

先端産業プロセス・高効率化 チームの概要

先端産業プロセス・高効率化チーム

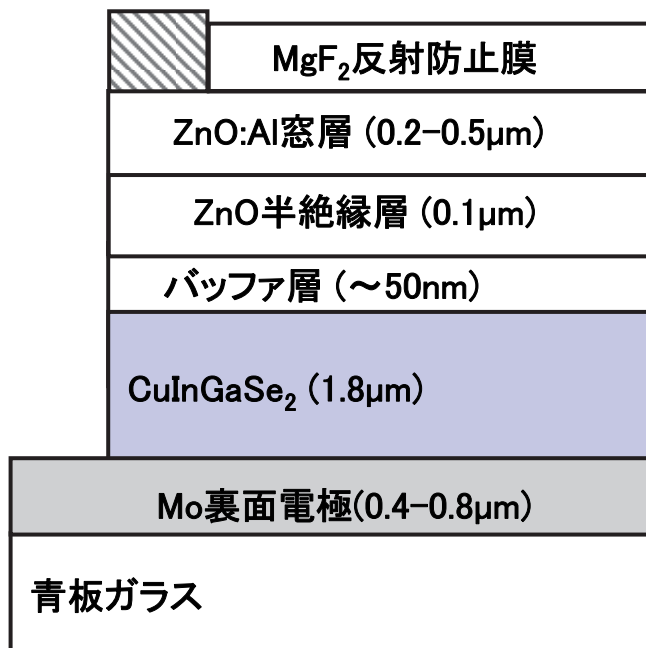
柴田 肇

発表内容

- 背景
- 小面積CIGSセルの高効率化(主担当:石塚尚吾)
- フレキシブルCIGS太陽電池(主担当:石塚尚吾)
- 省資源化・低コスト化技術(主担当:古江重紀)
- ワイドギャップCIGS系太陽電池(主担当:小牧弘典)
- スマート・スタック技術(主担当:鯉田崇)
- まとめ
- 今後の課題と方向性

CIGS太陽電池の構造と特徴

AINi電極



特徴

1. 変換効率が高い ($\eta = 20.3\%$)
2. 吸収係数が大きく薄膜化可能
 - ・Siの約100倍
 - ・吸収層約 $2\mu\text{m}$ 、全体で約 $3\mu\text{m}$
3. 優れた耐放射線性
 - ・NASDA人工衛星(つばさ:MDS-1)で実証済
4. 低コスト基板を使用可能

3kW CIGS モジュール ($\eta = 15\%$, 20m^2)

Cu:45g

In:49g

Ga:20g

Se:112g

シリコンで作製する場合: Si 15kg必要



量産化への移行

日本

Solar Frontier (20MW) → 80MW(2009) → **1GW (2011)**
ホンダソルテック (27.5MW)

Germany

Solibro → 75MW(2010) → **135MW (2011)**
Avancis (20MW) → **100MW (2012) : Hyundai H.I.とJV**

韓国

Samsung(セレン化法)、LG Innotek(蒸着法)が量産化
に着手

Turn-key system

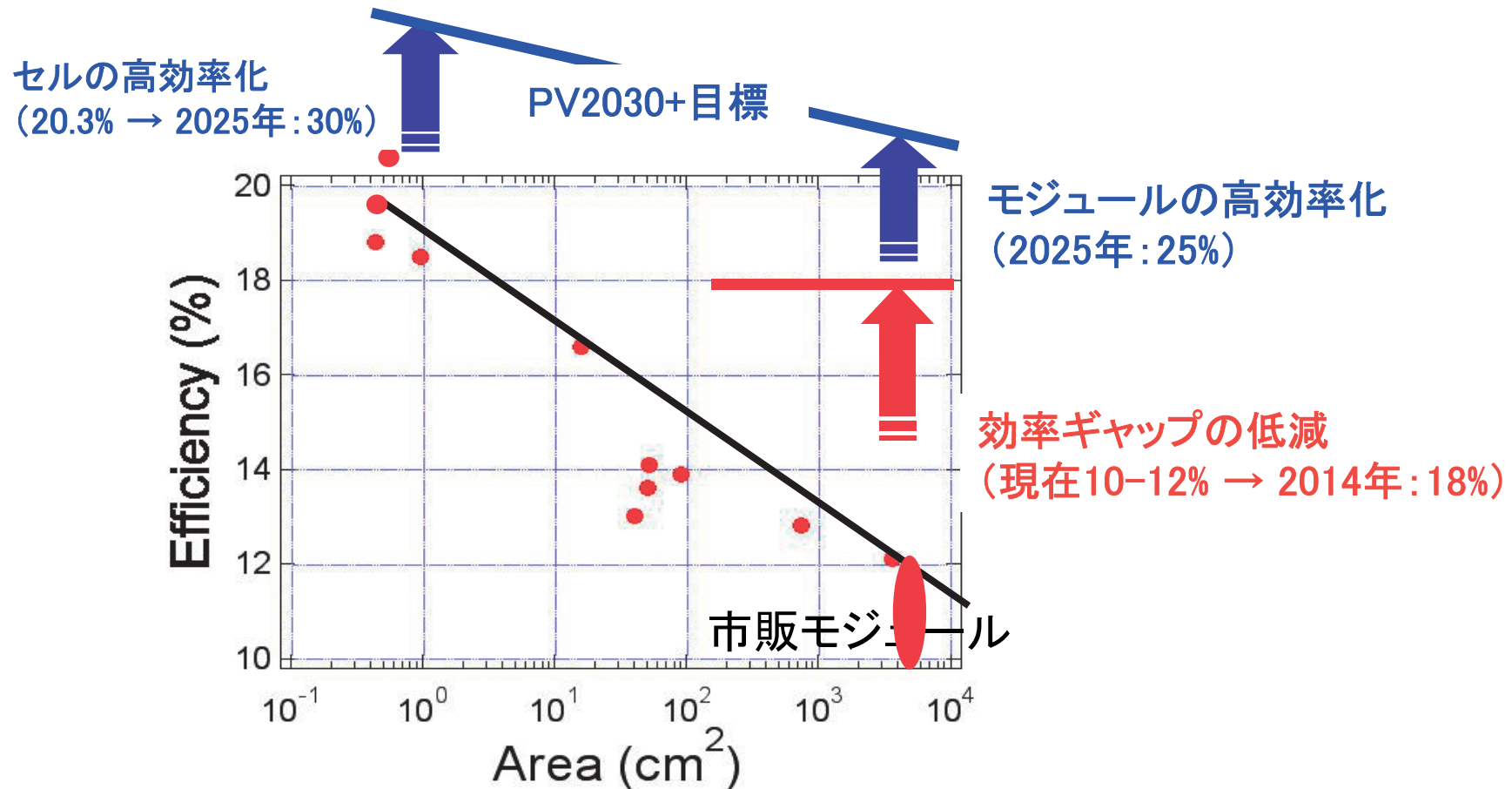
Centrotherm PV → 2nd Generation Equipment

Wuerth Solar → Manz (60& 120 MW turn-key:2011)

CIGS太陽電池の現状と課題

- 1) セル、モジュールの高効率化
- 2) フレキシブル太陽電池の高効率化
- 3) 省資源化、代替材料の開発
- 4) タンデム化

セル面積と効率の関係



1. セル・モジュール間の効率ギャップの低減
2. セル、モジュールの革新的高効率化技術開発

小面積CIGSの高効率化研究のトレンド

ZSW: 20.3% → 30% @ 2025

厚膜化と高温成長

AINi電極



薄膜化: 0.1μm
(光透過率、電気特性向上)

ワイドギャップ化: $E_g = 1.4-1.5\text{eV}$

CIGS光吸収層の厚膜化 (2-3μm)
Na量の最適化
Ga、In組成プロファイルの最適化
高温製膜 (600-650°C)
高温製膜用ガラス基板の開発

(サブ)モジュールの高効率化の現状

18% @2014 → 25% @2025

サブモジュールの性能

日本が世界をリード

Solar Frontier	17.2% (808 cm ²)	セレン化/硫化法	(June 2011)
AIST	16.6% (67.2 cm ²)	蒸着法	(June 2010)

量産モジュールの特性向上

Solar Frontier: 16%のサブモジュール技術を1GW量産工程へ導入
 Soliblo: 2010年、フルサイズジュールで14.6%(63X119 cm²) 達成

セル・モジュール間の効率ギャップ、大幅に低減

高効率化の課題

「NEDO次世代高性能」

- ・光吸収層の高品質化
- ・デッドエリアの低減 (P2,P3: レーザスクライブ?)
- ・面内均一性の向上 (組成、膜厚、等)
- ・小面積セルの高効率化 (効率25%技術をモジュールへ)

フレキシブル太陽電池

特徴

1. 軽量, 様々な形状に対応可能
2. 車載用、宇宙用等の新規応用分野
3. ロール・ツー・ロール工程による低コスト化
4. モジュールの軽量化

基板の選択条件

1. 熱膨張係数がCIGSと同等
2. 高温でも安定
3. 化学的に安定
 - ・バッファ層の溶液成長
4. 低コスト(ガラスより安価?)

導電性基板 or 絶縁性基板

金属箔(Ti, SS, 他) ポリイミド、セラミクス等

Naの導入

究極のフレキシブルモジュールへ —高性能、高機能、軽量、低コスト—

曲面、軽量、宇宙用等の限定的な応用だけでなく、電力用、家庭用まで

- ・フレキシブル基板の開発
高温耐性、化学的に安定、低コスト
- ・モジュール高効率化技術の開発 —集積型、グリッド型—
- ・R2Rプロセスの構築
R2Rは蒸着法が最適、セレン化法は現実的でない
- ・封止技術(材料、手法)、長期信頼性の向上

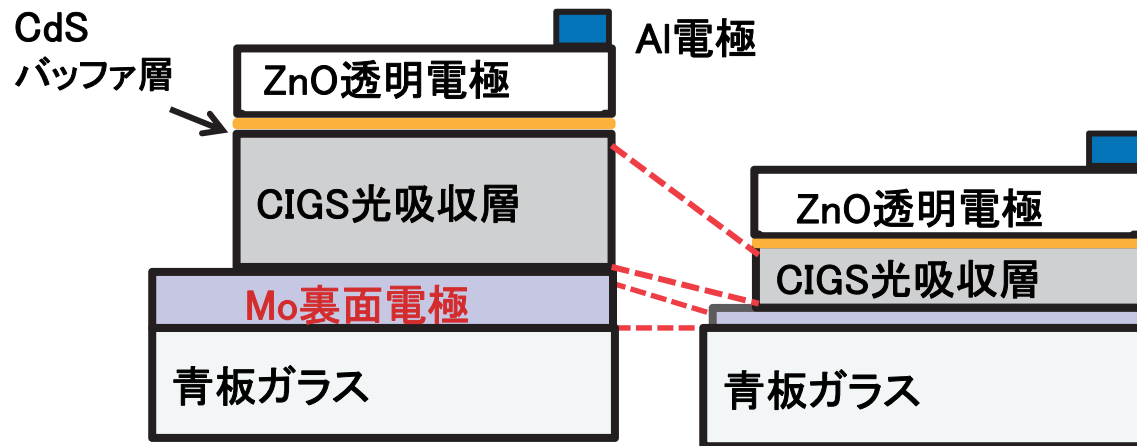
省資源化技術の開発

希少金属、高価な金属材料の使用量低減

➡ 少ない資源でより多くのエネルギーを生成

In、Ga、Mo、Se原料の使用量の低減(産総研の成果)

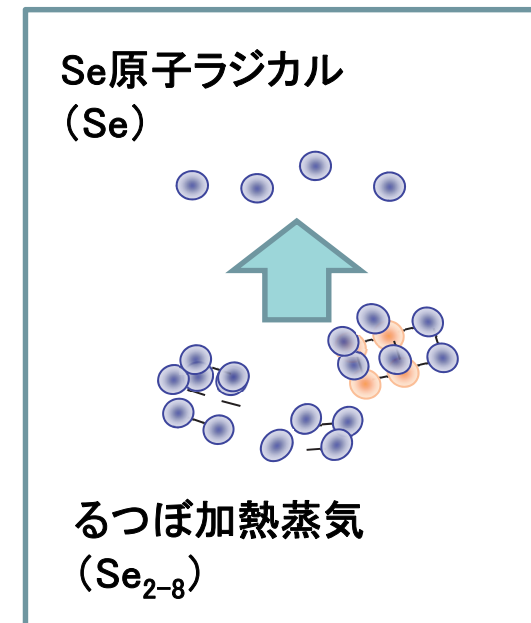
CIGS、Mo層の薄膜化



Mo: 800nm → 70nm 変換効率はほぼ同等
 CIGS : 1.8 μm → 0.75 μm 効率15%を実現
 さらなる薄膜化には新技術が必要

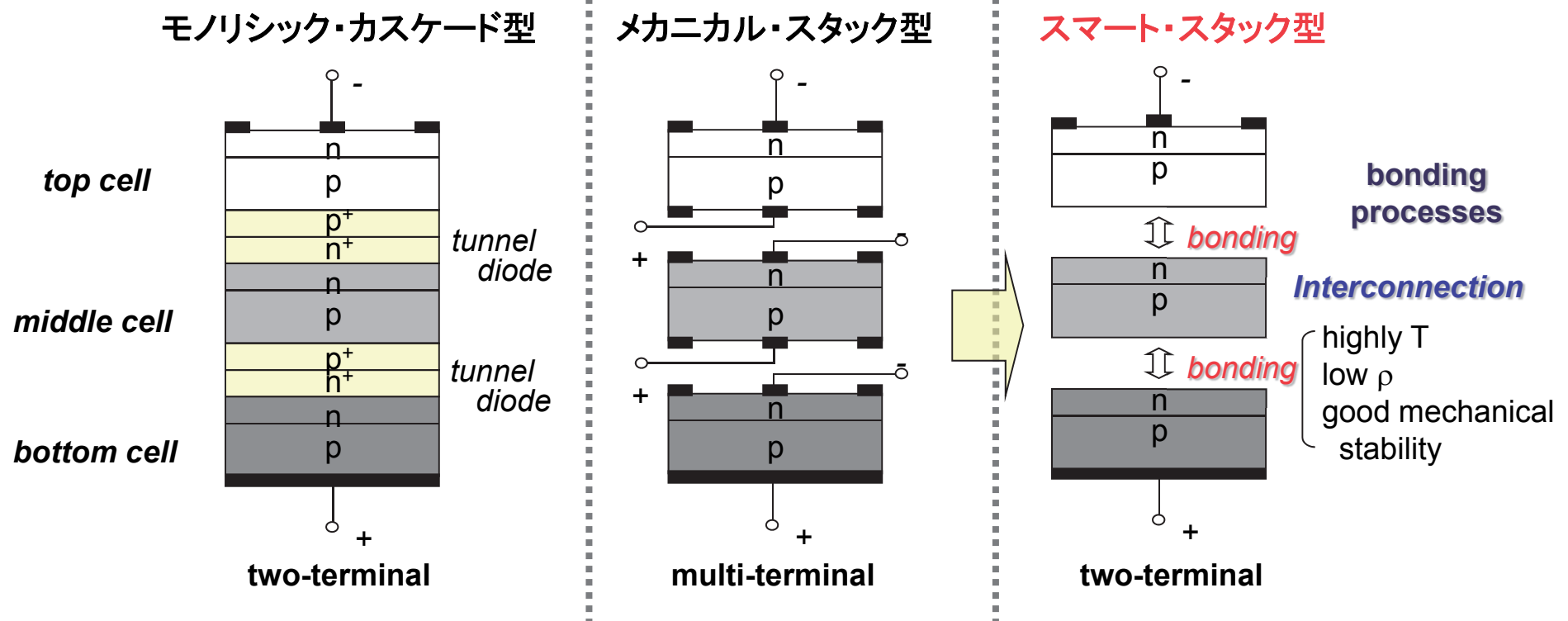
スループット向上 装置コスト低減

Se原料の利用効率の向上



Se: 利用効率10倍以上向上

タンデム型太陽電池



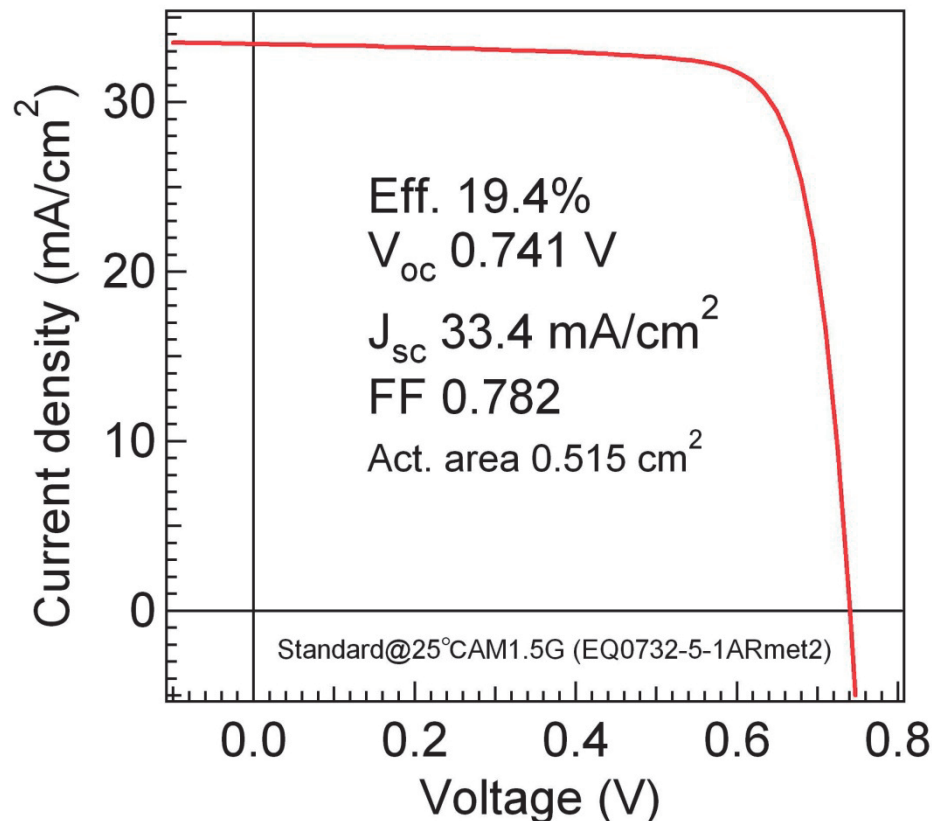
1. **スマート・スタック技術**の開発により、従来のメカニカル・スタックの弱点であった、**構造の複雑化**とスタック部での**光損失**の問題を解決する。
2. **化合物薄膜系4接合型太陽電池**のために、 $E_g \geq 1.8$ eVの高性能な**ワイドギャップ**太陽電池用化合物材料を開発する。

チームの研究目標

- 小面積CIGSセルの高効率化
- CIGSモジュールの高効率化
- フレキシブルCIGS太陽電池の高性能化
- 省資源化・低コスト化技術の開発
- タンデム化技術の開発
- 新分野の開拓

小面積CIGSセルの高効率化

主担当: 石塚尚吾



n 1.41

R_{sh} 1280 Ωcm^2

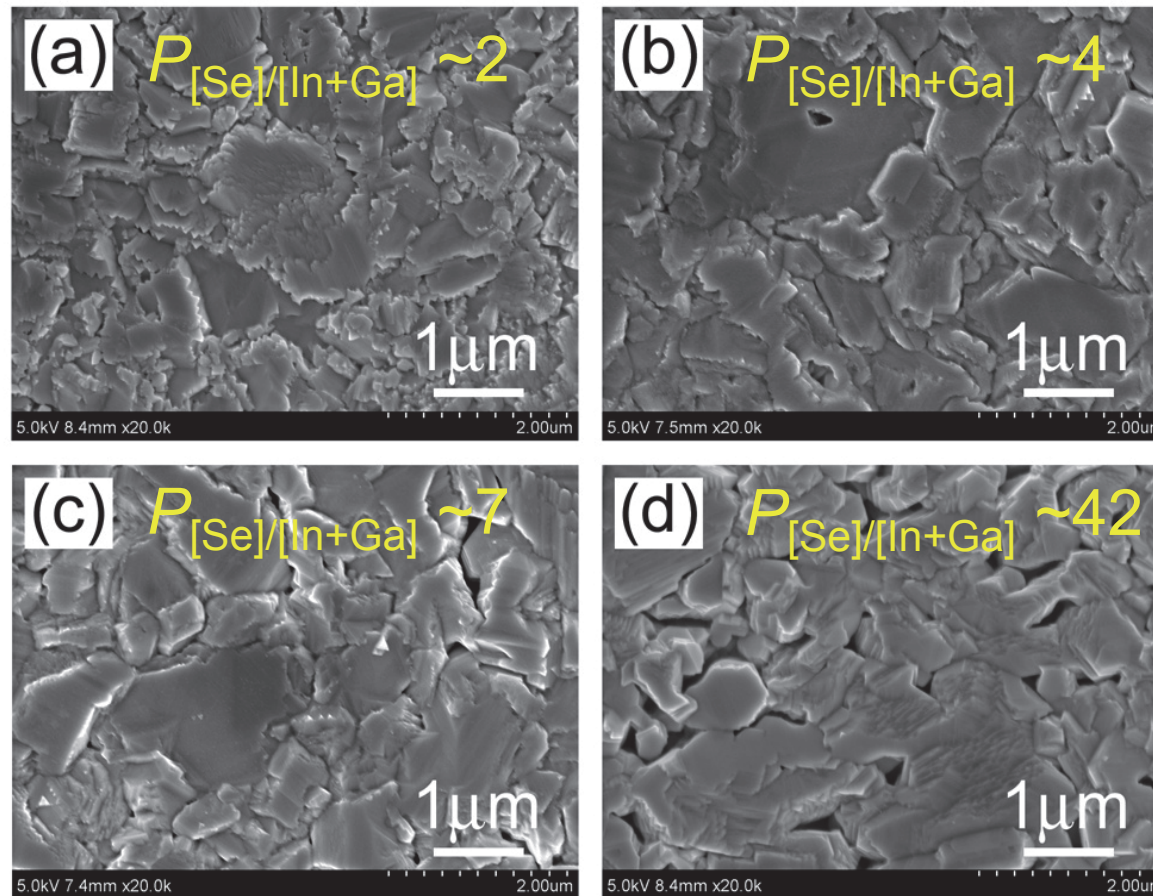
R_{ser} 0.532 Ωcm^2

J_0 5×10^{-11} mA/cm²

セル構造

AZO 300nm, i-ZnO 70nm,
 CdS 50nm, CIGS 2 μm ,
 Mo 800nm, SLG基板,
 ARコート有

CIGS薄膜表面のSEM画像

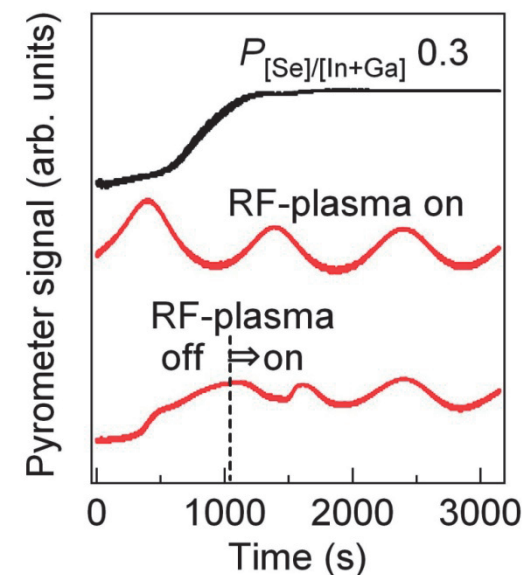
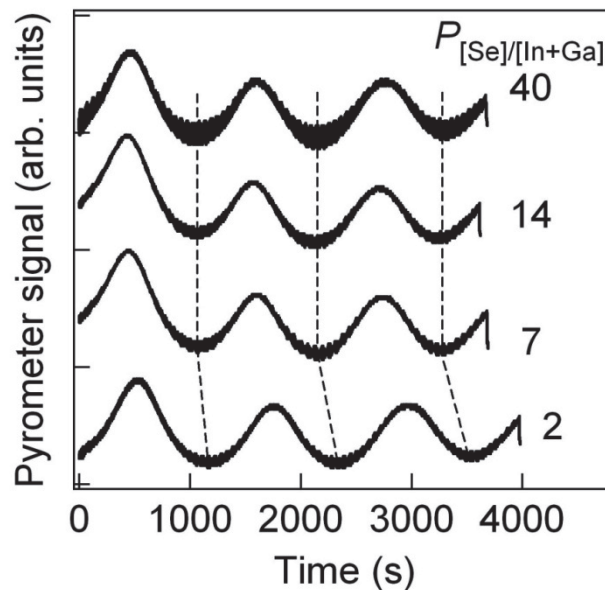
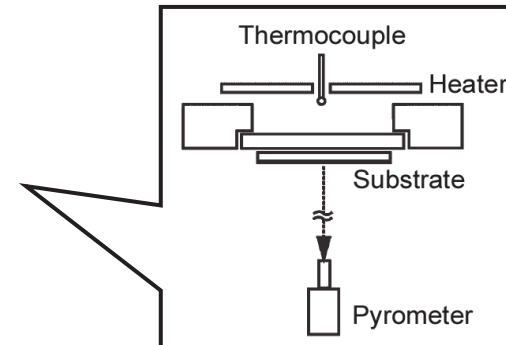


$P_{[Se]/[In+Ga]}$ の値が減少するほど、CIGS表面の平坦性は向上する。

ラジカルSeの効果

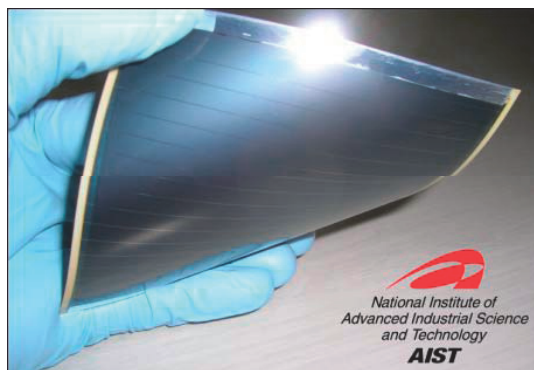
Pyrometer profiles for the 1st-stage
[(In,Ga)₂Se₃ precursor growth]

E-Se ———
R-Se ———



ラジカルSeを使うことでSe使用量を大幅に低減できる事を示している。

フレキシブルCIGS太陽電池1

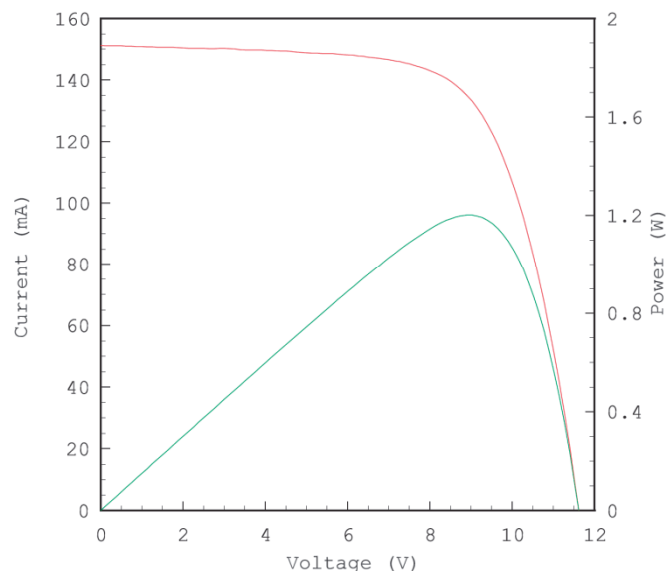


フレキシブルCIGSサブモジュールで、既に15.9%を達成(2010年2月25日プレス発表)している。

H22年度では、フレキシブCIGSサブモジュールにおいて、効率は同じ15.9%ながら、基板材料(ジルコニア・セラミックス)の薄型化(300 μ m \rightarrow 200 μ m)とMoの薄膜化(800nm \rightarrow 400nm)に成功した。

主担当:石塚尚吾

I-V CURVE
IEC60904-3Ed.2 75.7 cm²(aperture area) WXS-220S-20



Date : 19 Apr 2010
Data No : EQ0604-01
Sample No : EQ0604
Repeat Times : 3

I_{sc} 151.2 mA
V_{oc} 11.61 V
P_{max} 1.201 W
I_{pmax} 135.1 mA
V_{pmax} 8.89 V
F.F. 68.4 %
Eff(ap) 15.9 %
DTemp. 25.0 °C
MTemp. 25.0 °C
DIrr. 100.0 mW/cm²
MIrr. 100.4 mW/cm²

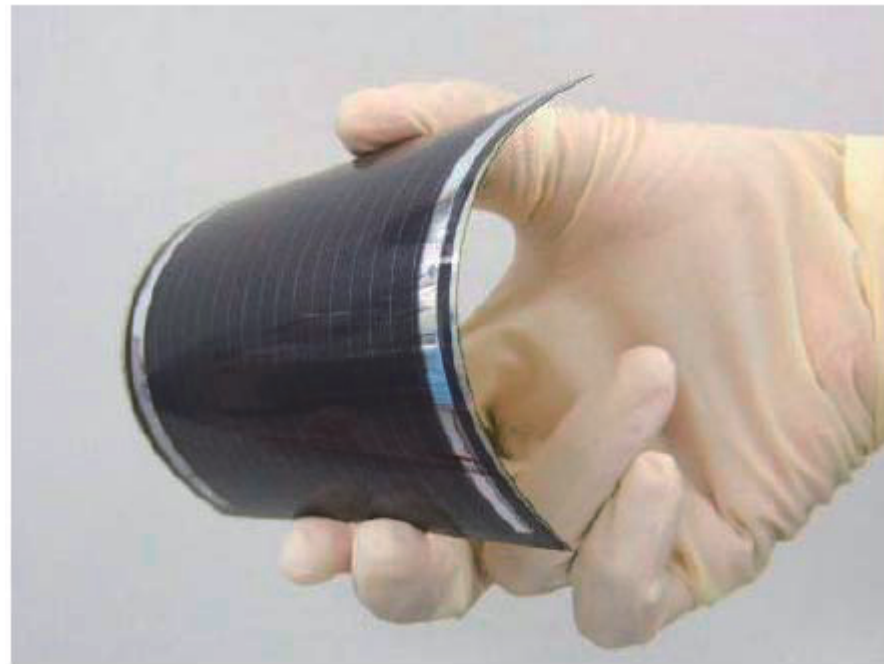
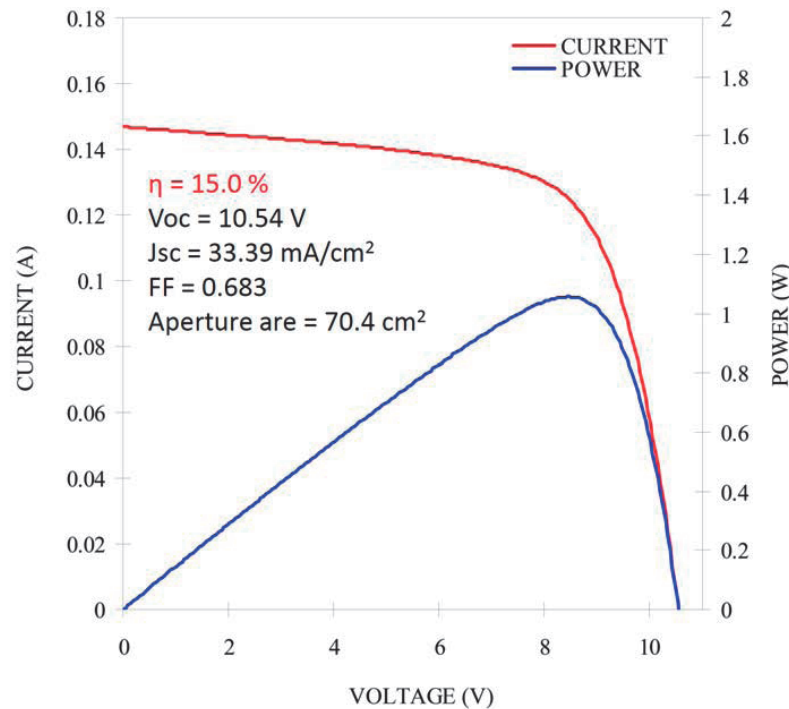
Ref. Device No CSI02
Cal. Val. of Ref. 129.46 [mA at100mW/cm²]
Scan Mode I_{sc} to V_{oc}



フレキシブルCIGS太陽電池2

主担当: 石塚尚吾

ステンレス基板上的集積型サブモジュールで変換効率15.0%を達成



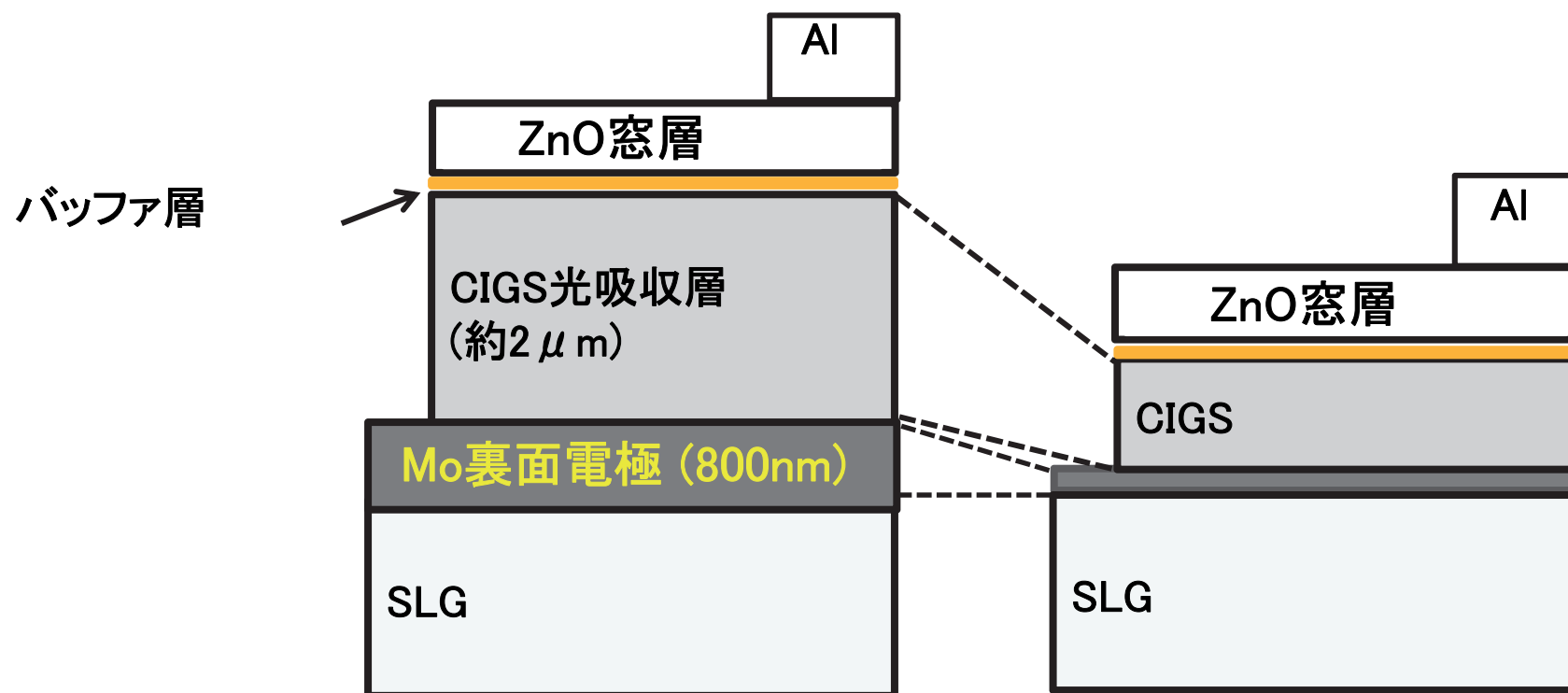
株式会社富士フィルムとの共同研究による

省資源化・低コスト化技術

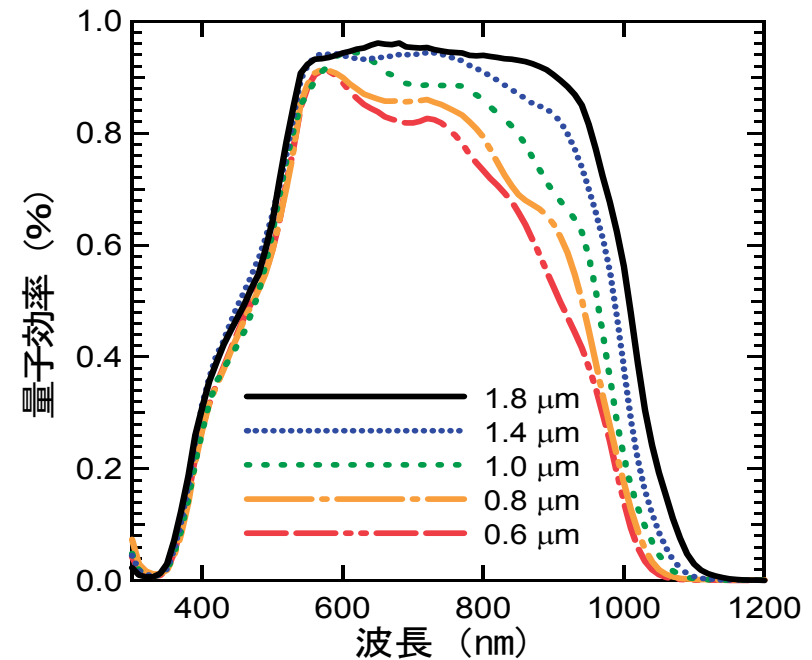
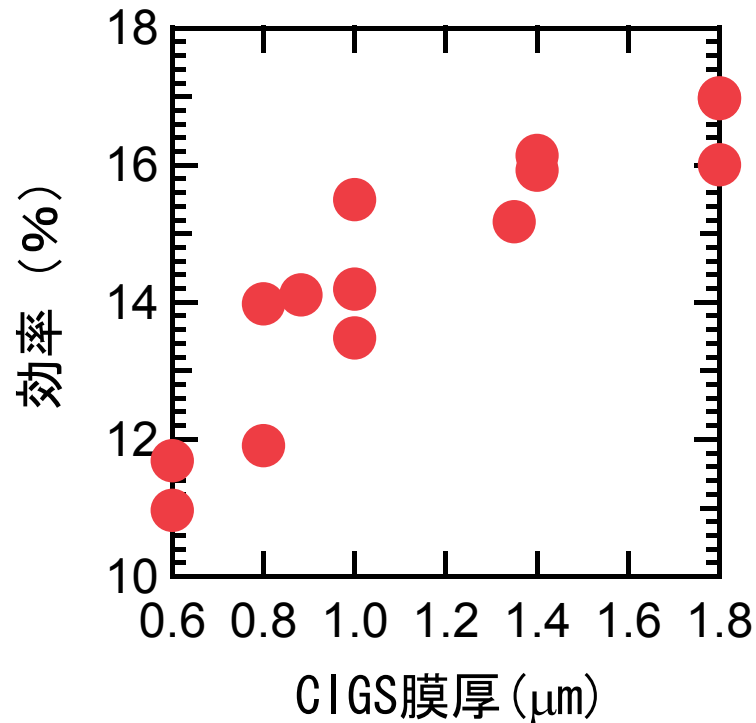
主担当：古江重紀

希少金属、高価な金属材料の使用量低減

➡ 低コスト、少ない資源でより多くのエネルギーを生成
(low cost, more energy for less material)



昨年度までの成果

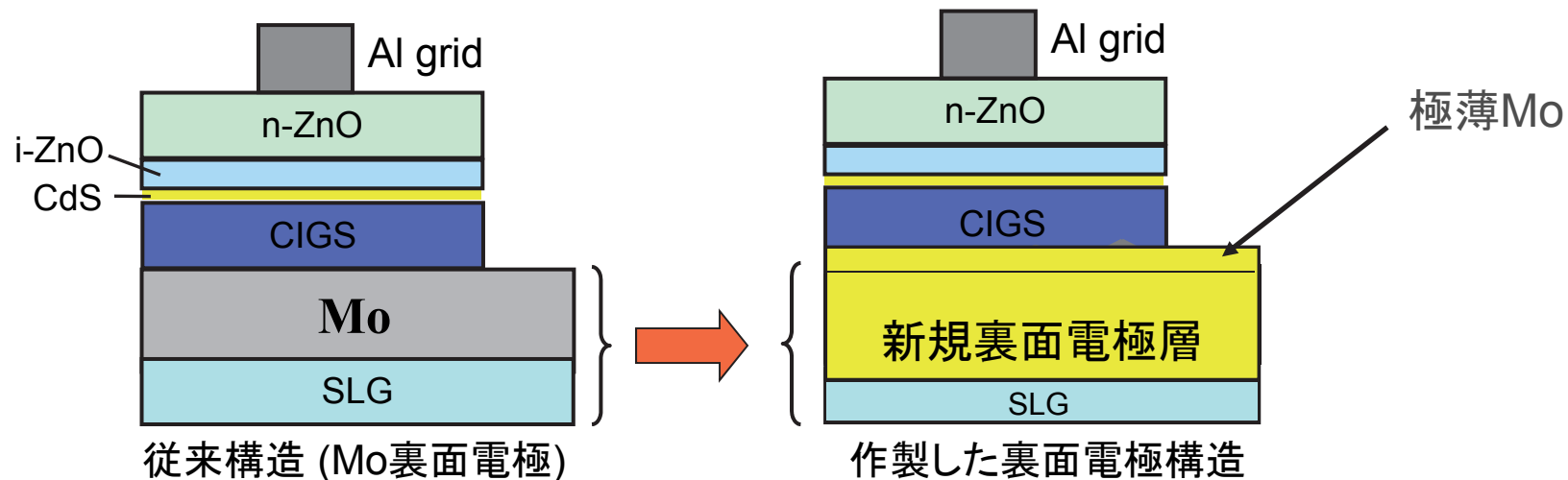


・1 μm以下で変換効率が大幅に低下

- ・近赤外域での分光感度低下
- ・短絡電流の低下

CIGSの薄膜化による効率低下の原因は、量子効率が低下による短絡電流の減少
 ⇒ 太陽光を十分に吸収できていない ⇒ **新しい太陽電池構造が必要**

新規裏面電極構造の研究



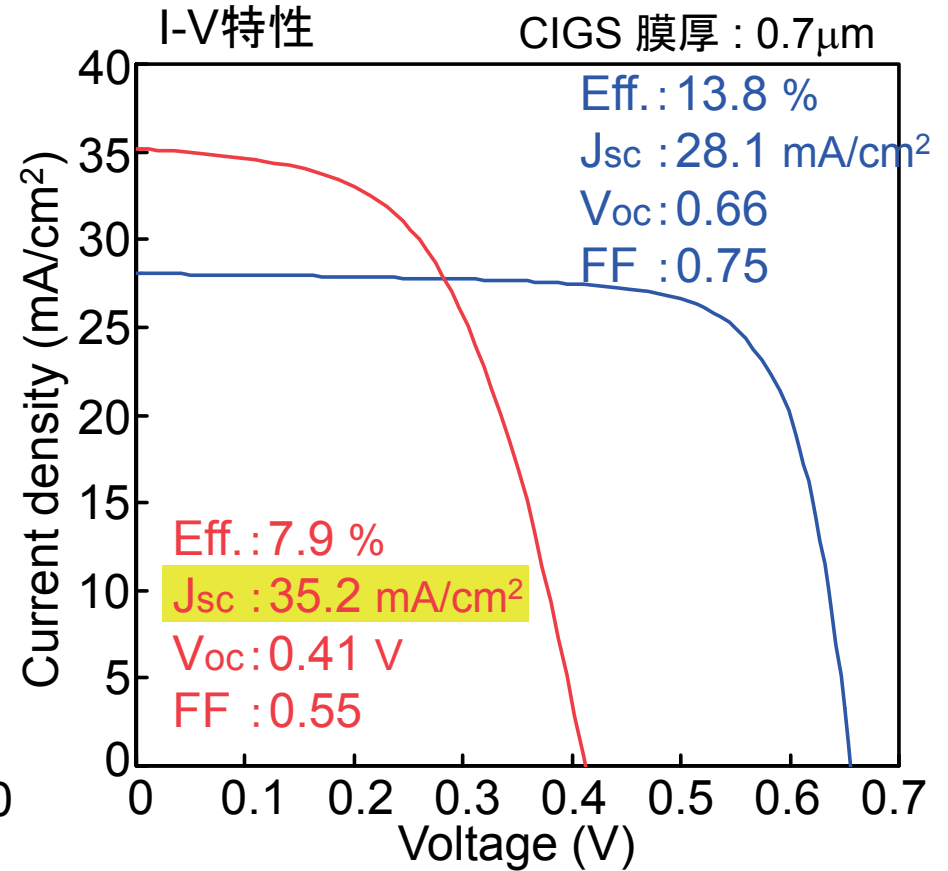
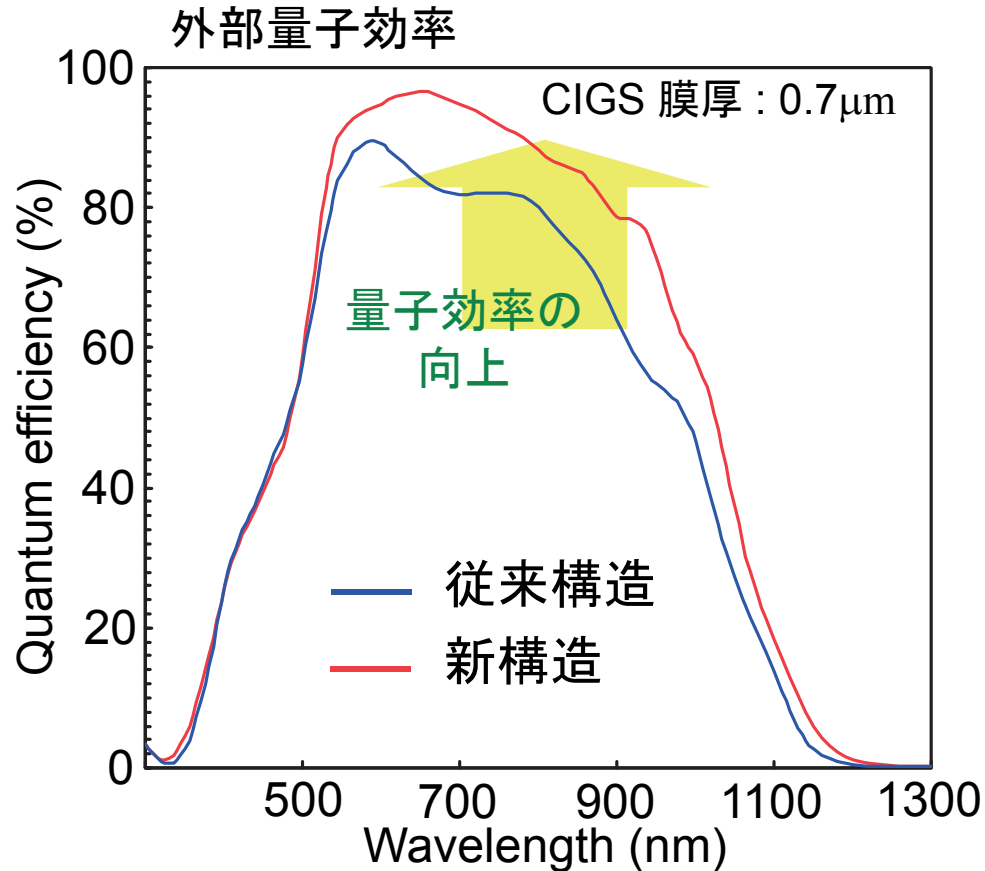
高反射金属と透明導電膜を用いた裏面電極構造の形成

新規裏面電極構造

- 高反射金属層: 透過光を再びCIGS光吸収層へ戻す
- 透明導電膜: CIGS製膜時の金属とSeの反応を防止
- 極薄Mo層: CIGSとの密着性、オーミック接触

⇒ 光閉じ込め効果による量子効率の向上を期待

新構造CIGS太陽電池の特性

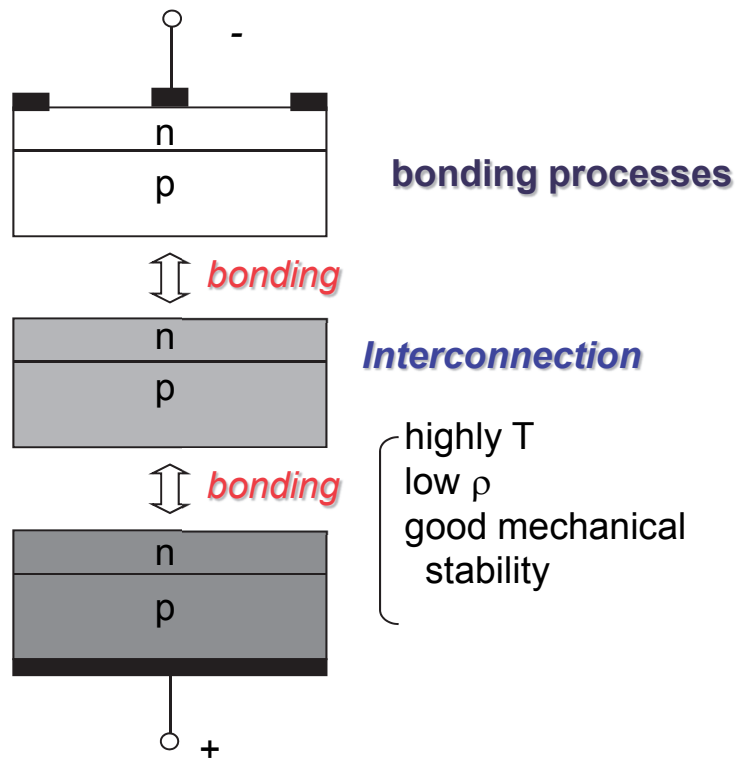


量子効率の向上、短絡電流の増大 ⇒ 光閉じ込め構造を実現

ただし、開放電圧 (V_{oc}) と曲線因子 (FF) が低下

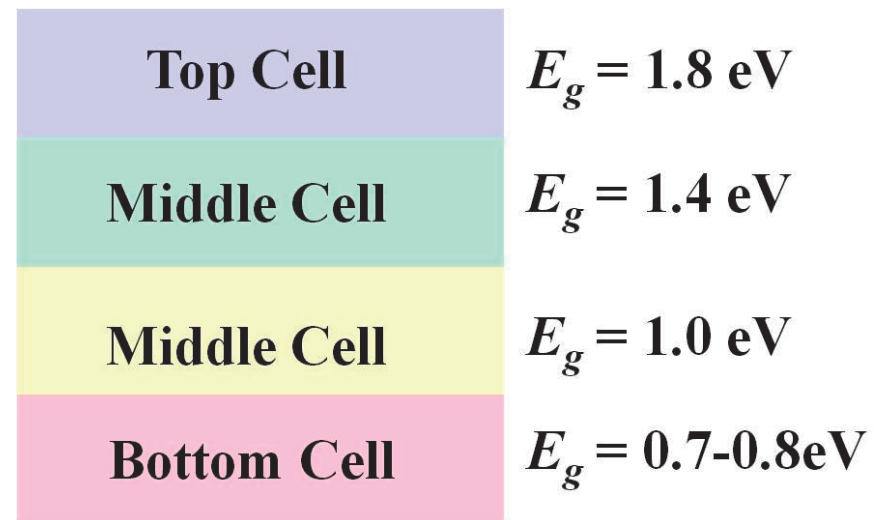
タンデム化技術の開発

スマート・スタック技術の開発



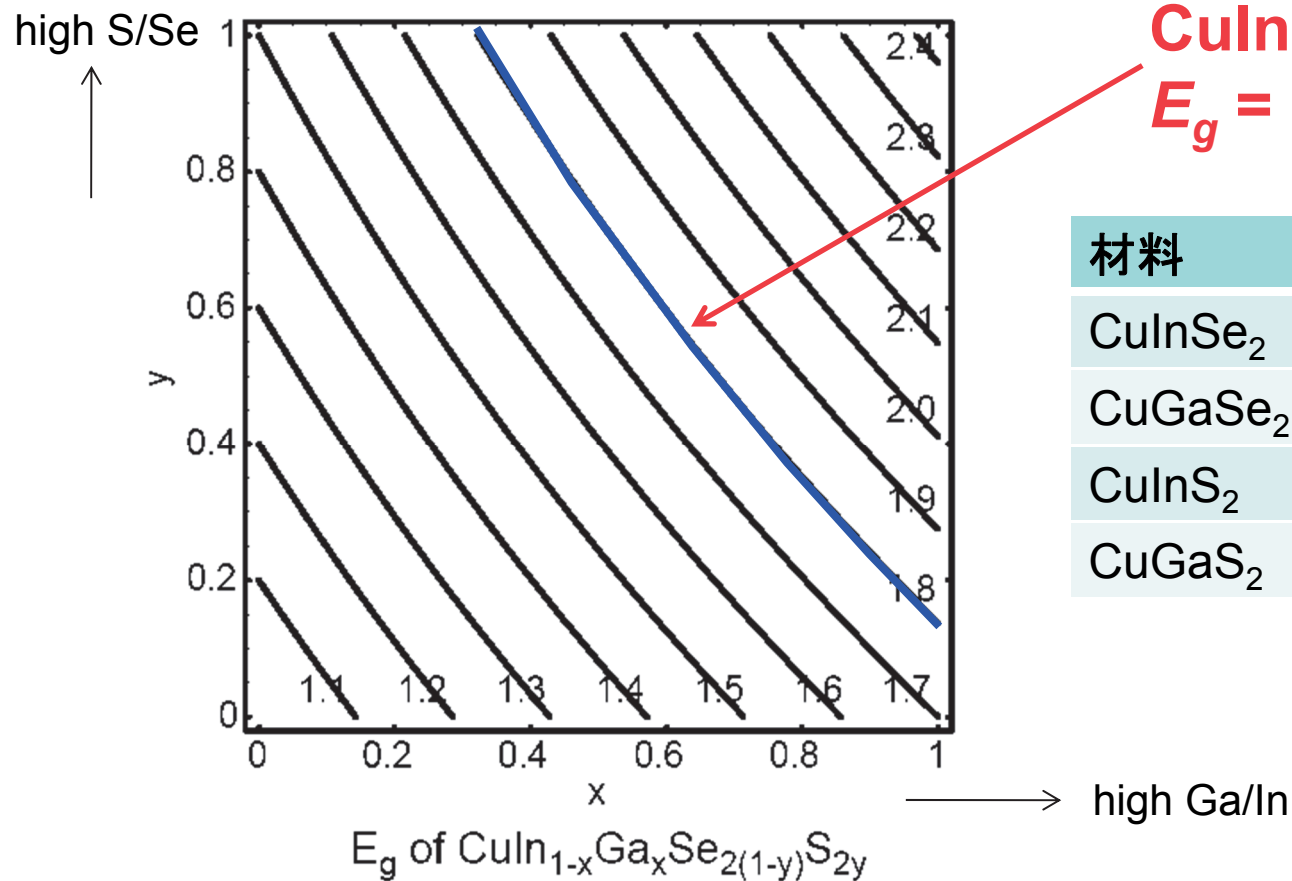
2端子型太陽電池

化合物薄膜系4接合型タンデム太陽電池の開発



ワイドギャップCIGS系太陽電池

主担当: 小牧弘典

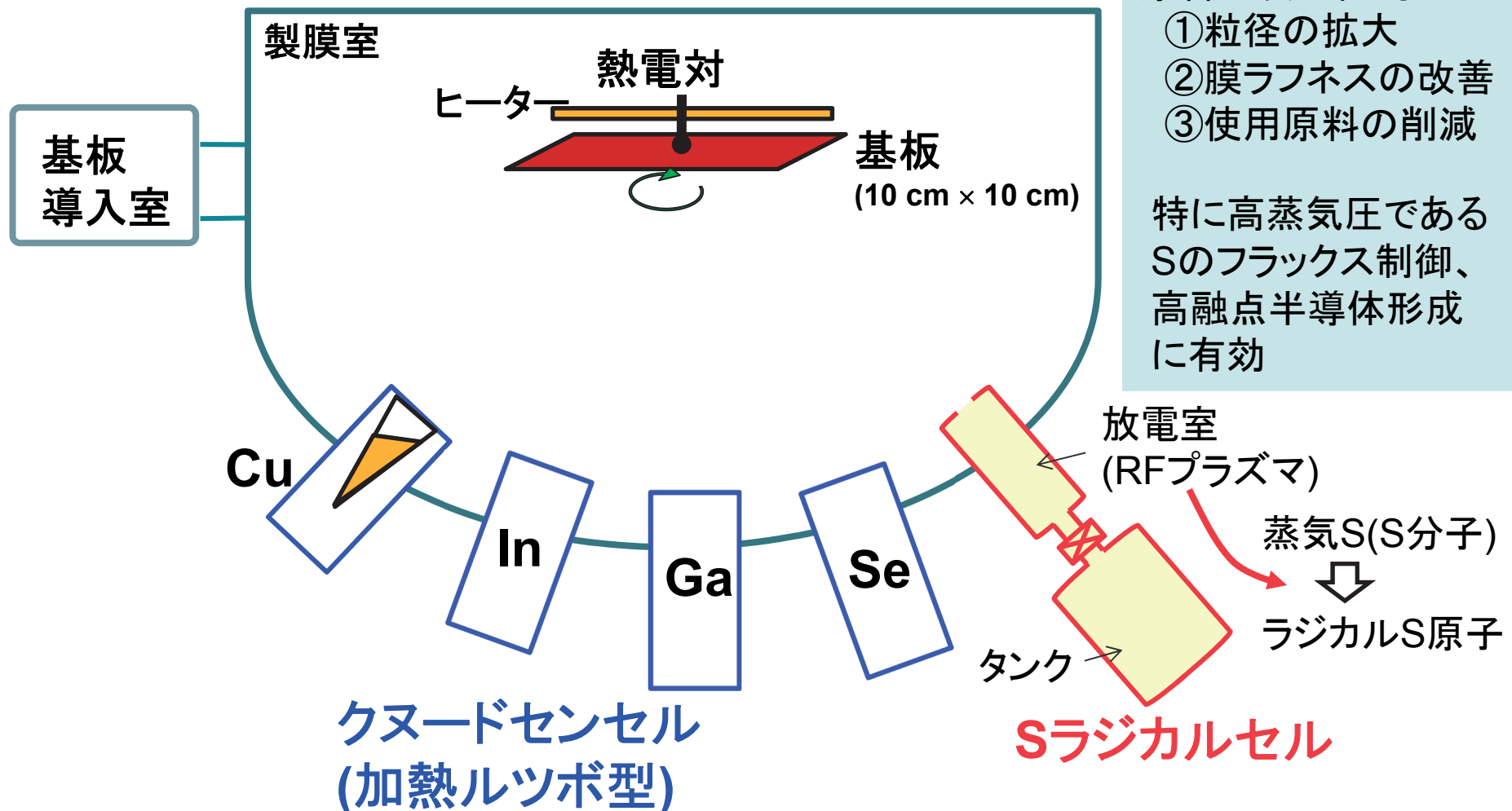


材料	バンドギャップ
CuInSe_2	1.01 eV
CuGaSe_2	1.68 eV
CuInS_2	1.53 eV
CuGaS_2	2.43 eV

CIGSSeの組成とバンドギャップの関係

CIGSSe製膜装置とSの導入方法

分子線エピタキシー装置



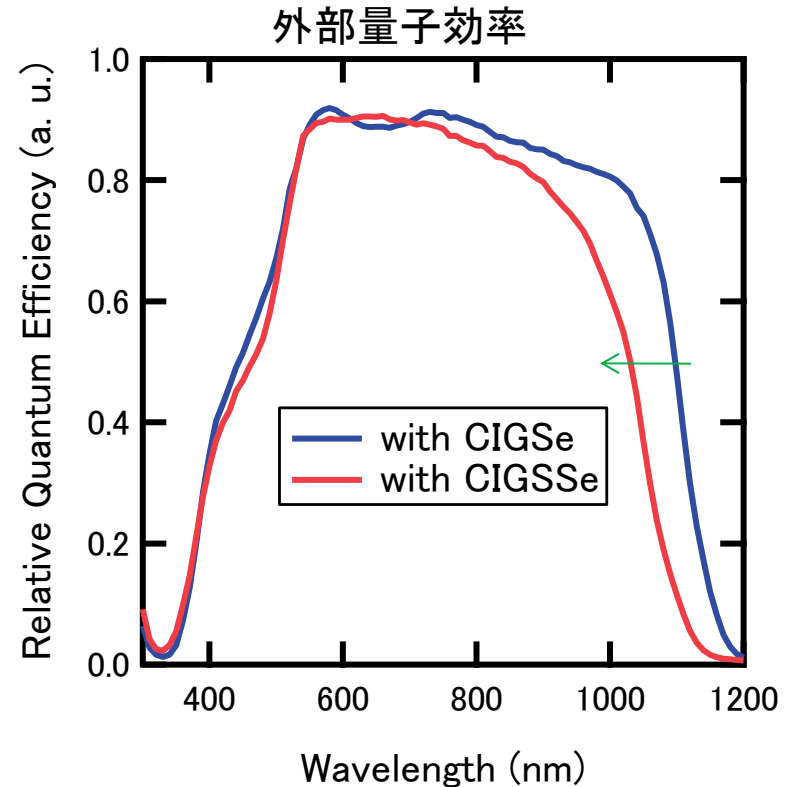
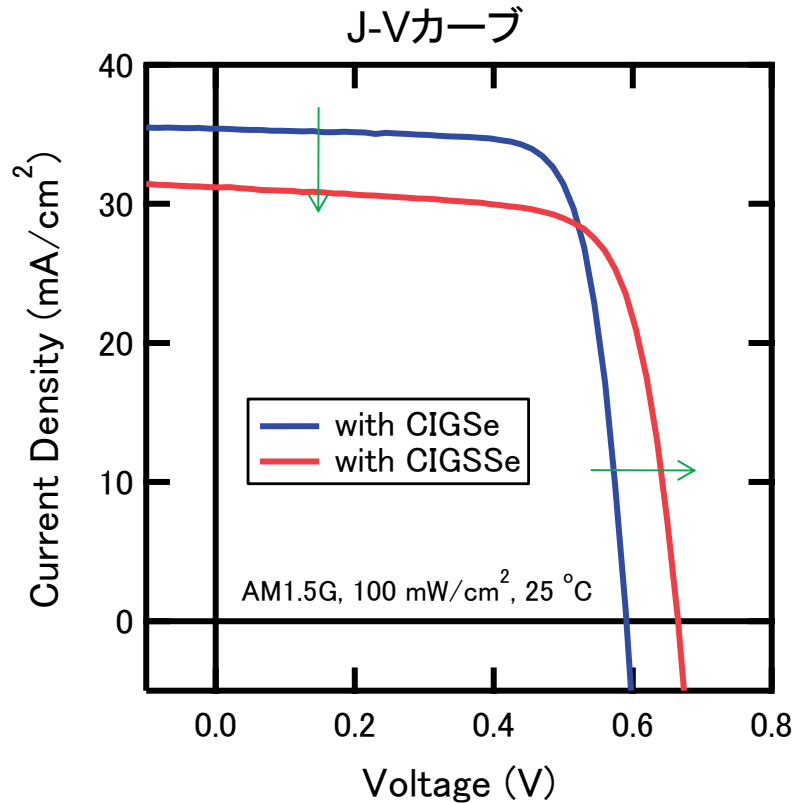
ラジカルセル利点
原料の反応性向上

- ①粒径の拡大
- ②膜ラフネスの改善
- ③使用原料の削減

特に高蒸気圧である
Sのフラックス制御、
高融点半導体形成
に有効

CIGSe・CIGSSe太陽電池特性

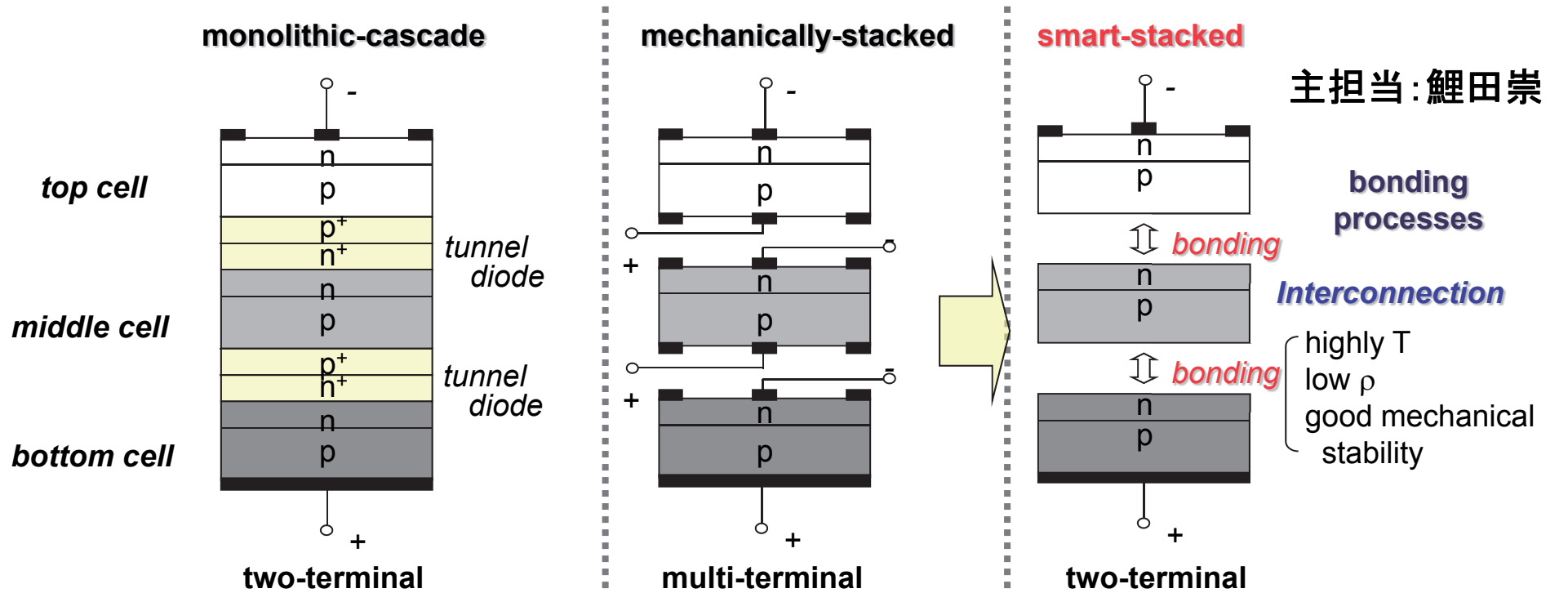
構成: n-ZnO/i-ZnO/CdS/CIG(S)Se/Mo/SLG(0.516cm²)



	Eff (%)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	S/VI ratio	Ga/In ratio
CIGSe	15.8	0.59	35.4	0.76	0.03	0.19
CIGSSe	15.0	0.67	31.2	0.72	0.43	0.24

V_{oc}↑, J_{sc}↓, E_g↑

スマート・スタック技術の開発



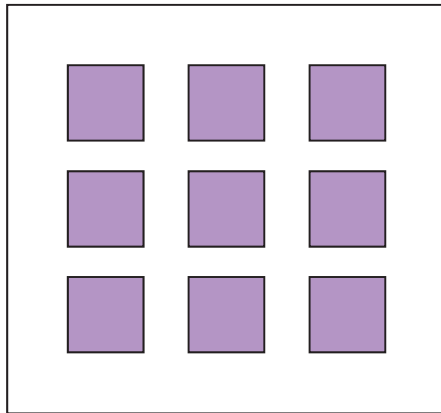
merit	simple fabrication process two-terminal →simple assembly	no restrictions for material and design	two-terminal →simple assembly no restrictions for material and design
demerit	material and design restrictions (lattice and bandgap matching)	multi-terminal →complex assembly optical loss in cell assembly top cell : thermal isolation	sub-cell high-quality polycrystalline film epitaxial film single crystalline thin-film

接合させた太陽電池

非晶質Si薄膜太陽電池

構造: glass/textured SnO₂/a-Si:H pin

サイズ: 10.4mm角(1.08mm²)



参考データ:

a-Si:Hセル: glass/textured SnO₂/a-Si:H pin/ZnO/Ag

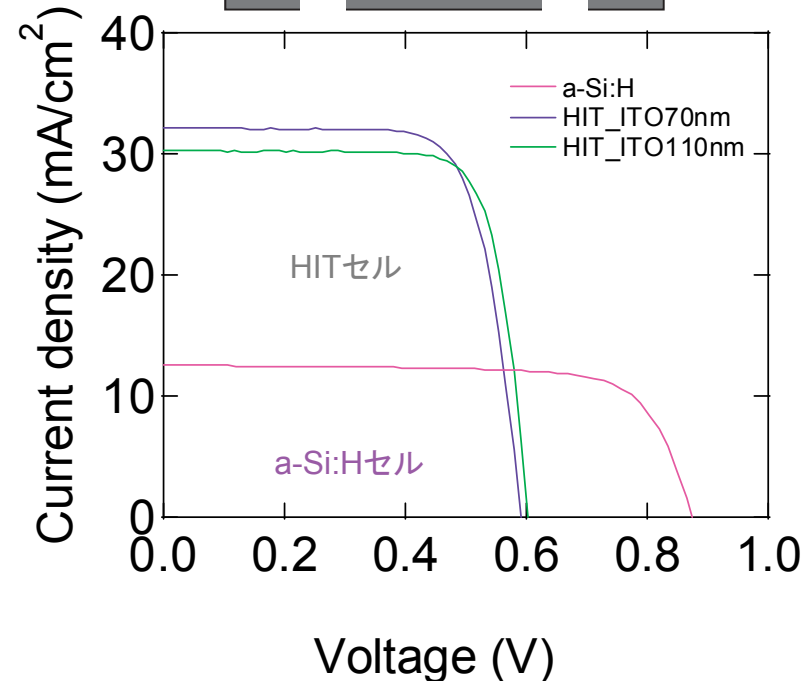
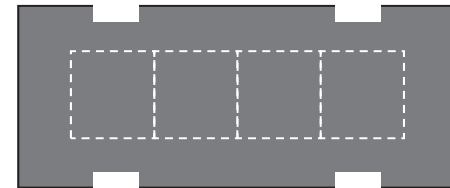
HITセル: Ag grid/ITO/a-Si:H (p/i)/c-Si (n)/Al

	Voc	Jsc	F.F.	eff.
a-Si:H	0.872	12.60	0.749	8.23
HIT70	0.591	32.12	0.743	14.11
HIT110	0.603	30.26	0.773	14.11

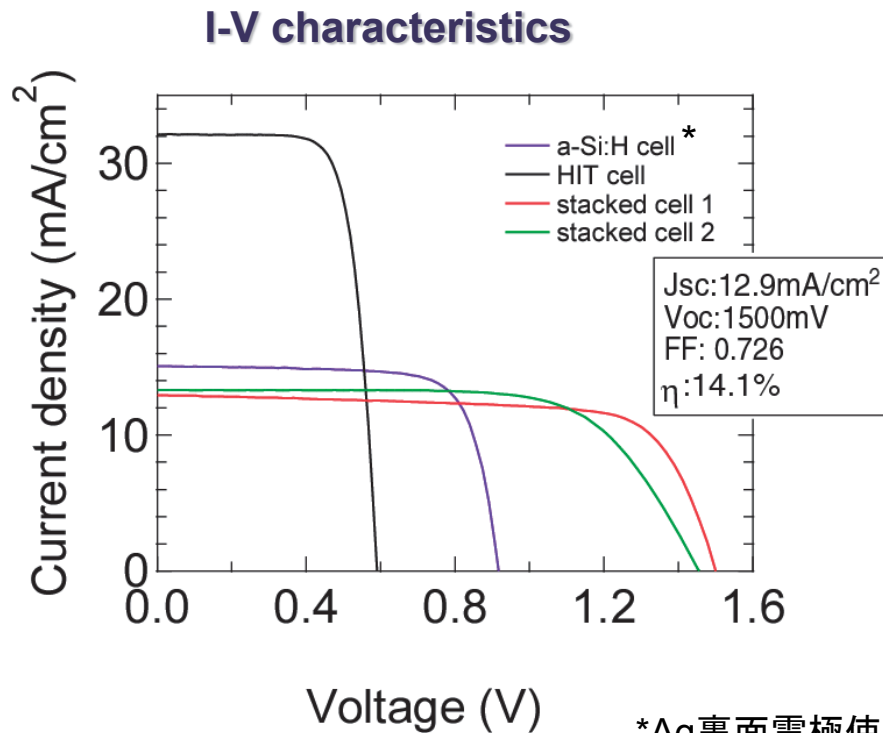
ヘテロ接合型(HIT)太陽電池

構造: ITO/a-Si:H (p/i)/c-Si (n)/Al

サイズ: 9.5mm角(0.90mm²)

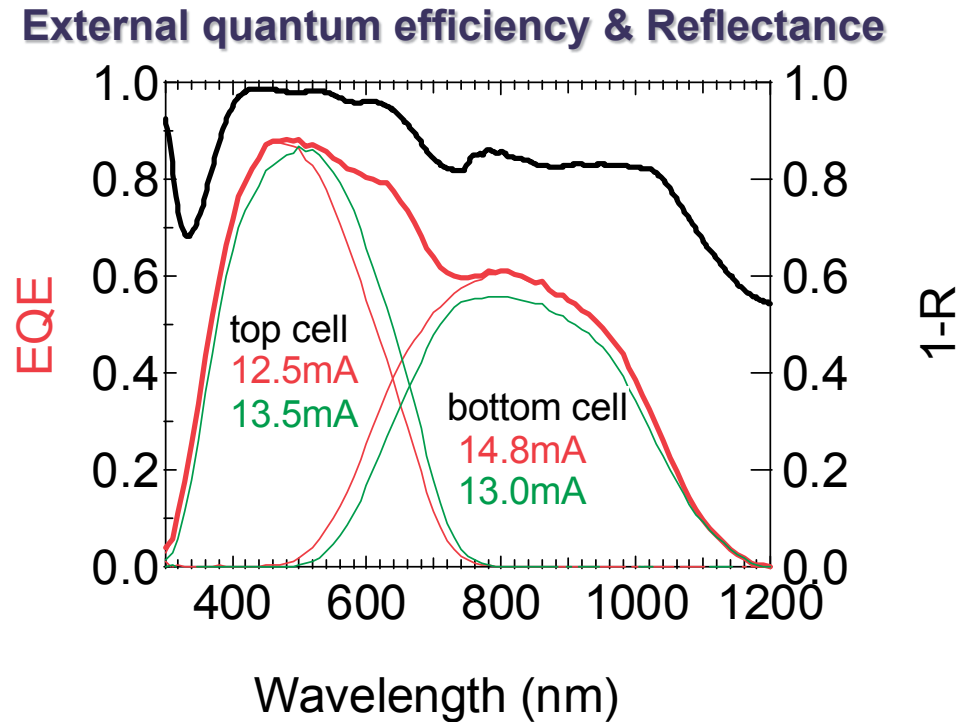


得られた太陽電池特性



*Ag裏面電極使用

HITセルサイズ1.0cm²を使用



最高効率: 14.1%、電流バランスにより改善の余地有り
 ボトムセル外部量子効率最大値~60% ⇒ バインダーの吸収抑制が必要

まとめ

- **小面積CIGSセルの高効率化**
変換効率19.4%を達成
- **フレキシブル(集積型サブモジュール)CIGS太陽電池**

 - ・厚さ200 μm のセラミックス基板上で変換効率15.9 %を達成
 - ・ステンレス基板上で変換効率15.0%を達成
- **省資源化・低コスト化技術**
CIGS膜厚0.7 μm の新構造型太陽電池で、短絡電流密度35.2 mA/cm²を達成
- **ワイドギャップCIGS系太陽電池**
CuIn_{0.76}Ga_{0.24}Se_{1.14}S_{0.86}太陽電池で変換効率15.0%を達成
- **スマート・スタック技術**
非晶質Si太陽電池とHIT太陽電池のスマート・スタックにより、開放電圧1.5 V、変換効率14.1%を達成

今後の課題と方向性

- **小面積CIGSセル**
開放電圧の向上、新バッファ層材料の開発
- **フレキシブルCIGS太陽電池**
低コスト基板材料の開発、高効率化、集積化技術、封止技術
- **省資源化・低コスト化技術**
CIGS薄膜の高品質化、新構造の最適化
- **ワイドギャップCIGS系太陽電池**
更なるワイドギャップ化の推進と高効率化、多接合化
- **メカニカルスタック技術**
電流整合の最適化、バインダー材料の光吸収を抑制
- **新分野の開拓**
新材料の開発