

NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.2-1

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：2025年7月16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)東京科学大、(学)立命館大、(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

1. 背景・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して実施した。**

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。

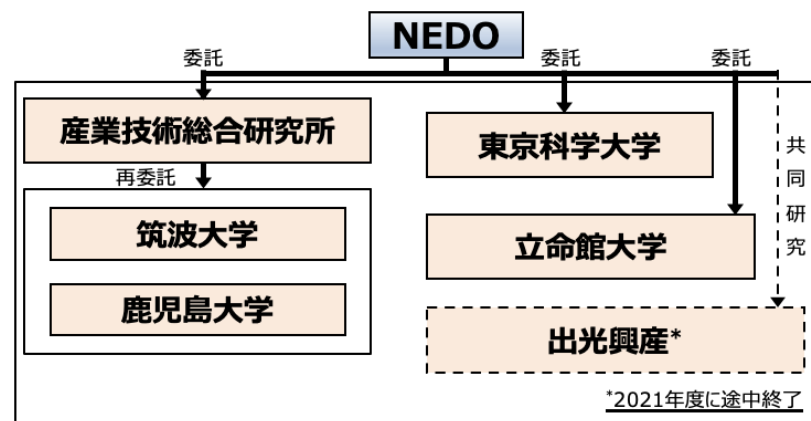
加速試験による**屋外15年相当で、94%以上の初期出力保持率を維持する。**

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/cm²、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。**

中間目標（2022年度末）と達成度（2021年3月5日時点）

1. 製造コスト35円/W以下の見通しを得る。

- 製造コスト換算で47円/W
 - 改善：表面材の変更、フレーム構造の再設計
 - 課題：鋼板プロセスの確立、集電構造の最適化



2. 架台を含めたモジュール重量5kg/m²以下

- 折板屋根を想定した架台・金具を含めたモジュール重量6.6kg/m²
 - 改善：大波ストレート屋根及び陸屋根への工法の工夫
 - 課題：平米当たりの金具等の重量削減

3. 1.2m²サイズでのモジュール変換効率16%

- 1.2m²サイズでのモジュール変換効率14.6%
 - 改善：Mo裏面電極の最適化、CIS膜の高品質化
 - 課題：CISコンソの技術の適用、不純物添加

4. 屋外暴露10年時点での初期変換効率に対する劣化率10%以下

- 既に認証（IEC61215-1～4準拠）を取得できるレベルにある。

事業概要III CISコンソの体制、開発項目(役割分担)

産業技術総合研究所

- 多様な基板を用いた超軽量ミニモジュールの開発
 - Ag添加およびアルカリ添加による光吸収層の高品質化
 - コンソーシアム内協業による窓層の改善
- 経時劣化特性評価
 - ミニモジュールの耐久性試験の実施
- 多様な基板を用いたタンデム用ボトムセルの開発
 - ボトムセル用ナロー・ギャップCIS太陽電池の開発

筑波大学

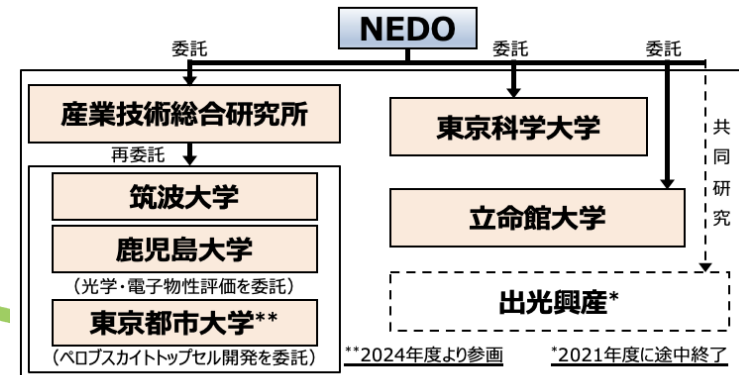
- 欠陥準位の分布と同定による軽量CIS太陽電池の開発支援

鹿児島大学

- 電池構造を縦貫する電子構造プロファイルの決定

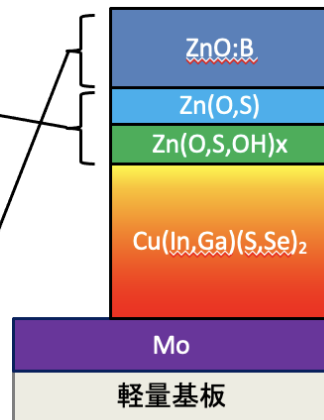
東京都市大学

- ペロブスカイトトップセルの開発



立命館大学

- 最適接合界面構造の開発
 - 最適なバンド構造を有するTCOとバッファ層の開発
 - 再結晶解析を通じた高効率化のボトルネックの明確化
- 加速劣化試験および高耐久性の実証
 - 加速劣化試験の実施
 - 劣化要因の明確化
- タンデム用新規セル構造の開発
 - PVKを分解しないCISセル新構造の開発と実証



東京科学大学

- 低コストバッファ・レスCIS太陽電池
 - 新規Zn-Ge-O低電子親和力材料開発
 - TCO/バッファ層一体型n型層
- 寄生抵抗低減技術開発
 - コンタクト抵抗・シャント抵抗評価
 - 寄生抵抗低減技術開発
- ベイズ最適化によるボトム・セル最適設計
 - 理想ボトムセル構造の探求
 - 制約条件下での最適設計

4. 研究成果

太陽電池関連

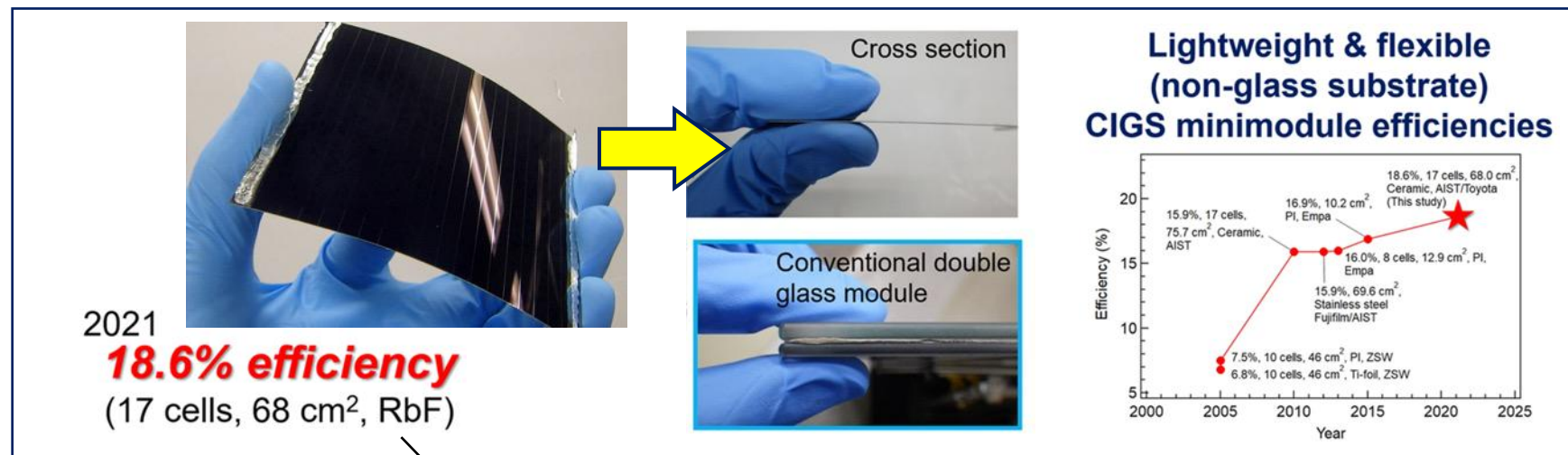
- 10cm角程度の集積構造型軽量CIS系ミニモジュールにおいて変換効率18.7%を達成した。また、同型ミニモジュールで架台を含めたモジュール重量 2.77 kg/m^2 相当を得て、最終目標である 3 kg/m^2 以下を達成した。
- ペロブスカイト/CIS構造の2接合タンデム太陽電池を作製し、変換効率22.3%を達成、トンネル接合部(再結合層)の材料設計が重要であるとの指針を明確にした。
- CIS系太陽電池のボトムセル応用に向けて、禁制帯幅1.0 eVのナローギャップCIGS太陽電池(ポリイミド基板)で変換効率21.2%を達成(V_{oc} 0.68 V、 J_{sc} 39.8 mA/cm^2 、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。
- 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)。

評価・分析関連

- 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、 V_{oc} 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角程度軽量CISミニモジュール

10cm角程度ミニモジュールの研究開発



← CIGSe光吸収層組成比制御

← アルカリ金属 (Na, K) 添加による表面改質

← 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 _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	FF (%)	Area (cm ²)	No. of cells	Test center
2021	RbF	18.64	12.70 (0.747/cell)	138.5	72.0	68.0 (d.a.)	17	AIST
2023	NaF + KF	18.70	12.08 (0.711/cell)	138.3	76.0	67.9 (d.a.)	17	AIST

2023

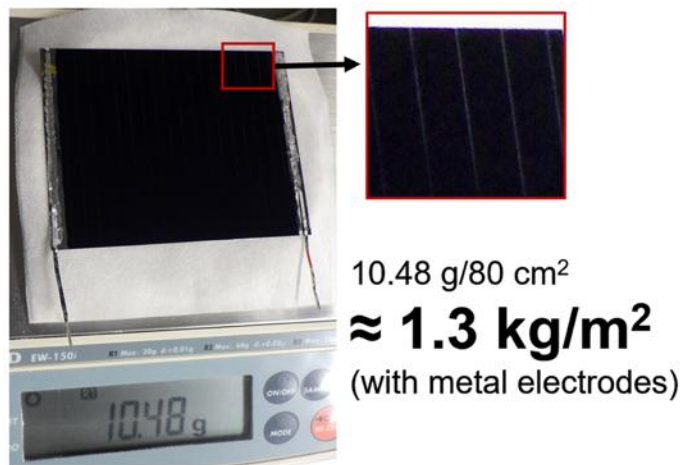
18.7% efficiency*同型デバイスの**世界最高効率を更新**

*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】

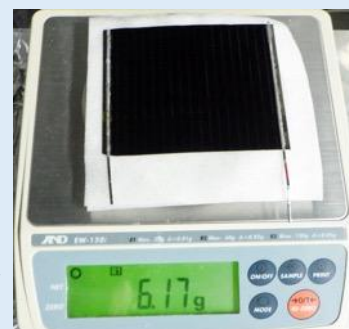


S. Ishizuka et al., npj Flex. Electron. **6**, 90 (2022).

基板 + その他モジュール材相当で
1.3 kg/m²

➡樹脂フィルム表面材 (0.3 kg/m²)
とフレーム (1.7 kg/m²) を合わせて、
3.3 kg/m²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/m²相当

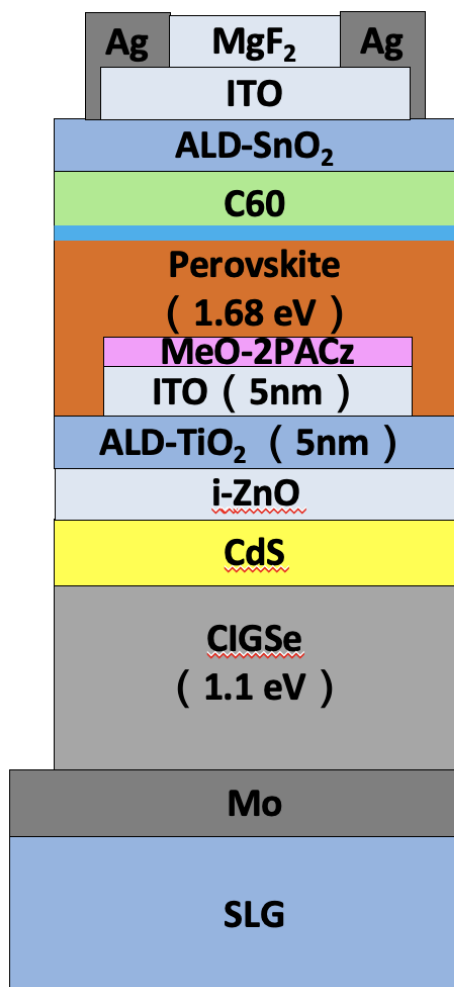
最終目標 3 kg/m²以下を達成

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1.91V、変換効率**22.3%**を達成。

課題：再結合層、ボトムの本バンドギャップ
などデバイス構造の最適化

- 再結合層をALD-SnO₂からALD-TiO₂へと変更することにより、
変換効率**22.3% (1cm²)**を達成した。

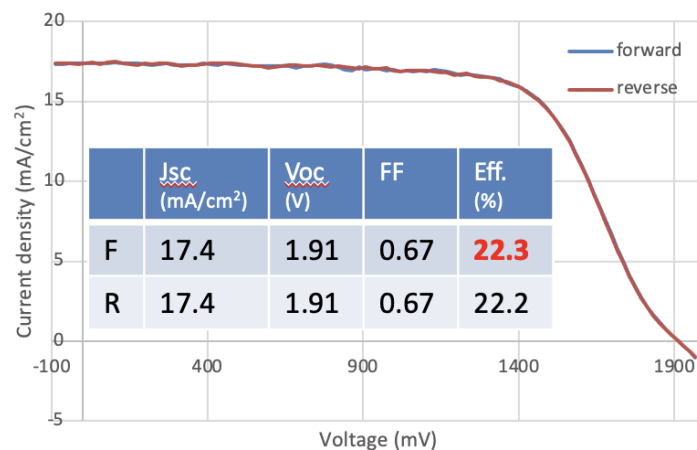
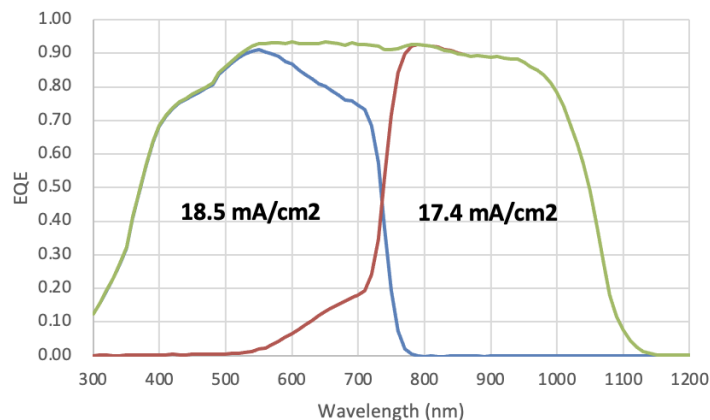


← Cs₅(MA₂₃FA₇₇)₉₅Pb(I₇₇Br₂₃)₃



セル面積: 1cm²

産総研
から提供



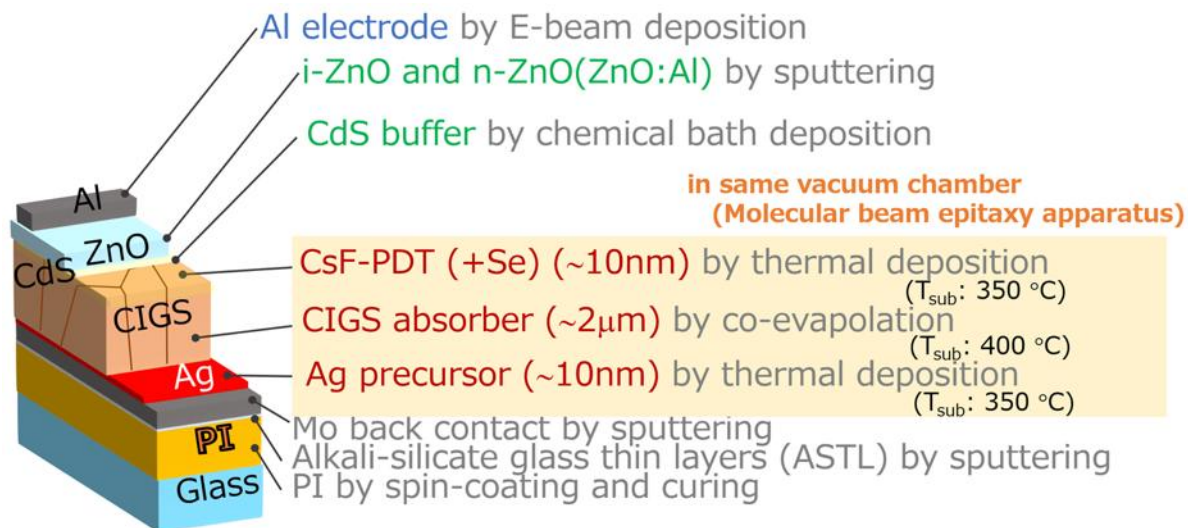
タンデム型太陽電池応用に向けたボトムセルの開発

$E_g \sim 1.0$ 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（1.0 eV）CIGSの**世界最高値***

	<i>Eff. (%)</i>	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	<i>FF</i>
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



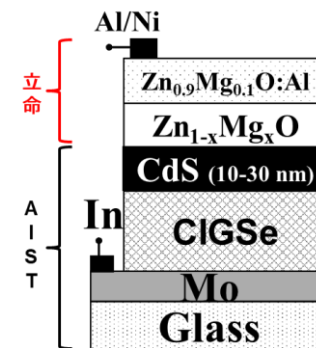
Y. Kamikawa et al., E-MRS, Warsaw, Sep. 19, 2024.

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

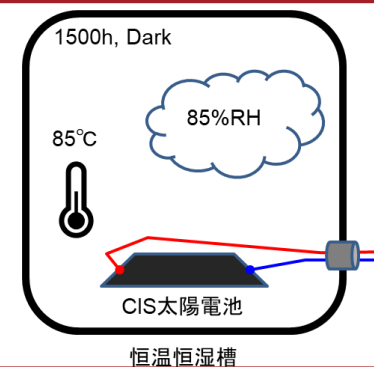
①高品質接合界面構造の開発

Cu(In,Ga)Se₂ (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%



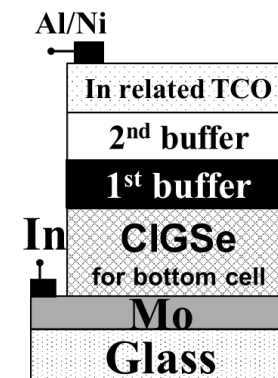
②加速試験による高耐久性実証

CIGSe太陽電池の加速試験を実施。
デバィ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℃85%RH, 1500h) 後、
94%の初期出力保持



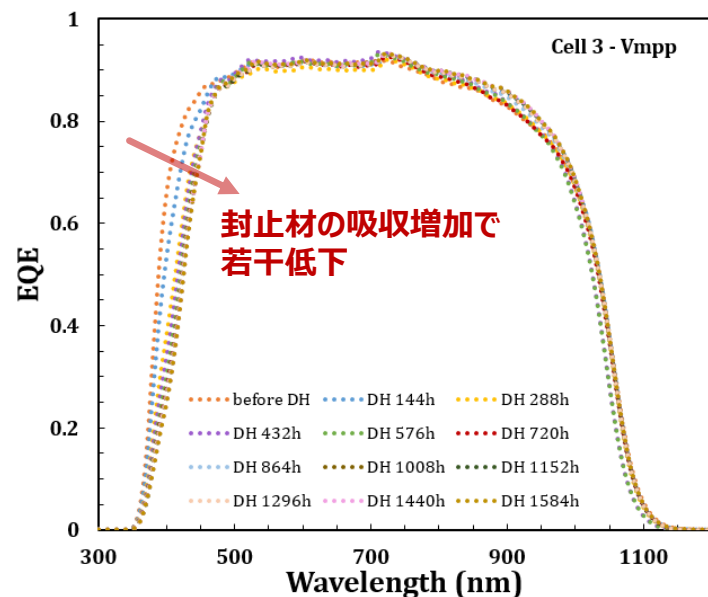
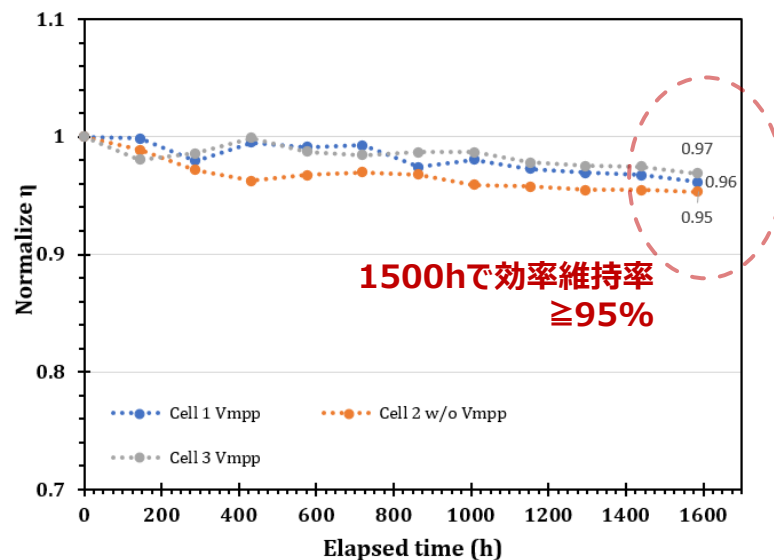
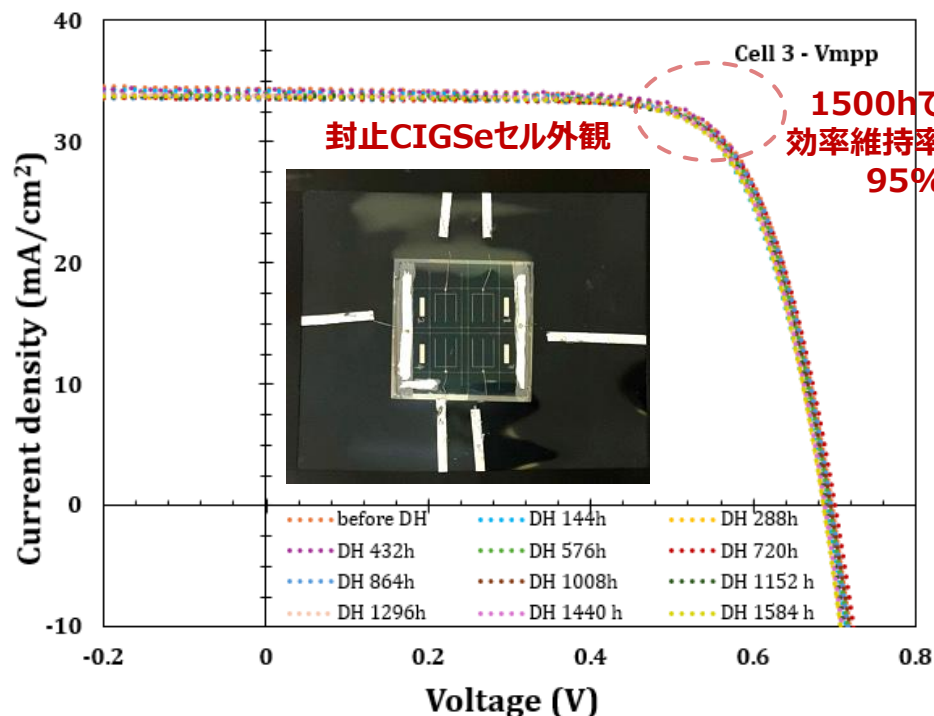
③タンデム用新規セル構造の開発

ℎℎℎℎℎℎ/CIGSeタンデム太陽電池を目指し、ℎℎℎℎℎℎ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。ℎℎℎℎℎℎ/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ℎℎℎℎℎℎの分解抑制を実証



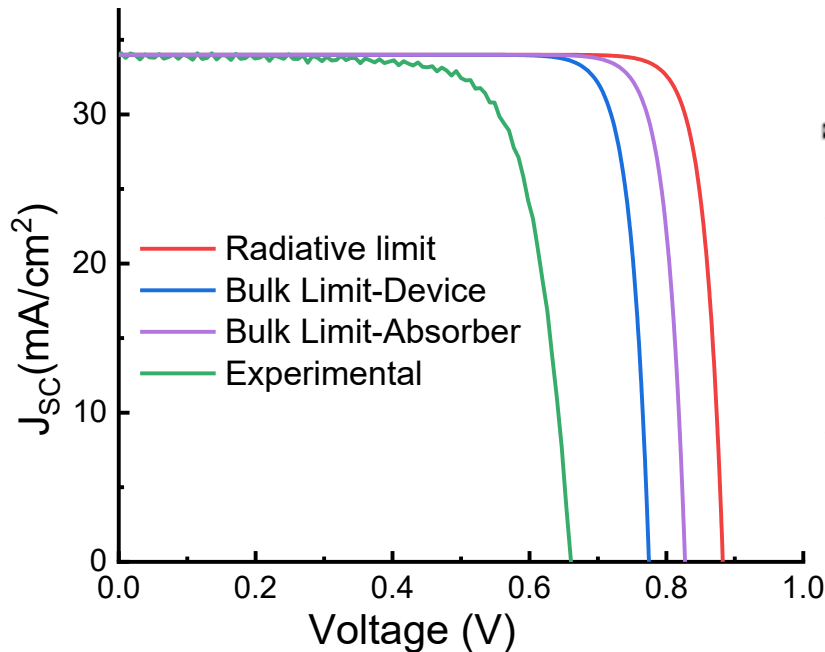
封止したCIGSeセルの高温高湿試験を実施し、高耐久性を実証

- 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する技術を開発
- 高温高湿試験 (85°C85RH%)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

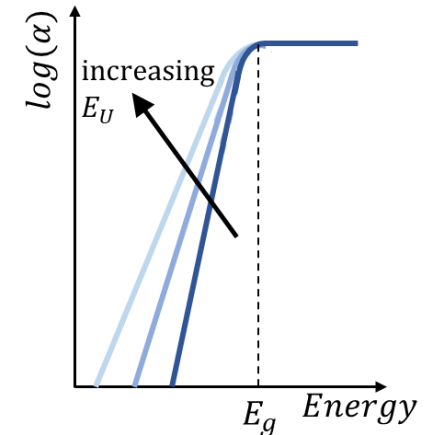
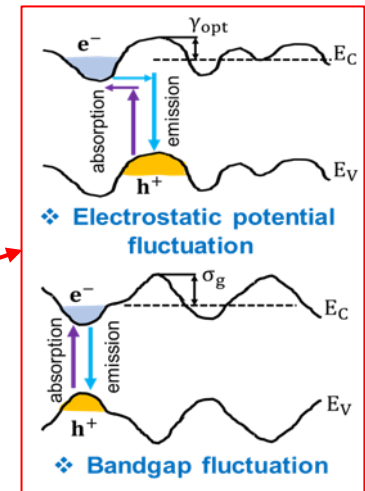
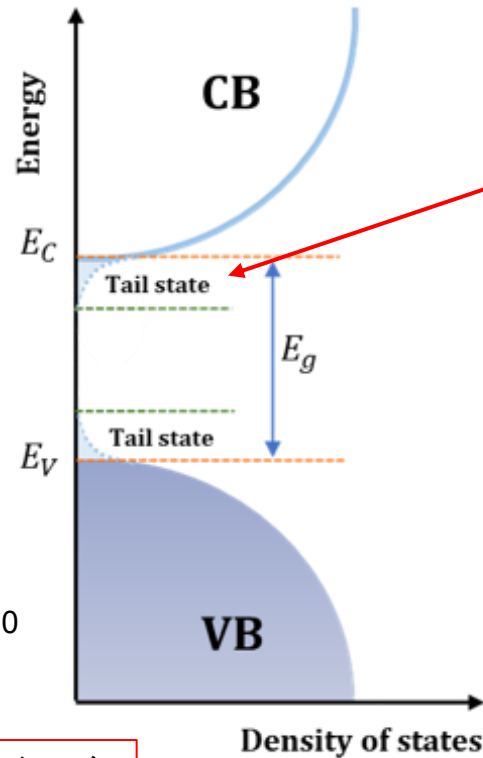


Radiative limit : 理論再結合寿命を用い、バルク再結合のみ起こると想定し導出

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

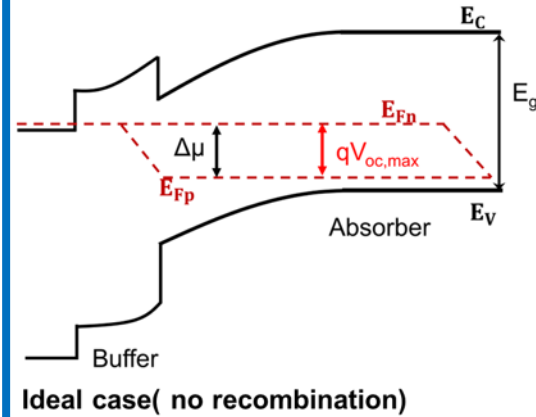
実測と理論値のギャップ



(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た。

バンドダイアグラム



フェルミ準位分裂(QFLS)従来式

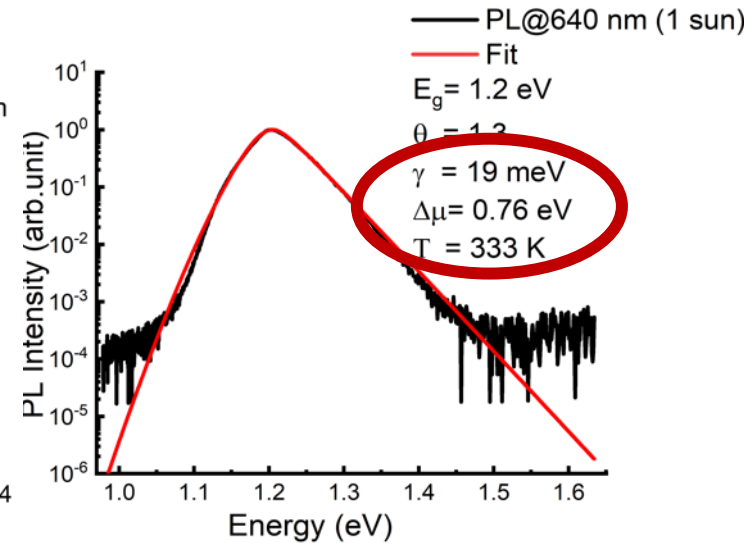
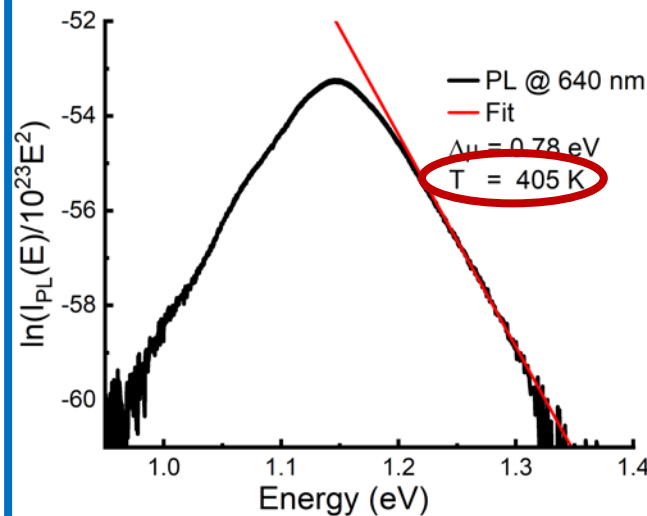
$$\Delta\mu = E_{Fn} - E_{Fp} = qV_{OC}$$

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

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 γ 、 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

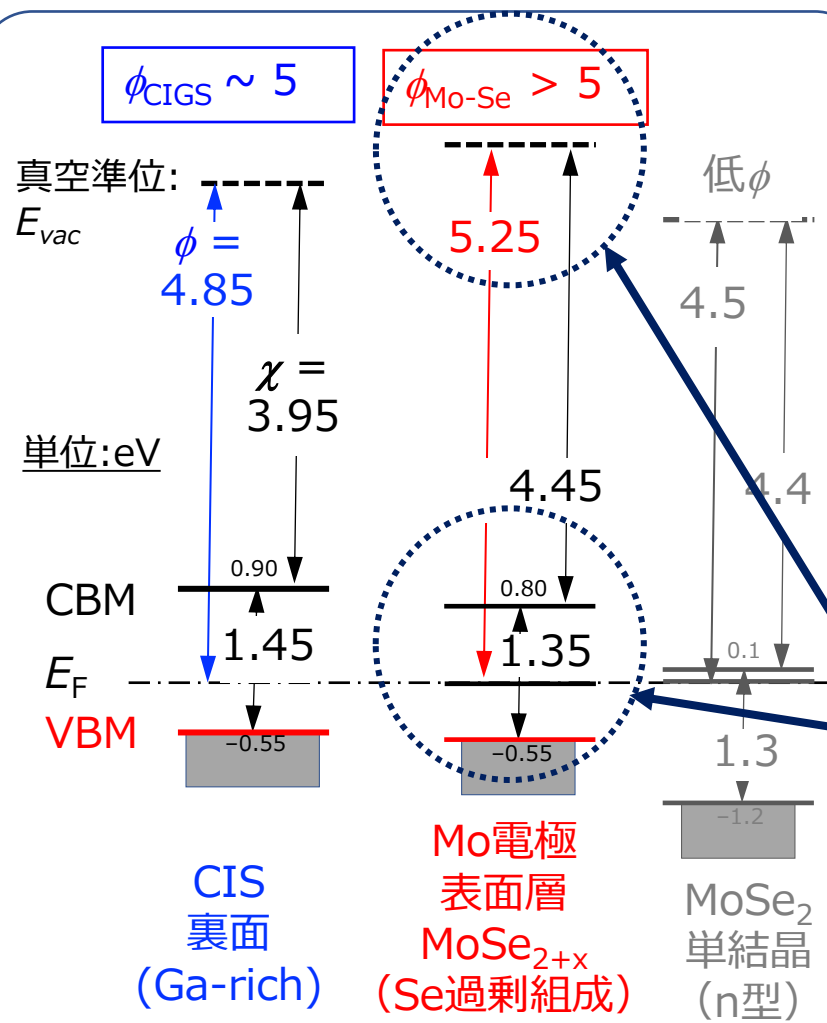
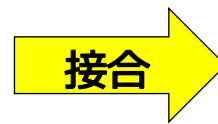
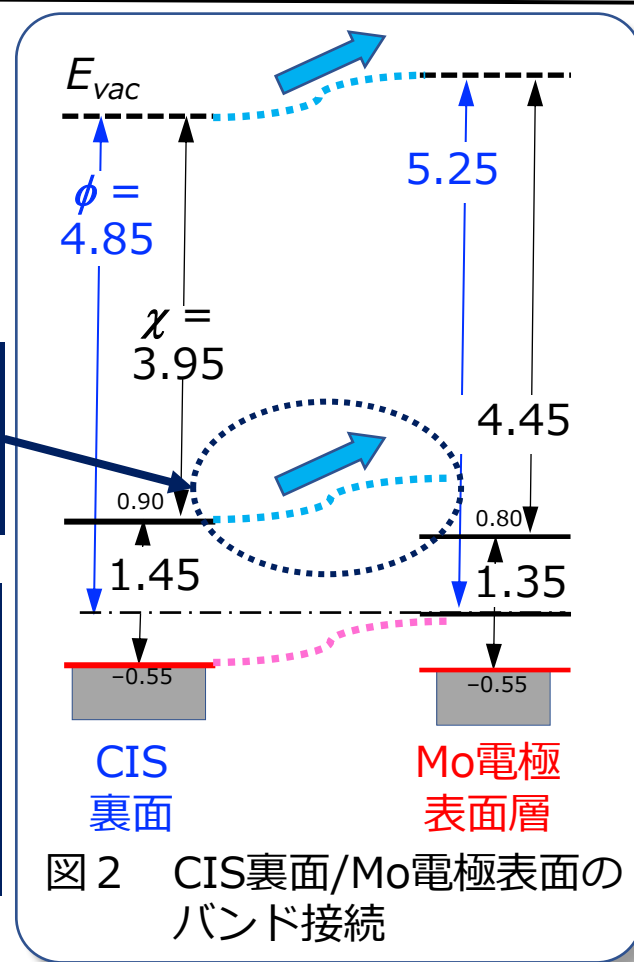


図1 裏側界面CIS側、Mo電極側；高温成長MoSe₂単結晶(参照用)のバンドラインアップ



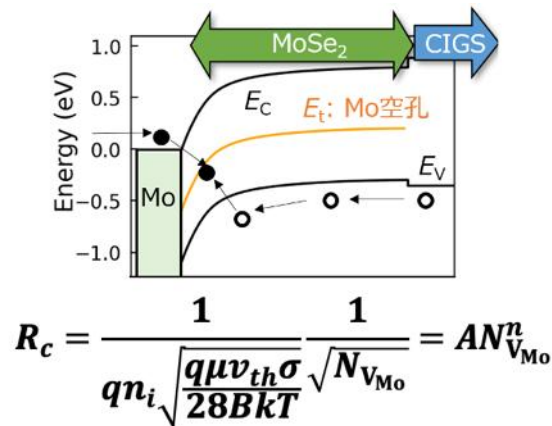
バンド接続：
伝導帯下端 (CBM)の上昇

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 ϕ

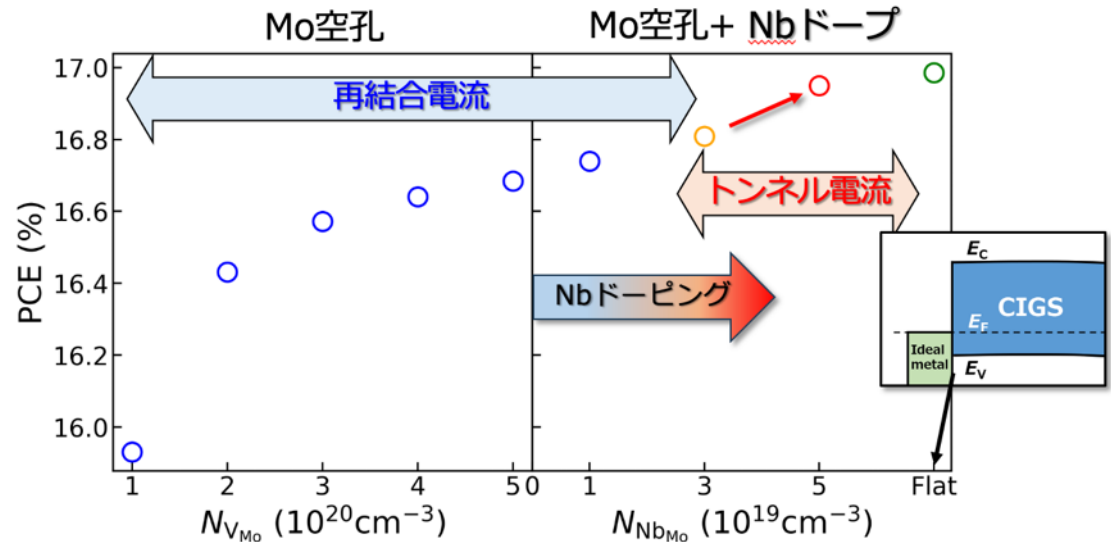


Mo電極：非化学量論組成 $MoSe_{2+x}$ による被覆
CIS裏面より高い仕事関数 $\neq$ バルク値
CIS側伝導帯下端の引き上げ

Back surface field増強による再結合抑制



q: 素電荷, n_i : 真性キャリア密度, μ : 移動度,
 σ : 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/MoSe₂/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、MoSe₂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、変換効率が絶対値で1%程度向上することを示した。

1. まとめ

- 高効率な軽量CIS太陽電池ミニモジュールの開発及び2端子型ペロブスカイト/CISタンデム太陽電池の開発に成功した。

2. 今後の課題：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、非輻射再結合メカニズムなどCISの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、熱光照射効果の最適化を進め、軽量ミニモジュールのさらなる高効率化に取り組む。
- エッチングを用いたセル分離によりFF 83.1%が達成され、メカニカル・スクライビングがFF低下の一要因であることが明らかになった。集積モジュール作製時のスクライビング工程など、TCO開発を含めたモジュール作製プロセスの検討を行う。

3. 今後の課題：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)の構造及び材料設計、並びに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等により、さらなる変換効率の向上に取り組む。