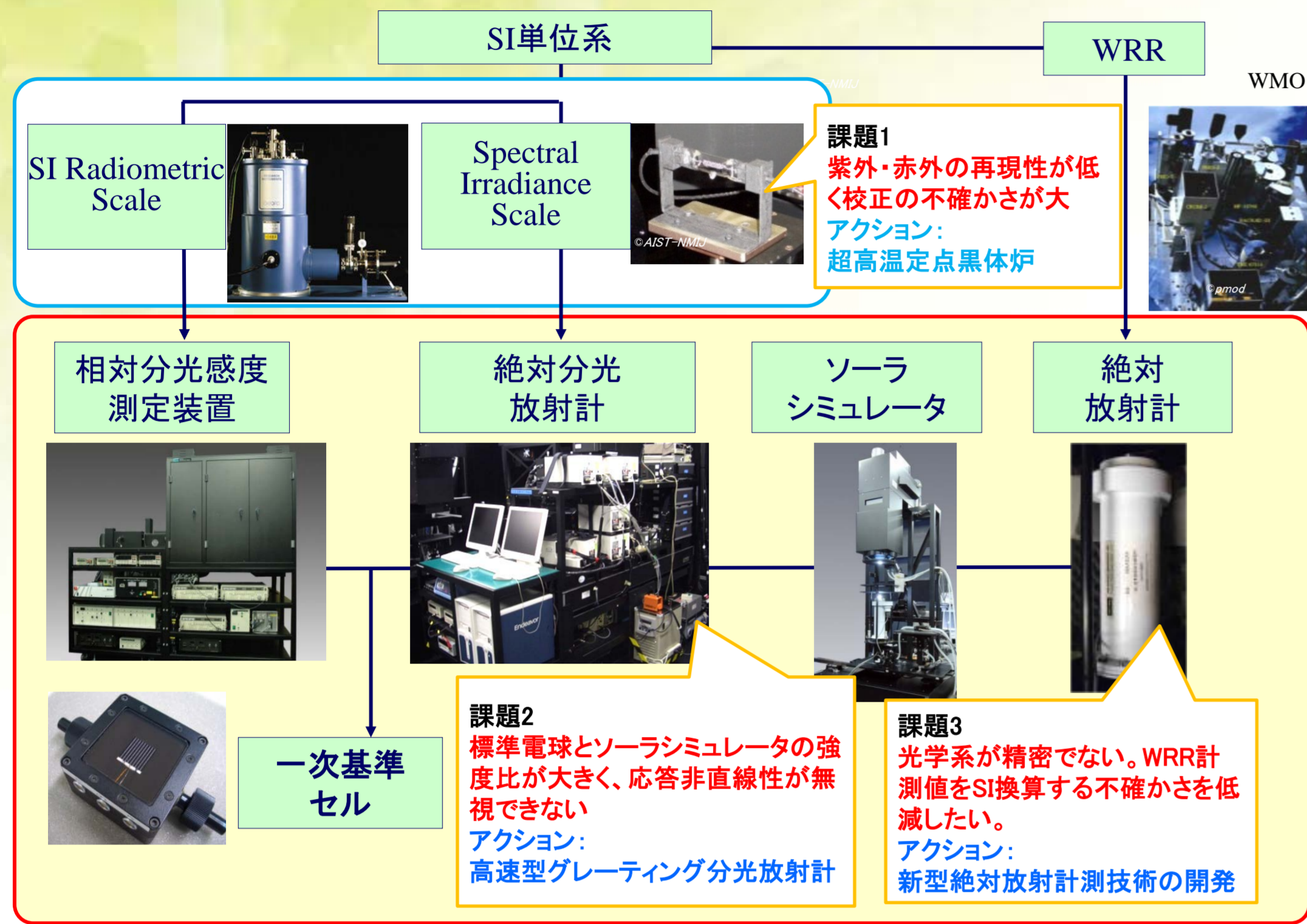


# 基準太陽電池校正技術の高度化

猪狩真一、渡邊 良一、小久保 順一、周 泓、武田 俊輔、高瀬 滝男  
産業技術総合研究所  
再生可能エネルギー研究センター 太陽光評価・標準チーム

## 研究背景・目的

校正の不確かさを改善するためのトレーサビリティ技術開発



## 課題1: 分光放射照度標準の不確かさ抑制(超高温定点黒体炉の測光標準利用) 標準電球から黒体セルへのトレーサビリティの変更

温度プラトー発生時の温度分布、放射シールドφ13、放射シールドφ8、つぼ開口φ3、分光放射標準電球、伝送光学系、放射温度計、積分球、光ファイバ、超高温定点黒体炉。

**分光放射照度標準の更新**  
金属炭化物-炭素(WC-C)の包晶点 3000 Kの温度定点時の放射を活用

坩堝前面の放射シールドからの副次的な放射を排除する技術を開発。  
炉内にバツフル光学系を挿入して測定。内部低反射処理・アパーチャー構成を最適化

プランクの黒体放射理論による計算値と相対値が一致する放射が利用可能となった。

## 課題への取り組み

### 課題2: 高速型グレーティング分光放射計の応答直線性の評価 積分球とLEDの組合せによる積分球光源法によるディテクタ単体での評価

高速型グレーティング分光放射計(分光器6台搭載)	
分光器	ディテクタ
UV (250-390 nm)	光電子増倍管
VIS1 (391-570 nm)	Siフォトダイオード A型
VIS2 (571-750 nm)	Siフォトダイオード B型
NIR (751-960 nm)	Siフォトダイオード B型
IR1 (961-1580 nm)	InGaAs PINフォトダイオード A型
IR2 (1580-2500 nm)	InGaAs PINフォトダイオード B型

**積分球光源法と重量法を併用した評価装置**

**PMT ソーラシミュレータ測定時の応答非直線性が高い**

ソーラシミュレータ測定時の光電子増倍管(250 nm~390 nm)の検出電流値のリニアリティ比は+7%程度に達し、誤差としては+14%となる

抵抗型デバイダ回路をアクティブ型に改造して再評価した結果、応答非直線性誤差は+0.1%未満に抑制。分光放射計に実装して特性改善確認済。

### 課題2: 高速型グレーティング分光放射計の応答直線性の評価 複数光源切り替え型照度可変光源の開発と適用

図1 光源の基本構成

- 有効照射面積: 20 mm × 20 mm
- 分光分布: AM1.5G近似
- 面内不均一性: ±2%以下
- JIS C 8912, JIS C 8933 クラスA

図2 照度設定と重量による照度の線形性

シャッター制御により複数光源の切り替えを瞬時にし、0.025 SUN~1.2 SUNの範囲で照度可変。重量の正確性は、線形性が検証されたコブレンツ型のサーモパイルで検証。

図3 照射面内不均一性(±2%以下)

ランプの出射光をファイバーユニットで均一化し、更にレンズ光学系で平行光線にする。

## 結果

- CMC(最高校正能力)を0.72%から0.5%台に改善**
- 超高温度定点黒体炉を標準光源として利用するための技術開発
  - ディテクタの応答直線性の評価技術とその解消手法の開発

測光標準	拡張不確かさ
標準電球	2.15%
標準電球とWRR	0.72%
超高温黒体炉とWRR	0.51%~0.53%

課題1と課題2の解決により、表1の3を大幅に改善し、拡張不確かさを従来の0.72%から0.5%台に大幅改善

合成標準不確かさ = 標準不確かさの二乗和の平方根

$$\sqrt{(0.20)^2 + (0.47)^2 + (0.07)^2}$$

拡張不確かさ = 合成標準不確かさ × 包含係数

包含係数K=2 で信頼区間95% で推定された誤差となる

### 課題3: 不確かさ抑制の為の絶対放射計測技術開発

- 従来の絶対放射計では、WRRとの比較校正値を更に改めてSI単位系に換算して利用
- 受光部の構造が複雑で再現性・再生産性が低く、今後は入手が困難
- これらの課題を解決するため、SI単位系で直接自己校正可能な絶対放射計測技術を開発中

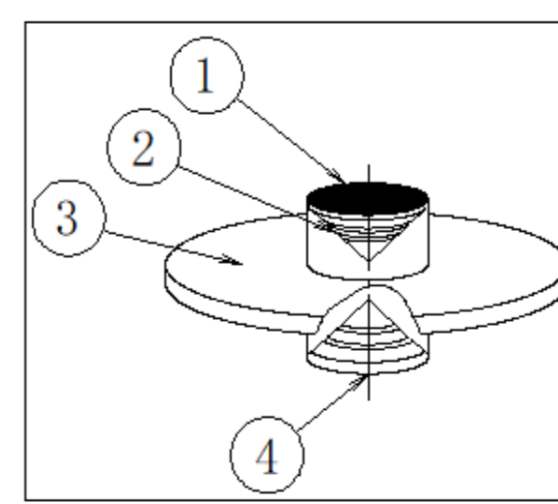


図4 従来型絶対放射計の代表的な受光部構造

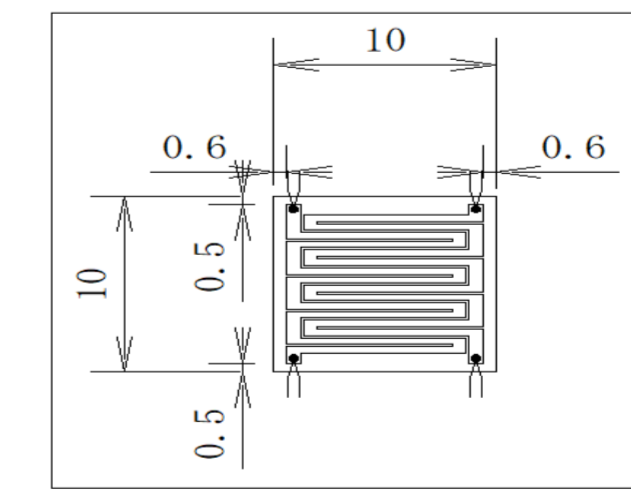


図5 開発中の受光部一例(平板構造)

- 受光部は薄い銀板で円錐形=加工困難
- ①の裏面に白金線巻き付け=加工困難
- ヒートシンク
- 黒体参照用の受光部

セラミック基板上に白金薄膜パターンを形成  
詳細設計完了、試作・評価中

## 結論

- 光電子増倍管のデバイダ回路の改造により、長年の課題であった短波長域の応答非直線性を解消できた。
- 技術開発の成果を導入して測定したデータに基づく不確かさの推定の結果、CMC(最高校正能力)は0.5%台に向上している。
- 絶対放射計による放射照度補正係数の不確かさを低減することで、CMCの更なる向上が期待される(開発中)。

## 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から受託して実施したものであり、関係各位に感謝する。

# 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、志村 陽哉、山越 憲吾、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 太陽光評価・標準チーム

## 研究の目的

発電性能の高効率化を目指した各種新型太陽電池の研究・開発が国内外研究機関において精力的に進められている。このような新型太陽電池の出力特性を高精度に評価するには、個々の特徴(構造、電気・光の応答性など)に応じた性能評価法の開発が必要である。

また、太陽光発電の主力電源化に向けた取り組みとして、新市場・新用途分野(壁面設置・屋根軽量・移動体等)への導入を目指した新型太陽電池の研究・開発が開始され、構造や設置環境に応じた性能評価法も求められている。

## 研究の概要

本発表では、下記2テーマについての成果を紹介する。

1. 新型太陽電池性能評価技術  
ペロブスカイト太陽電池の性能評価法の開発  
⇒ 特有の遅い時間応答、ヒステリシス特性の影響を受けない**定常状態**における**発電特性測定法**の開発。
2. 太陽電池モジュール角度特性評価  
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)である。  
⇒ **入射角度特性<sup>[1][2]</sup>**、**形状依存性**の評価・補正技術開発を開始。

## 1 新型太陽電池性能評価技術開発

### ペロブスカイト太陽電池

“(Quasi-) steady-state” (定常状態)における性能評価法<sup>[3, 4, 5]</sup>

- **Asymptotic法** (又は、Dynamic I-V法とも)
- **V<sub>mp</sub>ホールド法**  
バイアス電圧をV<sub>mp</sub>に保持し、P<sub>max</sub> (I<sub>mp</sub>) 測定
- **最大電力点追従制御**  
(Maximum-Power-Point Tracking; **MPPT**)

産総研での取り組み:

#### MPPT法による発電性能評価手順の開発

##### 測定手順

- Step 0: 事前測定 (V<sub>pm</sub>, I<sub>pm</sub> 概算値の算出)
- Step 1: 光照射 & MPPT制御開始(温度制御も)
- Step 2: 出力(P<sub>max</sub>)、V<sub>pm</sub>、I<sub>pm</sub> をモニター  
出力安定性の確認(現状目安として 5~10 分間)  
→ 安定性確認後、P<sub>max</sub>測定
- Step 3: I-V 測定(順方向、逆方向)

### MPPT法による測定結果

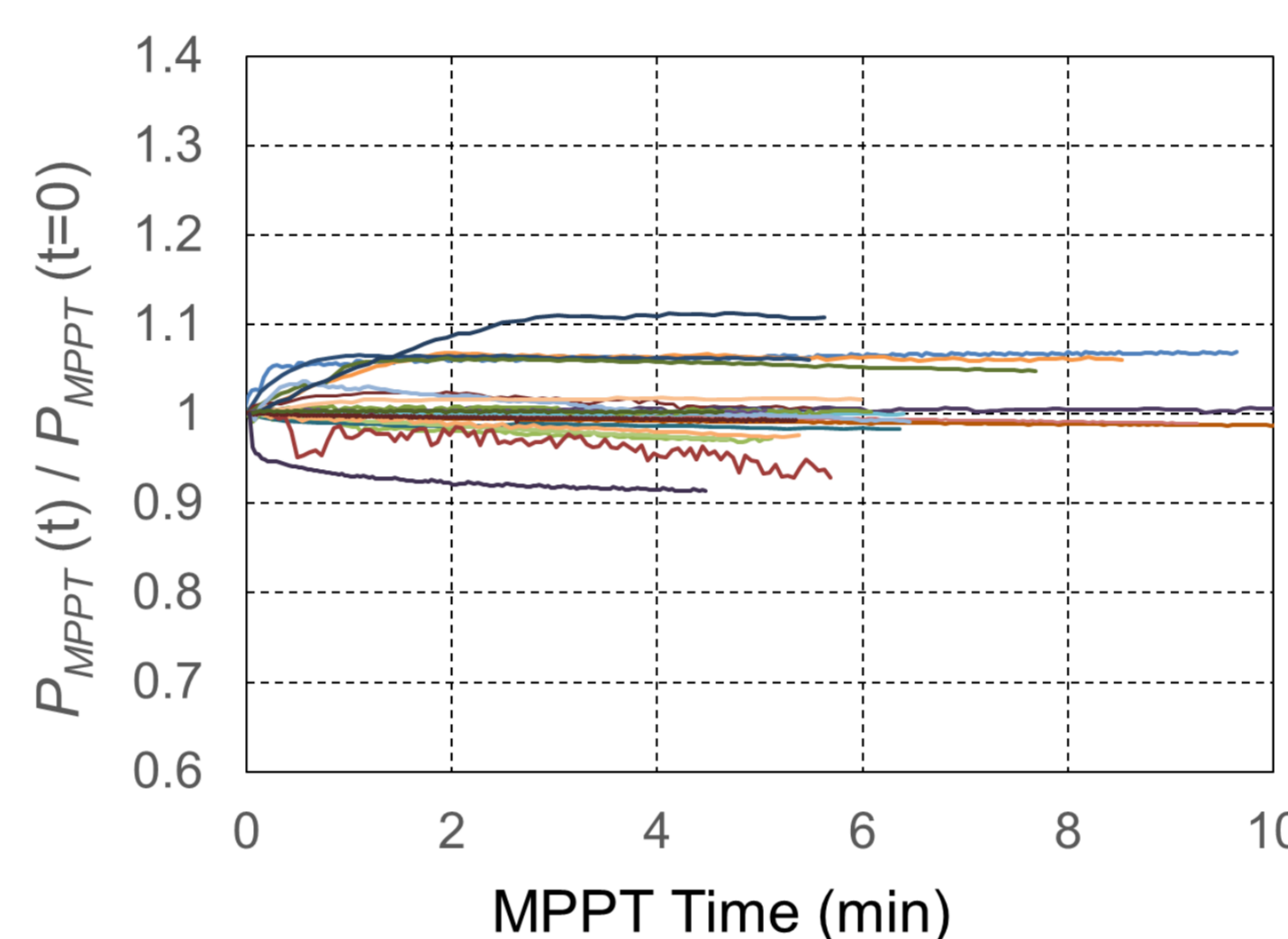


図1. 各種ペロブスカイト太陽電池のMPPT出力(P<sub>MPPT</sub>) (出力安定な24サンプル). 初期出力値(t=0)で規格化。

- 概ね5~10分間程度の安定性を確認。一部、MPPT開始初期に出力変動(~10%)を示すものあり。
- 安定なサンプルでは、制御開始初期値からの変化量、その制御時間内の変動量がそれぞれ±1.0%以内、0.5%以下

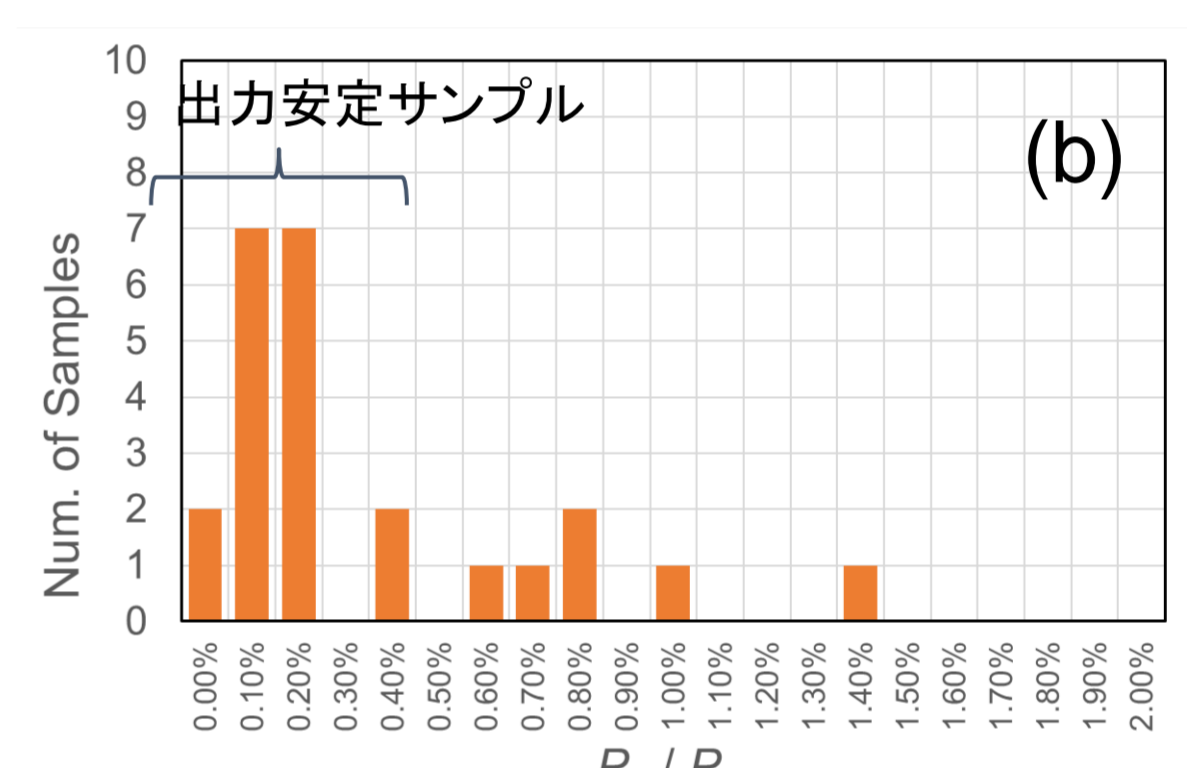
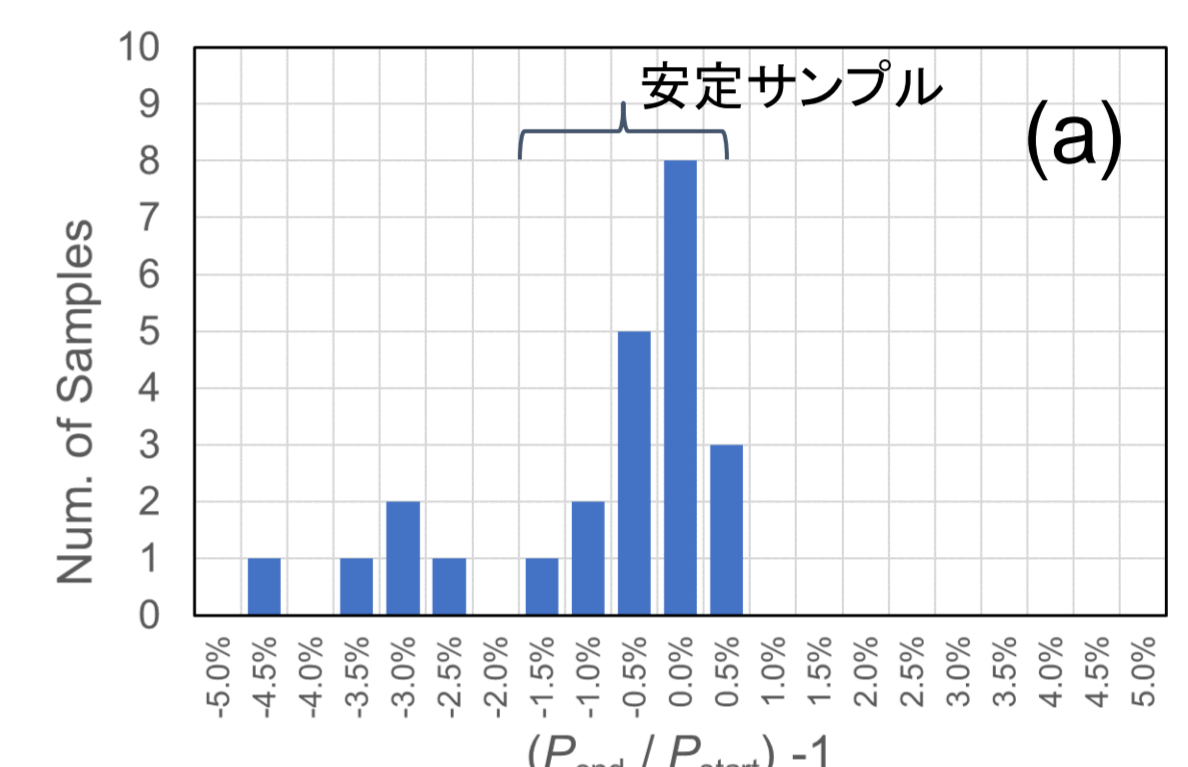


図2. MPPT制御5分間(一部、3分間)における (a)初期値からの変化量、(b)制御時変動量。

## 2. 太陽電池モジュール角度特性評価

### 結晶Si単セルモジュールによる基礎評価

#### 実験1. 光照射中央に設置

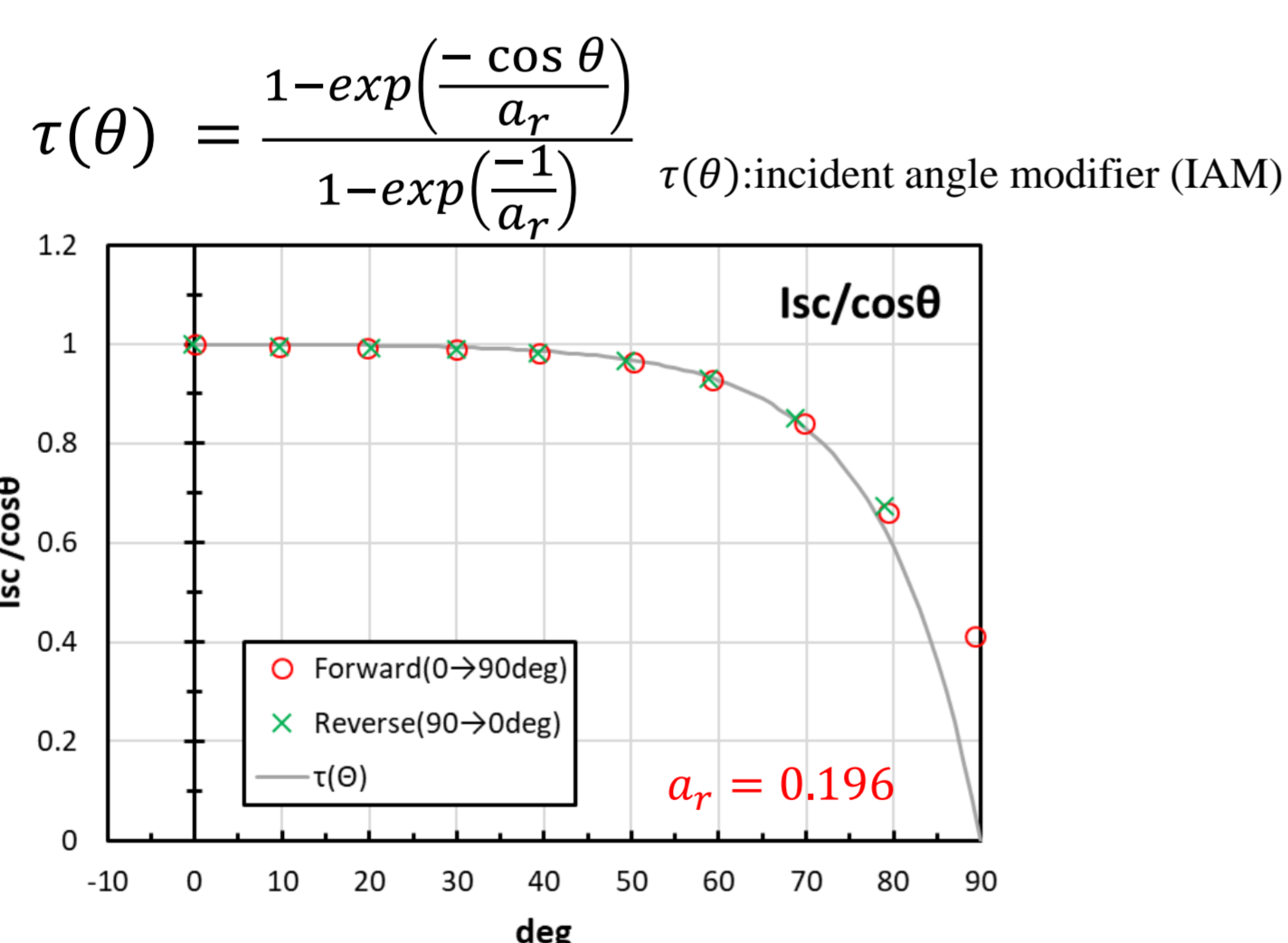


図3. 光照射エリア中央における単セルモジュール角度特性

#### 実験2. 光照射中央から上下±40 cmに設置

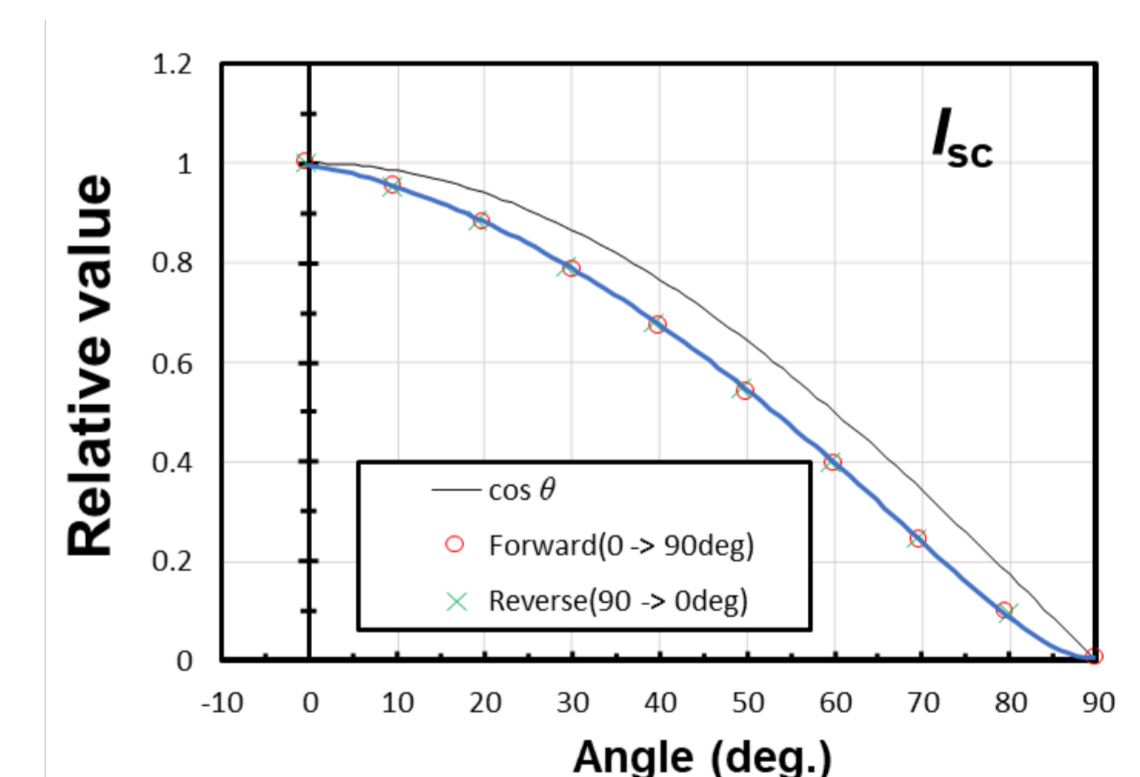
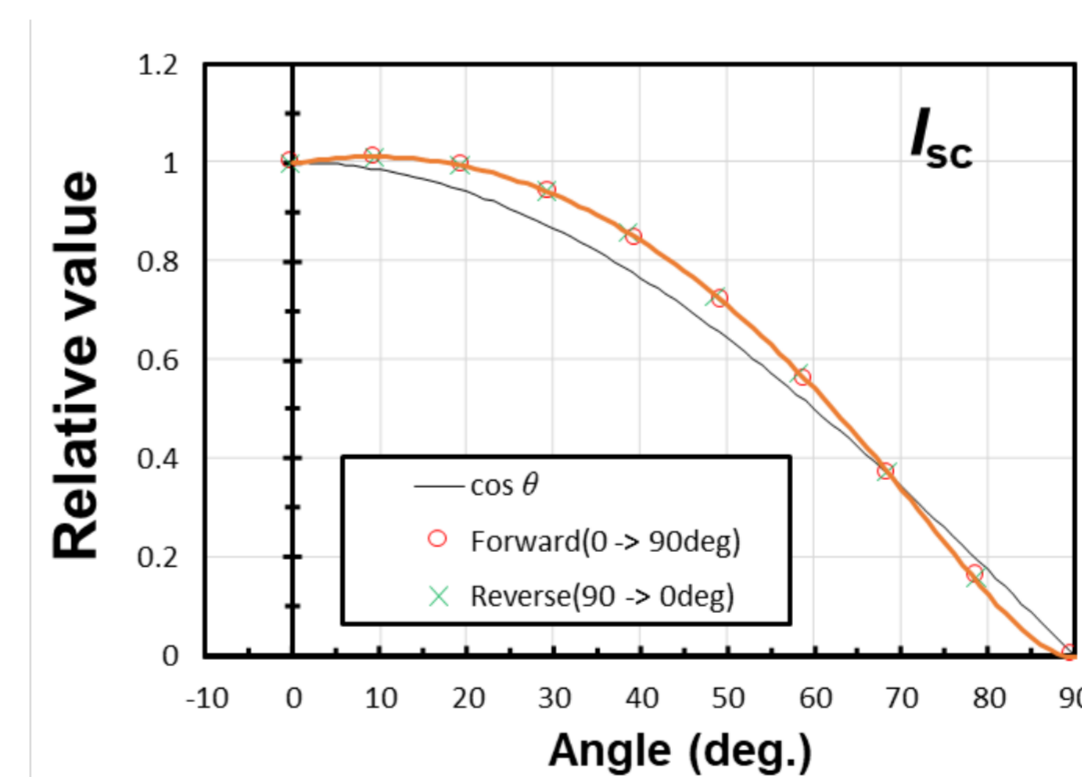
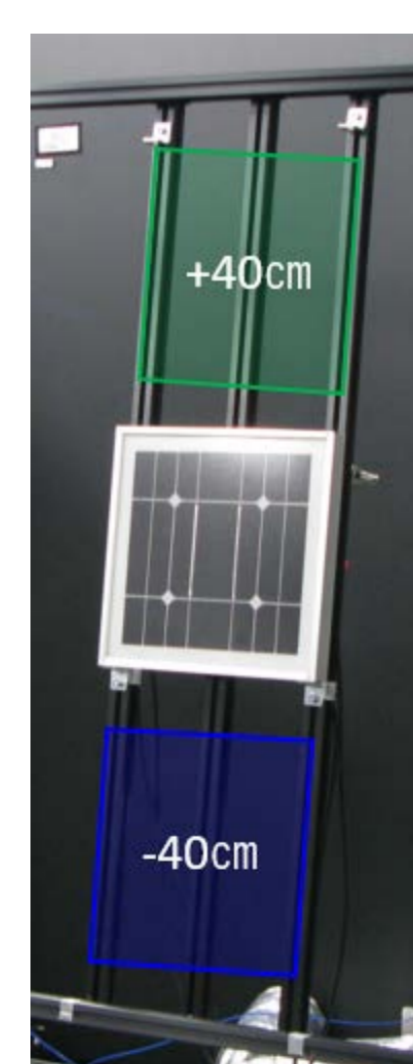


図4. 単セルモジュール短絡電流の角度特性(光照射中央より上下40 cm位置) 実線(橙、青)は照度空間分布を考慮した計算結果、黒実線はcosθ特性

- 照射の空間分布を考慮した解析を行なうことで、中央以外の各設置位置でも計算結果と実験結果との良い一致が得られた。

⇒ モジュールの角度特性評価にも今後適用

## まとめと今後の展開

1. 各種新型太陽電池の高精度性能評価技術開発  
・ペロブスカイト太陽電池の定常状態発電特性評価手法として、MPPT法を用いた性能評価手順を開発した。  
⇒ 安定なサンプルでは、測定時変動量0.5%以下で性能評価可能  
・新型結晶Siペアセル及びCIGS太陽電池においては測定再現性±0.5%を達成した(\*本文中には結果未掲載)。
2. 新用途向け新型太陽電池の性能評価要素技術開発  
・太陽電池セル・モジュールの角度特性の評価技術開発を開始した。  
・基礎評価として、単セルモジュールでの角度特性を評価し、照度空間分布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。

【今後の展開】モジュールでの角度特性評価、光源分布・角度特性を考慮した発電性能の評価・解析方法、補正技術の開発

## 参考文献

- [1] N. Riedel-Lyngskær et al., *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 1–19 (2020).
- [2] W. Herrmann, S. Schaaf, L. Rimmelspacher, J. Bonilla Castro, *Proceedings of 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference.* 1192 – 1196 (2019).
- [3] Y. Hishikawa, H. Shimura, T. Ueda, A. Sasaki, and Y. Ishii, *Curr. Appl. Phys.* **16**, 898 (2016).
- [4] R. B. Dunbar et al., *J. Mater. Chem. A* **5**, 22542 (2017).
- [5] IEC TR 63228:2019, “Measurement protocols for photovoltaic devices based on organic, dye-sensitized or perovskite materials”.

<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。

# 3端子型GaAs/Siタンデム太陽電池の性能評価

太野垣 健<sup>1</sup>、牧田 紀久夫<sup>2</sup>、立花 福久<sup>1</sup>、水野 英範<sup>1</sup>、大島 隆治<sup>2</sup>、高遠 秀尚<sup>1</sup>、菅谷 武芳<sup>2</sup>

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 ゼロエミッション国際共同研究センター

## 研究の目的

- 太陽光発電の利用多様化に向けて、太陽電池の高効率化技術の開発が進められており、太陽光の広範なスペクトルを効率よく利用するタンデム太陽電池の研究が進められている。
- タンデム太陽電池が高い効率を得るためには、トップセルとボトムセルの電流マッチが必要であり、最適なバンドギャップエネルギーの材料を選択しなければならないという制約がある。
- 3端子タンデム太陽電池は電流ミスマッチにより効率が低下しないタンデム太陽電池であり[1]、本研究では、スマートスタック接合技術を活用して作製した3端子GaAs/Siタンデム太陽電池[2]において、その性能評価をおこなった[3]。

## 実験

- バックコンタクト型のSiボトムセルとトップセルを接合することにより、3端子タンデム太陽電池を作製した。

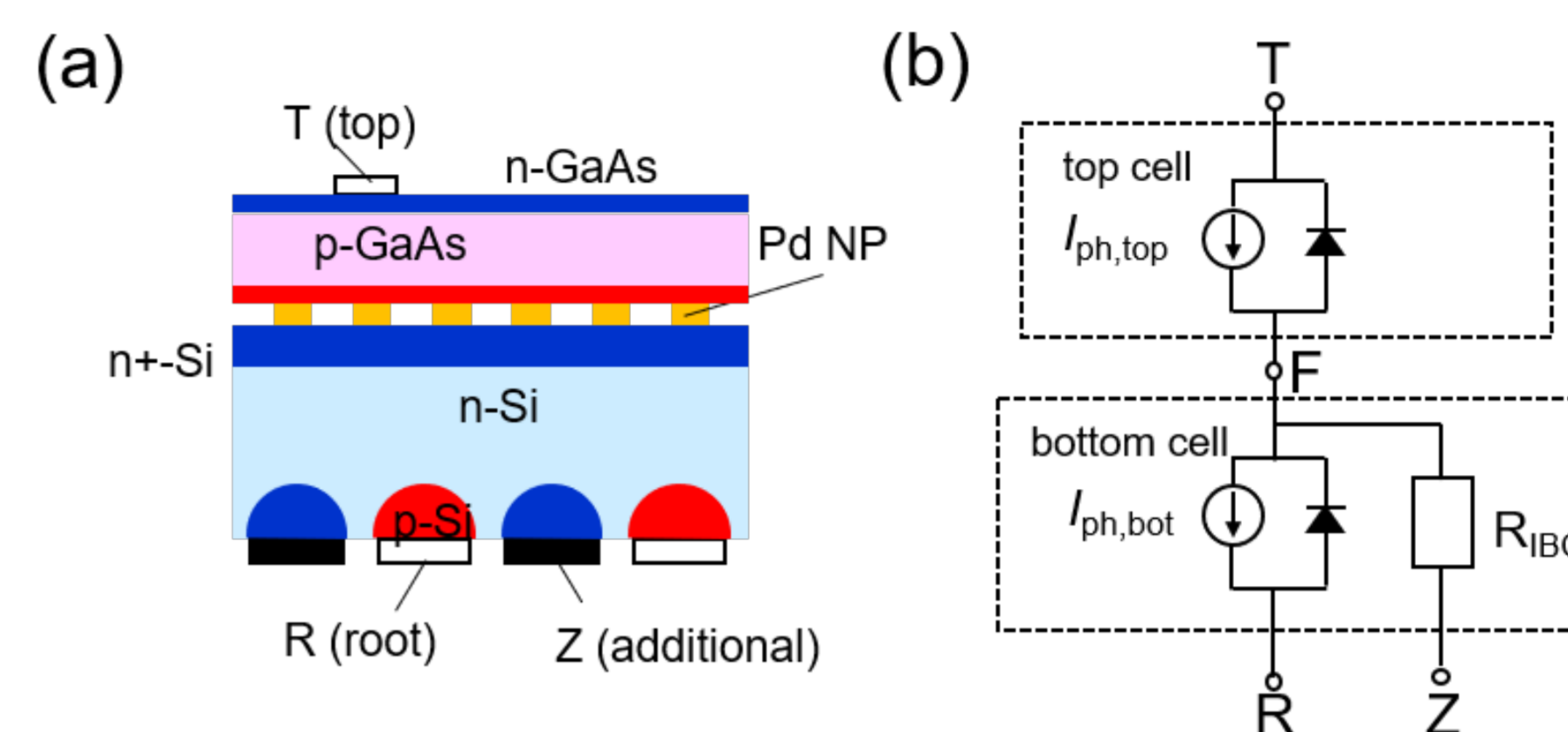


図1 (a)3端子タンデム合太陽電池の模式図と(b)等価回路図[3]

## 結果

- トップセルには厚さ2 μmのGaAsを使用し、Au電極を事前に形成した。トップセルの面積はボトムSiセルの面積よりも小さい(図2)
- ボトムセルには、n型Siウエーハ((100)両面研磨、1~5 Ωcm、厚さ200 μm)から作製したバックコンタクト型Siセルを使用した。エミッタとBSFエリアに使用される背面金属電極は、スクリーン印刷と焼成技術によって形成した。

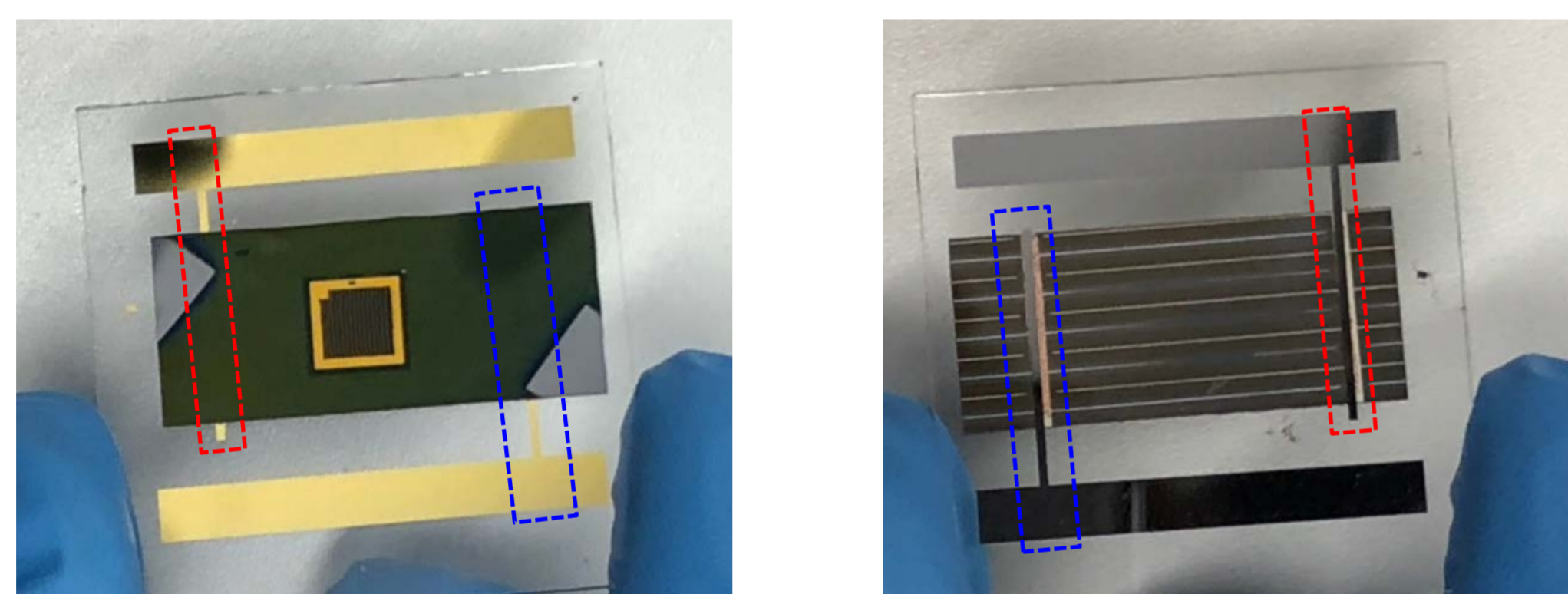


図2:3端子タンデム太陽電池の前面(左)および背面(右)のデジタルカメラ画像[2]。

- GaAsトップセルに覆われていないSiボトムセルを遮光し、照射面積を同一にした。
- 素子の3つの電極から2つをソースメータの各チャンネルに使用した。2チャンネル測定では、3つの接点のうちの1つを共通の接点として使用した。例:Z電極をCommon → CZ
- 各チャンネルにおける出力の和を総出力とした。

$$P_{CZ} = P_{ZT} + P_{RZ} = I_{TZ} V_{ZT} + I_{ZR} V_{RZ}$$

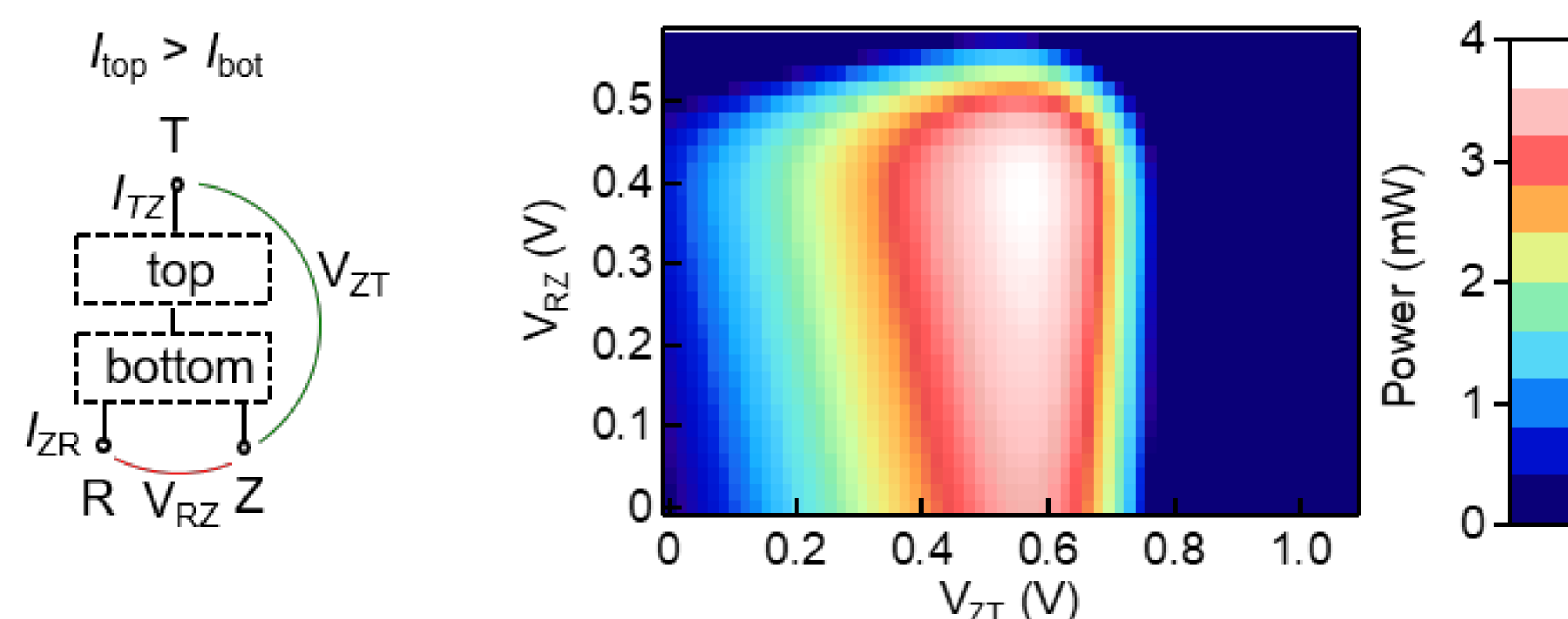


図3: CZ接続における出力コンターマップ[3]。

## 考察

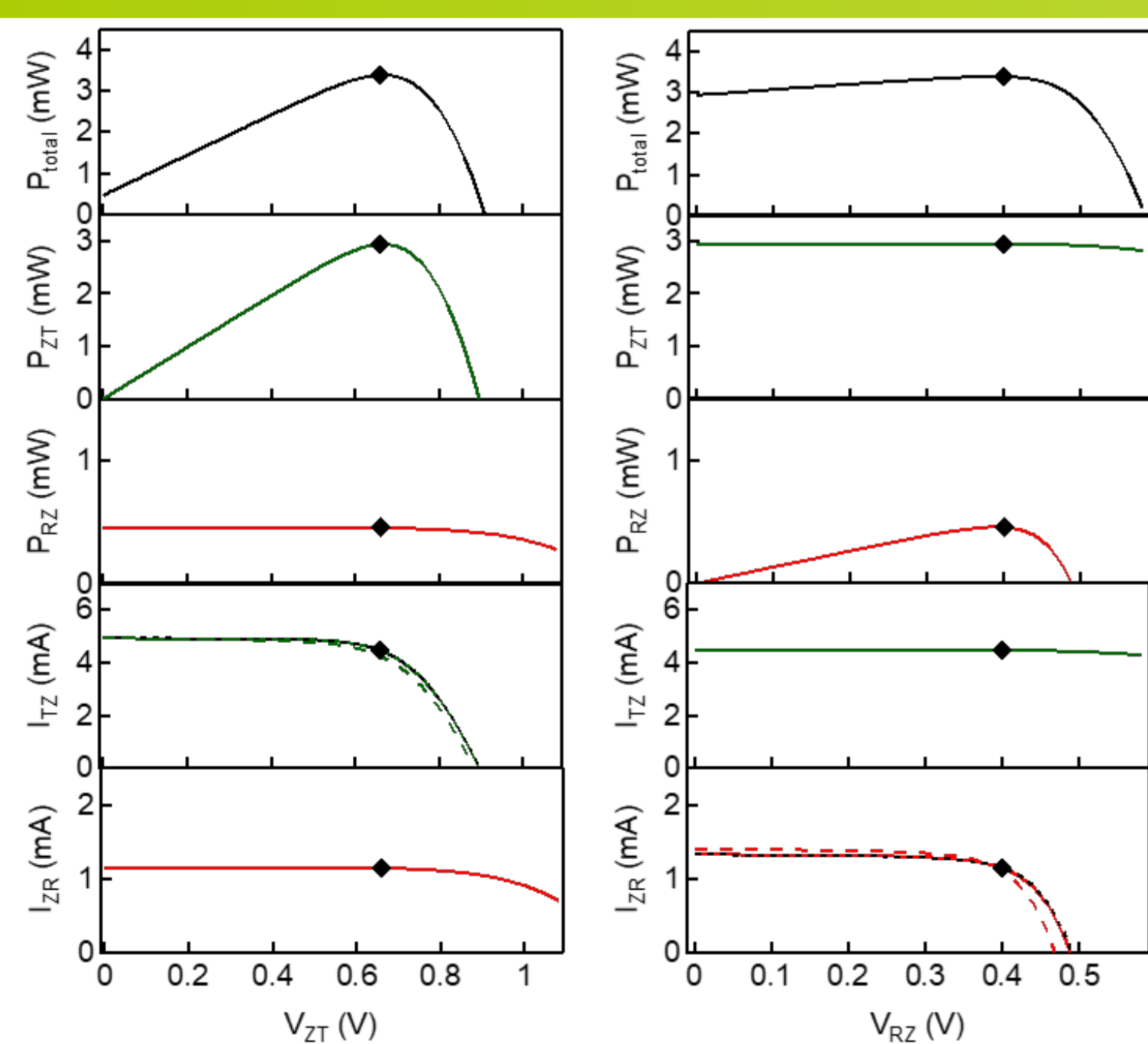


図4: CZ接続における電流電圧曲線[3]。

- 各チャンネルにおける電流電圧曲線は等価回路モデルで理解することができた。
- 最大出力は、接続方法によらず、同一の値が得られることが分かった。

$$P_{CZ} = P_{CT} = P_{CR} = I_{top} V_{top} + I_{bot} V_{bot} - (I_{top} - I_{bot})^2 R_{IBC}$$

Connection	$P_{ZT}$ mpp (mW)	$V_{ZT}$ mpp (V)	$P_{RZ}$ mpp (mW)	$V_{RZ}$ mpp (V)	$P_{RT}$ mpp (mW)	$V_{RT}$ mpp (V)	$P_{total}$ (mW)
CZ	2.94	0.66	0.46	0.40	-	-	3.40
CT	2.20	0.66	-	-	1.21	1.06	3.41
CR	-	-	-1.31	0.40	4.71	1.06	3.39

表1:3端子タンデム太陽電池特性[3]。

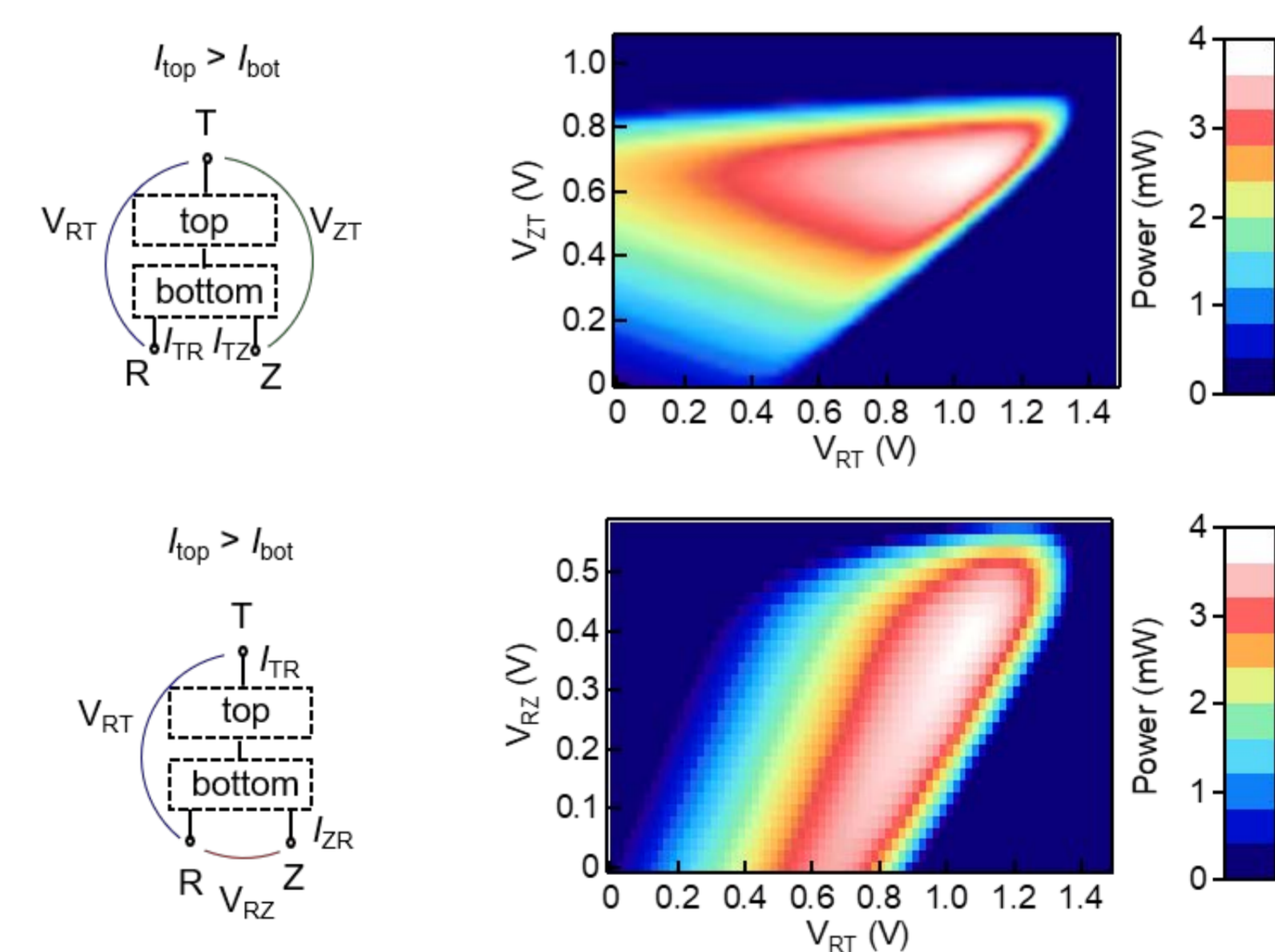


図5: CT(上図)およびCR(下図)接続における出力コンターマップ[3]。

## 結論

- 導電性ナノ粒子アレイを使用して結合されたIII-Vトップセルとバックコンタクト型Siボトムセルで構成される3端子タンデム太陽電池を実証した。
- 3端子タンデムによって抽出された合計電力を評価したところ、3端子タンデムの合計電力は、電極への接続方法によらず、トップおよびボトムサブセルによって生成された電力の合計に等しい値が得られることがわかった。

本研究は、国立研究開発法人NEDOの委託の下で行われた。

## 参考文献

- T. Nagashima, K. Okumura, K. Murata, and Y. Kimura, "Three-terminal tandem solar cells with a back-contact type bottom cell," IEEE Photovoltaic Specialist Conference pp. 1193–1196, 2000.
- T. Tayagaki, K. Makita, T. Tachibana, H. Mizuno, R. Oshima, H. Takato, and T. Sugaya, "Three-terminal tandem solar cells with a back-contact-type bottom cell bonded using conductive metal nanoparticle arrays", IEEE J. Photovoltaics. **10**, 358–362 (2020).
- T. Tayagaki, K. Makita, T. Tachibana, H. Mizuno, R. Oshima, H. Takato, and T. Sugaya, "Impact of loading topology and current mismatch on current-voltage curves of three-terminal tandem solar cells with interdigitated back contacts", Sol. Energy Mater. Sol. Cells **221**, 110901 (2021).

# 非平面型太陽電池ミニモジュール の試作と発電性能評価

太野垣 健、志村 陽哉、佐々木 あゆ美、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

- 輸送部門における低炭素化技術の一つとして高効率太陽電池の車載利用が検討されている。車載においては、定置型への利用と異なる状況のため、発電量評価の技術確立が課題となっている[1]。
- 自動車に搭載するには、側面やボンネット部など、曲面パネルの搭載も検討されている。太陽光発電パネルを車載利用する際に、曲面パネルへの日射光量の評価モデルの構築が進められてきた[2]。
- 本研究の目的は、太陽電池モジュールの発電性能における非曲面特性を理解することである[3]。

## 実験

- シリコン太陽電池(3×3 cm<sup>2</sup>)を非平面状に設置した曲面型シリコン太陽電池ミニモジュールを作製した。

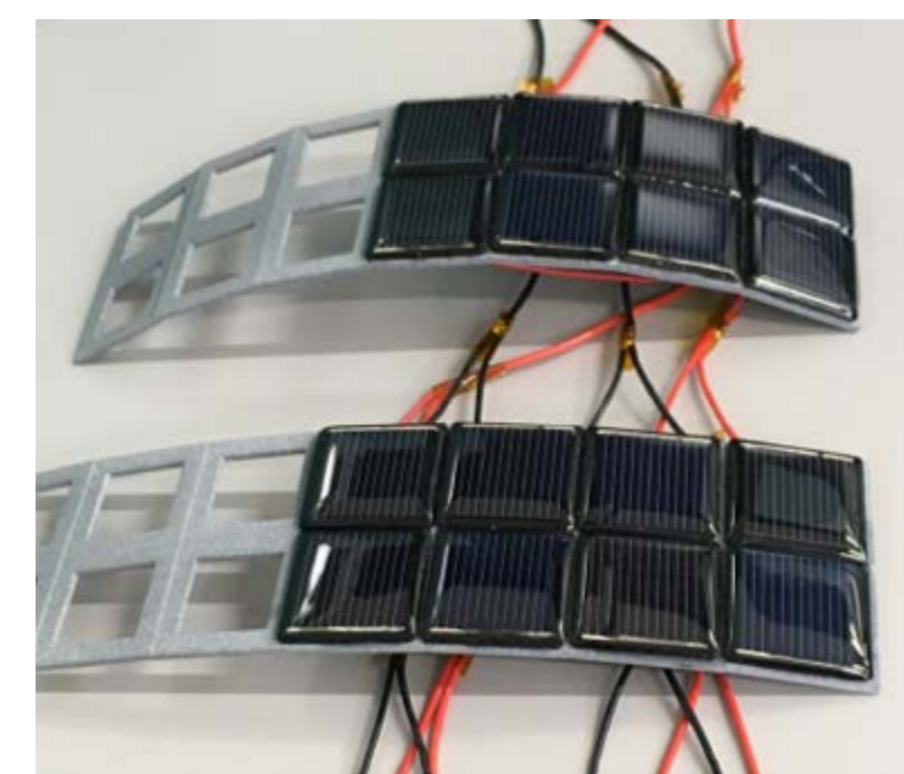


図1 曲面太陽電池ミニモジュールの外観。

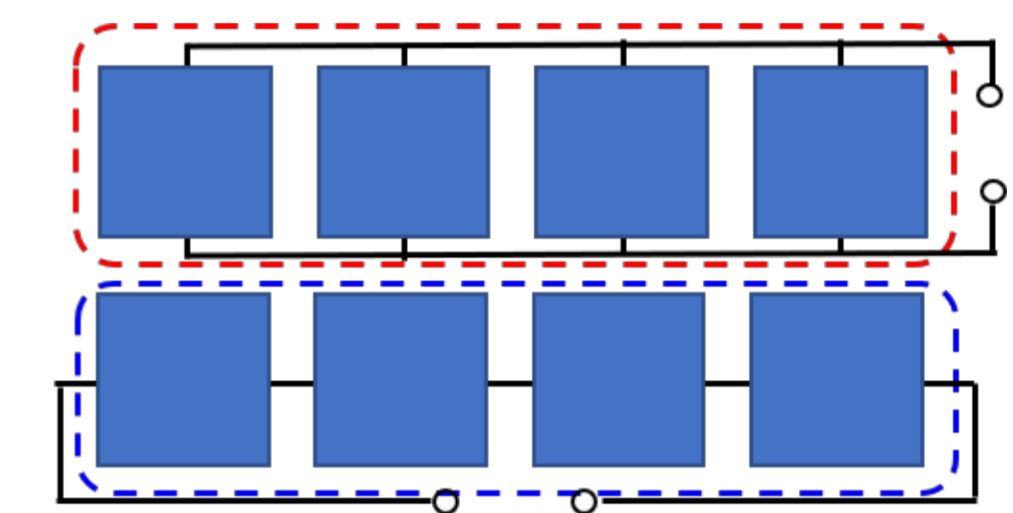


図2 曲面ミニモジュールにおける太陽電池間の接続。上部：並列接続。下部：直列接続

## 結果

- ソーラシミュレータ(垂直入射: 1.6° 内に90%以上、照射光強度の空間不均一性: 約1.5%以内)を用いて電流電圧曲線の測定を行った。

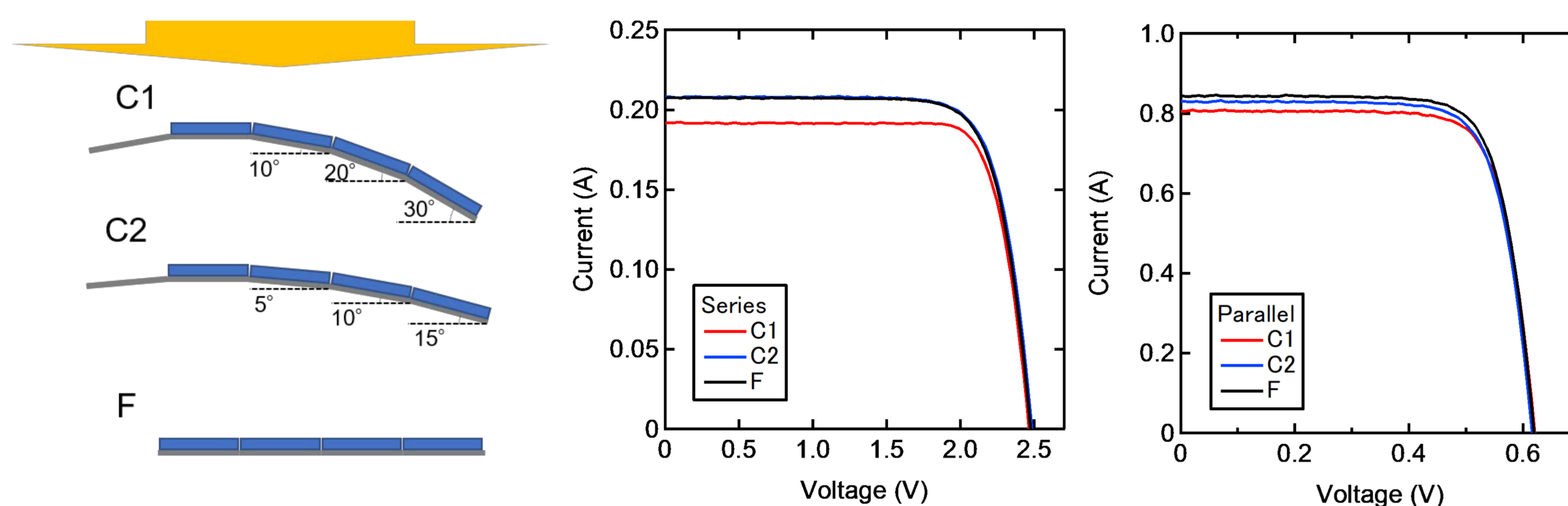


図3 曲面太陽電池ミニモジュール(C1およびC2)と平面モジュール(F)の電流電圧曲線。左：直列接続。右：並列接続。

- 短絡電流( $I_{sc}$ )は、入射光角度を考慮したモデルによる計算値と良い一致(±4%以内)を示した。
$$I_{sc}(\theta) = \frac{1 - R(\theta)}{1 - R(\theta=0)} I_{sc}(\theta=0) \cos \theta$$

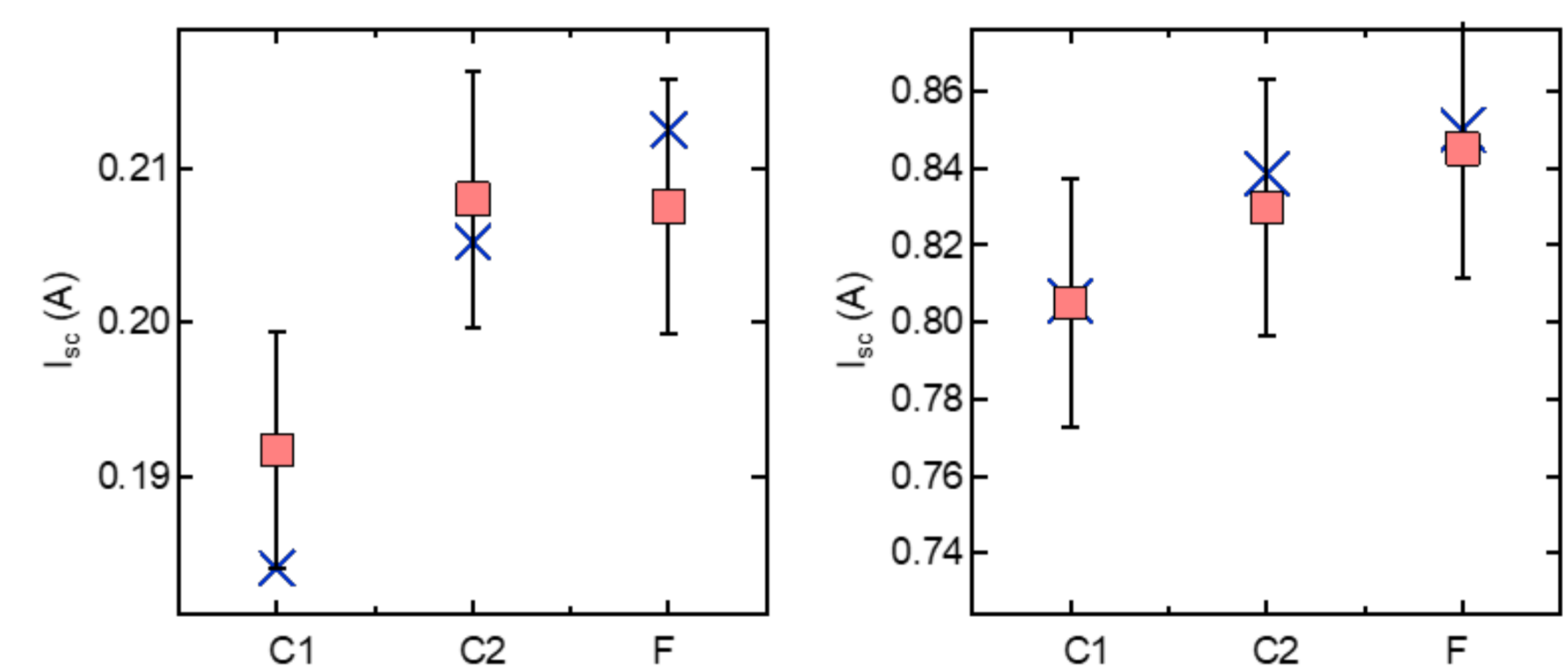


図4 曲面太陽電池ミニモジュール(C1およびC2)と平面モジュール(F)の短絡電流( $I_{sc}$ )。×：モデルによる計算値

## 考察

- 実用サイズのシリコン太陽電池を曲率R[m]の曲面に配置した曲面シリコン太陽電池モジュールの電流電圧曲線についてモデル計算を行った。

- 曲率の増大により、電流ミスマッチが生じ、生成電流は低下した。
- 曲面による電流ミスマッチの影響は直列接続において顕在化した。

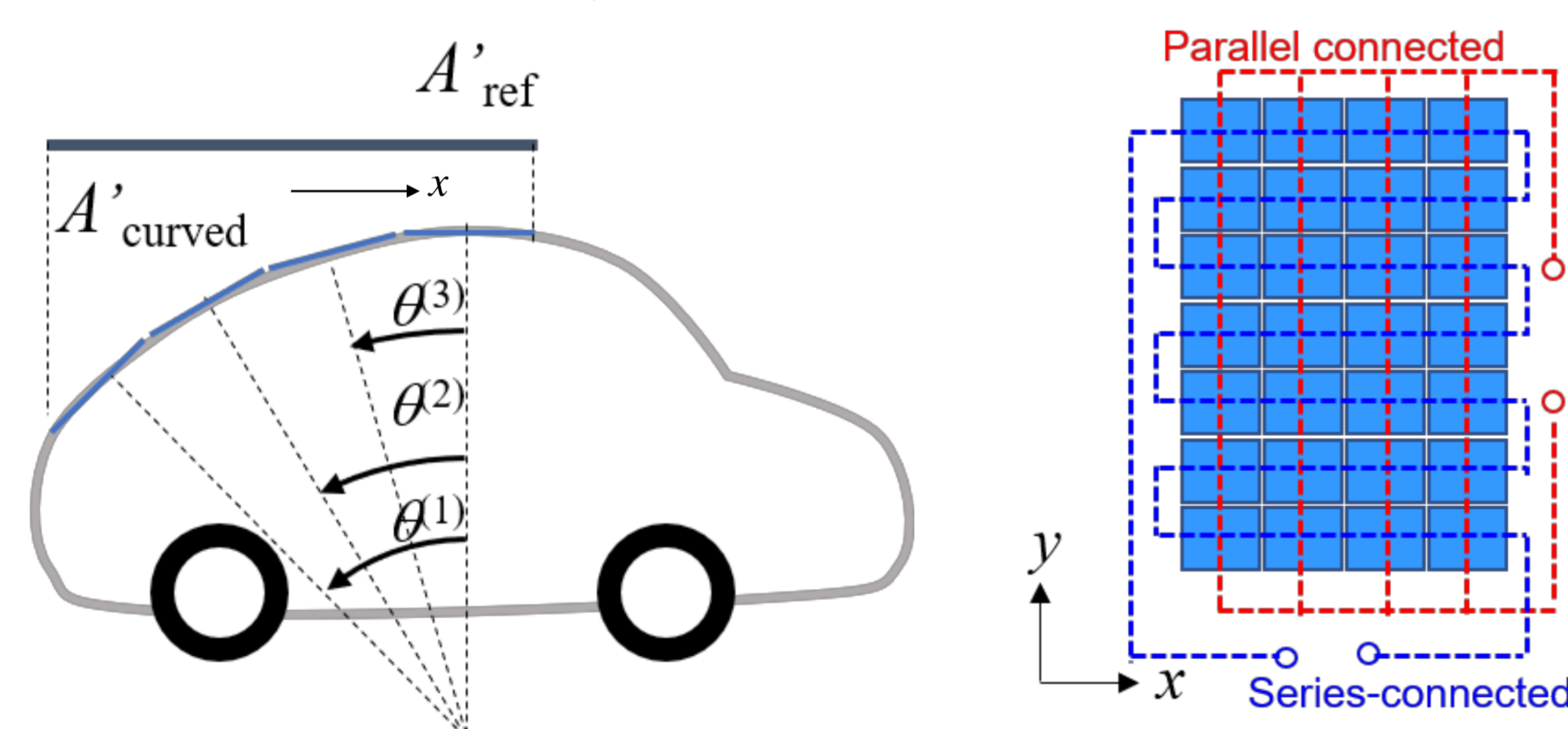


図5 曲面太陽電池モジュールのモデル図(左)とセル間の接続の概念図(右)

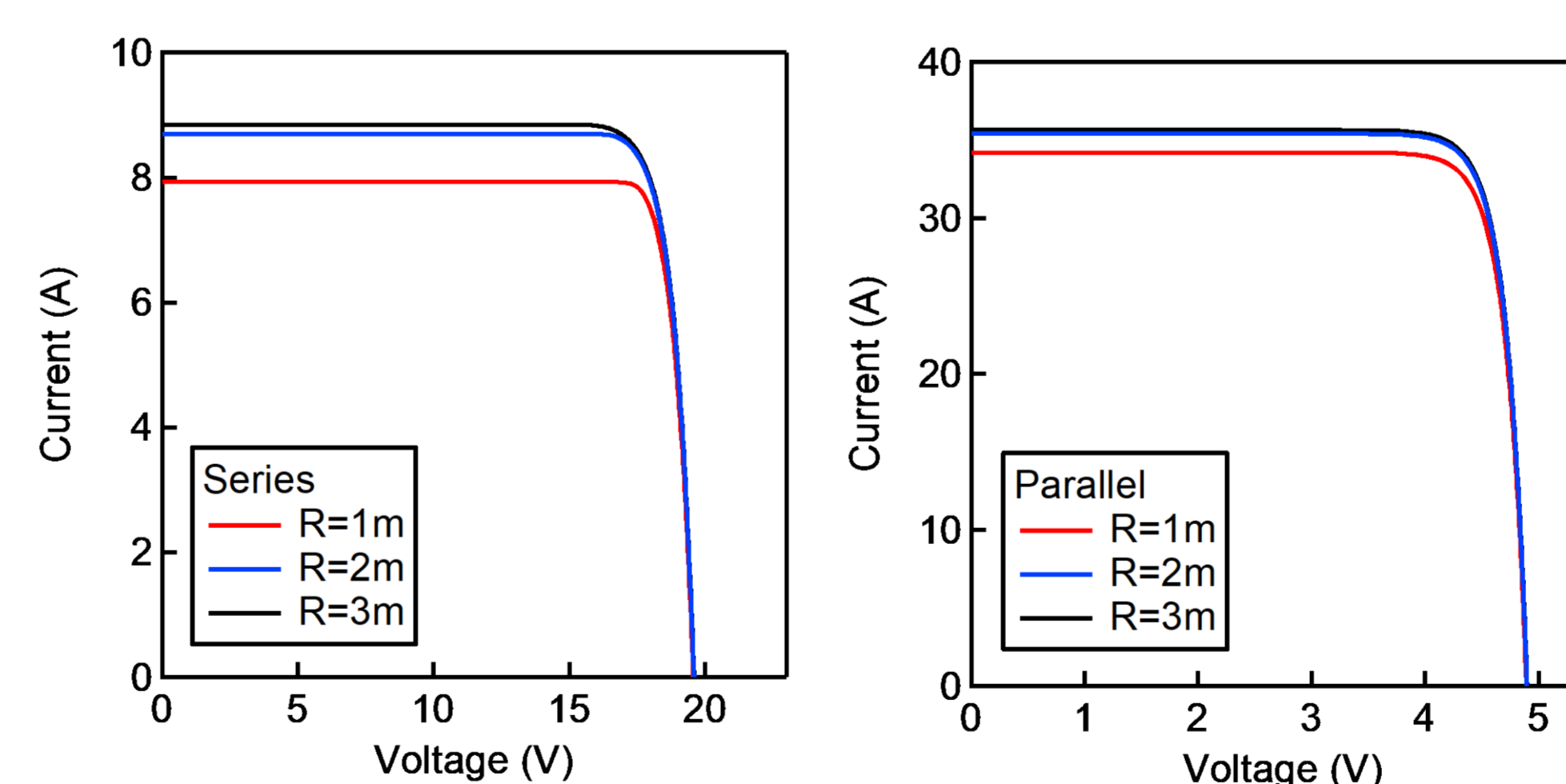


図6 曲面太陽電池モジュール(R=1,2,3m)の電流電圧曲線。左：直列接続。右：並列接続。

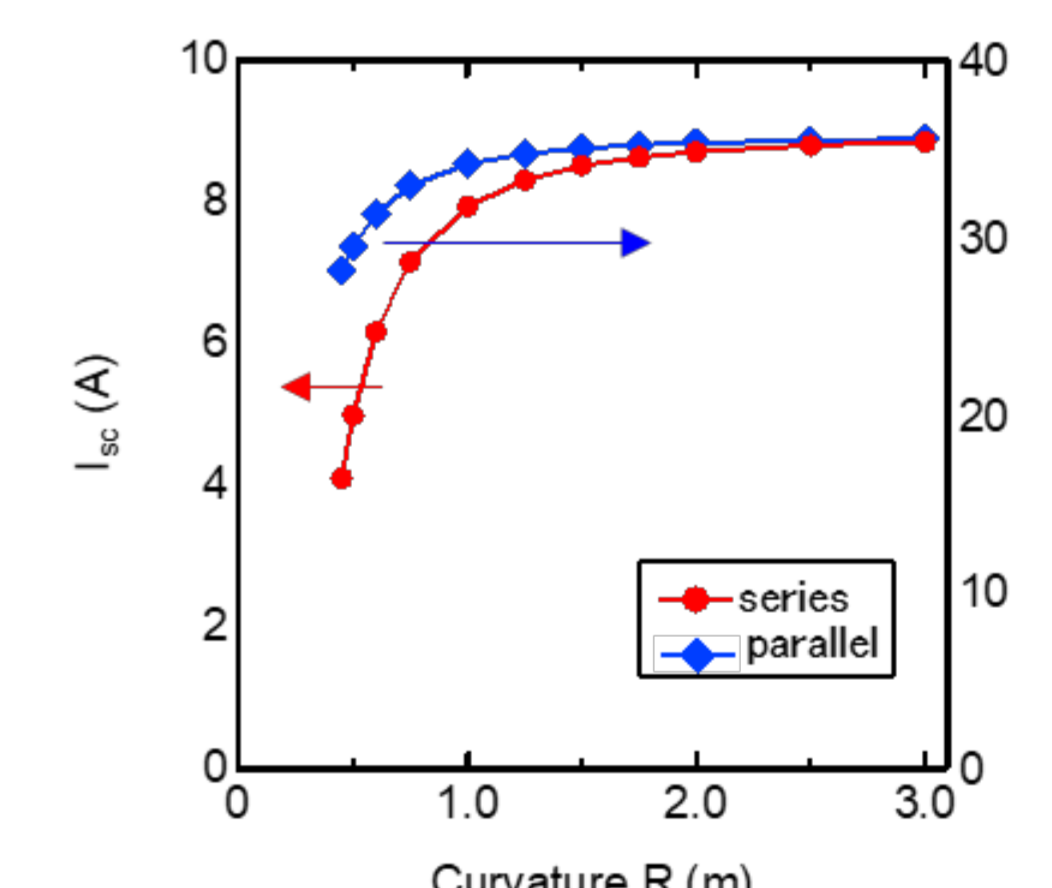


図7 短絡電流 $I_{sc}$ の曲率依存性。●：直列接続。◆：並列接続。

## 結論

- 本研究では、実用サイズのシリコン太陽電池を曲率1mの曲面に配置した曲面シリコン太陽電池モジュールを模擬した、非平面シリコンミニモジュールを作製した。
- ソーラシミュレータを用いた電流電圧測定により、曲面における電流ミスマッチの影響を検証し、曲面太陽電池モジュールにおける太陽電池セル間の接続が発電性能に及ぼす影響を示した。

本研究は、国立研究開発法人NEDOの委託の下で行われた。

## 参考文献

1. K. Araki, L. Ji, G. Kelly, and M. Yamaguchi, "To Do List for Research and Development and International Standardization to Achieve the Goal of Running a Majority of Electric Vehicles on Solar Energy," *Coatings*, **8**(7), 251 (2018).
2. T. Tayagaki, K. Araki, M. Yamaguchi, and T. Sugaya, "Impact of non-planar panels on photovoltaic power generation in the case of vehicles", *IEEE J. Photovoltaics*, **9**, 1721–1726 (2019).
3. T. Tayagaki, H. Shimura, A. Sasaki, and M. Yoshita, "Comparative study of power generation in curved photovoltaic modules of series- and parallel-connected solar cells", (*submitted*).

# MPPT動作中のPV性能リアルタイム診断技術

菱川 善博\*1、吉田 正裕\*1、千葉 恭男\*1、Manit Seapan\*2、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。
- ・IV特性についてはこれまでに、±0.5%程度以内の良好な再現性での屋外性能評価が可能な技術を開発した[1]-[4]。しかし評価のためにMPPT動作を止める必要がある。
- ・従来の常時監視は主に最大出力 $P_{max}$ データに基づき、長期のデータや相対比較が必要な場合が多かった。

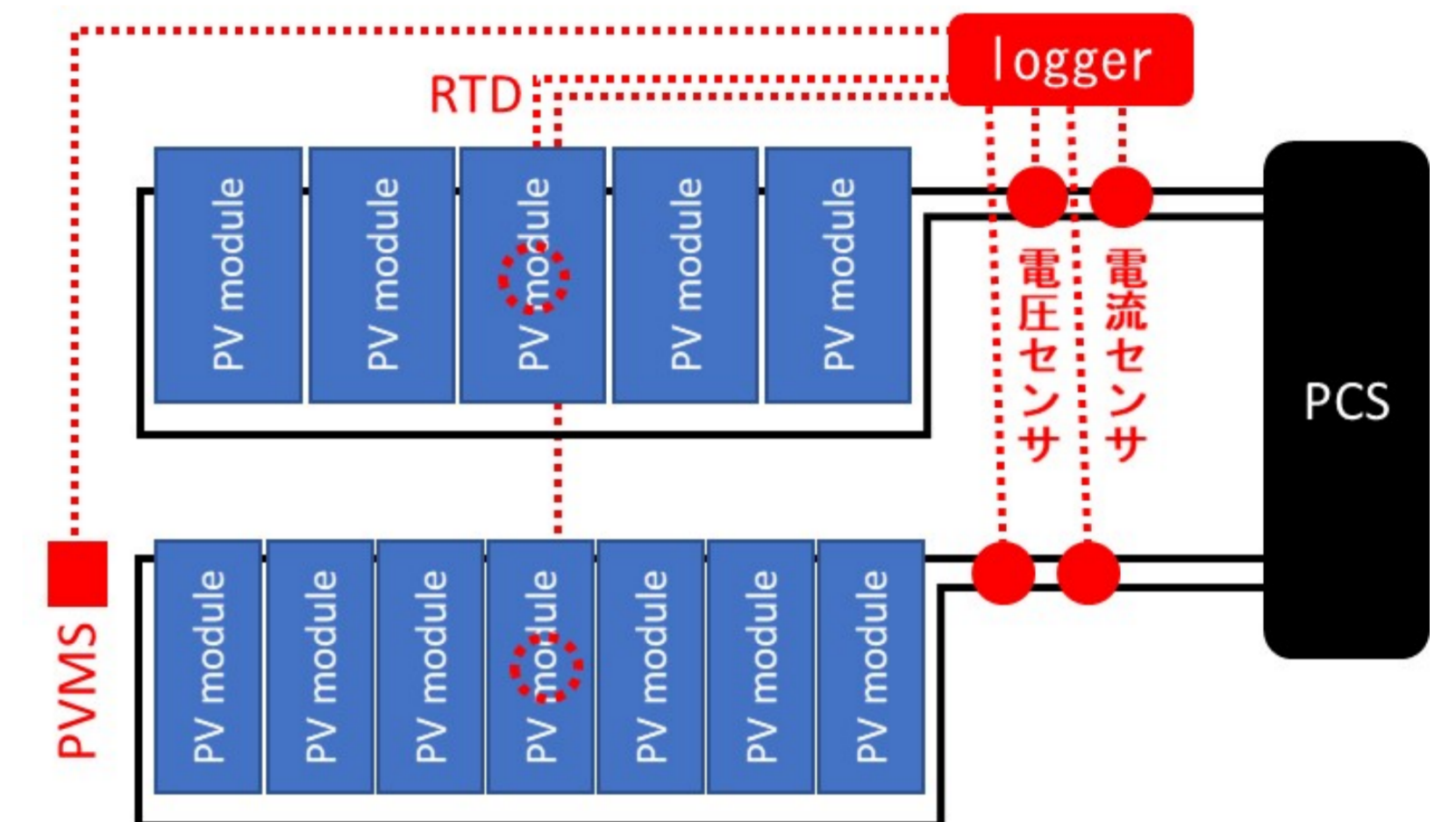
### 本研究の目的

- ・太陽電池の稼働中に、MPPT動作を止めることなく、リアルタイムで太陽電池の性能評価・故障診断を高精度に行う技術を開発する。

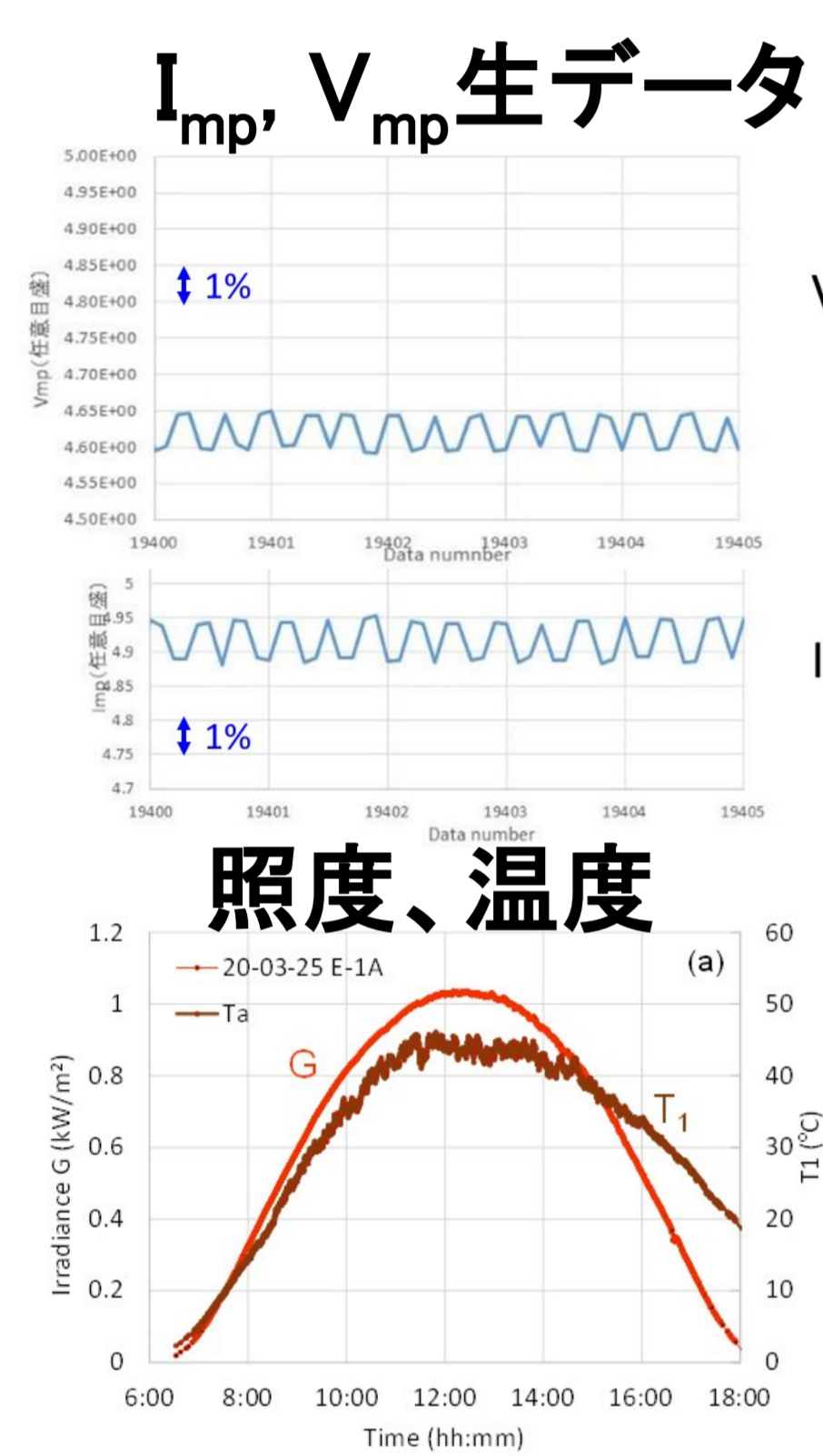
## 実験

産総研九州センター(佐賀県鳥栖市)太陽電池屋外曝露サイトでMPPT稼働中のE-1A、E-1Bシステムにおいて、 $I_{mp}$ と $V_{mp}$ の常時計測を実施( $I_{mp}$ : 最大出力動作電流、 $V_{mp}$ : 最大出力動作電圧)

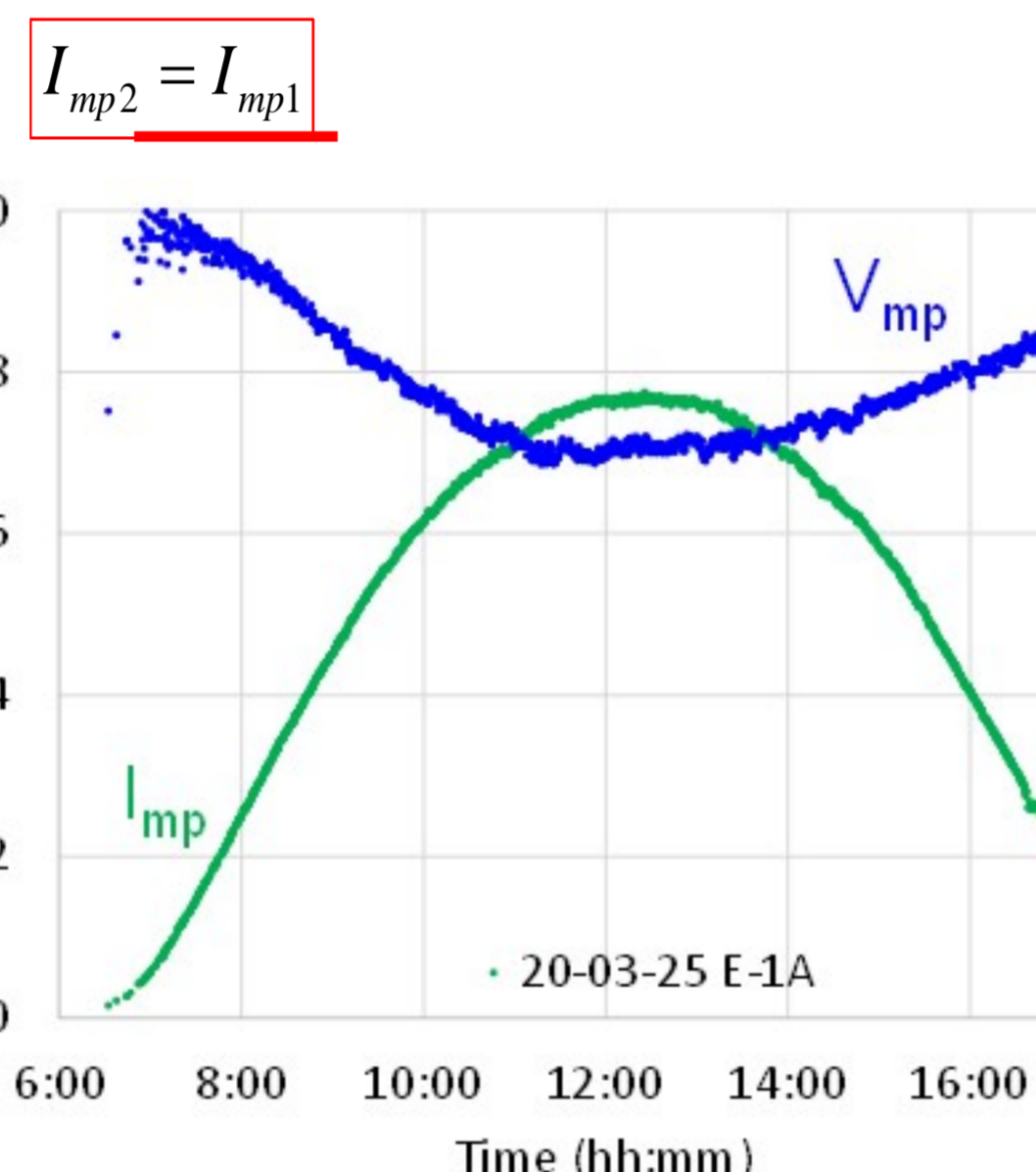
- ・PVセンサー(PVMS)で照度測定[2]
- ・ $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ の温度補正[5]



## 結果

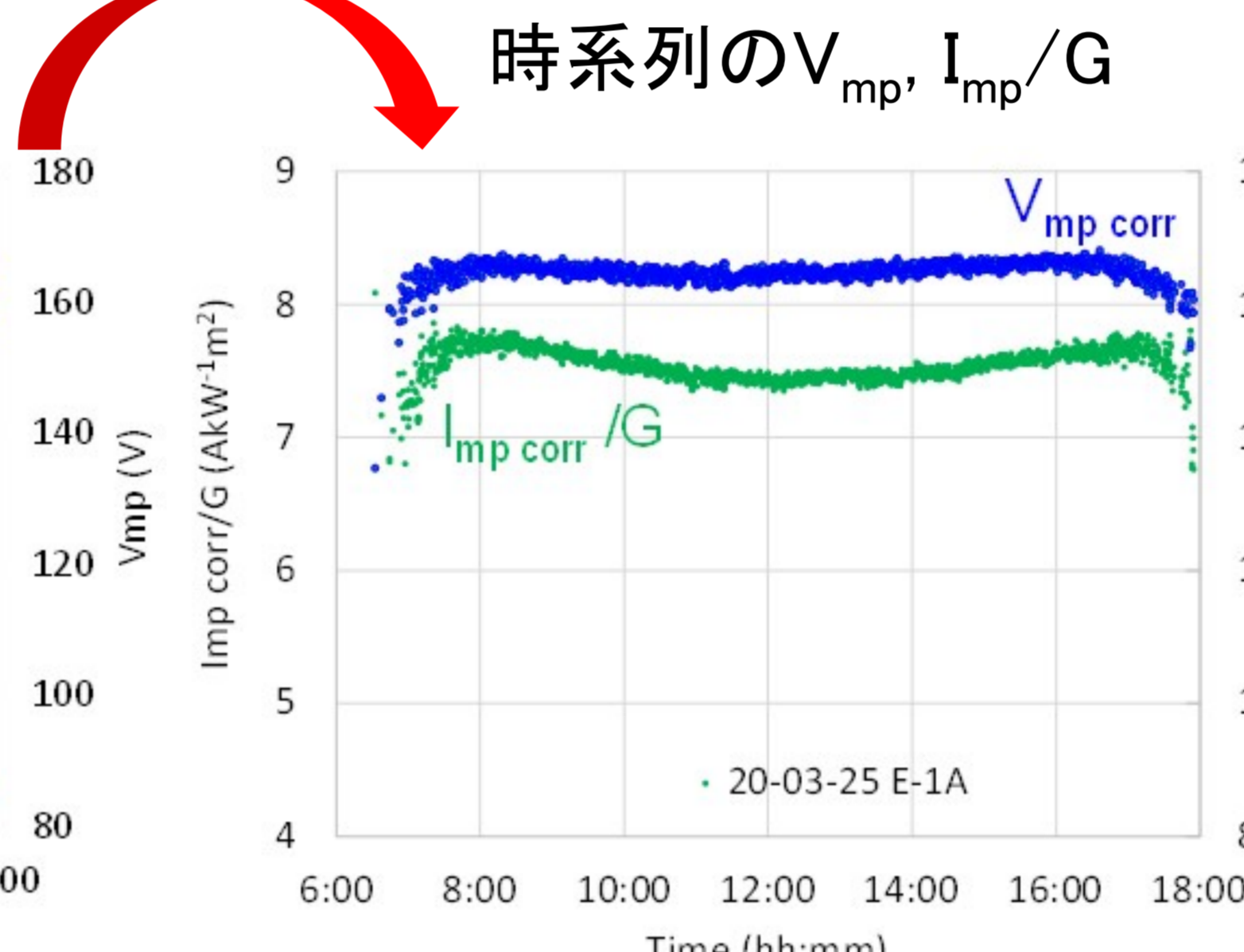


$$V_{mp2} = \left\{ V_{mp1} + \frac{T_2 - T_1}{T_1} \left( V_{mp1} - \frac{N_c n E_g}{q} \right) \right\} \times \{ 1 + \alpha(T_2 - T_1) \}$$

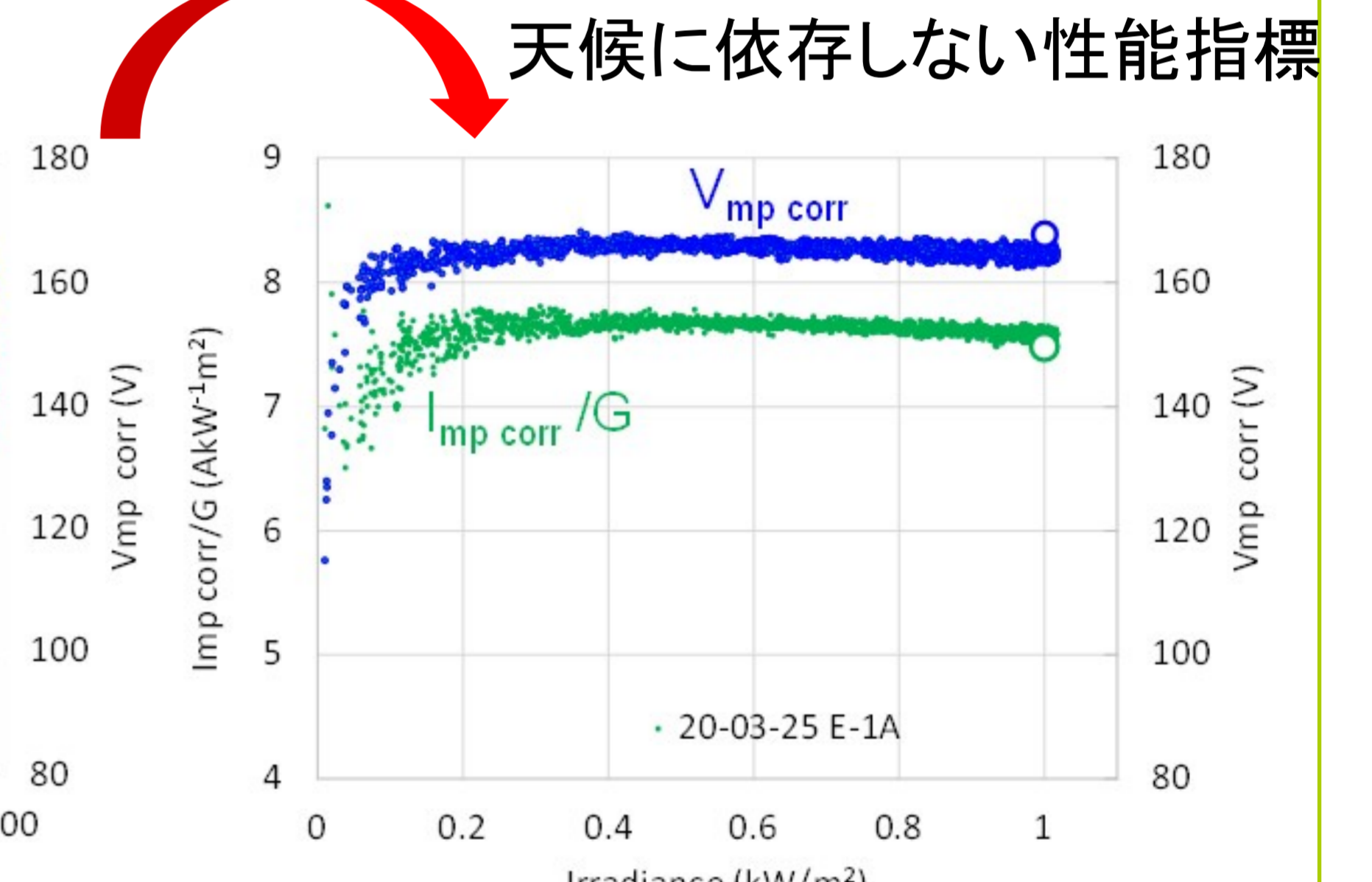


STCにおける $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ,  $P_{max}$ を正確に評価できる新手法を開発した[5][6]

$V_{mp}$  25°Cに温度補正[5]



照度Gに対する $V_{mp}$ ,  $I_{mp}/G$



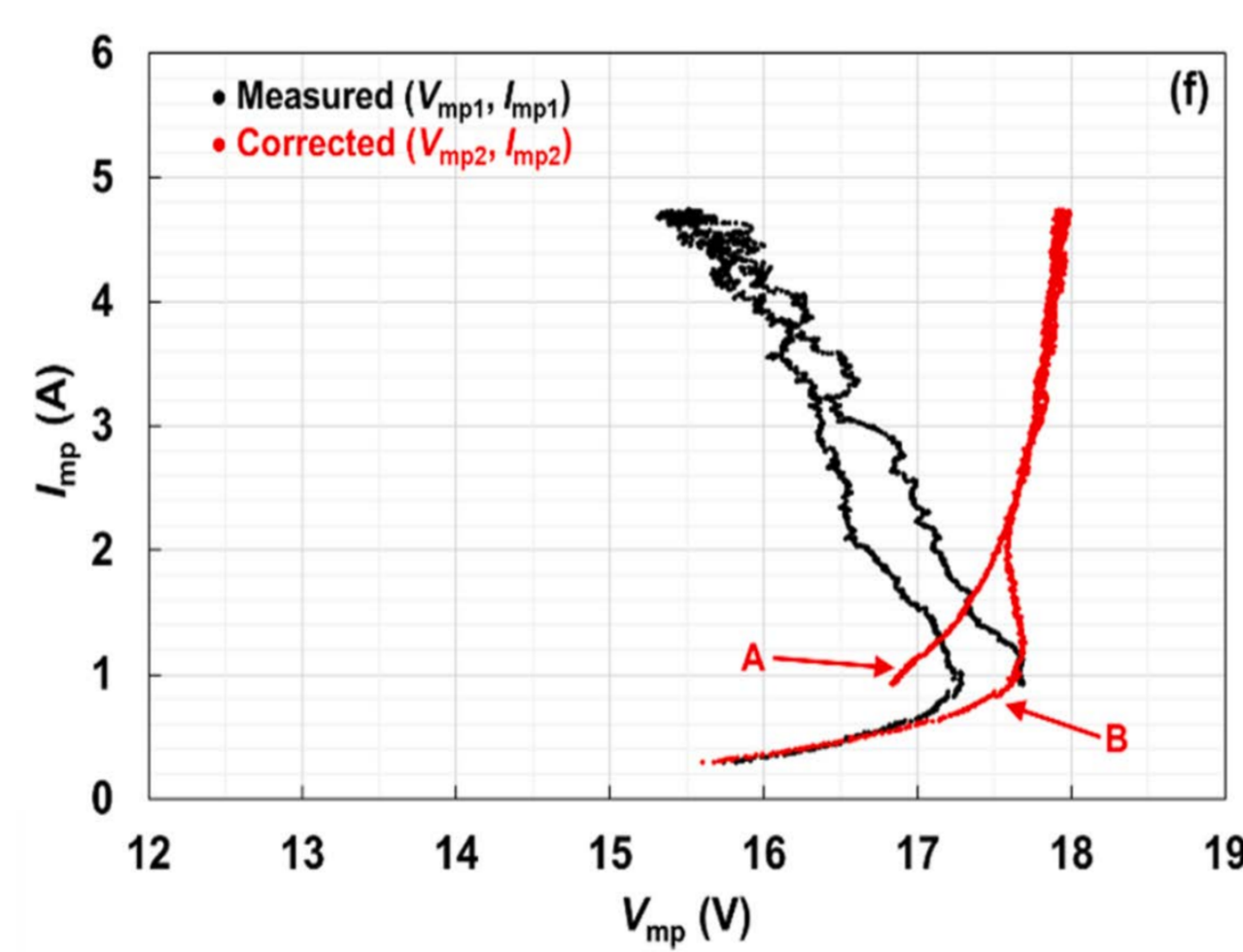
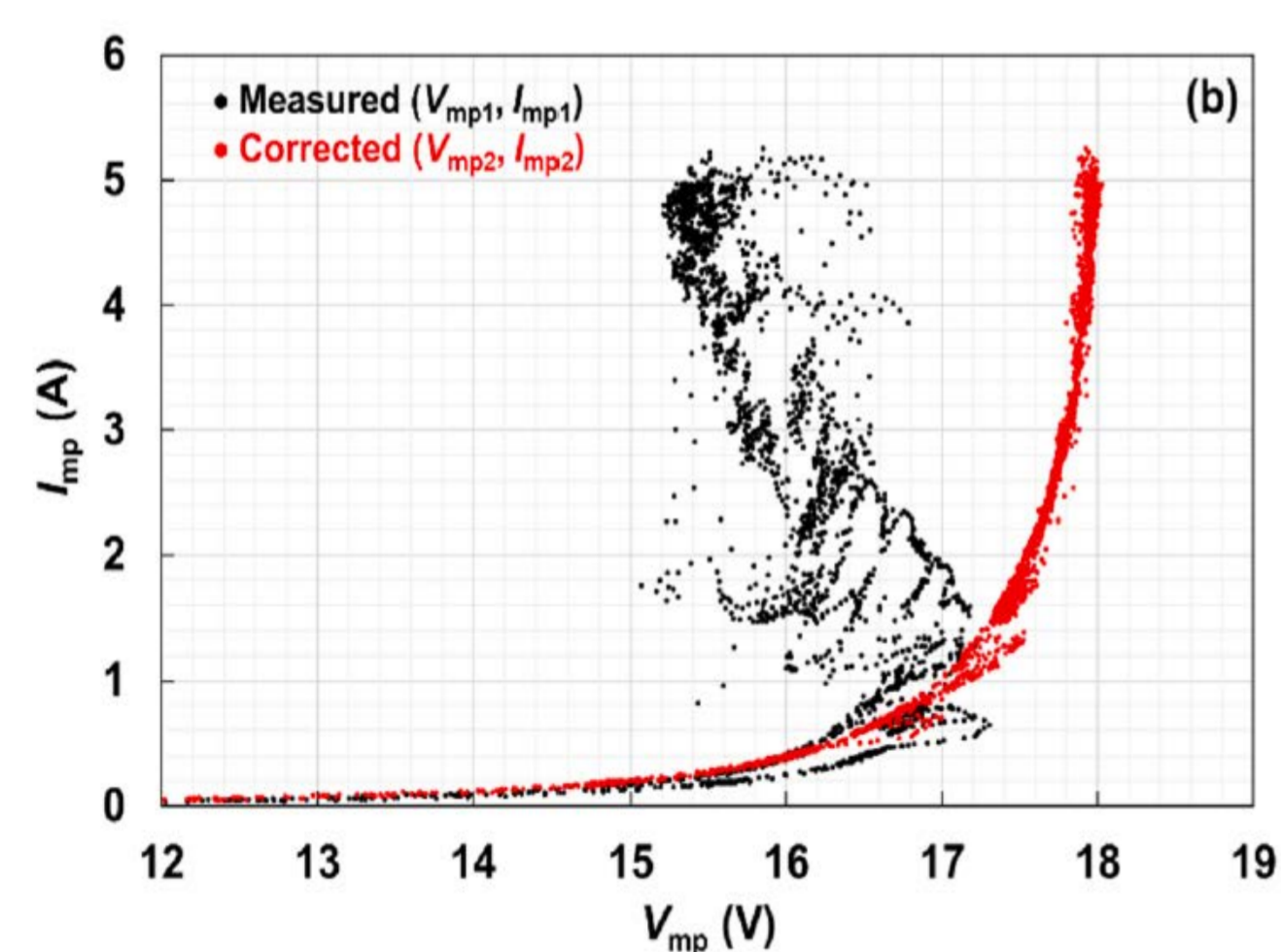
## 考察

$V_{mp}$ の温度補正 ⇒ 僅かな $V_{mp}$ の変化を敏感に検出

小さな部分影による $I_{mp}$ 低下⇒ $V_{mp}$ 増加[5]

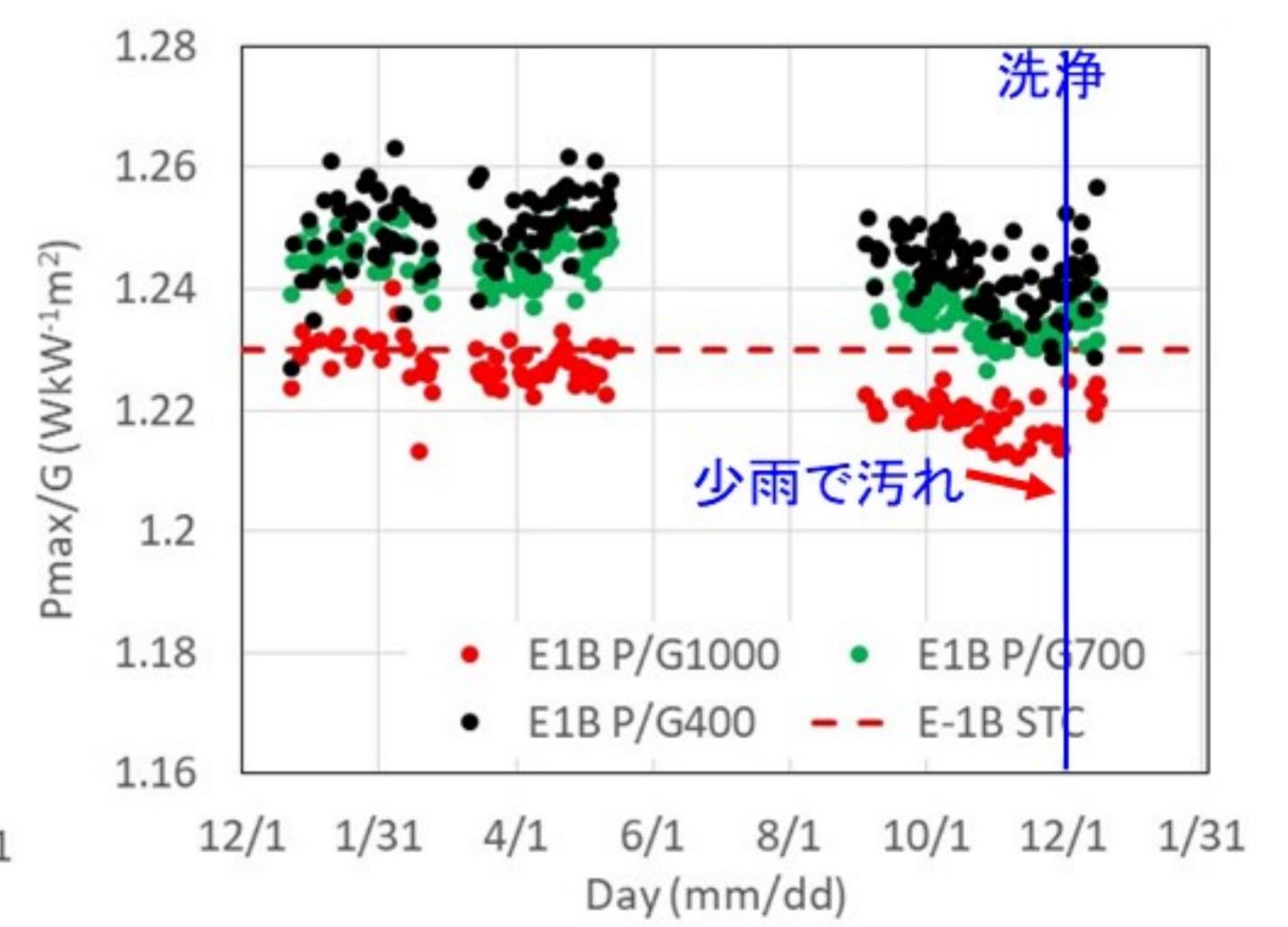
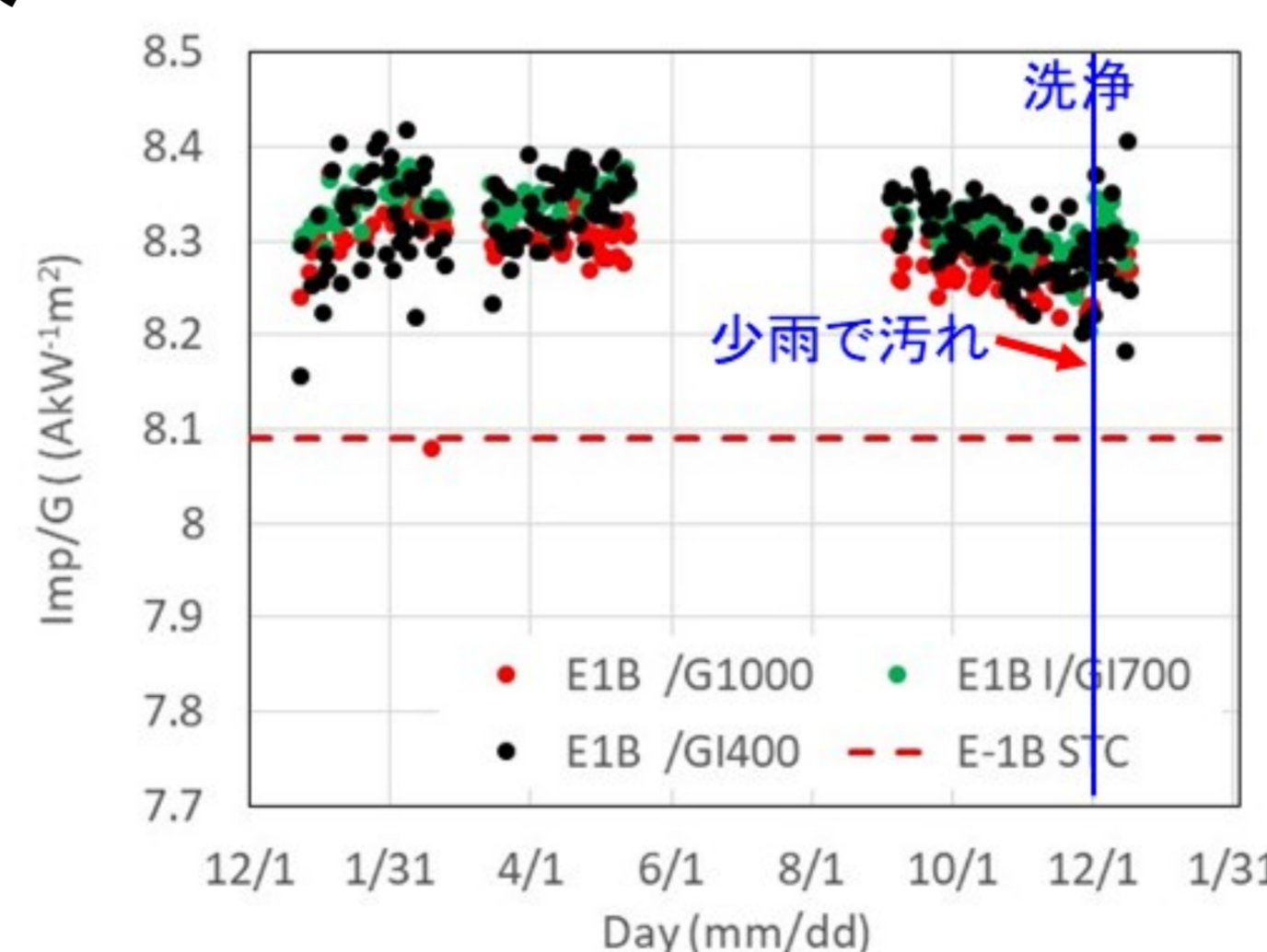
曇天: 散乱光大⇒部分影の影響小

晴天: 直達光大⇒部分影の影響大



PVMSによる照度計測 ⇒  $I_{mp}$ ,  $P_{max}$ の変化も正確に検出

汚れによる $I_{mp}$ の僅かな低下と洗浄による一時回復を検出  
低照度時(●●)にも、高照度時(●●)と同様の診断が可能



## 結論

- ・MPPT動作中の $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  ( $T$ ,  $G$ )から、太陽電池のSTCおよび低照度における $P_{max}$ 等のDC性能をリアルタイムで再現性良く定量評価できる基礎技術を開発した。
- ・ $P_{max}$ ,  $V_{mp}$ 等の絶対値再現性±0.5~±1%(暫定値)。
- ・経年変化診断や故障診断(部分影、電流不整合、抵抗増、等)のリアルタイム化、低コスト化、高精度化。
- ・今後
  - ・多くの事例での検証(istring、アレイ)
  - ・PCSデータの利用
  - ・照度温度のどちらか又は両方を割愛した場合の解析手法

## 参考文献

- [1] 菱川, 武内, 比嘉, 吉田, 「太陽電池屋外IV特性の新しいSTC補正法」太陽/風力エネルギー講演論文集(2018)31-34
- [2] 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
- [3] K. Nishioka, K. Miyanuma, 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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.

# 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および防草効果の検証

令和2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 太陽光システムチーム

## 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

## 成果

### 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
- ・FREYA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(FREYA)

### 防草効果



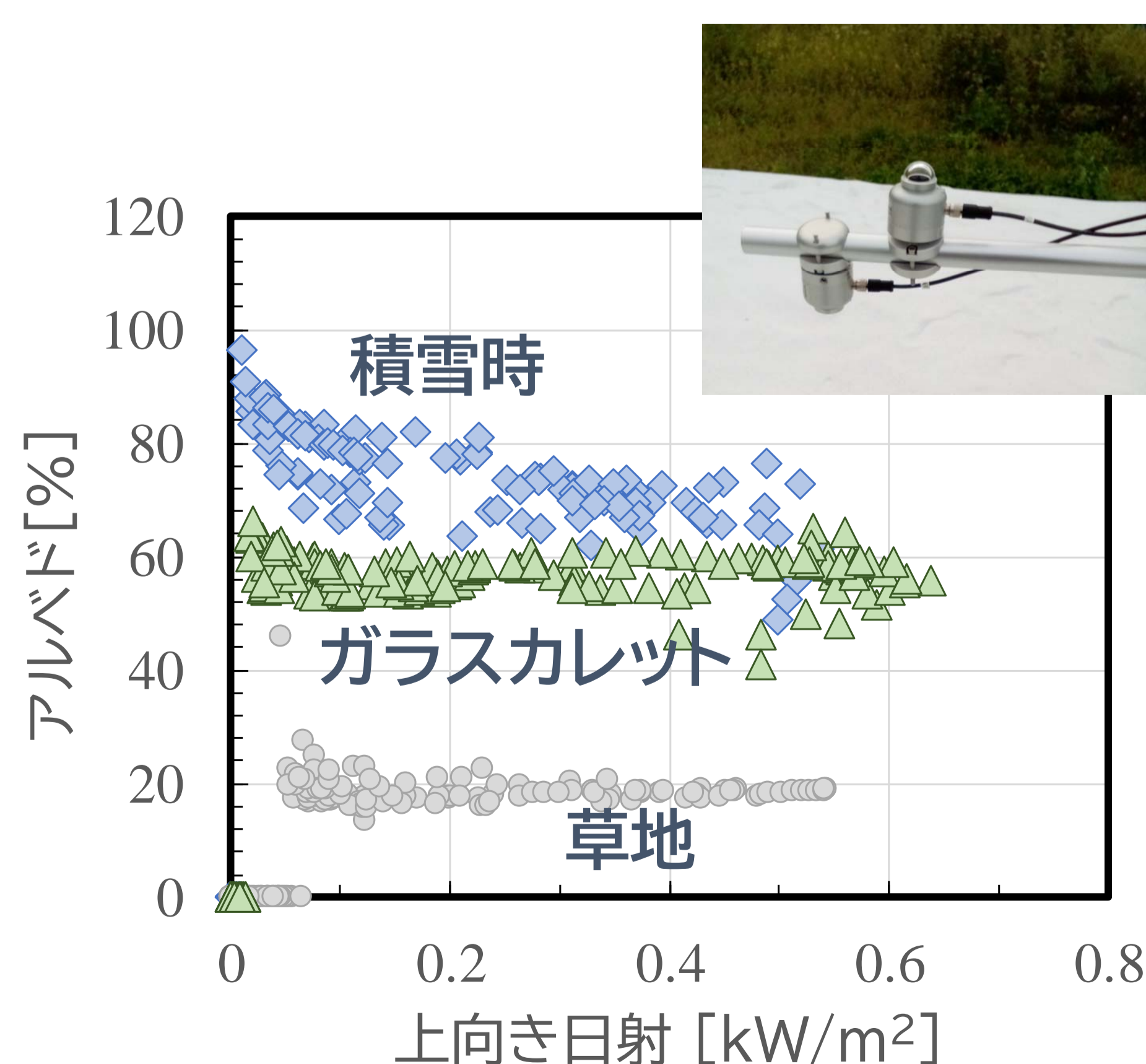
(株)環境保全サービス内(設置4年)



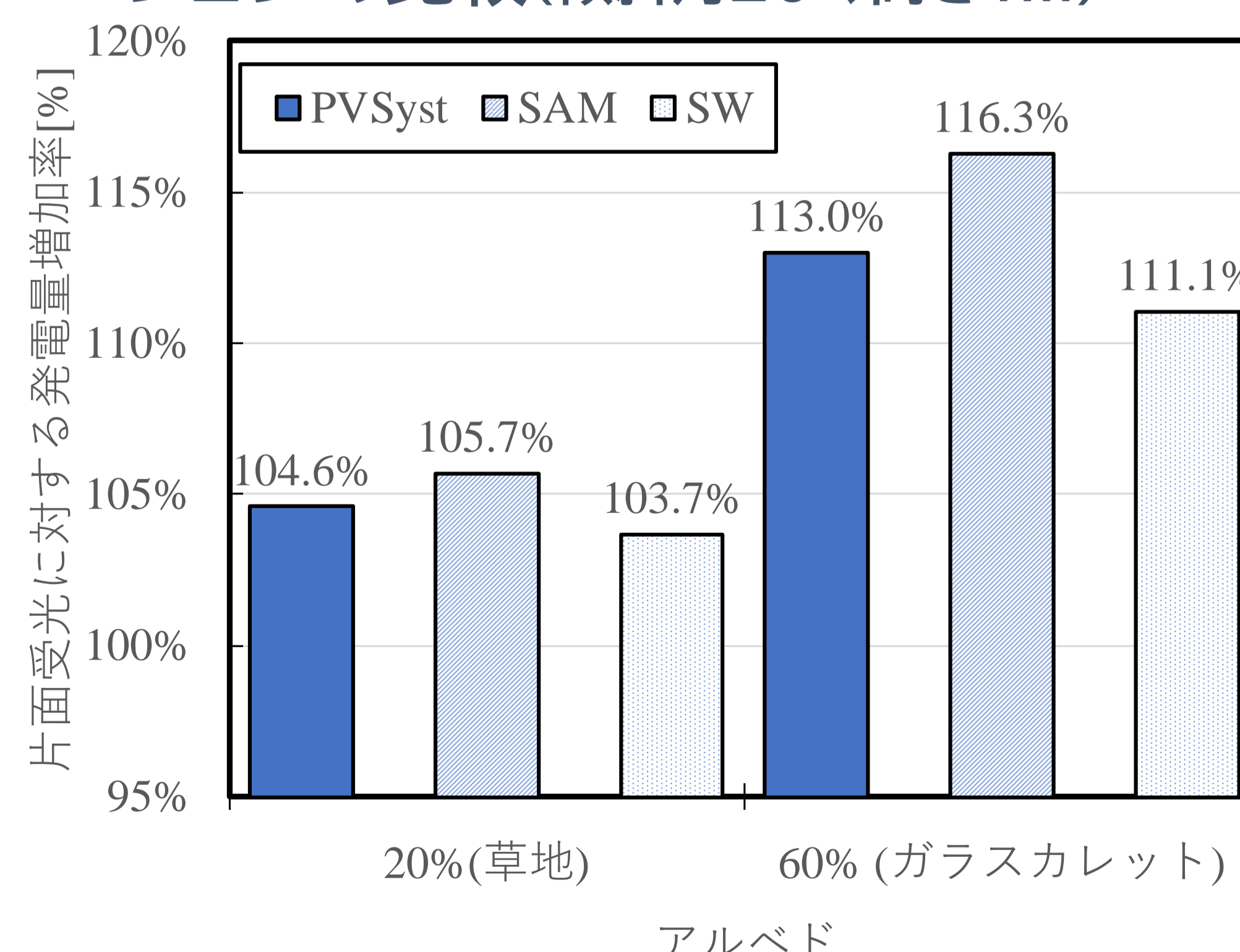
FREYA内(設置2020/9)

防草効果を確認  
 今後も継続して検証予定

### ガラスカレット(粒)の反射率の測定



### 3つの既存モデルの発電量シミュレーションの比較(傾斜角20°、高さ1m)



片面受光太陽電池に対し  
 ・両面受光(草地): 約5%増  
 ・両面受光(ガラス): 約15%増

ガラスカレットのアルベド: 約60%  
 草地(20%)の3倍

## まとめ

太陽光発電所に太陽電池パネルのリサイクルガラスを敷設する利点を確認  
 ・除草費用削減  
 ・両面受光型太陽電池を使用することによる発電収益増

両面型太陽電池の発電量は架台仕様等の設置構成に大きく依存するため、パターンを増やすなど実測データを蓄積を実施していく。

# 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

千葉恭男<sup>1</sup>、佐藤梨都子<sup>1</sup>、崔誠佑<sup>1</sup>、秋富稔<sup>1</sup>、石井徹之<sup>2</sup>、増田淳<sup>3</sup>

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



図1. 産総研九州センターの太陽電池モジュール屋外曝露サイトの南東から見た全景。(佐賀県鳥栖市 [33.2°N and 130.3°E, 気候区分: Cfa]).

## 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年から曝露を開始した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)、そして、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、これまでに得られた高効率結晶Si系太陽電池モジュールの屋内測定(出力)結果の年次推移を報告する。

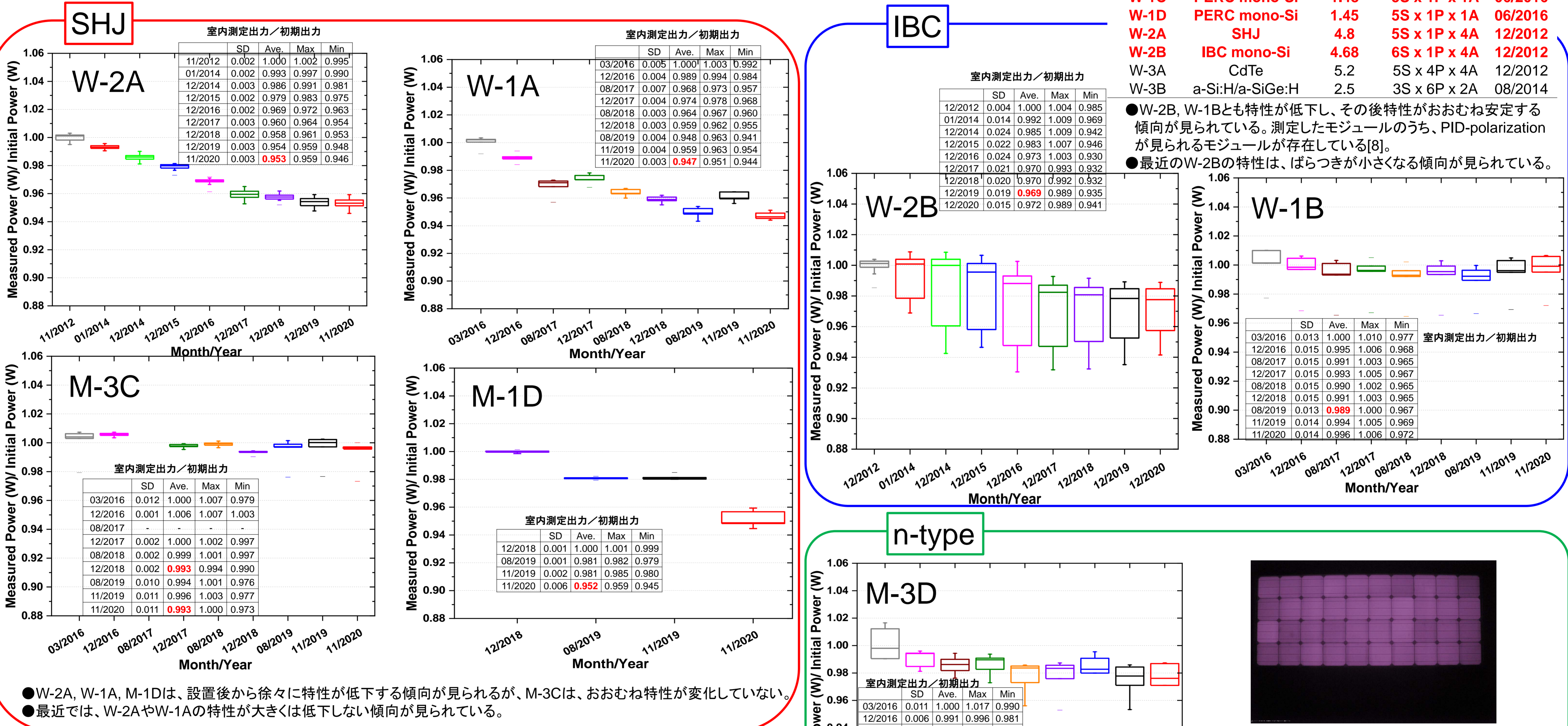
## 実験

- 対象としたモジュールは、以下の通りである。(カッコ内は、測定したモジュールの枚数)
  - ・SHJ 4種: W-2A(20枚)、W-1A(5枚)、M-3C(5枚)、M-1D(5枚)
  - ・IBC 2種: W-2B(24枚)、W-1B(5枚)
  - ・PERC 4種: W-1C(5枚)、W-1D(5枚)、M-3E(5枚)、M-3F(5枚)
  - ・n-type 1種: M-3D(7枚)
- 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/m<sup>2</sup>、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モジュール一覧

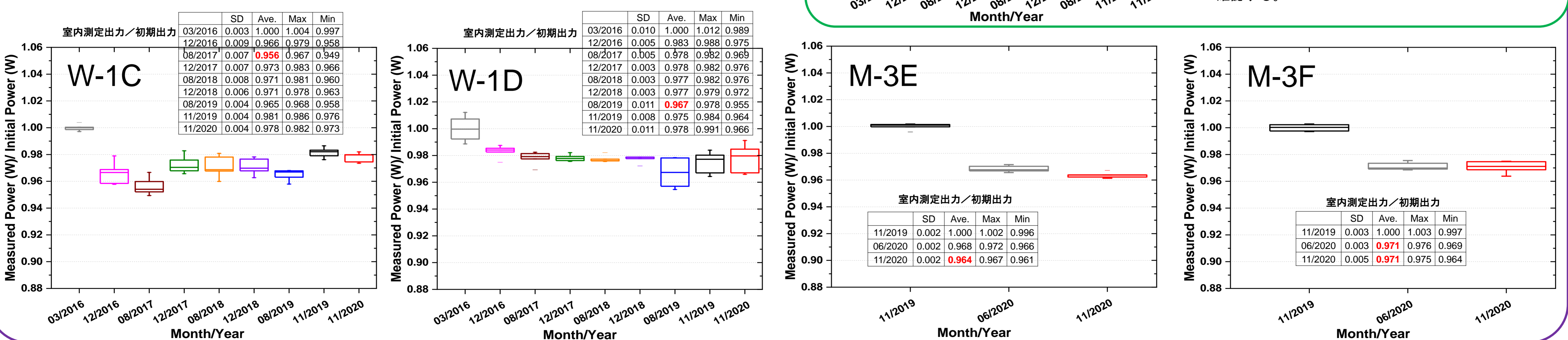
Location	Kinds	Total P <sub>max</sub> (kW)	Array Configuration	Installed Mon/Year
E-1A	p-type mono-Si	5.04	7S x 1P x 4A	09/2010
E-1B	p-type mono-Si	4.9	5S x 1P x 4A	12/2012
E-2A	p-type multi-Si	5	6S x 1P x 4A	09/2010
E-2B	p-type multi-Si	5	5S x 1P x 4A	12/2012
E-3A	CdTe	1.35	4S x 3P x 1A	11/2016
M-1A	a-Si:H/μc-Si:H	5.12	5S x 2P x 4A	09/2010
M-1B	a-Si:H/μc-Si:H	1.76	4S x 4P x 1A	07/2011
M-1C	CIGS	1.65	3S x 2P x 1A	08/2014
M-1D	SHJ	1.3	5S x 1P x 1A	01/2019
M-2A	CIGS	5	4S x 2P x 5A	09/2010
M-2B	CIGS	4.95	2S x 5P x 3A	03/2014
M-3A	a-Si:H	3	2S x 5P x 3A	09/2010
M-3B	a-Si:H	1.35	3S x 6P x 1A	07/2011
M-3C	SHJ	1.55	5S x 1P x 1A	06/2016
M-3D	n-type mono-Si	1.89	7S 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
W-1A	SHJ	1.25	5S x 1P x 1A	06/2016
W-1B	IBC mono-Si	1.05	5S x 1P x 1A	06/2016
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
W-2A	SHJ	4.8	5S x 1P x 4A	12/2012
W-2B	IBC mono-Si	4.68	6S x 1P x 4A	12/2012
W-3A	CdTe	5.2	5S x 4P x 4A	12/2012
W-3B	a-Si:H/a-SiGe:H	2.5	3S x 6P x 2A	08/2014

## 結果



## PERC

- 2016年に設置したW-1C、W-1Dは、設置後から特性が低下し、その後回復する傾向が見られている。
- 2020年に設置したM-3E、M-3Fも、設置後から特性の低下は確認された。今後、回復傾向のタイミングを把握するため、屋内測定の間隔を短くし、測定頻度を増やす予定である。



## 結論

- 2020年12月までに実施した高効率結晶Si系太陽電池モジュールの屋内測定(出力)結果の年次推移を示した。
  - SHJでは、M-1Dは、W-2AとW-1Aと同様に設置後に低下傾向を示した。M-3Cは設置後から特性の変化は見られていない。
  - IBCでは、設置後から特性が低下し、その後安定化する傾向が見られている。
  - n-typeでは、大きく特性が低下したモジュールが見られた。
  - PERCでは、W-1C、W-1Dと同様に、M-3EとM-3Fは、設置後から特性の低下が見られている。
  - 高効率結晶Si系太陽電池モジュールの特性の傾向を把握するため、今後も屋内測定を継続していく予定である。
- 【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。

## 参考文献

- [1] T. Ishii et al., 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).

# 被災地企業のシーズ支援事業「融雪型太陽電池モジュールの事業化支援」において試作された太陽電池モジュールの信頼性・安全性評価

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 太陽光システムチーム

## 背景

### シーズ支援事業：概要

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

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。

**FY2021募集中**

産総研 FREA 技術的支援の申請  
 コーディネーターによるマッチング  
 ●産総研研究者の選定  
 ●実施内容の検討・確定  
 被災地の企業  
 福島県浜通り15市町村所在する企業など  
 (詳細: Web確認)  
 再生可能エネルギーに  
 関連した技術やノウハウ  
 支援実施  
 シーズに関する技術支援  
 成果を企業へフィードバック  
 被災地域における新たな産業の創出

### FY20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

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)

融雪型太陽電池モジュール/システムの開発

**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  
 ・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

### 先行研究事例：融雪型太陽電池モジュール

最近の融雪型太陽電池モジュール研究事例

- 融雪用ヒータ内蔵型  
 [1] A. Rahmatmand, S. J. Harrison, and P. H. Oosthuizen, "An experimental investigation of snow removal from photovoltaic solar panels by electrical heating," *Sol. Energy*, vol. 171, pp. 811–826, Sep. 2018.
- 融雪用ヒータ内蔵型  
 [2] A. Rahmatmand, S. J. Harrison, and P. H. Oosthuizen, "An innovative method to control surface temperature of a rooftop photovoltaic system," *Sol. Energy*, vol. 195, pp. 581–591, Jan. 2020.
- 太陽電池セル通電 (発熱) 型  
 [1] C. Yan, M. Qu, Y. Chen, and M. Feng, "Snow removal method for self-heating of photovoltaic panels and its feasibility study," *Sol. Energy*, vol. 206, pp. 374–380, 2020.

現状の課題  
 融雪効率向上 (滑雪促進を含む) に関する技術要素の検討が中心であり、太陽電池モジュール/システムの安全性・信頼性に関して、融雪機能の付加による影響を検討した報告は (屋内試験・屋外試験とも) 稀有である。

## 結論

被災地企業のシーズ支援事業「融雪型太陽電池モジュールの事業化支援」において試作された融雪用ヒータ内蔵型太陽電池モジュールの信頼性・安全性を FREA 屋外曝露設備にて評価し、以下の結論を得た。

### ホットスポット試験

夏季環境 (高温 + 高日射量) で融雪用ヒータの温度制御に不具合 (連続通電) が生じた場合を想定したホットスポット試験において、裏面温度が 150°C を超えることは稀であり、このような最悪事態においてもモジュール劣化の促進や火災誘引などを引き起こす危険性は少ないと判断した (Panels 1 - 4)。

### 屋外融雪試験

FREA 屋外曝露設備で 2020 年 12 月期に観測された降雪 (~10cm 積雪) において、融雪型モジュールは優れた融雪機能を発揮した (Panels 5 - 6)。この際には、PV 回路を開放および短絡した場合とも、(夏季と同様に) 5~8°C の温度上昇が融雪型モジュール裏面で観測された (Panels 7 - 10)。今後は、より効果的な融雪ヒータ温度制御方法を検討していく (Panels 11 - 12)。

## 実験設備

### FREA 屋外曝露設備 (模擬屋根上設置)

融雪用ヒータ内蔵 太陽電池モジュール (2 モジュール)

連続写真撮影 (可視/赤外: 10分ごと)

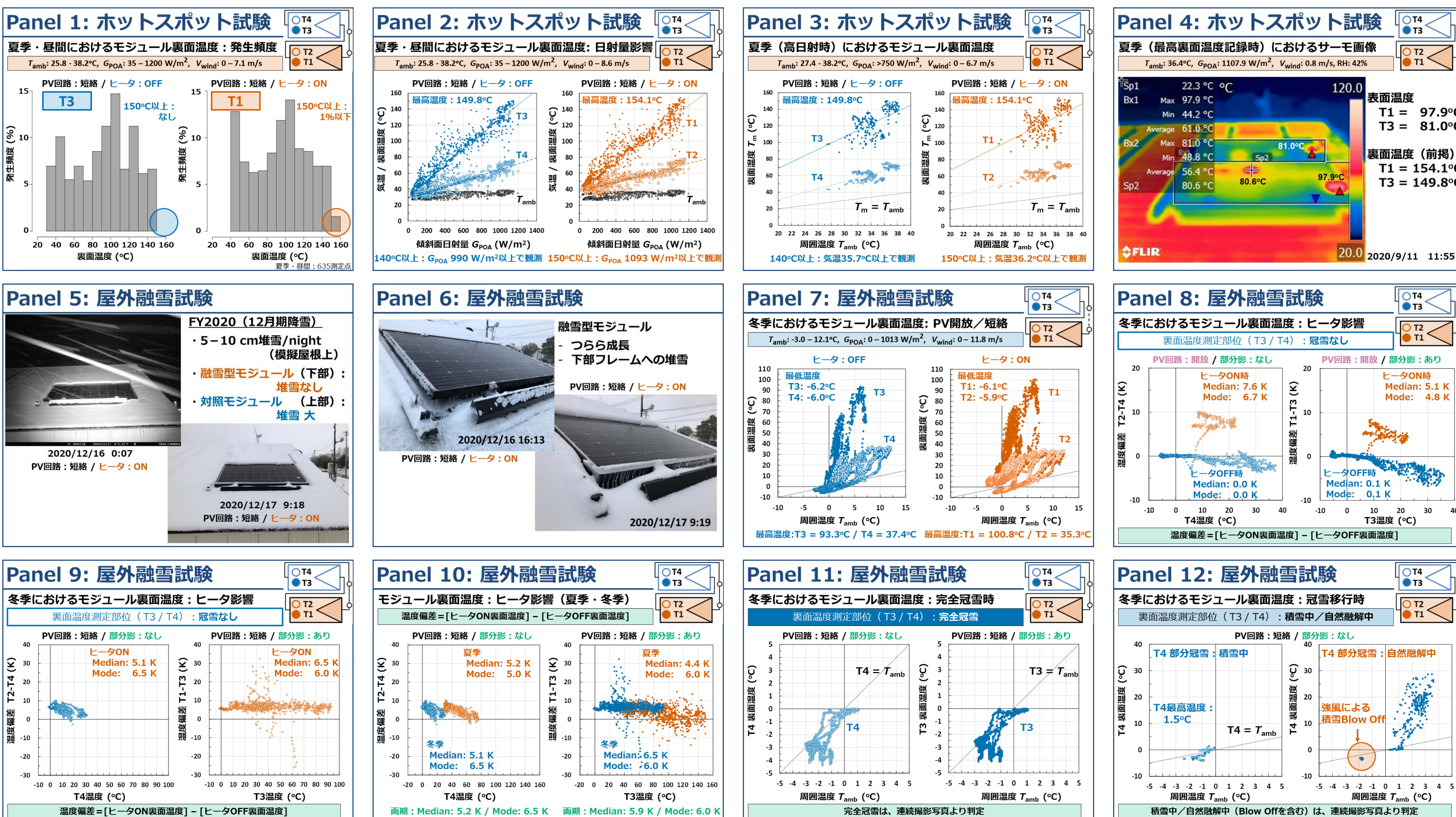
裏面温度測定  
 T1/T3セル表面: ホットスポット試験用部分影処理 (IEC 61215 MQT09準拠)  
 T2/T4セル表面: 部分影処理なし

裏面温度測定部位 (1分ごと計測)

PV回路 開放/短絡

融雪用ヒータ電源

## 結果



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。



# 太陽光発電設備の直流部分を対象とした 保安点検手順(ver.1.0)の提案

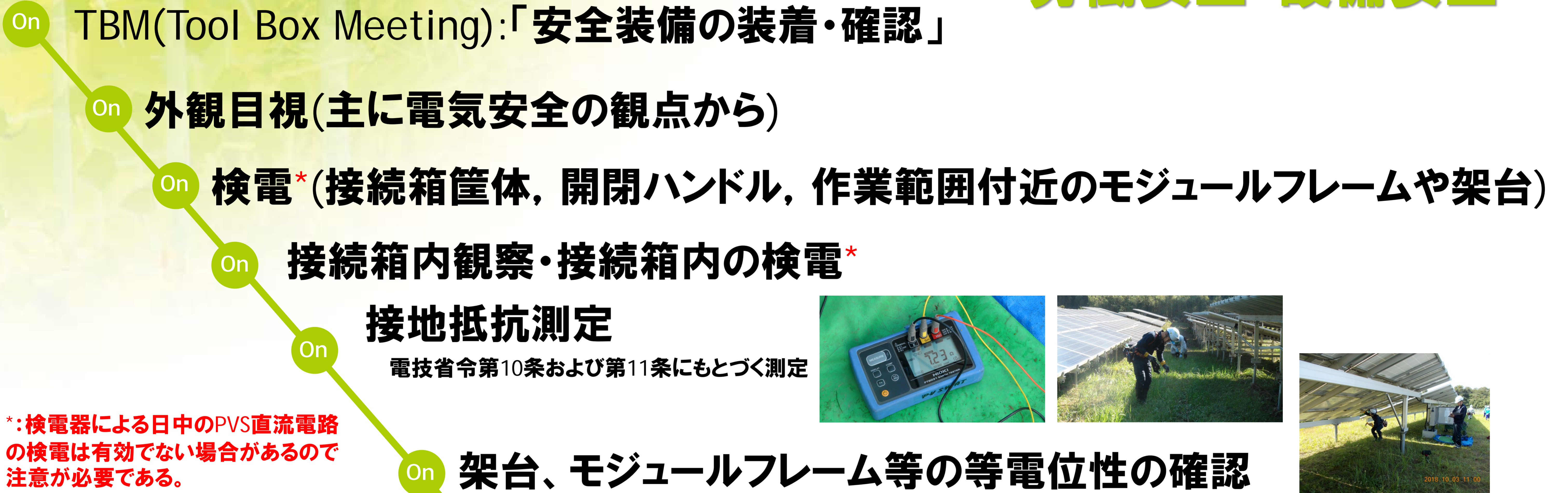
加藤和彦

産業技術総合研究所

再生可能エネルギー研究センター

太陽光システムチーム

## 労働安全+設備安全



## 設備安全



・各点検項目の具体的説明は、以下の資料に詳述している:

「太陽光発電の直流電気安全のための手引きと技術情報(第2版)」

([https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/service/PV\\_Electrical\\_Safety/index.html](https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/service/PV_Electrical_Safety/index.html))

また、希望者には非公式デモンストレーション動画(約1時間)を提供することも可能である。

# 太陽光発電設備の異常の傾向の早期検出を目指す絶縁抵抗測定装置の性能評価

高島工

産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

## 背景と目的

PV設備の感電・火災事故の予防保全:

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

※ 既存の絶縁抵抗測定:

数百kΩから数MΩを対象とした地絡の即時検知

本研究:

測定領域を20MΩ以上へ拡張した測定機(GFDI)の性能評価

本報:

- 絶縁抵抗値の検出限界値のPVストリング電圧に対する依存性評価
- PVアレイの絶縁抵抗測定

## まとめと今後の課題

まとめ

- 絶縁抵抗測定可能範囲(測定誤差±25%以下):

- 300Vストリング: 240MΩ程度以下
- 500Vストリング: 400MΩ程度以下

- アレイ絶縁抵抗測定:

- 本装置によりアレイ絶縁抵抗を測定可能
- 一部ストリングの絶縁抵抗の低下をアレイ絶縁抵抗測定により検出

今後の課題

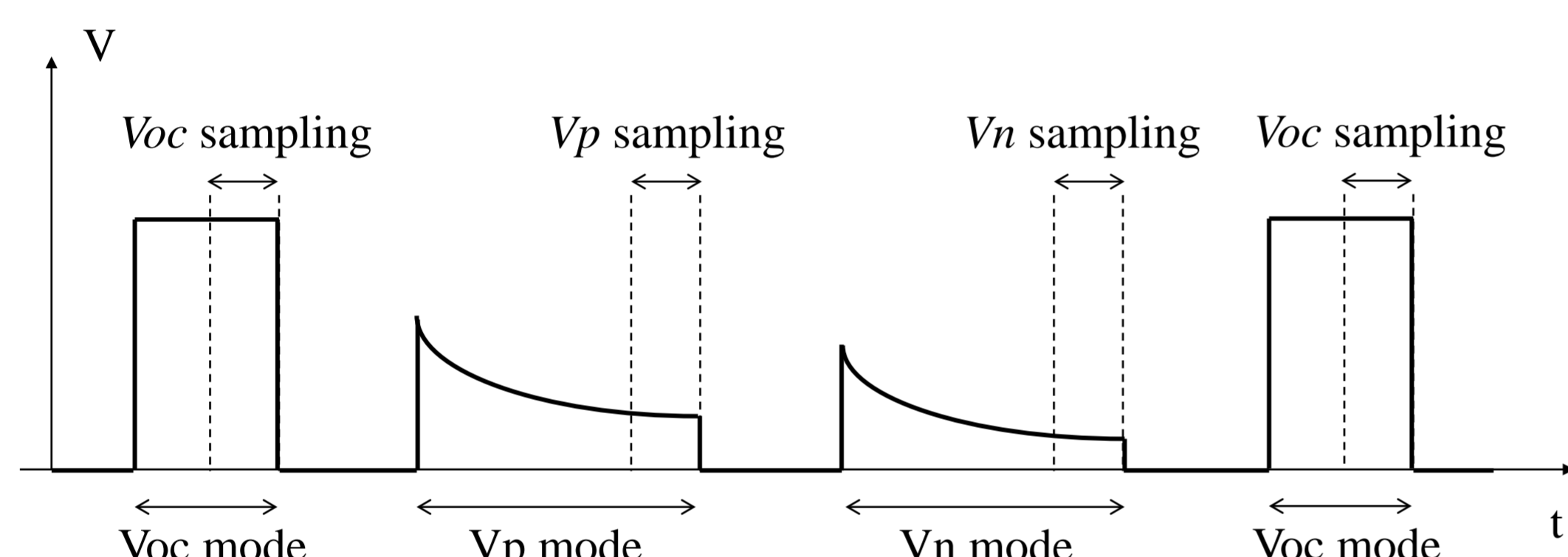
アレイ測定値(実測)とストリング測定合成値(計算)の差異要因の考察

## 絶縁抵抗値の検出限界値のPVストリング電圧に対する依存性評価

- 絶縁抵抗測定方法: 自己バイアス法

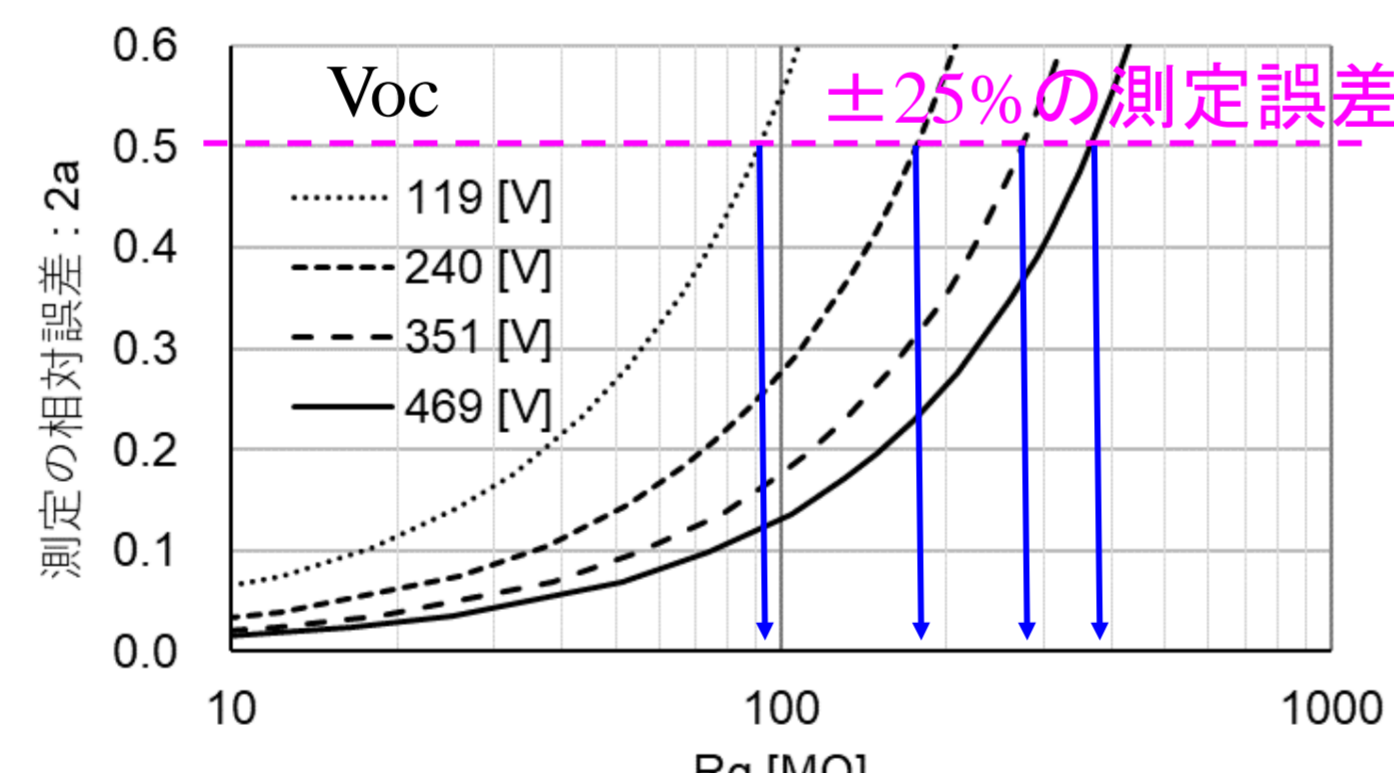
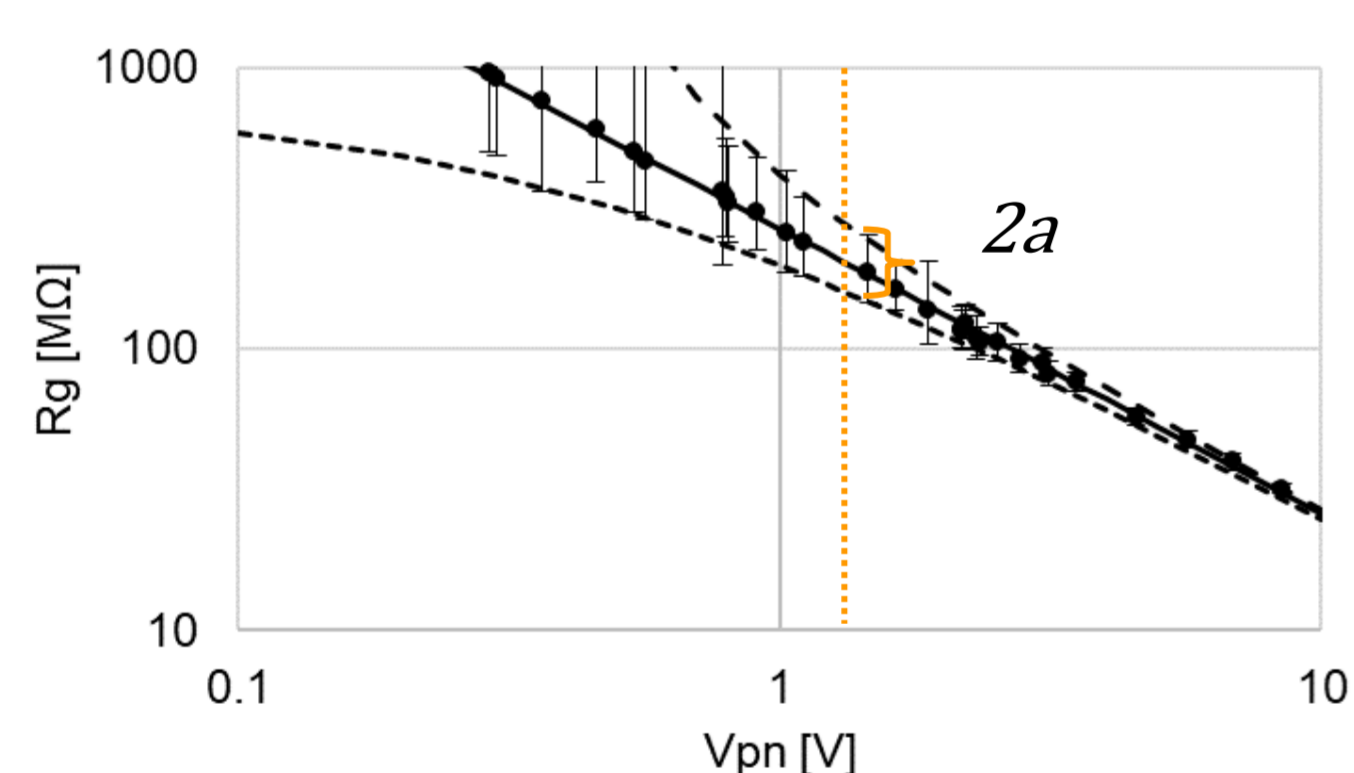
- PVストリング開放電圧  $V_{oc}$
- 対地電圧: 正極側  $V_p$
- 対地電圧: 負極側  $V_n$
- 検出内部抵抗  $R_m$  (1.12MΩ)

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



- 評価対象ストリング: 単結晶Siモジュール4枚、8枚、12枚、16枚直列
- 電圧測定(17Hz):  $V_{oc}$  / 2秒、 $V_p$  / 10秒、 $V_n$  / 10秒、 $V_{oc}$  / 2秒
  - 各測定の最終1秒を平均。 $V_{oc}$ は2回の平均。各パラメータ間: 0.8秒
- 測定年月、場所: 2020年3月、4月。産総研メガソーラタウン

## 検出限界値の導出



対地電圧に対する絶縁抵抗値のばらつき (8枚直列ストリング)

電圧測定の標準偏差: 0.34V  
信頼水準: 95%  
自由度: 16

t分布により信頼区間を算出し、絶縁抵抗値の測定誤差幅に換算

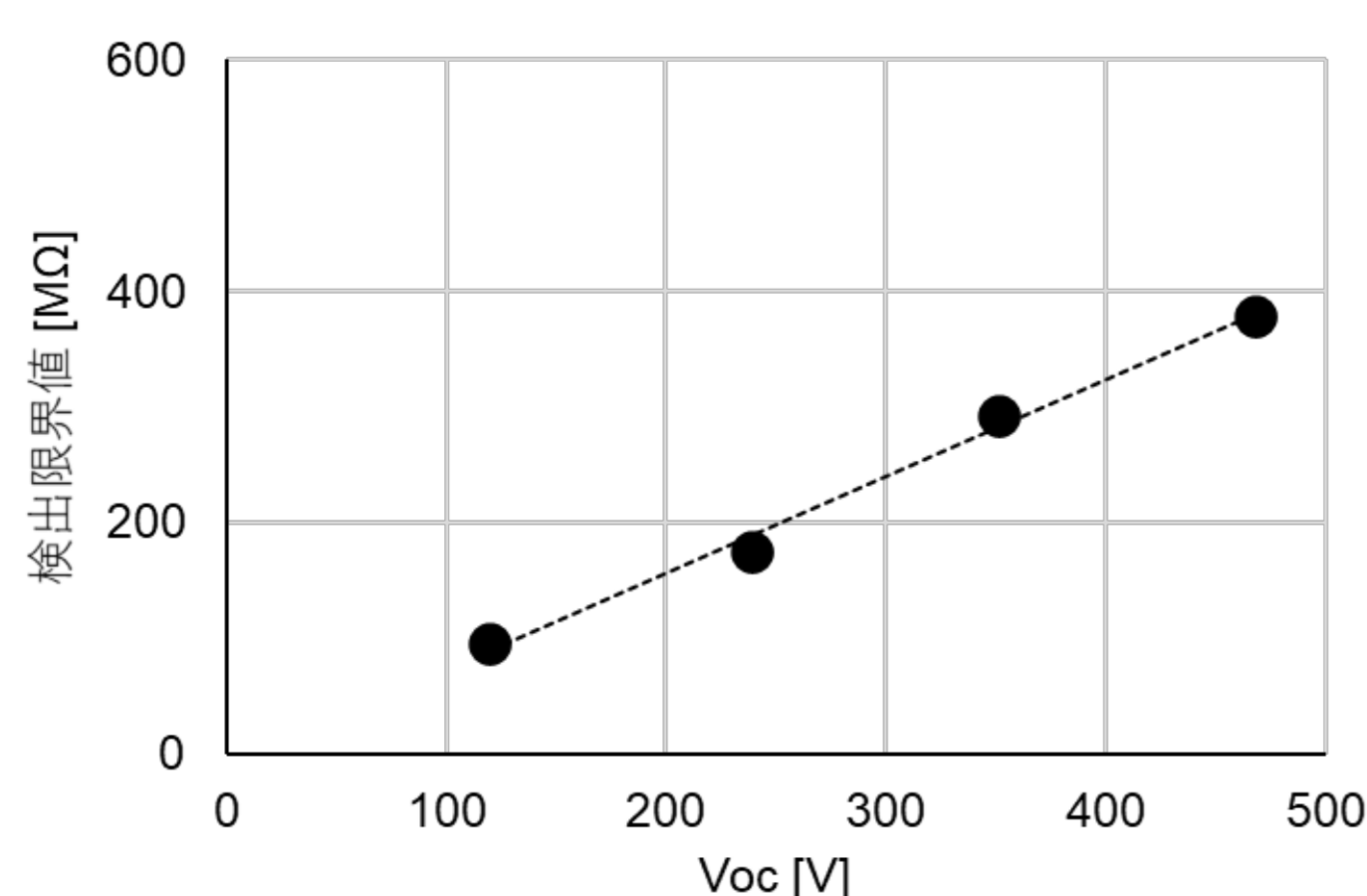
ストリング電圧、絶縁抵抗値に対する相対測定誤差

絶縁抵抗の測定誤差幅(相対値):

$$2a = \frac{R_{g\_top} - R_{g\_bot}}{R_g}$$

測定誤差が±25%以下となるように検出限界値を決定

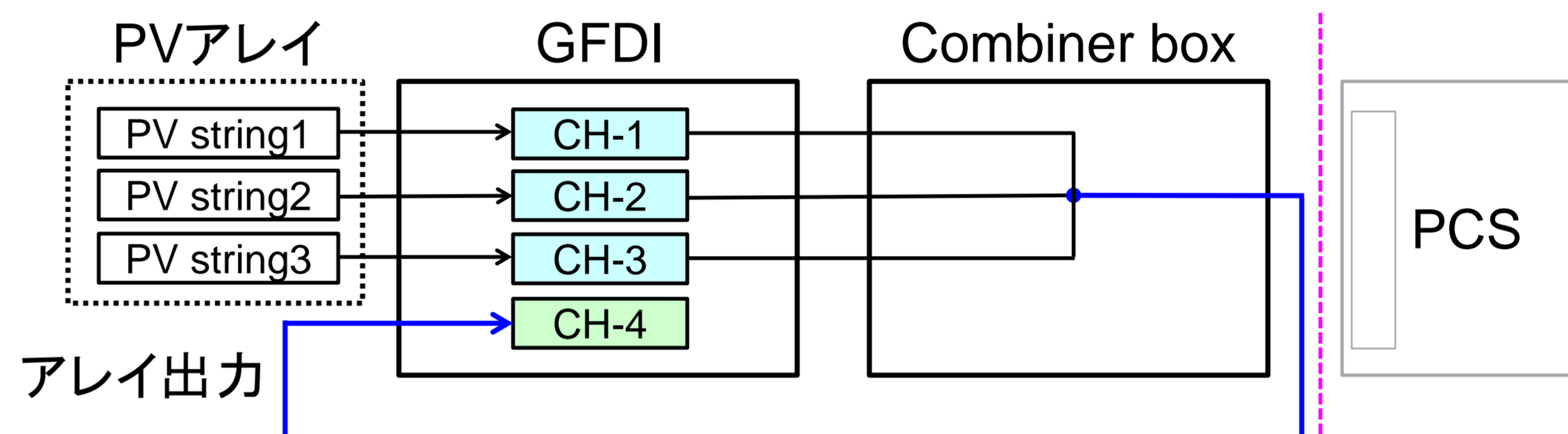
## 検出限界値(測定誤差±25%以下)



300Vストリング(住宅用PVシステム): 240MΩ程度以下まで

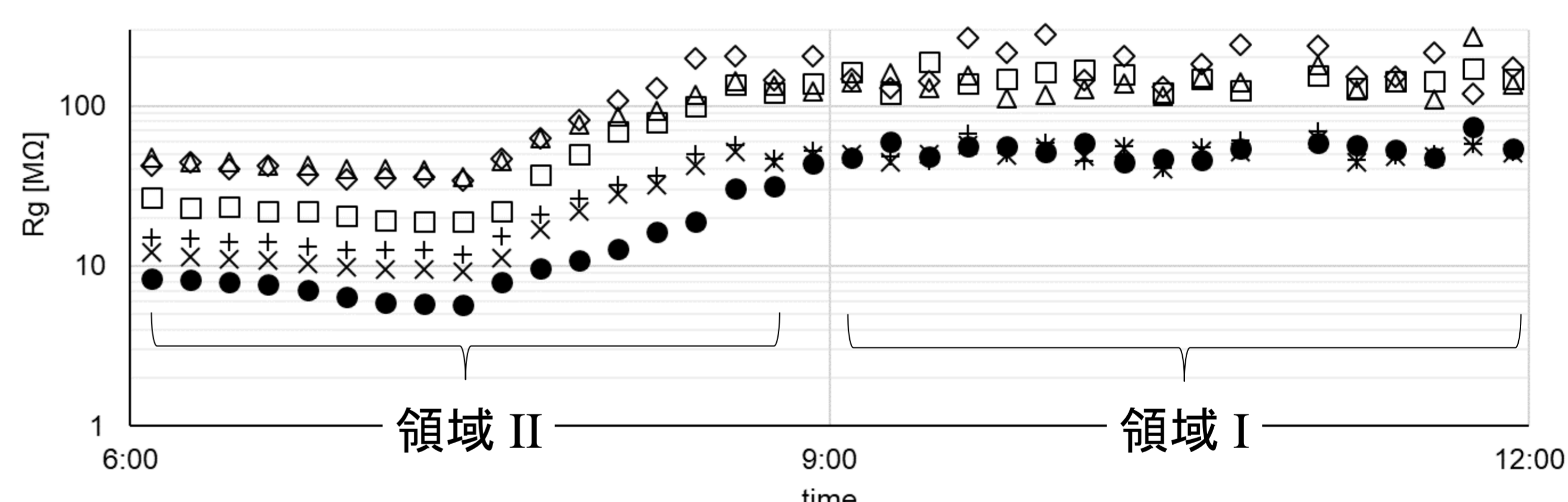
500Vストリング(一般用電気工作物): 400MΩ程度以下まで

## PVアレイの絶縁抵抗測定(ストリング計測とアレイ計測の比較)



- 測定対象アレイ: 多結晶Siモジュール9枚直列ストリング×3並列
- ストリング計測: チャンネル1(CH-1)~チャンネル3(CH-3)
- アレイ計測(接続箱出力): チャンネル4(CH-4)
- 測定時間:  $V_{oc}$  / 2秒、 $V_p$  / 30秒、 $V_n$  / 30秒、 $V_{oc}$  / 2秒
  - $V_{oc}$ : 2回の測定値(各最終1秒)を平均、 $V_p$ 、 $V_n$ : 9~10秒の間を平均
  - 各パラメータ間: 0.4秒。1チャンネルあたり、開始~終了までの計測時間: 90秒
  - チャンネル1~チャンネル4の総計測時間: 10分
- 測定年月、場所: 2020年10月。産総研メガソーラタウン

## ストリング絶縁抵抗とアレイ絶縁抵抗の比較



- : ストリング1測定値  $R_{g\_str1}$ 、◇: ストリング2測定値  $R_{g\_str2}$ 、△: ストリング3測定値  $R_{g\_str3}$
- : アレイ測定値  $R_{g\_array}$ 、×: 測定合成抵抗値  $R_{g\_calc}$  (ストリング並列接続により算出)
- + : 仮定合成抵抗値  $R_{g\_equiv}$  (ストリング1の抵抗値をストリング2と3の平均値と仮定)

$$\frac{1}{R_{g\_calc}} = \frac{1}{R_{g\_str1}} + \frac{1}{R_{g\_str2}} + \frac{1}{R_{g\_str3}}$$

$$\frac{1}{R_{g\_equiv}} = \frac{1}{R'_{g\_str1}} + \frac{1}{R_{g\_str2}} + \frac{1}{R_{g\_str3}}, R'_{g\_str1} = \frac{1}{2}(R_{g\_str2} + R_{g\_str3})$$

ストリングおよびアレイ絶縁抵抗値の経時変化

領域 I:

- アレイ測定値(●)がストリング測定合成抵抗値(×)と一致
  - アレイの絶縁抵抗を測定できることを確認

領域 II: ストリング1のみ他ストリングより15~50MΩ程度低絶縁抵抗

- アレイ測定値(●)が仮定合成抵抗値(+)より小
  - ストリング1の低絶縁抵抗状態を反映
- アレイ測定値(●)がストリング測定合成抵抗値(×)と不一致
  - 要因解明必要

# Detection of cell cracks and increased series resistance of crystalline silicon PV modules by using the voltage and current at maximum power point

Manit Seapan<sup>1</sup>, Yoshihiro Hishikawa<sup>2</sup>, Masahiro Yoshita<sup>2</sup>, Keiichi Okajima<sup>1</sup>

1 Department of Risk Engineering, University of Tsukuba

2 Renewable Energy Research Center, AIST

## Research purpose

- Degradations and failures occur in PV modules during their outdoor operation, such as cell cracks and an increase in series resistance ( $R_s$ ).
- Previous detection techniques, such as  $I$ - $V$  curve measurement, had a problem because they needed to interrupt the system operation.
- This study utilizes the temperature corrected of current-voltage at maximum power ( $I_{mp}$ - $V_{mp}$ ) curve instead of the  $I$ - $V$  curve using the new formulas recently proposed [1].
- Cracked cell and increase in  $R_s$  were investigated by simulations for detecting degradation using  $I_{mp}$ - $V_{mp}$  curve.

## Temperature correction of $V_{mp}$ and $I_{mp}$

The measured  $V_{mp}$  and  $I_{mp}$  are corrected to 25 °C using Eqs. (1) and (2) [1], as shown in Fig. 1.

$$V_{mp2} = \left[ V_{mp1} + \frac{T_2 - T_1}{T_1} (V_{mp1} - \frac{nE_g}{q} \cdot N_c) \right] \times [1 + \alpha(T_2 - T_1)], \quad (1)$$

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

Here,  $T_1$  and  $T_2$  is the measured and target module temperature in Kelvin (K), respectively.  $V_{mp1}$  and  $V_{mp2}$  are the  $V_{mp}$  at  $T_1$  and  $T_2$ , respectively.  $E_g$  is the bandgap energy of silicon.  $n$  is the diode ideality factor,  $q$  is the electron charge,  $N_c$  is the number of series-connected cells, and  $\alpha$  is the temperature coefficient (TC) of the short-circuit current ( $I_{sc}$ ).  $\alpha$  is estimated to have a value of 0.05%/K.  $I_{mp1}$  and  $I_{mp2}$  are the  $I_{mp}$  at  $T_1$  and  $T_2$ , respectively.  $nE_g/q$  is estimated to have a value of approximately 1.232 V.

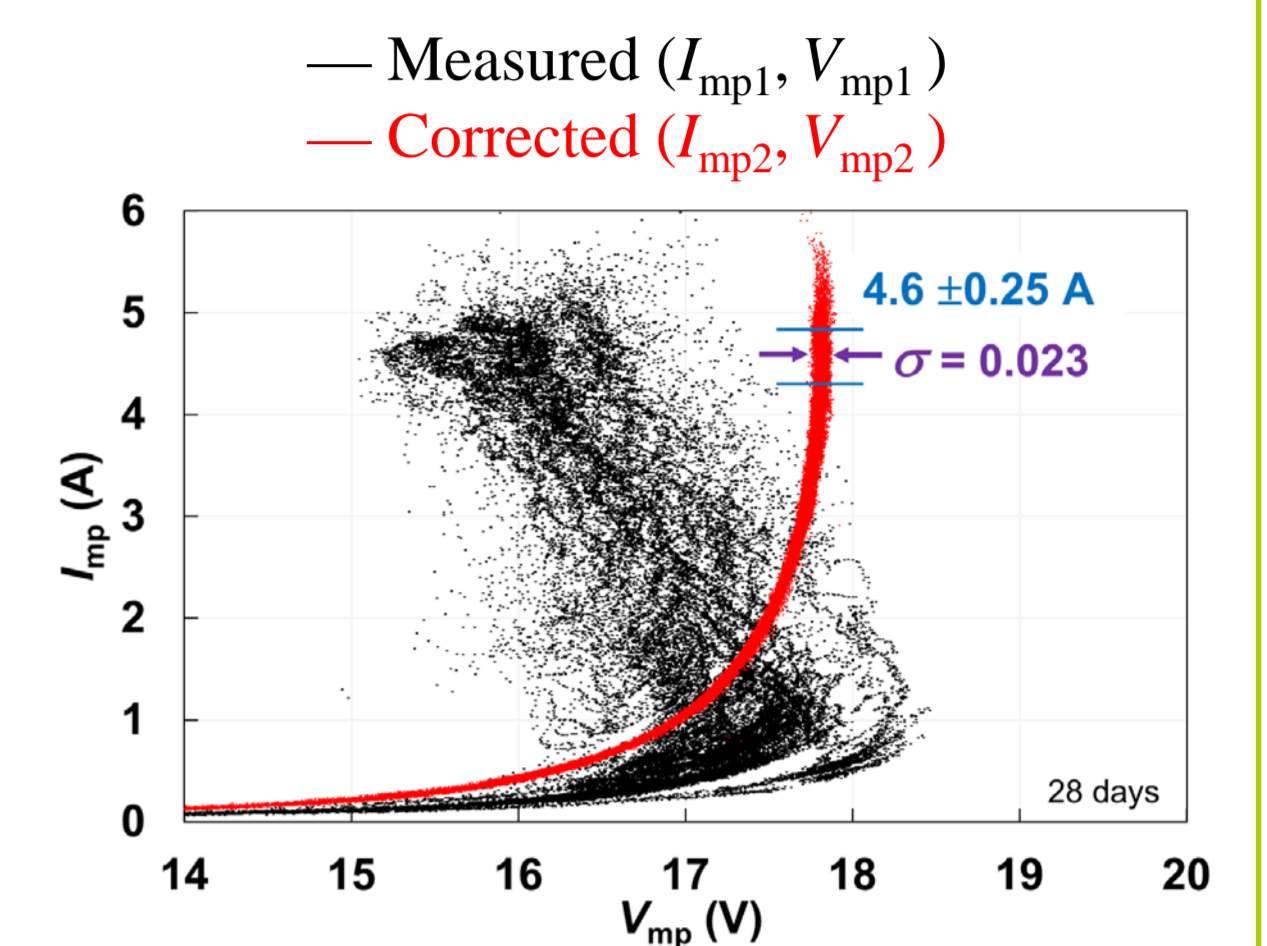


Fig. 1 Measured  $I_{mp}$  and  $V_{mp}$  are shown by the black symbols. The red symbols show the curve corrected to 25 °C using Eqs. (1) and (2).

## Cell crack and effect of $R_s$

### Cell crack

Numerical simulation has been performed to investigate the possible detection of cell cracks using the  $I_{mp}$ - $V_{mp}$  curve.

A cracked cell is represented by a cell with a reduced active area, as shown in Fig. 2.

The output current of a silicon PV cell for simulation is expressed by the Bishops model [2] as follows:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{N_c n k T}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \left[ 1 + a \left( 1 - \frac{V+IR_s}{V_{br}} \right)^{-m} \right]. \quad (3)$$

Here,  $I_{ph}$  is the photocurrent,  $I_0$  is the diode reverse saturation current,  $V$  is the output voltage,  $k$  is Boltzmann's constant,  $T$  is the device temperature in K,  $R_{sh}$  is the shunt resistance,  $a$  is the fraction of ohmic current involved in avalanche breakdown,  $m$  is the avalanche breakdown exponent, and  $V_{br}$  is the junction breakdown voltage.

### Effect of $R_s$

Another numerical simulation has been performed for assessing the degradation with increasing  $R_s$ . The  $I_{mp}$  and  $V_{mp}$  of a module, with one of the 36 series-connected cells with increased  $R_s$ , were determined from the  $I$ - $V$  curve of a module. A model of a module with an increased  $R_s$  is shown in Fig. 3, which exhibits the interconnection failure or solder bond failure as an example of increased  $R_s$ -based degradation.

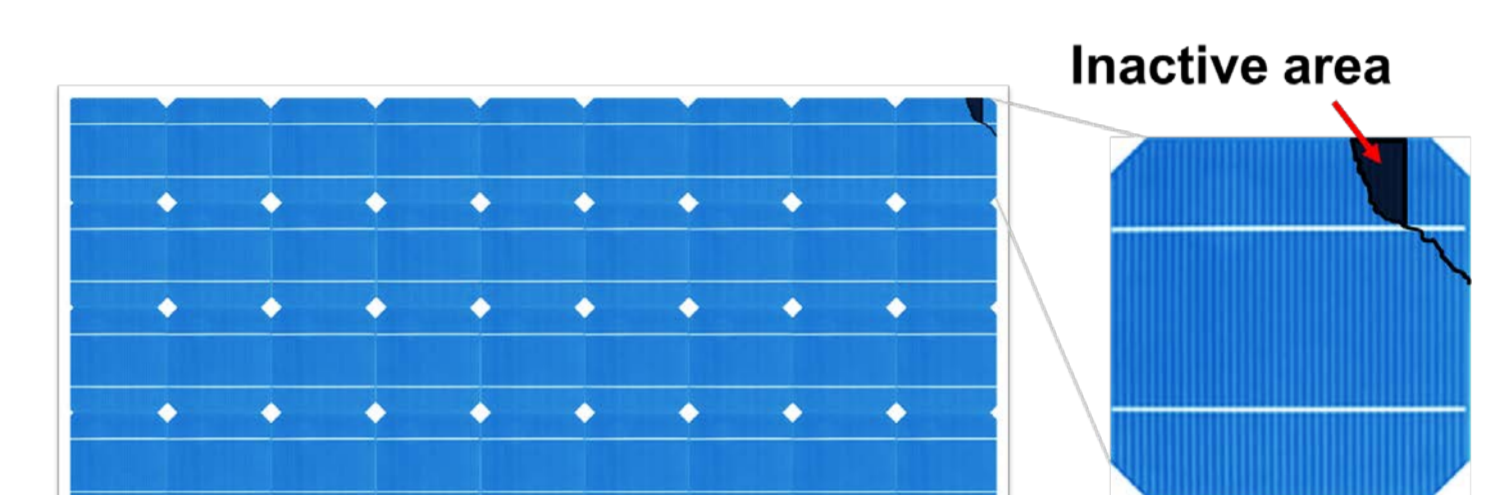


Fig. 2. Model of a module with a cell with crack. A black line shows a crack on a cell, and a dark area shows an inactive area.

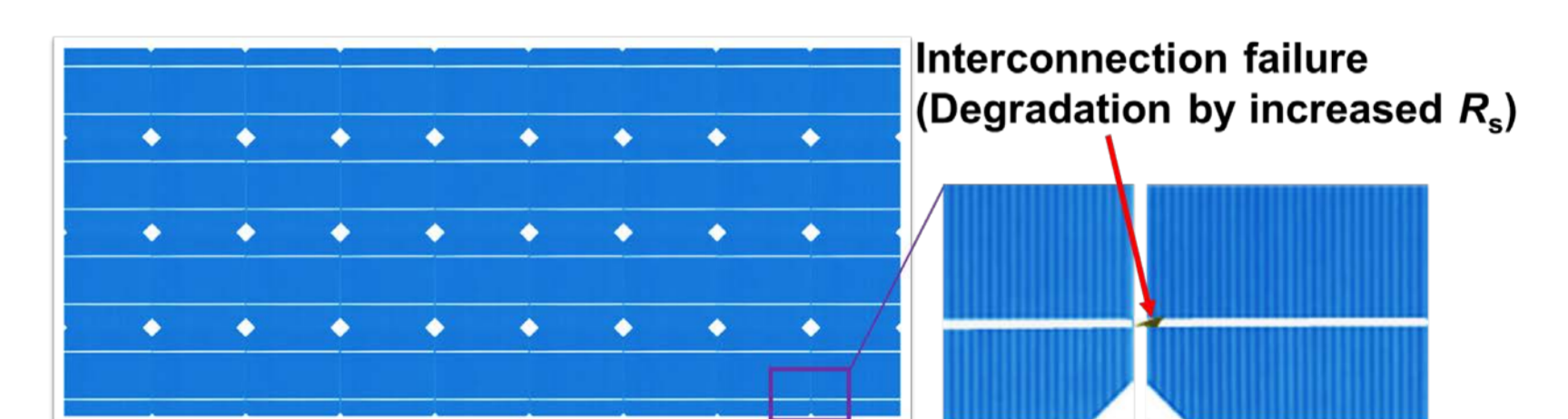


Fig. 3. Model of a module with a cell with an increased  $R_s$ ; an interconnection failure is an example of degradation by increased  $R_s$ .

## Results and discussions

### Simulation of cell crack effect

The simulations of the  $I_{mp}$ - $V_{mp}$  curves of a crystalline silicon PV module with and without a cracked cell using Eq. (3) were carried out, as shown in Fig. 4 by the blue lines and a red line, respectively. For the cell without a crack, the cell parameters of  $I_{ph} = 5.262$  A at irradiance ( $G$ ) = 1 kW/m<sup>2</sup>,  $I_0 = 5.3 \times 10^{-9}$  A,  $R_s = 6.4$  mΩ/cell,  $R_{sh} = 7$  Ω/cell,  $n = 1.147$ ,  $T = 25$  °C,  $a = 0.1$ ,  $V_{br} = -30$  V, and  $m = 4$  were chosen to fit the experimental data of Fig. 1. The results show that the  $I_{mp}$ - $V_{mp}$  curves with a cracked cell shift toward a higher voltage as the ratio of cracked cell increases (A cracked area from 7% to 14% of the cell area). An illustration of the variation of  $I_{mp}$  and  $V_{mp}$  by a cracked cell is shown in Fig. 5, where one of the 36 series-connected cells was assumed to have a crack.

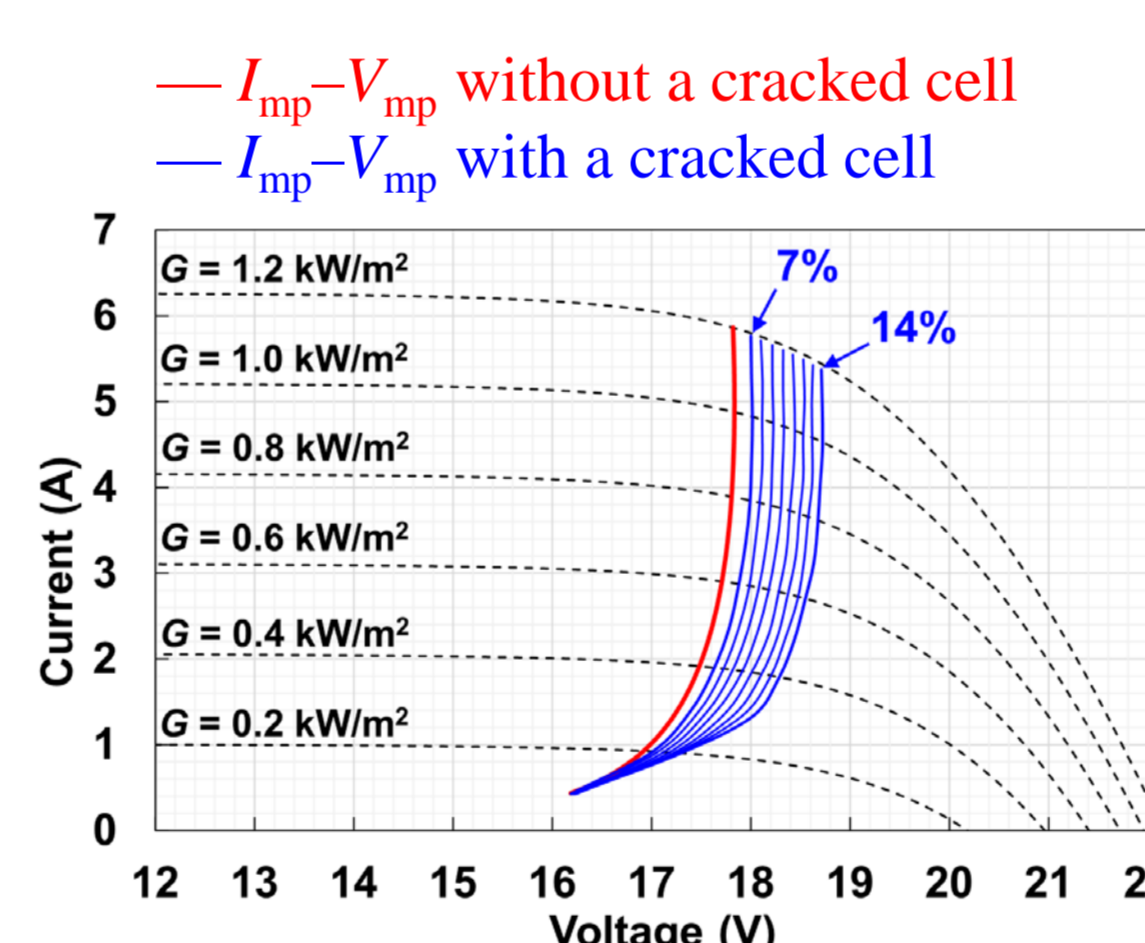


Fig. 4.  $I_{mp}$ - $V_{mp}$  curves of a PV module with and without a cracked cell are represented by blue lines and a red line, respectively.

### Simulation of $R_s$ effect

The simulation results with and without a cell with an increased  $R_s$  are demonstrated by the blue lines and a red line in Fig. 6, respectively. The parameters of normal cells (i.e., without an increased  $R_s$ ) were assumed to be identical to those in Fig. 4. The results suggest that an increase in  $R_s$  in the range of 0.1 - 0.6 Ω on one cell can be detected by the  $I_{mp}$ - $V_{mp}$  curves. An illustration of the variation of  $I_{mp}$  and  $V_{mp}$  by an increase in  $R_s$  is shown in Fig. 7, where one of the 36 series-connected cells was assumed to have an increased  $R_s$ .

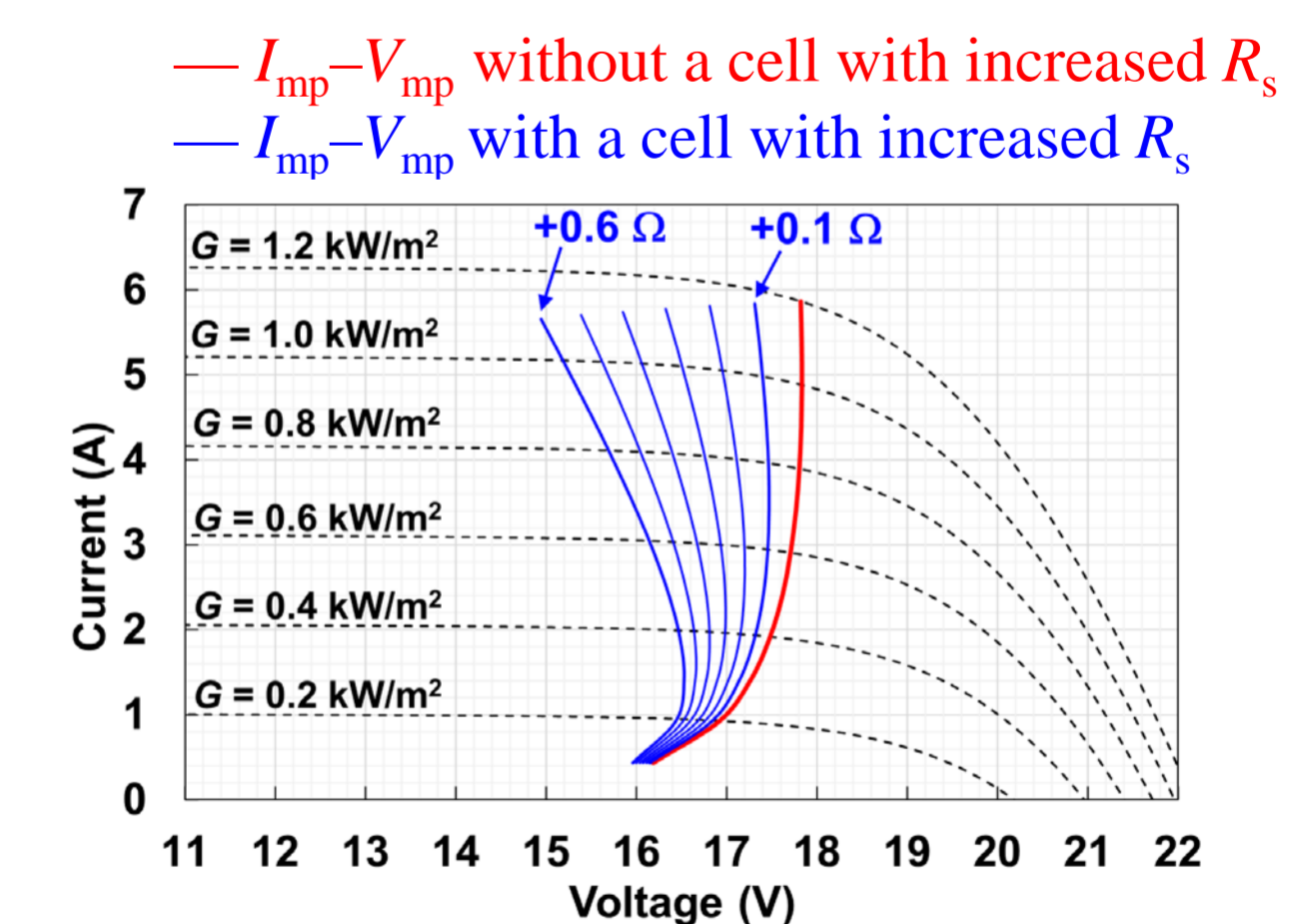


Fig. 6.  $I_{mp}$ - $V_{mp}$  curves of a PV module with and without an increase in  $R_s$  are represented by blue lines and a red line, respectively.

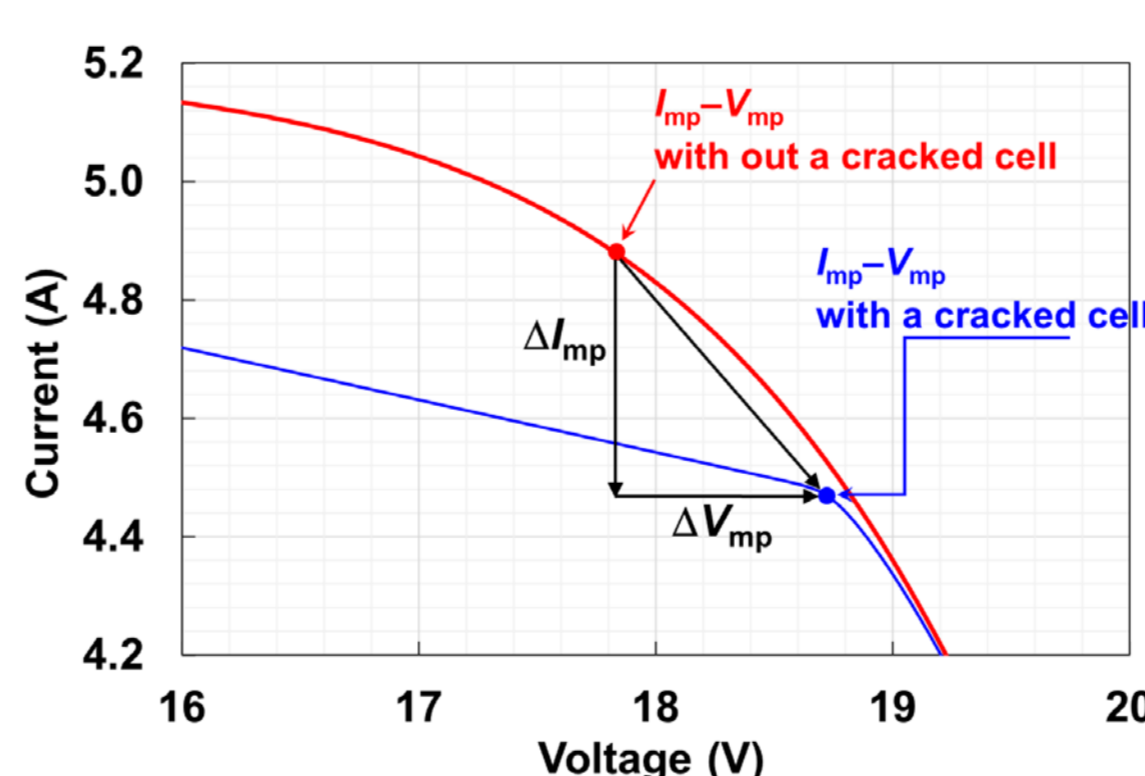


Fig. 5. An illustration of the variation of the  $I_{mp}$  and  $V_{mp}$  by the effect of cracked cell.

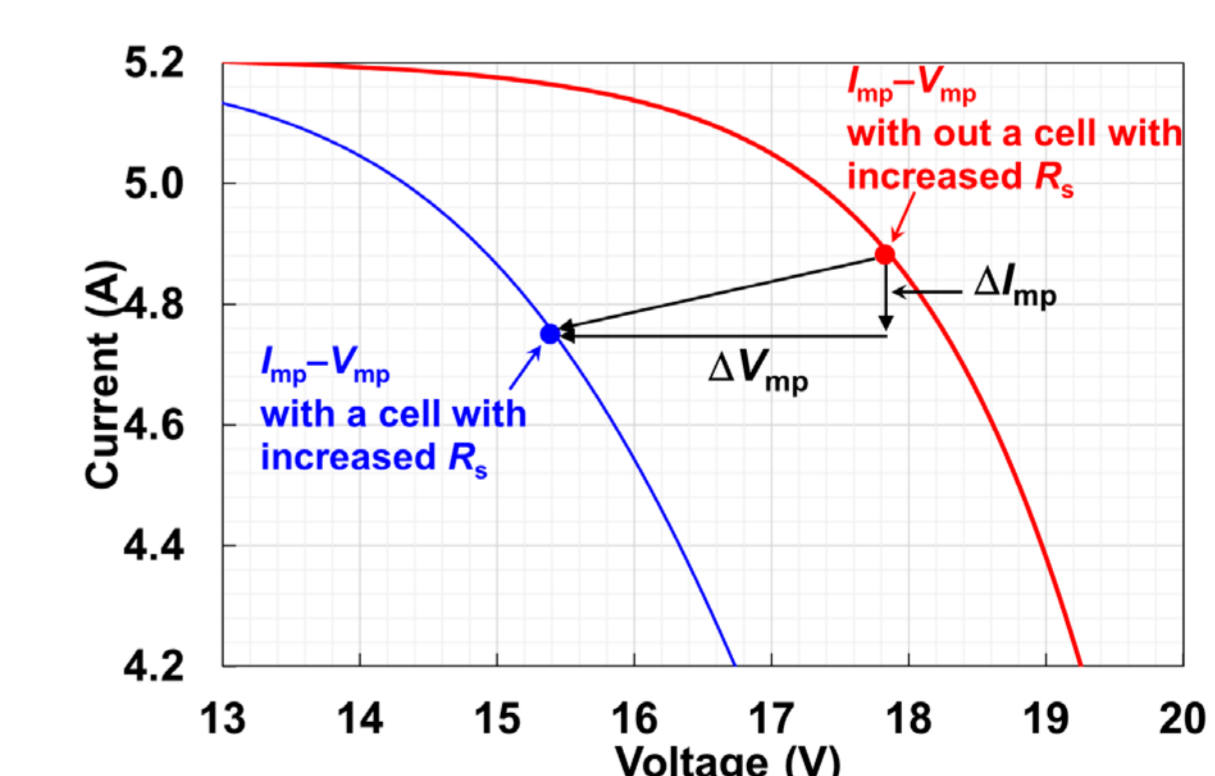


Fig. 7. An illustration of the variation of the  $I_{mp}$  and  $V_{mp}$  by the effect of increase in  $R_s$ .

## Conclusion

- This method uses the new formulas corrected time-series data of  $V_{mp}$  and  $I_{mp}$  for temperature.
- Only the  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ , and module temperature are necessary without other module-specific parameters, such as the TC.
- We firstly utilize the  $I_{mp}$ - $V_{mp}$  curve to identify a cracked cell and increase in  $R_s$  in the PV module.
- The results are applicable to a single PV module and multiple PV modules connected in series.
- The proposed method can be flexibly applicable for various types of PV modules and systems as it uses only the  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ , and module temperature.

## Acknowledgment

This work was supported in part by NEDO under METI

## References

- [1] 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. Sol. Energy, vol. 204, 459-465, (2020).
- [2] J.W. Bishop. Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits. Sol. Cells, vol. 25, 73-89, (1988).

# 水上PVシステムにおける接地抵抗測定手法の検討

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

## 研究背景と目的

湖や貯水池などを利用した水上太陽光発電システム(水上PV)では、システムと地面の間を水が大きく隔てている場合がある。このとき、地上に設置された太陽光発電システムの場合と同様の手法で水上PVの接地抵抗を測定するためには、システムから地面(岸など)まで測定機器の計測線を延長する必要性が生じる。しかし、発電システムは規模や周辺環境により設置状況が様々であるため、計測線を水上のシステムから岸边まで延長して測定を実施するには、計測線の準備を含めて多大な労力を要する。本研究では、通常は地面に設置する測定用の補助電極を水面上に設置することで、計測線を延長せずにシステムの接地抵抗を測定する手法を試み、手法の妥当性について検証を行った。

## 実験装置

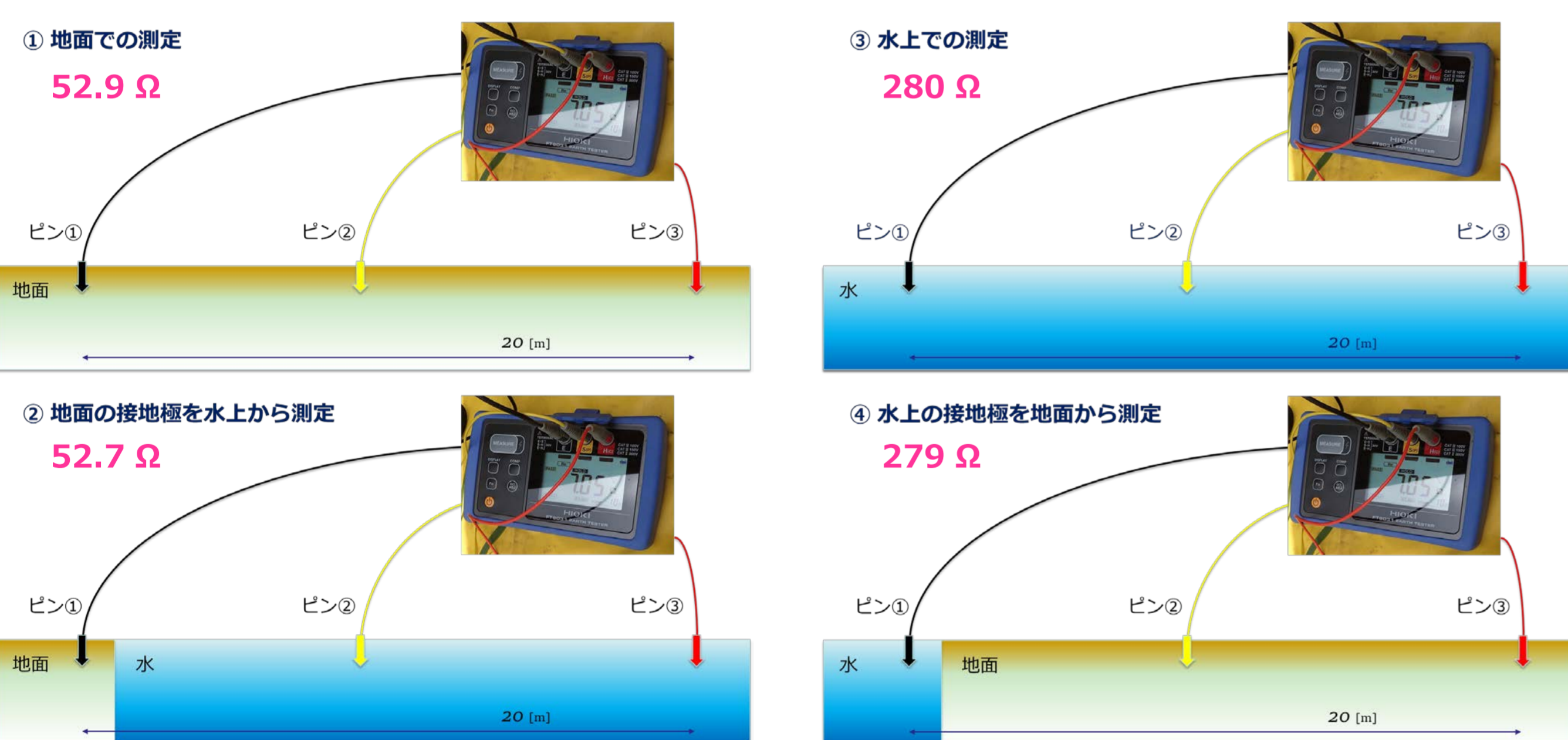
測定機器として市販の接地抵抗計(HIOKI, FT6031)を使用した。接地極および補助電極棒は装置に付属するステンレス製(全長270mm, 直線部長さ235mm, 直径6mm)を使用した。これらを地面に設置する際は、電極棒の直線部のみが全て土に埋まるまで地面に垂直に挿入した(打ち込み)。また、水面上に設置する際には、発泡スチロール(面積100mm×100mm, 厚さ30mm)をピンに装着することで浮力を確保して水面に浮遊させた。したがって、浮遊させた場合の水中の長さは205mmと見なした。



図 発泡スチロールを装着した電極棒

## 実験と結果①：水を介した接地極の接地抵抗測定

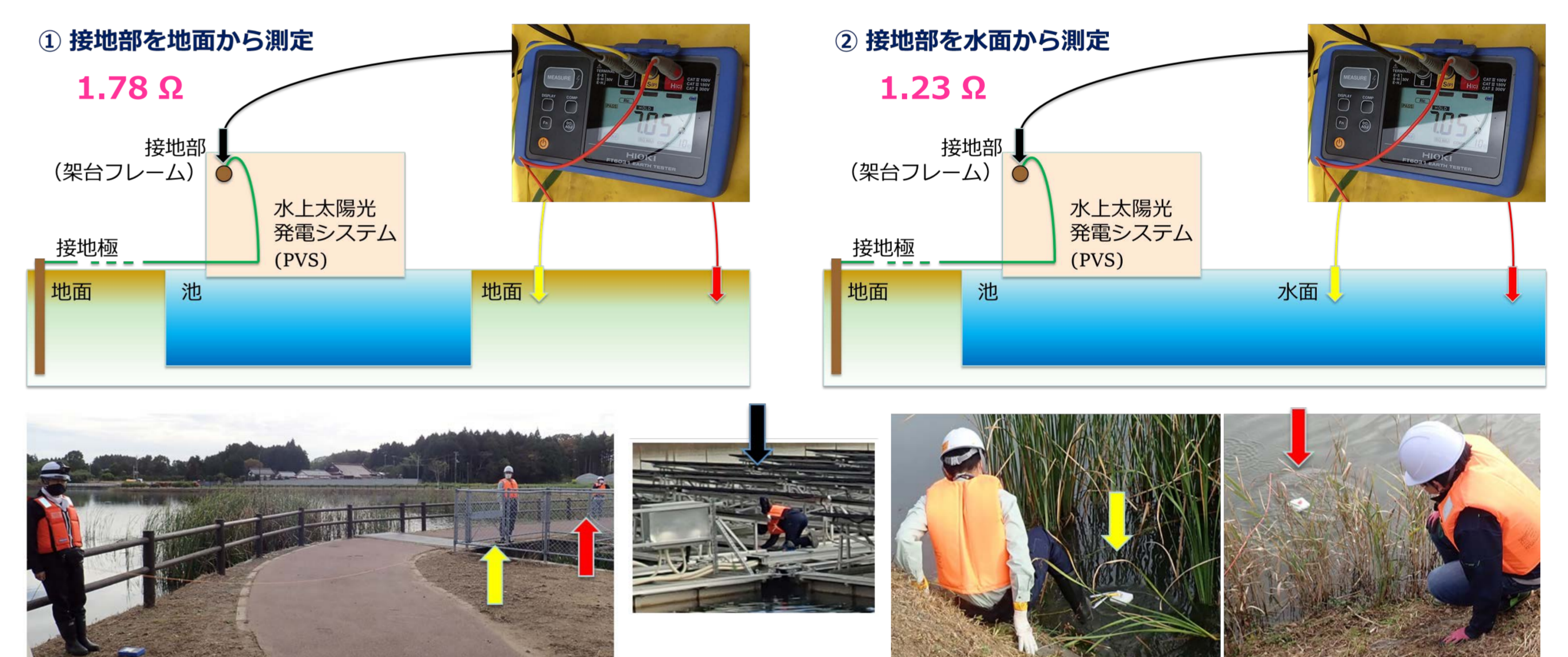
とある公園の池(福島県郡山市)において、接地極を地面あるいは水面上に設置し、それらの接地抵抗値を地面あるいは水面上に設置した補助電極により測定した。



「地面に設置した接地極の抵抗値」および「水面上に設置した接地極の抵抗値」とともに、**地面に設置した補助電極による測定と水面上に設置した補助電極による測定の差は0.4%未満**であった。

## 実験と結果②：水上太陽光発電設備の接地抵抗測定

とある水上太陽光発電設備(49.5kW, 福島県楡葉町)において、岸(地面)あるいは水面上に設置した補助電極によりシステムの接地抵抗を測定した。システムの接地は岸に埋設された接地極から接地線により架台のフレームに接続されており、施工時完了における接地極の接地抵抗値は1.48Ωと完成図書に記録されていた。



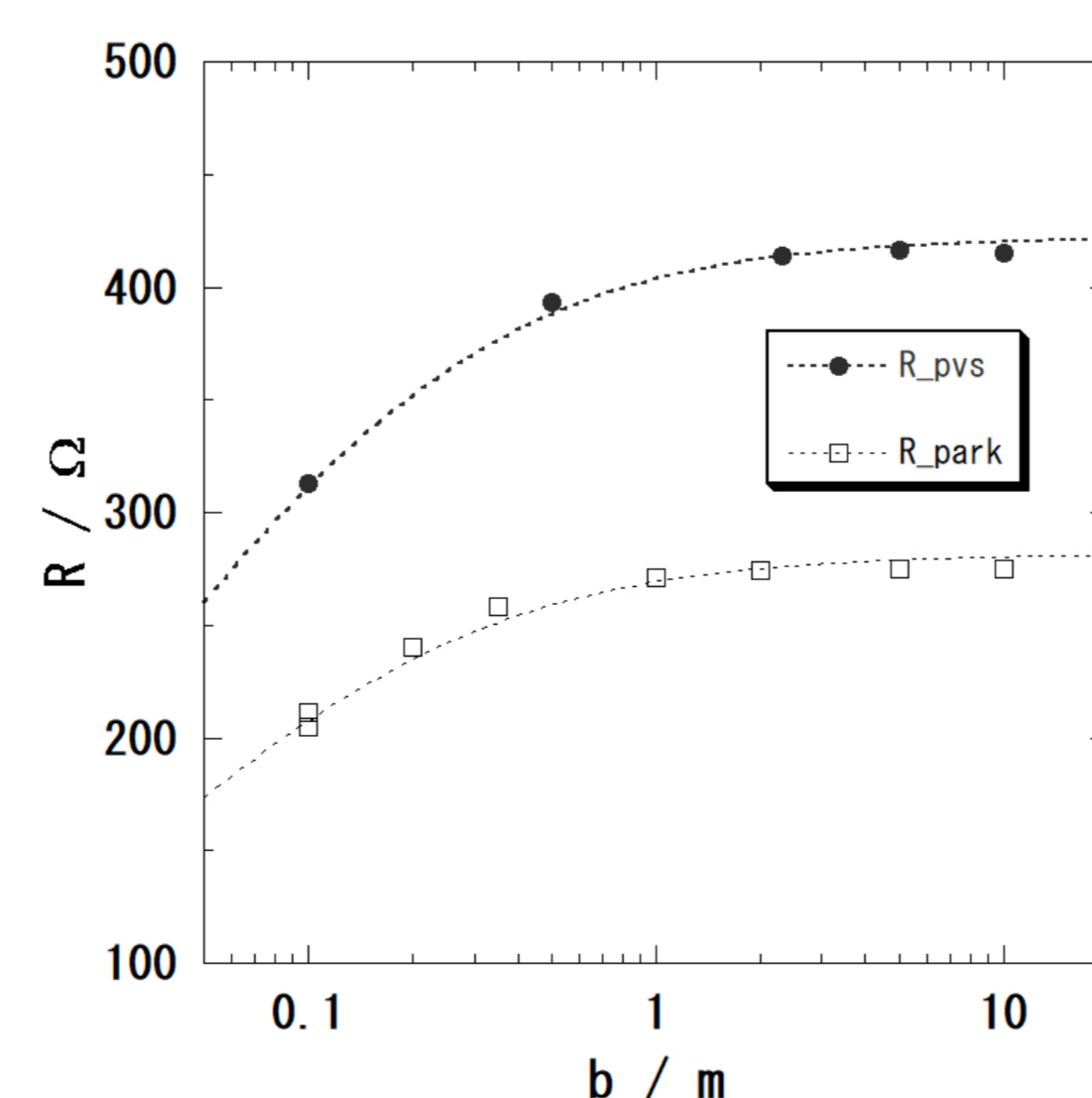
架台フレームの接地抵抗値について、**地面に設置した補助電極による測定と水面上に設置した補助電極による測定の差は0.5Ω程度**であった。

## 考察

接地極として長さ $L$ [m], 直径 $d$ [m]の棒状かつ先端が直径 $d$ [m]の半球状の金属を地面(あるいは水面)に鉛直に深さ $L+d/2$  [m]まで挿入した場合、接地極からの電流が接地棒の表面から垂直かつ一様に流れ出ると仮定すると、対象とする領域の地面(あるいは水)の抵抗率 $\rho$ [ $\Omega \cdot m$ ]が一様であれば、接地極から $b$ [m]離れた位置で測定される抵抗値 $R$ [ $\Omega$ ]は;

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{1 + \frac{2L}{d}}{1 + \frac{L}{b}}\right)$$

と計算される<sup>[1]</sup>。公園の池および発電設備が設置された池において、水面上に設置した補助電極棒の接地抵抗値の $b$ 依存性の測定から、水の抵抗率はそれぞれ約 $85\Omega \cdot m$ , 約 $128\Omega \cdot m$ と導出され、測定が概ね良好であることが示唆された。



## 結論

補助電極を水面上に設置しても、発電システムの接地抵抗を測定することができる。ただし、埋設されているシステムの接地極の近傍に補助電極(特に電圧極:黄)を設置しないように注意する必要がある。

### 【埋設されている接地極位置の確認方法】

- ・設備の完成図書など
- ・抵抗値の電圧極位置に対する依存性測定

## 謝辞

測定の機会をご提供いただきました郡山市様、ならびに福島発電株式会社様に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] A.C. Liew, M. Darveniza: Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths, Proc. IEE, 121, pp. 123-135 (1974)

# 発電実績データによる故障検知 機械学習アルゴリズムの開発

本田智則、小澤暁人

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

日本国内の設置済み太陽光発電設備容量(2020年6月末時点)は5.19GW、設置件数は213万カ所に昇る。このうち、210万カ所、**全体の98.5%(設備容量の44.0%)は主に住宅や工場の屋根、空き地等を利用した50kW未満の小規模発電所**となっている。大規模な太陽光発電所の設置は年々困難となっており、今後の太陽光発電普及において小規模発電所の増大が不可欠となっている。

一方、小規模発電所では発電システムの監視・管理に費用を割くことができず、故障による損失が長期化するケースが見られる。さらに、2019年2月に消費者庁から「住宅用太陽光発電システムから発生した火災事故」への注意が喚起されるなど、太陽光発電システムの故障が財産及び生命に対して損害を与える可能性も指摘されており、小規模発電所における**故障・異常検知の手法開発は喫緊の課題**となっている。

## 目的

小規模太陽光発電システムの故障検知(予知)を行うための低コストかつ新たな設備投資を伴わない手法の開発を行う。

開発する手法では、

- ・ 新たな設備設置を必要としない手法
- ・ 気象データなどに依存しない手法
- ・ リアルタイムな故障検知を実現し、情報をフィードバックできる手法

の3点を満たすことを目指した手法開発を行った。

本研究では、小規模発電所が国内に多数設置されている点に着目し、「1時間毎の発電実績データ」のみを利用して故障検知を目指すこととした。

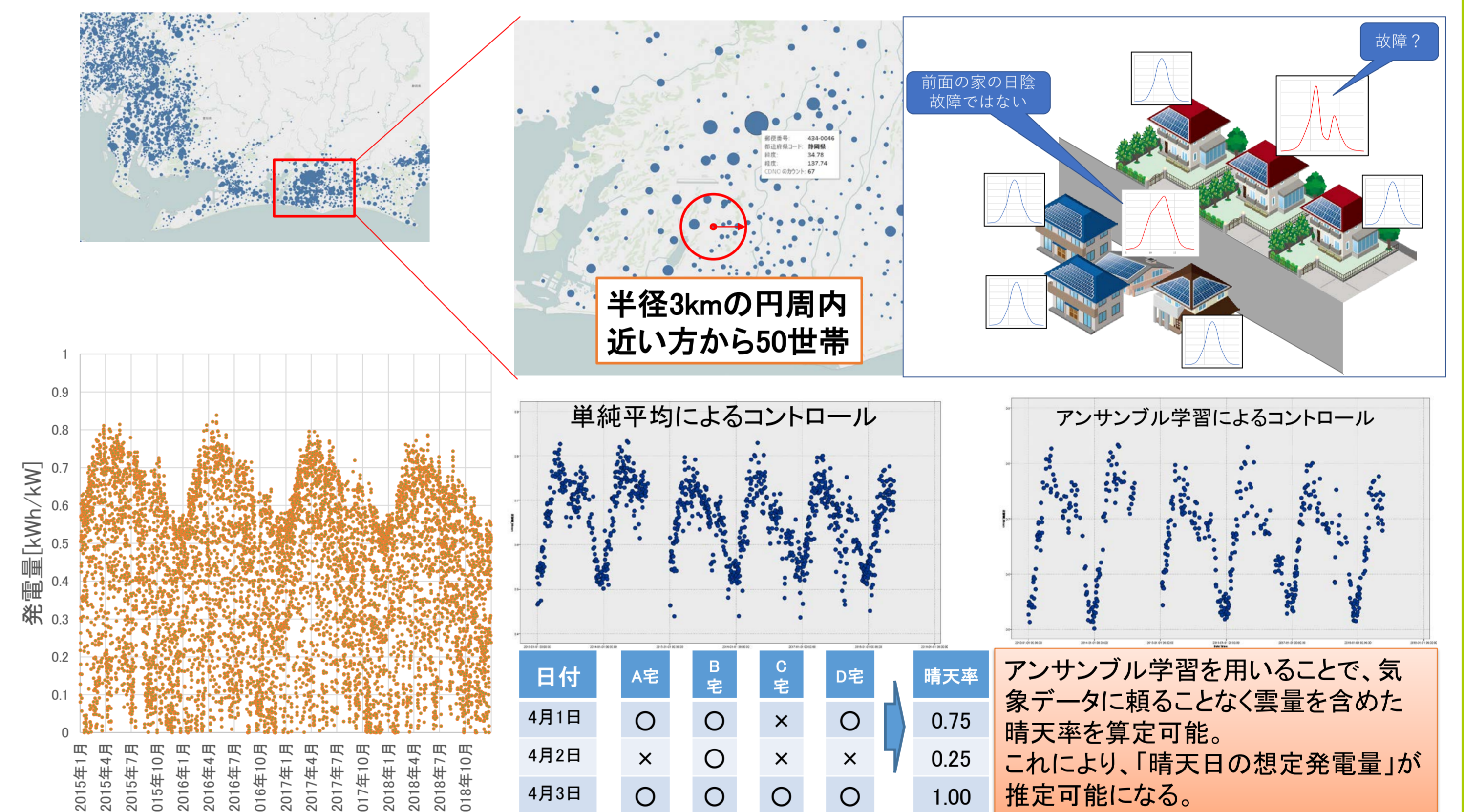
そこで、**発電実績データのみを用いて機械学習アルゴリズムを用いた、故障検知アルゴリズムを開発した。**

## 開発手法

### 故障検知手法

- ・ 2018年6月時点で発電を行っていた50,728世帯の住宅太陽光発電実績データを利用。対象は全国とした。
- ・ 評価対象住宅から半径3kmにある近隣太陽光発電設置住宅50世帯を抽出。
- ・ 50世帯の1時間毎発電実績から、晴天率を求め、晴天日のみの発電データを抽出。
- ・ 晴天日に想定発電量を下回る時間が連続する場合、異常と判定。検知にはマハラノビス距離を応用したアルゴリズムを開発。

開発手法は、小規模発電所(住宅屋根に設置された太陽光発電システム)の「数」に着目し、「**周りの住宅で発電しているのに、自分の家の発電量が低い場合は異常**」という極めて単純なアイデアをアルゴリズム化した。



## 手法の検証と考察

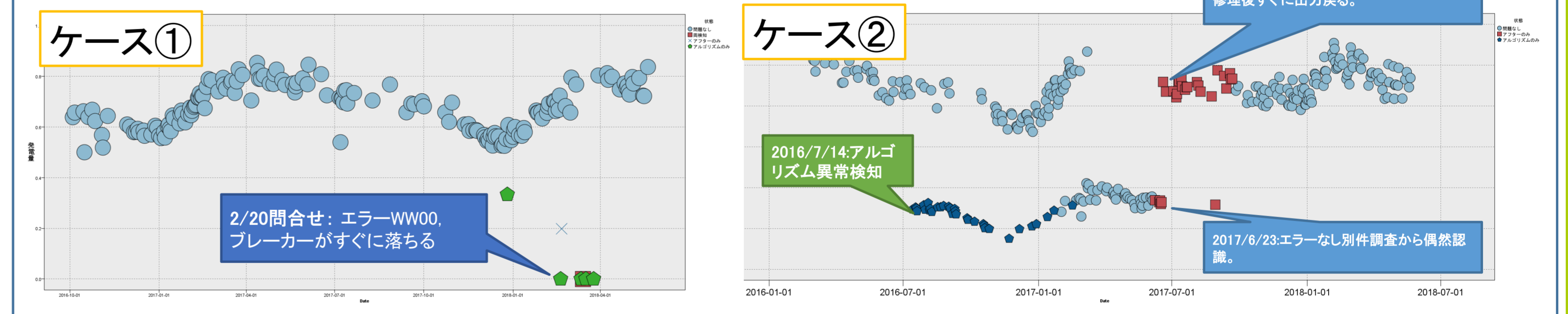
### 開発手法の精度検証

- ・ 対象となる50,728世帯のうち、過去に1110世帯で故障修理記録が残されていた。
- ・ 1110世帯のうち、737世帯の故障はソーラーパネルやパワーコンディショナ(パワコン)の故障ではなく、室内モニタの故障等であった。
- ・ 373世帯では出力の低下を伴う故障が記録されていた。また、57世帯では、ストリング異常等により長期間出力が減少する故障が記録されていた。
- ・ これら故障修理記録と、アルゴリズムによる「異常」の関係を検証。

### 開発アルゴリズムの検知力検証結果

- ・ アルゴリズムで出力低下が検知できた世帯: 325世帯/375世帯 (**検知率87.1%**)
- ・ スtring異常を検知できた世帯: 45世帯/57世帯 (**検知率79.0%**)

### アルゴリズムによる異常検知と故障修理記録の関係ケース



多くの故障ケースで、開発アルゴリズムによる「異常」がパワコンのエラー出力等による故障修理に先行して検知できていた。

## 結論

### 開発手法の特徴

- ・ 新たな設備を設置することなく、発電実績データのみに基づき住宅屋根太陽光発電システムの故障を検知する手法を開発した。
- ・ 開発したアルゴリズムでは、気象データ等を用いた高度な予測技術を用いていないため、発電実績データのみをリアルタイムに収集できれば早期に故障を検知することができる。

### 開発手法の課題

- ・ 開発手法は、周辺住宅発電実績と対象住宅の過去の発電実績を用いているため、「初期不良」に起因する故障は検知できない。
- ・ 晴天日のみの発電量に着目した手法であるため、梅雨など長期間晴天がない日が続く期間については検知精度が落ちる。

## 参考文献

1. 資源エネルギー庁; 固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト、2020年6月末時点の状況、<https://www.fit-portal.go.jp/>
2. 環境エネルギー政策研究所; 自然エネルギー白書2018/2019(2020)
3. 消費者庁; 消費者安全法第23条第1項の規定に基づく事故等原因調査報告書-住宅用太陽光発電システムから発生した火災事故等-(2019)
4. 小澤暁人, 本田智則; 電力データを用いた家庭用太陽光発電・蓄電システムの経済性評価, エネルギー・資源学会論文誌 41(6) pp.254-265 (2020).
5. Mahalanobis, Prasanta Chandra (1936). "On the generalised distance in statistics". Proceedings of the National Institute of Sciences of India. 2 (1): 49-55. Retrieved 2016-09-27.

# FREA太陽光システムチームの研究概要

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

## 研究の目的

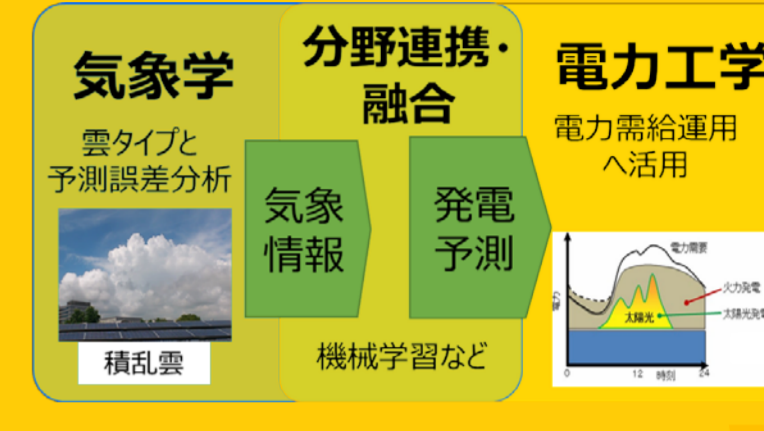
- 太陽光発電の主力電源化の実現するためには、長期安定電源化および持続的な発電事業の確立やさらなる導入拡大の方策が必要である。
- 長期安定電源化を実現するために、太陽光発電設備の安全性に関する設計技術、運用技術に関する研究開発や基盤整備を行っている。
- また、持続的な発電事業の確立や太陽光発電の大量導入時におけるスムーズな電力系統への統合のため、需給運用のための発電予測技術の研究開発を行っている。
- さらに、さらなる導入に向けた利用領域の拡大に関するシステム技術開発を行っている。

## 太陽光発電の主力電源化に向けた研究

**長期安定電源化**  
発電設備の安全設計、運用に関する研究



**持続的な発電事業**  
発電予測の高精度、高度化に関する研究



### 利用領域の拡大

融雪型の検討、モジュールリサイクル廃ガラスの有効利用  
車載等への適用の検討

## 太陽光発電設備の安全設計、運用に関する研究開発

- METI/MRI: 直流電気安全に関する基盤整備にて消防隊員へのリスクや火災リスクを整理(2012~2014)。
- NEDOプロを中心に実施(2016~2019)
  - 直流電気安全(火災、感電防止)に関する設計、運用方法の提案やガイドラインの策定
  - 現地保守点検手順の策定
  - 太陽光発電からの火災発生メカニズムの解明
  - 特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン策定(2020~)
  - 太陽光発電の安全性・信頼性評価、回復技術の技術情報基盤整備(2020~)
- 太陽光発電の事故発生リスク低減に貢献**
- 「太陽光発電の安全性に関する情報等」のダウンロードページ:  
[https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/service/PV\\_Electrical\\_Safety/index.html](https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/service/PV_Electrical_Safety/index.html)



図 太陽光発電の事故事例(火災、構造物飛散)



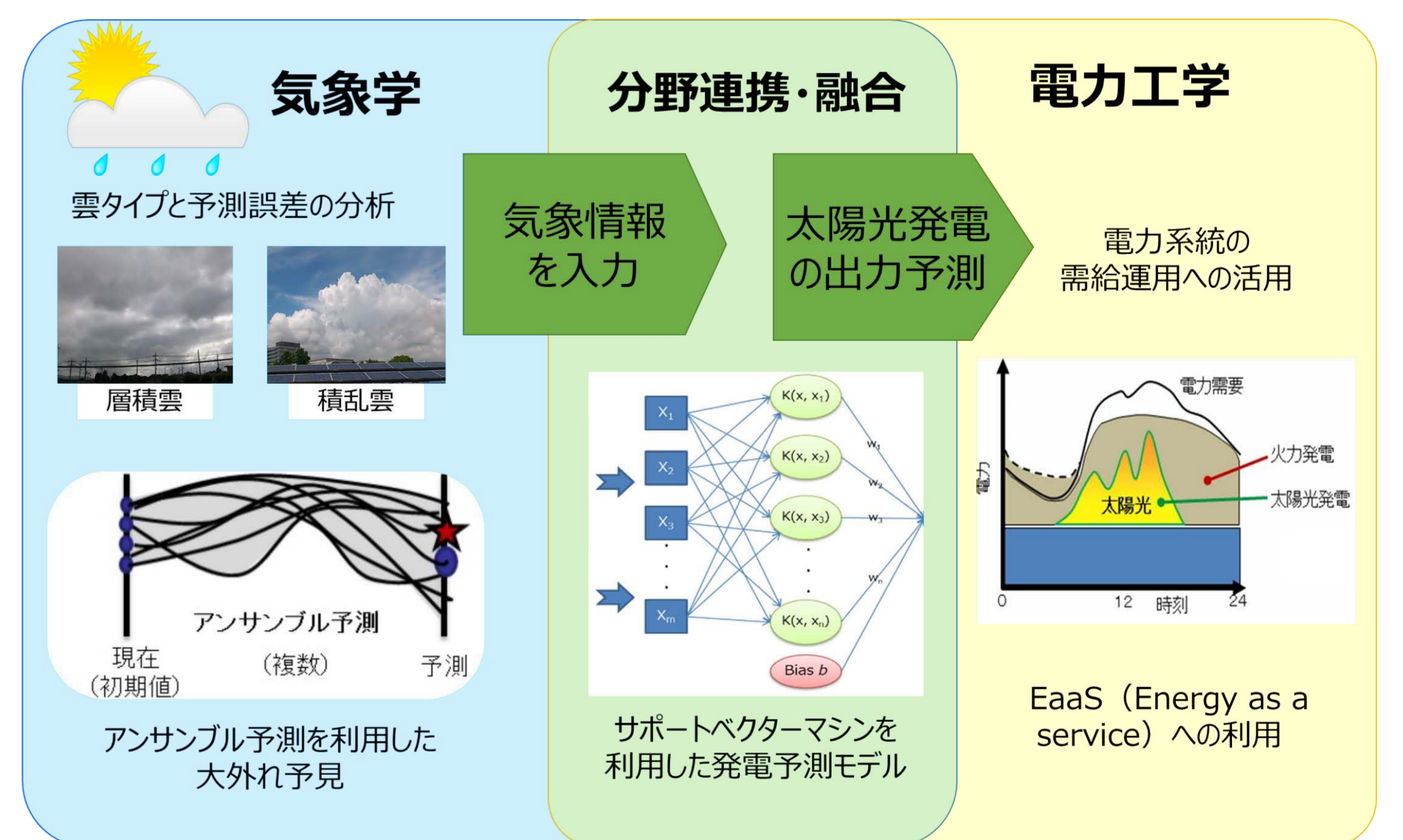
図 太陽光発電の保守点検技術

太陽光発電の直流電気安全のための  
の手引きと技術情報の作成・公開  
※METI/FIT制度の事業計画策定ガイド  
ラインで参考資料として引用されている。



## 太陽光発電予測・制御に関する研究開発

- NEDO(2010~2017)、2020~、JST CREST(2012~2019)を中心に実施。
- 次世代インバータ技術に関する研究(NEDO:エネルギーネットワークチームと連携)
- 調整力創出技術の開発(NEDO)
- 気象学と電力工学の分野融合研究を実施した発電予測(NEDO/JST)
- 衛星データによる発電推定(JST)
- 複数予報を利用した予測大外れ検知(JST)
- 太陽光発電導入拡大時の電力需給運用コスト削減に貢献**



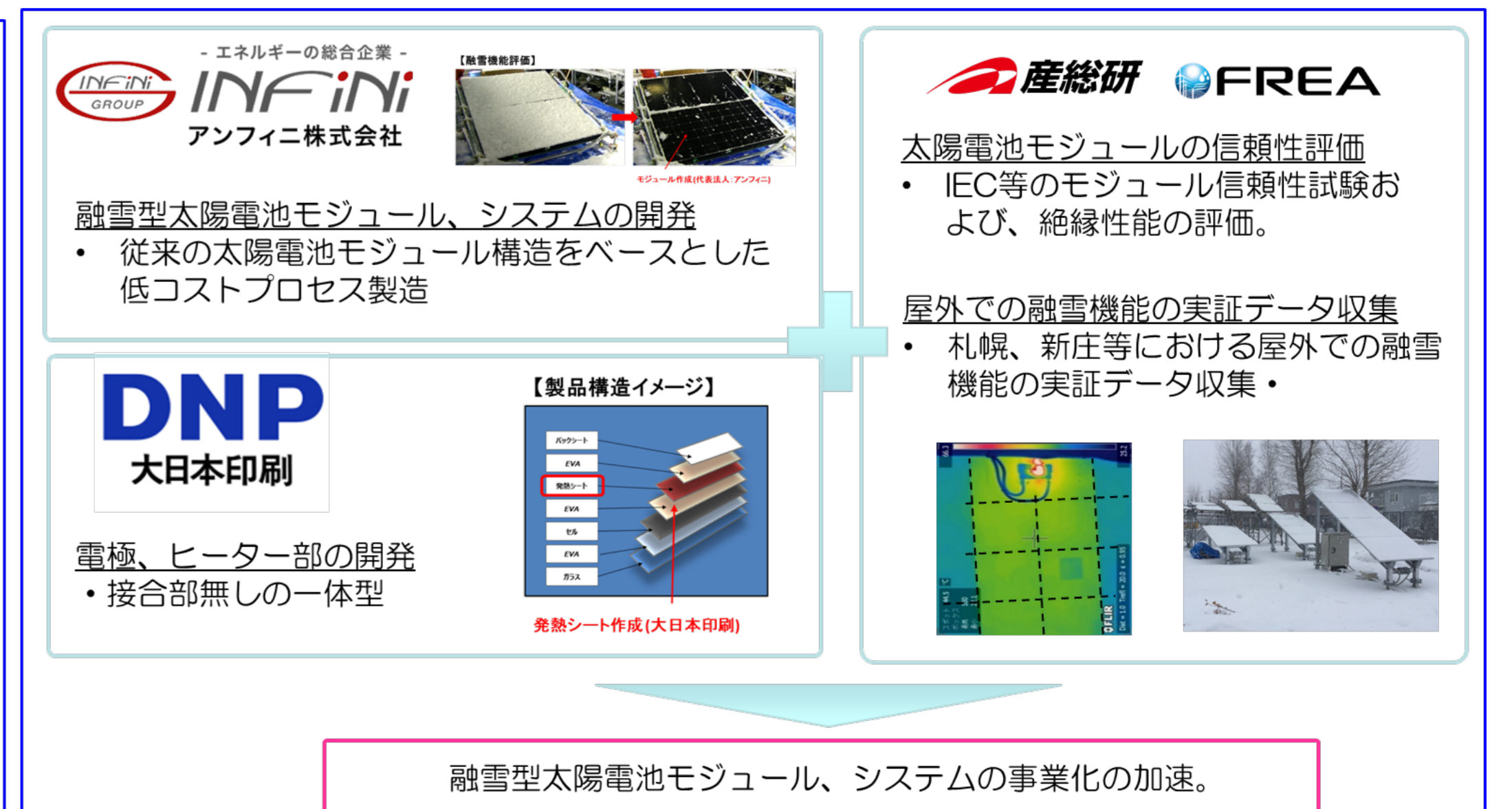
## 利用用途拡大に関する研究開発

- 福島県内企業との連携による両面受光太陽電池や融雪型太陽電池に関連する研究やモビリティへの太陽光発電の適用に関する研究開発を実施。

### 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



### 太陽電池を用いた屋根上の融雪装置の開発



# 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する検討

山田 隆夫・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 太陽光システムチーム

## 研究の背景・目的

- PVの1TW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、CO<sub>2</sub>削減。
  - 日本全体での2030年におけるCO<sub>2</sub>排出削減効果は最大227万t-CO<sub>2</sub>/年。(2030年に向けた乗用車におけるCO<sub>2</sub>排出削減量の11%相当)

プリウスをはじめ、海外での検討も活発化。



出典：TOYOTA  
https://toyota.jp/priusphv/performance/charge/?pa did=ag341\_from\_priusphv\_top\_performance03#



出典：Hyundai  
https://electrek.co/2018/10/31/hyundai-kia-solar-roof-electric-vehicles/

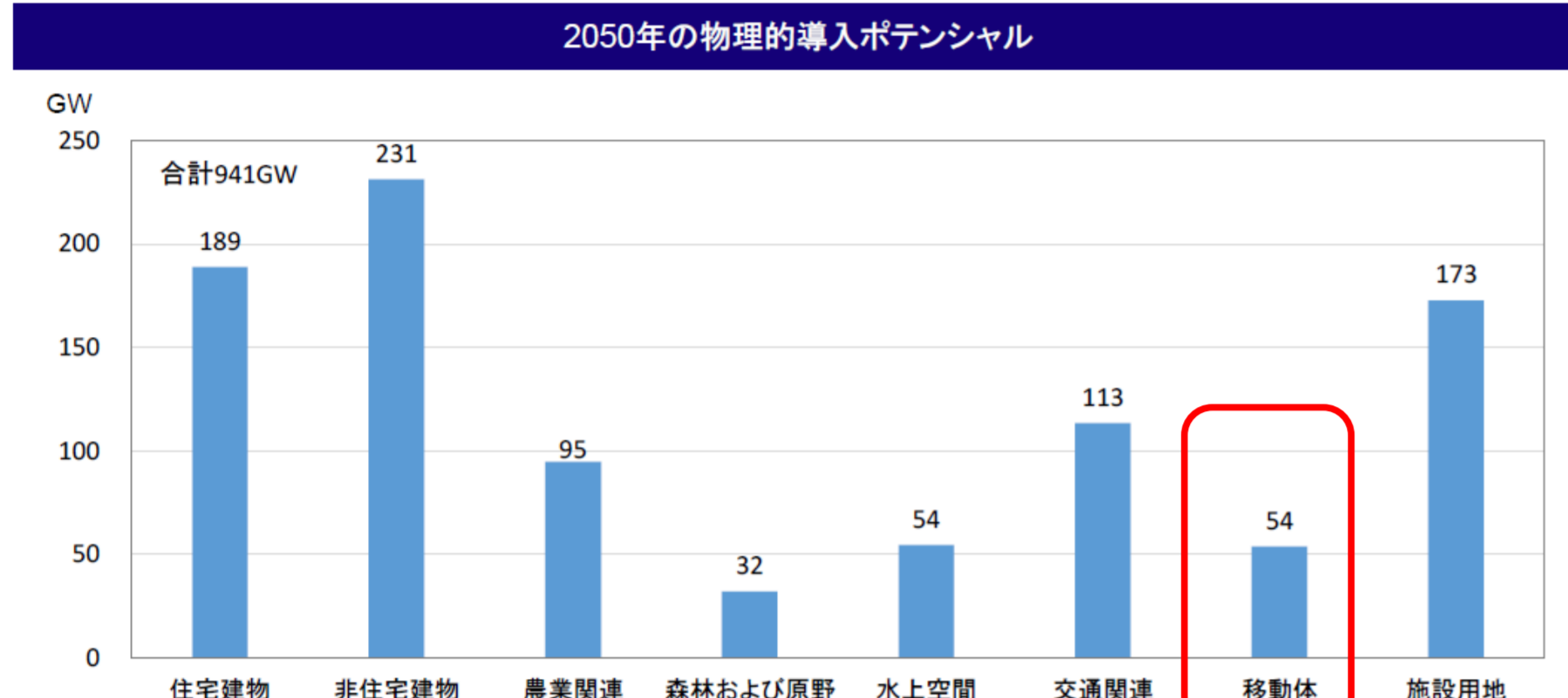


出典：Hanergy WEB  
http://hanergy.com/channel/fullySolarPoweredCars.html  
http://hanergy.com/channel/fullySolarPoweredCars.html

技術的課題のひとつに曲面によるミスマッチ

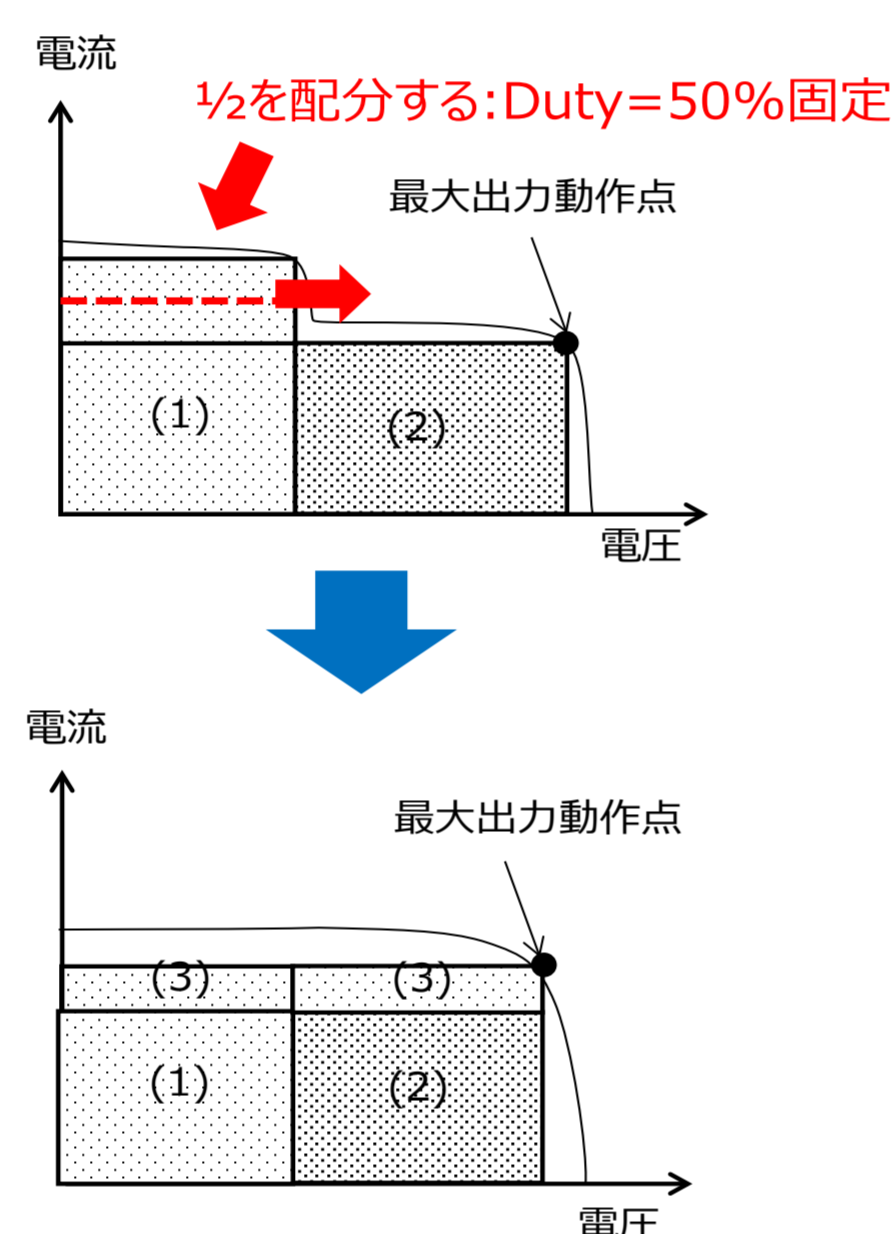
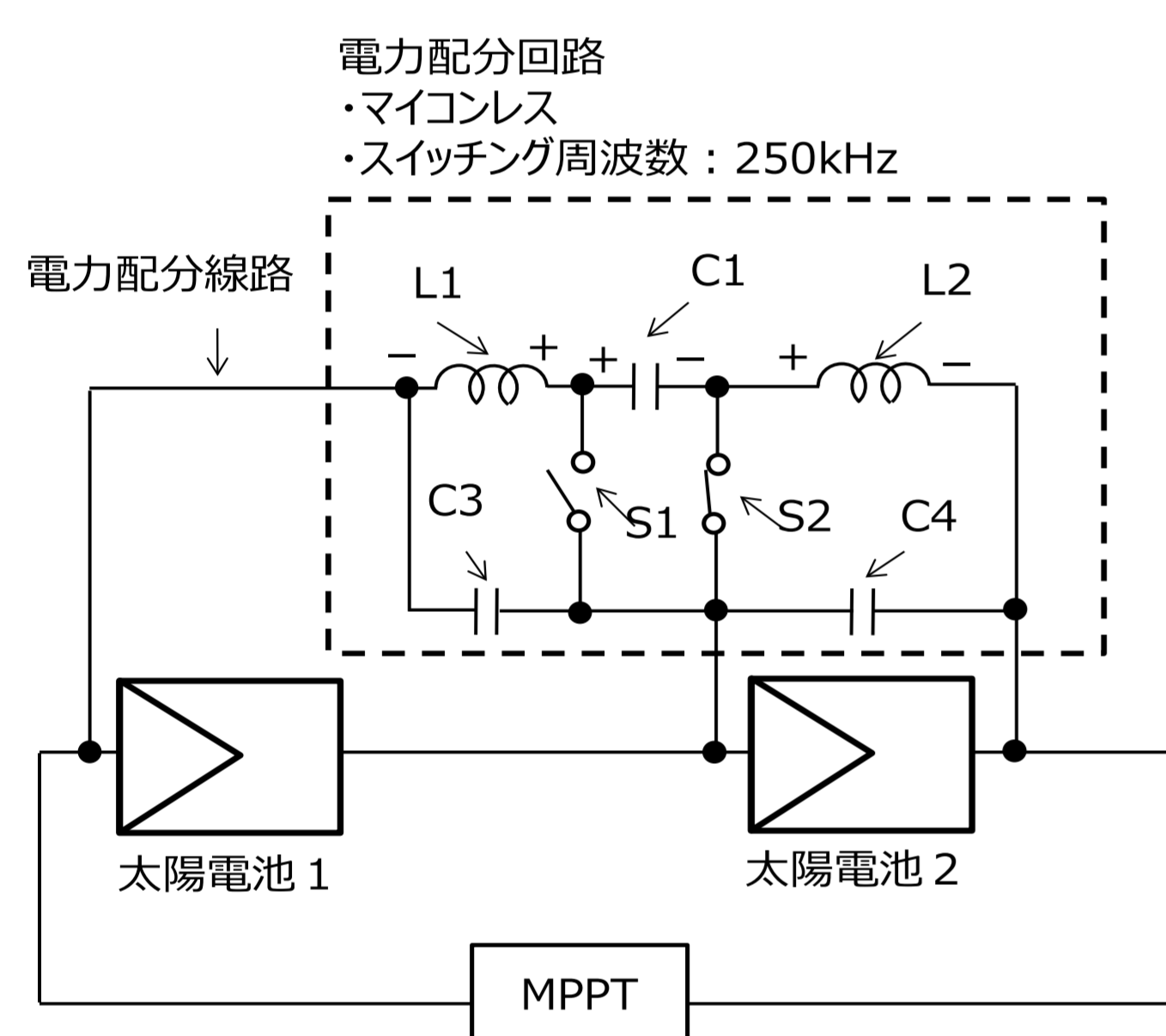


ミスマッチ損失の低減が必要

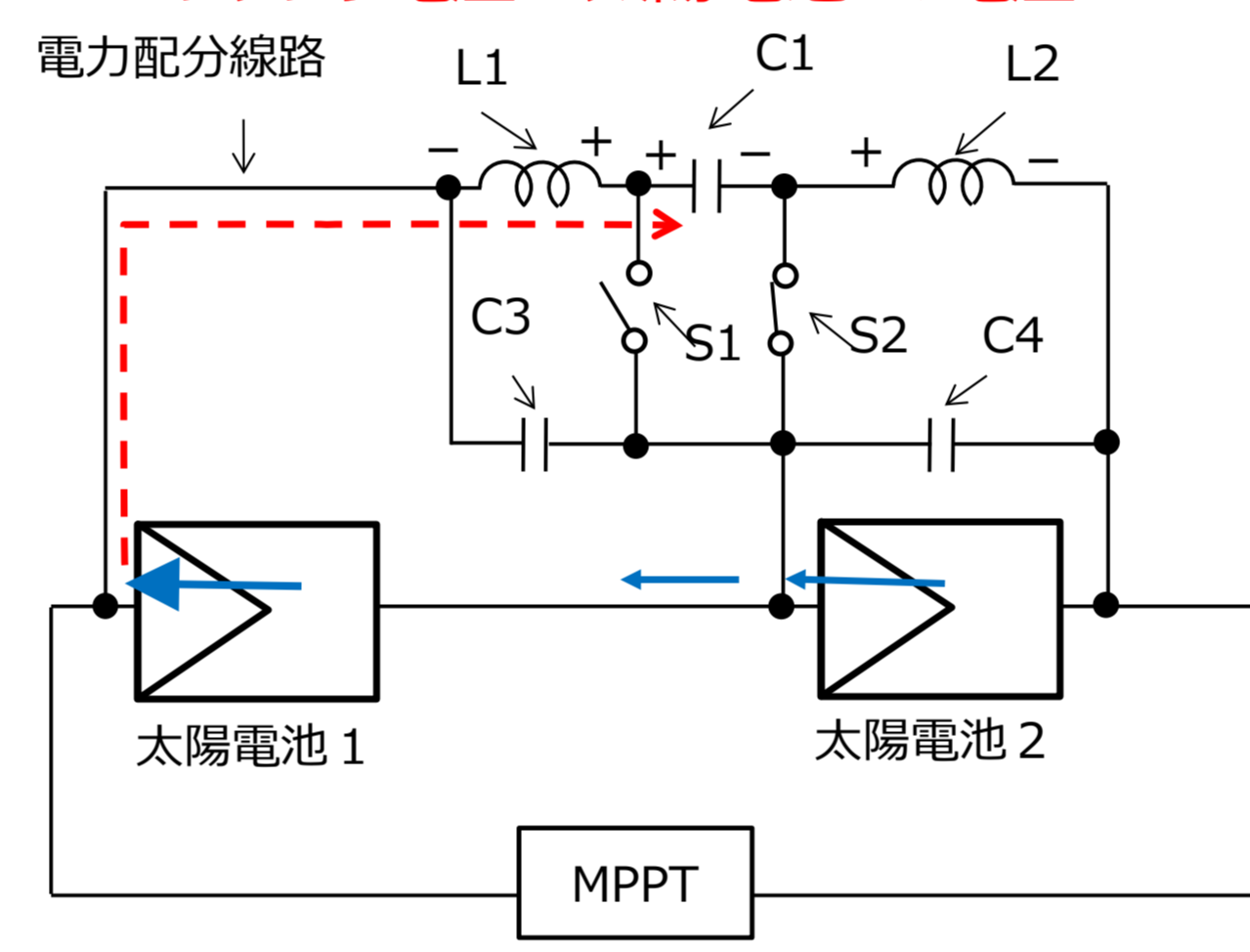


出典：平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査「再生可能エネルギー固定価格買取制度における賦課単価算定の精緻化に向けた分析等調査報告書」2018.3.

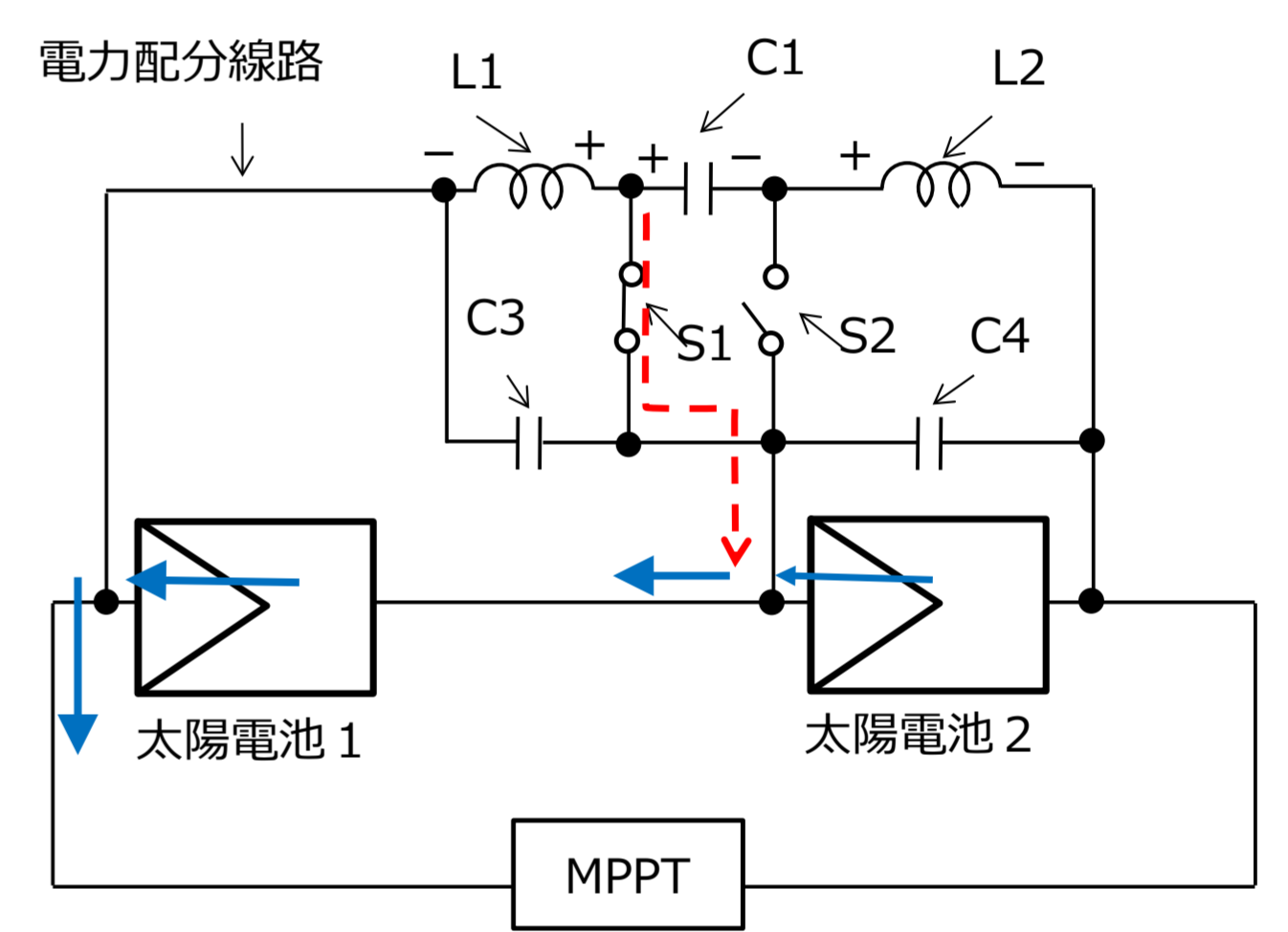
## 原理



- 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

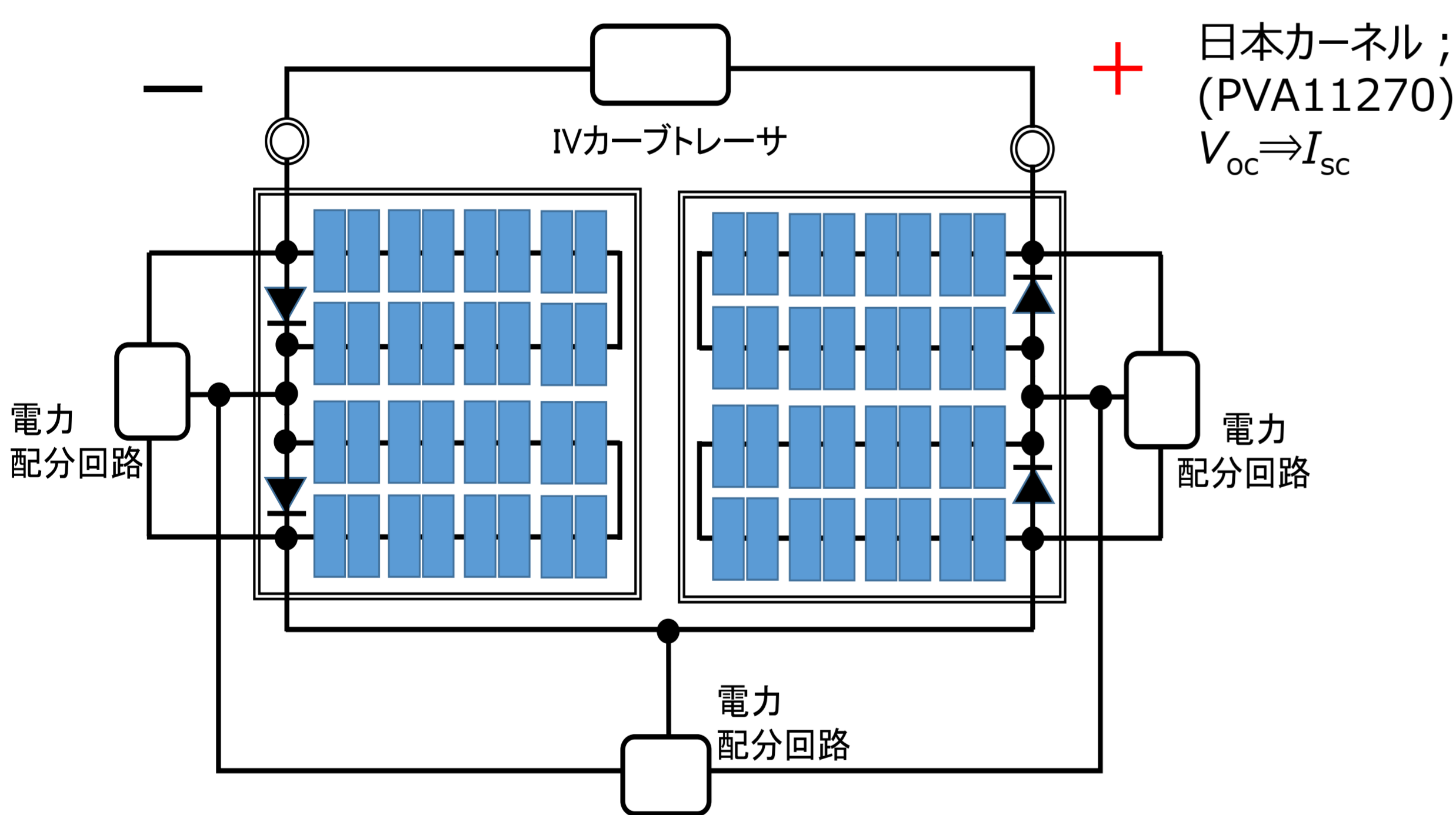


- 出力が小さい方は、動作電圧が $P_{max}$ 付近。  
⇒コンデンサ電圧 > 太陽電池2
- コンデンサから出力の小さい方へ並列に放電

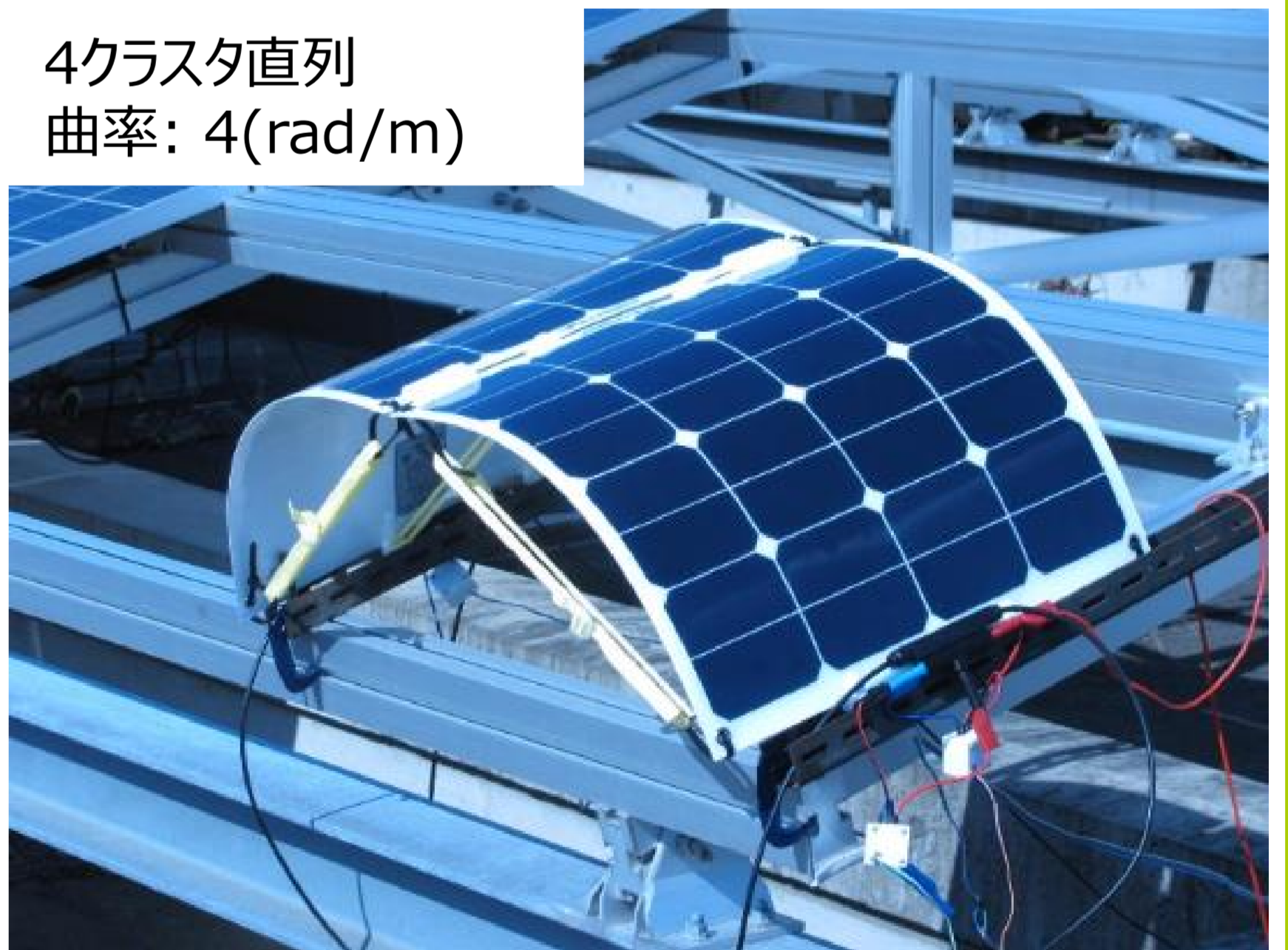


## 実験

- 電力配分回路をON/OFF時の $P_{max}$ を比較
- IVカーブトレサにより計測

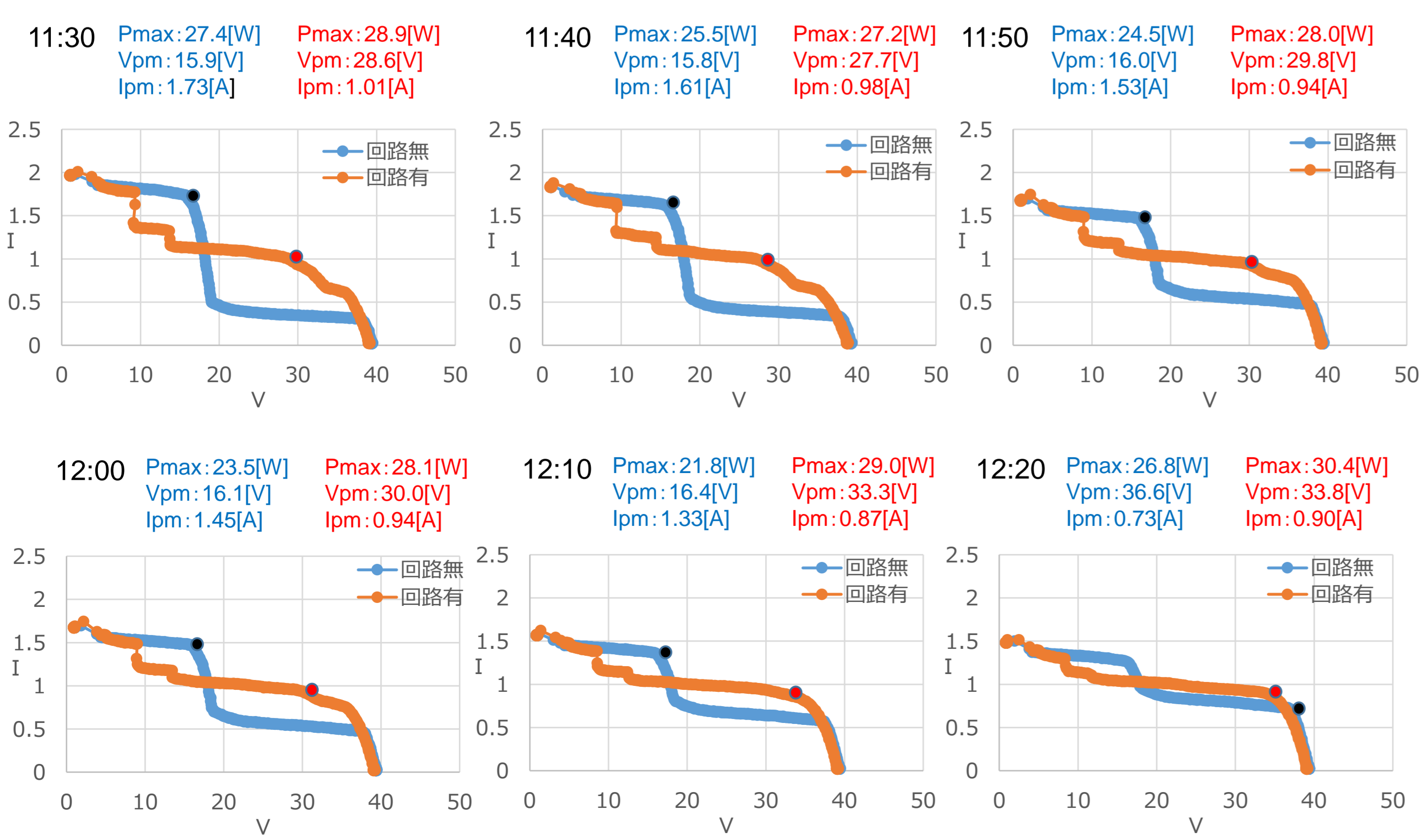


- 太陽電池1枚のスペック
- 2 クラスタ
  - $P_{max}$ : 50 W
  - $V_{pm}$ : 18 V
  - $I_{pm}$ : 2.7 A
  - $I_{sc}$ : 2.9 A
  - $V_{oc}$ : 20 V



ALLPOWERS ソーラーパネル  $P_{max}$ : 50 W × 2枚

## 結果

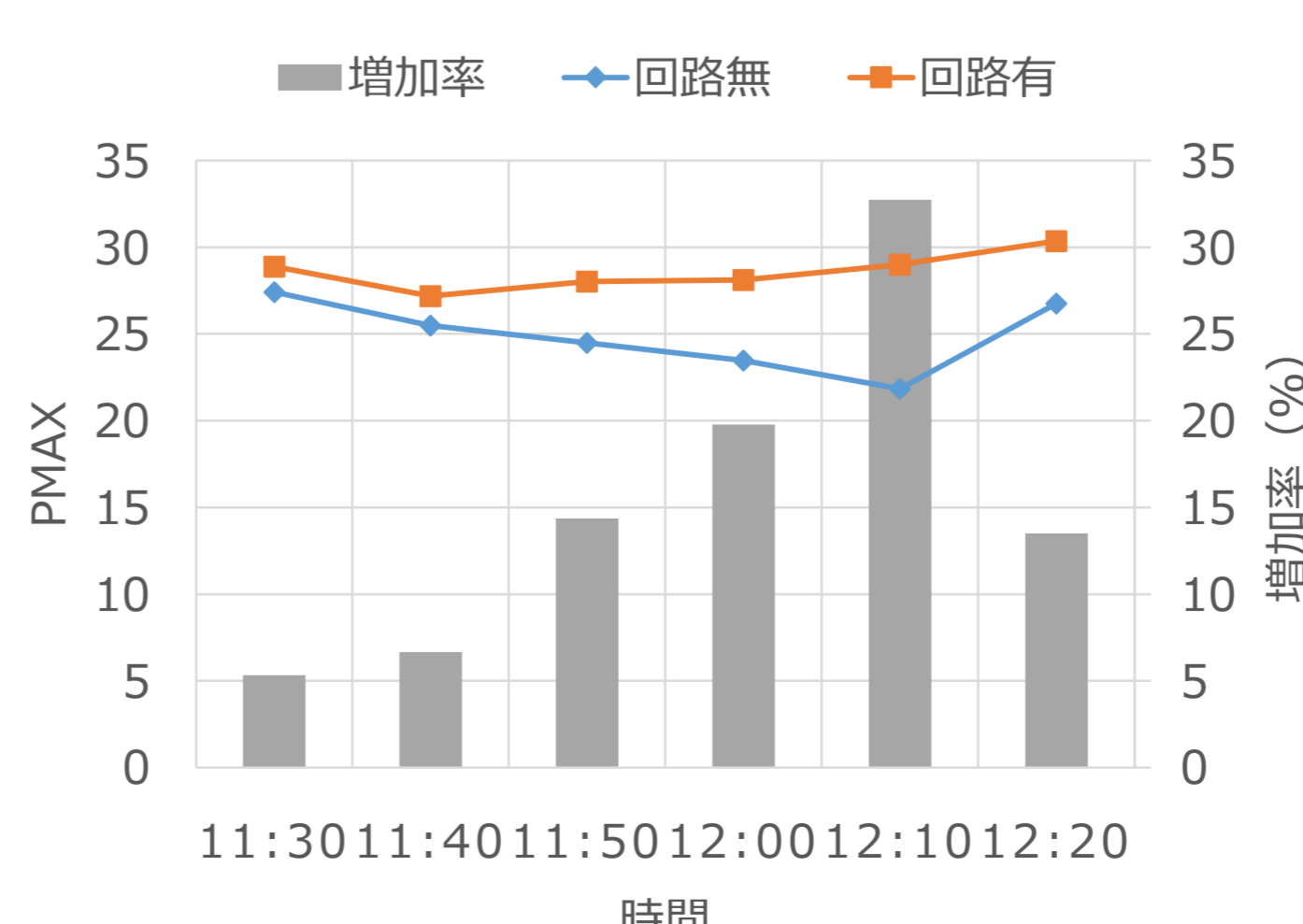


## まとめ

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、基礎実験を実施。

- 電力配分回路無ではモジュール間に出力電力差があると損失、電力配分回路有ではあまり変化がない。

- 電力配分回路有は電力配分回路無に対し最大32.7%の増加があった。



時刻	回路無 [W]	回路有 [W]	増加率 [%]
11:30	27.42	28.88	5.3
11:40	25.49	27.19	6.7
11:50	24.5	28.02	14.4
12:00	23.47	28.11	19.8
12:10	21.84	28.99	32.7
12:20	26.75	30.36	13.5

# 車載PVシステムの発電電力量測定：路線バスの場合

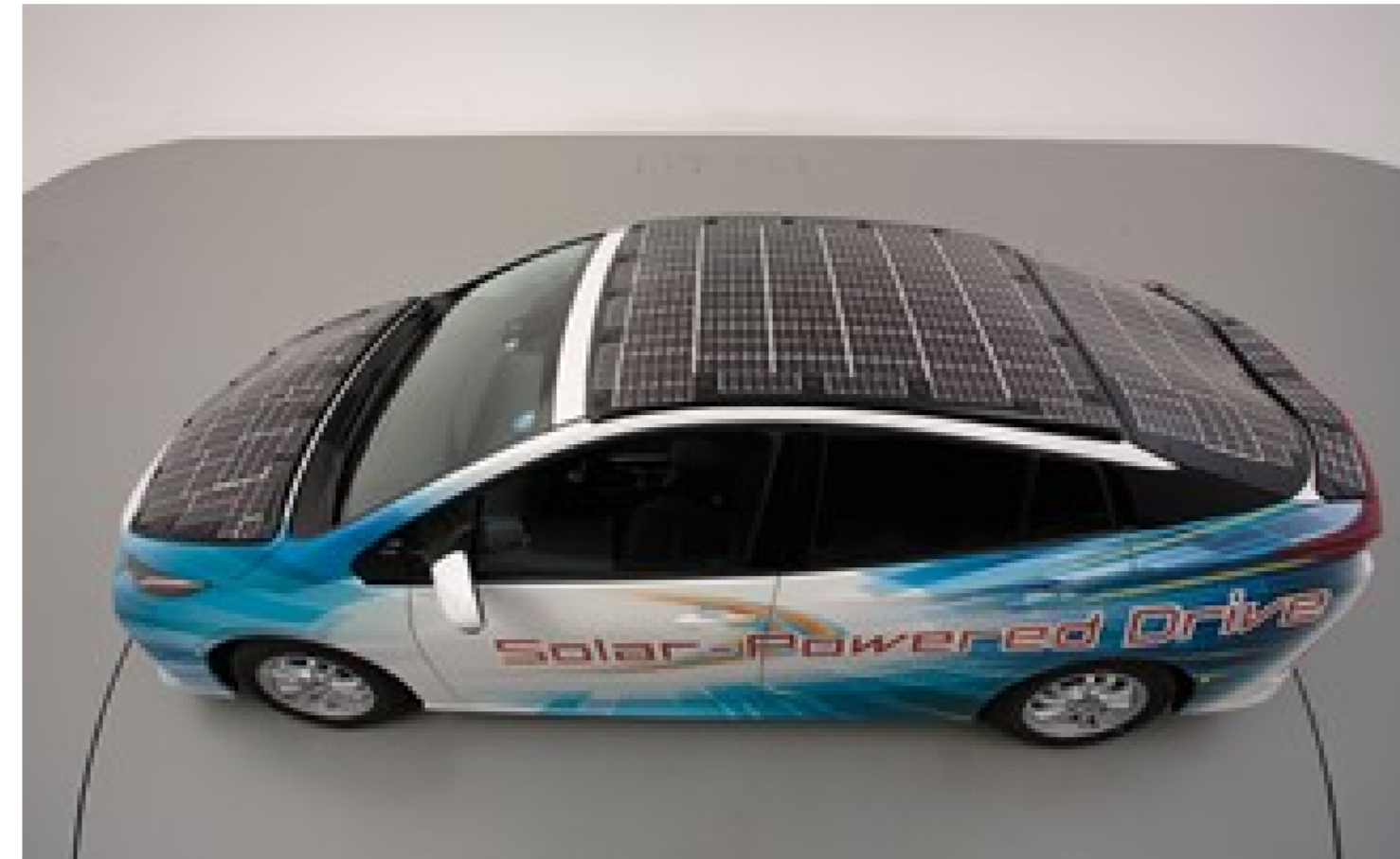
水野 英範<sup>1</sup>、伊野 裕司<sup>1</sup>、高遠 秀尚<sup>1</sup>、山田 隆夫<sup>2</sup>、高島 工<sup>2</sup>、大関 崇<sup>2</sup>  
 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター  
 1 太陽光チーム 2 太陽光システムチーム

## 車載PVの可能性

太陽電池(PV)の新たな応用先・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。

すでにトヨタプリウスPHVへの搭載例(オプション)もあるが、より大容量のPVを搭載することで駆動のメイン電源として活用することが可能と考えられる。

今般のクルマの電動化とPV搭載は、運輸部門のCO<sub>2</sub>排出量削減・低炭素化に向け親和性が高いと考えられる。



出典: トヨタ自動車

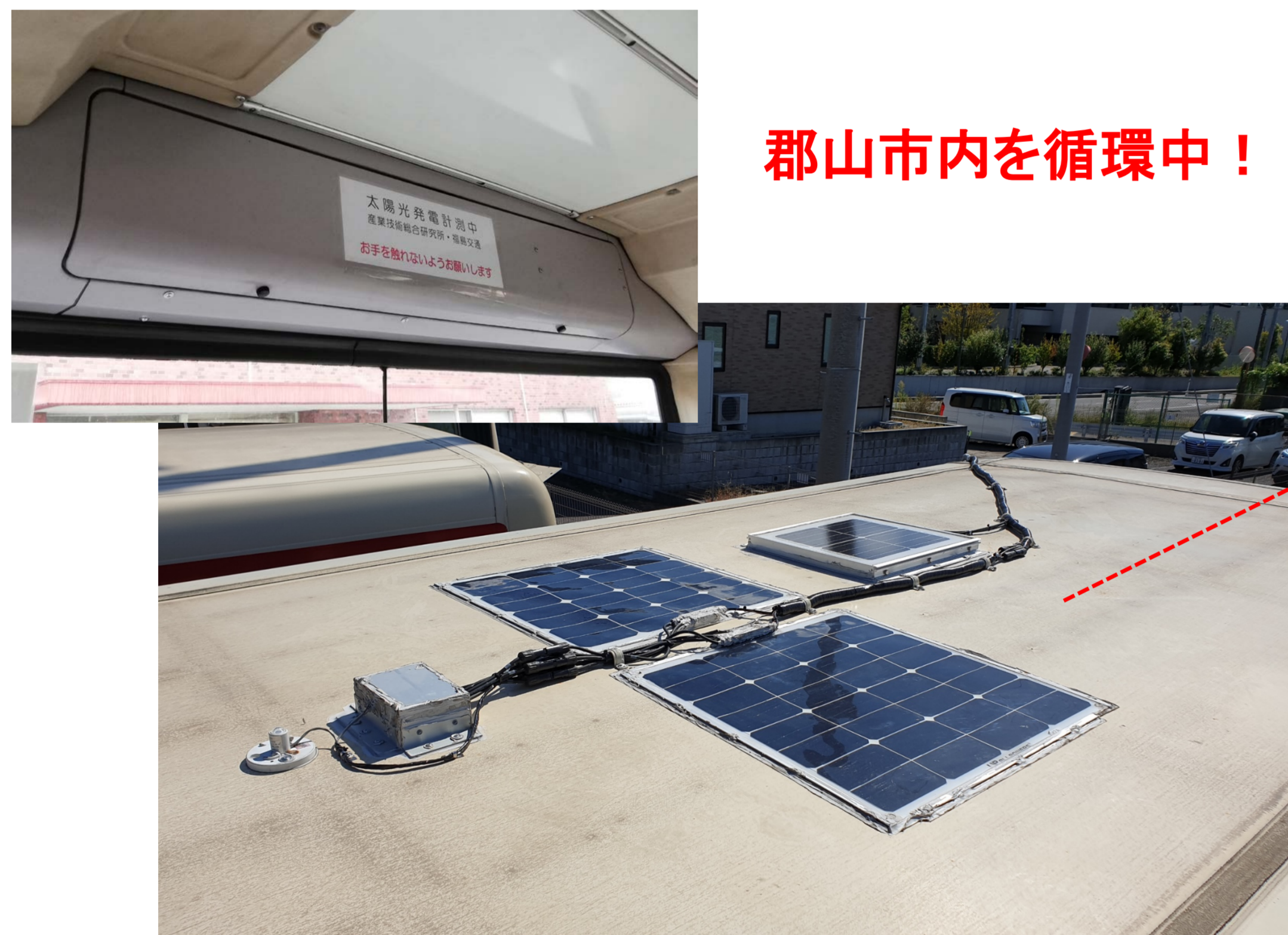


出典: Sharp

NEDOプロジェクトで開発されたPV搭載自動車(PHV、EV)

## 車載PVシステム(PV搭載バス)

我々は、車の中でも商用車をターゲットとしたPV搭載を検討している。福島交通株式会社の協力のもと、郡山市内を走る路線バスのルーフにPVモジュールを取り付け、発電量等の各種データ取得を行っている(令和2年度末まで予定)。



郡山市内を循環中!



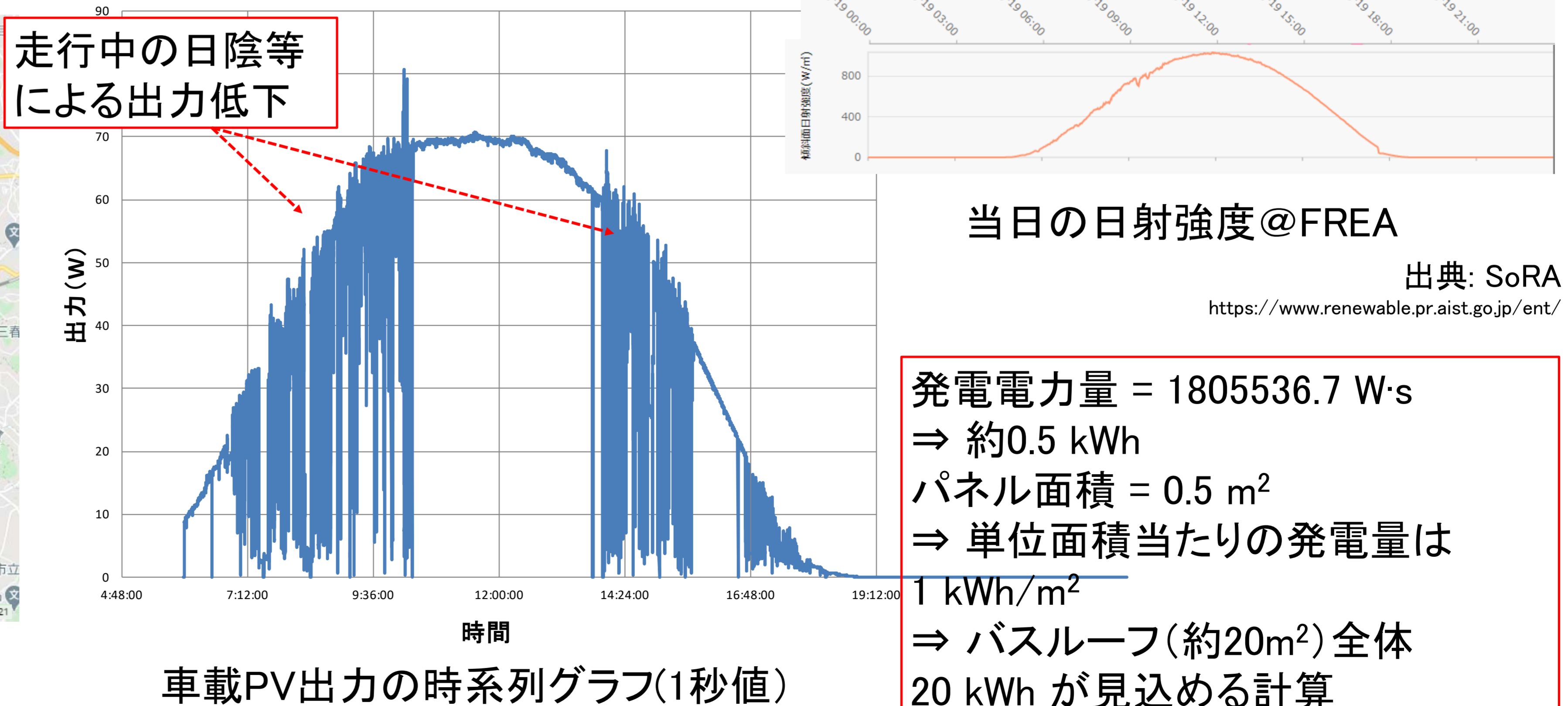
フレキシブルパネル(定格100W): MPPT制御、発電電力量・温度測定  
 アルミフレームパネル: 電流・温度測定、その他: 日射計、バスバッテリー計測

## 発電電力量測定

一例として、令和2年8月19日(水)のデータを示します。この日の天気は快晴、最高温度は33.4℃でした。



8/19の運行ルート(総移動距離: 約102 km)





# 電力データを用いた住宅用太陽光発電・蓄電システムの経済性評価

小澤暁人、本田智則

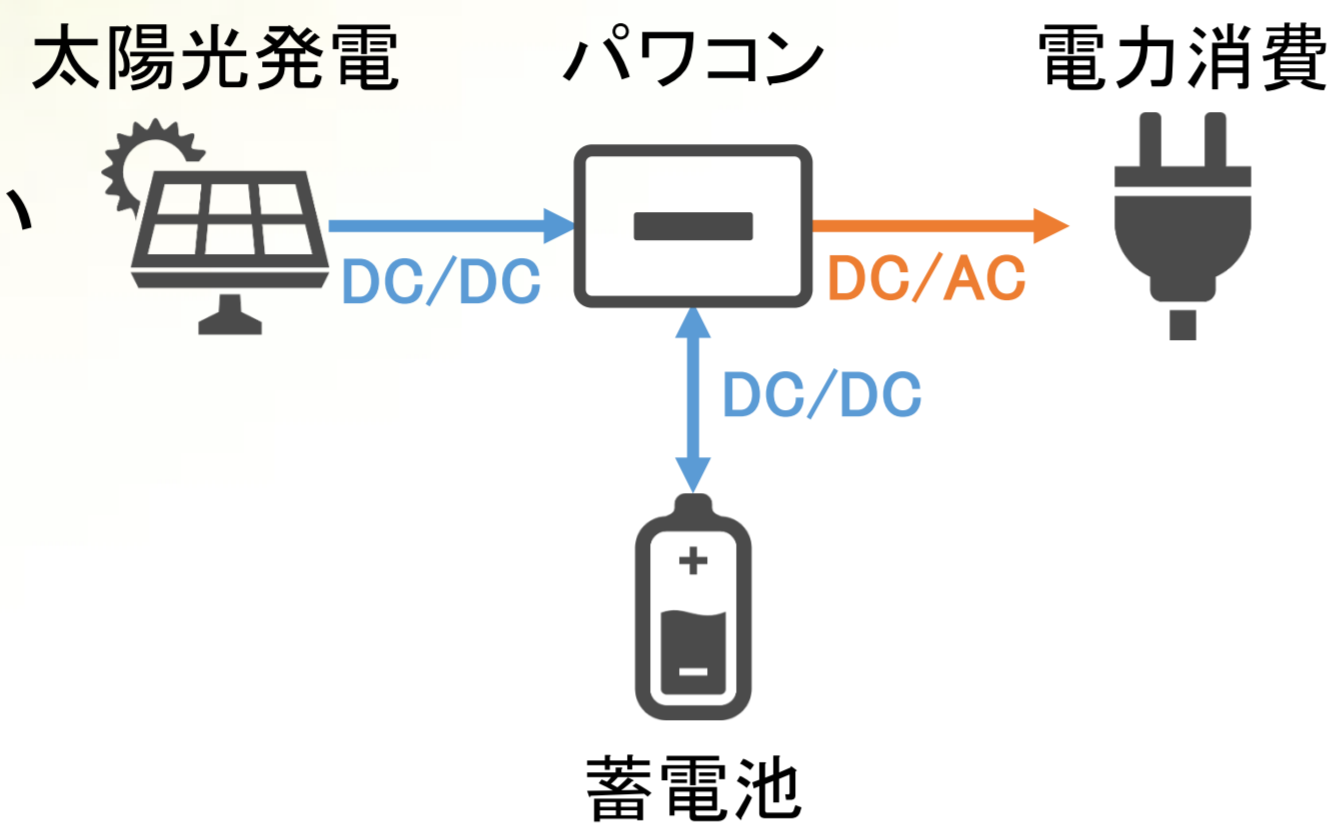
産業技術総合研究所 ゼロエミッション国際共同研究センター

## 研究背景

日本の家庭部門では東日本大震災以降のニーズの高まり、住宅用太陽光発電の普及、政府の助成事業を背景として定置式蓄電池の導入が堅調に増加を続けている<sup>1,2)</sup>。近年とりわけ注目を集めているのが、住宅用太陽光発電と蓄電池を組み合わせた「太陽光発電・蓄電システム」である。

### 太陽光発電・蓄電システムの利点

- ① 太陽光発電からの充電効率が高い
- ② 出力制御時の太陽光発電出力を充電できる
- ③ 停電時でも電力消費しながら充電できる
- ④ 蓄電池の運転モードが選択できる



## 目的

日本における住宅用太陽光発電・蓄電システムの利用に着目し、下表に示す様々な要因を考慮してシステムの経済性と電力自家消費を評価する

- 地理的要因: 消費電力量・太陽光発電量の実測データを用いて、様々な地域を対象とした分析を実施
- 技術的・社会経済的要因: 最新の動向を調査し、シミュレーションに反映
- 不確実性を有する要因: シナリオ分析・感度分析を実施し、異なる前提条件におけるシステムの経済性・太陽光発電の自家消費率への影響を評価

地理的要因	消費電力量 太陽光発電量
技術的要因	システム初期性能 経年による性能劣化 蓄電池の運転モード
社会経済的要因	電気料金プラン 電気料金の上昇 再エネ賦課金 売電価格 機器価格・補助金

## 手法

### 主要な想定

- シミュレーション期間: 25年間(2020年1月1日~2044年12月31日)
- 消費電力量・太陽光発電量: オール電化住宅およそ4万世帯で2012~2017年に実測したデータから、代表的な97世帯分をサンプリング
- 電気料金プラン: オール電化住宅向けの時間帯別料金プラン
- FIT制度の太陽光発電余剰電力の買取価格・期間: 21円/kWh・10年間

### システム構成<sup>3-5)</sup>

- 単結晶型ソーラーパネルとリン酸鉄リチウムイオン蓄電池を想定
- 初期性能・経年による性能劣化は下記の値を想定

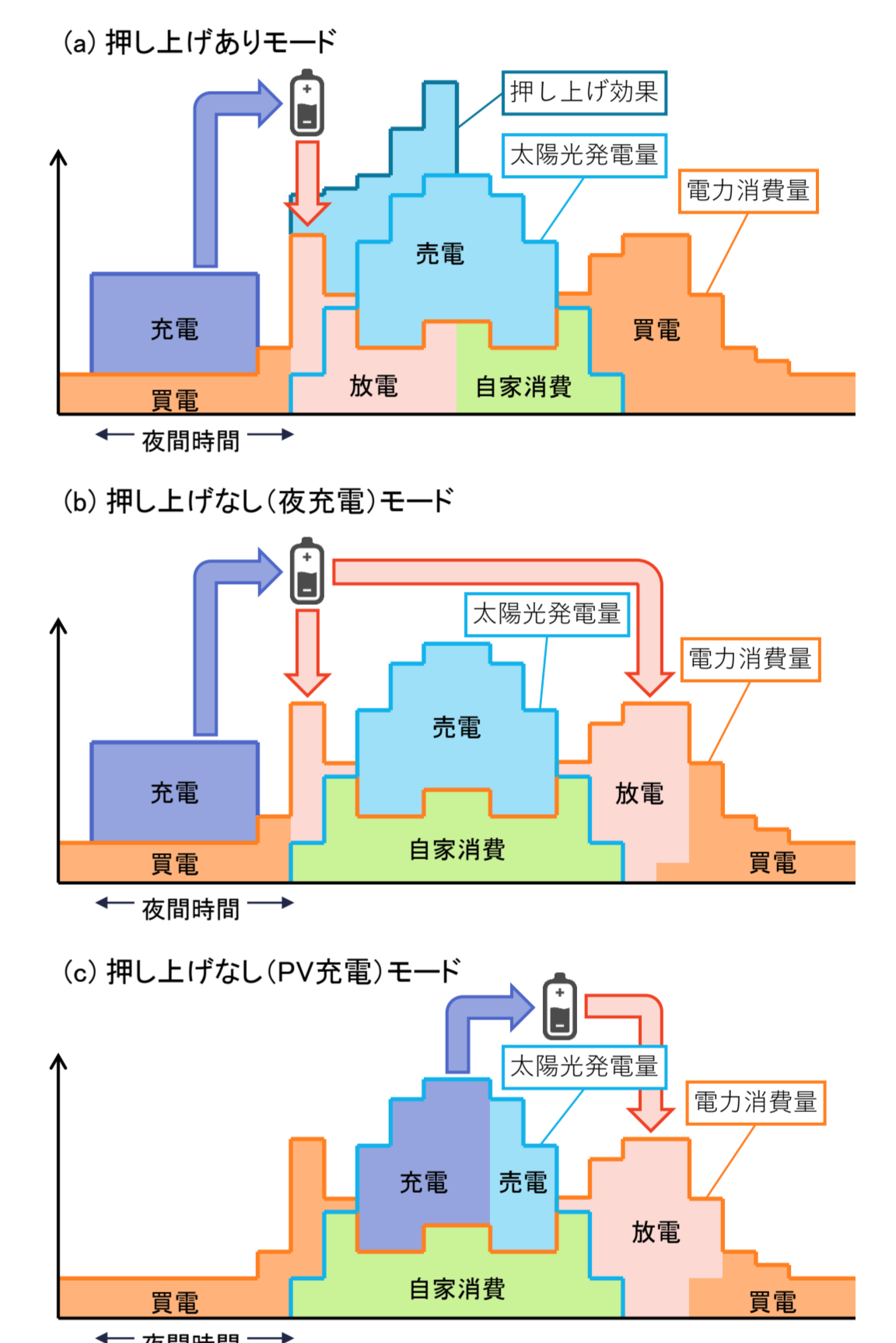
初期性能[単位]	設定値	経年による性能劣化[単位]	設定値
太陽光発電容量[kW]	4.50	太陽光発電出力低下率[%/年]	0.47~0.75
蓄電池定格容量[kWh]	5.65	蓄電池実効容量(12,000サイクル)[kWh]	2.88~3.84
蓄電池実効容量[kWh]	4.80	蓄電池充放電効率(12,000サイクル)	0.57~0.76
蓄電池充電能力[kWh/h]	2.20		
蓄電池放電能力[kWh/h]	3.00		
蓄電池充放電効率	0.95		

### 蓄電池の運転モード

- 押し上げありモード: 夜間時間に系統電力で充電して日中に放電することで太陽光発電の売電を多くする運転
- 押し上げなしモード: 太陽光発電を自家消費し不足分を蓄電池の放電で補うことで日中の系統電力の買電を少なくする運転

**不確実性分析** 以下の6個のパラメータのうち1個を低位~高位の間で変化させて残りの5つを中位に設定してシミュレーションを実施

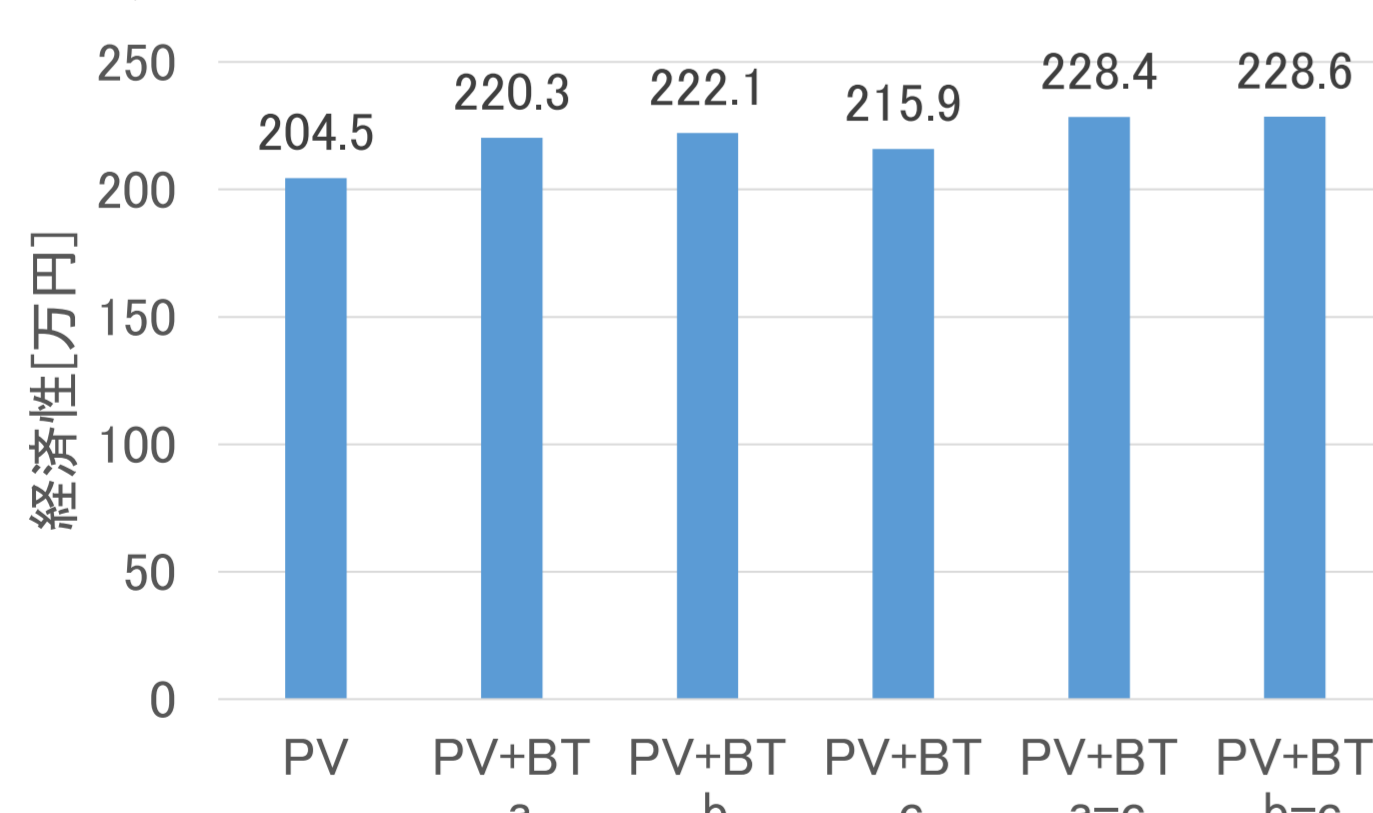
- 電力量料金単価の上昇[円/kWh/年]
- 将来の賦課金単価[円/kWh]
- 卒FIT後の売電価格[円/kWh]
- 太陽光発電出力低下率[%/年]
- 蓄電池実効容量(12,000サイクル)[kWh]
- 蓄電池充放電効率(12,000サイクル)



## 結果と考察

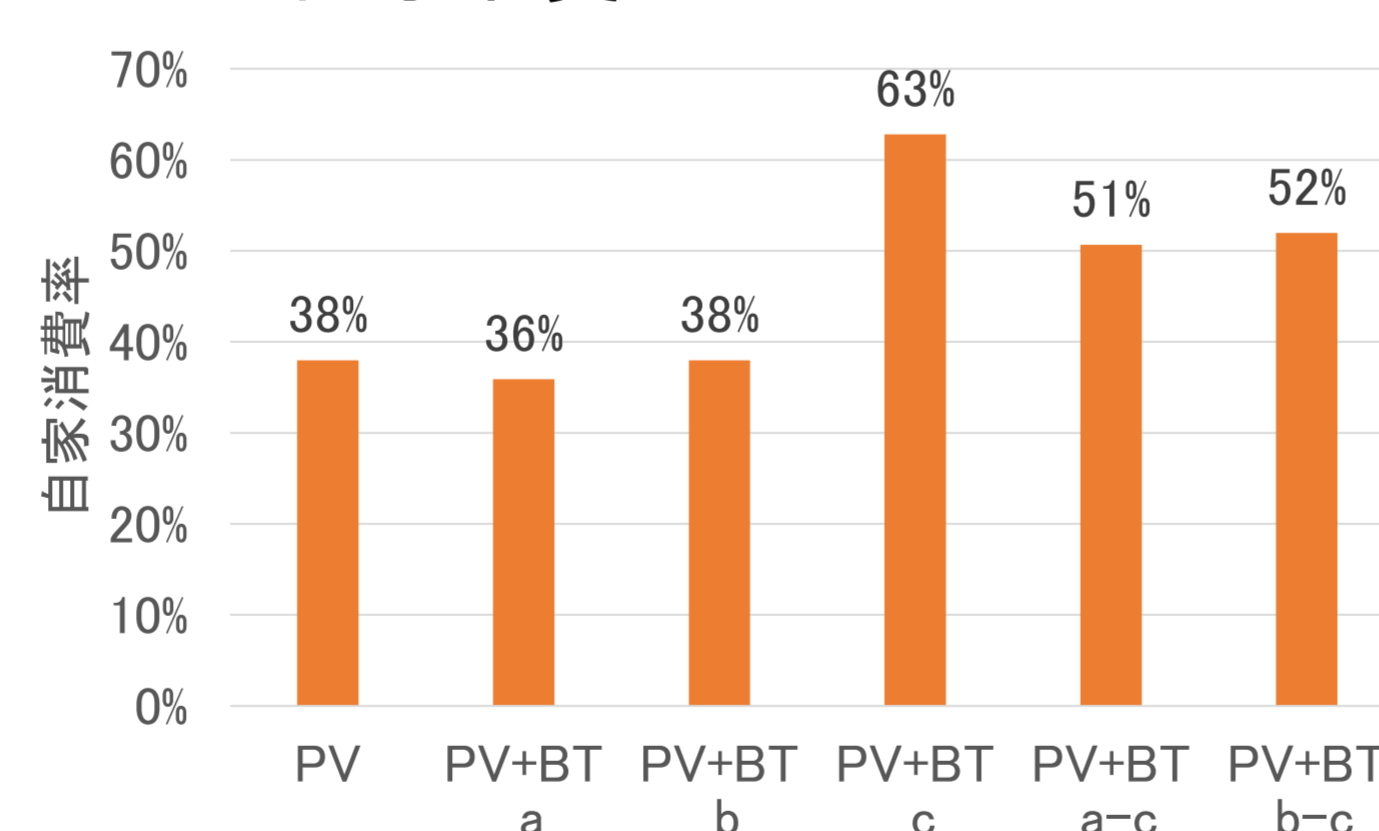
### 経済性

- 太陽光発電・蓄電池システムを利用することで、利潤は大きくなる。
- 卒FITのタイミングで運転モードを切り替える(PV+BT\_a-c・PV+BT\_b-c)場合、経済性は大きくなる。



### 太陽光発電の自家消費率

- 太陽光発電の余剰電力で充電する押し上げなし(PV充電)モードを採用する(PV+BT\_c・PV+BT\_a-c・PV+BT\_b-c)場合、発電量の半分以上が自家消費される。

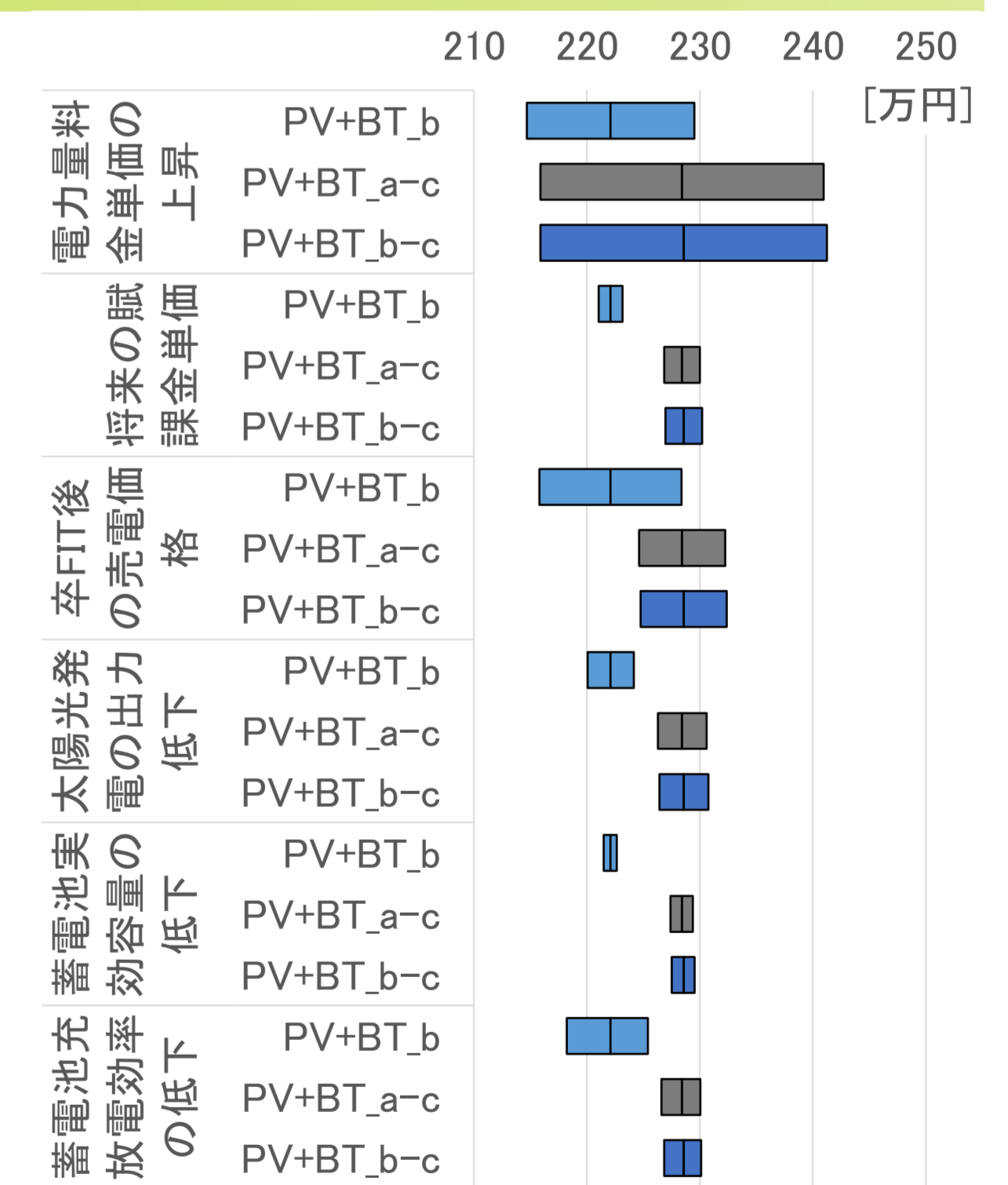


### 不確実性分析 経済性への影響

- 電力量料金単価の上昇が与える影響が最も大きく、次いで影響が大きいのは卒FIT後の売電価格である。太陽光発電・蓄電システムは電力売上の価格差で採算を取るため、これらのパラメータ変化はシステムの経済性に直結する。
- 興味深い点として、将来の賦課金単価がシステムの経済性に与える影響は小さい。

### 不確実性分析 自家消費率への影響

- 太陽光発電の出力低下や蓄電池実効容量の低下が多少影響する。



## 結論と謝辞

- システムの経済性について、卒FITのタイミングで蓄電池の運転モードを切り替えて太陽光発電の余剰電力を充電することで経済性は大きくなる。経済的な運転モードや投資回収条件は、地域によって異なる。
- 太陽光発電の自家消費率について、余剰電力を充電する運転モードを選択することで発電量の半分以上を自家消費できる。
- 感度分析の結果について、電力量料金単価の上昇や卒FIT後の売電価格、蓄電池容量保持率の大幅低下がシステムの経済性に大きく影響する。一方、自家消費が増加することで将来の賦課金単価が減少してもシステムの経済性は損なわれない。

本研究はJSPS科研費JP18H04155, JP18K14171の助成を受けたものです  
本研究の実施にあたって、住宅メーカーからデータの提供を受けました

## 参考文献

1. IRENA; Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030, p.132, (2017)
2. 日本電機工業会; JEMA 蓄電システムビジョン Ver.5, p.40, (2020).
3. 小澤暁人, 本田智則; 電力データを用いた家庭用太陽光発電・蓄電システムの経済性評価, エネルギー・資源学会論文誌 41(6) pp.254-265 (2020).
4. 崔誠佑, 佐藤梨都子, 石井徹之, 千葉恭男, 増田淳; 多数年の屋外曝露による各種太陽電池モジュールの経時変化特性, AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017.
5. 資源エネルギー庁; エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス検討会(第5回) 資料8定置用蓄電池の価格低減スキーム, p.4, (2017).

# 関東圏における、FITに支えられたメガソーラー増加の衛星画像を用いた検証

神山徹、Nevrez Imamoglu、今井正堯、中村良介

産業技術総合研究所 人工知能研究センター

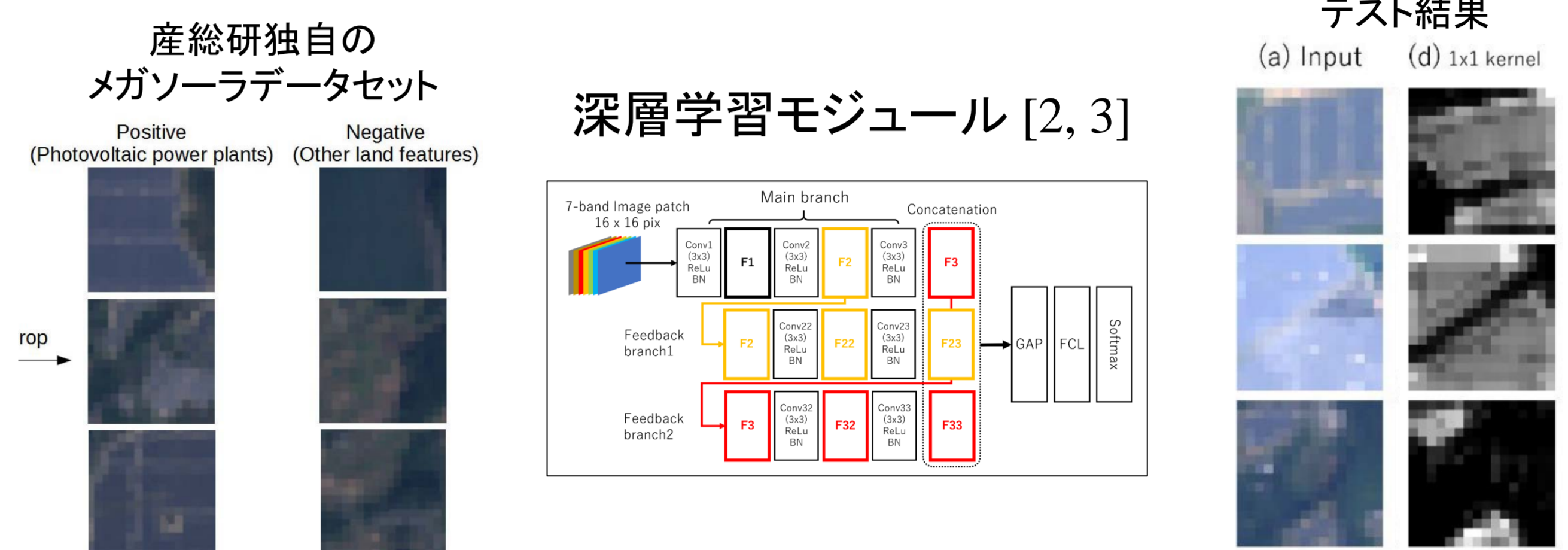
## 研究の目的

メガソーラー施設の増加を衛星画像を用いて  
広範囲、かつ網羅的に探査  
⇒ FITによる太陽光発電導入量の増加を検証

- FITにより太陽光発電導入量の大幅に増加
- 導入量の統計は事業者の申請ベース  
⇒ 「観測」により実態が報告された例はない
- 広範囲を一度に観測できる衛星画像と、大量のデータを網羅的に扱える深層学習技術の組み合わせにより調査

## 実験

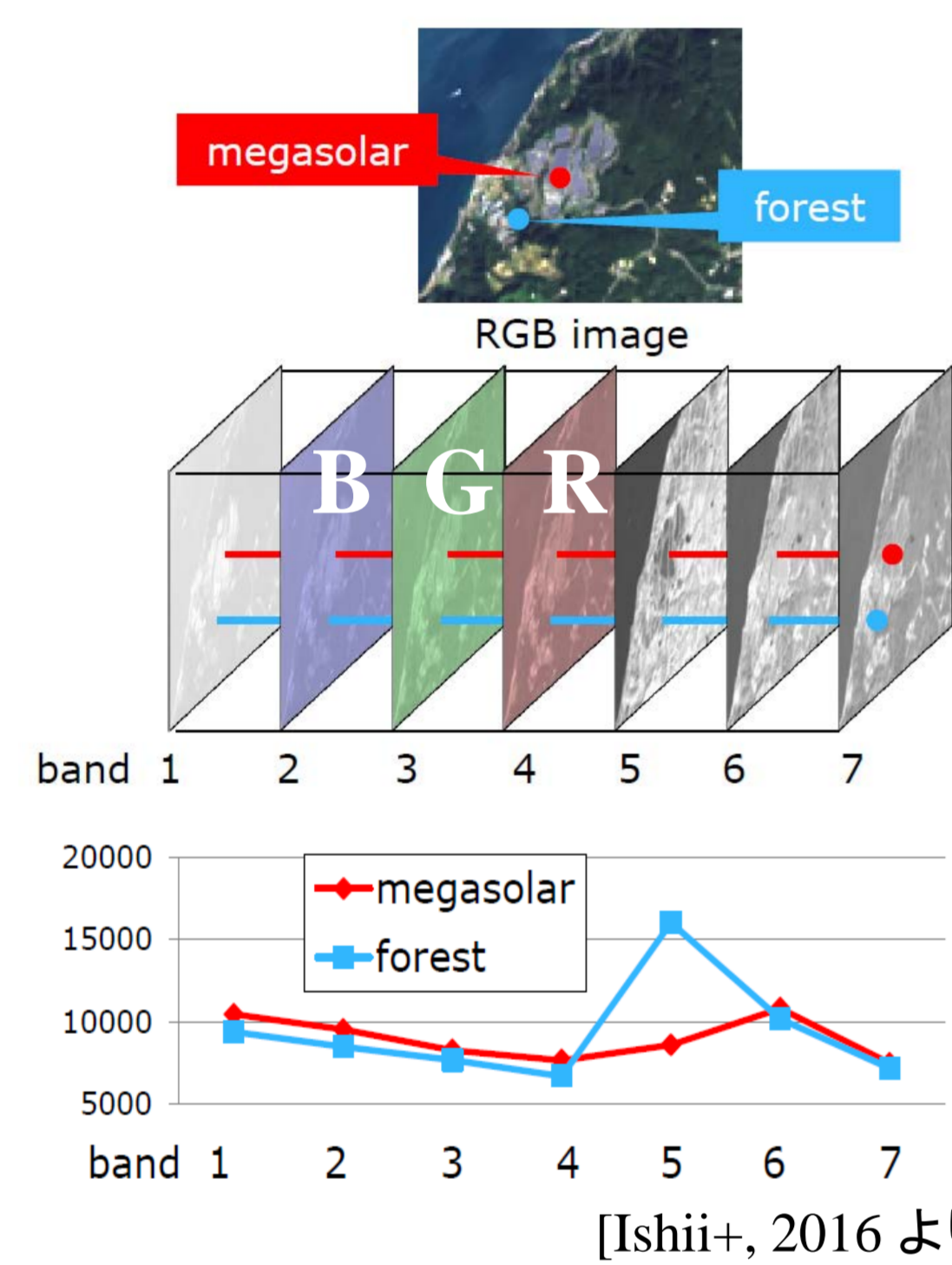
- メガソーラー施設にラベル付けをした衛星画像の教師データの準備
- 精度を高めるFeed back構造を持つ独自深層学習モジュールの開発
- 90%以上の精度でメガソーラー施設を画素単位で検出 [2, 3, 4]



## 結果

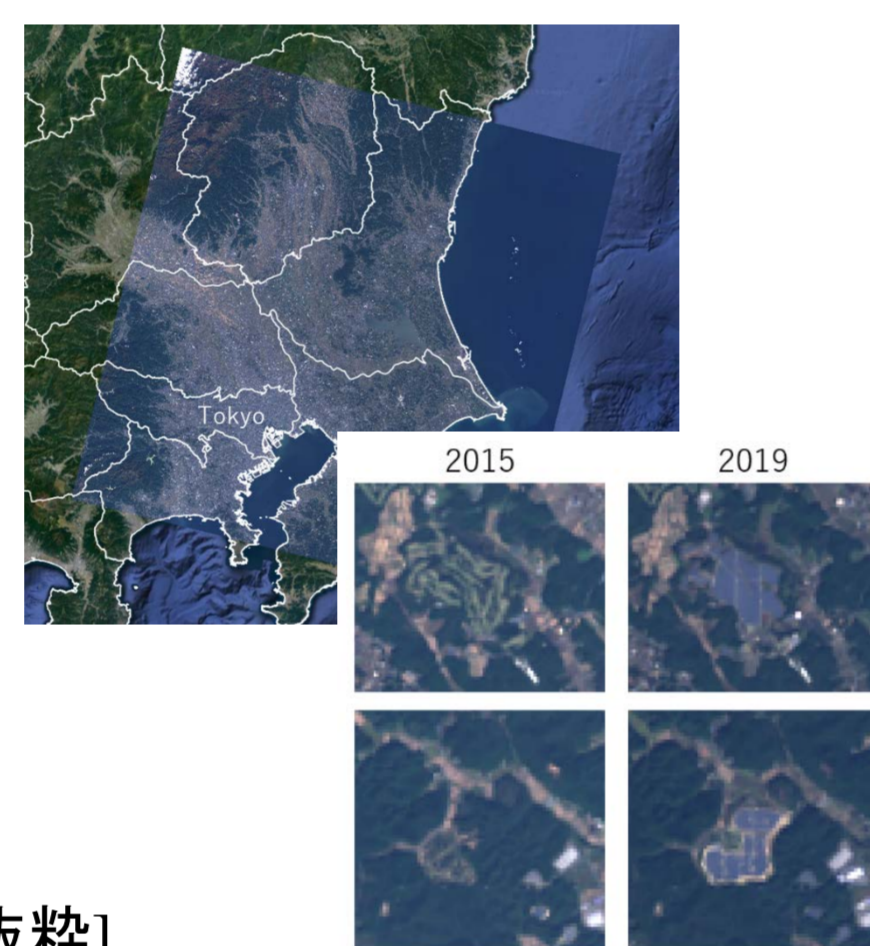
### Dataset

### Landsat8号観測画像



- 2013年～2019年を利用
- 30 m分解能 => 1 MW以上のメガソーラー施設検出に十分
- 紫外・可視・近赤外による観測 [1]  
⇒ 人間の知覚以上の判断材料 [3]

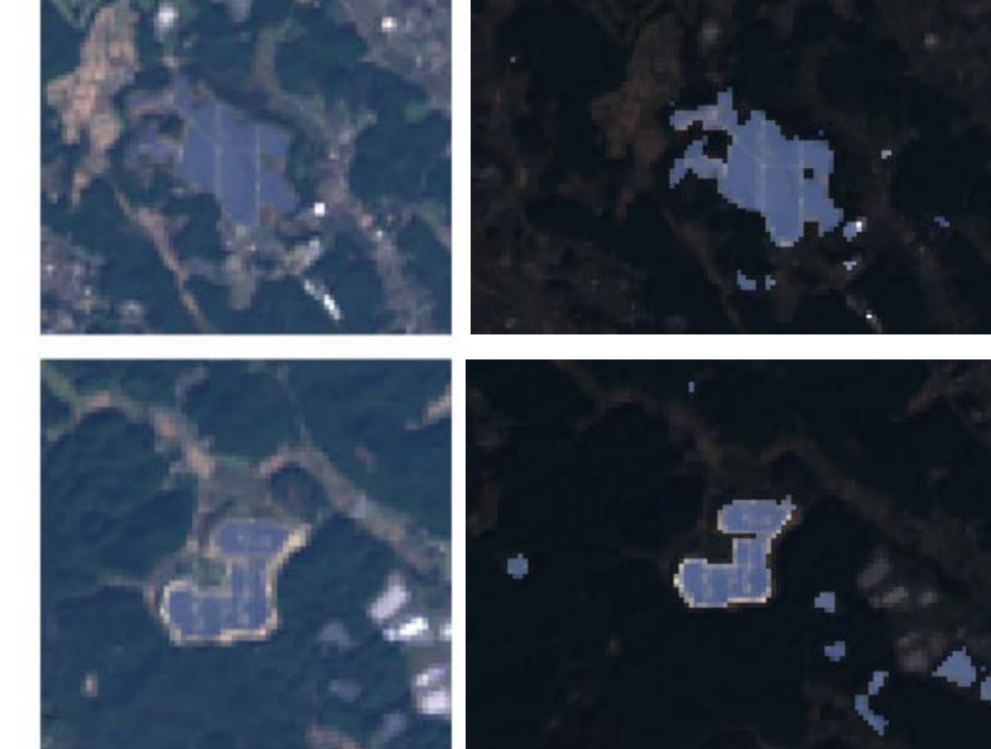
### Study area



- 関東広域  
~40,000 km<sup>2</sup>
- 平野部、山間部ともに開発によるメガソーラー施設の建設が見られる

### 検出例

2019 検出結果



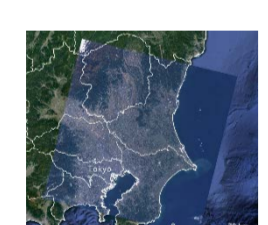
- 画素単位でのメガソーラー施設検出に成功  
⇒ ローカルな座標も情報が得られている
- 複数年の結果を比較することで、新規の設置、開発の進捗まで確認



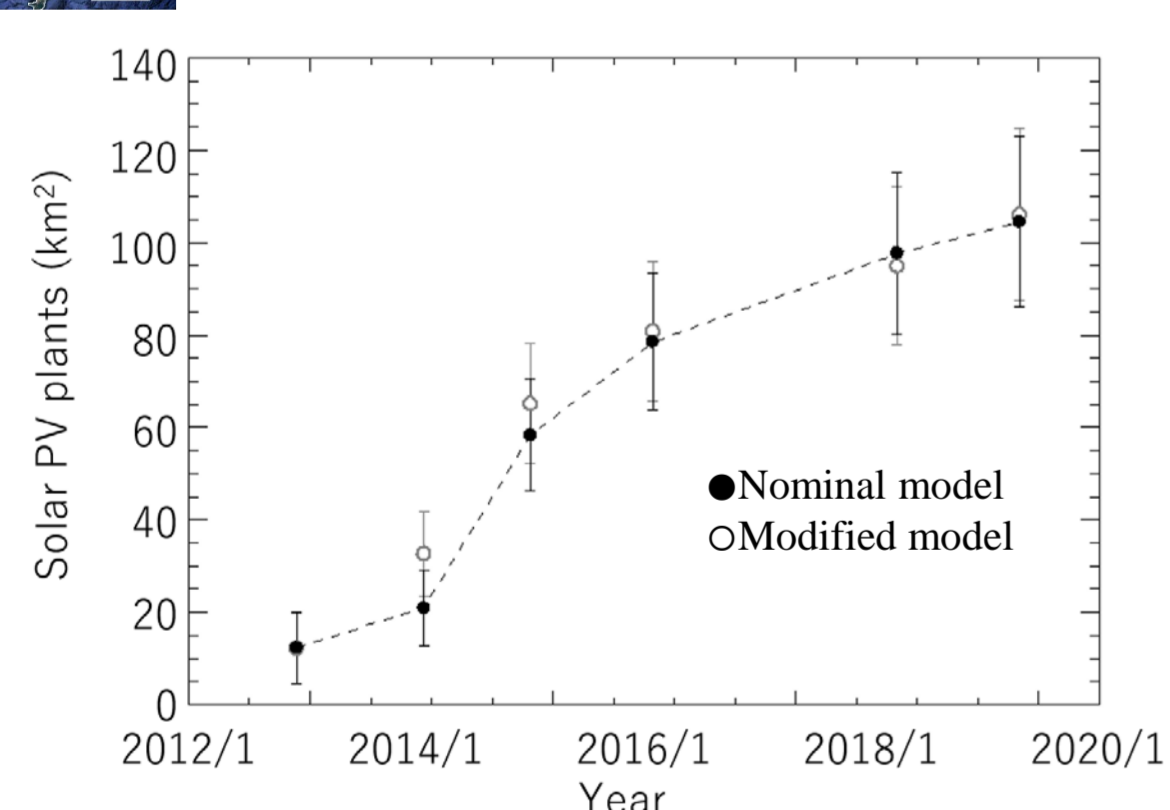
\*背景は2019年のGoogle Earth画像

## 考察

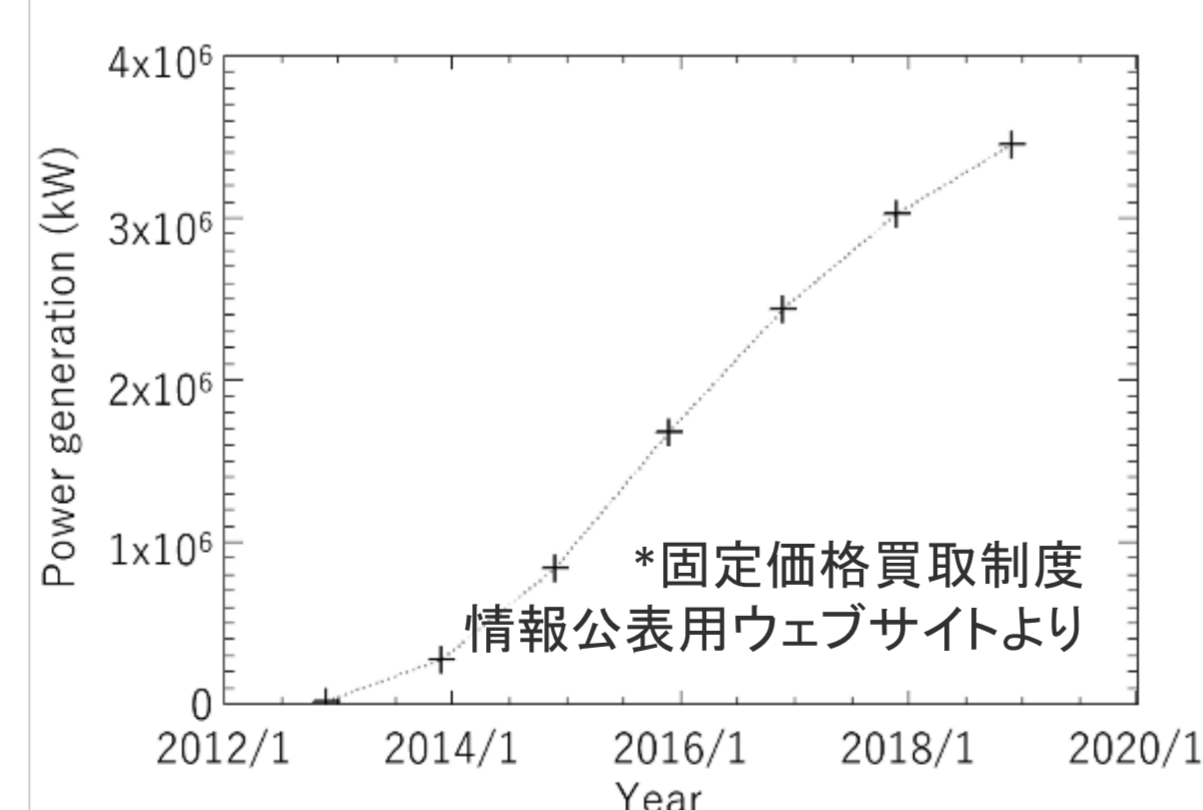
### 報告されている統計量との比較



衛星データから見積もられた関東圏の太陽光パネル総面積

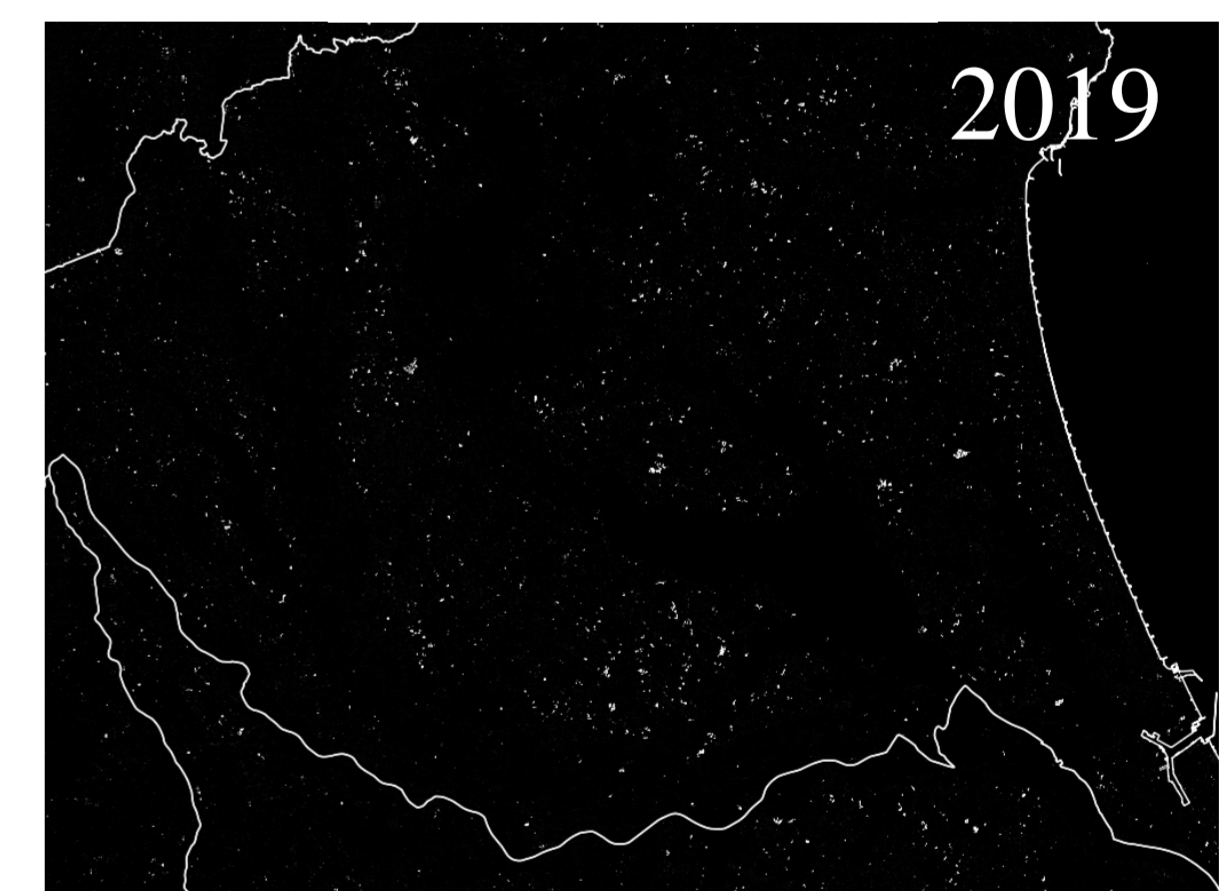
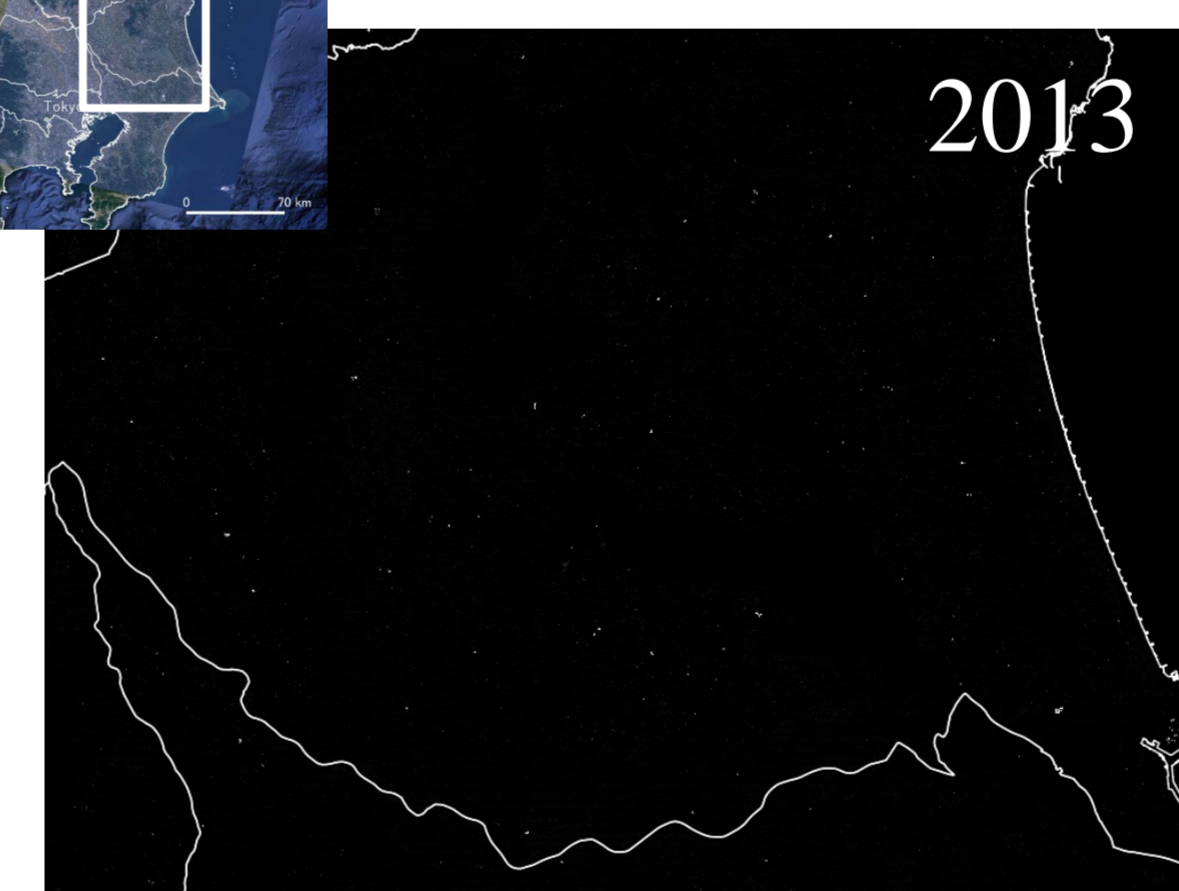
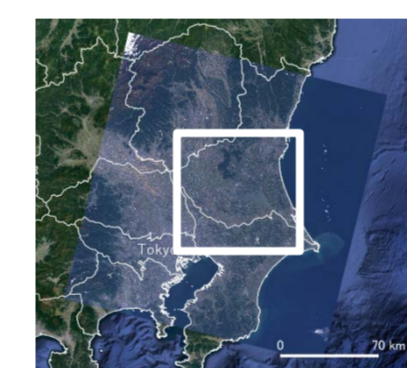


FITに基づく太陽光発電導入量 (1 MW以上の施設, 関東圏)



- 政府統計と整合的な結果: 2012年からの急激な増加  
2016年以降の鈍化 ⇒ 観測から導入の実際を確認

### メガソーラー施設の分布変化



White pixels: Detected mega-solar PV power plants

- 現在のメガソーラー施設はほぼFIT後の導入
- 広域にわかってまんべんなく敷設 => 土地利用の転用が促進された

## 結論

- 衛星画像+深層学習により、一つ一つのメガソーラー施設の位置を特定する形で広範囲の敷設状況を確認
- 推定されたメガソーラー施設の総面積変化は政府統計と整合的 ⇔ 観測により政策の影響を確認可能
- 発電施設の分布を提供可能  
⇒ 実態に合わせた発電予測に貢献可能

## 参考文献

- [1] D. Roy et al., "Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research," *Remote Sensing of Environment*, 145, pp. 154172, 2014.
- [2] N. Imamoglu, et al., "Solar Power Plant Detection on Multi-Spectral Satellite Imagery using Weakly-Supervised CNN with Feedback Features and m-PCNN Fusion," *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, pages 183.1-183.12. London, September 2017.
- [3] T. Ishii, E. et al, "Detection by Classification of Buildings in Multispectral Satellite Imagery," *Proceeding of Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR)*, 2016.
- [4] T. Kouyama et al., "Verifying Rapid Increasing of Mega-solar PV power plants in Japan by Applying a CNN-Based classification method to Satellite images", *Proceeding of IEEE IGARSS*, 2020

# 全天カメラ画像を用いた画像予測機械学習 モデルによる太陽光発電電力量予測

今井正堯<sup>1</sup>、神山徹<sup>1</sup>、大関崇<sup>2</sup>、大竹秀明<sup>2</sup>、佐藤光輝<sup>3</sup>

1 産業技術総合研究所 人工知能研究センター、  
2 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター、  
3 北海道大学

## 研究背景

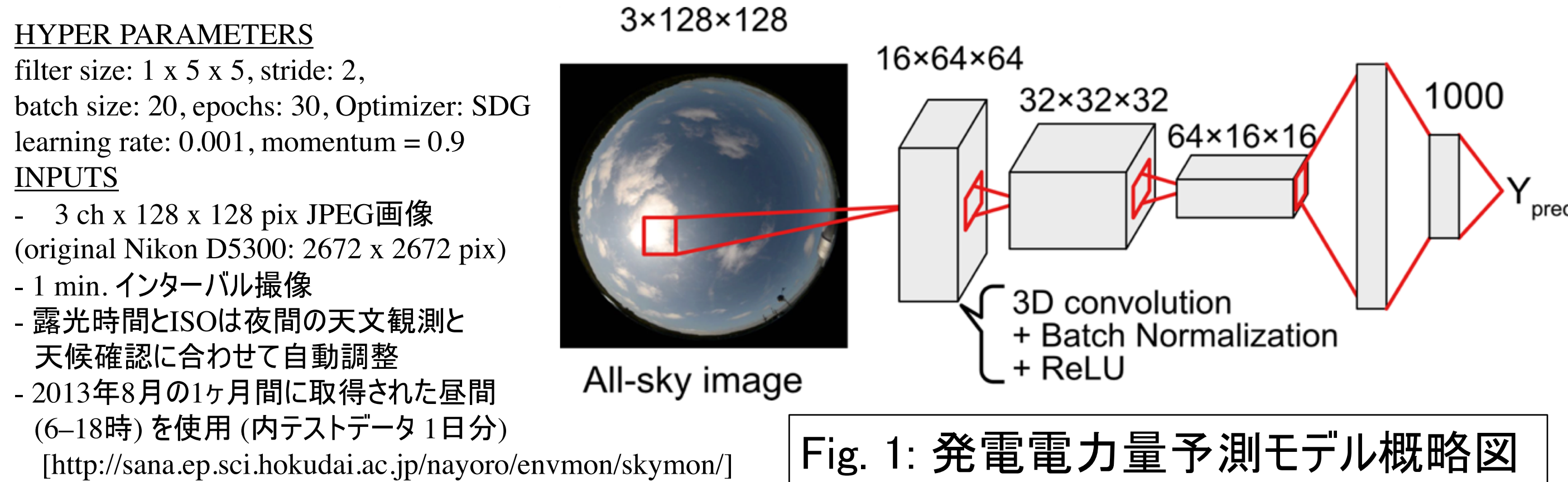
- 近年、太陽光パネルのコスト低下と気候変動リスクに対する警戒から、持続可能な発電方式として太陽光発電に対する期待が高まっている。
- 世界の太陽光発電電力量は2019年末の時点で電力需要の3% (627 GW)を超え、国内では九州電力が晴天時には全需要の9割に迫る電力を太陽光発電で賄うまでになっている。
- 一方、電力の効率的な利用には、供給と需要のバランスを最適化した送電網“スマートグリッド”の構築が必要不可欠であり、気象条件に大きく左右される太陽光発電電力量の正確な将来予測が鍵である。
- 機械学習を用いた先行研究では、発電電力量の時系列データから日(時間)毎の予測で二乗平均平方根誤差 (RMSE)で  $\sim 30\text{--}40 \text{ Wm}^{-2}$  の予測を実現 [Sfetsos et al. (2000), Cao et al. (2005)].
- 画像を用いた深層学習によって、5–20分先の予測を  $\sim 100 \text{ Wm}^{-2}$  の精度で実現した例も存在 [Lauret et al. (2015)].
- しかし、依然として曇りの天候時には分毎の予測精度は現状  $200\text{--}400 \text{ Wm}^{-2}$  程度であり、この短期予測精度の向上が重要な課題である。

## 研究目的

- 太陽光発電電力量を  $< 10$ 分時間分解能で長期的に予測。
- 地表への日射量に最も影響を与える全天の雲分布を捉えた魚眼カメラ画像と深層学習モデルを用い、日射量の再現実験を実施。
- 現在の開発中の学習モデルは以下の2つのパートで構成されている。  
第1段) 先行研究でも採用された、全天カメラ画像と現在の発電電力量を結びつける深層学習モデル  
第2段) 最先端の動画予測モデルを導入し、将来の全天の雲位置変化の可視化する深層学習モデル。
- 最終的には両パートを結合させることで、機械が出力する発電電力量の推移を利用者側が予測画像から視覚的にも解釈できるモデルを目指す。=> 学習過程や予測の妥当性検証ができること期待。
- 本発表では、1, 2段目のモデルを独立して学習させた結果を紹介し、今後の展望について議論する。

## 開発モデル1: 全天カメラ画像からの発電電力量予測モデル

入力画像) 北海道大学附属天文台取得の全天画像 (1分毎画像)  
予測・出力値) 同天文台で取得された日射計の照度 (1分値)  
学習モデル) 3D convolutionをベースとした深層学習モデル (Fig. 1)  
→ 全天カメラ画像を取得した瞬間 (1分先) の日射量推定を実施。



## <結果>

晴天時で、平均RMSE  $\sim 50 \text{ W m}^{-2}$  (実測値とのズレ  $< 5\%$ )  
曇天時で、 $150\text{--}200 \text{ W m}^{-2}$  (実測値とのズレ  $20\text{--}30\%$ )

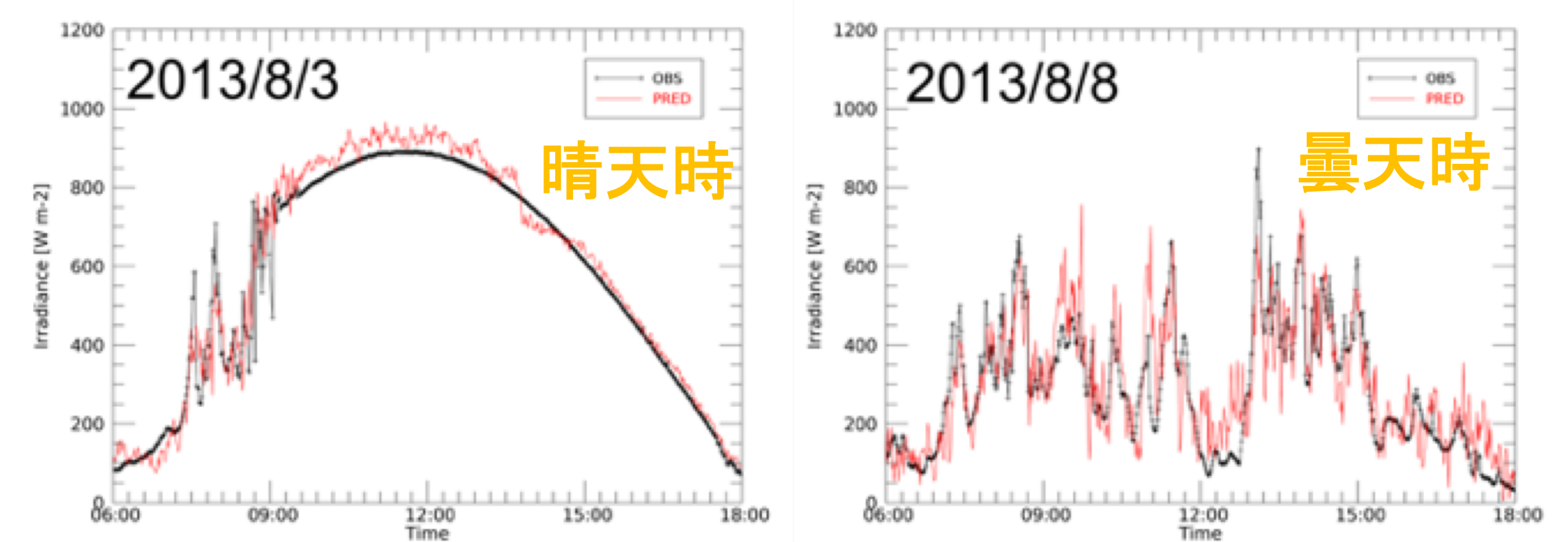


Fig. 2: 発電電力量予測結果例。黒線が実際の照度、赤線がモデル出力値

## 開発モデル2: 将来の全天カメラ画像予測

- モデル1では、入力画像から将来の日射量を推定させる場合、予測時間を長くするほどRMSEが単調増加 (10分先予測で倍以上精度悪化)  
→ 最新の動画予測モデル (E3D-LSTM, Wang et al., ICLR 2019) を用い、全球雲分布の変化を可視化、予測精度の向上と発電電力量の急激な変化を説明・理解できる新しい予測モデルを開発中。

- L1 lossを使用 (オリジナルモデルL1+L2 loss)
- 4つのE3D-LSTM層を結合
- 3D-Conv:  $2 \times 5 \times 5$  (time x height x width)
- 隠れ層: 64 each
- Temporal stride: 2
- 入力データ: 3 ch x 128 x 128 pix x 780 frames in a day (6–18時).
- Training: 27 日分, Test 4日分

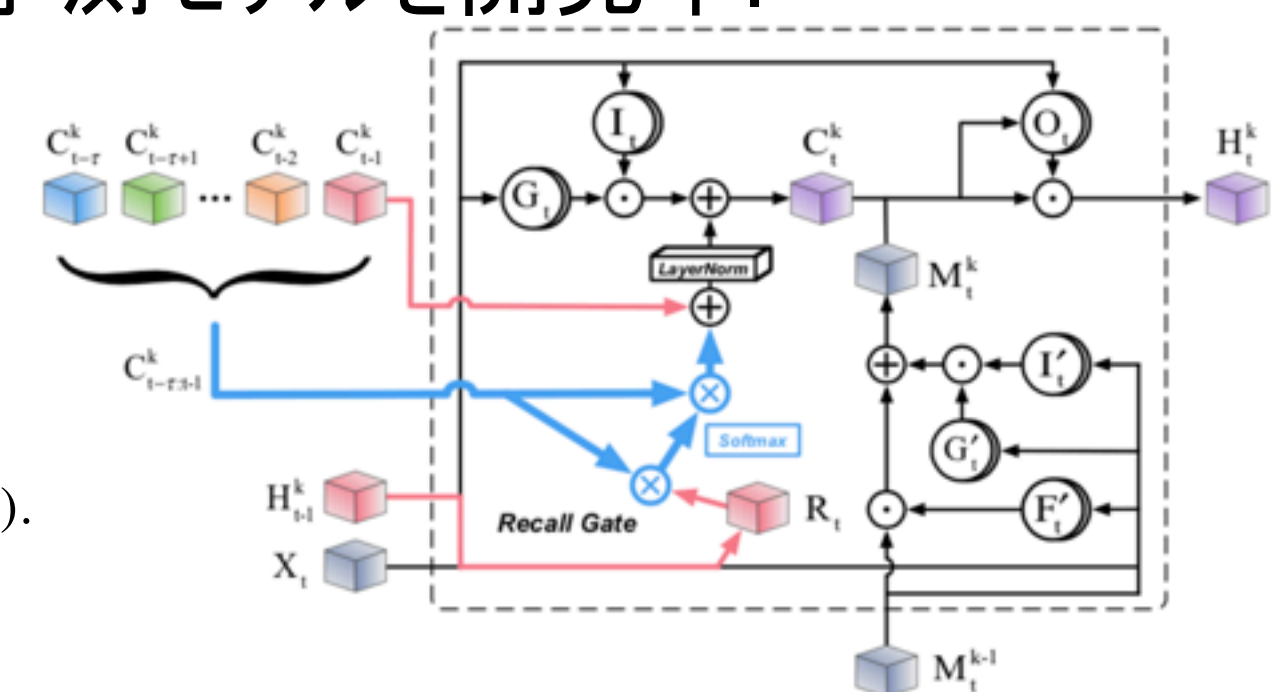


Fig. 3: E3D-LSTMモデル概略図。LSTMと同様の構造をもちつつ記憶セル (M) に複数の時刻ステップの情報を保持することで過去長期に遡った動画予測が可能。

- 10 フレーム (10分間) の連続全天カメラ画像を入力とし、続く連続した10分先までの全天カメラ画像を再現。
- 初期成果として、動画予測モデルを用いた全天画像の学習に成功、将来のおおよその雲分布の再現をした画像の生成を確認。
- 予測画像の雲は全体的にのっぺりしており、微細構造の再現が課題

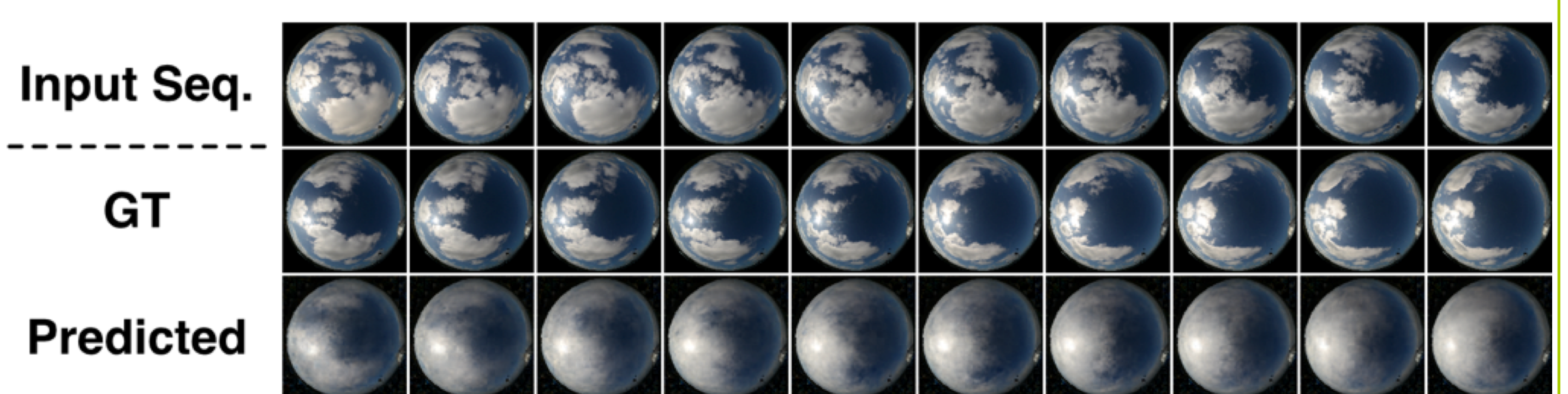


Fig. 4: 動画予測モデルによる全天雲分布再現結果

## 結論と今後

- モデル1 開発では、先行研究と同等の精度で画像からその時刻における日射量 (発電電力量) を推定・予測ができることを確認。
- 同モデルでは、予測時間を長くすると精度が悪化。数分先の全天の雲位置を予測するための第2段目のモデル開発を並行して実施。
- 最先端の動画予測モデル E3D-LSTMを用いることによって雲の流れを予測した将来の全天画像生成に成功した。
- 今後、日射量に影響する太陽方向の雲を正確に再現するために、微細な雲構造の学習を強化するモデル開発を継続する。  
(Loss設計の見直し、モデル内にGANの導入などを検討中)
- 最終的には、第1段目の3D convolutionと、第2段目のE3D-LSTMの結合モデルによって、高精度の長期発電電力量予測を目指す。

## 参考文献

- A. Sfetsos, A.H. Coonick, Univariate and Multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques, Solar Energy, 68, 169–178 (2000).
- S. Gao, Cao, J.: Forecast of solar irradiance using recurrent neural networks combined with wavelet analysis. Appl. Therm. Eng. 25 (2–3), 161–172 (2005).
- P. Lauret, C. Voyant, T. Soubdhan, M. David, P. Poggi A benchmarking of machine learning techniques for solar radiation forecasting in an insular context Sol Energy, 112. 446–457 (2015).
- Yunbo Wang, Lu Jiang, Ming-Hsuan Yang, Li-Jia Li, Mingsheng Long, and Li Fei-Fei. Eidetic3D LSTM: A model for video prediction and beyond. In International Conference on Learning Representations (ICLR), 2019

# 太陽光発電を含めたエネルギーマネジメントにおけるメソアンサンプル予報の利用検討

大竹秀明<sup>1,5</sup>、大関崇<sup>1</sup>、高松尚宏<sup>1</sup>、高根雄也<sup>2</sup>、森友輔<sup>3</sup>、若尾真治<sup>3</sup>、  
本田有機<sup>4</sup>、計盛正博<sup>4</sup>、仲江川敏之<sup>5</sup>

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 気象庁、5 気象研究所

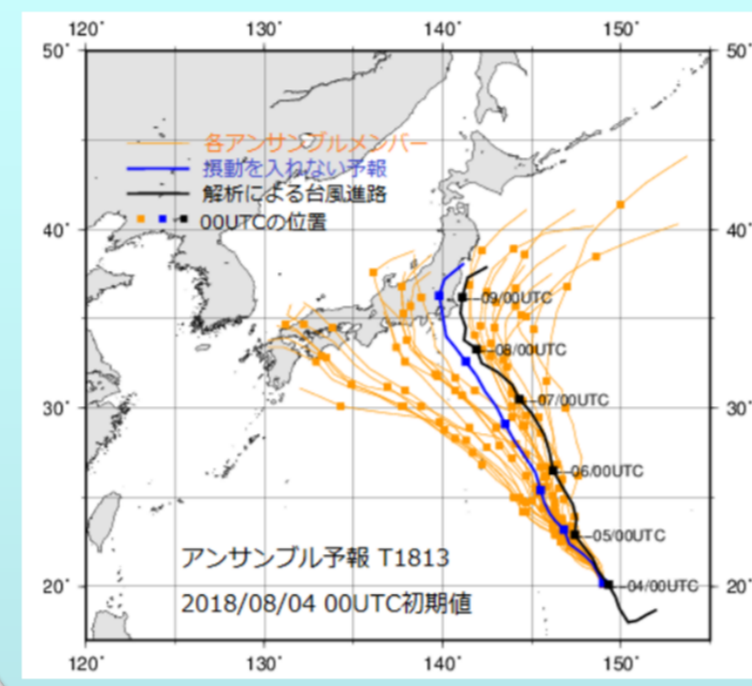
## 研究背景・目的

- 電力需給運用において出力予測の活用が進められている。
  - エネルギー分野でのアンサンプル予報の活用検討 (例えば、野原ら、2016(文献1)、大竹ら、2020(文献2))
  - 前日予測の出力予測誤差が大きい(予測の大外れ時) ⇒ 需給の対応にも課題
  - 予測の信頼度情報、予測大外れの事前検知・回避も予測提供側に求められる。
  - 気象庁：2018年にスパコン更新。メソアンサンプル予報システム(MEPS)の現業化(2019/6/27)(文献3) ⇒ 気象現象の発生を確率的に捉える
  - MEPS：メソモデル(MSM)をベースに複数予測を実施。降水、気温などの分析は実施されている。
  - 太陽光発電やエネルギーマネジメントに重要な日射量予測値についての分析やその応用利用研究についてはこれから
- 【目的】MEPSの予測誤差分析と天候を加味した事例調査を実施

## メソアンサンプル予報

### MEPSデータの予測精度の検証と予測技術の開発と応用利用の検討

産業技術総合研究所、気象庁予報部、気象研究所との共同研究  
「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」において実施中



(台風進路のアンサンプル予報の例、2018年8月4日9時を初期値とした台風第13号の5日予報)

- 複数の初期値を変えた予測の実施
- 予測時間が進むと予測に「ばらつき」が生じる
- 様々なシナリオの検討

出典 気象庁「アンサンプル予報」  
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/wh/tep/1-3-8.html>

## 予測データ仕様

### MEPSの仕様

注意：本研究ではオリジナルデータを用いて分析(支援センターのデータではない)

表 3.3.1 現象化した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	mesos
	水平格子間隔・鉛直層数	5 km, 76層
	天気	メソ解析値
初期値	陸面	地中温度第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	北太平洋高緯度海面水温解析値及び北半球海氷解析値
	陸面	地中温度は熱伝導方程式、体積含水率は強制元法により予測
境界値	海面	初期値に固定
	初期振動	SV法
アンサンプル手法	モデル振動	なし
	境界振動	側面境界振動は初期振動に用いたGSVを線形時間発展させて算出、下部境界振動はなし
メンバー数	21(コントロールラン1+振動ラン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」  
[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/66/No66\\_all.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/66/No66_all.pdf)

## 結果：予測誤差と区間滞在率

### 予測誤差

#### アンサンプル平均での評価

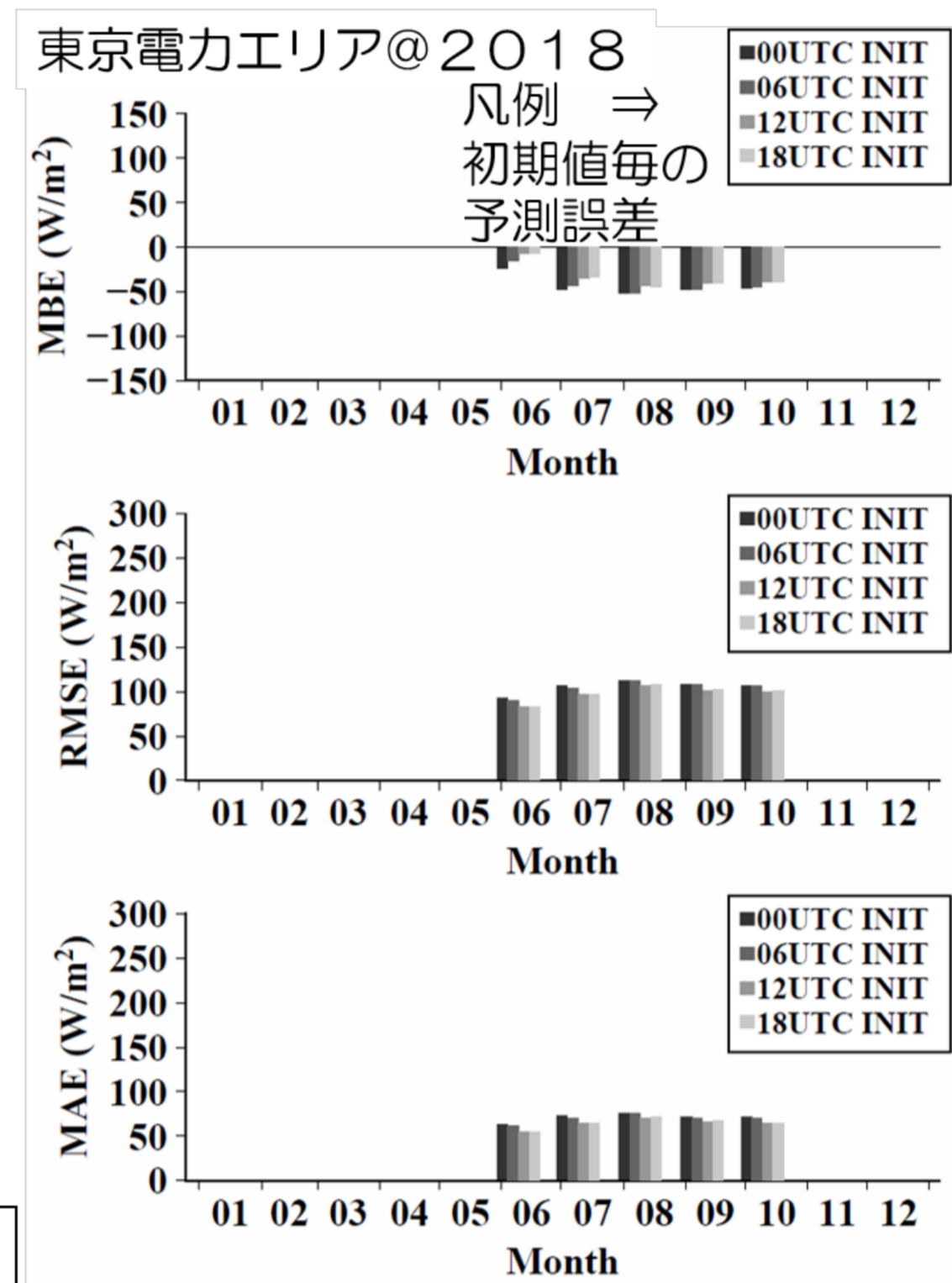
- 2018年6月から10月(6月、10月は、6/5-30、10/1-5の期間のみで評価)
- 日本時間5時~20時の夜間を除く時間を対象
- 00、06、12、18UTCの初期値毎評価
- 予測値は東電エリアのアンサンプル平均値、実測値は気象官署6地点の平均値

$$MBE = \frac{1}{N} \sum (FCST - OBS)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (FCST - OBS)^2}$$

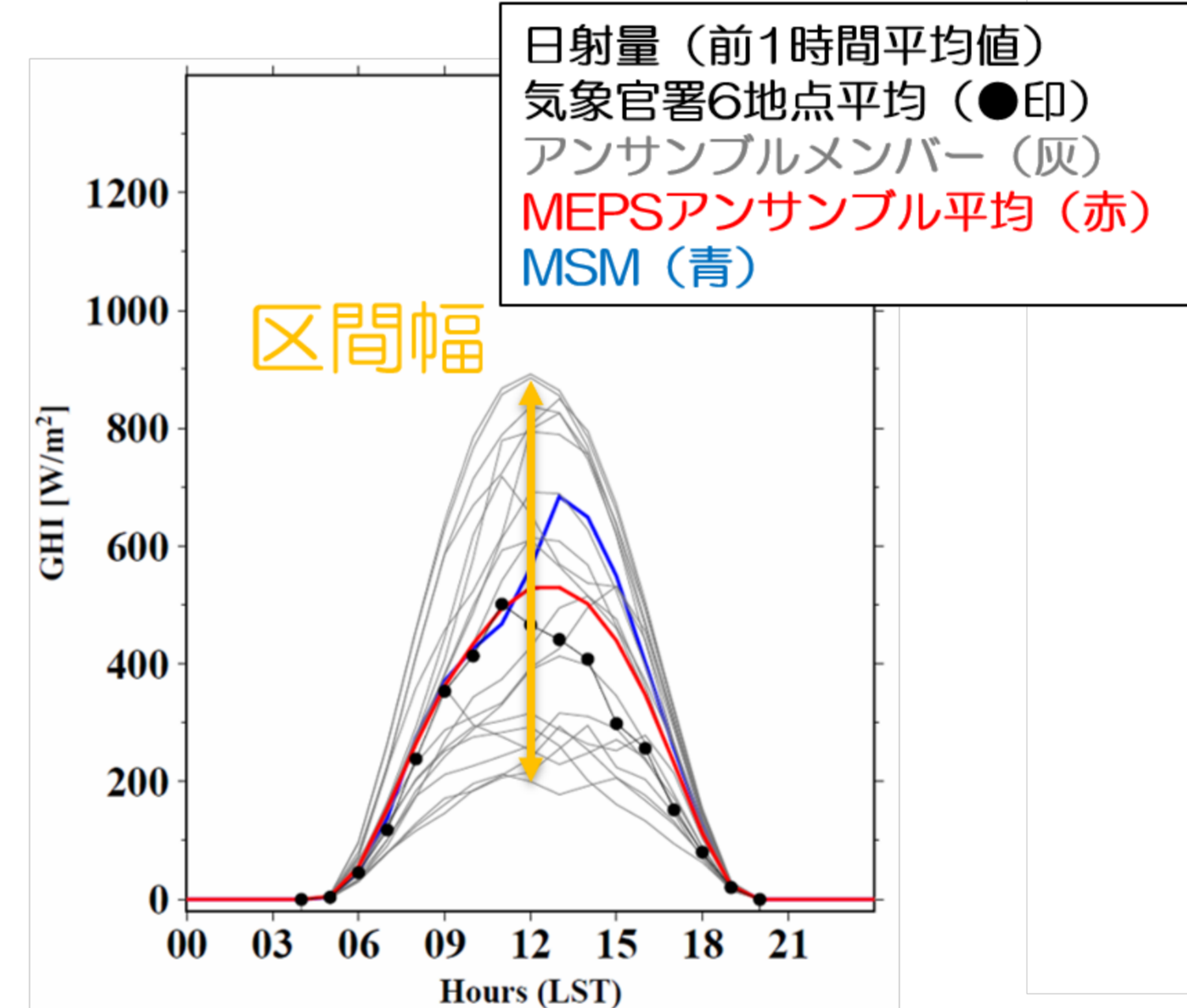
$$MAE = \frac{1}{N} \sum |FCST - OBS|$$

- MBEは過小気味で(大竹ら2018、電学論B)(文献4)と類似
- MSMの傾向と同様



### 滞在率 (coverage rate)

メンバーの最大、最小値の間(区間幅)に実測値が含まれているかどうか?

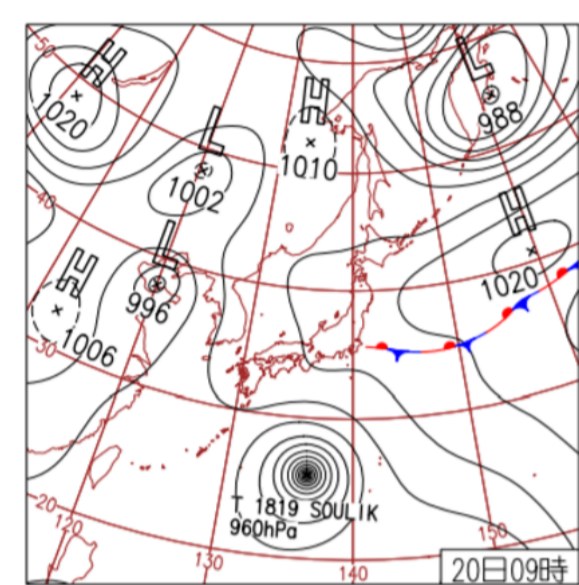


Year	Month	Initial time	Coverage rate (%)
2018	June	00UTC	69.2
		06UTC	67.8
		12UTC	65.1
		18UTC	59.9
	July	00UTC	56.8
		06UTC	54.4
		12UTC	52.1
		18UTC	49.5
	Aug	00UTC	49.7
		06UTC	49.6
		12UTC	49.1
		18UTC	47.9
Sep	00UTC	50.0	
	06UTC	51.5	
	12UTC	52.6	
	18UTC	52.7	
Oct	00UTC	52.8	
	06UTC	53.0	
	12UTC	53.2	
	18UTC	53.4	

- 滞在率：概ね49-69%前後⇒滞在率が低めであり、機械学習などを用いた補正も検討。
- 初期値が更新されるほど、各月で滞在率が低下(直近ほどばらつき：小)。

## 事例分析

### 地上天気図



### 個別事例分析

2018/8/20(事例：台風接近日)

台風が日本列島の南に位置し、北上中の事例。関東の東沖には、停滞前線も確認されている。

引用 気象庁 | 日々の天気図  
<https://www.data.jma.go.jp/fcd/tyho/o/hibiten/index.html>

### 気象衛星ひまわり(雲画像)

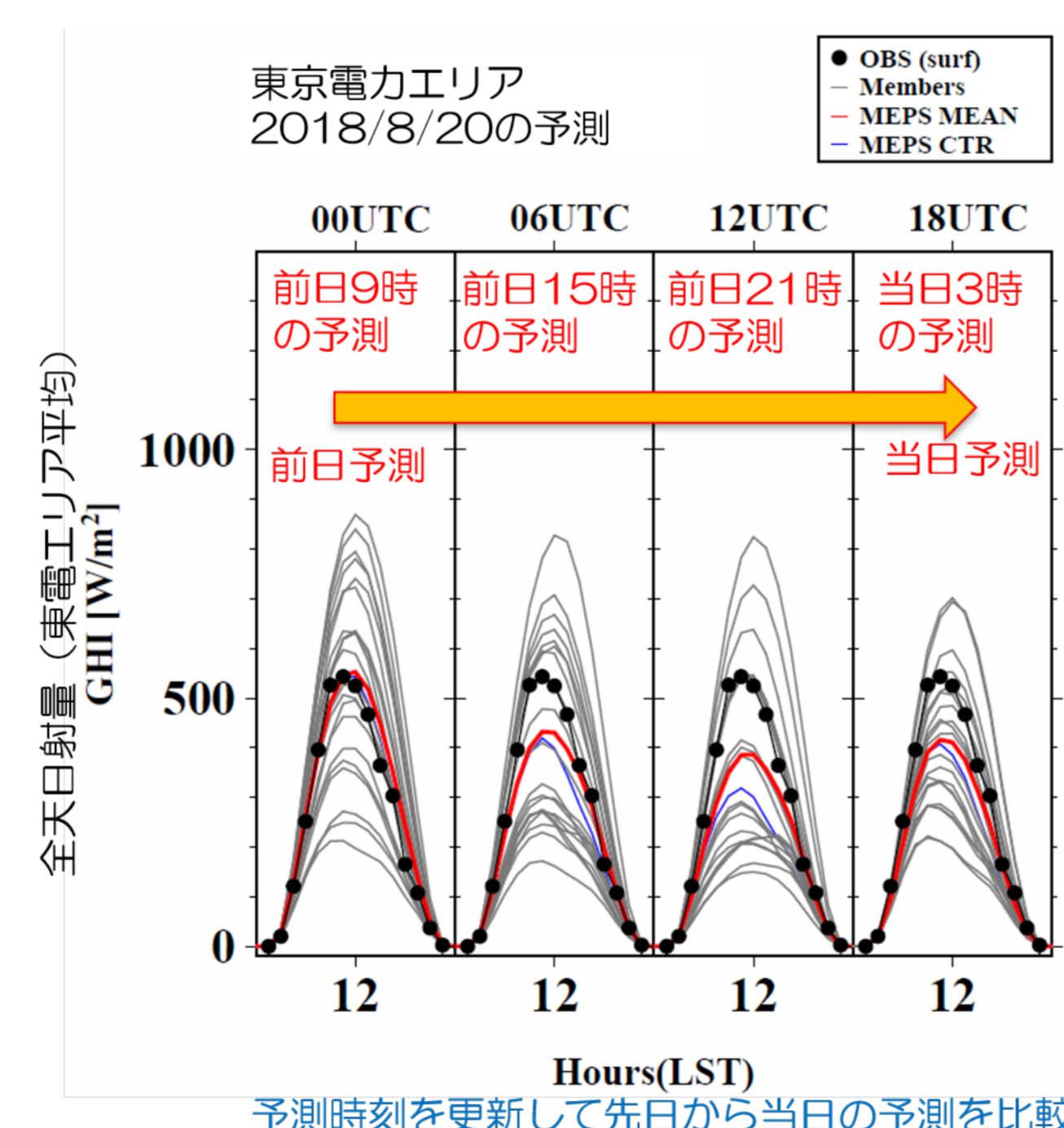


- 台風が日本列島に接近
- 東京電力エリアではその縁辺の雲域が太平洋側から覆っている事例

引用 JST CREST HARPS OASIS  
<http://psel01.ee.kagu.tus.ac.jp/harps/oasis/>

日射量(前1時間平均値)：気象官署6地点平均(●印)、アンサンプルメンバー(灰細線)初期値、2018.8.19(00, 06, 12, 18UTC)、MEPSアンサンプル平均(赤)、MSM(青)

- 前日予測に多様性があり、滞在率は100%の事例
- 当日予測はばらつきが小さい(初期振動が成長中のため)

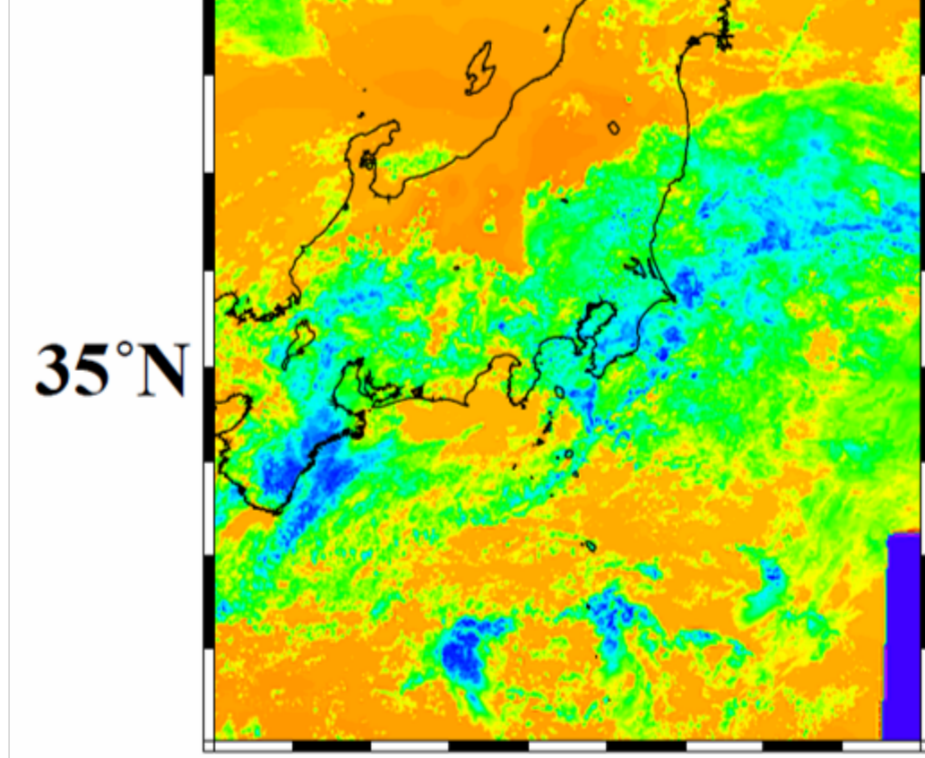


### 日射量予測(マップ)

2018年8月20日12時

AMATERASS 20180820 12JST GHI

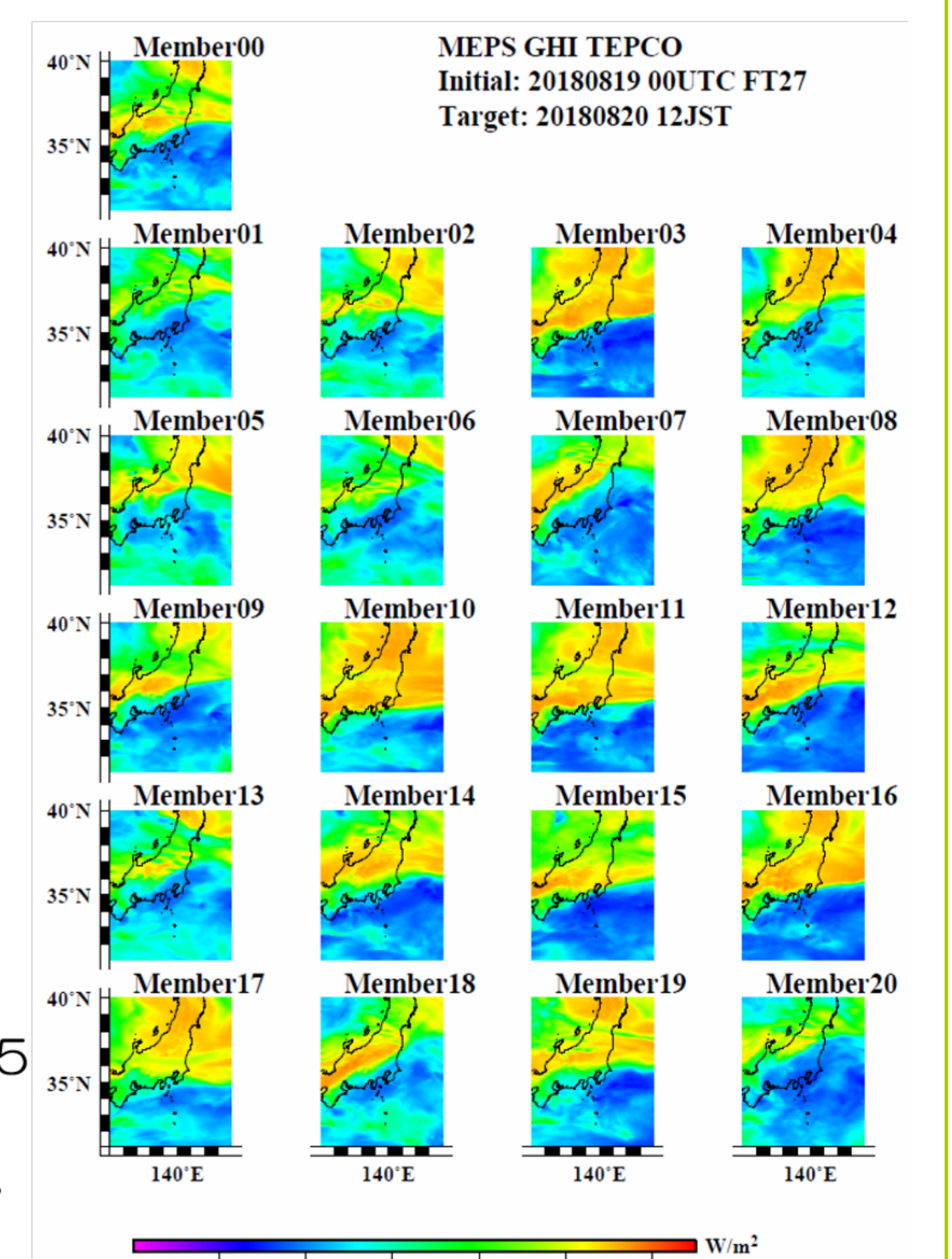
衛星推定日射量



0 200 400 600 800 1000 [W/m²]

太陽光放射コンソーシアム(文献5、AMATERASSデータを利用)

- MEPSでは関東地方の日射量予測(雲域の広がり方)に多様性あり



## まとめ

事例分析	多様性(ばらつき)があるMEPSメンバーがあると良い。必ずしも、いつも多様性がある予測となっていない。
予測誤差	過小予測の傾向(MSMの予測に類似) ⇒ 予報モデルがMSMと同一であることに起因。
信頼度情報	滞在率は電力エリア毎にみると5割から7割程度であり、機械学習などを用いた信頼度情報の修正も必要
MEPSの初期条件	日射予測用に考慮していない点もある(気象庁の初期条件、境界条件のそもそもの与え方)。

## 今後の課題

事例分析	予測情報に多様性(ばらつき)がある場合はどのような事例か?MEPSが有効に動く事象にはどのようなものがあるのか?
予測誤差調査	日射量以外の予測パラメータ(気温、気圧、風速、高度別雲量(上層、中層、下層)など)と予測誤差の調査
信頼度情報	高松ら(産総研・FREIA)、森ら(早稲田大)(同ボスター有り、ボスター番号21, 22)による機械学習、JITモデリングを用いた信頼度情報の再構築も検討
データ	通年での評価(気象庁に追加データを依頼中)

## 参考文献

- (1)野原ら、再生可能エネルギー発電出力予測のためのメソアンサンプル予報、第9回気象庁数値モデル研究会・第45回メソ気象研究会・第2回観測システム・予測可能性研究連絡会、(2016).  
[http://pf.kishou.go.jp/Presen2016/7\\_nohara.pdf](http://pf.kishou.go.jp/Presen2016/7_nohara.pdf)
- (2)大竹ら：メソアンサンプル予報による日射量予測の初期解析、電気学会 令和2年電力・エネルギー部門大会(2020年9月9日、オンライン)
- (3)気象庁予報部、第66号(令和元年度)メソスケール気象予測の現状と展望(数値予報課報告・別冊)(2019)
- (4)大竹ら、電気学会論文誌B、Vol. 138, No. 11, 881-892 (2018).
- (5)特定非営利活動法人 太陽放射コンソーシアム <http://www.amaterass.org/>

# メソアンサンブル予報データを用いた機械学習による広域日射推定の検討

高松尚宏<sup>1</sup>, 大竹秀明<sup>1</sup>, 大関 崇<sup>1</sup>, 仲江川 敏之<sup>2</sup>, 本田 有機<sup>3</sup>

1 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

2 気象研究所 3 気象庁

## 研究の目的

太陽光発電(PV)システムの導入拡大

→ 気象条件に依存した発電による電力系統運用への影響

PV導入量の拡大と安定な系統運用の両立のために  
日射予測技術の開発が必要

従来研究:

気象庁のメソスケール数値予報データ(MSM-GPV)を機械学習モデルへ活用  
➢ 日射予報精度がMSM-GPVの精度に依存

MSM-GPVの不確実性を補間する予報として、  
気象庁が新たにメソスケールアンサンブル予報システム(MEPS)を運用開始

MEPS予報データを使用することによる  
日射予測精度向上の可能性

本研究

MEPSデータを用いた機械学習モデルを複数のパターンで構成し、  
関東5地点を対象とした日射予測について従来のMSMデータを用いた予測と精度を比較

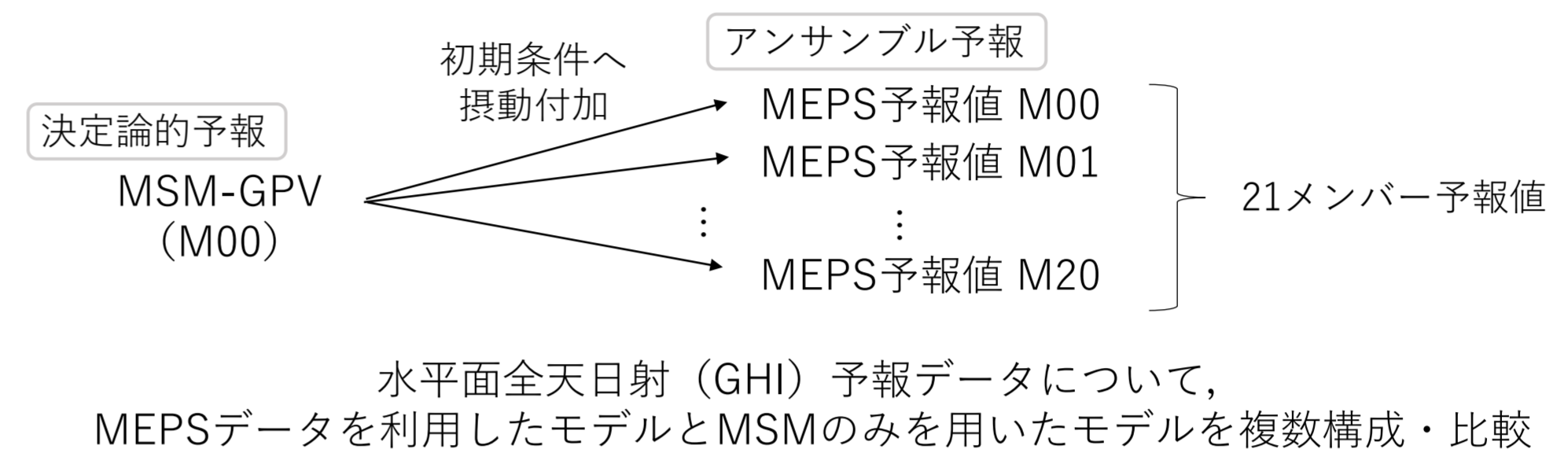
## アンサンブル予報

決定論的予報:

物理法則に基づく気象モデルからの数値解による予報  
→ 計算の初期条件として与えるパラメータによる誤差の発生

アンサンブル予報:

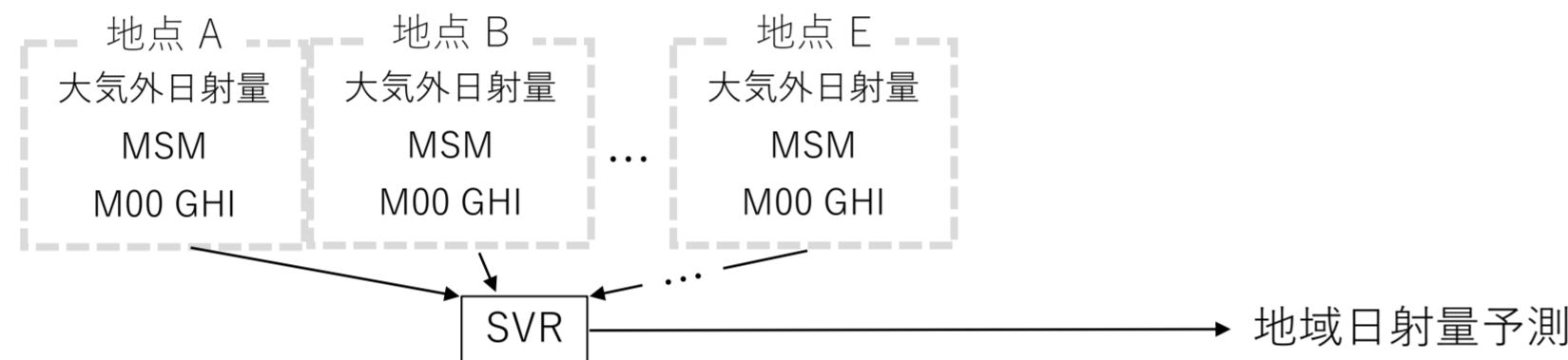
初期条件パラメータに摂動をあたえた複数予報  
→ 複数予報により気象予報の不確実性について可視化



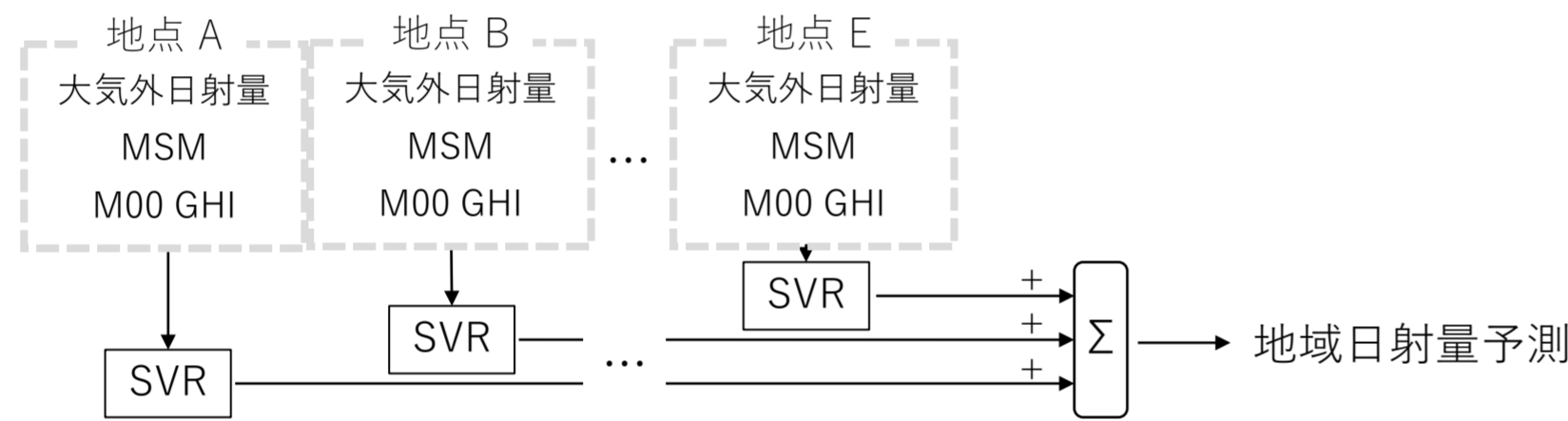
## 地域日射量予測モデル

従来型の地域日射量予測モデル (MSMデータ = M00データのGHIのみ利用)

Case 1: SVR 1機による地域日射量の直接予測

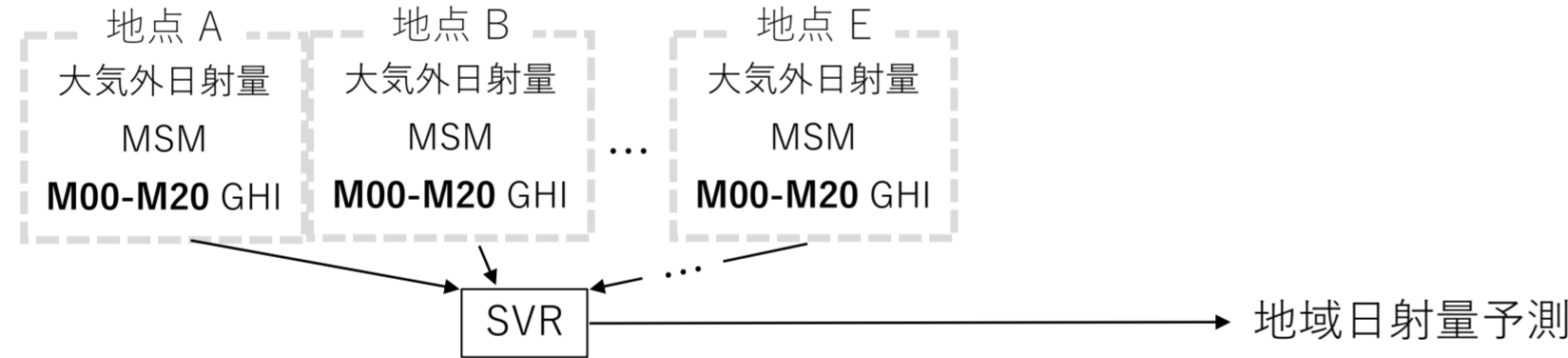


Case 2: 各地点のSVR予測結果を合計

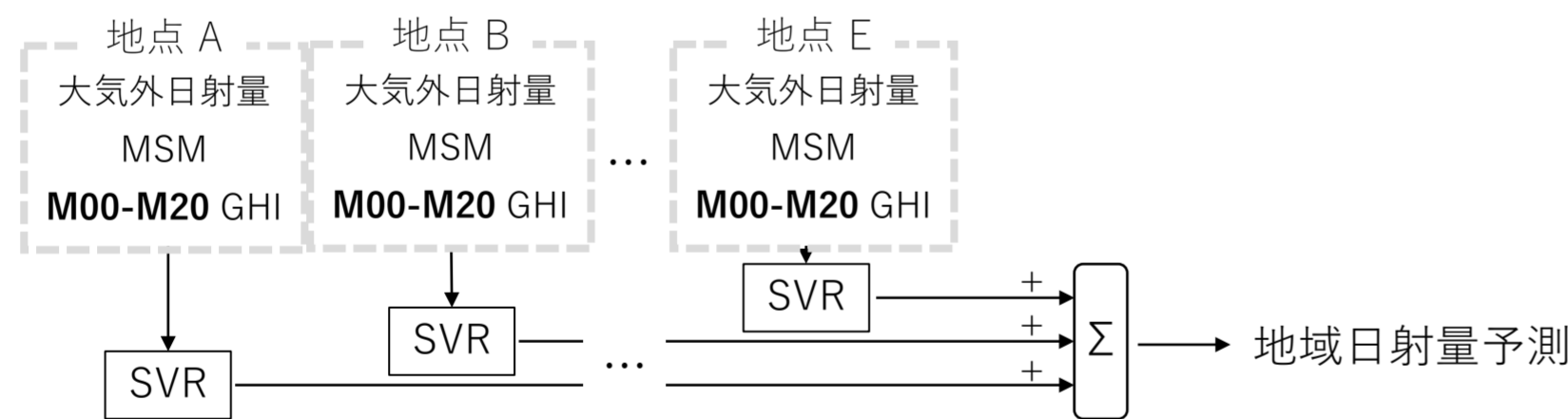


MEPSを利用した地域日射量予測モデル (M00-M20 = MEPS21メンバーデータ)

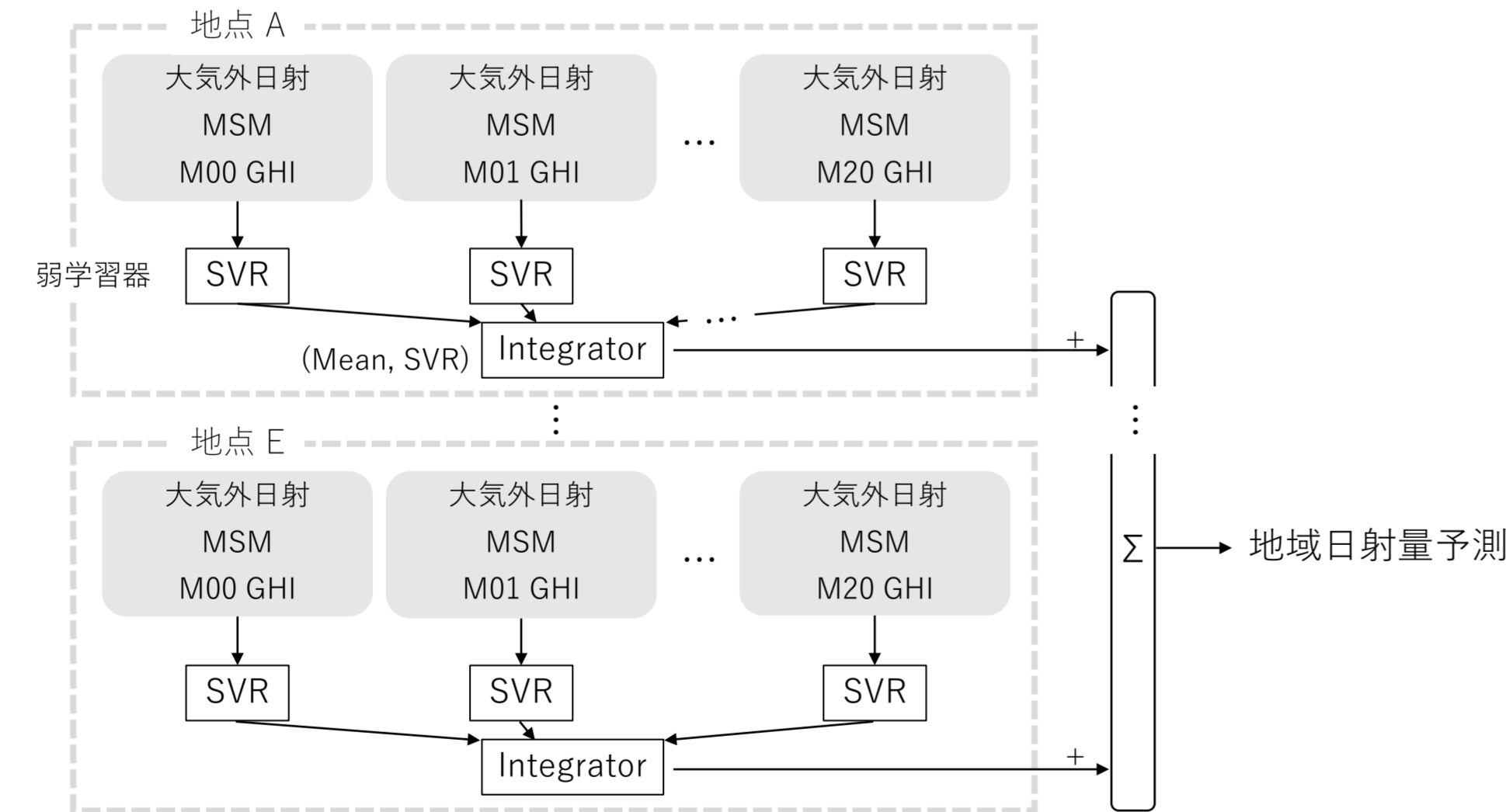
Case 1: SVR 1機による地域日射量の直接予測



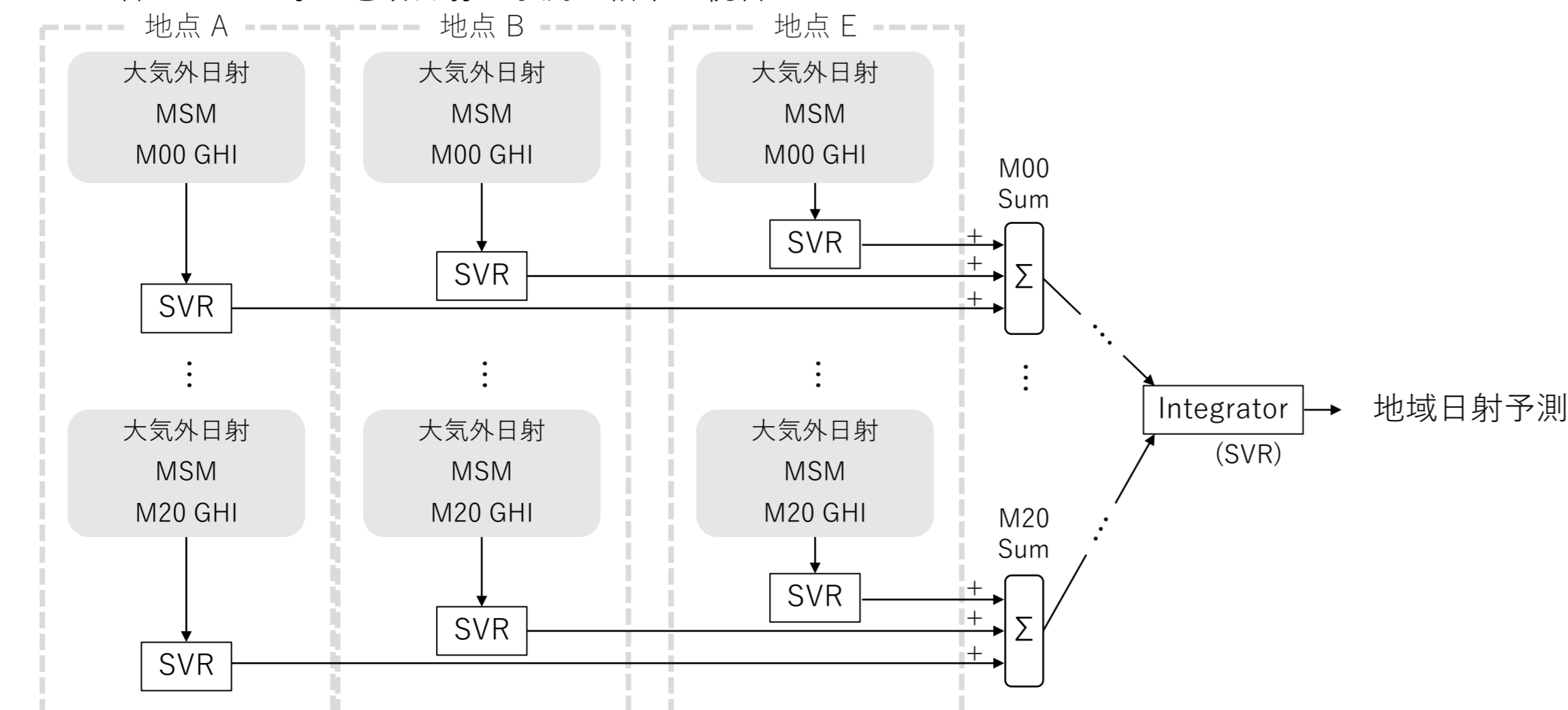
Case 2: 各地点のSVR予測結果を合計



Case 3: 各地点毎に2層型予測器の結果を合計 (各地点のメンバー毎にSVR予測器を構成)



Case 4: 各メンバー毎に地域日射を予測し結果を統合



## 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
  - 気温
  - 相対湿度
  - 上層雲量
  - 中層雲量
  - 下層雲量
- MEPSデータ
  - 水平面全天日射量 (予報値)

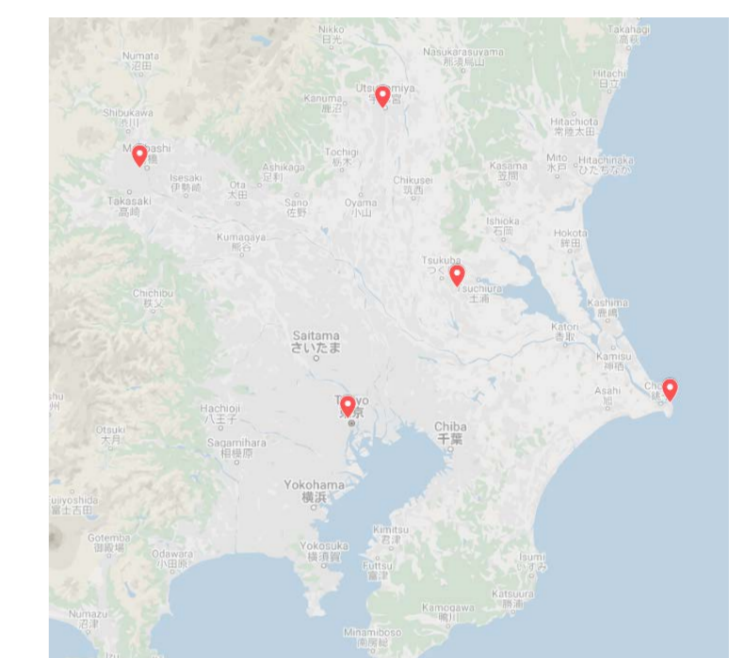


Fig. 1 Ground Observation Points (graphed by Google Map)

目的変数

- 水平面全天日射量 (地上観測データ)

4分割交差検証 (日付毎に非復元無作為抽出) により、モデルの予測精度を比較

## 予測結果

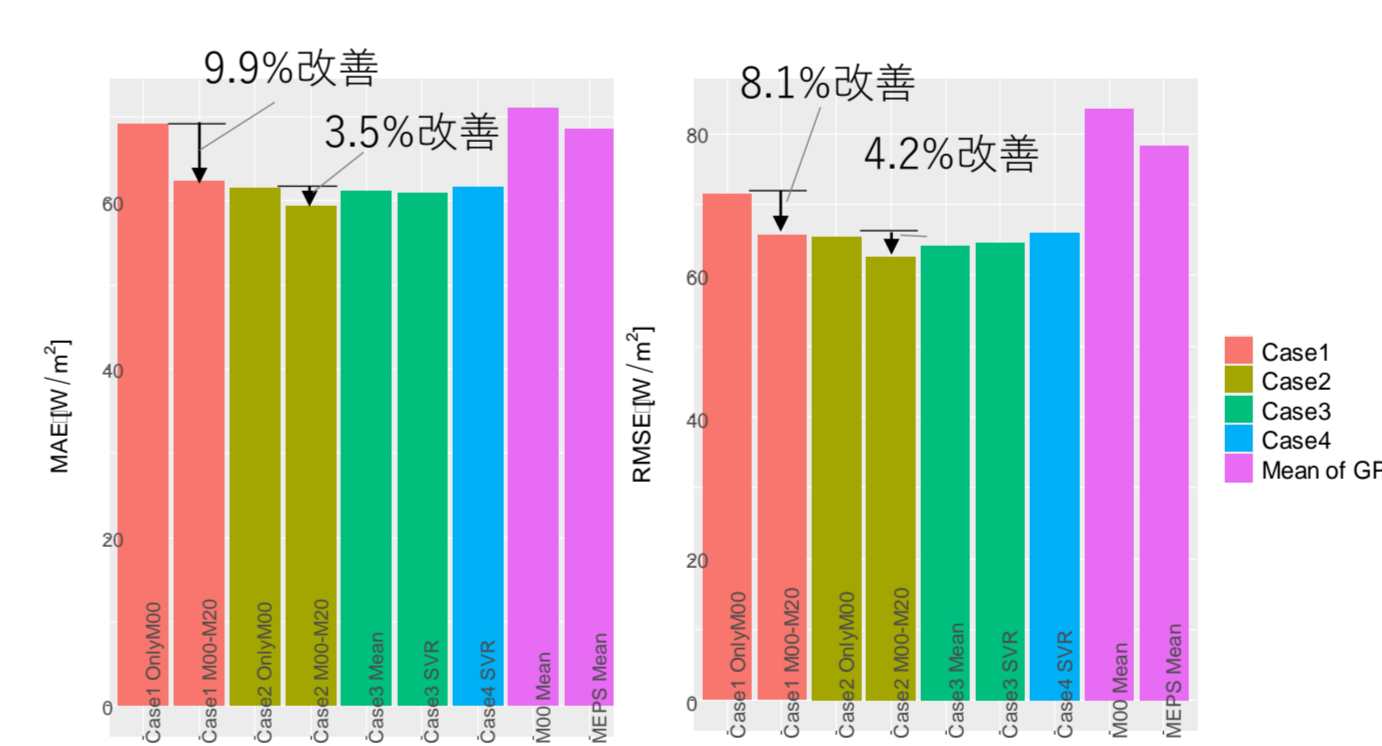


Fig. 2 予測誤差のMAE, RMSE (5地点平均)

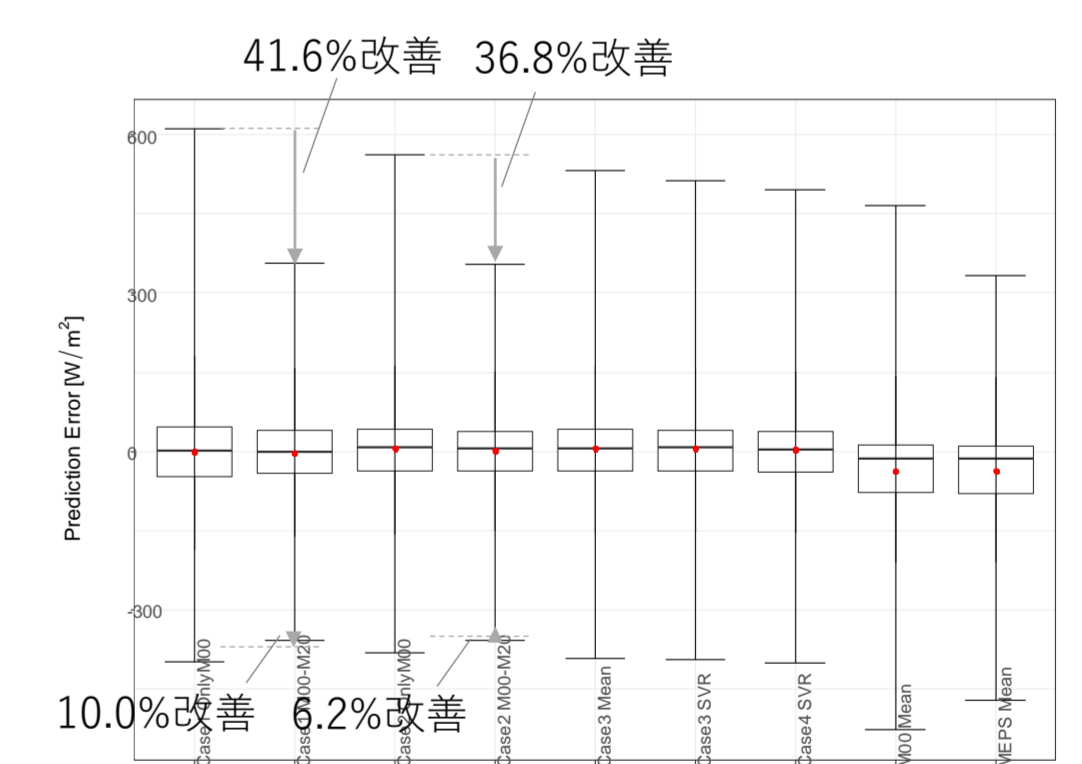


Fig. 3 予測誤差の四分位数 (5地点平均)

## 結論

- ◆ 関東5地点の地域日射量について、MEPSデータを用いた複数モデルの機械学習モデルによる予測を行い、予測精度について比較を行った。
- ◆ 気象庁配信の数値予報データにたいして、MSM及びMEPSデータを用いた機械学習モデルはMAE, RMSEともに改善がみられた。
- ◆ MEPSデータを用いた機械学習モデルは、同じ構成の場合にMSMのみを用いたモデルと比較してMAE, RMSE, 最大予測誤差について改善が見られた。
- ◆ 特に、予測値が実測値を上回る日射の過大見積もりについて、MEPSデータまとめて説明変数にもちいたモデルでは大きな改善がみられた。

# MEPSを用いたJIT Modelingによる 翌日日射量推定に関する基礎的検討

森友輔<sup>1</sup> 若尾真治<sup>1</sup> 大竹秀明<sup>2,3</sup> 大関崇<sup>2</sup> 高松尚宏<sup>2</sup> 仲江川敏之<sup>3</sup> 計盛正博<sup>4</sup> 本田有機<sup>4</sup>

1 早稲田大学、2 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター、  
3 気象研究所、4 気象庁

## 研究背景・目的

- 太陽光発電には天候による発電電力量変動が存在するため、電力系統への悪影響が出る。
- 電力のエネルギーマネジメントのために予測情報(発電電力量・負荷量)が不可欠である。
- 太陽光発電電力量に影響する日射量の予測に関して、**気象庁の数値予報システムMEPS(Meso-scale Ensemble Prediction System)を利用した実測値が100%入る信頼区間推定**を行う。

## 数値予報システム:MEPS(Meso-scale Ensemble Prediction System)<sup>1)</sup>

- 気象庁の数値予報システムの1つであり、2019年6月より運用開始
- 気象庁の数値予報システムである気象庁メソモデル(MSM、従来より運用されている単一の予測)と、MSMの計算時に摂動を与えて計算した20のアンサンブル予測の計21メンバーの気象予報値を計算する予報システム
- 21メンバーのばらつきにより、MSMの信頼度を把握可能
- 5km間隔で初期時刻(日本時間3時、9時、15時、21時)から39時間先までの気象予報値を1時間毎に計算

## 【MEPS単独による信頼区間推定】

- 前橋地方気象台(群馬県前橋市)の日射量観測点に最も近い地点のMEPSを使用<sup>2)</sup>
- 毎時間MEPSの予測値の最大値を信頼区間上限値、最小値を信頼区間下限値とする
- 2018年6月6日～10月6日の5～19時で実測値が信頼区間に入る割合は56.9%
- MEPS単独での信頼区間推定では活用が難しいため、他モデルの後処理が必要  
→**Just-In-Time Modeling(JIT Modeling)で実測値が信頼区間に入る割合を上げる<sup>3)4)</sup>**

## 予測手法<sup>3)4)</sup>

### 【Just-In-Time Modeling】

- 入出力関係を示すデータベースを用いた予測モデル
- 予測対象の入力ベクトルに似た入力を持つ近傍をデータベースからK個探索。近傍を中心としたカーネル関数を重畳し確率密度関数を作成。確率密度関数の累積確率がX%(目標信頼度)となる端から同量だけ切れる値を信頼区間上限・下限とする。
- 近傍数K=30、目標信頼度X=95%で実施
- 複数メンバーを使用する場合、各メンバー個別に確率密度関数を作成、全て重畳した確率密度関数を使用し信頼区間を算出

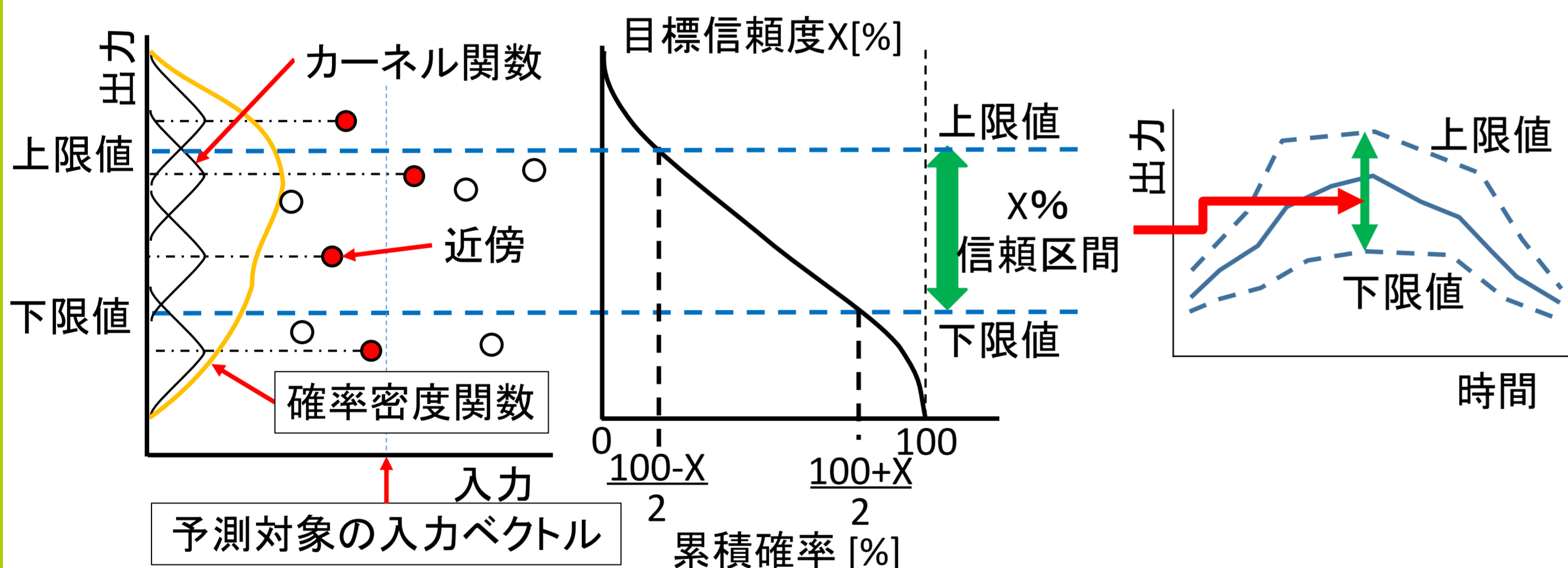


Fig.3. 1入力1出力(近傍数K=4)の概念図

Table.1. JIT Modelingのデータベースの入力と出力

入力(14要素)	出力
太陽高度, 昼時間, MEPSデータ(12要素)	日射量実測値 <sup>2)</sup>
JIT Modelingに使用したMEPSデータの要素名 日射量, 海面更正気圧, 気温, 気温と露点温度の差, 積算降水量, 風の東西成分(地表, 1000hPa, 950hPa), 風の南北成分(900hPa), 雲量(中層, 下層, 全雲量)	

## 結論

- MEPSを使用したJIT Modelingの日射量信頼区間推定の実施により、実測値がほぼ100%入る信頼区間が作成可能である。
- 今後、PICPを維持しMILが減少可能な信頼区間推定の開発を行う。

## 参考文献

- 気象庁, 数値予報課報告・別冊第66号「メソスケール気象予測の現状と展望」第3章:メソアンサンブル予報システム, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/66/chapter3.pdf>
  - 気象庁「過去の気象データ・ダウンロード」, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
  - 鈴木孝宣・後藤悠主・寺園隆宏・若尾真治・大関崇:「Just-In-Time Modelingに基づく日射量予測手法の開発」, 電気学会論文誌B, Vol.131, No.11, pp.912-919 (2011)
  - 山崎朋秀・本間隼人・若尾真治・藤本悠・林泰弘:「太陽光発電出力予測のためのJust-In-Time Modelingを用いた日射量予測信頼区間の推定方法」, 電気学会論文誌B, Vol.135, No.3, pp.160-167 (2014)
  - Voyant, C., Motte, F., Notton, G., Fouilloy, A., Nivet, M., & Duchaud, J. - "Prediction intervals for global solar irradiation forecasting using regression trees methods," Renewable Energy, 126, 332-340. doi:10.1016/j.renene.2018.03.055, Oct, 2018.
- ※本研究は産業技術総合研究所、気象庁、気象研究所、早稲田大学との共同研究課題「メソアンサンブ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」の一部である。

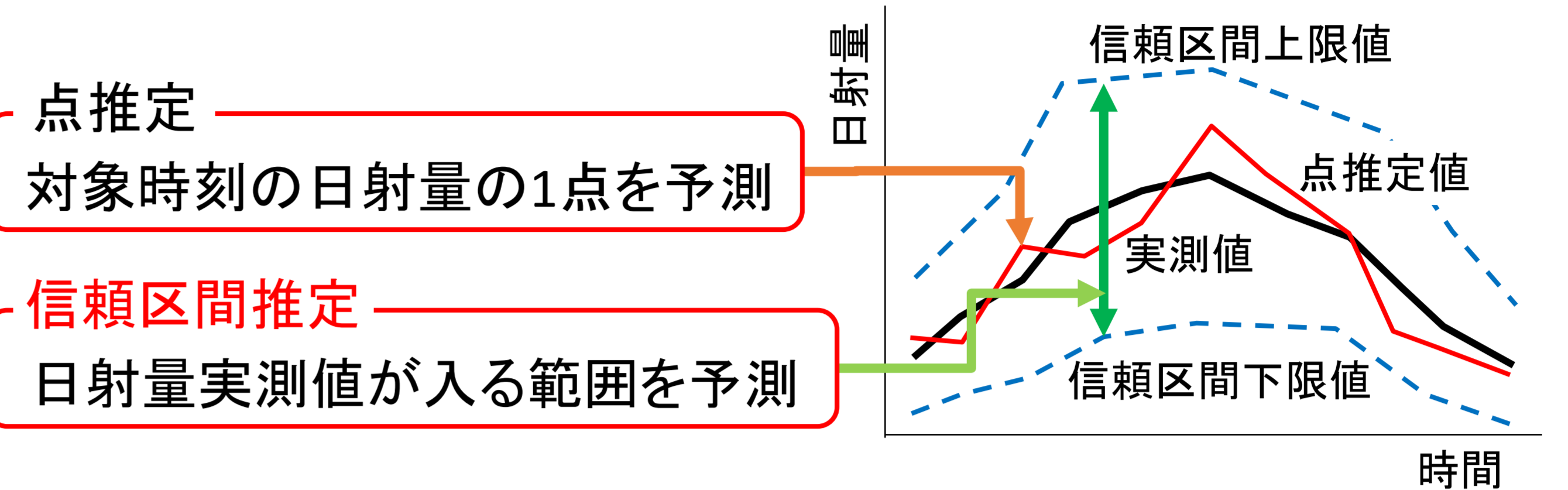
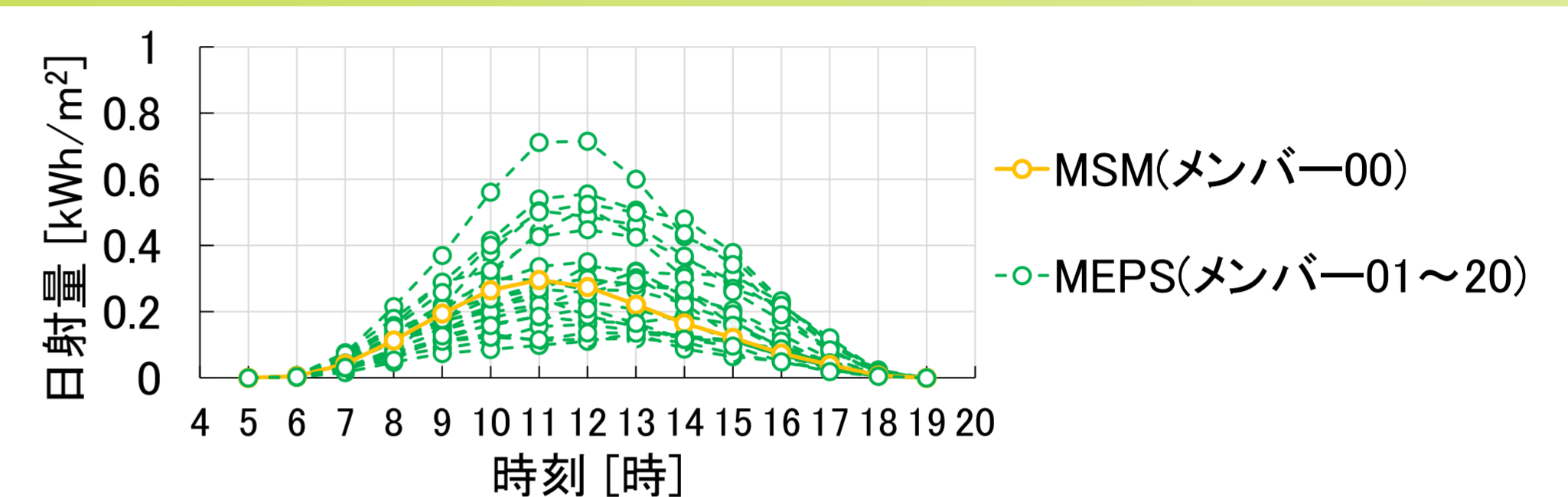


Fig.1. 日射量予測(点推定・信頼区間推定)の概念図



最大値:信頼区間上限 最小値:信頼区間下限

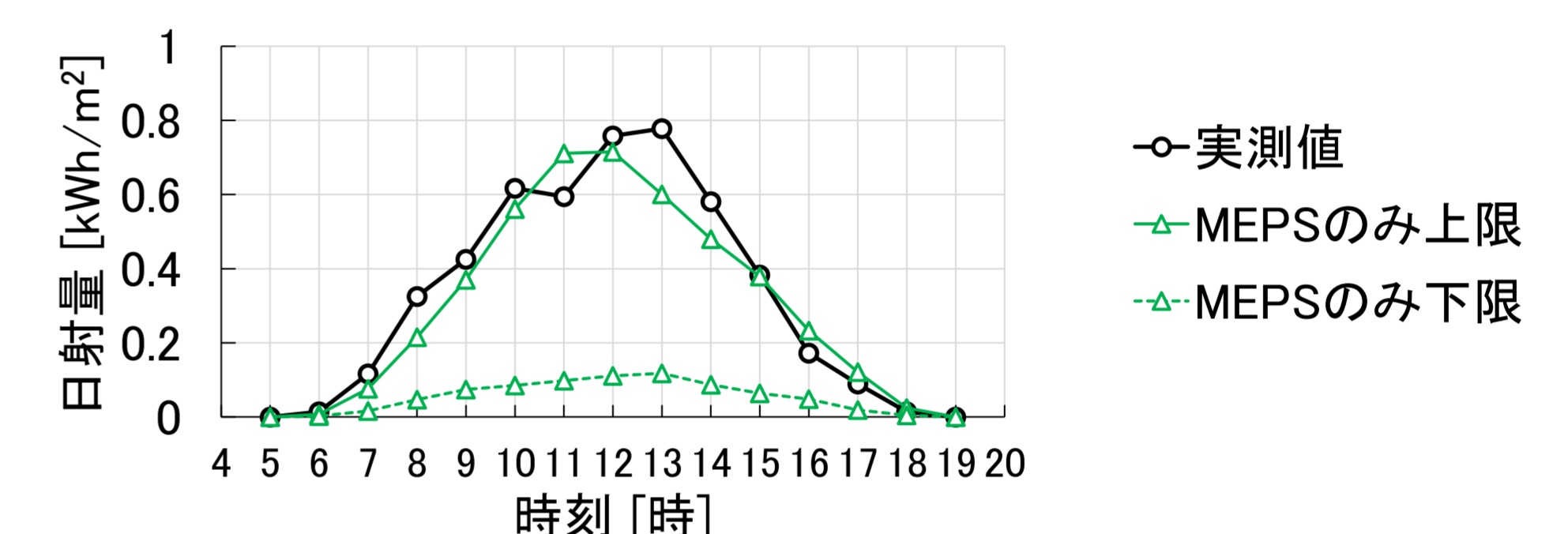


Fig.2. 2018年9月13日(群馬県前橋市)の日射量の時系列

## 結果

- 2018年6月5日～10月5日の初期時刻15時のMEPSを使用し、前橋地方気象台の5～19時の翌日日射量(2018年6月6日～10月6日)を4分割クロスバリデーションにて予測(計1845時間)

### 【評価指標】

- 高いPICPかつ小さいMILを持つことが目標である。

PICP(Prediction Intervals Coverage Probability)  
:実測値が信頼区間に入る割合<sup>5)</sup>

$$PICP [\%] = \frac{n}{N} \times 100 \quad n: \text{信頼区間に実測値が入る時間数} \\ N: \text{全時間数}$$

MIL(Mean Interval Length): 信頼区間の幅の平均値<sup>5)</sup>

$$MIL [kWh/m^2] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i \quad \delta_i: \text{信頼区間の上下限値の差} \\ N: \text{全時間数}$$

### 【信頼区間推定の結果】

- MEPSを使用したJIT Modelingの信頼区間は99%の割合で実測値が入る。
- MILは2.5倍となるため、幅の低減が課題となる。

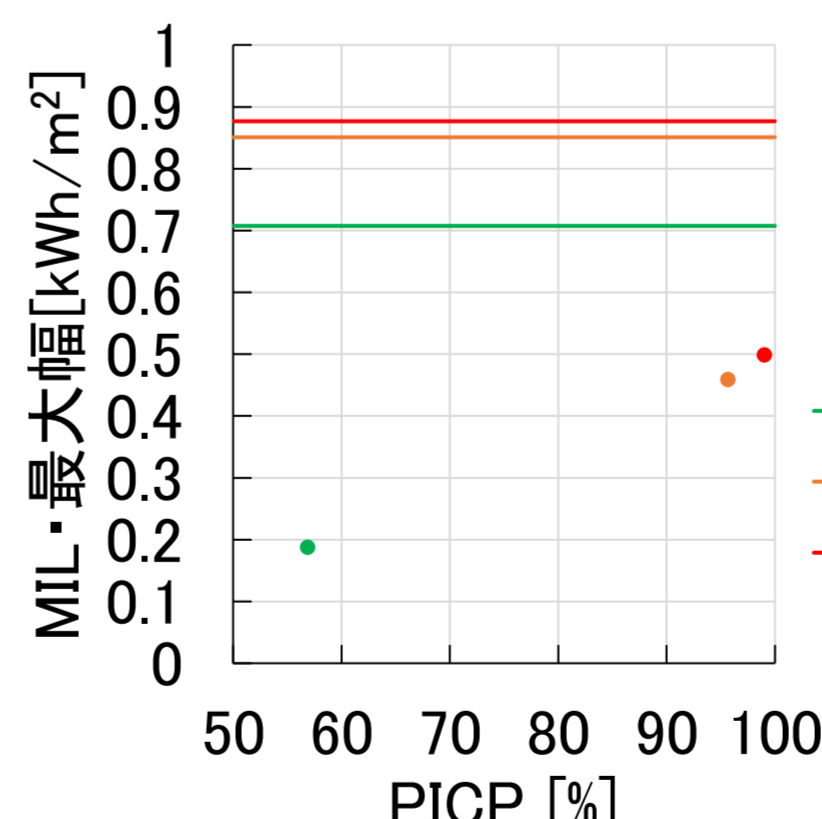


Fig.4. PICPとMIL・信頼区間の最大幅

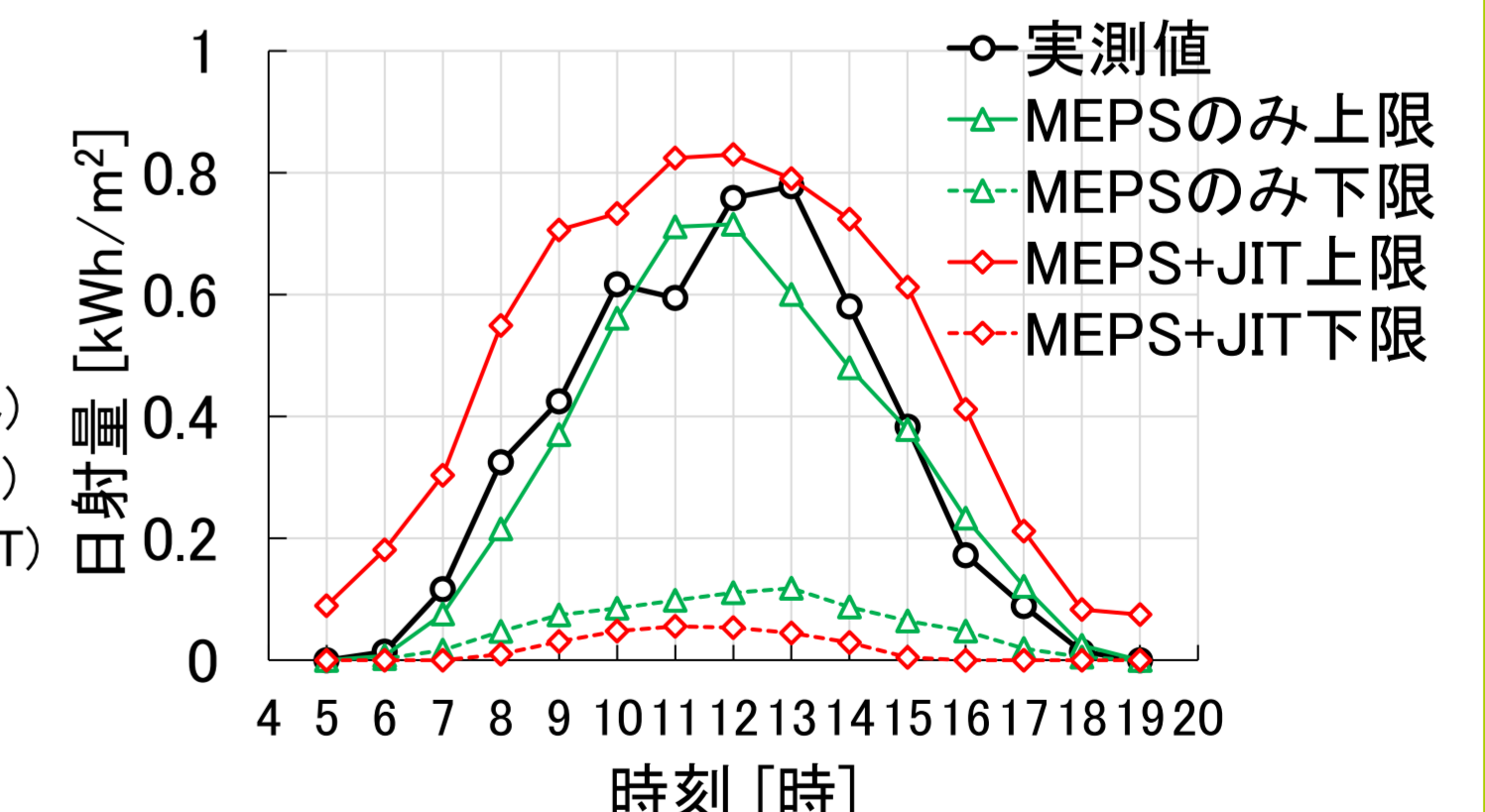


Fig.5. 2018年9月13日(群馬県前橋市)の日射量の時系列

# スマートスタック技術を用いた III-V//Cu(InGa)Se<sub>2</sub> タンデム型太陽電池の開発

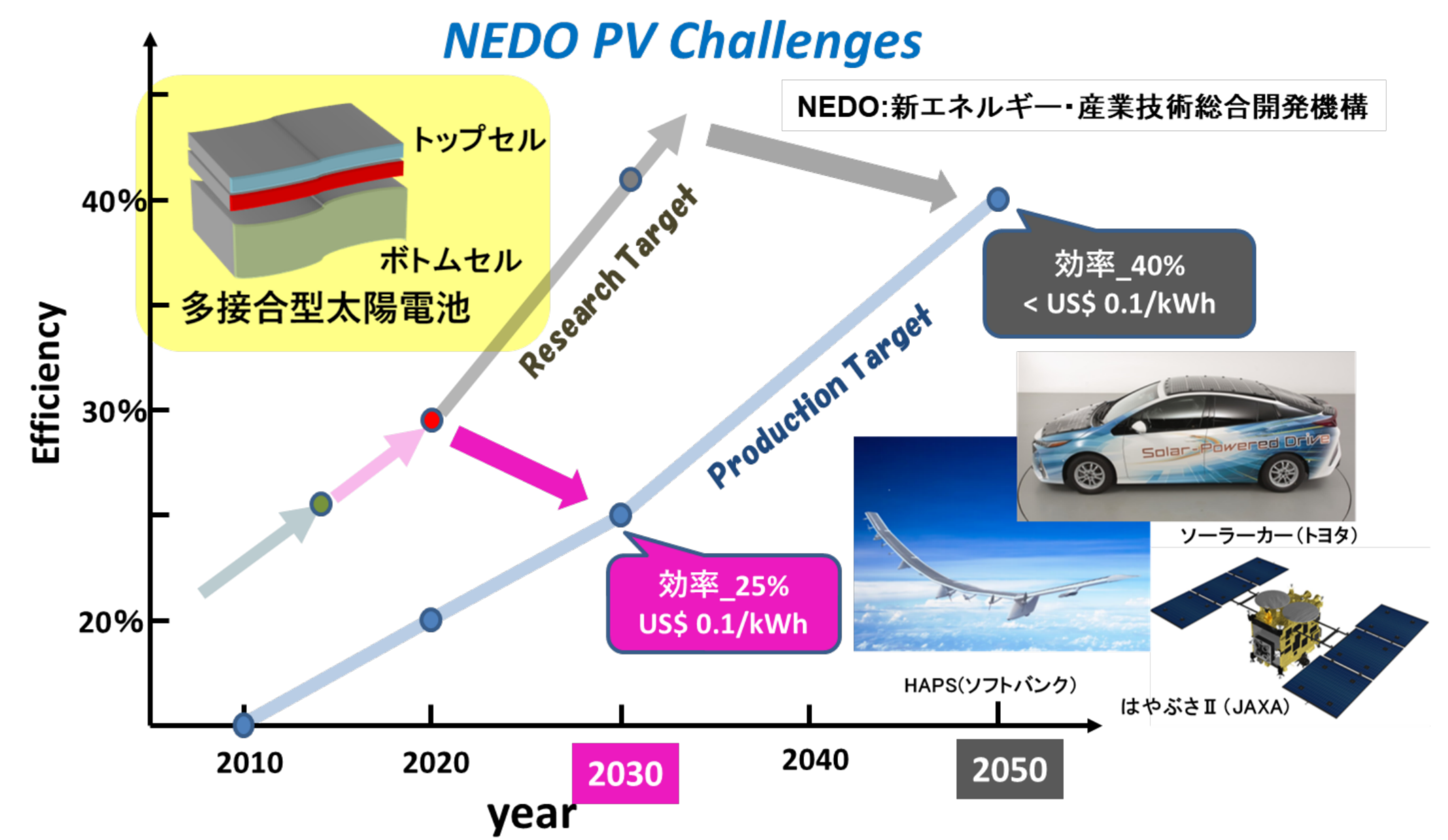
牧田紀久夫<sup>1</sup>、上川由紀子<sup>2</sup>、水野英範<sup>3</sup>、大島隆治<sup>1</sup>、庄司靖<sup>1</sup>、  
石塚 尚吾<sup>2</sup>、菅谷 武芳<sup>1</sup>、Ralph Müller<sup>4</sup>、Frank Dimroth<sup>4</sup>

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

CO<sub>2</sub>削減に向けて再生エネルギーの開発が進められており、特に次世代自動車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。

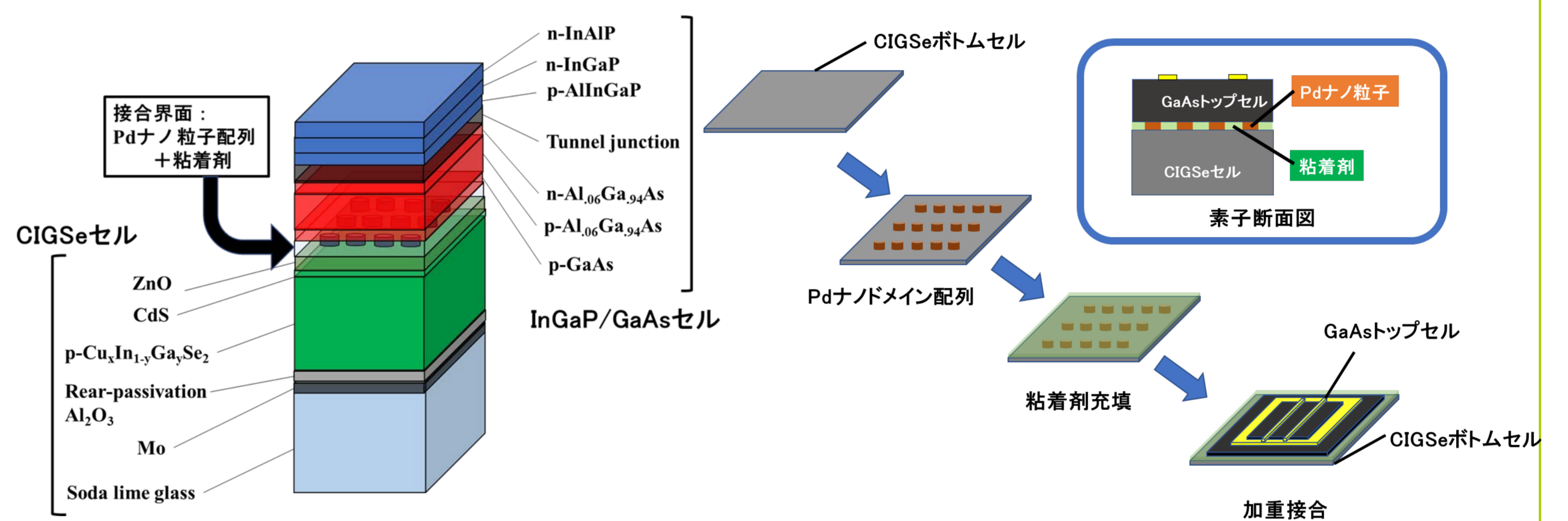
本研究では、高効率かつ曲面形状が可能なIII-V//Cu(InGa)Se<sub>2</sub> (以下CIGSe) 多接合太陽電池の開発を行っており、今回Fraunhofer研究所 (以下FhISE、独) と連携のもと、GaAs//CIGSe 3接合太陽電池を試作し、**発電効率~27.2%**を達成した。



多接合太陽電池の開発ロードマップ

## 実験

- 従来スマートスタック接合技術<sup>1)</sup>では、CIGSeの表面ラフネス/撥水性により接合が困難
- Pdナノ粒子に粘着剤<sup>2)</sup>を介在したスマートスタック技術を新たに開発(右図参照)
- 上記技術によりInGaP/AlGaAs//CIGSe 3接合太陽電池を試作
  - GaAs系トップセル: FhISE研究所が開発
  - CIGSeボトムセル: 産総研が開発
  - 独自の平滑処理/素子構造<sup>3)</sup>で性能適化

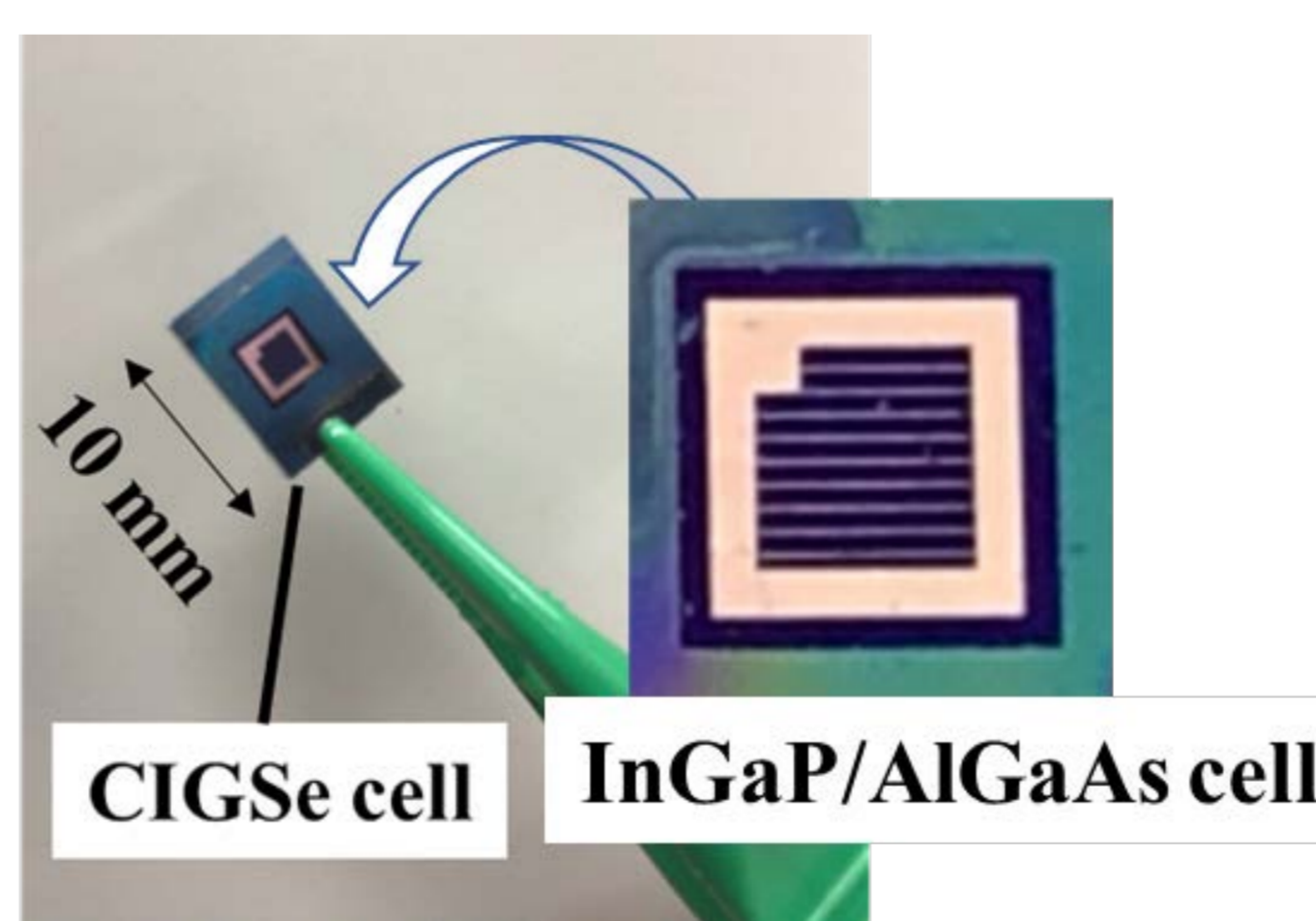


InGaP/AlGaAs//CIGSe 3接合太陽電池の構造

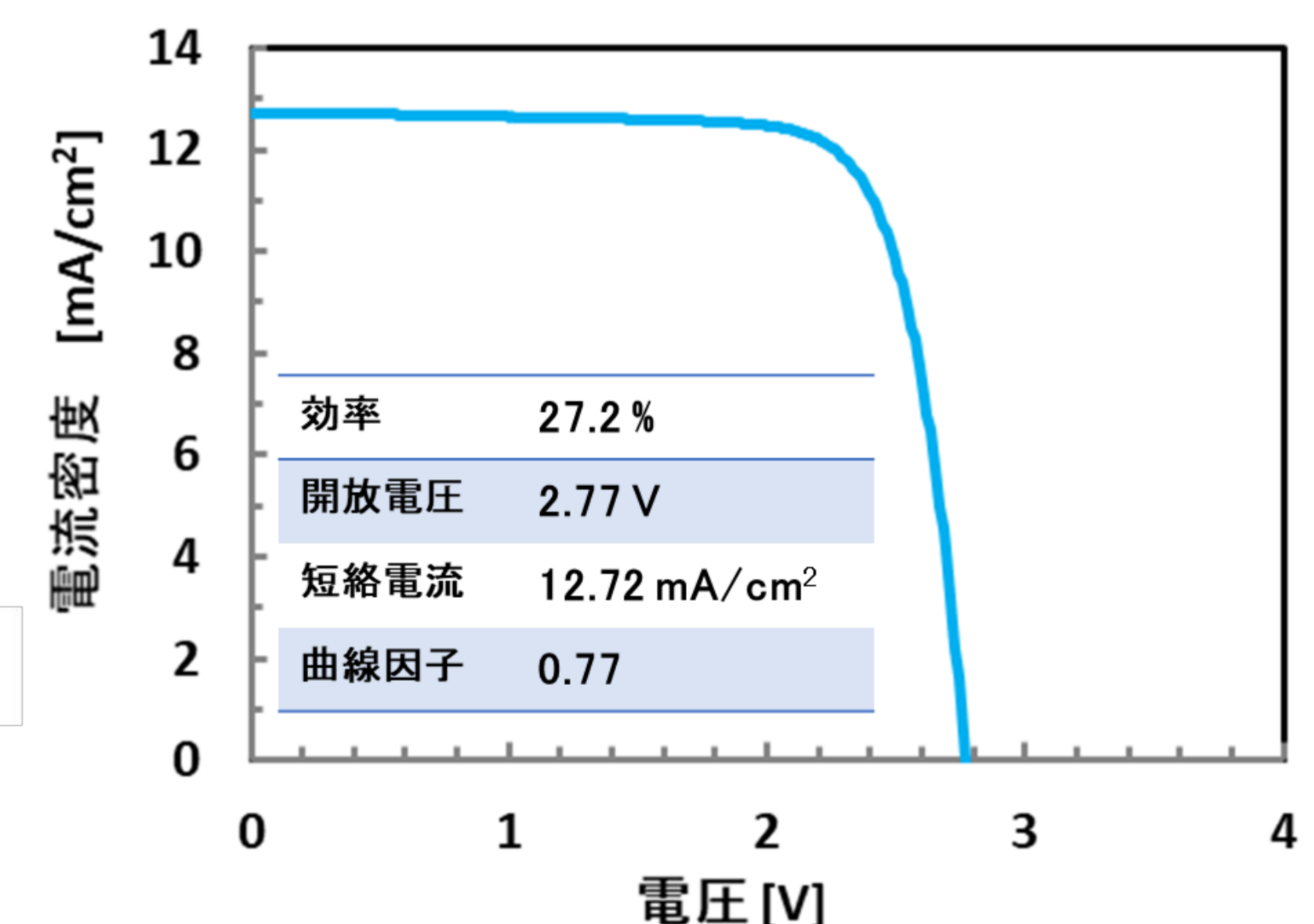
新たに開発された粘着剤を介在したスマートスタック技術

## 結果1 (素子特性)

- 発電効率~27.2%達成(従来:24.2% at 産総研\_2014)
- 2端子GaAs//CIGSe系素子として**最高性能**
  - CIGSeセルの平滑化および粘着剤介在によるスマートスタック技術適用で**安定接合を実現**
  - AlGaAsミドルセルの適用およびCIGSeセルの長波長化により**電流整合条件が改善**



InGaP/AlGaAs//CIGSe 3接合太陽電池の外観



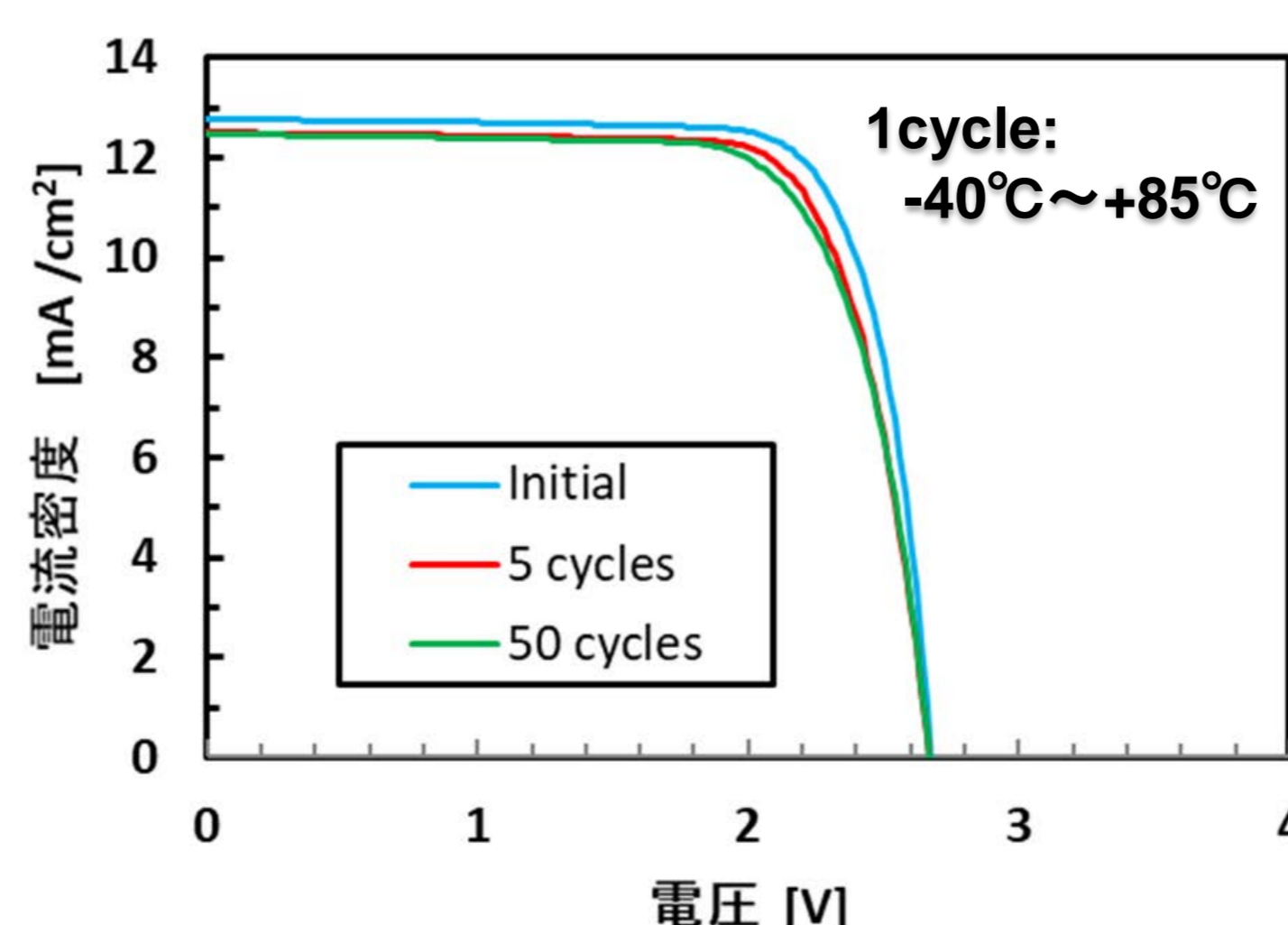
発電特性

- シミュレーションによる**予測発電効率~35%**
  - CIGSe性能向上(ボトムセルとしての特性最適化)
  - 接合界面の反射損失改善(ZnO層薄膜化等)

## 結果2 (信頼性試験)

- 信頼性初期検証として**温度サイクル試験**を実施  
50サイクル(-40°C~+85°C)

- 剥離等の外観損傷無し
- 発電効率の劣化率10%以下
- 初期的な素子耐性を確認**



温度サイクル試験

## まとめ

- Pdナノ粒子に粘着剤を介在した新スマートスタック技術開発
- InGaP/AlGaAs//CIGSe 3接合セルで発電効率~27.2%達成
- 温度サイクル試験により良好な初期信頼性を確認
- 今後は、高効率化(35%)およびCMPフリー/大面積化等が目標(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)

(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」

# 銅を接合媒体として用いたIII-V/Siスマートスタック

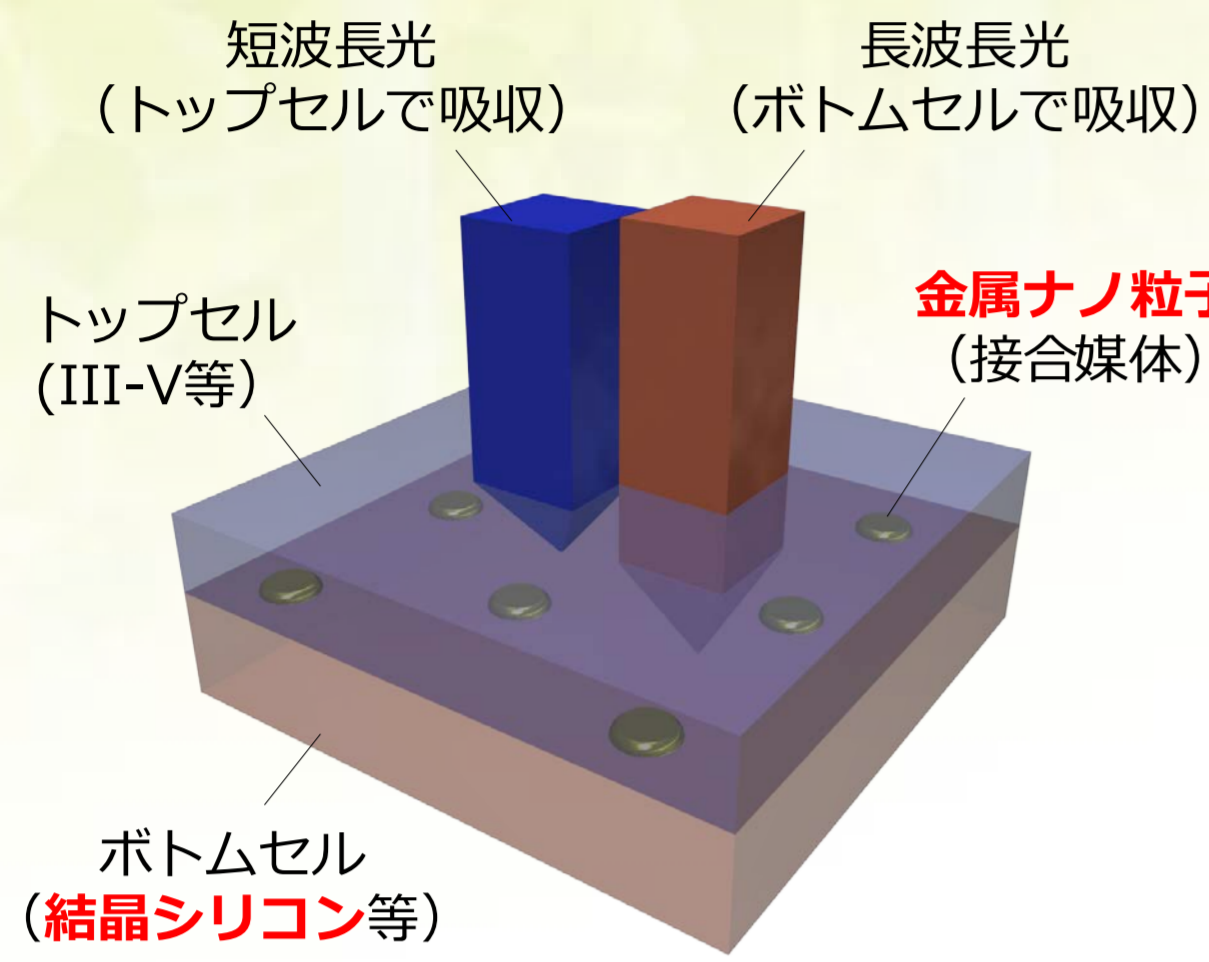
水野 英範<sup>1</sup>、牧田 紀久夫<sup>2</sup>、望月 敏光<sup>1</sup>、太野垣 健<sup>1</sup>、菅谷 武芳<sup>2</sup>、高遠 秀尚<sup>1</sup>

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 ゼロエミッション国際共同研究センター

## 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。<sup>[1,2]</sup>



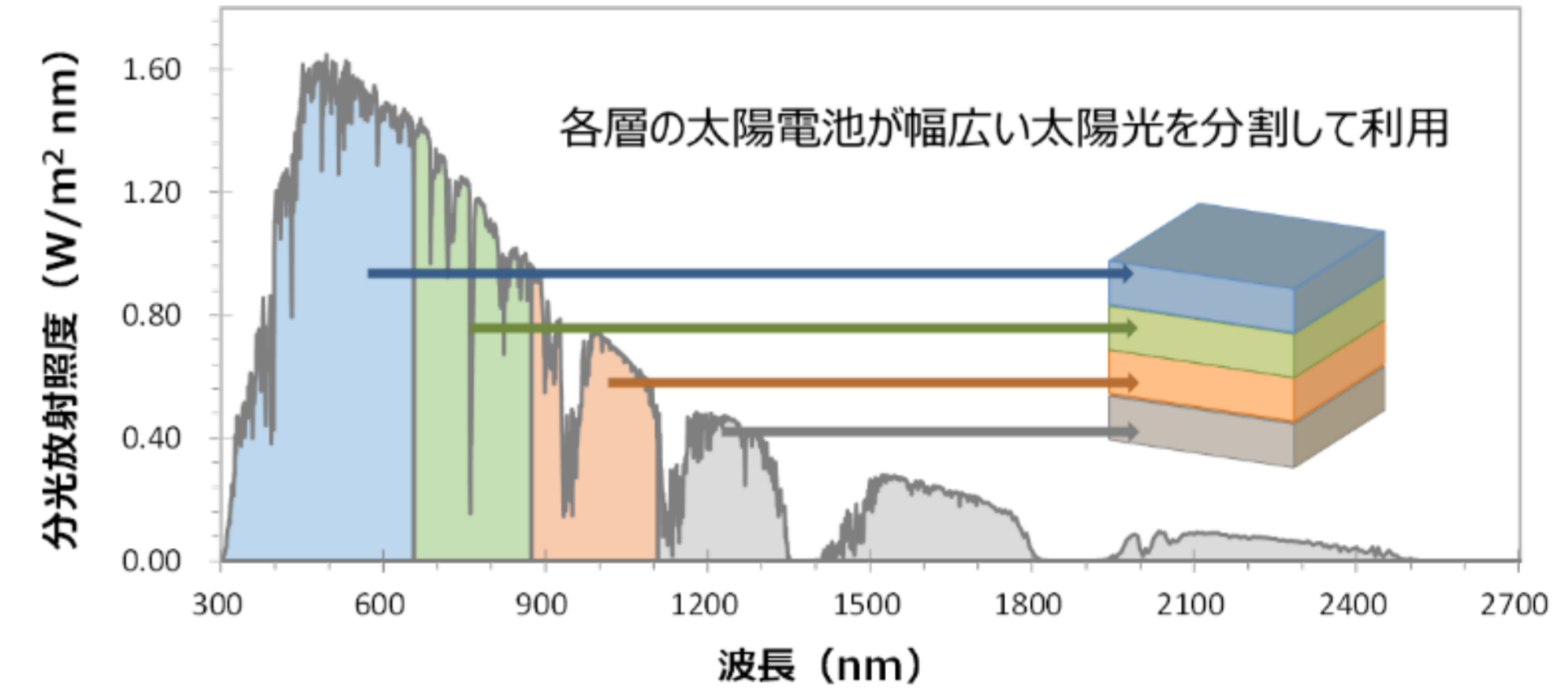
接合界面に  
金属ナノ粒子を配列  
↓  
電気を通し、光も  
阻害しないデザイン  
(電氣的・光学的接続)

これまでの、金属ナノ粒子の原料としては高価なパラジウムを用いてきたが、本研究では、今後の低コスト化を見据え安価な銅を用いたスマートスタックについて詳細検討を行った。

## 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。

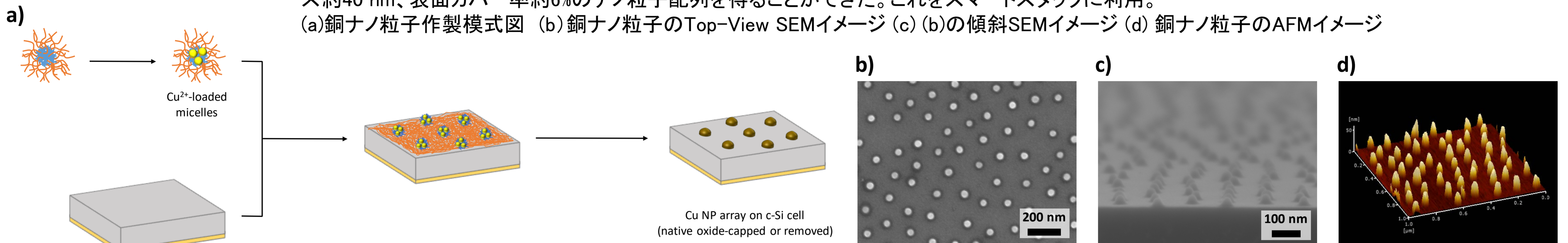


## 銅を用いたIII-V/Siスマートスタック<sup>[3]</sup>

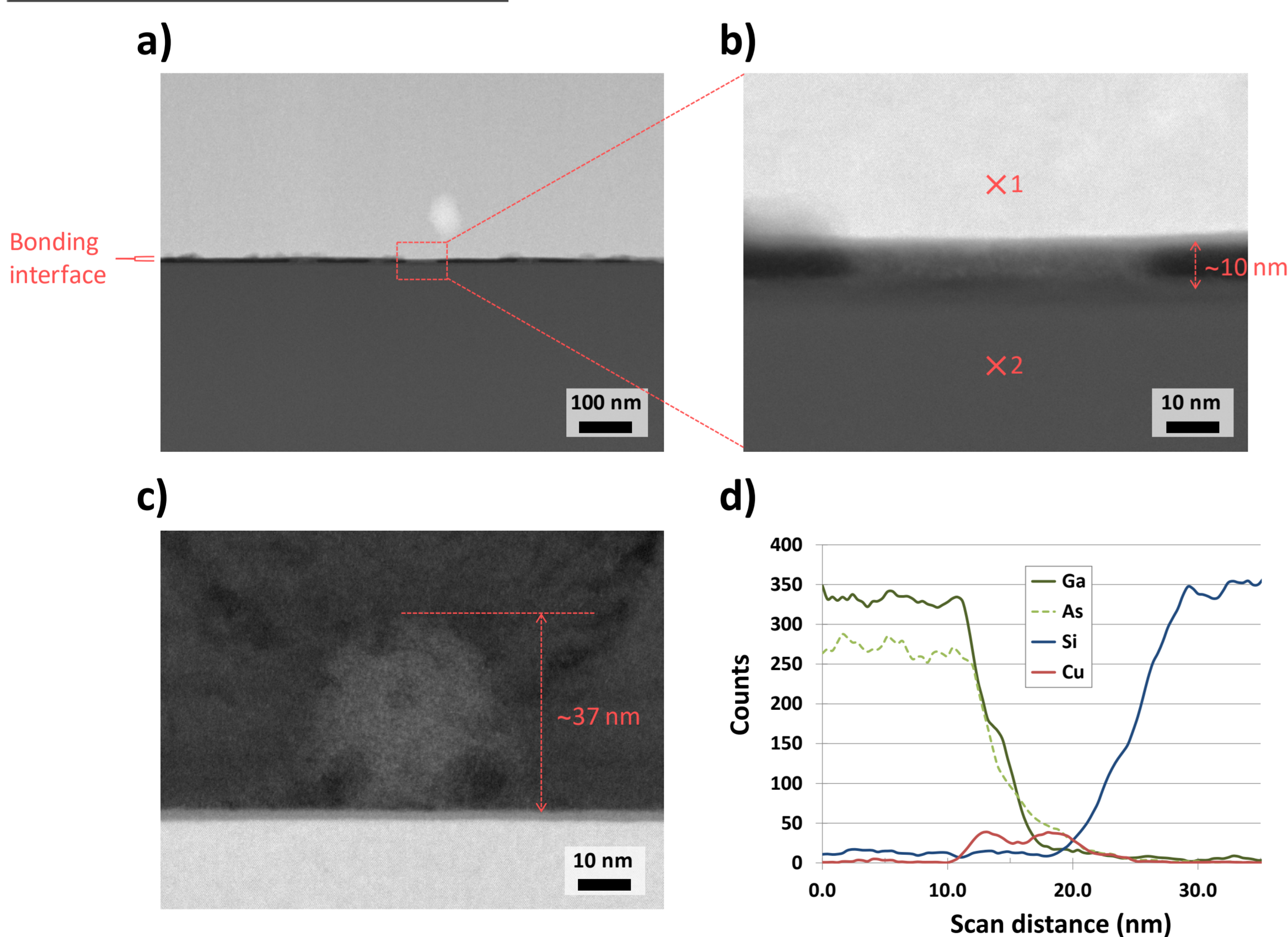
### 銅ナノ粒子の作製

Cu(II)イオンを導入したブロック共重合体の自己組織化ミセルを基板(シリコン太陽電池)表面にスピコートし、Ar/H<sub>2</sub>処理を行うことによりサイズ約40 nm、表面カバー率約6%のナノ粒子配列を得ることができた。これをスマートスタックに利用。

(a)銅ナノ粒子作製模式図 (b)銅ナノ粒子のTop-View SEMイメージ (c) (b)の傾斜SEMイメージ (d)銅ナノ粒子のAFMイメージ

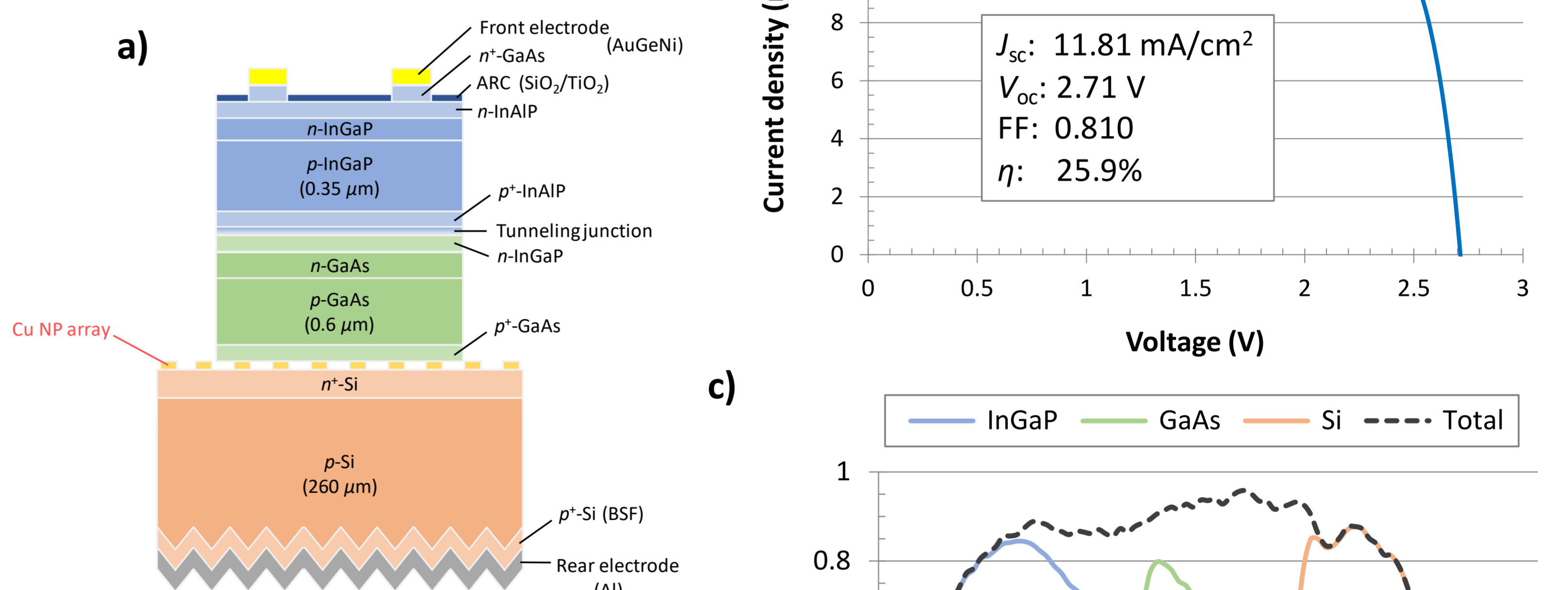


### 接合界面



STEMを用い、接合界面の観察を行った。(a,b)界面には約10 nmのギャップ(接合後の銅ナノ粒子の高さに由来)が確認された。(c)接合前の銅ナノ粒子は高さが約37 nmあったことから、スマートスタック接合は銅ナノ粒子の変形を伴って進行していることが確認された。(d) EDXラインプロファイル(bのX1からX2に沿って分析)においてはGaAs層へのCuの拡散の可能性も示唆された。

### デバイス特性



(a) 銅ナノ粒子配列を用いたInGaP/GaAs/Siスマートスタック3接合太陽電池の構造模式図 (b) 電流-電圧特性( $J_{sc} = 11.81 \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{oc} = 2.71 \text{ V}$ ,  $FF = 0.810$ , 変換効率 = 25.9%) (c) EQEスペクトル。InGaP・GaAs・Siセルにおいて発生した電流密度はそれぞれ11.90、11.82、12.11 mA/cm<sup>2</sup>であり、GaAs律速であることが確認された。

## まとめ

本研究では、スマートスタックに用いる金属として、高価なパラジウムではなく銅を検討した。銅ナノ粒子配列を用いた場合でも、高効率タンデム太陽電池実現に不可欠な低抵抗・高光透過を有する接合界面が得られることを確認した。InGaP/GaAs/Siからなる3接合太陽電池において変換効率25.9%を達成した。

謝辞: 本研究は 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。

## 参考文献

- [1] H. Mizuno, K. Makita, and K. Matsubara, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 191111 (2012).
- [2] H. Mizuno, K. Makita, T. Sugaya, R. Oshima, Y. Hozumi, H. Takato, and K. Matsubara, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 025001 (2016).
- [3] H. Mizuno, K. Makita, T. Michizuki, T. Tayagaki, T. Sugaya, and H. Takato, *ACS Appl. Energy Mater.*, **3**, 3445 (2020).



# ハイドライド気相成長法で作製した GaAs太陽電池のエピタキシャルリフトオフ

庄司靖<sup>1</sup>、大島隆治<sup>1</sup>、牧田紀久夫<sup>1</sup>、生方映徳<sup>2</sup>、菅谷武芳<sup>1</sup>  
 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

## 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

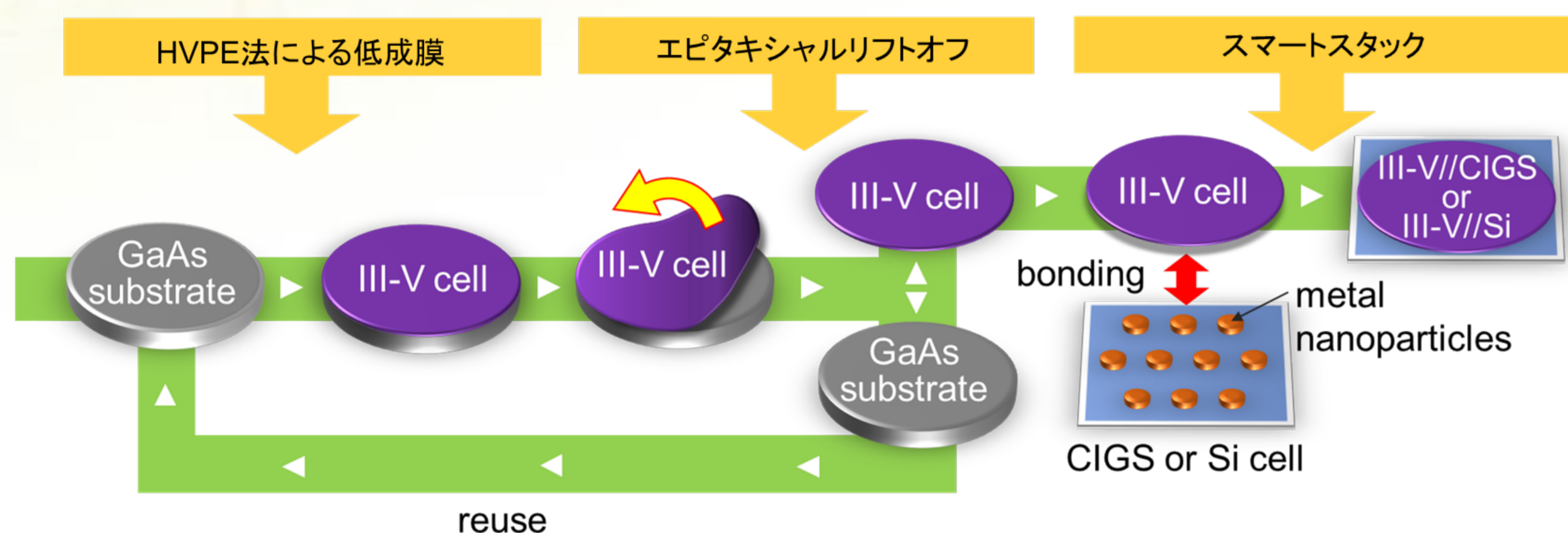


電気自動車

今後期待される応用先

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

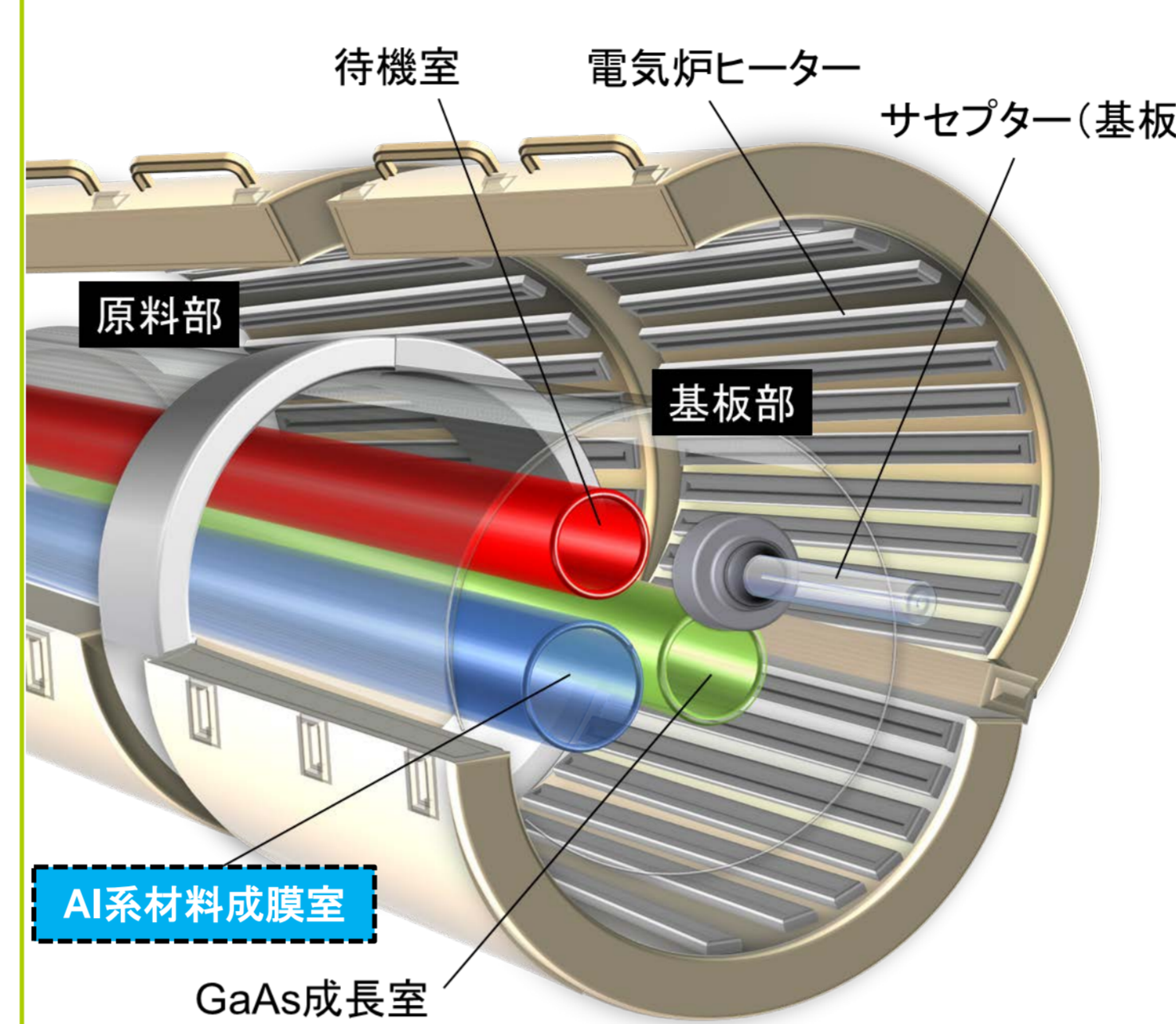
## 我々が提案する高効率・低コスト太陽電池作製のアプローチ



- ① 安価な原料のハイドライド気相成長(HVPE)法による成膜<sup>[1,2]</sup> → 成膜コストの低減
- ② エピタキシャルリフトオフ技術による基板再利用<sup>[3,4]</sup> → 基板コストの低減
- ③ 金属ナノ粒子を用いたスマートスタックによる異種材料接合<sup>[5]</sup> → 安価に高効率化

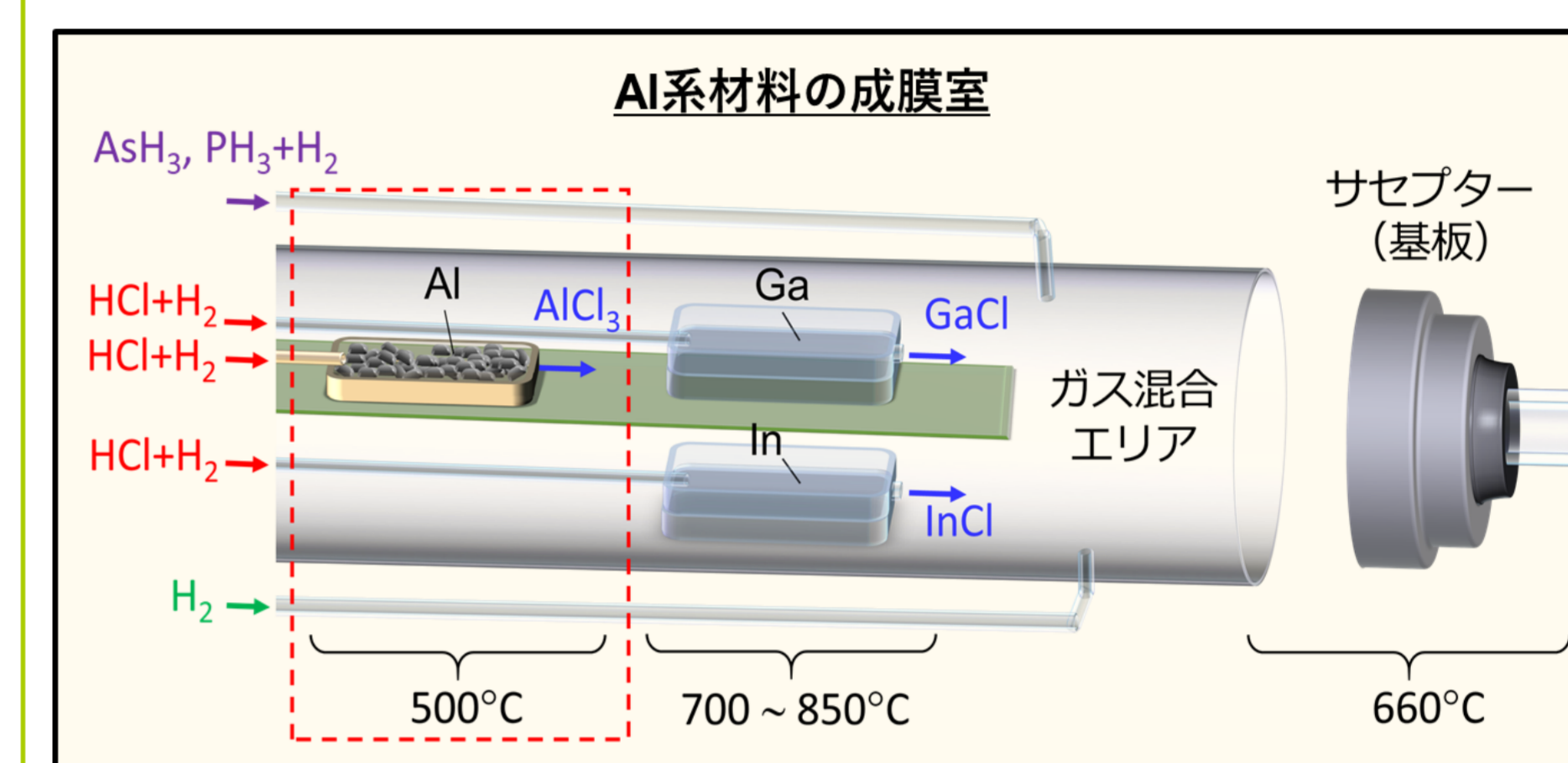
問題点: 基板再利用(エピタキシャルリフトオフ)を行うにはAIAsの成膜が必要  
 HVPE法ではAI系材料の成膜に課題あり<sup>[6]</sup>

## 本研究で用いたAI系材料成膜用HVPE装置

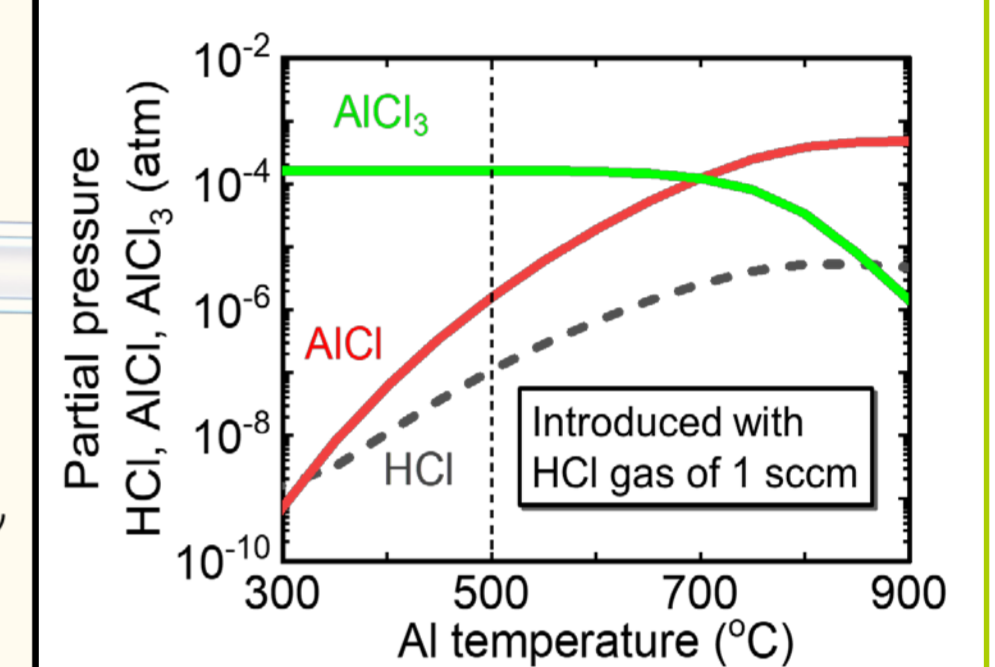


### HVPE法のメリット/デメリット

- 😊 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
    - ・AlCl<sub>3</sub>が石英反応炉を損傷
    - ・AlCl<sub>3</sub>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AlCl<sub>3</sub>の発生を抑制



AI温度に対する塩化物ガス種の平衡分圧に関する計算結果



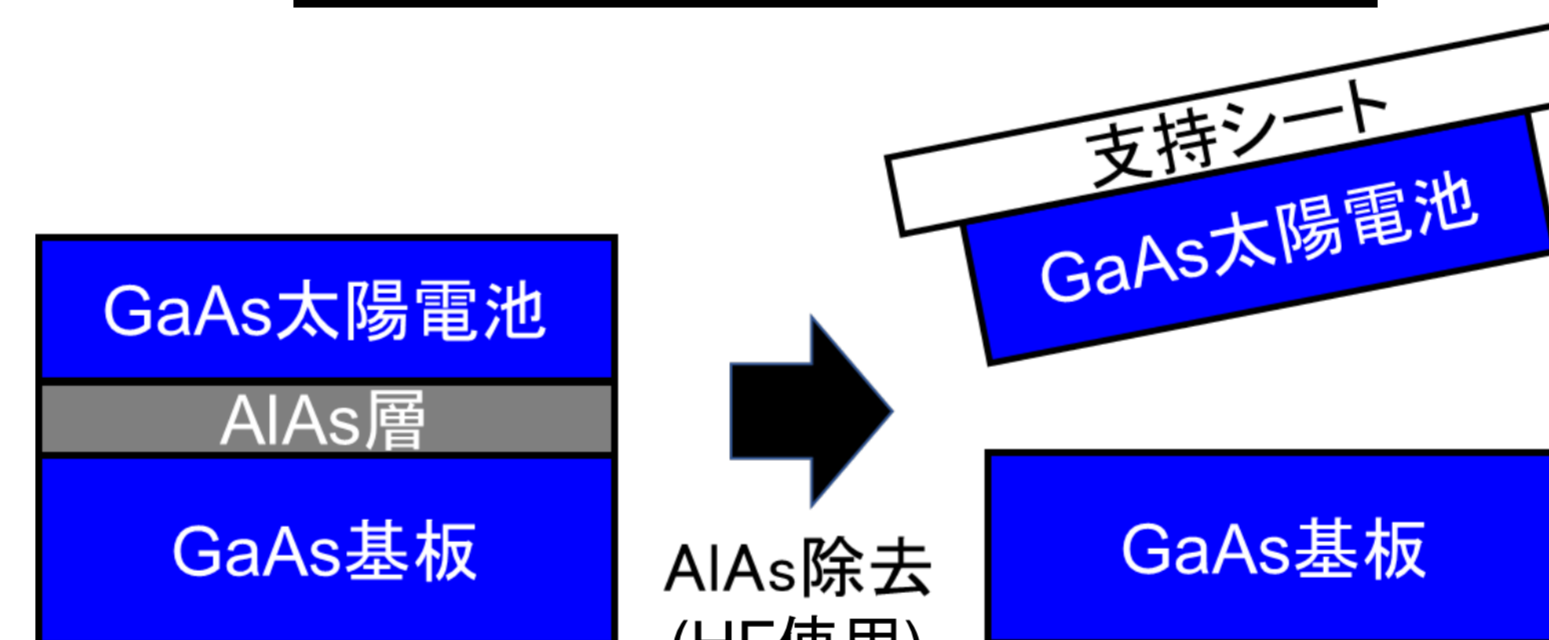
AlCl<sub>3</sub>を前駆体として生成・利用することでHVPEの石英炉の損傷を防止

## 実験結果

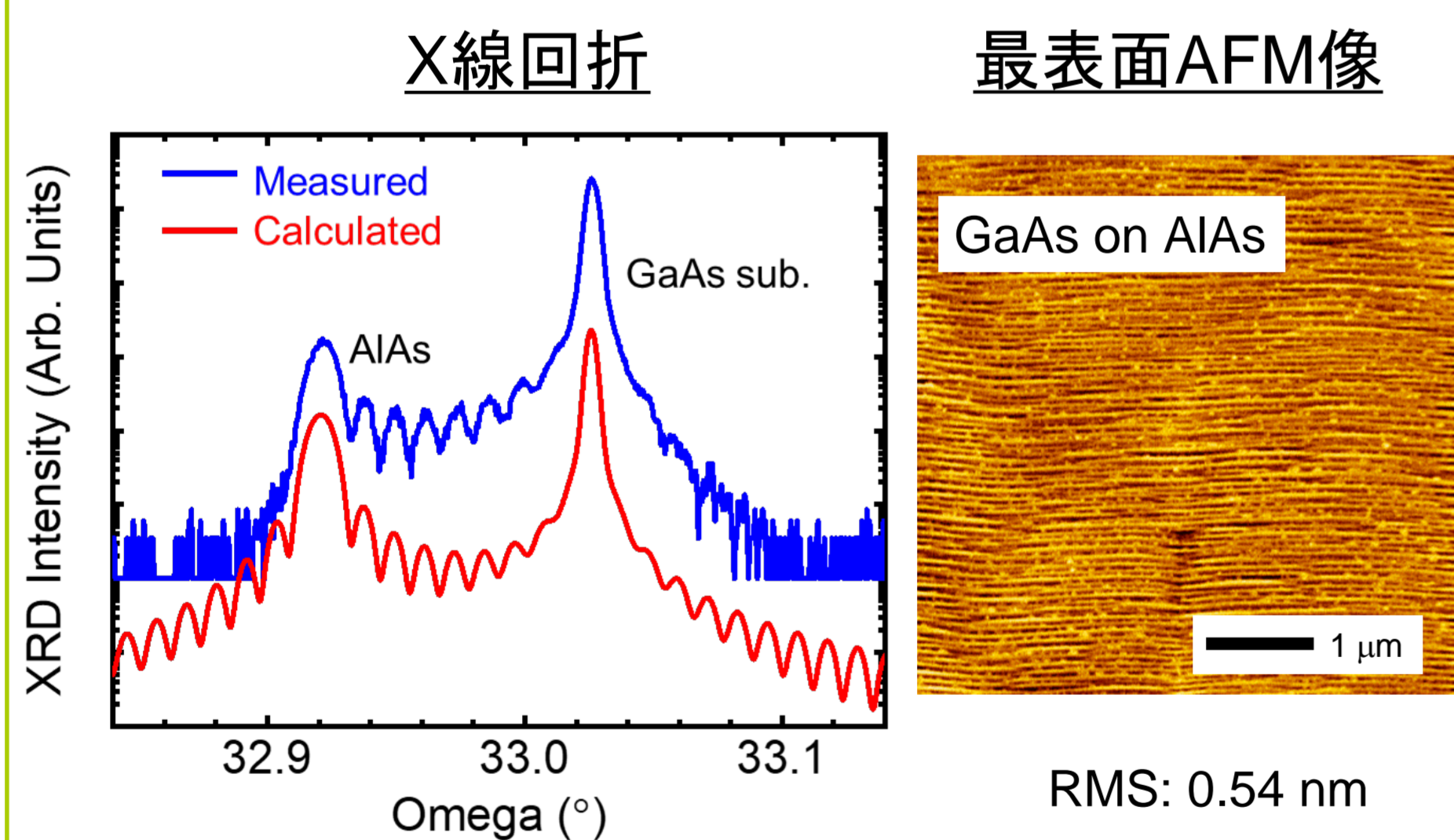
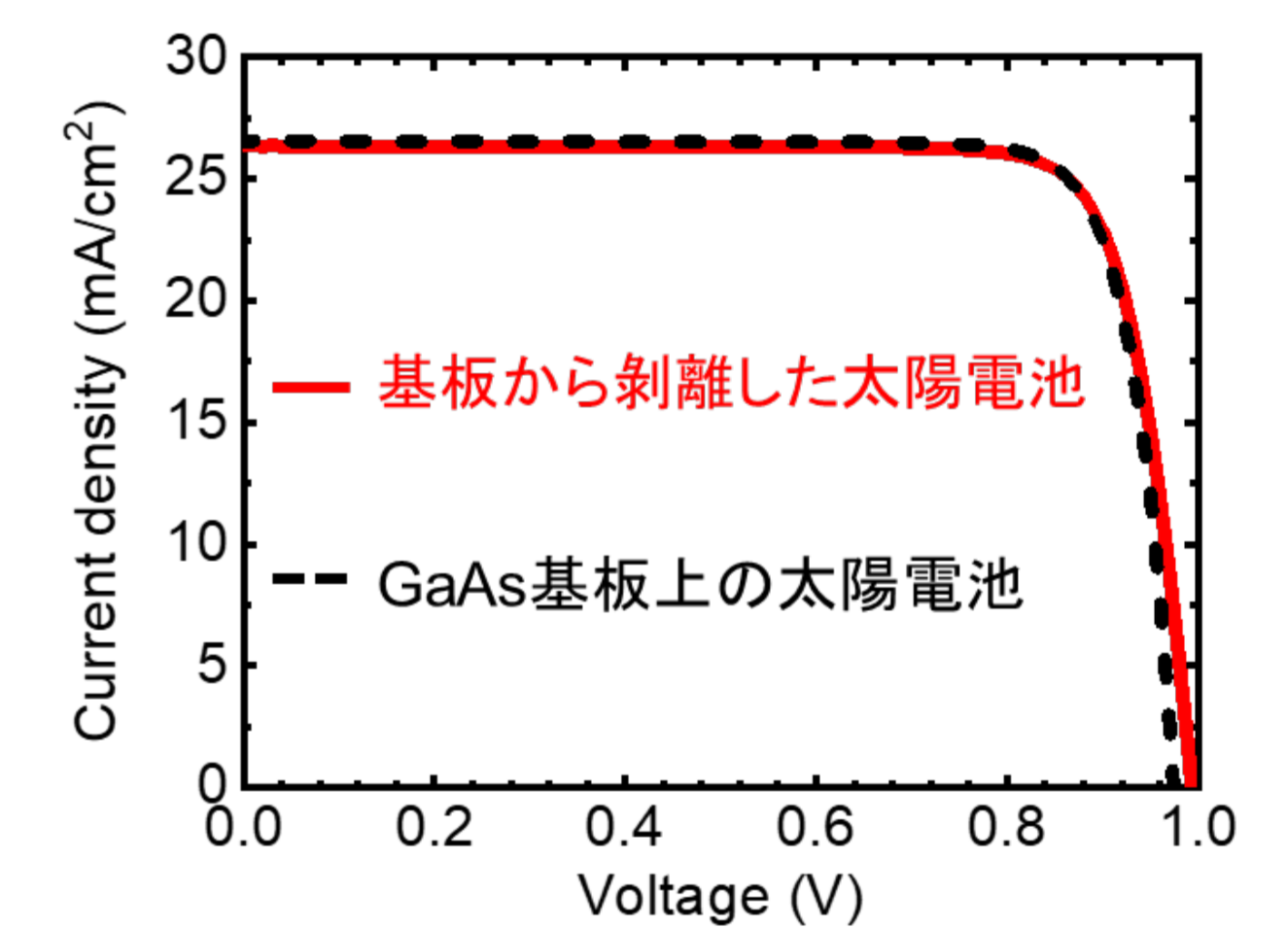
### HVPE法で成膜したAIAs層の評価

GaAs膜	HCl[Al]流量	6 sccm
AIAs層	AsH <sub>3</sub> 流量	10 sccm
GaAs基板	基板温度	660°C
	AI温度	500°C

### エピタキシャルリフトオフ試験



### 電流電圧特性の比較



- HVPE法で高品質なAIAs結晶が成膜できることを実証
- AIAs層上でも平坦なGaAs膜が得られることを確認

- エピタキシャルリフトオフによる太陽電池層と基板の分離に成功
- 基板から剥離することで軽量かつフレキシブルな太陽電池

- 基板から剥離しても性能を維持
- HVPE法で太陽電池の剥離は世界初

	基板から剥離したセル	GaAs基板上
J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	26.36	26.57
V <sub>oc</sub> (V)	0.994	0.974
FF (-)	0.826	0.838
Efficiency (%)	21.63	21.69

## 結論

- III-V族太陽電池のコスト低減を目的として、AIAsの結晶成長が可能な太陽電池成膜用HVPE装置を太陽日酸株式会社と共同で開発した。
- AI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(AlCl<sub>3</sub>)を生成し、結晶成長に利用した。
- HVPE法でも高品質なAIAs結晶が得られ、AIAs層上にも平坦なGaAs結晶が成長できることを実証した。
- AIAs層をHFで除去することによってHVPE法で作製した太陽電池を基板から剥離することに成功した。
- 剥離した太陽電池は基板上との太陽電池と同等の性能を示した。(HVPEで作製した太陽電池の剥離は世界初)

## 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「超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発」の委託の下で行われた。

## 参考文献

- [1] R. Oshima et al, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57, 08RD06 (2018).
- [2] Y. Shoji et al., Appl. Phys. Express, vol. 12, 052004 (2019).
- [3] M. Konagai et al., J. Cryst. Grow. vol. 45, 277 (1978).
- [4] E. Yablonovitch et al., Appl. Phys. Lett., vol. 51, 2222 (1987).
- [5] H. Mizuno et al., Jpn. J. Appl. Phys. vol. 55, 025001 (2016).
- [6] J. S. Yuan et al., J. Appl. Phys. vol. 57, 1380 (1985).

# 結晶シリコン太陽電池におけるマスク注入プロセスの開発

棚橋克人、森谷正昭、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

- シリコンデバイスにおいて拡散層を形成するプロセス技術としてイオン注入法がある。イオン注入法によれば熱力学的に非平衡な不純物プロファイルを生じ、面内均一性高く形成することが可能である。
- ハードマスクを利用するマスク注入法によればフォトリソなしで基板の特定領域へ拡散層を形成できるが、拡散層の面積と位置精度に応じたマスクの加工精度と位置合わせが求められるため、微細な拡散層ほどマスク注入の難易度が上がる。
- 本研究において、大面積シリコン製ステンシルマスクによる太陽電池基板へのマスク注入プロセス技術を開発する。

## シリコン製ステンシルマスクによるリンのマスク注入

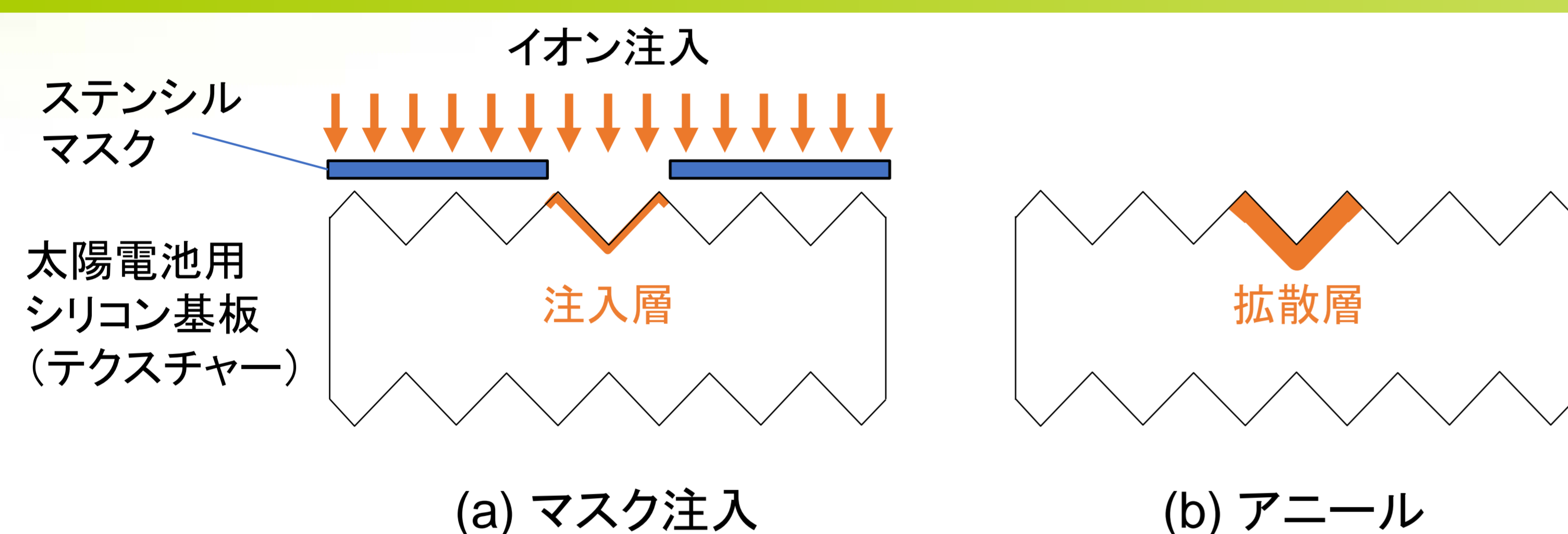
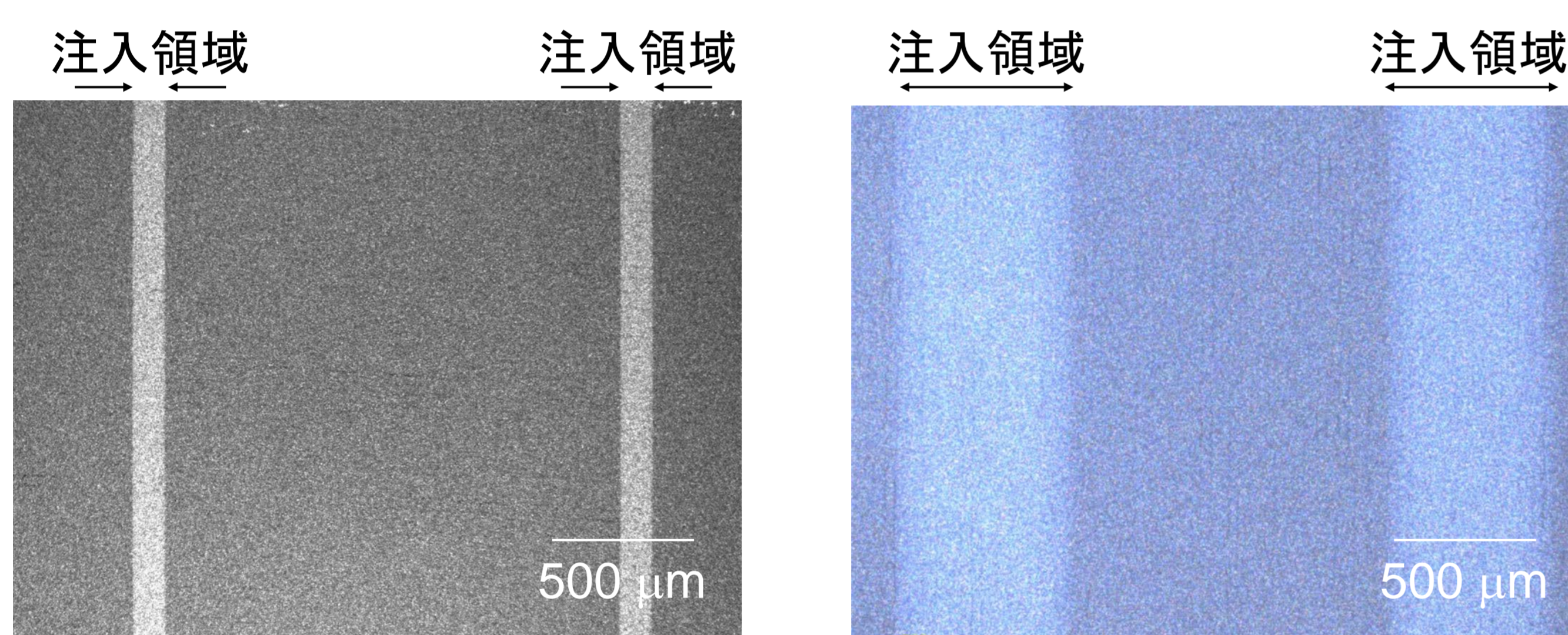


図1 マスク注入による拡散層の形成法

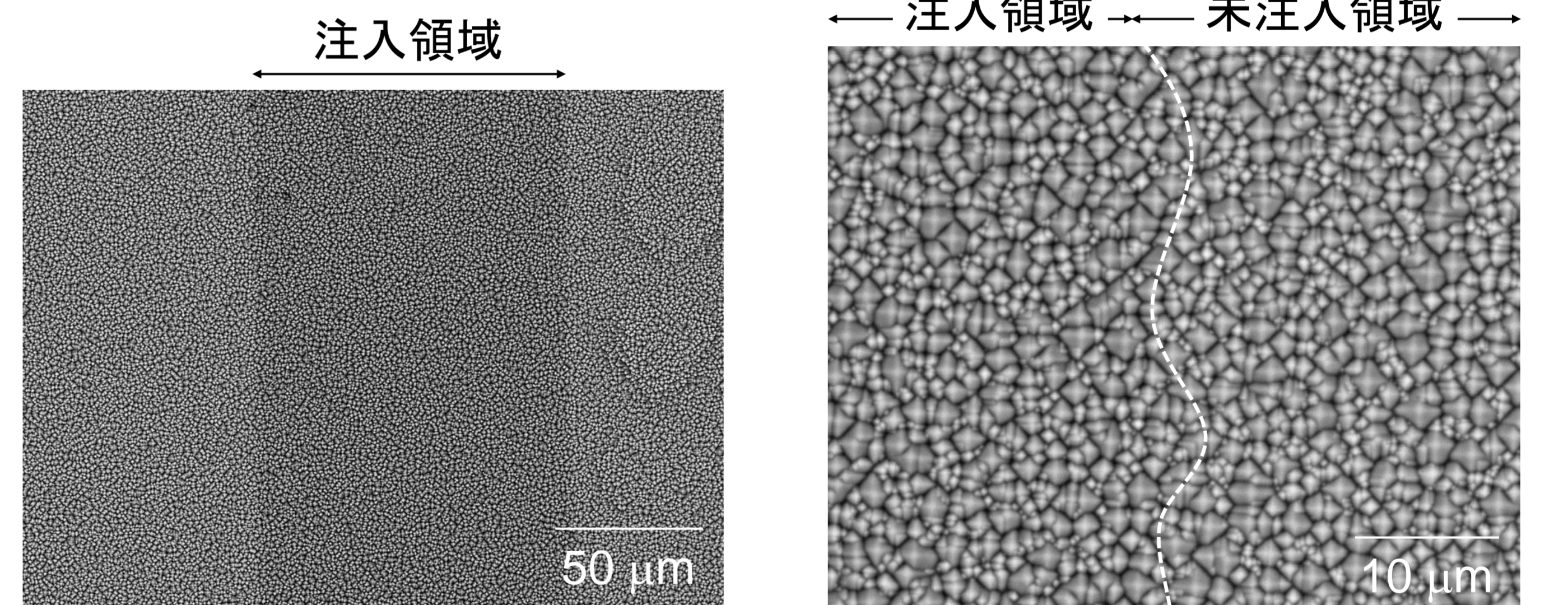


図2 シリコン製ステンシルマスク(200mmΦシリコン基板)



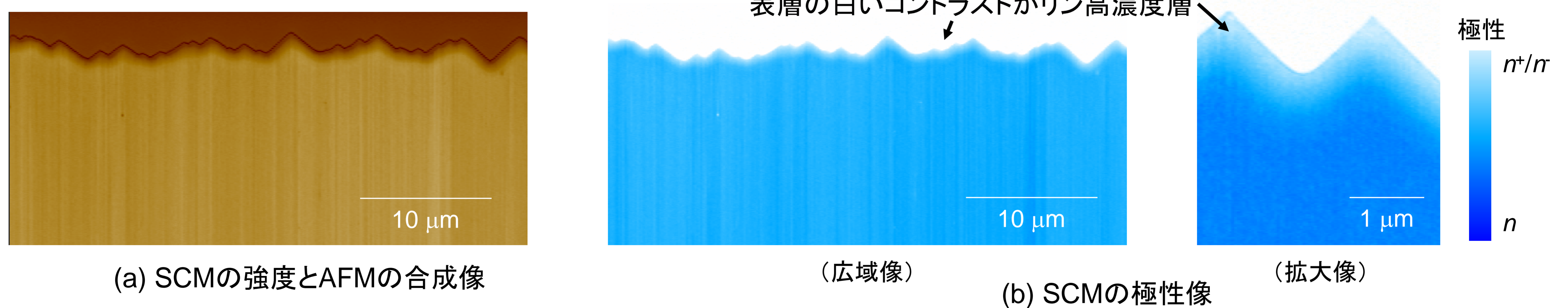
(a) シリコン製マスク (b) カーボン製マスク(従来法)

図3 マスク注入によるリン注入層のレーザ顕微鏡像



(a) スリット領域 (b) スリット端部の注入/未注入の境界

図4 シリコン製マスクによるリン注入層の走査型電子顕微鏡像



(a) SCMの強度とAFMの合成像

(広域像)

(b) SCMの極性像

(拡大像)

図5 マスク注入によるリン拡散層(活性化アニール後)の走査型容量顕微鏡像

## 結論

- 200mmΦと300mmΦのシリコン基板にスリット加工を施した大面積ステンシルマスクを開発し、156mm角の太陽電池用基板への一括マスク注入を可能にした。
- シリコン製マスクによる注入層は従来のカーボン製よりも細線（注入幅~100 μm）でエッジラフネス（数μm）が小さい。
- シリコン製ステンシルマスクを用いてテクスチャー基板へのリンのマスク注入を実施し、均一な深さのリン拡散層を形成した。

## 謝辞

- 本研究の一部は新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)の支援のもとに実施致しました。関係各位に感謝申し上げます。

## 参考文献

- Katsuto Tanahashi, Masaaki Moriya, Katsuhiko Shirasawa, Hidetaka Takato, Materials Science in Semiconductor Processing **124** (2021) 105589.

# 裏面電極型結晶シリコン太陽電池におけるイオン注入プロセスの開発

棚橋克人、立花福久、森谷正昭、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

- これまで我々は結晶シリコン太陽電池の拡散層を形成するためのプロセス技術としてイオン注入法の開発を進めてきた。イオン注入法によれば「イオン注入+アニール」により拡散層を形成するため、熱拡散法では実現できないような非平衡な不純物プロファイルを形成することが可能である。
- 裏面電極型太陽電池においては裏面にエミッタ領域とBSF領域を形成するが、極性が異なる拡散層の形成に伴う製造工程数の増加が課題である。本研究ではイオン注入法を用いて拡散層形成の工程を削減するプロセス技術を開発する。

## イオン注入法を利用したエミッタ・BSF領域形成のセルフアラインプロセス

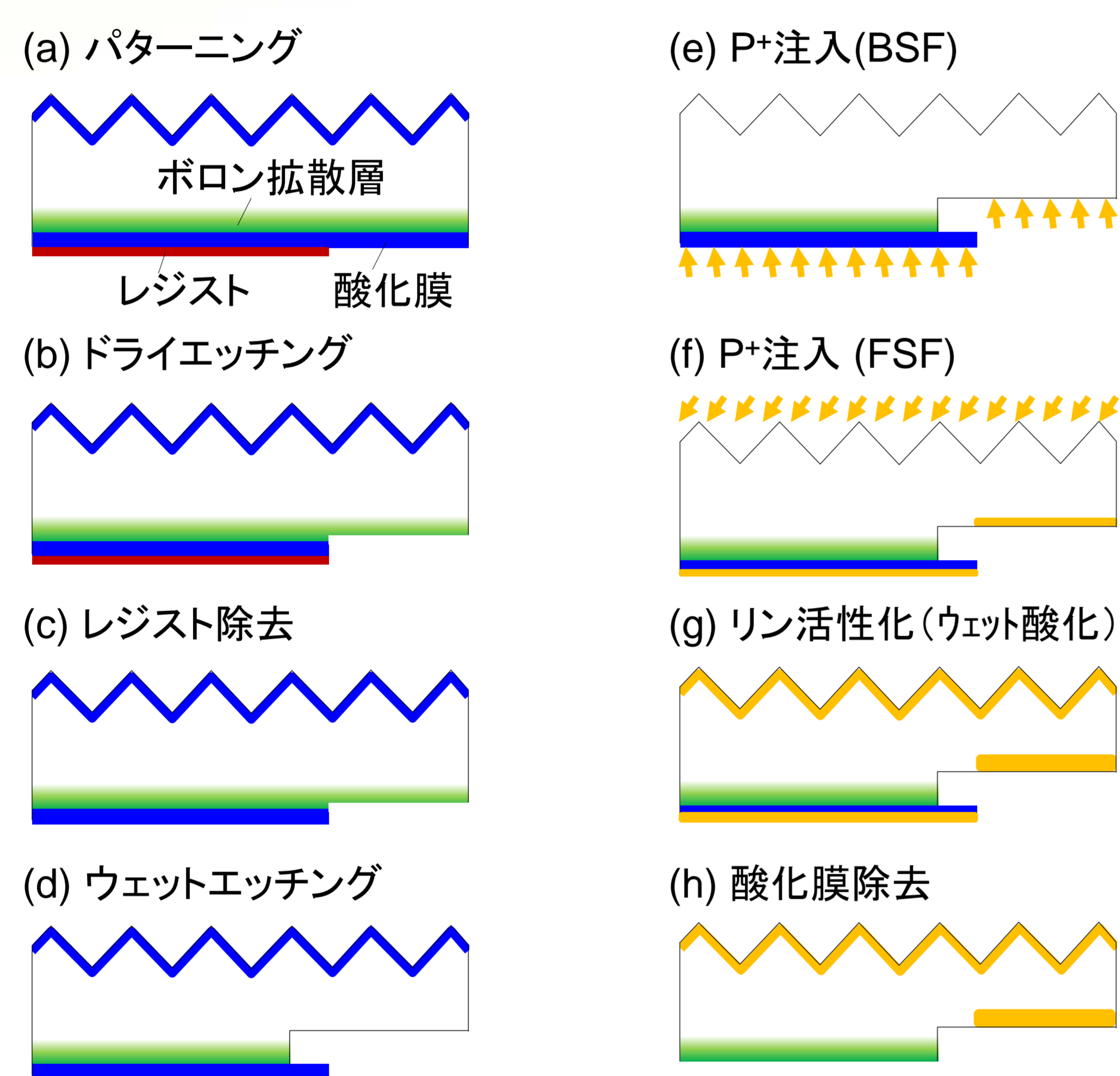


図1 リソグラフィ工程でエミッタ・BSF間にギャップを形成するためのイオン注入セルフアラインプロセスフロー。

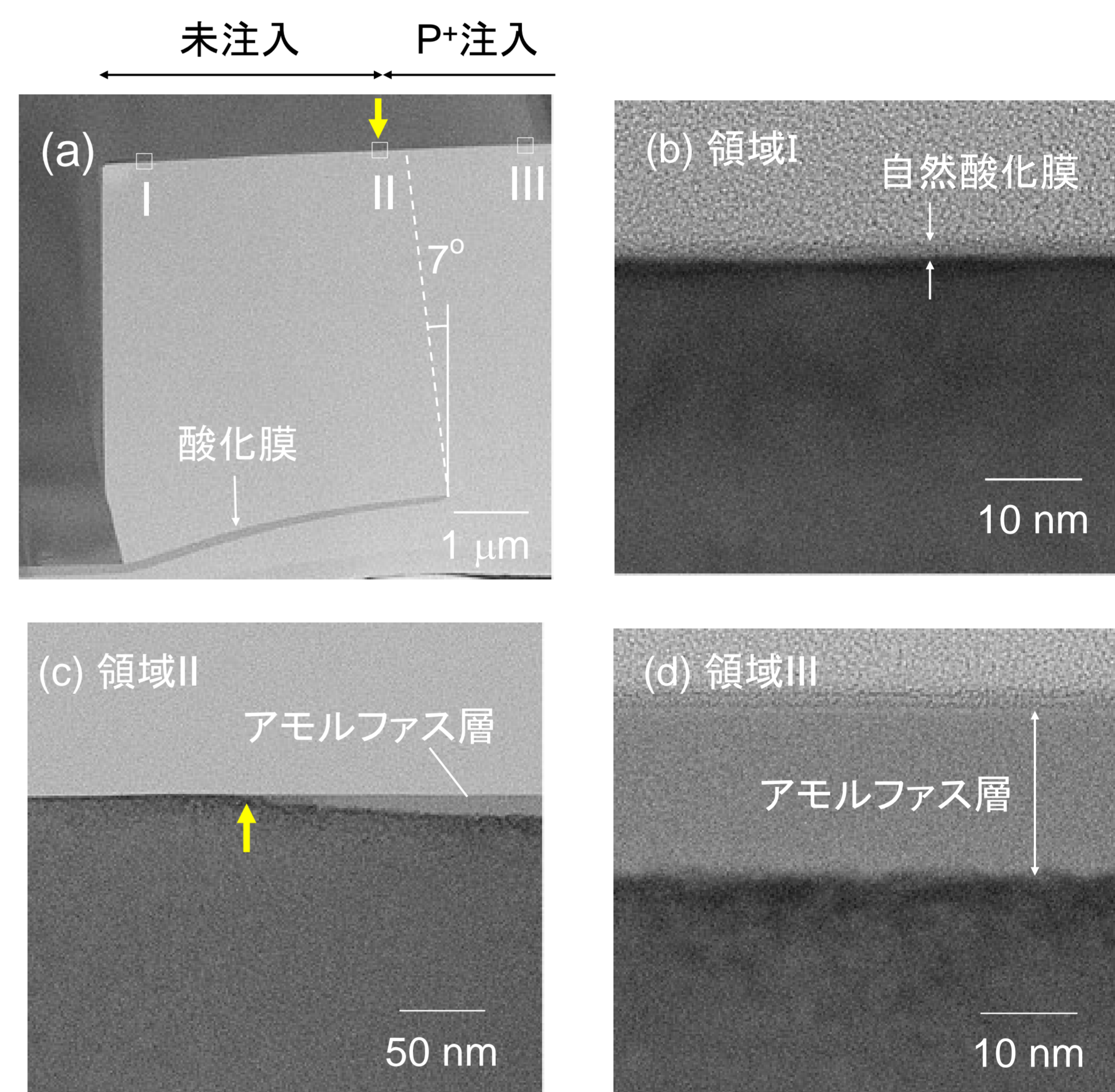


図2 酸化膜の底構造へリン注入を行ったときの(図1(e))の透過型電子顕微鏡像。(b), (c), (d)は(a)の領域I, II, IIIの拡大図。

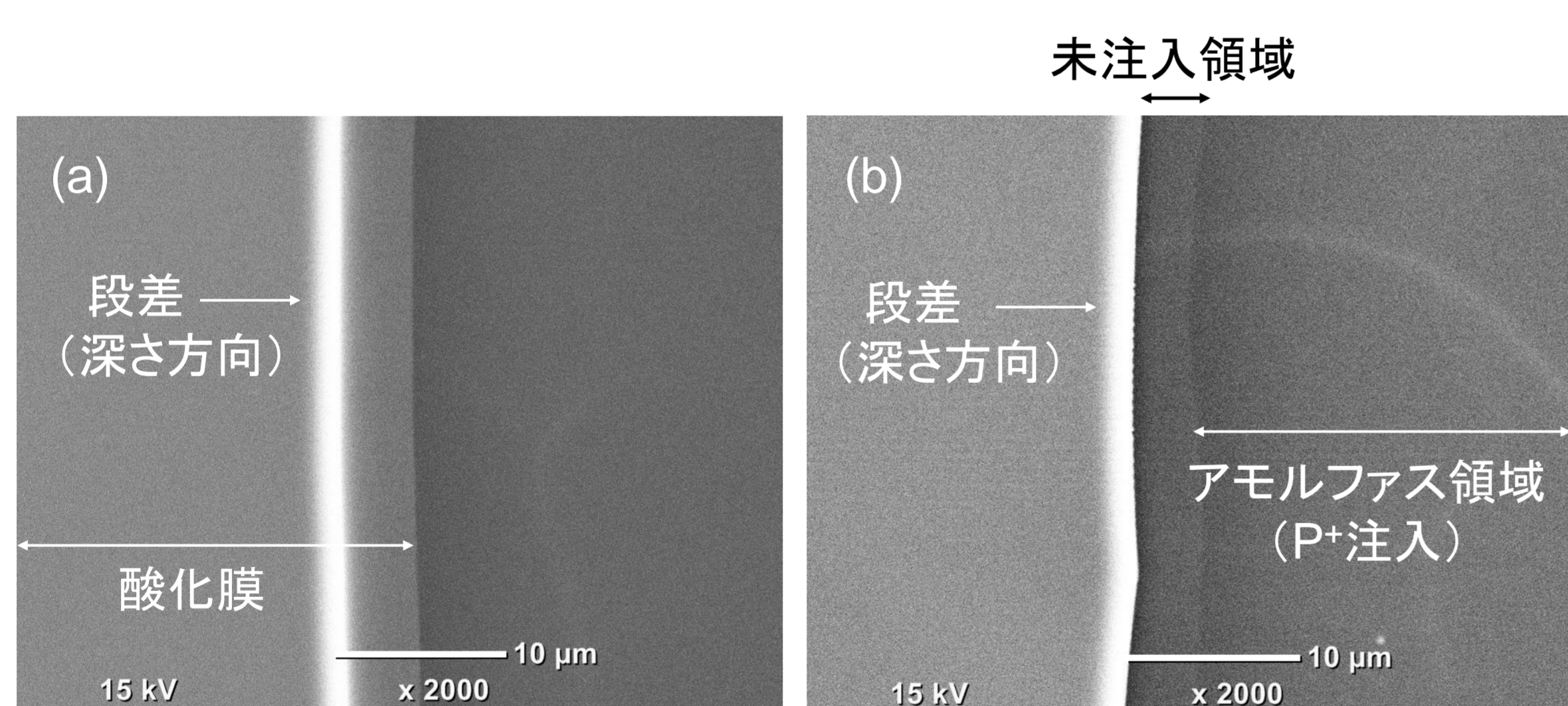


図3 酸化膜の底構造へリン注入を行ったときの(図1(e))の走査型電子顕微鏡像。(a)は酸化膜付きで観察、(b)は酸化膜剥離後の観察像。

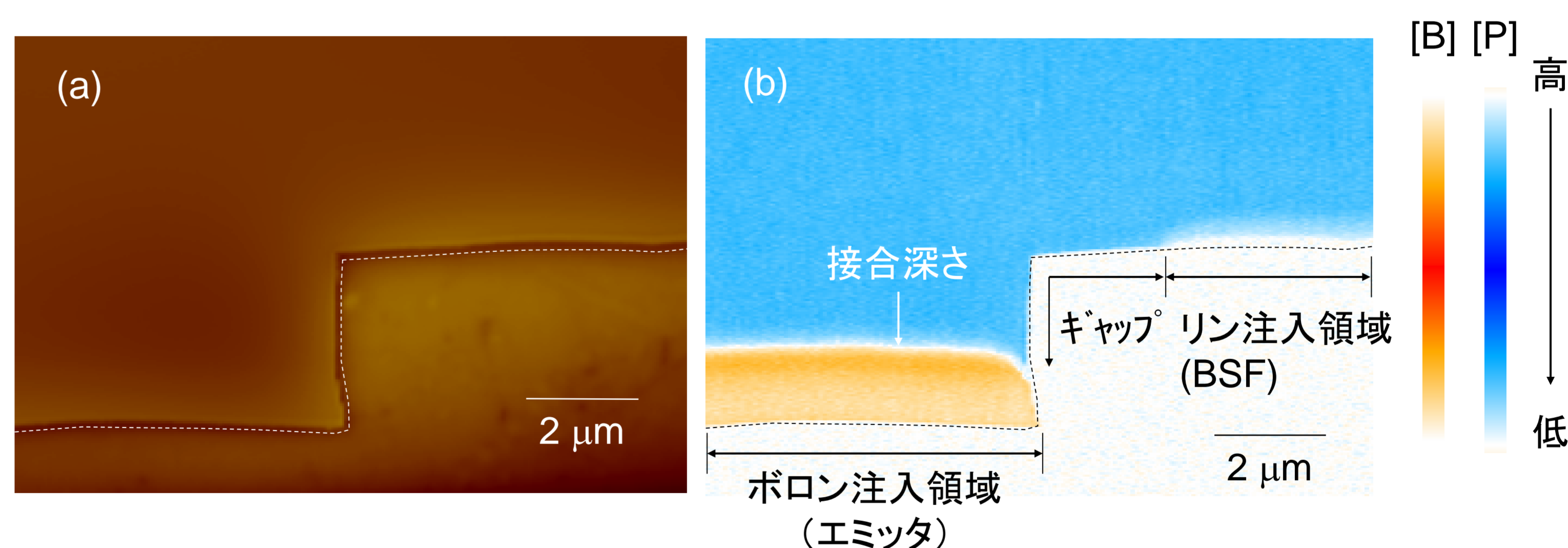


図4 図1のプロセスフローで作製したボロン拡散層(エミッタ)、リン拡散層(BSF)と未注入領域(ギャップ)の(a)原子間力顕微鏡像と(b)走査型容量顕微鏡像。

## 結論

- ボロン拡散層の形成後、フォトリソでエミッタ領域をパターニングし、ドライエッチングとウェットエッチングを併用してボロン層を分離後、酸化膜の底構造を形成した。
- 酸化膜をハードマスクにビームラインタイプのリン注入を行い、リンの注入領域と未注入領域(底構造によるマスク)を形成した。
- 以上より、リソグラフィ工程のみのセルフアラインプロセスでエミッタ、BSF、ギャップの形成が可能となった。

## 謝辞

- 本研究の一部は新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)の支援のもとに実施致しました。関係各位に感謝申し上げます。

## 参考文献

- K. Tanahashi, T. Tachibana, M. Moriya, Y. Kida, K. Shirasawa, and H. Takato, Proceedings of 34th EU PVSEC, (2018).

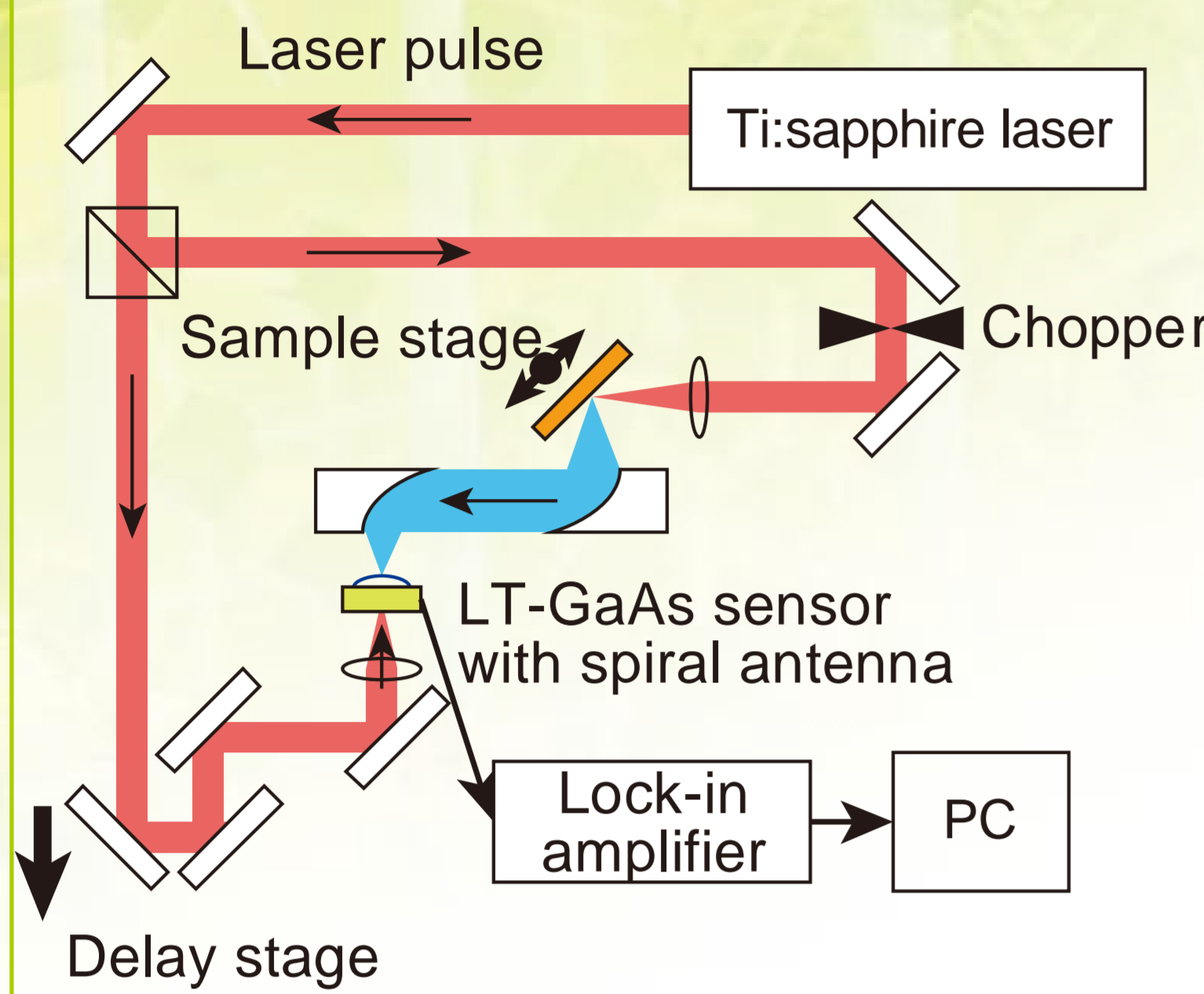
# ALD法を用いて作製した酸化膜のレーザーテラヘルツ放射顕微鏡による評価

望月 敏光<sup>1</sup>, 薄 謙志郎<sup>1</sup>, 棚橋 克人<sup>1</sup>, 伊藤 明<sup>2</sup>, 中西 英俊<sup>2</sup>, 川山 巖<sup>3</sup>, 斗内 政吉<sup>3</sup>

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、

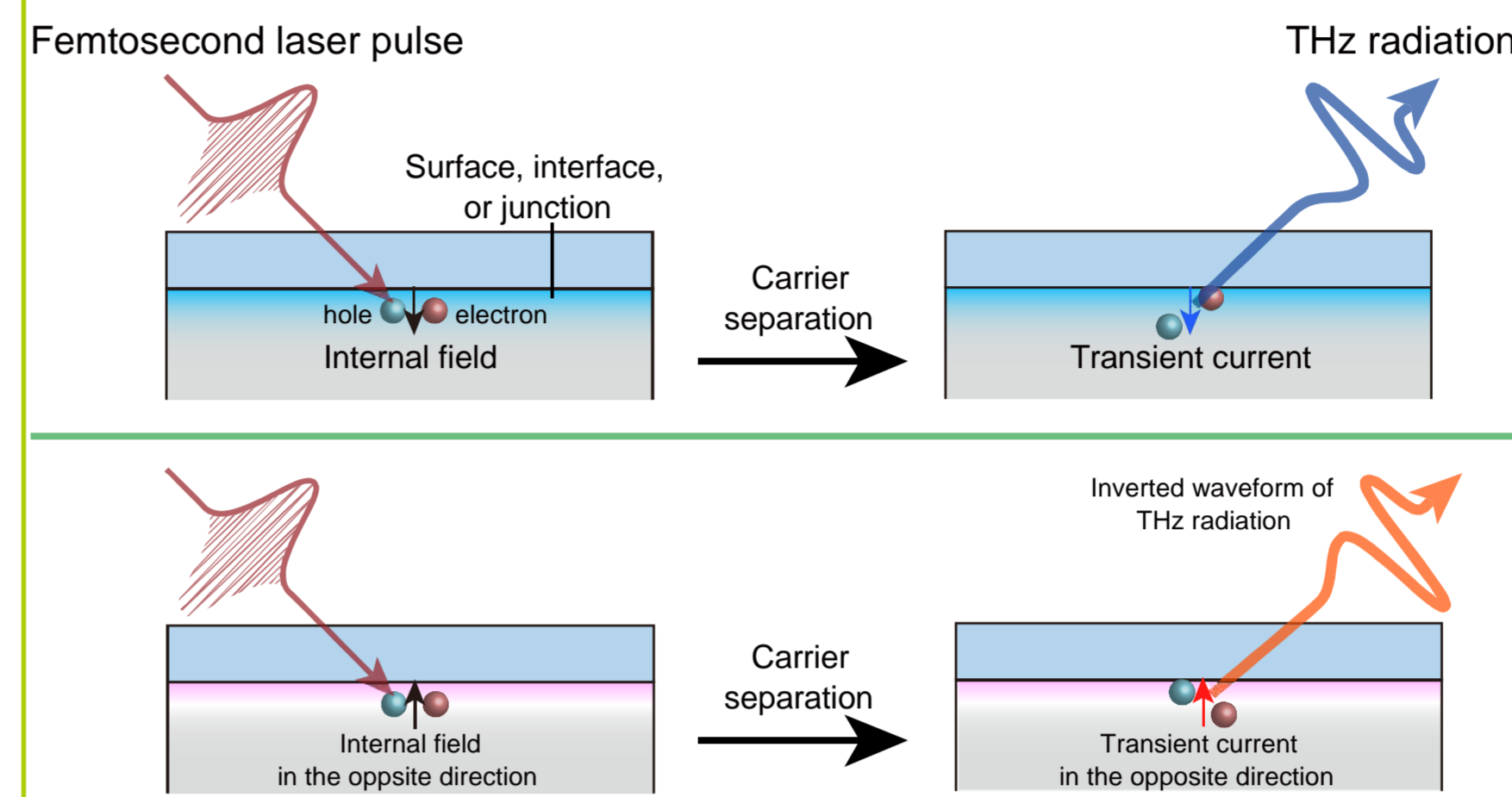
2 SCREEN、3 大阪大学

## LTEMについて



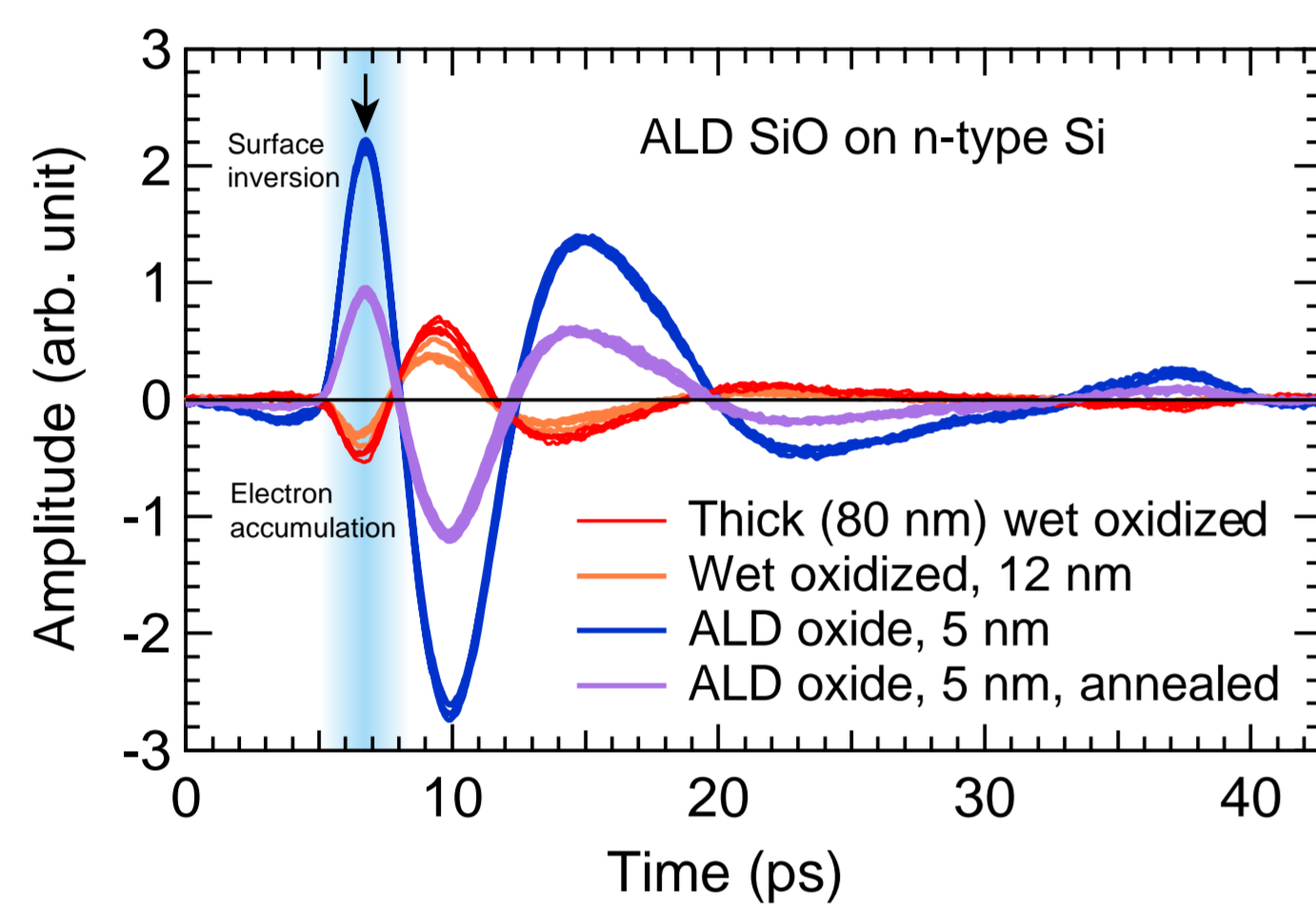
レーザーテラヘルツ放射顕微鏡 (Laser Terahertz Emission Microscopy, LTEM) は、半導体表面近くの評価を行える手法である。テラヘルツ時間領域分光に、半導体デバイスの評価用に高い空間分解能 (~10 μm) を付与したものである[1-6]。

## LTEMによる半導体評価の原理



半導体試料に超短パルス光を照射して放射されるTHz光の電場の極性と大きさは単純な近似では表面ポテンシャルと線形の関係があり、容量-電圧(C-V)法類似の評価を絶縁膜無しで行える[2,7,8]。

## 目的および評価した試料について



ALD process for silica: BTBAS precursor carried by N<sub>2</sub> bubbler, oxidized with ozone. Substrate temperature = 200 °C, 0.8 Å per cycle, cycle duration ~ 12 s.

太陽光チームではALD法で成膜されたSi酸化膜による太陽電池の表面パッシベーションの高性能化を進めており、その中で作られた試料のうちいくつかについて通常の酸化膜と逆位相のTHz波形が観測された。これは膜中固定電荷の極性反転を示唆するので、成膜条件を振って系統的な評価を行い反転の原因を探った。

ALD SiO<sub>2</sub>, 3/10 nm annealed in N<sub>2</sub>

CZ p-type cSi 400 μm  
N<sub>d</sub> = 1.4 × 10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup>

ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10 nm annealed in N<sub>2</sub>

CZ p-type cSi 166 μm  
N<sub>d</sub> = 1.7 × 10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>

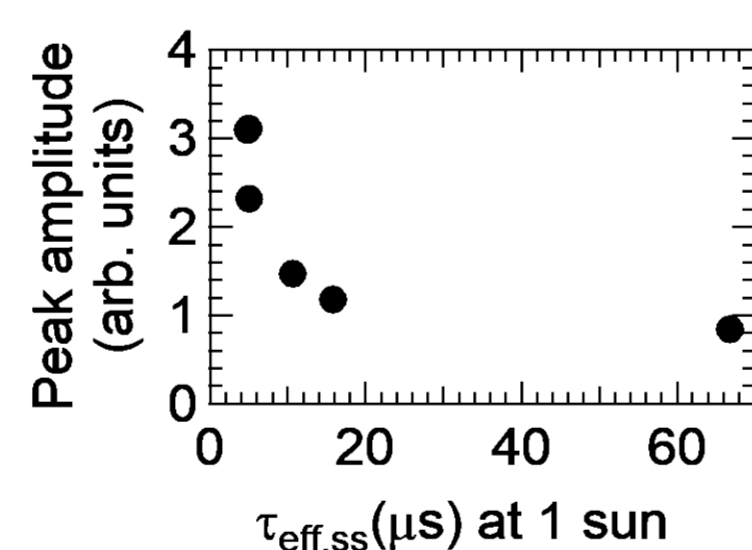
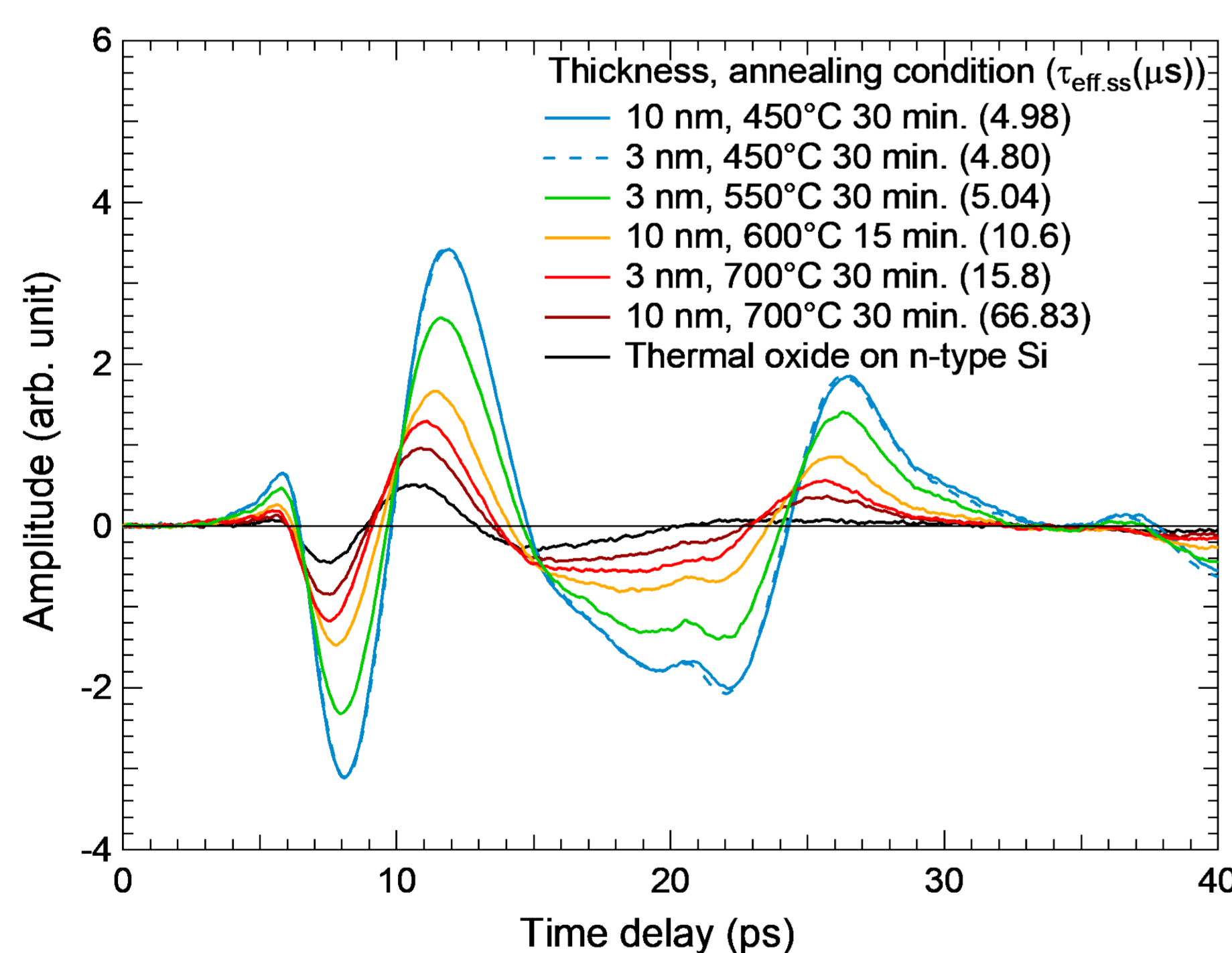
ALD SiO<sub>2</sub>, 0/1/10 nm annealed in N<sub>2</sub>  
450 °C, 30 min.

ALD process for alumina: TMA precursor carried by N<sub>2</sub> bubbler, oxidized with ozone. Substrate temperature = 200 °C, 0.8 Å per cycle, cycle duration ~ 18 s.

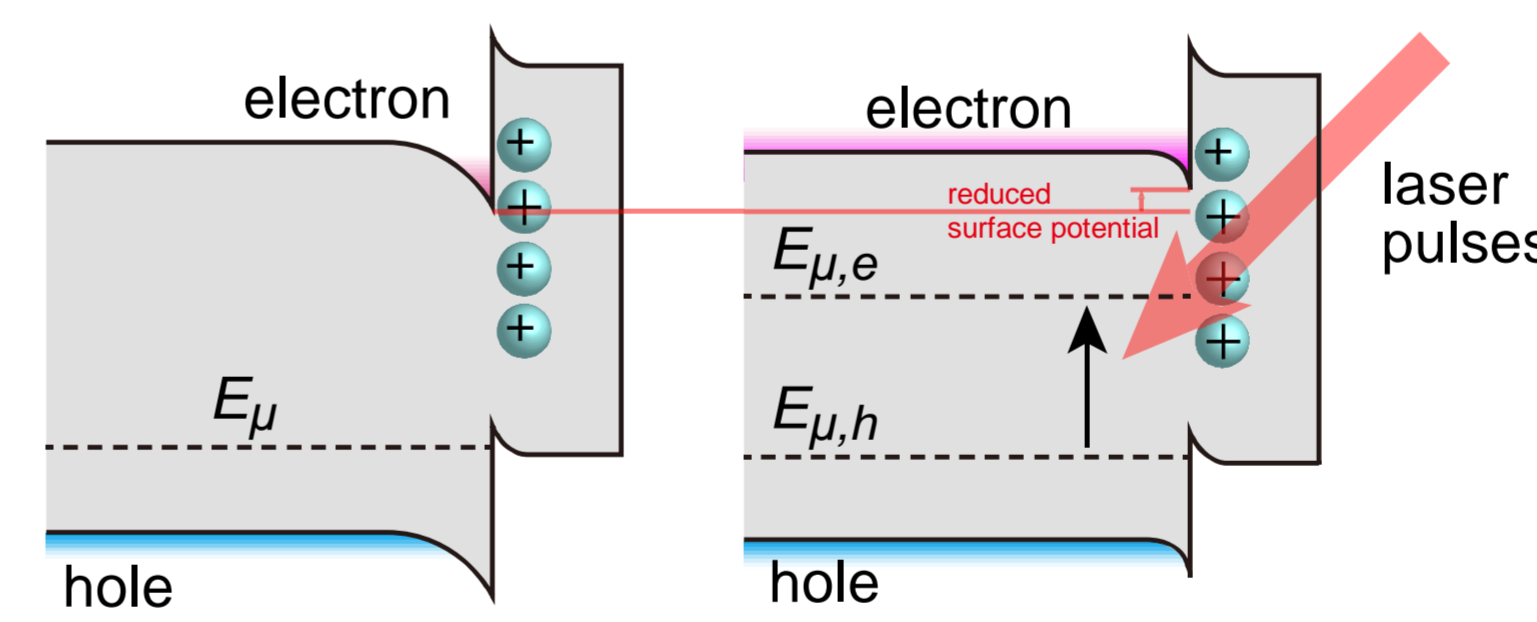
評価した試料はALD法で成膜した酸化膜付きp型シリコンウェハ、およびAlO/SiO多層膜付きシリコンウェハである。酸化膜試料はアニール時間および温度を変化させた。

AlO/SiO/Si試料についてはSiOの膜厚を変化させた上で、PERC型Si結晶太陽電池の作成プロセスと同様に窒素中で450 °C 30分のアニール後820 °Cで空気中の焼成をおこなっている。

## 結果と考察: 酸化膜付きシリコンウェハ

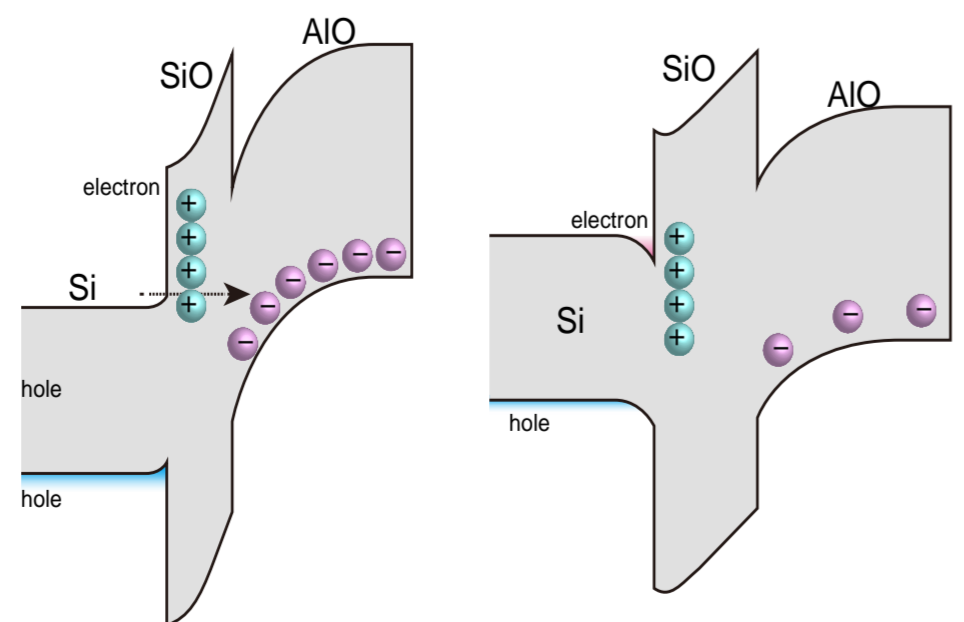
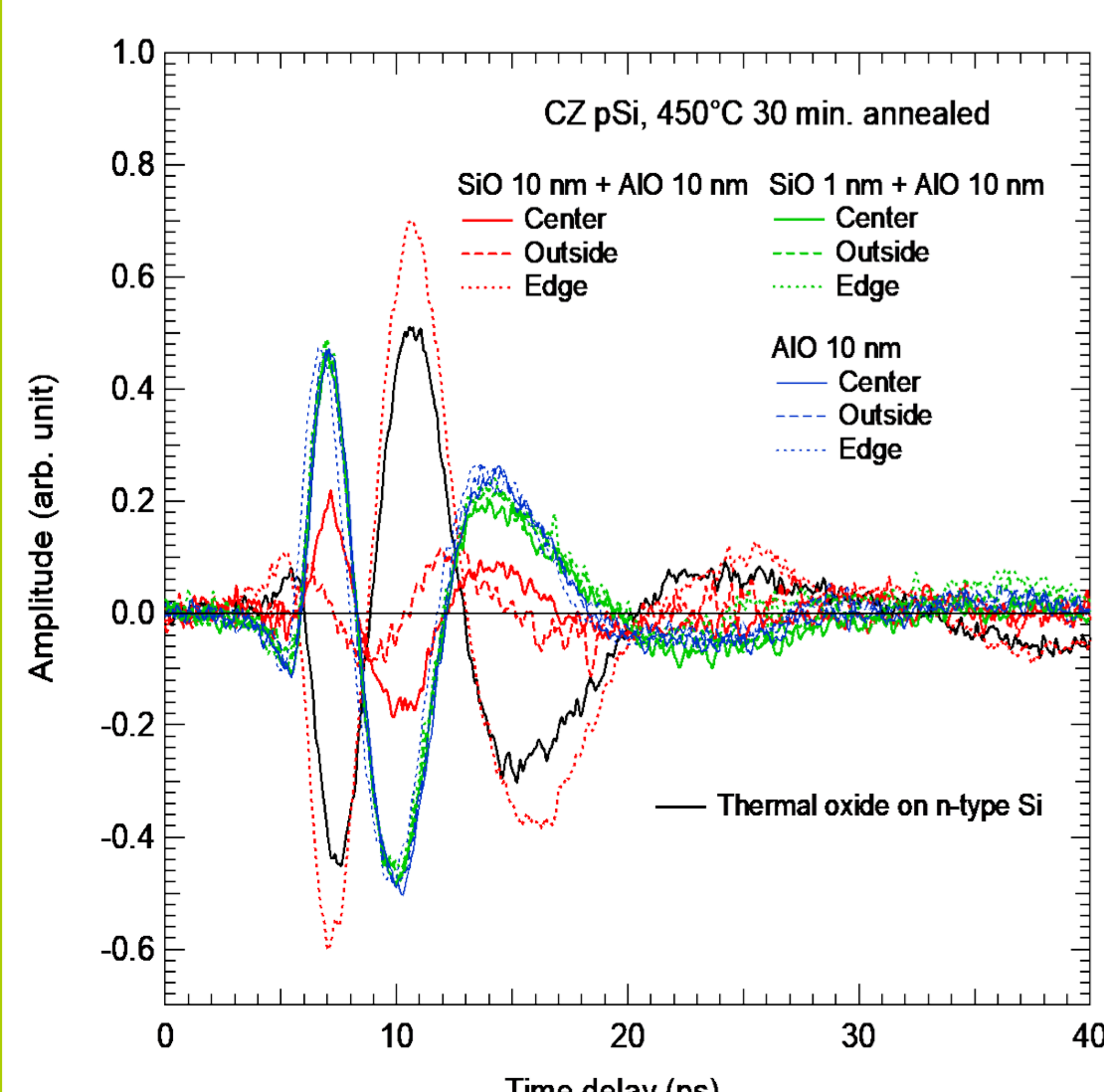


上図は長短パルス光により励起された少数キャリアが表面ポテンシャルをスクリーニングする様子を表したものである。少数キャリア寿命が長い試料についてはレーザーにより励起された電子および正孔が多数残り、この状態では膜中電荷と釣り合う為に必要な表面ポテンシャルが小さくなるため、膜中電荷が仮に同じであっても少数キャリア寿命が長い試料では表面ポテンシャルが小さくなり、検出されるTHz波の振幅は小さくなる。



- 酸化膜付きシリコンウェハ試料については、THz放射の振幅は少数キャリア寿命と強い負の相関を示した。
- 放射の極性は膜が通常の酸化膜と同様に正に帯電していることを示している。
- THz放射強度とライフタイムの負の相関は照射した長短パルスレーザーで励起された少数キャリアによる表面ポテンシャルのスクリーニング効果によるものと考えられる。
- 今回測定した条件内ではALD酸化膜中の電荷は大幅に変化しなかったものと推察される。

## 結果と考察: AlO/SiO/Si



(上) AlO/SiO/Si試料における、酸化膜厚の変化に伴うバンドダイアグラムの変化。

- AlO/SiO/Si試料にあっては、SiO膜厚が10 nmの試料ではTHz放射の極性反転が観測されており、ウェハ表面に反転層を形成していることを示す。この状態は表面パッシベーション特性を向上させる観点からは望ましくなく、実際にSiO膜厚が厚いと少数キャリア寿命は短くなる傾向にある。
- こうした極性反転は以前別の方法で報告されており、アニール処理中にAlOとSi基板の間にトンネル効果で電荷をやりとりできることがAlOの帯電量を変えると説明されている[9]。

## 結論と今後の展開

- LTEMはC-V法が使えない程薄い膜がついたSi表面パッシベーション膜の、膜中電荷の半定量的な評価手法として利用可能であり、検査手法として使っていく。
- ライフタイムとの負の相関があるため完全に定量的な評価のため今後これを考慮した方法を考えていく。
- AlO/SiO/SiについてはAlO領域に強制的にコロナ放電でキャリアを注入した場合にどうなるのかが興味深い。

## 参考文献

- [1] M. Tonouchi, Nat. Photonics 1, 97 (2007).
- [2] T. Mochizuki, A. Ito, J. Mitchell, H. Nakanishi, K. Tanahashi, I. Kawayama, M. Tonouchi, K. Shirasawa, and H. Takato, Appl. Phys. Lett. 110, 163502 (2017).
- [3] H. Nakanishi, A. Ito, K. Takayama, I. Kawayama, H. Murakami, and M. Tonouchi, AIP Adv. 5, 117129 (2015).
- [4] Y. Hotta, I. Kawayama, S. Miyake, I. Saiki, S. Nishi, K. Yamahara, K. Arafune, H. Yoshida, S. Satoh, N. Sawamoto, A. Ogura, A. Ito, H. Nakanishi, M. Tonouchi, and H. Tabata, Appl. Phys. Lett. 113, 012103 (2018).
- [5] Y. Nishihara, M. Chikamatsu, S. Kazaoui, T. Miyadera, and Y. Yoshida, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 04FS07 (2018).
- [6] M. Tonouchi, Journal of Applied Physics 127, 245703 (2020).
- [7] T. Mochizuki, A. Ito, H. Nakanishi, K. Tanahashi, I. Kawayama, M. Tonouchi, K. Shirasawa, and H. Takato, J. Appl. Phys. 125, 151615 (2019).
- [8] G. Dingemans, N. M. Terlinden, M. A. Verheijen, M. C. M. van de Sanden, and W. M. M. Kessels, J. Appl. Phys. 110, 093715 (2011).

## 参考文献

本研究は一部NEDOの助成の下行われました。関係各位に感謝申し上げます。

# 両面受光-裏面電極型結晶シリコン太陽電池の作製と評価

立花 福久、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 太陽光チーム

## 背景

両面受光-裏面電極型結晶Si太陽電池

- ✓ 受光面に電極の無い、裏面電極構造
- ✓ スクリーン印刷法による電極形成
- ✓ 細線電極により、裏面からの光取り込みが可能(両面受光型)

⇒ 需要の高まりが予想される本構造のこれまでの開発状況について報告を行なう。

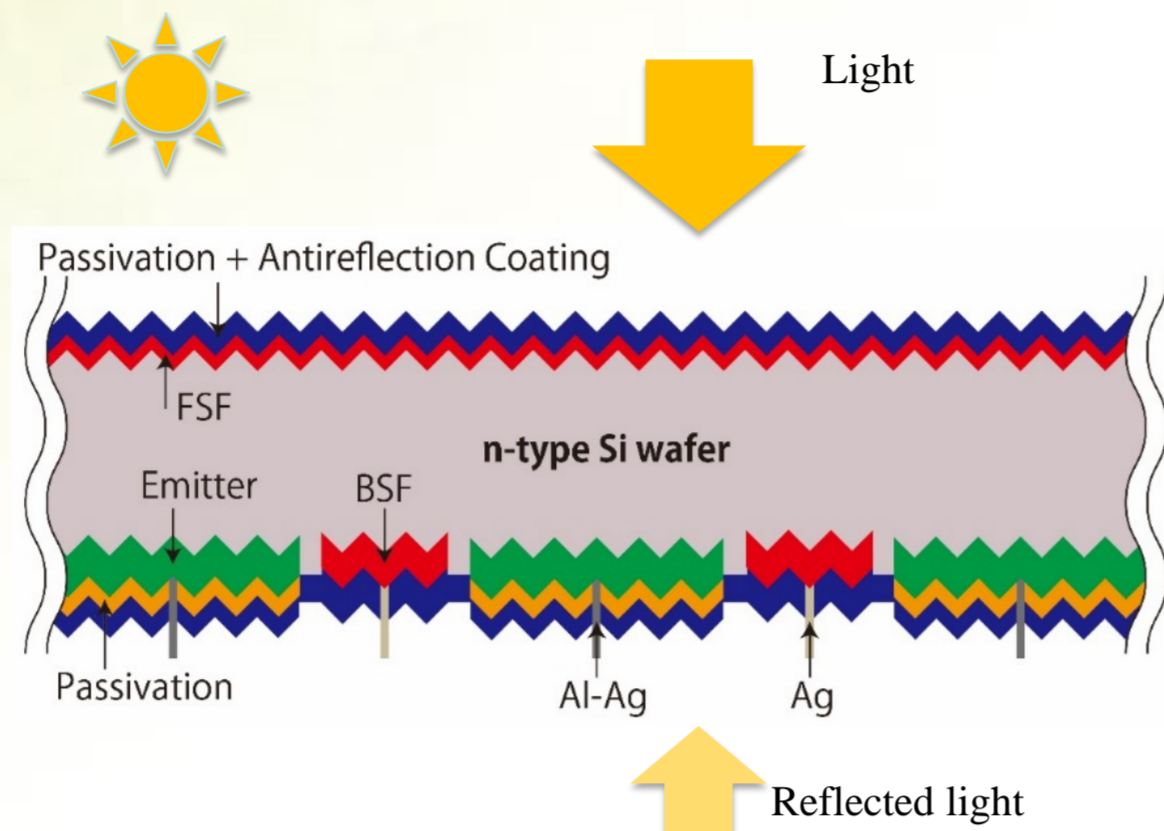
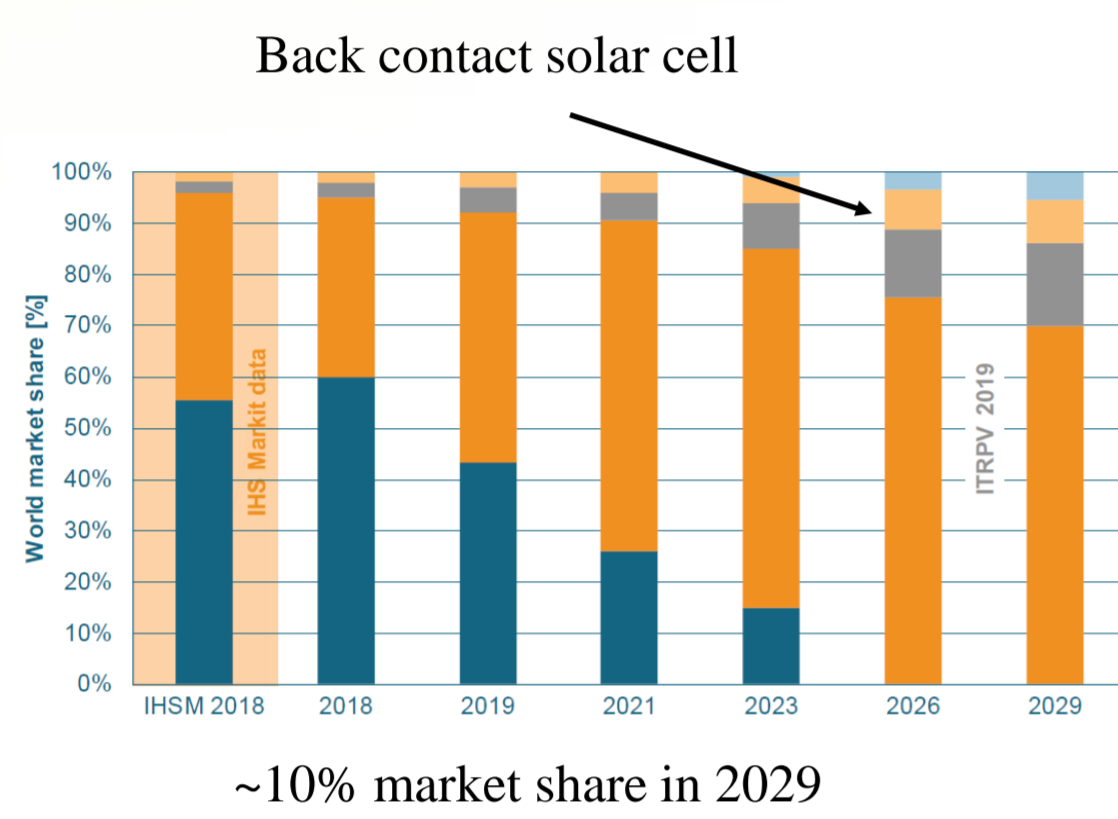


Fig. 1 Bifacial IBC solar cell.



Data from ITRPV roadmap, March 2019

## 実験

### セル構造

N型結晶Si基板 (1~3 Ω cm)  
基板厚さ: ~160 μm  
セル面積: 125 mm<sup>2</sup>

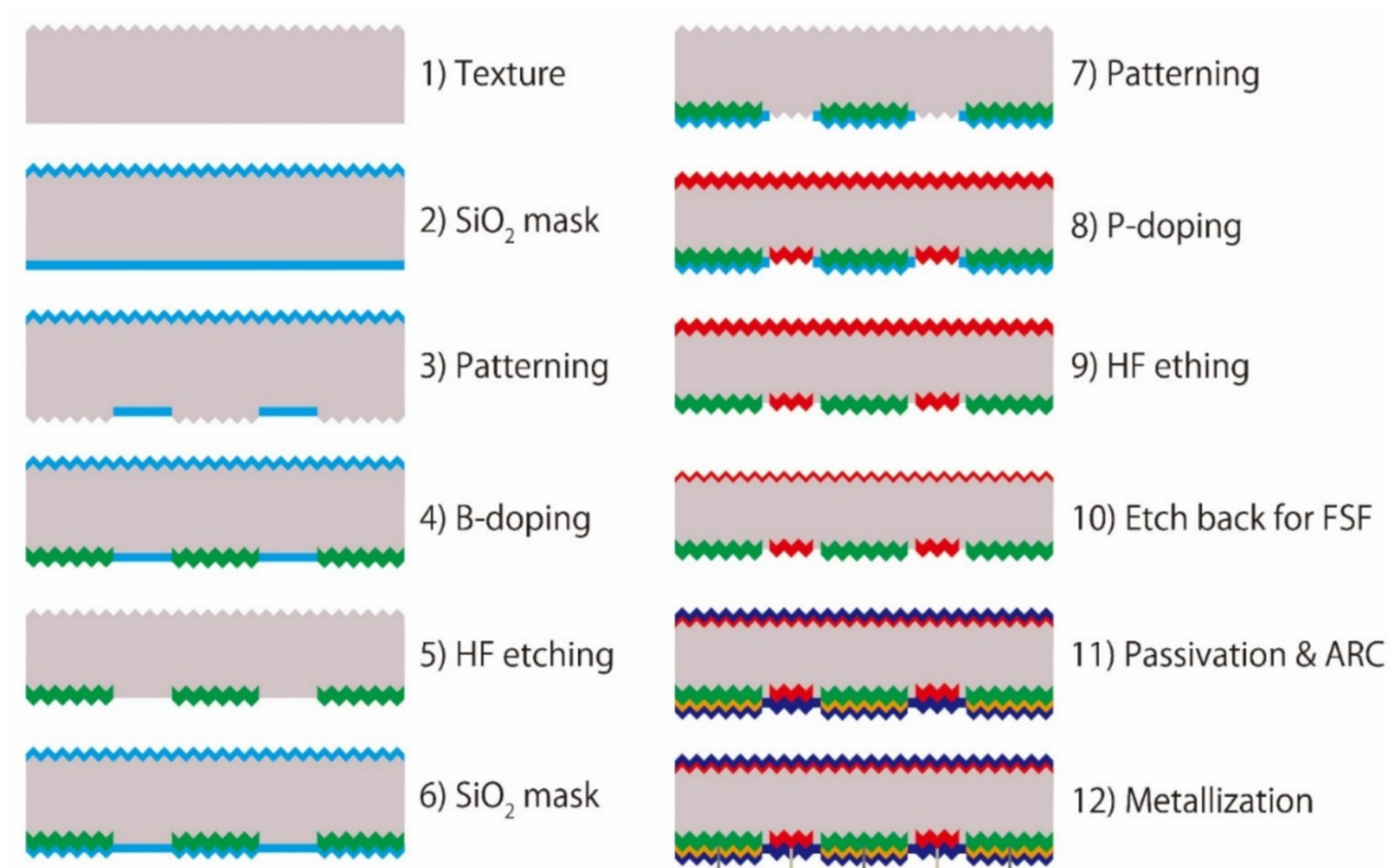
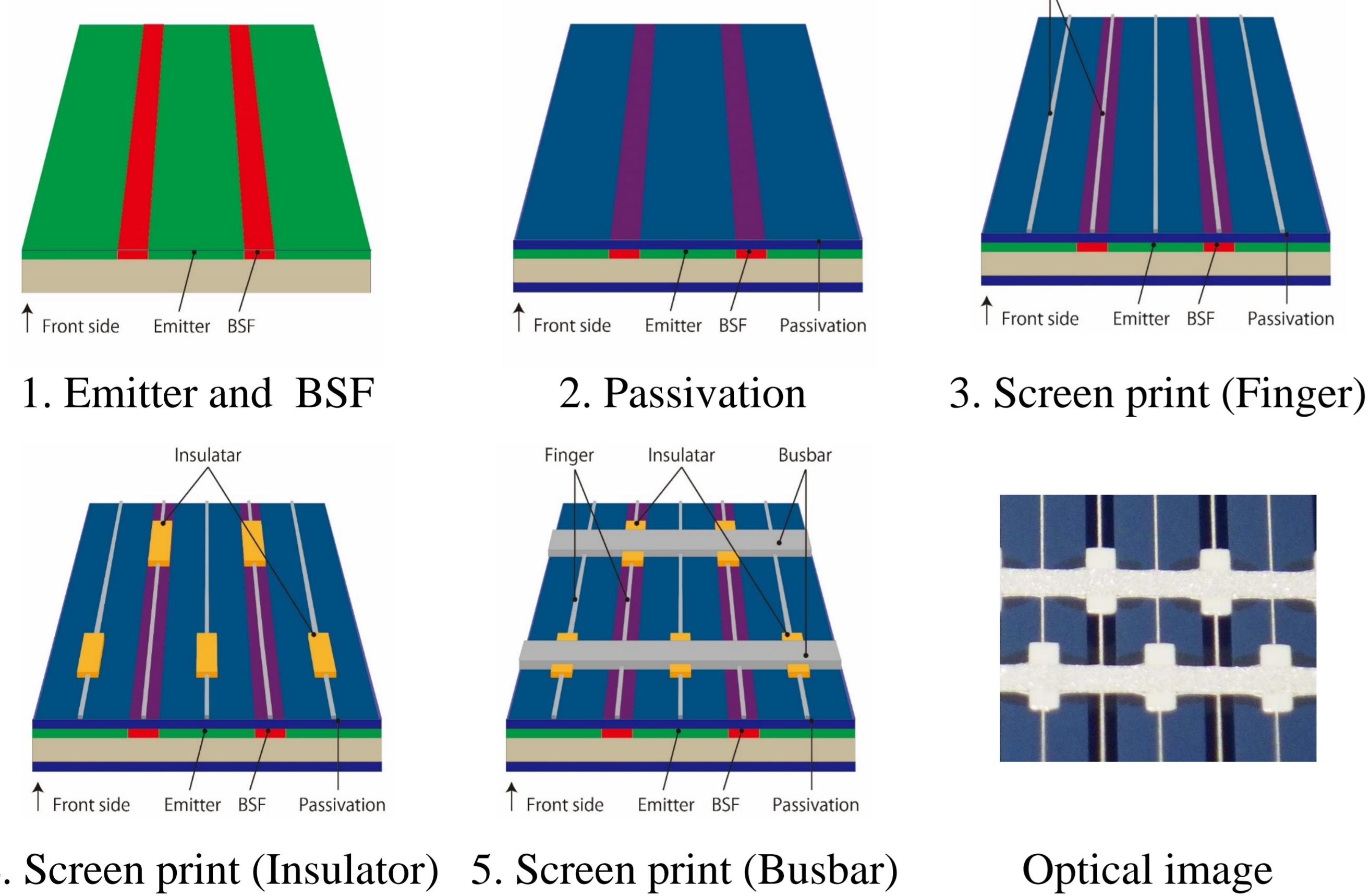


Fig. 2 Process flow

### 裏面電極作製工程



## セル特性結果

- ✓ 両面特性は約0.75を得ている。
- ✓ さらなる高効率化のためには開放電圧の向上が必要となる。

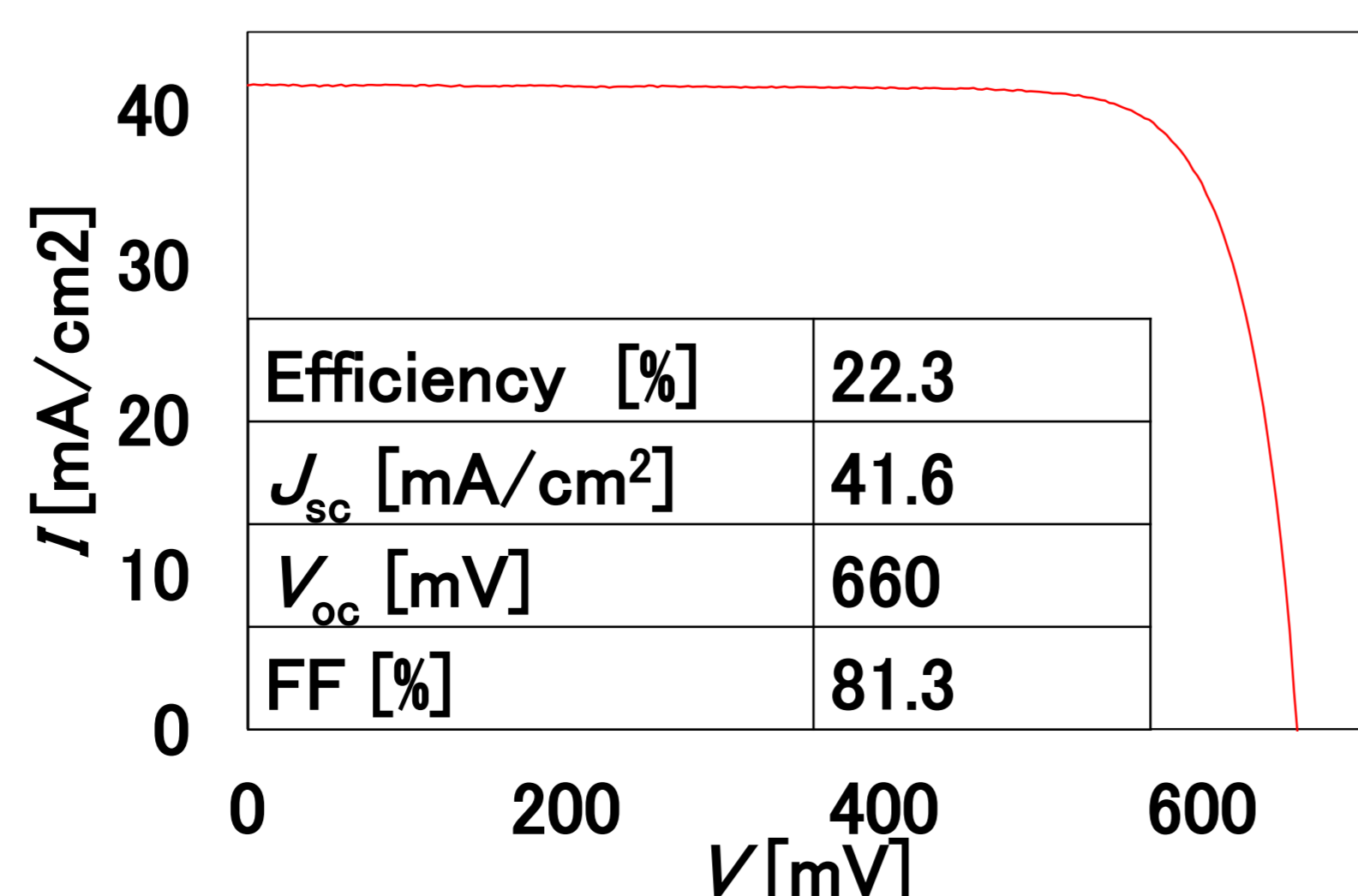


Fig. 3 IV properties of our best bifacial IBC cell (in-house measurement)

## セル評価結果

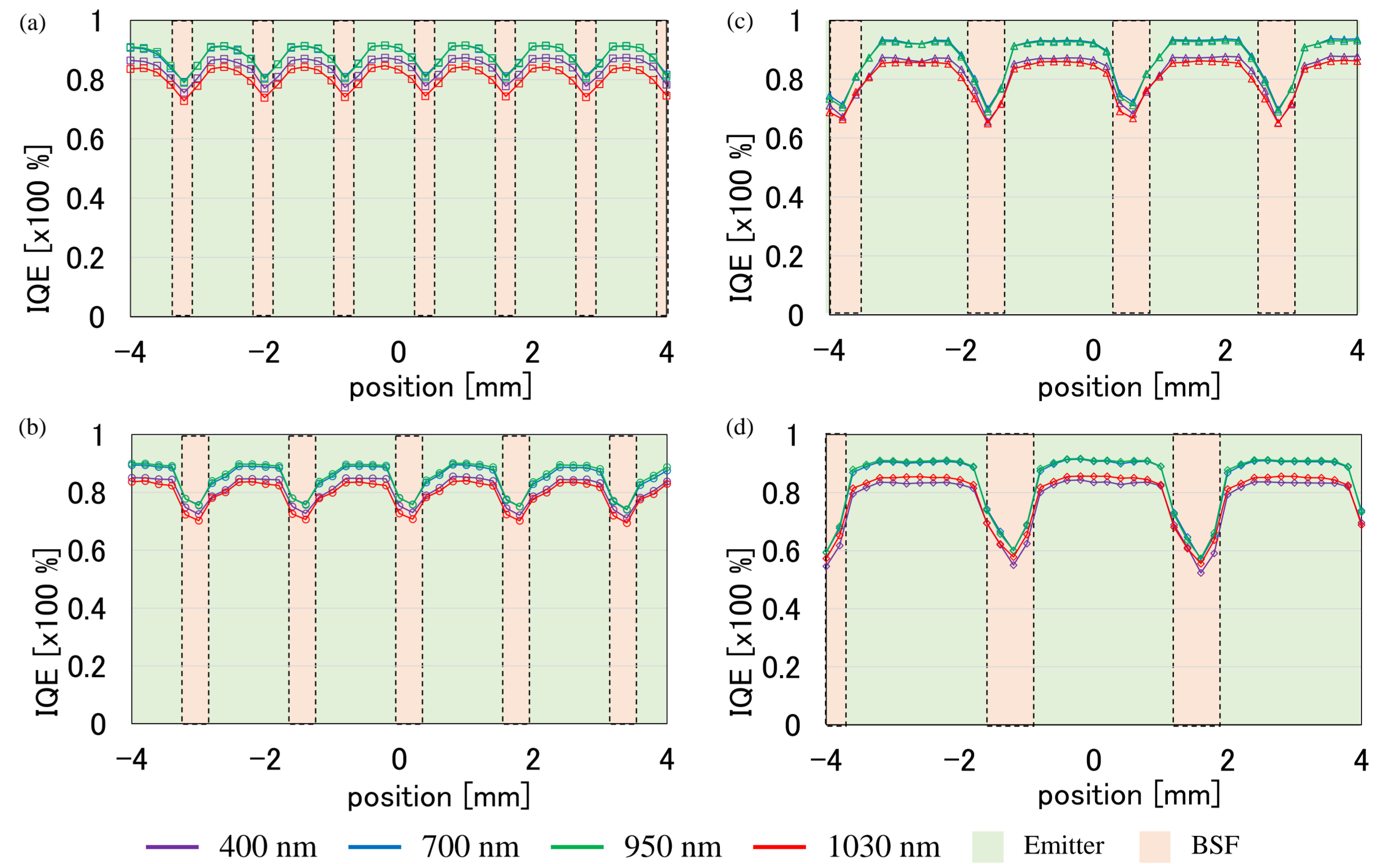


Fig. 4 IQE line scan profiles at fingers (a) pitch 1200 μm, (b) pitch 1600 μm, (c) pitch 2200 μm and (d) pitch 2800 μm.

- ✓ エミッタおよびBSF領域の比率を固定し(3:1)、ピッチを変更した際のIQEの変化として(図4)、ピッチが大きくなるにつれて、BSF領域においてIQEは低下した。これは電氣的遮蔽損失の増加によるものと考えられる。
- ✓ ピッチと $V_{oc}$ およびFFの関係(図5)については、ピッチが狭いほど高いFFが得られた。 $V_{oc}$ はほぼ一定であった。ピッチの増加によるFFの低下は直列抵抗の増加によるものと考えられる。

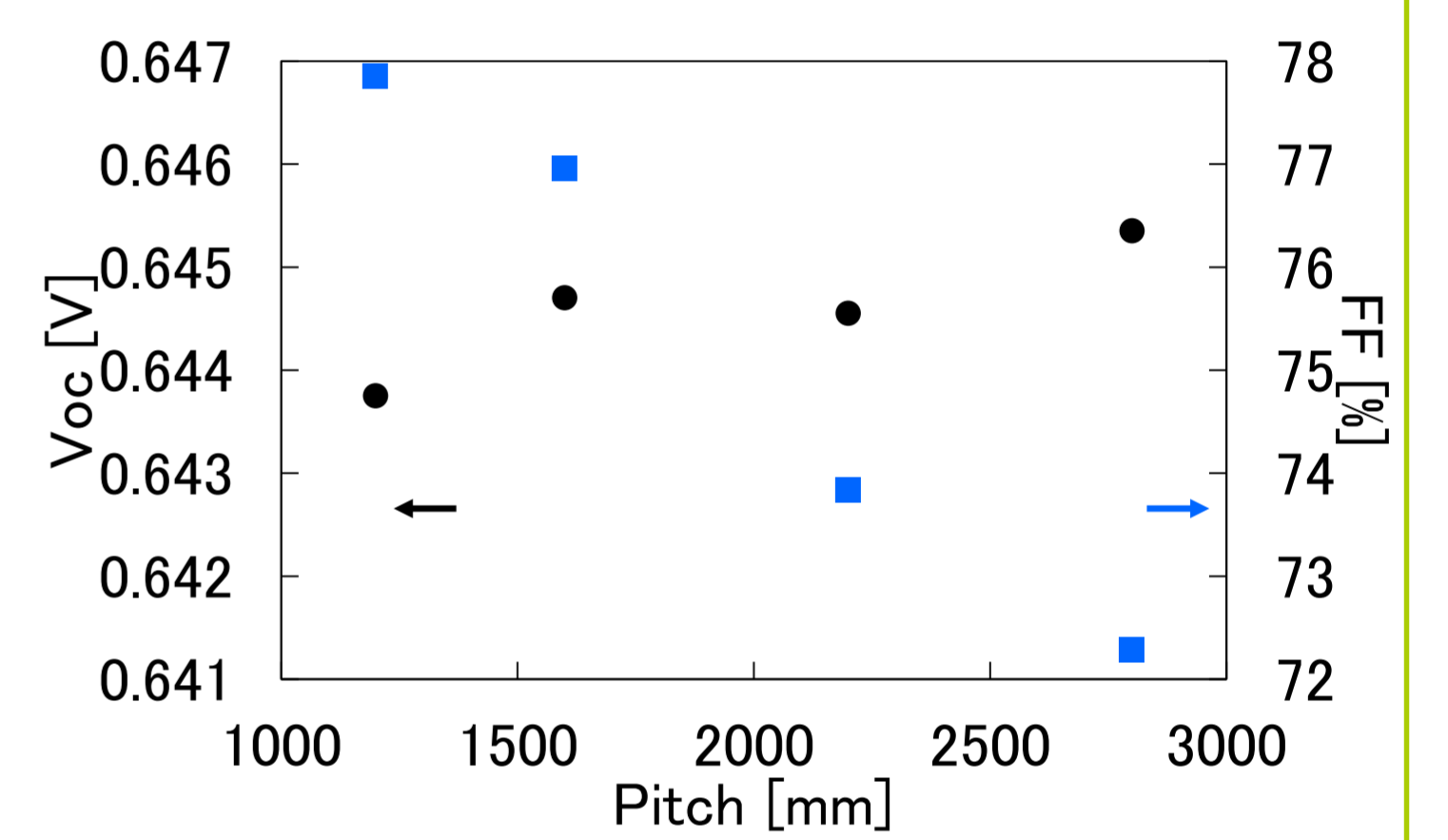


Fig. 5  $V_{oc}$  and FF for several pitch samples

## ロス解析結果

TABLE I: SURFACE RECOMBINATION PROPERTIES USING SYMMETRIC SAMPLE

Region	Equivalent $J_0$ [fA/cm <sup>2</sup> ]	Area fraction in bifacial IBC	$J_0$ in bifacial IBC [fA/cm <sup>2</sup> ]
Emitter	50 ± 6	0.748	37.40
BSF	293 ± 10	0.141	41.45
FSF	84 ± 20	1	84
Bulk	60 ± 5	1	60
Gap	500 ± 50	0.032	15.82
Total	-	-	238.68

Equivalent  $J_0$  were measured by QSSPC using the symmetric samples.

- ✓ 両面対象サンプルにおける各領域の表面再結合特性結果は表1の通り。
- ✓ 得られたセルの電流及び電圧から求めたセル全体の $J_0$ は330 fA/cm<sup>2</sup>であり、表1の合計との差が電極領域における $J_0$ である(=91.32 fA/cm<sup>2</sup>)。
- ✓ セル全体の $J_0$ に対して約5割の損失が電極およびFSF領域で発生しており、高効率化のためにはこれらの領域における再結合特性の改善が必要となる。

## まとめ

- ✓ エミッタ領域とBSF領域の比率を固定し、ピッチを変更することで、裏面構造がセル特性に与える影響を評価した。
- ✓ ピッチが大きくなるにつれて、電氣的遮蔽損失によってIQEは低下し、直列抵抗の増加によってFFは低下した。また、 $V_{oc}$ には大きな変化は見られなかった。このことから、高いセル特性を得るためには狭いピッチでの設計が必要となる。
- ✓ ロス解析結果から、高効率化のためには電極及びFSF領域における再結合特性の改善が必要である。
- ✓ 詳細な実験条件等は Jpn. J. Appl. Phys. **59** (2020) 116503 に記載。

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援のもとに実施されました。関係各位に感謝申し上げます。

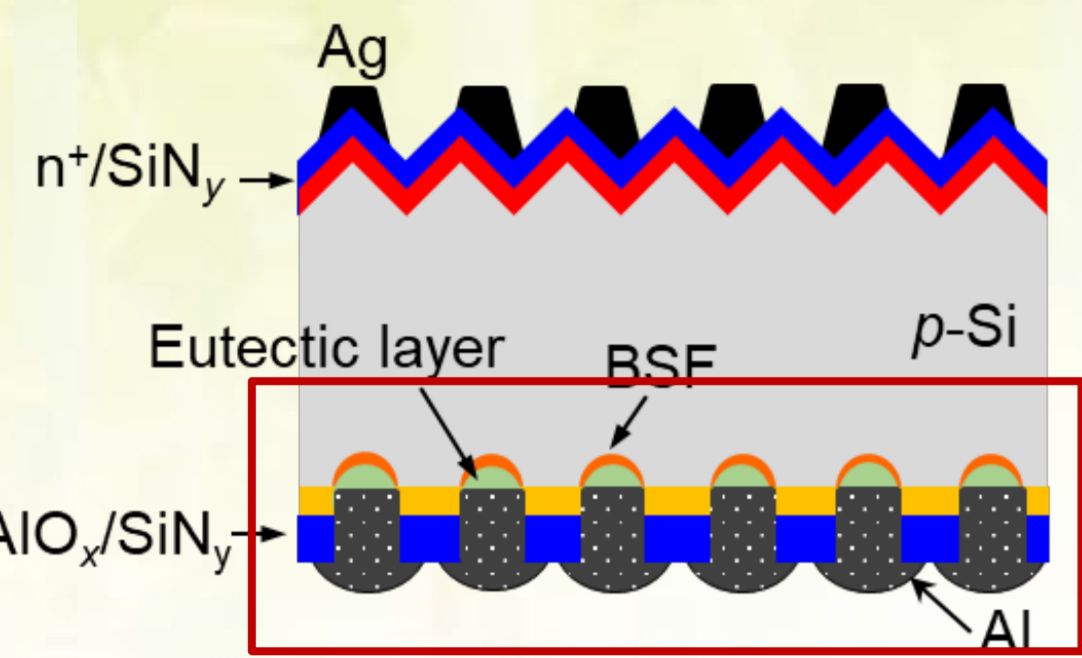
# Evaluation of metallization-induced losses in PERC solar cells using micro-photoluminescence imaging technique

Supawan Joonwichien, Katsuhiko Shirasawa, Hidetaka Takato

産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム

## Metallization-induced losses in rear-side of PERC<sup>[1]</sup>

We demonstrate and discuss the metallization-induced recombination losses at the rear side of PERCs evaluated by micro-photoluminescence imaging technique.



### A. Losses associated with Si within passivation layers

The level of surface passivation can be modified by adjusting the compositions of the SiNx films where compositions of Si, H, and N can be described with respect to the refractive index (n).

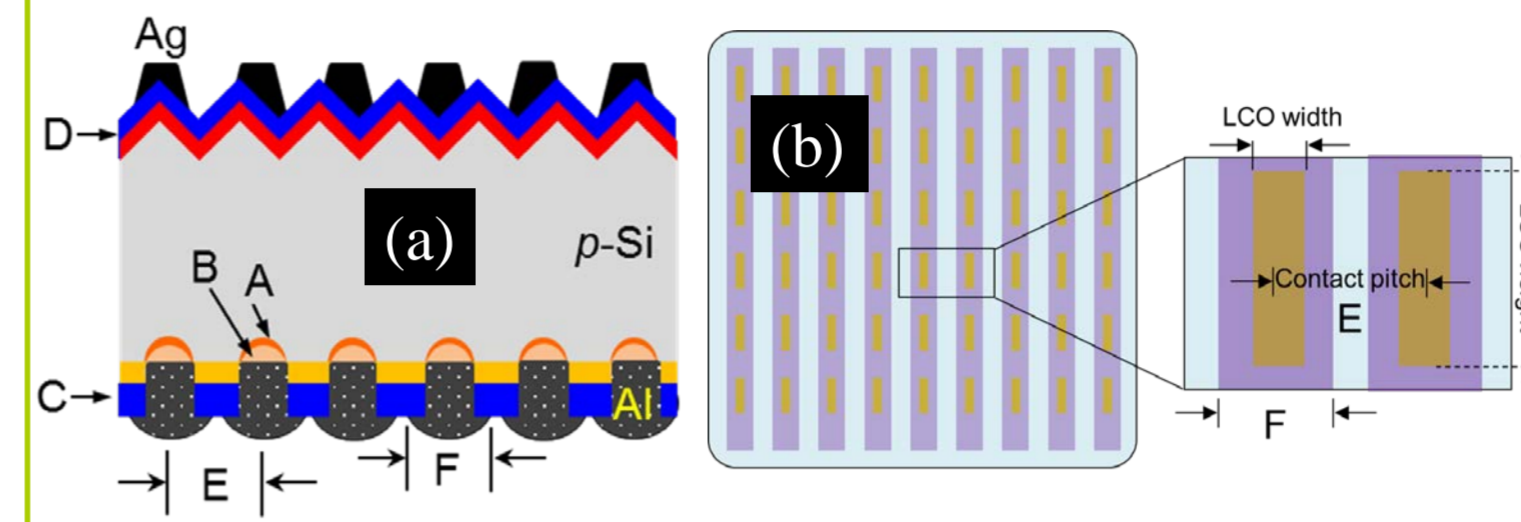
Film properties of AIOx/SiNx stacks after firing.

### B. Losses associated with Si present within the Al paste

The amount of Si in the Al paste has significant effect on solar cell parameters.

## Experimental<sup>[2]</sup>

Bifacial PERCs with different rear Al grid widths were used as test device models.



We completed the bifacial metallization by the Al grid screen-printing of commercial Al PERC paste directly on top of the ablated local contact. The printed line widths (F) were 80  $\mu\text{m}$ , 130  $\mu\text{m}$ , and 180  $\mu\text{m}$ , respectively.

Fig. 1 (a) Cross-sectional diagram (not to scale) of the p-type Bi-PERC. (b) Sketched rear side of Bi-PERC, showing dash-shaped local contacts and with Al-grid-printed contacts. A: Al-BSF. B: Local contact site. C: AIOx/SiNx passivation stacks. D: SiNx antireflection coating films. E: Distance between Al grids. F: Width of Al grid.

## Results<sup>[2]</sup>

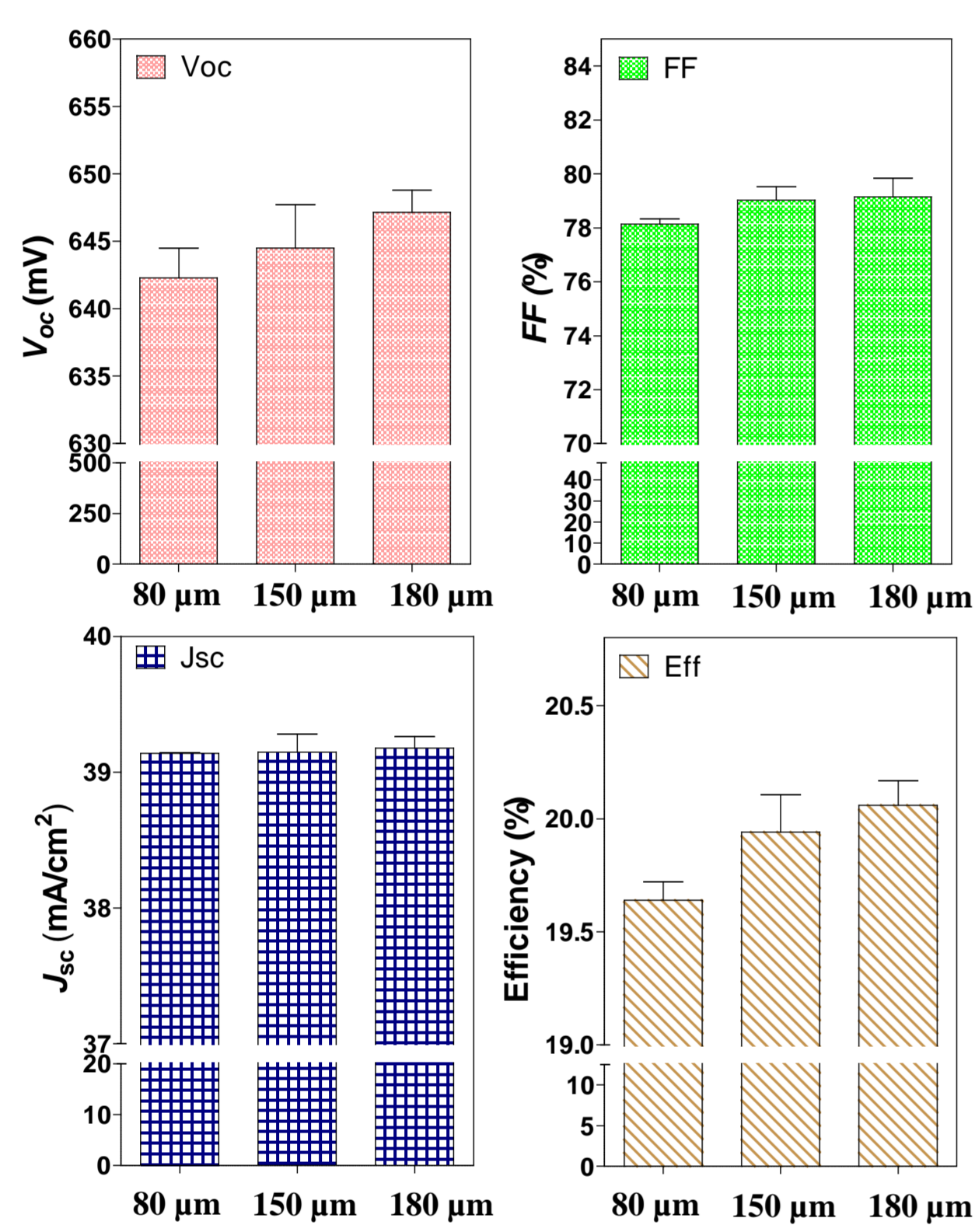


Fig. 2 Correlation between solar cell parameters and the width of Al grid contact (F).

- The results clearly show increases in the  $V_{oc}$ , FF, and conversion efficiency values with the widened finger width.
- The change in  $J_{sc}$  was negligible, suggesting that fraction of metallization areas on rear side of Bi-PERCs does not significantly affect the internal optical reflection inside the cell.
- The mean FF slightly improved, in which the Al grid for bifacial concept directly influences the series resistance as the finger dimensions and resistivity determines the resistance of the metal electrodes.
- From our earlier work [1], the resulting of thicker Al-BSF induced by a wider Al grid is not the only one reason for the improved  $V_{oc}$ .

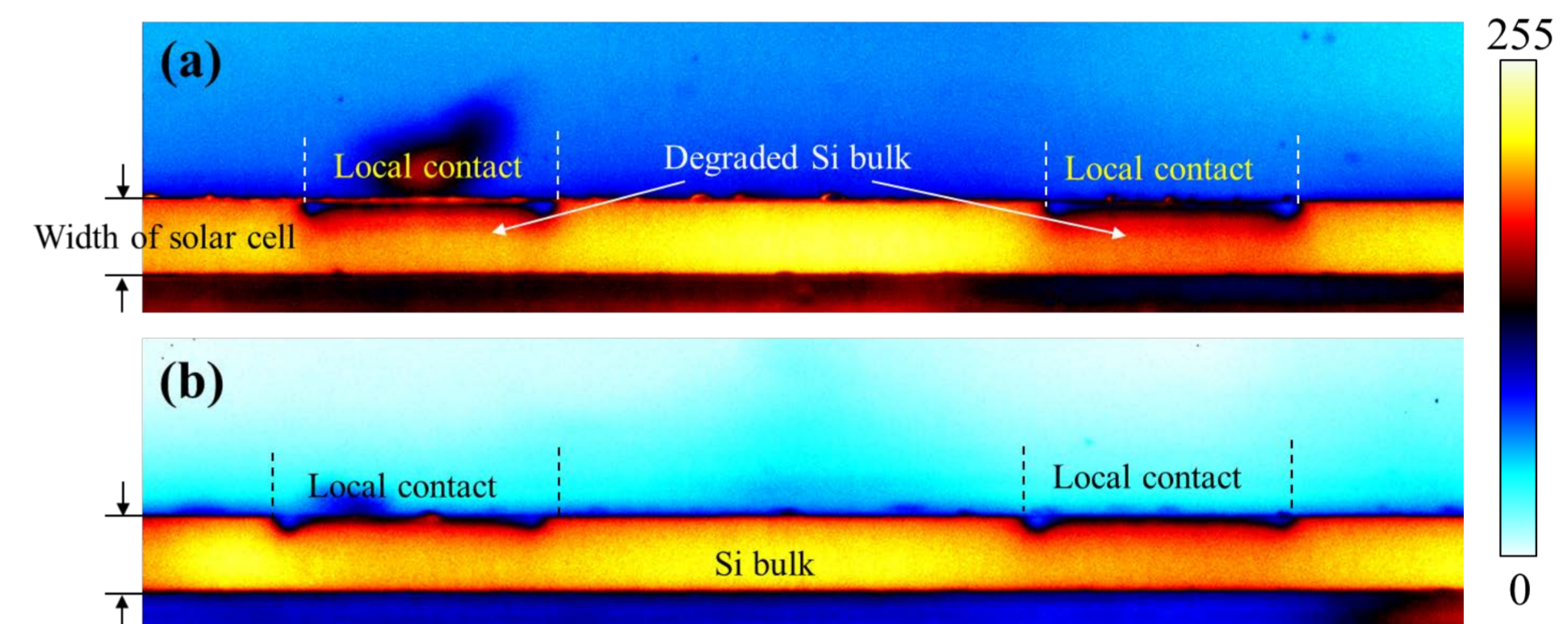


Fig. 3 Comparison of the cross-sectional micro-PL image of Bi-PERC metallized with (a) 80- $\mu\text{m}$  Al-grid width, and (b) 180- $\mu\text{m}$  Al-grid width, respectively, showing the Si substrate and local contact site.

- With focusing on the regions under local contact, PL contrast decreased compared to the PL contrast at the neighbor regions adjacent to the local contact for both samples.
- When the wider Al grid was used (Fig. 3b), higher PL signals below the local contact were observed, indicating the lower carrier recombination activities at Si substrate.
- The results of micro-PL imaging suggest that the dimension of Al grid for bifacial structure had impacted on not only the local contact formation, and surface passivation quality (as realized by other imaging techniques in our earlier works [1], [3]), but also the final quality of Si substrate directly under local contact areas.

## Discussion: possible physical mechanism based on imaging technique<sup>[2]</sup>

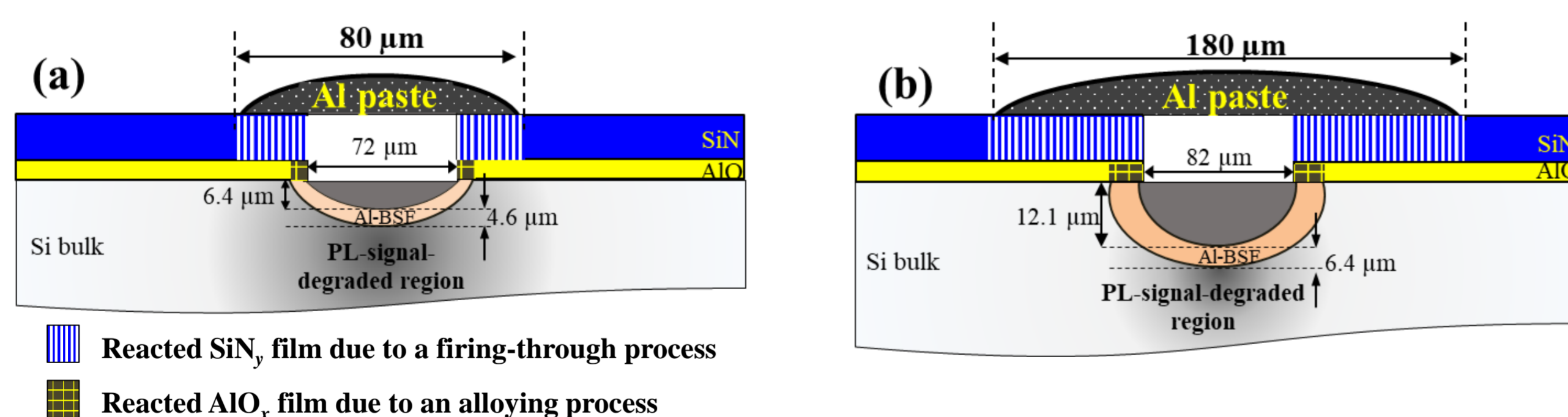


Fig. 4 Schematic drawing of local contact formation in the Bi-PERC metallized with (a) 80- $\mu\text{m}$  Al-grid width, and (b) 180- $\mu\text{m}$  Al-grid width, respectively. Image not to scale.

The micro-PL imaging technique can be used to measure the quantitative carrier recombination lifetime of the finished cells. The structural disorder and electron-hole recombination via band-tail states in amorphous Si and its alloys can be clarified using the PL technique [4]-[10].

- For wider Al grid width 180  $\mu\text{m}$ , the saturation process of the Si in liquid Al within the local contact is slower than the narrower Al grid width. This resulted in the larger contact depth accompanied by a thicker Al-BSF thickness [1], [11].
- The thicker Al-BSF has enabled a strong lateral current from front contacts to local rear contact. However, there were unavoidable events of a local penetration of Al from the paste into the SiNx film beneath the printed Al grid regions during contact firing. This led to higher fractions of contaminated SiNx film areas for wider Al grid width, thereby a degraded  $V_{oc}$ .
- In Fig. 4, micro-PL image for narrower Al grid width provided new evidence of that the alloying process during metallization also degraded the quality of Si substrate with high recombination centers located at the regions beneath local contact.
- In this work, the modification of rear side parameters of Bi-PERCs was found to modify the Al-BSF thickness, and final quality of surface passivation level and Si bulk. All these critical measurement parameters significantly impacted the  $V_{oc}$  and FF of a cell and play important roles in regulating high-yield of Bi-PERC performance.

## Conclusion

We utilized the micro-PL imaging technique to map the evidence of metallization-induced recombination losses relating with the Al-Si interdiffusion behavior during contact firing of Bi-PERCs.

- The results from micro-PL images show that the differences in Al rear grid width relating to the fractions of metallization area had significantly modified the Al-Si interdiffusion behavior thereby affecting the Al-BSF thickness, final quality of surface passivation level and Si bulk.
- Particularly, the latter one (quality of Si substrate) was first observed in this study and it can be detected by micro-PL imaging technique.

## References

- [1] S. Joonwichien M. Moriya, S. Utsunomiya, Y. Kida, K. Shirasawa, and H. Takato, IEEE J. Photovolt., vol. 10 (2), pp. 407–416, 2020.
- [2] S. Joonwichien, K. Shirasawa, and H. Takato, "Al-Si interdiffusion role in determining metallization-induced recombination losses of bifacial solar cell," To be submitted
- [3] S. Joonwichien, S. Utsunomiya, M. Moriya, Y. Kida, K. Shirasawa, and H. Takato, in Proc. 47th Int. IEEE PVSC (2020).
- [4] M. Tajima, Y. Iwata, F. Okayama, H. Toyota, H. Onodera, and T. Sekiguchi, J. Appl. Phys. 111, pp. 113523, 2012.
- [5] T. Trupke, R.A. Bardos, M.C. Schubert, and W. Warta, Appl. Phys. Lett. 89, pp. 044107-1–044107-3, 2006.
- [6] H. Sugimoto, M. Inoue, M. Tajima, A. Ogura, and Y. Ohshita, Jpn. J. Appl. Phys. 45, pp. L641–L643, 2006.
- [7] R.A. Street, Adv. Phys. 30, pp. 593–676, 1981.
- [8] T. Searle, in Properties of Amorphous Si and its Alloys, edited by T. Searle, p. 235, NSPEC, United Kingdom, 1998.
- [9] I. Guler, Mat. Sci. Eng. B-Adv. 246, pp. 21–26, 2019.
- [10] B. Hallam, B. Tjahjono, T. Trupke, and S. Wenham, J. Appl. Phys. 115, 044901, 2014.
- [11] S. Joonwichien M. Moriya, S. Utsunomiya, Y. Kida, K. Shirasawa, and H. Takato, IEEE J. Photovolt., vol. 8 (1), pp. 54–58, 2018.

# 高強度赤外光照射による LeTID加速試験の検討

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

- 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劣化であるが、劣化の根本原因の解明には至っていない。
- 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。
- LeTIDの影響を迅速に評価するために、高強度赤外光照射を使ったLeTIDの加速試験の検討を行った。

## 実験

### サンプル:

BドーピングCz-Si PERC (FREA製)

### ライトソーキング(LS)処理:

- 疑似太陽光 0.1 W/cm<sup>2</sup> / 95 °C
- LED (855 nm) 1 W/cm<sup>2</sup> / 100 °C

### 評価:

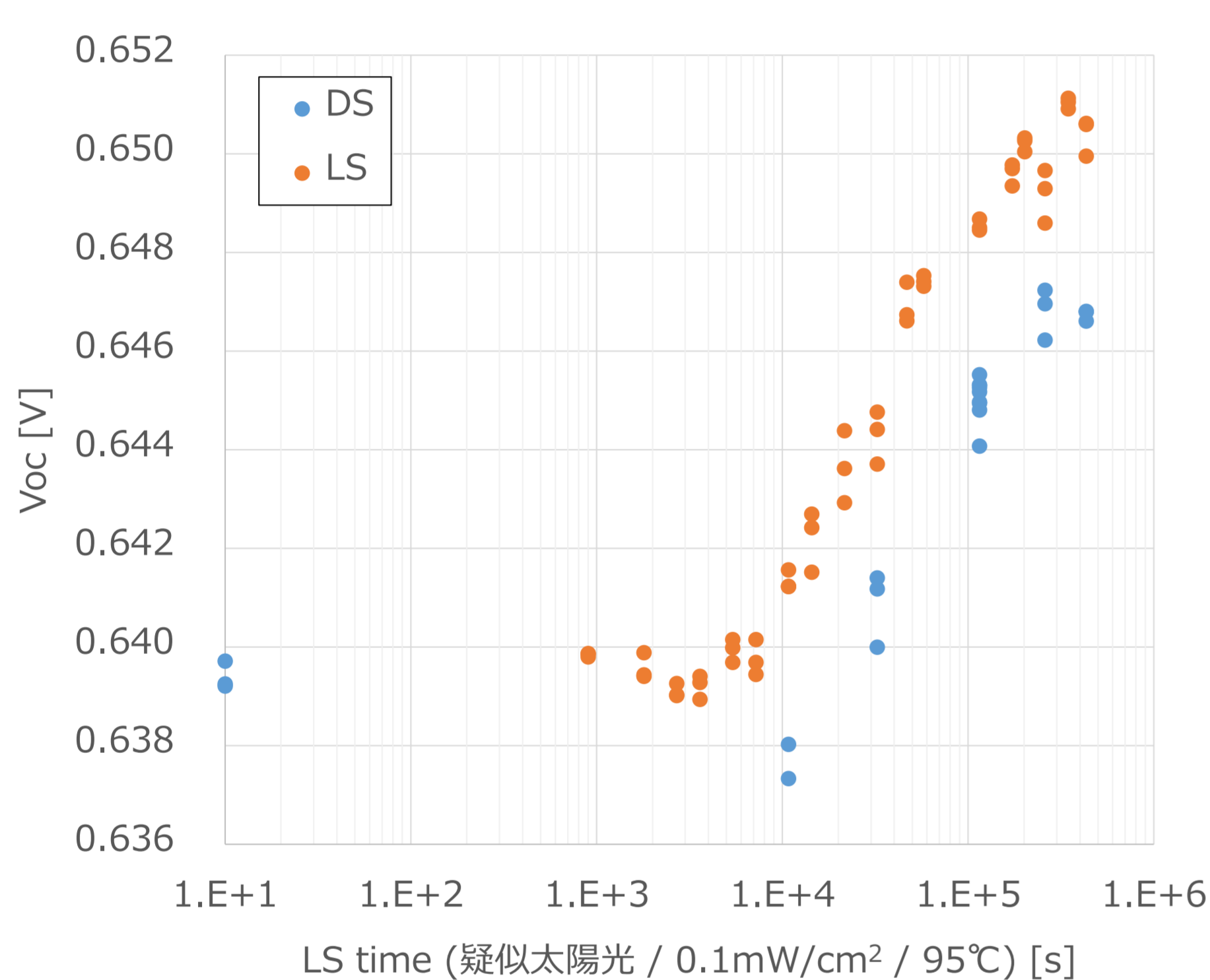
Suns-Voc測定, PL測定



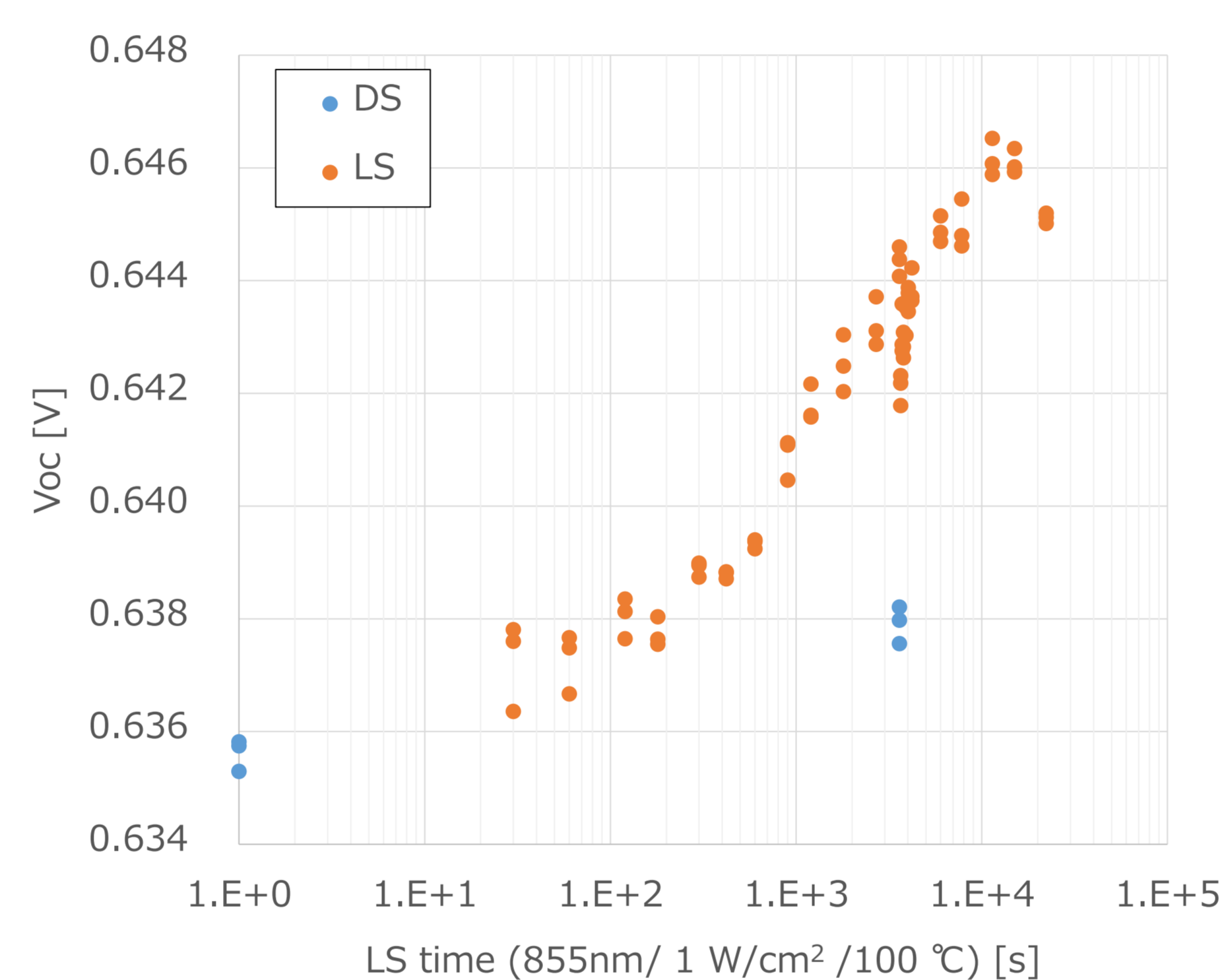
LED赤外光照射装置(IF855-180/180, カンタムエレクトロニクス)  
λ = 855 nm, 最大照度4W/cm<sup>2</sup>, 温度制御: 100~300°C

## 結果

### 疑似太陽光: 0.1 W/cm<sup>2</sup> / 95 °C



### LED (855 nm): 1 W/cm<sup>2</sup> / 100 °C

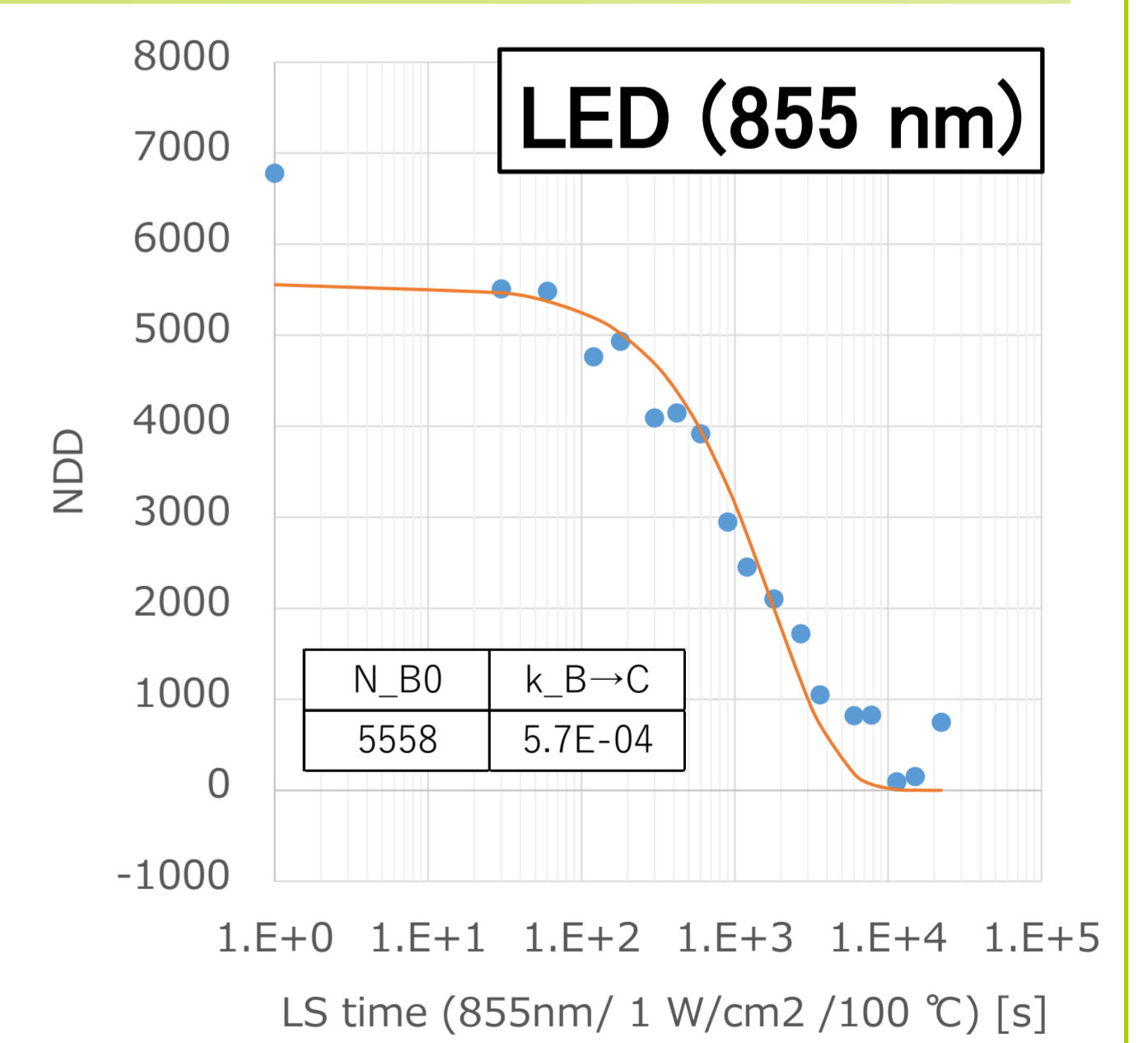
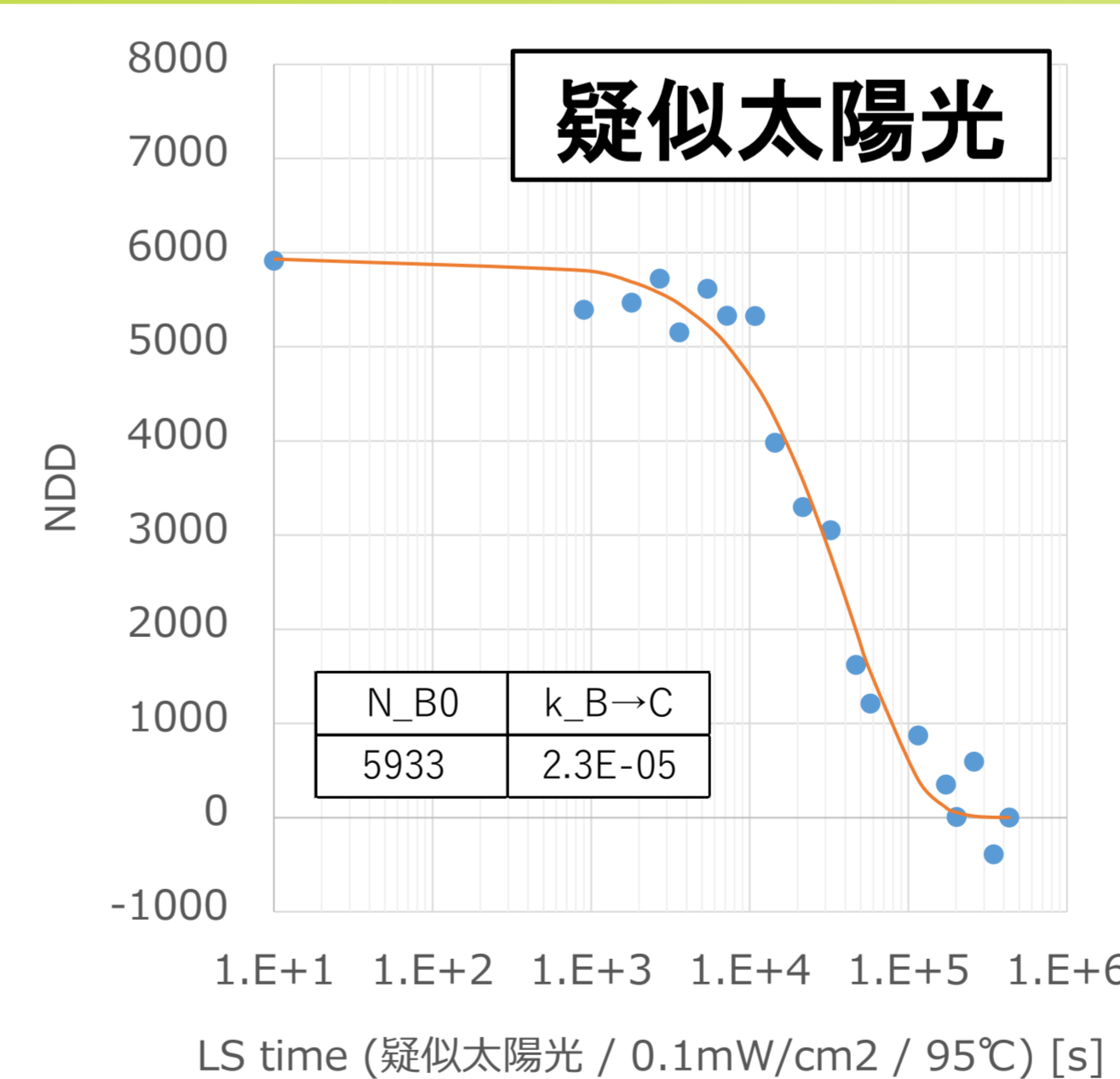


- 両方の処理条件で、LS処理により類似したVocの上昇が見られた。これは、疑似太陽光照射中に起こった変化が、855 nmでの赤外光照射によっても起こることを示唆する。
- LS処理の初期での劣化が小さかったことは、サンプルが初期状態ですでに活性化欠陥を含んでいたためと考えられる。ダークアニール処理により欠陥を減らした後でLS処理を行うと、劣化挙動がより明らかに観察された。
- また、どちらの処理条件でも、LS処理を中断し暗所保管(DS)すると、Vocの低下が見られた。

## 考察

- LS処理での欠陥密度の変化を表すために正規化欠陥密度(NDD)が使われており、一般に次式で定義される[1]:  

$$NDD(t) = \frac{1}{\tau(t)} - \frac{1}{\tau_0}$$
- Suns-Voc測定から導出されたライフタイム  $\tau$  を使い、NDD(t)を導出した(右図)。ただし、ここではLS処理前にすでに再結合活性化欠陥を含んでいると考えられたため、 $\tau_0$ の代わりにLS処理後の飽和したライフタイムを使用した。



- LS処理に対するNDDの挙動は、1つの指数関数で近似できた。これは、[1]で提案されている4状態間の反応モデルで考えると、再結合に対して活性化状態(状態B)から不活性化状態(状態C)への応として捉えられ、すなわち、

$$\frac{\partial N_B}{\partial t} = -k_{B \rightarrow C} N_B, \quad \frac{\partial N_C}{\partial t} = k_{B \rightarrow C} N_B$$

- NDDへのフィッティングにより求めた速度定数 $k_{B \rightarrow C}$ は、疑似太陽光処理で $2.3 \times 10^{-5}$  [1/s], LED処理で $5.7 \times 10^{-4}$  [1/s]となった。
- したがって、この条件での高強度赤外光照射処理は、疑似太陽光照射処理に対して、NDDの減少を約25倍に加速させた。

## 結論

- 疑似太陽光照射処理で見られた(劣化-)回復挙動が、855 nmでの赤外光照射によっても見られた。
- 反応速度定数の比較から、今回使用した条件での高強度赤外光照射処理は、疑似太陽光照射処理に対して、NDDの減少を約25倍に加速させたことがわかった。

## 参考文献

1. T. H. Fung *et al*, "A four-state kinetic model for the carrier-induced degradation in multicrystalline silicon: Introducing the reservoir state", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **184**, 2018, 48-56, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.04.024>.

# イオン注入酸化膜によるシリコン基板の パッシベーション技術の開発

棚橋克人、高遠秀尚


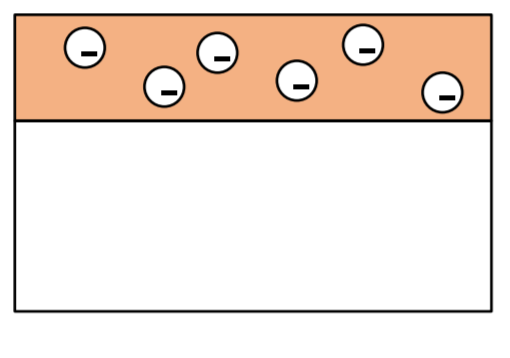
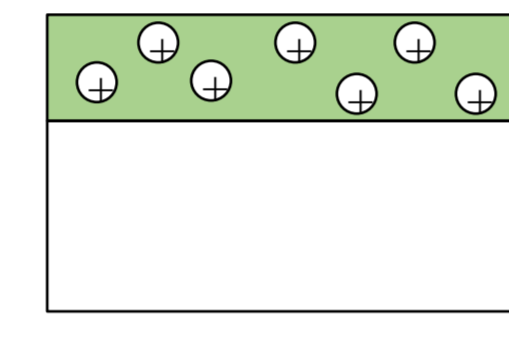
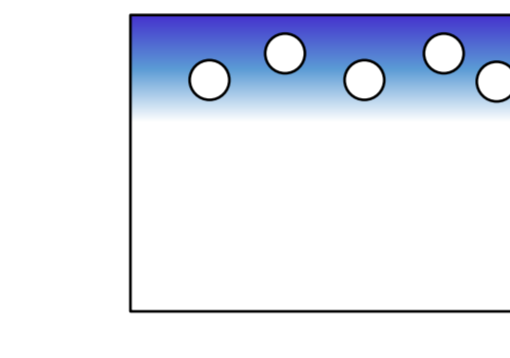
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

## 研究の目的

- 結晶シリコン太陽電池においてはパッシベーション膜としてシリコン酸化膜、アルミナ膜、窒化膜などが用いられている。界面欠陥や固定電荷など各種パッシベーション膜の特徴を活かして使い分けられている。
- 我々はイオン注入法を用いて酸化膜中の固定電荷を制御することにより「界面欠陥が低密度且つ電界効果の働きをもつ酸化膜(パッシベーション膜)」の開発に取り組んでいる。
- 今回、「シリコンへのカーボン注入+ウェット酸化」によりシリコン酸化膜への負の固定電荷の形成を検討した。

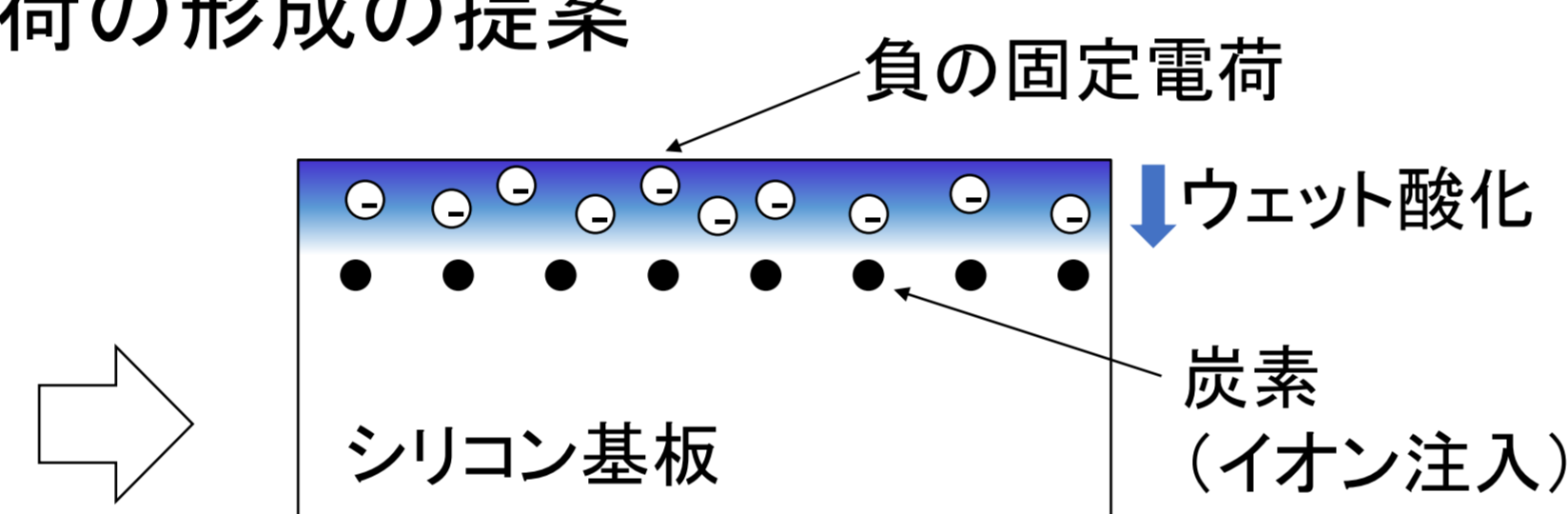
## イオン注入酸化膜における固定電荷の制御:カーボン注入による負の固定電荷の形成

### (1) パッシベーション膜の種類と特徴

	酸化膜	アルミナ	窒化膜	本研究 イオン注入酸化膜
膜種				
特徴	低界面欠陥密度	負の固定電荷	正の固定電荷	<ul style="list-style-type: none"> <li>固定電荷</li> <li>イオン注入により極性と密度を制御</li> <li>低界面欠陥密度</li> </ul>

### (2) イオン注入による負の固定電荷の形成の提案

- SiCパワーデバイスではウェット酸化膜中に発生する負の固定電荷の抑制が課題である。
- 白石らによれば、負の固定電荷の原因は酸化膜中に形成される炭酸イオン( $\text{CO}_3^{2-}$ )である。<sup>1</sup>



シリコン基板へカーボン注入した基板をウェット酸化し、シリコン酸化膜中へ負の固定電荷を形成するというアイデア

### (3) 実験方法

シリコン基板(半導体用6インチミラー基板)  
・p型、基板比抵抗 $7\Omega\cdot\text{cm}$

スルー酸化膜

カーボン注入  
・加速エネルギー10keV  
・ドーズ量 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$

スルー酸化膜除去

ウェット酸化  
・ $900^\circ\text{C}$

MOSキャパシタ作製

C-V測定

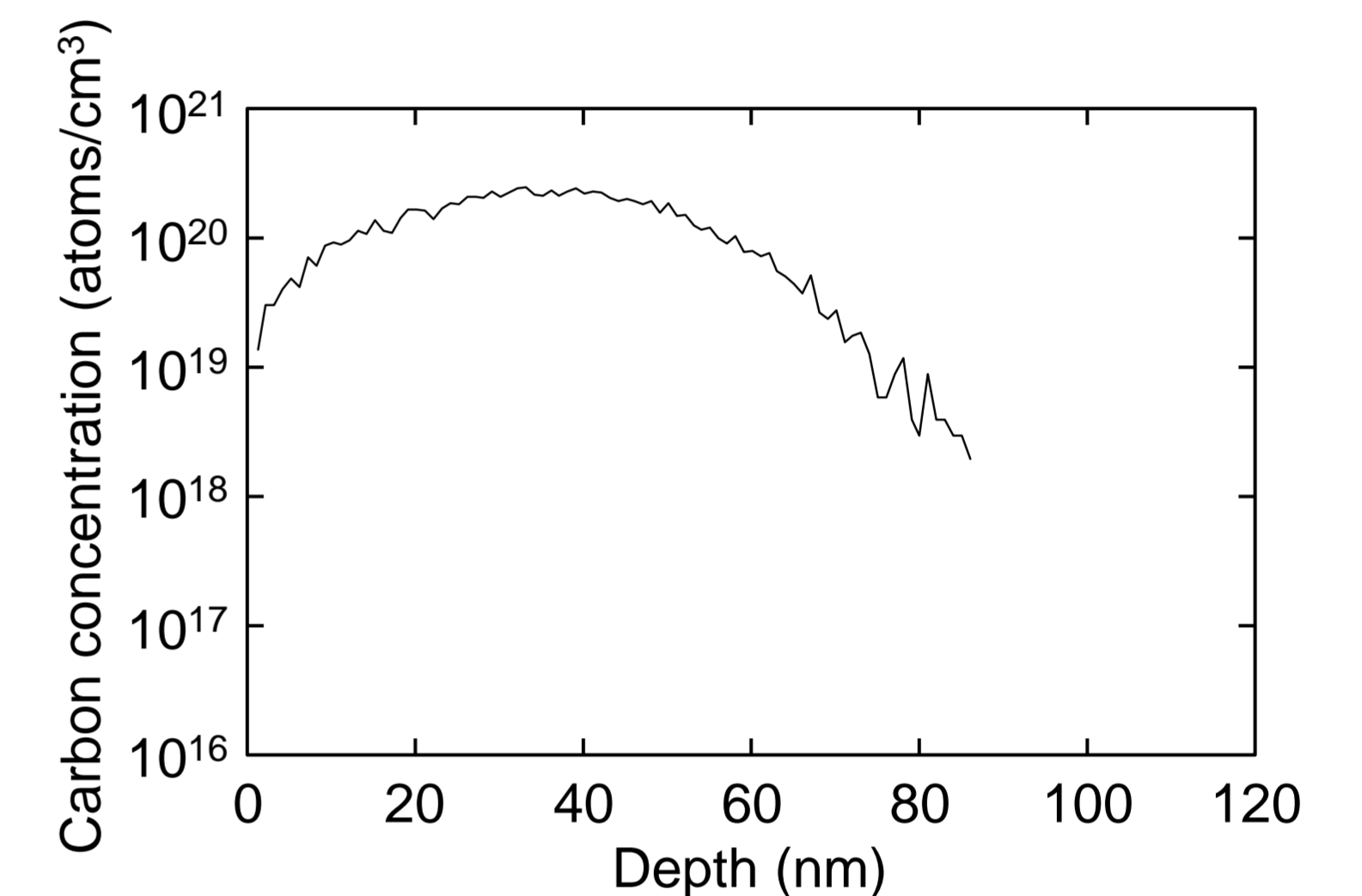


図1 シリコン基板へカーボンを注入(10 keV,  $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ )したときの深さ方向分布のシミュレーション。

### (4) 結果:C-V曲線の挙動

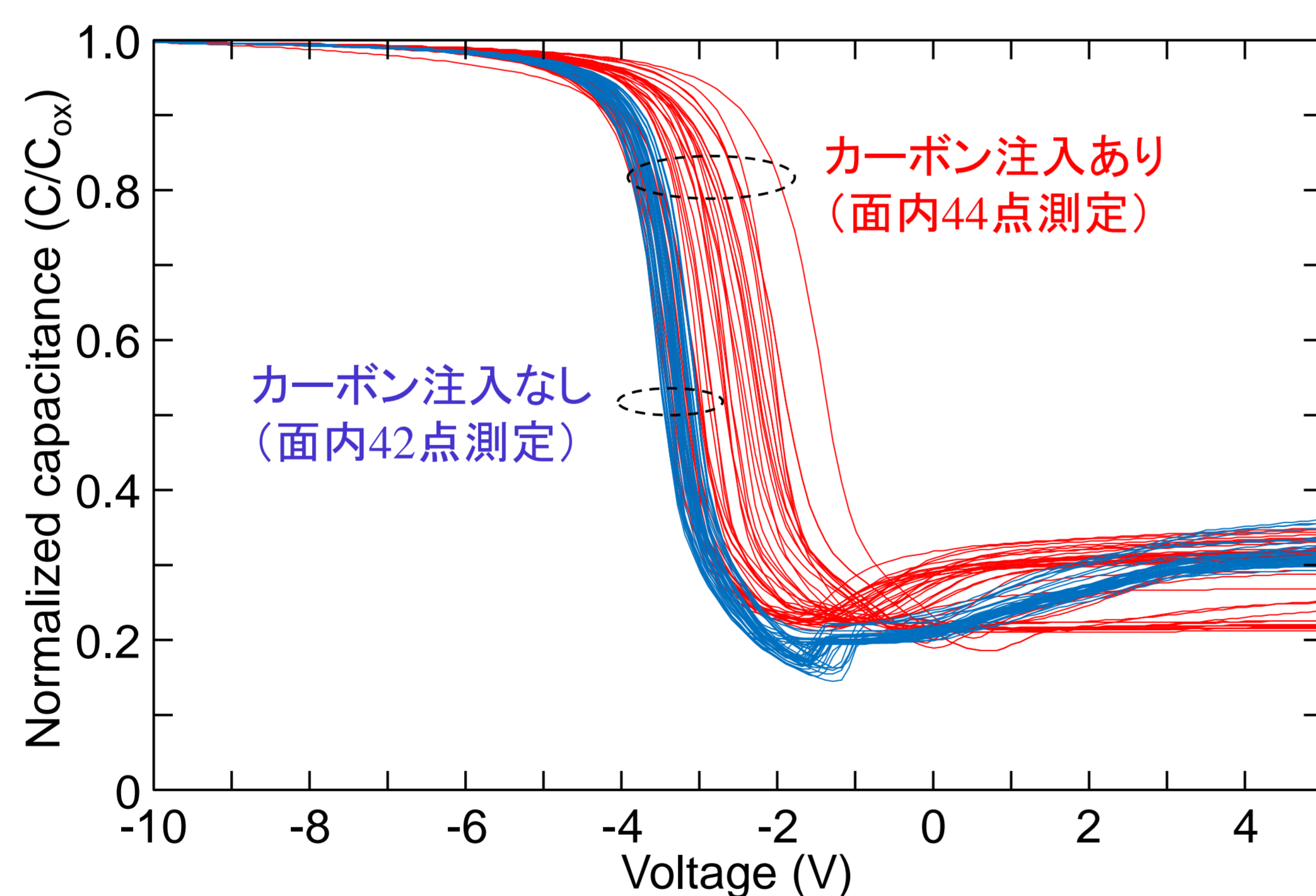


図2 「カーボン注入あり・なし+ウェット酸化」により形成したシリコン酸化膜のC-V曲線。

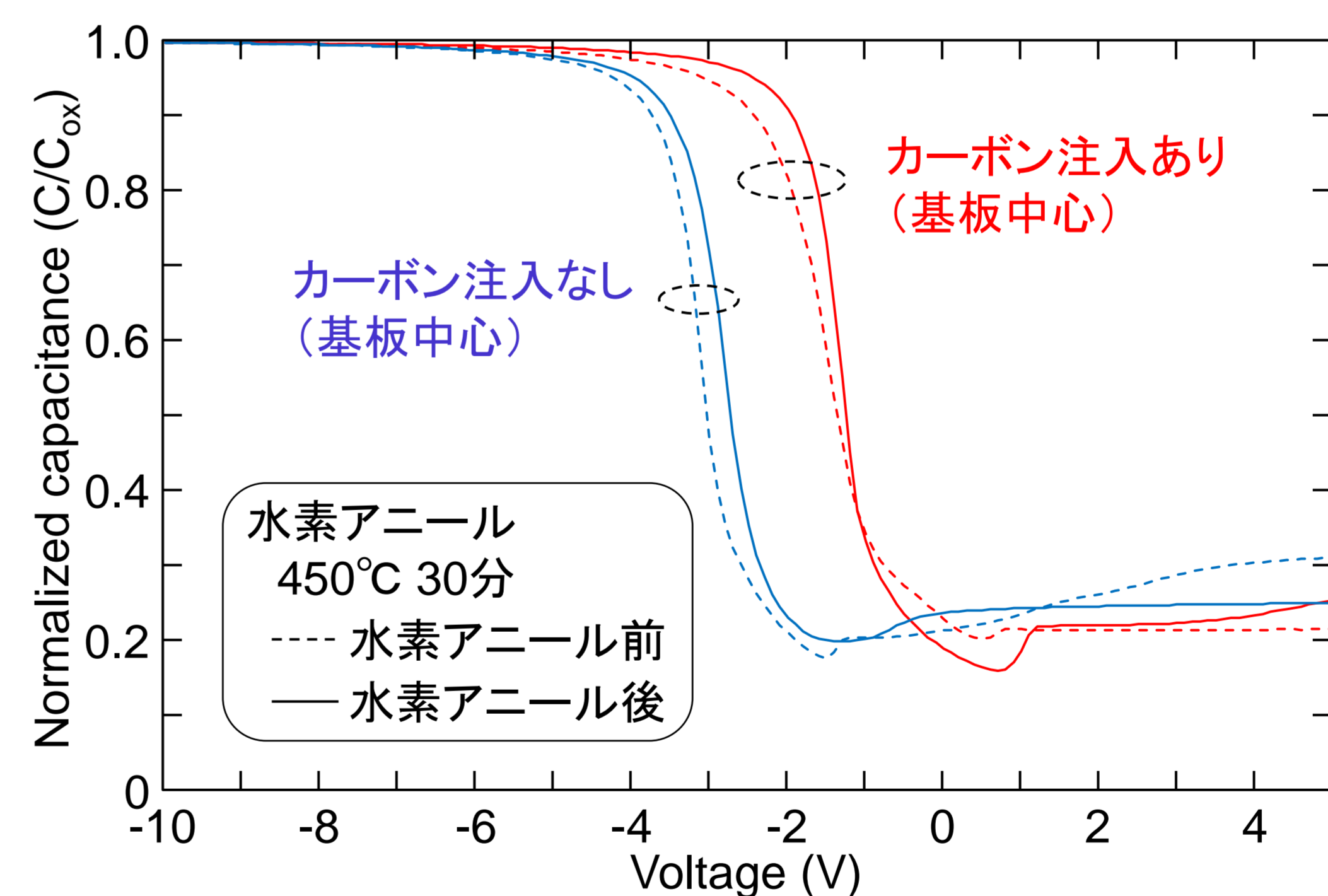


図3 カーボン注入あり・なしウェット酸化膜のC-V曲線に対する水素アニールの影響。

- p型シリコン基板へカーボン注入した基板のウェット酸化膜のC-V曲線はフラットバンド電圧が増加する方向へシフトし、水素アニールによってもカーボン注入あり・なしのC-V曲線の相対位置に変化は無い。

## 結論

- 今回、カーボンを注入したシリコン基板のウェット酸化膜に負の固定電荷が形成されていることを示唆する実験結果が得られた。今後カーボン注入やウェット酸化など各種プロセス条件について現象を明らかにし、我々が取り組んでいるイオン注入法によるシリコン酸化膜中の固定電荷の制御技術の開発につなげていく。

## 参考文献

- 1) Y. Ebihara, K. Chokawa, S. Kato, K. Kamiya, and K. Shiraishi, Appl. Phys. Lett. **100**, 212110 (2012).



# ALD法を用いて作製したSiO<sub>2</sub>膜の表面パッシベーション効果

薄 謙志郎<sup>1,2</sup>・望月 敏光<sup>1</sup>・棚橋 克人<sup>1</sup>・高遠 秀尚<sup>1</sup>・山口 克彦<sup>2</sup>

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 太陽光チーム、2 福島大学

## 研究の目的

- シリコン太陽電池の高効率化を目指す上で、シリコンウェハ表面再結合を抑制するためにパッシベーション膜の高品質化が求められている。
- 今回、ALD法を用いてSiO<sub>2</sub>膜(ALD-SiO<sub>2</sub>膜)をシリコン基板上に成膜したあと、各種熱処置を行いそのパッシベーション効果を検討した。
- セルプロセスに用いられる熱プロセスを想定して、N<sub>2</sub>アニール処理および電極焼成と同じ条件での熱処理を行い、熱処理がパッシベーション効果に与える影響を調べた。
- シリコン太陽電池におけるパッシベーション膜としてのALD-SiO<sub>2</sub>膜の膜厚及びN<sub>2</sub>アニール処理条件の最適化を行った。

## 実験手法

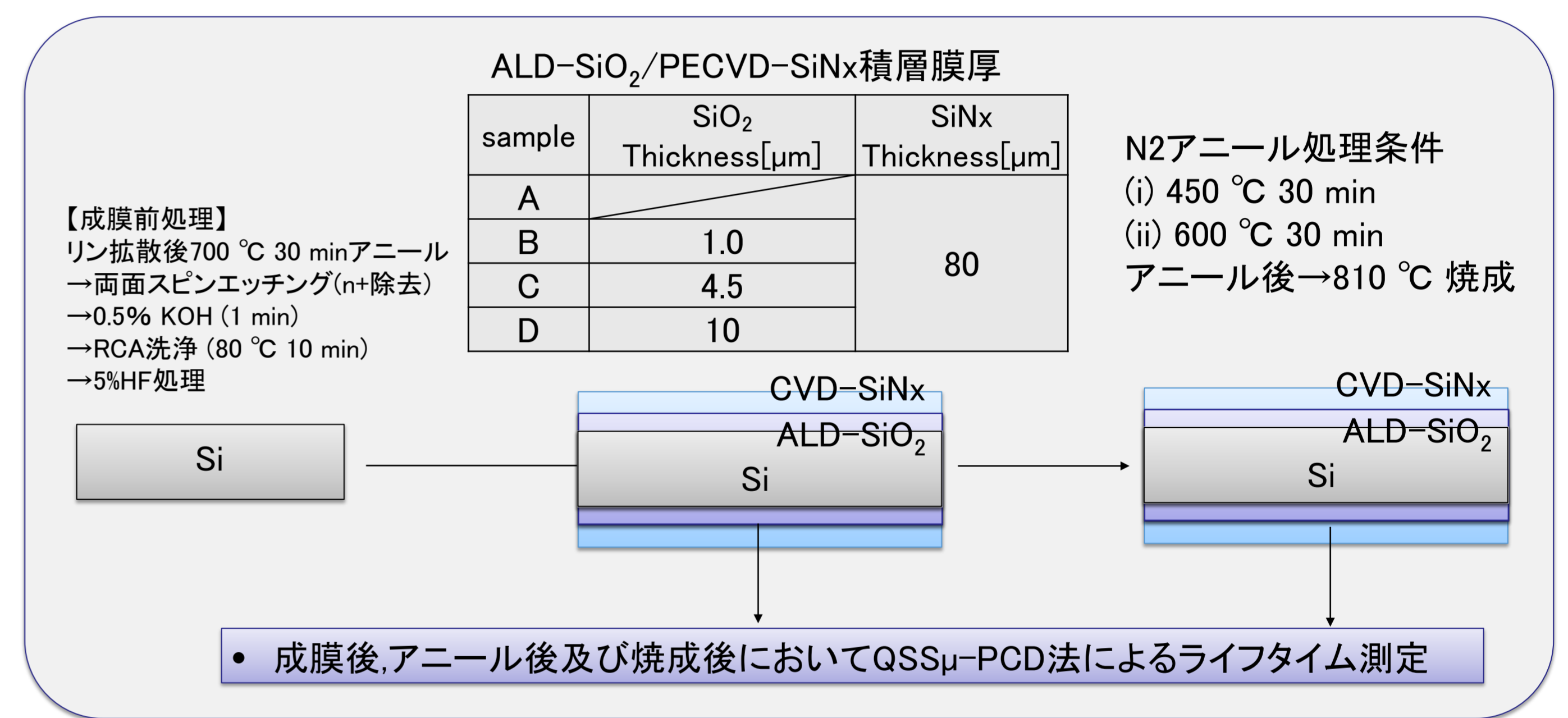
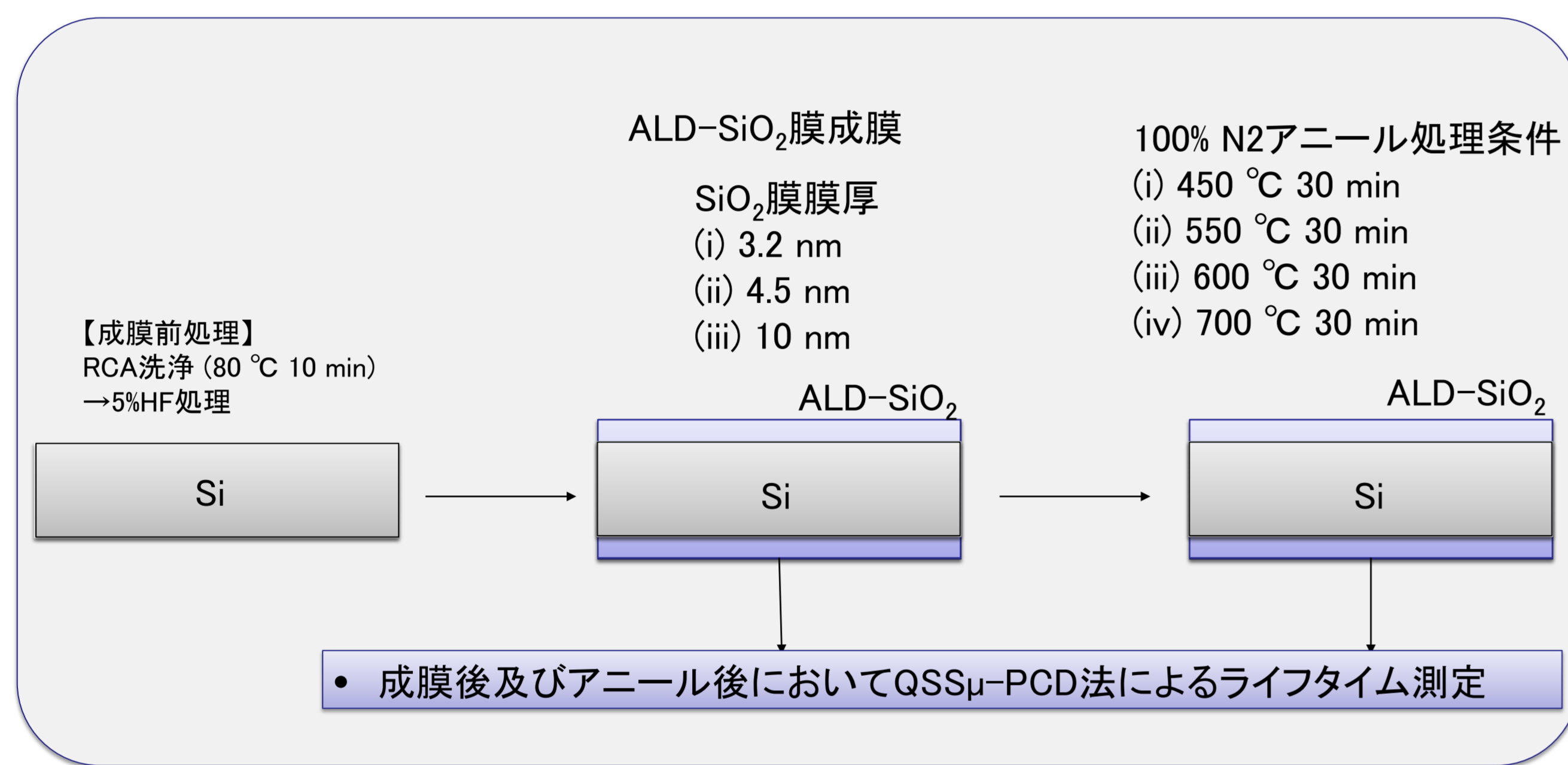
- 表1および表2に示すウェハ、実験手順でサンプルを作製した。
- ALD-SiO<sub>2</sub>膜のみ積層させたシリコンウェハおよび、ALD-SiO<sub>2</sub>膜上にPECVD法により成膜したSiN<sub>x</sub>膜(PECVD-SiN<sub>x</sub>)を積層させたシリコンウェハを作成し、成膜時、N<sub>2</sub>アニール後及び焼成を行った。
- 作製したサンプルをQSSμ-PCD法を用いたライフタイム測定により評価した。

表.1 ALD-SiO<sub>2</sub>膜単層のライフタイム測定に用いたシリコンウェハ

Sample wafers	Surface condition Front/Rear	Thickness [μm]	N <sub>A</sub> [cm <sup>-3</sup> ]	Resistivity [Ω cm]
Cz-P	mirror/texture	400±10	1.3E+15	10

表.2 ALD-SiO<sub>2</sub>/PECVD-SiN<sub>x</sub>積層膜のライフタイム測定に用いたシリコンウェハ

Sample wafers	Surface condition Front/Rear	Thickness [μm]	N <sub>D</sub> [cm <sup>-3</sup> ]	Resistivity [Ω cm]
Cz-N	texture/texture	148±2	4.2E+15	1.2



## 結果・考察

- 図.1にALD-SiO<sub>2</sub>膜単層のN<sub>2</sub>アニール処理後のライフタイム測定結果を示す。
- N<sub>2</sub>アニール処理温度450 °Cにおけるライフタイムは各膜厚とも約20 μs、N<sub>2</sub>アニール処理温度600 °Cにおけるライフタイムは各膜厚とも約40~60 μsと2~3倍に増加している。N<sub>2</sub>アニール処理温度700 °Cにおけるライフタイムは膜厚10 nmでは120 μsまで増加したが、膜厚3.2, 4.5 nmでは20~40 μsと低下した。
- 図.2にALD-SiO<sub>2</sub>/PECVD-SiN<sub>x</sub>積層膜の成膜時、N<sub>2</sub>アニール処理後、焼成後のLifetime測定結果を示す。
- PECVD-SiN<sub>x</sub>膜単層時と比較して、ALD-SiO<sub>2</sub>膜とPECVD-SiN<sub>x</sub>膜との積層膜にした場合のライフタイムの方が高い値を示しており、ALD-SiO<sub>2</sub>膜を積層させたことでシリコンウェハ表面の再結合速度がPECVD-SiN<sub>x</sub>膜単層の場合よりも抑制され、表面パッシベーションに有効であることが分かった。
- ALD-SiO<sub>2</sub>/PECVD-SiN<sub>x</sub>積層膜(厚さ1nmおよび10 nm)の場合、N<sub>2</sub>アニール処理温度が600 °Cにおいて450 °Cよりも高いライフタイム値が得られている。この結果はALD-SiO<sub>2</sub>膜単層の場合と対応が見られた。また、サンプルB~DのライフタイムがサンプルAと比較して高い値が得られたことから、ALD-SiO<sub>2</sub>膜を積層させたことでシリコンウェハ表面の再結合速度がPECVD-SiN<sub>x</sub>膜単層の場合よりも抑制されている。
- これらの結果から、PERC型セルなどの太陽電池の表面パッシベーション膜としてSiN<sub>x</sub>/ALD-SiO<sub>2</sub>/Si構造にすることで変換効率の改善が期待される。

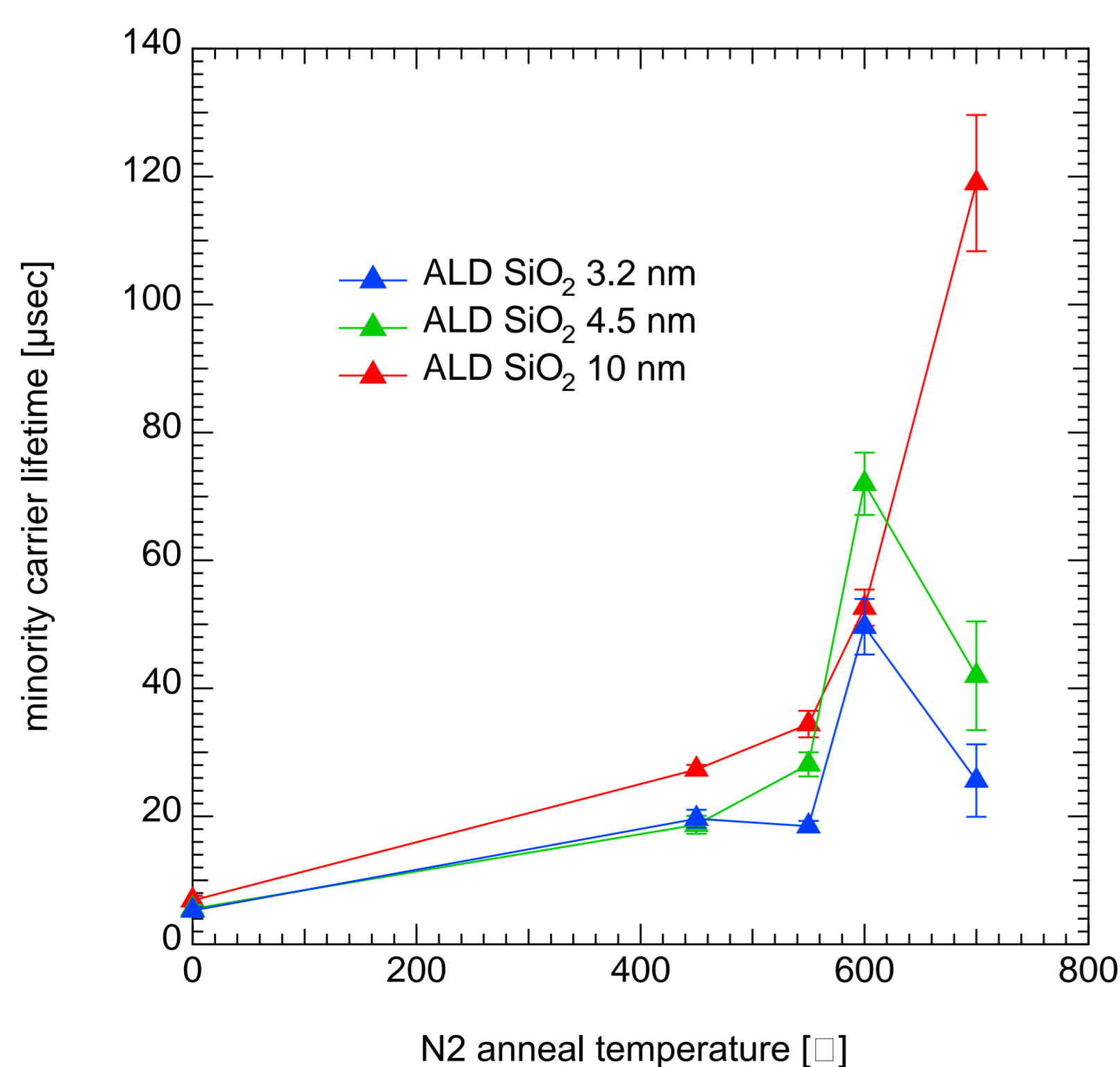


図.1 ALD-SiO<sub>2</sub>膜単層膜のN<sub>2</sub>アニール処理後のLifetime測定結果

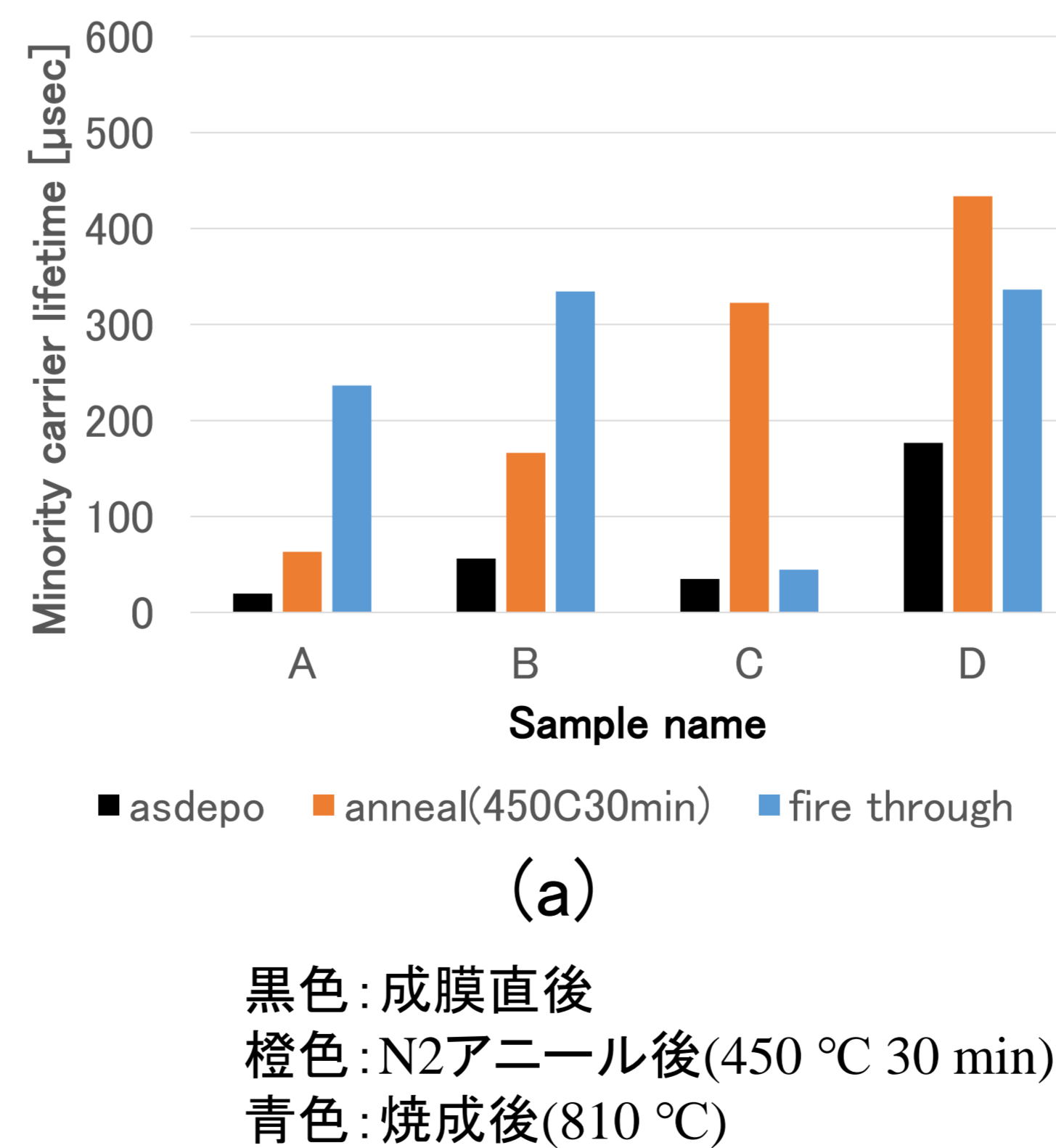
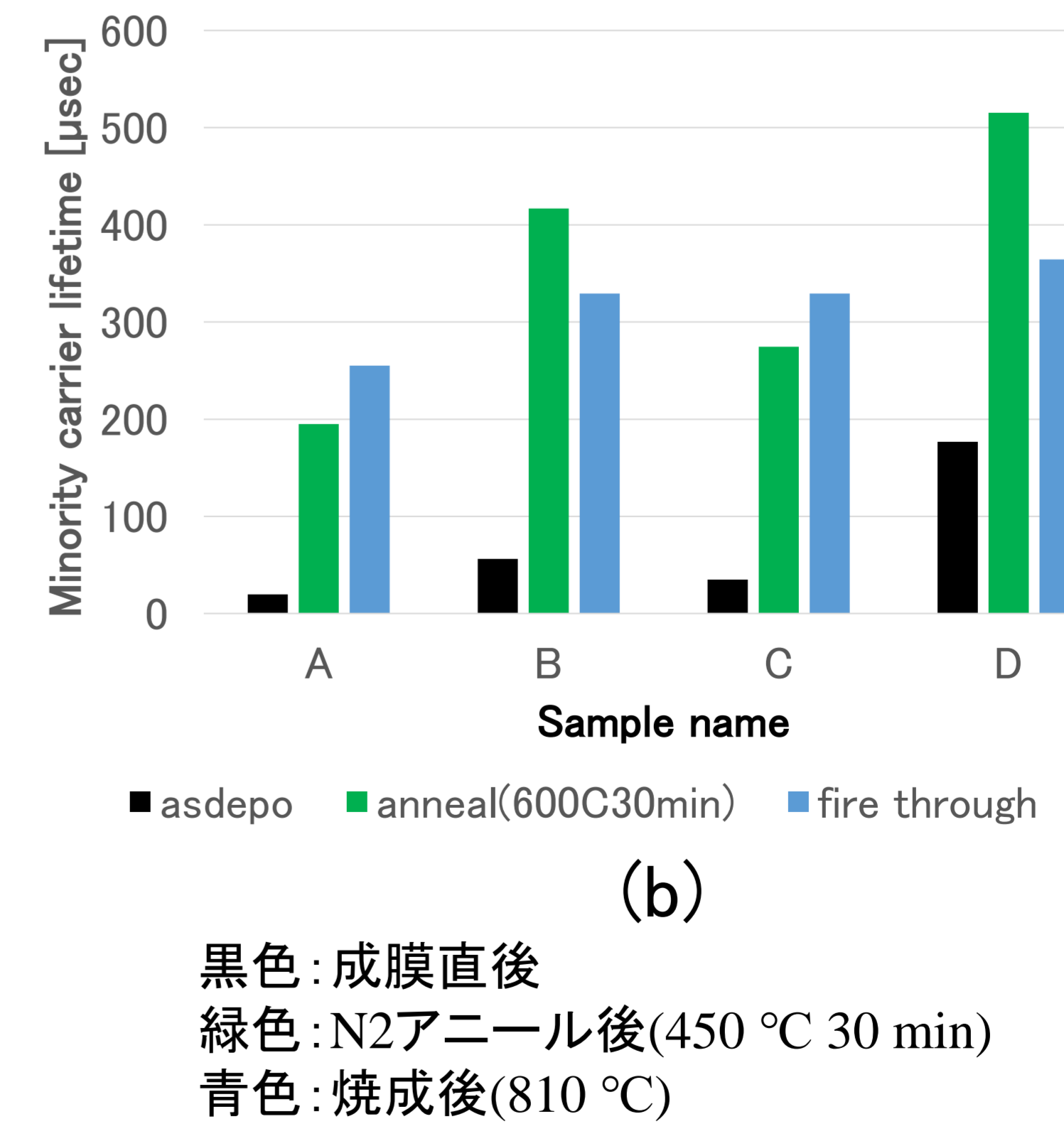


図.2 ALD-SiO<sub>2</sub>/PECVD-SiN<sub>x</sub>積層膜の成膜時、N<sub>2</sub>アニール処理後、焼成後のLifetime測定結果



## 参考文献

- [1] Vasylyuk et al, "A model for predicting the thermal conductivity of SiO<sub>2</sub>-Ge nanoparticle composites", Phys. Chem. Chem. Phys., 2015, 17, 13429-13441
- [2] Sang M Han, et al, "Detection of combinative infrared absorption bands in thin silicon dioxide films", Applied Physics Letters 70(24):3269-3271, 1997
- [3] Luis Fabián Peña, et al, "Atomic Layer Deposition of Silicon Dioxide Using Aminosilanes Disec-butylaminosilane and Bis(tert-butylamino)silane with Ozone", J. Phys. Chem. C 2016, 120, 10927-10935
- [4] Bo Han, et al, "On the Mechanisms of SiO<sub>2</sub> Thin-Film Growth by the Full Atomic Layer Deposition Process Using Bis(t-butylamino)silane on the Hydroxylated SiO<sub>2</sub>(001) Surface", J. Phys. Chem. C 2012, 116, 947-952

# ヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池におけるアモルファスシリコン界面層の物性と発電性能の相関

Effects of a-Si:H bilayers in a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells

齋 均<sup>1</sup>、許 宏榮<sup>2</sup>、陳 柏璋<sup>2</sup>、陳 珮伶<sup>2</sup>、松井 卓矢<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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、<sup>2</sup>台湾交通大学

H. Sai,<sup>1</sup> H.-J. Hsu,<sup>2</sup> P.-W. Chen,<sup>2</sup> P.-L. Chen,<sup>2</sup> T. Matsui<sup>1</sup> (1: GZR, AIST, Japan, 2: NTSU, Taiwan)

## Research Background

### ■ a-Si:H/c-Si heterojunction (SHJ) solar cells

- Excellent surface passivation by using **a-Si:H** [1]
- High efficiency (> 25%), high  $V_{OC}$  and low T-coefficient
- Suitable to bi-facial modules
- Applicable to thin wafers thanks to low-T process

### ■ Key issue – (i)a-Si:H/c-Si interface

#### □ Surface passivation

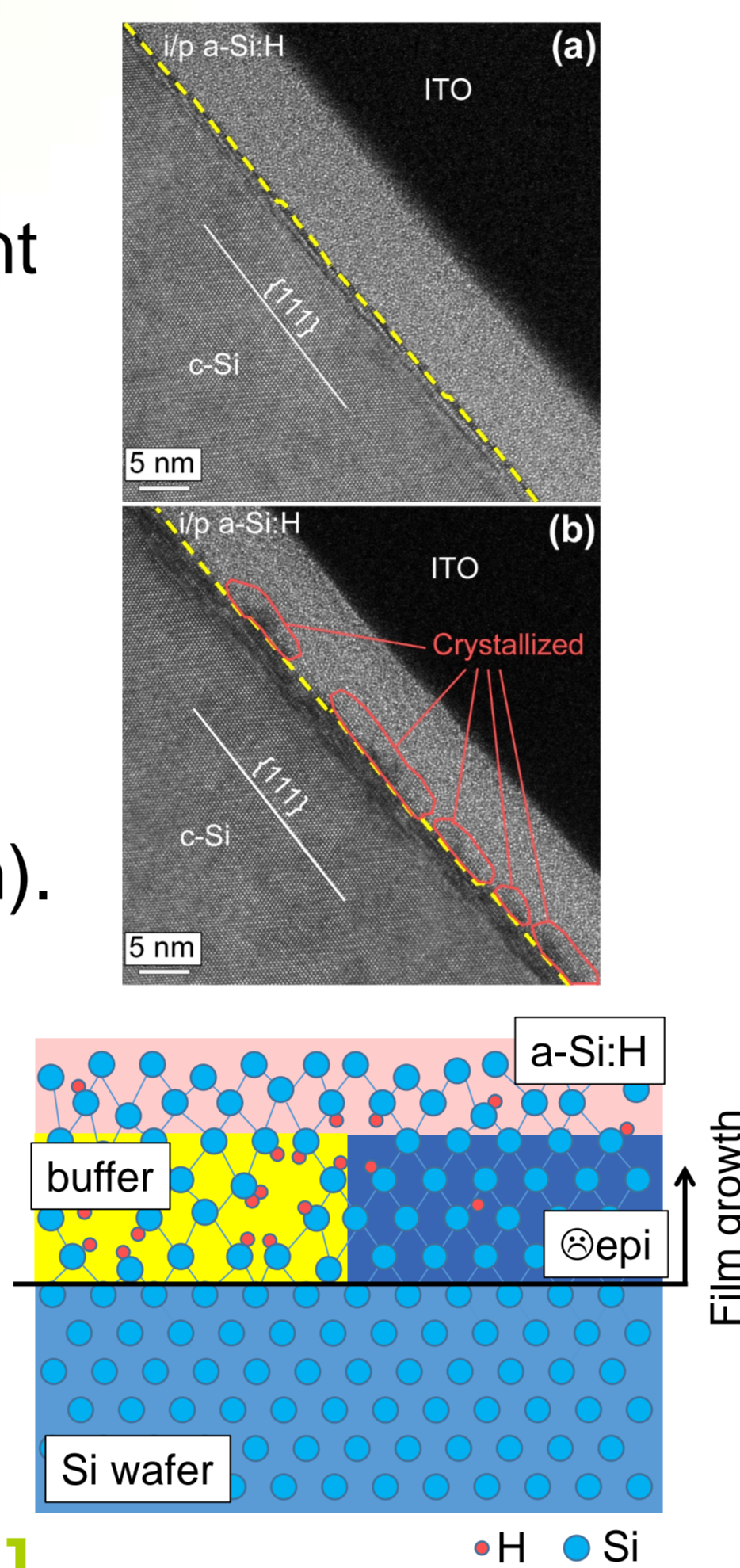
- Abrupt a-Si:H/c-Si interface is preferable. Epitaxial growth is detrimental (either as-grown or post-growth).
- Overlying p-layer deteriorates the passivation

#### □ Carrier transport channel

- Series resistance should be minimized.

### ■ 2-step growth of (i)a-Si:H [2-4]

- **Interfacial layer ( $i_1$ ) + bulk layer ( $i_2$ )** is effective for improving surface passivation.
- Record-efficiency (25.1%) cell has been achieved.[4]



## Research Objective

### ■ Our previous study [3] clarified:

- Porous and H-rich a-Si:H layers are suited for the interfacial layer ( $i_1$ ).
- Such layers are grown with pure  $\text{SiH}_4$  plasma at high-pressure and high-power conditions.
- **Microstructure factor  $R^*$**  determined by FT-IR is useful to optimize the  $i_1$ -layer.

### ■ However,

- Material properties of a-Si:H can be tuned by various process (PECVD) parameters.

### Objective:

How do the growth parameters affect the  $R^*$  of a-Si:H and the photovoltaic performance of SHJ solar cells?

### Parameters considered in this work:

- Substrate temperature ( $T_s$ )
- Gas pressure ( $P$ )
- Precursor gases ( $\text{SiH}_4$  and  $\text{Si}_2\text{H}_6$ )

## Experimental

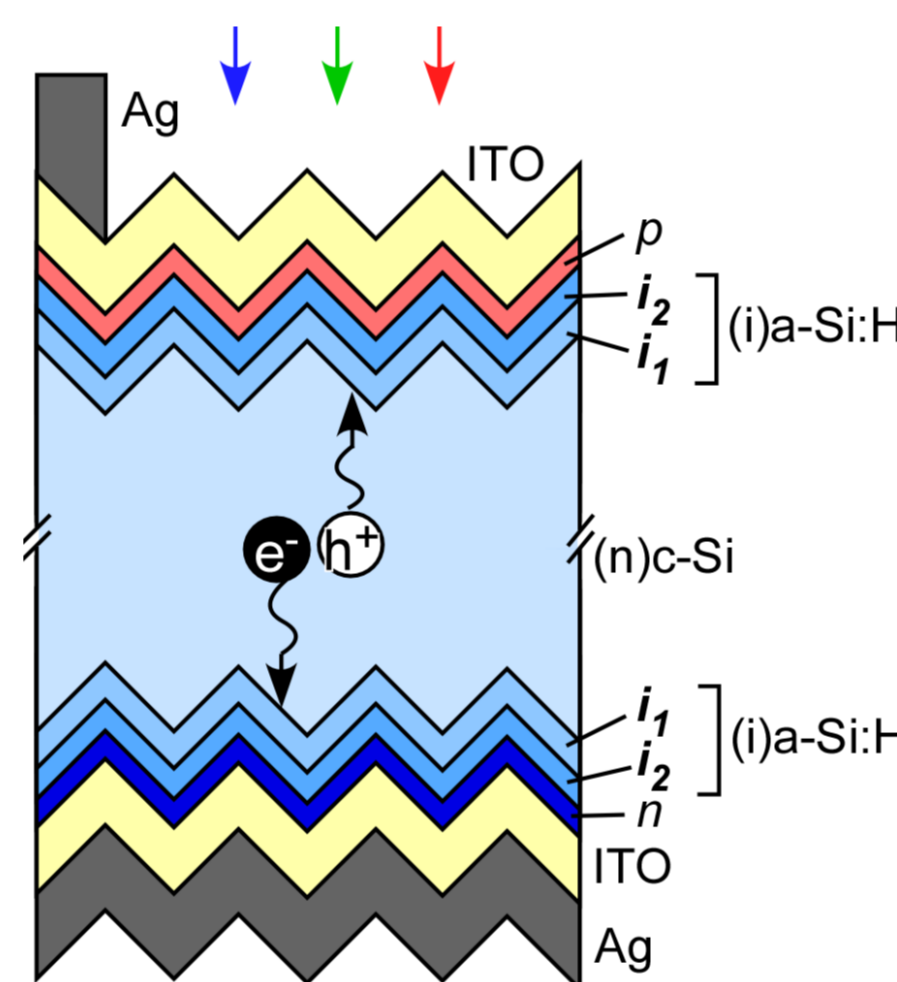
### ■ Growth of (i)a-Si:H layers

- PECVD, CCP, 13.56MHz
- Characterization: Ellipsometry, FT-IR

Table: Growth conditions for (i)a-Si:H layers

Layer Series	$\text{Si}_2\text{H}_6$	$i_1$	$P$	$i_2$
Si precursor	$\text{SiH}_4$ , $\text{Si}_2\text{H}_6$	$\text{SiH}_4$	$\text{SiH}_4$	$\text{SiH}_4$
$\text{Si}_2\text{H}_6$ concentration, $C_{\text{Si}_2\text{H}_6}$ [ $\text{Si}_2\text{H}_6$ ]/[ $\text{SiH}_4$ ]+[ $\text{Si}_2\text{H}_6$ ]]	0 – 75%	0	0	0
Hydrogen dilution [ $\text{H}_2$ ]/[ $\text{SiH}_4$ ]	0	0	0	10
Substrate temperature, $T_s$ (°C)	200	30 – 400	200	200
Pressure, $P$ (Pa)	13, 40	13	13-40	13
Power density ( $\text{mW cm}^{-2}$ )	11	11	11	11

### ■ Solar cell

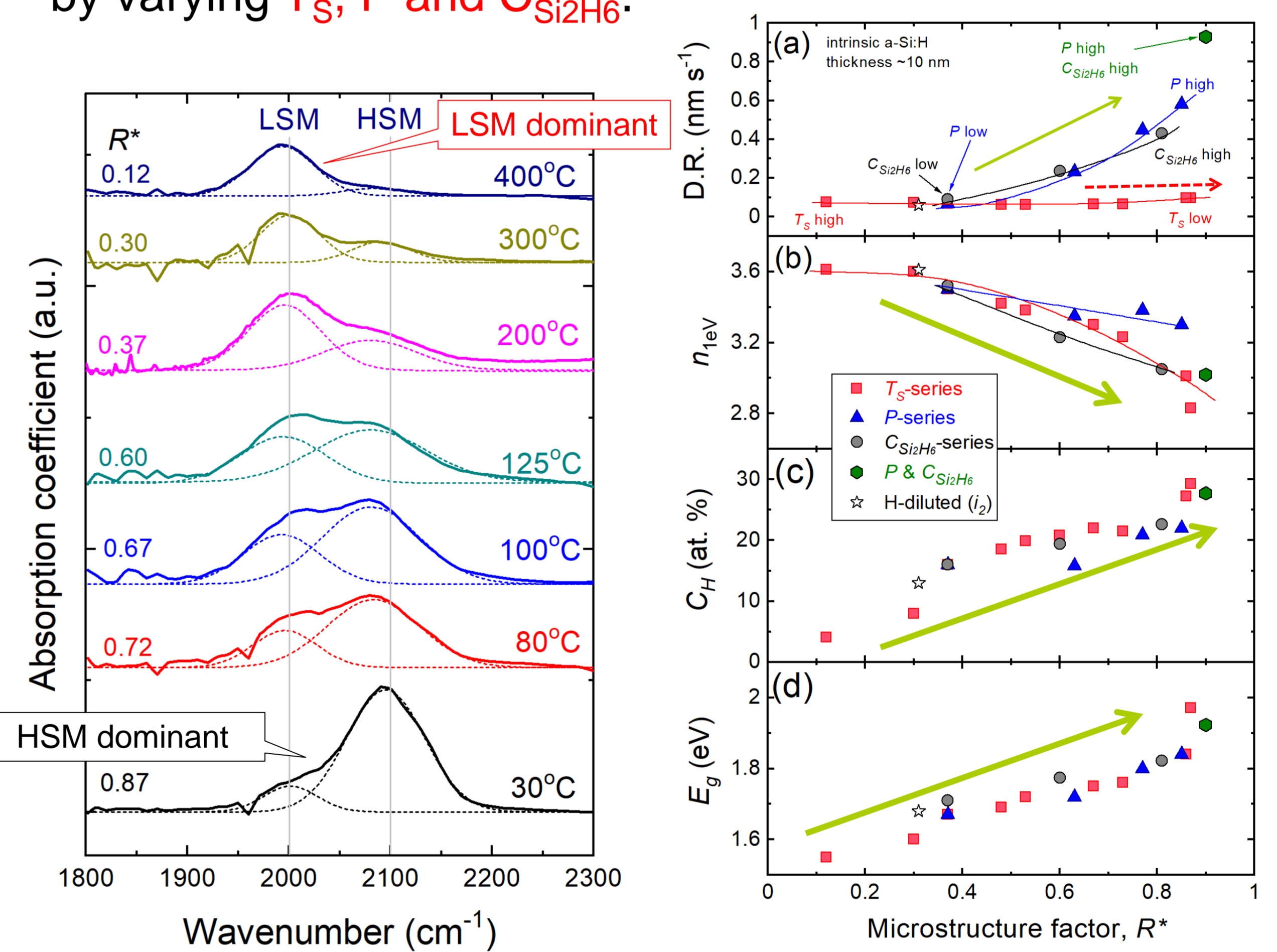


- Front emitter
- (n)FZ-Si, 270 $\mu\text{m}$
- Pyramid texture
- **(i)a-Si:H bilayer**
- ITO/Ag by SP

## Properties of (i)a-Si:H for interfacial layer [6]

### ■ Microstructure factor [5]: $R^* = I_{HSM} / (I_{LSM} + I_{HSM})$

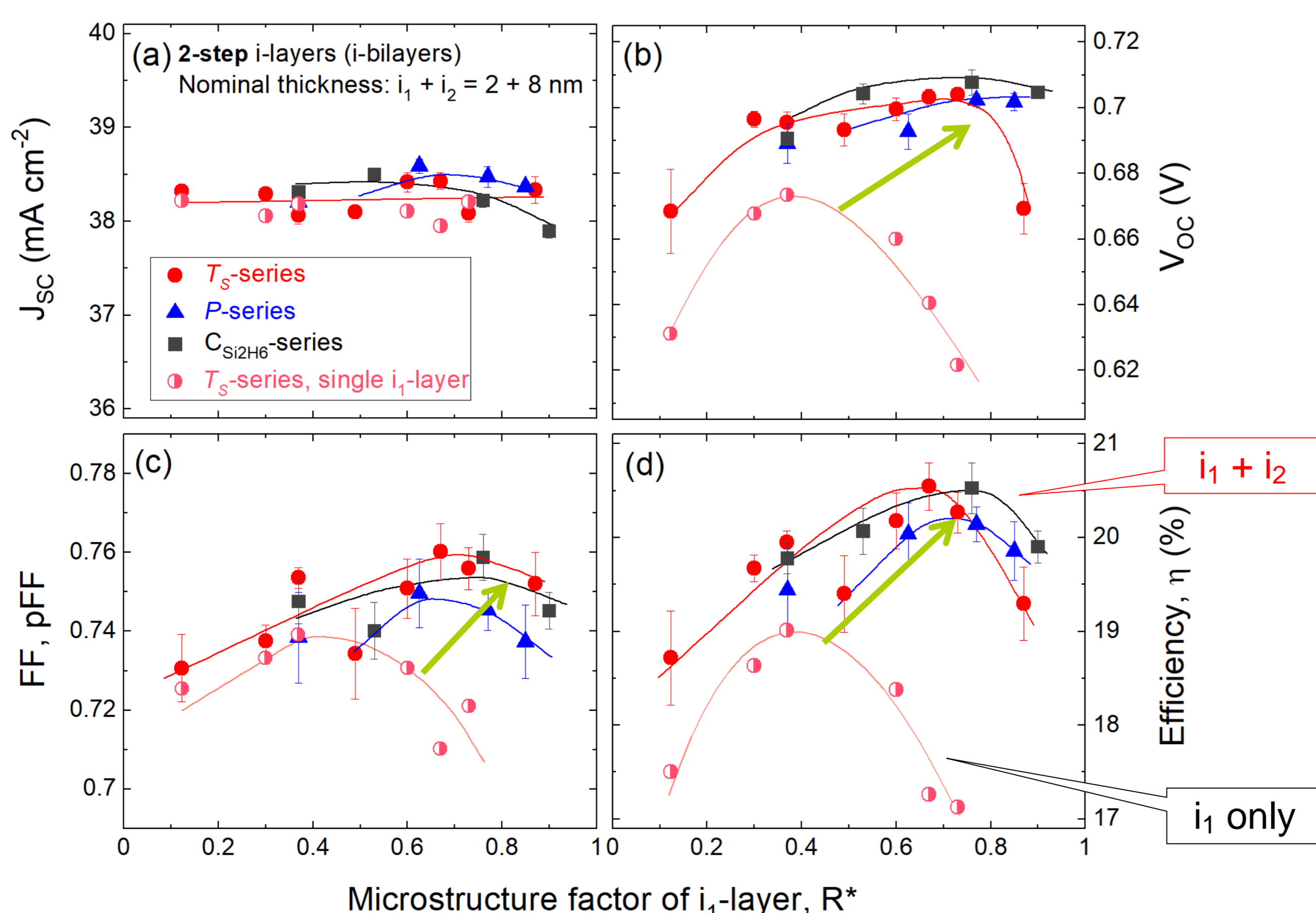
- D.R., refractive index ( $n_{1\text{eV}}$ ), hydrogen content ( $C_H$ ), and bandgap energy ( $E_g$ ) as well as  $R^*$  are controlled widely by varying  $T_s$ ,  $P$  and  $C_{\text{Si}_2\text{H}_6}$ .



## SHJ cells with (i)a-Si:H bilayers ( $i_1 + i_2$ ) [6]

### ■ Effect of (i)a-Si:H bilayer: $i_1$ - and $i_2$ -layers (2 + 8 nm)

- The  $V_{OC}$ , FF, and efficiency are significantly improved by applying i-bilayers.
- The best efficiency is obtained by using  $i_1$  layer with  $R^* \sim 0.7$ , **regardless of the process conditions.**



## Conclusions

- Material properties of a-Si:H layers can be tuned widely by controlling various PECVD parameters: temperature, pressure, mixing of  $\text{SiH}_4$  and  $\text{Si}_2\text{H}_6$  etc.
- Microstructure factor  $R^*$  of interfacial a-Si:H layers is a good measure to improve the surface passivation at a-Si:H/c-Si, regardless of the PECVD parameters.

## Acknowledgement

T. Oku, Y. Sato, and M. Tanabe in AIST for their technical supports.

## References

- [1] S. De Wolf., Green, 2, 7-24 (2012).
- [2] W. Liu *et al.*, J. Appl. Phys. 120, 175301 (2016).
- [3] H. Sai *et al.*, J. Appl. Phys. 124, 103102 (2018)
- [4] X. Ru *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 215, 110643 (2020)
- [5] J. Müllerová *et al.*, Appl. Surf. Sci. 254, 3690 (2008).
- [6] H. Sai *et al.*, Phys. Status. Solid. A. under review (2021).

# p型ナノ結晶シリコン薄膜を窓層に用いたヘテロ接合太陽電池の開発

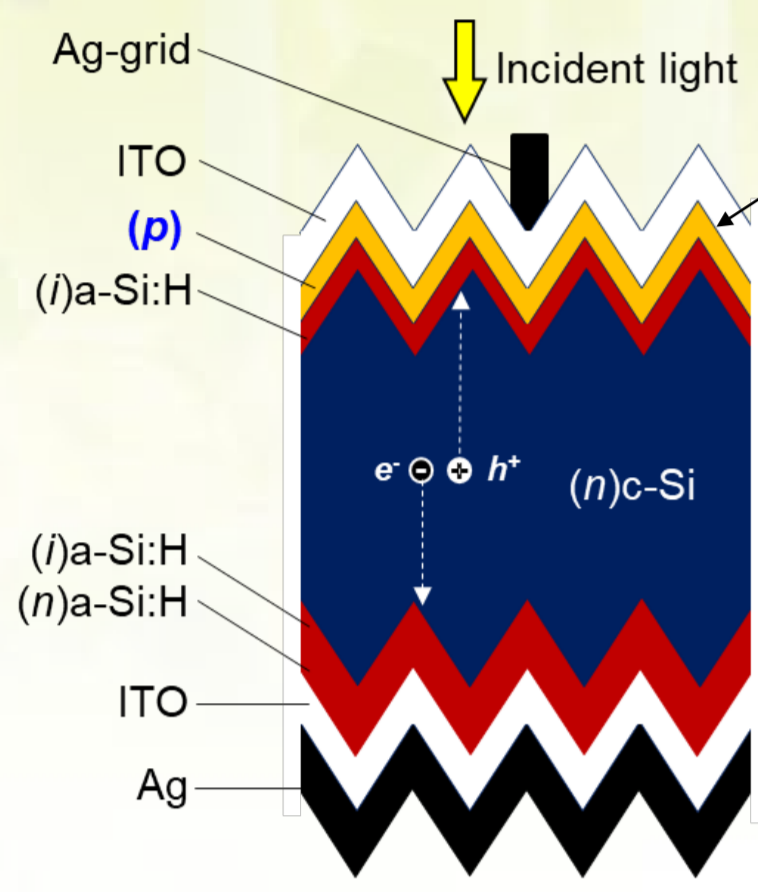
松井 卓矢<sup>1</sup>、海汐 寛史<sup>2</sup>、鯉田 崇<sup>3</sup>、齋 均<sup>1</sup>  
産業技術総合研究所

<sup>1</sup> ゼロエミッション国際共同研究センター、<sup>2</sup> 前太陽光発電研究センター、<sup>3</sup> 省エネルギー研究部門

## 研究の目的・実験

### a-Si:H/c-Si シリコンヘテロ接合(SHJ) 太陽電池

- ◎ 高い変換効率・低い温度係数
- ◎ 両面受光により発電量upが可能
- ◎ 窓層(特にドーパ層)の光吸収損失が課題
- ◎ 低温環境では特性(FF)が低下する[1]



受光面のp型a-Si:Hをp型nc-Si:Hに置き換える

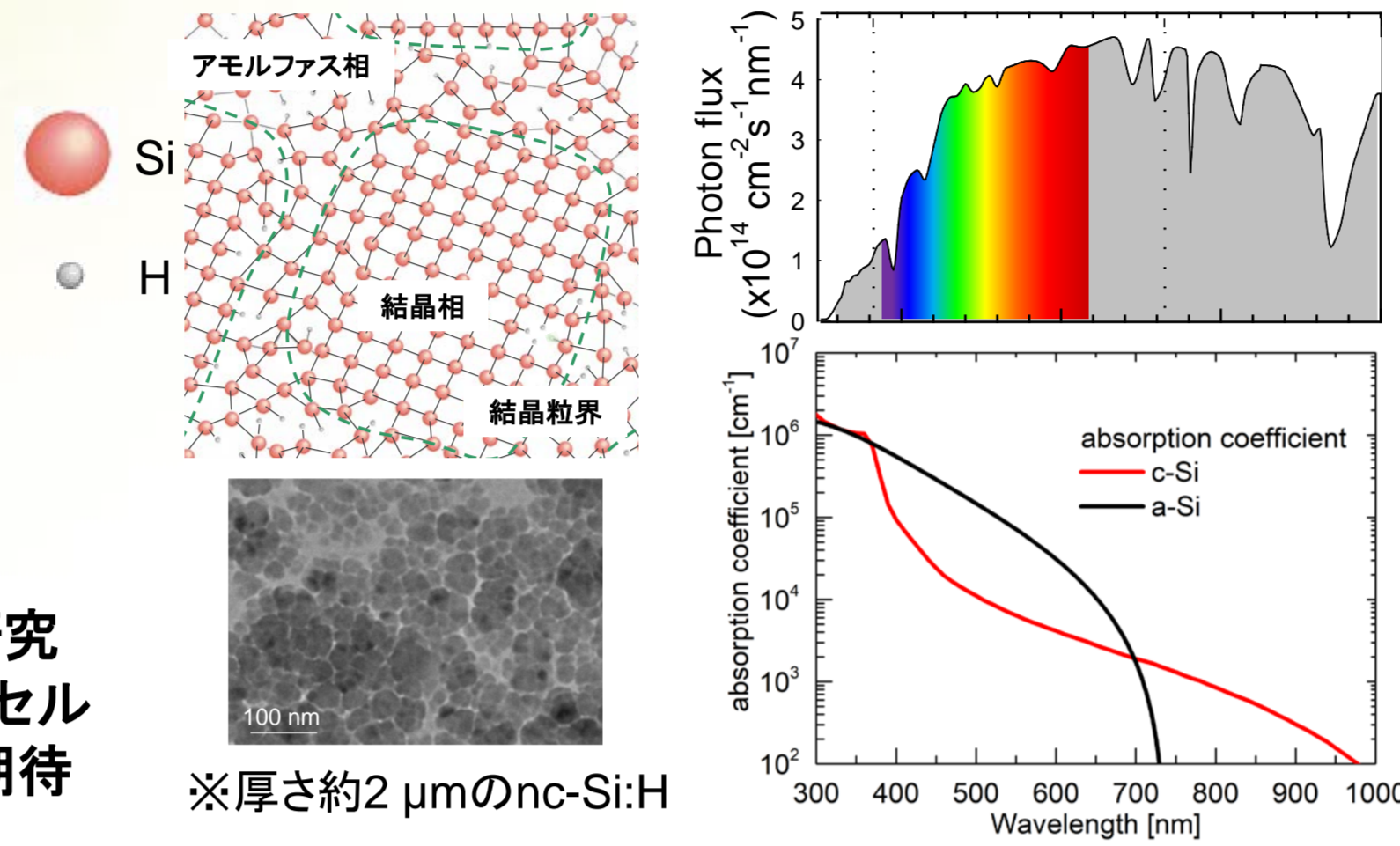
#### ■ 研究の課題

- ・ (p)a-Si:Hを(p)nc-Si:Hに置き換える研究は多数報告されているが[1-6]、高効率セル(eff.>23%)でどの程度の性能改善が期待できるのか不明

#### ■ 研究のねらい

- ・ nc-Si:H薄膜の物性とセル特性の関係を明らかにする。
- ・ 高効率なSHJでnc-Si:Hの効用を検証する。

### nc-Si:H薄膜の特徴



- ・ ナノメートルオーダーの結晶相とアモルファス相が混在した複合材料
- ・ a-Si:Hに比べて可視光領域の光吸収係数が小さい。

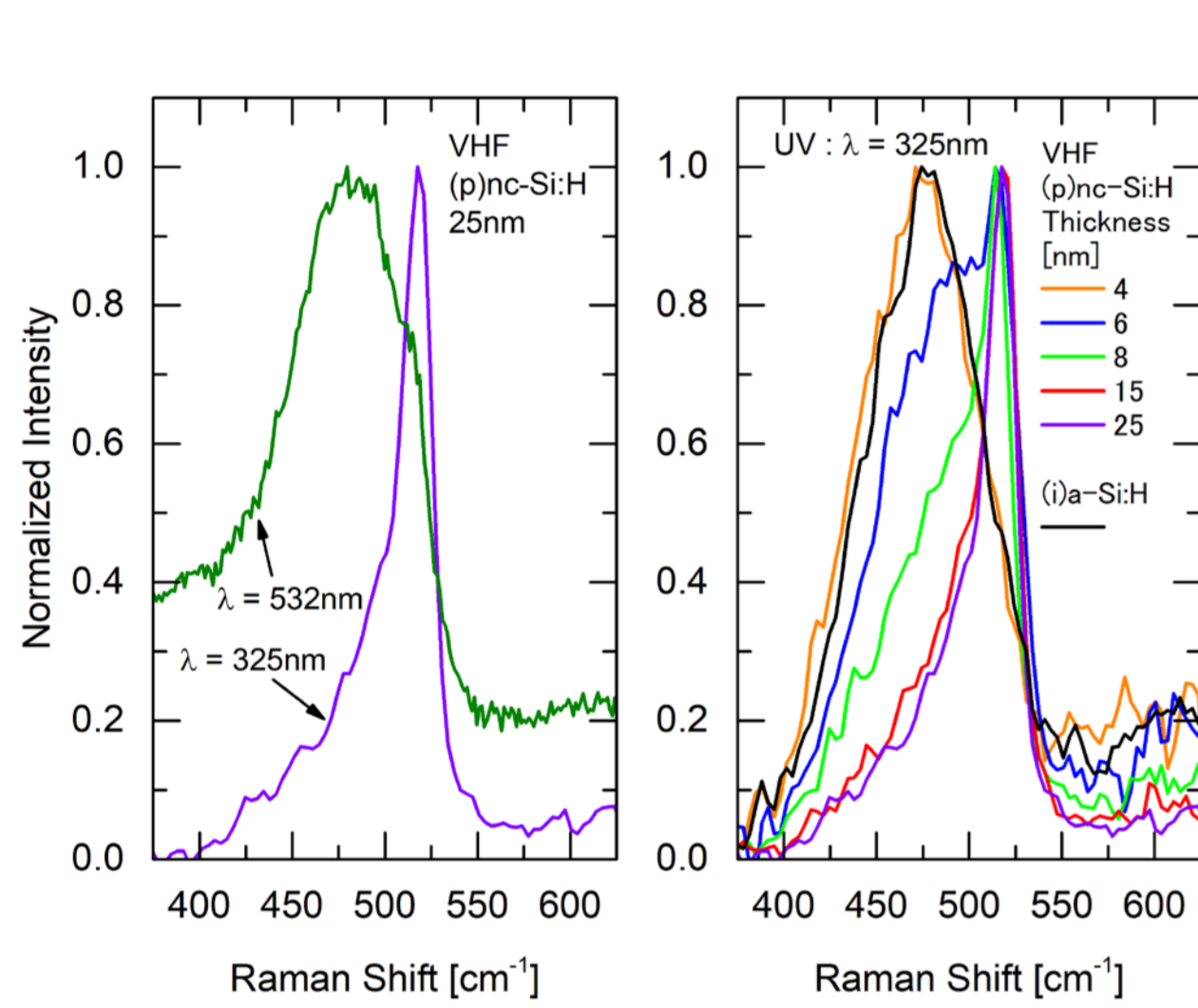
### p層製膜条件と評価手法

Material	(p)nc-Si:H	(p)nc-Si:H	(p)a-Si:H	
Frequency (MHz)	65.0 (VHF)	13.56 (RF)	13.56 (RF)	
Gas	SiH <sub>4</sub> (sccm)	3.0	3.5	5.0
flow	H <sub>2</sub> (sccm)	500	700	20
rate	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (sccm)	0.015	0.005	0.075
Pressure (Pa)		200	200	66.5
Power density (mW/cm <sup>2</sup> )		347	148	30
T <sub>s</sub> (°C)		180	150	150

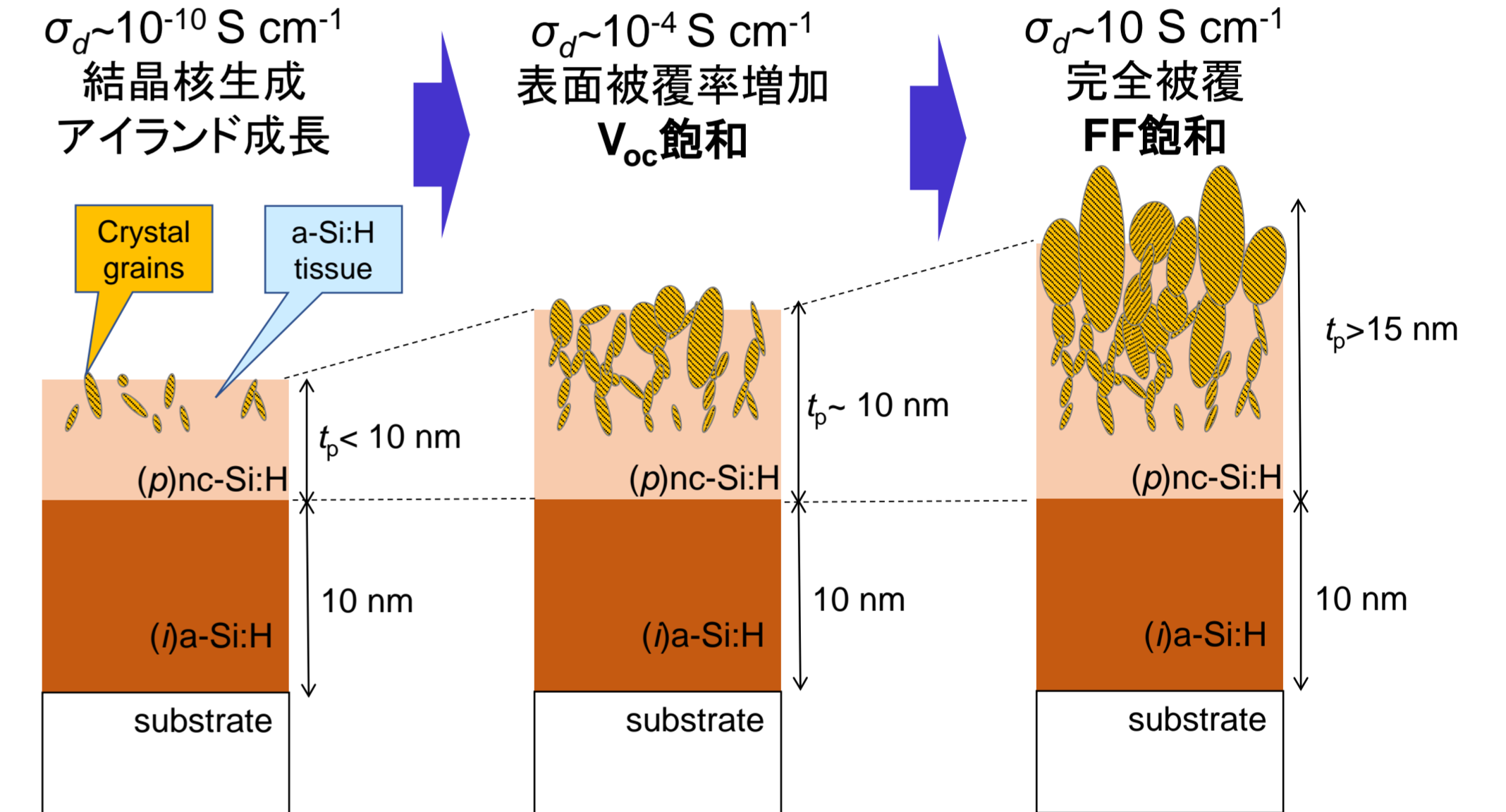
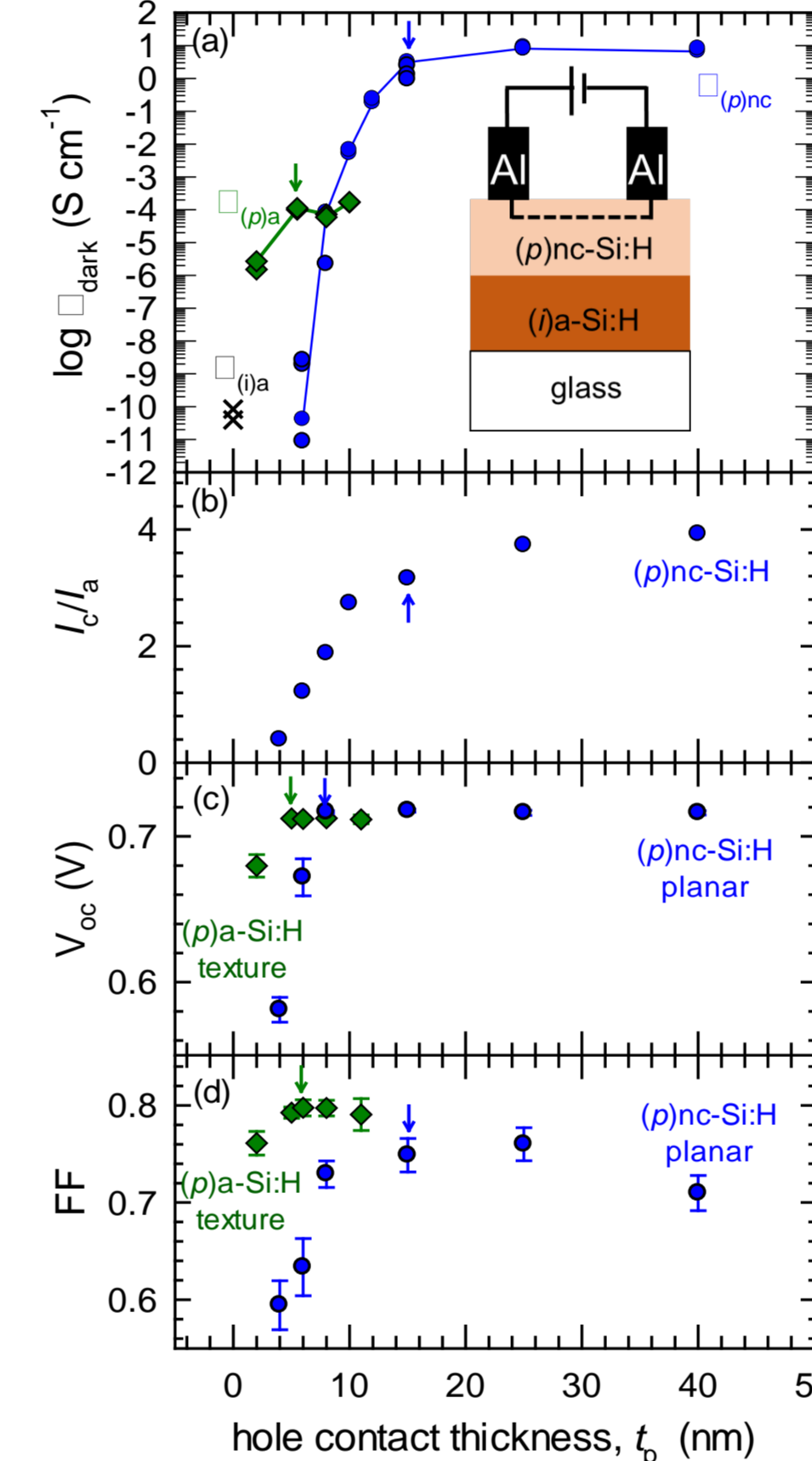
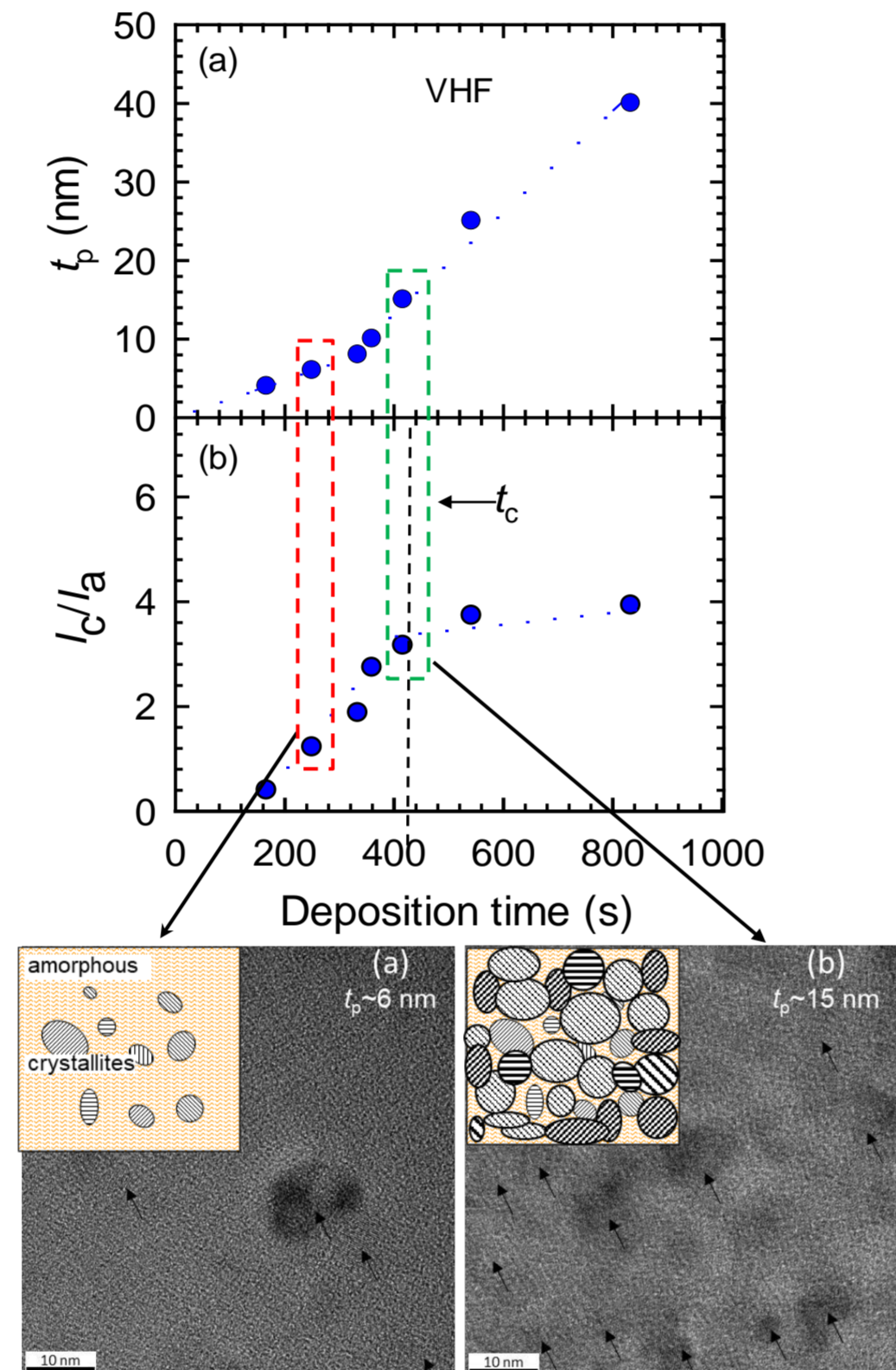
・ 各p層製膜条件はTEXセルの変換効率を指標に最適化した。

- ・ 結晶性: UV-Raman
- ・ 電気特性: Coplanar conductivity
- ・ セル特性(平坦・テクスチャSi): I-V, EQE
- ・ コンタクト抵抗

## nc-Si:H薄膜 (t<sub>p</sub>-4-40 nm) の成長と構造変化の評価 (VHF放電)



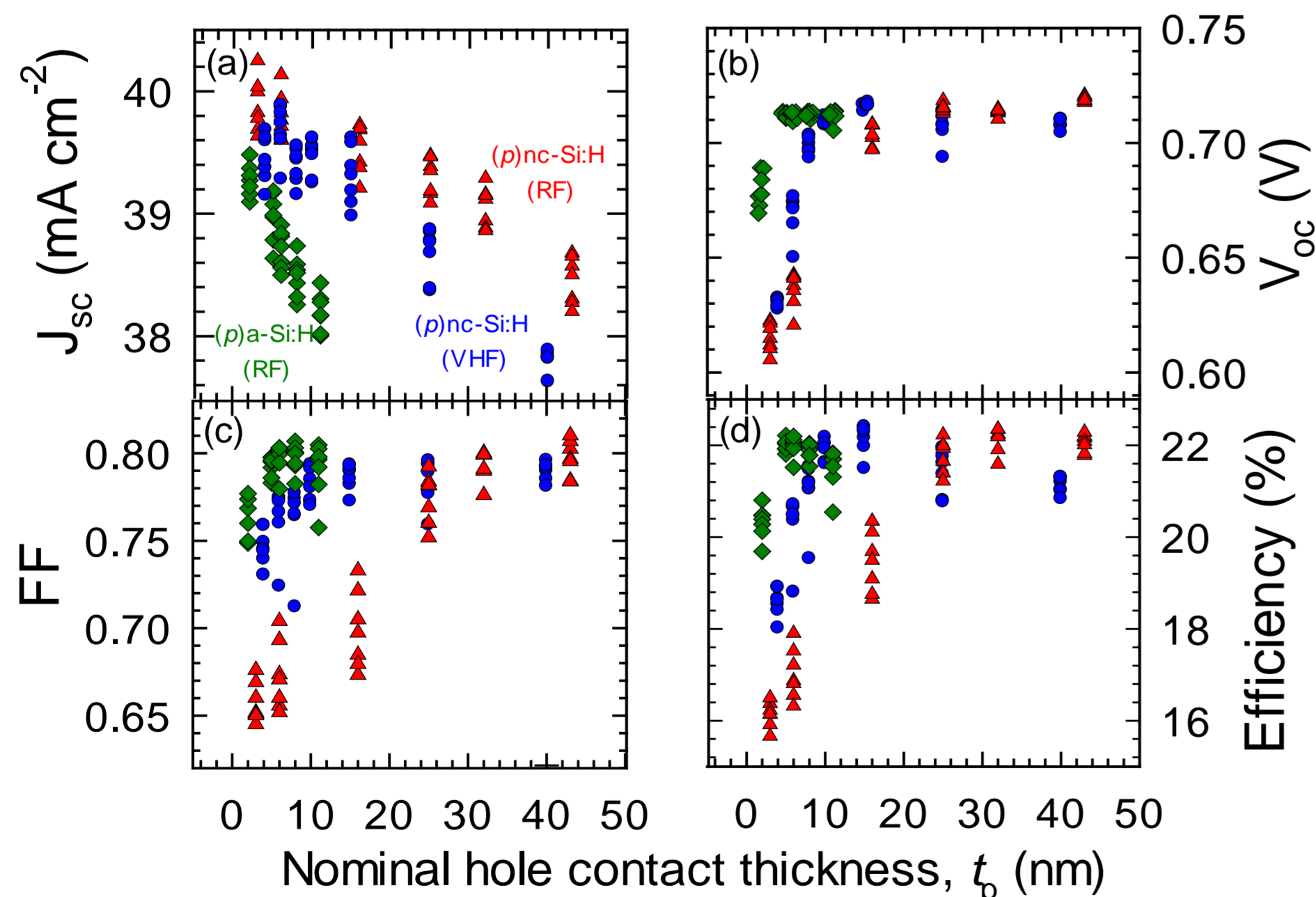
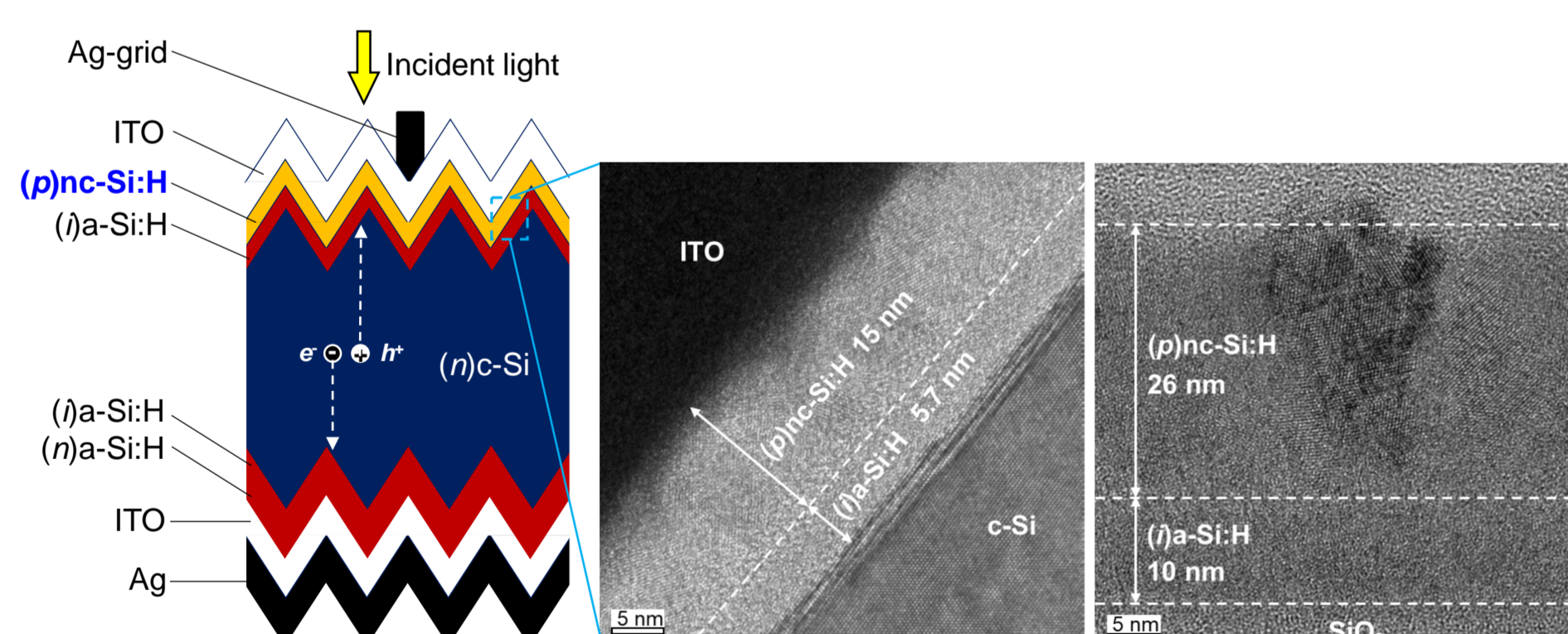
- ・ UV-Ramanで極薄nc-Si:H (<10nm) を評価
- ・ t<sub>p</sub>~4-6 nmで結晶核発生を確認
- ・ t<sub>p</sub>~15 nmで成長速度が増加するとともに結晶性が飽和(臨界膜厚: t<sub>c</sub>)  
→ ナノ結晶相の表面被覆が支配的に



- ・ 膜厚増加 (t<sub>p</sub>: 4-15 nm) に従って導電率は12桁増加  
→ (p)nc-Si:Hのアモルファス相の導電率は極めて低い(i層と同程度)
- ・ t<sub>p</sub>~15 nm(臨界膜厚: t<sub>c</sub>) 近傍で導電率、結晶性、FFが飽和  
→ 高いFFを得るためにはナノ結晶相による完全被覆が必要
- ・ V<sub>oc</sub> はp層の導電率により支配

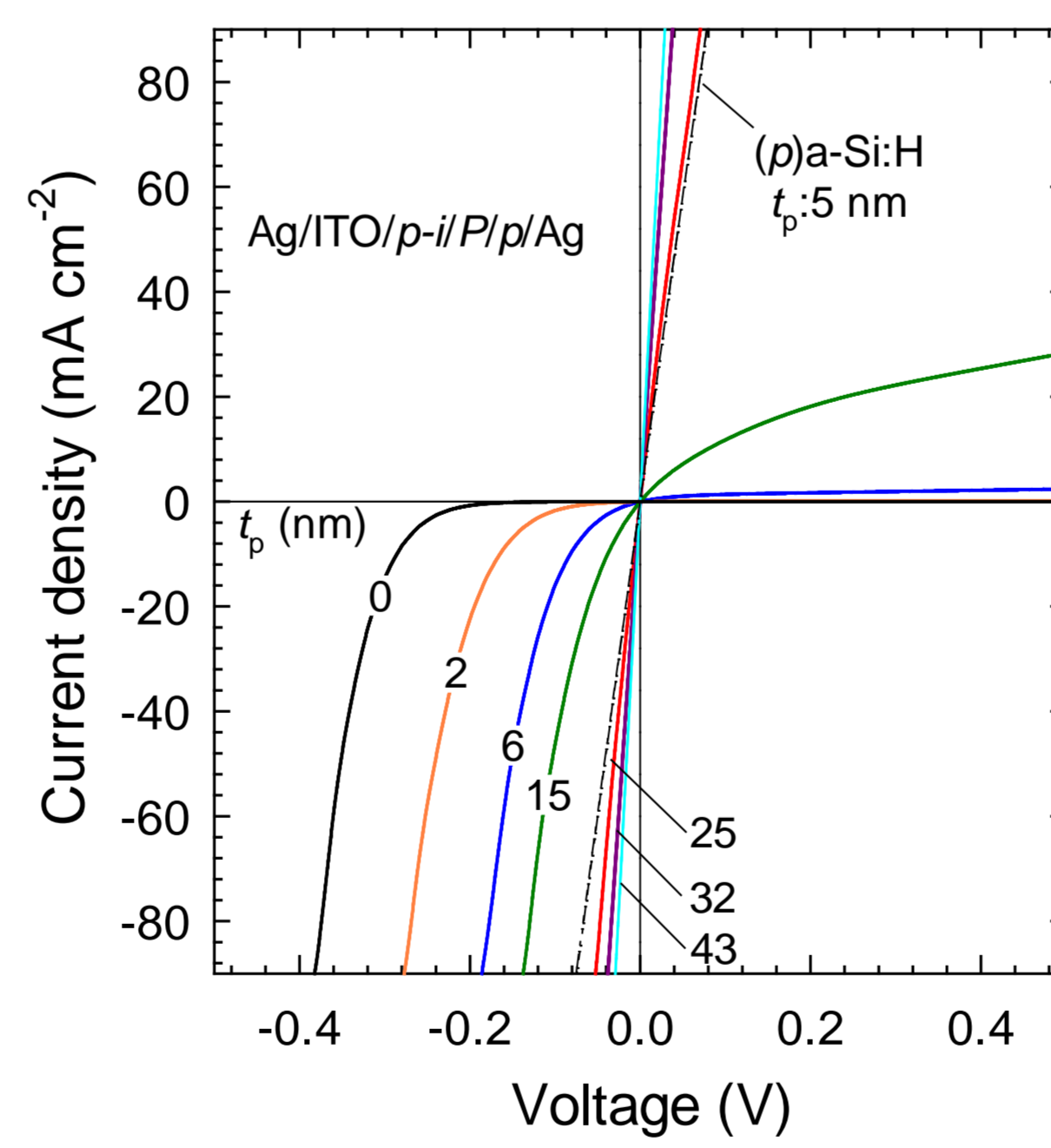
H. Umishio, H. Sai, T. Koida, T. Matsui, Prog. Photovolt. Res. Appl. (2020).

## セル特性のp層膜厚依存性 (VHF、RF放電)



H. Umishio, H. Sai, T. Koida, T. Matsui, Prog. Photovolt. Res. Appl. (2020).

### TCO/pコンタクト抵抗の評価

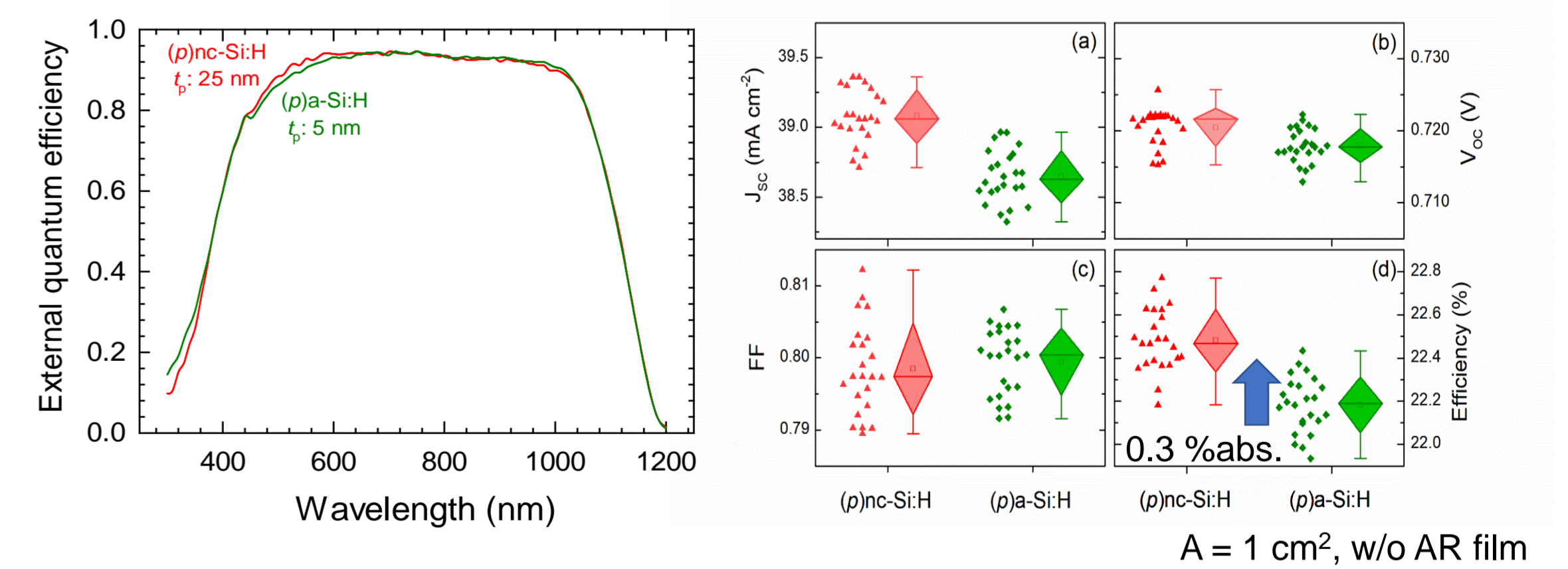


- ・ セル特性とp層膜厚(平坦基板に製膜した際の厚さに換算)の関係性を評価
- ・ t<sub>c,eff</sub>: (p)a-Si:H < (p)nc-Si:H (VHF放電) < (p)nc-Si:H (RF放電) → VHF放電による結晶核の高密度化を示唆
- ・ (p)a-Si:H → (p)nc-Si:Hの置換により、短波長応答の改善のみならず、パッシベーション向上やコンタクト抵抗低減の効果も得られ、0.3-0.6%abs.の効率改善を得た。
- ・ 高性能TCO(ITO→IWOH)の適用により、TCO/pコンタクト抵抗のさらなる低減でFFが改善し、変換効率23.54%を得た。

### ベストセルの比較

	TCO	t <sub>p</sub> (nm)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF	Eff.(%)
(p)a-Si:H	ITO	5	38.9	0.722	0.801	22.5
(p)nc-Si:H	ITO	25	39.4	0.729	0.804	23.1
(p)a-Si:H	IWOH	5	39.2	0.728	0.805	23.0
(p)nc-Si:H	IWOH	25	39.48*	0.733*	0.814*	23.56*

\* Independently measured by Calibration and Standard Measurement Team of AIST.



## 結論

- (j)a-Si:H層上の(p)nc-Si:Hの成長を調査した結果、VHF放電の場合、t<sub>p</sub>~5nmで結晶核生成、t<sub>p</sub>~15nmで結晶相の表面被覆を観測し、表面被覆に応じて導電率が劇的に変わることを見出した。
- 高いV<sub>oc</sub>、FFを得るために必要なnc-Si:Hの臨界膜厚は、t<sub>c,Voc</sub> < t<sub>c,FF</sub>で、それぞれnc-Si:H層の導電率(>10<sup>-4</sup> S cm<sup>-1</sup>)とナノ結晶相の表面被覆度に関係していることを明らかにした。
- SHJセルの(p)a-Si:Hを(p)nc-Si:Hに置き換えることでJ<sub>sc</sub>の改善(+1.4%)を得た。パッシベーション性能やTCO/pコンタクト性能も向上したため、V<sub>oc</sub>、FFも改善し、従来のSHJセルよりも高い効率(0.3-0.6%abs.)を得た。
- 高性能TCO(ITO→IWOH)の適用により、変換効率23.54%を達成した。
- VHF放電により、(p)nc-Si:Hの臨界膜厚を薄くできることが期待される。

## 参考文献

1. G. Nogay et al., IEEE J. Photovolt. 6,1654 (2016).
2. J. Sriharathikhun et al., Jpn. J. Appl. Phys. 48,101603 (2009).
3. O. M. Ghahfarokhi, et al., Appl. Phys. Lett. 104, 113901 (2014).
4. L. Mazzarella et al., Appl. Phys. Lett. 106, 023902 (2015).
5. L. Mazzarella et al., Phys. Status Solidi. 214,1532958 (2017).
6. A. Fioretti et al., IEEE J. Photovolt. 9,1158 (2019).

## 謝辞

本研究はNEDO委託事業のもと、コマツNTC(株)およびパナソニック(株)と連携して実施した。  
研究協力: 奥登志喜、佐藤芳樹、田辺まゆみ、上田孝、吉田正裕(産総研)、Pei-Ling Cheng(台湾交通大)

# 酸化チタンを正孔コンタクトとして用いた 新型結晶シリコン太陽電池の開発

松井 卓矢<sup>1</sup>、Martin Bivour<sup>2</sup>、Martin Hermle<sup>2</sup>、齋 均<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>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、  
<sup>2</sup>Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems



## Motivation

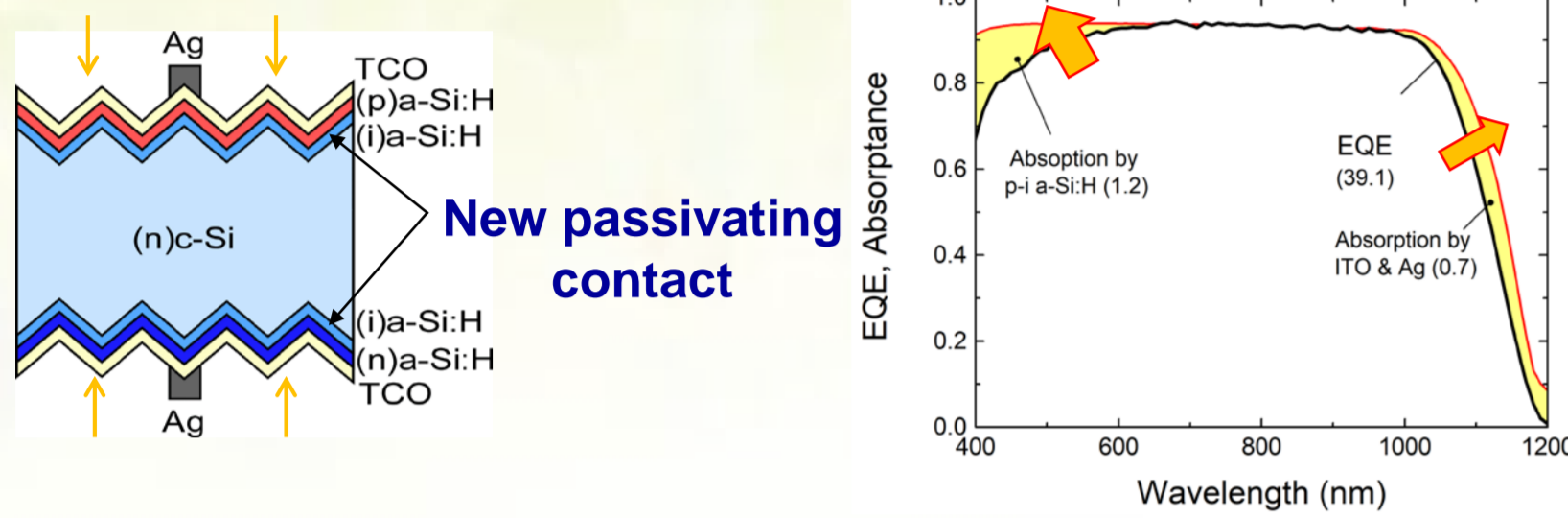
### Novel passivating contacts

#### Bifacial SHJ

⊕ Excellent performance, bifaciality, outdoor performance

⊗ Parasitic absorption by a-Si:H

⊗ CAPEX (PECVD tool)



Low cost and transparent passivating contact that can replace a-Si:H

➢ Metal-oxide semiconductors

### Non-Si passivating contacts

Metal oxides, nitrides, fluorides

Work function	low	low	?	high	
Material	LiF <sub>x</sub>	Ta <sub>2</sub> N <sub>x</sub>	TiO <sub>x</sub>	MoO <sub>x</sub>	
Carrier selectivity	e <sup>-</sup>	e <sup>-</sup>	e <sup>-</sup>	h <sup>+</sup>	
Carrier selectivity	e <sup>-</sup>	e <sup>-</sup>	h <sup>+</sup>	h <sup>+</sup>	
Buffer layers	a-Si:H	w/o	w/o	w/o	a-Si:H
efficiency	~20%	20.1%	22.1%	21.1%	23.5%
Structure					
Ref.	Bullock et al. Nat. Energy (2016) [1]	Yang et al. Adv. Energy Mater. (2018) [2]	Yang et al. Prog. Photovolt. (2017) [3]	This work [4]	Dréon et al., Nano Energy (2020) [5]

- various electron/hole selective materials
- preferably buffer free
- preferably transparent if applied as window

### TiO<sub>x</sub>

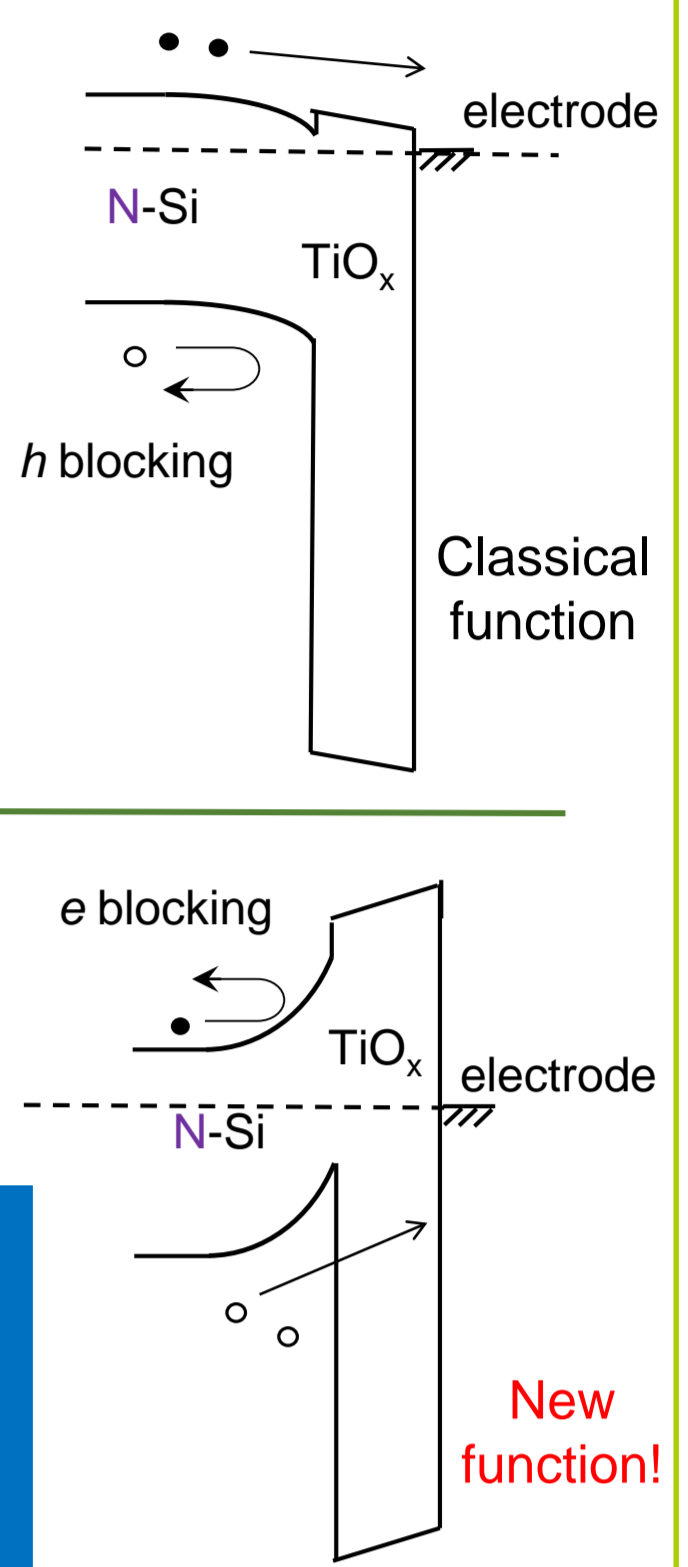
■ TiO<sub>x</sub> (TiO<sub>2</sub>) electron contact by thermal-ALD provides η=22.1% [3]

■ TiO<sub>x</sub> used as electron contacts in non-Si PV [6]

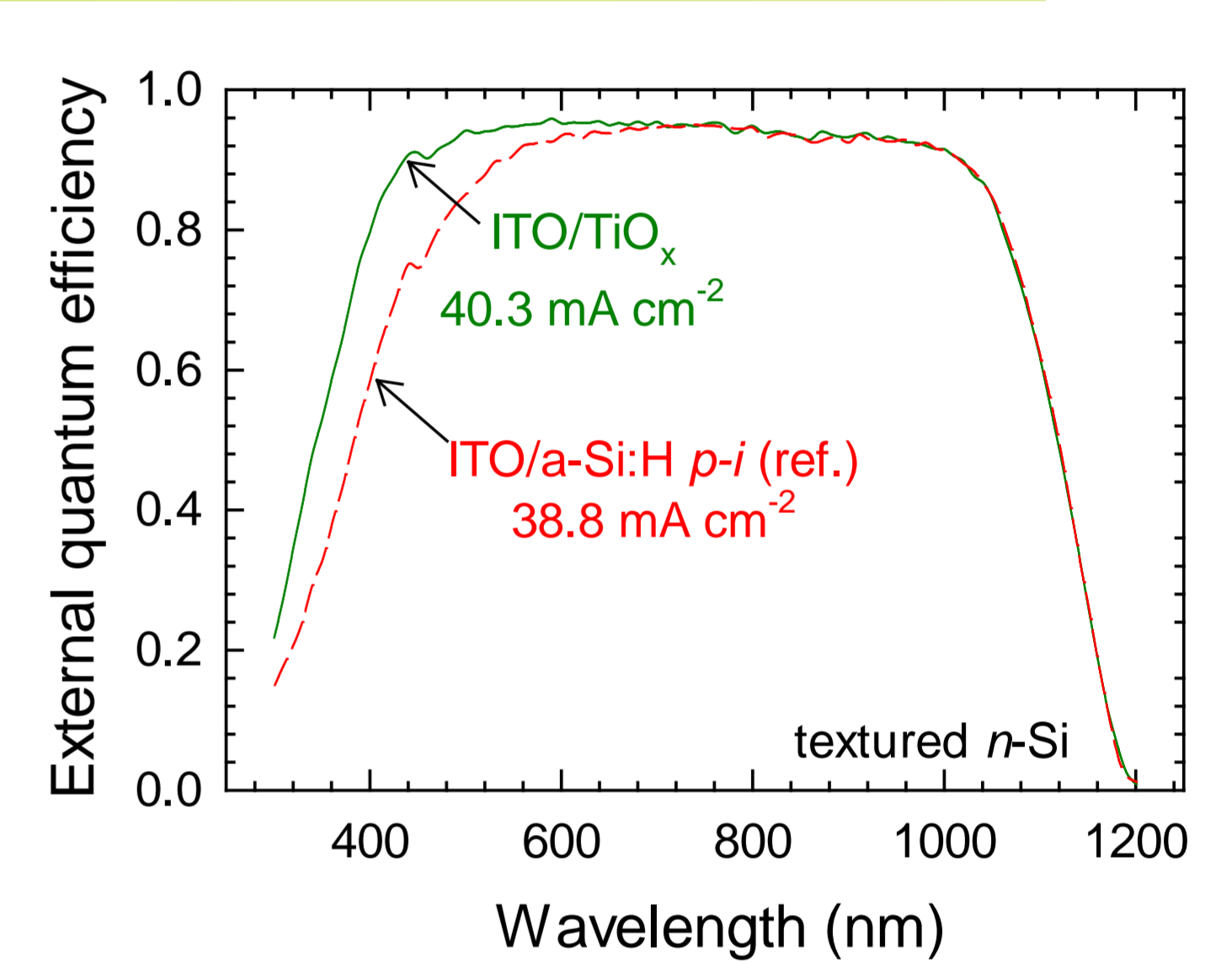
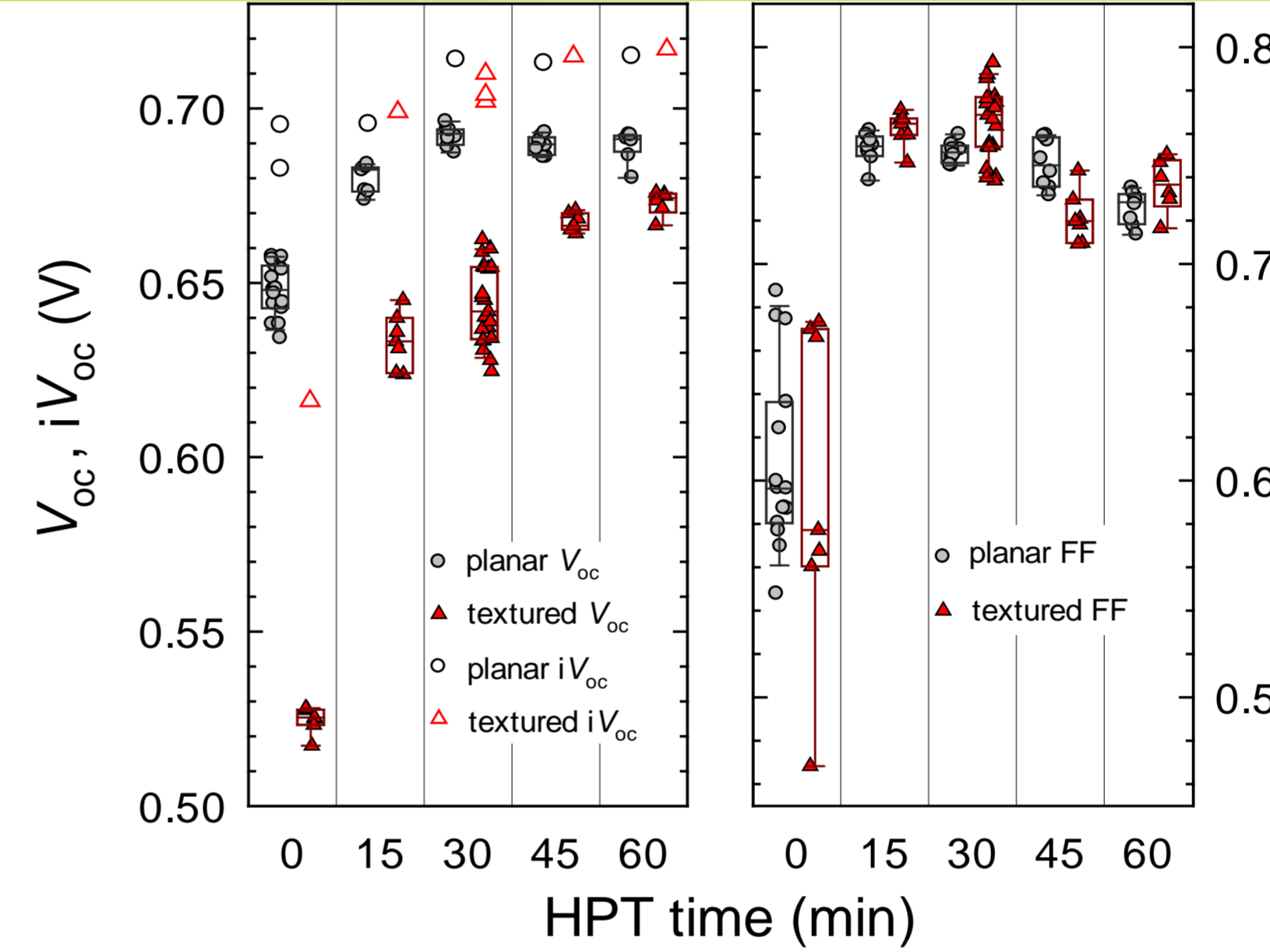
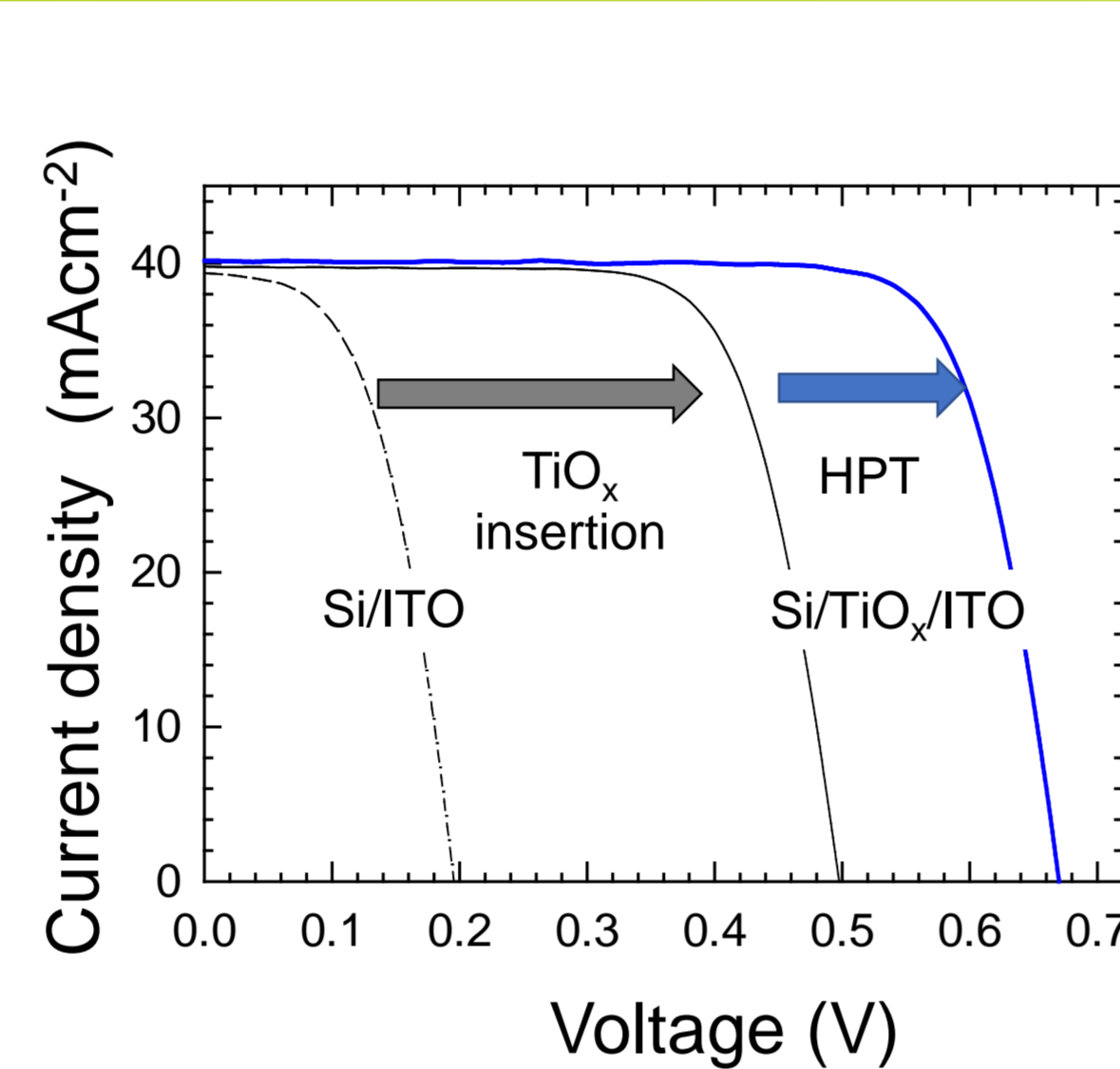
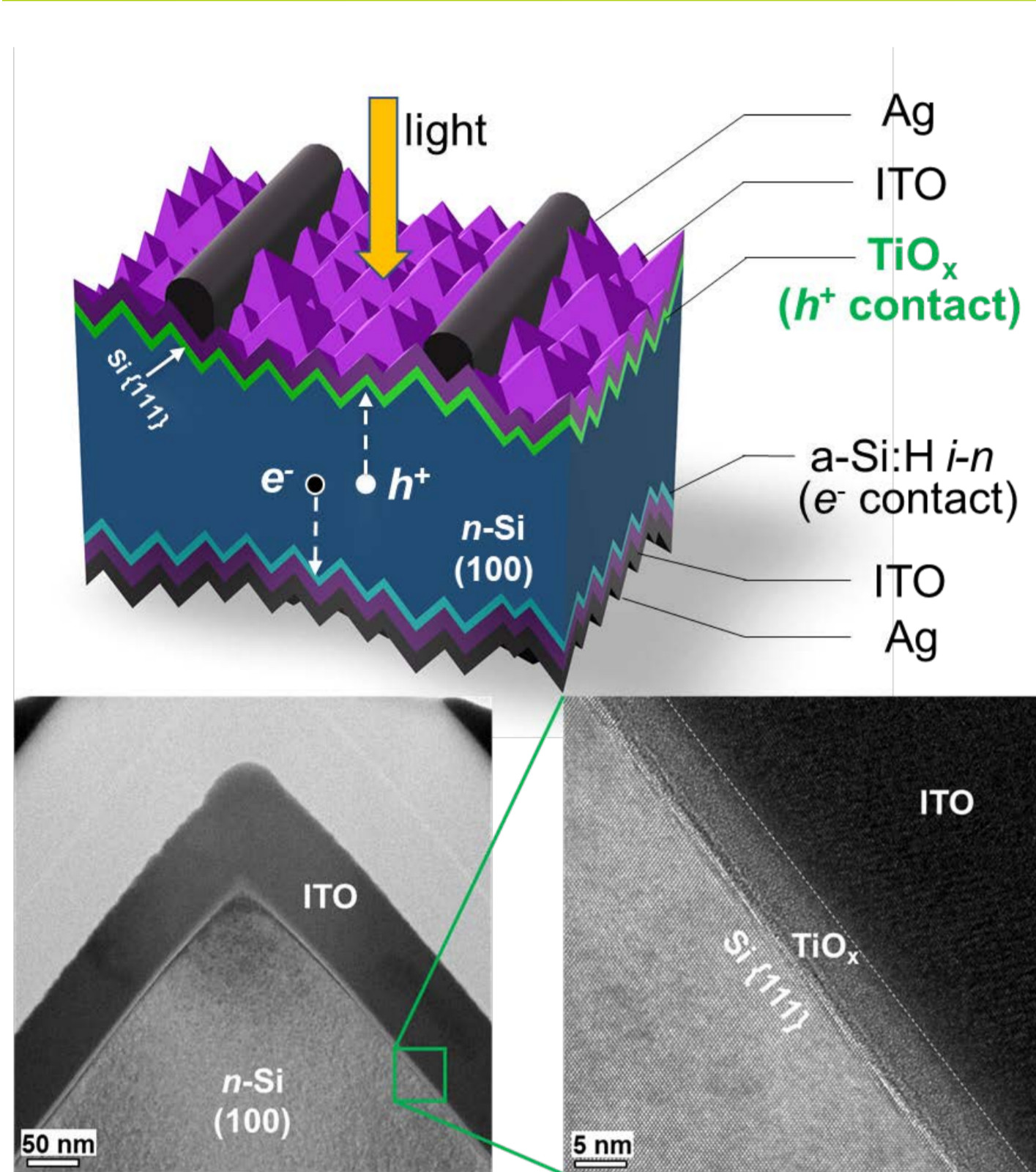
■ Electron selectively ascribed to the asymmetric band offset [7]

■ Recently, we find that TiO<sub>x</sub> can be tuned to work as hole selective contact [8,9]

- Contradiction to the previous understanding...
- Can TiO<sub>x</sub> actually work as hole transport layer in solar cells?



## Solar cells featuring ALD-TiO<sub>x</sub> hole contacts (textured Si)

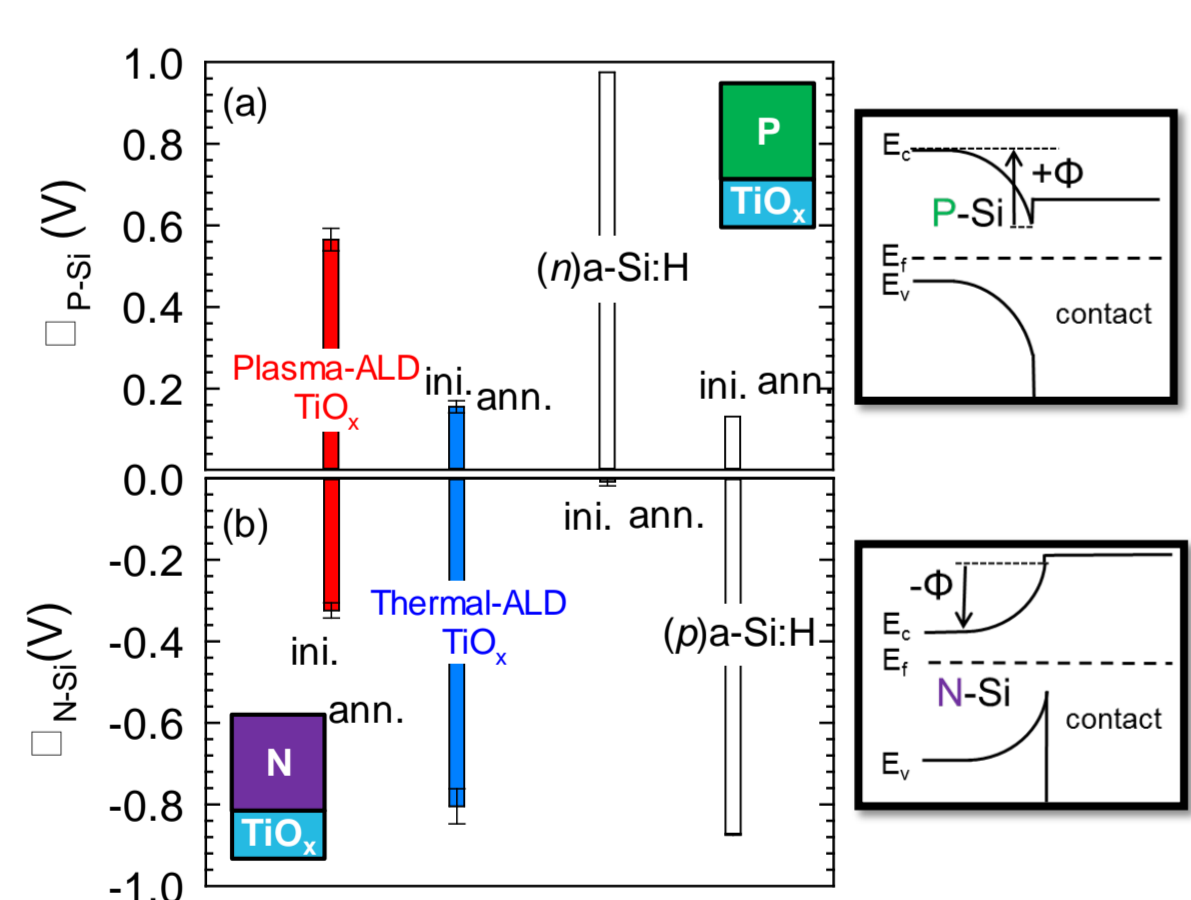


- Conformal deposition of TiO<sub>x</sub> layer (5 nm) by thermal-ALD on Si pyramids
- TiO<sub>x</sub> layer works as hole contact (emitter)
- Hydrogen plasma treatment (HPT) improves V<sub>oc</sub> and FF significantly
- A 21.1% independently-confirmed efficiency is demonstrated

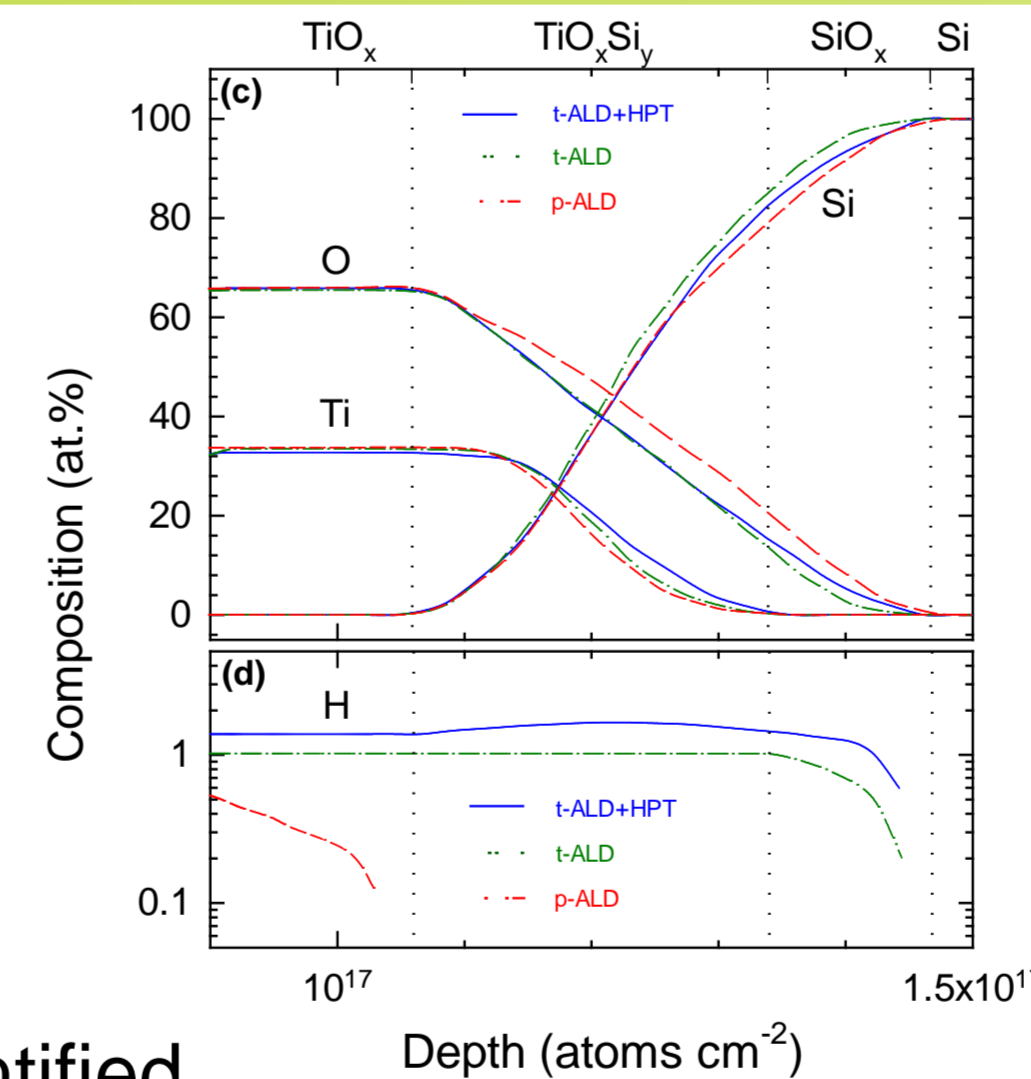
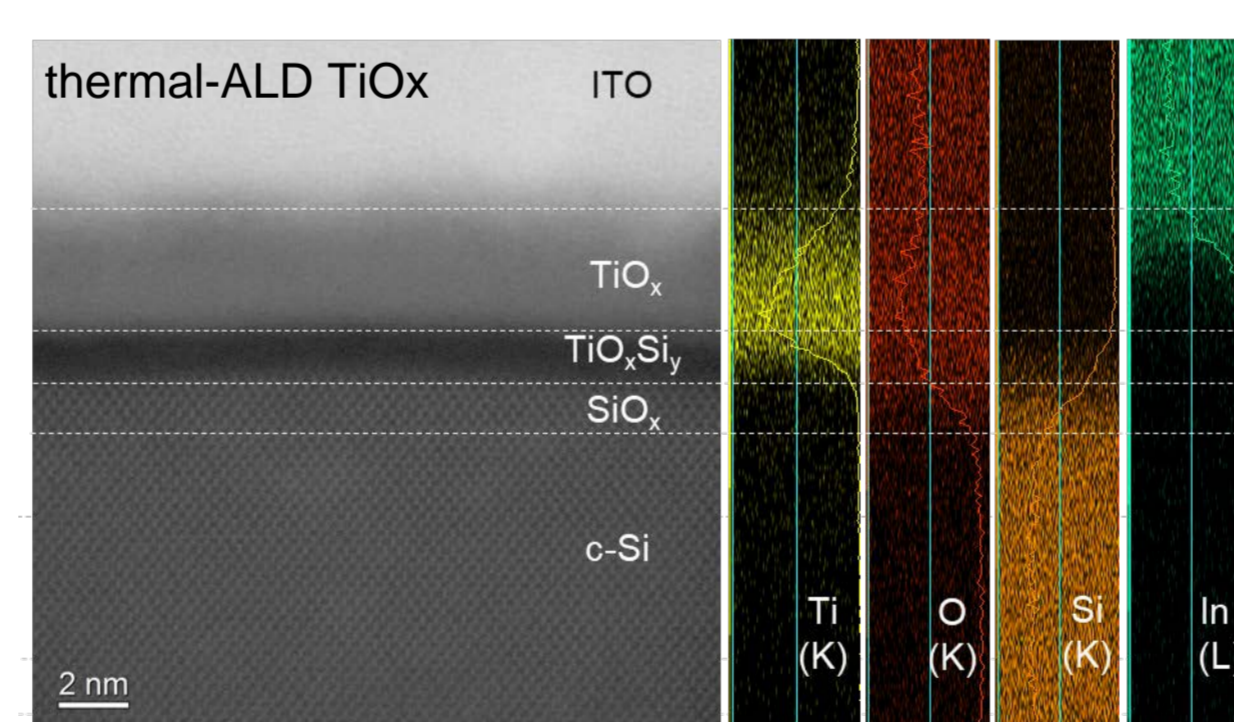
- Marked gain in blue response (ΔJ<sub>sc</sub>~1.5 mAcm<sup>-2</sup>)
- UV induced degradation is an emerging issue

## Origin of the hole selectivity and hole collection mechanism

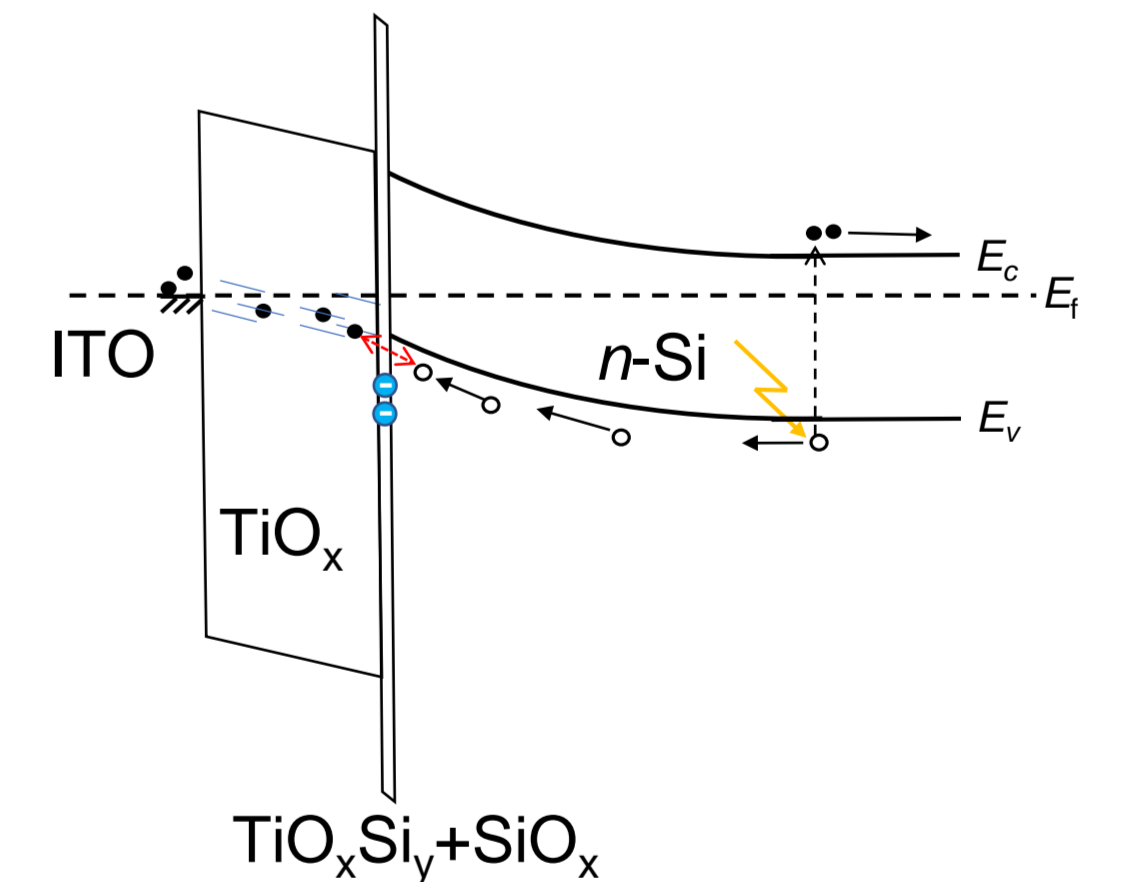
### Surface photovoltage (SPV) measurement



### TEM and RBS-ERDA analysis



### Possible band diagram



- Opposite polarity of induced band bending (Φ) by two ALD processes
- C-V indicates negative fixed charge in thermal-ALD TiO<sub>x</sub> [9]

- Intermixing (TiO<sub>x</sub>Si<sub>y</sub>) layer (~2 nm) identified
- Difference found in atomic profiles in the TiO<sub>x</sub>Si<sub>y</sub> layer → possible origin of the negative charge generation
- thermal-ALD TiO<sub>x</sub> contains 1 at.% hydrogen → passivation mechanism
- HPT slightly modifies interface composition and increase H content >1 at.%

- Negative fixed charge and (high WF) ITO create induced-junction in n-Si
- Hole (electron) transport via the localized states in TiO<sub>x</sub>

## Conclusions

- TiO<sub>x</sub> acting as an efficient hole selective passivating contact is demonstrated for textured Si.
- HPT drastically improves both passivation and hole selectivity.
- Parasitic absorption loss due to a-Si:H is almost completely removed thanks to the high transparency of TiO<sub>x</sub>.
- A 21.1% confirmed efficiency is demonstrated.

## References

- J. Bullock et al., Nat. Energy 1, 150231 (2016).
- X. Yang et al., Adv. Energy Mater. 8, 1800608 (2018).
- X. Yang et al., Prog. Photovolt. Res. Appl. 25, 896 (2017).
- T. Matsui et al., ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 49777 (2020).
- Dréon et al., Nano Energy 70, 104495 (2020).
- X. Yin et al., ACS Photonics 1, 1245 (2014).
- S. Avasthi et al., Appl. Phys. Lett. 102, 203901 (2013).
- T. Matsui et al., Energy Procedia 124, 628 (2017).
- T. Matsui et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 209, 110461 (2020).

## Acknowledgements

This work was mainly supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Japan. Cooperation: T. Oku, Y. Sato, M. Tanabe, H. Umishio, H. Shimura, M. Yoshita (AIST), M. Yamazaki (AIST-NPF), C. Luderer, L. Tutsch (FhG-ISE).

## Outlook

- Improving initial performance and UV tolerance.
- TiO<sub>x</sub>/Si/TiO<sub>x</sub> cell development and application for tandem devices.

# SHJ太陽電池における水素起因界面欠陥の発生機構

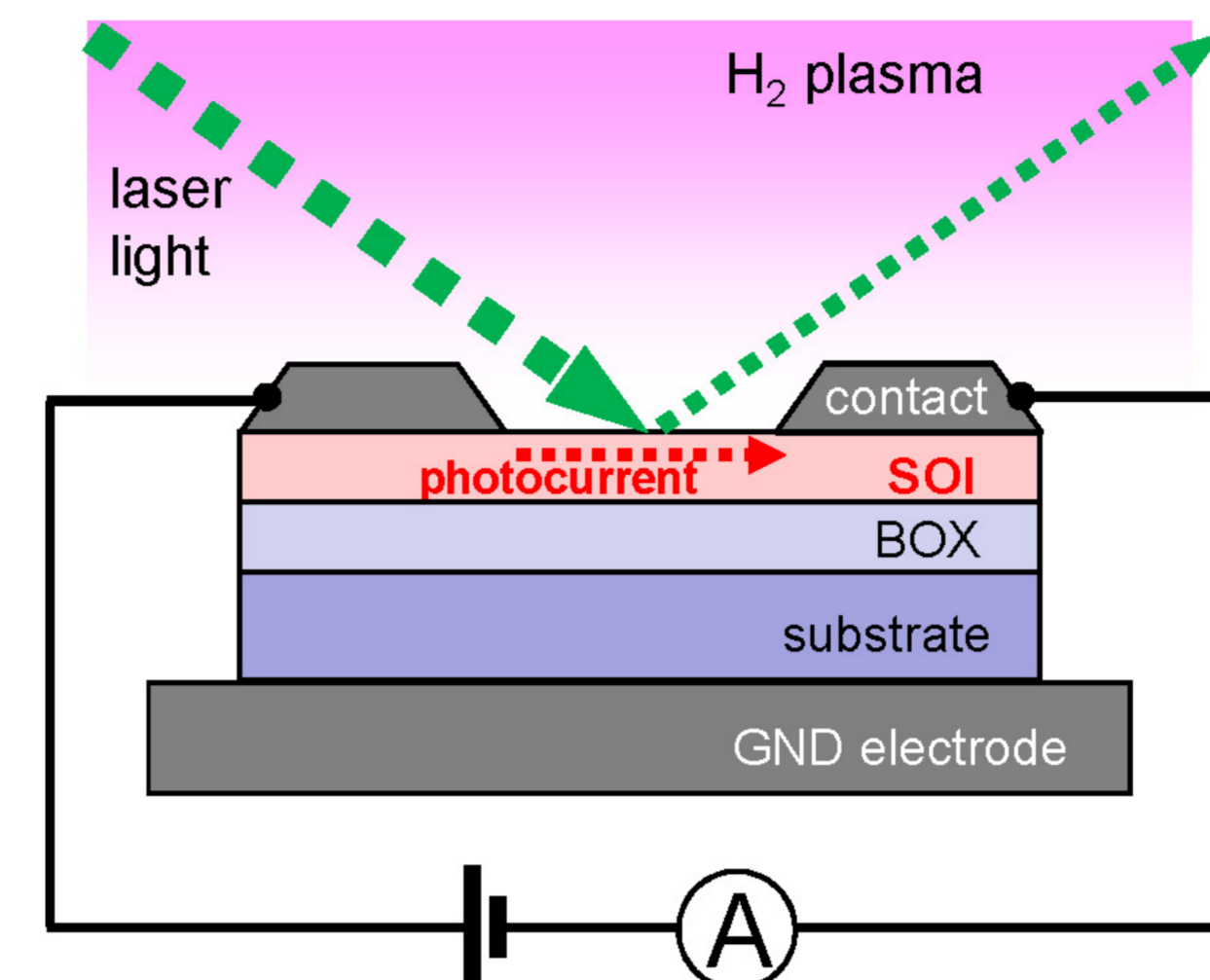
布村 正太<sup>1</sup>、坂田 功<sup>1</sup>、Mickaël Lozac'h<sup>2</sup>、松原 浩司<sup>3</sup>

産業技術総合研究所 <sup>1</sup>電子光基礎技術研究部門、  
<sup>2</sup>デバイス技術研究部門、<sup>3</sup>エネルギー・環境領域

## Abstract

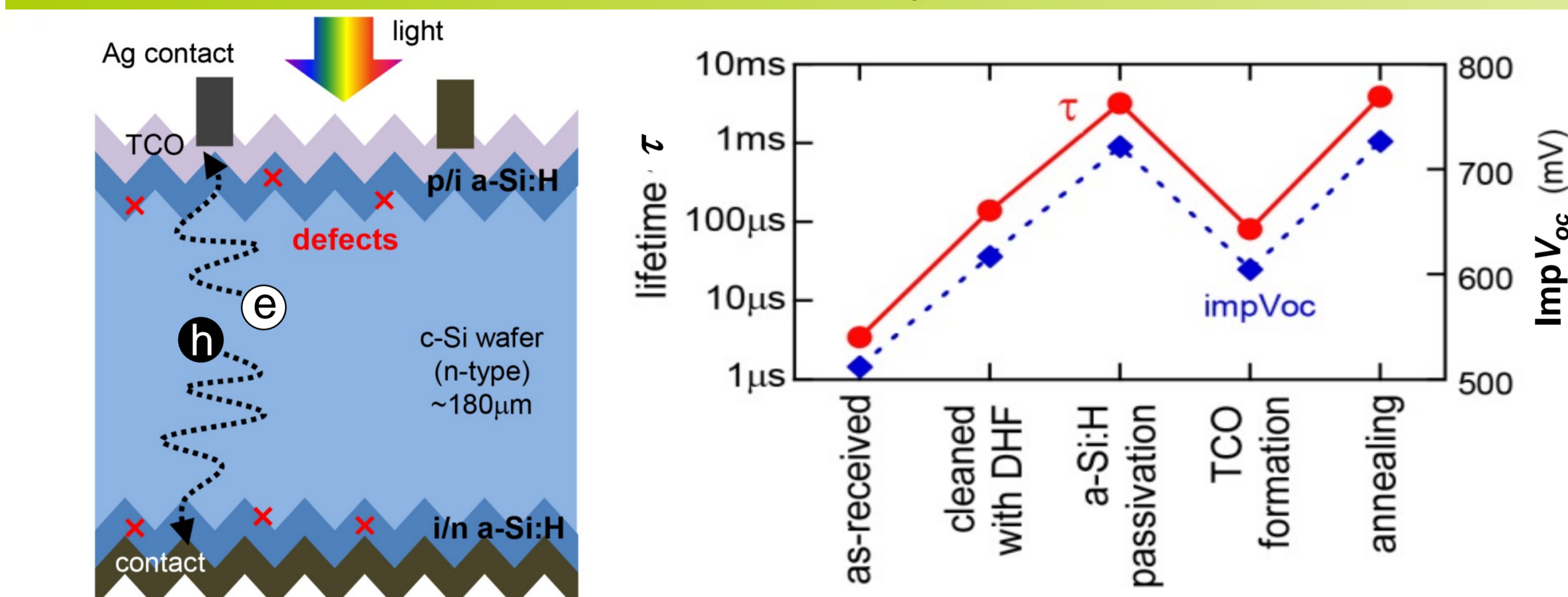
- **Hydrogen plasma-induced defects** in crystalline silicon have been studied, by using in-situ photocurrent measurement and spectroscopic ellipsometry.
- A hydrogen ( $H_2$ ) plasma treatment causes **surface defects**, **bulk defects** and **surface disordered layer (DSL)**, depending on the treatment time.
- The defect formation strongly depends on the treatment time & treatment temperature.

## Exp. Setup: In-situ real-time photocurrent measurement



- **Silicon on insulator (SOI)** is used as a sample for the photocurrent measurement.
- SOI is illuminated with a **semiconductor laser** (520nm, 1mW).
- The **photocurrent** is measured during  $H_2$  plasma treatment and subsequent postannealing.
- In experiments, the **treatment time ( $\Delta t$ )** and **temperature (T)** are varied.

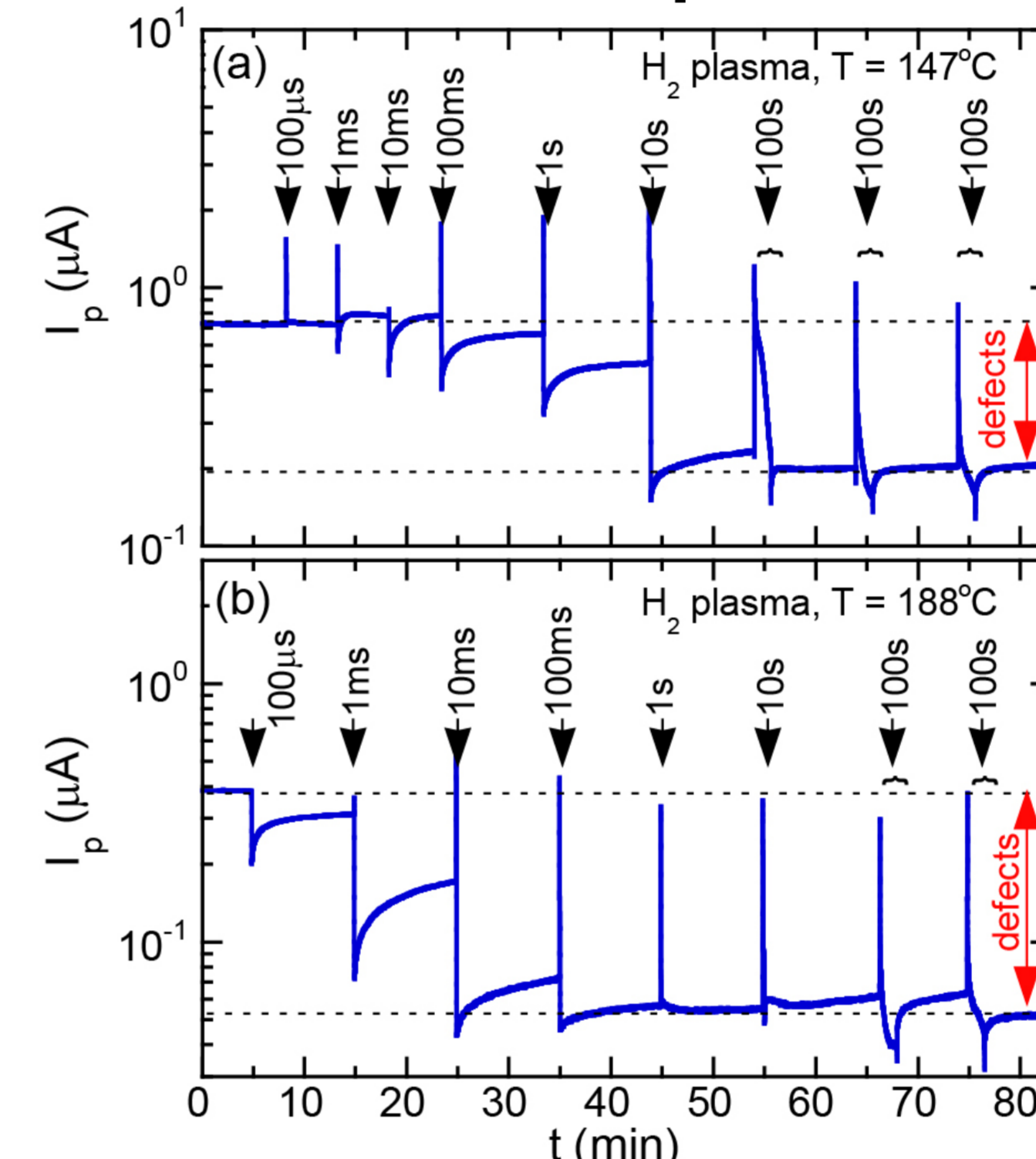
## SHJ solar cell structure & minority carrier lifetime



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

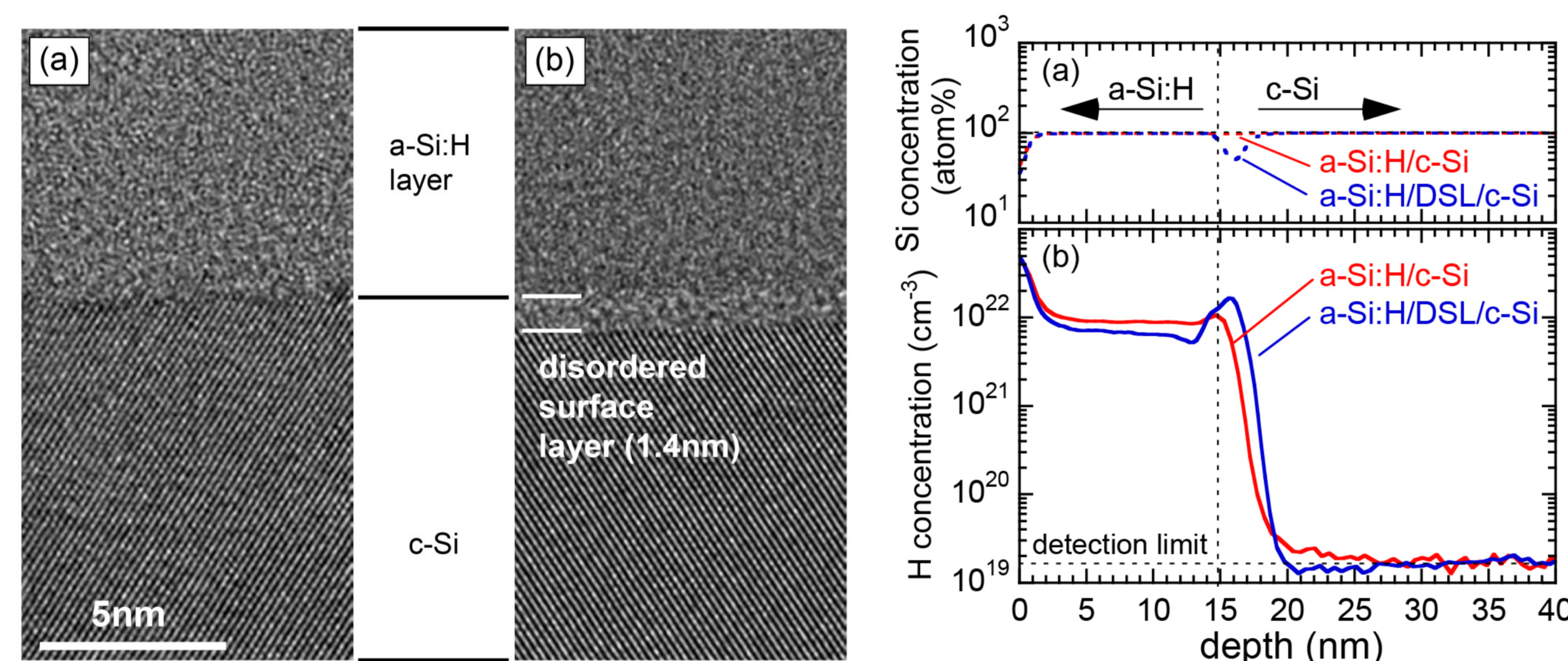
## Experimental results

### Time evolution of photocurrents



- The photocurrent ( $I_p$ ) is reduced by a  $H_2$  plasma treatment, indicating generation of defects (**defect generation**).
- The reduction of  $I_p$  is enhanced for a long- $\Delta t$  treatment; more defects are generated.
- The generation of defects are pronounced for a short- $\Delta t$  treatment under high-T conditions.
- During postannealing,  $I_p$  is increased, indicating the annihilation of defects. (**defect annihilation**)

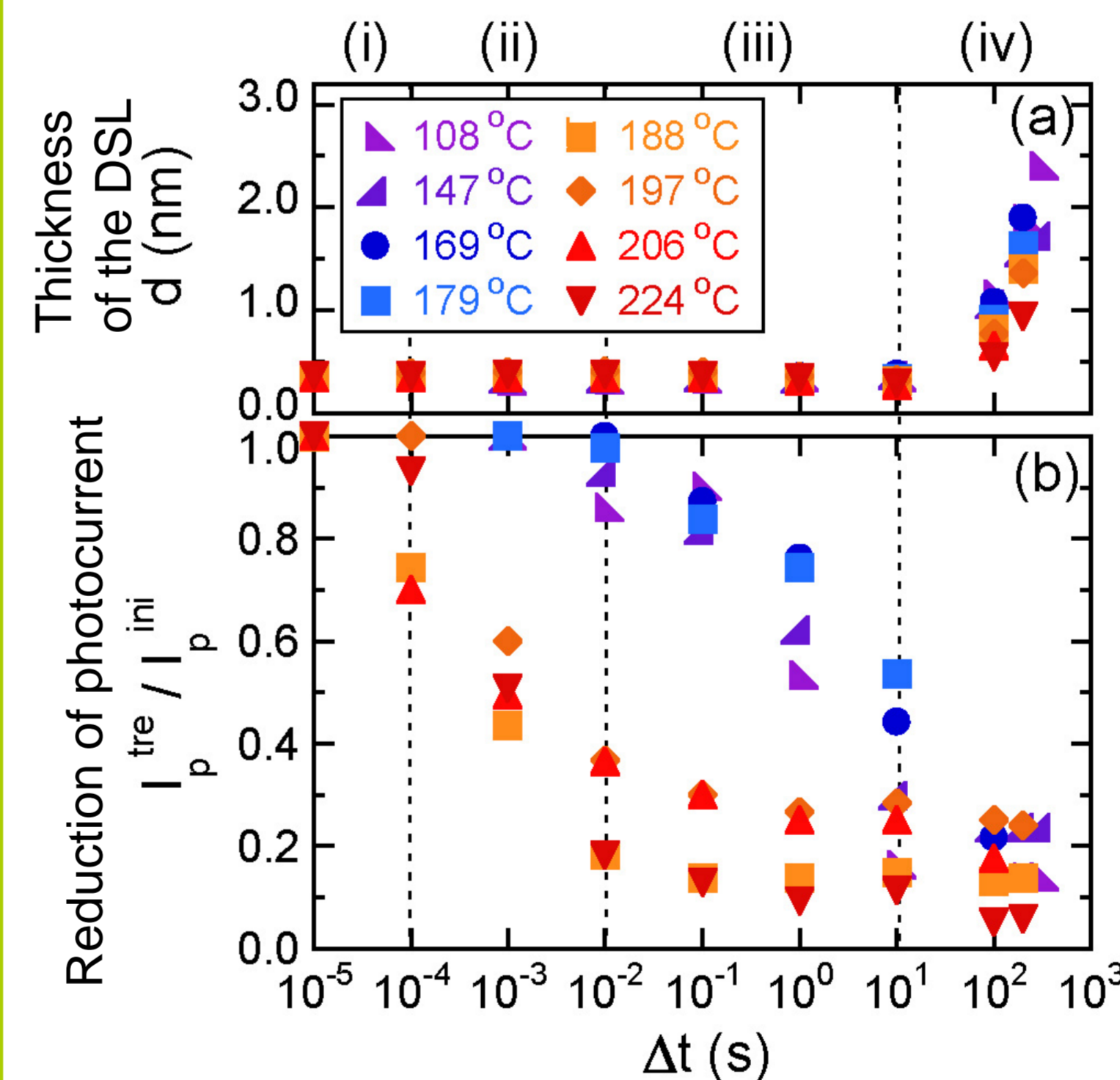
## TEM and SIMS analysis



- TEM: (a) Normal sharp interface of a-Si:H/c-Si. (b) Formation of the disordered surface layer (DSL). The DSL is formed by a sufficiently long- $\Delta t$   $H_2$  plasma treatment.
- SIMS: H atoms concentrate at the interface. The concentration is increased at the interface with DSL.

S. Nunomura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 59, SHHE05 (2020).  
S. Nunomura et al., *J. Appl. Phys.* 128, 033302 (2020).

### Photocurrent reduction & DSL

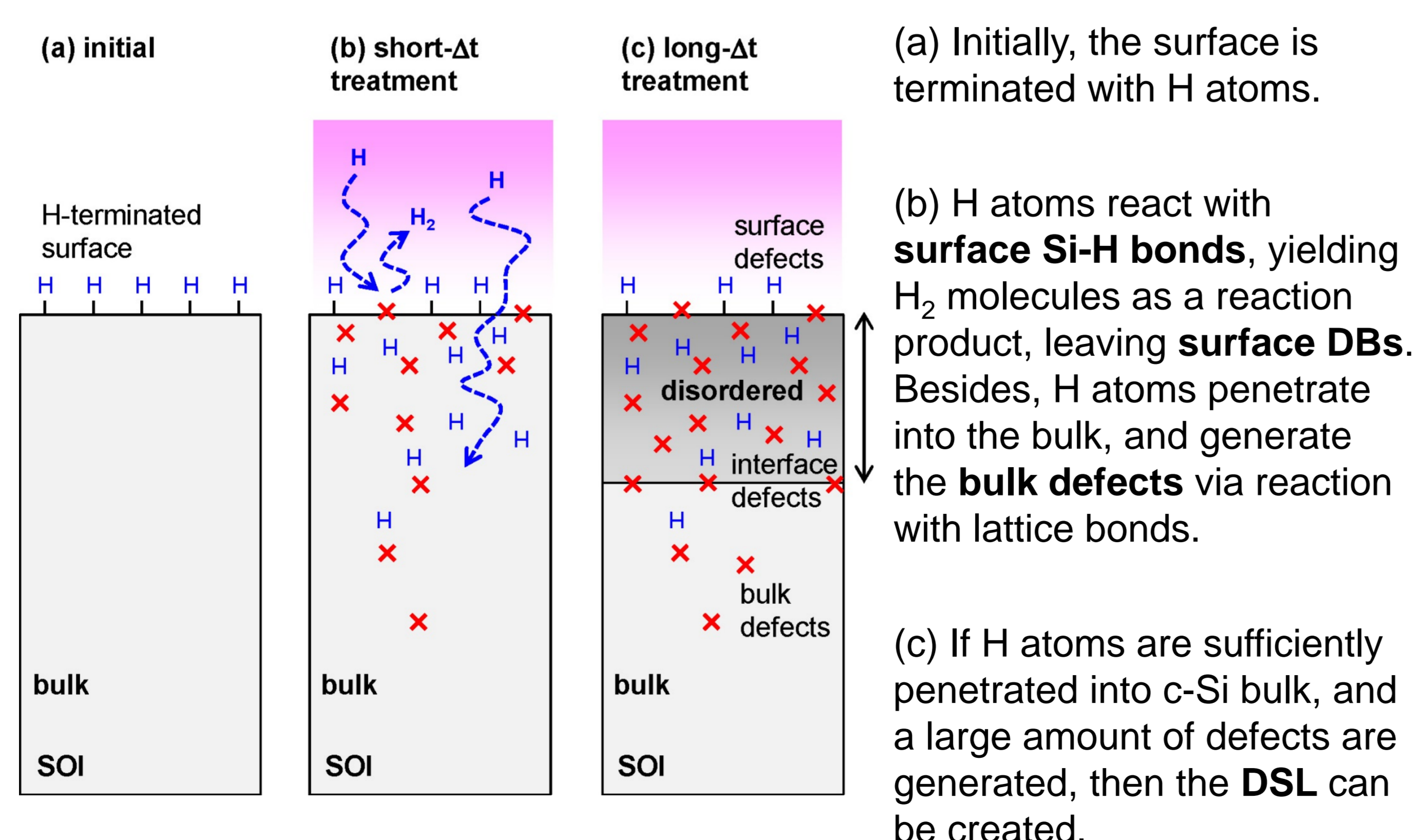


- (a) The **DSL** is formed only for long- $\Delta t$  treatment. No DSL formation for short- $\Delta t$  treatment.
- (b) The reduction tendency of  $I_p$  is classified into two groups: low-T and high-T groups.
- In the high-T group,  $I_p$  is decreased once  $\Delta t$  exceeds  $10^{-4}$  s.
- In the low-T group, a longer- $\Delta t$  treatment is required for generation of defects, possibly due to impurity adsorption.
- **Before formation of DSL, the H-induced electronic defects are created.**

S. Nunomura et al., *AIP advances*. 9, 045110 (2019).

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

## Model: Formation of H atom-induced defects & DSL



S. Nunomura et al., *AIP advances*. 9, 045110 (2019).

## Summary

- **The generation and annihilation of H-induced defects** in crystalline silicon has been studied during  $H_2$  plasma treatments, by using in-situ photocurrent measurement and spectroscopic ellipsometry.
- The H-induced defects are generated by a  $H_2$  plasma treatment, and annihilated/recovered by postannealing.
- The generation of defects depends on treatment time and temperature.
- The electronic defects are created before the formation of DSL, i.e., nanometer-scale amorphized surface layer.
- The **surface and/or bulk defects** are partially recovered, but the **DSL** is not recovered.

## Acknowledgements

This work was supported by JSPS KAKENHI (Grant Numbers 15K04717 & 18K03603) and New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

# Efficiency of double-sided TOPCon solar cells depending on Si surface: polished <100>, <111>, and textured

Mickaël Lozac<sup>1</sup>, Shota Nunomura<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Venture - Minimal Fab Promoting Organization, AIST

<sup>2</sup> Research Institute for Advanced Electronics and Photonics, AIST

## 1. Motivation for TOPCon structure

**TOPCon** (tunnel oxide passivated contact):

PCE > 25 % on c-Si wafers (n-type) [1]

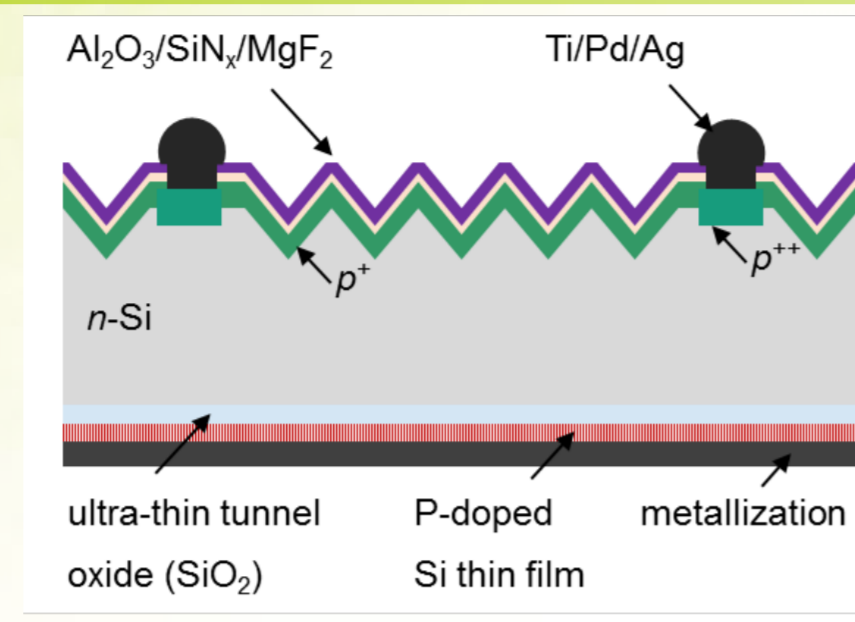
- Using conventional fabrication process (double-side ohmic contacts) => easy transfer to industrial processes

### Main Advantages:

- Carrier-selective contacts (efficient quasi-fermi levels splitting between e<sup>-</sup> and h<sup>+</sup>)
- Low contact resistivity for tunneling transport of carriers
- High transparency (wide bandgap)
- Superior thermal stability => can be use for **TANDEM solar cell structure with PCE > 30%**

### Disadvantages:

- Weaker passivation on textured wafers
- Weaker passivation on (p-type, boron) poly-Si/SiO<sub>x</sub>
- Front boron emitter diffusion can induce metallic impurities [2]



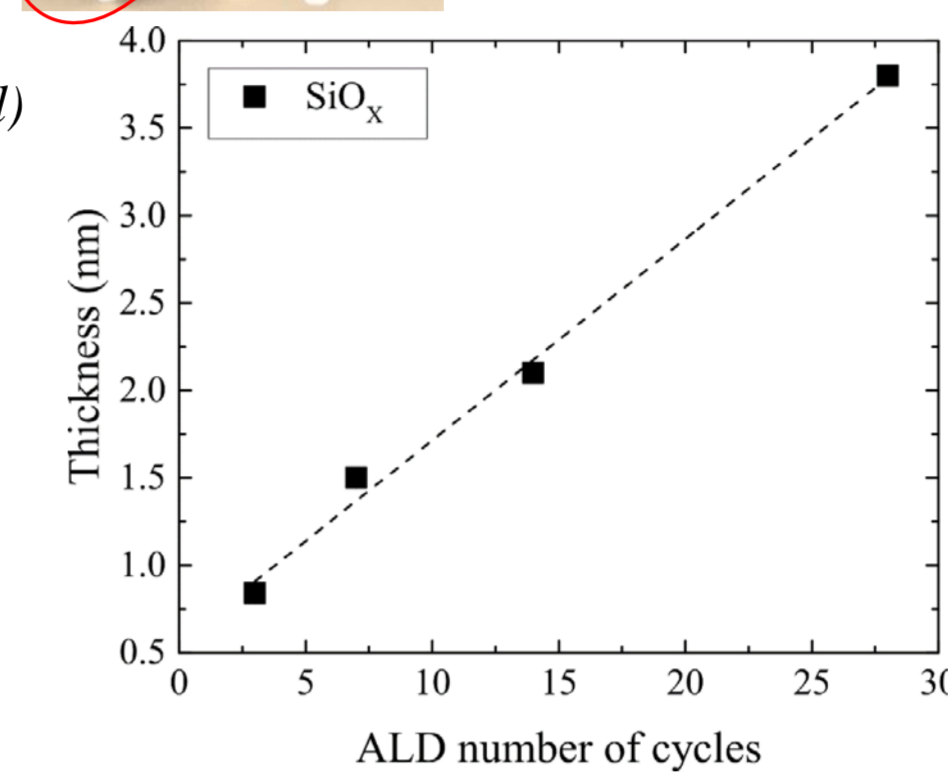
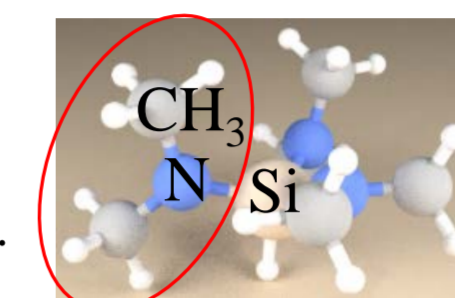
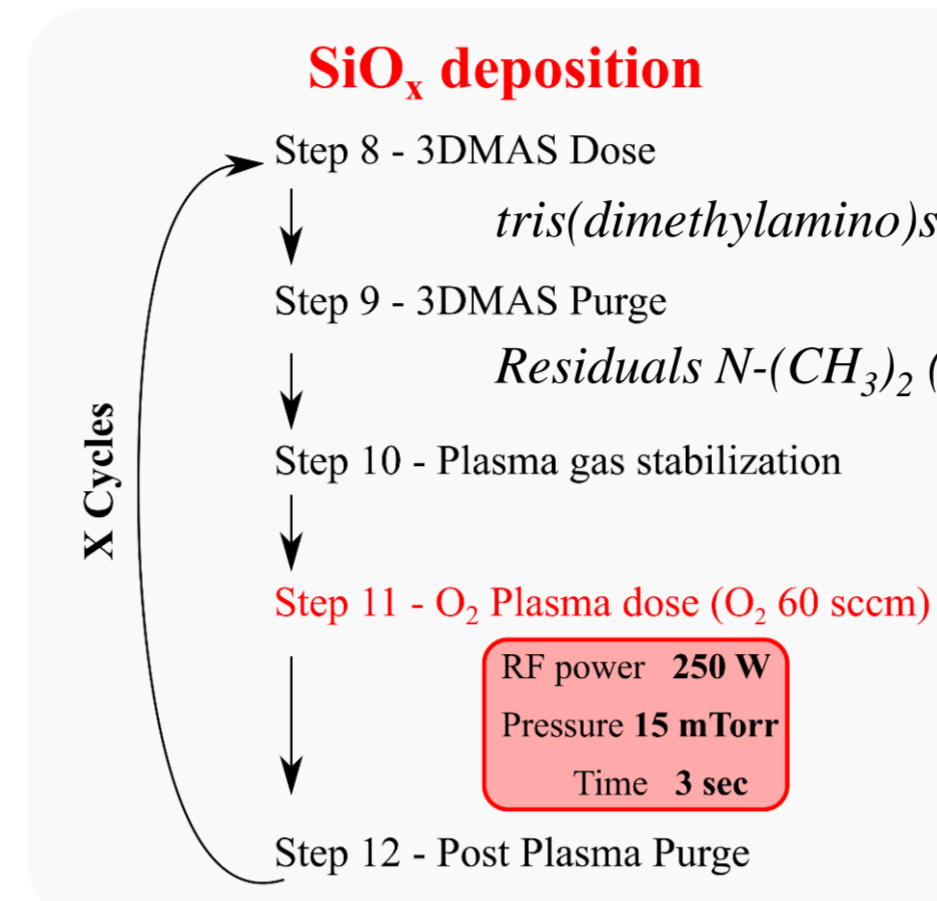
- [1] A. Richter et al., *SOLMAT* 173 (2017) 96-105
- [2] A. Richter et al., *Progr. in PV* 26 (2018) 342-350

### Requirements:

- Charges tunneling: SiO<sub>x</sub> < 2 nm

- Motivation to devp an efficient front TOPCon-like structure
- => **Selectivity for both front & rear on textured surfaces**
- Control of the thickness possible at atomic scale:**
- => Development of **Ultrathin SiO<sub>x</sub> by ALD**

## 2. Plasma assisted ALD



FlexAL ALD System - Oxford Instruments

Amorphous layer Si / O / Si ...

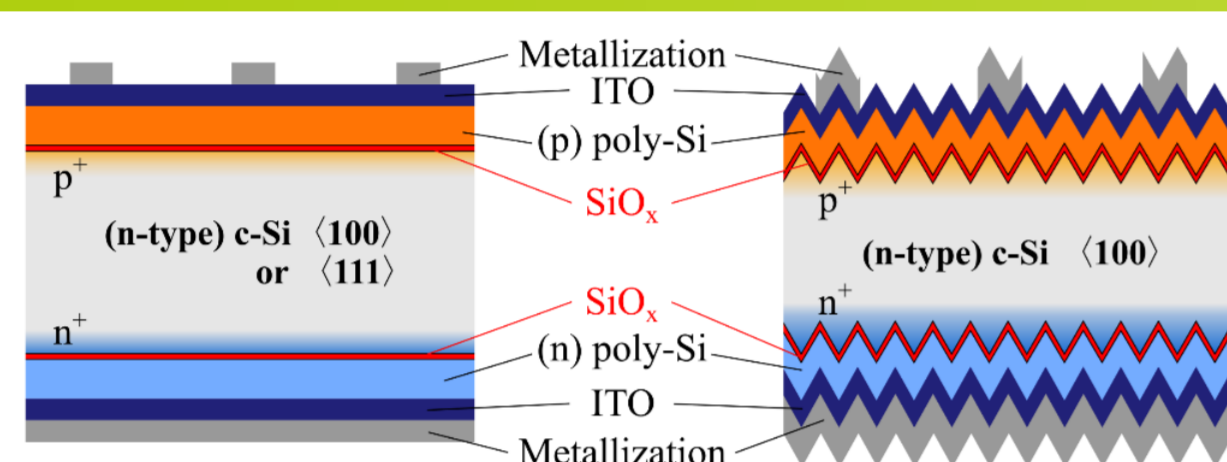
- Reduced defect formation by:
  - Low pressure (15 and 38 mTorr)
  - Using ICP (Inductively Coupled Plasma)

SiO<sub>x</sub> linear thickness confirmed depending on the number of ALD cycle [3].

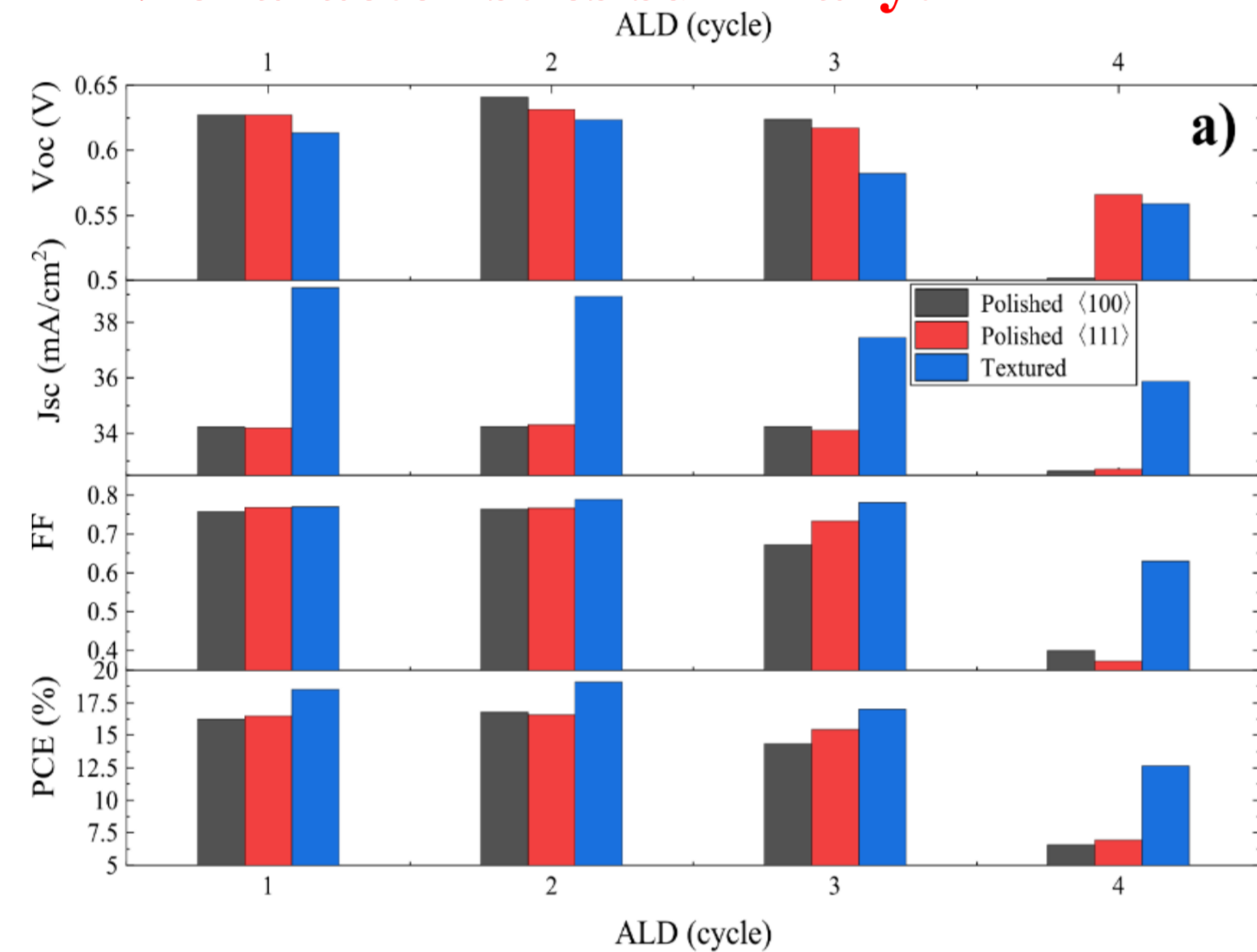
[3] M. Lozac'h et al., *SOLMAT* 185 (2018) 8-15

## 3. Double-sided TOPCon solar cells

### Structures:



### I-V characteristics summary:



[4] M. Lozac'h et al., *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 28 (2020) 1001-1011

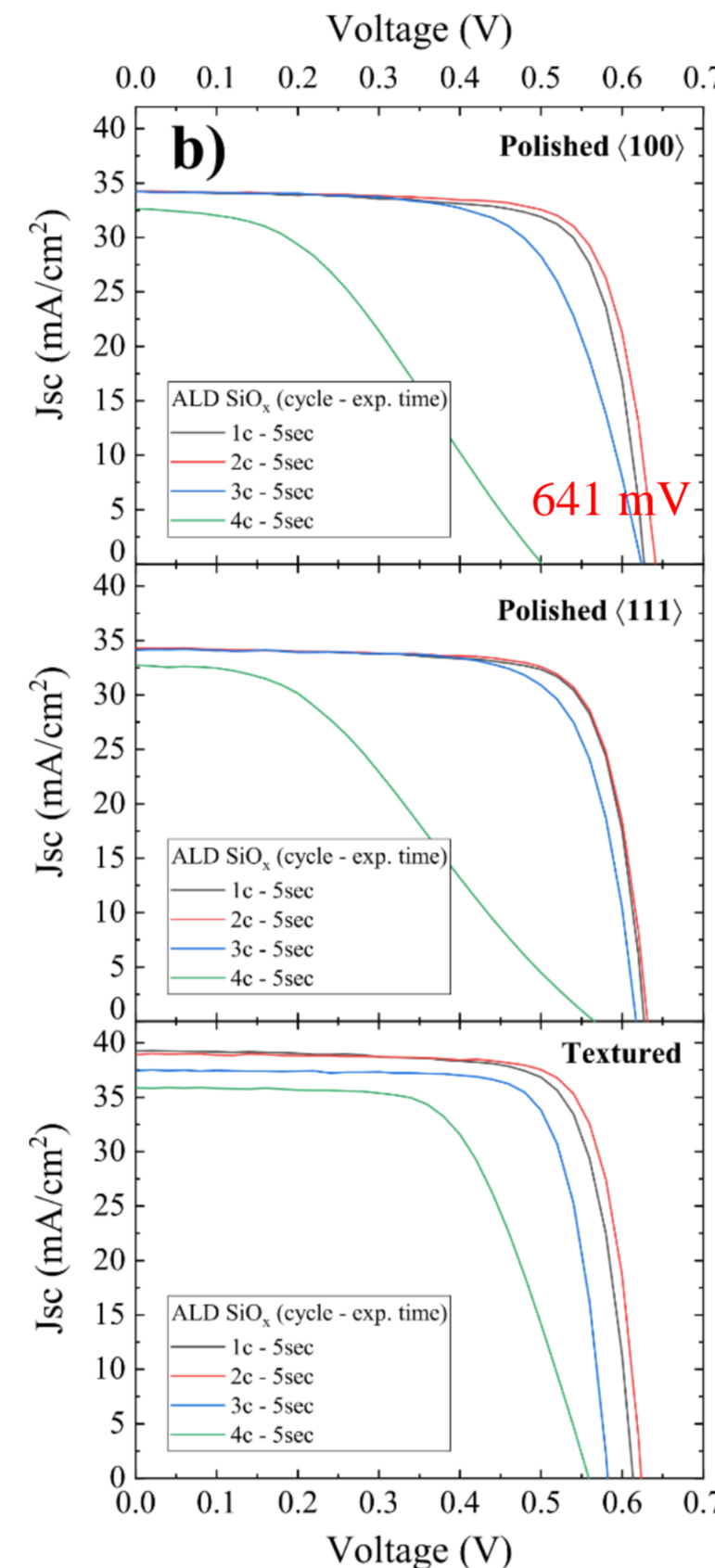
- The V<sub>oc</sub> and FF are optimized for SiO<sub>x</sub> with ALD 2-cycles, showing a PCE of 19.1% [4].

- The highest V<sub>oc</sub> is obtained on polished <100> surface with 641 mV.

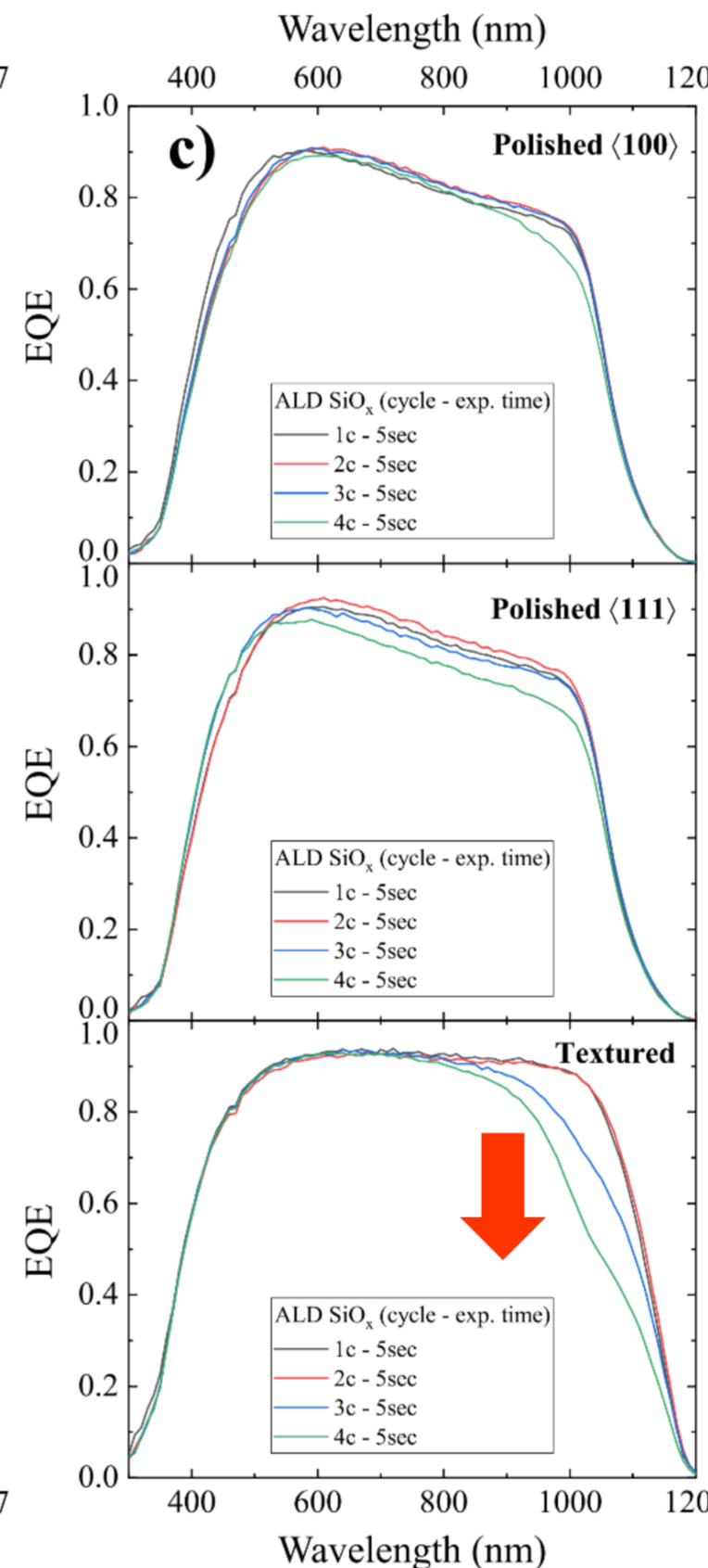
- the J<sub>sc</sub> is decreasing for thicker SiO<sub>x</sub> (ALD 3-, 4-cycles).

- Regarding the EQE for textured Si, the lost in J<sub>sc</sub> is mainly related to weaker absorption at wavelengths 800-1150.

### I-V Graphs



### EQE Graphs

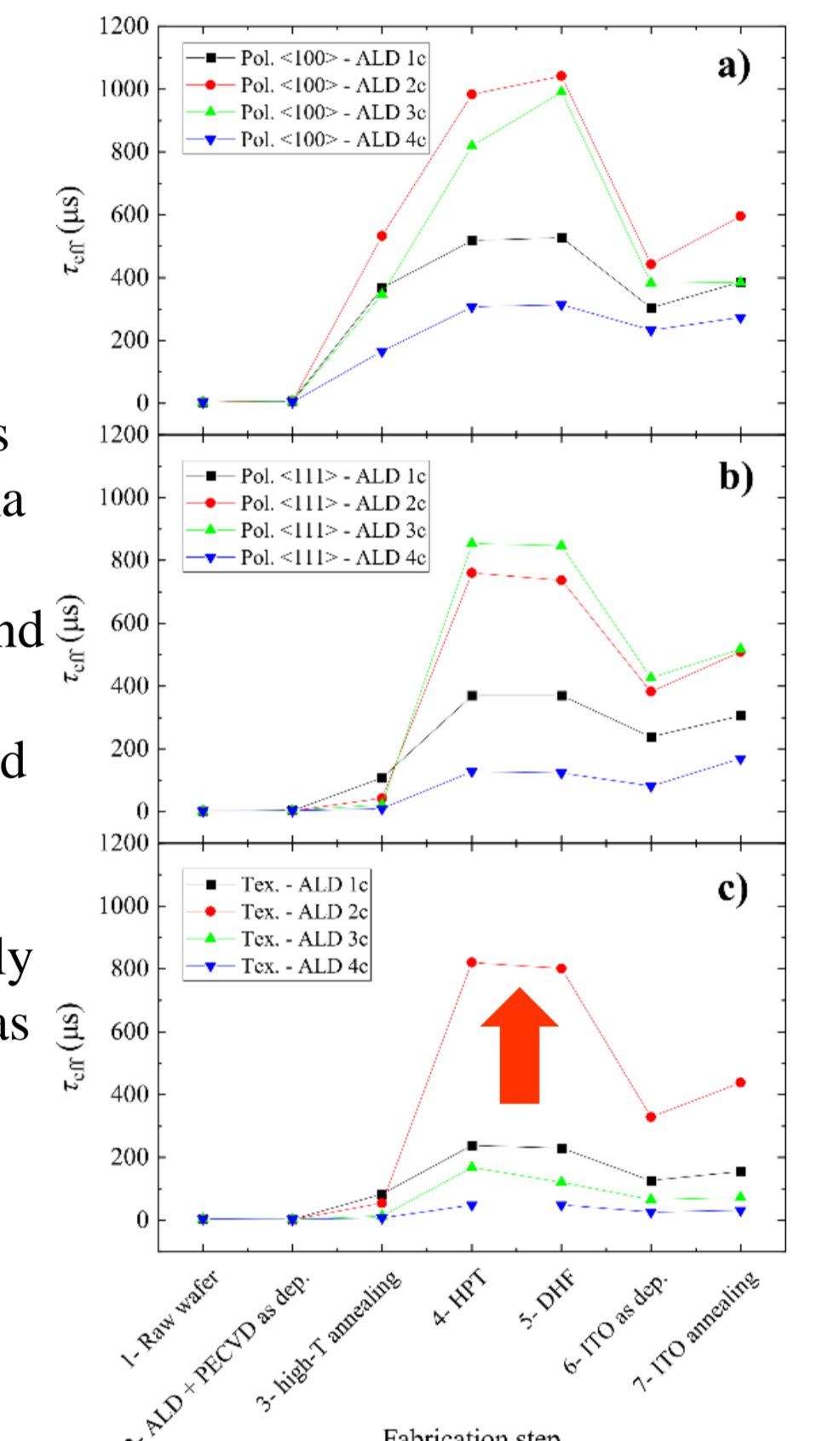


### τ<sub>eff</sub> evolution with fabrication process

Concerning the lifetime (τ<sub>eff</sub>) evolution with the fabrication process:

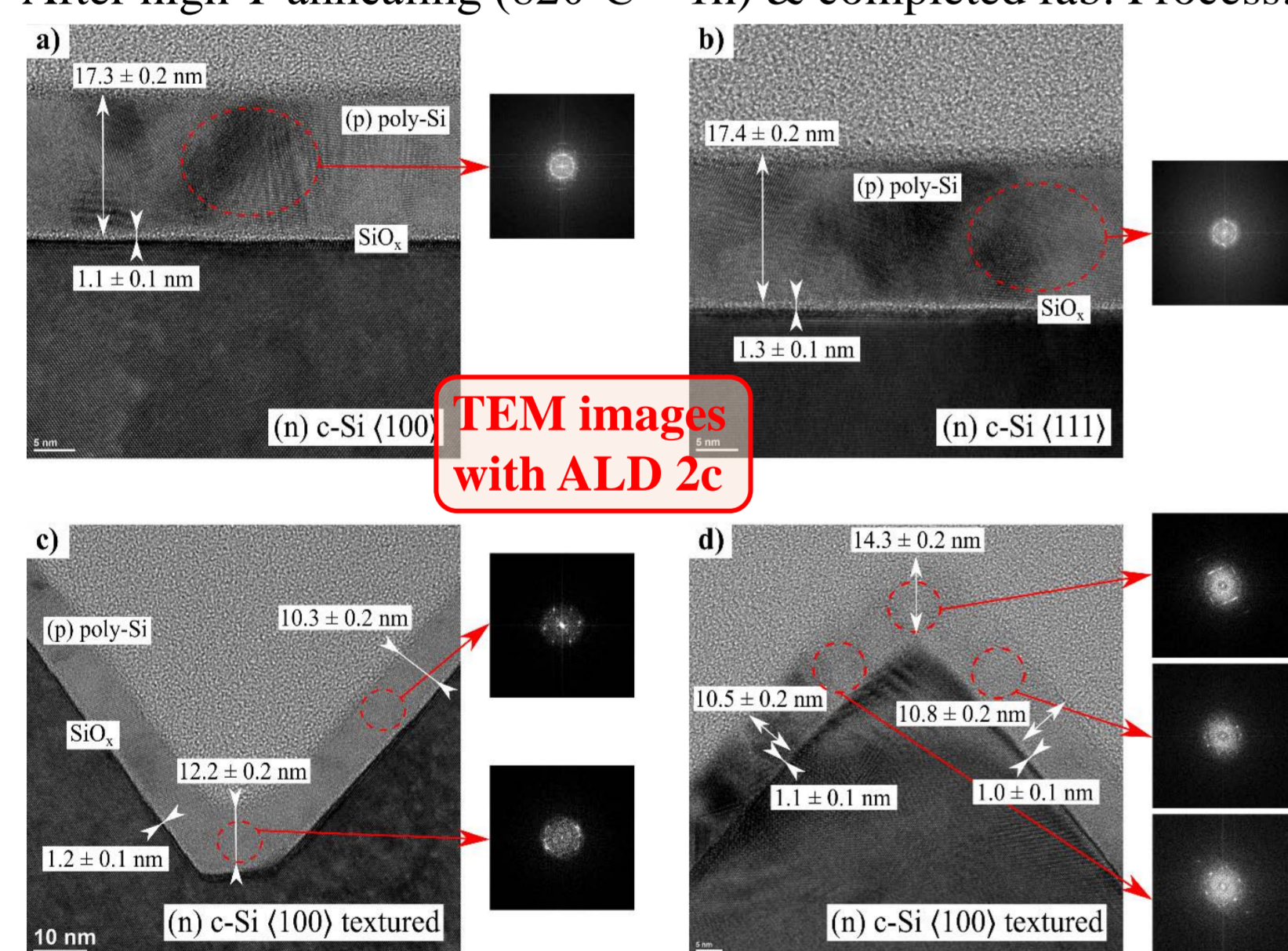
- τ<sub>eff</sub> max. is about 1ms after hydrogen plasma treatment (HPT) on polished <100> Si, and about 0.8 ms on polished <111> Si and textured surface.

- We underline that only SiO<sub>x</sub> with ALD-2c has τ<sub>eff</sub> enhanced after HTP for textured surface.



## 4. Front poly-Si/SiO<sub>x</sub> stack

- After high-T annealing (820°C - 1h) & completed fab. Process:

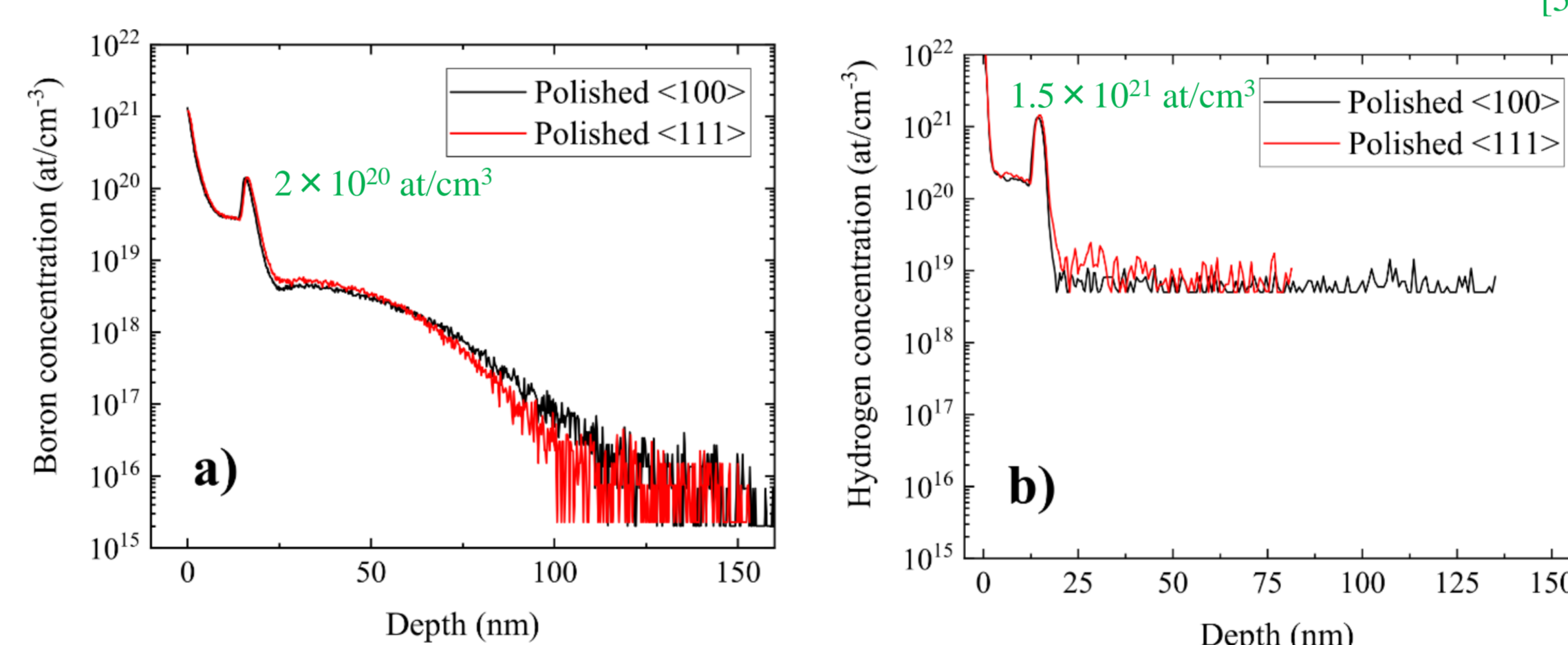


FEM images with ALD 2c

### TEM images [4]:

- ALD 2c corresponds to SiO<sub>x</sub> of 1.1 nm ± 0.1 nm on textured surface.
- Nature of poly-Si is well poly-Si even at the valley or top of tip.

### SIMS measurements on flat Si surface:

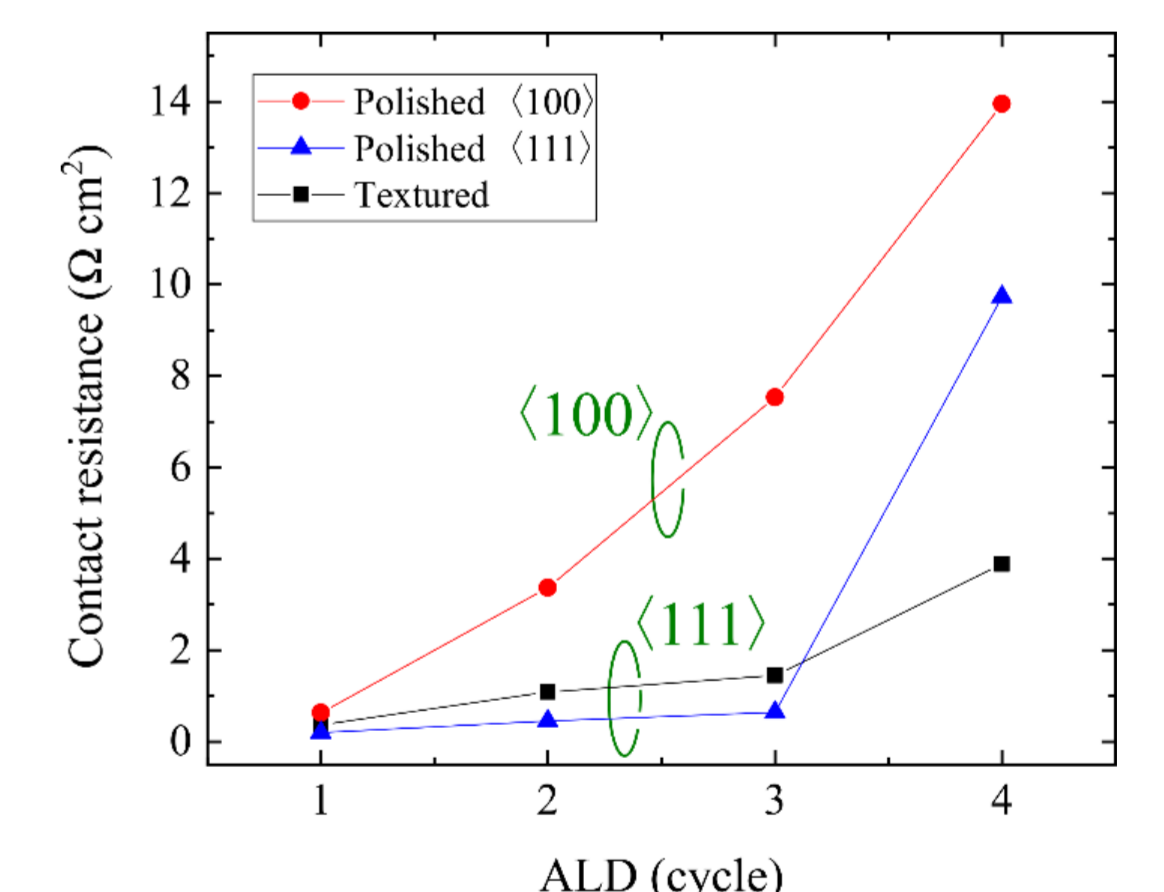


For polished Si surface samples:

- The difference in lifetime observed is not related to a different boron doping profile or H.
- At the interface SiO<sub>x</sub> / c-Si, the boron concentration is about 2 × 10<sup>20</sup> at/cm<sup>3</sup>, and the hydrogen concentration about 1.5 × 10<sup>20</sup> at/cm<sup>3</sup>.
- Regarding the FTIR analysis [5]:
- The **Stoichiometry** x of SiO<sub>x</sub> confirmed about **1.7** for both polished <100> and <111>

[4] M. Lozac'h et al., *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 28 (2020) 1001-1011

[5] M. Lozac'h et al., *SOLMAT* 185 (2018) 8-15



- The contact resistance measured is lower on <111> oriented Si surface contrary to <100>, probably related to a higher density of Si for <111> atomic plan.

## 5. Summary

- The Si surface, polished <100>, <111>, or textured has been investigation on the efficiency of double-sided TOPCon solar cell structure.
- The best efficiency of 19.1 % is obtained on textured Si surface for SiO<sub>x</sub> deposited by ALD 2-cycles that corresponds to a thickness of 1.1 ± 0.1 nm and 1.3 ± 0.1 nm on polished surface oriented <100> and <111>, respectively.
- We underlined that only SiO<sub>x</sub> with ALD-2cycles improves the lifetime after the hydrogen plasma treatment step to about 0.8 ms on textured Si.
- A lower contact resistance for Si <111> atomic plan orientation is also underlined.

## 6. Acknowledgement

We would like to acknowledge K. Matsubara, T. Matsui, H. Sai, I. Sakata for discussions, and A. Saito, T. Oku, Y. Saito for fabrication processes.

We are grateful to Masashi Yamazaki for his expertise on ALD system. This work was supported by NEDO and JSPS KAKENHI (18K03603). The ALD process was performed at AIST Nano-Processing Facility (NPF), supported by "Nanotechnology Platform Program" of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan.



# 3次元アトムプローブを用いた 薄膜微結晶シリコン太陽電池の微結晶分布の視覚化

清水 康雄<sup>1</sup>, 瀧 謙司<sup>2</sup>, 橋口 大樹<sup>2</sup>, 片山 博貴<sup>2</sup>, 松本 光弘<sup>2</sup>, 寺川 朗<sup>2</sup>,  
齋 均<sup>3</sup>, 松井 卓矢<sup>3</sup>, 井上 耕治<sup>4</sup>, 永井 康介<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>物質・材料研究機構, <sup>2</sup>パナソニック株式会社,  
<sup>3</sup>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, <sup>4</sup>東北大学金属材料研究所

## 背景

Siヘテロ接合 (Si Hetero-Junction: SHJ) 太陽電池の素材として微結晶Si (nc-Si:H)に注目  
→ 利点: 透明性, 高いドーピング効率(導電性)  
→ 課題: nc-Si:Hは複合材料  
結晶相と非結晶相の分布は物性を決める重要パラメータ

nc-Si:H太陽電池でa-Si:Hを上回る発電効率11.9%  
H. Sai et al., Appl. Phys. Express 11, 022301 (2018).

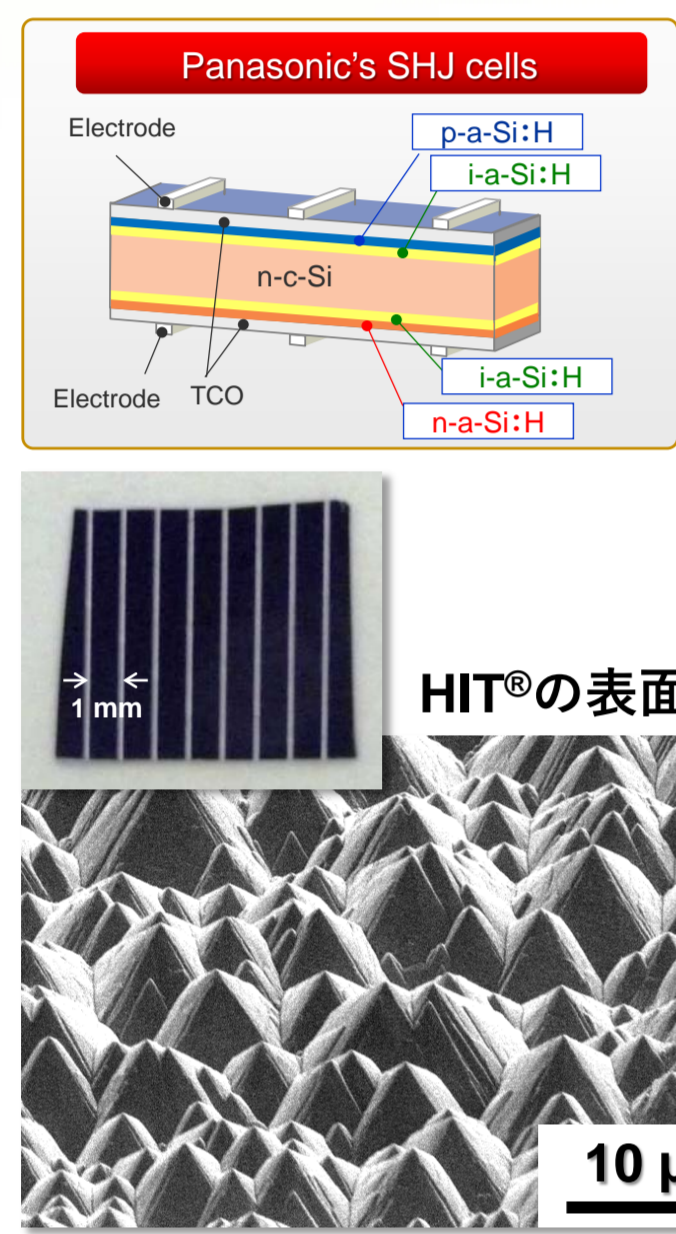


Fig. Cross-sectional SEM image of a typical nc-Si:H (or μc-Si) solar cell.

しかし結晶相の3次元分布は評価されておらず未解明

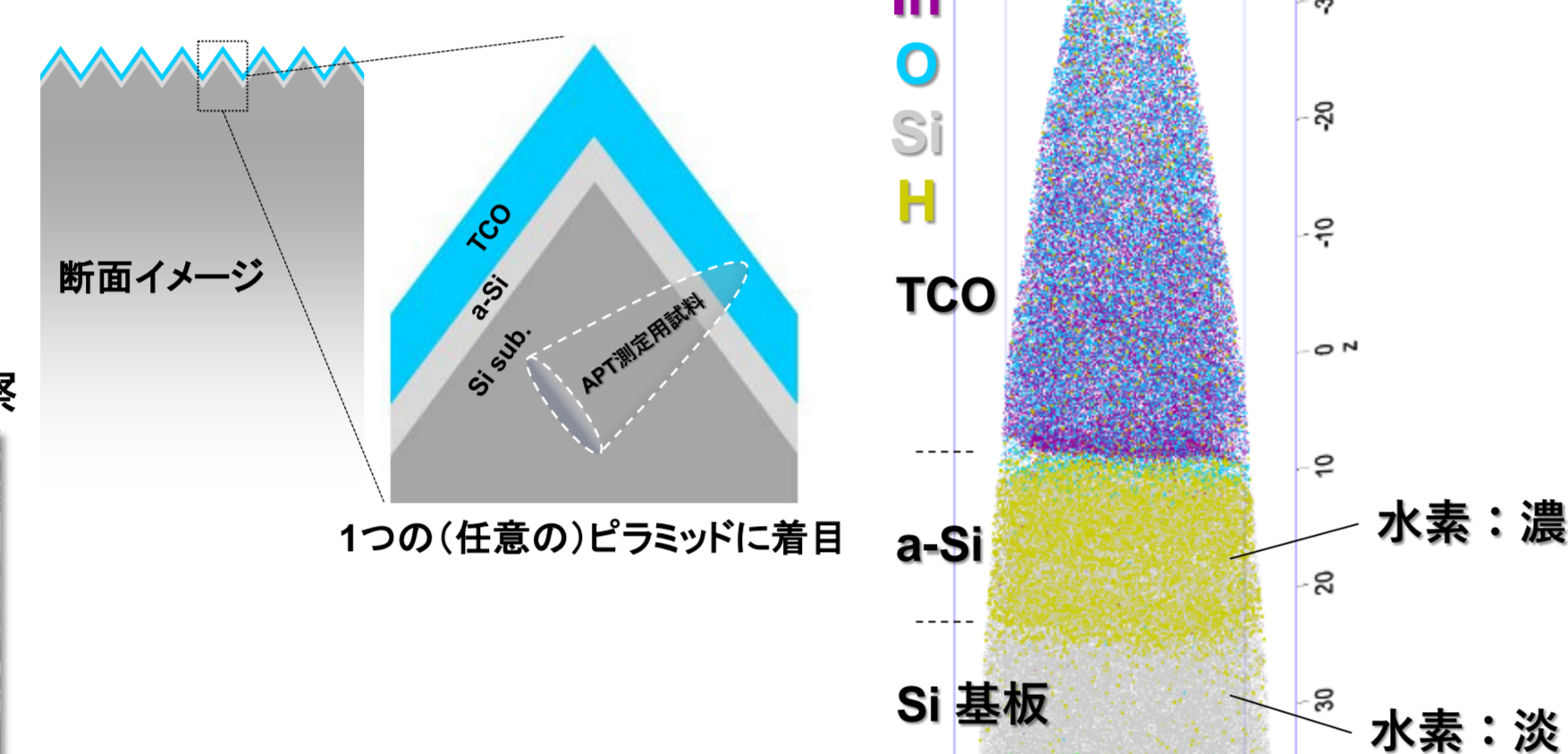
主な微結晶分析法:  
断面方向からの透過電子顕微鏡観察による2次元解析 (結晶・非結晶相の判別)

## 先行研究: SHJ太陽電池のテクスチャ斜面上の元素分布評価の例



e.g., M. Taguchi et al., Prog. Photovoltaics 13, 481 (2005). (Panasonic Corp.)

Y. Shimizu et al., Appl. Phys. Express 13, 126503 (2020). (NIMS, IMR Tohoku Univ., and Panasonic Corp.) [Spotlights 2020]



Siヘテロ接合の既報事例  
集束イオンビーム技術を活用して任意の領域を切り出し, 3次元アトムプローブ (Atom Probe Tomography: APT) 法を適用して, Si太陽電池のテクスチャ斜面上の元素分布の取得に成功 (a-Si/c-Siの識別が可能)  
→ Si太陽電池分野においてAPT法による水素分布・定量の先駆け

## 目的

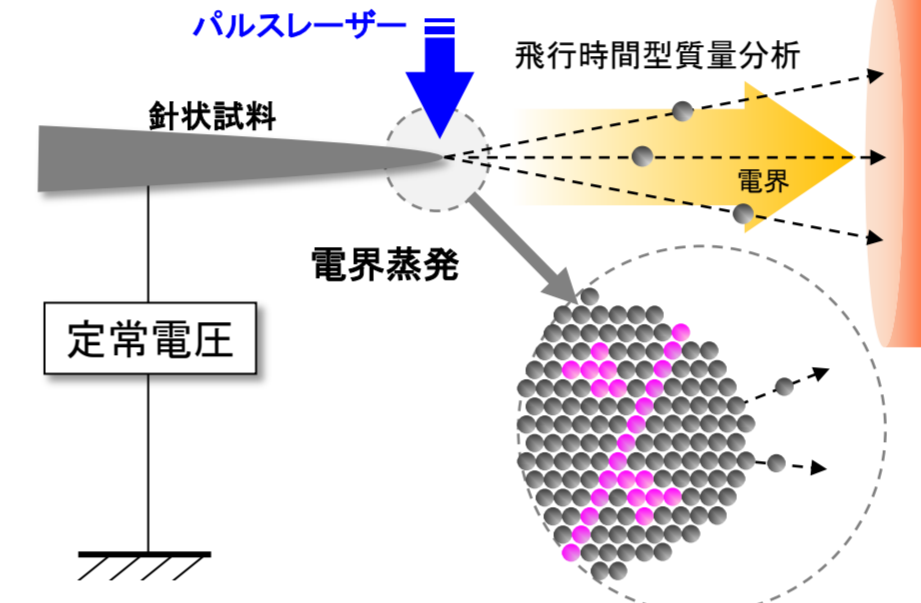
微結晶層のモデル材料として, 高性能薄膜nc-Si:H電池の材料を評価し, 結晶相の実空間分布の取得へ  
水素分布に着目し, 3次元アトムプローブ法を活用して微結晶の描画法を確立  
→ 最終ターゲットは極薄膜(数十nm)解析へ

## 実験

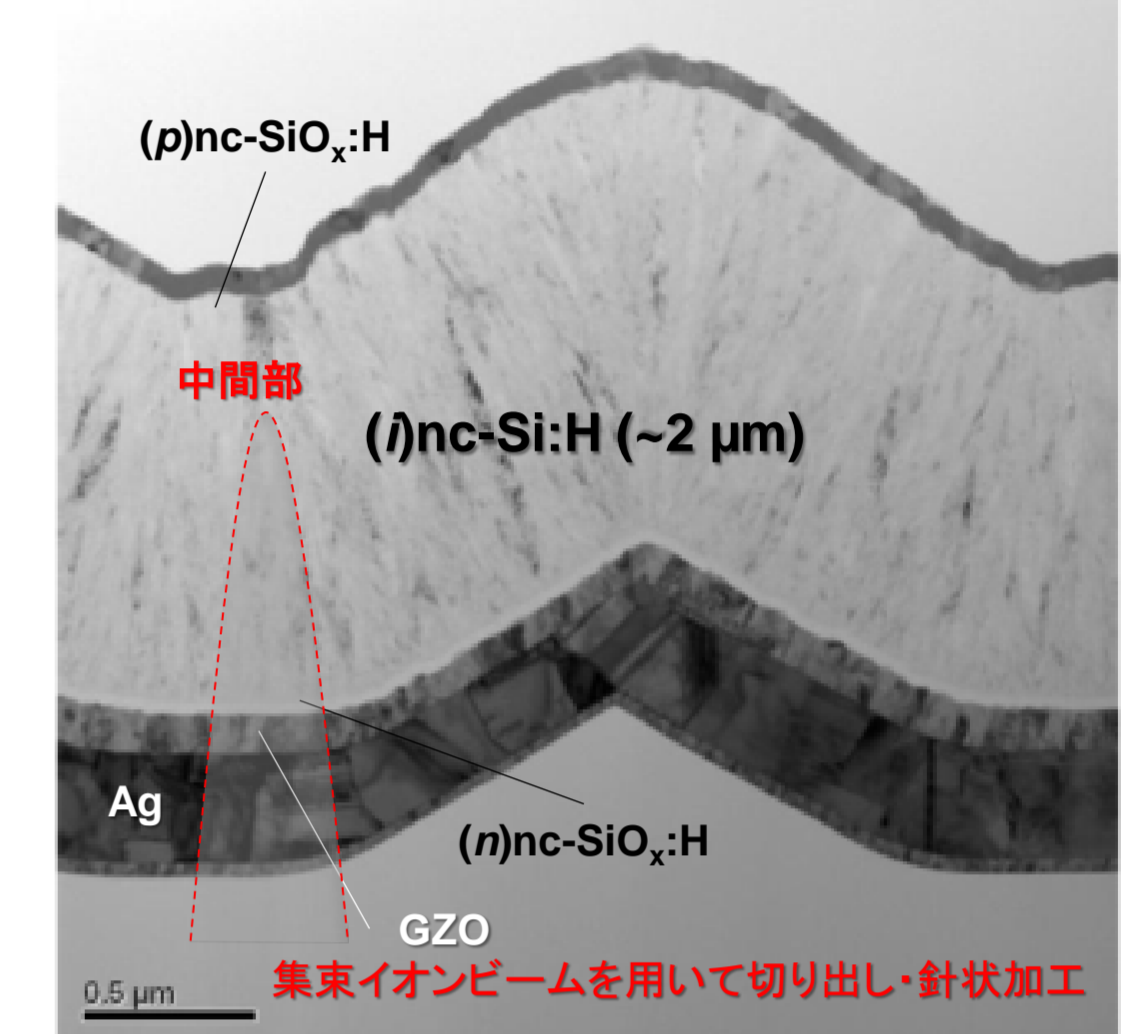
APT法を適用するには...  
→ 針状試料の用意, 先端径50 nm以下 (微細加工が必須)

【試料】  
効率11.9%を達成したものと同等のハニカム基板を用いたnc-Si:H太陽電池  
H. Sai et al., Appl. Phys. Express 11, 022301 (2018).

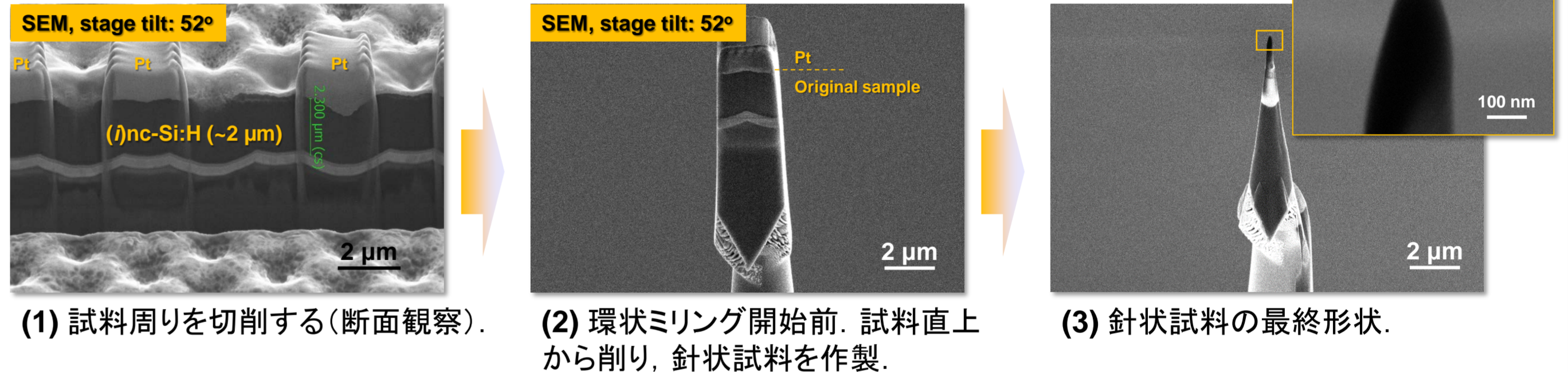
### 3次元アトムプローブ(APT)法



- 原子レベルで元素の実空間分布を取得  
- 元素間の検出効率の差はほとんど無し  
APT測定原理 & 応用例 [Review article]  
Y. Shimizu et al., J. Vac. Soc. Jpn. 56, 340-347 (2013).  
A. D. Giddings, Y. Shimizu et al., Scripta Mater. 148, 82-90 (2018).

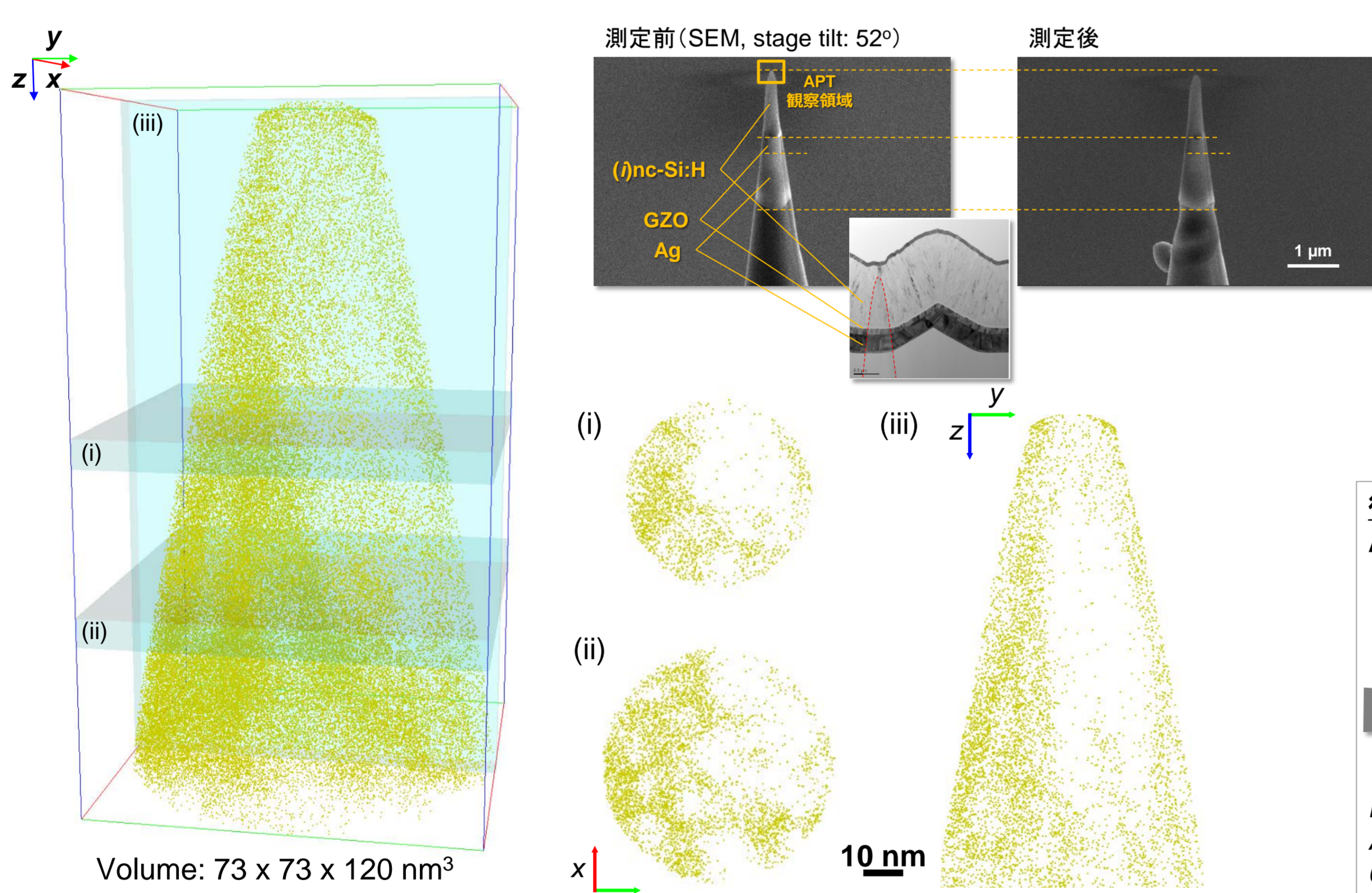


### 集束イオンビーム (FIB) による加工手順



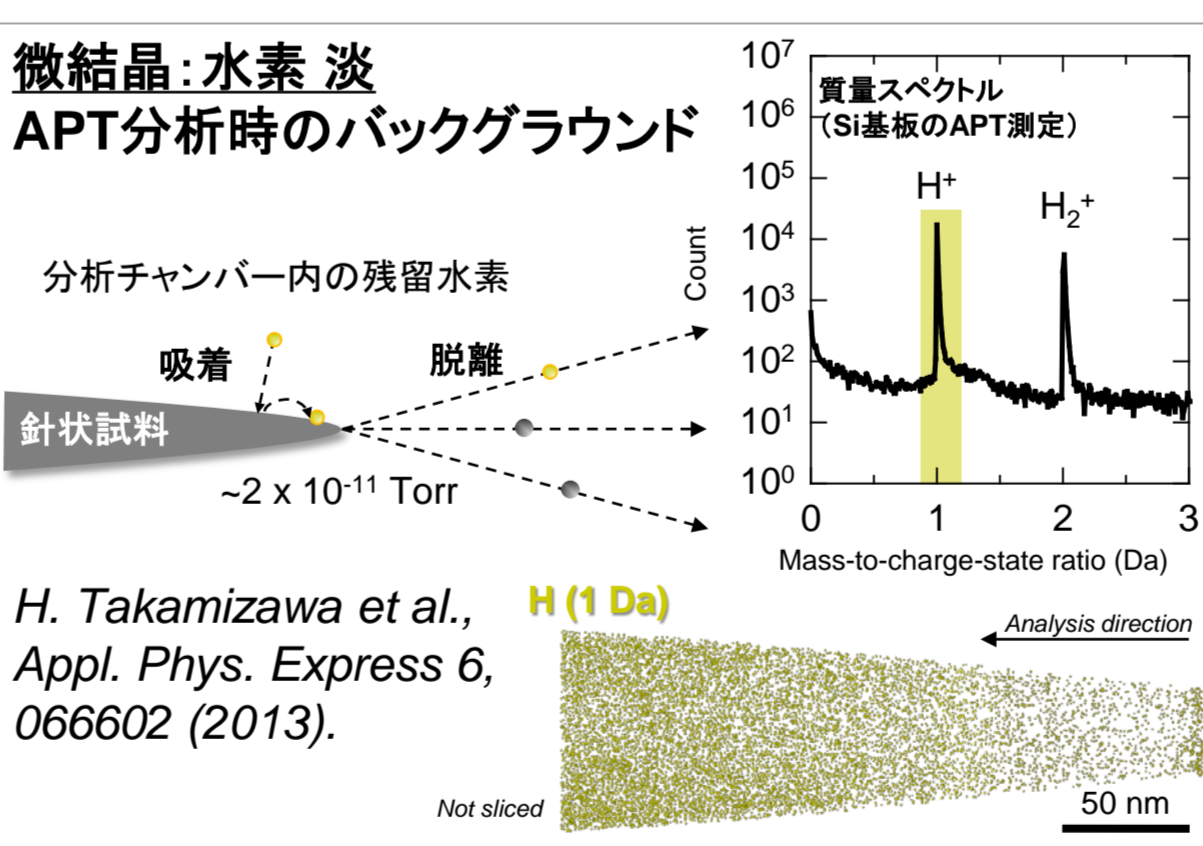
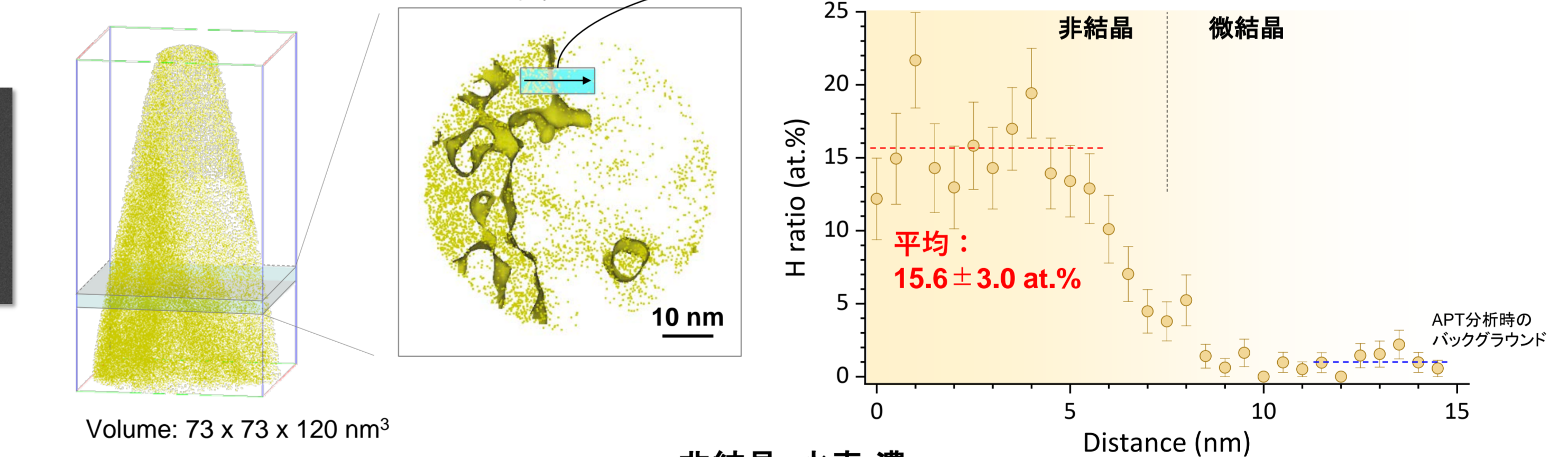
## 結果・考察

### (1) 微結晶層の3次元アトムマップ (水素分布の表示)



- 微結晶層のAPT測定に成功
- 水素分布の濃淡を観測 → 微結晶分布の3次元直接観察

### (2) 水素分布の解釈



### 非結晶:水素濃

先行研究: FT-IRによる水素量測定  
H. Sai et al., J. Appl. Phys. 124, 103102 (2018).

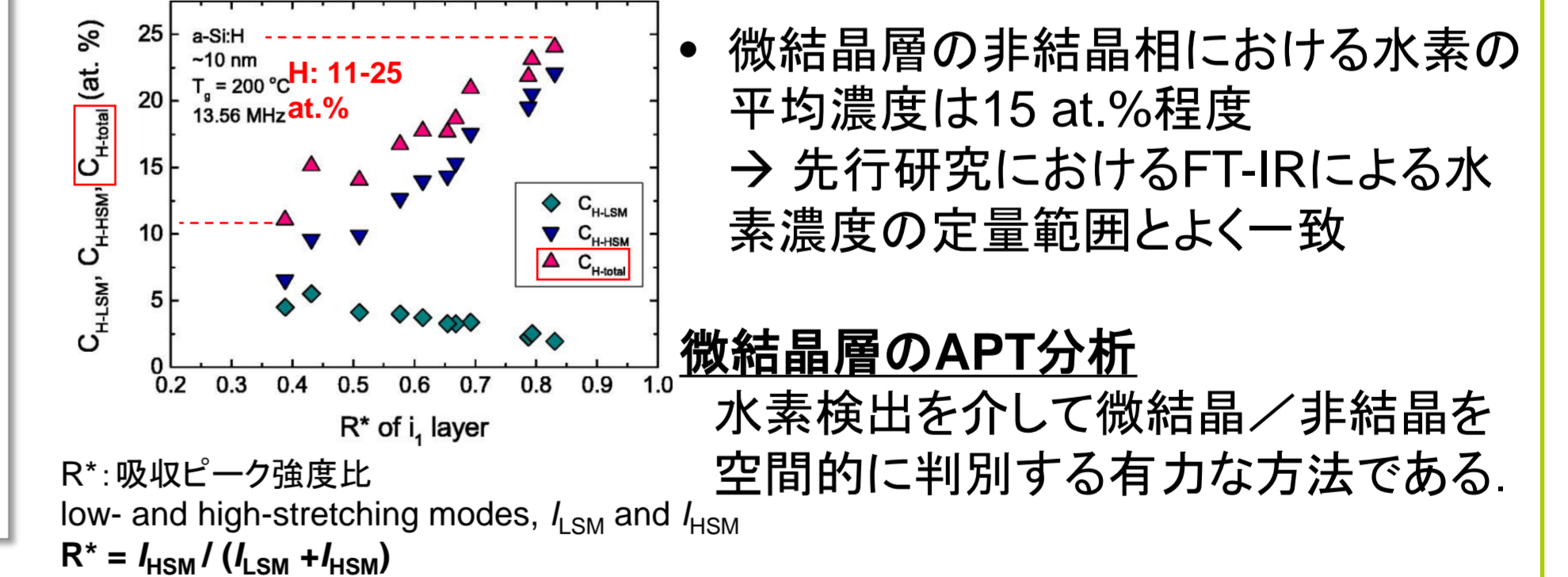


FIG. H content in a-Si:H films grown with pure SiH<sub>4</sub>.

## まとめ

3次元アトムプローブ法 (APT) を用いて微結晶Si層中の水素の空間分布を観測した。微結晶層において水素分布の濃淡が見られた。  
→ 微結晶粒の3次元描画法の確立へ

### 今後の展開・課題

Siヘテロ接合太陽電池に適用されたnc-Si:H層へ応用  
→ 本手法はピラミッドテクスチャ上の極薄nc-Si:H膜の評価に適用可能

### 高機能の微結晶Si太陽電池の設計に活用へ

- ✓ 微結晶形成メカニズムの解明 (微結晶層の上層~下層を系統的に調べて比較)
- ✓ 膜物性や発電特性との対応

## 謝辞

本研究の一部は, 2018年度NEDO「エネルギー・環境新技術先導プログラム」の委託により実施された。

## 成果

### 【論文】

Y. Shimizu, H. Sai, T. Matsui, K. Taki, T. Hashiguchi, H. Katayama, M. Matsumoto, A. Terakawa, K. Inoue, and Y. Nagai, "Crystallite distribution analysis based on hydrogen content in thin-film nanocrystalline silicon solar cells by atom probe tomography," Appl. Phys. Express, Vol. 14, No. 1, 016501/1-5 (2021).

### 【口頭発表】

清水康雄, 瀧謙司, 橋口大樹, 片山博貴, 松本光弘, 寺川朗, 齋均, 松井卓矢, 井上耕治, 永井康介, "3次元アトムプローブを用いた薄膜微結晶シリコン太陽電池の微結晶分布の視覚化," 第17回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム, 2020年10月。

# CIGS太陽電池のアルカリ金属添加効果

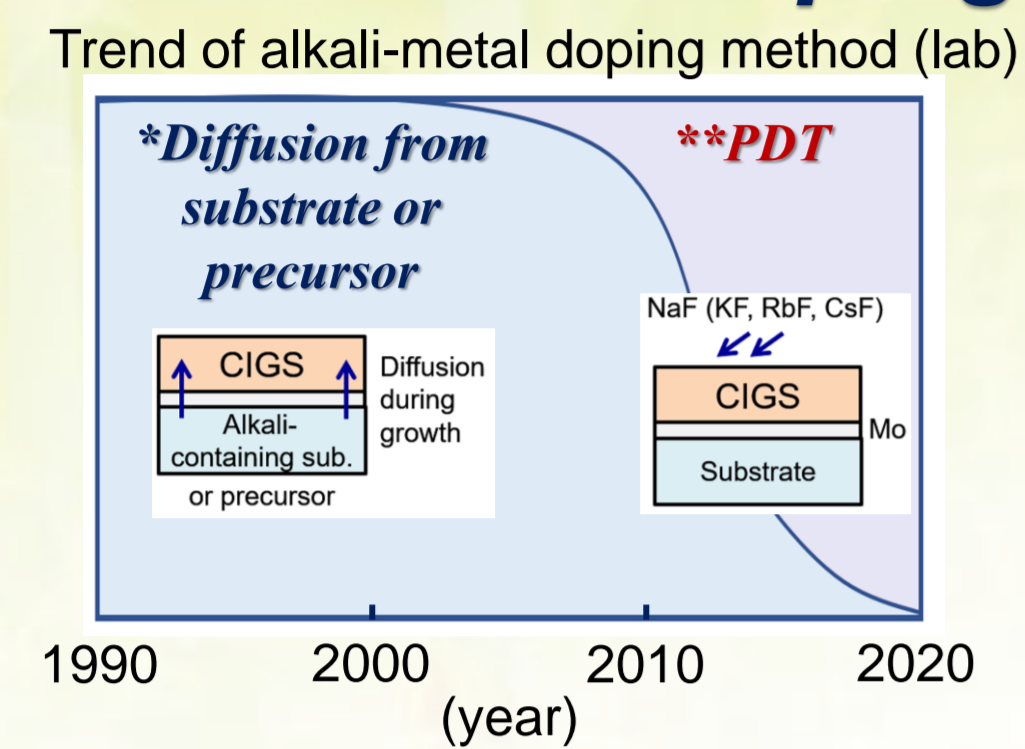
～軽いリチウムLiから重いセシウムCsまで～

石塚尚吾<sup>1</sup>、上川由紀子<sup>1</sup>、西永慈郎<sup>1</sup>、田口昇<sup>2</sup>  
産業技術総合研究所 <sup>1</sup>省エネルギー研究部門、<sup>2</sup>電池技術研究部門

## 研究の目的

Alkali-metal effects on CIGS solar cells have long been studied but detailed mechanisms are still open to discussion

### Alkali-metal doping



### PDT (postdeposition treatment)

Li Na K Rb Cs  
 $V_{oc} \uparrow$  &  $FF \uparrow$  (Eff.  $\uparrow$ ),  $N_{CV} \uparrow$

### Diffusion from substrate or precursor

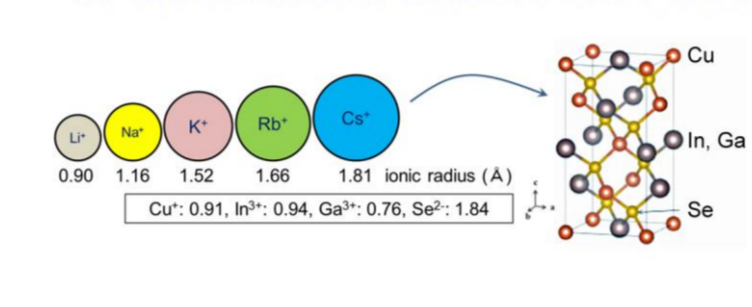
Li Na K Rb Cs  
 $V_{oc} \uparrow$  &  $FF \uparrow$  (Eff.  $\uparrow$ ),  $N_{CV} \uparrow$ , (112)  $\uparrow$   
Grain size  $\downarrow$

Red: No or very few reports to date (This study)  
Blue: Well studied

### This study

Focus on Comparative study on Light & heavy alkali-metal effects on CIGS & CGS

Systematic knowledge of alkali-metal effects on CIGS



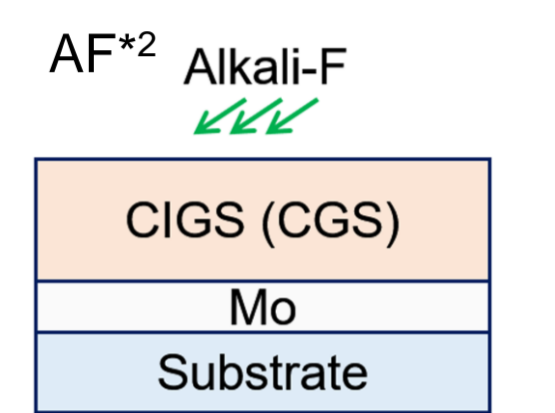
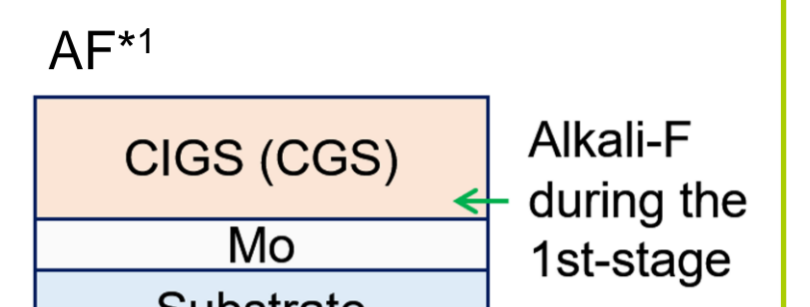
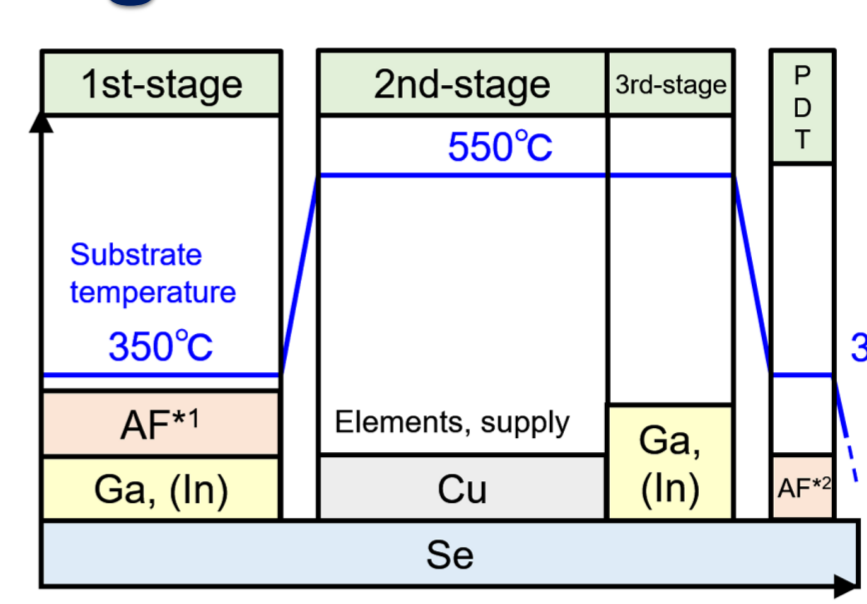
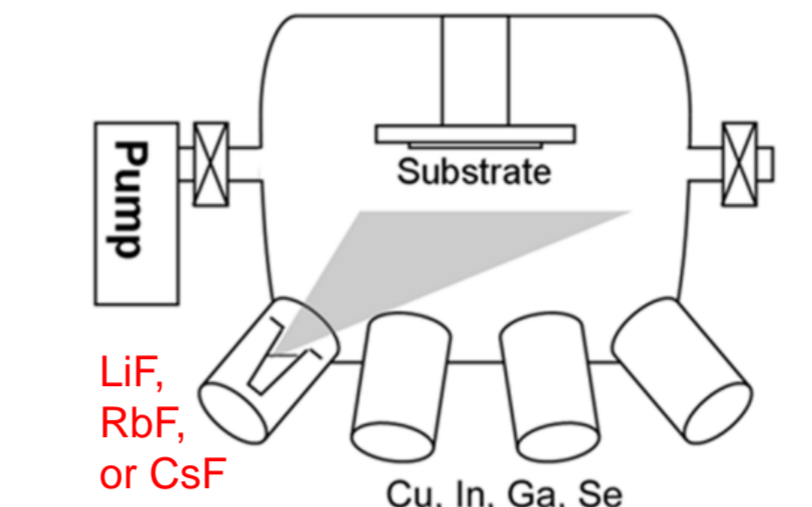
\*NaF precursor<sup>[1]</sup>, MoNa<sup>[2]</sup>, sputtered SLG<sup>[3]</sup>, etc.  
\*\*NaF-PDT<sup>[4]</sup>, KF-PDT<sup>[5]</sup>, RbF-PDT<sup>[6]</sup>, Cs-treatment<sup>[7]</sup>  
 $\eta \sim 20.4\%$   $\rightarrow$   $\eta \sim 22.6\%$   $\rightarrow$   $\eta \sim 23.35\%$   
Small area cell efficiency  $\rightarrow$

- [1] e.g. M. A. Contreras et al., Proc. 26<sup>th</sup> IEEE PVSC (1997), p.359.
- [2] e.g. L. Mansfield et al., Proc. 37<sup>th</sup> IEEE PVSC (2011), p.003636.
- [3] S. Ishizuka et al., Appl. Phys. Lett. 93, 124105 (2008).
- [4] D. Rudmann et al., Appl. Phys. Lett. 84, 1129 (2004).
- [5] A. Chirila et al., Nat. Mater. 12, 1107 (2013).
- [6] P. Jackson et al., Phys. Stat. Sol. RRL 8, 583 (2016).
- [7] M. Nakamura et al., IEEE J. Photovolt. 9, 1863 (2019).

## 実験

### CIGS & CGS film growth

Three-stage coevaporation



AF: Alkali-fluoride (LiF, RbF, CsF, etc.)

AF\*1: LiF or RbF supply @1st-stage  
or  
AF\*2: LiF- or RbF (CsF)-PDT

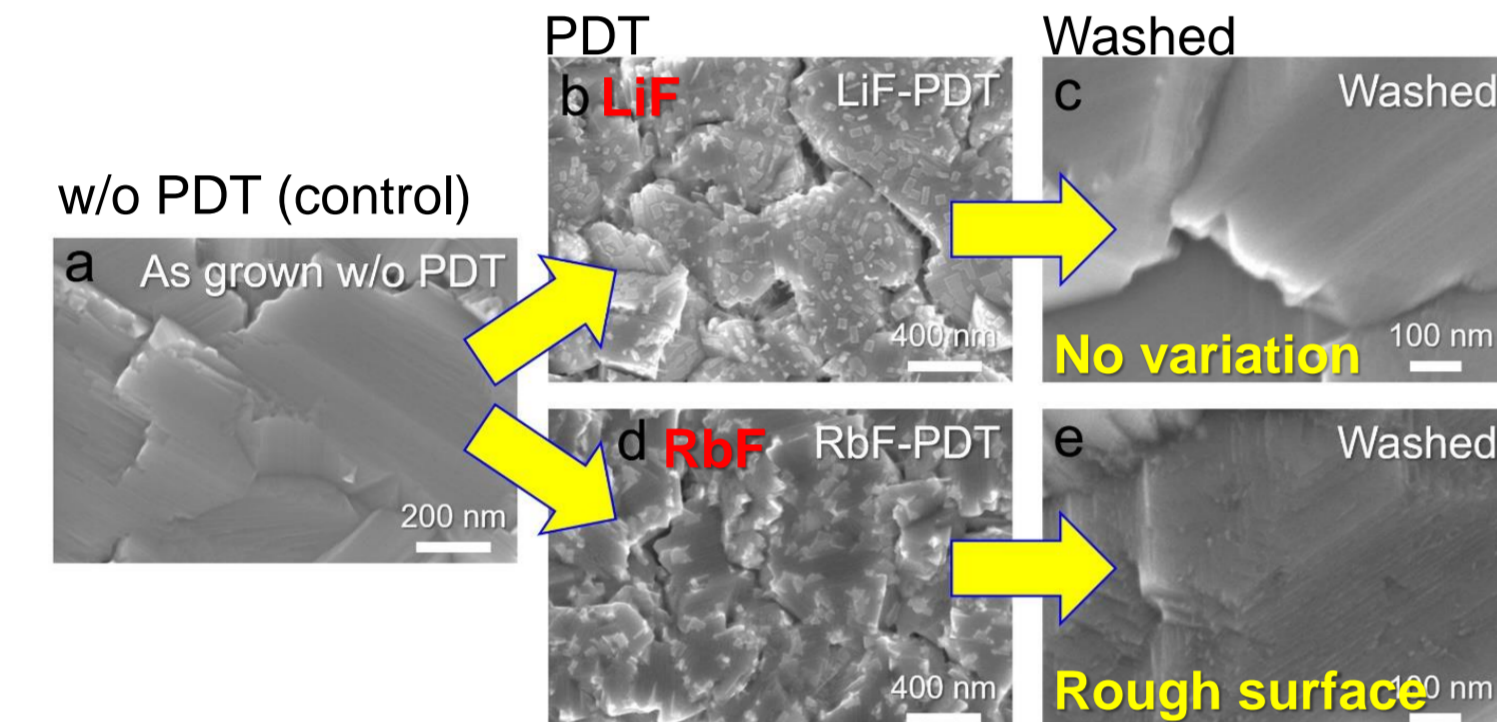
### Characterization

Morphology (SEM), alkali depth profiles (SIMS), XRD,  $N_{CV}$ , PL, solar cell parameters

## 結果と考察

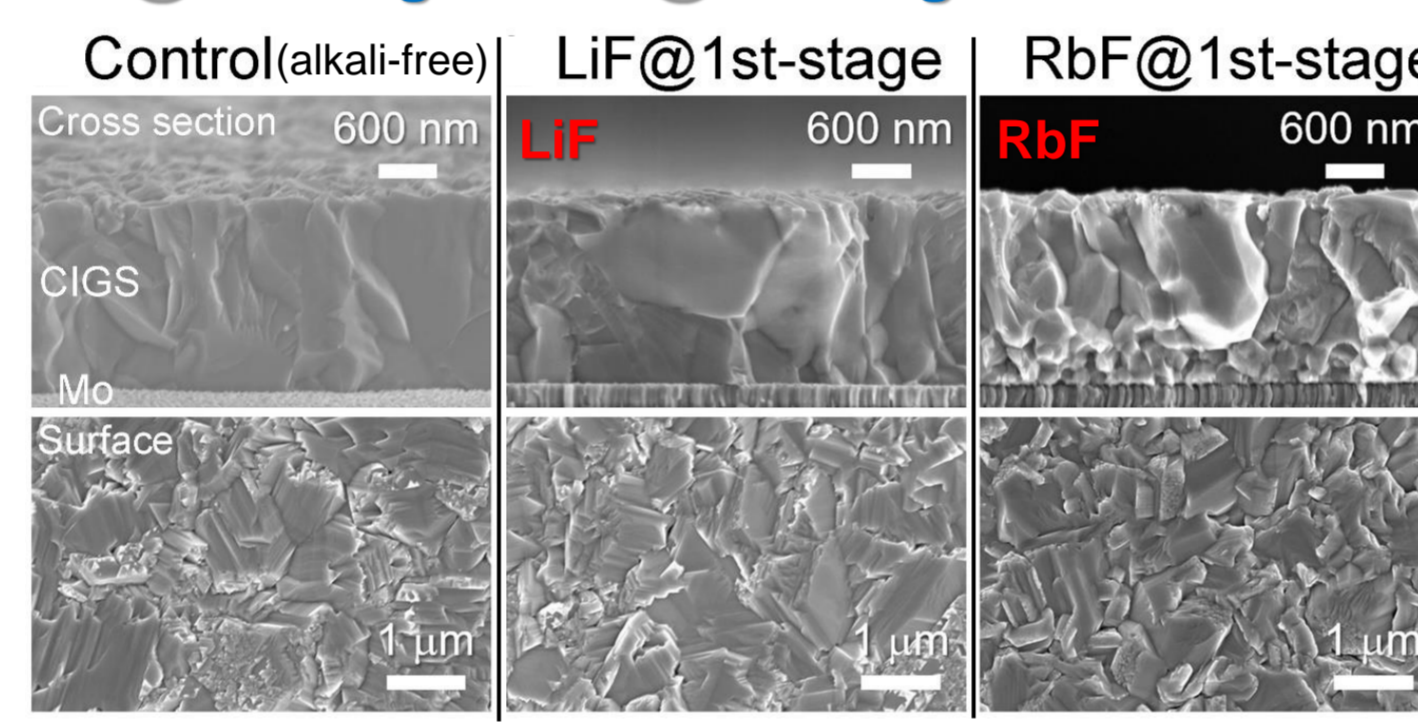
### Morphology variations

LiF-PDT / RbF-PDT



Substrate: SLG (alkali-containing)  
Rough surface morphology  
No Li Na K Rb Cs Yes

LiF@1st-stage / RbF@1st-stage



Substrate: Sapphire (alkali-free)  
Small grain size @CIGS/Mo  
No Li Na K Rb Cs Yes

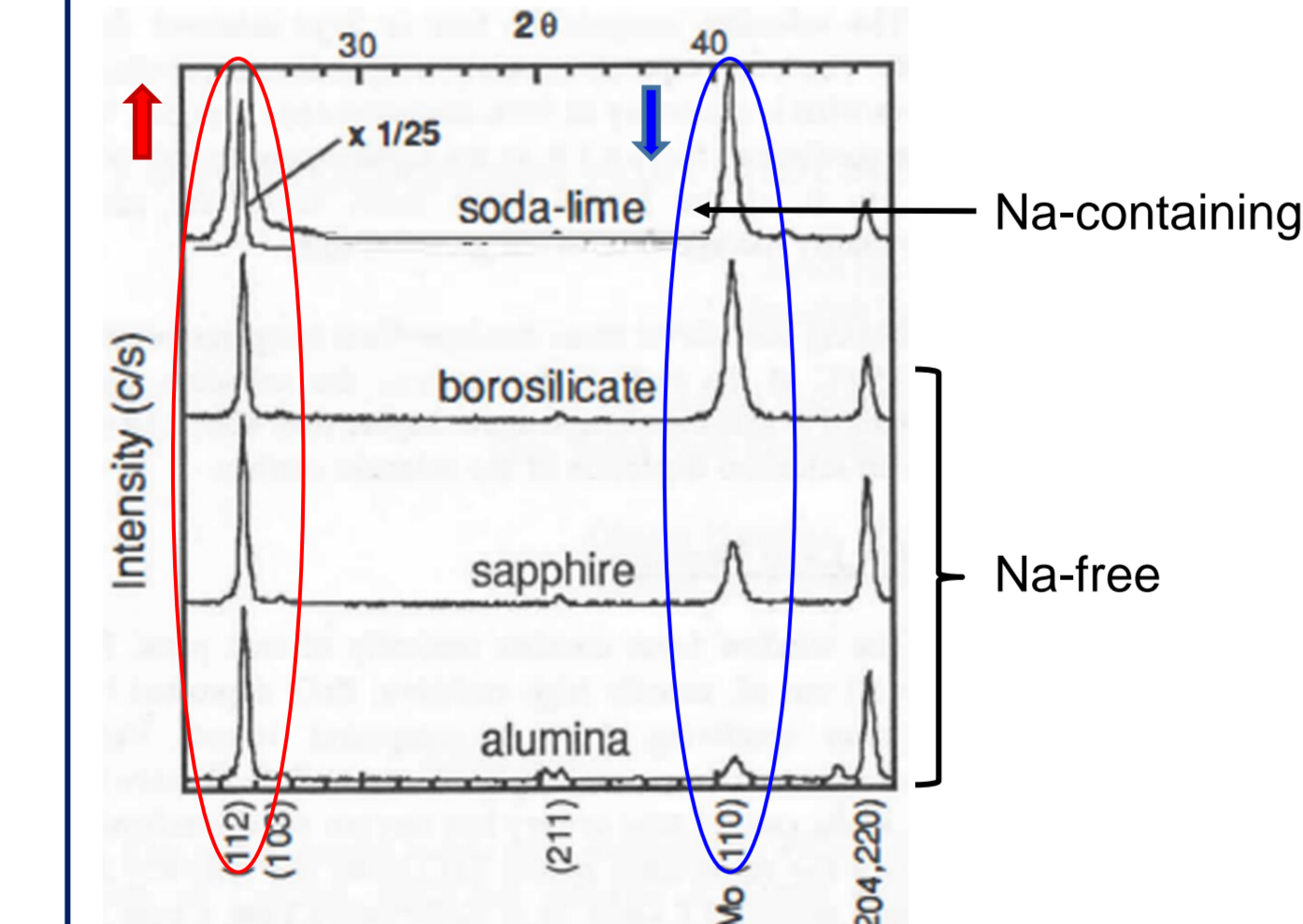
Future study is required

PDT (CIGS薄膜形成後のアルカリ金属添加)による表面形態変化は、軽いLi、Naでは見られず、Kもしくはそれより重いアルカリ元素でのみ明瞭に観察される。一方、CIGS製膜中に存在することで小粒径化を招くのはNaがそれより重い元素である。

### Alkali-effects on CIGS growth orientation (XRD)

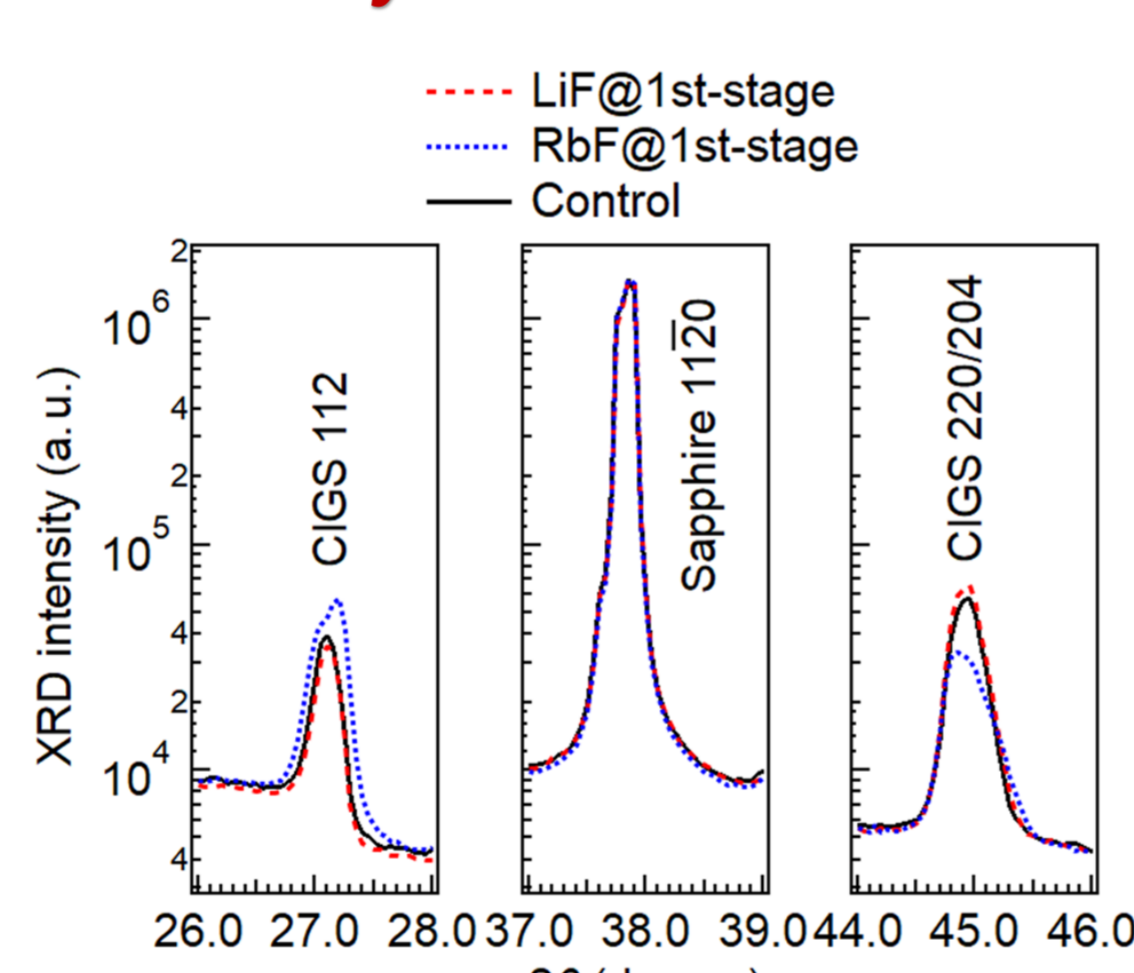
#### Previous reports

Na present during CIGS growth enhances (112)/(204,220) orientation ratio<sup>[8,9]</sup>



[8] J. Hedström et al., Proc. 23<sup>rd</sup> IEEE PVSC (1993), p.364.  
[9] M. Bodeg Ård et al., Thin Solid Films 361-362, 9 (2000).

#### This study



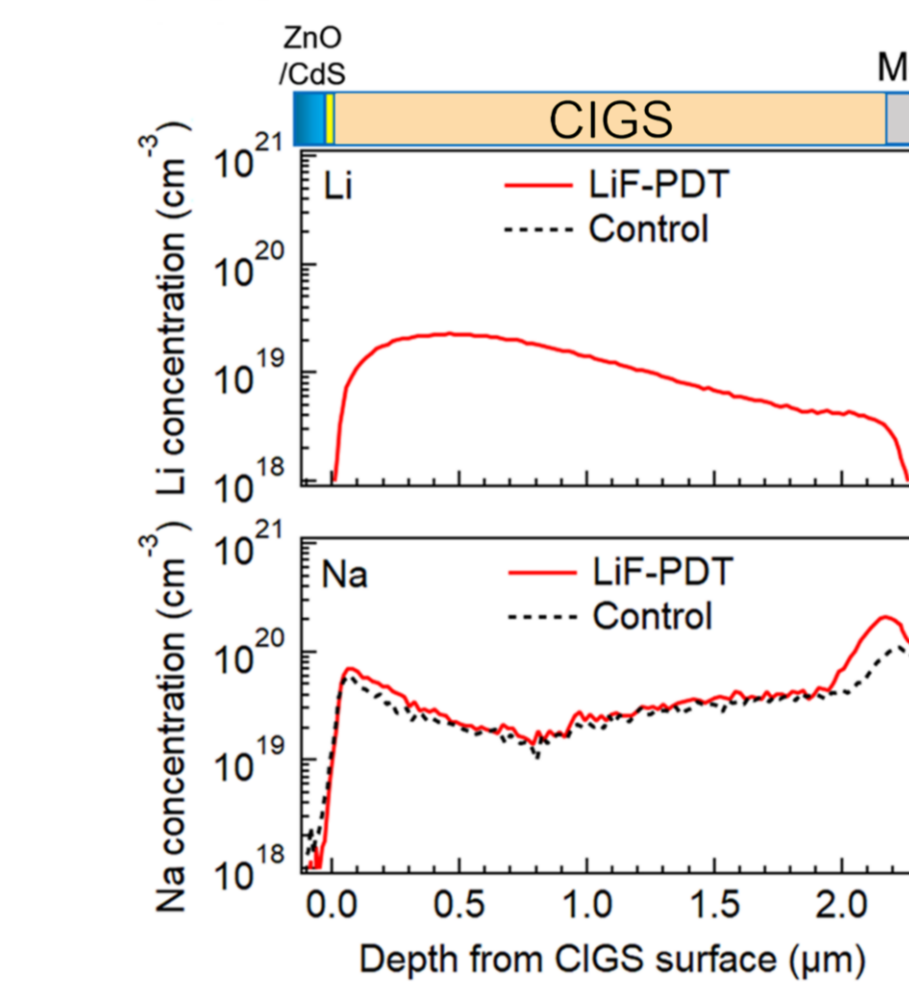
Substrate: Sapphire  
(112)/(204,220)  $\uparrow$   
No Li Na K Rb Cs Yes

Future study is required

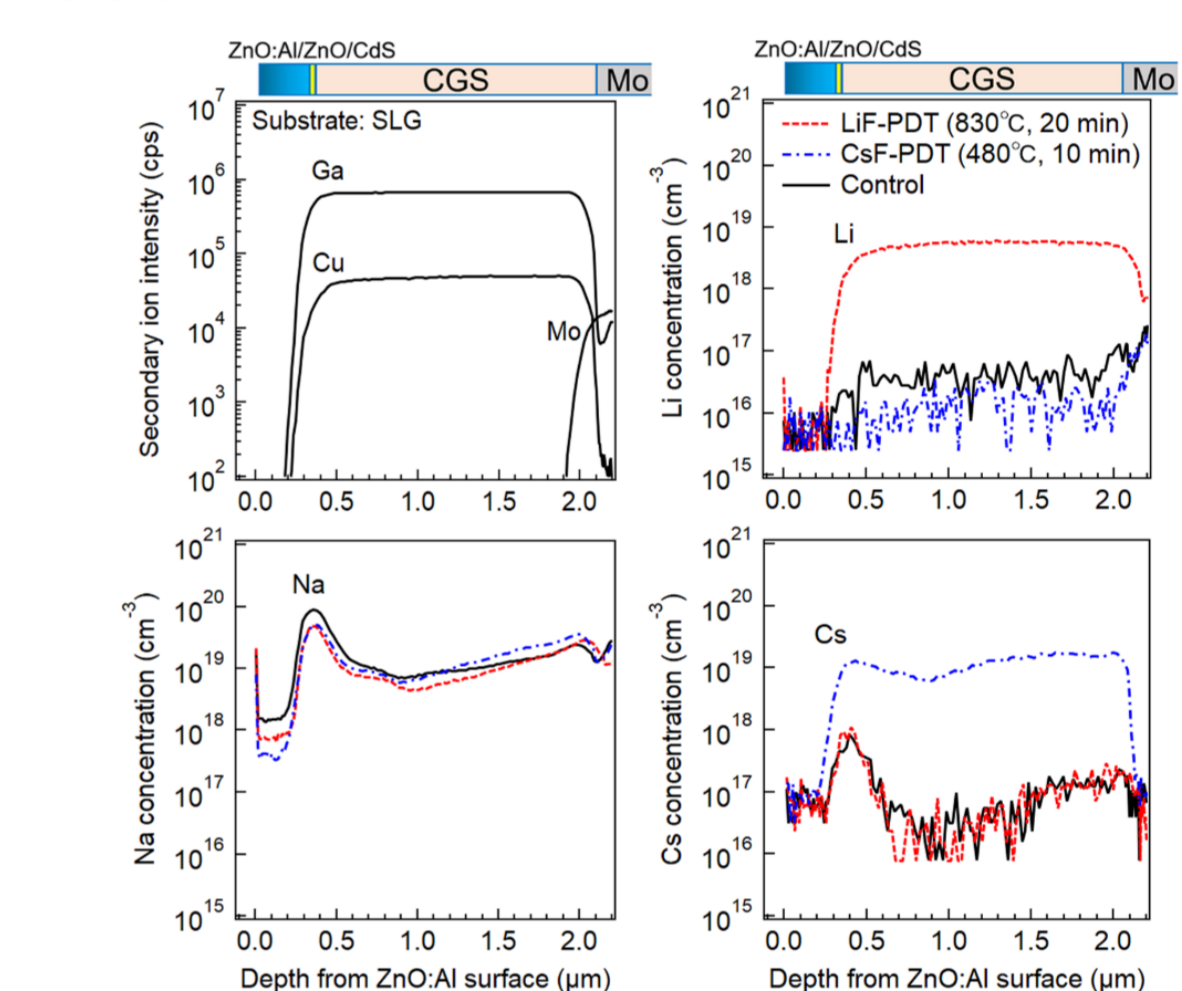
製膜中にNaが存在することで(112)配向が強くなるのが知られるが、Liではその傾向は見られない。一方、重いRbではNaと同様に(112)配向が強くなる傾向を確認。

### SIMS depth profiles

CIGS



CGS

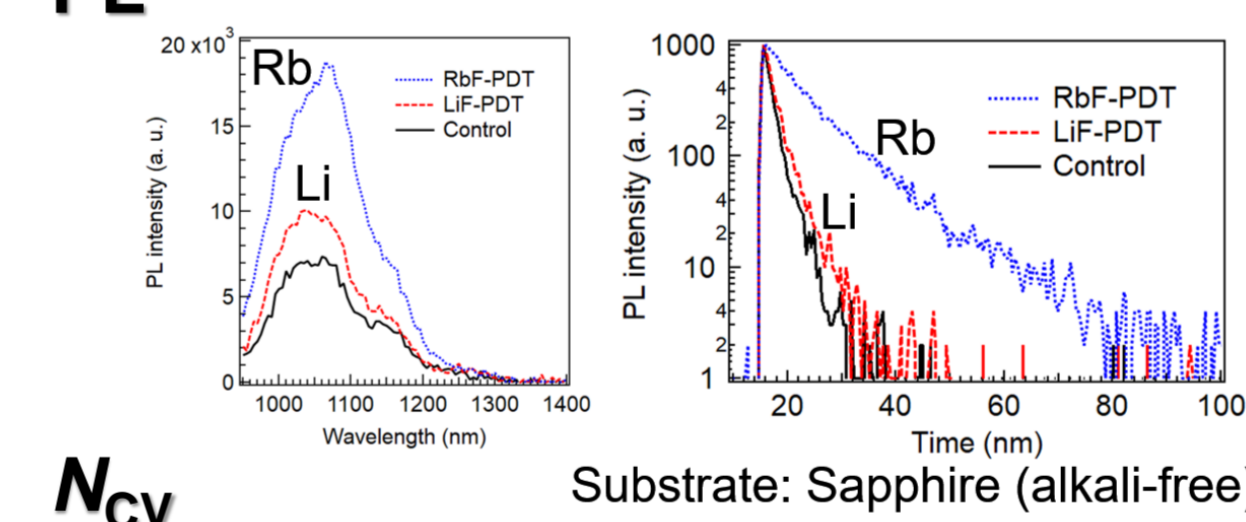


Concentration in the C(I)GS surface/back surface  
No Li Na K Rb Cs Yes

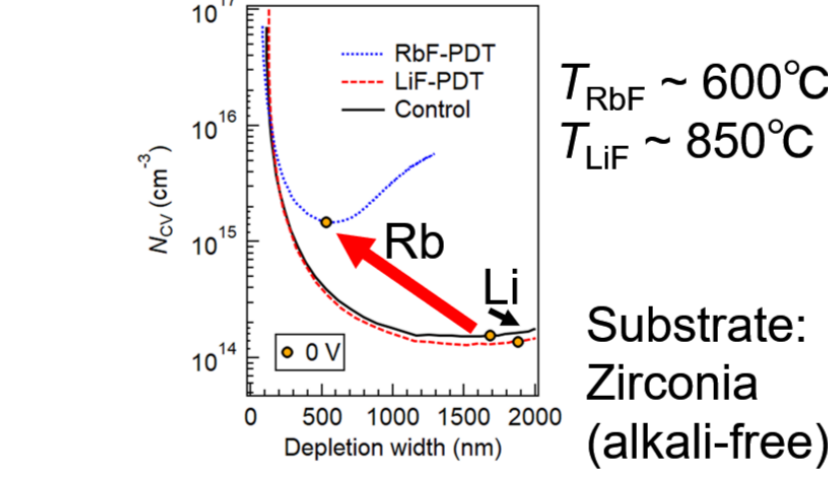
Naとそれより重いアルカリ金属はCIGS表面やCIGS/Mo裏面界面に多く偏析する傾向が知られるが、軽いLiではそのような傾向は見られない。

### PL & Solar cell device properties

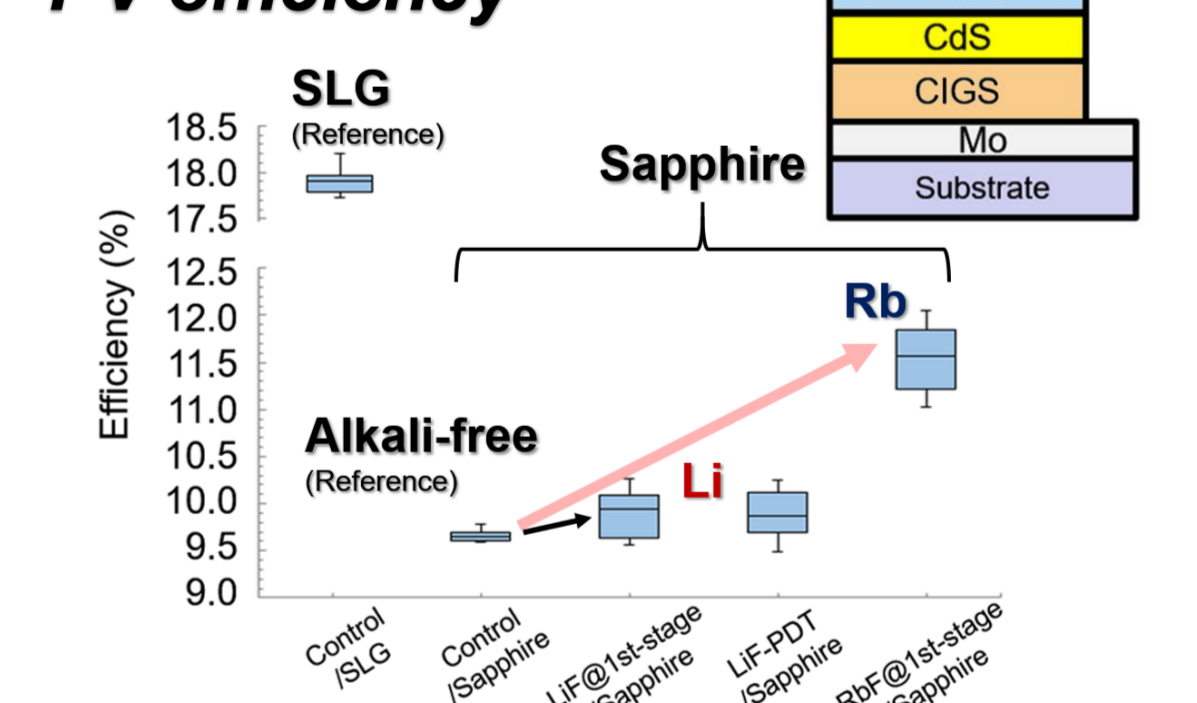
#### PL



#### N<sub>CV</sub>



#### PV efficiency



#### Beneficial effects

Li  $\Rightarrow$  Very modest  
Na, K, Rb, Cs  $\Rightarrow$  Significant

Naよりも重いアルカリ金属はCIGS太陽電池性能の向上に大きな効果があるが、軽いLiはほとんどない。Li添加でも性能向上が見られるCu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>系太陽電池とは対照的な結果。

## 結論

CIGSにおけるアルカリ金属添加効果は、薄膜組成や添加方法にも依存するが概ね下記の傾向が確認された。

### Alkali-metal effects on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> [Ga]/([Ga]+[In]) ~ 0.3

CIGS film & device property	Li	Na	K	Rb	Cs
Surface pore formation (PDT)	×	×	○	○	○
(112) $\uparrow$	×	○	-	○	-
Grain size (doping during growth) $\downarrow$	×	○	○	○	-
$N_{CV}$ (PDT) $\uparrow$	×	○	○	○	○
$N_{CV}$ (doping during growth) $\uparrow$	○	○	○	○	-
PL intensity $\uparrow$	△	○	○	○	○
PL lifetime $\uparrow$	△	○	○	○	○
PV efficiency $\uparrow$	△	○	○	○	○

(112): (112)/(204,220) growth orientation ratio, PDT: Postdeposition treatment,  $N_{CV}$ : Nominal carrier density, PL: Photoluminescence, PV: Photovoltaic. ○, △, ×: This study. -: Future work (probably ○)

## 謝辞

本研究は、公益財団法人三菱財団自然科学研究助成 (ID: 201910001)、JSPS科研費19K05282、および一部NEDOの支援により実施されました。厚く御礼申し上げます。

また、デバイス作製および評価測定における樋口博文氏、飯岡正行氏、高橋秀樹氏の協力を感謝致します。

## 参考文献

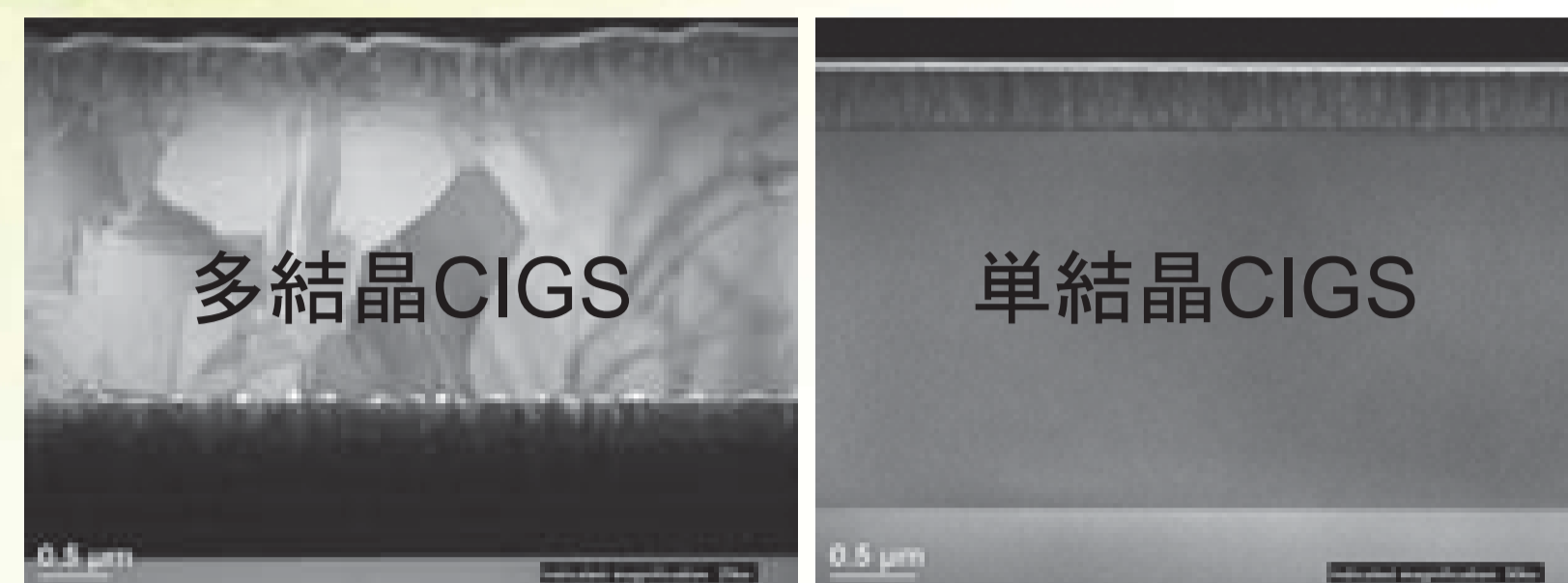
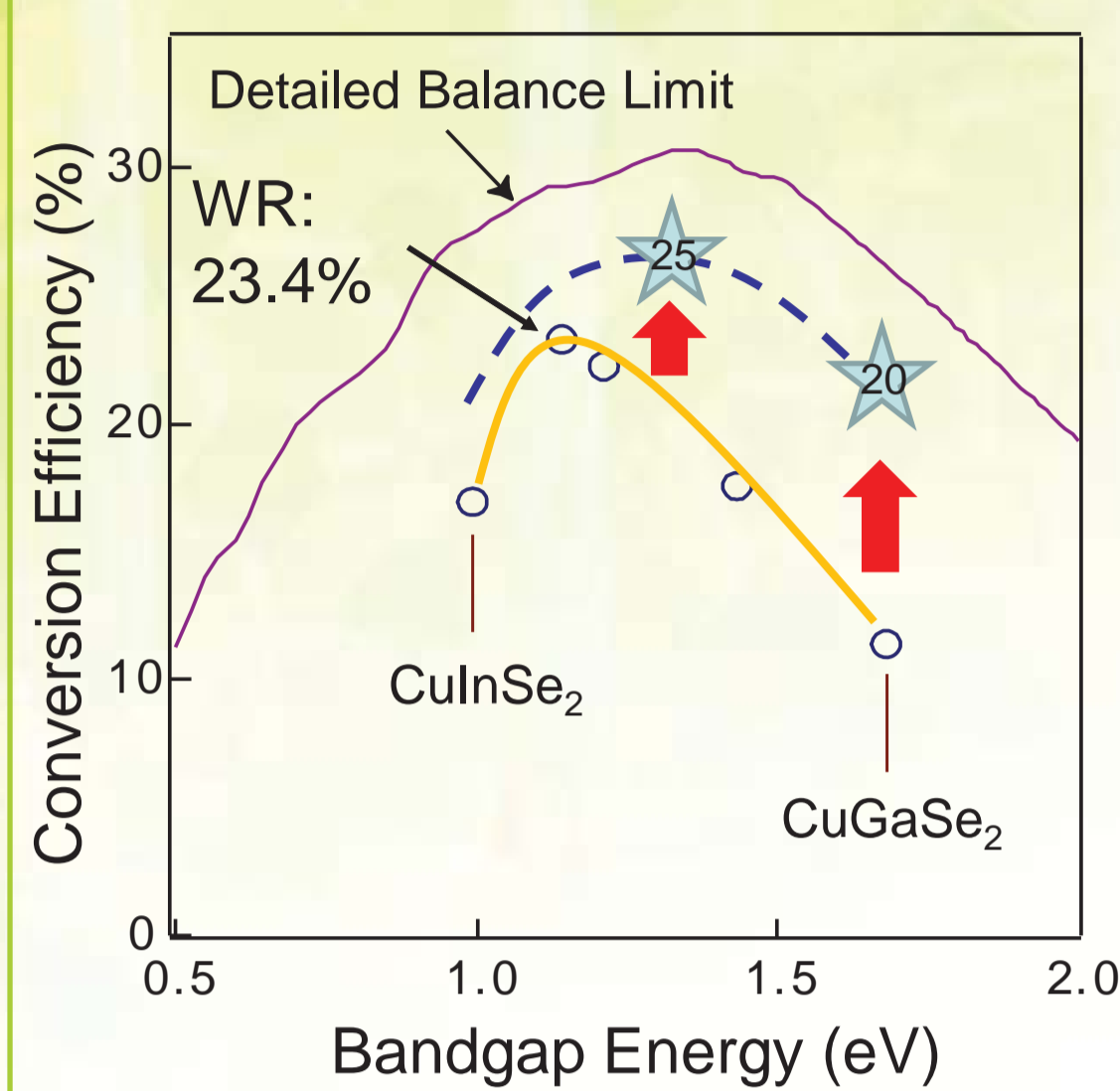
- 本研究成果の詳細は下記文献より参照可能です。
- S. Ishizuka and P. J. Fons, ACS Appl. Mater. Interfaces **12**, 25058 (2020).
- S. Ishizuka, N. Taguchi, J. Nishinaga, Y. Kamikawa, and H. Shibata, Sol. Energy **211**, 1092 (2020).
- S. Ishizuka, N. Taguchi, and P. J. Fons, J. Phys. Chem. C **123**, 17757 (2019).



# 単結晶Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>太陽電池のアルカリ金属添加効果

西永慈郎、石塚尚吾  
産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門

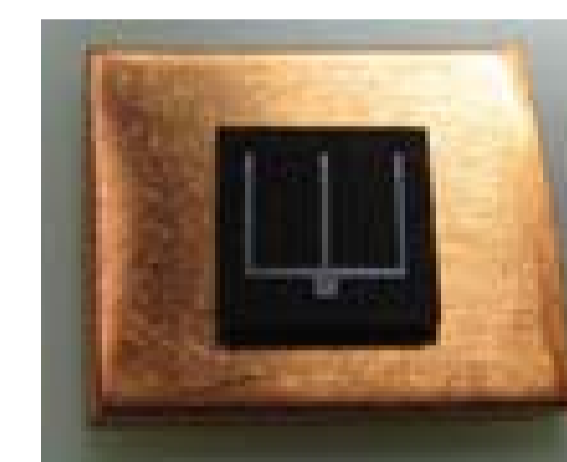
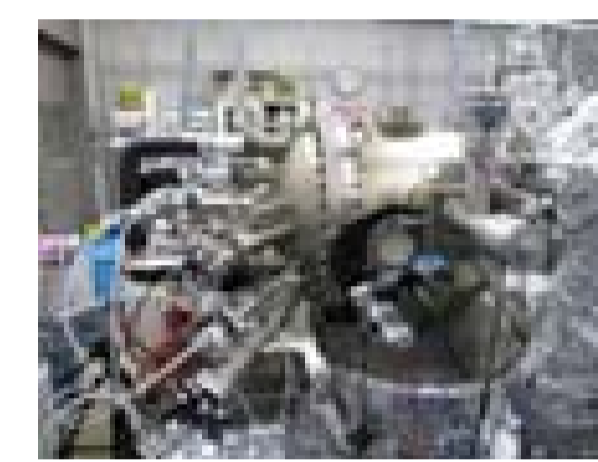
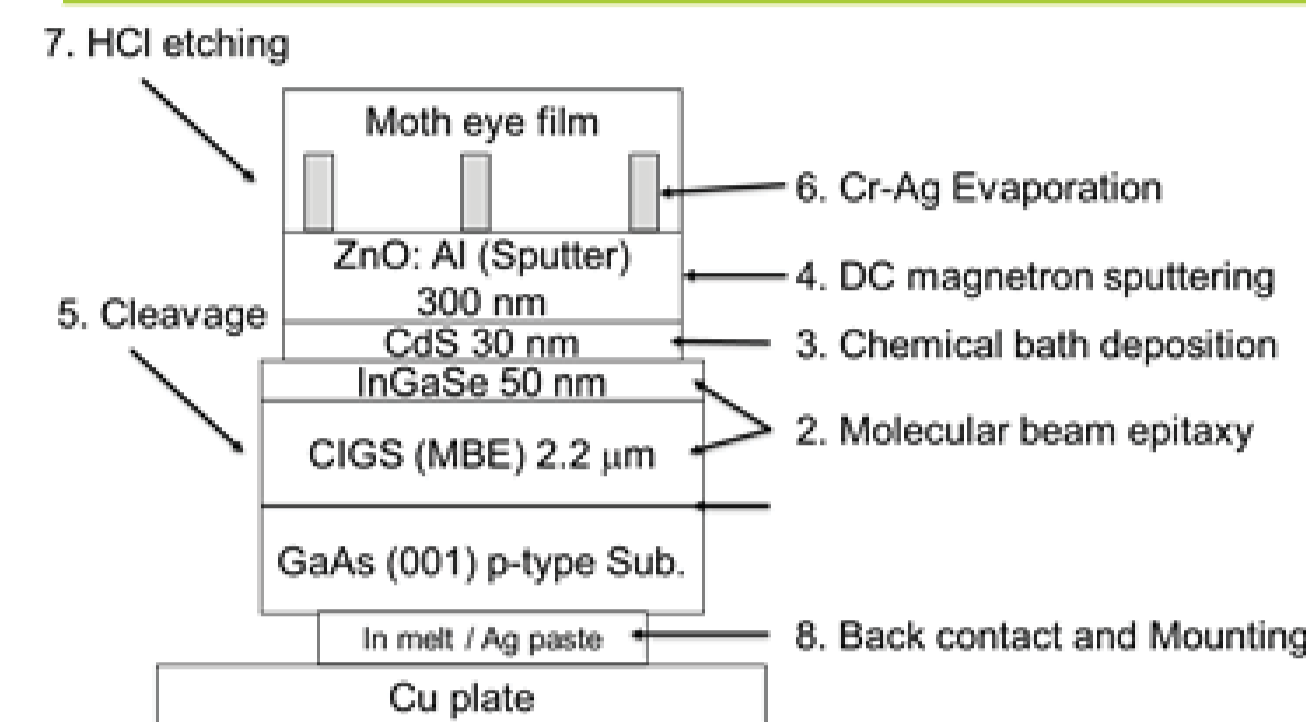
## 研究の目的



多結晶CIGS太陽電池と単結晶CIGS太陽電池を比較し、CIGS太陽電池の基礎的物性を理解する

アルカリ金属添加効果を検証

## 実験方法



### CIGS solar cells

- 分子線エピタキシー(MBE)法による成膜 (Co-evaporation: Cu, In, Ga, Se)
- Ga濃度: 0.3, 0.7、Cu濃度: 0.85 - 1.0
- CIGS成膜中にNaF添加 (NaF doping)
- CIGS成膜後にKF処理 (KF-PDT)
- CdS/AZO/Al grid (Area: 0.25 cm<sup>2</sup>)

### Measurements

- Ion gauge, STEM, TRPL
- J-V curves and C-V

## 結果 (Ion gauge, STEM)

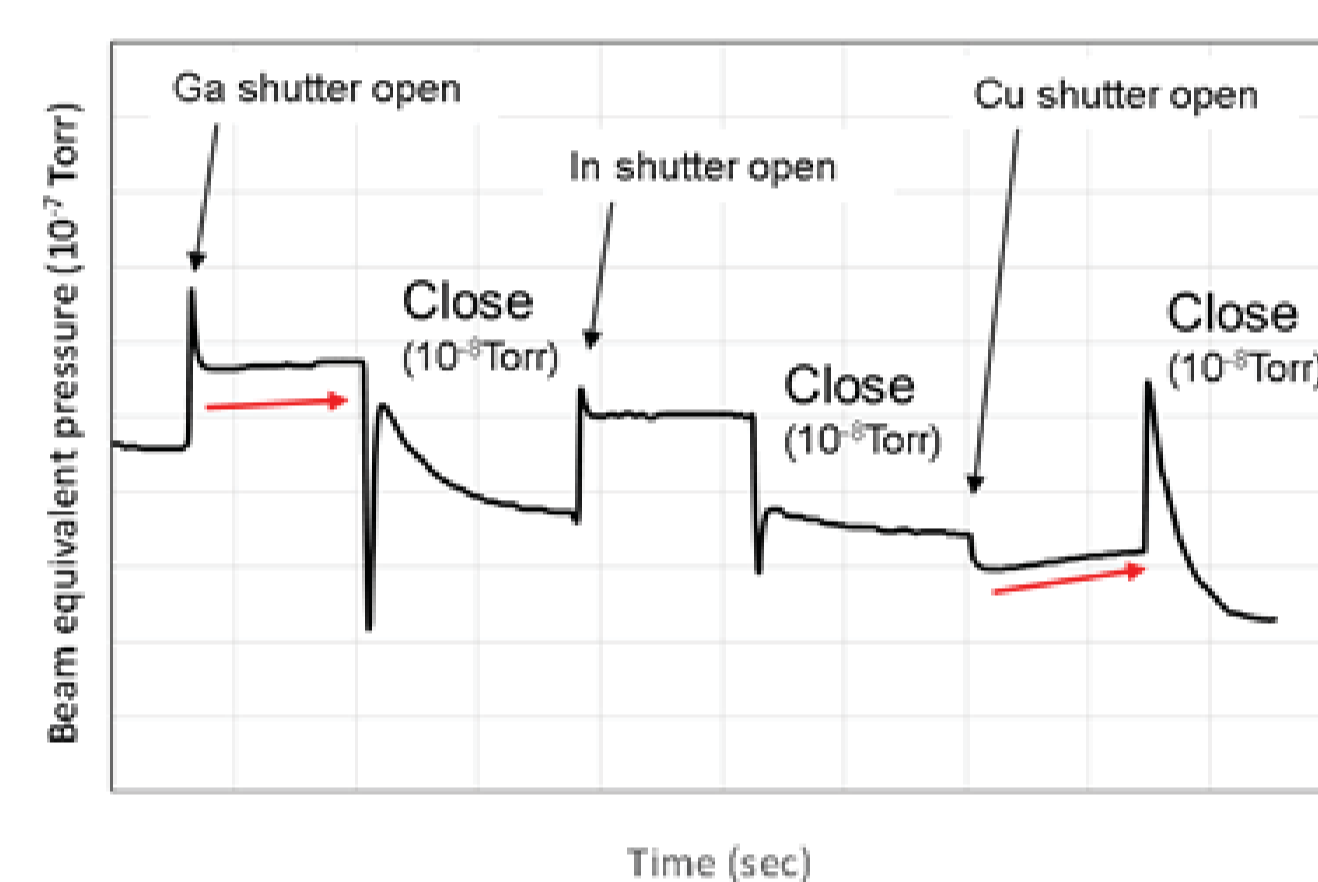
### MBE法による組成制御

$$\frac{J_i}{J_{Ga}} = \frac{P_i \eta_{Ga}}{P_{Ga} \eta_i} \sqrt{\frac{T_i M_{Ga}}{T_{Ga} M_i}}$$

$$\frac{\eta_i}{\eta_{N_2}} = \left( \frac{0.6 Z_i}{14} + 0.4 \right)$$

$P_i$ : Beam equivalent pressure  
 $M_i$ : Relative molecular mass  
 $T_i$ : Absolute cell temperature

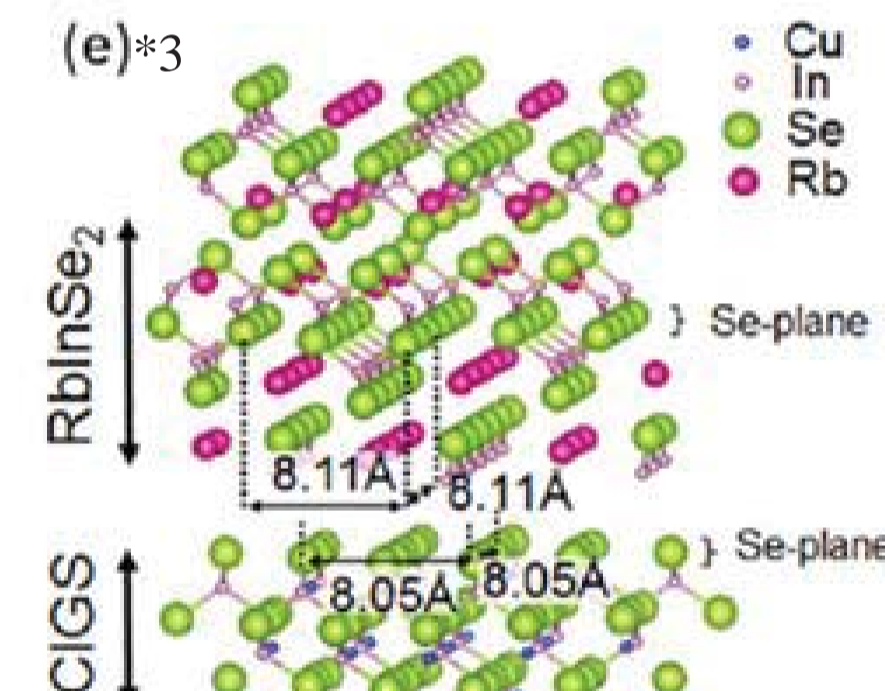
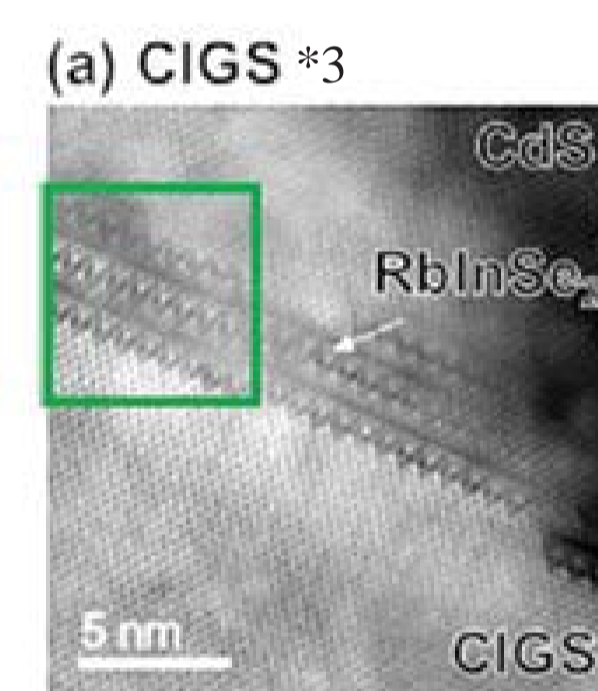
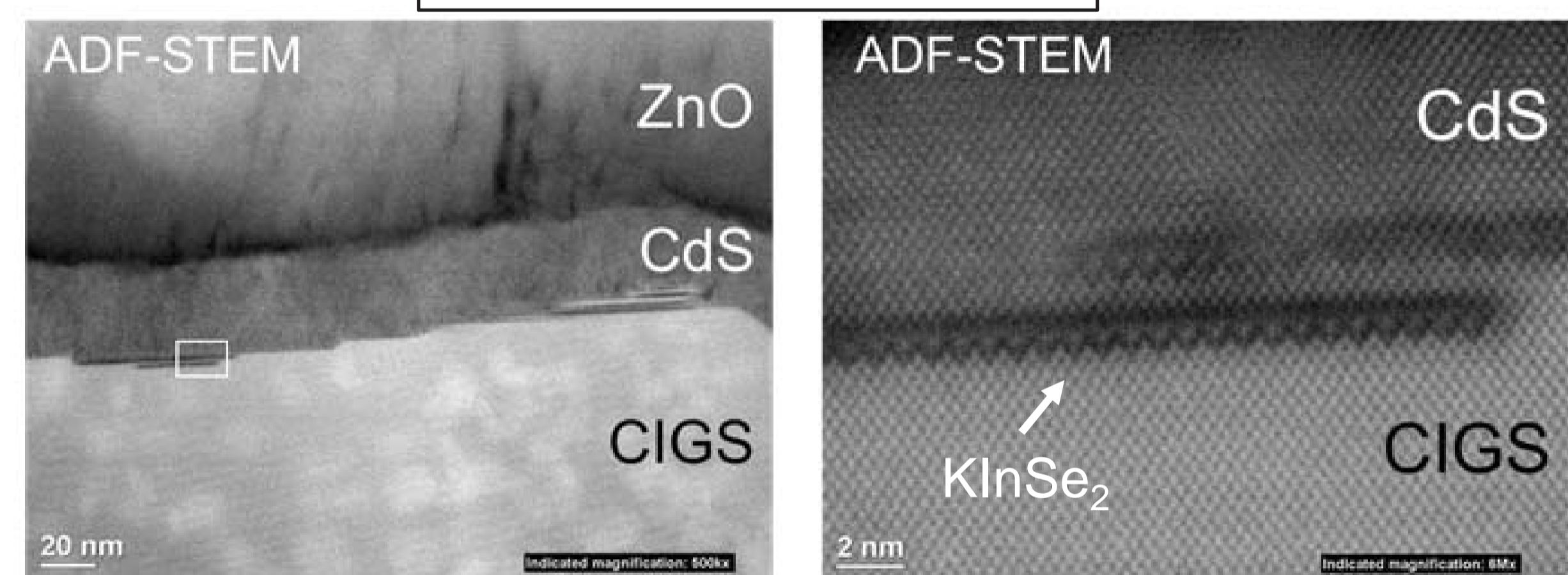
$\eta_i$ : ionization efficiency  
 $Z_i$ : number of electrons



$$BEP = BEP_{open} - BEP_{close} - BEP_{extra}$$

- $T_{Ga} = 902^\circ\text{C}$ ,  $P_{Ga} = 1.2 \times 10^{-7}$  Torr
  - $T_{In} = 778^\circ\text{C}$ ,  $P_{In} = 5.4 \times 10^{-7}$  Torr
  - $T_{Cu} = 1180^\circ\text{C}$ ,  $P_{Cu} = 1.33 \times 10^{-7}$  Torr
- $GGI_{flux} = 0.3$  }  $CGI = 0.95$

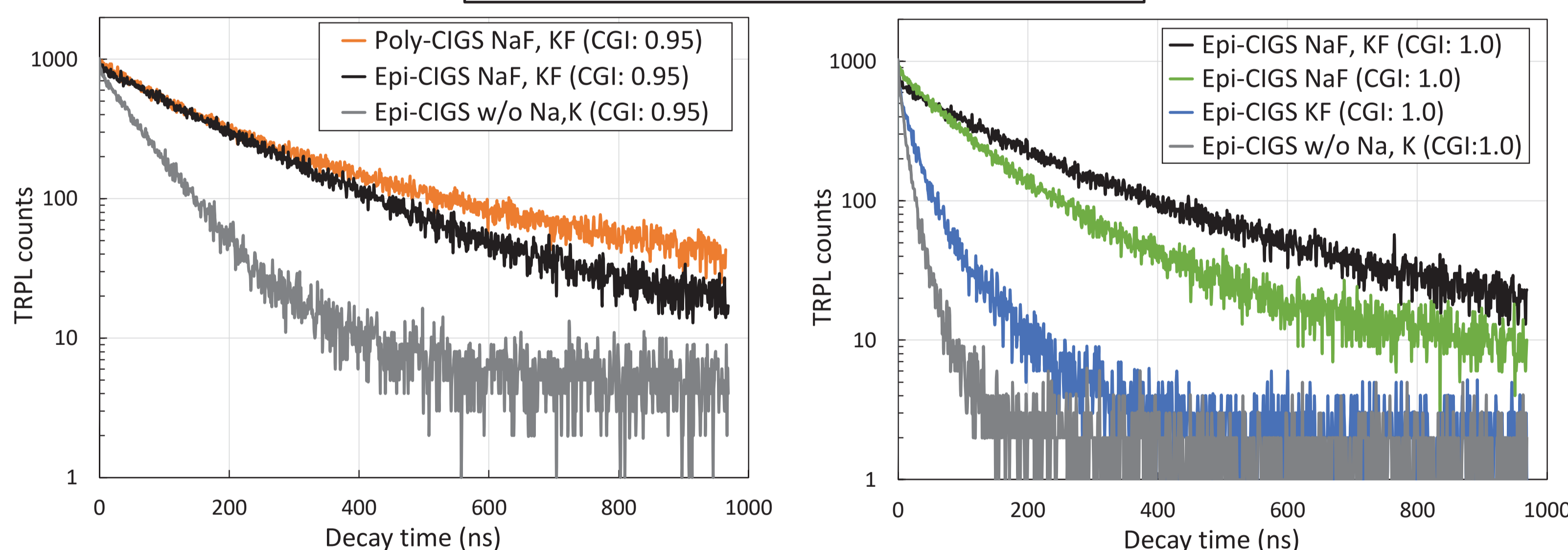
### CdS/CIGS heterointerface



- 単結晶CIGSにも、KF-PDTによる高効率化は有効
- CdS/CIGS界面にK由来の化合物が形成されている (KInSe<sub>2</sub>と考えられる)

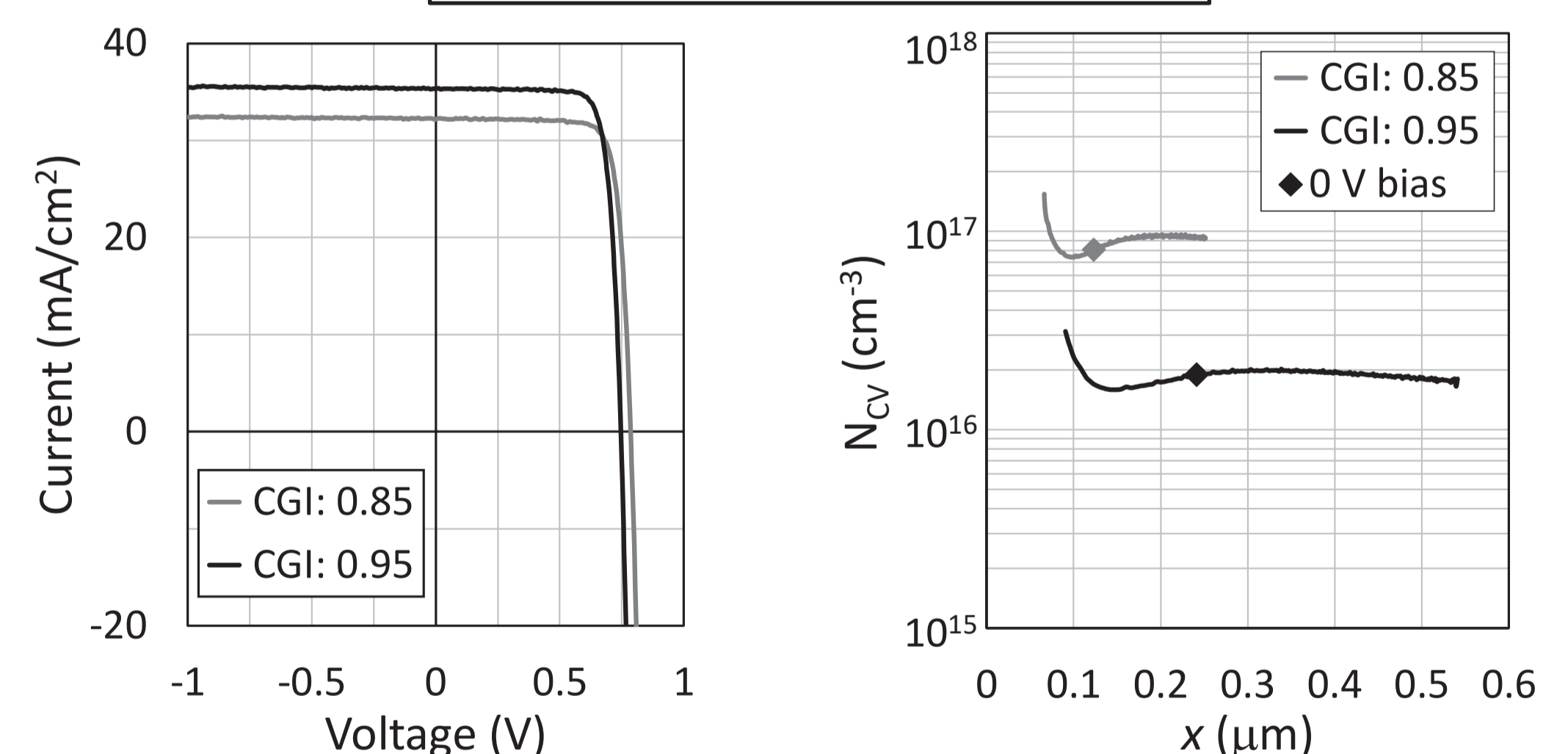
## 結果 (TRPL, J-V curves)

### Time-resolved Photoluminescence



- NaF doping, KF処理によって高効率Poly-CIGS(変換効率22%)と同程度の発光寿命
- Cuスティキオメトリ単結晶CIGSであっても、アルカリ金属フリーでは発光寿命が短い

### J-V curves and C-V curves



	Eff. (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$E_g$ (eV)	$V_{oc, deficit}$ (V)	$R_{sh, dark}$ ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$R_{ser, dark}$ ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$N_{cv, 0V}$ (cm <sup>-3</sup> )	$J_{0, dark}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$n_{dark}$
CGI: 0.85	20.6	0.785	32.3	0.813	1.23	0.445	$1 \times 10^5$	0.3	$1 \times 10^{17}$	$9 \times 10^{-10}$	1.3
CGI: 0.95	21.3	0.747	35.3	0.809	1.15	0.403	$8 \times 10^4$	0.2	$2 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{-8}$	1.3

## 結論

### ➤ CIGSエピタキシャル成長

- ・ MBE法により、粒界のないCIGS層の成膜に成功
- ・ KF処理によって、CdS/CIGS界面にKInSe<sub>2</sub>を確認

### ➤ 単結晶CIGSのアルカリ金属添加効果

- ・ NaF doping, KF処理による発光寿命の増大を確認
- ・ アルカリ金属添加によって変換効率21.3%を達成
- ・ 多結晶CIGSのアルカリ金属添加効果とほぼ同じ

## 参考文献

1. S. Niki, H. Shibata, P. J. Fons, A. Yamada, A. Obara, Y. Makita, T. Kurafuji, S. Chichibu, H. Nakanishi, Appl. Phys. Lett. **67**, 1289 (1995).
2. M. Fujita, A. Kawaharazuka, Y. Horikoshi, J. Cryst. Growth **378**, 154 (2013).
3. N. Taguchi, S. Tanaka, S. Ishizuka, Appl. Phys. Lett. **113**, 113903 (2018).
4. S. Siebentritt, N. Papathanasiou, J. Albert, and M. Ch. Lux-Steiner, Appl. Phys. Lett. **88**, 151919 (2006).
5. J. Nishinaga, T. Nagai, T. Sugaya, H. Shibata, S. Niki, Appl. Phys. Express **11**, 082302 (2018).
6. J. Nishinaga, T. Koida, S. Ishizuka, Y. Kamikawa, H. Takahashi, M. Iioka, H. Higuchi, Y. Ueno, H. Shibata, S. Niki, Appl. Phys. Express **10**, 092301 (2017).

# タンデム型太陽電池応用を目指した CIGS太陽電池の表面平坦化

上川由紀子、西永慈郎、柴田肇、石塚尚吾  
産業技術総合研究所

省エネルギー研究部門 化合物薄膜材料グループ  
(兼)ゼロエミッション国際共同研究センター 多接合太陽電池研究チーム

## 研究の目的

Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>(CIGS) は高い光吸収係数を有しており、数μmの薄膜で高い光電変換効率(>23%)が得られる。<sup>1</sup>また、フレキシブル基板上への応用も期待されている他、高放射線耐性<sup>2</sup>、長期安定性<sup>3</sup>などの優位性を有する。CIGSではGa/(In+Ga)組成比によりバンドギャップを1.0~1.7eVと広い範囲で調整可能である<sup>4</sup>。1.1eV以下の低Ga組成CIGSはタンデム型太陽電池向けのボトムセルとしても期待されている。一方、タンデム化に際して、CIGS太陽電池の表面凹凸が障害となる場合がある<sup>5-7</sup>。本研究では、長波長吸収型CIGS太陽電池の高い性能を維持しながら表面平坦性を向上することを目的とした。

## 実験

Br系水溶液※によるCIGS光吸収層の表面エッチング(Brエッチング)を行った。光吸収層膜厚は第一段階の初期にのみGaを照射する(右)変調型3段階法を用いて、単一傾斜のGa組成分布を形成した。<sup>5</sup>膜厚は3μmとした。

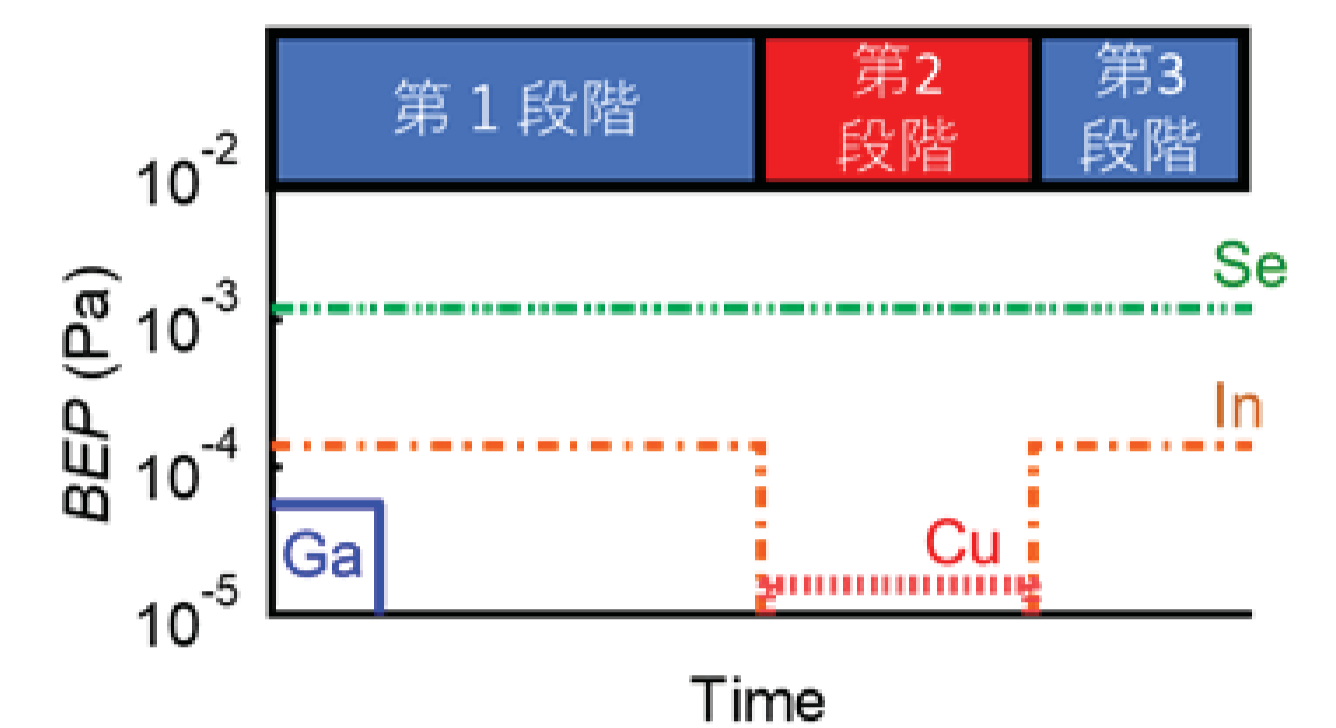
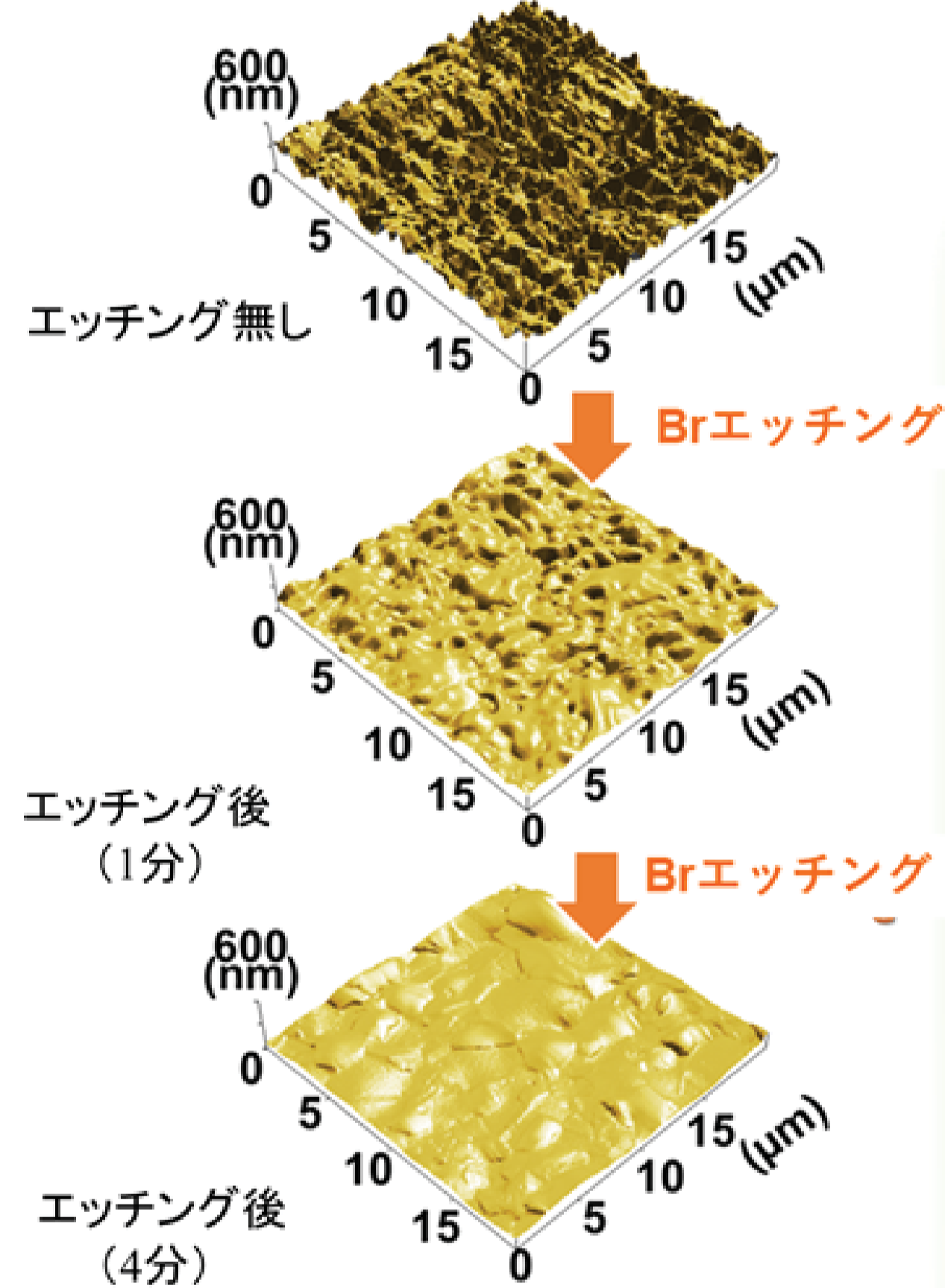
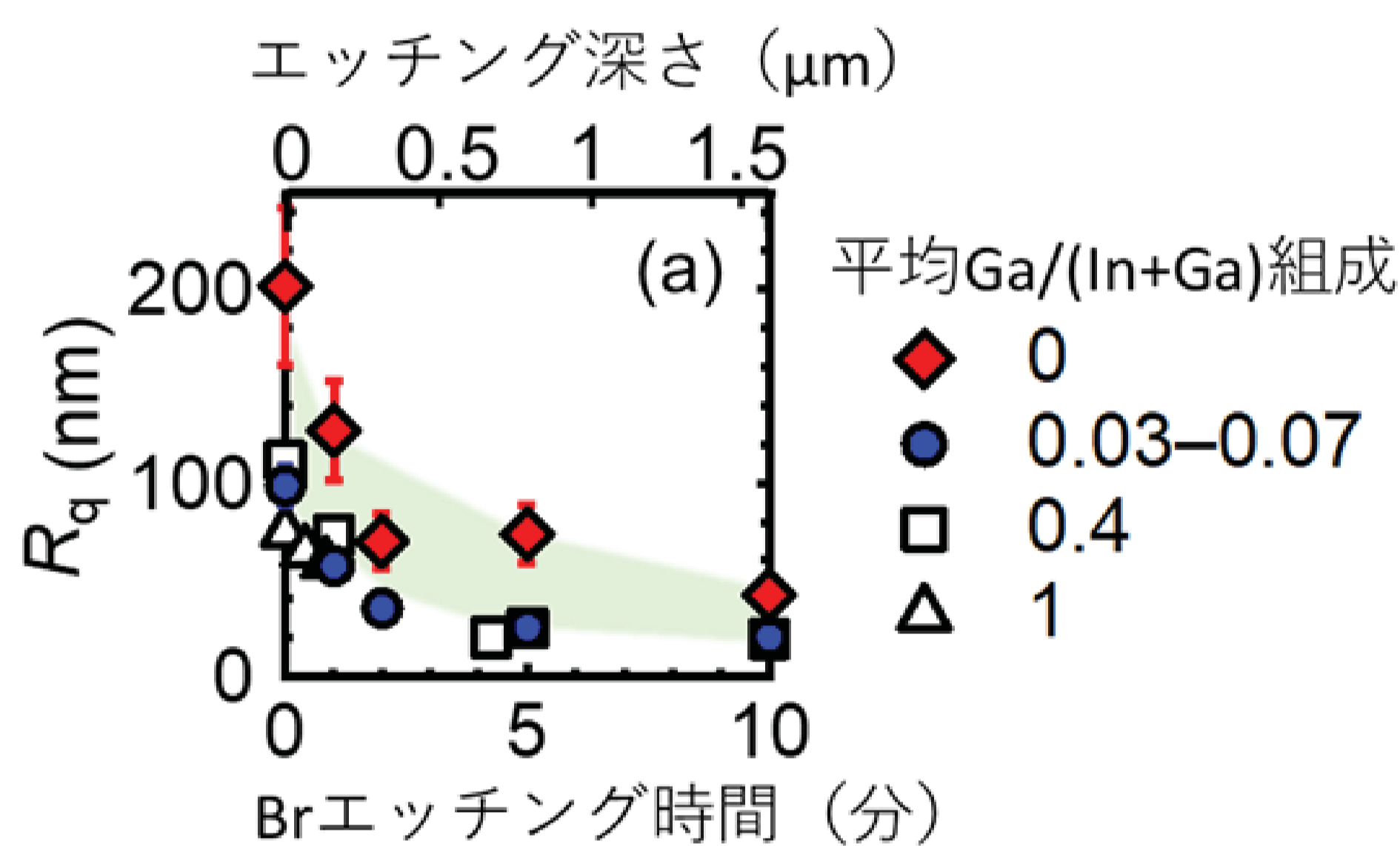


図: 単一傾斜のGa組成分布を有する光吸収層の成膜プロセス(変調型3段階法)<sup>5</sup>

※ HBrとH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>の水溶液

## 結果と考察



幅広いGa / III組成(0~1)においてBrエッチングによる光吸収層の表面平坦性の向上傾向が観察された。Brエッチング後のCIGS表面には0価のセレン(Se<sup>0</sup>金属セレン)が形成されるが<sup>8</sup>、このことにより、特に凹部でのエッチング速度が小さくなり<sup>8,9</sup>、エッチングが進行するとともに、表面平坦性が向上する<sup>7</sup>。

図:(上)原子間力顕微鏡(AFM)により評価した表面粗さ(Rq)のBrエッチング時間依存性  
(下)CIS:Ga光吸収層(平均Ga組成0.03)の表面AFM像<sup>7</sup>

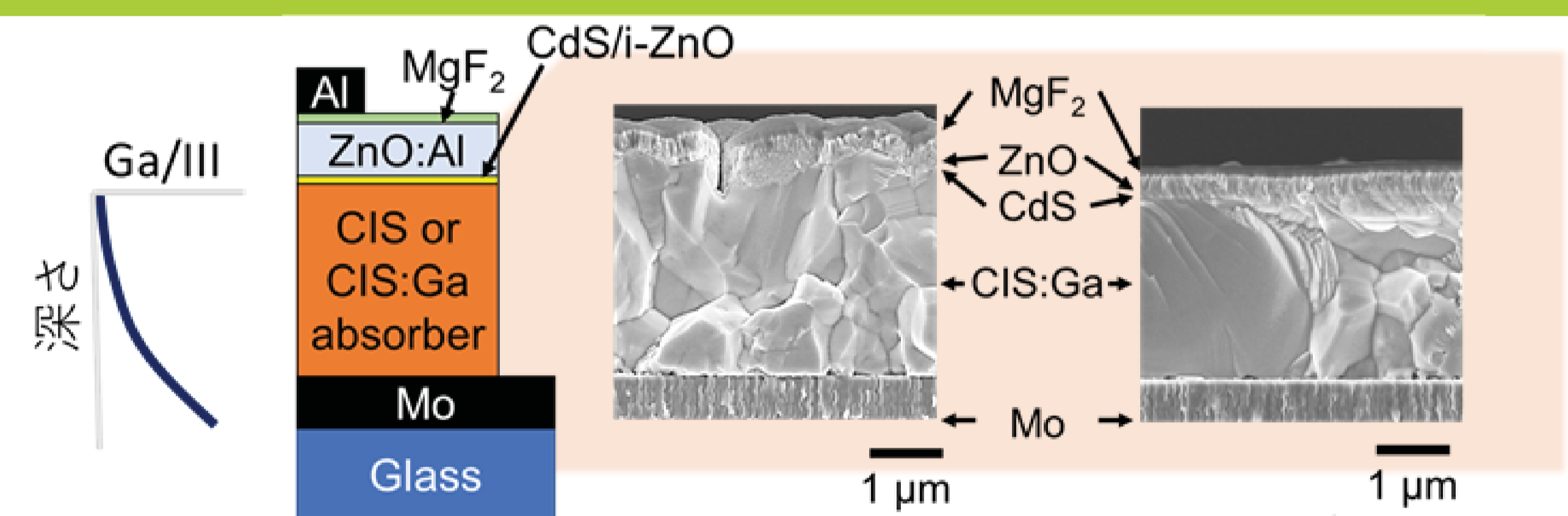


図:(左)デバイス概略図  
(右)断面SEM像<sup>7</sup>

- × Ga単一傾斜無し
- △ Ga単一傾斜不十分 (Ga/III平均値:0.03)
- Ga単一傾斜十分 (Ga/III平均値:0.1)

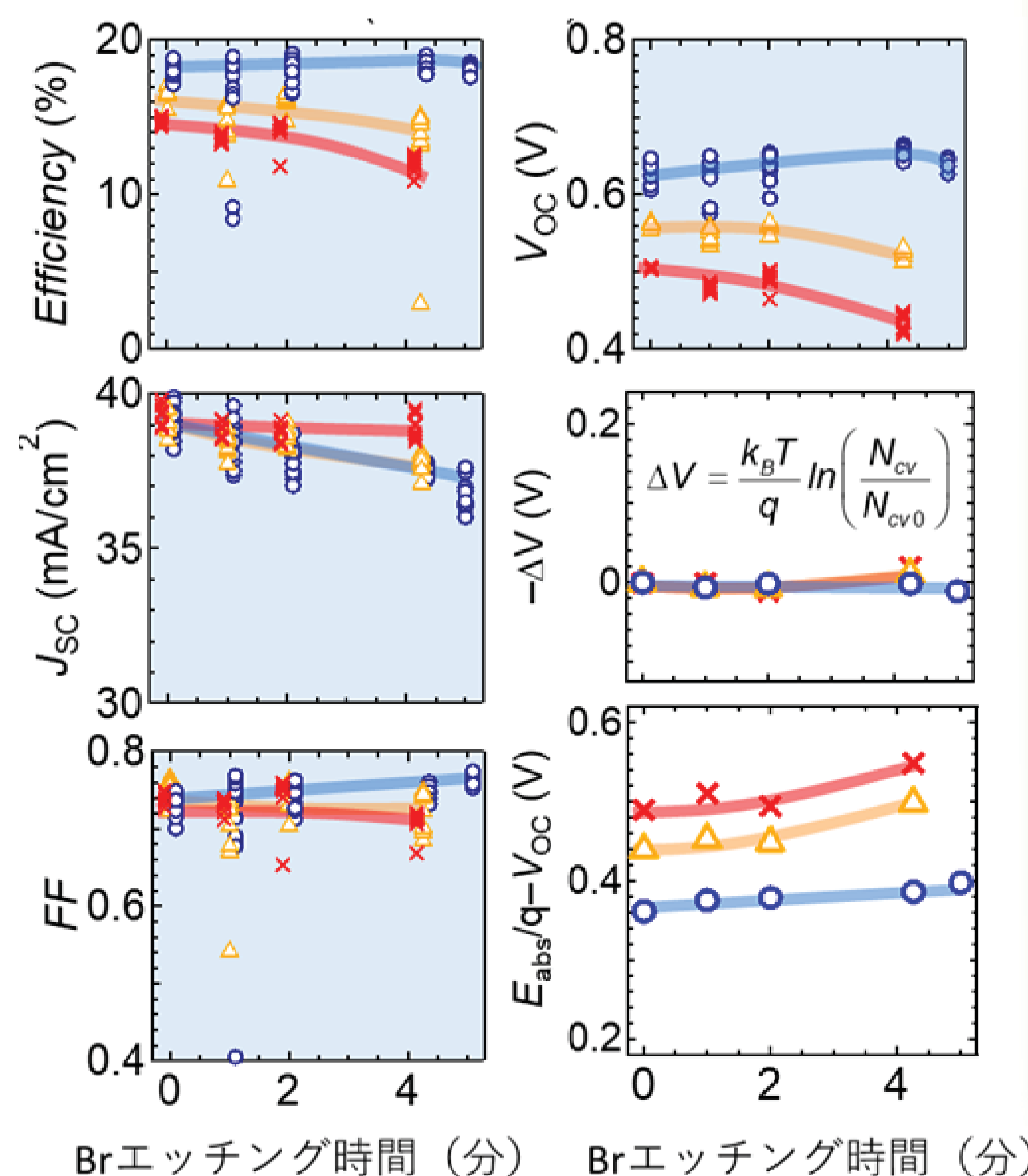


図:(上左)デバイス概略図  
(上右)Brエッチング前後の光吸収層の断面SEM像  
(下)太陽電池特性のBrエッチング時間依存性<sup>7</sup>

光吸収層表面をBrエッチングによって平坦化したデバイスの太陽電池特性を左図に示す。Ga単一傾斜が無いものおよび傾斜が不十分なものでは、Brエッチングにより光吸収層膜厚が3μmから約2μmに減少した際、特性の低下がみられた。裏面再結合損失が増加したためと考えられる<sup>10</sup>。一方、十分なGa傾斜構造を有する試料ではこの裏面再結合による特性低下を抑制できる。

## 結論

Br系エッチング処理により幅広い組成範囲でCIGS光吸収層の表面平坦化に有効であることが分かった。この手法を活用して、表面平坦性の高いCIGS太陽電池を作製可能となる。Ga傾斜構造を活用することで、エッチングによる特性低下を抑制できるため、長波長吸収型CIGS太陽電池の高い性能を維持しながら表面平坦性を向上することが可能となる。

## 参考文献

- [1] M. Nakamura *et al.*, IEEE J. Photovoltaics 2019, 9, 1863–1867.
- [2] S. Kawakita *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 2019, 41, L797.
- [3] J. Nishinaga *et al.*, Appl. Phys. Express, 2017, 10, 092301.
- [4] S. Han *et al.*, Appl. Phys. Lett. 2005, 87, No. 151904.
- [5] M. Jošt *et al.*, ACS Energy Lett. 2019, 4, 583–590.
- [6] K. Makita *et al.*, Proceedings of 29th EUPVSEC, 2014.
- [7] Y. Kamikawa *et al.*, ACS Appl. Mater. Interfaces 2020, 12, 45485–45492.
- [8] B. Canava *et al.*, J. Phys. Chem. Solids 2003, 64, 1791–1796.
- [9] M. Bouttemy *et al.*, Thin Solid Films 2011, 519, 7207–7211.
- [10] Y. Kamikawa *et al.*, IEEE PVSC: Chicago, 2019.

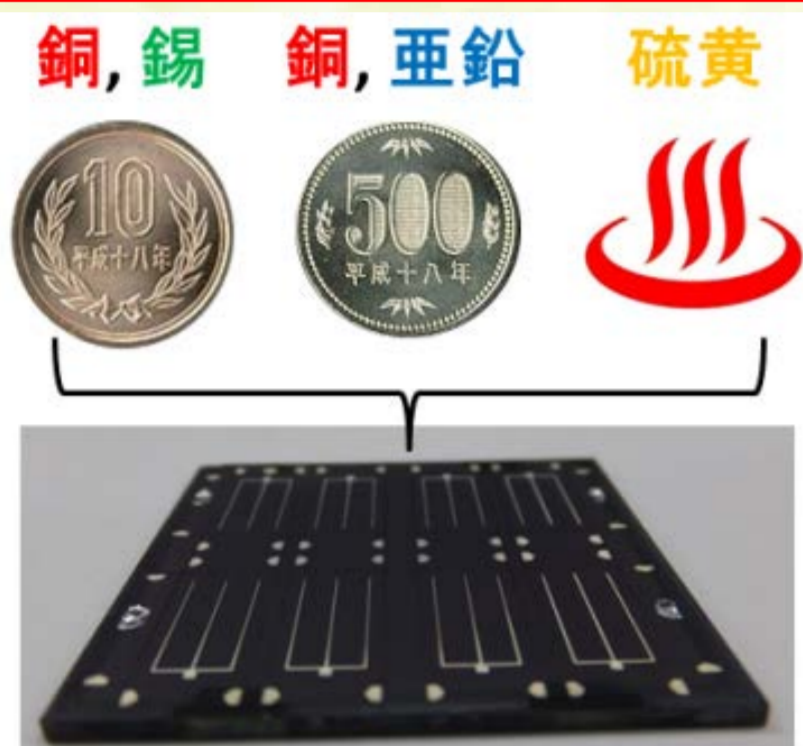
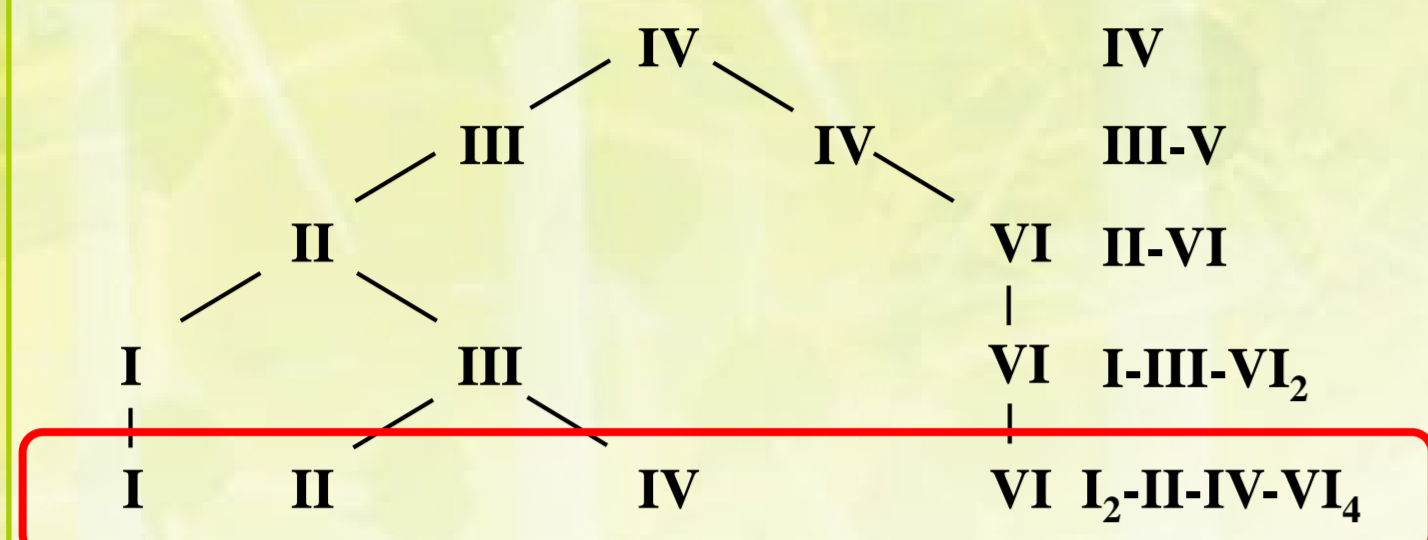
【謝辞】 本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援により実施された。

# 多様な化合物半導体を利用した新規薄膜太陽電池とその評価

反保衆志、永井武彦

産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門

## 研究の背景および目的



同時蒸着法により作製

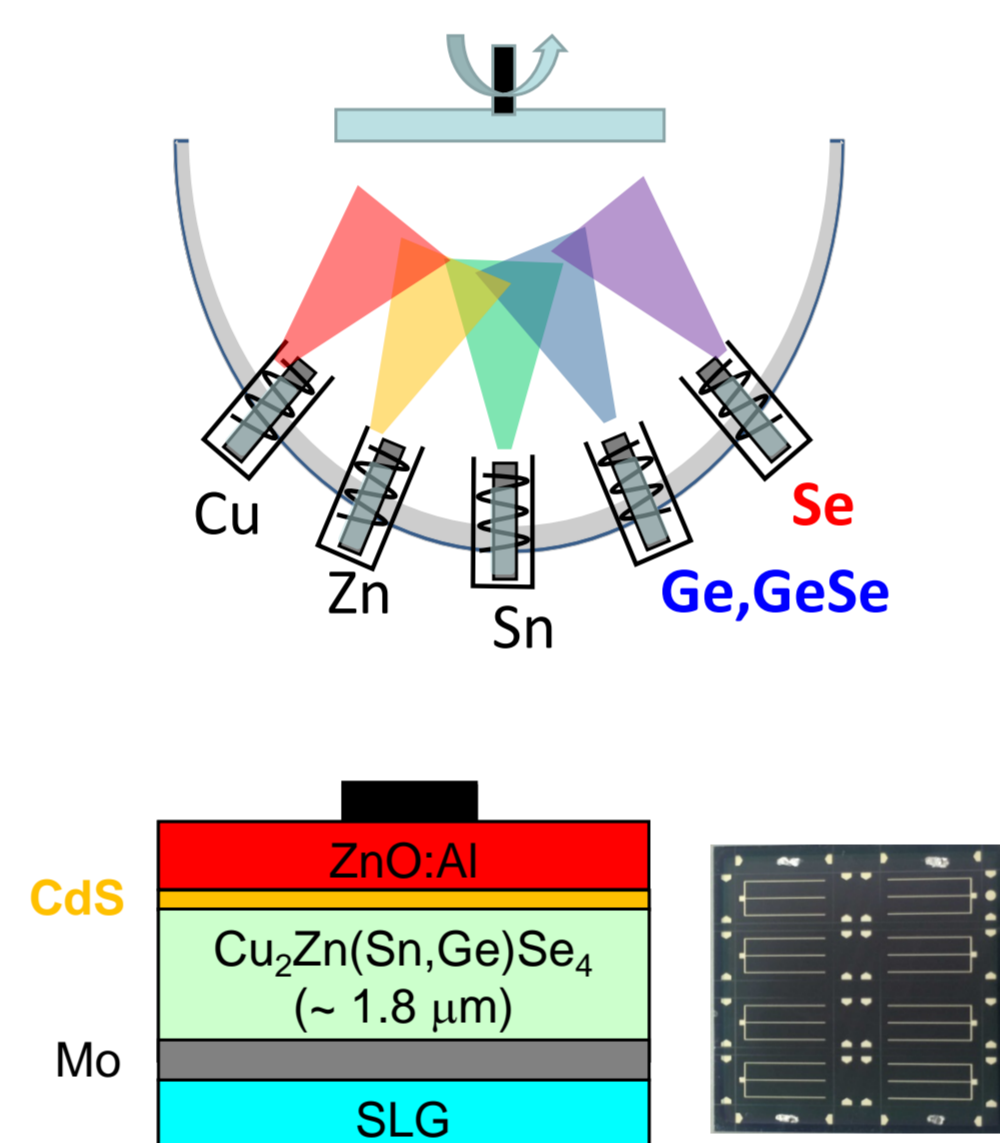
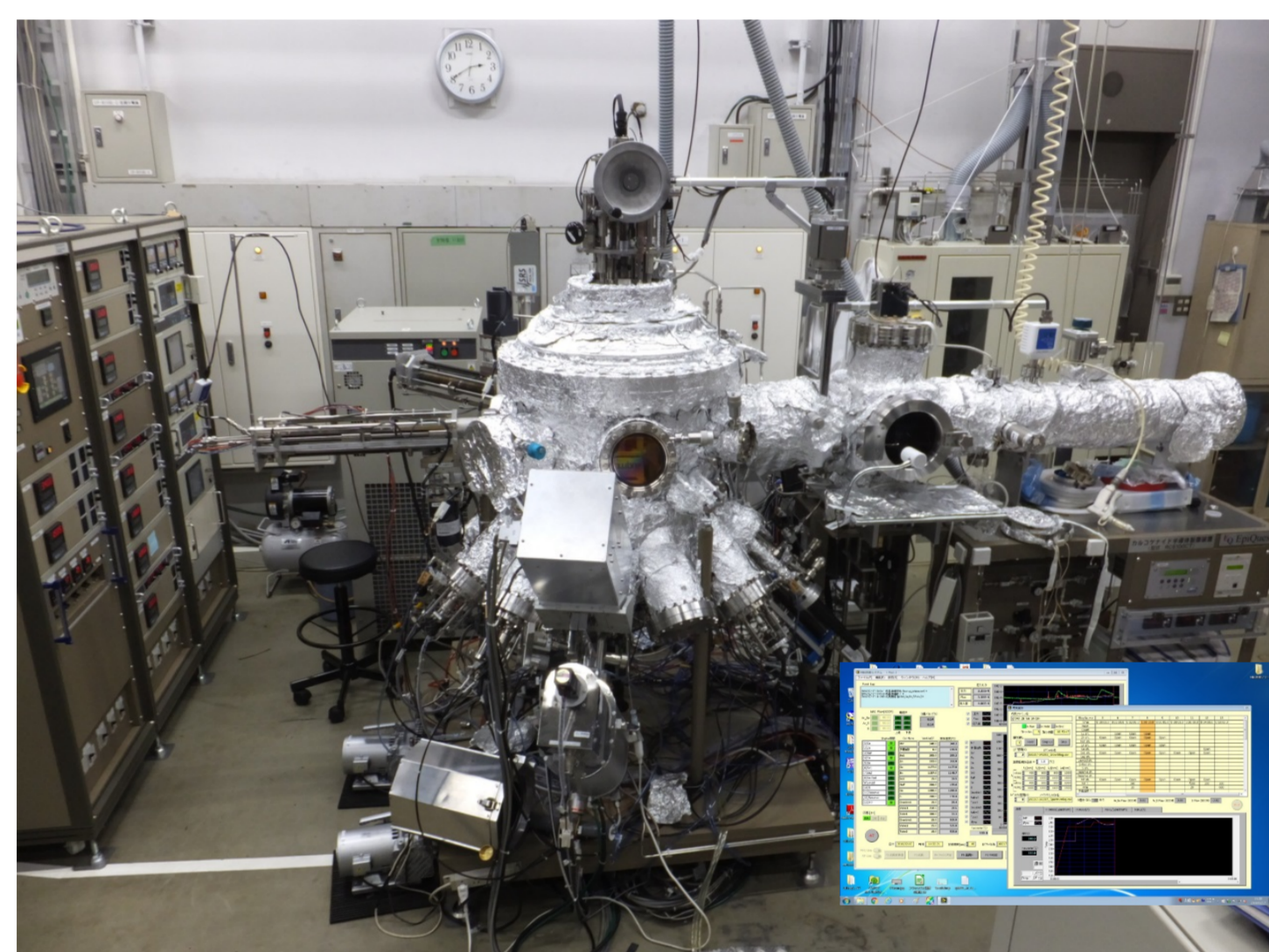
**社会的背景:** 2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会を実現し、ストックベースのCO<sub>2</sub>をも削減する「ビヨンド・ゼロ」を達成するためには、再生可能エネルギーの大量導入が不可欠であり、太陽電池はその主要電源として期待されている。このような太陽電池の大量導入時代においては、長期信頼性に優れ、高効率で安価で、かつ、低環境負荷の条件も望まれる。

**研究目的:** 既存の材料系においては、太陽電池材料として安価、長期信頼性、低環境負荷を満たすものが無い。我々の研究では、これら条件を満たす太陽電池材料として、**多元系からなる多様な化合物半導体を開発し、従来に実現できなかった機能性を有するテラワット太陽電池時代に不可欠となる半導体薄膜・太陽電池の開発を目的**としている。

**発表内容:** 本発表では、その一例としてケステライト結晶構造を有するCu<sub>2</sub>Zn(Sn<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>)Se<sub>4</sub>を光吸収層とした太陽電池の開発状況について報告する。この材料の課題は、開放電圧が他の薄膜太陽電池と比較し低く、その主要因が未知な点に有る。本発表では、CZTGSeプロセス技術の改善と表面・界面の電子状態評価を実施し、課題解明に迫る研究結果を得たので報告する。

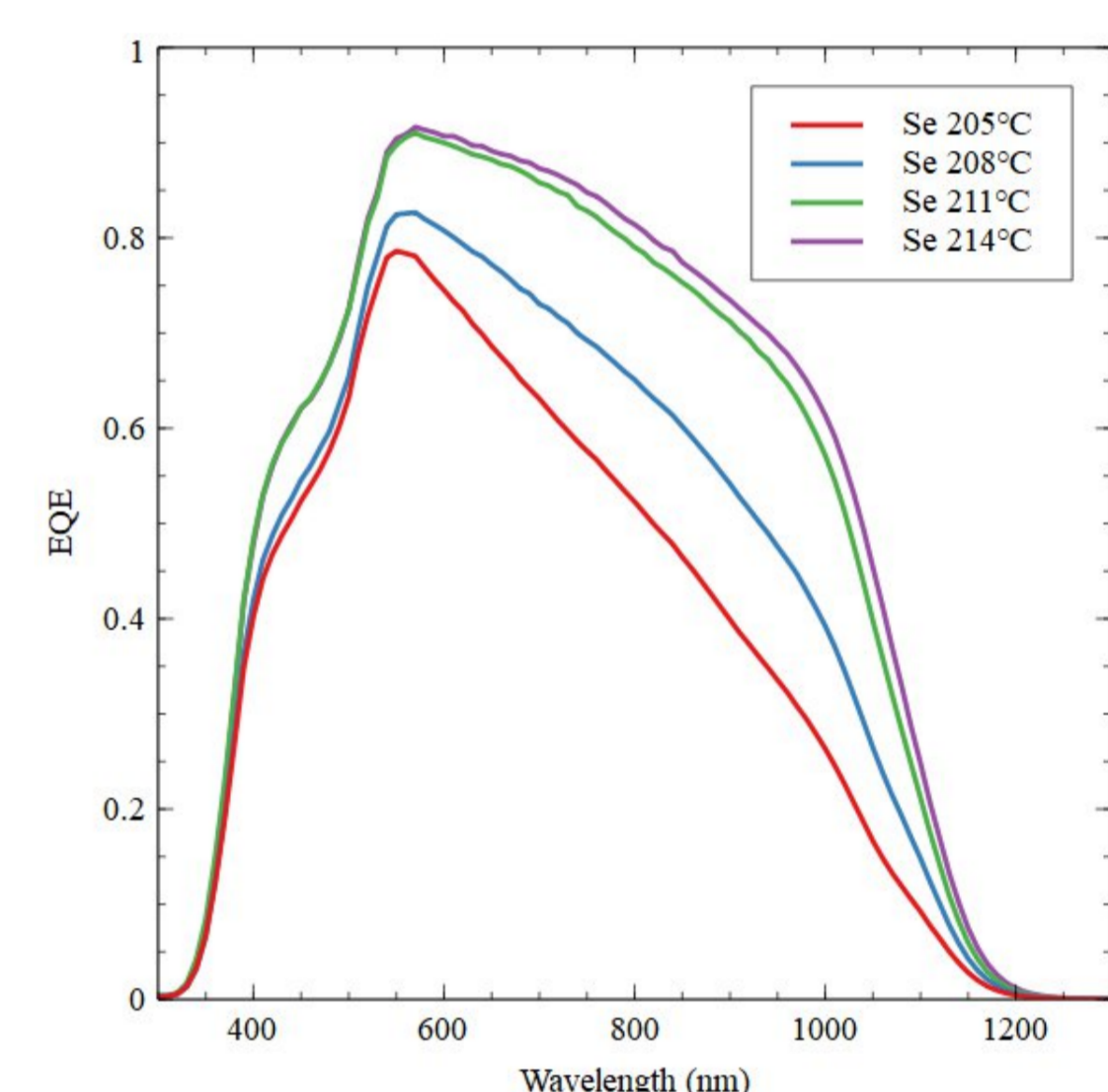
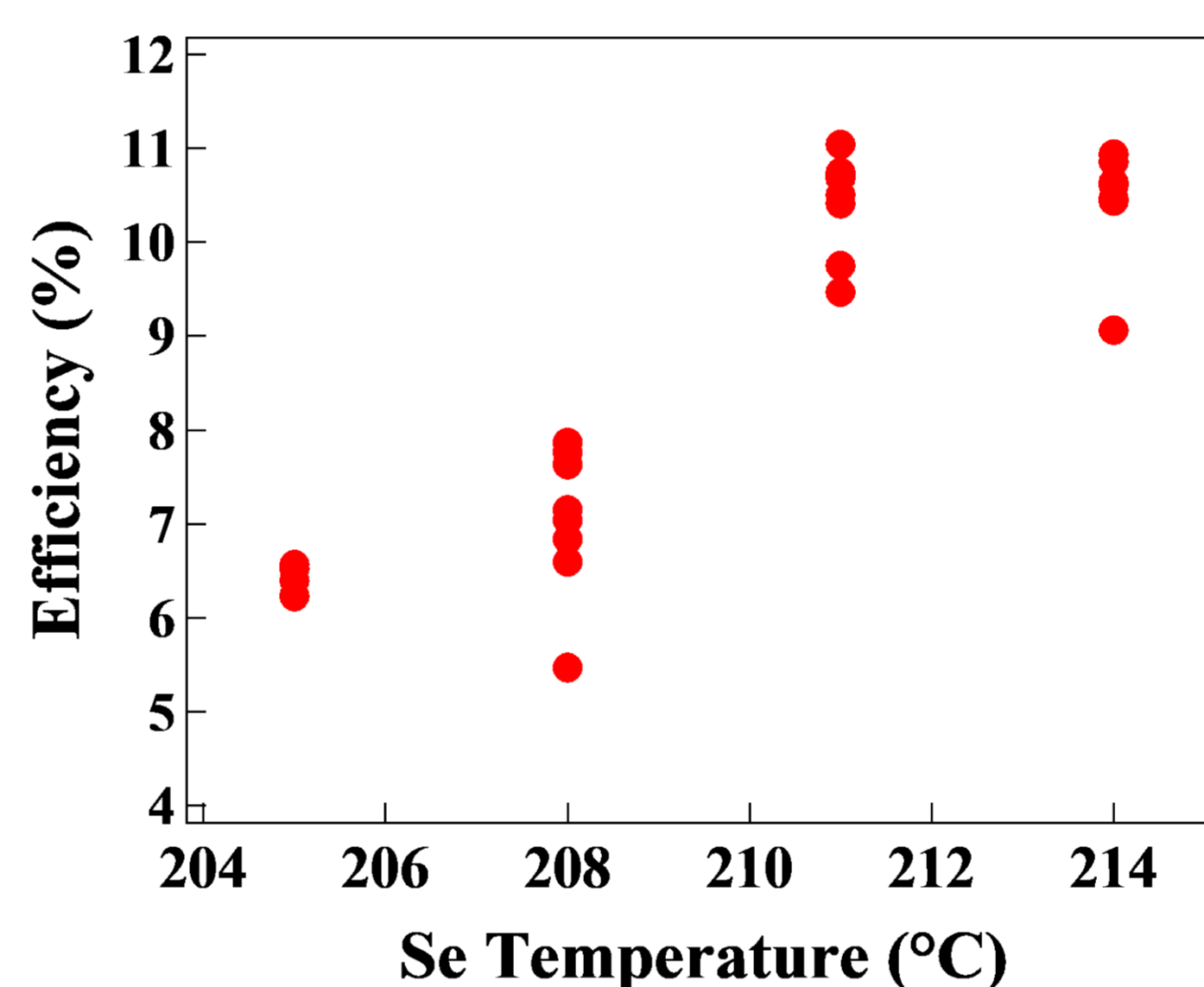
## 結果1 (カルコゲナイド薄膜成長技術と太陽電池)

### 2台の硫化物・セレン化合物専用 MBEによる材料探索



豊富な資源を利用したTW-PV時代に適した太陽電池の研究開発

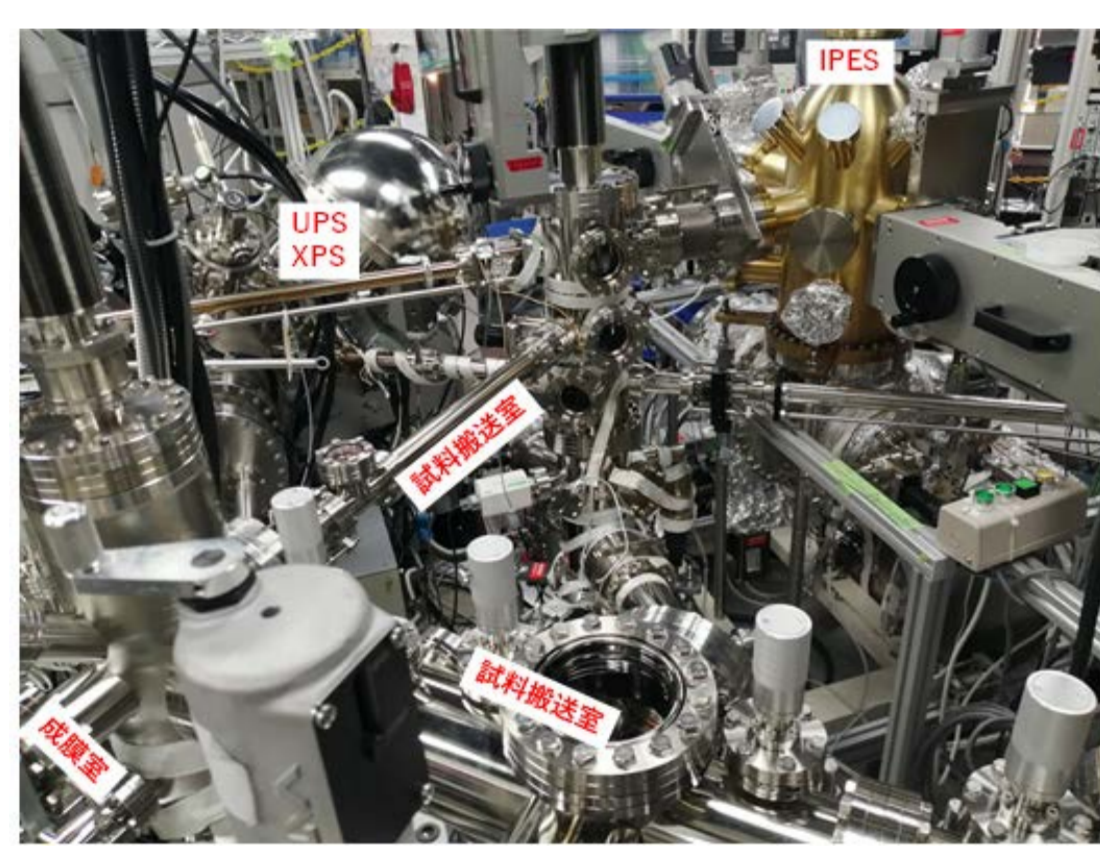
### Geを含む混晶系によるCZTS系太陽電池の高効率化



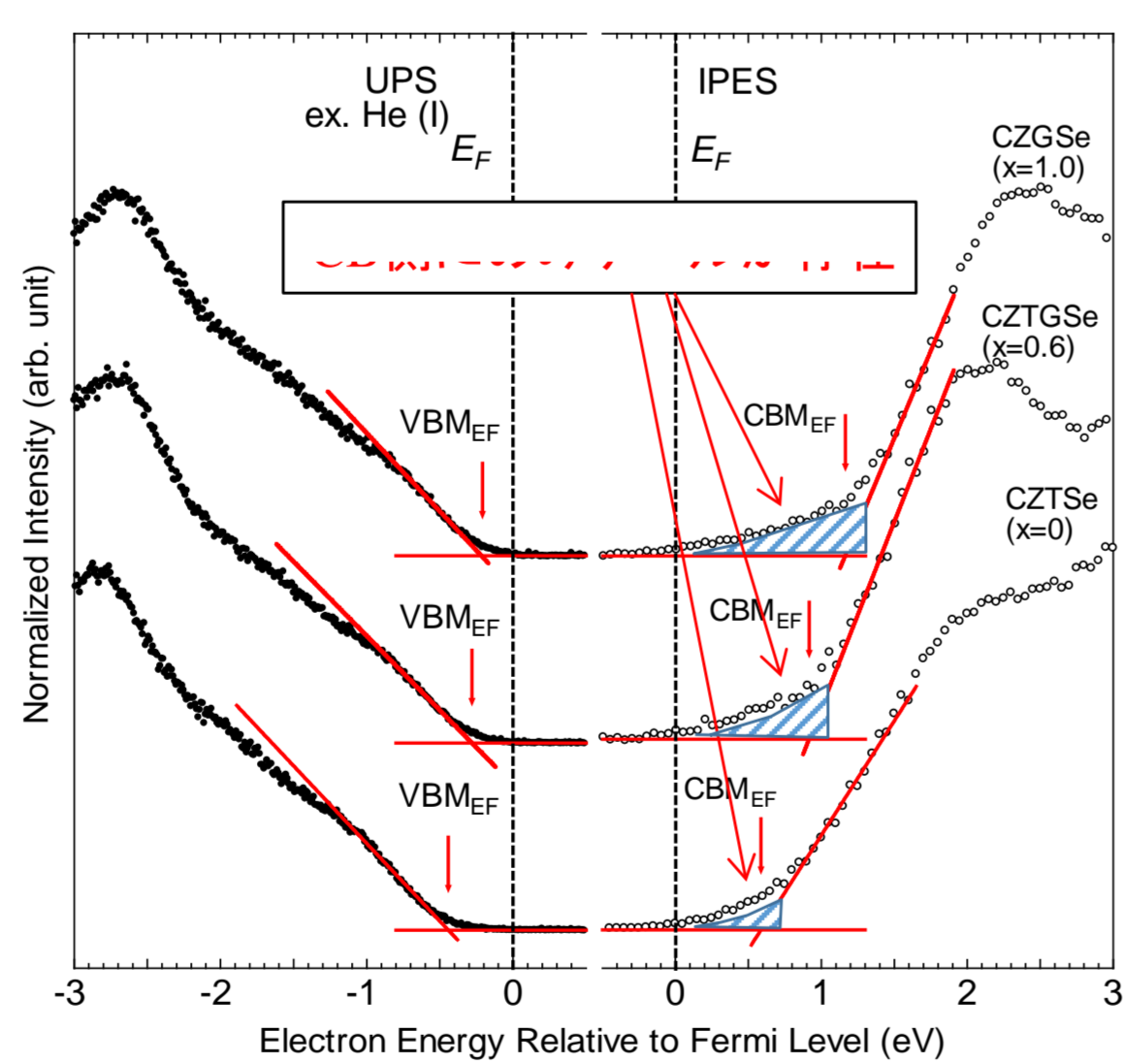
製膜時のSe供給が太陽電池特性に大きな影響

拡散長の増大や表面再結合の抑制効果

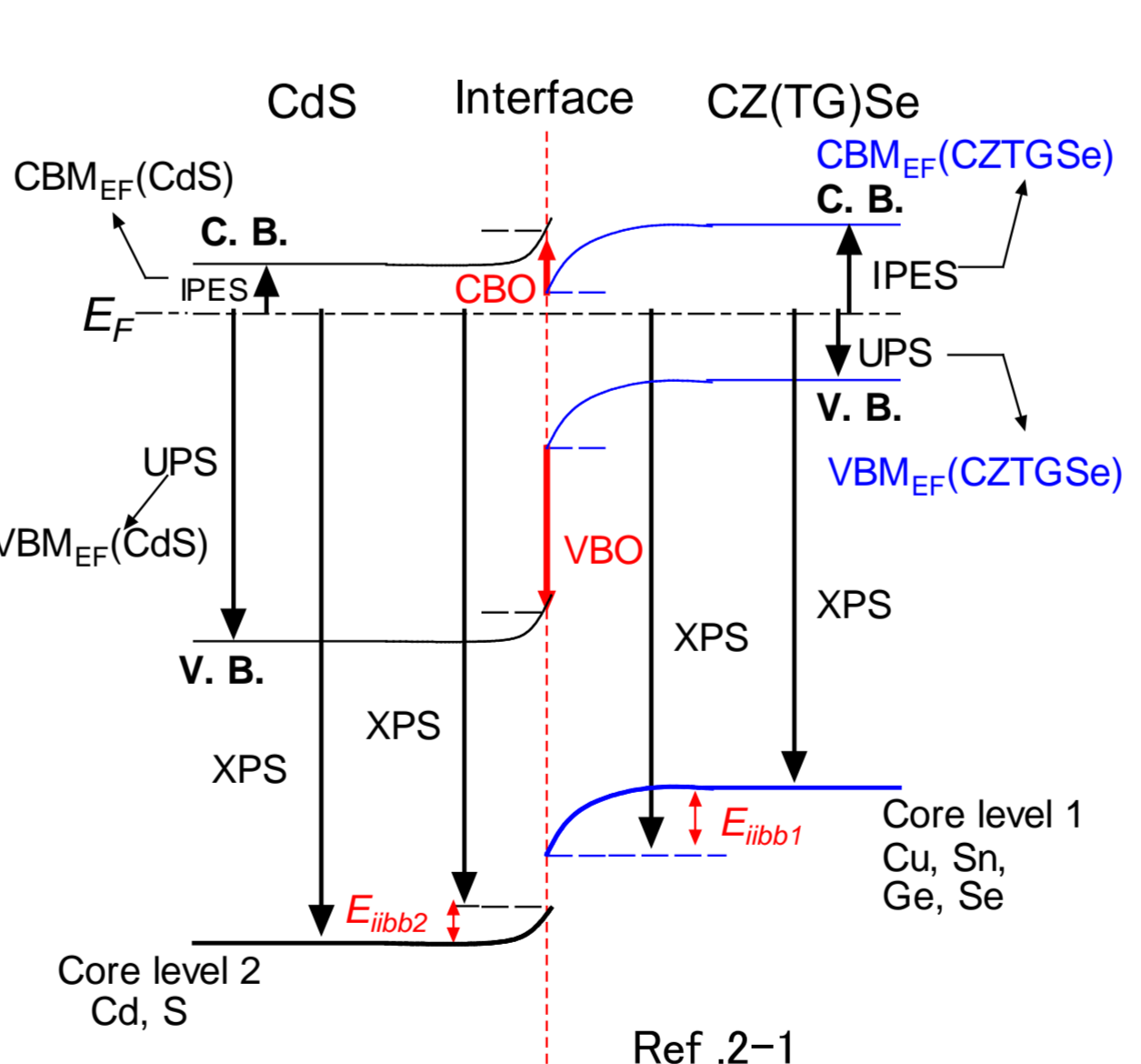
## 結果2 (カルコゲナイド薄膜表面・界面の電子状態評価)



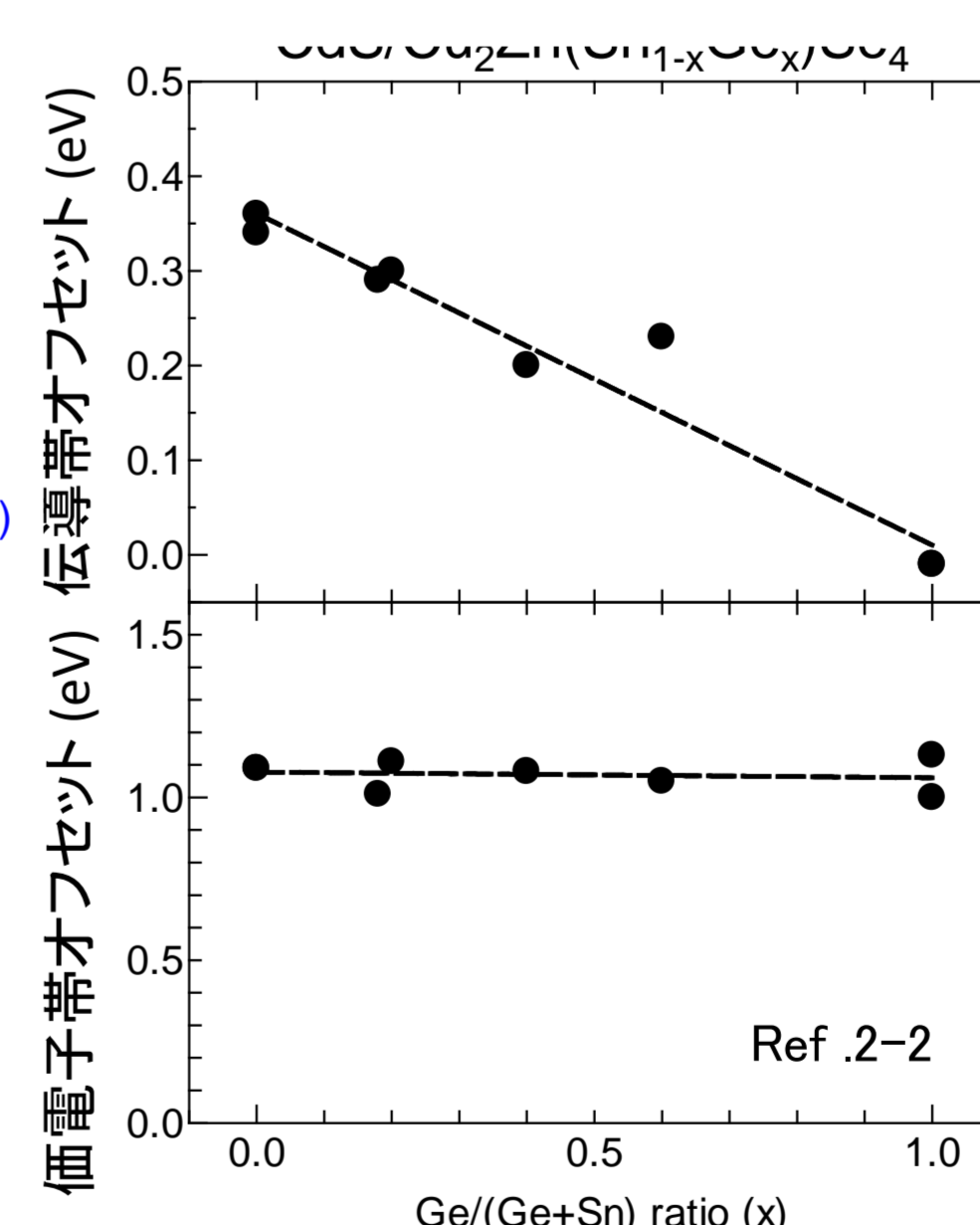
### 正・逆光電子分光法を用いた表面電子状態測定結果



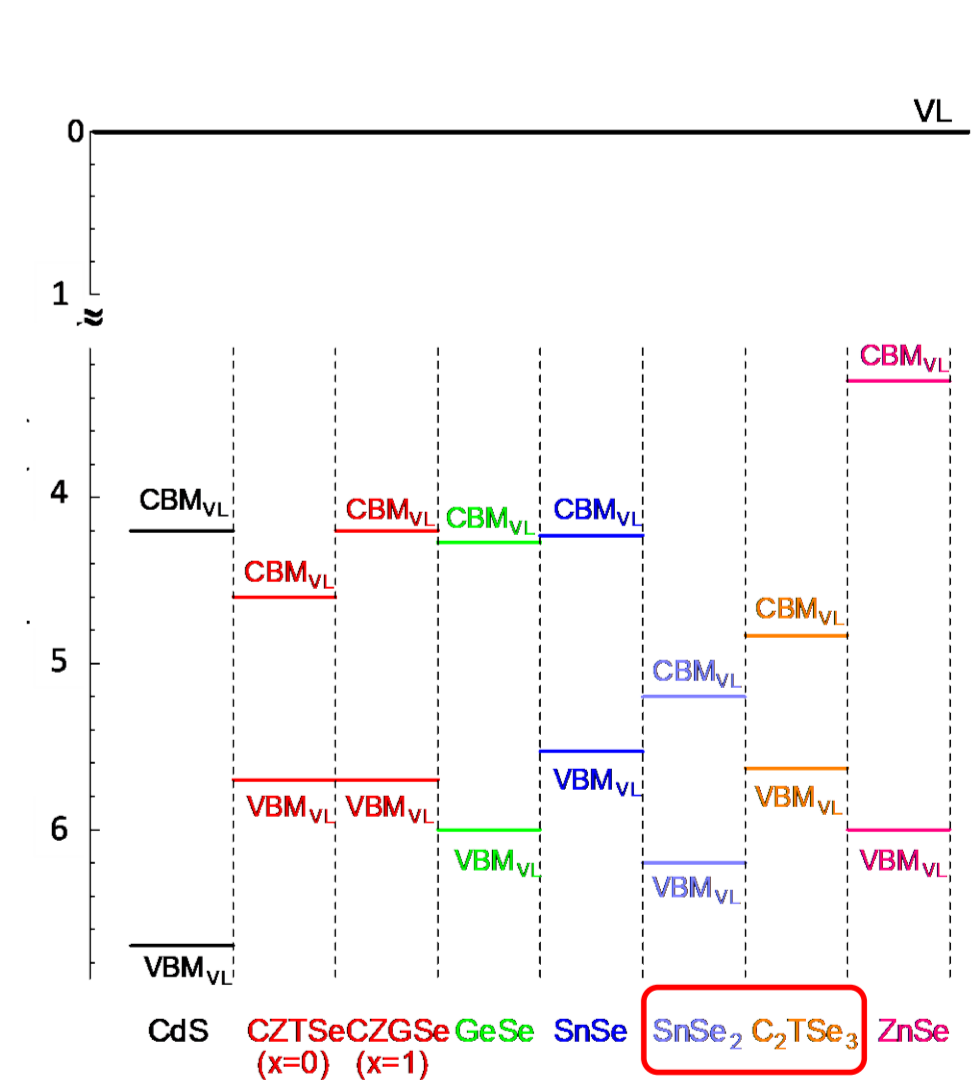
### CBO, VBO評価手法の概念図



### CBO, VBOの結果



### 考えられる表面異相の候補



## 将来展望

### 本発表のまとめ

- 製膜プロセスの改良と表面・界面の電子状態評価による太陽電池性能向上に関する知見の収集とフィードバックにより、高効率化への方向性が明らかになってきた。

### 今後の展開

- テラワット級の太陽電池導入時代に向けた太陽電池材料として利用可能な、天然埋蔵量豊富で、長期信頼性、低環境負荷、安価といった従来に無い新規機能性を有する多様な化合物半導体薄膜の探求と太陽電池応用を推進する。

## 参考文献

- [1-1] H. Tampo *et al.*, J. Appl. Phys, **122** (2017) 023106.
- [1-2] H. Tampo *et al.*, ACS Appl. Mater. & Interfaces, **11** (2019) 13319.
- [2-1] T. Nagai *et al.*, ACS Appl. Mater. & Interfaces, **11** (2019) 4637.
- [2-2] T. Nagai *et al.*, Phys. Status. Solidi-RRL., **14** (2020) 1900708.

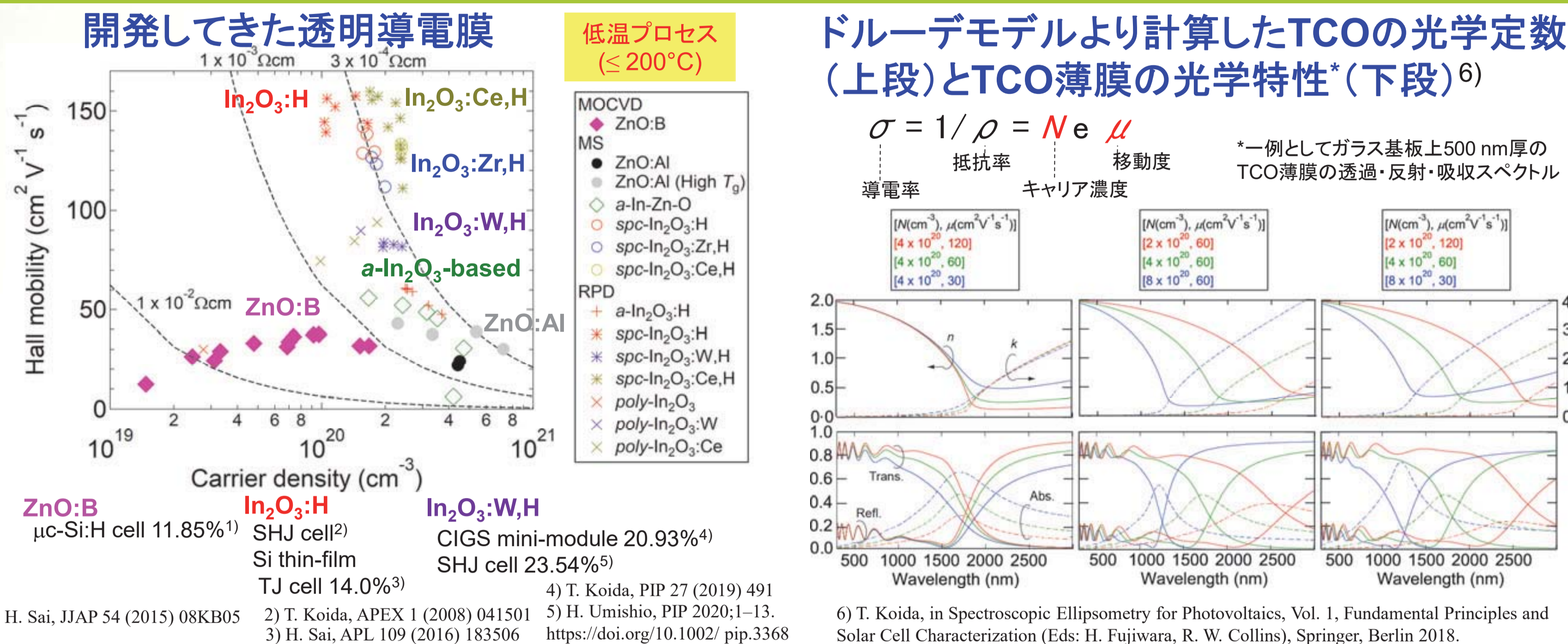
# 広帯域透明電極の太陽電池応用 — 他機関との連携 —

鯉田 崇

産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門

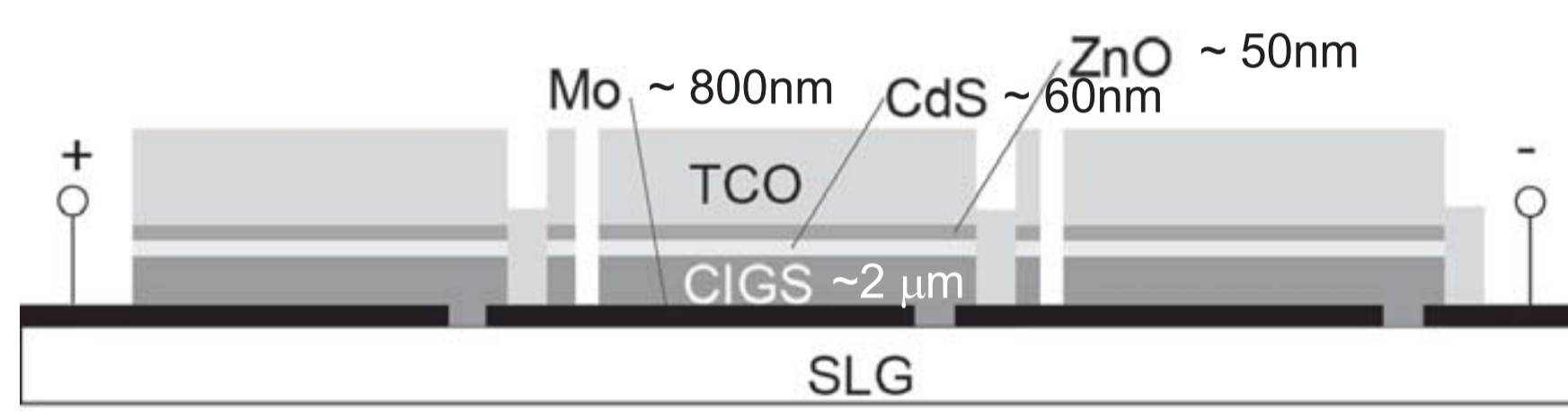
## はじめに

高い電子移動度を持つ透明導電性酸化物(TCO)薄膜は、導電率を向上させると同時に自由キャリア吸収を減らすことが出来る。多接合型太陽電池や近赤外イメージセンサーなどの窓電極に適用することで、近赤外域(800-1700 nm)にも感度を持つデバイスの実現を可能にする。これまで、TCO薄膜の研究を行い、ITOやIZOより高移動度な $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me}$  (Me: Zr, W, Ce)薄膜や200°C以下のプロセス温度で更に高移動度な固相結晶化 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ と $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me},\text{H}$ 薄膜などを見出してきた。そして、産総研研究者が開発しているSiヘテロ接合型太陽電池、Si系薄膜太陽電池、CIGSミニモジュールの窓電極に適用し、高移動度TCO薄膜の有用性を電池性能で示してきた。今回は、他機関(ベルリン・ヘルムホルツ資源エネルギーセンターとフ라운ホーファー研究機構太陽エネルギーシステム研究所)のCIGS太陽電池とSiヘテロ接合型太陽電池の窓電極に適用した結果を紹介する。製造工程等の異なるセルプリカーサー上に形成することで、TCO薄膜の新たな課題も明らかとなり、窓電極材料および製造手法を改良しているところである。



## $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 系透明電極(RPD法)のCIGS薄膜太陽電池応用(AIST / PVcomB HZB)

### 一般的なCIGS太陽電池の構造



#### TCO deposition

**Inline Pulsed DC Magnetron Sputtering (@HZB)**

Area: 30 x 60 cm<sup>2</sup>

Target:  $\text{In}_2\text{O}_3$

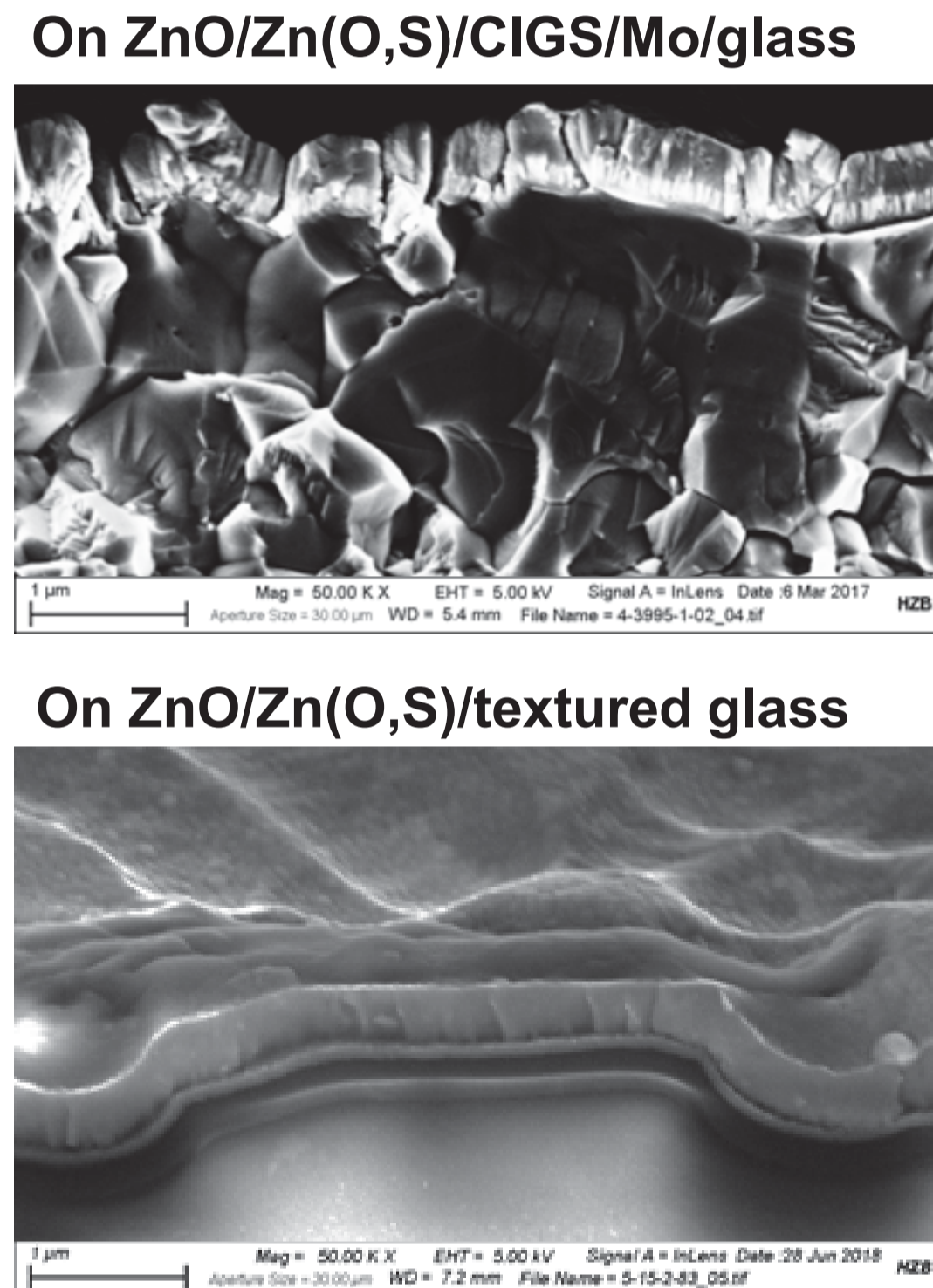
**Reactive Plasma Deposition (@AIST)**

Area: 20 x 20 cm<sup>2</sup>

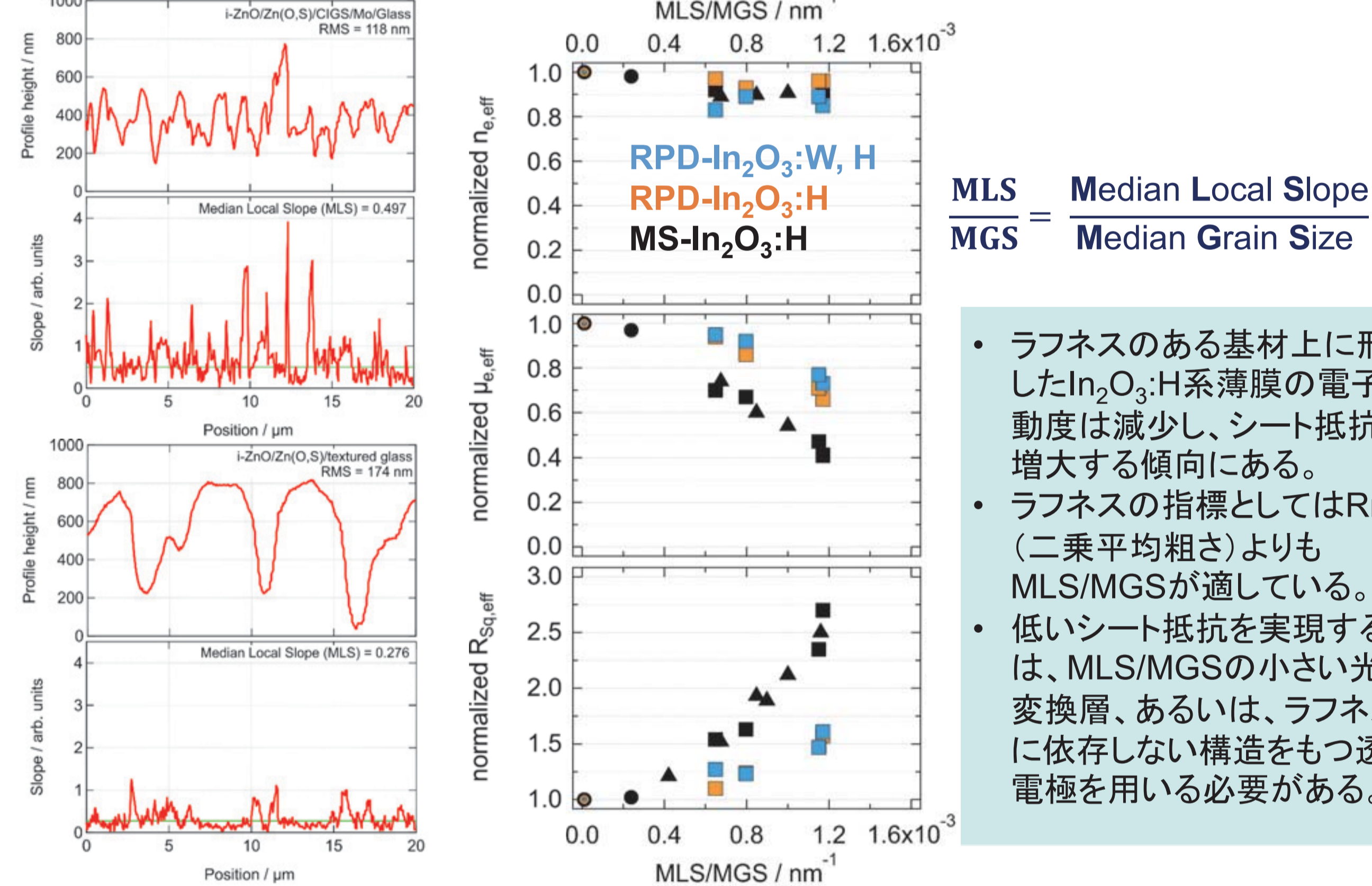
Tablet:  $\text{In}_2\text{O}_3, \text{In}_2\text{O}_3:\text{W}$

本研究は、ベルリン・ヘルムホルツ資源エネルギーセンター博士課程学生Darja Erfurtさんと一緒に産総研で実施(2017/11/6-2018/2/23)した内容です。詳細は論文[1]を参照してください。

### 異なる基材上の $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 薄膜の断面SEM像

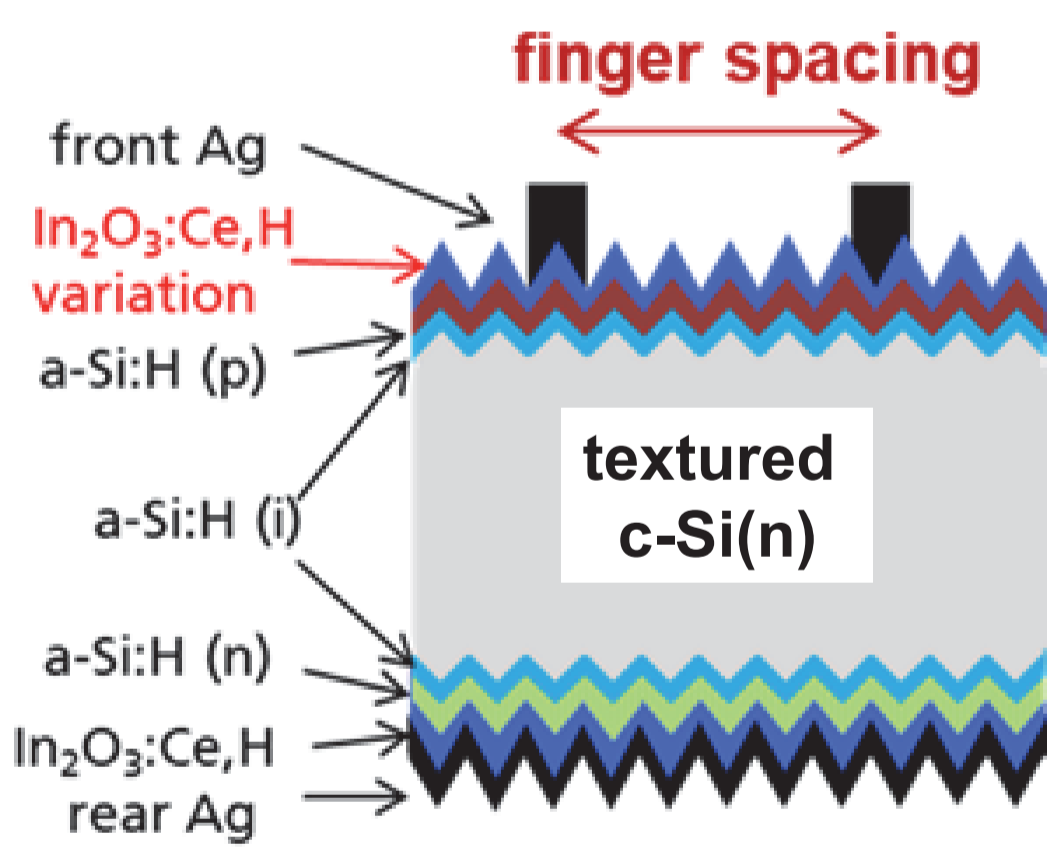


### 凹凸のある基材上のTCO膜の電気特性



## $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Ce},\text{H}$ 透明電極(スパッタ法)のシリコンヘテロ接合型太陽電池応用(AIST / Fraunhofer ISE)

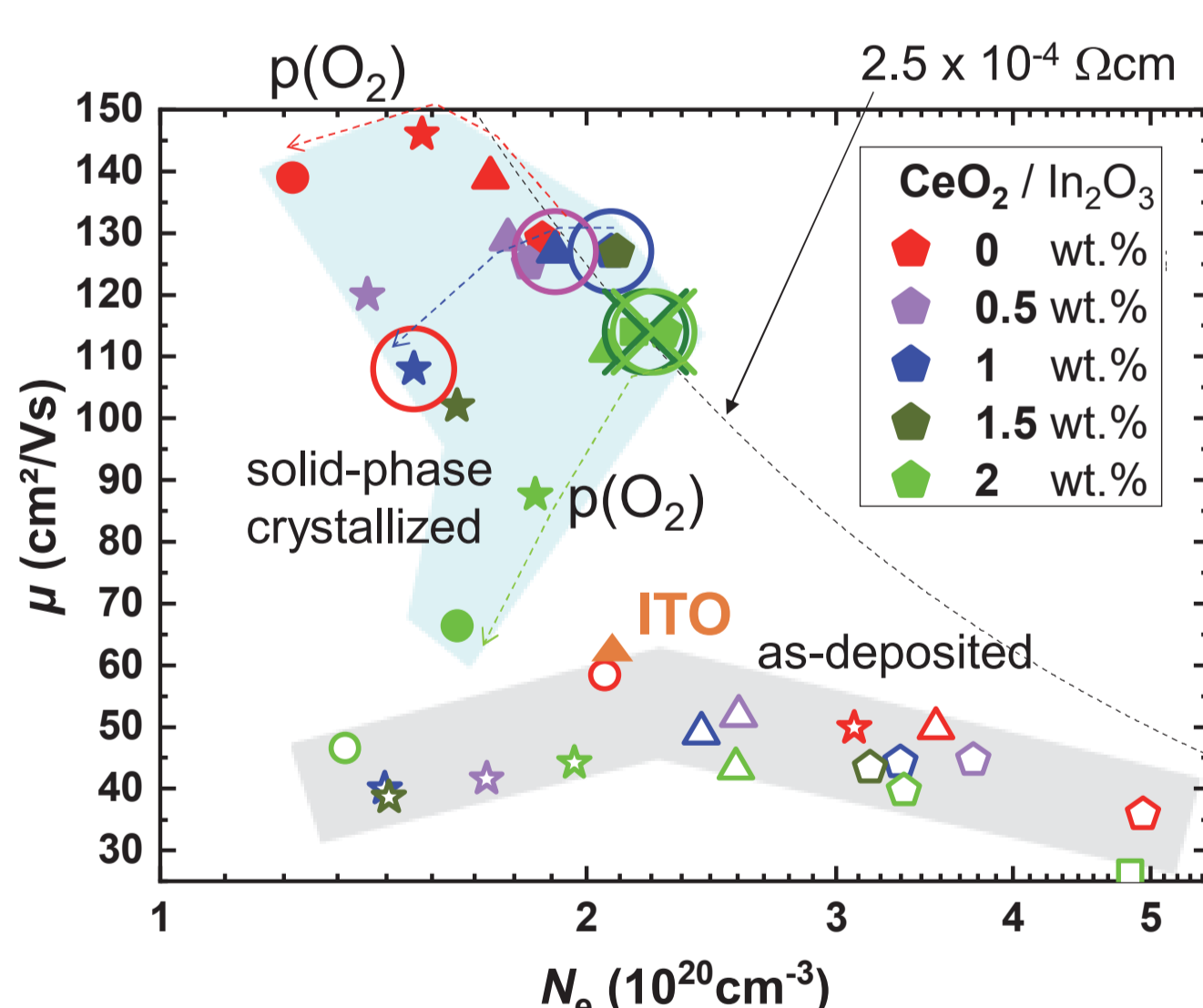
### 作製した太陽電池\*



\*セルプリカーサーはFraunhofer ISEにて作製。産総研では表面・裏面側のTCO及び金属電極を形成。

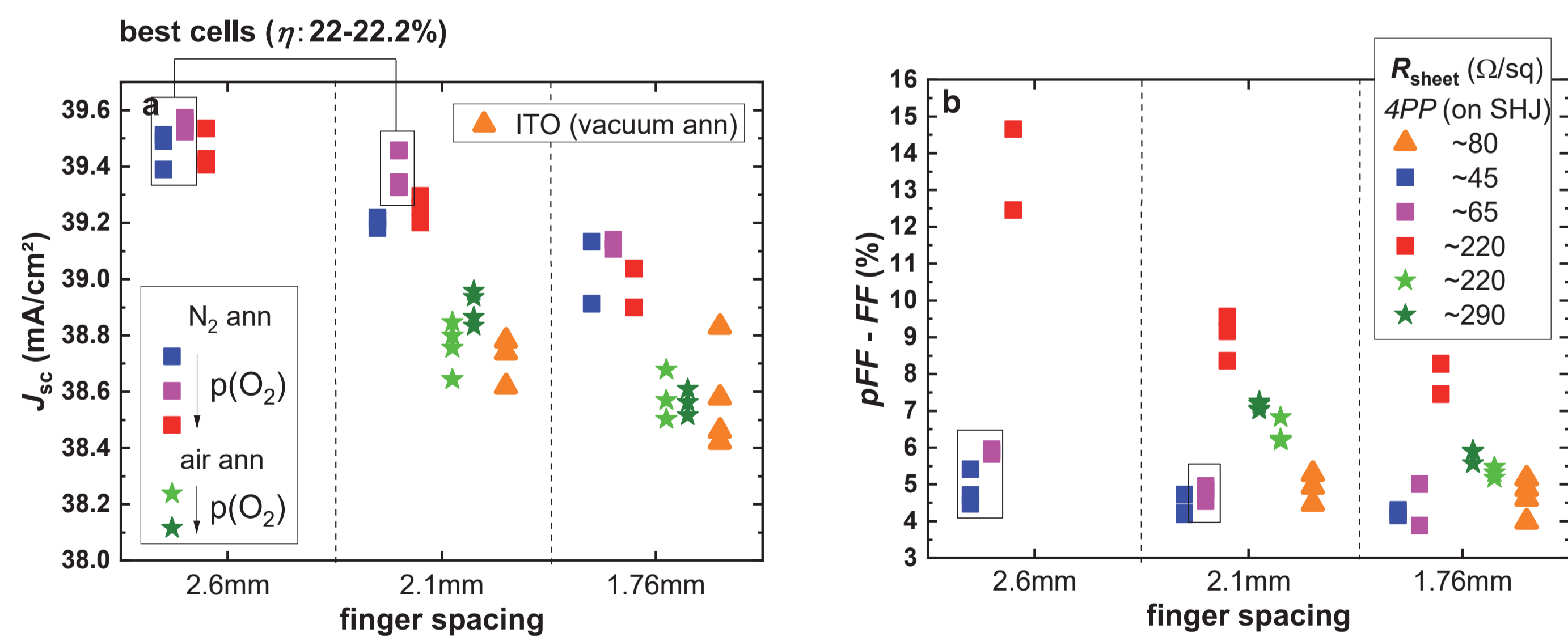
本研究は、フ라운ホーファー研究機構太陽エネルギーシステム研究所 博士課程学生Leonard Tutschさんと一緒に産総研で実施(2019/5/13-2019/9/6)した内容です。詳細は論文[2]を参照してください。

### $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Ce},\text{H}$ 窓電極(スパッタ膜)



- ITOよりも顕著に高い移動度
- で記した材料を太陽電池の窓電極に適用

### 太陽電池の光学特性と抵抗損失



- 太陽電池特性(電池性能最適化未実施):  $V_{oc}$ : 710 ± 5 mV,  $pFF$  = 83 ± 1%
- 窒素アニール: 短絡電流密度向上(+ 0.6 mA/cm<sup>2</sup> vs ITO)、フィンガー電極幅の増加可変換効率 22.2%
- 空気アニール: 直列抵抗・光学損失の増加、雰囲気に影響を受けない構造をもつ窓電極が必要

## まとめと今後の展開

- 他機関のセルプリカーサー上に、RPD法/マグネトロンスパッタ法を用いて $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 系広帯域透明電極を形成。産総研の太陽電池<sup>4,5)</sup>では問題とならなかった現象を確認。[1,2]
- 太陽電池をポストアニールしている際、窓電極層をHall測定することで、アニール雰囲気や窓電極の下地層が窓電極の輸送特性に与える影響を評価。
- 超高真空下で太陽電池をポストアニールし、最表面の窓電極層からの脱ガス成分を分析することで、窓電極層およびその下地層からのH拡散の影響を評価。
- これら評価結果と太陽電池特性を比較検討することで、問題の要因を明らかにし、個々のデバイスに応じた製造手法を改良。
- また、上記の評価手段を用いて、スイス連邦工科大学ローザンヌ校PV-LAB博士課程学生Esteban Rucavadoさんと一緒に $\text{MoO}_x$ 正孔輸送層を持つSi太陽電池やパッシベーションコンタクトを持つSi太陽電池、Zn-Sn-O系透明導電膜の研究を産総研で実施。[3-6]
- これまで、低温(150~200°C以下)・プラズマ損傷の少ないプロセスで製造可能な広帯域透明電極の材料・製法開発に従事。今後は、窓電極に対して異なるプロセスを要求するデバイスに対しても広帯域透明電極を適用できるよう、引き続き材料・製造プロセス開発に従事。適用したいデバイスがあれば、お気軽にご相談ください。

[1] D. Erfurt, T. Koida, M. D. Heinemann, C. Li, T. Bertram, J. Nishinaga, B. Szyszka, H. Shibata, R. Klenk, R. Schlattmann, Impact of rough substrates on hydrogen-doped indium oxides for the application in CIGS devices, Solar Energy Materials and Solar Cells 206 (2020) 110300

[2] L. Tutsch, H. Sai, T. Matsui, M. Bivour, M. Hermle, T. Koida, The sputter deposition of broadband transparent and highly conductive cerium and hydrogen co-doped indium oxide and its transfer to silicon heterojunction solar cells, Prog Photovolt Res Appl. 2021;1-11. <https://doi.org/10.1002/pip.3388>

[3] G. Nogay et al., Interplay of annealing temperature and doping in hole selective rear contacts based on silicon-rich silicon-carbide thin films, Solar Energy Materials and Solar Cells 173 (2017) 18

[4] S. Essig et al., Toward Annealing-Stable Molybdenum-Oxide-Based Hole-Selective Contacts For Silicon Photovoltaics, Solar RRL 2 (2018) 1700227

[5] E. Rucavado et al., New Route for "Cold-Passivation" of Defects in Tin-Based Oxides, The Journal of Physical Chemistry C 122 (2018) 17612

[6] A. Ingenito et al., A passivating contact for silicon solar cells formed during a single firing thermal annealing, Nature Energy 3 (2018) 800

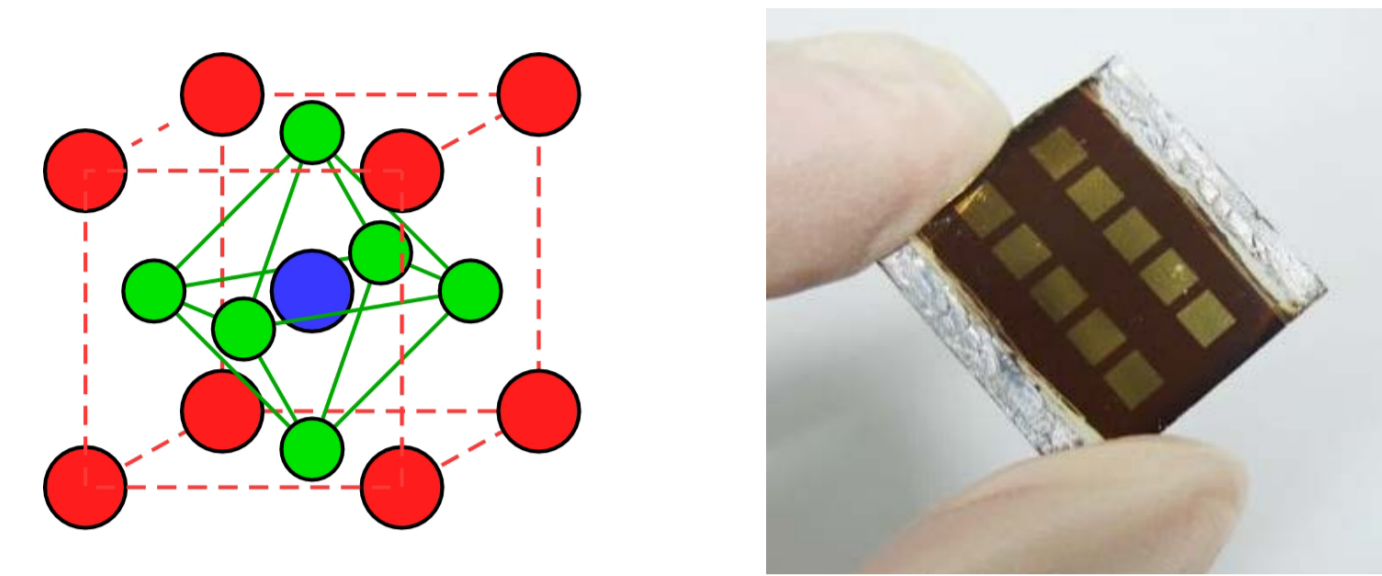
# 有機無機ペロブスカイト結晶への溶液ポスト処理技術による高性能太陽電池の開発

古郷 敦史、近松 真之

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

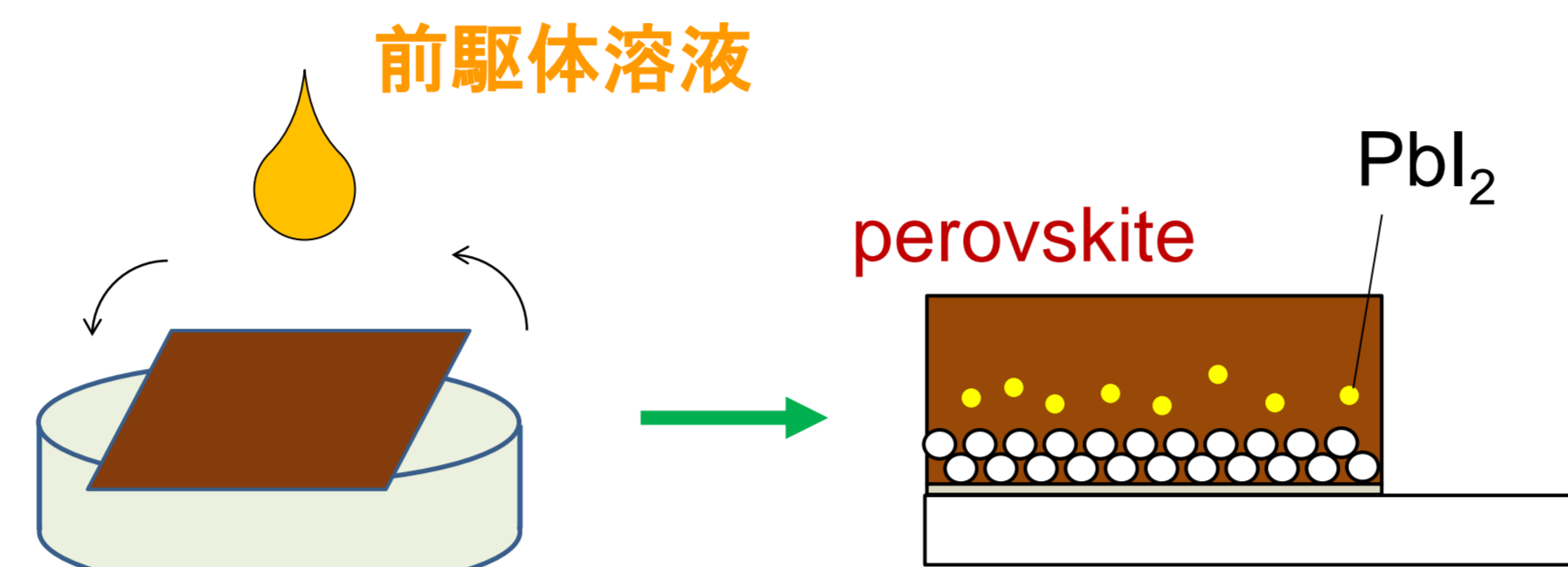
## 背景

ペロブスカイト太陽電池



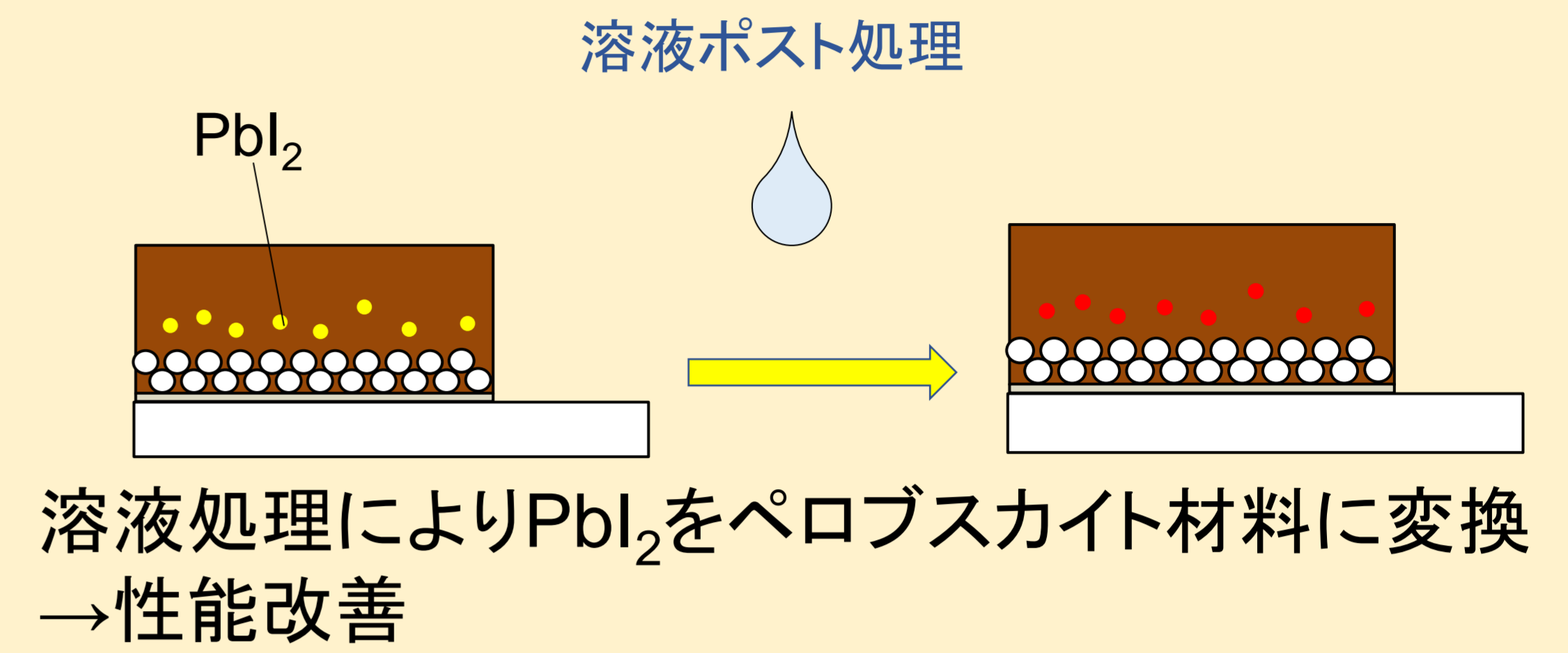
25%超の高効率太陽電池  
軽量フレキシブル化が可能

塗布・乾燥プロセス



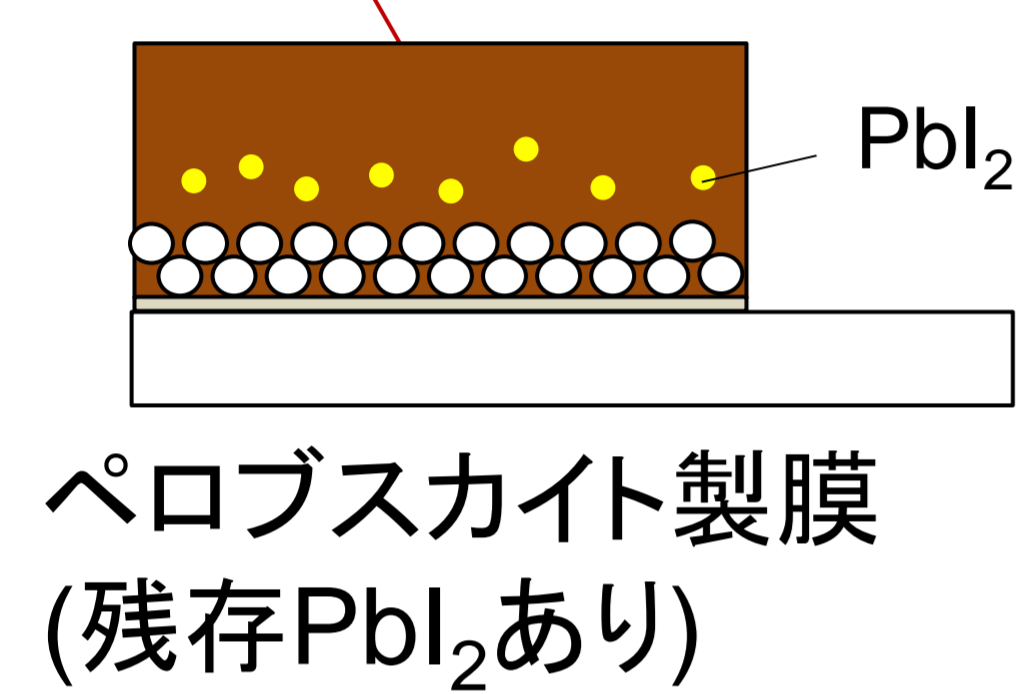
塗布・乾燥により製膜するので  
PbI<sub>2</sub>などの反応物質が残る

## 本研究の目的



## 実験

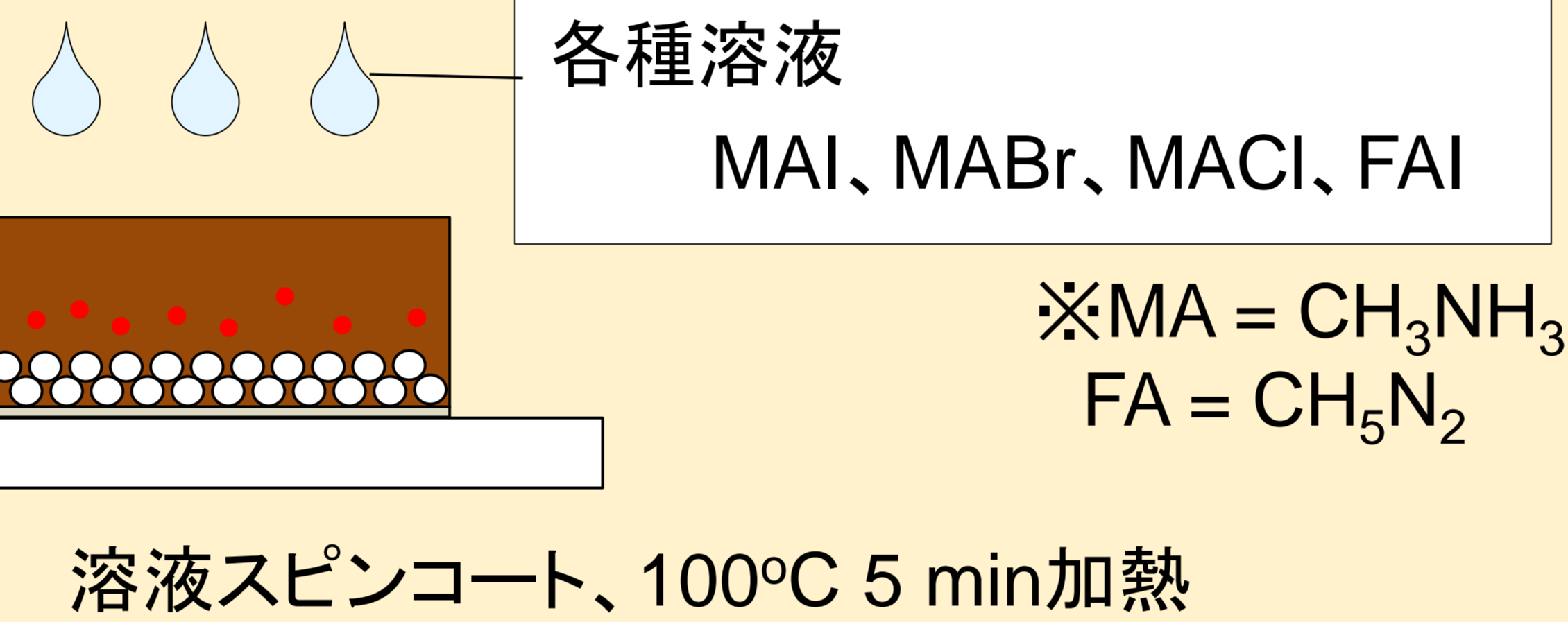
$\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.83}\text{MA}_{0.17})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$   
perovskite



ペロブスカイト製膜  
(残存PbI<sub>2</sub>あり)

M. Saliba et al.,  
Energy Environ. Sci., 2016, 9, 1989.

## 溶液ポスト処理

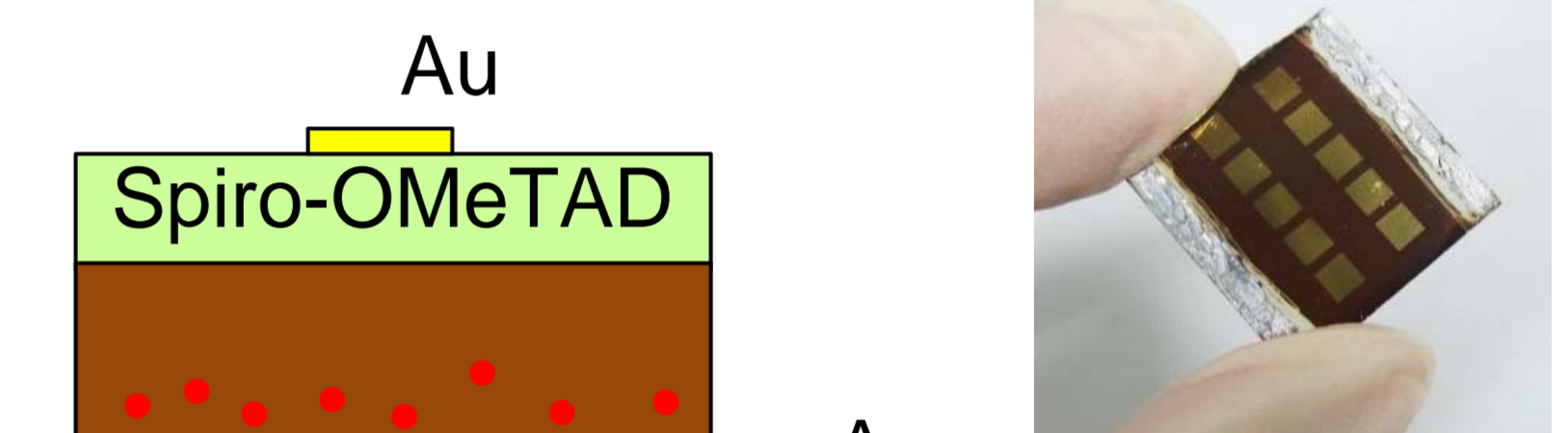


各種溶液

MAI, MABr, MACl, FAI

※MA = CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>  
FA = CH<sub>5</sub>N<sub>2</sub>

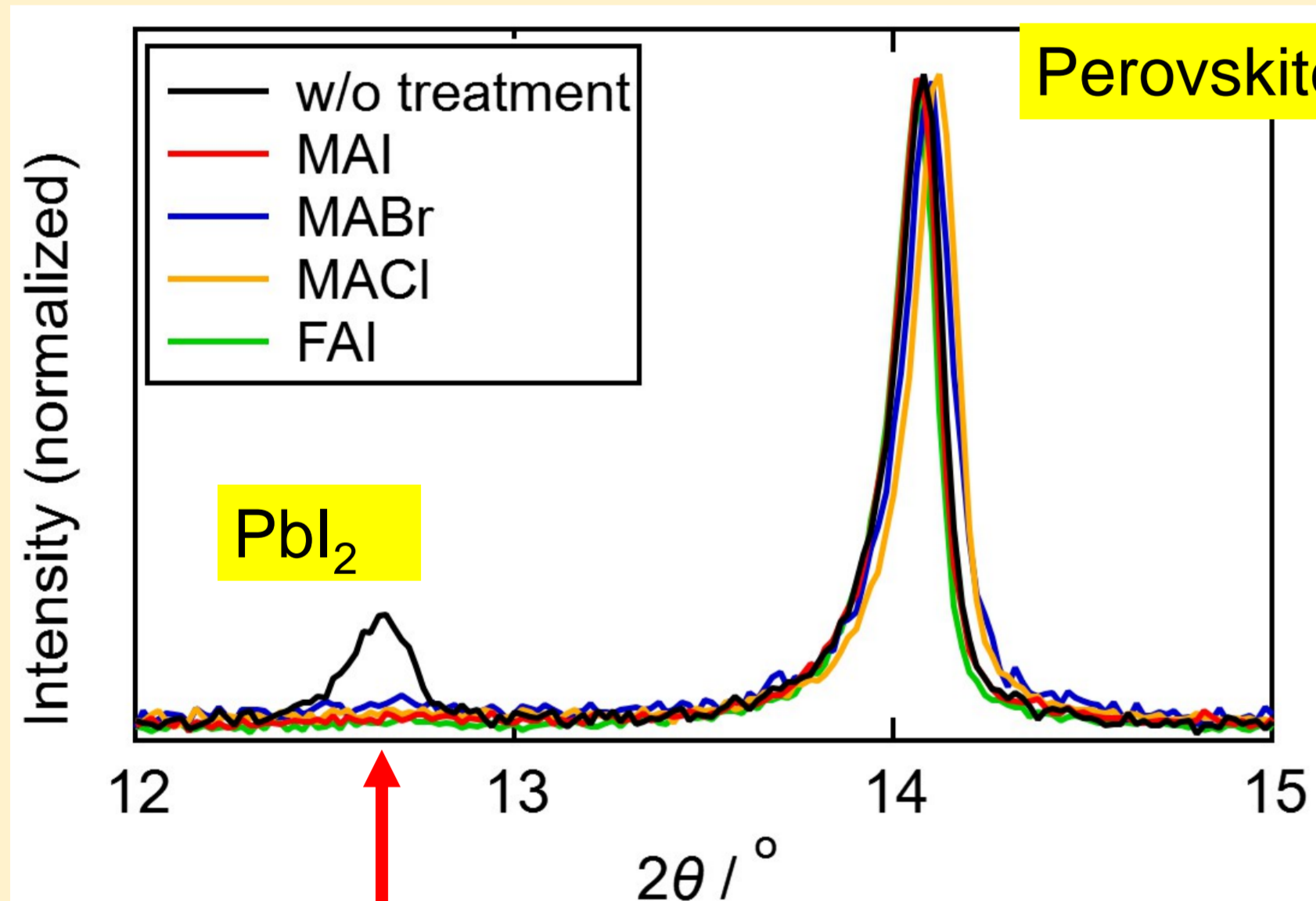
溶液スピコート、100°C 5 min加熱



Spiro-OMeTAD スピコート  
Au蒸着(3 mm × 3 mm)

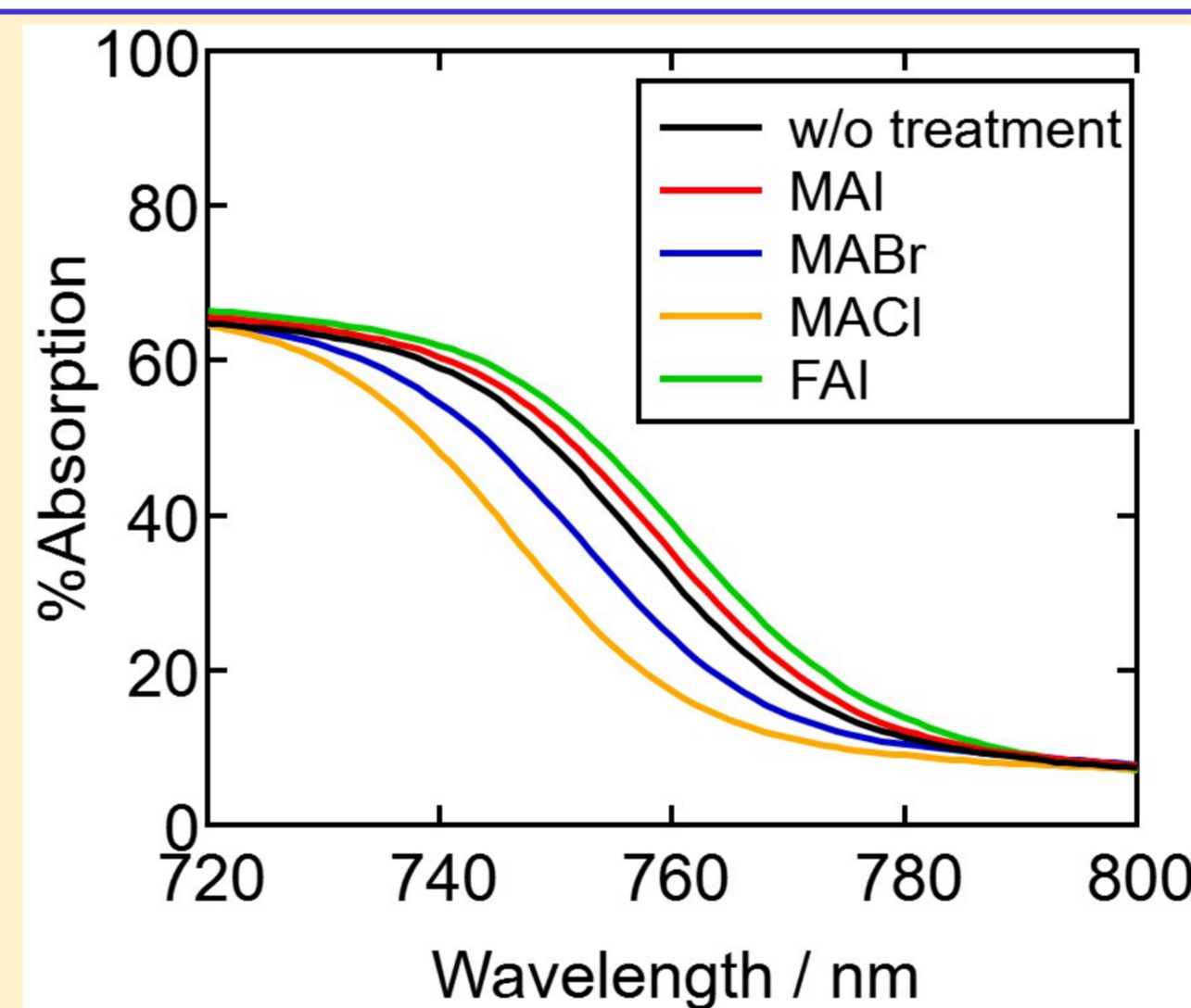
## 結果と考察

### ペロブスカイト内のPbI<sub>2</sub>評価 (XRD)

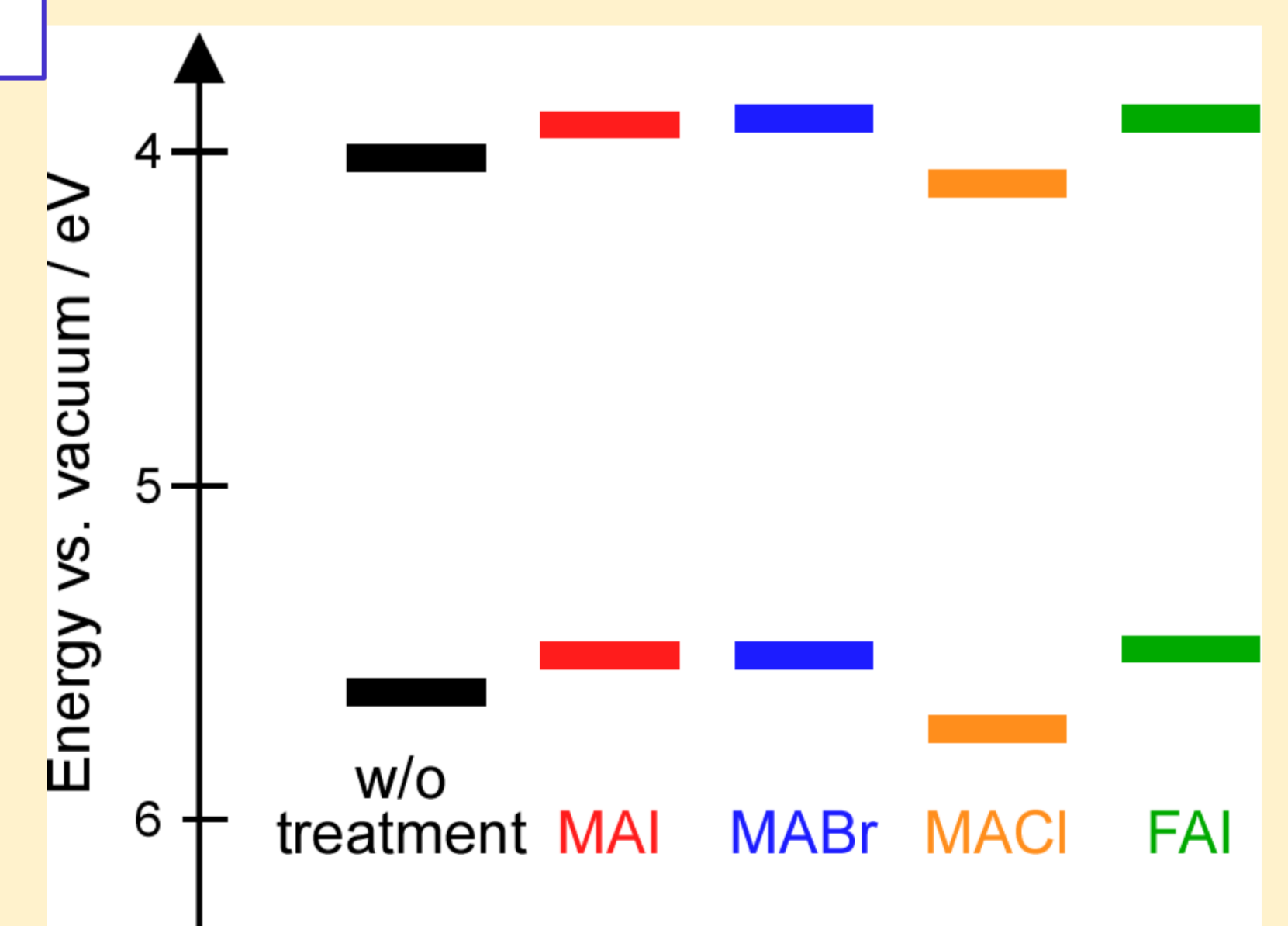


溶液ポスト処理により、PbI<sub>2</sub>回折ピーク消滅

### 電子構造の変化

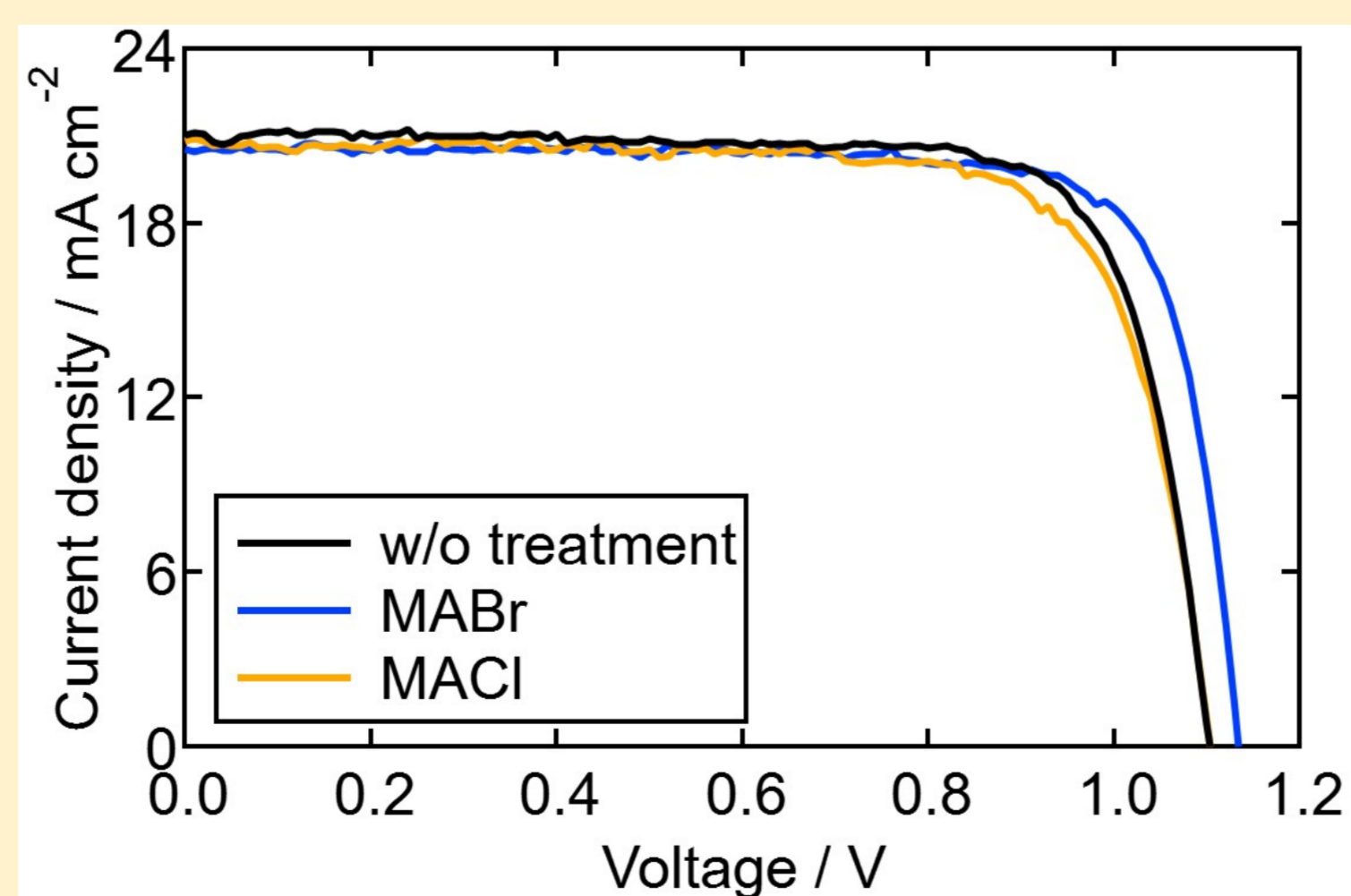
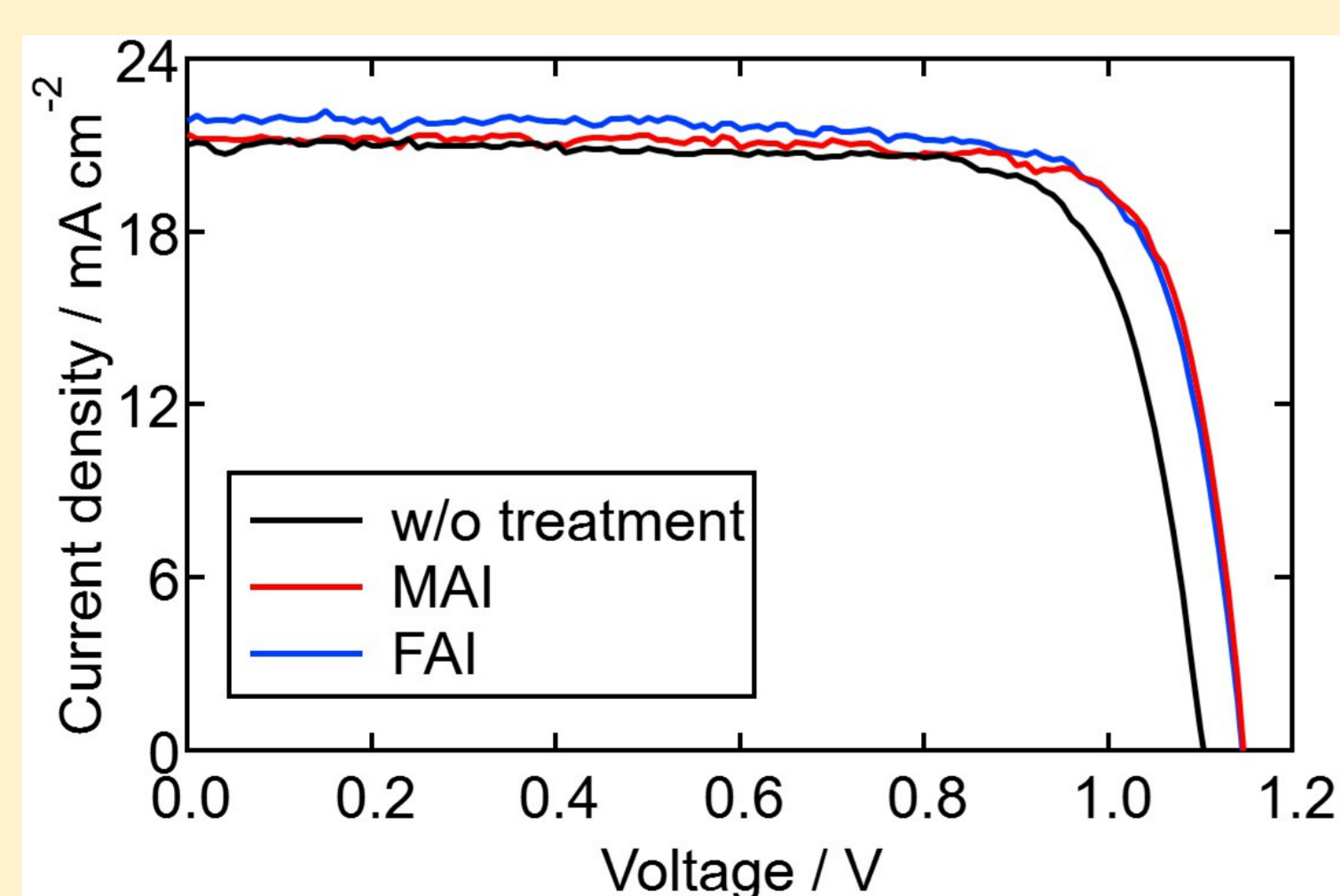


吸収端(バンドギャップ)変化



電子バンドが変化

### 発電特性



Perovskite	J <sub>sc</sub> / mA cm <sup>-2</sup>	V <sub>oc</sub> / V	曲線因子 (FF)	発電効率 / %
無処理	21.4	1.11	0.771	18.3
MAI	21.4	1.14	0.785	19.2
MABr	20.7	1.14	0.785	18.6
MACl	20.6	1.12	0.758	17.4
FAI	21.8	1.14	0.790	19.5

FAI処理: バンドギャップ減少によりJ<sub>sc</sub>改善  
PbI<sub>2</sub>除去・トラップ密度減少により、FF・V<sub>oc</sub>改善

## 結果と考察

- ▶ MAI, MABr, MACl, FAI溶液ポスト処理により、ペロブスカイト層内に残存するPbI<sub>2</sub>を除去した
- ▶ 処理剤の種類によってペロブスカイト結晶の電子バンドが変化し、吸収波長域が増大したFAI処理で最も高いエネルギー変換効率を得られた。

A. Kogo and M. Chikamatsu, Chem. Commun., 2020, 56, 1235.

## 謝辞

- ▶ 科研費若手研究「多層ペロブスカイト結晶による高耐久高効率有機無機ハイブリッド太陽電池の開発」(18K14329)
- ▶ NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」

# 有機無機ペロブスカイト結晶への溶液ポスト処理技術による

## 高性能太陽電池の開発

古郷敦史、近松真之  
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

有機・無機イオンのハイブリッド構造をしたペロブスカイト結晶は、前駆体溶液の塗布・乾燥プロセスにより容易に製膜でき、太陽電池の光吸収層として用いると 25.2%の高い発電効率を示すことから、低コスト発電素子として近年急速に注目を集めている。しかし、塗布・乾燥工程によってペロブスカイト結晶の成長制御することは非常に困難であり、反応物である  $\text{PbI}_2$  がペロブスカイト膜に残存してしまうといった課題がある。

そこで、本研究では、製膜したペロブスカイト結晶にハロゲン化メチルアンモニウム(MAX)およびヨウ化ホルムアミジニウム(FAI)溶液で処理することで(溶液ポスト処理)、 $\text{PbI}_2$  をペロブスカイトに変換し、結晶の発電特性を改善した<sup>1-3</sup>。

フッ素ドープ酸化スズ導電性基板の上に  $\text{TiO}_2$  膜を製膜し、文献<sup>4</sup>に従って  $\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.83}\text{MA}_{0.17})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$  ペロブスカイトを製膜した。このペロブスカイト結晶に、MAI、MABr、MAcI、FAI の 2-プロパノール溶液をスピコートして 105 °C で 5 分間アニーリングした。

X 線結晶解析の結果、各種溶液処理によってペロブスカイト内の  $\text{PbI}_2$  がなくなっていることがわかった。これは、 $\text{PbI}_2$  が MAX あるいは FAI と反応して  $\text{MAPbI}_2\text{X}$  あるいは  $\text{FAPbI}_3$  になったためと考えられる。光吸収スペクトルを測定したところ、FAI 溶液で処理した場合はペロブスカイト結晶の吸収端が長波長にシフトし、MABr および MAcI で処理した場合は短波長にシフトした。これは、 $\text{FA}^+$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{Cl}^-$  イオンが導入されたことでペロブスカイト結晶のバンドギャップエネルギーが変化したためである。

ペロブスカイト層の上に spiro-OMeTAD 層を製膜し、金を蒸着することで太陽電池素子を作製した(電極面積 0.09  $\text{cm}^2$ )。ペロブスカイト結晶に MAI 溶液処理をした場合、 $\text{PbI}_2$  除去および表面トラップの減少により開放電圧が改善し、発電性能が向上した。FAI 溶液で処理した場合は、バンドギャップエネルギーの減少により吸収光波長域が増加したため、さらに発電性能が改善した(図 1)。一方で、MABr、MAcI 溶液で処理した場合は発電特性の改善はわずかもしくは見られなかったものの、バンドギャップエネルギーの増加により、開放電圧が改善することがわかった。

このように、本研究ではペロブスカイト結晶に溶液ポスト処理をすることによって、 $\text{PbI}_2$  を除去し、バンドギャップエネルギーを制御することで、太陽電池の発電性能を改善できることを明らかにした。

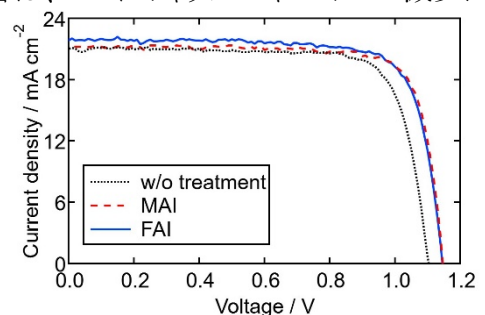


図 1. MAI および FAI 溶液で処理したペロブスカイト結晶が示す光電流密度-電圧曲線。

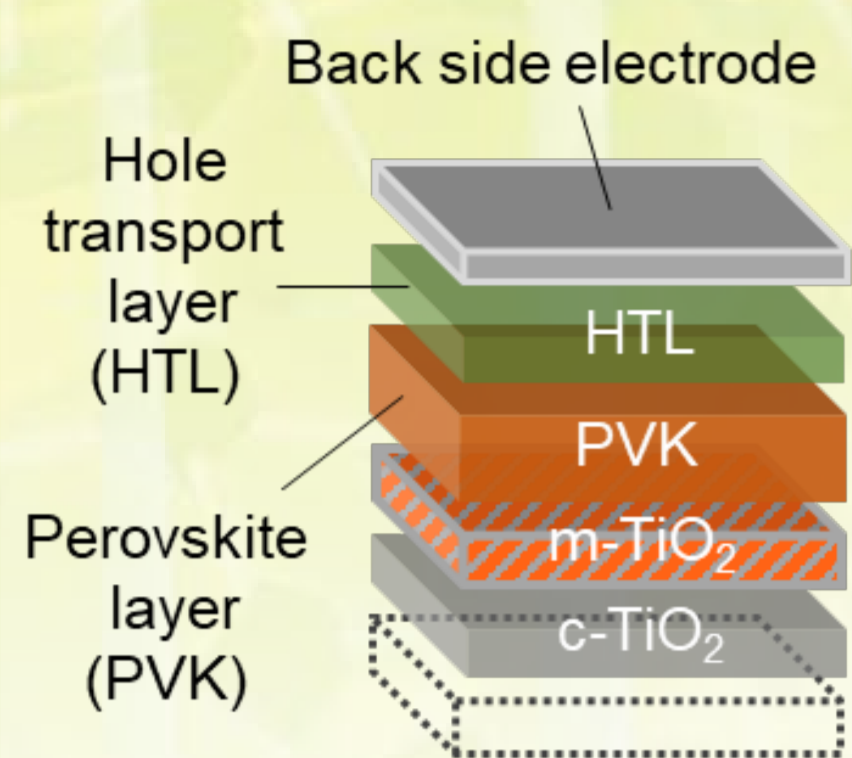
1. A. Kogo, T. N. Murakami and M. Chikamatsu, *Chem. Lett.*, 2018, 47, 1399.
2. A. Kogo, T. Miyadera and M. Chikamatsu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11, 38683.
3. A. Kogo and M. Chikamatsu, *Chem. Commun.*, 2020, 56, 1235.
4. M. Saliba, et al. *Energy Environ. Sci.*, 2016, 9, 1989.

# ドナーアクセプター型共重合体をホール輸送層として用いたペロブスカイト太陽電池におけるパッシベーションの効果

小野澤伸子、西原佳彦、近松真之、吉田郵司  
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

## Background & Motivation

### Background



The power conversion efficiency (PCE) of perovskite solar cells (PSCs) has risen up to 25.2%.

HTMs have been actively explored. The exploration mainly focused on the following three characteristics:  
1) Long-term stability.  
2) High hole mobility.  
3) Suitable frontier energy levels matching that of perovskite layer.

Fig. 1 Typical mesoporous-type device structure.

### Spiro-OMeTAD

→ Typical HTM. Li-TFSI is added as dopant.  
→ Relatively expensive.

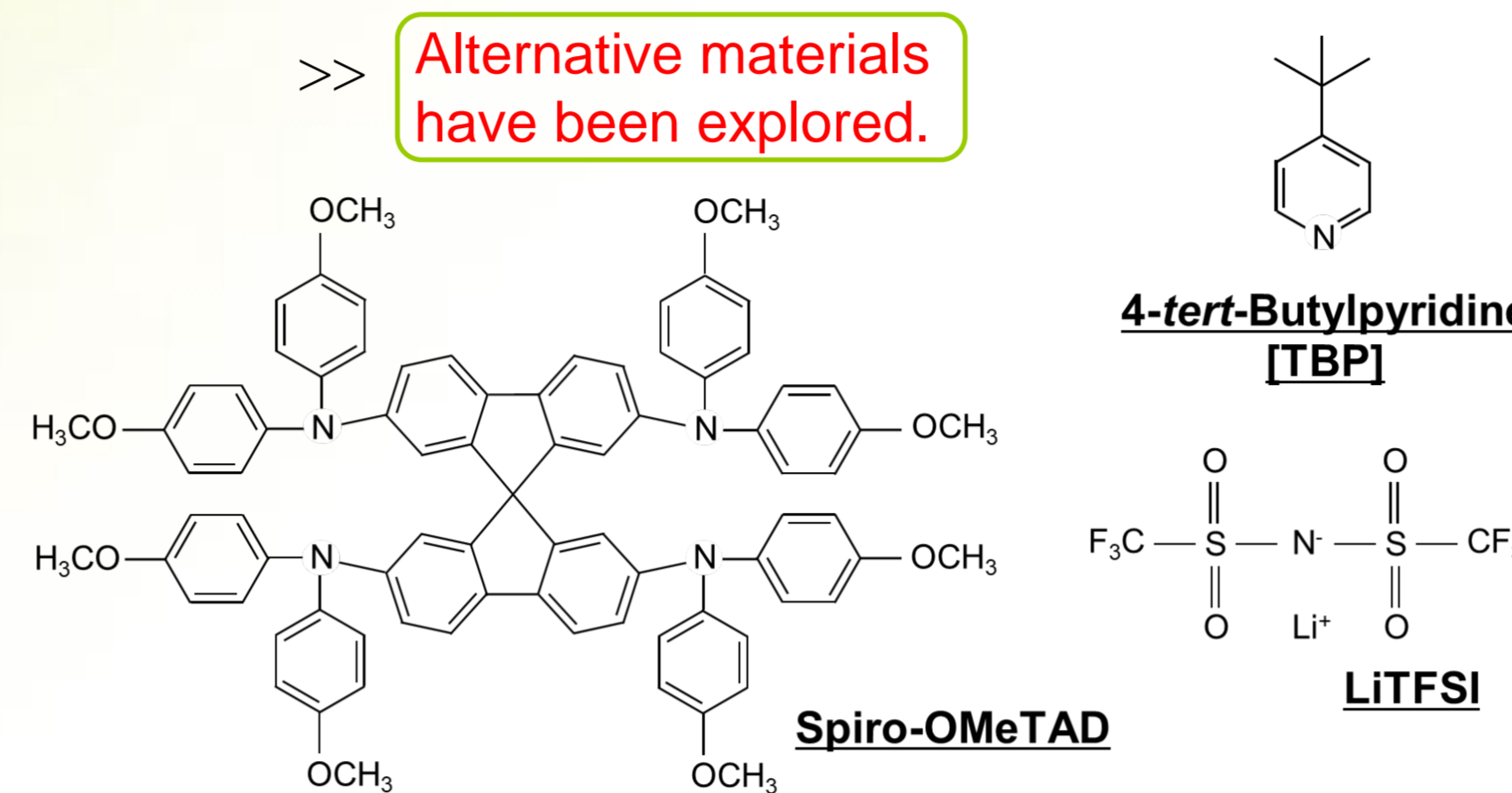


Fig. 2 Molecular structures of Spiro-OMeTAD and dopants.

### Donor-acceptor (D-A) copolymer

• Simple synthetic method  
• Good stability  
• Flexible electron density distribution

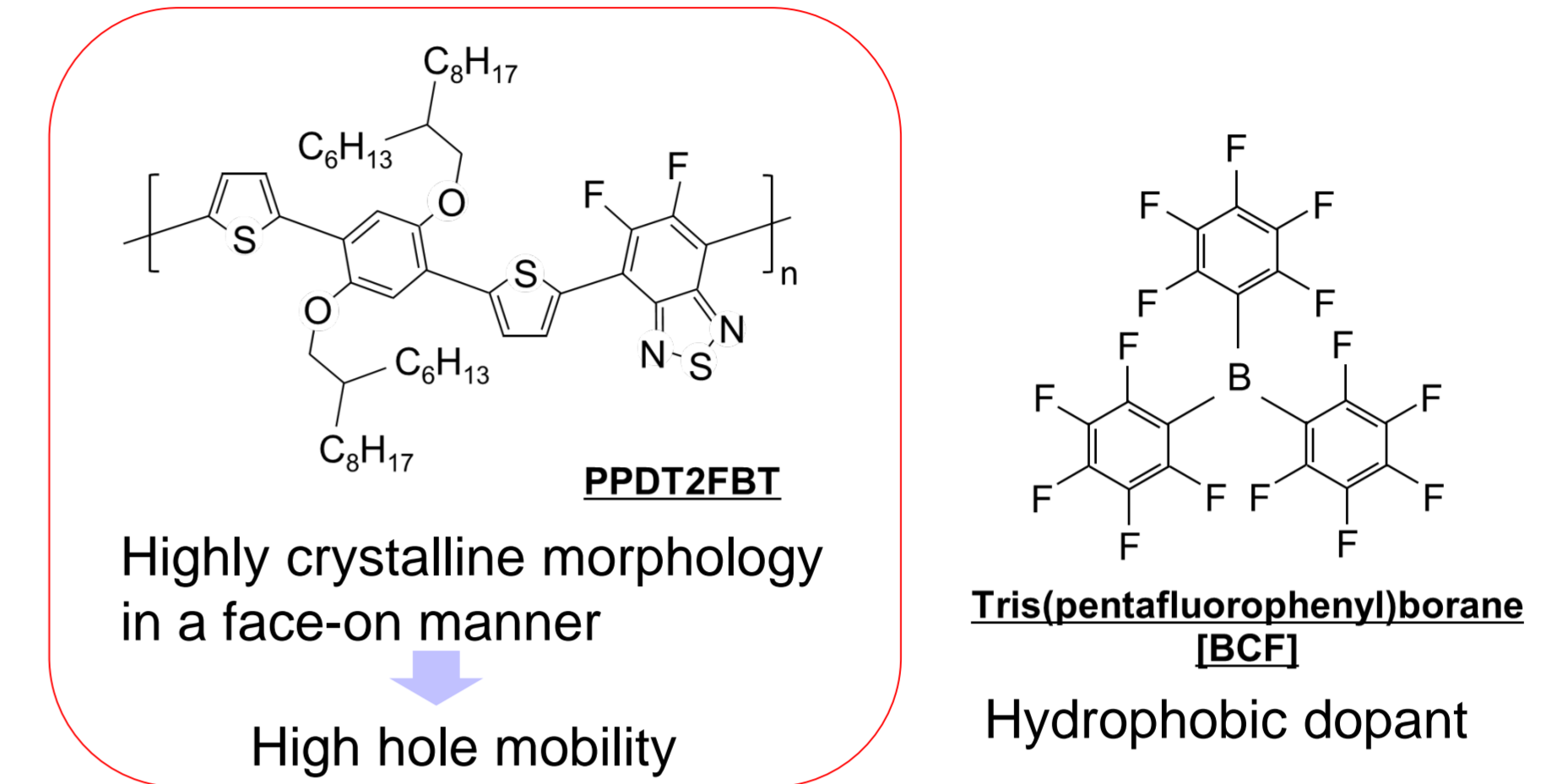


Fig. 3 Molecular structure of PPDT2FBT<sup>[1]</sup> and BCF

## Experimental

### Device fabrication

● Inside of glove box ●  
Environment : N<sub>2</sub> atmosphere  
O<sub>2</sub> < 15 ppm. H<sub>2</sub>O < 10 ppm.

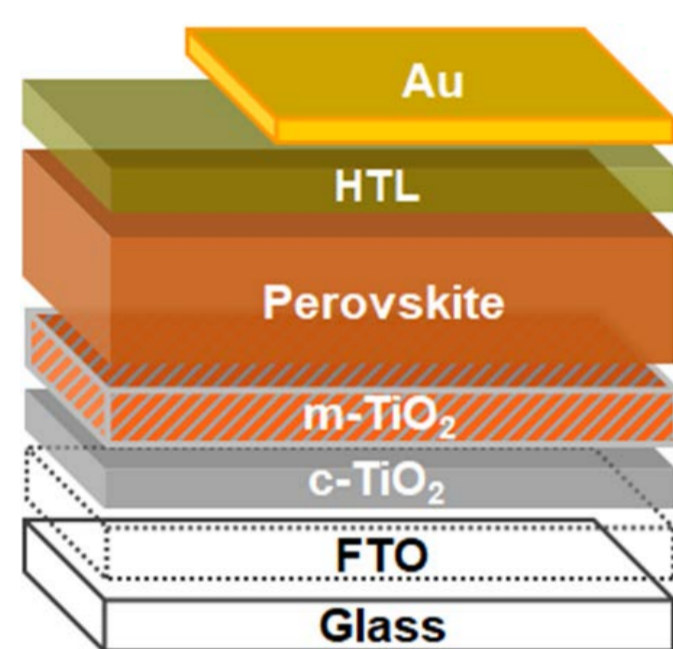


Fig. 4 Device structure.

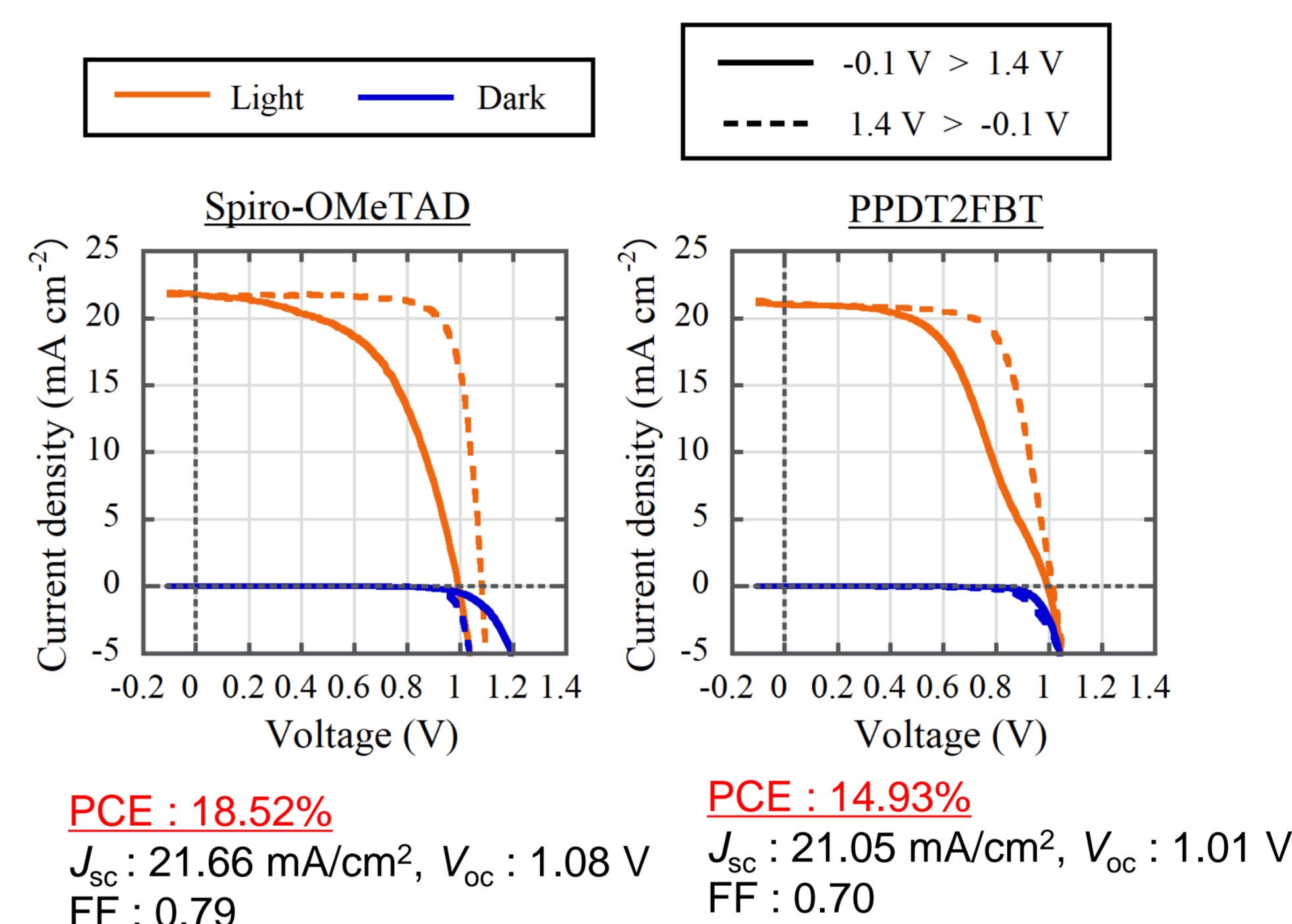
- I. Compact TiO<sub>2</sub> layers (c-TiO<sub>2</sub>)  
• Spray pyrolysis method.
- II. Mesoporous TiO<sub>2</sub> layers (m-TiO<sub>2</sub>)  
• Spin coating of TiO<sub>2</sub> particles-dispersed solution, and baking at 450°C.
- III. Perovskite layers (PVK)  
• PVK precursor solution. (Solvent : DMSO+DMF) [CS<sub>0.05</sub>FA<sub>0.79</sub>MA<sub>0.16</sub>PbI<sub>2.52</sub>Br<sub>0.48</sub>]  
>> PVK layers formed by the anti solvent method.
- IV. Hole Transporting Layers (HTL)  
• HTM solution. (Solvent : toluene) [ PPDT2FBT ] (Preheating : 80°C)  
PPDT2FBT with BCF  
>> Spin coating
- V. Au electrodes  
• Vacuum evaporation.

● desiccator ●  
Environment : Under the dry air.  
Humidity : < 5%RH  
Temperature : 20 ~ 25°C  
UV shielding

Keeping in dry air

## Results and Discussion

### J-V measurement



The PCE of PPDT2FBT based devices decreased compare to that of standard PSCs with spiro-OMeTAD.

Fig. 5 J-V characteristics of spiro-OMeTAD and PPDT2FBT based devices.

### FABr passivation<sup>[2]</sup>

Passivation  
• FABr / IPA solution [ 5 mg/mL ]  
>> spin coating  
→ 100°C / 5 min

Formamidinium bromide [FABr]

Fig. 6 Device structure with FABr passivation

### XRD spectra

After FABr passivation on perovskite, the peak of PbI<sub>2</sub> disappeared.  
→ PbI<sub>2</sub> dose not remained.  
→ An additional FAPbBr<sub>3-x</sub>I<sub>x</sub> was constructed.

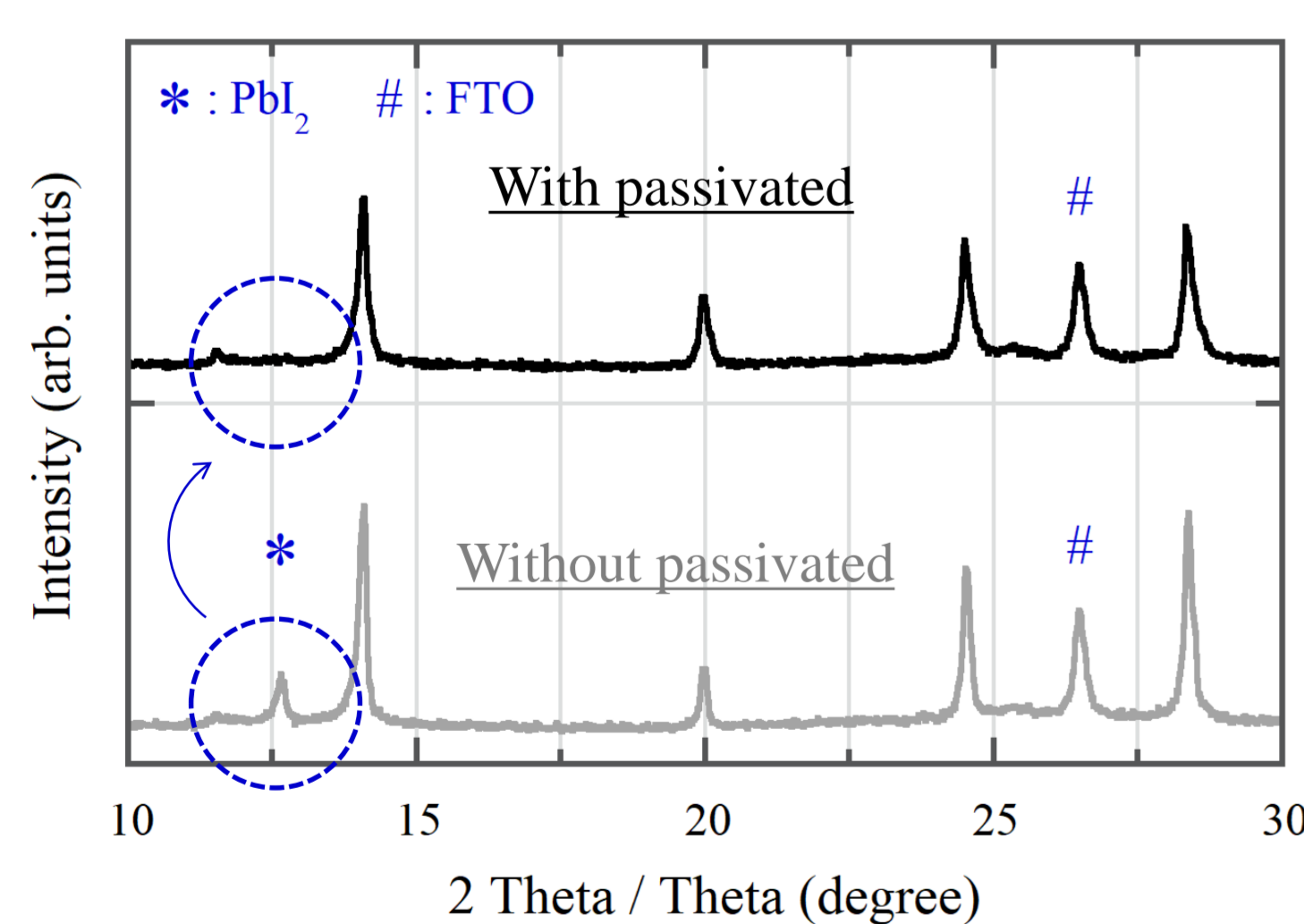
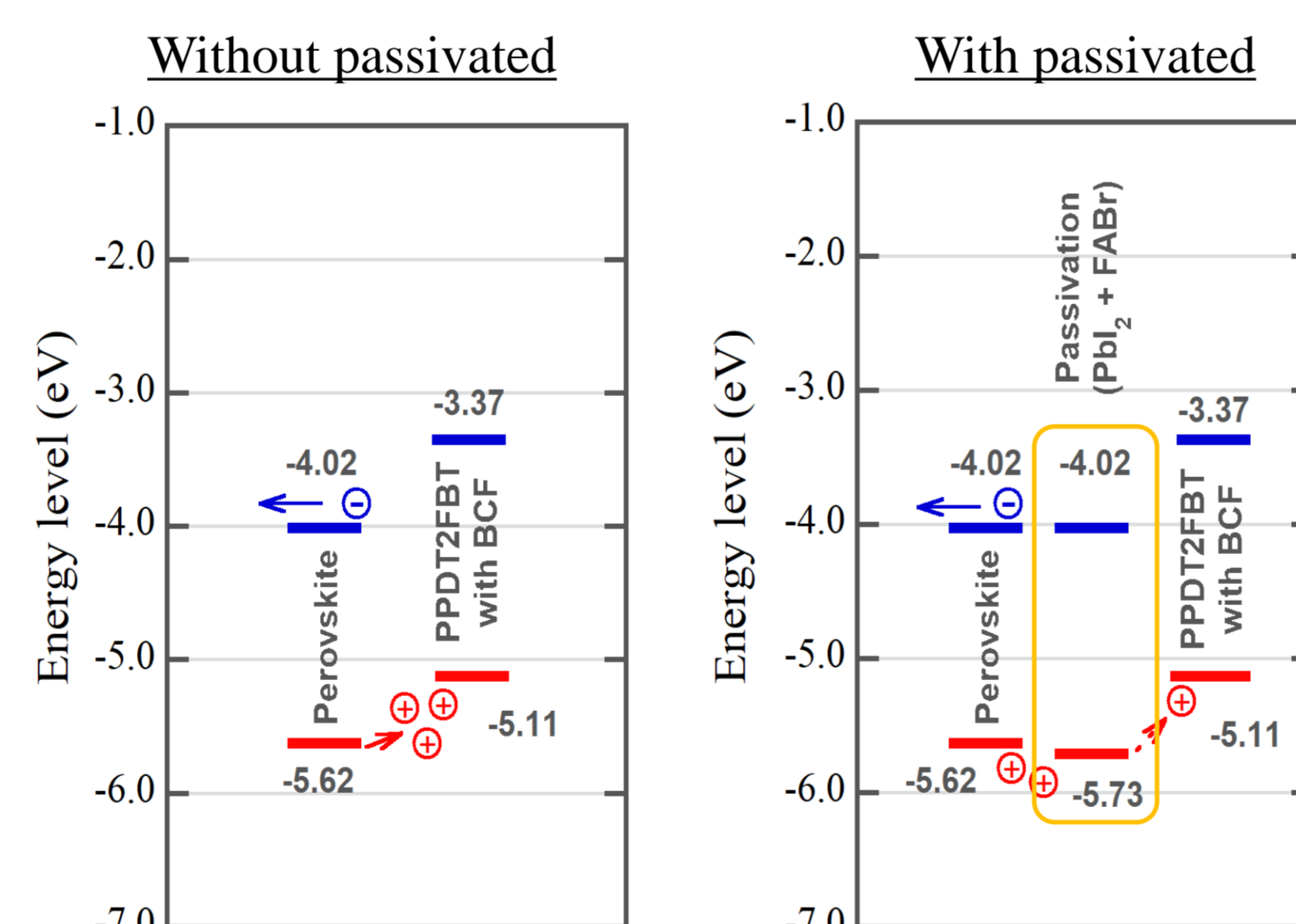


Fig. 7 XRD spectra of with or without passivation layer.

### Band diagram

Energy levels are calculated by using PYS (photoelectron yield spectroscopy) and UV-vis spectroscopy. (The arrows indicate the recombination process of electrons.)



The carrier recombination was suppressed by inserting the passivation layer.

Fig. 8 Inferred charge recombination mechanism

### J-V measurement of the optimized devices

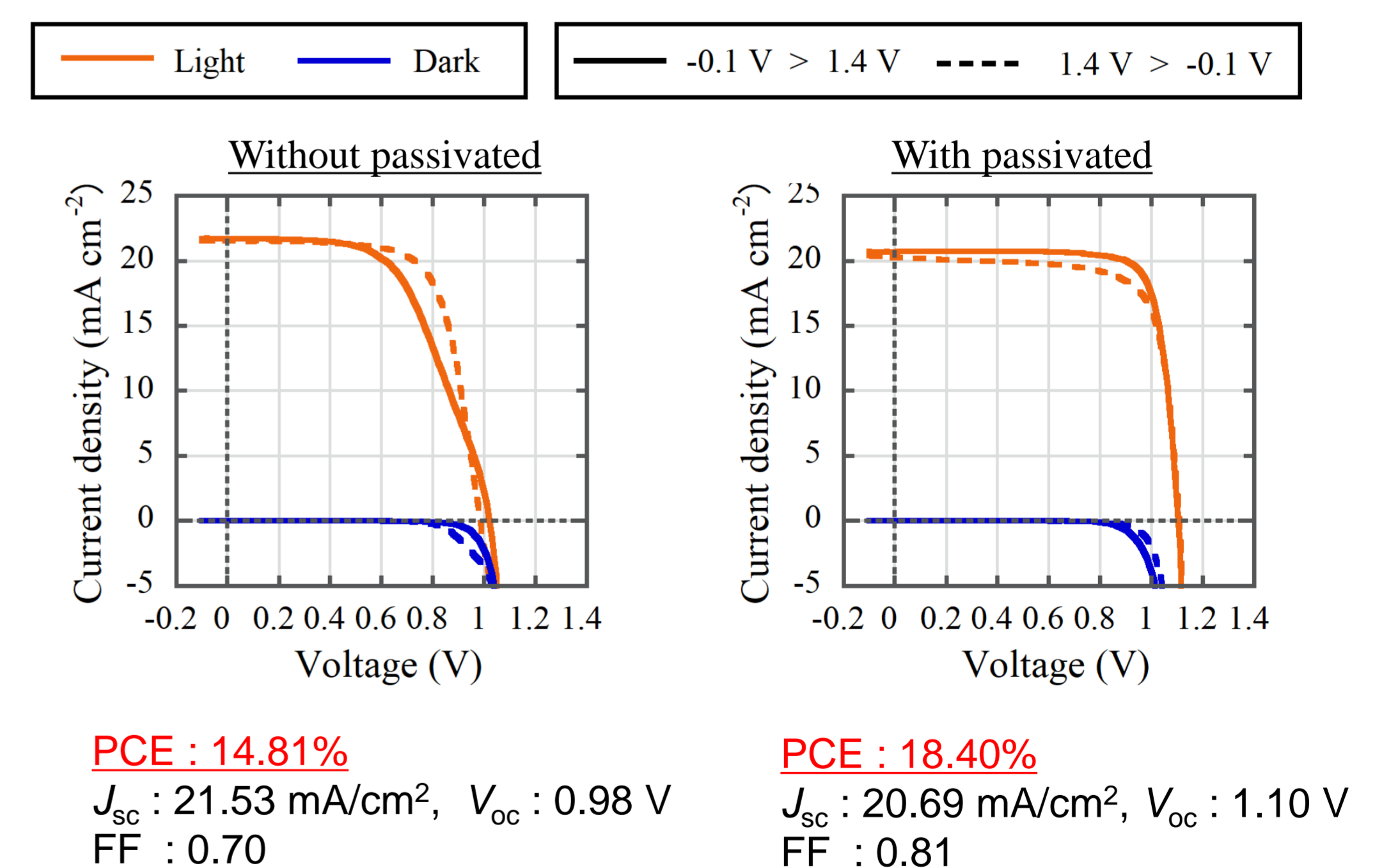


Fig. 9 J-V characteristics of the optimized PPDT2FBT based devices without or with passivation layer.

## Summary

- We investigated a D-A copolymer (PPDT2FBT), as a HTL in PSCs.
- It was turned out that the valence band level of FABr passivation layer was slightly lower than that of perovskite layer.
- PSCs treated with FABr solution showed higher open-circuit voltage and fill factor than those of untreated cells. This result indicates that the passivation layer prevents a backflow of holes from a HTL to the perovskite to suppress charge recombination.
- For the optimized PPDT2FBT based devices, the PCE was recorded 18.4%.

## References

- [1] C. W. Koh, J. H. Heo, M. A. Uddin, Y. -W. Kwon, D. H. Choi, S. H. Im, H. Y. Woo, ACS Appl. Mater. Interfaces, **9**, 43846 (2017).
- [2] K. T. Cho, S. Paek, G. Grancini, C. Roldán-Carmona, P. Gao, Y. Lee, M. K. Nazeeruddin, Energy Environ. Sci., **10**, 621 (2017).

## Acknowledgement

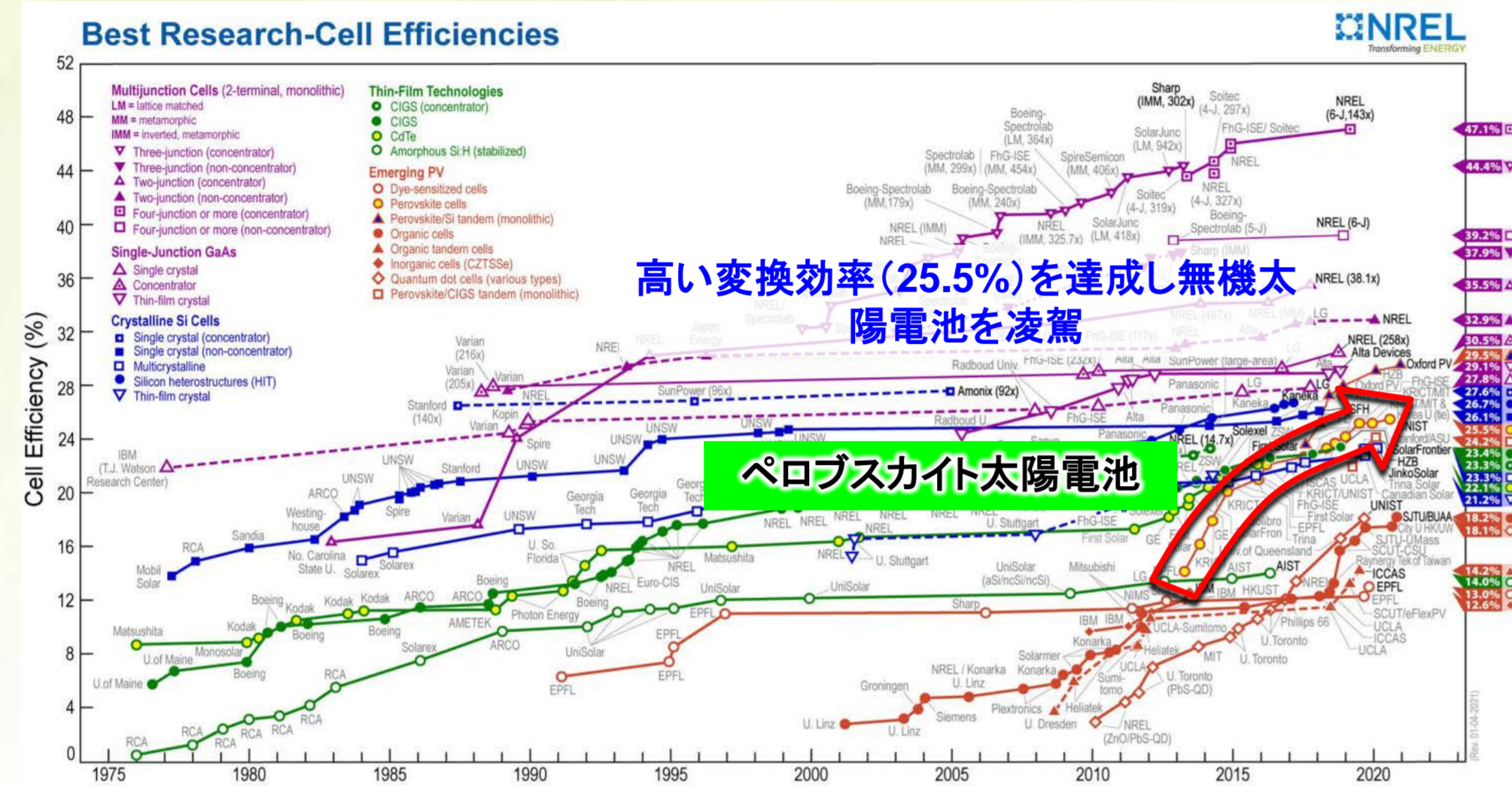
This work was supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

# CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>ペロブスカイトのエピタキシャル成長

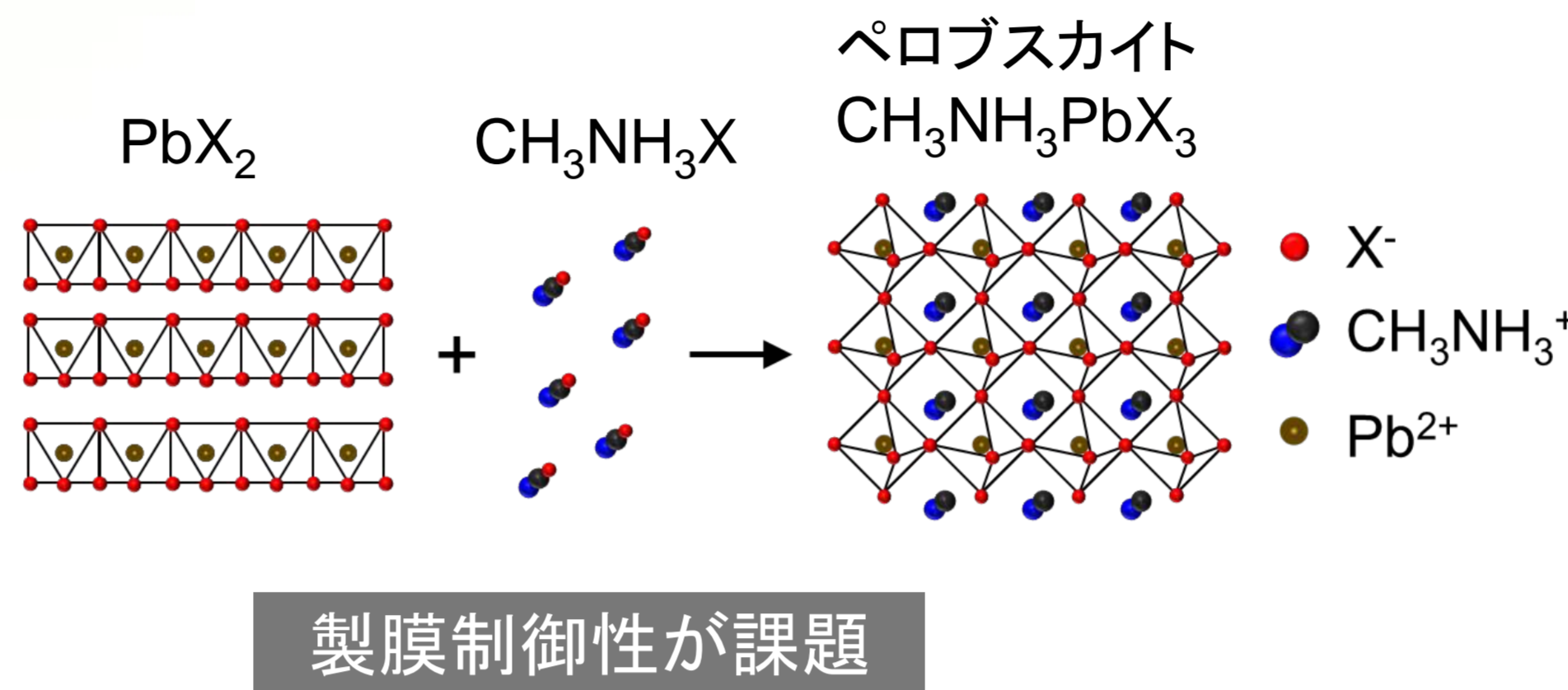
宮寺 哲彦<sup>1</sup>, 阿内 悠人<sup>2</sup>, 小金澤 智之<sup>3</sup>, 矢口 裕之<sup>2</sup>, 近松 真之<sup>1</sup>  
 1 産業技術総合研究所 ゼロエミッション国際共同研究センター、  
 2 埼玉大学、3 高輝度光科学研究センター

## 研究の目的

### ペロブスカイト太陽電池



簡便なプロセス(溶液or真空蒸着)が特徴

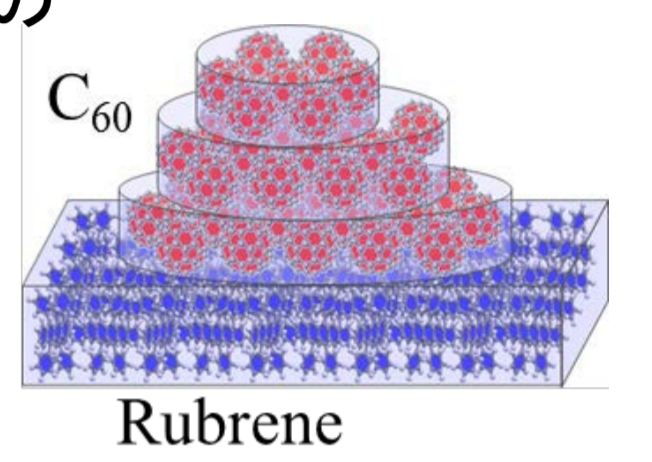


### Focus of this study

ペロブスカイトのエピタキシャル成長  
 ⇒ 構造制御された薄膜の構築

参考: ルブレン単結晶上での  
 C<sub>60</sub>のエピタキシャル成長

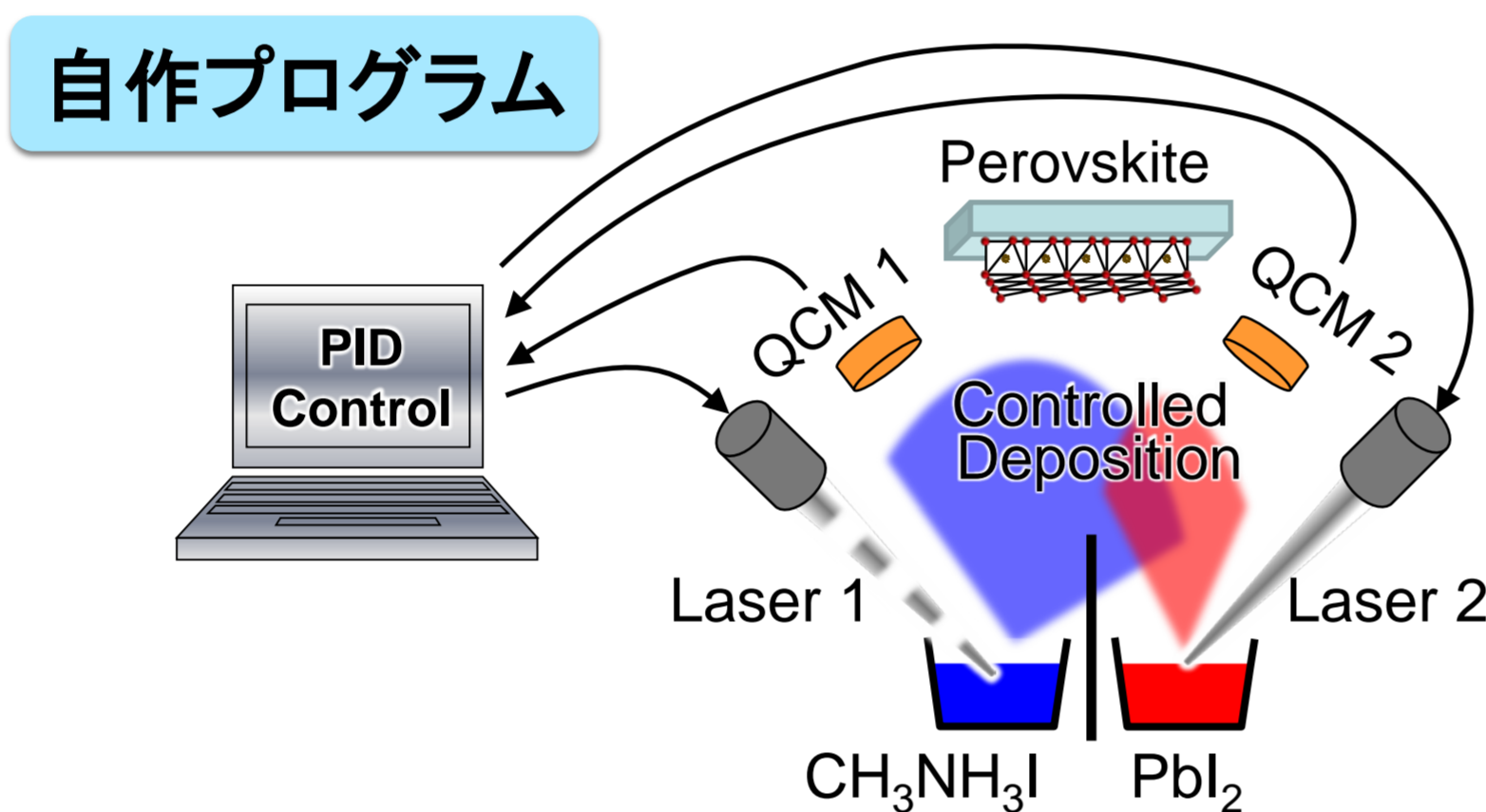
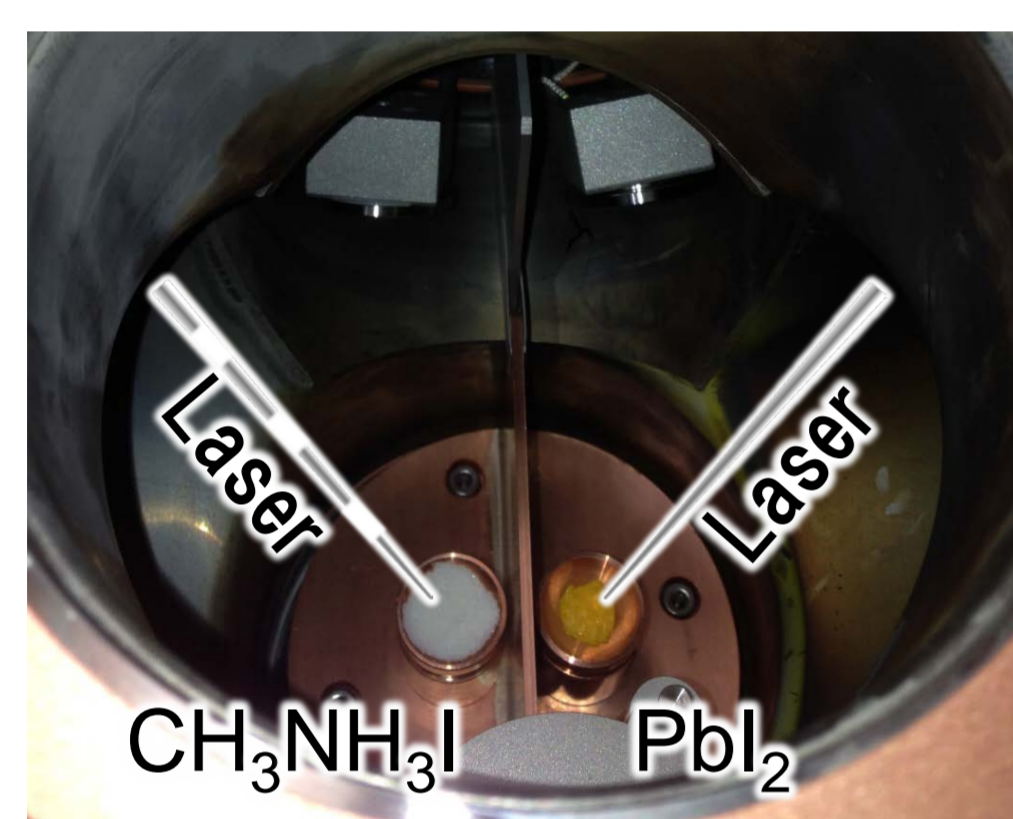
H. Mitsuta, T. Miyadera et al.  
*Cryst. Growth Des.*, 17,  
 4622-4627 (2017).



## 実験装置

### レーザー蒸着法

T. Miyadera, et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8, pp 26013–26018.



### Laser parameters

808 nm semiconductor laser

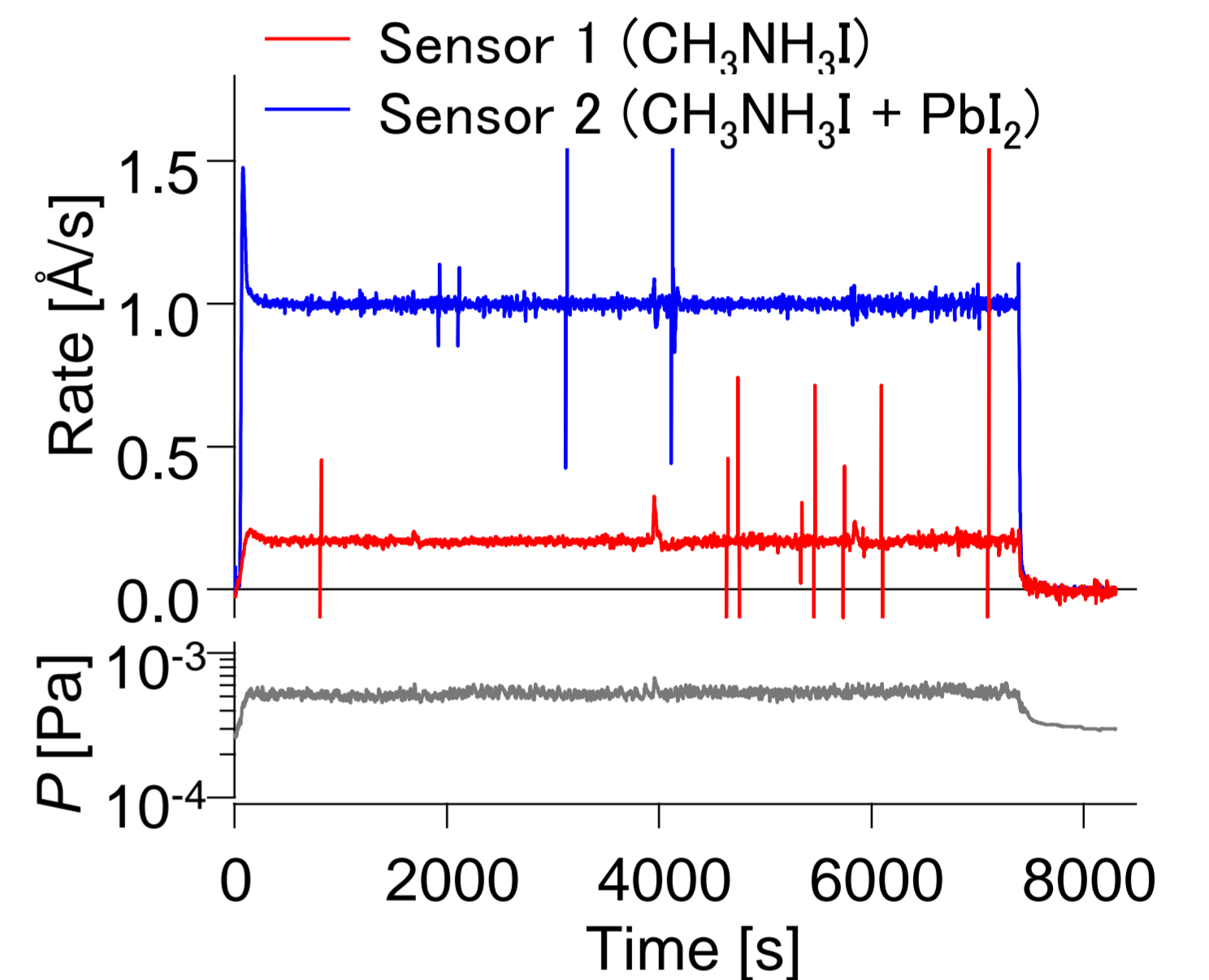
### PbI<sub>2</sub>

Continuous wave (power ~10 W)

### CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I

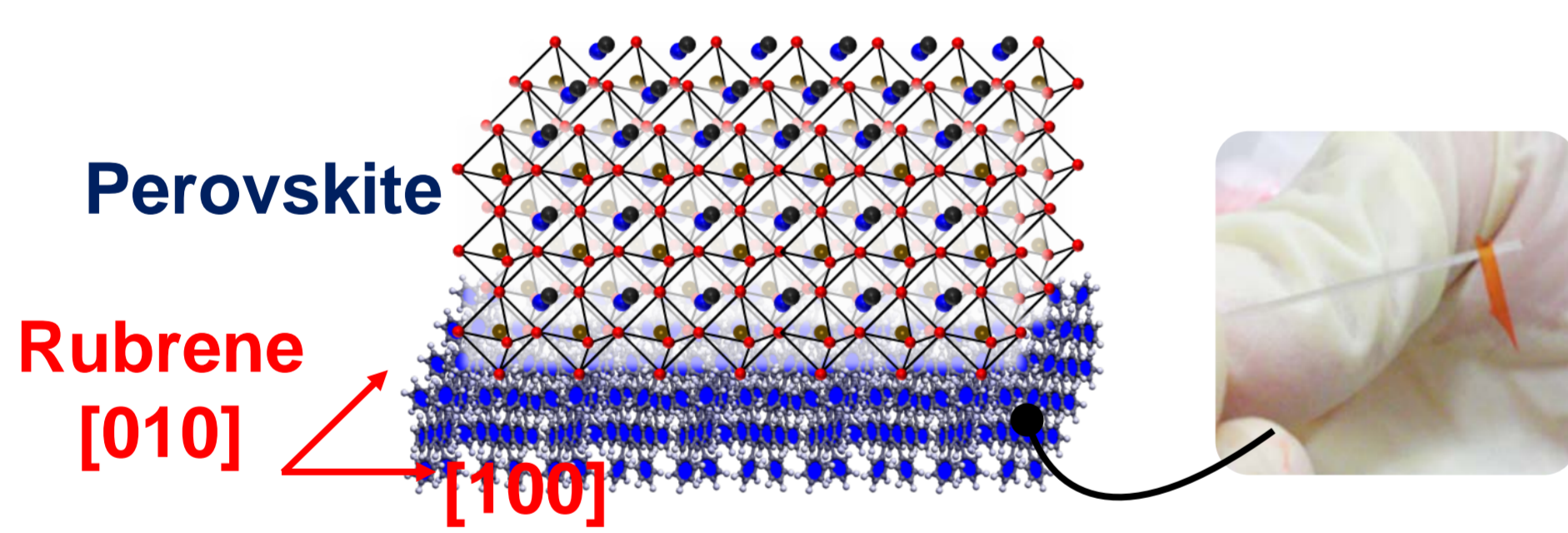
Modulated wave (power ~20 W)

Deposition rate is adjusted by varying the duty ratio of the pulse.



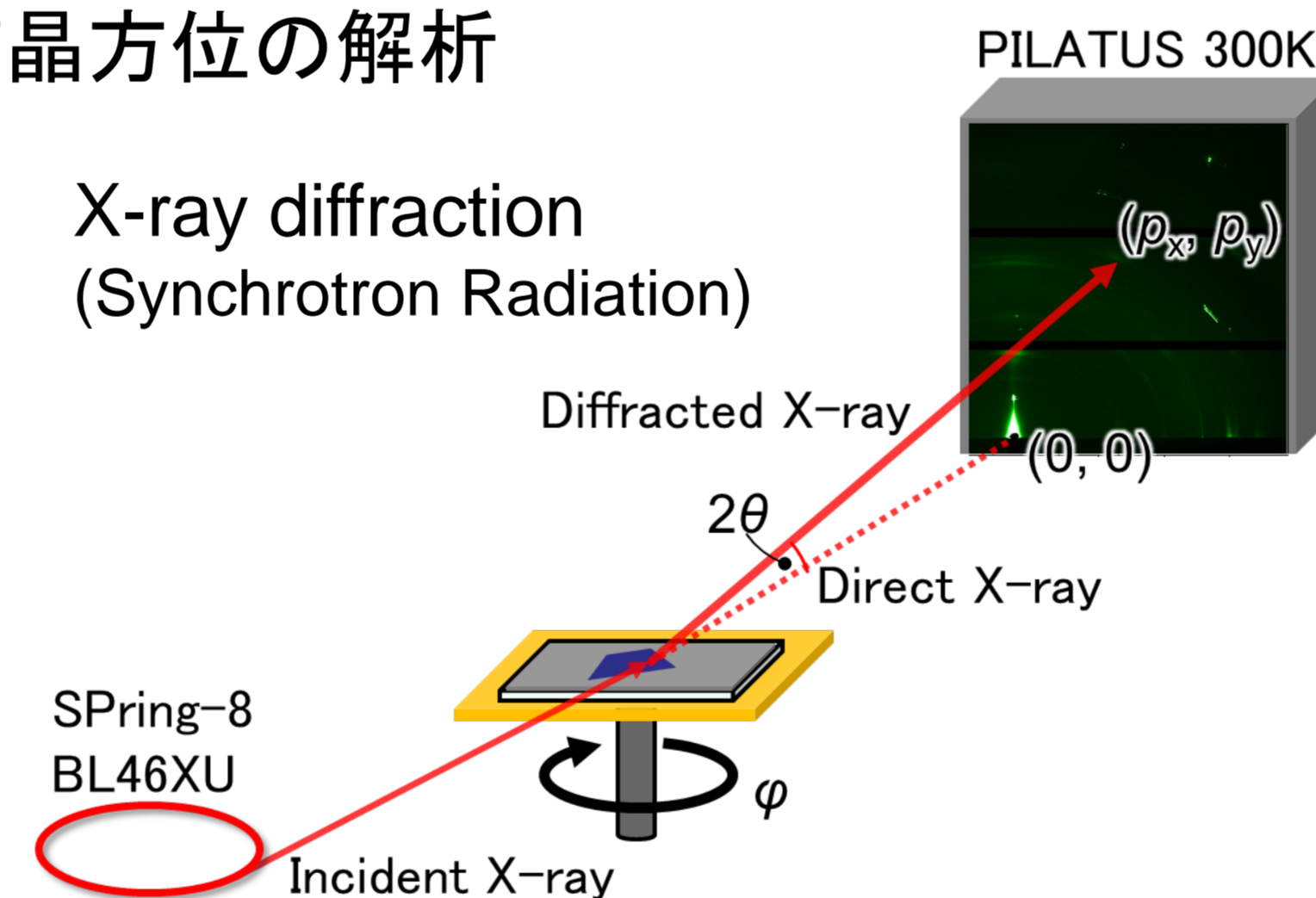
## 実験結果

ルブレン単結晶上にレーザー蒸着で  
 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>を共蒸着(PbI<sub>2</sub> + CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I)

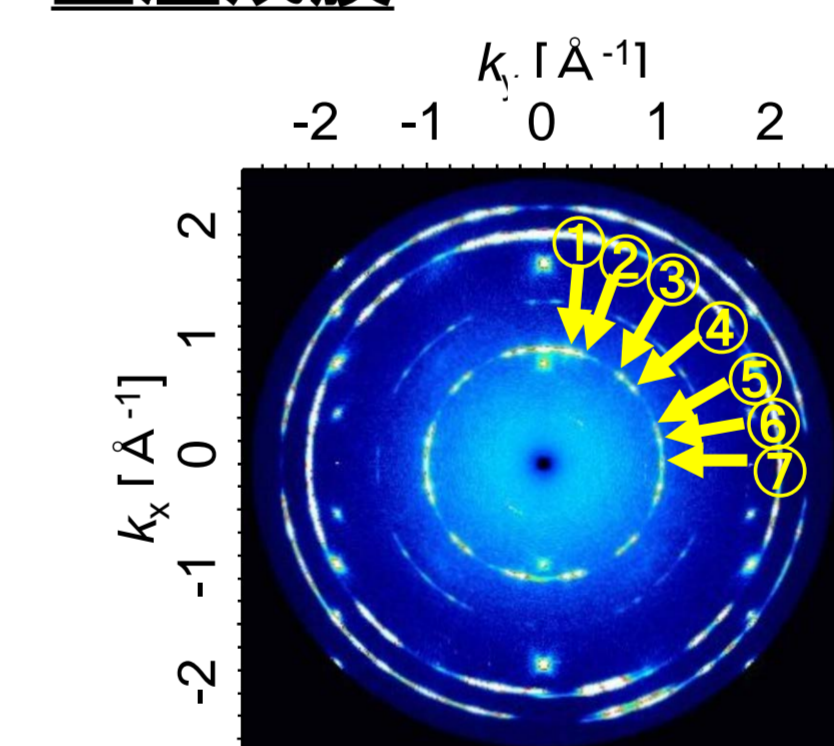


### 結晶方位の解析

X-ray diffraction  
 (Synchrotron Radiation)

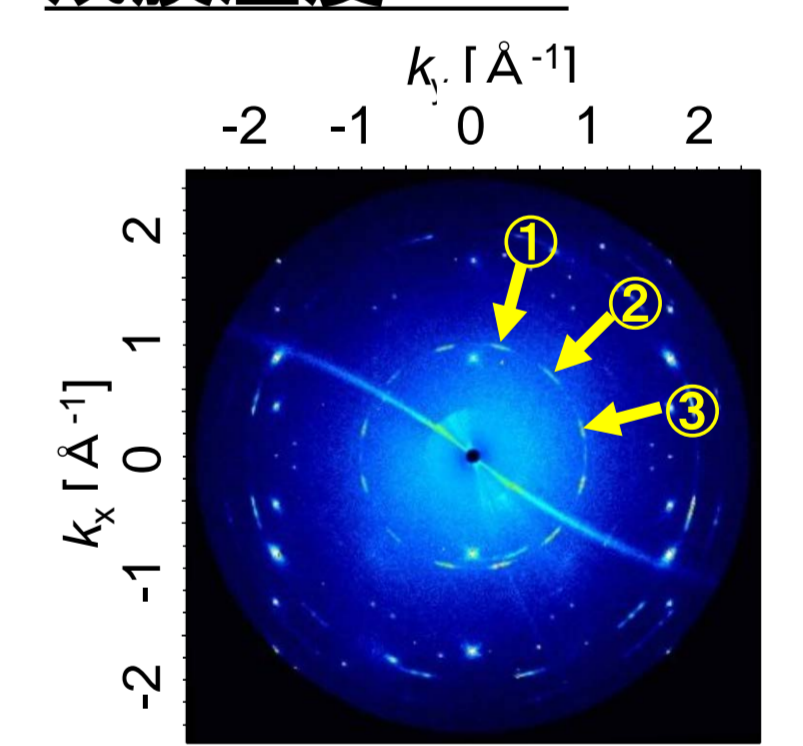


### 室温成膜



6 ~ 7種類の方角で成長  
 11°, 18°, 41°, 50°,  
 72°, 79°, (0°)

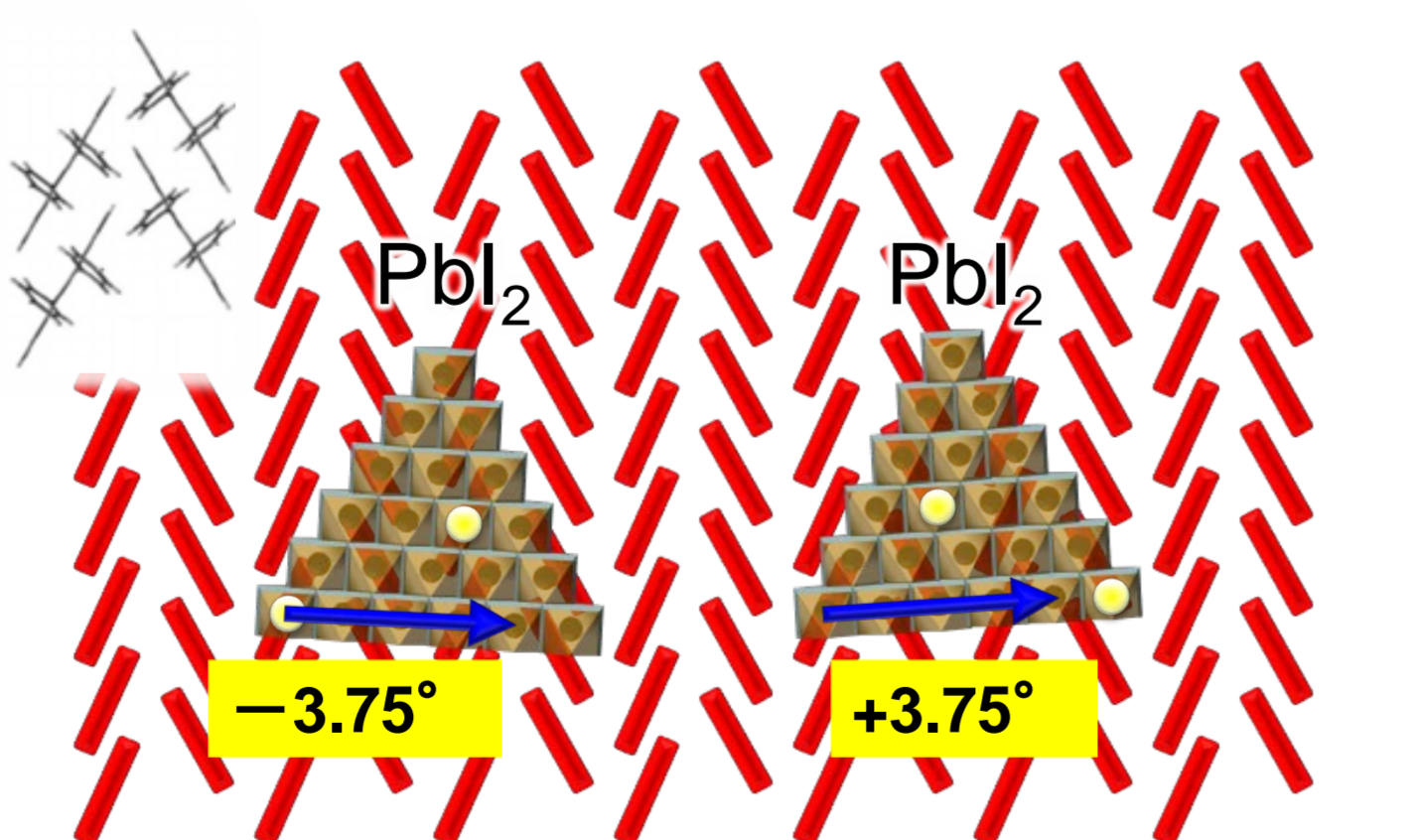
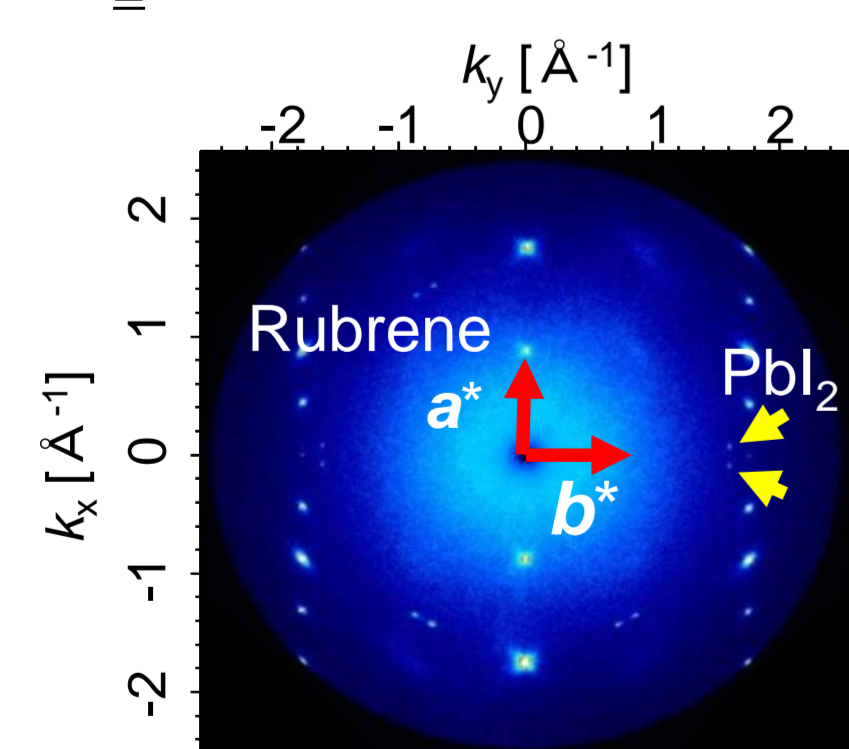
### 成膜温度80°C



3種類の方角で成長  
 15°, 45°, 75°

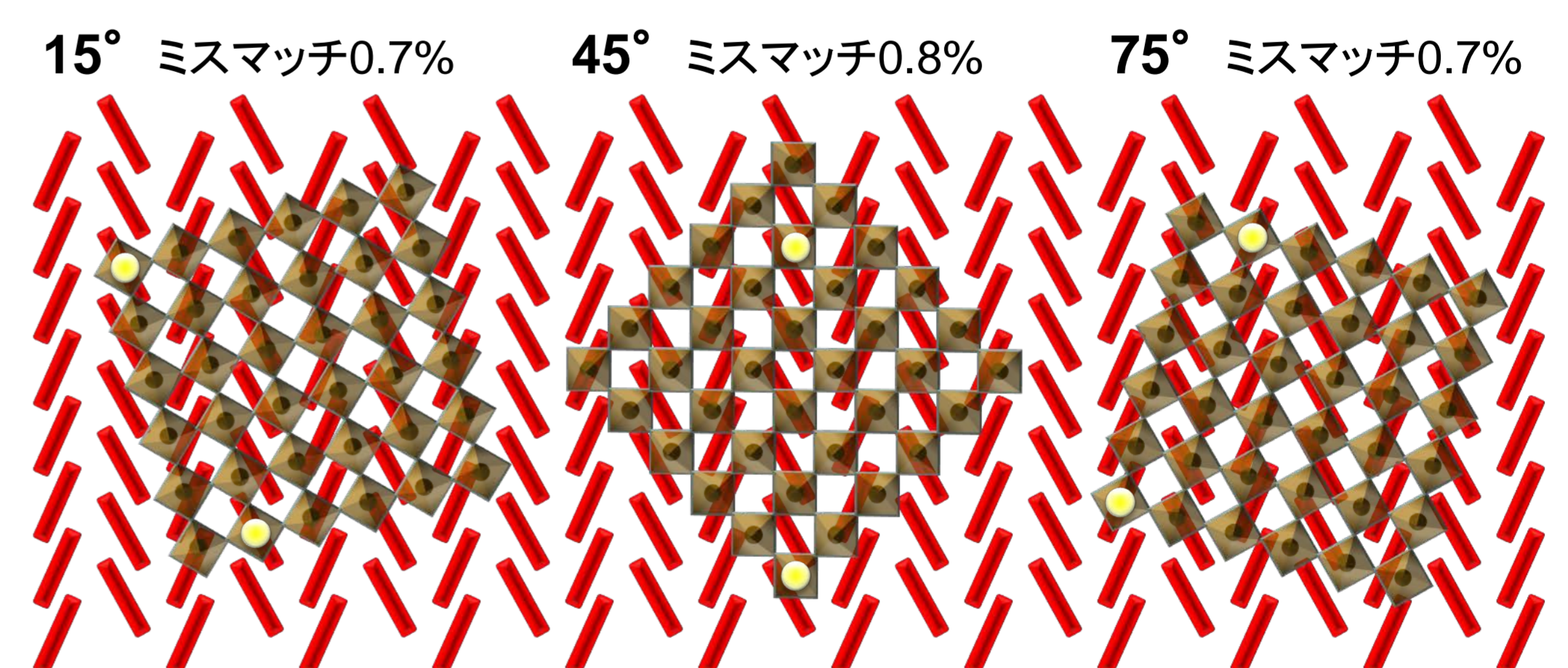
## 成長モデル

### PbI<sub>2</sub>のエピタキシャル成長



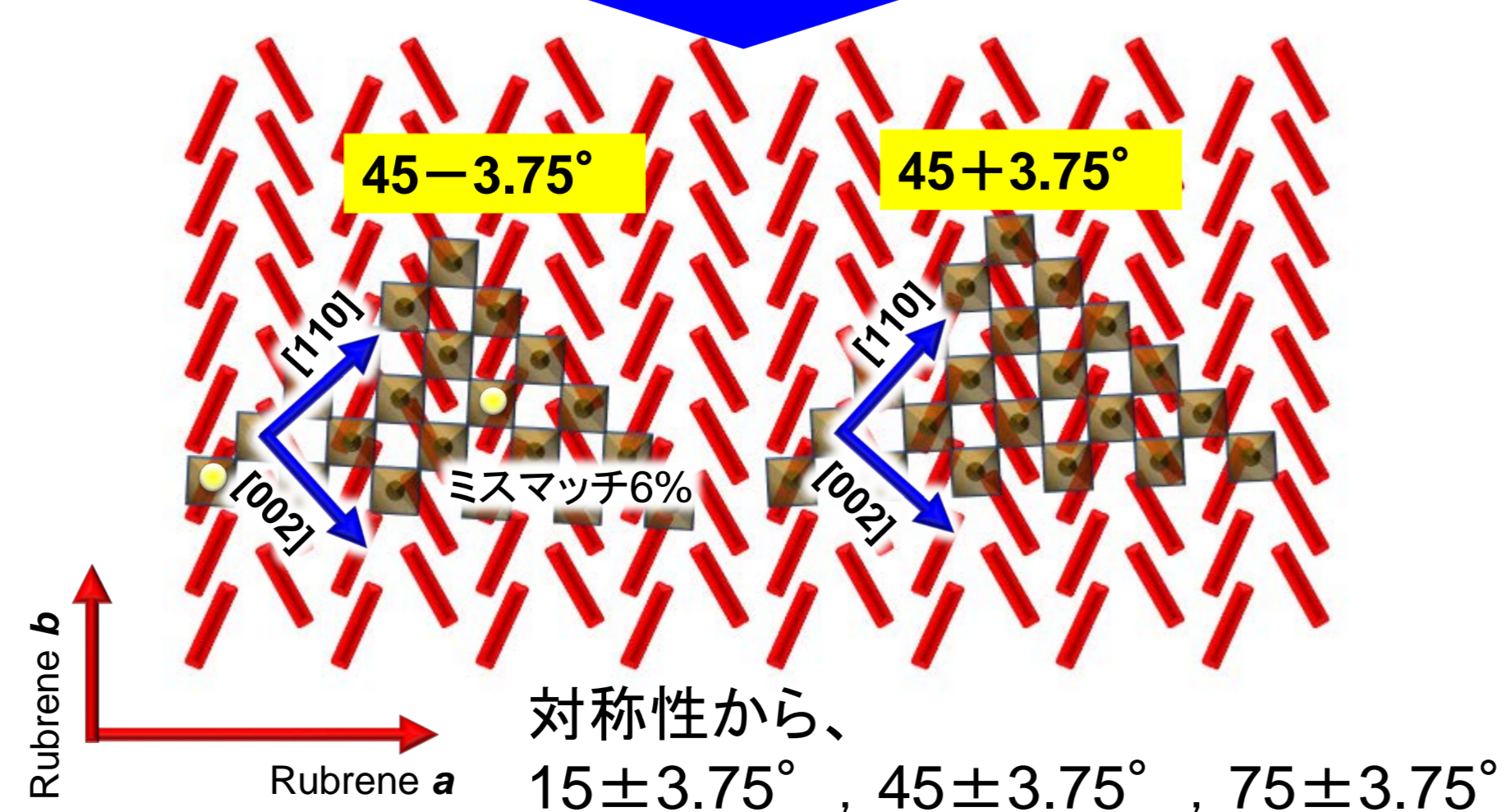
### 成膜温度80°C

格子不整合の小さい、安定なサイトへ成長していく。



### 室温成膜

PbI<sub>2</sub>がエピタキシャル成長し、面内方位を保ったままペロブスカイトが形成されていく。



### 結論

- ルブレン単結晶上でのCH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>のエピタキシャル成長に成功。
- 成膜温度による成長様式の違い  
 室温: PbI<sub>2</sub>がエピタキシャル成長、面内方位を保ってペロブスカイトが形成  
 80°C: 格子整合の小さい安定なサイトへ成長

T. Miyadera et al., *APL Materials* 8, 041104 (2020).



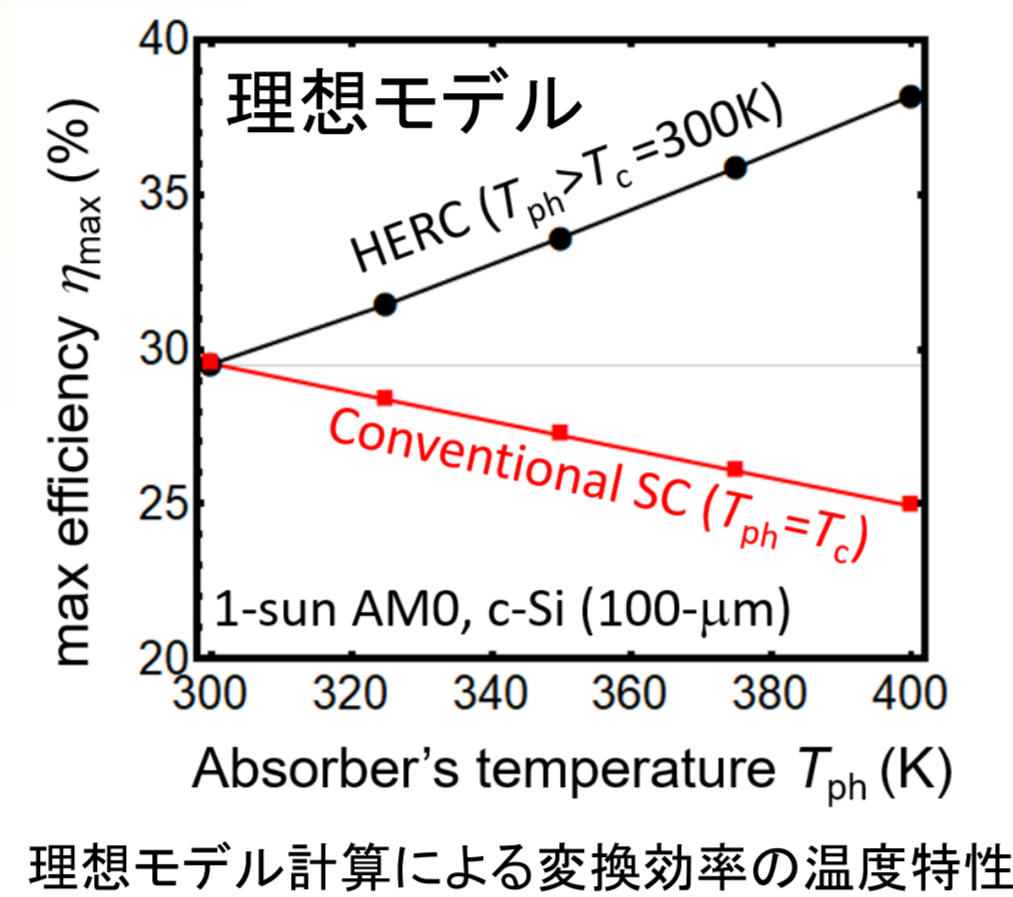
# 熱回収型太陽電池(タイプI)の理論的進展: 非輻射再結合とバンドギャップ縮小の影響

上出健仁<sup>1</sup>、望月敏光<sup>1</sup>、秋山英文<sup>2</sup>、高遠秀尚<sup>1</sup>

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 物性研究所

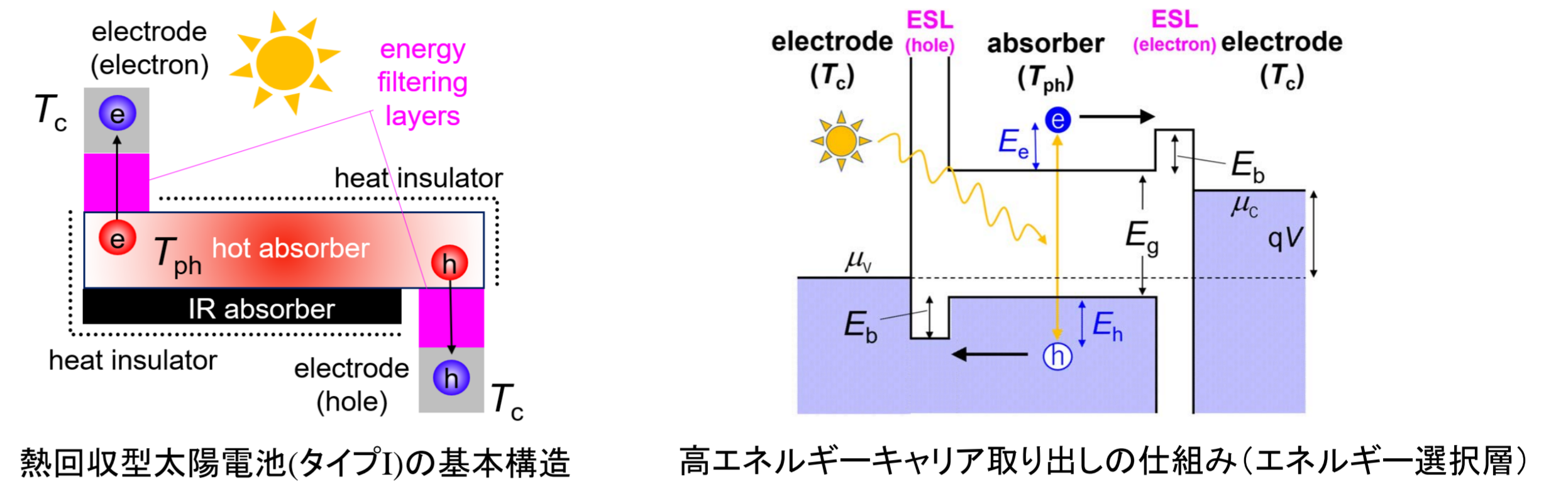
## 研究の目的

- 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)
- 熱回収型タイプIの特性は、理想太陽電池(キャリア寿命が輻射再結合で決まる場合)についてのみ試算を行った。
- 現実的な要素(非輻射再結合とバンドギャップの縮小効果)を考慮したモデル計算により、熱回収型太陽電池が実際に応用できるか検証する。



## 熱回収型太陽電池(タイプI)

熱を光吸収体内に蓄えて吸収体自体を温め、さらに高エネルギーキャリアを選択的に取り出すことにより、通常は棄てられる熱の一部が回収されSQ限界を超える高い変換効率が得られる太陽電池。結晶シリコン太陽電池にも適用可能な産総研のアイデア。



## 結果1: 非輻射再結合の影響

非輻射再結合が存在する普通の太陽電池の特性 ( $T_{ph}=T_c=300$  K, 1 sun, 結晶シリコン)

	non-radiative lifetime $\tau_{nr}$ (ms)			
	0.1	1	10	$+\infty$
$\eta_{max}$ (%)	20.0	24.3	28.1	29.5
$V_{oc}$ (V)	0.687	0.802	0.859	0.868
FF	0.745	0.775	0.834	0.869
$J_{sc}/J_{sun}$	1.000	1.000	1.000	1.000

※Si太陽電池のレコード  
=26.7% (Kaneka, HIT)

非輻射再結合が存在する熱回収型太陽電池(タイプI)の特性 ( $T_{ph}=400$  K,  $T_c=300$  K, 1 sun, 結晶シリコン)

	non-radiative lifetime $\tau_{nr}$ (ms)			
	0.1	1	10	$+\infty$
$\eta_{max}$ (%)	24.9	30.6	35.8	38.2
$V_{oc}$ (V)	0.840	0.991	1.089	1.110
FF	0.778	0.804	0.850	0.880
$J_{sc}/J_{sun}$	0.972	0.980	0.988	0.998
$E_b^{opt}$ (eV)	0.32	0.39	0.45	0.47

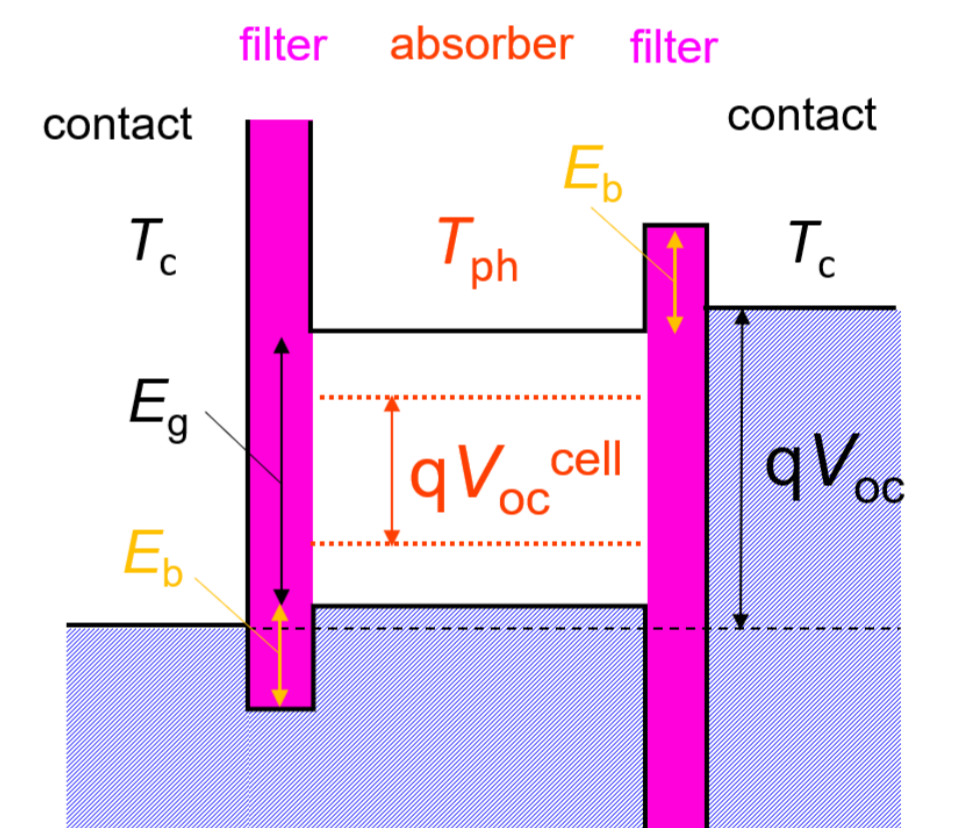
同じ品質(同じ非輻射再結合寿命)の結晶シリコンを用いた場合と比較すれば、いずれの場合も熱回収効果により変換効率の上昇(正の温度特性)がみられる。  
→ 熱回収効果は非輻射再結合に強い耐性がある。

非輻射再結合へ耐性があることの二つの理由

- 熱回収型太陽電池の正の温度特性は、主に開放電圧の温度特性(下の式)に起因している。開放電圧の正の温度係数は、開放電圧の値そのものによらず、エネルギー選択層の障壁によってのみ決まる。このため、正の温度特性は結晶の品質(キャリア非輻射寿命)によらないことになる。

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{2E_b}{qT}$$

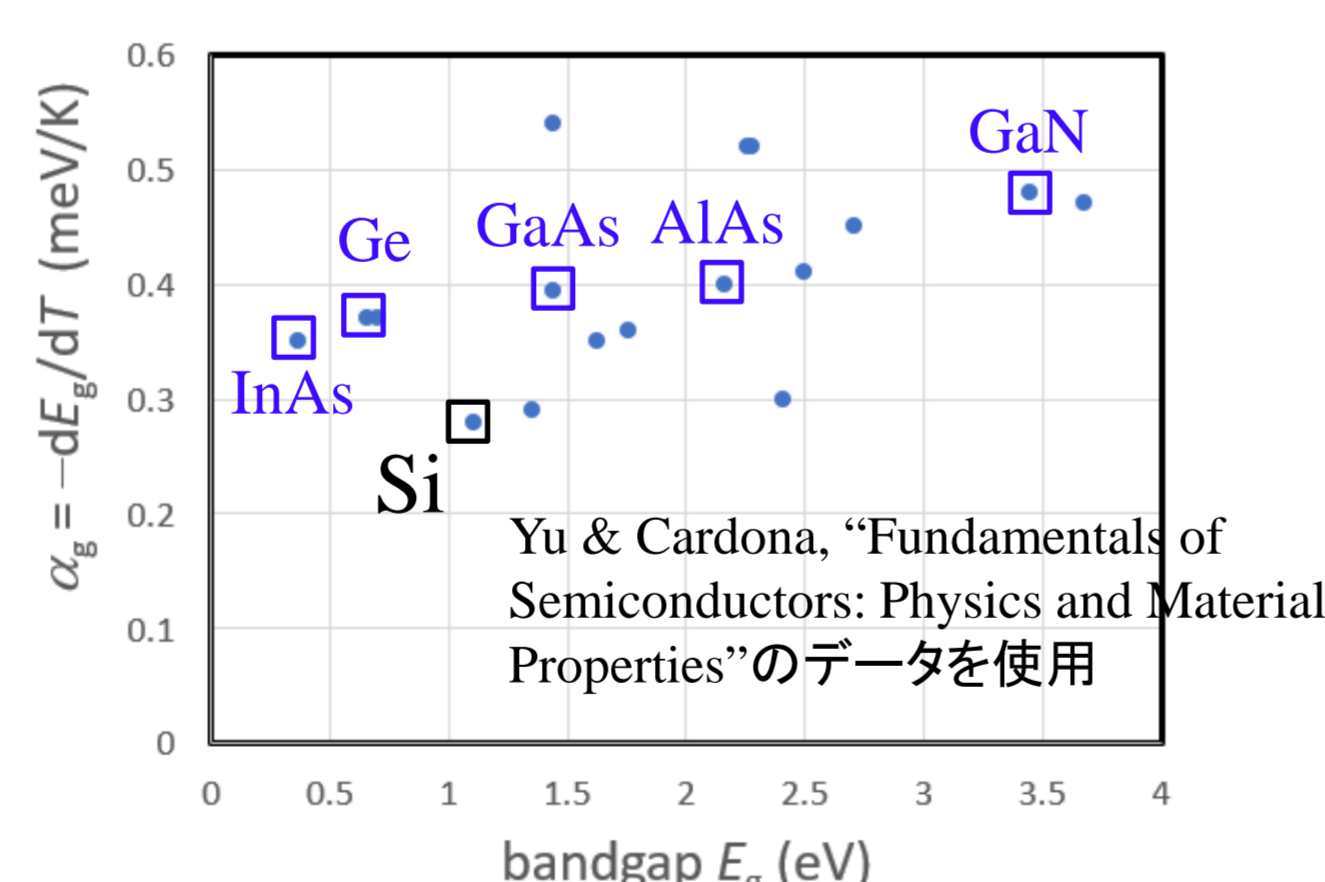
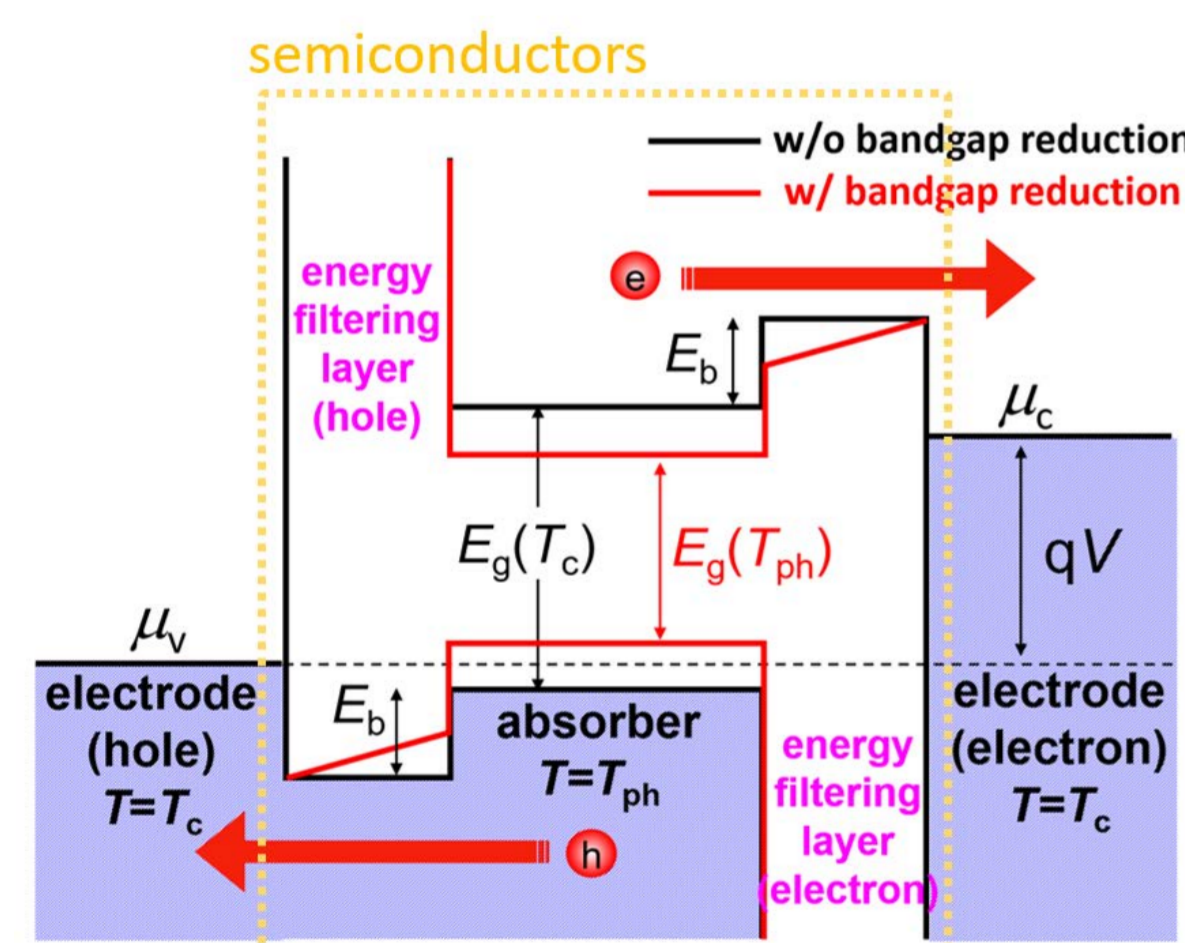
K. Kamide et al., Phys. Rev. Applied, 12, 064001 (2019).



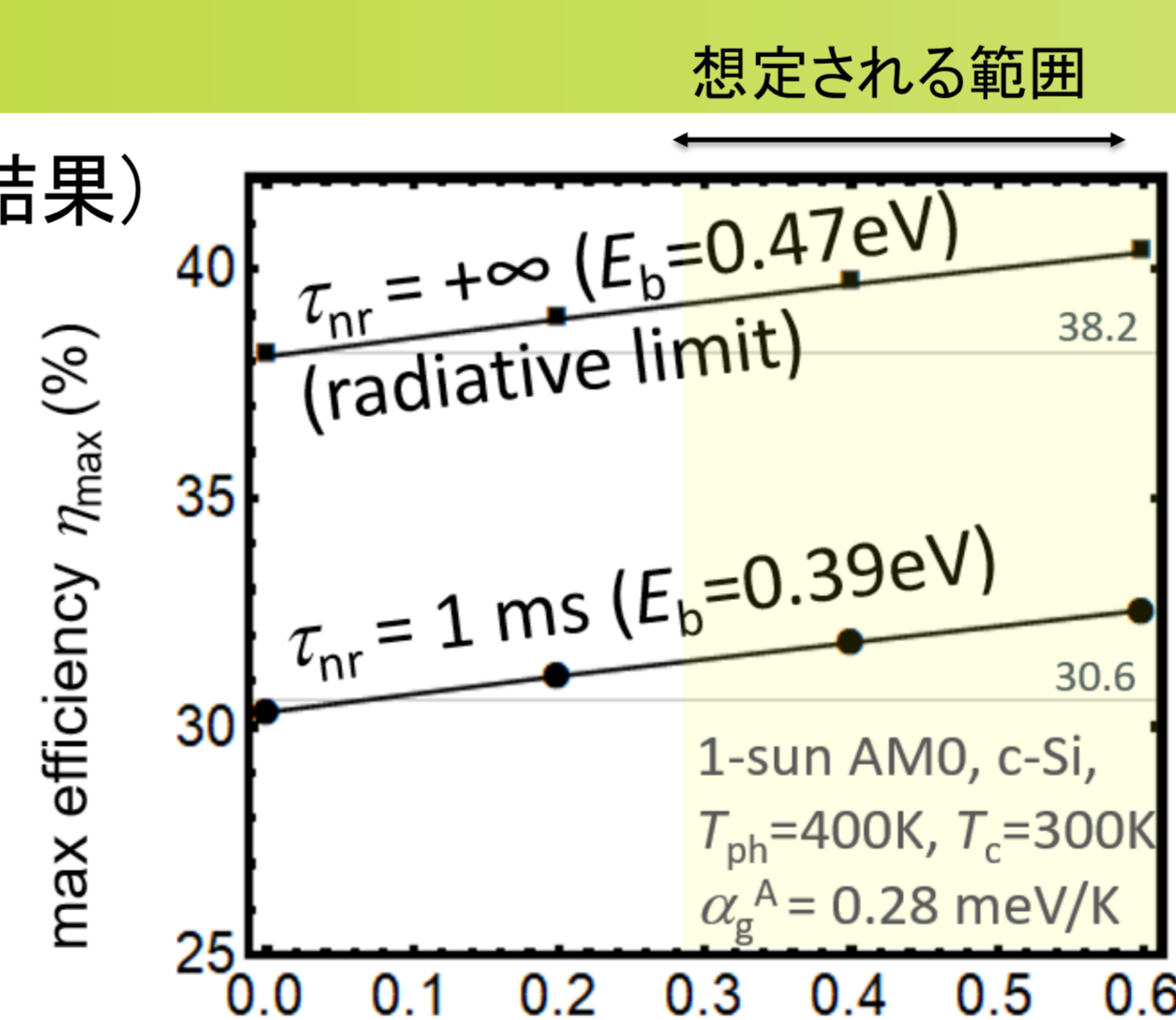
- 非輻射再結合によるエネルギー損失は吸収体を温める熱となるため、その一部は熱回収型構造により電力として回収される。このため、通常の太陽電池より非輻射再結合による性能低下は抑えられる。

## 結果2: バンドギャップ縮小の影響

熱回収型太陽電池では、高温化した吸収体を用いるため吸収体(結晶シリコン)のバンドギャップが縮む。単純には、開放電圧を低下させる一方で短絡電流を増加させる効果があると予想される。さらに、エネルギー選択層内部の温度上昇も起こるため、最終的なデバイス特性への影響は、単純には予想できない。



(計算結果)



エネルギー選択層材料のバンドギャップ縮小係数  $\alpha_g^F$  (meV/K)

エネルギー選択層材料のバンドギャップ縮小は正に働き、熱回収効果をより高める。吸収体とエネルギー選択層の寄与を合わせるとバンドギャップ縮小は良い影響を与え効率をさらに増加させる。

バンドギャップ縮小が良い効果を与える理由

エネルギー選択層内には温度勾配が存在するため、バンドプロファイルにも勾配が発生。この勾配は、吸収体から電極(順方向)へのキャリアの流出を促進し、電極から吸収体(逆方向)への流入を抑制する効果がある。このラチェットの効果により、エネルギー選択層のバンドギャップ縮小が開放電圧の特性に正の寄与を生む:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{2E_b}{qT} + \frac{\alpha_g^F - \alpha_g^A}{q}$$

$\alpha_g^A$ : 光吸収層(Si)のバンドギャップ縮小係数  
 $\alpha_g^F$ : エネルギー選択層のバンドギャップ縮小係数

## 結論

- 熱回収型太陽電池(タイプI)のコンセプトは、非輻射再結合やバンドギャップ縮小が存在する現実の太陽電池にも応用できることを理論的に確認した。
- この知見により本コンセプトの結晶シリコン太陽電池への応用への期待がより確かなものとなった。

## 参考文献

- (熱回収型太陽電池:タイプI)
- [1] K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. 12, 064001 (2019).
  - [2] 上出他, PCT/JP2018/043782 (W I P O) (2018).
  - [3] K. Kamide et al., 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), pp. 1817-1821 (2018).
  - [4] K. Kamide et al., 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 2175-2177 (2020).
- (熱回収型太陽電池:タイプII)
- [5] 上出他, PCT/JP2019/045804 (W I P O) (2019).
  - [6] 上出他, 第66回応用物理学会春季学術講演会 11a-W321-5 (2019).
  - [7] K. Kamide et al., PVSEC-29 (Xian, China, 2019).

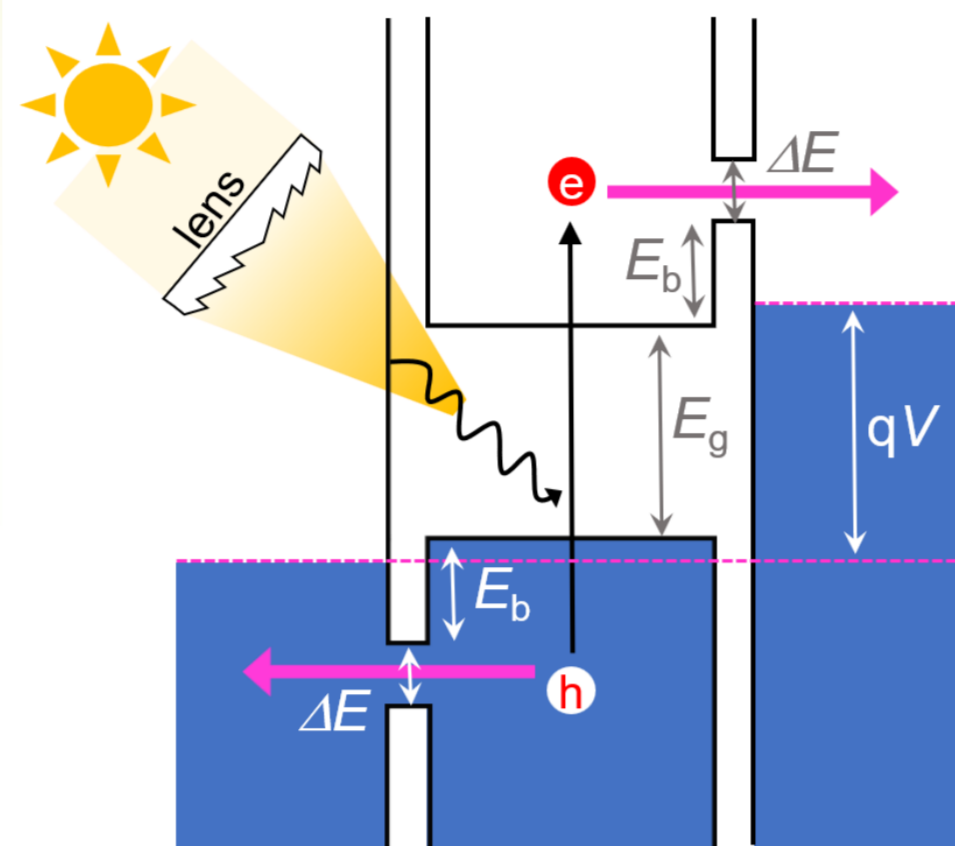
# ホットキャリア太陽電池のI-V特性と安定性に関する理論研究

上出健仁

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

- ホットキャリア太陽電池 (HCSC [1]) は高速キャリア取り出しにより熱化損失を低減し高い変換効率を実現できる太陽電池のコンセプトであり、その変換効率限界はよく調べられている[2,3]。
- 一方、I-V特性についてはモデルにより異なるタイプのIV曲線が得られており踏み込んだ議論はされておらず十分理解されていない。
- I-V特性について動作安定性も含め理解するために、太陽電池の非平衡理論[4]を用い解析を行った[5,6]。



HCSCの概念図

## 先行研究: いくつかの理論モデルとI-V特性

文献によりI-V曲線が異なり通常期待される滑らかなもの(下記 1./2.)ばかりでなくヒステリシスが見られたり(3.)、短絡条件付近で信頼性の低い結果しか得られない(1.)など、現状、HCSCのI-V特性の理解は不十分。

### 1. 粒子数保存モデル(Ross and Nozik, 1982 [1])

HCSCの初期理論。吸収された光子数と生成されたキャリア(電子正孔対)の生成数とが一致する。

### 2. II-ARモデル (P. Würfel, 1997 [7])

キャリア間相互作用が強く多重キャリア生成・消滅過程(インパクトイオン化 (II) とオージェ再結合(AR))が高速に起こる極限のHCSC理論。

### 3. レート方程式モデル(竹田他 2010~ [2, 3])

キャリアダイナミクスを現象論的に緩和時間で記述するHCSCのモデル。

## 結果1: インパクトイオン化とオージェ再結合を考慮しない場合のI-V特性と動作安定性

### 方法

#### 非平衡理論[2-4]+線形安定性解析[5,6]

太陽電池のキャリアダイナミクスを考慮した微視的レート方程式(非平衡理論[4])

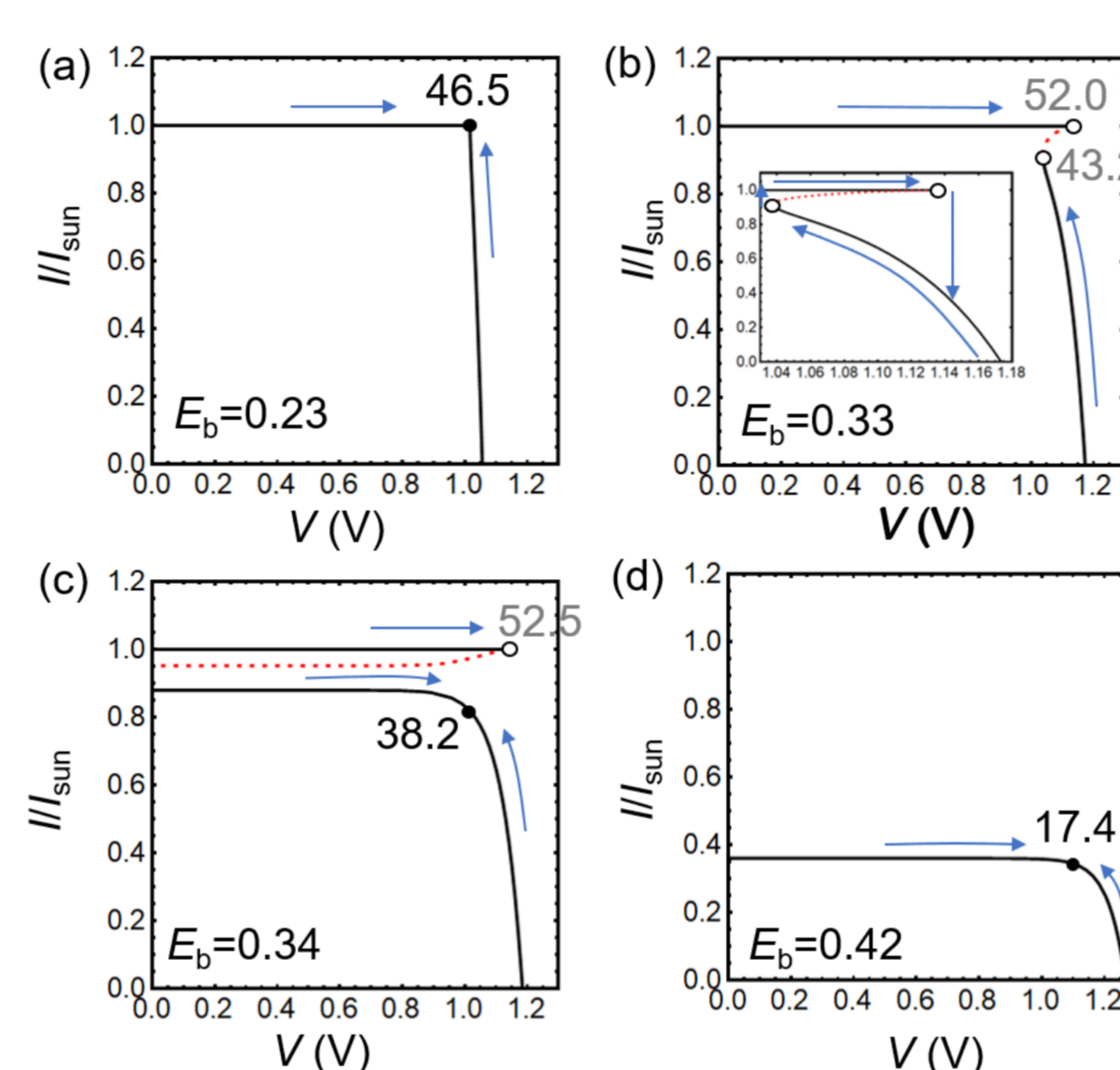
$$\frac{d}{dt}n_E = R_E^{\text{sun}} - R_E^{\text{rad}} - R_E^{\text{out}} - R_E^{\text{eq}} - R_E^{\text{th}}$$

$R_E^{\text{sun}}$ : 光注入     $R_E^{\text{rad}}$ : 発光再結合     $R_E^{\text{out}}$ : 取り出し  
 $R_E^{\text{eq}}$ : 平衡化 (電子間相互作用)     $R_E^{\text{th}}$ : 熱化 (電子-格子相互作用)

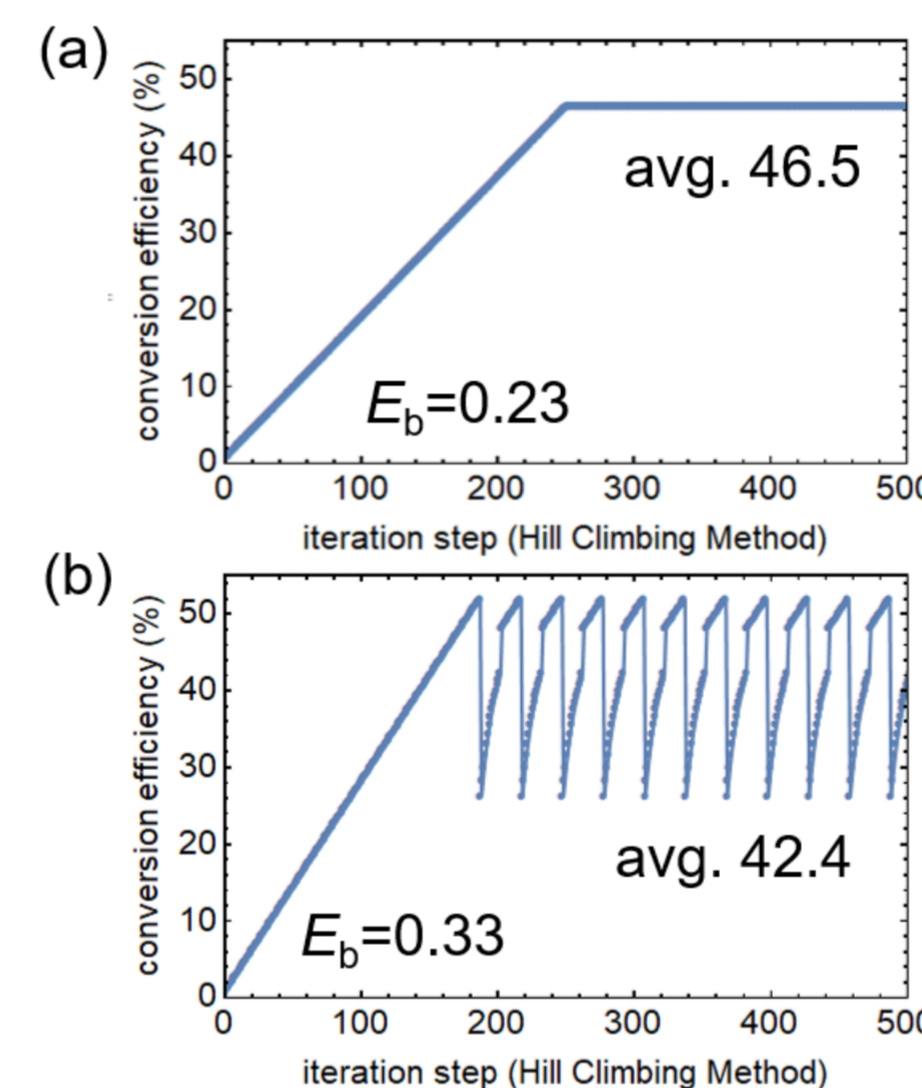
で定常状態におけるキャリアの分布関数を決定し、これを用いてI-V特性を決定。さらに定常解の周りで方程式を線形化しI-V曲線上各点の線形安定性を調べる[5,6]。

### 結果

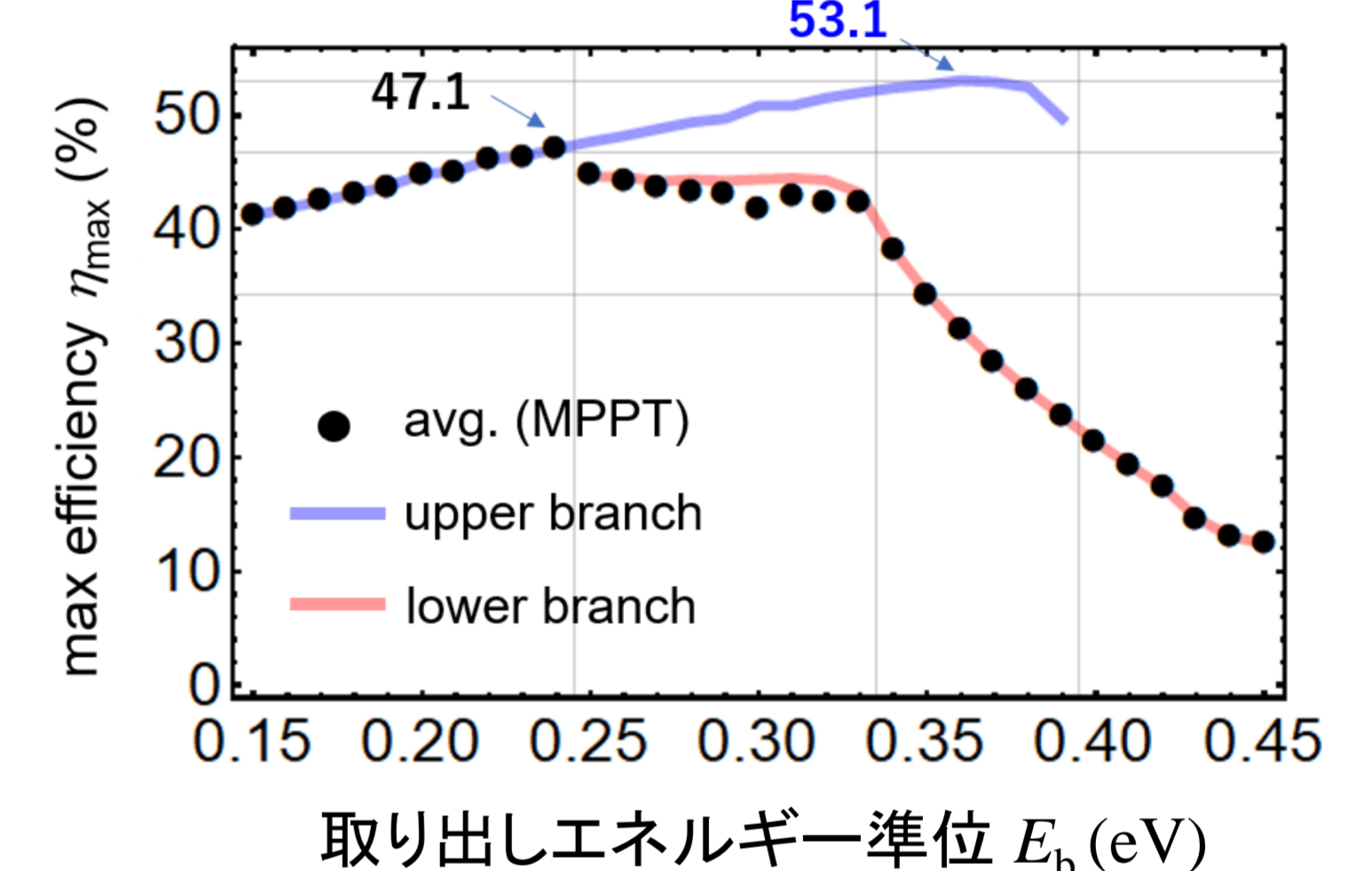
(現実的な設定) 1000倍集光,  $E_g=0.93$  eV, 吸収体厚=100 nm,  $\Delta E=0.1$  eV, 平衡化時間 = 1 ps, 熱化時間 = 1 ns, 取り出し時間=10 ps



最大効率を与える最適取り出し準位付近( $E_b$ )でI-V曲線が分岐する。負性抵抗を示す分岐(赤線)は不安定のためヒステリシスを示す。MPPT(最大電力点追従)を用いた実際の出力に影響。



I-V特性にヒステリシスがある場合、MPPT(hill-climbing法)による出力の時間変化に振動が発生し、平均出力が大きく低下する。

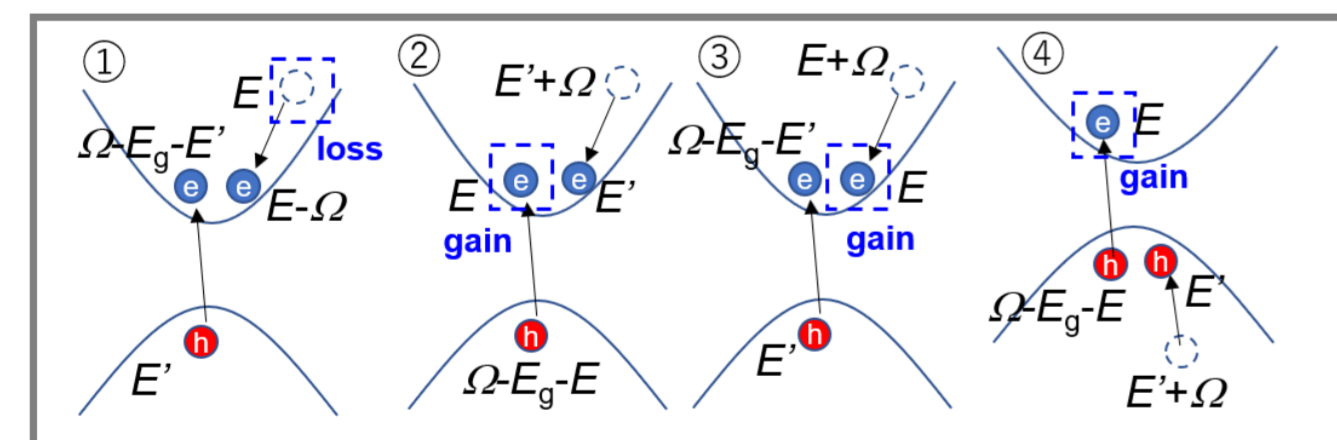


I-V特性にヒステリシスが生じる場合、MPPTによる平均効率が大きく下がる為、ヒステリシスの生じない少し低めの取り出しエネルギー準位が良い選択となることが分かる。

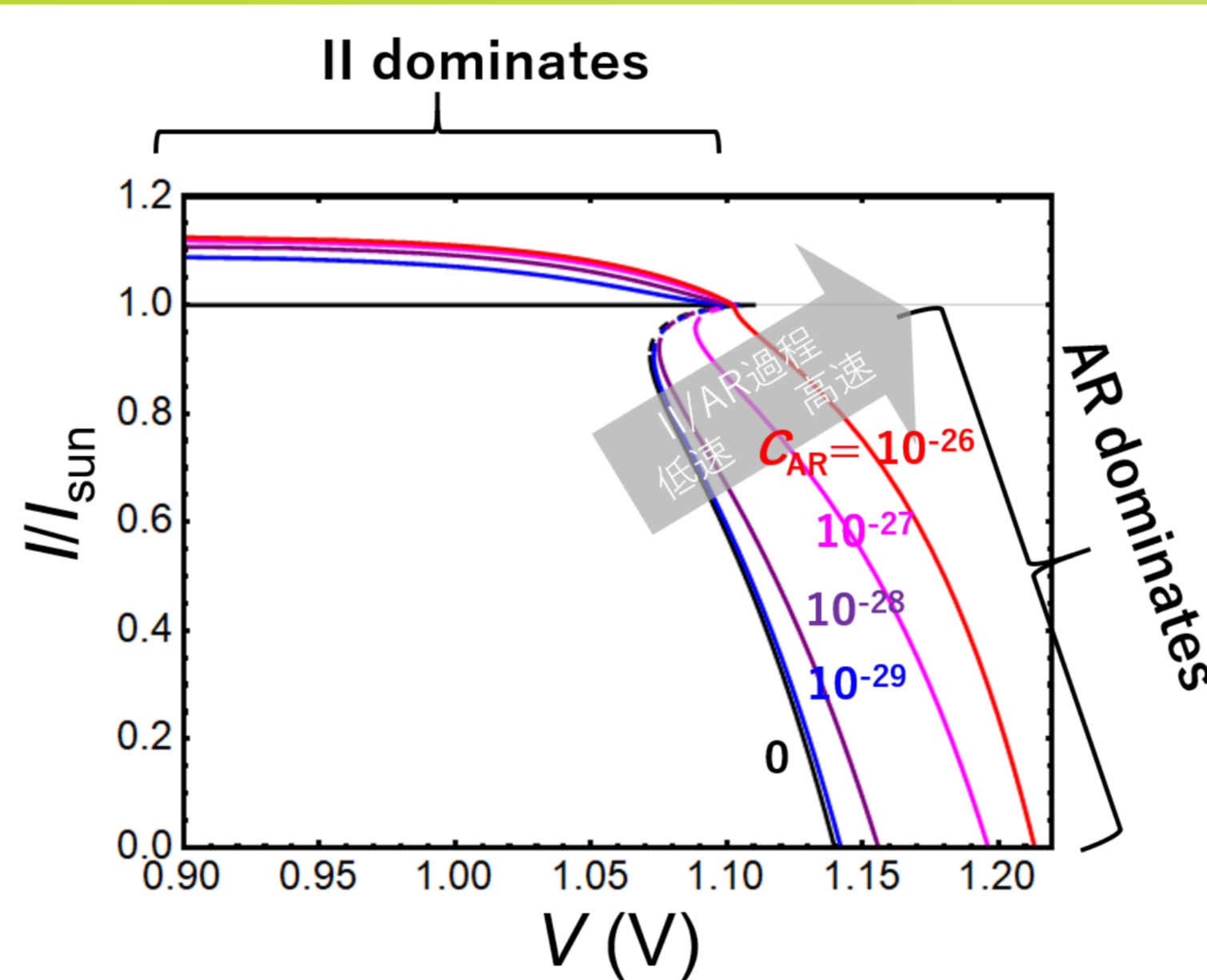
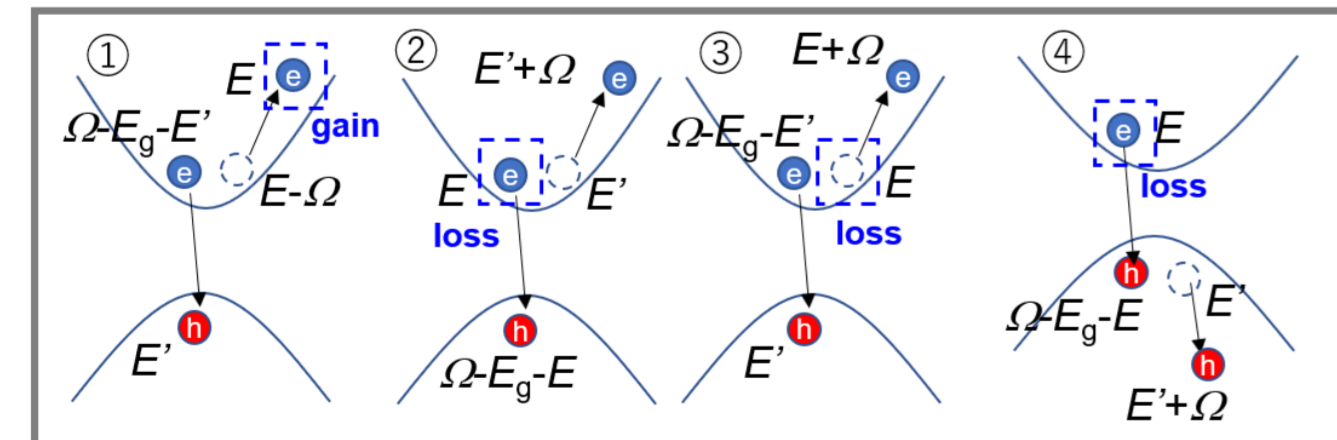
## 結果2: インパクトイオン化とオージェ再結合の影響

現実には存在する多重キャリア生成・消滅過程を、物質定数であるオージェ再結合係数  $C_{AR}$  ( $\text{cm}^6/\text{s}$ )により考慮しその影響を調べる。

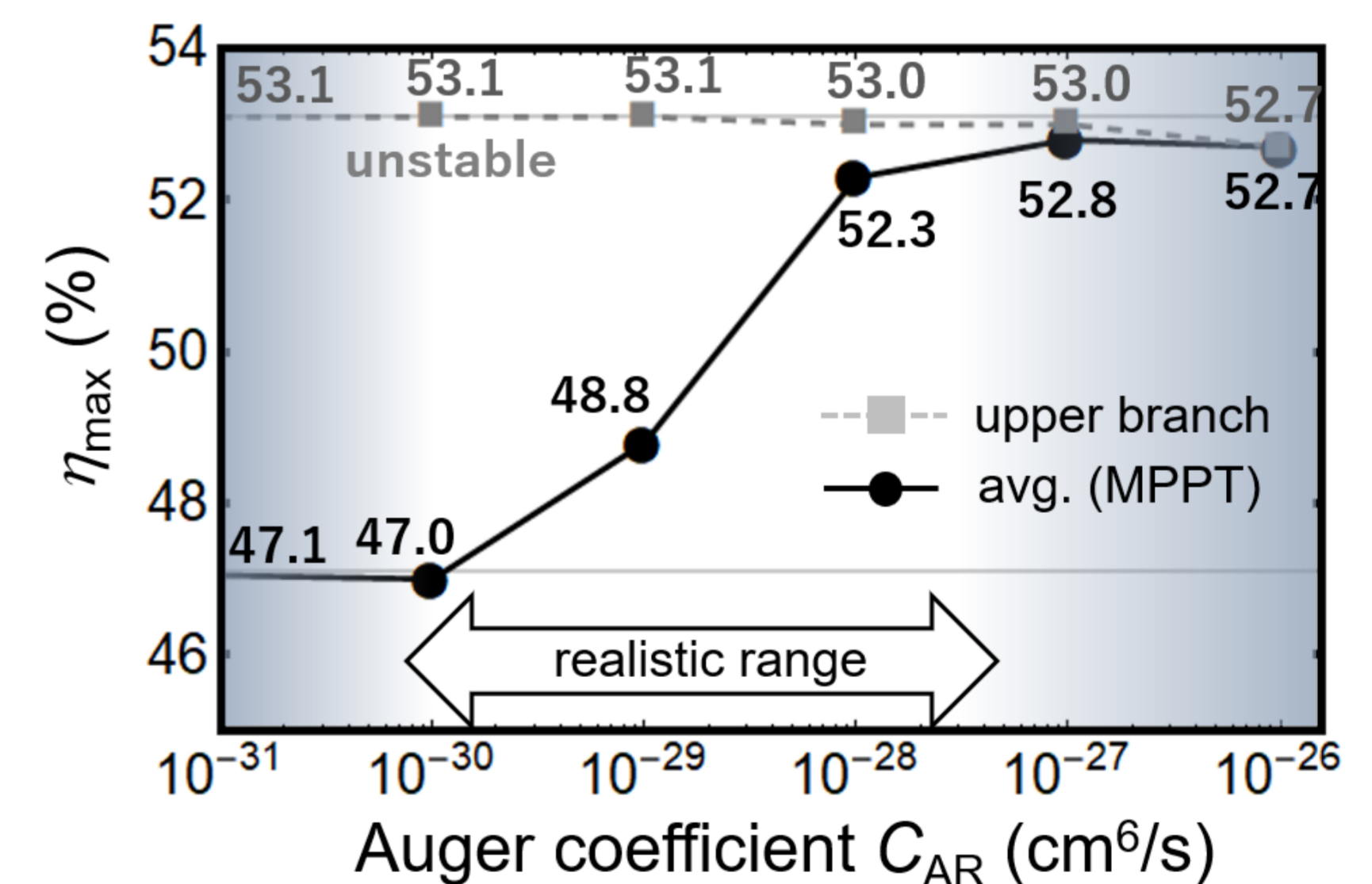
### インパクト・イオン化過程(II)



### オージェ再結合過程(AR)



多重キャリア生成・消滅過程が高速に起こる( $C_{AR}$ が大きい)とI-Vヒステリシス(不安定性)を低減できることが明らかになった。



多重キャリア生成・消滅過程が高速に起こるほどMPPTによる平均効率が向上する。なるべく大きな $C_{AR}$ を持つ材料を吸収体にすべきという材料選択指針が得られた。

## 結論

- 太陽電池の非平衡理論と線形安定性解析により、安定性動作条件におけるホットキャリア太陽電池のI-V特性と変換効率を調べた。
- 高効率なホットキャリア太陽電池ではI-Vヒステリシスが生じ得るが、取り出しエネルギーを少し低めに選択することでそれに伴う動作不安定性を回避できる。
- 多重キャリア生成過程がヒステリシスや不安定性を抑制し実デバイスの効率を向上させることから、オージェ再結合係数の大きな材料を選択すべきという指針が得られた。

## 参考文献

- [1] R. T. Ross and A. J. Nozik, J. Appl. Phys. **53**, 3813 (1982).
- [2] Y. Takeda et al., Appl. Phys. Exp. **3**, 104301 (2010).
- [3] Y. Takeda et al., J. Appl. Phys. **118**, 124510 (2015).
- [4] K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. **10**, 044069 (2018).
- [5] 上出, 第80回応用物理学学会秋季学術講演会 20a-B12-1 (2019).
- [6] K. Kamide, J. Appl. Phys. **127**, 183102 (2020).
- [7] P. Würfel, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **46**, 43 (1997).

# ホットキャリア太陽電池における バレー間散乱利用の理論的検証

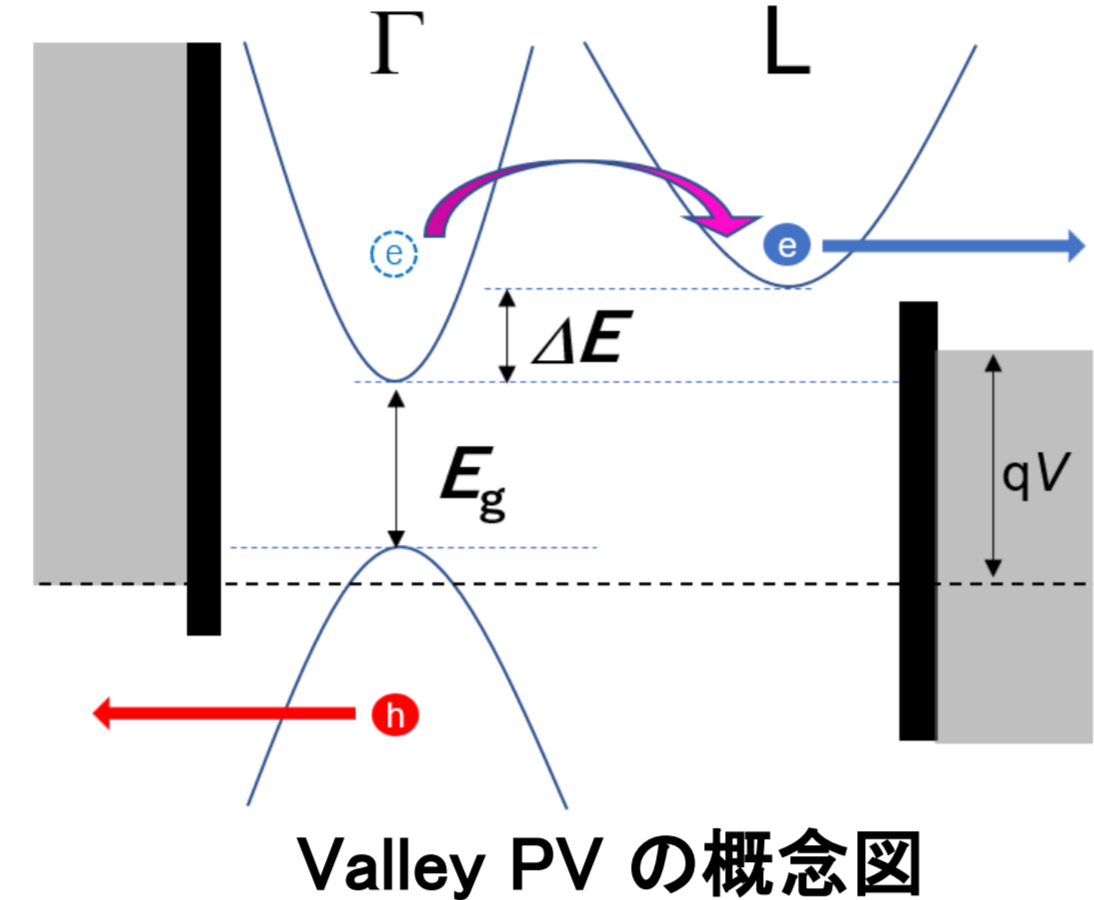
上出健仁

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

2019年にD. Ferry(アリゾナ州立大)はバレー間フォノン散乱によりホットキャリアの熱緩和を抑制するValley PVを、ホットキャリア太陽電池(HCSC[1])実現への近道となるコンセプトとして提案した[2]。この興味深い提案について、オクラホマ大-アリゾナ州立大の研究グループが検証実験を始めたが、今のところはっきりした効果は示されていない[3,4]。

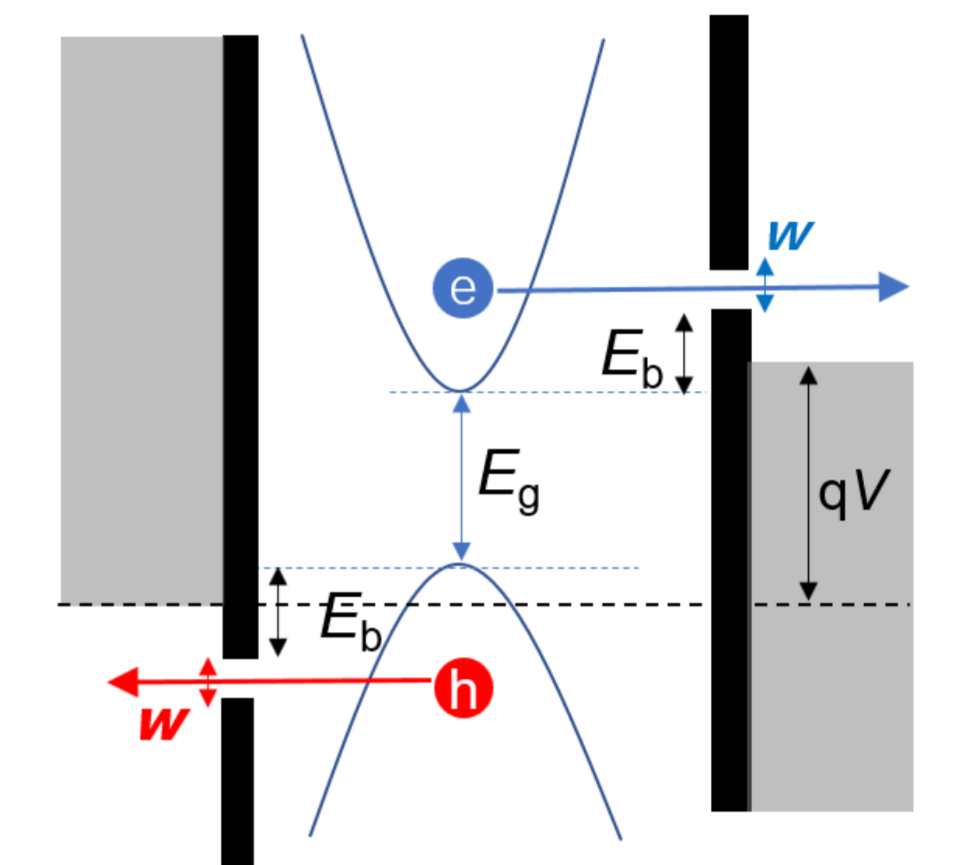
デバイス特性は、提案[2]で推定値(外挿値)が与えられているのみで十分に示されていない。提案通り、従来のHCSCを向上させる効果が得られるか、非平衡理論[5,6]を用い検証する。



Valley PVの概念図

## ホットキャリア太陽電池(HCSC)とバレー間散乱

ホットキャリア太陽電池は光生成後に存在するホットキャリアを高速に取り出すことで熱化損失を回避し高い変換効率(理想的には80%以上[1])を実現できる太陽電池の古くから知られたコンセプトである。キャリア取り出し実現条件(=高速+エネルギー選択)が厳しく今のところ実現されていない。最近、バレー間散乱を利用すれば高速取り出しの条件が緩和され実現可能になると提案された[2]。

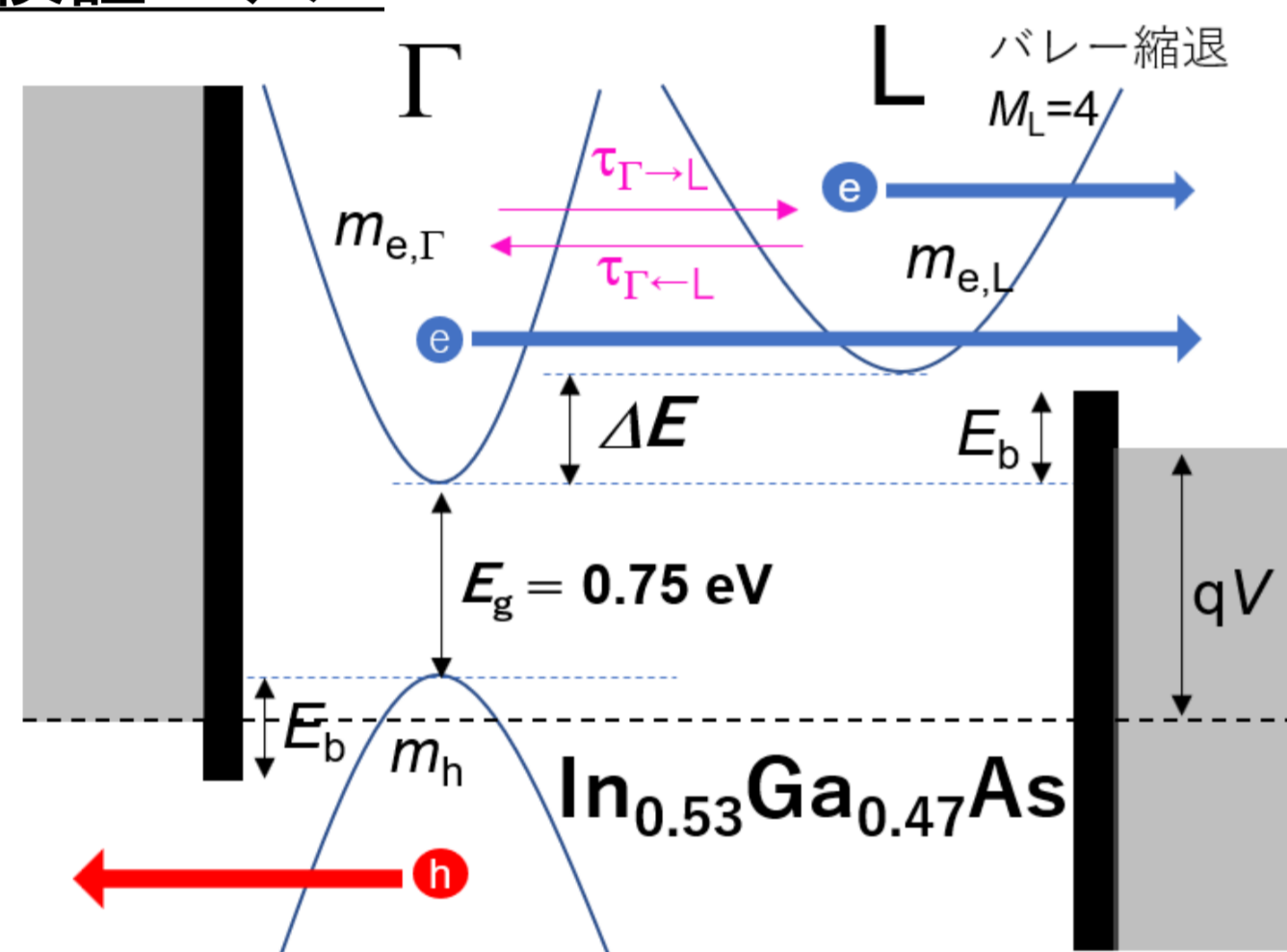


ホットキャリア太陽電池(通常)のバンド構造

## 理論検証

バレー間散乱が強く働く場合に、従来のHCSCと比較し正の効果(デバイス特性を改善する/実現条件が緩和されるなど)が付与されるか理論検証する。

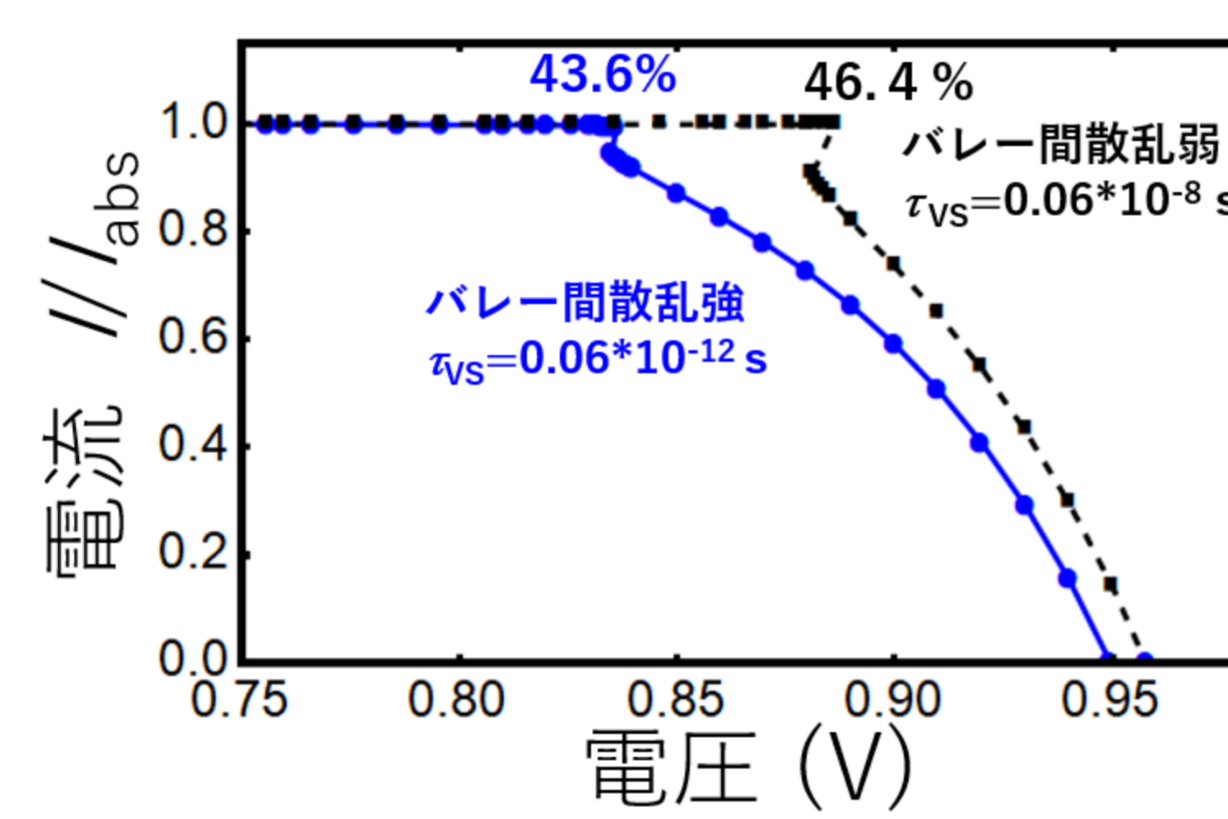
### 検証モデル



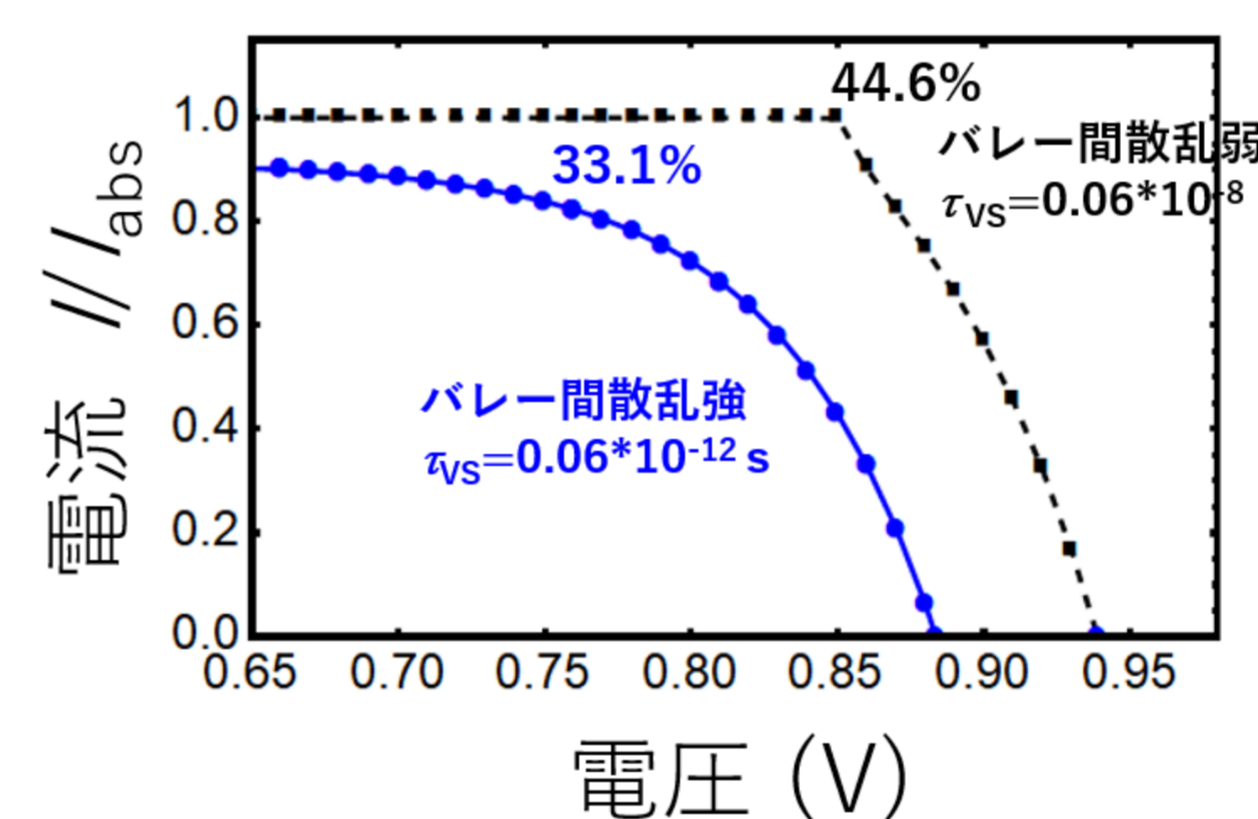
1000倍集光、光吸収層厚 = 100 nm、直接遷移( $\Gamma-\Gamma$ )の吸収度=1、間接遷移( $\Gamma-L$ )の吸収度= $10^{-3}$

### ① バレー間散乱が良いHCSCをより特性改善するか?

(設定1)  $\Delta E = 0.5 \text{ eV}$ ,  $E_b = 0.3 \text{ eV}$   
平衡化時間 = 1 ps,  
取り出し時間 = 10 ps,  
熱化時間 = 1000 ps (1 ns)



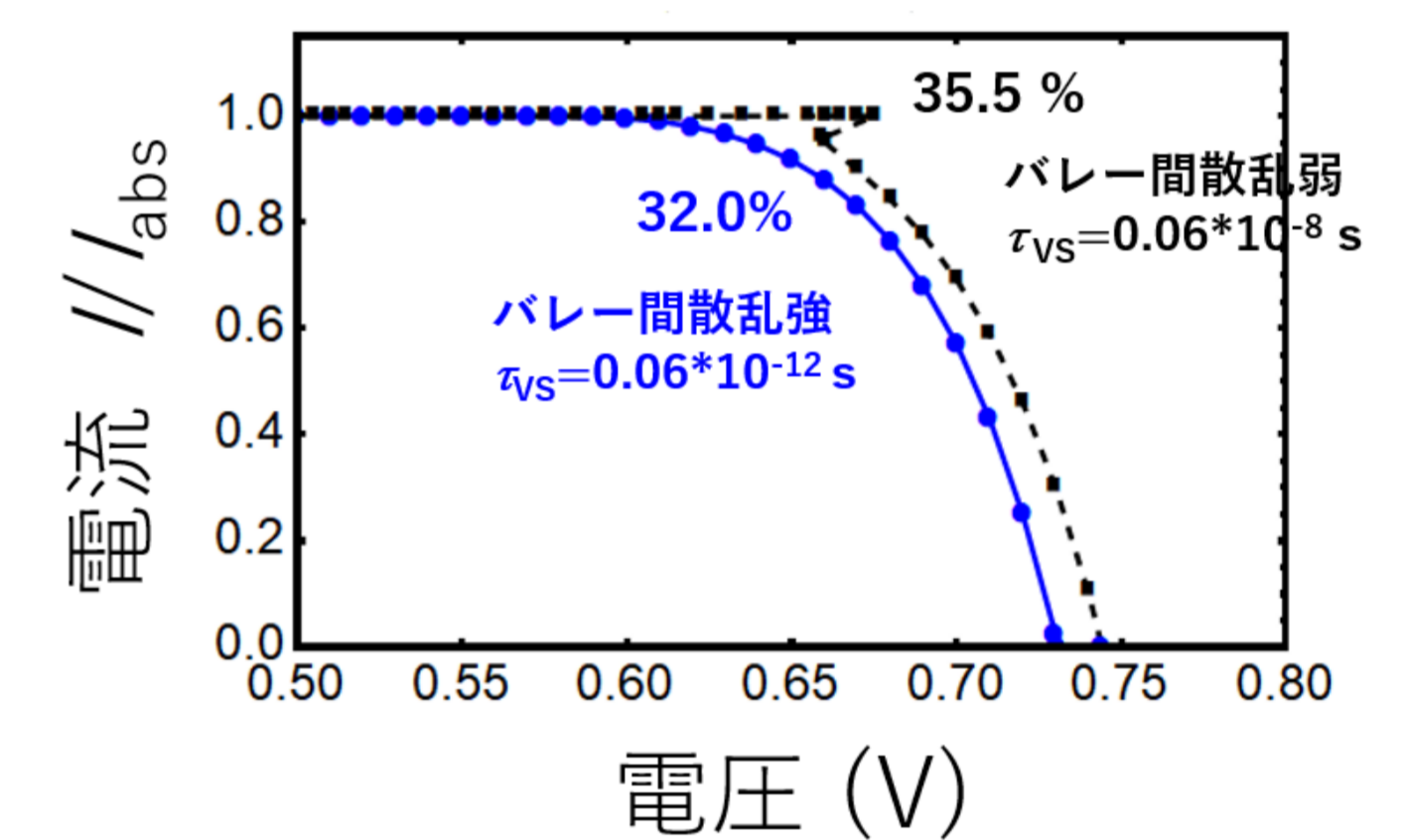
(設定2)  $\Delta E = 0.3 \text{ eV}$ ,  $E_b = 0.3 \text{ eV}$   
平衡化時間 = 1 ps,  
取り出し時間 = 10 ps,  
熱化時間 = 1000 ps (1 ns)



否: 高速なバレー間散乱の導入により逆に電圧が下がり最大効率も低下。  
(46.4%  $\rightarrow$  43.6%, 44.6%  $\rightarrow$  33.1%)

### ② バレー間散乱が悪いHCSCを特性改善/実現条件を緩和するか?

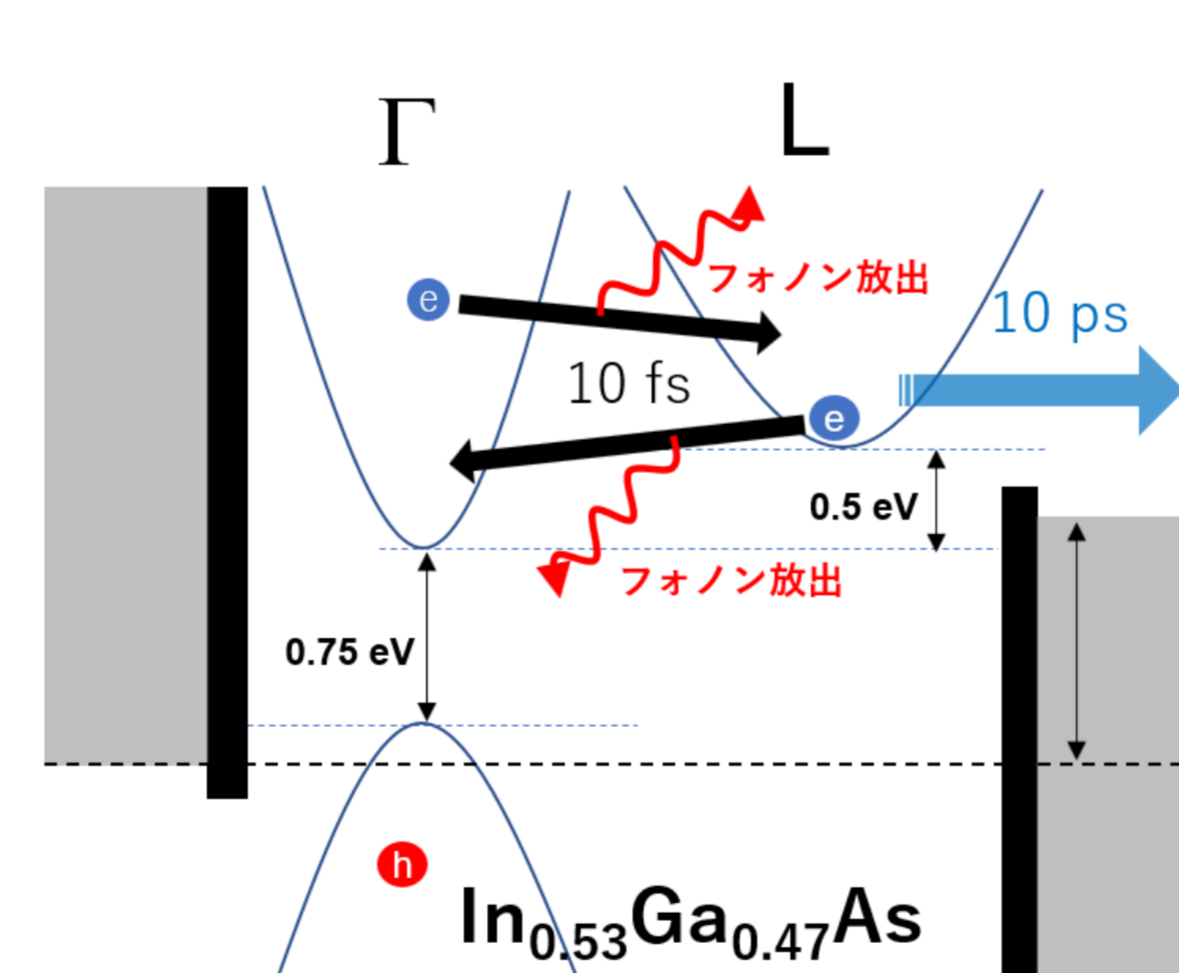
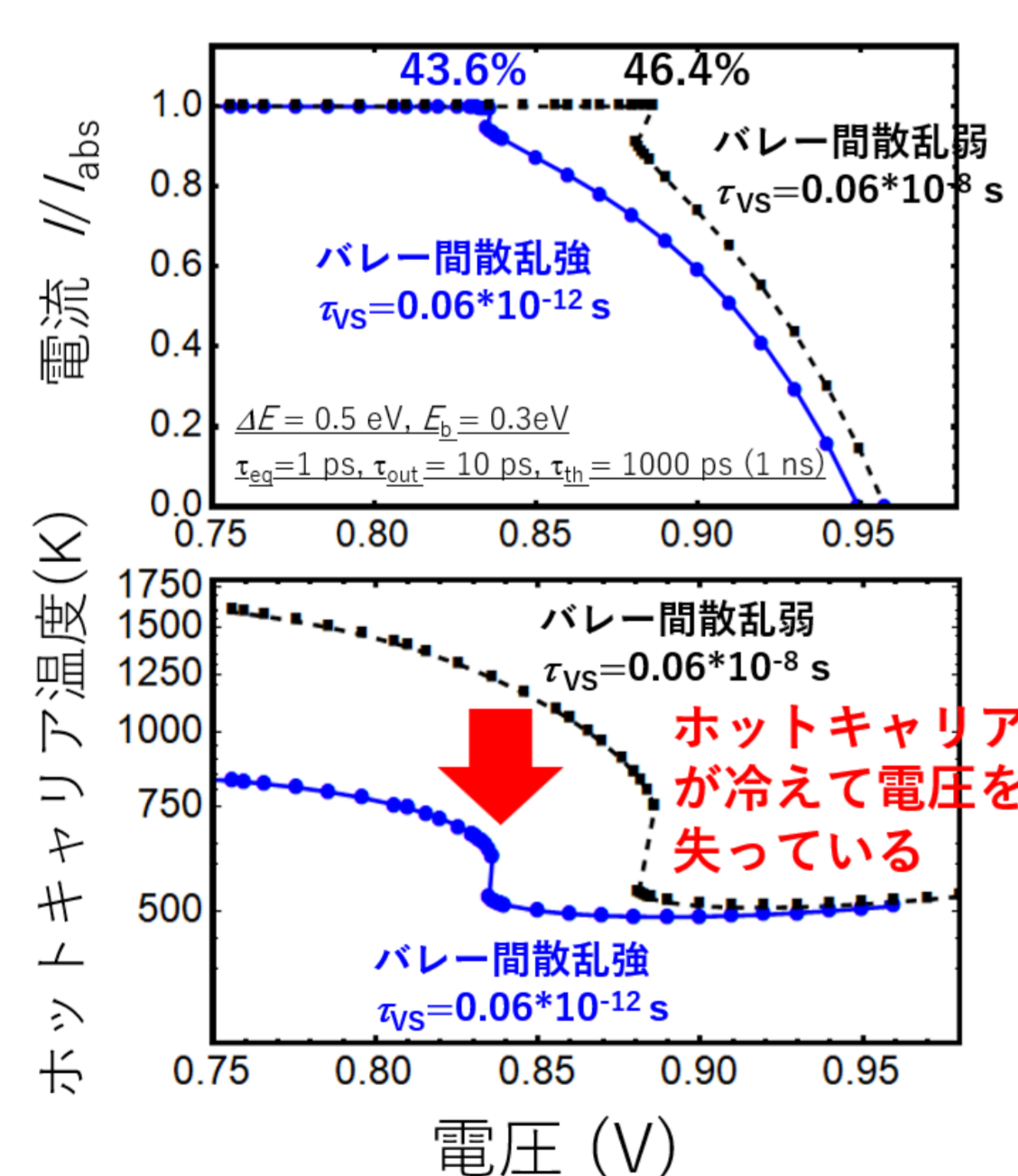
(設定3)  $\Delta E = 0.2 \text{ eV}$ ,  $E_b = 0.2 \text{ eV}$   
平衡化時間 = 1 ps, 取り出し時間 = 10 ps,  
熱化時間 = 100 ps (0.1 ns)



否: バレー間散乱の導入によりHCSCの特性はさらに低下。(35.5%  $\rightarrow$  32.0%)  
つまり、実現条件の緩和にも寄与しない。

## 考察

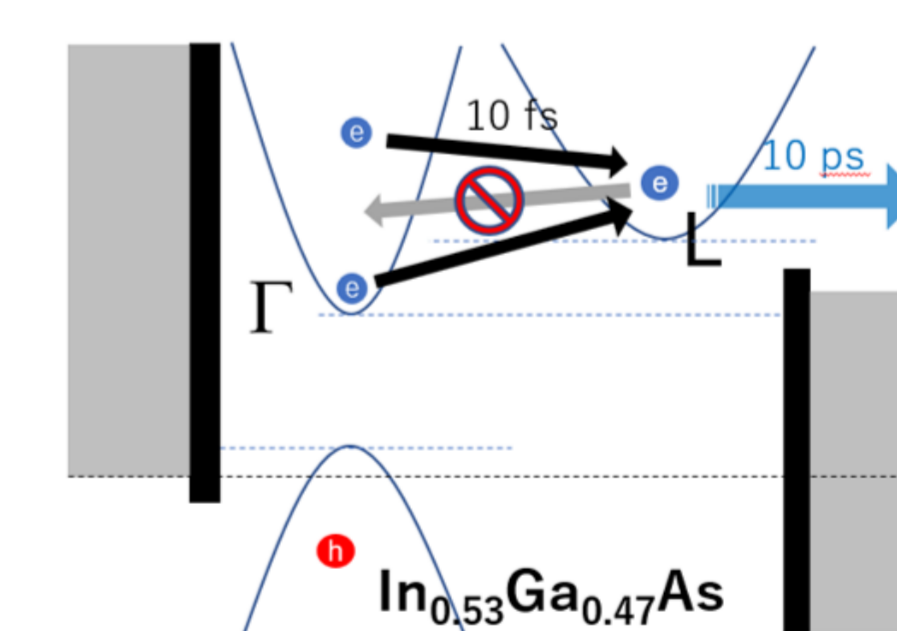
### 解釈: 熱緩和を抑制できそうなのに、なぜ?



バレー間散乱は格子への熱放出を伴い、かつ、双方向的に起こる( $\Gamma \leftrightarrow L$ )。これがキャリア取り出しの前に頻繁に起こるため、キャリア温度を低下させる。提案[2]とは逆に格子温度へのエネルギー緩和を早める。

### どうしたらうまく働くか

(可能性1) 何らかの仕掛けで散乱が一方向的( $\Gamma \rightarrow L$ )になる場合



(ただし、Gunn効果の単純な適用には原理的な疑問が残る。)

(可能性2) バレー間フォノンが高温化する場合(ホットフォノン)

特性改善が期待され、高速取り出しの条件も緩和される。この場合、高温フォノン温度への熱緩和がまず起こるので、コンセプトや特性は熱回収型太陽電池[8]に近くなる。

## 結論

- バレー間散乱が従来のホットキャリア太陽電池を改善するかどうか太陽電池の非平衡理論を用い理論検証した。
- バレー間散乱がフォノン放出を伴う双方向の過程である限り、正の効果を引き出すことは難しそう。
- 散乱に一方向性を与える何らかの仕掛け(ラチェット[9])が、正の効果を引き出すために必要になるのではないかと。

## 参考文献

- R. T. Ross and A. J. Nozik, J. Appl. Phys. **53**, 3813 (1982).
- D. Ferry, Semicond. Sci. Technol. (SST) **34**, 044001 (2019).
- H. Esmailpour et al., Nature Energy **5**, 336 (2020).
- D. K. Ferry et al., J. Appl. Phys. **128**, 220903 (2020).
- K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. **10**, 044069 (2018).
- K. Kamide, J. Appl. Phys. **127**, 183102 (2020).
- 上出, 第81回応用物理学学会秋季学術講演会 10a-Z15-14 (2020).
- K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. **12**, 064001 (2019).
- M. Yoshida et al., Appl. Phys. Lett. **100**, 263902 (2012).