

# F R E A における結晶シリコン 太陽電池の開発

再生可能エネルギー研究センター  
太陽光チーム  
高遠 秀尚

# 太陽光チームの研究課題

## 主な研究課題

### 1. 高効率・高信頼性結晶シリコン太陽電池の開発



- ・セルの高効率化（裏面電極型セルなど）
- ・新規作製プロセス（イオン注入技術など）
- ・評価技術（LTEMなど）
- ・モジュールの信頼性向上

### 2. 多接合セル（スマートスタック技術）



化合物セル/シリコンセル  
ペロブスカイトセル/シリコンセル



太陽光発電研究  
センターと共同

### 3. 新概念「熱回収型太陽電池セル」の提案と実証

## 共同研究

- 被災地企業のシーズ支援事業（民間企業 7社）
- 福島県の事業（福島県ハイテクプラザ+民間企業 2社）
- 第2期結晶シリコン太陽電池基盤技術コンソーシアム(民間企業 6社)

# 発表内容

## ■ セルの高効率化

- ・ PERCセルの選択エミッタ形成技術  
熱拡散 + エッチバック、ステンシルマスクを用いたイオン注入
- ・ 両面受光ー裏面電極型セル（口頭発表(立花)）

## ■ イオン注入を用いたプロセス技術

- ・ 裏面電極型セルのセルフアラインプロセスの開発
- ・ ステンシルマスクを用いた拡散層の形成技術

## ■ セルの評価技術

- ・ LTEMによる裏面電極型セルの評価
- ・ 量子効率マッピング法によるPERCセルの評価

## ■ モジュールの信頼性

- ・ DH、PCT試験でみられるバスバー付近から劣化が進展する劣化モードの劣化要因を検討

## スマートスタック技術(口頭発表(水野) )

## ■ 新コンセプト「熱回収型太陽電池」 （口頭発表(上出) )

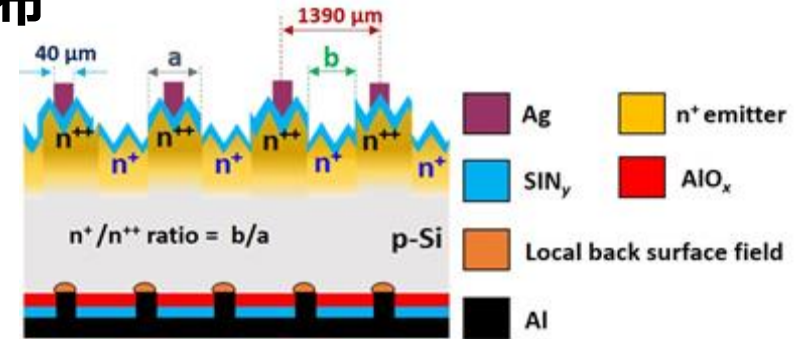
## ■ 福島県ハイテクプラザとの共同研究

## ■ 屋根材一体型モジュール「福島モデル」の開発

# PERCセルの選択エミッタ形成技術

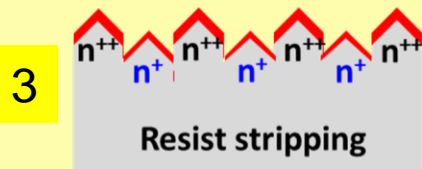
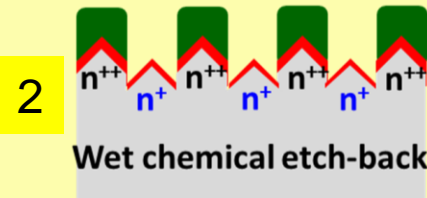
## ■ リン熱拡散+エッチバック による選択エミッタ作製プロセスの検討

- ・スクリーン印刷によるレジストインク塗布
- ・酸溶液によるエッチバック

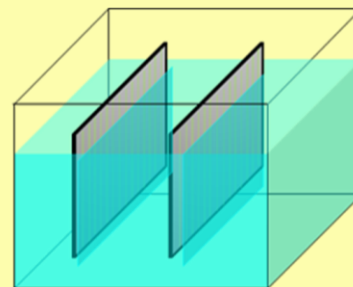


エッチバック法により作製した選択エミッタを有するPERCセルの模式図

### Selective emitter formation



Dipping time (s)	Final $R_{sheet}$ ( $\Omega/sq$ )
30	140



Dipping samples into etching solution

### 作製したPERCセルの特性

$J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ )	$V_{oc}$ (mV)	FF	Eff. (%)
39.4	663	0.776	20.3

同時に作製した、均一のエミッタに比べて、 $V_{oc}$ は、10 mV向上。

# 裏面電極型太陽電池の開発

## ■ FREA作製裏面電極型セルの特徴

- 両面受光構造
- スクリーン印刷による電極形成
- 拡散領域（リン、ホウ素（ボロン））の最適化
- 細線ワイヤー技術



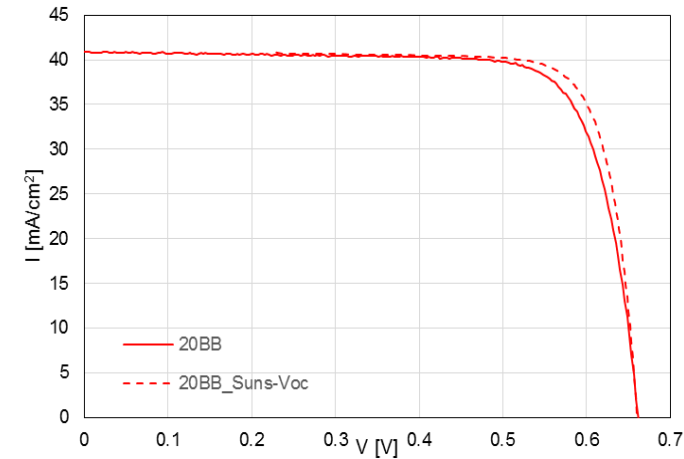
(a) 受光面側



(b) 裏面電極部分

作製した両面受光—裏面電極型セル

変換効率、21.1%



$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$V_{oc}$ [mV]	FF [%]	Eff. [%]
40.9	661	78.1	21.1

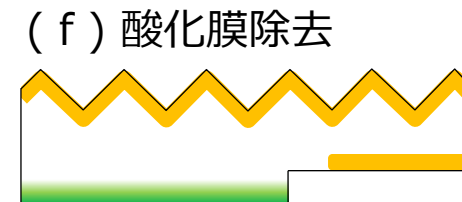
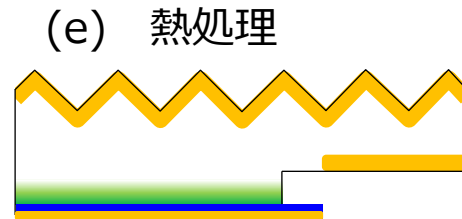
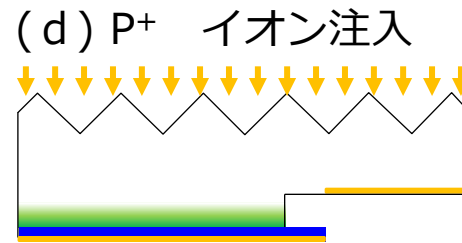
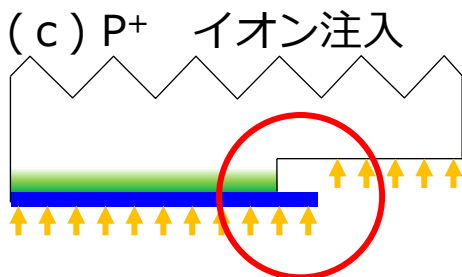
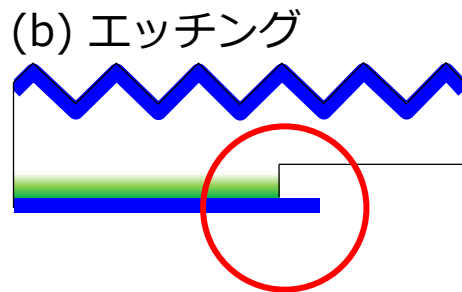
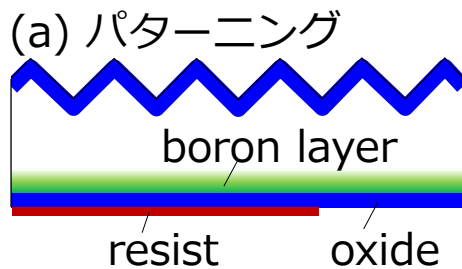
pFF [%] :81.1    pEff. [%] :21.8

直列抵抗損失を無視した場合

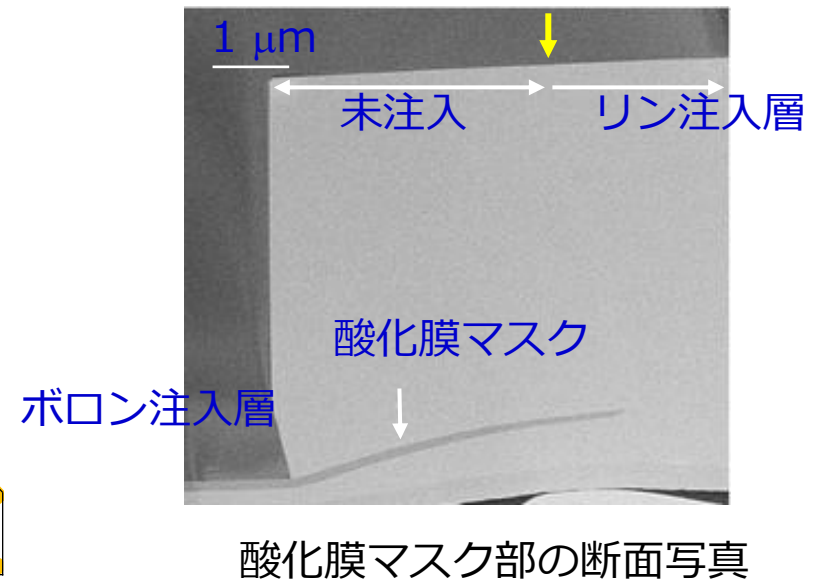
作製した両面受光—裏面電極型セルの  
電流—電圧特性

# イオン注入技術を用いた裏面電極型太陽電池

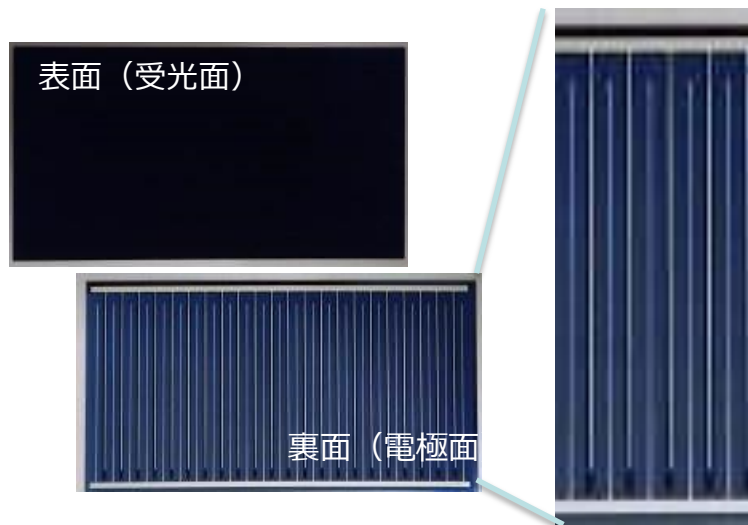
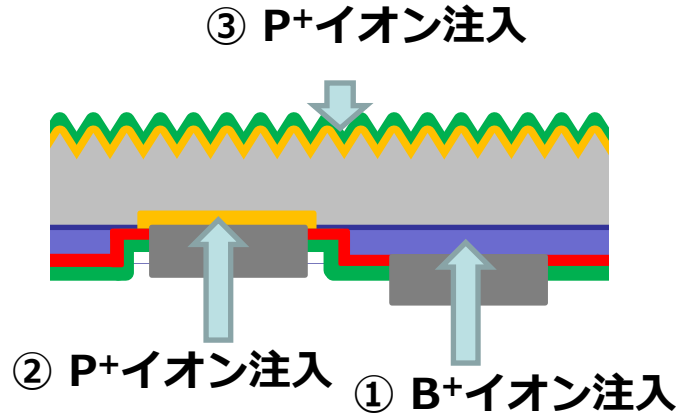
- 酸化膜マスク注入によるギャップ付き裏面電極型セルのセルフアラインプロセスを構築。パターンニング1回のみ。
- BおよびPのイオン注入技術を適用（全部で3工程）



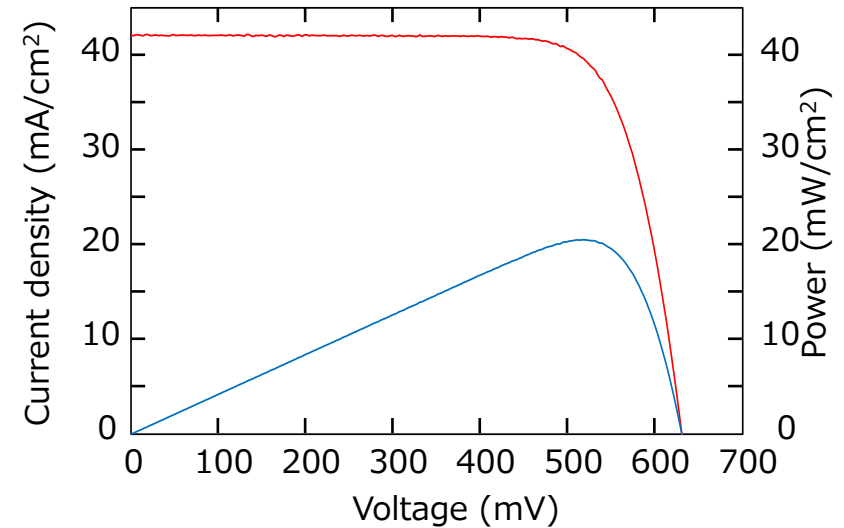
開発した酸化膜マスク注入による  
ギャップ付き裏面電極型セルのセル  
フアラインプロセス



# セルフアラインプロセスで作製したセルの特性



裏面電極型セルの構造と写真

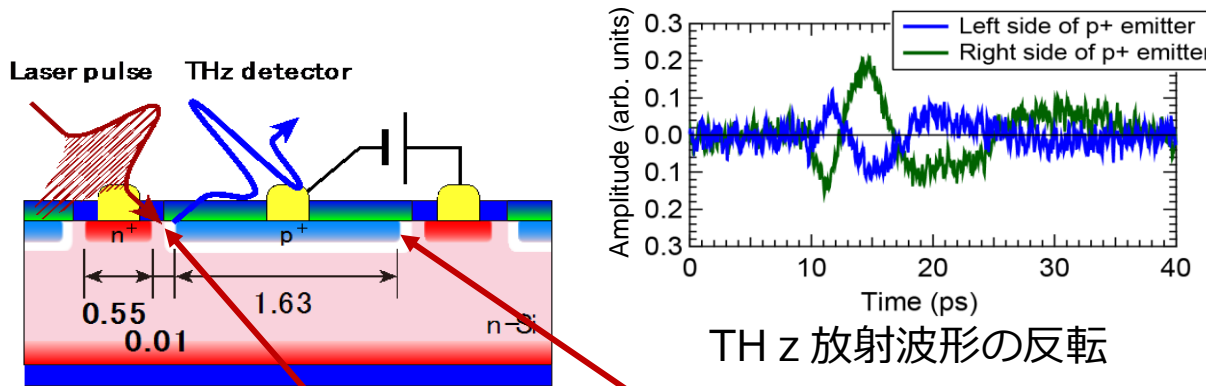


$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	$FF$ (%)	$\eta$ (%)	Active area (cm <sup>2</sup> )
42.1	630.4	77.3	20.5	6.35

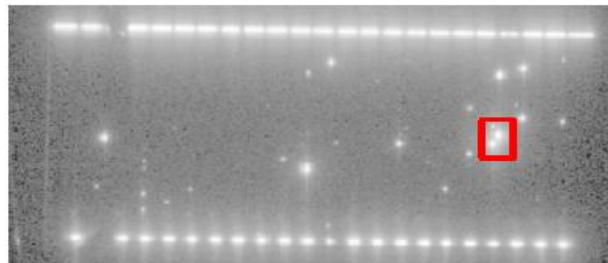
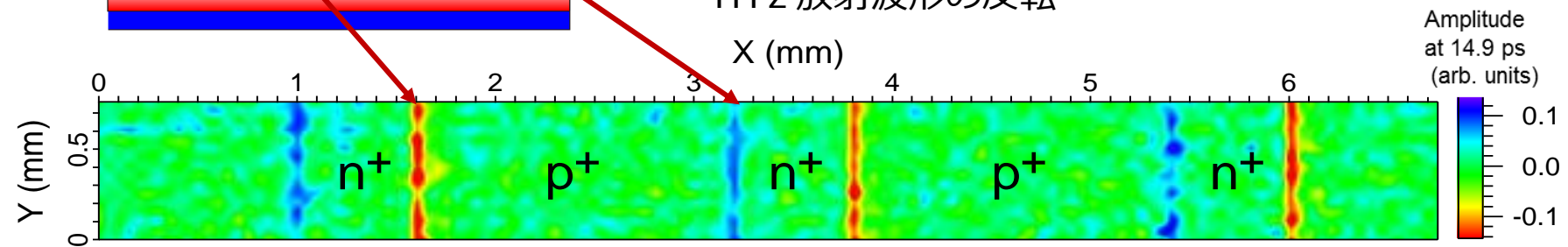
セルフアラインプロセスで作製した  
裏面電極型セルの電気的特性  
(変換効率20.5%)



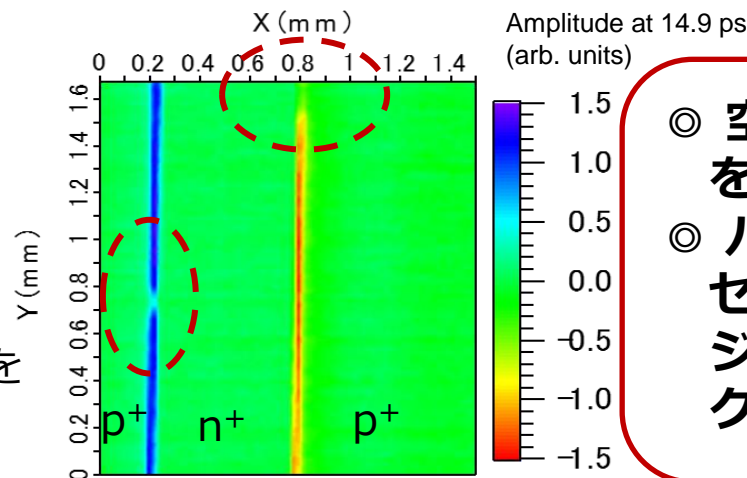
# 裏面接合のレーザTHz顕微鏡による評価



- ◎ 裏面電極セルのジャンクションをLTEMで観測
- ◎ 50マイクロメートル以下の分解能で内部電場を可視化



逆バイアスEL像。赤い四角の部分をLTEMで観測。

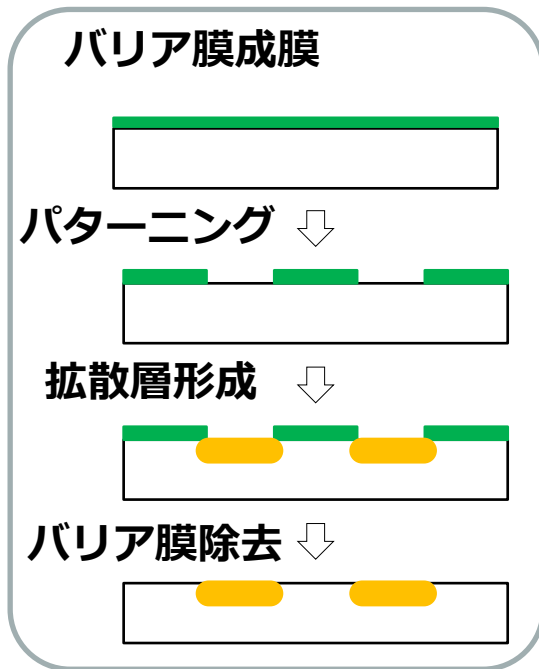


- ◎ 空乏層の形成不良を可視化できる。
- ◎ バックコンタクトセルで起きやすいジャンクションリークの評価に有効。

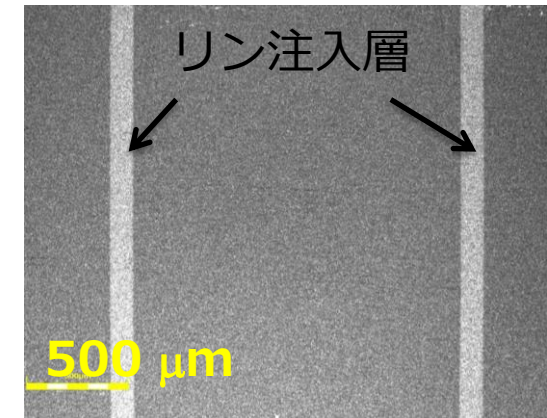
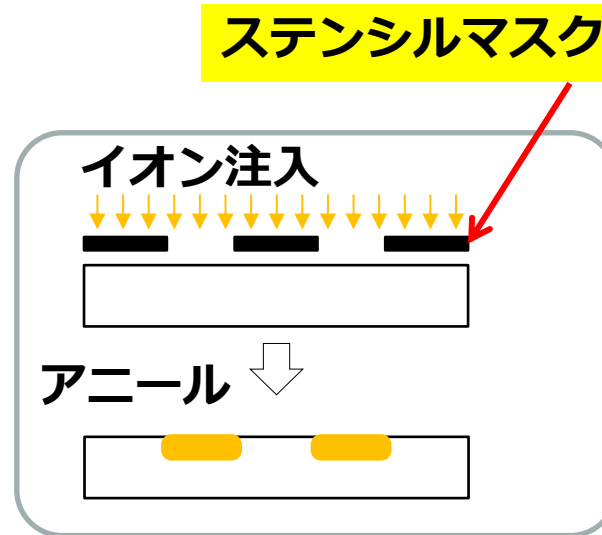


# ステンシルマスクを用いたイオン注入技術

## 通常のパターニングプロセス



## ステンシルマスクイオン注入



リンのイオン注入後の表面写真

### 利点

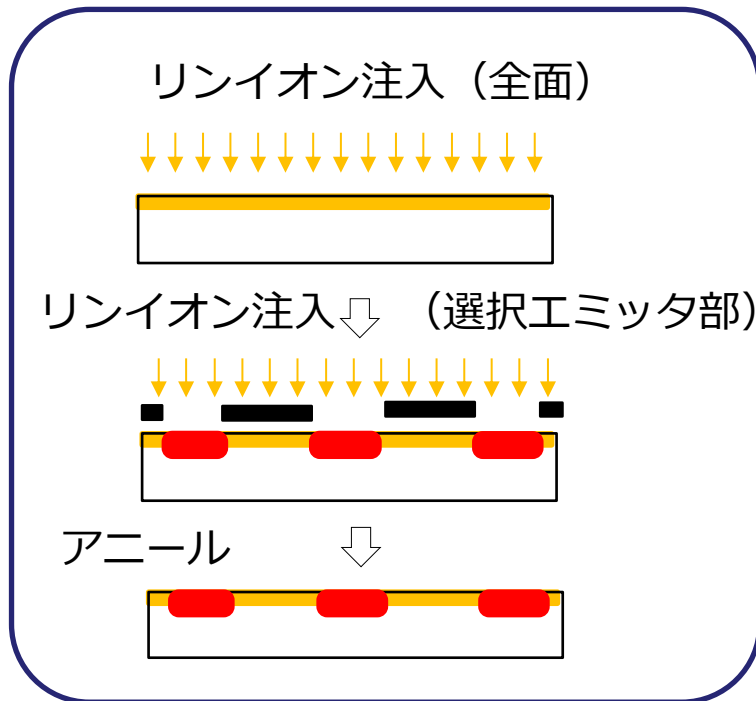
- ・ プロセス工程数の大幅な削減が可能
- ・ BCセルといった、作製工程数が多いセルのコスト低減に有効

### 課題

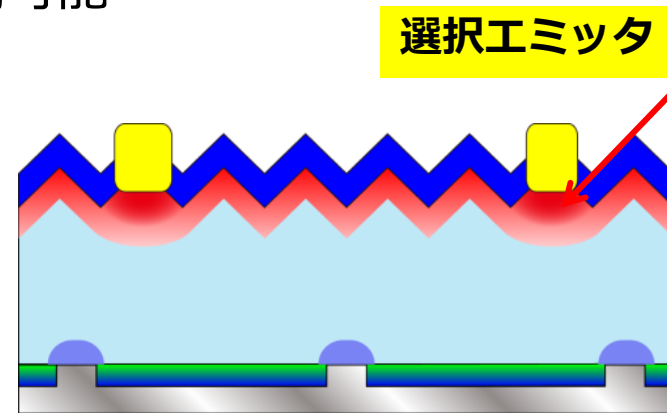
- ・ 精密なマスクの作製方法が確立されていない。
- ・ 複数のマスクを用いた場合、それぞれの位置合わせ精度の向上が必要

# ステンシルマスクを用いたイオン注入で 選択エミッタを有するPERCセルを作製

- ステンシルマスクを用いたイオン注入法を用いることで、プロセス工程数を削減可能



選択エミッタ作製プロセス



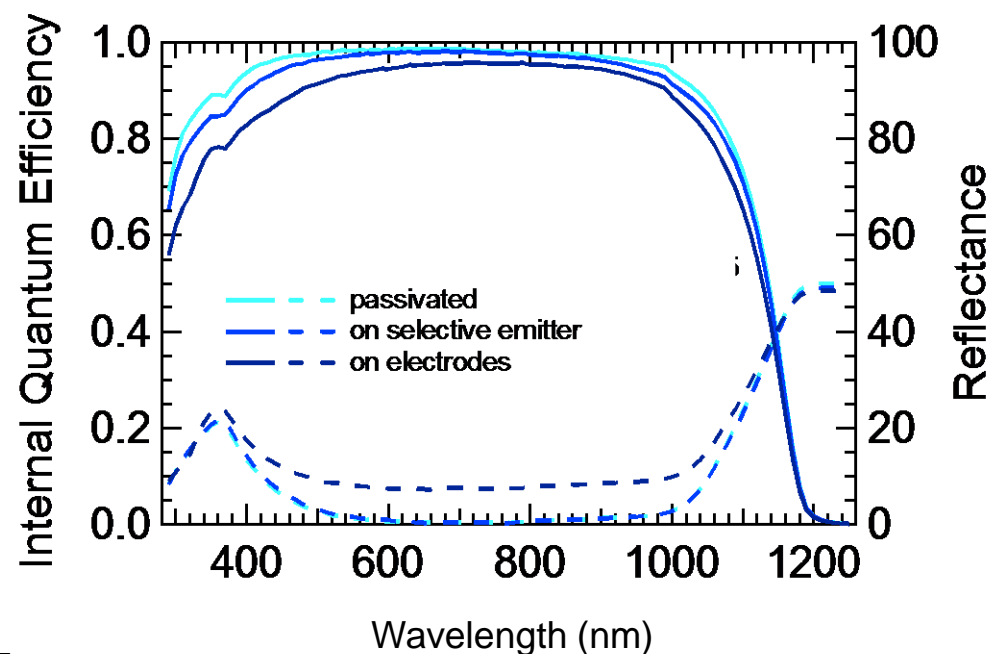
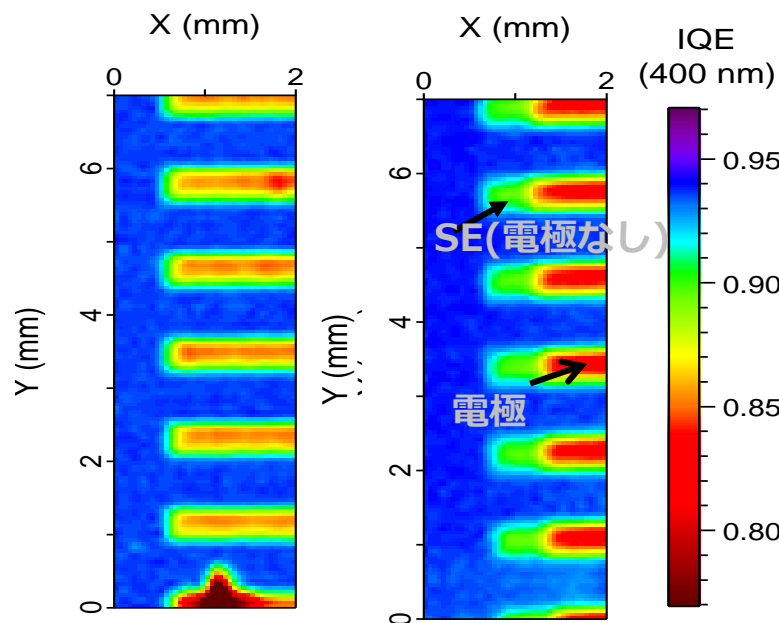
iSE-PERCセルの構造

作製したPERCセルの特性

$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$V_{oc}$ [mV]	FF [%]	Eff. [%]
38.9	651	77.5	19.6

# イオン注入を用いた選択エミッタ形成

- 注入マスクを用いたイオン注入法で初めて選択エミッタを有するPERCセル(iSE(ion-implanted selective emitter)-PERC)の作製に成功。



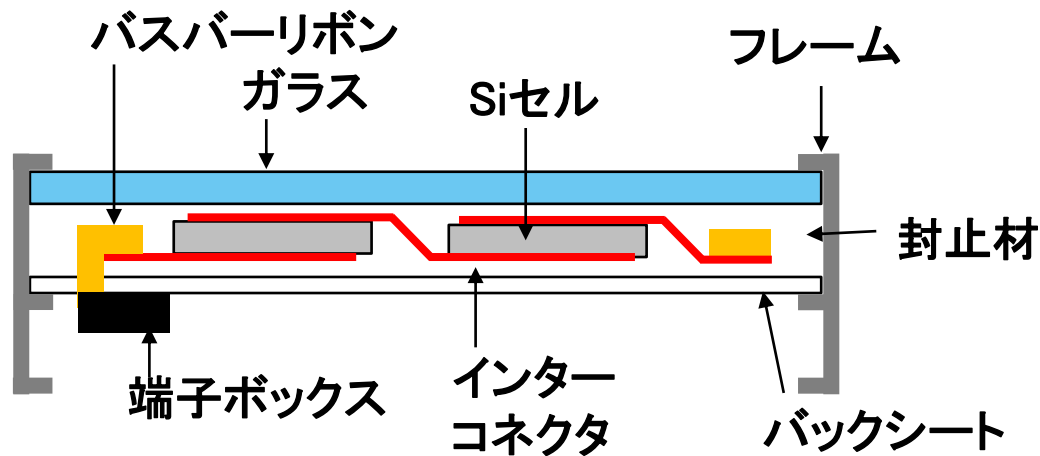
フィンガー電極端部での内部量子効率分布(波長400 nm)

iSE-PERCのIQE

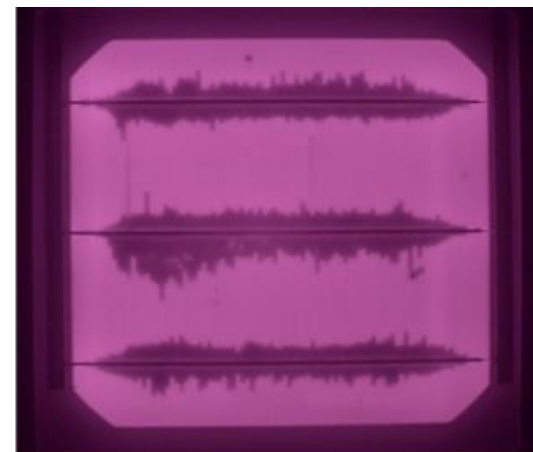
- 選択エミッタ領域でも良好な拡散層が形成されている。

# 太陽電池モジュールの信頼性評価

- 太陽電池モジュールの高信頼性・長寿命化を達成するために、屋外試験と屋内での加速試験による劣化モードの調査が欠かせない。
- 屋外試験でのモジュール劣化のうち、インターコネクタに起因する劣化がしばしば見られる。
- 最近のモジュールを用いたDH試験では、バスバー付近からEL暗部が進展する事例が多い。



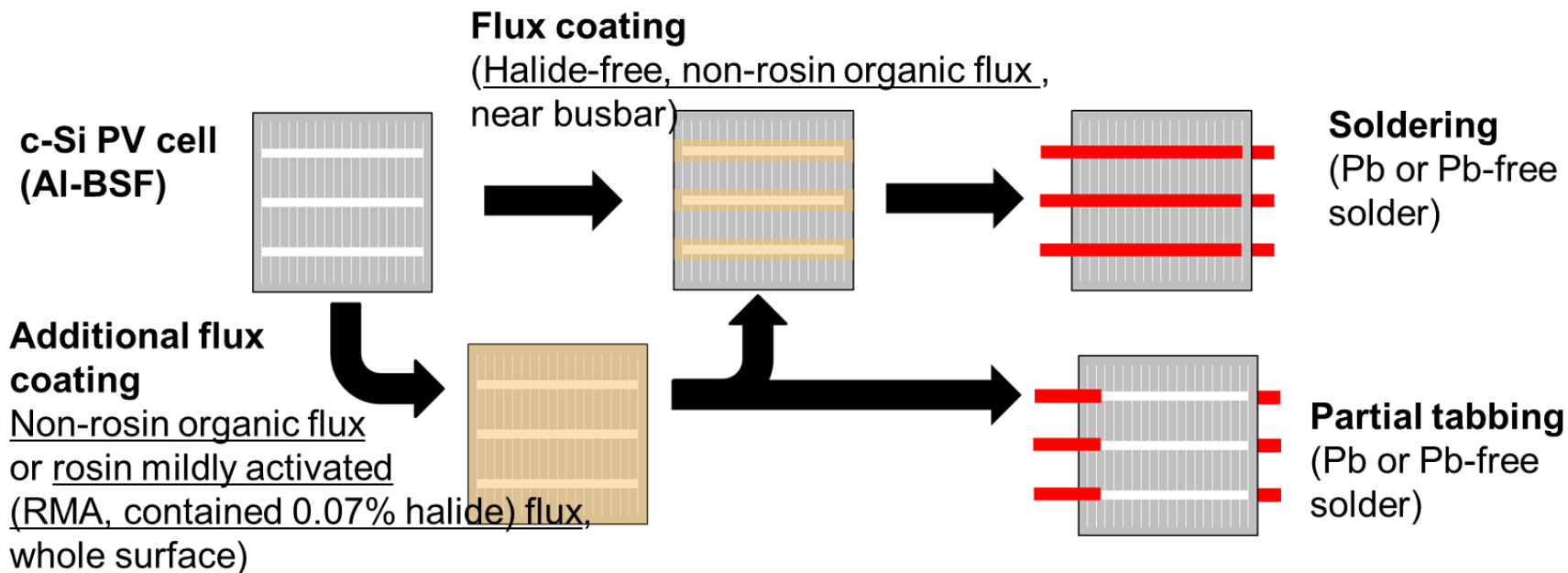
モジュール構造



1セルモジュールでの劣化試験例  
バスバー付近からEL暗部が進展

# モジュールの信頼性評価

- **タブ付けに用いるフラックスの影響を調査。**
- FREAでは、高信頼性結晶シリコン太陽電池モジュールの故障モード・メカニズムを明らかにするため、標準的な高温高湿(DH)試験(85°C 85%RH 1000 h)よりも厳しい条件の2種の試験を行っている。
  - 95°C 95%RH ~3000 h DH試験,
  - 110°C 85%RH ~1000 h プレッシャークッカー試験(PCT)



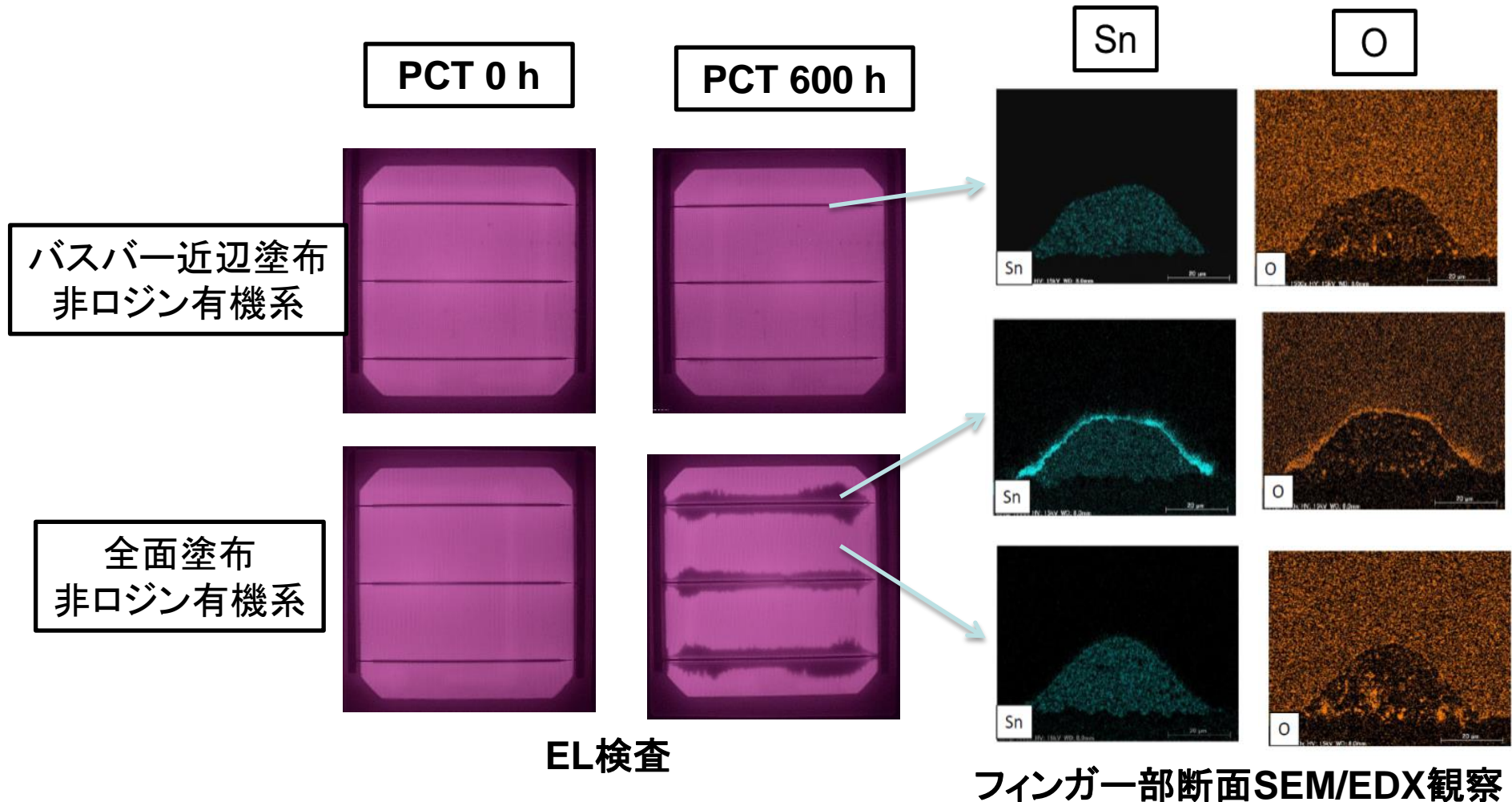
## ■ プレッシュャークッカー試験(PCT): 110°C, 85%RH

- 有鉛はんだ試料またはフラックスをセル全面に塗布した試料で、より速い劣化が見られた。
- 部分タブ付試料は、タブ付を行っていない箇所では1000 hのPCTの後でも劣化が見られなかった。

Solder	Flux	Interconnector	PCT 0 h	600 h	650 h	700 h	792 h	900 h	1000 h
有鉛はんだ	バスバー付 近塗布非ロ ジン有機系	標準							
	全面塗布 非ロジン 有機系								
	RMA flux 全面塗布				/		/		/
無鉛はんだ	バスバー付 近塗布非ロ ジン有機系								
	全面塗布 非ロジン 有機系								
	RMA flux 全面塗布				/		/		/
有鉛はんだ	全面塗布 非ロジン 有機系	部分					/		
無鉛はんだ									



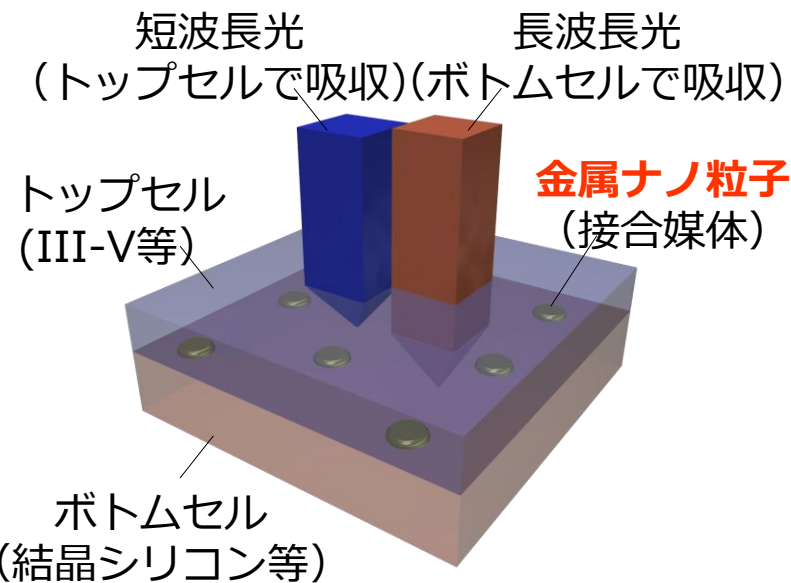
- 劣化領域のAgフィンガー電極表面に新たな層が確認され、EDX分析からSnとOが検出された。
- これらは、モジュール(封止材EVA)の劣化が、従来の酢酸による要因だけでなく、フラックスにより、より促進されている可能性を示唆。



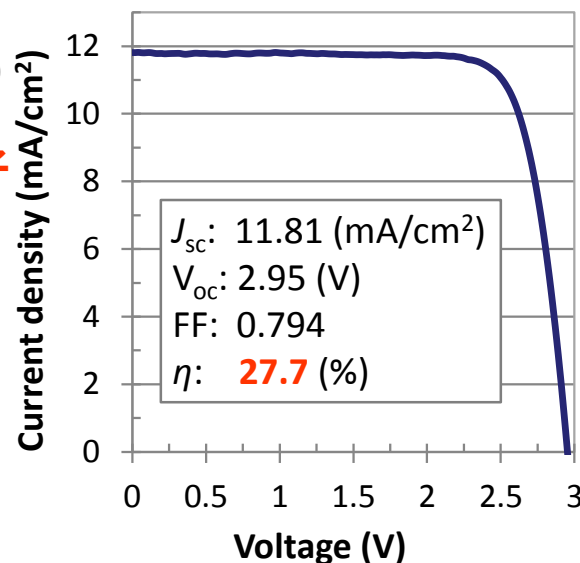


# スマートスタック技術による次世代タンデム型太陽電池の開発

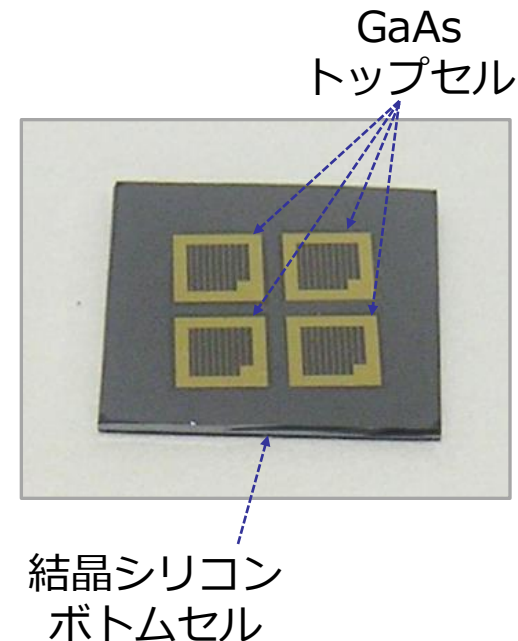
- スマートスタックとは、金属ナノ粒子配列を接合媒体として用いた産総研オリジナルの接合技術
- III-V/Siの組み合わせでこれまでに変換効率27.7%達成。
- 信頼性検証やモジュール化（複数枚トップセルの一括スマートスタック）など、実用化に向けた技術開発も進行中。



スマートスタック構造  
(特許第5875124)



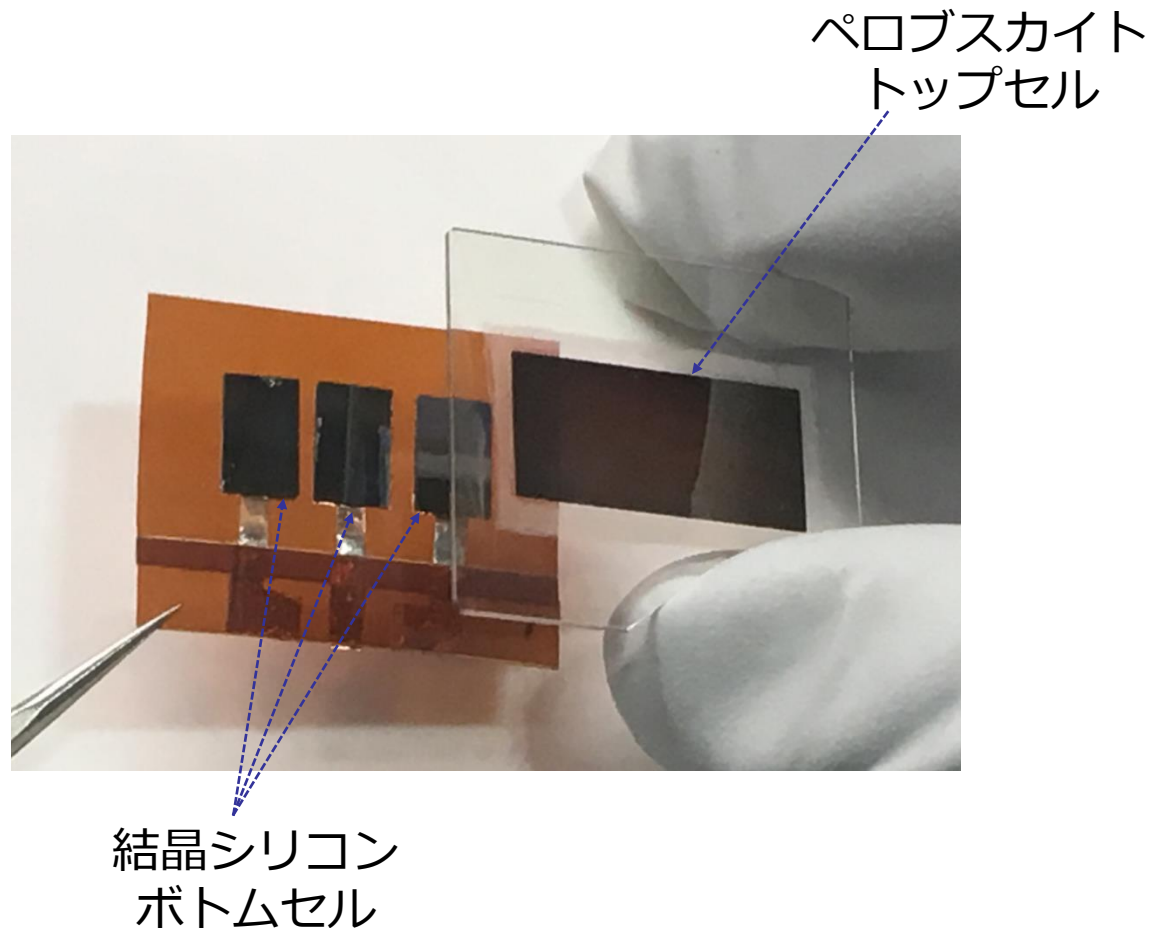
InGaP/GaAs/Siスマート  
スタックセル電流-電圧特性



4枚トップセルの  
一括スマートスタック

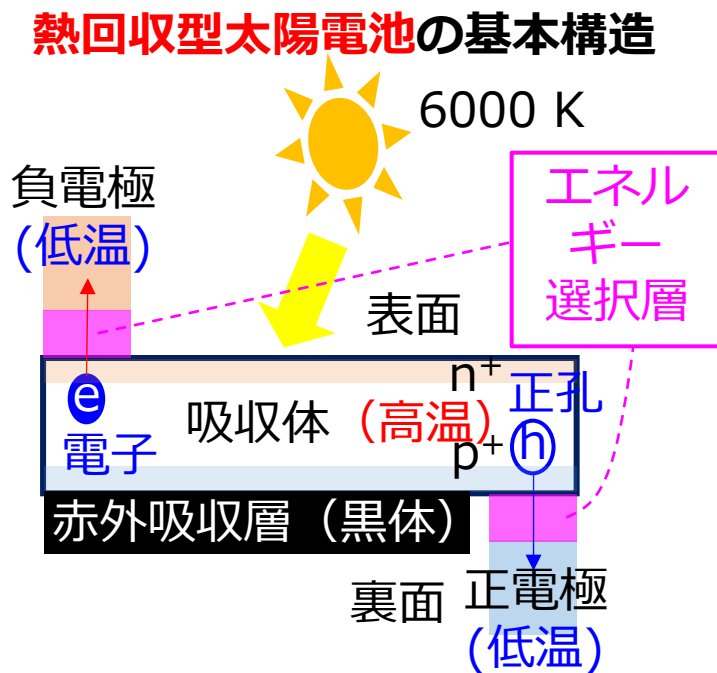
# ペロブスカイト/Siスマートスタック

- スマートスタック技術によりペロブスカイト（トップセル）と結晶シリコン（ボトムセル）のタンデム化も検討中。

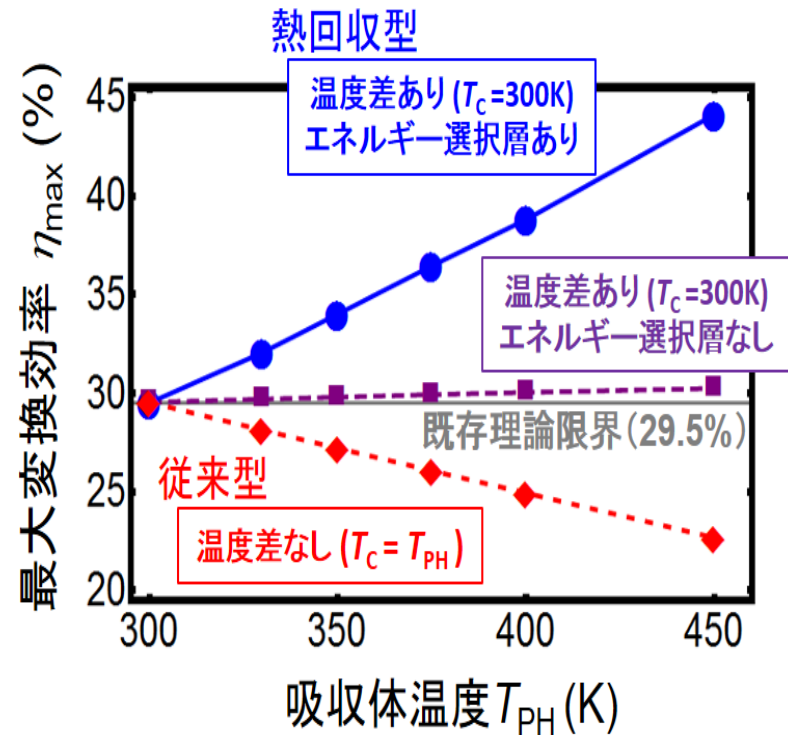


# 太陽電池の新コンセプト「熱回収型太陽電池」

- 光吸収体に熱を蓄え、高エネルギーキャリアを選択して取り出すことにより、従来棄てられていた熱が回収され高いエネルギー変換効率を得られる太陽電池



- [条件1] 吸収体温度 > 電極温度
- [条件2] 高エネルギーキャリアの選択的取り出し (エネルギー選択層を利用)

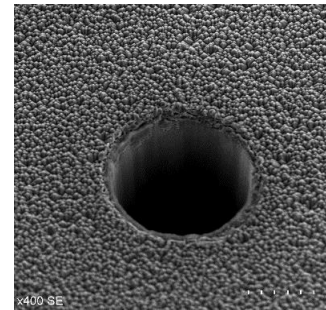
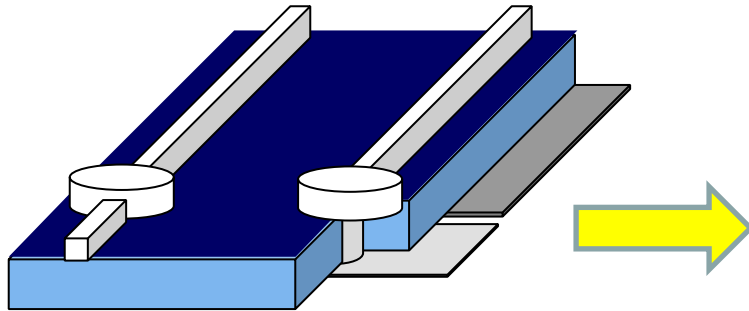


[特徴]

- 熱起電力を利用し従来理論限界を超える高効率化が可能

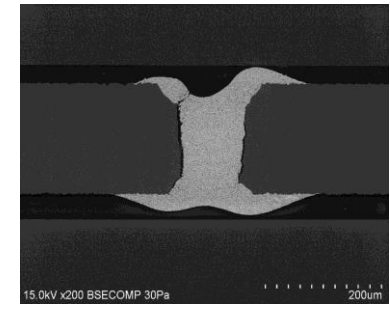
# 福島県ハイテクプラザ、県内企業、大学と共同で作製したメタルラップスルー(MWT)型セル

1. シリコン基板に貫通孔をあけて、表面側電極を裏面に回した構造
2. セル間の配線は裏面のみ



レーザ穴加工

東成イービー東北(株)



電極充填加工配線形成

(株)東北電子  
ハイテクプラザ

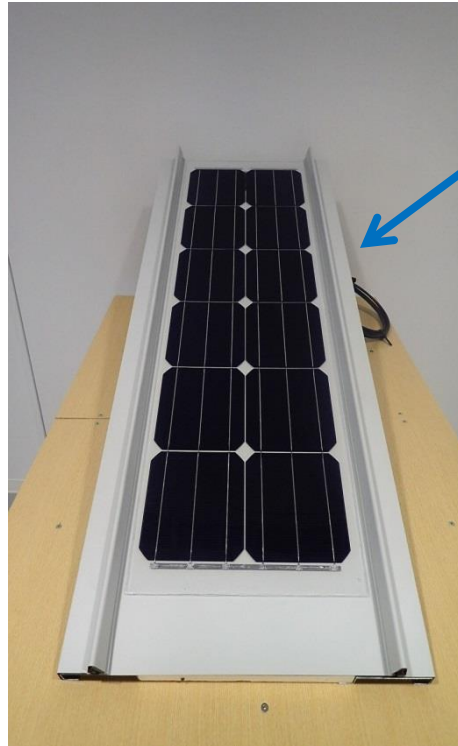


変換効率 17.4%

\* 本事業は産総研連携強化型技術開発事業（福島県）で実施した。

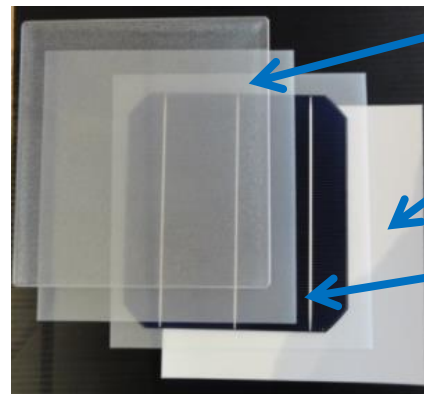
（共同研究先）福島県ハイテクプラザ、東成イービー東北(株)、(株)東北電子、日本大学工学部池田研究室

# 屋根材一体型太陽電池モジュール



アンフィニ (モジュール作製)  
 カナメ (屋根材設計・作製)  
 さんのう (遮熱性塗料)

## モジュール構成部材



アサカ理研  
 (カバーガラスの反射防止・防汚)  
 クニミネ工業  
 (粘土材を用いたバックシート)  
 山王  
 (セル間の配線に用いる導電性  
 フィルム用銀めつき粒子)

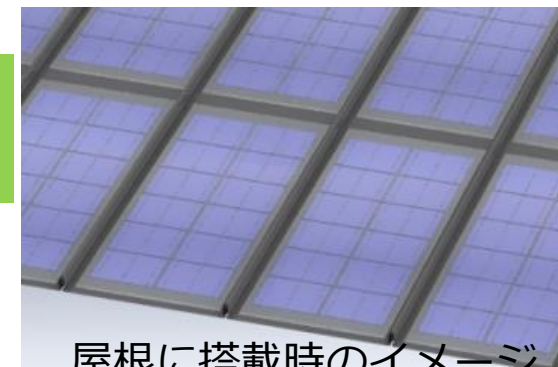
## 産総研

- ・試験モジュール作製
- ・信頼性評価
- ・屋外暴露試験

高性能化・高信頼性化を支援



福島モデルと  
 して事業化



屋根に搭載時のイメージ

# まとめ

- PERCセルの選択エミッタ形成技術  
量産を指向したリン熱拡散+エッチバックプロセスにより開放電圧の向上が図られた。
- 裏面電極型セルの作製技術
  1. 両面受光—裏面電極型セルを作製し、21.1%を得た。
  2. 裏面電極型セルのセルフアラインプロセスを初めて構築(特許出願済)し、変換効率20.5%を得た。
- イオン注入技術  
新しく開発したステンシルマスクを用いたイオン注入技術により、選択エミッタを有するPERCセルの作製に成功した。
- 結晶シリコン太陽電池モジュールの劣化モードの検討  
モジュール(封止材EVA)の劣化が、従来の酢酸による要因だけでなく、フラックスにより、より促進されている可能性を示した。
- 今後は、上記技術の統合を進めることで、新しいモジュール構造の実現を図る。

## 謝辞

本研究の一部は、経済産業省のもと、NEDOから委託され実施したもので、関係各位に感謝します。