

文部科学省  
「革新的エネルギー研究開発拠点形成事業」  
“FUTURE-PV Innovation”

研究課題： ナノワイヤー太陽電池

研究総括

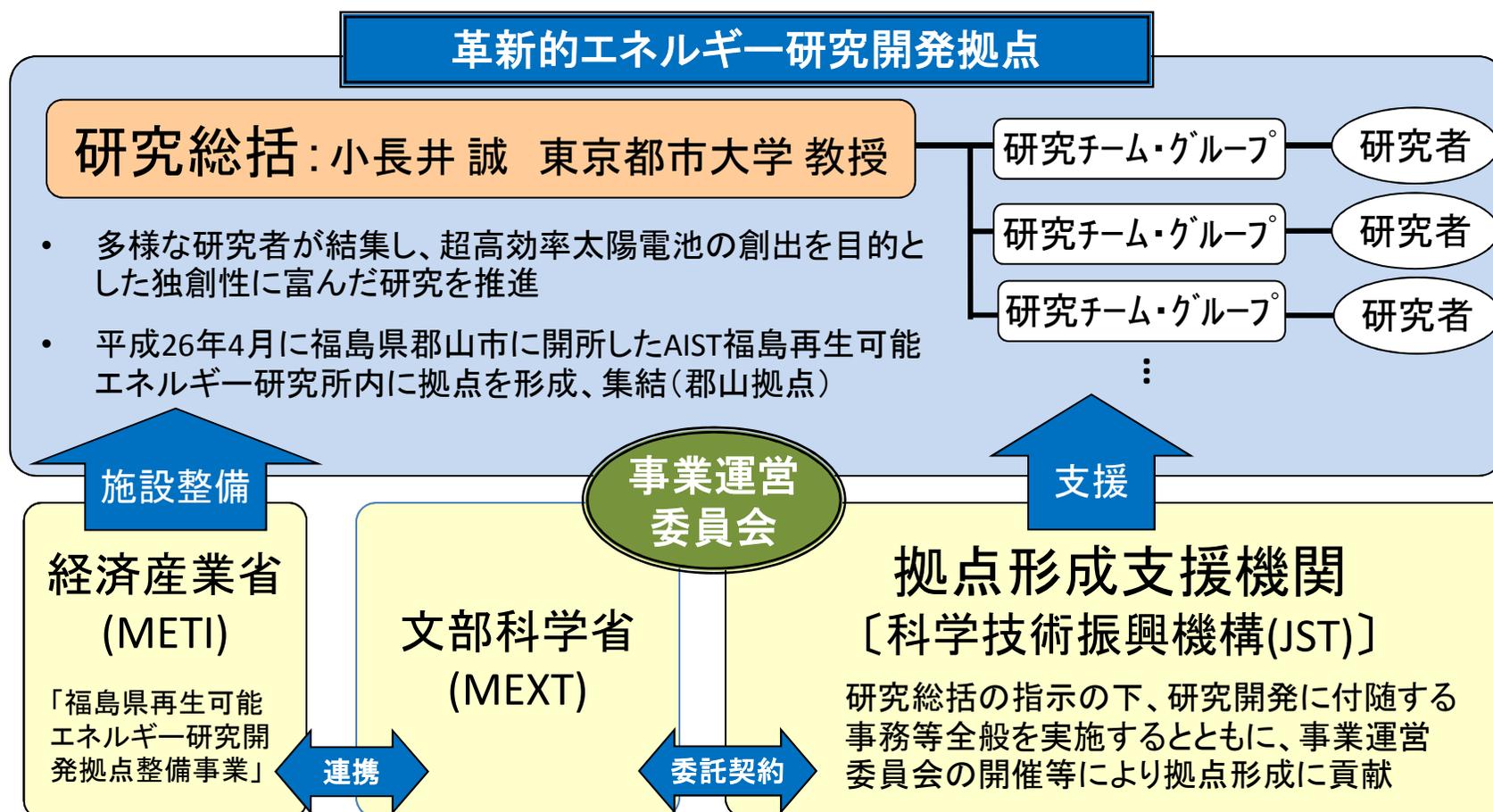
東京都市大学総合研究所・教授 小長井誠

## OUTLINE

1. 事業の概要
2. 研究成果
3. 今後の方向性

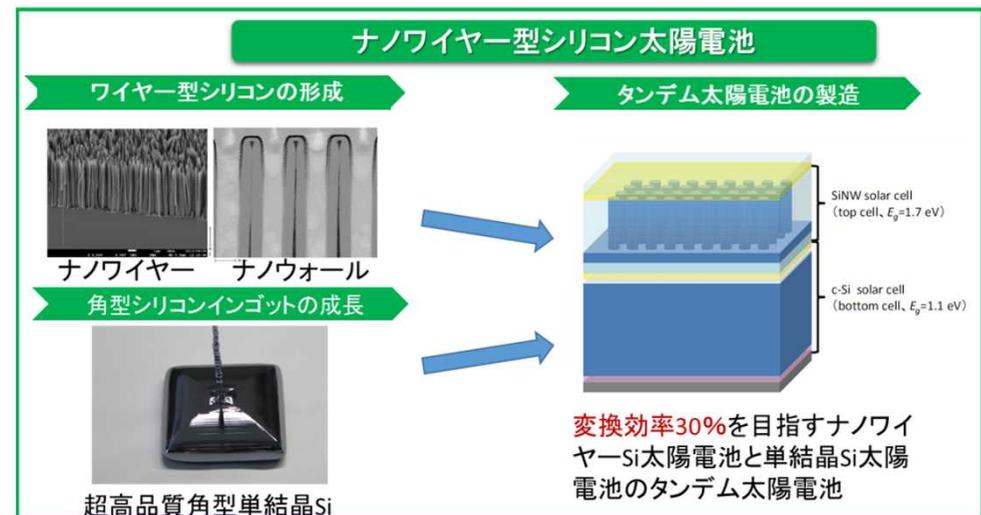
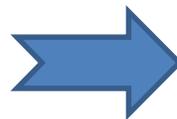
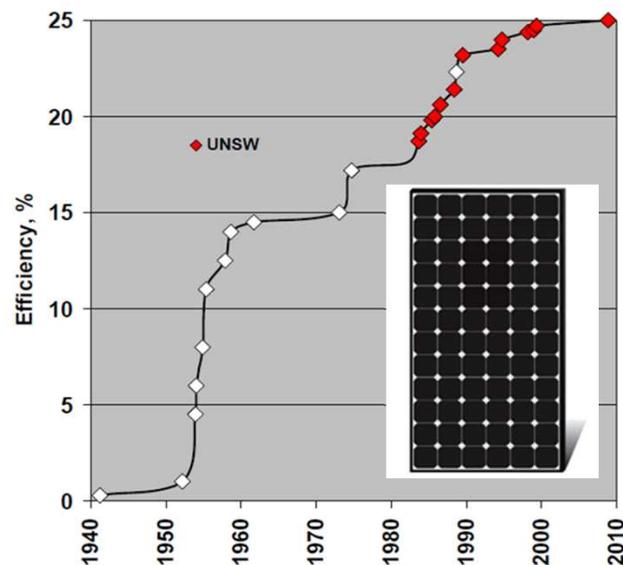
# 事業計画概要

- 実施期間：平成24年度～平成28年度（5カ年度）
- 研究テーマ：ナノワイヤー太陽電池
- 予算：1,185百万円（平成24年度）、1,285百万円（平成25年度）  
1,282百万円（平成26年度）、373百万円（平成27年度）、235百万円（平成28年度）



# FUTURE – PV Innovationの位置づけ

1. 従来型Si太陽電池のエネルギー変換効率は25-26%で飽和傾向
2. Si太陽電池の変換効率の飛躍的向上を目指す革新技術開発
  - ・ナノワイヤーSi太陽電池とヘテロ接合Si太陽電池のタンデム化で**変換効率目標~30%**
  - ・超薄型ワイヤー型Si太陽電池で開放電圧の大幅アップ(**0.75 – 0.80 V**)
3. 量子効果の現れるナノワイヤー(ウォール)は、未踏領域
  - ☀ バルク結晶の超高品質化(キャリアライフタイム10ms以上)
  - ☀ ナノワイヤー(ウォール)の形成プロセス確立・物性評価(新物性の出現)
  - ☀ ナノワイヤーデバイス技術開発と超高効率の実証(従来の概念を覆すブレイクスルー)

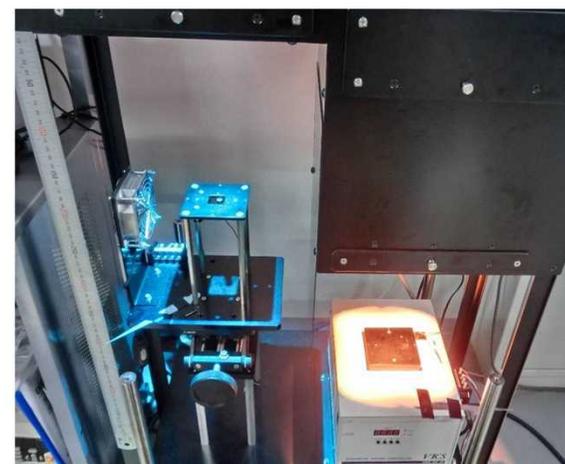
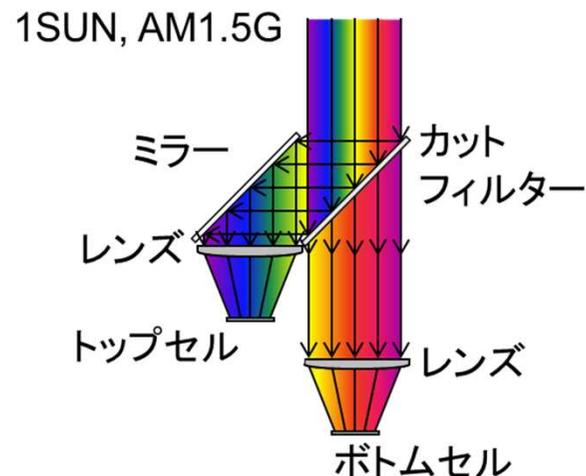
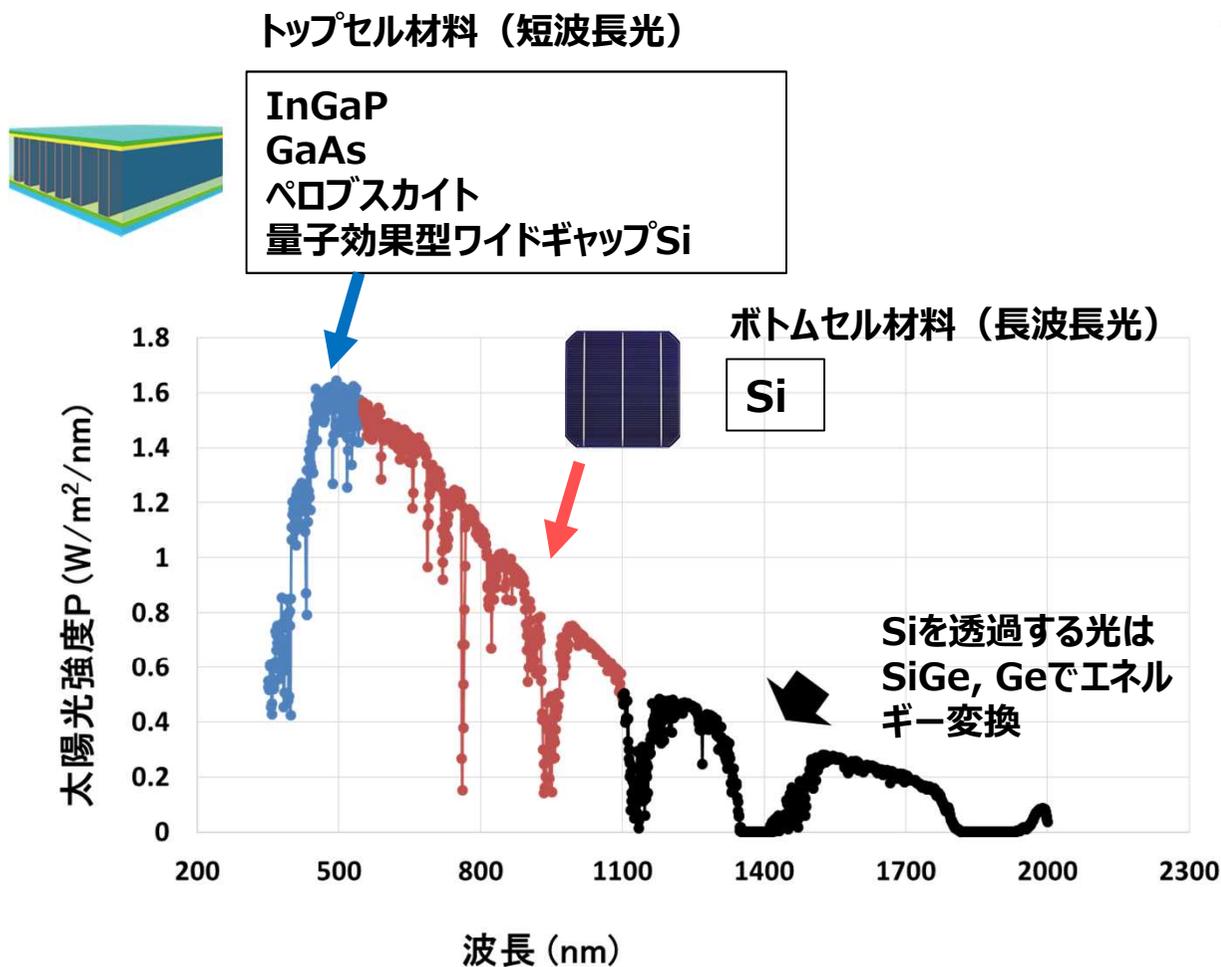


従来型Siシングル接合太陽電池の変換効率推移。変換効率25-26%で飽和傾向。材料物性で決まる理論限界に迫っている。

本研究開発拠点で狙う変換効率30%以上の超高効率タンデム型Si太陽電池。量子効果型ワイドギャップSi太陽電池

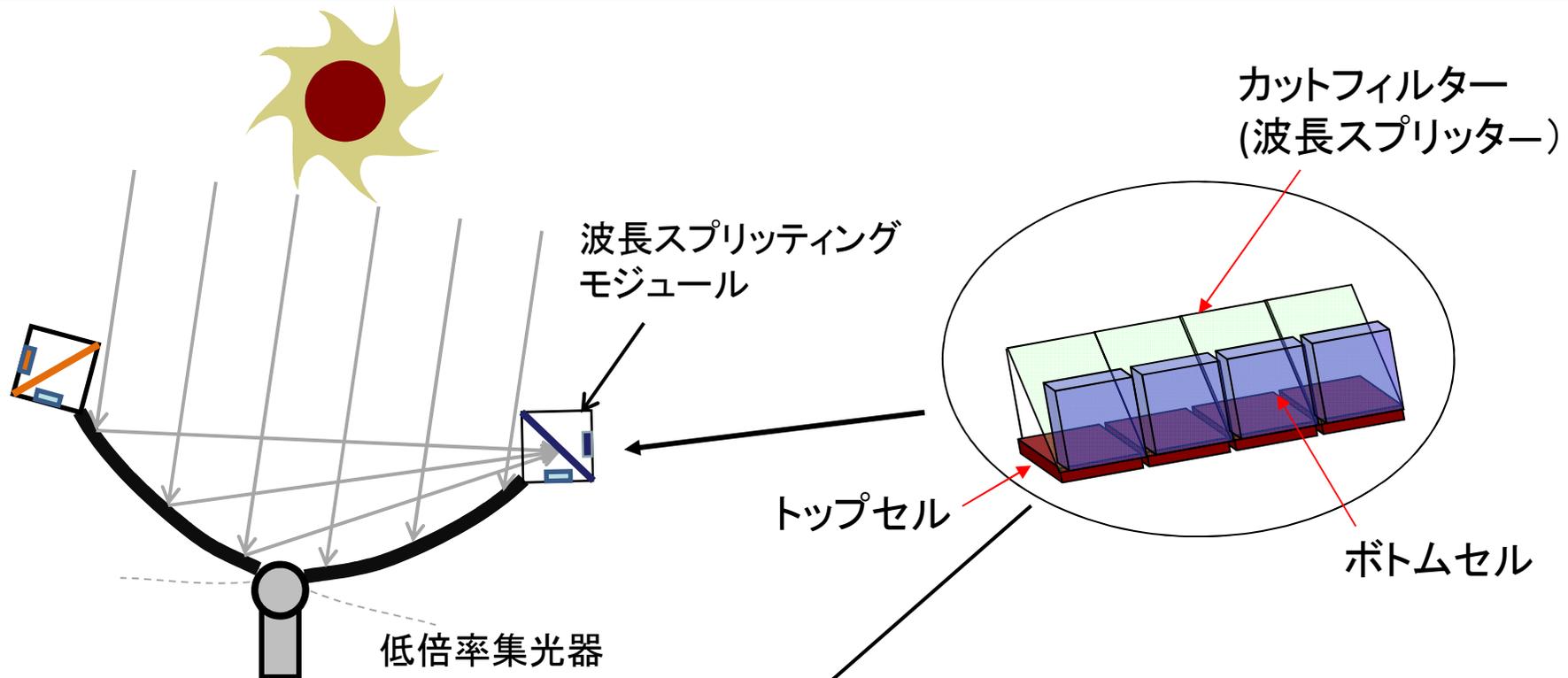
# 低倍率集光・波長スプリッティングシステムの提案

光学的カットフィルターで太陽光を短波長側と長波長側に分け、それぞれトップセル、ボトムセルに照射する。



特性評価のための分光ソーラーシミュレータ

# 低倍率集光・波長スプリッティングPVシステムの構成例



- ・追尾システムの採用によりシステム利用率は20%程度アップ
- ・安価な低倍率集光系による大幅な発電コストの削減

# FUTURE-PV Innovation ー事業の年次推移



	H24年7月～	H25年度	H26年度	H27年度	H28年度
<b>1. 事業全体の推進</b>					
a. 研究組織体制など	研究者(JST)雇用・各研究機関			JST研究者は、全員郡山で研究実施	
b. 設備導入・移設・立上など	各研究機関に設備設置	郡山拠点に設備設置・移設		郡山拠点で立上・本格稼働	
c. 広報・アウトリーチ		・第1回国際シンポ ・第1回郡山理科教室	・第2回国際シンポ ・第2回郡山理科教室	・第3回郡山理科教室 ・第4回郡山理科教室	
				<b>研究成果のアピール 新技術説明会、産業フェアなど</b>	
<b>2. チーム1 超高品質Si結晶技術</b>	・京都大学にて研究実施 ・既設設備で準備研究実施			・郡山拠点に設置した大型結晶成長炉で本格稼働 ・50cmルツボへ移行 ・AISTのモジュールラインでの評価・実証	
<b>3. チーム2 ナノワイヤー形成プロセス・物性評価</b>	・東工大、東北大、NAISTにて実施 ・大型設備は、各研究機関に設置し、その後、郡山に移設、H25年度大型設備は、郡山に直接設置。			・郡山拠点(一部は東工大、名大)で実施。 ・設備の立ち上げ、本格稼働 ・ナノワイヤー作製技術の絞り込み ・デバイス化	
<b>4. チーム3 ナノワイヤー太陽電池</b>	・東工大にて実施 ・SiO <sub>2</sub> /Siヘテロ接合太陽電池で変換効率19%の達成 ・ナノ構造、マイクロ構造太陽電池試作の要素技術開発			・郡山拠点、ならびに一部は都市大、東工大で実施。 ・設備の立ち上げ、本格稼働 ・量子効果の検証 ・デバイス化に向けた要素技術研究	
				・波長スプリットング構造で変換効率30%の実証を目指す	
<b>5. 技術支援チーム</b>		・備品管理 ・移設作業		・各チームへの研究活動・技術支援 ・安全・安心、廃液処理など支援業務	

最終目標の達成



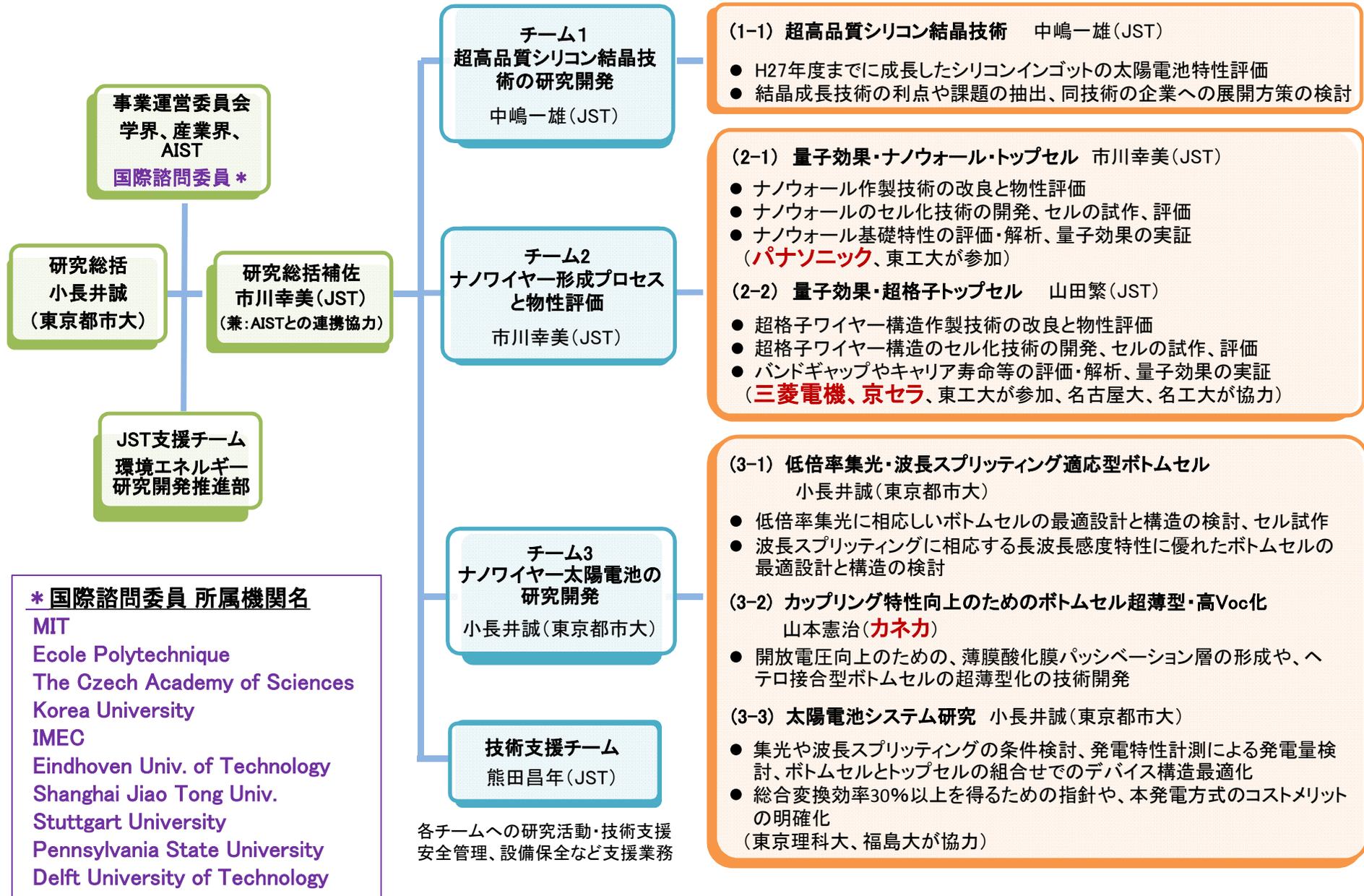
# H27年度までの研究課題



## H28年度（最終年度）は、量子効果型Si太陽電池の実現にfocus

- チーム1 超高品質シリコン結晶技術の研究開発（評価が中心）
- チーム2 ナノワイヤー形成プロセスと物性評価（量子効果の実証）
  - ・量子効果・ナノウォール・トップセル
  - ・量子効果・超格子トップセル
- チーム3 ナノワイヤー太陽電池の研究開発（波長スプリッティング法の有効性）

# FUTURE-PV Innovation ー実施体制（平成28年度）



# 平成28年度末までに どのようにして変換効率30%を実証するのか

1. 波長スプリッティング法を採用する。
2. 1 sunでの変換効率をいっそう向上させ、また発電コストを下げるため、5倍から50倍程度の低倍率集光を行う。
3. 平成28年度末までの変換効率目標は下記のとおり。
  - 1 sun(集光なし)の状態、変換効率 28%  
トップセルの変換効率 8-9% (波長スプリッター・短波長)  
ボトムセルの変換効率 20-19% (波長スプリッター・長波長)  
合計変換効率 28%

---

- 1sun で変換効率 28% が達成できれば、5倍から50倍の低倍率集光により変換効率 30%の達成は可能。

## 今後の方針

ナノウォール・超格子ワイヤーでの量子効果・ワイドギャップ化の検証を確実に行うとともに、デバイス化に向けたプロセス開発、ナノサイズのワイヤー・ウォール内での電子輸送特性の把握に集中する。太陽電池特性の初期特性を得る。

# NOC法による大口径単結晶インゴットの試作に成功

## AISTのモジュール化ラインでセル試作開始

従来のCZ法では、インゴット径はルツボ径の30%  
NOC法では80-90%まで大幅に向上

50cm径のルツボで35-45cm径  
の単結晶インゴットの成長に成功



40cm径のルツボで32cm径の単結晶インゴットの成長に成功

- ・ 6インチセルで変換効率19.6%を実証  
(試作ラインでの最高性能に迫る値)

(a)



Crucible diameter: 40 cm,  
Maximum diameter: 32.2 cm,  
Diameter ratio : 0.80  
Mass: 8050 g,  
 $\Delta T$ : 53.5 K

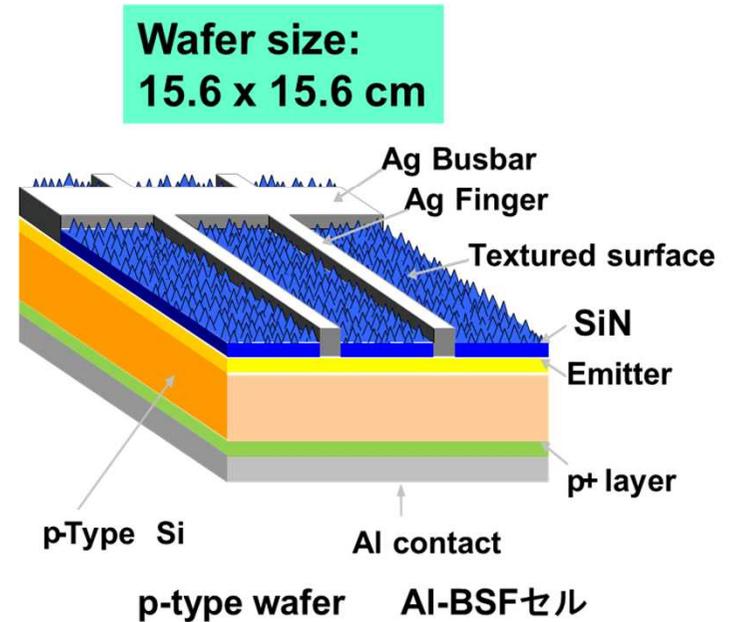
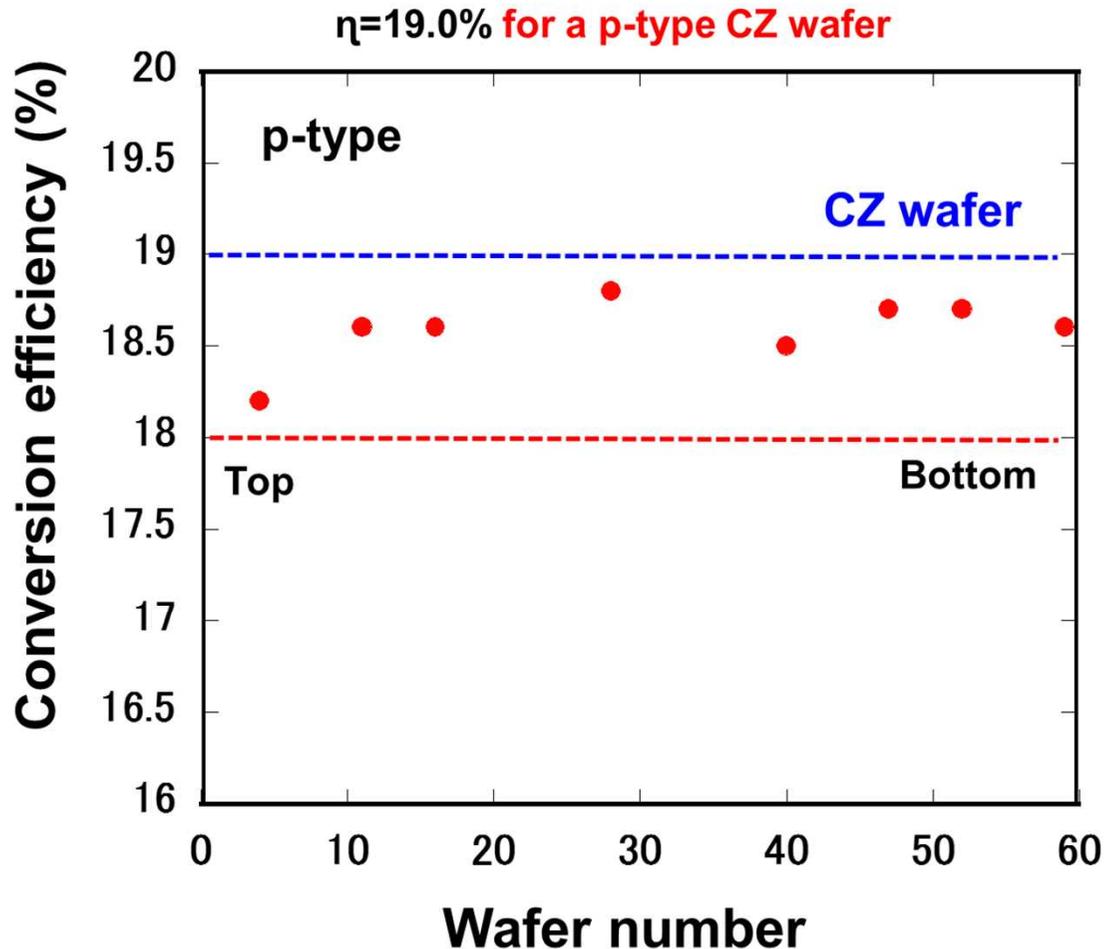
(b)



・無転位化が残された課題

# AISTのモジュール化ラインでの評価

## FUTURE事業とAIST事業の連携

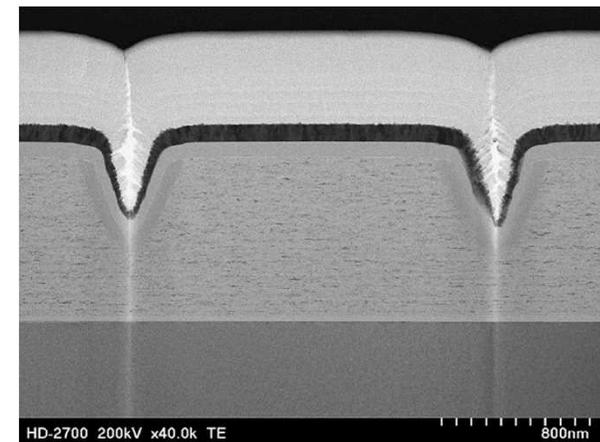
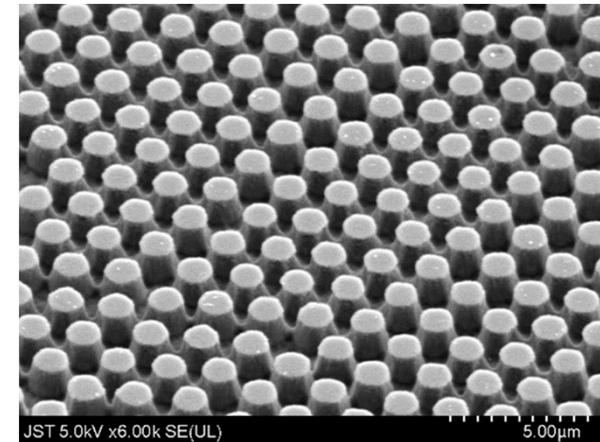
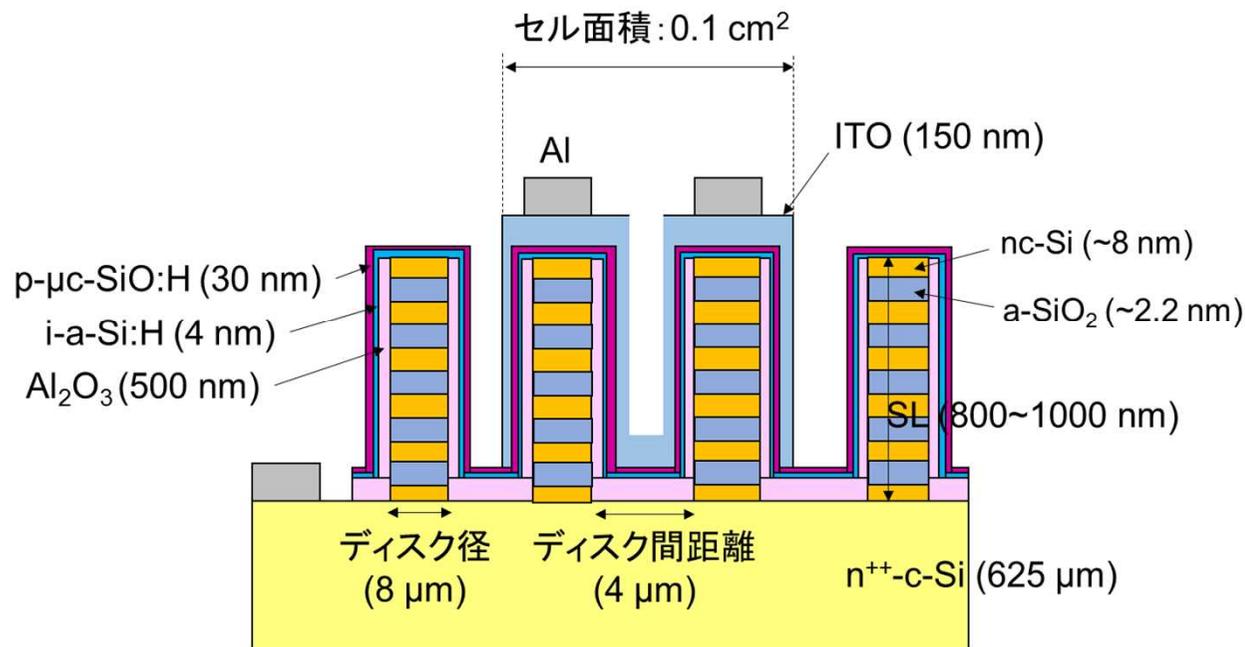


$\eta=18.2 - 18.8 \%$   
Scattering width: 0.6 %

☀️ AISTのほか、米国・MITのグループやフランス・INESに評価依頼

# 超格子ワイヤー太陽電池構造

量子効果は実証済。開放電圧640mVの初期特性観測。



# 数ナノサイズのウォール作製技術の新規開発に成功

## 1. 形の整ったナノサイズのウォール作製技術の新規開発に成功

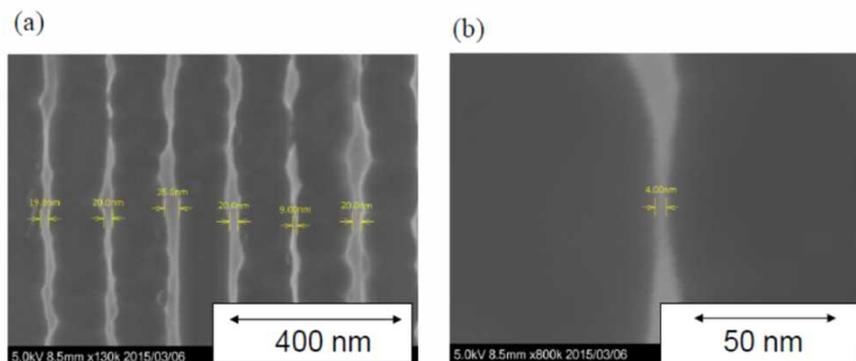
・これまでの各チーム・グループの成果を融合

## 2. これにより、量子効果が期待できる領域まで細線化が可能となり、現在、量子効果によるSiのワイドギャップ化を検証中

・状態密度

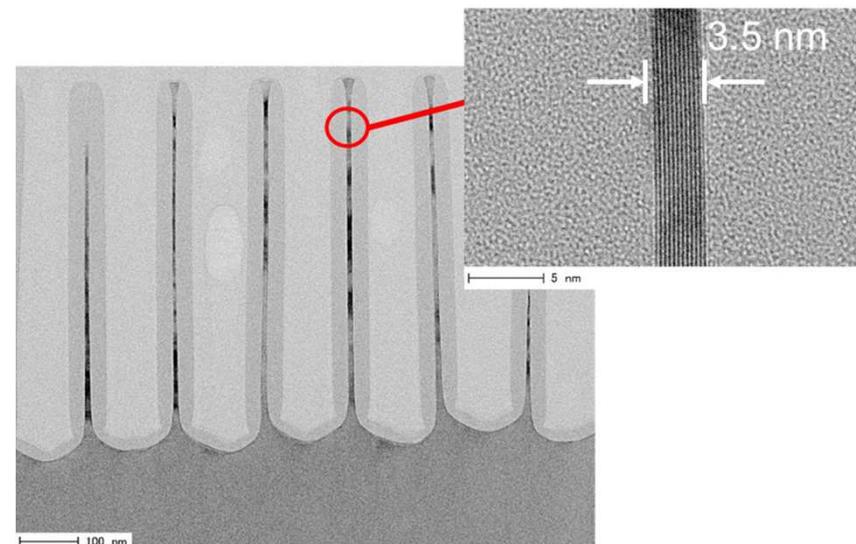
・フォトルミネッセンス： 室温で1.7eVのフォトルミネッセンスを観測

1nm-5nmの幅のウォールの作製に成功！



ナノインプリント + Ag触媒エッチング

表面形状

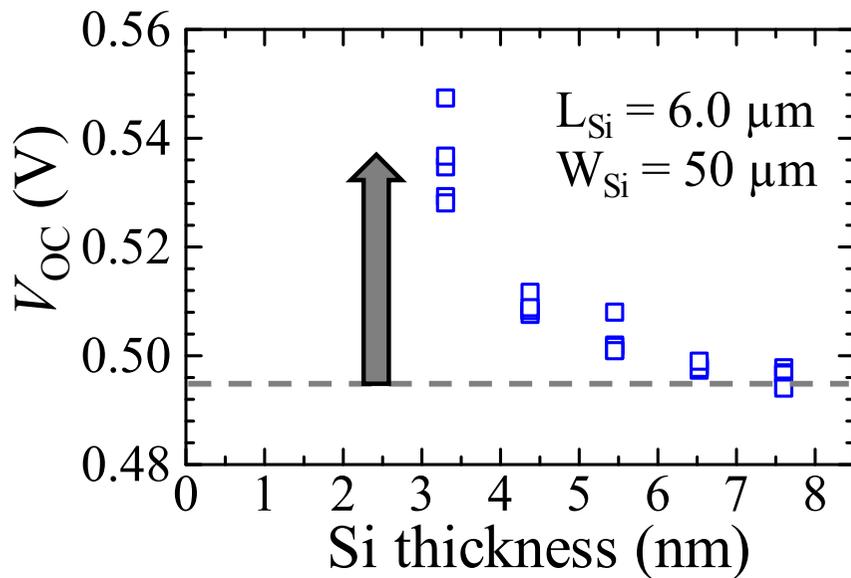
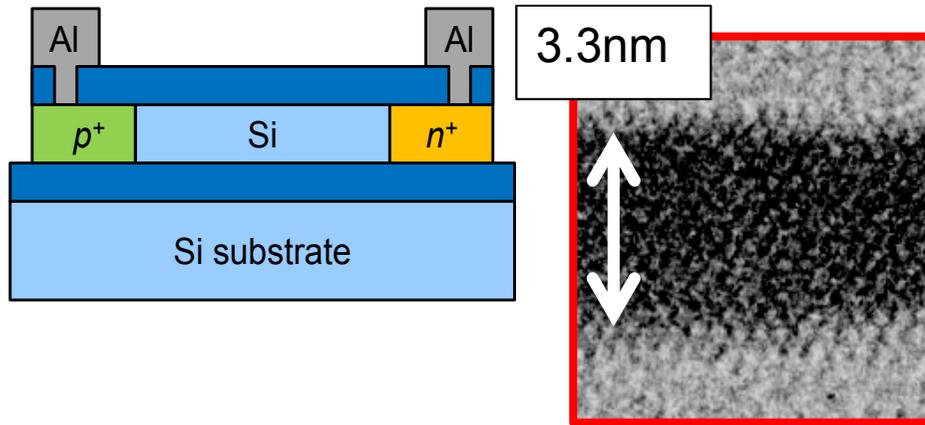


ナノインプリント + 異方性エッチング

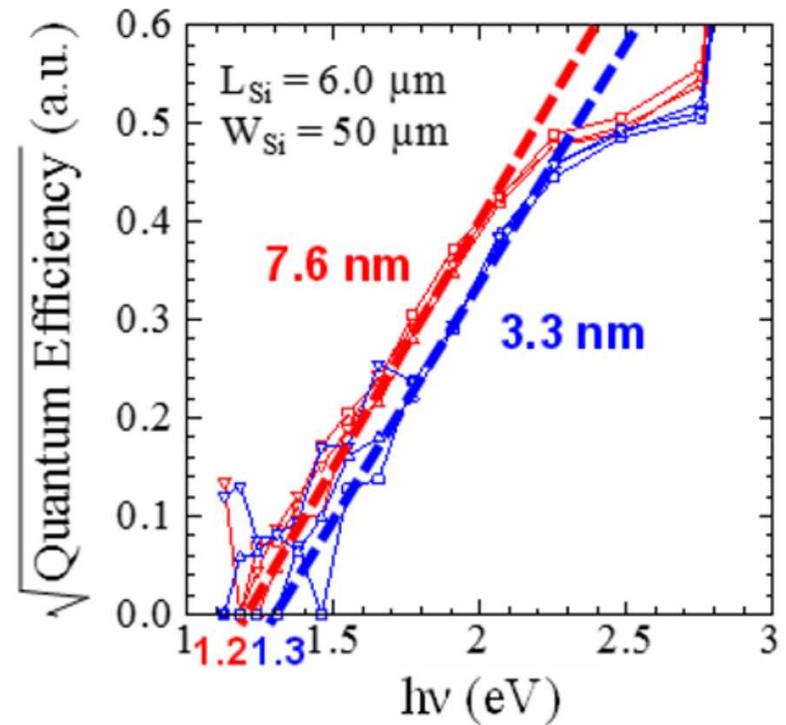
断面形状

# 横型ナノウォール太陽電池

幅7nm以下の膜厚で開放電圧の増大を確認、量子効果が



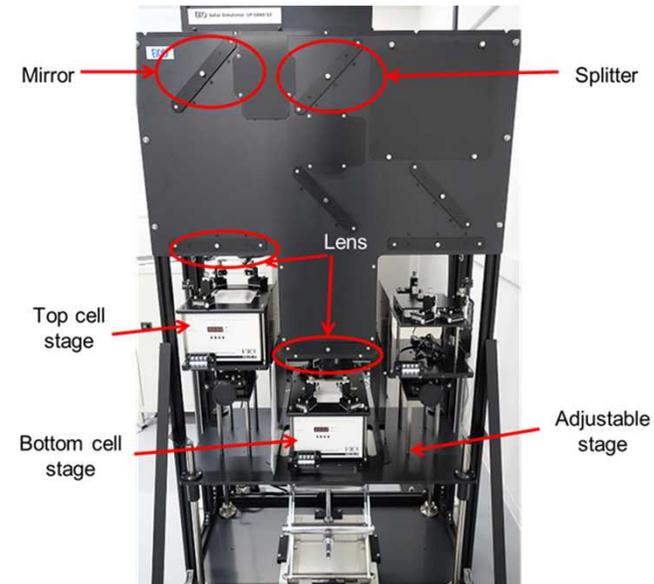
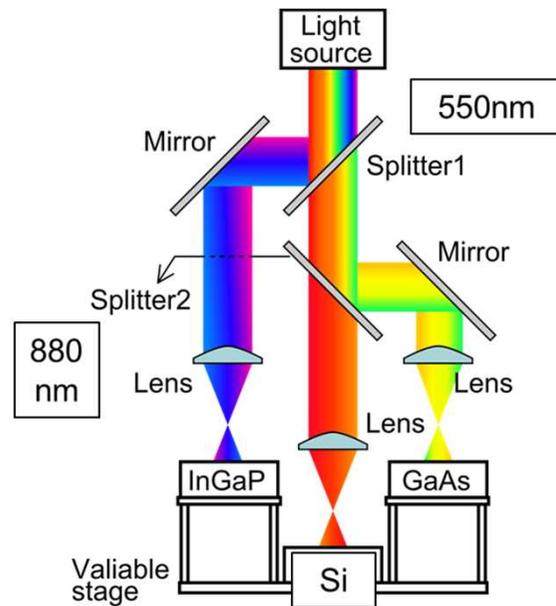
薄膜化で開放電圧が増大



薄膜化で基礎吸収端(禁制帯幅)が短波長側にシフト

# 波長スプリッティング太陽電池の特性

構造	集光倍率	変換効率 (%)
a-Si:H // c-Si	1 sun	25.1
InGaP // c-Si	1 sun	29.5
InGaP // GaAs // c-Si	1 sun	32.3
InGaP // GaAs // c-Si	10 suns	35.3



# 波長スプリットング太陽電池の屋外発電特性



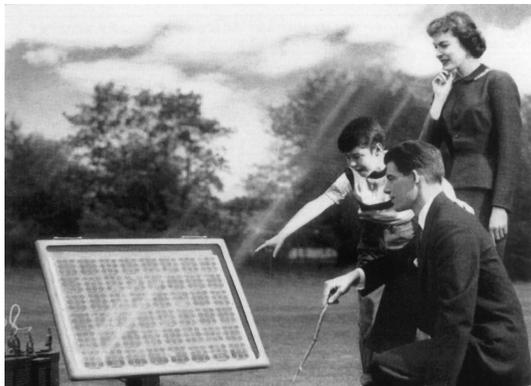
- ☀️ 一軸追尾、二軸追尾によるシステム利用率の向上
- ☀️ 低倍率集光系における散乱光の寄与(特にトップセル)
- ☀️ 年間発電量予測

# 代表的な研究成果とH28年度の課題・目標

テーマ	研究成果	H28年度の課題と達成目標
超高品質シリコン結晶技術（NOC法）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・50cmのルツボ径で45cm径の単結晶Siインゴットを成長</li> <li>・キャリアライフタイム 3ms</li> <li>・<b>6インチSiセルで<math>\eta=17.9-19.6\%</math></b> (平均18.9%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・無転位化が残された課題</li> <li>・国内外の研究機関によるセル化、NOC法の特徴の明確化</li> <li>・実用化に向けた活動</li> </ul>
超格子ワイヤー太陽電池（トップセル）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SiO/Si超格子構造の作製技術、セル化プロセス開発</li> <li>・試作セルでワイドギャップ化に伴う高い<b>開放電圧Voc=0.64V</b>を観測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超格子ワイヤー太陽電池でSi以上の高い開放電圧を実証</li> <li>・水素パッシベーション技術開発、ワイヤー形状の最適化、セル化プロセスの最適化</li> </ul>
ナノウォール太陽電池（トップセル）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ナノインプリントと異方性エッチングの併用により、<b>幅1-4nmのナノウォール</b>の作製技術を開発</li> <li>・フォトルミネッセンス、状態密度測定などによる<b>量子効果の検証</b></li> <li>・横型ナノウォール太陽電池で禁制帯幅の<b>ワイドギャップ化(1.3eV)</b>を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ナノウォールにおける量子効果の検証（継続）</li> <li>・ナノウォール太陽電池のセル化プロセス開発</li> <li>・太陽電池特性からワイドギャップ化を検証</li> <li>・トップセルとしての課題の抽出</li> </ul>
Siボトムセル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低倍率集光型セルで<b>Voc=0.77V</b></li> <li>・厚さが50ミクロンのSiセルでVoc=0.74V</li> <li>・ナノワイヤー/ナノウォールに対応したパッシベーション技術、接合形成技術、電極形成技術開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低倍率集光下で開放電圧Voc=0.8V, 変換効率25%以上</li> </ul>
低倍率集光波長スプリッティング太陽電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>・InGaP//c-Siで<math>\eta=29.5\%</math>(1sun)</li> <li>・InGaP//GaAs//c-Siで<b><math>\eta=35.3\%</math>(10suns)</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超格子ワイヤー/ナノウォールトップセルを用いた場合の変換効率予測、課題の抽出</li> <li>・システム利用率アップの実証と年間発電量予測、発電コスト試算</li> </ul>

# 今後の方向性

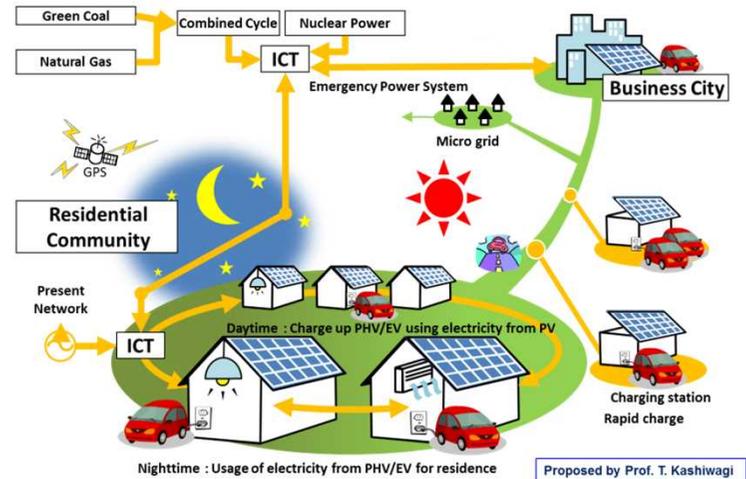
## 1. 太陽電池技術の過去、現在、未来



Si solar cell:  
Invented in 1954



present



Smart Community

1954

変換効率  $\eta = 5-6\%$

2014

$\eta = 20\%$

180GW

(世界の積算導入量)

Si  
CdTe,  
Cu(InGa)Se<sub>2</sub>,  
a-Si/ $\mu$ c-Si  
III-V

2050

$\eta = 40\%$

4500GW

(世界の積算導入量)

Si  
CdTe,  
Cu(InGa)Se<sub>2</sub>,  
a-Si/ $\mu$ c-Si  
III-V  
Dye, organic ?  
Perovskite ?

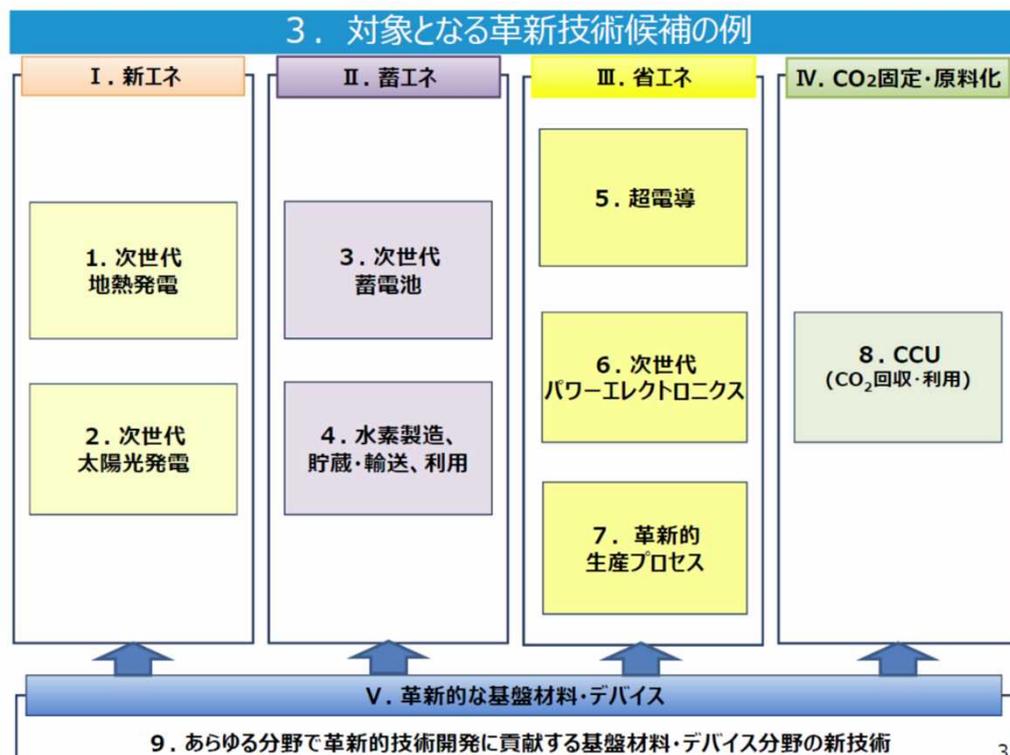
# 今後の方向性

## 2. 量子効果型ならびにペロブスカイト

### CO<sub>2</sub>削減に向けた太陽光発電の位置づけ

- ・ 2050年頃という長期的視野に立って、世界全体で温室効果ガスの抜本的な排出削減を実現するためには、多様な再生可能エネルギー源開発が必要。
- ・ 太陽光発電のCO<sub>2</sub>削減効果は、0.29kg-CO<sub>2</sub>/kWh。100GW導入した場合、日本のCO<sub>2</sub>削減量3%に対応。

太陽光発電100GWの導入は、日本の年間電力総需要の10%に相当。



総合科学技術・イノベーション会議  
平成28年4月19日  
「エネルギー・環境イノベーション戦略について」答申

・次世代太陽光発電については

「量子ドット、ペロブスカイト等の新構造・新材料を利用した次世代太陽電池を開発する」

と明記されている。

# 今後の方向性

## 3. 具体的なテーマ案

- わが国の技術力を取り戻し産業競争力を強化するため、革新性が高くすぐに真似されない技術を開発。
- わが国で最初に見出されたペロブスカイト太陽電池の研究を拠点に集約化し、国際競争力アップ、実用化に向けての基礎研究加速。
- 加えて、当面、太陽電池材料はシリコンが主流になることから、シリコンベース太陽電池の超高効率化を目指す（NEDOでは、まだ未実施の革新技術）。
- 未だ研究開発が行われていないが、産業界が真に必要としている革新技術

具体的には、

- (1) ペロブスカイト太陽電池の鉛フリーによる環境フレンドリー化や、高信頼化・長寿命化の基礎研究、変換効率を極限まで向上させる研究
- (2) すぐに真似できない革新技術としての超高効率・量子効果型シリコン太陽電池
- (3) 製造に要するエネルギーの少ない超薄型・高効率シリコン太陽電池、シリコンベース・タンデム太陽電池、世界展開のためのグローバル実環境適応型太陽電池の研究開発など