

2012年5月24-25日 太陽光発電工学研究センター 成果報告会

# 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

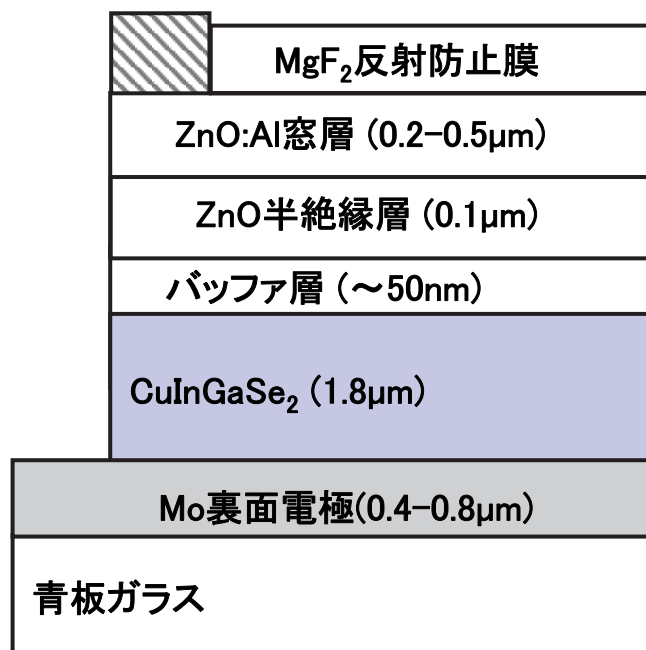
柴田 肇

# 発表内容

- 背景
- 小面積CIGSセルの高効率化
- フレキシブルCIGS太陽電池の開発
- ワイドギャップCIGSSe系太陽電池の開発
- 薄膜太陽電池用高性能透明導電膜の開発
- 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 ( $\eta = 15\%$ ,  $20\text{m}^2$ )

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)

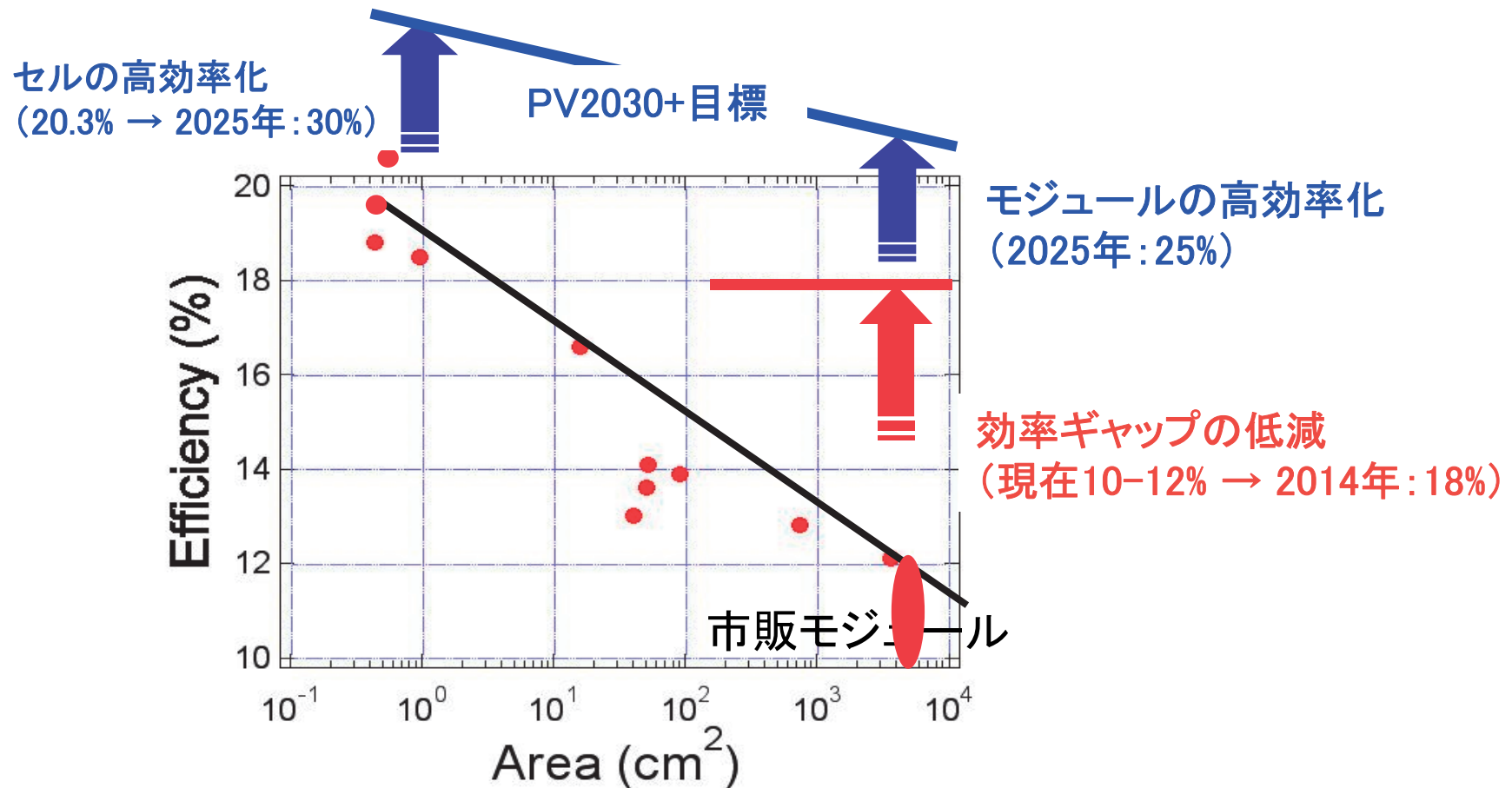
# CIGS太陽電池の現状と課題

## 1) CIGS太陽電池に存在する4種類のギャップ

- ①小面積セルの効率とモジュールの効率の間に存在するギャップ
- ②現状の効率とPV2030+目標効率との間に存在するギャップ
- ③CIGS太陽電池の効率と単結晶系太陽電池の効率の間に存在するギャップ
- ④フレキシブル基板上の太陽電池の効率と青板ガラス上の太陽電池の効率の間に存在するギャップ

## 2) 省資源化、代替材料の開発

# 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

AlNi電極



- 薄膜化: 0.1 $\mu$ m  
(光透過率、電気特性向上)
- ワイドギャップ化:  $E_g=1.4-1.5$ eV
- CIGS光吸収層の厚膜化 (2-3 $\mu$ m)  
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 $^{\circ}$ 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 17.8% (30cm x 30cm) セレン化/硫化法 (Feb. 2012)  
AIST 16.6% (67.2 cm<sup>2</sup>) 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、フルサイズモジュールで14.6%(63X119 cm<sup>2</sup>) 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

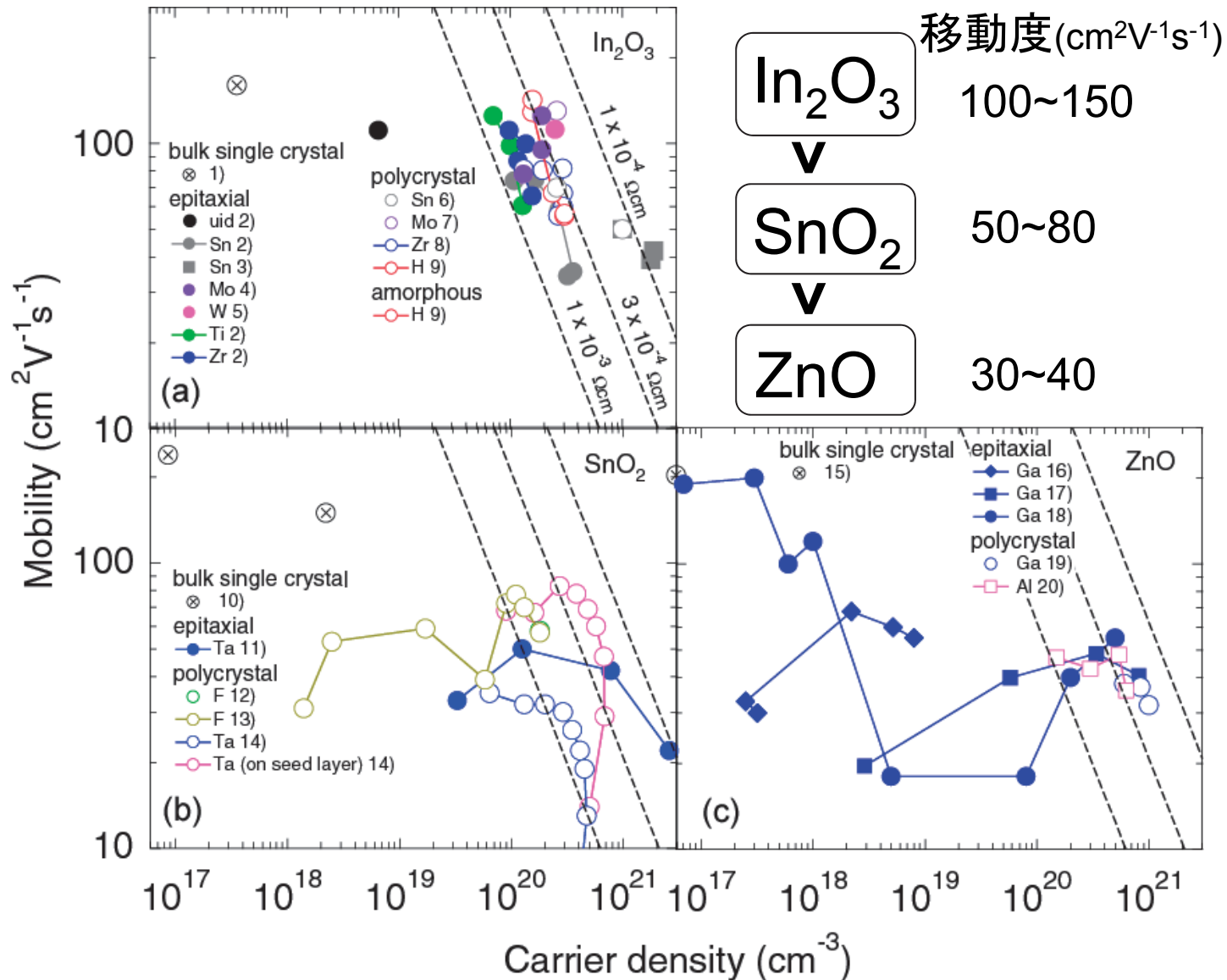
# 究極のフレキシブルモジュールへ

## 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
- ・Empa(スイス)が、ポリイミド上のフレキシブルCIGS太陽電池(面積:  
0.582 cm<sup>2</sup>)で、効率18.7%を達成(2011年9月)

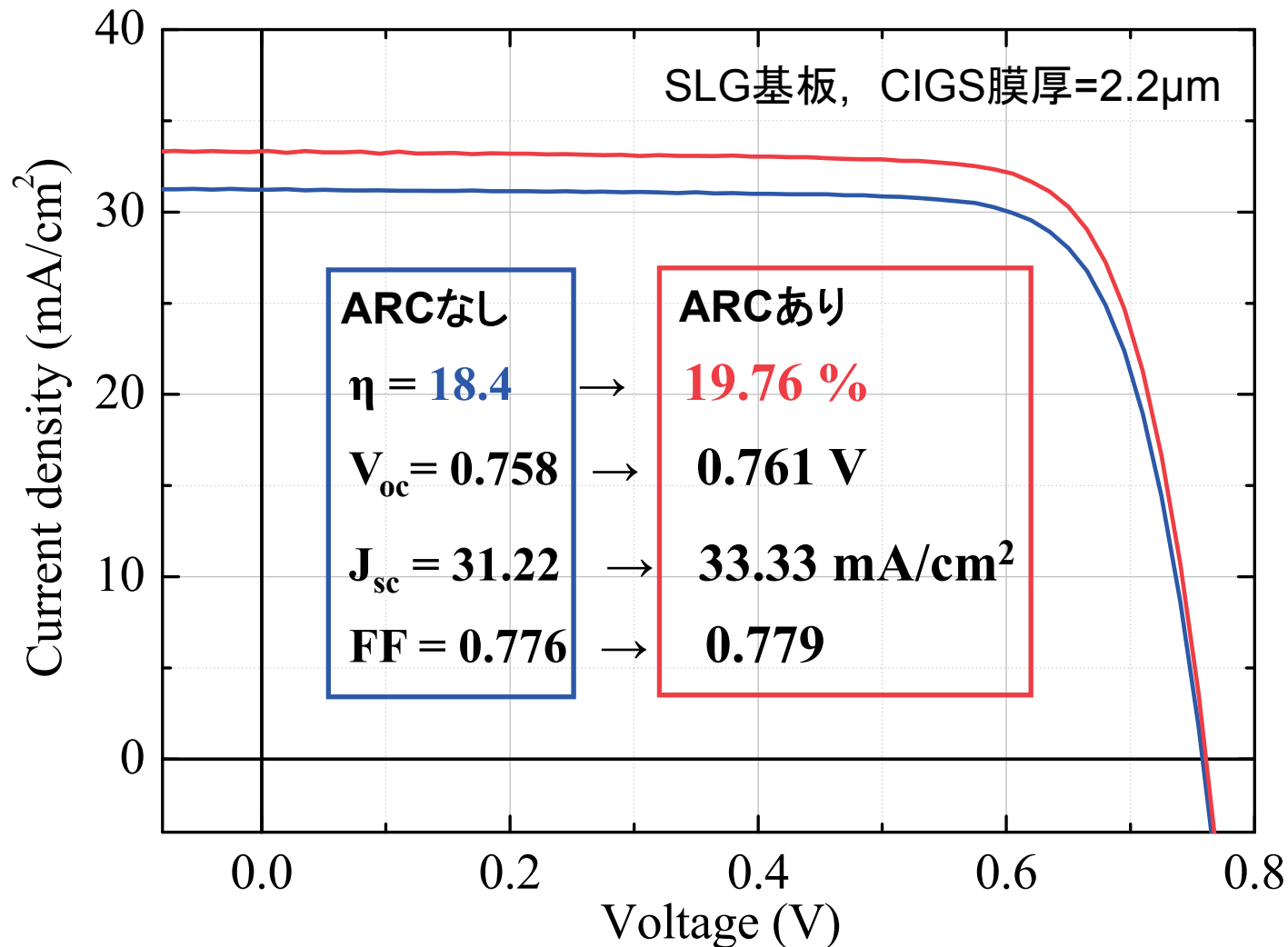
# 現状の薄膜太陽電池用透明導電膜の特性比較



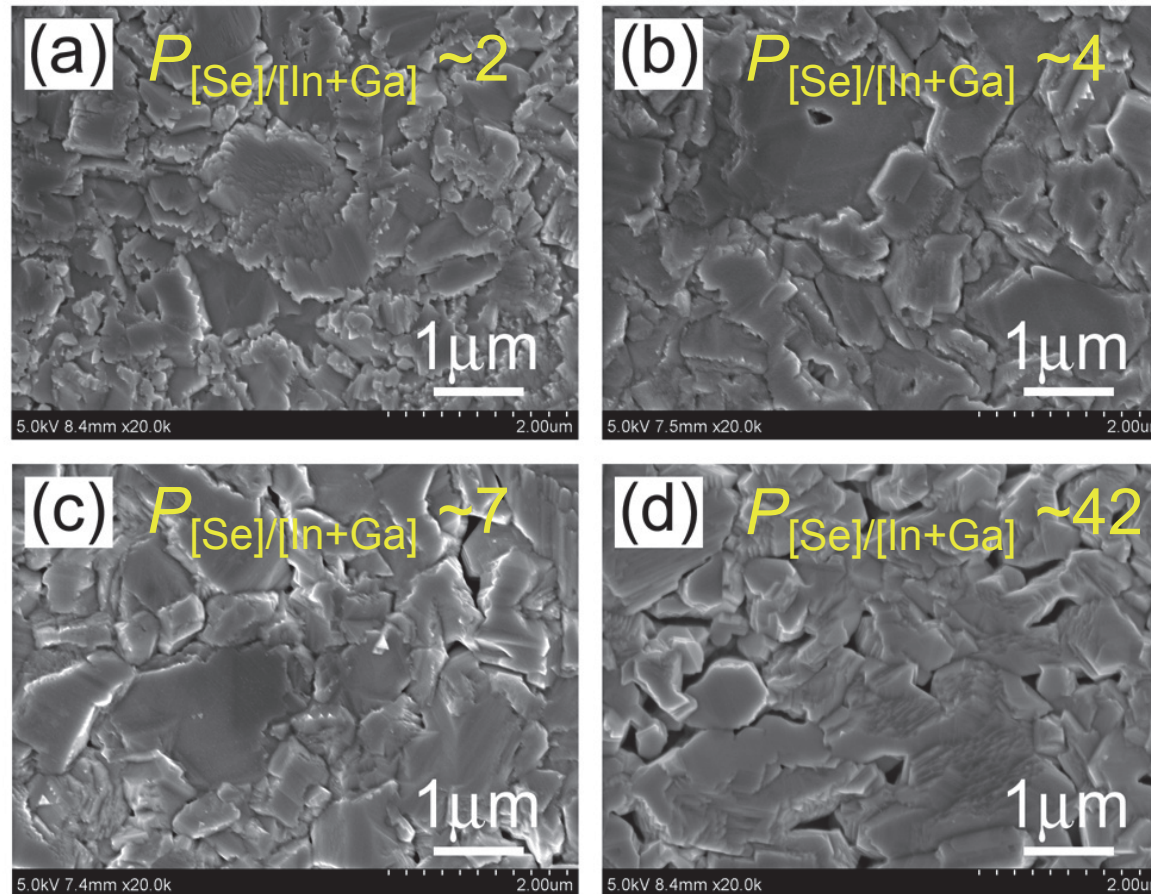
# チームの研究目標

- 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
- ワイドギャップCIGSSe系太陽電池の開発
- 薄膜太陽電池用高性能透明導電膜の開発
- 省資源化・低コスト化技術の開発
- 新分野の開拓

# 小面積CIGSセルの高効率化



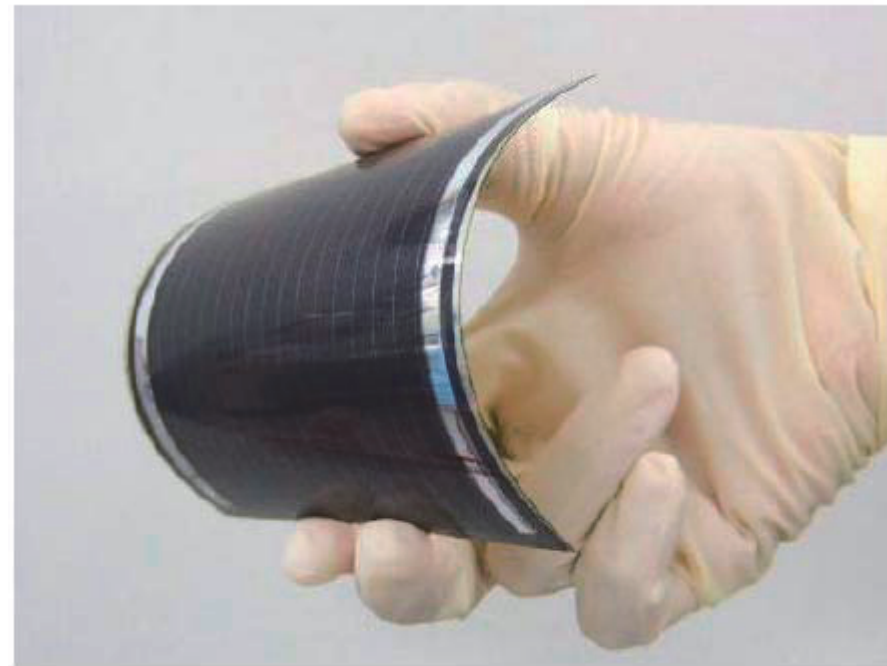
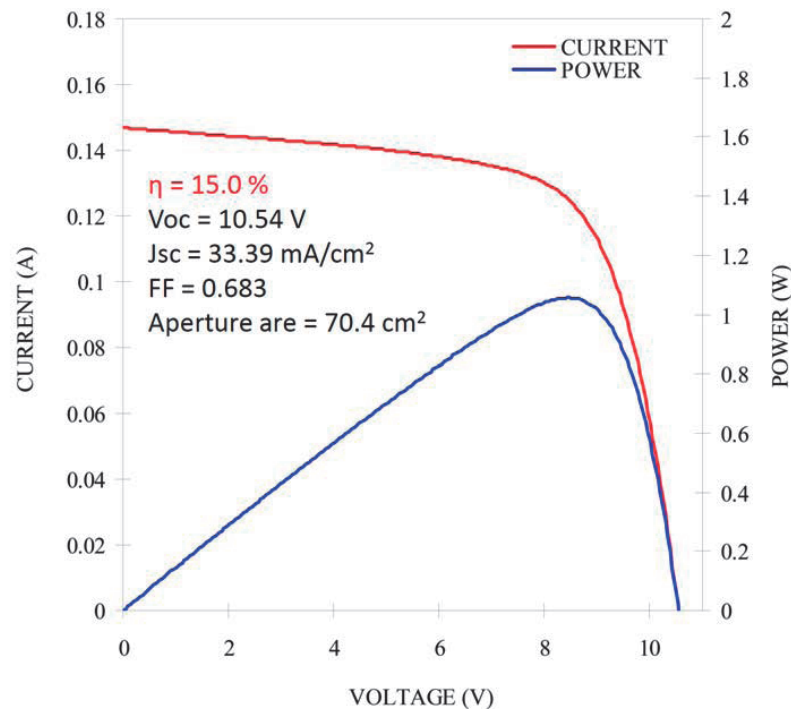
# CIGS薄膜表面のSEM画像



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

# フレキシブルCIGS太陽電池

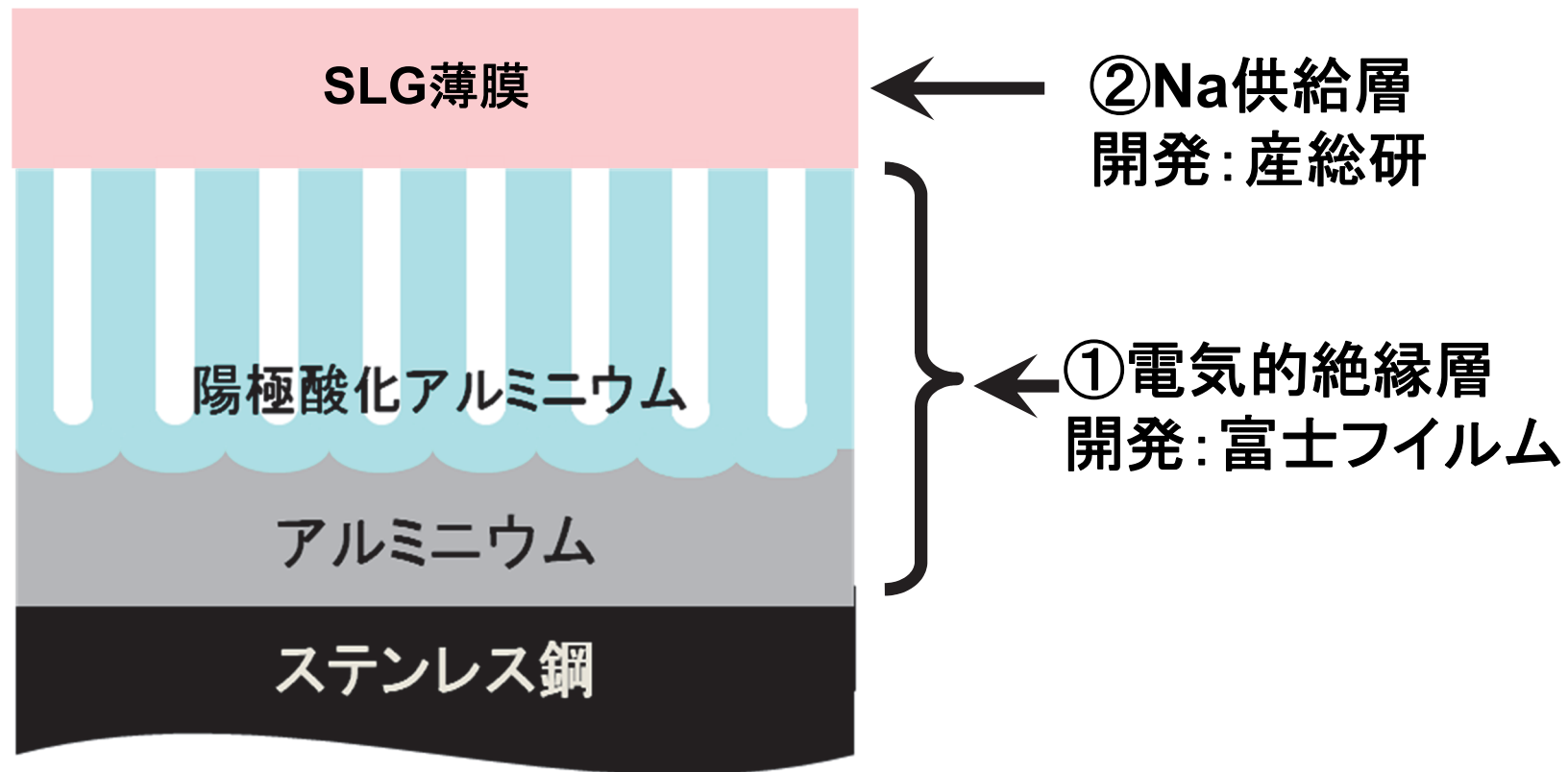
ステンレス基板上の集積型サブモジュールで変換効率15.0%を達成



富士フイルム株式会社との共同研究による

## フレキシブルCIGS太陽電池開発のポイント

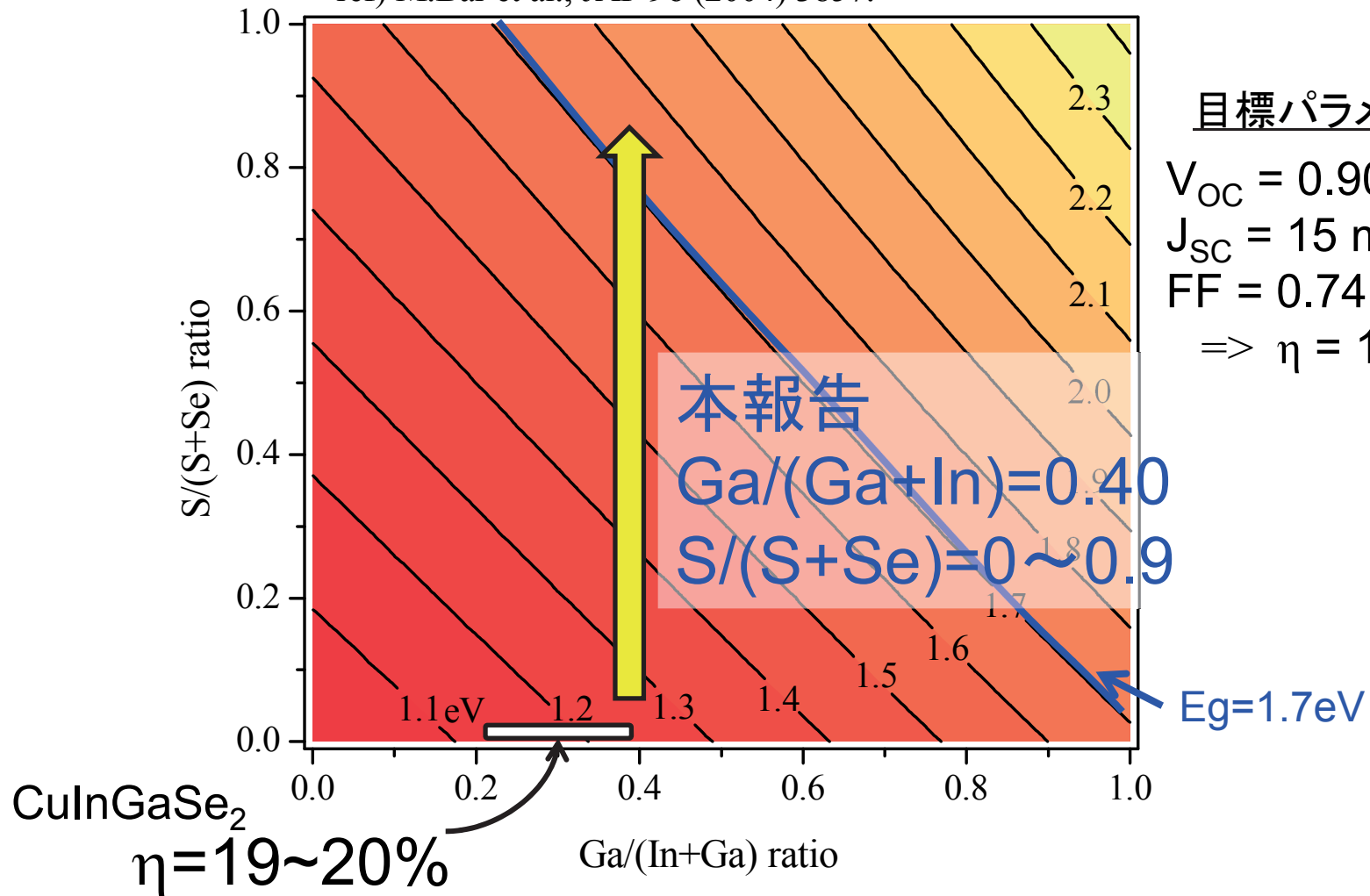
- ①電気的絶縁性の確保
- ②ナトリウム供給技術の確立





# ワイドギャップCIGSSe系太陽電池

$E_g = 1.00 + 0.13x^2 + 0.08x^2y + 0.13xy + 0.55x + 0.54y$   
 ref) M.Bar et al., JAP **96** (2004) 3857.



目標パラメータ

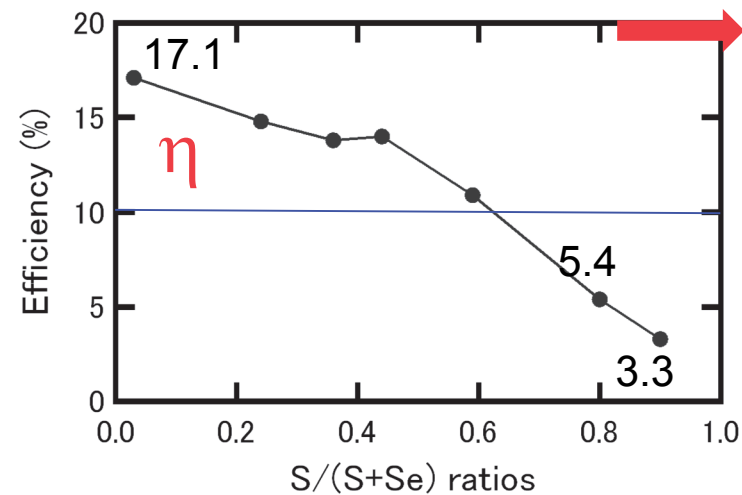
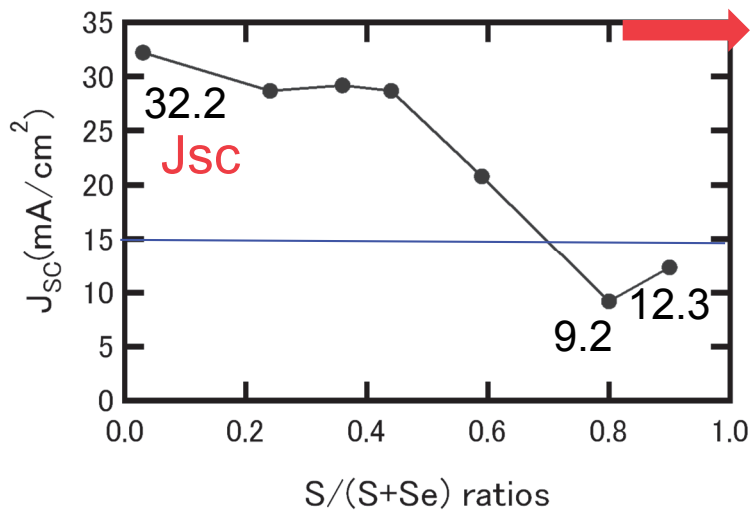
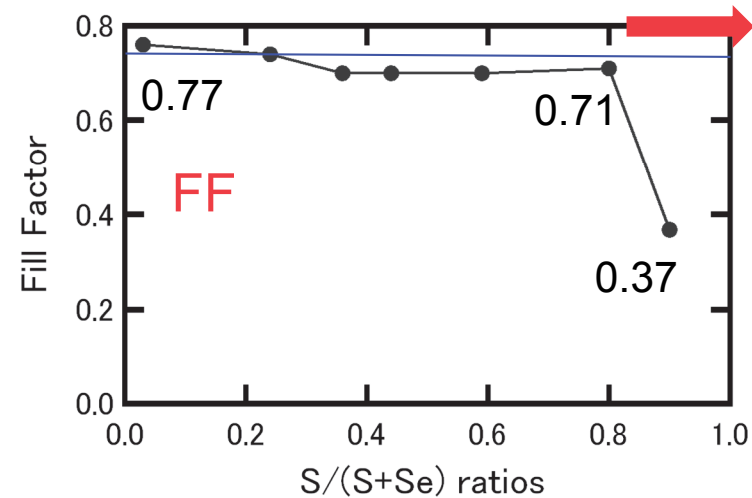
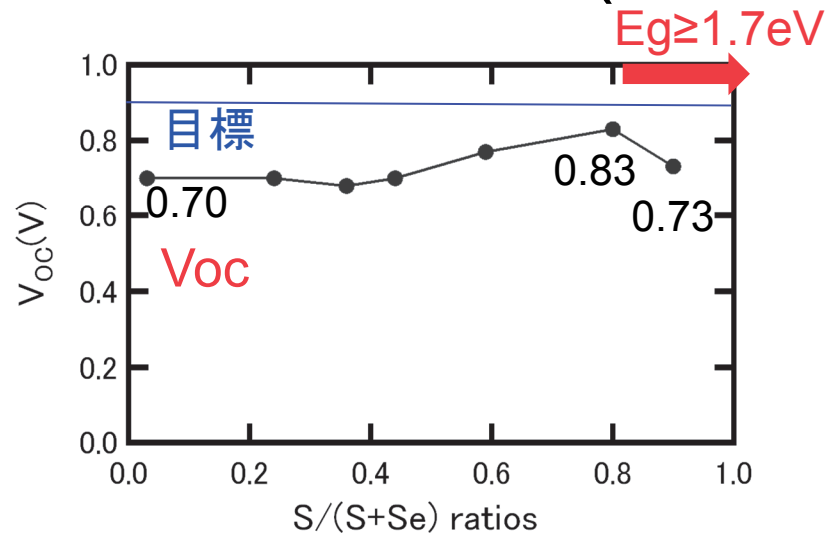
$V_{OC} = 0.90 \text{ V}$   
 $J_{SC} = 15 \text{ mA/cm}^2$   
 $FF = 0.74$   
 $\Rightarrow \eta = 10.0\%$

本報告  
 $Ga/(Ga+In) = 0.40$   
 $S/(S+Se) = 0 \sim 0.9$

$E_g = 1.7 \text{ eV}$

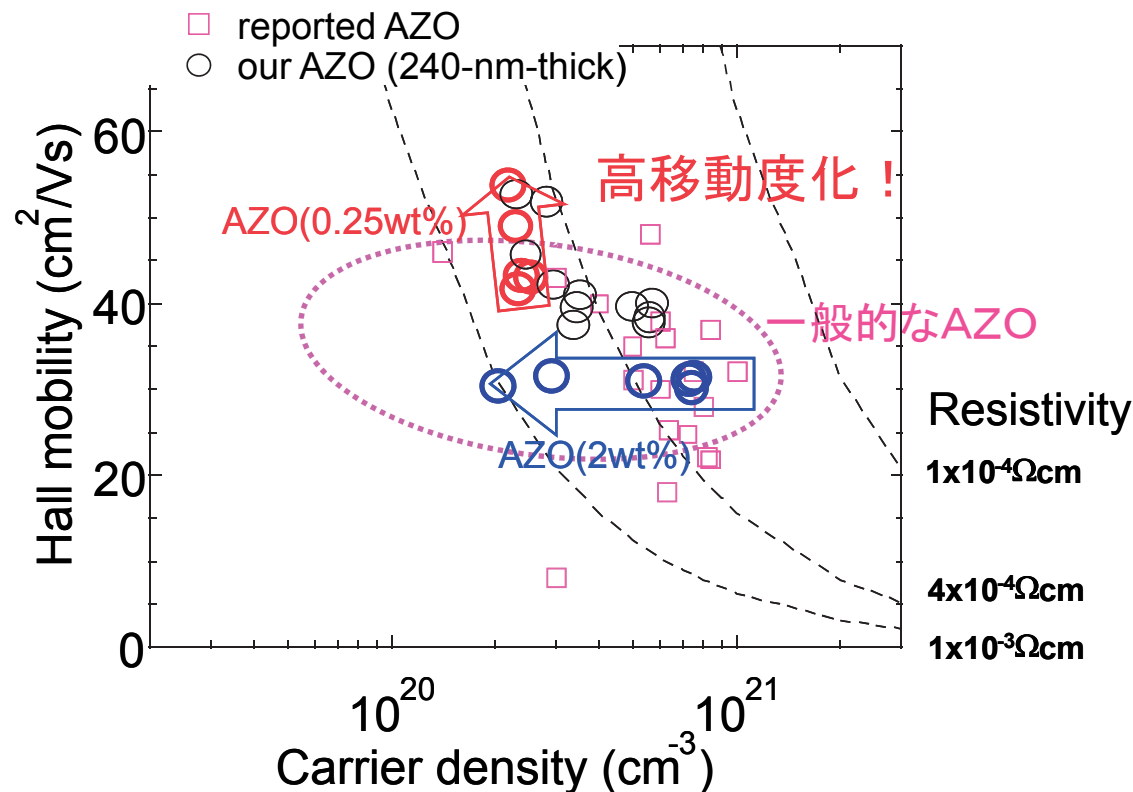
$CuInGaSe_2$   
 $\eta = 19 \sim 20\%$

# 得られた結果 (Ga/III=0.4, S/VI=0.03~0.9)



S/VIが0.8まではVoc増加、FFはほぼ不変、Jscが大きく低下、  
S/VIが0.9ではJscが増加、Voc低下、FFが大きく低下

# ZnO系透明導電膜の高性能化



低酸素分圧( $\sim 1 \times 10^{-23}$  atm)  
 高温アニール(600~650°C)

低Al濃度 ZnO:Al (0.25, 0.5 wt.%)

高移動度化

← 粒界散乱の抑制による

(化学吸着酸素の減少 → 電位障壁の減少)

← 残留歪の効果は支配的でない

(高酸素分圧・高温アニールでは移動度増加しない)

高Al濃度 ZnO:Al (1, 2 wt.%)

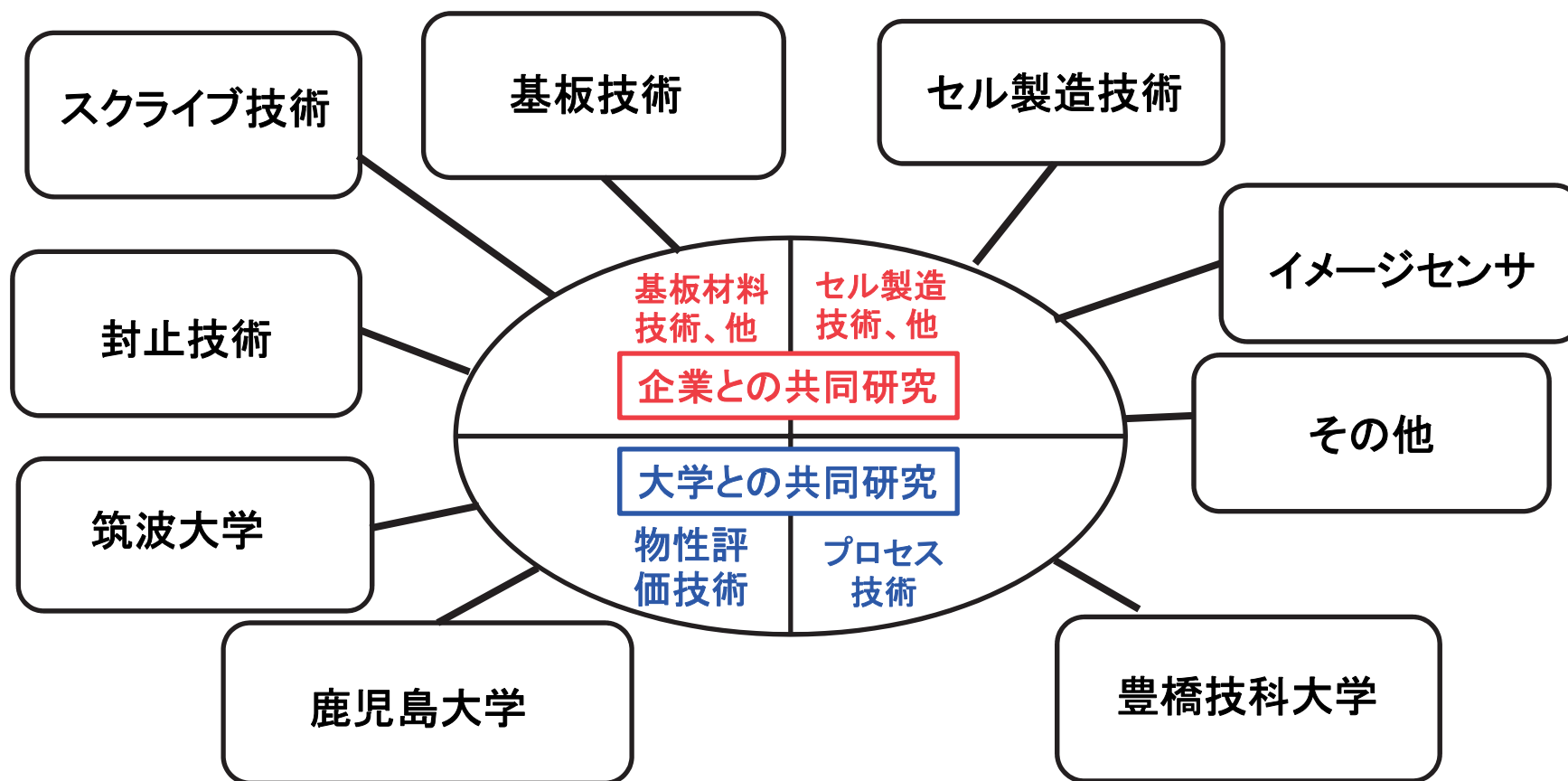
キャリア濃度減少

← 電荷補償欠陥の生成による

(酸素分圧増加と共に更にキャリア減少)

# 実用化を目指した企業・大学との共同研究

## 先端産業プロセス・高効率化チームの研究体制と研究課題



# まとめ

- **小面積CIGSセルの高効率化**  
変換効率19.8%を達成
- **フレキシブル(集積型サブモジュール)CIGS太陽電池**  
ステンレス基板上で変換効率15.0%を達成
- **ワイドギャップCIGSSe系太陽電池**  
CuIn<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>Se<sub>0.4</sub>S<sub>1.6</sub>太陽電池 ( $E_g = 1.7 \text{ eV}$ ) で変換効率5.4%を達成
- **薄膜太陽電池用高性能透明導電膜**  
低Al濃度ZnO:Alにおいて移動度50~60cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>を達成

# 今後の課題と方向性

- **小面積CIGSセル**  
短絡電流の向上、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、ナトリウム制御技術、封止技術の開発
- **ワイドギャップCIGSSe系太陽電池**  
硫黄系化合物に固有の問題点を解決⇒更なるワイドギャップ化の推進と高効率化
- **薄膜太陽電池用高性能透明導電膜**  
ZnO結晶粒の大粒径化 & 粒界・欠陥の不活性化
- **新分野の開拓**  
新材料の開発(革新デバイスチームとの共同研究)