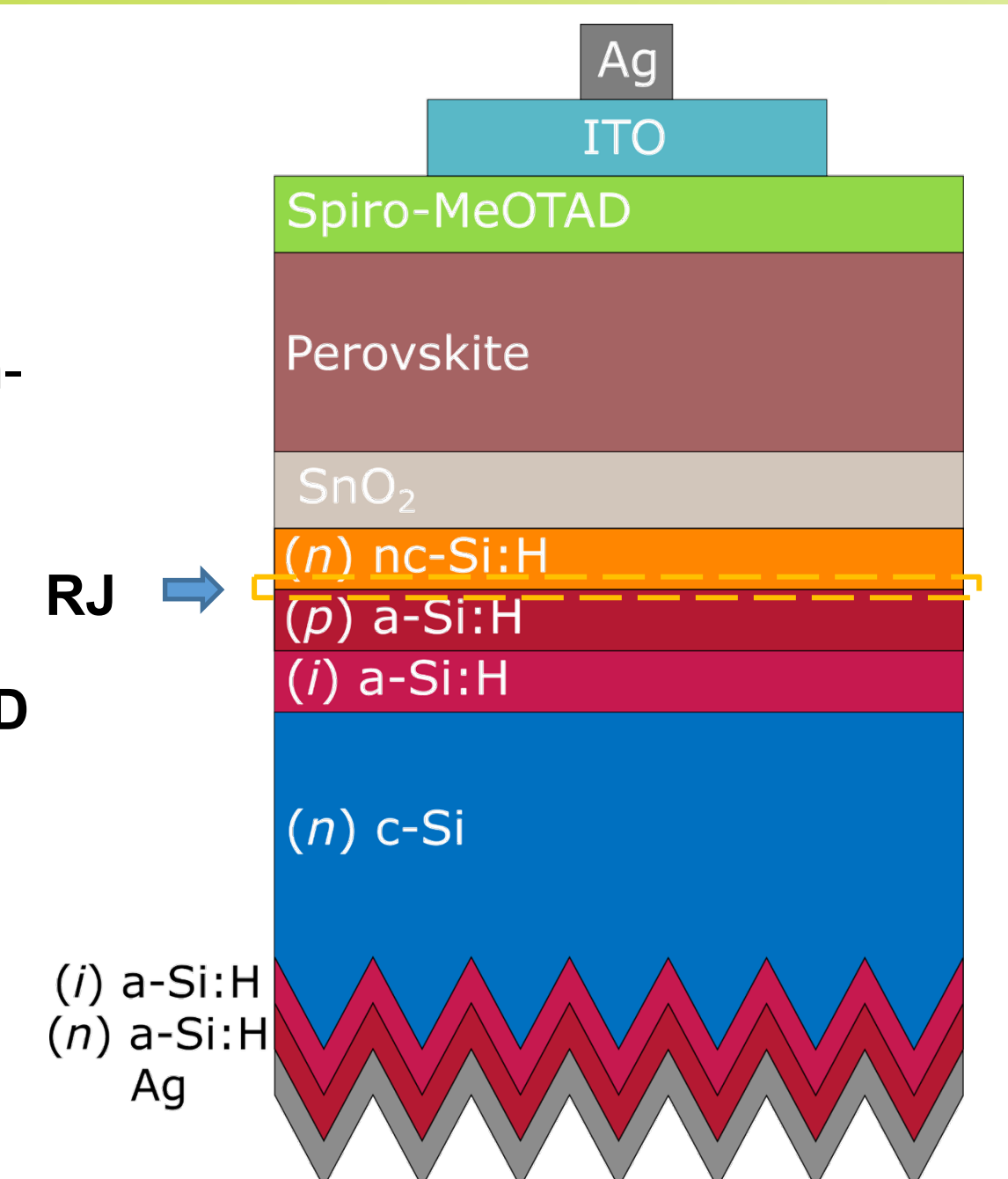
- ITO/Ag (sputtered)
- HTL: doped spiro-MeOTAD (spin-coated)
- Perovskite: $\text{Rb}_{0.05}(\text{FA}_{0.83}\text{MA}_{0.17})_{0.95}\text{PbI}_{0.83}\text{Br}_{0.17}$ (spin-coated)
- ETL: SnO_2 (spin-coated)

Recombination Junction (RJ) Layer

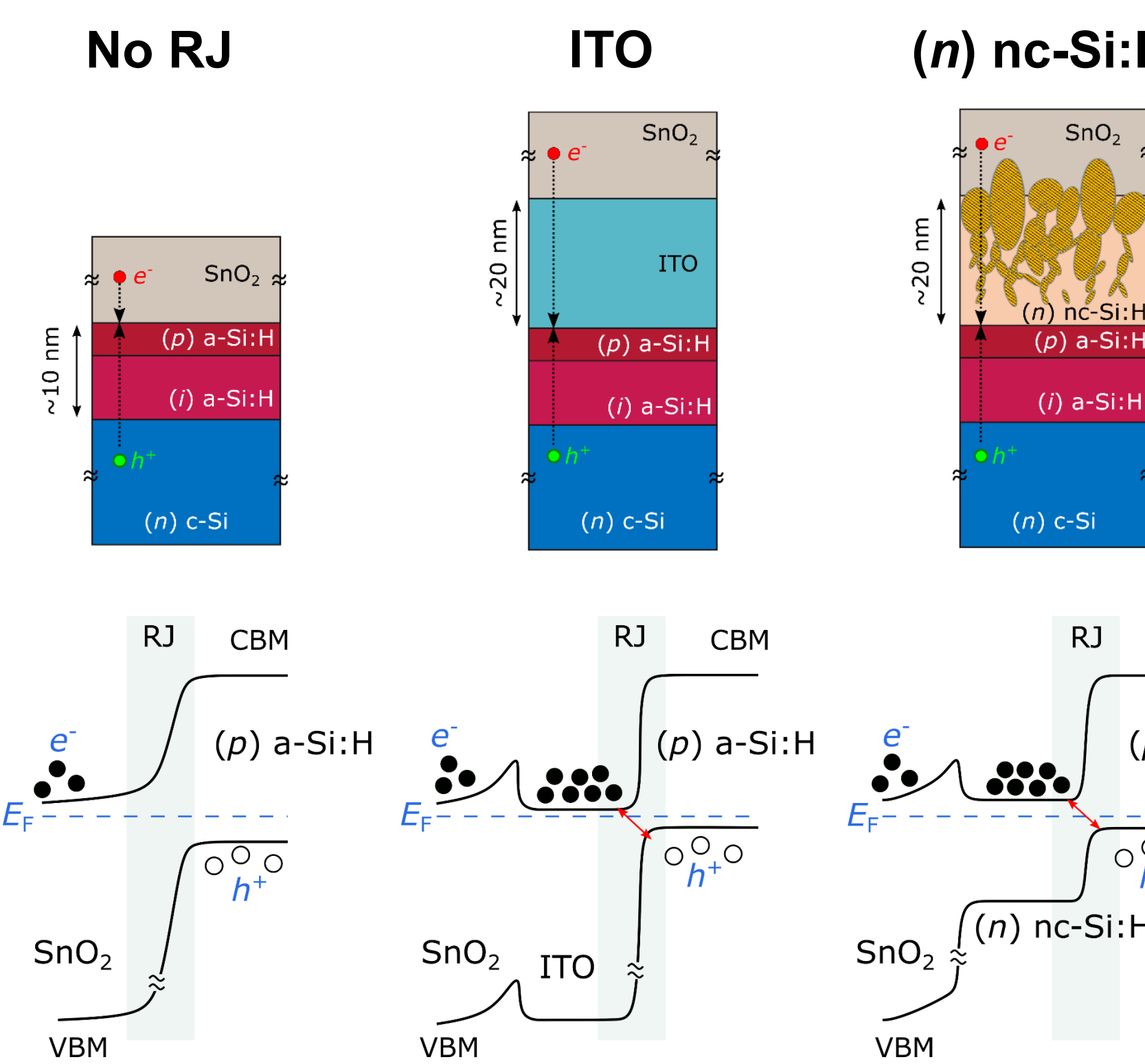
- n-type nanocrystalline Si ((n) nc-Si:H) by PECVD
- Sputtered ITO

Bottom Cell (front emitter)

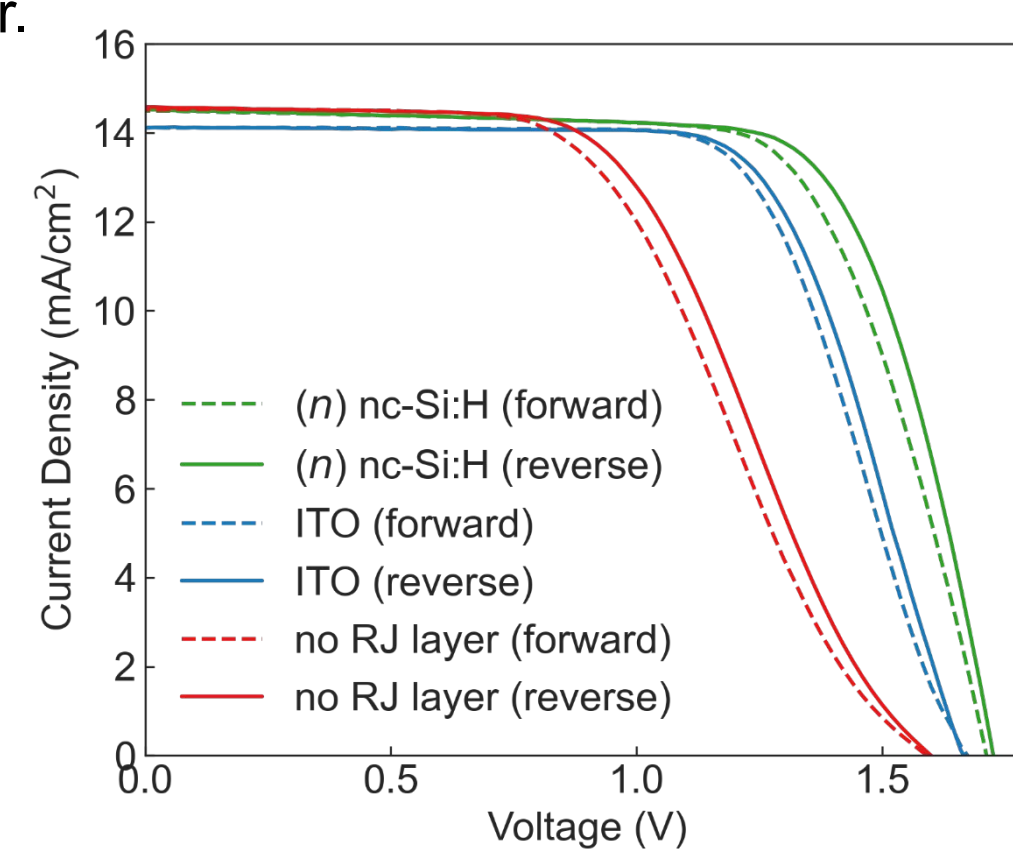
- Silicon heterojunction (SHJ)
- Textured (rear), planar (front)



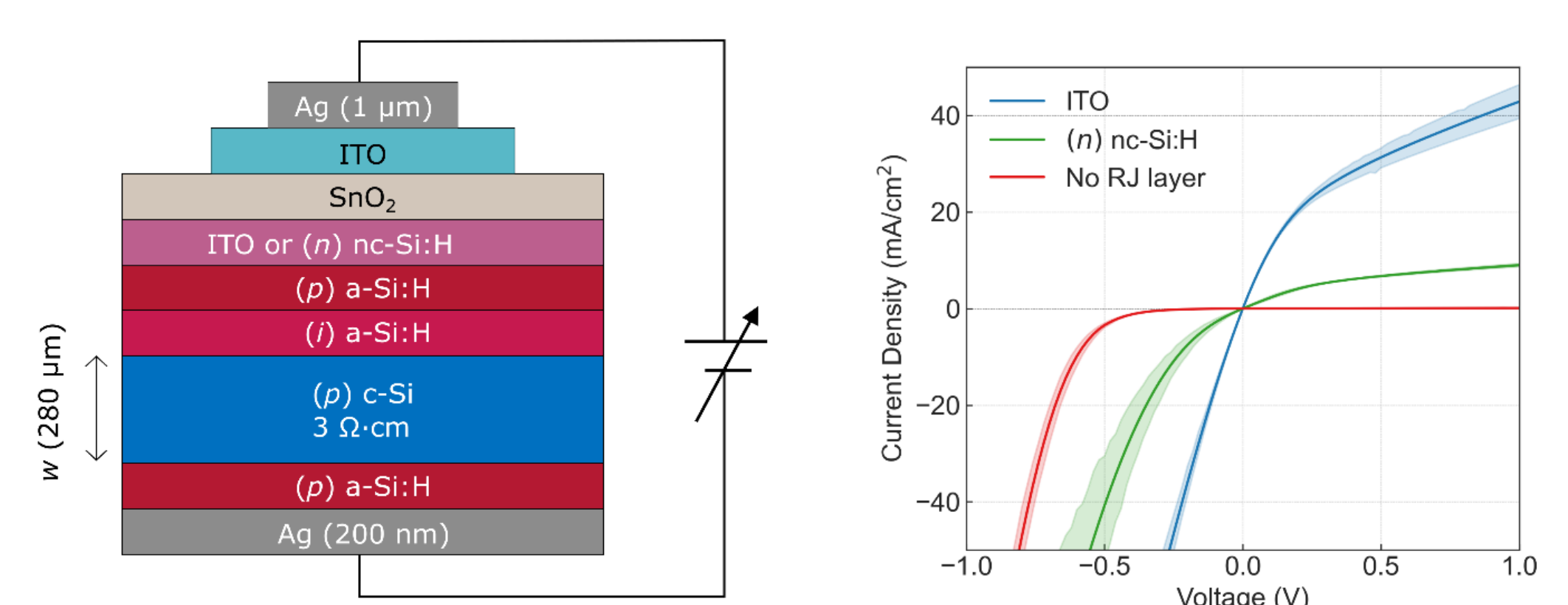
RJ Layer Contact Properties



- Investigated various RJs on the solar cell device performance.
- No RJ layer exhibits S-shape due to charge carrier depletion at the SnO_2 /(p) a-Si:H interface.
- (n) nc-Si:H RJ layer exhibits slightly superior J_{SC} than the ITO RJ layer due to reduced interfacial reflection at the RJ layer.



Dark IV through RJ

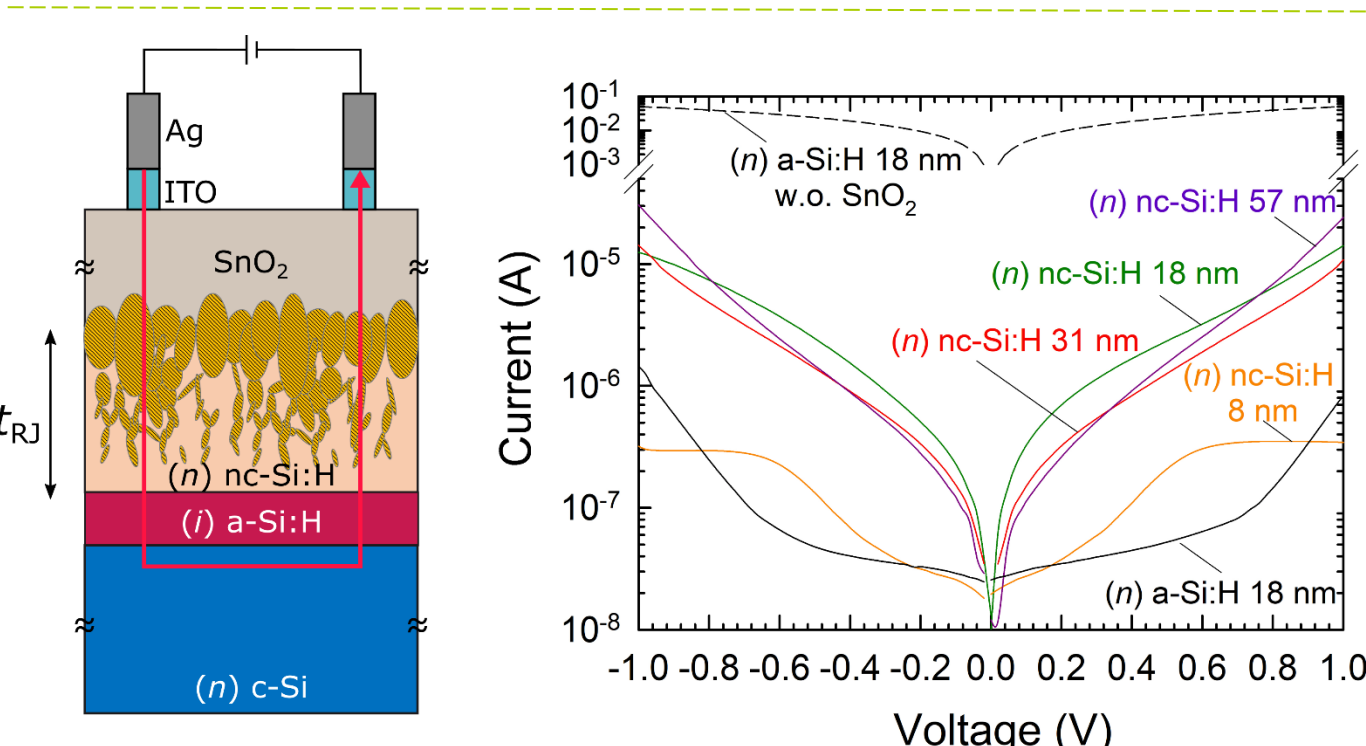
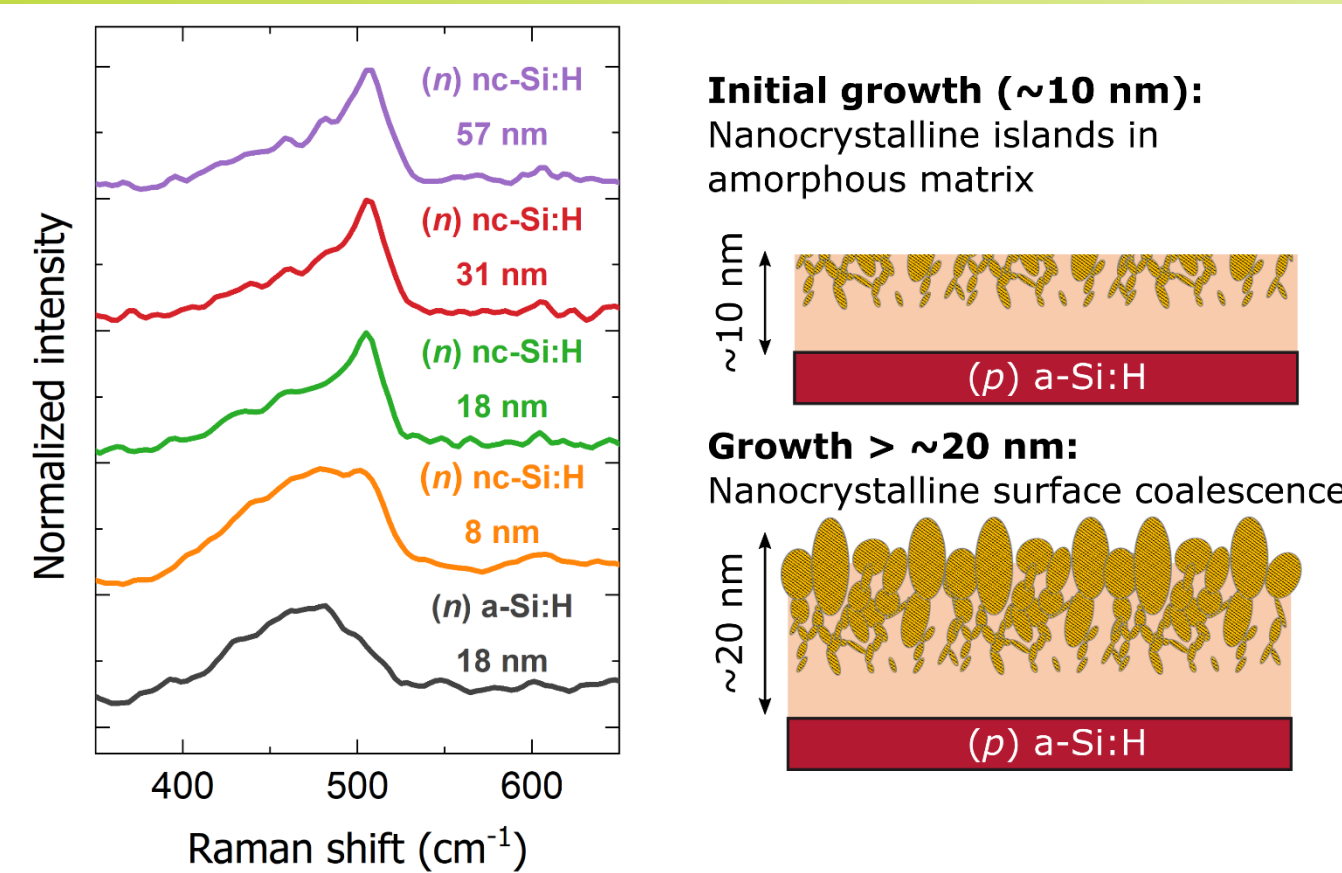


- A test structure was fabricated for characterizing recombination current (electrons supplied from SnO_2 , and holes from Si).
- No current should flow in the forward bias for the ideal RJ, whilst reverse bias should exhibit high conductivity.
- No RJ layer results in high resistivity at low voltages (<0.4 V), explaining the S-shape illuminated IV.
- RJ layer (ITO, (n) nc-Si:H) facilitates current flow at low voltages through the RJ.
- ITO RJ layer exhibits significant shunting in the forward bias (reverse bias in the solar cell), possibly causing a lower V_{OC} .

(n) nc-Si:H Thickness Dependence

UV ($\lambda=325$ nm) Raman Spectroscopy

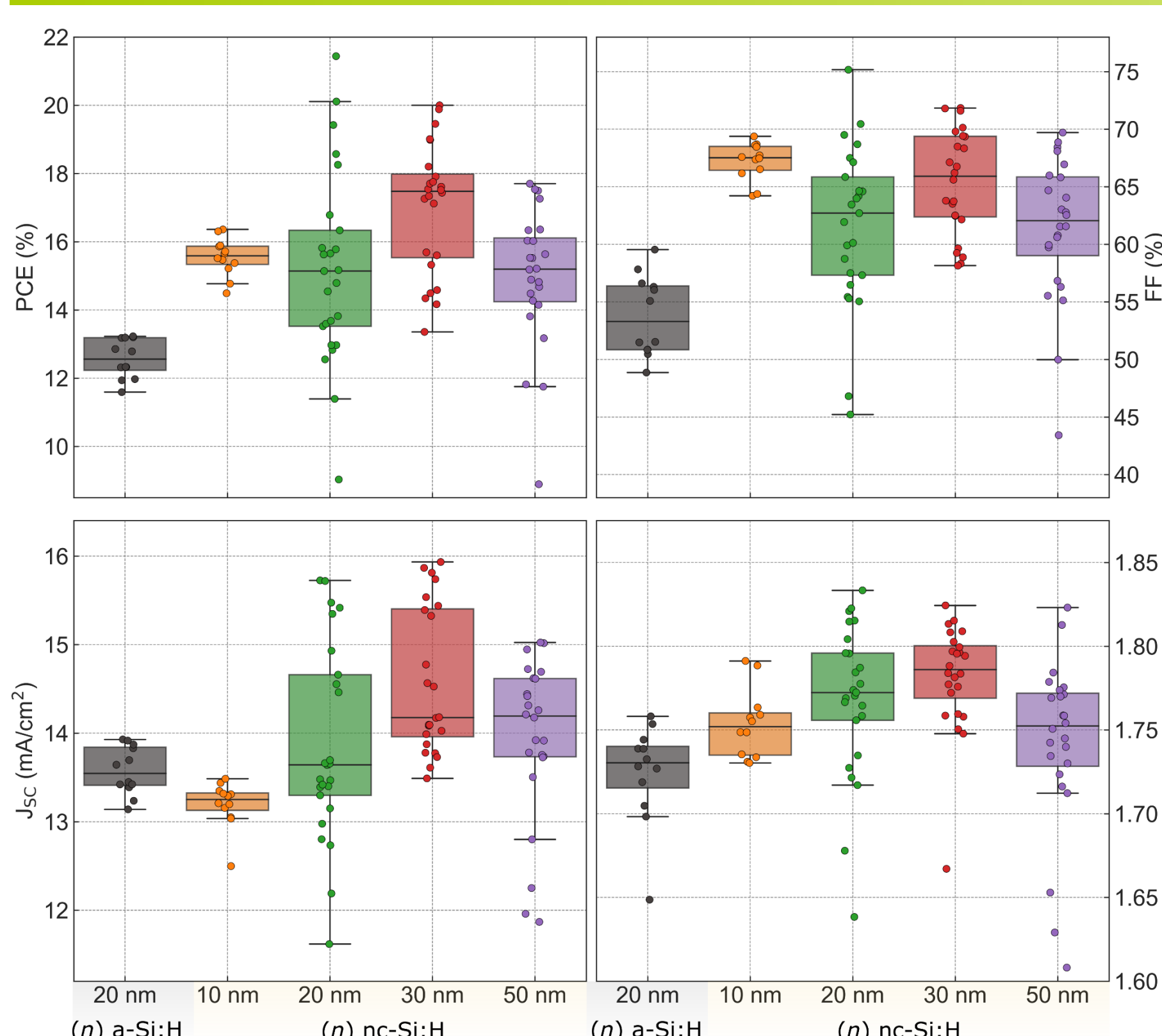
- Crystallization is identified at ~ 10 nm, but nc-Si:H layer still exhibits amorphous-rich character.
- Above ~ 20 nm the layer exhibits nanocrystalline surface coalescence.
- Umishio et al. found that full nanocrystalline surface coalescence can occur at ~ 15 nm. [1]



Coplanar Dark I-V Measurement

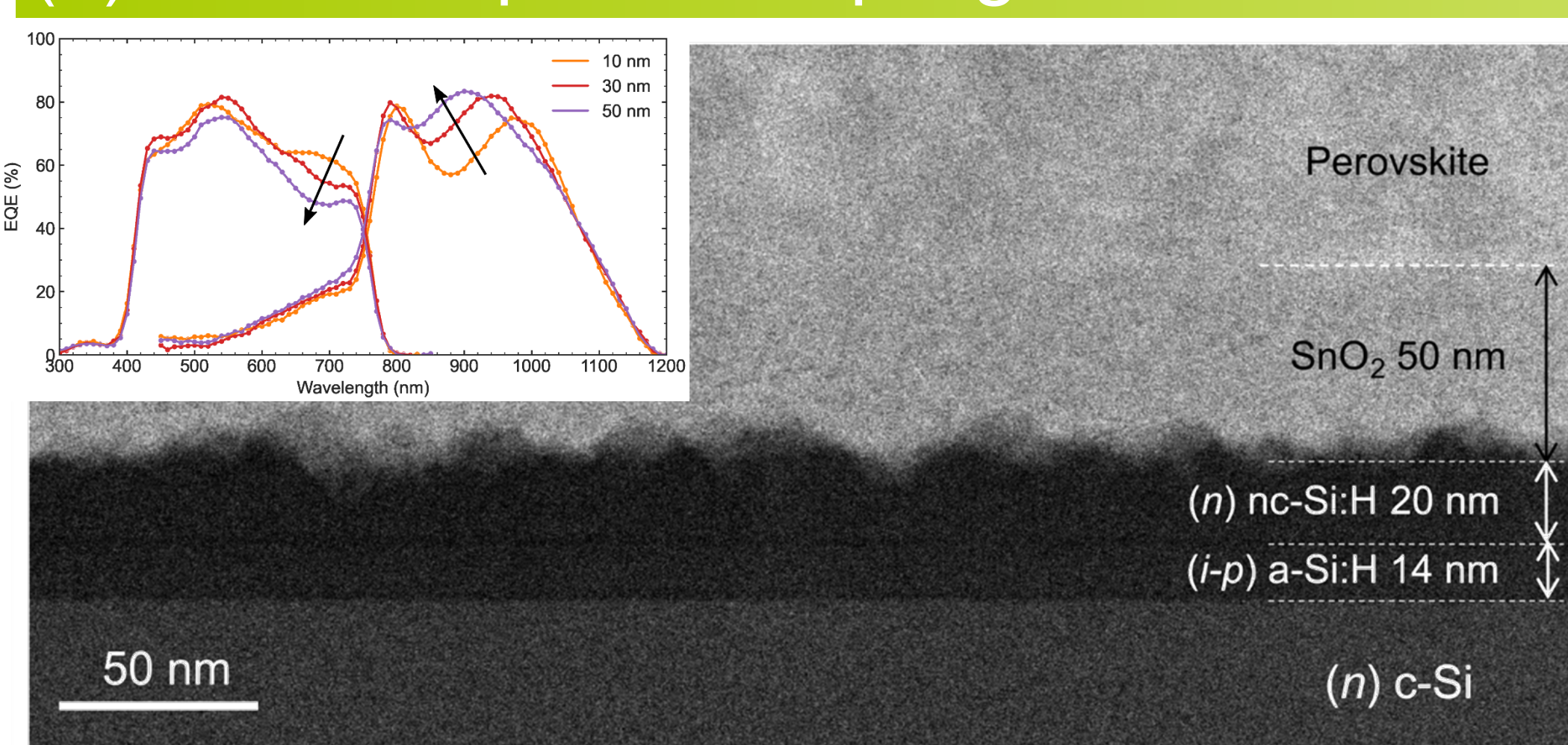
- (n) nc-Si:H RJ layer ~ 10 nm exhibits high contact resistivity and is similar to amorphous Si.
- (n) nc-Si:H RJ layer ~ 20 nm and higher leads to nanocrystalline surface coalescence which results in lower contact resistance.

(n) nc-Si:H Thickness– Device Performance



- (n) nc-Si:H outperforms (n) a-Si:H RJ for any thickness.
- 20-30 nm (n) nc-Si:H RJ layer tends to give superior performance.
- We observe a decrease in reflection as (n) nc-Si:H increases from 10 nm to 30 nm which results in higher J_{SC} .
- Lower FF, J_{SC} and V_{OC} for ~ 50 nm due to current mismatch due to J_{SC} limited by the top cell.

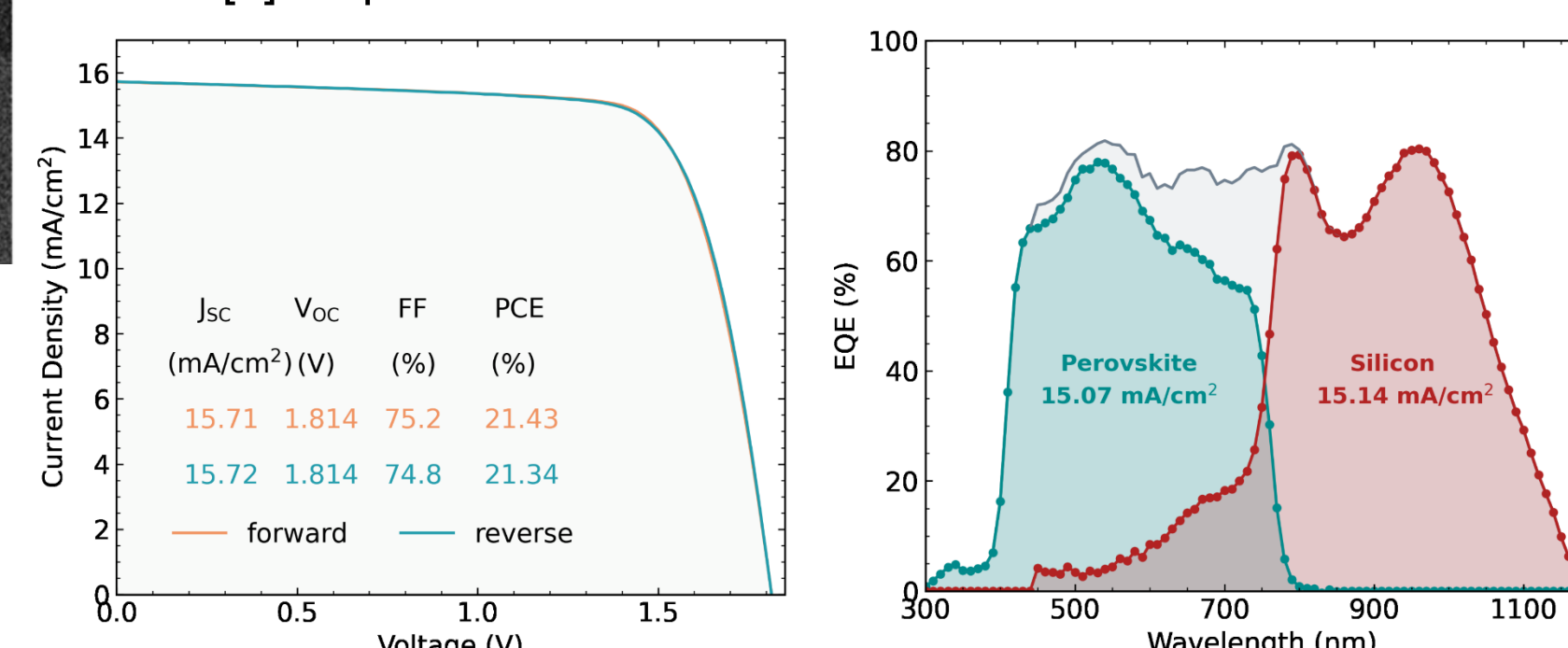
(n) nc-Si:H Optical Coupling



- Scanning TEM revealed a surface roughening (~ 10 nm) of the (n) nc-Si:H layer.
- Interfacial mixing layer between (n) nc-Si:H and SnO_2 provides a refractive index grading, acting as an optical coupler.
- Perovskite/ SnO_2 interface is smooth.

Champion Device Performance – 20 nm RJ layer

- Highest device performance was achieved with a 20 nm (n) nc-Si:H RJ layer ($\sim 21\%$).
- These are unoptimized device for studying the (n) nc-Si:H RJ.
- J_{SC} is strongly limited by reflection and parasitic absorption in the thick spiro-MeOTAD layer (~ 200 nm).
- Device optimization in current configuration has been demonstrated with efficiency $>27\%$. [2]
- See [3] for published results in full.



Conclusion

- (n) nc-Si:H RJ performed superior to ITO RJ, non-optimized cells achieved efficiencies of $\sim 21\%$.
- Interfacial reflection at the RJ can be controlled by varying the (n) nc-Si:H thickness.
- nc-Si:H and SnO_2 ETL can provide a refractive index grading, acting as an optical coupler.

References

- Prog. Photovolt. Res. Appl., 2021, 29, 344–356.
- Energy Environ. Sci., 2021, 14, 4377–4390.
- Appl. Mater. Interfaces, 2022, 14, 33505–33514.

Acknowledgements

Funding: NEDO
Technical Assistance: T. Oku, Y. Sato, M. Tanabe, M. Miyata, Y. Muto

Developing highly transparent colored reflectors for building-integrated photovoltaics (BIPV)

Zhihao XU, Koji Matsubara, Takuya MATSUI, and Hitoshi SAI
Global Zero Emission Research Center (GZR), AIST

Introduction



1. BIPV combines photovoltaics and buildings.
2. Colors of conventional PV modules are dark. Therefore: aesthetic appearance with favorable colors is essential for BIPV applications



Swedish Research Institute^[4] Port of Singapore^[4]

Purpose: Fabrication of colored glasses & high η colored PV modules
Method: Dielectric multilayers + Texturing glass sheet + Encapsulation with cells.

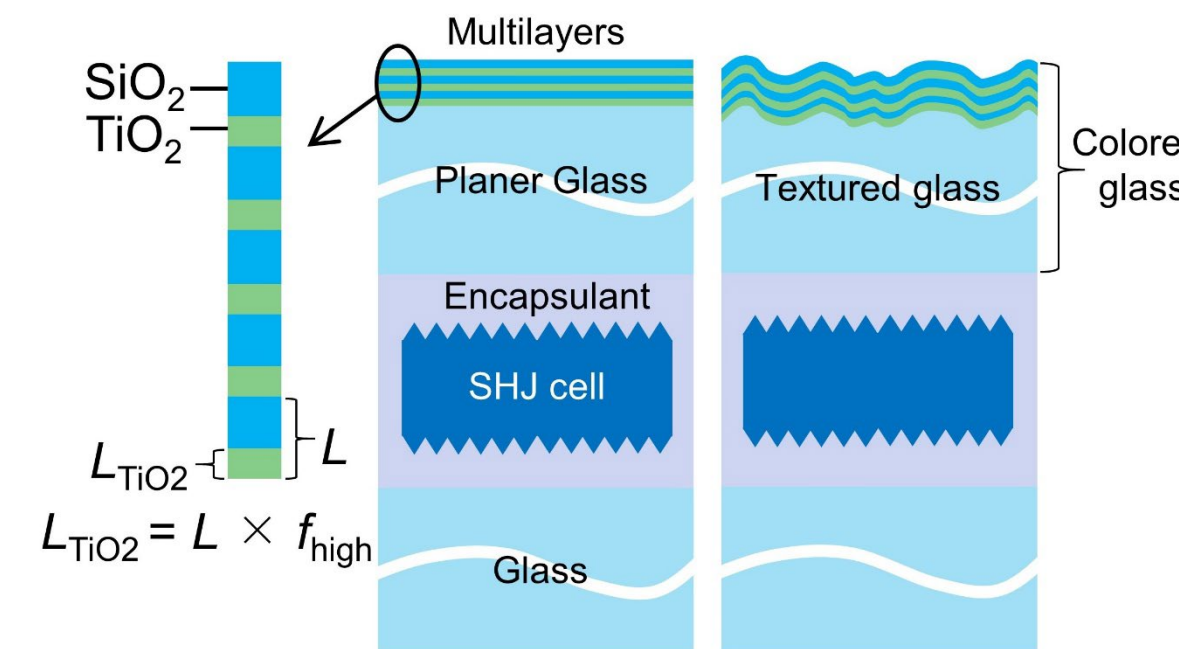
Covering colored glasses is one of the applicable methods to achieve colored PV modules

- Chemical pigments^[5]:
NG: degradation
Sensitive to UV, T , and H
- Structured colors^[6]:
NG: nonuniform colors
Sensitive to angles

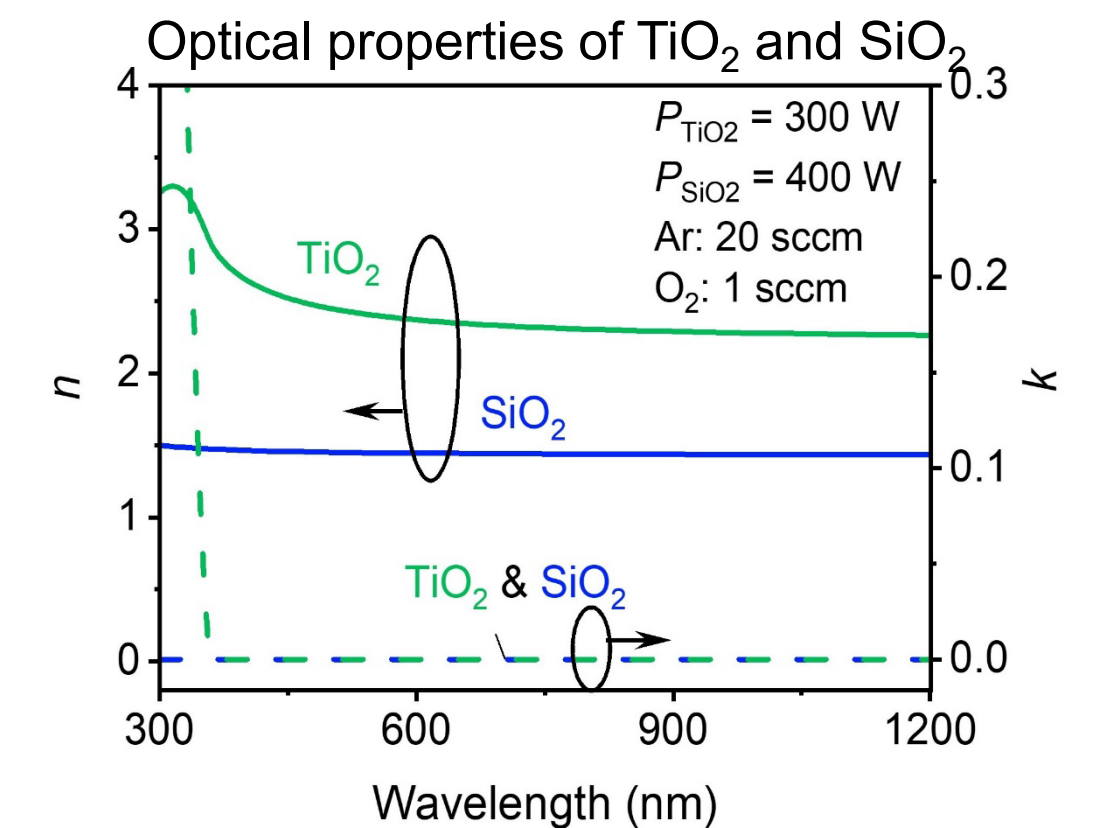
In this study, we focus on structured colored glass

Experiment

- Optical simulation: RSoft (RCWA)
- Sample preparation
 - Planer and textured (sandblasted) glasses
 - Multilayers with TiO_2 and SiO_2 (RF sputtering)
 - Mini-modules with SHJ cells
- Characterization
 - Ellipsometry
 - UV/VIS spectrometer
 - Laser microscope
 - J-V



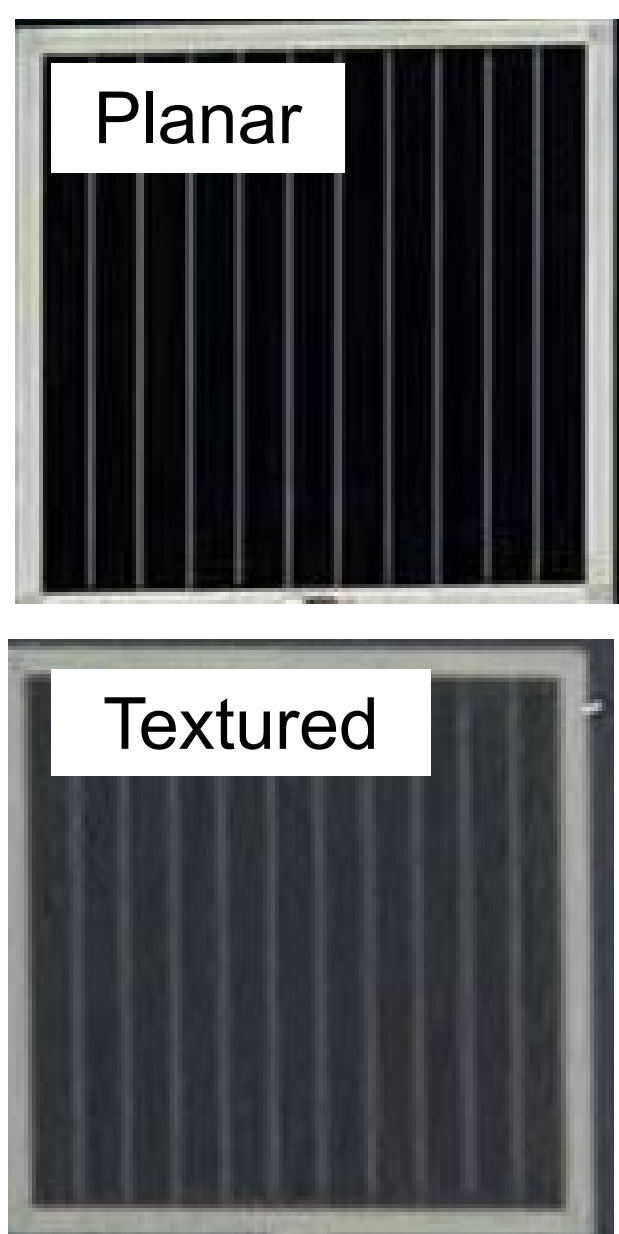
Multilayer parameters: f_{high} and L



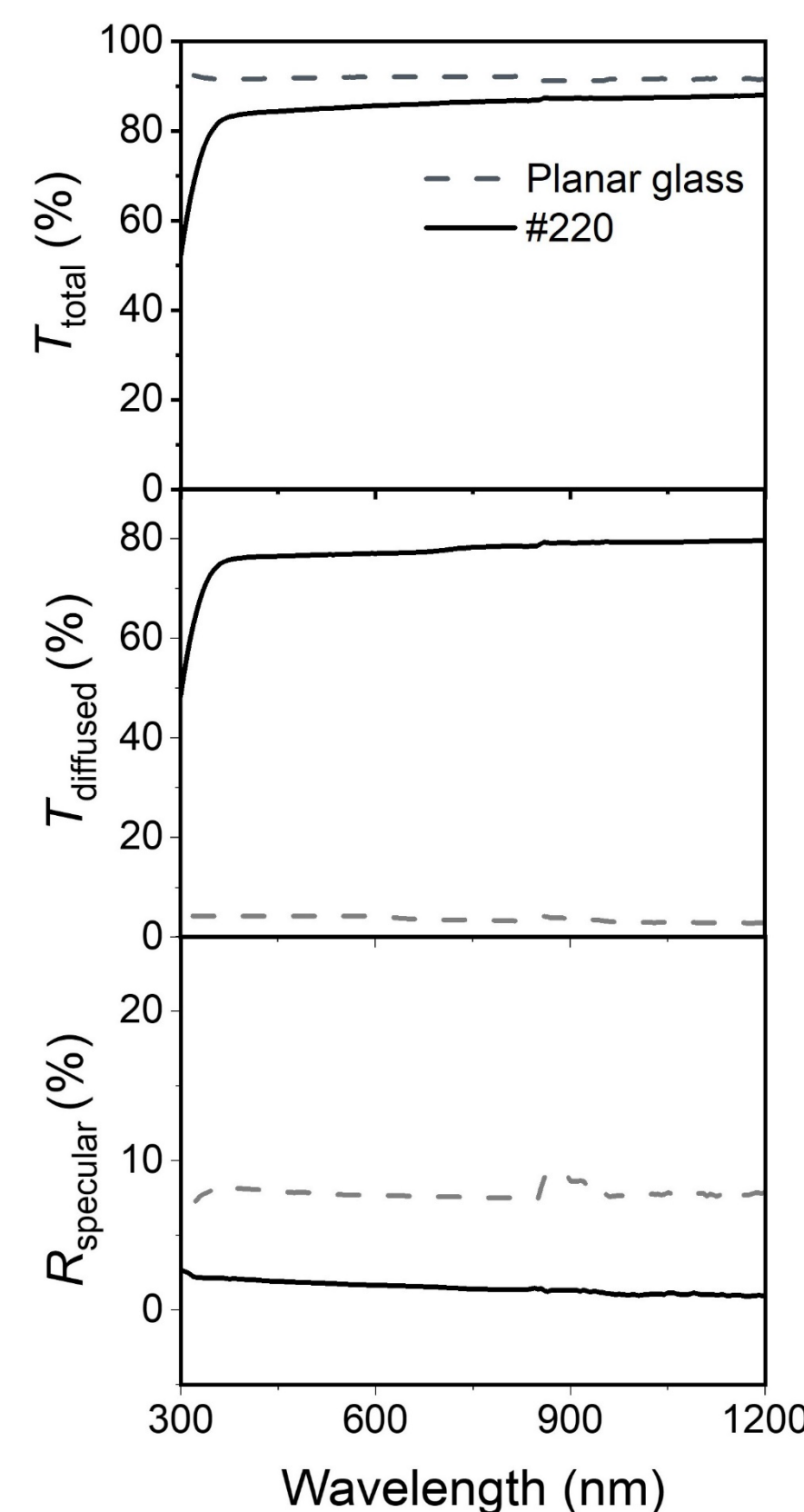
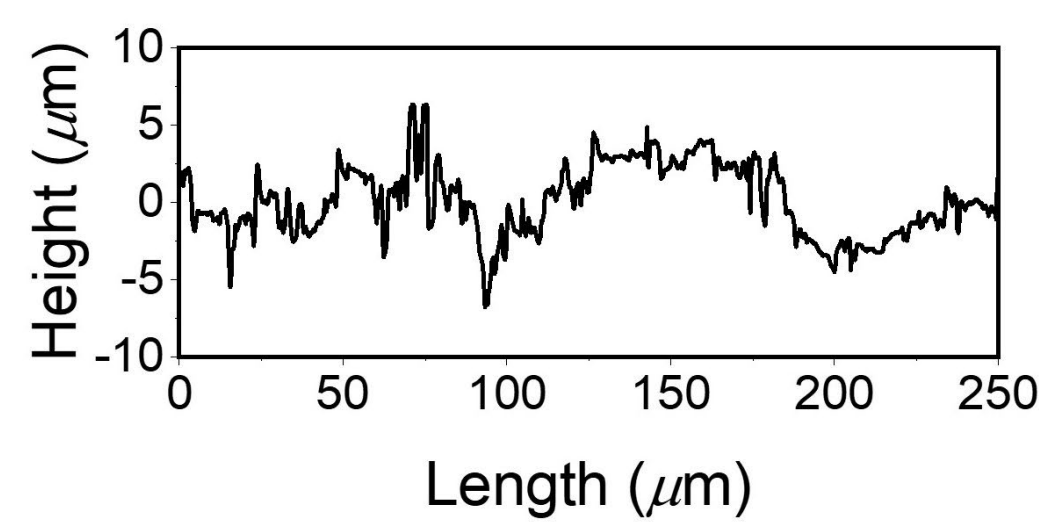
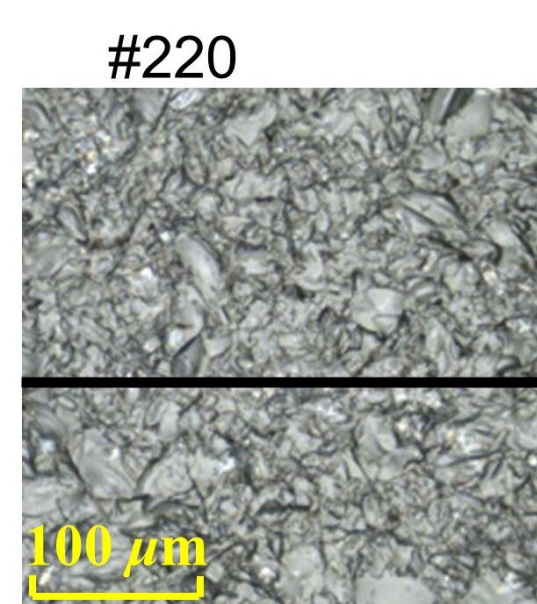
Results and discussion I

- Comparison of planer/textured glasses
 - Textured glass sheets prepared by the sandblasting (#220) show rough surface, highly diffusive surface.

Appearance of mini-modules

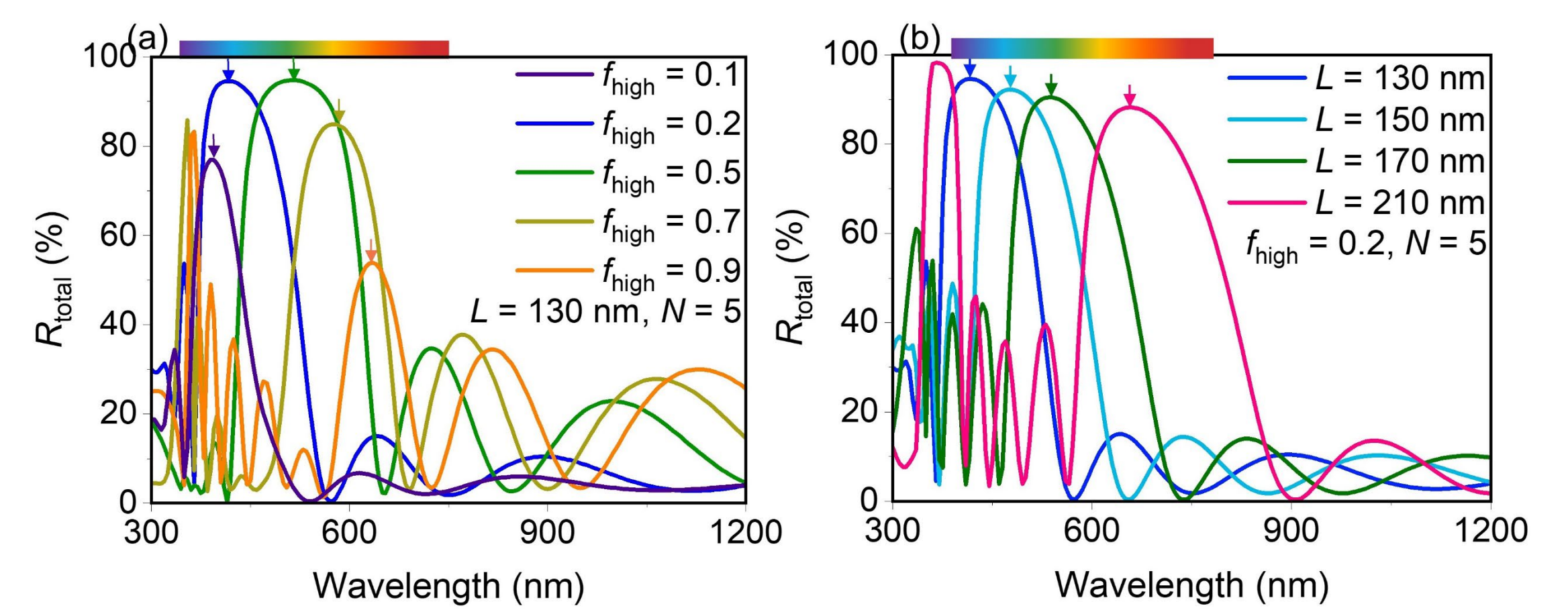


Morphology of textured glass



- Optical simulation results

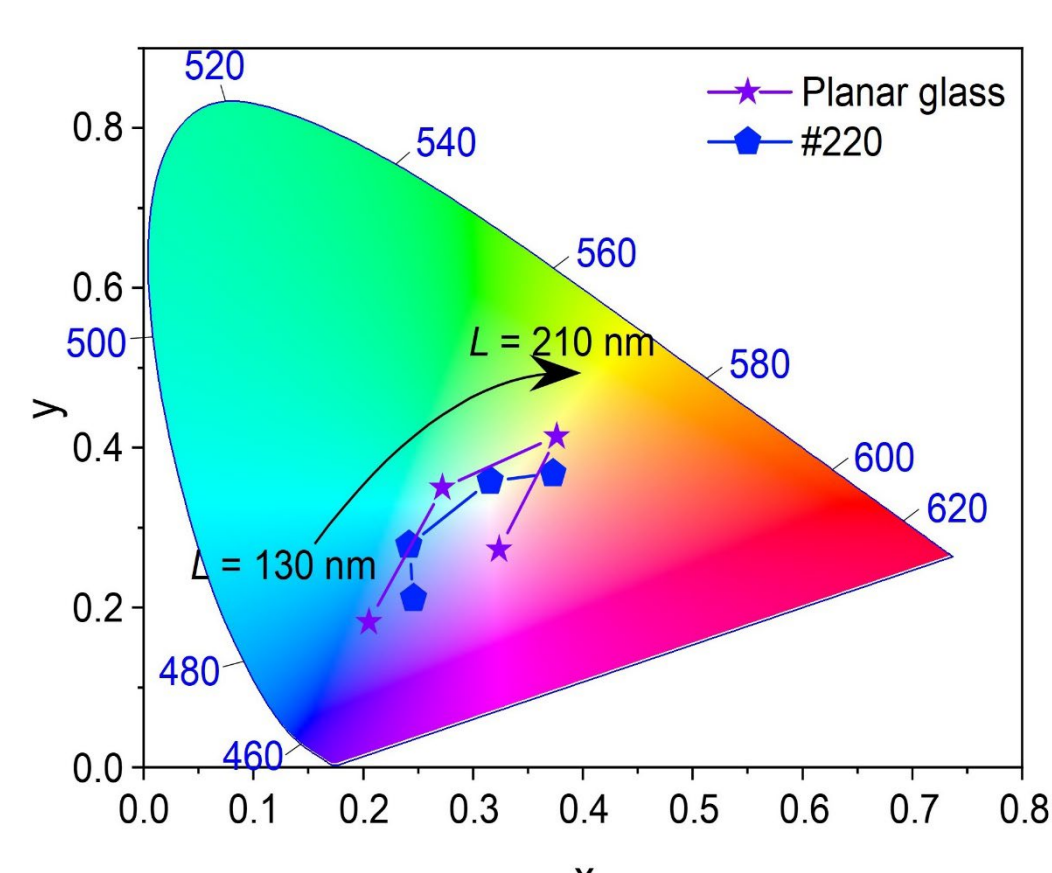
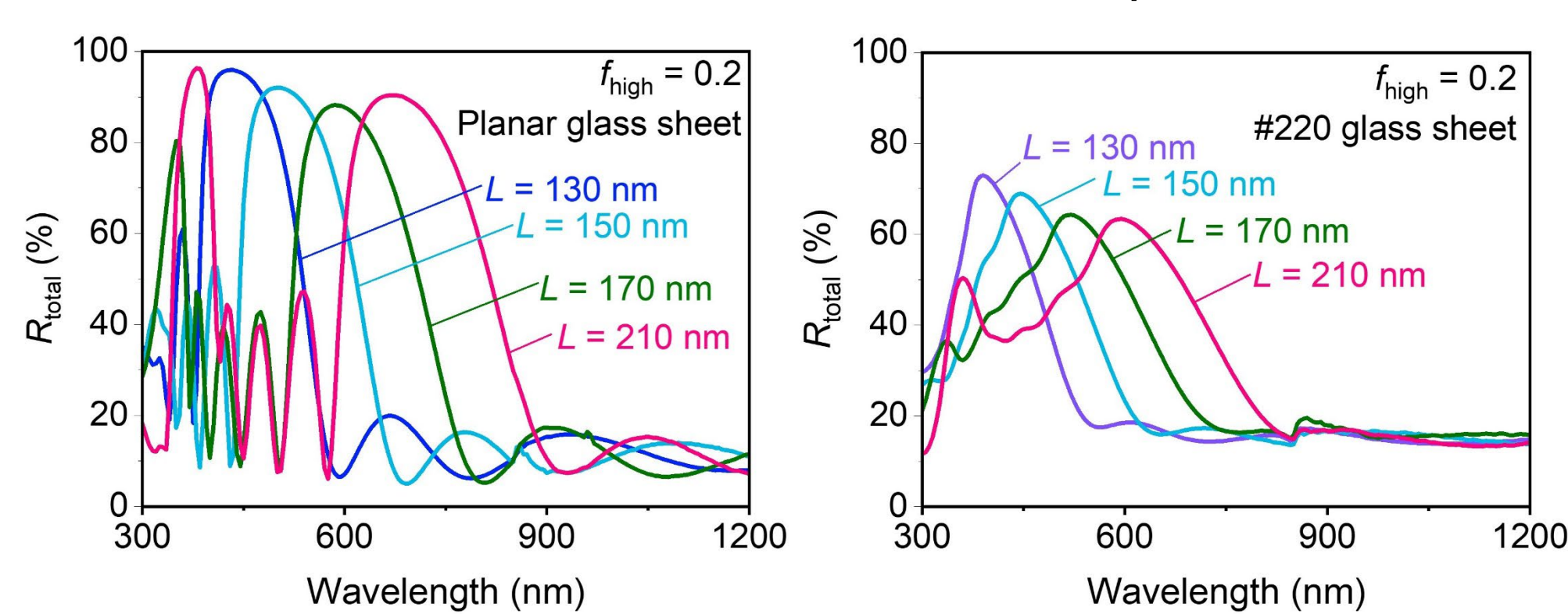
- $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ Multilayers (MLs) on planer glass, 10 layers (fixed)



1. The width, the height and the position of the main R peak are strongly dependent on f_{high} and L , according to the interference principle
2. We choose $f_{\text{high}} = 0.2$ to fulfill a distinguishable color and an acceptable optical loss.
3. The R peak is shifted to longer λ with increasing of L , indicating that color is widely controllable.

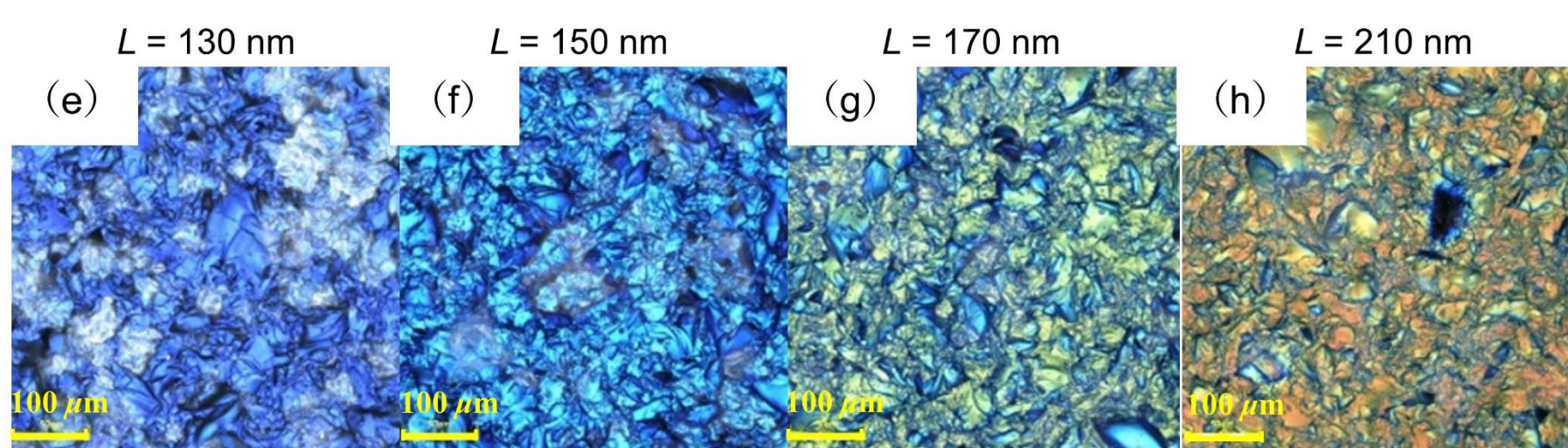
Results and discussion II

- Fabrication and characterization of MLs on planar and textured (#220) glass sheets

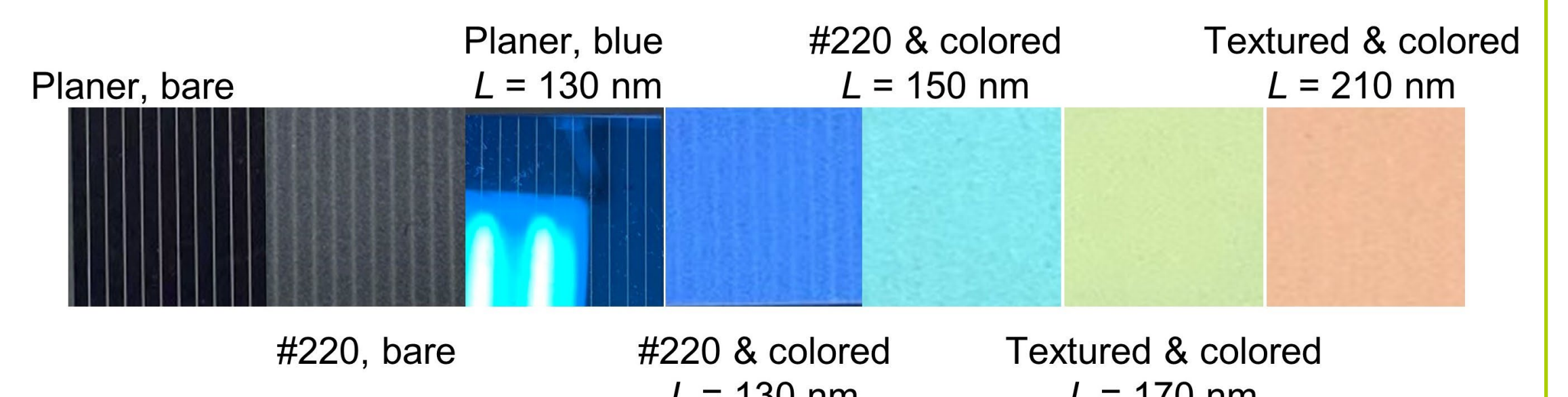


Planar and textured glasses with wide range of colors, from blue to red are achieved.

Next: Encapsulation with cells



- Colored minimodules



Glass type	MLs	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)	$\Delta\eta$ (rel. %)
Planar	Bare	39.1	0.710	0.800	21.7	-0.0
	Blue ($L = 130$ nm)	29.5	0.710	0.801	16.4	-24.6
Textured (#220)	Bare	35.8	0.713	0.801	20.6	-4.9
	Violet ($L = 130$ nm)	32.5	0.712	0.804	18.1	-16.5
	Cyan ($L = 150$ nm)	32.2	0.711	0.798	18.2	-16.3
	Green ($L = 170$ nm)	29.7	0.710	0.803	17.2	-20.9
	Orange ($L = 210$ nm)	27.5	0.711	0.802	15.5	-28.4

Conclusion & Next plan

- Conclusion:

1. We investigated the possibility of color control in PV modules for BIPV applications by means of structural colors ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ multilayers).
2. The hues of colored glasses are widely controllable by simply varying the layer parameters, even on textured glasses.
3. Colored textured glasses show more uniform appearance with anti-glare effect.
4. Colored modules with violet, cyan, green and orange with efficiencies from 15% to 18% were successfully developed.

- Next plan:

Overcoming the nonuniform colors due to different incident light angles.
Reduction of optical loss by colored glasses using optimization of structure of MLs.

References

1. [The History and Definition of Solar Cells \(thoughtco.com\)](#)
2. [Tsukuba center building, march 2012.jpg - Wikipedia](#)
3. D. Craciunescu *et al.*, Conf. Ser.:Mater. Sci. Eng. 471 112015 (2019).
4. [SwissINSO](#)
5. R. W. Sabnis, Displays **20**, 119-129 (1999).
6. A. F. Kaplan *et al.*, Appl. Phys. Lett. **99**, 143111 (2011).

Acknowledgement



This project is financially supported by NEDO.
The authors would like to thank Y. Sato, M. Tanabe, T. Oku for sample preparation and technical support.

結晶Si基板を用いたフレキシブルモジュールの作製と評価

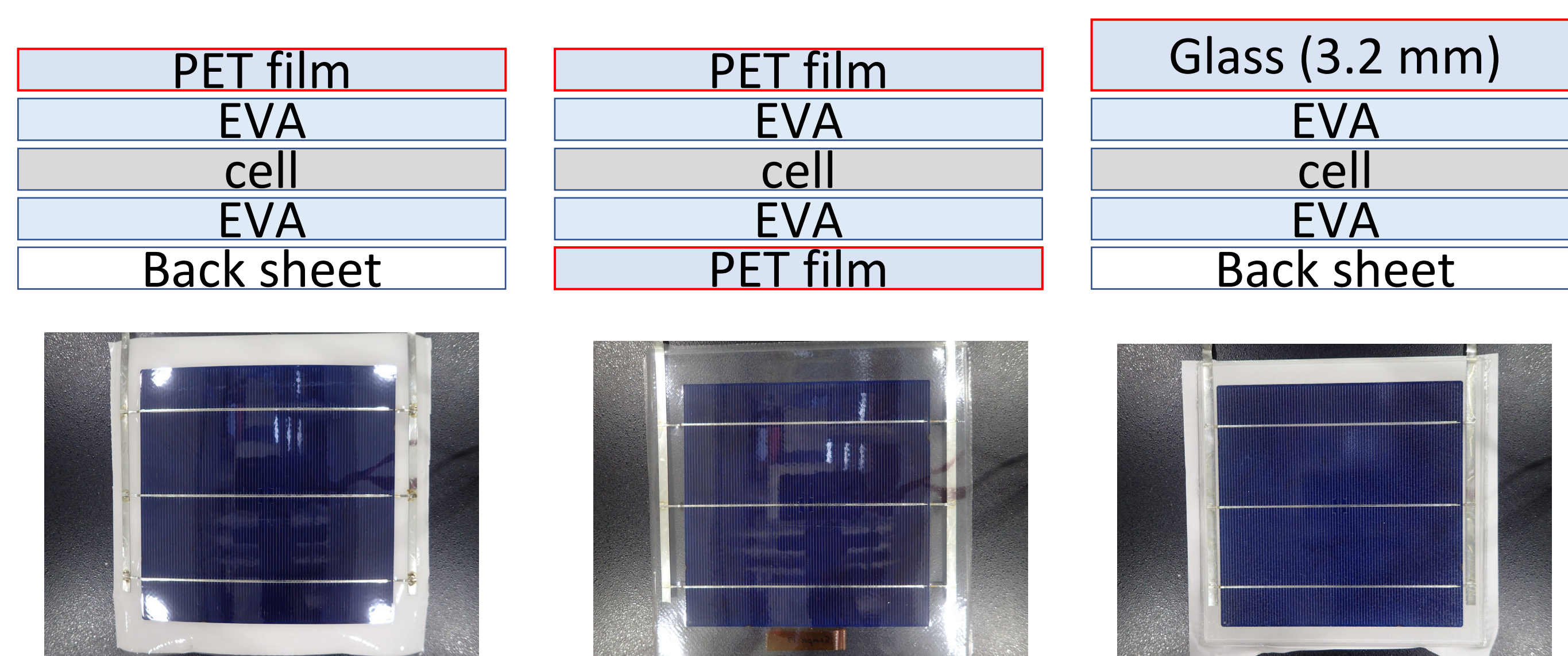
立花福久、棚橋克人、白澤勝彦
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

研究の目的・概要

- 軽量/柔軟性を特徴とした太陽電池モジュールの開発が重量制限のある屋根や移動体への設置を目的として近年盛んに進められている。本研究では結晶シリコン基板を用いてフレキシブルモジュールを作製した際の課題の抽出及び利用先拡大の探索を目的としている。
- 156mm角サイズの結晶シリコン太陽電池を使用したモジュールを作製し、モジュール特性の評価、曲率半径200mmの治具への貼付、加速劣化試験による信頼性評価などを行った。
- 温度85°C湿度85%の高温高湿度の試験槽に長時間保持し続ける加速劣化試験の結果、フレキシブルモジュールは比較試料であるガラスを使用したモジュールに比べ、高い信頼性を示すことが確認された。

サンプル作製・実験方法

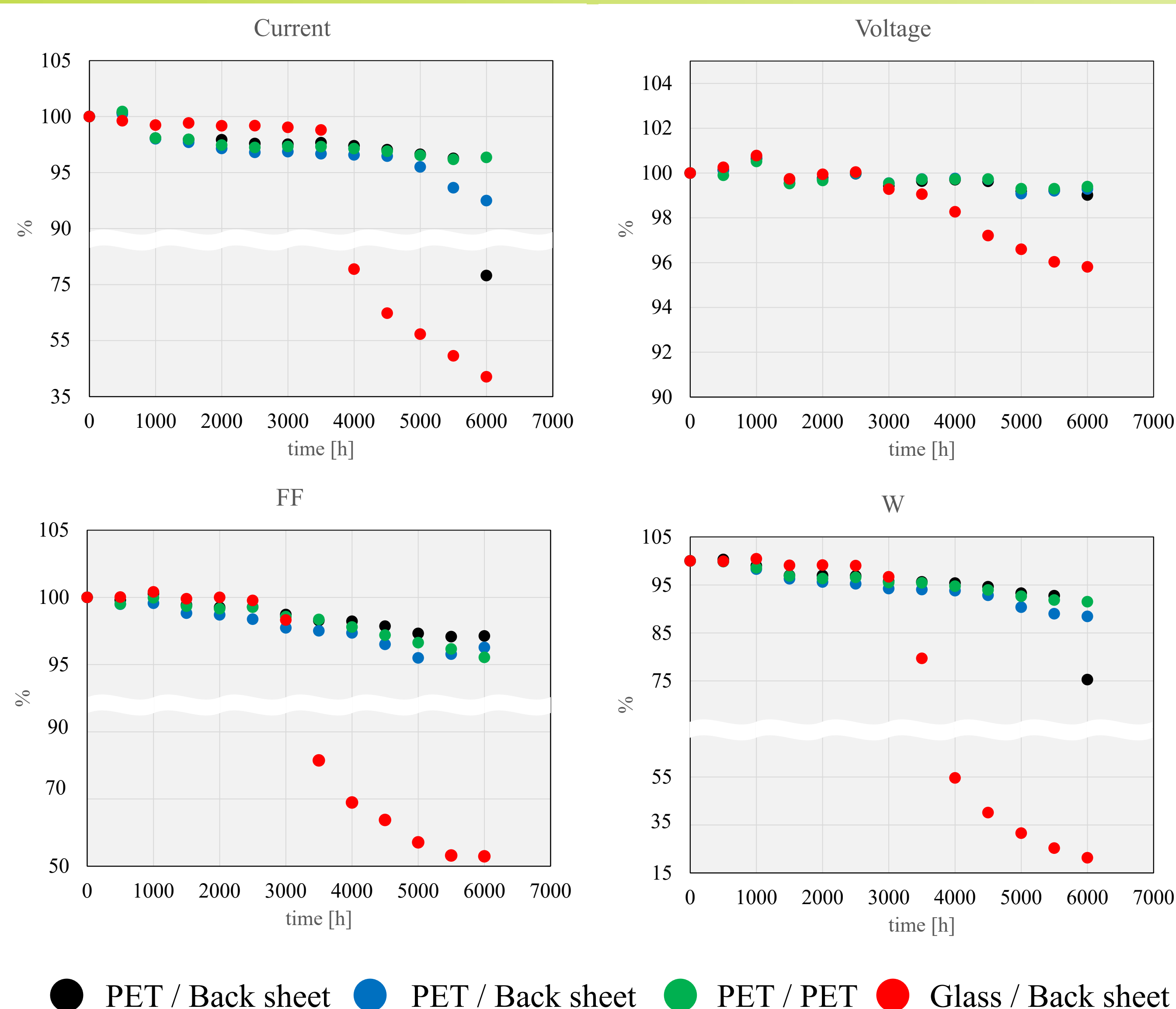
- 市販品(156mm角)の結晶Si太陽電池を使用して、1枚モジュールを作製。基板厚は約180um
- 半田付けによるリード線の形成
- フィルム材料を使用した湾曲可能なモジュールとガラス板を使用した比較用のモジュールを作製
- 加速劣化試験として高温高湿条件(温度85°C湿度85%)の試験槽に長時間保持し続けた。モジュール特性を500時間ごとに測定し、特性の変化を評価した。



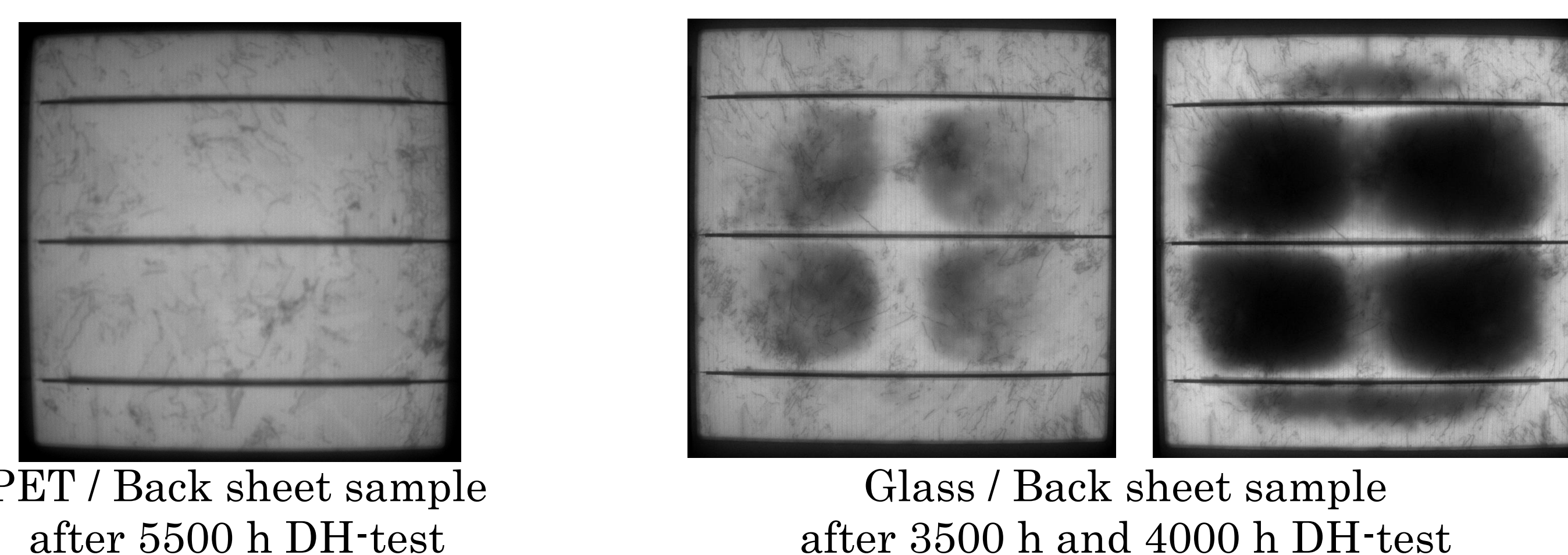
加速劣化試験用サンプルの構造模式図及び上面からの写真

結果と考察

- ガラスとバックシートを組み合わせたサンプル(Glass / Back sheet sample)では加速劣化試験の試験時間が3000時間を超えたところでFFの大きな低下が確認された。FFが大きく低下した後のELイメージではサンプルの中心部にコントラストの暗部の発生が確認された。一方で、PETフィルムとバックシートを組み合わせたサンプル(PET / Back sheet sample)、受光面および裏面にPETフィルムを用いた組み合わせ(PET / PET sample)では電流の小さな低下が確認されたが、ELイメージには暗部の発生は確認されなかった。
- Glass / Back sheet sampleで確認されたELイメージの暗部の分布はモジュール内部の水分および酢酸の発生分布のシミュレーション結果[1]とよく一致していた。この結果は酢酸起因の電極の腐食劣化が発生していることを示している。
- PETフィルムを用いたサンプルではFFの劣化はガラスを用いたサンプルに比べて小さく、ELイメージでの暗部の発生が確認されなかったことから、加速劣化試験中に発生する酢酸はPETフィルムを通過して外部に放出されている可能性を示している。
- 高温高湿度の状況下においてはPETフィルムを用いたモジュールは高い信頼性を示すことが明らかになった。



各サンプルの太陽電池特性と加速劣化試験時間の関係



ELイメージング評価結果

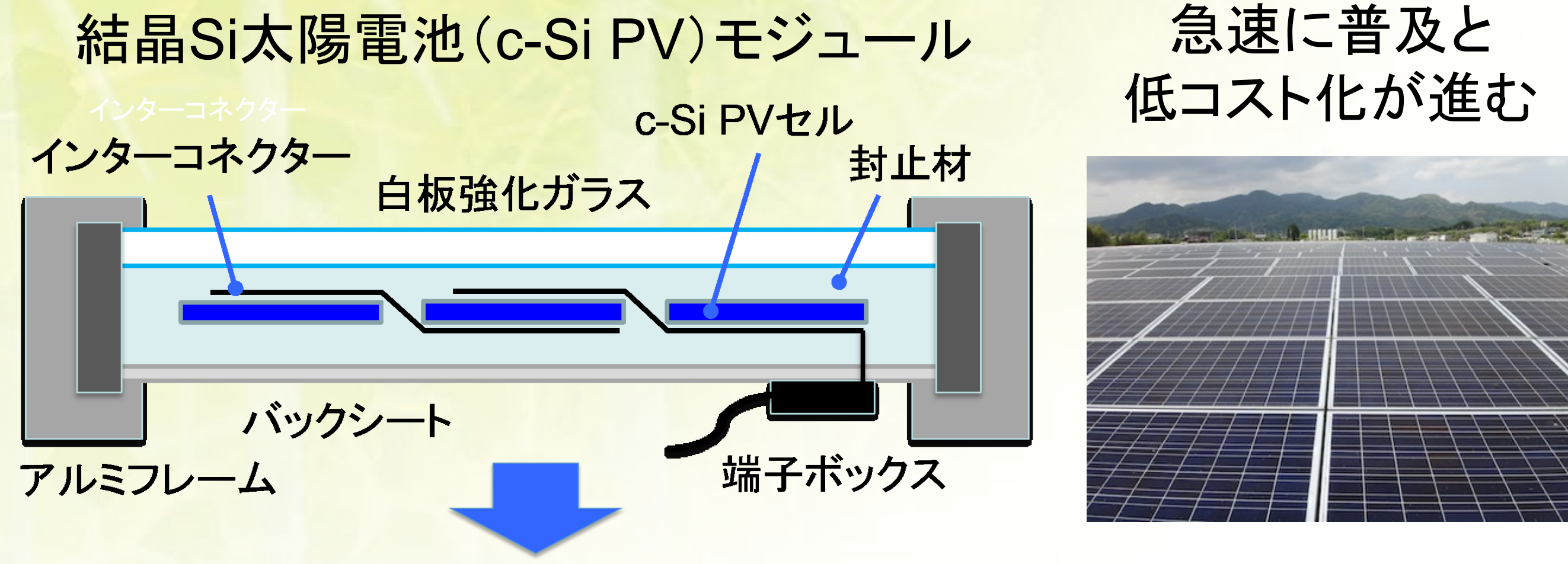
[1] J. Irikawa, et al., Proceeding of PVRW 2019

結晶Si太陽電池モジュールの化学劣化： Siセルによる違い

原 浩二郎

産業技術総合研究所 センシングシステム研究センター

研究の目的

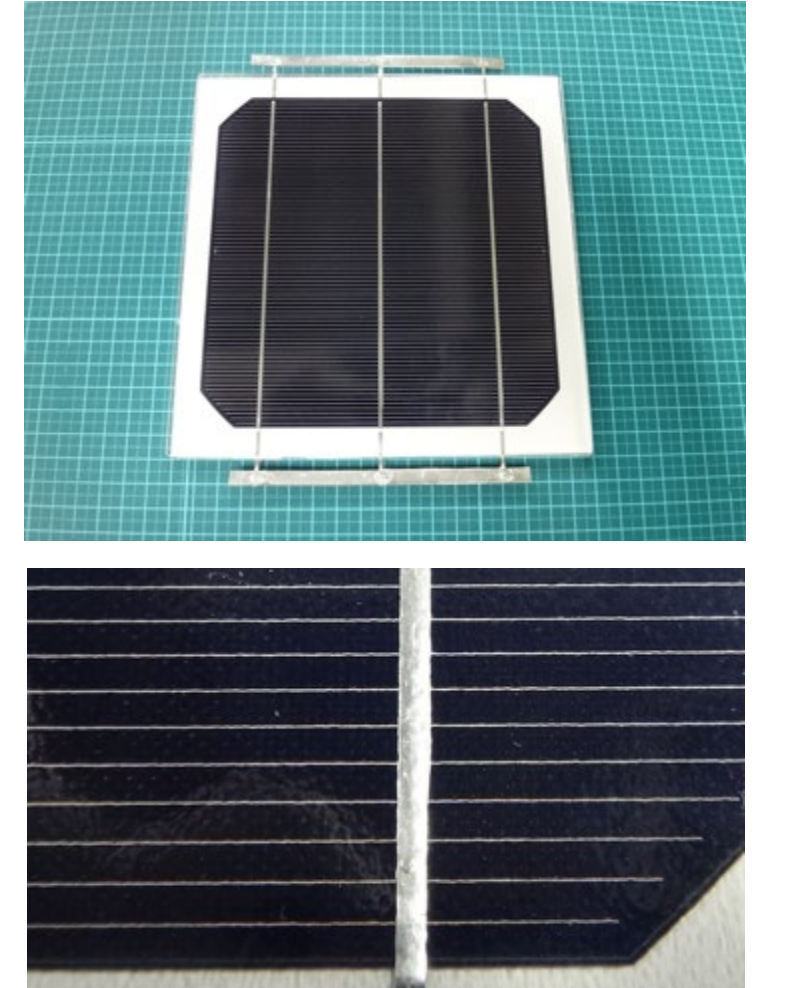


- ・ 最近のc-Si PVモジュールの長期信頼性を明らかにする
- ・ さらなる高信頼性モジュール(寿命40年以上)の実現

実験

高温高湿試験によるc-Si PVモジュールの化学劣化をSiセルを変えて比較・評価

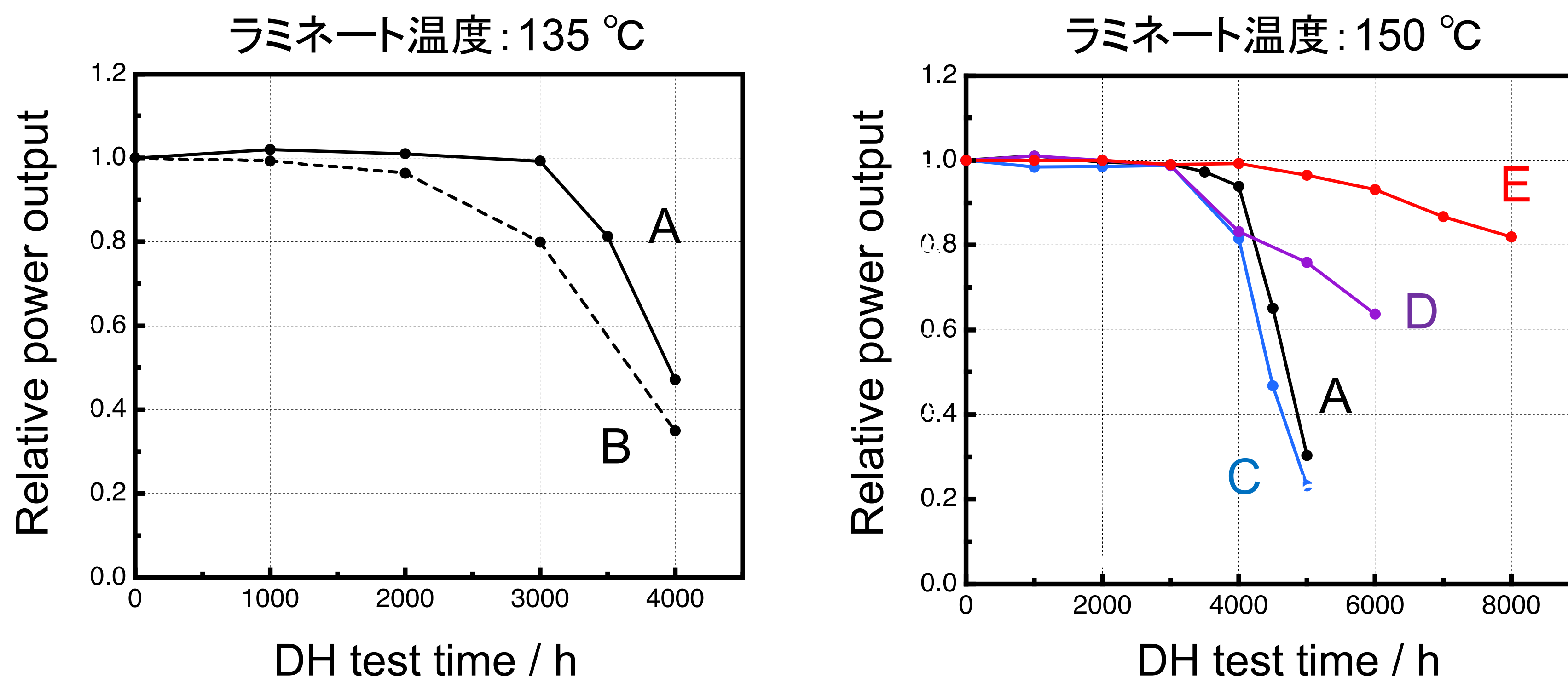
- ・ 試験モジュール(単セルモジュール)
 - ・ 5種類のSiセル(EVA封止材、他部材は同じ)
 - ・ ラミネート温度: 135 °C、あるいは150 °C
- ・ 高温高湿(Damp-heat、DH)試験
 - 温度85 °C+湿度85%、~8000時間
- ・ 評価・分析方法
 - ・ PV特性(I-V特性、EL特性)
 - ・ Ag電極の断面SEM図、電子プローブマイクロ分析(EPMA)



Siセル上のAgフィンガー電極

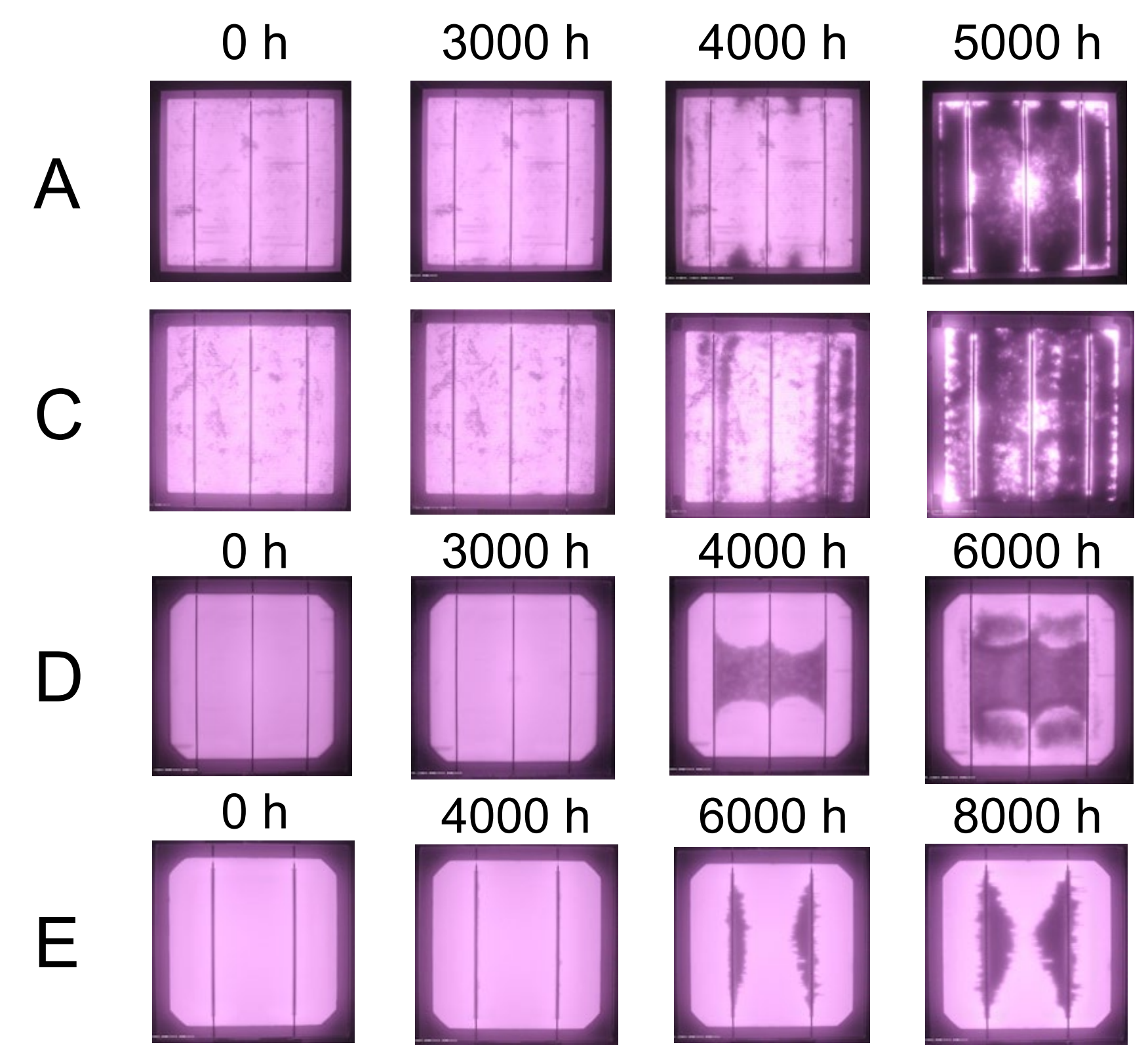
結果と考察

DH試験によるモジュールの出力変化 (Siセルの比較)

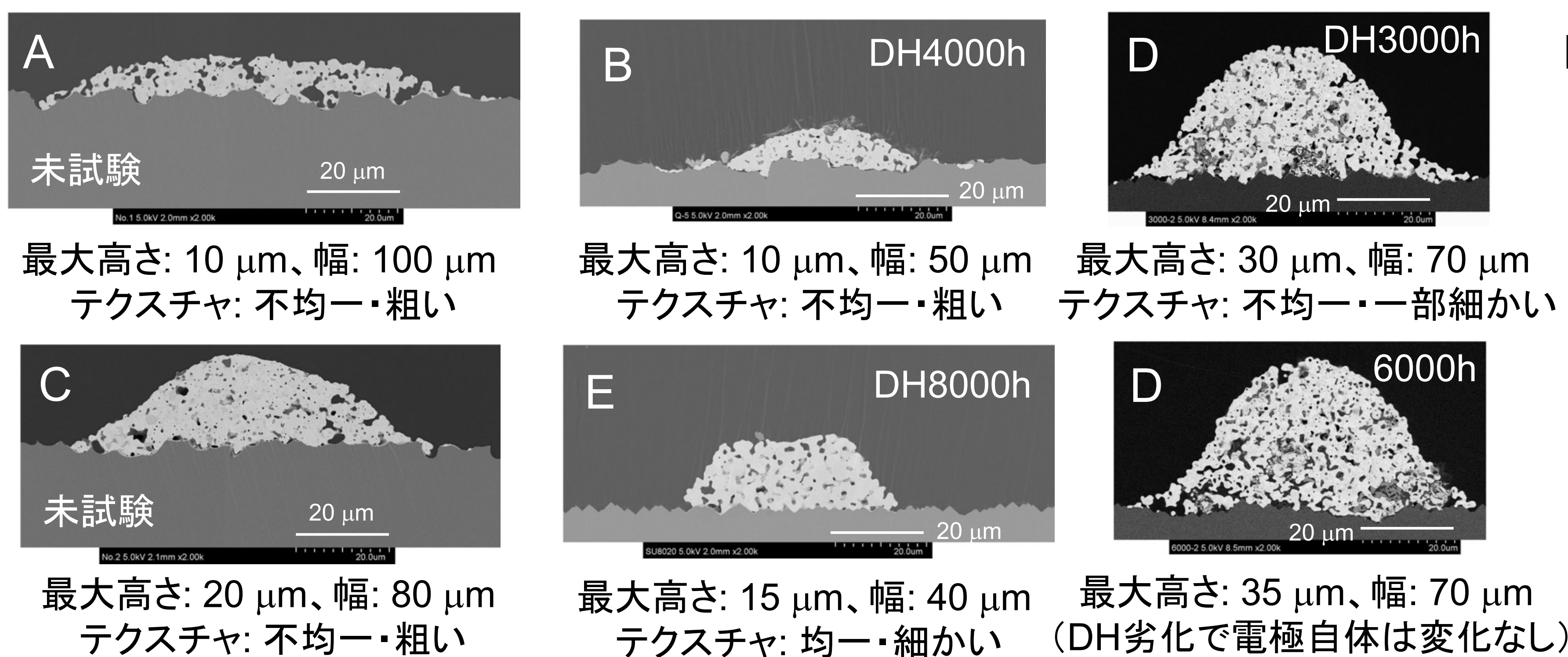


DH劣化の傾向はSiセルによって異なる (ラミネート温度でも)

DH試験によるEL特性の変化

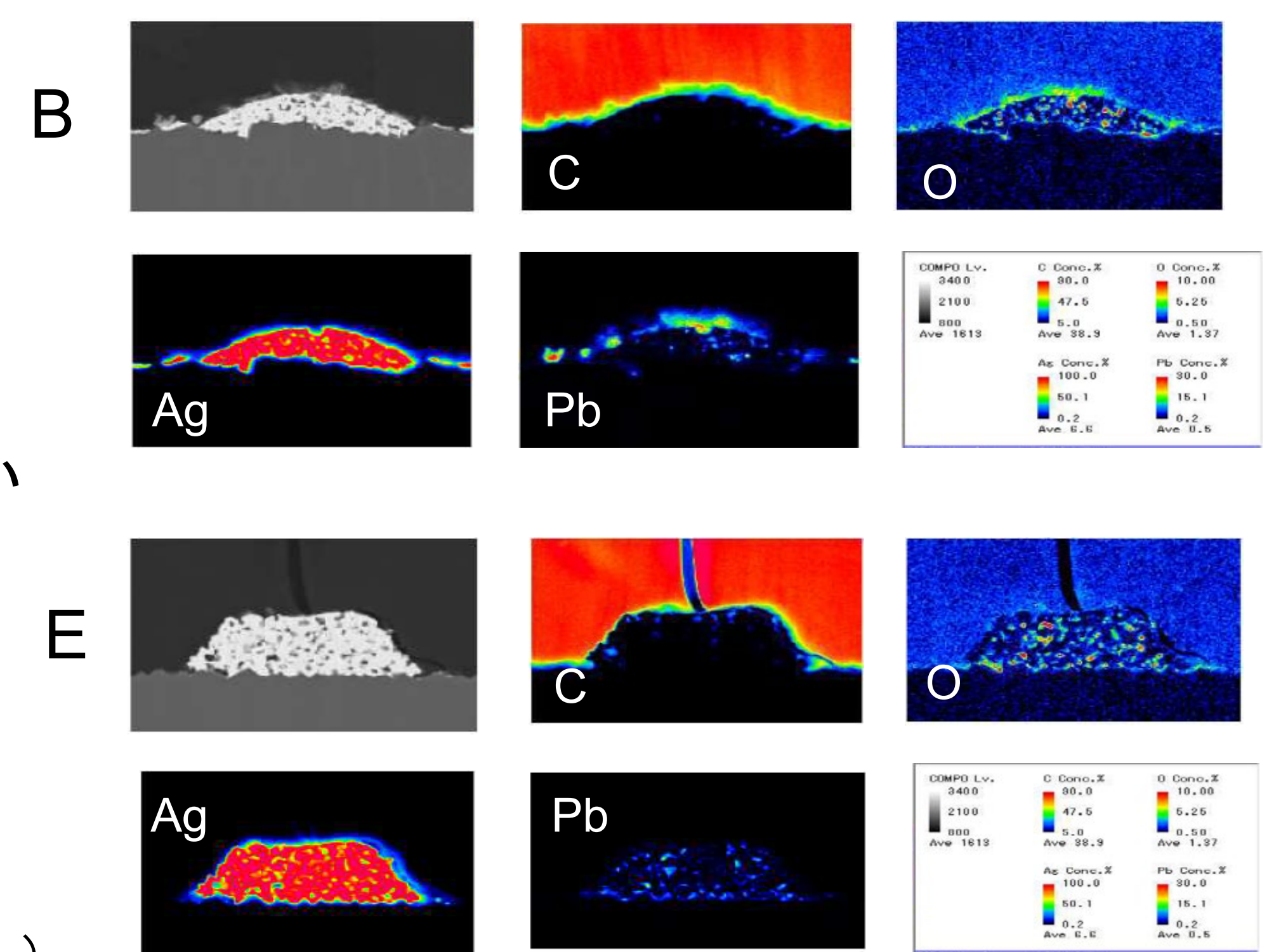


Siセル上のAgフィンガー電極の断面SEM図 (未試験とDH試験後)



劣化支配要因 → Ag電極の断面構造 (高さと同幅)、Si表面テクスチャ

EPMAによる元素分析 (SiセルBとE)



結論・まとめ

- ・ DH試験によるc-Si PVモジュールの化学劣化メカニズム
 - ・ 酢酸(EVA封止材の加水分解により生成)によりAgフィンガー電極が腐食(ただし、電極自体は大きな変化なし)
 - ・ Ag電極とSiセル界面のガラス成分(PbOなど)が酢酸と反応か
 - ・ DH劣化を支配する要因
 - ・ Ag電極の断面構造(高さと同幅) → 腐食の影響の受けやすさ
 - ・ Si表面テクスチャの構造 → 酢酸の浸透や反応のしやすさ?
 - ・ ラミネート温度 → 残留する架橋剤が酢酸生成を促進か?
- Siセルの低コスト化などは長期信頼性を損なう可能性あり

今後の予定

屋外曝露モジュールにおいても同様の劣化の違いを確認。DH試験との相関を含めて、長期屋外曝露条件での劣化を評価する

参考文献

1. K. Hara and Y. Chiba, Durable crystalline silicon photovoltaic modules based on breathable structure, Jpn. J. Appl. Phys., **60**, 027001 (2021).
2. K. Hara, Chemical degradation of crystalline silicon photovoltaic modules by Damp-heat tests, Bull. Chem. Soc. Jpn., In preparation.

屋外曝露された高効率結晶Si系太陽電池モジュールの 屋内測定結果の年次推移(III)

千葉恭男¹、佐藤梨都子¹、崔誠佑¹、秋富稔¹、石井徹之²、増田淳³
 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電力中央研究所、3新潟大学

研究の目的

我々は、産総研九州センター(佐賀県鳥栖市)にて、系統連系された太陽電池アレイの実発電量の評価を実施してきた。また、ソーラーシミュレータを用いた屋内での標準試験条件(STC)における測定などによりモジュールの劣化率の評価を行ってきた[1-8]。2012年から曝露を開始したヘテロ接合型単結晶Si太陽電池(SHJ)やバックコンタクト型単結晶Si太陽電池(IBC)に加え、2016年には裏面不動態型単結晶Si太陽電池(PERC)やn型単結晶Si太陽電池(n-type)の曝露を開始し、2019年、および2020年にはSHJとPERCをそれぞれ追加導入してきた。今回は、2021年にLight- and elevated temperature-induced degradation(LETID)が生じている可能性が示唆されたPERCの屋内測定(出力)結果の年次推移を報告する。

実験

- 表1は、それぞれの対象モジュールを設置時期の早い順に示している。
 ・PERCは、W-1C(5枚)、W-1D(5枚)、M-3E(5枚)、M-3F(5枚)を評価した。
- 対象のモジュールを取り外し、洗浄後、ソーラーシミュレータ(日清紡メカトロニクス社製 PVS1222i-L)を用いて標準試験条件(1 kW/m²、AM1.5G、25°C)で特性を評価した。
- 対象のモジュールは設置する前に屋内測定を実施している。今回は、その値(初期値)で規格化した結果を示す。

表1. 九州センターに設置しているPERCモジュール一覧(それぞれの設置時期の早い順に掲載)

Location	Kinds	Total P _{max} (kW)	Array Configuration	Installed Mon/Year
W-1C	PERC mono-Si	1.48	5S x 1P x 1A	06/2016
W-1D	PERC mono-Si	1.45	5S x 1P x 1A	06/2016
M-3E	PERC mono-Si	1.25	5S x 1P x 1A	02/2020
M-3F	PERC mono-Si	1.55	5S x 1P x 1A	02/2020

結果

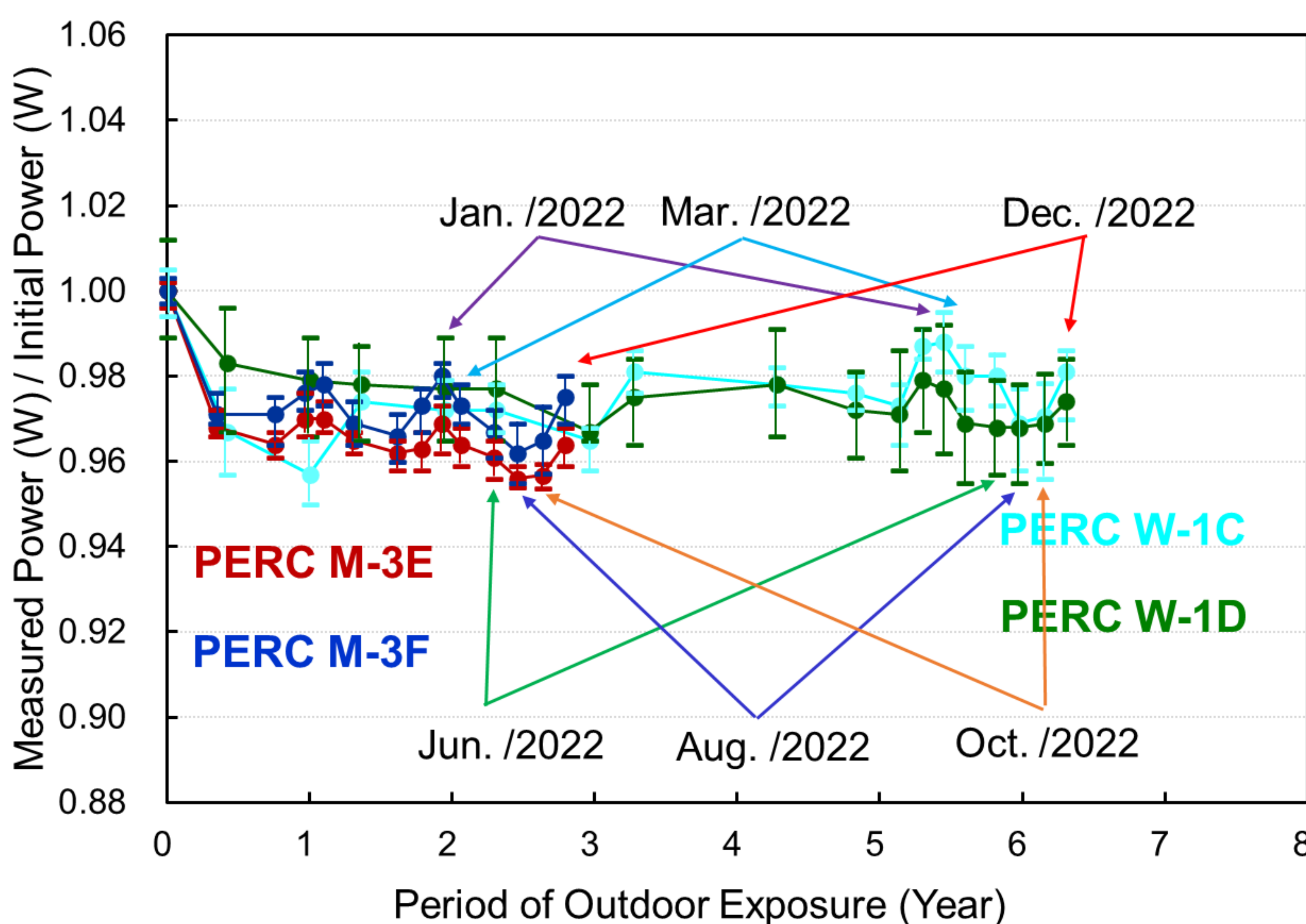


図1 PERCの屋内測定結果の年次推移

(図1内に示された年月は、屋内測定を実施した時期を示す)

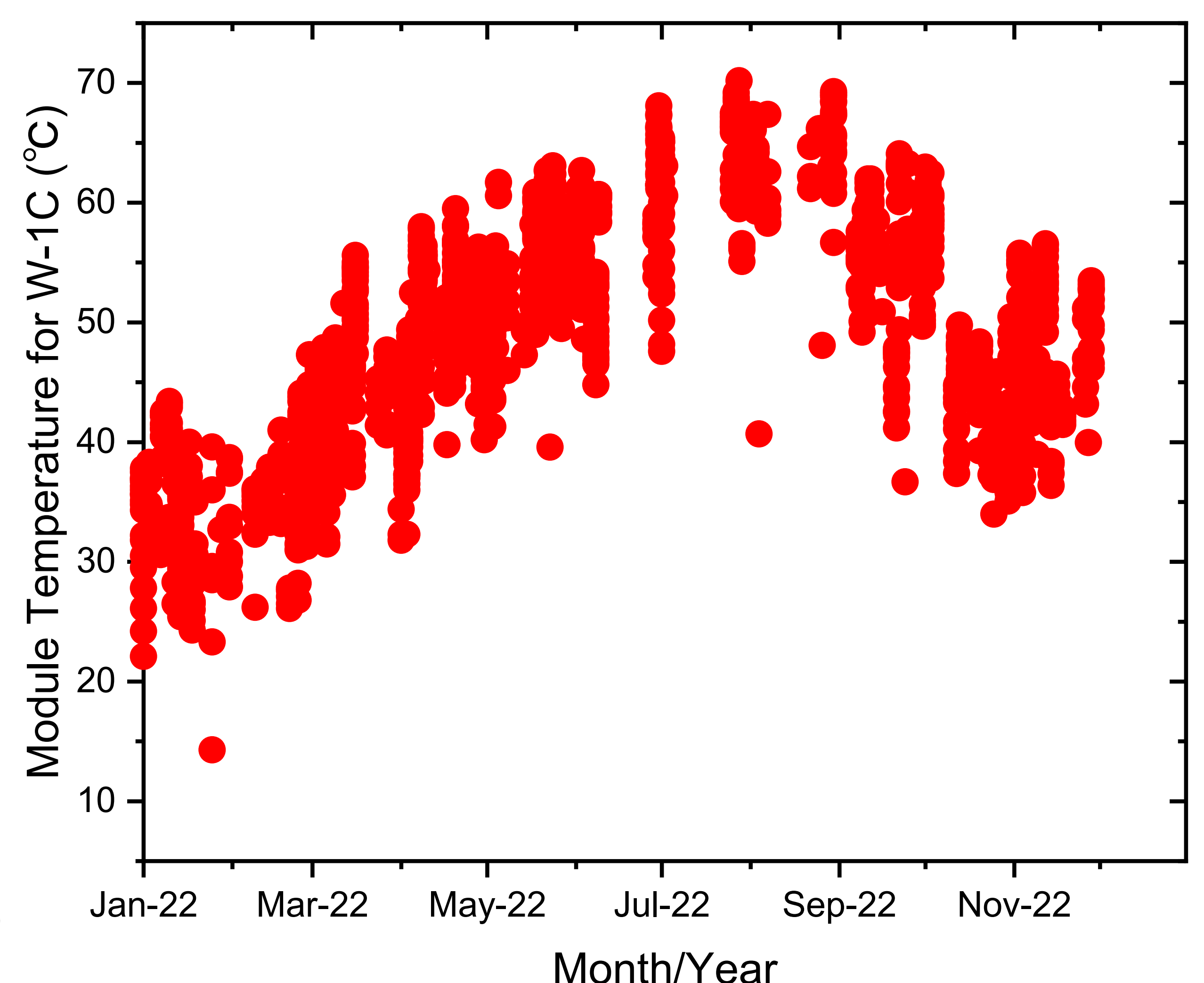


図2 2022年11月30日までのPERC(W-1C)モジュール温度の変化
(日射量が800~1000 W/m²のデータを抽出)

考察・まとめ

PERCモジュール

- 2022年は、計6回の屋内測定を実施。
- その結果、夏季に特性が低下し、冬季に特性が回復することが見られ、2021年の特性の変化の再現性を確認[9]。
- モジュール温度が50°C以上になるときにLETIDが生じる[10, 11]ことが報告されていることを鑑みると、2022年の夏の屋内測定時にもLETIDが生じている可能性を示唆。
- 2022年のW-1Cのモジュール温度の変化を見ると、3月や11月にも50°C以上となる日があることを確認。
 ⇒3月の屋内測定では特性の低下を確認しているが、11月は屋内測定をしていないため、発電量データとの比較を行っていく。
 12月の屋内測定での特性の回復は、モジュール温度が50°Cよりも低下したことを反映していると考えている。
- 今後、屋内測定を継続し、発電量データとの比較を実施していく。

参考文献

- [1] T. Ishii and A. Masuda, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 25, 953 (2017).
- [2] T. Ishii et al., Japanese Journal of Applied Physics 56, 08MD05 (2017).
- [3] S. Choi et al., Japanese Journal of Applied Physics 56, 08MD06 (2017).
- [4] S. Choi et al., Thin Solid Films 661, 116 (2018).
- [5] Y. Chiba et al., Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RG04 (2018).
- [6] R. Sato et al., Japanese Journal of Applied Physics 58, 052001 (2019).
- [7] R. Sato et al., Japanese Journal of Applied Physics 58, 106510 (2019).
- [8] T. Ishii et al., Progress in Photovoltaics: Research and Applications 28, 1322 (2020).
- [9] Y. Chiba et al., Submitted to Japanese Journal of Applied Physics.
- [10] F. Kersten et al., Solar Energy Materials & Solar Cells 142, 83 (2015).
- [11] E. Fokuhl et al., EPJ Photovoltaics 12, 9 (2021).

謝辞

- 本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により行った。
- 立命館大学総合科学技術研究機構の菱川善博教授、並びに産業技術総合研究所の吉田正裕博士および太野垣健博士と議論をさせていただきました。各位に感謝いたします。

CIS系太陽電池材料で高効率な水素生成に成功

石塚尚吾¹、岡本陸²、池田茂²

¹産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門、²甲南大学

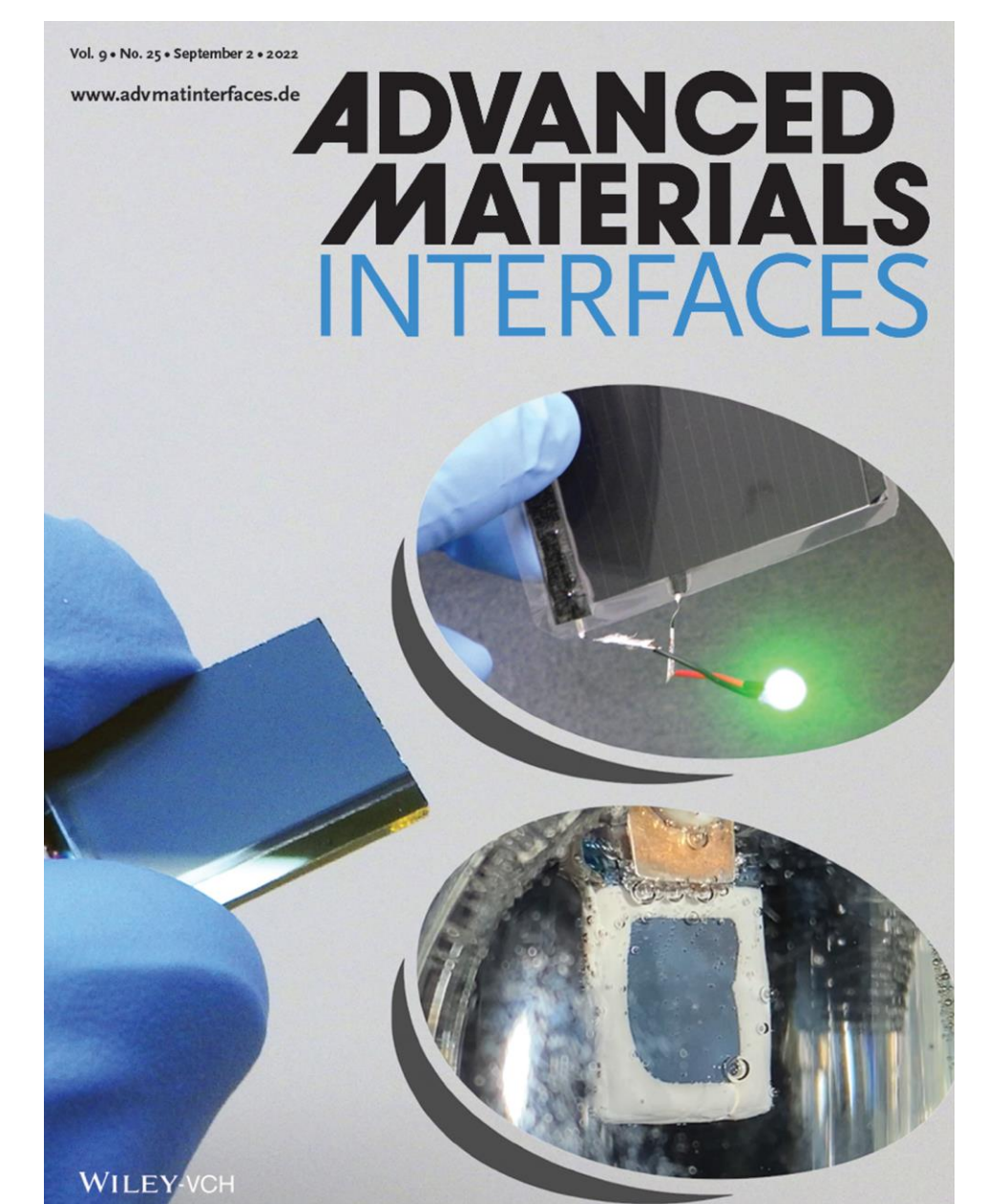
はじめに

CuInSe₂ (CIS) 系化合物によるエネルギー変換技術

再生可能エネルギーの普及への期待が高まる現在、特に太陽光発電と水素エネルギーは注目されている。近年、主流である結晶シリコン系太陽電池とは異なるさまざまな太陽電池が提案されており、中でもCIS系太陽電池は、高い光電変換効率と優れた長期信頼性などの特長で知られている。CIS系材料は、薄膜材料という特長を活かして、エネルギー変換デバイスの軽量化や柔軟性を持たせることなども可能である。禁制帯幅の広いワイドギャップCIS系材料は、安価な次世代タンデム型太陽電池の実現を目指す上で、波長の短い青色光を吸収するトップセル材料として、特に注目されている。

一方、光電気化学的手法による実用的な水分解水素生成では、実現に必要な性能、安定性、コストなどの条件を満たす理想的な光電極材料の開発が課題である。

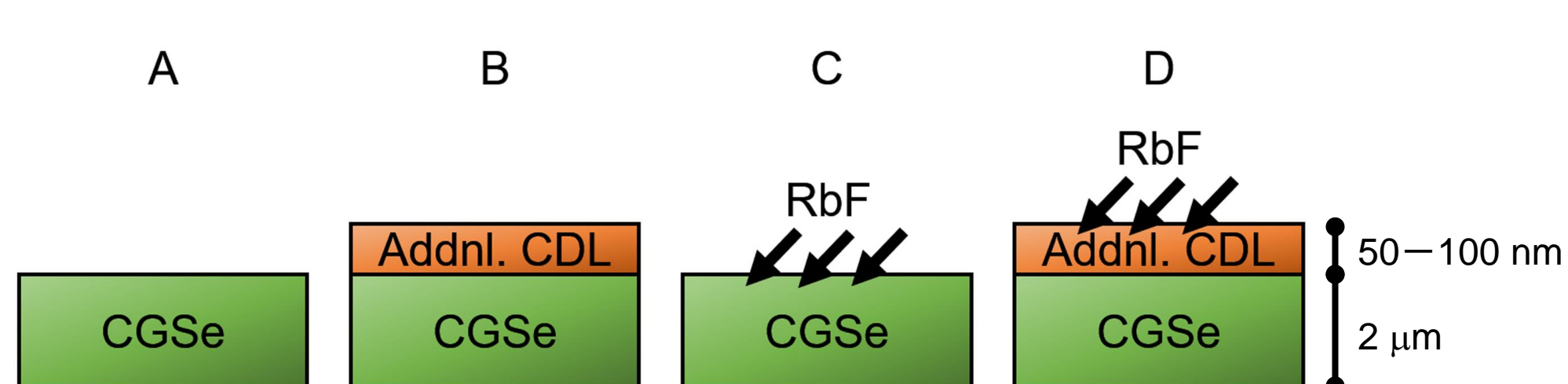
ここでは、禁制帯幅1.7 eVのCuGaSe₂薄膜を用いた太陽電池と光電極という2つの異なるエネルギー変換デバイスにおいてそれぞれの性能を向上させた最近の研究を紹介する。



Enhanced Performance of Ternary CuGaSe₂ Thin-Film Photovoltaic Solar Cells and Photoelectrochemical Water Splitting Hydrogen Evolution with Modified p-n Heterointerfaces <https://doi.org/10.1002/admi.202201266>
S. Ishizuka, R. Okamoto, S. Ikeda
Adv. Mater. Interfaces 9, 2201266 (2022).

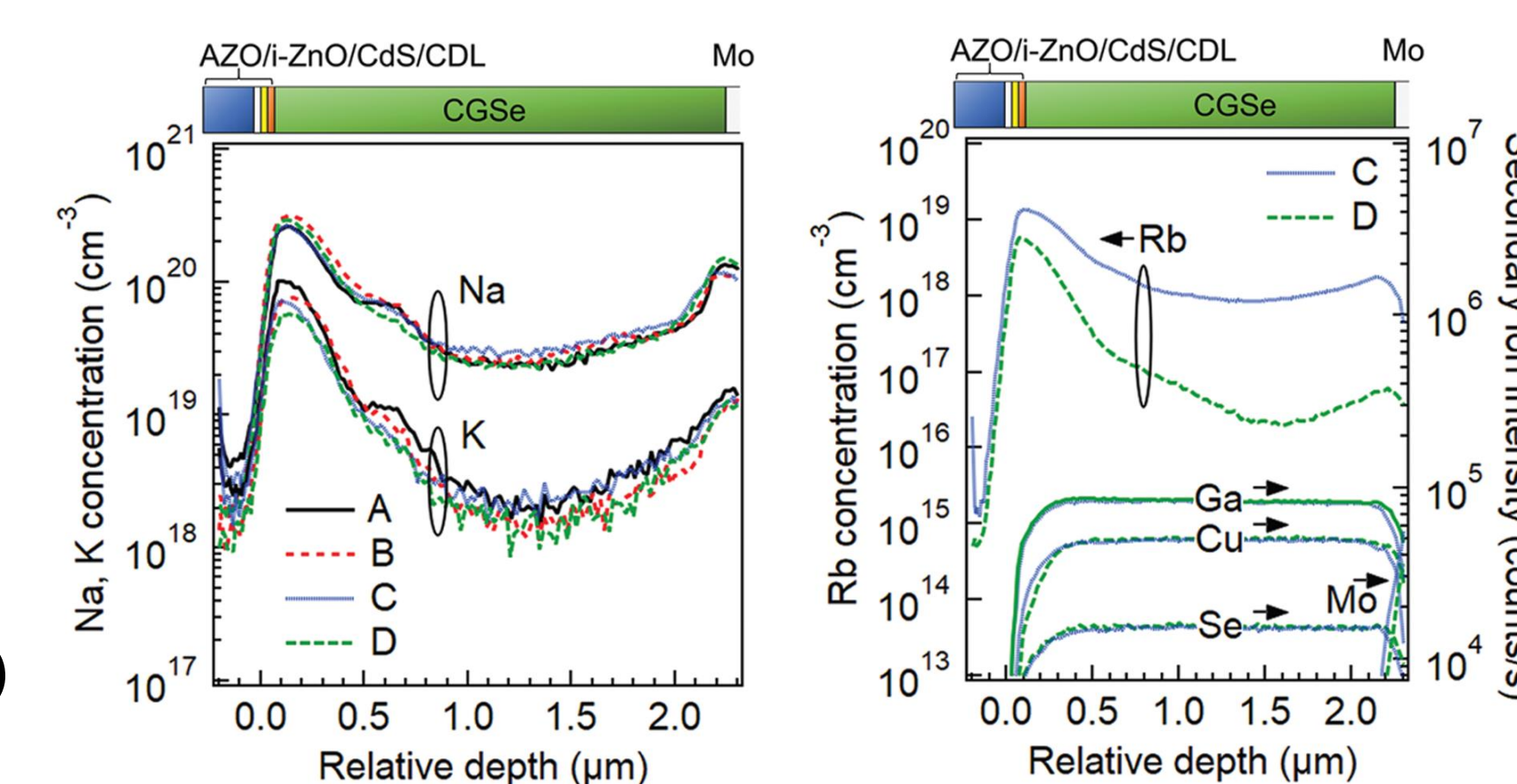
実験結果

4種類のCuGaSe₂薄膜を作製し検証

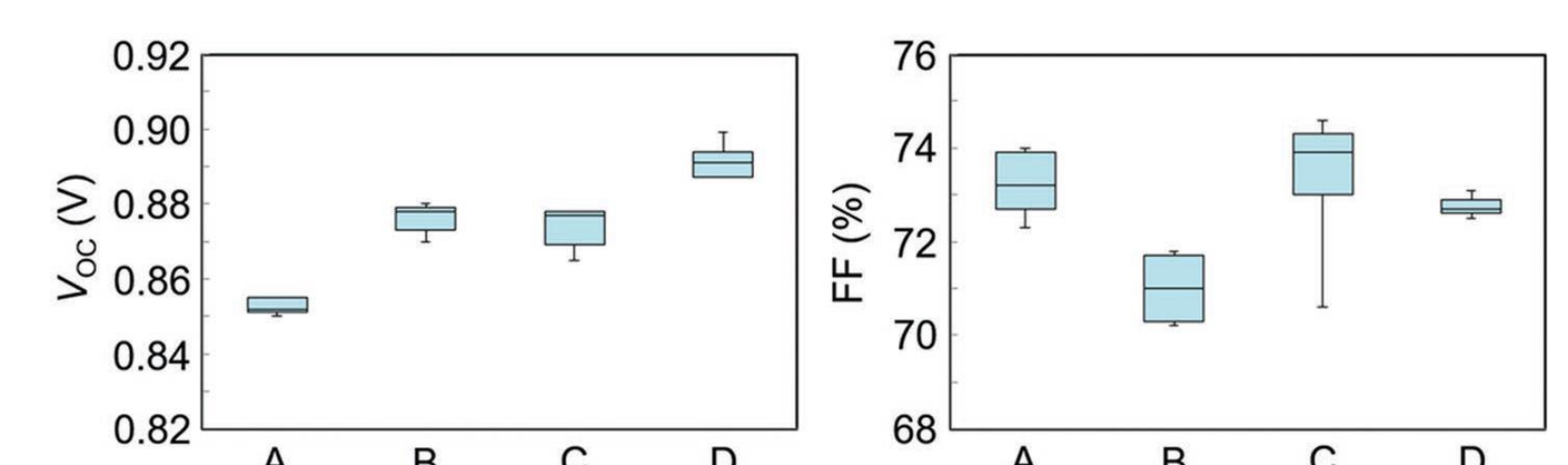


CGSe: CuGaSe₂
Addnl. CDL: Additional Cu-deficient layer (銅欠乏層)
RbF: フッ化ルビジウム(表面部分製膜中に添加)^[1]

CuGaSe₂薄膜中のアルカリ金属分布

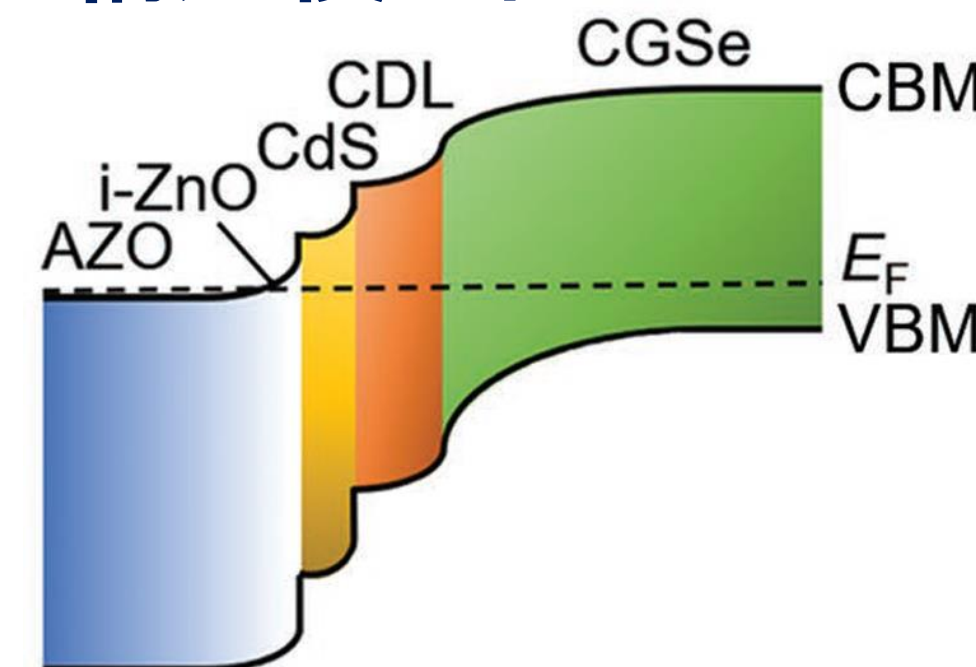


試料A,B,C,Dの太陽電池における開放電圧(V_{OC})と曲線因子(FF)比較

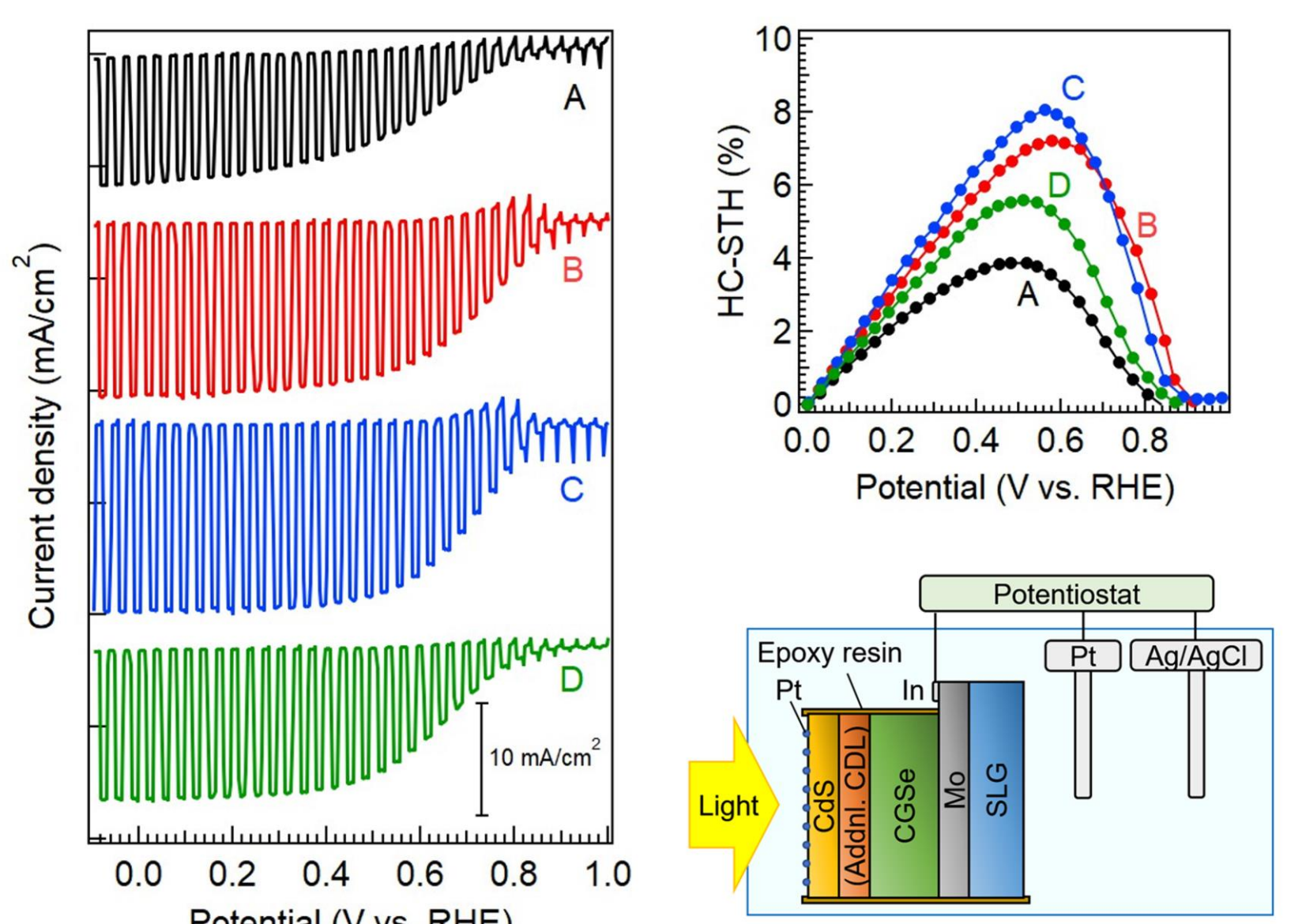


表面銅欠乏層はV_{OC}の向上に、表面アルカリ金属(Rb)添加はFFの向上にそれぞれ寄与

CuGaSe₂太陽電池のエネルギーバンド構造模式図



太陽電池と同様の表面改質により水分解水素生成能を大幅改善

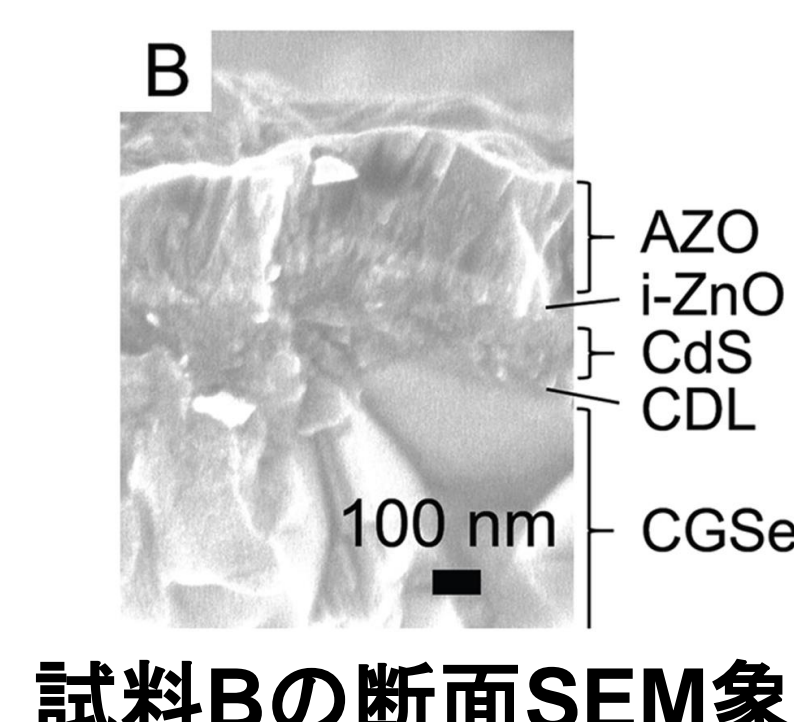


Sample	Maximum HC-STH [%]	Current density [mA cm ⁻² @ 0 V vs RHE]	Current onset [V vs RHE]	Area [cm ²]
A	3.88	11.4	0.838	0.661
B	7.22	15.4	0.913	0.667
C	8.06	16.7	0.862	0.681
D	5.60	13.4	0.883	0.734

CuGaSe₂光電極でHC-STH ~8%、オンセットポテンシャル>0.9Vを達成

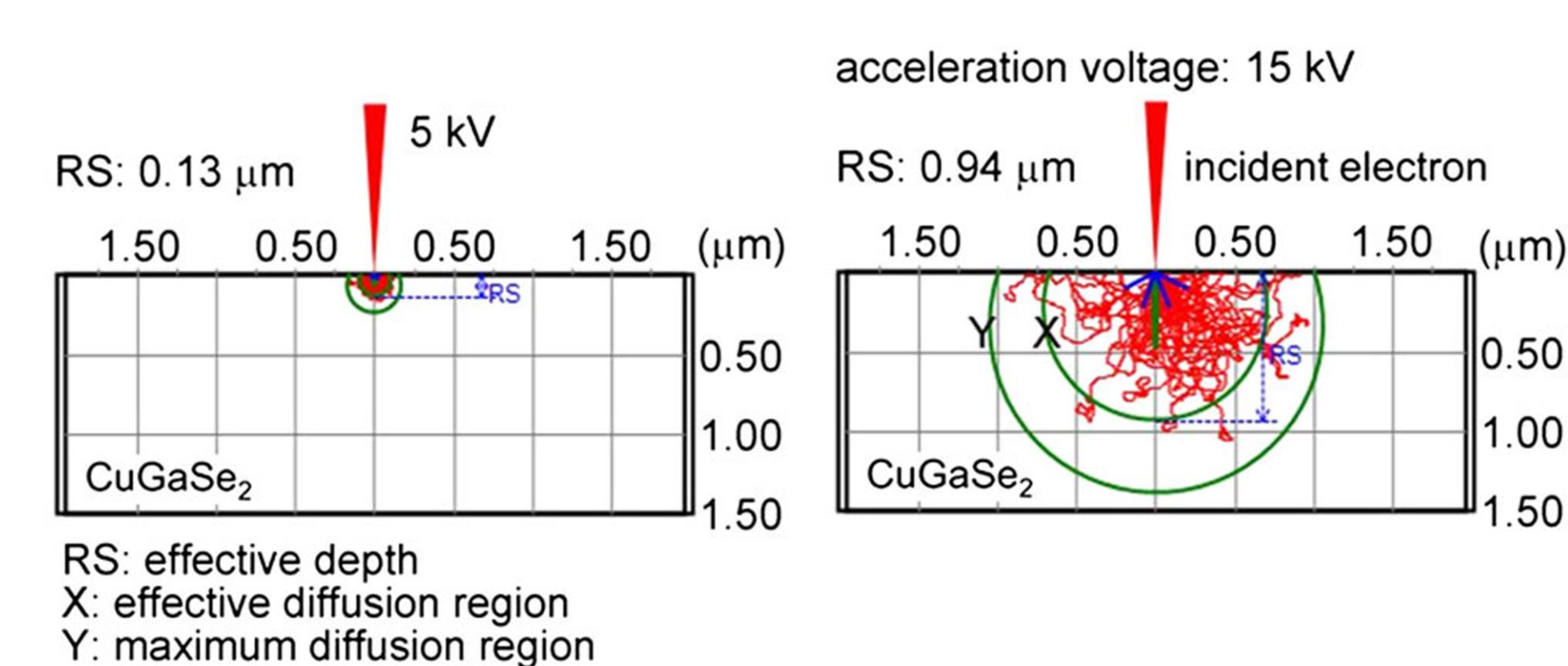
Table 1 | [Cu]/[Ga] composition ratios in CGSe A, B, C, and D films.

CGSe	[Cu]/[Ga] (V _{acc} ~ 5 kV)	[Cu]/[Ga] (V _{acc} ~ 15 kV)
A	0.64	0.87
B	0.35	0.74
C	0.65	0.87
D	0.36	0.75



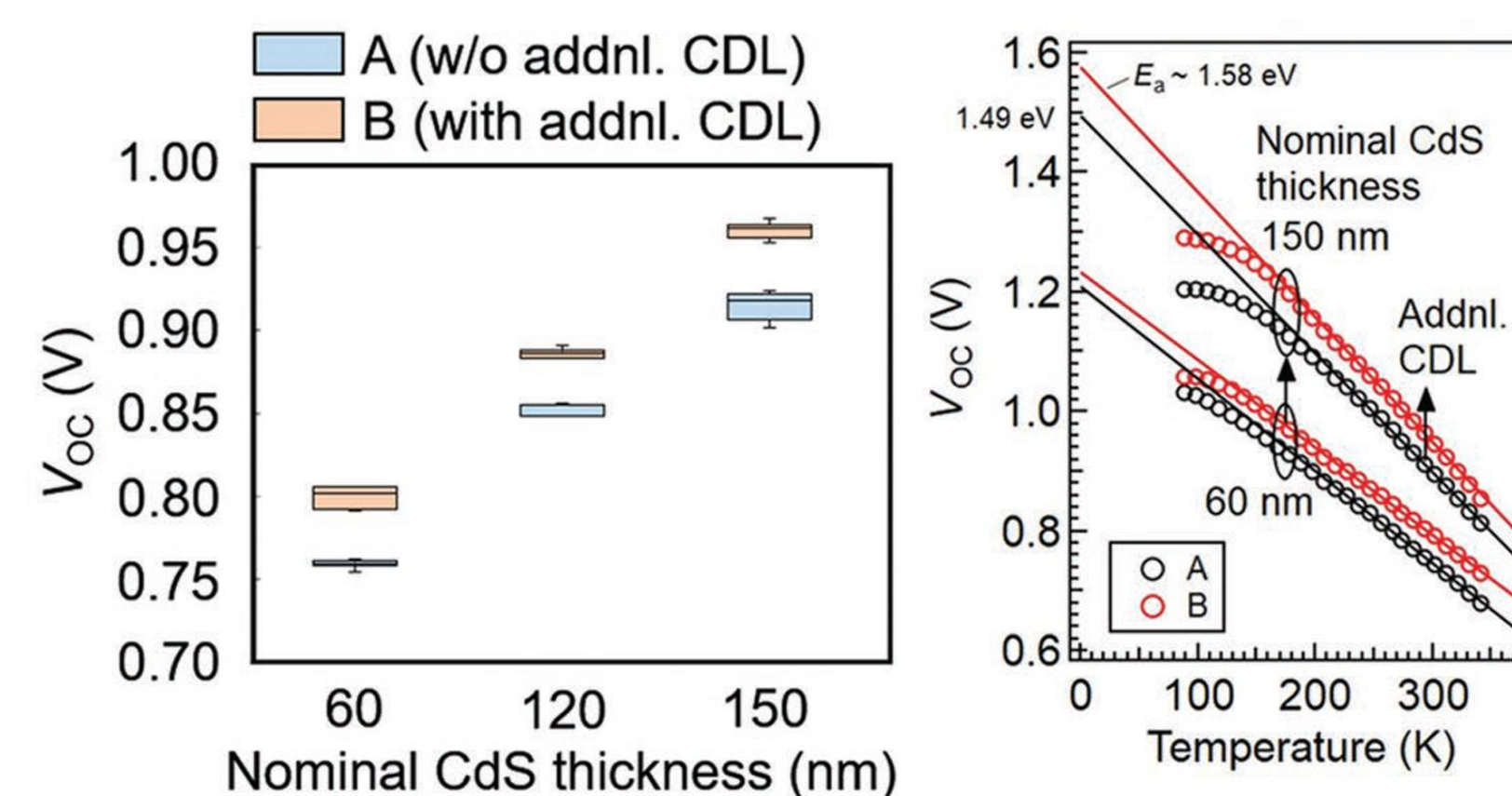
試料Bの断面SEM象

試料A,B,C,Dの表面付近組成(EPMA測定)



EPMA測定時における電子線プローブ侵入深さの目安^[2]

CDL、CdS層による表面改質とV_{OC}変化



n-CdSとCDL膜厚制御で界面再結合抑制 ⇒ V_{OC}改善を実現

まとめ

- ✓ 広禁制帯幅(1.7 eV) CuGaSe₂太陽電池における界面再結合がデバイス性能に与える影響は大きく、光吸収層の表面改質により改善の余地がある
- ✓ 光吸収層表面の銅欠乏層(CDL)やCdSバッファ層の制御により観察された開放電圧や曲線因子の改善がその根拠となる
- ✓ 界面だけでなく、CuGaSe₂薄膜バルク内の欠陥制御・再結合抑制技術の改善で、さらなるデバイス性能向上も期待できる

謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費(19H02822、19K05282、20H05120)およびNEDO「クリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業」の支援を受け実施されました。

参考文献

- [1] S. Ishizuka, R. Okamoto, S. Ikeda, *Advanced Materials Interfaces* **9**, 2201266 (2022). <https://doi.org/10.1002/admi.202201266>
- [2] S. Ishizuka, A. Yamada, P. J. Fons, H. Shibata, S. Niki, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **22**, 821 (2014). <https://doi.org/10.1002/pip.2464>

ポリイミド基板上フレキシブルCIGS太陽電池におけるMo裏面電極の歪制御

上川 由紀子¹、増田 泰造²、西永 慈郎¹、石塚 尚吾¹
 1 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門、
 2 トヨタ自動車株式会社

研究背景・目的

【背景】

太陽電池の設置量が増えるにつれて¹、軽量性やフレキシブル性を有する太陽電池の重要性も増してきております²。フレキシブル太陽電池は曲面にも適しております。Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)系の薄膜太陽電池は、フレキシブル・軽量太陽電池としても期待されており²⁻⁴、ポリイミド基板上のCIGS太陽電池では22.2%の効率が達成されています⁵。近年、フレキシブルセラミック基板上のミニモジュールでは、18.6%の効率が達成されています⁶。

【目的】

今回、軽量・フレキシブル性に優れたポリイミドフィルムを基板として利用する際に、考慮すべき歪制御に関して、特にMo裏面電極製膜条件の及ぼす影響について明らかにすることを目的としました。

実験⁷

CIGS層 製膜最高温度：400°C
 製膜方法：多元蒸着法(3段階法※)
 ※In,Ga,Se,照射、Cu,Se照射、In,Ga,Se照射の3段階

Mo層：インライン型DCスパッタ法
 Ar圧力(P_{Ar}): 0.1-1.0 Pa

使用基板：
 ポリイミド(PI)フィルム
 (Upilex® 50S,
 25S, 25SV5の3種類)⁸

膜厚：25もしくは50 μm

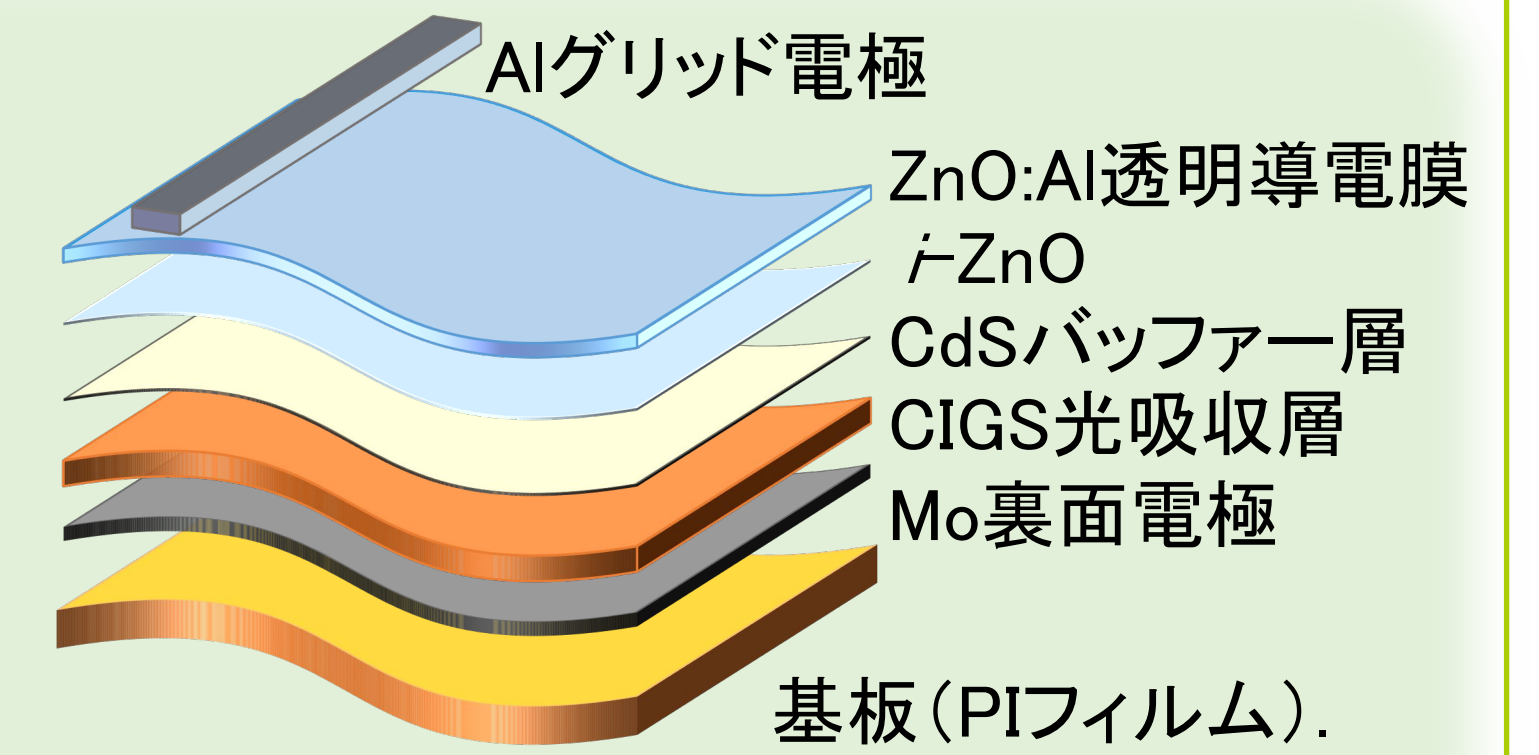


図1. フレキシブルCIGS太陽電池の概略図

結果と考察

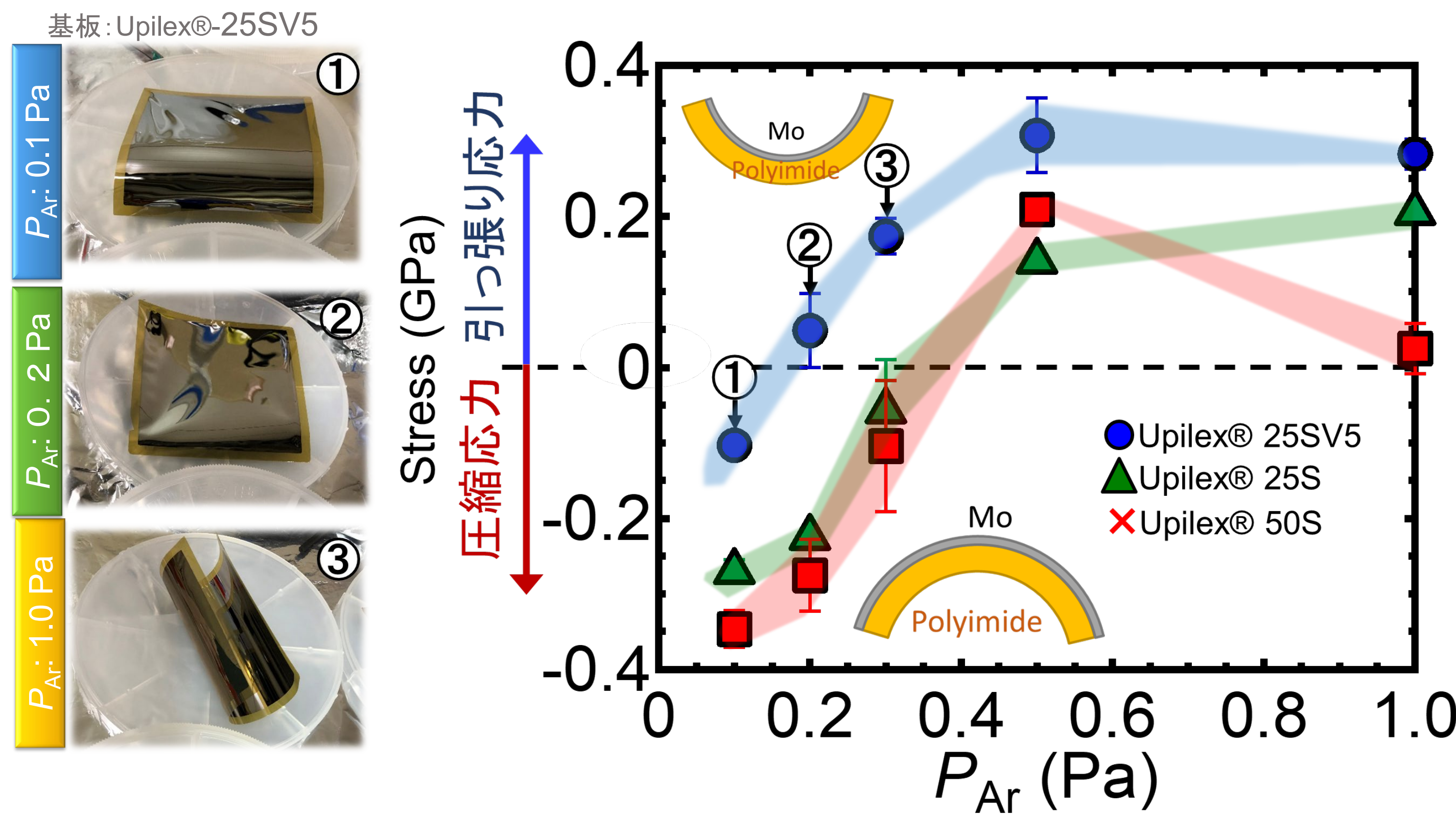


図2. (左)ポリイミドフィルム(Upilex®25SV5)上にMo裏面電極を製膜した後の写真
 (右)Stoneyの方程式により算出したMoにかかる応力

基板にフレキシブル基板を用いる場合には、上部層との間の熱膨張係数差に起因する「熱応力」の他、スパッタ膜の微細構造等に起因する「内部応力」⁹の制御も重要となります。図2(左)にポリイミドフィルム(Upilex®25SV5)上にMo裏面電極を製膜した後の写真を示します。Moのスパッタ製膜時のAr圧力(P_{Ar})を増加させた場合に、上に凸の湾曲から、下に凸の湾曲へと変化しました。

図2(右)にStoneyの方程式¹⁰より算出したMoにかかる応力を示します。SLG基板向け等に用いられる P_{Ar} :0.5Pa~の条件下では、引っ張り応力を示しました。反跳Arのエネルギーが低いため、Moの密度が低いことが(図3)要因と考えられます。一方、 P_{Ar} を0.1Pa程度にまで低下させた場合には、応力は圧縮に転じました。熱歪の影響が重畳されているため、フィルム種類により応力は上下しています。

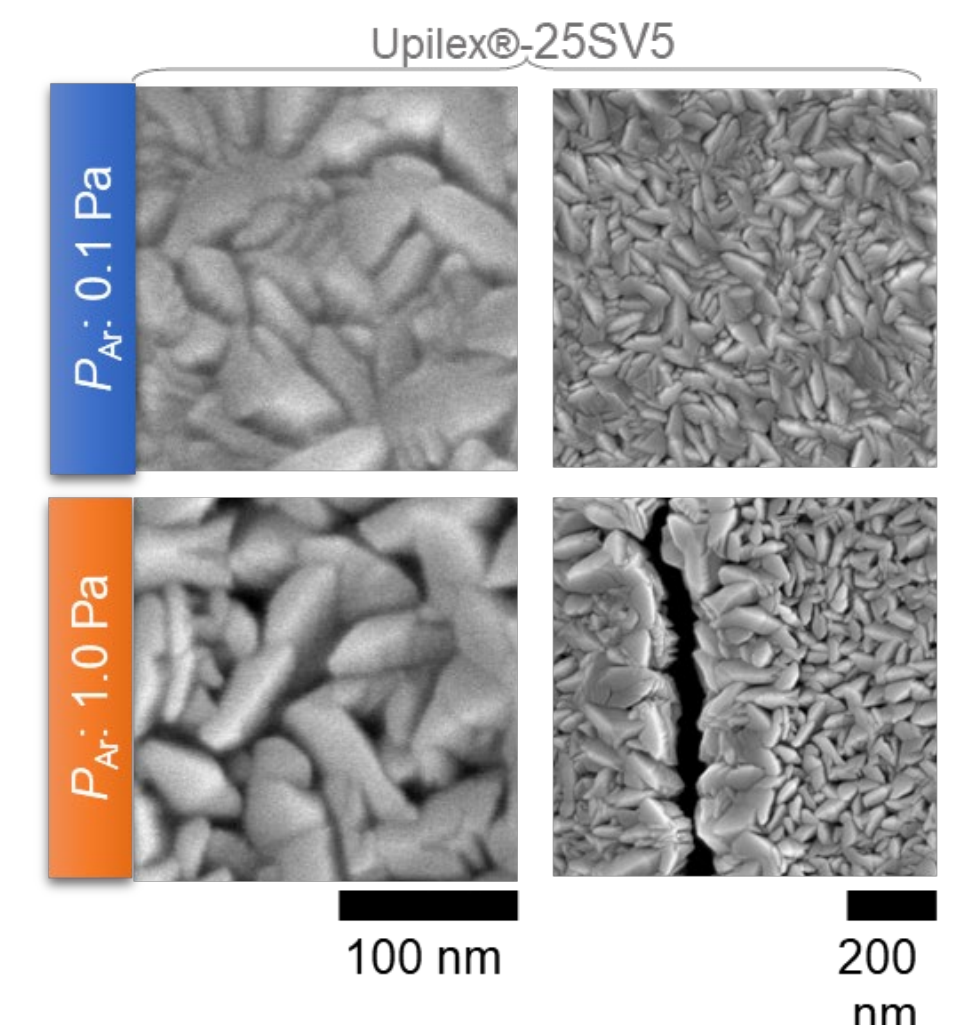


図3. 0.1および1.0Paの P_{Ar} で製膜したMoのSEM観察像

図4に異なる P_{Ar} で作製した太陽電池のFFの直列抵抗(R_s)依存性を示します。引っ張り応力が大きくなると、Mo膜にクラックが形成され(図3)、直列抵抗(R_s)が増加し、太陽電池特性(特にFF)を低下させる要因となります。

図5(左)に変換効率のアルカリ金属供給条件依存性を示します。MoとPIフィルムとの間にASTL(Alkali-silicate glass thin layers¹¹)を導入することで熱拡散にてアルカリ金属の供給を行いました。また、一部試料では、PDT(post deposition treatment¹²)による供給も併用しました。アルカリ金属の添加により変換効率が向上しました。ここで、Mo製膜中の P_{Ar} を変化させた場合には、Moの密度変化に伴い、基板側から供給するアルカリ金属(Na, K)の供給量も変化するため⁷、太陽電池の変換効率も多少変化する(図5中の○と●)ものの、アルカリ添加量の供給量の調整で十分に補完可能と考えられます。

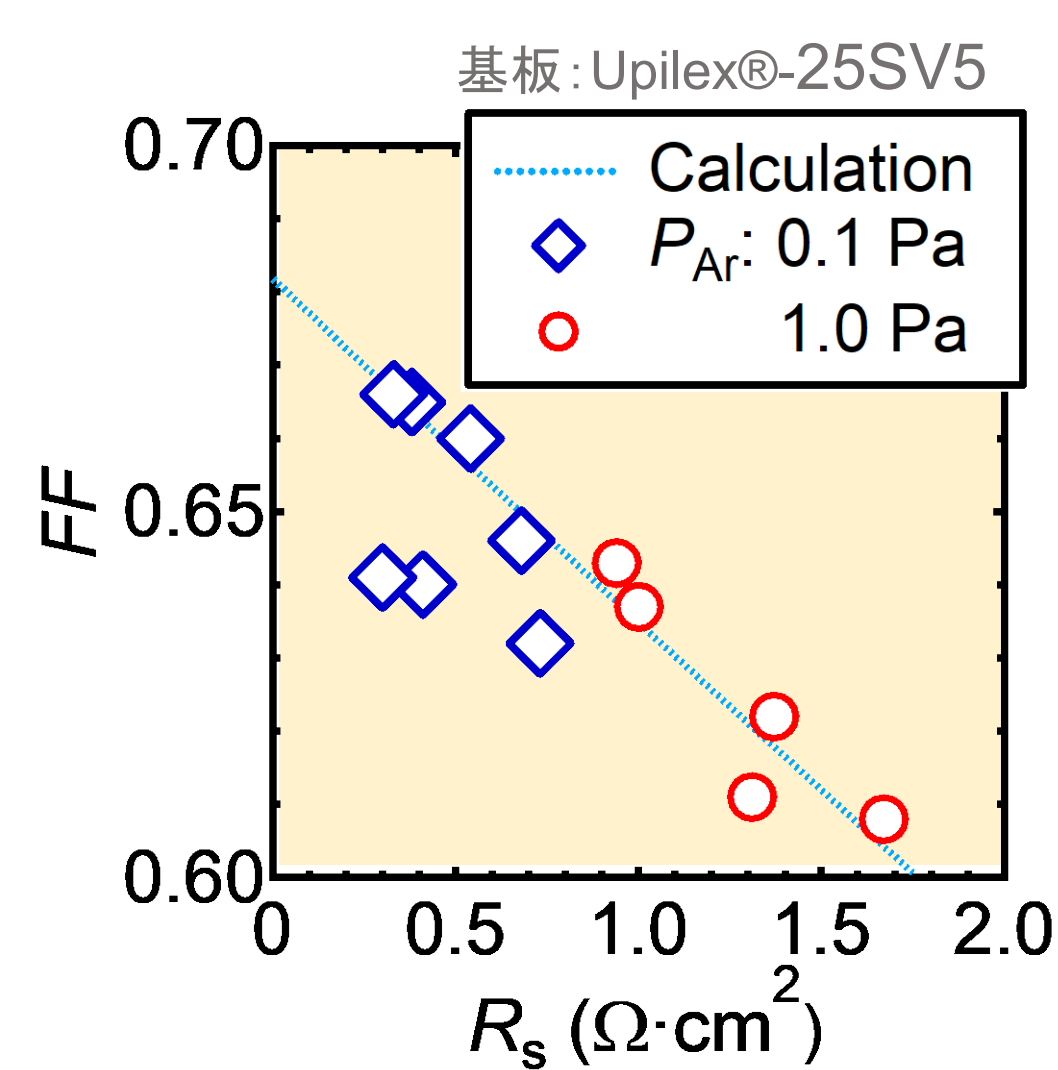


図4. 異なる P_{Ar} で作製した太陽電池のFFの直列抵抗(R_s)依存性

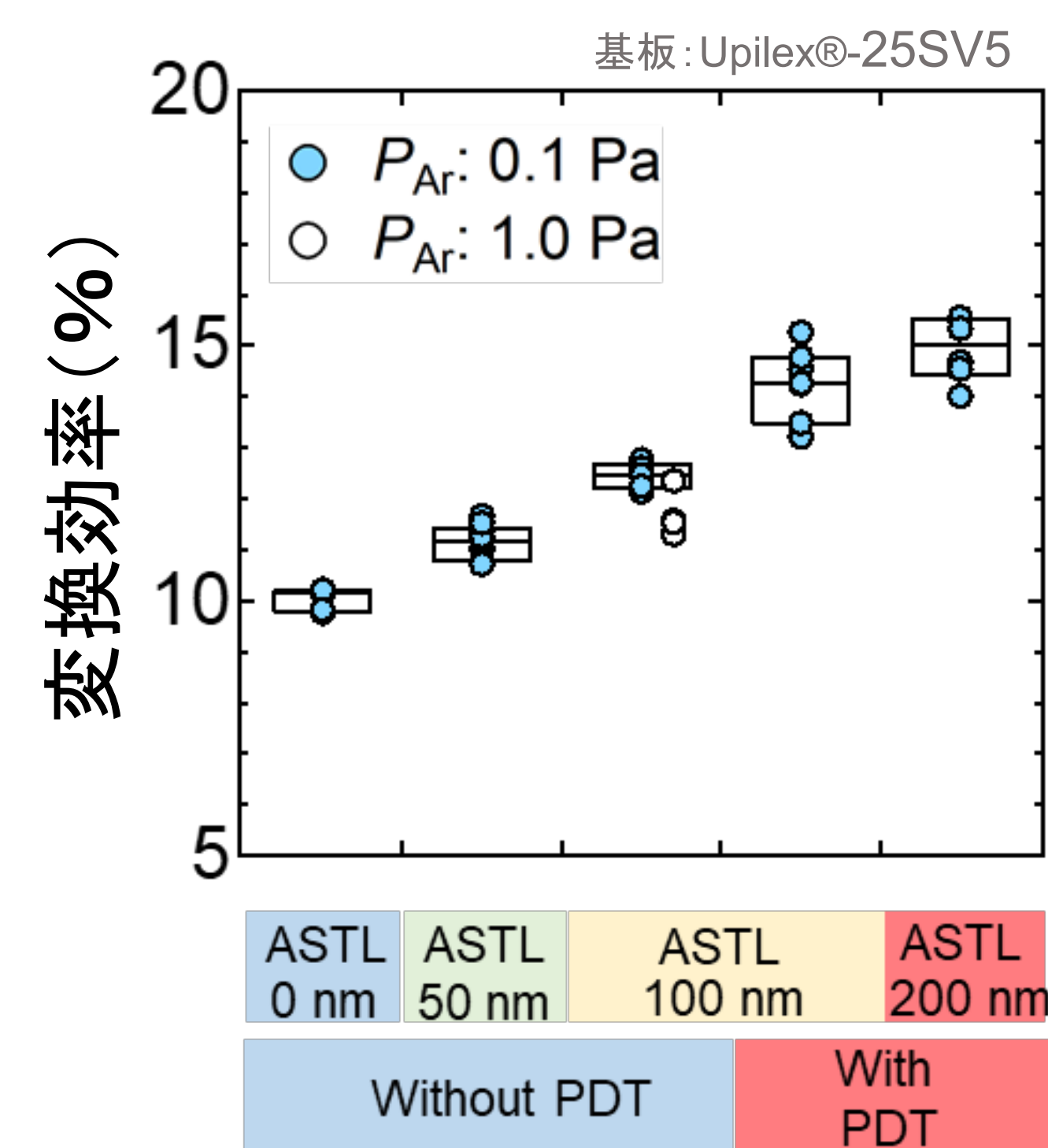


図5. (左)変換効率のアルカリ金属供給条件依存性
 (右)フレキシブルCIGS太陽電池の例

結論

Mo裏面電極をスパッタ法にて製膜する際の P_{Ar} の影響に着目し、歪状態を調べました。 P_{Ar} :0.5Pa~等の条件下では、Mo密度が低く、Mo裏面電極には引っ張り応力が生じました。引っ張り応力下においては、柔軟なポリイミドフィルムを基板に用いた場合には、Mo膜にクラックが生じデバイス特性を低下させることが問題となりました。一方、 P_{Ar} を0.1Pa程度にまで低下させた場合には、応力は圧縮に転じ、クラック発生を抑制することが出来ました。

アルカリ金属添加によりフレキシブルCIGS太陽電池の特性が改善することを確認しました。ここで、Mo製膜中の P_{Ar} を変化させた場合には、Moの密度変化に伴い、基板側から供給するアルカリ金属(Na, K)の供給量も変化するため、変換効率も多少変化するものの、アルカリ添加量の供給量の調整で十分に補完可能と考えられます。

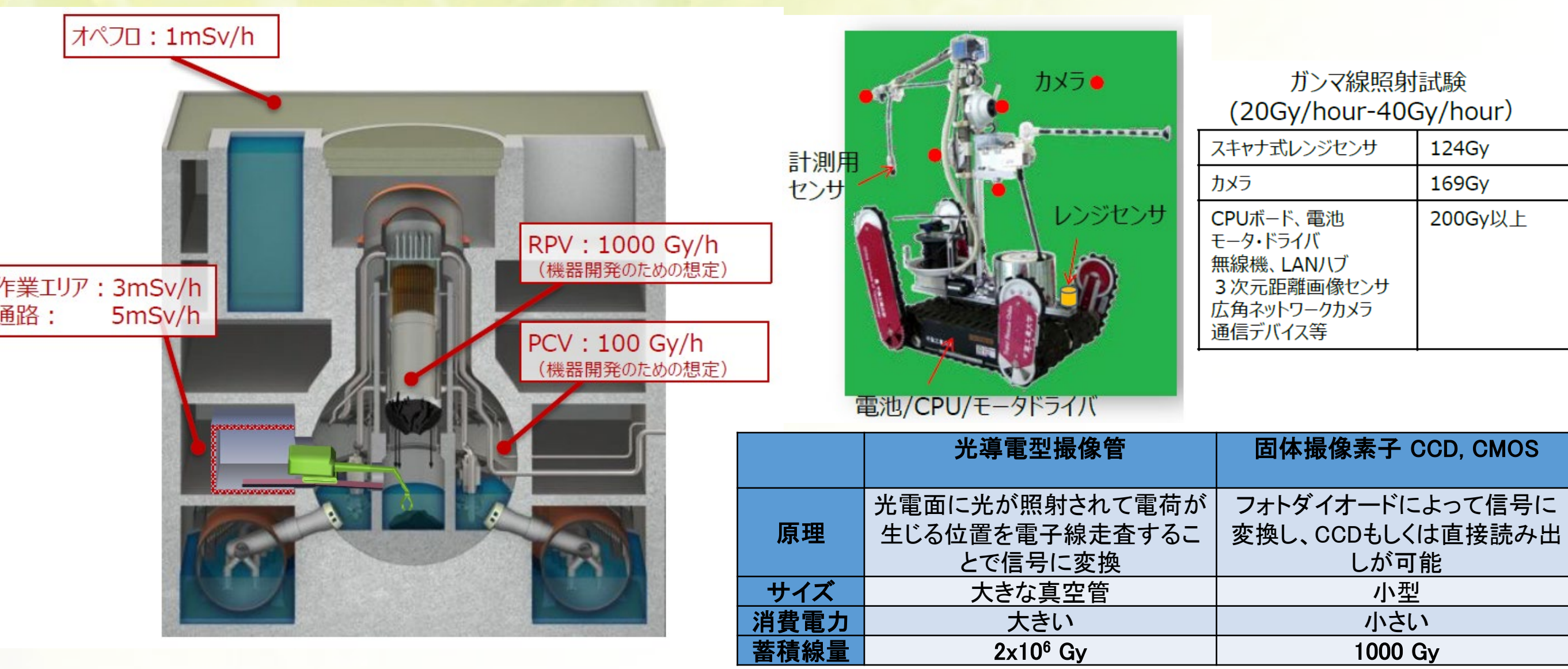
参考文献

- [1] N. M. Haegel *et al.*, Science **356**, 141 (2017).
- [2] J. Ramanujam, *et al.*, Progress in Materials Science **110**, 100619 (2020).
- [3] F. Kessler *et al.*, Solar Energy **77**, 685 (2004).
- [4] T. Masuda, *et al.*, IEEE JPV **8**, 1326 (2018).
- [5] EMPA Press release 2022/10/10.
- [6] S. Ishizuka *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. **24**, 1262 (2022).
- [7] Y. Kamikawa *et al.*, Solar Energy **241**, 327 (2022).
- [8] Ube corporation HP, https://www.ube.com/upilex/en/upilex_grade.html#01.
- [9] J.A. Thornton, J. Vac. Sci. and Technol. **11**, 666 (1974).
- [10] G.G. Stoney, Proc. Roy. Soc. A. (1909).
- [11] S. Ishizuka *et al.*, Appl. Phys. Lett. **93**, 124105 (2008).
- [12] A. Chirila *et al.*, Nat. Mater. **12**, 1107 (2013).

CIGS太陽電池の逆バイアス時におけるリーク電流に関する考察

西永慈郎、上川由紀子、石塚尚吾
産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門

研究の目的 (福島第一原子力発電所[1]、ロボットの放射線耐性[2,3])



ロボット・カメラの放射線耐性は低い → 放射線耐性の高い半導体材料開発が必要

研究背景 (CMOS回路の放射線耐性[4]、CIGSイメージセンサ[5])

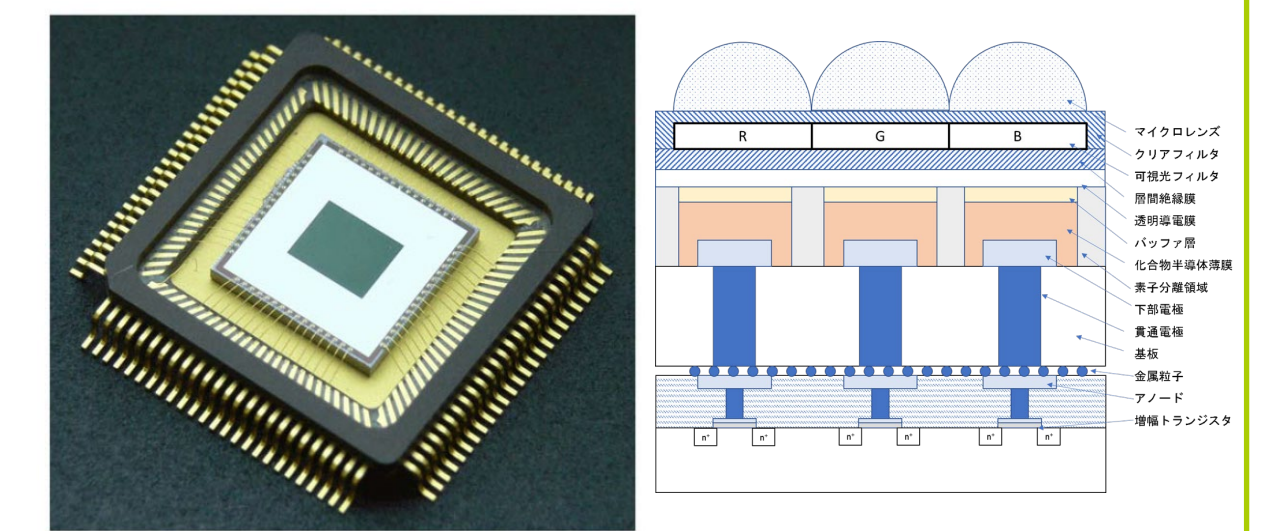
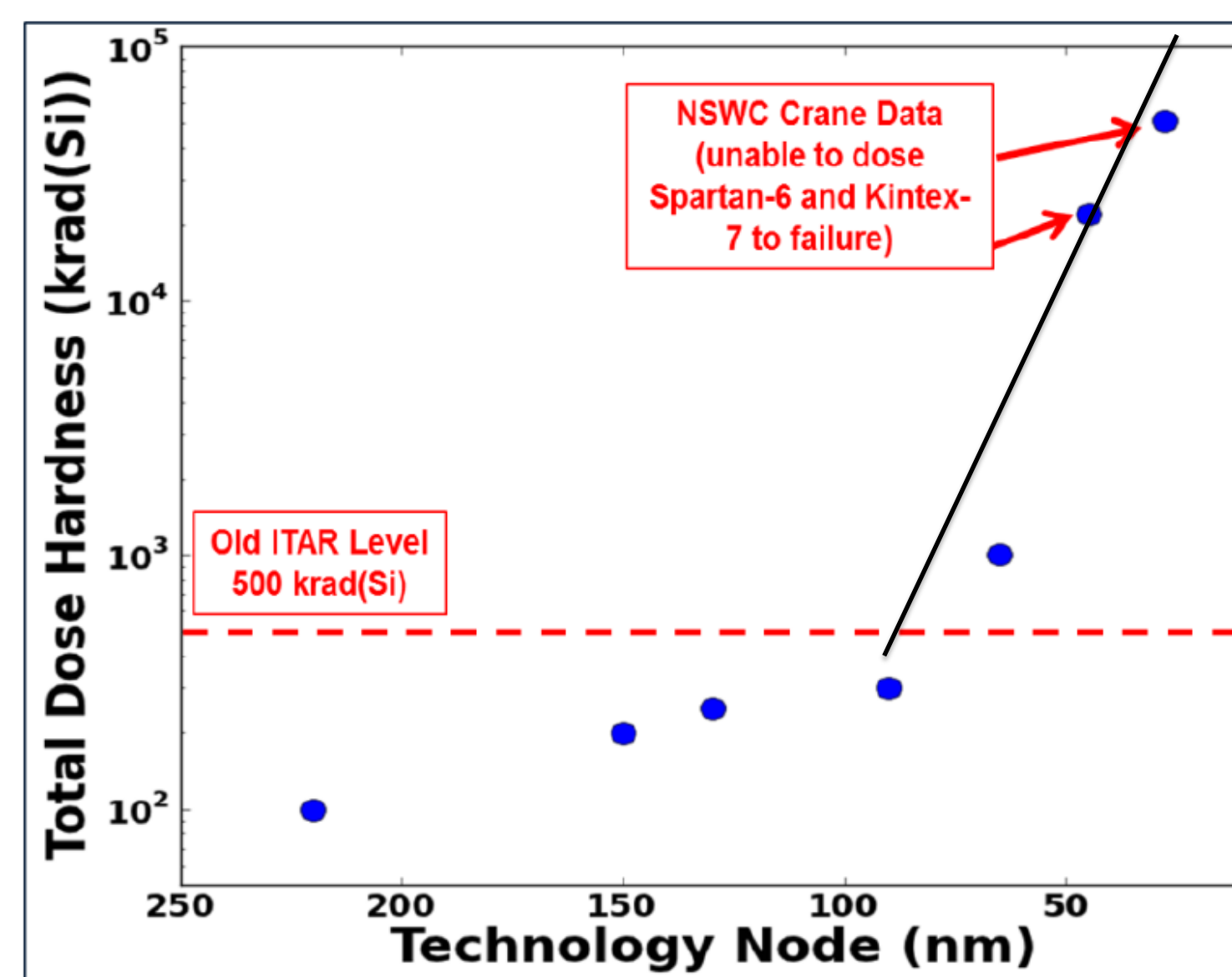
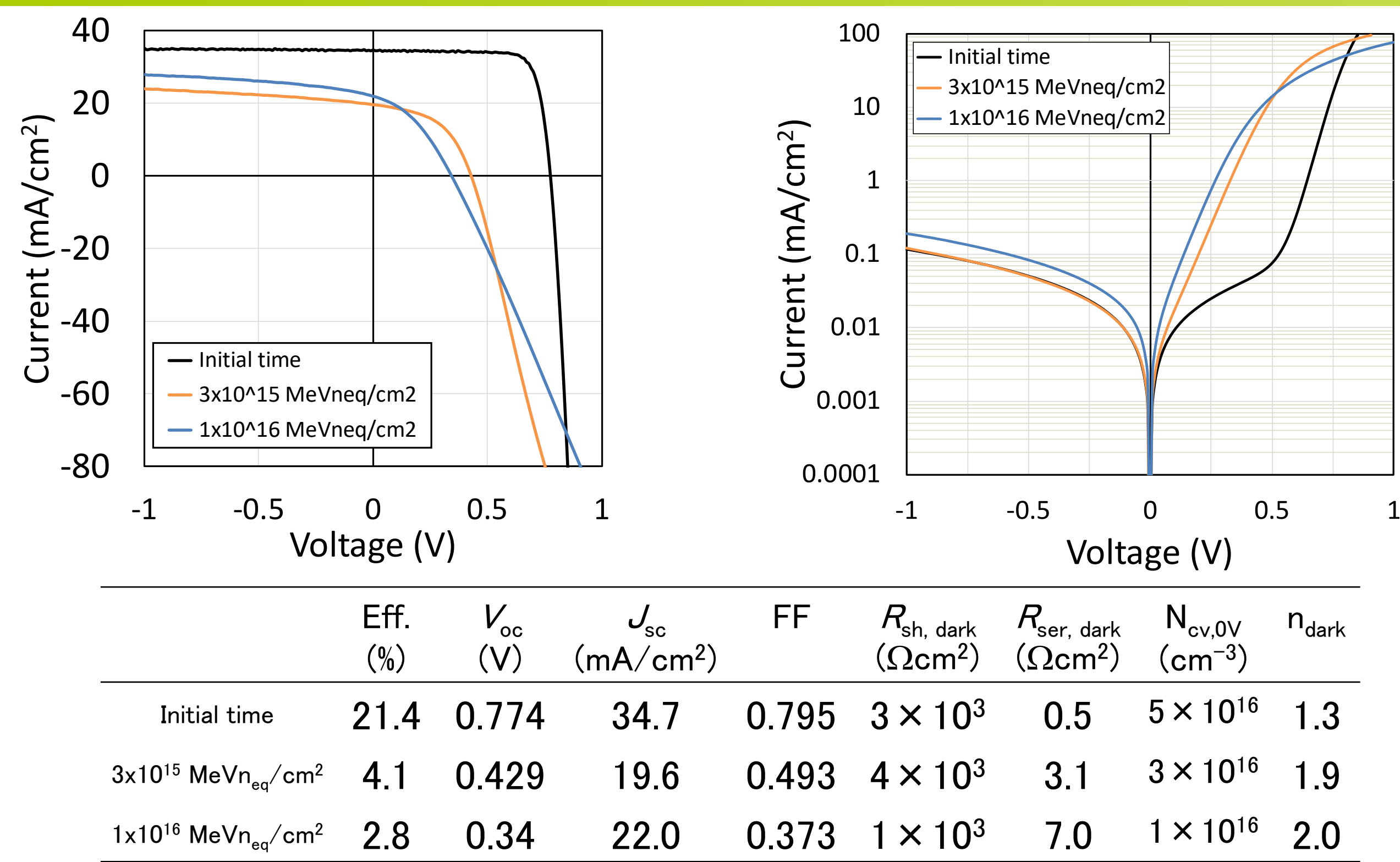


Fig. 4. Typical appearance of the CIGS image sensor developed in this work. The device has 512x288 pixels, with each pixel size of 10 μm × 10 μm.

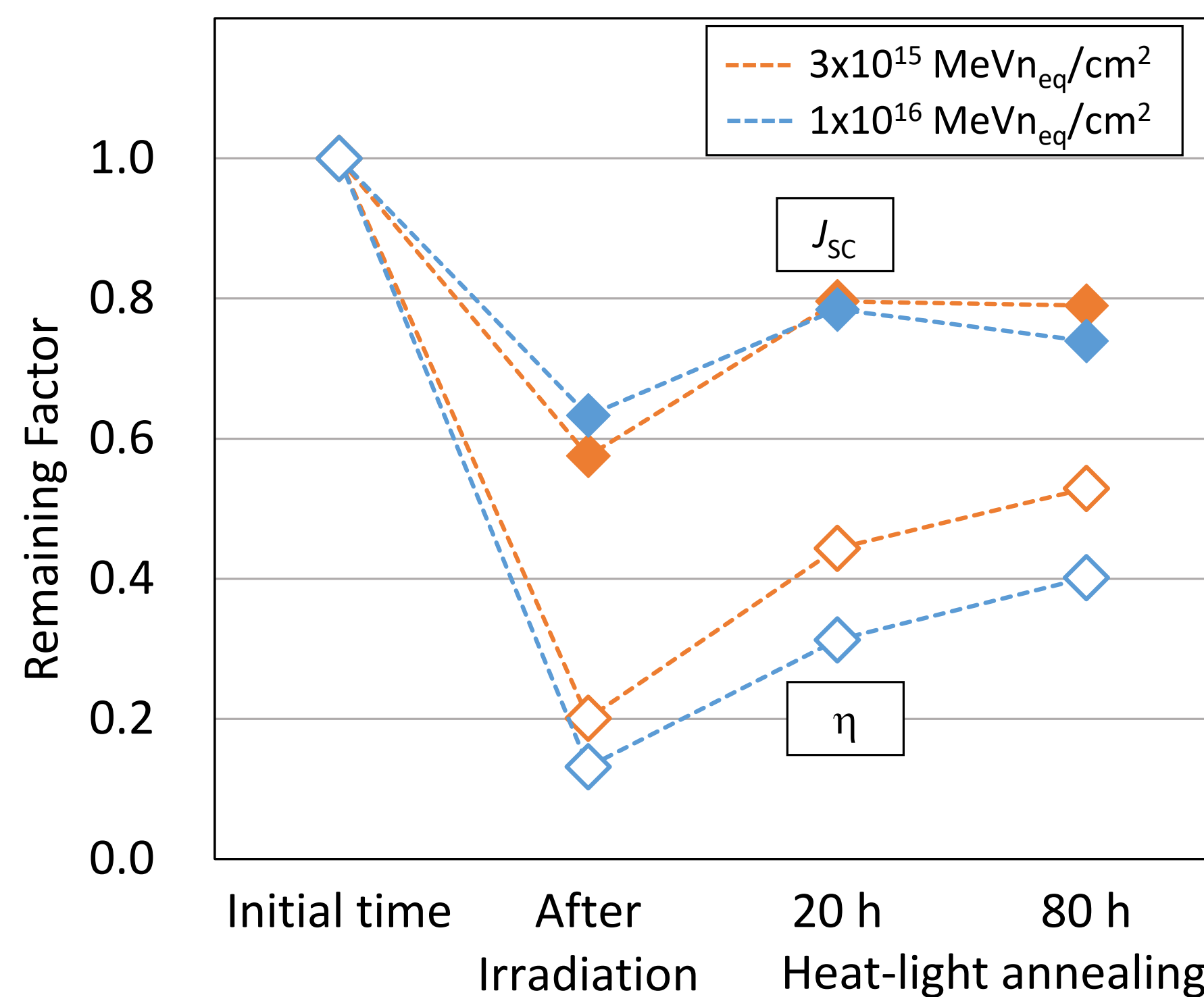
CMOS回路の放射線耐性は改善されており、既に1MGy以上が達成

CIGSを光検出部として利用すれば、放射線耐性の高いイメージセンサとして期待できる

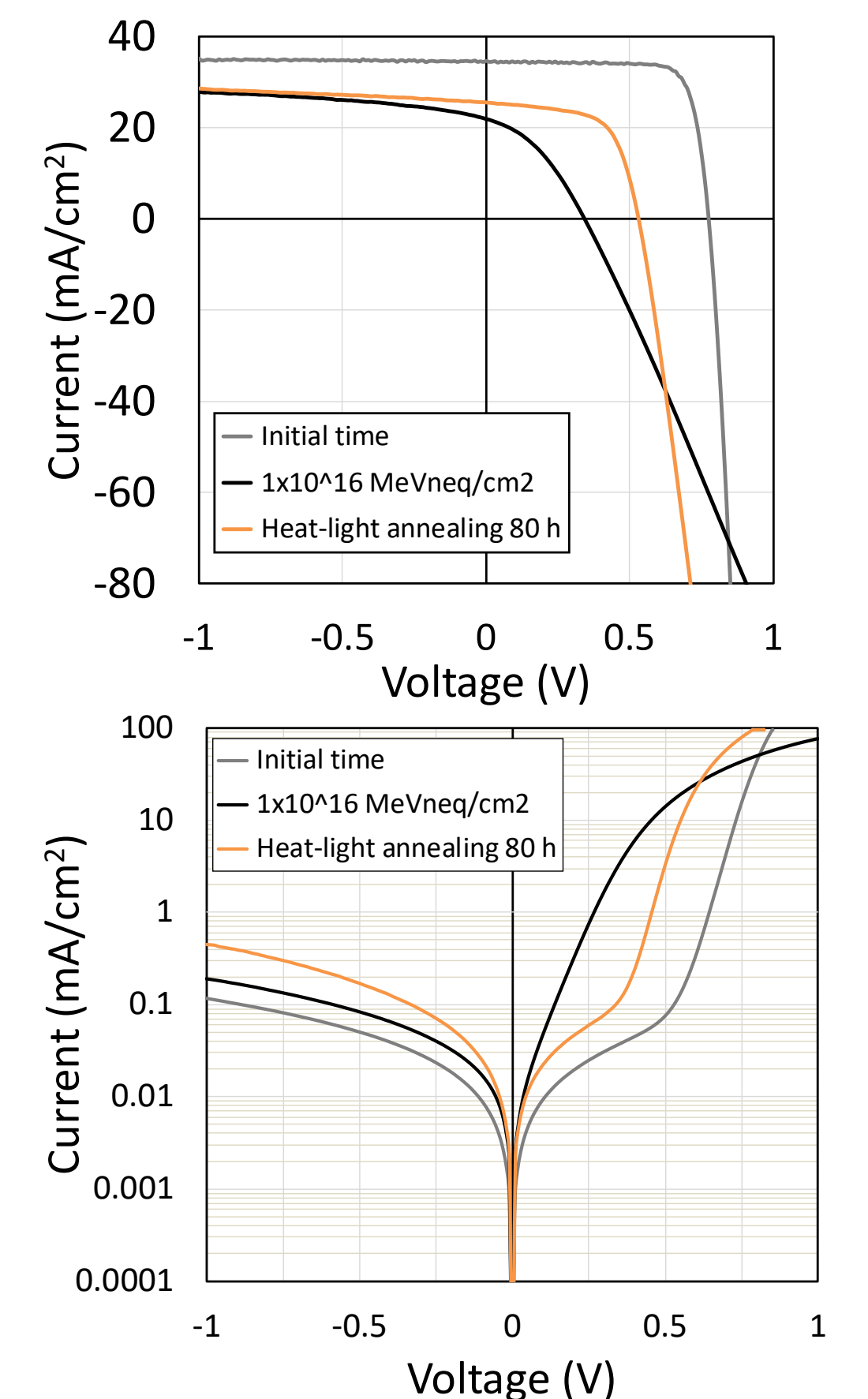
CIGS太陽電池の放射線耐性 (陽子線照射による劣化、および熱・光照射による回復)



CIGS太陽電池に陽子線照射(3 × 10¹⁵ MeVn_{eq}/cm² (1MGy), 1 × 10¹⁶ MeVn_{eq}/cm² (4MGy))を行うと、出力電流、変換効率が劣化

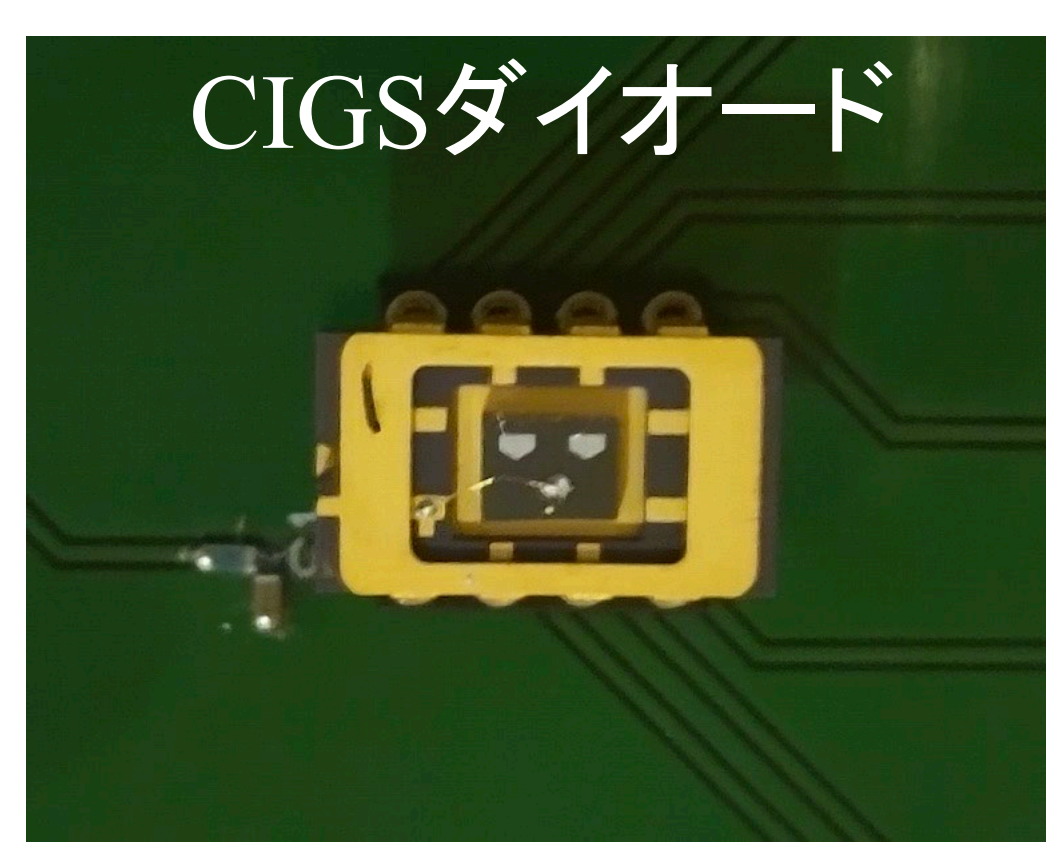


90°Cで熱処理すると、太陽電池特性が改善される。出力電流は20時間で初期値の80%まで回復する。

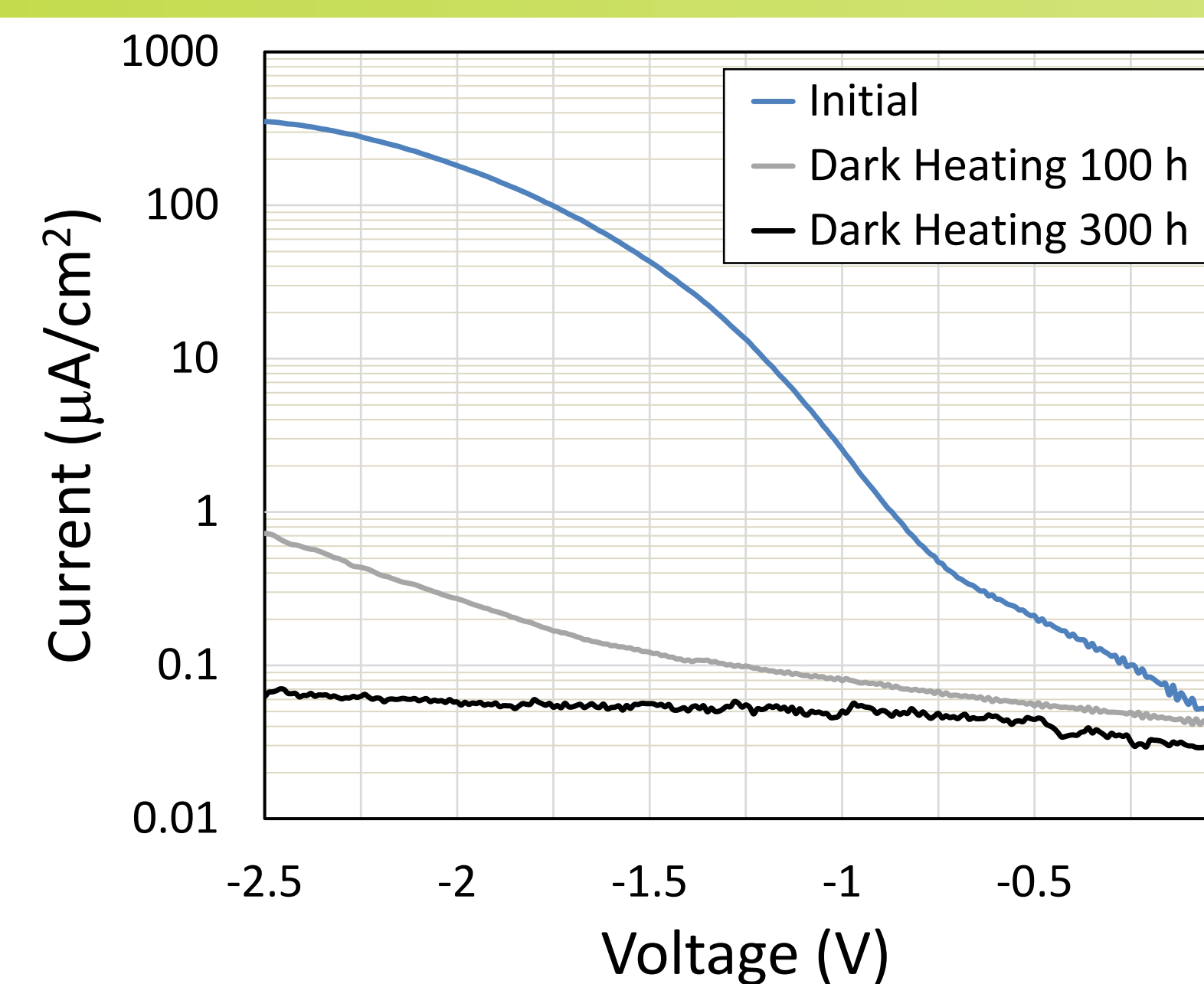


CIGS太陽電池の逆バイアス時のリーク電流

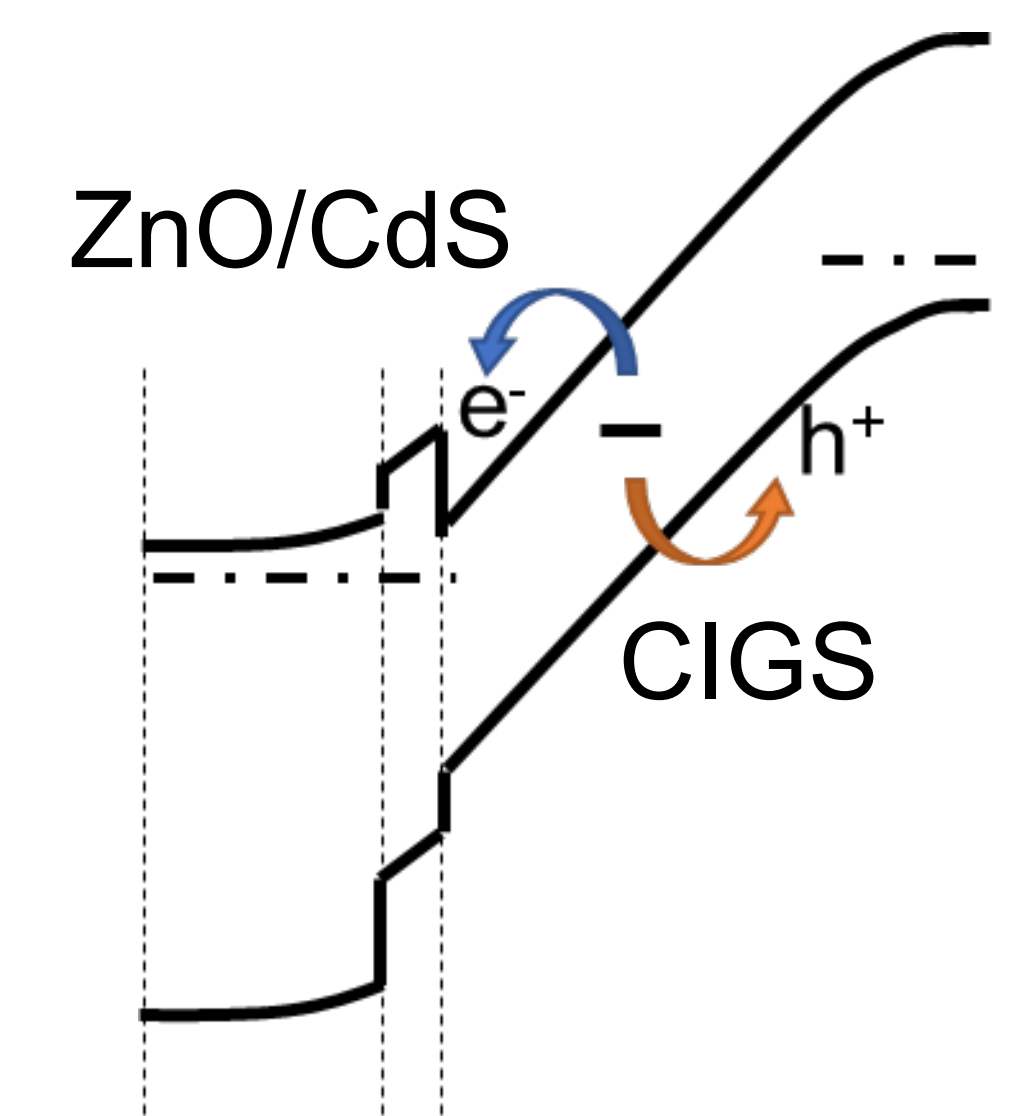
Al 3.0 μm
Al-doped ZnO 350 nm
i-ZnO 60 nm
CdS 30 nm
CIGS 2 μm
Mo 0.8 μm
Soda Lime Glass 1.1 mm



CIGS太陽電池による放射線検出を目標に、リーク電流の少ないCIGSダイオードを作製した。メカニカルスクライブによる素子分離を行うと、端面に発生するリークパスによって並列抵抗が低下する。そこで化学エッチングによるn型層除去によってCIGSダイオードを作製し、その後、暗状態130°Cで300時間熱処理(Dark heating (DH))を行った。



CIGSダイオードの逆バイアス時のリーク電流は長時間DHによって劇的に減少する。これはDHによって、空乏層内の再結合中心が減少することを示唆している。



結論

- 高い放射線耐性を有する半導体検出器が求められている。
- CIGS太陽電池は放射線耐性が高く、高放射線耐性CMOS回路と組み合わせて、イメージセンサとしての応用が期待できる。
- CIGS太陽電池の放射線耐性が高い理由は、低い温度(90°C程度)の熱処理で、放射線損傷が回復するため。
- 逆バイアス時のリーク電流は、Dark heatingによって大幅に減少させることが可能。S/N比の高い光・放射線検出部として利用できる。

参考文献・謝辞

- [1] 高守謙郎(IRID), IRIDシンポジウム2019年.
- [2] 新井民夫(芝浦工大), IRIDシンポジウム2016年.
- [3] 対災害ロボティクス・タスクフォース, 2011年4月27日
- [4] M. Gadlage, "Radiation Hardening and Trust in a COTS Age", Naval Sea Systems Command.
- [5] K. Miyazaki *et al.*, Thin Solid Films, 517, 2392 (2009).

謝辞: 本研究はTIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」により実施されたものである。関係各位に感謝致します。

CIGS太陽電池における相反定理の実験的な検証

柴田 肇¹、西永 慈郎¹、上川 由紀子¹、鯉田 崇¹、永井 武彦¹、反保 衆志¹、石塚 尚吾¹、
望月 敏光²、山口 真史³

1 産総研 省エネルギー研究部門、2 産総研 再生可能エネルギー研究センター、
3 豊田工業大学

1. はじめに

太陽電池の**相反定理**は、U. Rau, Phys. Rev. **B76**, 085303 (2007) により次式で与えられる。

$$\phi_{em}(E) = EQE(E)\phi_{BB}(E) \exp(qV/kT) \quad (1.1)$$

この定理は、理想的な太陽電池においては成立すると考えられるが、現実に存在する様々な太陽電池の全てにおいて成立するとは限らない。

本研究においては、我々が作製した高効率なCIGS太陽電池について、(1.1)式が定性的・定量的に成立するか否かを実験的に検証した結果を報告する。

2. 実験方法(1)

我々は、 $J_{em}(V)$ を次式で定義する。

$$J_{em}(V) \equiv q \int_0^{\infty} \phi_{em}(E) dE \quad (2.1)$$

最も一般的には、 $J_{em}(V)$ は次式で与えられる。

$$J_{em}(V) = J_{0,em} \exp(qV/nkT) \quad (2.2)$$

我々は、 $J_{0,rad}$ を次式で定義する。

$$J_{0,rad} \equiv q \int_0^{\infty} EQE(E)\phi_{BB}(E) dE \quad (2.3)$$

従って、もし(1.1)式が成立するならば、次式が成立するはずである。

$$J_{0,em} = J_{0,rad} \quad (2.4)$$

$$n = 1 \quad (2.5)$$

EQE(E): 外部量子効率スペクトル
 $\phi_{BB}(E)$: $T = 300K$ の黒体輻射スペクトル
 $\phi_{em}(E)$: EL発光スペクトル
 $\phi_{PL}(E)$: PL発光スペクトル
 $J_{dark}(V)$: 暗状態のJ-V特性
 J_0 : 逆方向飽和電流密度
 $J_{0,rad}$: J_0 の放射限界
 $J_{0,em}$: (2.2)式の前置因子
 n : ダイオード理想因子

2. 実験方法(2)

我々は、CIGS太陽電池を用いて、以下の(1)-(4)を遂行した。

- (1) EQE(E)を測定し、(2.3)式により $J_{0,rad}$ を算出する。
- (2) EL発光強度の絶対値を測定し、 $J_{em}(V)$ を求める。
- (3) 得られた $J_{em}(V)$ に(2.2)式をフィッティングして、 $J_{0,em}$ と n の値を決定する。
- (4) $J_{0,rad}$ と $J_{0,em}$ の値を比較し、両者が一致するか否かを確認する。

太陽電池のLEDとしての量子効率 $Q_{LED}(V)$ は、次式で与えられる。

$$Q_{LED}(V_{OC}) \equiv J_{em}(V_{OC})/J_{dark}(V_{OC}) \quad (2.6)$$

更に我々は、**ERE** (external radiative efficiency)を次式で定義する。

$$ERE \equiv Q_{LED}(V_{OC}) = J_{em}(V_{OC})/J_{dark}(V_{OC}) \quad (2.7)$$

2. 実験方法(3)

$J_{dark}(V_{OC}) = J_{SC}$ であると仮定すると、次式を得る。

$$ERE = J_{em}(V_{OC})/J_{SC} \quad (2.8)$$

$J_{rad}(V)$ は、次式で与えられる。

$$J_{rad}(V) = J_{0,rad} \exp(qV/kT) \quad (2.9)$$

ERE*を、次式で定義する。

$$ERE^* \equiv J_{rad}(V_{OC})/J_{SC} \quad (2.10)$$

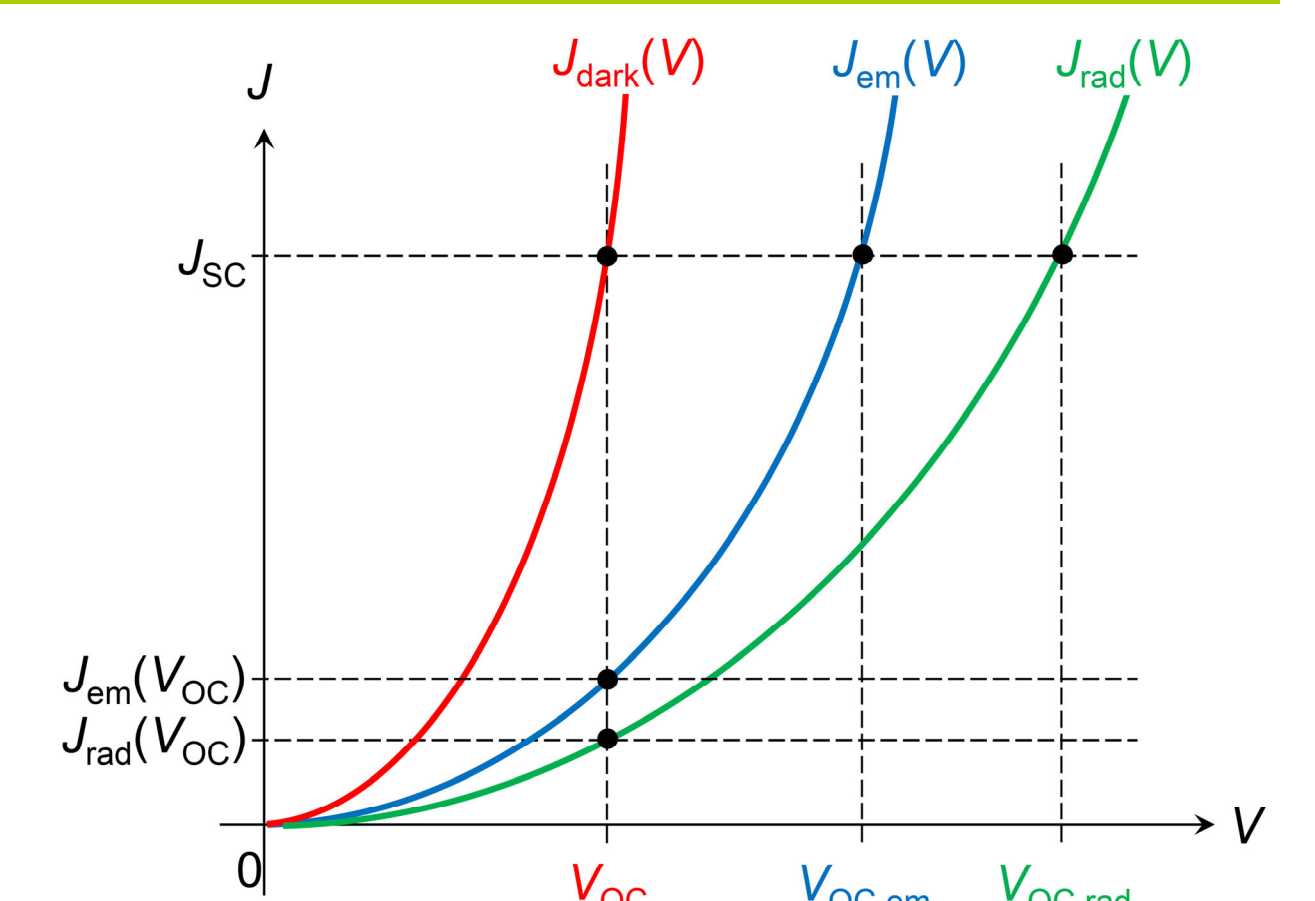


Fig. 1 本研究で定義した $J_{em}(V)$ 、 $J_{rad}(V)$ 、 $J_{dark}(V)$ の模式図

3. 実験結果と考察(1)

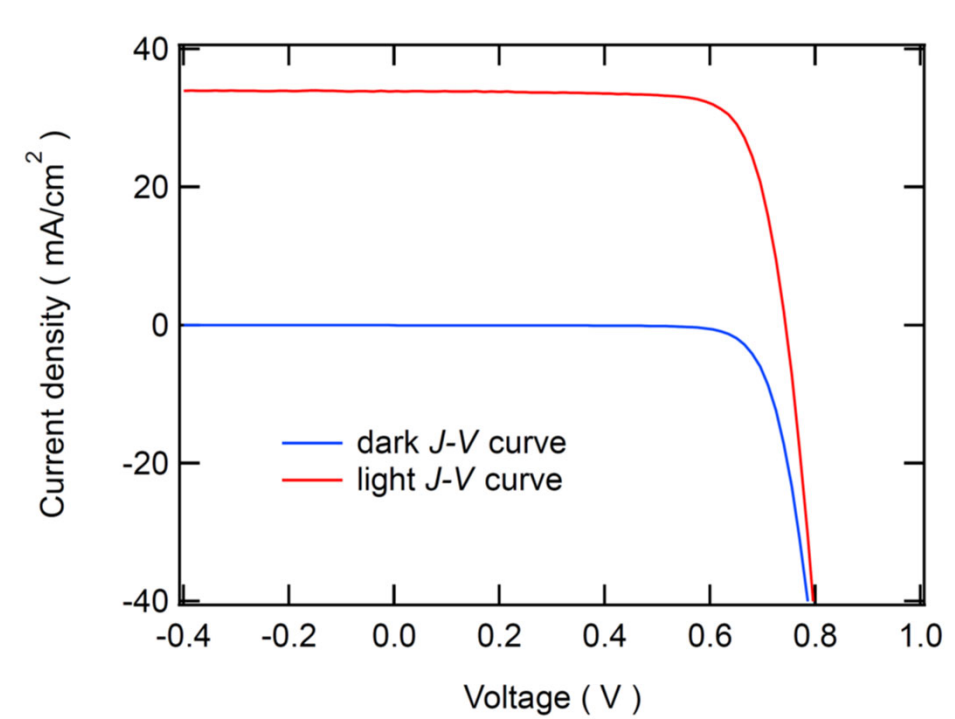


Fig. 2 本研究で用いたCIGS太陽電池の、暗状態(青色)と明状態(赤色)のJ-V特性

η (%)	V_{OC} (V)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF	R_{in} (Ω cm ²)	R_{sh} (Ω cm ²)	J_0 (mA/cm ²)	n
19.5	0.74	33.9	0.77	1.2×10^4	0.69	1.50×10^{-8}	1.35

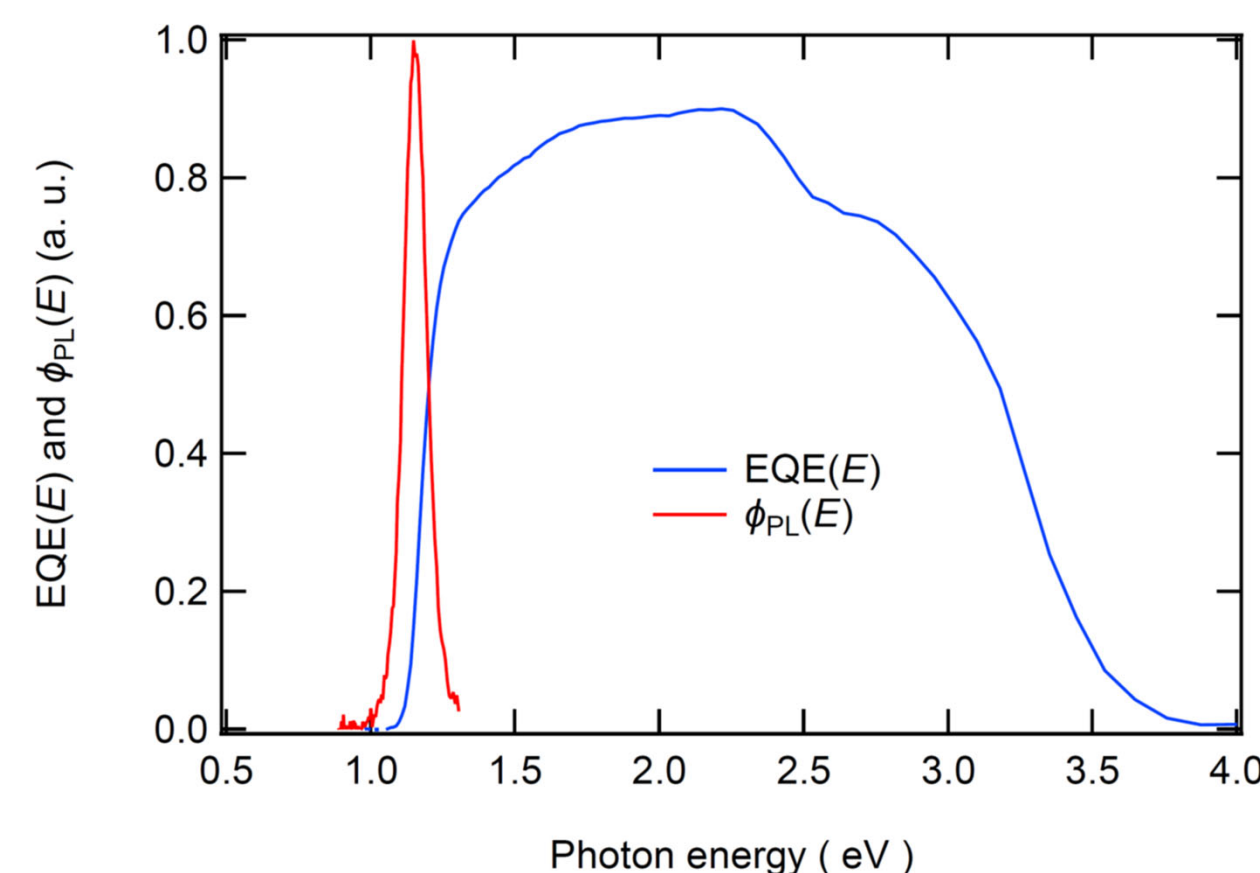


Fig. 3 本研究で用いたCIGS太陽電池の、EQE(E)スペクトル(青色)とPL発光スペクトル $\phi_{PL}(E)$

3. 実験結果と考察(2)

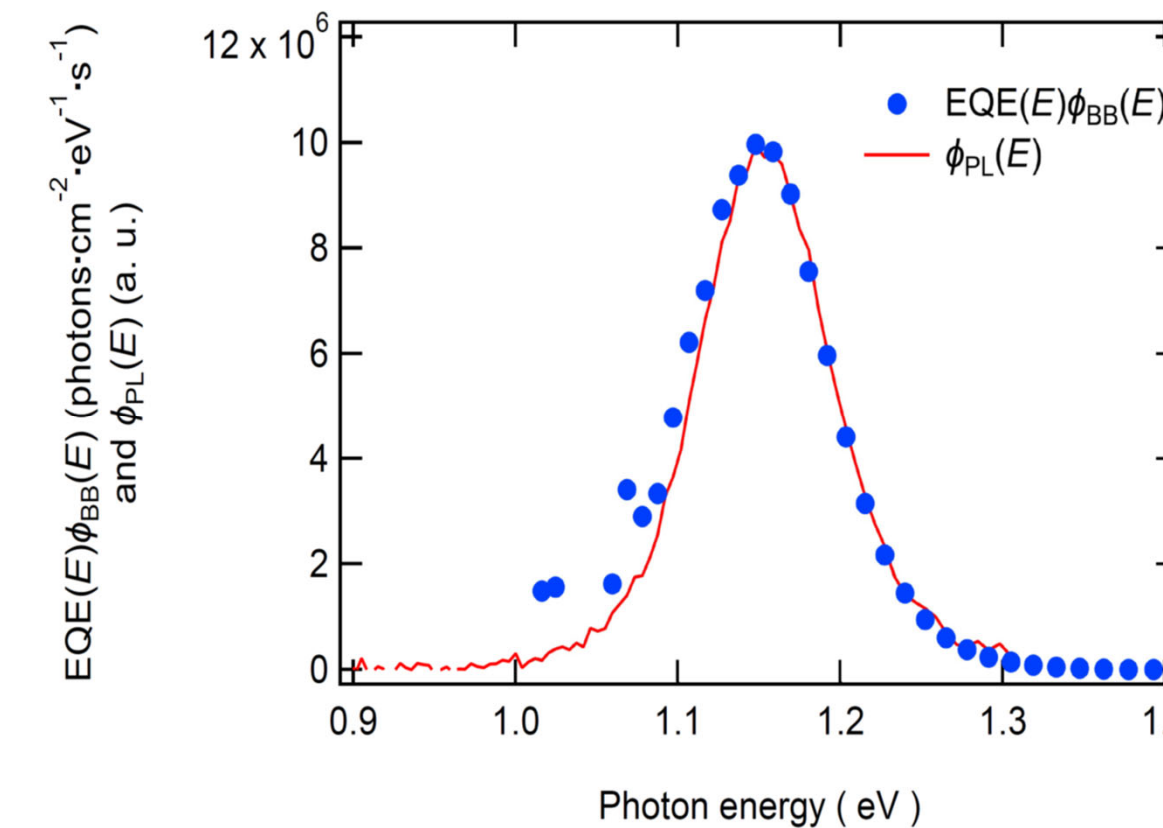


Fig. 4 青色の点はFig. 3に示されたEQE(E)を用いて算出されたEQE(E) $\phi_{BB}(E)$ であり、赤色の曲線はFig. 3に示されたPL発光 $\phi_{PL}(E)$ である。

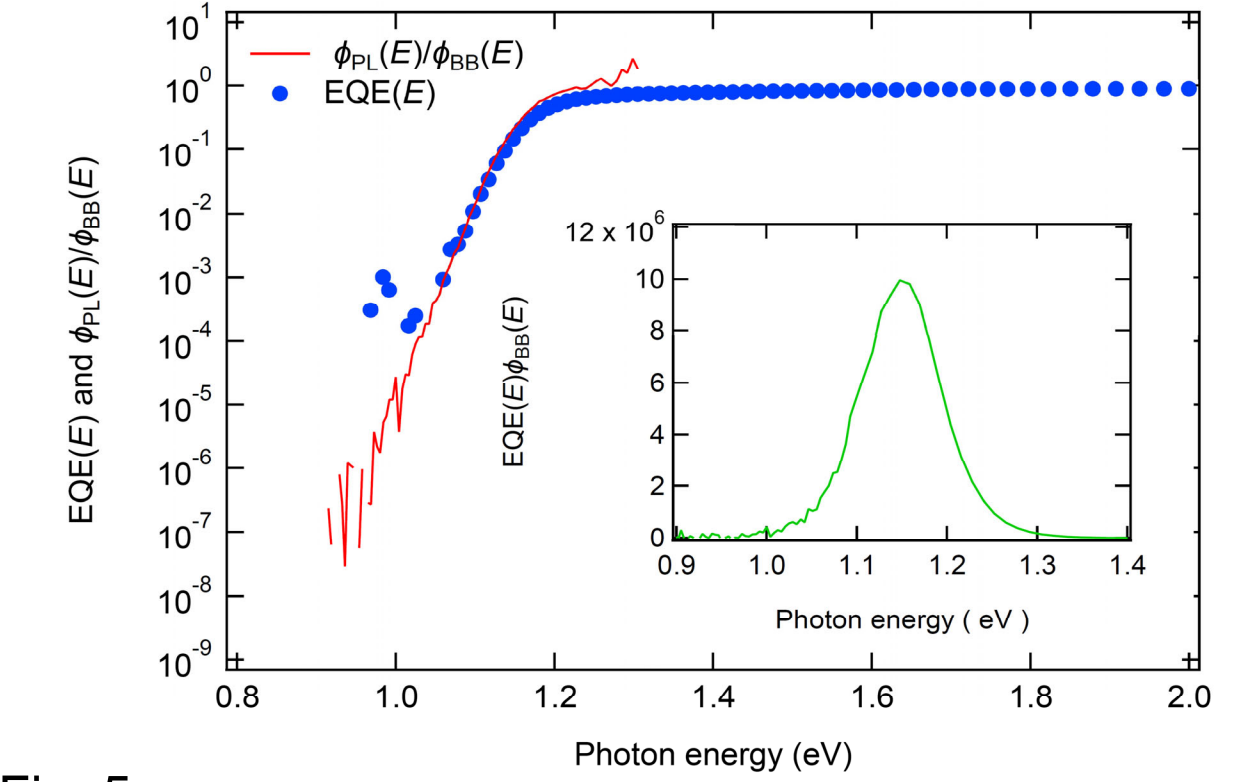


Fig. 5 赤色の曲線は $\phi_{PL}(E)\phi_{BB}(E)$ であるが、適当な比例係数が乗じられている。青色の曲線はFig. 3に示されたEQE(E)である。挿入図はEQE(E) $\phi_{BB}(E)$ であるが、EQE(E)は赤色の曲線で低エネルギー側に外挿されている。

3. 実験結果と考察(3)

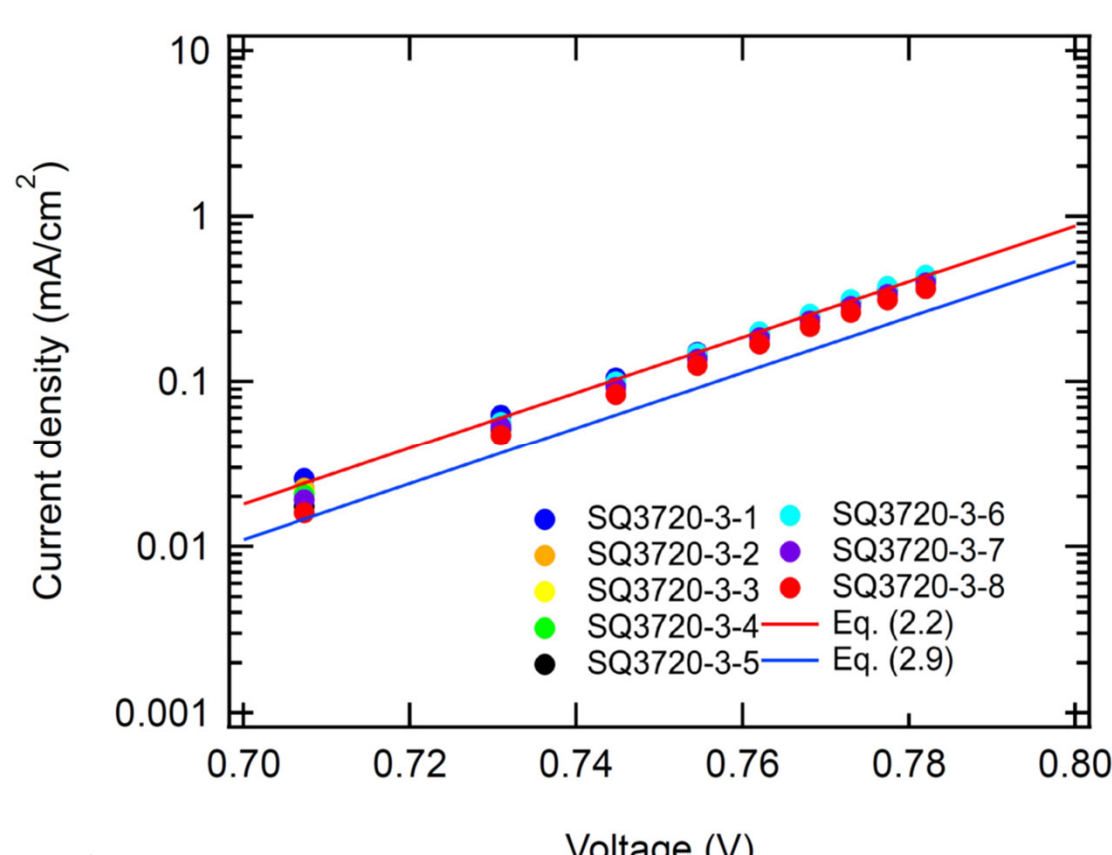


Fig. 6 データ点は $J_{em}(V)$ である(相対誤差は25%程度)。赤色の曲線は(2.2)式をデータ点にフィッティングした結果である。青色の曲線は(3.1)式を(2.9)式に代入した結果である。

Fig. 5の挿入図(2.3)式に代入して積分を実行すると、以下の結果を得る。

$$J_{0,rad} = (1.8 \pm 0.1) \times 10^{-14} \text{ mA/cm}^2 \quad (3.1)$$

Fig. 6に示された $J_{em}(V)$ に(2.2)式をフィッティングすると、以下の結果を得る。

$$J_{0,em} = (2.9 \pm 1.5) \times 10^{-14} \text{ mA/cm}^2 \quad (3.2)$$

$$n = 1.001 \pm 0.018 \quad (3.3)$$

従って、我々のCIGS太陽電池においては、我々の測定精度の範囲内で、(1.1)式が成立していることが確認された。

3. 実験結果と考察(4)

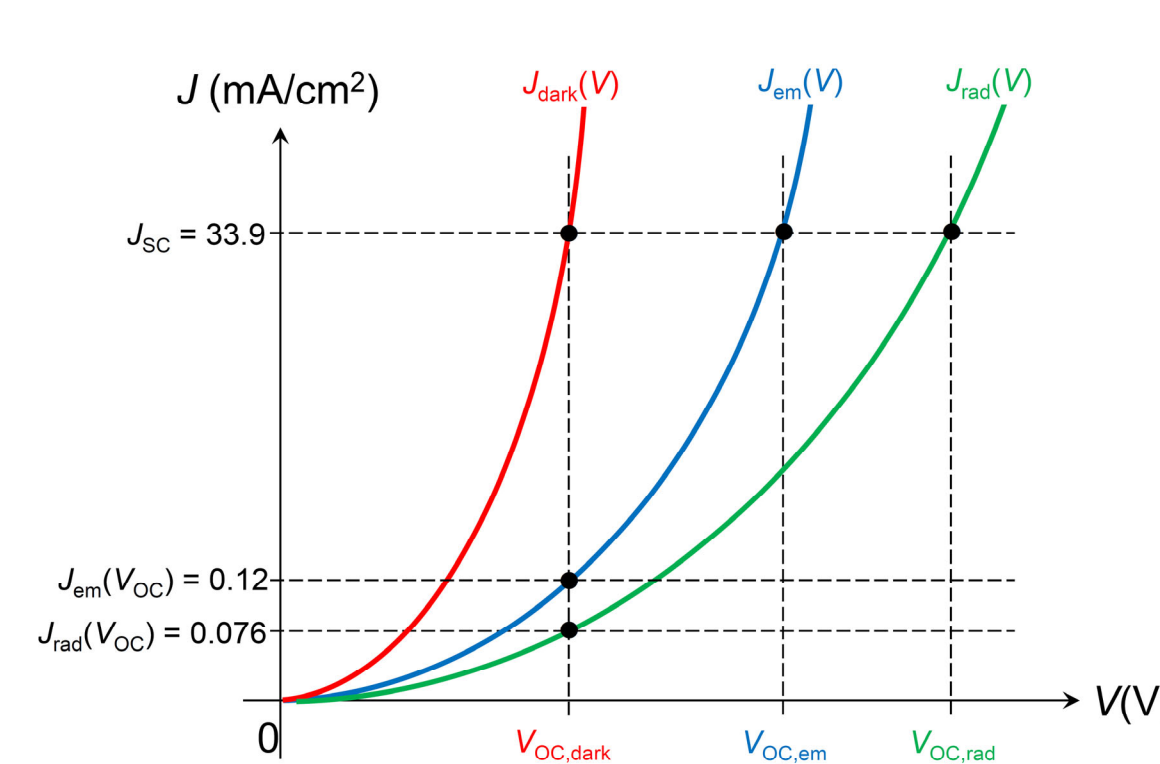


Fig. 7 本研究の結果の模式図。

$$ERE = 0.12/33.9 = 0.0035.$$

$$ERE^* = 0.0076/33.9 = 0.0022.$$

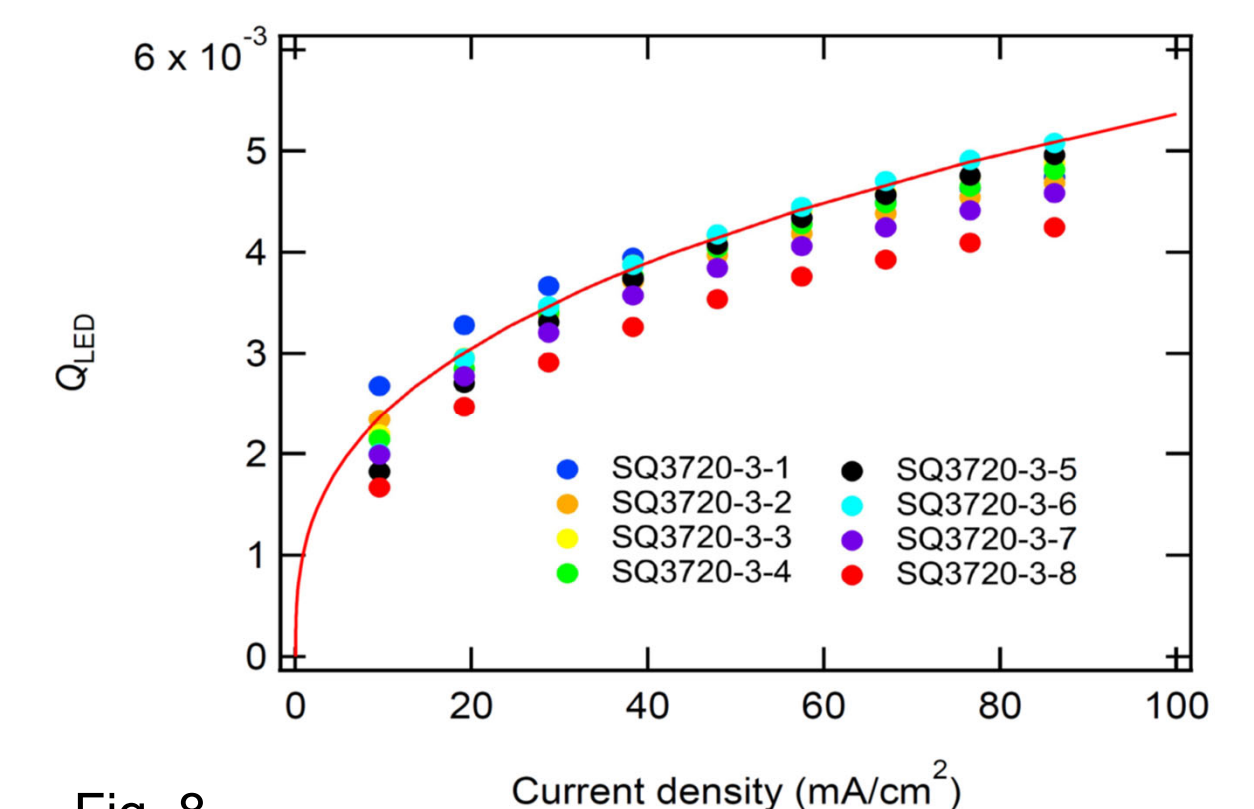


Fig. 8 データ点は Q_{LED} を J_{dark} の関数として示した結果である。赤色の曲線は、 $J_0 = 1.50 \times 10^{-8} \text{ mA/cm}^2$ と $J_{0,em} = 2.9 \times 10^{-14} \text{ mA/cm}^2$ を、後述する(3.6)式に代入し、 $n = 1.35$ とおいた結果である。

3. 実験結果と考察(5)

一般的には、 $J_{dark}(V)$ は次式で与えられる。

$$J_{dark}(V) = J_0 \exp(qV/nkT), \quad (3.4) \quad \text{where } n = 1.35.$$

$J_{em}(V)$ は(2.2)式で与えられるが、(3.3)式により $n = 1$ であることが確認されている。従って、(2.2)式において $n = 1$ とおき、その結果と(3.5)式を(2.6)式に代入すると、 Q_{LED} のV依存性は次式で与えられる。

$$Q_{LED}(V_{int}) = \left(\frac{J_{0,em}}{J_0}\right) \left\{ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \right\}^{\left(\frac{n-1}{n}\right)} \quad (3.5)$$

従って、 Q_{LED} は J_{dark} の関数として、次式で与えられる。

$$Q_{LED} = \left(\frac{J_{0,em}}{J_0}\right) J_{dark}^{n-1} \quad (3.6)$$

4. 結論

我々が作製した高効率なCIGS太陽電池について、(1.1)式で与えられる**相反定理**が定性的・定量的に成立するか否かを、実験的に検証した。

結果として、我々の測定精度の範囲内では、我々のCIGS太陽電池では(1.1)式が**定性的・定量的に成立している**ことが確認された。

また、EL発光メカニズムが電子・正孔対の直接的な再結合によるバンド端発光であるときは、(2.2)式で与えられる**nの値**が厳密に1になることを、初めて実験的に証明した。

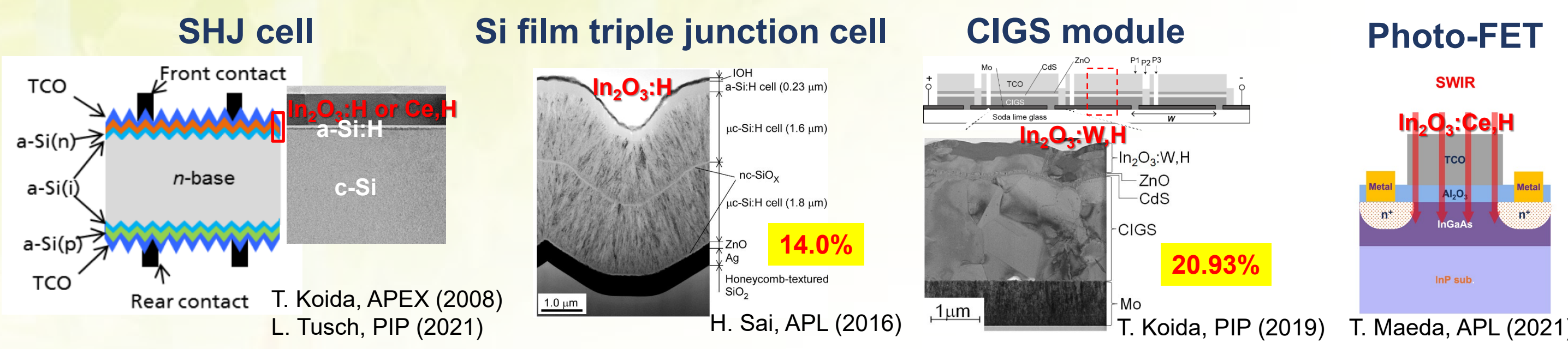
広帯域透明電極In₂O₃:TM,Hの高移動度起源

鯉田 崇

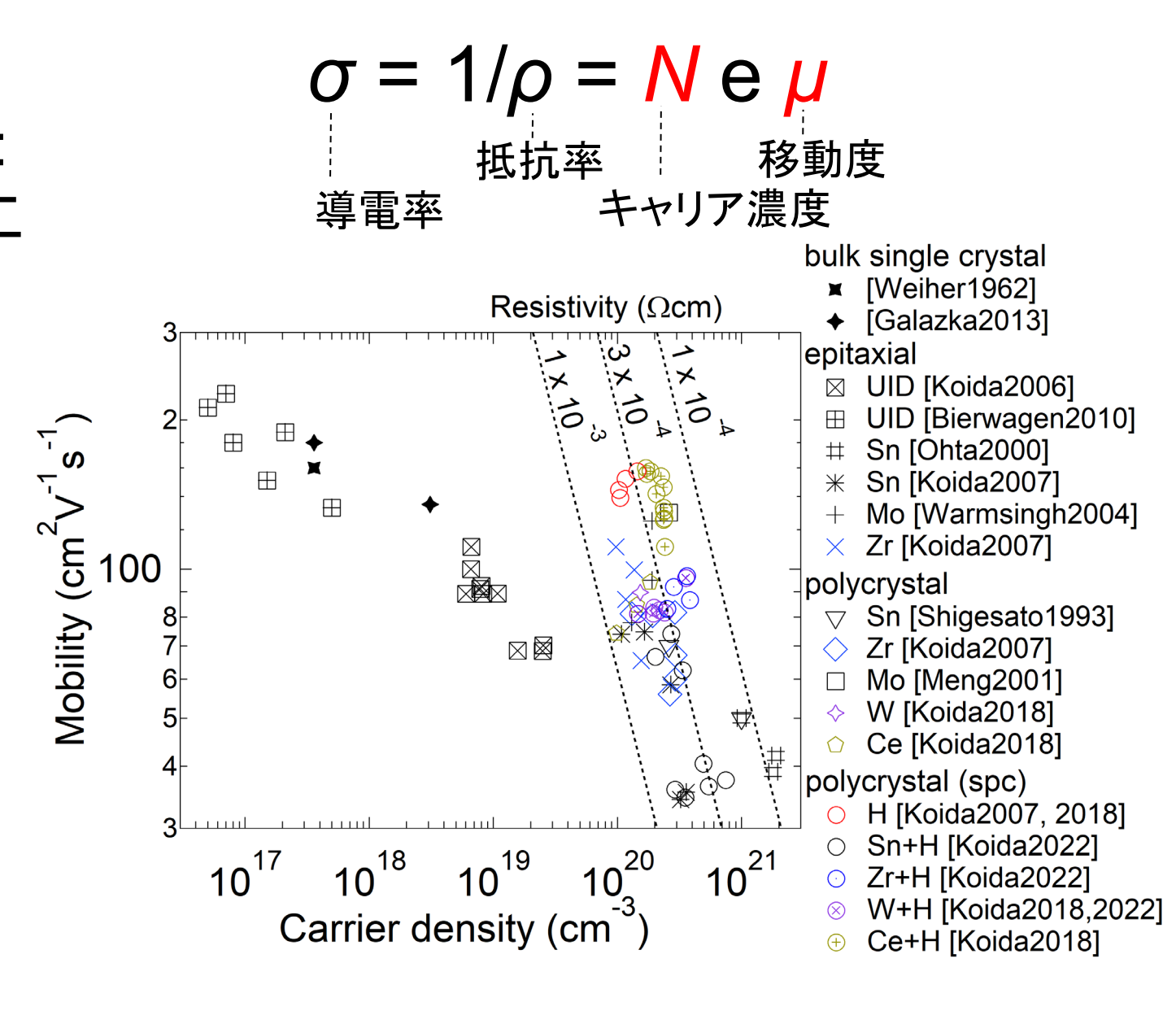
産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門

はじめに

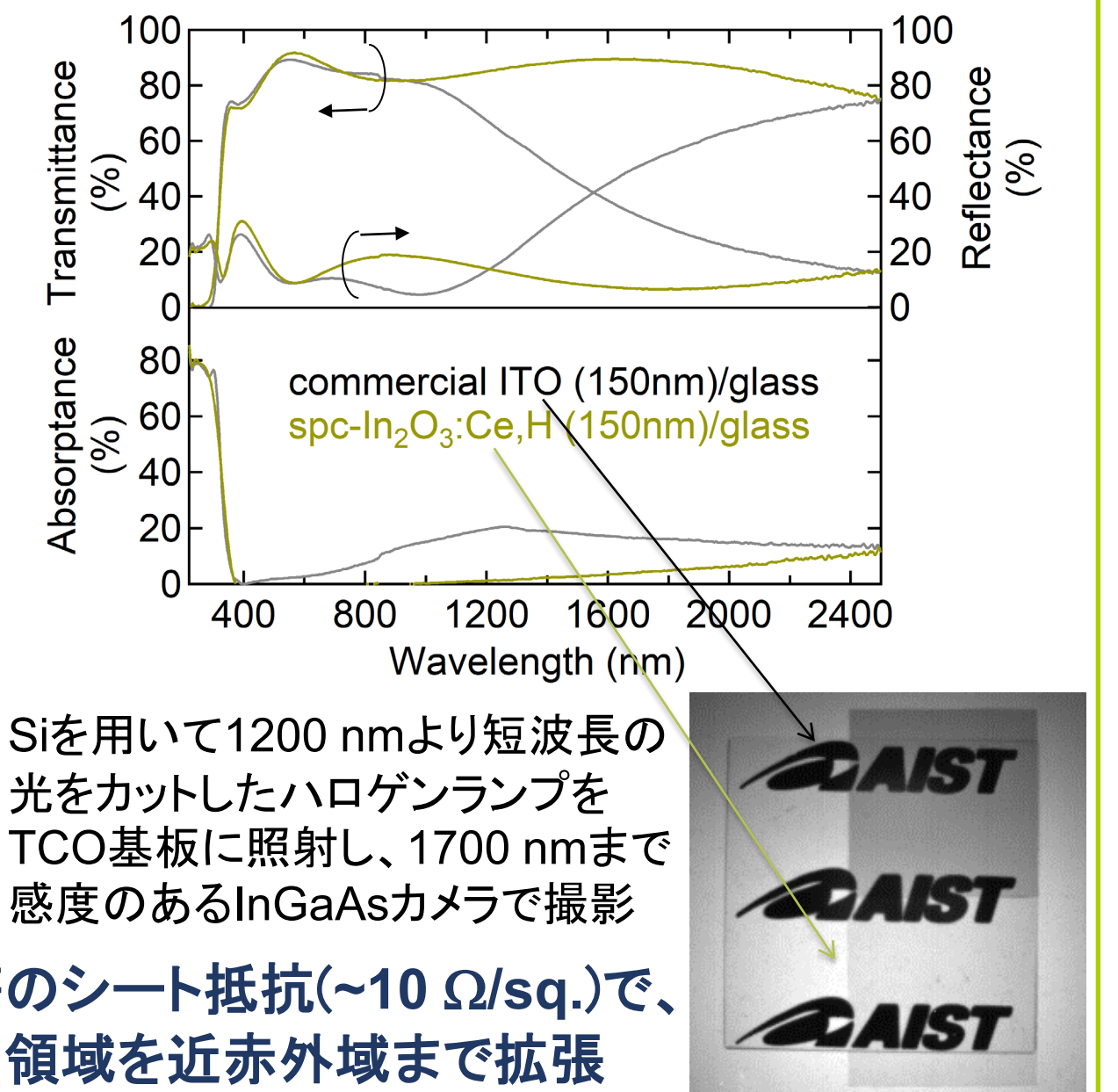
透明導電膜はIn₂O₃やSnO₂などワイドバンドギャップ半導体を高濃度電子ドーピングした薄膜である。可視域の透明性に優れることからディスプレイや太陽電池の窓電極として広く用いられている。これまで、単結晶・多結晶・非晶質構造の様々なIn₂O₃薄膜の研究に従事し、高温成長エピタキシャル薄膜よりも高い移動度を示すIn₂O₃:H及びIn₂O₃:TM,H(TM:遷移金属、H:水素)多結晶薄膜を200℃以下の低温プロセスでガラスや樹脂フィルム基板上に作製できることを報告してきた。高移動度であるため、低キャリア濃度で高導電率を実現でき、透明領域を従来の可視域から近赤外域にまで拡張出来る。SiやCIGSをはじめとした各種太陽電池の高効率化は既に実証済みで、近赤外センサや多接合型太陽電池の高効率化も期待できる。



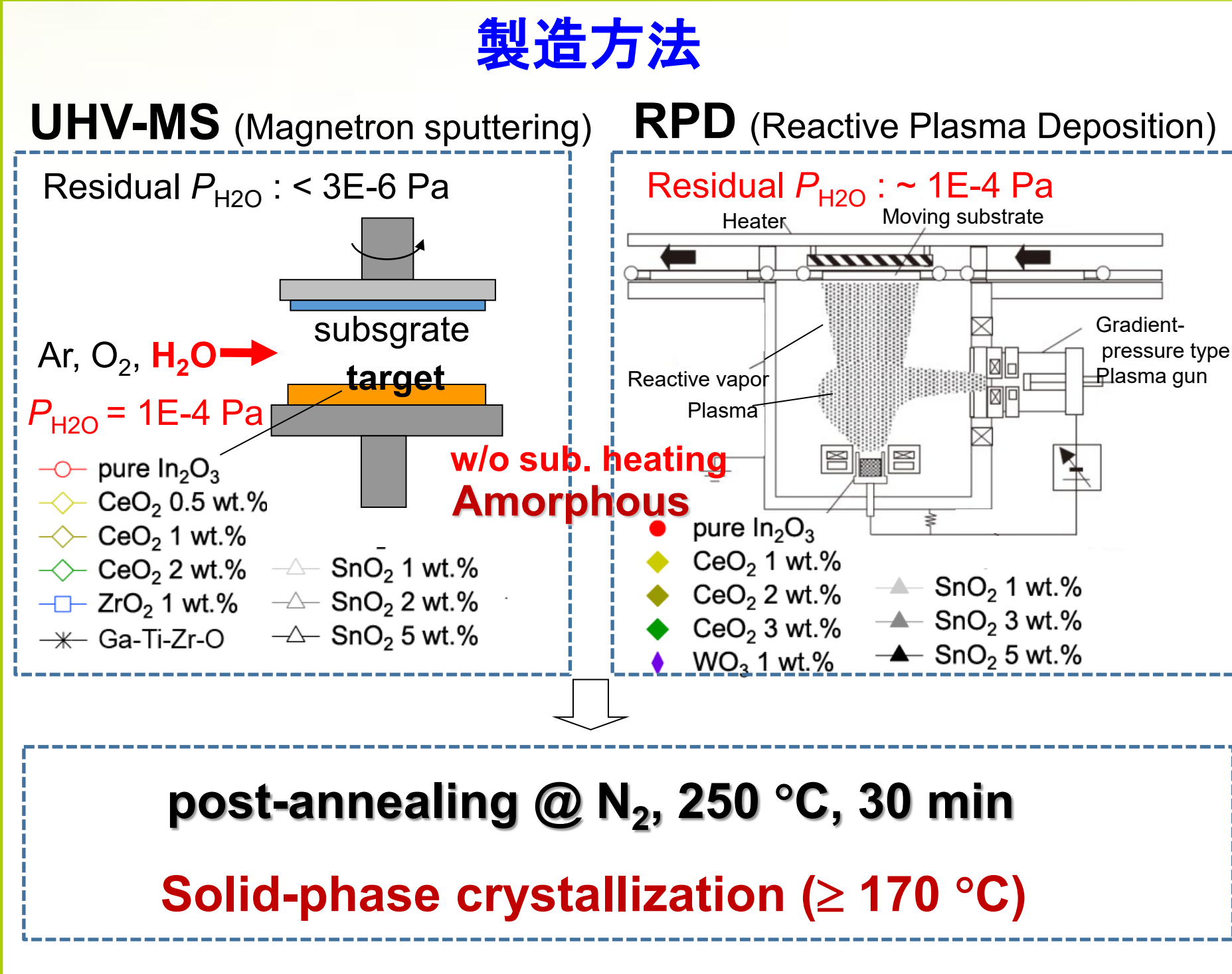
高移動度In₂O₃薄膜の開発



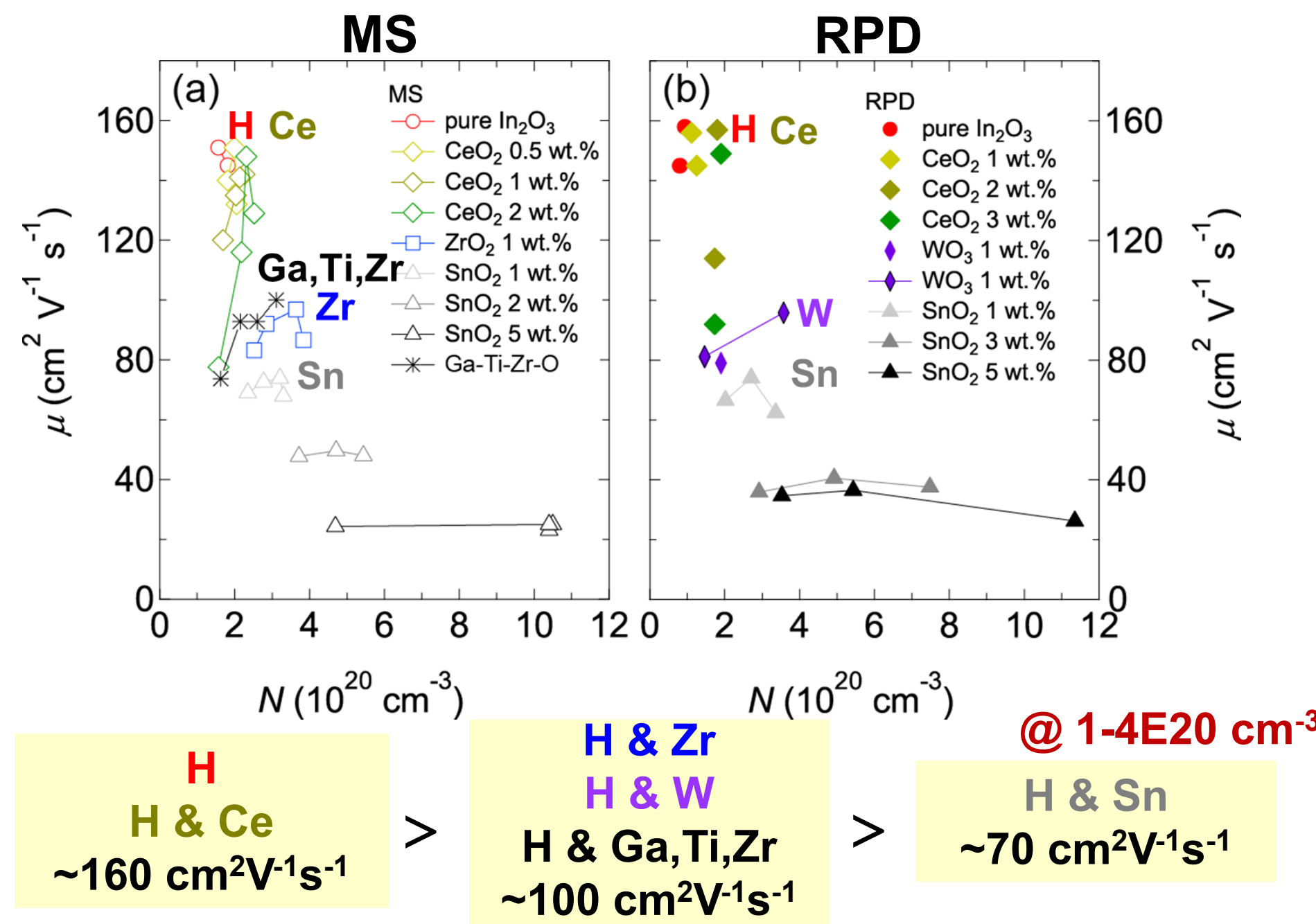
市販ITO基板との比較



これまで製造してきた高移動度In₂O₃:TM,H薄膜



電気特性



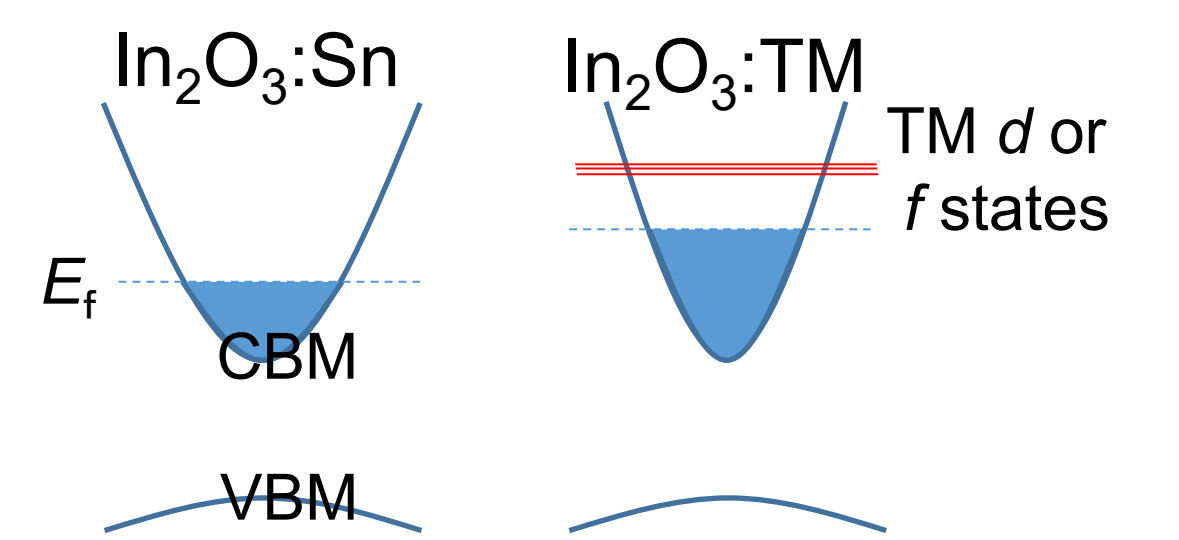
目的

高移動度要因の解明

$$\mu = \frac{e \times \tau}{m^*}$$

①電子の有効質量(m*)

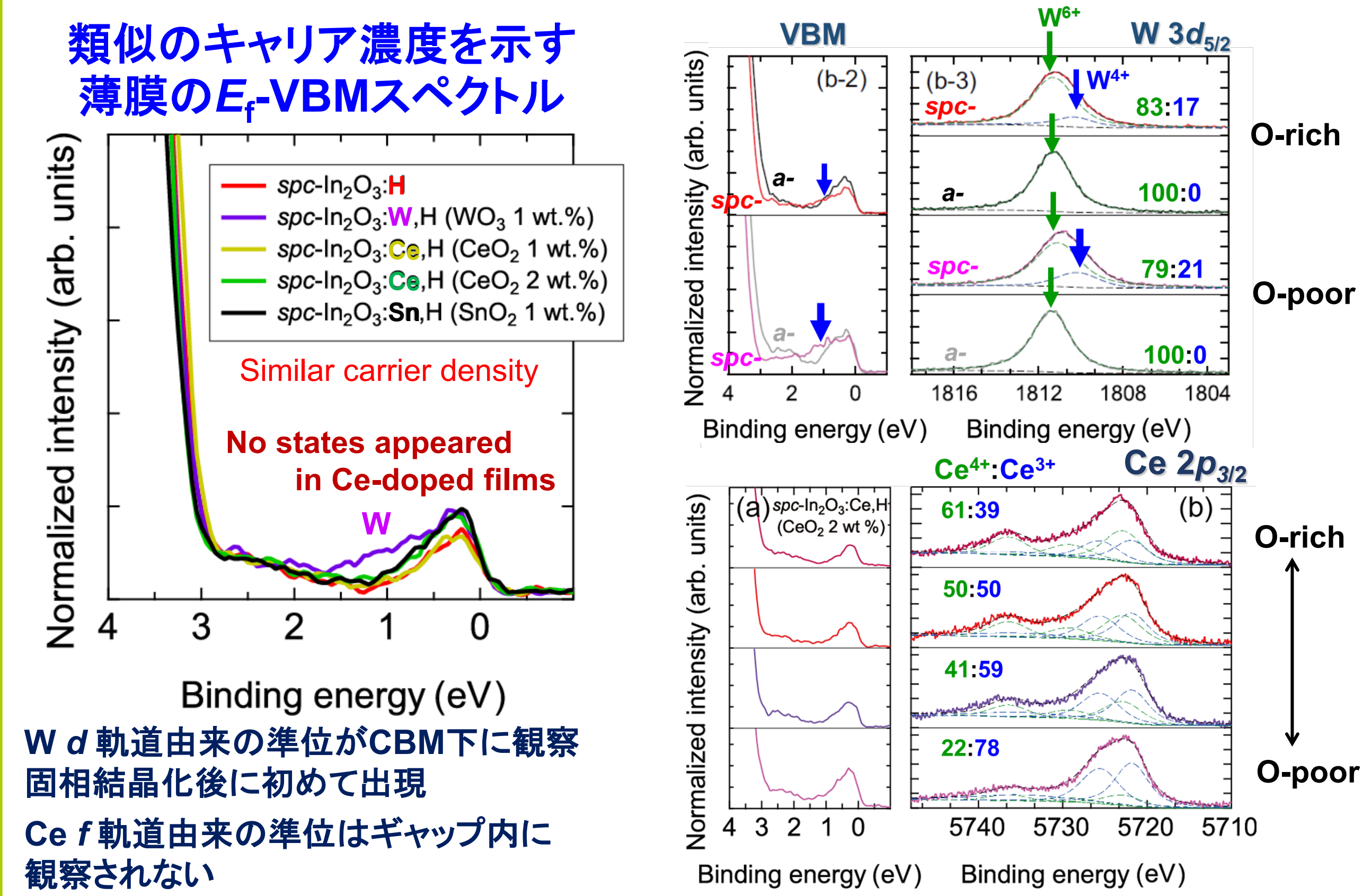
仮説: In₂O₃の伝導帯と遷移金属不純物元素の相互作用が小さいため、電子の有効質量が軽いのではないか?



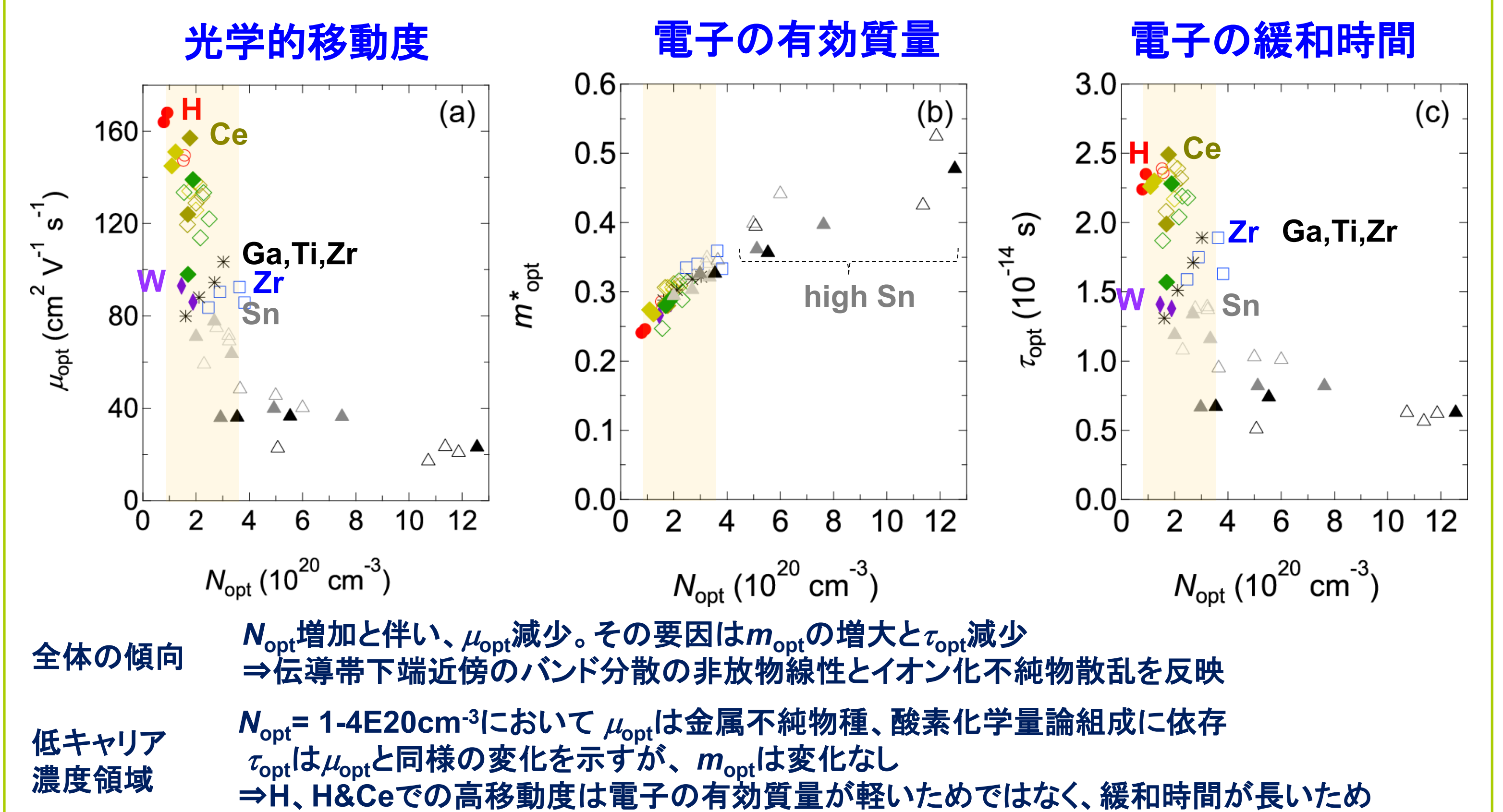
②緩和時間(τ)

仮説: 添加不純物により散乱因子(格子・不純物・粒界)が抑制されているのではないか?

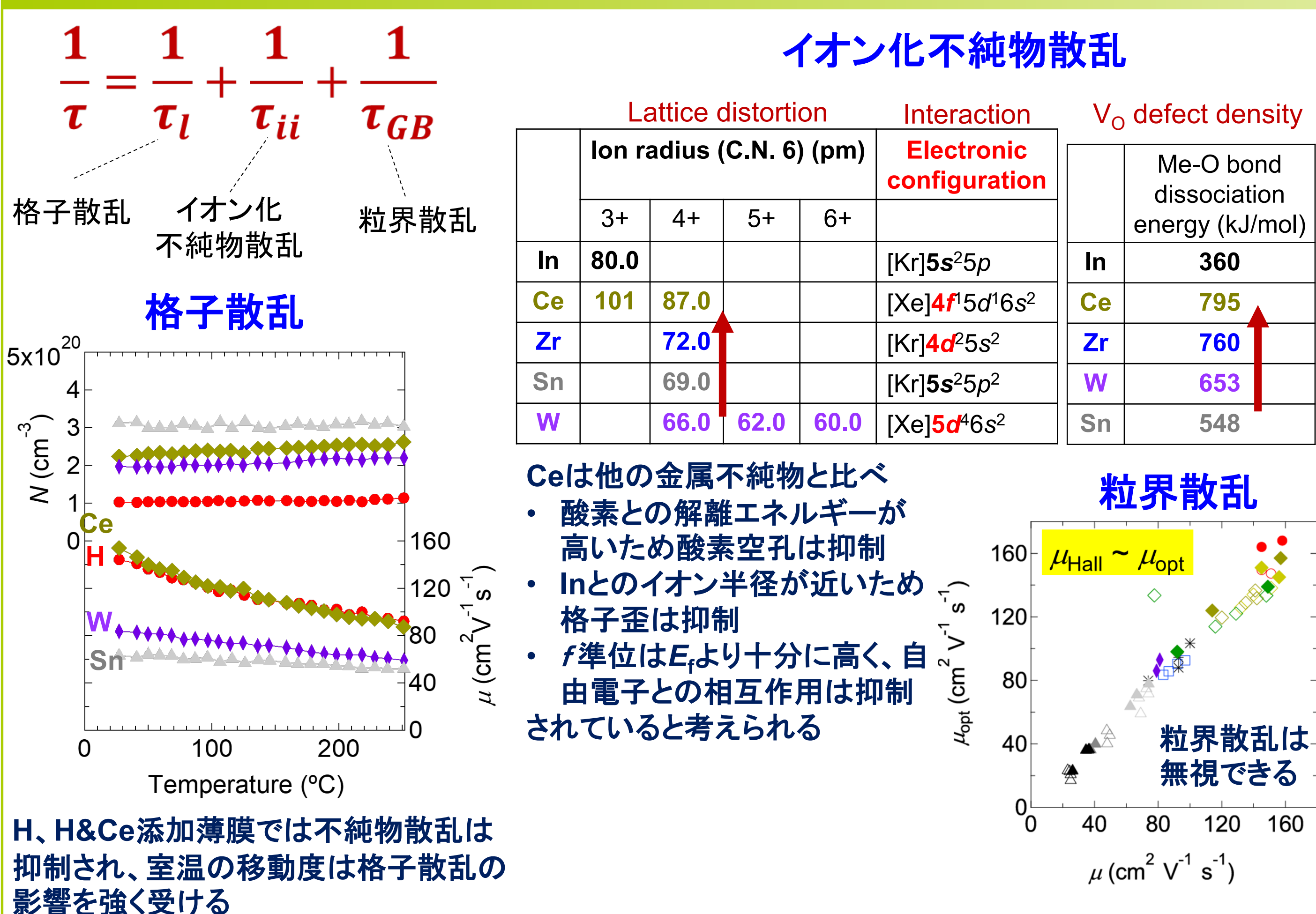
電子状態 (HAXPES)



電子の有効質量と緩和時間 (SE@UV-IR)



緩和時間(キャリア散乱)



まとめ

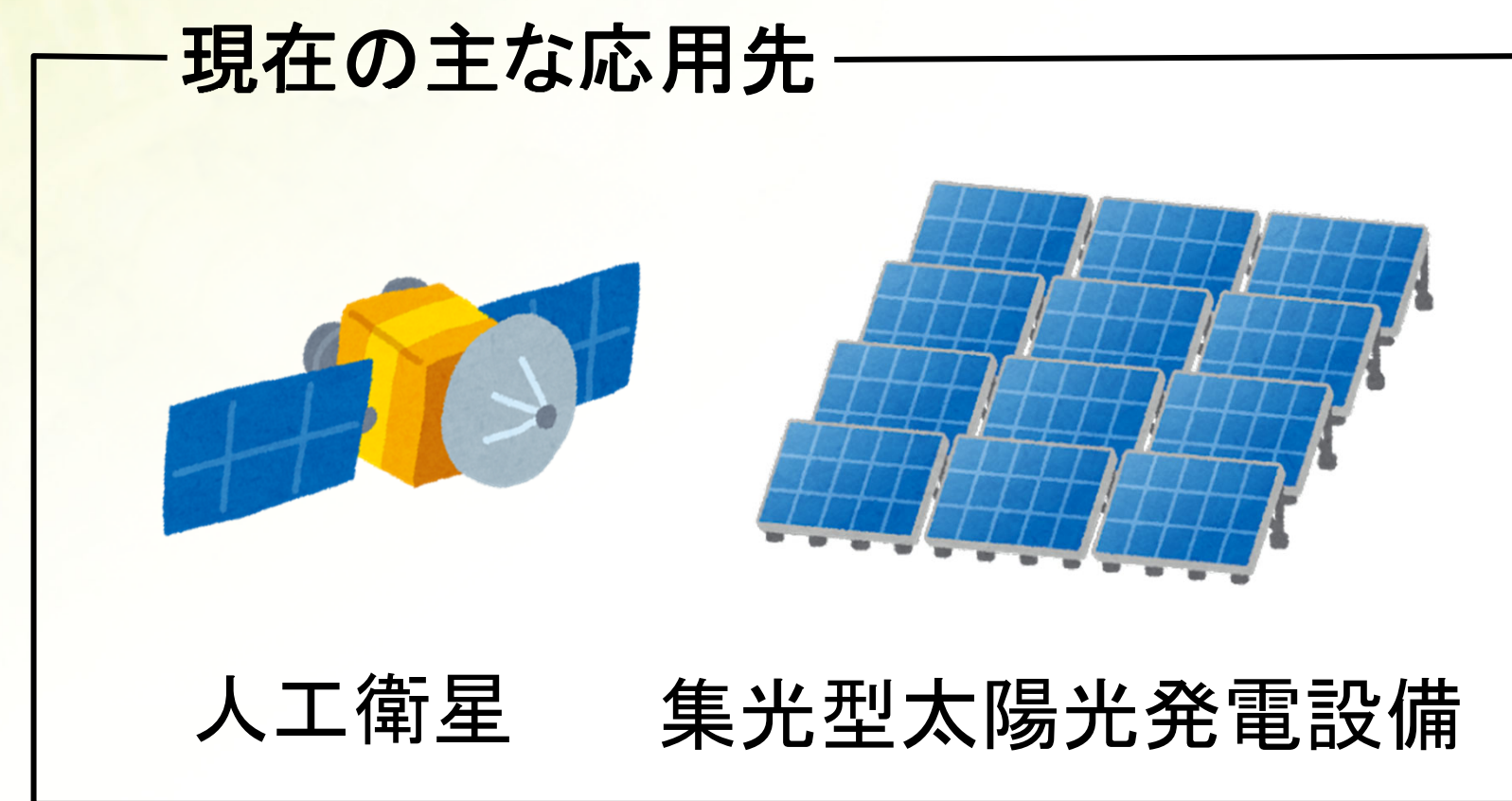
- 適切な水蒸気分圧で非晶質相を形成し、固相結晶化させたIn₂O₃:H及びIn₂O₃:TM,H(TM: Ce, Zr, W, Ga&Ti&Zr)はIn₂O₃:Sn,HやITOよりも本質的に高い移動度を示す。なお、H及びTMは固相結晶化時のアニール温度で決定される準安定過飽和固溶状態にある。薄膜性能は堆積方法に依らず、HとMe量、酸素化学量論組成で決定される。
 - 高移動度要因を明らかにするため、光電子分光を用いた電子状態評価、Hall測定と分光エリプソメトリー測定を用いた電子移動度、有効質量、緩和時間の評価を行った。
 - W添加薄膜ではW d 軌道由来した準位が伝導帯下端の下に観察された。一方、Ce添加薄膜ではCe f 軌道由来の準位はギャップ内に観察されなかった。なお、W、Ce及びZr添加In₂O₃ではW d 軌道由来した準位は伝導帯下端の下に、Ce f、Zr d 軌道由来した準位は伝導帯内に形成されることが第一原理計算より示唆されている。
 - 電子の有効質量は添加不純物元素に依らないが、緩和時間は強く依存することから、高移動度要因は長い緩和時間(散乱過程の抑制)に起因することが判った。
 - ✓ 光学的移動度と電氣的移動度の関係より、固相結晶化薄膜では不純物元素に依らず粒界散乱は無視できるほど小さい。
 - ✓ 移動度の温度依存性より、In₂O₃:H及びIn₂O₃:Ce,H薄膜では顕著に不純物散乱が抑制され、室温の移動度は格子散乱の影響を強く受けている。
 - ✓ Ceは他の金属不純物と比べ、酸素との解離エネルギーが高いため酸素空孔は抑制、Inとのイオン半径が近いため格子歪は抑制、f準位はE_fより高く自由電子との相互作用は抑制されている。
- 参考文献:
T. Koida and J. Nomoto, Phys. Rev. Mater. 6, 055401 (2022), "Effective mass of high-mobility In₂O₃-based transparent conductive oxides fabricated by solid-phase crystallization"

低コストタンデム太陽電池に向けたHVPE成長III-VセルとSHJセルの接合

庄司 靖¹、齋 均¹、大島 隆治¹、牧田 紀久夫¹、松井 卓也¹、生方 映徳²、菅谷 武芳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太陽日酸株式会社 イノベーションユニット

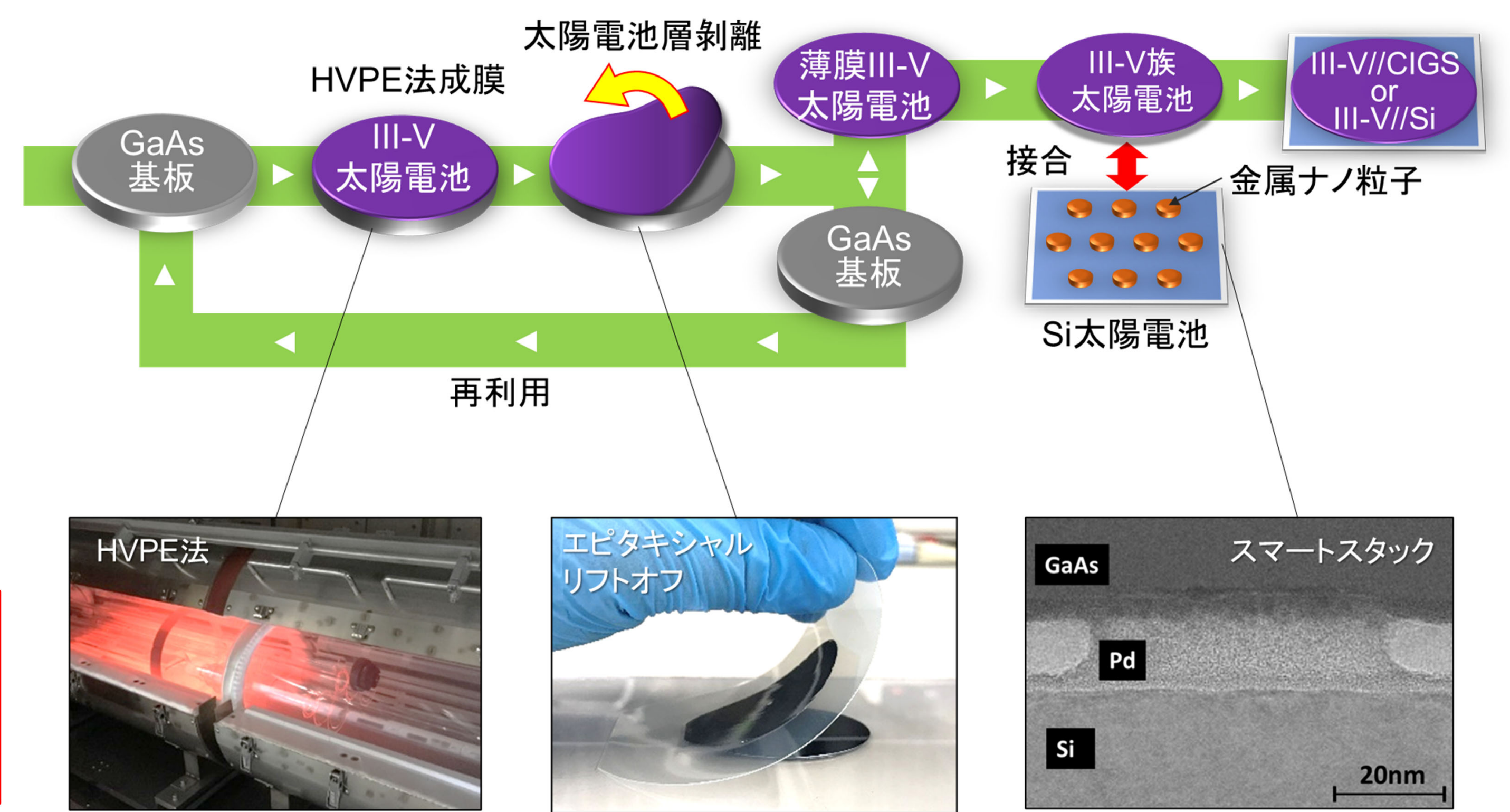
研究の目的

低炭素社会に向けて太陽光発電の導入量拡大が期待されており、発電効率の高いIII-V族太陽電池の移動体応用が検討されている。当該応用には太陽電池の製造コスト低減が課題であり、本研究ではタンデム太陽電池を安価に作製する方法を検討した。



高効率・低コスト太陽電池の実現に向けた検討中のプロセス

- ① ハイドライド気相成長(HVPE)法によるIII-V太陽電池の作製^[1-5]
→ 安価な原料を用いるため結晶成長コストが低減
- ② 太陽電池層剥離技術(エピタキシャルリフトオフ)による基板再利用^[6-8]
→ 高価なGaAs基板のコストが低減
- ③ スマートスタックによるIII-VセルとSiセルの異種材料接合^[9-11]
→ 安価で高効率なタンデム構造を作製可能

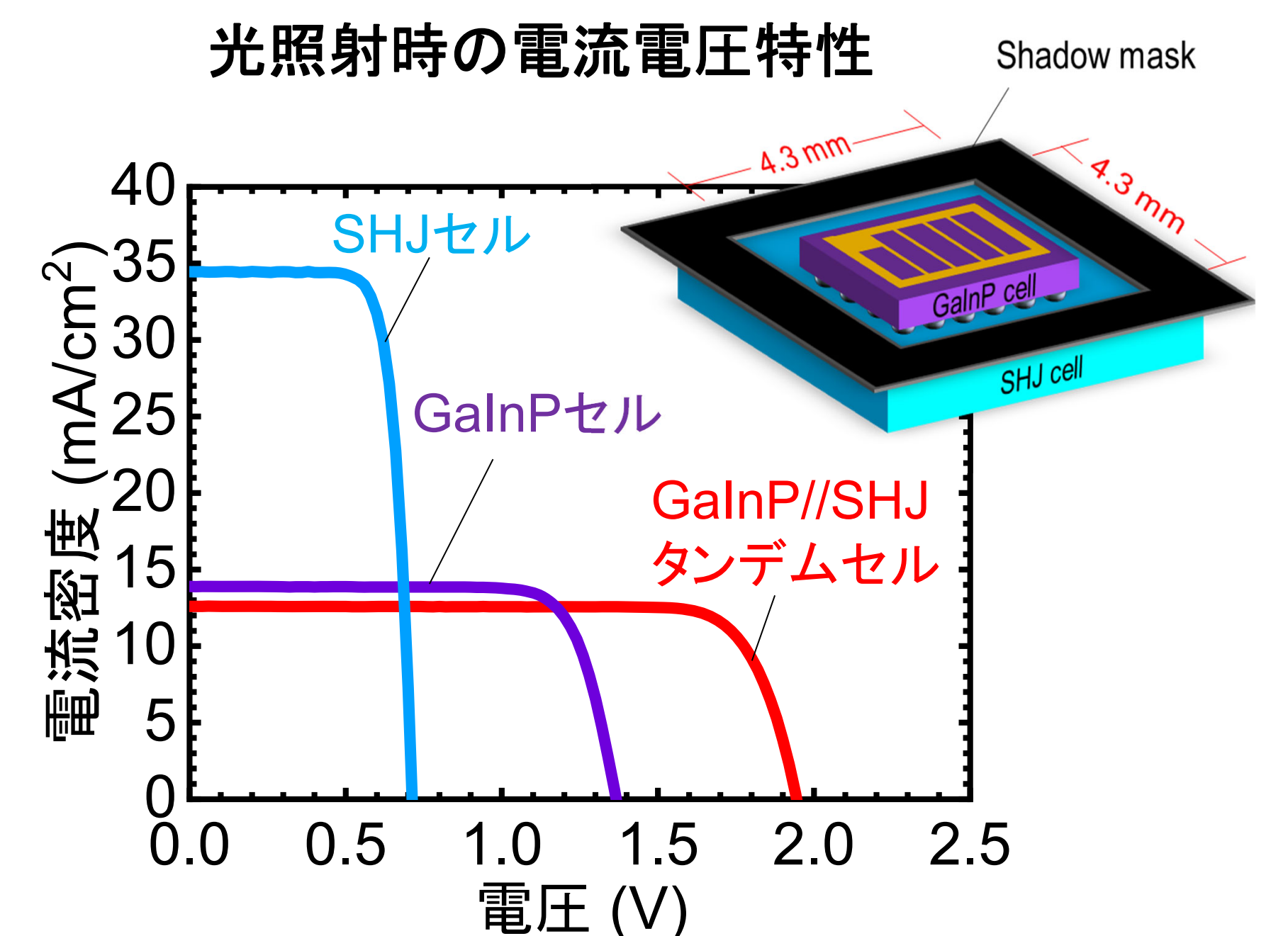
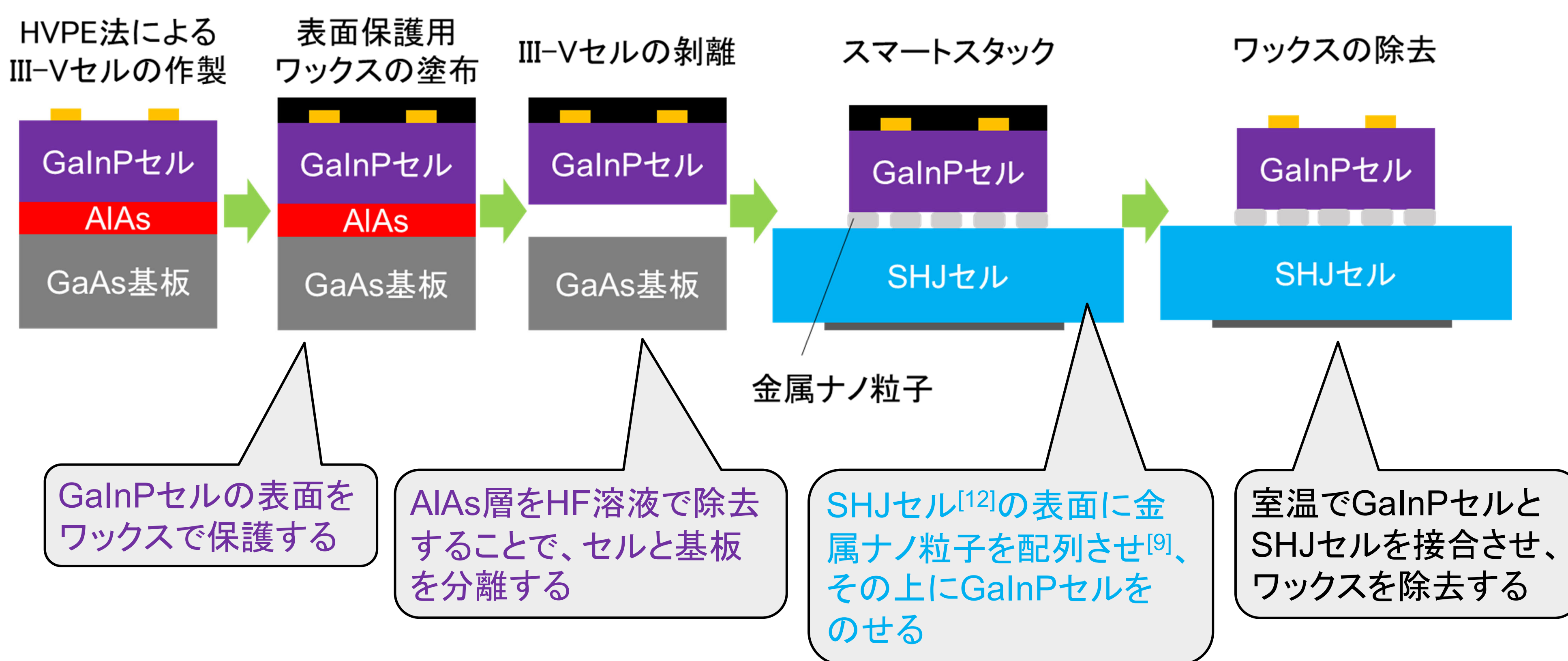


本研究の実施内容

HVPE法で作製したIII-Vセルとシリコンヘテロ接合型(SHJ)セルのスマートスタックを実施し、低コストタンデムセルの作製プロセスを実証する

実験と結果

タンデムセルの作製(III-VセルとSHJセルの接合)プロセス



- サブセルの発電面積を調整することで光電流を整合させた^[13]
- タンデムセルにおいて1.97 Vの開放電圧を得た

結論

- スマートスタック技術を用いて、HVPE法で作製した低コストIII-VセルとSHJセルの接合を初めて実証した
- 作製したデバイスでは良好な電気特性が得られており、低コストプロセスでタンデムセルが作製できることを示した
- 本技術を3接合構造に適用することで発電効率30%超のIII-V//Siセルを安価に作製できる可能性がある

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] J. Simon, et al., *IEEE J. Photovolt.* vol. 6, 191 (2016).
- [2] K. L. Schulte et al., *J. Cryst. Growth* vol. 434, 138 (2016).
- [3] R. Oshima et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 57, 08RD06 (2018).
- [4] J. Simon et al., *Crystals* vol. 9, 3 (2019).
- [5] Y. Shoji et al., *Sol. RRL* vol. 6, 2100948 (2021).
- [6] M. Konagai et al., *J. Cryst. Growth* vol. 45, 277 (1978).
- [7] G. J. Bauhuis et al., *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol.18, 155 (2010).
- [8] Y. Shoji et al., *IEEE J. Photovolt.* vol. 11, 93 (2021).
- [9] H. Mizuno et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 55, 025001 (2016).
- [10] K. Makita et al., *Prog. Photovolt. Res. Appl.* vol. 28, 16 (2019).
- [11] H. Mizuno et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* vol. 14, 9, 11322 (2022).
- [12] H. Umishio et al., *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol.29, 344 (2021).
- [13] M. Baba et al., *IEEE J. Photovolt.* vol. 8, 654 (2018).

HVPEで作製したInGaP/GaAs2接合太陽電池の空間均一性の評価

○南雲 大輔^{1,2}、庄司 靖¹、太野垣 健¹、大島 隆治¹、牧田 紀久夫¹、岡野 好伸²、菅谷 武芳¹
 1 産総研 ゼロエミッション国際共同研究センター、2 東京都市大学
 ○D. Nagumo^{1,2}、Y. Shoji¹、T. Tayagaki¹、R. Oshima¹、K. Makita¹、Y. Okano²、T. Sugaya¹
 1 GZR, AIST、2 Tokyo City University
 E-mail: g2181469@tcu.ac.jp

研究の目的

- III-V族化合物太陽電池の製造コスト低減に向けて、ハイドライド気相成長(HVPE)の検討が進められている。これを大型ウェファに適用するには、成膜の空間的均一性が課題となる。我々は、発光(PL)イメージング測定によって、2インチウェファの基板に作製したInGaP単接合太陽電池の性能の空間分布を簡便に調べることを示した[1]。
- 本研究では、PLイメージング測定でInGaP/GaAs2接合太陽電池におけるInGaPの発光強度を評価し、太陽電池性能と相関を調べた。電界発光(EL)測定ではInGaPサブセルとGaAsサブセルの電圧を見積もり、太陽電池性能と関係解明を進めた。

結果①: 発光特性と太陽電池性能

試料 InGaP/GaAs2接合太陽電池(HVPE法により作製)
 ウェファ大きさ: 2インチ
 セルの大きさ: 3.2 mm角

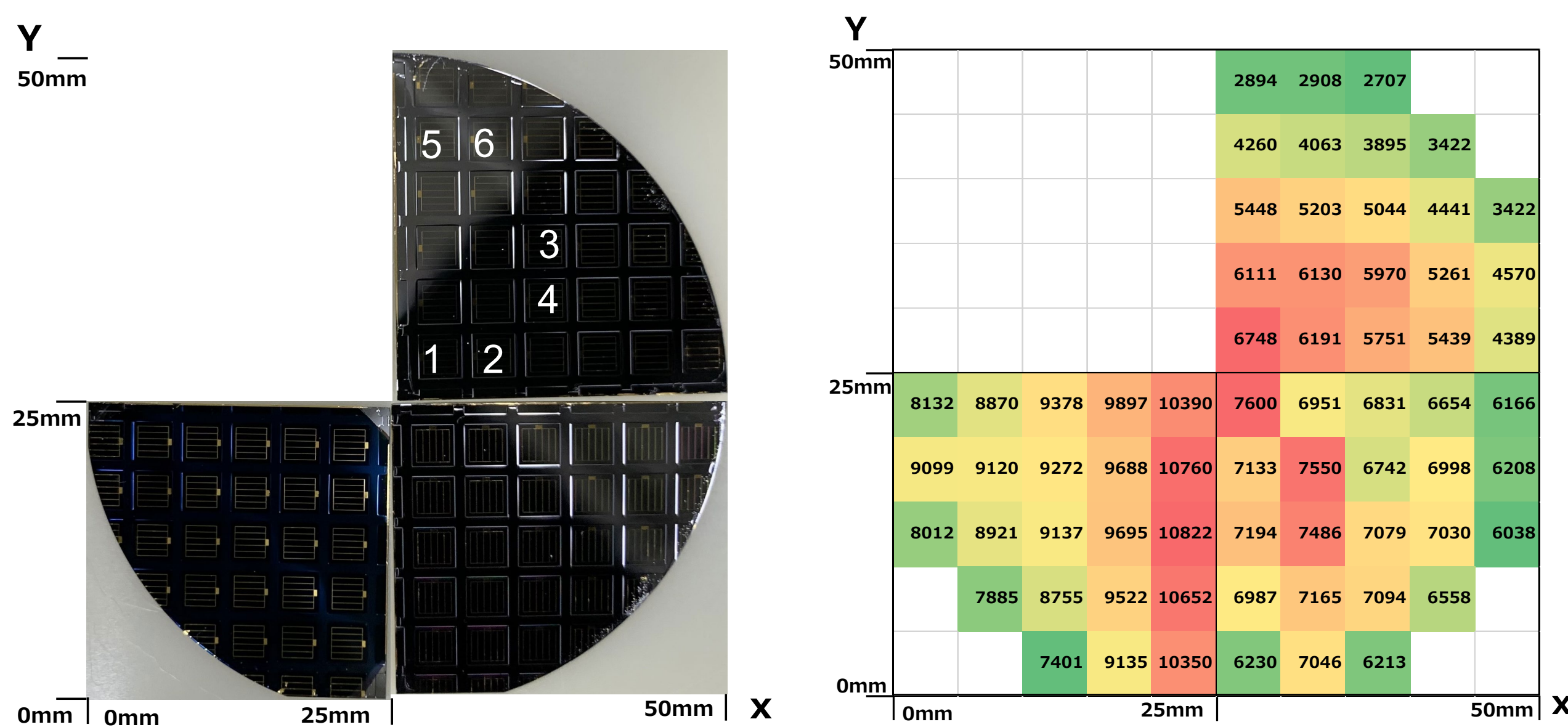


図1. 本研究で使用したInGaP/GaAs2接合太陽電池

図2. InGaP/GaAs2接合太陽電池におけるInGaPサブセルの発光強度の分布

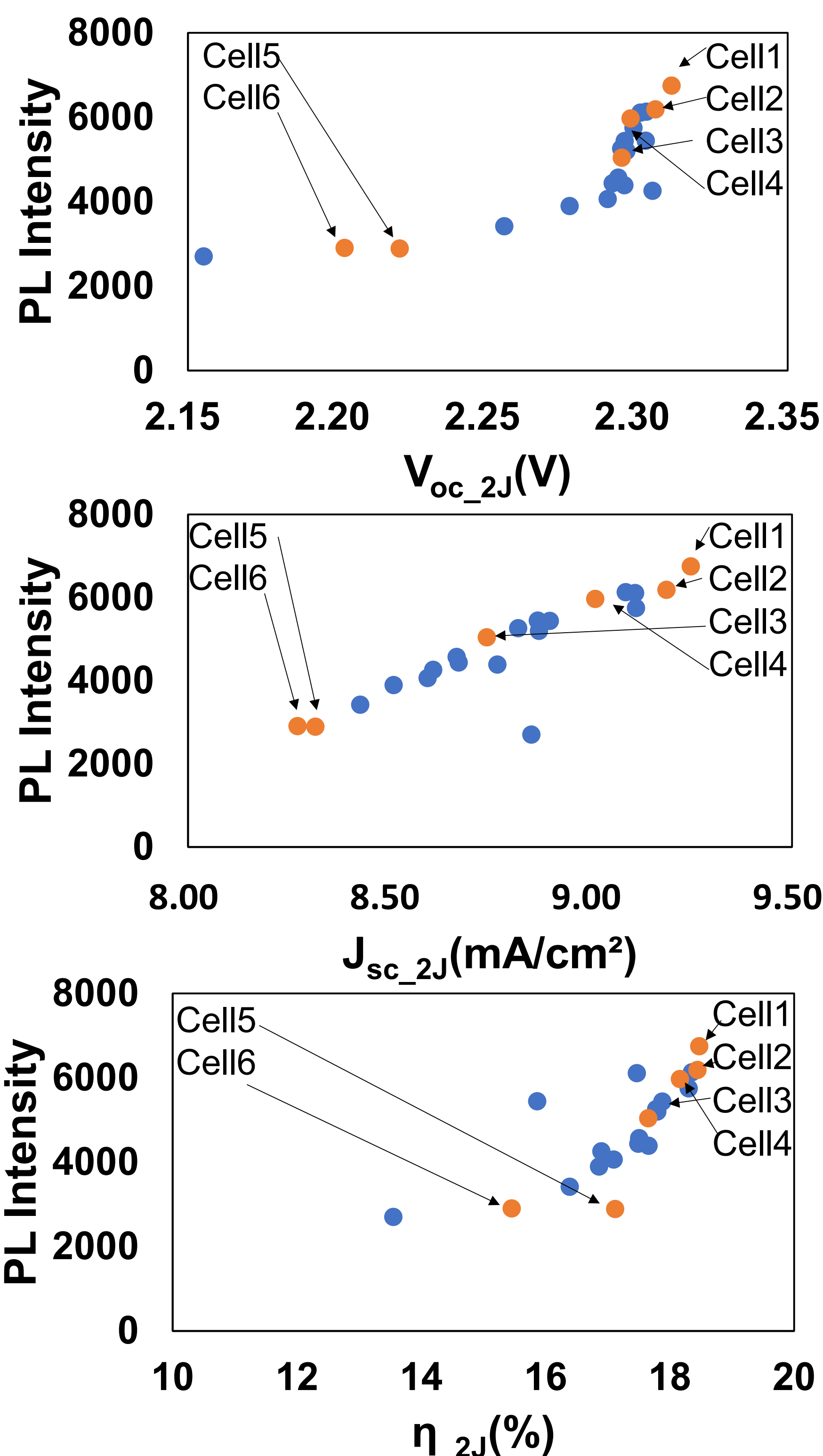


図3. InGaP/GaAs2接合太陽電池のPL強度と太陽電池性能の関係

InGaP/GaAs2接合太陽電池におけるInGaPサブセルの発光強度は、高いセルほど太陽電池性能に良い傾向が見られた。

結果②: 電界発光と太陽電池性能

InGaP/GaAs2接合太陽電池の電圧低下の起源を解明するために、EL測定を用いてGaAsとInGaPサブセルの寄与を調べた。

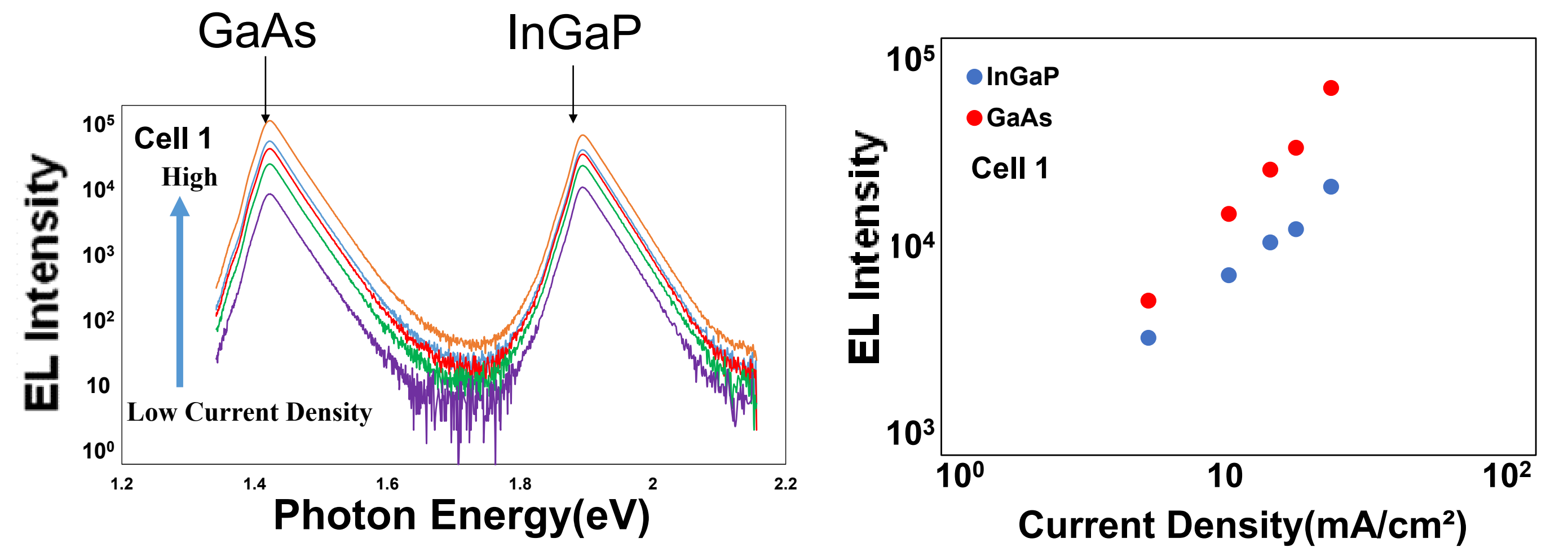


図4. InGaP/GaAs 2J 太陽電池のELスペクトル

図5. InGaPトップセルとGaAsボトムセルの電流密度とEL強度の関係

EL強度と量子効率の値からサブセル電圧を求める計算式[2]

$$V_i(J_{EL}) = \frac{kT}{q} \ln[\phi_{EL,i}(J_{EL})] + \frac{E}{q} - \frac{kT}{q} \ln(E) - 2 \frac{kT}{q} \ln(\phi_{EQE,i}) - \delta V_i$$

EL強度 光エネルギー 量子効率 Luminescence collection factor

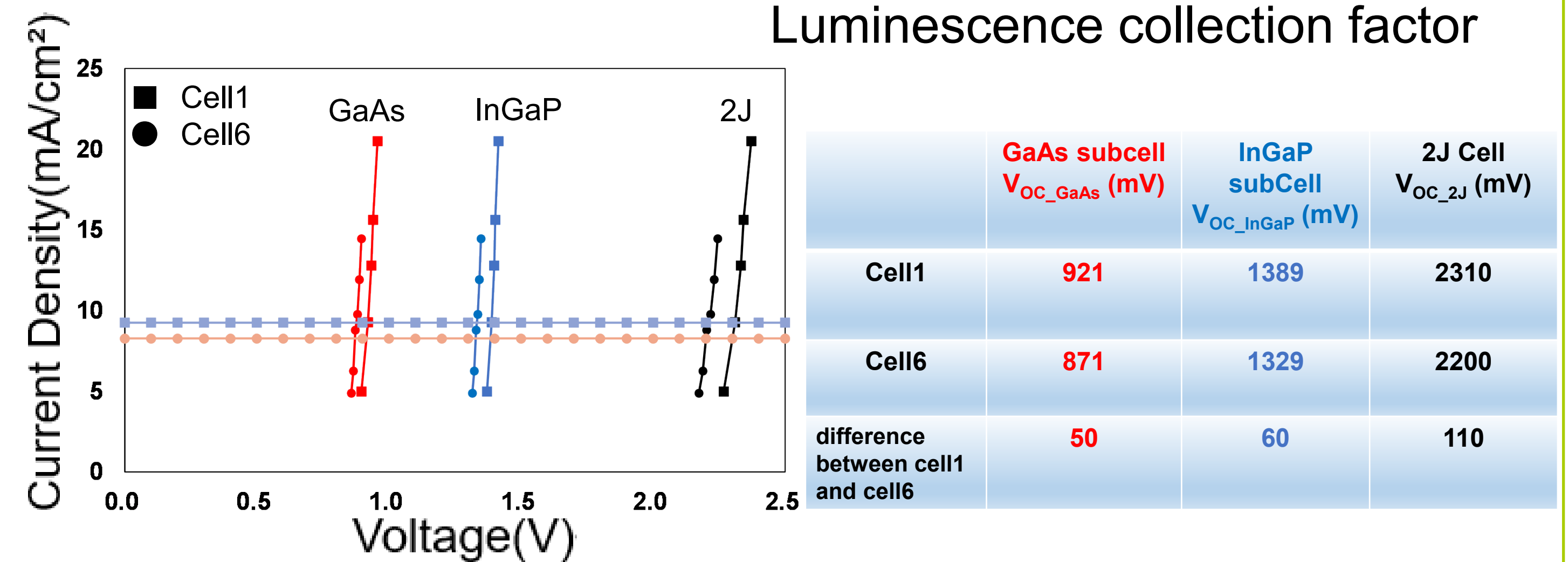


図6. InGaP/GaAs2接合太陽電池とInGaPトップセル、GaAsボトムセルの電流密度と電圧の関係

表1. InGaP/GaAs2接合太陽電池とサブセルの電圧

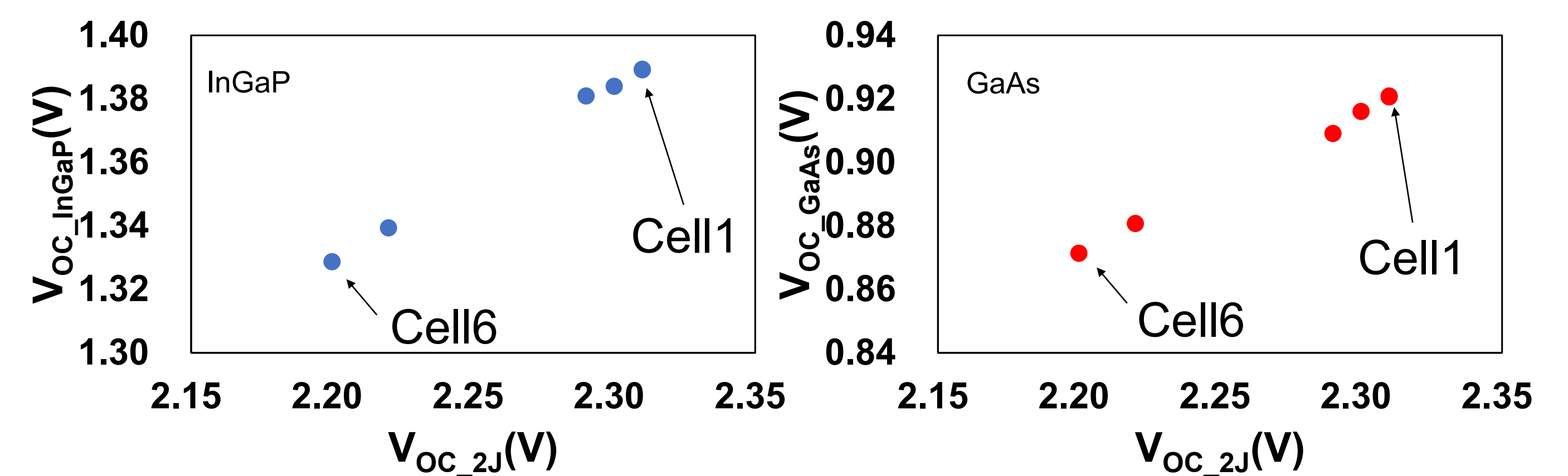


図7. InGaP/GaAs2接合太陽電池のサブセル電圧

本試料であるInGaP/GaAs2接合太陽電池の電圧低下は、InGaPとGaAsサブセルにおける電圧低下が同程度寄与していた。

結論

- InGaP/GaAs2接合太陽電池にPLイメージング測定とEL測定を行った。
- InGaP/GaAs2接合太陽電池におけるInGaPの発光強度は、太陽電池性能と相関が見られた。
- InGaP/GaAs2接合太陽電池の電圧低下の起源について、GaAsとInGaPサブセルにおける電圧低下の割合を見積もった。
- InGaP/GaAs2接合太陽電池においても、PLイメージングにより簡便に性能評価が可能であることを示した。

参考文献

- 南雲ほか, 2021年応用物理学会秋季学術講演会 23a-P12-1.
- T. Aihara et al., Jpn. J. Appl. Phys. 59, SGGF02 (2020).

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)の結果得られたものである。

HVPE法を用いた 超高速GaAs太陽電池の開発

大島 隆治¹、小倉 暁雄²、庄司 靖¹、牧田 紀久夫¹、生方 映徳³、今泉 充²、菅谷 武芳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 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 3 大陽日酸株式会社

研究の目的

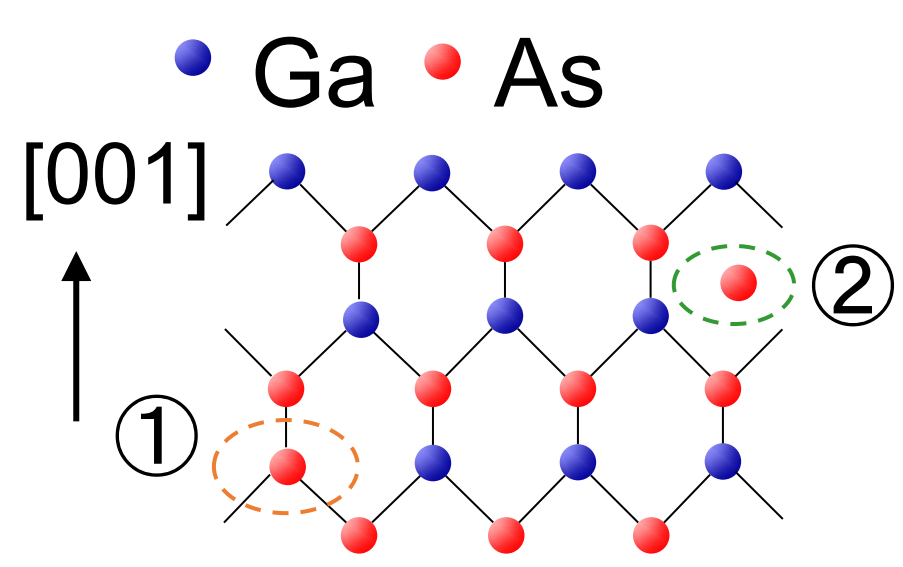
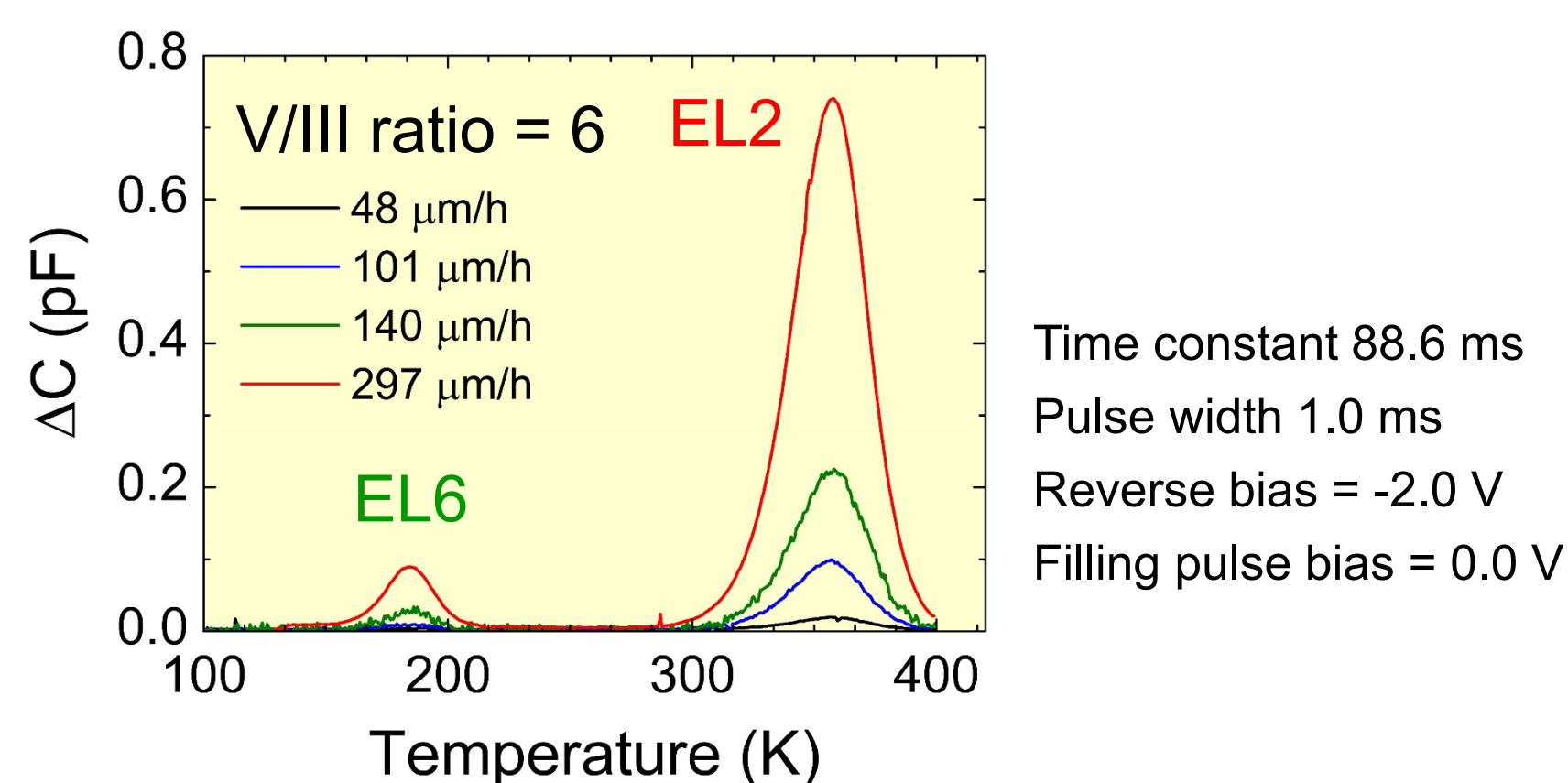
- ・ **ハイドライド気相成長(HVPE)法**はIII-V族化合物太陽電池の**低コスト成長技術**として期待されている。
- ・ これまでに我々は、3室構造のHVPE装置を開発し、高速成長[1]、界面制御[2]、アルミ系材料の導入[3]に取り組み、GaInP/GaAs 2接合セルにおいて変換効率28.3%を得た。
- ・ 高性能III-Vセルの量産技術の構築には、**高速成長時に太陽電池性能の低下を伴わない高品質な結晶**を得ることが課題である。
- ・ 今回、GaAsセルの性能に影響を与える深い電子トラップ、および成長速度と太陽電池性能との相関を調べた。

DLTS法を用いた電子トラップ解析

DLTS試料

p^+ -GaAs, 0.2 μm
 p^+ -GaAs, 0.1 μm
 **n -GaAs, 2 μm ,
 $4\sim 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$**
 n^+ -GaAs, 0.2 μm
 n^+ -GaAs(001) 4° to (111)B

DLTSスペクトル

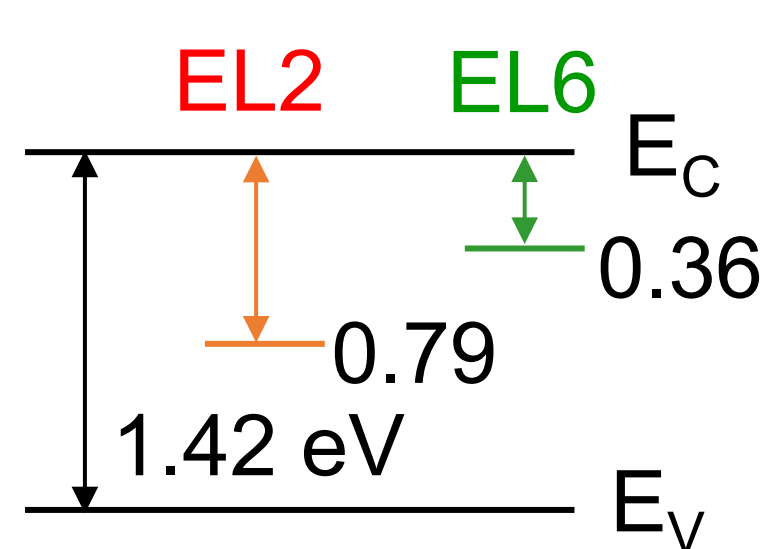


・ **形成される欠陥種は成長速度に依存しない**

・ GaAs結晶中の結晶欠陥に関する文献[4]と比較して各ピークを同定;

EL2 \Rightarrow ① Asアンチサイト(As_{Ga})を含む複合欠陥

EL6 \Rightarrow ② 格子間As(As_i)を含む複合欠陥



・ 高速化に従ってEL2欠陥密度は増大

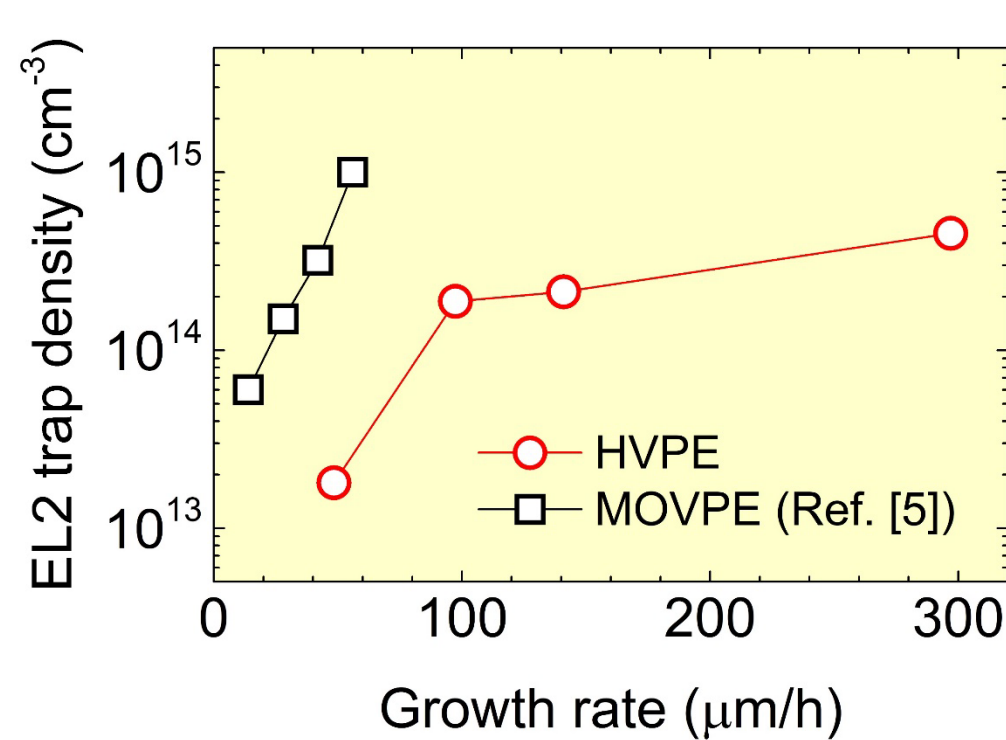
・ **MOVPE法[5]と比較して顕著に小さい** (HVPE法での他の報告値と同等[6])

\Rightarrow 高温、低V/IIIのHVPE成長は、吸着原子の表面マイグレーションが促進されることで欠陥形成が抑制された可能性

HVPE: V/III = 6, $T_{\text{sub}} = 660^\circ\text{C}$

MOVPE [5]: V/III = 9, $T_{\text{sub}} = 640^\circ\text{C}$

EL2トラップ密度



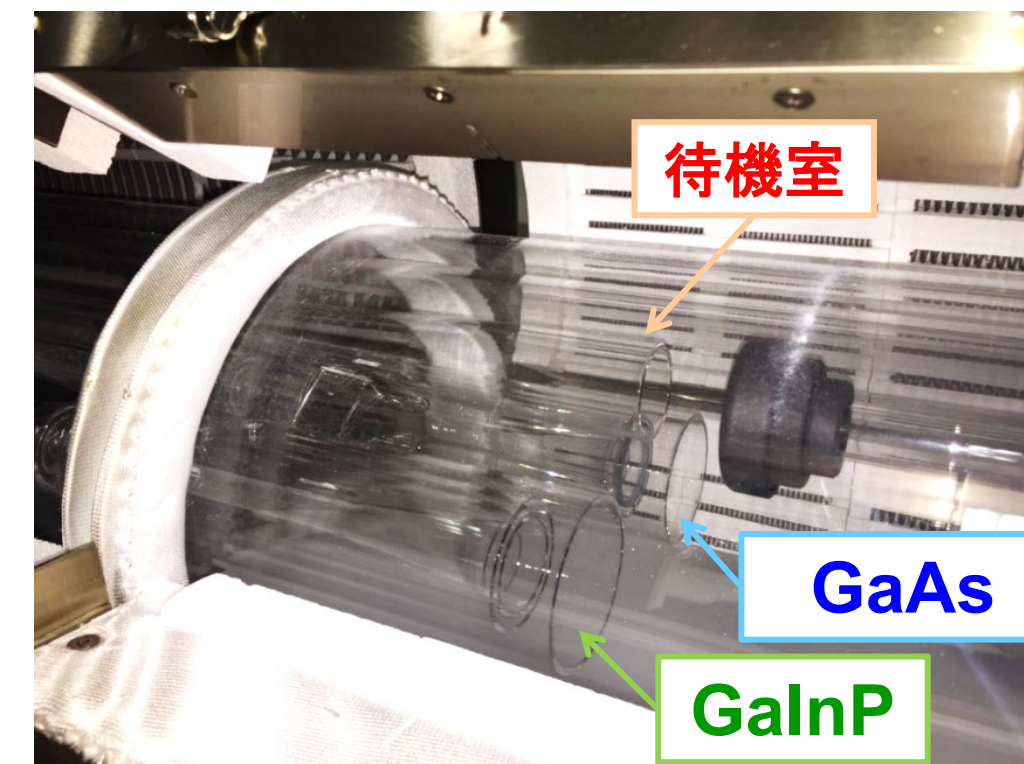
結論

- ・ HVPE法を用いた超高速GaAs結晶の深い電子トラップをDLTS法により評価し、**EL2トラップ密度がMOVPE法を用いた高速GaAs成長と比較して顕著に小さい**ことを明らかにした。
- ・ 超高速GaAsセルにおいて、**200 $\mu\text{m}/\text{h}$ (ベース層成膜時間: 36秒)までの範囲においてセル特性の低下は見られなかった。**
- ・ 今後は同様に超高速化したGaInPセルを開発し、超高速2接合セルを実現する。

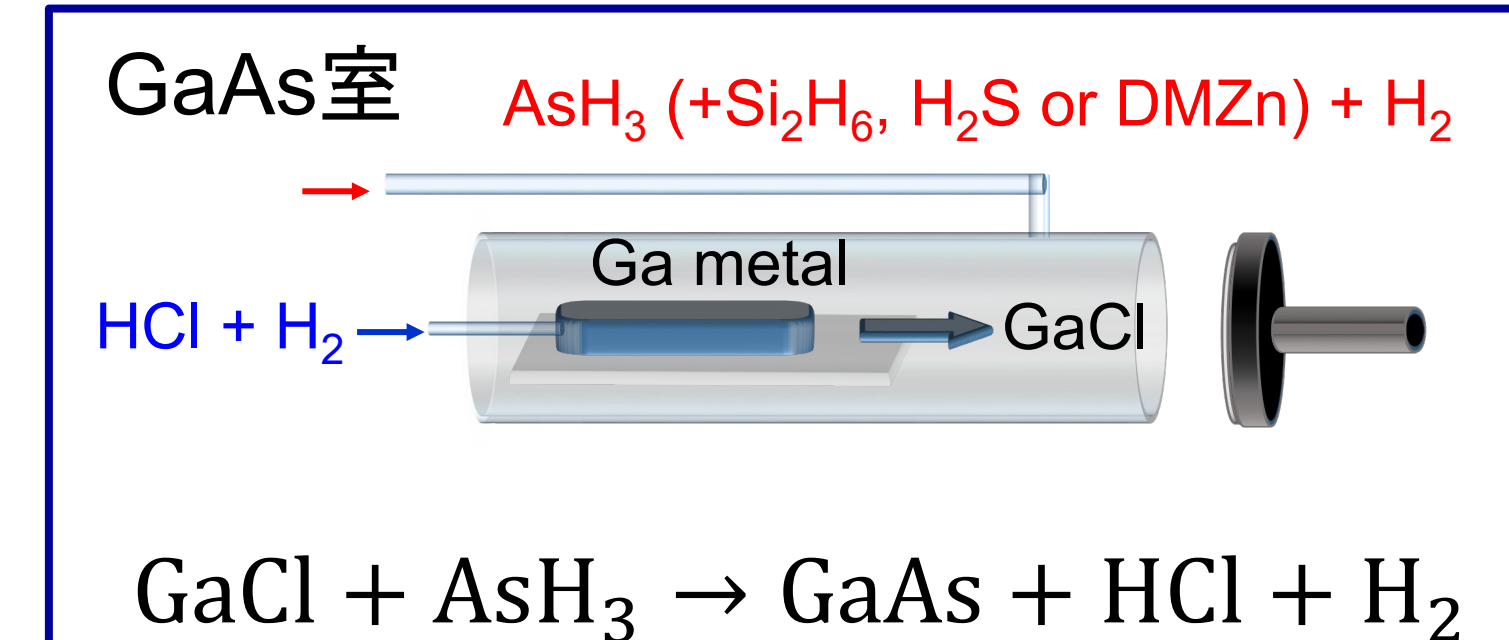
本研究は、国立研究開発法人NEDOの委託の下で行われた。

ハイドライド気相成長(HVPE)法

大陽日酸 H260

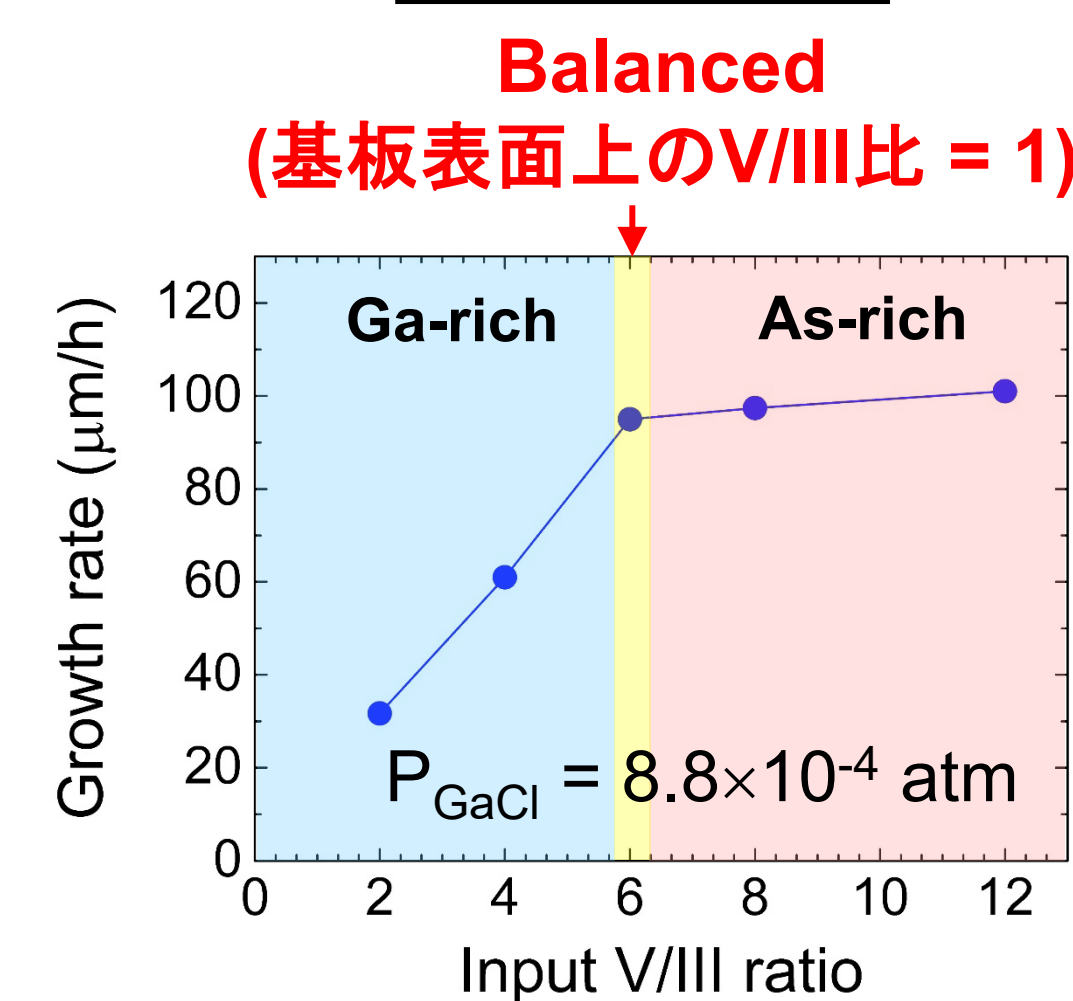


- ・ ホットウォール型反応炉 (原料部 $\sim 700^\circ\text{C}$, 基板部 $\sim 660^\circ\text{C}$)
- ・ 常圧プロセス
- ・ 3室構造によるヘテロ成長

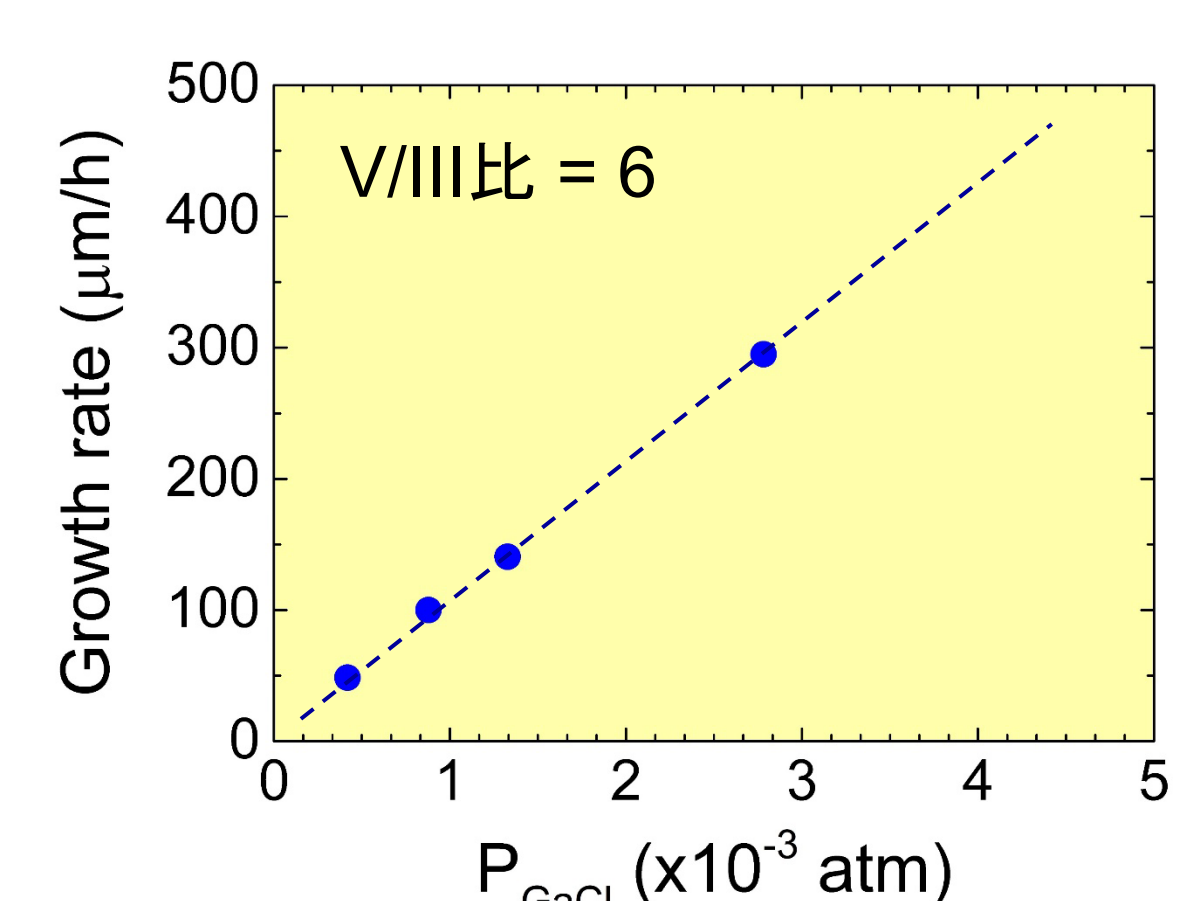


高速GaAs成長

V/III比依存性



GaCl分圧依存性



供給原料V/III比 = 6において、

- ・ 成長に寄与するGa種, As種がバランス (成長表面上のV/III比 = 1)
- ・ 成長速度が P_{GaCl} に対して線形に増大 (最大**297 $\mu\text{m}/\text{h}$** まで確認)

超高速GaAs太陽電池

GaAs太陽電池 (Rear Heterojunction)

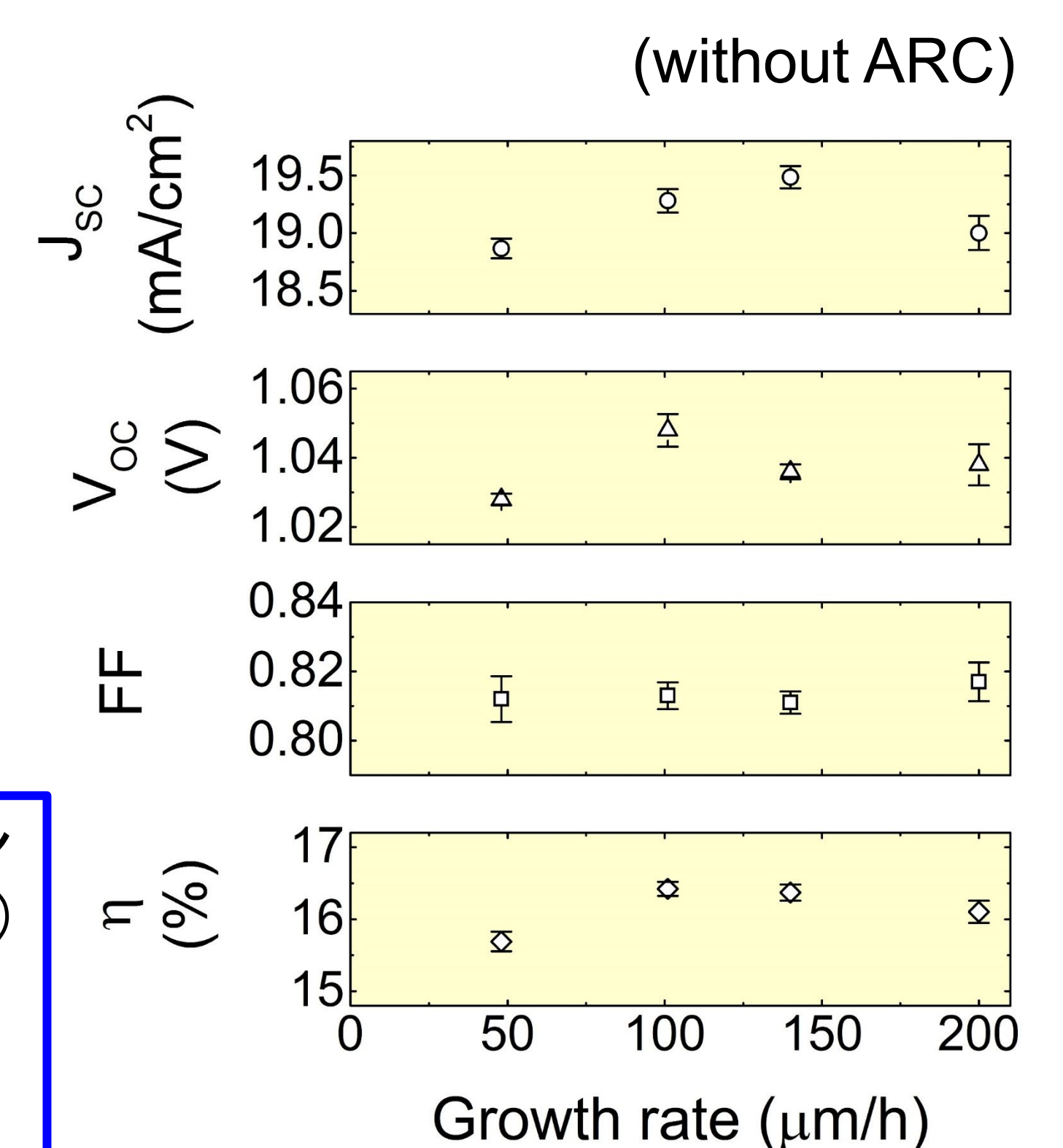
n^+ GaInP window, 50nm
 n GaAs base, 2 μm
 $3\sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 p^+ GaInP emitter, 100 nm
 p^+ GaAs
 p^+ GaAs(001) 4° to (111)B

n GaAs base層のみの成長速度を48 ~ 200 $\mu\text{m}/\text{h}$ の範囲で変化

- ・ 開放電圧(1.04 V \pm 0.01V)とバンドギャップ(1.42 eV)との差(W_{oc})は**0.38 V**であり、高品質なGaAs結晶が得られている
- ・ 48 ~ 200 $\mu\text{m}/\text{h}$ の範囲において、**セル特性の低下は見られない**

\Rightarrow 本研究の範囲内の成長速度では、EL2トラップによるセル特性への影響は小さいと考えられる。

セルパラメータ (without ARC)



参考文献

- [1] R. Oshima et al., *J. Cryst. Growth* 2020, **537**, 125600.
- [2] R. Oshima et al., *IEEE J. Photovolt.* 2019, **9**, 154.
- [3] Y. Shoji et al., *Sol. RRL* 2022, **6**, 2100948.
- [4] C. V. Reddy et al., *Phys. Rev. B* 1996, **54**, 11290.
- [5] K. J. Schmieder et al., *IEEE J. Photovolt.* 2017, **7**, 340.
- [6] W. Metaferia et al., *Nat. Commun.* 2019, **10** 3361.

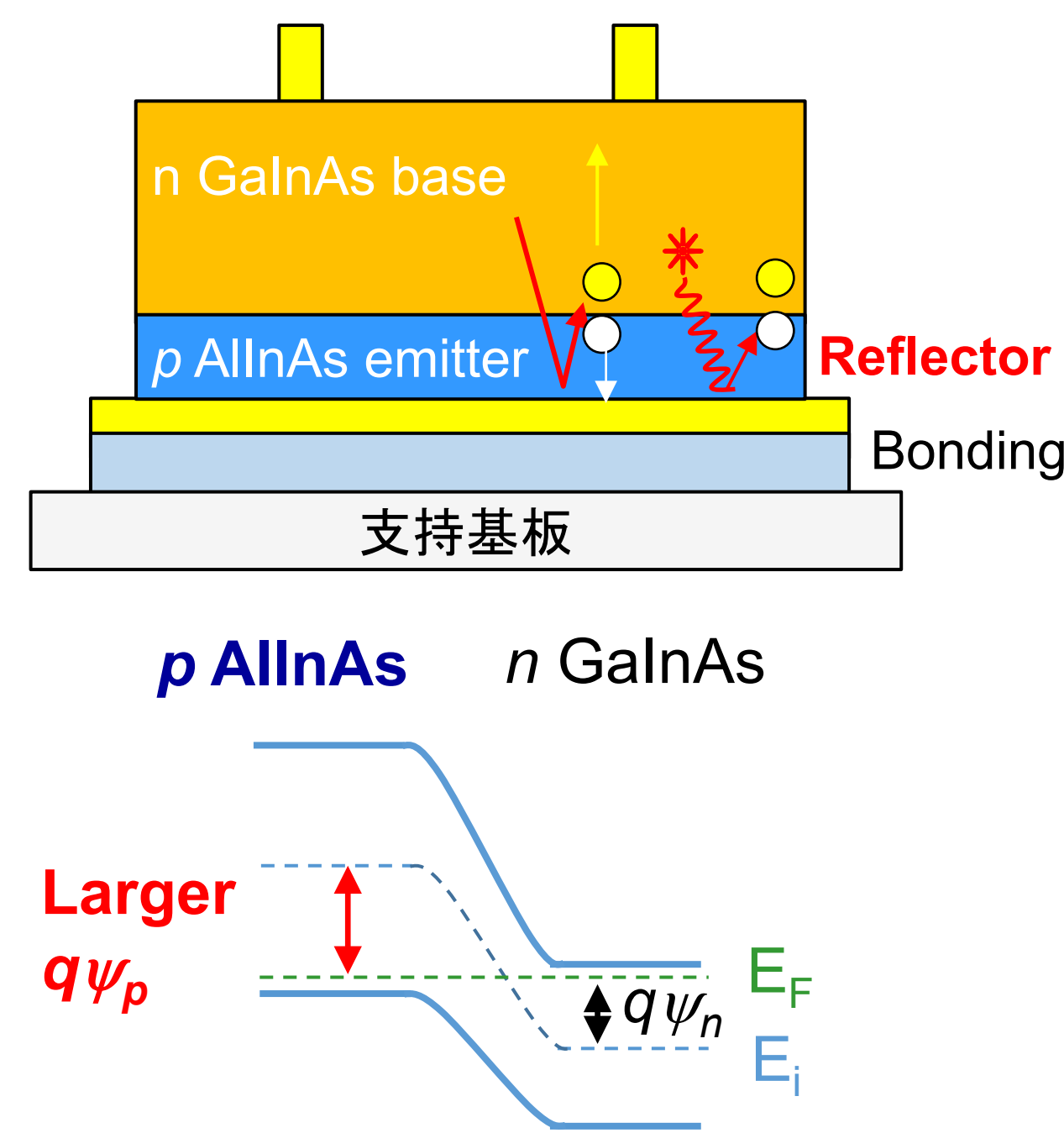
MBE法を用いた GaInAsへテロ接合型太陽電池の開発

大島 隆治、庄司 靖、牧田 紀久夫、菅谷 武芳
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

研究の目的

- Ga_{0.47}In_{0.53}AsはInPと格子整合する0.75 eV帯材料であり、多接合太陽電池におけるボトムセルとして用いられている[1-3]。しかし、GaInAsセルの研究開発例は少なく、高効率化技術は確立されていなかった。
- これまでに、高温成長、微傾斜基板を用いたGaInAs結晶の高品質化[4]、成長シーケンスの最適化によるヘテロ界面の高品質化[5]を実現し、変換効率13.1%までの高効率化を達成した。
- 一方で近年、GaAs太陽電池においてヘテロ材料を用いたpn接合によってエミッタ層での再結合損失を低減でき、開放電圧が向上できることが示されていた[6]。
- 今回、InP基板上GaInAsセルにおいて初めて逆積みリアヘテロ接合型太陽電池による高性能化を検討した。

リアヘテロ接合型セル



1. 裏面反射構造

- 光路長の増大
- 発光再結合によって放出された光子の再吸収 (フォトンリサイクリング [7])

2. ヘテロpn接合

- 内蔵電界 (V_{bi}) の増大
- エミッタ層での非発光再結合損失の低減

GaInAsリアヘテロ型セル(RHJ)の構造最適化

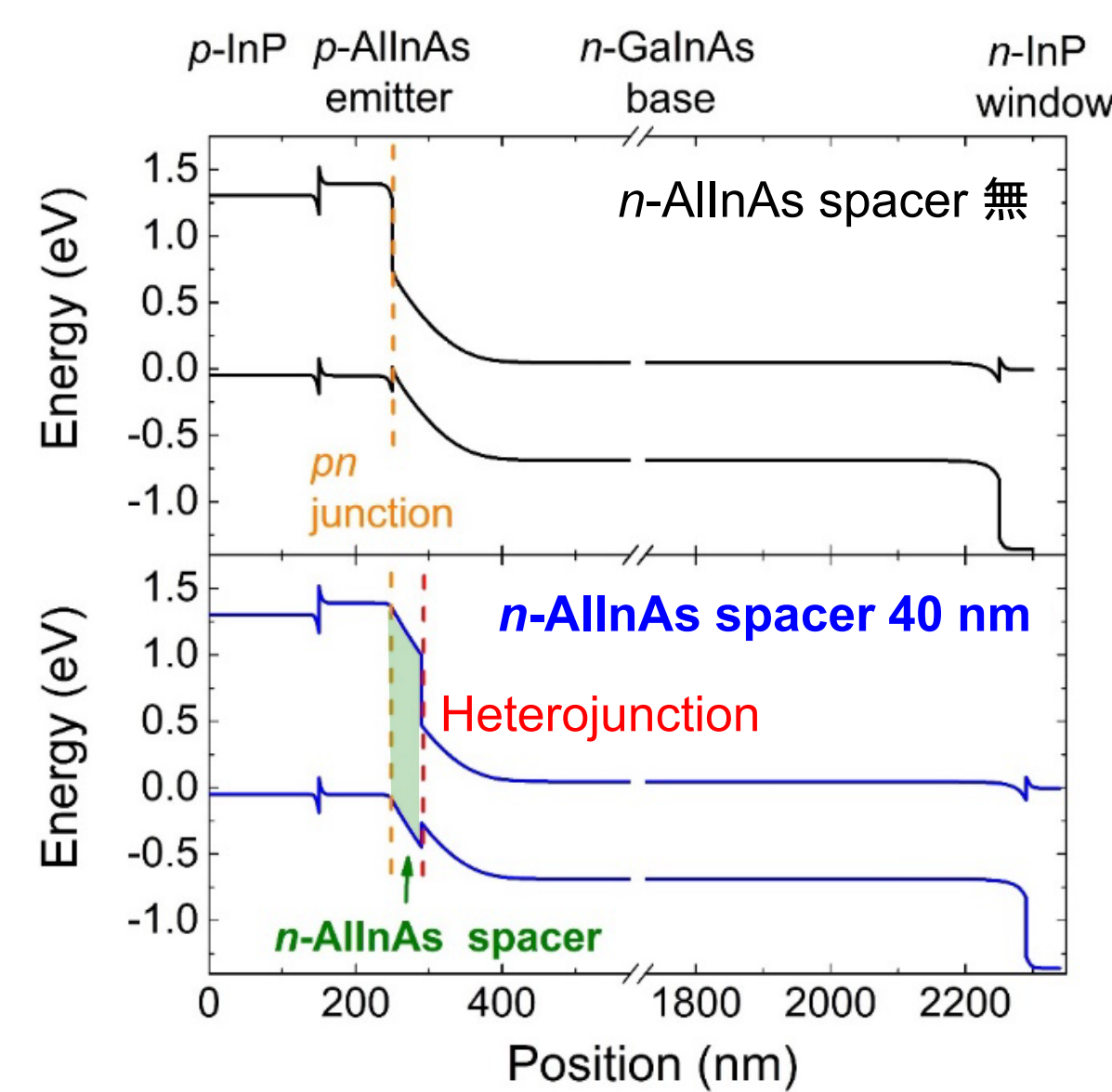
固体ソース分子線エピタキシー(MBE)法

- 2インチInP(001)基板上にセル構造を形成

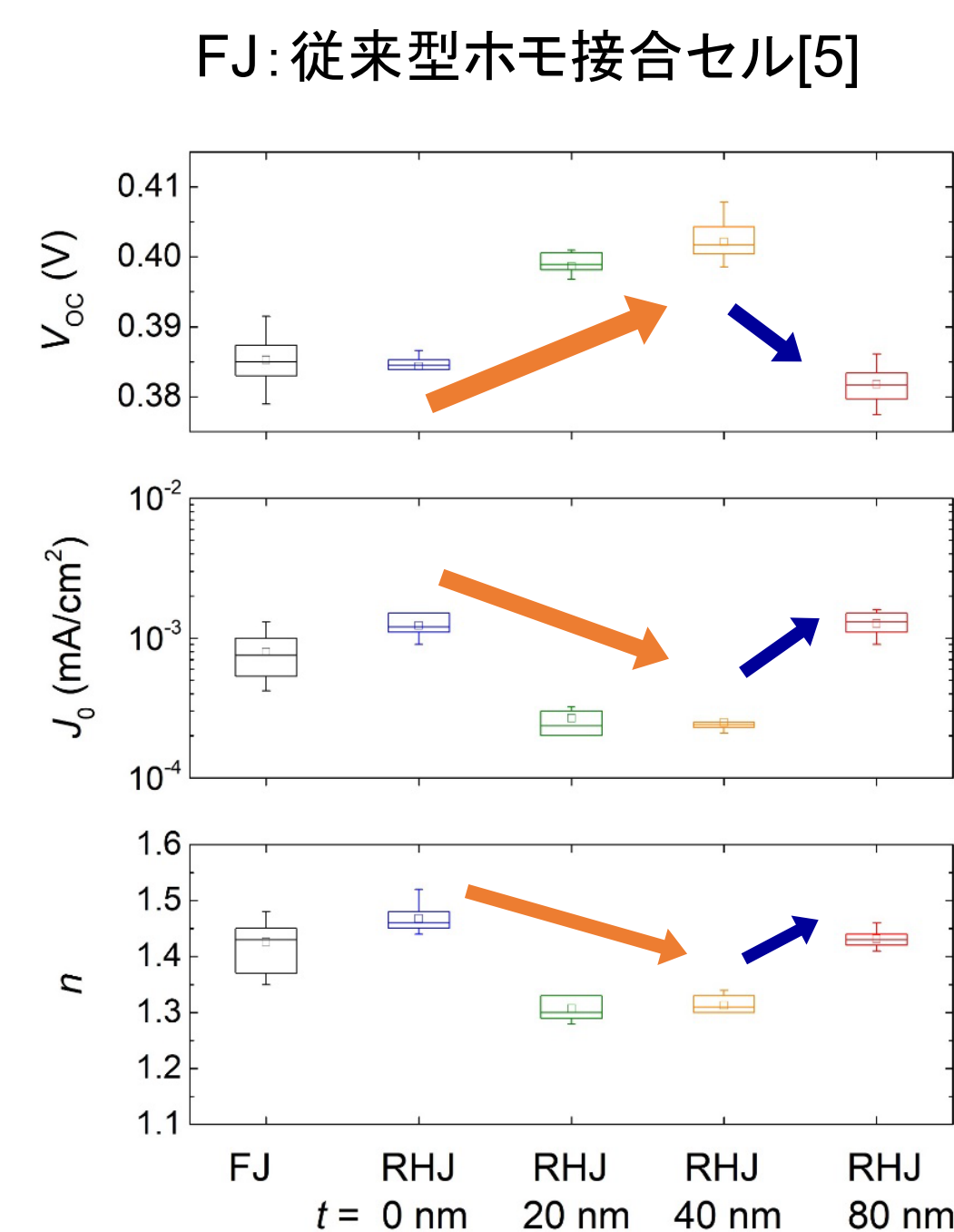


バンド構造

- n-AllnAsスペーサー層を導入することによってpn界面とヘテロ界面の距離を制御



解放電圧(V_{OC}), 逆方向飽和電流(J_0), ダイオード因子(n)のn-AllnAsスペーサー層厚依存性



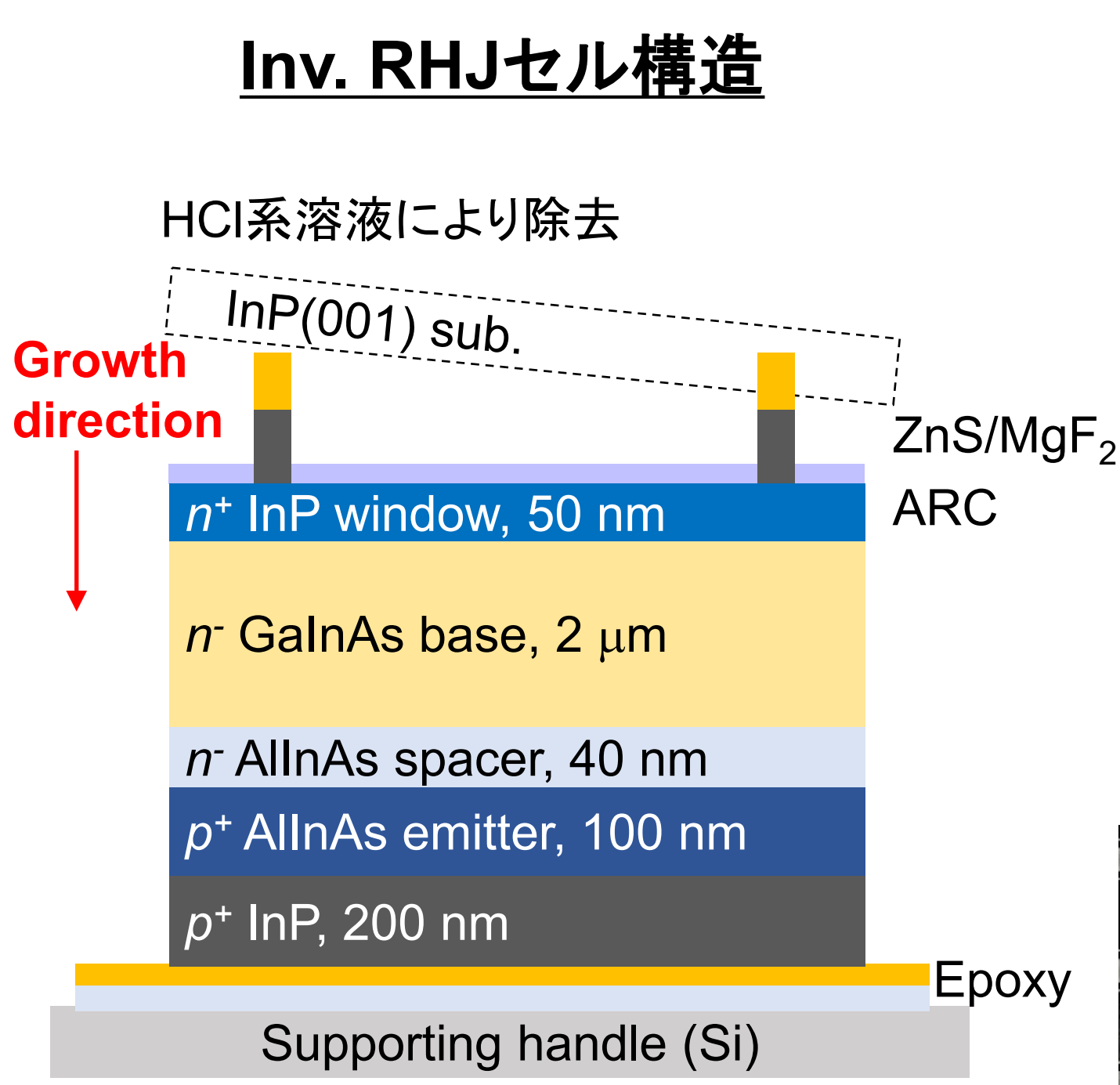
- 適した膜厚(20~40 nm)のn-AllnAsスペーサー層の導入により V_{OC} が向上

再結合速度が速いpn接合部から界面準位が形成されるヘテロ界面を引き離すことにより再結合損失が低減

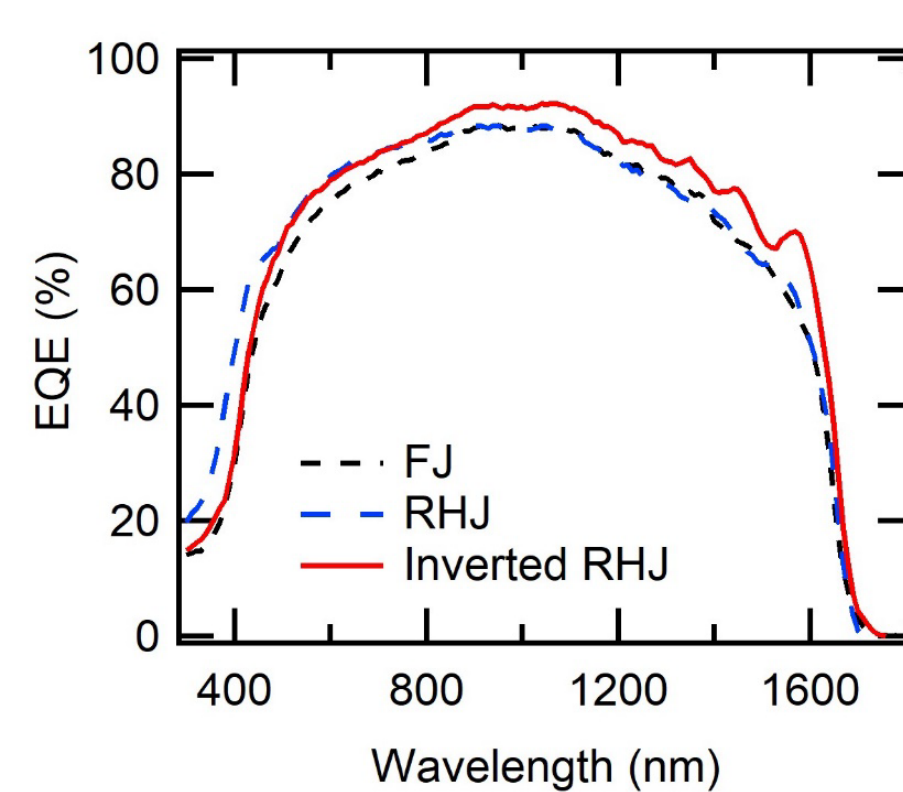
$$J_0 = qSN_D e^{-qV_{bi}/kT}$$

N_D : ベース層のキャリア濃度
 S : 界面再結合速度
 qV_{bi} : 内蔵電界

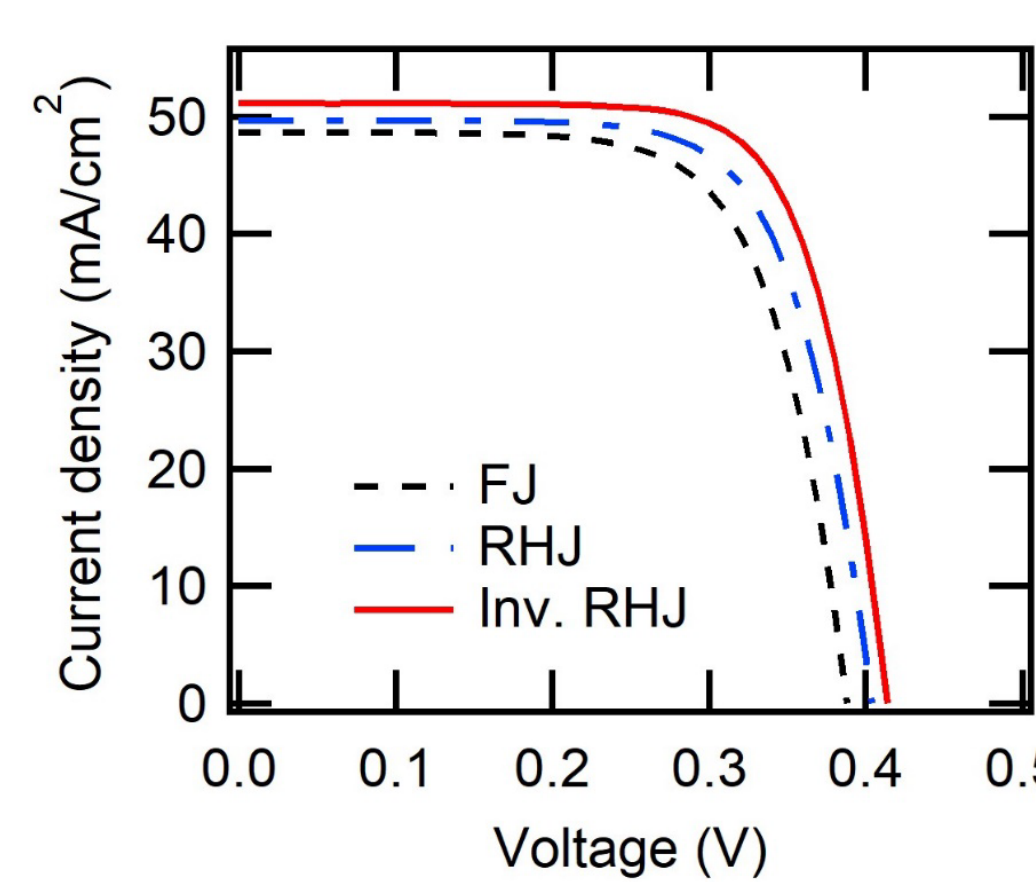
GaInAs逆積みリアヘテロセル(Inv. RHJ)の評価



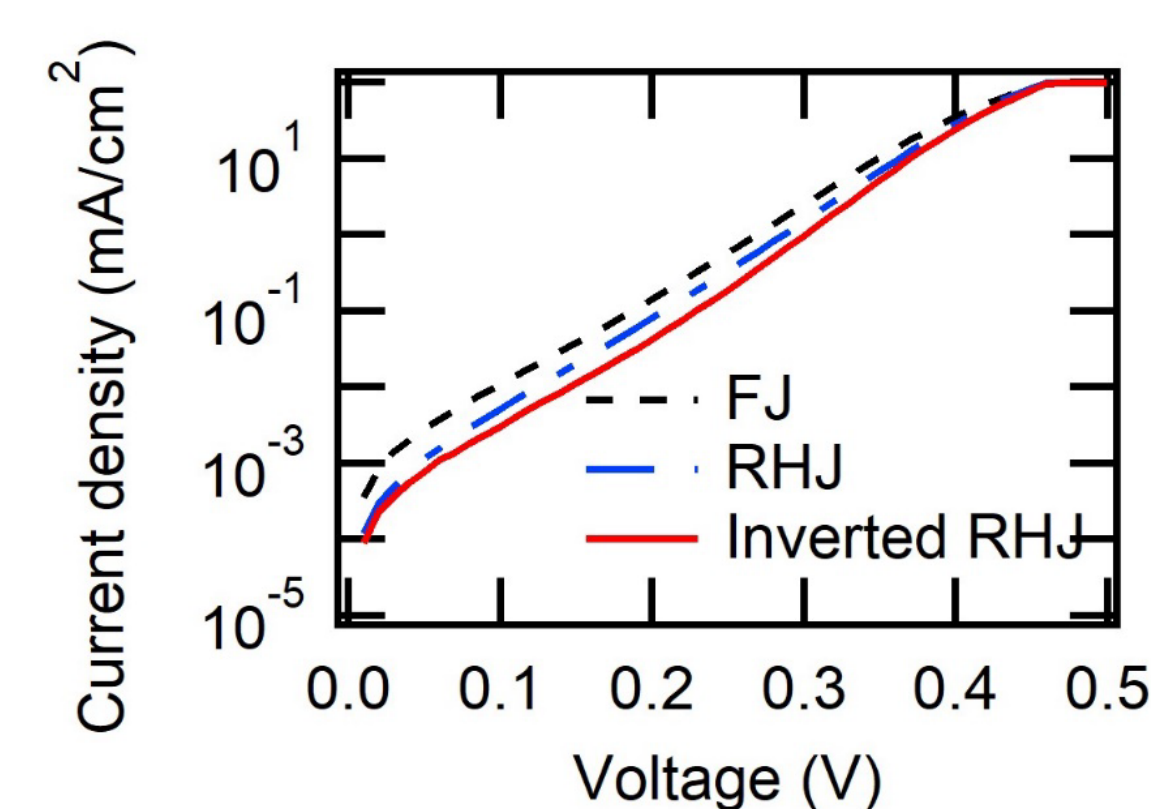
外部量子効率



Lighted I-V (AM1.5G 100 mW/cm²)



Dark I-V



J_0 for p⁺-n diode

$$J_0 \sim \frac{qn_i W}{\tau}$$

Radiative lifetime (τ_{rad}) [7]

$$\tau_{rad} = \frac{\tau_{theory}}{1-f}$$

f: pn接合で発光した光子が再吸収される割合

- 裏面反射を利用することにより長波長側の外部量子効率が向上
- Inv. RHJセルは暗電流が最も小さく、フォトンリサイクリングが生じている可能性を示唆 ⇒ V_{OC} が向上

他機関との比較

本研究により世界最高レベルの変換効率を実現

Method	V_{OC} (V)	η (%)	Institution	Ref.
MOVPE	0.4	12.8	NREL, USA	[1]
	0.39	9.7	Univ. Tokyo, Japan	[2]
	0.35	-	Univ. Lyon, France	[3]
MBE	0.39	13.1	AIST, Japan (This work)	FJ [5]
	0.40	14.2		RHJ
	0.41	15.4		Inv. RHJ

結論

- MBE法によるInP基板上0.75 eV GaInAs太陽電池の高効率化に取り組んだ。
- GaInAsリアヘテロ型セルでは、適した膜厚(20~40 nm)のn-AllnAsスペーサー層の導入によってヘテロ界面での再結合の影響が低減し、ダイオード特性が向上することを見出した。
- GaInAs逆積みリアヘテロ型セルでは、裏面反射構造によって外部量子効率が向上した。さらに、 J_0 が低減することにより V_{OC} が向上し、結果として世界最高レベルの変換効率15.4%を達成した。

本研究は、国立研究開発法人NEDOの委託の下で行われた。

参考文献

- [1] M. W. Wanlass et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 1996, **41/42**, 405.
- [2] H. Sodabanlu et al., Jpn. J. Appl. Phys. 2018, **57**, 08RD09.
- [3] F. Chancerel et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2019, **195**, 204.
- [4] R. Oshima et al., Phys. Status Solidi A 2020, **217**, 1900512.
- [5] R. Oshima et al., J. Cryst. Growth 2022, **593**, 126769.
- [6] T. Nakamura et al., J. Appl. Phys. 2021, **130**, 153102.
- [7] C. H. Henry et al., IEEE J. Quantum electronics, 1983, **QE-19**, 905.

フレキシブル性を有するGaAs//CuInGaSSe タンデム型太陽電池の開発

牧田紀久夫¹、富田仁²、水野英範³、大島隆治¹、庄司靖¹、菅谷 武芳¹、
Ralph Müller⁴、David Lackner⁴、Frank Dimroth⁴

1 産総研 ゼロエミッション国際共同研究センター、2 出光興産 (株)、
3 産総研 再生可能エネルギー研究センター、4 Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems

研究の目的

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31%、1kWh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、高効率かつ曲面形状が可能なIII-V//Cu(InGa)SSe₂ (以下CIGSSe)系のタンデム型太陽電池の開発を行っており、今回出光興産(株)、Fraunhofer研究所(以下FhISE、独)と連携のもと、2端子構造として世界初のフレキシブル型GaAs//CIGSSe系3接合太陽電池を試作し、基本性能を実証した。

メガソーラ



セルコスト <1 \$/W

高効率GaAs系多接合太陽電池の移動体搭載

*HAPS 市場規模 100MW
セルコスト 10\$/W



*High altitude platform station
高高度疑似衛星

移動体搭載

衛星搭載 市場規模 1 MW
セルコスト 100\$/W



車載搭載 市場規模 10GW
セルコスト 2\$/W



実験

スマートスタック技術によりフレキシブル型InGaP/AlGaAs//CIGSSe 3接合太陽電池(結果構造図参照)を試作。

Key technology. 1

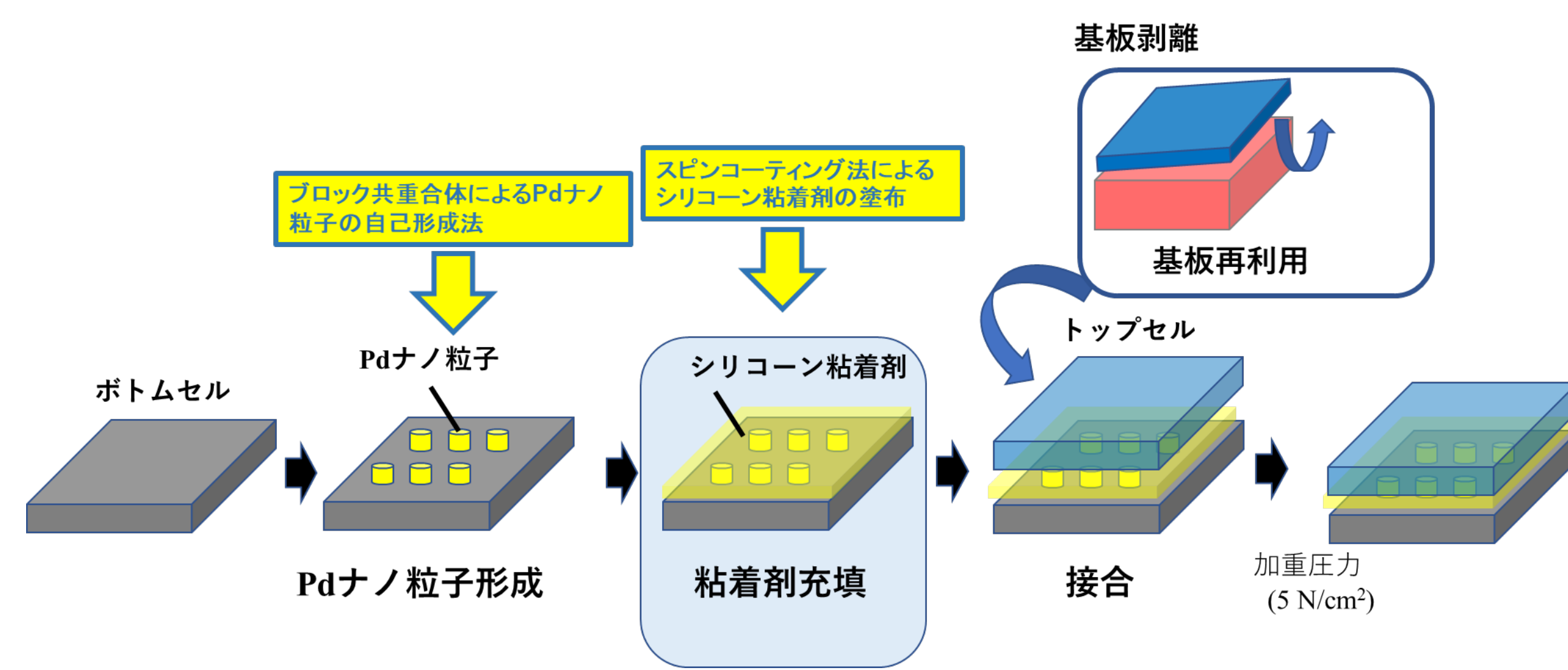
本研究では、スマートスタック技術¹⁾を改良しPdナノ粒子と粘着剤²⁾を接合界面に適用、接合強度の改善に成功。

- 1)産総研独自のPdナノ粒子を介在した半導体接合技術。
- 2)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。

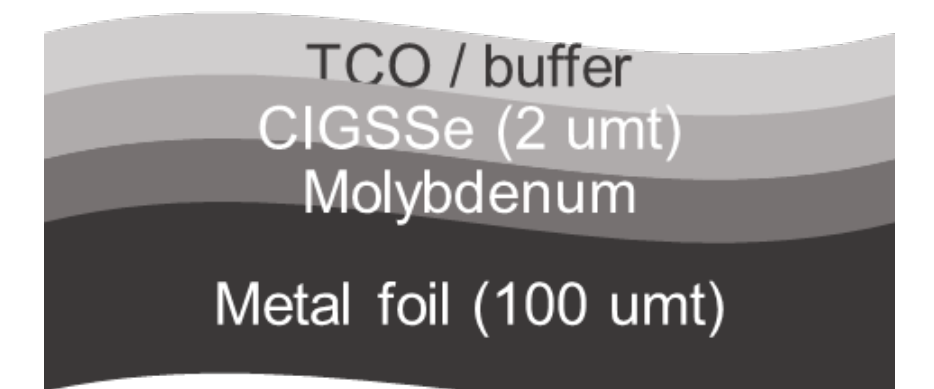
Key technology. 2

フレキシブル性³⁾を有しかつボトムセルとして適化⁴⁾したCIGSSeセル(出光興産(株)開発)を適用。

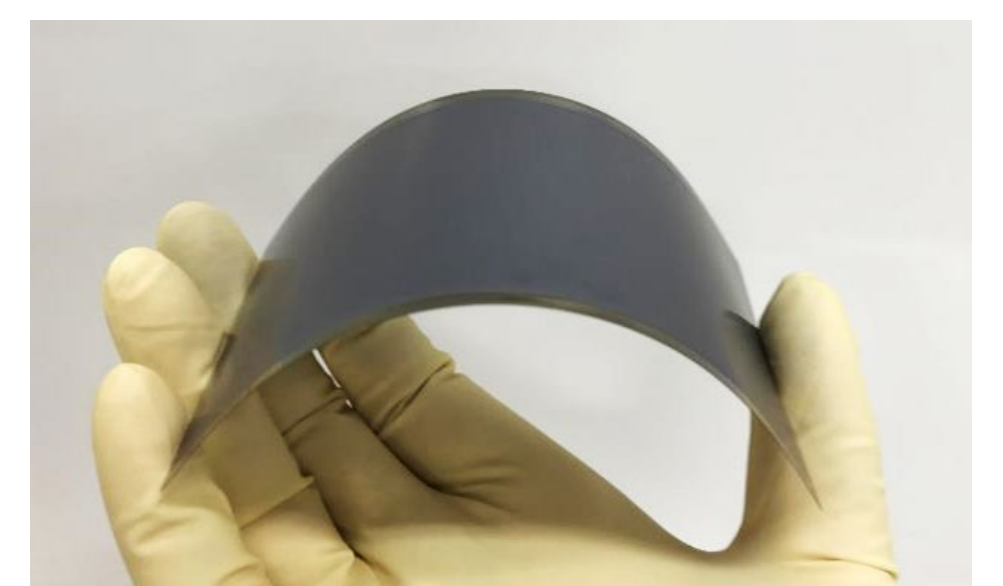
- 3) CIGSSeセルは、SAS法により金属フォイル上に形成。SAS法: Sulfurization after selenization process
- 4) Gaの分布を適化し(Ga-grading)、Eg~1.0eVを実現。



新スマートスタック技術



素子構造

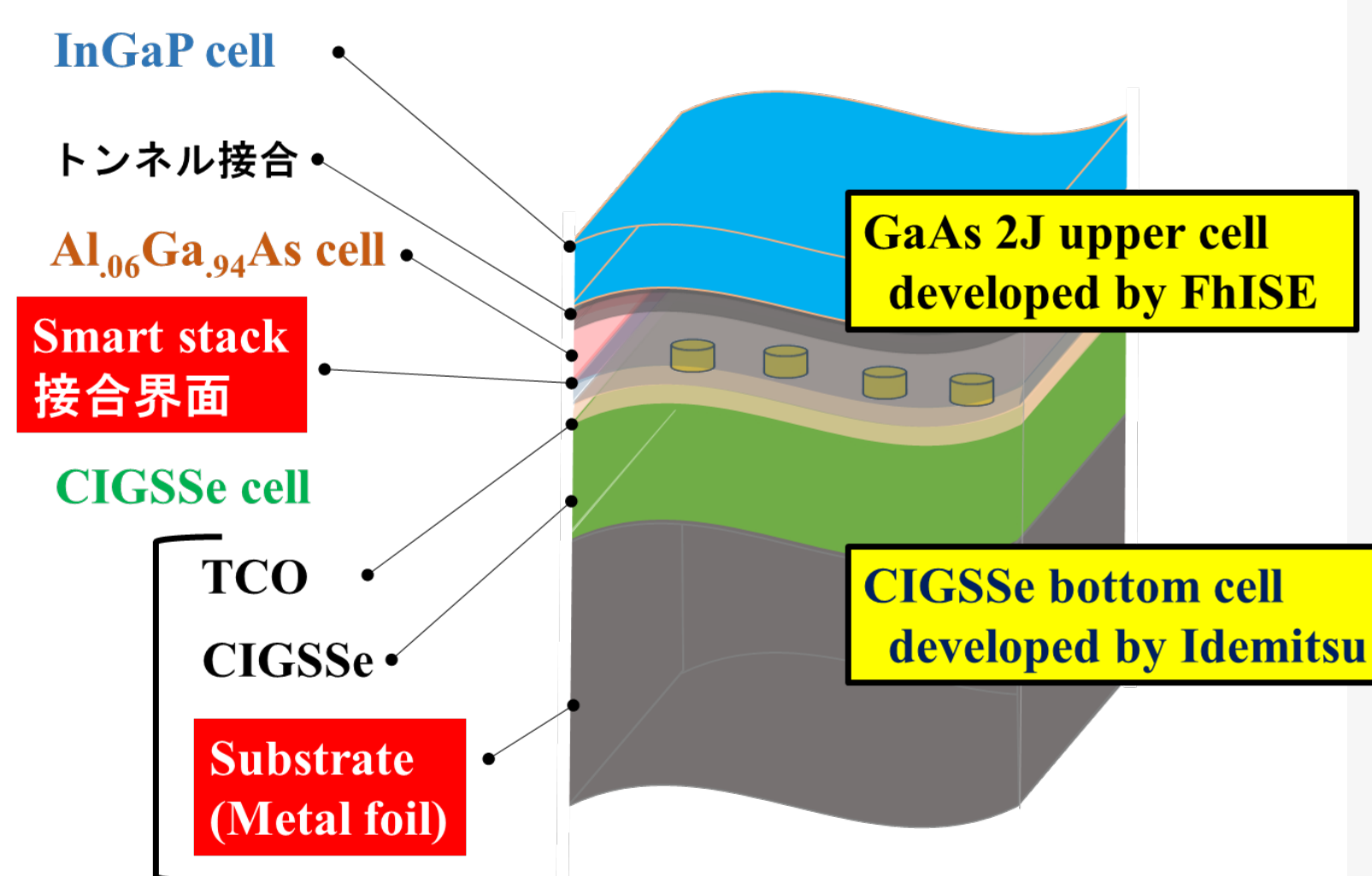


フレキシブル型CIGSSeセル
(出光興産(株)開発)

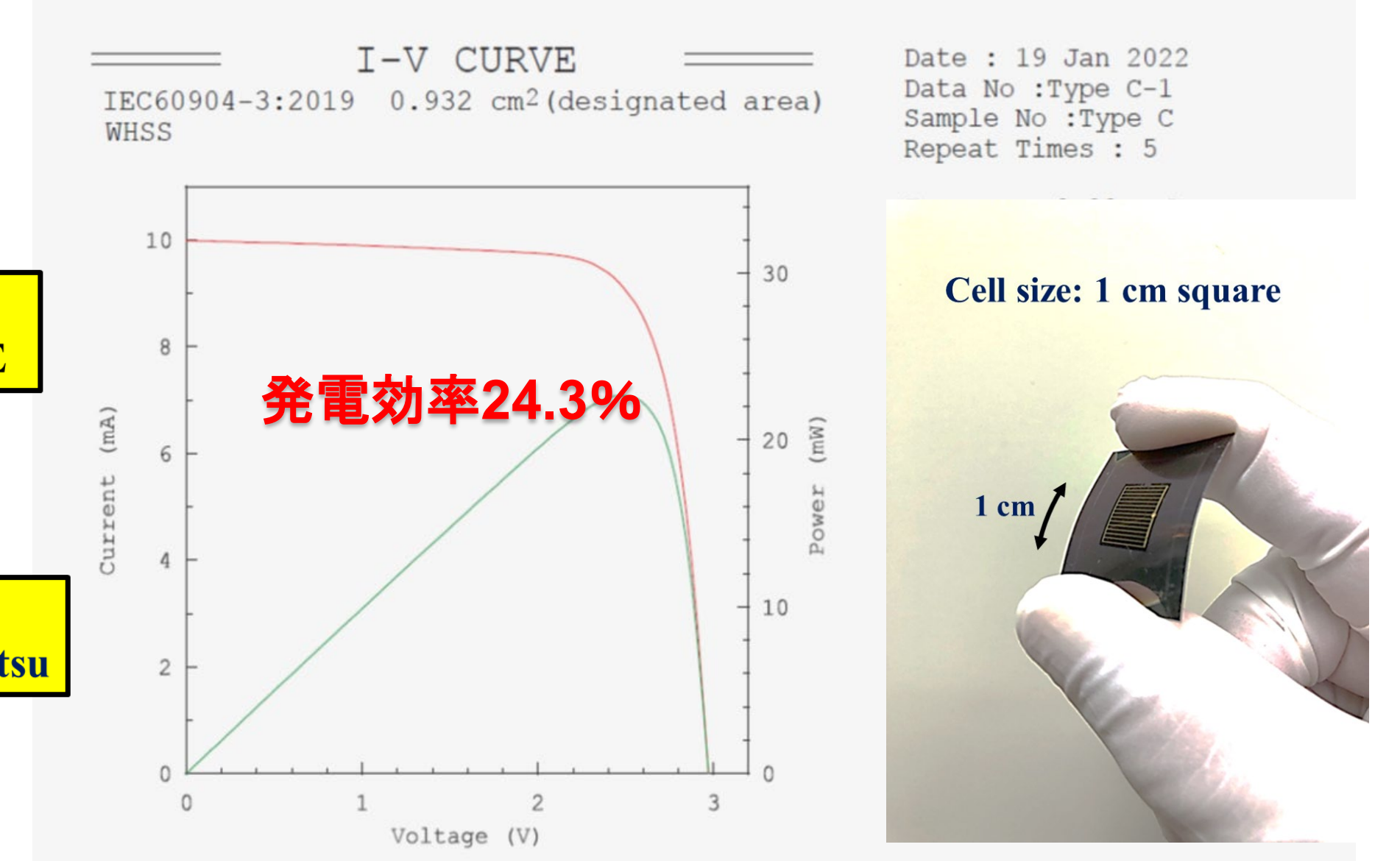
結果

2端子として世界初のフレキシブル型GaAs//CIGSSe系タンデム太陽電池を実証。AM 1.5Gで発電効率~24.3%(V_{oc}-2.97V、J_{sc}-10.7mA/cm²、FF-0.76)。

- ・新スマートスタック技術により、GaAs系セルとフレキシブル型CIGSSeセルとの安定接合を実現。
- ・Ga-grading技術によるCIGSSe吸収層のバンドギャップ狭小化が、多接合構造での発電性能に貢献。



素子構造



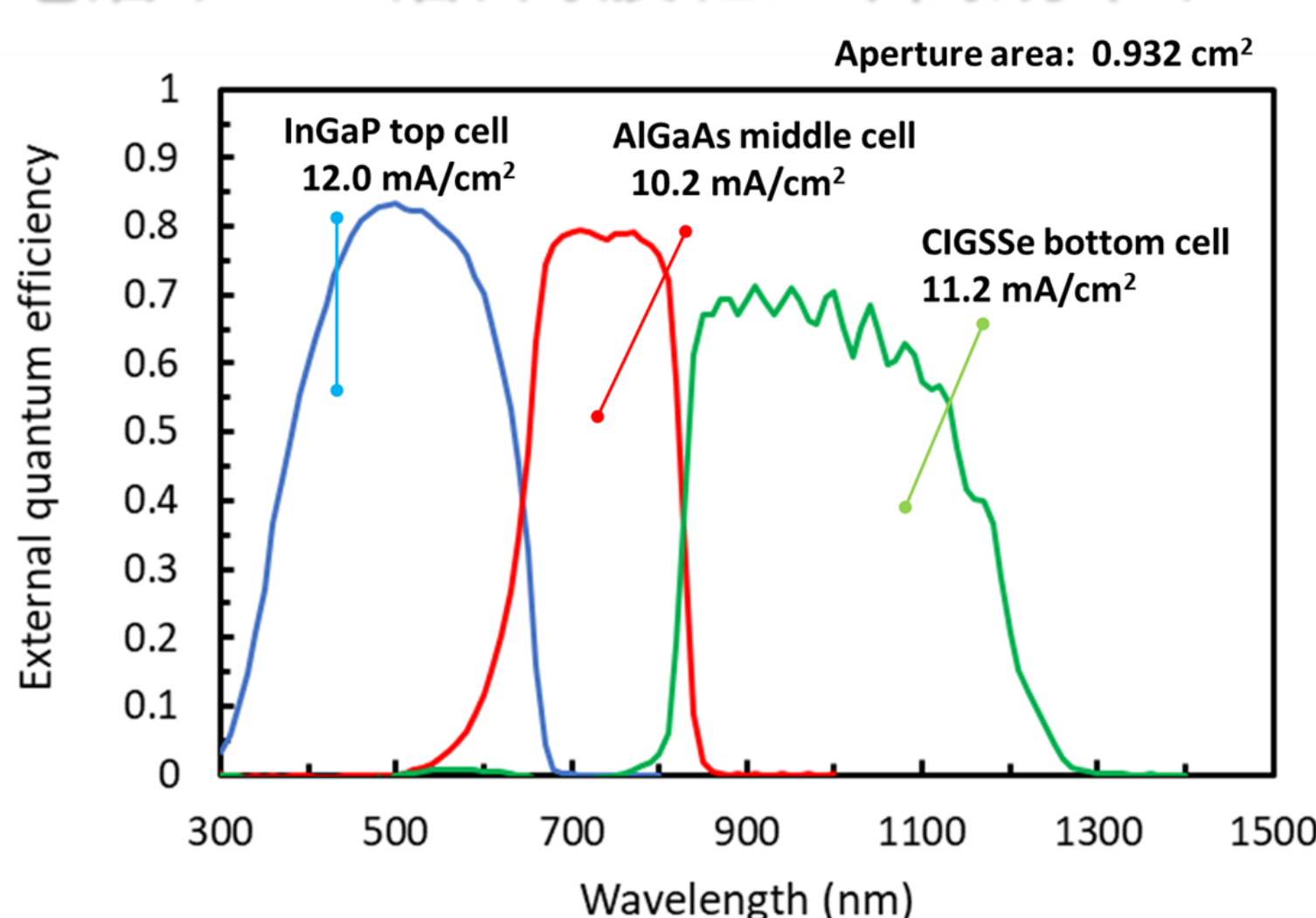
発電特性

素子外観

フレキシブルInGaP/AlGaAs//CIGSSe 3接合太陽電池

考察

- ・分光感度評価により、AlGaAsミドルセルが性能律速と分析。
- ・高効率化のためには、①GaAsミドルセルの適用(ミドルセルの光電流増加)、②CIGSSeボトムセルの量子効率改善、が必要。
- ・特に上記②では、CIGSSeセルの表面ラフネス低減および透明導電層(TCO層)薄膜化が、高効率(>30%)への鍵。



InGaP/AlGaAs//CIGSSe 3接合太陽電池の分光感度評価

本研究でのCIGSSeセルでは、表面ラフネス~100nm、TCO膜であるZnOの膜厚~300nmである。これにより、接合界面において20%程度の反射損失が観測されている。現在、産総研では独自のエッチングによるCIGSe表面平滑化処理、またTCO膜薄膜化(目標膜厚~10nm)の検討が進められている。これらの技術適用等により、発電効率>30%が可能。

まとめ

- ・Pdナノ粒子と粘着剤を介在した新スマートスタック技術の開発。
- ・上記技術によりフレキシブル型InGaP/AlGaAs//CIGSSe 3接合太陽電池を試作、発電効率~24.3%を達成した。
- ・今後は、高効率化(>30%)および大面積化(4インチ化)が目標。

(関連論文)

- H. Mizuno *et al.*, Appl. Phys. Lett., 55, 025001 (2016).
- M. Nakamura *et al.*, IEEE J. Photovoltaics, 9, 1863 (2019).
- 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、特願2019-056782「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」

車載PVのポテンシャル検討：商品配送車の場合

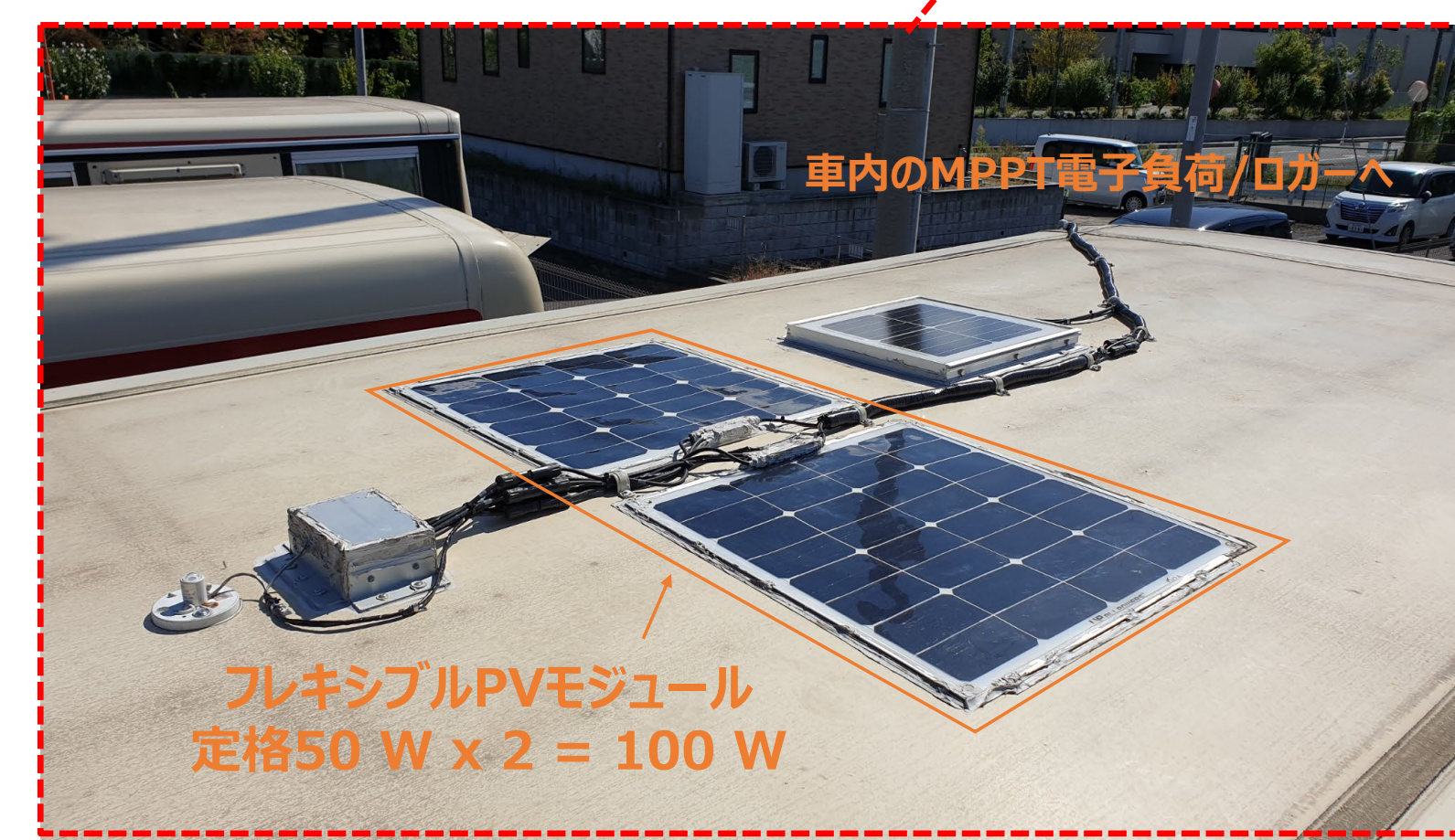
水野 英範、棚橋 克人、高島 工、大関 崇
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

車載PVの可能性

- ◆ 脱炭素化社会に向けて
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。
- ◆ ターゲット
本研究では、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。決まった路線・エリアを走っている商用車の方が、乗用車に比べPV搭載のメリットを評価しやすいと思われるため。

過去の検討：PV搭載路線バス

福島交通株式会社との協力のもと、福島県郡山市内を走る路線バスのルーフにPVモジュール(50W x 2枚)を取り付け。



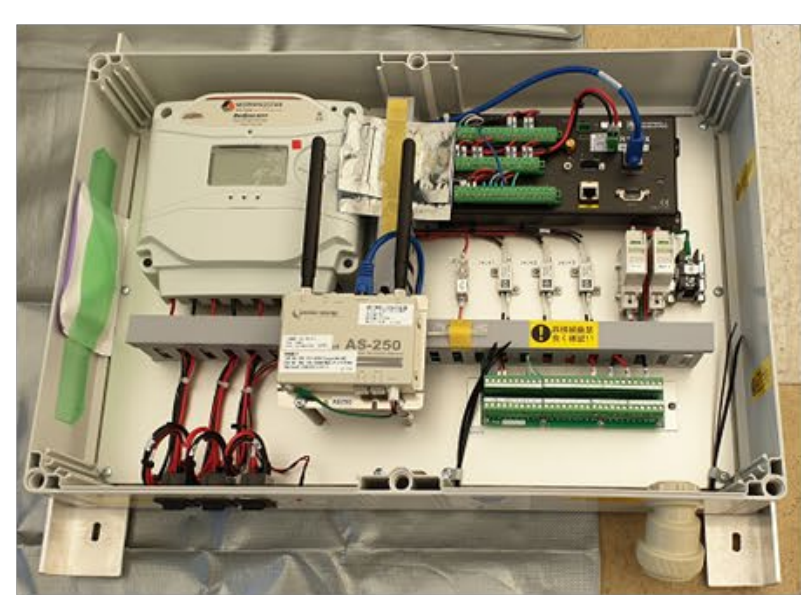
運行中の発電量モニタリングを実施してきたが、路線バスはディーゼル駆動のため、PV電力との突合せ評価が困難であった。→ 本研究では、EVを用いた走行データとPV関連データの同時取得を実施。

商品配送用EVとしてのデータ取得

実証車として、三菱自動車のminiCAB MiEVを導入。ルーフボックスにPVモジュール型日射センサー、ロガー等を搭載し、車内に走行データ取得端末を設置。走行中の日射データ、走行データを同時取得を可能とした。

実証車

PVモジュール型日射センサー
日射計測用ロガー等



PVモジュール + バッテリー (独立電源) で稼働



走行データ取得端末



福島県内企業との連携



従来のガソリン配送車



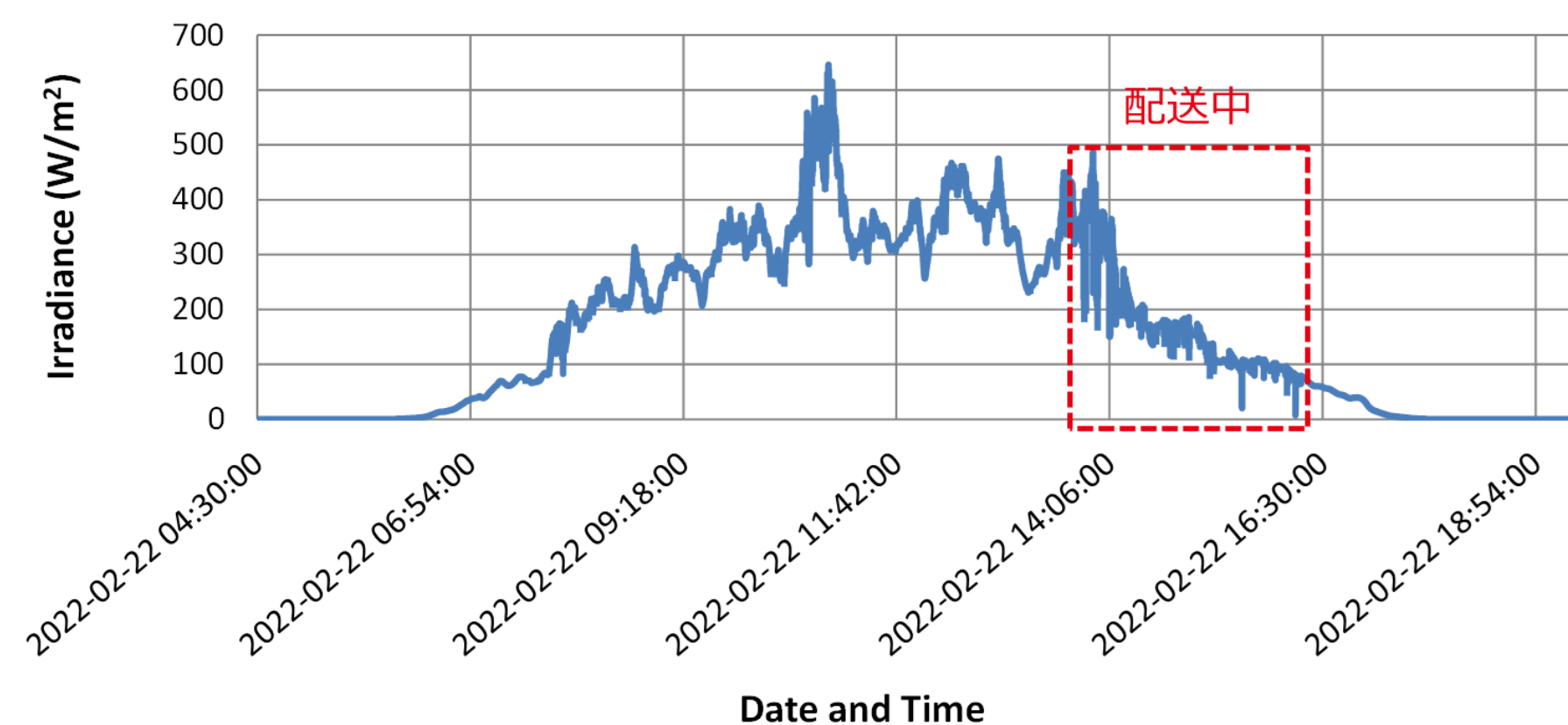
実証車 ミーブPVEV

※现阶段では搭載している日射計 (pyronometer) のため、PVではなくPV

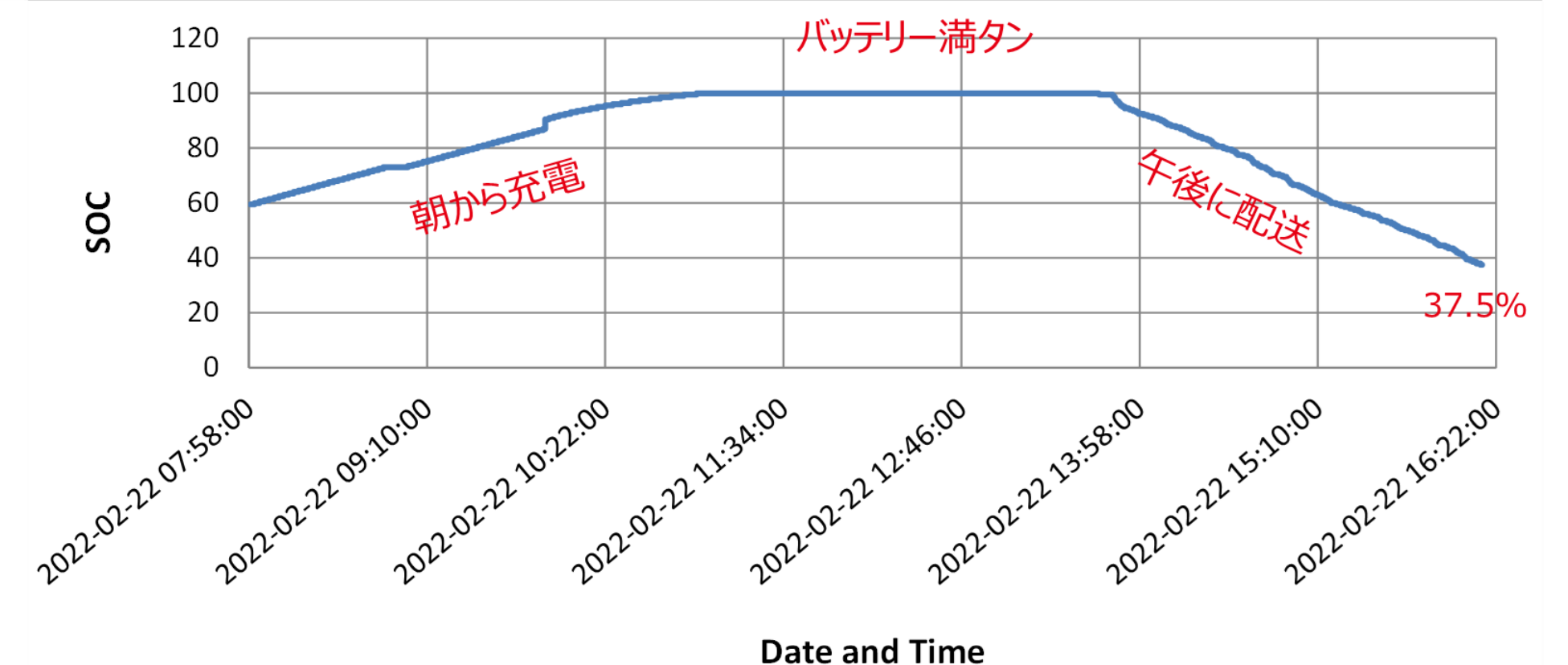
株式会社ヨークベニマル(本社：福島県郡山市)が実施している商品配送サービス用車両として実証車を導入。データの取得を2022年2月より開始。

2022年2月取得データによるポテンシャル検討

データ取得例(2022年2月22日)

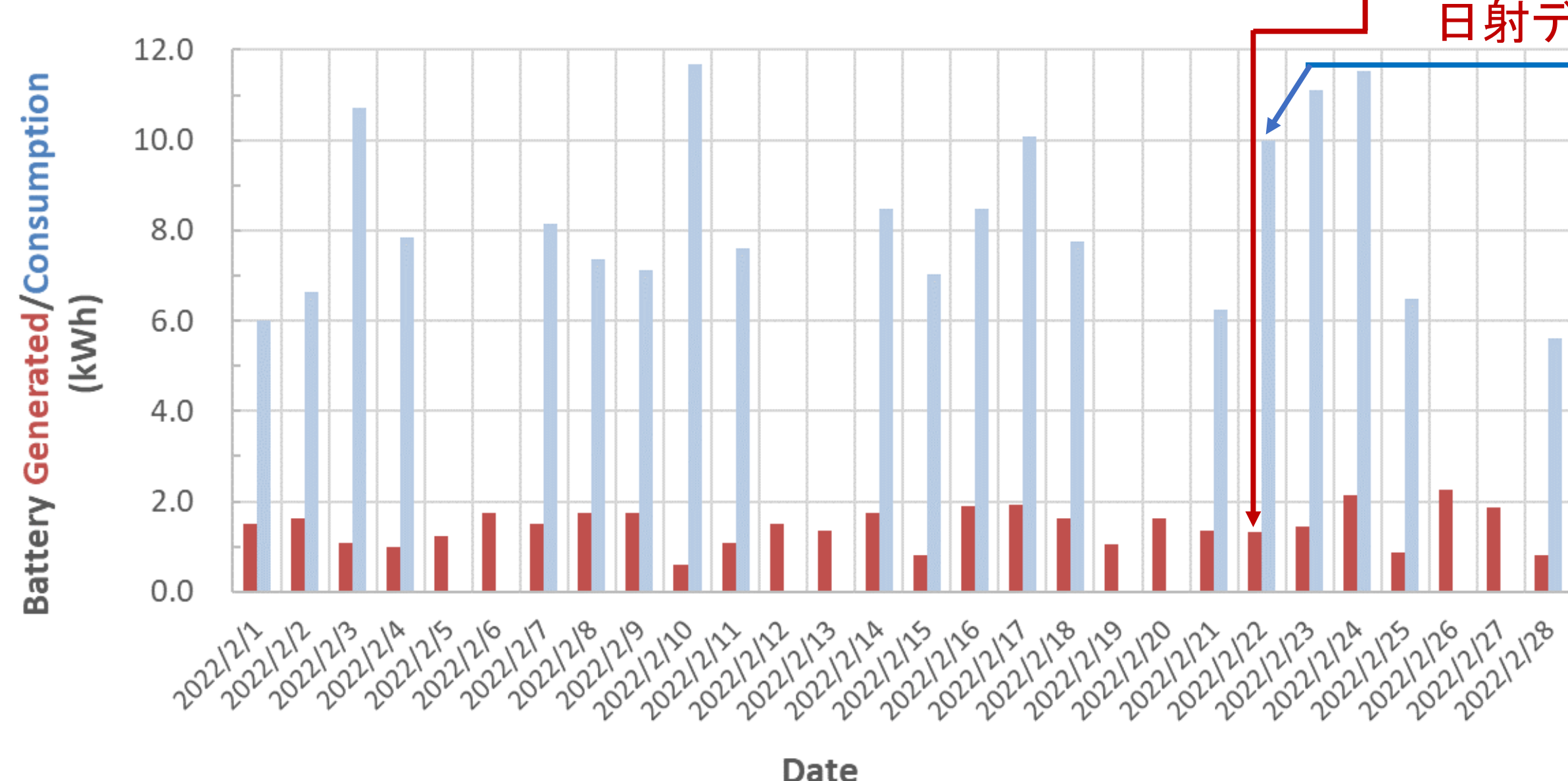


実証車ルーフへの日射データ (1秒値)



バッテリー利用パターンデータ

バッテリー使用量とPV発電電力量(推定値)との比較



①赤いバー：
日射データから当日のPV発電電力量の推定値を算出

②青いバー：
配送で消費した1日当たりのバッテリー量を算出

- ③両者の比(赤いバー/青いバー)を取ることで、その日のバッテリー消費量に対してどの程度PV電力でまかなえた可能性があるかを見積ることが可能：
- データ例の2022/2/22の場合、1.31 kWh/10.0 kWh = 13.1%
 - 2月の平均では、17.4% → バッテリー消費(走行+暖房)・日射獲得の観点では、2月は1年の中でも最も厳しい期間の一つであるが、PV搭載により2割弱の電力が賄える可能性を確認。
 - 同様の評価を3月についても行ったところ、平均値として57.8%
 - 商品配送車は、PVEV導入の有望なユースケースである

謝辞：本研究は令和3・4年度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)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技術の研究

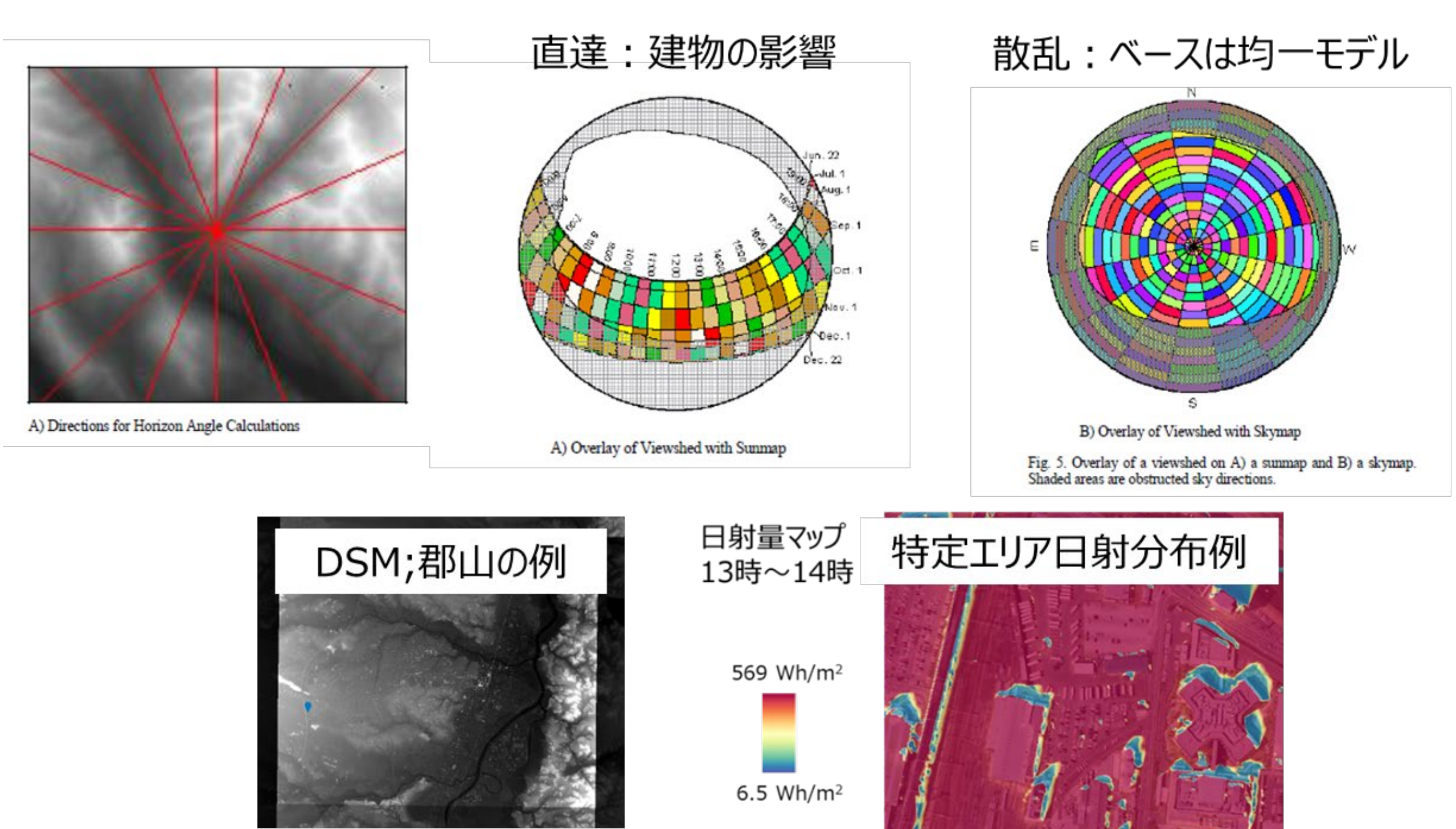
大関崇、水野英範、高島工
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

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[1]、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。
- 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た。

推定方法の概要

- PVとEVの充放電シミュレーションを行うため、時系列データが必要。
- 従来の研究: ルート不特定、統計的手法がメイン
- ルート特定&時系列データはあるが、推定・評価の時間解像度が粗いことやデータ期間が短いなど、検証が不十分。
- 本研究では、GIS&衛星観測データを利用した時系列モデルを検討。
- ArcGIS Spatial Analyst;日射量解析を利用。5分平均。
- DSM: AW3D高精細版DSM(0.5m解像度)
- 日影補正係数の計算
 - 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(月に1つ)
- 衛星観測データを入力とした放射モデルによる推定
 - 太陽放射コンソ: 直達、散乱、全天日射を公開データを利用
 - 2.5分、1kmメッシュ
- 実測データ
 - 2021年1月~2021年12月 の各1週間分(合計84日)
 - 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
 - 1秒サンプリング、5分平均値を利用。



出典: The Solar Analyst 1.0 User Manual.



図 実測データ収集の概要

結果概要

- 建物の日陰などの影響を一定程度再現できていることを確認。
- 本手法で推定できない事象: DSM作成後、高架等の上、樹木、電柱・電線など。
- 今後は、発電データ、長期間の評価、他のエリア、EVの実測データも利用した検証を実施予定。

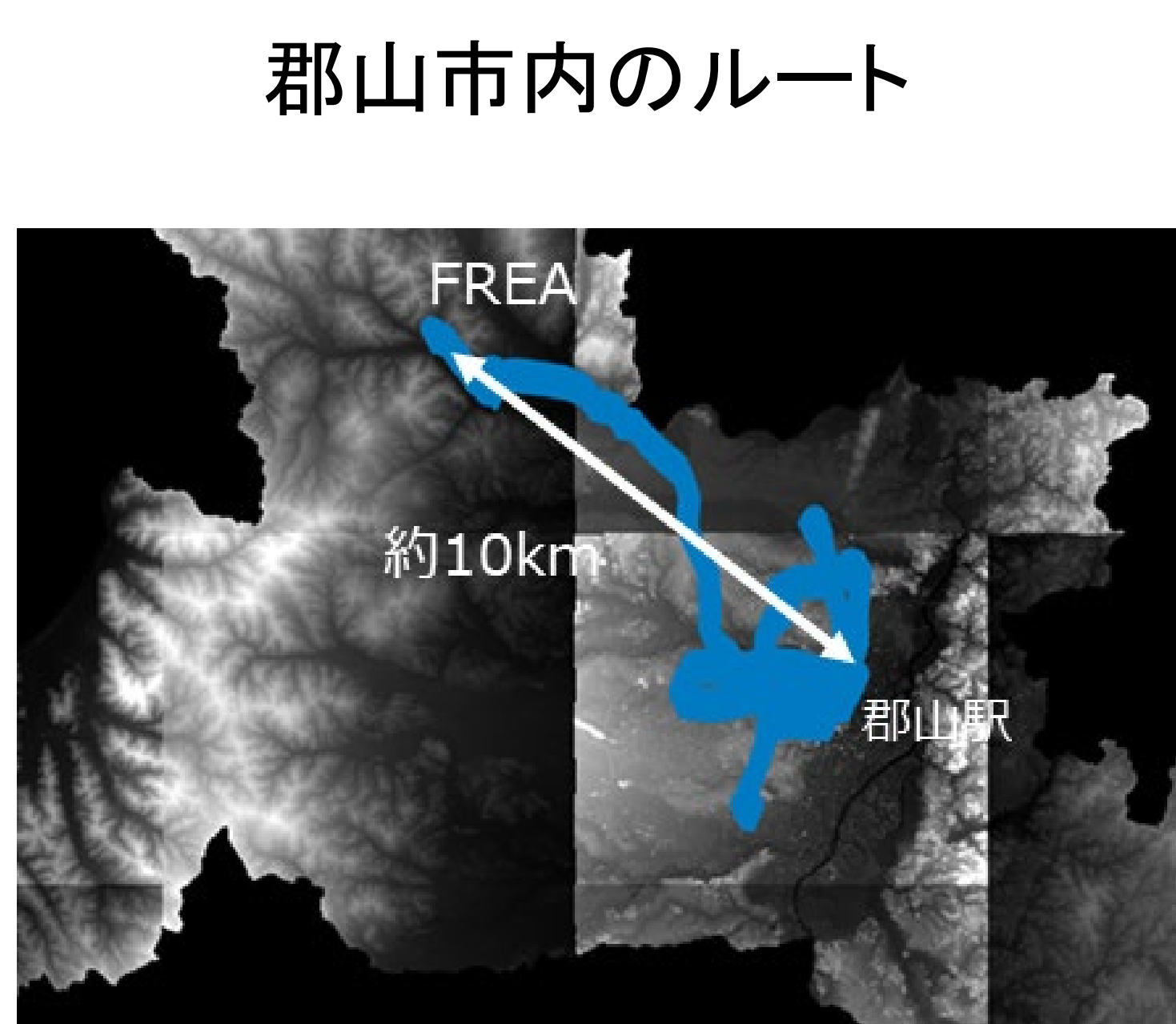


図 推定結果の例: 2021/08/06

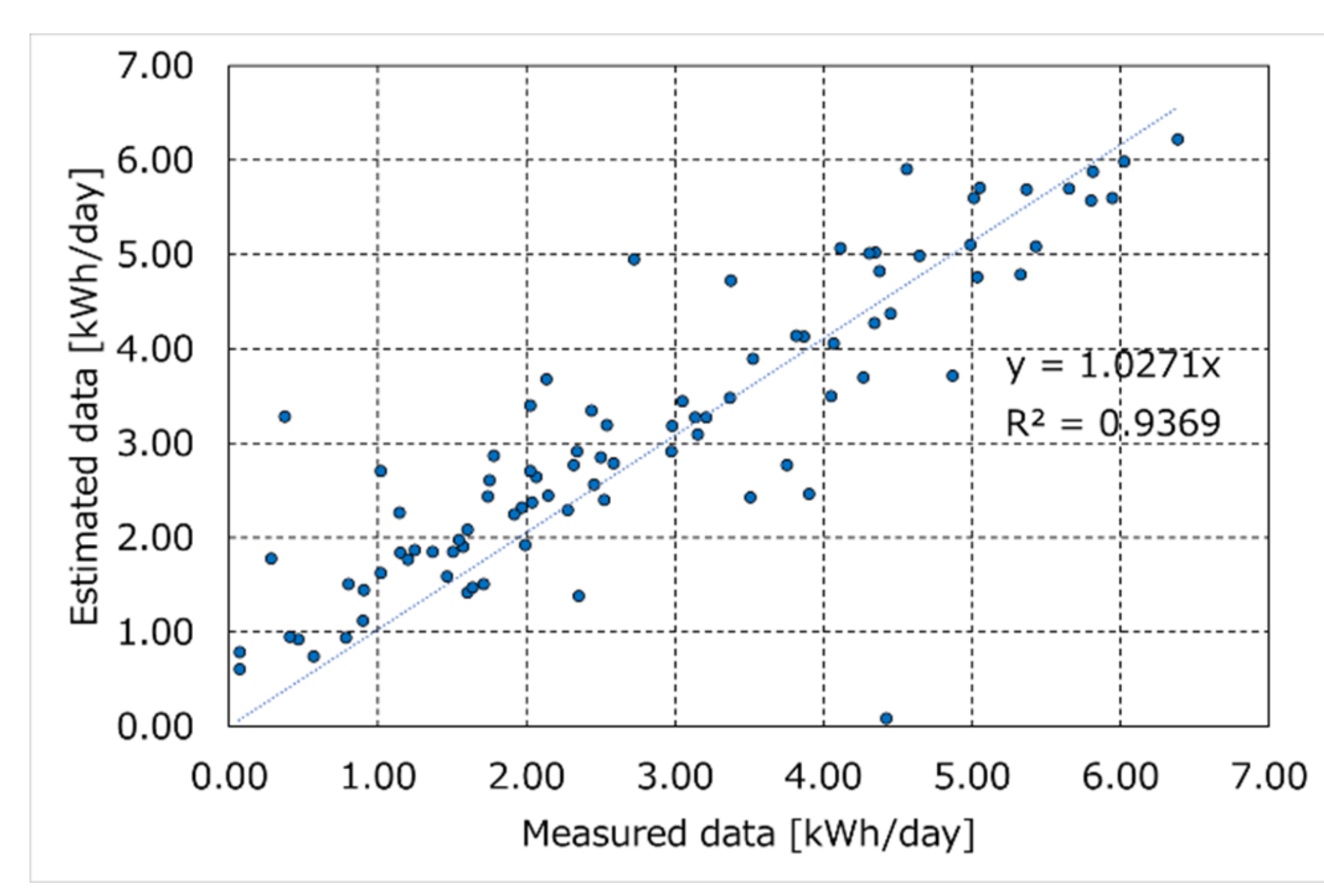
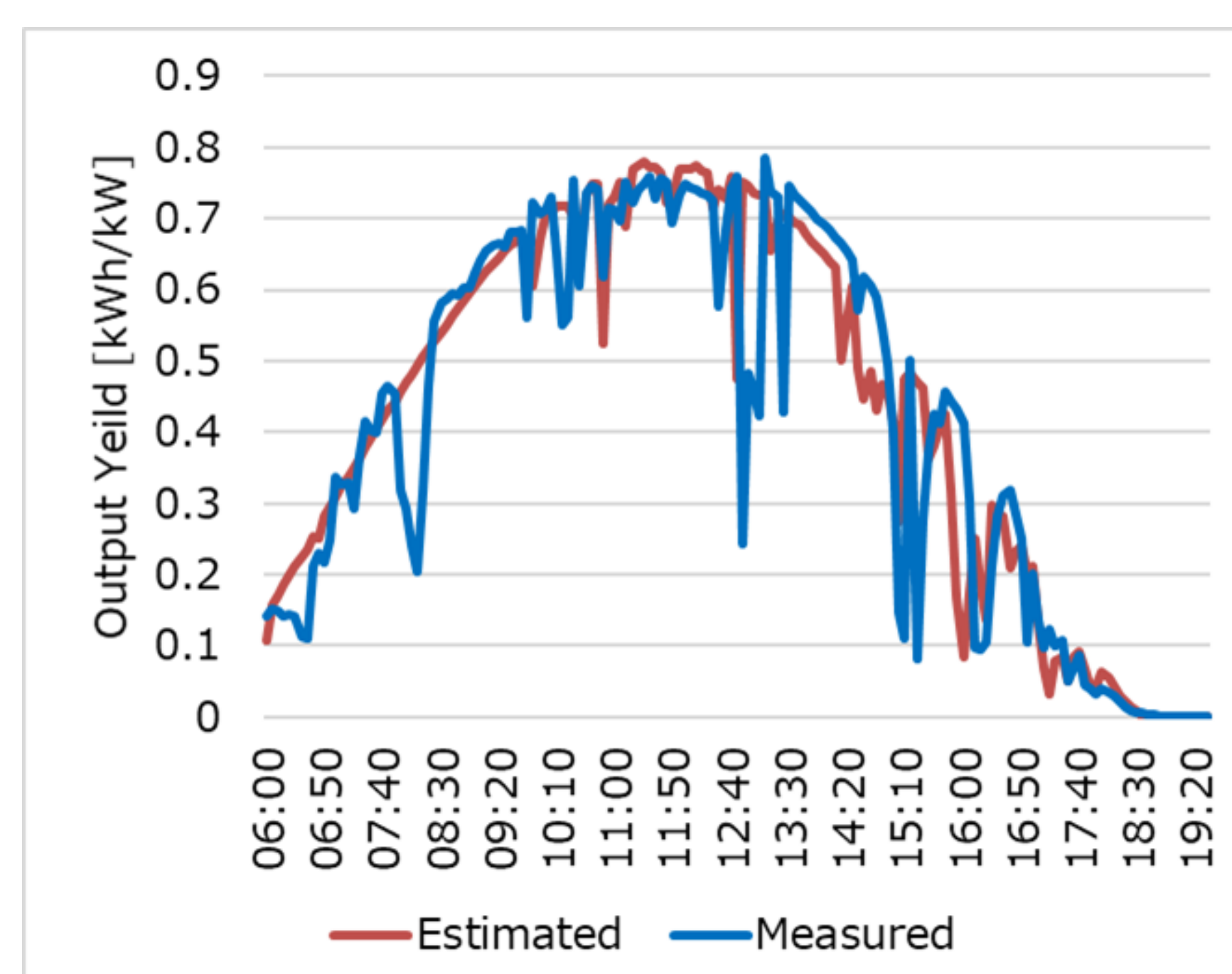


図 推定結果: 日積算

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)の一環で行った。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。

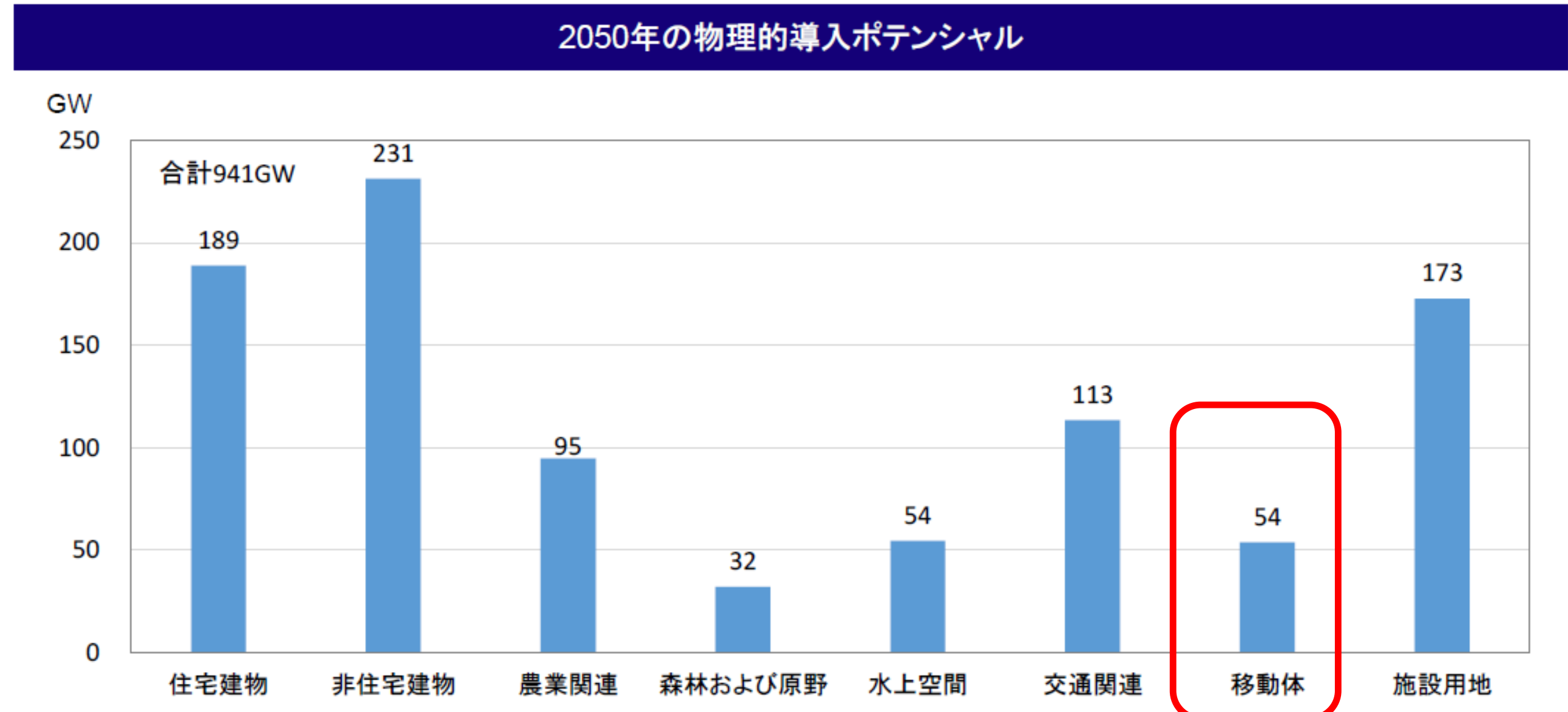
車載PVシステム向けの電力配分回路に関する研究

山田 隆夫、大関 崇、高島工、水野 英範
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

研究の背景・目的

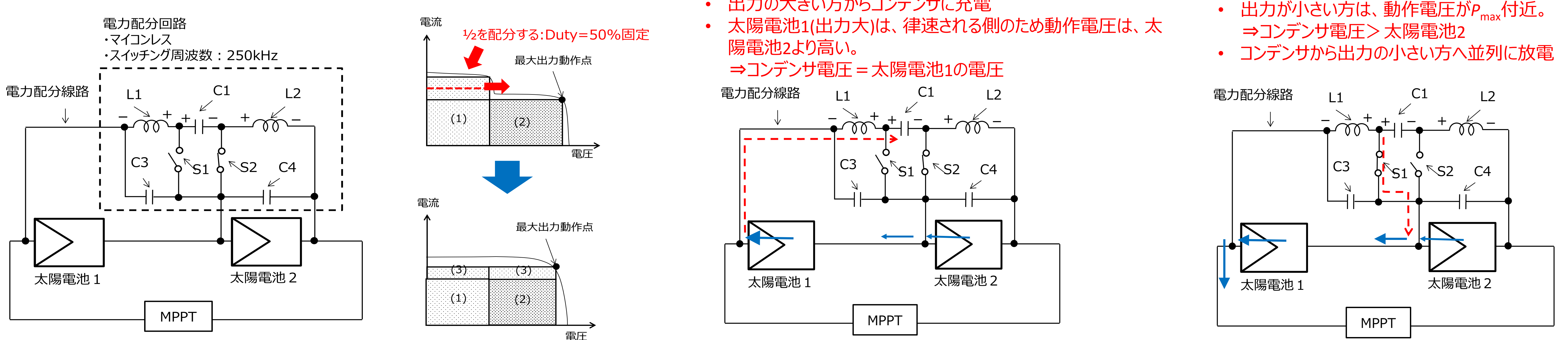
- PVの1 TW導入⇒脱炭素なXaaS実現におけるPV導入形態(利用用途、多様性)
- 移動体へのPV導入(VIPV; Vehicle Integrated PV)
IEA PVPS 17 “PV for Transport”開始、IEC Standard WG7でも議論開始。
- 運輸部門のエネルギー、CO₂削減。
日本全体での2030年におけるCO₂排出削減効果は最大227万t-CO₂/年。
(2030年に向けた乗用車におけるCO₂排出削減量の11%相当)
- 車載用PVについて、プリウスをはじめ、海外での検討も活発化。
- 曲面や部分陰によるミスマッチ損失が地上用よりも多い可能性。
- ミスマッチ損失の低減が必要。

VIPVの可能性



出典：平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査「再生可能エネルギー固定価格買取制度における賦課金単価算定の精緻化に向けた分析等調査報告書」2018.3.

原理



実験

- 3クラスを有する太陽電池2枚を用いて、屋外の実証実験を実施。
- ゴムシートによりクラスタIVの計上を模擬して、2枚に同様な日影を模擬。
- 配分回路の有り無しにより、相対的に発電特性を比較を実施した。
- 2台のIVカーブトレーサを用いて同時測定を実施した。



図 実験利用したモジュール外観

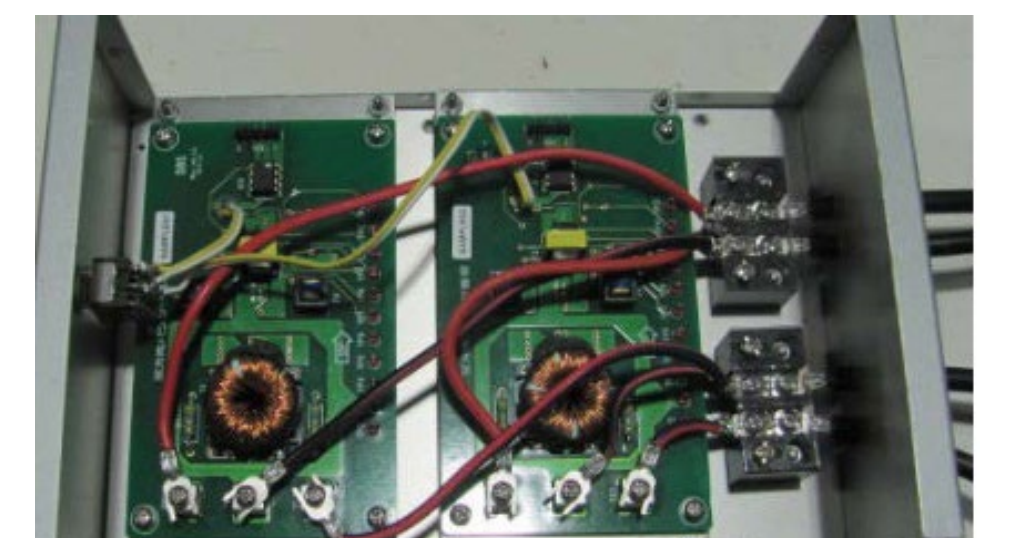


図 配分回路の外観

結果

- 各日陰ケースにおいて、約1週間ずつのデータを収集した。
- 1分値ごとの平均結果を示す。

表 配分回路の有無による実験結果

日影パターン	測定日	配分回路有	配分回路無し	比率:有/無
①	2022/08/15-08/22	44.8	45.1	99%
②	2022/08/22-08/29	43.5	41.8	104%
③	2022/08/29-09/05	30.6	26.5	116%
④	2022/09/05-09/12	28.0	26.6	105%
⑤	2022/09/12-09/21	37.1	30.4	122%
⑥	2022/09/21-09/28	30.7	25.7	120%
⑦	2022/09/28-10/05	26.9	18.0	149%
⑧	2022/10/05-10/13	17.1	15.5	110%
⑨	2022/10/13-10/20	22.3	15.5	144%
日陰無し	2022/10/20-10/31	57.5	58.8	98%
Total		34.3	30.9	111%
配分回路未接続	2022/12/05-12/12	26.3	26.3	100%

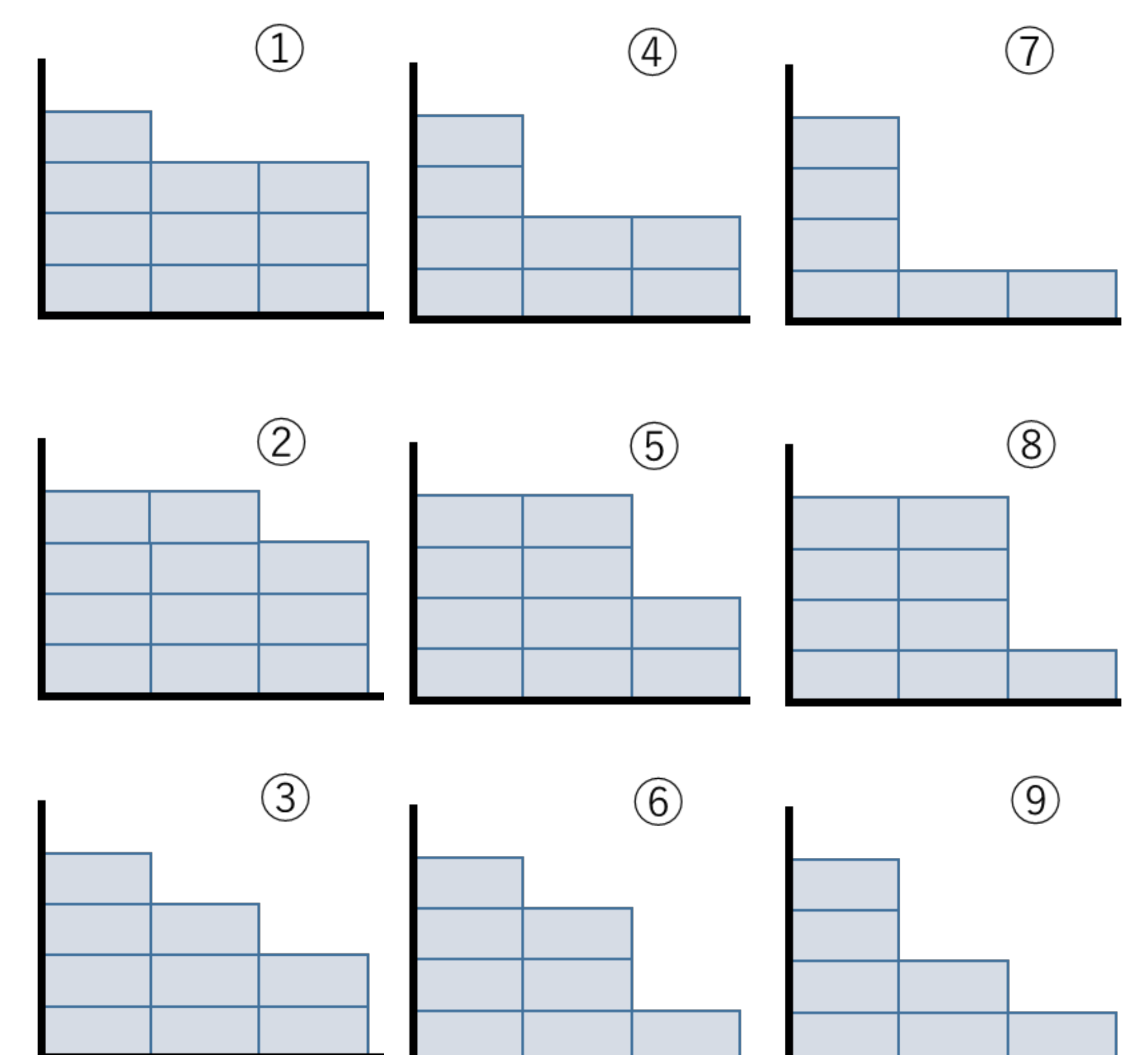


図 日影パターンの概要図 (IVカーブのイメージ)

まとめ

- 太陽光発電システム搭載自動車への電力配分回路の適用に関して、屋外実験を実施。
- 日影のパターンにより、有効性が異なる。日影によるミスマッチが多いほど効果大きい。
- 他方で、ミスマッチがあまりない状態では損失になること、効果が見られないケースがある。
- 今後は、継続的な屋外における実証データ収集とともに、車の屋根に搭載した実験を実施していく。

謝辞: 本成果の一部は、令和4年度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「太陽光搭載型電気自動車の実証拠点化(需給一体型EV)」の一環により実施した。

太陽光-熱電ハイブリッド素子の最適設計と検証実験

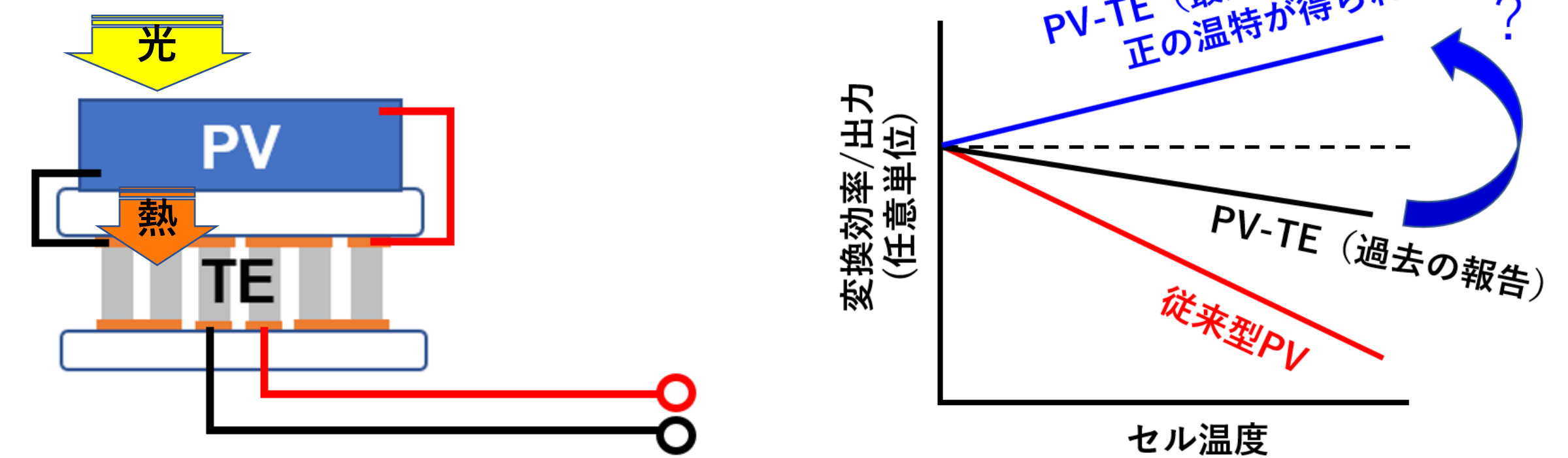
上出 健仁¹、佐久間 惇²、望月 敏光¹、高遠 秀尚¹、秋山 英文²
 1 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター
 2 東京大学

研究の概要

- 高温時に変換効率が向上する正の温度特性(通常とは逆の特性)を持つ「熱回収型太陽電池」を理論提案している(タイプI=ワイドギャップ半導体利用[1]、タイプII=熱電変換素子利用[2])。
- タイプIIの本構造(2端子直列型太陽電池-熱電素子(PV-TE)ハイブリッド素子)の特性を最適化する設計理論を導き[3-5]、得られた設計指針の妥当性を実験で検証した[6-7]。

太陽光-熱電(PV-TE)ハイブリッド素子の開発

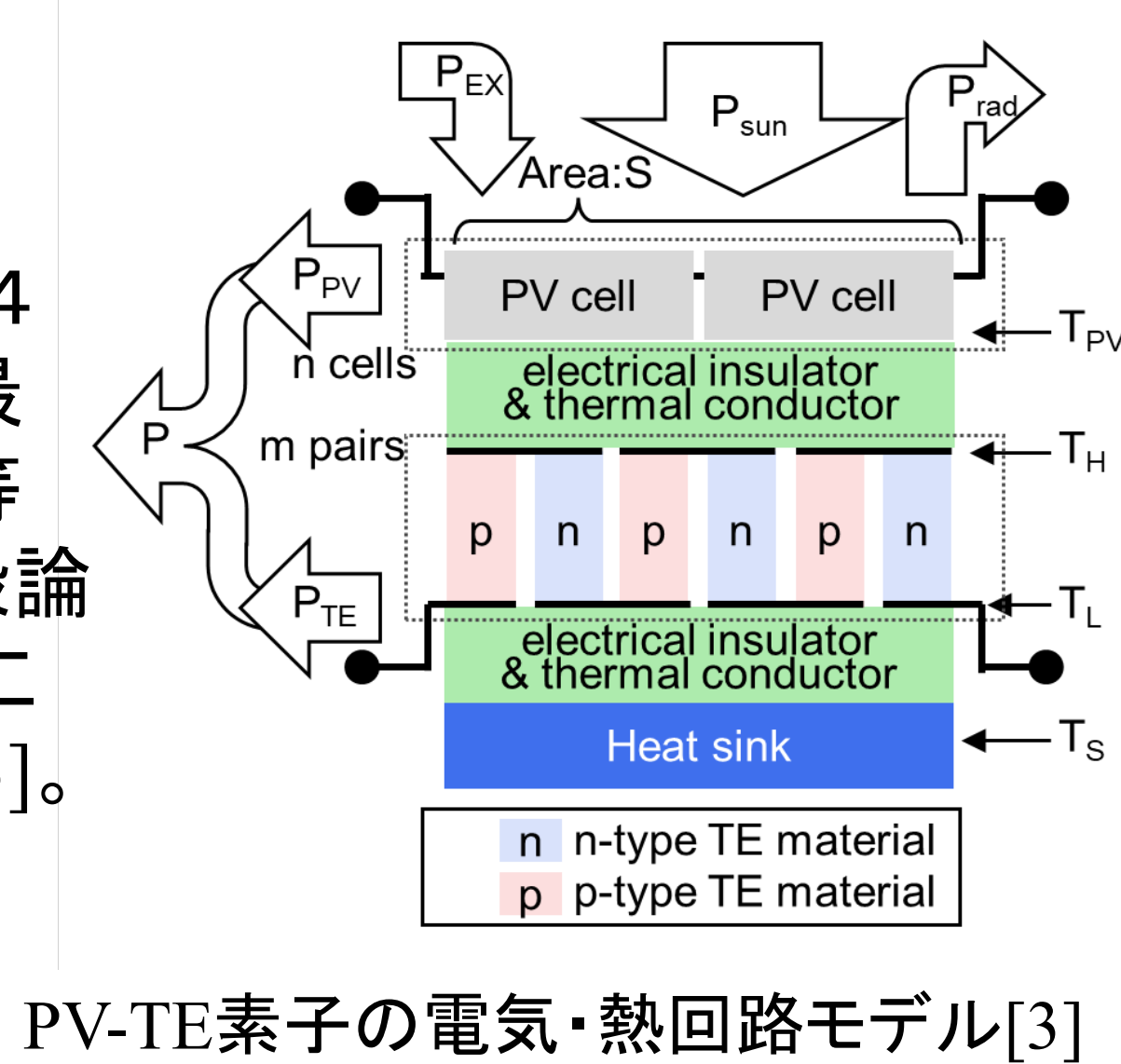
太陽電池は高温化すると出力が下がるが、太陽電池からの排熱を熱電回収すれば、温度特性を大きく改善することができるはず。4端子型と同等の出力が得られれば経済性に優れた2端子型がさらに有利。



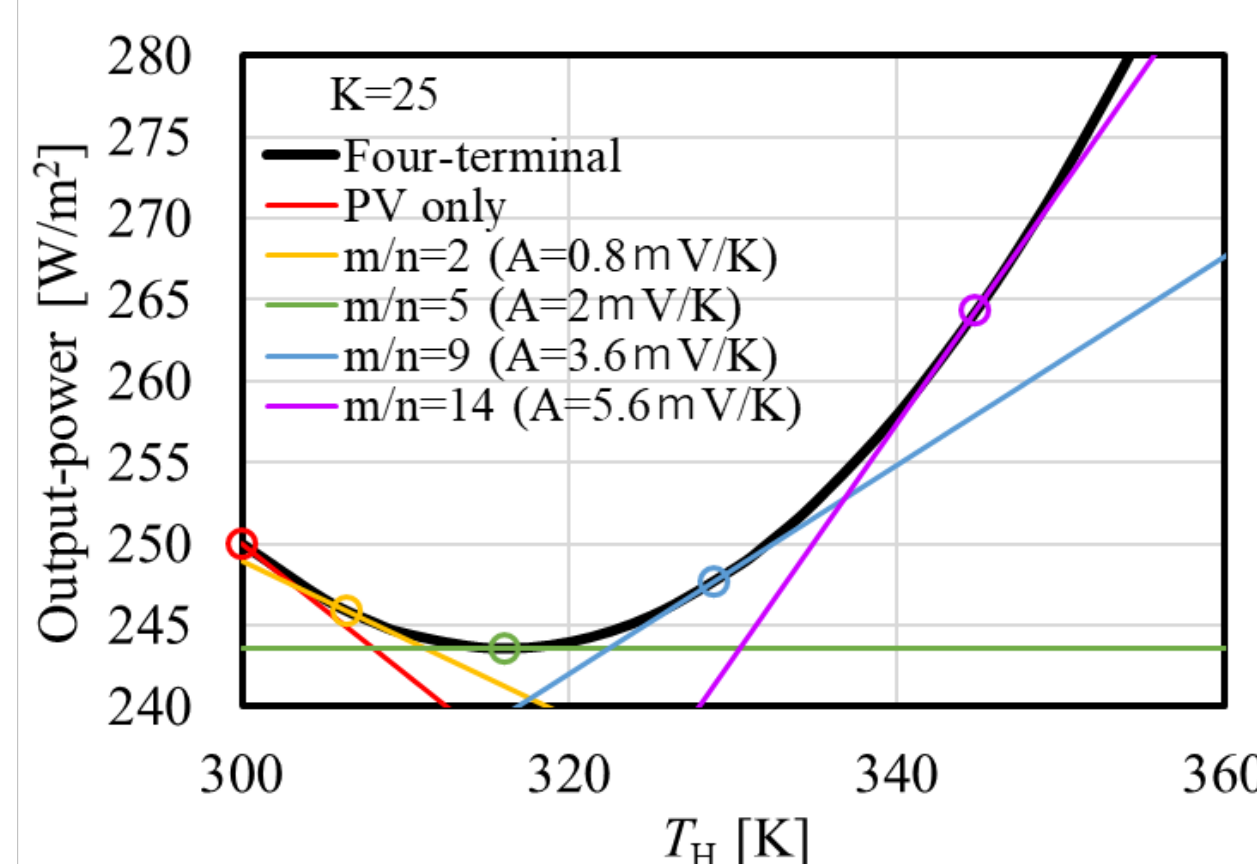
設計理論 [3,4,5]

2端子型ハイブリッド素子はPVとTEからの出力を独立に最大化して取り出す4端子型に対し、電気的な不整合による損失が追加で発生する。不整合損失を回避する設計が可能か理論的に検証した[3, 4, 5]。

2端子型と4端子型の最大出力の等価性を一般論として示すことに成功 [3]。



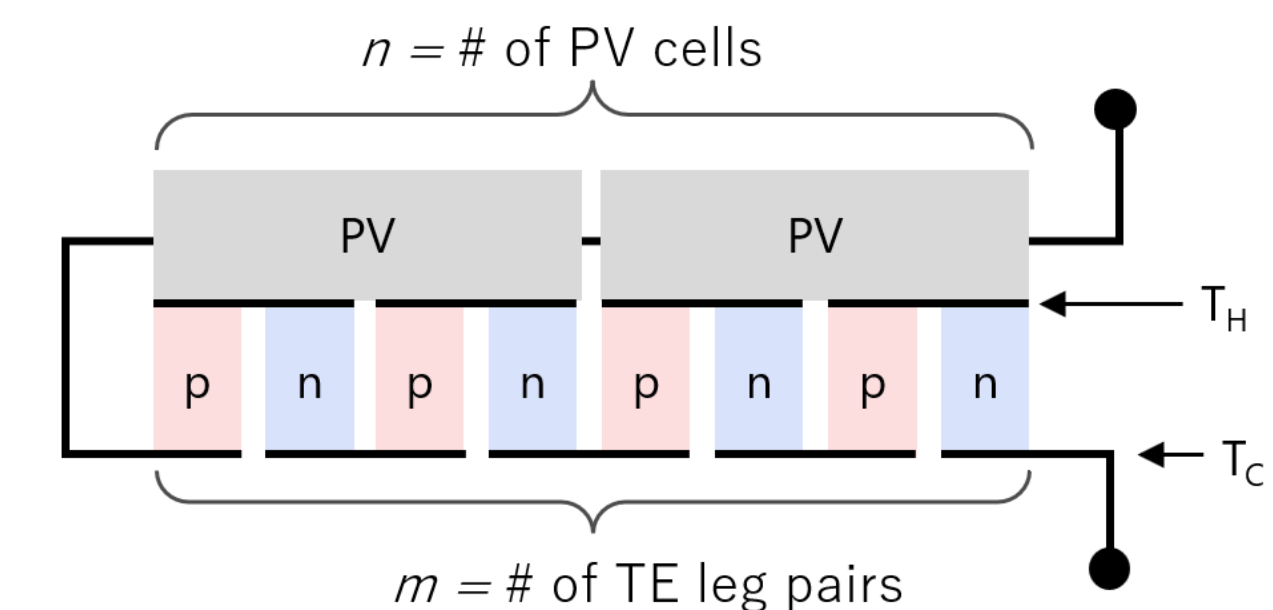
PV-TE素子の電気・熱回路モデル[3]



市販のPVとTE素子(結晶SiとBiTe)のハイブリッド素子の出力温度特性の計算結果[4, 5]。どの温度設定でも、m/nを最適化することにより2端子型が4端子型と等しい最大出力が得られることが分かる。

設計理論: 普遍的ロスレス・ハイブリッド公式
 ~2端子型での不整合損失を消失させる条件式[6, 7]

直列する素子数の比(m/n)が整合条件を決める重要な設計パラメータ



最適値の理論公式

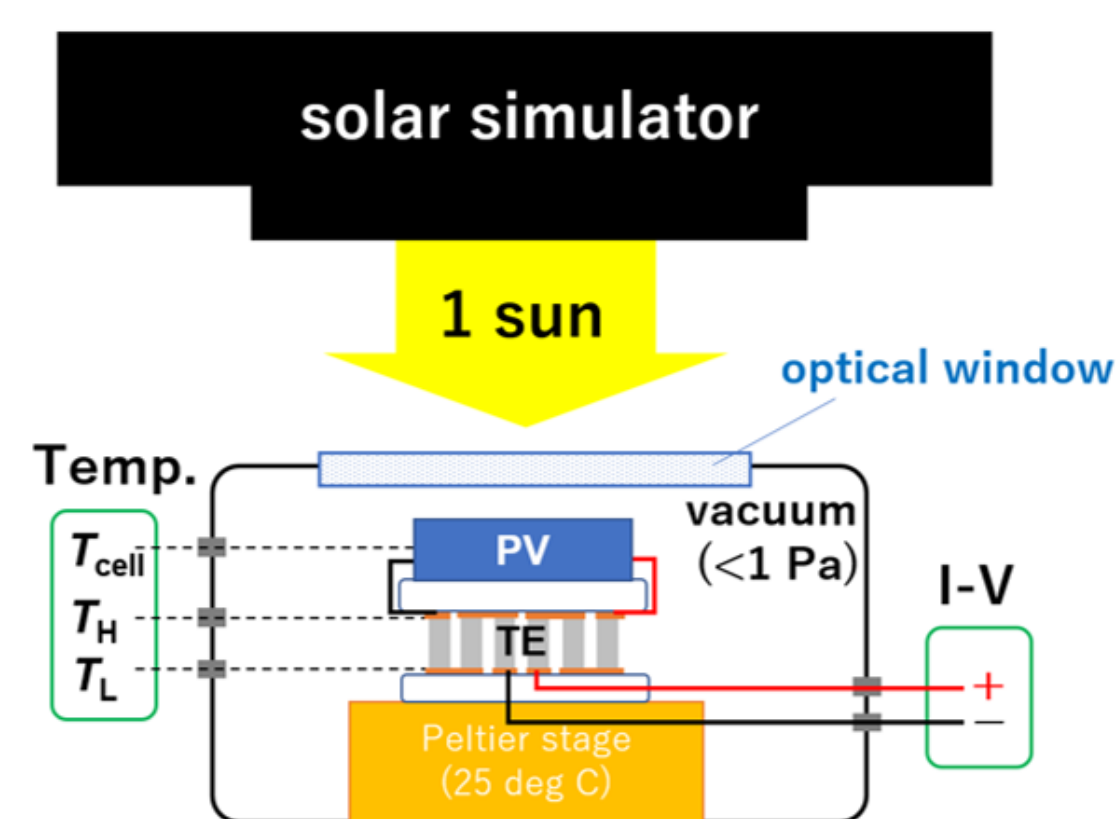
$$\left(\frac{m}{n}\right)^{\text{opt}} = \frac{Q_H / J_{PV}^{\text{MPP}}}{\left(\frac{|\alpha_p| + |\alpha_n|}{2}\right) \times 4T_C} \times \frac{ZT_C}{1 + ZT_C/2}$$

Q_H ($\sim P_{\text{sun}} \times (1 - \eta_{PV})$): TE素子への熱流入
 J_{PV}^{MPP} : PV素子の電流(最大電力点での)

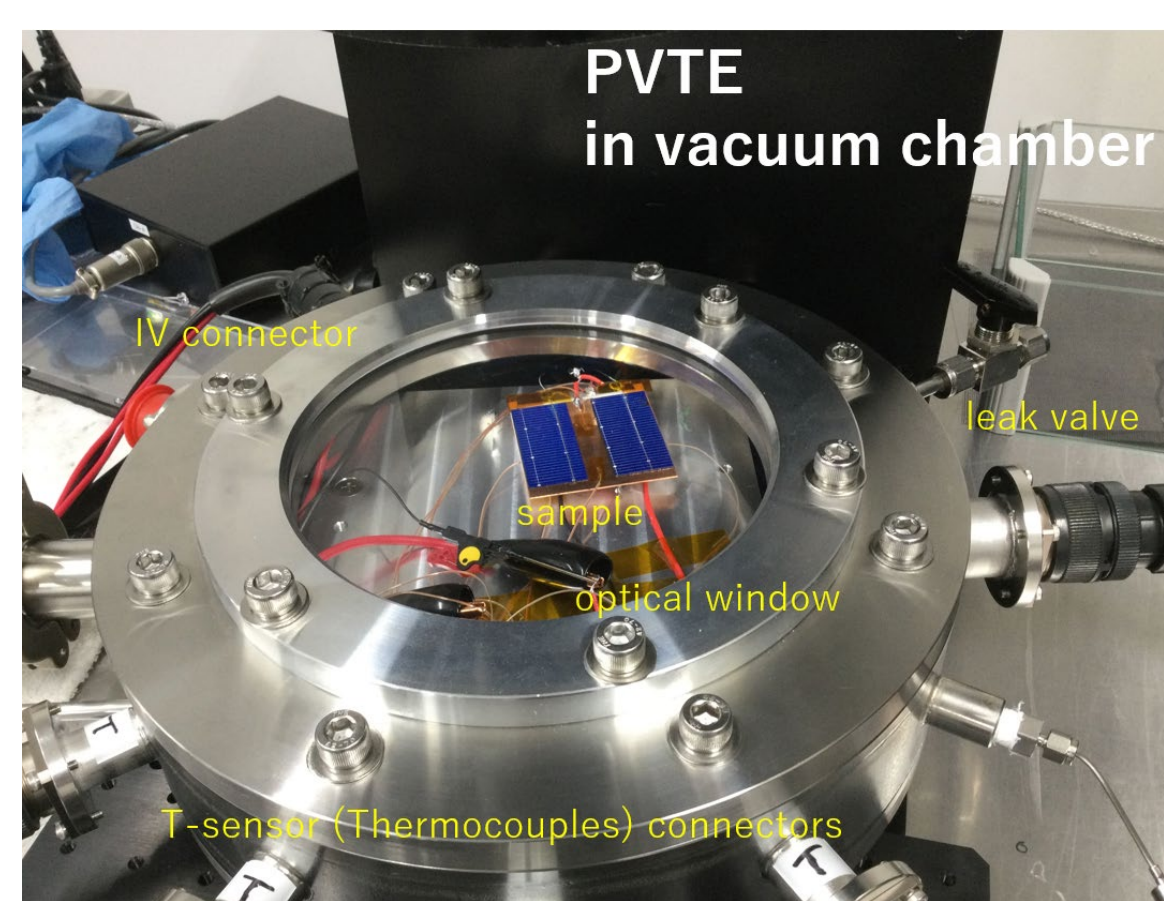
Z: 熱電材料の性能指数、 α_n, α_p : 熱電材料のゼーベック係数

検証実験と結果 [6,7]

これまで外部から熱を印可した条件下でハイブリッド素子の正の温度特性を確認している[2]。太陽光受光以外による入熱を絶った真空下で、温度係数の向上を設計パラメータ(m/n)を変えて評価し、理論の妥当性を検証した[6, 7]。

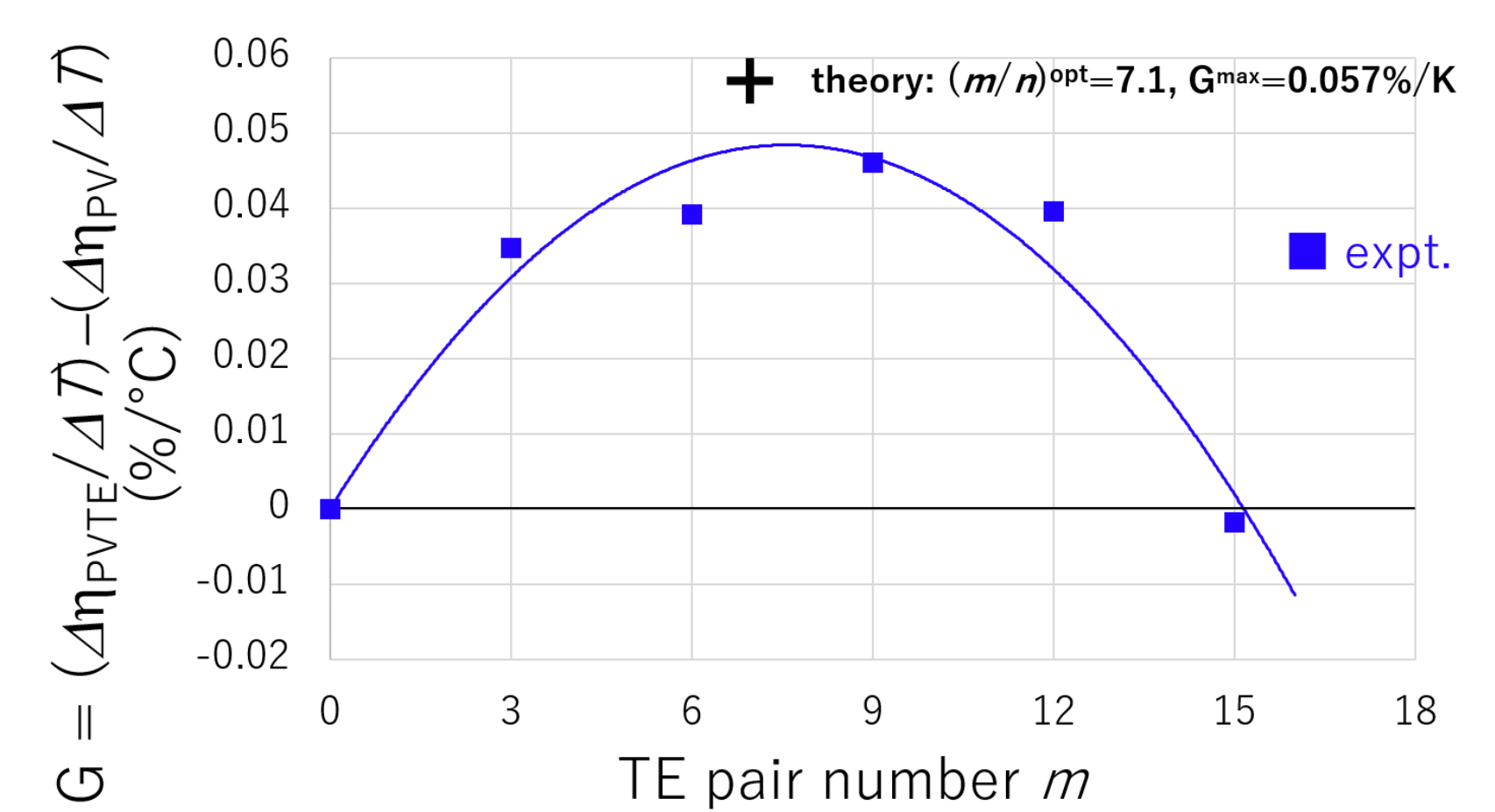


実験概略図(真空チャンバー内で試作素子の各所温度と光照射I-V特性の同時測定を行った)



検証実験系の写真

結果) PV-TEハイブリッド化による出力温度係数の利得



m/nの最適値を実験的に評価した(n=1)。試作素子の熱流評価も行い、結果が理論(ロスレスハイブリッド公式)と整合することを確認した。これにより設計理論の妥当性が示された[6, 7]。

結論

- 直列2端子PVTEハイブリッドの設計の一般論を整備し、検証実験で不整合損失を回避する設計の理論公式の妥当性を確認した。
- 実際の熱環境や、より実用的な冷却方法(フィン+空冷/水冷)、集光下での測定が次の課題。

参考文献

- [1] K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. 12, 064001 (2019).
- [2] K. Kamide et al., 38th EU PVSEC, 1BO.16.4, pp. 37-40 (2021).
- [3] J. Sakuma et al., Appl. Phys. Express 16, 014003 (2023).
- [4] 佐久間他、第83回応用物理学会秋季学術講演会 21p-B202-11 (2022).
- [5] J. Sakuma et al., PVSEC-33, WeP-42-18 (2022).
- [6] 上出他、第83回応用物理学会秋季学術講演会 21p-B202-12 (2022).
- [7] K. Kamide et al., PVSEC-33, TuO-42d-04 (2022).

謝辞

本研究はJSPS科研費 JP19K04523の助成を受けたものです。

熱回収型太陽電池の原理検証： 太陽電池のゼーベック効果確認

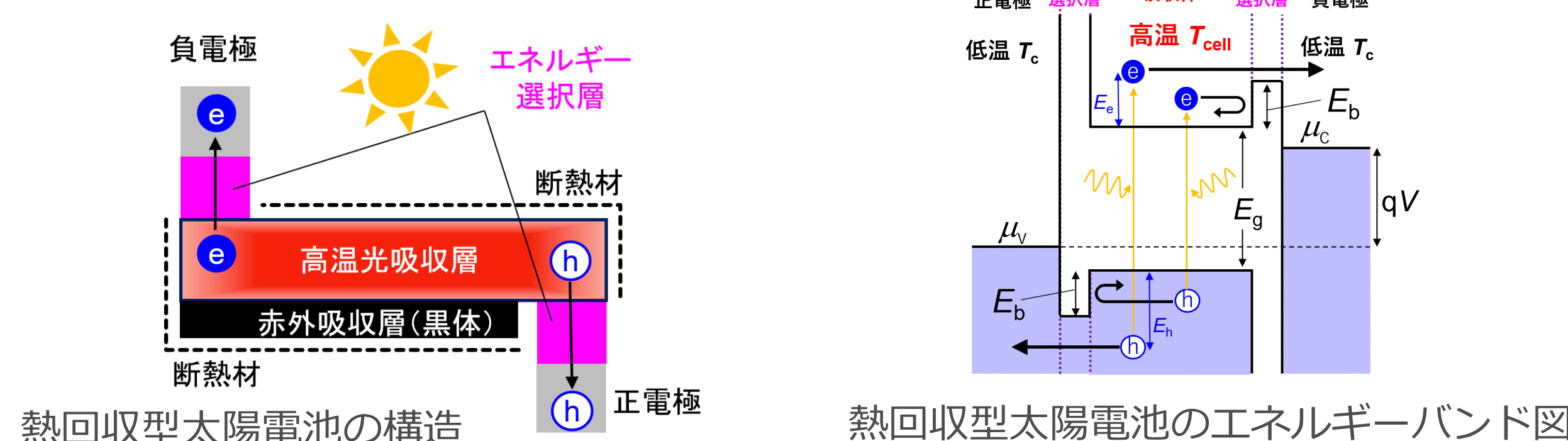
上出 健仁¹、佐久間 惇²、望月 敏光¹、秋山 英文²、高遠 秀尚¹
 1 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター
 2 東京大学

研究の概要

- 高温時に変換効率が向上する正の温度特性(通常とは逆の特性)を持つ「熱回収型太陽電池」を理論提案している(タイプI=ワイドギャップ半導体利用[1]、タイプII=熱電変換素子利用[2])。
- タイプIIは、これまで理論提案にとどまっていた。熱回収型タイプIの動作原理を検証するため、開放電圧の正の温度係数をもたらす太陽電池の熱起電力効果(ゼーベック効果)を実験的に評価した[3,4]。

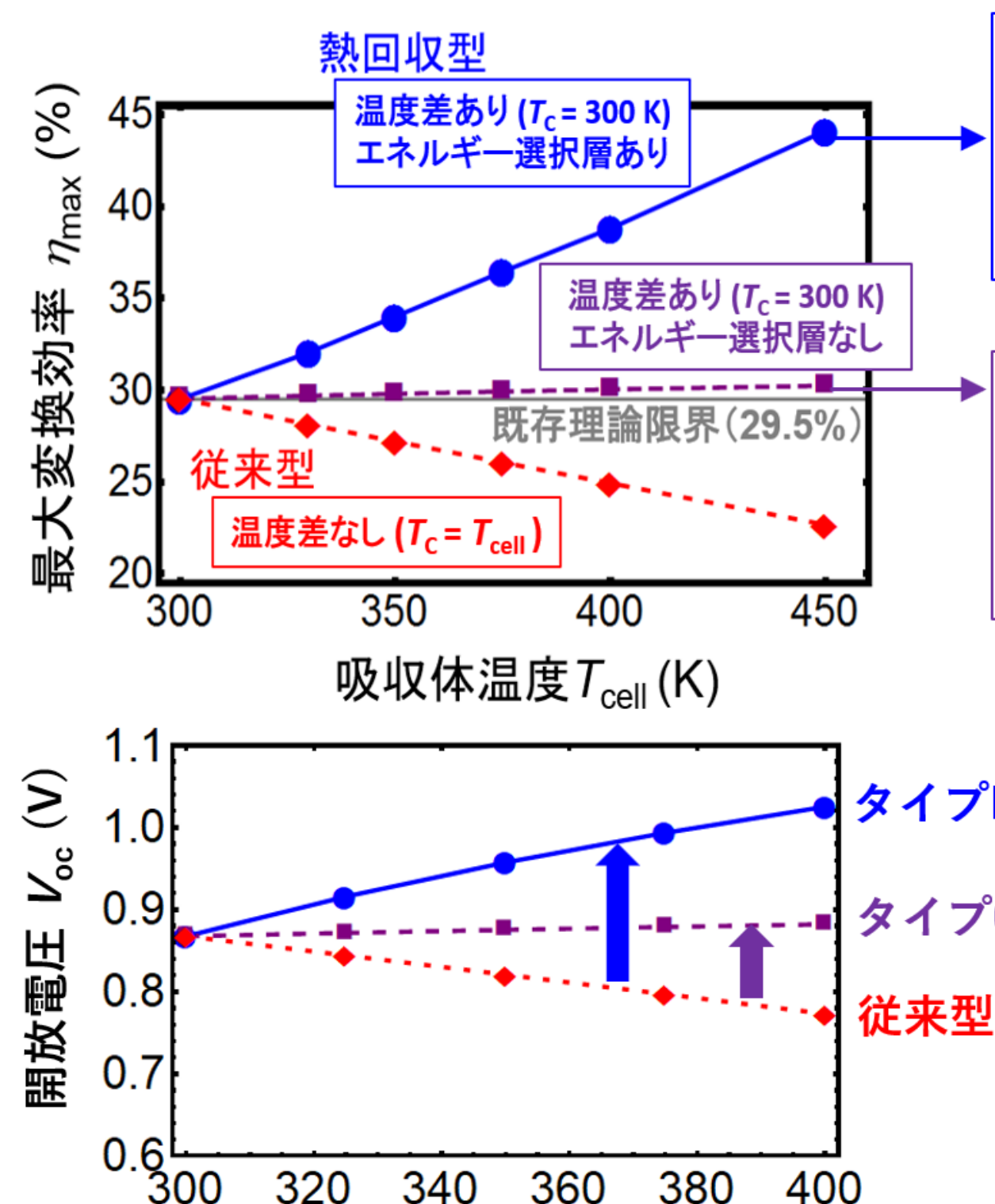
熱回収型太陽電池の原理 [1]

構造: 電極(室温)と光吸収体(高温)の間に、取り出せる電荷のエネルギーを選択するエネルギー選択層(ESC)を有する
 効果: 光起電力に加え、吸収体が高温になるとエネルギー選択層(ESC)の熱起電力により電圧が上昇(熱起電力が吸収体内部の電圧減少を凌駕する)



検証実験のコンセプトと方法 [3,4]

熱回収型太陽電池の温度特性



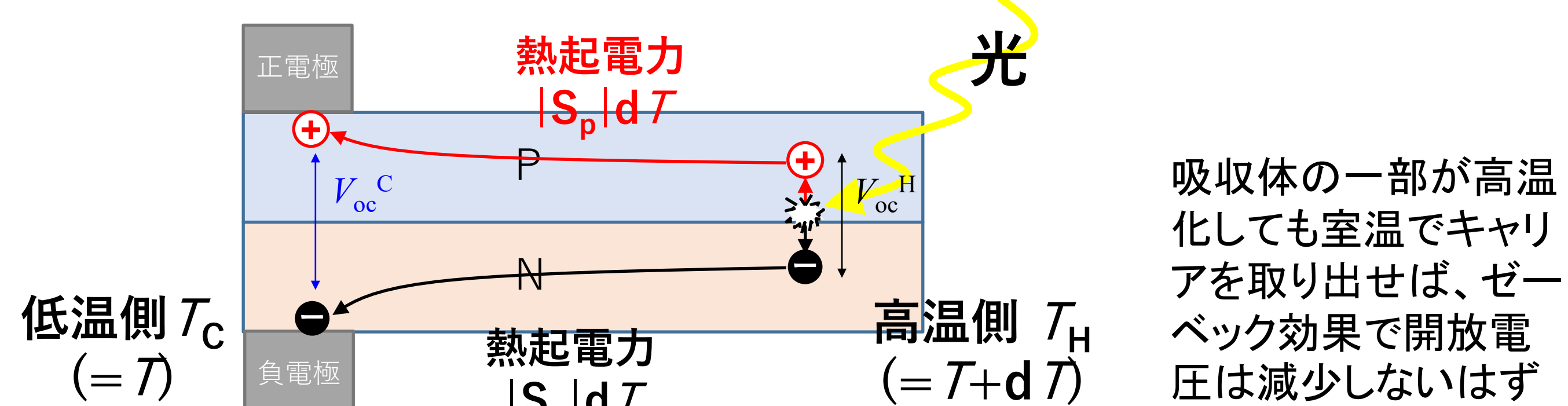
タイプ I ($E'_g > E_g$)
 ... ESCとしてヘテロ構造バリアを用いたヘテロ接合構造

タイプ 0 ($E'_g = E_g$)
 ... ESCに吸収体と同じ半導体材料を用いたホモ接合構造

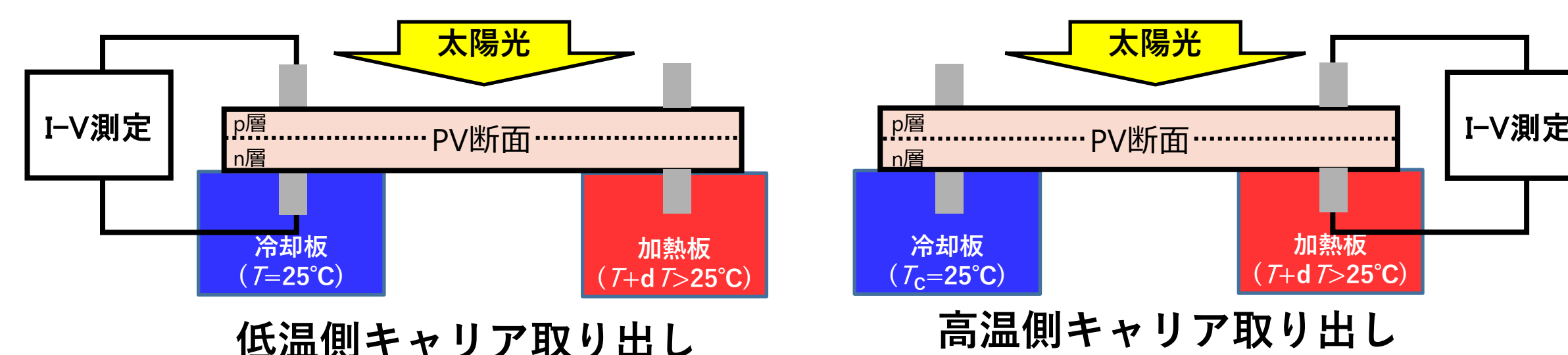
熱回収型の正/非負の温度特性は「半導体の熱起電力(ゼーベック効果)」による。

この熱起力を実験で検証

タイプ0(温度勾配をもつ通常の太陽電池)による実験の原理



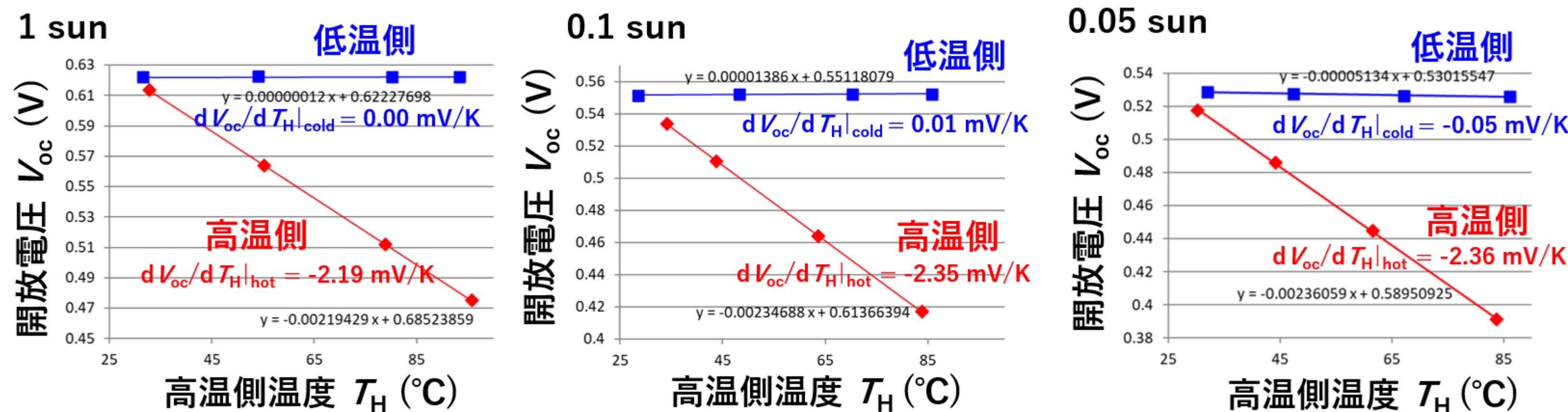
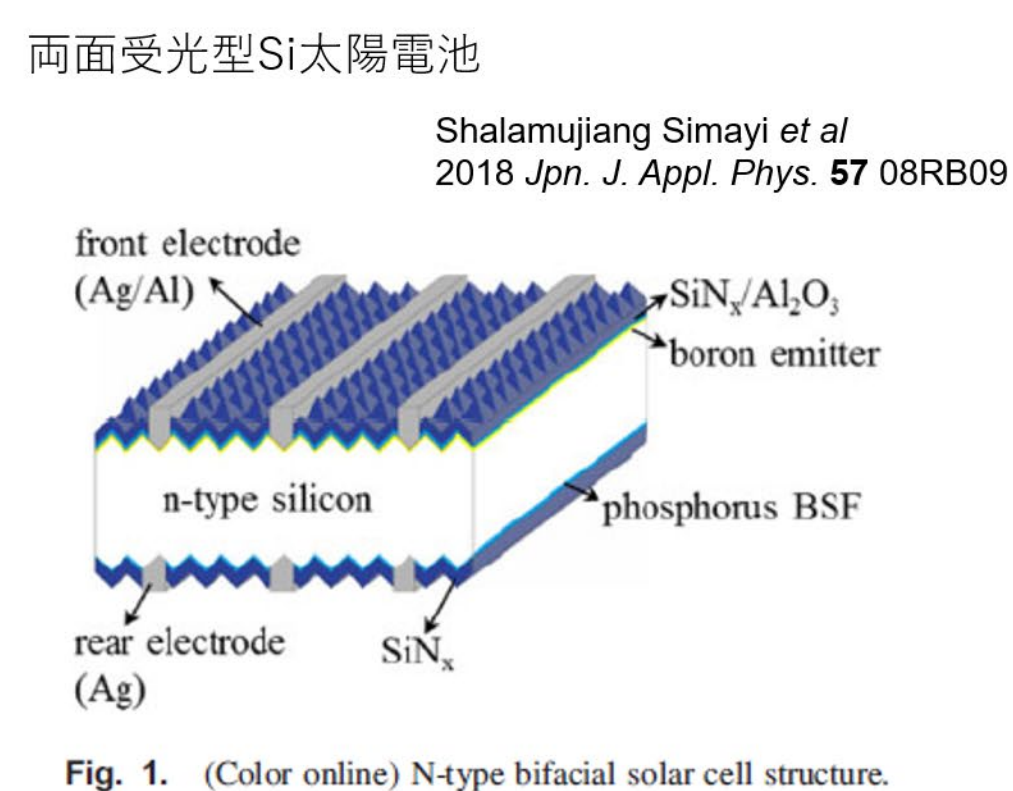
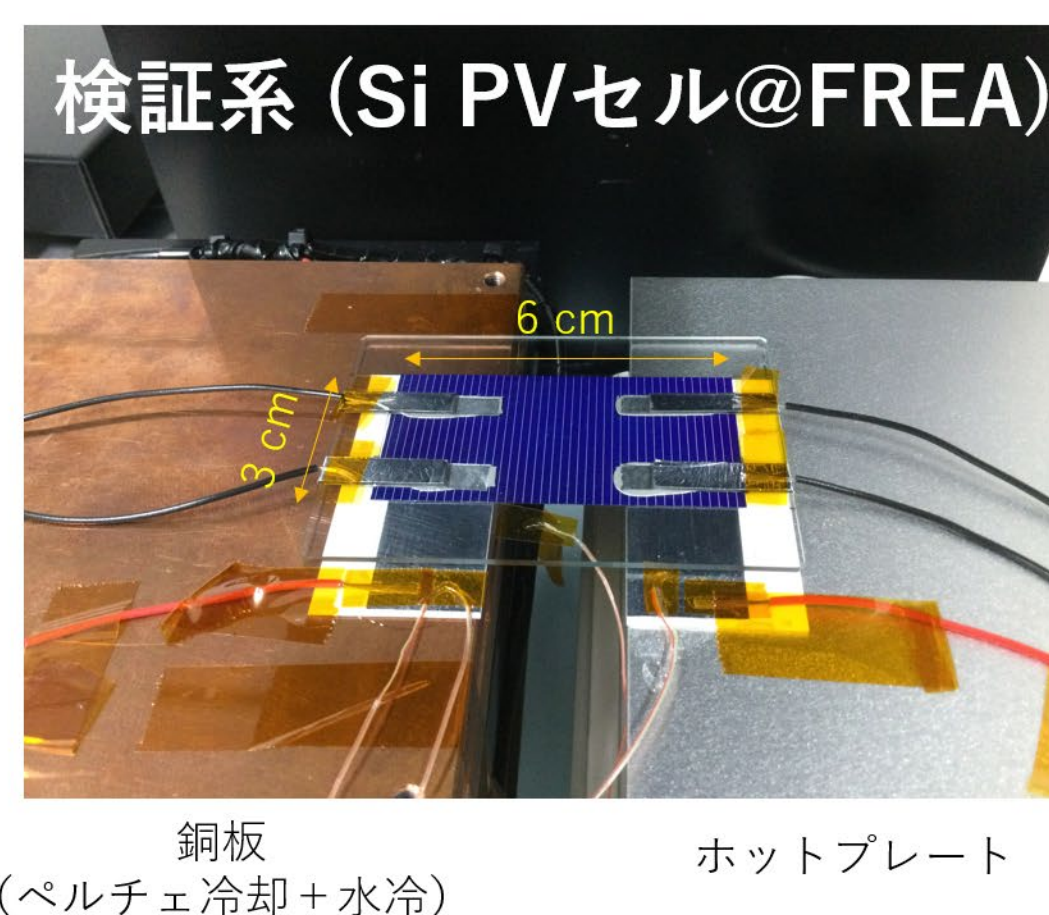
低温側キャリア取り出しでの開放電圧の温度係数 (dV_{oc}/dT_{cold}) と高温側キャリア取り出しの開放電圧の温度係数 (dV_{oc}/dT_{hot}) の差分からゼーベック効果の影響を抽出する。



検証実験と結果 [4]

結晶シリコン太陽電池(両面受光型[5])を用いてタイプ0の検証用デバイスを作成し、低温側(=室温に固定)と高温側での開放電圧の温度係数測定を実施した。さらに、面内抵抗の影響を排除するため照度を下げた実験や詳細な理論解析を合わせて行い、太陽電池のゼーベック効果を評価した。

結果) どの照度においても、高温側キャリア取り出しの負の温度係数に対し、低温側キャリア取り出しの温度係数がほぼ消失していることを確認。より詳細な理論解析と突き合わせ、太陽電池のゼーベック効果による温度係数の向上が見えていることを確認した。



結論

- 熱回収型太陽電池の動作原理を確認するための検証実験を進めた。タイプ0の検証用デバイスを作成し、開放電圧の温度係数測定を行い、詳細な理論解析と突き合わせることで「熱回収型太陽電池におけるゼーベック効果」を確認した。
- 「従来型太陽電池の負の温度係数は光吸収体自身のゼーベック効果で相殺可能」であることを確認した。

参考文献

- [1] K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. 12, 064001 (2019).
- [2] K. Kamide et al., 38th EU PVSEC, 1BO.16.4, pp. 37-40 (2021).
- [3] 佐久間他、第82回応用物理学会秋季学術講演会 1a-N204-10 (2021).
- [4] 上出他、第69回応用物理学会春季学術講演会 23p-E106-19 (2022).
- [5] S. Simayi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57, 08RB09 (2018).

謝辞

本研究はJSPS科研費 JP19K04523の助成を受けたものです。

新型太陽電池の性能評価技術

吉田正裕、山越憲吾
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

研究概要と目的

太陽光発電の主力電源化に向けた取り組みとして、高効率な発電性能を有する新材料・新デバイス構造による新型太陽電池デバイスの研究開発、また、新市場分野(壁面設置・屋根軽量・移動体等)への導入を目指した新用途向け新型太陽電池の研究・開発が国内外研究機関にて精力的に実施されている[1,2]。

本研究では、各種新型太陽電池の研究開発に資する、発電特性を高精度に評価する性能評価技術の開発、また、新用途・設置環境に応じた性能評価の基盤となる基礎評価技術の研究開発を実施している。

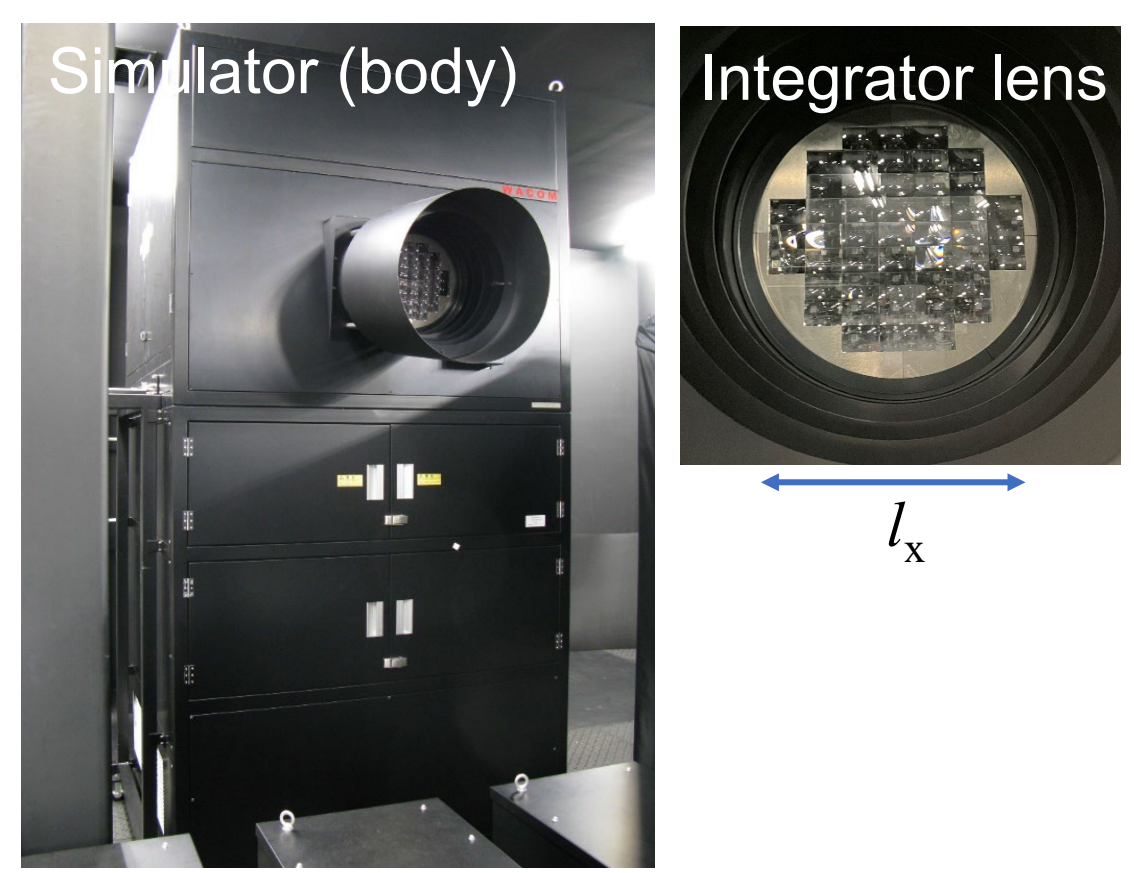
研究内容

本発表では、高精度性能評価の基盤技術開発の一つとして、曲面太陽電池の発電性能評価技術について報告する。

- ソーラシミュレータ光の照度分布(角度、空間分布)評価
→ 曲面太陽電池モジュールの屋内計測に使用するソーラシミュレータの照度分布(角度、空間分布)を評価[3,4]。
- 曲面太陽電池モジュールの発電性能評価
→ 曲面太陽電池モジュールの屋内計測を実施。I-V特性の曲率依存性を測定し、1.のシミュレータ照度分布を考慮したシミュレーションにより解析[4]。

結果&考察-1. モジュール用ソーラシミュレータ光の光分布(角度、空間分布)評価[3,4]

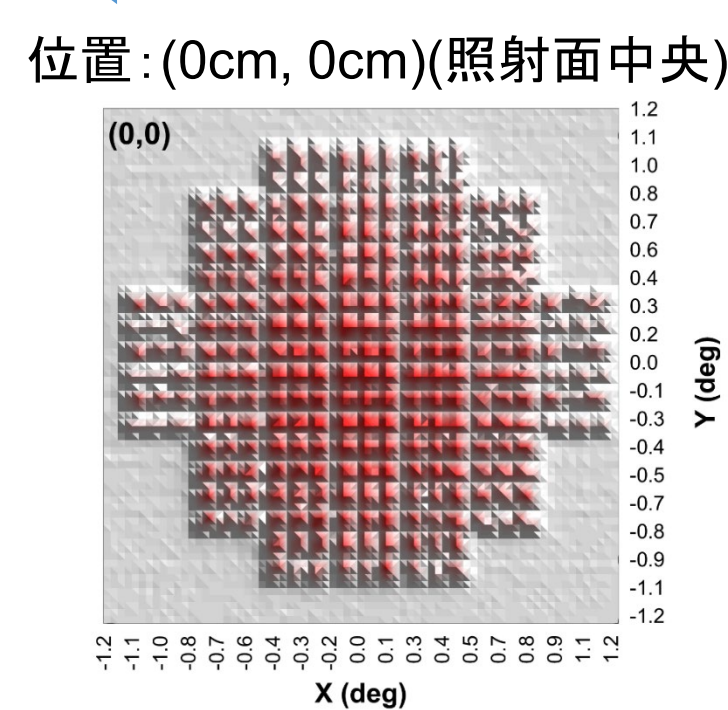
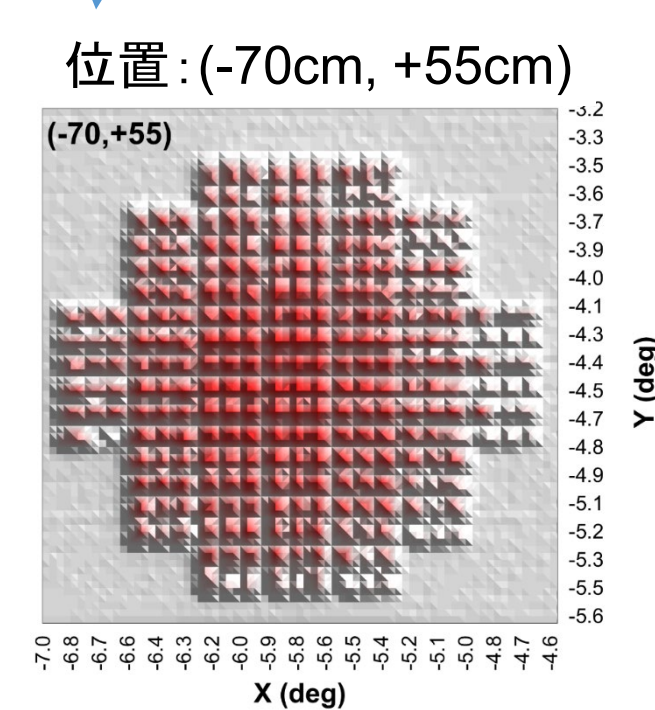
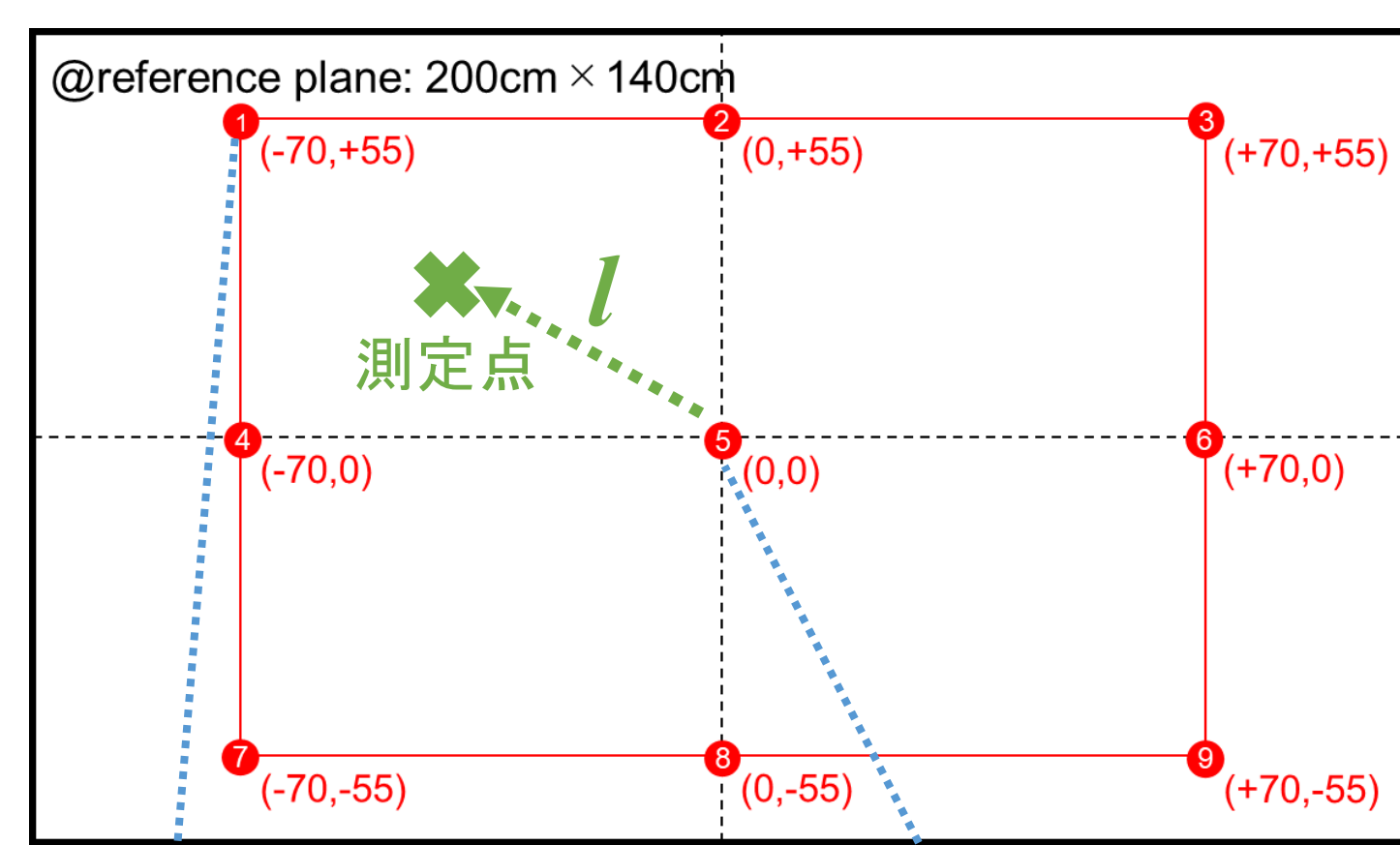
モジュール用ソーラシミュレータ



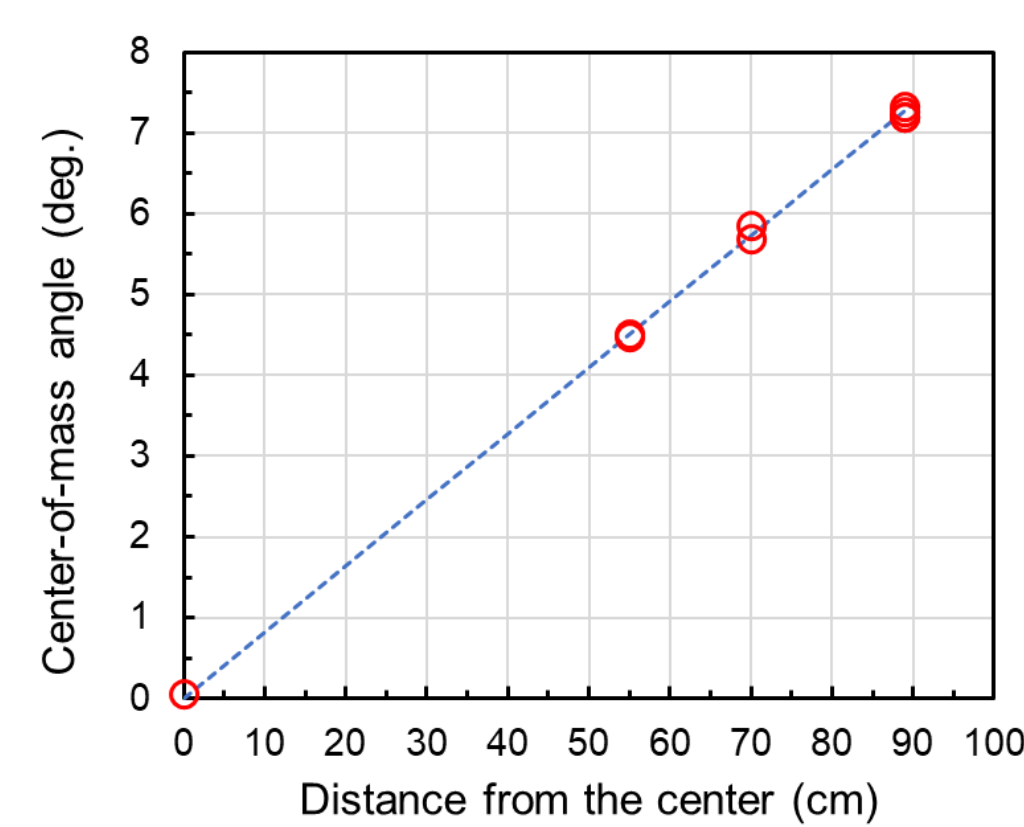
- ロングパルスソーラシミュレータ
- ・キセノンランプ 6灯
 - ・パルス幅 100 ~ 1000 ms
 - ・Class A 以上(IEC 60904-9)[5]

照射光の角度分布

照度参照面上各位置での角度分布



角度分布の重心位置vs 面内位置

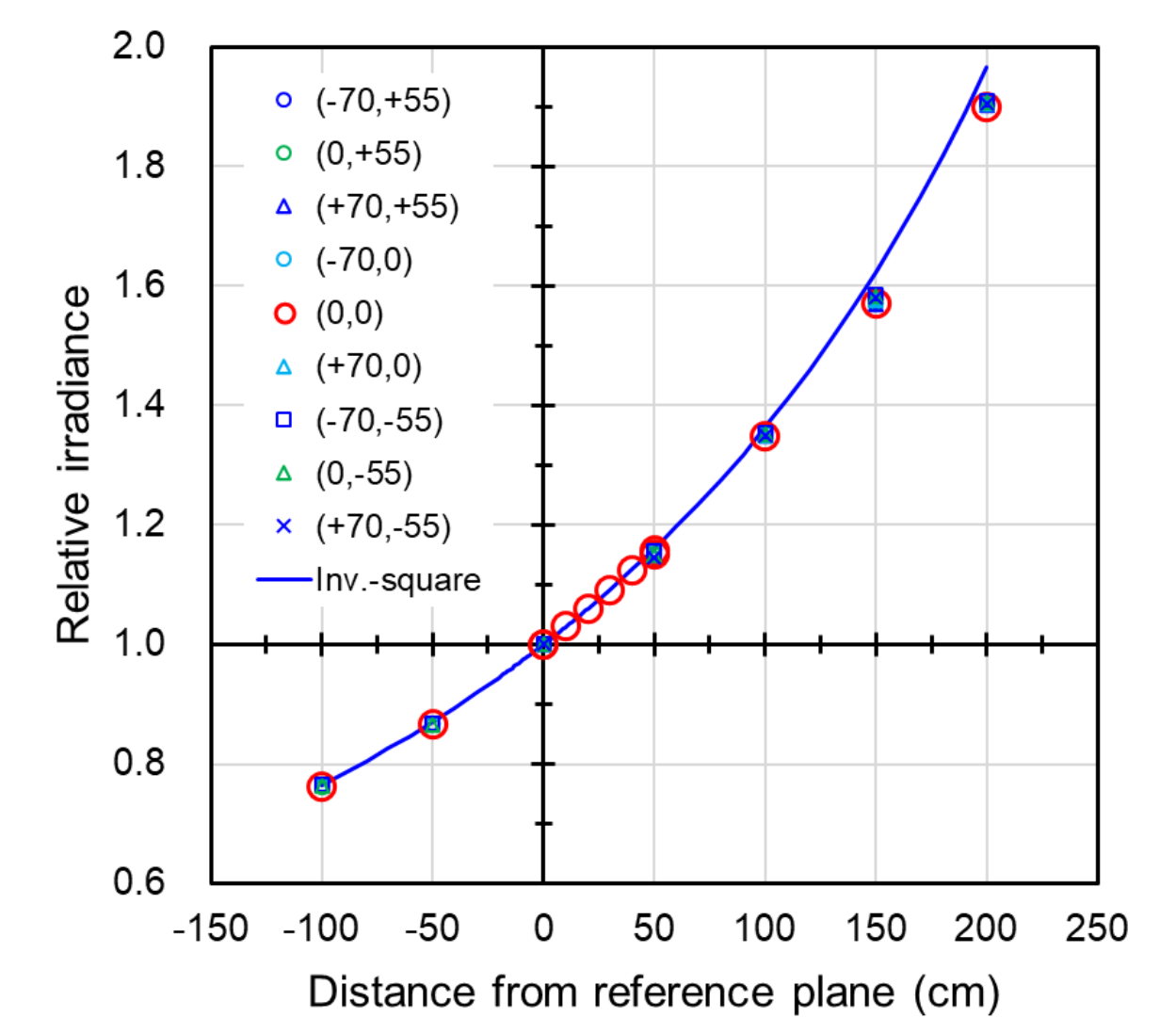


照射面中央から測定点までの距離 l

モジュール測定基準面内位置での照射光角度特性

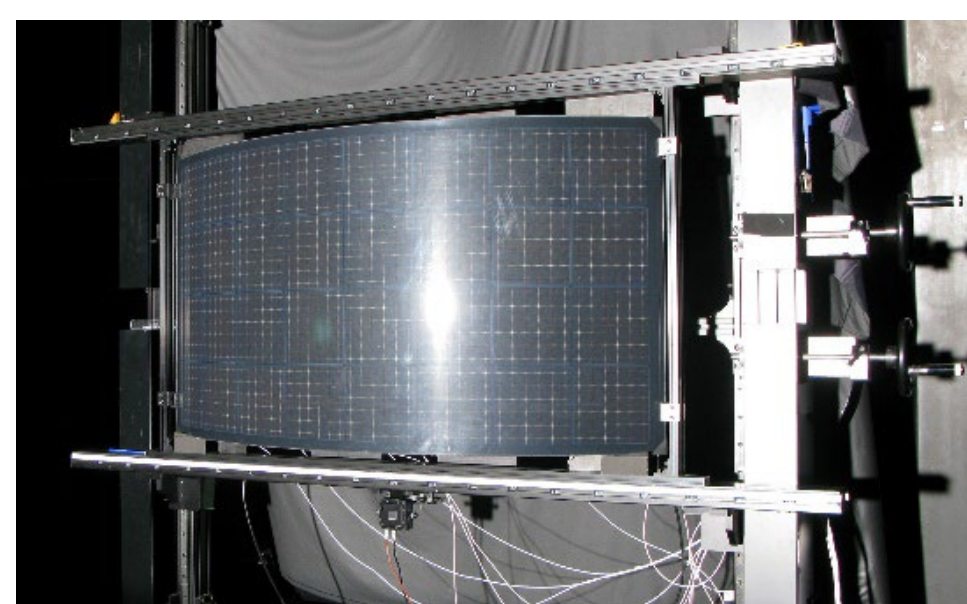
- ・角度分布広がりが $\pm 1.2^\circ$ 以内
- ・参照面内位置に依らない
- ・角度分布の重心位置は、中心からの距離(l)のアーктンジェント (arctan) 特性

照度空間分布(光軸前後方向)



- ・基準面前後方向の照度空間分布は、ほぼ距離の逆2乗則に従うことを確認

結果&考察-2. 曲面太陽電池モジュールの発電特性評価[4]



曲面モジュール設置の様子

テストモジュール:

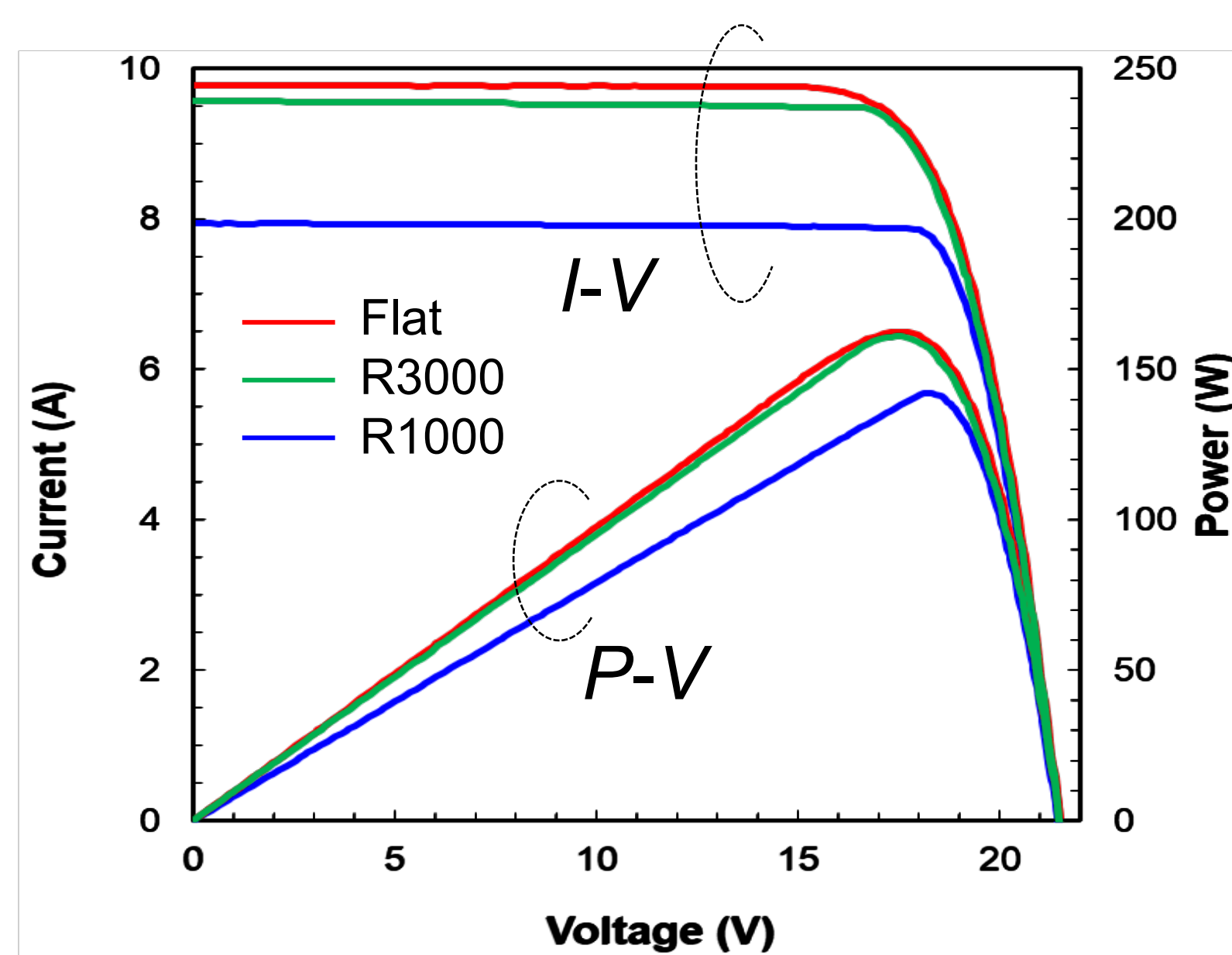
- ◆ 曲面結晶Siモジュール
 - ・曲率半径(R) : 1000, 2000, 3000 (mm)
 - ・4x8 セル, 2 バイパスダイオード
- ◆ フラット結晶Siモジュール(比較参照用)

曲面モジュール設置:

- ◆ シミュレータ光軸に対して垂直に設置
- ◆ 照度基準面は、モジュール短辺のガラス端面位置

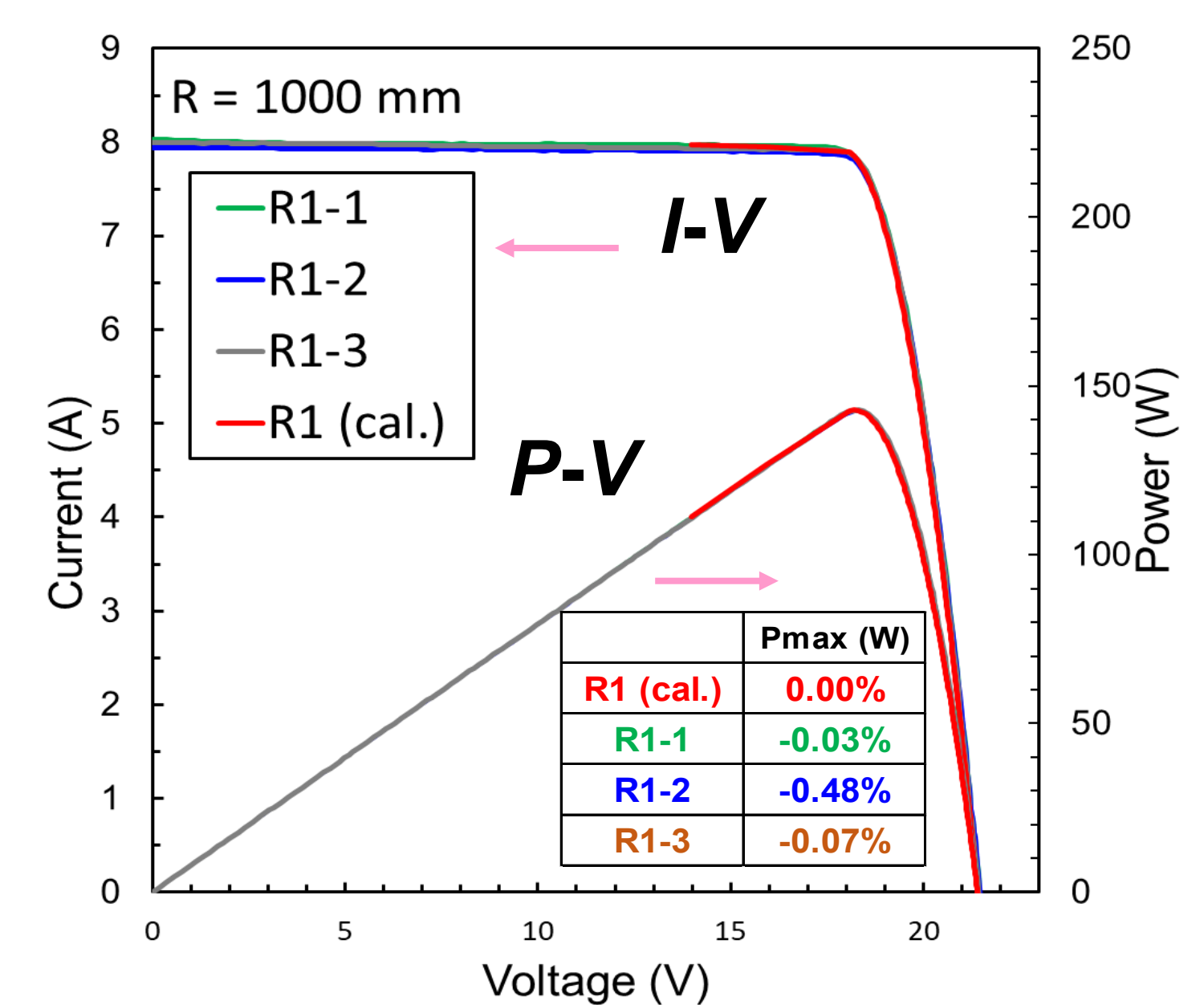
曲面モジュール: AGG Energy製、測定はJEMA・JETの協力による。

測定結果: I-V 特性, P-V 特性



- ・ I-V (P-V) 特性は曲率半径に依存。
- ・ 曲率半径に応じて短絡電流(I_{sc})が減少。
- ・ 傾斜の最も大きな最外側セルでの電流制限。

解析結果: 測定結果との比較



- ・ シミュレータ光の照度空間分布(面内、光軸方向)を考慮し、曲面モジュールI-V特性を計算。
- ・ P_{max} のずれ1%以内で、測定結果をよく再現。

まとめと今後の展開

新用途向け新型太陽電池の性能評価要素技術開発として、曲面太陽電池モジュールの性能評価技術開発について報告した。

- モジュール用ソーラシミュレータ光の照度分布評価
 - ・ 曲面モジュールの測定結果を解析する上で、シミュレータ光の照度分布の情報が重要。
 - ⇒ シミュレータ光の角度、空間分布(面内、光軸方向)を精緻に評価。
- 曲面太陽電池モジュールの発電特性評価
 - ・ 曲率半径の異なる曲面太陽電池モジュールのI-V特性を測定。
 - ・ シミュレータ光の照度空間分布を考慮した計算により、曲面モジュールのI-V測定結果をよく再現(P_{max} ずれ < 1%)。

➡ 今後、性能評価で要求される測定精度許容量の算定と精度検証。

参考文献

- [1] K. Araki et al., *Coatings*, **8**, 251 (2018).
- [2] T. Tayagaki et al., *IEEE J. Photovolt.*, **11**, 708-714 (2021).
- [3] 吉田、他、「新型太陽電池セル・モジュールの高精度性能評価技術開発」(AIST太陽光発電研究 成果報告2021)
- [4] M. Yoshita et al., "Towards performance characterization of curved photovoltaic modules with solar simulators" (WeP-22-09, Nov.16, 2022), PVSEC-33 (Nagoya, Japan).
- [5] IEC 60904-9:2020, Photovoltaic devices - Part 9: Classification of solar simulator characteristics.

<謝辞>本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の受託研究として実施したものであり、関係各位に感謝する。また、曲面モジュール測定では、JEMA、JETの協力に感謝する。

傾斜地設置型、営農型、水上設置型の太陽光発電設備の設計・施工ガイドラインの策定

大関崇¹、高森浩治²、渡辺健二³、井上康美⁴、榎本哲也⁵、
千葉隆弘⁶、安達聖⁷、谷口徹朗⁸、大野慶詞⁹

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 構造耐力評価機構、3 八千代エンジニアリング、4 太陽光発電協会、
5 デロイトトーマツコンサルティング、6 北海道科学大学、7 防災科学研究所、
8 大阪公立大学、9 キョーラク

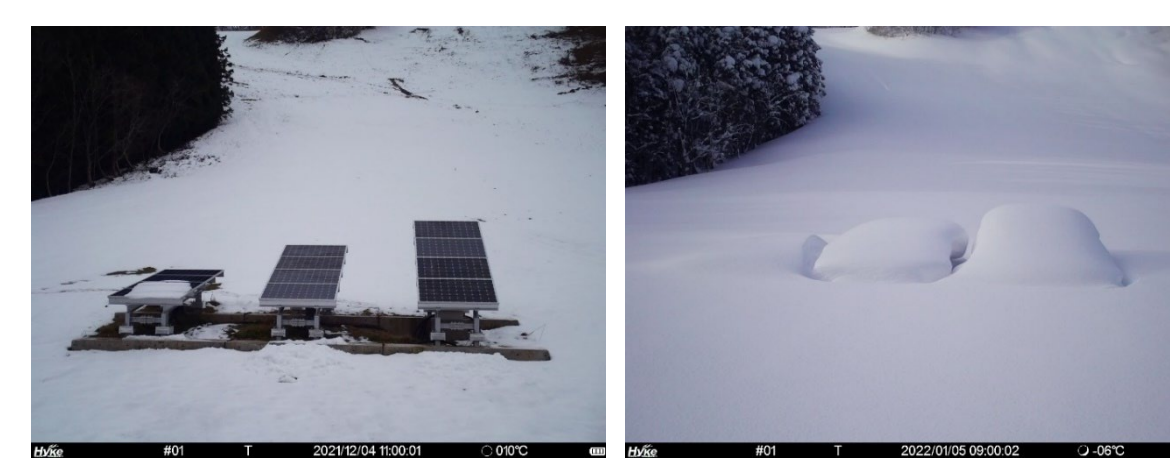
研究の目的

- 太陽光発電の導入は、2012年のFIT開始後に急拡大。
- 台風、積雪、豪雨など自然事象による被害が少なからず発生しており、安全性や防災・景観あるいは環境影響に対する地域の懸念が高まっている。
- 近年では、太陽光発電所の建設に適した場所の減少に伴い、傾斜地や農地、さらには水上へと展開されているが、これらの設置環境での太陽光発電設備は、一般的な地上設置型の太陽光発電設備より設計や施工上の難易度高く、これらの設備の自然事象による被害が発生。
- 景観・環境影響については地域の問題として取り上げられており、地方自治体の条例において発電所への要求事項として整備されつつあるが、それらを満足させる方法については具体的に示されていない。
- これら設備の設計・施工に関する知見が極めて少ないこと、ガイドライン等のオーソライズされた資料が整備されていない。
- 近年増加傾向にある傾斜地、農地、水上の新しい設置環境の太陽光発電設備の安全な導入拡大を行うために、実証実験も踏まえ、設計・施工ガイドラインを策定することを目的とした。

実証実験の概要

傾斜地設置型

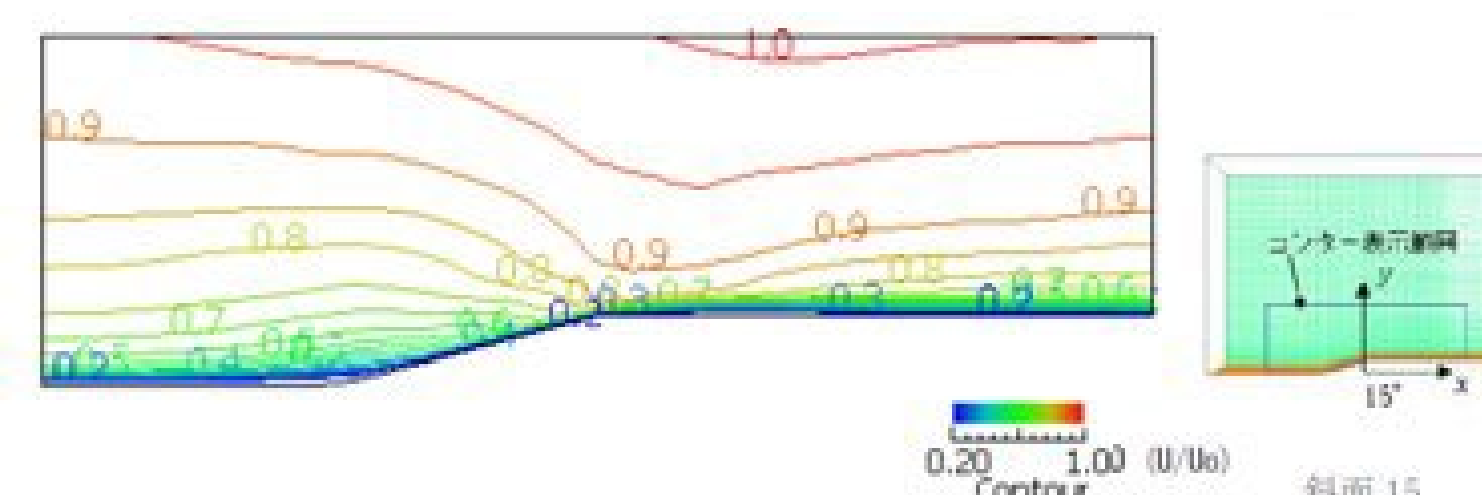
- 単純地形のCFD ⇨ 設計風速・風圧係数
- 風洞実験 ⇨ CFDの検証
- 実地形のCFD ⇨ CFDの実地形への適用性検討
- 架台の耐風圧試験(杭不良時) ⇨ 架台性能の検証
- 積雪荷重実測 ⇨ 軒先荷重、グライド・クリープによる荷重
- 杭の水平載荷試験 ⇨ 支持力の低減
- 杭の水平載荷試験(杭種追加) ⇨ 支持力の低減
- 地盤侵食の実測調査 ⇨ 斜面保護工の有効性確認



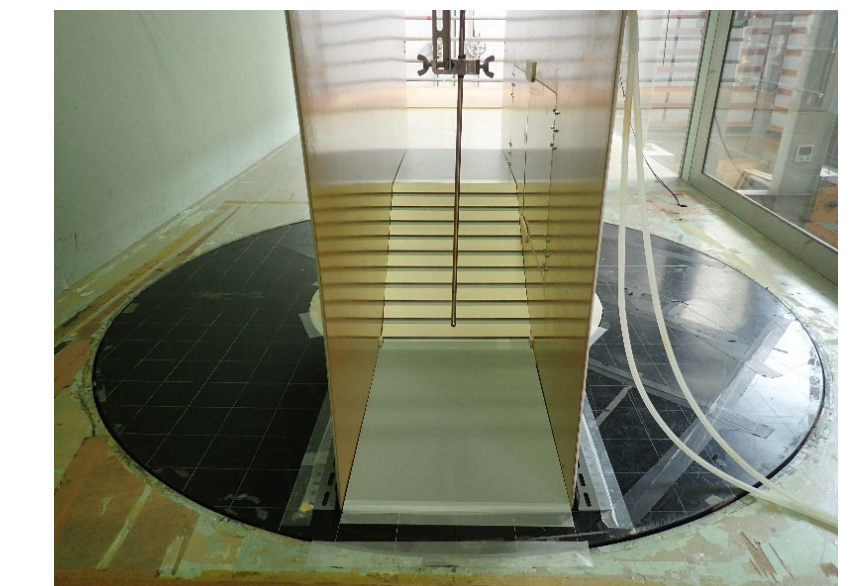
積雪荷重の測定の概要



地盤侵食の実測調査



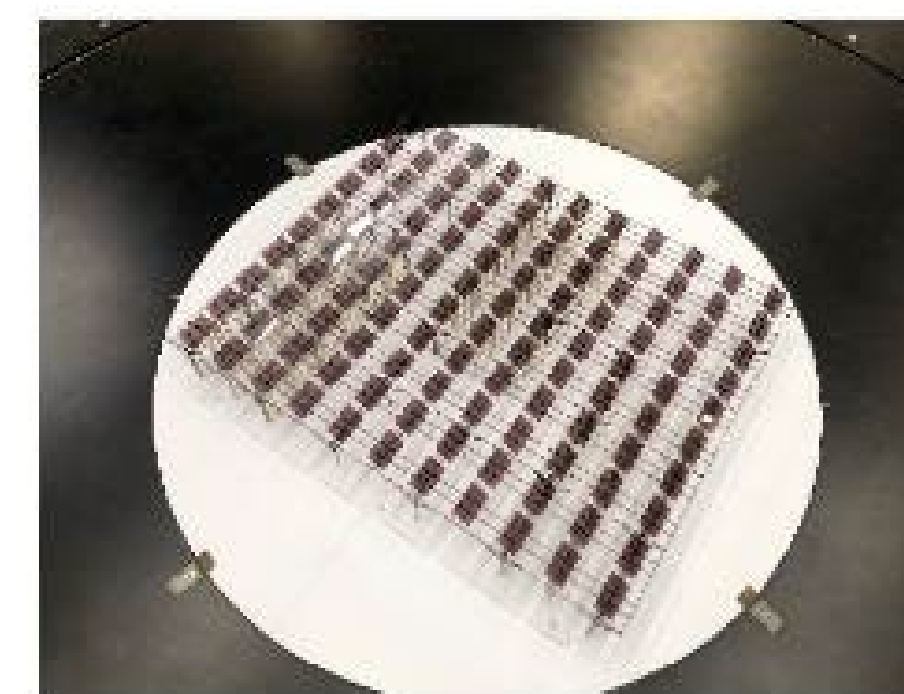
実地形のCFD計算



風洞実験(傾斜地)

営農型

- 風洞実験(藤棚式) ⇨ 風圧係数
- 風洞実験(足高式) ⇨ 風圧係数
- 地盤調査 ⇨ 農地の地盤特性把握
- 杭の載荷試験 ⇨ 農地での杭の抵抗力確認



風洞実験(営農型)



杭基礎載荷試験



水上設置型

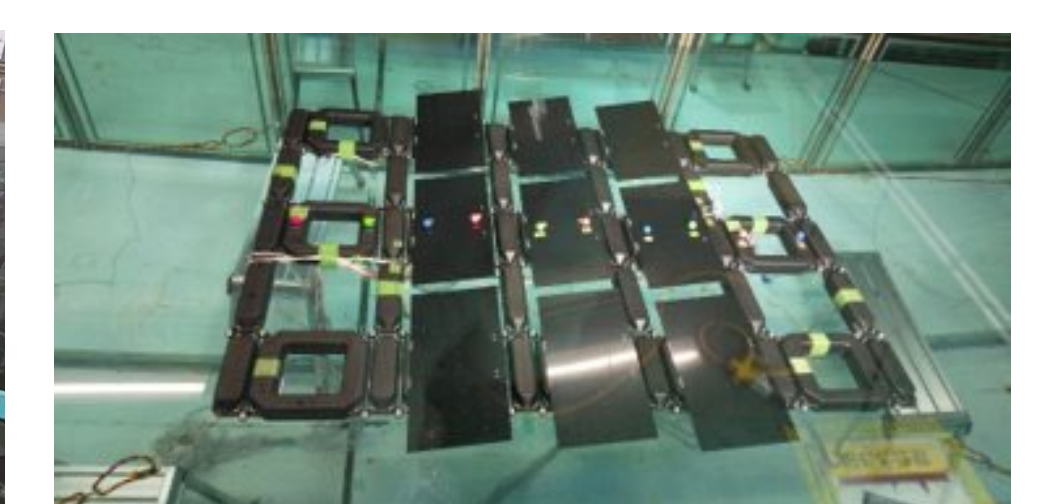
- 係留索に作用する荷重実測 ⇨ 係留部の設計荷重
- 水理実験 ⇨ 係留索への荷重把握
- アンカーの載荷試験 ⇨ 斜め引張耐力の把握
- 風洞実験 ⇨ 設計用風力係数
- 風水洞実験 ⇨ フロート間接合部の荷重把握
- フロート間接合部の載荷試験 ⇨ 安全性確認
- フロート耐力試験 ⇨ フロートの耐力
- 接地測定、絶縁抵抗測定 ⇨ 感電、火災防止



係留索への荷重測定



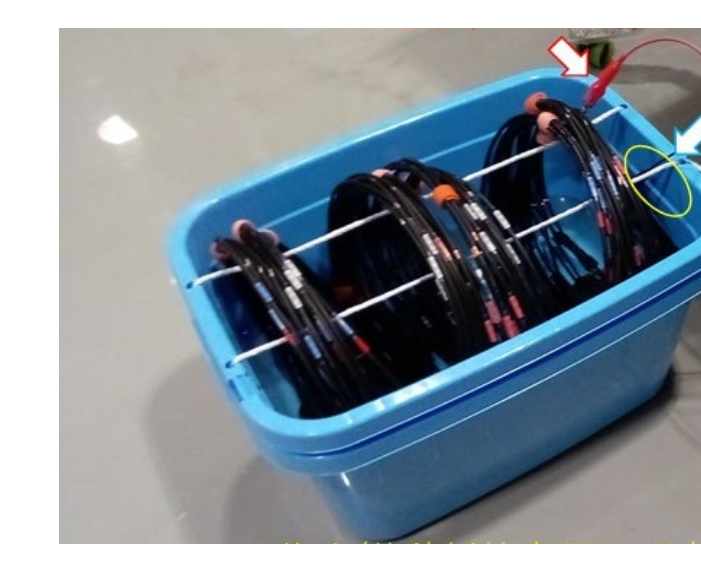
水理実験



風水洞実験



強度評価



コネクタ水没試験

ガイドラインの公開

- 暫定版のガイドライン(傾斜地/営農/水上設置型ガイドライン2021年版)を、2021年11月12日に公開。
- https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP2_100060.html
- 電気事業法における、『発電用太陽電池設備に関する技術基準を定める省令(令和3年経済産業省令第29号)』の逐条解説に、設計・施工の技術的内容をできるだけ具体的に示した技術資料として規定されている。
- https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2021/12/20211220-1.html

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。

PVSの接地抵抗測定における留意点

池田 一昭, 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

はじめに

太陽電池モジュールとその支持物(架台および基礎)で構成されるPVS(太陽光発電設備)の非充電の露出導電性部分は、接地電極との接続および設備内での等電位ボンディングにより、大規模かつ複雑な接地体(接地抵抗を測定する対象物)となっている。接地電極の構造が単純あるいは小規模な場合は、接地電極を設備側から分離して接地抵抗を測定することで、電極と接続する設備の接地抵抗の最大値を確認することができる。しかし、接地電極自体が大規模あるいは複雑な場合、また設備側との分離が困難な場合や太陽電池モジュールや支持物に対する接触電圧を確認する場合などで、電極と設備を接続した状態での測定が必要な場合は、接地体の設備規模(対角距離など)の数倍程度離れた位置に測定用の補助電極を設置する必要があるとされており、大規模な測定装置の導入や遠方での補助電極の設置場所の確保および測定装置との電気的な接続などに著しい困難や多大な労力を要する。本報では、小型・携帯型の接地抵抗計を使用して太陽光発電システムの接地抵抗を測定するにあたり、測定方法の本質に立ち返って補助電極の設置位置に関する検討および調査を行い、その結果を測定時の留意点として報告する。また、簡潔に接地抵抗値を推定する手法の実証実験について紹介する。

実験と結果

接地抵抗測定には日置電機(株)製の接地抵抗計FT6031および補助接地極L9840、RSコンポーネンツ製50mテストリードリールを使用した。接地抵抗を測定する方法は、電位降下法(Fall-of-potential method:FOP法)が最も一般的である¹⁾。また、測定対象の接地抵抗値は、FOP法により測定された抵抗値の空間分布においてFlat slope法を適用して決定することが広く行われている²⁻⁷⁾。Flat slope法が適用できる(抵抗値の空間分布における変化量が小さい)領域は地表面上で2次元的に広がっており、電圧補助極(S極)は必ずしも接地極(E極)と電流補助極(H極)を結ぶ直線上に設置する必要はない³⁻⁵⁾(Fig.1)。これについて、産総研・福島再生可能エネルギー研究所(FREA、福島県郡山市)の敷地内で実証実験を行った。接地極として日置電機L9840を使用し、S極の配置を3通り:(1) H-E極を結ぶ線分を内分する配置[標準式]、(2) H-E極を結ぶ線分を外分する配置(E極は中央)、(3) H-E極を結ぶ直線上以外に配置、に変化させた場合にS極においてE極の接地抵抗を測定し、配置の違いによる顕著な差が生じないことを確認した(Fig.2)。なお、S極の設置位置について「 $\angle HES$ が 30° 以下であれば誤差の少ない測定が可能」との誤解がある。これは、半球状電極を用いた場合の計算において、真値と同じ抵抗値を示す場所がH極を囲む閉曲線に現れ、その閉曲線の広がりが直線EHに対して最大で 28.95° になることに由来していると考えられる^{3,7)}(Fig.3)。

H極として下端が半球状の円柱形(電極の円柱部の長さL[m]、円柱および下端半球の直径d[m];Fig.4)を上端が地表面と同じ高さになるように埋設するとき、接地抵抗値 $R_H[\Omega]$ を有するH極によってこの電極から十分遠方の距離b[m] ($b \gg L$)に重畳する抵抗量 $\Delta(b)[\Omega]$ の空間分布(いわゆる抵抗区域)は式(1)により見積もれる^{8,9)}。式(1)は $L=23.5\text{cm}$ 、 $d=6\text{mm}$ (日置電機製の補助接地極L9840)として導出した。FREA内で実施した測定における $R_H=190\Omega$ および 140Ω の場合の $\Delta(b)$ について、電極からの距離依存性の結果をFig.5に示した。E極の測定値に重畳した量はS-H間の距離bに概ね反比例していたが、H極から10mの距離付近における重畳量はいずれも0.5程度であった。電極と大地との接触状態の善し悪しを反映する格好で電極の有効長が半分程度であったためと考えられる。なお、重畳分も含めた絶対値について測定の目的に照らして不都合がなければ、電極間距離をむやみに確保しようと労を費やすことは不毛である。

$$\Delta(b) = \frac{1}{18.6} \frac{R_H}{b} \quad (1)$$

PVSでは集中極を施設するのが一般的であるが、集中極を経由する以外の経路でも接地の機能が発現し、集中極と架台等による並列極が形成される場合も多い。並列極同士が近接している領域では、各電極の近傍である効果と複数電極が並列接続している効果の相乗により、システム領域内で測定される接地抵抗値は、システムから十分遠方で測定される接地抵抗値と比較して著しく小さい値となる。FREA内のB区画250kW-PVS(架台脚の接地領域:東西43m×南北112m、コンクリート打設の架台脚:Fig.6(2)×396本、すべてのPVモジュールおよび架台等は等電位ボンディングで連結、設備西側の建屋内に集中極を施設)において、PVS敷地の内外にH極を設置して接地抵抗測定を実施した。設備の南西の角から12m北側の架台脚にE極を接続した。E極に対して、西へ81m、南へ33m、東へ8m(PVS敷地内)、東へ30m(PVS敷地内)の位置にそれぞれH極を設置した場合に、E極に対して西側に設置したS極(E極から3m、10m、50m)により接地抵抗を測定した(Fig.6)。H極が南33m(PVS端からは21m)では、S極がPVSから西へ離れるにしたがって、E極の接地抵抗測定値が 0.2Ω 程度で収束する傾向を示した(Fig.7)。西81mではPVS近傍において南33mと同傾向であったが、S極が50mの位置ではH極の抵抗値が 0.05Ω 程度重畳した。東30mでは、収束値が 0.1Ω 程度を示した。これは、H極が並列極と見なされる架台脚により囲まれることでPVS敷地外への通電量が減少し、S極付近での電位差が減少したと考えられる。また、東8mではH極の抵抗値が重畳することで、PVSから遠ざかるほど抵抗値が減少して見えた。今例のように架台脚による接地の並列性が高い場合、H極を架台脚の近傍(特にPVS敷地内)に設置すると、H極と近接する一部の接地極との間に偏った電流が流れるため、H極からの電流や接地システムへ電流が等方的に流入するという電流経路が成立せず、FOP法の原理が成立しない。接地システムの敷地外、可能であれば抵抗区域外にH極を設置するのが理想であるが、実現不可能な場合や測定精度が労力に見合わない場合もあるため、要求する測定精度を把握した上での作業が必要である。

棒状電極の抵抗値は電極から十分離れた位置では半球状電極と同様に電極からの距離に反比例して収束値に漸近すると見なせる。また、これまでの経験では、どの規模の接地体でも同様の傾向は見える。これは並列極を構成する各々の極が距離に反比例して収束する傾向を有することに起因すると考えられる。そこで、接地体の接地抵抗値の空間分布 $R(b)[\Omega]$ は、接地体から十分離れた位置において、式(2)のとおり距離b[m]に反比例する形で近似できると仮定する。ここで、 $\alpha[\Omega]$ は無次元における接地抵抗の収束値、 $\lambda[\text{m}]$ は変化の割合を示し抵抗区域の広さの目安になる変数で、 $\delta[\text{m}]$ は調査域からみた見かけの接地極の原点で、接地極の近傍での双曲線近似からのズレを吸収する役割も担っている。変数を3つ使用するため、仮の原点を基点とする任意の直線にそって抵抗値の位置依存性を (b_1, R_1) 、 (b_2, R_2) 、 (b_3, R_3) のように3組測定して式(3)へ代入すると、収束値 α を計算できる。この手法では、抵抗値の変化を利用して収束値を推定するため、抵抗区域内すなわちPVSの近傍で測定を実施できる利点がある。FREA内のD区画250kW-PVS(架台脚の接地領域:東西67m×南北50m、根入れコンクリート基礎上に金属鋼材をボルト止め:Fig.7×42個、すべてのPVモジュールおよび架台等は等電位ボンディングで連結、設備北側の敷地内に接地棒6本を並列施設:Fig.8)において、PVS端から約25m以内での接地抵抗測定値の距離依存性3点により、PVSの接地抵抗値を 0.78Ω と推定した(Fig.9)。設備の南東の角から約10m北側の架台の金属鋼材にE極を接続し、E極に対して東側に設置した10数点のS極のうち比較的直線状に並んだ3点の測定値で双曲線関数を構築し、無限遠における収束値を計算した。

$$R(b) = \alpha \left(1 - \frac{\lambda}{b - \delta} \right) \quad (\alpha, \lambda > 0) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{(b_3 R_3 - b_2 R_2)(R_2 - R_1) - (R_3 - R_2)(b_2 R_2 - b_1 R_1)}{(b_3 - b_2)(R_2 - R_1) - (R_3 - R_2)(b_2 - b_1)} \quad (3)$$

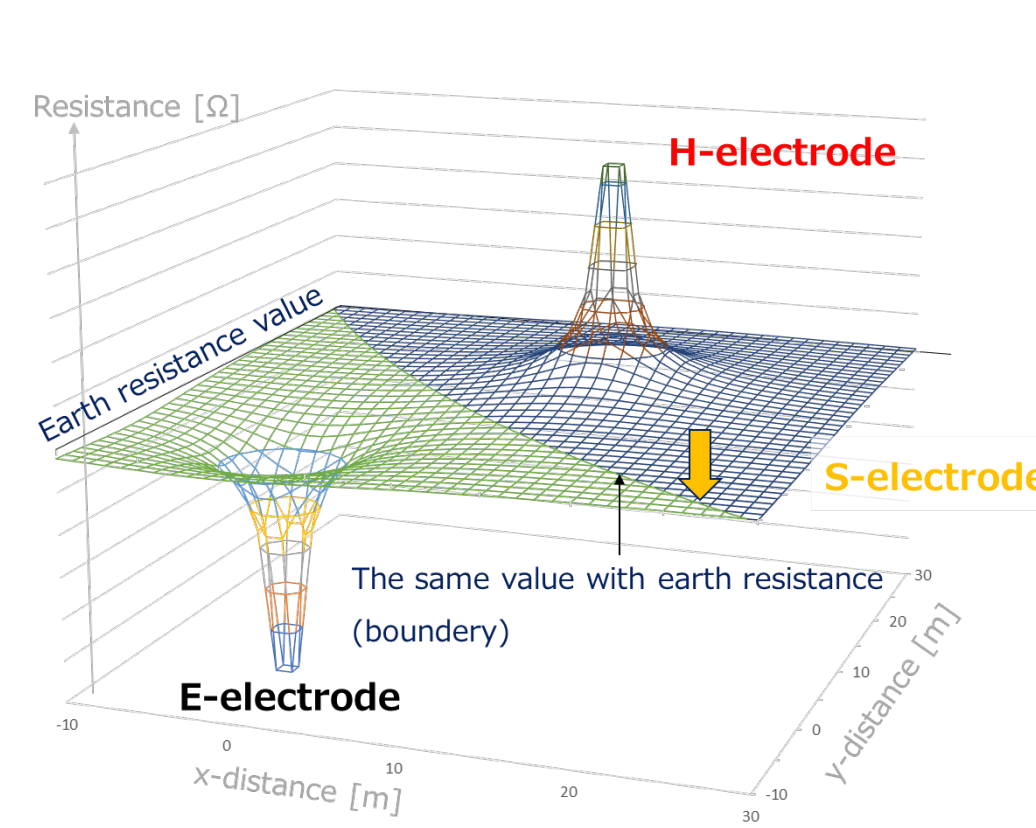


Fig.1 接地極および電流補助極周辺の接地抵抗測定値の平面分布(概要図)

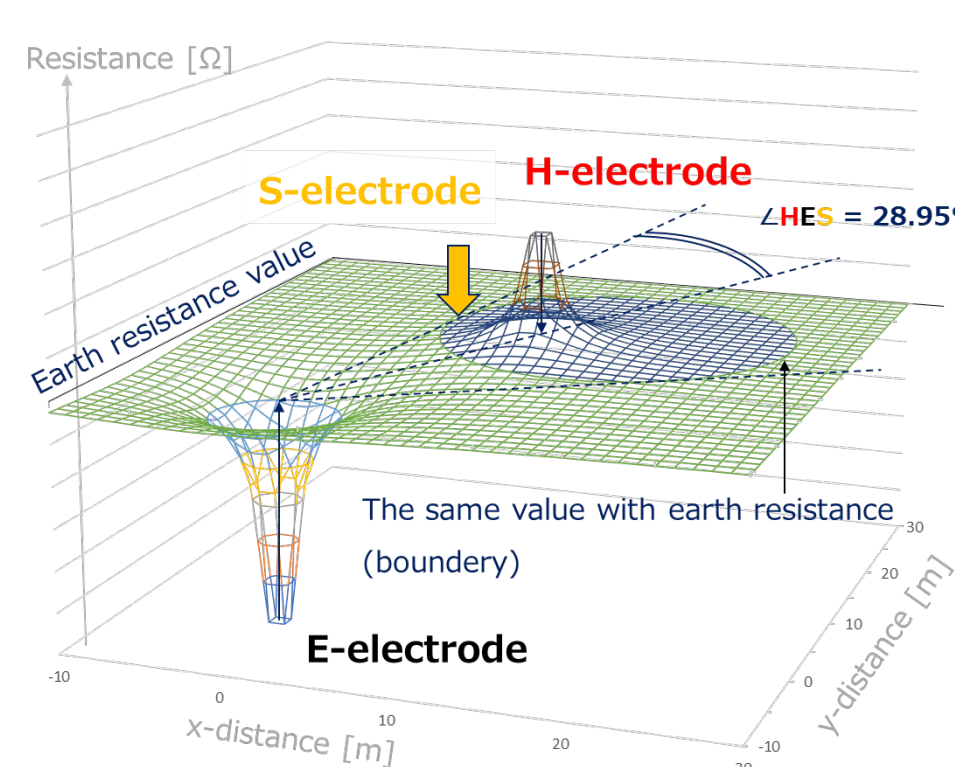


Fig.3 「30度以下で誤差の少ない測定」の誤解の発端に関する正しい解釈(概要図)

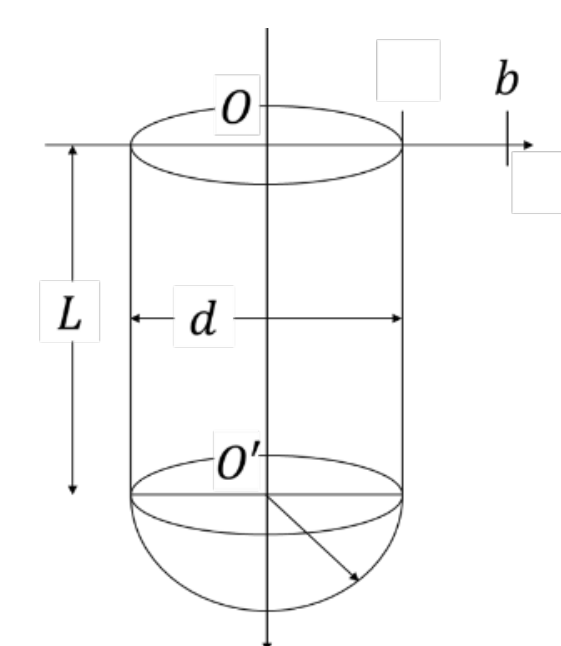


Fig.4 電流補助極の形状

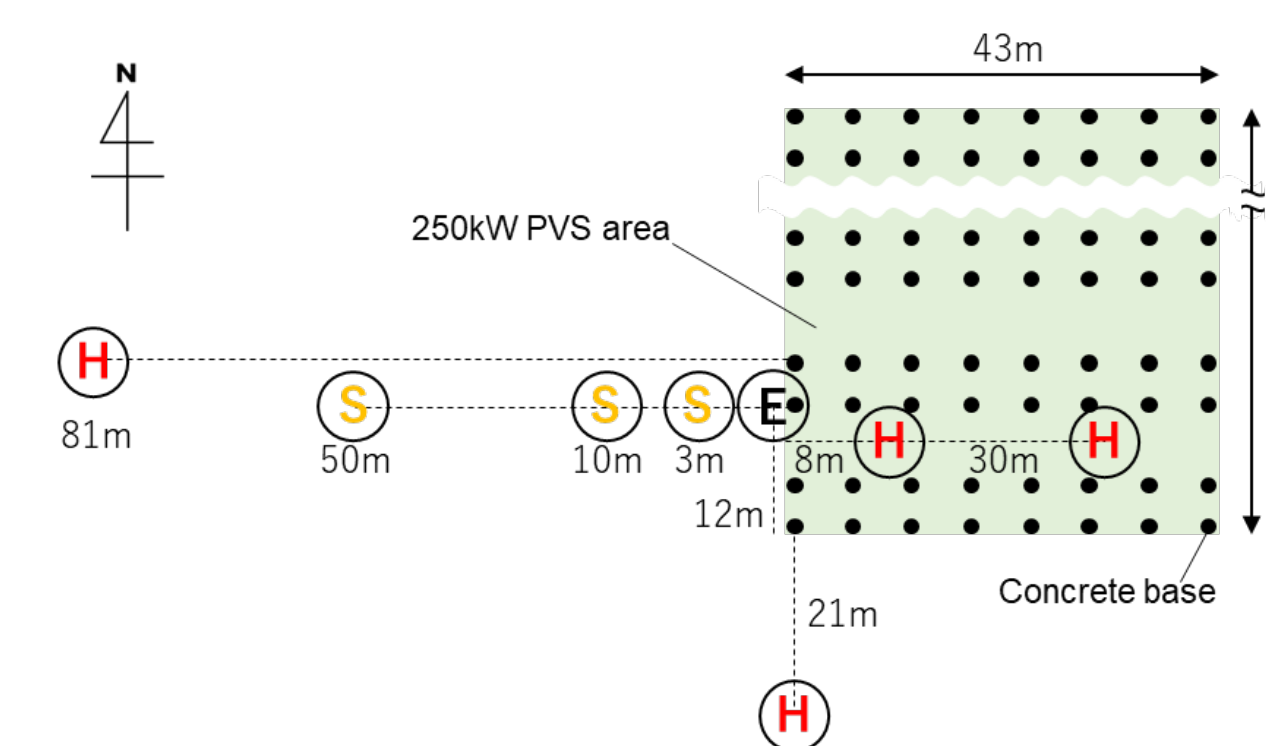


Fig.6 FREA-B区画 250kW-PVSにおける接地抵抗測定時の接地極および補助接地極の配置図

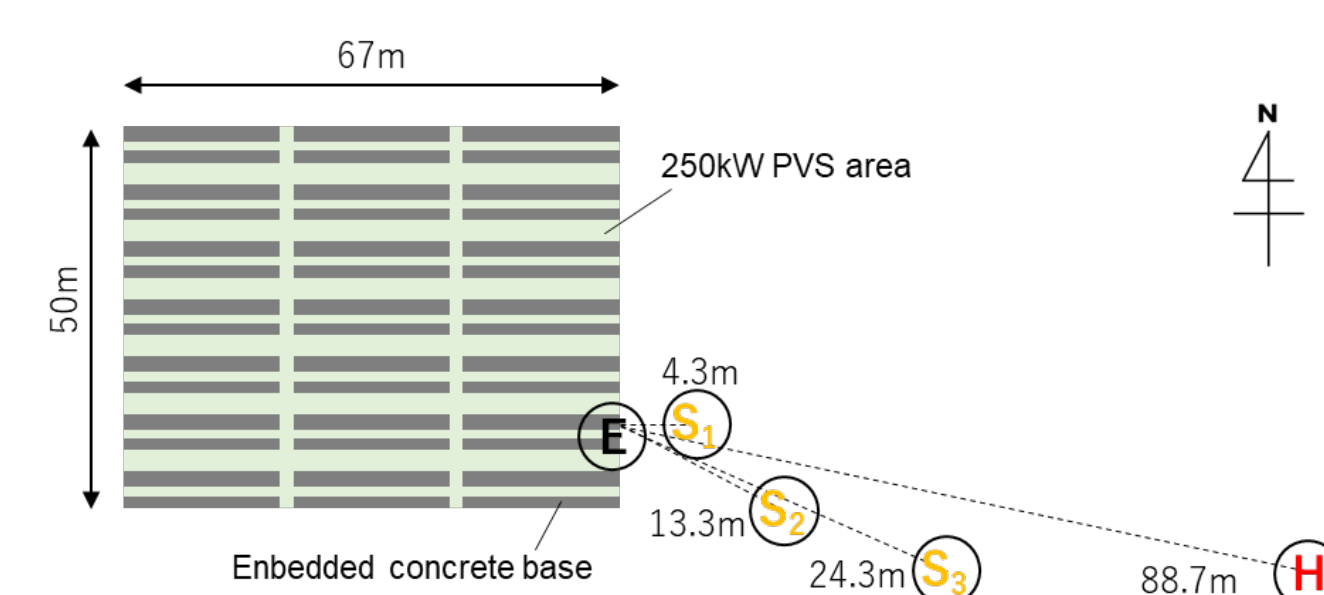


Fig.8 FREA-D区画 250kW-PVSにおける接地抵抗測定時の接地極および補助接地極の配置図

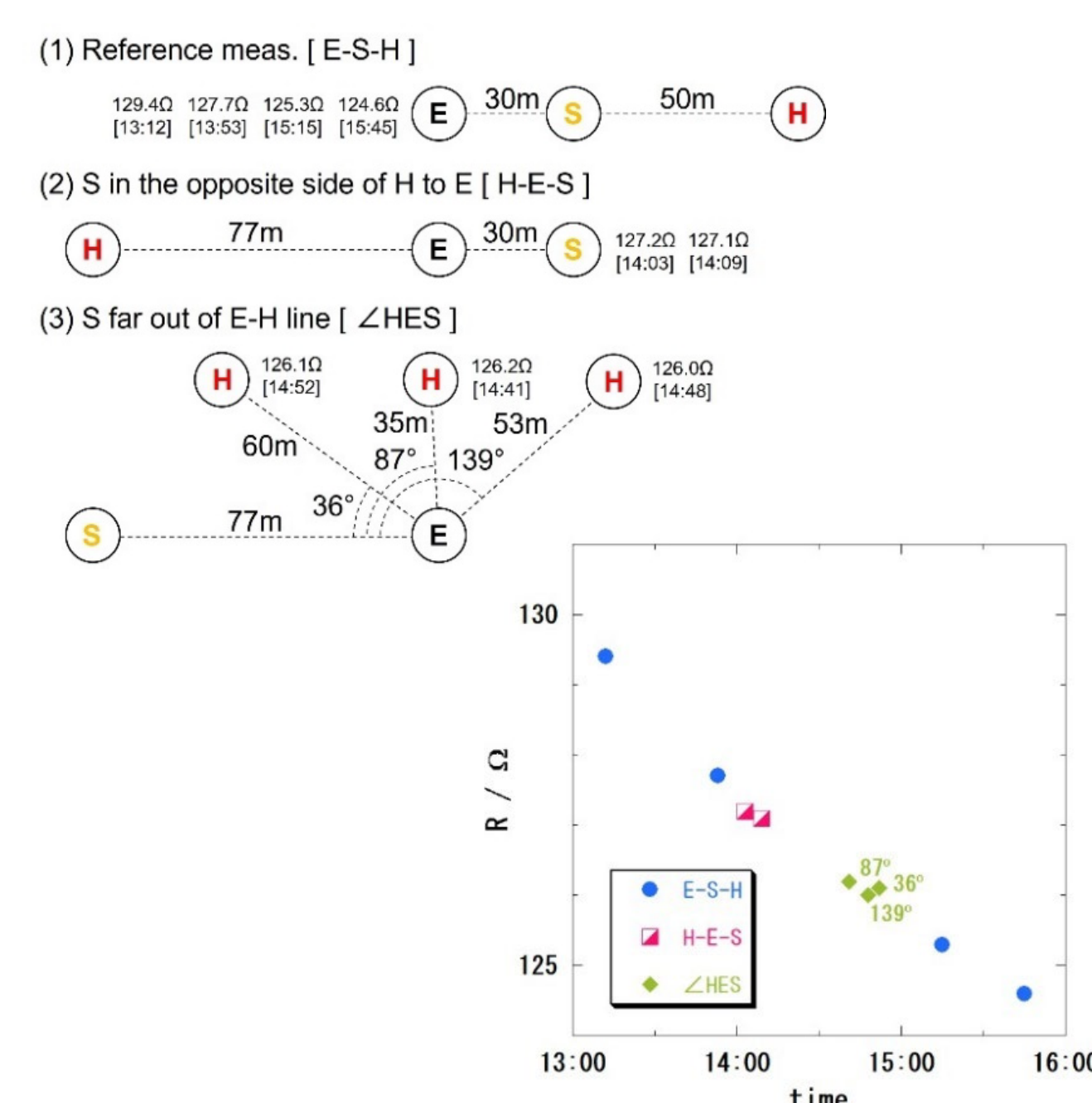


Fig.2 補助電極の配置図および配置を変化させた場合のE極の接地抵抗測定値(経時変化を含む)

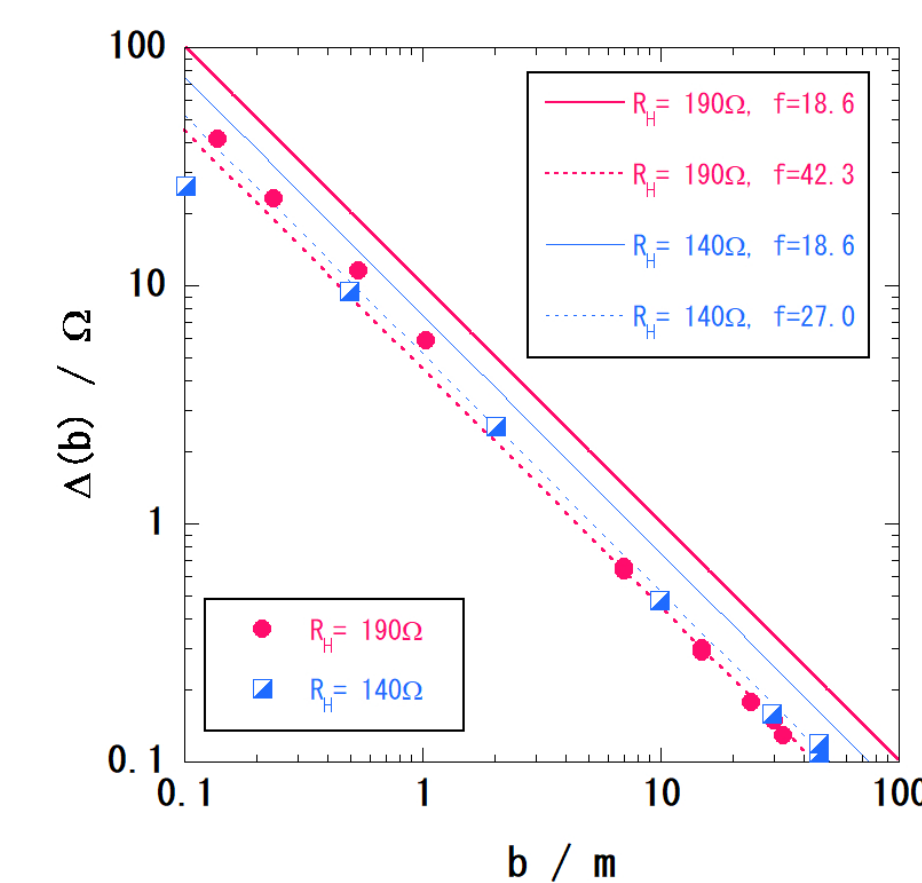


Fig.5 電流補助極による接地抵抗測定値への重畳量に関する電流極からの距離依存性

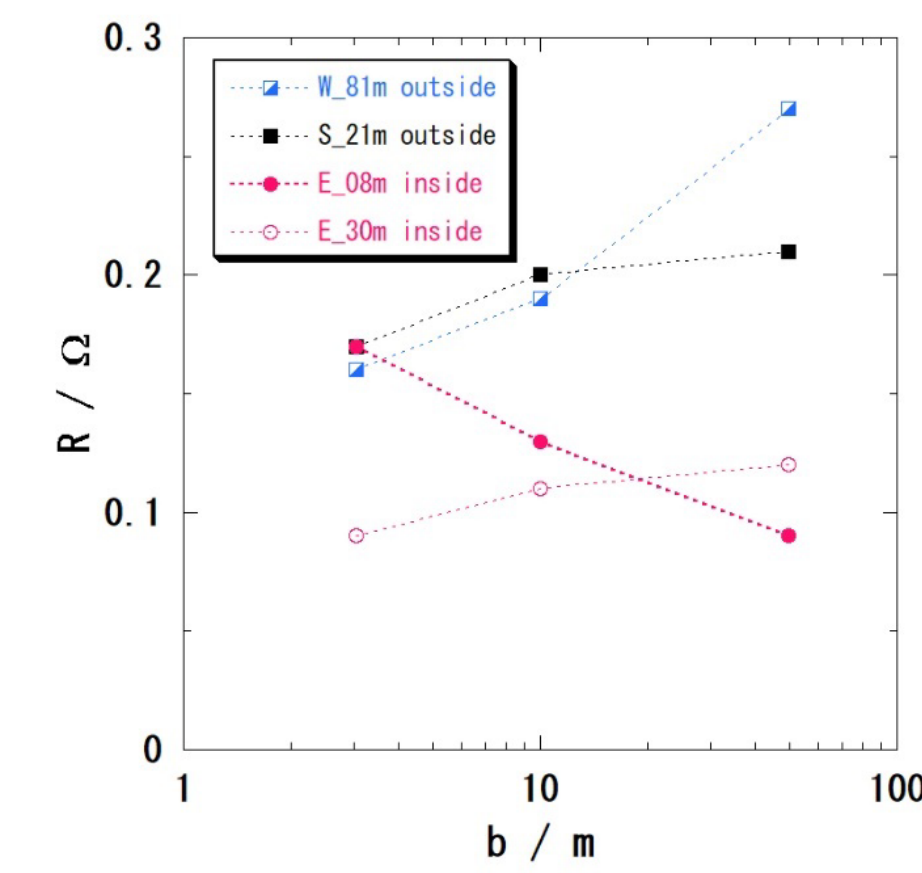


Fig.7 電流極の設置位置が異なる場合の接地抵抗測定値の距離依存性

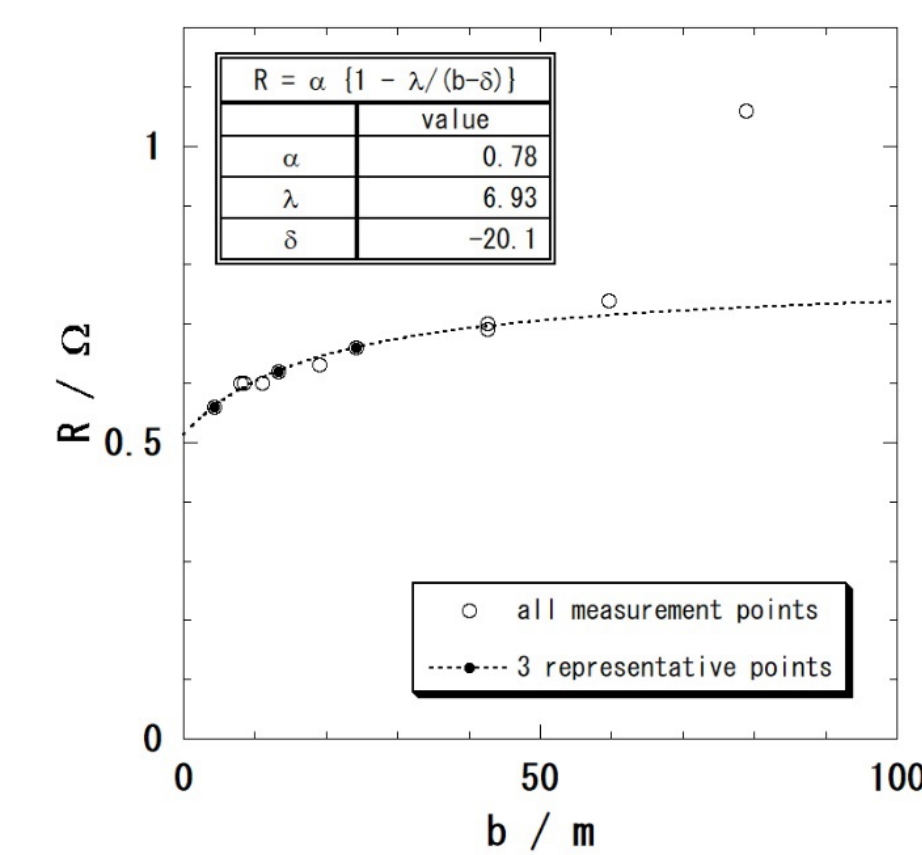


Fig.9 接地抵抗測定値の距離依存性と双曲線近似による収束値の計算

まとめ

市販の小型・携帯型接地抵抗計を用いて太陽光発電システムの接地抵抗測定を実施する際の留意点を列記した。測定対象が集中極型であるか並列極型であるかは測定により明らかになる結果ではあるが、架台の構造等から予め見当をつけて測定を実施することが重要である。E極に対してS極とH極を一直線上に設置する必要性は必ずしもないため、E、S、Hの3極を三角形に配置にすることで、測定に必要な空間は任意で選択できる。ただし、H極の接地抵抗がE極の接地抵抗の測定値(すなわちS極)へ重畳する量(測定誤差)は、H極の接地抵抗値に比例し、H-S極間の距離に反比例する。ここで、H極の形状因子を算出することで重畳量の絶対値を概算できることから、E極の接地抵抗の測定値(S極で測定)とH極からの重畳量の比を吟味して、必要な測定精度を確保できるH極の設置場所とH-S極間の距離を決定することが重要である。また、広がったE極(並列極型)に対してH極で流入する電流の等方性を確保するためには、E極の領域の外側にH極を設置する必要がある。E極の領域端からH極までの距離として、H-S極間に必要な距離と同程度を確保して測定を行い、E極の接地抵抗の測定値を吟味してH極の位置の是非を確認する必要がある。

S極の設置に必要な空間を縮小する方法として、抵抗区域内で測定した接地抵抗の位置に関する依存性を双曲線により外挿し、無限遠での接地抵抗値を推定する方法について実証実験を行った。この手法の実施を含め、接地抵抗の測定時には50m程度のテストリード線を複数本準備しておくことは有益である。なお、小型・携帯型接地抵抗計においては $1\Omega/50\text{m}$ 程度以下のテストリードが有用である。

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(JPNP20015)の結果得られたものである。

参考文献

1. P. D. Morgan and H. G. Taylor, Measurement of the resistance of earth electrodes, World Power, 21, 22-27, 76-81, 131-135 (1934).
2. E. B. Curdts, Some of the fundamental aspects of ground resistance measurements, AIEE Transactions, 77 Part I, 760-767 (1958).
3. G. F. Tagg, Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering a large area, Proc. IEE, 111, 2118-2130 (1964).
4. IEEE Power and Energy Society, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, IEEE Std 81-2012 (2012).
5. Megger, Getting Down to Earth - A practical guide to earth resistance testing, https://megger.com/
6. 川瀬太郎著, 新電気シリーズ 地絡保護と接地技術, (1977), オーム社, 東京.
7. 高橋健彦著, 川瀬太郎監修, 図解 接地技術入門, (1986), オーム社, 東京.
8. A. C. Liew and M. Darveniza, Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths, Proc. IEE, 121 (2), 123-135 (1974).
9. 池田一昭, 大関崇, 太陽光発電システムの接地抵抗測定における留意点, 日本太陽エネルギー学会講演論文集2022, 151-154.

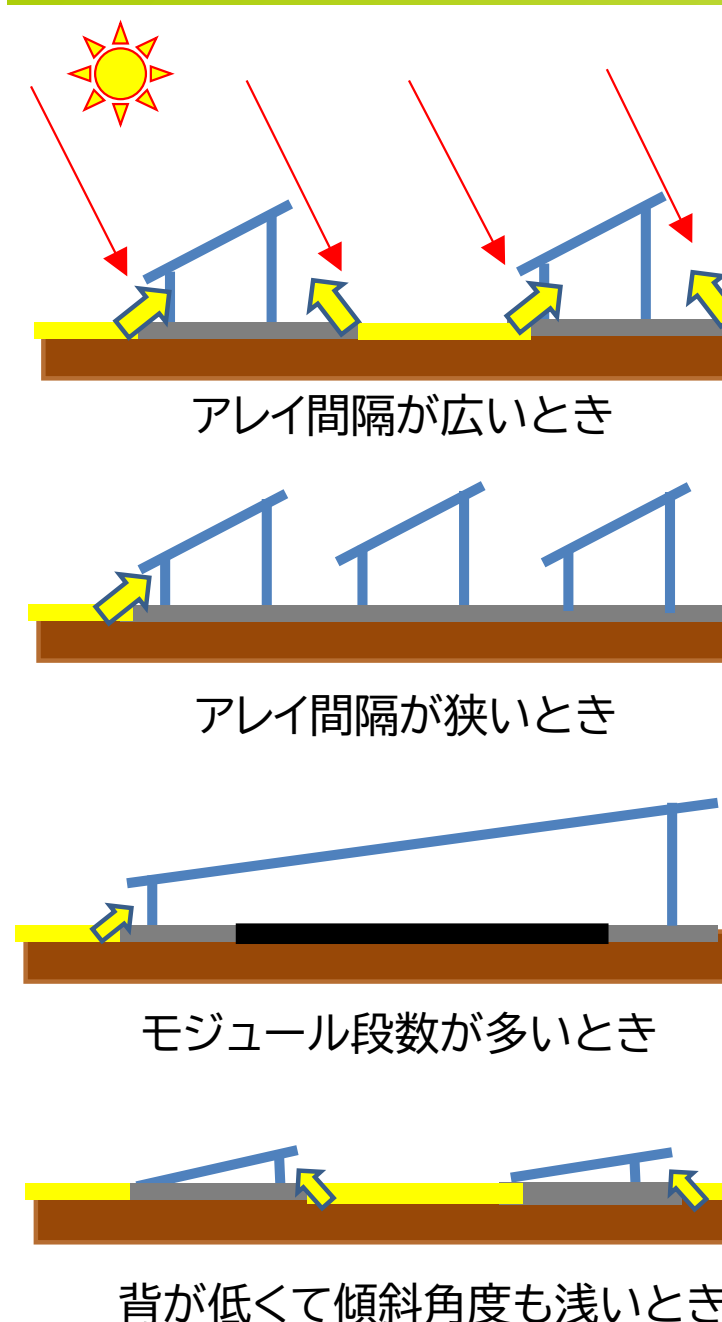
両面受光型太陽電池における裏面受光による 発電電力変動要因の分析 および簡易的な発電電力量増加率計算モデルの開発

津野裕紀¹ 土田脩斗² 山田昇² 大関崇¹
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長岡技術科学大学

研究の目的

両面受光型の片面受光型に対する出力増加率(Bifacial energy gain: BGe)は、アレイの高さやアレイ間の幅等の幾何的な要素に強く依存する。このため年間発電量を推測するためには光線追跡法や形態係数モデルがよく利用される。これらの計算には専用のソフトウェアが必要となり、設定には専門的な知識が必要である。その一方で、小規模の発電所向けにはできるだけ低コストで簡易にBGeを求めたいという需要もあることから、簡易的な計算モデルを開発した。

両面受光型の出力増加率を決める要素



- およその増加:
- 6.8%
 - 5.6%
 - 3.4%
 - 1%
- Bifaciality
 - 地面の反射率(アルベド)
 - アレイの高さ
 - アレイの幅(モジュール段数)
 - アレイ間の幅
 - 設置傾斜角度, 方位
 - 設置地域

これらの依存性を調べ、モデル化を試みた

発電電力量増加率の定義

$$PR_{Bifi} = PR_{front} \cdot K_{Bifi}$$

$$= PR_{front} \cdot (1 + BG_E)$$

- PR_{Bifi} : 両面受光型太陽電池の出力係数
- PR_{front} : 両面受光型太陽電池の表面のみの出力係数
- K_{Bifi} : 片面に対する両面受光型太陽電池の発電電力量増加係数
- BG_E : 片面に対する両面受光型太陽電池の発電電力量増加率

$$K_{Bifi} = K_{r_irr} \cdot K_{r_shade} \cdot K_{r_mismatch} \cdot K_{r_edge}$$

表面に対する裏面入射日射増加量による利得係数

ジュールフレームや架台梁による遮光による損失係数

アレイ内の照度むらによる動作点ミスマッチに起因する損失係数

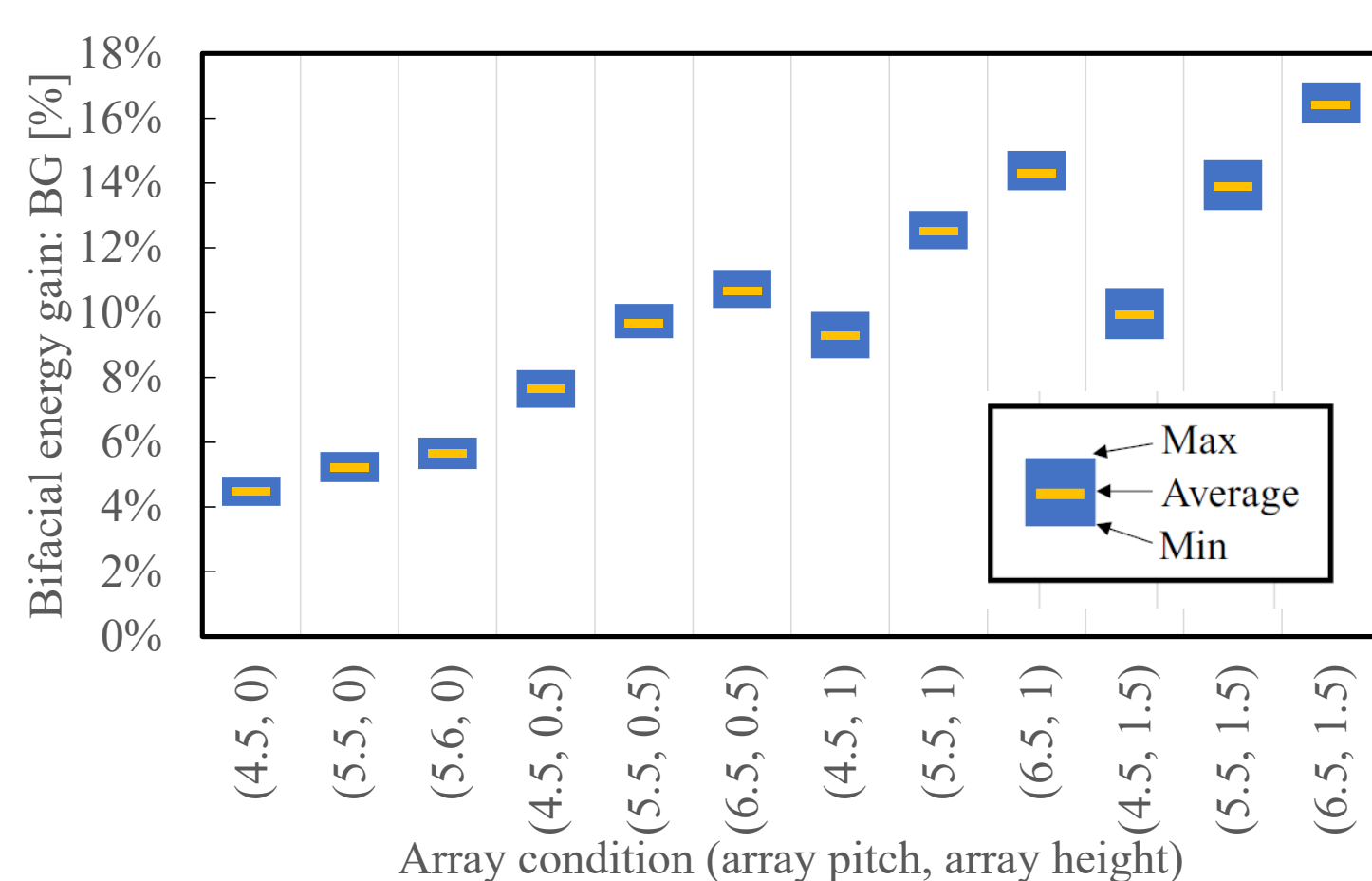
エッジ効果による利得係数

本報告での開発対象

K_{r_shade} , $K_{r_mismatch}$, K_{r_edge} を1としたときの K_{Bifi}

年間BGeの地域性(気象・緯度)の検証

各地の両面と片面の発電電力量をPVsystを用いて算出し、BGeの地域性を検証



- 地域や気象条件の依存性: 2σで1%以下と小さい
- アレイの設置条件による変化が大きい

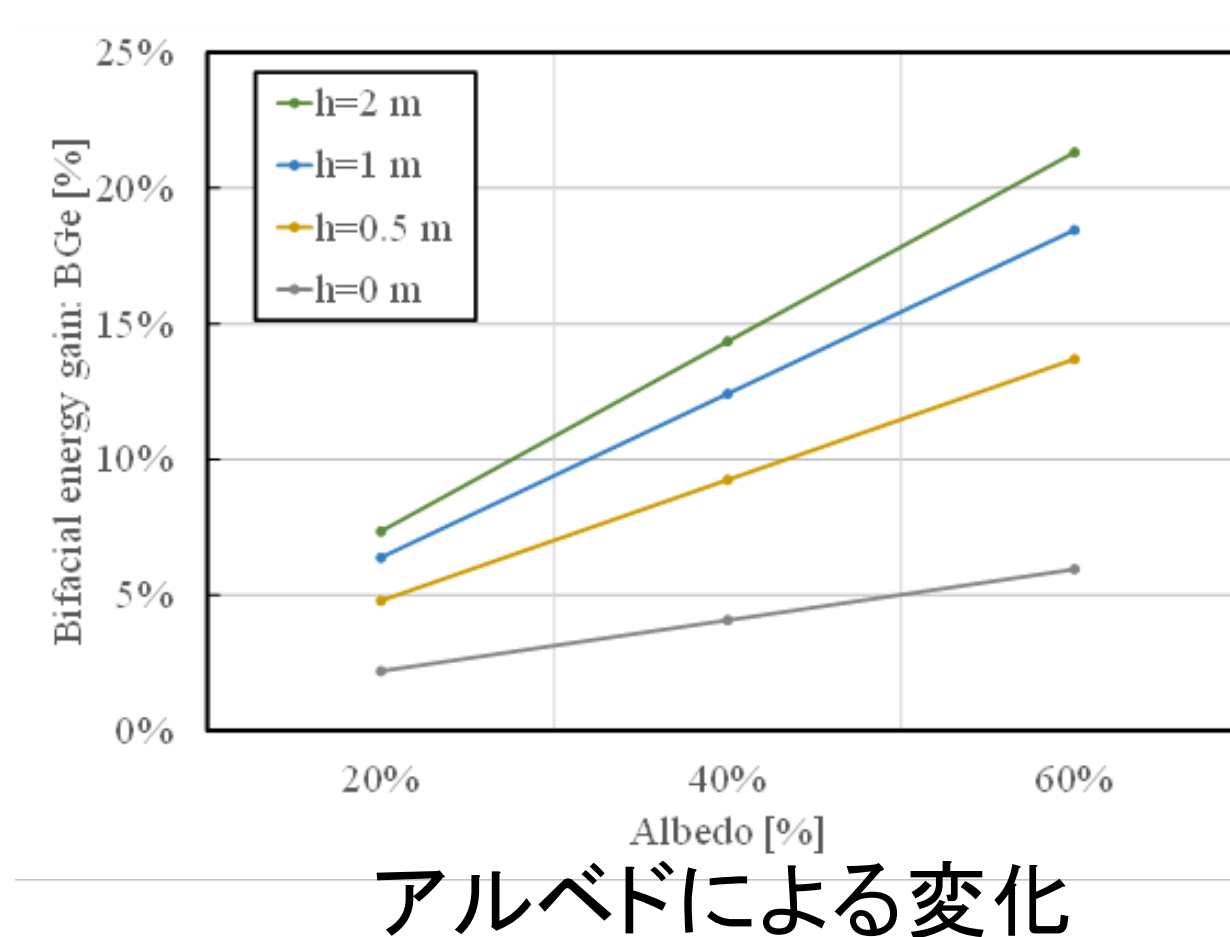
結論

両面受光型太陽電池の年間発電電力量を複雑なモデルやソフトウェアを使うことなく簡易に求めたい

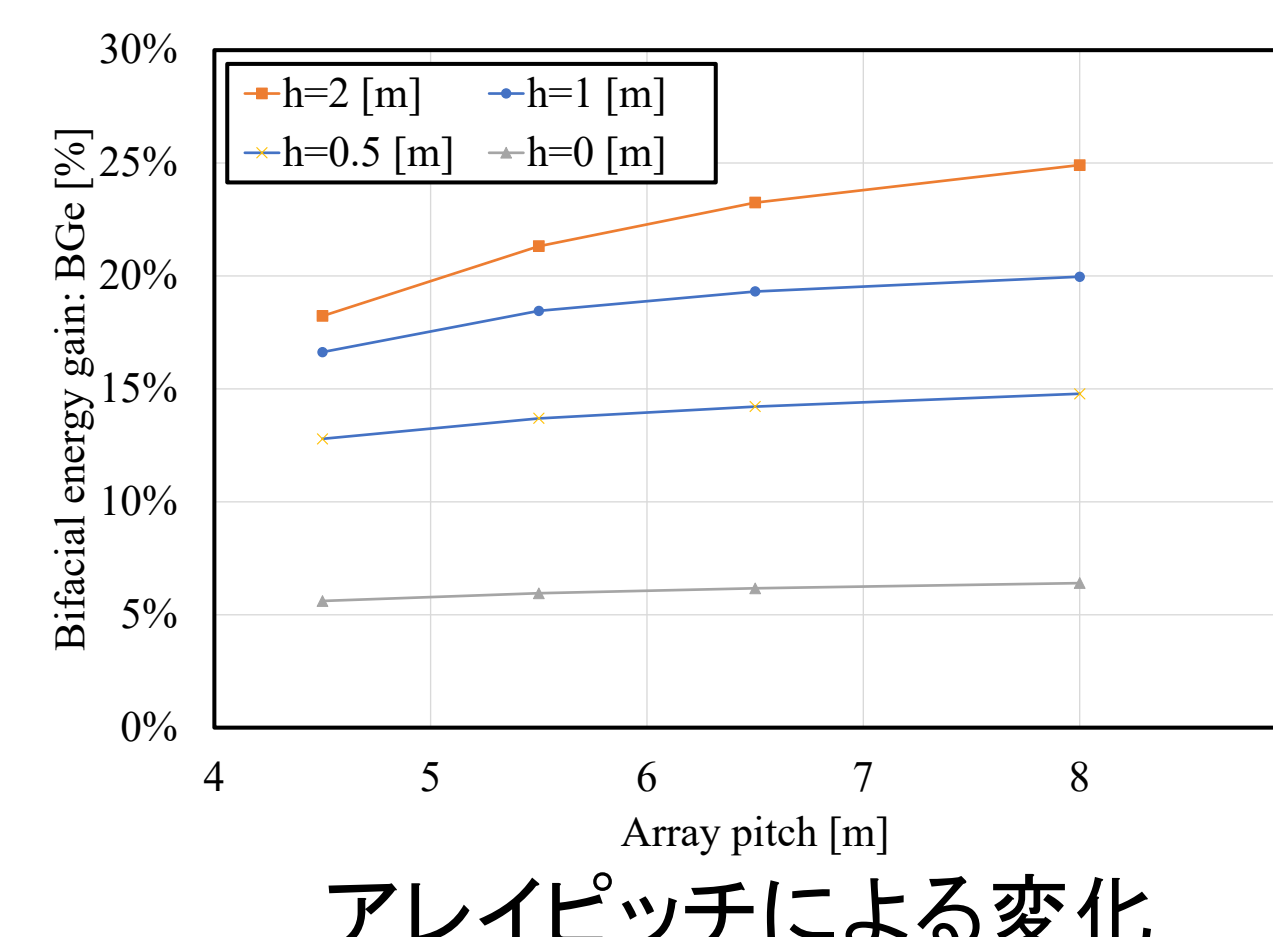
- 既存のソフトウェアの分析結果から、
- 地域依存性は±1%程度と小さい
 - アレイ設置条件の依存性が大きい

開発したモデル式によって傾斜角ごとにパラメータをフィッティングさせたところ、よく一致した

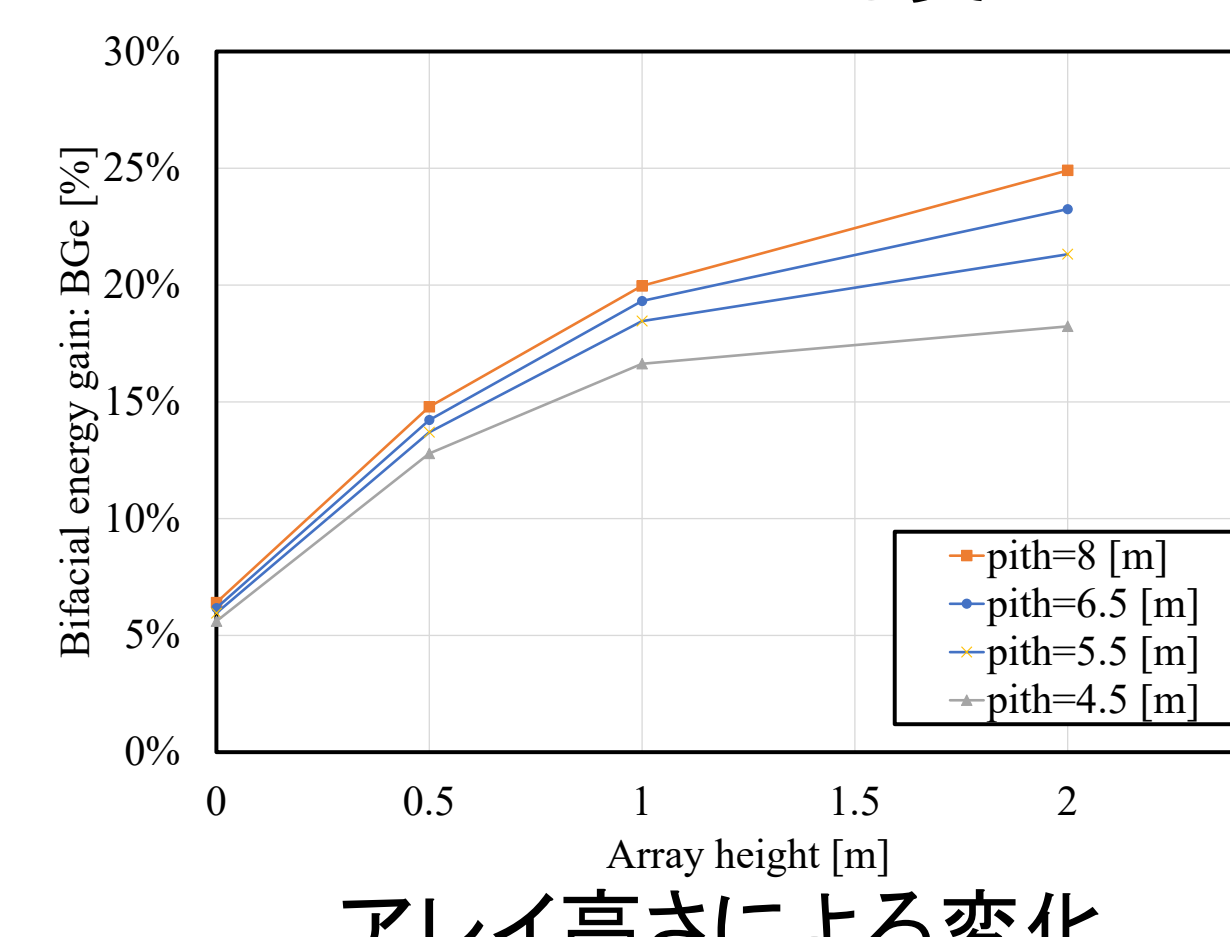
アレイの設置条件による依存性の検証



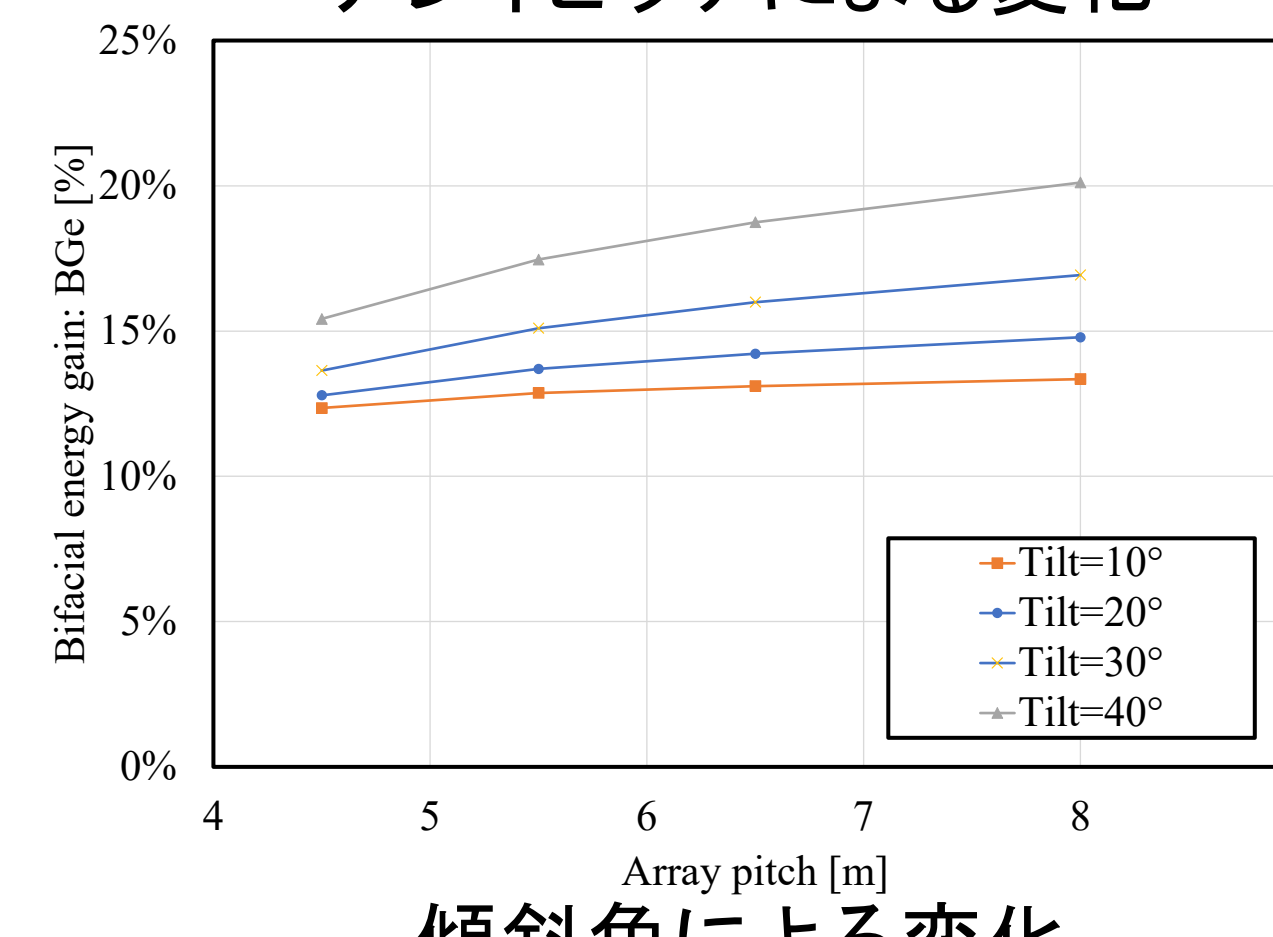
アルベドによる変化



アレイピッチによる変化



アレイ高さによる変化



傾斜角による変化

簡易モデルの開発と検証

簡易モデル式

$$BG_E = Albedo \cdot \varphi_{Bifi} \cdot a [b \cdot (1 - \sqrt{gcr}) \cdot (1 - e^{-c \cdot h \cdot gcr}) + d \cdot (1 - e \cdot gcr^{1.5})]$$

PVsystと簡易モデルの差の平均値と標準偏差

Model		10°	20°	30°	40°
Modified	Mean	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
SW model	S.D.	0.8%	0.7%	0.8%	1.1%

シミュレーションソフトとほぼ同じ値を近似式で表すことが可能となった

謝辞

本成果は、令和4年度「被災地企業等再生可能エネルギー技術シーズ開発・事業化支援事業」の結果得られたものである。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

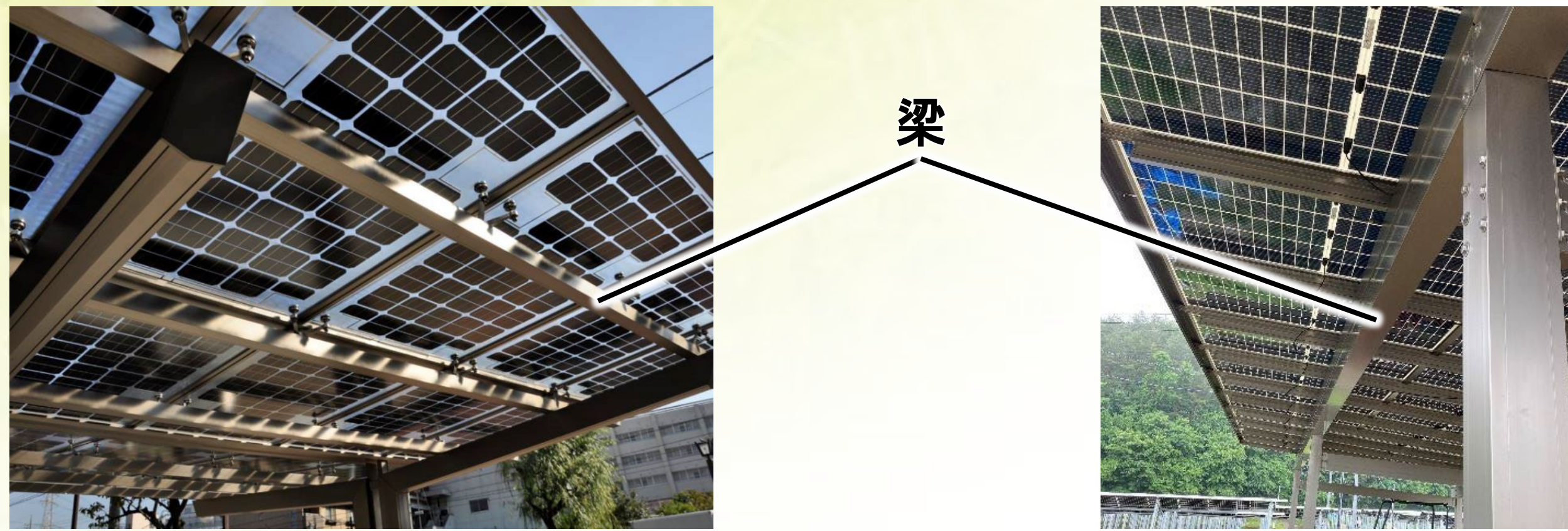
- [1] IEA PVPS, "Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications", Report IEA-PVPS T13-14, (2021).
- [2] C. Deline, et. al., "Bifacial PV Performance Models: Comparison and Field Results", BiFiPV 2017 Workshop, (2017).
- [3] 土田, 佐藤, 山田, 津野, 大関 "両面受光型太陽電池モジュール裏面側の部分影が発電出力に及ぼす影響の解析" 日本太陽エネルギー学会研究発表会, (2022)

両面受光型太陽電池モジュール裏面側の部分影が発電出力に及ぼす影響の解析

土田脩斗¹、津野裕紀²、佐藤大輔¹、大関崇²、山田昇¹

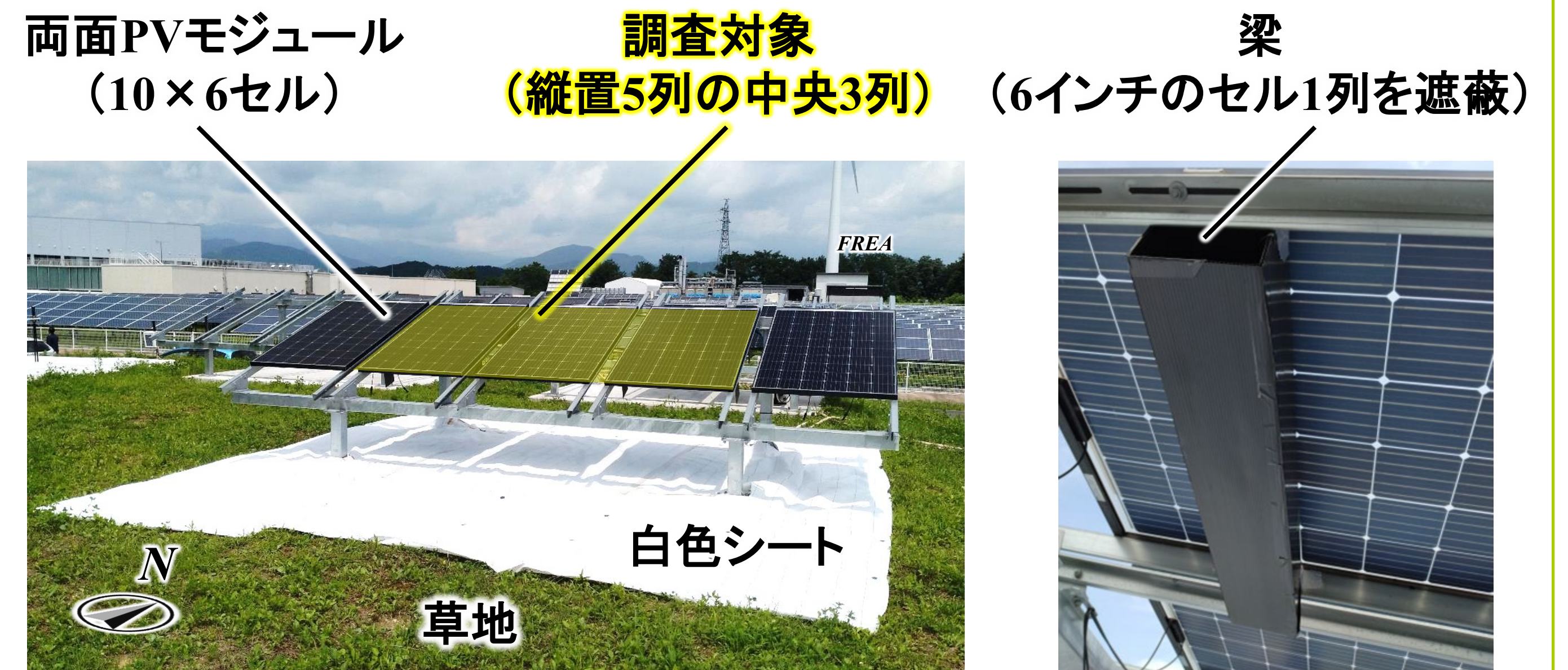
1長岡技術科学大学、2産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

研究の目的



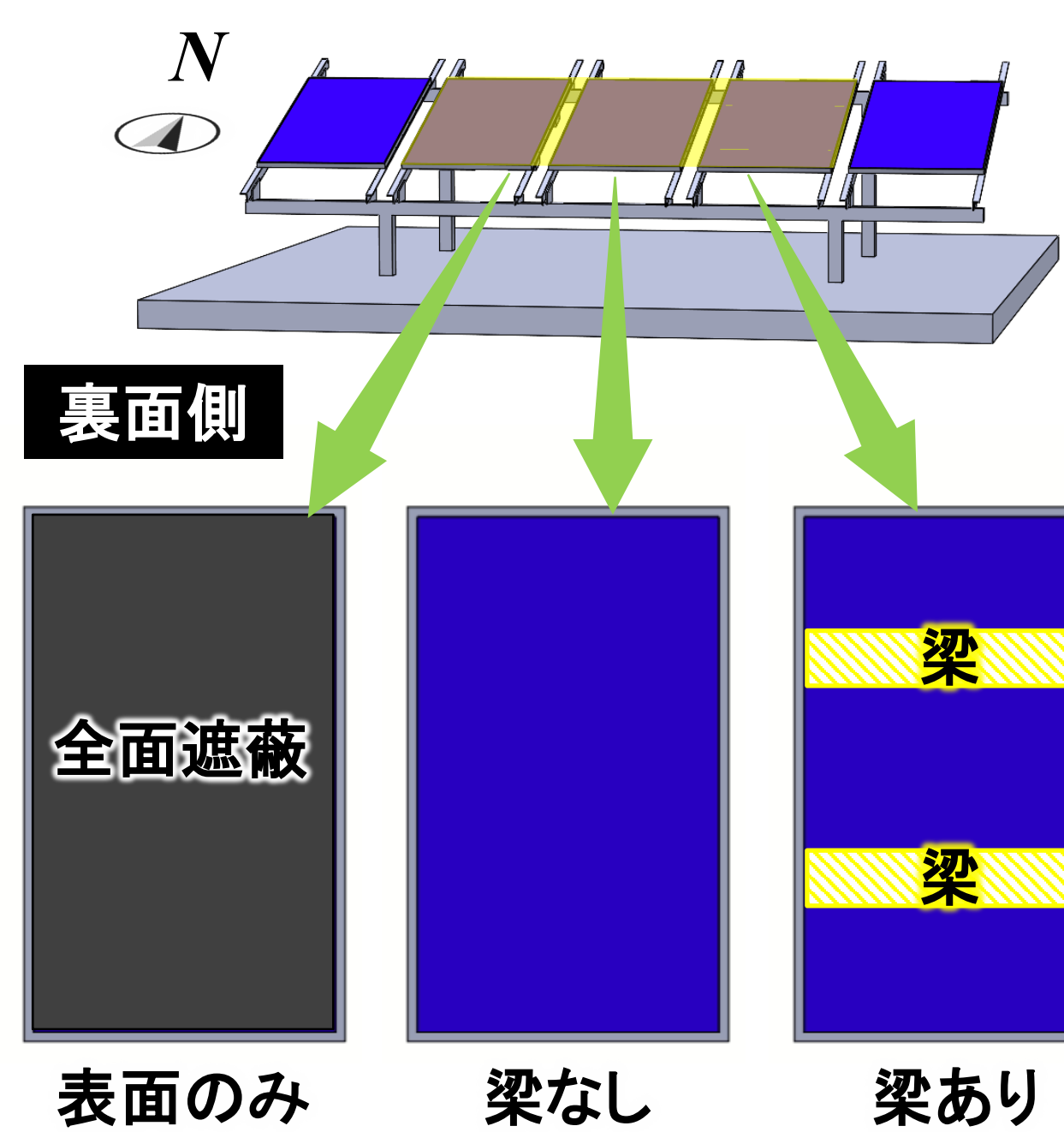
両面受光型太陽電池(両面PV)システムの裏面側の梁が発電出力に及ぼす影響を明らかにすること

両面PVアレイ

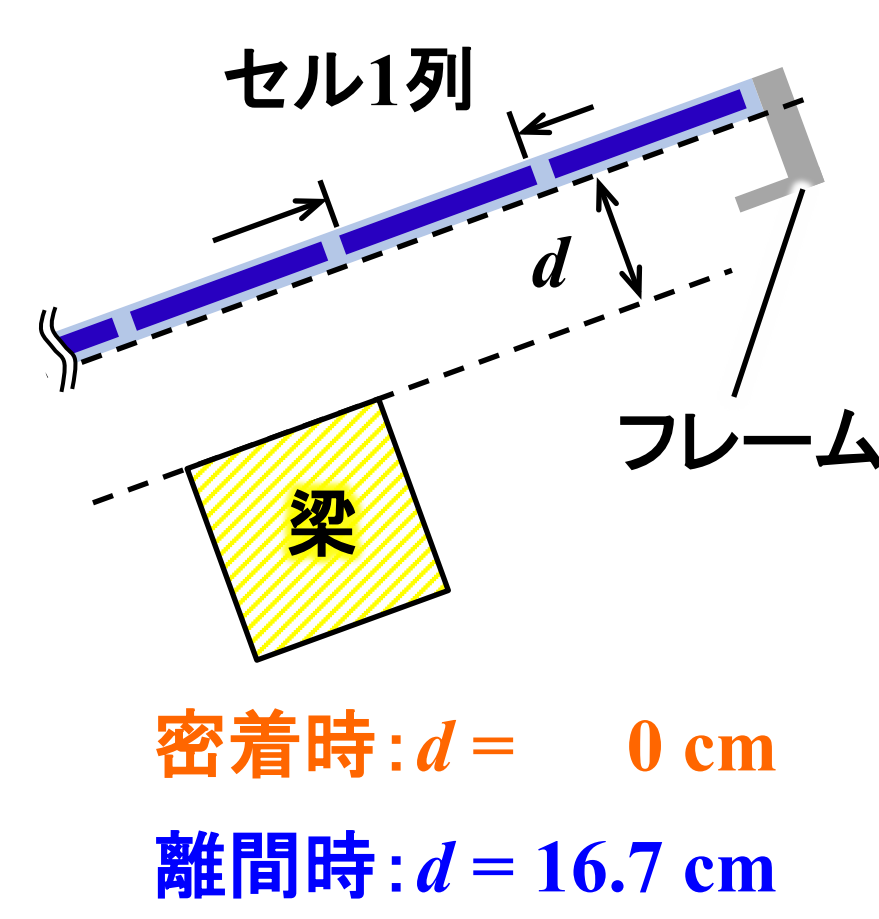


解析条件と手法

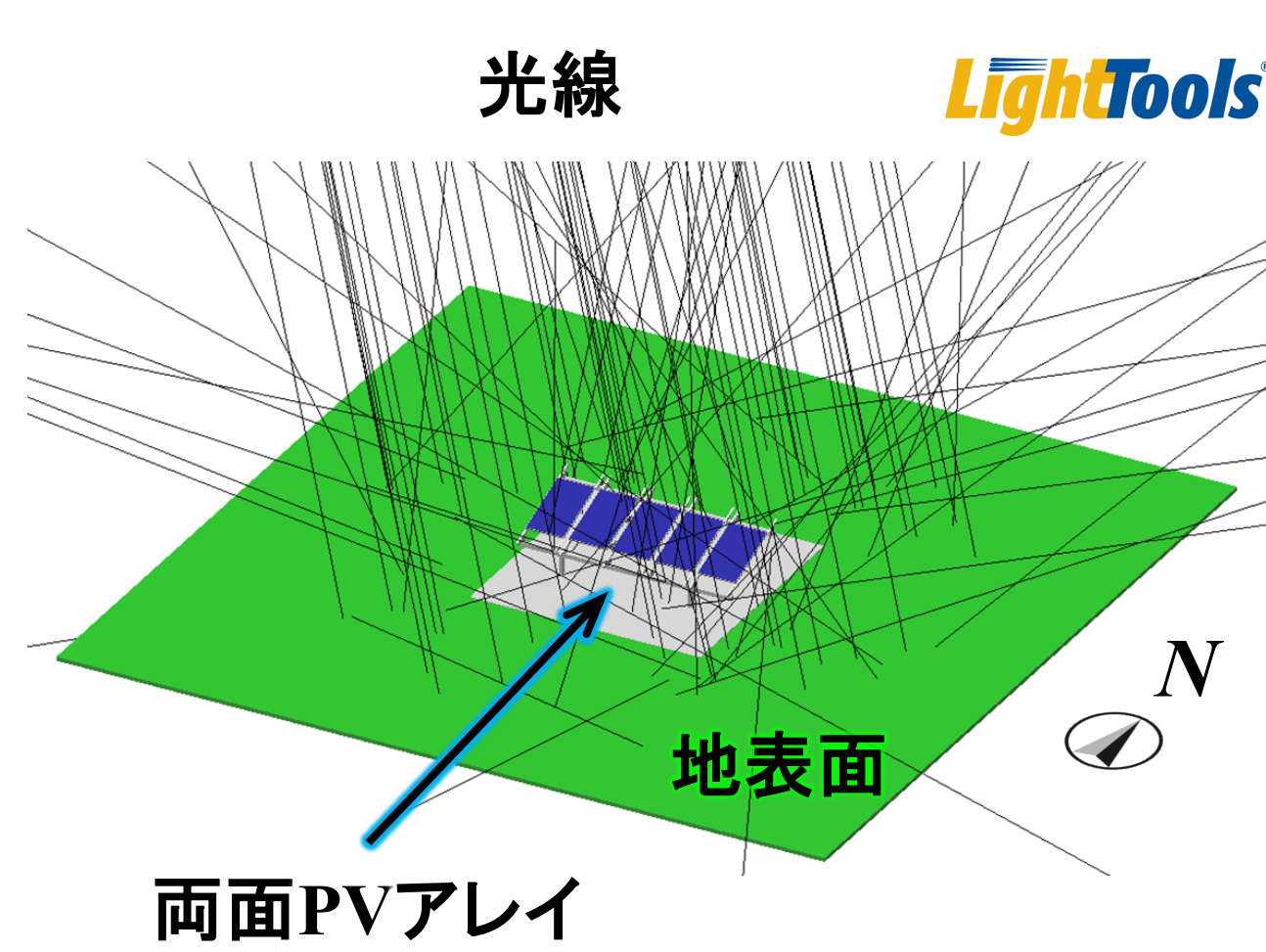
解析条件



傾斜角	20°
地上高さ	0.78 m
モジュールサイズ	1.65 × 1.0 m ²



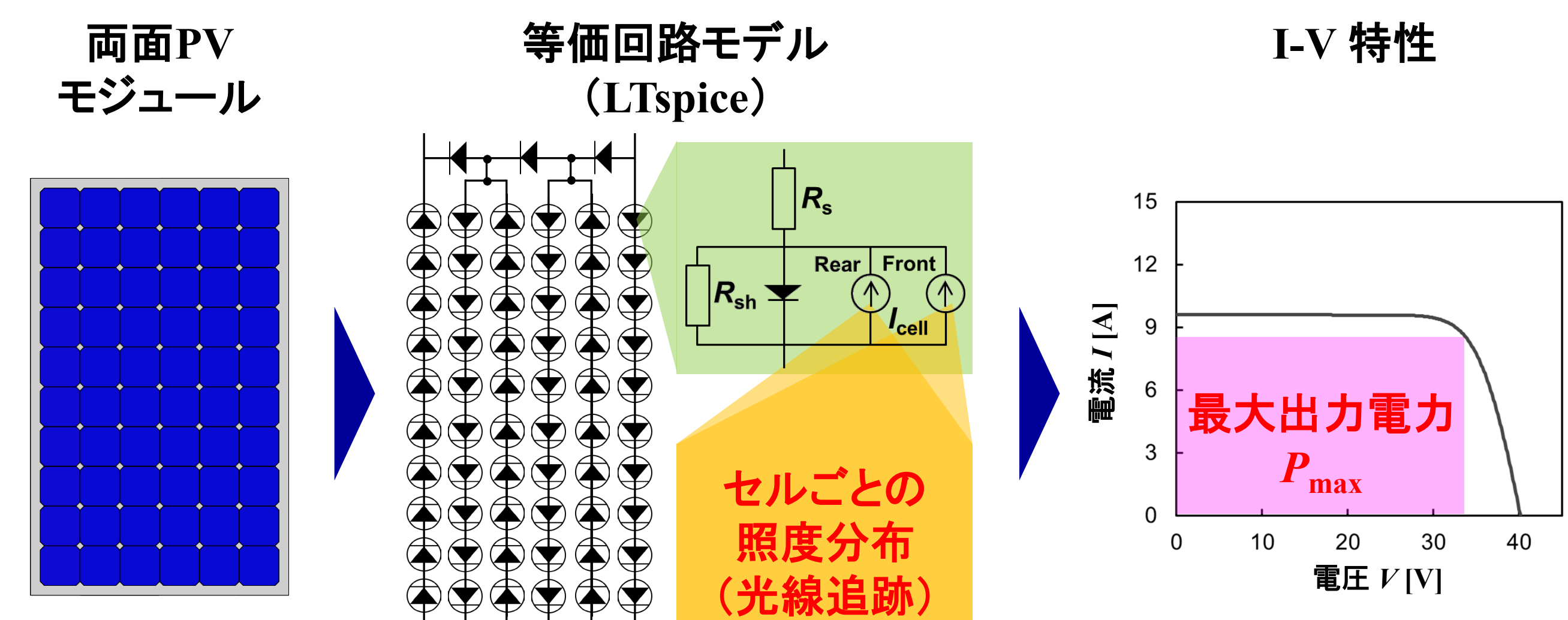
光線追跡解析



日射データ	実測値 (福島県郡山市)
光線本数	2×10^9
日付	密着時(2022/9/25) 離間時(2022/9/30)
時刻	4:00 - 20:00
アルベド (白色シート)*	0.7
アルベド(草地)*	0.2
架台・フレームの 反射率*	0.5
梁の反射率*	0.06

* 反射面: 拡散反射(ランバート面と仮定)

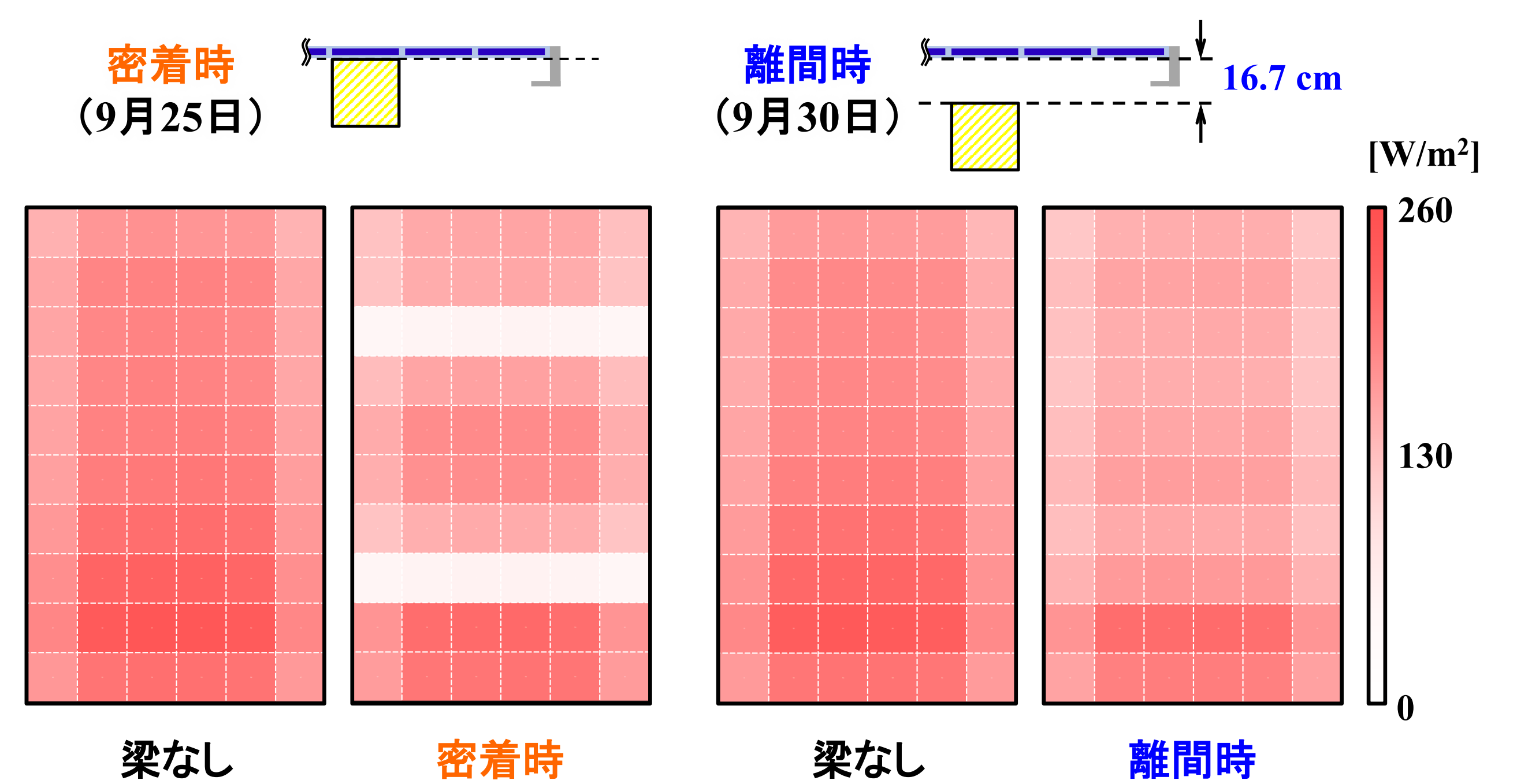
電気回路解析



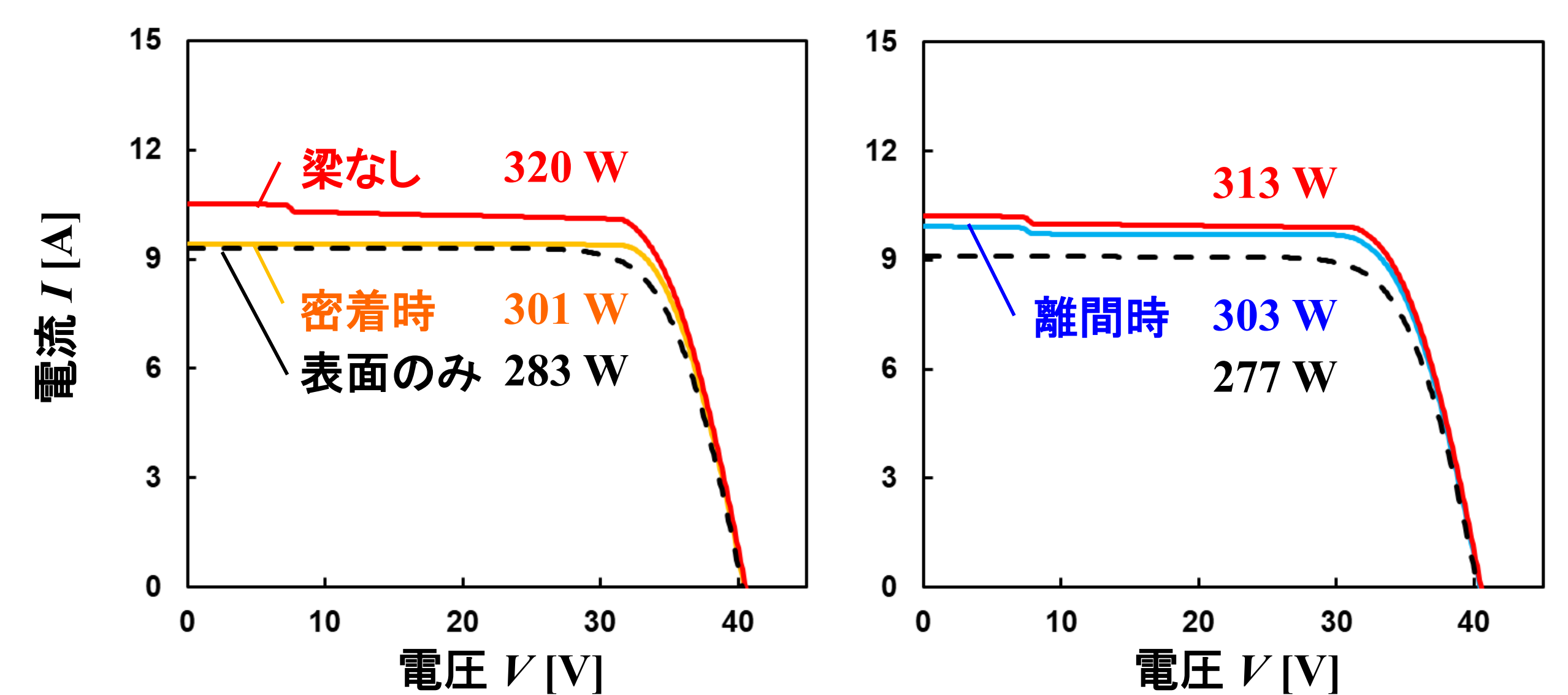
2条件(密着時、離間時)の梁の状態における発電特性を評価

結果

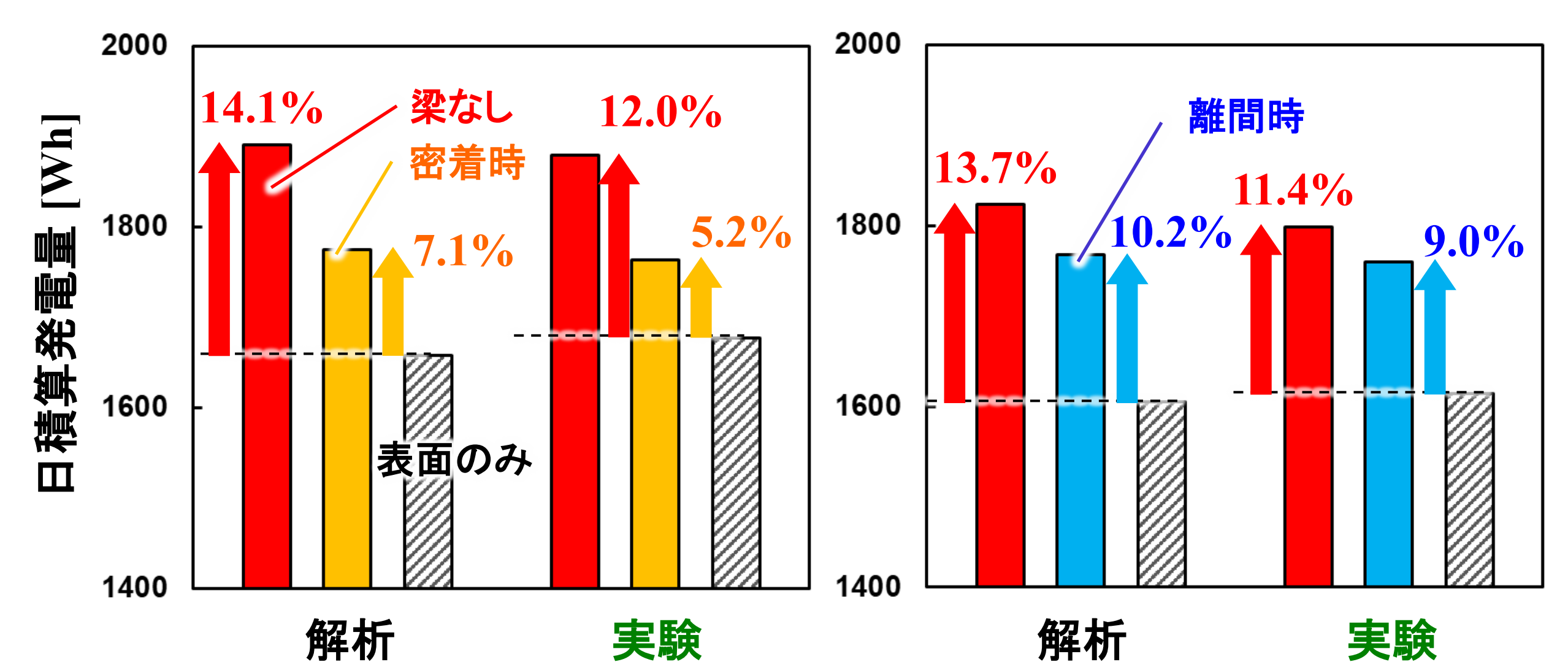
各モジュールの裏面の照度分布(12:00)



I-V特性(12:00, 解析, モジュール温度25°C)



日積算発電量と裏面利得(解析と実験)



まとめと今後

- 梁がモジュール裏面に密着した状態でも、梁がない状態の約半分の裏面利得が得られた。
- 梁がモジュール裏面から離れて設置された状態では、梁がない状態の約70%の裏面利得が得られた。
- 実験との比較により、光線追跡解析と電気回路解析による解析手法の妥当性が確認された。
- 今後は、年間を通じた調査を行うことで、両面PVシステム裏面側の構造物の部分影による年間損失の推定モデルを確立したい。

垂直設置した両面PVモジュールの影と天空率を考慮した裏面日射強度の推定

Amirul Naim Bin Hashim¹、重信颯人¹、伊藤雅一¹、津野裕紀²、大関崇²
 1福井大学、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

研究の背景・目的

背景

両面PVモジュールは、裏面でも発電するが自身の影や裏側の建物などによって日射強度が減少するため、影と天空率を考慮していない従来の方法では実際よりも発電量を高く推定する。影と天空率(Sky View Factor: SVF)を考慮した裏面日射強度の推定手法が必要である

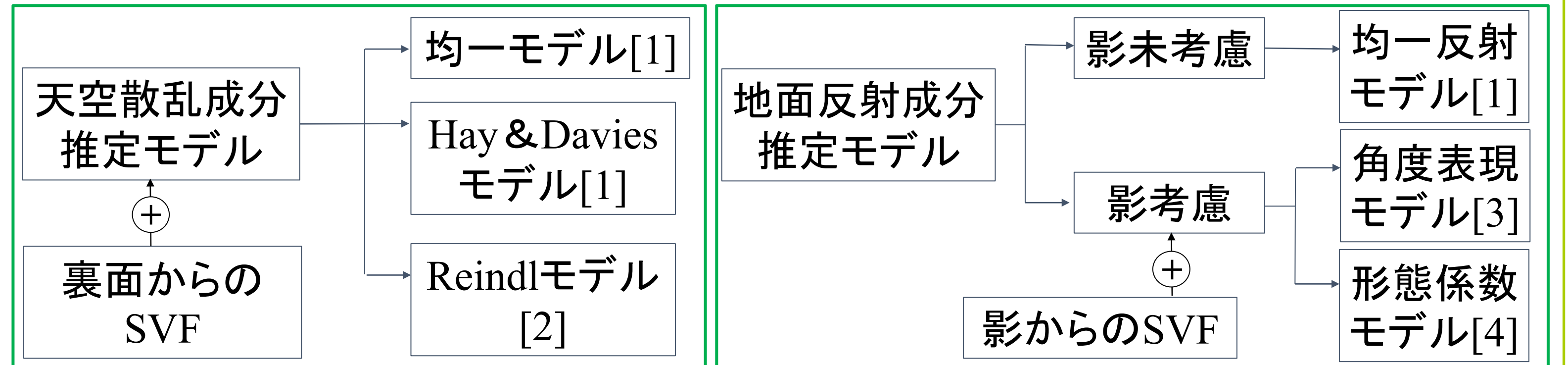
本研究の目的

影とSVFを考慮した裏面日射強度推定手法を提案し、その有効性を検証する

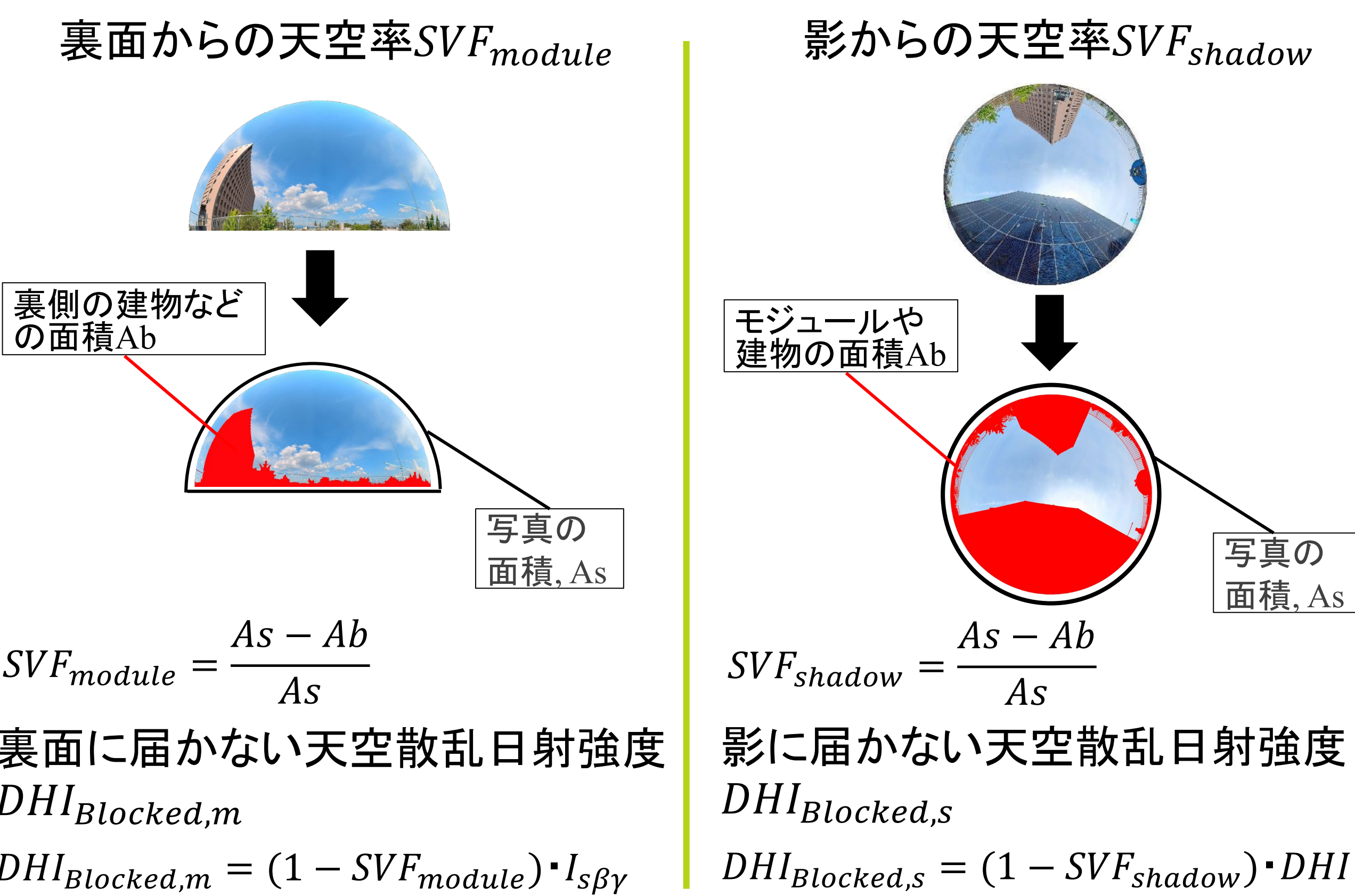
裏面日射強度推定手法

裏面には直達日射は当たらないので、裏面日射強度 I_{rear} は天空散乱成分 $I_{s\beta\gamma}$ と地面反射成分 $I_{r\beta\gamma}$ で構成される。 $I_{s\beta\gamma}$ は左図のように裏面からのSVFを加え、三つのモデルで比較した。また、 $I_{r\beta\gamma}$ は影を考慮モデルに影からのSVFを加え、三つのモデルで比較した。

$$I_{rear} = I_{s\beta\gamma} + I_{r\beta\gamma}$$



天空率



実験

裏面日射強度の測定実験

使用器具：モジュール[縦幅1.12m, 横幅0.97m]

日射計, 魚眼カメラ

傾斜角: 90°

裏面日射強度の実測値: CH2

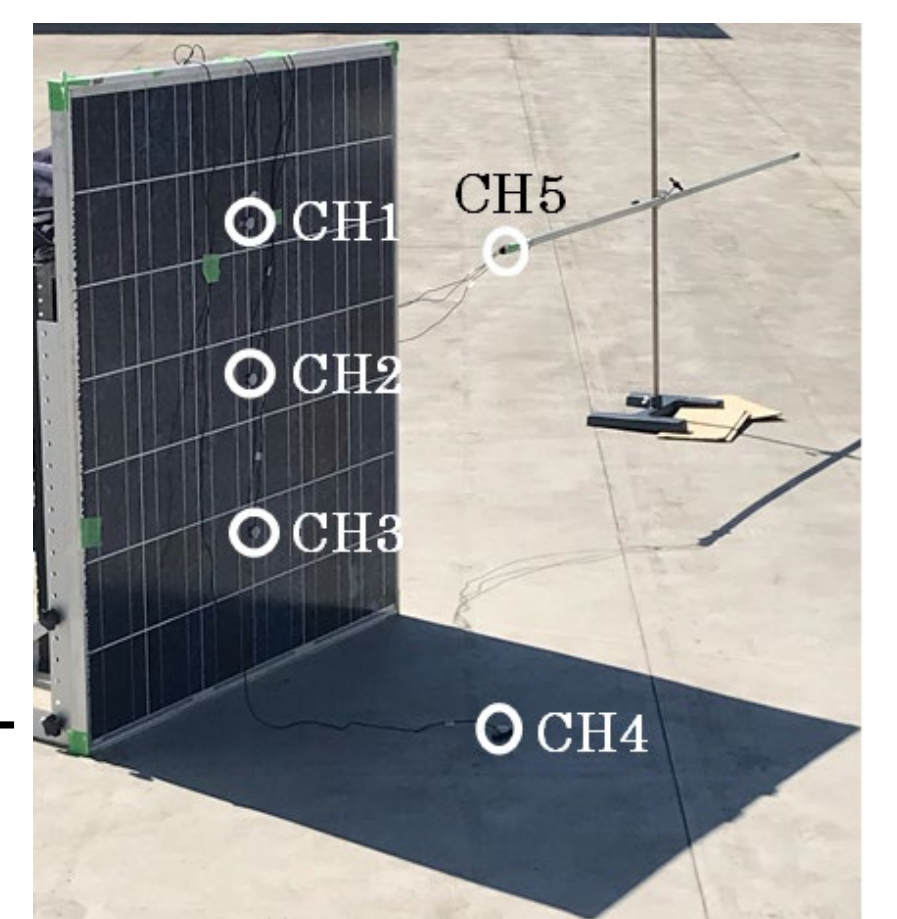
全天と直達日射強度: 精密日射計と直達日射計

天空率: 魚眼カメラ(CH2とCH4の位置に設置)

アルベド: 小型日射計をCH5に下向きに設置し、

地面で反射した日射強度を測定し算出

日付	時刻	設置方法
5月25日	13:00-16:00	東西軸
6月28日	12:30-16:30	東西軸
7月26日	12:40-16:40	東西軸
8月1日	12:10-16:40	東西軸



実験の写真



精密日射計と直達日射計

結果(8月1日の裏面日射強度実験)

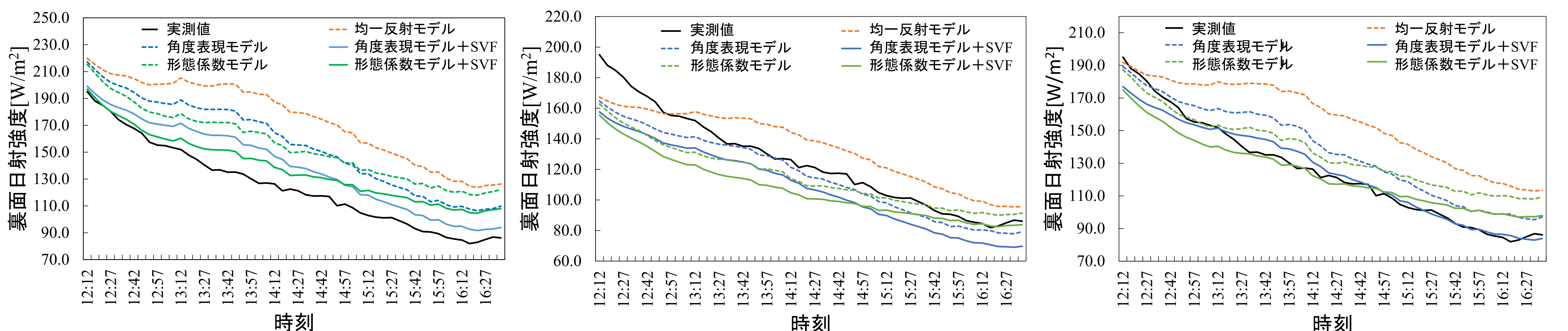


図1 均一モデルで天空散乱成分を推定する場合

図2 Hay&Daviesモデルで天空散乱成分を推定する場合

図3 Reindlモデルで天空散乱成分を推定する場合

均一モデルとReindlモデルでは天空率を考慮した方が結果が良くなり、Hay&Daviesモデルでは天空率を考慮しない方が結果が良くなる

結論

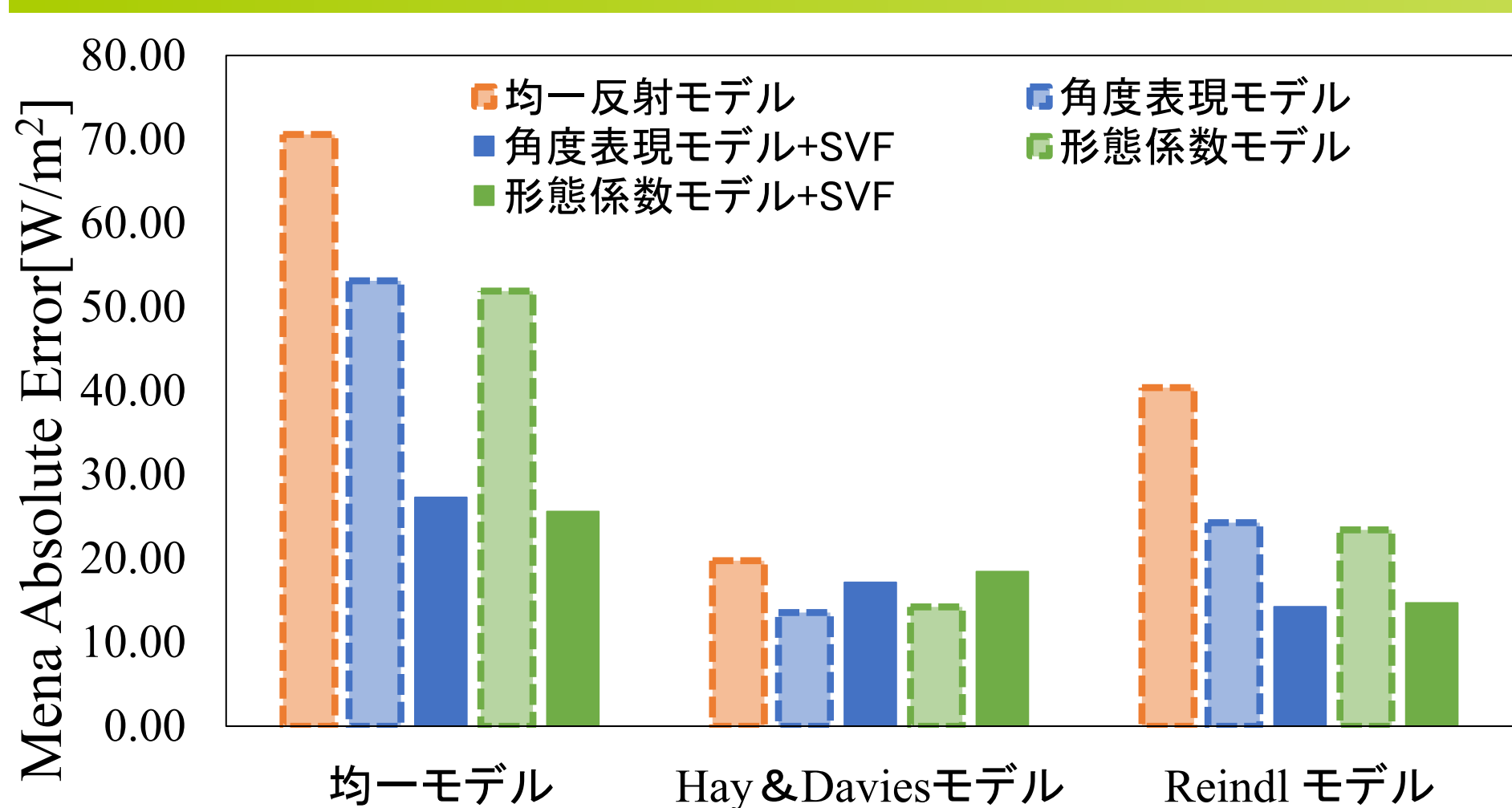


図4 全実験の各モデルの平均MAE

- 全体的に不均一モデルのHay&DaviesモデルとReindlモデルの方が全実験の平均MAEが少ない。
- Hay&Daviesモデルでは影だけ考慮する場合の平均MAEが最小となり、天空率を考慮すると平均MAEは増加した。
- 影と天空率の両方を考慮した場合はReindlモデルで最小のMAEが得られた。

参考文献

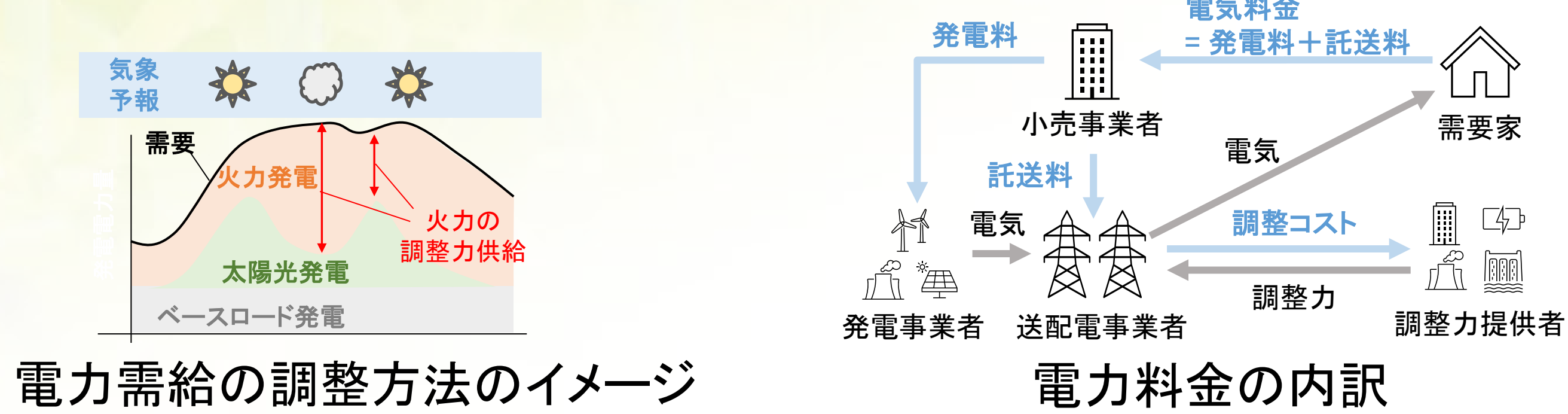
- [1]一般社団法人日本太陽エネルギー学会:改訂新太陽エネルギー利用ハンドブック(2015)
- [2] D. Reindl, W. Beckman, and J. Duffie, "Evaluation of hourly tilted surface radiation models," Sol. Energy, vol. 45, no. 1, pp. 9-17, 1990.
- [3] 小山稔貴, 重信颯人, 田岡久雄, 伊藤雅一:「垂直設置した両面受光型太陽電池モジュールの影を考慮した裏面日射強度の推定方法の検討」, 令和2年電気学会全国大会講演論文集, pp.44-45 (2020)
- [4] 野坂良輔, 重信颯人, 伊藤雅一:「影考慮のための形態係数を用いた両面PVモジュールの裏面日射強度の推定」, 令和3年電気学会全国大会講演論文集, pp.10-11 (2021)

機械学習モデルによる 翌日日射予測の大外し事例の分析

高松尚宏¹、中島虹¹、大竹秀明^{1, 2}、大関崇¹、山口浩司³
 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気象研究所、3日本気象協会

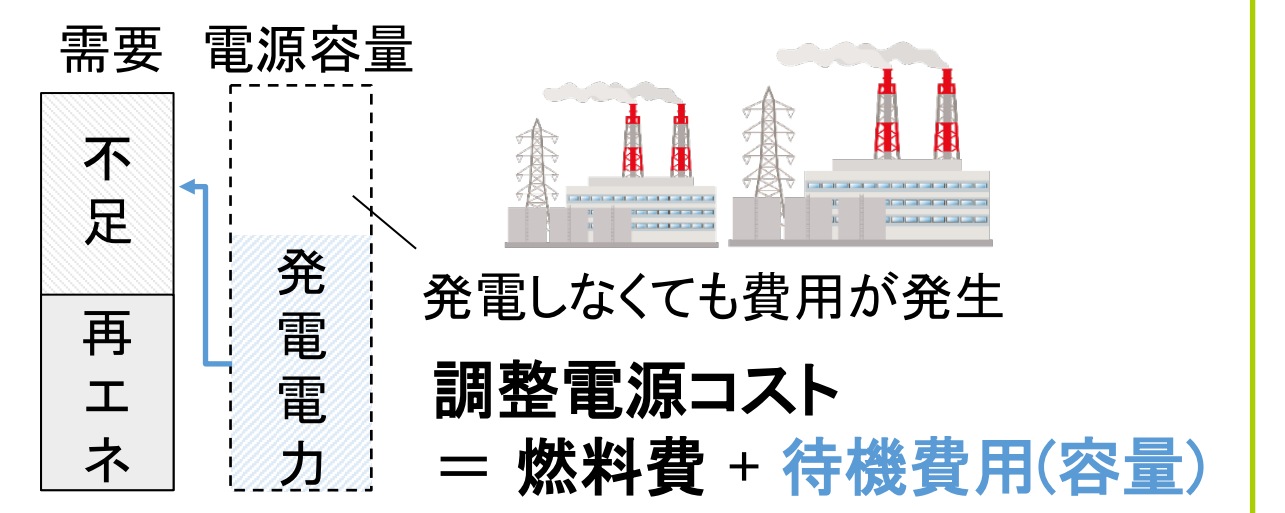
気象予報と電力システム

- 電力の需要と供給を一致＝火力等で調整
- 火力発電のスタンバイには時間とコストが必要
(ガスタービン7-18時間、それ以外14-20時間^[1])
- 気象予報で翌日の電力需給を計画、予測外れに備えた調整力調達
- 安定運用のコスト(託送料)は電気料金に反映: 社会コスト

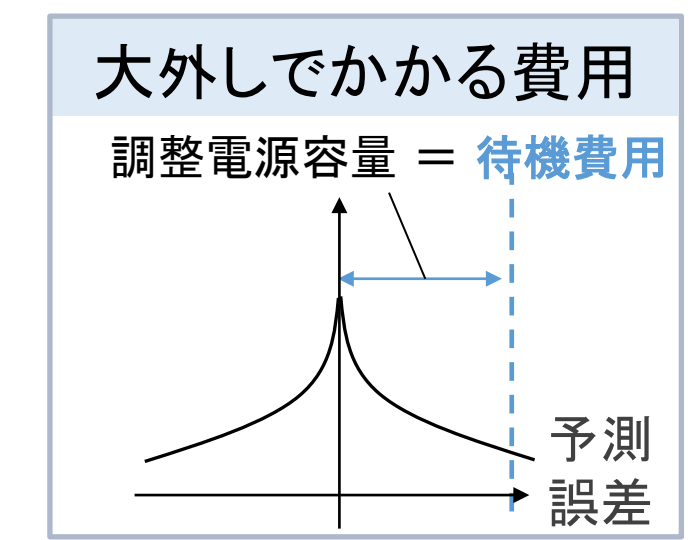
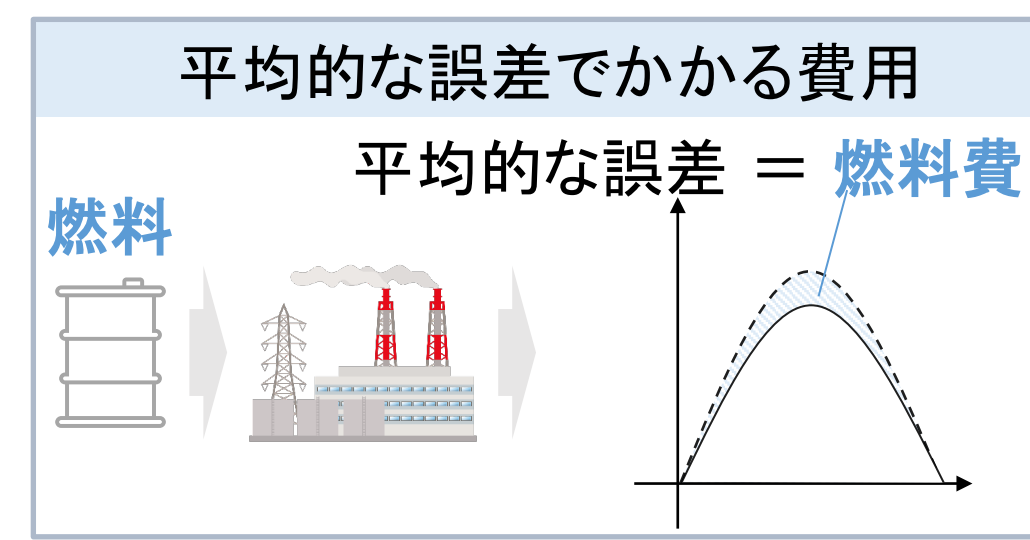


日射予測の研究課題

- 日射予測の高度化
 - 平均精度の向上
 - まれな大外し低減
- 大外し低減＝待機費用(容量)削減*
 *調整電源の待機費用は年間で約1200億円相当^[2]

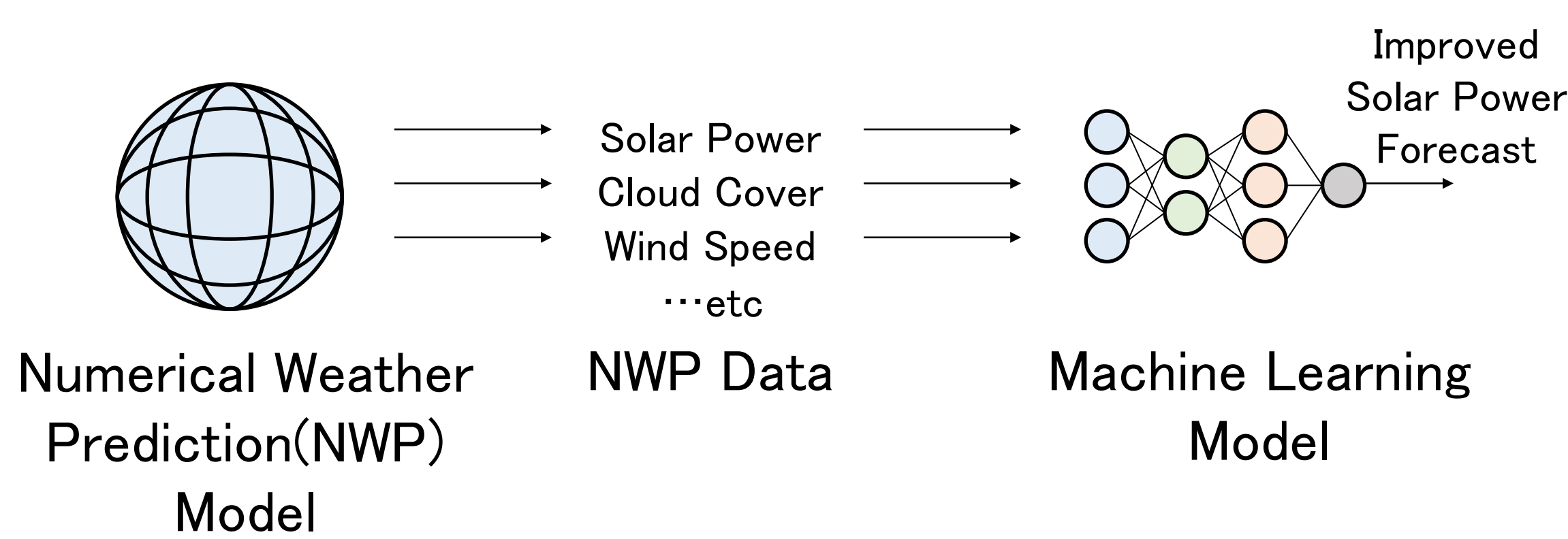


予測モデルの大外しを改良する必要
 →モデルが大外しする要因について分析



日射予測と機械学習モデル

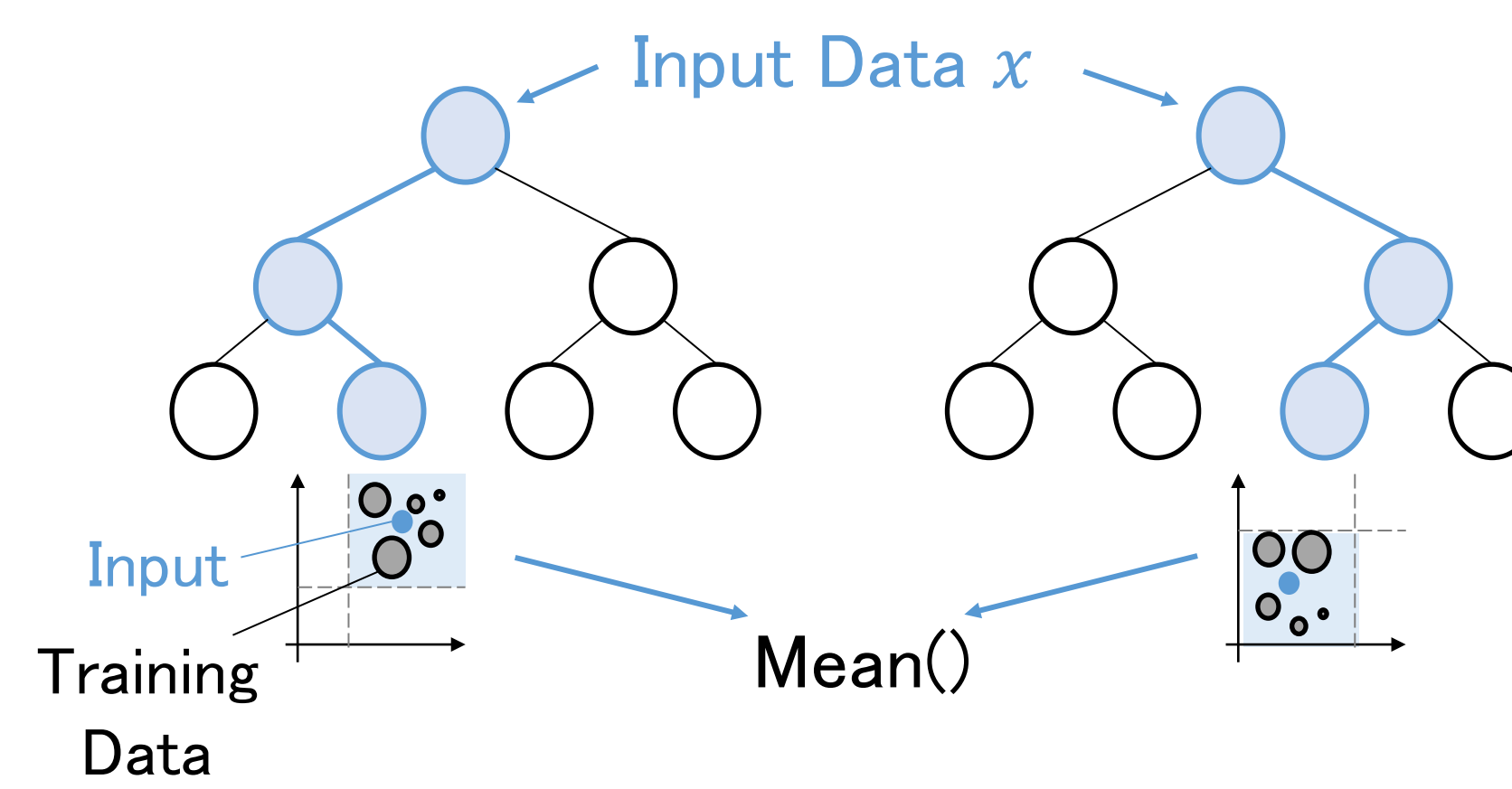
数値気象予報モデルへの機械学習モデルの活用



機械学習モデルによる数値気象予報の後処理

- 数値気象予報(NWP)は、前日以前の日射予測に有用
- 格子解像度やモデル内の物理過程に由来して、系統的な誤差が発生
- 機械学習は、統計処理によりNWPの系統誤差を補正するのに有効

ランダムフォレスト(RF)



- ランダムに生成された決定木群から入力データに類似する訓練データを判別し、それらの期待値を回帰する予測モデル
- 過学習が生じにくく、基本設定で高パフォーマンスなモデルを構築可能

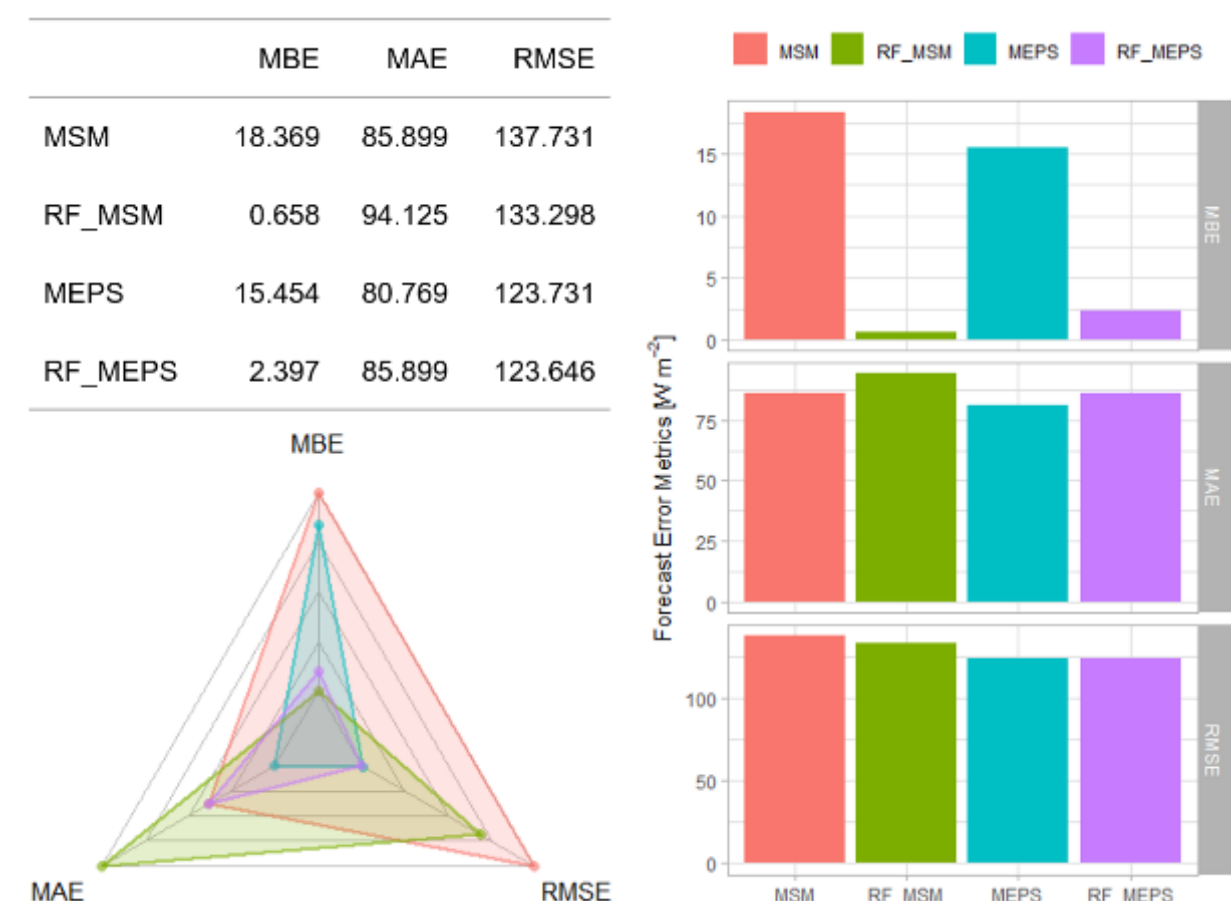
数値気象予報(NWP)を用いたランダムフォレスト(RF)を構築・予測大外し事例を分析

予測結果と大外し分析

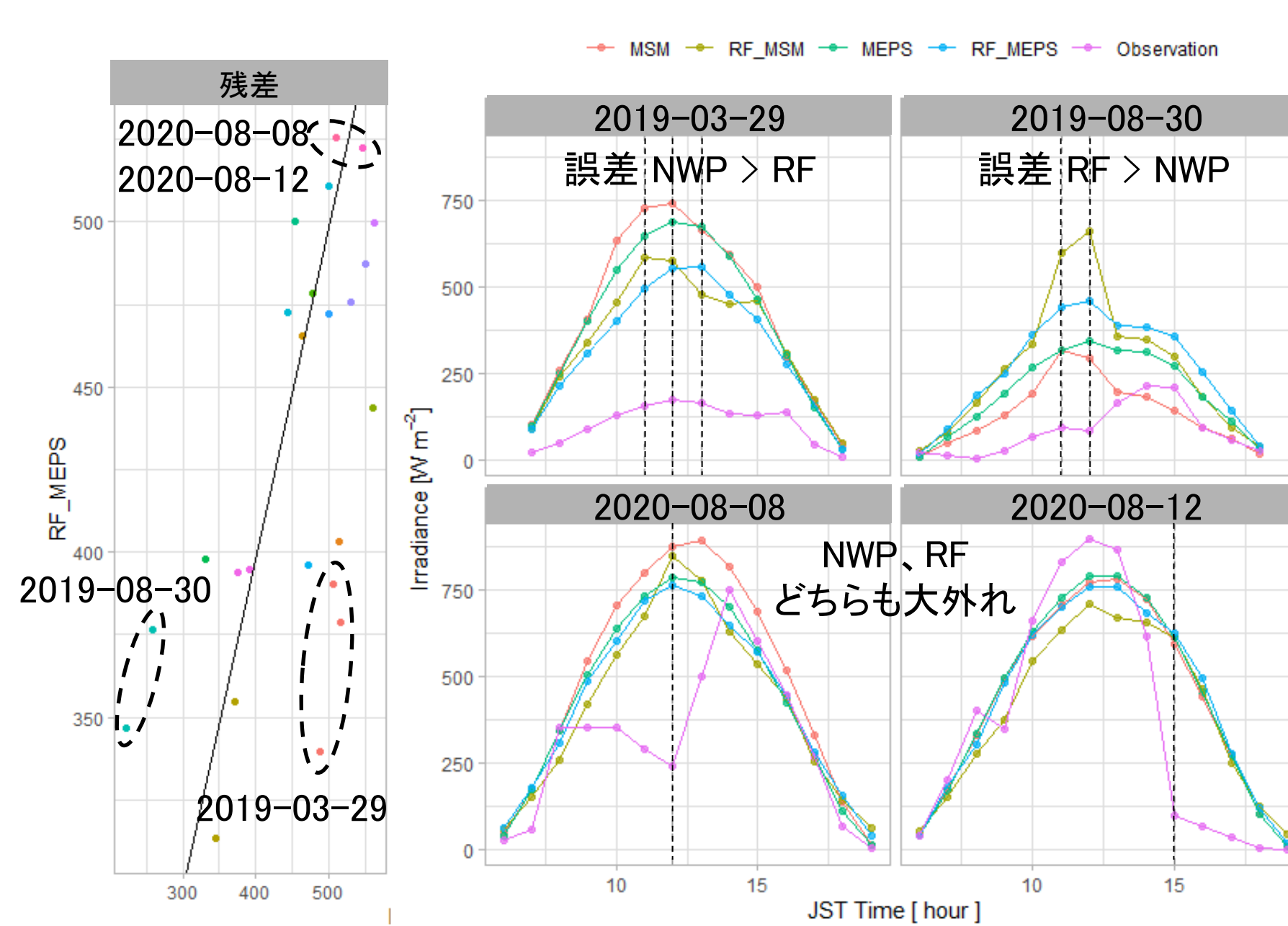
検証ケース

- 予測対象地点: 東京地点
- データ期間: 2019-01-01～2021-12-31
- 時間窓60日のロールアップ検証

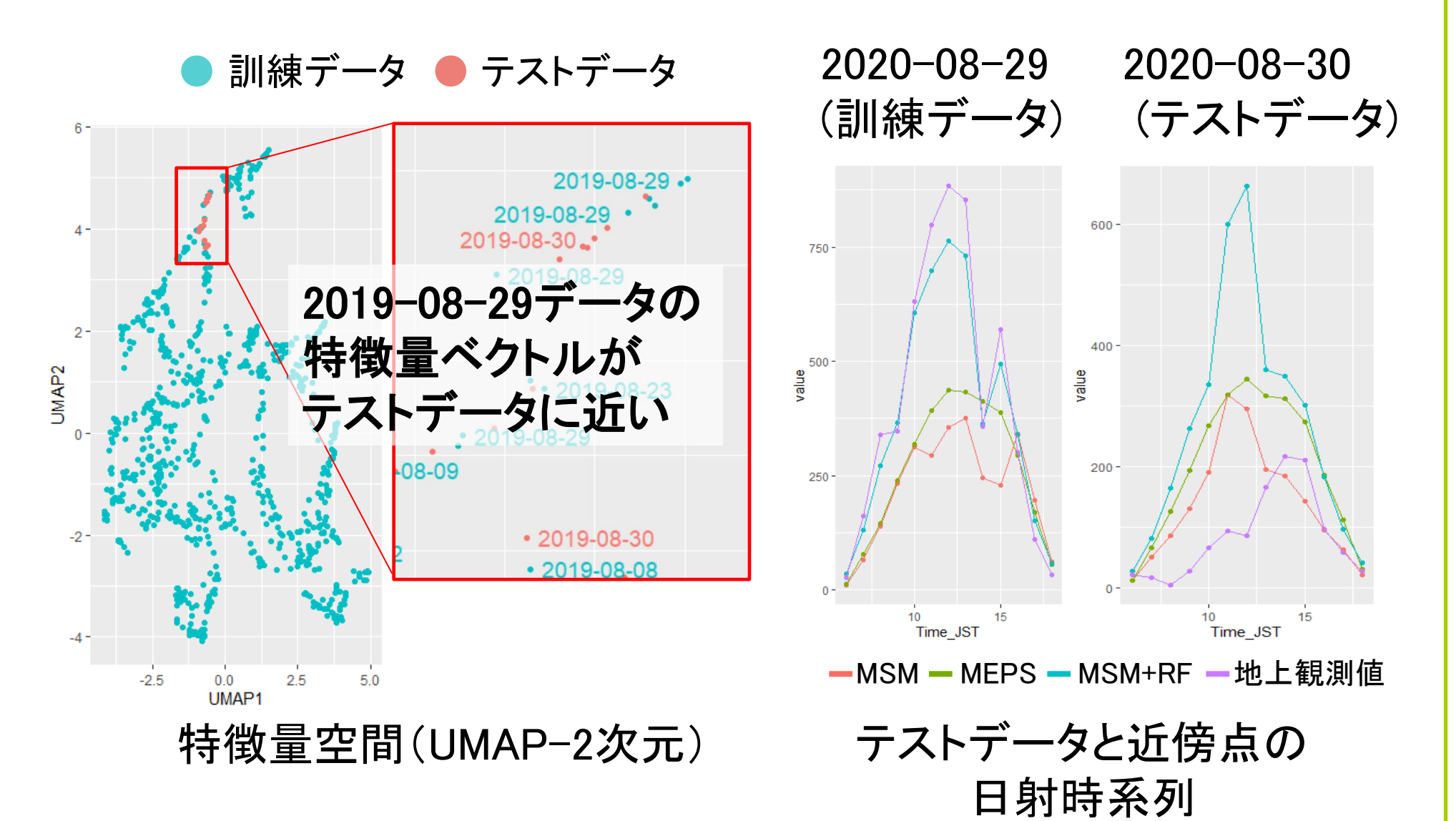
予測モデルの基本性能



大外しケースの抽出



特徴量空間の可視化



類似度の高い訓練データでNWPが過少予測
 ⇒機械学習が過大側に予測値補正 & 大外し悪化

NWPの過大・過少予測について、
 モデルの判別能力を改善する必要あり

RFでバイアス誤差が改善→大外しは？ RFで日射予測大外しが悪化したケースが存在

結論

- 数値気象予報データを入力としたランダムフォレストモデルの日射予測大外しの分析を検討
- 機械学習モデルが大外しを悪化させるケースを抽出し、UMAPによる特徴量空間の可視化を実施
- 大外し悪化ケースにおいて、テストデータ近傍のNWP日射予報値が過少予測となっており、それに影響されてランダムフォレストがNWP予報の過大予測を悪化
- NWPの過少・過大予測についてモデルの判別能力を改善する必要

参考文献

- 第3回調整力の細分化及び広域調達の技術的検討に関する作業会 配布資料「⑤細分化・市場化に伴い必要となる技術的な対応、ルール等(調達タイミング)の検討について」、中部電力, 2017
- 需給調整市場における三次調整力①、②の取引状況, 電力需給調整力取引所, 2022
- 日本太陽エネルギー学会2022年度研究発表会, メソアンサンブル予報システム(MEPS)予報データを入力とした機械学習モデルの日射予測大外しの分析の基礎検討, 高松尚宏, 中島虹, 大竹秀明, 大関崇, 山口浩司, 2022

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)の一環で進められており、気象庁および気象研究所からメソアンサンブル予報データの提供を受けている。

日射量予測大外れ事例における 全球アンサンブル予報の特徴

中島虹¹、大関崇¹、大竹秀明^{1,2}、高松尚宏¹、仲江川敏之²、山口浩司³

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 気象研究所、3 日本気象協会

1. 研究の目的

日本では太陽光発電システム(以下、PV)が年々導入されつつある。PVの出力量は日射量に左右されるため、翌日から翌々日の日射量を予測することは重要である。しかし、日射量予測を大きく外す事例(大外れ事例)が年間で数事例発生している。電力の安定供給のためにも年間の日射量予測最大誤差を低減することは重要である。予測の高精度化や不確実性の把握には、アンサンブル予報を用いることが有用であると考えられる。アンサンブル予報では、わずかに異なる初期値から複数の予報結果が得られるため、予報される日射量を確率的にとらえることが可能となる。本報告では、東京電力エリアにおいて気象庁全球モデル(GSM)の日射量予測大外れ事例について、世界的に広く利用されている気象モデルであるWRFを利用した計算を行った。入力データとして全球アンサンブル予報(以下、GEPS)を利用することで、日射量予測誤差が大きくなった要因について検討する。

2. データと手法

- 対象期間
2021年1月1日~2021年12月31日
- データ
 - 気象庁観測値
 - 日射量
 - 日照時間(日射量の推定に利用(斎藤ほか2018))
 - GEPS:51メンバー
- エリア日射量の比較方法
 - 実績値
市区町村別の太陽光発電認定・導入量をもとに気象官署の日射量を加重平均した値
 - GSM予報値
前々日の12UTCを初期時刻としたGSM予報値

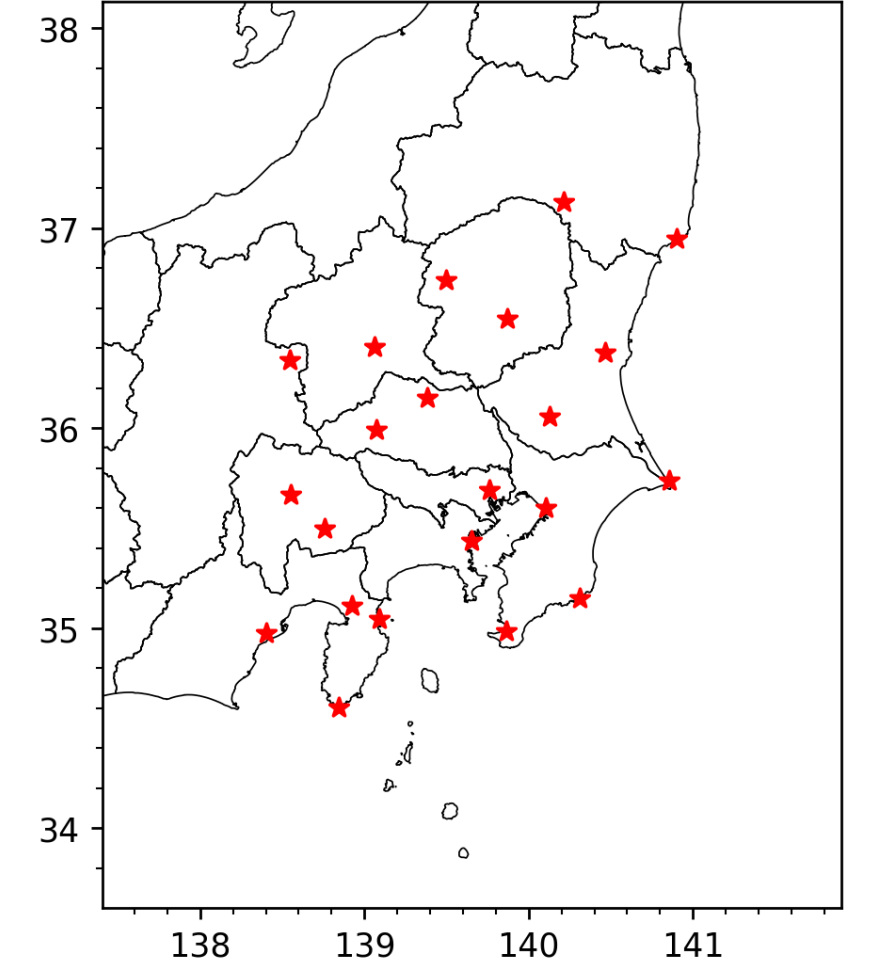


図1 気象庁観測地点分布図

3. 結果

1. 大外れ事例の抽出

日積算誤差(AE)を指標に2021年の日射量予測大外れ事例を抽出した(図2)。

$$AE = \sum_{T=0}^{23} |Sim_T - Obs_T|$$

2. GEPSを利用したWRF計算

最も誤差が大きかった5月22日(図2赤枠)を対象にWRF計算を実行。

◆ WRF計算設定

モデルバージョン: WRF ver.4.3.3

計算領域: 図3

格子間隔: D1=25km, D2=5km

鉛直層: 34層(上端高度=約20.8 km)

初期値・境界値: ①GEPS(1.25°×1.25°)
②NCEP GFS(0.25°)

計算時刻: 5月20日 21JST ~ 5月23日 00 JST

◆ WRF計算結果(図5)

- GEPS全メンバーが過大評価
- メンバー間のばらつきは他事例よりも小さい

予報時の信頼度は高いが、大外れしてしまう危険あり

電力の安定供給で課題

◆ 鉛直構造の特徴(図6)

- 5月22日(図6 赤枠)
中層(500~300hPa)で乾燥バイアス

GEPSは雲が発生しにくく、日射量過大となりやすい気象場を予報していた。それ以外の事例でも乾燥バイアスあり

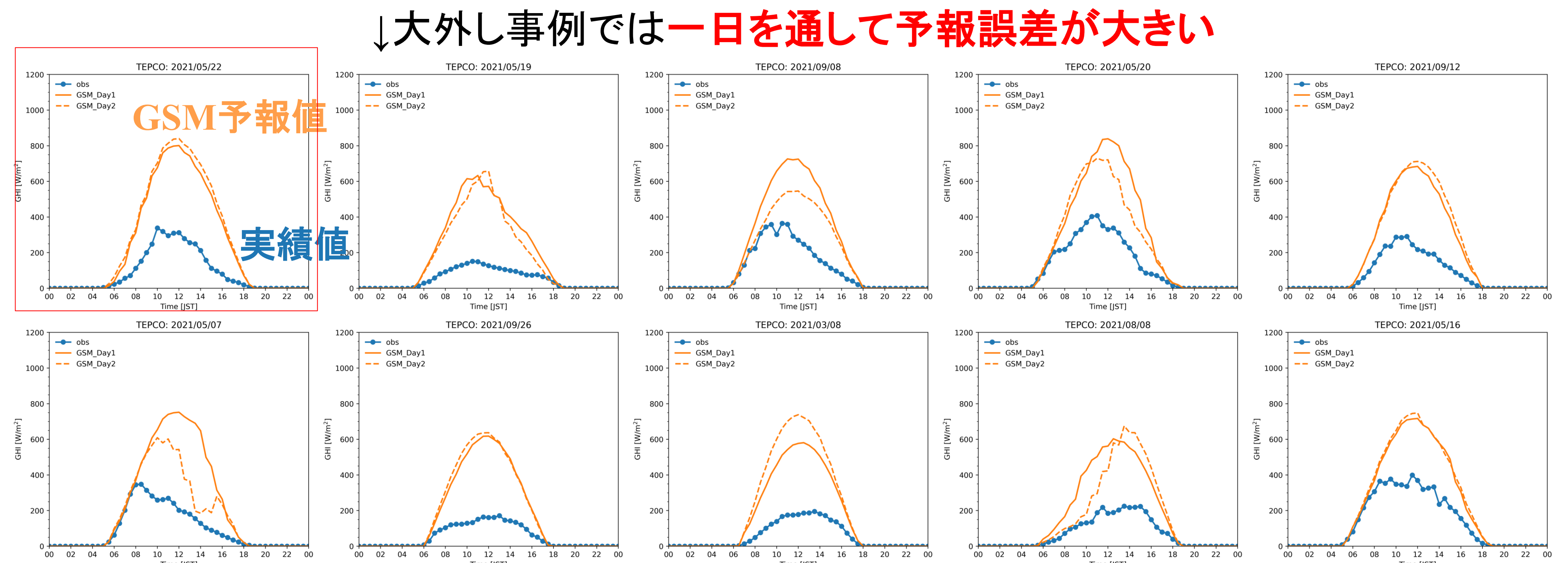


図2 2021年日積算誤差ワースト10における実績値(青)とGSM予報値(オレンジ)の日射量日変化

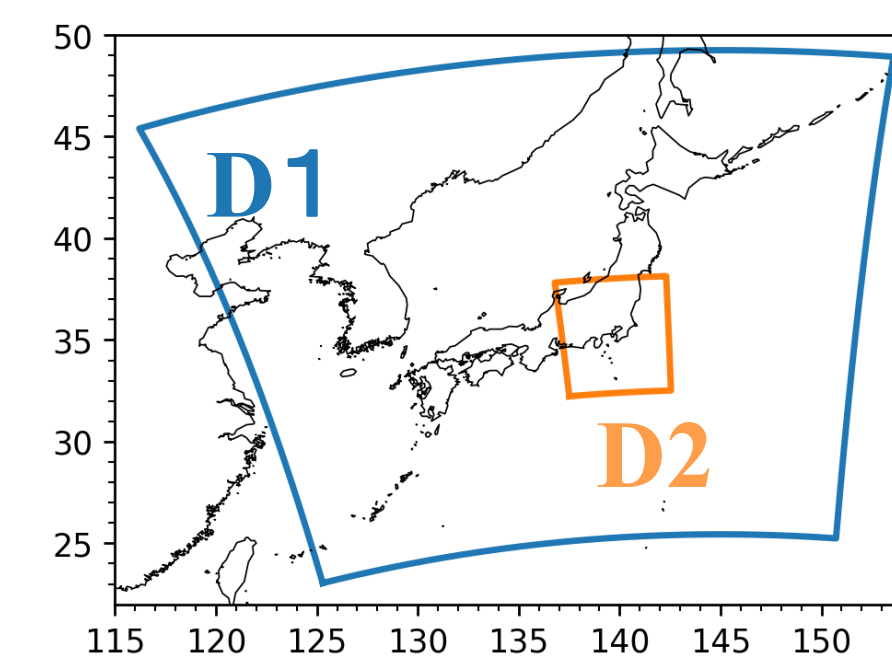


図3 計算領域

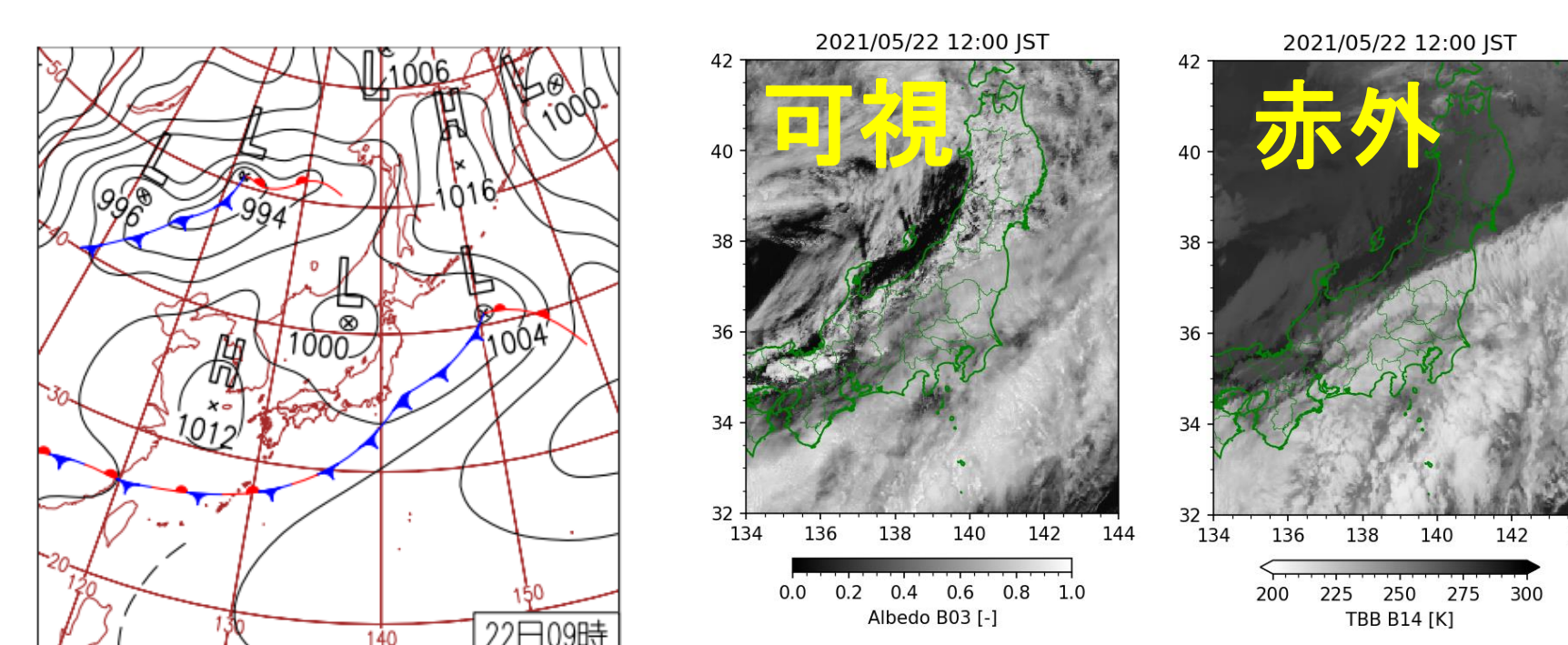


図4 2021年5月22日の天気図と衛星画像(気象庁HPとひまわりモニターより取得)

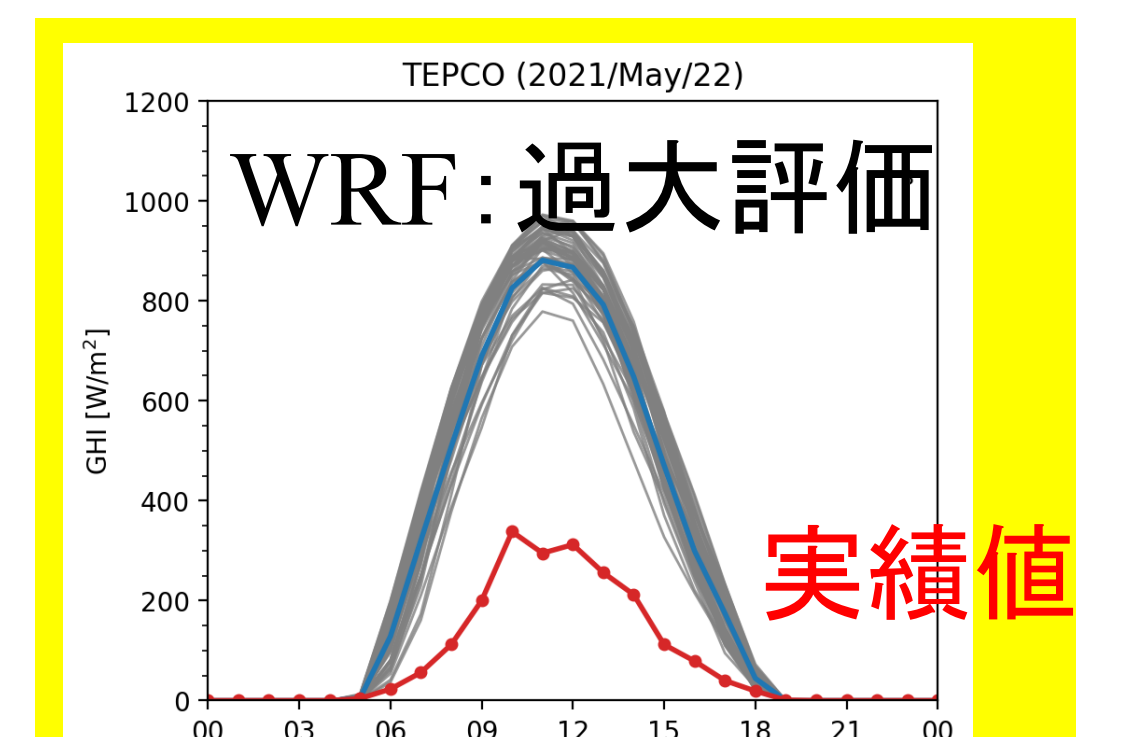


図5 WRF計算結果(灰と青)と実績値(赤)の日射量日変化

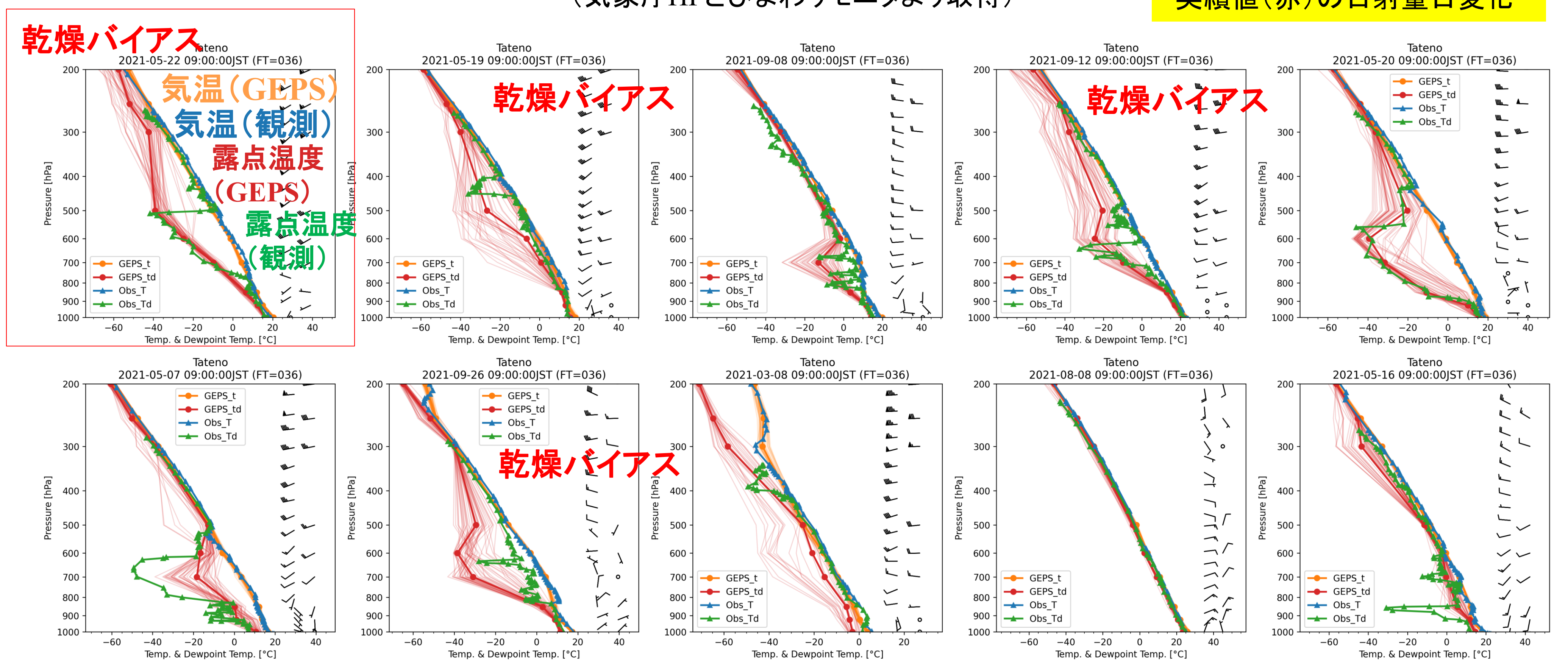
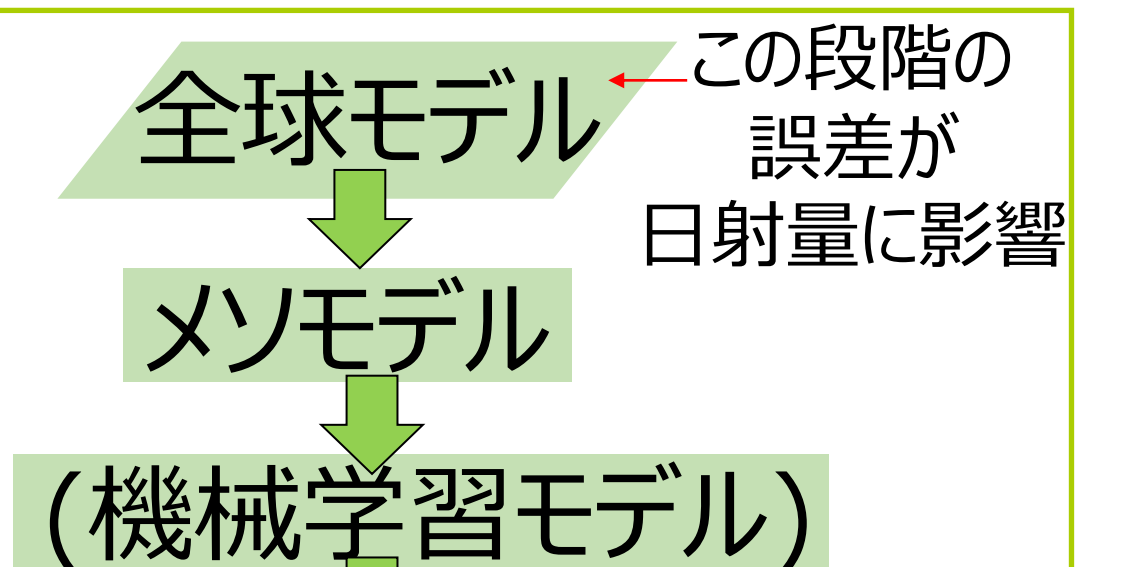


図6 2021年日積算誤差ワースト10の9時の館野におけるラジオゾンデ観測とGEPS予報値の気温・露点温度・風の鉛直分布

結論

- 東京電力エリアにおける日射予測大外れ事例における全球アンサンブルモデル(GEPS)の特徴を解析した。
- 日射量予測誤差が2021年で最も大きかった5月22日を対象にGEPSを入力値としたWRF計算を実行した。
 - ✓ GEPS全メンバーで日射量を過大評価し、メンバー間のばらつきも小さかった。(電力安定供給で課題)
 - ✓ GEPSは大気中層で乾燥バイアスを示し、雲が発生しにくい気象場を予報していた。(その他の事例でも乾燥バイアスあり)
- 大外れ事例は、日射量予測に必要な全球モデルの気象場の誤差が大きく、その誤差が日射量予測に影響を与えたと示唆される。日射量予測値



参考文献

斎藤哲彦, 佐々木寛介, 板垣昭彦, 宇都宮健志, 山口浩司. 2018, ひまわり8号データを用いた衛星推定日射量における雲・積雪判別の初期検討. 電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌), 138(6), p.460-465.

謝辞

本研究はNEDOの「翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発」によりなされた。GEPSデータは、気象庁より提供を受けた。

「日射量予測大外れ事例における全球アンサンブル予報の特徴」

中島虹¹、大関崇¹、大竹秀明^{1,2}、高松尚宏¹、仲江川敏之²、山口浩司³

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 気象研究所、3 日本気象協会

1. はじめに

日本では太陽光発電システム（以下、PV）が年々導入されつつある。PV の出力量は日射量に左右されるため、翌日から翌々日の日射量を予測することは重要である。しかし、日射量予測を大きく外す事例（大外れ事例）が年間で数事例発生している。電力の安定供給のためにも年間の日射量予測最大誤差を低減することは重要である。予測の高精度化や不確実性の把握には、アンサンブル予報を用いることが有用であると考えられる。アンサンブル予報では、わずかに異なる初期値から複数の予報結果が得られるため、予報される日射量を確率的にとらえることが可能となる。本報告では、東京電力エリアにおける日射量予測大外れ事例について世界的に広く利用されている気象モデルである WRF ver.4.3.3 を利用した計算を行った。入力データとして全球アンサンブル予報（以下、GEPS）を利用することで、日射量予測誤差が大きくなった要因について検討する。

2. 結果

図 1 に日射量実績値と WRF による計算結果を示す。いずれのメンバーも日射量を過大評価していた。メンバー間のばらつき（灰色の幅）が小さく、予報の信頼度は高いが大外れとなる事例であったといえる。

図 2 に 5 月 22 日 9 時の館野におけるラジオゾンデ観測と、その 48 時間前を初期時刻とする GEPS 予報値の気温と露点温度の鉛直分布を示す。ラジオゾンデ観測では 500~300 hPa で気温と露点温度の差は小さい（オレンジと緑）。その一方で、GEPS では気温と露点温度の差が大きい（青と赤）。このことは GEPS に乾燥バイアスがあったことを示す。つまり、GEPS は実際の気象と比べて雲が発生しにくく、日射量が過大となりやすい気象条件を予報していたことが示唆された。

また、2021 年の 1 月から 12 月の間で日射量予測の日積算誤差が大きかった 10 事例について図 2 と同様に館野のラジオゾンデ観測と GEPS を比較した結果、5 事例において露点温度の予報精度が低かった。また、乾燥バイアスの事例では日射量を過大評価する傾向が認められた。このように、日射量予測大外れ事例では、境界値に利用される全球モデルの乾燥バイアスが寄与していることが示唆された。

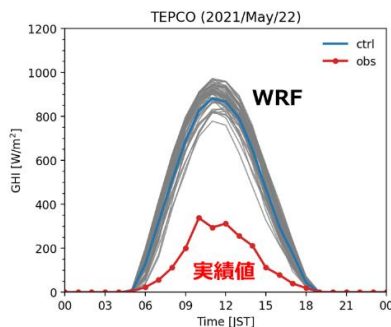


図 1 2021 年 5 月 22 日の日射量実績値(赤)と WRF による予報結果(青と灰)

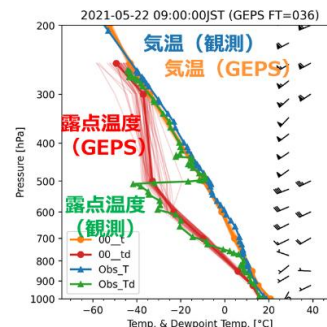


図 2 2021 年 5 月 22 日 9 時の館野における気温、露点温度鉛直分布。ラジオゾンデ観測(緑, 青), 初期時刻 5 月 20 日 9 時の GEPS 予報値(赤, オレンジ)。

謝辞 本研究は NEDO「翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発」(2021~2024 年度)においてなされた。GEPS データは、気象庁より提供を受けた。

メソアンサンブル予報システム(MEPS)の3時間データの1時間値への補間による予測誤差評価

大関崇¹、大竹秀明^{1,2}、高松尚宏¹、中島虹¹
 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気象研究所

研究の目的

- 電力システム改革に伴い調整力は需給調整市場を利用して一般送配電事業者が調達。
- 再エネ予測誤差分(3次調整力②)は、過去の予測誤差実績の3σ相当で確保。
 - 再エネの予測誤差は正規分布を取らないため、片側分布を想定した99.87%の分位点。
- FIT特例制度による予測誤差：
 - 前々日の16時および前日再通知
 - その断面での予測誤差が三次調整力②の必要量
 - 三次調整力②の必要量＝「前日予測値-実績値」の再エネ予測誤差3σ相当
- 調整力確保に必要なコスト(三次調整力②の実績)は約1000億程度であり、再エネ賦課金を利用した交付額は約800億相当。
- 社会コスト低減のため、予測誤差低減、特に大外れ誤差の低減が必要。

研究の目的

- メソアンサンブル数値予報モデルGPV (MEPS)
- 3時間値しか公開されていないため、適切な1時間値への変換方法を検討
- MEPS: 21メンバー: NusDAS形式
- 時間解像度: 1時間値(3時間値は1時間値を単純平均で作成)
- Forecast Horizon: 前日予測(初期値 前日9時、対象の1日分)
- 期間: 2020/1~2020/12
- 実測: 地上気象官署 水平面日射量
- 地点: 東京、つくば、宇都宮、銚子、前橋。広域エリアは単純平均。
- MSM: コントロールランのメンバー00を利用
- GSMLレベルの課題
 - 複数モデルの利用 → 海外モデル
 - アンサンブル予報の利用 → GEPS
- メソレベルの課題
 - モデルの改良 → 雲物理過程
 - メソアンサンブル → MEPS
- 共通
 - 機械学習などによる複数モデルのブレンド
 - 大外れに特化した機械学習
 - 信頼度(調整力のテーブルの分類)、予測予見性の検討

結果概要

- ①線形内挿: 3時間平均値を1時間値へ線形内挿
- ②大気外日射量による配分方法: 大気外日射量を1時間ごとに計算し、当該3時間平均値を大気外日射量の値に按分

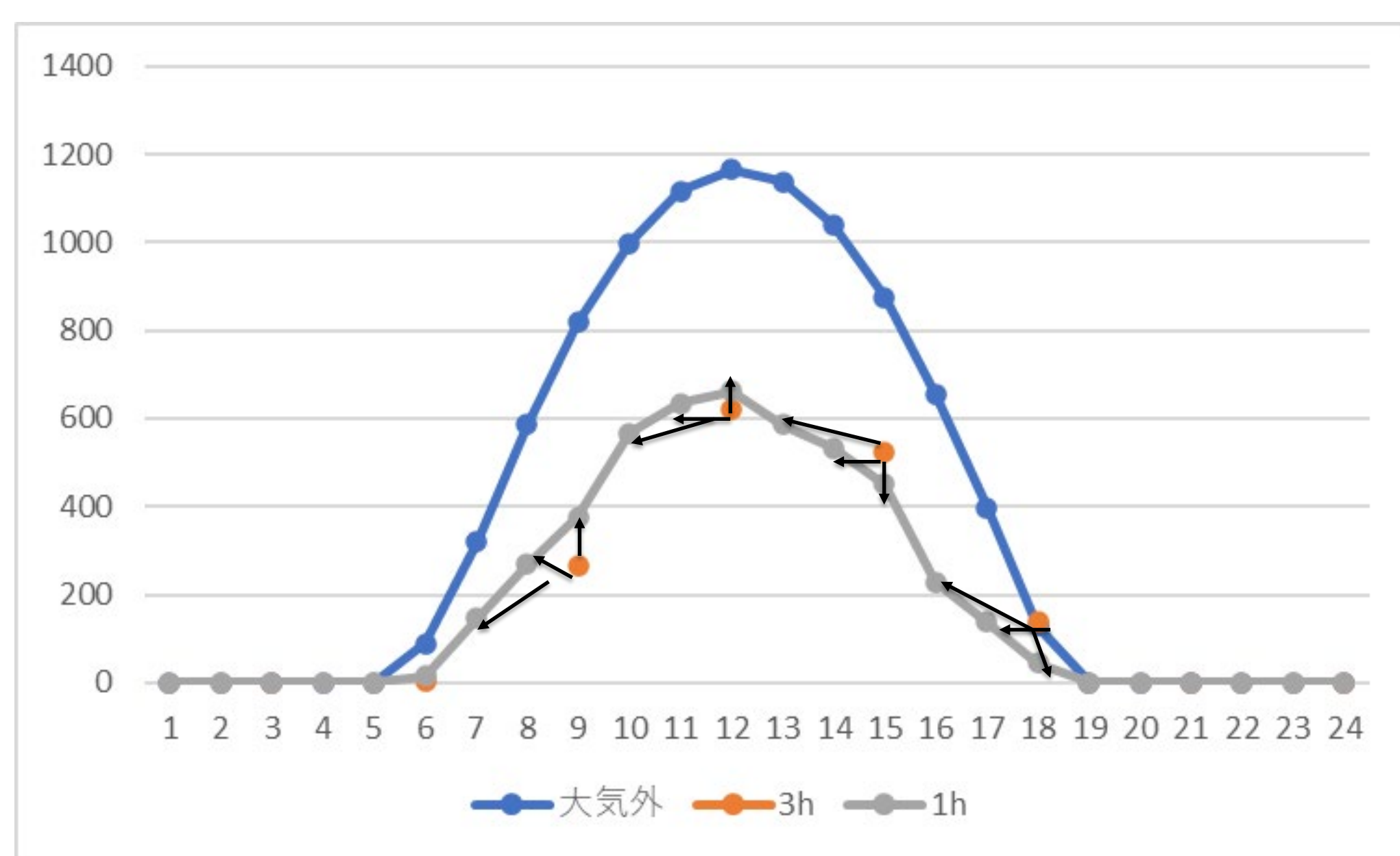


図 ダウンスケール方法の概要

表 RMSEの結果

	MPES 1時間値	大気外日射の按分 (1->3->1h)	線形補間 (1->3->1h)	MSM
Tokyo	116	117	124	130
Tsukuba	109	110	118	119
Choshi	120	122	128	136
Maebashi	107	109	117	115
Utsunomiya	112	114	121	122
Area Total	82	83	93	90

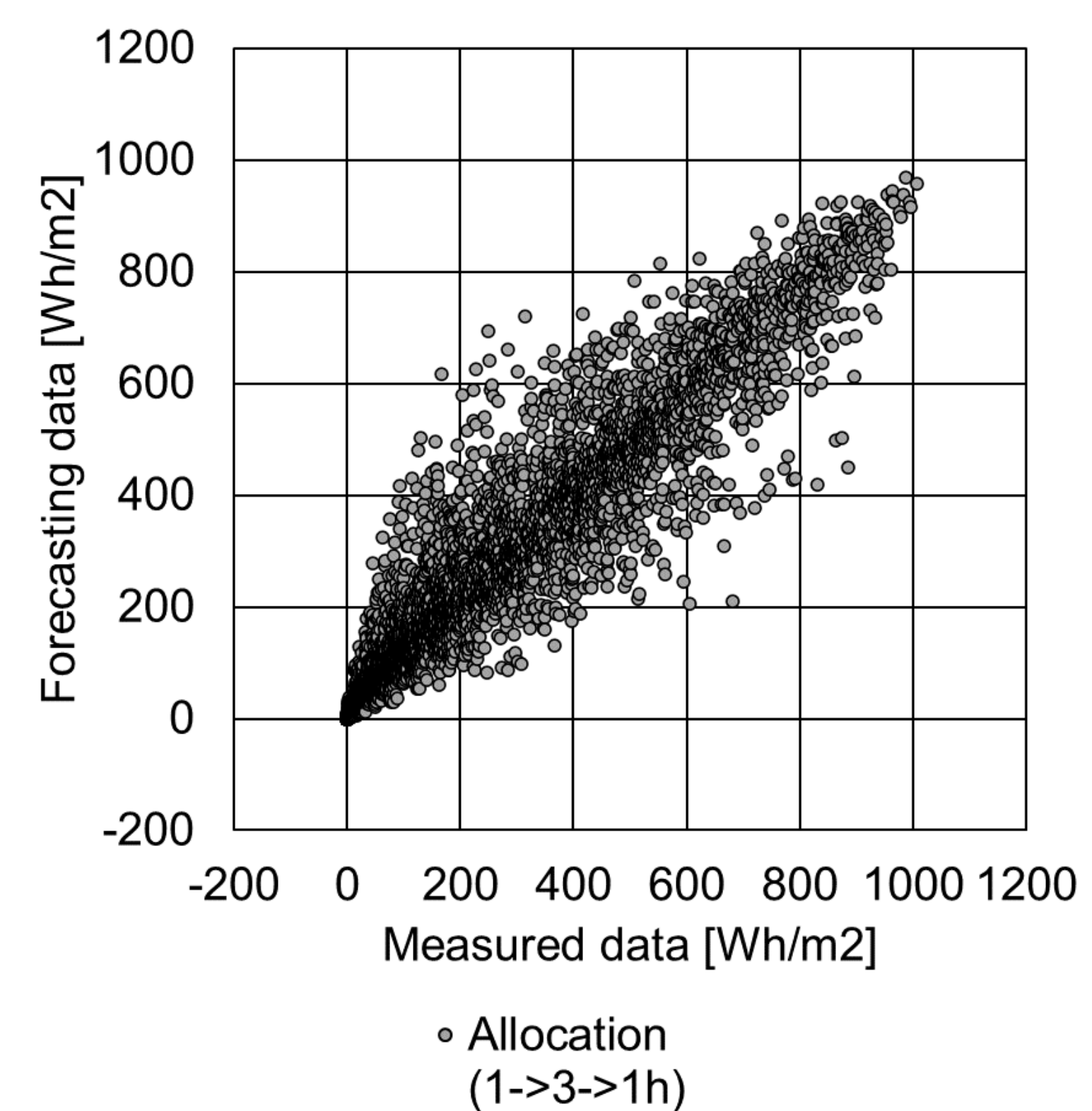


図 実測一予測の相関図(大気外日射の按分)

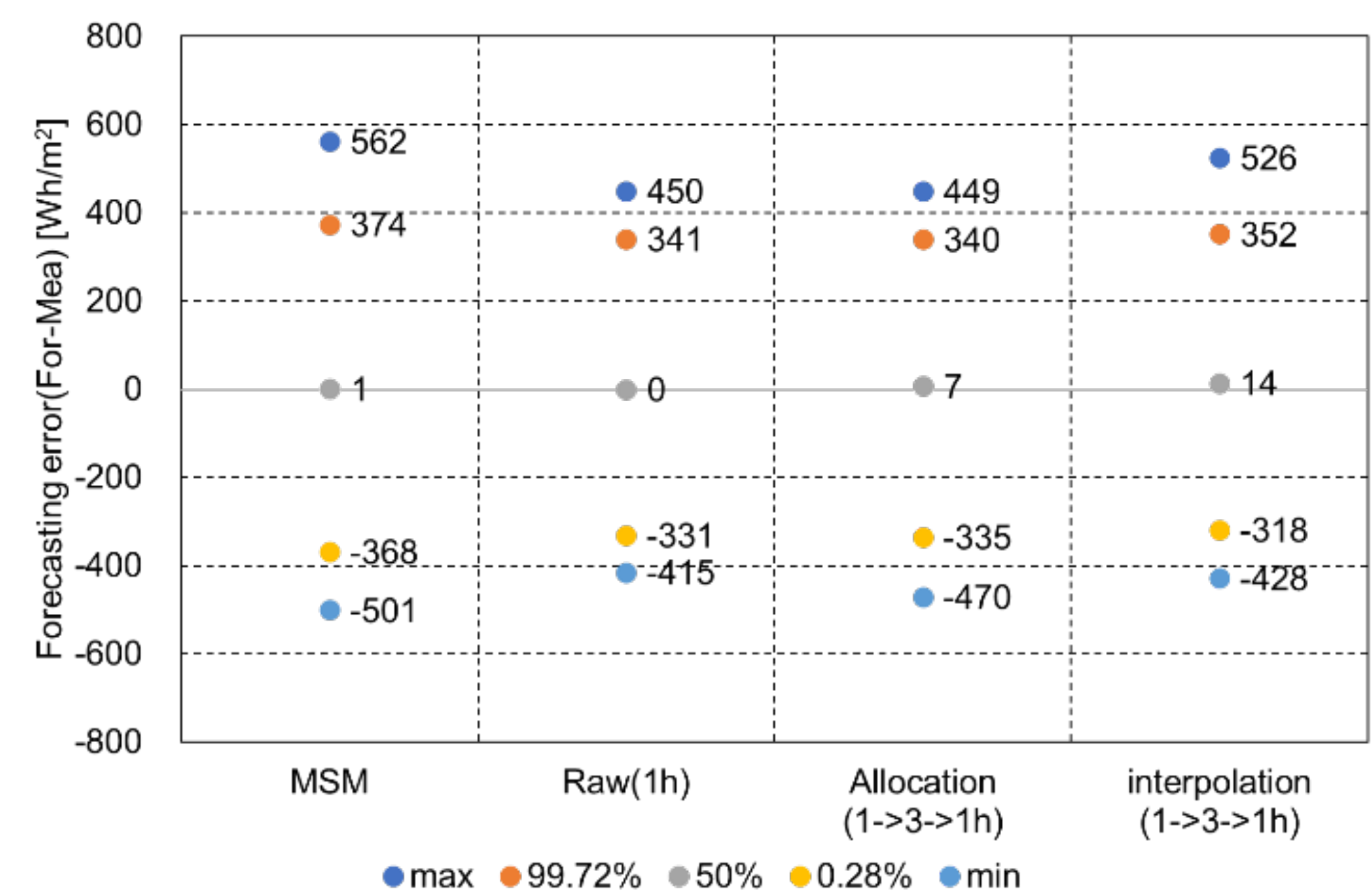


図 予測誤差の各分位点

まとめ

- ダウンスケール方法として、簡便な数値的な方法として、大気外日射による按分を検討。
- MEPSで計算された1時間値(非公開)と比較をして十分な精度が期待できることを示した(翌日予測において)

謝辞: 本研究におけるMEPSのデータは、気象庁・気象研究所より提供いただいた。使用に関して協力頂いた関係者に感謝する。

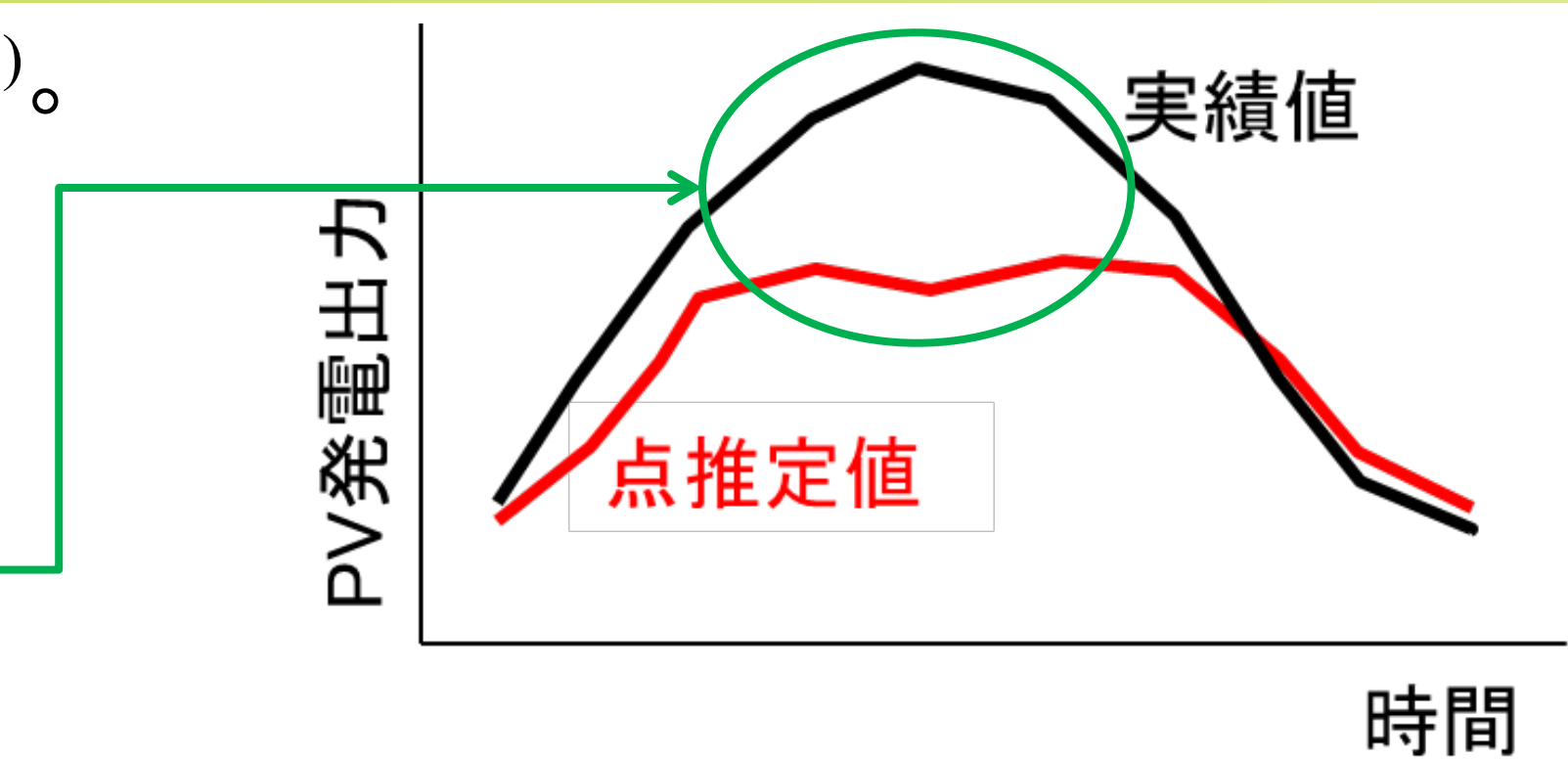
Auto-Encoderを用いた 翌日エリアPV出力推定に関する基礎的検討

森友輔¹、若尾真治¹、大竹秀明^{2,3}、高松尚宏²、大関崇²

1 早稲田大学、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 気象研究所

研究背景

- ・太陽光発電(PV)の導入が大量に行われている(2021年時点において累積78.2GWが導入)⁽¹⁾。
- ・PVの出力は天候によって変動する。
→電力システムの需給バランス維持のためにPV出力の予測が必須である。
- ・PV出力の予測値には誤差が含まれ、
予測値と実測値の誤差が大きい場合においても需給バランスに影響を与える
→PVの予測情報には平均的な誤差と大外し両方の改善が求められる。

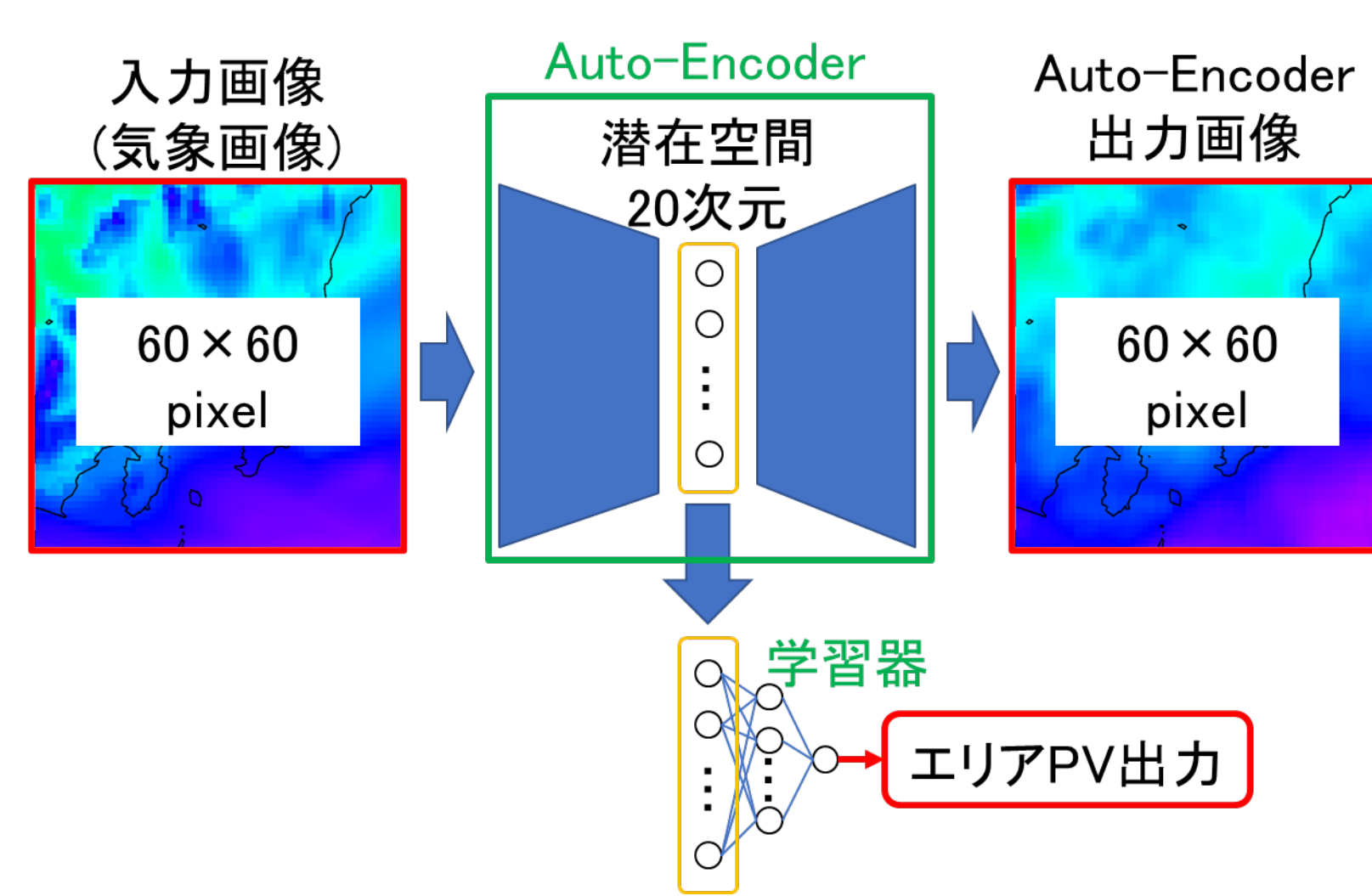


予測手法

- ・過去の翌日エリアPV出力の予測には離散的な複数地点の情報が入力の情報として用いられていた⁽²⁾。
→気象画像を入力とすることで多数の地点情報に加え気象の連続的な空間分布情報を利用する。
⇔計算時間の増大、予測に不要な情報を抽出することによる精度の悪化のおそれ
→気象画像から翌日エリアPV予測に必要な情報を抽出し、抽出した情報をもとに予測を実施する予測モデルを開発。

Auto-Encoderを用いた予測モデル⁽³⁾

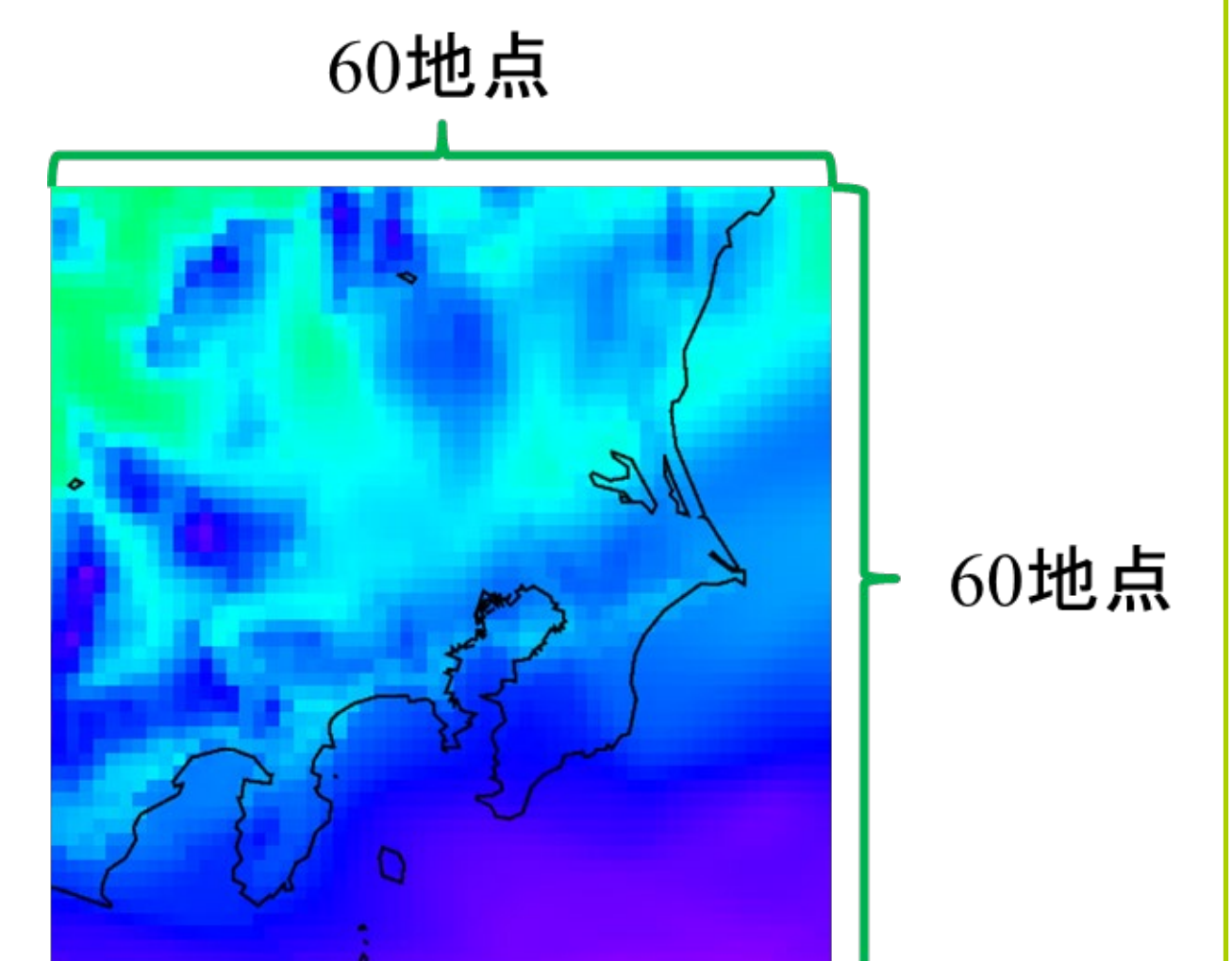
- ①Auto-Encoderを用いて気象画像から予測に必要な情報を抽出
→畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を利用したAuto-Encoderを用い気象画像の情報を低次元の潜在空間に抽出
- ②抽出した情報を用いニューラルネットワークでエリアPV出力を予測



入力情報: MEPS: Meso-scale Ensemble Prediction System⁽⁴⁾

の予報データ(各グリッドデータを画像化した)

- ・MEPS: 2019年より運用開始した気象庁の数値予報システム
- ・Meso-Scale Model (MSM: 従来の数値予報システム)に加え、MSMの計算時に摂動を与えて計算した20メンバーの計21メンバーの予測値を算出する数値予報システム
- ・初期時刻(日本時間3, 9, 15, 21時)から39時間先まで1時間間隔で予測
- ・本検討では予測対象前日の初期時刻3時におけるメンバー00(MSMに相当)の日射量と下層雲量の画像を使用(右図: 日射量画像の一例)⁽⁵⁾
→60×60=3600地点の情報



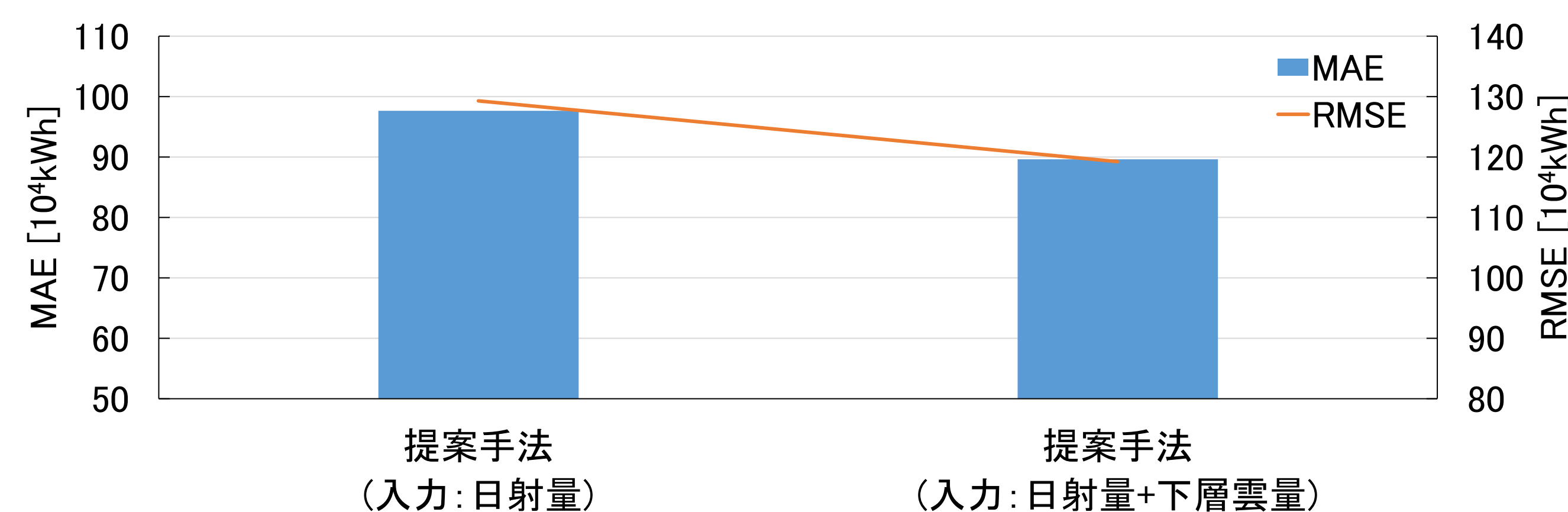
結果

2018年6月7日～2018年10月7日(123日)の期間における7時～17時(11時間)の東京電力エリア全体のPV発電量⁽⁶⁾(対象時刻の1時間前から対象時刻までの積算値)を前日の3時に予測。(MEPSデータは、気象庁から2018年より提供いただいた)

→合計1353時間の予測を4分割クロスバリデーションにて実施。

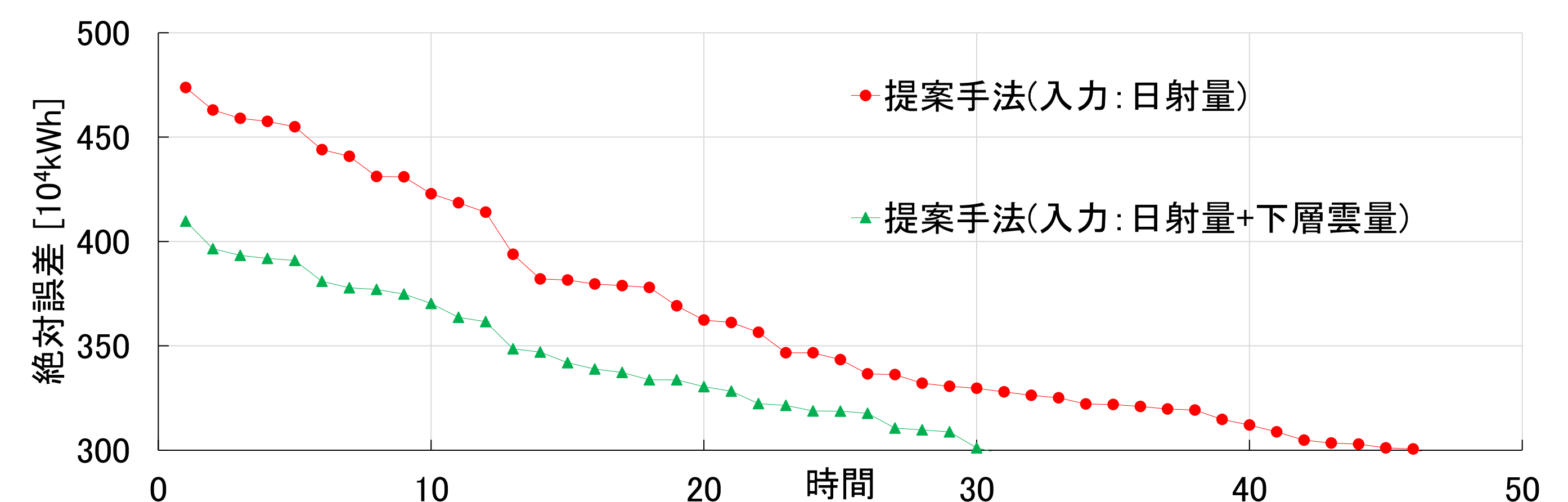
MAE(平均絶対誤差)、RMSE(平均二乗誤差)

- ・下層雲量の追加でMAE、RMSE共に低減する。



絶対誤差の持続曲線

- ・下層雲量の追加で約13%最大絶対誤差を削減。



結論

- ・Auto-Encoderを用いて気象画像から必要な情報を抽出することにより、大量の情報を利用可能な高精度な予測を実現した。
- ・今後、MEPSの他メンバーの情報利用を含めたAuto-Encoderの構造の最適化を進め、予測精度のさらなる向上を検討する。

参考文献

- 1) G. Masson, E. Bosch, I. Kaizuka, and A. Jäger-Waldau, "Snapshot of Global PV Markets 2022 Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach PVPS," (2022)
- 2) 東京電力パワーグリッド(株):「再エネ出力制御の低減に向けた取組について」, 経済産業省第32回総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/032_01_01.pdf (2023年1月21日閲覧)
- 3) 森友輔, 若尾真治, 大竹秀明, 高松尚宏, 大関崇, 「Auto-Encoderを用いたエリアPV発電予測に関する基礎的検討」, 2021年12月1日新エネルギー・環境研究会, pp.67-72 (2021)
- 4) K. Ono, M. Kunii, and Y. Honda: "The regional model-based Mesoscale Ensemble Prediction System, MEPS, at the Japan Meteorological Agency", QJR Meteorol Soc., Vol.147, No.734, pp.465-484 (2021)
- 5) P. Wessel, J.F. Luis, L. Uieda, R. Scharroo, F. Wobbe, W.H.F. Smith, and D.Tian: "The Generic Mapping Tools version 6", Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol.20, No.11, pp.5556-5564 (2019)
- 6) 東京電力パワーグリッド(株):「エリア需給実績データについて」,https://www.tepeco.co.jp/forecast/html/area_data-j.html (2023年1月21日閲覧)

※画像の描画にはThe Generic Mapping Toolsを用いた。

謝辞: MEPS データの使用に協力頂いた気象庁, 気象研究所に深謝の意を表す。

北海道における太陽光発電システム上の積雪モニタリング

大竹秀明^{1,3}、大関崇¹、今井正亮²、庭野匡思³、小野耕介³

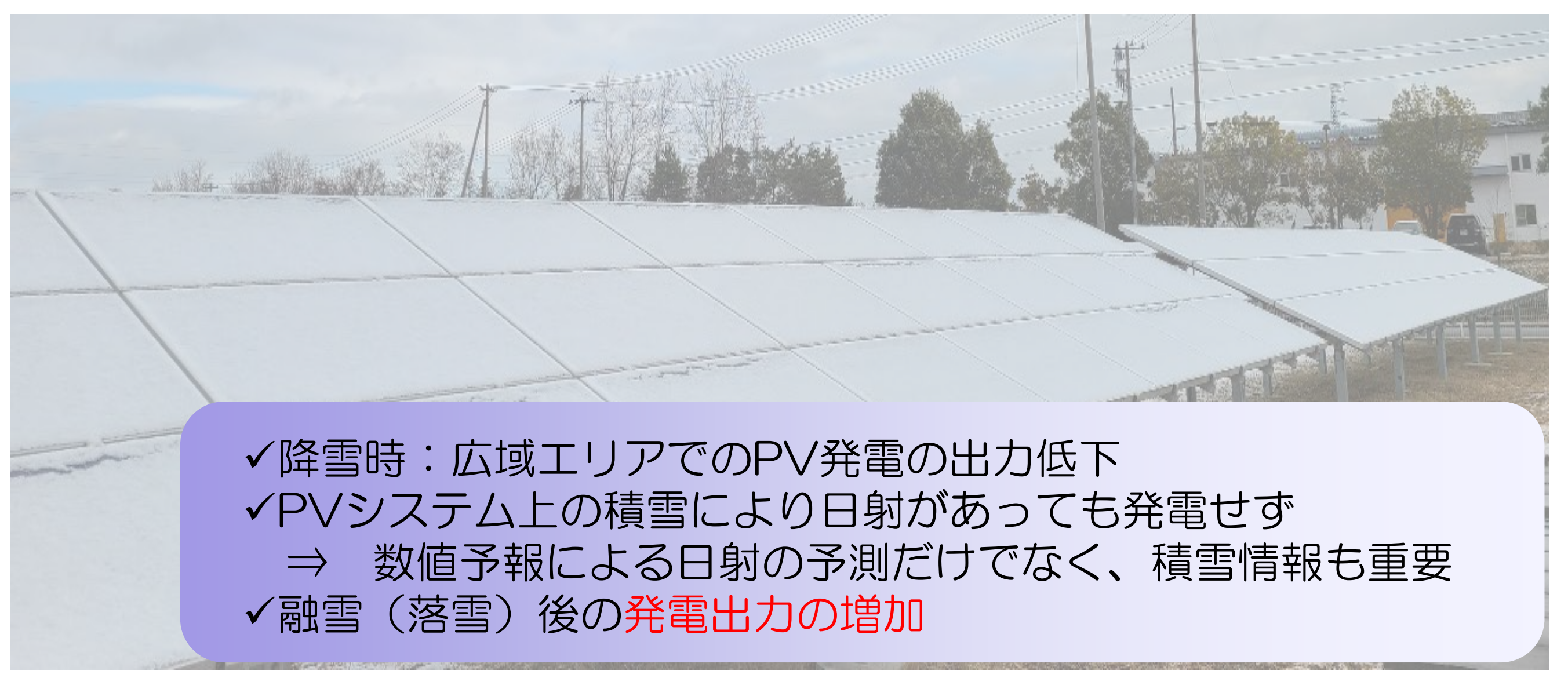
1 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 2 京都産業大学、
3 気象研究所

はじめに

- 国内では、太陽光発電(以下、PV)の導入が加速。電力需給のバランスのためにも、発電予測の活用が進む(複数社の予測の利用)
- PVに、雲がかかり(日射が少なくなる)、PVが発電しない場合は、火力発電などのほかの電力を調達(写真)。
- 電力の市場取引も始まり、電力供給量の計画を作成するためにもPVの出力予測が必要
- PV上に積雪があると、数値予測による日射量予測の精度が高くとPV出力予測に誤差発生



課題: PV上の積雪



積雪が認められる太陽光発電システム(産総研 福島再生可能エネルギー研究所にて大竹が2022年1月撮影)

目的

【太陽光発電出力と積雪に関する先行研究】

Perovich, (2007)[1]

積雪が2 cm 程度であっても日射の透過に大きな影響(透過率は波長にも依るが10~20%程度まで低減)。10 cm程度になると日射の条件に依らずほとんど出力しない(透過率は波長にも依るが10%未満)

Marison et al. (2013)[2]

PVシステム上に積雪があることで月換算で発電電力量の損失(年間の1~12%出力低下)

Hayibo et al. (2022)[3]

片面PVの積雪損失は冬期で平均33%、年間では16%。両面PVは、冬季の平均積雪量が16%、年間では2%。厳しい冬季条件下で片面PVより優れた性能を発揮することを屋外の観測から明らかに。

→ 発電予測に関連した研究例はまだ少ない

【目的】

どのような過程でPV上の積雪が落雪するのか、**PV上の積雪動態のモニタリング**から明らかにする。最終的には、積雪を加味した発電電力量の予測と評価を行う。

科研費研究の主な実施事項

(本発表は (a) のテーマについて報告)

(a) 積雪モニタリング

・PVシステム上の積雪モニタリングから積雪、融解、落雪の一環したプロセスを理解する(気象研、産総研)

(b) 積雪時発電予測

・積雪変質過程を考慮した積雪の開始、融解・落雪のタイミングを含めた積雪動態のモデル化と予測不確実性の分析(気象研、東大、京都産業大、産総研)

(c) 予測インパクト評価

・発電予測を活用した電力市場取引や電力経済の分野から予測のインパクト評価(東京理科大)

観測: ほくでんエコエナジー株式会社(運営)「ワインの里池田ソーラー発電所」



引用 ほくでん「大規模太陽光発電(メガソーラー)の導入」
https://www.hepco.co.jp/energy/recyclable_energy/solar_power/megasolar.html

PV上の積雪のモニタリング結果の一例

事例: 2022年2月20日

・三陸沖に低気圧があり、道東付近は降雪(本サイトでも最大18cmの積雪)

・朝は降雪によりPV全面に積雪を観測

・図1: PV下部より落雪(10:00)、その後上部から下部にかけて落雪(10:30頃)(全層雪崩の形態に類似)

⇒ 落雪の様子やメカニズムを理解する上で貴重なデータを取得

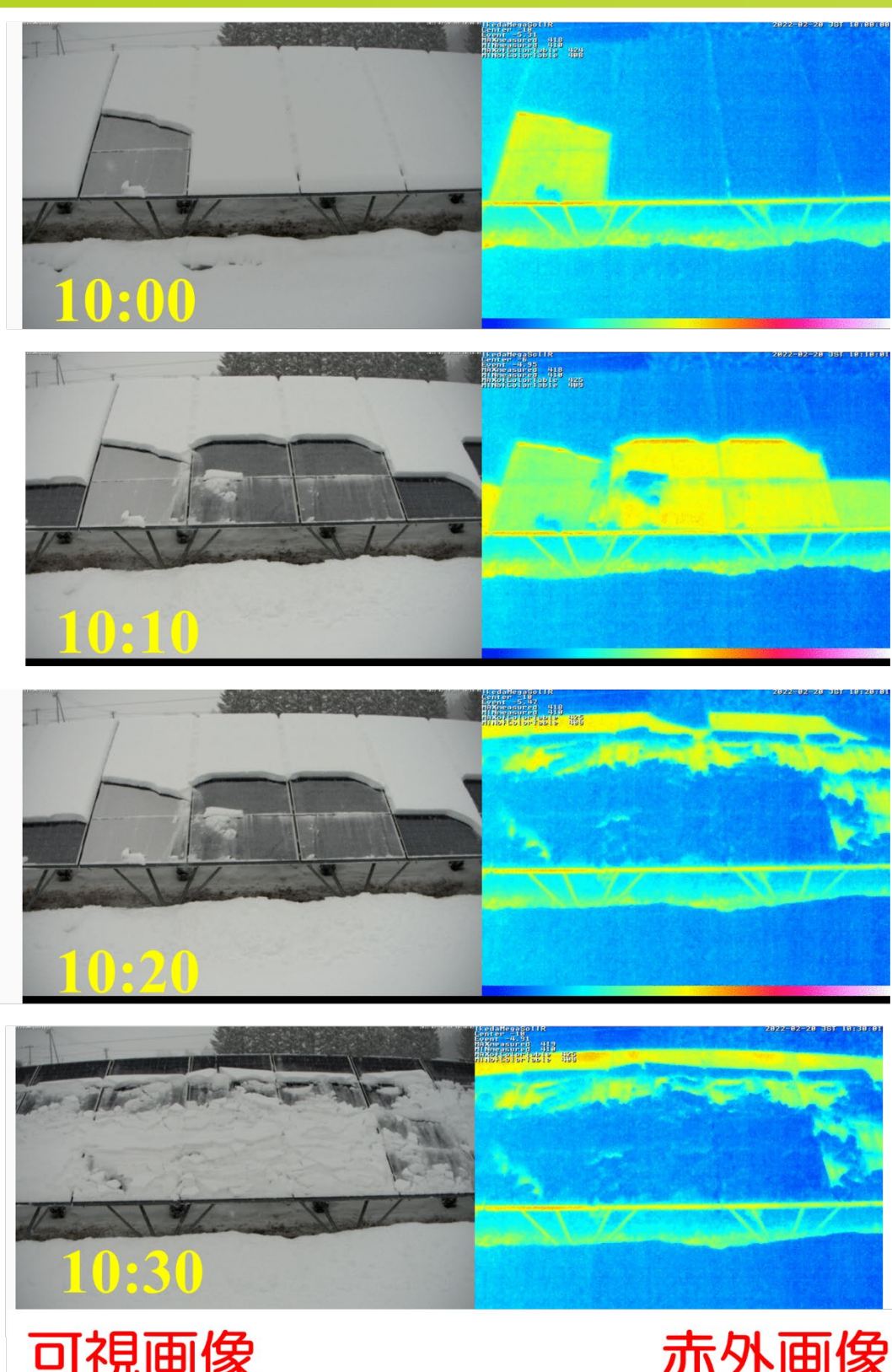


図1. PV上の積雪が落雪する様子の一例(2022年2月20日10:00-10:30まで10分毎)。(左)可視カメラと(右)赤外カメラの時間変化を示す。

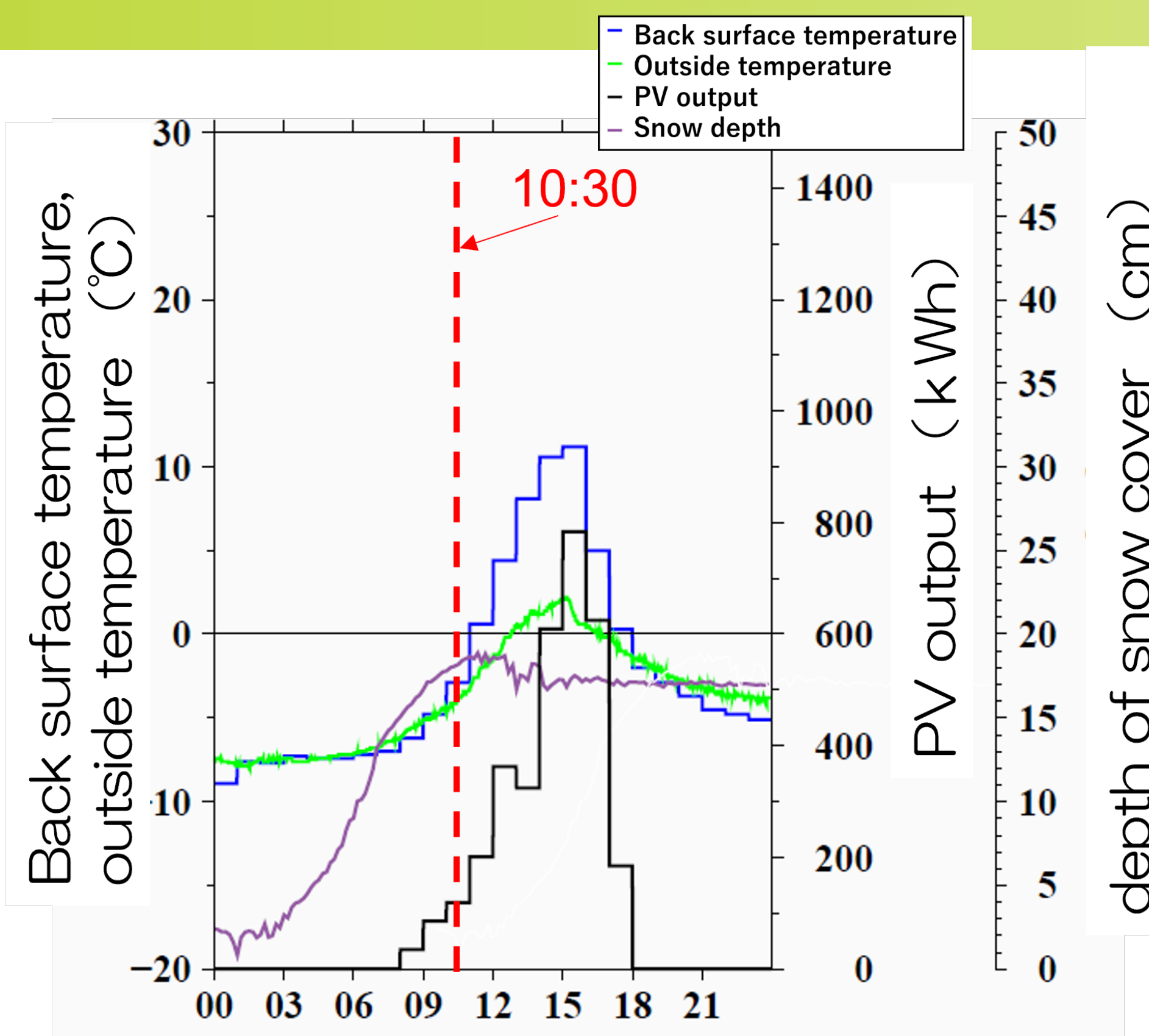


図2. 裏面温度、外気温、PV出力(本サイト合計値)、モニタリングしているPV付近の積雪深さの時系列変化(2022年2月20日)

✓ 図2: 深夜から昼前までに最大18cm積雪。

✓ サイト全体のPV出力が増加するとともに裏面温度も上昇

✓ 気温(temp)は12時過ぎに0度を超えるが、落雪は10時頃から開始。

✓ PV背面を計測した温度(裏面温度; PV temp)は外気温よりも早いタイミングで0°C線を越えている。

※ ただし、裏面温度を計測している場所は、本モニタリングをしているPVシステムとは異なる場所のデータであることに注意。

✓ PVは発電すると熱を帯びることから積雪下部を融解し(水の形成)、融雪落雪を促進する可能性が示唆される。

まとめ

・2022年1月末から気象観測、積雪モニタリングを開始し、2~3月中に複数の積雪イベントを確認

・積雪が多い場合、少ない場合などいくつかの積雪イベントがあった

・積雪が多い場合は、PVシステムの下部の積雪が落雪したあと、上部から下部にかけて全層雪崩のように落雪が発生

・PV出力と裏面温度の相関性

・発電が開始されると太陽光発電システムの裏面温度が上昇 ⇒ 融解、落雪の促進

今後の予定

2023年冬の観測を継続し、PV積雪事例の蓄積を行うとともに積雪を加味した発電出力の予測の開発を進める。

参考文献

- [1] Perovich, 2007, J. Glaciol., Vol.53, pp.201-211.
- [2] Marison et al, 2013, Solar Energy, Vol.97, pp.112-121.
- [3] Hayibo et al. 2022, Renewable Energy, 193, 657-668

謝辞

本研究は科研費・基盤研究B「太陽光発電システム上の積雪動態の解明と予測への展開」(研究課題 21H01873, 2021-2023年度)に置いて実施されている。また、本研究の一部は環境省地球環境保全試験研究費(MLIT2253)の助成を受けている。計測には、北海道電力総合研究所、ほくでんエコエナジー株式会社に協力を頂いた。また、北海道池田町役場よりメガソーラーサイトでの観測の許可を頂いた。

「北海道における太陽光発電システム上の積雪モニタリング」

大竹秀明^{1, 3}、大関崇¹、今井正堯²、庭野匡思³、小野耕介³

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 京都産業大学、3 気象研究所

1. 背景

太陽光発電(以下、PV)の出力予測を活用した電力需給の運用がなされている。冬季は PV システム上に雪が積もることがある。その場合、数値予報技術により日射量の予測が精度良く行えたとしても、積雪により日射が遮断され、PV の出力が十分に得られず、電力の需要と供給のバランスを維持させることが難しくなる。そのため、PV システム上の積雪を考慮した太陽光発電の出力予測技術が求められている。

2. 積雪モニタリング

本研究では、科研費・基盤研究 B「太陽光発電システム上の積雪動態の解明と予測への展開」(代表:大竹秀明)において、実際に PV システム上の積雪のモニタリングを行い、雪がどのように積り、落雪するのか、一連の積雪の動態を明らかにすることを目的としている。2022 年1月末より、ほくでんエコエナジー株式会社が運営する「ワインの里池田ソーラー発電所」(北海道中川郡池田町 出力:1,500kW)の設備の一角で、気象センサー、積雪深、可視・赤外カメラ等を設置し、PV システム上の積雪動態の冬季連続観測を開始した。

図1は 2022 年 2 月 20 日の積雪イベント時の(左)可視画像、(右)赤外画像で 10:00~10:30 の 10 分毎の画像を示したものである。この日は三陸沖に低気圧があり、道東エリアでは南~東寄りの風が入りやすく、広域で降雪があった事例である。本観測サイトでも最大 18cmの積雪が観測された。可視画像から、10:00

に PV システム下部で一部の落雪が確認されたのち、PV システムの下部で一気に落雪が進む(10:10 頃)。その後、PV システム上部の積雪が全層雪崩のような滑雪が発生し(10:30 頃)、徐々に滑雪が継続する様子が確認された。赤外画像から落雪が発生した箇所では PV システムの表面が露出し、積雪面に比べて比較的温度が高くなっている様子が確認された。積雪が落ちるタイミングを予測することができれば、落雪により太陽光発電の出力がいつ高くなるのか予測することができる。

今後は、積雪イベントの観測を継続し、積雪イベントの事例の蓄積をするとともに、メガソーラーサイトの発電出力データ、外気温や PV 温度データ等の比較を進め、落雪を誘発する要因について分析を進める予定である。

謝辞 本研究は科研費・基盤研究 B「太陽光発電システム上の積雪動態の解明と予測への展開」(研究課題 21H01873.2021-2023 年度)に置いて実施されている。計測には、北海道電力総合研究所、ほくでんエコエナジー株式会社に協力を頂いた。

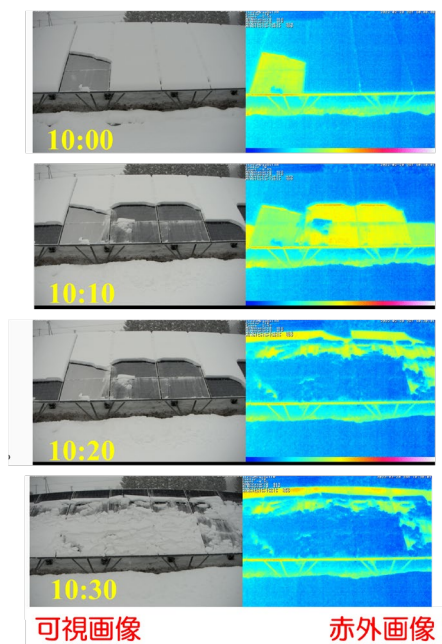
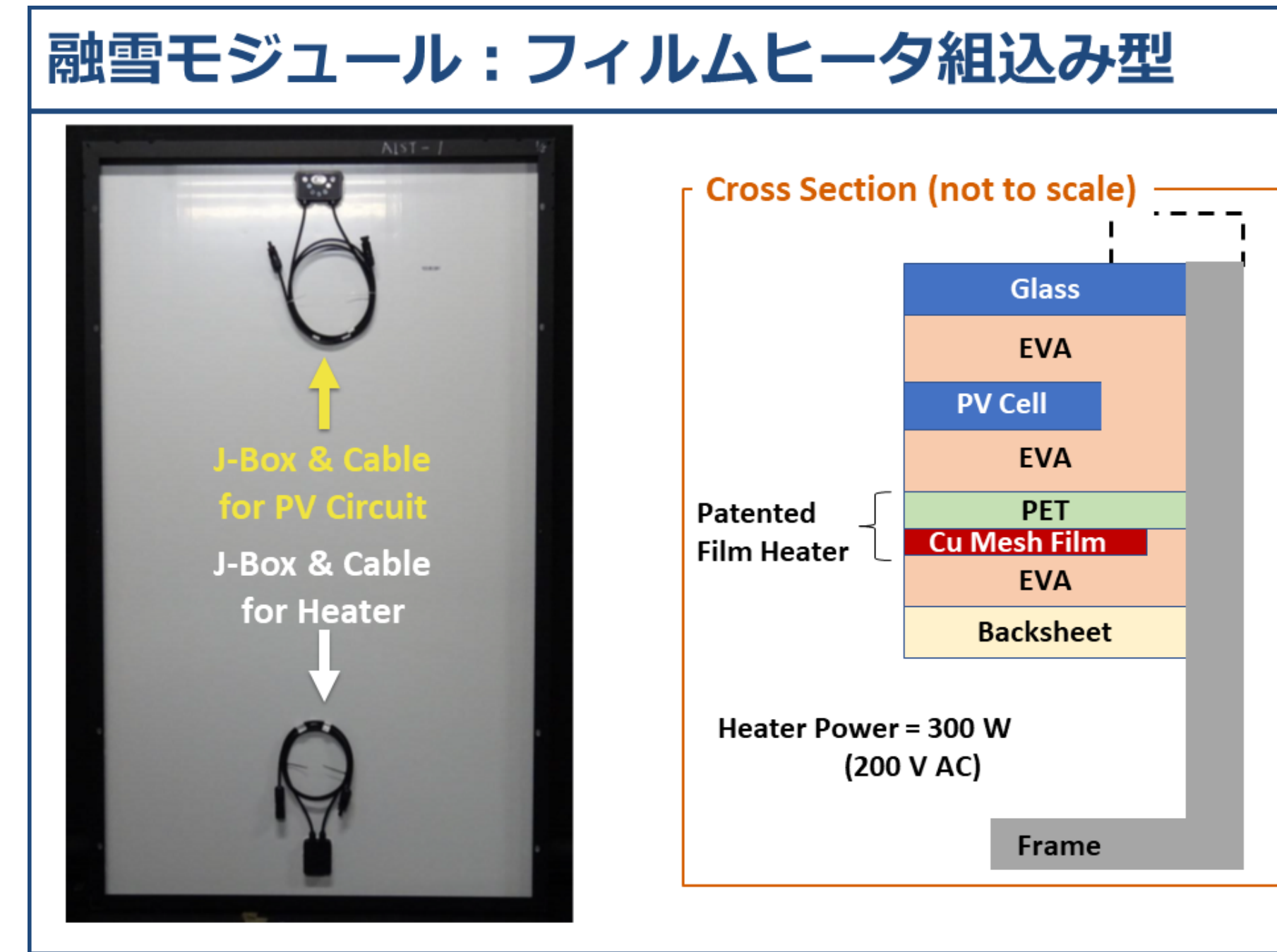
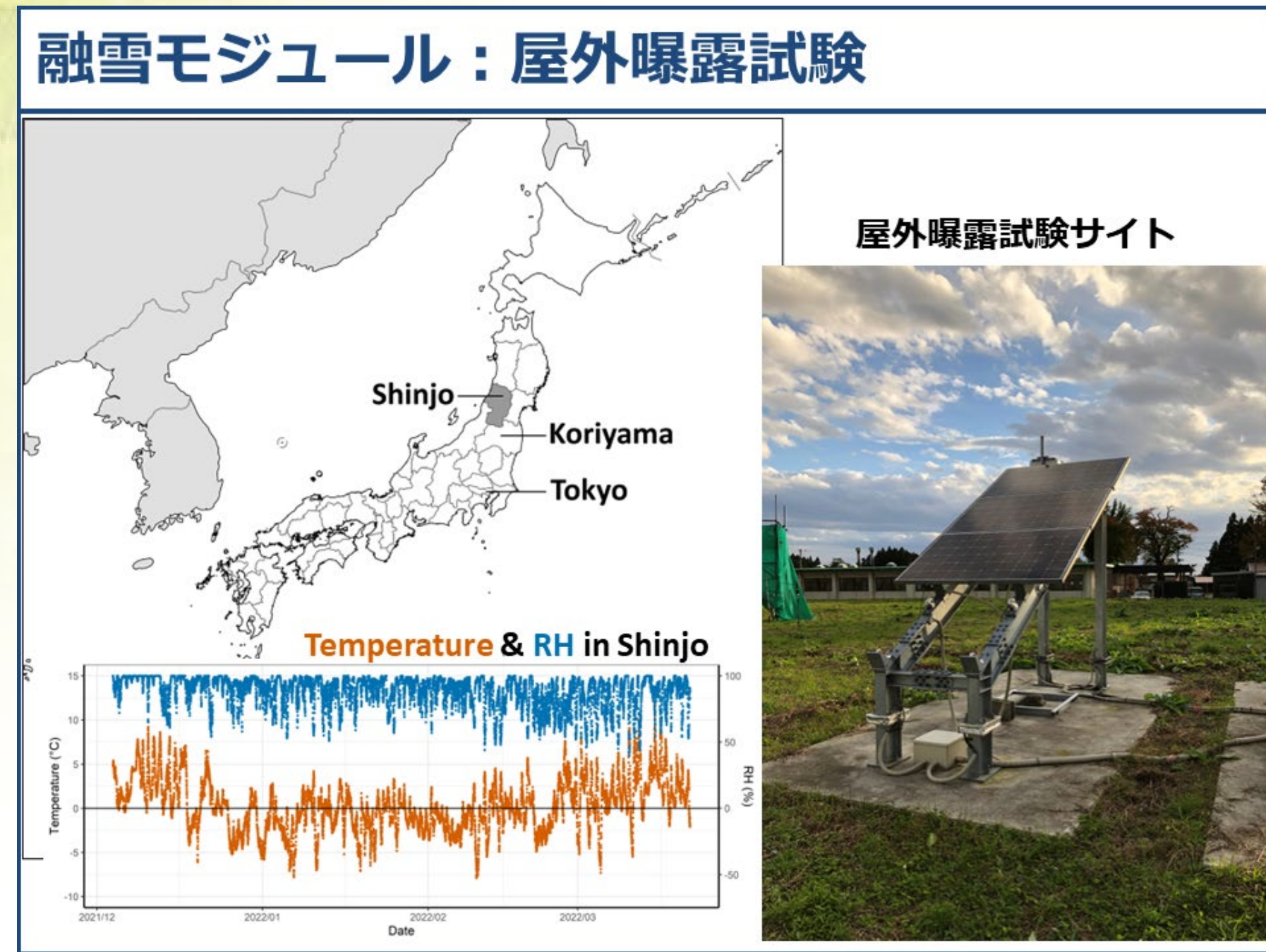
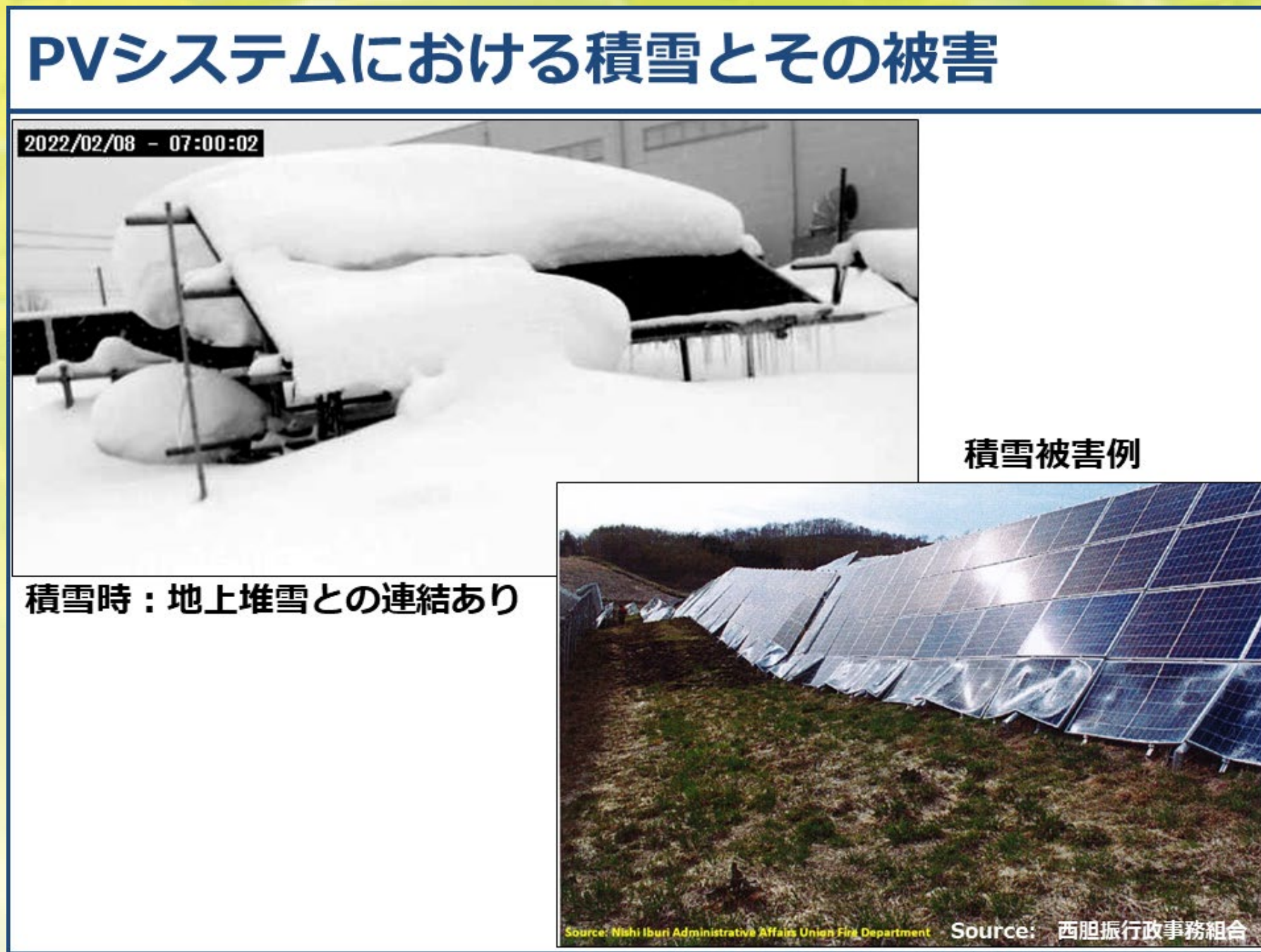


図1. 2022 年 2 月 20 日の積雪イベントの観測事例。

融雪型太陽電池モジュールにおける融雪時モジュール温度特性

棚橋 紀悟・津野 裕紀・池田 一昭・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

背景・屋外曝露試験

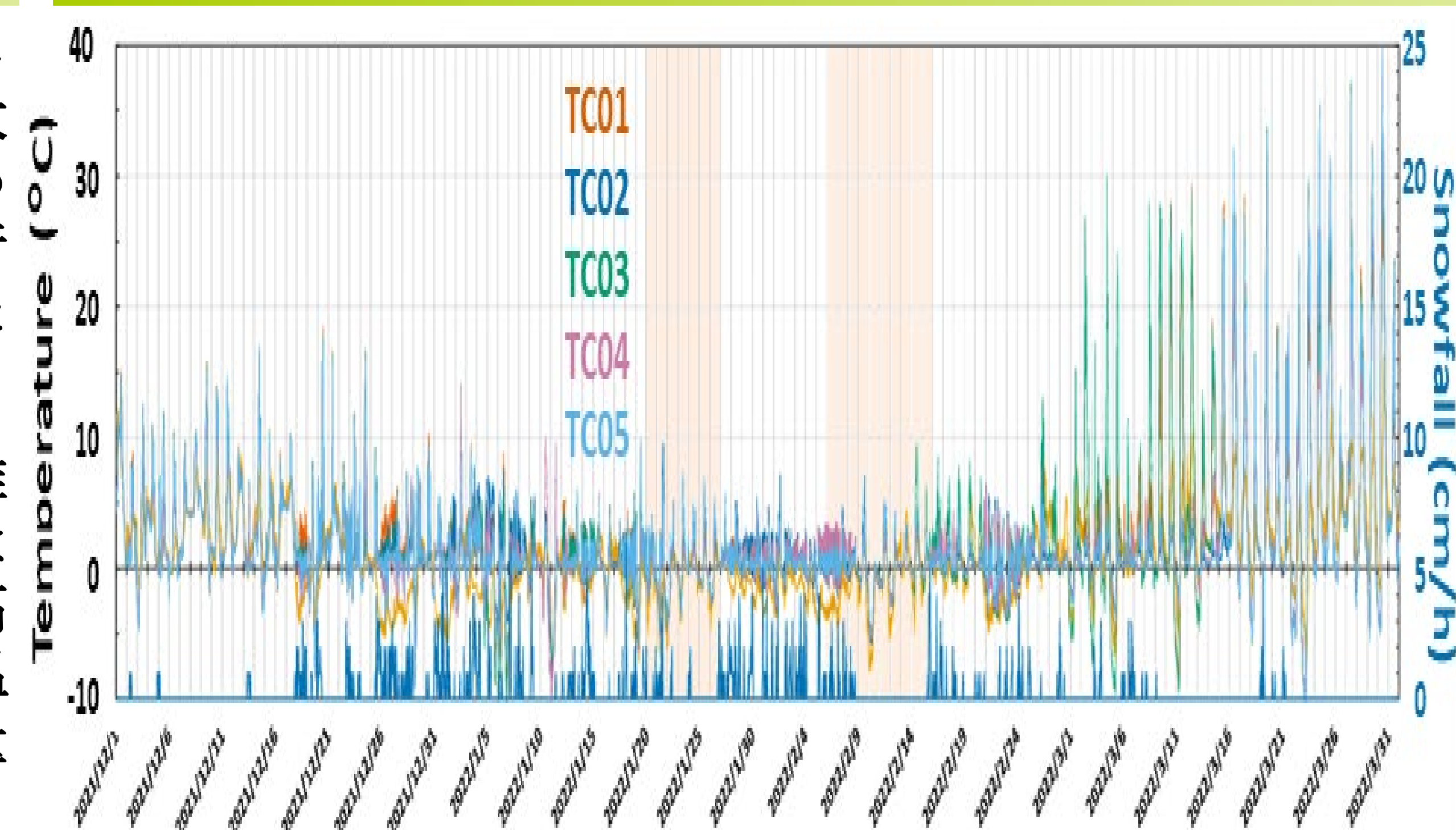


結論

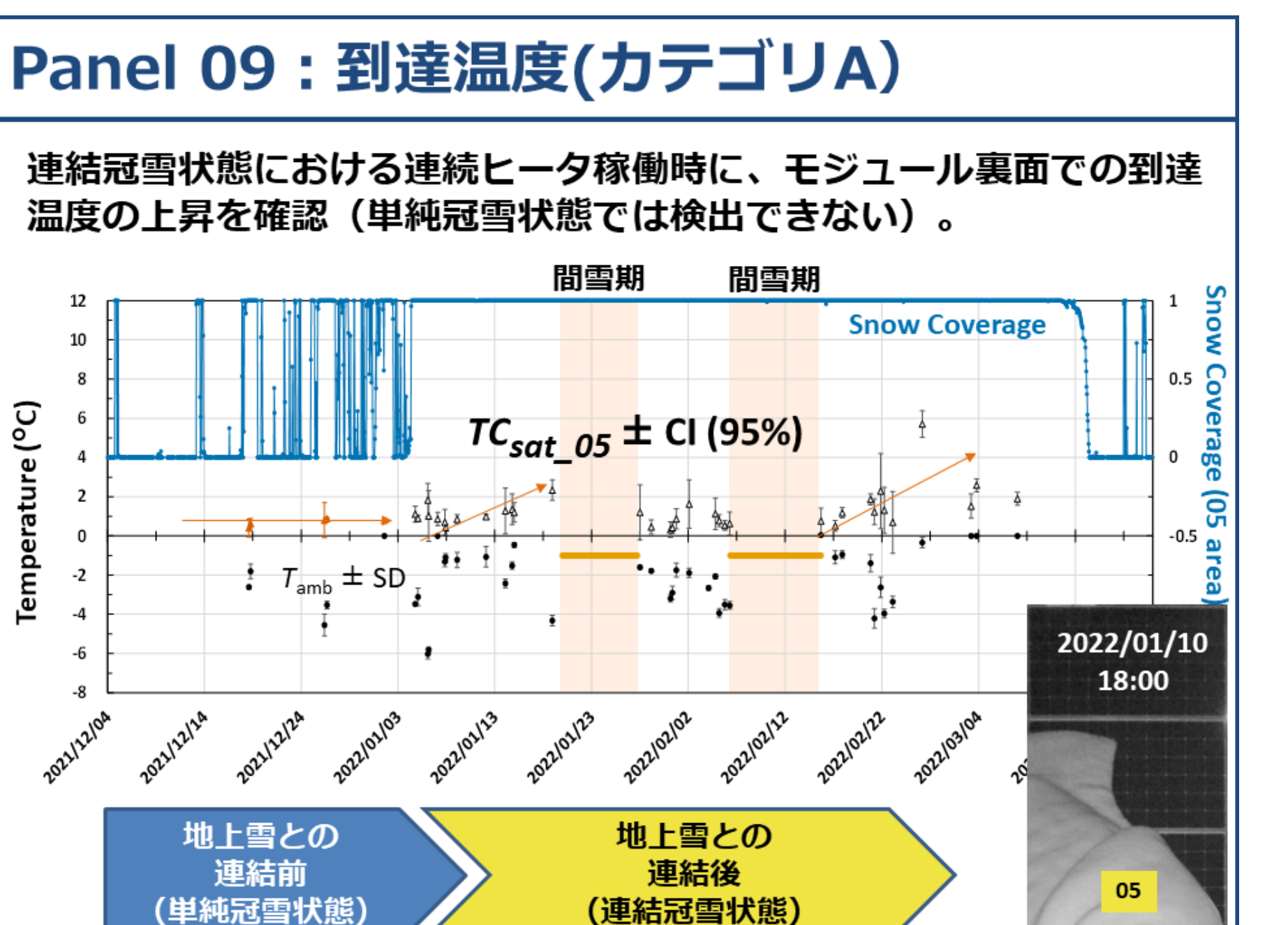
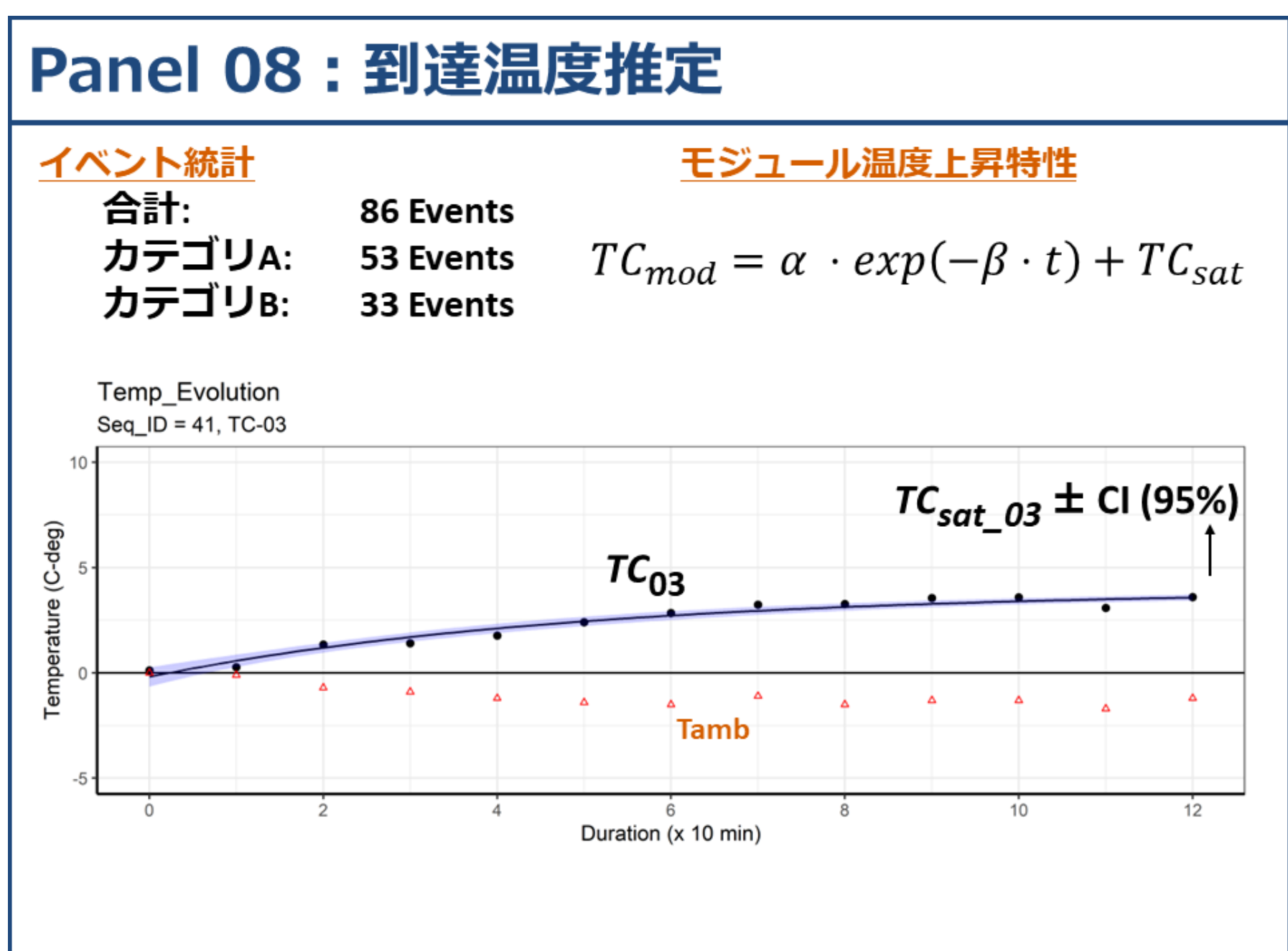
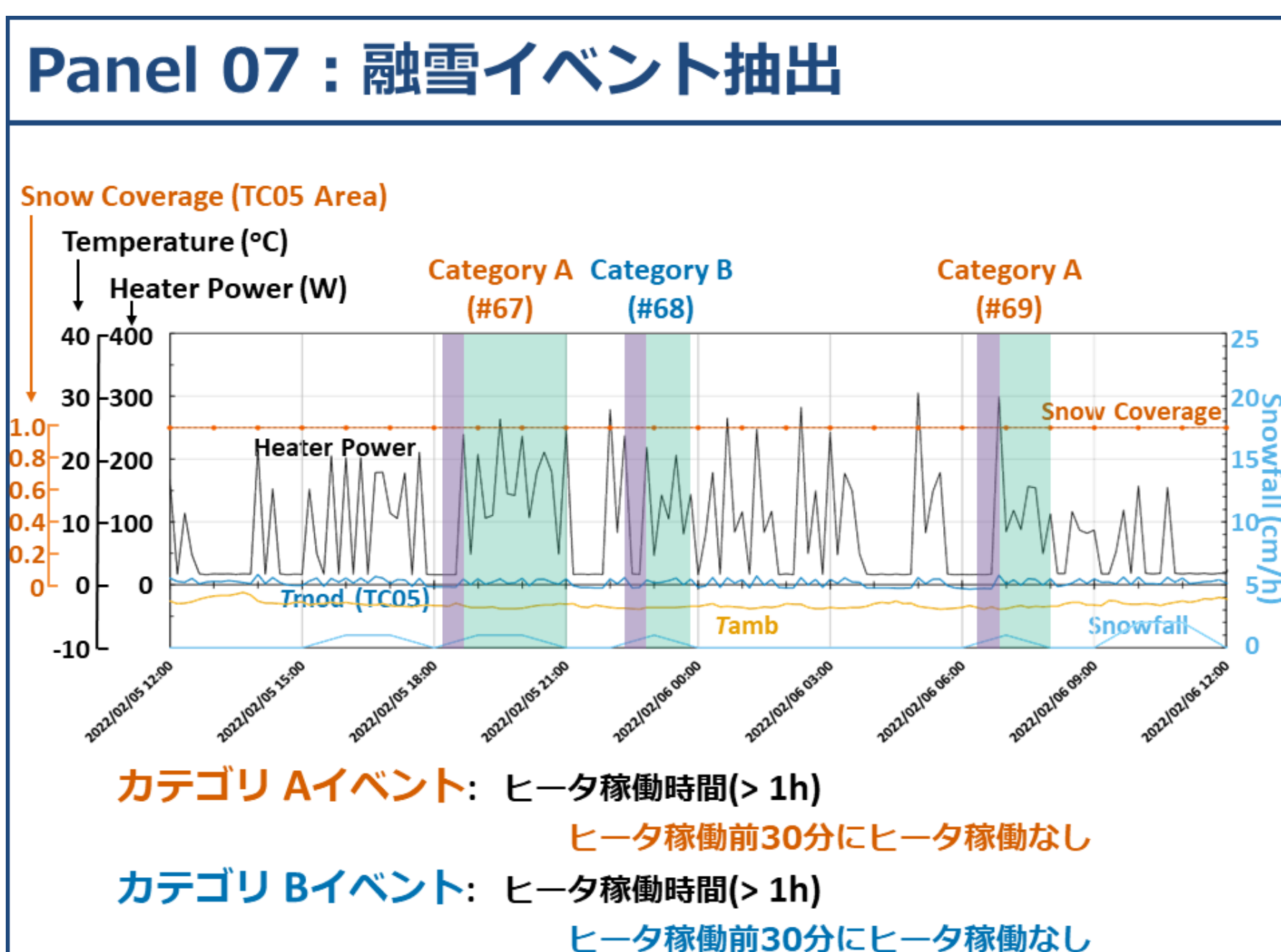
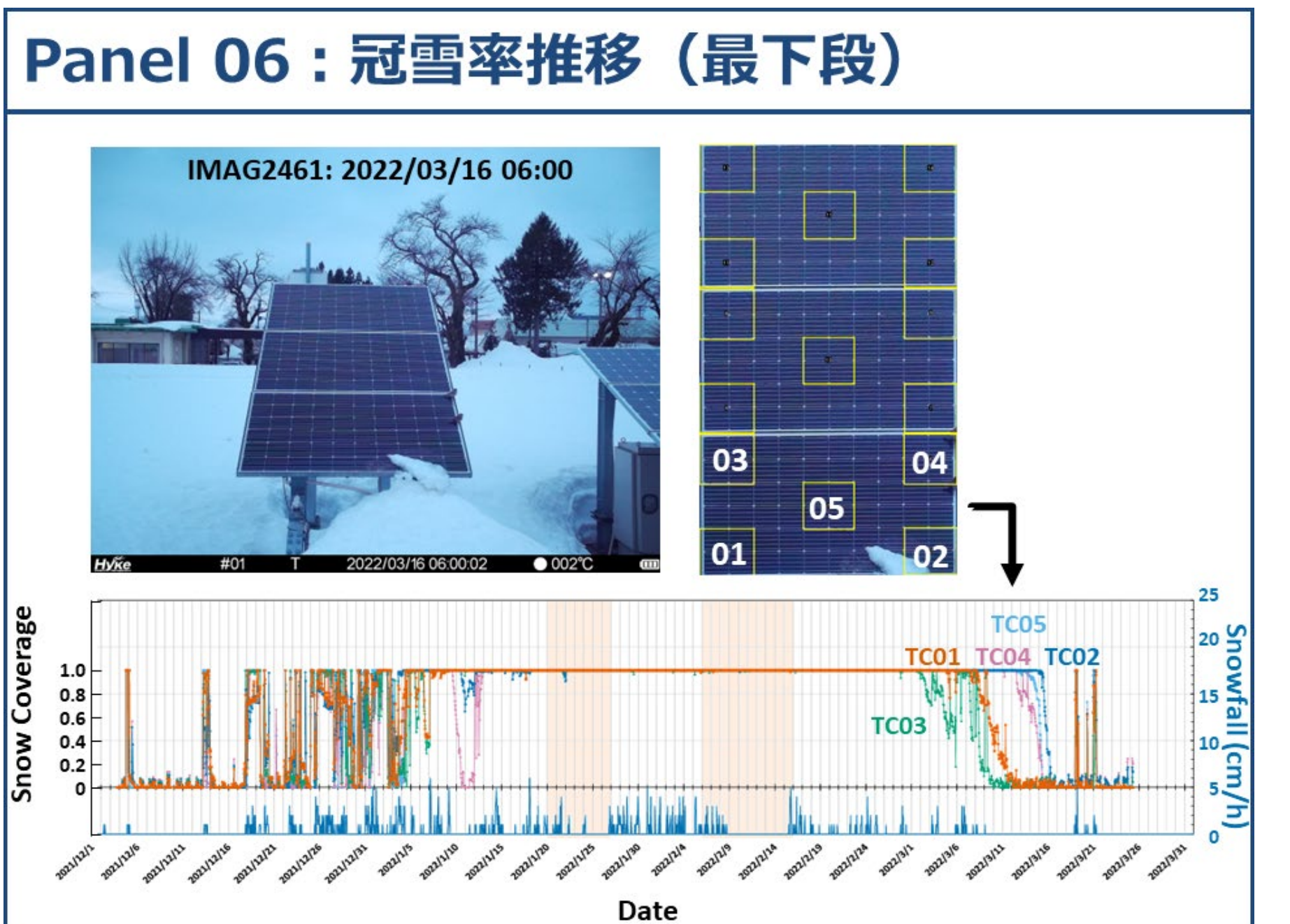
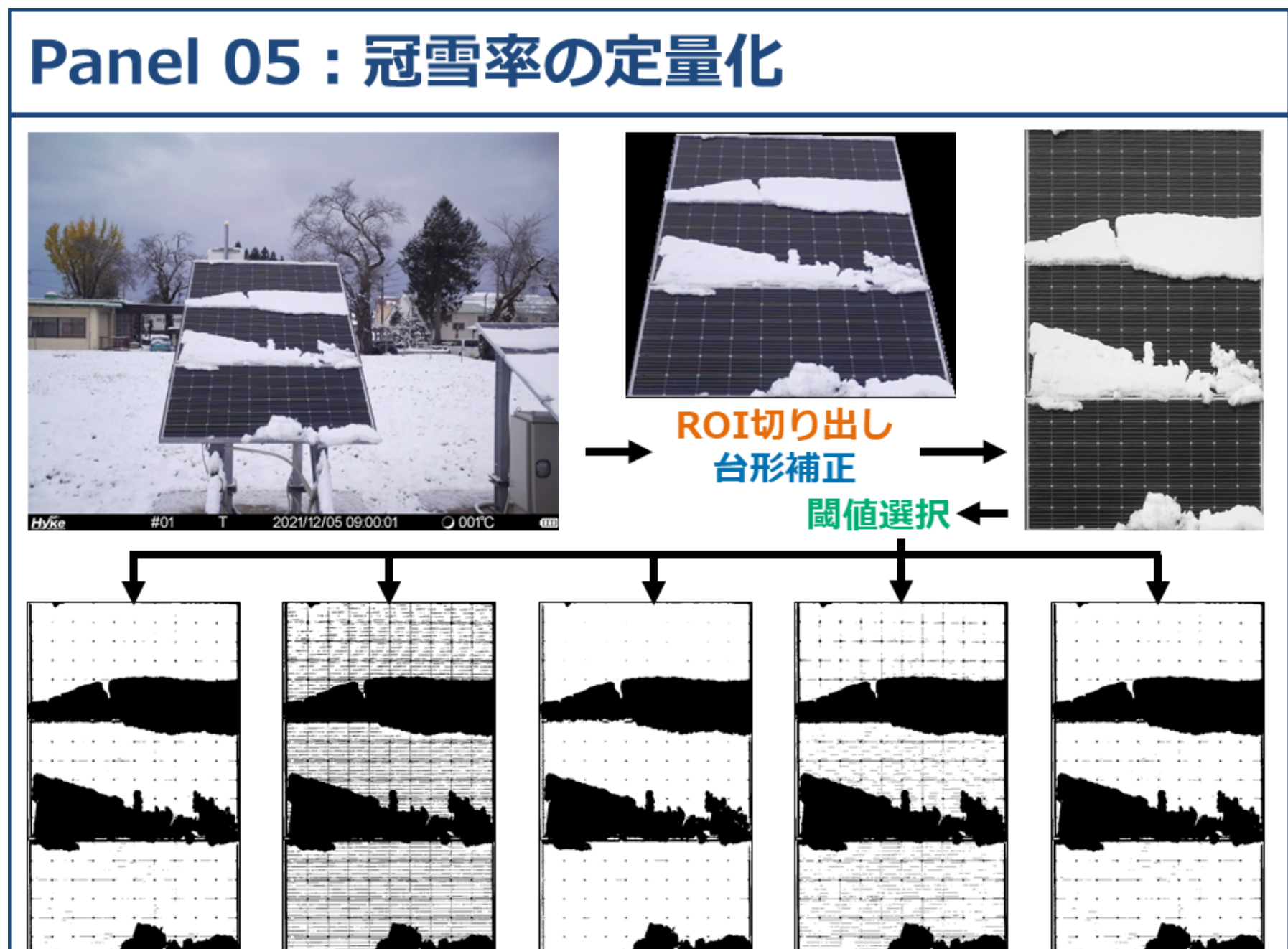
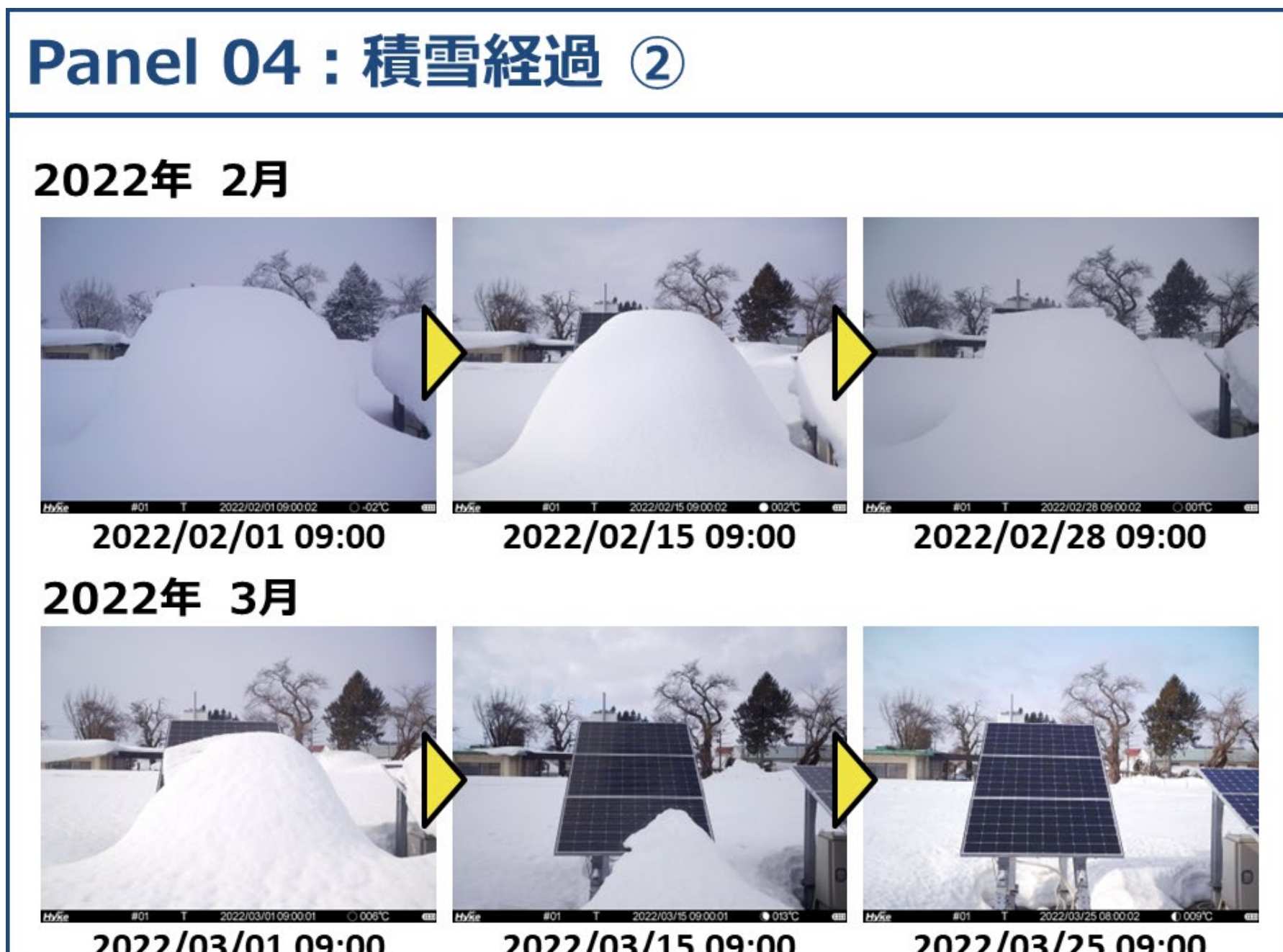
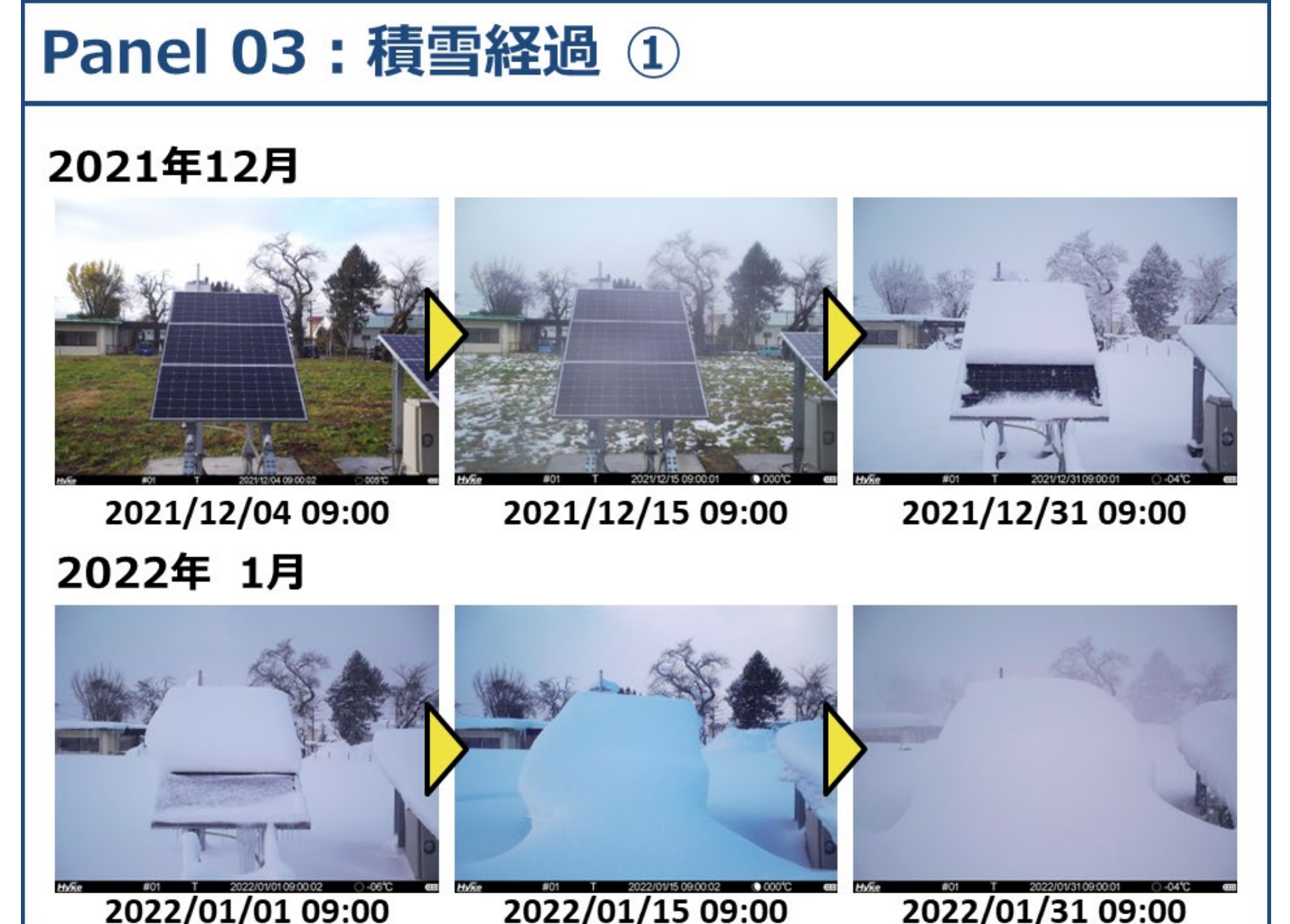
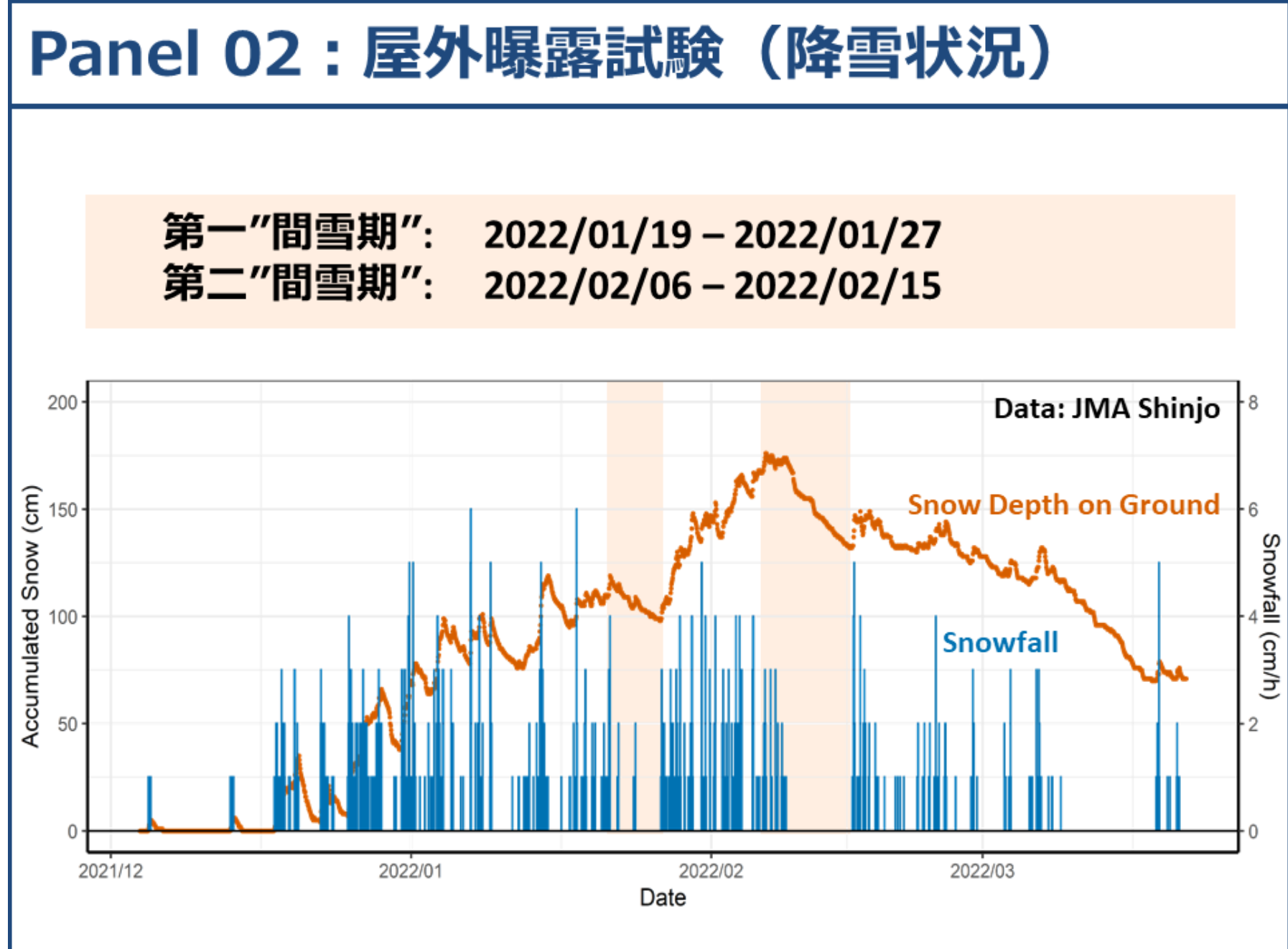
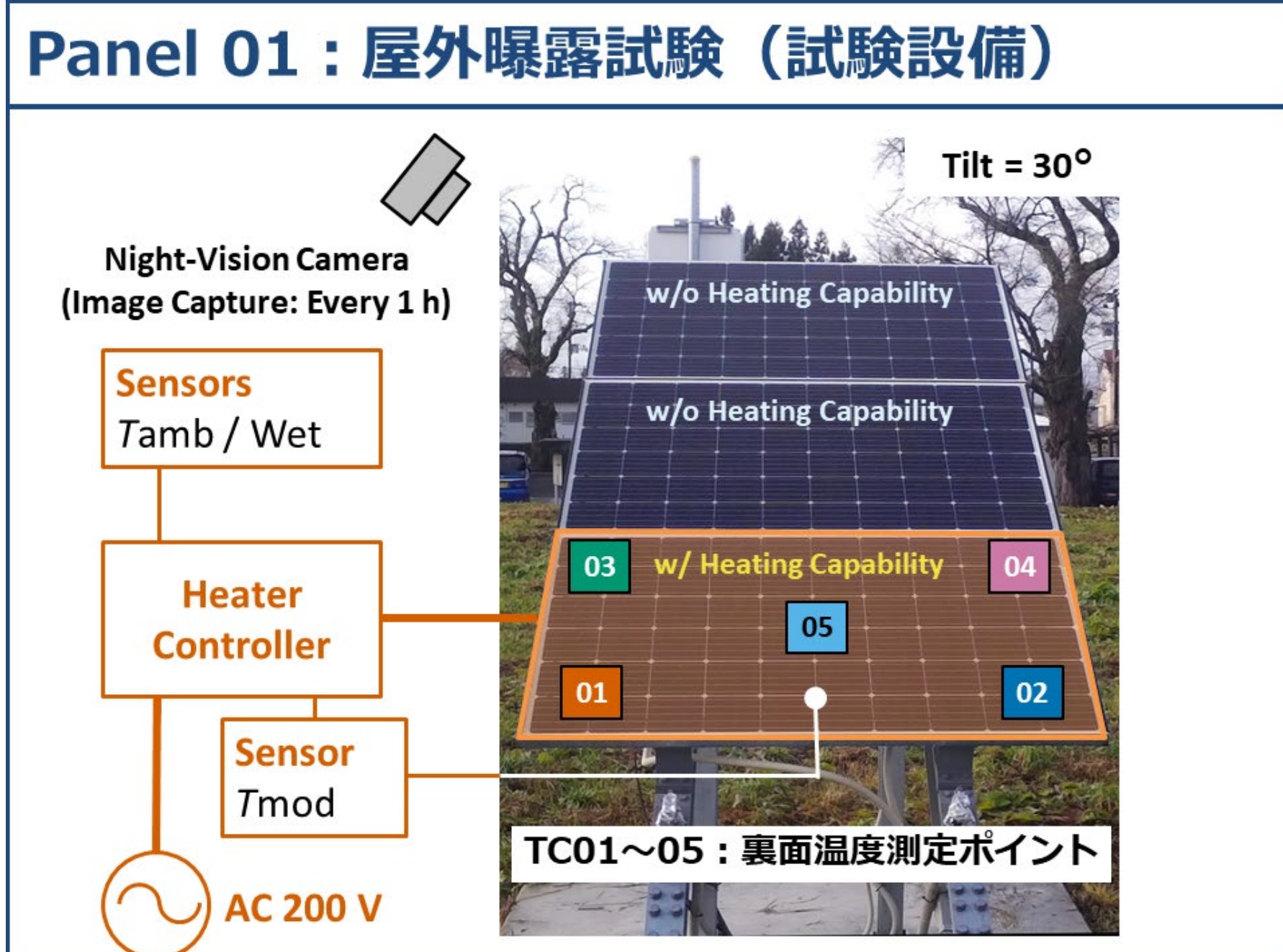
深雪地域に設置されたPVシステムでは、積雪による大きな荷重により深刻な破壊が生じる場合がある。特に、地上積雪とPVモジュール上の積雪が連結した場合には、さらに大きな荷重が負荷され、被害が拡大する場合もある。この被害を回避する方法を探るため、山形県新庄市に設置したPVモジュールにおいて、内蔵ヒータにより積雪時に融雪を行い（Panel 01）、5地点のPVモジュール裏面温度（右図）およびヒータ出力を記録した。同時に、連続撮影によりPVモジュールの冠雪状況を把握した（Panels 03 - 06）。

収集した記録から1時間以上の連続加熱イベントを抽出し、その際のモジュール温度推移を確認した（Panels 07 - 08）。その結果、地上積雪との連結がない単純積雪状態では、加熱時でも1°C程度までの昇温に留まった（Panel 09）。一方、PVモジュール上に高く積雪し、かつ地上積雪と連結した状態では、経過時間の増大にともないモジュール温度の大きな上昇がみられた（Panel 09）。これは、積雪層-モジュール界面が低熱容量物質（空気など）に変化したことを示唆しており、積雪荷重の低減効果が期待できた。

融雪モジュール裏面温度（FY2021）



結果



本検討にあたり、多大な議論・サポートいただきました北海道科学大学：千葉教授・防災科学技術研究所：安達博士に深謝申し上げます。

太陽光発電のHeadroom制御の実証実験

大関崇¹、高松尚宏¹、中島虹¹、大竹秀明¹、橋本潤¹、大谷謙仁¹、
植田譲²、大場健史³、志賀慶明³

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東京理科大学、3東芝エネルギーシステムズ

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と。
- 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 ΔkW)のマナイズを実現する必要があり、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(ΔkW 価値)を創出する技術の有効性を示すことを目的とした。

推定方法の概要

- Headroom制御について、実際のPVシステムを利用した基礎的な実験を行った。
- 産業技術総合研究所(郡山)に設置しているDC250kW/AC250kWのシステムを利用した。
- 実証するシステムは、PVアレイに設置された太陽電池式日射計による日射データ収集装置、日射データを利用して期待発電電力を推定する装置、期待発電電力に対して確保するHeadroomの比率(ΔP)により制御可能なPCSにより構成する。
- また、計画値同時同量を模擬して指令値が検討可能なシステムの構築を行った。

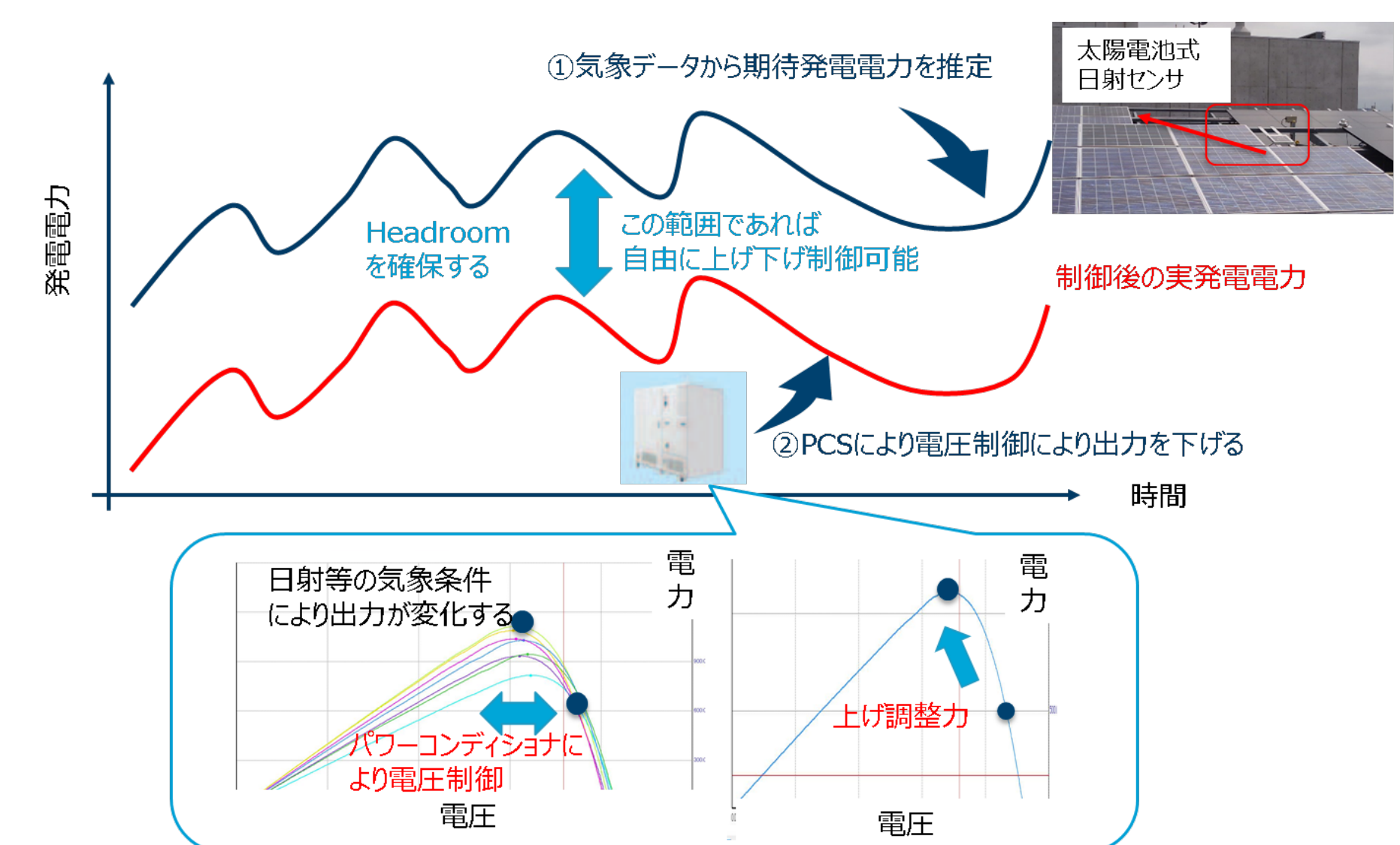
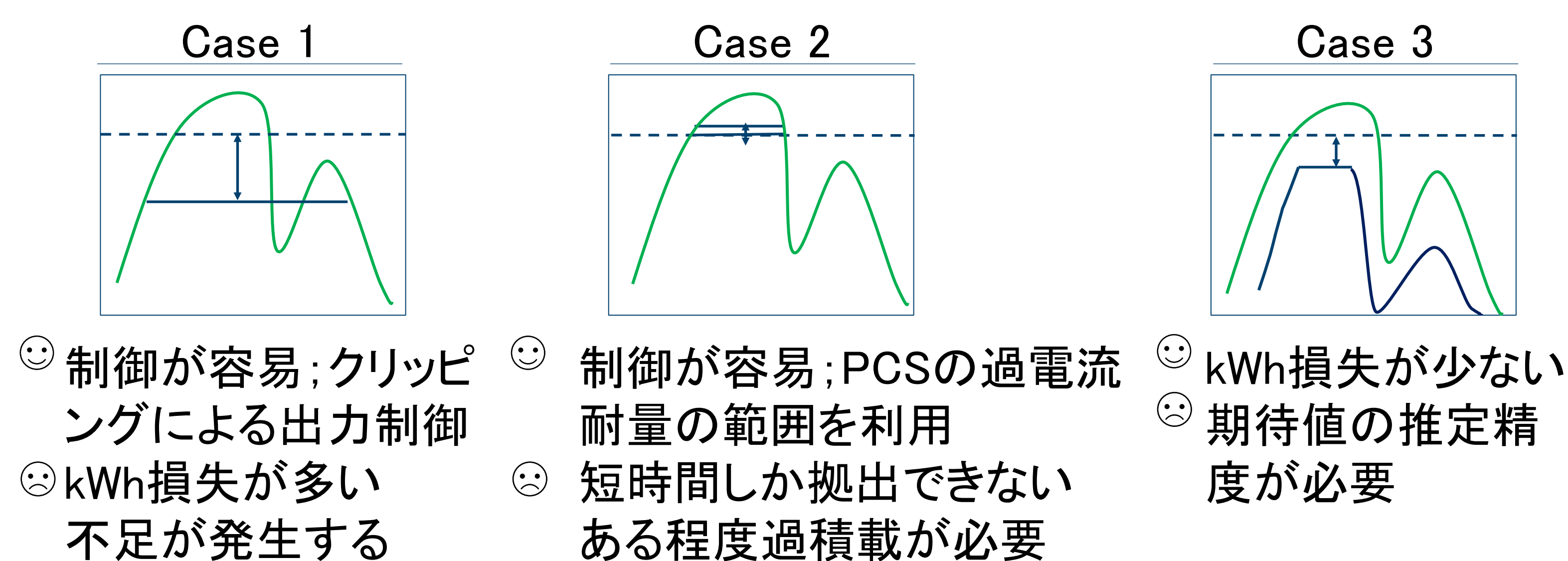


図 Headroom制御概要

結果概要

期待発電電力の推定方法:

- リアルタイムの日射計測からの単純回帰式の検討
- 1日前までのデータを利用して式を検討
- 1~30日までのデータを利用した場合の検討
- 単純回帰: $EP = a \cdot HA_g^2 + b \cdot HA_g$
EP: 期待発電電力、 HA_g : 傾斜面日射強度

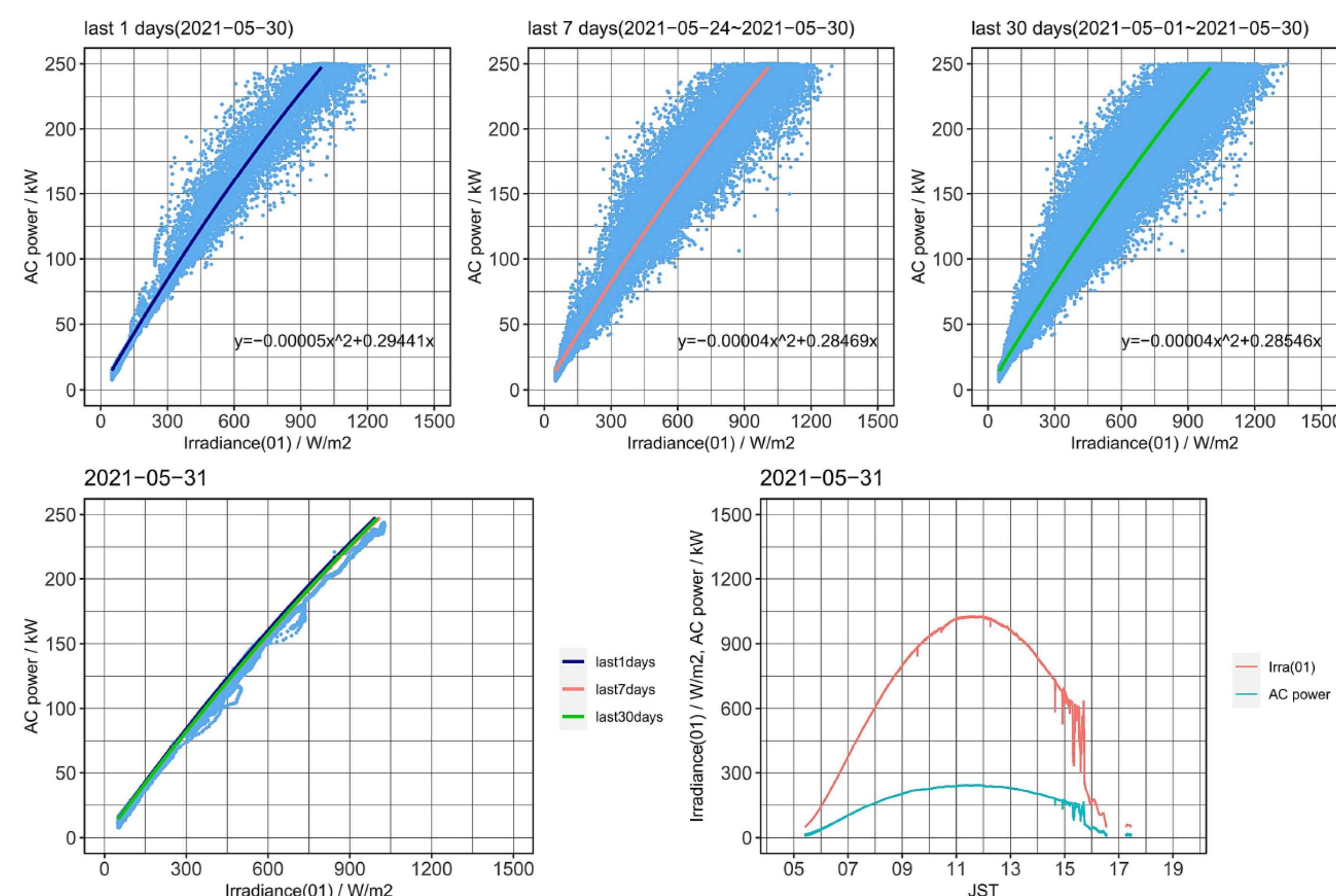


図 期待発電電力の推定例

実験結果概要:

- Headroom指令を行ったデータの例を示す(Fig.1)。日射から期待発電の推定は簡易的な多項式とした。2022/08/19~08/22 10:00~15:00において、前半30分: Headroom制御、後半30分をフルパワーとして実験を行った。快晴日以外ではばらつきも多く想定Headroomが確保できない時間帯もあった

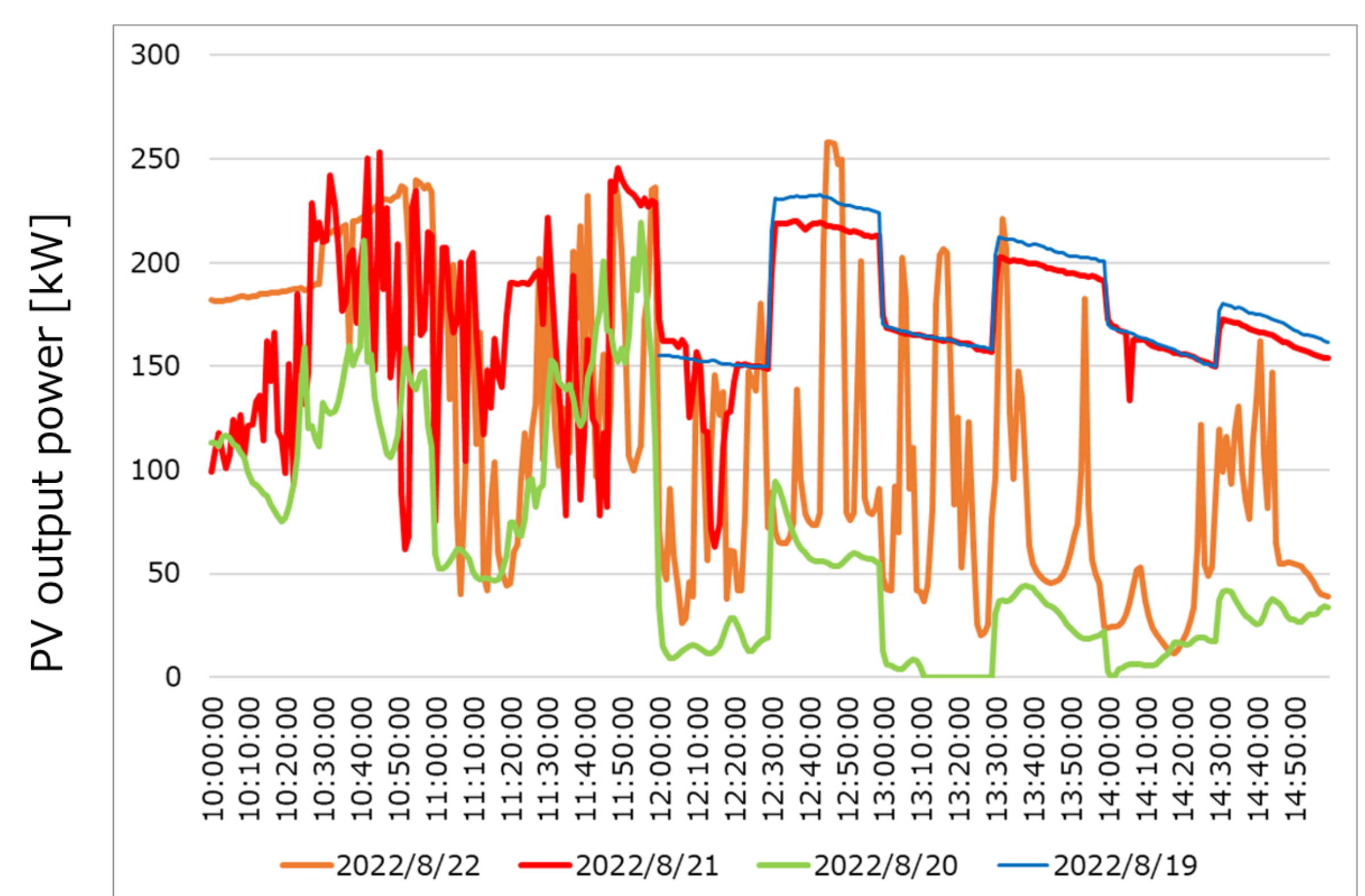


図 Headroom制御の実験結果例

謝辞: 本研究, 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)「太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の長期安定電源化技術開発/系統影響緩和に資する技術課題の検討及び実証(太陽光発電による調整力創出技術の実証研究)」の結果得られたものである。

PV発電予測誤差吸収のためのHeadroom制御

Headroom Control for PV Power Generation Prediction Error Absorption

崔 錦丹¹、界 波¹、方 雪¹、大関 崇²、植田 譲¹

1 東京理科大学

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

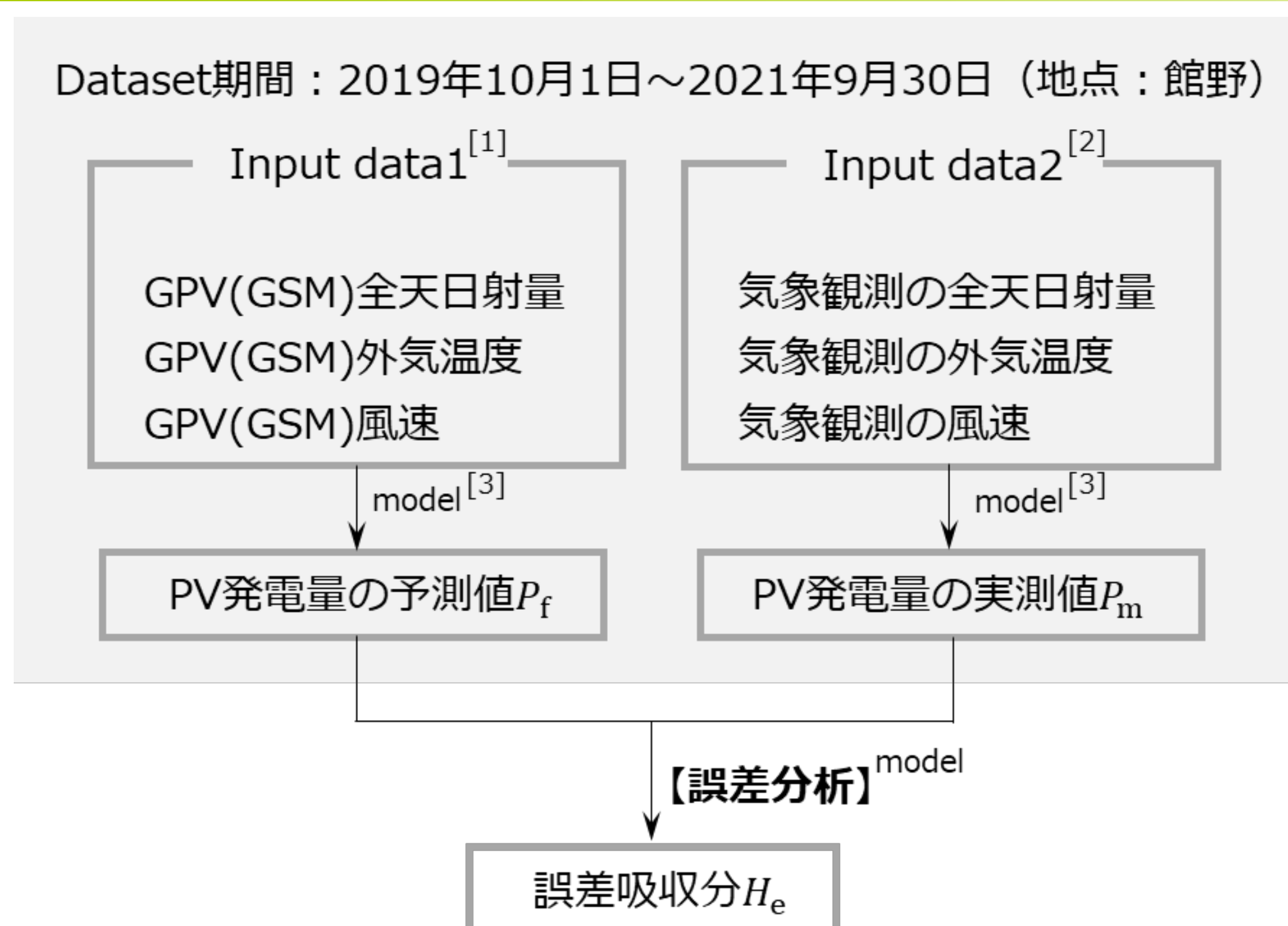
研究の目的

- 再生可能エネルギー(再エネ)の導入促進には発電事業者の利益を考慮しなければならないため、エネルギー価値や環境価値など以外の価値を検討する必要がある。
- 太陽光発電所を対象に前日スポット市場へエネルギー価値の計画値 P_p を供出するとともに、Headroom確保より需給調整市場へ上げ調整力の計画値 H_r の創出を検討する。
- 当日インバランスが生じない計画を立てるためHeadroomに予測誤差吸収分 H_e を考慮しなければならない。
- 過去のデータよりPV発電予測値の誤差分析を行い、誤差吸収分のHeadroom H_e を決める。

提案手法

- Step1** : 過去のPV発電量の0.01kW単位 ($\pm 1\%$ 誤差) で予測誤差($e = P_f - P_m$)の最大値・最小値・平均値を算出する。
- 四分位範囲の1.5倍を外れ値として除外し、頂点を基準に分けて近似曲線(過大誤差と過小誤差限界ライン)を求める。
- Step2** : 近似曲線を用いてテスト期間の最大過大予測誤差 e_1 と最大過小予測誤差 e_2 、 e_2 適用時の最大予測補正值と e_1 適用時の最小予測補正值を求める。
- Step3** : 過大、過小になる確率 ε_1 と ε_2 を求める。
- Step4** : 最大予測誤差、最小予測誤差に過大率、過小率を加味して予測値を修正する。 $H_e = e_1 \times \varepsilon_1 + e_2 \times \varepsilon_2$, $P_{f_rev} = P_f - H_e$

使用データ



- 分析期間: 2019年10月1日~2020年9月30日
- テスト期間: 2020年10月1日~2021年9月30日

結果

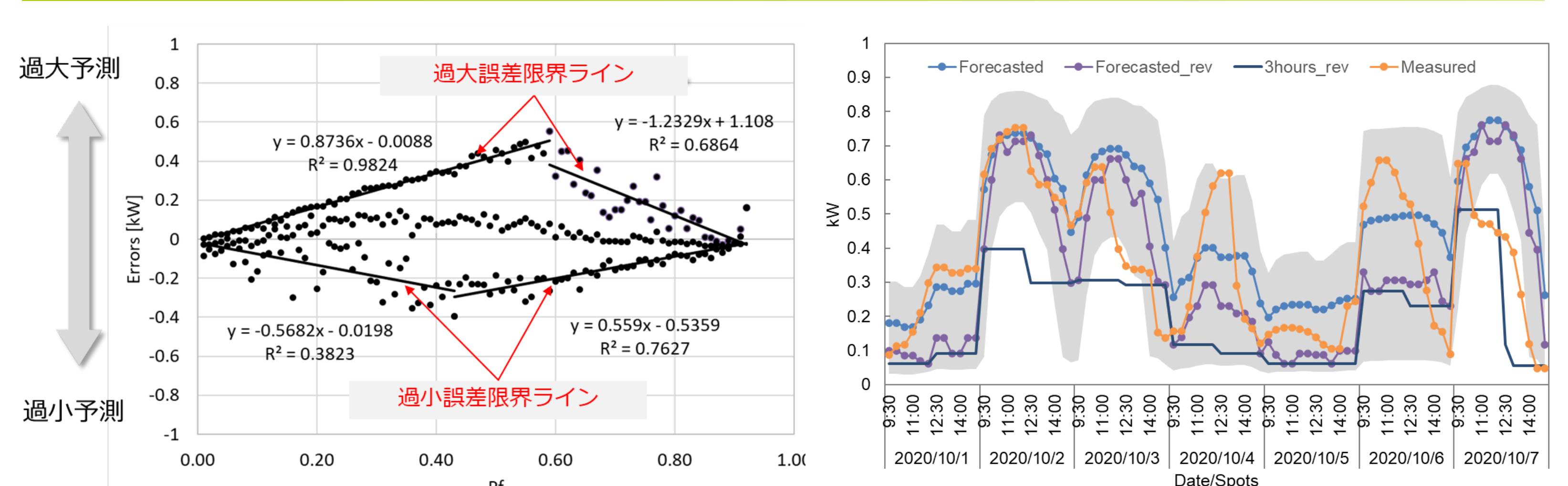


Fig.1 Overestimation and underestimation error limit linear line

Fig.2 PV output of representative days (Oct.1,2020~Oct.10,2020)

- 過大予測と過小予測後半の近似曲線の決定係数(R^2)が非常に高い(Fig. 1)。
- テストデータのほとんどは過去データの最大予測補正值と最小予測補正值の間に入る(Fig.2)。

結果

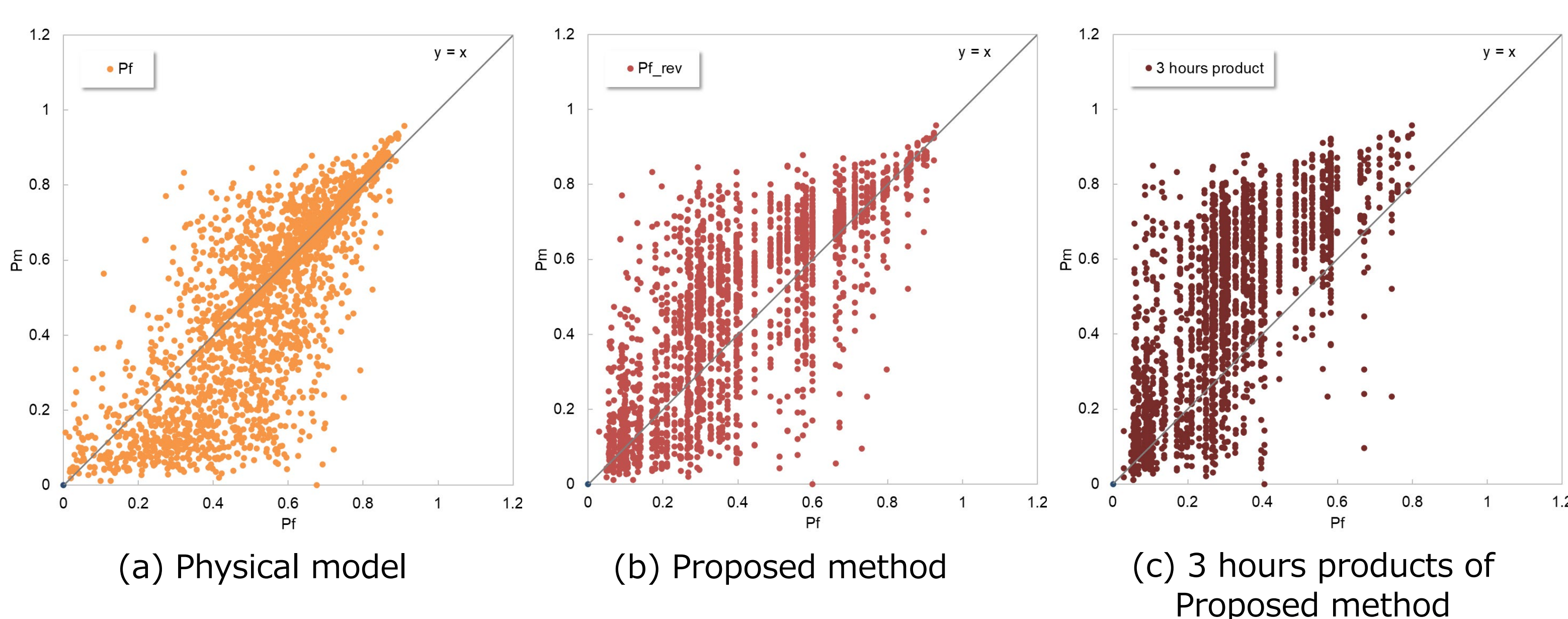


Fig.3 The PV output comparison of forecasted and measured value

考察

- 需給調整市場3次②の継続時間3時間商品への対応の場合、3時間(6コマ)PV予測補正值の最小値を計画値とする。
- 30分で見ると予測誤差が吸収できなかったのが、3時間(6コマ)で見ると吸収できたブロックがある。
- 最後の2コマのインバランスが生じたブロックが見られる。
- 予測の大はずれの時は計画値を大幅に縮小しても誤差が吸収できないブロックが見られる。
- 3時間(6コマ)のPV予測値(補正值)の変化量(ばらつき)の検討が必要と考えられる。

まとめと今後の課題

- 年間(今回の調整力供出時間帯9:00~14:30)で見ると過大予測時が多く、過大予測2570コマに対して過小予測は1807コマであったが、本手法を用いて H_e を確保することで誤差吸収できたのは2814コマ(3時間商品なら3310)、吸収できなかったのは1563コマ(3時間商品なら1067)で大幅に削減できた。
- 今後、機械学習を用いた手法の検討と、誤差吸収が難しい時間帯(コマ)の特徴の分析を行い、調整力の供出可否の検討を行いたい。

謝辞

本研究は、NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の長期安定電源化技術開発/系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証(太陽光発電による調整力創出技術の実証研究)」によるものである。

参考文献

- [1] 気象業務センター: <http://www.jmbsec.or.jp/>
- [2] 気象庁: <http://www.jmbsec.or.jp/jp/>
- [3] 日本太陽エネルギー学会, [改訂] 新太陽エネルギー利用ハンドブック, 2015年10月

Electricity price forecasting method for the JEPX spot market based on ARIMA model

Xue FANG¹, Jindan CUI¹, Jie BO¹, Takashi OOZEKI², Yuzuru UEDA¹

¹ Tokyo University of Science,

² Renewable Energy Research Center, AIST

Background, Purpose and Vision

• Japan's power trades expand in Japan Electric Power Exchange (JEPX) market with the trade volume of the day-ahead spot market increased.

• Feed-In Tariff (FIT) based between household consumers and electricity companies start to expire sequentially from the end of 2019.

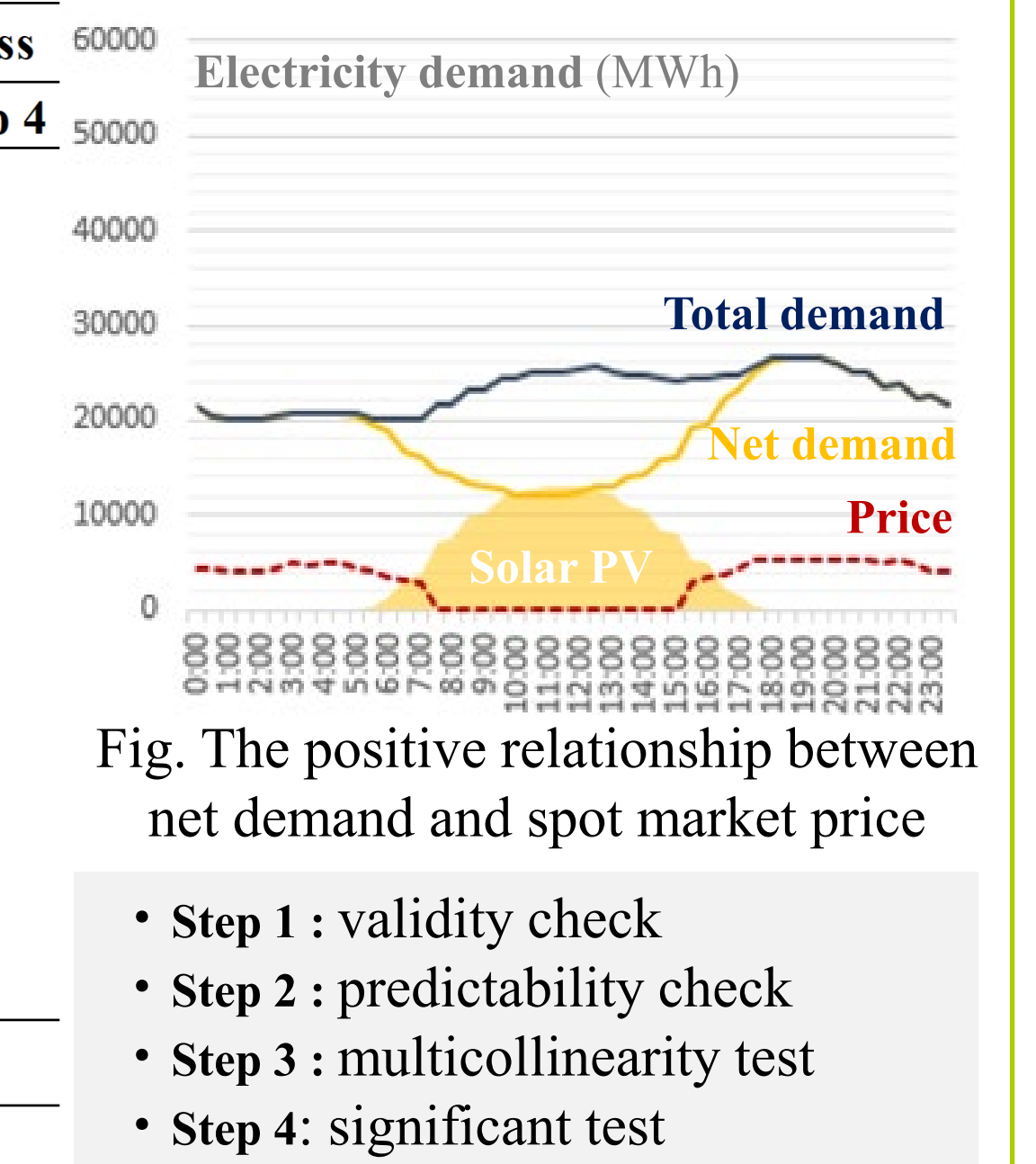
• Japan recorded large increases in solar energy and the growth is on course to accelerate over the coming years.



Predictor Variable Selection

Variable	Variable description	Unit	URL	Variable selection process			
				Step1	Step 2	Step 3	Step 4
D_t	Total demand of electricity	(GWh)	[1]	O	O		
D_n	Net demand for electricity (total demand minus Solar PV power generation)	(GWh)	[1]	O	O	O	O
G_f	Fossil fuel power generation	(GWh)	[1]	O	O	-	-
G_s	Solar photovoltaic power generation	(GWh)	[1]	O	O	-	-
G_h	Hydro power generation	(GWh)	[1]	O	O	O	-
G_p	Pumped-storage hydroelectricity	(GWh)	[1]	O	-	-	-
G_w	Wind power generation	(GWh)	[1]	O	O	O	O
G_n	Nuclear power generation	(GWh)	[1]	-	-	-	-
G_g	Geothermal power generation	(GWh)	[1]	-	-	-	-
G_b	Biomass power generation	(GWh)	[1]	O	-	-	-
E_i	Electricity imports	(GWh)	[1]	O	-	-	-
T	Temperatures	(°C)	[2]	O	O	O	O
W	Wind speed	(m/s)	[2]	O	O	O	-
Y	P_s System price in the JEPX spot market	(yen/kWh)	[3]	-	-	-	-

* The circle symbol (O) means that the variable passed the corresponding selection check or test.



Spot Market Price forecasting Results

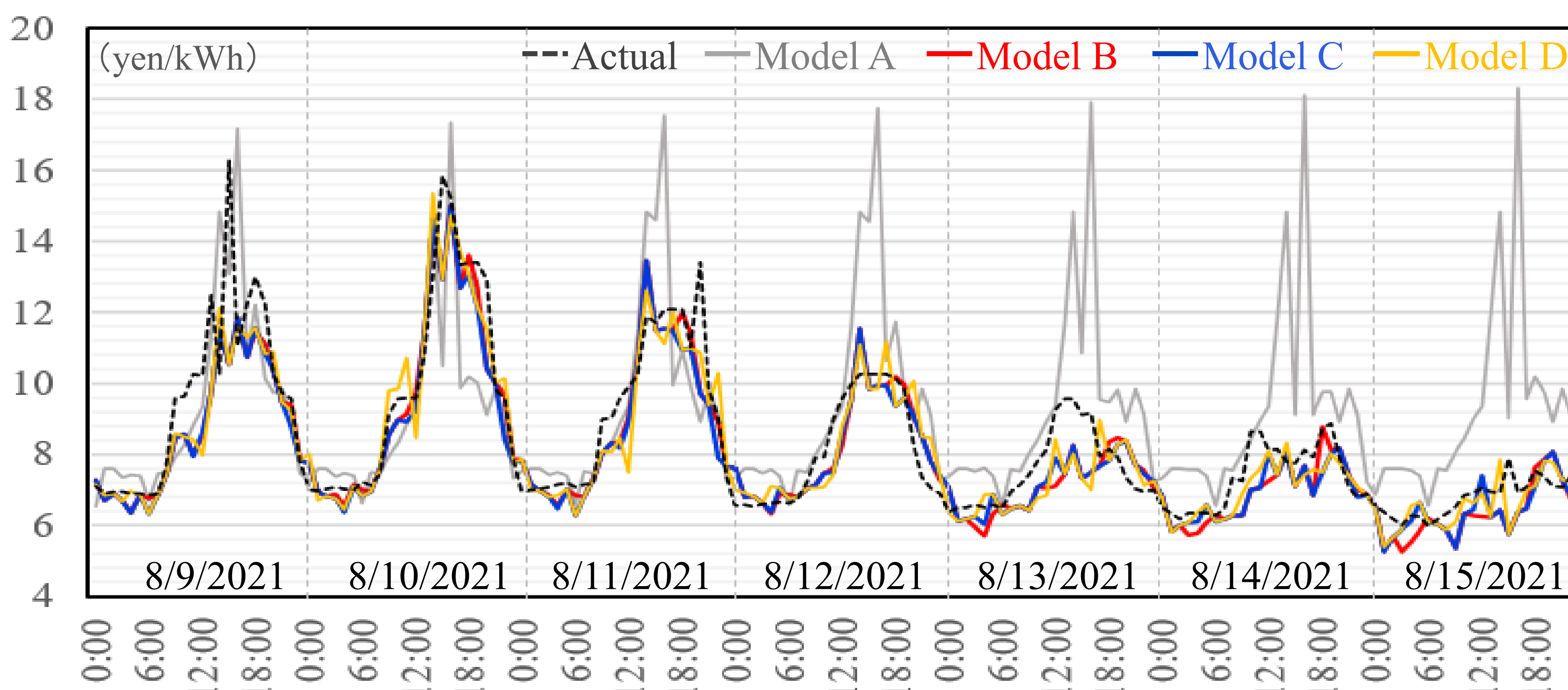


Fig. The actual and predicted prices result for one week

Dataset and Method

- **Study area:** Tokyo area, Japan
- **Time period:** First half of FY2021
 - ① Study time: 4/1/2021~8/8/2021
 - ② Prediction time: 8/9/2021~8/15/2021
- **Data set:** 1-hour data
Actual values (Model validation)
Predict values (Future practical project)
- **Model:** ARIMA
(Autoregressive Integrated Moving Average)
- **Software:** SPSS statistics (28.0)

Performance Evaluation

Model	Dependent variable	Exogenous variables*			Estimation		Evaluation					
		D_n	T	G_w	Over	Under	MSE	RMSE	MAPE	MAE	R^2	Σ z-score**
A	P_s	-	-	-	94.64%	5.36%	5.900	2.429	18.505	1.565	0.847	13.499
B	P_s	O	-	-	54.17%	44.64%	0.976	0.988	7.526	0.668	0.974	3.455
C	P_s	O	O	-	55.95%	42.86%	0.996	0.998	7.724	0.693	0.973	3.586
D	P_s	O	O	O	54.76%	44.05%	0.971	0.986	7.489	0.675	0.974	3.460

Note: * P_s (yen/kWh) means the system price in the JEPX spot market. D_n (GWh) means the net demand for electricity (total demand minus Solar PV power generation). T (°C) means the average temperature in Tokyo Metropolitan. G_w (GWh) means wind power generation. The circle symbol "O" means that the exogenous variable is used in the model. ** Σ z-score is the sum of standardized scores (between 0 and 2) of five evaluation results, where the R^2 scores took a negative value. A smaller Σ z-score means a better fit model.

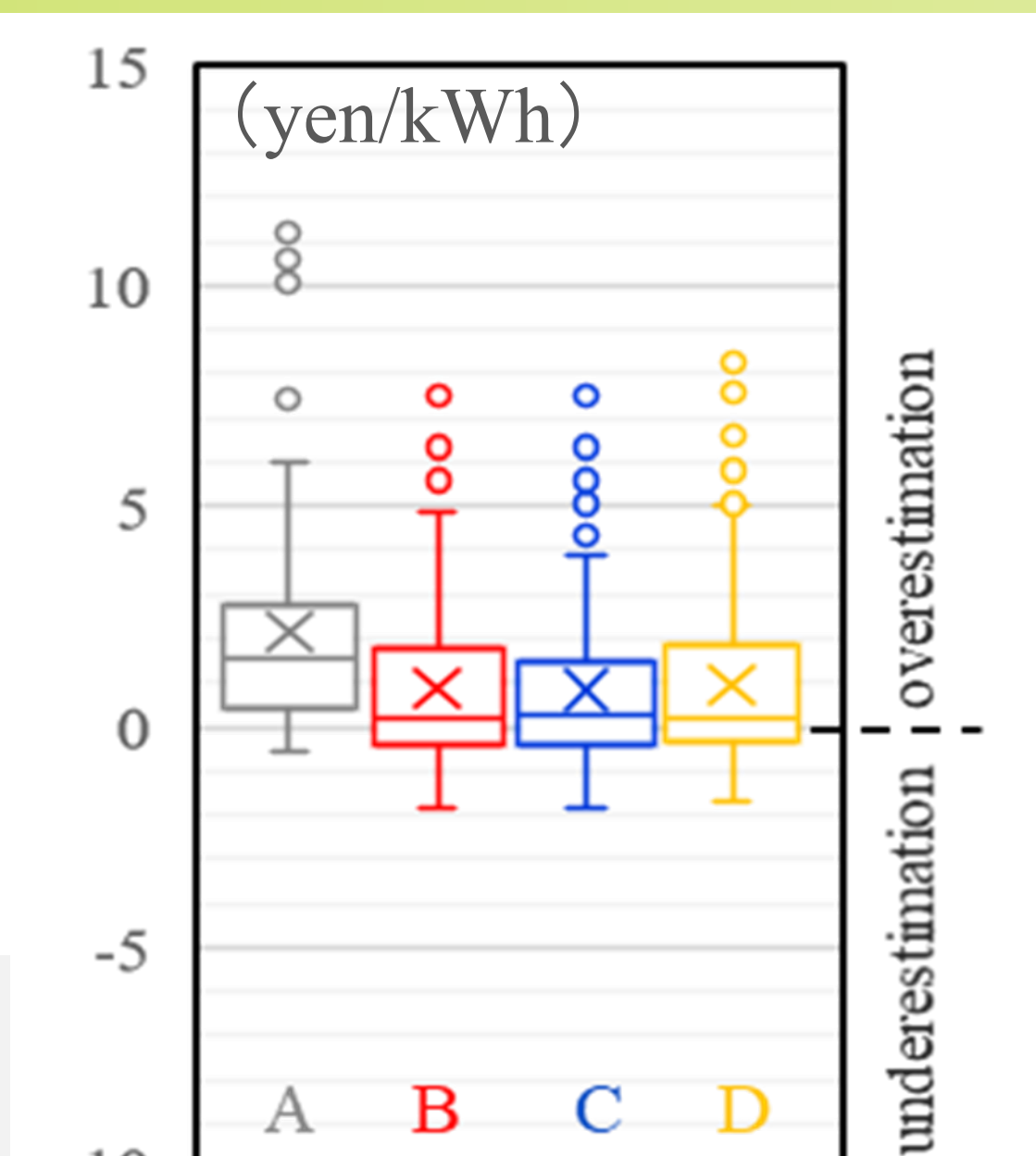


Fig. The error range (Predicted minus actual prices)

Conclusions

- There is an obvious positive relationship between the net demand (total demand minus Solar's contribution) and the spot price of the corresponding timeframes.
- The ARIMA method combined with related predictor variables improves the forecast accuracy in JPEX spot market.
- It can be basically fitted with a better performance in the daytime, but the accuracy needs to be further improved.

Acknowledgments

This study was supported by NEDO "Demonstration study of photovoltaic power generation technology to create flexibility".

References

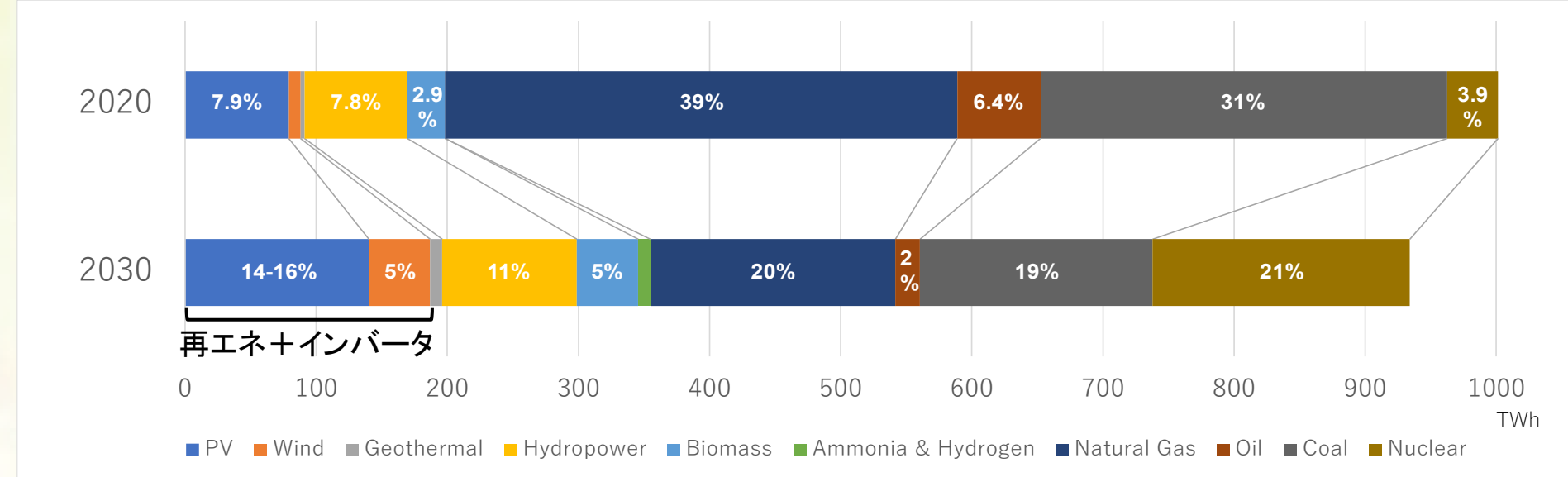
- [1] TEPCO, <https://www.tepco.co.jp>.
- [2] Japan Meteorological Agency, <https://www.jma.go.jp>.
- [3] JEPX, <http://www.jepx.org/market>.

PVを入力とした疑似慣性PCSに関する研究

高松尚宏¹、大関崇¹、織原大¹、喜久里浩之¹、橋本潤¹、大谷謙仁¹
 松浦隆祥²、宮崎聡²、宮崎輝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東京電力ホールディングス

研究背景

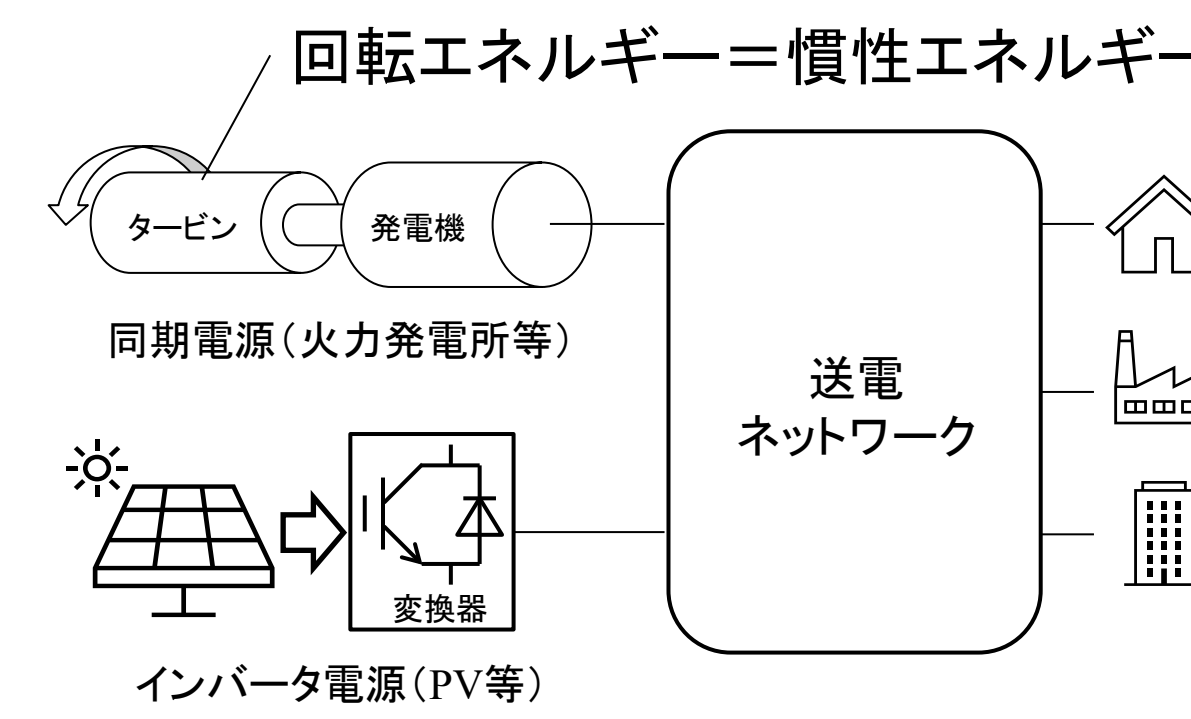
- 再生可能エネルギーや蓄電池の普及に伴い、インバータ電源が増加
- インバータ電源の増加で電力系統の慣性が減少すると、電力系統の安定運用が困難に
- 再生可能エネルギーから慣性の供給を可能とするシステムが必要



2030年の日本の電源構成 (第6次エネルギー基本計画[1]に基づく)

電力系統と慣性

- 電力系統はタービンの回転エネルギーを慣性エネルギーとして持つ
- 瞬間的な変動に対し、慣性エネルギーを放出・吸収して系統を安定化



電力系統が持つ慣性エネルギー

インバータ電源 (PV等) の導入拡大

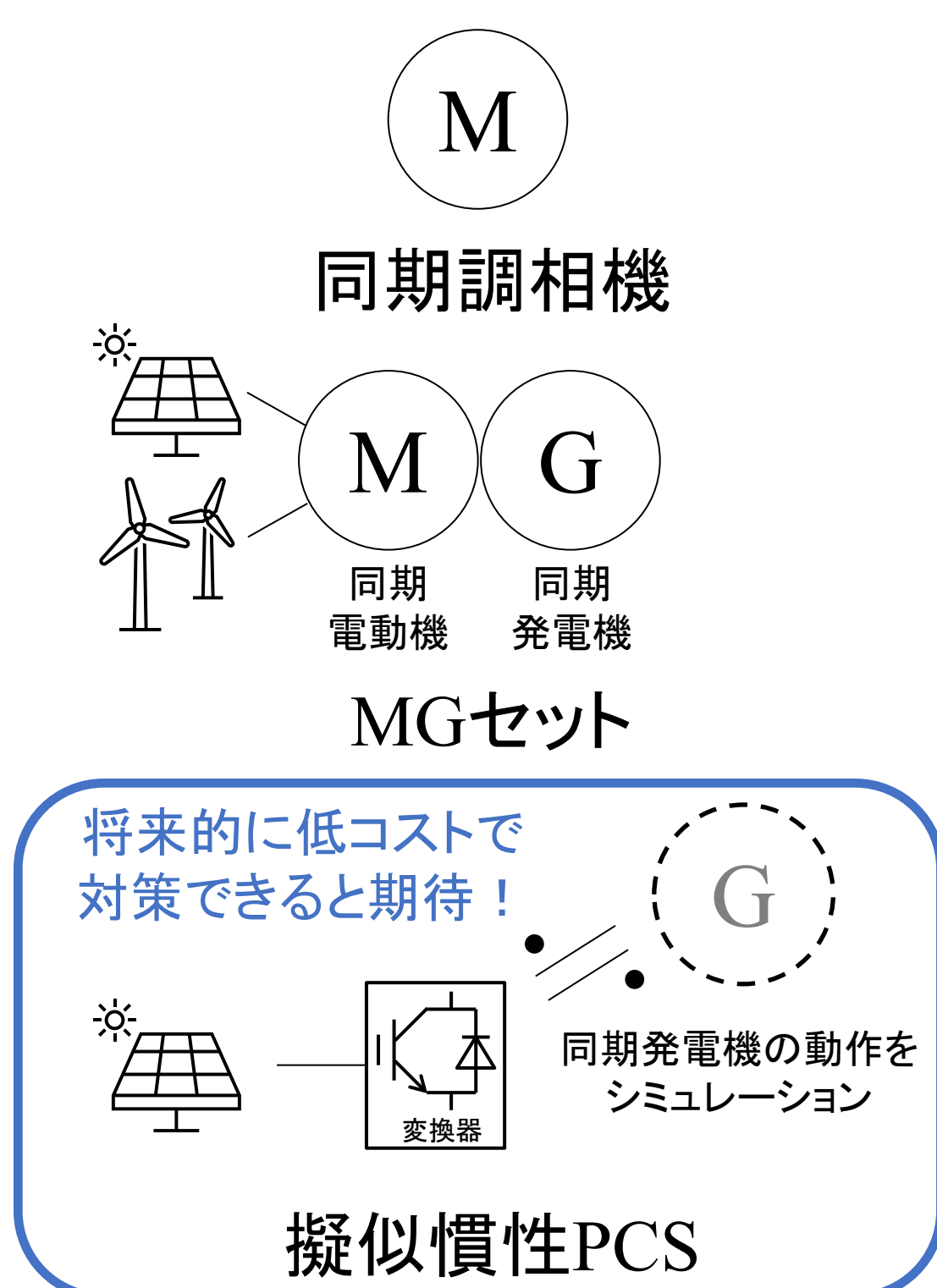
同期電源の減少

慣性エネルギーの減少

電力系統の不安定化

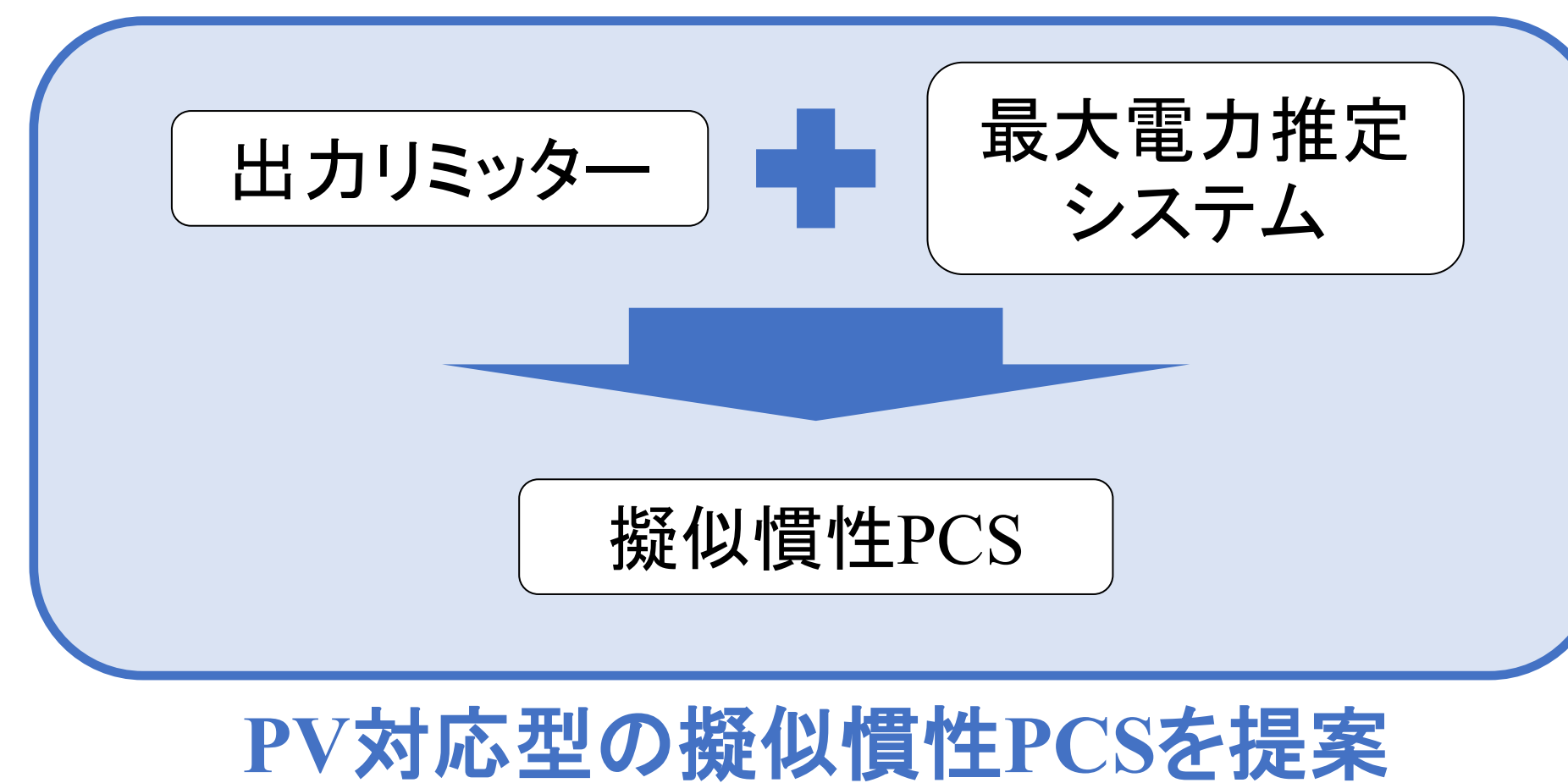
PVを電源とした疑似慣性PCS

● 慣性低下への対策方法[2]

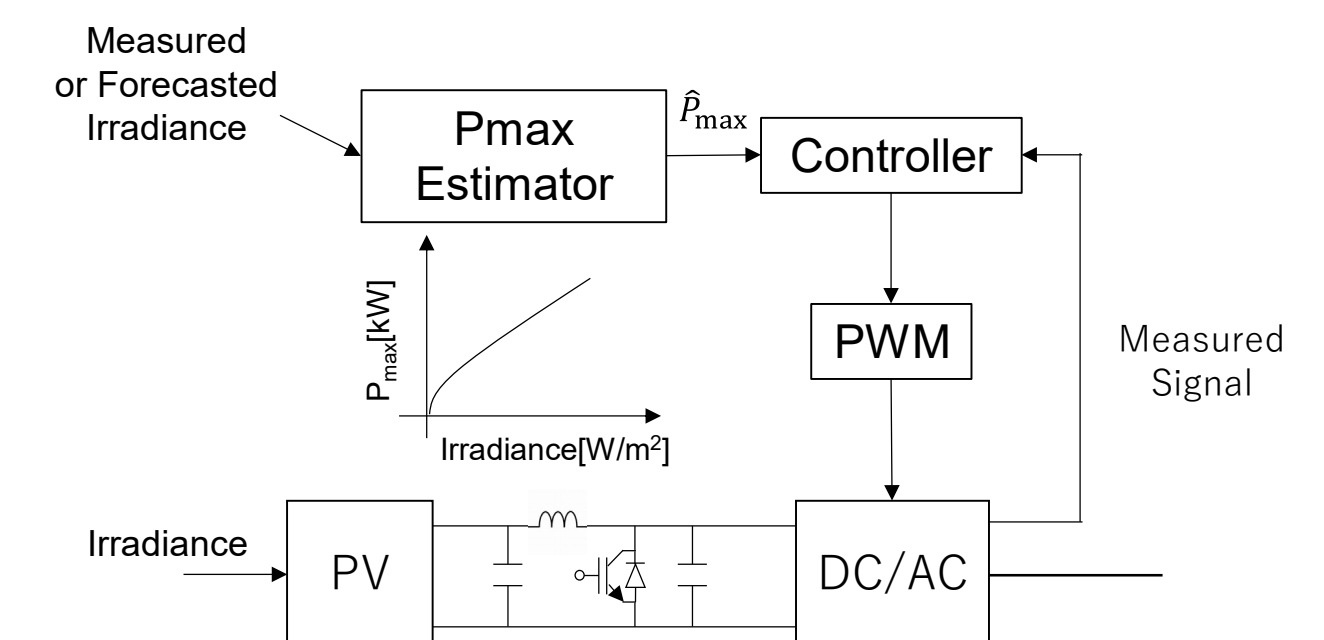


● PV電源を入力とした時の疑似慣性PCSの課題

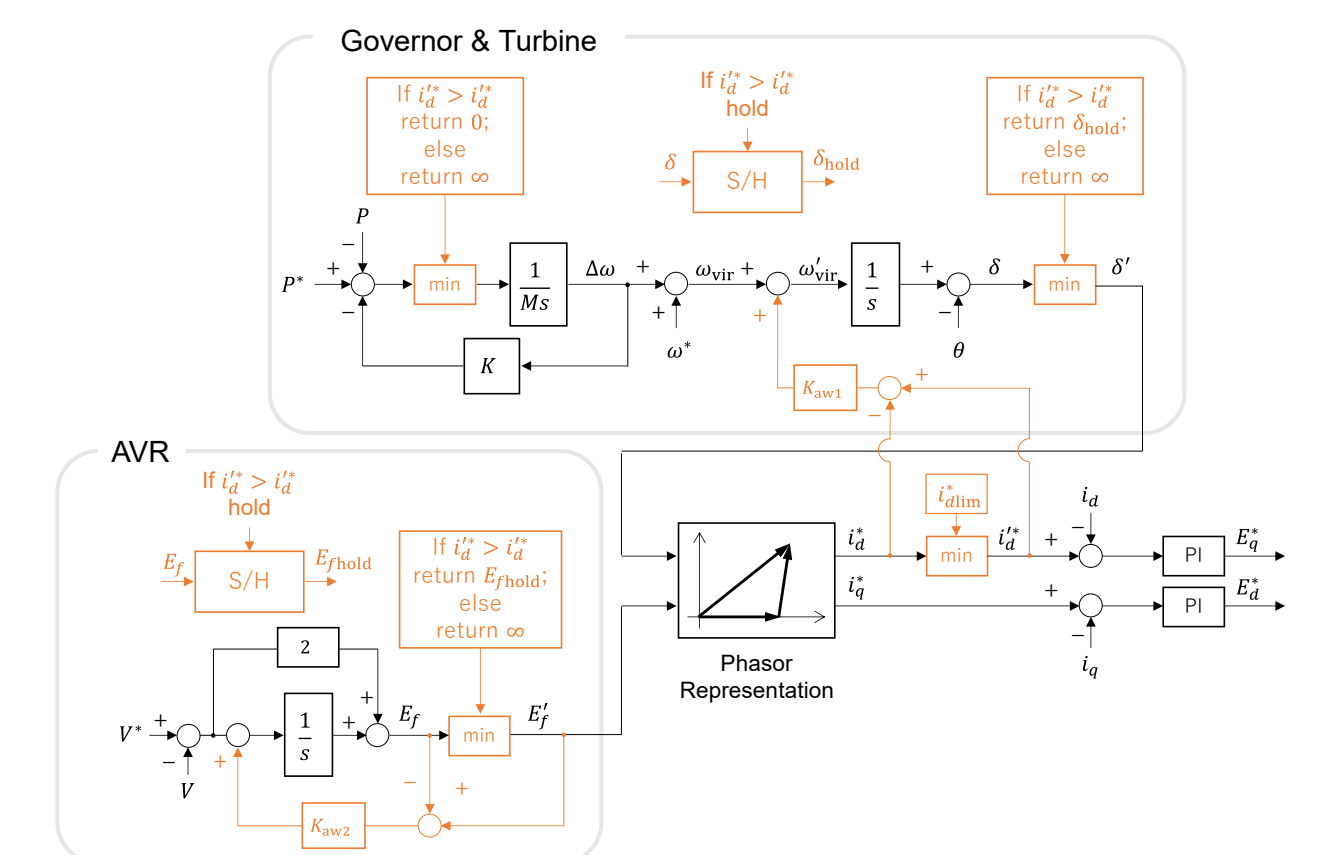
- 疑似慣性PCSの多くは蓄電池の利用を前提
- 最大電力点以上にPVは発電ができない
→ 出力リミッターの追加
- 日射条件でPVの最大電力が変動
→ 最大電力推定システムの追加



PV対応型の疑似慣性PCSを提案



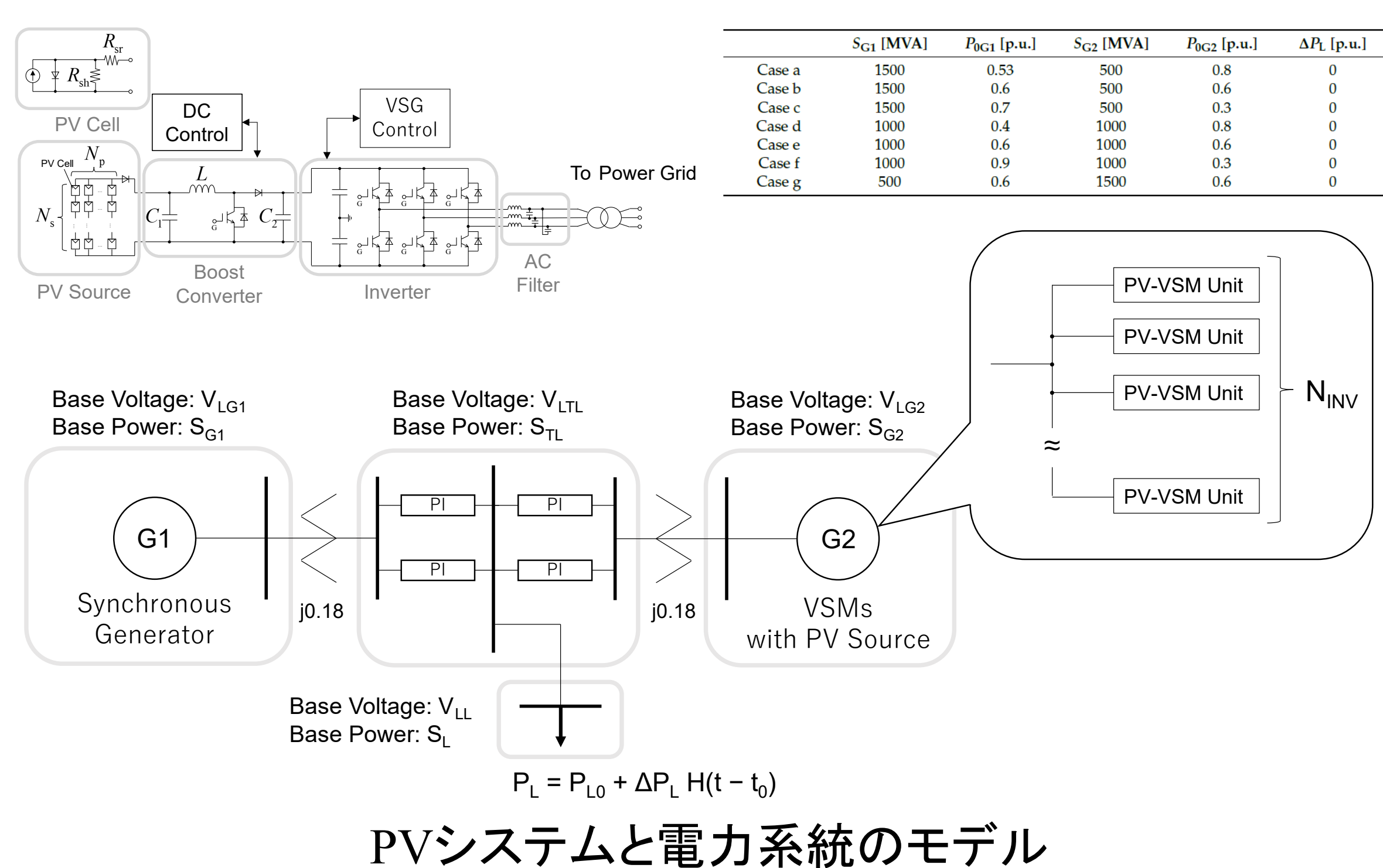
提案した疑似慣性PCSの概略図



出力リミッターの制御アルゴリズム

シミュレーションと結果

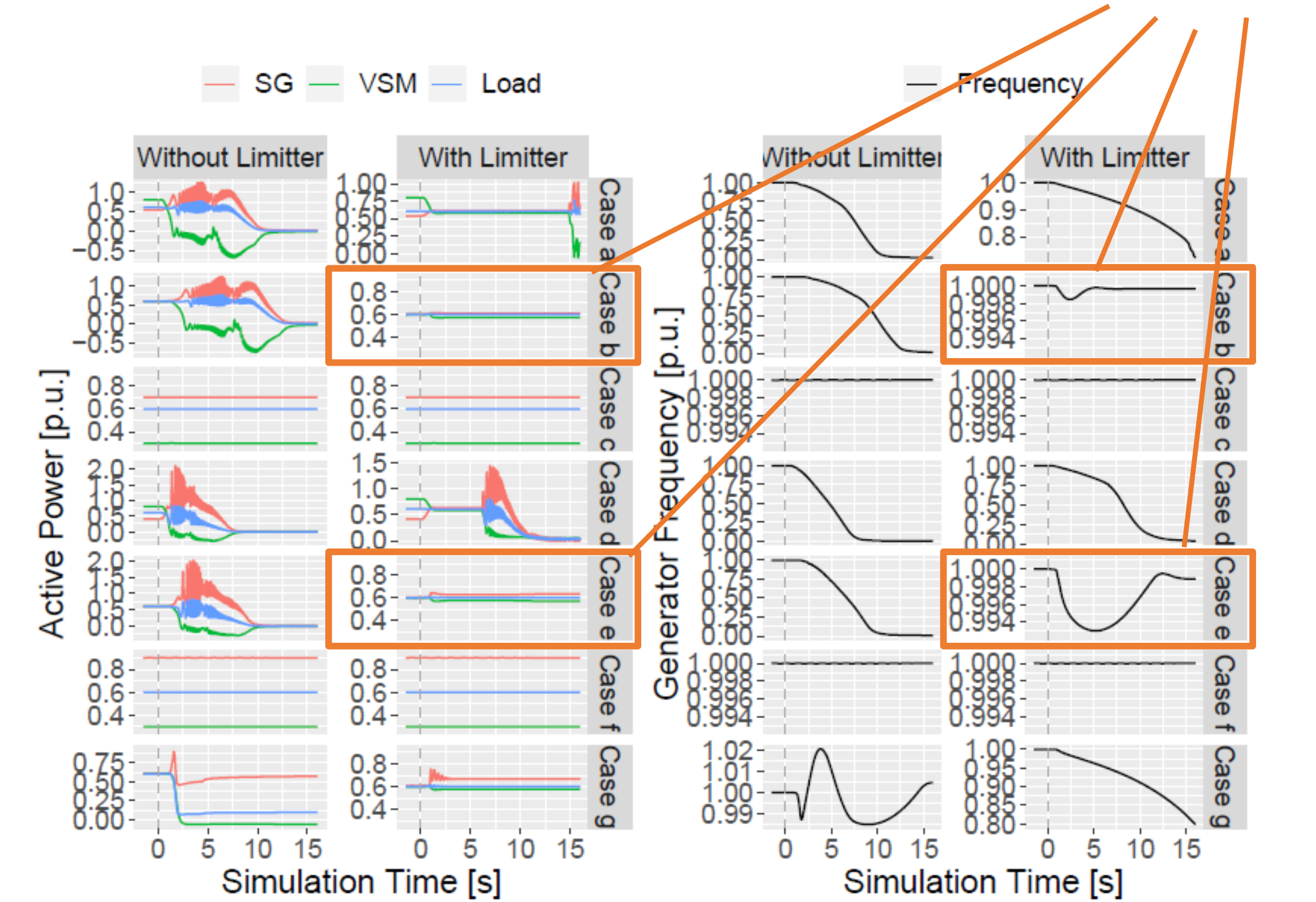
● シミュレーションモデル



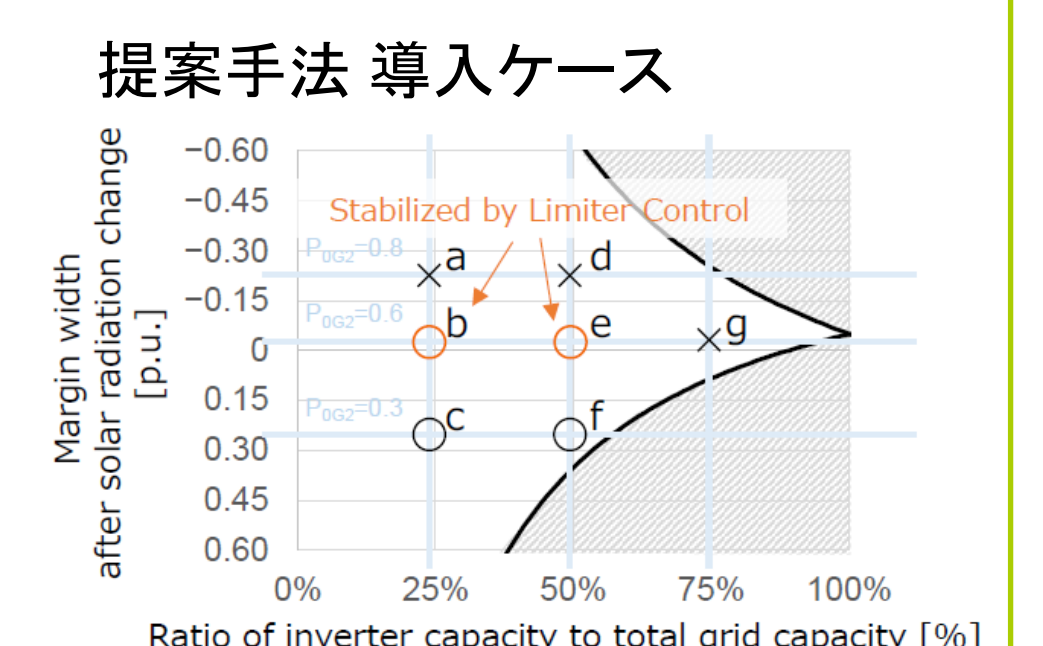
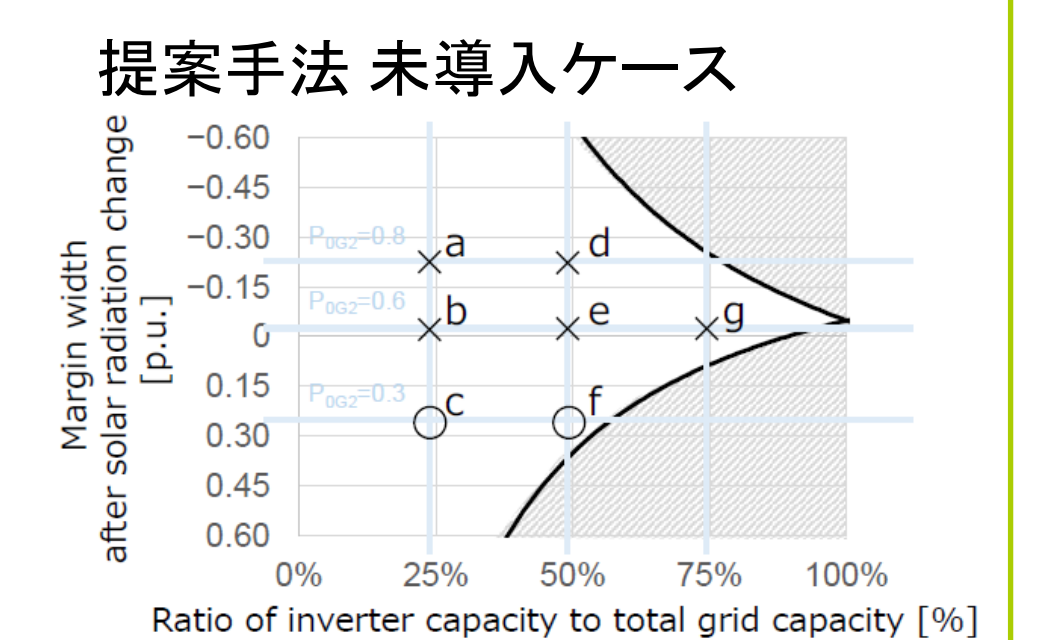
PVシステムと電力系統のモデル

● 日射変動時の疑似慣性PCSの動作

提案手法の導入により安定化



各解析シナリオでの有効電力出力と発電機周波数の変動 (日射は1秒間に約42%減少するランプ変動を想定)



各解析シナリオの設定値とPCS動作安定性

結論

- PV対応型の疑似慣性PCSを提案
- 提案PCSが電力系統に接続された状態を想定し、日射ランプ変動時の動作をシミュレーションで確認
- 提案手法によって日射変動に対する疑似慣性PCSの安定性を向上させることが可能

参考文献

1. 経済産業省, エネルギー基本計画の概要, 2021
2. 送配電網協議会, 同期電源の減少に起因する技術的課題, 2021
3. Takamatsu T, Oozeki T, Orihara D, Kikusato H, Hashimoto J, Otani K, Matsuura T, Miyazaki S, Hamada H, Miyazaki T. Simulation Analysis of Issues with Grid Disturbance for a Photovoltaic Powered Virtual Synchronous Machine. Energies. 2022; 15(16):5921. <https://doi.org/10.3390/en15165921>

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 (JPNP19002) の結果得られたものである。