

# 2024年度NEDO再生可能エネルギー一部成果報告会 プログラムNo.10

## 太陽光発電主力電源化推進技術開発 ／太陽光発電の新市場創造技術開発 ／フィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発 (重量制約のある屋根向け)

発表日：2024年12月17日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 山田 明

(国研)産総研、(国)Science Tokyo、(学)立命大、(国)筑波大、(国)鹿児島大、(学)都市大

問い合わせ先 東京科学大学 E-mail: yamada.a.ac@m.titech.ac.jp TEL: 03-5734-2698

# 事業概要I

## 1. 目的

2018年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画を受け、再生可能エネルギーの主力電源化に向け、従来の太陽光パネルに匹敵する発電性能を有し、軽量かつ屋根の形状に適合して設置可能なCIS太陽電池の開発を目的とする。

## 2. 期間

2020年度～2024年度

## 3. 目標（中間・最終）

**中間目標:** 小面積セルの外部発光量子効率(ERE) 0.3%、FF 0.82の達成を目指すとともに、それらの技術の体現として小面積セル22%、または10cm角程度のミニモジュールで19%程度の光電変換効率を可能にする多様な基板上で応用可能な要素技術を開発する。

**最終目標:** 小面積セルでERE 0.5%、FF 0.83の達成を目指すとともに、10cm角程度の超軽量ミニモジュールで変換効率22%以上の達成、または達成見通しを得るための要素技術を確立する。

加速試験による屋外15年相当で、94%以上の初期出力保持率を維持する。

軽量基板上に、ボトムセル用として好適な性能( $E_g$  1.0 eV、 $V_{oc}$ : 0.63 V、 $J_{sc}$ : 39 mA/cm<sup>2</sup>、FF: 0.77、変換効率19%)を有する狭禁制帯幅CIS系太陽電池を実現し、ペロブスカイト/CISタンデム太陽電池で効率25%達成の指針を明確にする。 2/21

## 4. 成果・進捗概要

- 熱光照射(HLS)処理によるERE向上により、ERE値0.69%を得て最終目標を達成した。また、VocとEREの相関指標を得た。
- エッチングによる小面積セル分離技術を確立し、小面積セルにおいてFF83.1%を得て、FFの最終目標値を達成した。
- 10cm角程度集積構造型軽量CIS系ミニモジュールで変換効率18.7%を達成している。また、同型ミニモジュールで架台を含めたモジュール重量2.77 kg/m<sup>2</sup>相当を達成し、最終目標である3 kg/m<sup>2</sup>以下を達成した。
- 高温高湿試験(85°C、85RH%)を実施、1500h経過後の効率は初期に対して94%以上を維持しており最終目標値を達成した(電圧印加有無に寄らず)。
- CIS系太陽電池のボトムセル応用に向けて、禁制帯幅1.0 eVのナローギャップCIGS太陽電池(ポリイミド基板)で変換効率21.2%を達成(Voc 0.68 V、Jsc 39.8 mA/cm<sup>2</sup>、FF 0.78)、最終目標である変換効率19%を大きく上回り達成した。
- ペロブスカイト/CIS構造の2接合タンデム太陽電池を作製し、変換効率21%を達成、トンネル接合部(再結合層)の材料設計が重要であるとの指針を明確にした。

# 10cm角程度軽量ミニモジュール

# 10cm角程度ミニモジュールの研究開発

2021  
**18.6% efficiency**  
(17 cells, 68 cm<sup>2</sup>, RbF)

**Lightweight & flexible (non-glass substrate) CIGS minimodule efficiencies**

Year	Efficiency (%)	Area (cm <sup>2</sup> )	No. of cells	Test center
2005	7.5%	46	10	PI, ZSW
2005	6.8%	46	10	Ti-foil, ZSW
2010	15.9%	75.7	17	Ceramic, AIST
2011	16.9%	10.2	8	PI, Empa
2012	15.9%	69.6	17	Stainless steel, Fujifilm/AIST
2015	16.0%	12.9	8	PI, Empa
2021	18.6%	68.0	17	Ceramic, AIST/Toyota (This study)

- ← CIGSe光吸収層組成比制御
- ← アルカリ金属 (Na, K) 添加制御改善
- ← 熱光照射処理による準安定アクセプタの活性化

Year	PDT	Efficiency (%)	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (mA)	FF (%)	Area (cm <sup>2</sup> )	No. of cells	Test center
2021	RbF	18.64	12.70 (0.747/cell)	138.5	72.0	68.0 (d.a.)	17	AIST
<b>2023</b>	NaF + KF	<b>18.70</b>	12.08 (0.711/cell)	138.3	<b>76.0</b>	67.9 (d.a.)	17	AIST

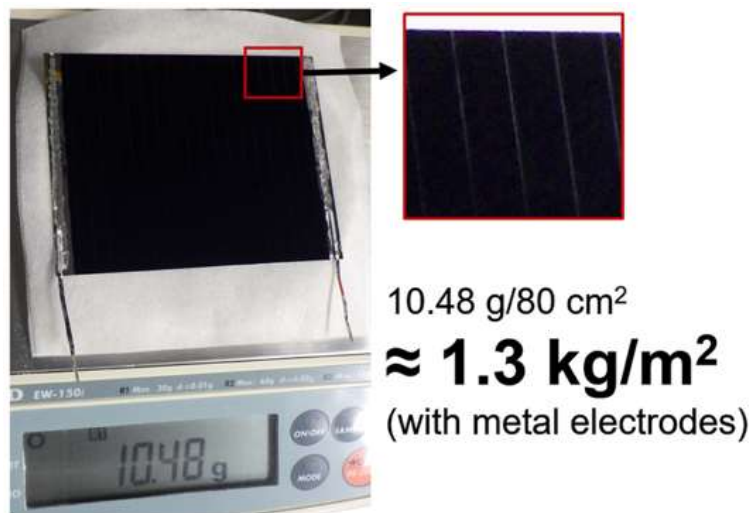
2023  
**18.7% efficiency\***  
同型デバイスの**世界最高効率を更新**

\**Certified* (unpublished result)

4元系CIGSe (Ag, S添加なし) であり、さらに性能向上が期待される。

## 超軽量モジュールの開発

## 【これまで】



S. Ishizuka et al., npj Flex. Electron. **6**, 90 (2022).

基板 + その他モジュール材相当で  
1.3 kg/m<sup>2</sup>

➡樹脂フィルム表面材 (0.3 kg/m<sup>2</sup>)  
とフレーム (1.7 kg/m<sup>2</sup>) を合わせて、  
**3.3 kg/m<sup>2</sup>**相当

## 【本事業成果】

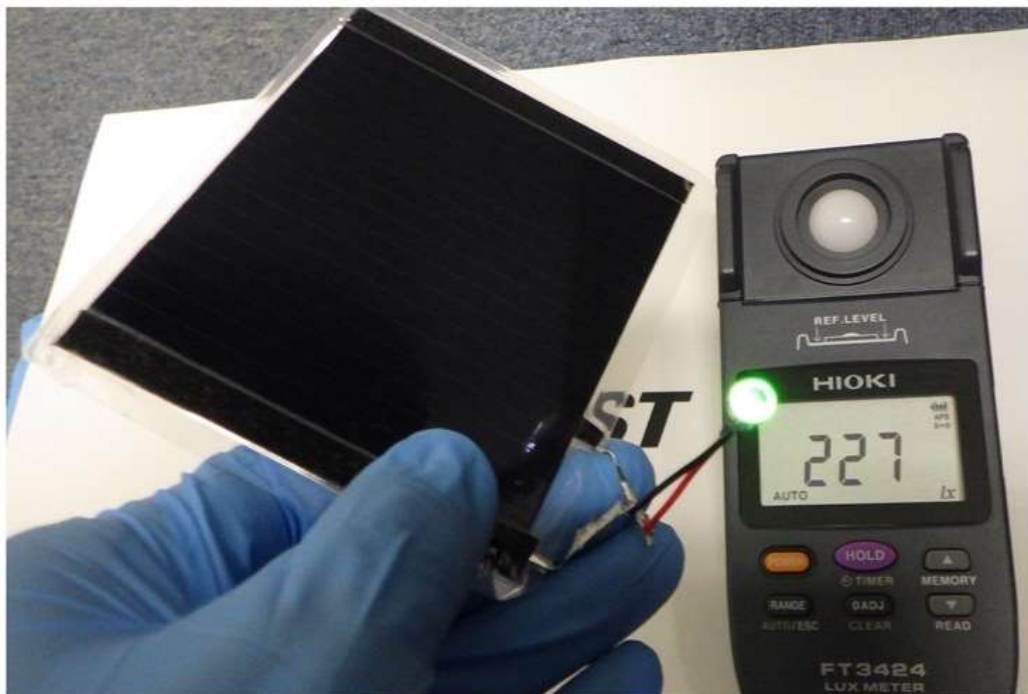


さらに薄く軽いフレキシブル基板を用いたミニモジュールの作製

➡架台を含めたモジュール換算で、  
**2.77 kg/m<sup>2</sup>**相当

**最終目標 3 kg/m<sup>2</sup>以下を達成**

# 低照度環境下における動作検証



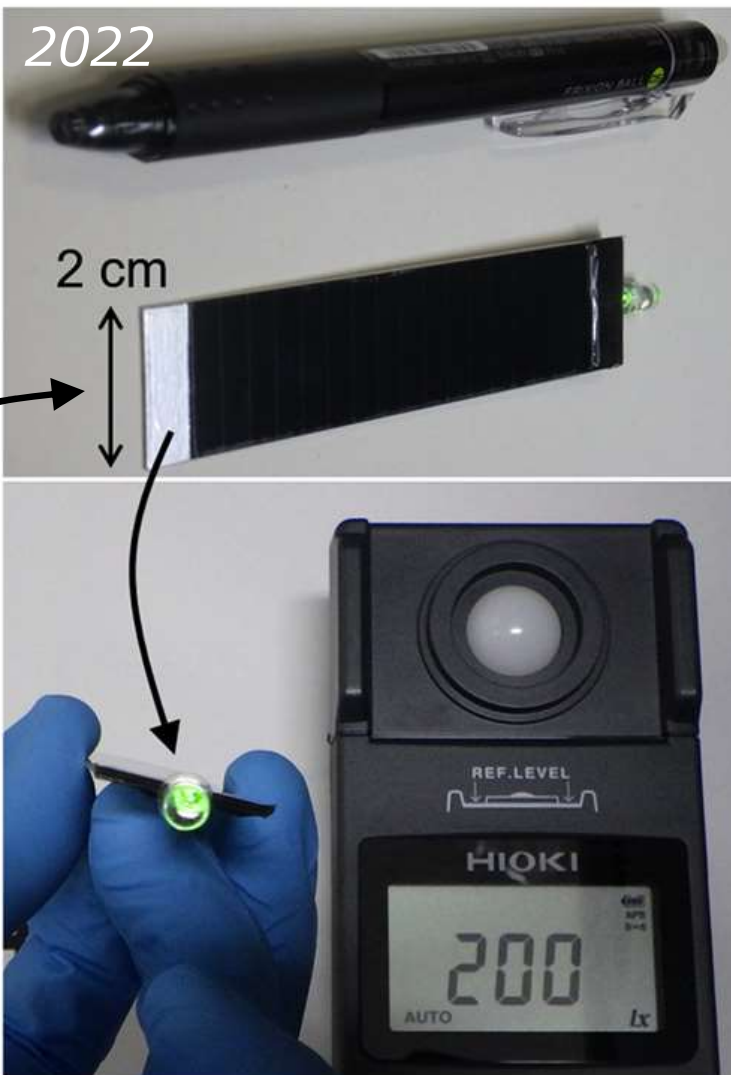
メカニカルスクライビング試料

CIS系太陽電池  
200 lx程度の低照度環境下  
(蛍光灯照明床付近)  
でも**使用可能**



©Shogo Ishizuka 2010

簡易ラミネーションのみで10年  
以上室内保管（問題なく動作）



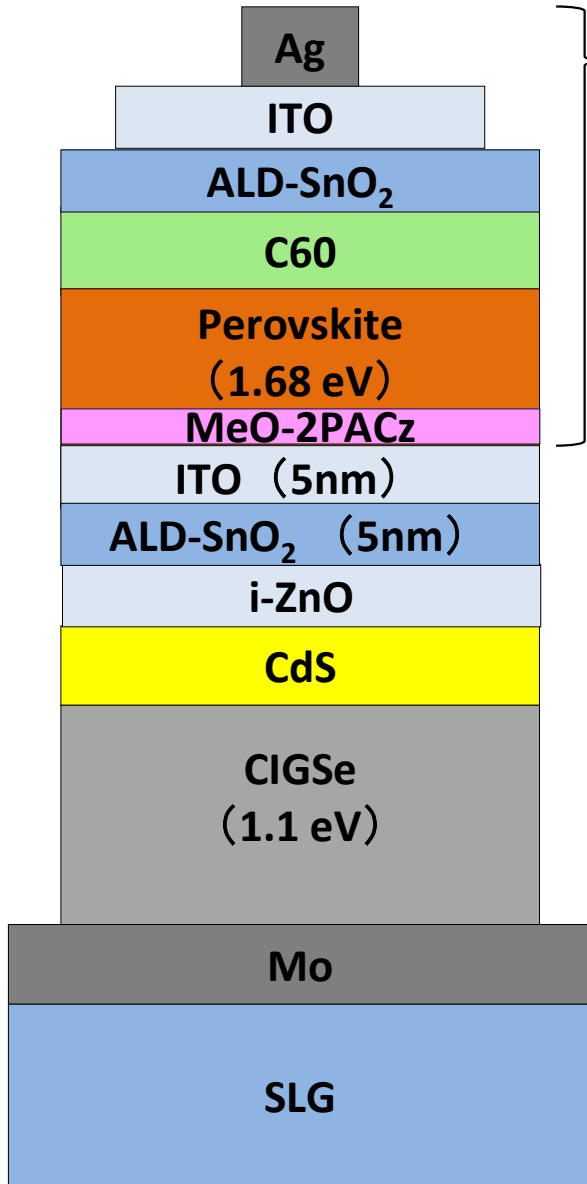
S. Ishizuka et al., npj Flex. Electron. **6**, 90 (2022).

# ペロブスカイト/CISタンデム太陽電池

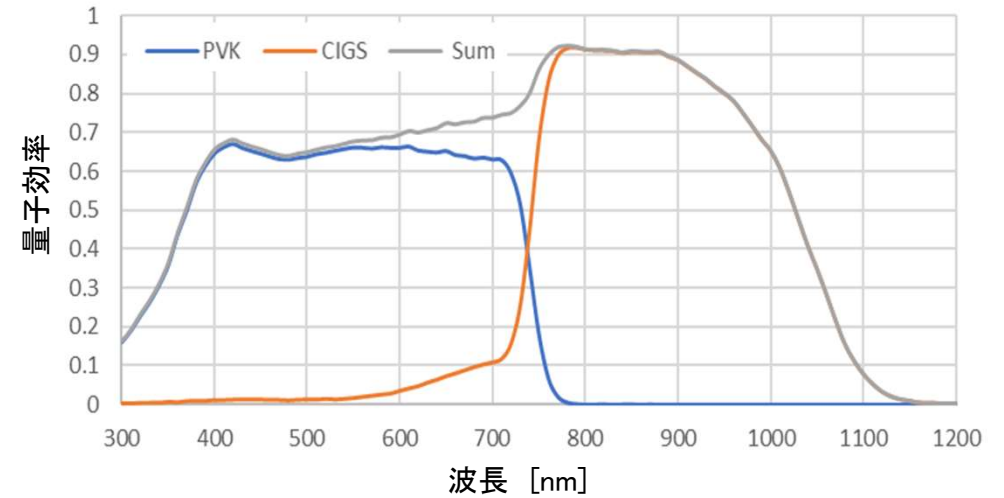
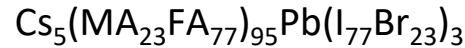
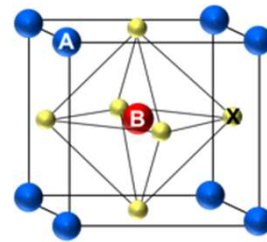


2端子型ペロブスカイト/CISタンデム太陽電池で  
開放電圧1.77V、変換効率**17.7%**を達成。

課題：再結合中間層、ボトムバンド  
ギャップなどデバイス構造の最適化



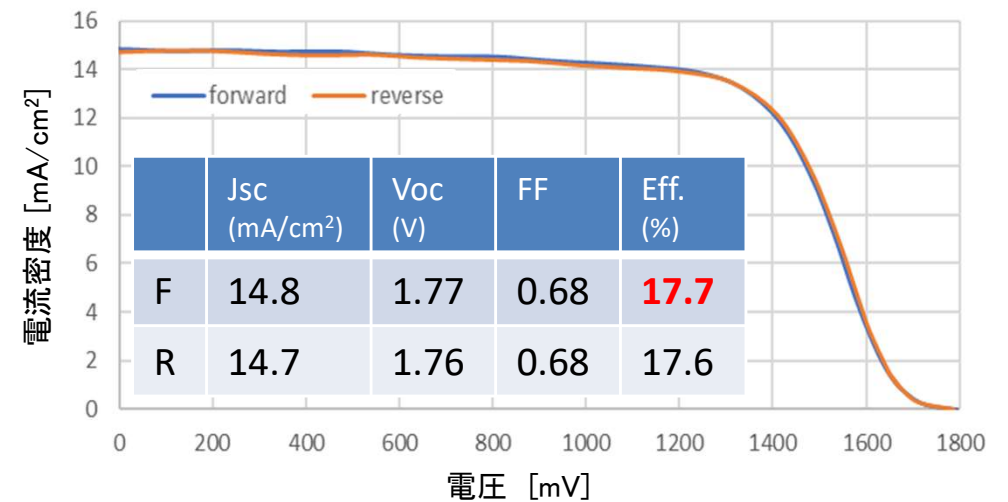
東京都市大学  
ペロブスカイト太陽  
電池(トップセル)



産総研  
CIGS太陽電池  
(ボトムセル)



セル面積: 1cm<sup>2</sup>



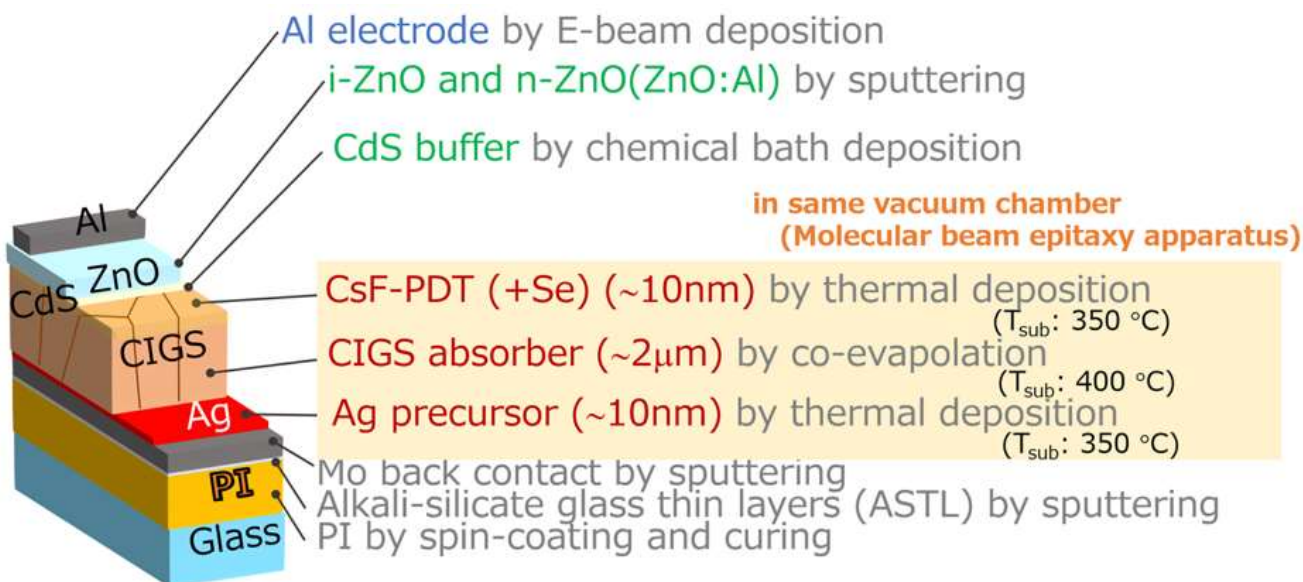
# タンデム型太陽電池応用に向けたボトムセルの開発

$E_g \sim 1.0$  eVのCIGS (ポリイミド基板) で**効率21.2%を達成**  
 超軽量・フレキシブル・低温製膜

## ボトムセル用ナローギャップ<sup>o</sup> (1.0 eV) CIGSの**世界最高値\***

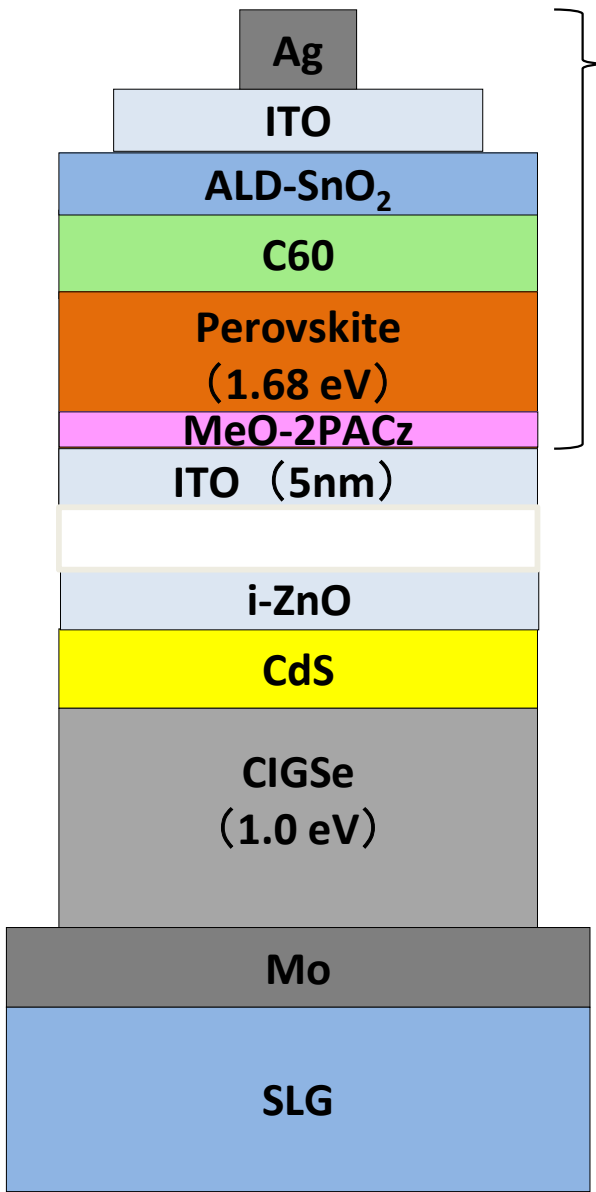
	Eff. (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF
Forward scan	21.2*	0.6834	39.78	0.778
Reverse scan	21.2*	0.6836	39.76	0.782

\*第三者機関 (JET) 測定値

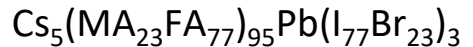
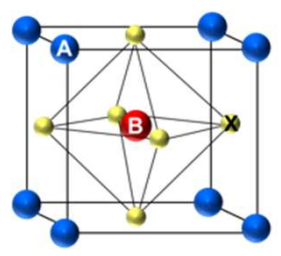


Y. Kamikawa et al., E-MRS, Warsaw, Sep. 19, 2024.

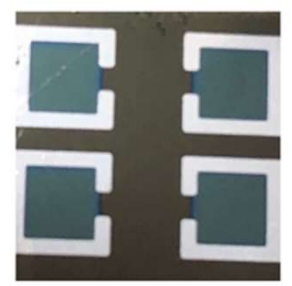
2端子型ペロブスカイト/CISタンデム太陽電池で  
開放電圧1.62V、変換効率**21%**を達成。



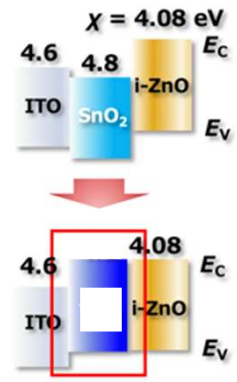
東京都市大  
ペロブスカイト太陽  
電池(トップセル)



東京科学大  
CIGS太陽電池  
(ボトムセル)



3mm-square cell



Carrier transport  
was improved.

- ボトムセルのバンドギャップ最適化
- トンネル接合層の工夫



	Eff (%)	Voc (V)	FF	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )
順方向	21.4	1.625	0.668	19.7
逆方向	21.0	1.622	0.663	19.6

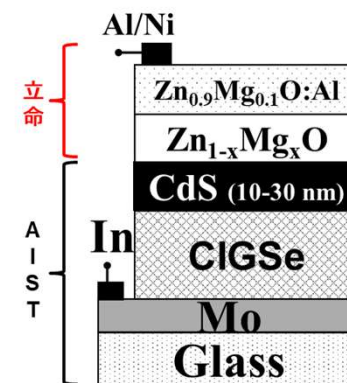
# 高耐久性

# 高品質界面(高効率化), 耐久性, タンデム用透明電極に取り組む

## ① 高品質接合界面構造の開発

Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGSe)基板 (産総研製) をベースに、  
適したバンド接続・低い界面欠陥密度を実現するバッファ層・TCO層  
(ZnMgO系材料) を開発。

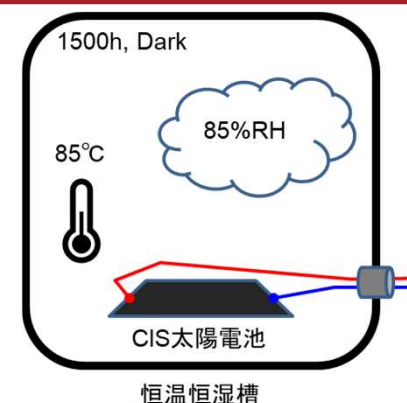
【最終目標】 効率24% (2024.12現在 21.4%。達成に向け検討中)



## ② 加速試験による高耐久性実証

CIGSe太陽電池の加速試験を実施。  
テバ<sup>TM</sup>解析で劣化要因を明確化し産総研へフィードバック。

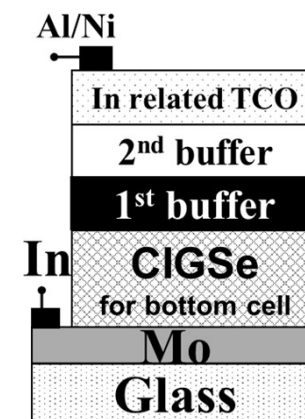
【最終目標】高温高湿試験 (85°C85%RH,1500h)後、  
94%の初期出力保持(2024.12現在 セル:1500h達成、ミニモジュール:試験中)



## ③ タンデム用新規セル構造の開発

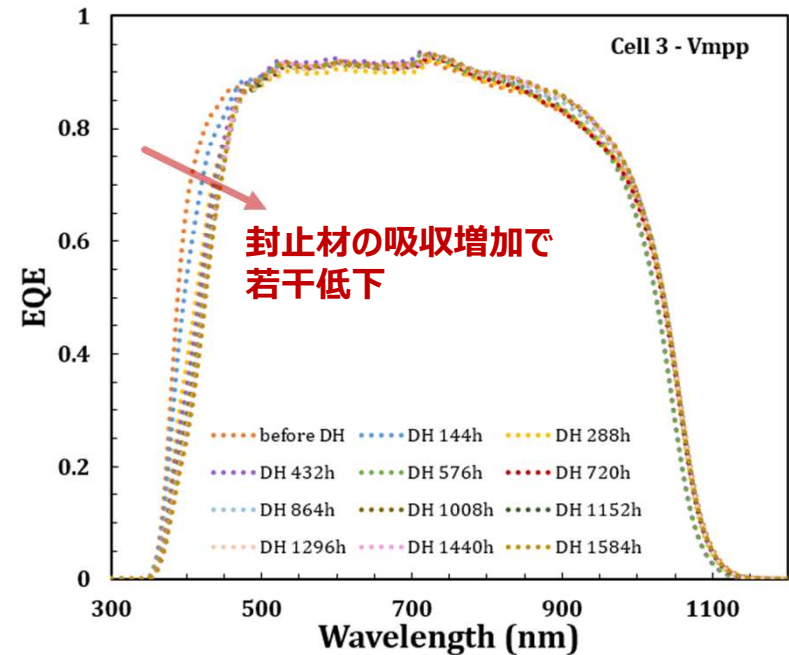
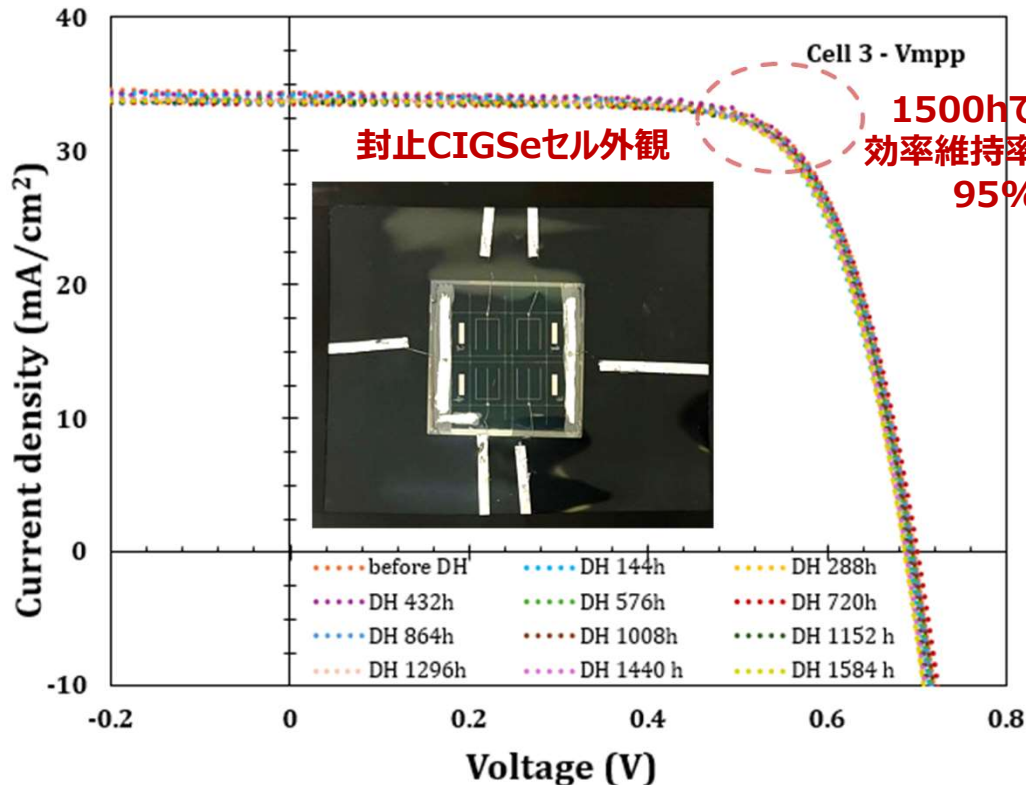
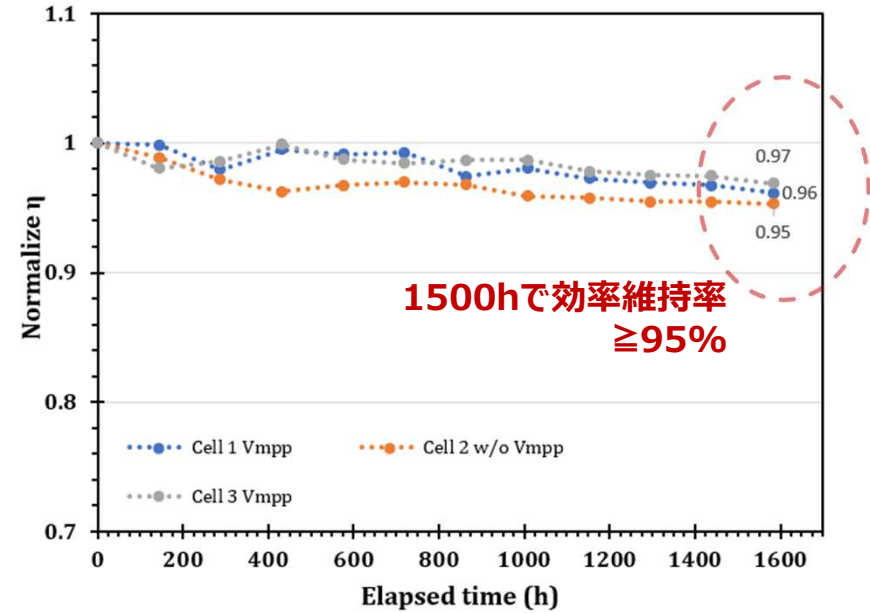
h<sup>+</sup> トラップサイト/CIGSeタンデム太陽電池を目指し、h<sup>+</sup> トラップサイトの分解を  
促進しない、タンデム用新規セル構造 (In系TCO、バッファ層) を有する  
CIGSe太陽電池を実現する。h<sup>+</sup> トラップサイト/CIGSeタンデム作製時のZnOの  
影響評価と接合評価を実施し、高効率化指針を明確にする。

【最終目標】CIGSe太陽電池上でh<sup>+</sup> トラップサイトの分解抑制を実証  
(2024.12現在 InZnO上のMAPbI<sub>3</sub>でGlass上と同等の安定性を達成)



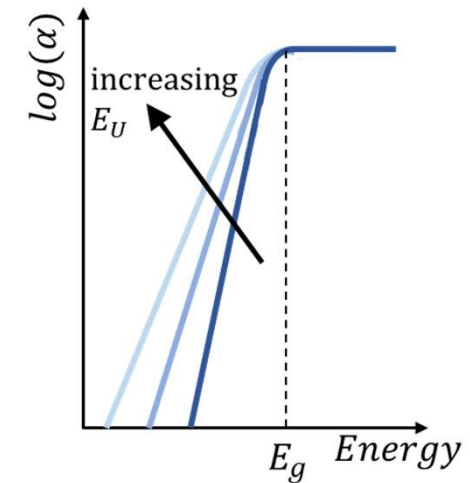
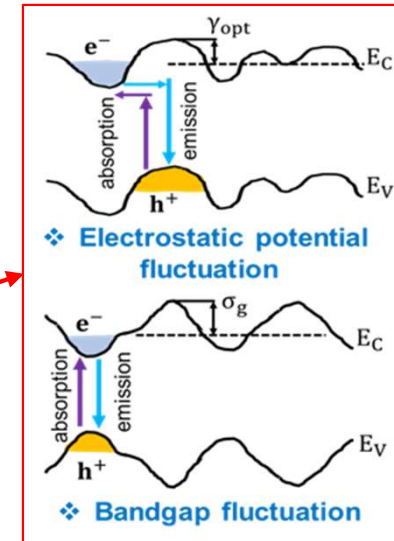
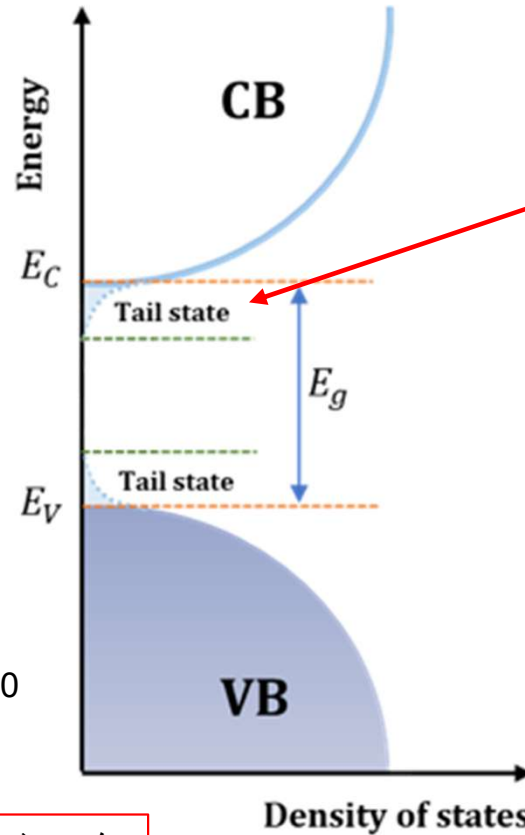
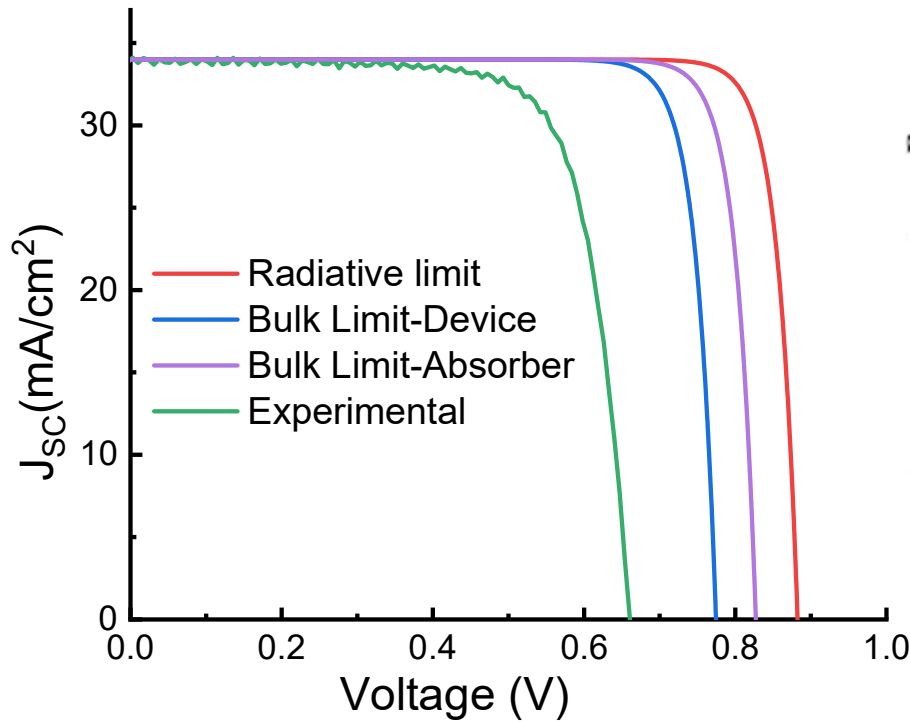
# 封止したCIGSeセルの高温高湿試験を実施し、高耐久性を実証

- CIGSeセルをフロントバリアフィルムとバックシートで封止（ミニモジュールは試験中）
- 高温高湿試験（85℃85RH%）を実施
- ※ IEC規格に則って、電圧印加しながら試験
- Jscは封止材の影響で若干低下（QEより）
- 1500h経過後、初期に対して94%以上の効率の維持を達成（電圧印加有無に寄らず）



# 高効率化指針（Voc, FF制限要因の明確化）

### 再結合成分の評価の重要性



**Radiative limit** : 理論再結合寿命を用い、バルク再結合のみ起こると想定し導出

**Bulk limit** : 蛍光寿命計測で得た少数キャリア寿命を用い、バルク再結合のみ起こると想定し導出

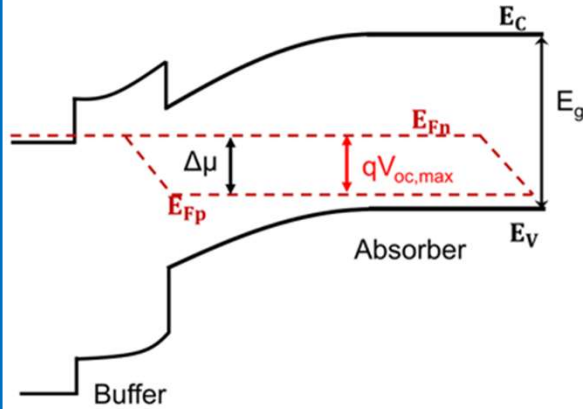
**Experimental** : 実モジュールの切り出しにより評価した実測値

(左)バンド裾揺らぎ (Tail State) の概念図  
(右)バンド裾揺らぎの光吸収係数に与える影響 (点線が理想系の光吸収)

組成不均一、結合長の揺らぎにより形成されたバンド裾揺らぎが開放起電圧損失に与える影響を調査している。



### バンドダイアグラム



Ideal case (no recombination)

1sun太陽光照射時には少数キャリアの形成によりフェルミ準位分裂が起こる。

→ 1sunと等量の光照射条件において取得した蛍光スペクトルより、フェルミ準位分裂幅 $\Delta\mu$ を抽出。

→理想的には $V_{oc} = \Delta\mu$

### フェルミ準位分裂(QFLS)従来式

$$\Delta\mu = E_{Fn} - E_{Fp} = qV_{oc}$$

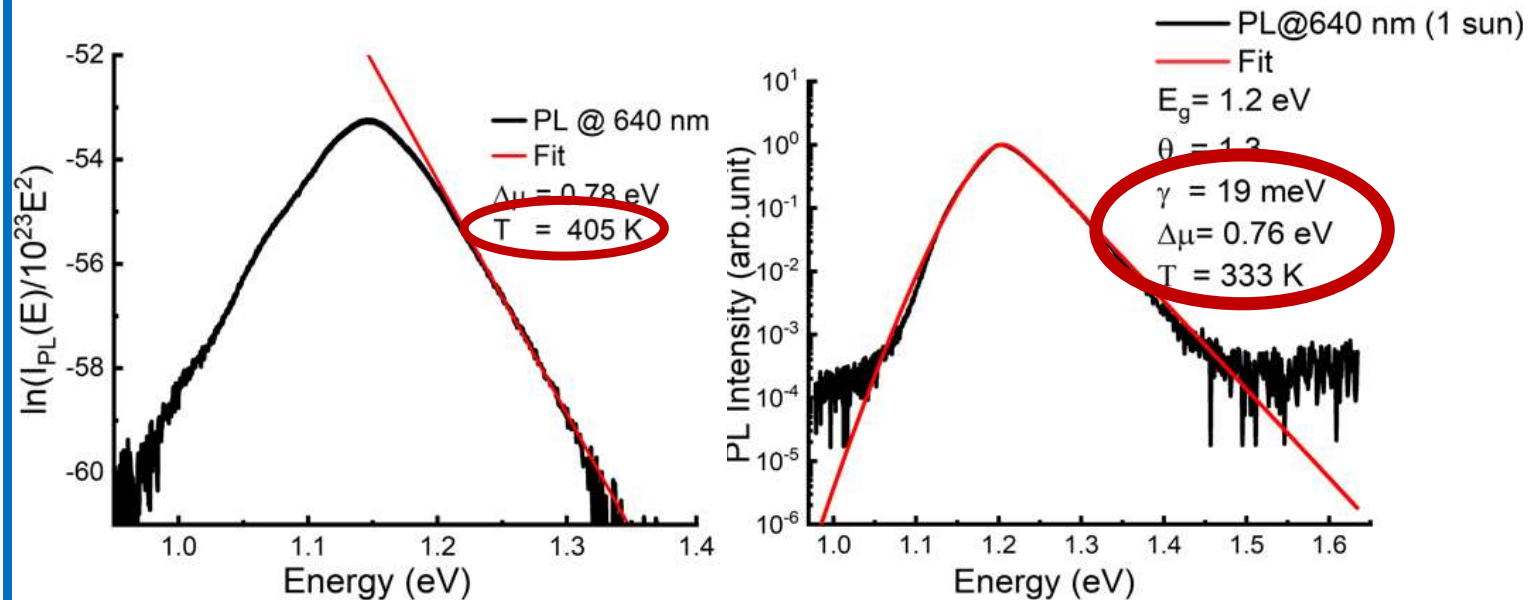
$$\phi_{PL}(E) = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E - \Delta\mu}{k_B T}\right) - 1}$$

### バンド裾揺らぎを組み込む

$$\phi_{PL}(E) = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E - \Delta\mu}{k_B T}\right) - 1}$$

$$\times \left\{ 1 - \exp \left[ -G(\Delta E) \alpha_0 d \left( 1 - \frac{2}{\exp\left(\frac{E - \Delta\mu}{2k_B T}\right) + 1} \right) \right] \right\}$$

$$\left( \begin{array}{l} G(E) = \int_{-\infty}^{\infty} T(E') \alpha_{Ideal}(E - E') dE' \\ T(E) = N \exp\left(-\left|\frac{E - E_1}{\gamma}\right|^\theta\right) \end{array} \right)$$



従来式では、測定温度が室温にも関わらず、抽出した温度パラメータが高くなるが、バンド裾揺らぎの効果（アーバックパラメータ $\gamma$ 、 $G$ に組み込まれる）を導入した式ではこれを解消可能になった。

→バンド裾揺らぎがCIGS太陽電池ではQFLS（開放起電圧）に影響

# 外部発光量子効率(ERE)のデバイス性能指標活用

EREは非輻射成分が0なら100%、非輻射成分が増えると減少する。

## 変換効率 = 22%を達成するために必要なEREの値は？

① 変換効率 = 22%を達成するために必要な $V_{OC}$ の値は？

→  $J_{SC} = 37 \text{ mA/cm}^2$ 、 $FF = 0.78$ と仮定すると

→  $V_{OC} = 0.77 \text{ V}$

②  $V_{OC} = 0.77 \text{ V}$ を達成するために必要なEREの値は？

→  $ERE = \exp\{(q/k_B T)(V_{OC} - V_{OC,rad})\} = 0.44\%$

→  $ERE > 0.5\%$ が望ましい。

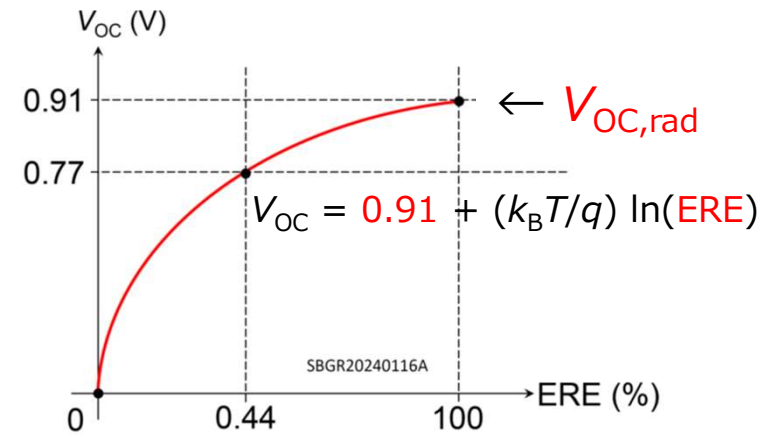


図3 変換効率=22% ( $V_{OC}=0.77 \text{ V}$ ) を達成するために必要なEREの値を算出する方法の模式図

## 現状と残課題

① HLS (熱光照射) 処理によるEREの向上の程度

- ・ 従来のERE決定方法:  $ERE = 0.07\% \rightarrow 0.27\%$  (3.9倍)
- ・ 新しいERE決定方法:  $ERE = 0.10\% \rightarrow 0.69\%$  (6.9倍)

② 最終目標値 ( $ERE = 0.5\%$ ) に対する達成度

- ・ 従来のERE決定方法:  $0.27/0.5 = 54\%$
- ・ 新しいERE決定方法:  $0.69/0.5 = 136\%$



高性能なCIGS太陽電池の開発とHLS処理を併用することで達成

\* 新しいERE決定方法: EL発光強度の絶対値から決定する方法

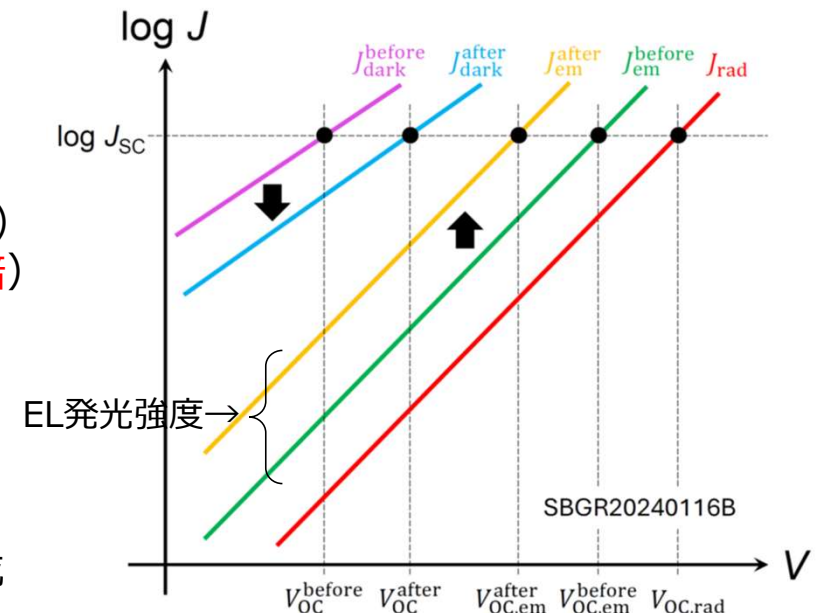


図4 HLS処理が暗状態のJ-V特性とEL発光強度 ( $J_{em}$ ) のV依存性に与える影響の模式図

H. Shibata et al., submitted.

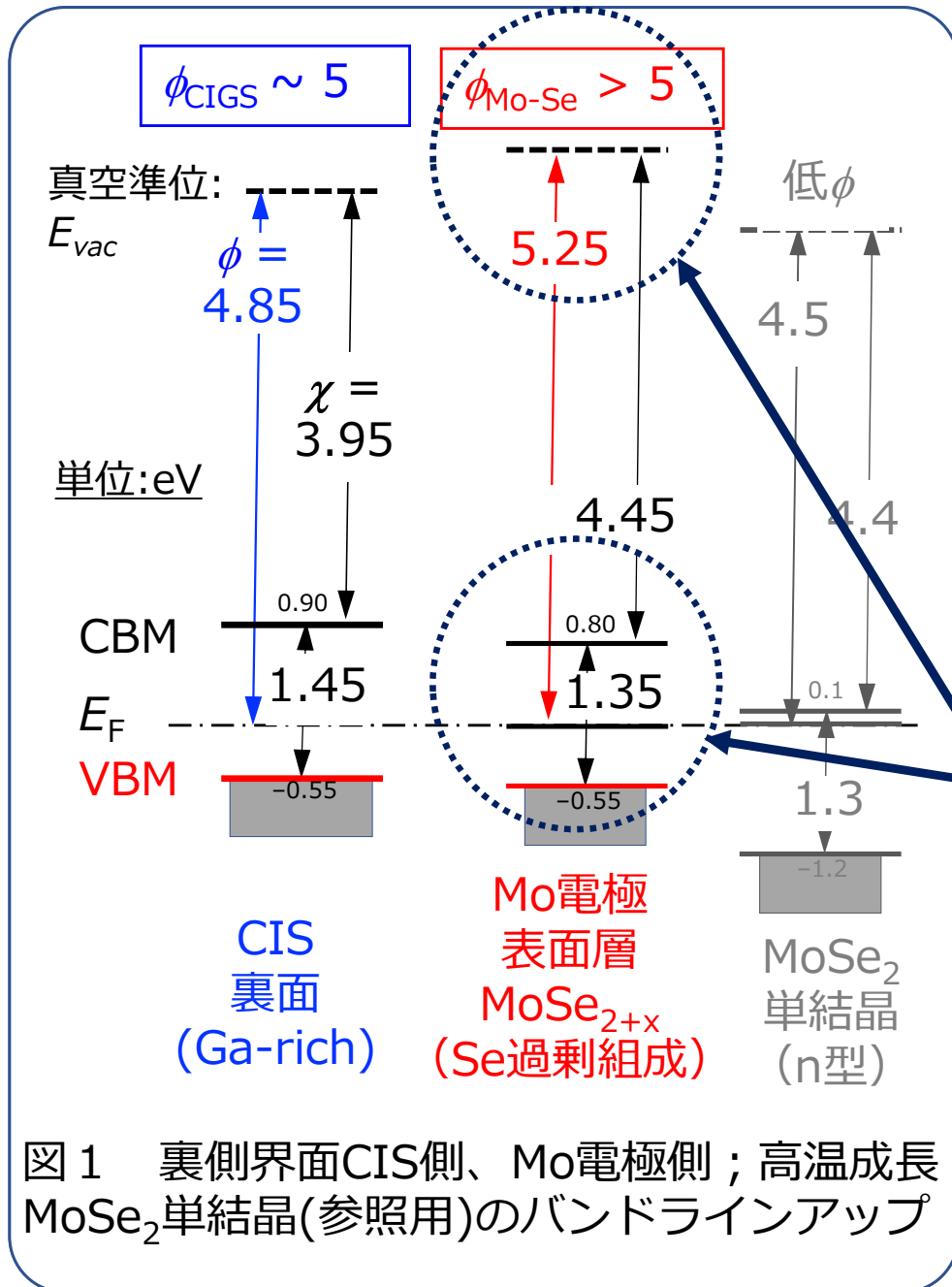
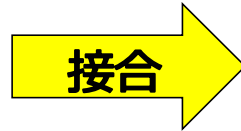
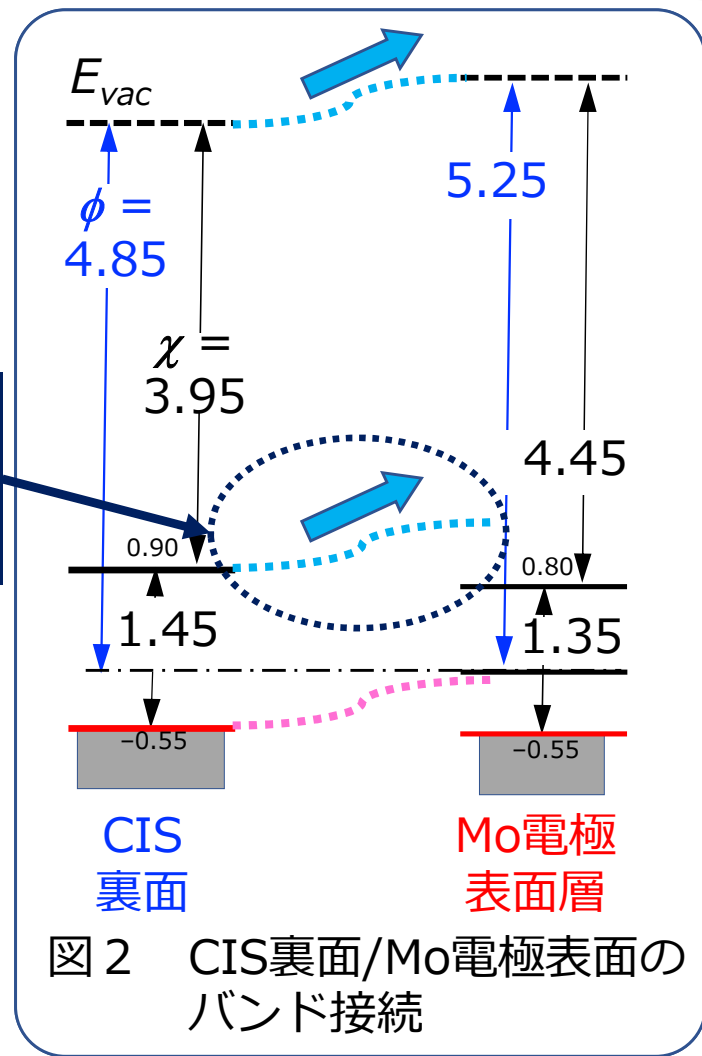


図1 裏側界面CIS側、Mo電極側; 高温成長  $\text{MoSe}_2$ 単結晶(参照用)のバンドラインアップ



バンド接続:  
伝導帯下端 (CBM)の上昇

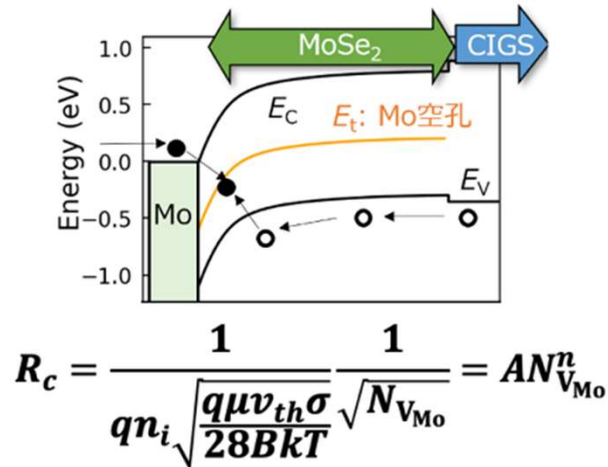
Mo電極表面:  
Mo-Se化合物層が存在  
p型方向変成、  
高仕事関数 $\phi$



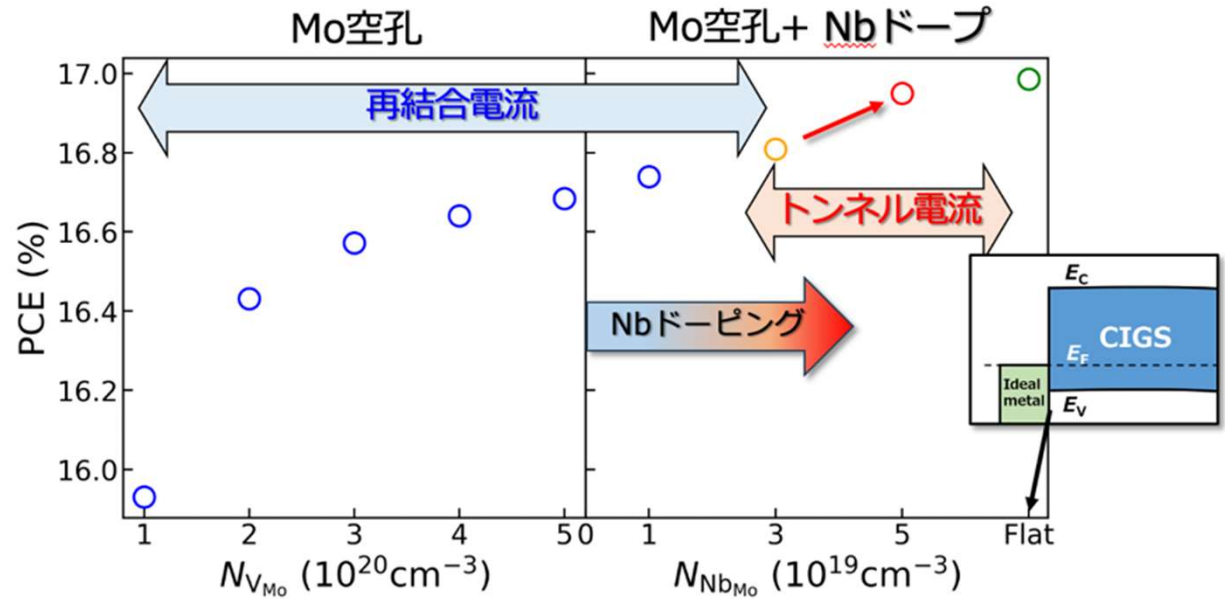
Mo電極: 非化学量論組成  $\text{MoSe}_{2+x}$  による被覆  
CIS裏面より高い仕事関数  $\neq$  バルク値  
CIS側伝導帯下端の引き上げ

Back surface field増強による再結合抑制

# 裏面コンタクト改善による効率(FF)向上



q: 素電荷,  $n_i$ : 真性キャリア密度,  $\mu$ : 移動度,  
 $\sigma$ : 捕獲断面積,  $v_{th}$ : 熱速度, k: ボルツマン定数,  
 T: 温度, B: 定数,  $N_{V_{Mo}}$ : Mo空孔密度



- 鹿児島大学での実験結果を元に、Mo/MoSe<sub>2</sub>/CIS裏面界面をモデル化、Mo空孔を介した再結合電流により擬オーミック性が保たれていることを明らかにした。
- 再結合電流のみではFFに下限があり、MoSe<sub>2</sub>へのNbドーピング（正孔濃度増加）によりトンネル電流が支配的となり、FFが向上、変換効率が向上することを見出した。

## 1. 軽量ミニモジュールの効率改善

- 小面積セルの研究開発で得られたFF及び効率改善の知見を産総研の軽量ミニモジュール開発に集約するとともに、輻射性再結合メカニズムなど基礎物性理解を深めてVocの改善を図る。また、Ag等の元素添加効果の最適化検討や、熱光照射効果最適化の検討を進め、軽量ミニモジュールの高効率化に取り組む。
- 集積モジュール作製時のスクライビング工程などがFF制限要因であるため、TCO開発を含めたモジュール構造の検討を行う。今回、エッチングによるセル分離技術によりFF 83.1%が達成され、メカニカル・スクライビングがFF低下の要因であることが明確になった。

## 2. ペロブスカイト/CISタンデム太陽電池の効率改善

- ペロブスカイト/CIS接合部のトンネル接合(再結合層)の重要性並びに構造の知見を産総研が開発した表面平坦化ナローギャップボトムセルに適用し、さらなる変換効率の向上に取り組む。