

研究分野紹介

化合物薄膜太陽電池

太陽光発電工学研究センター
先端産業プロセス・高効率化チーム

柴田 肇

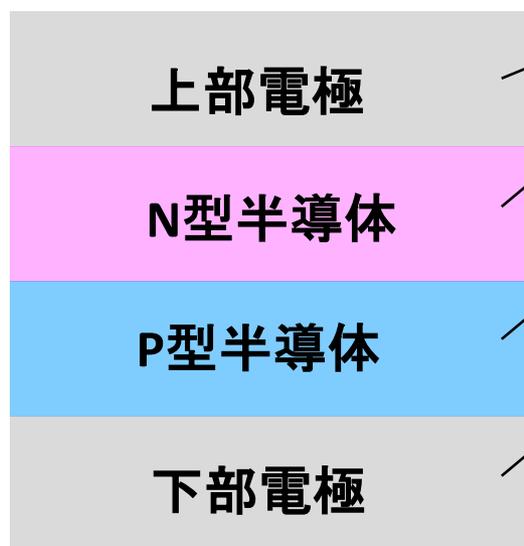
化合物薄膜太陽電池とは何か？

ガラス基板の上に(下に)、半導体薄膜を蒸着して作る太陽電池

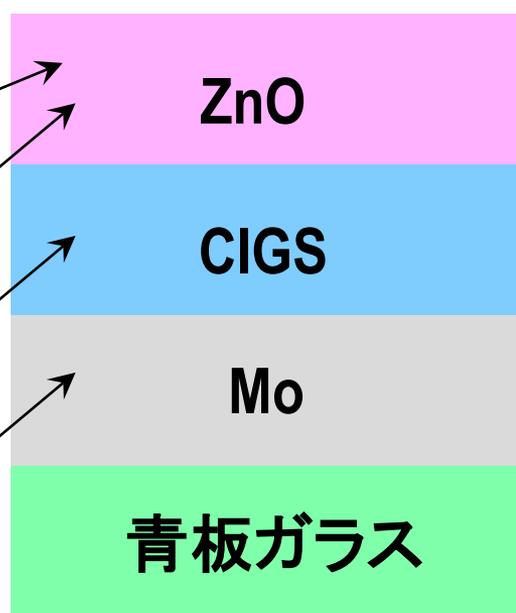
例: CdTe, CIGS, CZTS, etc.



薄膜太陽電池の基本構造



太陽電池の基本構造

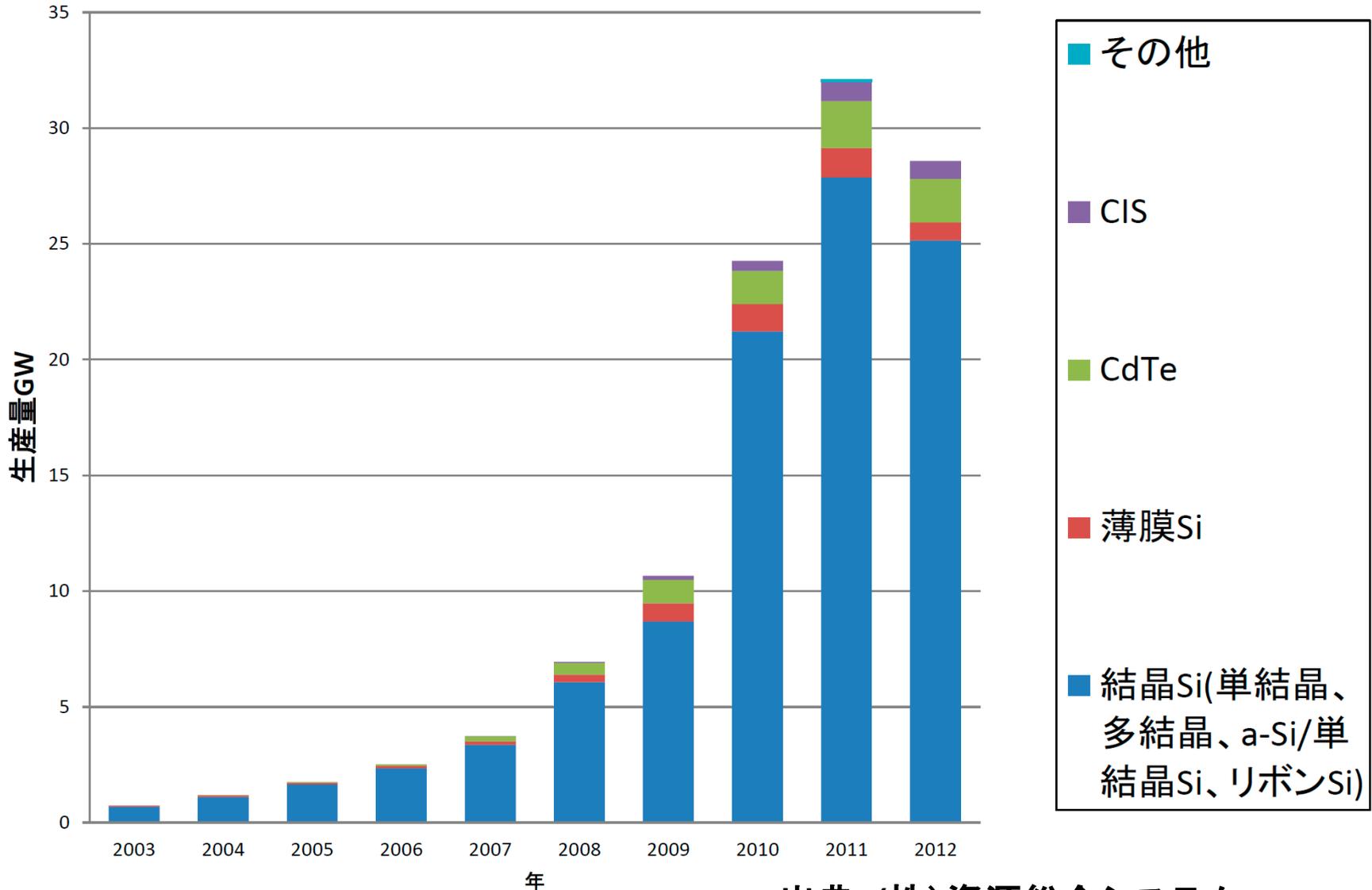


CIGS 太陽電池の例

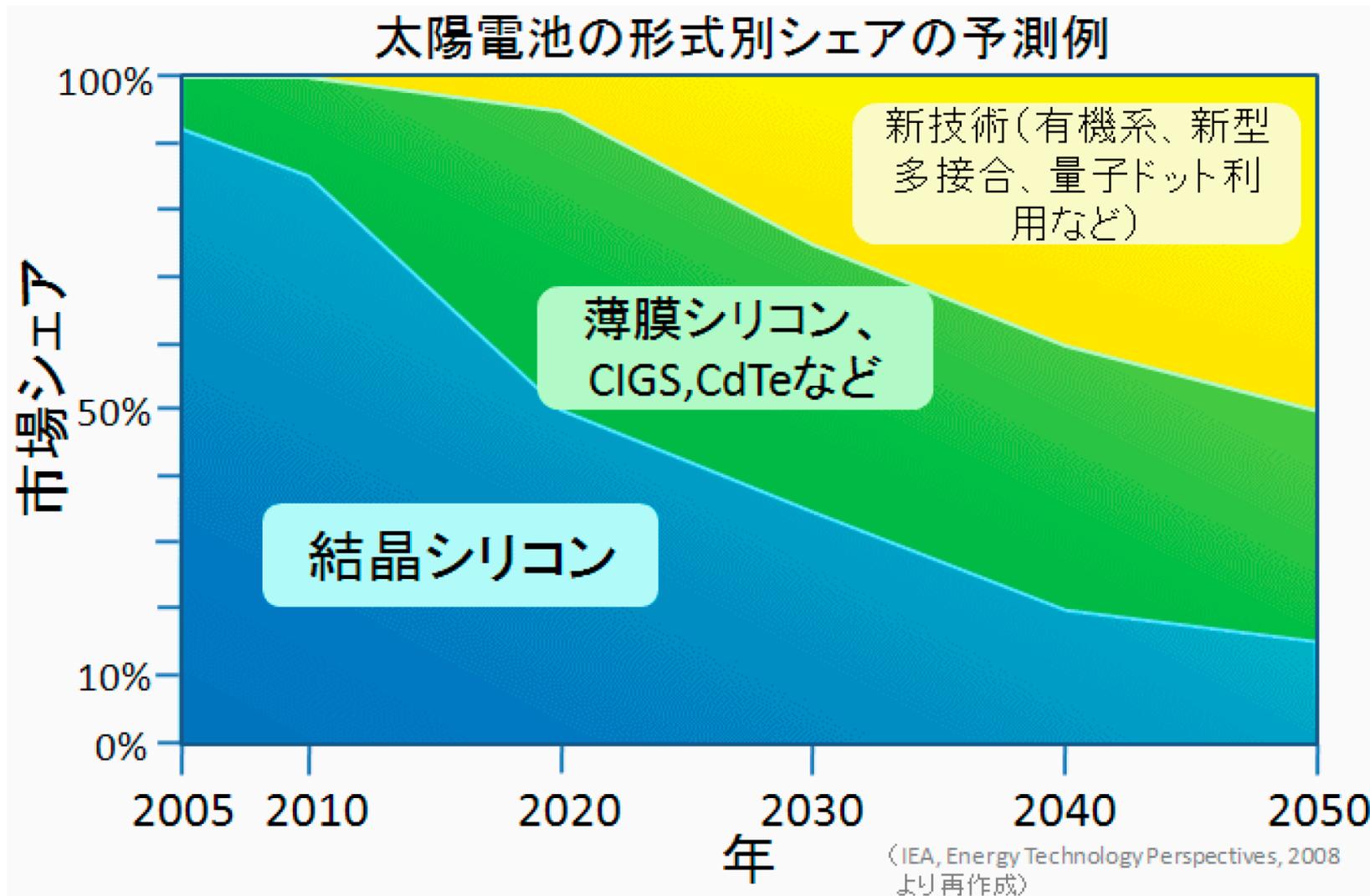
これらの層が薄膜で形成されている。

全体の膜厚はおよそ 5 μm .

世界における種類別太陽電池生産量



出典:(株)資源総合システム



図の出典: http://unit.aist.go.jp/rcpvt/ci/about_pv/types/groups.html
産業技術総合研究所・太陽光発電工学研究センターHP

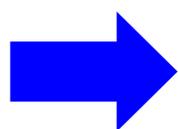
なぜ化合物薄膜太陽電池が必要か？

1. 低コスト化が容易である (CdTeが典型例)

出典：<http://pvinsights.com/>

| 種類 | モジュール変換効率(%) | 1 Wあたりの販売価(\$/W) |
|-------|--------------|------------------|
| 単結晶Si | 15 - 20 | 0.55 - 0.94 |
| 多結晶Si | 13 - 16 | |
| CdTe | 9 - 12 | 0.49 - 0.90 |
| CIGS | 13 - 14 | |

低コスト化が容易な理由 { ① 原料の使用量が少ない
② 大面積の大量生産が容易



将来的に結晶シリコン系とシェアを分け合う存在となり得る。

2. 化合物材料の研究それ自身に大きな意義がある

化合物の材料探索範囲は無限にある。

⇒現在より更に優れた化合物を開発できる余地が大きい

理想の太陽電池用半導体材料の条件

- ① エネルギー禁制帯幅: 1.4 - 1.5 eV
- ② 高い光吸収係数
- ③ 高いP/N制御性
- ④ 大きなキャリア拡散長(⇐ 高い移動度、長いキャリア寿命)
- ⑤ 低コストプロセスへの適用性が高い
- ⑥ 希少金属を使わない
- ⑦ 環境負荷が小さい

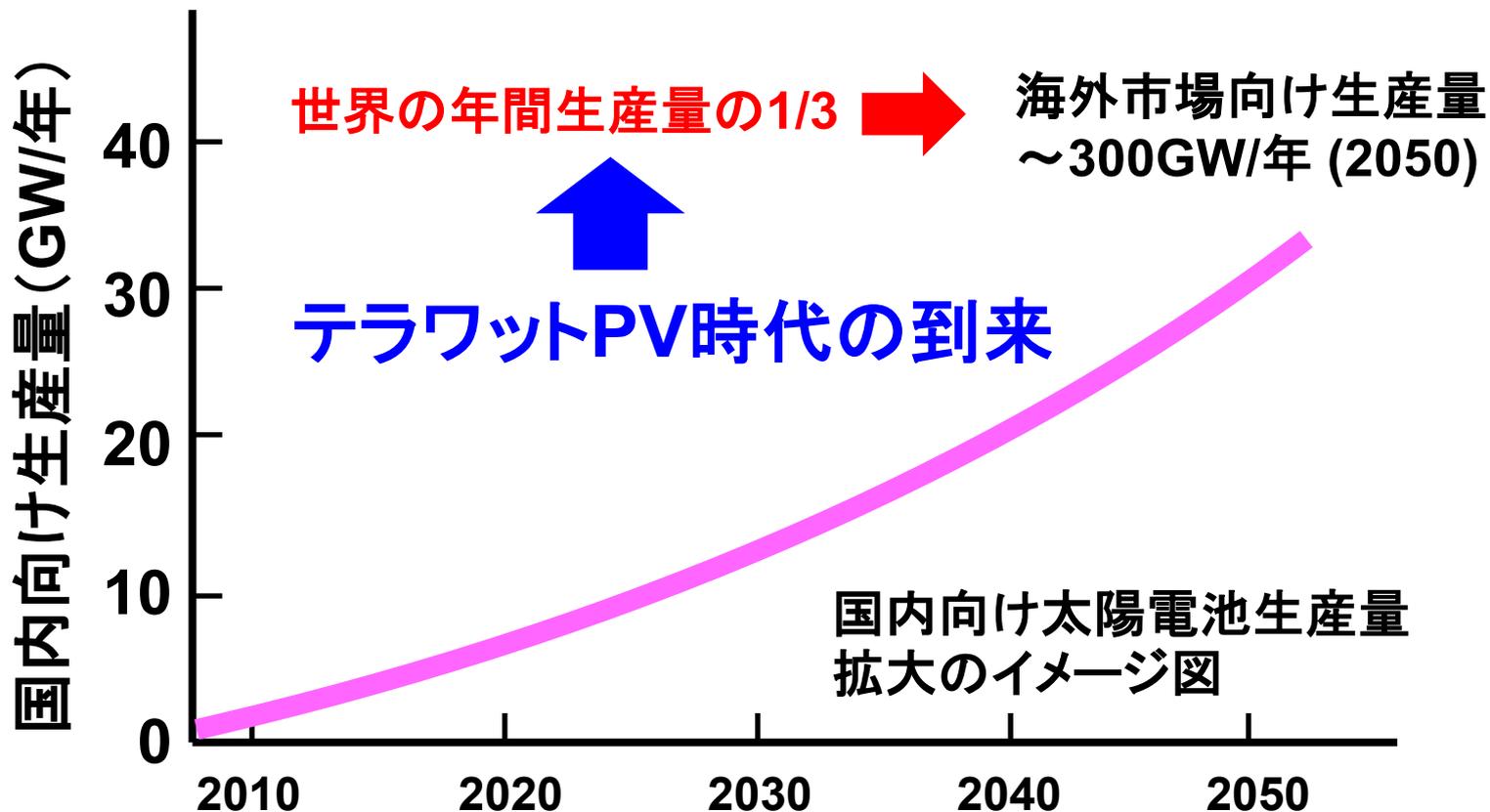
高い変換効率

CdTeの物性は、上記①～⑤において、ほぼ完璧

⇒夢の新材料を探し求める研究は意義がある

3. 供給量の上限が大きい

年産テラワット時代には、結晶シリコン太陽電池のみでは供給不足になる可能性がある



図の出典: 太陽光発電ロードマップ(PV2030+) NEDO

太陽電池用半導体材料の性能比較

| | Si | GaAs | CdTe | CIGS | CZTS |
|---------------|----|------|------|------|------|
| エネルギー禁制帯幅 | △ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 高い光吸収係数 | × | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 高いP/N制御性 | ○ | ○ | △ | △ | △ |
| 大きなキャリア拡散長 | ○ | ○ | ○ | ○ | △ |
| 低コストプロセスへの適用性 | × | × | ○ | ○ | ○ |
| 希少金属を使わない | ○ | × | × | △ | ○ |
| 環境負荷が小さい | ○ | × | × | ○ | ○ |

△の課題は技術開発で克服可能 ⇒ 産総研の研究ミッション
CIGSとCZTSに対する期待は非常に高い

各種太陽電池の性能比較

| | 変換効率 | 製造コスト | 耐久性 | 将来性 |
|---------|------|-------|------|-------|
| 単結晶シリコン | ★★★★ | ★★ | ★★★★ | 成熟に近い |
| 多結晶シリコン | ★★★★ | ★★ | ★★★★ | 成熟に近い |
| 薄膜シリコン | ★★ | ★★★★ | ★★★ | 課題がある |
| 化合物薄膜 | ★★★ | ★★★★ | ★★★★ | 非常に有望 |
| 有機系 | ★ | ★★★★ | ★ | 課題がある |

各種化合物薄膜太陽電池の性能比較

| | CdTe | CIGS | CZTS | シリコン |
|--------------|-------|---------|-------|-------|
| 変換効率 | ★★★ | ★★★★ | ★★ | ★★★★★ |
| コスト | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★ |
| 年生産量の上限 / GW | 6 - 8 | 20 - 30 | ★★★★★ | ★★★★★ |
| 環境負荷 | ★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ |
| 開発状況 | 開発途上 | 開発途上 | 開始直後 | 成熟状態 |

CIGS/CZTSの課題は技術開発で克服可能 ⇒ 産総研の研究ミッション
CIGSとCZTSに対する期待は非常に高い

化合物薄膜太陽電池の魅力

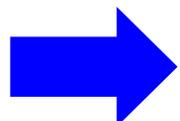
- (1) 潜在能力が高く、開発の余地が大きい。
⇒ モジュール変換効率20% (小面積セル25%) まではOK
- (2) 夢の新材料を発見できる余地さえある。
- (3) 製造コストを、結晶シリコン系よりも大幅に削減可能である (特にCZTS)。
- (4) CZTSは原料供給限界や環境負荷の問題を持たない (CIGSも当分の間は原料供給限界の問題は無い)。
- (5) 耐久性に優れている。
- (6) フレキシブル化にも対応可能。

化合物薄膜太陽電池の技術課題

- (1) 変換効率向上の指針が明白ではない。
← 過去の開発が主に経験と試行錯誤に基づいて行われてきた。
- (2) 新材料探索の指針が明白ではない。
- (3) 現状で変換効率の高い材料は、なぜか希少金属もしくは環境負荷の高い元素を必要とする。
- (4) セルやモジュール製造工程が、隠されたノウハウの塊になっている。
- (5) モジュール製造工程を分業化できない。
⇒ 全ての技術を自力で開発する覚悟のあるメーカーだけが新規参入できる。

化合物薄膜太陽電池の未来

- (1) **技術革新・材料開発**による性能向上・コスト削減の余地が大きい。
- (2) **CIGS**は20-30 GW/年まではOK。← **技術開発で増大可能**
- (3) 化合物薄膜太陽電池が無ければ、**テラワットPV**時代の到来は実現可能性が低い。
- (4) テラワットPV時代には、シリコン太陽電池以上に**低コストで高性能**な電池となり、シリコン太陽電池と並んで**主要な太陽電池**の1つとなっている。
- (5) ある程度以上の**技術力**が必要。

 **化合物薄膜太陽電池の未来は明るい**

化合物薄膜太陽電池の技術動向

1. CIGS太陽電池

- ① セレン化法の進展 ($\eta = 20.9\%$) ソーラーフロンティア
- ② フレキシブル化の進展 ($\eta = 20.4\%$) EMPA
- ③ ホモ接合技術 ($\eta = 20.7\%$) 東芝
- ④ **カリウム** 添加効果 ($\eta = 20.8\%$) EMPA → ZSW

2. CZTS太陽電池

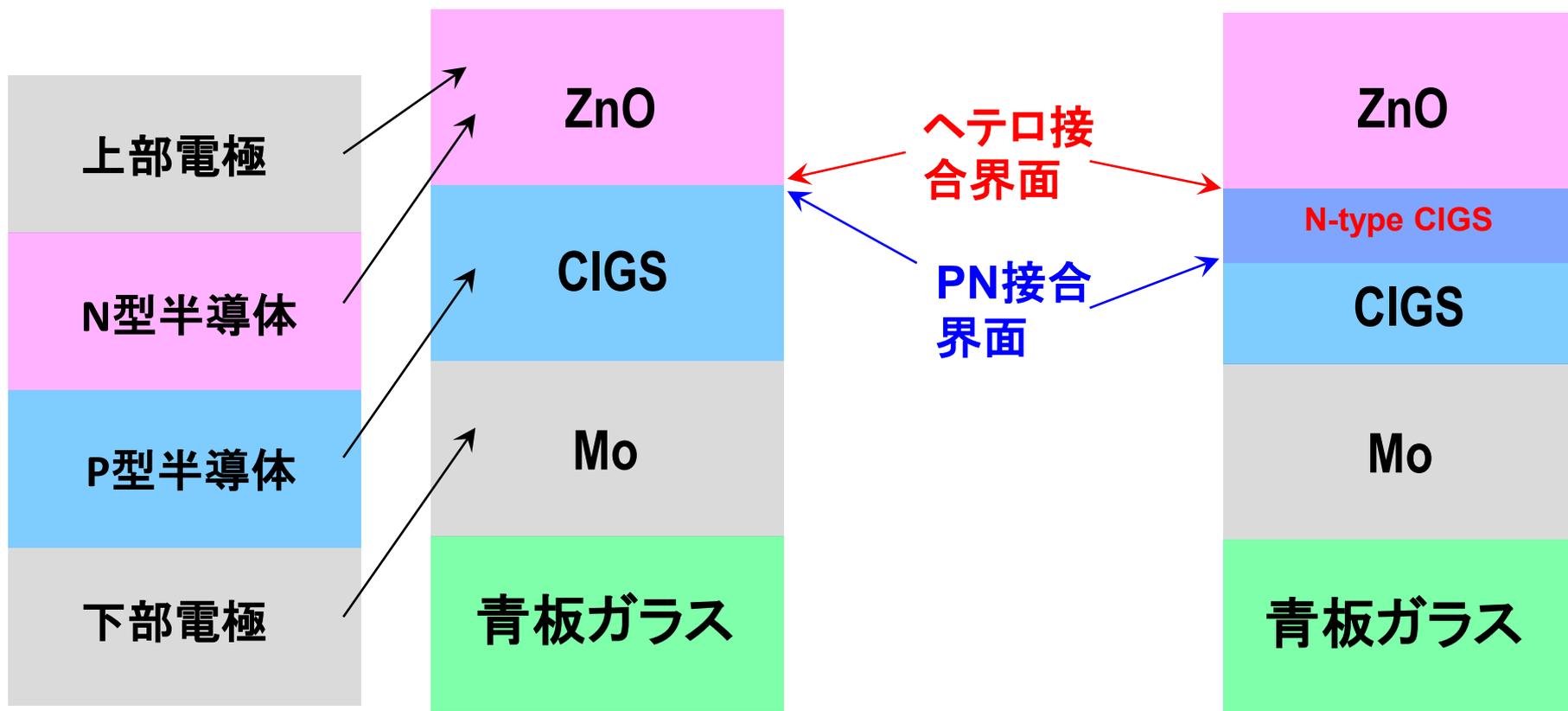
- ① 着実に進展 ($\eta = 12.6\%$) IBM

3. CdTe太陽電池

- ① CIGSに追いつく勢い ($\eta = 20.4\%$) First Solar

ホモ接合CIGS太陽電池のコンセプト

CIGS層の表面近傍をN型化する → ヘテロ接合界面とPN接合界面を分離する



太陽電池の基本構造

CIGS 太陽電池の基本構造

産総研の研究指針

- (1) 化合物薄膜太陽電池**技術の体系化**を目指す。
- (2) CIGS (CZTS) 太陽電池で、**モジュール変換効率20%**(小面積セル25%)を実現するために不可欠な、**高効率化技術**を開発する。
- (3) CIGS (CZTS) 太陽電池で、**モジュール原価35-40円/W**あるいは**発電コスト14円/kWh**を実現するために必要な、**低コスト化技術**を開発する。
- (4) 解明された知見を国内メーカーに普及させ、**国内産業の創出に貢献**する。
- (5) 年産テラワット時代にも対応可能な、**新しい化合物半導体材料**を開発する。

高効率化技術

- ① 高品質結晶 ⇒ 大きなキャリア拡散長
 - ② 高品質ヘテロ接合界面
 - ③ ホモ接合技術
 - ④ 高いP/N制御技術
 - ⑤ 高性能な透明導電膜の開発
- ② ③ } ヘテロ接合界面でのキャリア再結合を抑制

低コスト化技術

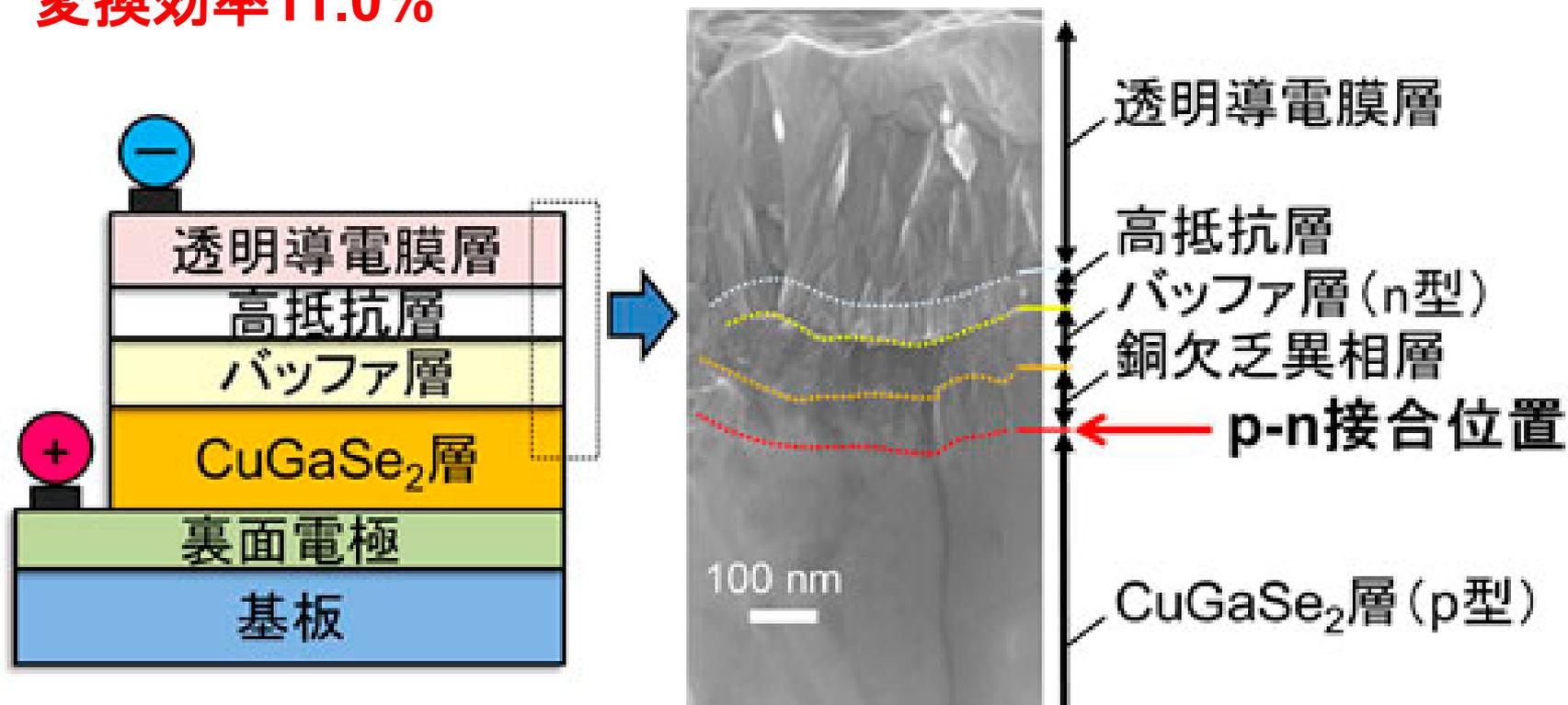
- ① CIGSの高速製膜技術
- ② CIGS膜厚を低下させる技術
- ③ レーザースクライブ技術
- ④ 原料利用効率の向上

新しい化合物半導体材料の開発

- ① 金属カルコゲナイド

産総研における最近の成果1

ワイドギャップCIGS太陽電池の高性能化の基本指針を解明
変換効率11.0%



CuGaSe₂太陽電池のデバイス構造と断面の電子顕微鏡写真

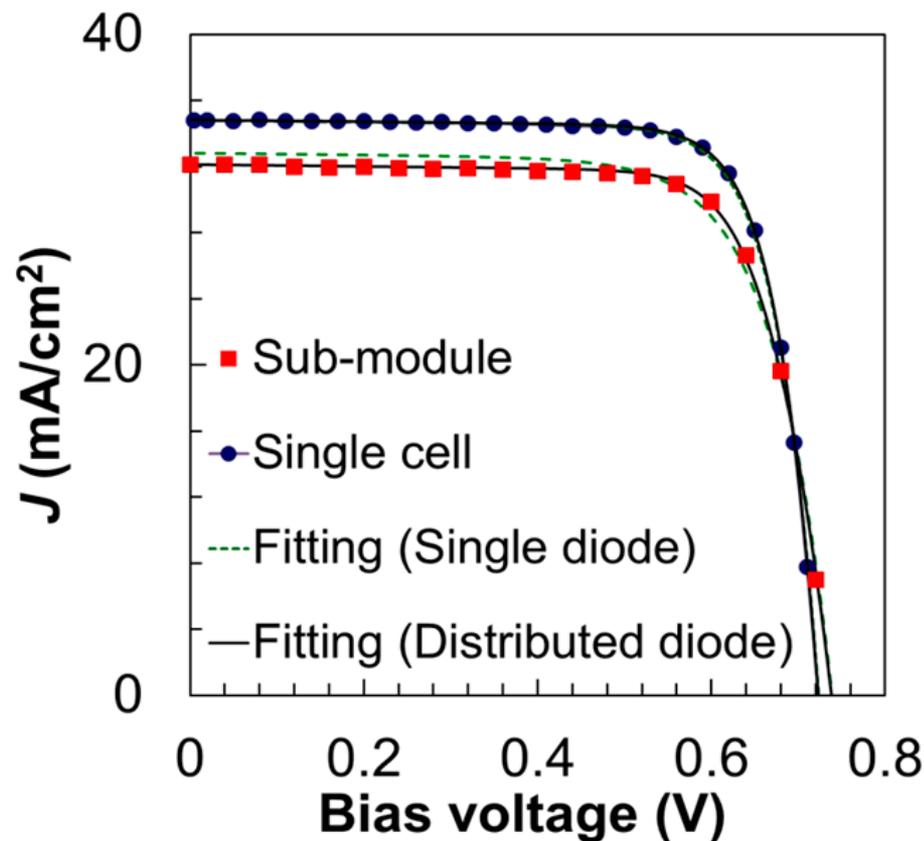
詳細はトピックス講演1 (石塚尚吾)

産総研における最近の成果2

CIGSサブモジュールの変換効率を向上させるための指針を解明
 変換効率18.3%



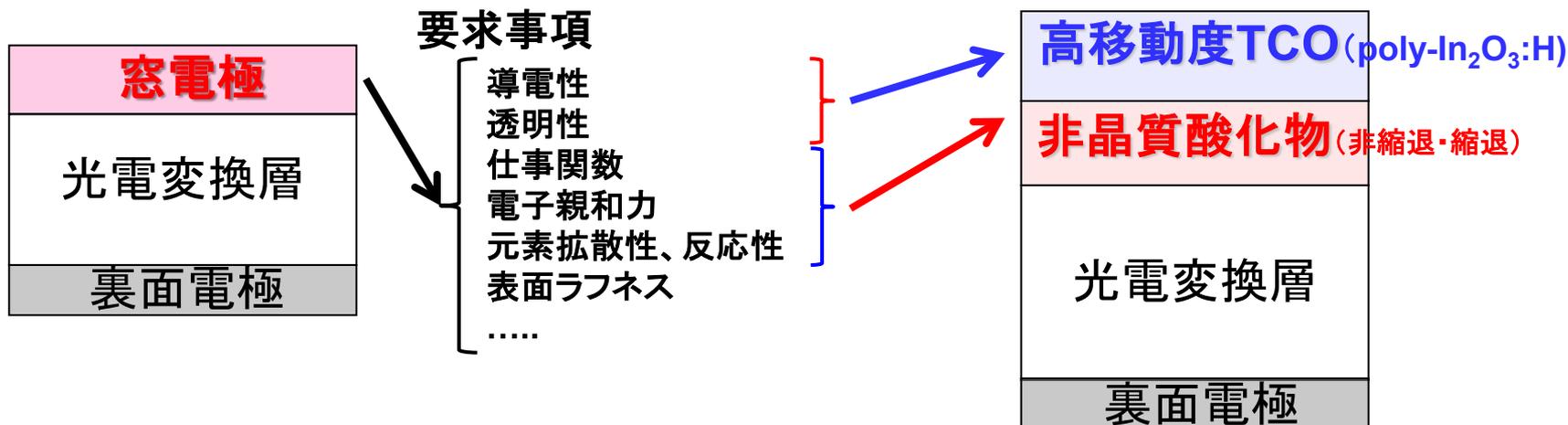
CIGSサブモジュールの写真



詳細はポスターセッションP5(上川由紀子)

産総研における最近の成果3

透明導電膜およびバッファ層のための非晶質半導体薄膜の開発



低温プロセスで作製するヘテロ接合半導体(素子)において、非晶質酸化物半導体の有効性を示した。

詳細はポスターセッションP3(鯉田 崇)

まとめ

(1) 化合物薄膜太陽電池の未来は明るい

(2) 現時点での**潜在能力**は

① モジュール変換効率：**20%**(小面積セル**25%**)

② モジュール原価：**35 - 40円/W**

③ 発電コスト：**14円/kWh**

(3) 技術革新・材料開発により

① 潜在能力を更に向上することが可能

② **資源制約**と**環境負荷**の問題を解決

③ コスト削減が可能

(4) **テラワットPV時代**の到来に不可欠な太陽電池

(5) 技術の体系化と普及が課題