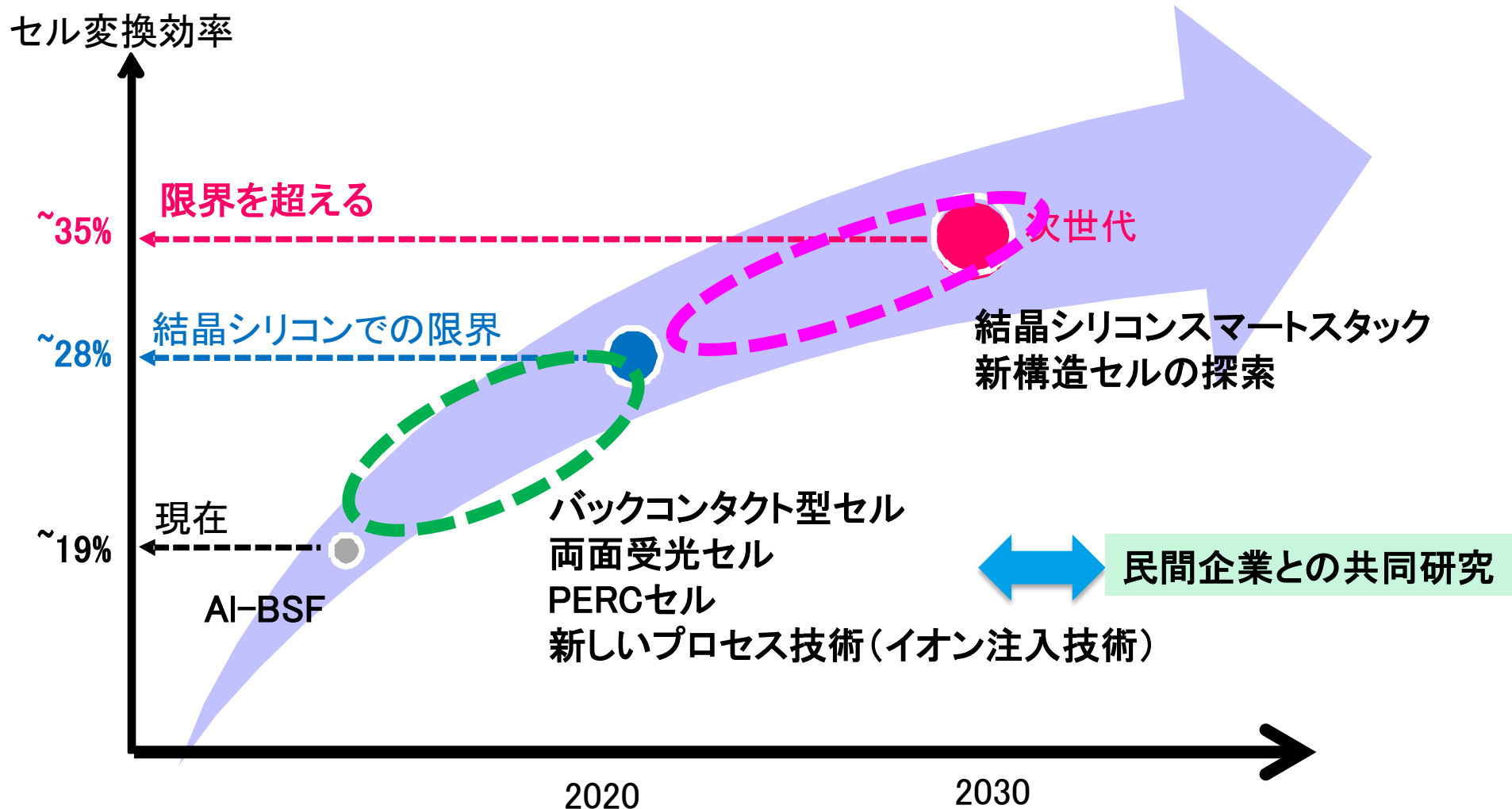


# 結晶シリコン太陽電池の研究開発

産業技術総合研究所  
福島再生可能エネルギー研究所  
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

# FREA太陽光チームの研究開発目標



1. 高効率・高信頼性モジュールを低コストで作製するための技術開発
2. 次世代の高効率(>30%)太陽電池の開発

**発電コスト目標 2020年 14円/kWh、2030年 7円/kWh を先導する技術の開発を行う。**

# 1. 結晶シリコンの新しい成長法の開発

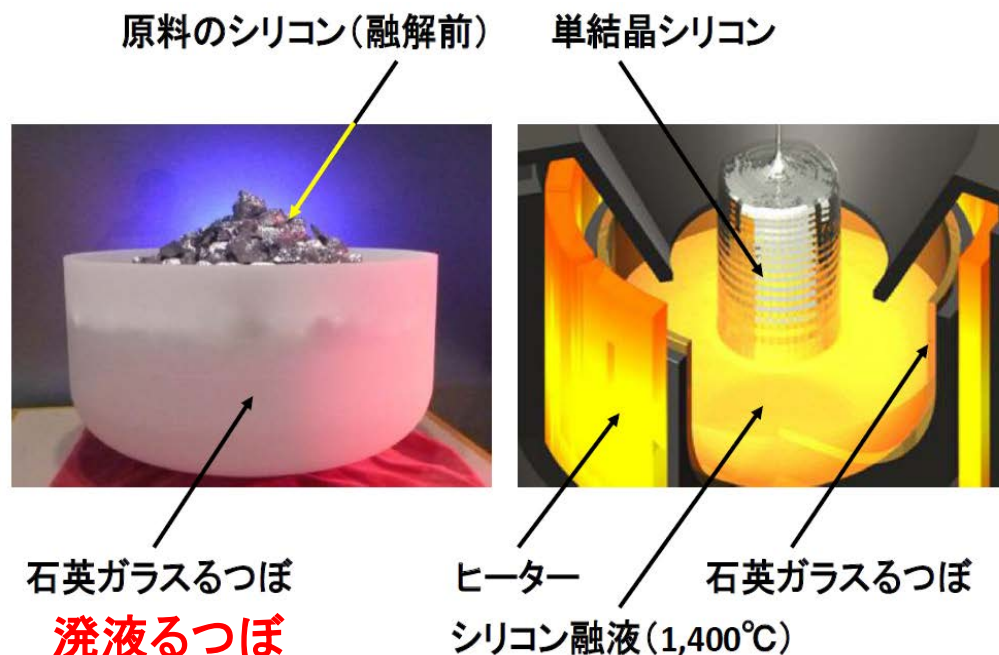
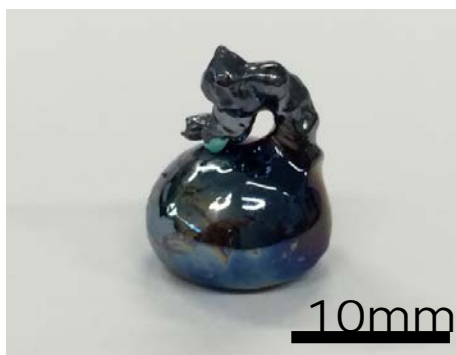
## 1-1. LCZ法の進展

### <経緯>

- ・FTB研究所(株)・東北大学が開発した 澆液るつぼ Liquid Inert (“Liquinert”) Crucible を用いた新規結晶成長方法(\*LCZ法)を、3者で開発。
- ・\*LCZ=“Liquinert”-crucible Applied CZ Growth
- ・石英ガラスるつぼに澆液性をもたせることにより、石英るつぼからシリコン融液への不純物の混入を防止。
- ・高品質な単結晶シリコンの製造に成功。

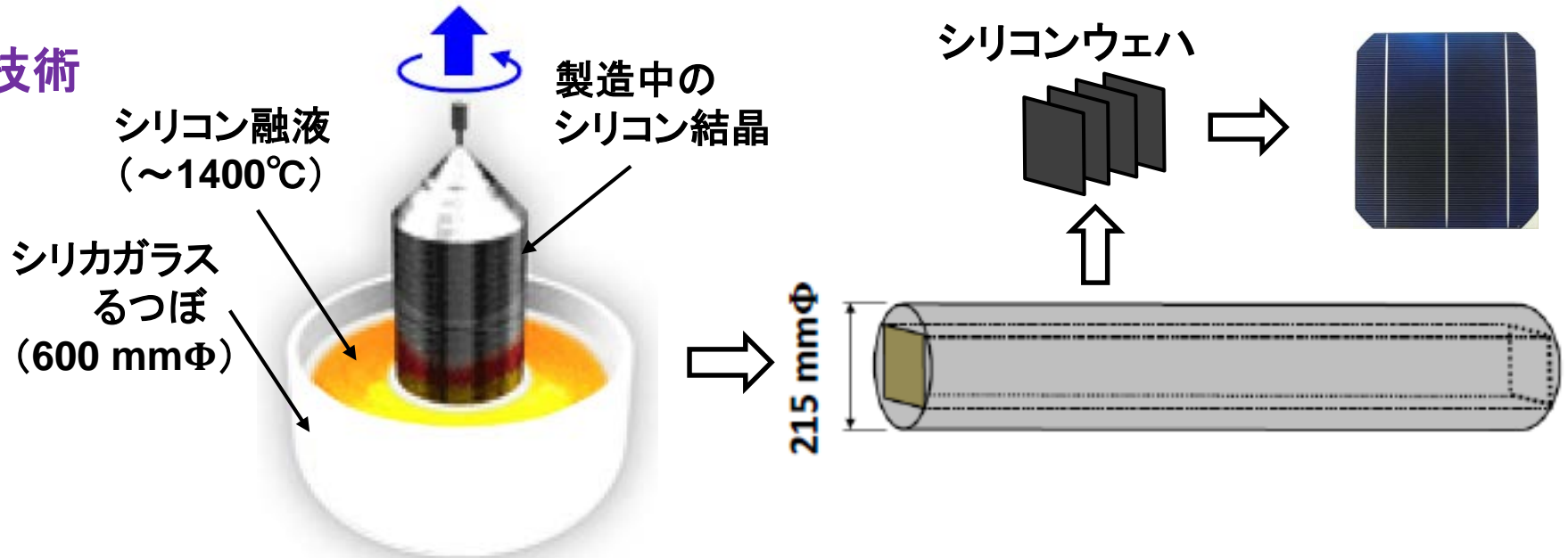
### <目標>

- ・低酸素化・低炭素化
- ・インゴットの大口径化



## 1-2. 澆液るつぼを用いた新規結晶製造方法(LCZ法)の進展

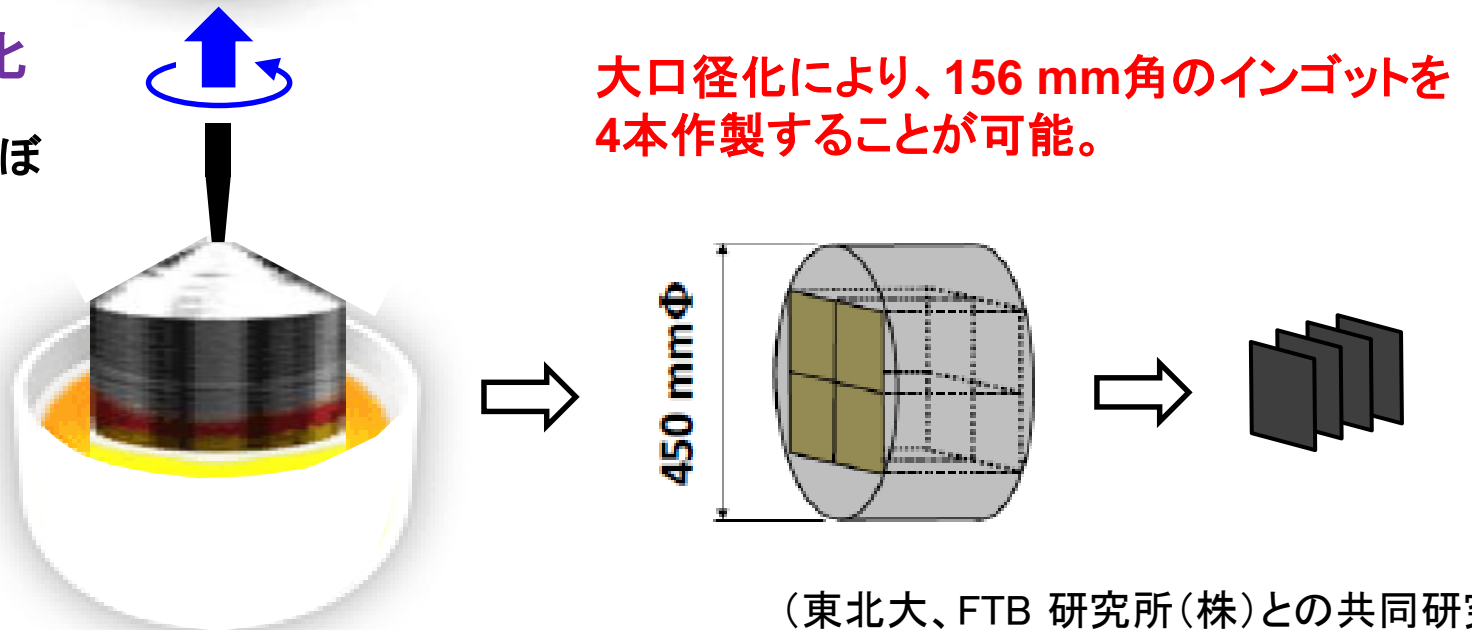
### ・現在の技術



### ・LCZ法による大口徑化

- (1) 同一サイズの澆液るつぼ
- (2) 結晶製造装置の改良

収率 1.5倍  
ウェハの形状は正方形  
低コスト



(東北大、FTB 研究所(株)との共同研究)

## 1-3. LCZ法による大口径化実験

(1) 小型結晶製造装置  
(るつぼ径**165 mmΦ**)を  
用いた研究を実施中

(2) 現在の成果

- ・**120 mmΦ (口径比 73%) の結晶製造に成功**
- ・特許

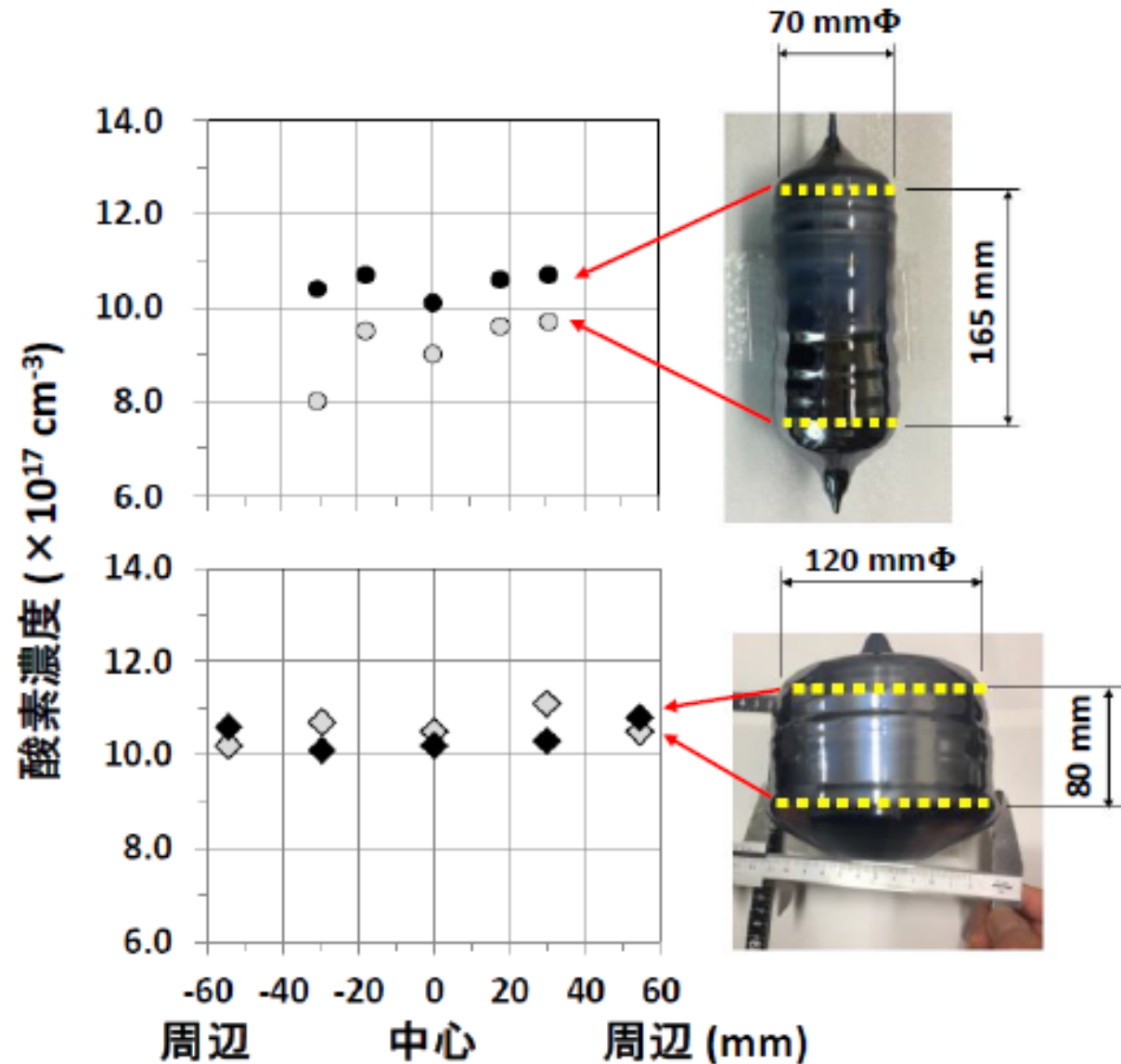
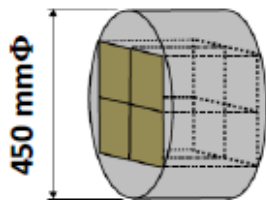
特願 2017-034069 (産総研)

特願 2017-069022

(産総研、東北大、FTB研)

(3) 最終目標:

直径600 mmΦの澆液るつぼから、  
直径450 mmΦ (口径比**75%**)の  
大口径結晶を製造すること。

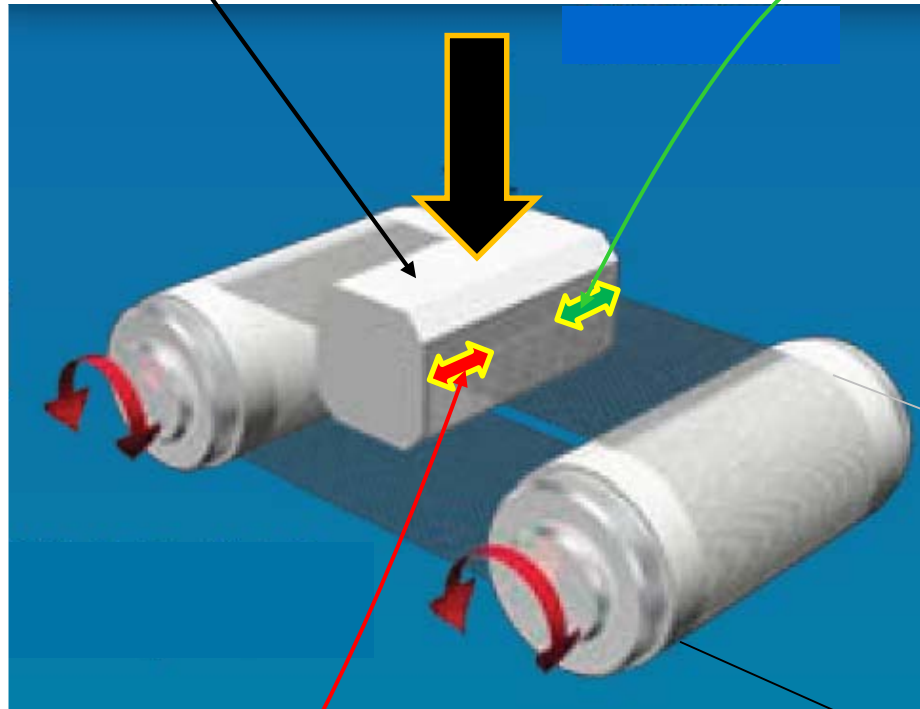


## 2. シリコンインゴットのスライス技術の開発

### 2-1. 薄型・高強度ウェハの作製技術

シリコン・インゴット

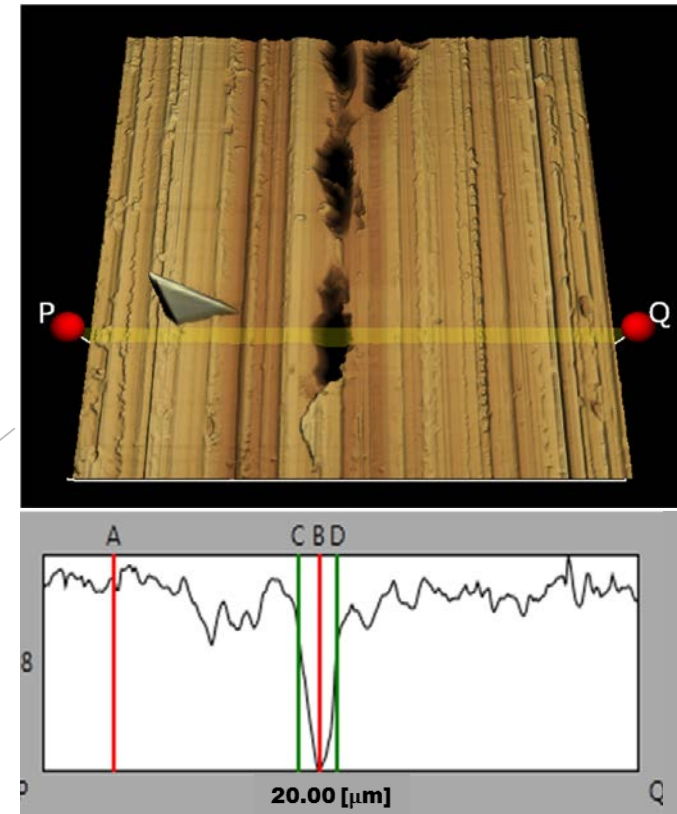
新線側



ダイヤモンド  
ワイヤー

新線

旧線



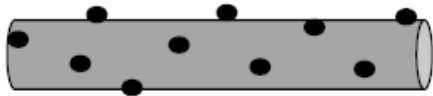
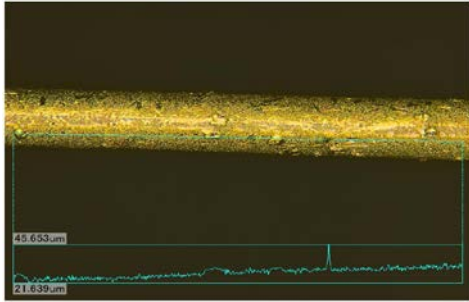
スライス後のウェハ表面  
および断面の形状

旧線側

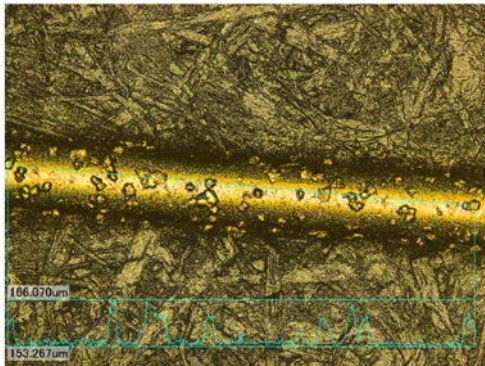
マルチワイヤー・ソーの模式図

## 2-2. ワイヤ形状とウェハ強度の関係

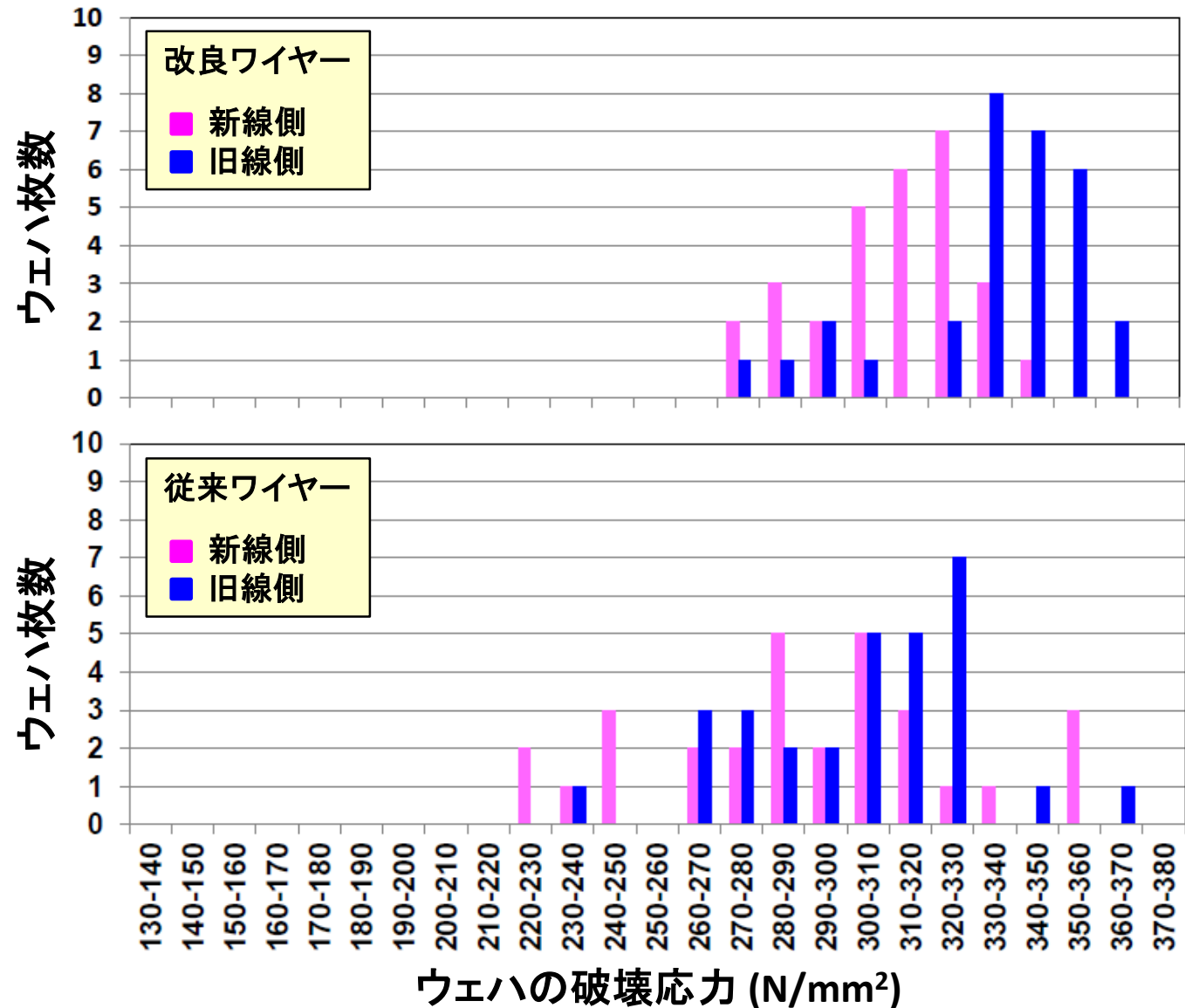
改良ワイヤー



従来ワイヤー



((株)ノリタケカンパニーリミテド  
との共同研究)

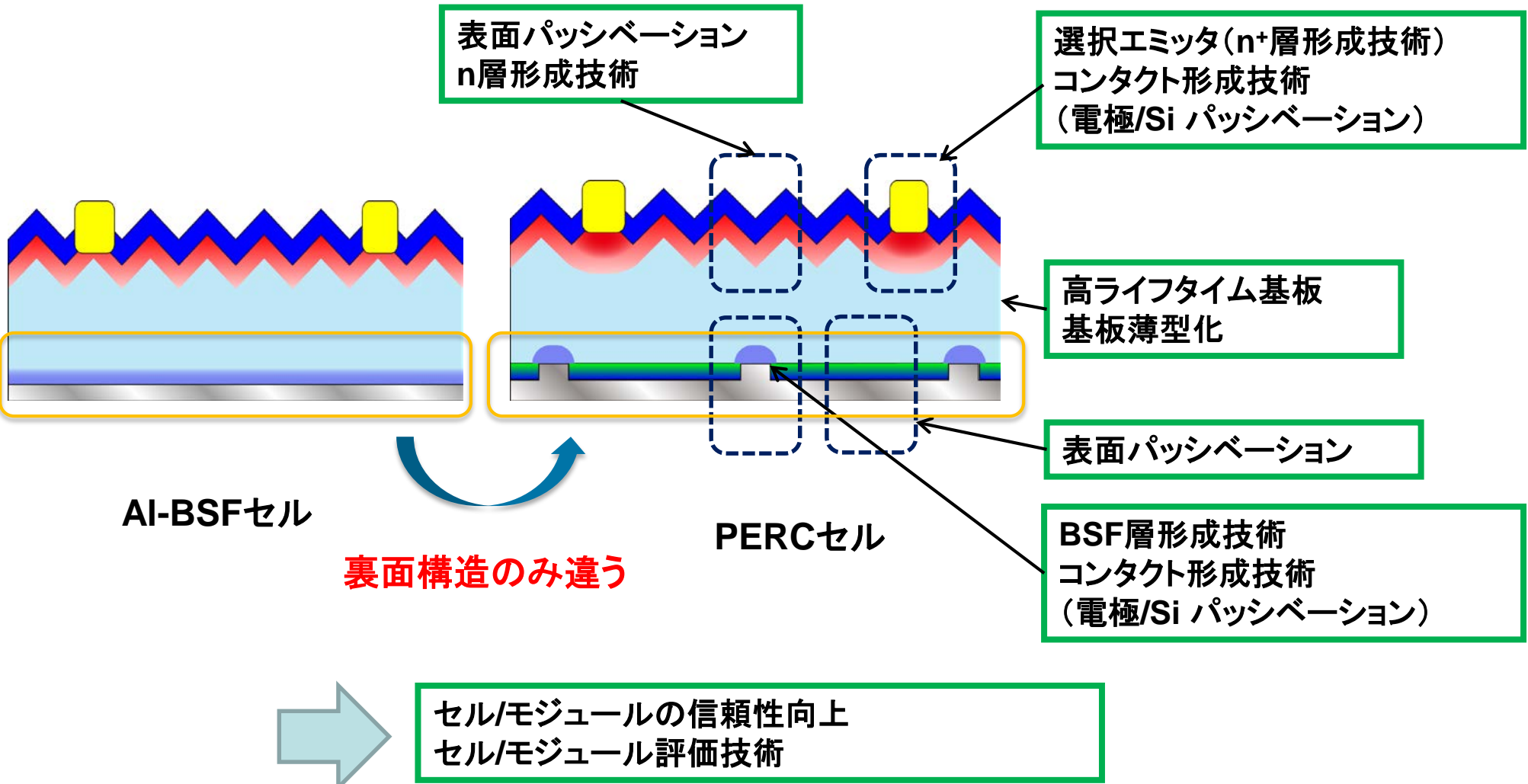


**ワイヤーの改良によりウェハの強度を高めることができた。**

### 3-1. PERC型セルの高効率化

- ・市場はAI-BSF から PERC型へ移行中  
(コスト競争力のあるセル/モジュールの開発が必要)

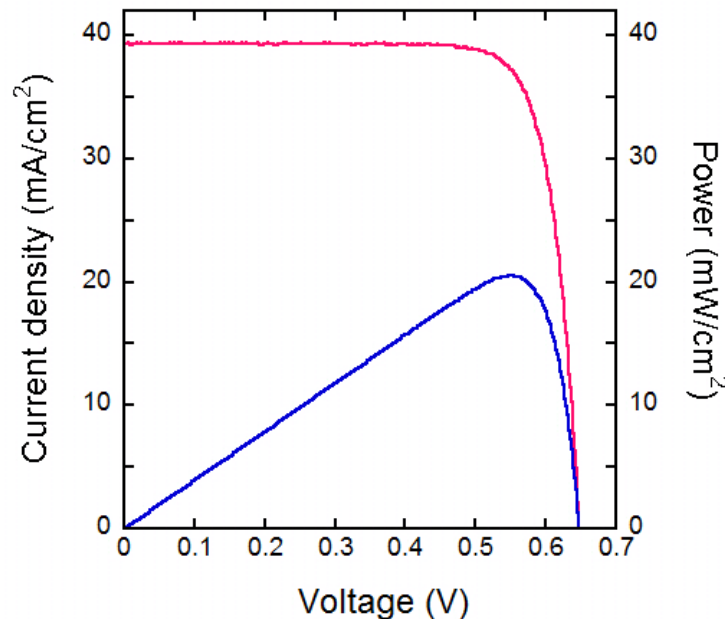
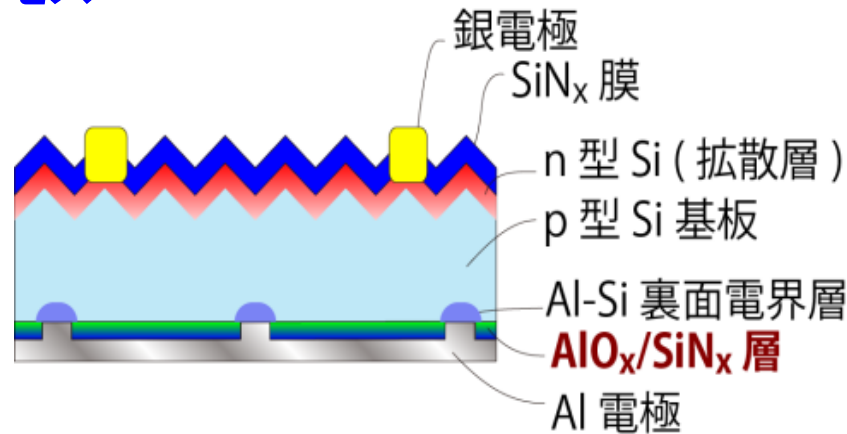
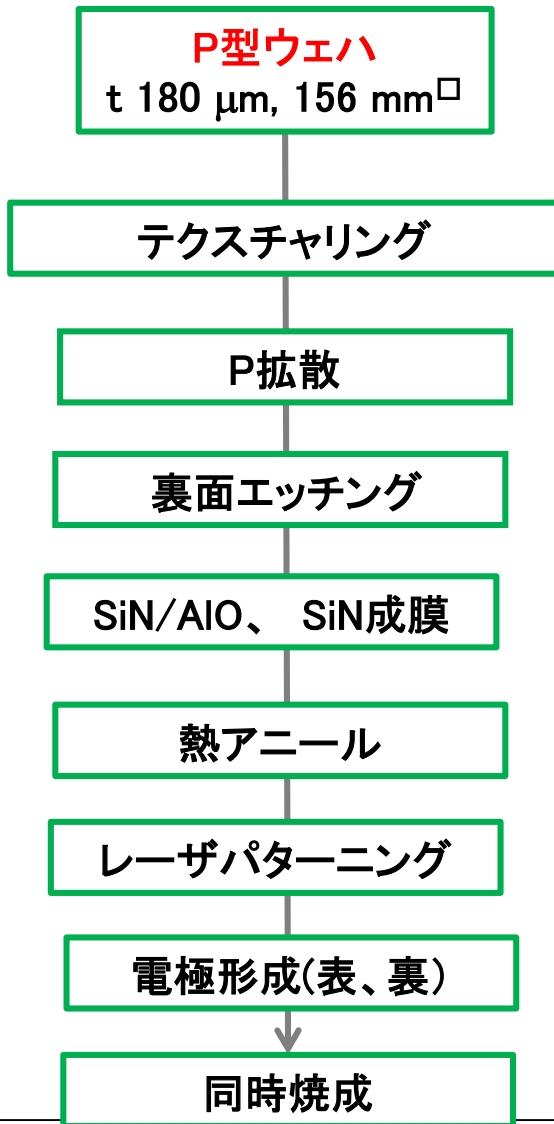
#### ・FREAにおける開発項目





## 3-2. PERCセルの効率化

### セル(選択エミッタなし)作製プロセス

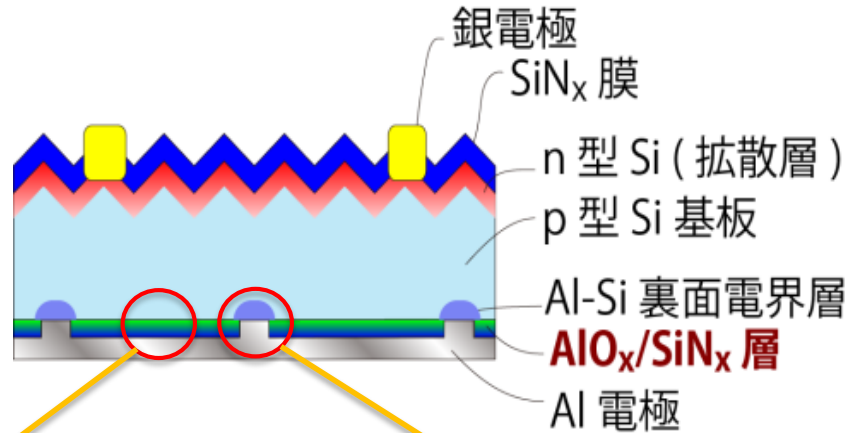


セルのI-V特性

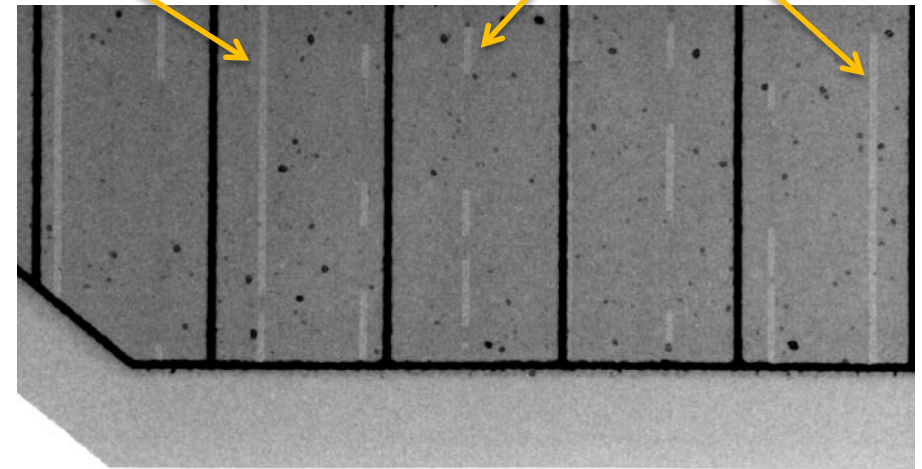
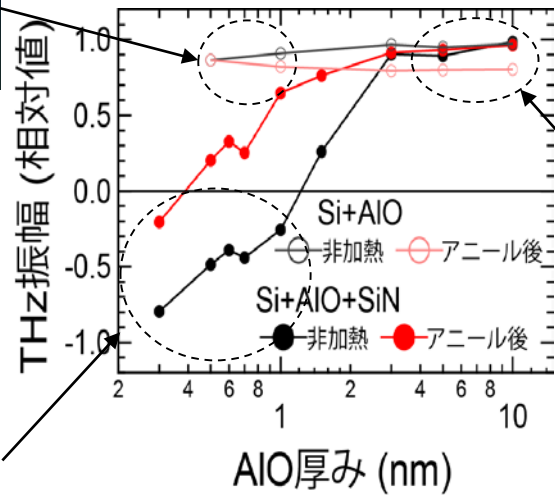
Jsc 39.3 mA/cm<sup>2</sup>  
 Voc 0.648 V  
 FF 0.806  
 Eff 20.54%  
 面積 244.3 cm<sup>2</sup>

**量産化プロセスで  
変換効率 20.5%  
を達成。**

### 3-3. PERCセルの裏面構造の最適化



電極部のボイド



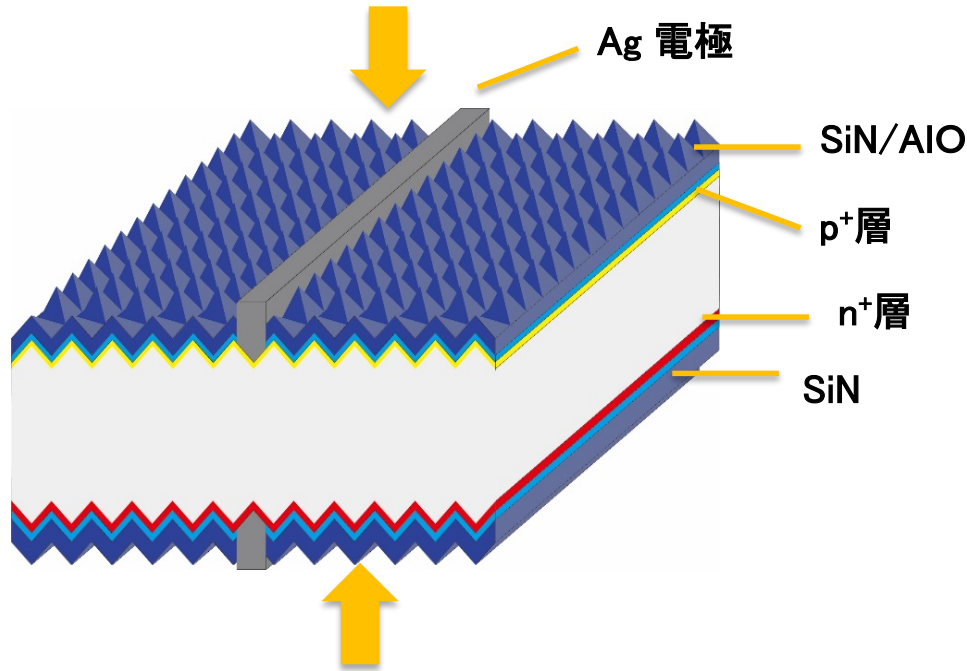
セルのX線透過像

レーザテラヘルツ放射顕微鏡による AIO膜/Si界面における表面ポテンシャルのAIO膜厚依存性

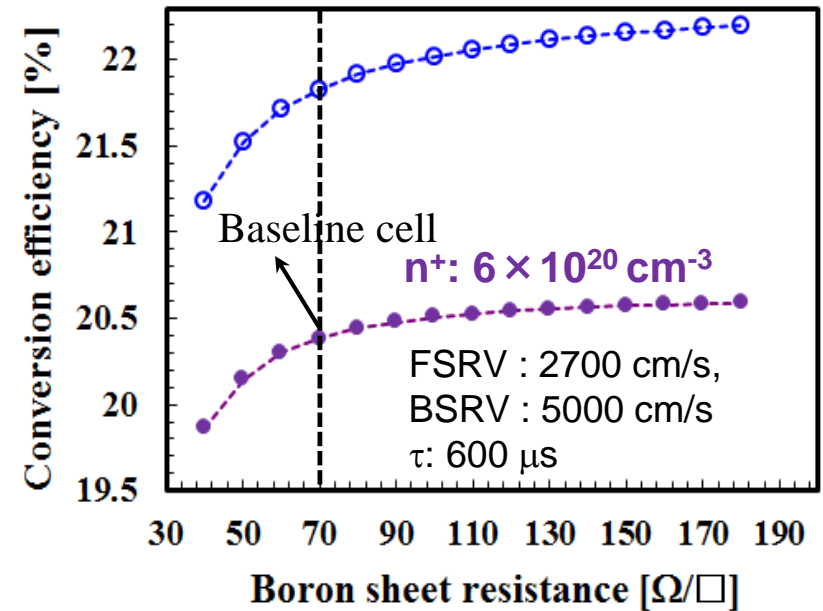
SiNとAIOの固定電荷が競合する様子を観測し、AIO膜厚の最適化を図った。

裏面電極部のボイドを観測できる。

# 4. 両面受光型セルの高効率化



$n^+ : 6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$   
 FSRV : 100 cm/s,  
 BSRV : 100 cm/s  
 $\tau : 2 \text{ ms}$



PC1Dによるシミュレーション結果

	$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$V_{oc}$ [mV]	FF [%]	$\eta$ [%]
p <sup>+</sup> side	39.2	643.6	80.5	20.3
n <sup>+</sup> side	36.2	642.2	80.6	18.7

1. 量産化プロセスで変換効率20.3%を達成。
2. 裏面側からの受光でも高い変換効率。

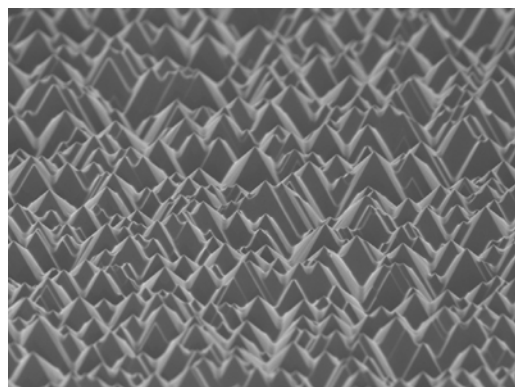
本結果を基にしたシミュレーションから変換効率22%を見通せる。

## 5-1. 新しいセル作製プロセスの開発

- ・イオン注入技術を用いた新規作製プロセスの開発
- ・高効率セル(バックコンタクト型セル)作製プロセスにイオン注入を最大限に用いることでセル作製工程数の半減をめざす。



イオン注入装置

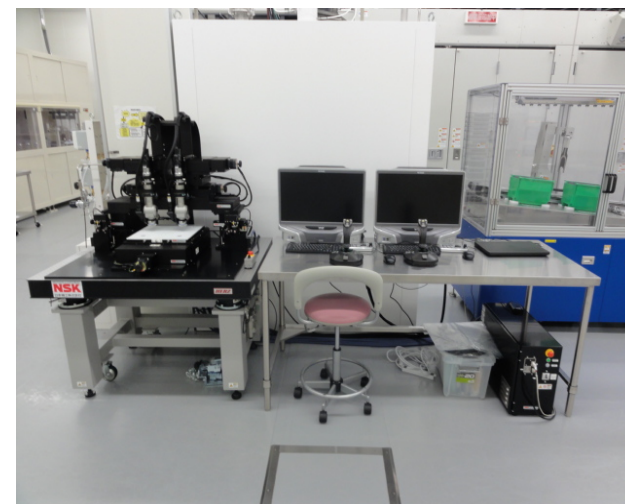


太陽電池の表面

- ・ボロン・リン共にイオン注入
- ・Bifacialセル  
バックコンタクトセル  
に適用。

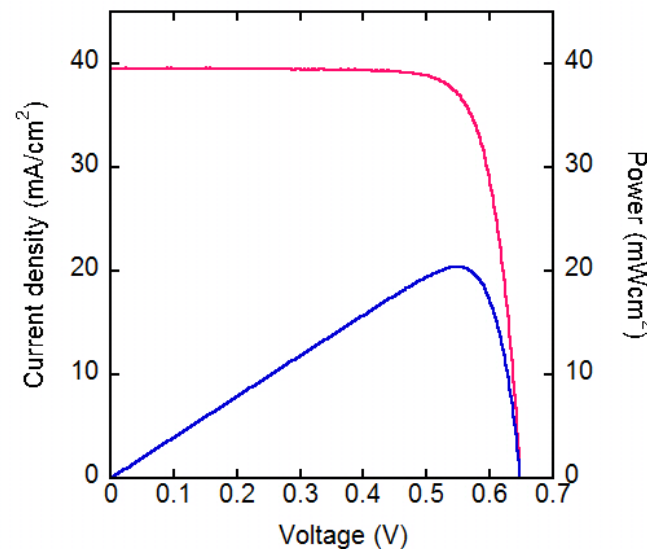
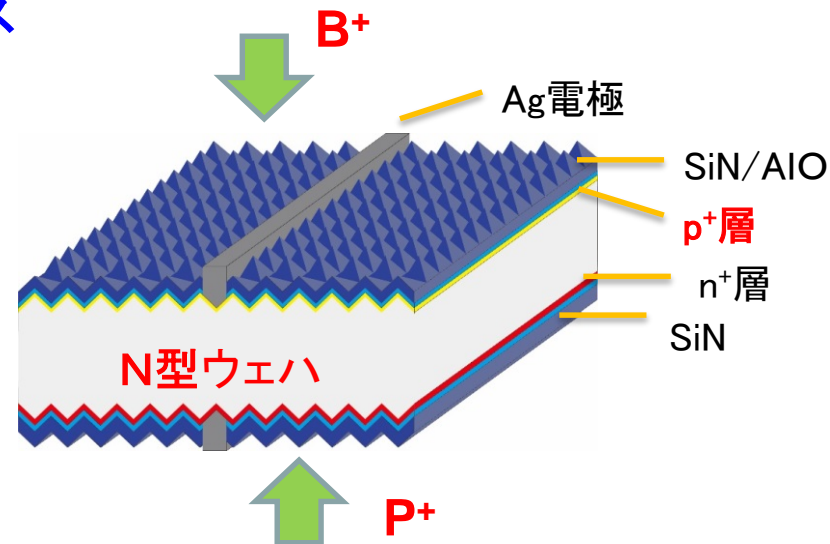
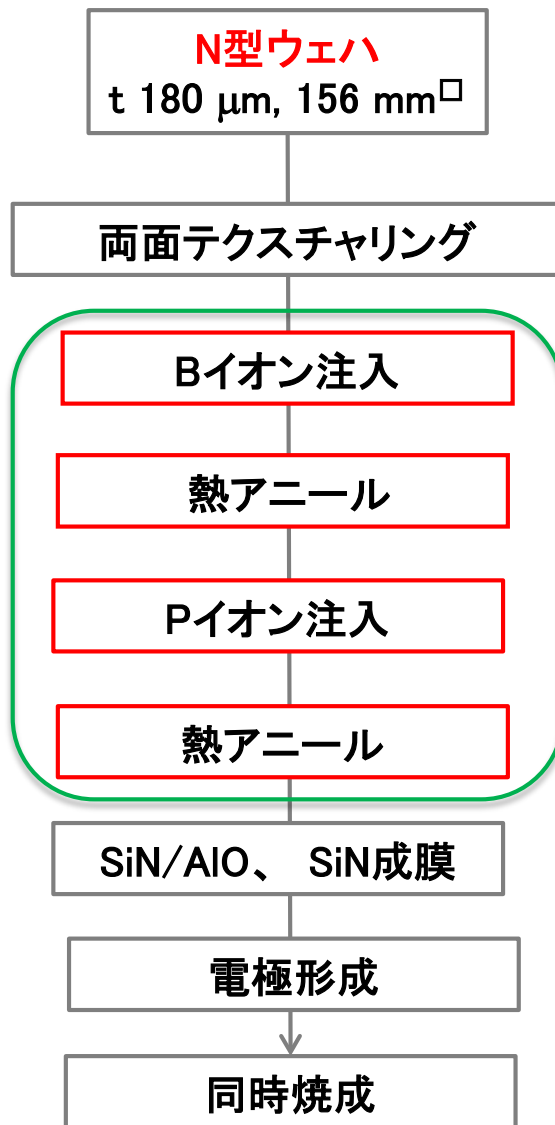
◆ プロセス工程数の大幅な削減を目指して、注入マスクを用いた作製プロセスの開発を進めている。

- ・昨年度、産総研独自仕様の注入マスク位置合わせ装置を導入(右図)。
- ・現在、注入マスクの設計と試作を進めている。



## 5-2. イオン注入(表ボロン、裏リンとも)によるBifacialセルの作製

今回のセル(選択エミッタなし)の作製プロセス

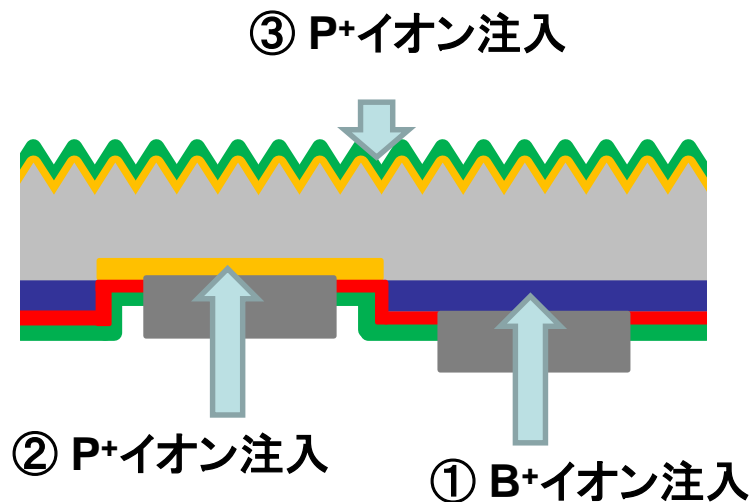


$J_{SC}$ : 39.5 mA/cm<sup>2</sup>  
 $V_{OC}$ : 0.648 V  
 FF: 0.797  
 $\eta$ : 20.4%  
 area: 239 cm<sup>2</sup>

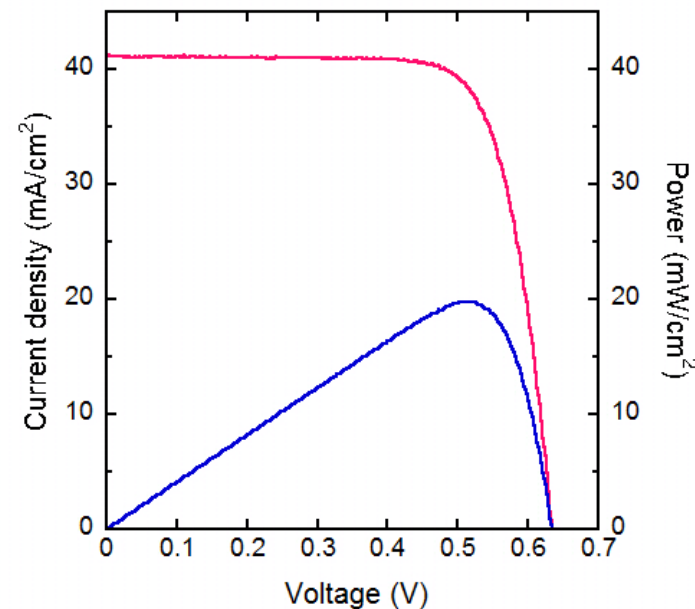
変換効率**20.4%**を達成  
(前回 20.0%)

セルのI-V特性

## 5-3. イオン注入技術により作製したバックコンタクト型セルの特性



バックコンタクト(BC)セルの構造



$J_{SC}$ : 41.1 mA/cm<sup>2</sup>  
 $V_{OC}$ : 0.634 V  
 FF: 0.759  
 $\eta$ : 19.8%  
 area: 8.28 cm<sup>2</sup>

セルのI-V特性

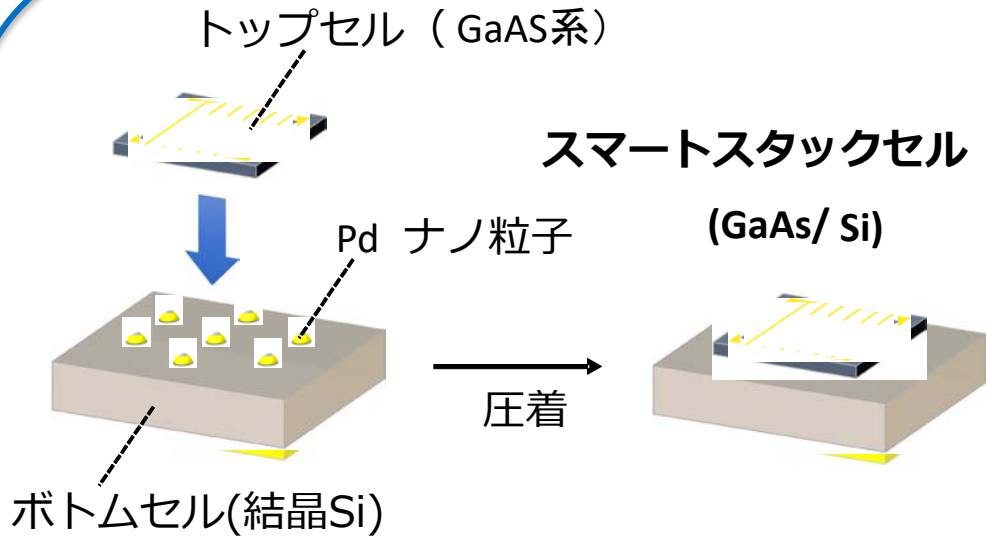
- ・今回、熱拡散の代わりに、BおよびPのイオン注入技術をバックコンタクト型セルの作製に適用(全部で3工程)し、変換効率19.8%を得た。
- ・電極は、低コスト化を図るため、電極ペーストのスクリーン印刷を用いて作製した。

➡ BCセルの基礎的なプロセス技術を確立した。

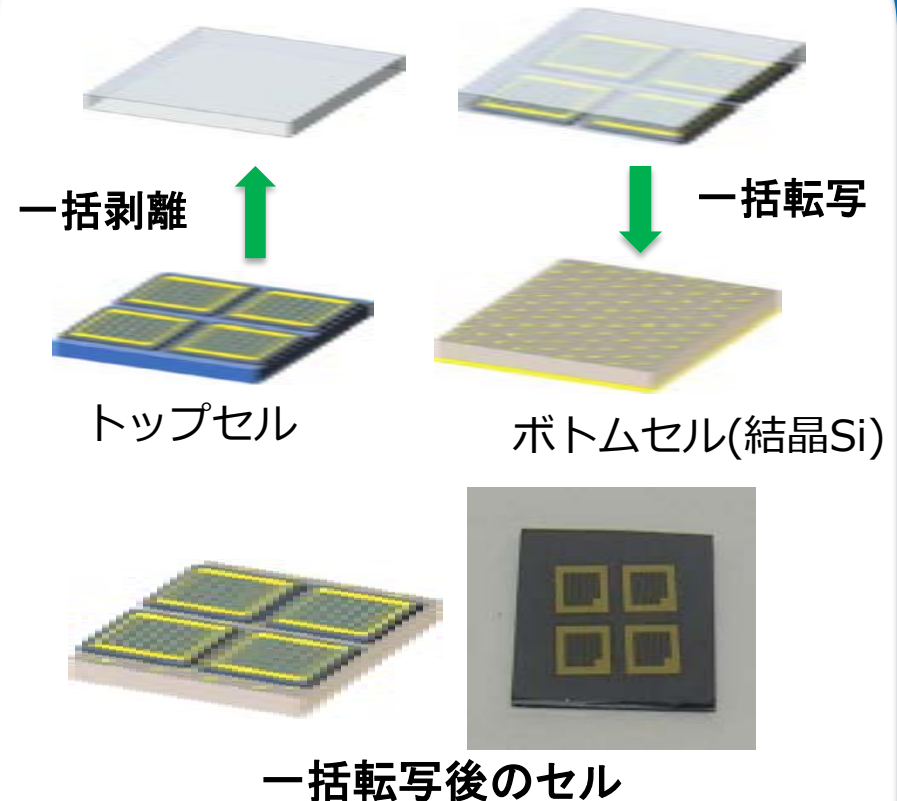
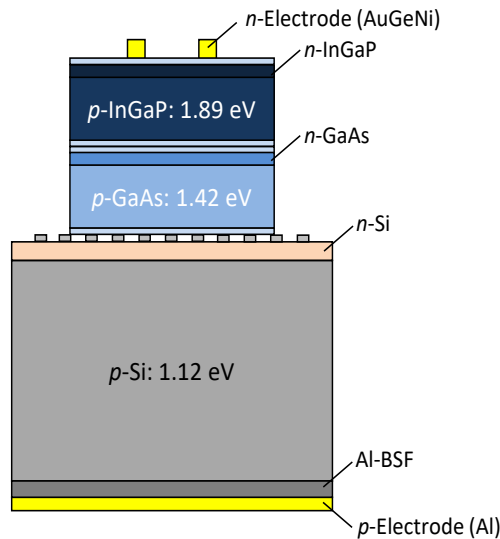
## 6. 多接合セル(スマートスタック技術)

太陽光発電研究センターと共同で実施

一括剥離・転写に成功

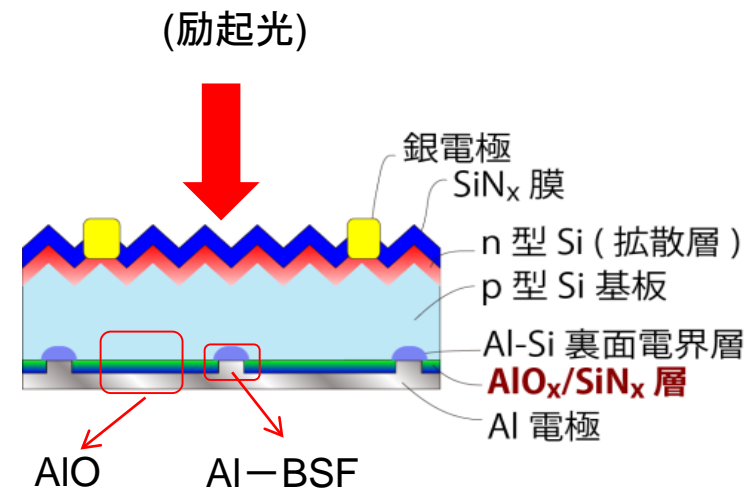
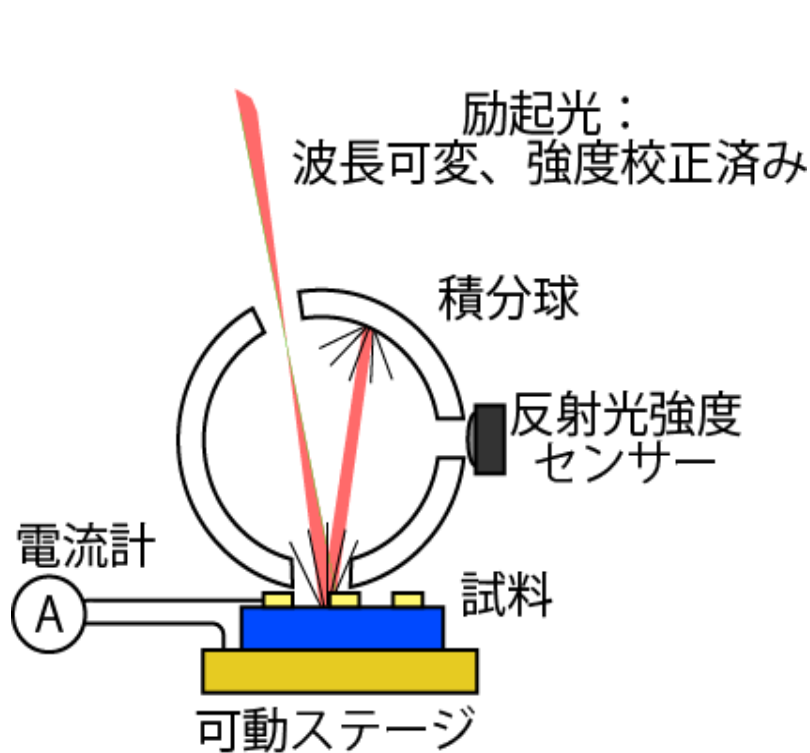


変換効率 **25.1%**  
を達成  
(昨年度 20.1%)

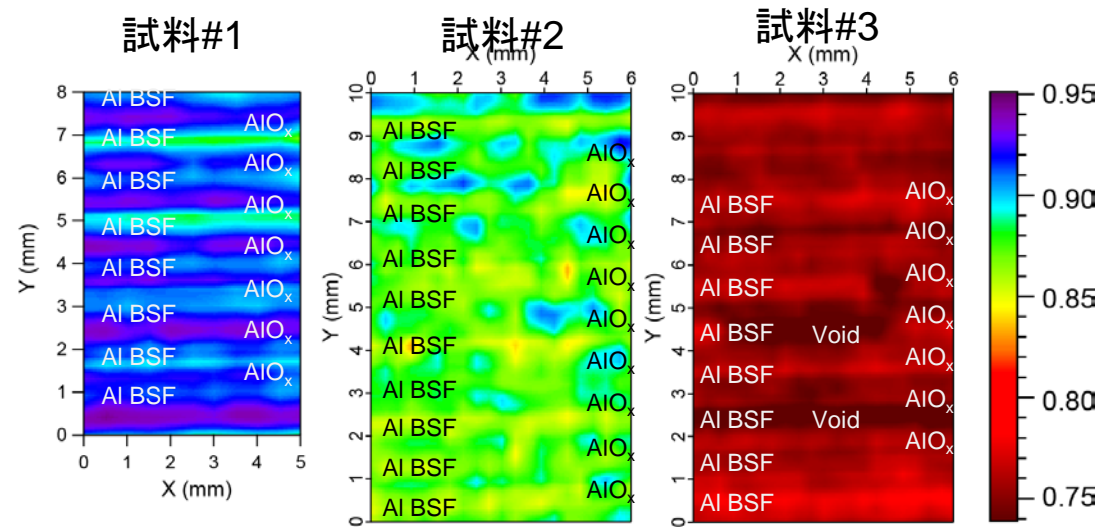


InGaP/GaAs//Si セル(反射防止膜なし)  
で、**21.0%**を達成。

# 7. 新しい評価手法—内部量子効率マッピング法—の開発



- 0.1-0.8 mmのサイズ可変スポットと可動ステージによる任意の波長での量子効率マッピングが可能な装置により測定手法を開発した。
- PERC型セルのAl電極部 (Al-BSF部) とAIO膜によるパッシベーションがなされた部分とを分離して評価することに成功 (図2)。



良い ← AIO膜によるパッシベーション → 悪い

図2 PERCセル裏面の内部量子効率マッピング (裏面パッシベーションの品質を可視化できる。)

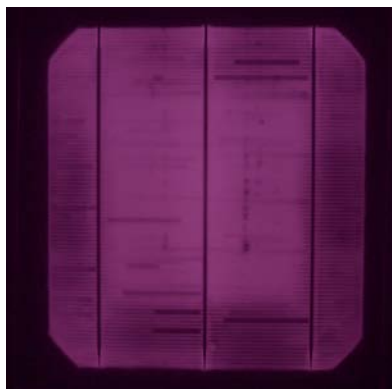
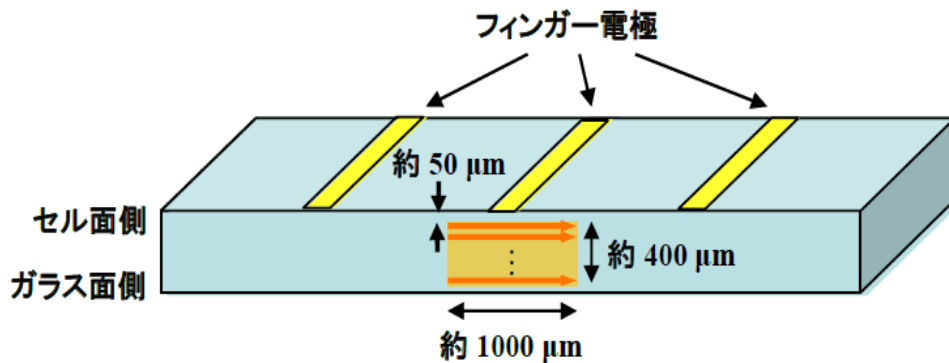
特願2016-170095



## 8. モジュールの信頼性評価

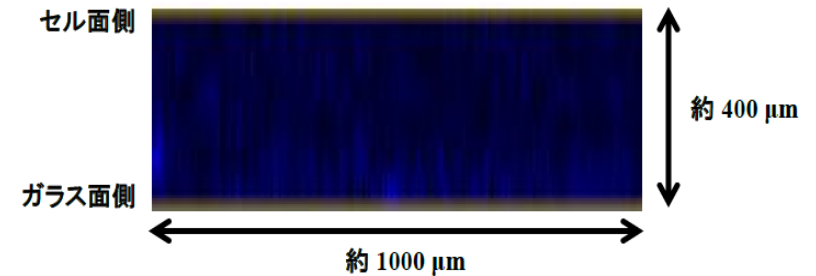
### PID試験

t3.2 mmの白板強化ガラスを用いたモジュール  
PID条件: -1000V, 85°C, 85%

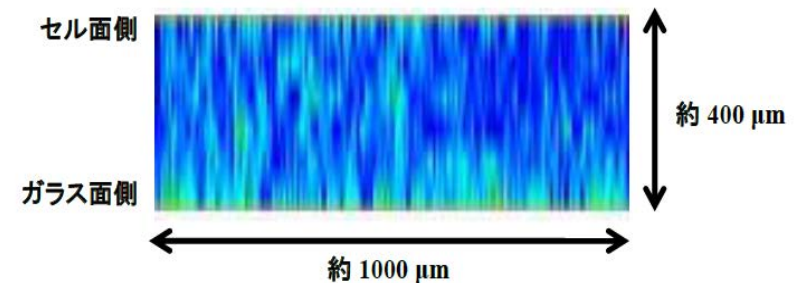


PID試験後のEL画像(例)

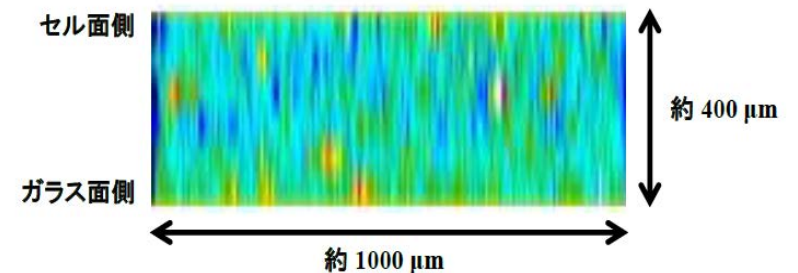
- ・PID試験後にNaが増加
- ・Naは、EVA中に一様には分布をしていない。  
(EL暗部でNa濃度が高い。)



PID試験前



PID試験後: EL明部

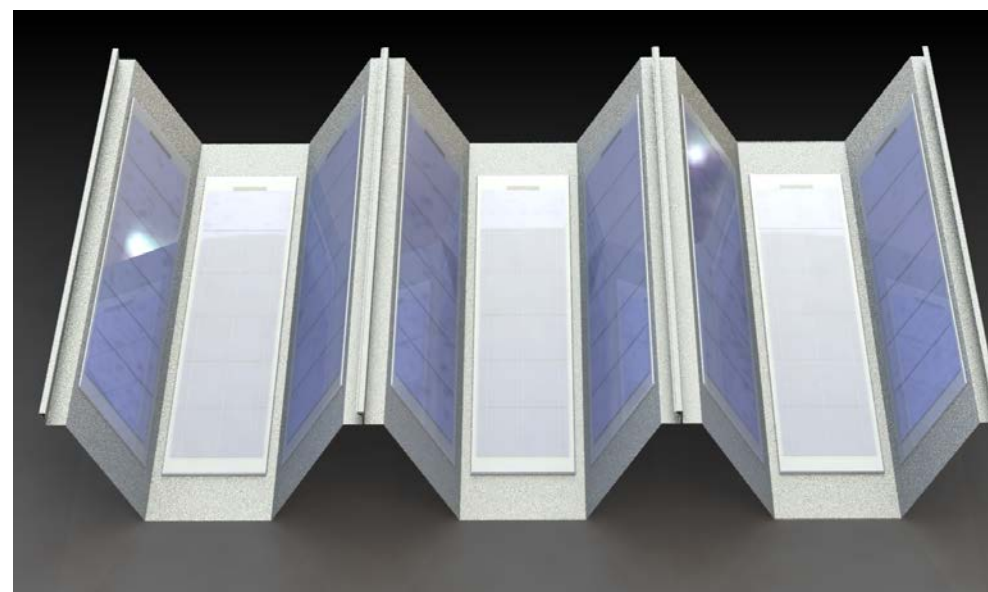
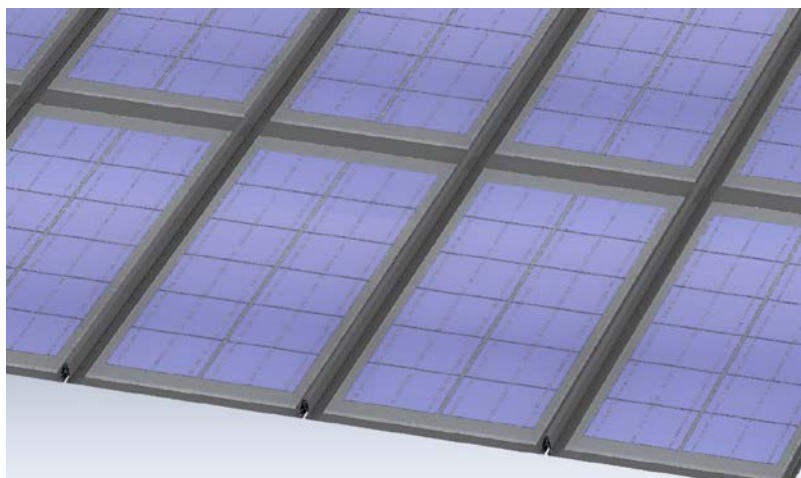
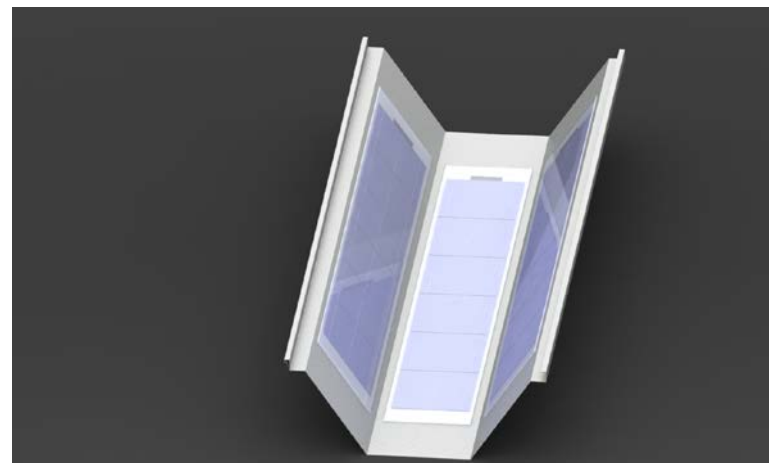
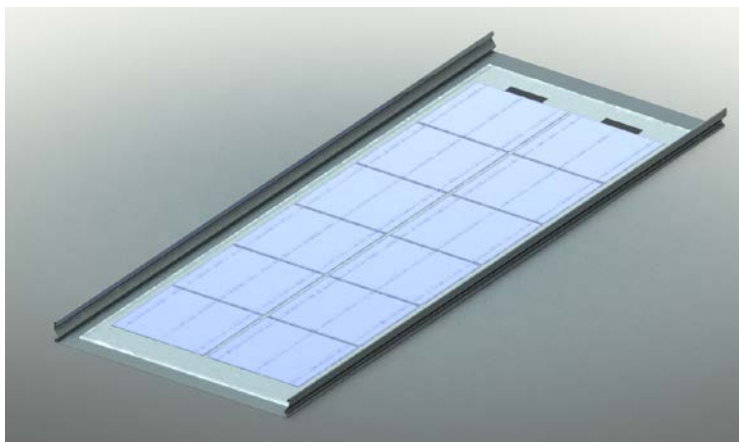


PID試験後: EL暗部

PID試験前後のEVA中のNa濃度マップ  
(LA-ICP-MS)

## 9. 建材一体型モジュールの提案

### ・高信頼性低コスト型屋根材一体型モジュール

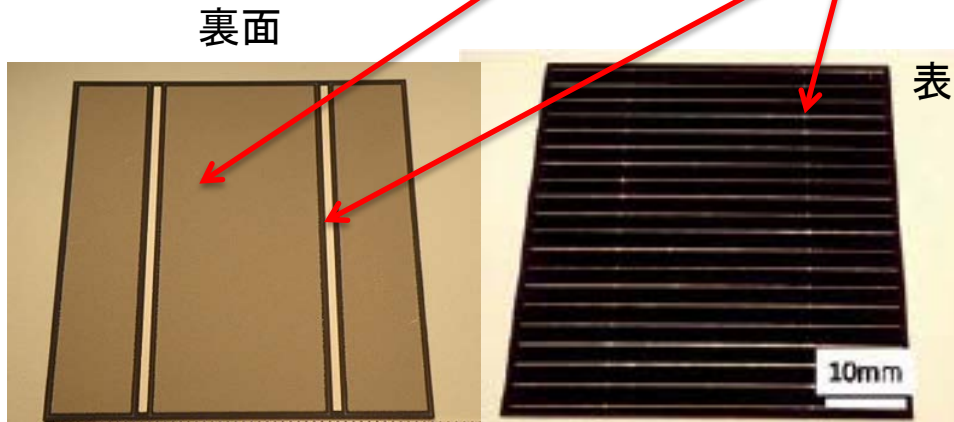
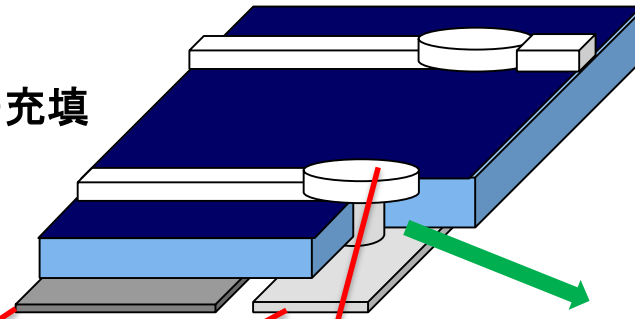


(協力: 信越化学工業(株)、(株)カナメ)

# 10. メタル・ラップ・スルー(MWT)型太陽電池セルの開発

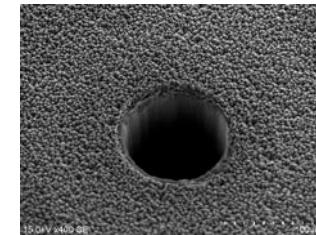
## 福島県ハイテクプラザとの共同研究

- 作製に必要な技術
  - シリコン基板への孔あけ
  - 貫通孔への電極ペーストの充填



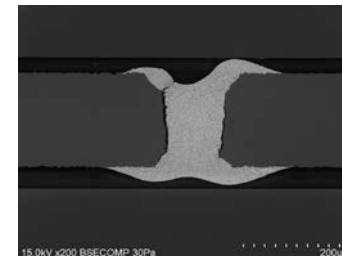
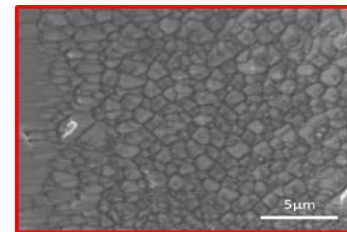
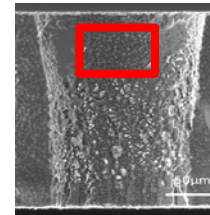
福島県ハイテクプラザ作製のセル

変換効率 16.0%



1. レーザ加工による貫通孔形成  
(東成イービー東北(株))

2. エッチングによるダメージ層除去



3. 貫通孔への電極材料の充填  
(東成イービー東北(株))

本研究は、「ふくしまからはじめよう。産総研福島拠点連携技術開発推進事業」のもとに、東成イービー東北(株)、(株)東北電子、(株)横浜石英、日本大学と共同で行われました。

## 11. 被災地企業のシーズ支援事業

### (株)アサカ理研

分子結合チタニアシリカの開発  
(ガラス上に塗布)



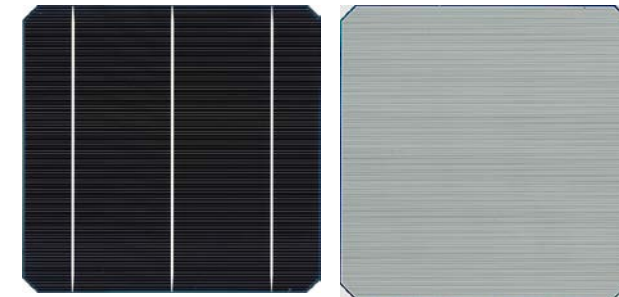
### クミネ工業(株)

天然粘土鉱物(ベントナイト)を用いたバックシート



### AGCエレクトロニクス(株)

電極ペースト用ガラスフリット



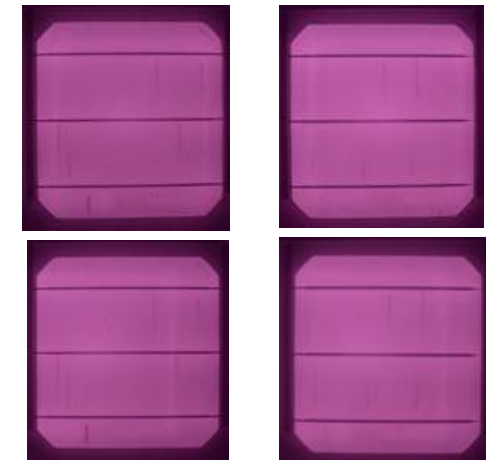
### 日本化成(株)

モジュールの信頼性向上  
(架橋助剤の開発)



### (株)山王

導電性フィルムに混入させる  
Ag めっきアクリル樹脂粒子の開発




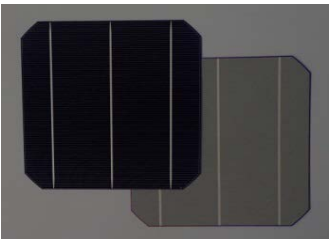
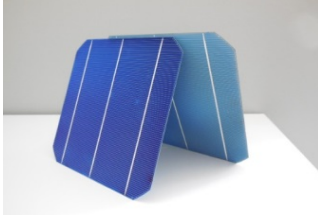

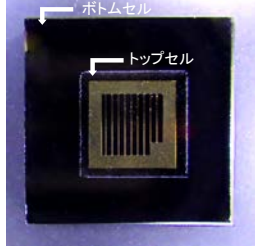
高温高湿試験前(上段)、273時間  
間の試験後(下段)のEL写真。

CF接続

半田接続

## 12. まとめ

### ・セル効率

AI-BSF Pイオン注入で作製	PERC	Bifacial P, Bイオン注入で作製	BC P, Bイオン注入で作製	スマートスタック (InGaP/GaAs//Si)
				
19.4%	20.5%	20.4%	19.8%	25.1%
Jsc 38.0 mA/cm <sup>2</sup> Voc 0.638 V FF 0.800 area 239 cm <sup>2</sup>	Jsc 39.3 mA/cm <sup>2</sup> Voc 0.648 V FF 0.806 area 244.3 cm <sup>2</sup>	Jsc 39.5 mA/cm <sup>2</sup> Voc 0.648 V FF 0.797 area 239 cm <sup>2</sup>	Jsc 41.1 mA/cm <sup>2</sup> Voc 0.634 V FF 0.759 active area 8.28 cm <sup>2</sup>	Jsc 10.51 mA/cm <sup>2</sup> Voc 2.88 V FF 0.830

- LCZ法により、大口径化実験を行い、澆液るつぼ径165 mm $\phi$ に対し、120 mm $\phi$  (口径比 73%) の結晶製造に成功。
  - ダイヤモンドワイヤーの改善(砥粒の分散性の向上)により、強度の高いウェハがスライスできた。
  - B、Pのイオン注入を用いた両面受光セル、バックコンタクトセルの基礎的な作製プロセスを確立。
  - 新しい評価手法の提案(LTEM、内部量子効率マッピング)を行った。
  - モジュールの信頼性試験により、PID特性に対する新しい知見を得るとともに、ダブルガラス構造の優位性を示した。
- 本研究の一部は、NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」において実施されたものです。関係各位に感謝いたします。