

キャビティにVantablackをコーティングした 国産絶対放射計によるIPC参加報告

猪狩真一¹、大久保和彦²、小久保順一¹、石川英生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 石川産業株式会社

研究の目的

- ・ソーラシミュレータ法による基準太陽電池の一次校正の不確かさ評価の結果、放射照度の絶対放射測定の不確かさの低減が測定校正能力の向上に必要である。
- ・不確かさの小さい放射照度の絶対測定を目的として、円錐型受光部を持つ絶対放射計の国産化を果たした。2015年のIPC XIIにおいてWRRスケールとの差が1%以内であることを証明した。
- ・技術課題を解決し、極低反射黒色処理(Vantablack)により可能となった平板構造受光部を持つ絶対放射計を開発した。2021年のIPC XIIIで特性を評価し、実用化することが目的である。

実験

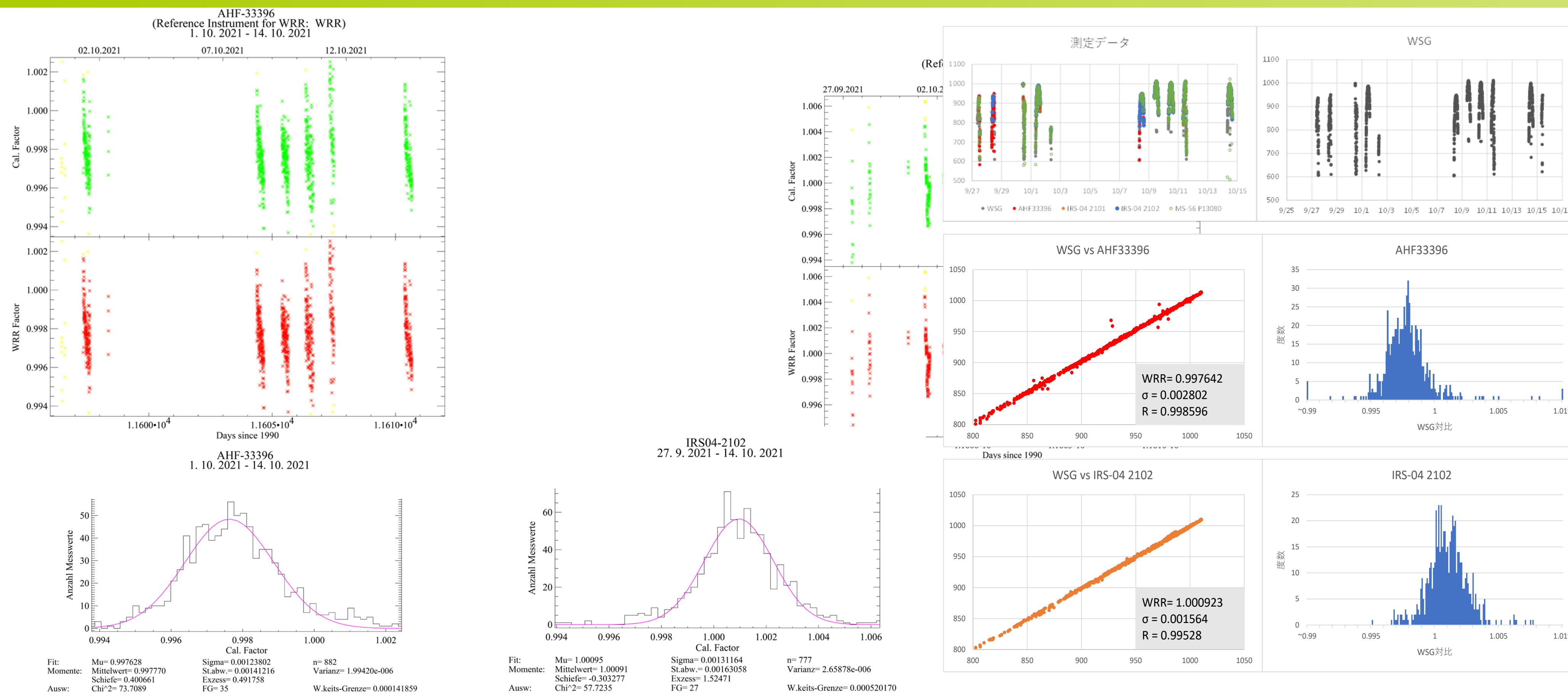
校正場所: PMOD/WRC Dorfstrasse 33, 7260 Davos Dorf



校正日時: 2021年9月28日～10月16日

スクリーニング条件: AOD500 < 0.12、
 太陽から8°以内に雲が無い、風速 < 2.5m/秒

結果



IPC速報値

	WRR factor	σ	n
AHF33396	0.997628	1238 ppm	882
IRS-04 2101	1.001307	1074 ppm	759
IRS-04 2102	1.000969	1312 ppm	777



考察

- ①スクリーニング条件を、満足した4日間のWSGの測定結果を用いて各測定時間における仮WRR値(以下、便宜的にWSGと表記)を算出。
- ②AHF 33396、IRS-04 2101、2102の該当する測定時間のデータを抽出。
- ③各測定値から、WSGの逆数を乗じた補正係数を算出。
- ④補正係数の平均を求め、これを WRR factor (試算値)とする。

この際、 σ 、相関係数等も求め、総合的な評価を行った。

IPC速報値とAIST/石川産業試算値との差は極めて僅か。

AIST/石川産業試算値

WRR factor (試算値)	σ	n	モード
AHF33396 0.997642	2802 ppm	708	パッシブモード
IRS-04 2101 1.001334	1356 ppm	601	アクティブモード
IRS-04 2102 1.000923	1564 ppm	590	アクティブモード

IPC速報値とAIST/石川産業試算値との差

AHF33396	14 ppm
IRS-04 2101	27 ppm
IRS-04 2102	-47 ppm

結論

- ・ IPC-XII参加時の結果から抽出された技術課題である応答速度の向上と風の影響の排除が成功し、有効データ数の増加とバラツキの緩和が実現できた。器差も微少である。
- ・ 独自のデータ処理手順による試算値とIPC速報値とで高い合致度を得た。試算結果の信頼度から、WRRとの差は従来の1%から0.1%へと大幅に改善できた。
- ・ 以上の結果から、極低反射黒色処理(Vantablack)の有用性と、それが可能とした平板構造受光部の実用性が確認できた。

参考文献

- 1) "Calibration of a solar absolute cavity radiometer with traceability to the world radiometric reference" Ibrahim Reda, January 1996, NREUP-463-20619.
- 2) "International Pyrheliometer Comparison (IPC-XII): 28. Sep - 16. Oct 2015," WMO IOM Report No. 124, 2016.
- 3) "Optical reflectance of pyrheliometer absorption cavities: progress toward SI-traceable measurements of solar irradiance" Applied optics / Vol. 55, No. 23, 10 August 2016.
- 4) "International comparisons of the absolute radiometer MAR-1 with the world radiation standard" M. N. Pavlovich, S. P. Morozova, V. I. Sapritskii, A. A. Stakharnyi, and B. E. Lisyanskii, Measurement Techniques, vol. 58, No. 11, February 2016.

MPPT稼働中のPV性能診断技術

菱川 善博¹、吉田 正裕¹、千葉 恭男¹、Manit Seapan²、岡島 敬一²

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 筑波大学

研究の目的

従来の経緯

- ・屋外で稼働する太陽電池モジュールやシステムの性能を正確に把握する必要性が益々高まっている。
- ・太陽電池のMPPT稼働中に、ほぼリアルタイムで太陽電池の性能評価・動作診断を高精度に行う技術を開発している[1]-[4]。

本研究の目的

以下の技術を開発した[5,6]。

- ・PVモジュールやistring性能の変化(不具合)を、 I_{mp} ・ V_{mp} の計測値から高感度に検出する技術。
- ・更に、部分影等によるPV動作の一時的な変化を検出する技術。

実験

実験システム外観



照度センサ: PVMS [1]
(PV module irradiance sensor)
温度センサ: Pt100



電流・電圧
センサ



I_{mp} , V_{mp} 温度補正式 [4]

$$V_{mp2} = \left\{ V_{mp1} + \frac{T_2 - T_1}{T_1} \left(V_{mp1} - \frac{N_c n E_g}{q} \right) \right\} \times \{ 1 + \alpha(T_2 - T_1) \} \quad (1)$$

$$I_{mp2} = I_{mp1} \quad (2)$$

結果: MPPT稼働中に測定した I_{mp} , V_{mp} を、(1),(2)式を用いて25°Cに補正

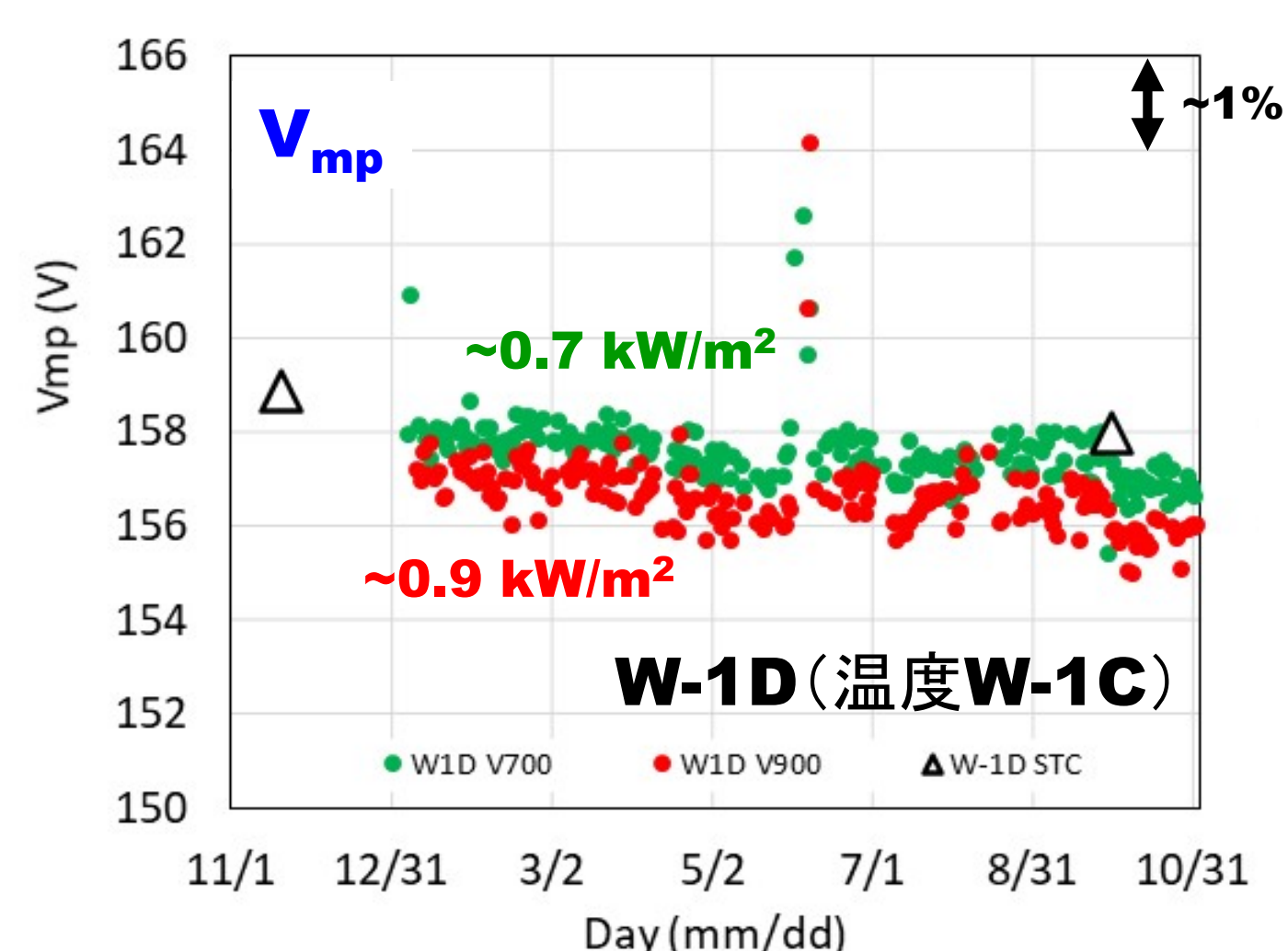


図1 最大電力動作電圧 V_{mp}

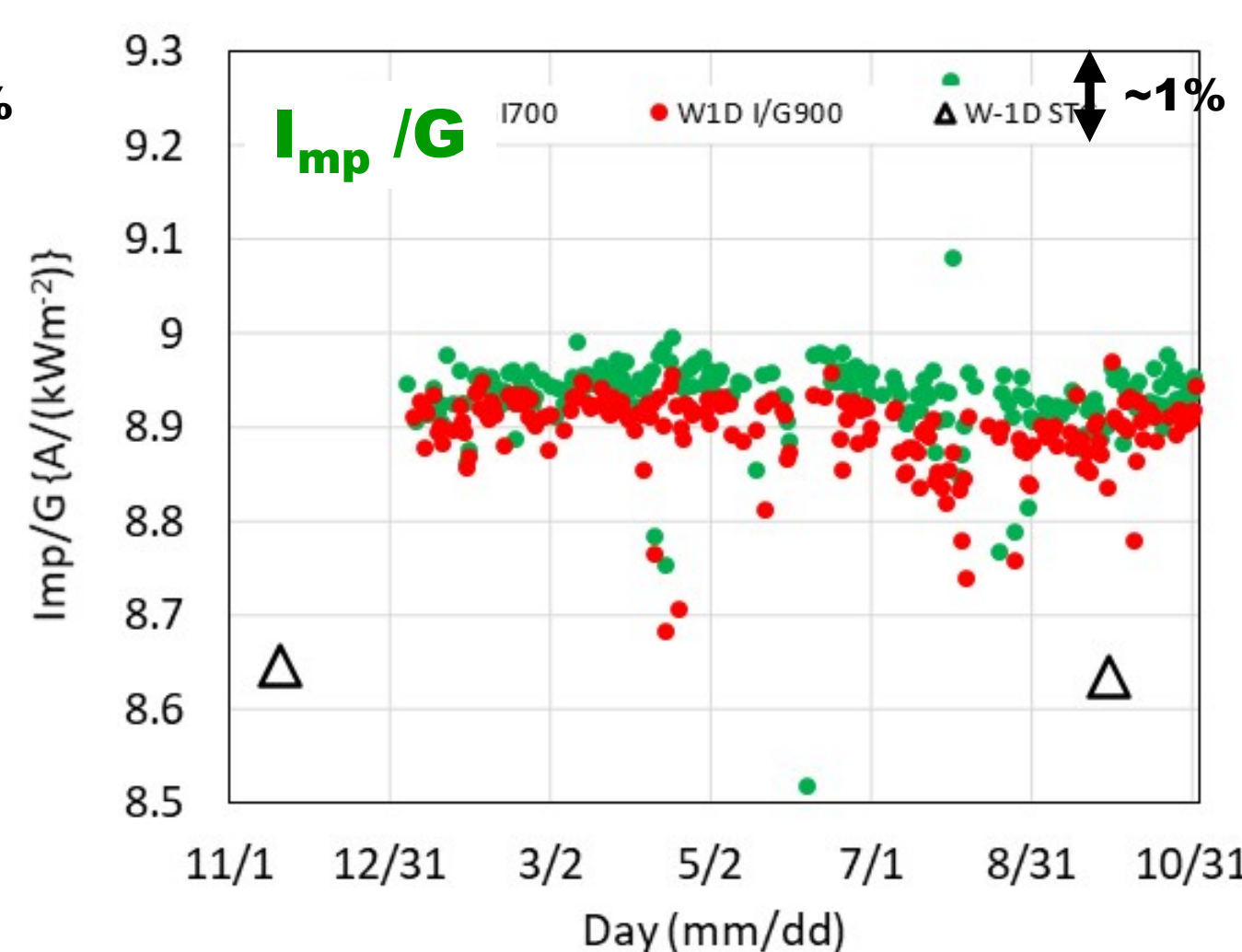


図2 最大電力動作電流/照度 I_{mp}/G

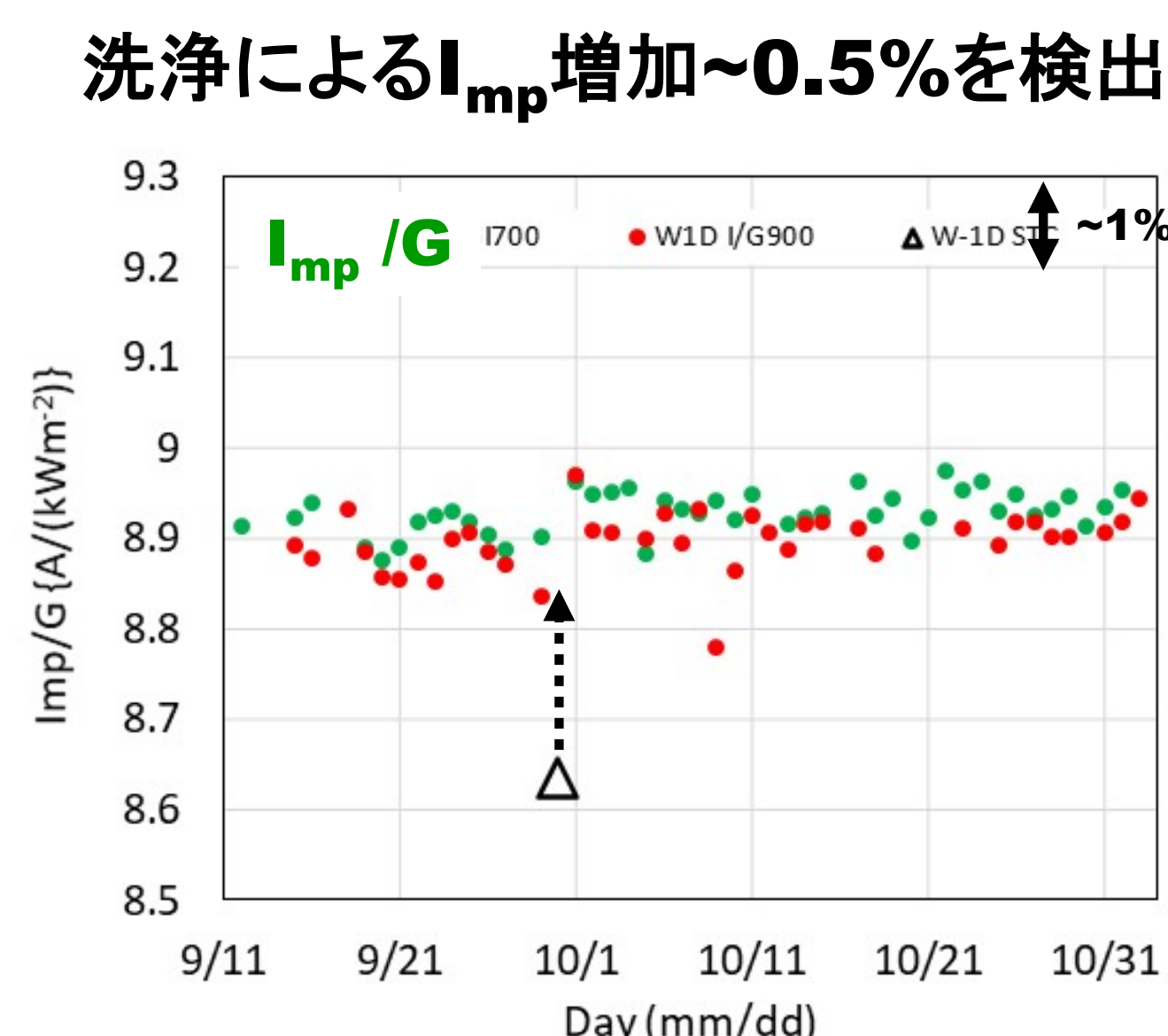


図3 I_{mp}/G モジュール洗浄前後

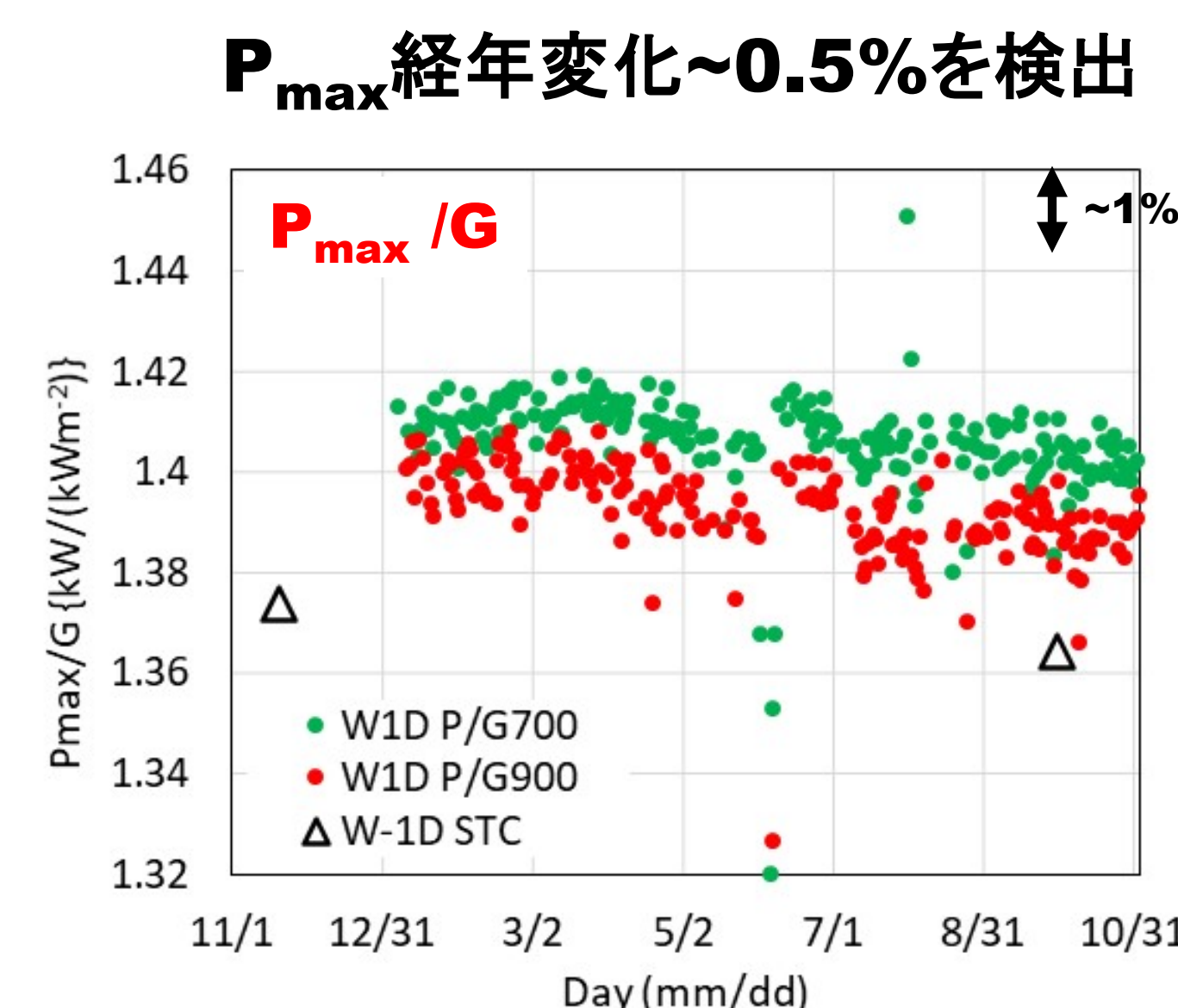


図4 最大電力/照度 P_{max}/G

考察: 部分影の検出 ~ I_{mp} , V_{mp} の一時的な変動の解析と検出

istring (60x5セル直列)中の1セル部分影の一例

- ・影面積<5% : I_{mp} , V_{mp} 変化なし
- ・5%<影面積<15% : V_{mp} 増, I_{mp} , P_{max} 減
- ・15%<影面積 : V_{mp} 減, I_{mp} , P_{max} 増 → 一定

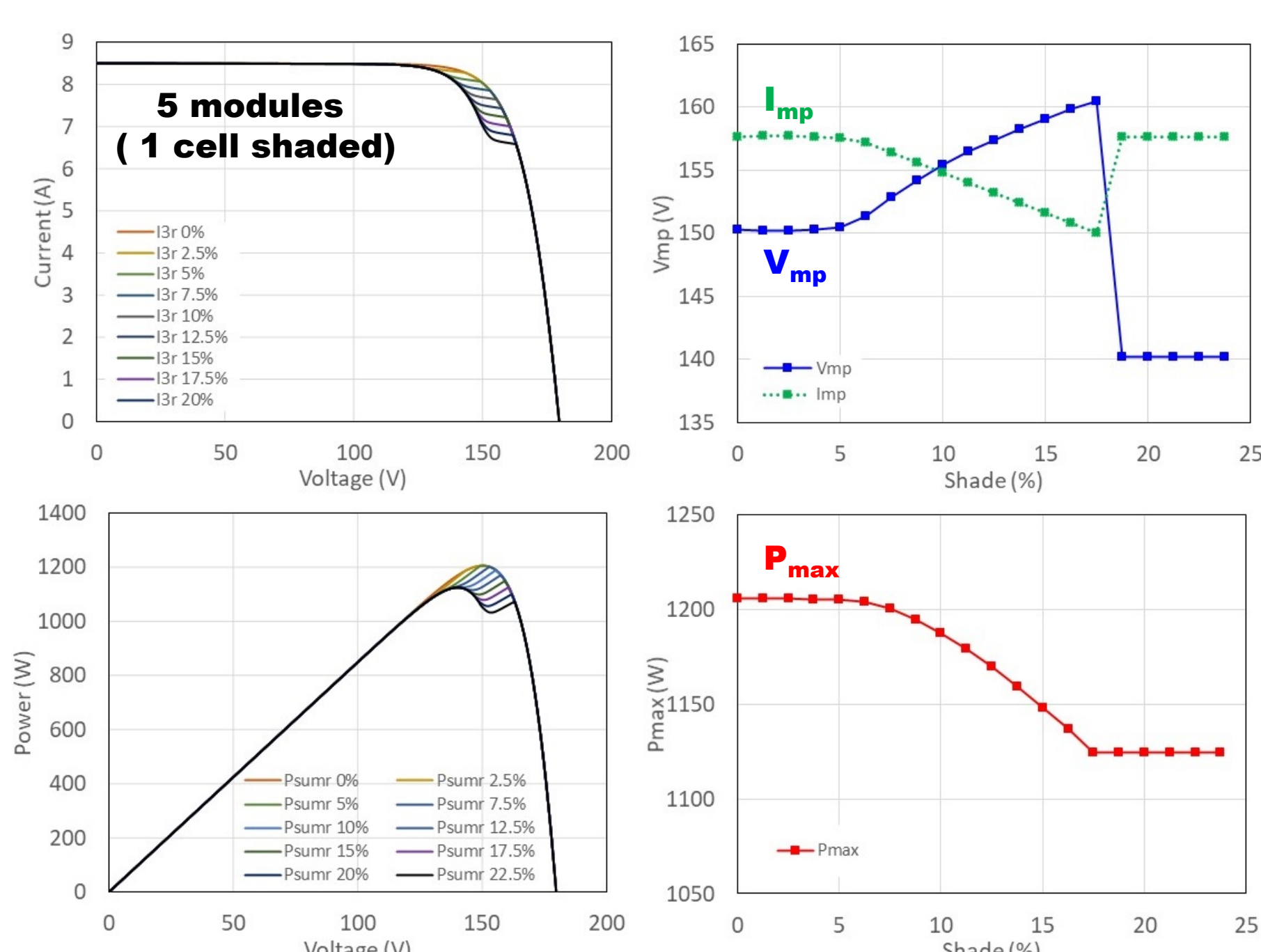
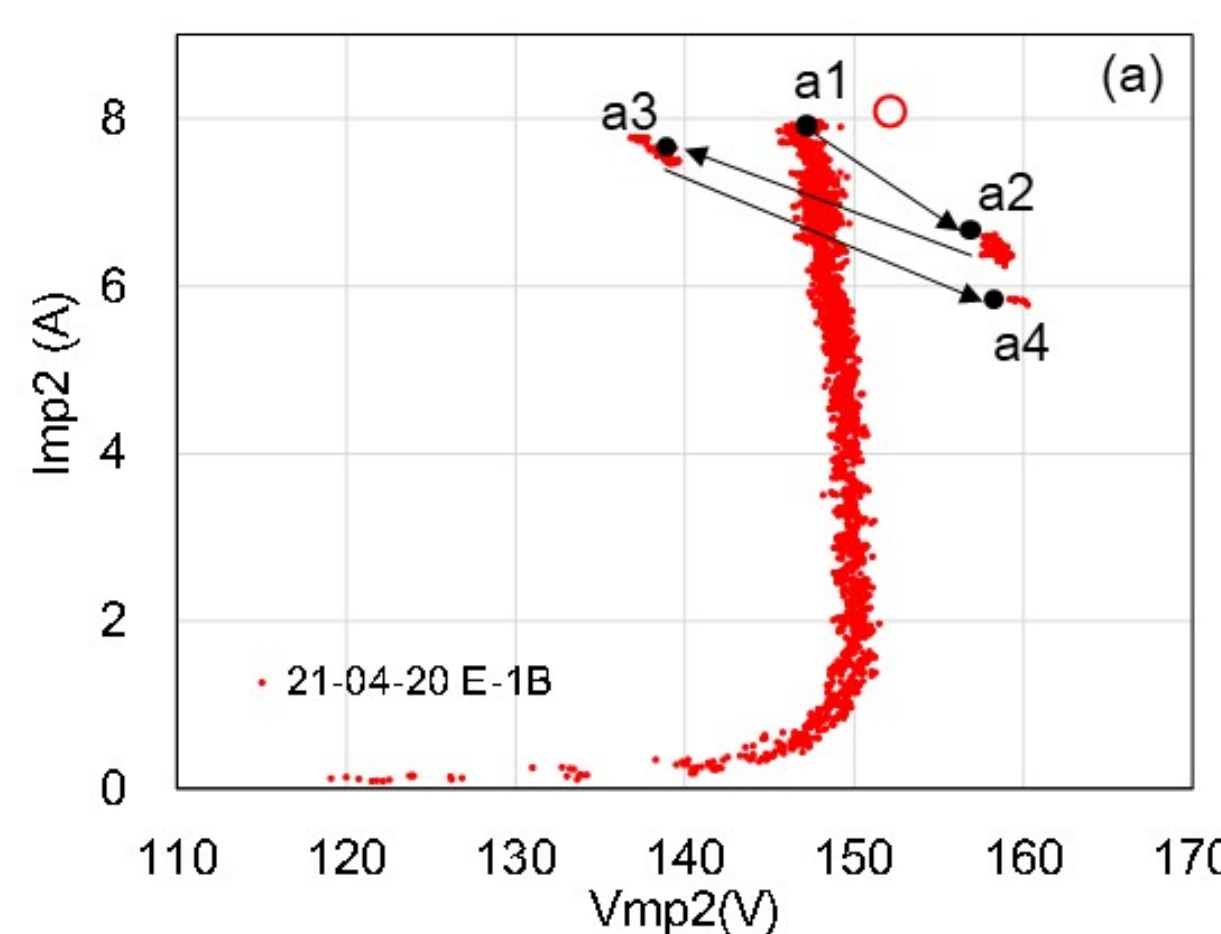


図5 1セル上の部分影がistringの I_{mp} , V_{mp} に及ぼす影響(シミュレーション)

1セルに部分影



数セルに部分影

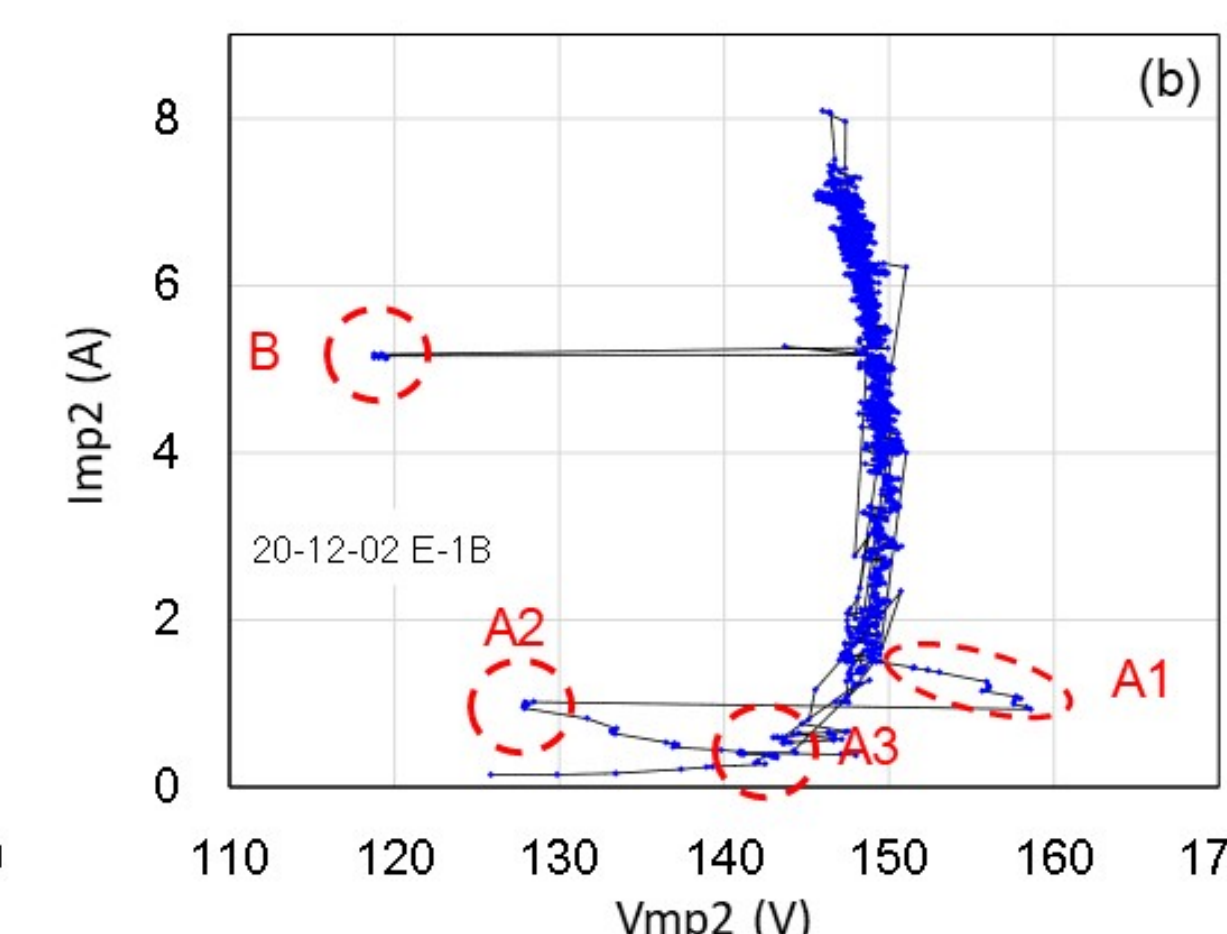
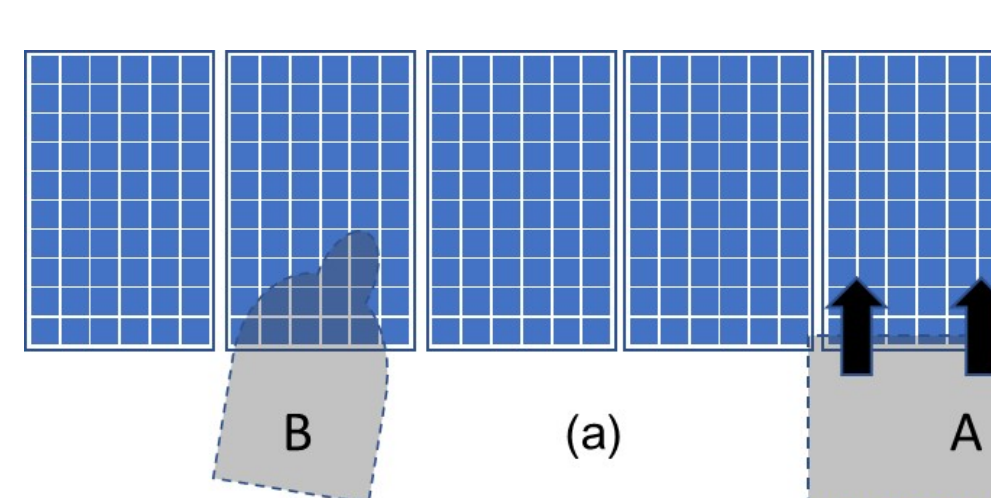


図6 1セル~数セル上の部分影がistringの I_{mp} , V_{mp} に及ぼす影響(実験結果)

下草により複数モジュールに部分影

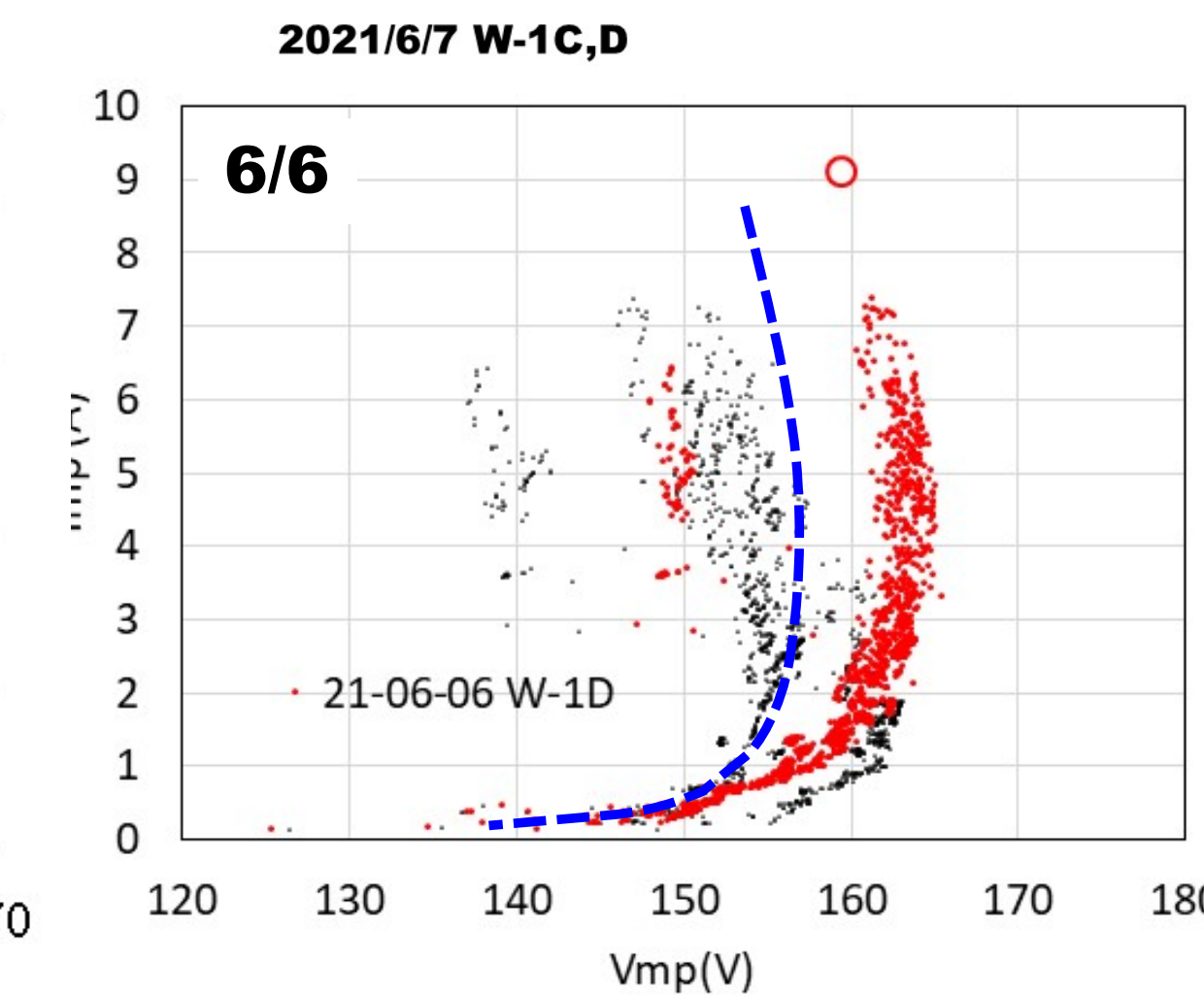


図7 下草による部分影がistringの I_{mp} , V_{mp} に及ぼす影響(実験結果)

結論

- MPPT稼働中の V_{mp} , I_{mp} (, T, G) から、DC側の P_{max} 等の性能をリアルタイムで再現性良く定量評価できる技術を開発した。
- 性能の常時監視
 - ・0.5%~1%程度の $P_{max,STC}$ 等性能変化(短期、長期)を検出できた。
 - ・精度1%~2%(検証中)
- 短時間での診断
 - ・部分影(セル面積の5%~)を検出できた。
 - ・BD動作、開放、短絡、等各種不具合(要検証)
- 今後
 - ・多くの実例で検証、ケーブル抵抗を考慮する。
 - ・PCSデータの利用(V, I計測器不要), T,G測定省略可能性を検討する。

参考文献

- [1] Y. Hishikawa, M. Higa, T. Takenouchi et al., "Improved precision of the outdoor performance measurements of photovoltaic modules by using the photovoltaic irradiance sensor", Solar Energy 211 (2020) 82-89.
- [2] K. Nishioka, K. Miyayama, Y. Ota et al., "Accurate measurement and estimation of solar cell temperature in photovoltaic module operating in real environmental conditions" Jpn. J. Appl. Phys. 57 (2018) 08RG08.
- [3] J. Chantana, H. Mano, Y. Horio et al., "Spectral mismatch correction factor indicated by average photon energy for precise outdoor performance measurements of different type photovoltaic modules" Renew. Energy 114 (2017) 567-573.
- [4] M. Seapan, Y. Hishikawa, M. Yoshita, K. Okajima, "Temperature and irradiance dependences of the current and voltage at maximum power of crystalline silicon PV devices", Solar Energy 204 (2020) 459-465.
- [5] 菱川、吉田、千葉、Seapan、岡島「MPPT動作中のPV性能リアルタイム診断技術」日本太陽エネルギー学会研究発表会講演論文集(2020)61.
- [6] Y. Hishikawa, M. Yoshita, Y. Chiba, M. Seapan, K. Okajima, "Precise performance diagnosis of photovoltaic string by operation voltage and current: Experimental verification" Solar Energy 230 (2021) 704-713.

各種薄膜太陽電池の屋外SMM補正

菱川 善博、吉田 正裕

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

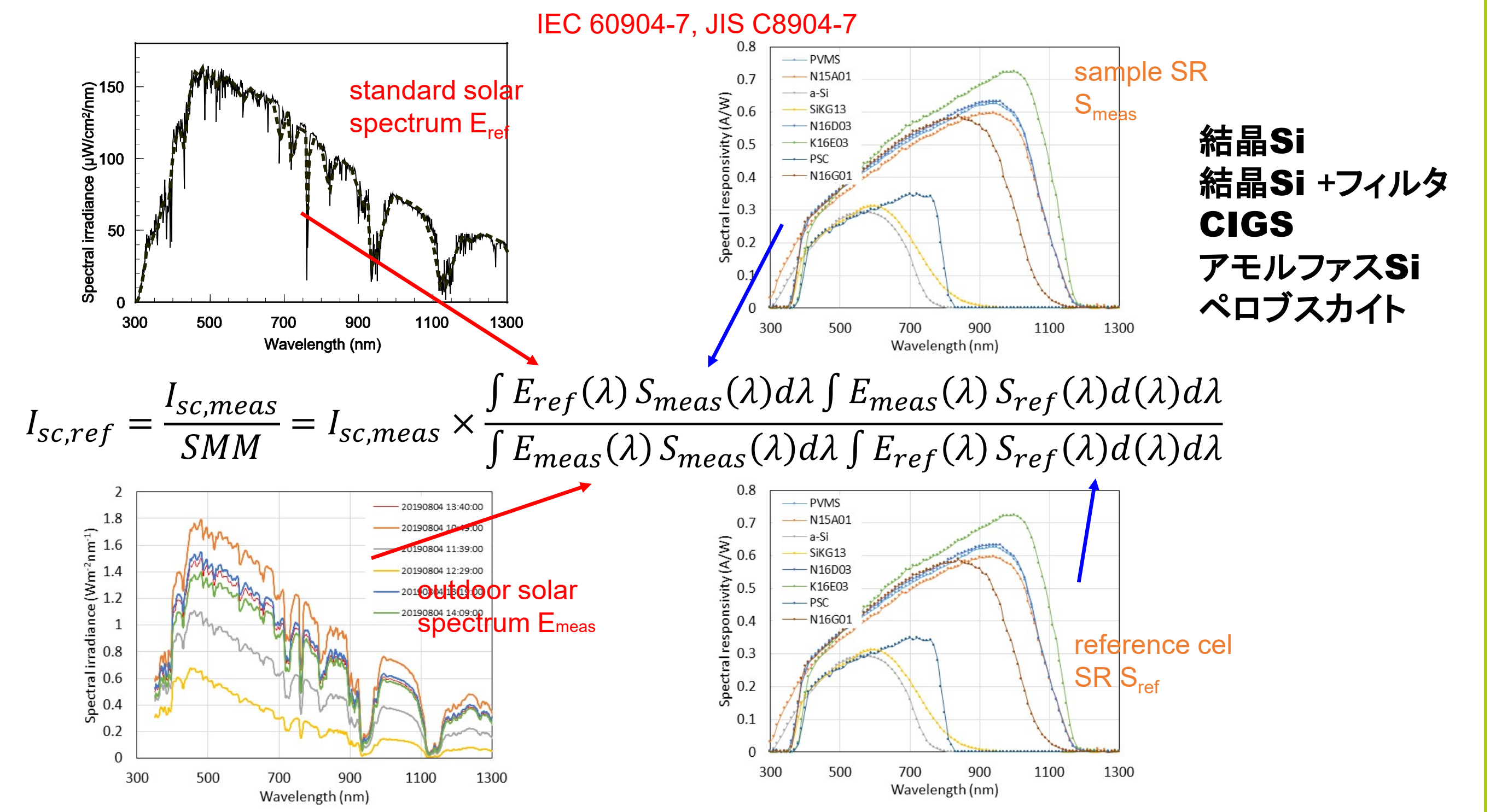
自然太陽光の様々な分光スペクトルの下で太陽電池の性能を正確に評価するには、スペクトルの影響を正確に把握して補正することが必要である。特に分光感度の波長域が材料によって大きく異なる薄膜太陽電池では、スペクトル効果の影響も顕著である。

結晶シリコン太陽電池の評価では、結晶シリコン太陽電池を用いたPV日射センサ(PVMS)[1]を用いることにより屋内測定とそれと色無の高精度性能評価が可能であることが明らかになったが、薄膜太陽電池の高精度な屋外測定技術は明らかになっていない。

本研究ではPVMSを使用して、様々な薄膜太陽電池の自然太陽光に対するスペクトルミスマッチ(SMM)を分光放射計が不要で高精度に算出・補正する新しい手法を検討した。

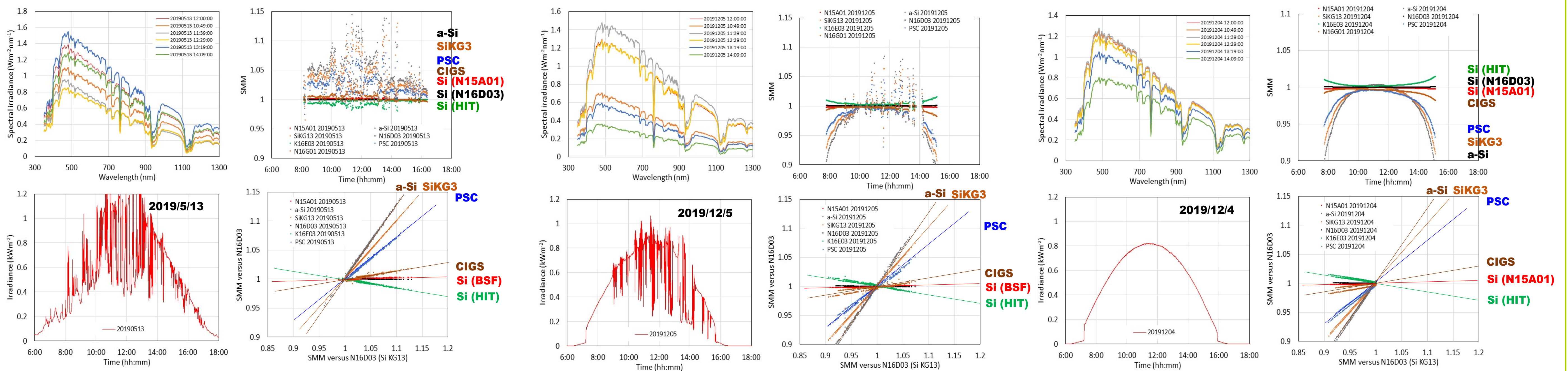
実験

スペクトルミスマッチSMMの計算 [2]



結果: 屋外の様々な自然太陽光スペクトルにおける各種薄膜太陽電池のSMM

太陽電池の種類や屋外の天候に関わらず、SMMの間の相互関係は同じ比例関係(線形関係)に従うことが初めて明らかになった。

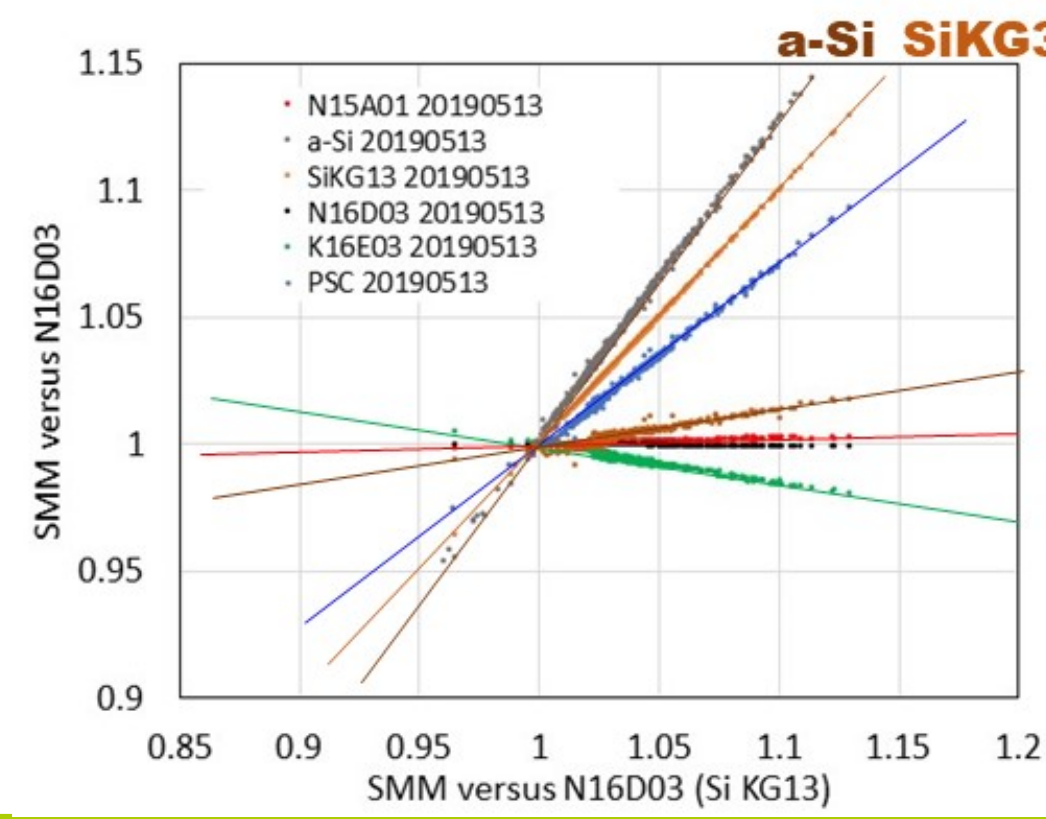


考察: 各種薄膜太陽電池の高精度屋外測定手順の提案

各種太陽電池のSMMは、日時・天候にかかわらずほぼ比例関係にあることが明らかになった

$$(例) SMM_{PSC} - 1 \cong 0.7 \times (SMM_{SiK3} - 1)$$

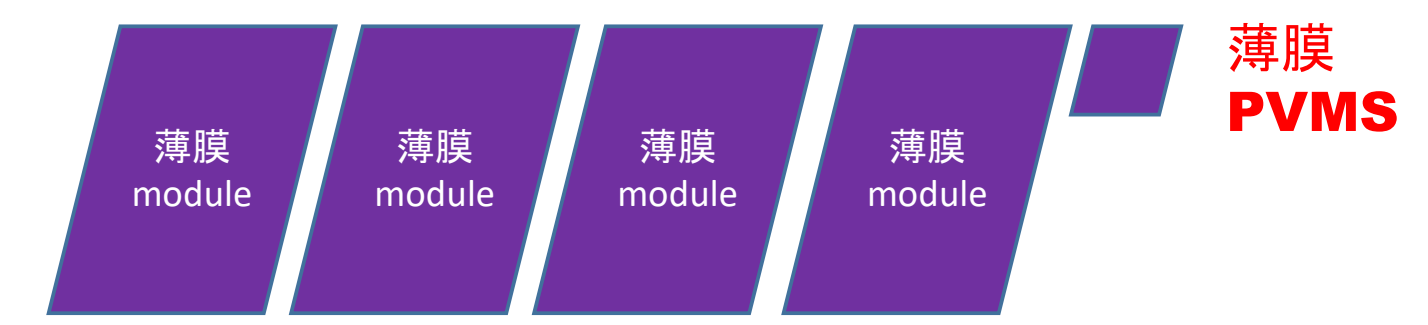
⇒2種類の照度センサから、任意の薄膜太陽電池のSMM補正を行うことができる



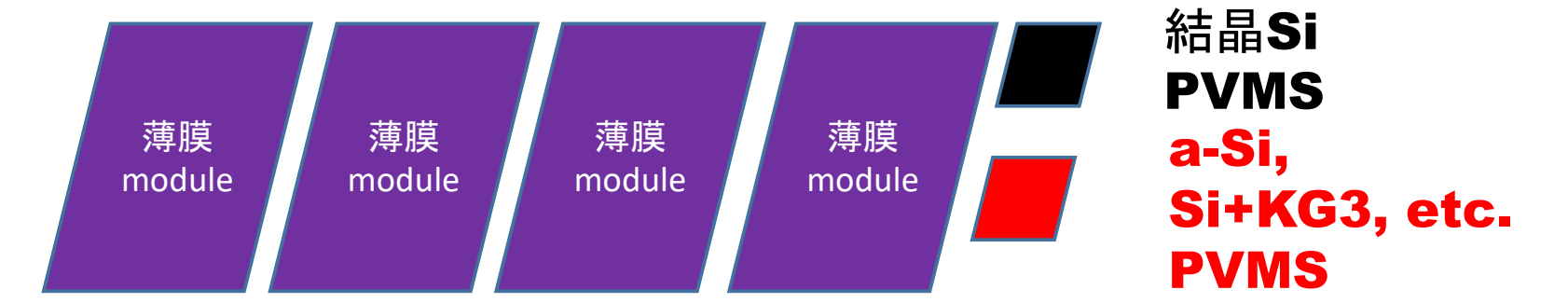
$$I_{sc,ref} = \frac{I_{sc,meas}}{SMM}$$

$$= I_{sc,meas} \times \frac{\int E_{ref}(\lambda) S_{meas}(\lambda) d\lambda \int E_{meas}(\lambda) S_{ref}(\lambda) d\lambda}{\int E_{meas}(\lambda) S_{meas}(\lambda) d\lambda \int E_{ref}(\lambda) S_{ref}(\lambda) d\lambda}$$

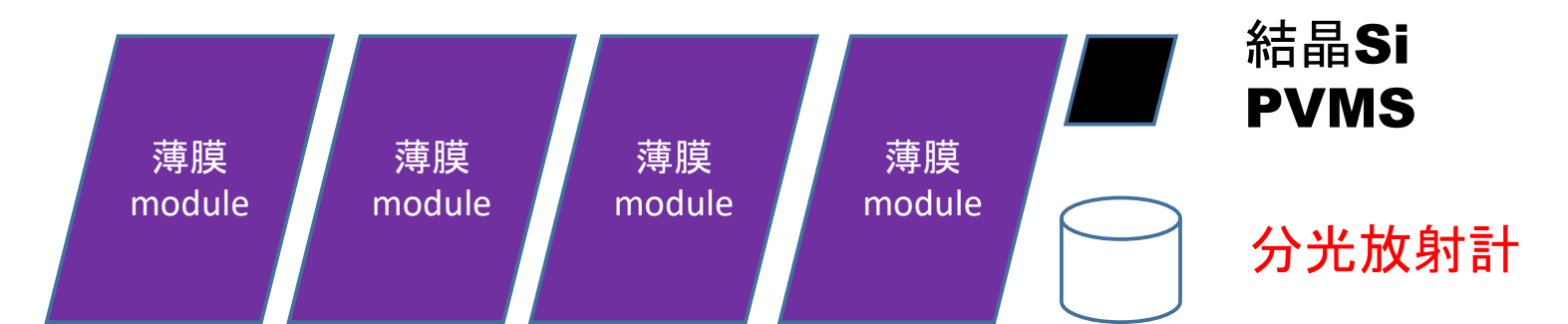
1. モジュールと同じ太陽電池のPVMS (高精度、低価格)



2. 二種類のPVMS (低価格)



3. PVMS + 分光放射計



結論

- (これまで) 主に結晶シリコン太陽電池モジュールの高精度屋外測定技術を開発。
- (本研究) 各種薄膜太陽電池の屋外性能評価に重要なSMMについて、実験とシミュレーションによる検討を行った。
- 各種太陽電池のSMMは、幅広い日時・天候において相互にほぼ比例関係にあることが明らかになった。
- 2種類の照度センサから、薄膜太陽電池のSMMを推定可能(温度特性、角度特性がほぼ同じ場合)。推定精度 $\pm 1\%$
- 今後
 - ・実際の薄膜太陽電池 & 二種類PVMSによる実証
 - ・表面反射等による角度特性が及ぼす影響が重要

参考文献

- [1] Y. Hishikawa, M. Higa, T. Takenouchi et al., "Improved precision of the outdoor performance measurements of photovoltaic modules by using the photovoltaic irradiance sensor", Solar Energy 211 (2020) 82-89.
- [2] IEC60904-7: 2019 "Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices".

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

吉田正裕、上田孝、山越憲吾、志村陽哉、佐々木あゆ美、菱川善博
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精力的に進められている。

本研究では、このような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開発を実施している。

研究内容

高精度性能評価の基盤技術開発として、下記2テーマについて研究開発状況を紹介します。

1. 太陽電池の角度特性評価

新用途向け新型太陽電池は、新規構造(フレキシブル・曲面)を有するとともに、設置環境も特有(斜入射、日射変動など)。

⇒太陽電池セル・モジュールの入射角度特性^{[1][2]}の評価・補正技術の開発を実施。

2. 曲面太陽電池モジュールの発電特性評価

⇒フレキシブル太陽電池モジュールを使用し、曲率を変えて設置し、I-V特性の曲率依存性を測定評価。

結果1. 太陽電池の角度特性評価

基準セルの分光感度角度特性評価

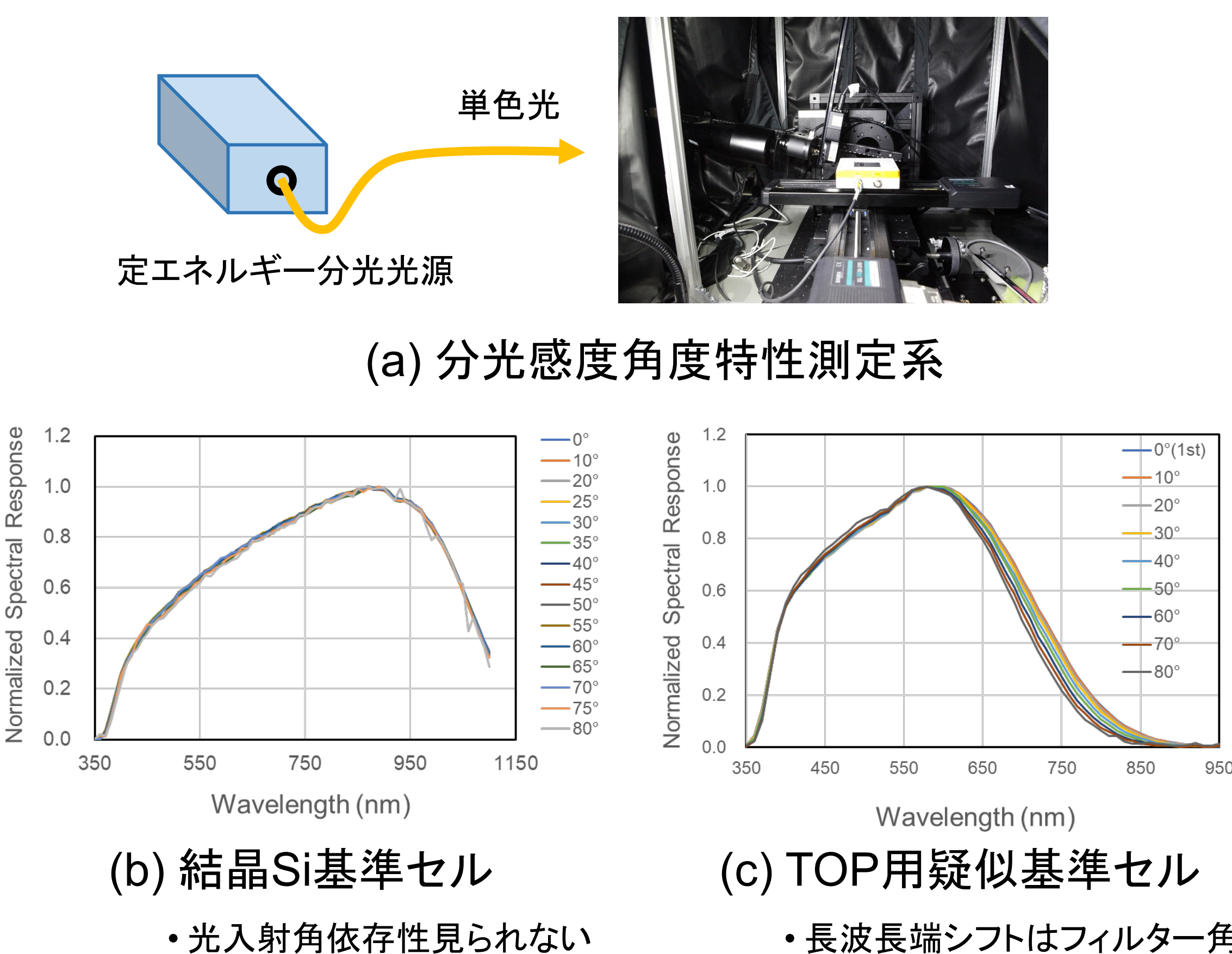


図1. 基準セル分光感度の角度特性測定(規格化比較)

太陽電池モジュールの角度特性評価

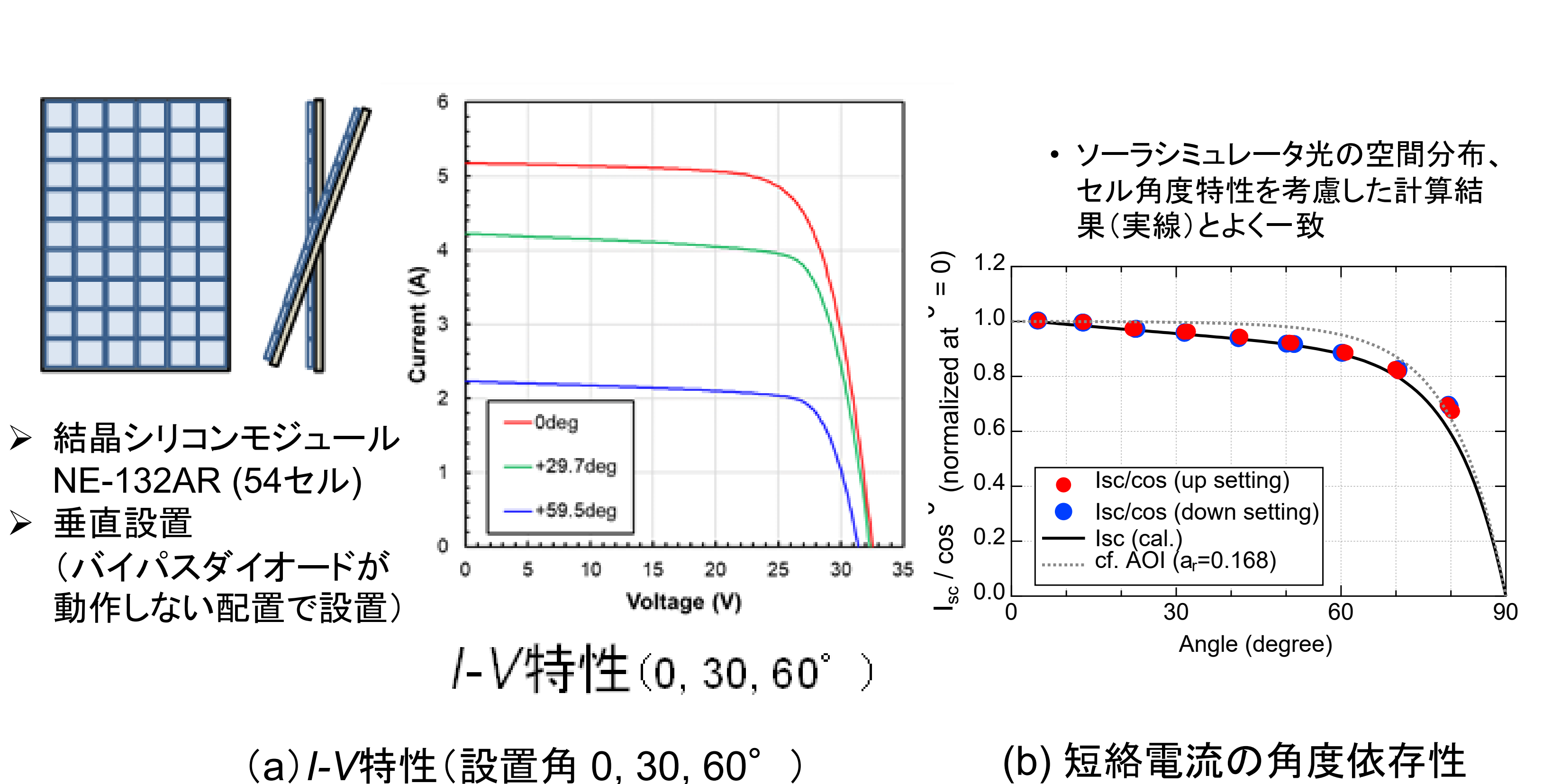


図2. 結晶シリコン太陽電池モジュールの角度特性測定

結果2. 曲面太陽電池モジュールの発電特性評価

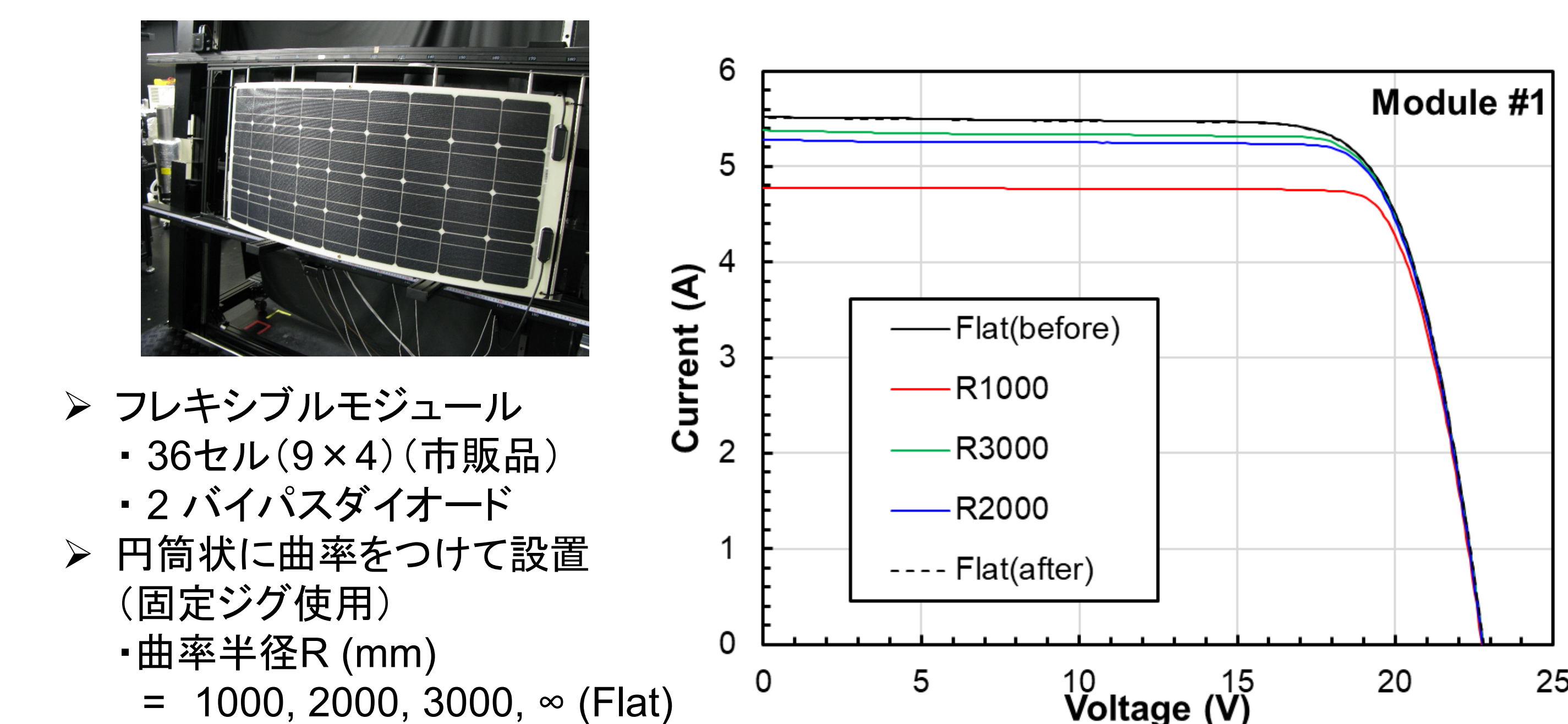
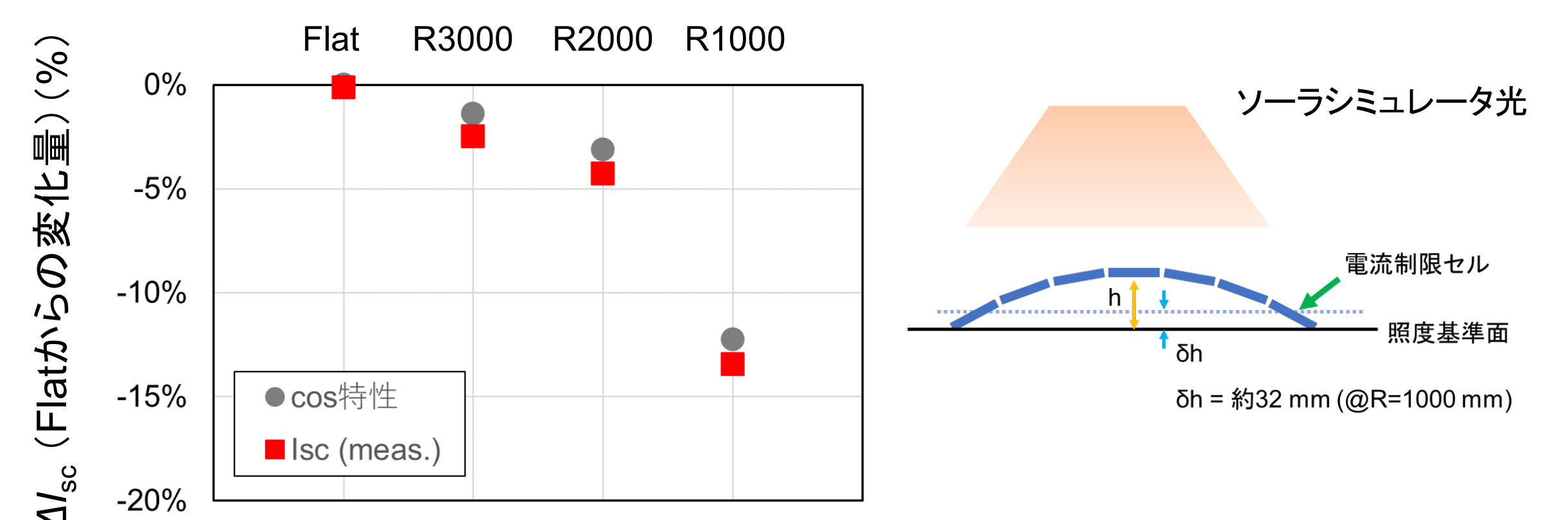


図3. フレキシブルモジュールI-V特性の設置曲率半径依存性



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の研究開発を進めている

- 太陽電池セル・モジュールの角度特性評価
 - 太陽電池セル分光感度の角度特性測定系を構築した。
 - 太陽電池モジュール出力I-Vの角度特性を測定した。照度空間分を考慮した解析により、計算結果と実験結果との良い一致を得た。
- 曲面太陽電池モジュールの発電特性評価
 - 太陽電池モジュールI-V特性の曲率依存性を評価した。
 - 構成要素セルの設置角度分布を反映した出力特性が観測された。
 - 照度分布、入射角度特性、セル接続^[4]などを考慮した解析手法の開発を進める。

参考文献

- [1] F. Plag, I. Kröger, T. Fey, F. Witt, and S. Winter, *Prog Photovolt. Res Appl.*, 26, 565–578 (2018).
- [2] W. Herrmann, S. Schaaf, L. Rimmelspacher, J. Bonilla Castro, *Proceedings of 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 1192-1196 (2019).
- [3] N. Martin and J. M. Ruiz, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 70, 25-38 (2001).
- [4] T. Tayagaki, H. Shimura, A. Sasaki and M. Yoshita, *IEEE J. Photovoltaics*, 11, 708-714 (2021) and references therein.

<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。

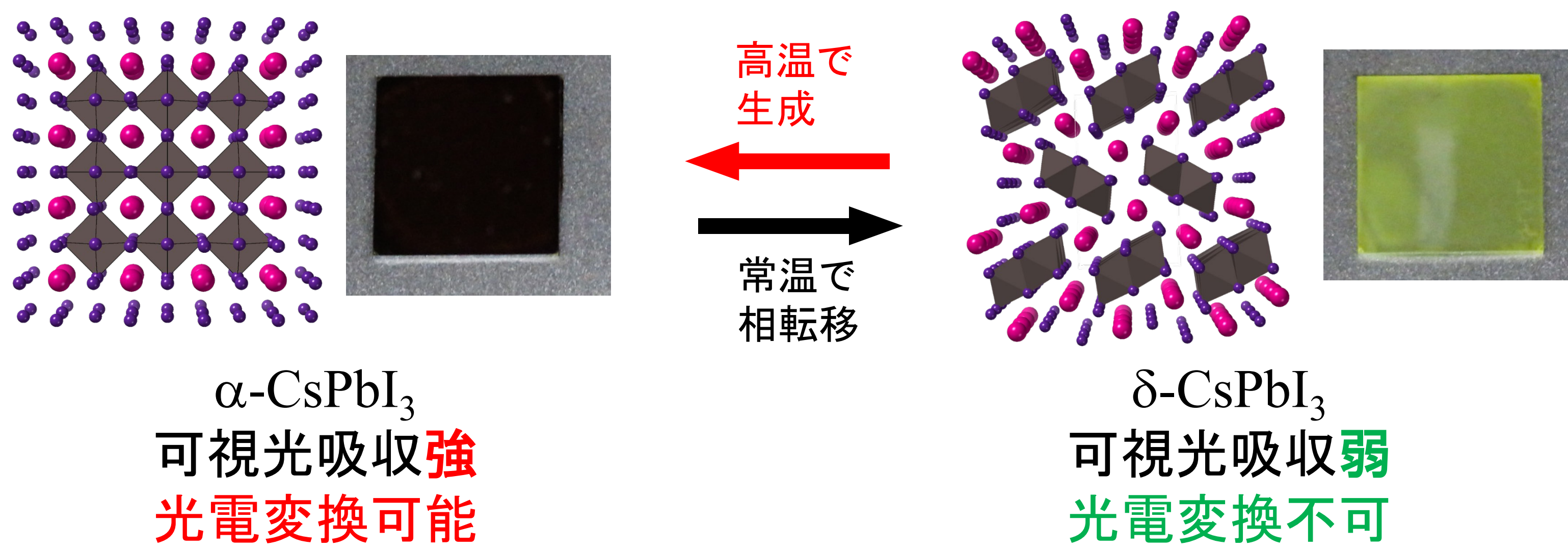
CsPb_{1-x}Ge_xI₃無機ペロブスカイト結晶の発電特性評価

古郷敦史、山本晃平、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

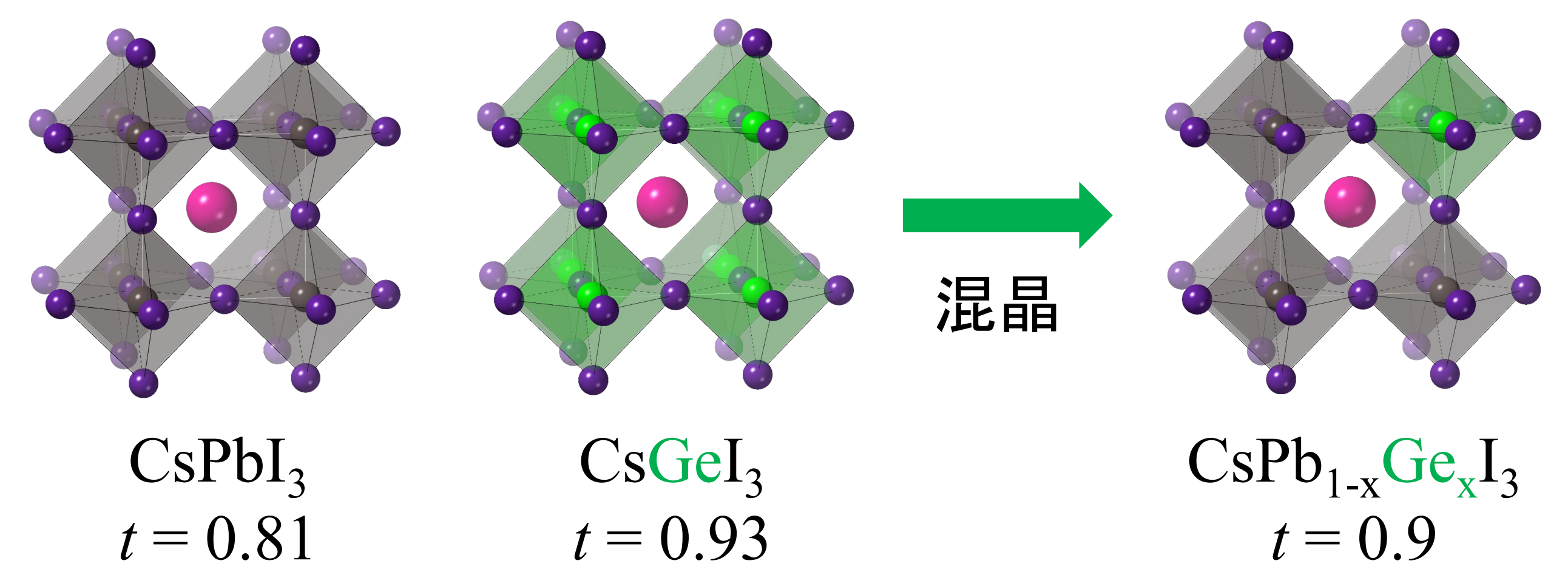
CsPbI₃ペロブスカイト太陽電池

- 従来のCH₃NH₃PbI₃ペロブスカイト太陽電池より安定 (CH₃NH₃⁺は熱・光で分解されるが、Cs⁺は分解されない)
- ×分解はされないが、相転移を起こす。常温で次第にα相 → δ相(可視光吸収弱い)
- × α相生成に>300 °C の高温焼成が必要



本研究の目的

α-CsPbI₃を常温で安定化するため、イオン半径 r の小さいGeイオンを導入

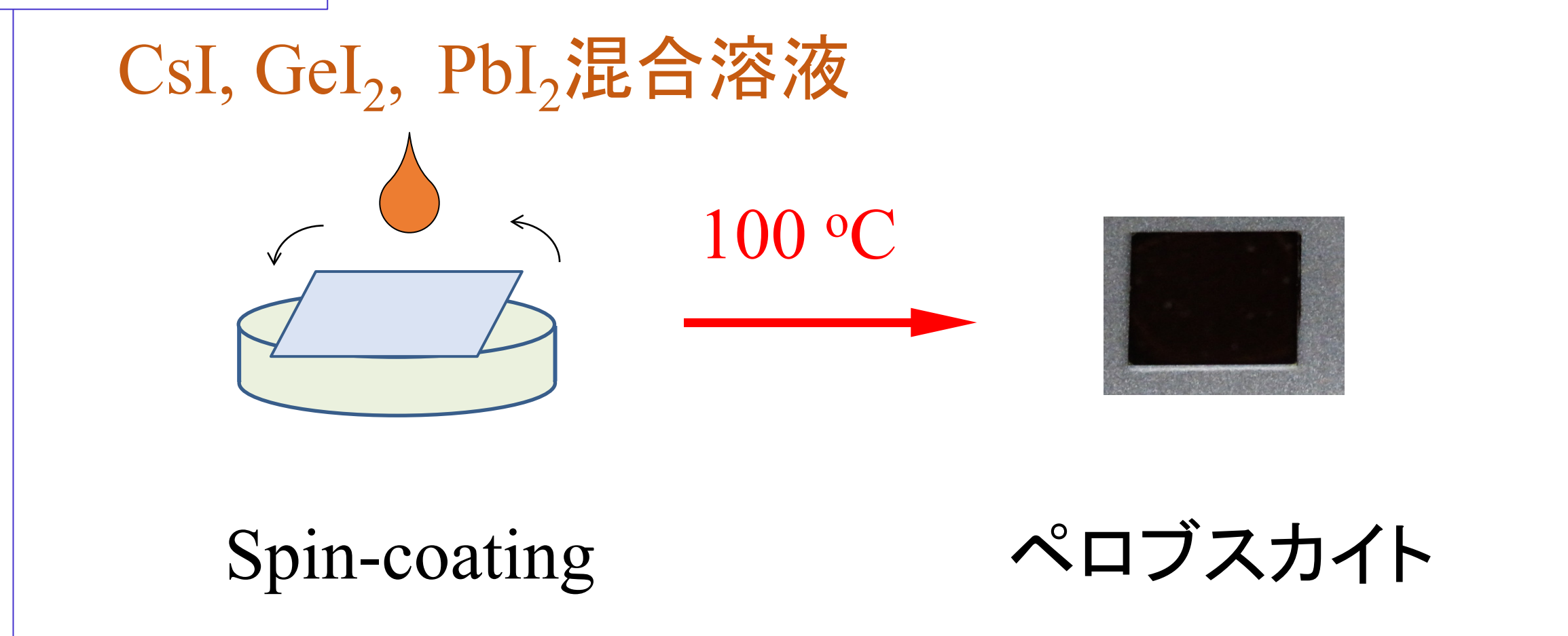


$$\text{トレランスファクター } t = \frac{r_{\text{Cs}} + r_{\text{I}}}{\sqrt{2} (r_{\text{Pb}} + r_{\text{I}})}$$

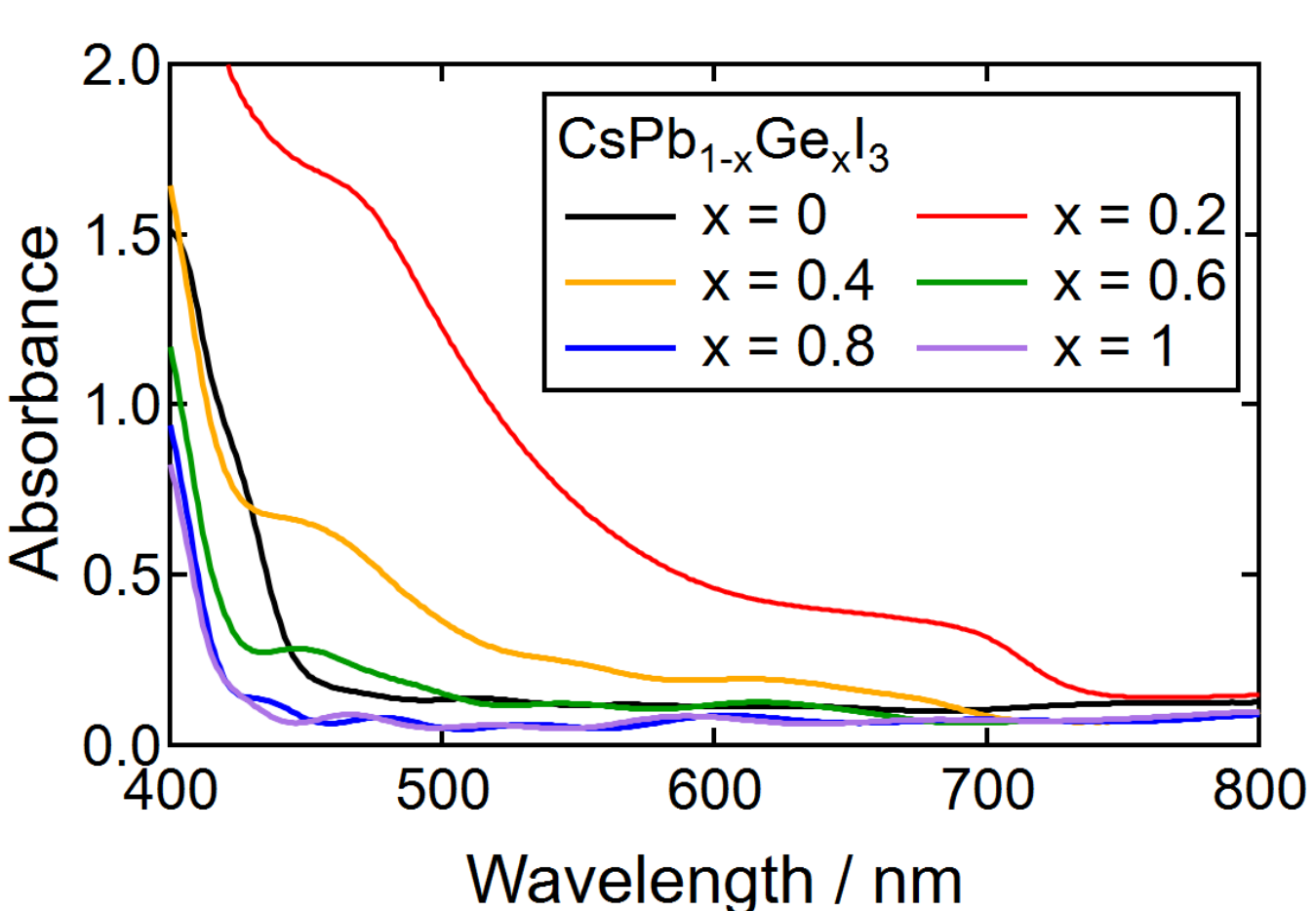
が0.9-1の範囲にあるとα相が常温で安定

結果と考察

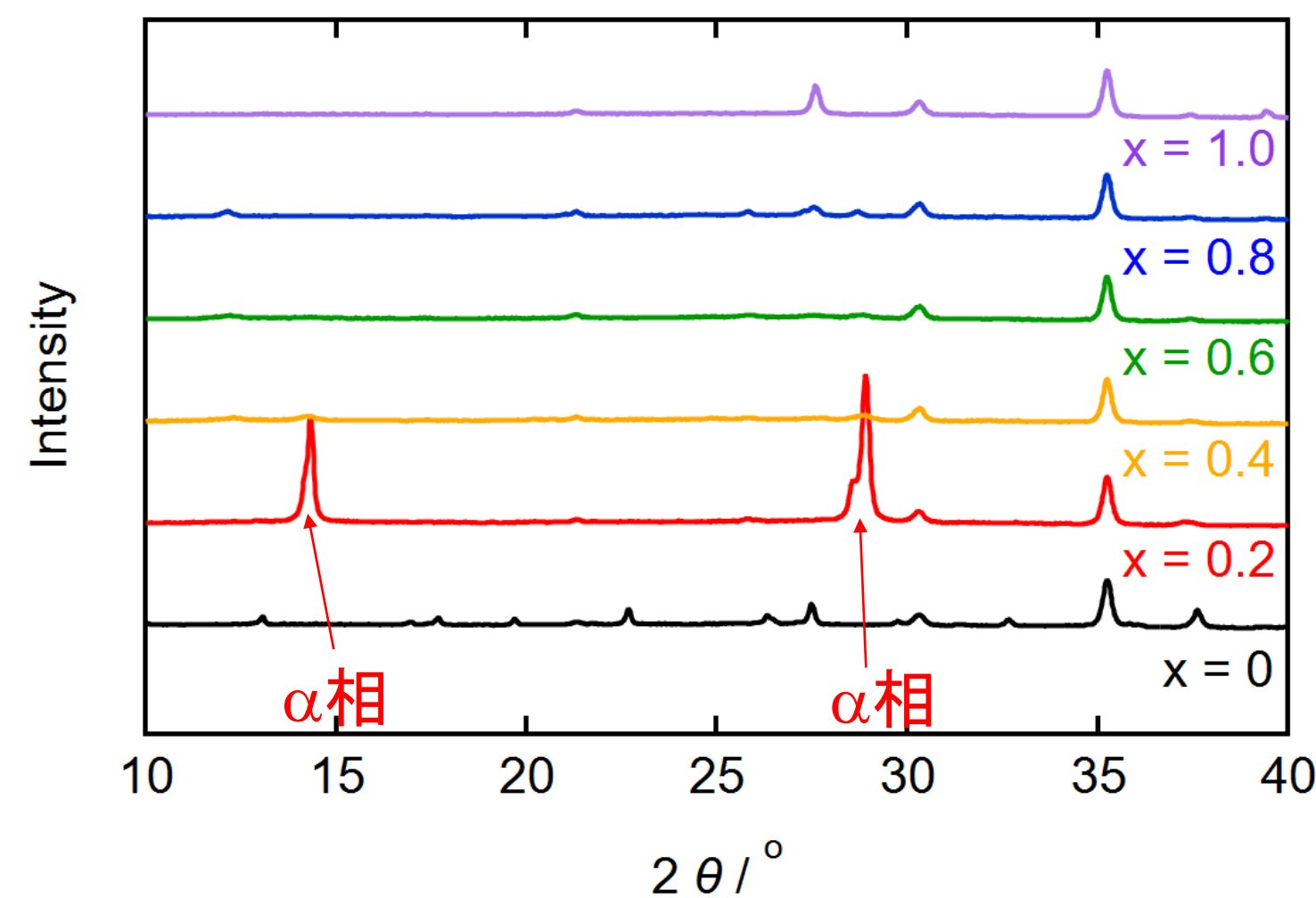
実験手法



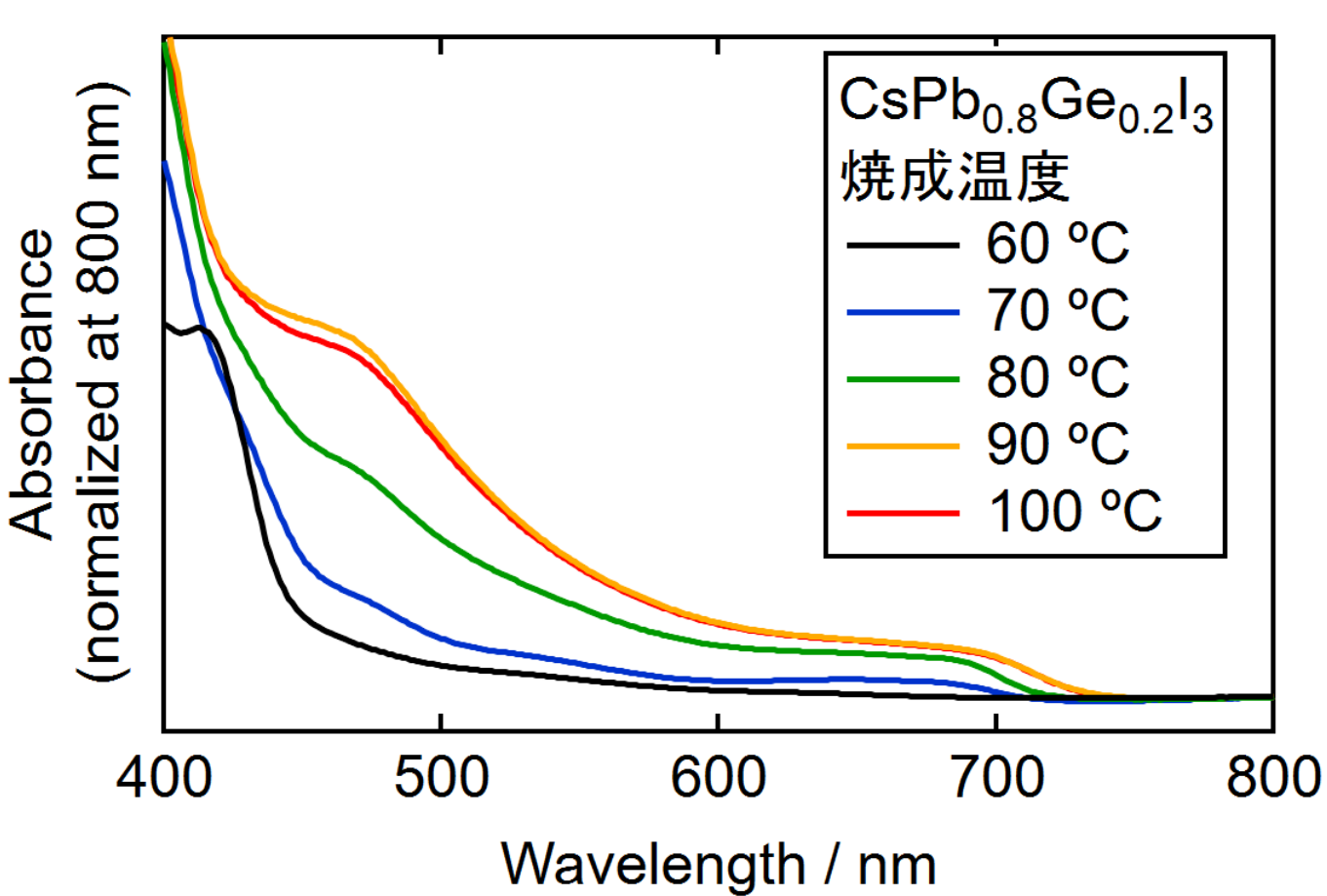
吸収スペクトル



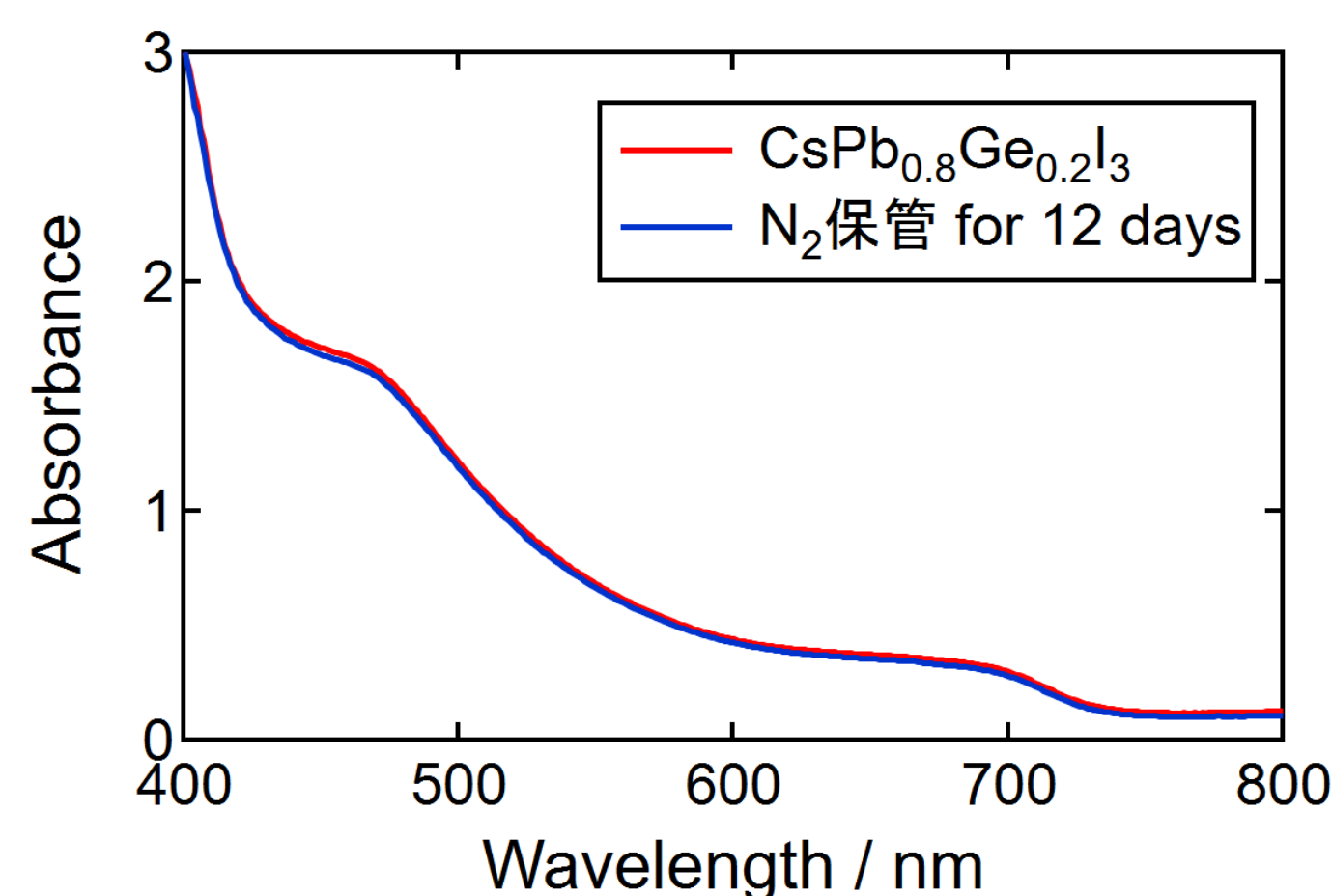
X線結晶解析



20%のGeドーピングで
可視光吸収、α-CsPb_{1-x}Ge_xI₃生成



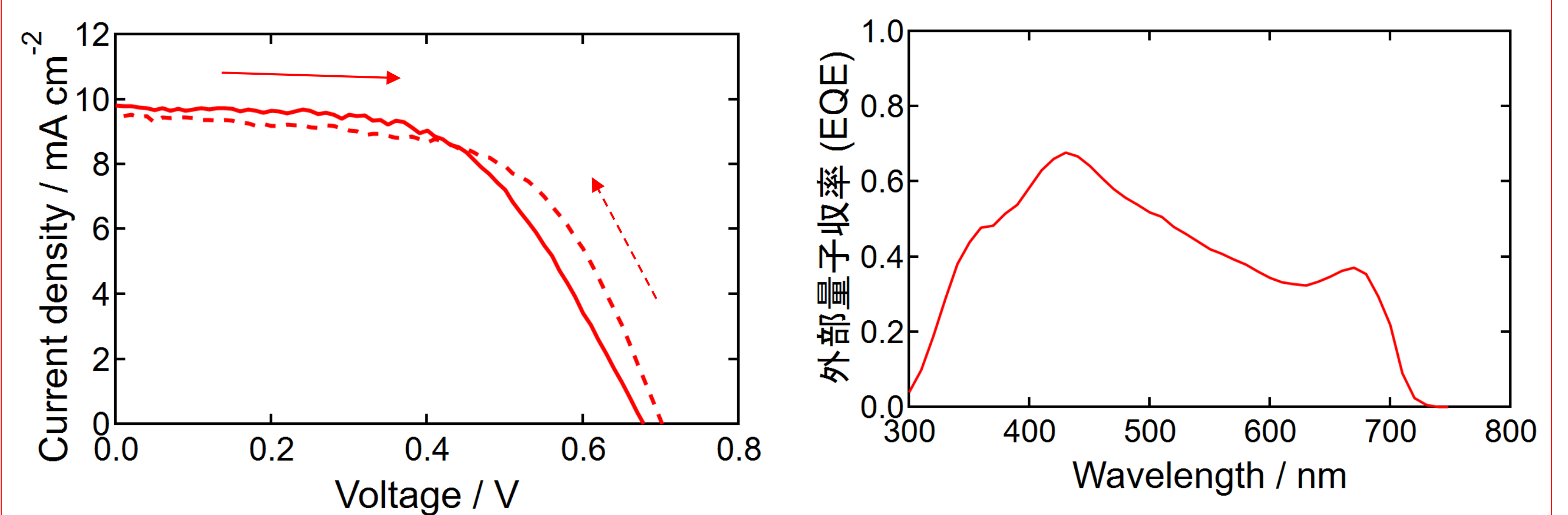
80 °C以上の加熱で
α-CsPb_{0.8}Ge_{0.2}I₃生成



室温で安定

光電変換特性

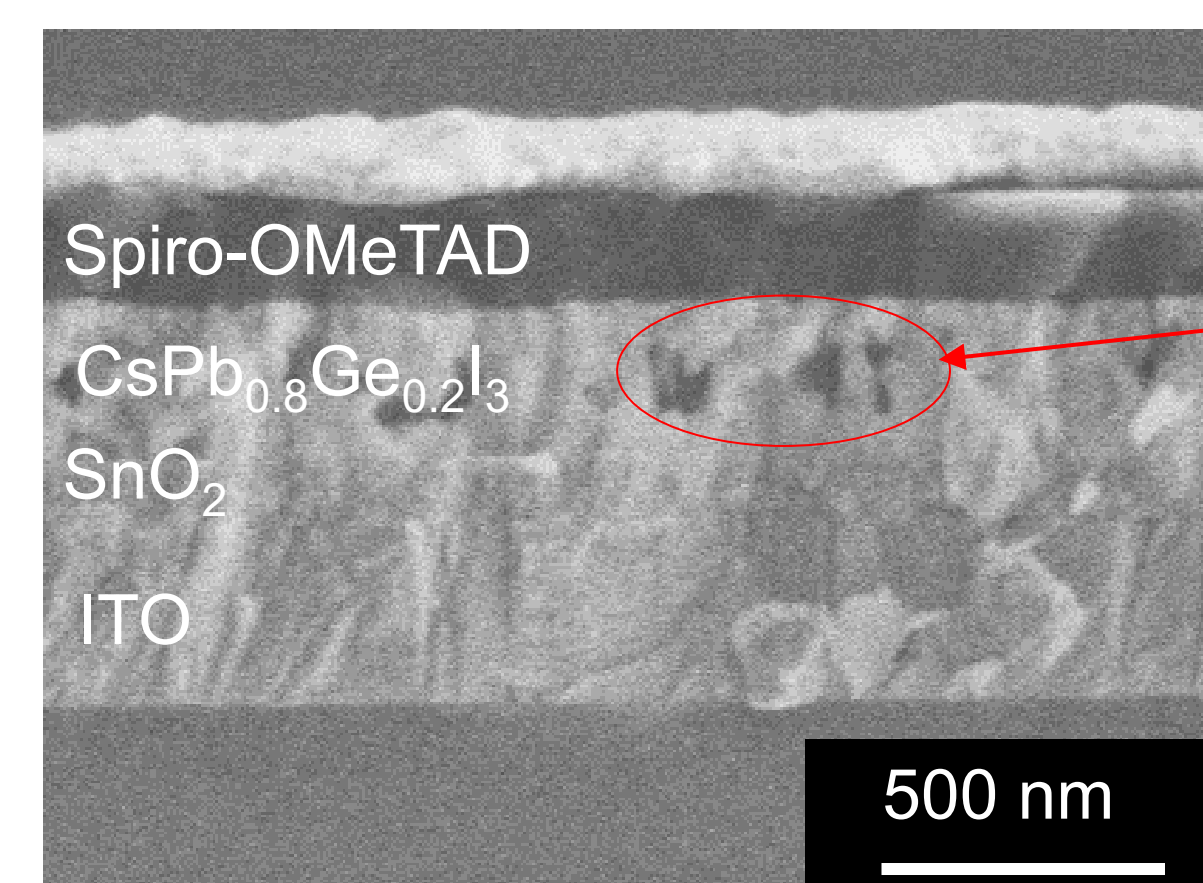
セル構造: ITO/SnO₂/CsPb_{0.8}Ge_{0.2}I₃/spiro-OMeTAD/Au



Scan Direction	J _{sc} / mA cm ⁻²	V _{oc} / V	FF	PCE / %
forward scan (-0.2 V → 1.3 V)	9.80	0.678	0.566	3.76
backward scan (1.3 V → -0.2 V)	9.58	0.701	0.590	3.97

3.97%のエネルギー変換効率
~70%の光電流生成の外部量子効率
が得られた

顕微鏡観察画像



CsPb_{0.8}Ge_{0.2}I₃層に
Voidがみられる。
前駆体溶液に添加剤を
加える等改善が必要

結論

CsPbI₃ペロブスカイト結晶にGeイオンを導入することで、80 °Cの低温製膜に成功した。(従来は>300 °C)
CsPb_{0.8}Ge_{0.2}I₃は常温で安定である。
エネルギー変換効率 3.97%が得られた。(今後、添加剤等で改善予定)

A. Kogo, K. Yamamoto, T. N. Murakami, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**, 020904 (2022).

謝辞

科研費若手研究 (21K14733)
「ゲルマニウムを用いた
高耐久ペロブスカイト太陽電池の開発」

CuSCN正孔輸送層を用いたペロブスカイト太陽電池の特性評価

駒澤雄飛¹、内田史朗¹、村上拓郎²、古郷敦史²

1 千葉工業大学

2 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

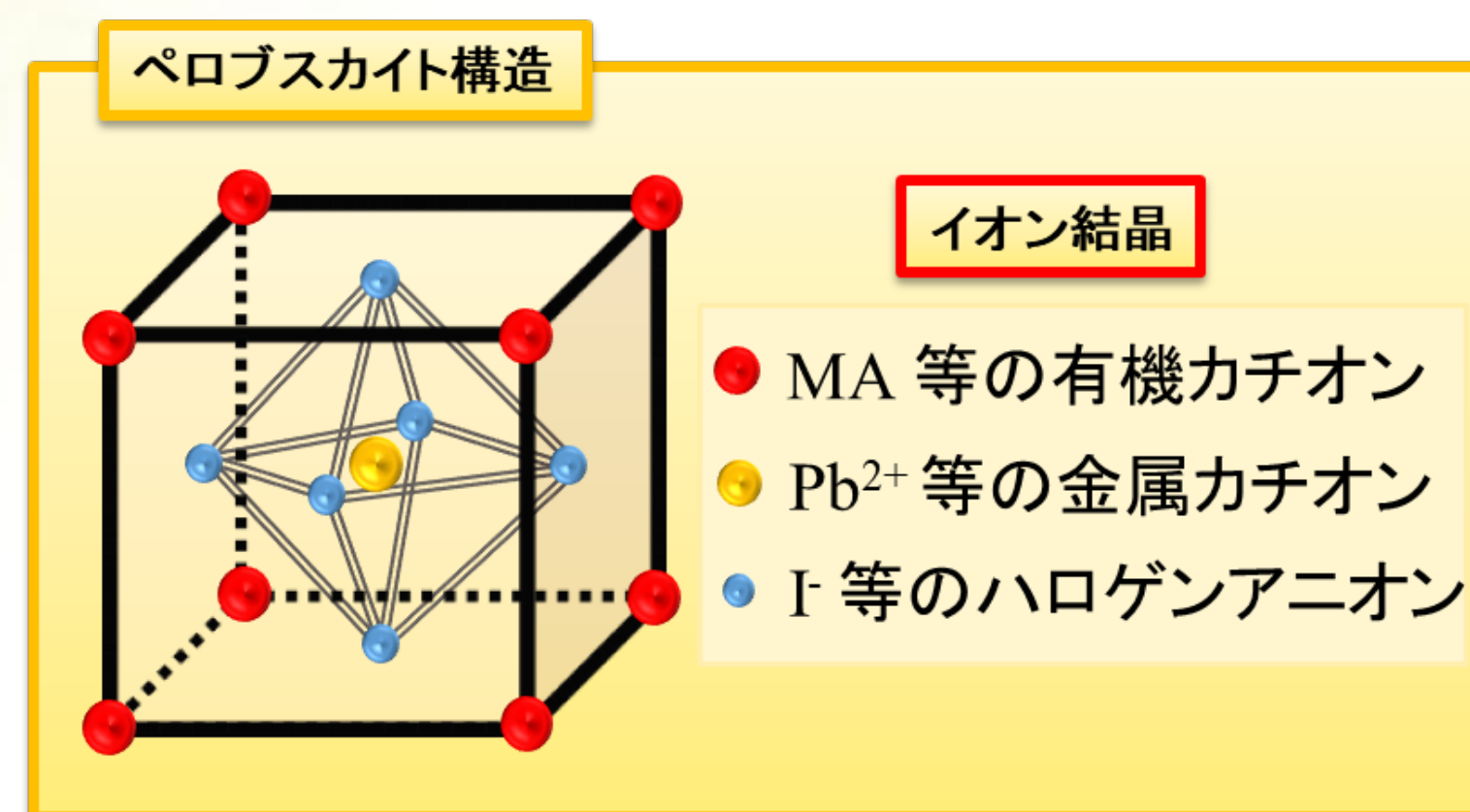
ペロブスカイト太陽電池(Perovskite Solar Cell)

- エネルギー変換効率が高い(25.5%) [1]
- 塗布法で容易に作製が可能(低コスト)

×正孔輸送材

spiro-OMeTAD 高価・低耐久

代替となる正孔輸送材料が求められている



本研究の目的

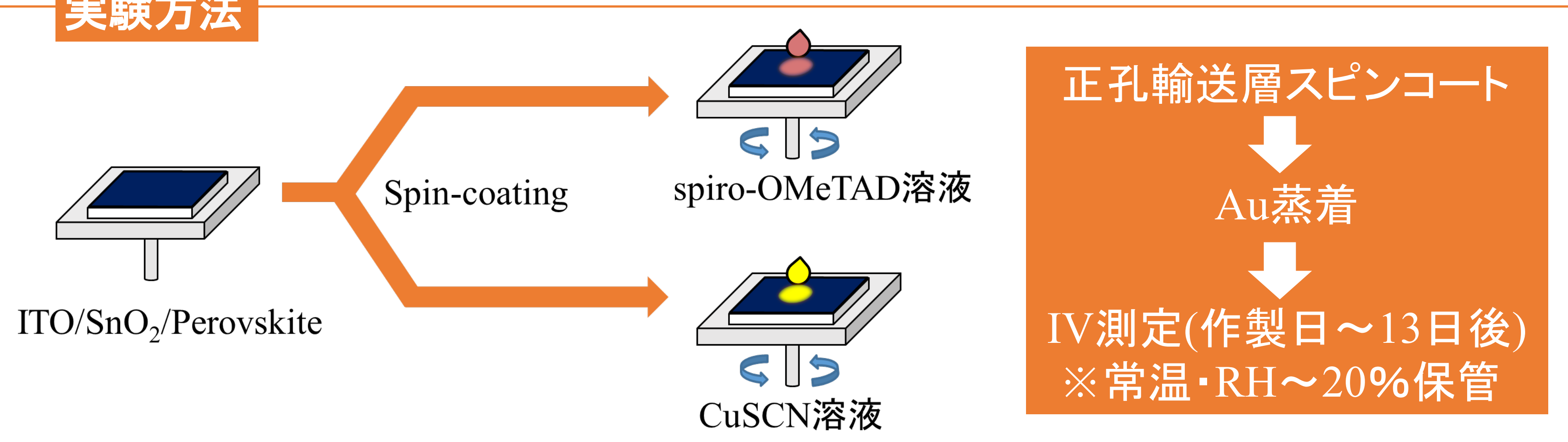
CuSCN (チオシアン酸銅) [2] を spiro-OMeTADの代替材料として検討した

- 低コスト
- 無機化合物のため、高耐久

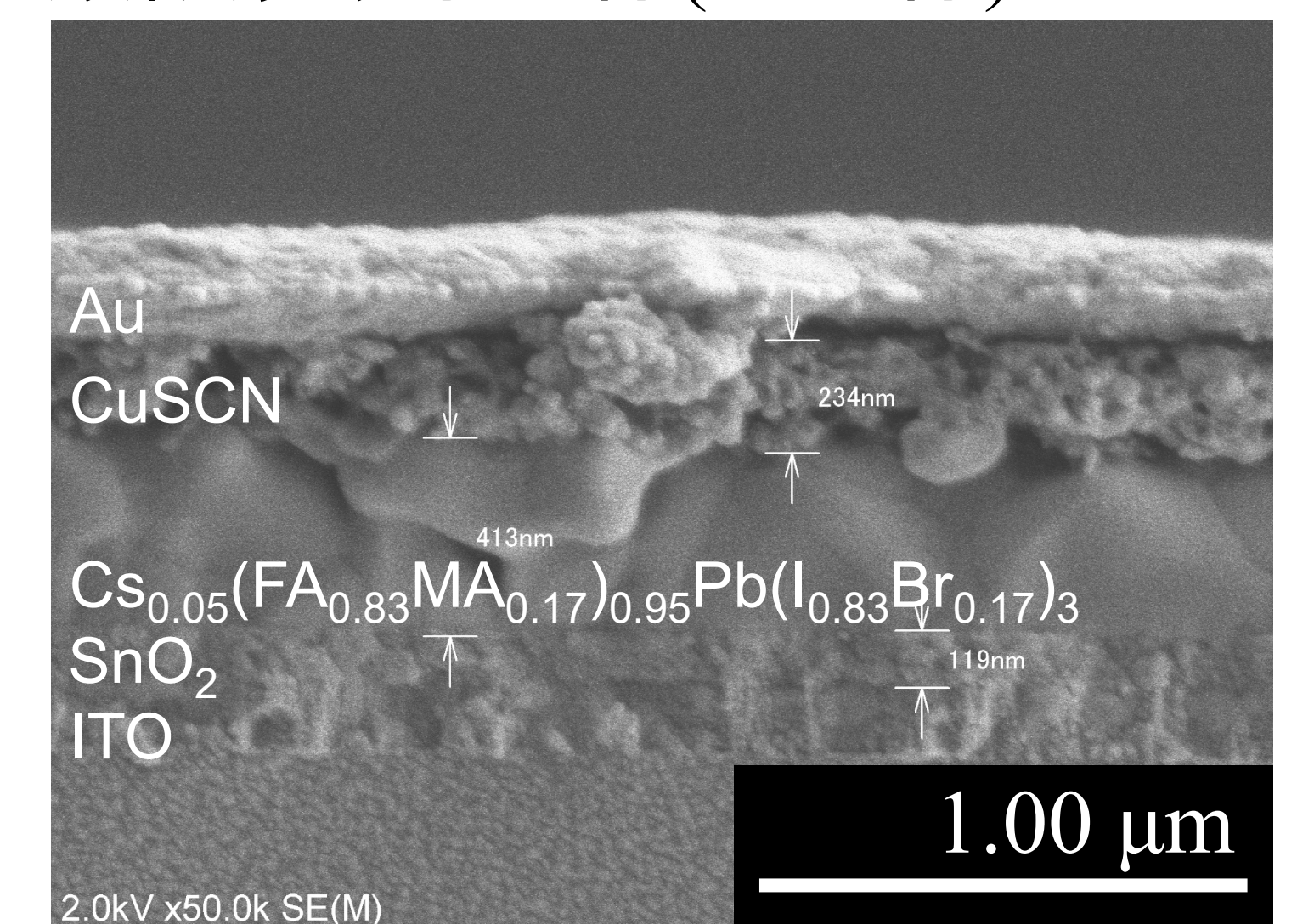
CuSCNを正孔輸送層としてペロブスカイト太陽電池に導入し性能・耐久性を評価した

結果と考察

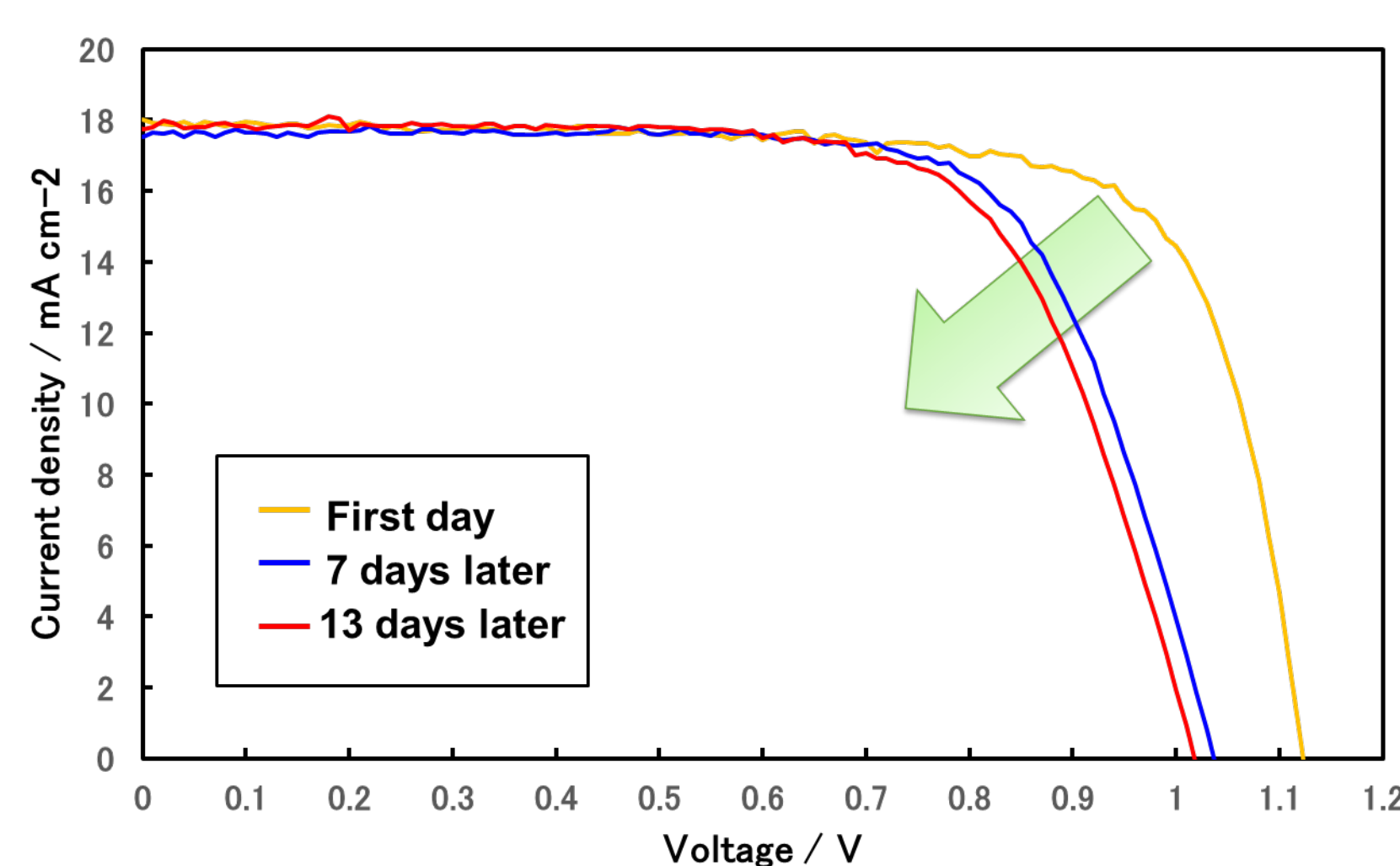
実験方法



顕微鏡観察画像(SEM像)



Spiro-OMeTAD

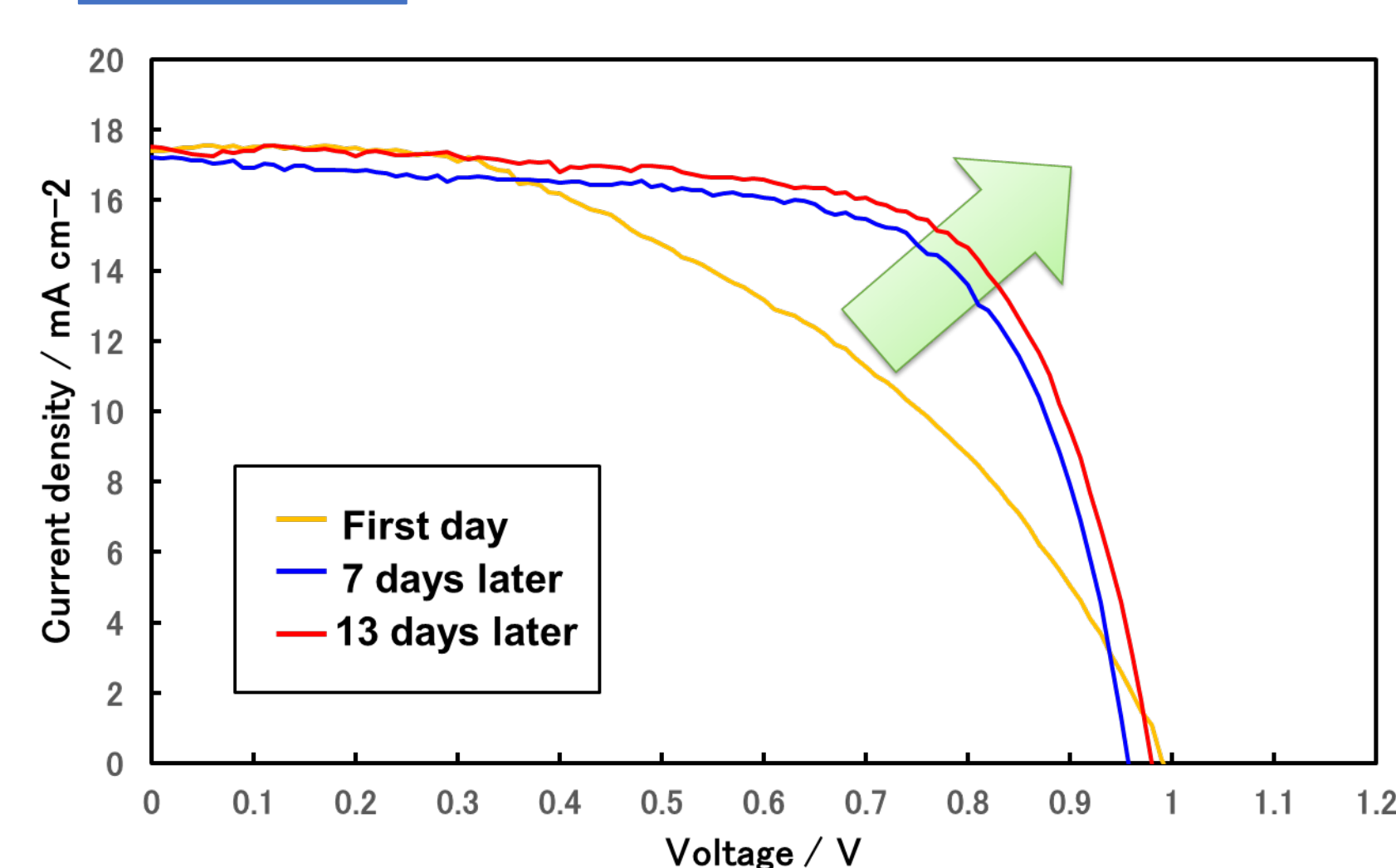


	Jsc / mA cm ⁻²	Voc / V	FF	PCE / %
First day	18.01	1.123	0.751	15.18
7 days later	17.53	1.037	0.723	13.14
13 days later	17.75	1.018	0.702	12.68

時間経過により、エネルギー変換効率低下

→ 主にFFの低下が原因 → 水分吸収による劣化

CuSCN



	Jsc / mA cm ⁻²	Voc / V	FF	PCE / %
First day	17.41	0.992	0.466	8.05
7 days later	17.58	0.912	0.713	11.42
13 days later	17.51	0.980	0.685	11.76

時間経過により、エネルギー変換効率向上

→ 主にFFの向上が要因 → エイジングによる層の平滑化

結論

spiro-OMeTAD正孔輸送層ペロブスカイト太陽電池と比較し CuSCN正孔輸送層ペロブスカイト太陽電池は、

時間経過によりエネルギー変換効率が向上し、
耐久性が高くなった。

(今後、添加剤等で変換効率の改善予定)

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).

有機薄膜結晶上のヘテロエピタキシャル成長による ハロゲン化鉛ペロブスカイト結晶の配向制御

神川郁海¹, 宮寺哲彦², 近松真之², 村上拓郎², 吉田郵司², 野田啓¹
¹慶應義塾大学, ²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

研究背景, 目的

■ハロゲン化鉛ペロブスカイト(組成式 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, MAPbI_3)

✓可視光波長が吸収できるエネルギーギャップ

✓大きな吸光係数

✓長いキャリア拡散長

✗結晶粒界を要因とするトラップ準位の発生, キャリア再結合の増加[1]

⇒ペンタセン, ルブレンを下地として採用し, ヘテロエピタキシャル成長を用いてペロブスカイト結晶の配向を制御することでその結晶粒界を減少させ, もってペロブスカイト太陽電池の変換効率向上を目指す.

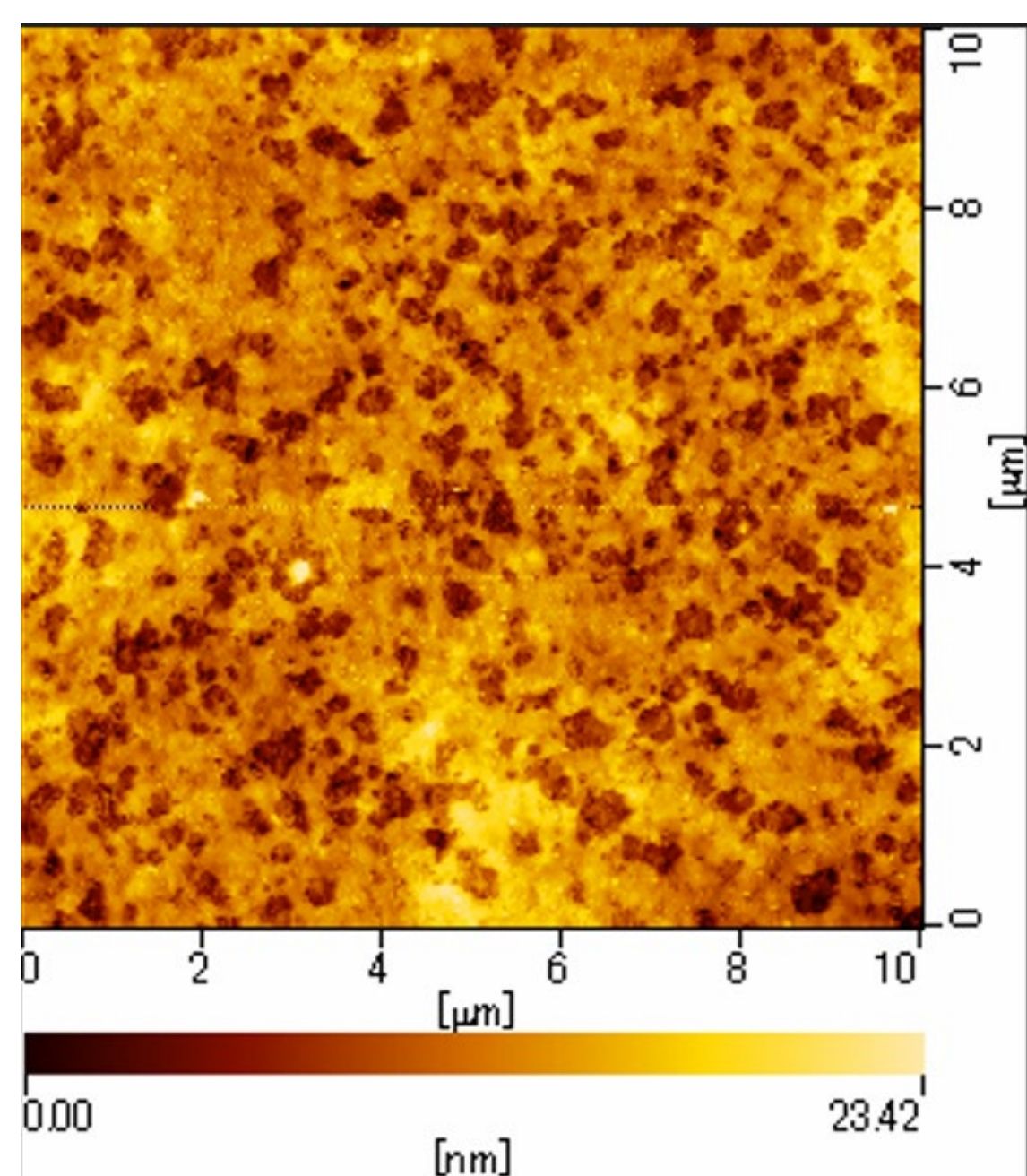
■高結晶性有機薄膜(ペロブスカイトの下地)の選択

①ルブレ膜上にペロブスカイトをヘテロエピタキシャル成長させ, ペロブスカイトの配向を制御[2]

②ペンタセン膜上にルブレンを成長させると, ルブレの結晶性が向上[3]

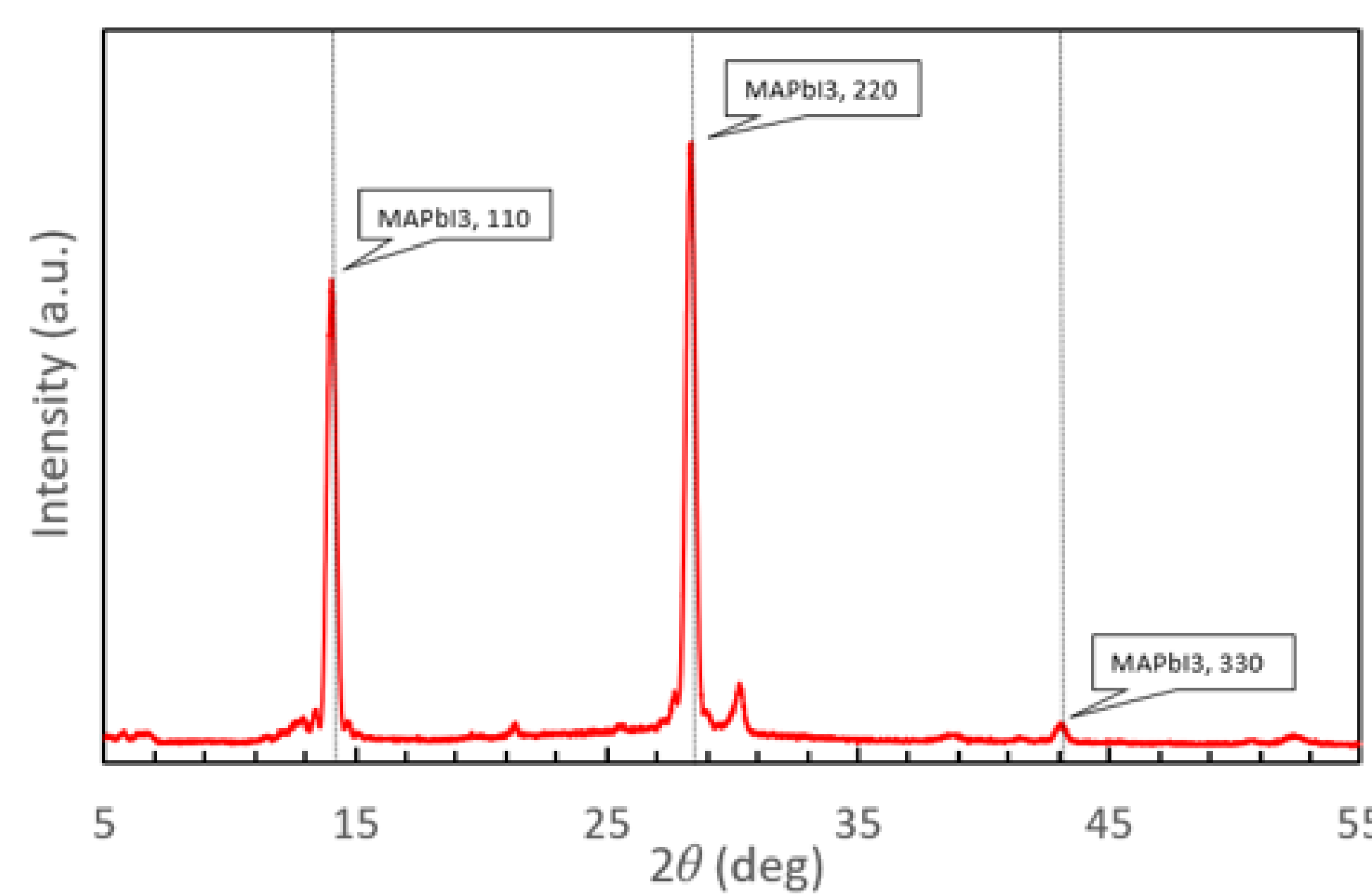
結果, 考察

■ペロブスカイト膜の作製



ペロブスカイト膜のAFM像

⇒RMS = 3.347 nmの平坦な膜



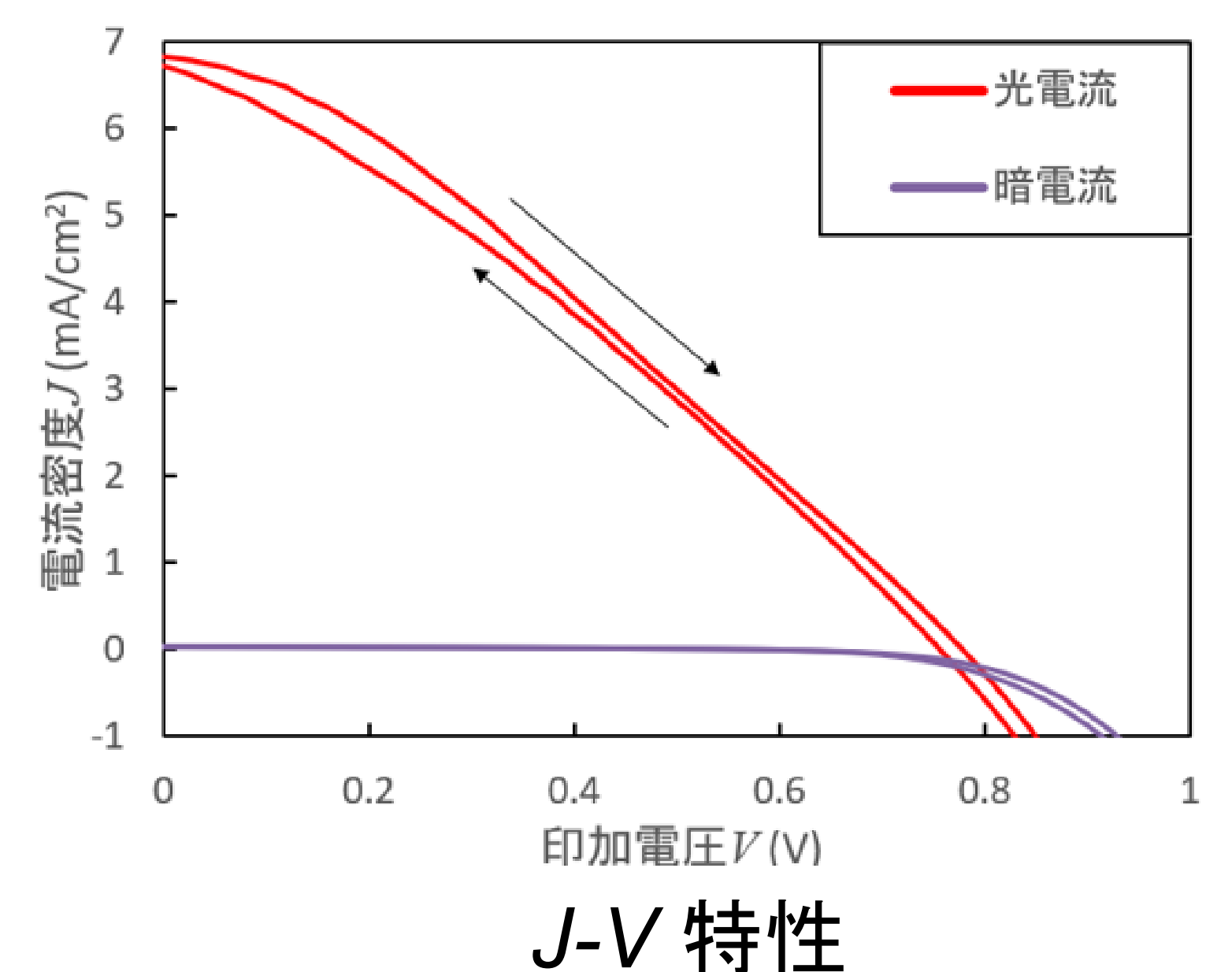
ペロブスカイト膜のXRDパターン

⇒MAPbI₃は(110)面およびその高次回折ピークのみ検出

■ペロブスカイト太陽電池の作製 ※照射条件: AM1.5G 1-Sun

ペロブスカイト太陽電池の 各パラメータ

	forward	backward
短絡電流密度 j_{sc} (mA/cm ²)	6.82	6.71
開放電圧 V_{oc} (V)	0.78	0.75
曲線因子FF	0.31	0.30
直列抵抗 R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	38.9	41.0
並列抵抗 R_{sh} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	431	209
変換効率 η (%)	1.63	1.54



J-V 特性

⇒変換効率は1.63%

ペロブスカイト太陽電池の 高効率化に向けて

1. 直列抵抗を低減

⇒電極を再度検討

2. 光吸収効率を向上

⇒ペロブスカイトの膜厚を最適化



基板温度50°C

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (MAI) 2 nm / 回, PbI_2 1 nm / 回で
交互に10回ずつ成膜(真空中レーザ蒸着)

基板温度50°Cで10 nm 成膜(真空中レーザ蒸着)

基板温度50°Cで10 nm 成膜(真空中レーザ蒸着)

スピコート後, 135°Cでポストアニール

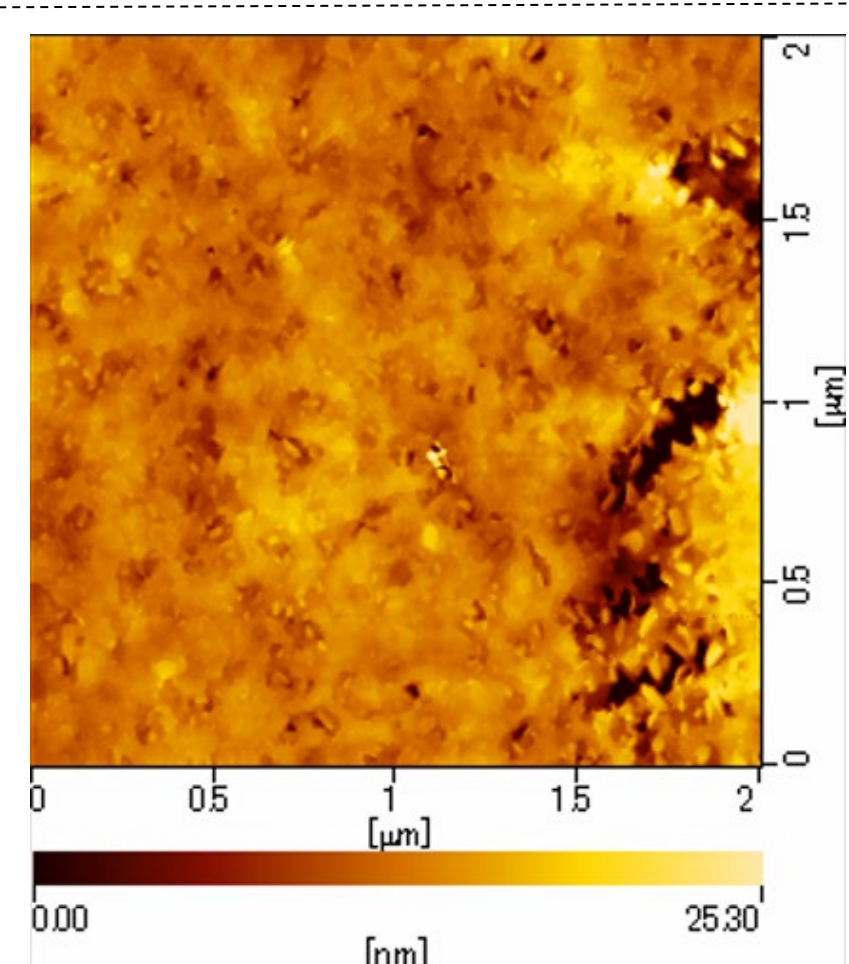
作製した試料の膜構造

■高結晶有機薄膜の有無による差異

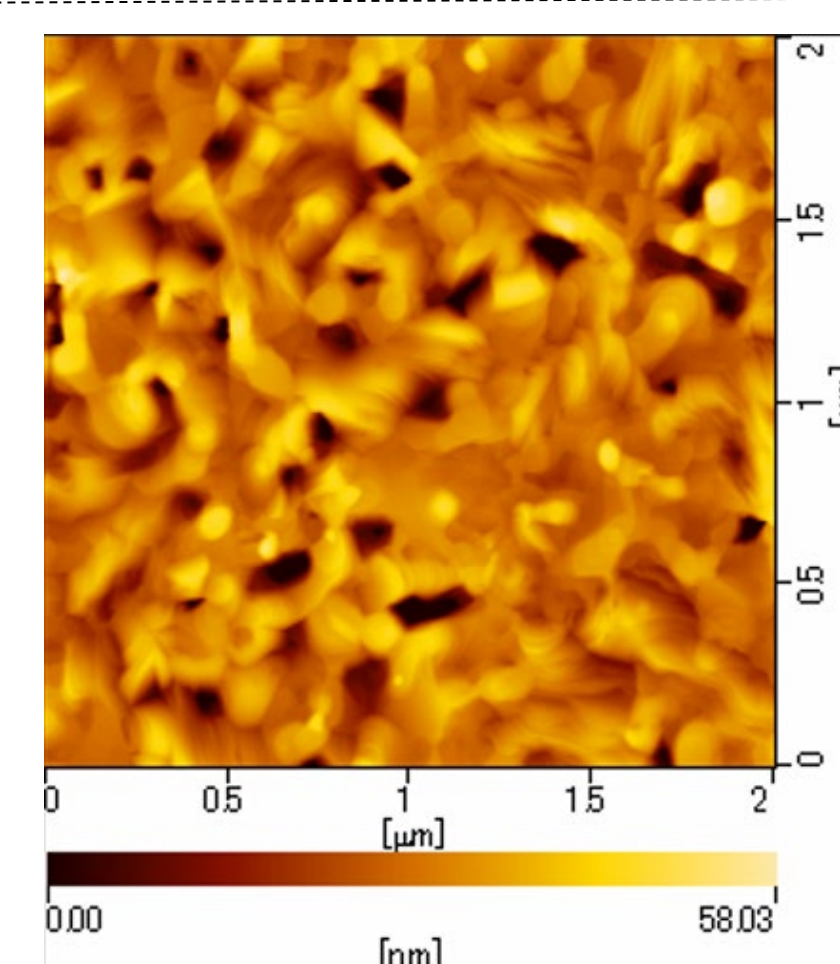
高結晶有機薄膜あり → RMS = 3.185 nm

高結晶有機薄膜なし → RMS = 8.452 nm

⇒高結晶有機薄膜により, ペロブスカイトの
平坦性が向上し, 結晶粒界が減少



高結晶有機薄膜あり



高結晶有機薄膜なし

結論

下地材料として高結晶ペンタセン, ルブレを使用したことで, ペロブスカイト結晶を(110)面配向に制御でき, 結晶粒界の少ない平坦な膜が得られた.

参考文献

[1] Guo, Q et al. *Nanoscale* 11, 115-124 (2019).

[2] Miyadera, T et al. *APL Mater.* 8, 041104 (2020).

[3] Haemori, M et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* 44, 3740-3742(2005).

有機薄膜結晶上のヘテロエピタキシャル成長による ハロゲン化鉛ペロブスカイト結晶の配向制御

神川郁海¹, 宮寺哲彦², 近松真之², 村上拓郎², 吉田郵司², 野田啓¹

1 慶應義塾大学, 2 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

背景と目的 近年, ハロゲン化鉛ペロブスカイト (組成式 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, 以下 MAPbI_3) を発電層に使用したペロブスカイト太陽電池が, その優れた変換効率から注目されている. その一方で, MAPbI_3 の結晶粒界による局所的なトラップ準位の発生やキャリア再結合の増加が問題となっており [1], 太陽電池としての性能を向上させるために結晶粒界を減少させることが要請される. 本研究では, 結晶粒界の減少に寄与する手法として MAPbI_3 のヘテロエピタキシャル成長 [2] に注目し, MAPbI_3 の結晶性を向上させることを目的として, ヘテロエピタキシャル成長の下地に用いる有機薄膜結晶の材料を検討した.

結果と考察 ITO 基板の上に PEDOT:PSS をスピコートし, その上に有機薄膜結晶としてペンタセン, ルブレンをレーザ蒸着によりそれぞれ 10 nm ずつ順に成膜した. なお, 成膜中は基板温度を 50°C に保った. その後, ルブレン上に $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (以下, MAI), PbI_2 をレーザ蒸着で交互に成膜し, MAPbI_3 膜を作製した. 成膜 1 回あたりの目標膜厚を MAI, PbI_2 ともに 1 nm とし, それぞれ 10 回交互に成膜した. このとき, 基板温度は 50°C に保った. こうして得られた MAPbI_3 膜について XRD の測定結果と AFM 像をそれぞれ Fig. 1, Fig. 2 に示す. 作製した MAPbI_3 膜について, Fig. 1 からヘテロエピタキシャル成長によって (110) 配向していることが示され, Fig. 2 の AFM 像の RMS が 3.347 nm であることから, 高い平坦性を有することが確認された. また, 素子構造を ITO/PEDOT:PSS/ペンタセン/ルブレン/ MAPbI_3 /C₆₀/BCP/Al とし太陽電池を作製して AM1.5G, 1-Sun 照射下で J - V 特性を測定したところ, 変換効率は 1.63% と算出され, 太陽電池として機能することが確認された. 変換効率を向上させる手法としては, 直列抵抗を低減するために使用する電極を再検討すること, 光吸収の効率を向上させるために発電層である MAPbI_3 膜の膜厚を最適化することが挙げられる.

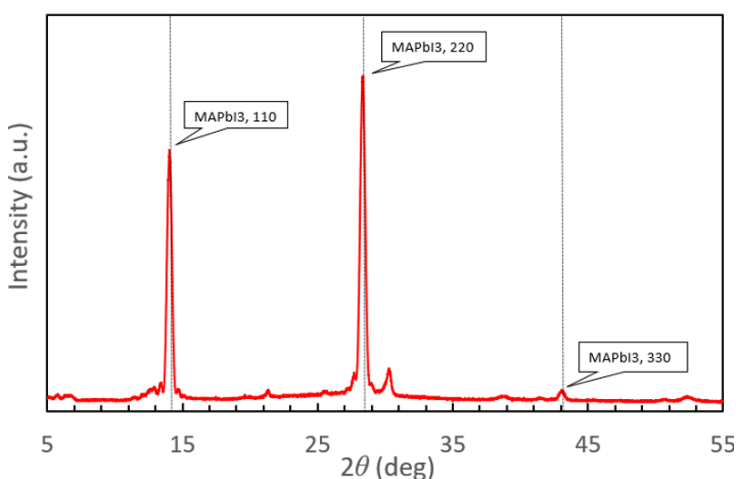


Fig. 1 X-ray diffraction patterns of the MAPbI_3 film

[1] Guo, Q et al. *Nanoscale* 11, 115-124 (2019)

[2] Miyadera, T et al. *APL Mater.* 8, 041104 (2020)

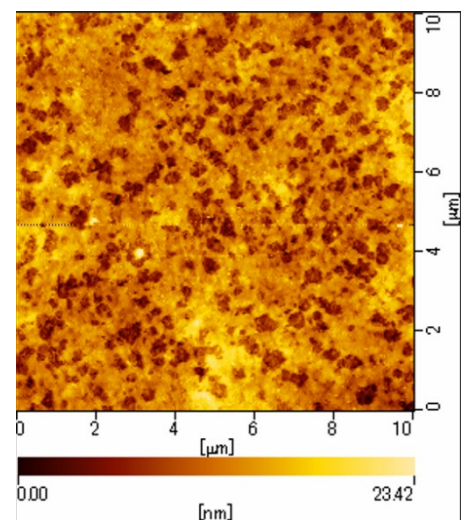


Fig. 2 10 μm \times 10 μm AFM image for the MAPbI_3 film

ペロブスカイト・シリコンタンデム太陽電池用 トップセル作成のための成膜技術の検討

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

研究の目的

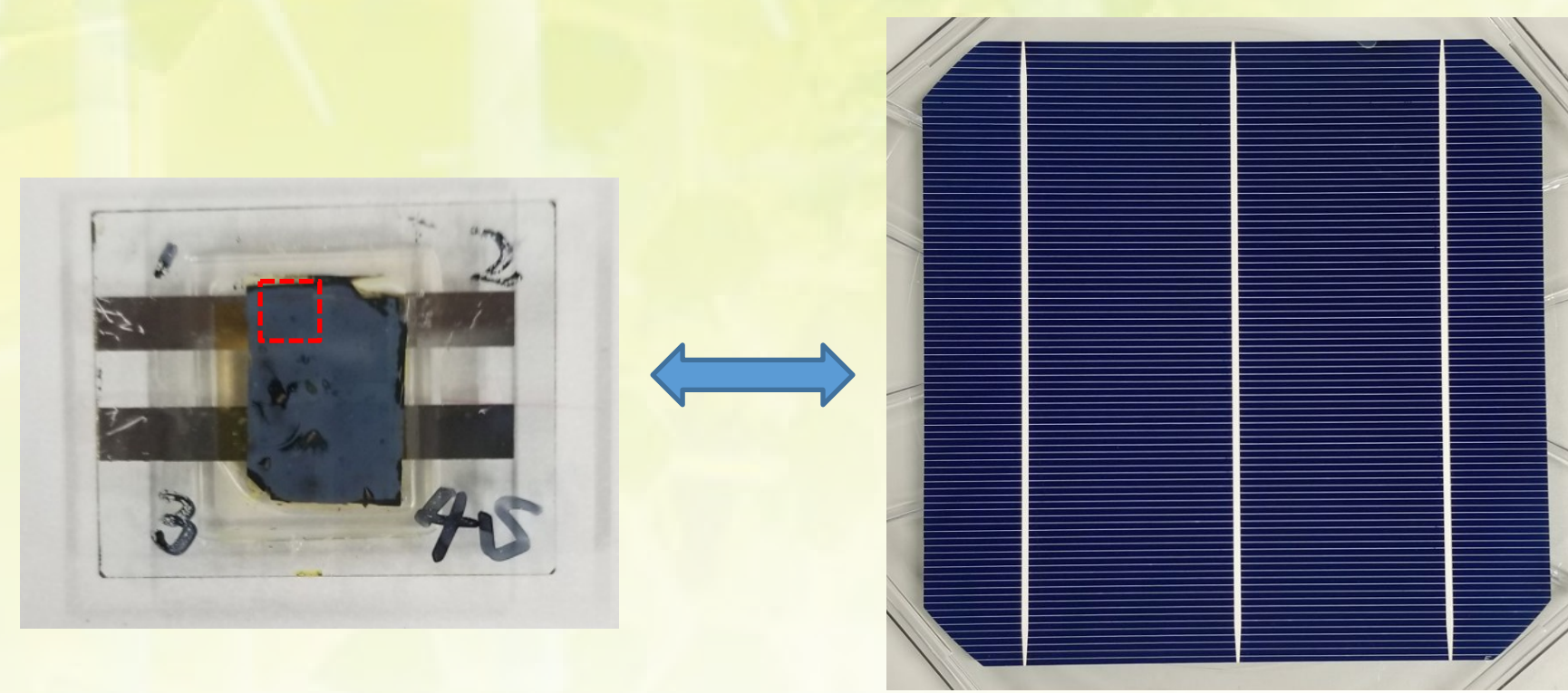


図1：(左) 山形大学で作成したペロブスカイト太陽電池。赤の点線で示した領域が3 mm角の太陽電池となっている。(右) 一般的な大きさの結晶シリコン太陽電池。156 mm角の大きさがあり、この大きさの領域に3 mm角の太陽電池作成のレシピをそのまま適用してペロブスカイト太陽電池を作ることは出来ない。

鉛ハライドペロブスカイト化合物を活性層とする太陽電池はインク塗布による成膜により約3 mm角(0.0954 cm²)では単体で25.5%の効率を示し[1]、インクのレシピを変えることでバンドギャップ制御も可能であるため、これをトップセルとし、結晶シリコン系太陽電池をボトムセルとしたタンデム太陽電池が30%を超える変換効率と低コストを両立した太陽電池の実現に有望である。

本研究の目的は、これまで1cm前後の大きさで研究されてきたペロブスカイト太陽電池のスケールアップのために必要な要素技術の研究と開発である。

結果① 発電特性の例

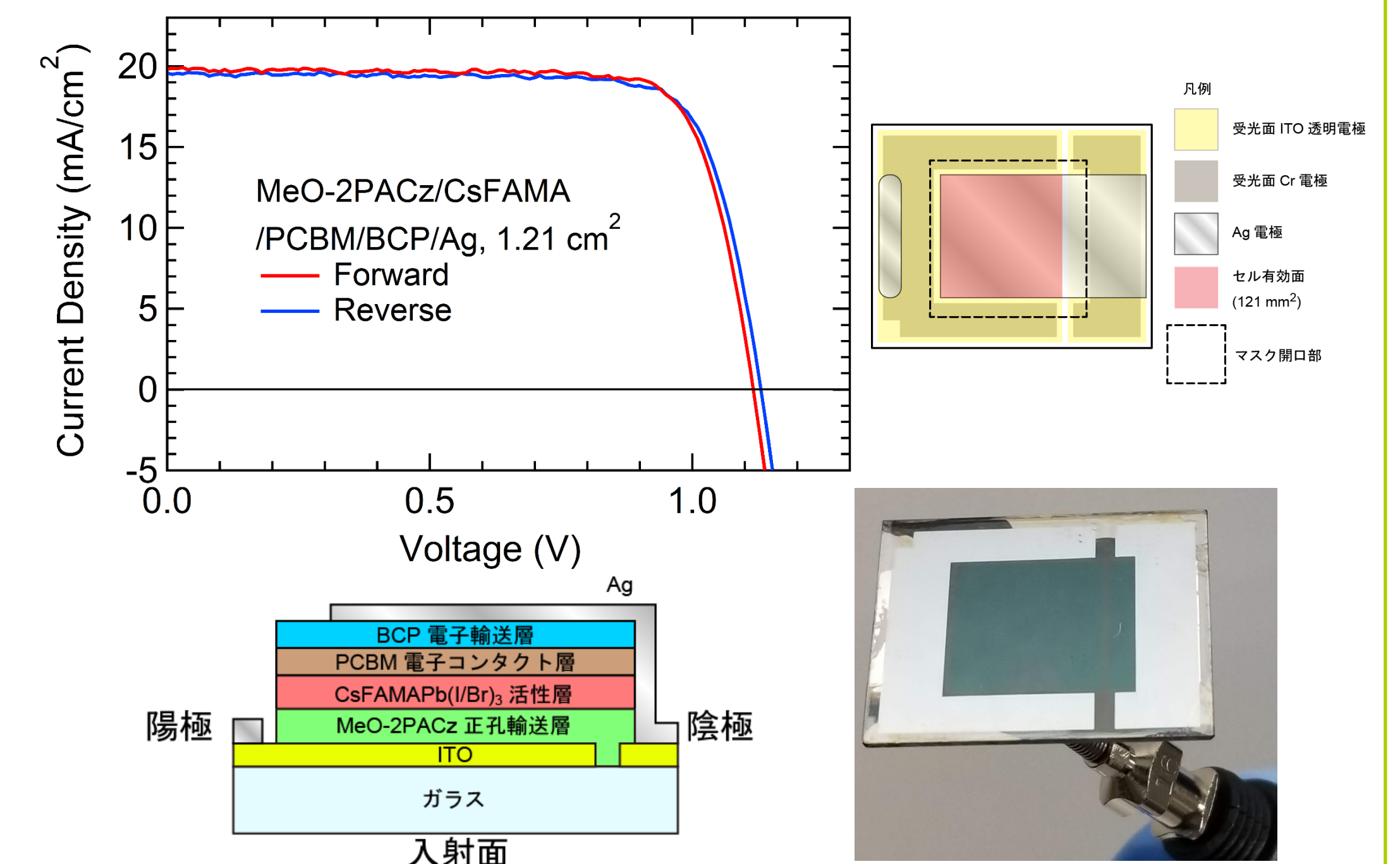


図3：(左上) 作成した太陽電池試料の発電特性の例。(右上) 裏面側から見た場合のセル設計図。(左下) 作成したセルの構造。(右下) 作成したセルを入射面側から見た場合の写真。

2021年12月時点での11mm角セルの発電特性の例を示す。電圧上昇(下降)側で効率17.5 (17.5) %、開放電圧1.12 (1.13) V、短絡電流密度19.8 (19.6) mA/cm²、曲線因子0.79 (0.79)であり、ヒステリシスも殆ど無いことが分かる。このセルはバンドギャップが1.7 eVとシリコンとのタンデムに最適化されており、この効率であってもボトムセルの効率を24%として適切にタンデム化された場合28%の効率が見込める。現在さらなる高効率を求めて、各種のレシピや試料作製条件を山形大学と連携して最適化しており、並行して特性を損ねずにプロセスの制約(特に超低湿度環境が必須である点)を緩和する手段を検討している。

実験

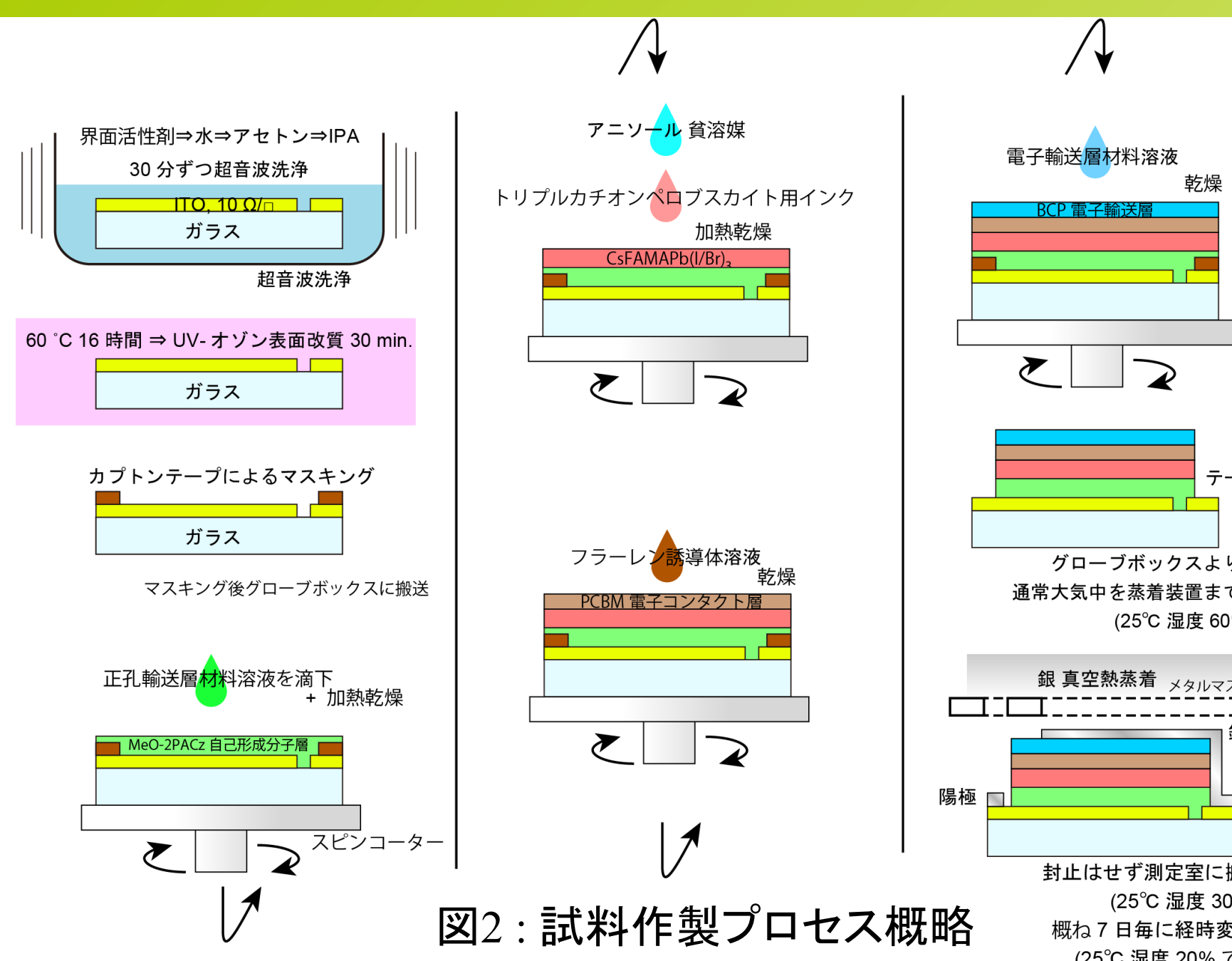


図2：試料作製プロセス概略

左図に示すようなプロセスにより11mm角(1.21cm²)のペロブスカイト太陽電池を作成し、その発電特性及びその経時変化を評価した。太陽電池はp-i-n型であり、プロセスの特徴としてはp-i-n型にあつてはC₆₀を含む材料を真空蒸着し多層膜とする場合が多い[2][3]電子輸送層をスピコーティングにより成膜し、銀電極のみを真空蒸着により行っている点が挙げられる。作成した太陽電池は封止せずに湿度20%、25°Cの空气中で保管して経時変化を見た。

結果② 発電特性の経時変化

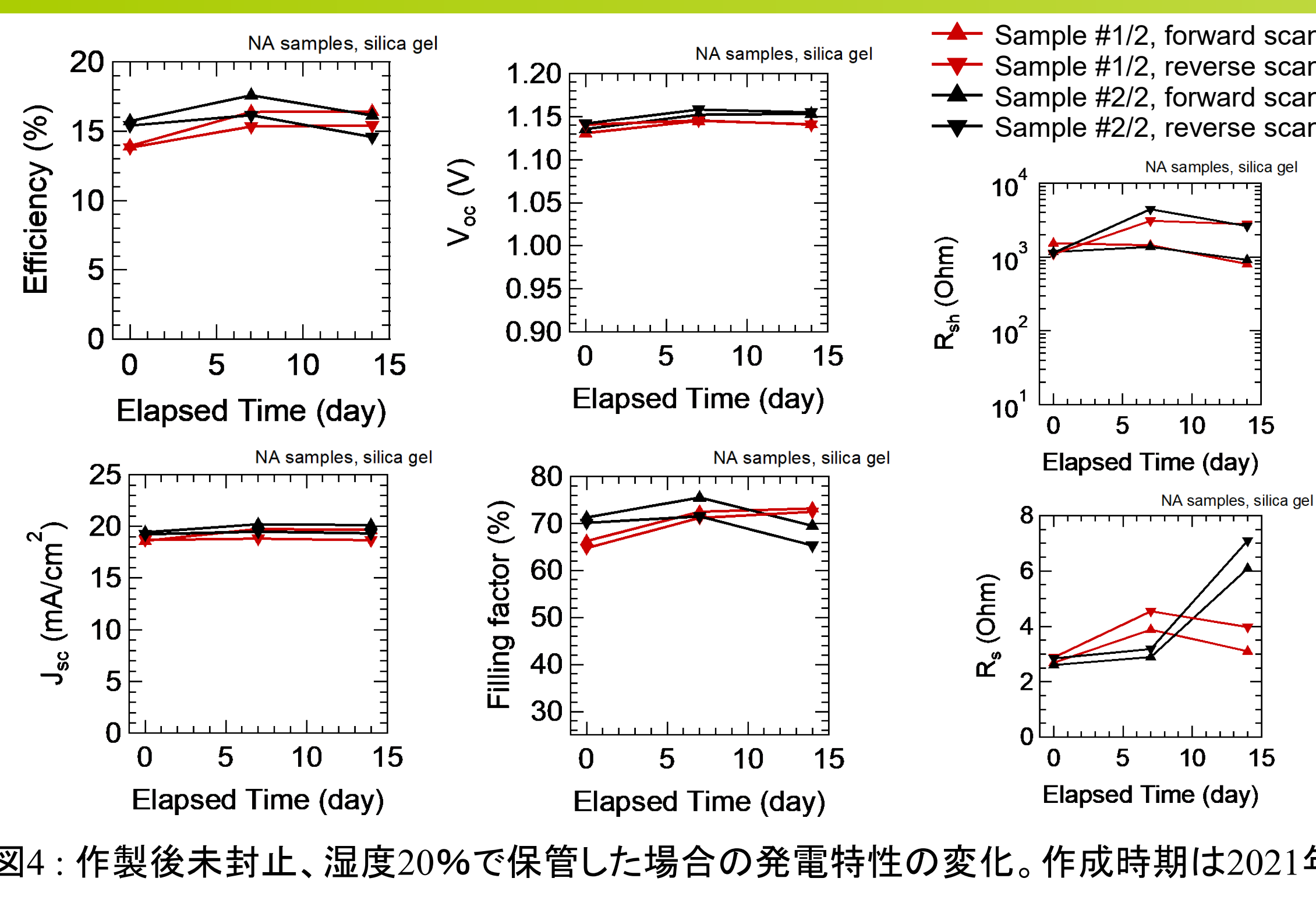


図4：作製後未封止、湿度20%で保管した場合の発電特性の変化。作成時期は2021年9月。

2021年9月作成の11mm角セルを湿度20%で保管した場合の発電特性の経時変化を示す。図3に示したものより3か月早い時期の実験であるため初期の特性はやや劣る。エネルギー変換効率は作成直後に比べ7日後の方が高い場合があることが分かった。この際開放電圧、短絡電流およびフィルファクターの全てが向上する場合があることも分かった(図5)。外部量子効率も全波長領域においてほぼ均一に向上している。但しヒステリシスについては時間経過により大きくなる傾向が見られた。湿度20%は輸送容器内でも比較的容易に維持できる値である。これはタンデム太陽電池作成に向け、今回のレシピによる太陽電池がプロセス途中での輸送にある程度耐えうることを意味する。

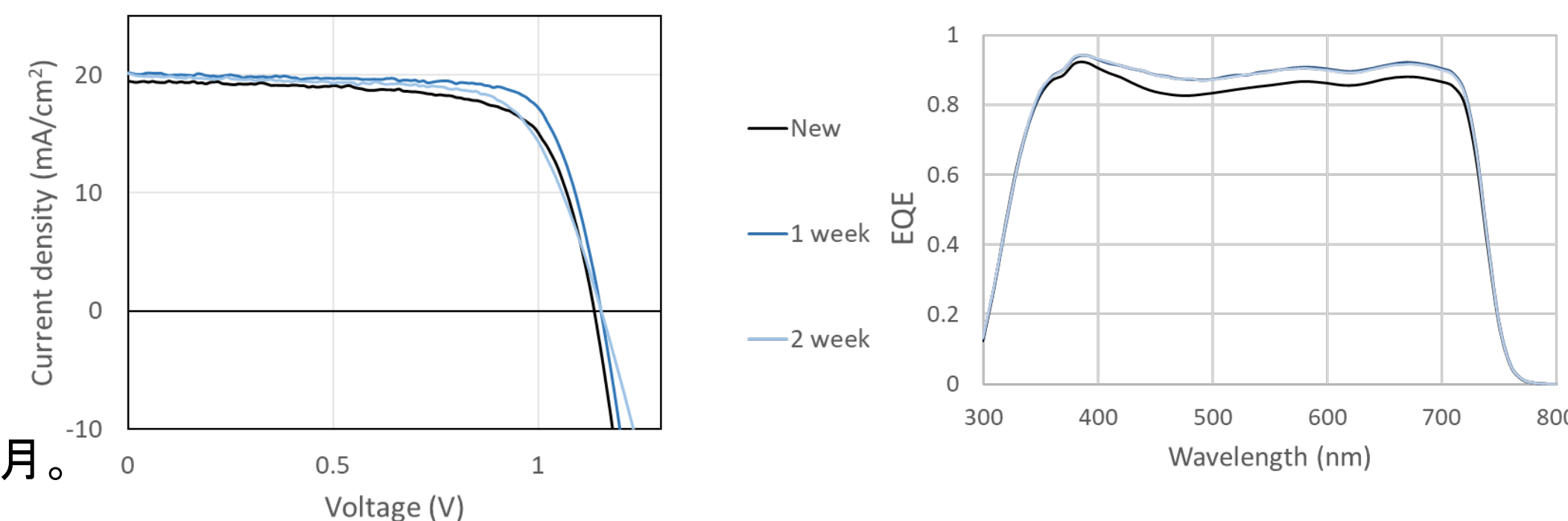


図5：図4で示した#2試料のIV特性及び外部量子効率の時間変化。作成後7日目のエネルギー変換効率は17.58%であった。

まとめと今後の展開

- ◎ 正孔輸送層、ペロブスカイト層および電子輸送層を順にスピコーティングにより成膜してトリプルカチオン太陽電池を作成し、エネルギー変換効率17.5%(セル面積1.21 cm²)を得た。
- ◎ 湿度20%、25°Cの空气中で保管した試料が1週間程度エネルギー変換効率を保つことが分かった。
- ◎ NEDOプロジェクトの目標であるエネルギー変換効率30%超のタンデム太陽電池の実現のために、更なる効率向上が必要である。
- ◎ こうした比較的小面積でのエネルギー変換効率の向上と並行し、より大きな面積(100cm²)への全面成膜でのセル作成を進めている。
- ◎ 貧溶媒を用いたスピコーティングによる成膜はペロブスカイト太陽電池を作成する方法としては最も高いエネルギー変換効率を示すが、インク等材料の使用率が低いという問題があるので、印刷機によるスリットコーティングによるインク塗布と窒素吹き付けによるガスクエンチを併用した成膜の検討を進める。

参考文献

- [1] Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2022). Solar cell efficiency tables (version 59). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 30(1), 3-12.
- [2] Yang, D., Sano, T., Yaguchi, Y., Sun, H., Sasabe, H., & Kido, J. (2019). Perovskite Solar Cells: Achieving 20% Efficiency for Low-Temperature-Processed Inverted Perovskite Solar Cells (Adv. Funct. Mater. 12/2019). Advanced Functional Materials, 29(12), 1970074.
- [3] Stolterfoht, M., Grischek, M., Caprioglio, P., Wolff, C. M., Gutierrez-Partida, E., Peña-Camargo, F., ... & Neher, D. (2020). How to quantify the efficiency potential of neat perovskite films: perovskite semiconductors with an implied efficiency exceeding 28%. Advanced Materials, 32(17), 2000080.

謝辞

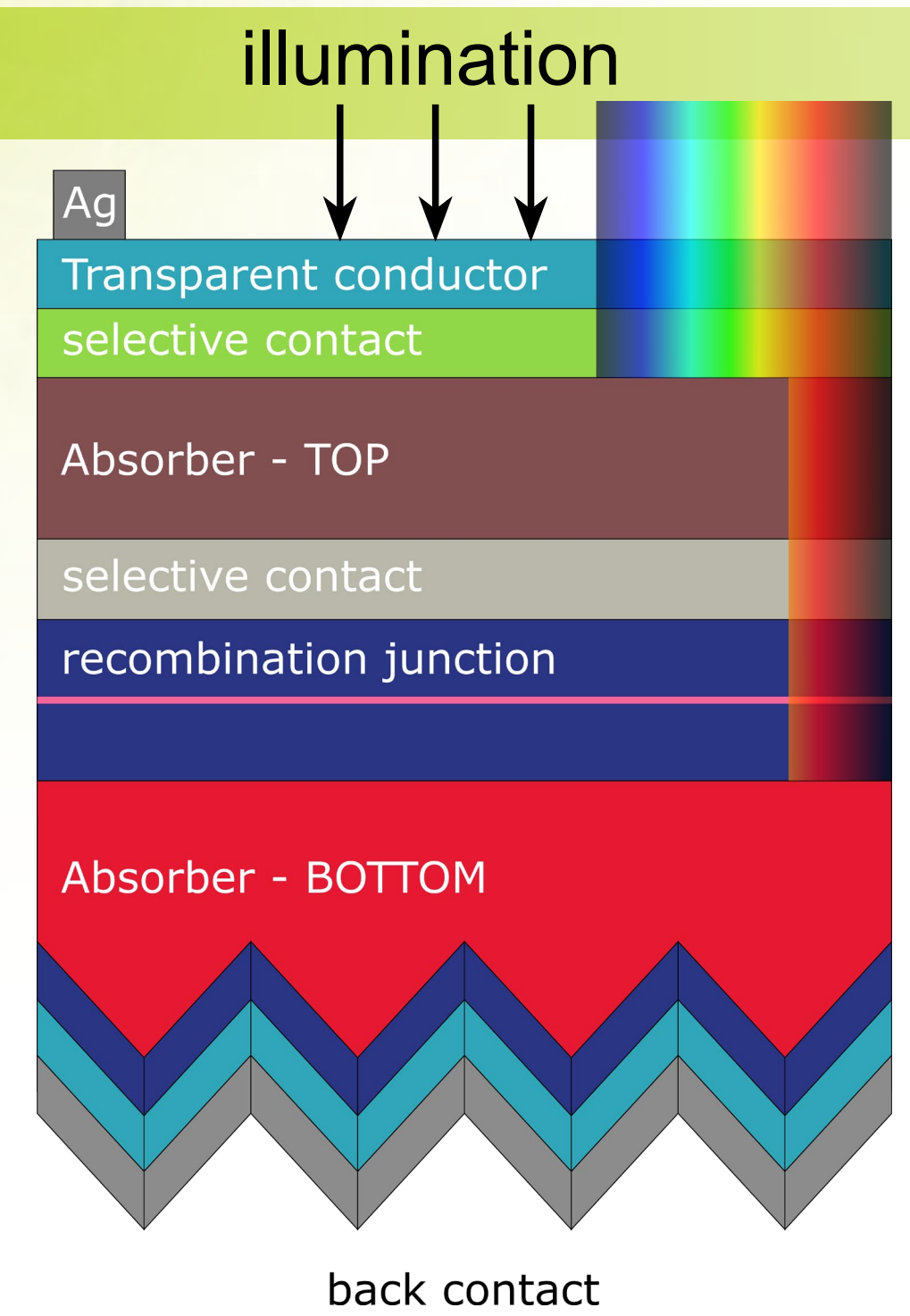
トップセル、ボトムセルの効率とタンデム太陽電池の効率の関係の理論計算を行った上出健仁博士及び、ご助言ご検討頂きましたカネカ株式会社の三島良太博士、足立大輔博士、山本憲治博士に御礼申し上げます。また本研究はNEDOプロジェクト太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の新市場創造技術開発/移動体用太陽電池の研究開発の一環として行われました。関係各位に御礼申し上げます。

Development of a novel recombination junction for perovskite-silicon tandem solar cells

Calum McDonald, Vladimir Svrcek, Hitoshi Sai, Atsushi Kogo, Tetsuhiko Miyadera, Takuro N. Murakami, Masayuki Chikamatsu, Yuji Yoshida, Takuya Matsui
Global Zero Emission Research Center
National Institute for Advanced Industrial Science and Technology

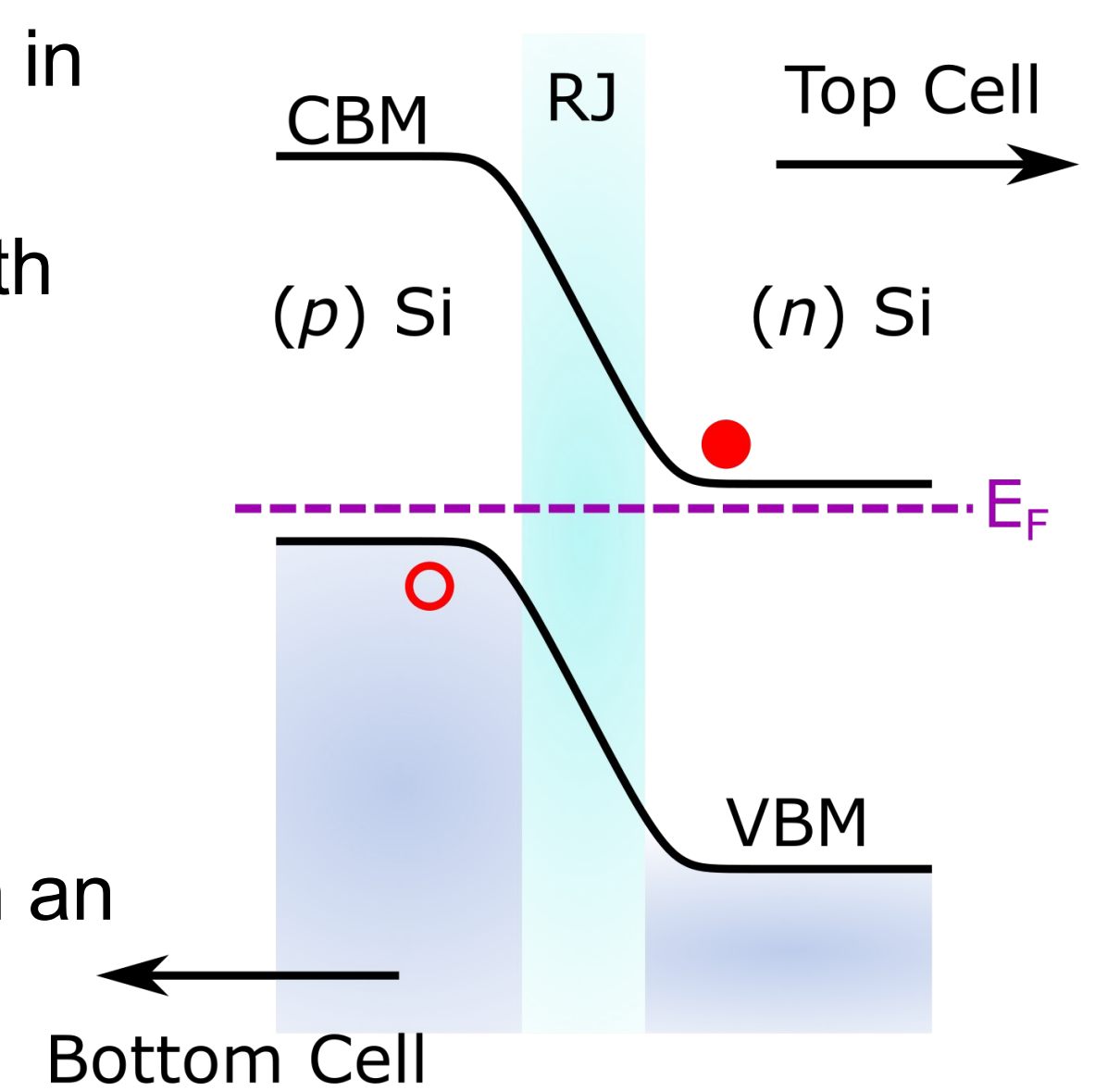
Tandem Solar Cells

- Forming tandem solar cells with silicon can further increase device performance.
- Lead-halide perovskites can match the silicon cell to form high-efficiency tandems.
- The facile deposition of perovskites makes them ideal for tandem devices with silicon.



What is the recombination junction (RJ)?

- Essential to collect charges generated in the top / bottom cells.
- Electrons (from top cell) recombine with holes (from bottom cell).
- Usually ITO used in perovskite-silicon tandems [1].
- Industrially favourable to reduce the complexity of the device structure.
- In this study we try to replace ITO with an in-situ deposited RJ using nc-Si:H.



Device Fabrication/Characterization

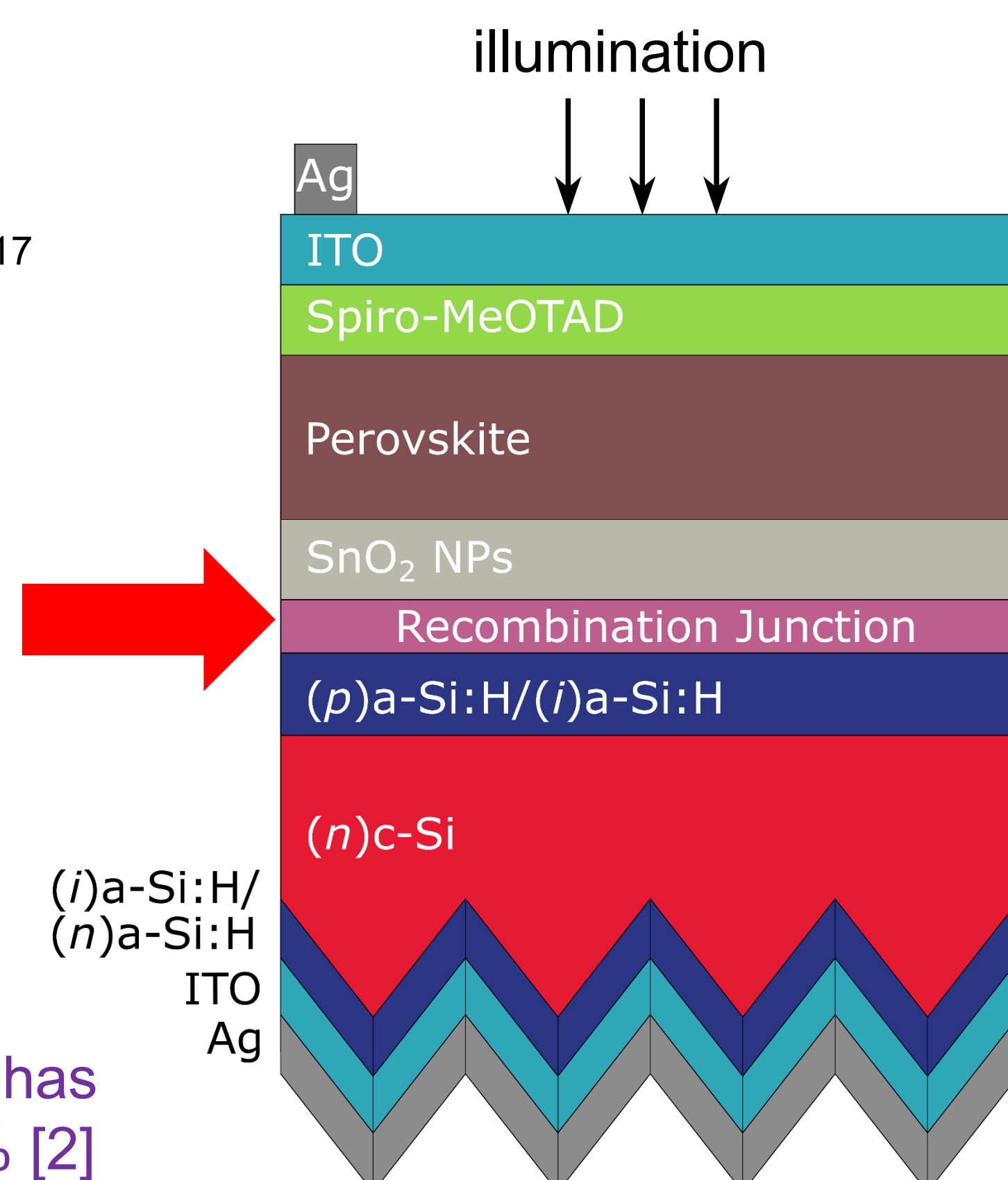
Top cell (n-i-p configuration)

- ETL: SnO₂ nanoparticles.
- Perovskite: Rb_{0.05}(FA_{0.83}MA_{0.17})_{0.95}PbI_{0.83}Br_{0.17}
- HTL: doped spiro-MeOTAD.
- ITO/Ag (sputtered).

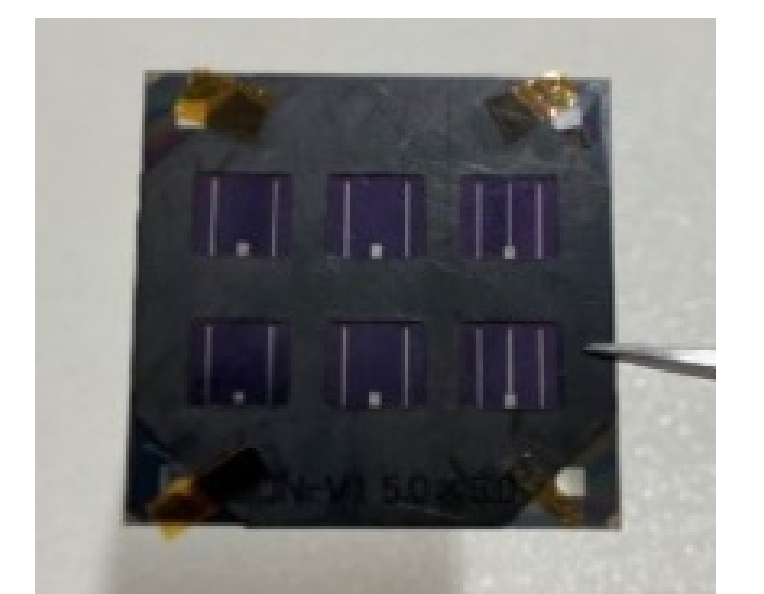
Bottom Cell (front emitter)

- Silicon heterojunction (SHJ): textured (rear), planar (front).
- Nanocrystalline Si (nc-Si:H) RJ deposited by plasma enhanced CVD.
- ITO RJ, deposited by sputtering.

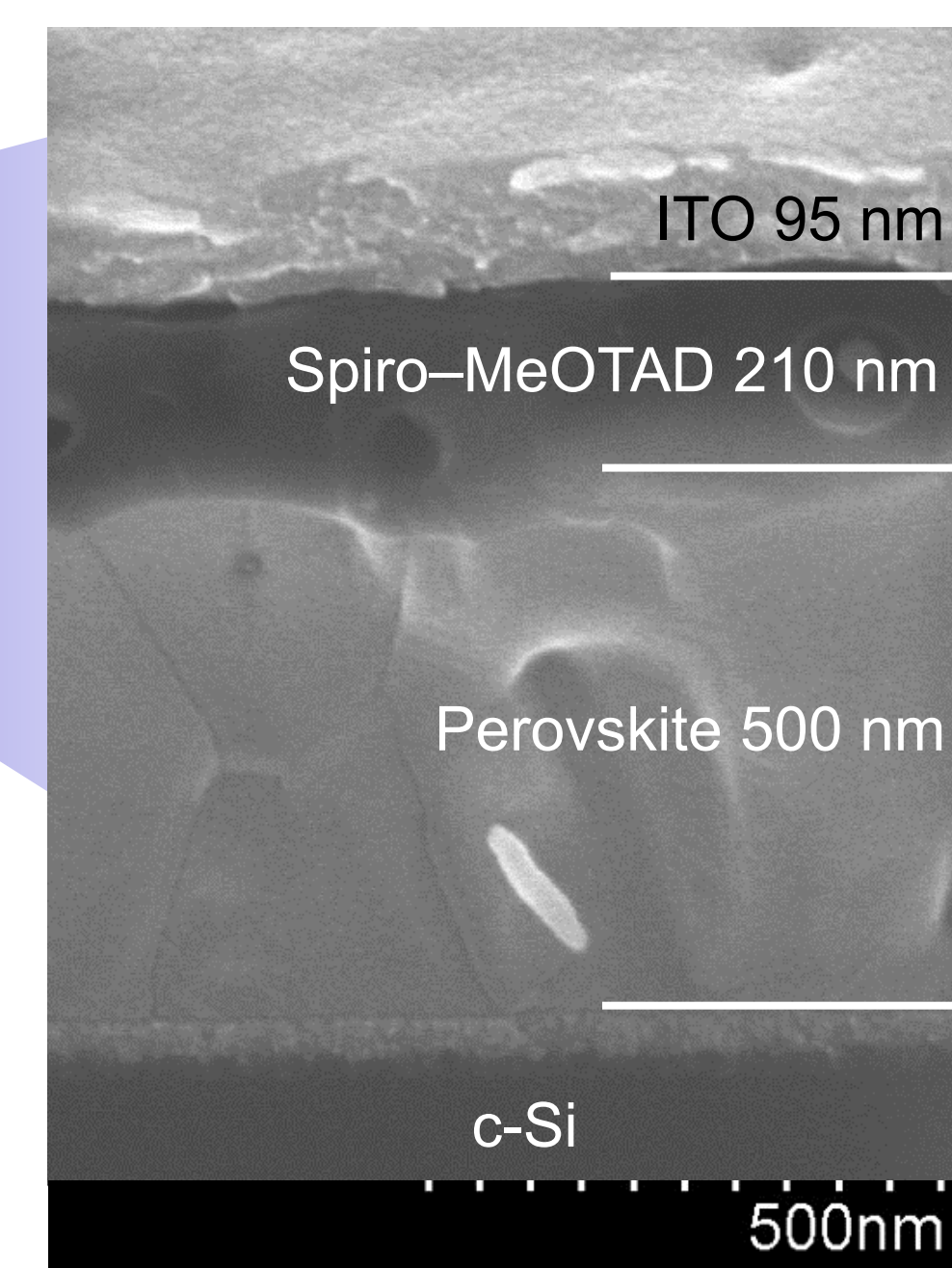
Device optimization in this configuration has been demonstrated with efficiency >27% [2]



Device with mask

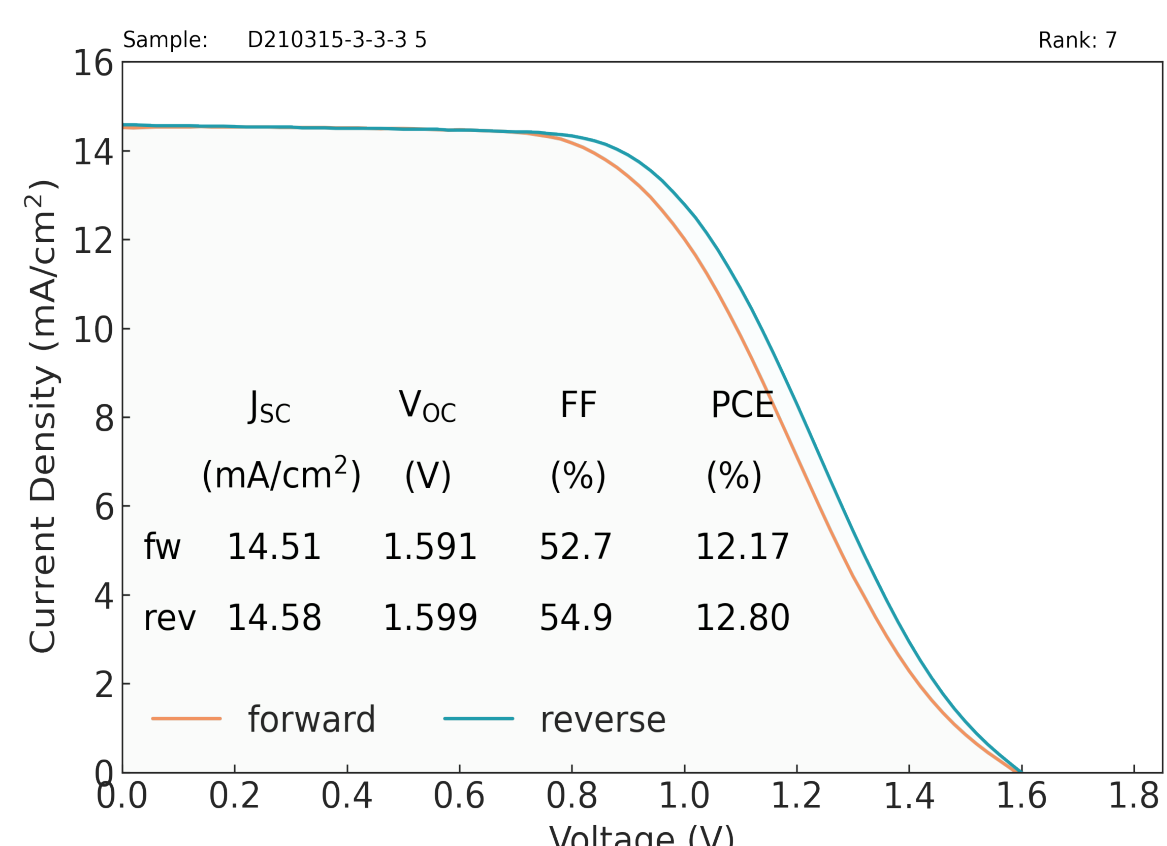
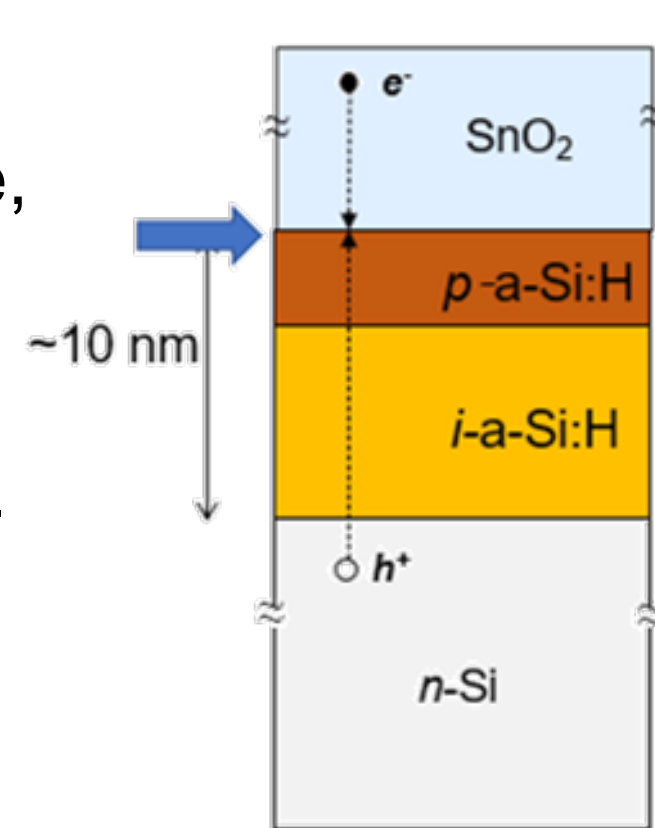


- Cells are shaded using a shadow mask.
- Cell area: 0.2275 cm²
- Without anti-reflection (AR).
- SnO₂ 40 nm
- (n) nc-Si:H 20 nm



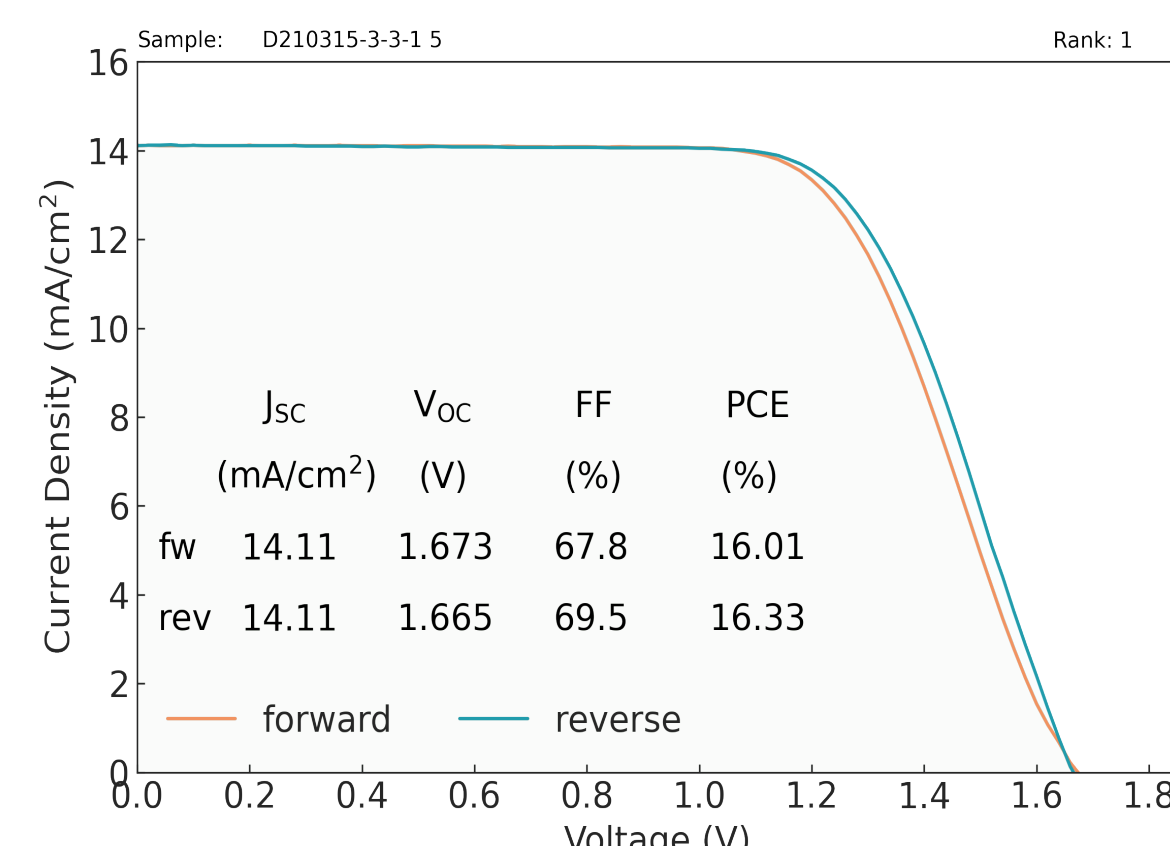
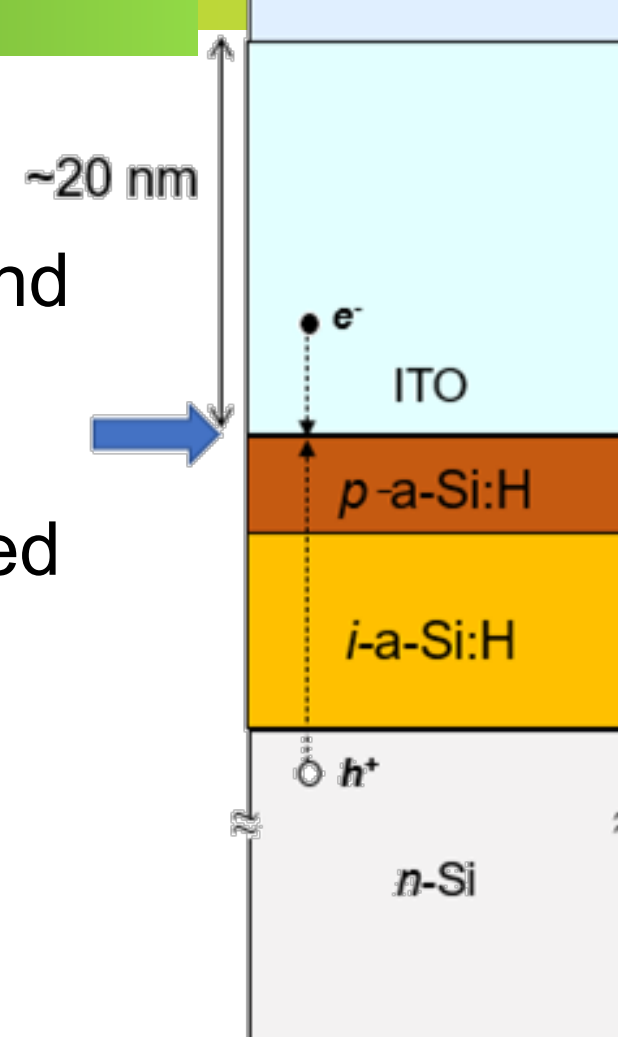
Without RJ

S-shape curve, low V_{OC}.
High contact resistivity at a-Si:H/SnO₂ interface.



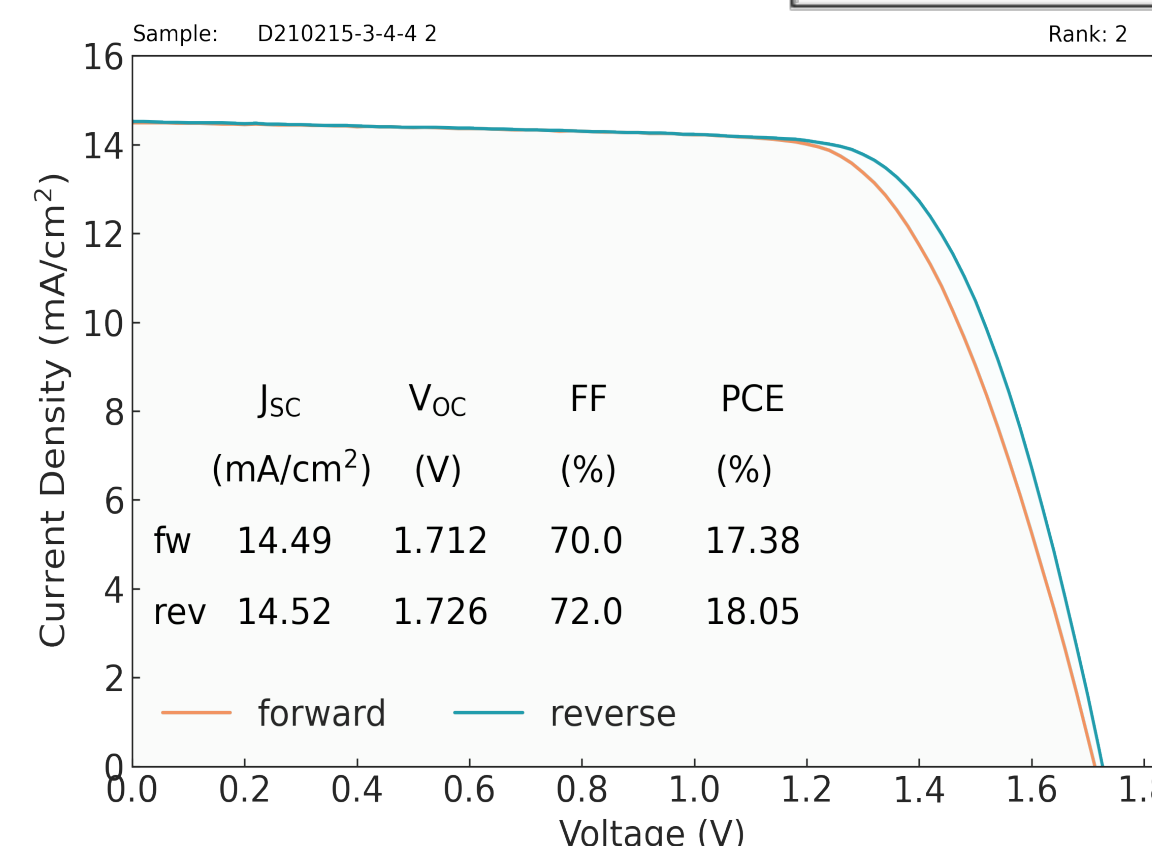
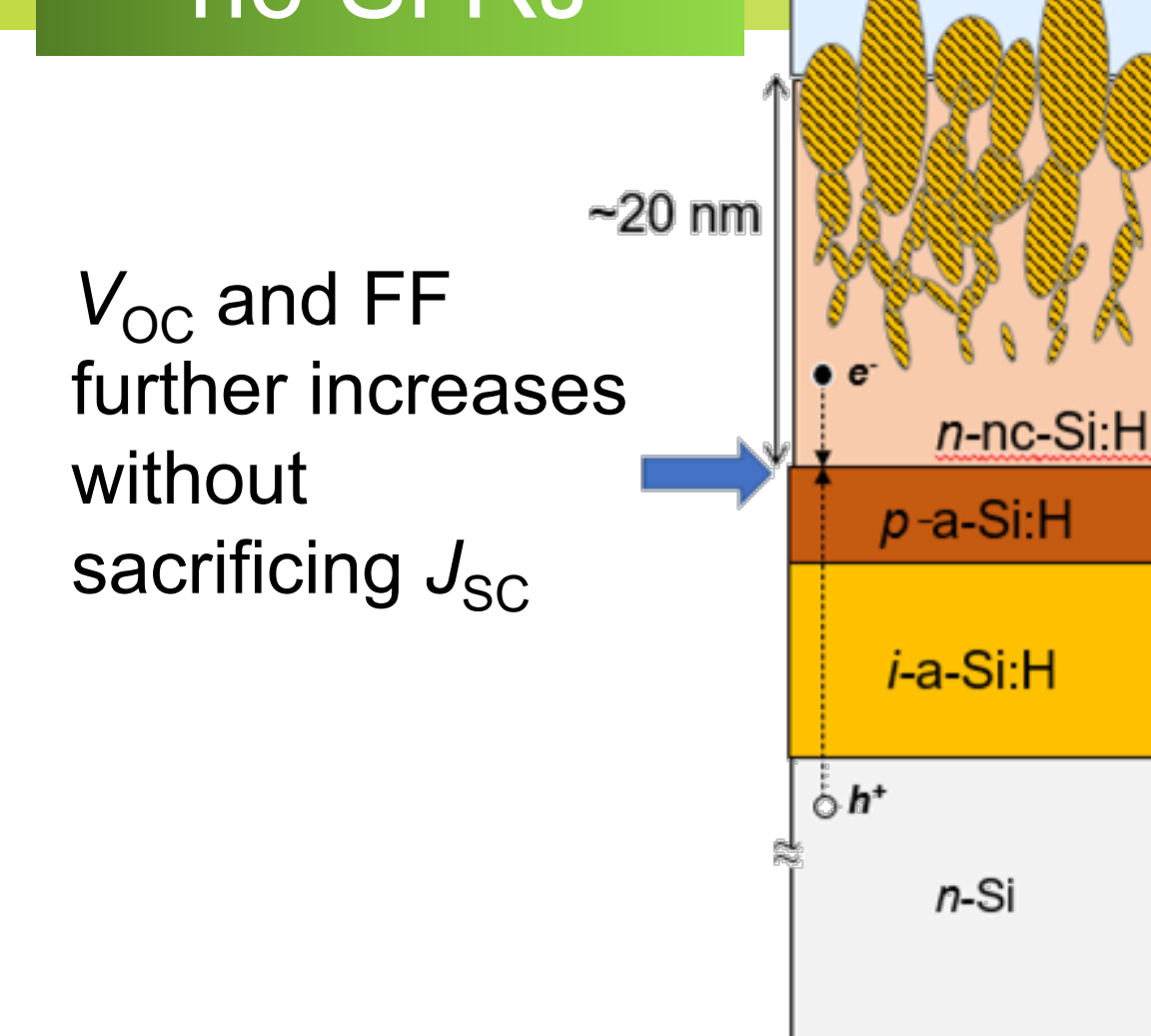
ITO RJ

Improved V_{OC} and FF.
Lower J_{SC} caused by internal reflection.

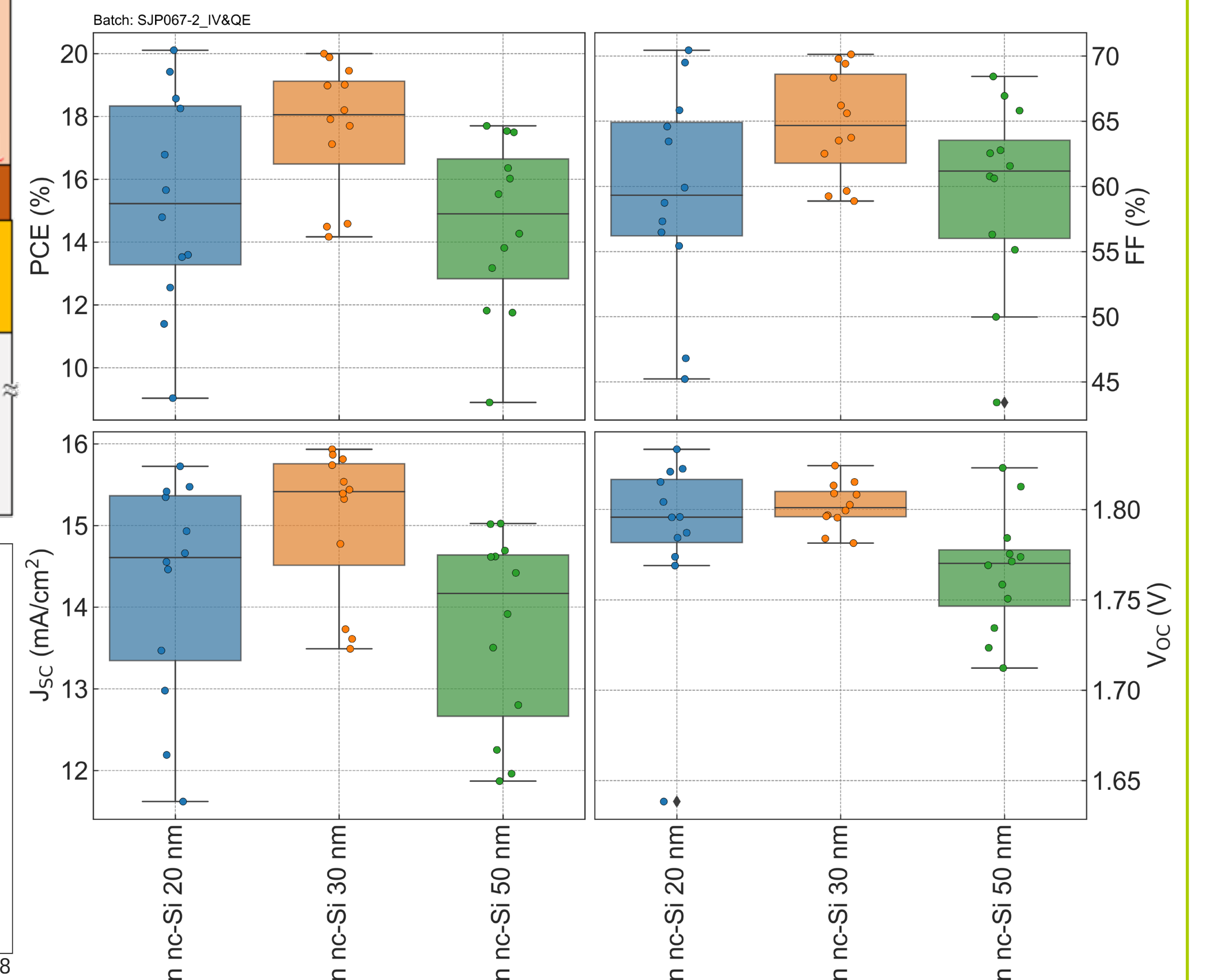


nc-Si RJ

V_{OC} and FF further increases without sacrificing J_{SC}



Varying the thickness of the nc-Si RJ



Conclusion

- We introduced nc-Si:H RJ into tandem devices.
- Unoptimized device for studying the nc-Si:H RJ.
- J_{SC} strongly limited by reflection and parasitic absorption in the thick spiro-MeOTAD layer (~200 nm).
- We observe superior performance when using nc-Si:H RJ over ITO RJ.
- 30 nm nc-Si RJ exhibited highest device performance.

References

- Al-Ashouri *et al.*, *Science* **370**, 1300–1309 (2020).
- Erkan Aydin *et al.*, *Energy Environ. Sci.*, **14**, 4377–4390 (2021).

Acknowledgements

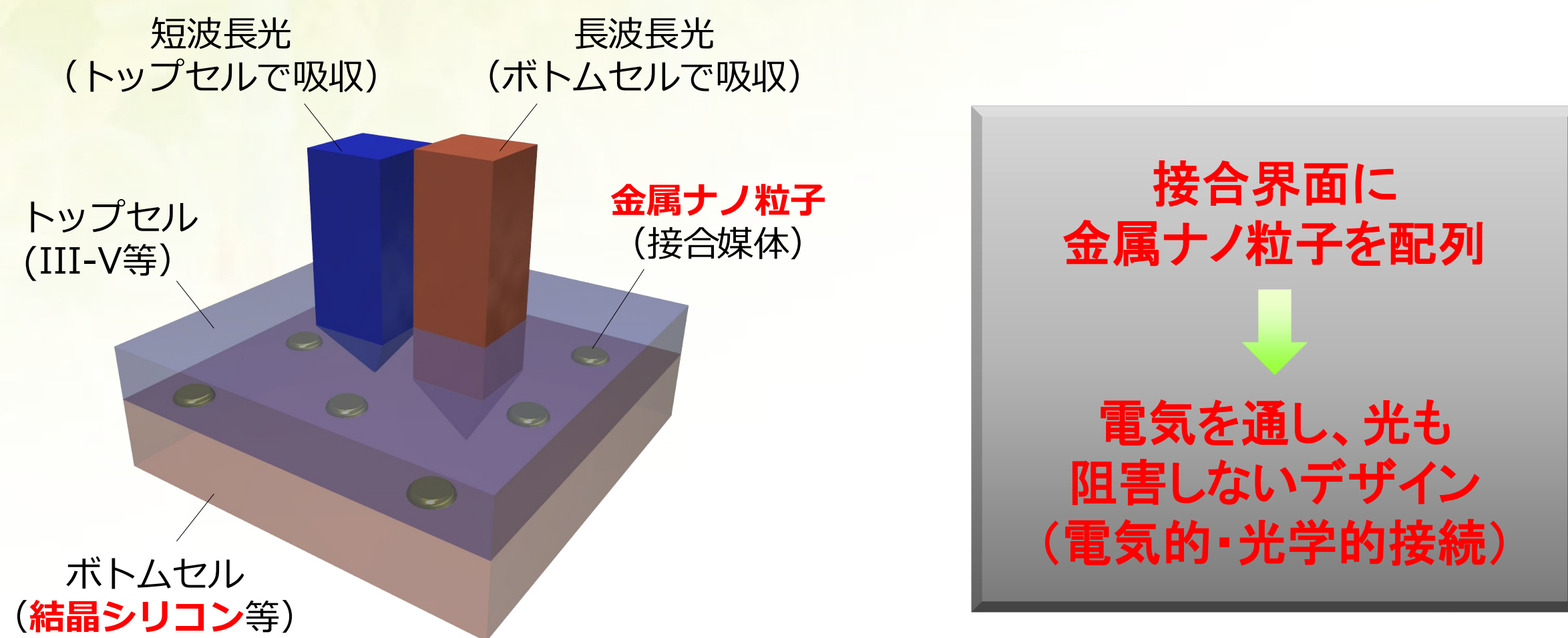
奥 登志喜、佐藤 芳樹、田辺 まゆみ、宮田 碧、武藤 由樹子

ヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池を用いた III-V//Siスマートスタック

水野 英範¹、牧田 紀久夫²、齋 均²、望月 敏光¹、松井 卓矢²、高遠 秀尚¹、
 Ralph Müller³、David Lackner³、Frank Dimroth³、菅谷 武芳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 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
³ Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems

スマートスタックとは？

われわれが提案するタンデム型(多接合)太陽電池の作製方法であり、その特徴は金属ナノ粒子配列を異種太陽電池の接合媒体として用いていることである。^[1,2]

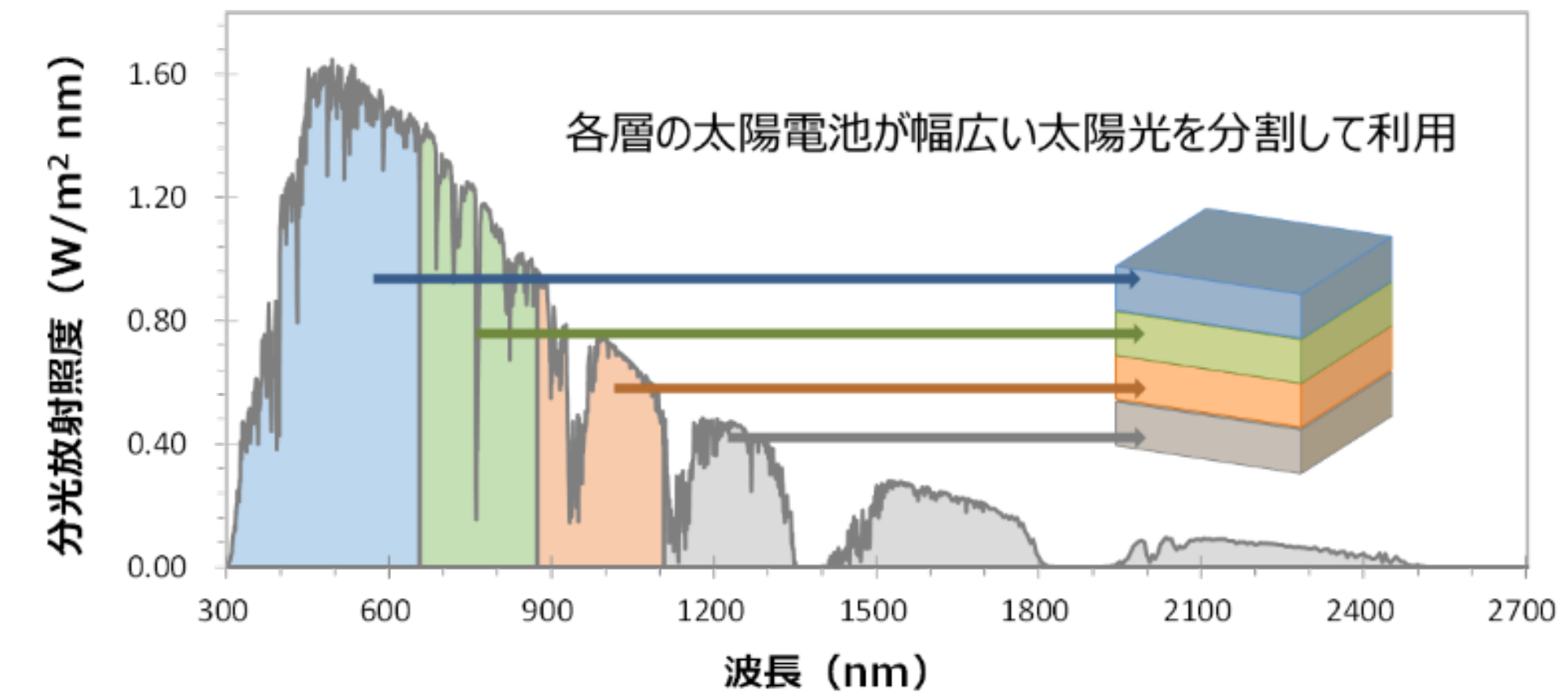


これまでにTOPCon型結晶シリコン太陽電池をボトムセルとして用いたIII-V//Siスマートスタックで変換効率30.8%を達成している。^[3] 本発表では、シリコンヘテロ接合(SHJ)をボトムセルとして用いた「III-V//SHJスマートスタックセル」についての検討結果を報告する。

Siタンデム太陽電池

現在の結晶Si太陽電池は、研究開発レベルではセル効率26%以上、モジュール効率24%以上の報告がなされている。他方で、結晶Si太陽電池の理論限界効率はDetailed Balance Theoryによれば29%程度(セルの場合)と言われており、更なる高効率化(30%以上)を実現するためには何らかの工夫が必要となる。

有効な手段の一つは、結晶Siとは異なる太陽電池材料を積層することで得られる多接合またはタンデム型と呼ばれるデバイス構造を導入することである。これらの太陽電池では、紫外から赤外という幅広い波長を有する太陽光を各々の太陽電池(光電変換層)で有効に電気に変換できるため、従来の単接合型太陽電池と比較して大幅な変換効率の向上が可能となる。

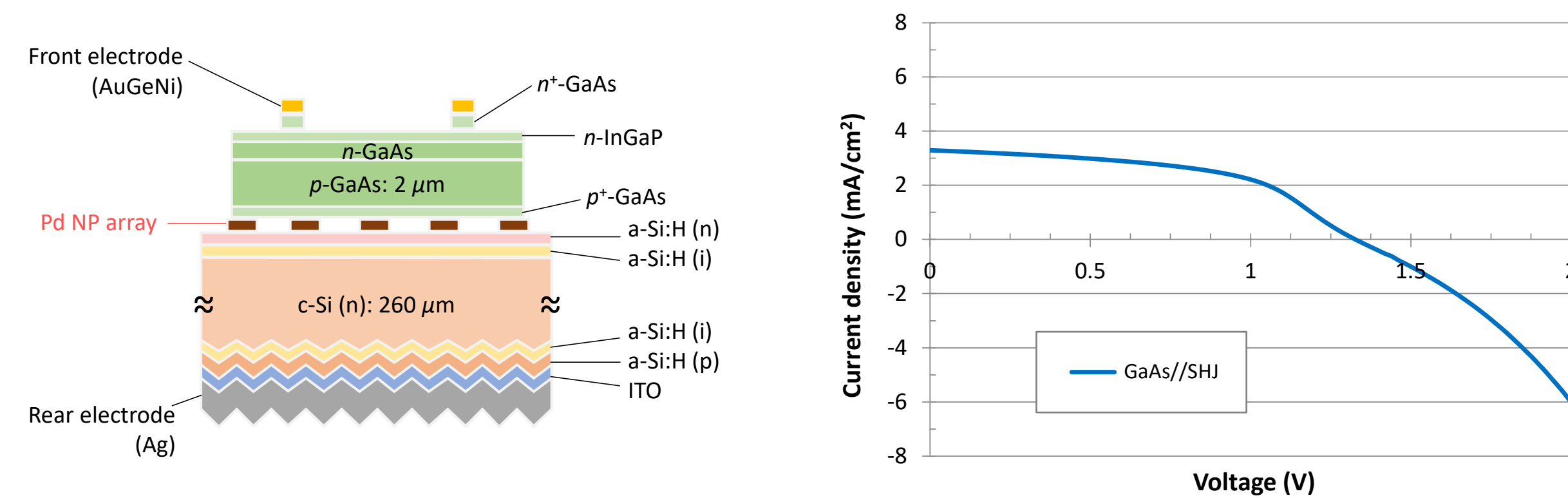


SHJを用いたIII-V//Siスマートスタック^[4]

謝辞: 本研究の一部は NEDO の委託のもと実施されたものであり、関係各位に感謝いたします。

GaAs//SHJによる初期検討

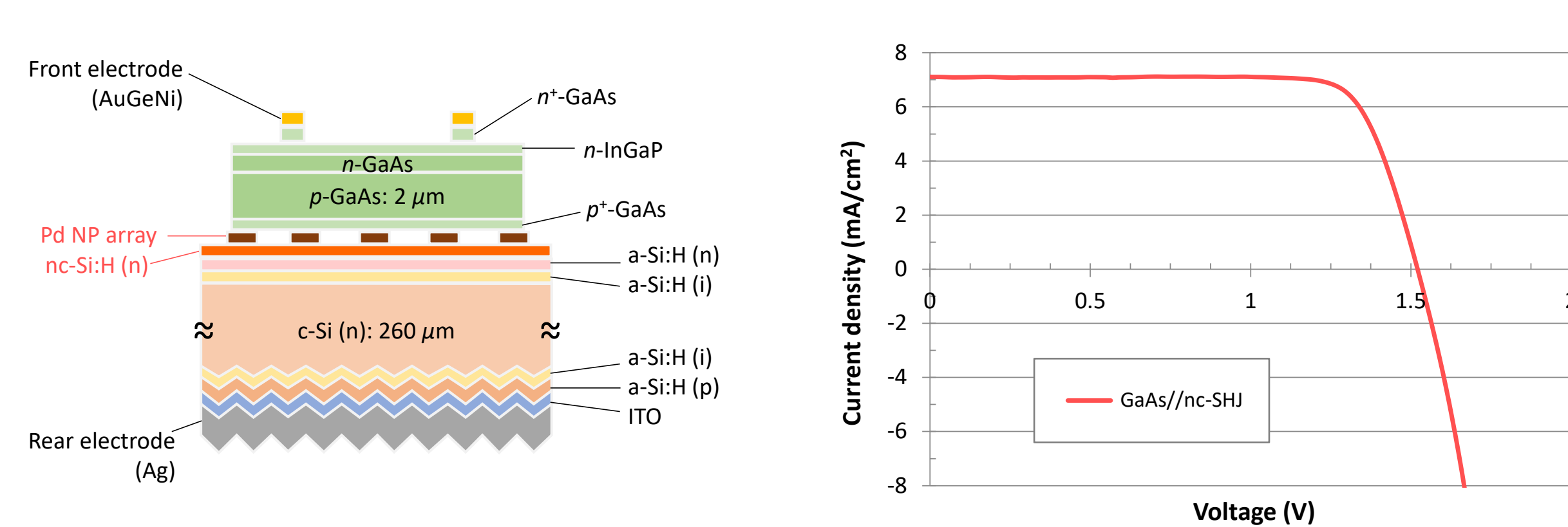
a-Si:H(n)層を最表面に有するSHJボトムセルにPdナノ粒子配列を作製した場合



⇒ 接合抵抗が高く、FFが出ない & J_{sc} も想定(〜7 mA/cm²)より低い
 ⇒ a-Si:H上への直接のPdナノ粒子配列では良好なタンデム特性が得られない

GaAs//nc-SHJによる検討

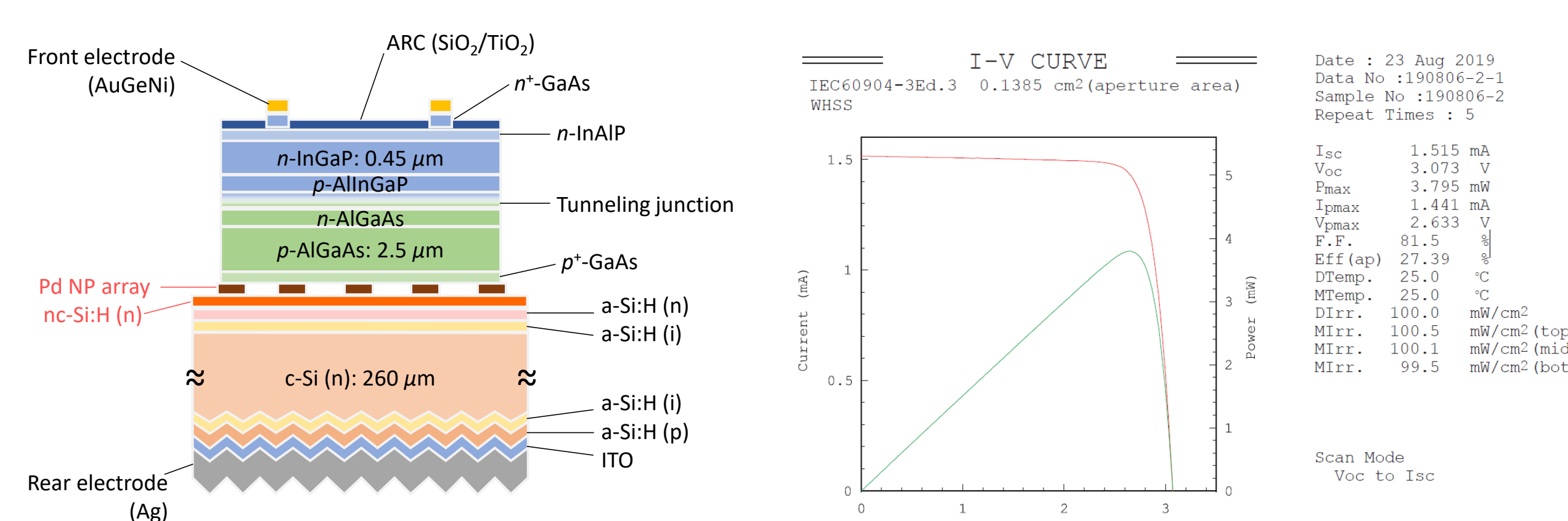
a-Si:H(n)層上にnc-Si:H(n)層を挿入したボトムセル(nc-SHJ)にPdナノ粒子配列を作製した場合



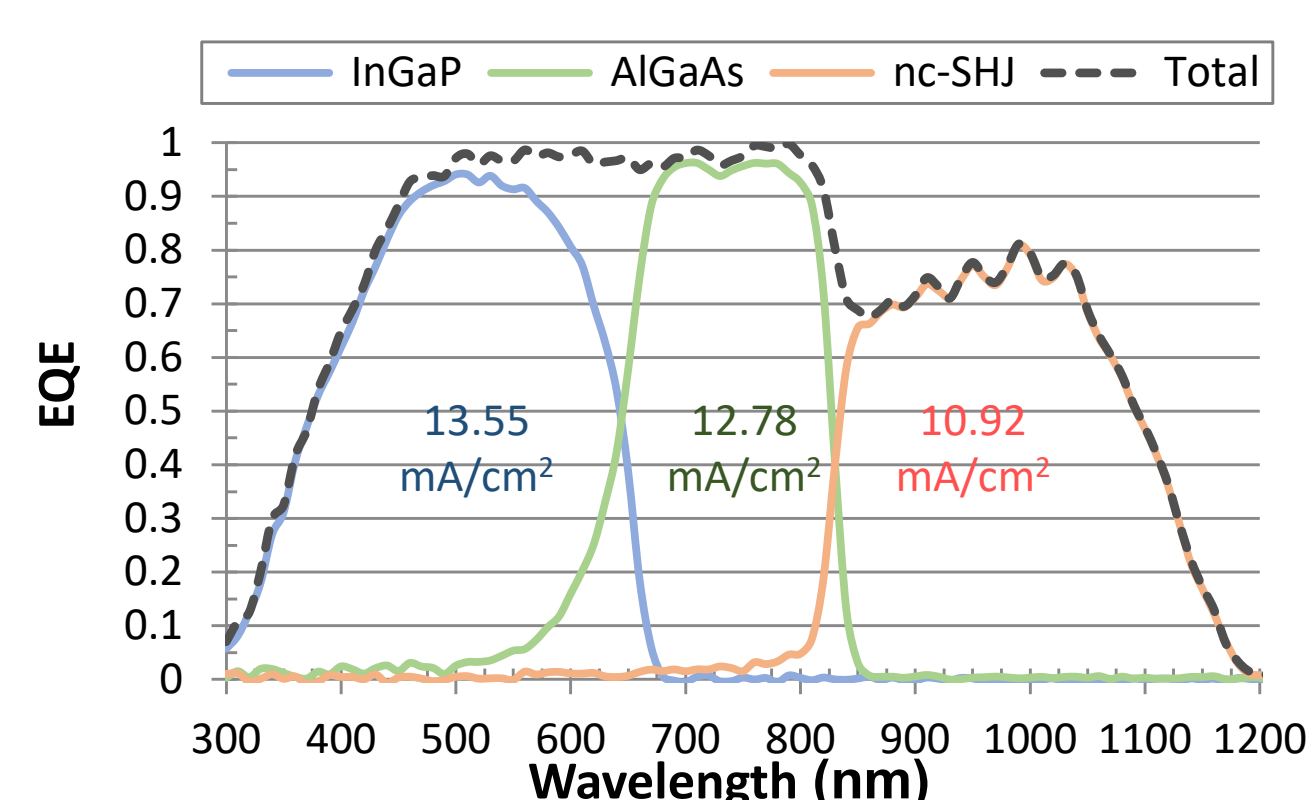
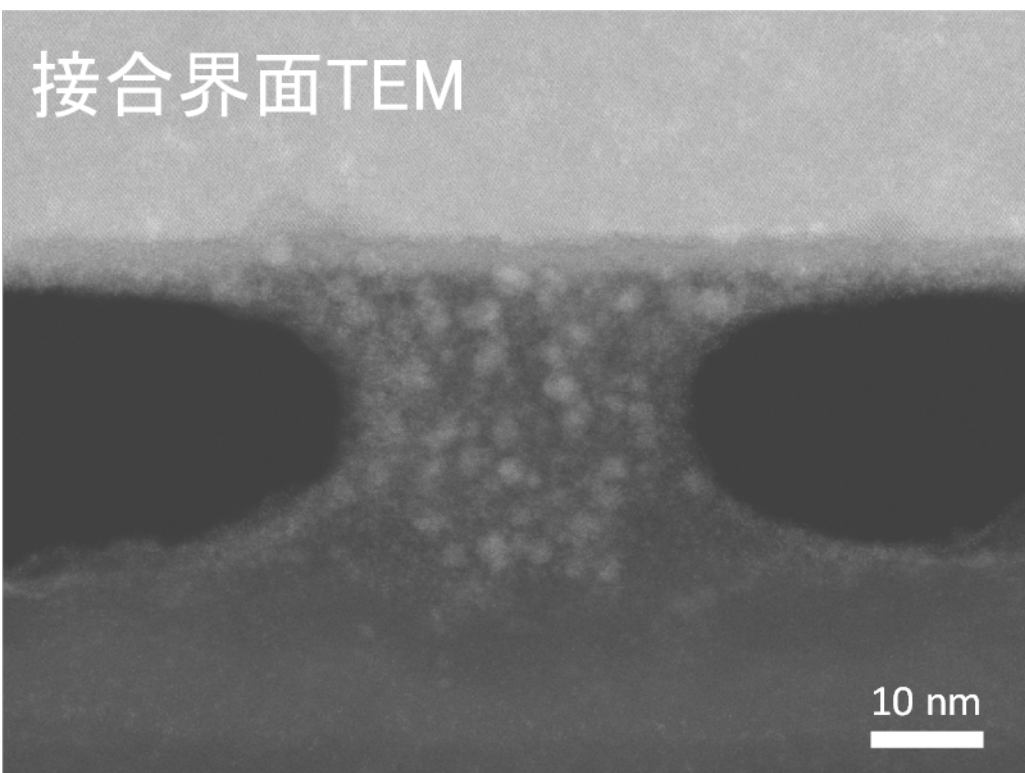
⇒ 特性が著しく改善(nc-Si:H層によるa-Si:H層の保護、導電性の改善)

InGaP/AlGaAs//nc-SHJによる高効率セルの開発

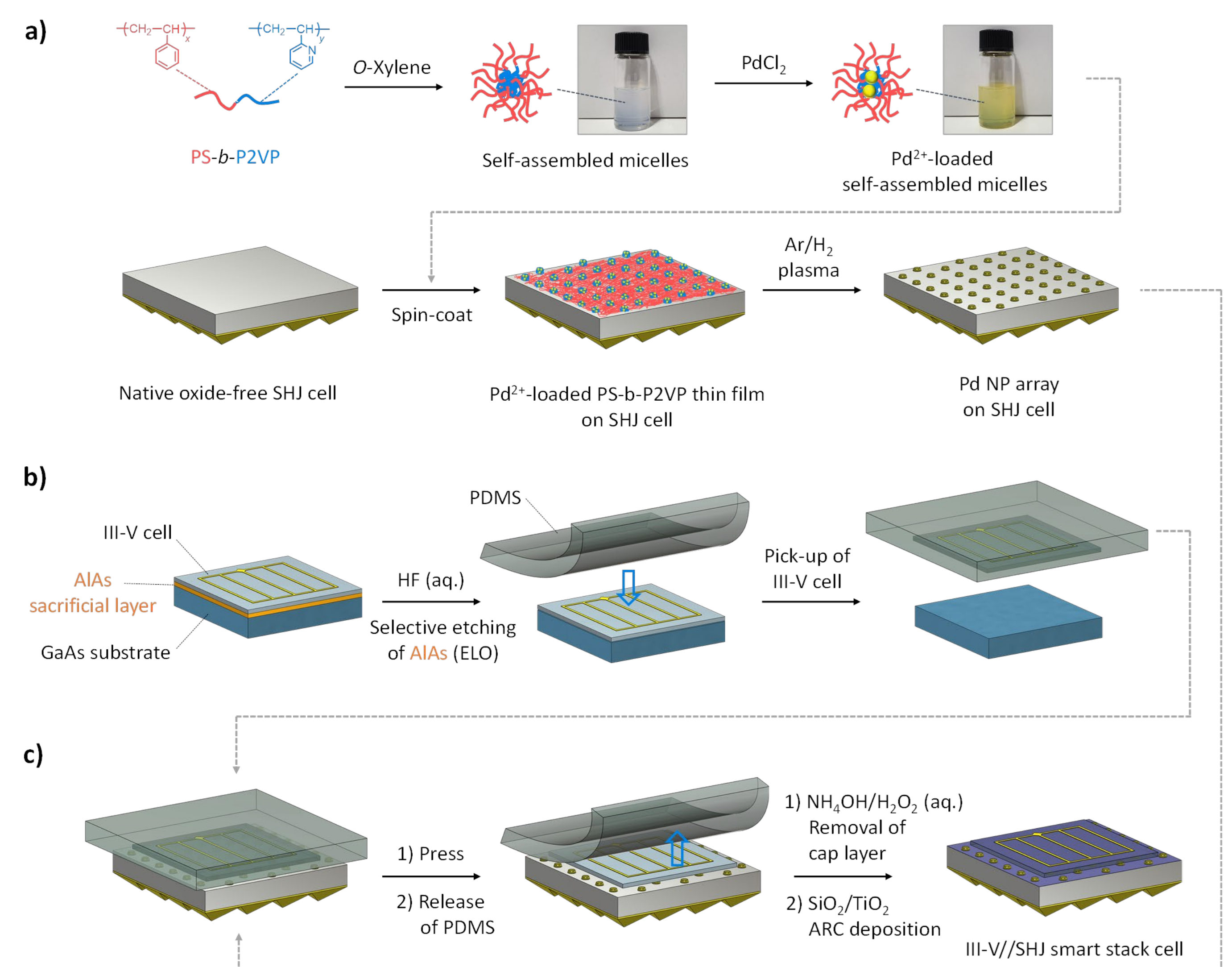
変換効率27.4%を達成



接合界面TEM



スマートスタックプロセス



- SHJセル上へのPd NPアレイの作製
- III-V族化合物セルのELOとPDMSによるピックアップ
- Pd NPアレイで装飾されたSHJセル上のIII-V族セルの接合、NH₄OH/H₂O₂によるIII-V族セルのキャップ層の除去、SiO₂/TiO₂ベースのARCの成膜。

まとめ: a-Si:HキャップのSHJセル上にPdナノ粒子配列を直接作製すると、接合抵抗が高く、SHJセルのパッシベーション効果も失われ、良好なタンデム特性が得られなかった。そこで、Pdナノ粒子配列とSHJセルの間に水素化ナノ結晶Si(nc-Si:H)層を導入し接合抵抗の改善とパッシベーション効果の保持を図った。このようなnc-Si:HキャップのSHJセルをInGaP/AlGaAs 2接合セルと組み合わせ、27.4%の変換効率(AM1.5G条件下)を達成した。EQEからは、ボトムSHJセルで J_{sc} が律速されていることが確認された。接合界面ギャップの制御により、更なる高効率化(TOPConの場合の30.8%を超える効率)が可能と考えられる。

参考文献

- [1] H. Mizuno, K. Makita, and K. Matsubara, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 191111 (2012).
- [2] H. Mizuno, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 025001 (2016).
- [3] K. Makita, *et al.*, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **28**, 16 (2020).
- [4] H. Mizuno, *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, DOI: 10.1021/acsami.1c22458 (2022).

スマートスタック技術を用いたIII-V//CIGSe タンデム型太陽電池の開発 (II)

牧田紀久夫¹、上川由紀子²、水野英範³、大島隆治¹、庄司靖¹、
石塚 尚吾²、菅谷 武芳¹、Ralph Müller⁴、Frank Dimroth⁴

産業技術総合研究所 1 ゼロエミッション国際共同研究センター、2 省エネルギー研究部門、
3 再生可能エネルギー研究センター、4 Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (独)

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)Se₂ (以下CIGSe) 多接合太陽電池の開発を行っており、今回Fraunhofer研究所(以下FhISE、独)と連携のもと、GaAs//CIGSe 3接合太陽電池を試作し、「AIST太陽光評価・標準チームでの高精度測定」で2端子として世界最高性能である発電効率~28.1%(昨年度27.2%)を達成した。

メガソーラ



高効率GaAs系多接合太陽電池の移動体搭載



移動体搭載

衛星搭載 市場規模 1 MW
セルコスト 100 \$/W

*High altitude platform station
高高度疑似衛星

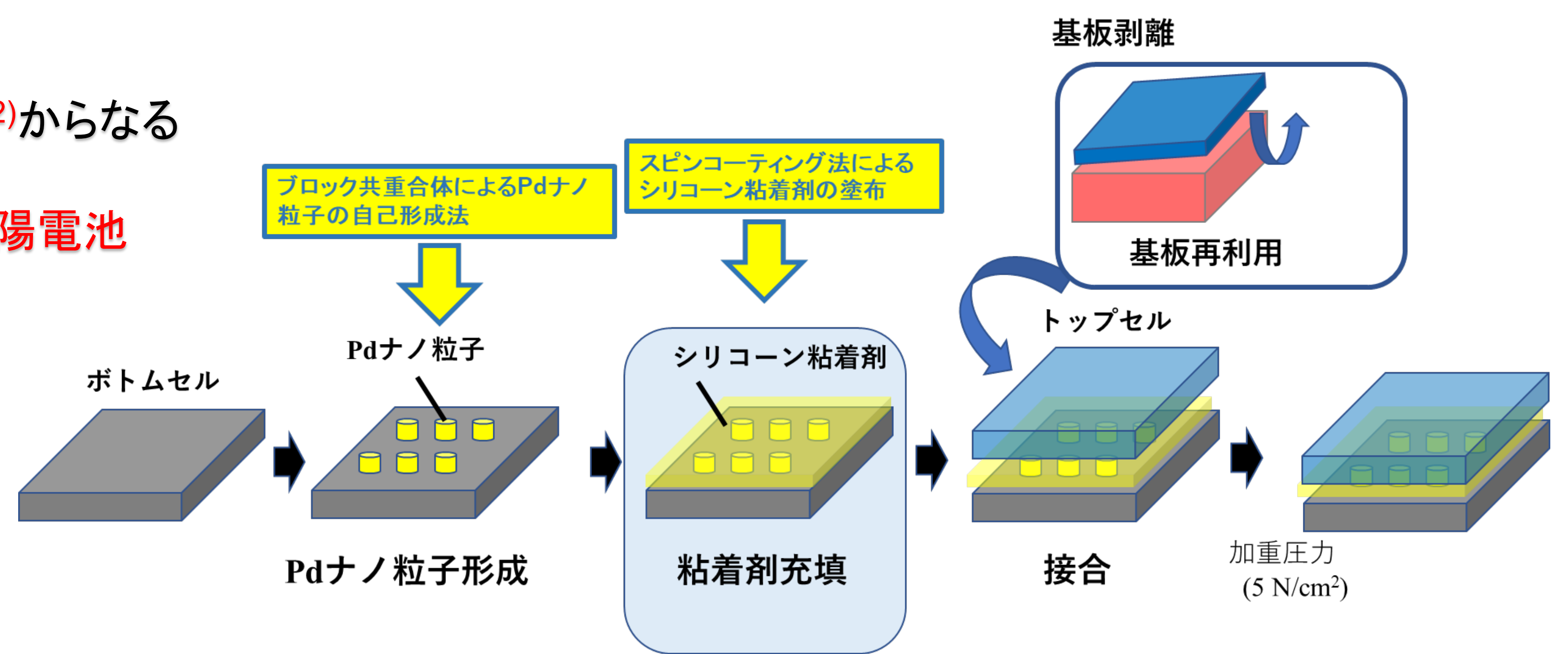
車載搭載 市場規模 10GW
セルコスト 2\$/W



実験

- スマートスタック技術¹⁾を改良して、Pdナノ粒子と粘着剤²⁾からなる接合技術を開発し(右図参照)、接合強度の強化に成功。
- 上記技術を適用して、InGaP/AlGaAs//CIGSe 3接合太陽電池(結果図参照)を試作。
 - GaAs系トップセル: FhISE研究所が開発
 - CIGSeボトムセル³⁾: 産総研が開発。

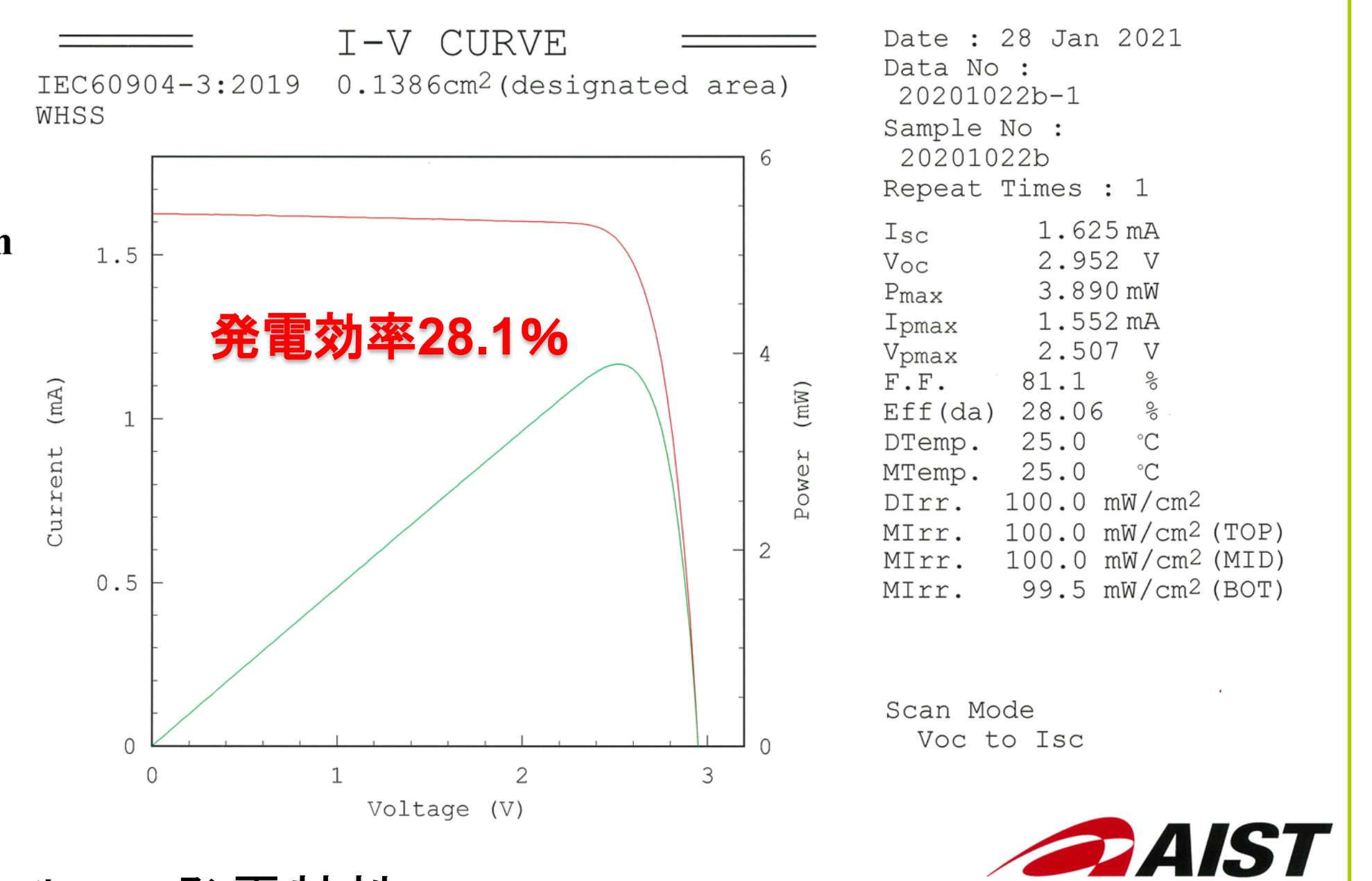
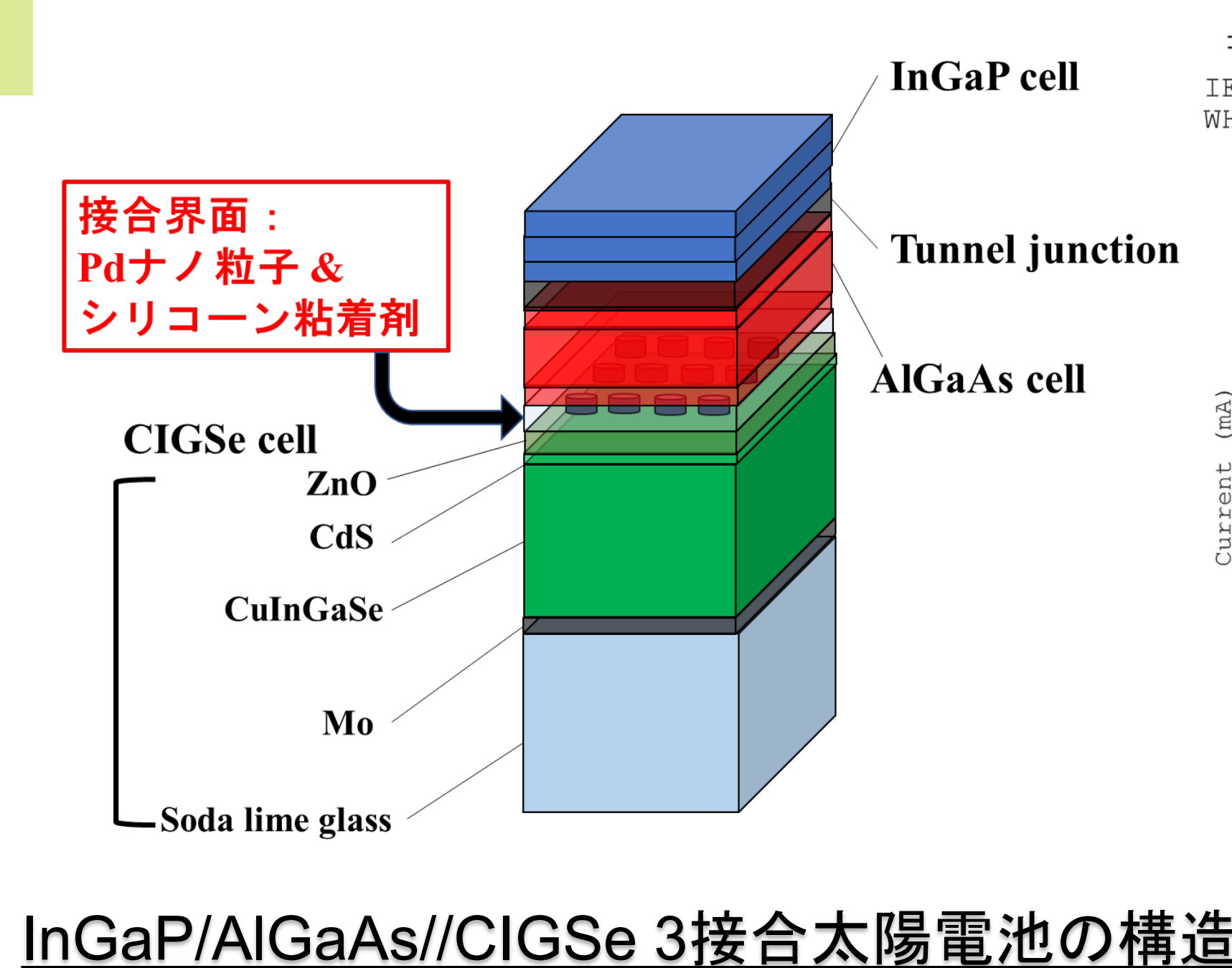
- 産総研独自のPdナノ粒子を介した半導体接合技術。
- 粘着剤は、シリコン系粘着剤。信越シリコン(株)製X-40-3306。高温高湿耐性に優れる。
- CIGSeセルは、吸収層のGaの分布を適化し、E_g-1.0eV(昨年度1.05eV)および開放電圧、曲性因子等の改善を実現。ボトムセルとして性能向上が図られた。
- CIGSeセルは、低コスト化の観点よりCMP処理(Chemical Mechanical Polishing)を適用していない(CMPフリー化)。



Pdナノ粒子および粘着剤を介した新スマートスタック技術

結果

- 発電効率~28.1%達成(昨年度:27.2%)
 - * AIST太陽光評価・標準チームでの高精度測定
- 2端子GaAs//CIGSe系素子として世界最高性能。
 - *Solar cell efficiency tables (version 58)掲載
- 接合プロセス条件の適化により、CIGSeのCMPフリーでの安定接合を実現。
- CIGSeセル高性能化が、多接合構造での発電特性改善に寄与。



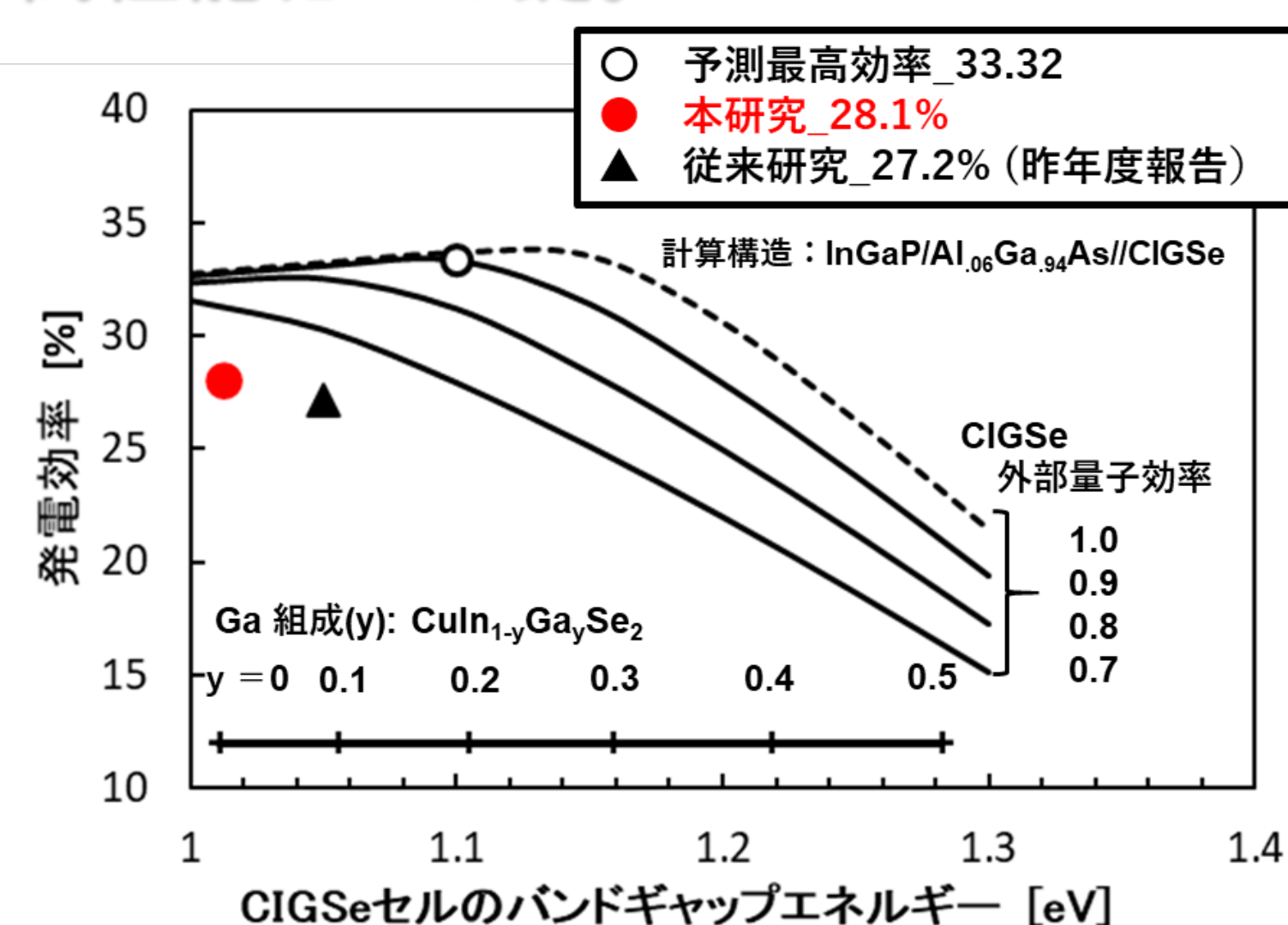
InGaP/AlGaAs//CIGSe 3接合太陽電池の構造

発電特性

* AIST太陽光評価・標準チームでの高精度測定

考察

- シミュレーションによる予測最高効率~33.32%。
- 実験値(28.1%)との乖離は、接合界面での反射損失に起因したCIGSeセルの外部量子効率低減が原因。
- 要因である、CIGSeセルの表面ラフネス低減およびZnO薄膜化が高性能化への鍵。



本研究でのCIGSe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。これにより、発電効率>30%が可能。

InGaP/AlGaAs//CIGSe 3接合太陽電池の予測性能

まとめ

- Pdナノ粒子と粘着剤を介した新スマートスタック技術を開発。
- GaAs//CIGSe系3接合セルで発電効率~28.1%達成(世界最高)。
- 今後は、高効率化(>30%)および大面積化(4インチ化)が目標。

(主要論文)

- H. Mizuno et al., Appl. Phys. Lett., 55, 025001 (2016).
- Y. Kamikawa et al., ACS Appl. Mater. Interfaces, 12, 45485 (2020).
- K. Makita et al., Progress in Photovoltaics, 28, 16 (2020).
- K. Makita et al., Progress in Photovoltaics, 29, 887 (2021).
- M. A. Green et al., Progress in Photovoltaics, 29, 657 (2021).
- K. Makita et al., IEEE Journal of Photovoltaics, to be published, <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3132897>.

(主要特許)

- 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」

MBE法によるGaInAs太陽電池の パッシベーション層材料の最適化

大島 隆治¹、石塚 優希²、岡野 好伸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 東京都市大学

研究の目的

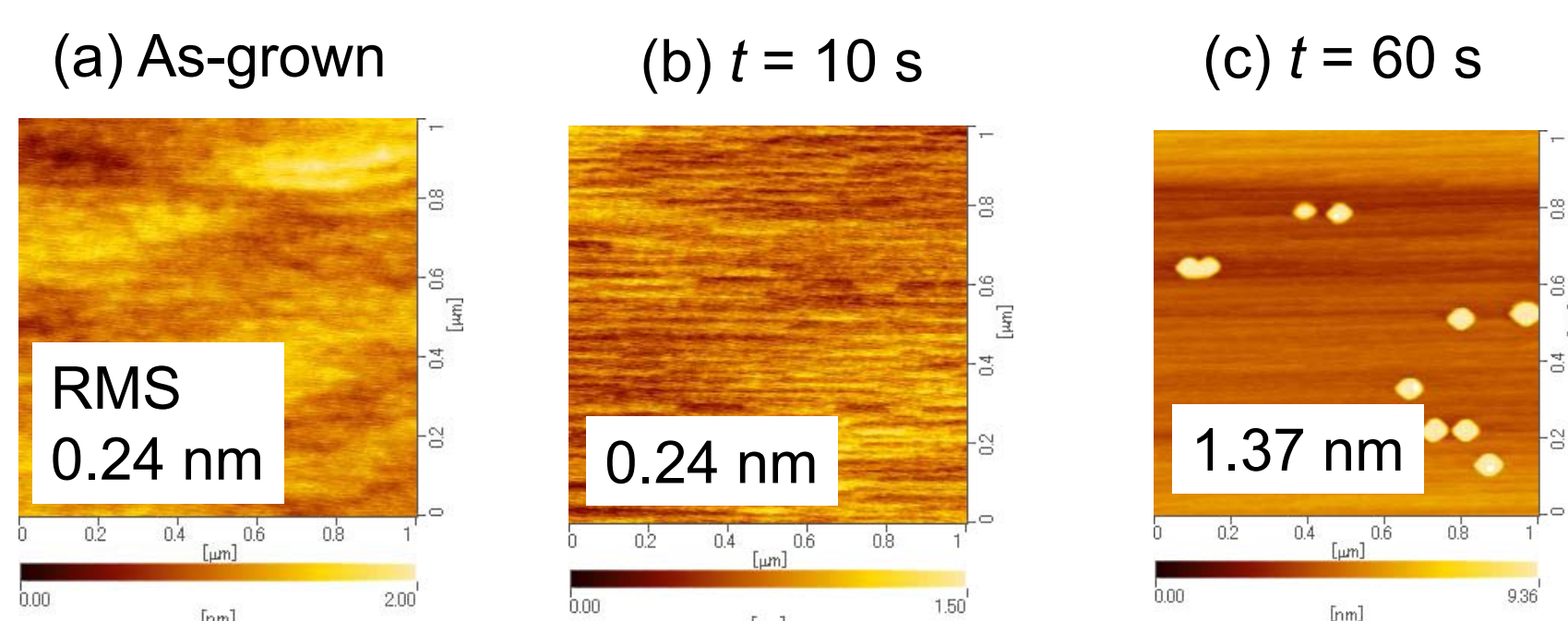
- Ga_{0.47}In_{0.53}AsはInPと格子整合する0.75 eV帯材料であり、多接合太陽電池におけるボトムセルとして用いられている[1-3]。しかし、GaInAsセルの研究開発例は少なく、高効率化技術は確立されていなかった。
- 太陽電池の高効率化において、バルク欠陥、界面欠陥、表面/裏面の表面準位を介した非発光再結合を抑制することが重要である。
- これまでに、高温成長、微傾斜基板を用いることで高品質なGaInAs結晶成長を実現し、高効率化できることを明らかにした[4]。
- 今回、InP基板上GaInAsセルにおいてパッシベーション層であるwindow層、BSF層とGaInAsとのヘテロ界面の高品質化、およびパッシベーション層材料の最適化による高効率化を検討した。

結果と考察① GaInAs/InPヘテロ界面

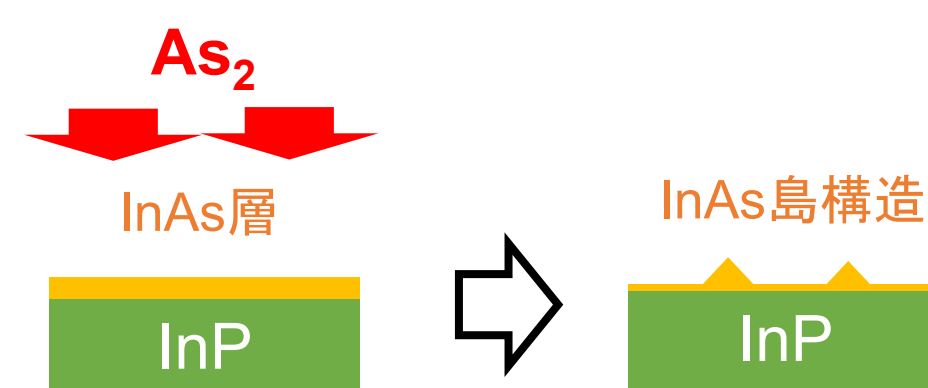
- GaInAs/InPヘテロ成長では、V族(As, P)フラックスの供給をまず安定させる必要があるが、成長表面での意図しないAs/P交換反応が生じる[5,6]。
- ⇒ それぞれの表面材料(InP, GaInAs)において、高品質なヘテロ界面を得るためのV族供給条件の最適化を検討

InP 表面

基板温度(T_S) = 500°C (GaInAsの成長温度)

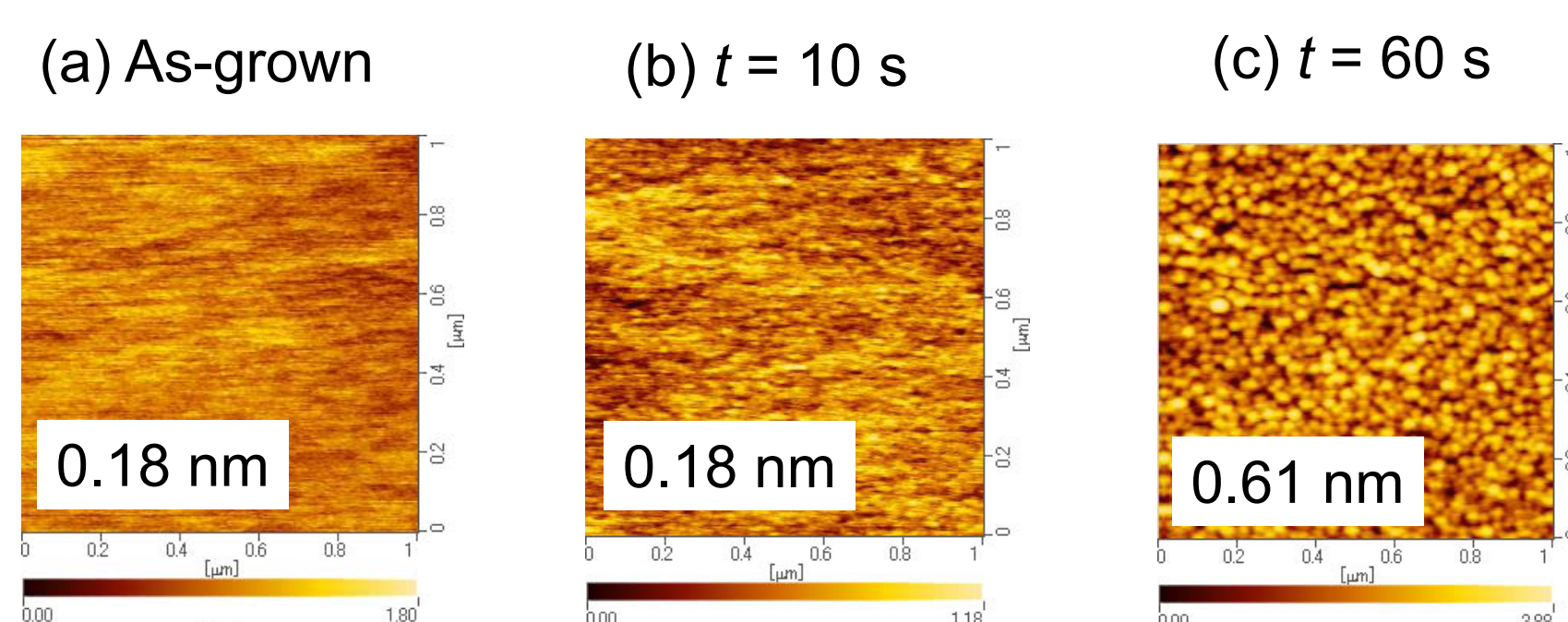


- 照射初期はステップ構造が維持されるが、長時間照射により3次元構造が形成
- ⇒ As/P交換反応により表面にInAs原子層が形成し、その後厚膜化することで島構造が形成

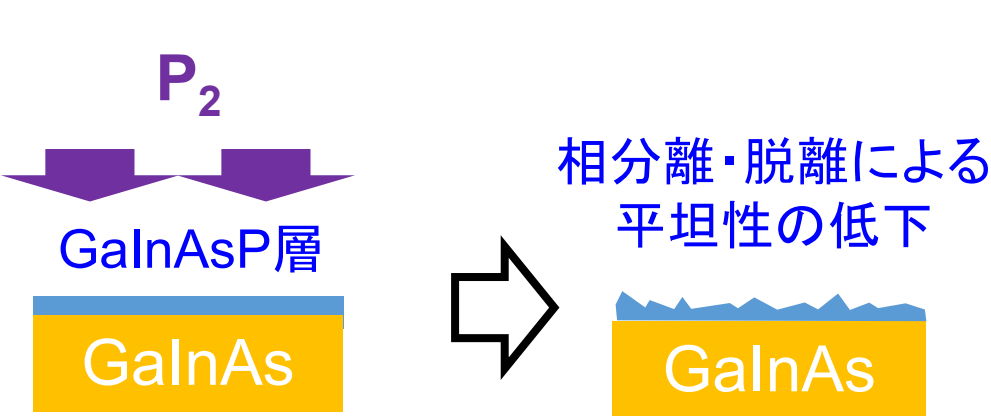


GaInAs 表面

基板温度(T_S) = 450°C (InPの成長温度)



- 照射初期からステップ構造が消失し、その後にラフネスが増大
- ⇒ P原子の付着係数はAsよりも低いため、表面に不安定なGaInAsP層が形成
- ⇒ その後、相分離による分解、表面からの原子の脱離が促進



⇒ InP, GaInAsそれぞれの表面における平坦性の劣化メカニズムは異なるが、ヘテロ界面の高品質化には短時間のV族原料の切り替えが必要

結論

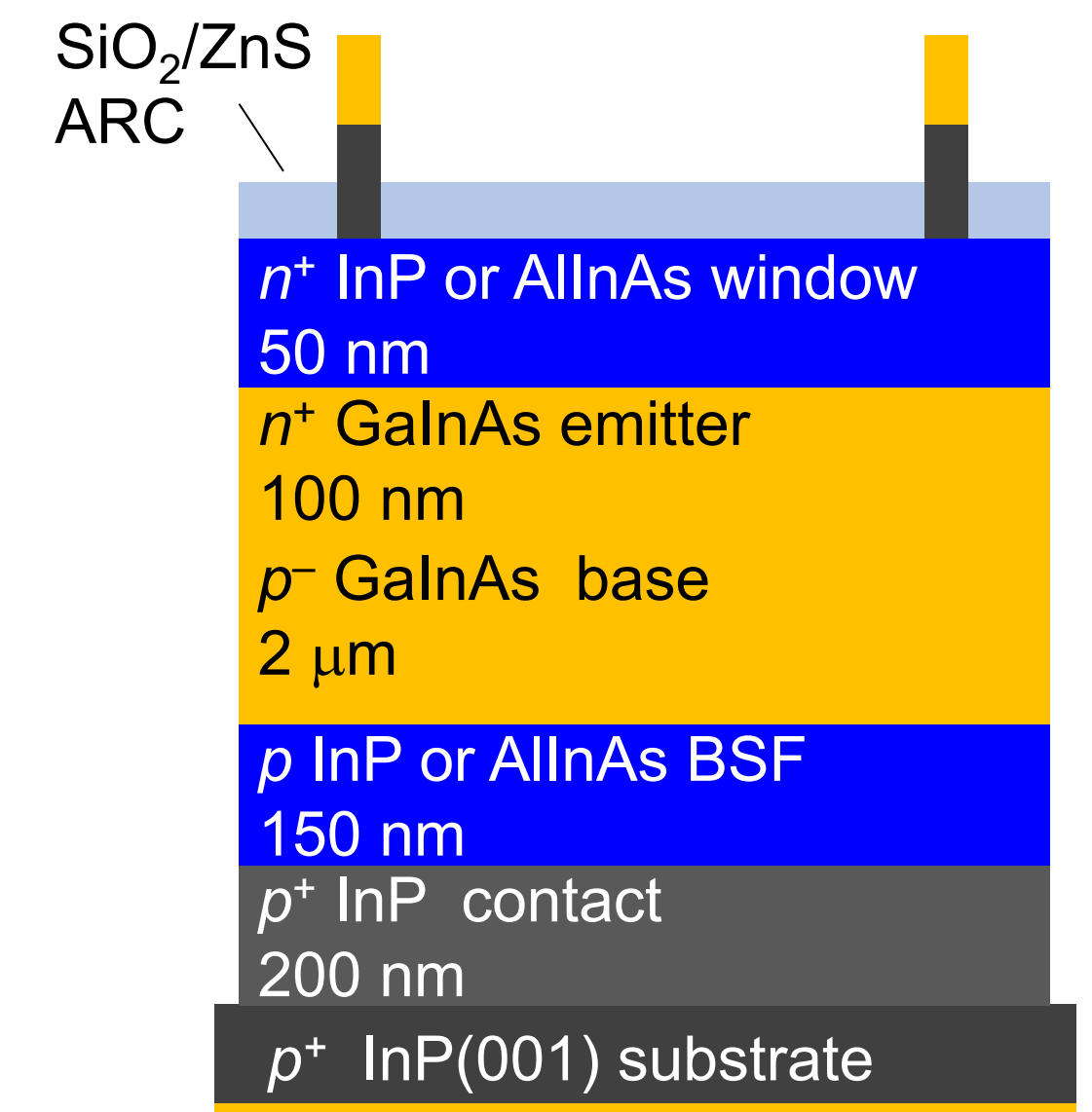
- MBE法によるInP基板上0.75 eV GaInAs太陽電池の高効率化に取り組んだ。
- GaInAs/InPヘテロ界面の高品質化に向けて、InP, GaInAsそれぞれの表面劣化メカニズムが異なることを明らかにし、短時間のV族原料の切り替えによって表面でのAs/P交換反応を小さくできる結果を得た。
- GaInAs太陽電池において、窓層にInP、BSF層にAllnAsを用いた組み合わせが最適であることを明らかにし、世界最高レベルの変換効率を得た。今後更なるセル構造の高度化による高効率化を図る予定である。

本研究は、国立研究開発法人NEDOの委託の下で行われた。

GaInAs太陽電池の作製

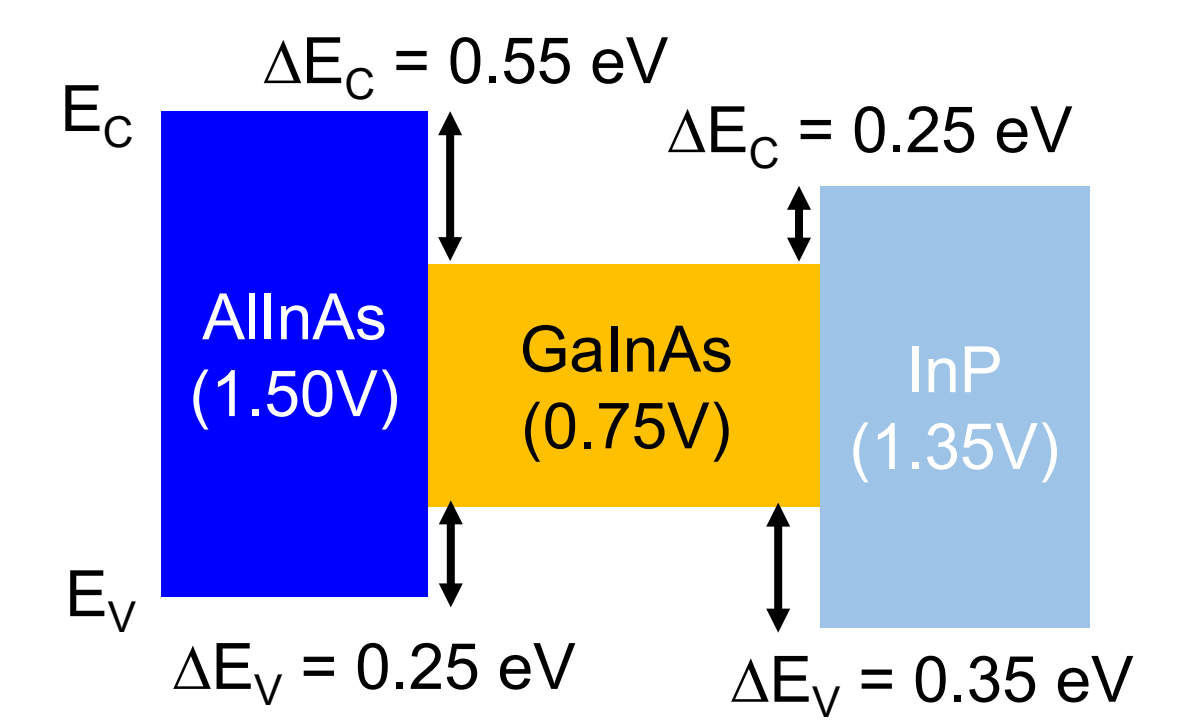
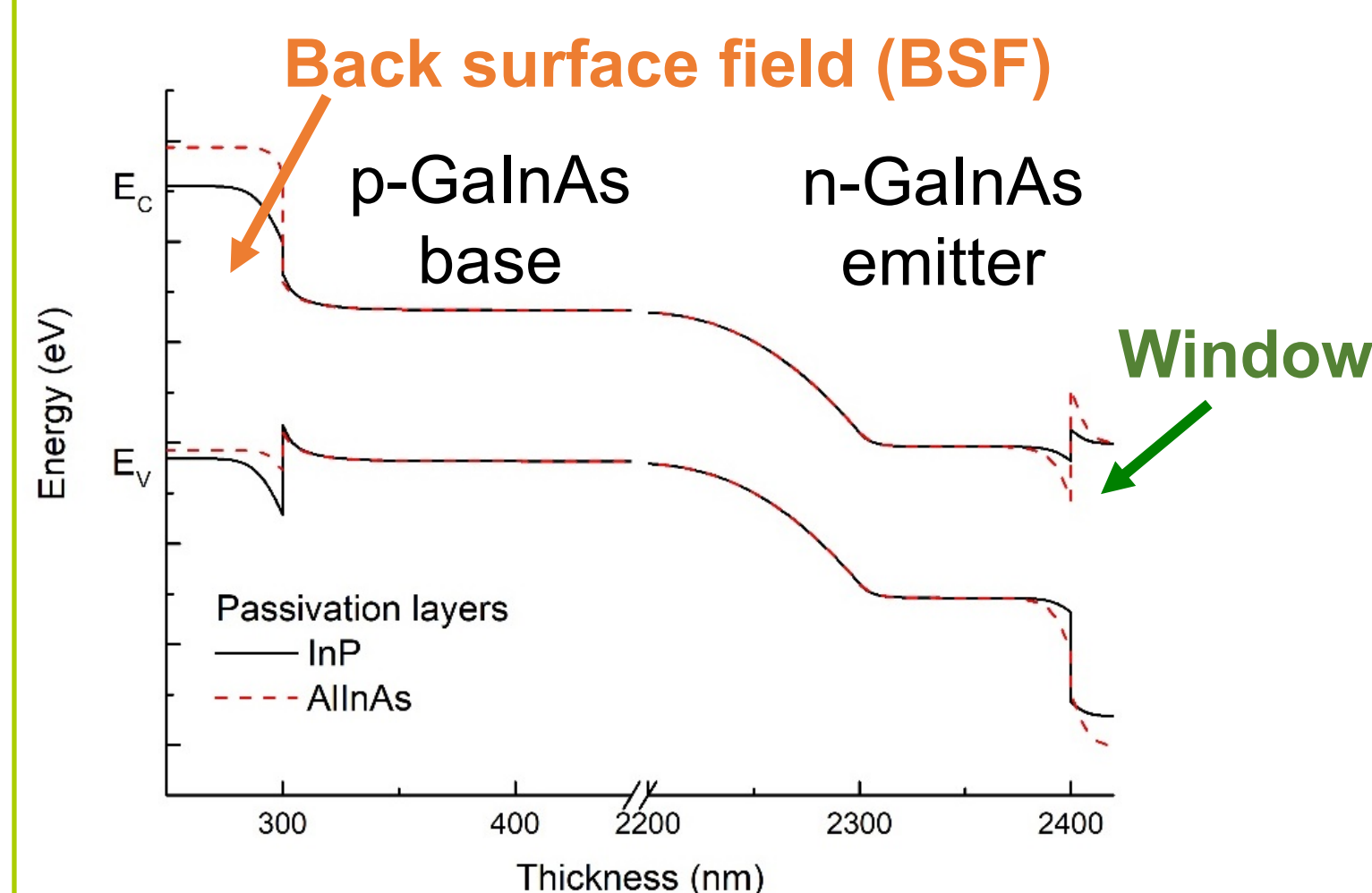
固体ソース分子線エピタキシー(MBE)法

- 2インチ p-InP(001) (2° off to (111)A)
- 成長温度: 500°C (GaInAs, AllnAs)
450°C (InP)
- 成長速度: 1.0 μm/h (GaInAs, AllnAs)
0.8 μm/h (InP)
- V族圧力: P_{As2} = 1.2 × 10⁻⁵ Torr
P_{P2} = 1.5 × 10⁻⁵ Torr



セルサイズ 3.2 mm口

バンド構造図



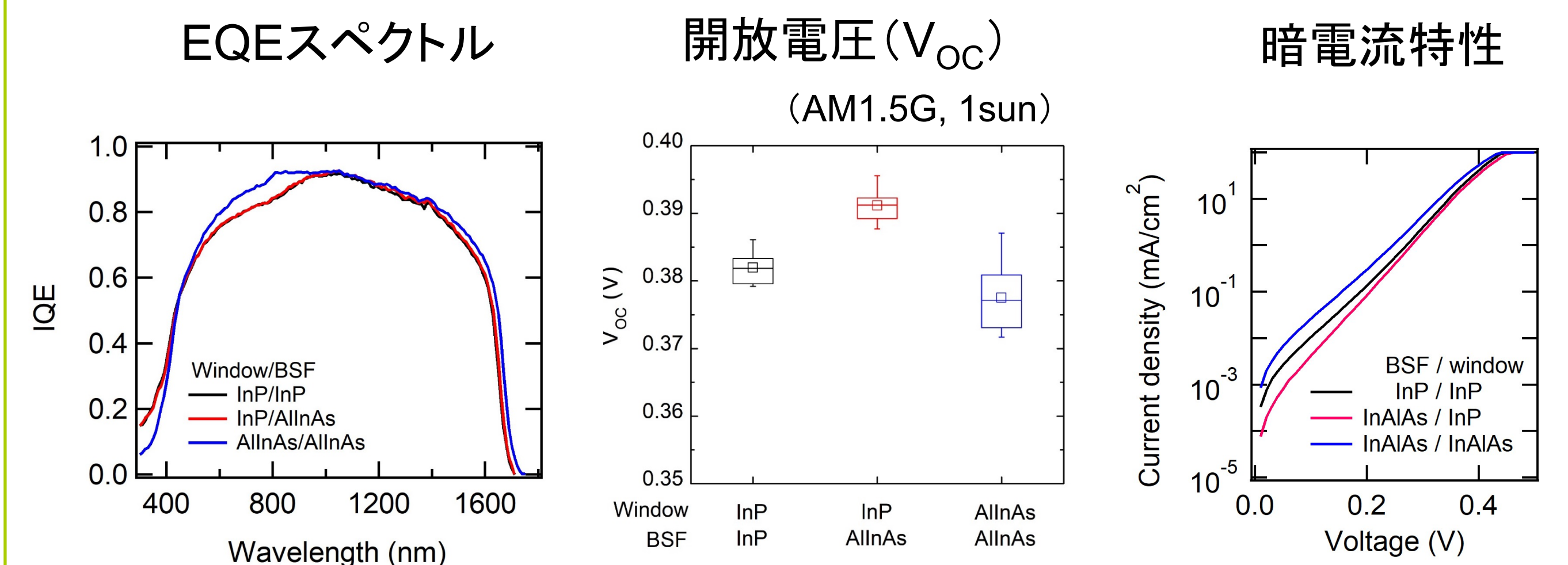
3種類の組み合わせを検討

	Window	BSF
I.	InP	InP
II.	InP	AllnAs
III.	AllnAs	AllnAs

実験

1. 成長シーケンスの改善によるGaInAs/InPヘテロ界面の高品質化
2. GaInAsセルにおけるパッシベーション層材料の最適化

結果と考察② GaInAs太陽電池の評価



Window層の検討

- AllnAsはInPと比較してワイドギャップであり、450 ~ 900 nmのEQE感度の改善に有効
- 一方で、AllnAs/InGaAsはΔE_vが小さいため、AllnAsをwindow層に用いると暗電流が増大し、V_{OC}が低下

⇒ Window窓層材料としてInPが最適

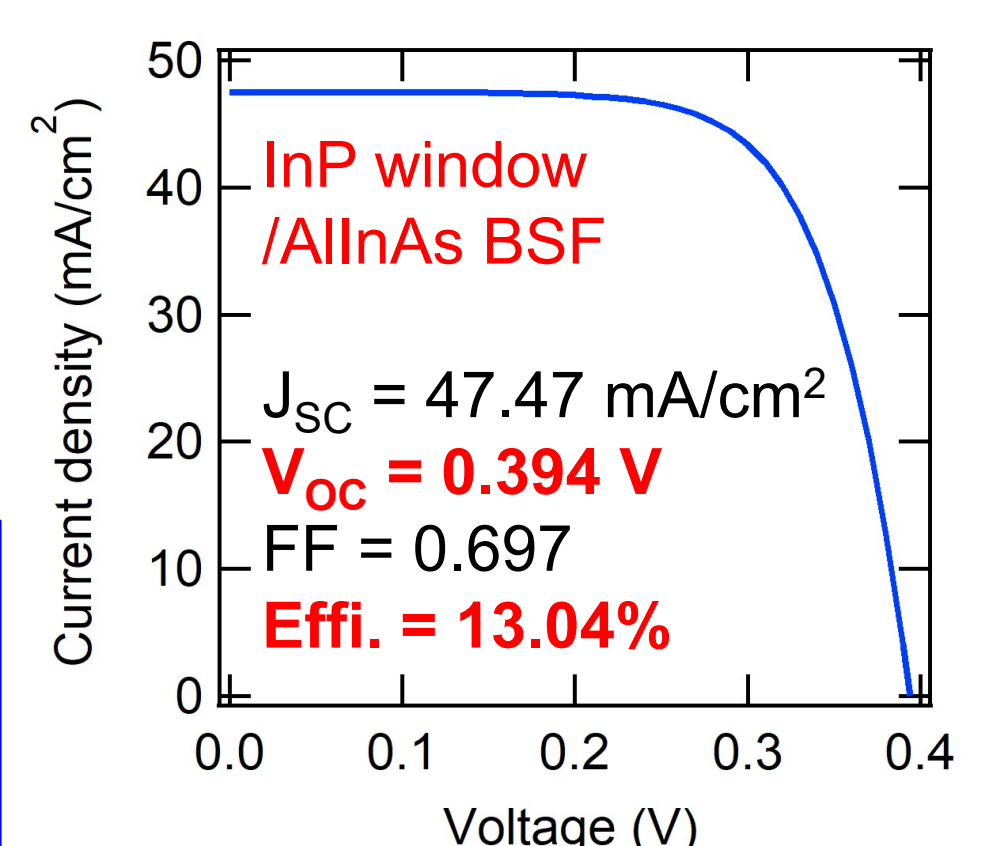
BSF層の検討

- AllnAsはInPと比較してΔE_cが大きく、BSF層として用いることで暗電流が減少し、V_{OC}が増大

⇒ BSF層材料としてAllnAsが最適

- 得られたV_{OC}、変換効率は世界最高レベル
- セル構造の高度化(リアヘテロ、裏面反射の導入)により更なる高効率化が可能

The best GaInAs cell in this work



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] M. U. González et al., Appl. Surf. Sci. 2002, 188, 188.
- [6] S. Hasan et al., J. Crystal Growth 2021, 557, 126010.

HVPE法におけるInGaP/GaAs タンデム太陽電池の高効率化

庄司 靖¹、大島 隆治¹、牧田 紀久夫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

発電効率の高いIII-V族化合物太陽電池の移動体応用を検討

現在の主な応用先



人工衛星



無人航空機

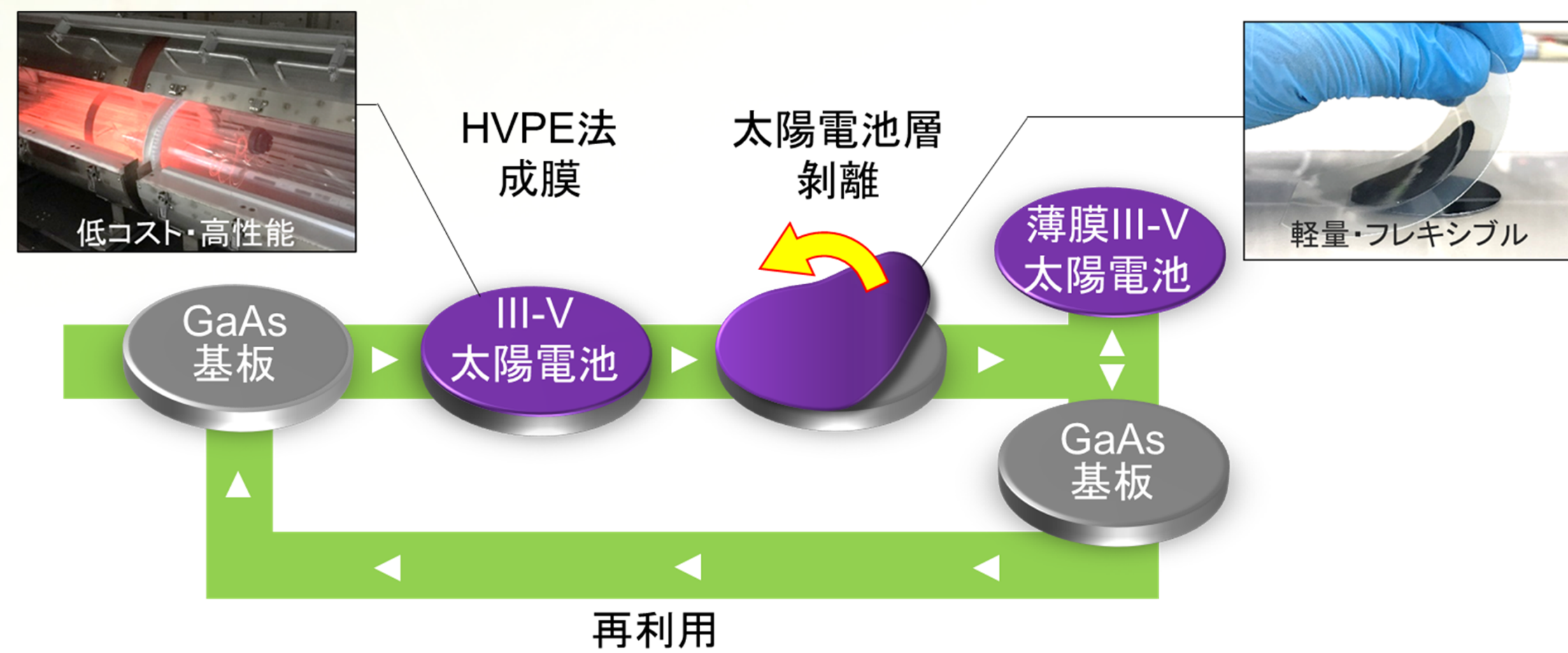


電気自動車

今後期待される応用先

- ・発電コストが高いため、用途に限られる
- ・移動体応用には高い効率と低コストの両立が必要

■ 我々が提案する低コストIII-V族化合物太陽電池作製のアプローチ ■

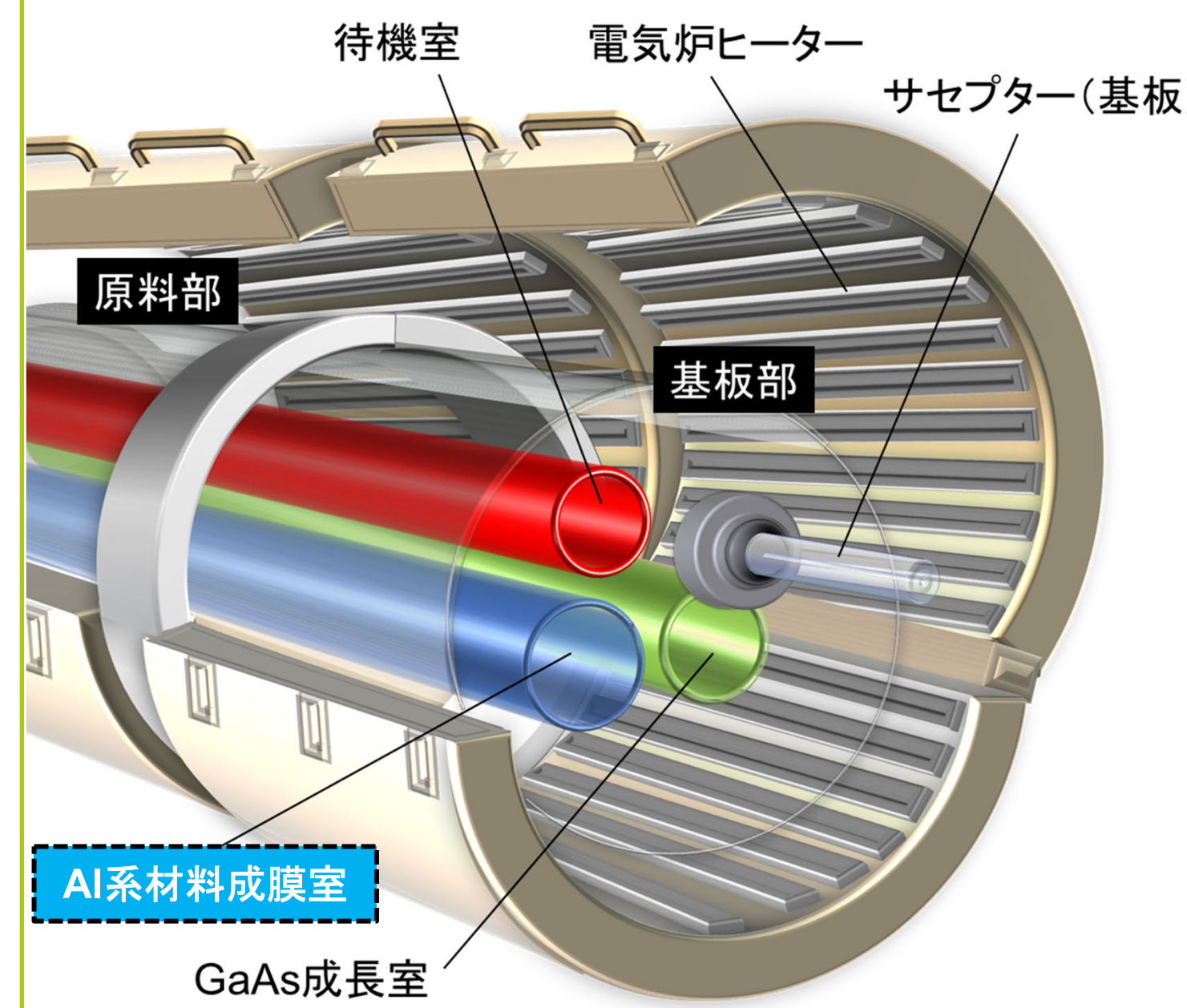


- ① 安価な原料のハイドライド気相成長(HVPE)法による成膜^[1-3] → 成膜コストの低減
- ② 太陽電池層剥離技術による基板再利用^[4,5] → 基板コストの低減、
軽量・フレキシブルセルの作製

問題点: HVPE法における高効率太陽電池の作製
 → AI系パッシベーション層の導入に課題あり^[6]

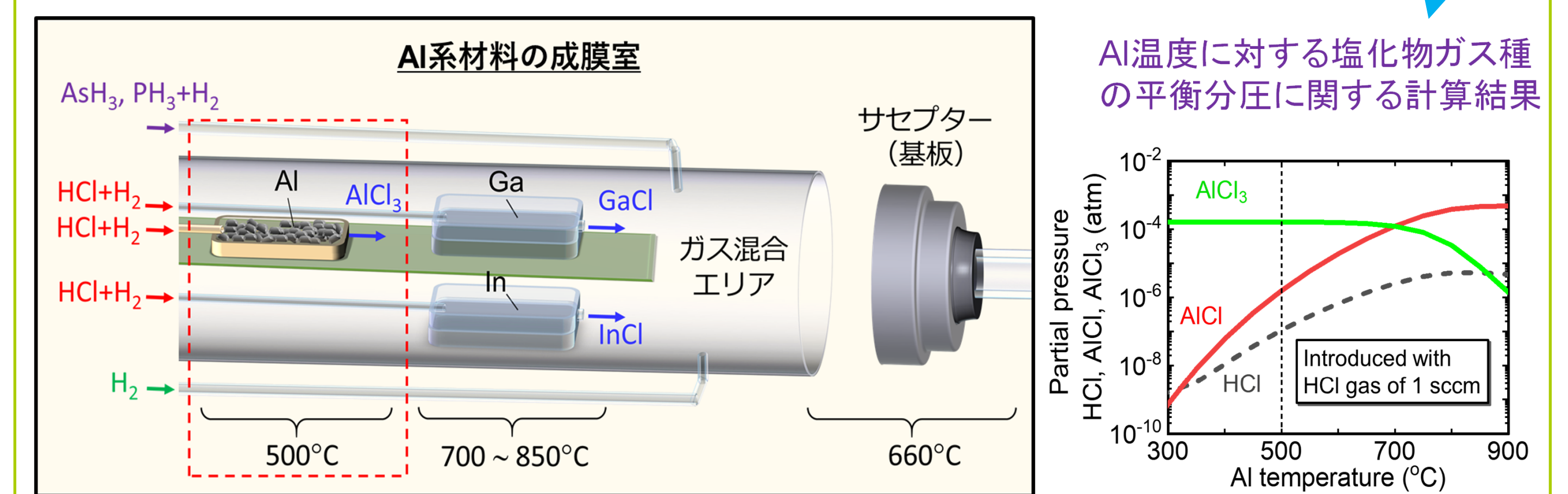
本研究: HVPE法でのAlInGaPパッシベーション層の成膜と太陽電池の高効率化

本研究で用いたAI系材料成膜用HVPE装置



HVPE法のメリット/デメリット

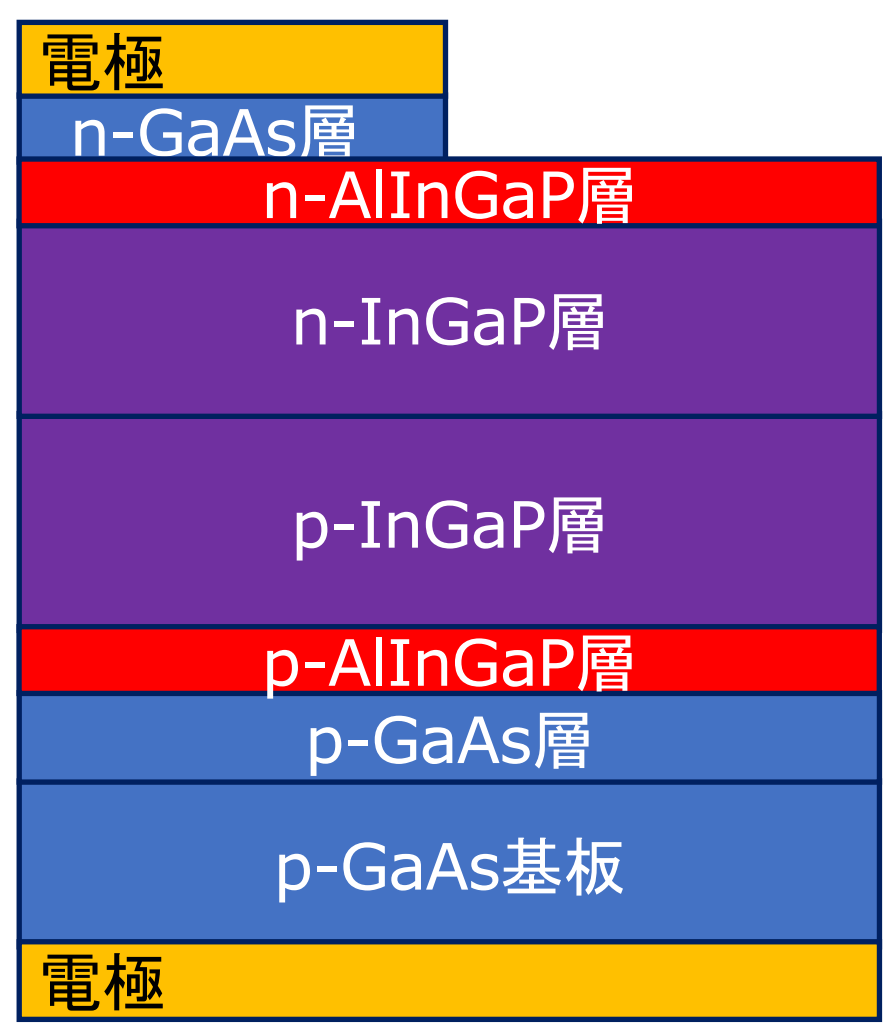
- 😊 純金属を使用するため原料費が安い
 - 😊 成長速度が速い
 - 😞 AI系材料の成膜が困難^[7]
 - ・AlCl₃が石英反応炉を損傷
 - ・AlCl₃の分配係数が大きく制御が困難
- 対策: AI原料の温度を低温(500°C)にすることでAlCl₃の発生を抑制



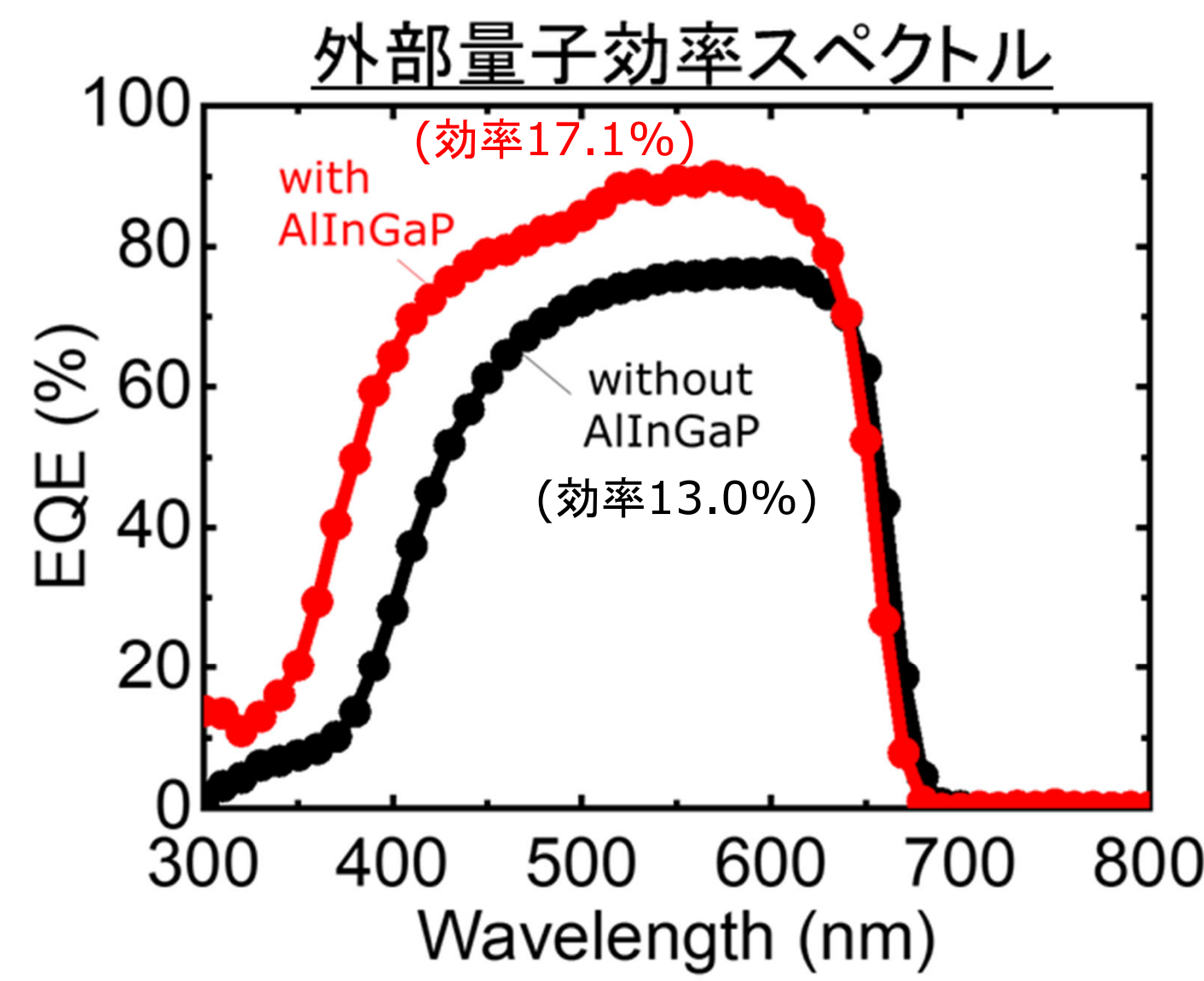
AlCl₃を前駆体として生成・利用することでHVPEの石英炉の損傷を防止^[8-10]

AlInGaPパッシベーション層導入による太陽電池の高効率化

InGaPトップセルの高効率化

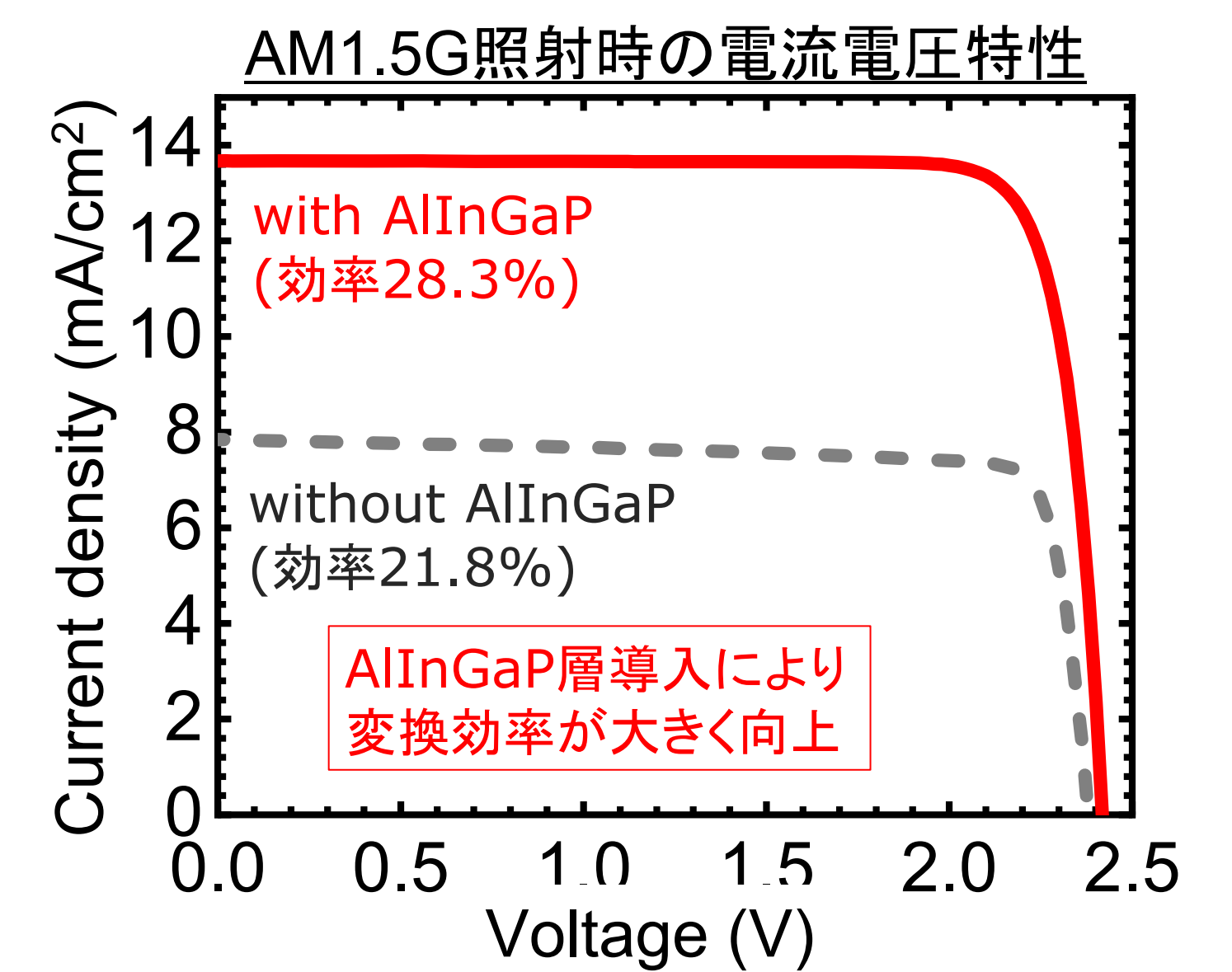
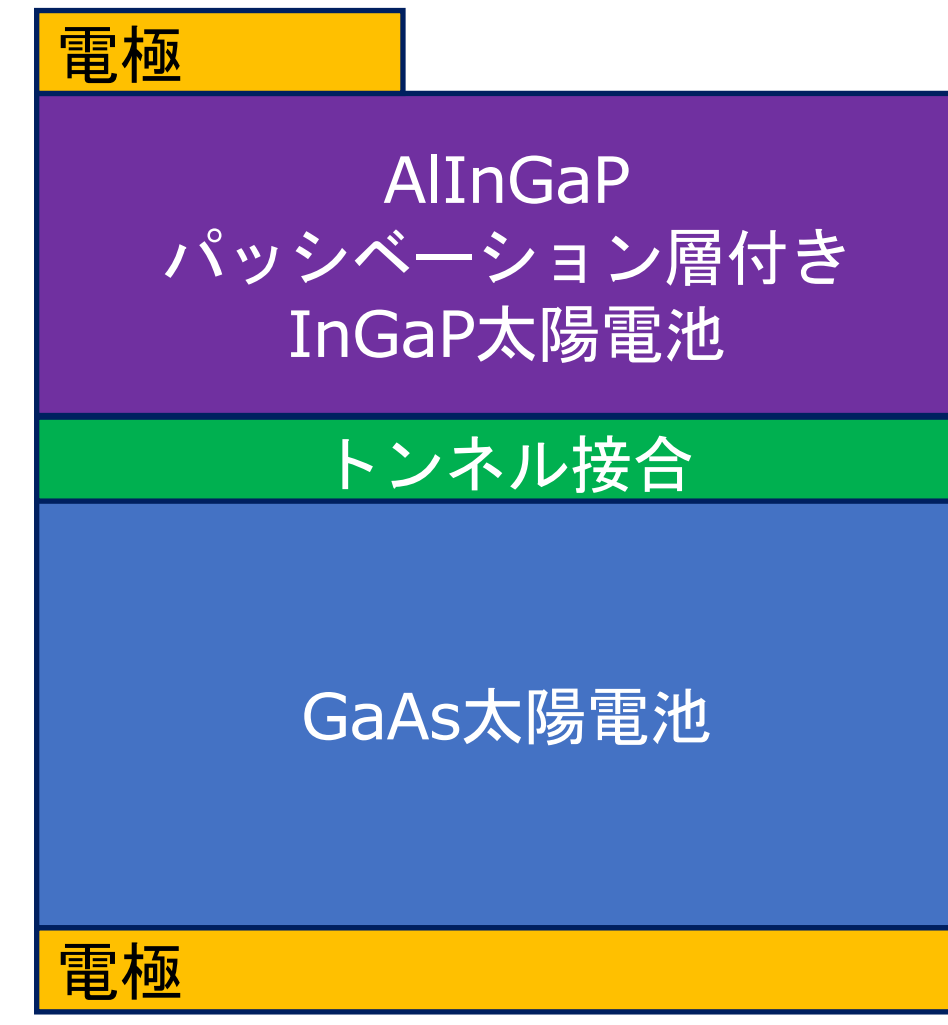


表面/界面での再結合損失を減少させる



AlInGaP層の導入によりInGaP層吸収波長域の外部量子効率が改善
 → InGaPトップセルの変換効率を13.0%から17.1%に向上

InGaP/GaAsタンデムセルの高効率化



【参考】これまでのHVPE太陽電池の最高効率
 米国 NREL GaAs太陽電池: 25.5%^[11]
 米国 NREL InGaP/GaAs太陽電池: 24.9%^[12]

本研究ではHVPE法の太陽電池として世界最高効率(28.3%)を達成^[13]

結論

- 高性能III-V族太陽電池の作製が可能なHVPE装置を太陽日酸株式会社と共同で開発した。
- AlとHClガスを温度500°Cで反応させることで、HVPE装置の石英反応炉を還元しない三塩化アルミニウム(AlCl₃)を生成し、結晶成長に利用した。
- AlInGaP層を太陽電池に導入し、HVPE法の太陽電池として世界最高効率(28.3%)を達成した。

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] C. O. Bozler et al., Appl. Phys. Lett. vol. 31, 629 (1977).
- [2] J. Simon, et al., IEEE J. Photovolt. vol. 6, 191 (2016).
- [3] R. Oshima et al, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57, 08RD06 (2018).
- [4] M. Konagai et al., J. Cryst. Grow. vol. 45, 277 (1978).
- [5] Y. Shoji et al., IEEE J. Photovolt. vol. 11, 93 (2021).
- [6] W. Metafelia et al., Proc. 47th IEEE PVSC, 0672 (2020).
- [7] J. S. Yuan et al., J. Appl. Phys. vol. 57, 1380 (1985).
- [8] Y. Kumagai et al., Phys. Stat. Sol. (C) vol. 0, 2498 (2003).
- [9] Y. Shoji et al., 29th PVSEC, no. 5ThP.13/707, Xi'an (2019).
- [10] K. L. Schulte et al, ACS Appl. Energy Mater. vol. 2, 8405 (2019).
- [11] Y. Shoji et al., IEEE J. Photovolt. vol. 11, 93 (2021).
- [12] J. Simon et al, Proc. 48th IEEE PVSC, 1545 (2021).
- [13] Y. Shoji et al, Solar RRL, 2100948 (DOI: 10.1002/solr.202100948)

低コストHVPE法により作製した InGaP太陽電池の発光イメージ測定

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 東京都市大学

研究の目的

- III-V族太陽電池の製造コスト低減に向けて、HVPE (hydride vapor phase epitaxy)を用いた高速成膜技術が開発されている[1-3]。しかし、大型ウェファへの適用には、成膜の空間均一性が課題となっている[4]。また、太陽電池用Siウェファの評価には、蛍光(PL)イメージングが広く用いられている[5]。
- 本研究では
 - III-V族太陽電池ウェファにおける空間均一性を非接触で評価する手法として、PLイメージング測定を検討した。
 - EL測定を用いて、開放電圧などの太陽電池性能と電界発光(EL)強度についての関係[6,7]を調べ、これらとPL強度の関係解明を進めた。

先行研究: HVPEにおける空間不均一性[4]

先行研究(K. L. Schulte, W. Metaferia, J. Simon, A. J. Ptak, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. **197**, 84 (2019).)において

- HVPEで作製されたGaAs太陽電池(ARCなし)の性能(開放電圧、短絡電流、効率)の2Dマップが評価され、ウェファ内での不均一性が報告されている。
- HVPEで作製された $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ 膜について、XRDにより評価した組成比 x についてウェファ内での不均一性が報告されている。

結果①: 太陽電池性能と発光特性

測定試料: InGaP太陽電池(ARCなし)
典型値 $J_{sc} = 10 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{oc} = 1.37 \text{ V}$
FF = 0.86、変換効率 11.9%

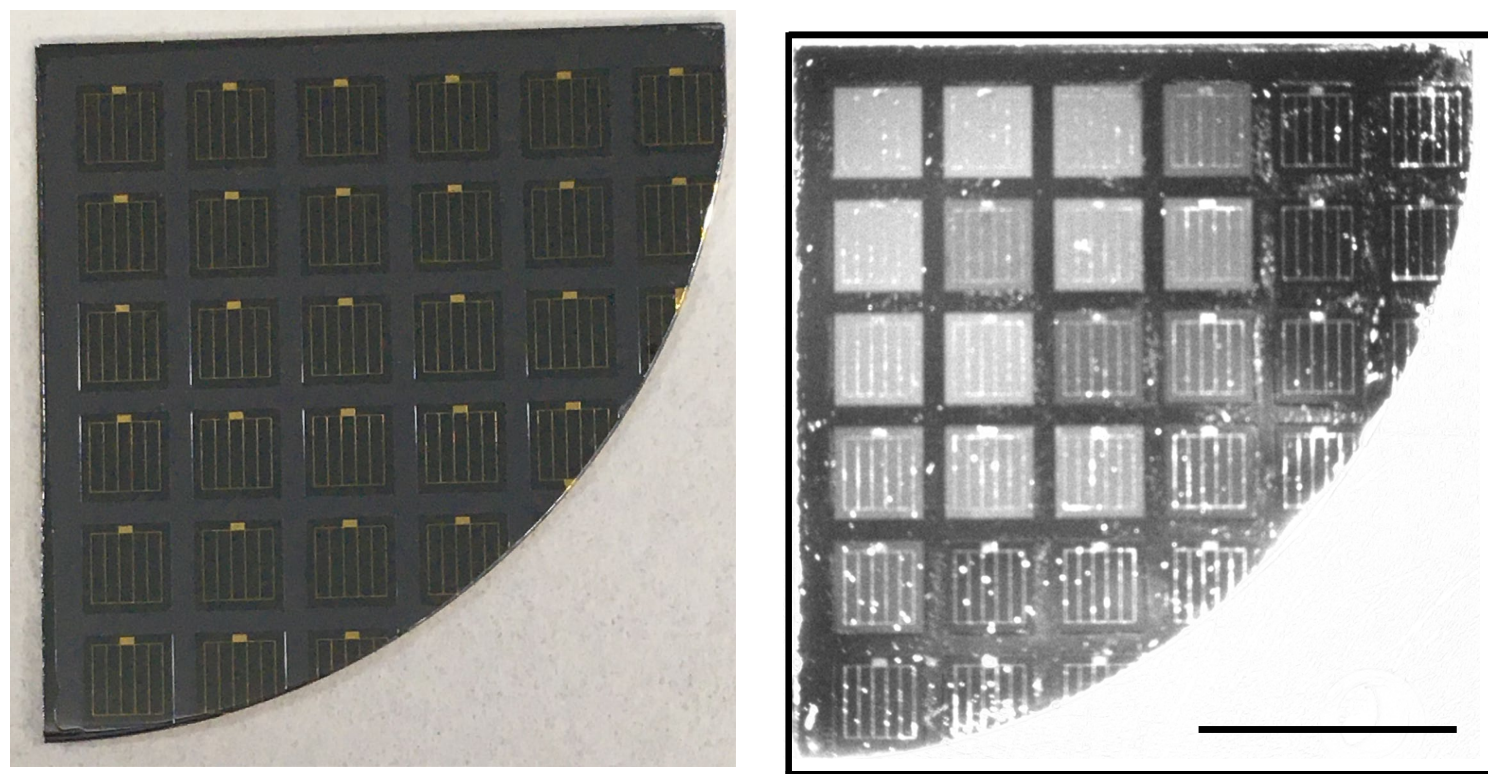


図1 InGaP太陽電池(左)とPLイメージ(右)。

青色光照射(白色LED+光学フィルタ)し、InGaPからの赤色発光をCMOSカメラで検出。

太陽電池性能とEL強度

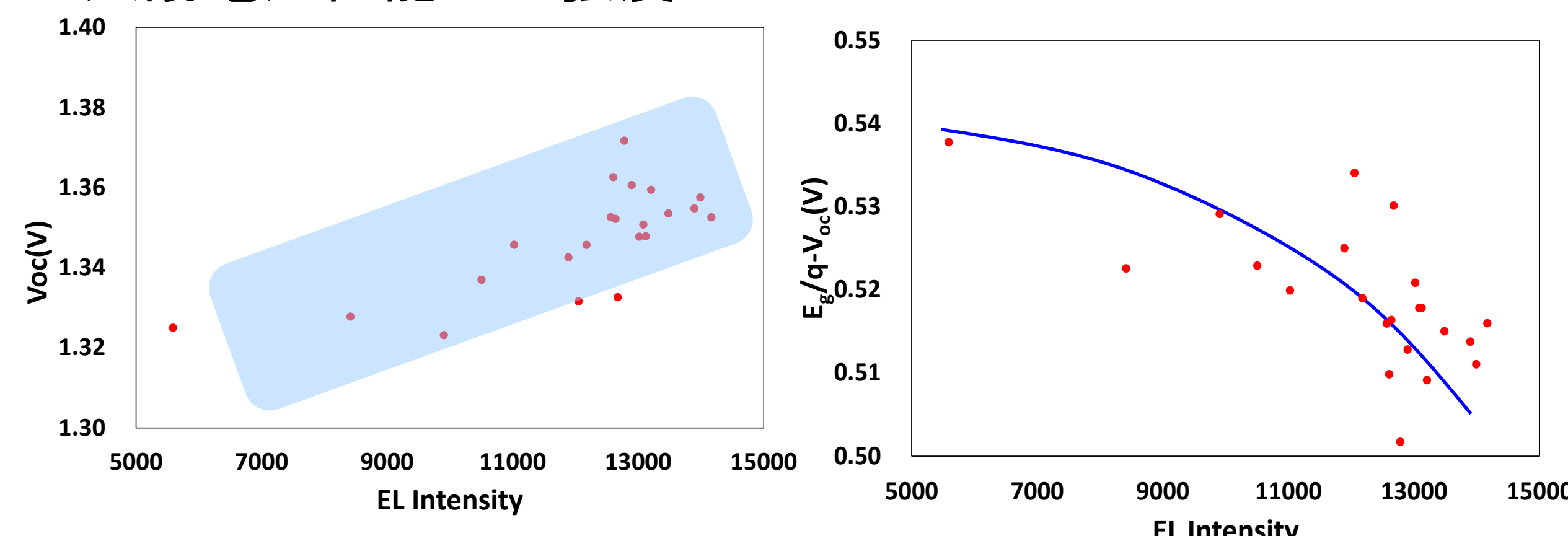


図2 開放電圧とEL強度(左)と電圧損失($E_g/q-V_{oc}$)とEL強度。

- EL強度が高いほど高い開放電圧を示す傾向が見られた。
- バンドギャップ(組成)の均一性を考慮しても、EL強度が高いセルにおいて、電圧損失が低減している傾向が見られた。

太陽電池性能とPL強度

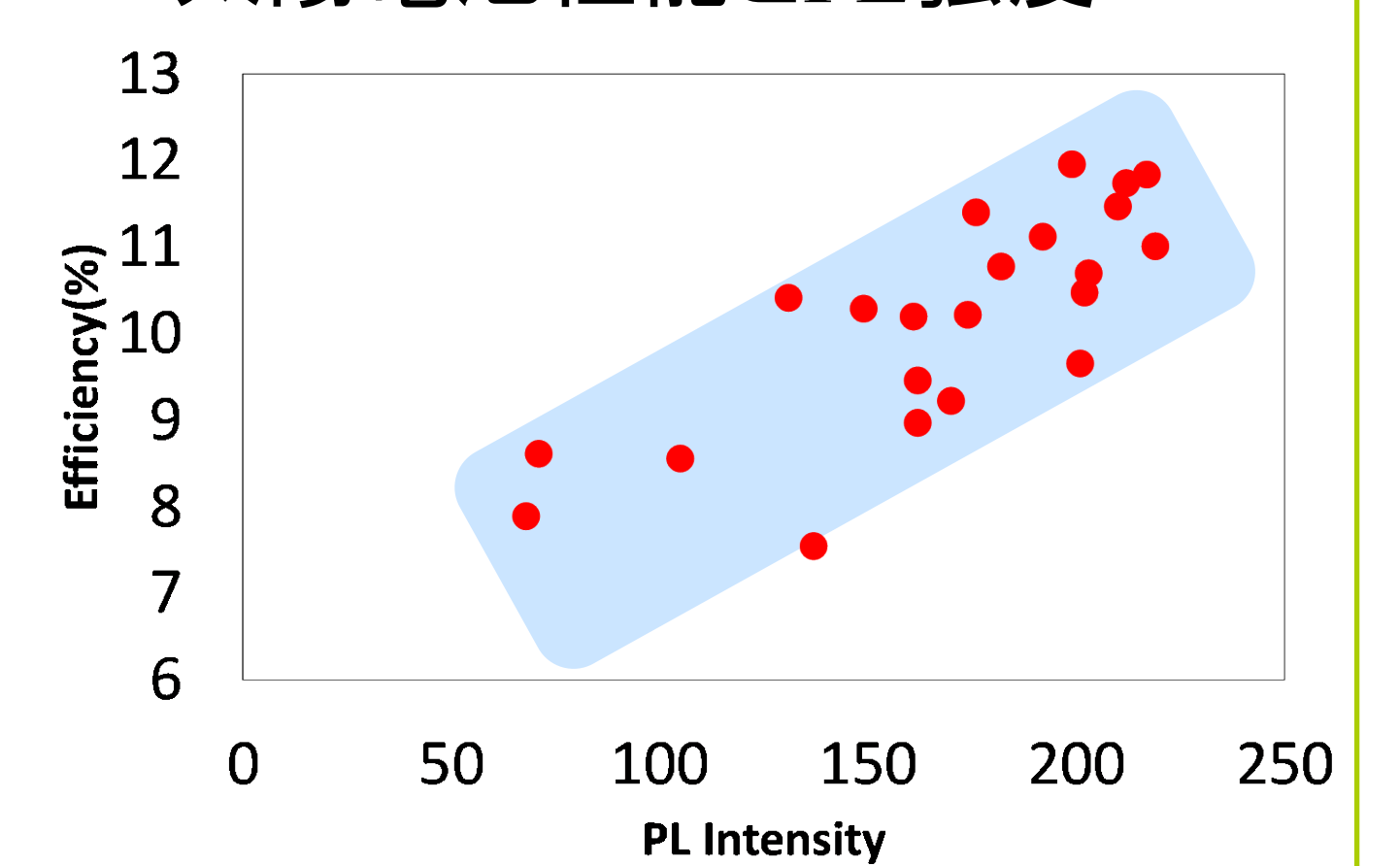


図3 太陽電池性能(変換効率)とPL強度。

PL強度が高い太陽電池ほど高い変換効率を示している傾向が見られた。

結果②: 空間均一性の検討

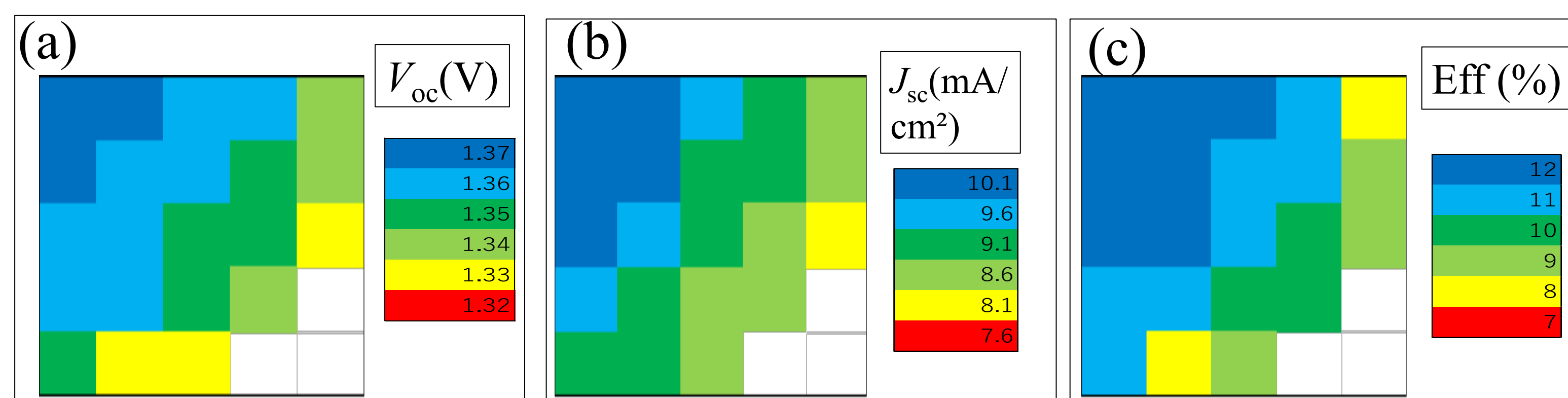
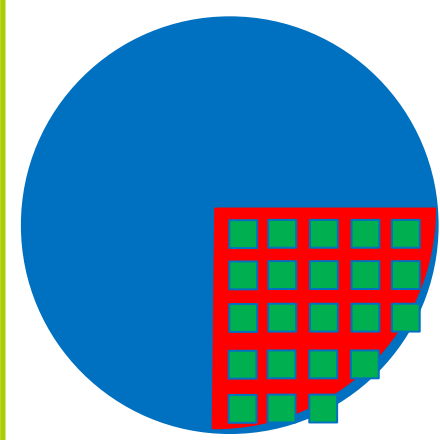


図4 InGaP太陽電池性能の2Dマップ (a)開放電圧、(b)短絡電流、(c)変換効率。

- PLイメージ(図1)に見られるように、ウェファが中心部から端に向かって、太陽電池性能の低下が見られた。

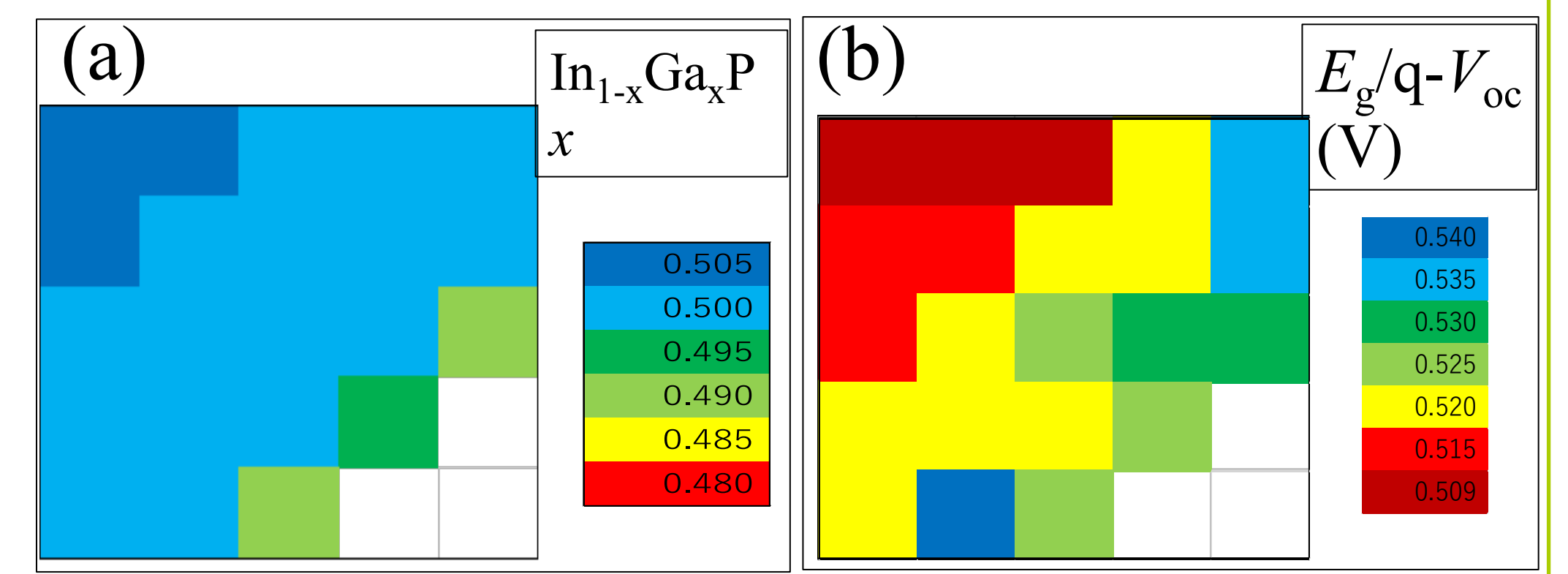


図5 (a) InGaP太陽電池の組成 x の2Dマップ(発光波長による評価)。(b) 電圧損失の2Dマップ。

$$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P} @ 300\text{K}: E_g = 1.351 + 0.643x + 0.786x^2$$

- ウェファ端側で電圧損失が大きくなった。

結論

- HVPEを用いて作製した太陽電池について、PL測定とEL測定を用いて太陽電池性能と発光測定との関係を調べ、PL強度・EL強度が大きい太陽電池ほど高い変換効率を示す傾向を見出した。
- PLマッピング測定を行い、太陽電池性能と発光特性の空間均一性に相関があることを見出した。ウェファ中心部から動径方向に向かって、性能が空間分布している傾向を見出した。

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

- W. Metaferia, K. L. Schulte, J. Simon, S. Johnston, and A. J. Ptak, Nat. Commun. **10**, 3361 (2019).
- Y. Shoji, R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata, and T. Sugaya, Appl. Phys. Express **12**, 052004 (2019).
- R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata, and T. Sugaya, IEEE J. Photovoltaics. **10**, 749 (2020).
- K. L. Schulte, W. Metaferia, J. Simon, A. J. Ptak, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. **197**, 84 (2019).
- T. Trupke and P. Würfel., Appl. Phys. Lett. **89**, 044107 (2006).
- M. Yamaguchi, K.-H. Lee, H. Yamada, Y. Katsumata, Prog. Photovolt. Res. Appl. **26**, 543 (2018).
- U. Rau, Phys. Rev. B **76**, 085303 (2007).

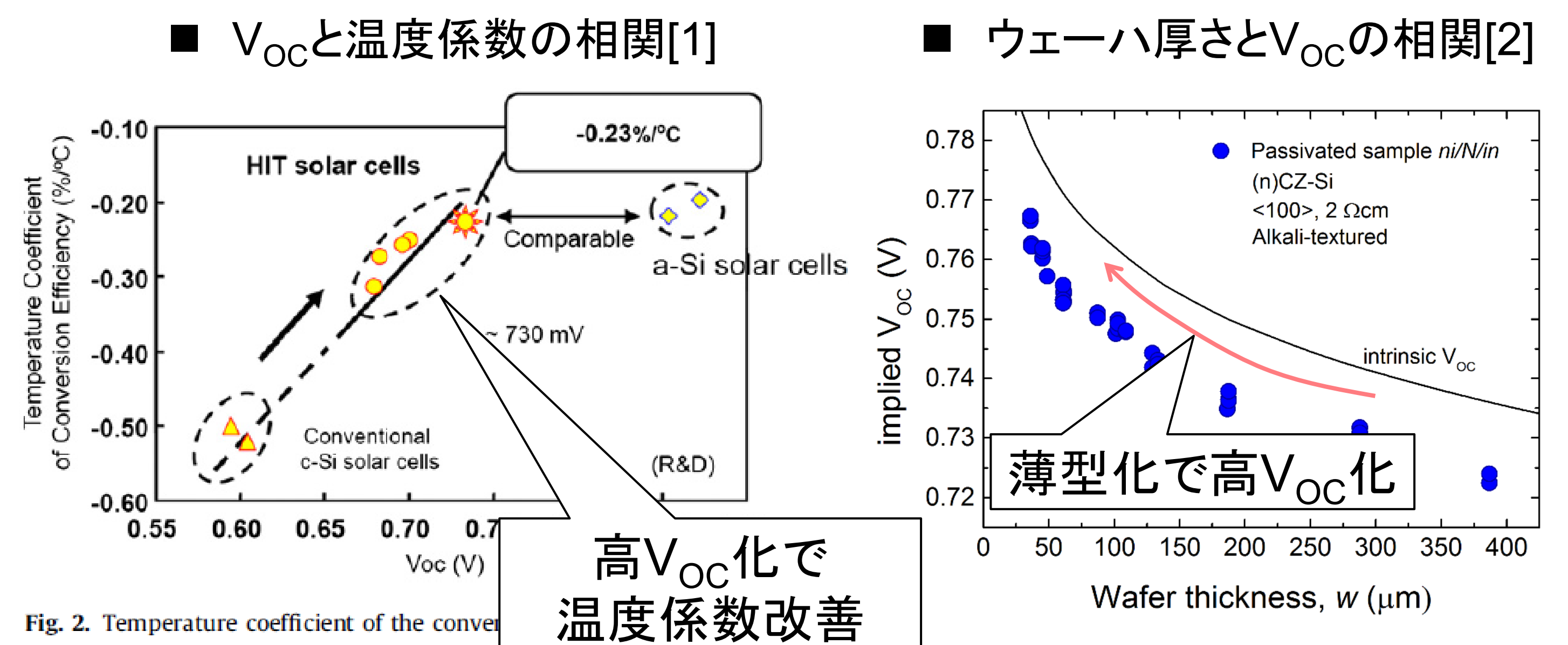
超薄型化による結晶シリコン太陽電池の高V_{OC}化と温度特性

齋 均、海汐 寛史、松井 卓矢
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



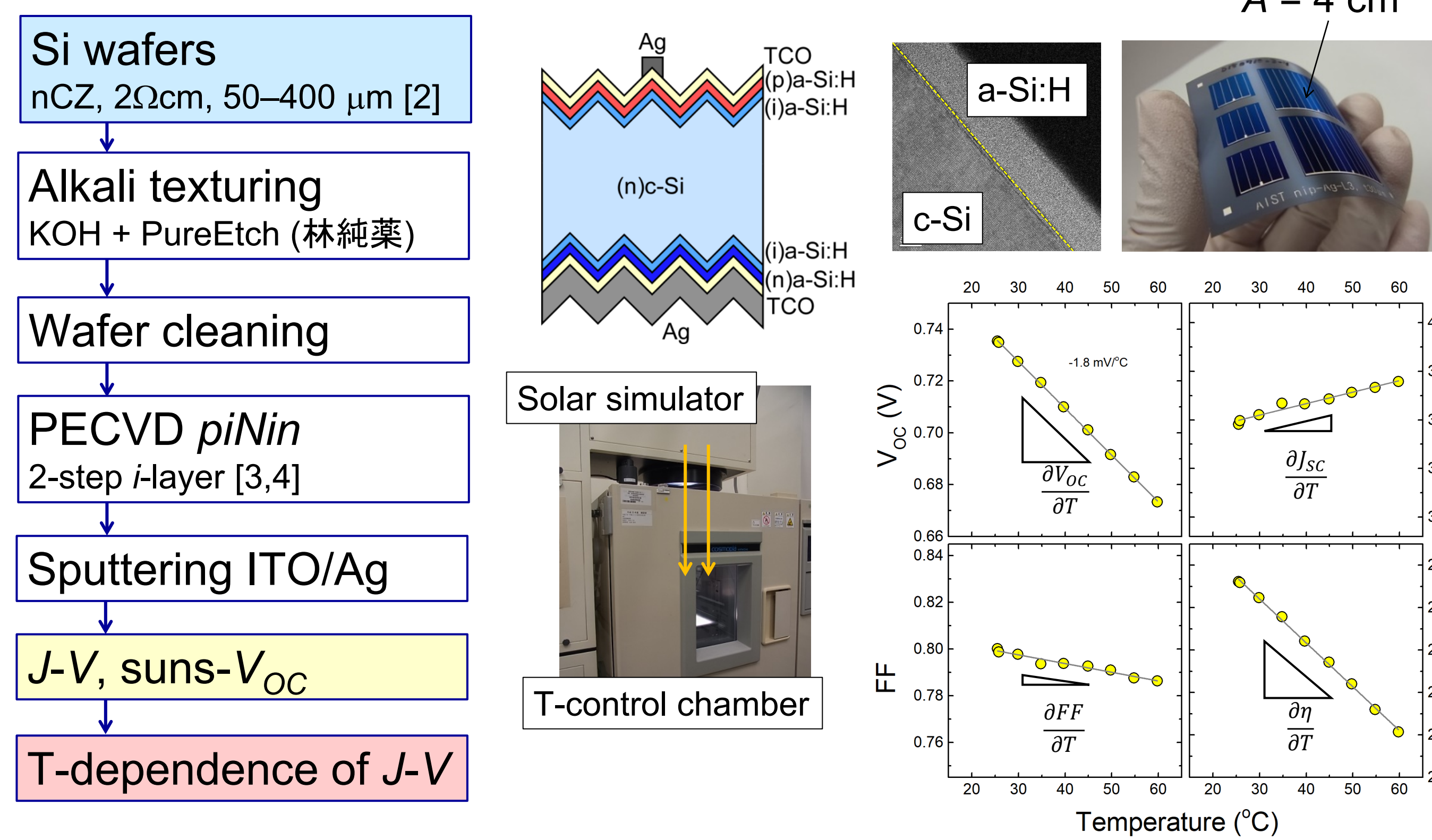
研究の目的

結晶シリコン太陽電池の発電効率は、温度上昇と共に低下し、その程度は温度係数(TC)により定量化される。屋外設置された太陽電池の温度は、標準条件(25°C)を超えることが多いため、TCを小さくする(温度耐性を高める)ことで実発電量を増やすことができる。TCを小さくするには、高V_{OC}化が有効であり、その方策の一つにウェーハの薄型化がある。本研究では、ウェーハ薄型化による高V_{OC}化とTCへの影響について、シリコンヘテロ接合型(SHJ)太陽電池を用いて実験的に検討した。



実験

プロセス・評価の流れ



結果: SHJセル特性とウェーハ厚

2水準のセルを評価

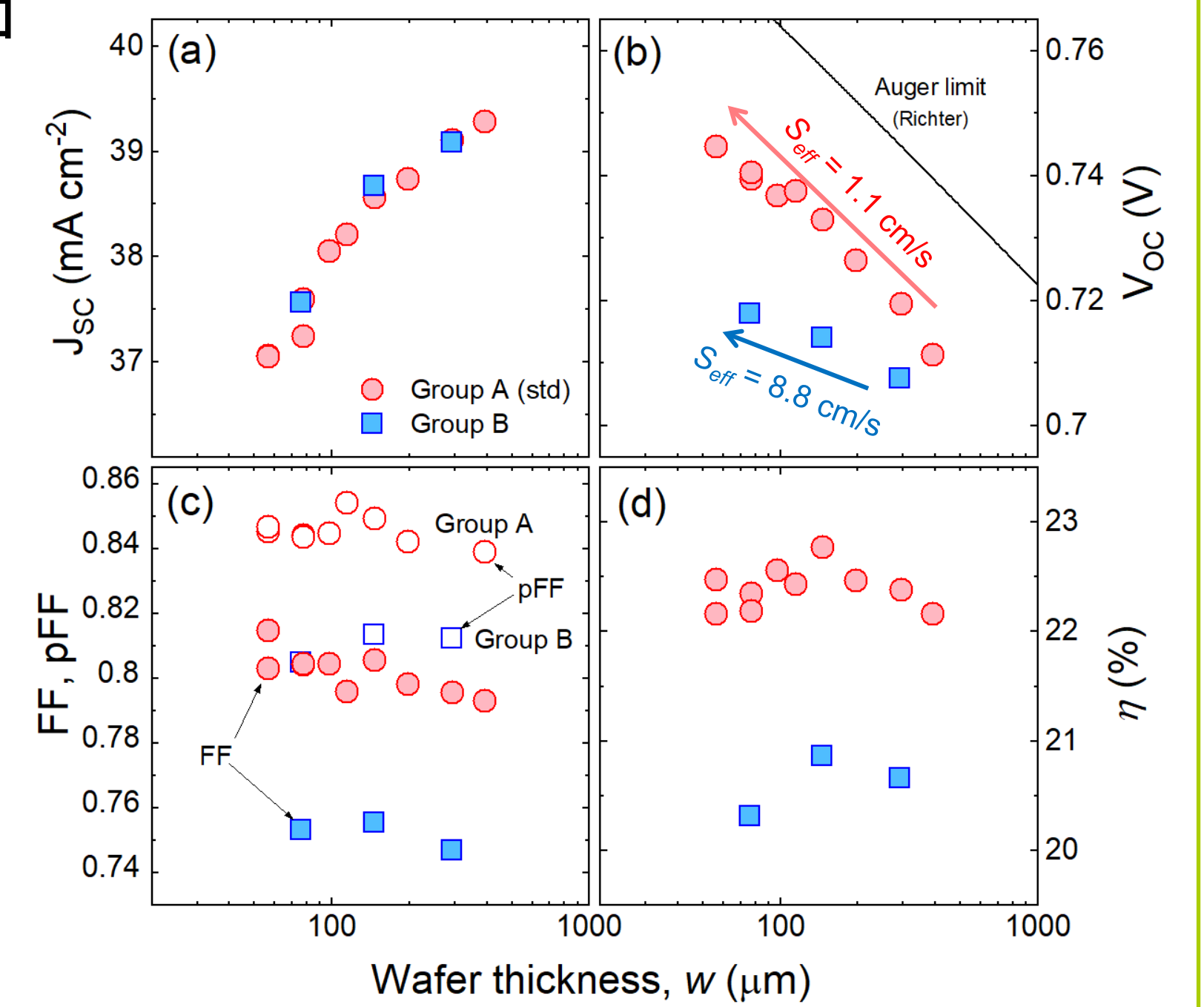
表面再結合速度をPECVD条件で調整:
A(good) S_{eff} = 1.1 cm/s
B(poor) S_{eff} = 8.8 cm/s

ウェーハ厚減少により:

	A	B
V _{OC}	↑	↑
J _{SC}	↓	↓
FF, pFF	←	←
η	←	←

高精度評価値:

w(μm)	J _{SC} (mAcm ⁻²)	V _{OC} (mV)	FF(%)	η(%)
56.5	37.27	750	81.4	22.72



結果: 温度係数

SHJセルの温度係数とウェーハ厚の相関

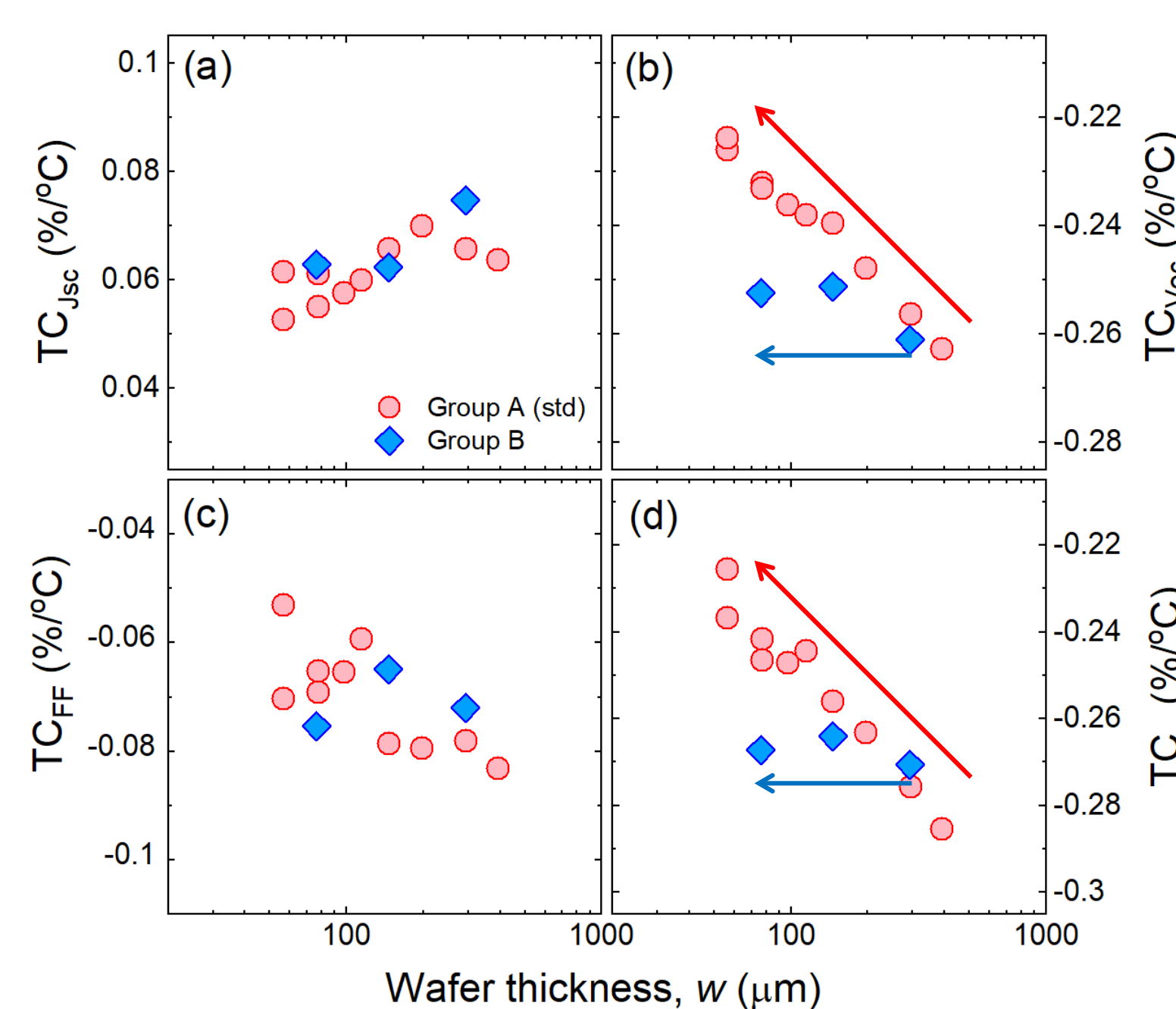
$$TC_{V_{OC}} = \frac{1}{V_{OC,25^\circ C}} \frac{dV_{OC}}{dT}$$

$$TC_{J_{SC}} = \frac{1}{J_{SC,25^\circ C}} \frac{dJ_{SC}}{dT}$$

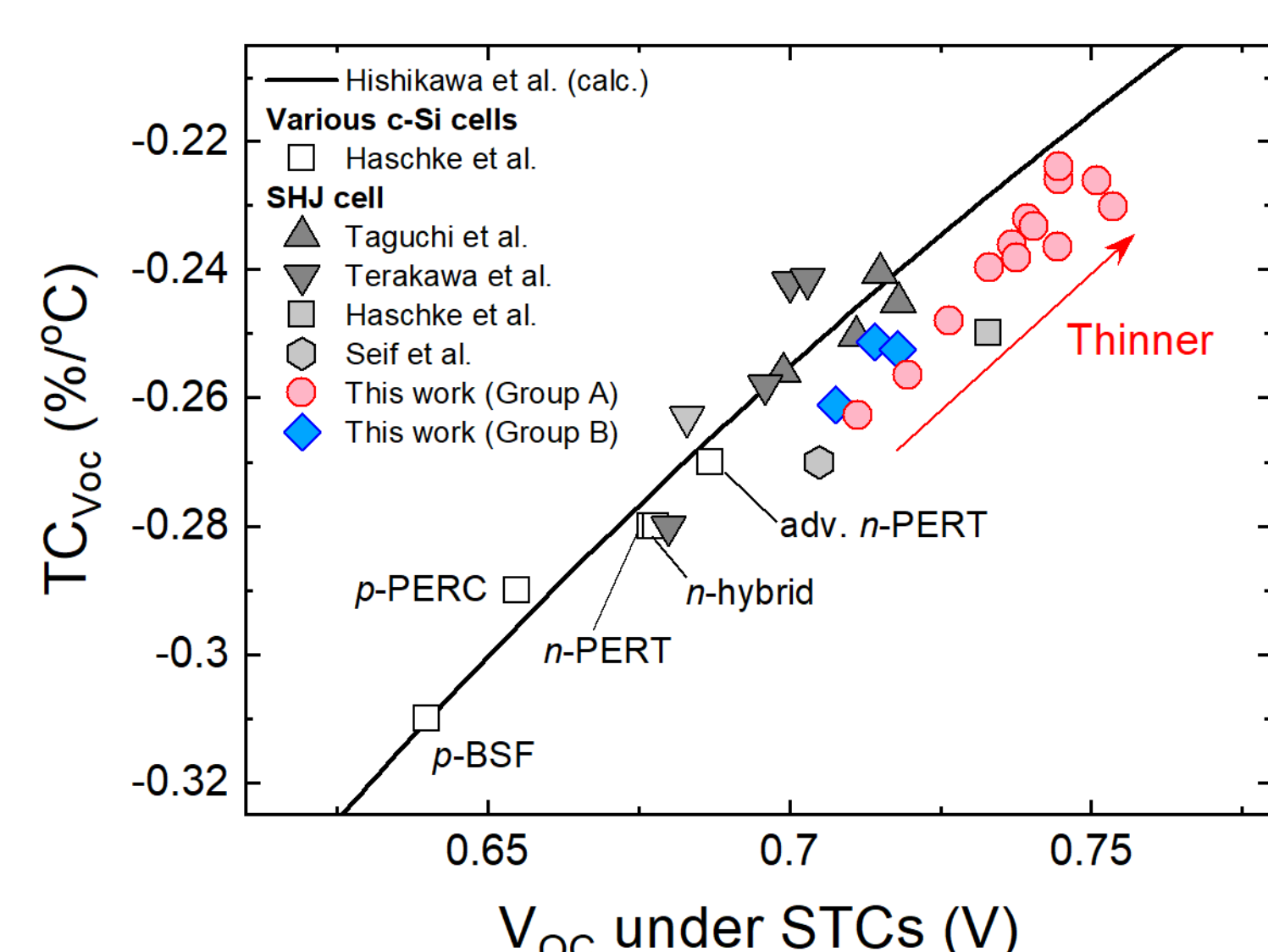
$$TC_{FF} = \frac{1}{FF_{25^\circ C}} \frac{dFF}{dT}$$

$$TC_{\eta} = \frac{1}{\eta_{25^\circ C}} \frac{d\eta}{dT}$$

- TC_ηはTC_{V_{OC}}に強く依存
- 表面パッシベーションが良好ならば、薄型化によりTC_{V_{OC}}及びTC_ηが向上

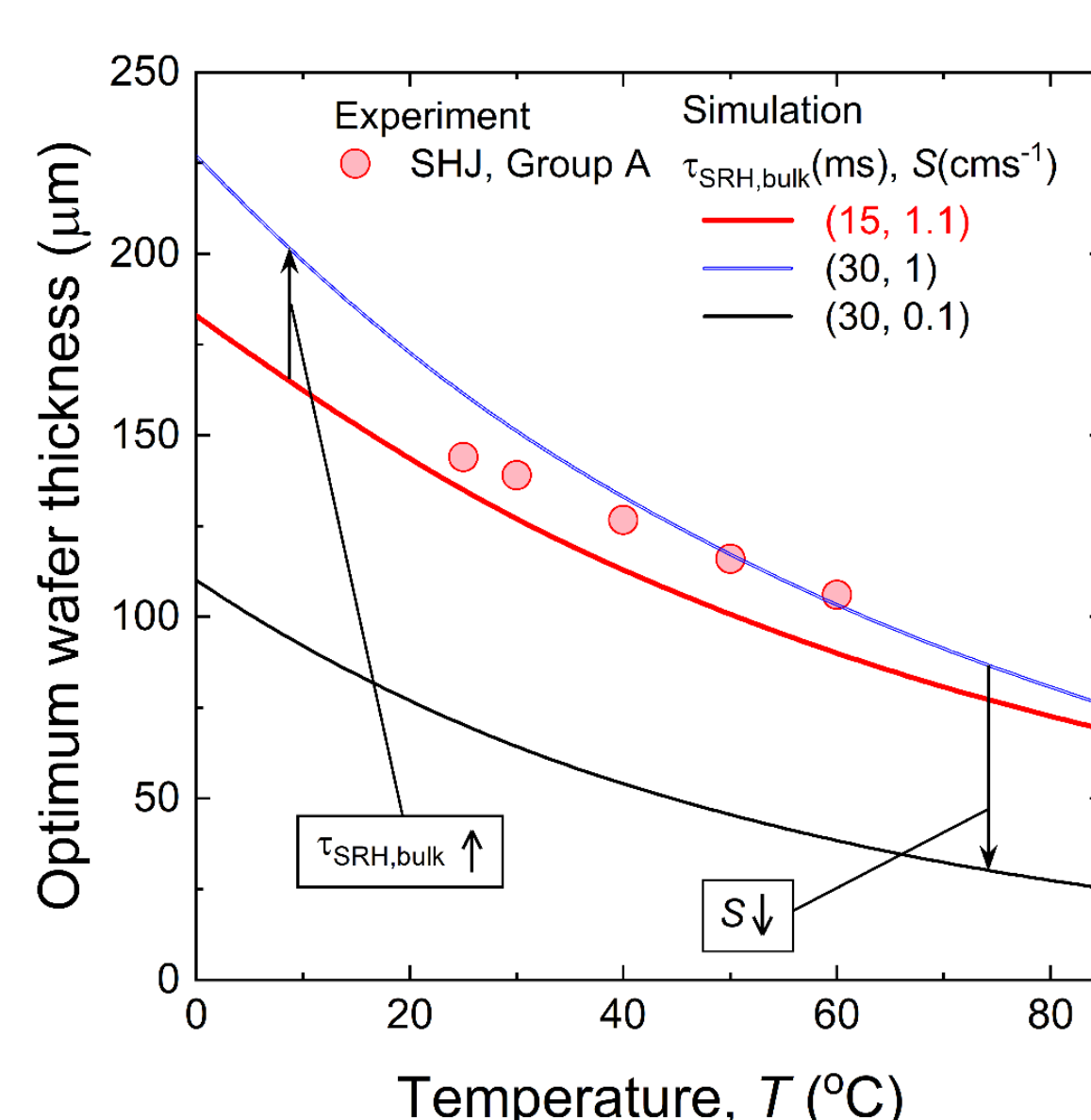


V_{OC}と温度係数の相関[5-9]



- 高V_{OC}化でTCが改善

動作温度と最適ウェーハ厚の相関



- 温度上昇に伴い最適厚さが減少

結論

- 高V_{OC}化の方策: SHJ構造 + ウェーハ薄型化
 - 高V_{OC}化により温度係数(TC)が改善
 - 温度上昇に伴い最適なウェーハ厚が薄型化
 - 高温下では薄型化で発電量を向上できる可能性有
- 詳細は:
H. Sai et al., Prog. Photovolt. **29** (2021) 1093–1104

謝辞

本研究にご協力いただいた以下の方々並びにNEDOのご支援に感謝申し上げます。

コマツNTC(株): 河津 智之、長井俊樹
産総研: 奥登 志喜、佐藤 芳樹、田辺 まゆみ、吉田 正裕、上田 孝、志村 晴哉、佐々木 あゆみ



参考文献

- T. Mishima et al., SOLMAT 95 (2011) 18.
- H. Sai et al., JJAP **57** (2018) 08RB10.
- H. Sai et al., JAP **124** (2018) 103102.
- H. Sai et al., PSSa **218** (2021) 2000743.
- Y. Hishikawa et al., IEEE JPV **8** (2018) 48.
- J. Haschke et al., Energy Environ. Sci. **10** (2017) 1196.
- M. Taguchi et al., JJAP **47** (2008) 814.
- A. Terakawa et al., Proc. 15th PVSEC (2005) 2.
- J.P. Seif et al., IEEE JPV **5** (2015) 718.

フッ素イオン注入したpoly-Si/SiO₂/Siの酸化膜の評価

棚橋 克人、立花 福久、高遠 秀尚
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

- フッ素は酸化膜/シリコンの界面欠陥を終端する働きがあり、MOSTランジスタのゲート絶縁膜へフッ素をドーピングすることにより電気特性が向上する。
- TOPConのpoly-Si/SiO₂/Siの構造はMOSTランジスタのポリシリコン電極/ゲート絶縁膜/シリコン基板に類似していることから、フッ素をドーピングするプロセスの親和性が高い。
- MOSTランジスタではポリシリコンへフッ素を注入し、熱処理によってゲート絶縁膜とシリコン基板へ拡散させている。本研究において、イオン注入法によりpoly-Si/SiO₂/Si構造へフッ素注入を行い、フッ素の分布と酸化膜の特性を評価した。

実験方法

- 熱酸化膜付き(厚さ20nm)のシリコン基板(p型、6インチミラー)に、LPCVD法によりpoly-Si(厚さ100nm)を成膜した。
- poly-Si/SiO₂/Si構造へフッ素イオン(F⁺)を注入した。加速エネルギーは5keV、ドーズ量は1×10¹³~1×10¹⁵ atoms/cm²である。F⁺はpoly-Siのみに注入されている。
- 900°Cの等温熱処理(窒素雰囲気中)を施した。
- ケミカルエッチングによりpoly-Si層を除去した後、酸化膜の特性を評価した。

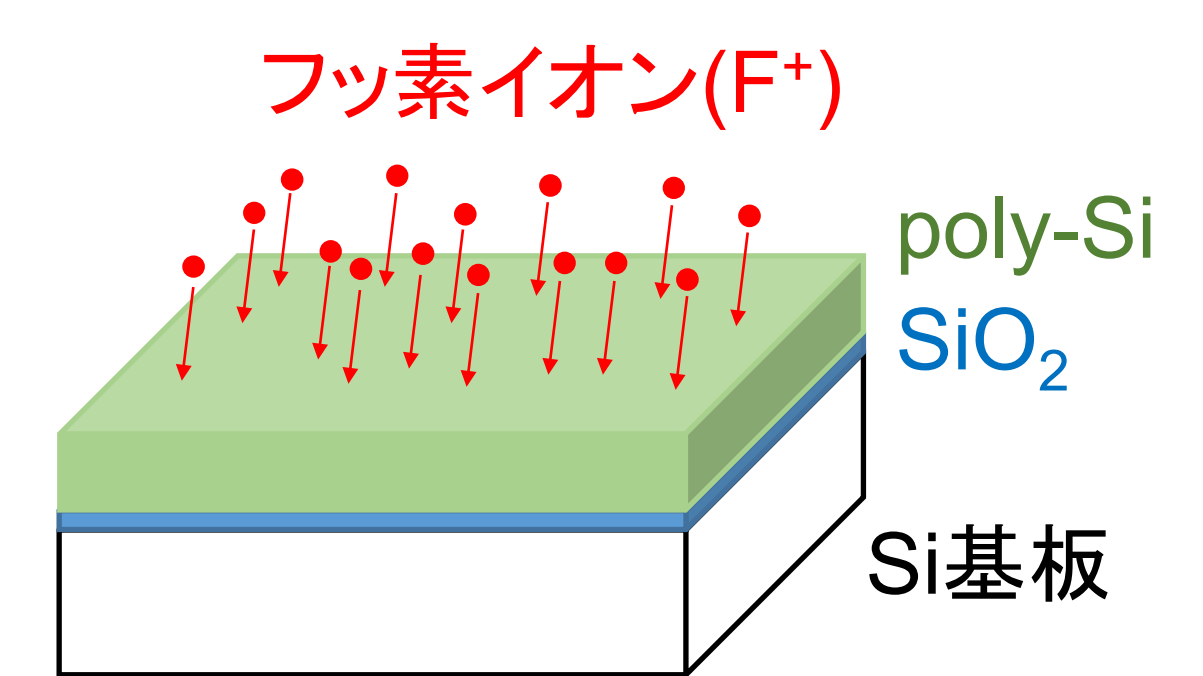


図1 poly-Si/SiO₂/Si構造へのフッ素注入の模式図

結果と考察

(1) 酸化膜中のフッ素の分布

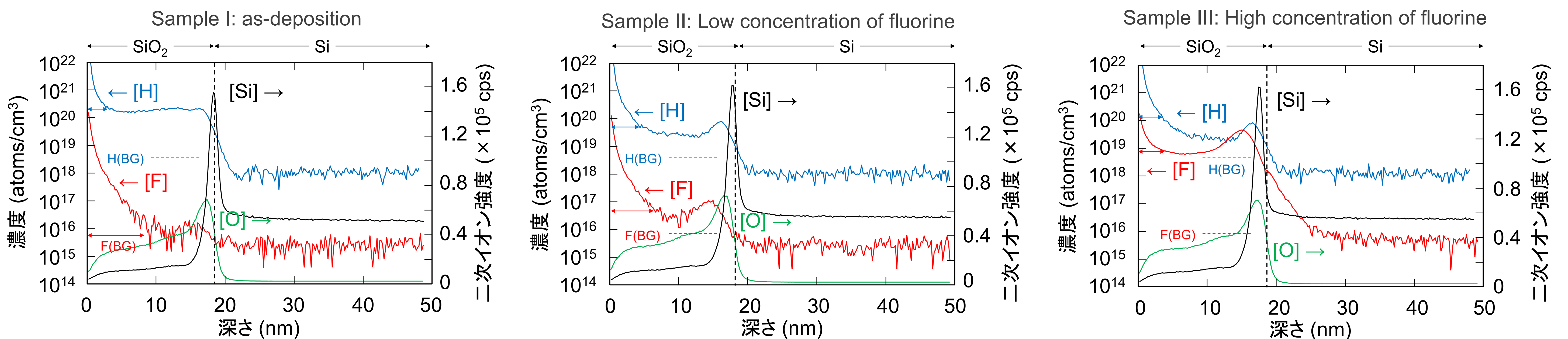


図2 SIMS法によるSiO₂/Si中のフッ素濃度、水素濃度、酸素の二次イオン強度の深さ方向分布

(poly-Siをエッチングし、SiO₂/Si構造の酸化膜表面からSIMS分析を行った。両矢印で示した表層のフッ素(赤)と水素(青)は表面吸着物に起因する。酸化膜中のバックグラウンドレベル(BG)を点線で示した。)

(2) フッ素をドーピングした酸化膜の特性

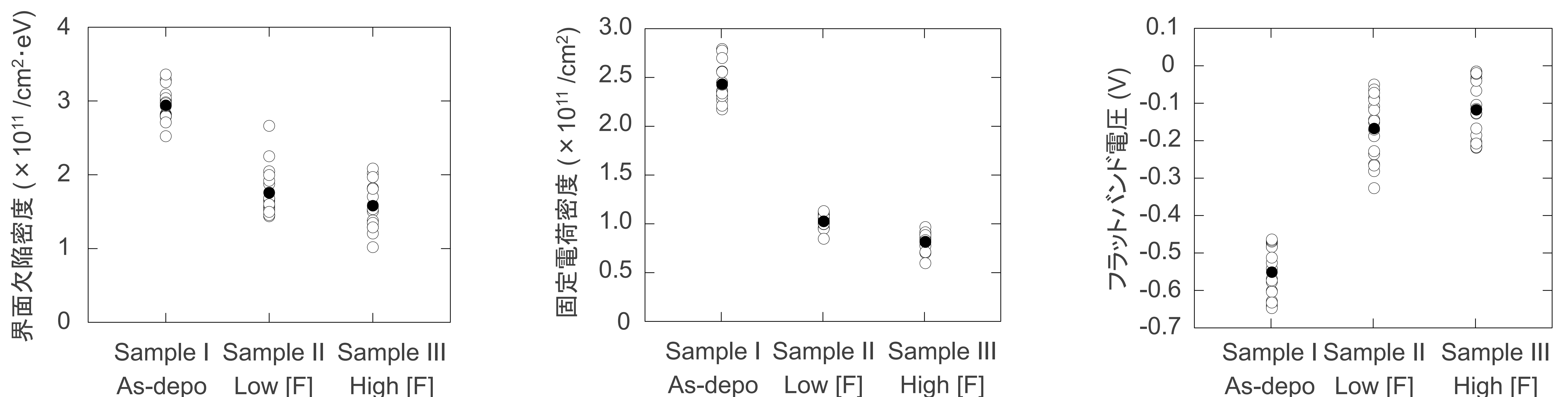


図3 poly-Si層をエッチングし、SiO₂/Si構造としたときの界面欠陥密度、固定電荷密度とフラットバンド電圧

- poly-Siへ注入されたフッ素はSiO₂/Si側へ内方拡散し、SiO₂/Si界面にパイルアップすることが分かった。
- フッ素濃度の増加に伴い界面欠陥密度が減少した。これはSiO₂/Siの界面欠陥がフッ素によって終端された効果である。
- フッ素ドーピングにともなう固定電荷の減少が観測された。フッ素ドーピングによる負の固定電荷の生成に起因する。

BドーピングモノライクSi PERCセル に対するLeTIDの調査

伊野裕司¹、入江祐太²、平藤 駿介²、伊藤憲和²、
新楽浩一郎²、白澤勝彦¹、高遠秀尚¹

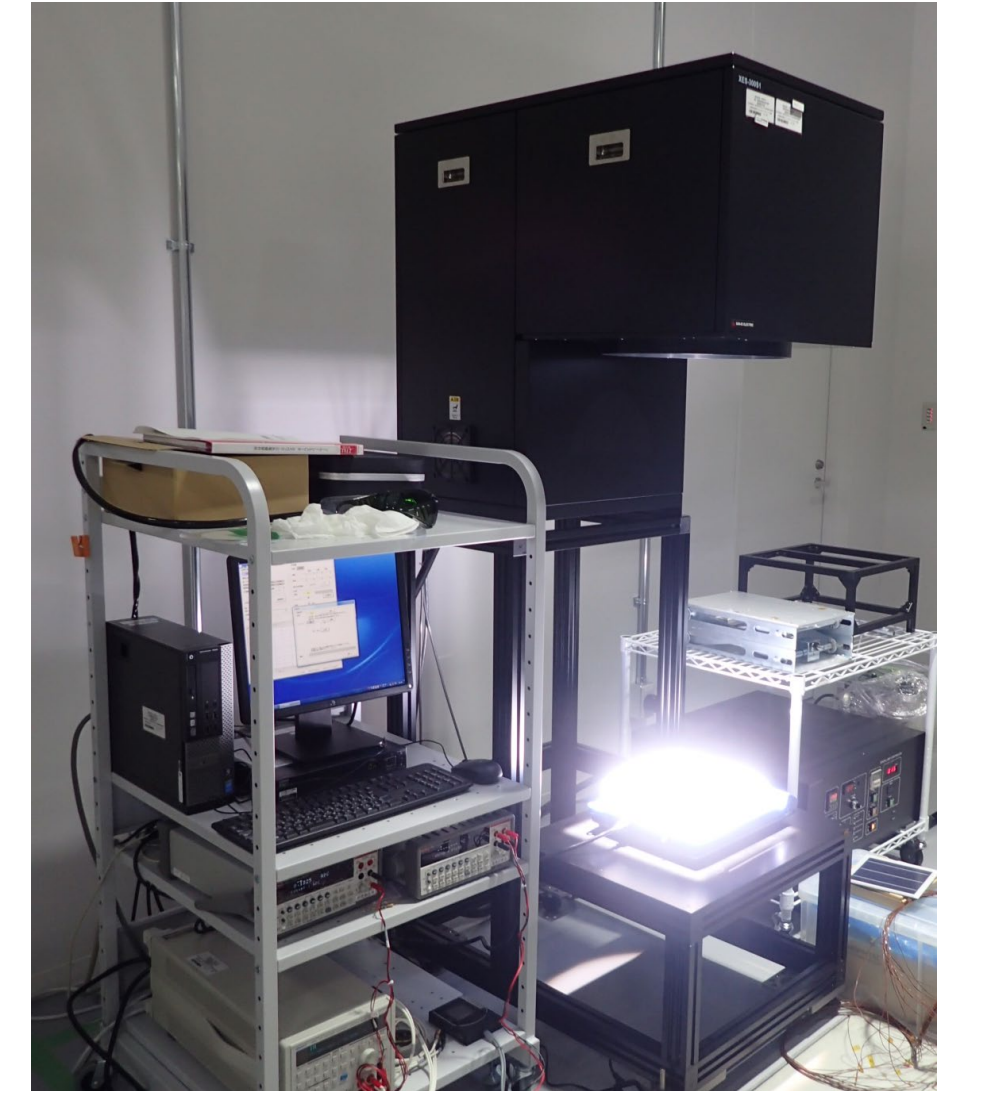
1産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター、2京セラ

研究の目的

- LeTID (Light- and elevated temperature-induced degradation) は、現在主流のp型結晶シリコンPERCセルで問題となっている高温で発生する光劣化であるが、その詳細については不明な点も多い[1].
- 太陽電池の発電量向上のためには、LeTIDによる損失を定量化し、その影響を最小限に抑えることが重要である.
- ここでは、BドーピングモノライクSi PERCセルの光劣化挙動を測定・分析した.

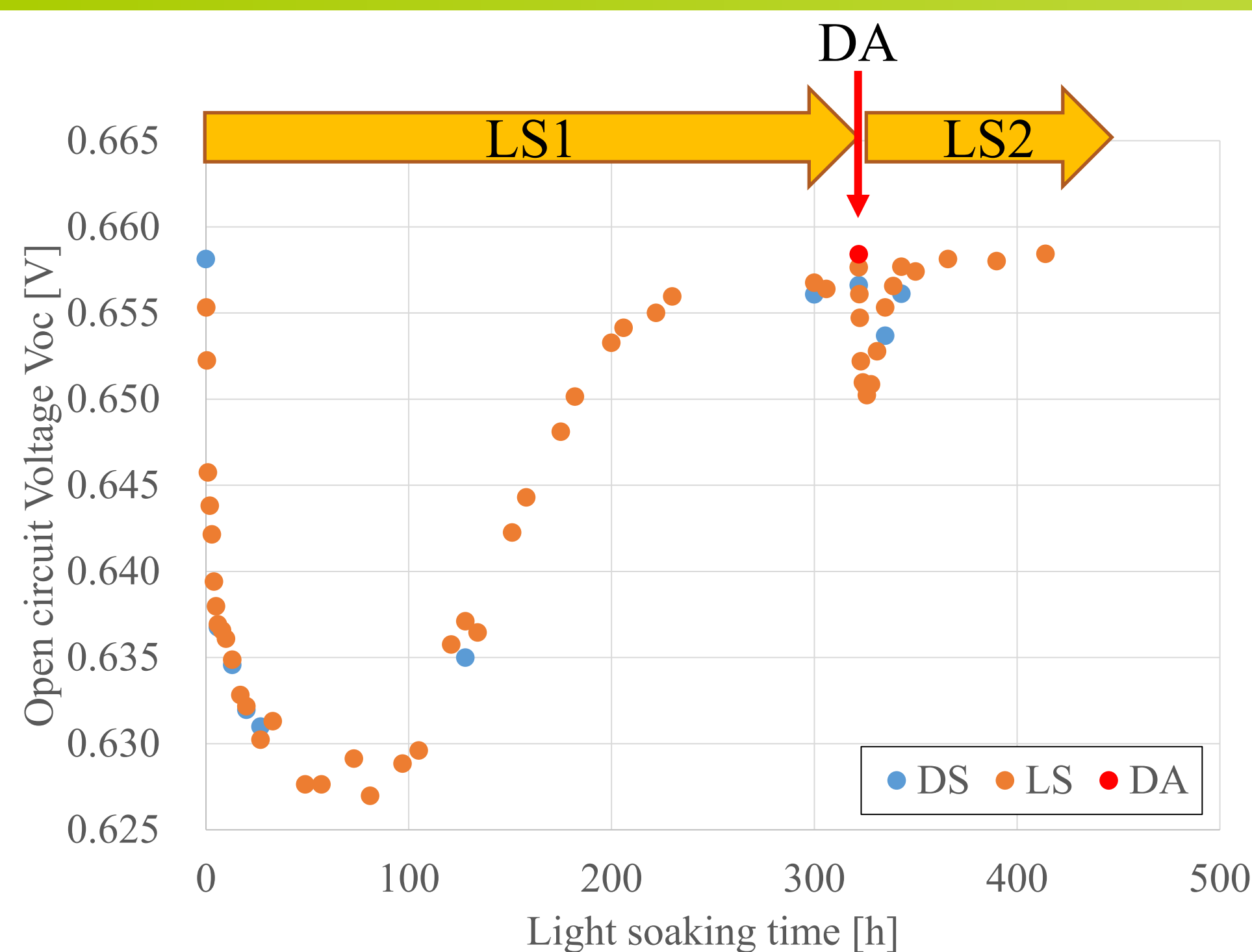
実験

- サンプルには、BドーピングモノライクSi PERCセルを使用した.
- 光劣化試験は、高温光照射(LS1, 1 sun / 95 °C)とダークアニール(DA, 175 °C / 30 min), および再度の高温光照射(LS2, 1 sun / 95 °C)から構成された.
- サンプル評価のために、光劣化試験を都度中断し、25 °CでSuns-Voc測定を行った.



疑似太陽光照射装置

結果

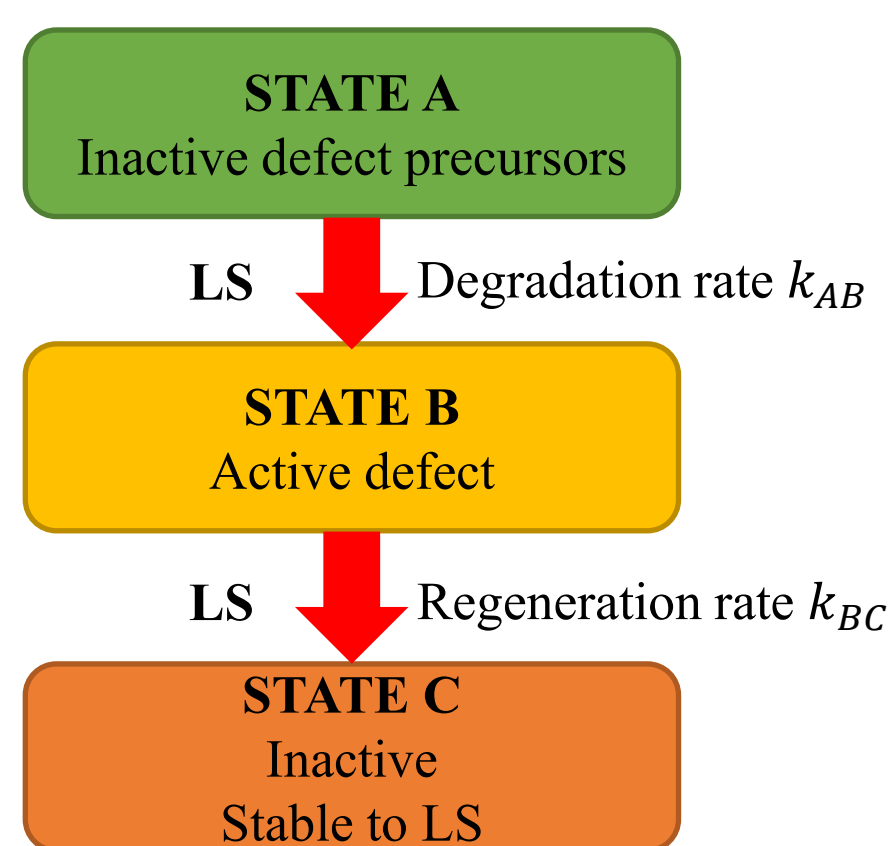


光劣化試験によるVocの変化

- Vocは、1回目のLS処理(LS1)81h後に最低値をとり、初期値から31.1mV低下.
- その後、LS1処理300hで、初期水準まで再生.
- LS1処理で再生状態となった後で、DA処理を行い、2回目のLS処理(LS2)を同条件で行った.
- LS2処理4hで最低値をとり、DA後の値から8.2mV低下.
- その後、LS2処理44hで、初期水準まで再生.
- LS1とLS2でともに、劣化-再生挙動が観察されたが、その劣化の程度と時間は大きく異なっていた.

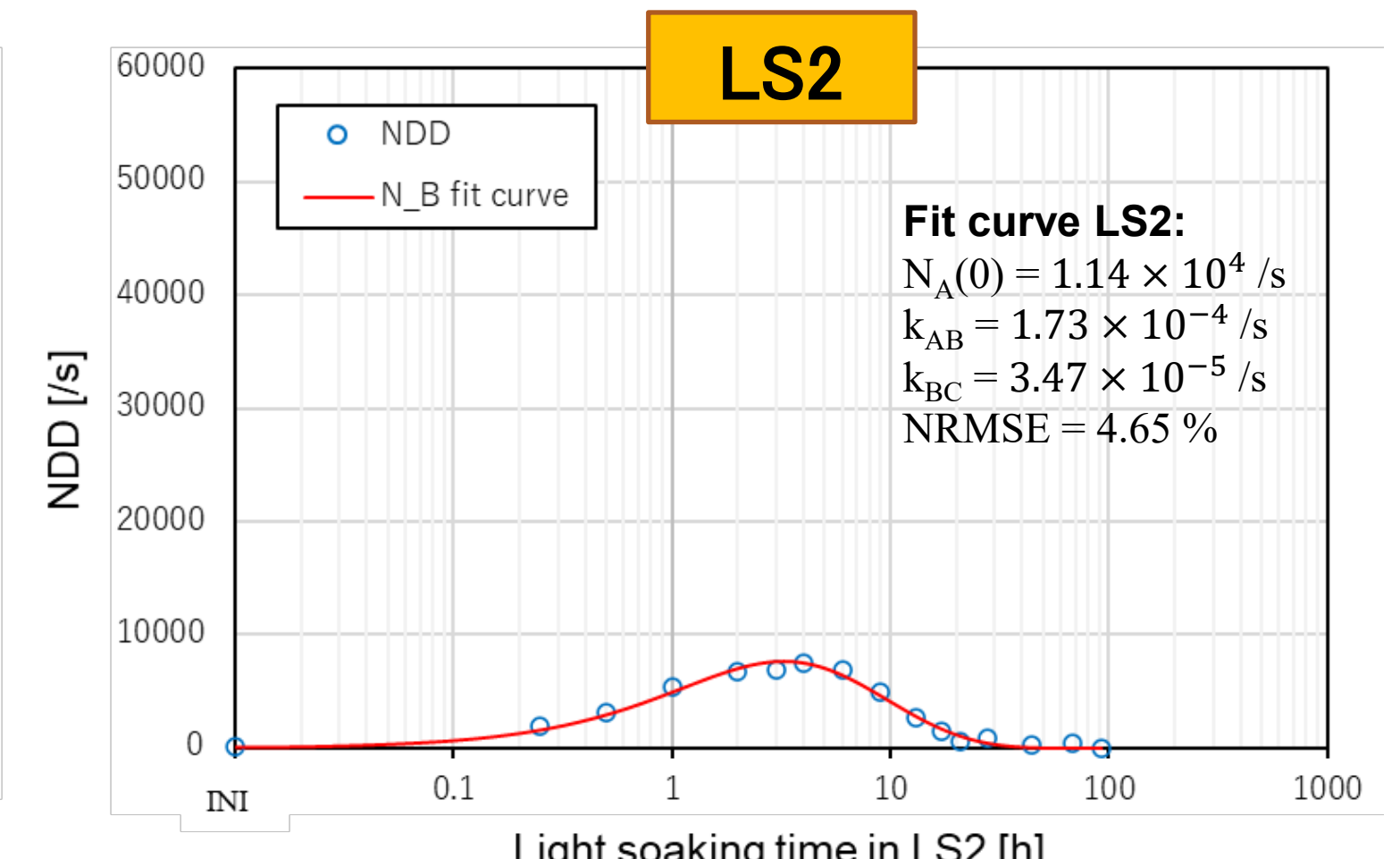
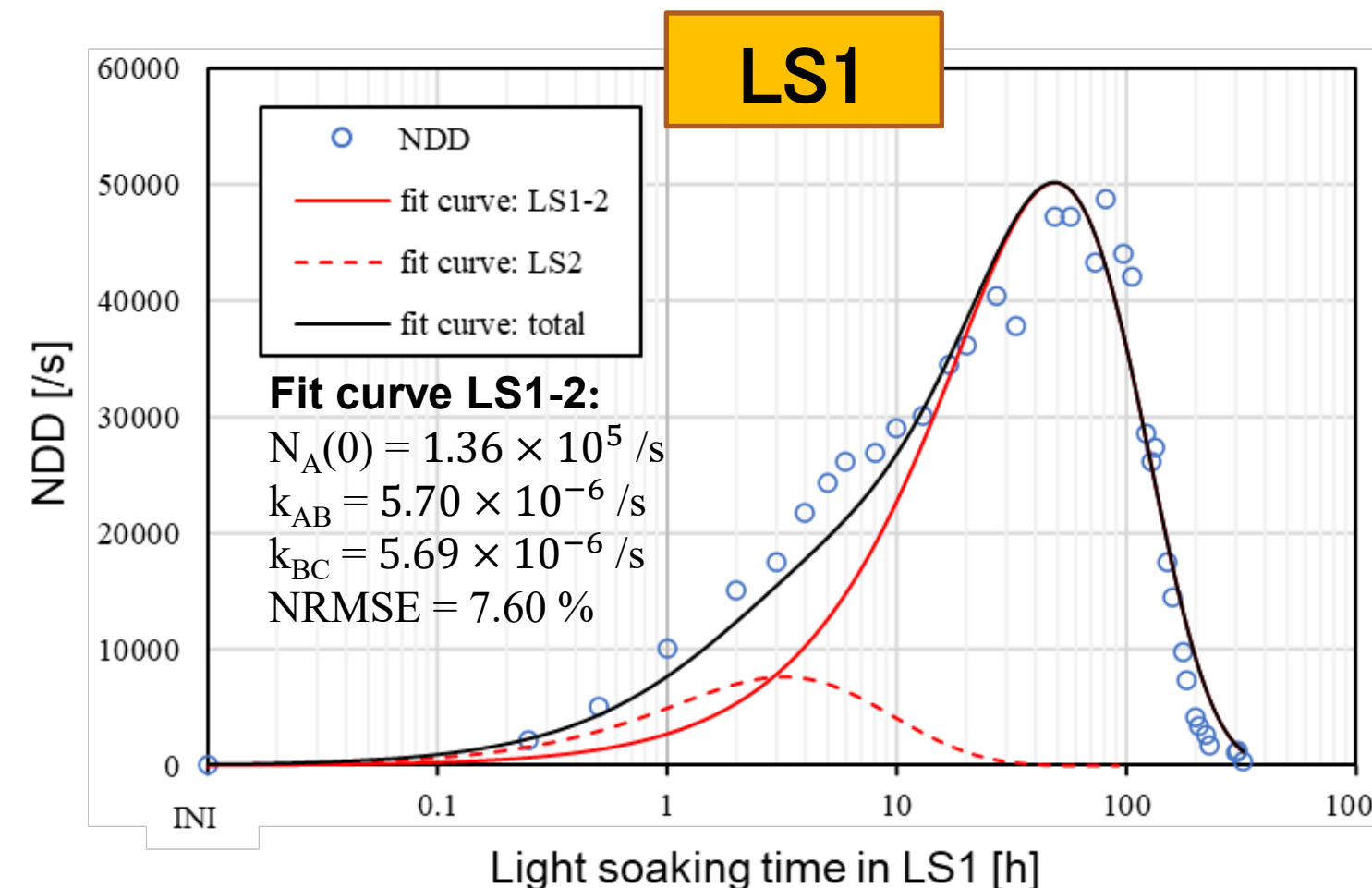
考察

- 光劣化挙動を分析するために、光照射中のライフタイム変化から、正規化欠陥密度 $NDD(t) = 1/\tau_{eff}(t) - 1/\tau_{eff}(t_0)$ を導出し、3状態モデルによるフィッティングを行った[2, 3].



3状態モデル

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_A}{\partial t} &= -k_{AB}N_A \\ \frac{\partial N_B}{\partial t} &= k_{AB}N_A - k_{BC}N_B \\ \frac{\partial N_C}{\partial t} &= k_{BC}N_B \end{aligned}$$



- LS2での光劣化挙動は、1組の3状態モデルに従う光劣化欠陥で記述できるのに対し、LS1での挙動を説明するためには、更にもう1つの光劣化欠陥が必要であった.
- したがって、LS1では、DA処理に対し異なる挙動を示す2種類の光劣化が生じていると考えられる.

結論

- BドーピングモノライクSi PERCセルの光劣化挙動を、高温光照射とダークアニールを組み合わせた光劣化試験により調査し、3状態モデルにより分析した.
- その結果、第1の光照射処理中に、その後の熱処理に対し異なる挙動を示す2種類の光劣化が生じていることが示唆された.
- 今回の試験と分析により、結晶シリコン太陽電池の異なる種類の光劣化を区別して評価することができるようになった.

参考文献

1. D. Chen *et al.*, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, 29, pp. 1180-1201, 2021.
2. A. Herguth *et al.*, *Proc. IEEE 4th World Conf. Photovoltaic Energy Convers.*, pp. 940-943, 2006.
3. T. H. Fung *et al.*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 184, pp. 48-56, 2018.

結晶Si基板を用いたフレキシブルモジュールの作製

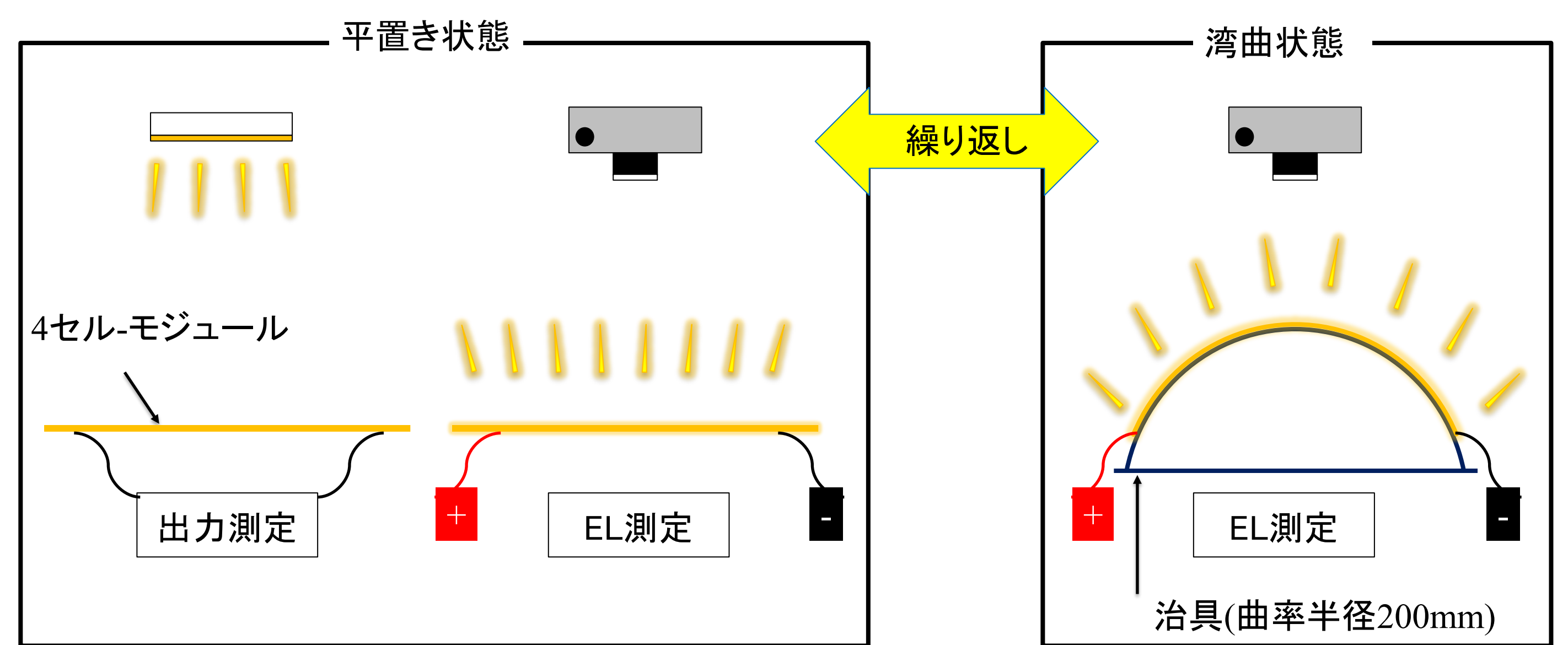
立花福久、棚橋克人、伊野裕司、白澤勝彦、高遠秀尚
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

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4枚を使用したモジュール、4セルモジュールを作製し、モジュール特性の評価、曲率半径200mmの治具への貼付などを行った。
- 湾曲の繰り返しによるモジュール特性の変化、湾曲保持状態におけるモジュール特性の変化などを中心に評価を行った。

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、4枚直列に接続。基板厚は約180um
- 半田付けによるセル間の接続&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
- モジュール評価として平置き状態における出力測定及びEL測定、湾曲用治具に貼り付けたままのEL測定を繰り返し行った。



モジュール評価の概要

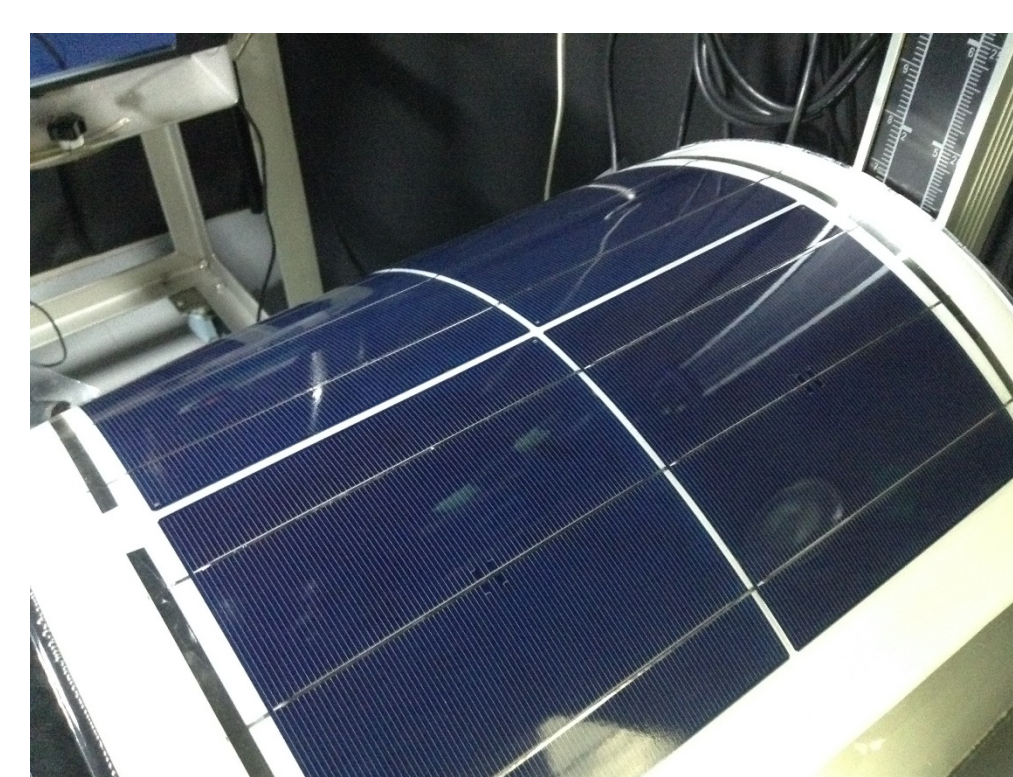
結果と考察

- 初期特性としてフィルム材料を使用した湾曲可能なモジュールはガラス板を使用したモジュールに対して約95%程度の出力を示した。
- 電圧およびFFには大きな影響はなく、電流値がガラス板構造に対して低下していた。
- ガラス板表面のエンボス加工による効率的な反射光の低減が、フィルム材料には付与できていないため、表面反射による差が電流および出力として現れていると考えられる。

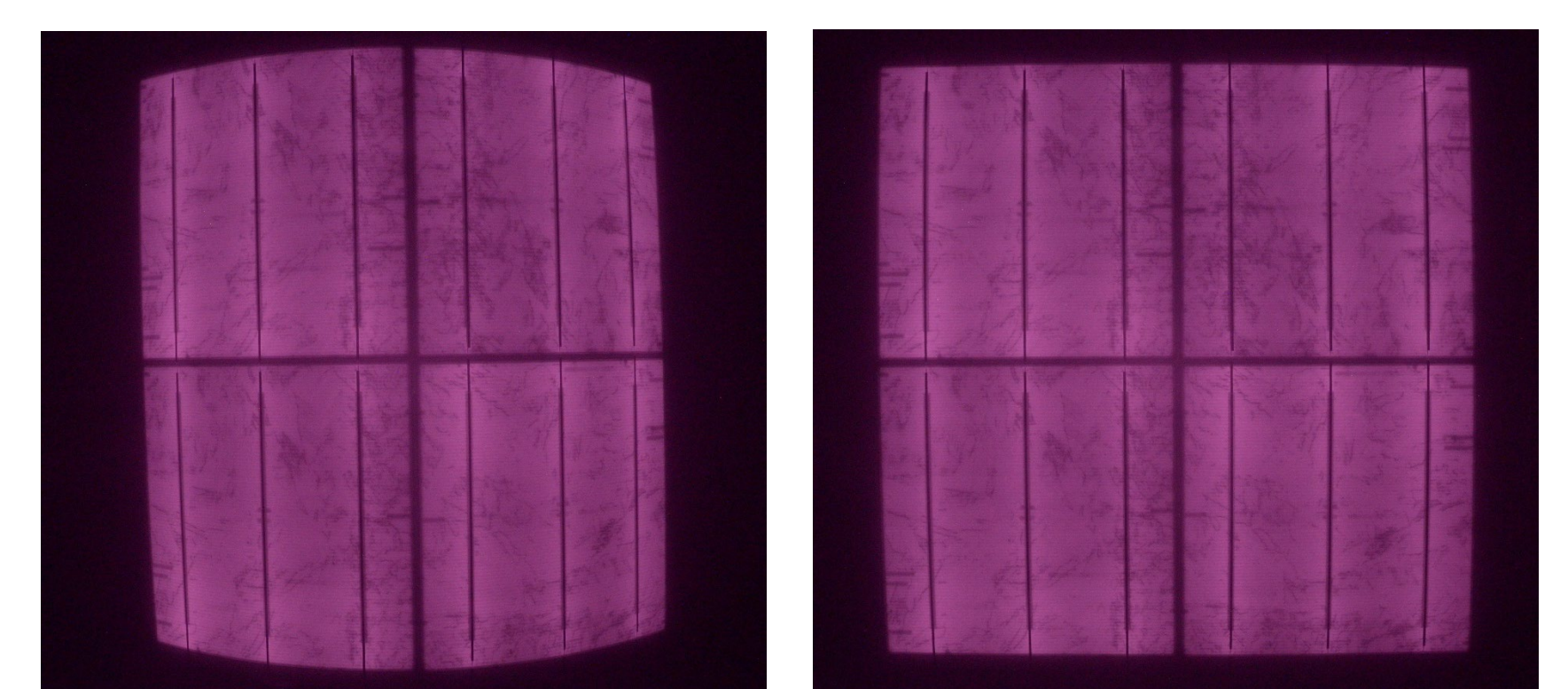
- 曲率半径200mmの治具へ貼り付け時には外観の変化は確認されず、また、EL測定によるクラックの発生等は確認されず。
- 平置き状態と湾曲状態を繰り返し行い、平置き状態での出力特性を確認したところ、6回までの間の変化は初期値に対して1%以下であった。その後、湾曲状態で暗室保管を行うが、出力特性に大きな変化はない(~105日)。

モジュールの初期特性値

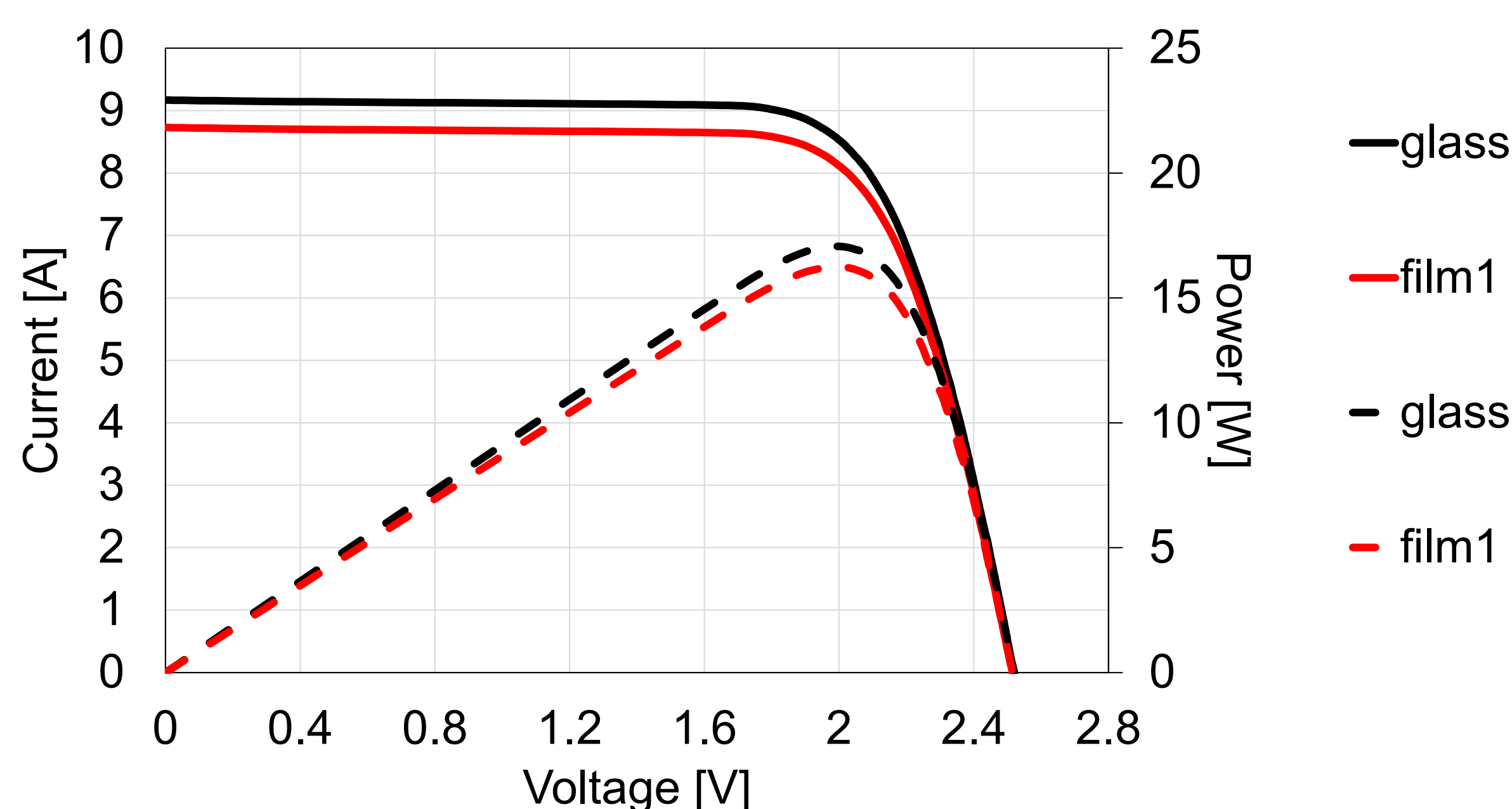
サンプル	Glass	Film1 (対glass)
電流 [A]	9.17	8.73 (95.22 %)
電圧 [V]	2.52	2.52 (99.81 %)
FF [%]	0.74	0.74 (100.16 %)
出力 [W]	17.1	16.3 (95.19 %)



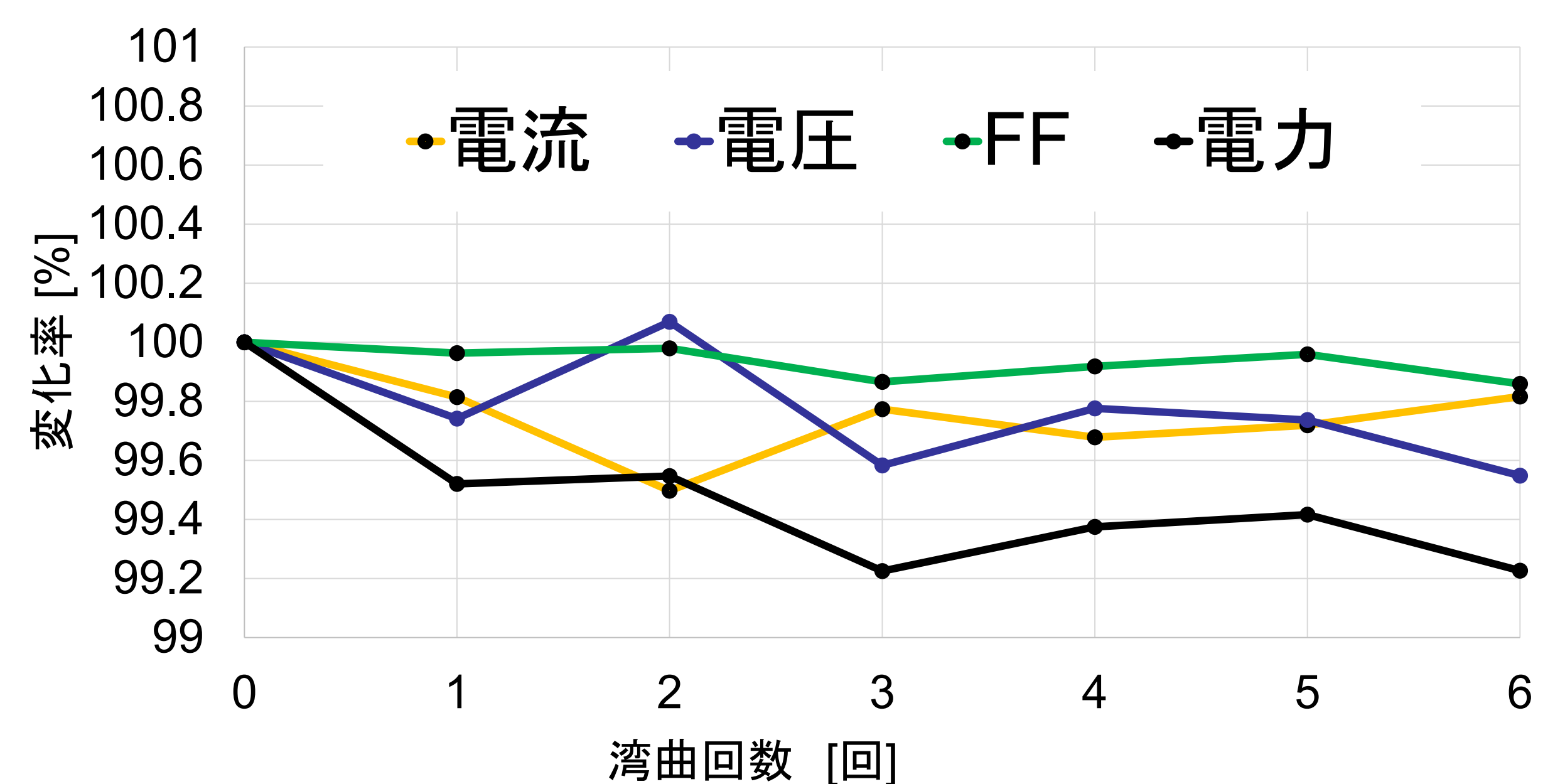
湾曲時の例



EL測定例(湾曲時および平置き時)



モジュールのIV特性・出力特性



湾曲の繰り返しと特性変化の関係

フラットな両面受光型 太陽電池パネルと設置法の開発

小野裕道¹、三瓶義之¹、松本聖可¹、鈴木雅千¹、原朋弥¹、池田信也¹、本田剛²、堀内芳明³、
木村太亮⁴、高遠秀尚⁵、白澤勝彦⁵

1福島県ハイテクプラザ、2福島双羽電機株式会社、3東北芸術工科大学、4アンフィニ株式会社
5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

近年、普及しつつある両面受光型太陽電池パネルは、垂直に設置しても十分な発電量が得やすいと考えられる。この設置形態では、これまでガラスやプラスチックで作られていた屋外の仕切り板や看板、案内板などに用途の拡大が見込まれる。

本研究では、フラットな太陽電池パネルを「市街地」に設置することを目指し、太陽電池パネルに内蔵させるバイパスダイオードを開発した。加えて、このダイオードを内蔵したフラットなパネル表面を加飾するデザインを考案した。

実験

太陽電池パネルにバイパスダイオードを内蔵させるためには、セルとタブ線が重なった部分と同程度の厚さと発熱時の放熱設計が必要となる。

そこで放熱性の向上を目指し、樹脂で封止しない厚さ0.9mmのバイパスダイオードを試作し、放熱特性を測定した。

また、これを組み込んだ太陽電池パネルの加飾デザインを考案した。



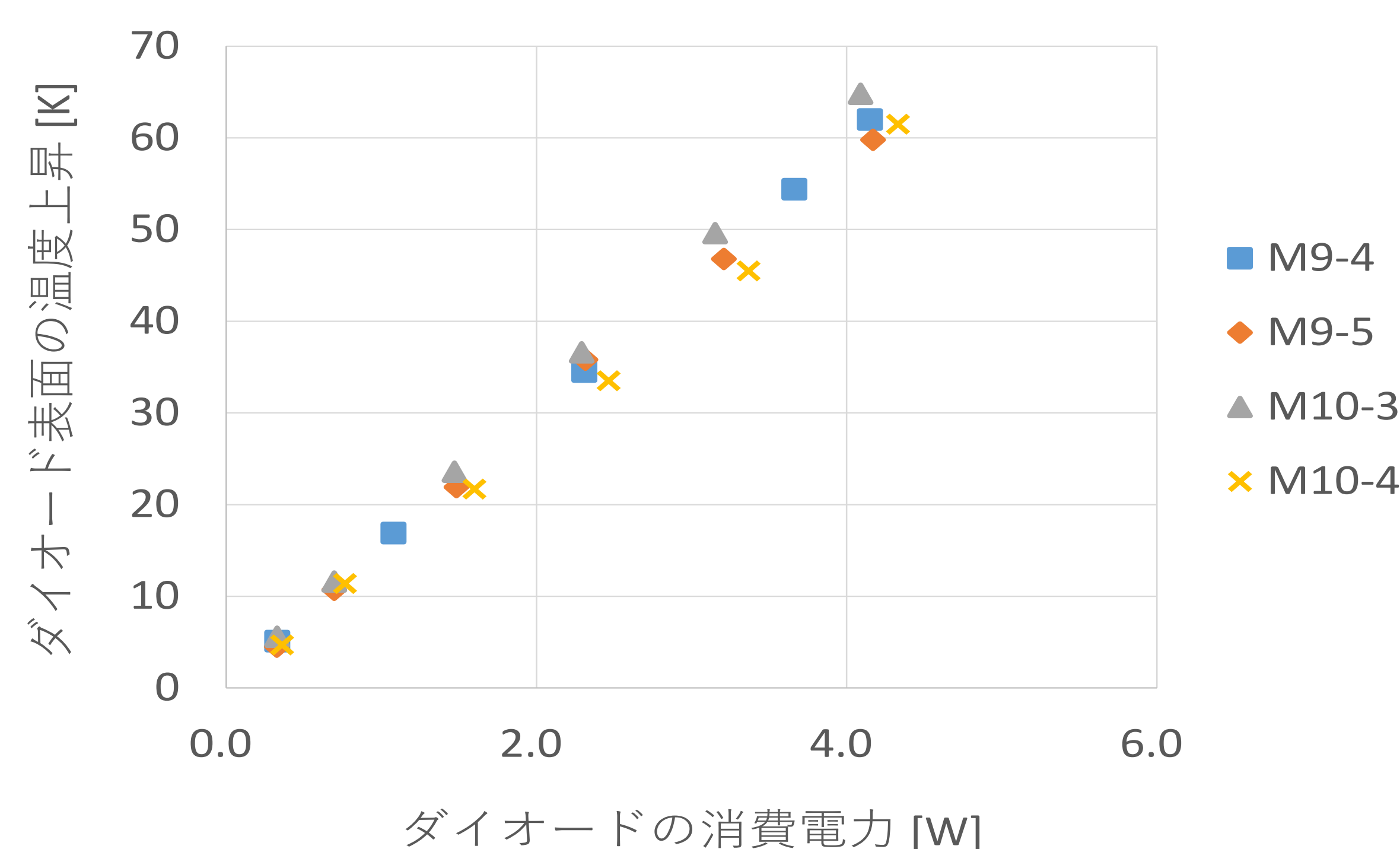
インラミネート型
バイパスダイオード

結果

1 放熱特性の測定

一般に電子回路の熱設計は、素子の消費電力ごとに上昇した温度を測定し、消費電力と温度の傾きである熱抵抗 R_{th} [K/W] を算出して評価する。これと同様にインラミネート型バイパスダイオードについても、熱抵抗を求め、ラミネート後の放熱特性を評価した。

4種類のダイオードを熱電対とともに太陽電池パネルにラミネートした。これに定電流電源で定格電流10[A]を印加した際のダイオードのカソード電極の温度を測定し、熱抵抗を求めた。その結果、温度上昇は61.6[°C]で、その時の熱抵抗は13.9[K/W]であった。これは、ジャンクションボックス内に内蔵するタイプのバイパスダイオードと同程度の熱抵抗であった。



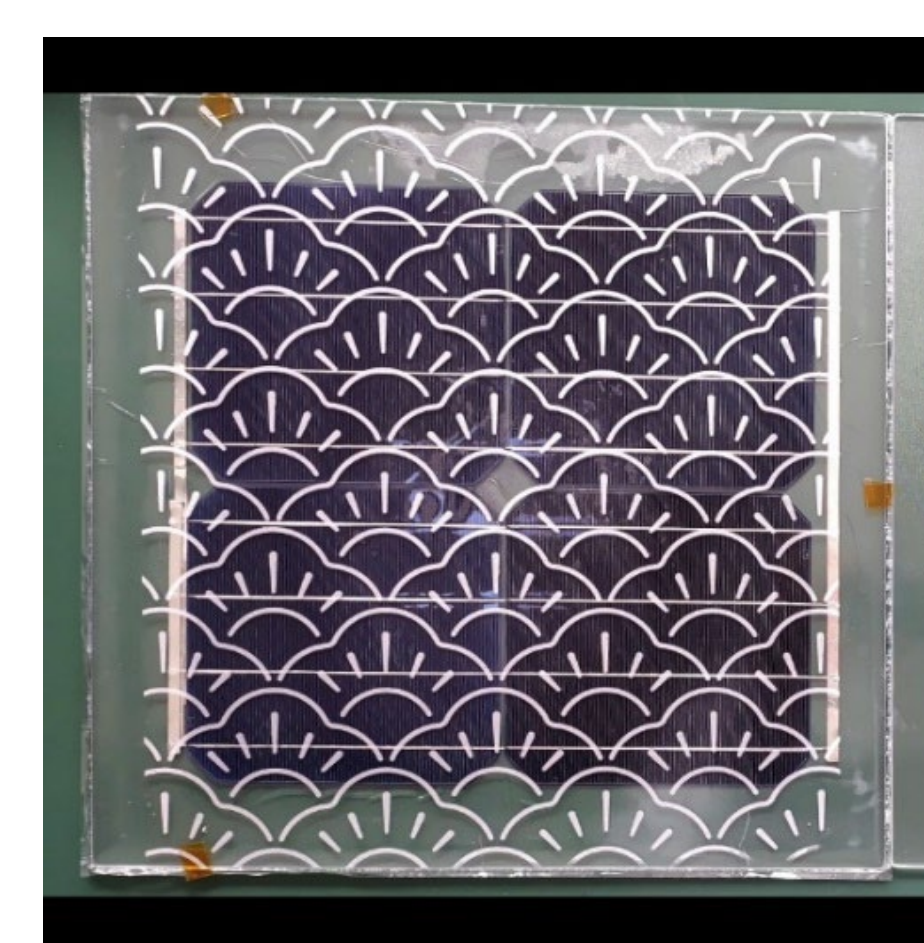
ラミネート下ダイオードの熱抵抗

2 市街地に適した設置法の開発

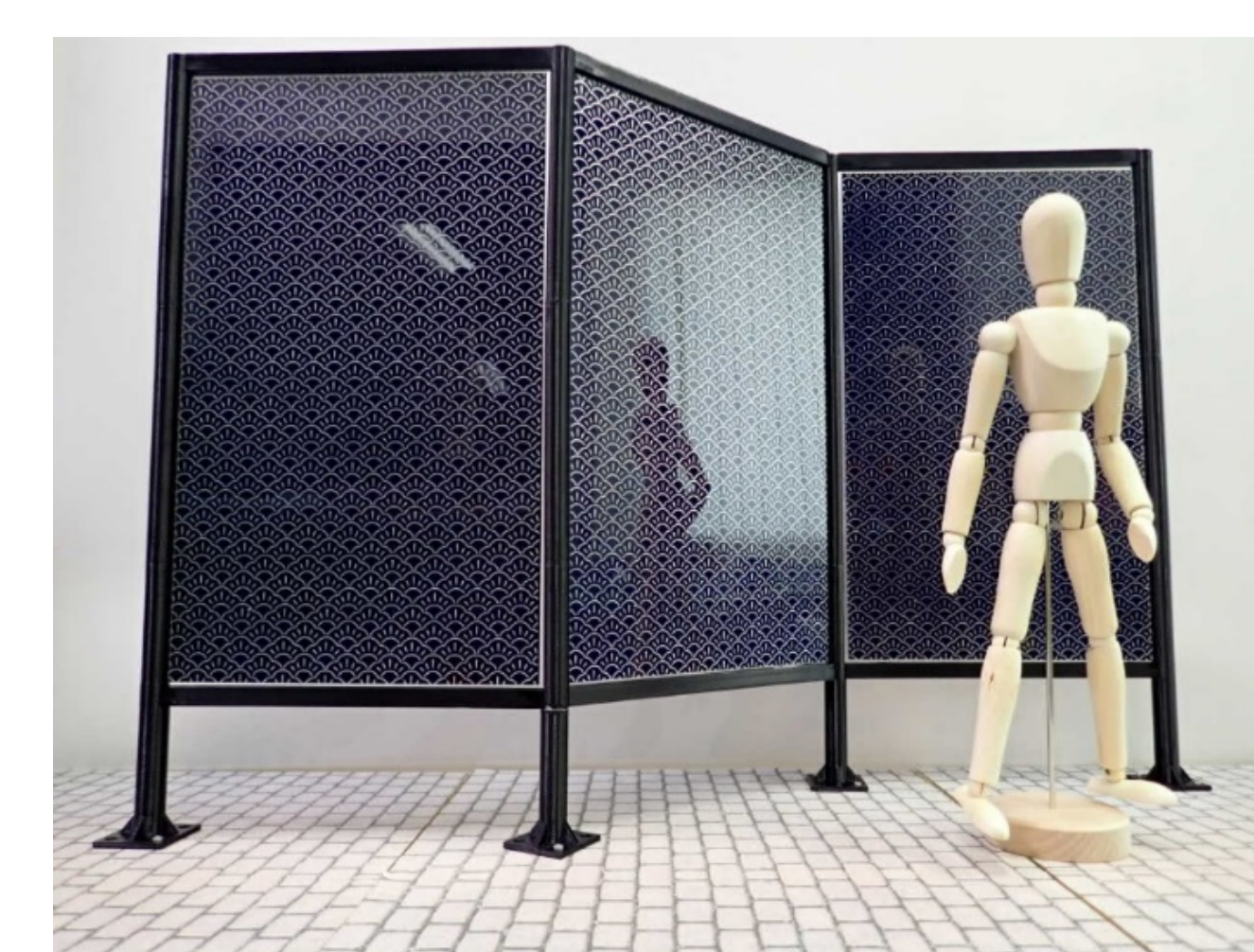
共同研究者間でブレインストーミングによるアイデア発想を行い、市街地で想起される場所と建物を書き出した。その結果、「市街地中心地」と「郊外」に大別された。「市街地中心地」には駅前や商店街、「郊外」には、学校や公園があげられた。これを元に「駅や観光地などでの照明や案内表示板」を使用シーンに選定した。

単結晶シリコン太陽電池は、直列接続されたセルに発電電流量のばらつきが起こるとホットスポットが発生する。ホットスポットの発生を抑制するため、セルごとの模様の遮光面積が均一な柄を検討し、伝統柄の「松」柄を選定した。

視認性を確認するため、小型太陽電池パネルのガラス面にエポキシ樹脂でスクリーン印刷し、アルミ粉で蒔絵を施した。また、同じ柄を太陽電池パネルに加飾した場合のスケールモデルを作成した。加飾により単色で無機質な印象の太陽電池パネルに、見る人の目線を意識した加飾により華やかな印象を持たせることができた。



スクリーン印刷で加飾した
太陽電池パネル



案内板のデザインモデル

考察

単結晶シリコン太陽電池パネルを加飾した場合、セルごとの発電電流量にばらつきが発生すると、ホットスポットが発生する。今後、模様が不均一な加飾を行った場合でもホットスポットが発生しにくい加飾技法を検討する。

結論

- ・放熱性に優れたインラミネート型バイパスダイオードを開発した。
- ・市街地向けに太陽電池パネルの表面を加飾した案内板を考案した。

参考文献

小野裕道 ほか. フラットな両面受光型太陽電池パネルと設置方法の開発, 令和2年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告(2020) pp.25-31.

融雪機能を有する太陽電池モジュールの屋外融雪試験における融雪特性

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・目的

シーズ支援事業：概要

東日本大震災において甚大な被害を受けた被災地の企業が開発した再生可能エネルギーに関するシーズを、産総研が技術支援する「被災地企業のシーズ支援プログラム」。

企業のシーズが詰まった製品などを、産総研のノウハウや研究設備を用いて性能評価等の技術支援を実施。

FREA
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

<https://www.fukushima.aist.go.jp/seeds/>

FY20-21事業：融雪型太陽電池モジュールの事業化支援

エネルギーの総合企業・**INFInI** アンフィニ株式会社
融雪型太陽電池モジュール/システムの開発

産総研 **FREA**
太陽電池モジュールの信頼性・安全性評価
屋外での融雪機能実証 (データ収集)

DNP 大日本印刷
融雪用ヒータ (発熱シート) の開発

融雪型太陽電池モジュール/システムの事業化加速

支援課題：融雪型太陽電池モジュールの事業化

支援対象シーズ

・融雪用ヒータ (発熱シート) を内蔵した太陽電池モジュール

想定する波及効果

- ・豪雪地帯における融雪型太陽電池の導入促進 (雪害回避)
- ・経済的な融雪方法による、雪下ろし事故・落雪事故の低減 (手間要らず・安全な雪下ろし/想定外落雪の回避)
- ・豪雪地帯家屋における居住性・美観性向上 (雪庇成長の抑制/雪庇防止柵の代替)
- ・豪雪地帯における太陽電池モジュールの耐久性向上 (大きな雪荷重ストレスからの解放)

支援内容

- ・ホットスポット影響などの安全性・信頼性評価
- ・屋外における融雪機能の実証と技術課題探索

屋外融雪試験：概要

・多雪地域での融雪モジュール耐久性性能確認
最大積雪深が140 cmを超える環境での耐久性性能確認 (2021年1-2月：ほぼ100 cm超の積雪深環境)
https://www.bosai.go.jp/seppyo/snowdepth_s/2020-2021.png
→ 発電特性 (I-Vカーブ) の10分ごと測定などによる電氣的トラブル発生時の検出

・融雪機能の実証と融雪指標の定量化

最大積雪深が140 cmを超える環境での融雪機能実証、および融雪度合いを判定する定量的指標の探索
→ 1時間ごとの撮像による冠雪率測定およびモジュール裏面温度測定による融雪指標の検討

結論

試作した融雪用ヒータ内蔵型太陽電池モジュールの融雪効果などを、多雪地域の屋外曝露設備において評価し、以下の結論を得た。

屋外耐久性試験

最大積雪深が140 cmを超える多雪地域に、融雪型太陽電池モジュールを冬季に約3か月間設置した。目視確認と発電特性データからは、顕著な破壊・変形や明確な性能低下は確認できなかった。(昨年度報告した) 屋内加速試験結果とあわせて、本試作モジュールの冬季適用可能性が示唆された。

融雪機能試験

2020年12月13日~2021年3月23日の100日間に収集した画像データ (Panels 01-03) や温度データなどから本試作モジュールの融雪機能を評価した。融雪評価指標に開口率を導入し、降雪時の融雪ヒータの稼働による開口率の増大とともに (Panels 04-06)、付随するモジュール温度上昇を確認した (Panels 07-09)。また、降雪時においても、発電電力の増加がみられた (Panels 10-12)。今後は、より経済的な融雪ヒータ温度制御方法を検討していく。

実験設備

屋外融雪試験設備：山形県新庄市

2021/01/04 04:00
堆雪：1 m³/m² 程度
→ 約300 kg/m²

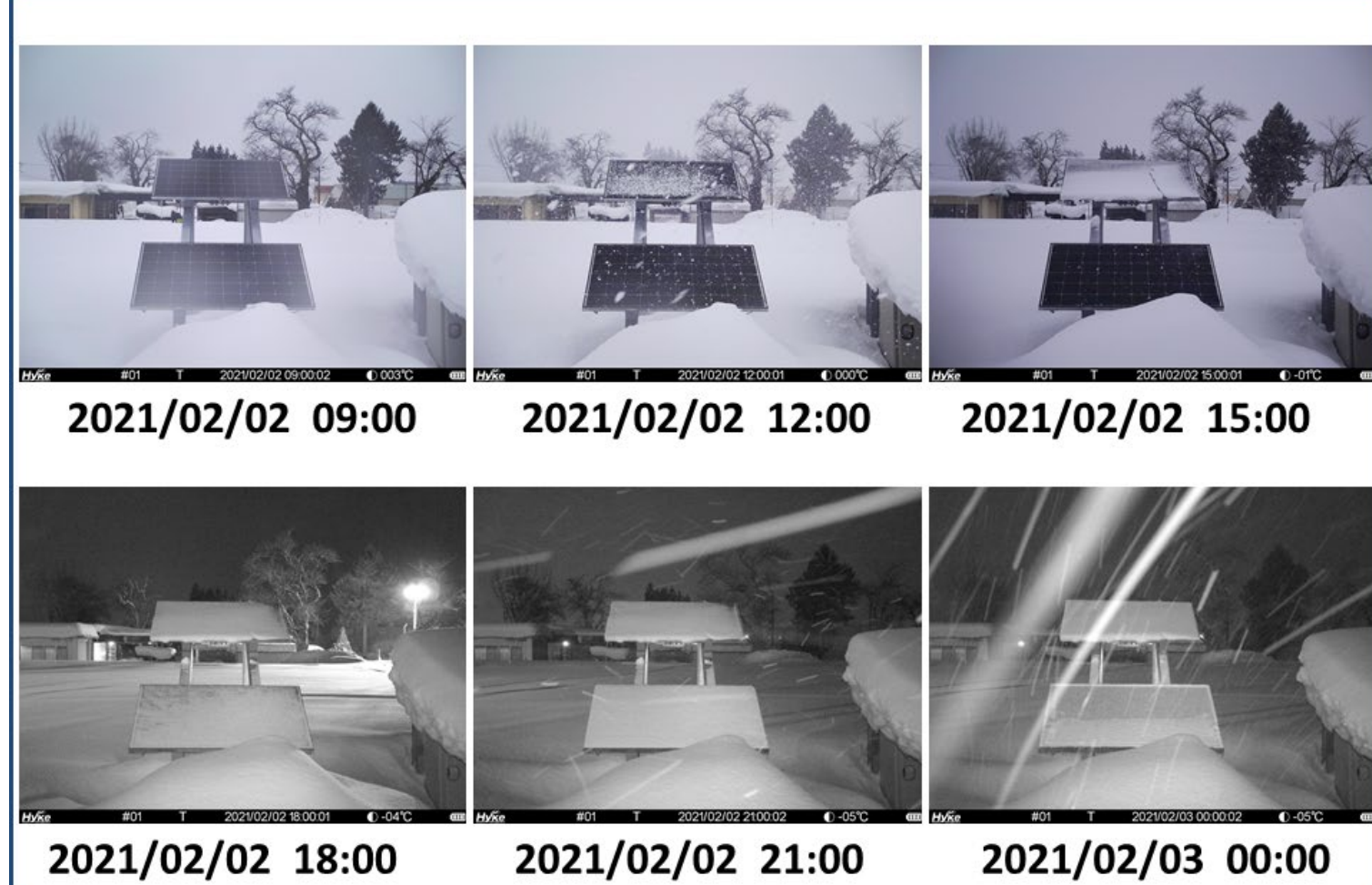
30°勾配ラック
融雪モジュール 発熱なし
モジュールなし
融雪モジュール 発熱あり
モジュールなし

融雪ヒータ制御方法：
気温 0℃以下 かつ 降雨・降雪による水分を検知すると、ヒータONとなる制御方式。

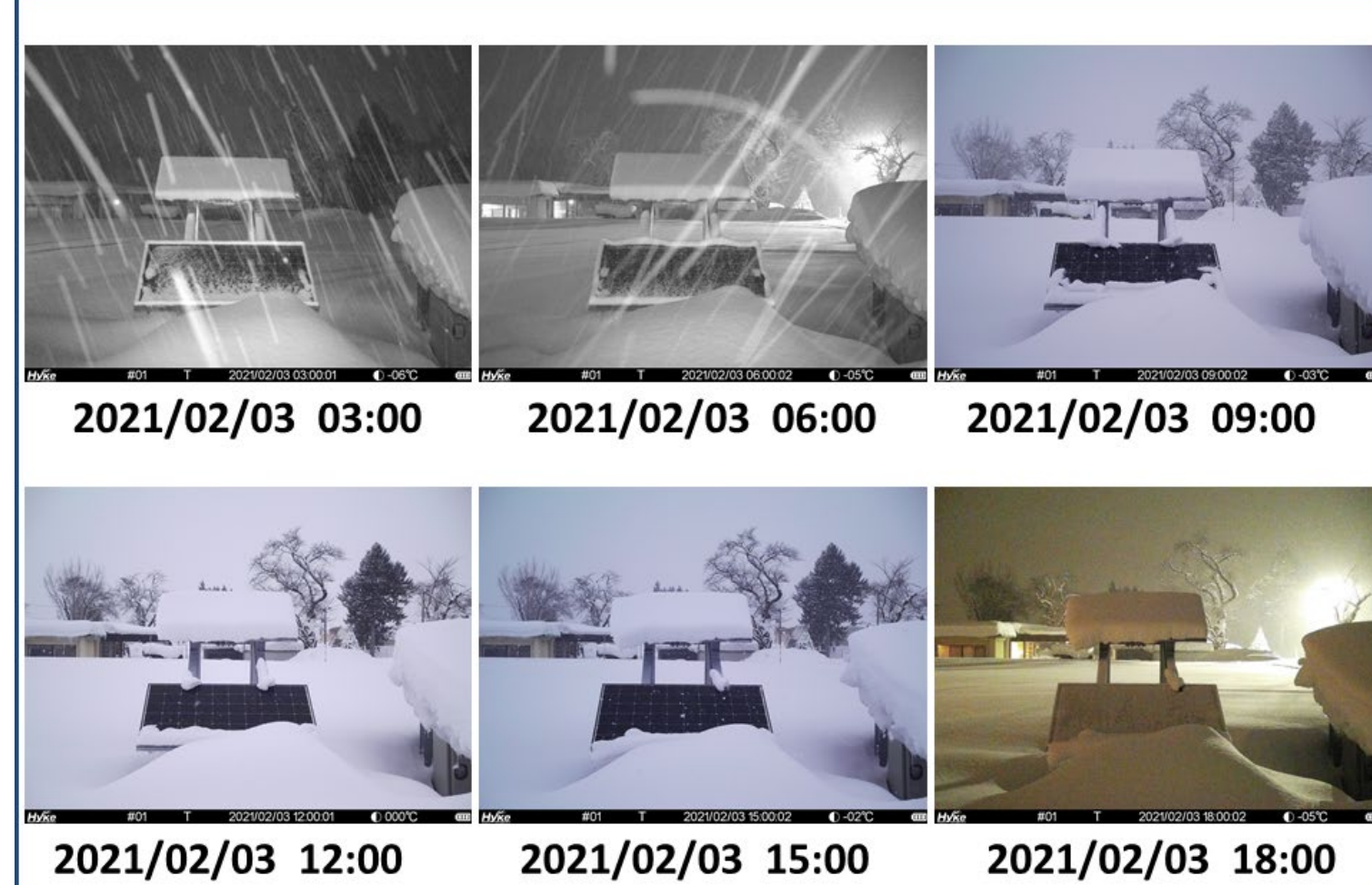
本設備の運用は、防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 新庄雪氷環境実験所のご協力のもとで実施。ご協力いただいた関係者に深謝申し上げます。

結果

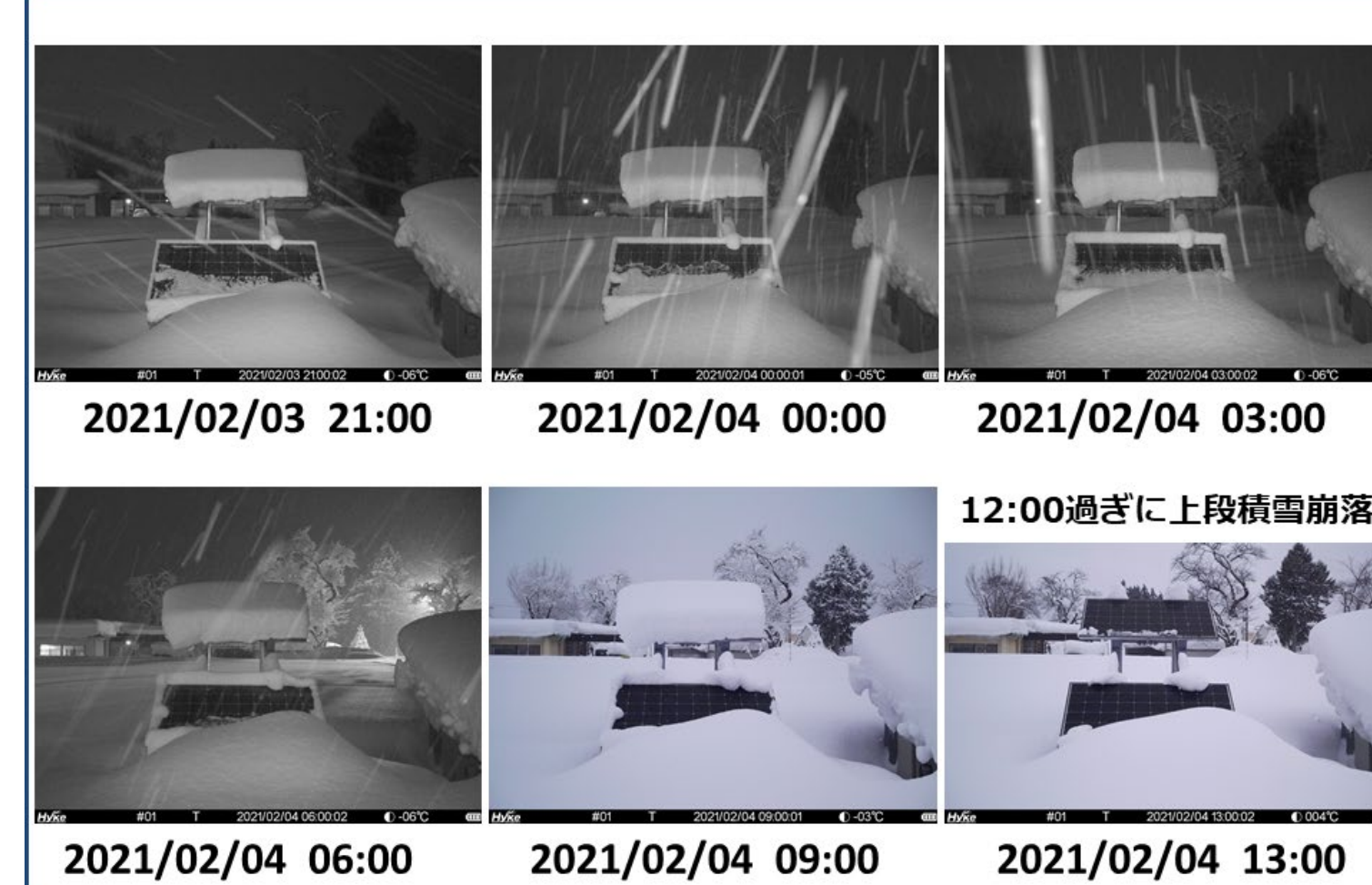
Panel 01: 降雪時の積雪状況 (1)



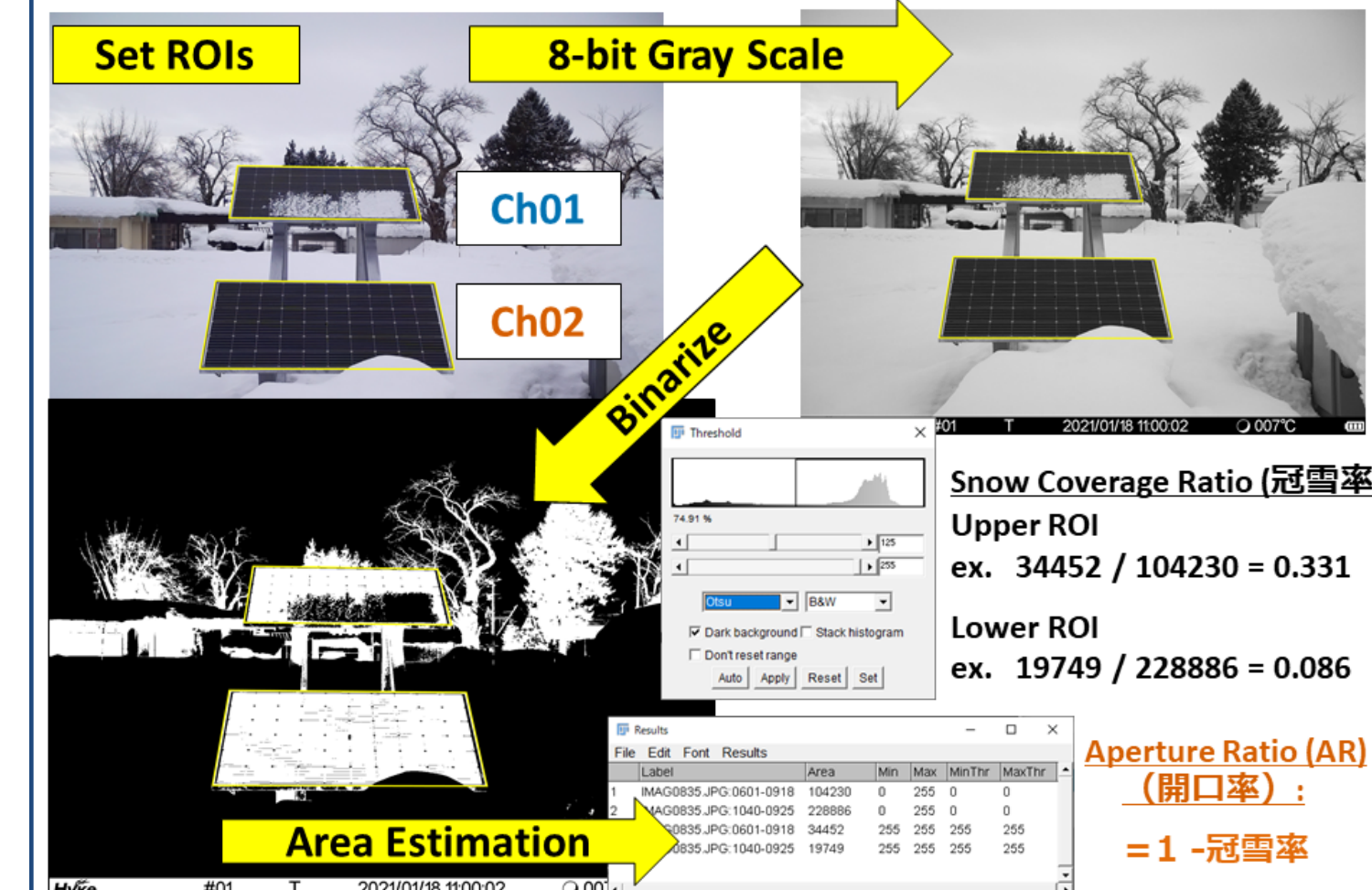
Panel 02: 降雪時の積雪状況 (2)



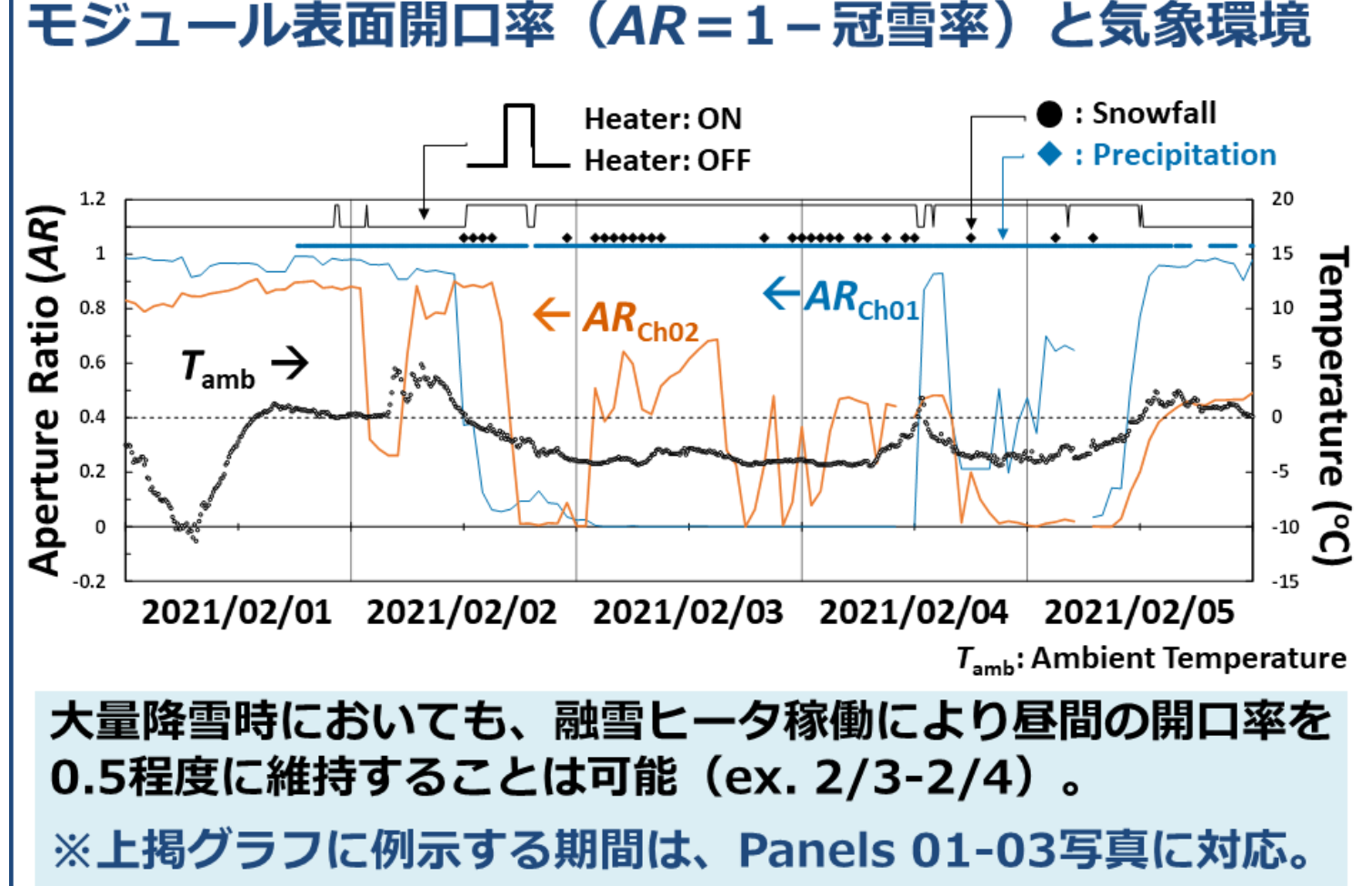
Panel 03: 降雪時の積雪状況 (3)



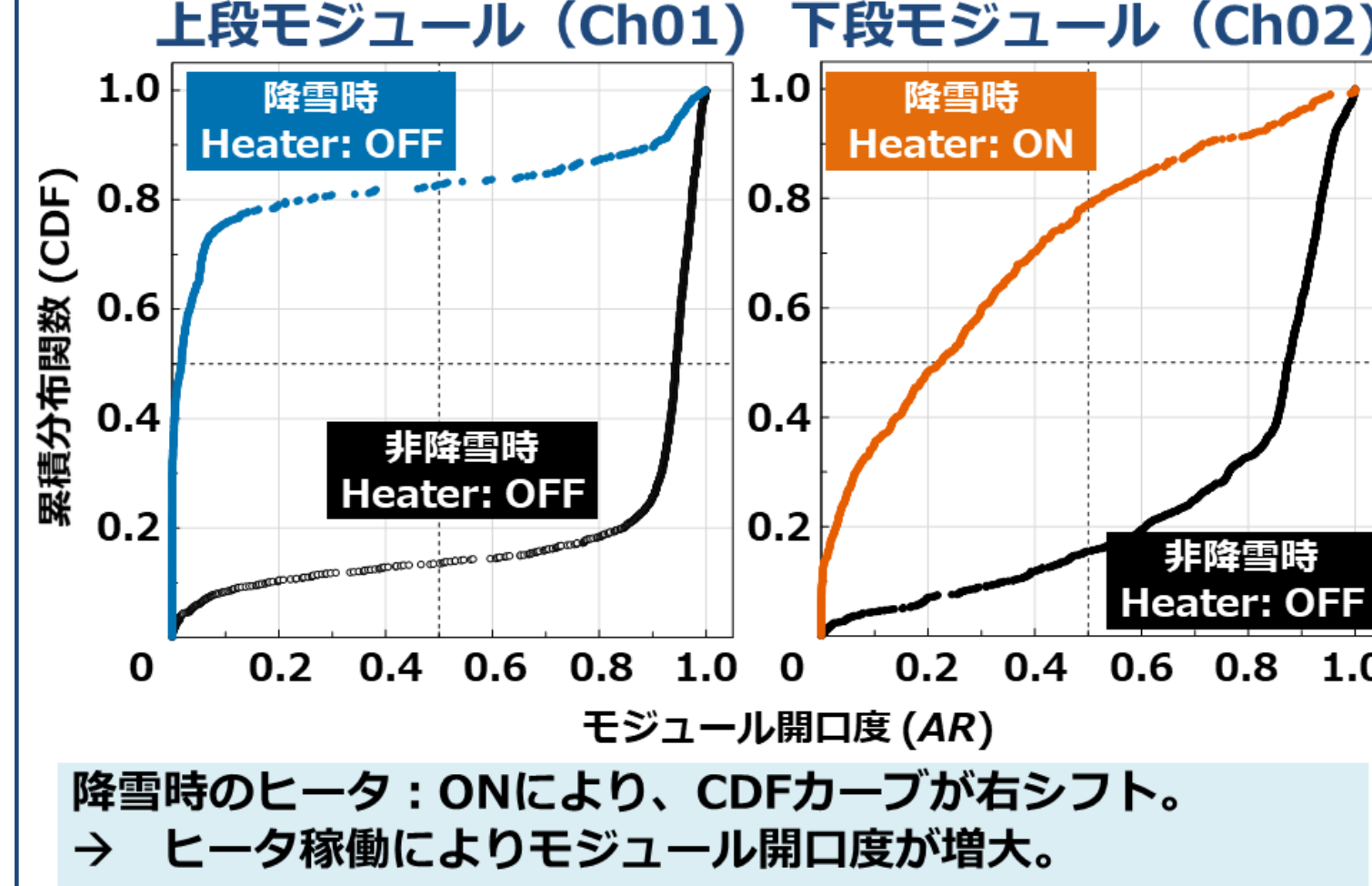
Panel 04: 冠雪率/開口率 測定



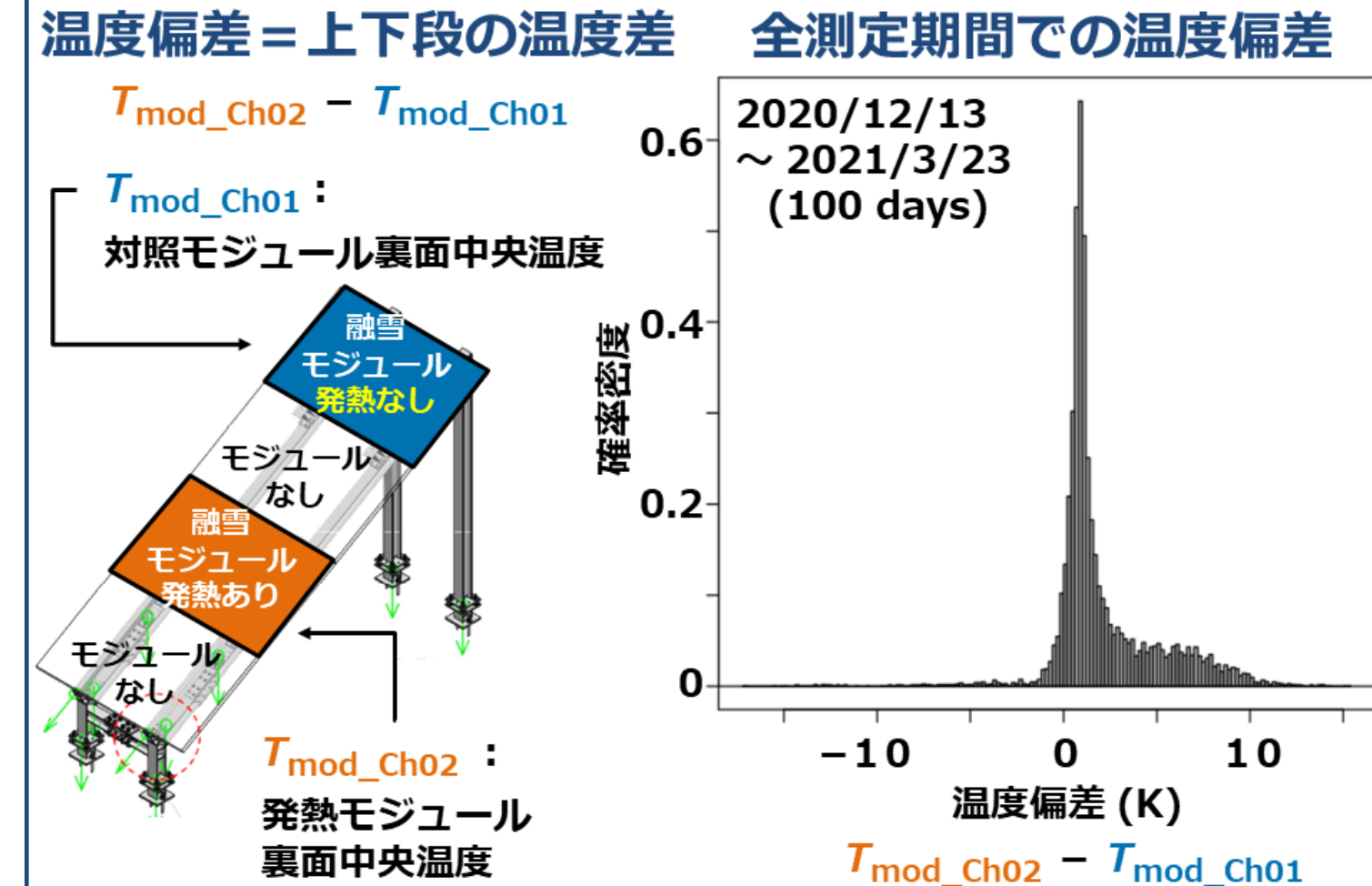
Panel 05: 大量降雪時の冠雪状況例



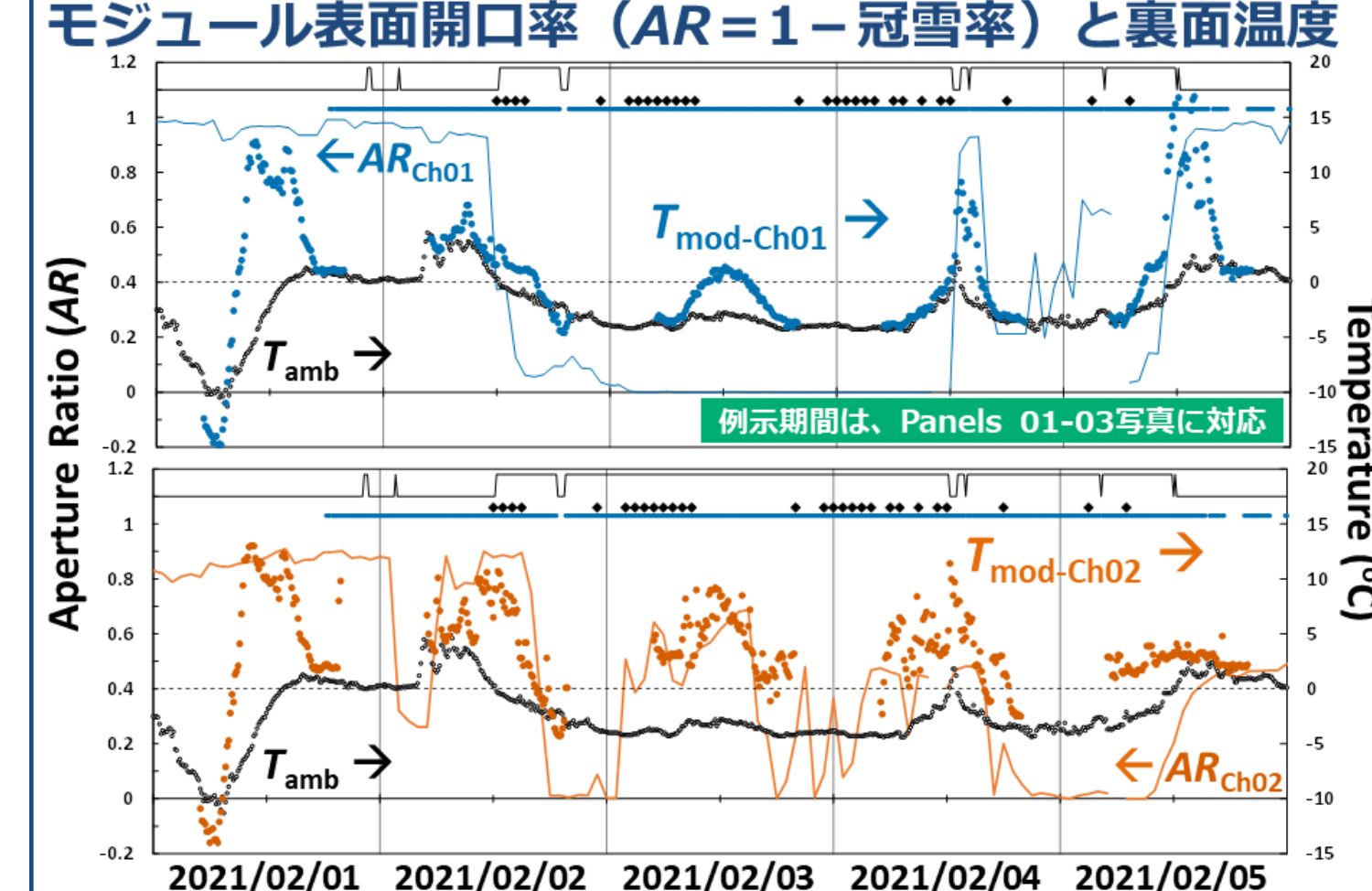
Panel 06: モジュール開口度 (AR) 変化



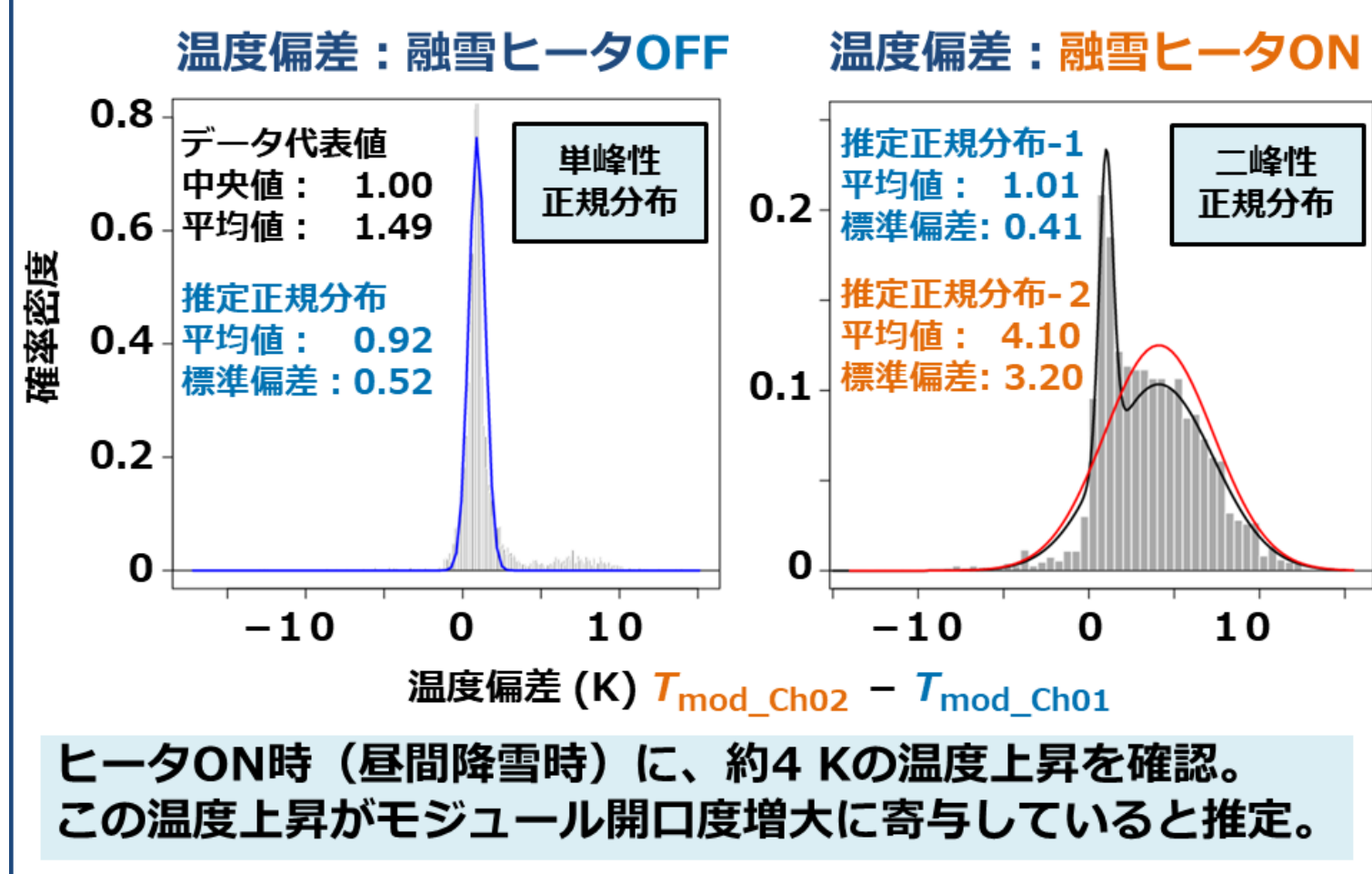
Panel 07: モジュール裏面温度偏差



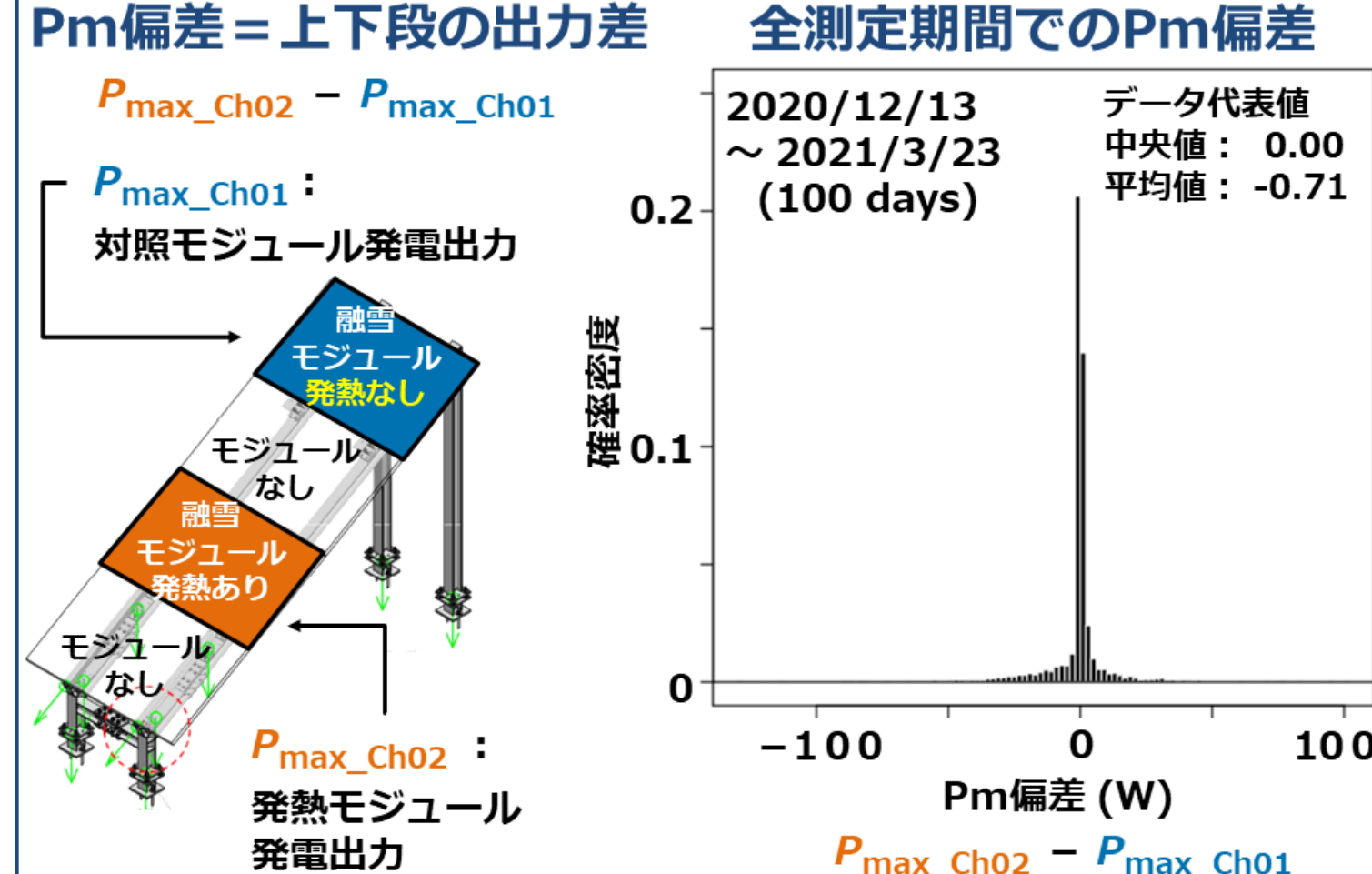
Panel 08: 大量降雪時の裏面温度例



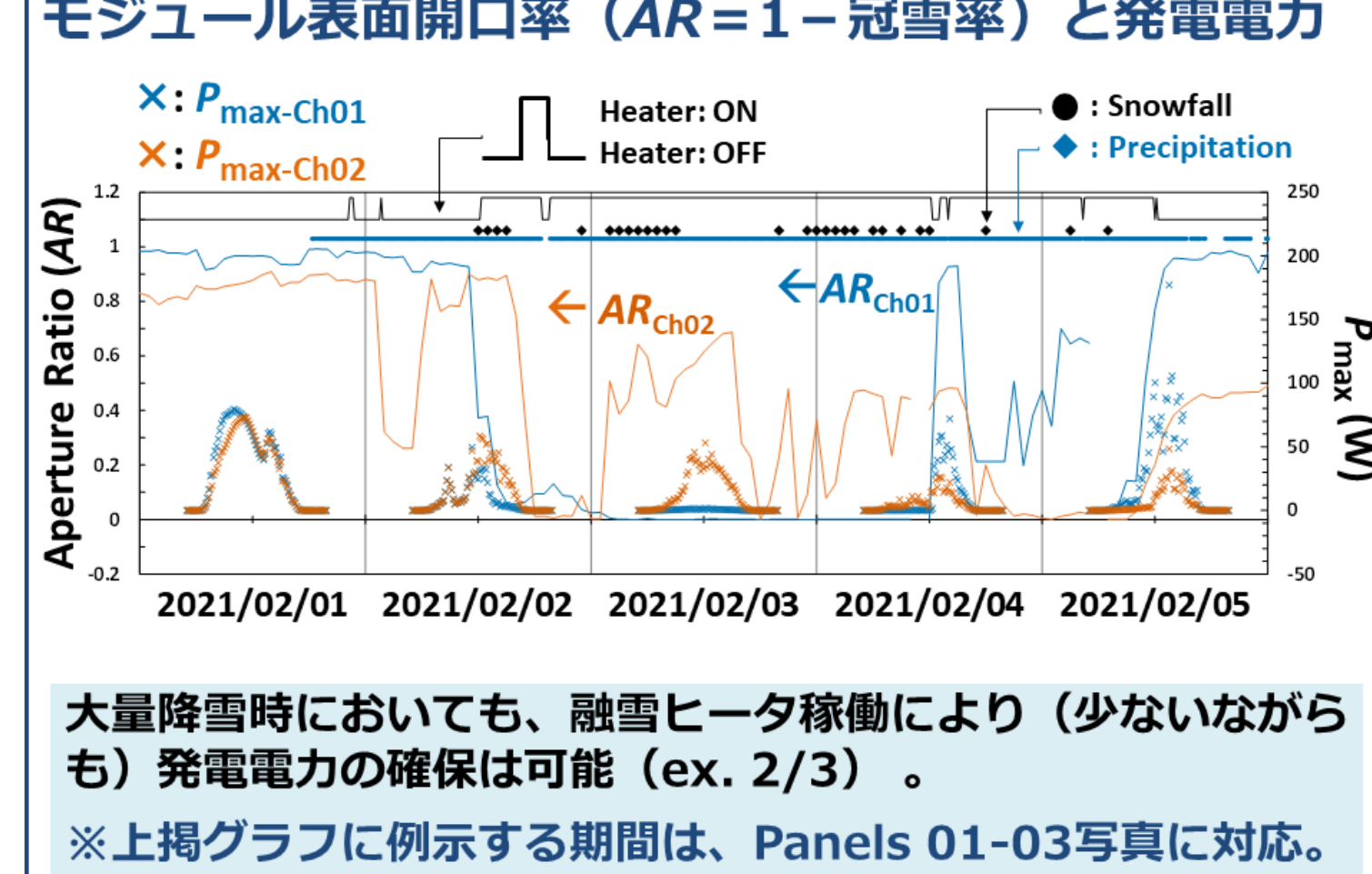
Panel 09: モジュール裏面温度特性



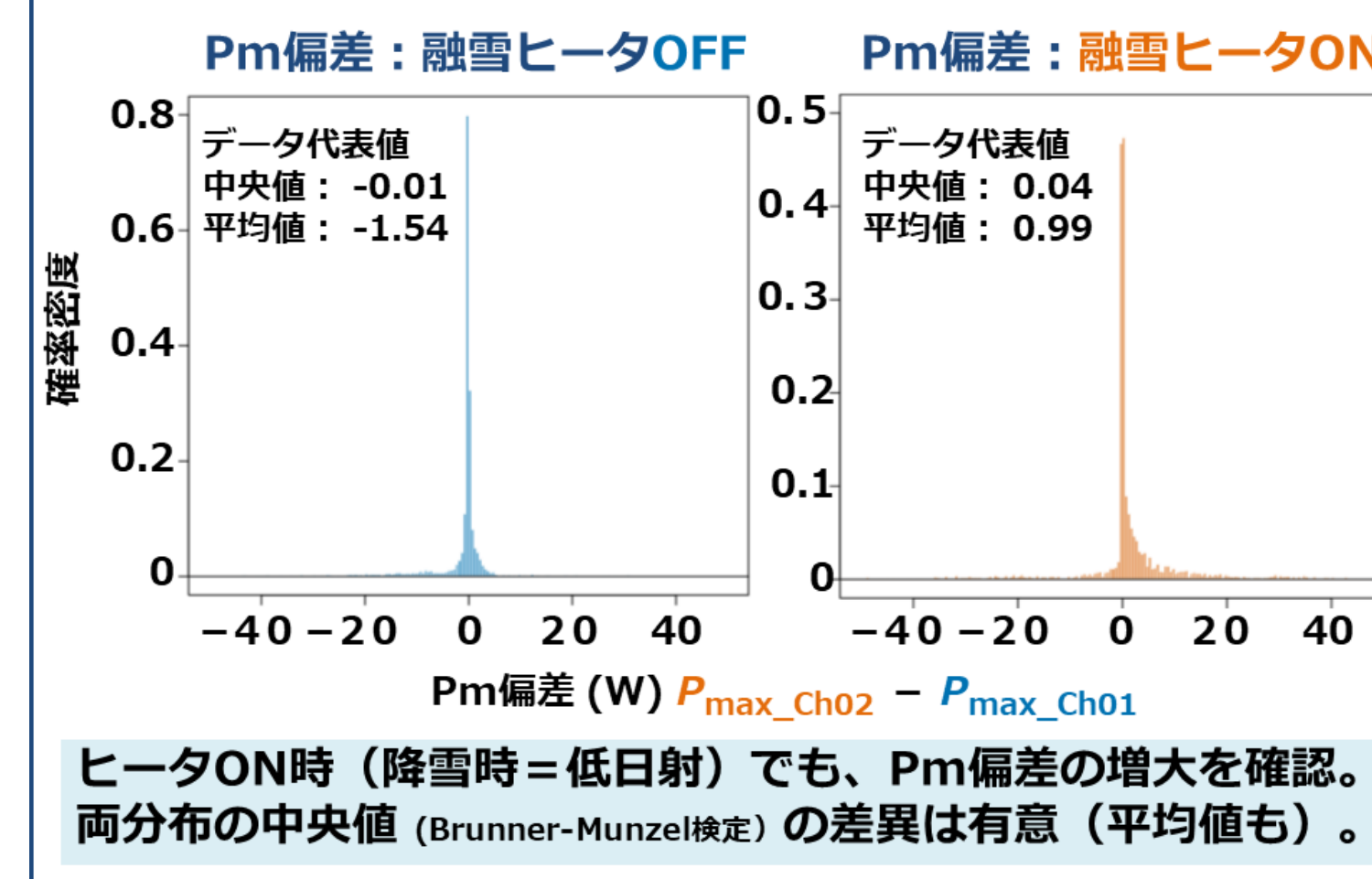
Panel 10: モジュール発電電力偏差



Panel 11: 大量降雪時の発電状況例



Panel 12: モジュール発電電力特性

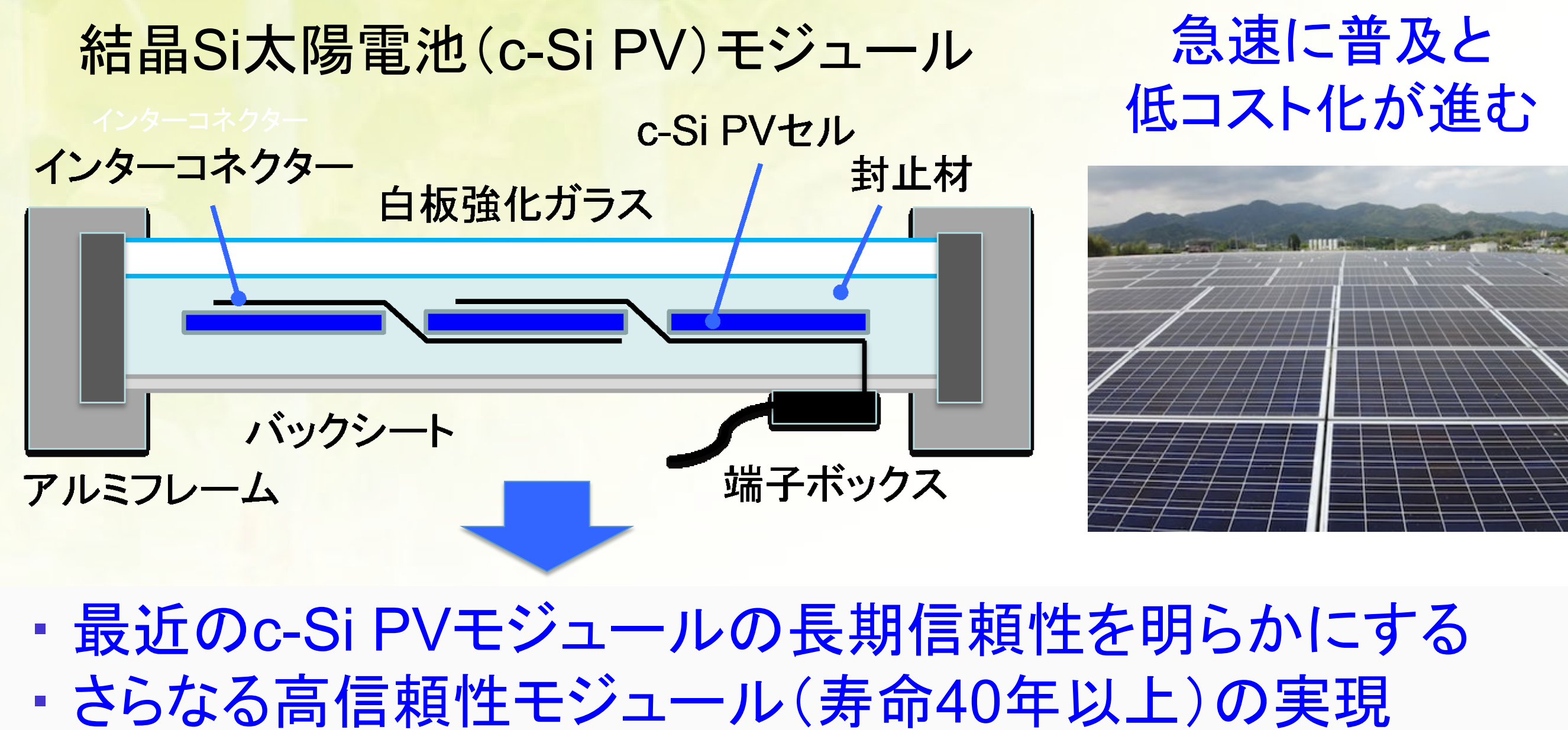


本事業を共同して推進いただいた企業 (アンフィニ株式会社・大日本印刷株式会社) の関係諸氏に深謝申し上げます。

ポリオレフィン封止材を用いた 長期曝露PVモジュールの評価

原 浩二郎¹、千葉 恭男²、白髭 靖史³、小保内 直博³、上野 滋弘³、高山 泰樹³
産業技術総合研究所 1センシングシステム研究センター
2再生可能エネルギー研究センター、3大日本印刷

研究の目的



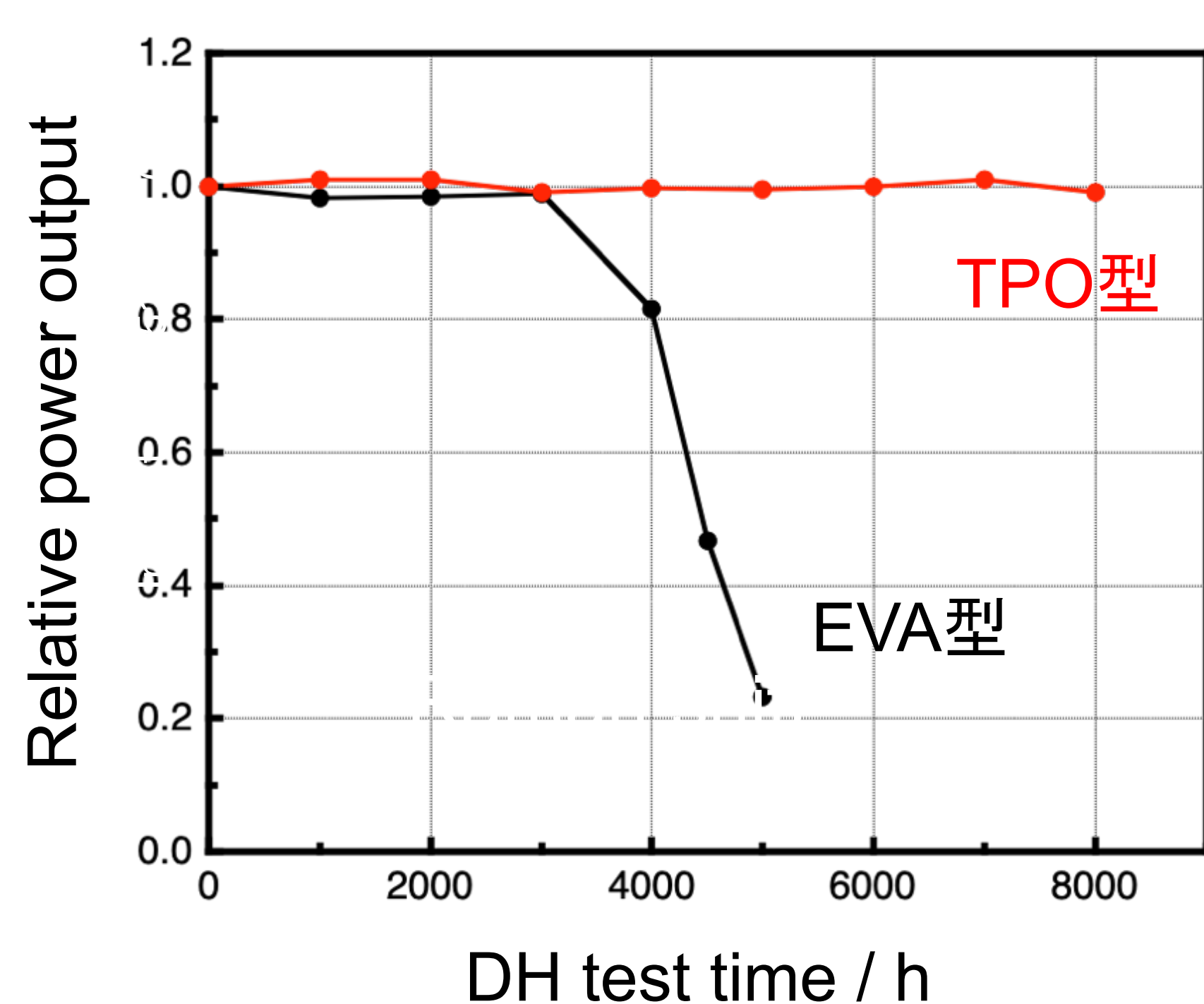
実験

- 熱可塑ポリオレフィン(TPO)封止材を用いた
c-Si PVモジュールの長期信頼性を評価
- 評価モジュール(試作)
 - 屋外曝露試験
大型モジュール(現時点で約10年曝露)
 - 高温高湿(Damp-heat, DH)試験
単セルモジュール(～8000時間)
 - 評価方法
 - PV特性(I-V特性、EL特性、他)
 - 分光法(ATR-FT-IR、モバイルラマン、他)



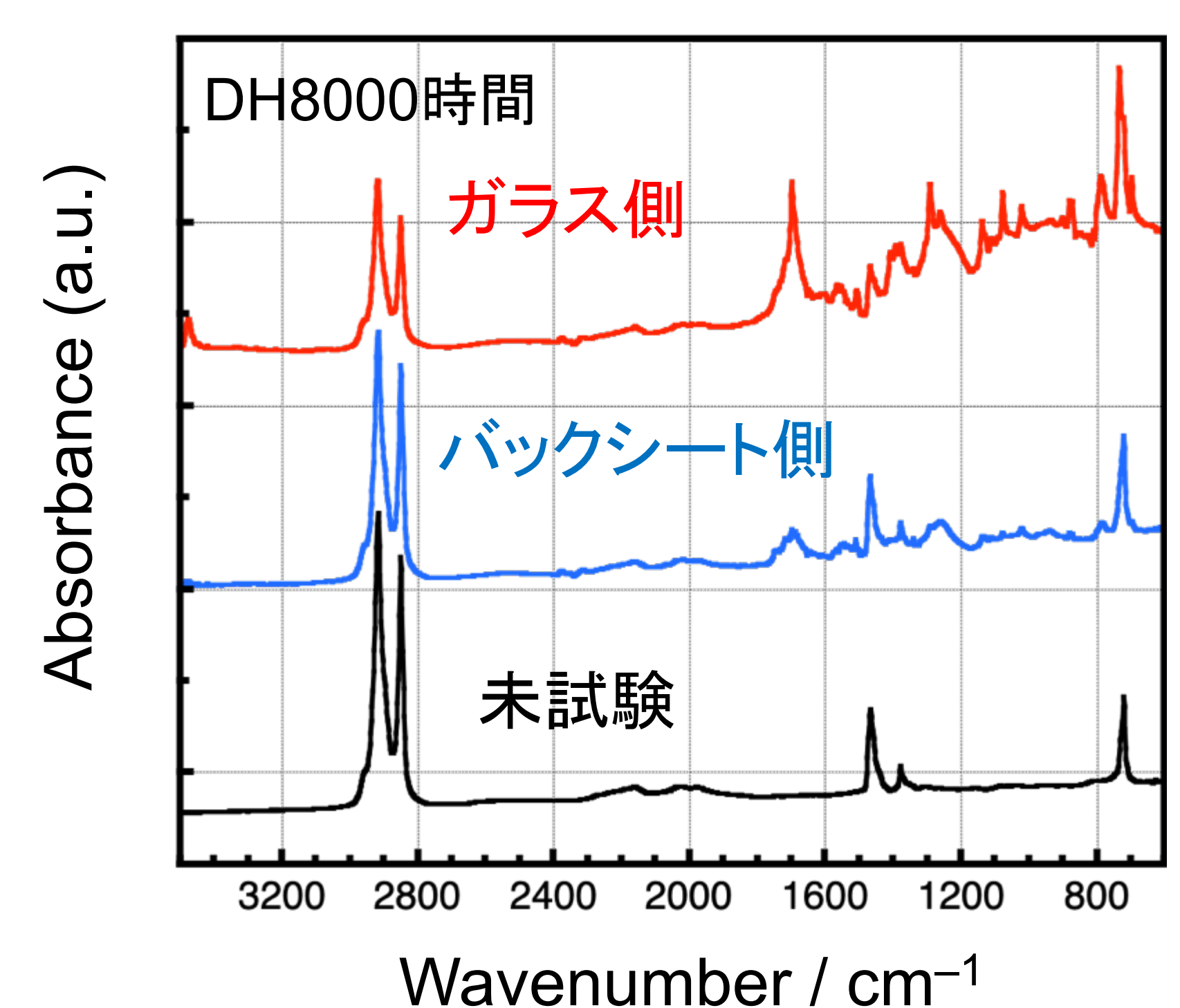
結果

DH試験・EVA型とTPO型の比較(出力とEL特性の変化)



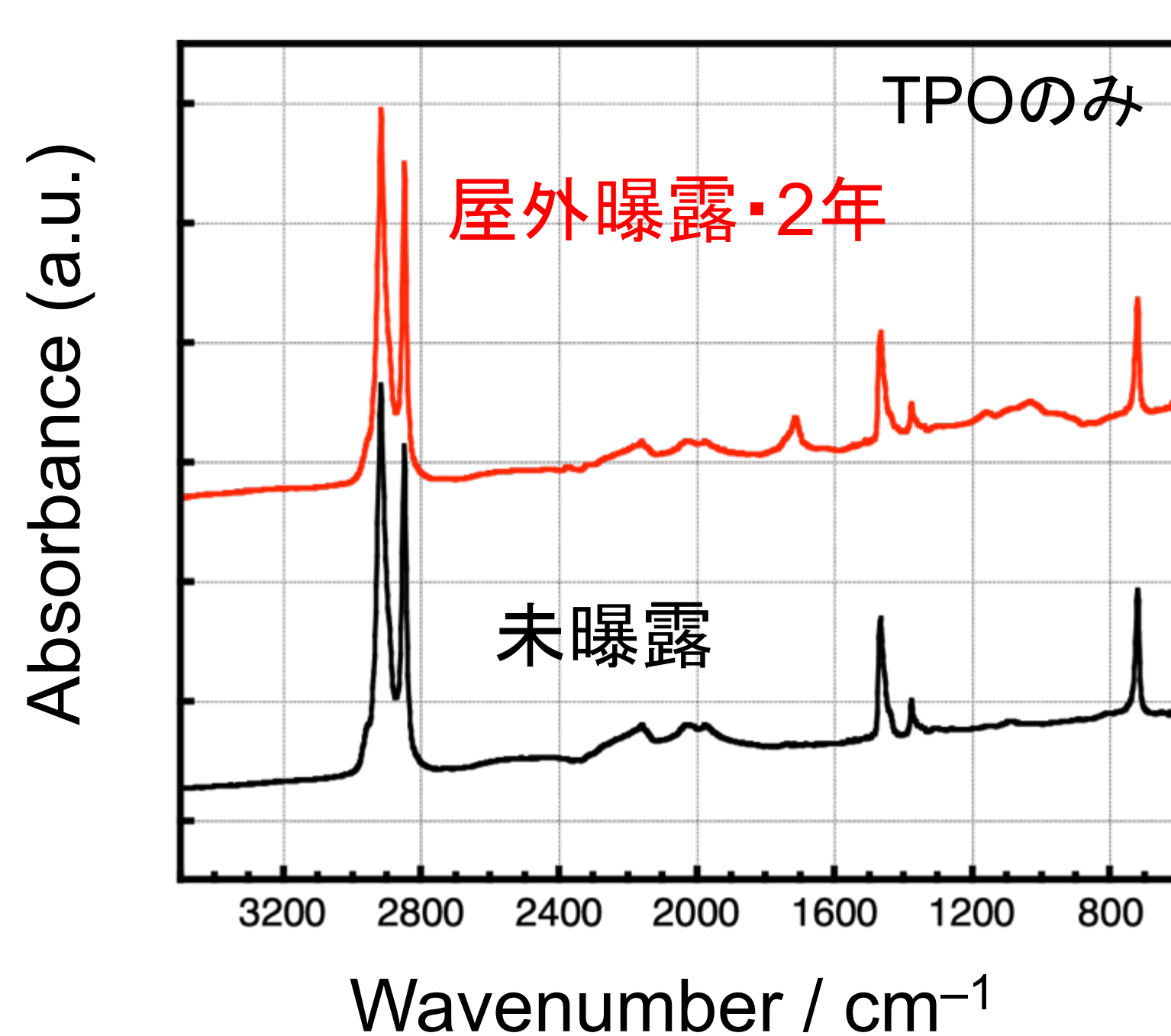
TPO型 → DH8000時間でも大きな劣化なし

DH試験・TPOのFT-IR吸収スペクトル



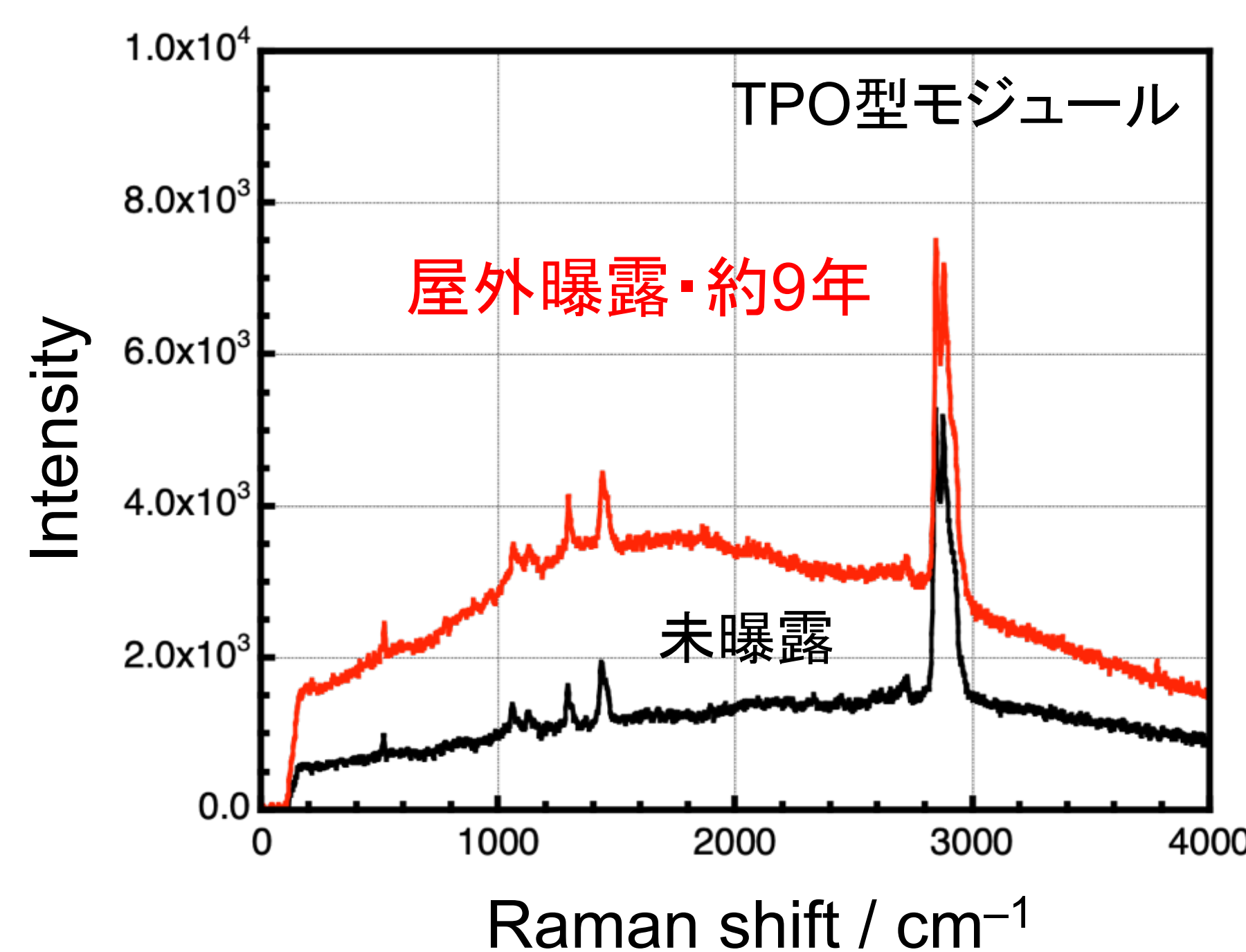
ガラス側のTPOが大きく酸化劣化

屋外曝露・TPOのFT-IR吸収スペクトル



TPOのみ曝露2年で大きな劣化なし

屋外曝露・TPOのラマンスペクトル



モジュール中で大きな劣化なし

屋外曝露・TPO型モジュールの外観



出力低下率 = 0.39～0.45%/年
(屋外曝露・約8年の時点)

まとめ・結論

- DH試験(～8000時間)
 - TPO型は劣化なし(EVA型は3000時間以降大きく劣化)
 - ガラス側のTPOが大きく酸化劣化(出力への影響なし)
 - 屋外曝露試験(～約10年)
 - TPOのみ曝露(2年) → 大きな劣化なし(酸化劣化あり)
 - 屋外曝露モジュール(～約10年)
 - ラマンスペクトル → TPOに大きな劣化なし(蛍光は増加)
 - 出力低下率 = 0.39～0.45%/年(屋外曝露・約8年の時点)
- TPO封止材を用いたc-Si PVモジュールの高信頼性を実証

今後の展開

さらなる長期屋外曝露条件でのTPO型モジュールの長期信頼性の評価(EVA型との比較や市販モジュールの評価を含む)

参考文献

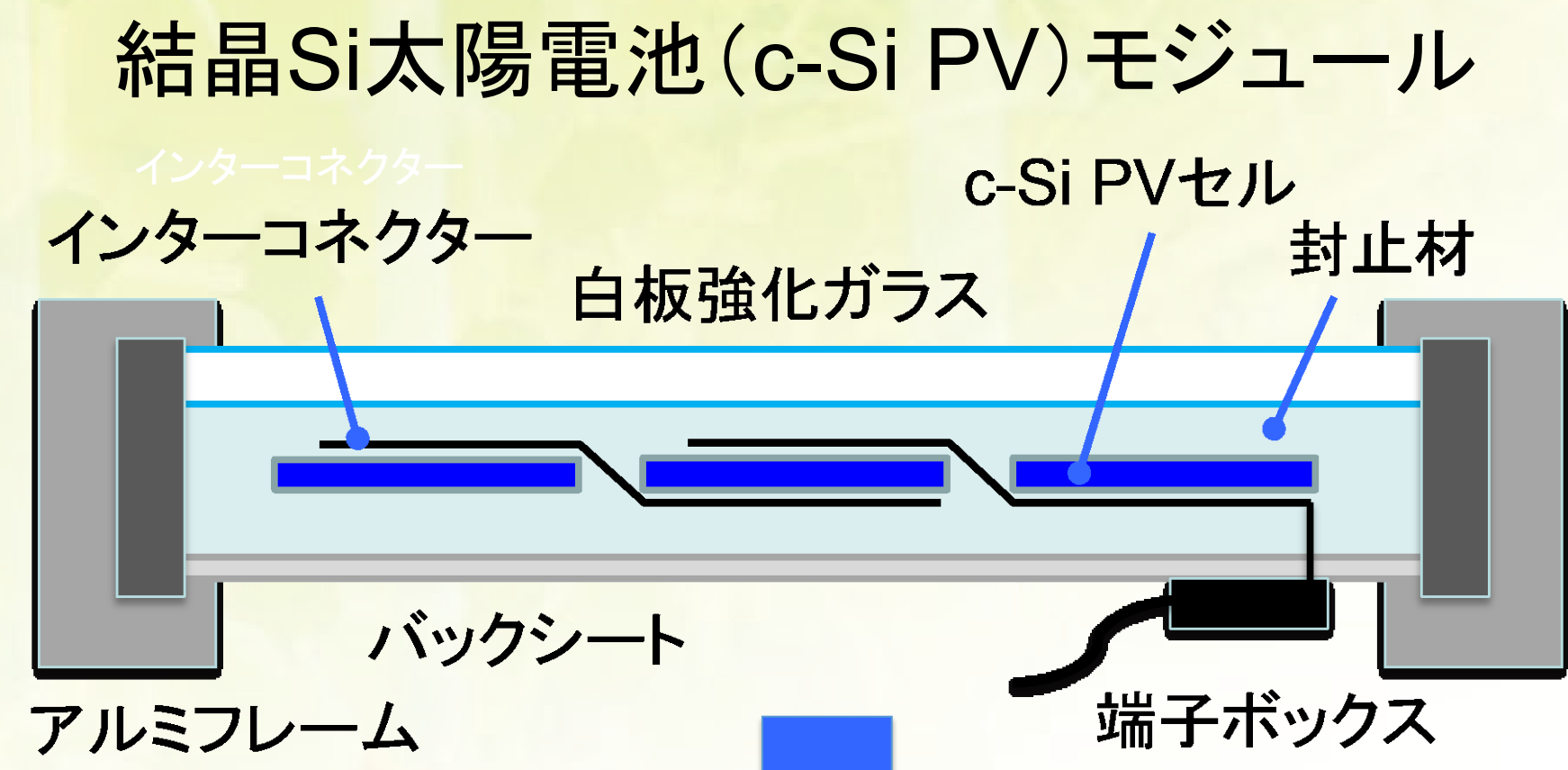
- K. Hara, Raman spectroscopic analysis of encapsulants in aged photovoltaic modules, J. Photochem. Photobiol. A: Chem., **425**, 113721 (2022).
- K. Hara et al., Durable polyolefin encapsulants in aged photovoltaic modules, Bull. Chem. Soc. Jpn., In preparation.

ラマン分光法による屋外曝露 PVモジュールの評価

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



急速に普及と
低コスト化が進む



- ・最近のc-Si PVモジュールの長期信頼性を明らかにする
- ・PVモジュールの新たな劣化評価方法(非破壊)の開発

実験

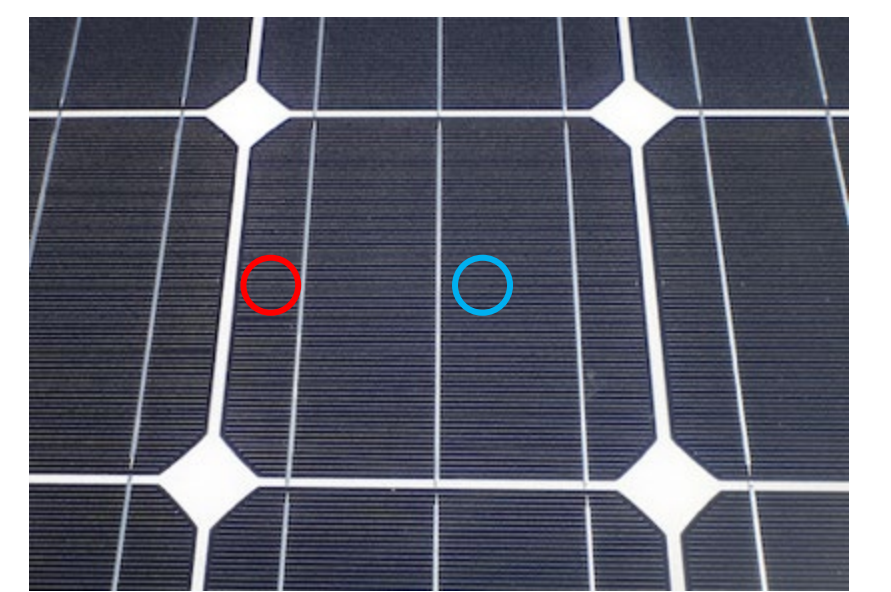
モバイルラマン測定装置により曝露PVモジュール中のEVA封止材を非破壊分析

・評価モジュール

- ・市販と試作の屋外曝露モジュール
鳥栖などの国内で1年～約27年曝露
- ・高温高湿(DH)試験モジュール
単セルモジュール(～8000時間)

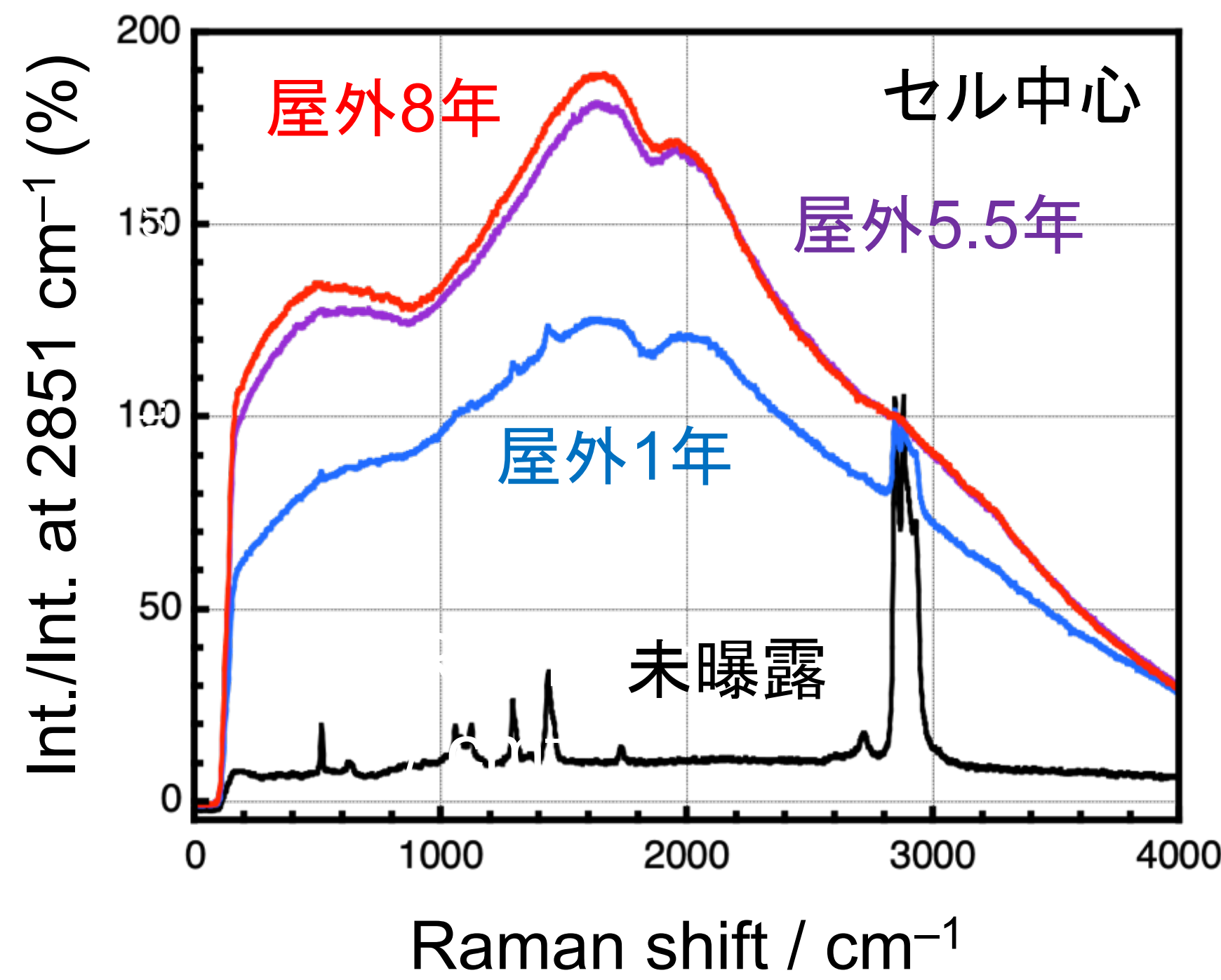
・評価方法

- ・モバイルラマン(日清紡メカトロニクス製)
- ・EVAの測定位置: Siセルの中心部と端部



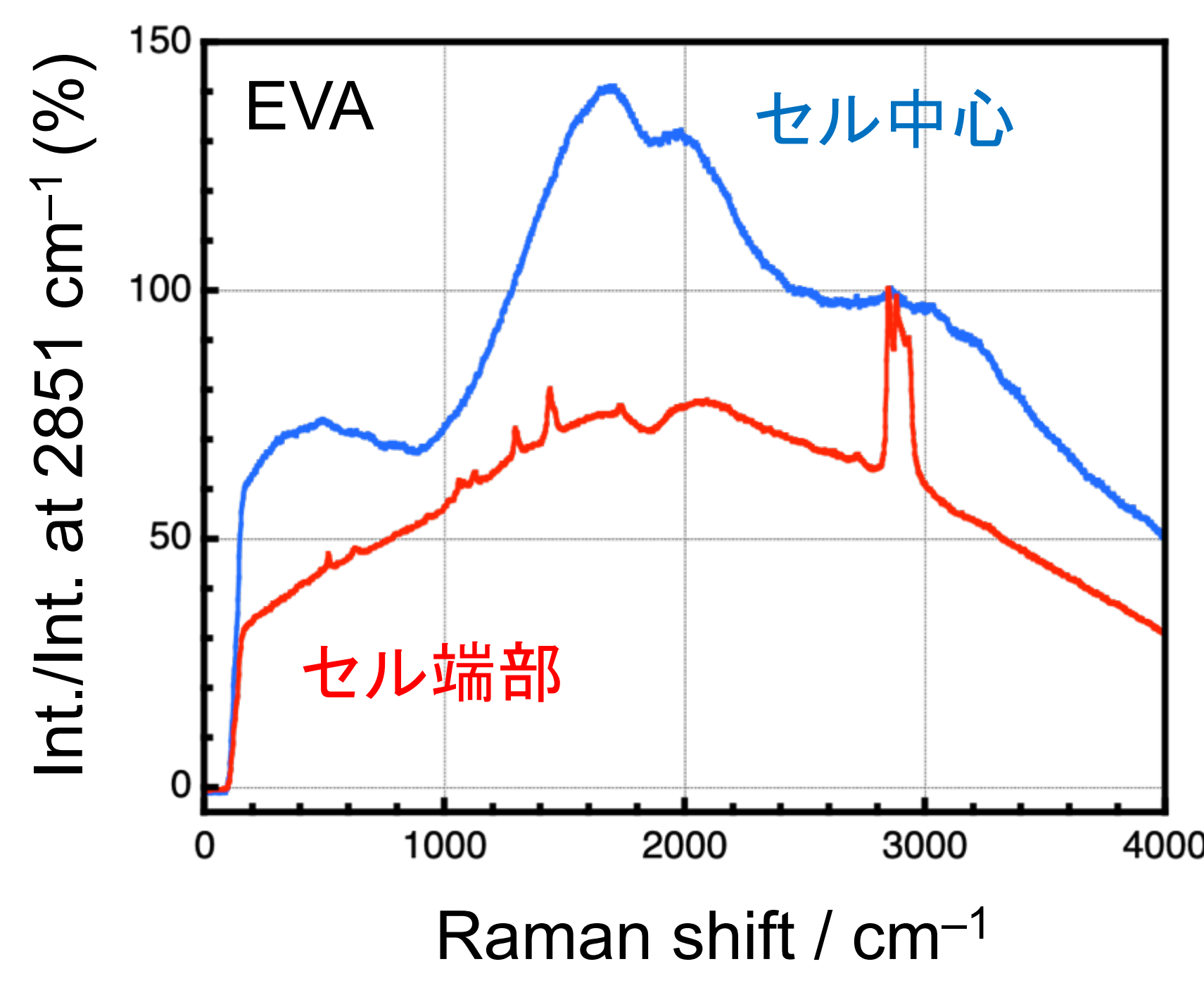
結果と考察

屋外曝露モジュールA(～8年)



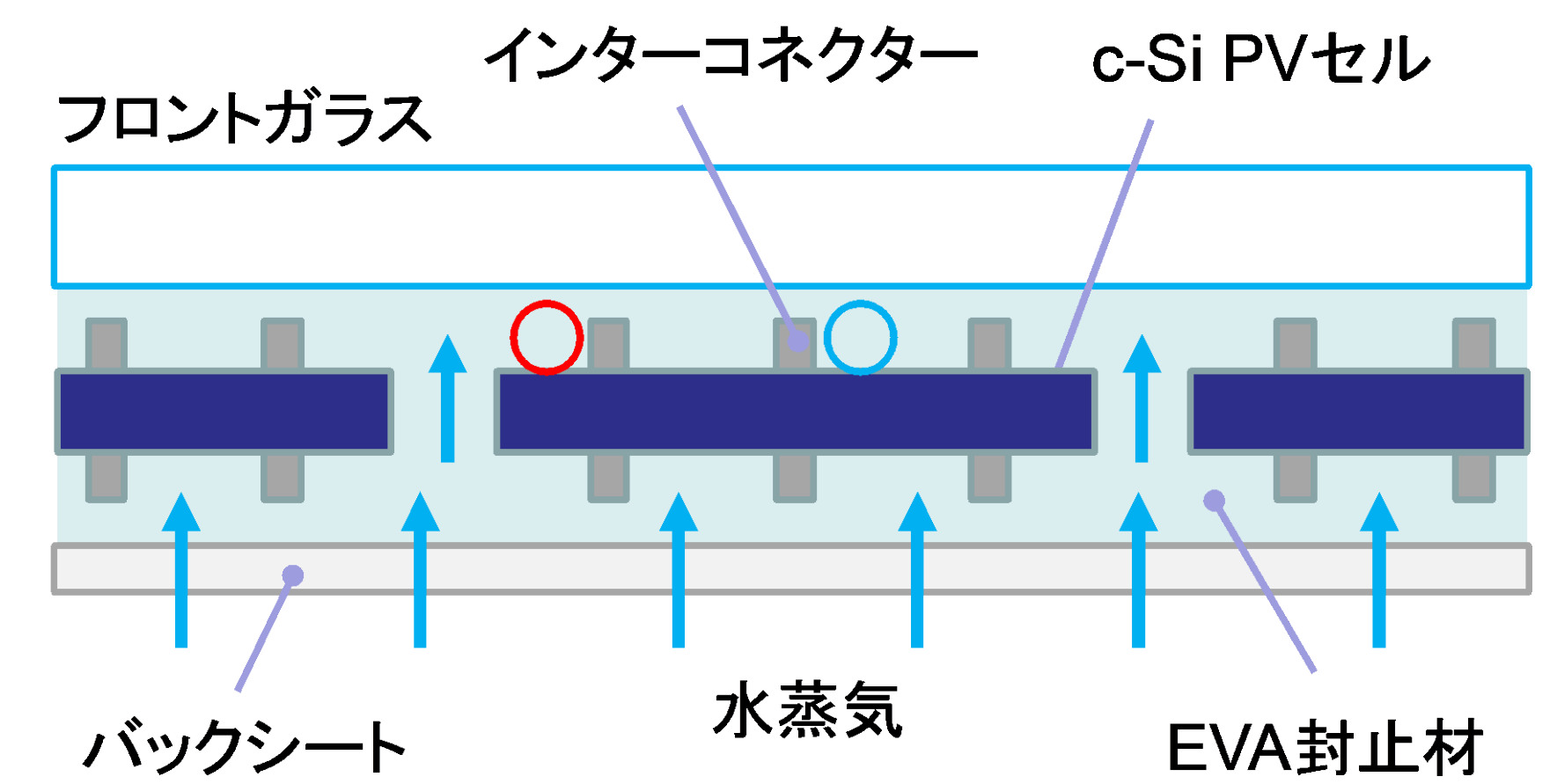
屋外曝露により蛍光強度が増加

長期屋外曝露モジュールB(約27年)



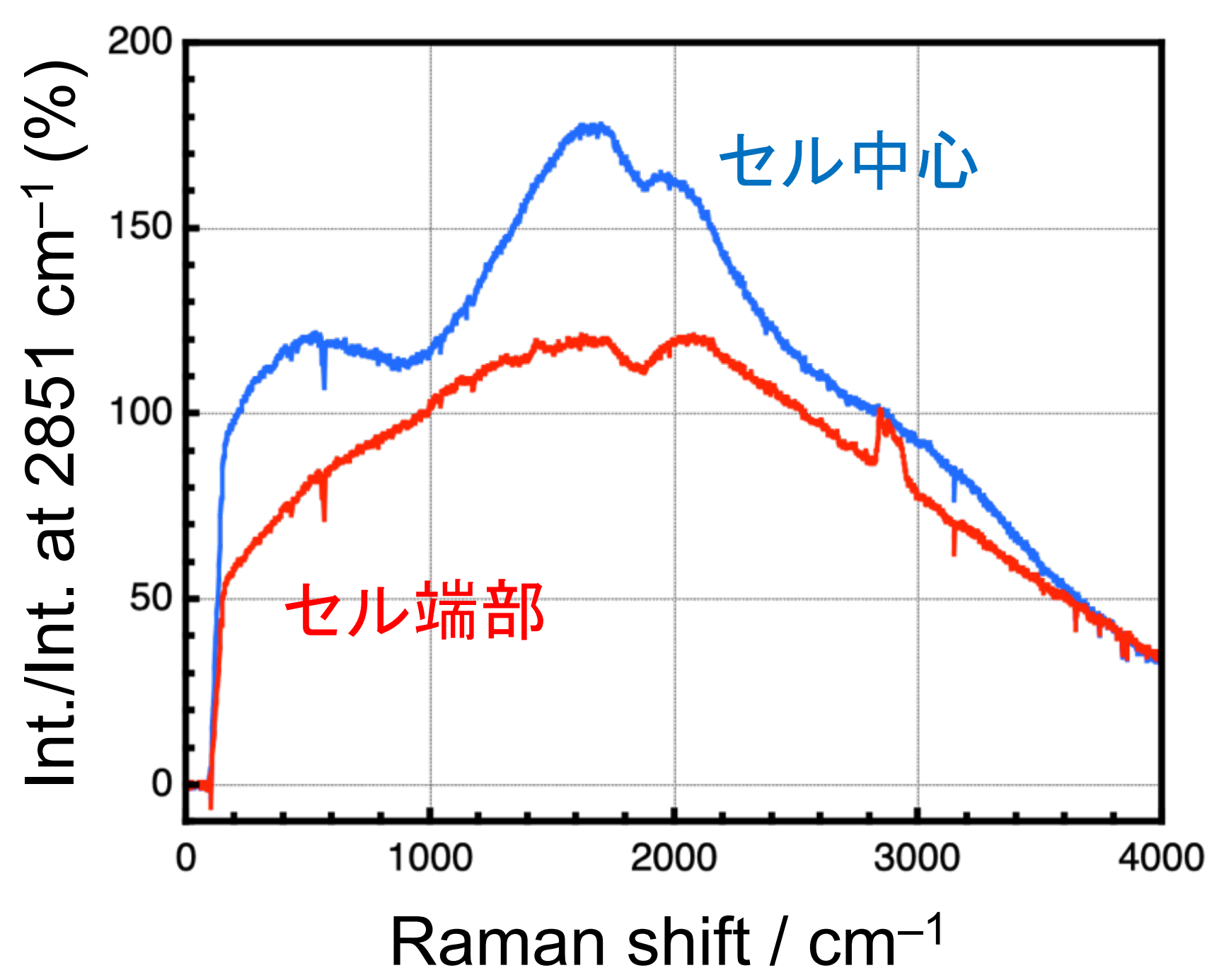
スペクトルのセル位置依存性あり

モジュール中の水蒸気の影響



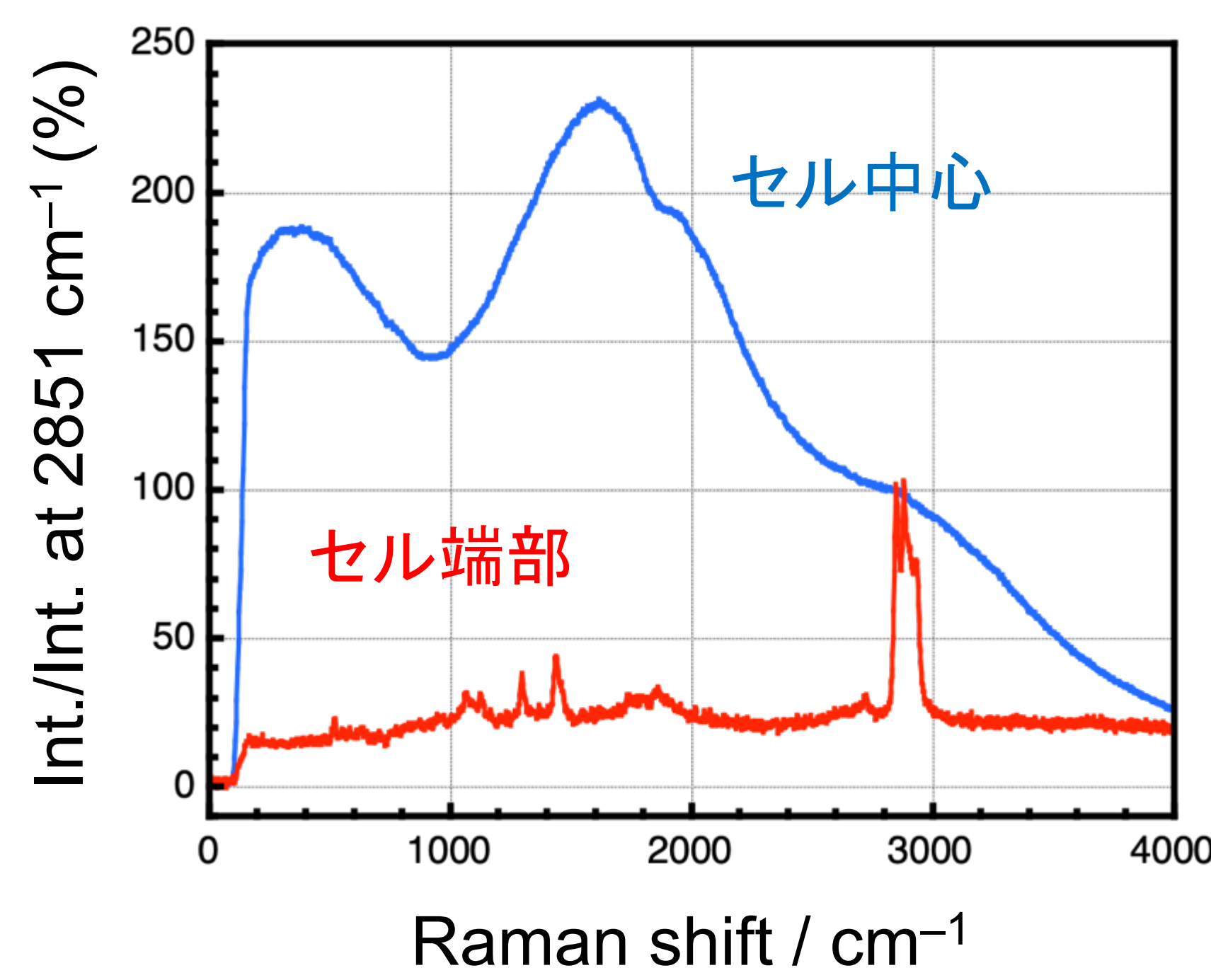
セル端部のEVAは
水蒸気の影響を受けやすい

長期屋外曝露モジュールC(約24年)



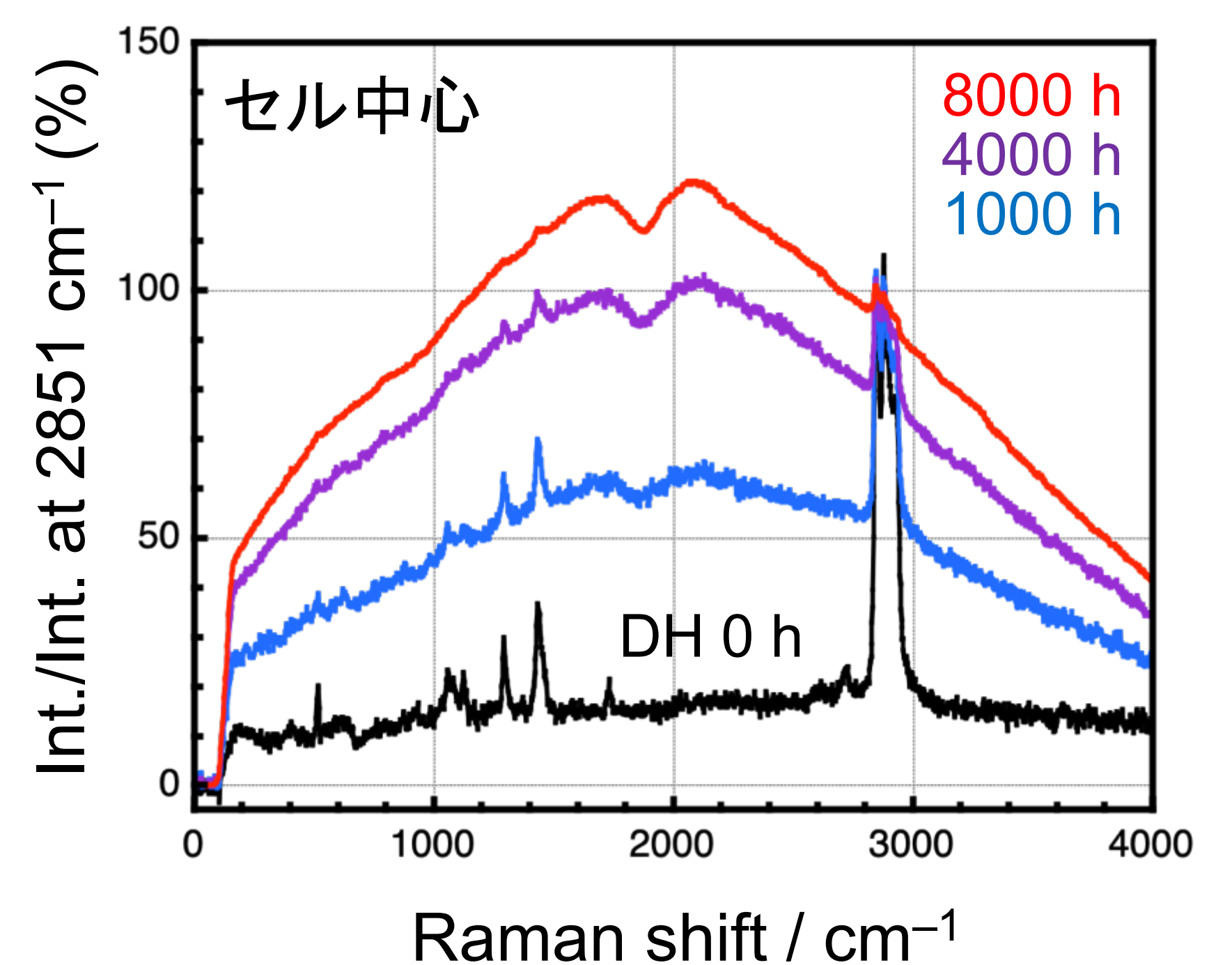
位置依存性(水蒸気の影響)あり

屋外曝露モジュールD(約9年)



セル端部は未曝露と類似スペクトル

DH試験モジュール(～8000時間)



長期屋外のセル端部と類似スペクトル

まとめ・結論

- ・屋外曝露モジュール(～約27年)
 - ・屋外曝露により蛍光強度が増加(添加剤の反応が原因)
 - ・EVAのセル位置依存性あり
(セル端部は水蒸気の影響を受けやすく、中心は受けにくい)
 - ・曝露初期のセル端部は未曝露と類似スペクトル
(水蒸気の影響により蛍光化合物が未生成、あるいは酸化)
 - ・DH試験モジュール(～8000時間)
 - ・蛍光強度が増加し、長期屋外のセル端部と類似スペクトル
- 屋外のセル端部がDH型の場合はEVA劣化の可能性あり
(長期屋外曝露とDH試験による酢酸の生成 → FT-IRで確認)

今後の展開

今後のスペクトル経時変化を評価するとともに、さまざまな屋外曝露モジュール中のEVAを分析し、評価データを蓄積する

参考文献

1. K. Hara and Y. Chiba, Spectroscopic investigation of long-term outdoor-exposed crystalline silicon photovoltaic modules, J. Photochem. Photobiol. A: Chem., **404**, 112891 (2021).
2. K. Hara, Raman spectroscopic analysis of encapsulants in aged photovoltaic modules, J. Photochem. Photobiol. A: Chem., **425**, 113721 (2022).

廃ガラスの反射光を利用した両面受光型太陽電池の発電量増加効果の評価

令和3年度シーズ支援プログラム:太陽電池のリサイクルから作製したガラスの有効資源化に関する研究

津野 裕紀 棚橋 紀悟 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

事業の概要

シーズ支援プログラムとは

東日本大震災において甚大な被害を受けた被災地（福島県、宮城県、岩手県の3県）の企業が開発した再生可能エネルギーに関連するシーズを、当研究所が技術支援する事業として「被災地企業のシーズ支援プログラム」を実施しています。本事業では、企業のシーズが詰まった製品等を、産総研のノウハウや研究設備を用いて、技術の性能評価等の技術支援を実施しています。その成果の当該企業での実用化を通じて、被災地域における新たな産業の創出を目的としています。

Link: <https://www.fukushima.aist.go.jp/seeds/index.html>

太陽電池のリサイクルから作製したガラスの有効資源化に関する研究

代表法人: 廃ガラスリサイクル事業共同組合
連携法人: 株式会社高良
飯岡工業株式会社
株式会社丸東
株式会社環境保全サービス

産総研の支援内容

- ・防草材としての評価
- ・両面受光型太陽電池の反射材としての評価

企業の持つシーズ

- ・太陽電池パネルの処理工程を全て自動化した一体型システム
- ・100%リサイクル
- ・鋭利な角のない粒状のガラスに粉砕



Link: <https://www.glassrecycle.ne.jp/panel>

期待される波及効果

- ・廃ガラスの利用用途拡大
- ・太陽電池パネルの100%リサイクルの実現

結果

ガラス敷設による反射光の発電量増加効果

ガラスを地面に敷設することで、裏面も発電が可能な両面受光型太陽電池の発電量が増加する効果を検証

経済的には

「ガラス工事費用+除草費用」より「発電量増による収益」が上回るほど事業性は高いことから、どの程度発電するか事前に予測できることが必要

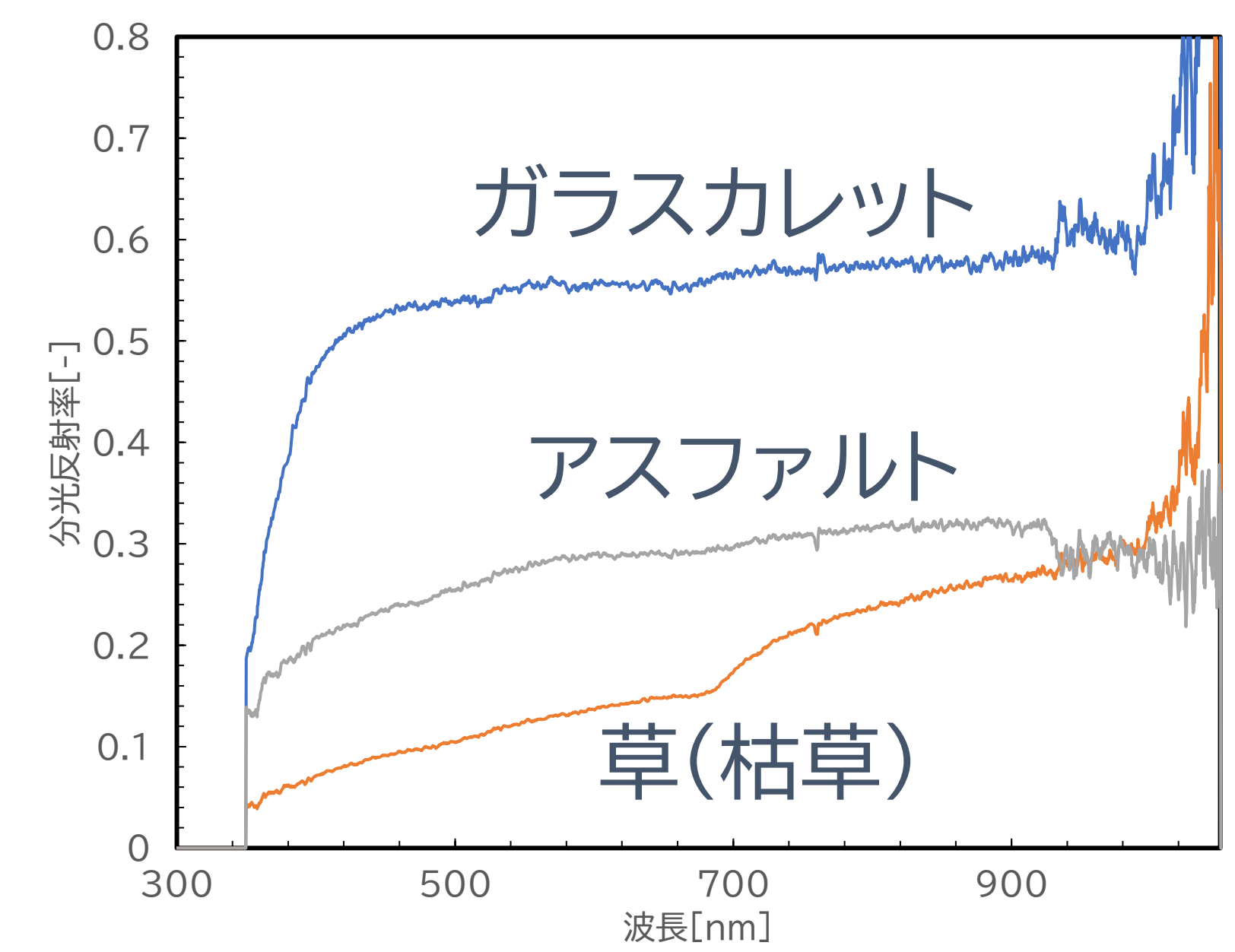
検討事項

- ・ガラスの反射率(アルベド)の測定
- ・FREAサイト内での実測
- ・実測と既存モデルの比較
- ・簡易的な発電量予測モデルの開発
- ・経済性の評価



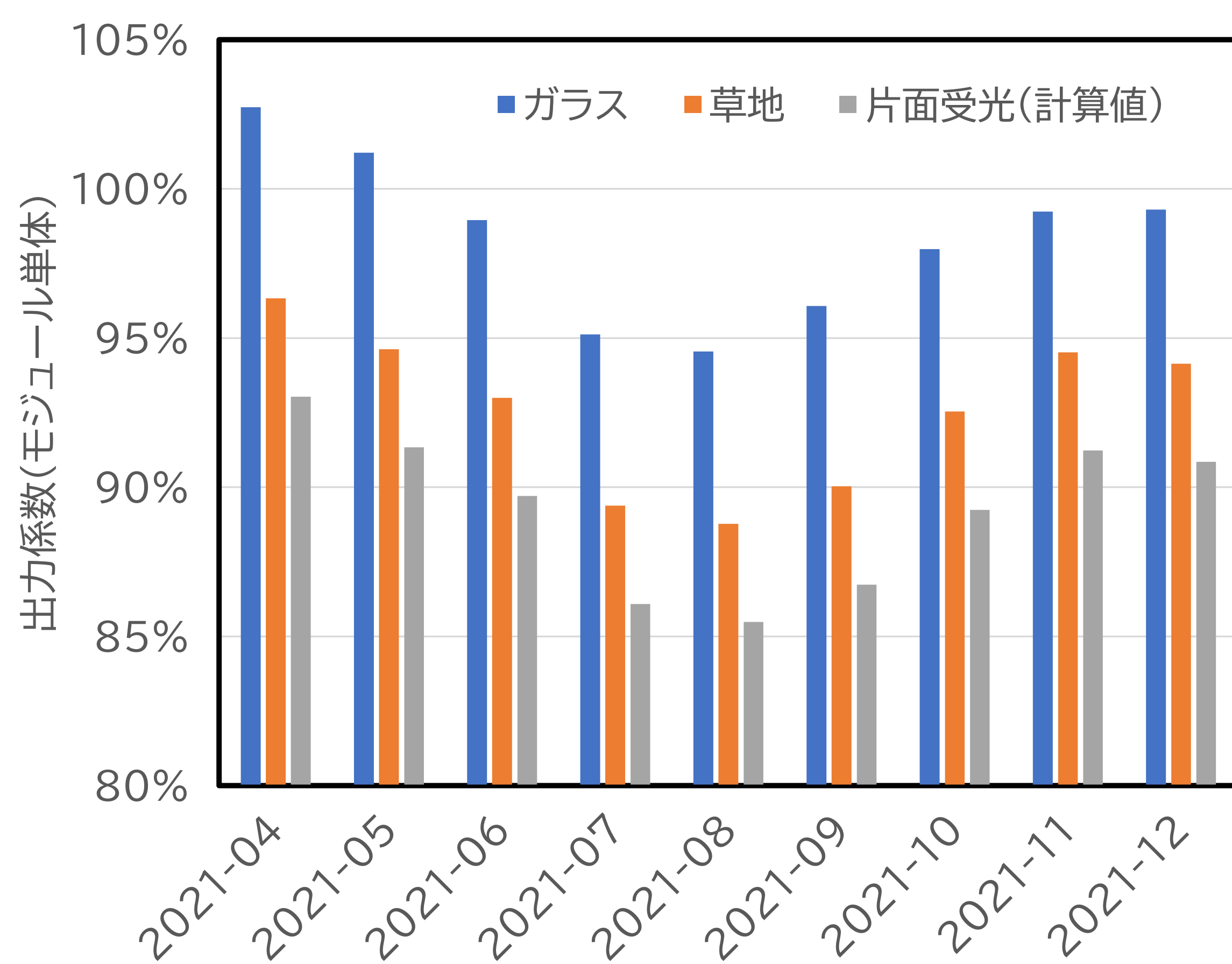
両面受光太陽電池(FREA)

地面の反射率(アルベド)の比較



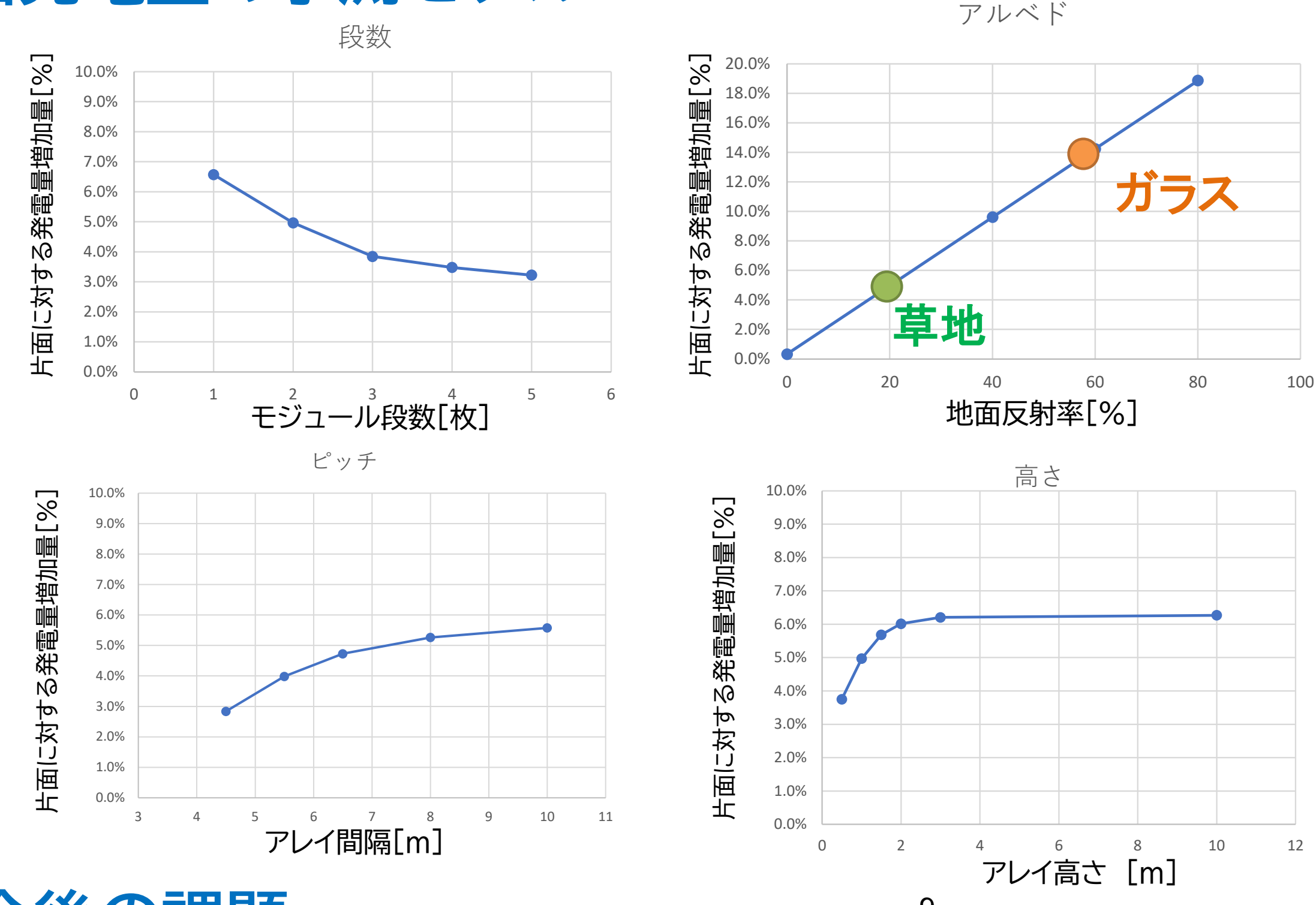
- ・ガラスカレットの反射率は草地の約3倍
- ・紫外線から赤外線までほぼフラット

発電電力量の比較



- ・両面+草地は片面受光に対して+3~4%
- ・両面+ガラスは片面受光に対して+8~10%
→地面反射率に強く依存する

裏面発電量の予測モデル



今後の課題

- ・裏面の影の影響の検証
- ・ガラスの安全性の検証
- ・垂直設置の経済性の検証
- ・設計と予測の指針の作成

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(II)

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年には裏面不導態型単結晶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、約9年曝露してきたSHJと約5年曝露してきたPERCを含むそれぞれの屋内測定(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。
 - ・SHJは、W-2A(20枚:測定枚数 以下同様)、W-1A(5枚)、M-3C(5枚)、M-1D(5枚)を評価した。
 - ・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SHJと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-2A	SHJ	4.8	5S x 1P x 4A	12/2012
W-1A	SHJ	1.25	5S x 1P x 1A	06/2016
M-3C	SHJ	1.55	5S x 1P x 1A	06/2016
M-1D	SHJ	1.3	5S x 1P x 1A	01/2019
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

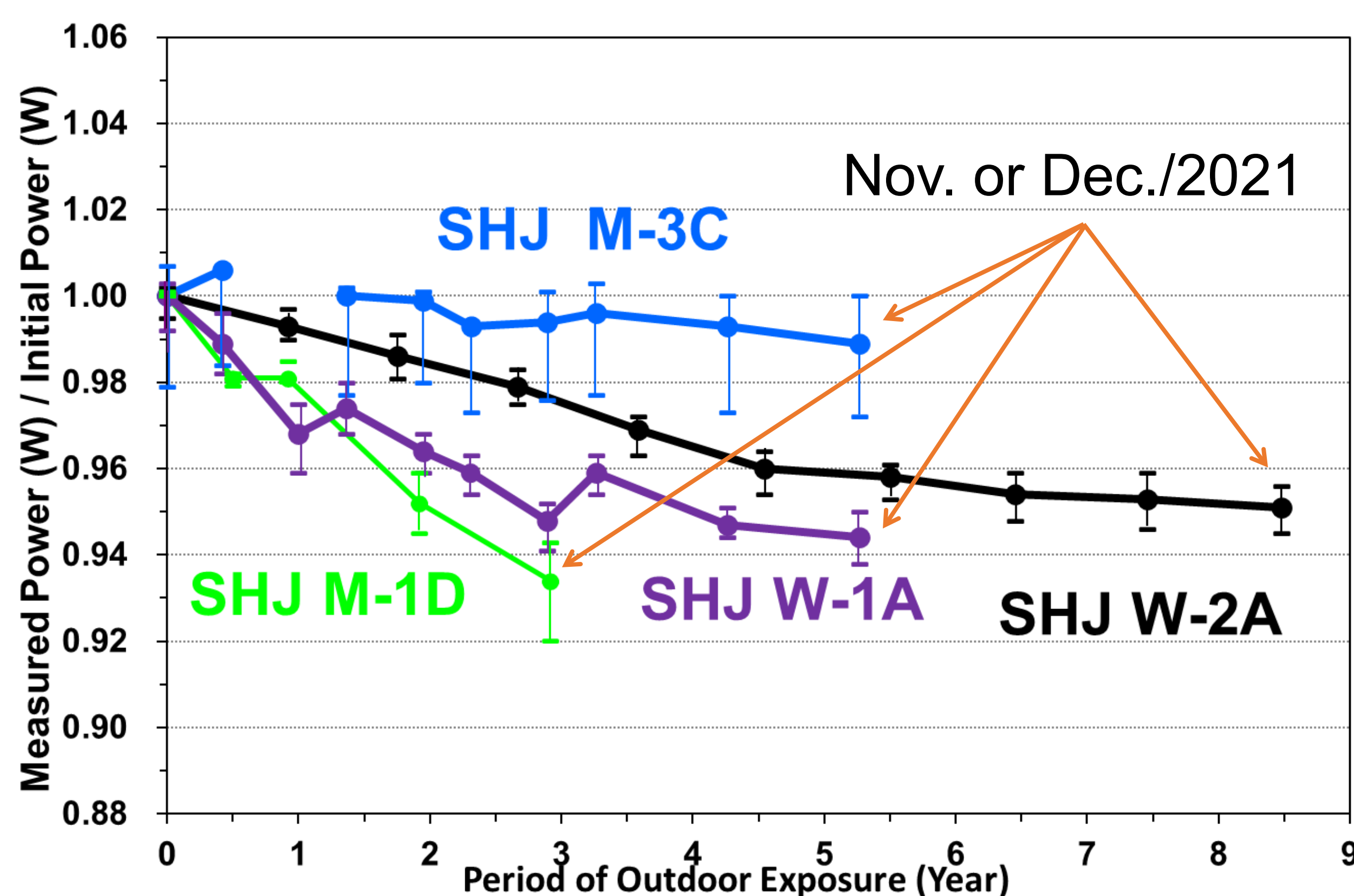


図1 SHJの屋内測定結果の年次推移

SHJモジュール (2021年は、屋内測定を1回実施)

- W-2A : 曝露開始から約5年後頃からの劣化の鈍化傾向を継続。
- W-1A : W-2Aに見られている劣化の鈍化傾向と類似。
- M-1D : 急激な劣化を継続。
W-1Aや、W-2Aに見られる設置直後からの推移と類似。
- M-3C : 設置開始からの安定な傾向を維持。
2020年からの1年間の推移は、W-2AやW-1Aと類似。

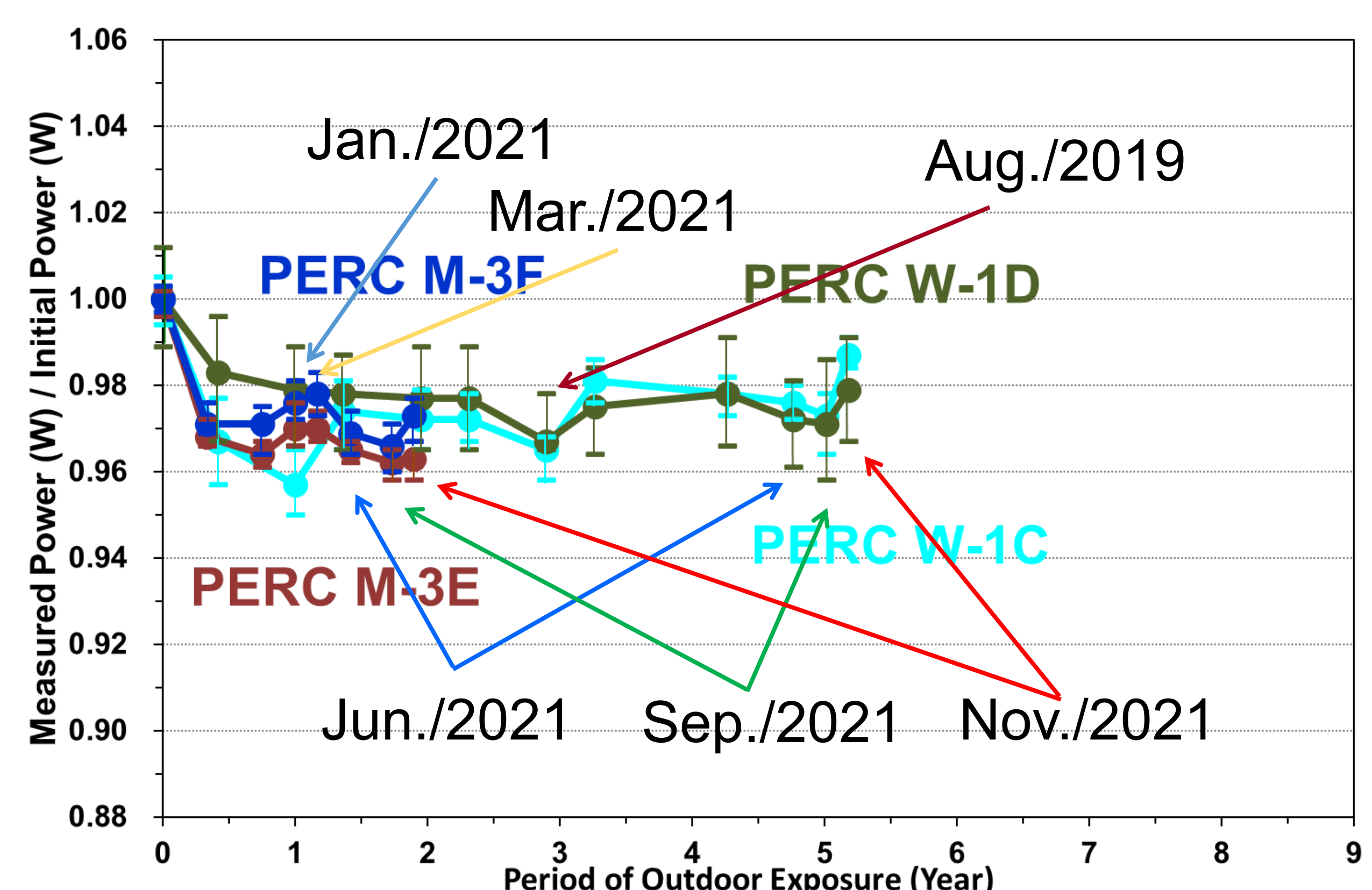


図2 PERCの屋内測定結果の年次推移

PERCモジュール (2021年は、屋内測定を5回実施)

- M-3E・3F : 6月、9月の測定結果は、1月、3月の結果より低下。
- W-1C・1D : 6月、9月の測定結果は、2020年11月の結果より低下。
- 4種類のPERCすべてで、11月の測定結果は、9月の結果より回復。

(図1、2内に示された年月は、屋内測定を実施した時期を示す)

考察・まとめ

SHJモジュール

- W-2A, W-1A, M-3Cの1年間の屋内測定結果から、劣化率が類似する傾向を示唆。
- 今後、M-1Dの動向に注視していく。

PERCモジュール

- モジュール温度が50°C以上になるときにLight- and elevated temperature-induced degradation; LETID)が生じる[9,10]ことが報告されていることを鑑みると、夏の測定時ではLETIDが生じている可能性を示唆。
- 2019年8月のW-1Cおよび1Dの屋内測定結果においても、低下を確認。
- 2021年のW-1Cのモジュール温度は、概ね4月~10月頃までの間で50°C以上を観測。
- 今後、屋内測定の頻度を維持し、測定を継続していく。

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] F. Kersten et al., Solar Energy Materials & Solar Cells 142, 83 (2015).
- [10] E. Fokuhl et al., EPJ Photovoltaics 12, 9 (2021).

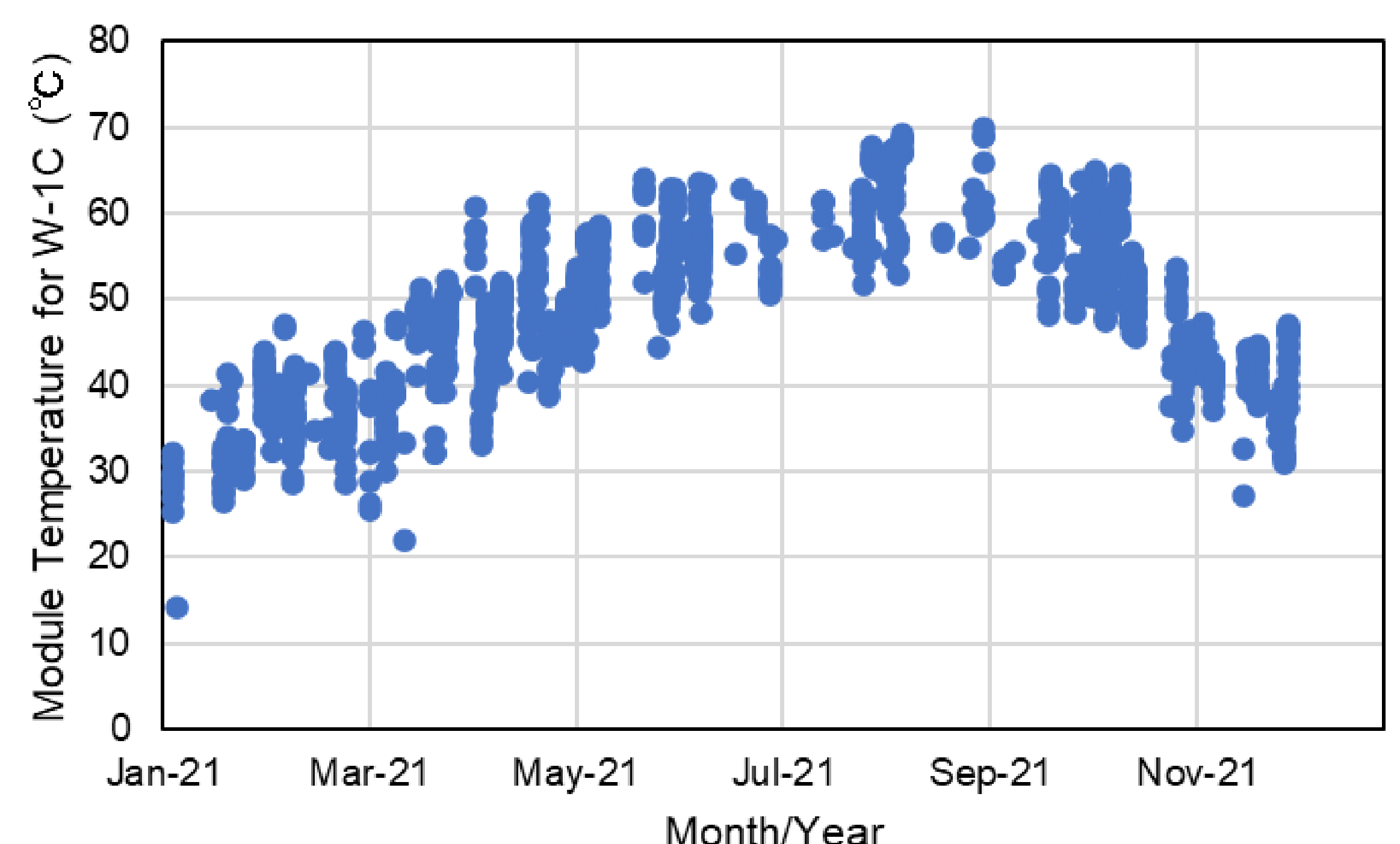


図3 2021年のPERC(W-1C)モジュール温度の変化
(日射量が800~1000W/m²のデータを抽出)

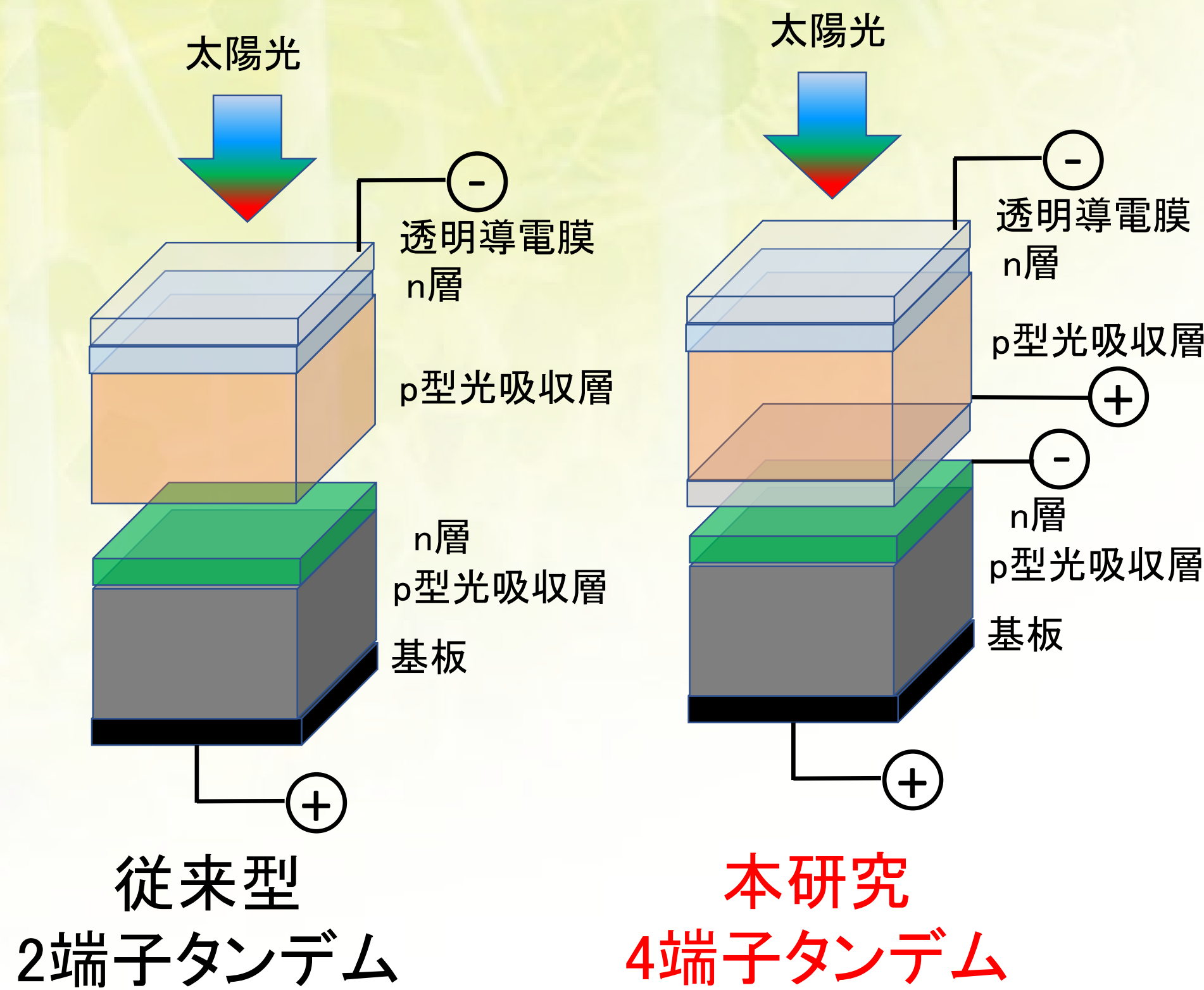
謝辞

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。

タンデム太陽電池用トップセルの開発

永井 武彦、鯉田 崇、石塚 尚吾、反保 衆志
産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門

研究の目的

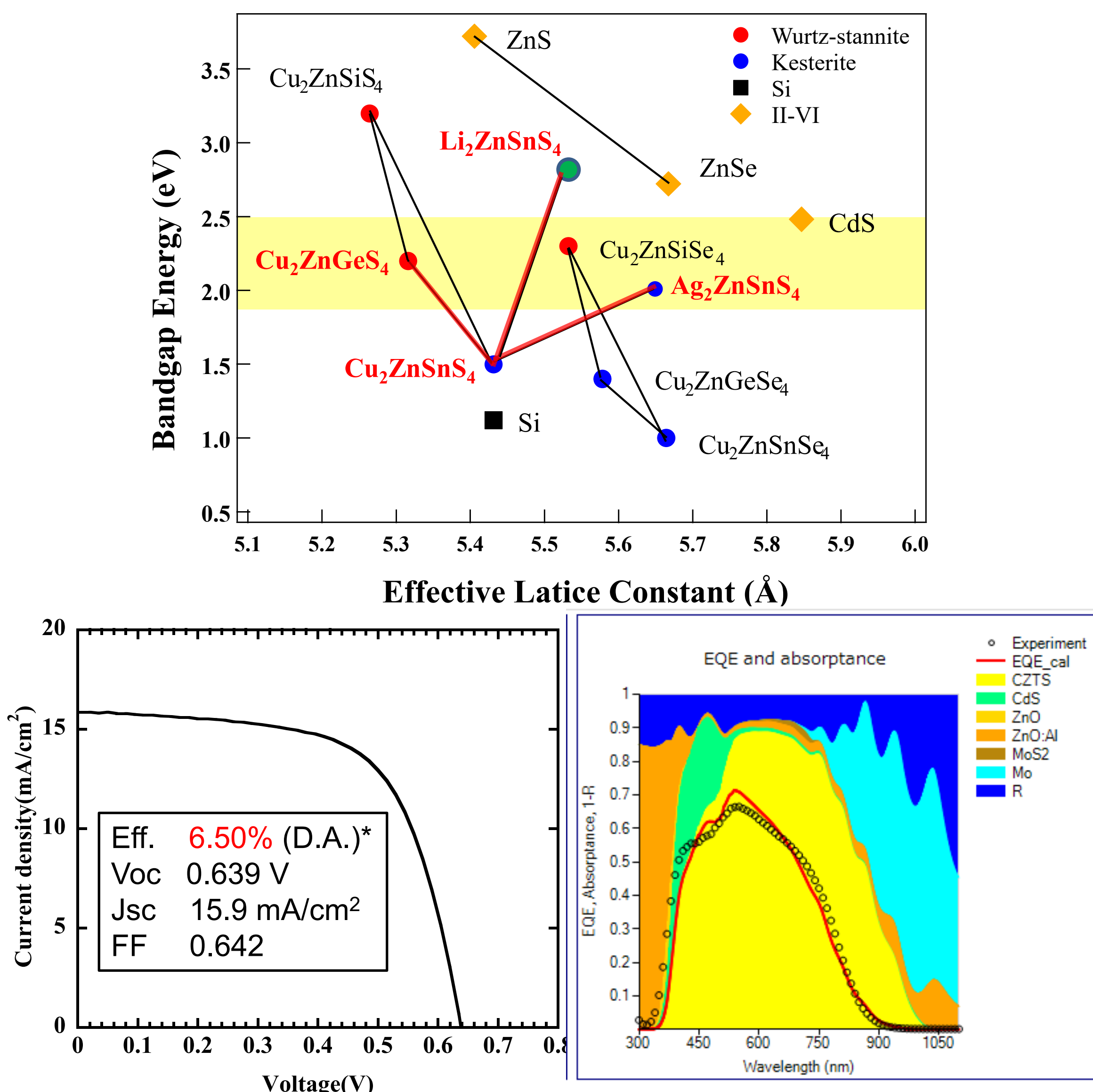


本研究では、「長期信頼性を有する安価な高性能PVを」というテラワットPV時代のニーズに答え、テラワットPV社会を牽引する「エネルギー新時代のコマ」となりうる高性能な太陽電池の開発を目指す。これらの高い要求に応える太陽電池には、長期信頼性・高効率・低コスト・低環境負荷(資源問題)を同時に実現することが求められる。本研究開発において実施する内容は、従来型の2端子型とは異なる4端子型の太陽電池用のトップセルを高効率化させる技術の研究開発である。

上記目的達成のため、今年度、トップセル材料となり得る材料 $(\text{Ba}_x\text{Sn}_{1-x})\text{S}$ (BTS)および $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)を光吸収層とした太陽電池を作製し、その可能性について検討を行った。また、太陽電池の高性能化を目的に、光吸収層(CZTSおよびBTS)に適合する広帯域透明電極の開発と、表面およびヘテロ接合界面の電子構造を調べたので報告する。

光吸収層の探索・デバイス化

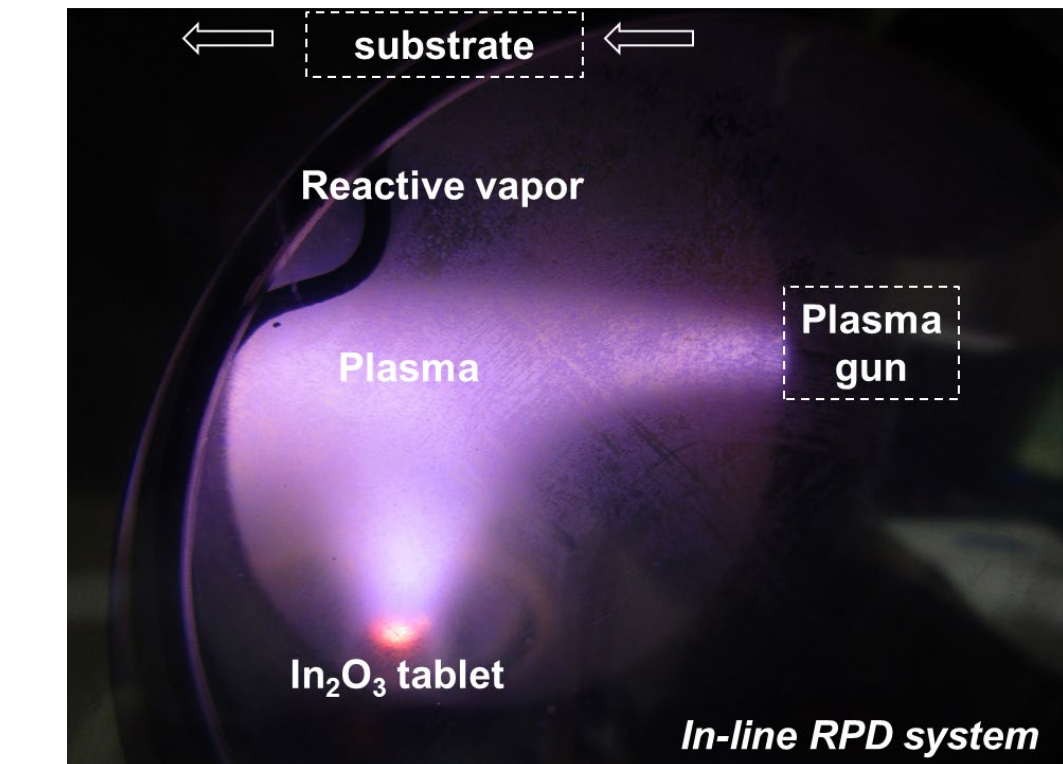
CZTSをベースとしてワイドギャップ化を検討



CZTSの高効率化のためには V_{oc} deficitの改善が鍵となる事を明らかにした。

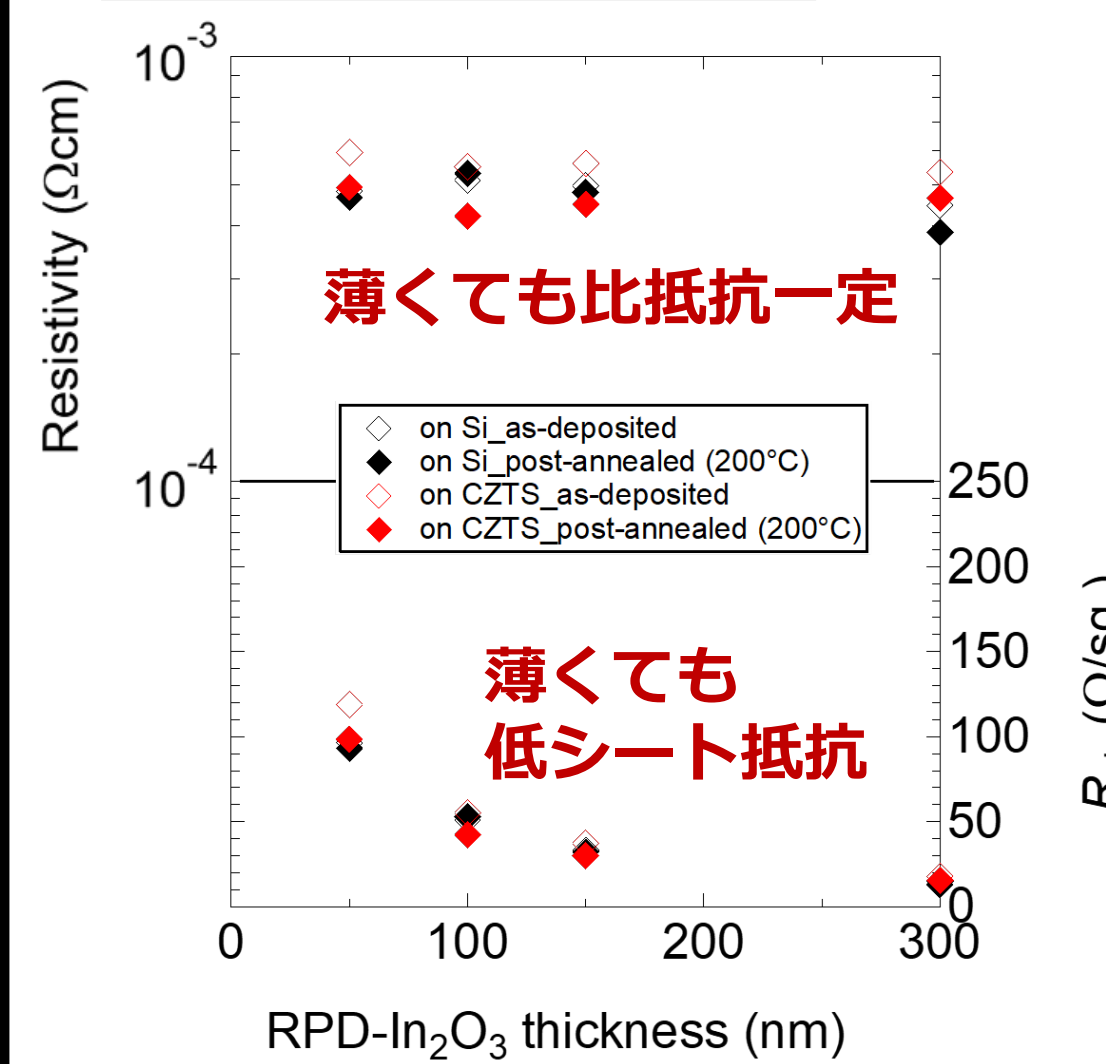
広帯域透明電極開発

RPD法 (Reactive Plasma Deposition)

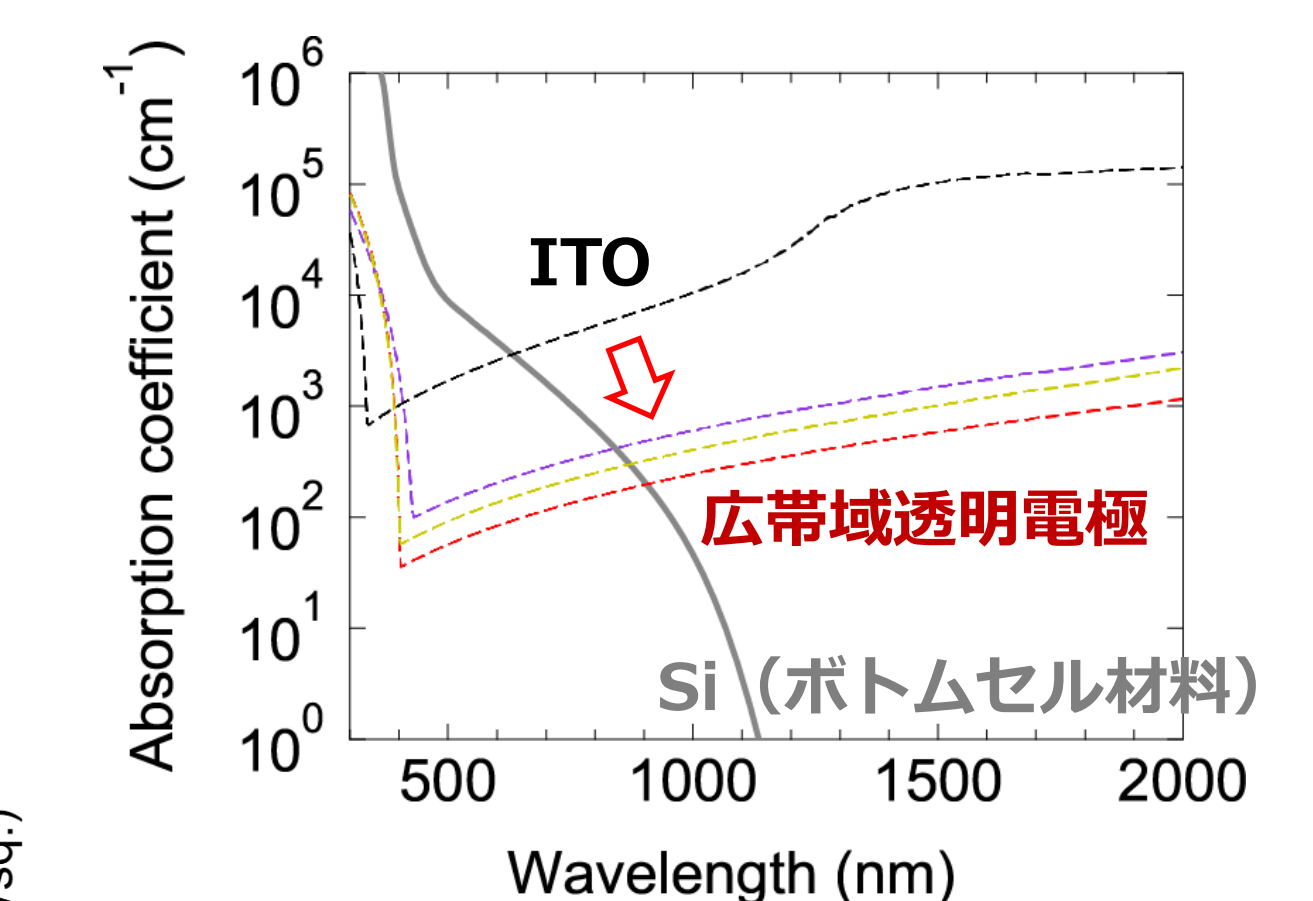
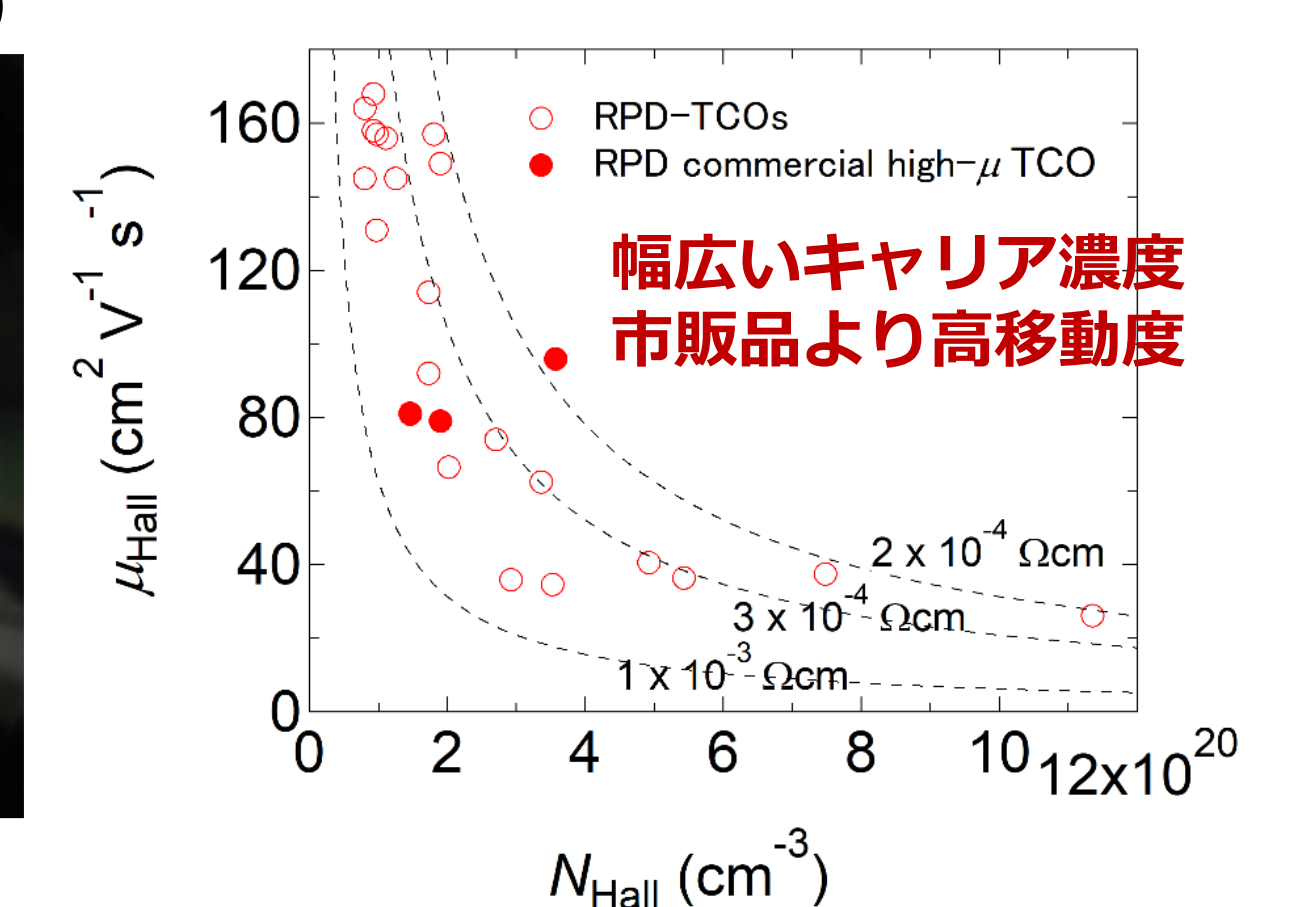


重要な制御パラメーター
金属添加不純物の種類・添加量
水蒸気分圧・酸素分圧

CZTS上の窓電極特性



$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me}_x\text{H}$ (Me:Ce,W,Sn) 薄膜^[1,2]



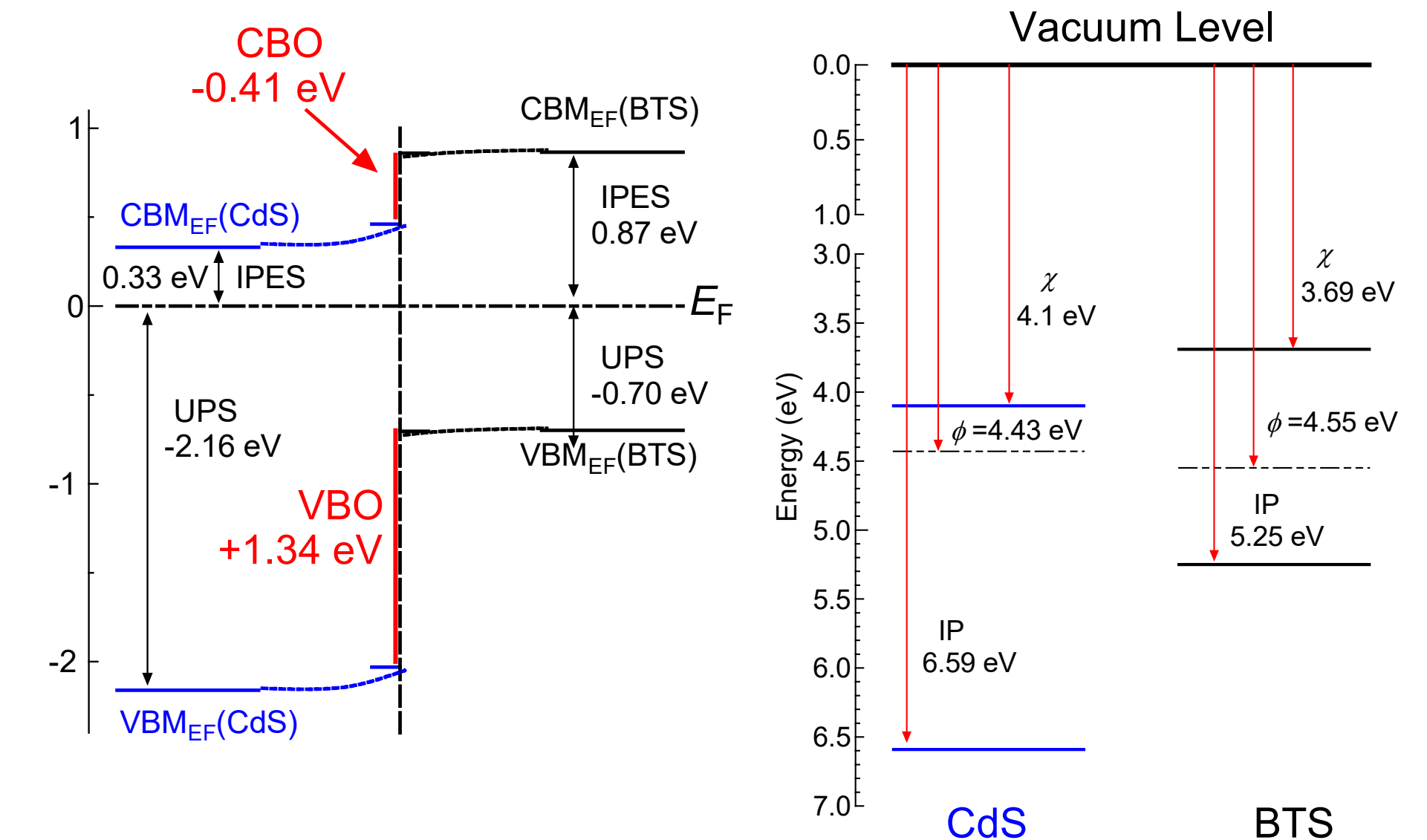
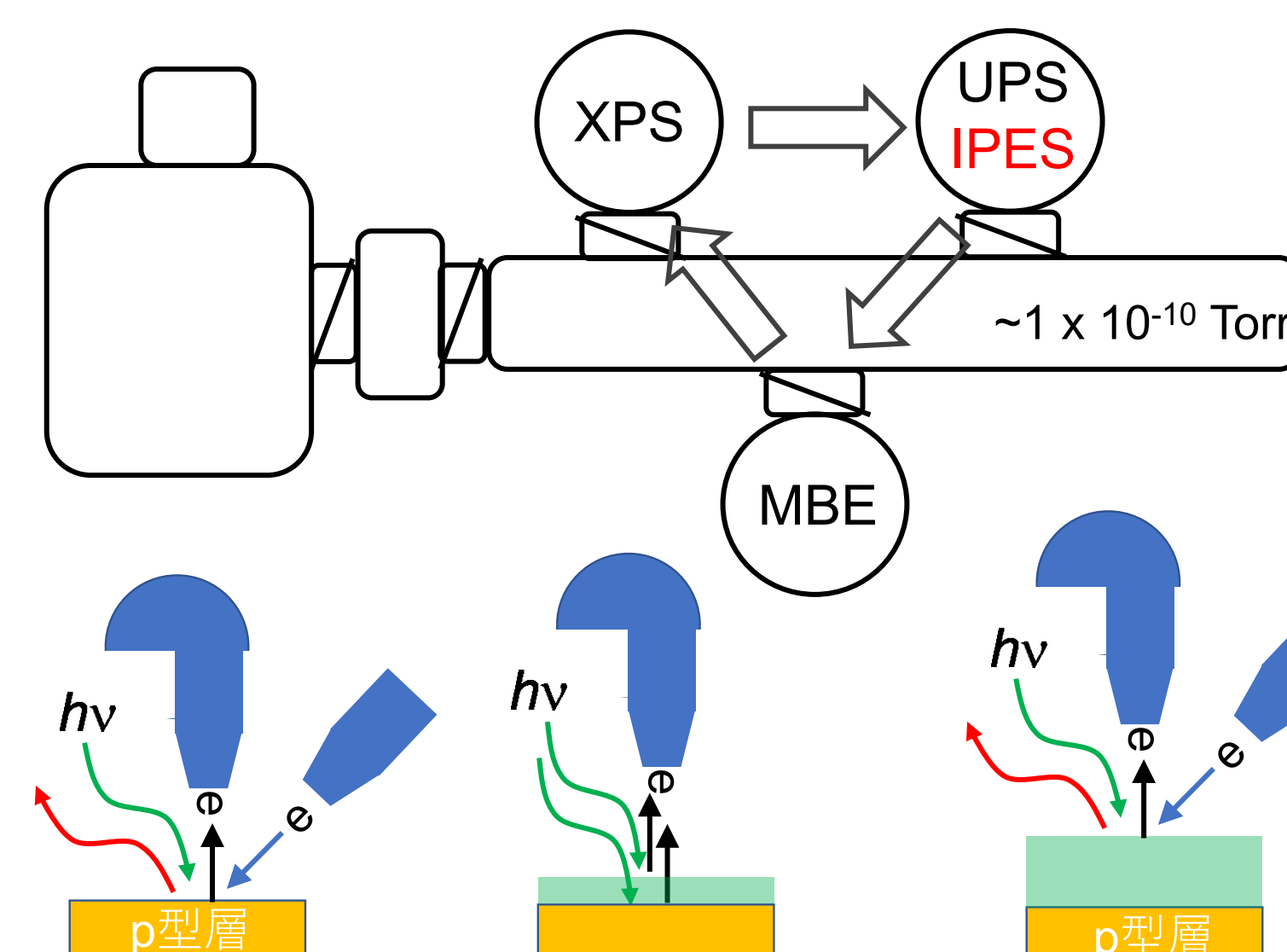
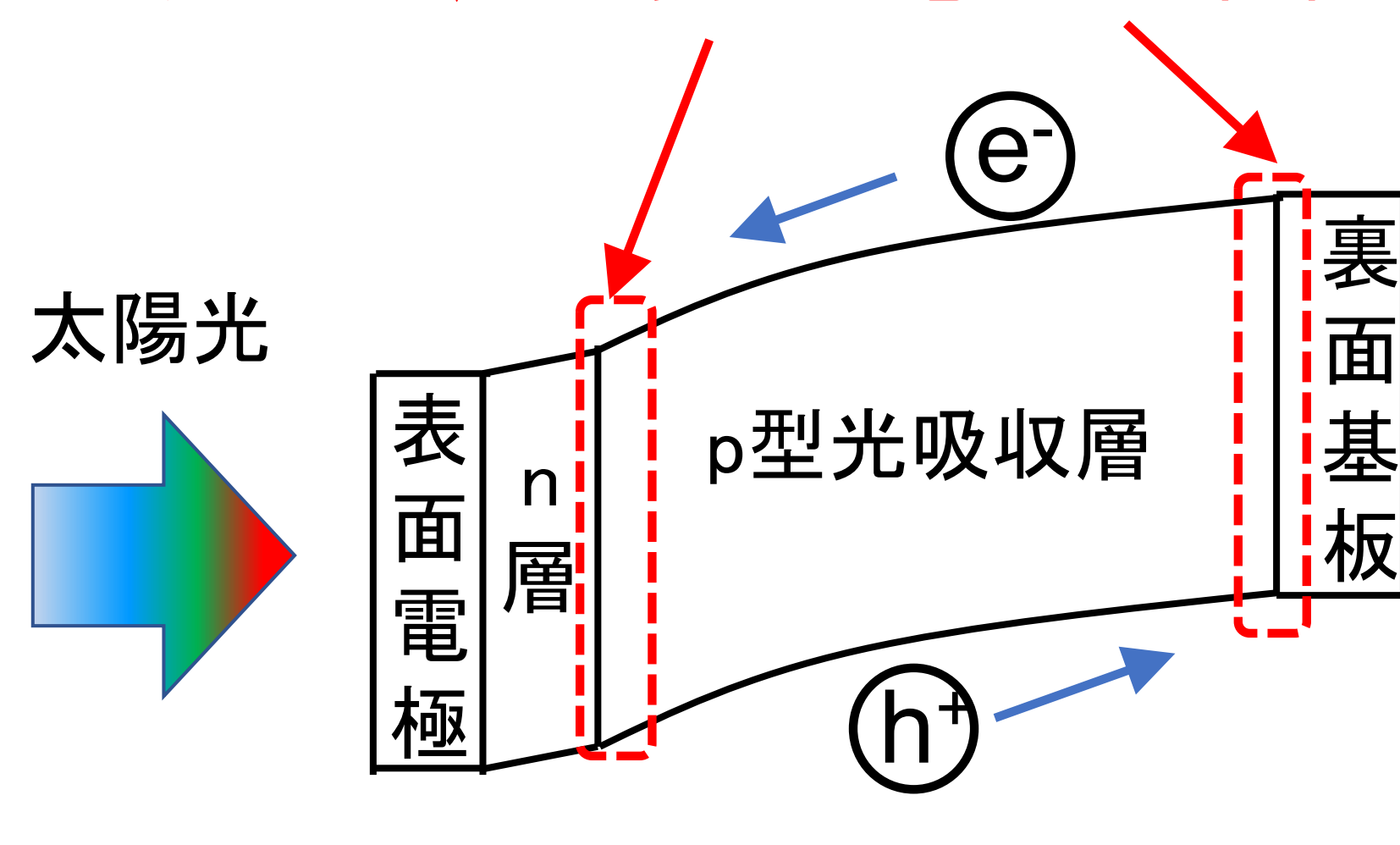
[1] T. Koida, Y. Ueno, and H. Shibata, Phys. Status Solidi A 215, 1700506 (2018).
[2] T. Koida and Y. Ueno, Phys. Status Solidi A 218, 2000487 (2021).

各種光吸収層上にイオン衝撃の少ないRPD法を用いて、広帯域透明電極を低温プロセスで形成する事に成功した。

BTS表面および界面電子状態・物性評価による太陽電池の高効率化

真空一貫複合装置を用いた光電子分光法とn型層堆積により、表面・界面の電子状態を精密評価

研究対象: 表面・界面の電子状態評価



BTSの高効率化のためには電子親和力が3.7 eVより小さなn型層の開発が必要となる事を明らかにした。

※ 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) エネルギー・環境新技術先導研究プログラム「4端子タンデム太陽電池用トップセルの開発」において実施した。

CIGS太陽電池におけるパッシベーション構造導入の効果検討

上川 由紀子¹, ナルドン マルコ², 柴田 肇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ボーリング・グリーン州立大学

研究の目的

CIGS系材料では界面パッシベーションの研究は途上である。CIGS系太陽電池では結晶品質が高い場合には、裏面パッシベーションが更なる変換効率向上に有効であると期待される[1-2]。本研究では、CIGS太陽電池の界面パッシベーション構造、手法について検討している。今回、特性改善が報告されている構造 (ALD- AlO_x/Mo)[3-5]にてパッシベーション効果について検討した。

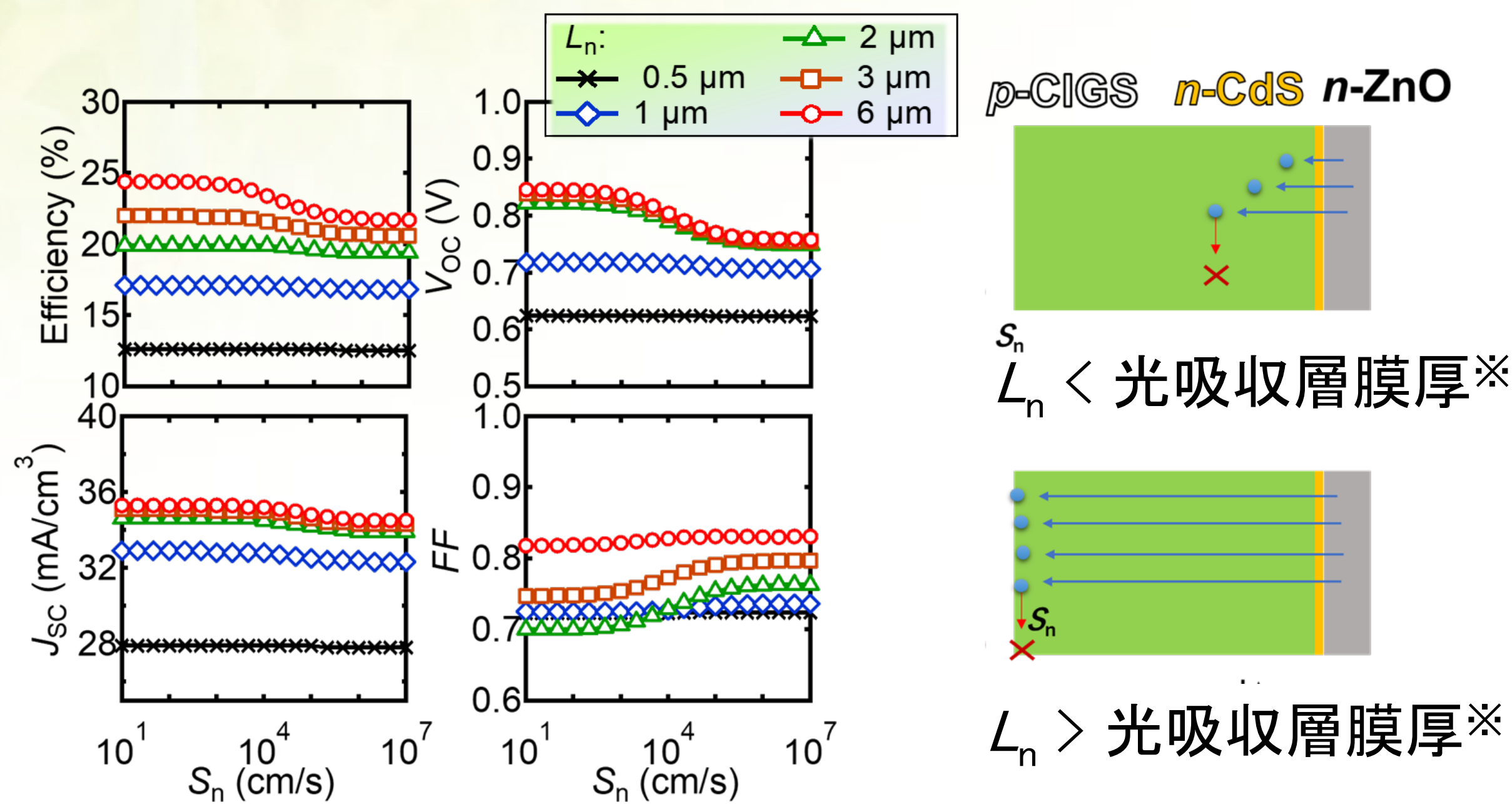


図1 (左) 太陽電池特性の裏面再結合速度 (S_n) 依存性のデバイスシミュレーション結果 [1-2]、(右) 少数キャリア拡散長 (L_n) と S_n の影響の関係 [1-2]

実験

裏面再結合が大きく影響する条件 ($L_n >$ 光吸収層膜厚 \times) を満たす薄膜構造にて実験を行った。太陽電池として駆動させる場合には、下図に示すフォトリソグラフィプロセスによって、コンタクトホールを形成した。コンタクトホールのサイズは数百ナノメートルとし、ホールの間隔は0.8もしくは2 μm とした。 Al_2O_3 成膜は原子層堆積 (ALD) 法を用いた。Al源には $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ (TMA)を用いた。O源には①酸素プラズマ(ICP) もしくは② H_2O を用いた。それぞれplasma ALDおよび thermal ALDと表記する。成膜温度は200 $^\circ\text{C}$ とした。

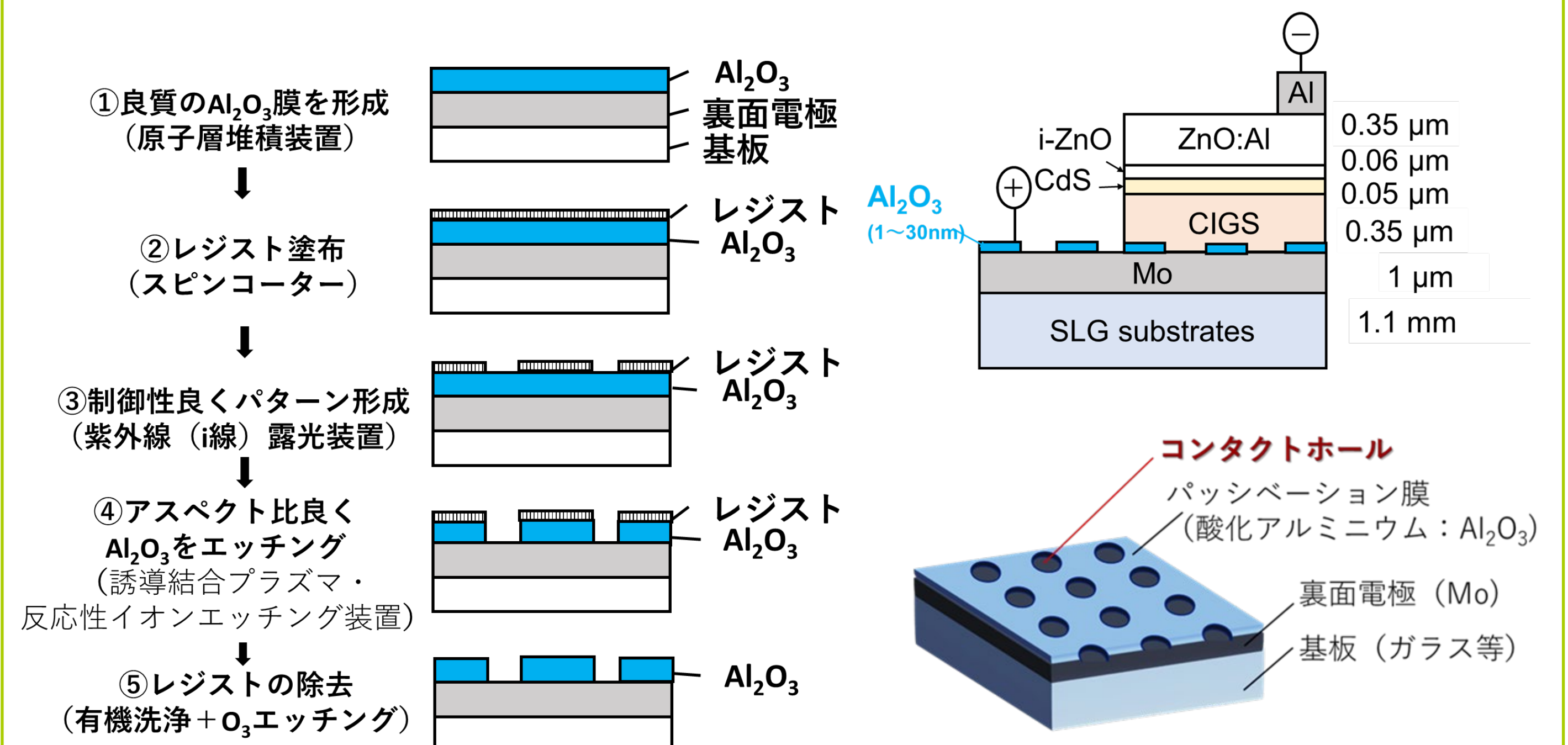


図2 フォトリソグラフィプロセス

図3 (上) 試料構造、(下) パッシベーション構造

結果と考察

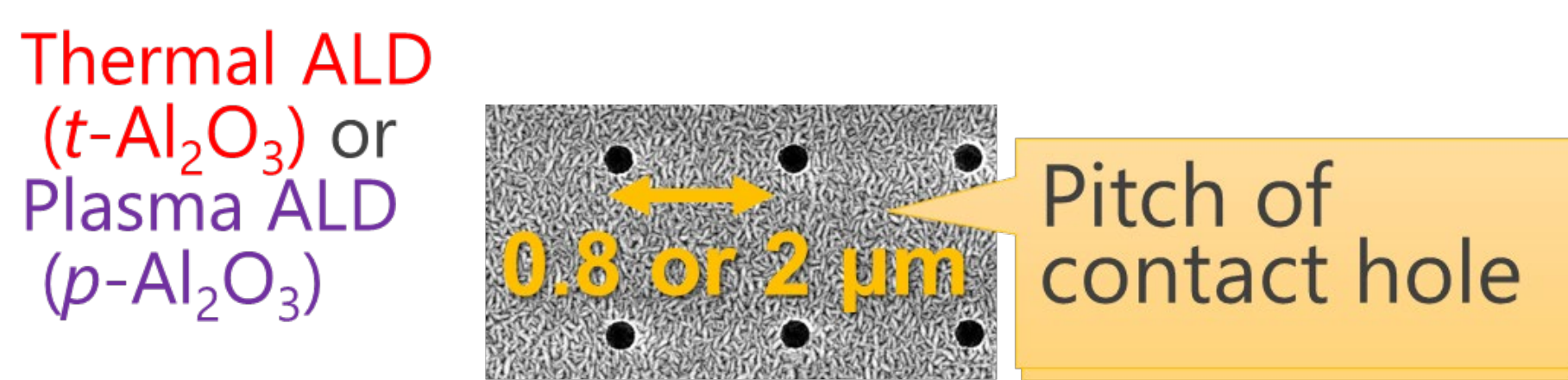
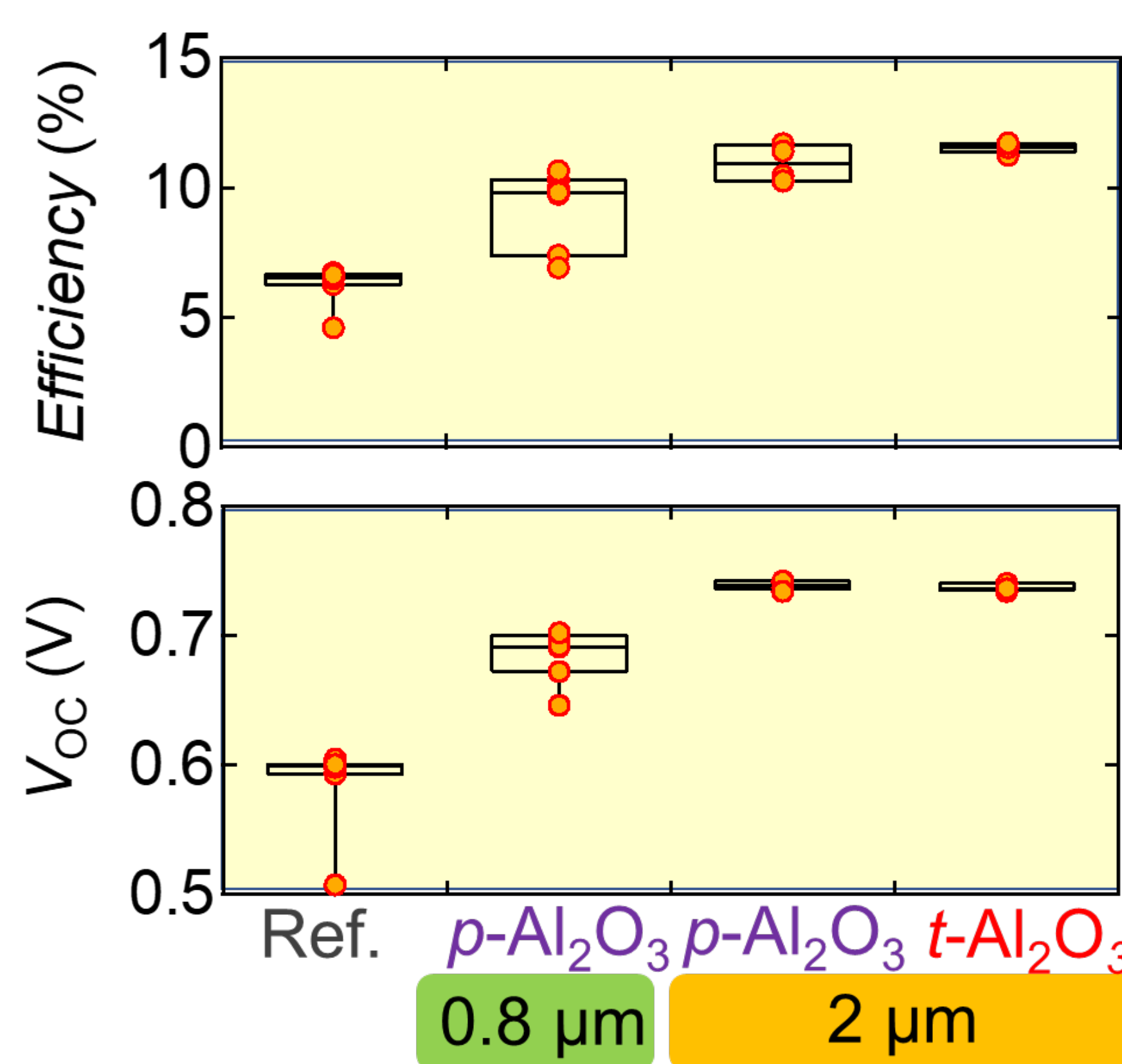


図4 参照試料(Ref.)および $p\text{-Al}_2\text{O}_3$ および $t\text{-Al}_2\text{O}_3$ を導入したCIGS太陽電池の変換効率および開放電圧 (V_{oc})

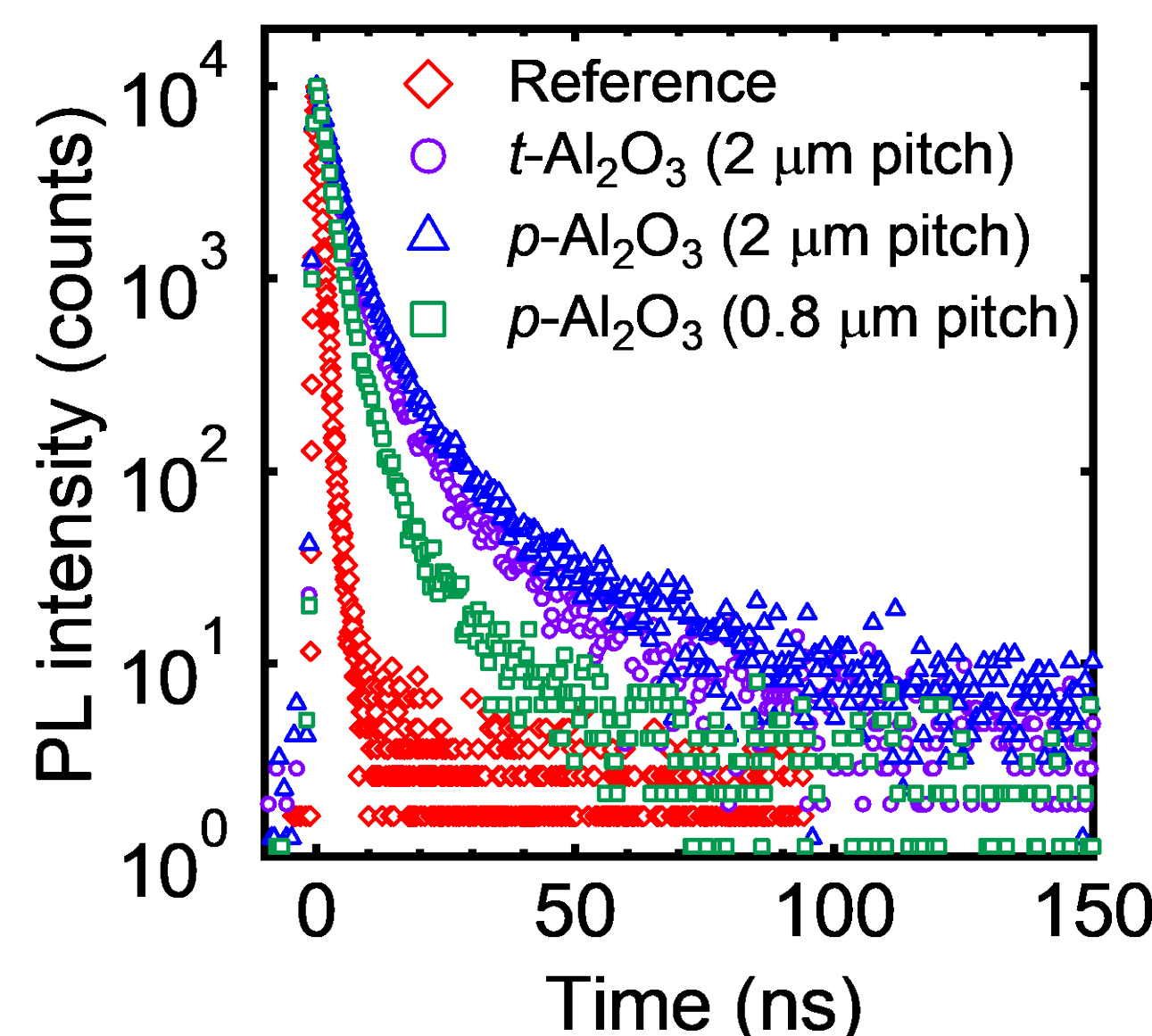


図5 時間分解PL評価結果

◆ Without PDT
● With NaF&KF PDT

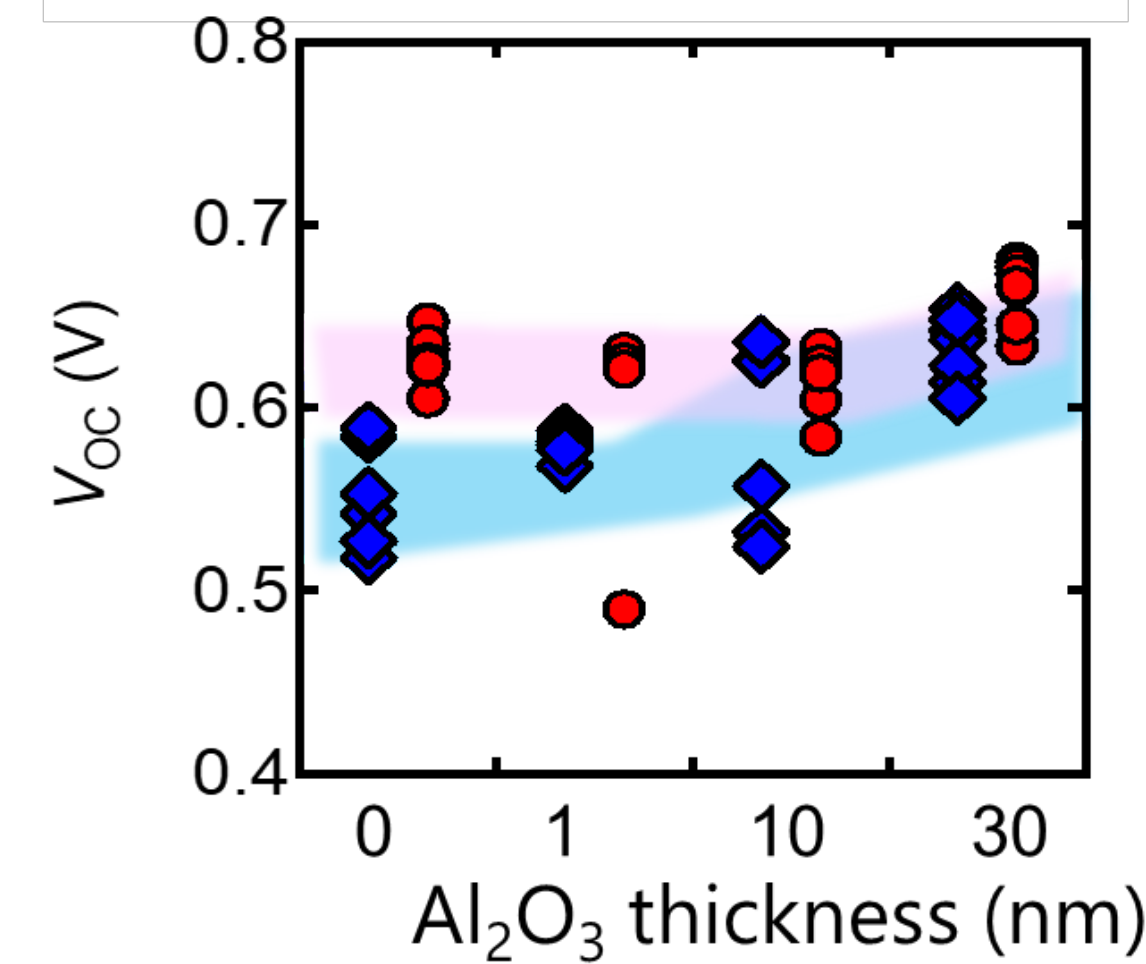


図6 V_{oc} の Al_2O_3 膜厚依存性

Al_2O_3 の面積が増加するのに伴い、 V_{oc} の向上が確認された。この際、時間分解PL法によって評価される少数キャリア寿命も増加しており、CIGS/ Al_2O_3 界面の再結合速度はCIGS/Moの再結合速度に比べて小さいことが分かる。

また、 Al_2O_3 膜を導入した際に副次効果として、Na濃度の増加も確認された。裏面電極のMo表面が酸化されることによりモリブデン酸ナトリウムのような形で、Naを含有し易くなったことなどが考えられる。

アルカリ金属の表面添加処理 (PDT) をした場合には、Na、K共に濃度の増加が見られた。この条件において Al_2O_3 無しでも0.6 Vを超える高い V_{oc} が得られた。30 nmの Al_2O_3 膜を導入した際にはパッシベーション効果により更に V_{oc} が増加した。

[Na] and [K] in CIGS (EPMA@5KV)

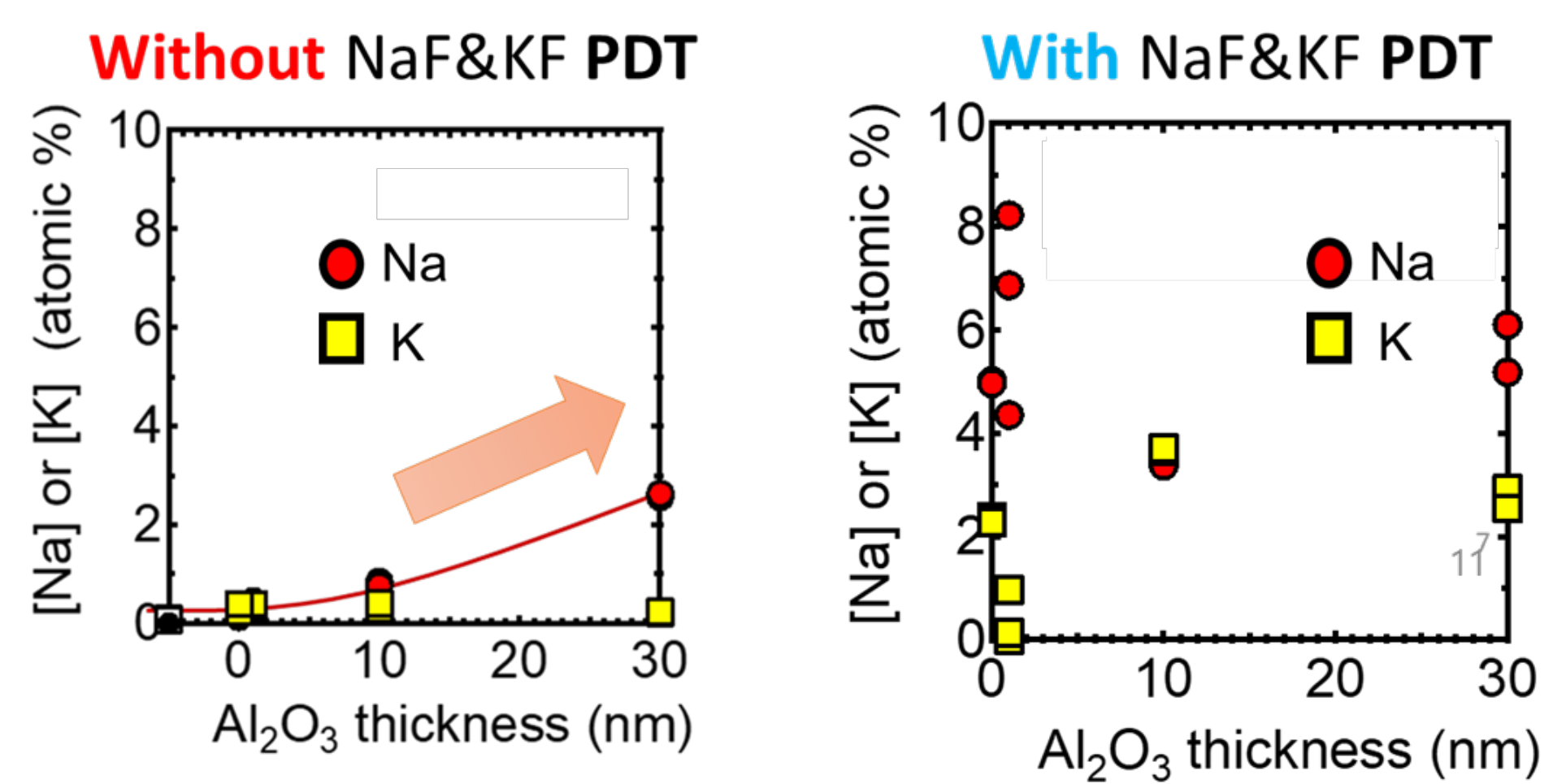


図7 アルカリ金属濃度の Al_2O_3 膜厚依存性

結論

Al_2O_3 の面積が増加するのに伴い少数キャリア寿命が増加することが確認された。CIGS/ Al_2O_3 界面の再結合速度はCIGS/Moの再結合速度に比べて小さいことが確認された。また、アルカリ金属の拡散量が Al_2O_3 の導入によって増加した。アルカリ金属の表面添加処理 (PDT) をした場合には、Na、K共に濃度の増加が見られた。この条件において Al_2O_3 無しでも0.6 Vを超える高い V_{oc} が得られた。パッシベーション構造導入の効果には、副次的に作用するNaの添加効果も重なっていることが考えられる。

参考文献

- [1] 上川由紀子他 成果報告会ポスター P32 (2019).
- [2] Y. Kamikawa et al., "Assessing the impact of back-contact recombination on CIGS solar cells with improved crystal quality", Proc. IEEE PVSC (2019).
- [3] C. J. Frosch et al., J. Electrochemical Society, **104** (1957) 547.
- [4] B. Vermang et al., IEEE J. Photovoltaics, **4** (2014) 48.
- [5] S. Choi et al., Thin Solid Films **665** (2018) 91.

※厳密にはquasi-neutral region (QNR)の厚み

【謝辞】本研究は、JSPS科研費 (JP20K0534) の助成を受けたものです。また、太陽電池特性の評価に関する成果の一部は、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) の委託業務の結果得られたものです。ALD成膜およびナノプロセスの一部は産業技術総合研究所 ナノプロセッシング施設にて行ったものです。ここに記して感謝の意を表します。

CIGS太陽電池のERE(外部発光量子効率)と開放電圧の関係

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、山口真史²

1 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門、2 豊田工業大学

研究の目的

外部発光量子効率(ERE)は、次式で定義される。

$$ERE = \frac{\text{単位時間あたりの発光光子数 (photons/s)}}{\text{単位時間あたりに注入された電子数 (electrons/s)}} \quad (1)$$

V_{OC} の放射限界値($V_{OC,rad}$)とEREの間には、次式の関係が成立する。

$$V_{OC,rad} = V_{OC} - \left(\frac{k_B T}{q}\right) \ln ERE \quad (2)$$

但しここで(2)式の右辺のEREは、デバイスへの注入電流が I_{SC} であるときの値である。

$V_{OC,rad}$ の値は V_{OC} の理論限界値であり、デバイス開発の重要な指針の一つである。

本研究の目的は、産総研で作製されたCIGS太陽電池の V_{OC} とEREの値を測定し、 $V_{OC,rad}$ の値を評価することである。

実験

EREの測定には、ATTO社製のERE測定装置 WSL-2000 SCREMSを用いた。

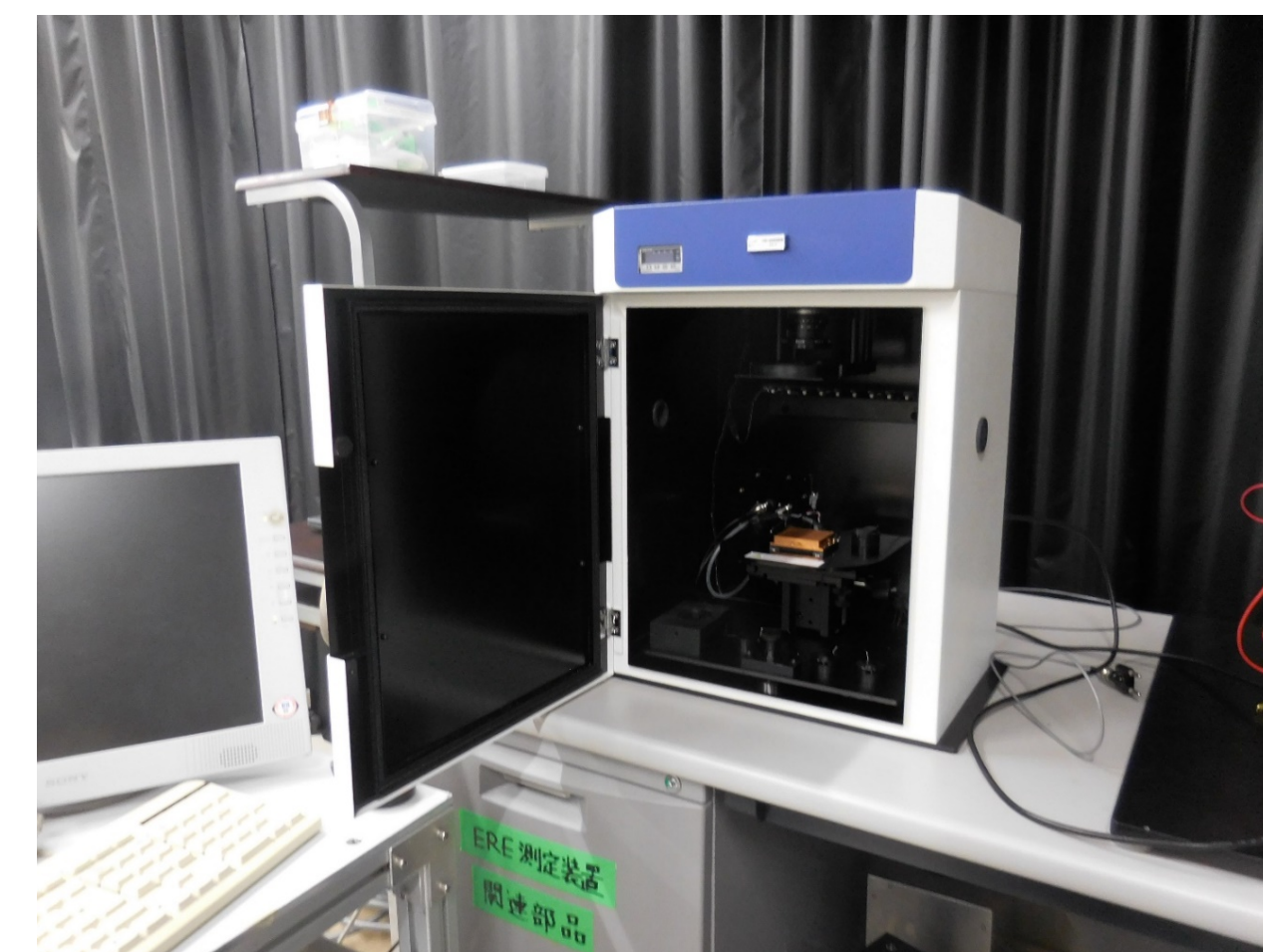


図1 WSL-2000 SCREMSの全体像

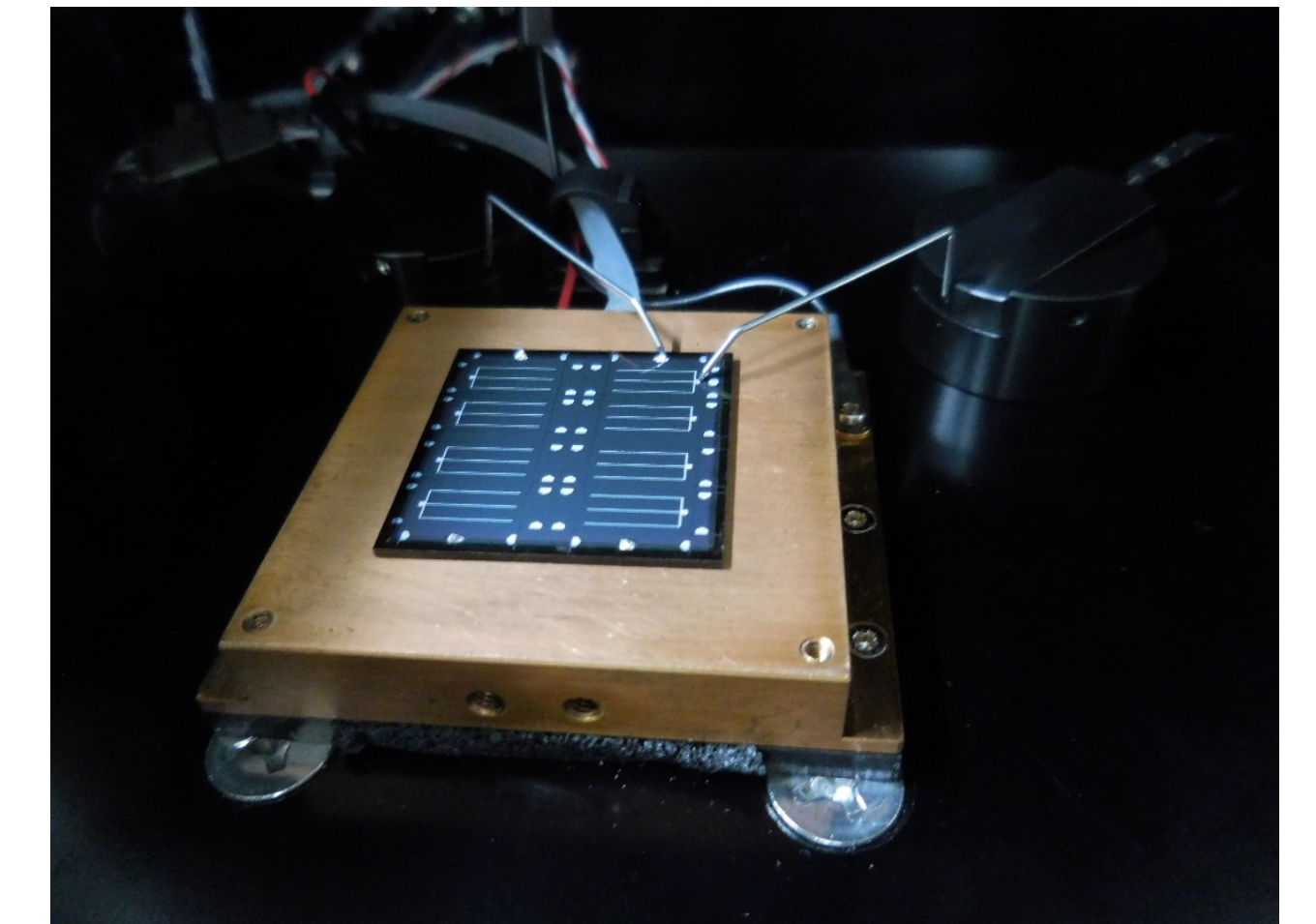


図2 試料付近の拡大図

結果と考察1

実際にEREを測定する方法は、以下ようになる。

- ①セルに電流 I を流す。
- ②セルのエレクトロルミネッセンス(EL)画像を、適当な露光時間で撮影する。
- ③得られたEL画像から、セル全体の発光強度を算出する。
- ④得られた発光強度と露光時間から、単位時間あたりの発光光子数 N を算出する。
- ⑤EREの値を、 $ERE = N/qI$ により算出する(q は電気素量である)。

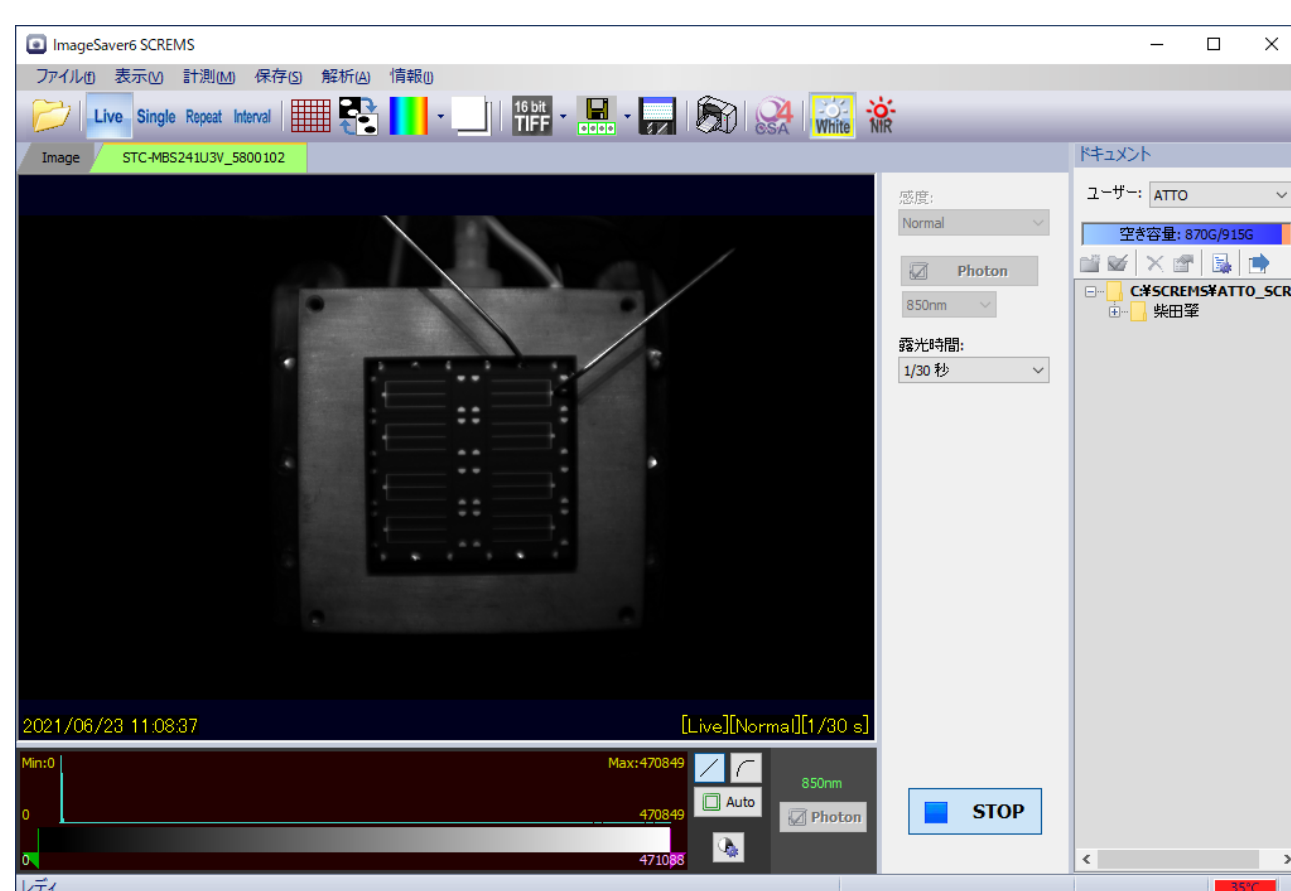


図3 装置に内蔵されている白色光源で照明されたときの画像

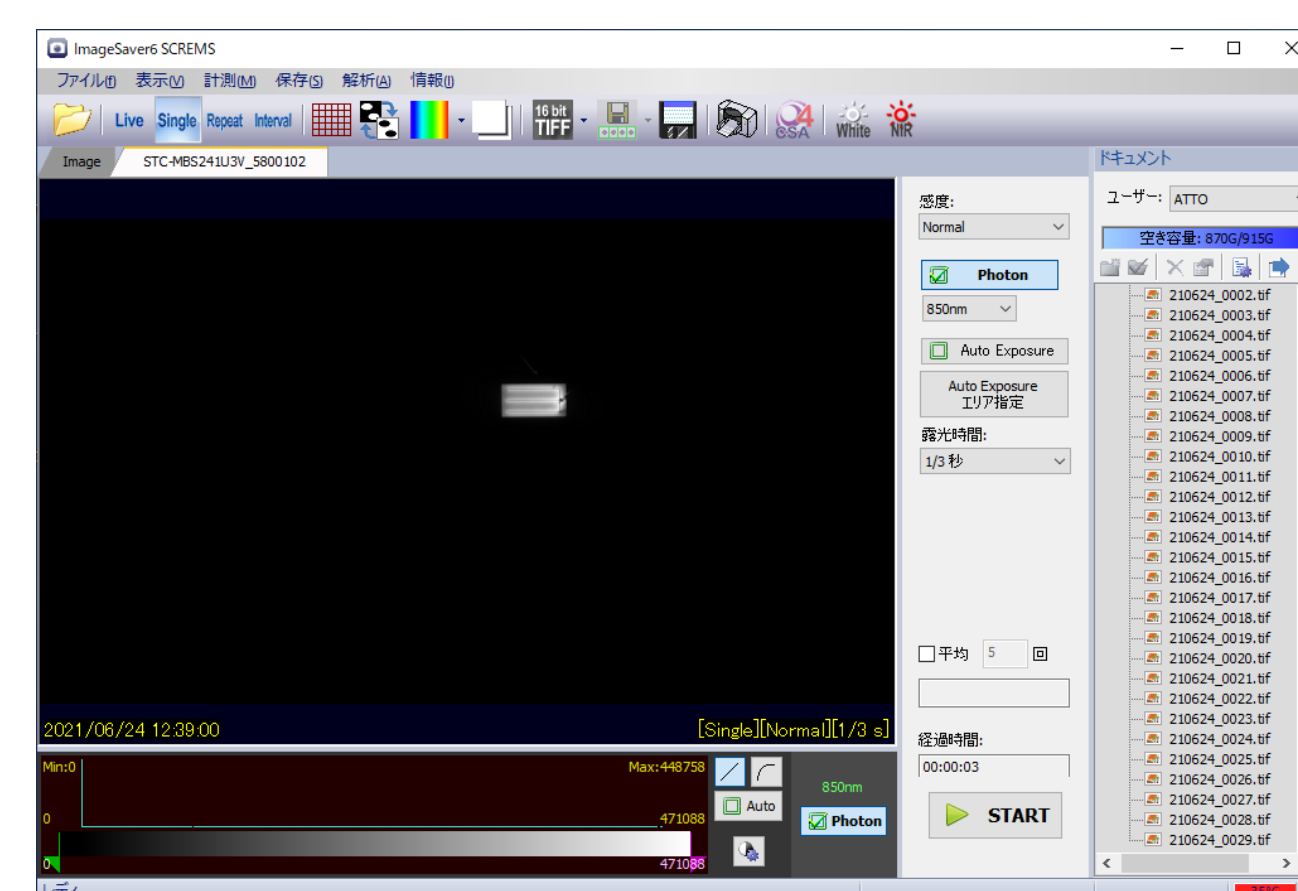


図4 撮影されたEL画像の例 (I = 40 mA、露光時間 = 1/3 sec)

図2に示された8個のセルについて、EREの値の I 依存性を求めた結果を図5に示す。図5を見ると、 I の値が増大するに従ってEREの値も単調に増大することが分かる。

後述する表1に示すように、これらのセルの I_{SC} は約18 mAであるため、図5の結果から $I = 20$ mAのEREの値を抜粋した結果を図6に示す。

図6を見ると、これらのセルのEREの値は、およそ $ERE \approx 0.4\%$ であることが分かる。

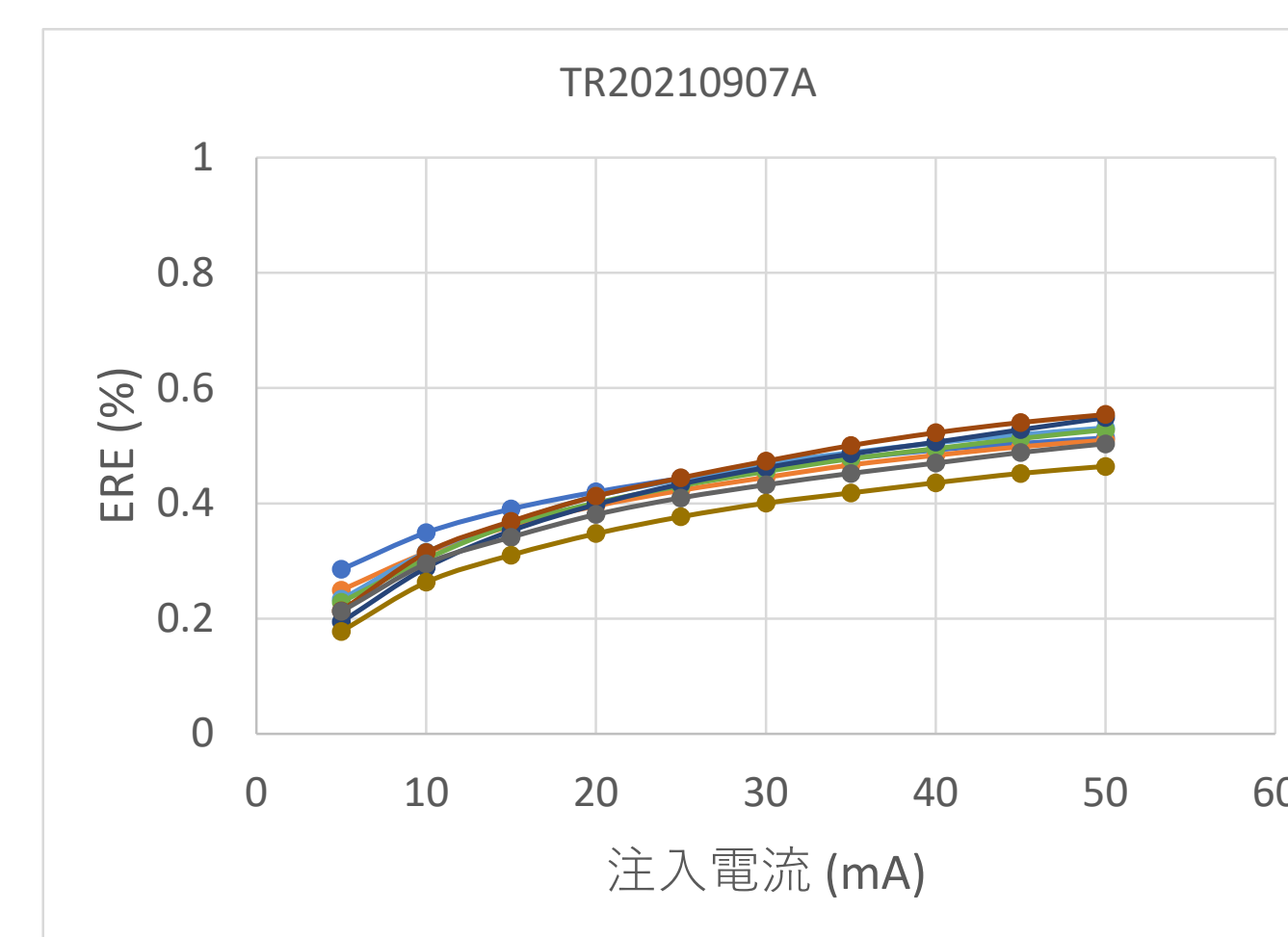


図5 EREの値の I 依存性

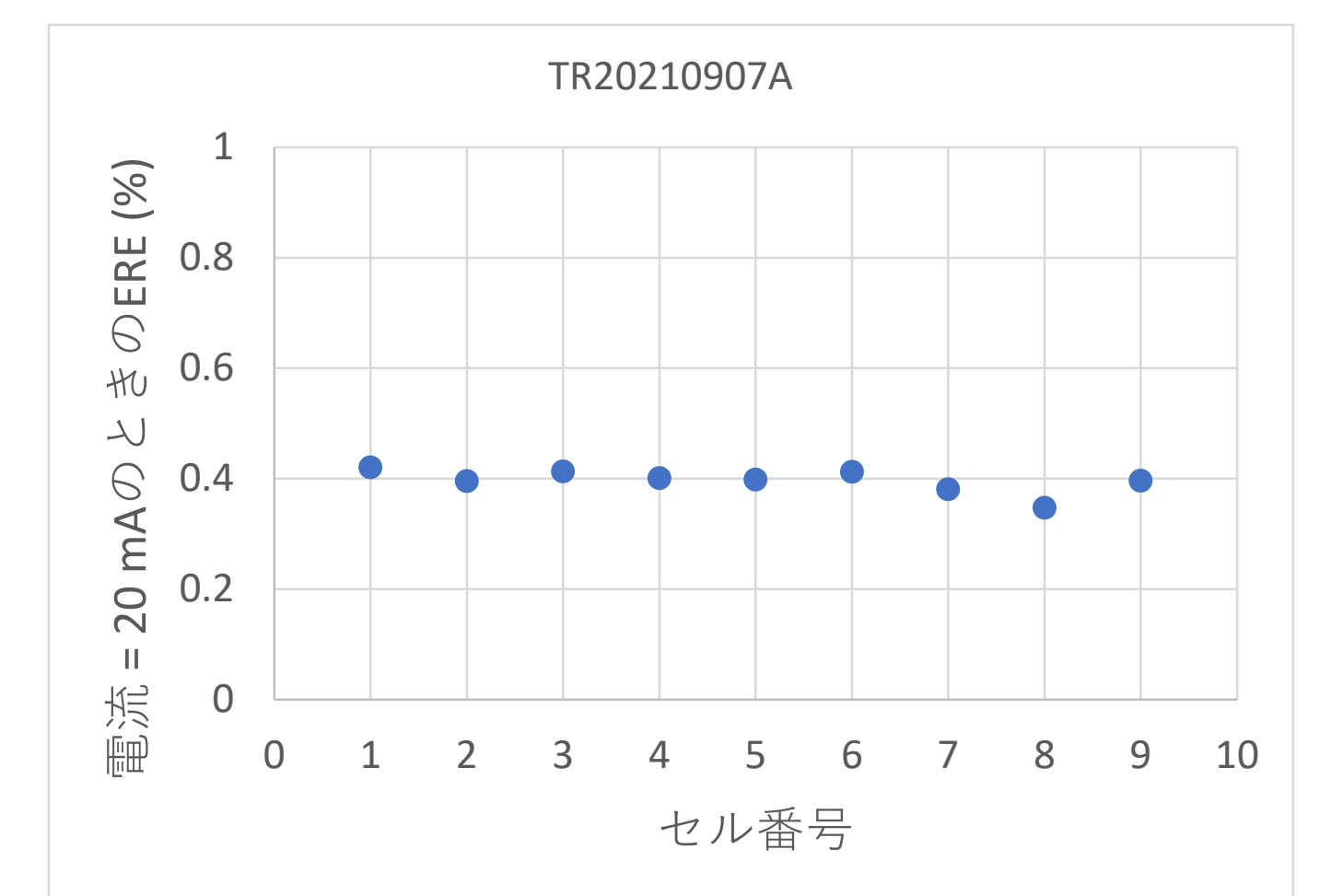


図6 $I = 20$ mAのEREの値

結果と考察2

図2に示された8個のセルの $J-V$ 特性(平均値)を、図7に示す。

また得られた結果からデバイス・パラメータの値を求めた結果を、表1に示す。

表1 デバイス・パラメータ

パラメータ	変換効率 (%)	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF
数値	19.5	0.74	17.7	33.9	0.77

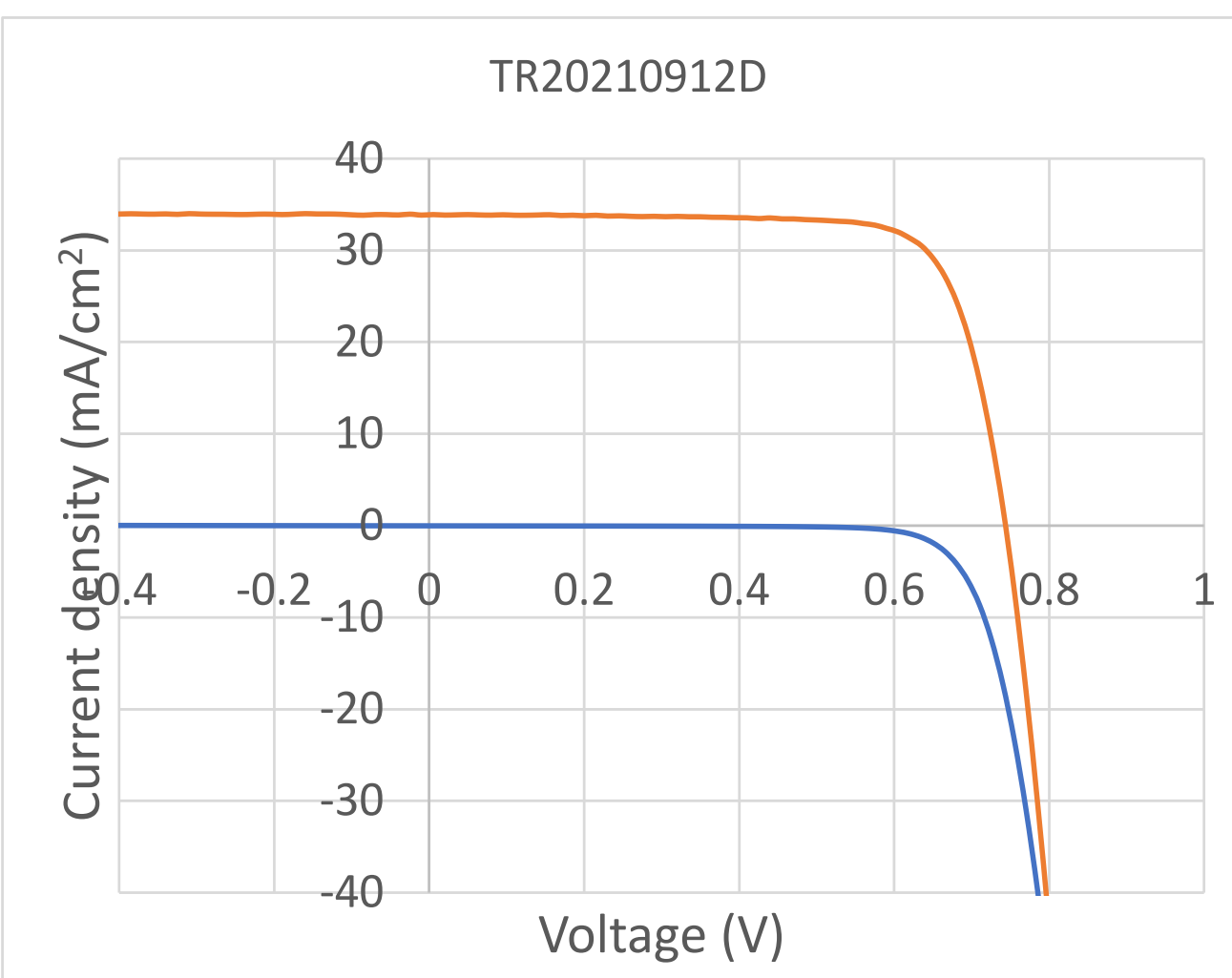


図7 セルの $J-V$ 特性(平均値)

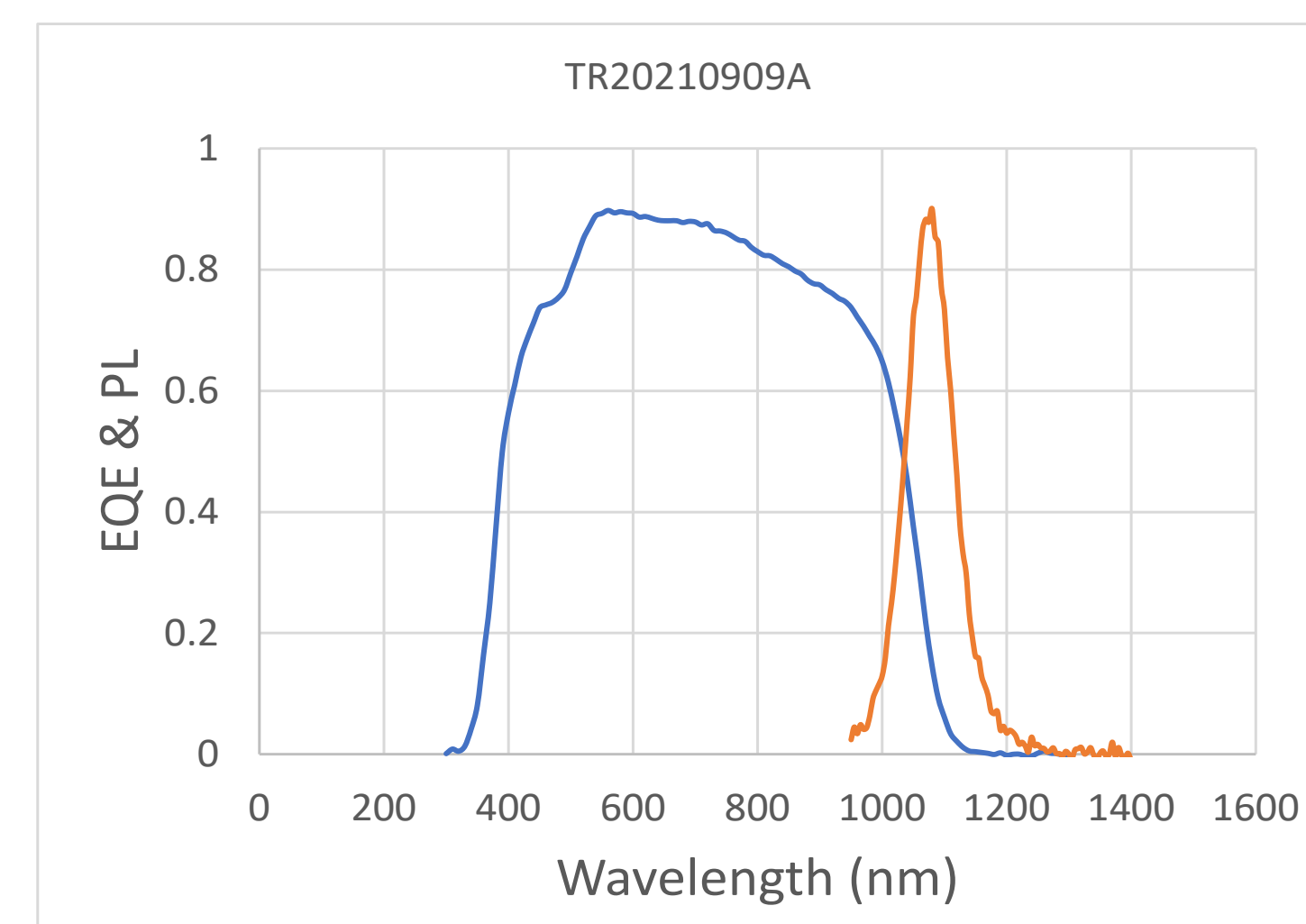


図8 セルのEQEスペクトル(平均値)とPLスペクトル

図2に示された8個のセルのEQEスペクトル(平均値)を、PLスペクトルと一緒に図8に示す。

PL発光の発光メカニズムは、バンド端発光であると考えられる。従って本研究で測定したEL発光の発光メカニズムも、バンド端発光であると考えられる。

また $E_g = 1.16$ eV であることが、EQEスペクトルから分かる。

図6で得られた $ERE = 0.4\%$ という値と表1の $V_{OC} = 0.74$ V という値を(2)式に代入して $V_{OC,rad}$ の値を求めると、 $V_{OC,rad} \approx 0.89$ V という値を得る。

結論

図9に示す結果を、最終的に得た。従って、このセルの V_{OC} の本質的な損失量は、 $V_{OC,nrad} \approx 0.15$ V であることが分かる。

なお図5において I の値が増大するに従ってEREの値も単調に増大する理由としては、注入電流が増大するに従って非輻射性再結合が抑制されることが考えられる。

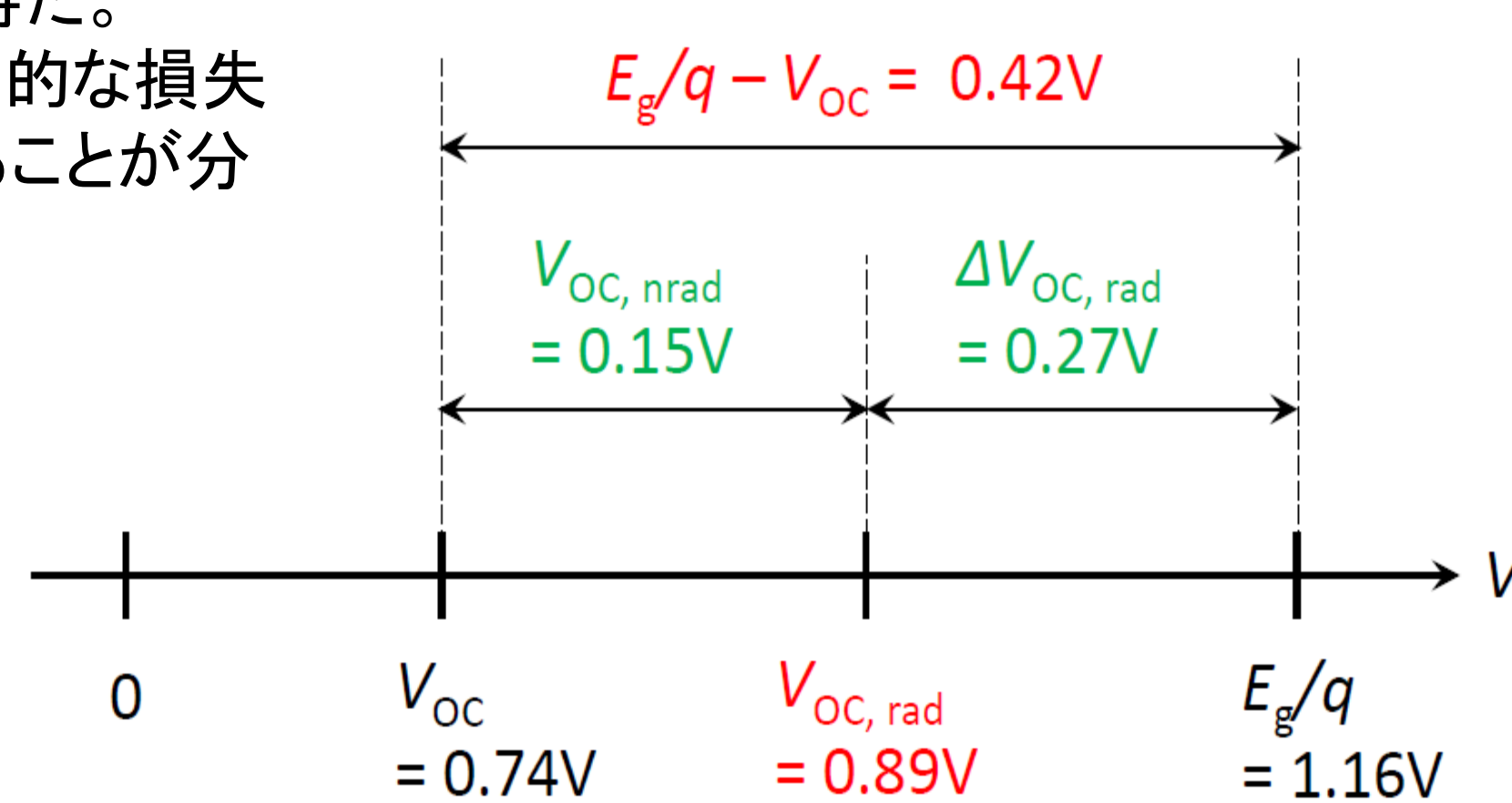


図9 セルの V_{OC} と $V_{OC,rad}$ の関係

参考文献

- U. Rau and J. H. Werner, Appl. Phys. Lett., 84, 3735 (2004).
- U. Rau, Phys. Rev. B, 76, 085303 (2007).
- U. Rau et al., Phys. Rev. Appl. 7, 044016 (2017).
- T. Kirchartz and U. Rau, J. Appl. Phys. 102, 104510 (2007).
- T. Kirchartz et al., Thin Solid Films 515, 6238 (2007).
- T. Kirchartz and U. Rau, Phys. Stat. Solidi(a) 205, 2737 (2008).
- T. Kirchartz et al., Solar Energy Materials & Solar Cells 92, 1621 (2008).
- T. Kirchartz et al., Prog. Photovolt.: Res. Appl. 17, 394 (2009).
- M. Green, Prog. Photovoltaics 20, 472 (2012).
- M. Green and A. Ho-Baillie, ACS Energy Lett. 4, 1639 (2019).
- M. Yamaguchi et al., J. Mater. Res., 32, 3445 (2017).
- M. Yamaguchi et al., Prog. Photovolt.: Res. Appl. 26, 543 (2018).
- M. Yamaguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57, 04FS03 (2018).
- M. Yamaguchi et al., DOI:10.1557/s43578-021-00440-x

CIS系太陽電池における界面とバルクの物理と化学、これからの研究開発課題

石塚尚吾¹、西永慈郎¹、別府孝介²、前田毅²、青柳風香²、和田隆博²、山田明³、Jakapan Chantana⁴、西村昂人⁴、峯元高志⁴、Muhammad Monirul Islam⁵、櫻井岳暁⁵、寺田教男⁶

¹産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門、²龍谷大学、³東京工業大学、
⁴立命館大学、⁵筑波大学、⁶鹿児島大学

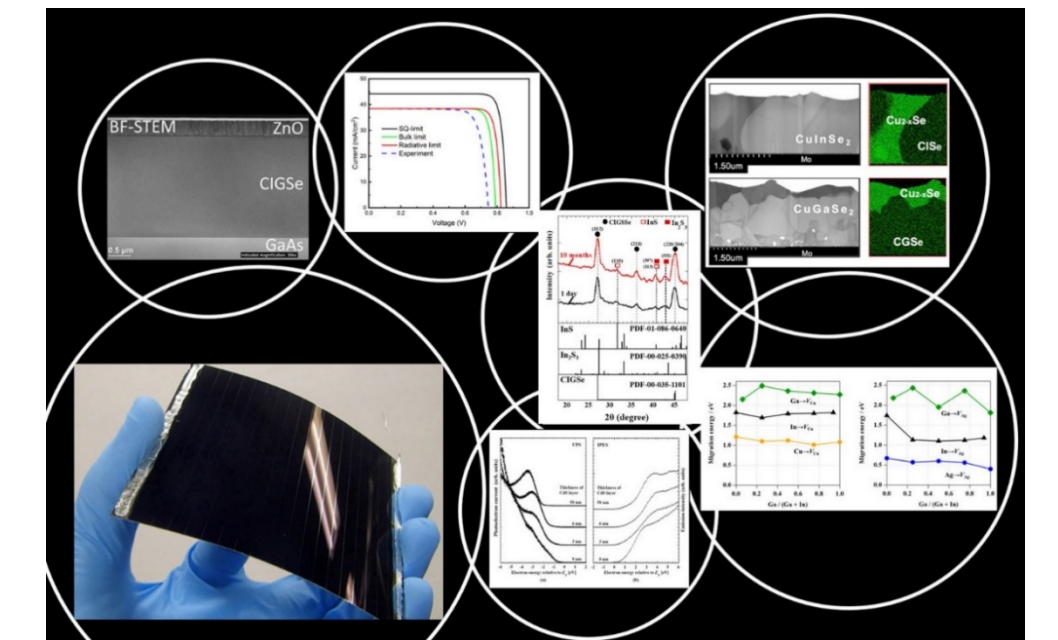
はじめに

CIS系太陽電池の研究開発課題

CIS系太陽電池とは、Cu、In、Seを主成分とし、これにGaやSなどを含有するI-III-VI₂系化合物を光吸収層とした太陽電池の総称である。多元系化合物として多くの派生材料が存在し、太陽電池以外にも様々なエネルギー変換デバイスへの応用が期待される材料群でもある。CIS系太陽電池はすでに実用化もされているが、アルカリ金属効果やその制御など、未解明でさらなる研究が必要とされる課題も多い。細分化が進む多元系カルコゲナイド材料の研究において、CIS系太陽電池の発展と応用を見据え基礎に立ち返り、研究開発課題を整理することは重要である。特に、多結晶材料からなるCIS系太陽電池ではバルク同様に界面や粒界におけるキャリア再結合の抑制は重要であり、開放電圧や曲線因子などの太陽電池パラメータ改善に繋がる技術開発は恒久的な課題である。最近我々は、英国王立化学会が刊行するPhysical Chemistry Chemical Physics誌に、CIS系太陽電池の今後の展望について最新の研究成果を交えながらPerspective論文としてまとめた^[1]。ここではその内容をダイジェストで紹介する。

PCCP

Physical Chemistry Chemical Physics
ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY



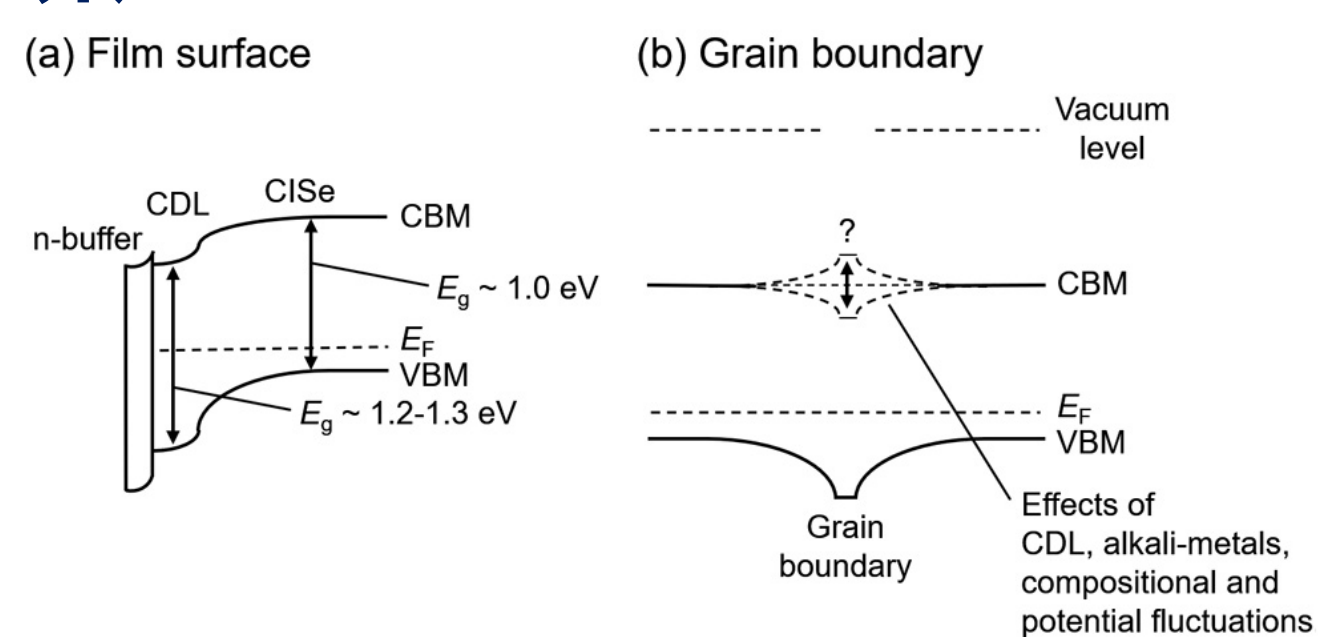
Physical and chemical aspects at the interface and in the bulk of CuInSe₂-based thin-film photovoltaics

S. Ishizuka, J. Nishinaga, K. Beppu, T. Maeda, F. Aoyagi, T. Wada, A. Yamada, J. Chantana, T. Nishimura, T. Minemoto, M. M. Islam, T. Sakurai, and N. Terada

Phys. Chem. Chem. Phys. 24, 1262 (2022).
<https://doi.org/10.1039/D1CP04495H>

最近の研究紹介^[1]

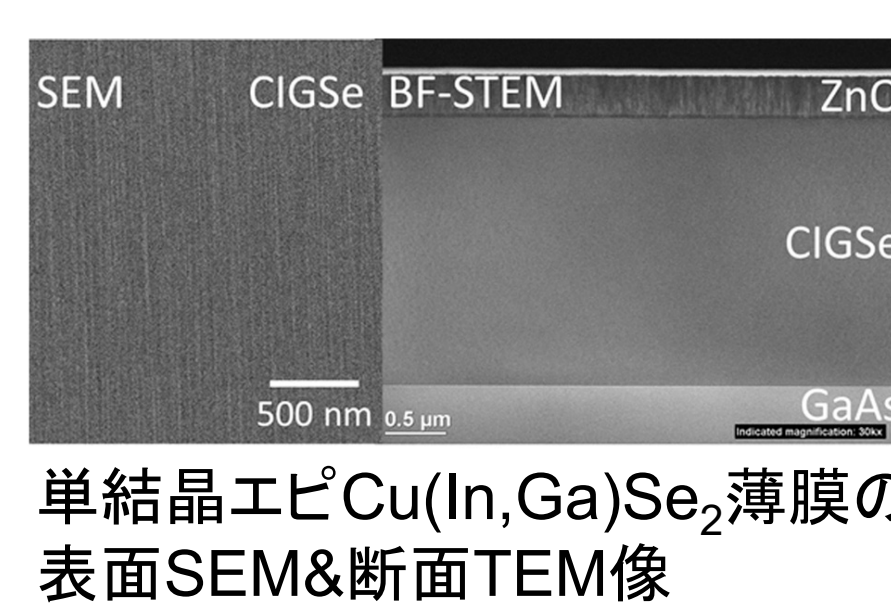
銅欠乏相の役割とアルカリ金属添加効果 (産総研)



多結晶Cu(In,Ga)Se₂表面・界面に存在する銅欠乏相が太陽電池デバイスに及ぼす影響の検証

単結晶Cu(In,Ga)Se₂薄膜太陽電池 (産総研)

Ag Grid
Anti-reflection coating
Al doped ZnO (AZO) 300 nm
CdS 40 nm
CIGSe 2.2 μm
GaAs (001) p ⁺ -type substrate 350 μm
Indium electrode

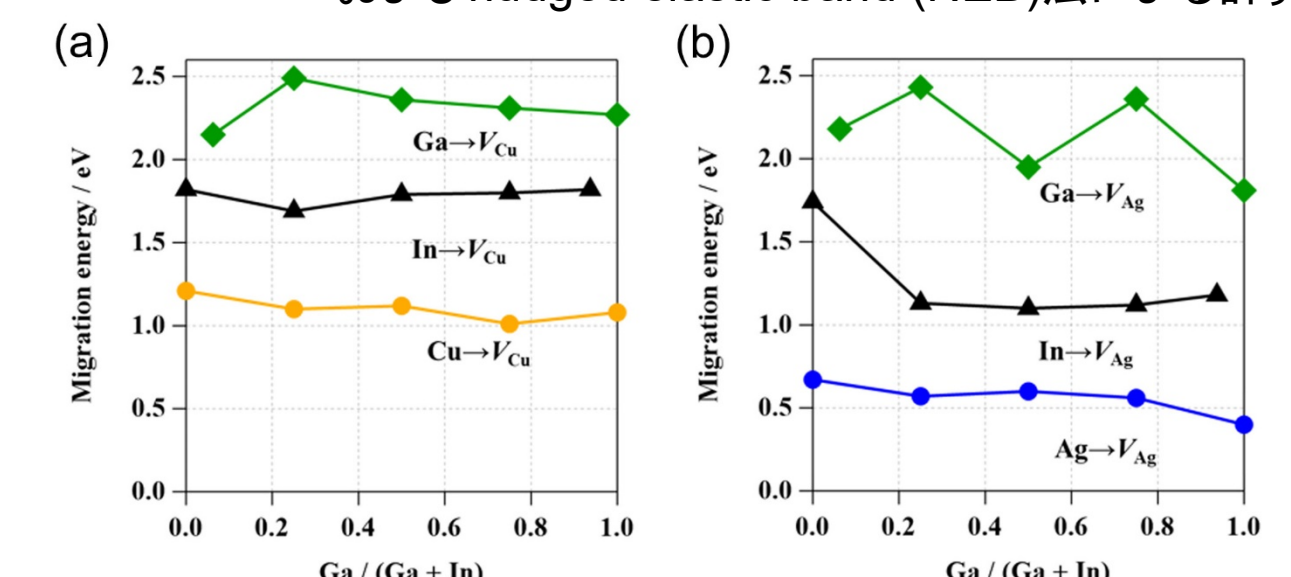


単結晶エピCu(In,Ga)Se₂薄膜の表面SEM&断面TEM像

単結晶エピCu(In,Ga)Se₂薄膜太陽電池と従来の多結晶薄膜太陽電池の比較検証

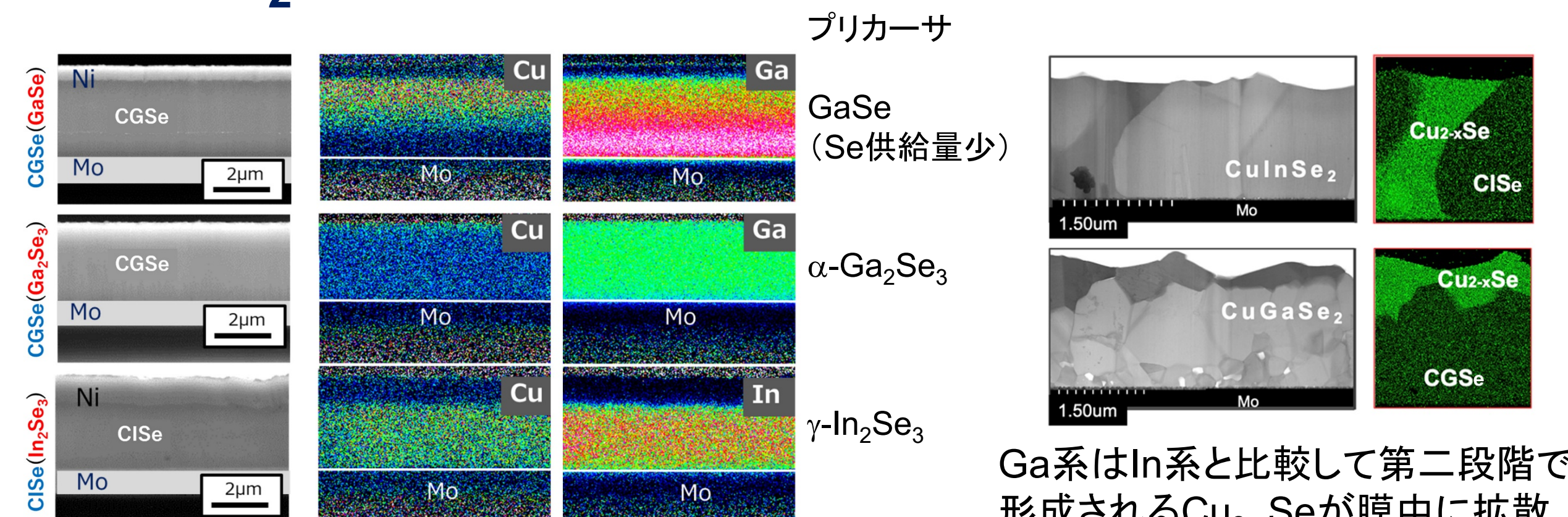
Ag(In,Ga)Se₂とCu(In,Ga)Se₂比較 (龍谷大)

Linear and quadratic synchronous transit (LST/QST)法およびnugded elastic band (NEB)法による計算結果

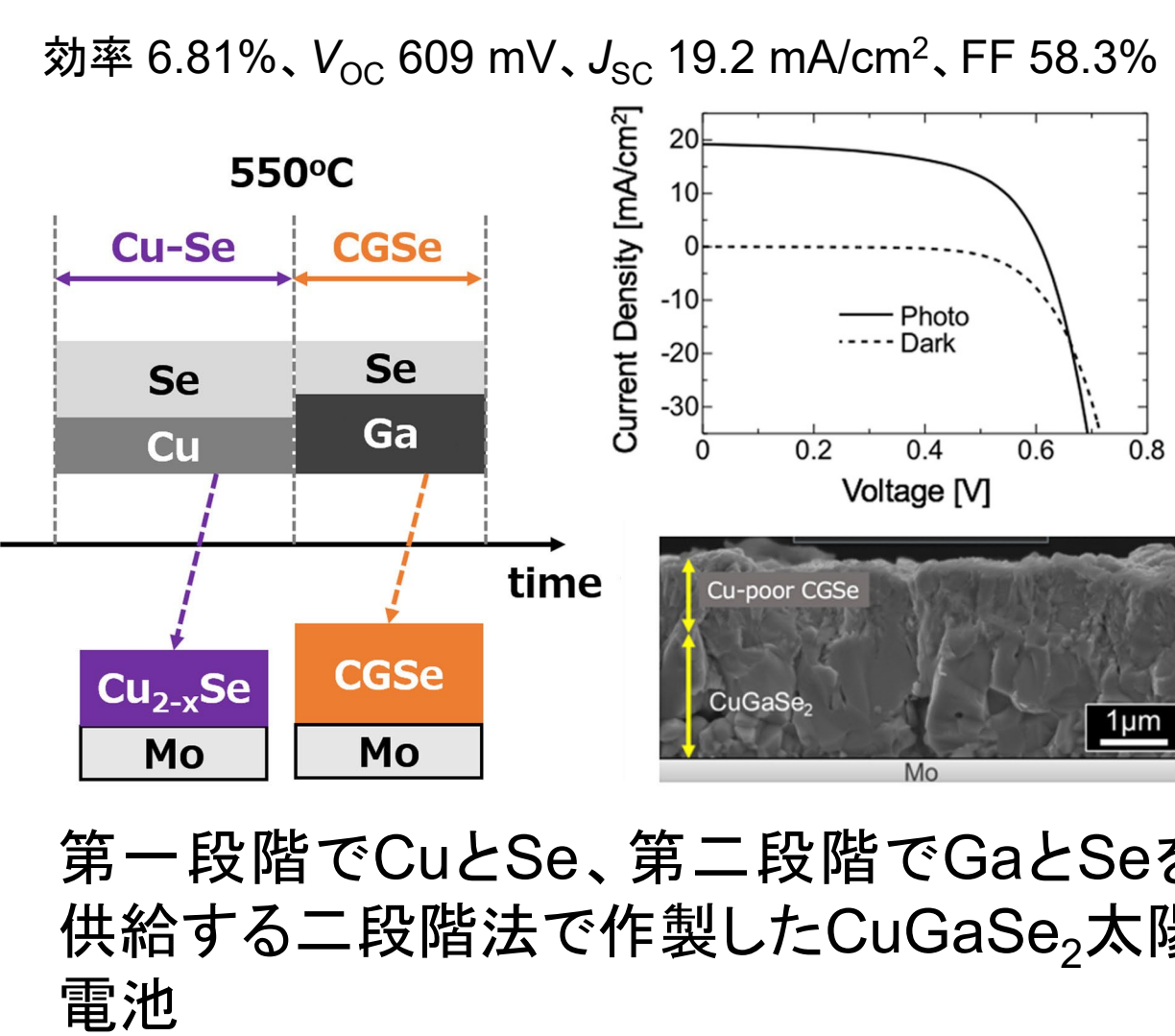


AgはCuよりも拡散しやすい
⇒Ag添加による粒径増大効果を説明

CuGaSe₂の製膜 (東工大)

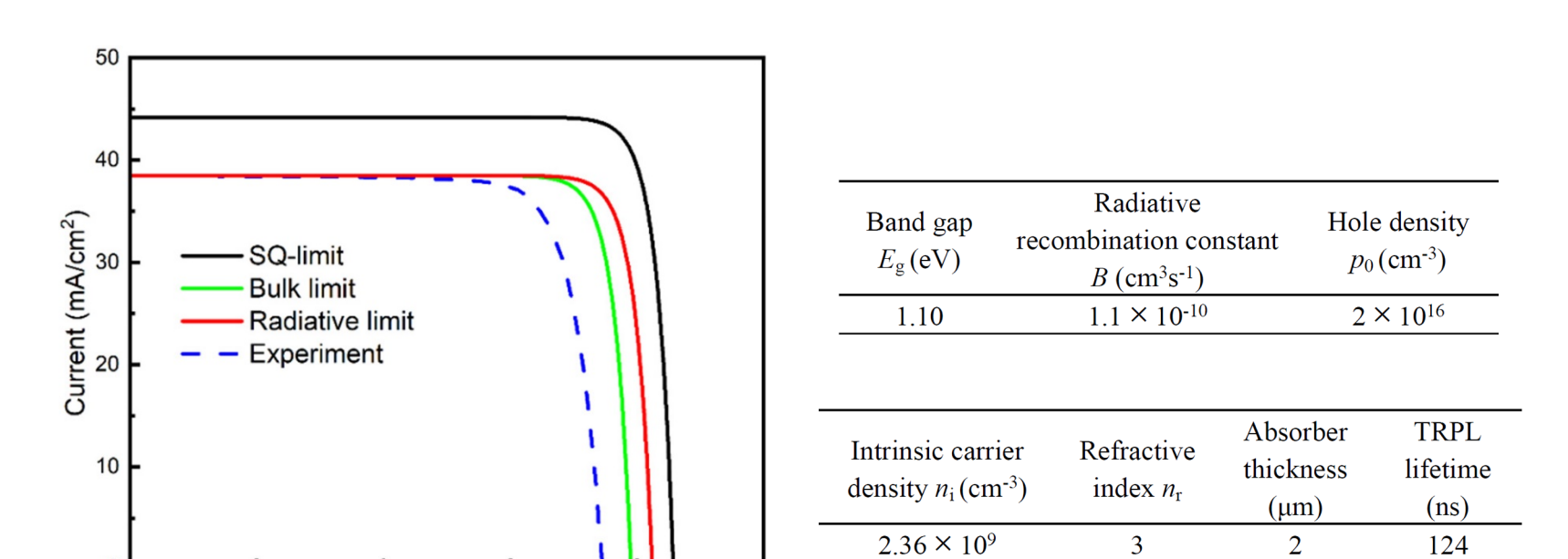


三段階法の第一段階で用いるプリカーサの違いによって最終的に得られる薄膜の元素分布の違い



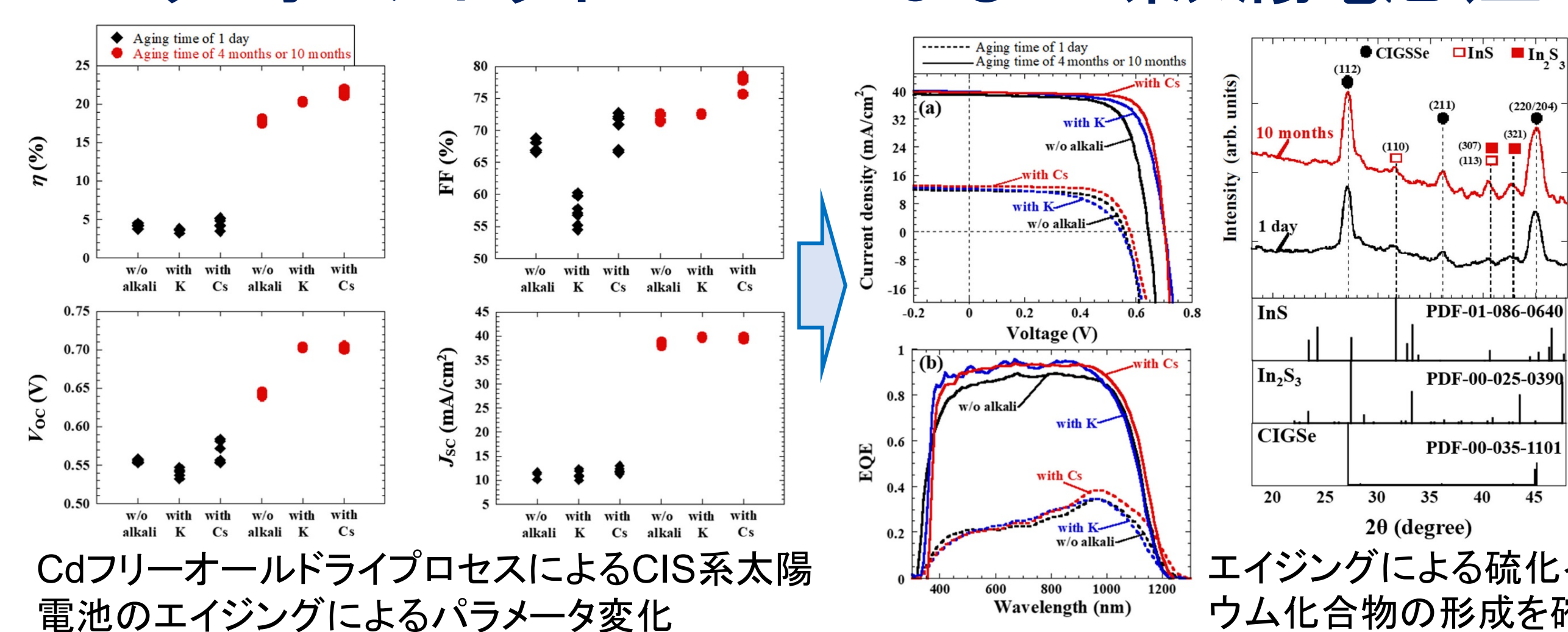
第一段階でCuとSe、第二段階でGaとSeを供給する二段階法で作製したCuGaSe₂太陽電池

開放起電圧損失の解析 (筑波大)



バルク再結合によるV_{OC}損失は、界面や空乏層再結合と比較しても大きな割合を占めており、今後も重要な課題

CdフリーオールドライブプロセスによるCIS系太陽電池 (立命館大)



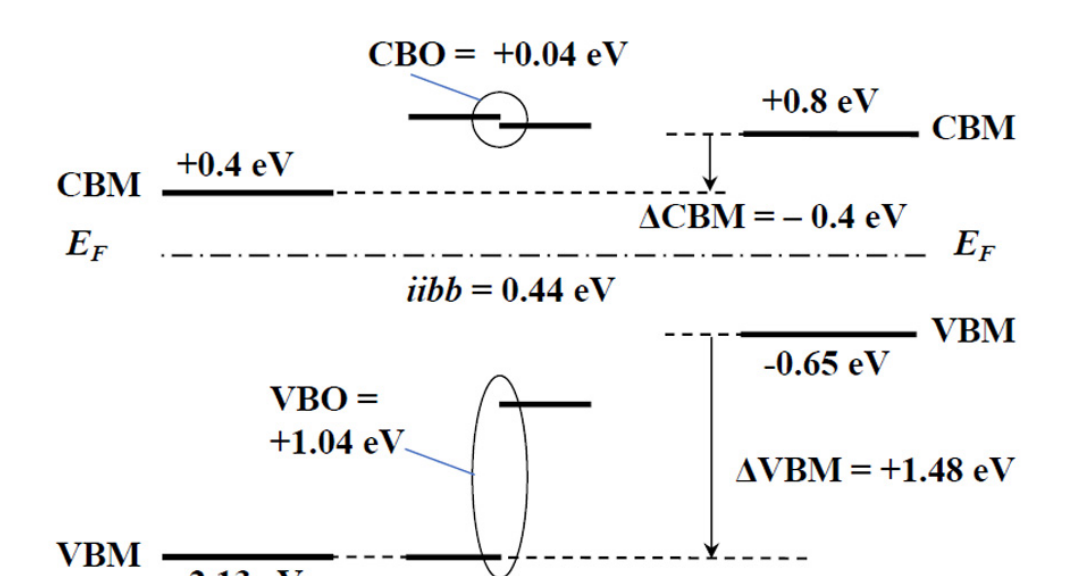
CdフリーオールドライブプロセスによるCIS系太陽電池のエージングによるパラメータ変化

Alkali treatment	Aging time of CIGSse	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF (%)	η (%)
Cd-free and all-dry process CIGSse solar cells	without	11.6	0.557	68.8	4.4
	1 day	38.2	0.546	72.6	18.0
	1 day	12.0	0.546	57.7	3.7
	10 months	39.7	0.702	72.5	20.2
	10 months	12.8	0.576	71.8	5.3
	10 months	39.7	0.706	78.5	22.0
CdS-buffered CIGSse solar cells	without	36.1	0.672	75.5	18.3
	1 day	36.4	0.671	74.1	18.1
	1 day	36.8	0.680	76.4	19.1
	10 months	37.9	0.677	75.0	19.2
	1 day	38.6	0.705	79.0	21.5
	10 months	38.9	0.710	78.3	21.7

Cdフリー、オールドライブプロセスで変換効率22%

エージングによる硫化インジウム化合物の形成を確認

深さ方向の界面電子構造解析 (鹿児島大)



正・逆光電子分光法により導出されたCdS/Cu(In,Ga)(S,Se)₂界面エネルギーバンド構造

まとめ

(1)アルカリ金属添加制御とCIS系光吸収層表面や粒界の銅欠乏相層との関係、(2)単結晶Cu(In,Ga)Se₂薄膜を用いた物性評価とデバイスの評価、(3)Ag系とCu系の違い、(4)新しいCuGaSe₂製膜方法の提案、(5)オールドライブプロセスによるCdフリー高効率CIS系太陽電池、(6)開放起電圧損失の解析、(7)正・逆光電子分光法による界面エネルギーバンド構造解析について、最新の研究成果を交えて今後の展望と研究開発課題の整理を行った。特に、これからの重要課題の一つとして曲線因子(FF)の改善が挙げられる。各内容の詳細については、右記参考文献をご参照頂きたい。

謝辞

本研究は、NEDOの支援によって実施されました。また一部の研究は、JSPS 科研費(19K05282、20K05354)、三菱財団自然科学研究助成(No.20190001)の支援を受け実施されました。本研究にご協力頂いた多くの方々、樋口博文氏、飯岡正行氏、高橋秀樹氏、田口昇氏、田中真悟氏、上川由紀子氏、増田泰造氏、P. J. Fons氏、C. S. Langham氏、加藤拓也氏、杉本広紀氏、木本祥紀氏、試料を御提供頂いた出光興産株式会社(ソーラーフロンティア)に深く感謝致します。

参考文献

[1] S. Ishizuka, J. Nishinaga, K. Beppu, T. Maeda, F. Aoyagi, T. Wada, A. Yamada, J. Chantana, T. Nishimura, T. Minemoto, M. M. Islam, T. Sakurai, and N. Terada, Phys. Chem. Chem. Phys. 24, 1262 (2022). <https://doi.org/10.1039/D1CP04495H>

CIS系太陽電池のアルカリ金属添加制御と軽量ミニモジュール高性能化

石塚尚吾¹、上川由紀子¹、西永慈郎¹、増田泰造²
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

研究の目的

太陽光発電の設置場所制約の克服



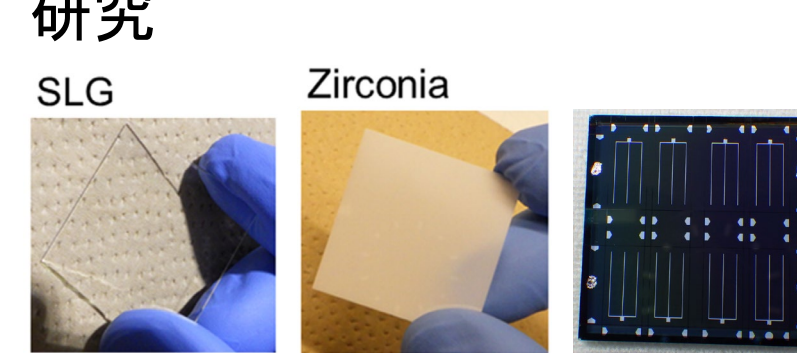
CIS系太陽電池におけるアルカリ金属添加効果

アルカリ金属添加によって光電変換効率が向上する効果は、CIS系光吸収層表面の銅欠乏層(CDL)の存在に左右されるが、これまでに、CDLは有る方が良い^[1]、無い方が良い^[2]、という相反する報告があり、検証が必要とされていた。

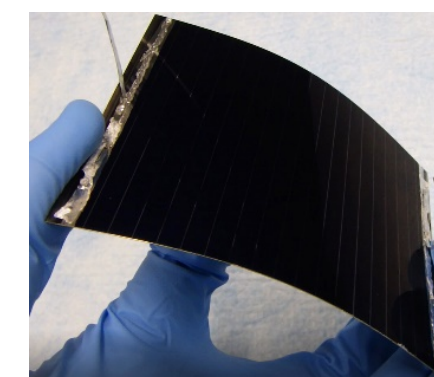
実験

アプローチ

1. 小面積セルや薄膜を用いた基礎研究

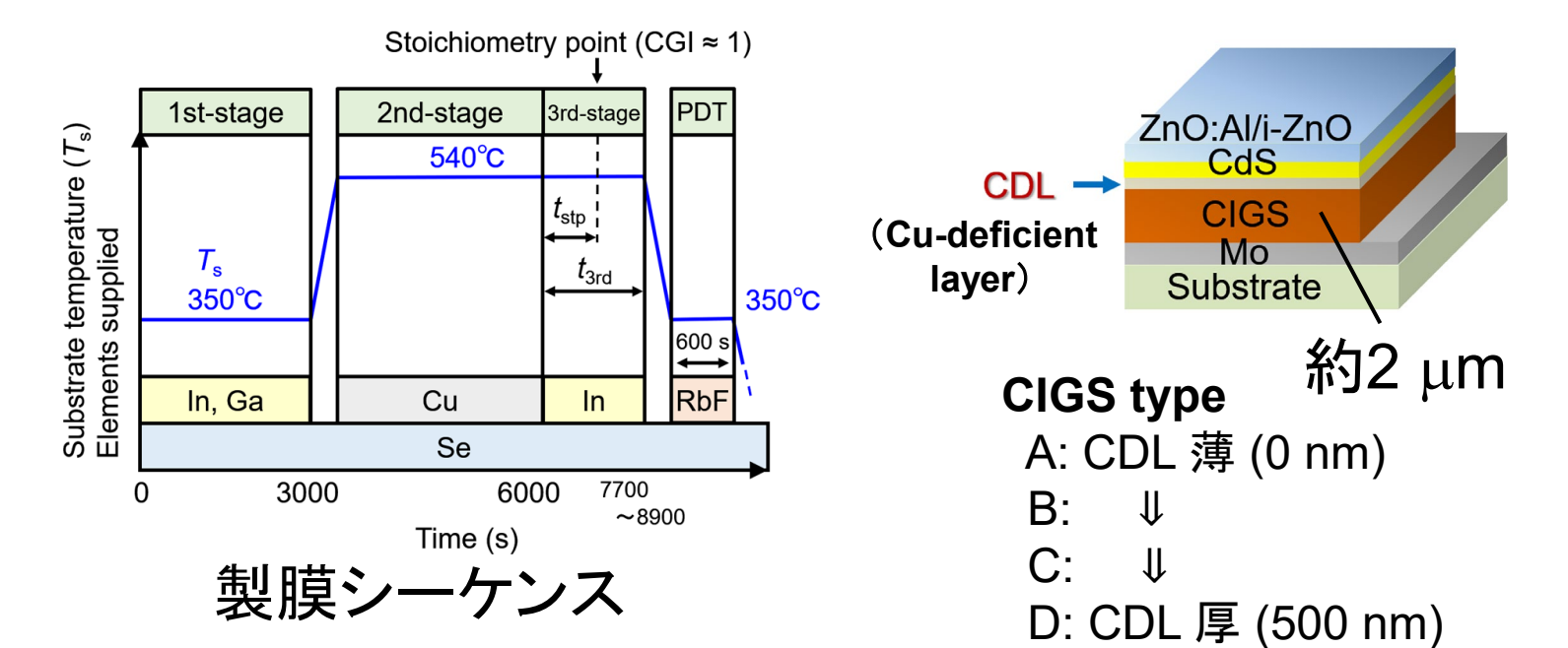


2. 軽量フレキシブルミニモジュールへの応用



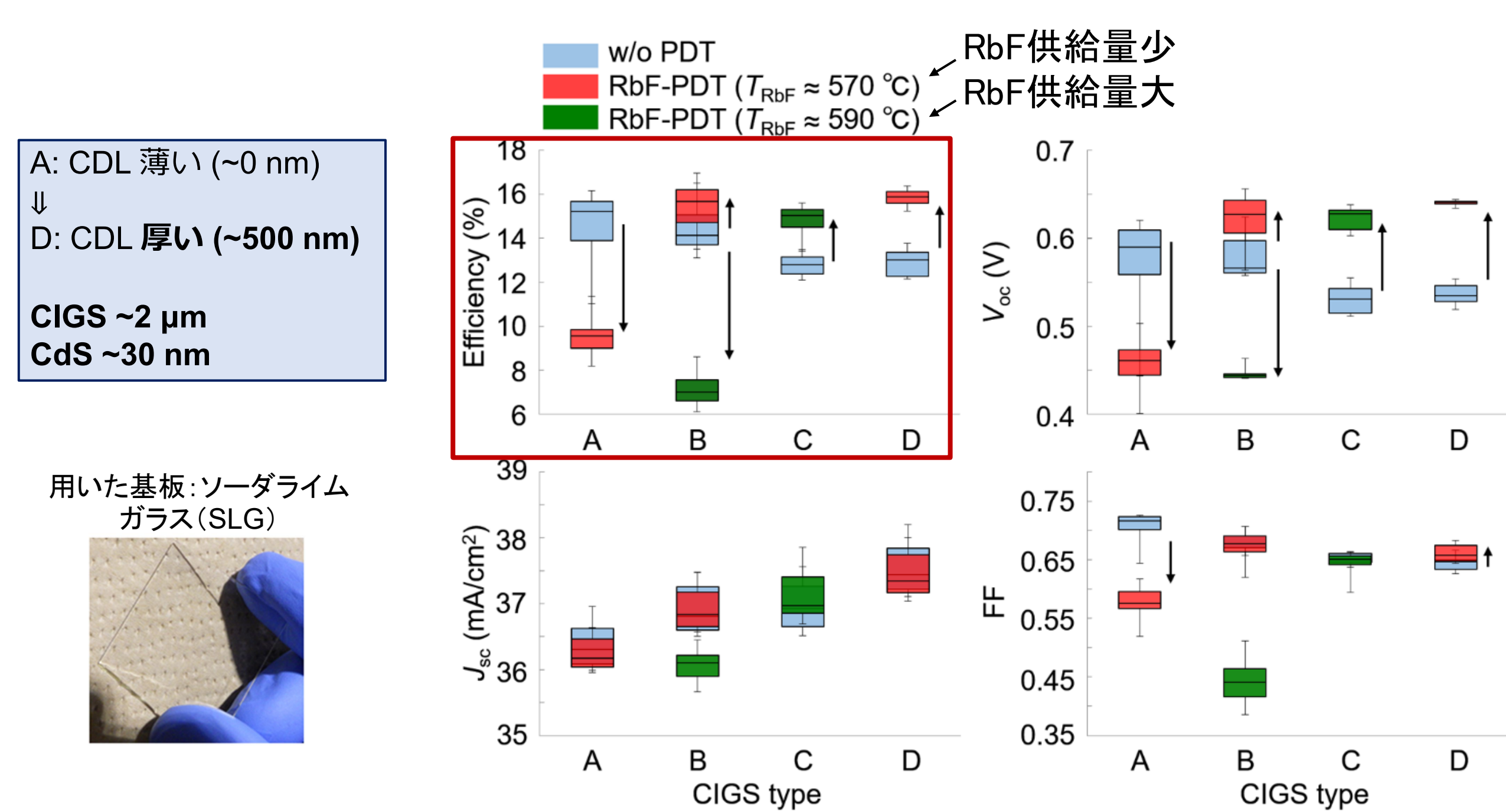
小面積セルや薄膜評価に用いたCIS系薄膜とデバイス構造

用いたCIS系薄膜: Cu(In,Ga)Se₂ (三段階蒸着法CIGS^[3])
 三段階目の製膜時間で表面銅欠乏層(CDL)厚を制御^[4]



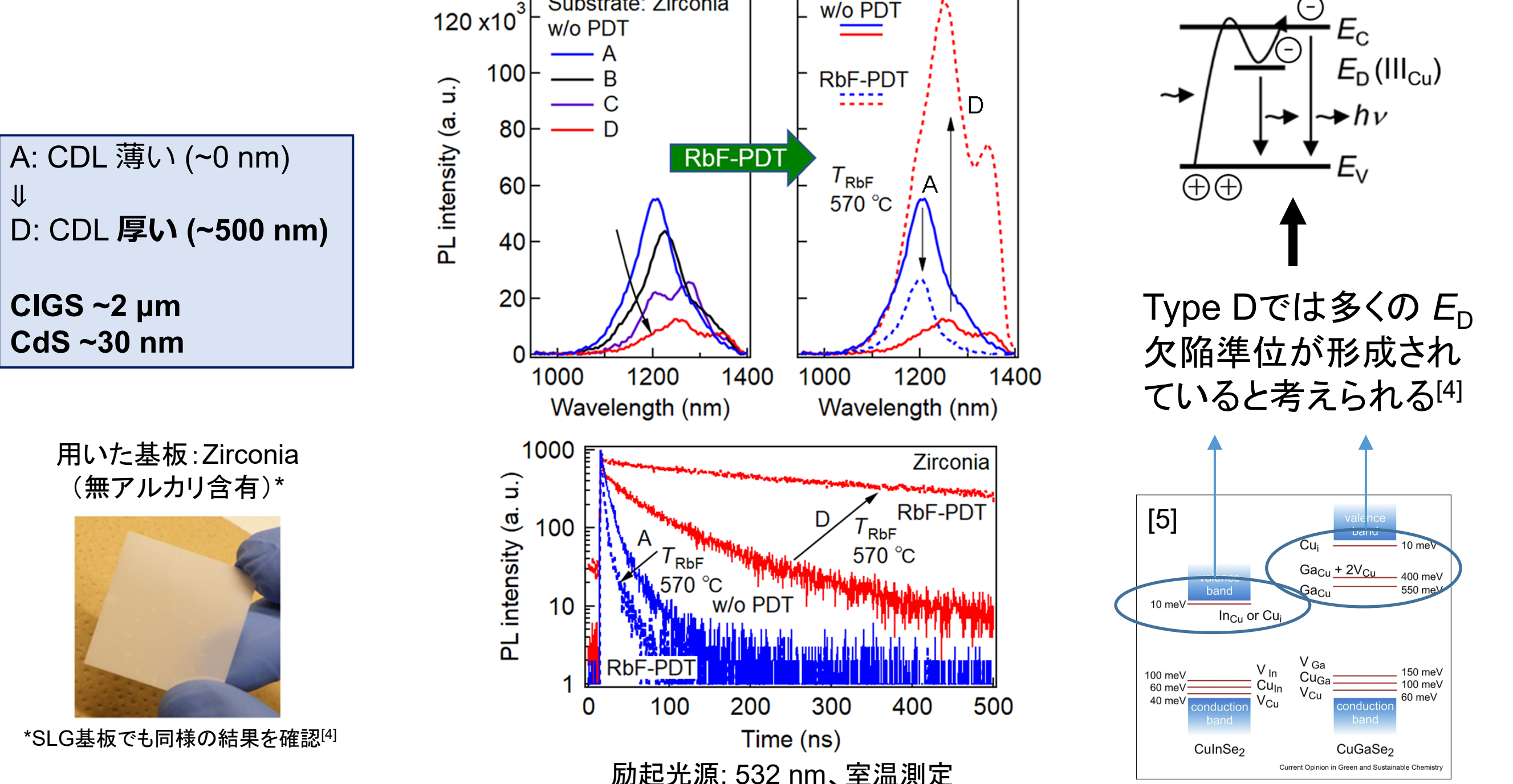
結果1. 小面積セルや薄膜を用いた基礎研究

太陽電池パラメータの変化



RbFポストデポジション(PDT)添加効果は、CIGS表面状態(CDL thickness)とRbF供給量に強く依存

PL & TRPL



- CDL厚増加でPL発光強度減少(RbF-PDT無しの場合)
- CDL厚増加でPL発光強度増加(RbF-PDT有りの場合)
- CDL厚増加で発光寿命増加? ⇒ 解釈には注意が必要

結果2. 軽量フレキシブルミニモジュールへの応用

CIGS薄膜表面改質 (本研究)



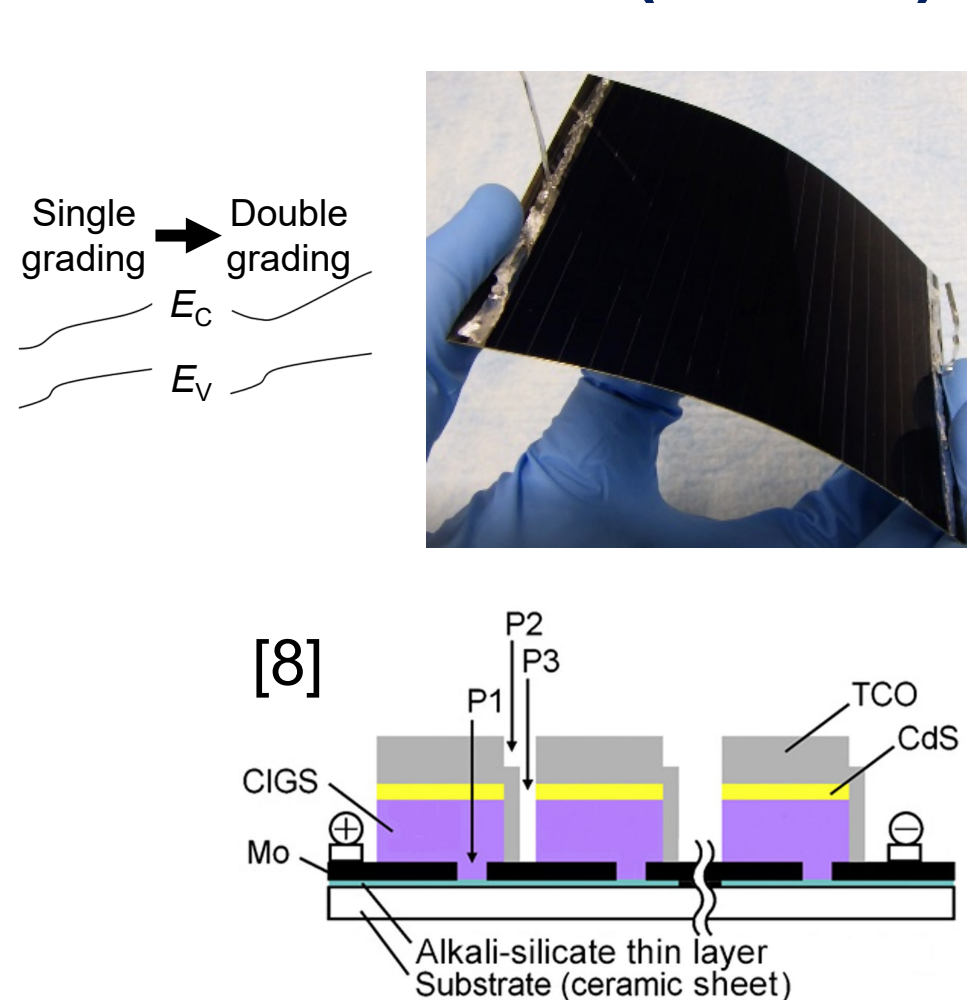
裏面側からのアルカリ添加制御 [6]
 Na, K
 CIGS, Mo
 基板

スパッタ形成アルカリ含有プリカーサ層 (ASTL) によるNa & K 拡散制御

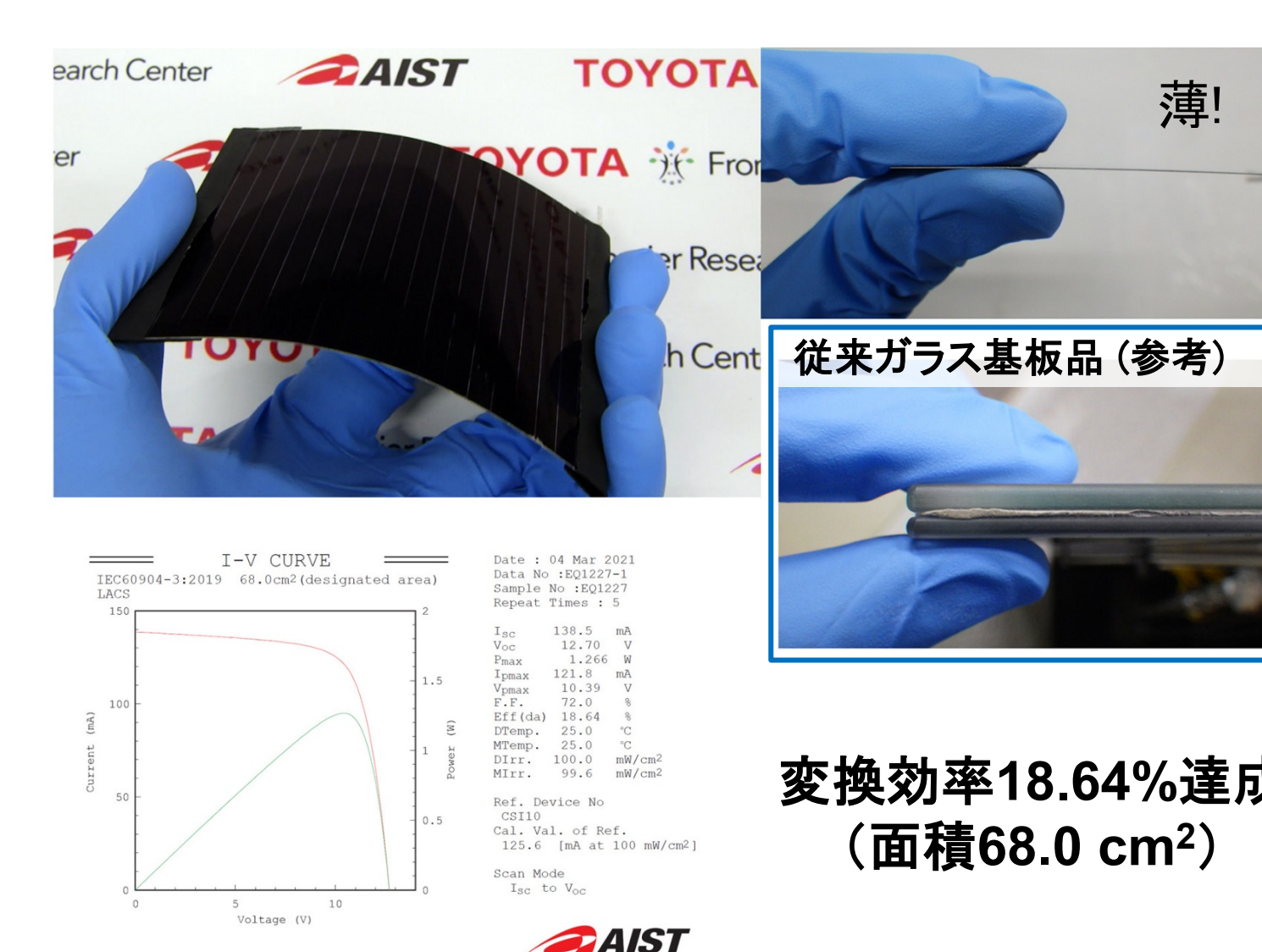
熱光照射効果 [7]
 Lamp, Hotplate, Sample

準安定アクセプタの活性化

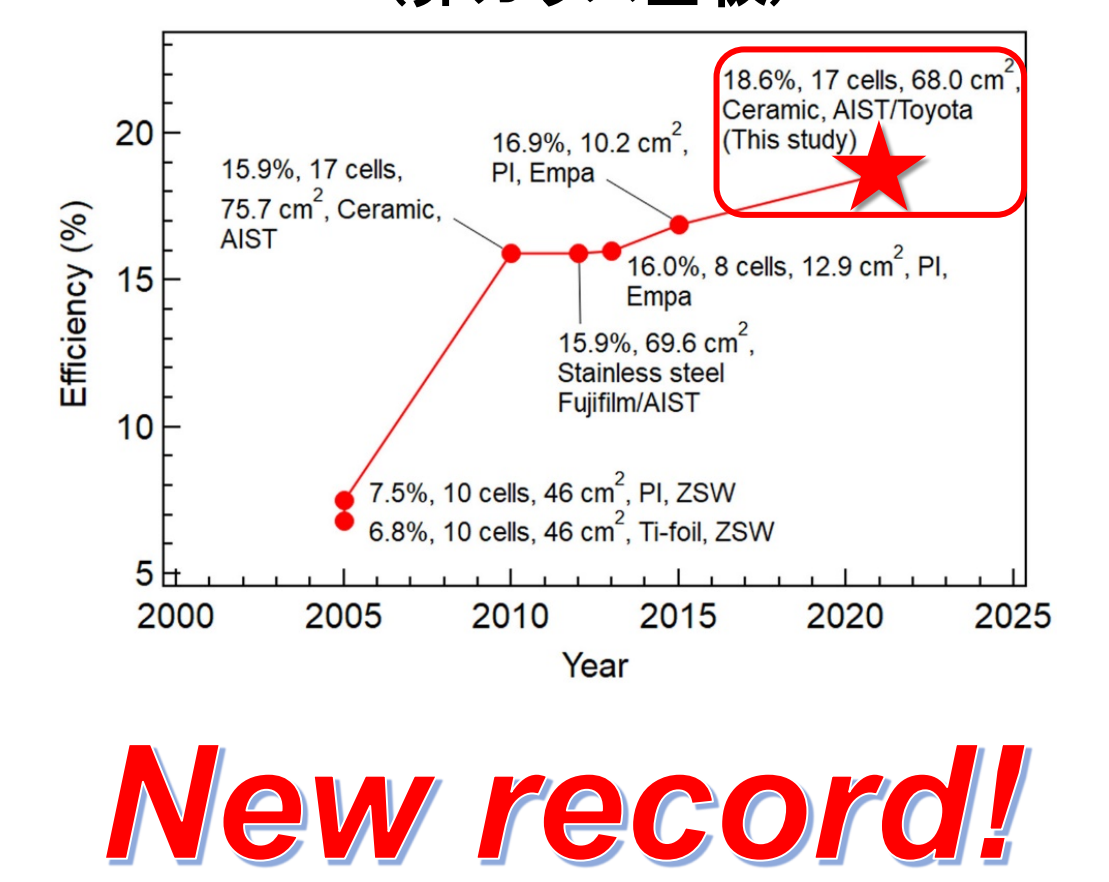
集積型軽量フレキシブルミニモジュールの作製 (本研究)



17セル集積構造の軽量フレキシブルCIS系太陽電池ミニモジュール



CIS系集積構造ミニモジュールの光電変換効率推移 (非ガラス基板)



まとめ

- Cu欠乏層(CDL)には、アルカリ金属ハライドPDTによる性能向上を促進させる効果がある(効果はCDL厚やCIS系薄膜の組成比、アルカリ添加量などにも依存)
 - CIGS光吸収層表面改質
 - + 裏面からのアルカリ添加制御
 - + 熱光照射効果
- ⇒ 変換効率18.64%の集積型軽量フレキシブルCIGSミニモジュールの作製に成功

謝辞

本研究は、三菱財団自然科学研究助成(No.20190001)、JSPS 科研費(19K05282)、および一部NEDOの支援によって実施されました。また、太陽電池デバイスの作製と評価において、樋口博文氏、飯岡正行氏、高橋秀樹氏のご協力に感謝します。

参考文献

- [1] T. Lepetit *et al.*, Prog. Photovolt. **25**, 1068 (2017).
- [2] T. Kodalle *et al.*, IEEE J. Photovolt. **9**, 1839 (2019).
- [3] A. M. Gabor *et al.*, Appl. Phys. Lett. **65**, 198 (1994).
- [4] S. Ishizuka *et al.*, Phys. Rev. Appl. **15**, 054005 (2021).
- [5] S. Siebentritt, Curr. Opin. Green Sustain. Chem. **4**, 1 (2017).
- [6] S. Ishizuka *et al.*, J. Renew. Sustain. Energy **1**, 013102 (2009).
- [7] J. Nishinaga *et al.*, Appl. Phys. Express **10**, 092301 (2017).
- [8] S. Ishizuka *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. **94**, 2052 (2010).

CIS系太陽電池の水分解水素生成 光カソードへの応用

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

研究の目的

CuGaSe₂ (CGS)、禁制帯幅1.7 eVのCIS系材料

CuGaSe₂ (CGS)は、1.7 eVの禁制帯幅を有したタンDEM太陽電池のトップセル材料として有望であるが、同時に水分解水素生成光カソード用材料としても注目されている。これまでのカルコゲナイド系光カソードでは、Cu(In,Ga)Se₂系で3.7%^[1]、Cu₂ZnSnS₄系で3.2%^[2]のSTH (solar to hydrogen) 効率が報告されていた。

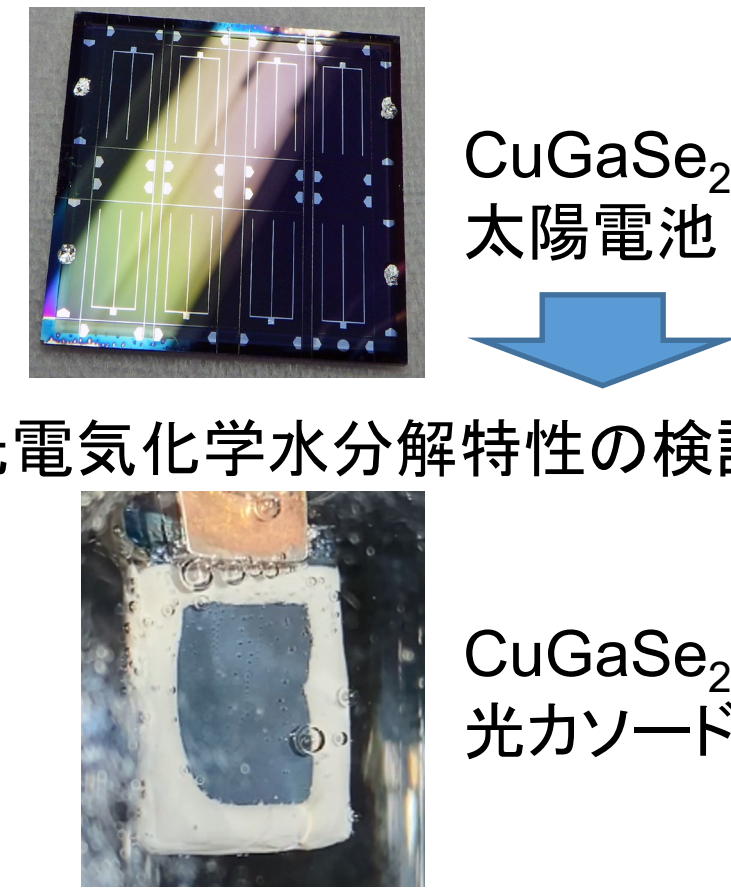
CGSの銅欠乏層に着目

CIS系太陽電池において、銅欠乏相で形成される層 (Cu-deficient layer, CDL) の役割解明は重要な研究課題である。今回、三元系CGSデバイスにおけるCDLの役割や性能への影響を検証し、また、光カソード材料としての可能性を検証した。

実験

アプローチ

1. CuGaSe₂太陽電池の銅欠乏p-nヘテロ接合界面とデバイス特性の相関性検証
2. 光電気化学水分解特性の検証



三元系CuGaSe₂薄膜の作製^[3]

- ・用いたCIS系薄膜: CuGaSe₂ (三段階蒸着法CGS)
- ・表面銅欠乏層 (CDL) 厚を変化させた4種のCGS薄膜試料を作製 (type A, B, C, and D)

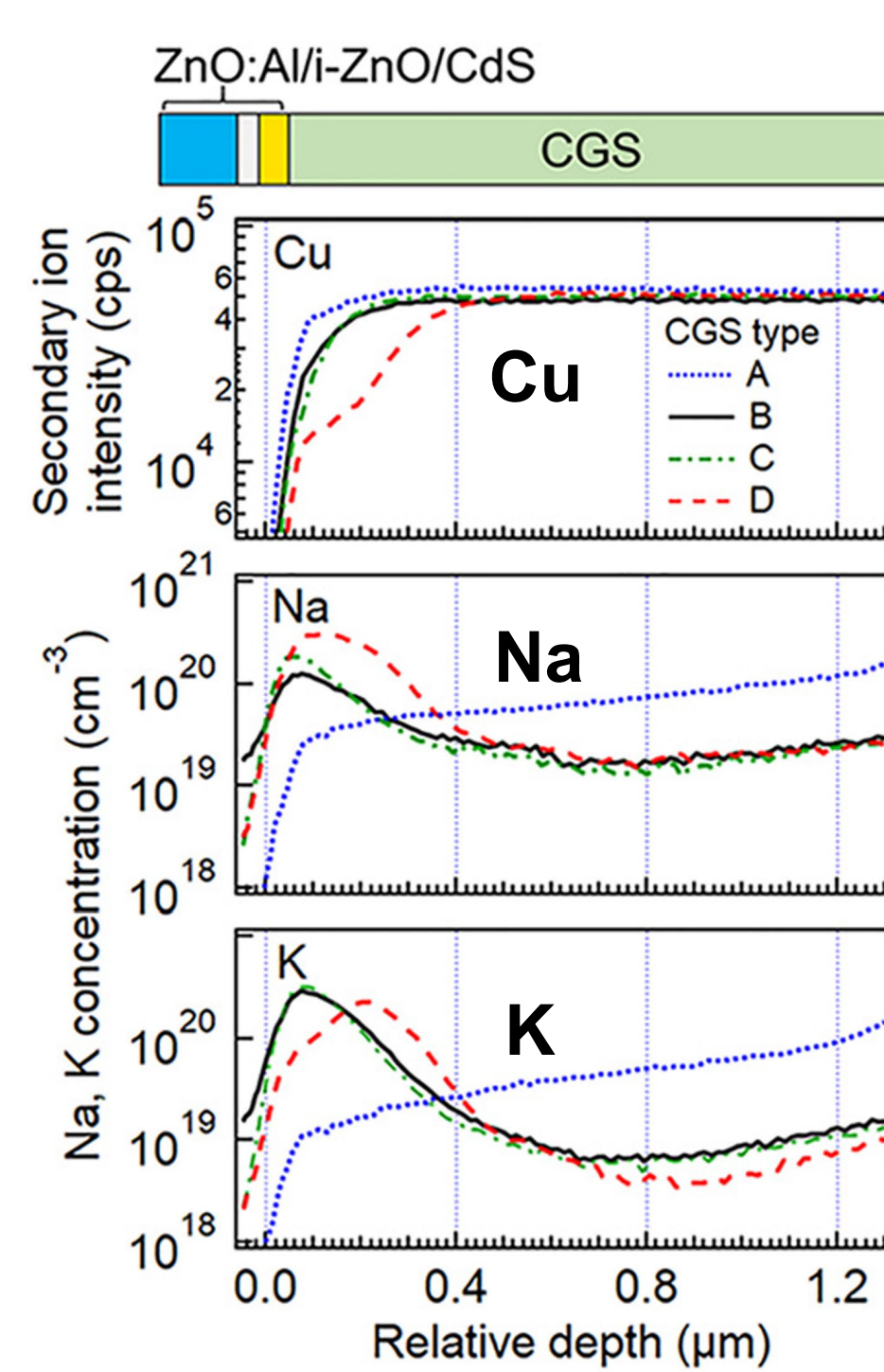
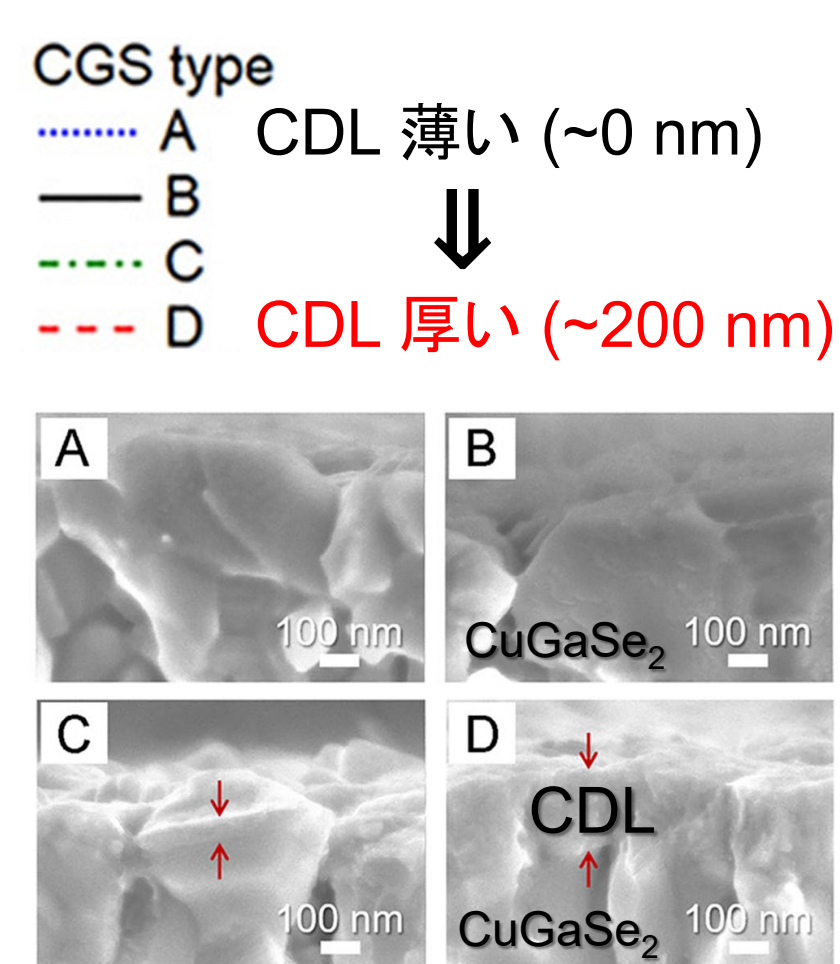
CGS type	CDL (nm)	[Cu]/[Ga] (V _{acc} ≈ 5 kV)	[Cu]/[Ga] (V _{acc} ≈ 15 kV)
A	0	1.1	1.1
B	Ref	0.64	0.92
C	50	0.43	0.83
D	200	0.29	0.54

CGS+Cu₂Se Mo SLG } 1.2-1.6 μm
CGS Mo SLG } 1 μm
CDL CGS Mo SLG }
B + CDL 50 nm }
B + CDL 200 nm }
SLG: ソーダライムガラス基板

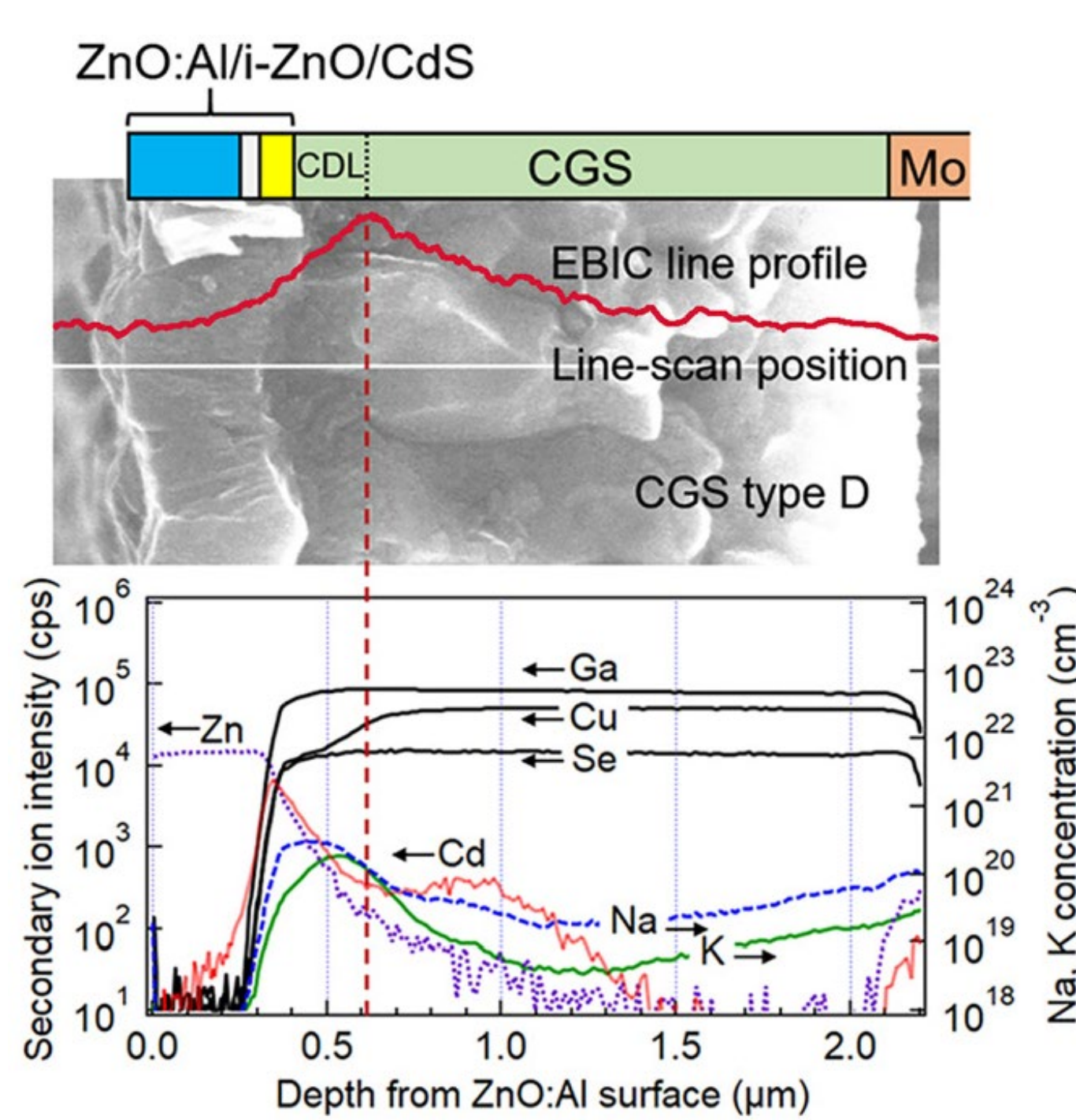
V_{acc}: EPMA組成分析で用いた加速電圧

結果1. CuGaSe₂太陽電池の銅欠乏p-nヘテロ接合界面の影響検証^[3]

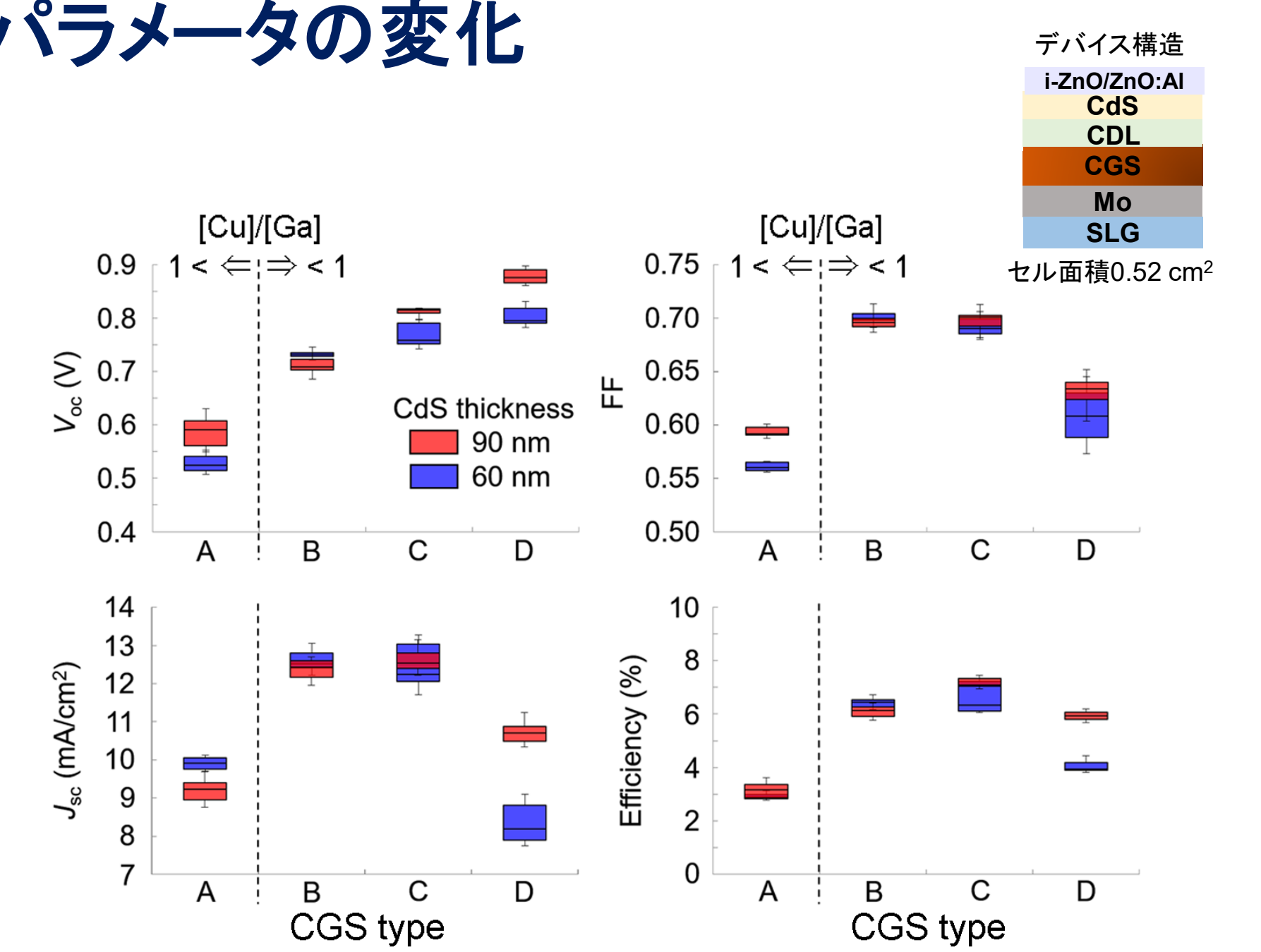
SEM & SIMS



EBIC



CDL厚とCdS厚の変化による太陽電池パラメータの変化

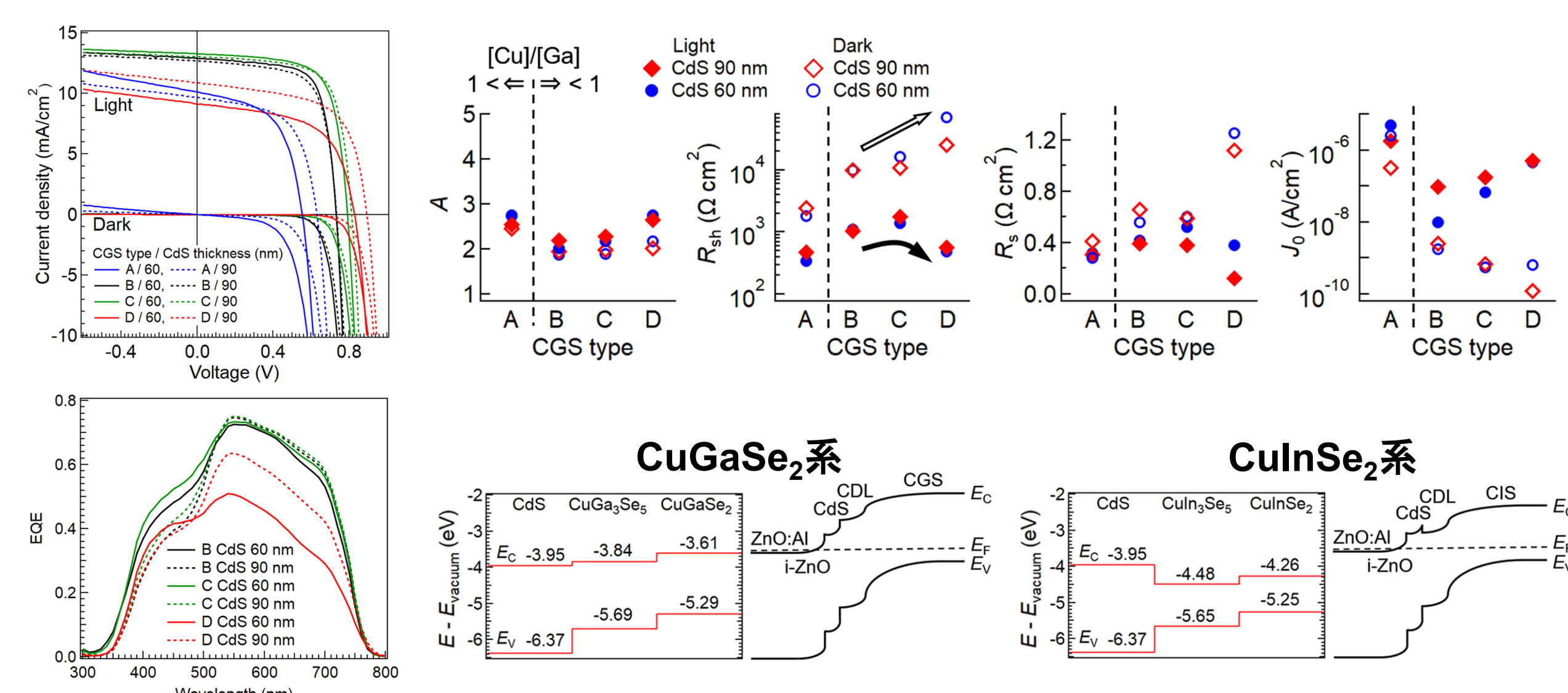


- ・CDLは基板から拡散したアルカリ金属を蓄積 (B, C, D)
- ・CDLの無い試料type Aは表面にアルカリを蓄えられない
- ・軽い(小さい)Na、次いで重い(大きい)Kが表面に (D)

CDL/CGS界面付近にEBIC信号のピーク ⇒ Buried p-n junction (埋込型p-n接合)はCDLに由来し、CDLがn型層としての役割を担うことを示唆

CDL厚増加でV_{OC}が減少するCuInSe₂系^[4,5]と異なり、CGSではCDL厚増加でV_{OC}が増加

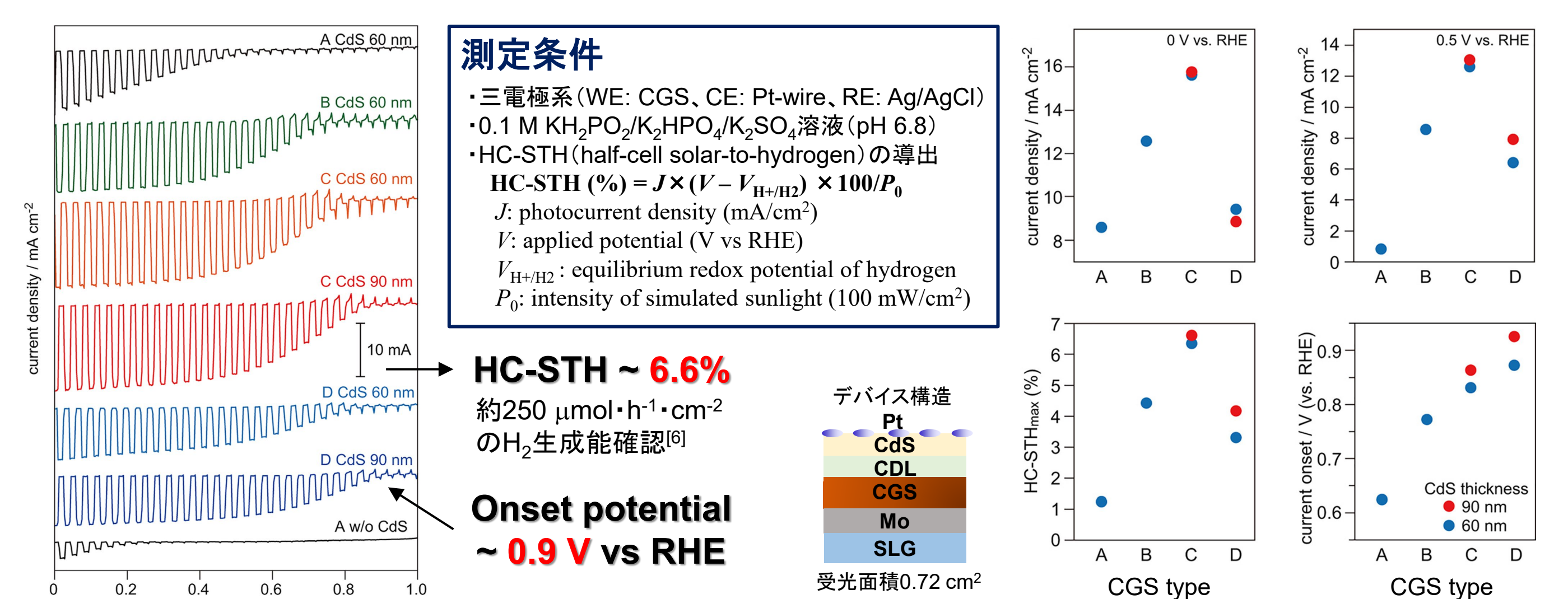
J-V、EQE、ダイオードパラメータの変化



CuInSe₂系とは異なるCuGaSe₂系のCDL厚とV_{OC}の相関は、CdS/CDL/CGS界面ΔE_cの差異によるキャリア再結合抑制効果のためと考えられる^[3]

結果2. 光電気化学水分解特性の検証^[6]

LSV



CGS系光カソードによる水分解水素生成でHC-STH効率6.6%を達成^[6]

まとめ

- ・CuInSe₂と異なり、CuGaSe₂ではp-nヘテロ接合界面の銅欠乏層 (CDL) を厚くすることで、太陽電池の開放電圧を向上させる効果が得られた。
- ・三元系CuGaSe₂を基本とする光カソードにおいて、CDLとCdSバッファ層の膜厚制御により、同系材料によるHC-STH効率として世界最高レベルとなる6.6%達成や、0.9 Vの高いonset potentialを得ることに成功した。

謝辞

本研究は、三菱財団自然科学研究助成 (No.20190001)、および、JSPS 科研費 (19K05282、19H02822、20H05120) の支援によって実施されました。また、ゼロエミッション国際共同研究センター人工光合成研究チームの三石雄悟主任研究員に有意義なご議論感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Kobayashi *et al.*, Energy Environ. Sci. **11**, 3003 (2018).
- [2] D. Huang *et al.*, Energy Environ. Sci. **14**, 1480 (2021).
- [3] S. Ishizuka, Appl. Phys. Lett. **118**, 133901 (2021).
- [4] B. Namnuan *et al.*, J. Alloy Compd. **800**, 305 (2019).
- [5] S. Ji *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 041003 (2020).
- [6] S. Ikeda *et al.*, Appl. Phys. Lett. **119**, 083902 (2021).

広帯域透明電極の安定性

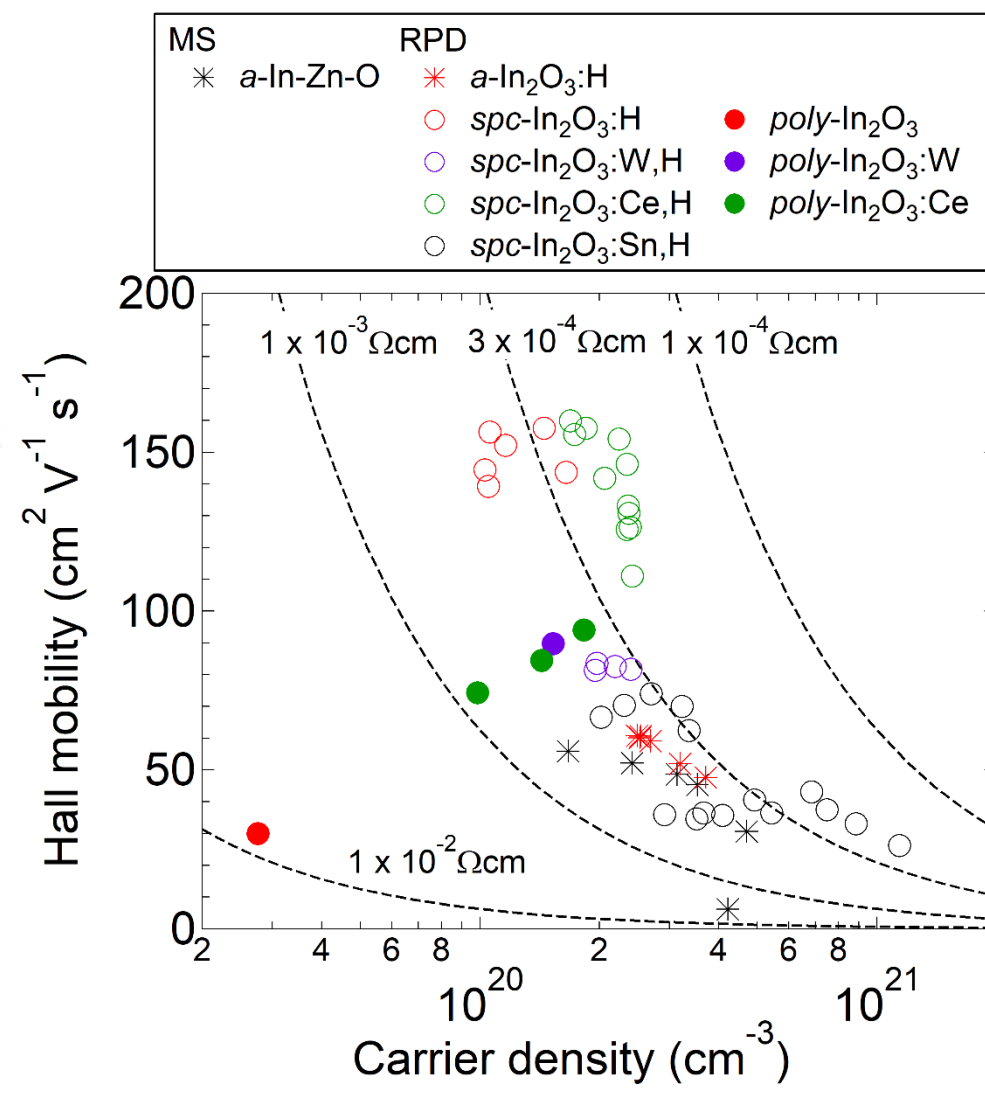
鯉田 崇

産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門

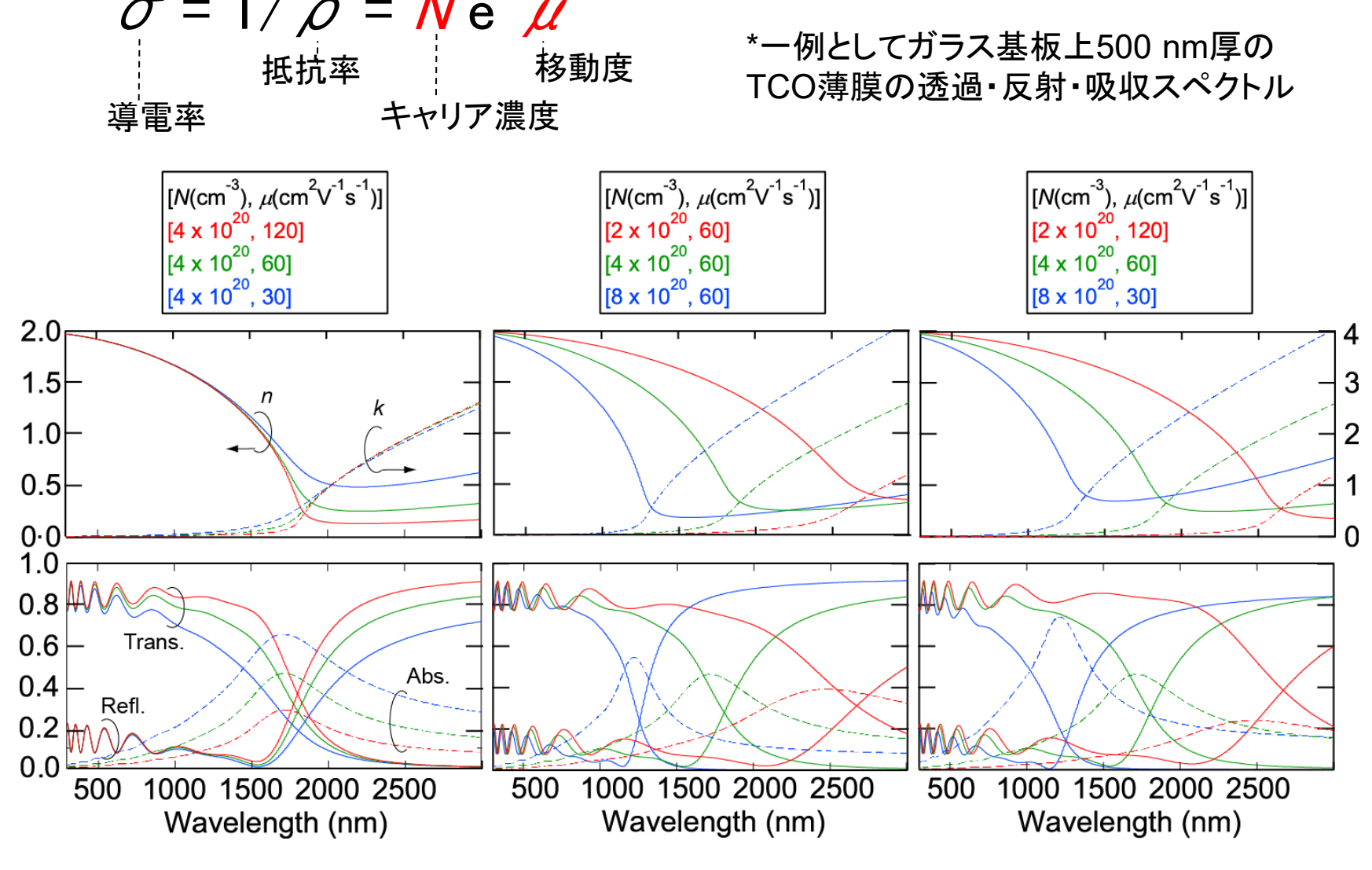
はじめに

高い電子移動度を持つ透明導電性酸化物(TCO)薄膜は、高い導電性を示しながら、透明領域を可視から近赤外域にまで拡張することができる。このような広帯域TCO薄膜を受光デバイス窓電極に適用することで、既存デバイスの高性能化だけでなく、近赤外域(800-1700 nm)にも感度を持つ将来の多接合型太陽電池や近赤外イメージセンサーなど新しいデバイス[1]も創出できる。今回は、広帯域TCO薄膜の製造方法が、薄膜の初期電気特性とその安定性に影響を与えることを報告する[2]。加熱成膜した多結晶 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me}$ (Me: W, Ce)薄膜は、 $70 - 80 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ という比較的高い移動度を示す。湿熱試験後も安定で、成膜温度以上の温度でポストアニールを行うと、移動度は $110 - 140 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ と向上する。一方、非晶質膜をポストアニールして固相結晶化した $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me,H}$ 膜は、 $100 - 160 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ と非常に高い移動度を示すが、湿熱試験や高温アニール処理に対する安定性は、多結晶膜に比べて低い。電気特性の劣化は、薄膜中の水素含有量が増えるほど大きい。広帯域TCO薄膜を受光デバイスの窓電極に適用する際には、デバイスの製造工程に応じて、気相合成で結晶化させた多結晶薄膜と固相結晶化させた多結晶薄膜を使い分ける必要がある。

低温プロセスで作製したTCO薄膜の電機特性[2]



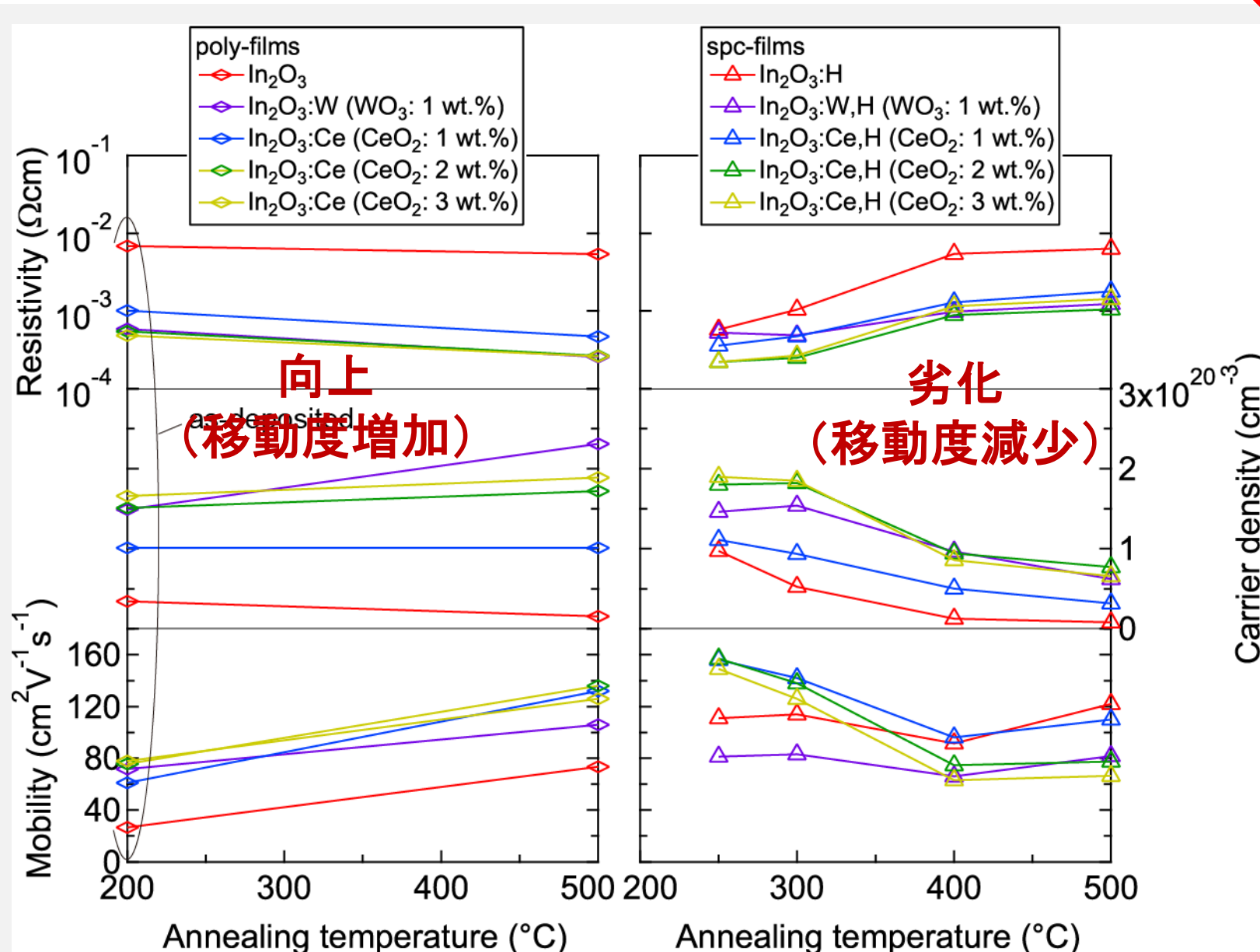
ドルーデモデルより計算したTCOの光学定数(上段)とTCO薄膜の光学特性*(下段)[3]



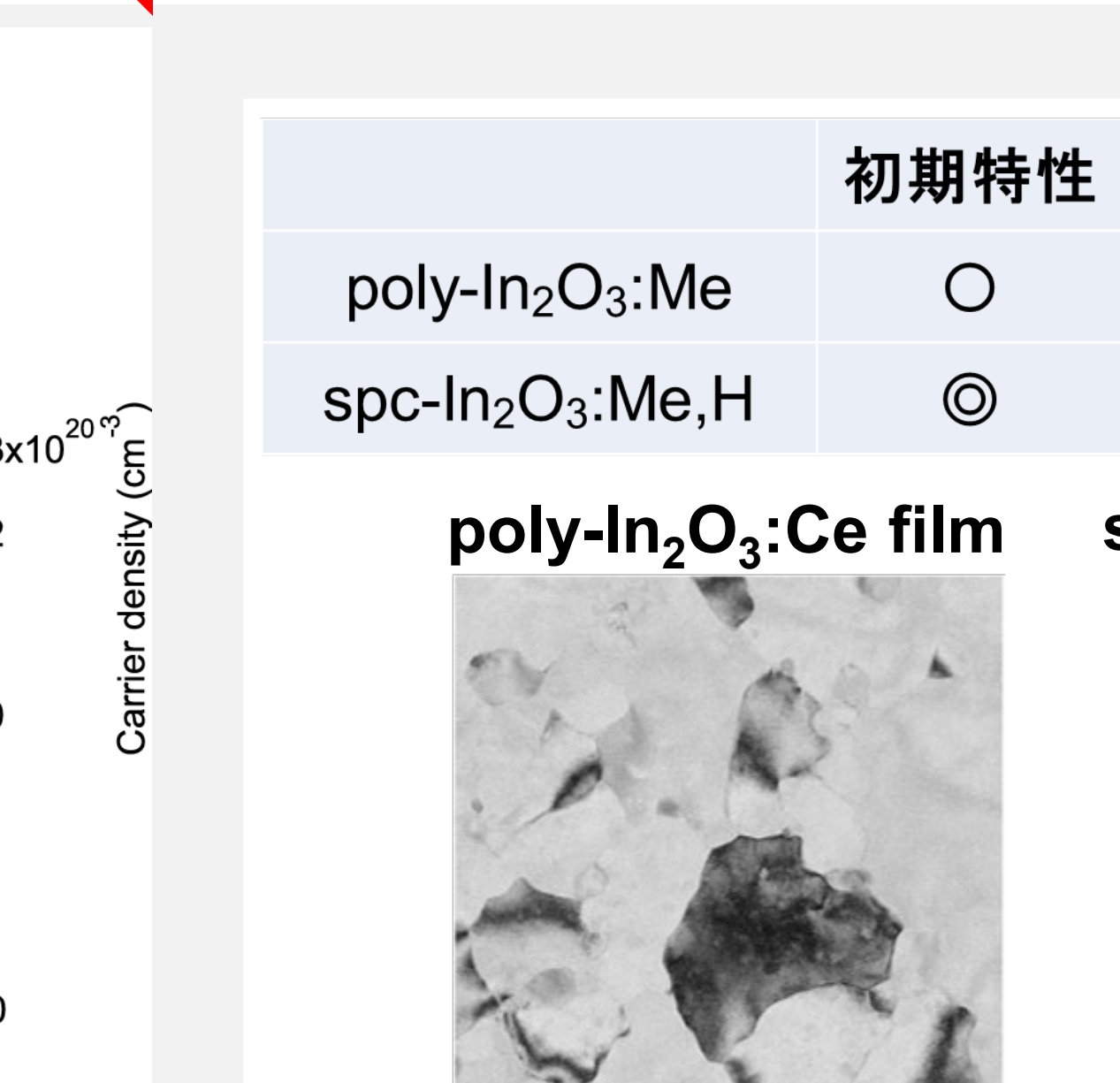
広帯域TCO薄膜の耐熱性・耐湿性

加熱試験

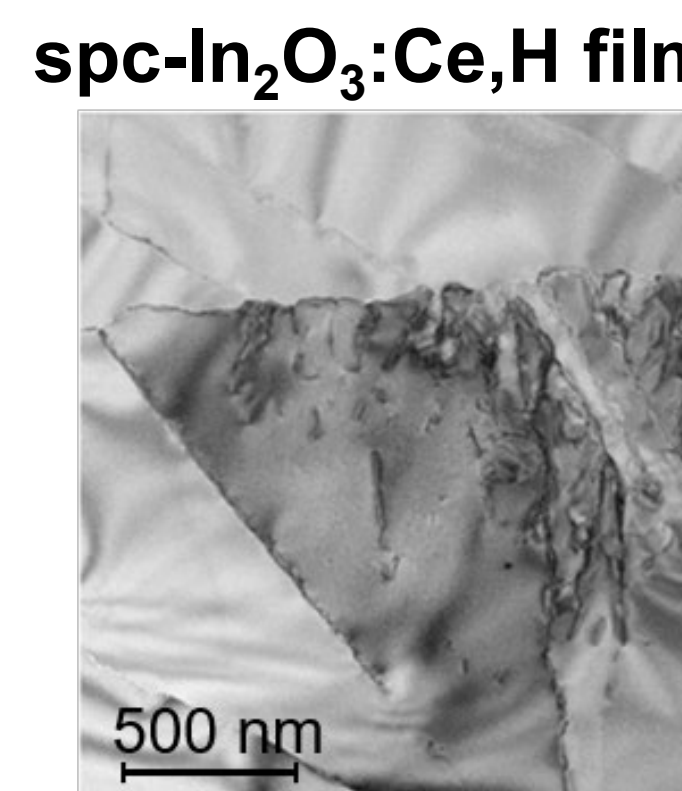
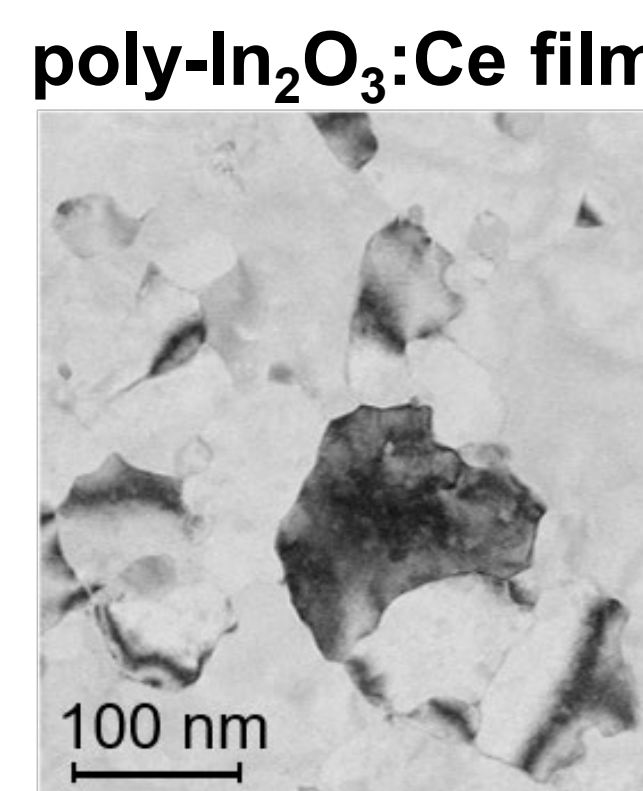
Hall測定 多結晶薄膜



固相結晶化膜

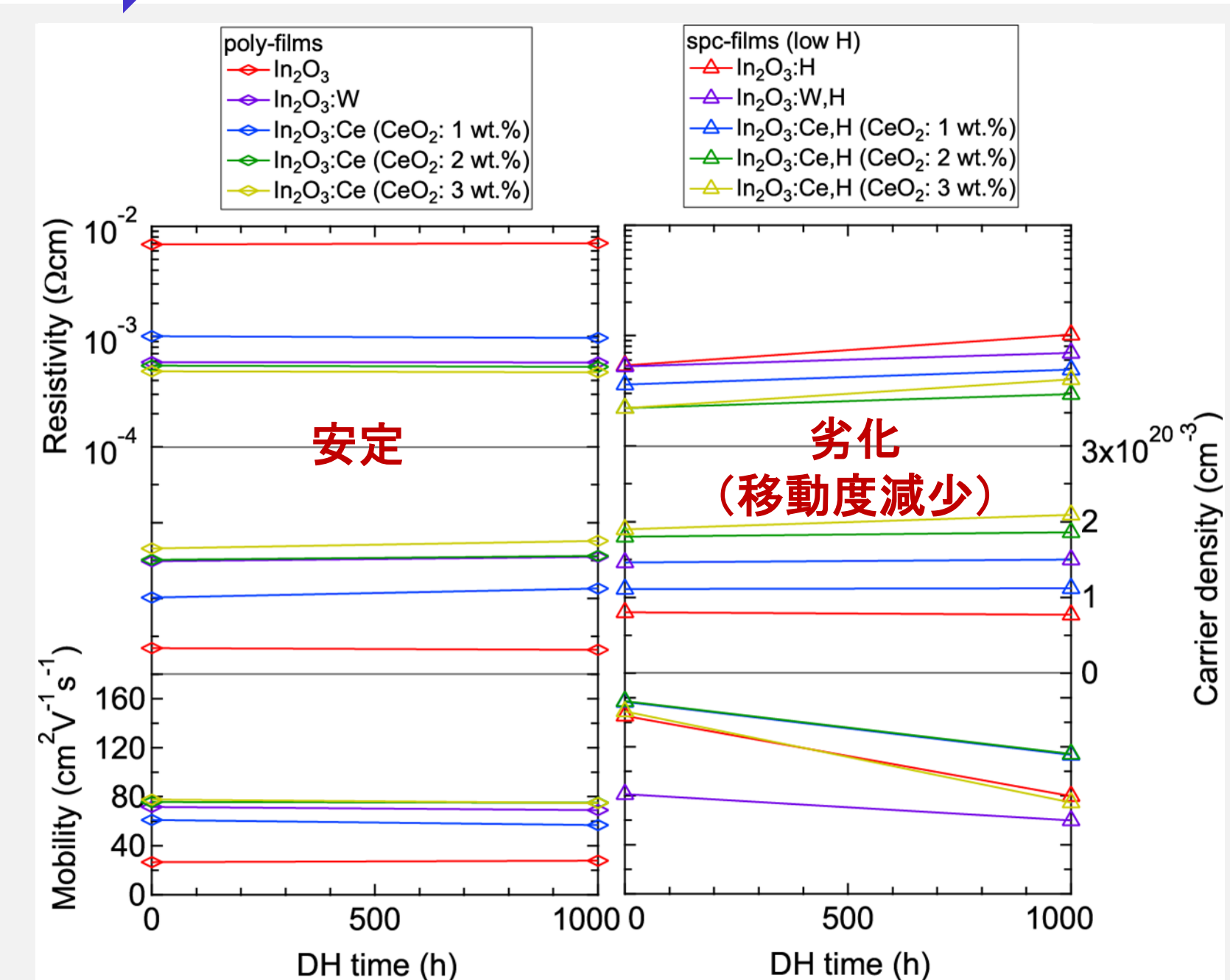


	初期特性	加熱試験後	湿熱試験後
poly- $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me}$	○	向上	安定
spc- $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me,H}$	◎	劣化	劣化

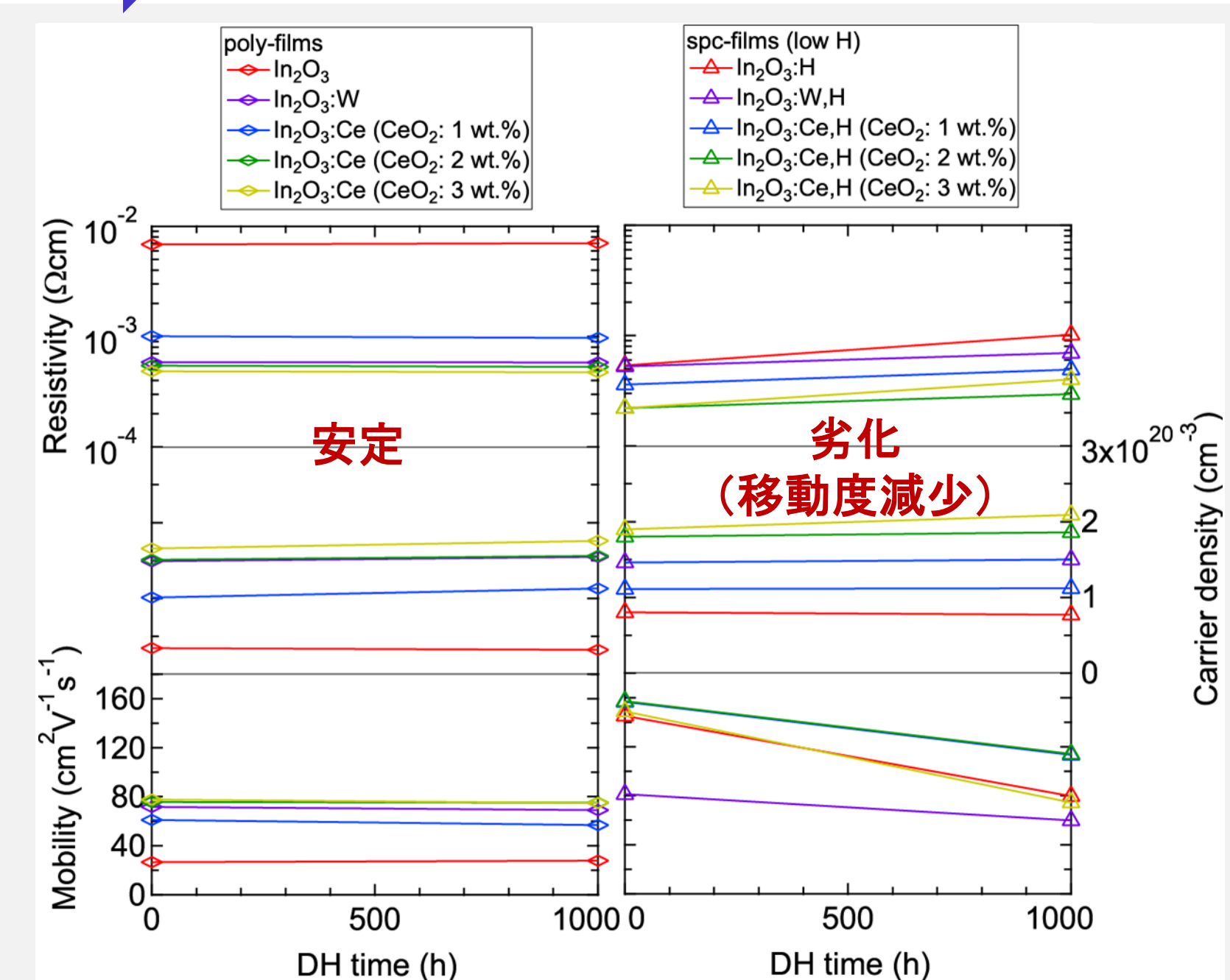


湿熱試験

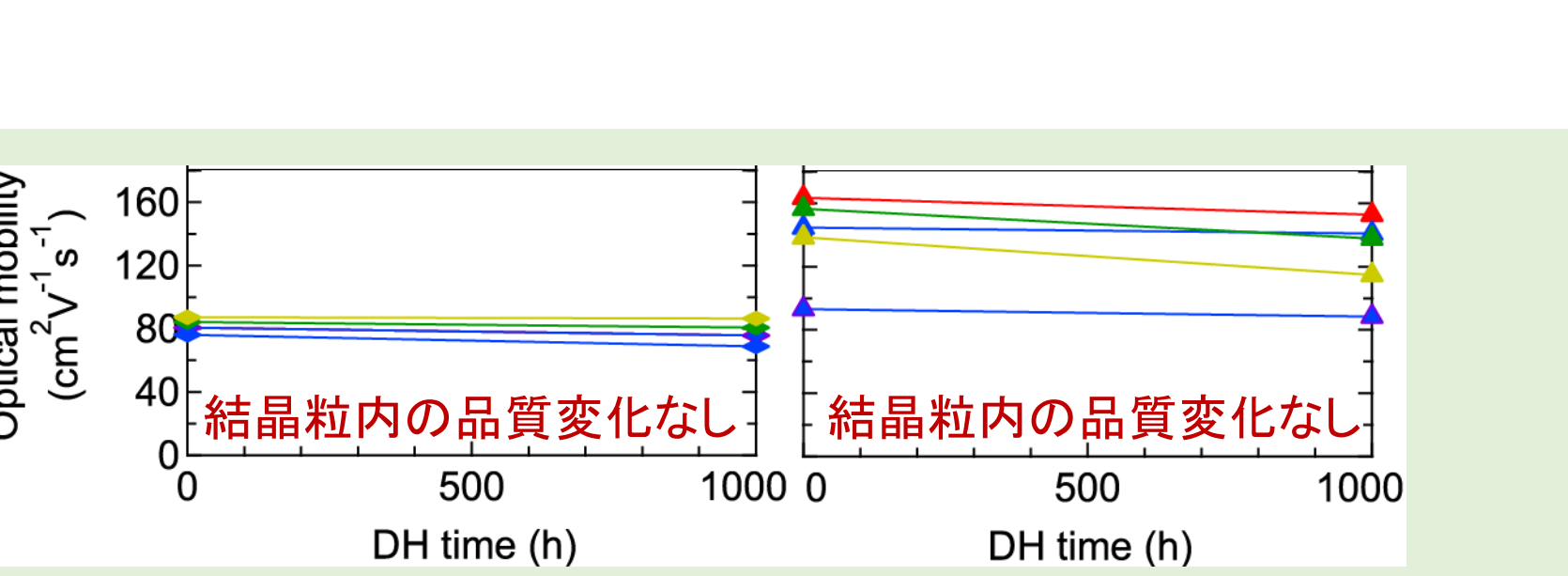
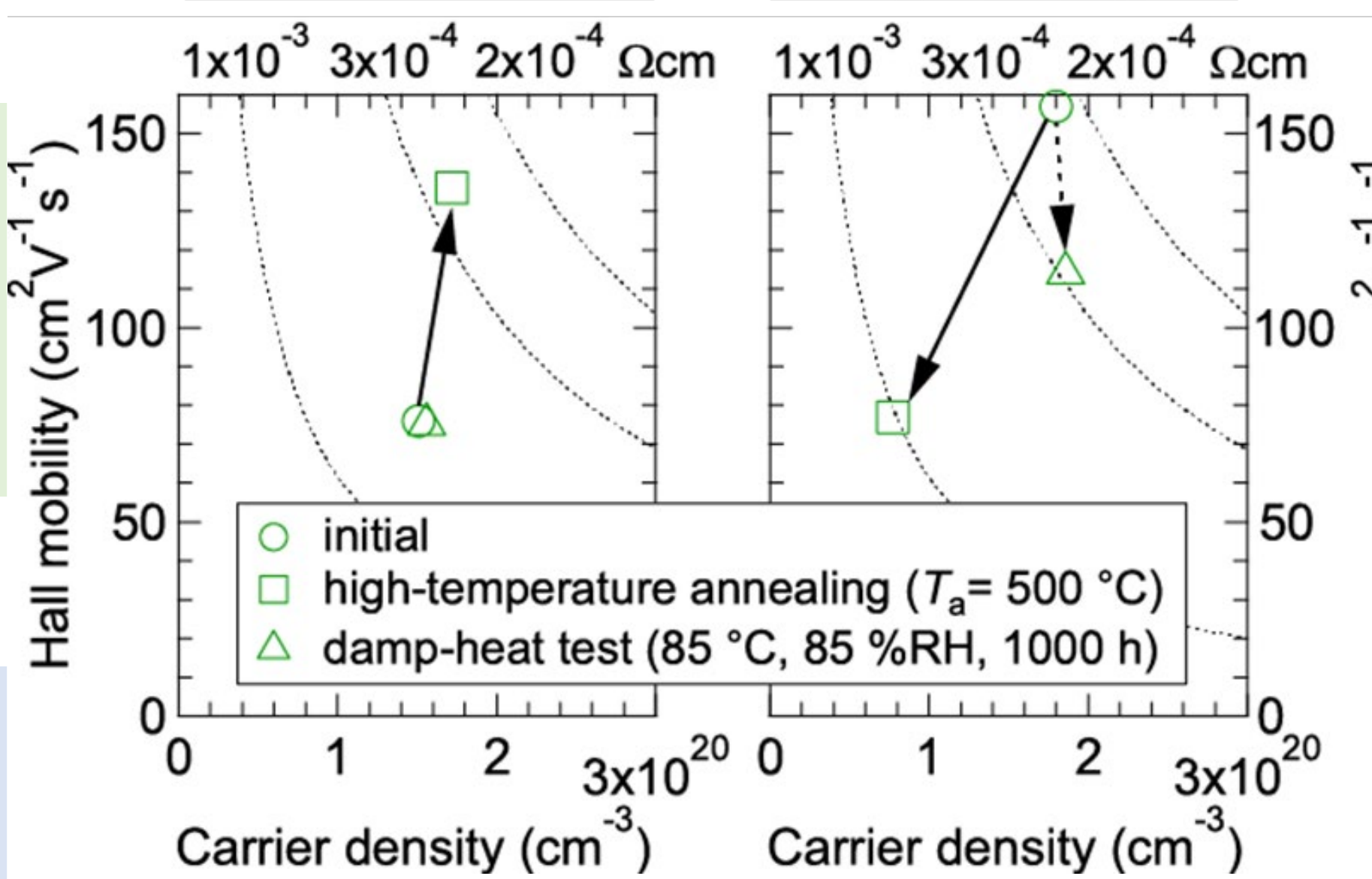
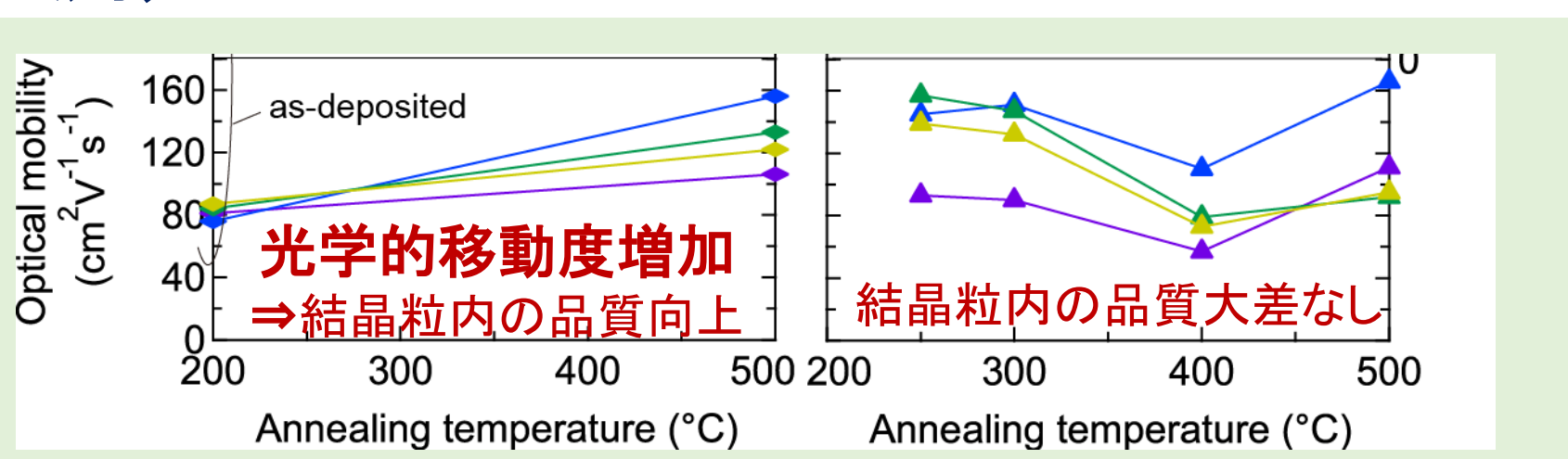
多結晶薄膜



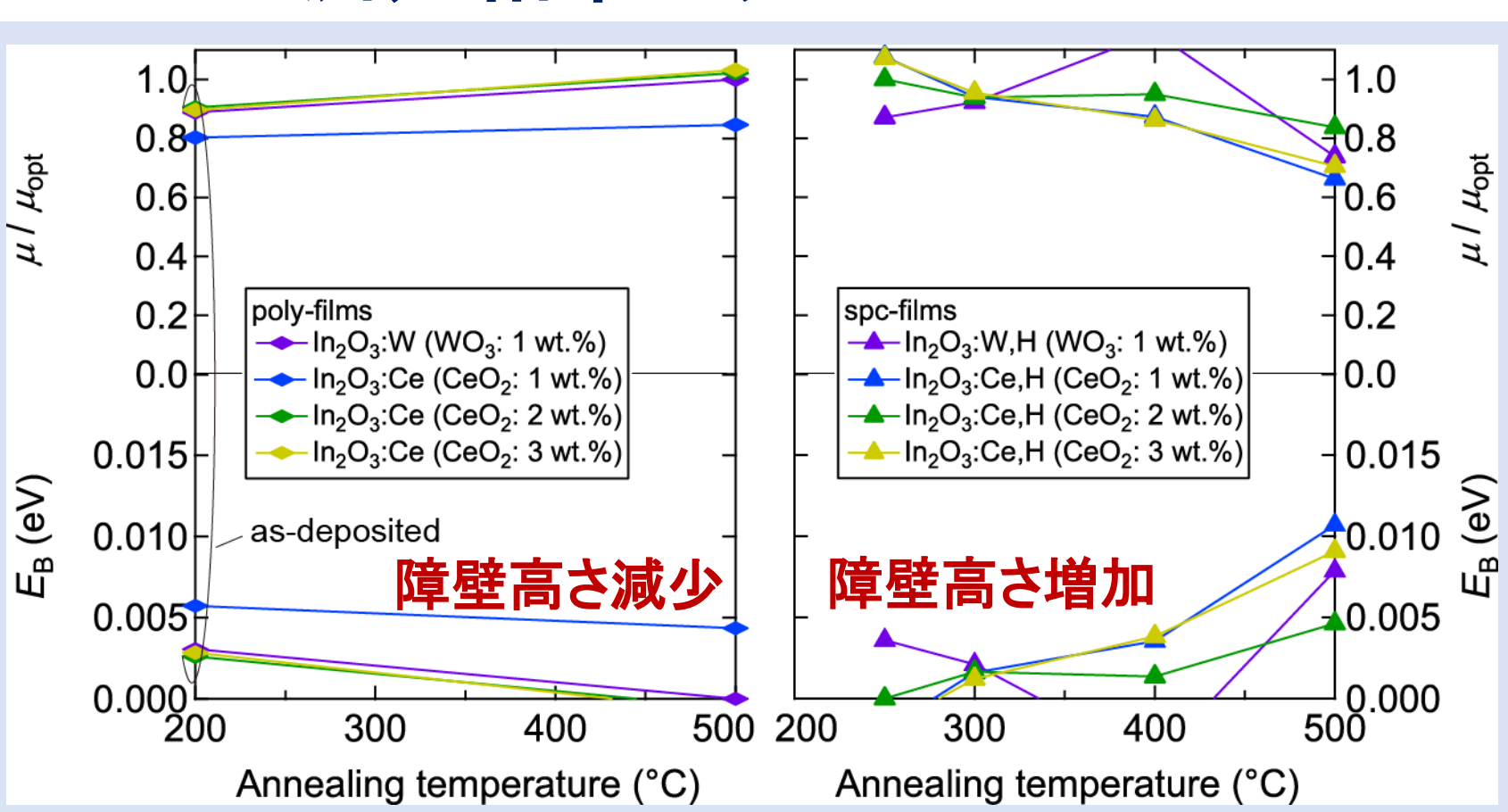
固相結晶化膜



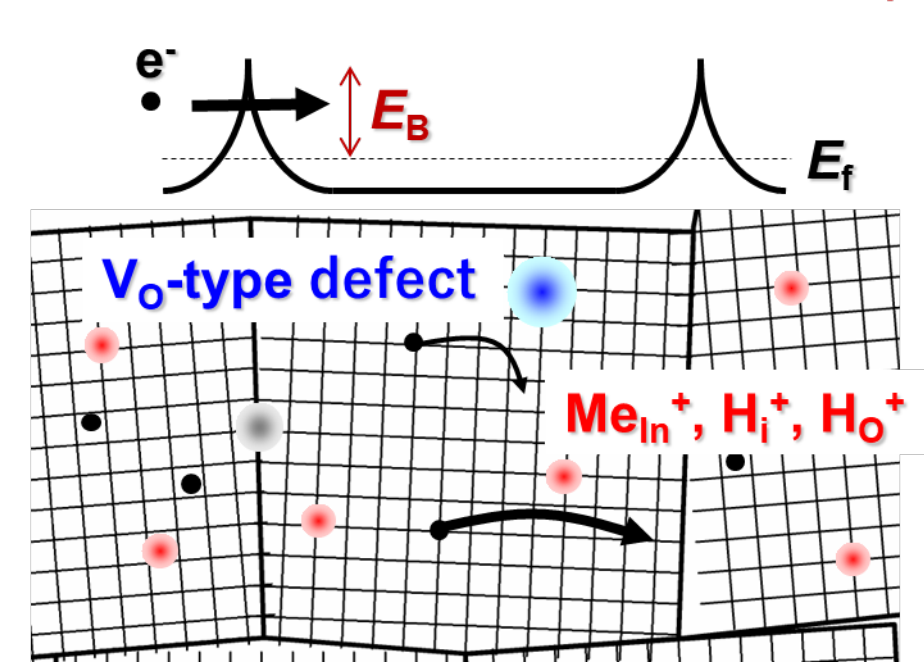
SE測定



Hall&SE測定結果より



$$\mu = \mu_{IG} \exp(E_B / k_B T), \mu_{IG} = \mu_{opt}$$



結晶粒内/粒界共に品質向上し、移動度増加

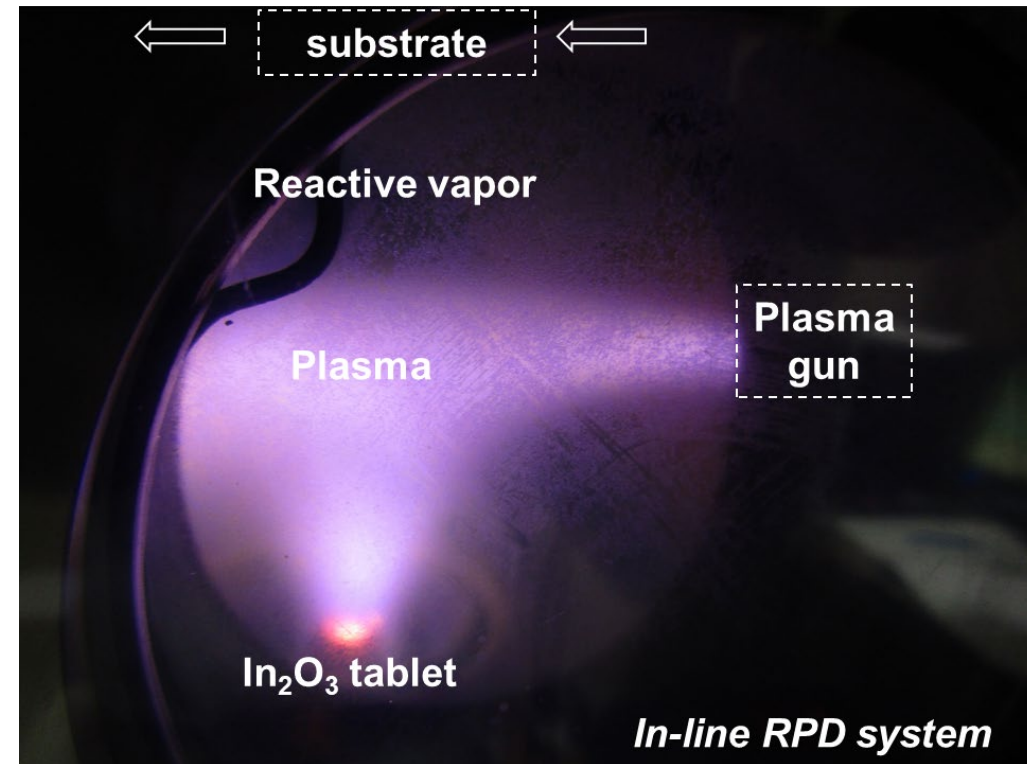
結晶粒界での電子の障壁高さ増大により、移動度減少

結晶粒内/粒界共に安定

粒界での電子の障壁高さ増大により、移動度減少

実験方法

製造方法: 反応性プラズマ堆積法(RPD)
 評価対象: 多結晶薄膜 poly- $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me}$ (Me: W, Ce)
 製膜温度: 200°C
 膜厚: 60 nm
 固相結晶化膜 spc- $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me,H}$ (Me: W, Ce)
 製膜温度: 非加熱
 膜厚: 60 nm、
 ポストアニール: 250°C、30分
 試験方法: 加熱試験 300 - 500°C (窒素雰囲気中)
 湿熱試験 85°C, 85RH%, 1000 h
 分析手法: Hall測定
 分光エリプソトリー(SE)測定(波長範囲: 200 nm - 30 μm)



まとめ

- 広帯域透明電極を薄膜トランジスタ、フォトセンサー、発光デバイス、太陽電池などの(光)電子デバイスに適用する際は、多結晶薄膜および固相結晶化薄膜を適切に使用する必要がある。
- 300~500°Cのメタライゼーションプロセスを使用するデバイスでは、poly- $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me}$ 薄膜が候補となる。熱処理により、電気・光学特性の向上も期待できる。
- 低温(200°C以下)プロセスが必要となるデバイスでは、spc- $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me,H}$ 薄膜が候補となる。しかし、高温高湿環境下では、薄膜粒界に水分子が侵入し、電子の輸送特性が劣化する(特に薄い薄膜で顕著)。劣化軽減には、製膜時におけるHの含有量の調整が重要である。製膜温度を調整し、成膜時の結晶相とポストアニール後の結晶相が混在した膜を作製することも有効である。また、デバイス全体の封止も有効である。
- ここではRPD法により形成されたTCO薄膜を紹介したが、マグネトロンスパッタ法により形成されたTCO薄膜でも類似の結果を確認している[4]。

参考文献

- [1] T. Maeda, K. Oishi, H. Ishii, W.H. Chang, T. Shimizu, A. Endoh, H. Fujishiro, T. Koida, Appl. Phys. Lett. 119, 192101 (2021), "High and broadband sensitivity front-side illuminated InGaAs photo field-effect transistors (photoFETs) with SWIR transparent conductive oxide (TCO) gate"
- [2] T. Koida, Y. Ueno, Physica Status Solidi A, 218, 2000487 (2021), "Thermal and damp heat stability of high-mobility In_2O_3 -based transparent conducting films fabricated at low process temperatures"
- [3] T. Koida, High-mobility transparent conductive oxide layers, in spectroscopic ellipsometry for photovoltaics, Vol. 1, Fundamental principles and solar cell characterization (Eds: H. Fujiwara, R. W. Collins), Springer, Berlin 2018.
- [4] T. Koida, Physica Status Solidi A, 214, 1600464 (2017), "Amorphous and crystalline In_2O_3 -based transparent conducting films for photovoltaics"

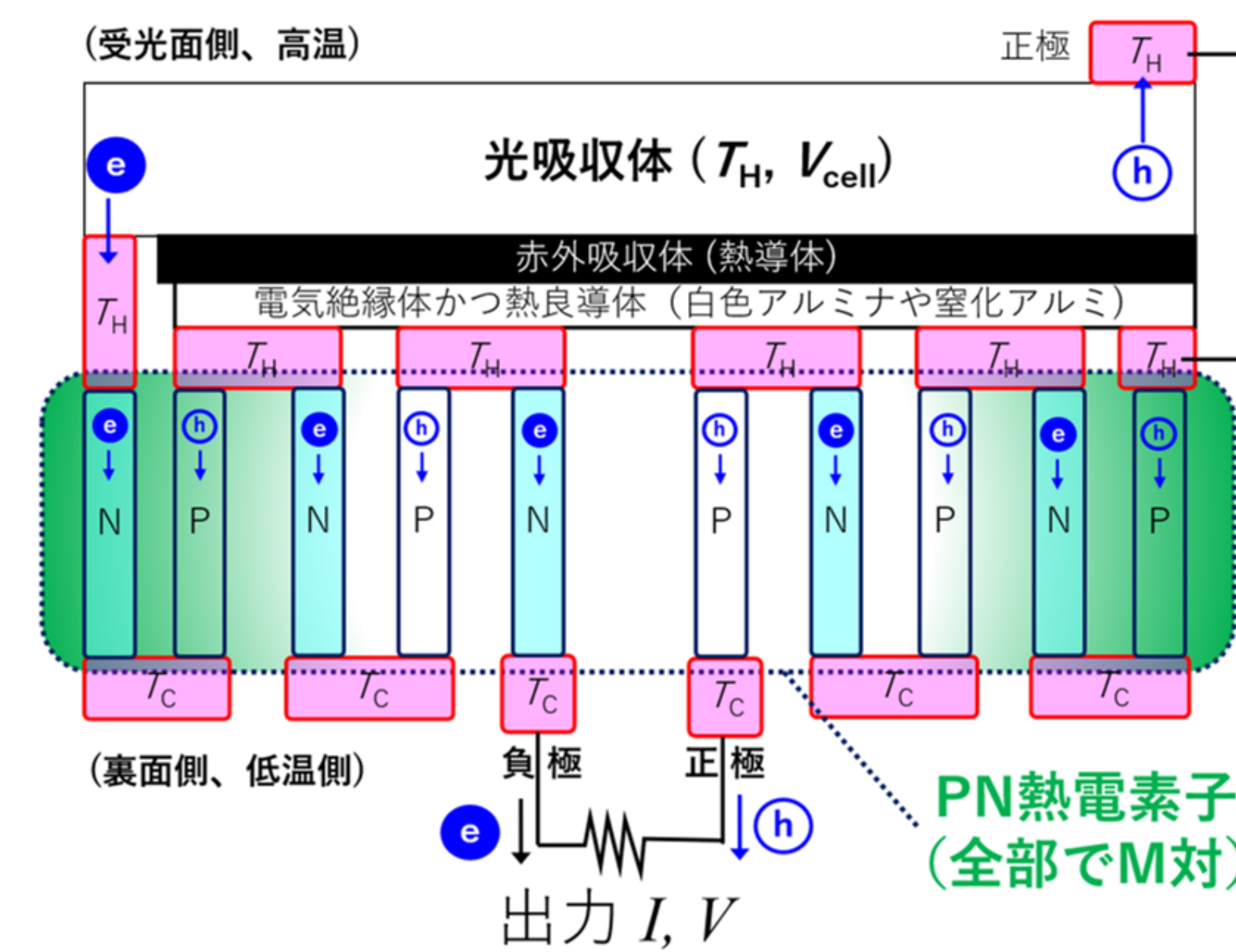
二端子直列型太陽電池-熱電素子ハイブリッド素子の開発: 熱回収型太陽電池の一形態として

上出健仁¹、望月敏光¹、佐久間惇²、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

研究の目的

- 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、タイプII=熱電変換素子利用)。
- タイプIIの本構造(二端子直列型太陽電池-熱電素子(PV-TE)ハイブリッド素子)を作製し、温度制御下(強制加熱+冷却)でI-V測定を行い、開放電圧だけでなく、出力の上での「正の温度特性」の観測を目指す。

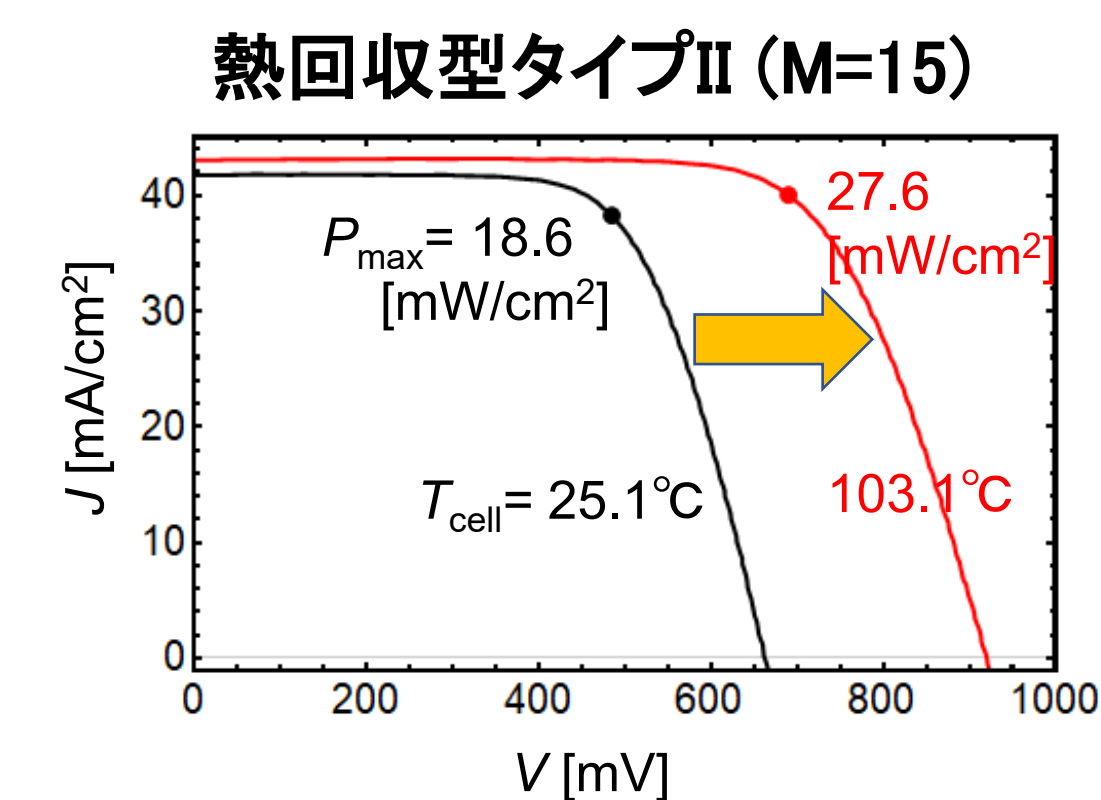
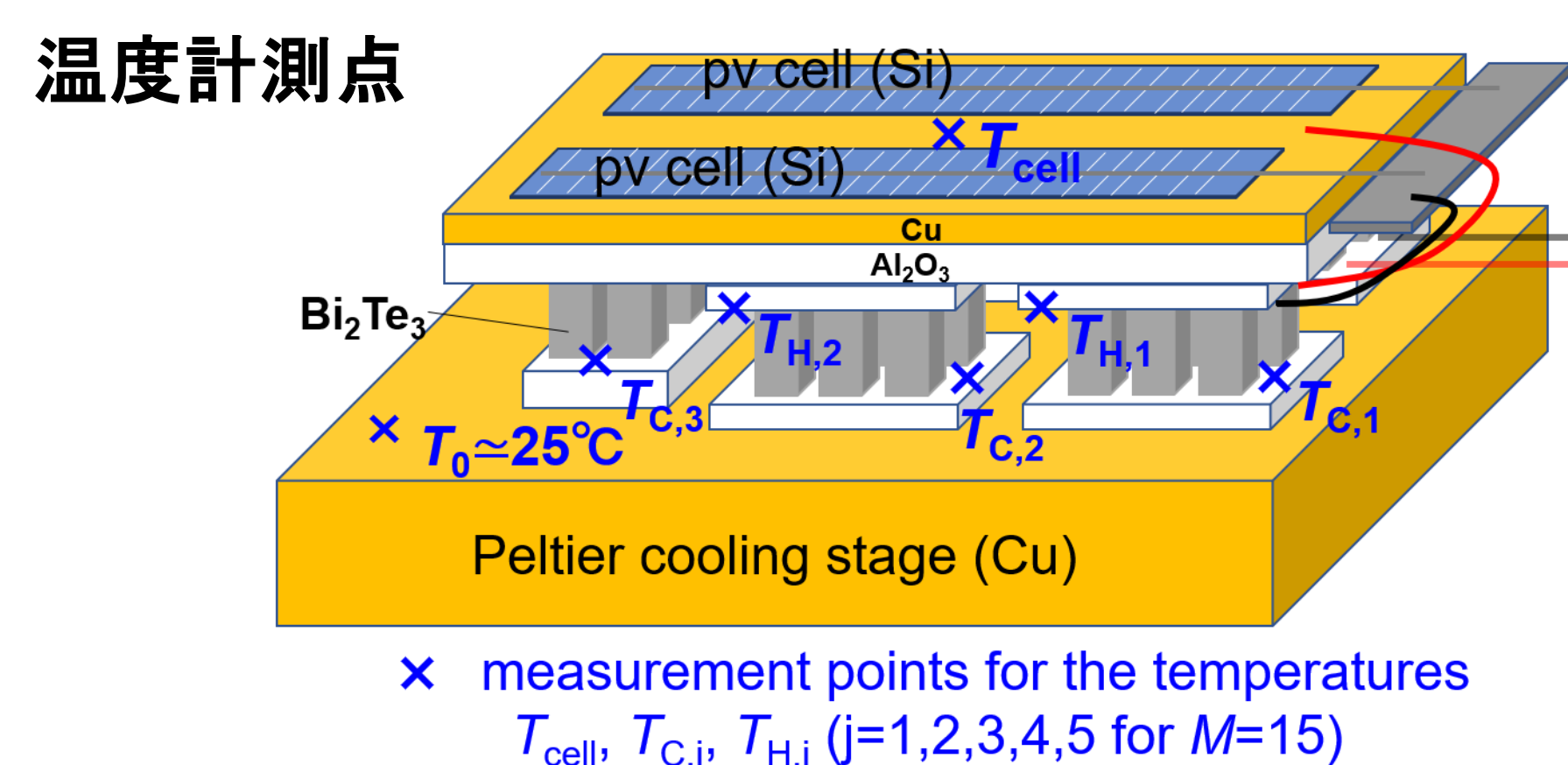
実験



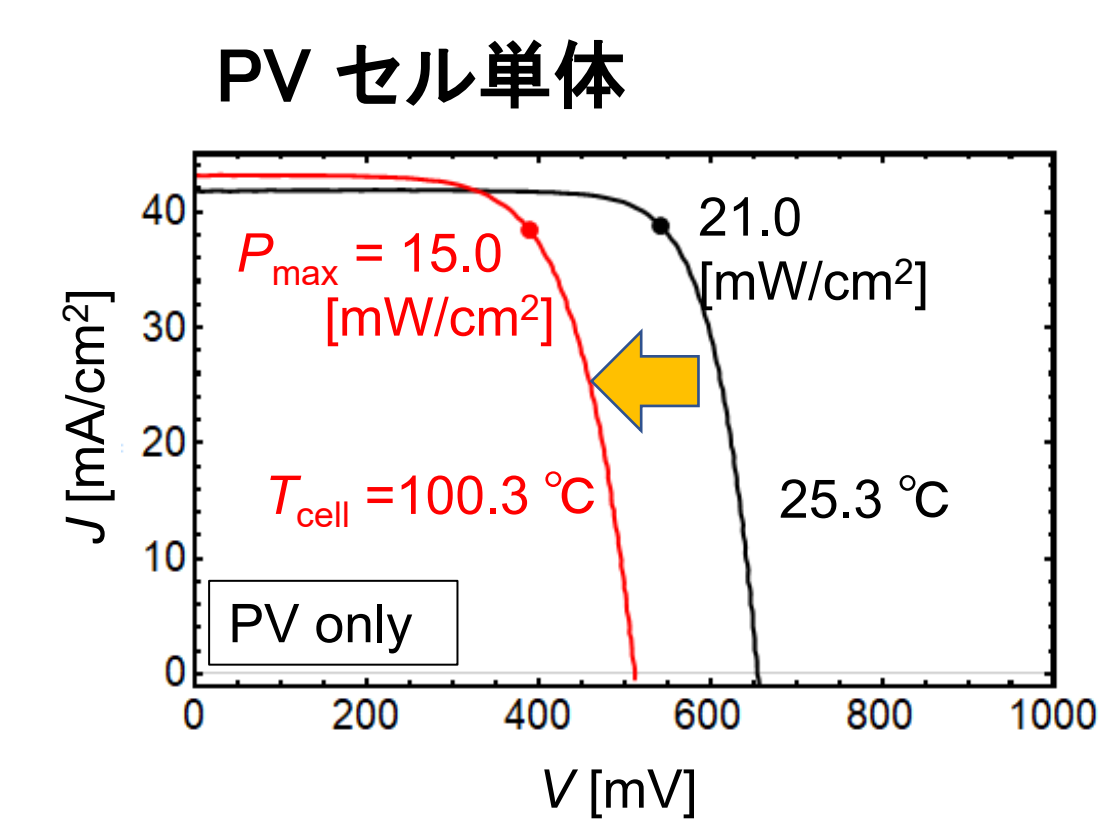
異なる熱電素子対数(M)を持つデバイスを試作し各所温度計測と発電特性評価を同時に行い熱回収効果を評価した。

結果1

市販の結晶Si太陽電池(変換効率約21%)と、M=3の熱電モジュール(BiTe)を複数組み合わせ異なる対数(M=3,15)のデバイスを作製し、セル面と低温部を温度調節しながらI-V測定を行った。



• 熱回収型タイプII: V_{OC} と P_{max} が温度とともに上昇(正の温度特性)

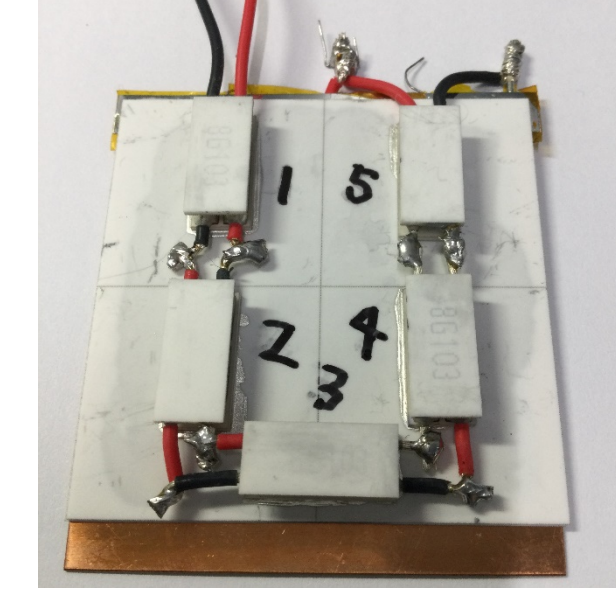
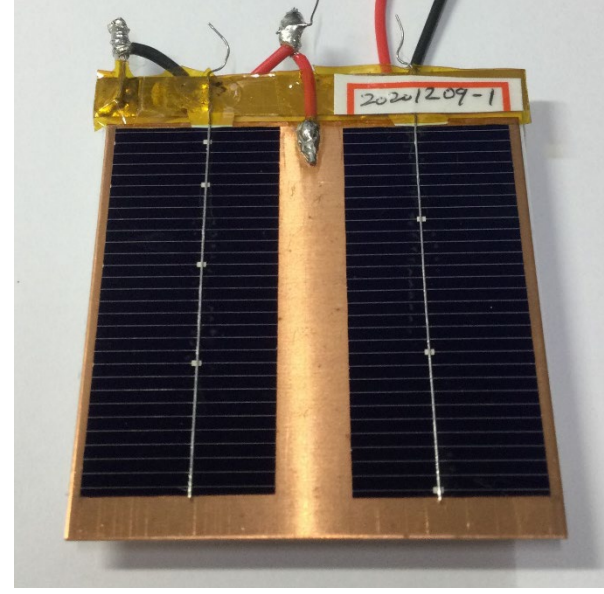


• PVセル単体: V_{OC} と P_{max} が温度とともに減少(負の温度特性)

サンプル: 熱回収型タイプII (M=15)

Top view

Bottom view



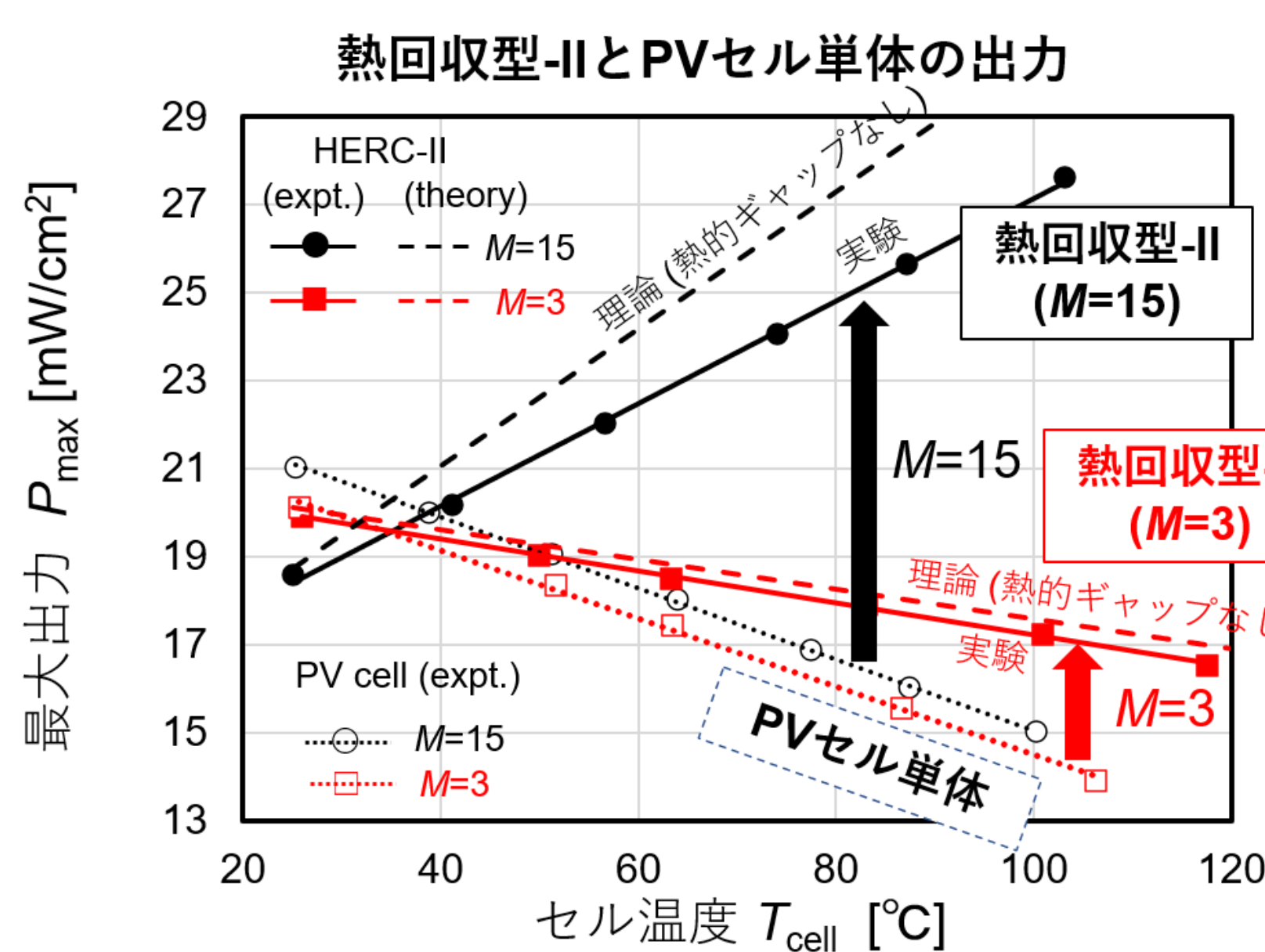
市販シリコン太陽電池 (PERCセル)

BiTe TE素子 (ZT=1.2@300K) (M=3のミニモジュールを複数接続して作製)

- 温度設定については、下段の冷却ステージを常に25°C付近に保った(自然冷却の方法で実現できる最も理想的な状況)。
- 各所温度は、TEデバイスの上面と下面、およびPVセル設置面に熱電対を複数取り付け、平均値として計測。

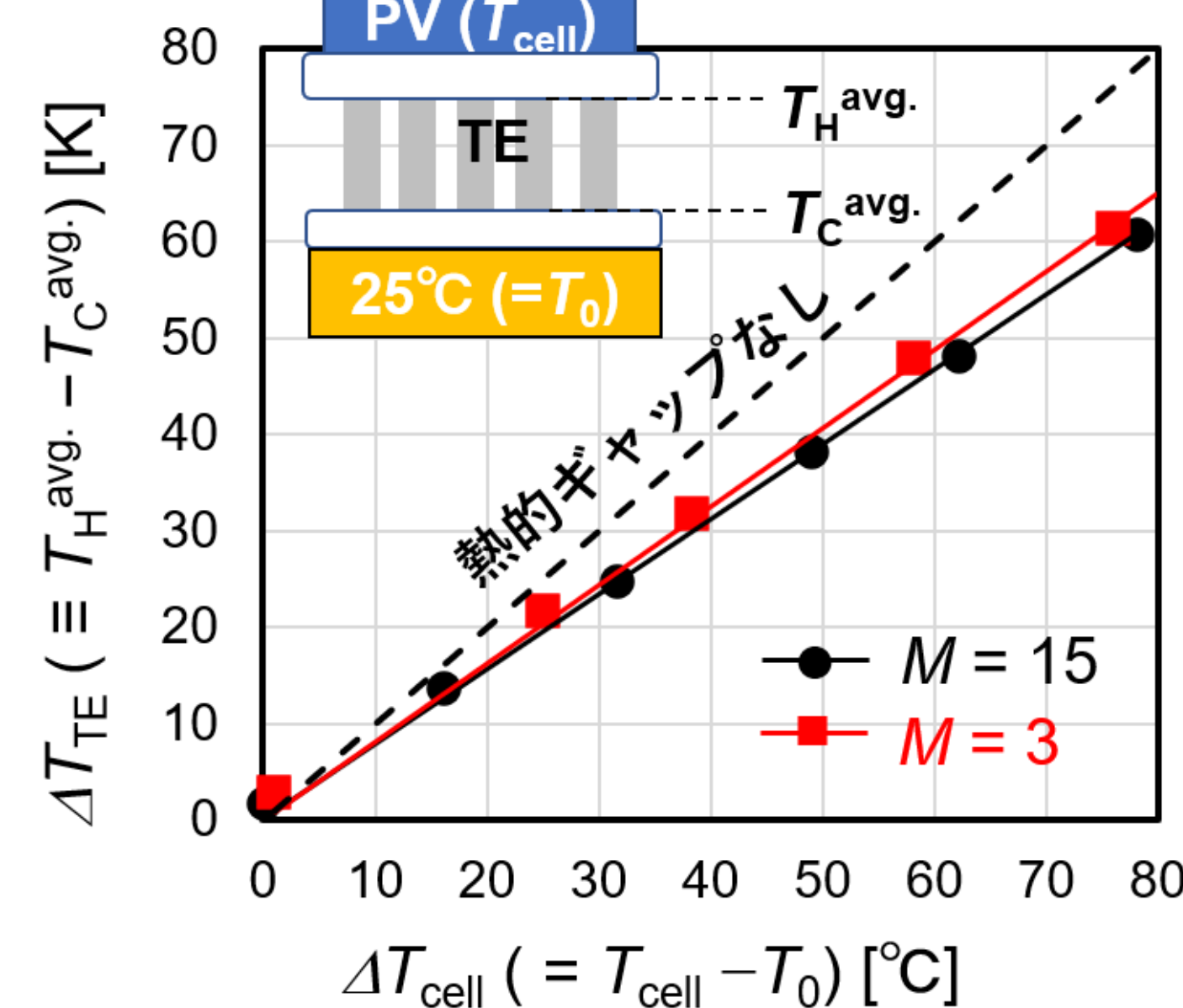
結果2

最大出力の温度依存性と対数Mによる違い



適切なM(ここでは15)で設計することで出力における正の温度特性が得られる。

デバイス内の熱的ギャップ



不要な熱的ギャップ(=ΔT_cell-ΔT_TE)を低減する熱設計で出力のさらなる向上が可能。

結論と展望

- シリコン太陽電池と市販のTE材料で作製した熱回収型タイプIIが、PVセルの排熱に加え外部熱を利用した場合に、出力の上で正の温度特性を示すことを明らかにした。
- 実用的に許される外部熱量の範囲で、出力の正の温度特性が観測できることを示すことが次の課題。
- 熱利用効率向上のため、赤外吸収体の導入に取り組む。
- より実用的な系を意識し、受動冷却による実験を行う。

参考文献

- (熱回収型太陽電池:タイプII)
- [1] K. Kamide et al., 38th EU PVSEC, 1BO.16.4, pp.37-40 (2021).
 - [2] 上出他, 第82回応用物理学会秋季学術講演会 11a-N204-8 (2021).
 - [3] 上出他, 第66回応用物理学会春季学術講演会 11a-W321-5 (2019).
- (熱回収型太陽電池:タイプI)
- [4] K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. 12, 064001 (2019).
 - [5] K. Kamide et al., WCPEC-7, IEEE PVSC Proceedings, pp.1817-1821 (Hawaii, USA, 2018).
 - [6] K. Kamide et al., IEEE PVSC-47, pp. 2175-2177 (2020).

自己バイアス法による絶縁抵抗測定での測定時間の短縮に向けた対地電圧推定方法の検討

高島 工、池田一昭
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

●研究の背景と目的

【PVstringの絶縁抵抗測定】

既存: 数百kΩから数MΩを対象とした地絡の即時検知。
本研究: 数十から数百MΩを対象とした不具合発生の予兆検知。
絶縁抵抗の異常の傾向を早期に検出し、定期点検時に異常箇所を改修。
→ PV設備の感電・火災事故の予防保全に寄与。
目的: 自己バイアス法による絶縁抵抗測定の測定時間の短縮。
本報: 短時間の対地電圧測定データから一定時間後の対地電圧値を推定する手法の検討結果と絶縁抵抗の推定結果の報告。

●結論

- 自己バイアス法で絶縁抵抗の算出に必要な対地電圧を短時間で推定する方法を検討した。
 - 短時間の経時変化を3つの関数で再現し、3つの外挿値の平均を対地電圧の推定値とした。
- 10秒間の対地電圧実測値から30秒後の対地電圧を推定し、絶縁抵抗値を算出した。
 - 74MΩ以下の領域: 推定値の平均が実測値よりも6.6MΩ大。推定値のばらつきの幅は9.6MΩ程度。
 - 74MΩ以上の領域: 推定値のばらつきの幅は146MΩ程度。
 - より高精度な30秒値推定には10秒を超える測定時間が必要。

1. 自己バイアス法と対地電圧

自己バイアス法: string開放電圧と対地電圧から絶縁抵抗値を算出する手法。

$$R_g = R_m \left(\frac{V_{oc}}{|V_p| + |V_n|} - 1 \right)$$

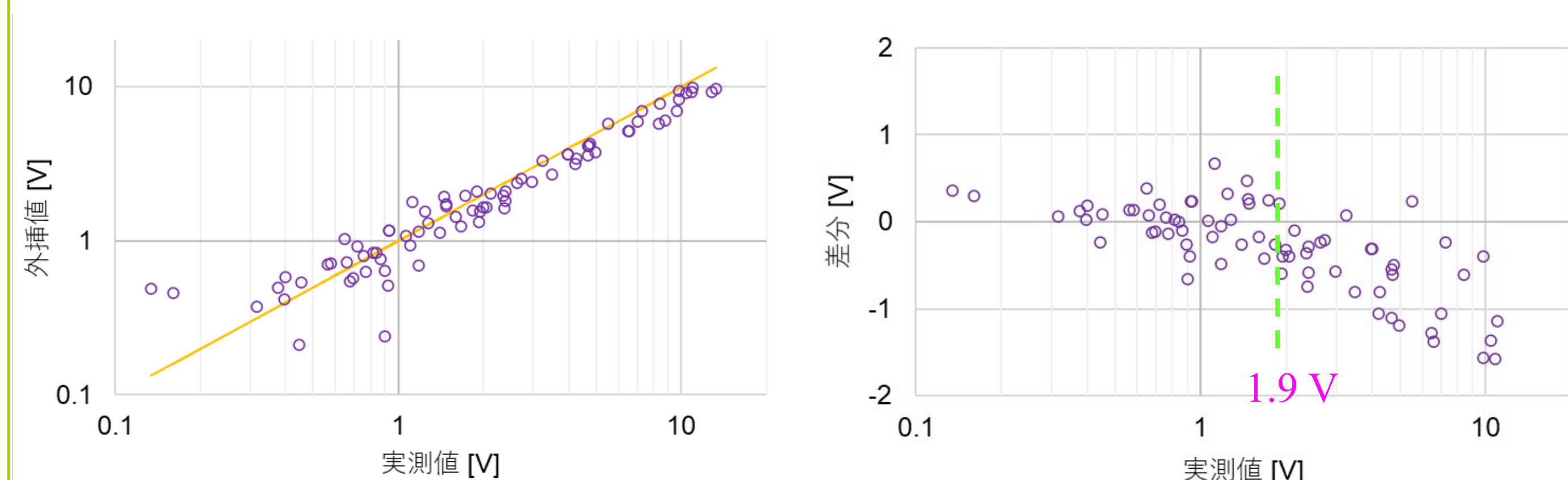
R_m : 検出抵抗
 V_{oc} : 開放電圧
 V_p : 対地電圧(正極)
 V_n : 対地電圧(負極)

【課題】

- 対地電圧は測定開始から時間の経過とともに減衰し、絶縁抵抗値の計算に必要な収束値を得るために多分な時間を要する。
- 減衰は単純な等価回路から導出される波形とは異なり、抵抗値(特に高抵抗)や測定時の環境により多様な形を示す。

【本研究】短時間の測定データから一定時間後の電圧値(あるいは収束値)を推定する。

4. 対地電圧の推定値と実測値



対地電圧外挿値の平均値と実測値の関係
対地電圧の残差と実測値の関係
実測値 < 1.9V: 残差は正側、負側とも同程度に分布
実測値 > 1.9V: 残差は負側に偏って分布

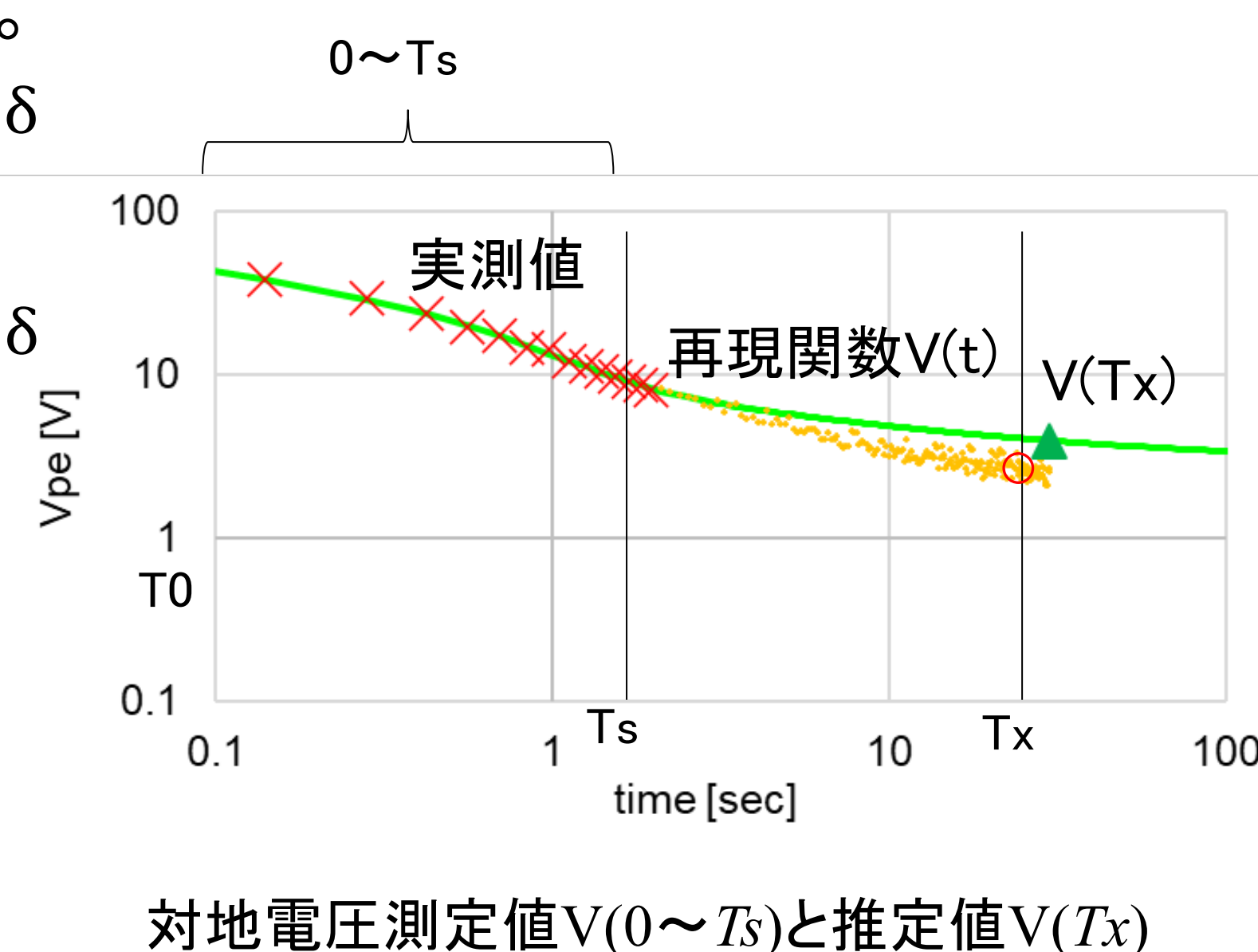
2. 対地電圧を推定する手順

① 時刻0~Ts秒後までの対地電圧の測定データを再現する関数を以下の3形式で作成する。

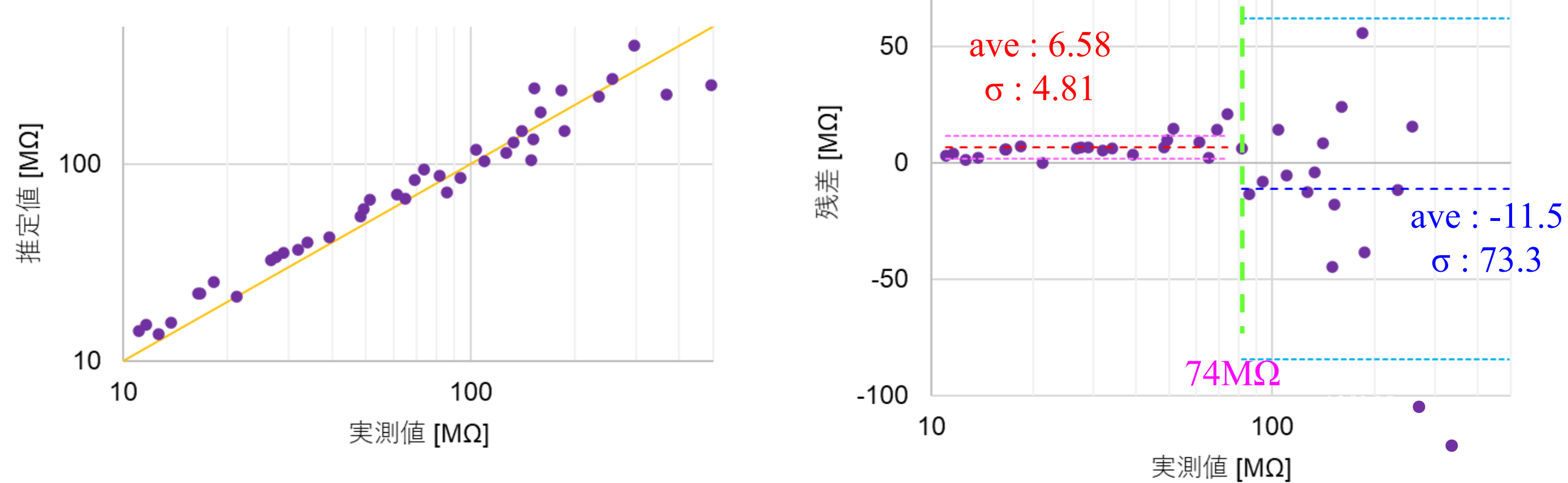
- (1) $V(t) = \beta e^{-\frac{t}{\tau}} + \alpha t^{-\gamma} + \delta$
- (2) $V(t) = \beta e^{-\frac{t}{\tau}} + \alpha t^{-\gamma}$
- (3) $V(t) = \alpha t^{-\gamma} + \delta$

② 3つの関数を用いて時刻Tx(>Ts)における対地電圧を外挿する。

③ 3つの外挿値の平均値をTx秒後の対地電圧の推定値とする。



5. 絶縁抵抗の推定



絶縁抵抗推定値と実測値の相関
絶縁抵抗値の残差と実測値の関係
① 74MΩ以下: 推定値の平均が実測値よりも6.6MΩ大きい。推定値のばらつきは4.8MΩ程度。
② 74MΩ以上: 推定値のばらつきは標準偏差で73MΩ程度。

3. データ処理方法と使用した対地電圧測定データ

【処理】測定開始から10秒間の対地電圧値から再現関数を作成。
→ 3関数の30秒外挿値を平均して対地電圧を推定。
→ 30秒絶縁抵抗値を算出。

【対地電圧測定データ】

- 測定対象: 多結晶Siモジュール8枚直列のstring。
- 測定回数: 40回。
- 電圧測定手順: $V_{oc} / 2$ 秒 → $V_p / 30$ 秒 → $V_n / 30$ 秒 → $V_{oc} / 2$ 秒。
各電圧値は測定期間の終端1秒間の平均値を採用。
ただし V_{oc} は2回の測定値のさらに平均値。
各パラメータの測定間隔: 0.4秒。サンプリング: 7Hz。
- 検出抵抗 R_m : 1.12 MΩ

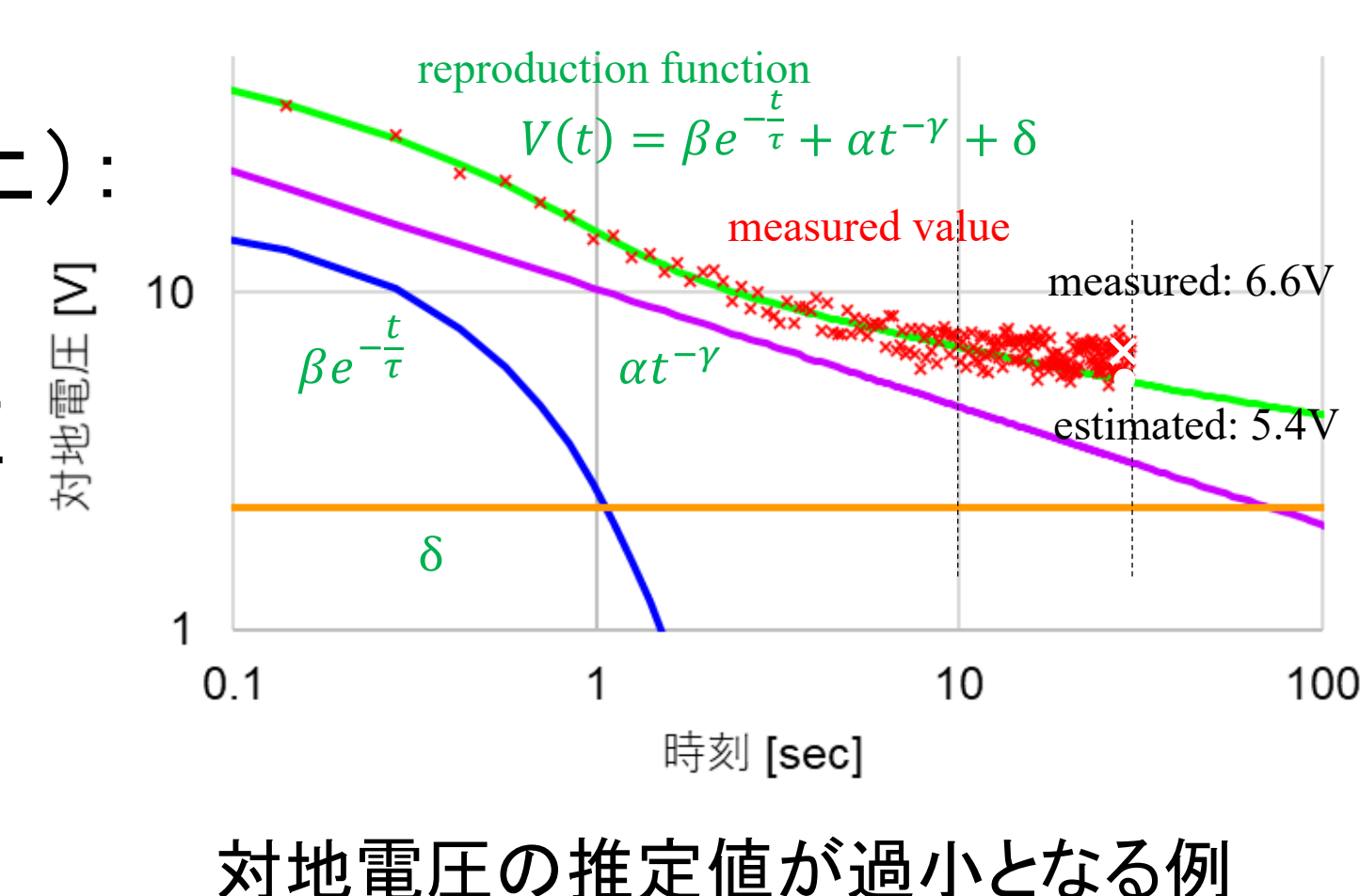
6. 考察

●低絶縁抵抗領域(74MΩ以下):

- 絶縁抵抗値を過大推定 = 対地電圧を過小推定: 42例中33例。
- ➔ 実測値には時定数が10秒を超える電圧成分が重畳する。
- ➔ 短時間データで構築した関数では重畳成分を表現できない。
- ➔ より高精度な30秒絶縁抵抗値の推定には10秒を超える測定時間が必要。

●高絶縁抵抗領域(74MΩ以上):

- 対地電圧の残差の実測値に対する相対比が大きいため推定誤差が大。
- 推定精度の向上には対地電圧の残差の低減が必要。



太陽光発電のHeadroom制御の基礎検討

大関 崇、高松 尚宏、大竹 秀明

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

- 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となる。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なる。
- 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必要がある。
- そのため本事業では、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する。

まとめと今後

- 持続的なPV発電事業の実現のため、Headroom制御による電源価値向上に向けたフィジビリティスタディを行った。
- 今後、Headroom制御を利用して下記のような検討を行う。

- (1) インバランス低減技術
- (2) 需給調整市場への拠出技術
- (3) Headroom制御の実現
- (4) システム化の検討

太陽光発電のHeadroom制御

- 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。
 - 福島再生可能エネルギー研究所(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)分の有効電力を制御可能なPCSから構成される。
 - 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。
- Headroom指令を行ったデータの例を示す。ここでは、日射から期待発電の推定は簡易的な多項式とした。
 - 昼の11~14時に50kWのHeadroomを確保するような制御指令を行っている。
 - 図に示す通り、大きな変動をしているが50kWを確保していることがわかる。また、日射と出力との相関図から特定の日射に対して50kWオフセットして動作していることが確認できる。
 - 日射とのばらつきや期待発電電力の推定精度の確認は今後の課題である。

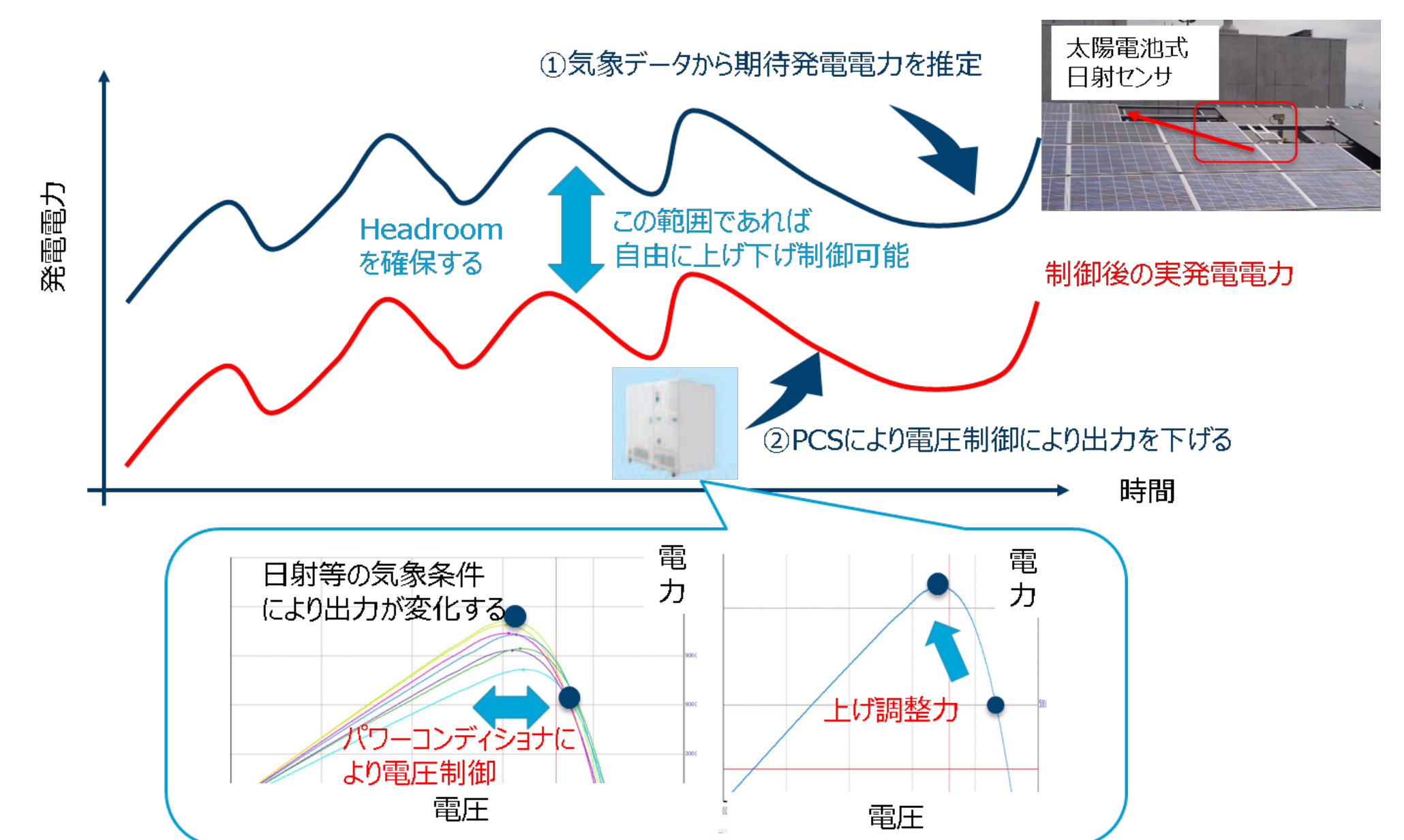
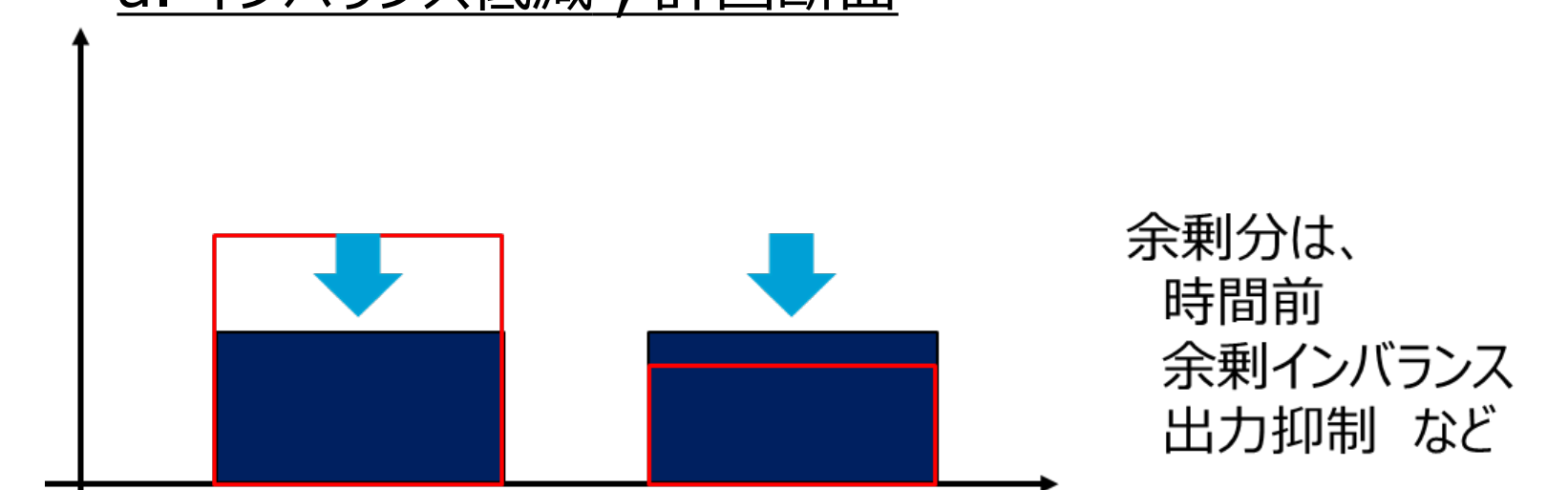


図 Headroom制御概要

a. インバランス低減; 計画断面



b. 需給調整市場調整力創出: 計画断面

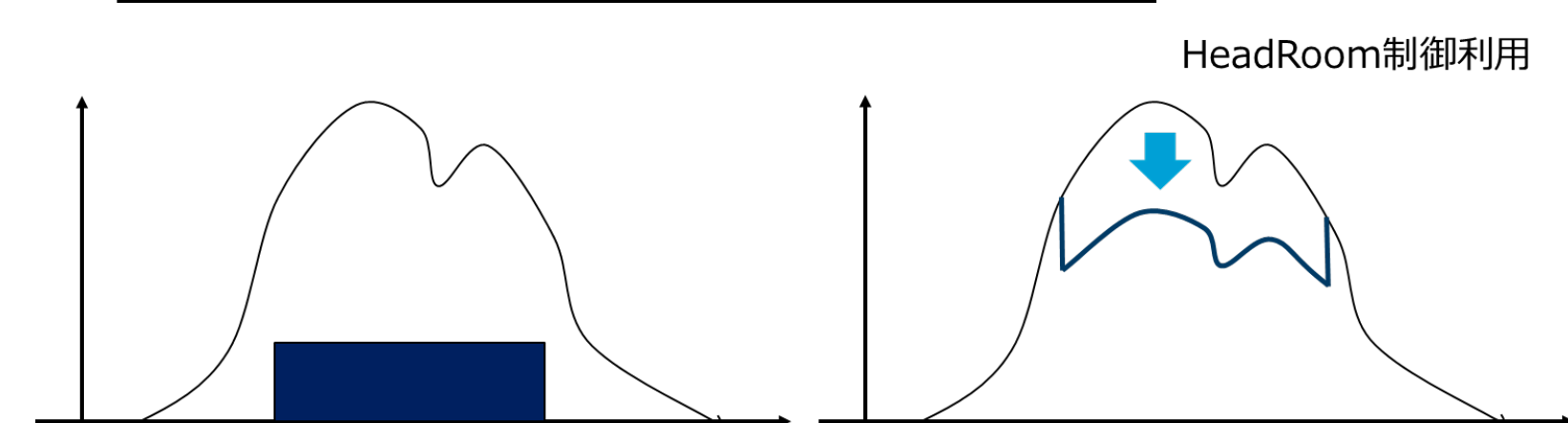


図 Headroom制御を利用したユースケース

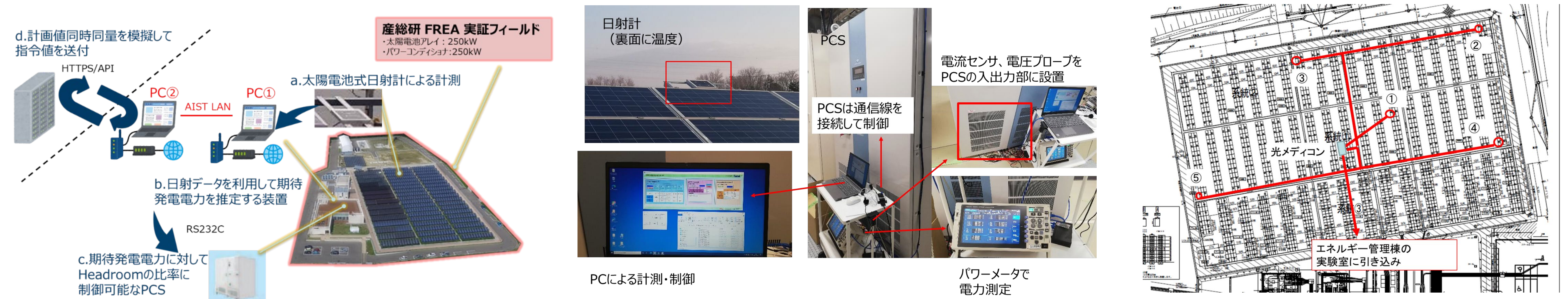


図 実証実験設備の概要

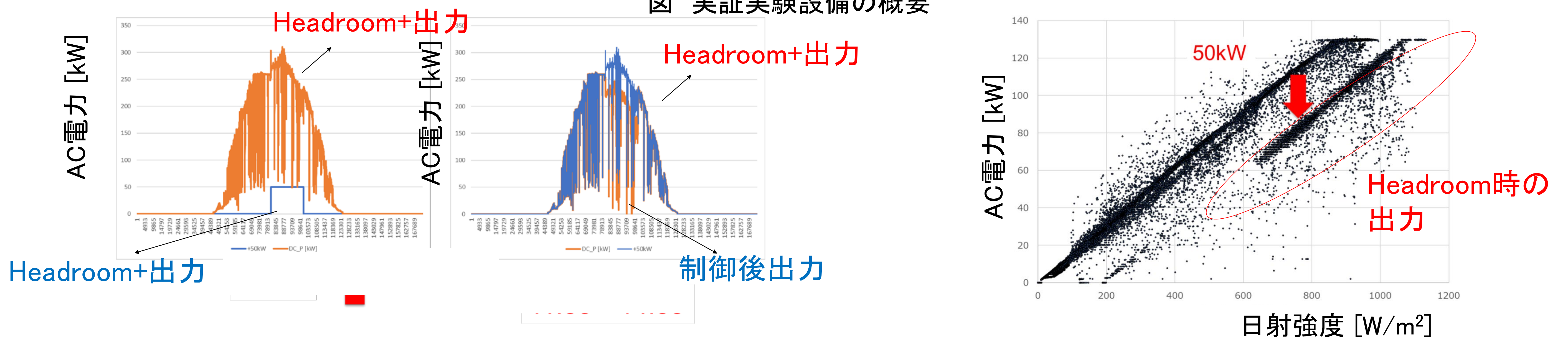


図 Headroom制御の実施例(11:00~14:00の間 50kW分のheadroom)

謝辞:本研究の一部は、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)」の一環で実施した。

出力予測の大外れ時のアンサンブル予報の分析

大竹秀明^{1,2,4}、大関崇¹、高松尚宏¹、高根雄也²、森友輔³、若尾真治³、仲江川敏之⁴
 産業技術総合研究所 1 再生可能エネルギー研究センター、2 環境創生研究部門、
 3 早稲田大学、4 気象研究所

はじめに

- 電力需給運用 ⇒ 前日の出力予測情報（数値予報ベース）の活用が進む
- 出力予測誤差が大きいケース ⇒ **電力需給バランスに課題**
- 確率予測や複数（アンサンブル）予測の活用 ⇒ 予測の信頼度情報の利用
- 海外：予測の不確実性の情報を用いたEVや蓄電池制御の研究なども進む（例えば、El-baz, 2018 et al. ⁽¹⁾など）
- メソアンサンプル予報システム（MEPS）の現業化（2019/6/27）
⇒ 気象現象の発生を確率的に捉える。降水、気温などの分析は進んでいるが、太陽光発電の出力に
関係する日射量に関する分析が必要。

【先行研究】

- MEPSデータにベータ分布を適応した新たな信頼度情報の作成（野原と菅野、2021⁽²⁾）
- MEPSにおける日射量予測の大外れ事例の抽出、4か月分のデータの初期評価（大竹、2021⁽³⁾、電気学会B部門大会）
- MEPSを入力として、機械学習(SVM)の複数予測器の利用と統合手法による出力予測の大外れの低減効果（Takamatsu et al. 2021⁽⁴⁾）

アンサンブルデータ

メソアンサンプル予報（MEPS）の仕様

運用開始日	2019年6月27日	
実行頻度（初期時刻）	1日4回（00, 06, 12, 18 UTC）	
予報期間	39時間	
数値予報モデル	名称	isctca
	水平格子間隔・鉛直層数	5 km, 76 層
	初期値	メソ解析値
境界値	陸面	地中海温度第1・2層は解析値、第3・4層は気候値（数値予報モデルで用いる9層に内挿して利用）、土壌水分（体積含水率）は解析値
	海面	北西太平洋高解像度海面水温解析値及び北半球海面解析値
	陸面	地中海温度は熱伝導方程式、体積含水率は強制復元法により予測
アンサンブル手法	初期摂動	SV法
	モデル摂動	なし
メンバー数	21（コントロールラン1 + 摂動ラン20）	

出典 気象庁（2020）、数値予報課報告「メソスケール気象予測の現状と展望」⁽⁵⁾
 気象庁メソモデル（MSM）をコントロールランとして初期摂動を与えてアンサンブル予報を実施
 本研究ではオリジナルデータを用いており、気象業務支援センター提供のデータとは異なる。

全球アンサンブル予報（GEPS）の仕様

数値予報モデル	TL479（格子間隔約40 km × 0.375°） ²
水平分解能	100 層（最上層 0.01 hPa）
鉛直層数	00, 06, 12, 18UTC ⁹
初期時刻	132 時間（初期時刻：06, 18UTC） ⁹
予報時間	264 時間（初期時刻：00, 12UTC）
メンバー数	27 メンバー（26 摂動ラン + コントロールラン）

出典：気象庁「数値予報解説資料（数値予報研修テキスト）」第52巻（令和元年度）最近の数値予報システムとガイダンスの改良について⁽⁶⁾

- ✓ 最大11日先までの予測データがある。出力は6時間毎。
- ✓ 全球モデル（Global spectral model, GMS）をベースにアンサンブル予報を実施
- ✓ 出力変数：東西風、南北風、気温、湿度、地上気圧、全雲量、上層雲量、中層雲量、下層雲量、降水量
- ✓ 出力変数には日射量がないので、雲量などから機械学習などで推定する必要あり

目的

出力予測が大きく外れた場合のMEPSと全球アンサンブル予報（GEPS）の雲量の比較について事例分析を実施 ※本研究は、気象庁、気象研、日本大学、産総研の共同研究課題「メソアンサンプル予報を用いた再生可能エネルギー出力予測に関する研究」の中で実施中

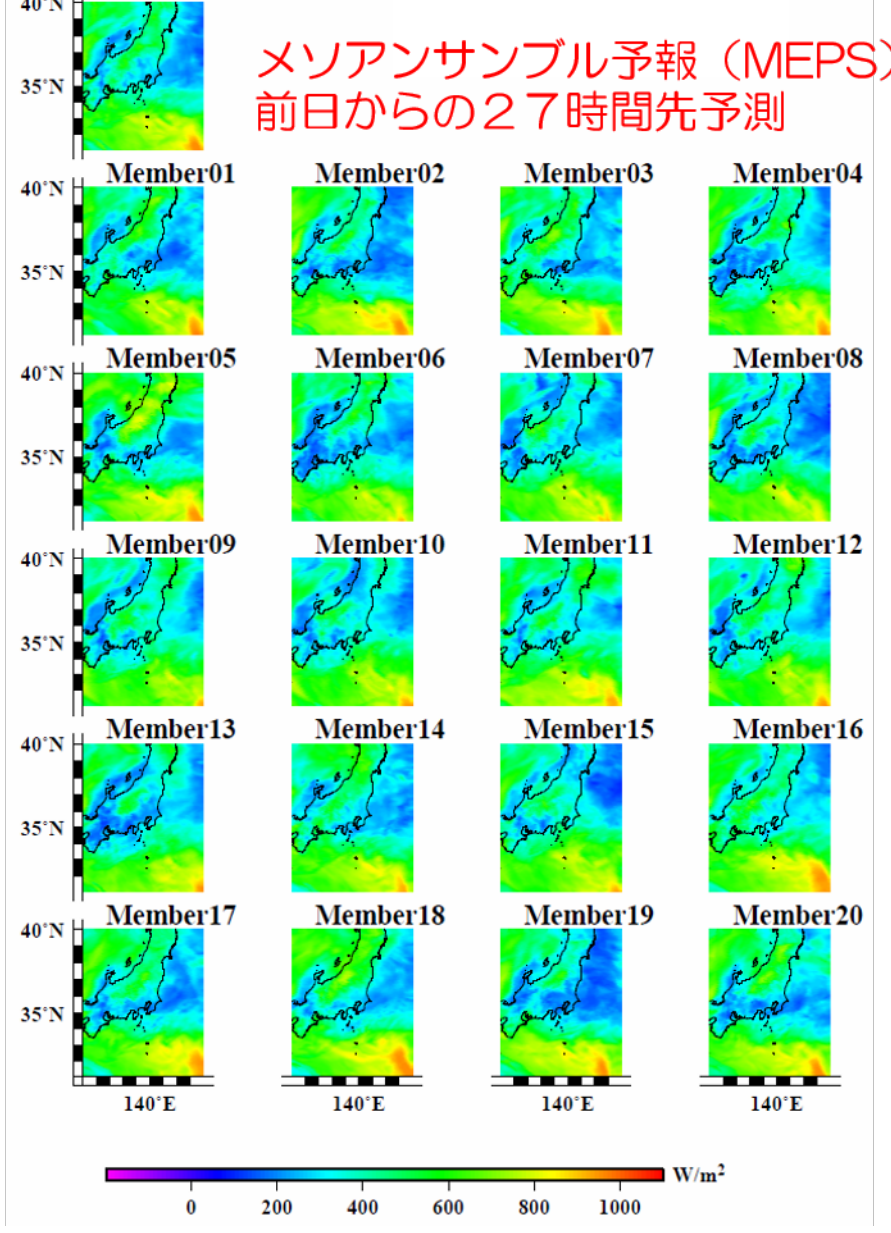
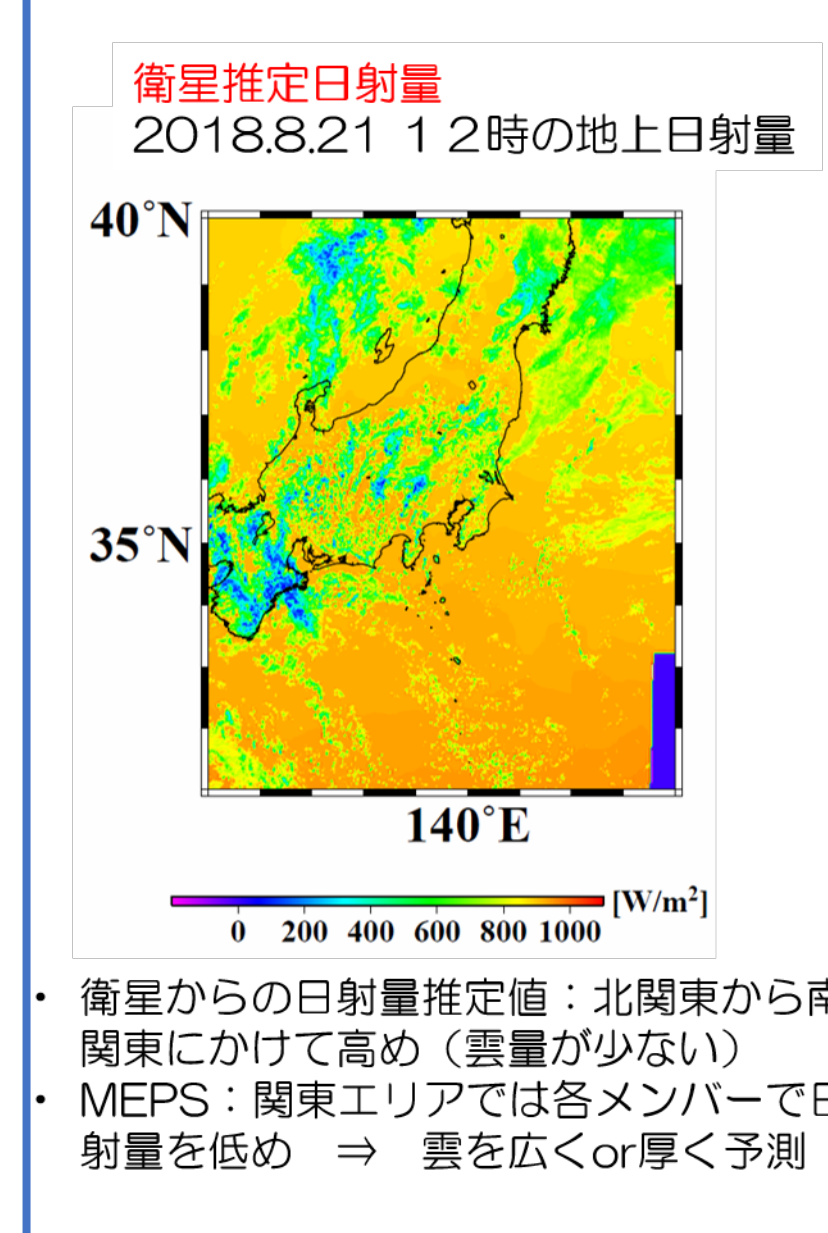
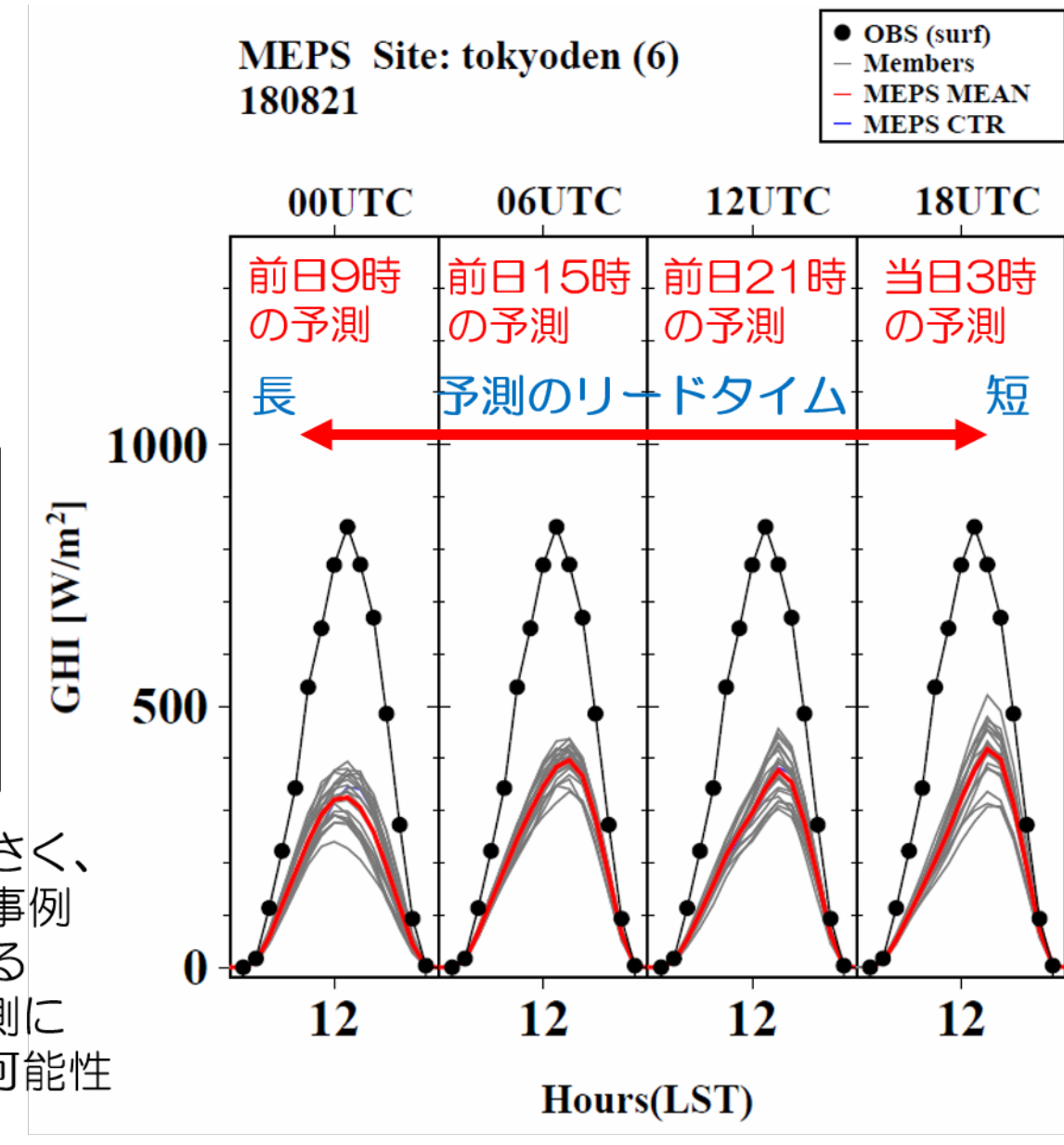
事例（日射量予測の大外れ）：2018年8月21日

MEPSの日射量の予測大外れ事例
 事例：曇天
 2018/8/21

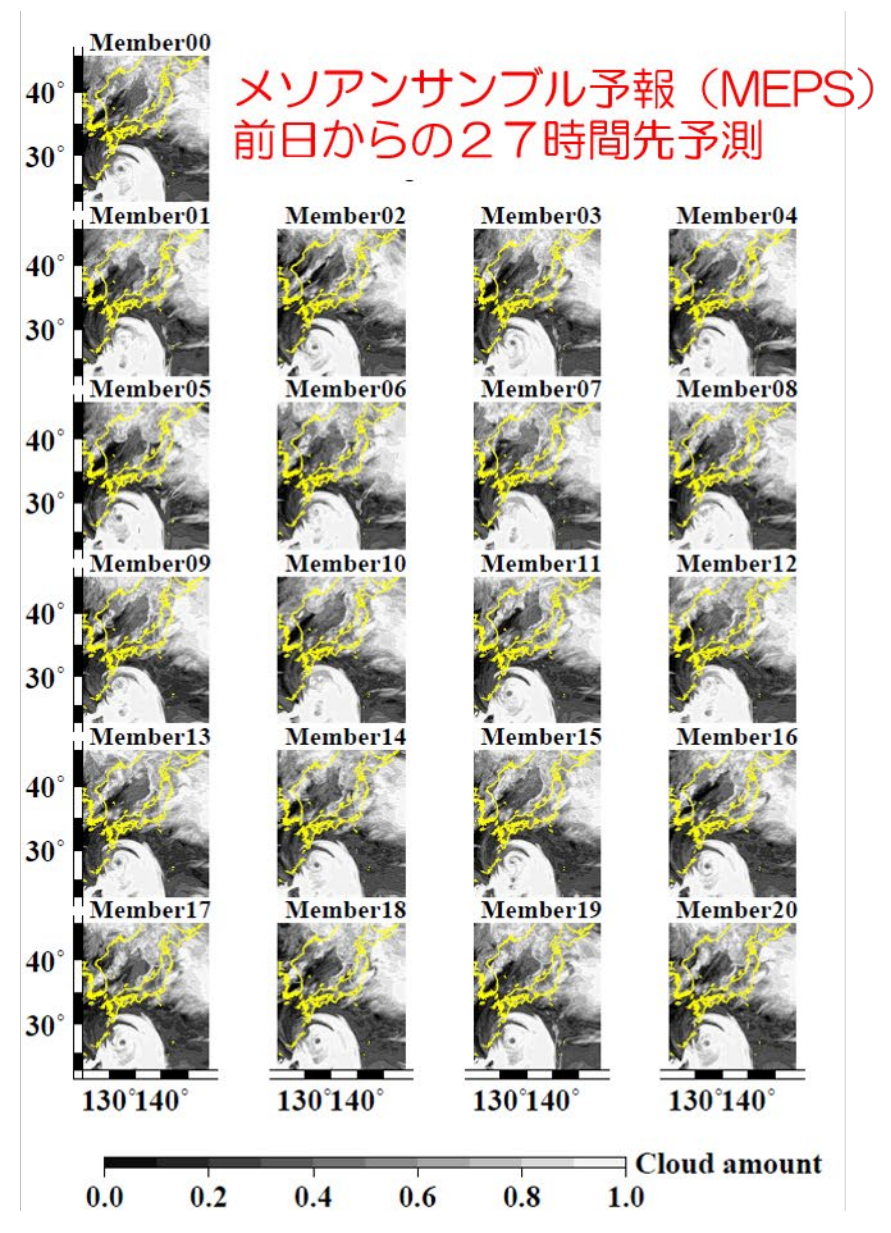
初期値 2018.8.20
 00, 06, 12, 18UTC

日射量（前1時間平均値）
 気象官署6地点平均（●印）
 アンサンブルメンバー（灰）
 MEPSアンサンブル平均（赤）
 MSM（青）

- 前日予測ではばらつきが小さく、さらに予測が大きく外れた事例
- 当日予測も大きく外れている
⇒ 初期値のばらつきが雲の予測に多様性を与えていない可能性がある

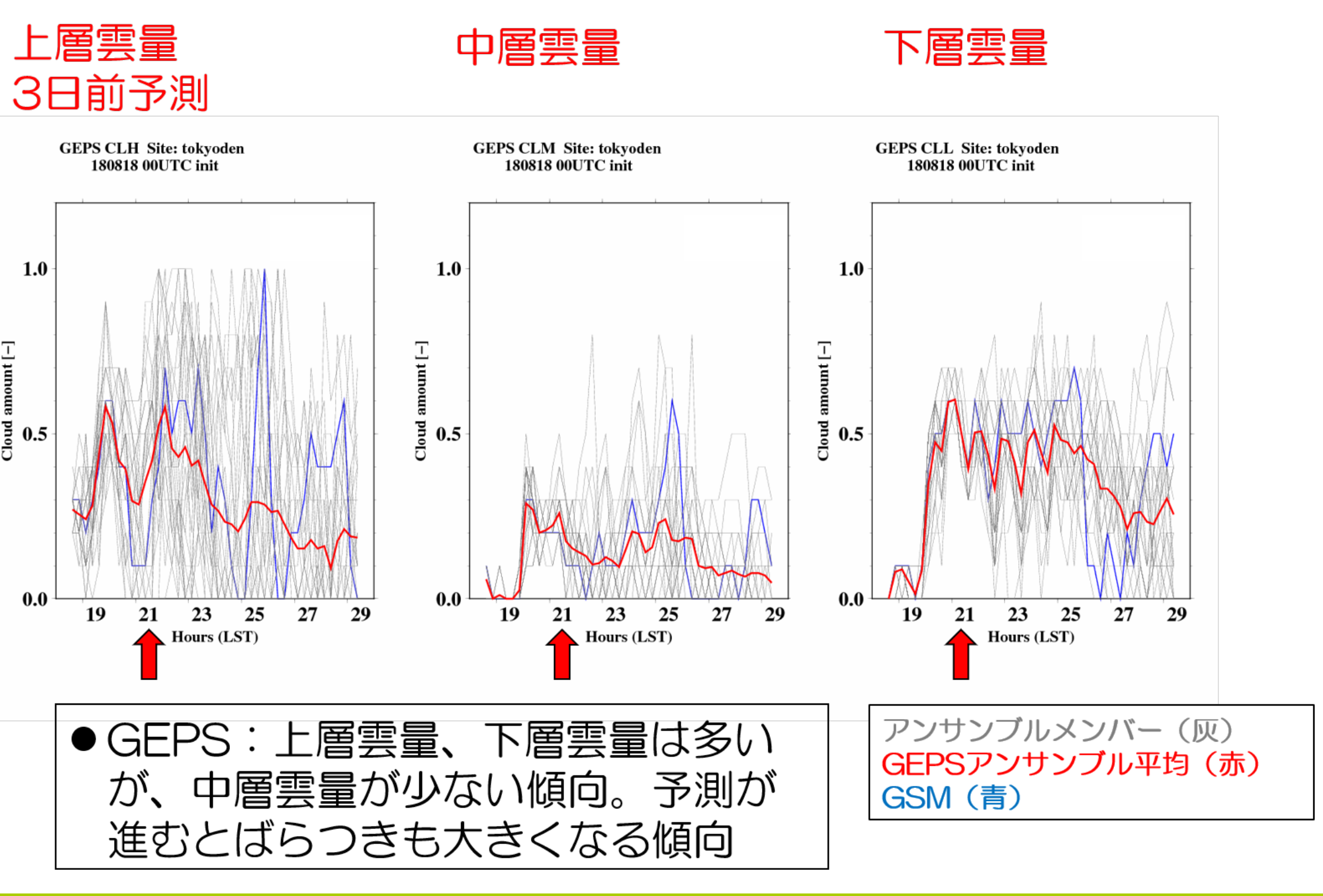
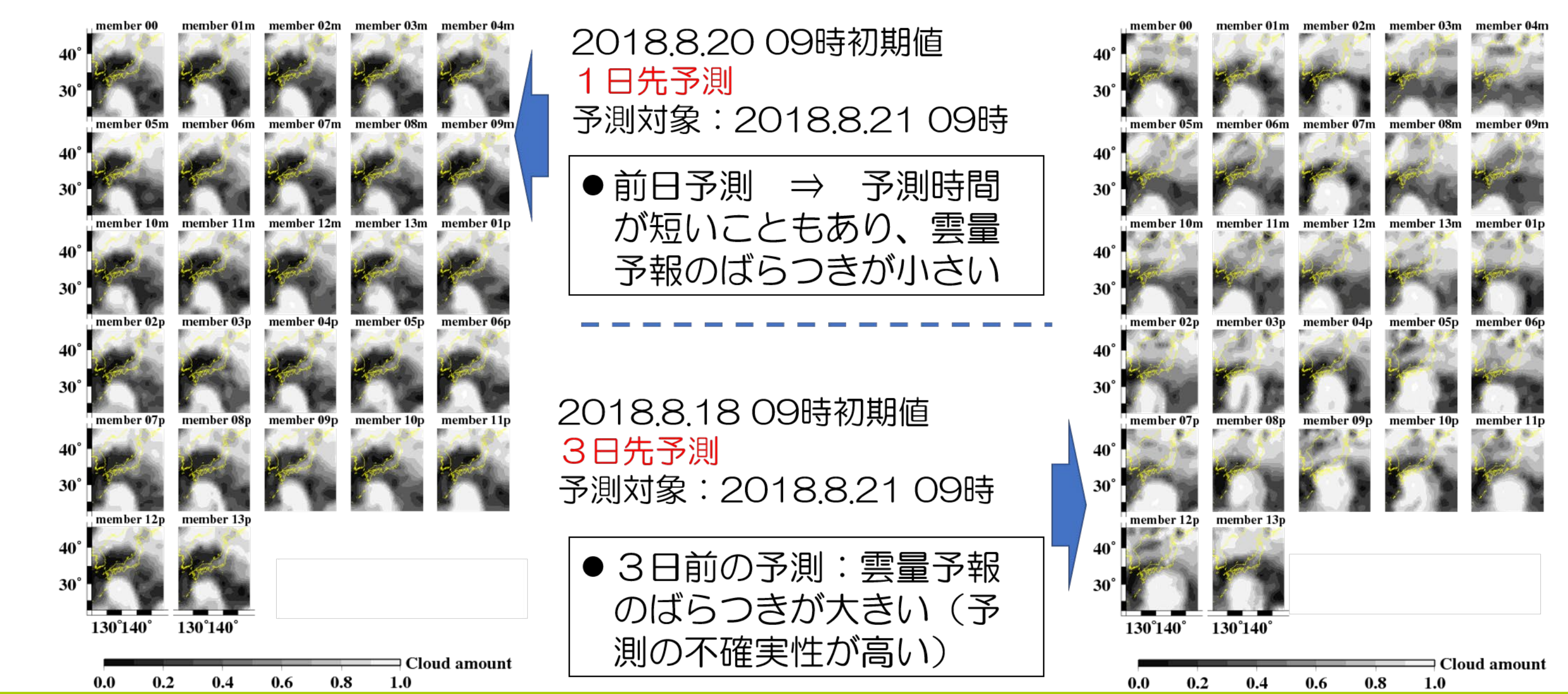


- 2018.8.20 09時初期値
 1日先予測
 予測対象：2018.8.21 09時
- MEPS：前日の予測では、各雲量の予測のばらつきが小さい ⇒ 雲量の予測のばらつきが小さいため、地上の日射量のばらつきも小さい
 - MEPSでは、全球モデルを境界条件に与えているので、その特性を境界条件付近から受ける特性がある



全球アンサンブル予報の雲量予測

全球アンサンブル予報による雲量予測（27メンバー）



まとめと今後の展開

- ✓ メソアンサンプル予報（MEPS）の出力予測の大外れ事例に注目して、全球アンサンブル予報（GEPS）の雲量予報との比較解析を行った。
- ✓ MEPS（39時間前予測）のアンサンブルメンバー間のばらつきは小さいが、日射量予測の大外れ事例を確認した。
- ✓ GEPSによる数日前の雲量予測の情報を解析すると、3日前頃にはばらつき（予測の不確実性）を確認することができた。
- ✓ 中層、下層に比べて上層雲量ではばらつきが大きく、中層雲量はやや少なめであった。

（今後の予定）

- GEPSの数日前のばらつきの情報からMEPSの日射量予測の大外れを事前に検知できないかを分析
- 事例の蓄積から、日射量予測の大外れ事例の雲量予測傾向を確認

参考文献

- (1) El-Baz, W., M. Seufzger, S. Lutzenberger, P. Tzscheuschler, U. Wagner, 2018, Impact of probabilistic small-scale photovoltaic generation forecast on energy management systems. Solar Energy, Vol.165, 1, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.069>
- (2) 野原, 菅野, 2021: 太陽光発電出力確率予測 - 中国エリアにおける予測事例とその検証 -, 電中研報告, C20008. <https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=C20008>
- (3) 大竹ら, 2021: メソアンサンプル予報による日射量予測大外れ時のスプレッドマップ, 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会 (2021年8月25日)
- (4) Takamatsu, T., H. Ohtake, T. Oozeki, T. Nakaegawa, Y. Honda, M. Kazumori, 2021: Regional Solar Irradiance Forecast for Kanto Region by Support Vector Regression Using Forecast of Meso-Ensemble Prediction System. Energies, Vol. 14, No. 11, 3245. <https://doi.org/10.3390/en14113245>
- (5) 気象庁, 2020, 数値予報課報告「メソスケール気象予測の現状と展望」, https://www.ima.go.jp/ima/kishou/books/nwpreport/66/No66_all.pdf
- (6) 気象庁, 2019, 「数値予報解説資料（数値予報研修テキスト）」第52巻（令和元年度）最近の数値予報システムとガイダンスの改良について. https://www.ima.go.jp/ima/kishou/books/nwptext/52/No52_all.pdf

独立成分分析を用いたサポートベクター回帰による前日日射予測の検討

高松尚宏¹、大竹秀明^{1,2}、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気象庁 気象研究所

1. 研究背景

- 太陽光や風力などの変動性再生エネルギー（VRE）の送電系統への導入が世界中で拡大
- 系統運用者（TSO）は、需要とVRE発電の残差需要を補償できるように、需給調整市場にて調整用電源を前日以前の段階で調達
- 調整用電源の調達量の決定に、VRE発電の予測誤差（ 3σ 誤差）を用いることが日本でも検討されている^{*1}
- 効率的な系統運用のために、調整用電源の調達コストの抑制が必要

VRE発電予測の平均的な精度に加え、大外しを抑制した日射予測技術の開発が必要

^{*1} 資源エネルギー庁、再エネ予測誤差に対応するための調整力確保費用（access on 22 October 2021）, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/022_03_00.pdf

- 1-3日前の段階において、数値気象予報（NWP）による日射予測が比較的優位
- NWPデータの後処理に機械学習をもちいることで、空間解像度等に起因する誤差を補正し精度改善が可能
- しかし、NWPには予報外れが生じうるため、そのようなノイズに対しても大外しを抑制できる頑健な予測モデルを構築する必要

本研究では、日射予測の大外し（ 3σ 誤差）抑制を目的として、サポートベクター回帰（SVR）に以下の手法を適用

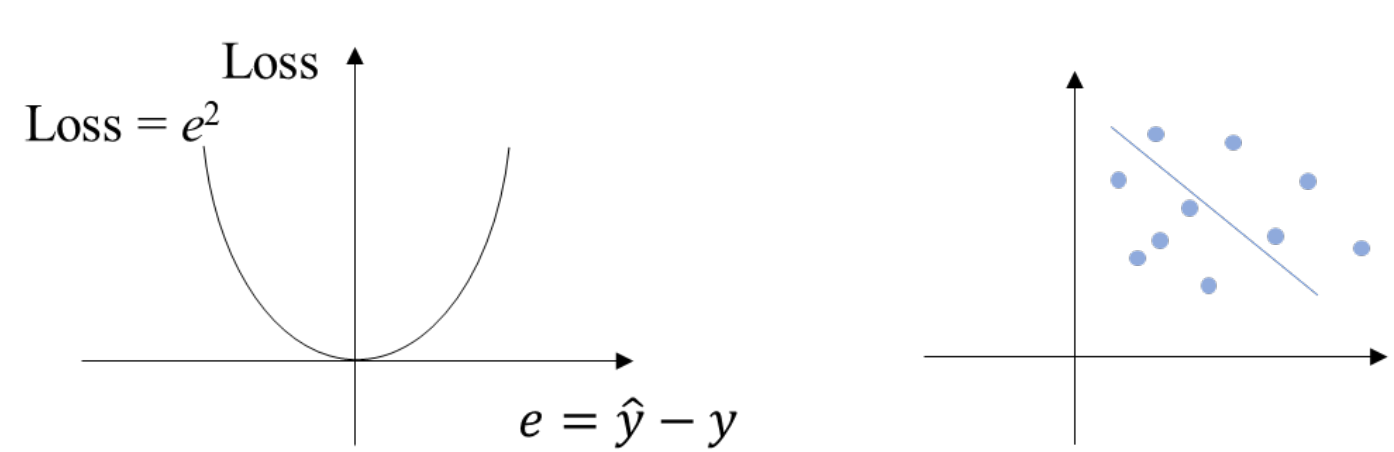
- 独立成分分析（ICA）による次元削減
- 分位点回帰をもちいた分位点予測値の出力

関東地域のエリア平均日射予測を実施、各手法の有効性を検討

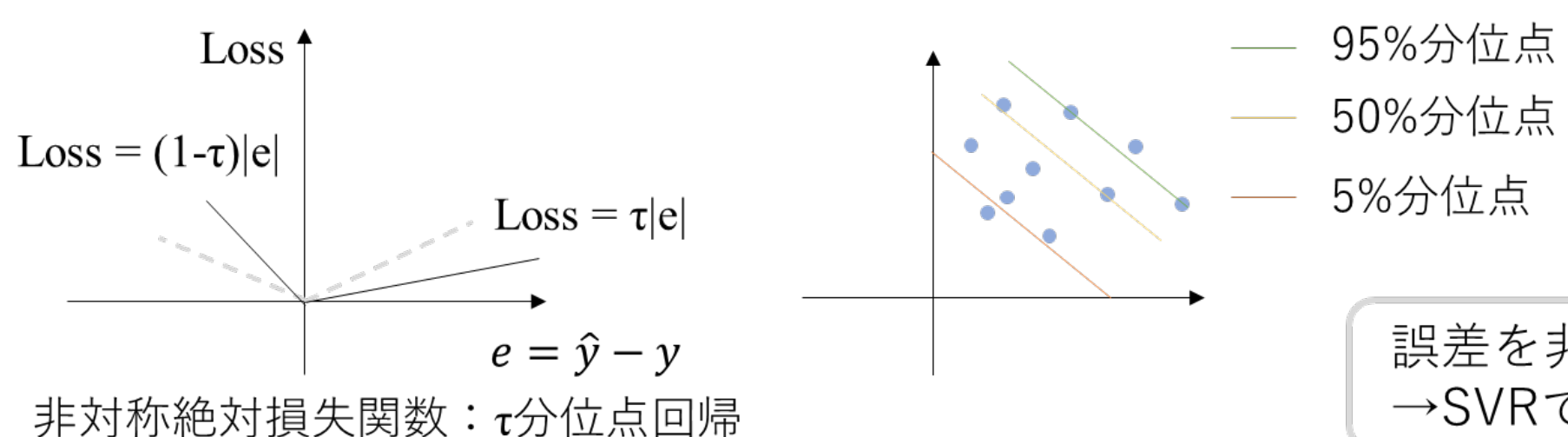
2. 研究手法

分位点回帰

最小二乗法：誤差の二乗和を最小化する回帰曲線を決定（平均相当）



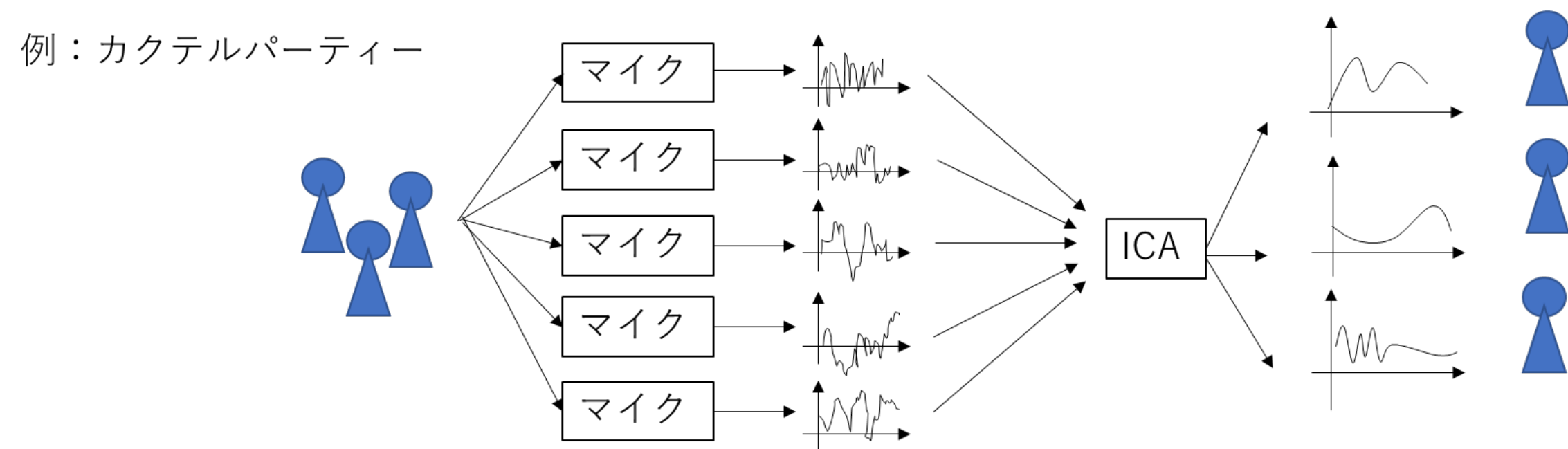
分位点回帰：誤差に重みをつけて損失を評価し分位点を推定



誤差を非対称絶対損失関数で評価 → SVRで分位点回帰が可能

独立主成分分析

- 多数の観測データが直接観測されない少数の独立な信号源から構成されるときに、信号源を推定する分析手法
- 予測モデルの構成において説明変数の次元削減に用いられる手法のひとつ
- 説明変数の次元削減により、機械学習モデルの表現力を適切な範囲に抑制することが可能

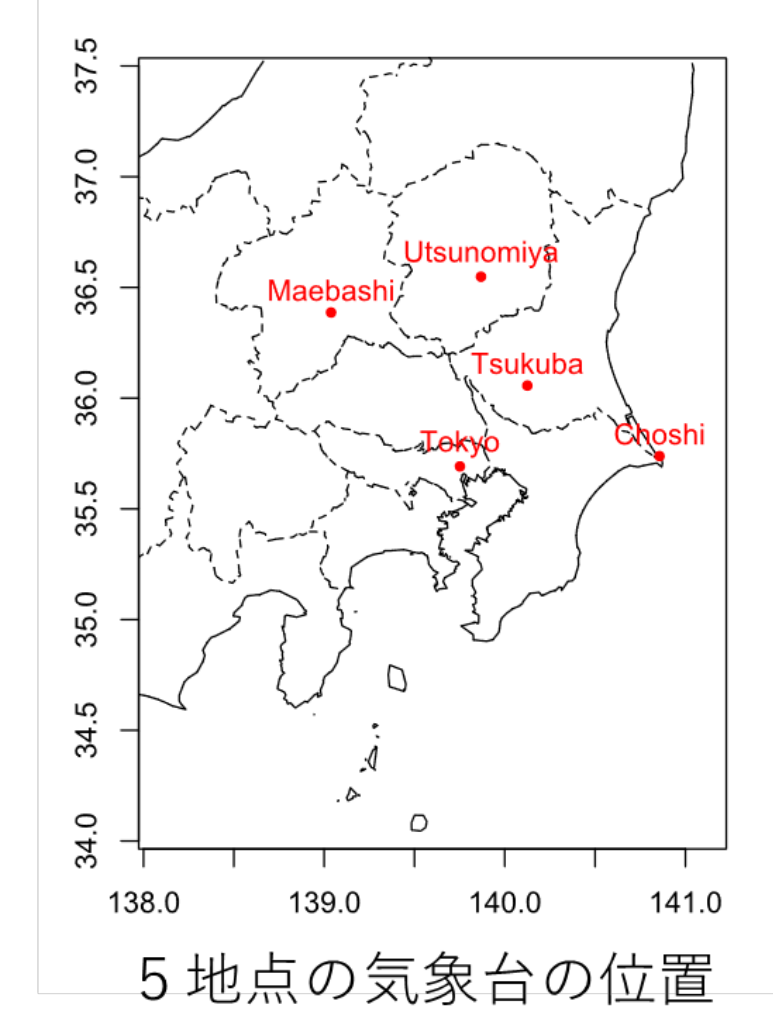


3. データ・評価手法

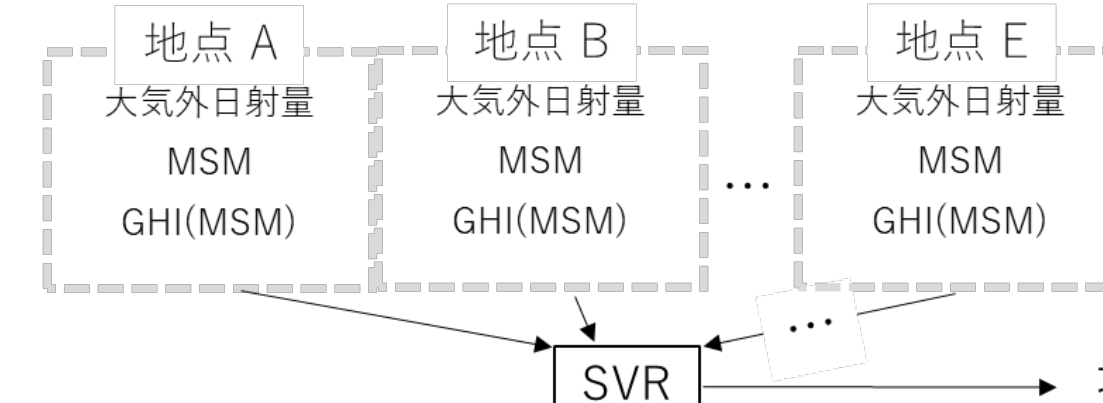
使用データ

対象地点：関東地域5箇所の気象台データ（つくば、宇都宮、前橋、東京、銚子）
 対象期間：2018/06/06 - 2018/10/06

- 説明変数
- 大気外日射量（計算値）
 - MSM-GPVデータ（JST15時）
 - 気温
 - 相対湿度
 - 上層・中層・下層雲量
 - 水平面全日射量（予報値）
- 目的変数
- 水平面全日射量（地上観測データ）

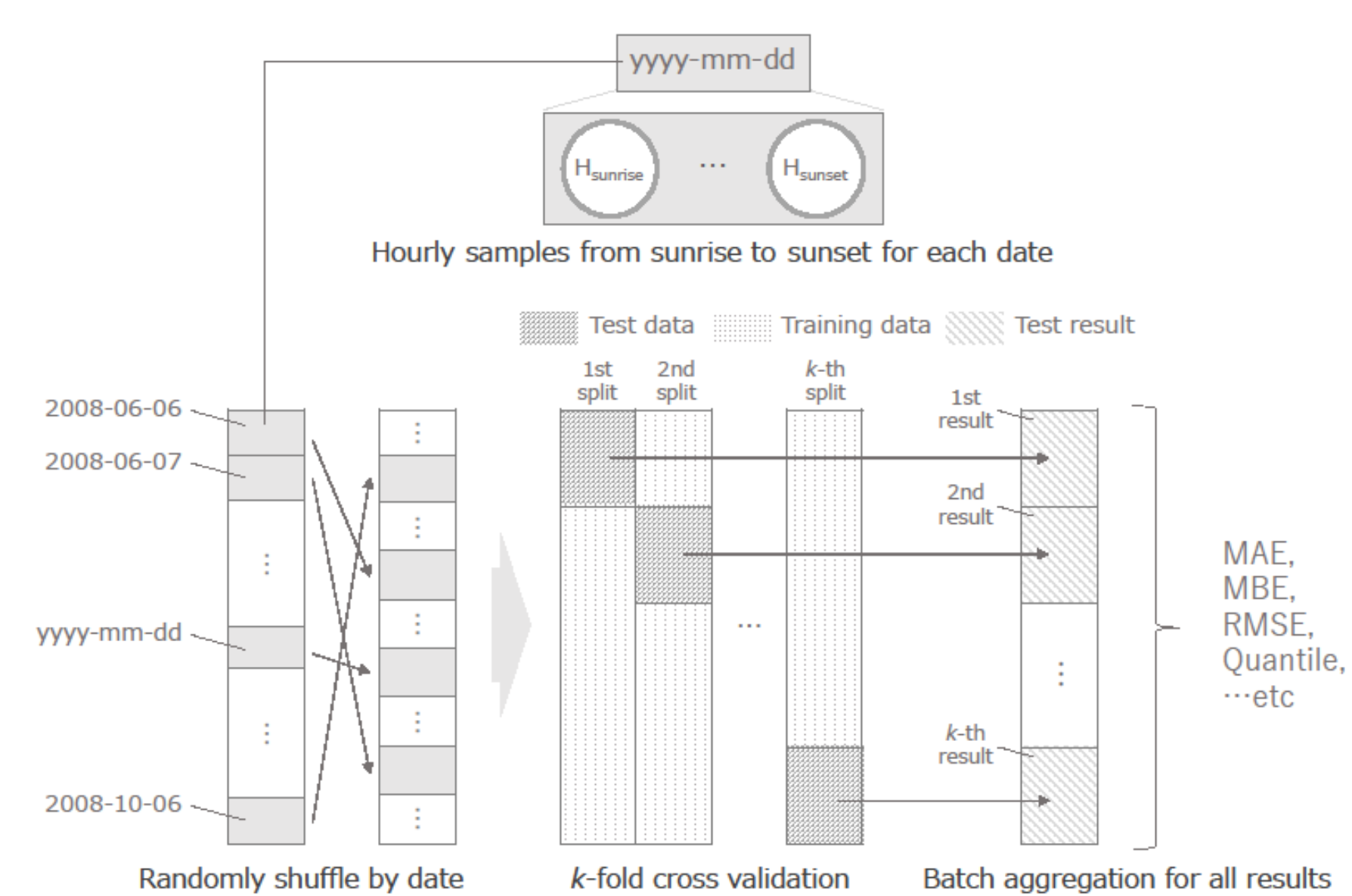


学習機の構成（SVR 1機による地域日射量の直接予測）

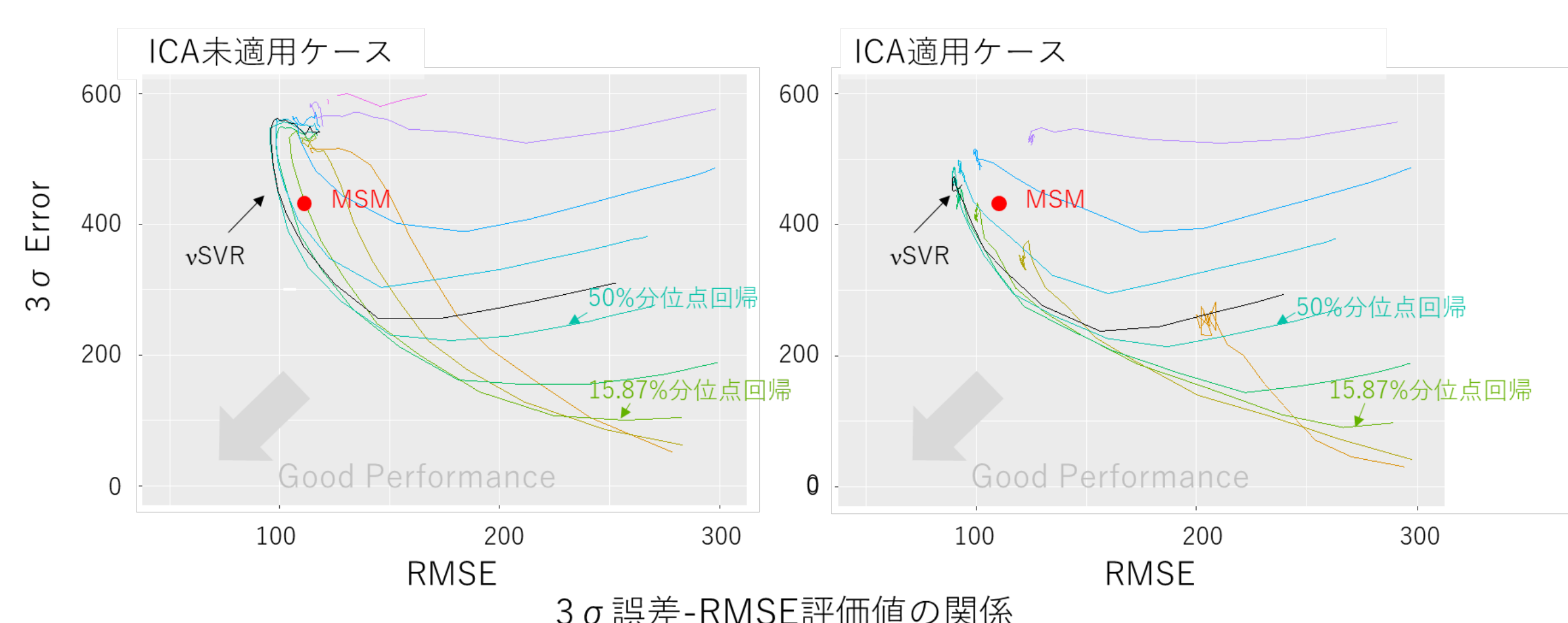


評価手法

- 4-fold交差検証法
- 日付ごとにデータをランダムにシャッフル
- テスト結果を一括して評価・集計



予測結果



- ✓ 次元圧縮により、RMSEと過大な大外しをともに抑制可能
- ✓ 学習が抑制的なモデルでは分位点回帰で日射のより保守的な予測が可能

結論

- 本研究では、ICAと分位点回帰をSVRへ適用することで日射予測の大外し低減可能性について検討
- 関東5地点のエリア平均GHI予測に本研究の予測モデルを適用したところ、ICAによって予測のRMSEと 3σ 誤差の抑制が同時に達成される
- RMSEの増加を許容した場合、分位点回帰を適用することでv-SVRに比較し 3σ 誤差を抑えた保守的な日射予測値が得られる
- オンラインでパラメータを更新するモデルにおいては、モデルの予測誤差が満たすべき性質を設計要件とし、各手法の適用やパラメータ設定を決定するといった運用も可能

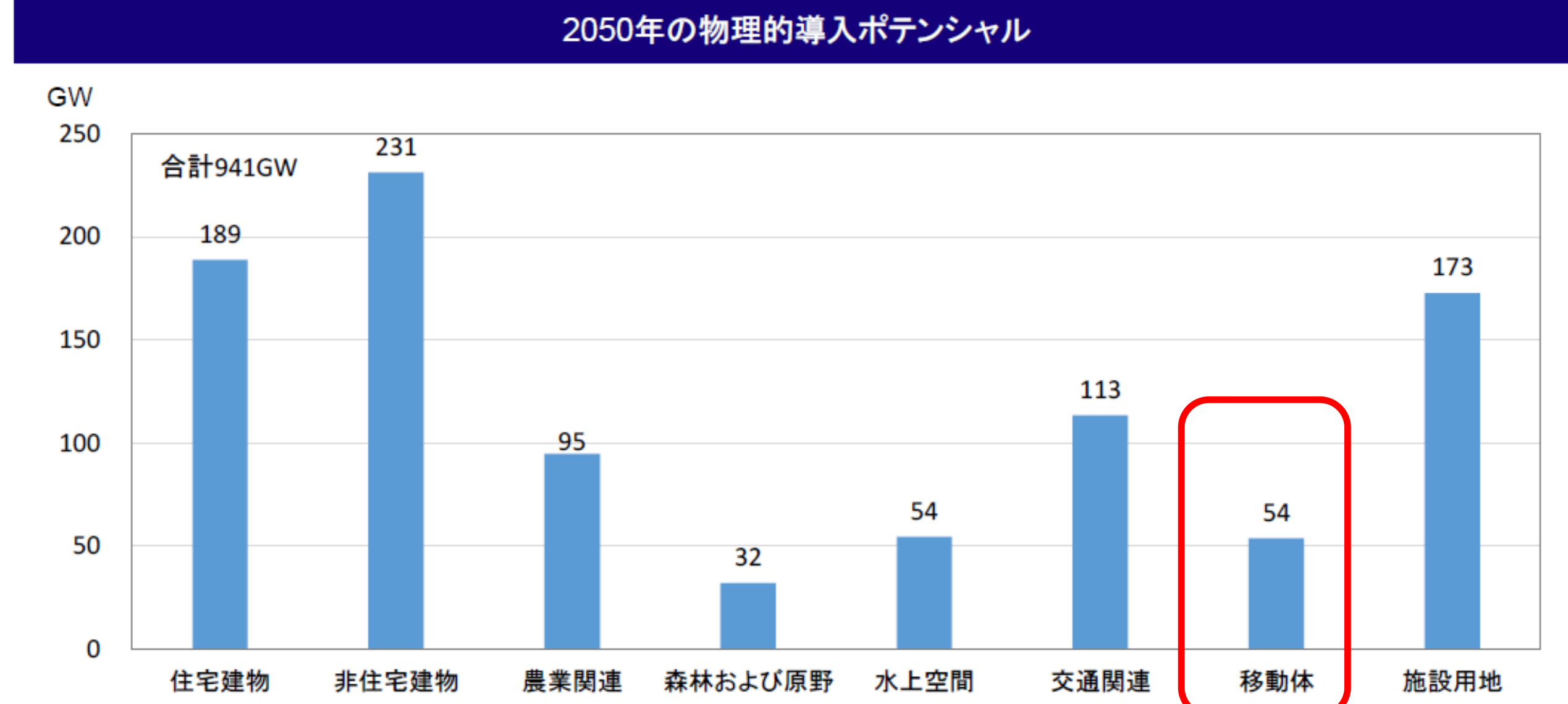
車載PVシステム向けの電力配分回路に関する研究

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

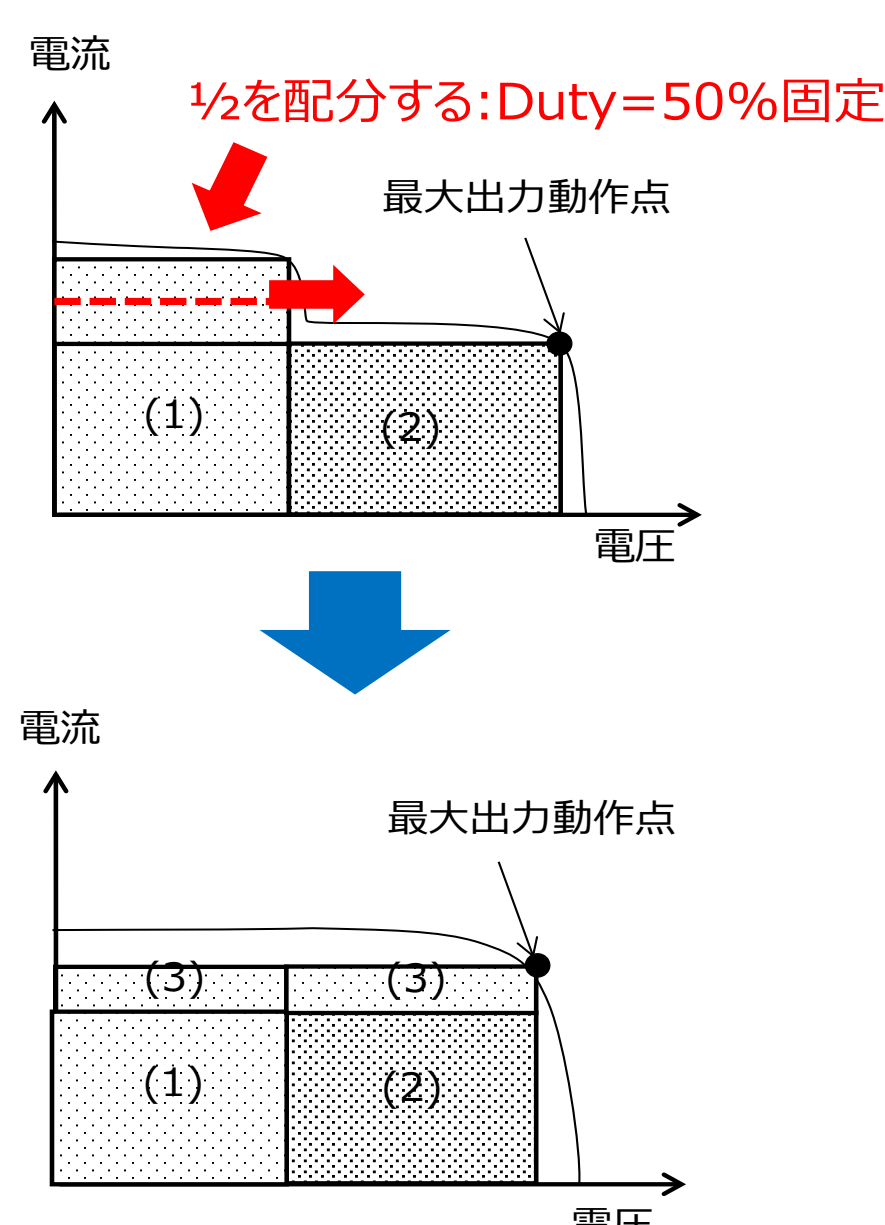
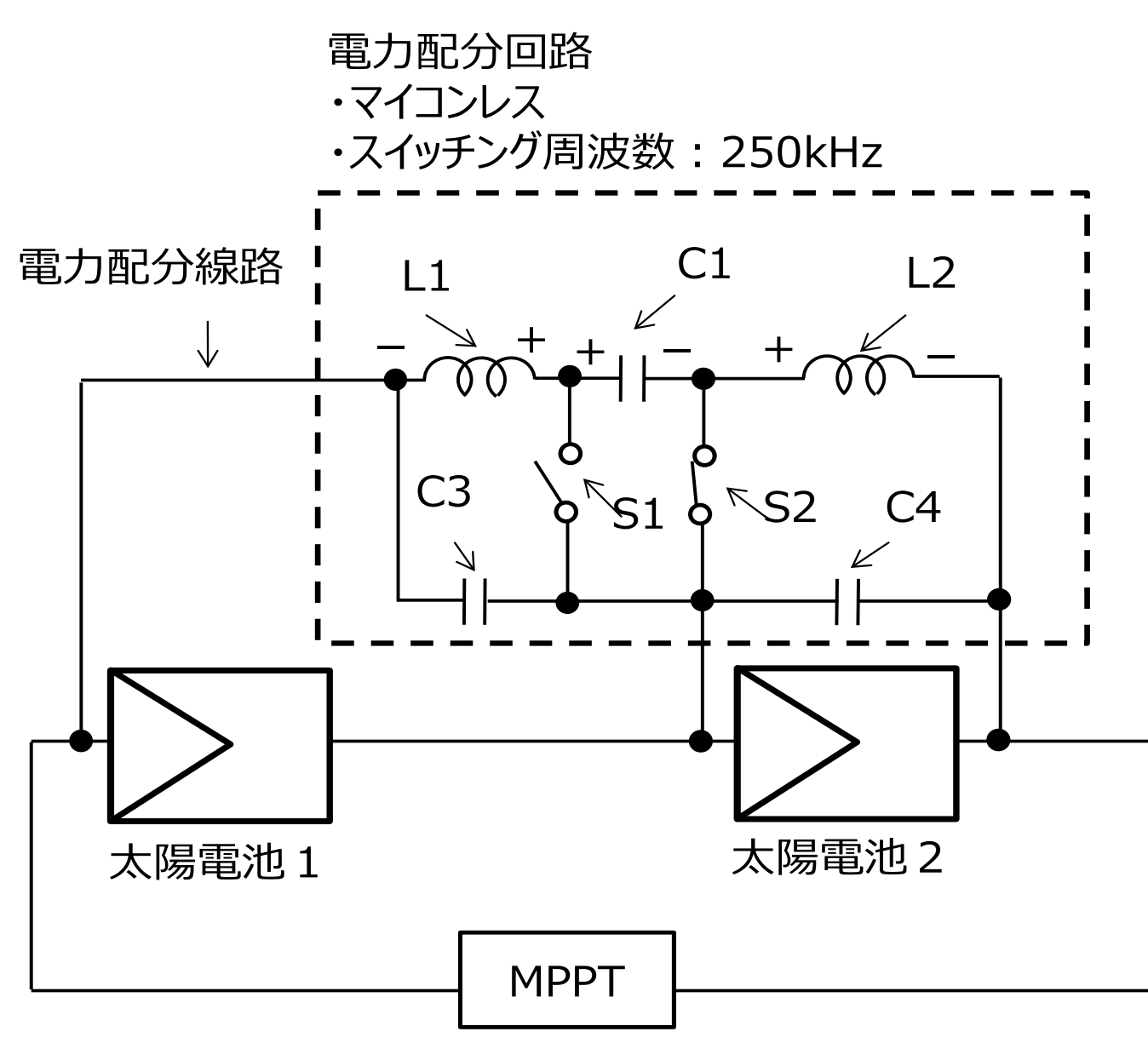
- ・PVの1 TW導入⇒脱炭素なXaaS実現におけるPV導入形態(利用用途、多様性)
- ・移動体へのPV導入(VIPV; Vehicle Integrated PV)
IEA PVPS 17 “PV for Transport”開始、IEC Standard WG7でも議論開始。
- ・運輸部門のエネルギー、CO₂削減。
日本全体での2030年におけるCO₂排出削減効果は最大227万t-CO₂/年。
(2030年に向けた乗用車におけるCO₂排出削減量の11%相当)
- ・車載用PVについて、プリウスをはじめ、海外での検討も活発化。
- ・曲面や部分陰によるミスマッチ損失が地上用よりも多い可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

VIPVの可能性

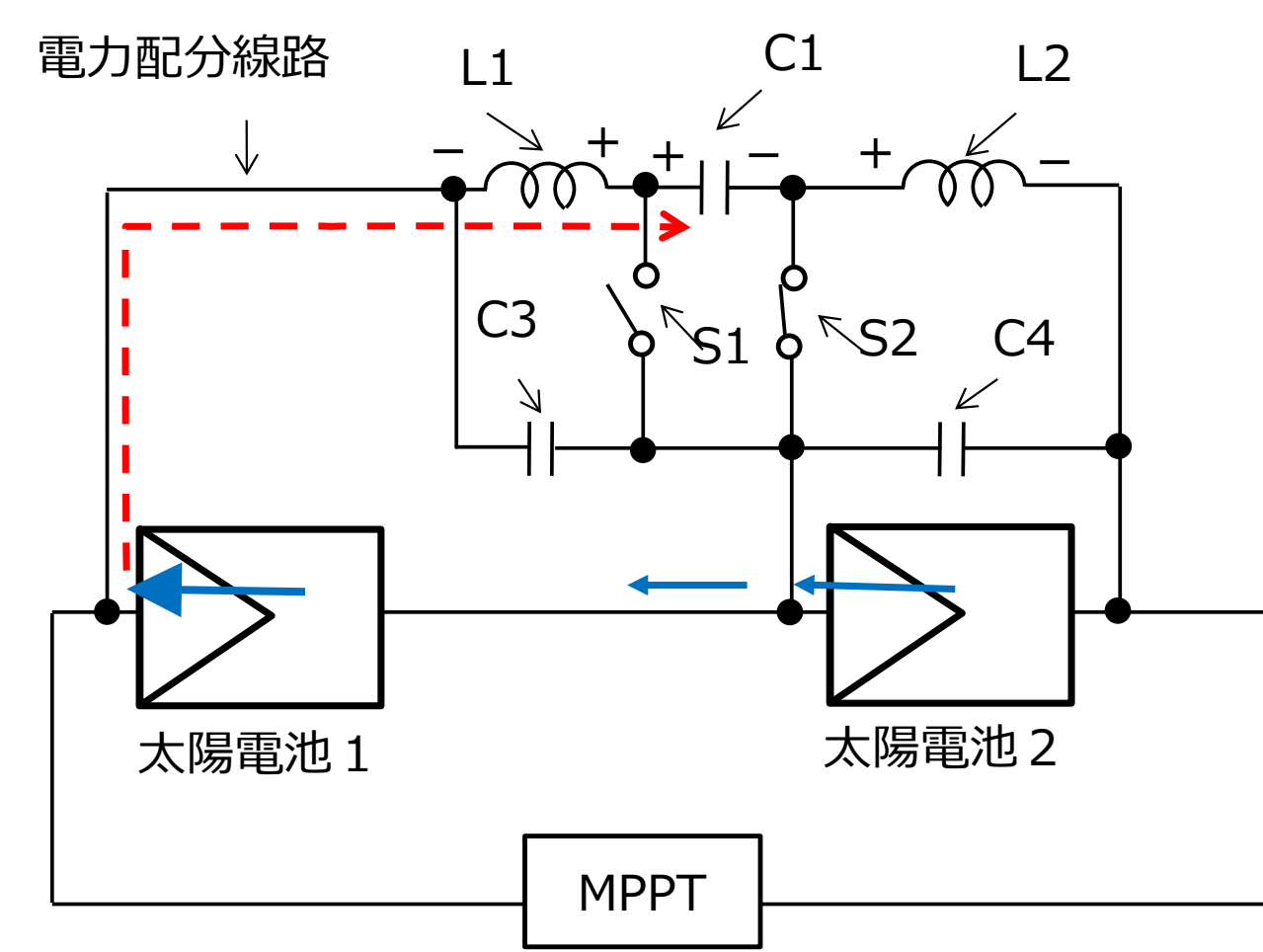


出典：平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査「再生可能エネルギー固定価格買取制度における賦課金単価算定の精緻化に向けた分析等調査報告書」2018.3.

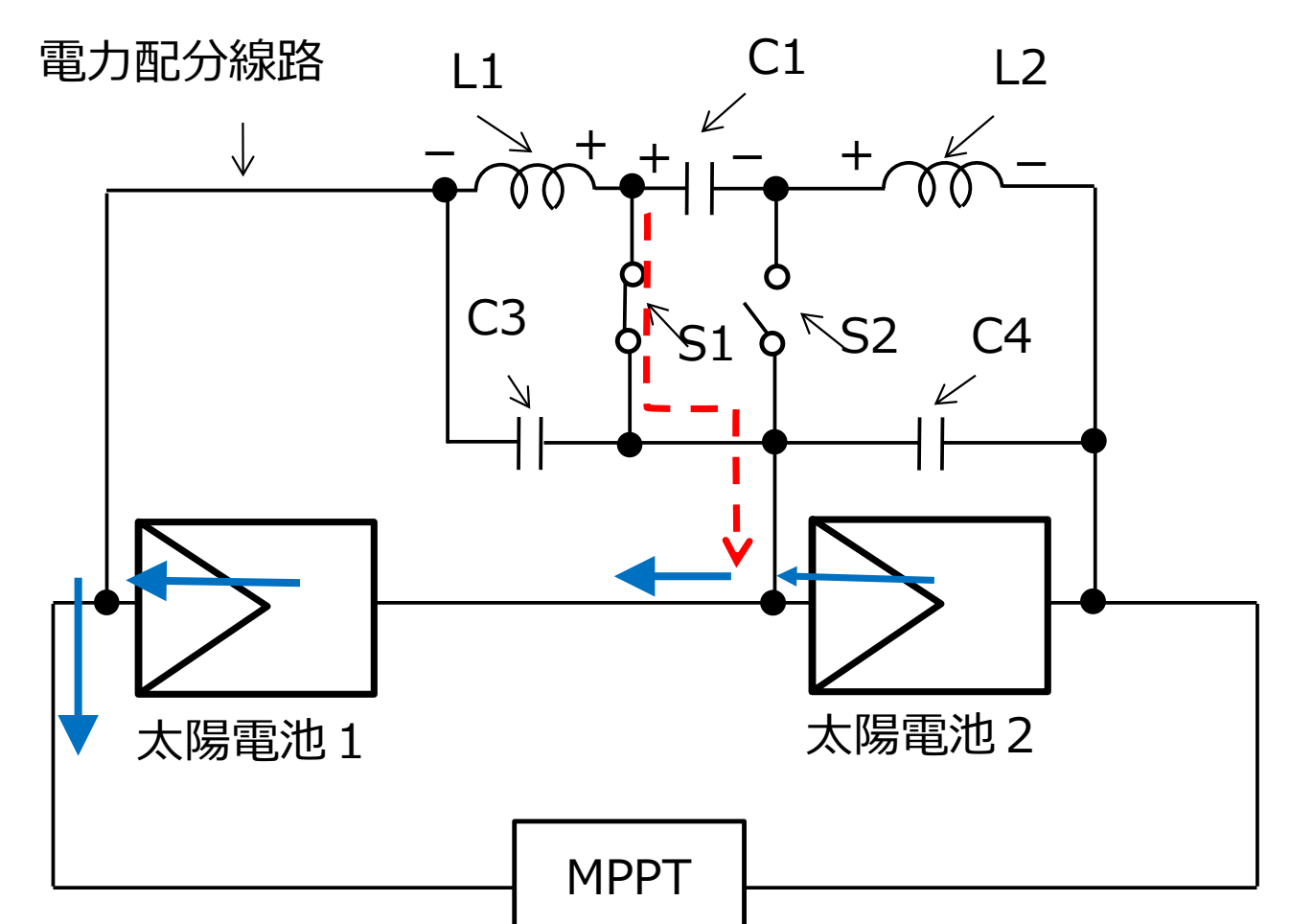
原理



- ・出力の大きい方からコンデンサに充電
- ・太陽電池1(出力大)は、律速される側のため動作電圧は、太陽電池2より高い。
⇒コンデンサ電圧 = 太陽電池1の電圧



- ・出力が小さい方は、動作電圧がP_{max}付近。
⇒コンデンサ電圧 > 太陽電池2
- ・コンデンサから出力の小さい方へ並列に放電



実験

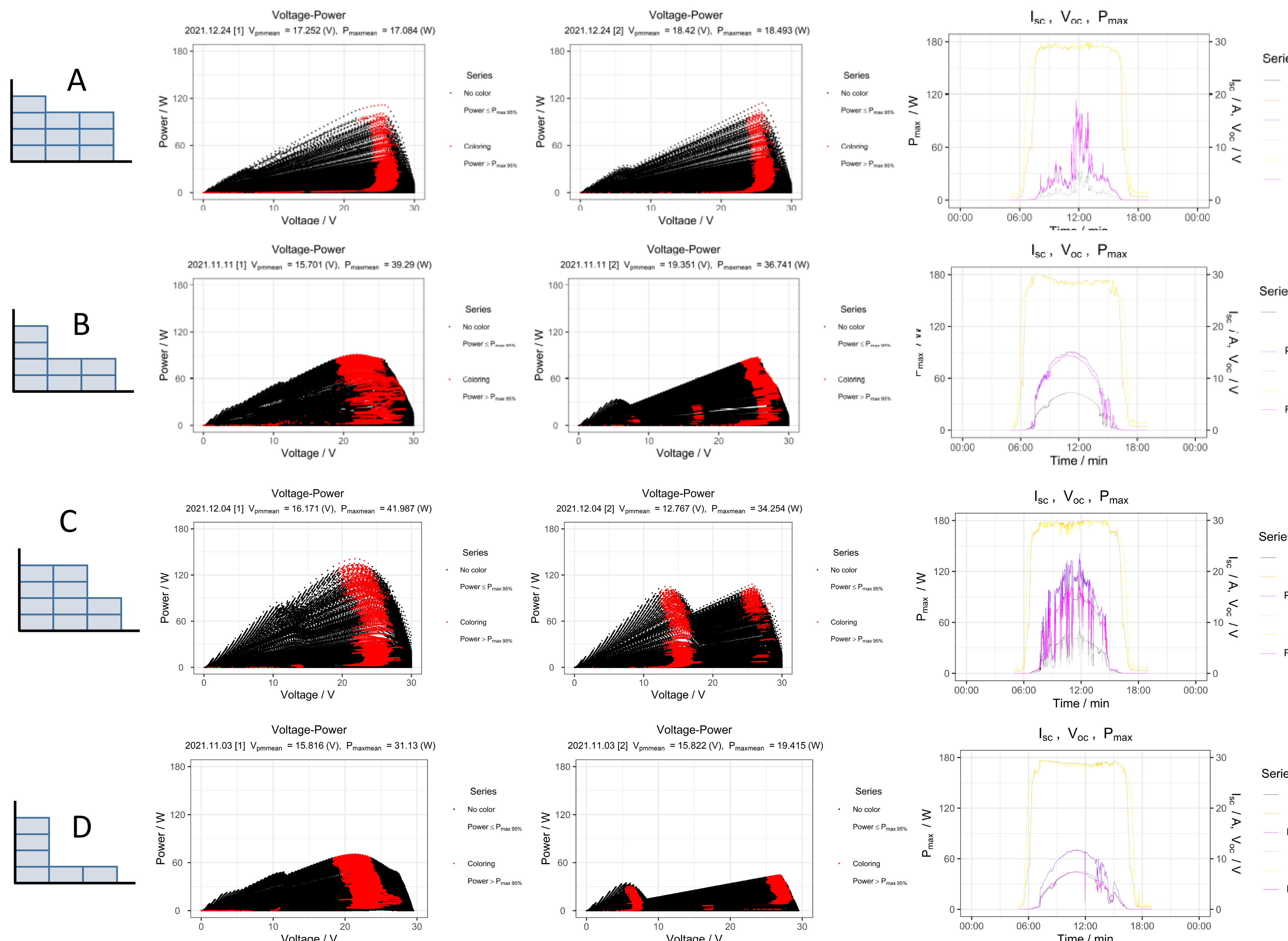
- ・3クラスタを有する太陽電池モジュール2枚を用いて、屋外の実証実験を実施。
- ・ゴムシートによりクラスタIVの形状を模擬して、2枚に同様な日影を模擬。
- ・配分回路の有り無しにより、相対的に発電特性の比較を実施した。
- ・2台のIVカーブトレーサを用いて同時測定を実施した。



結果

日陰パターン(IVの模式)の実験結果を示す。

日影パターン	日にち	配分回路有り[W]	配分回路無し[W]	比率
A	12月24日	17.1	18.5	92%
B	11月1日	39.3	36.7	107%
C	12月4日	42.0	34.3	123%
D	11月3日	31.1	19.4	160%



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。

- ・日陰のパターンにより、有効性が異なる。日影によるミスマッチが多いほど効果が大きい。
- ・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。

本成果の一部は、令和3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。

車載PVシステムの発電電力量評価：路線バスの場合

水野 英範、伊野 裕司、高遠 秀尚、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の取り組み

- ◆ PV R&Dの方向性
新たな応用先・市場開拓の一環として、モビリティ(クルマ・ドローン等)への展開が本格化しつつある。
- ◆ 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。
- ◆ ターゲット
FREAでは、クルマの中でも商用車をターゲットにしたPV搭載を検討する(乗用車では、NEDOプロが先行)。決まった路線・エリアを走っている商用車の方が、PV搭載のメリットが見える化しやすいと思われるため。

PV搭載路線バス

福島交通株式会社
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



車内のMPPT電子負荷装置・データロガーに接続(測定間隔1秒)。GPSレシーバーによるバスの位置情報も同時に取得
⇒発電状況の見える化

発電電力量の測定結果・評価

データ測定は2020年の7月から継続して行っているが、ここでは夏の快晴日に特化した3日(2020年8月19日、2021年6月10日、および2021年8月6日)の結果について紹介する。

走行ルート 中心部(駅周辺)は重複がみられるが、郊外部はバラバラ

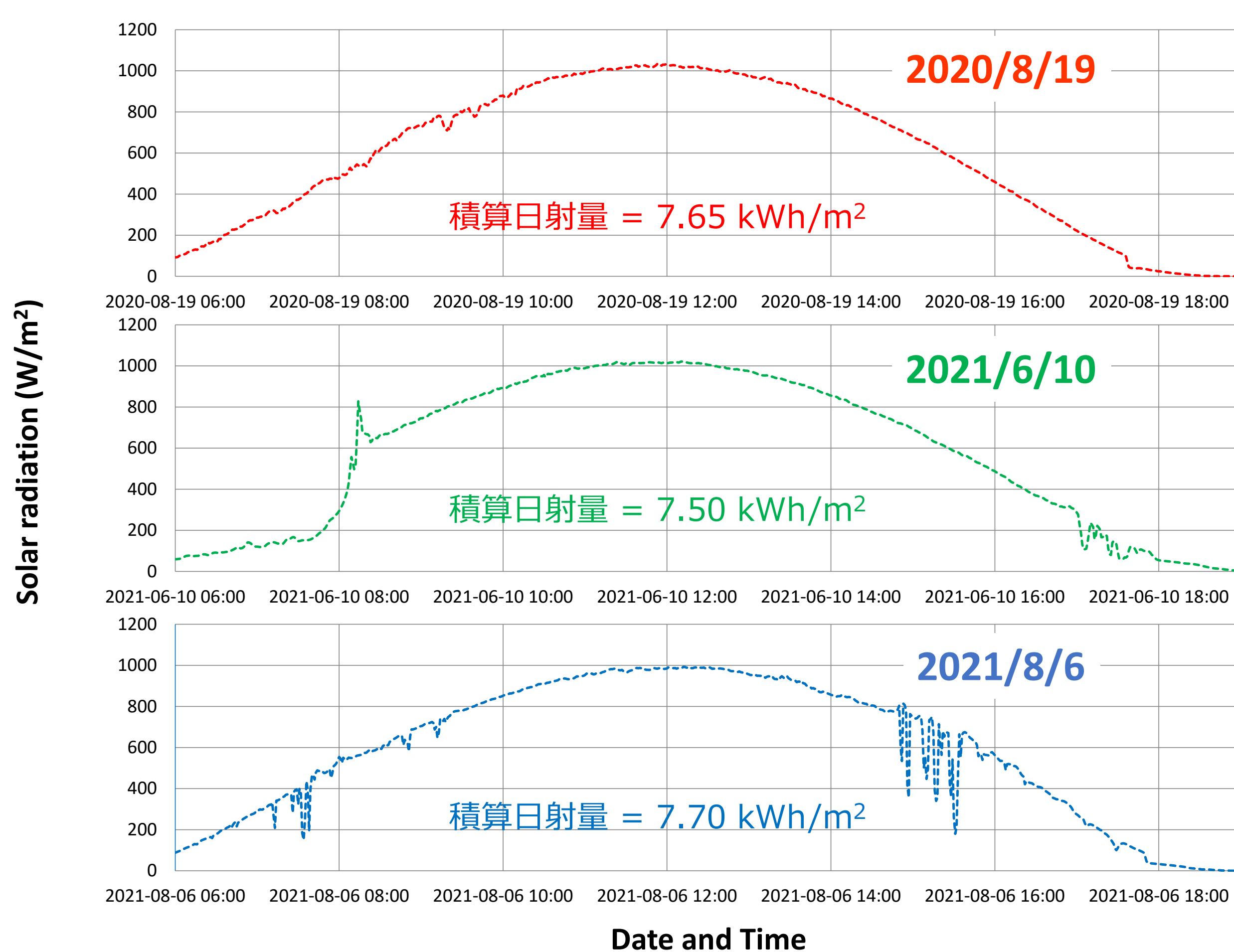


傾斜面積算日射量と発電電力量の比率

快晴日においては、走行ルートの違いに依らず、当日の(傾斜面)積算日射量の約13~15%の範囲で発電電力量が得られることが示唆された。

日付	積算日射量 (kWh/m ²)	発電電力量 (kWh/m ²)	比率 (%)
2020/8/19	7.65	1.0	13.1
2021/6/10	7.50	1.1	14.7
2021/8/6	7.70	1.1	14.3

各日の日射強度 FREAに設置された南向き・20°傾斜面日射計のデータ



バス搭載PVの出力

走行ルートの違いに関わらず、積算値は概ね同等に

