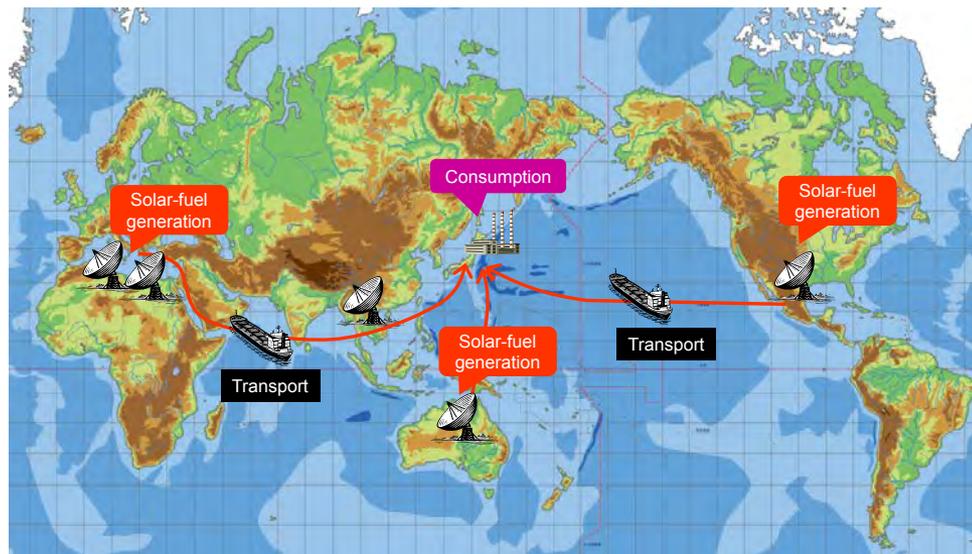


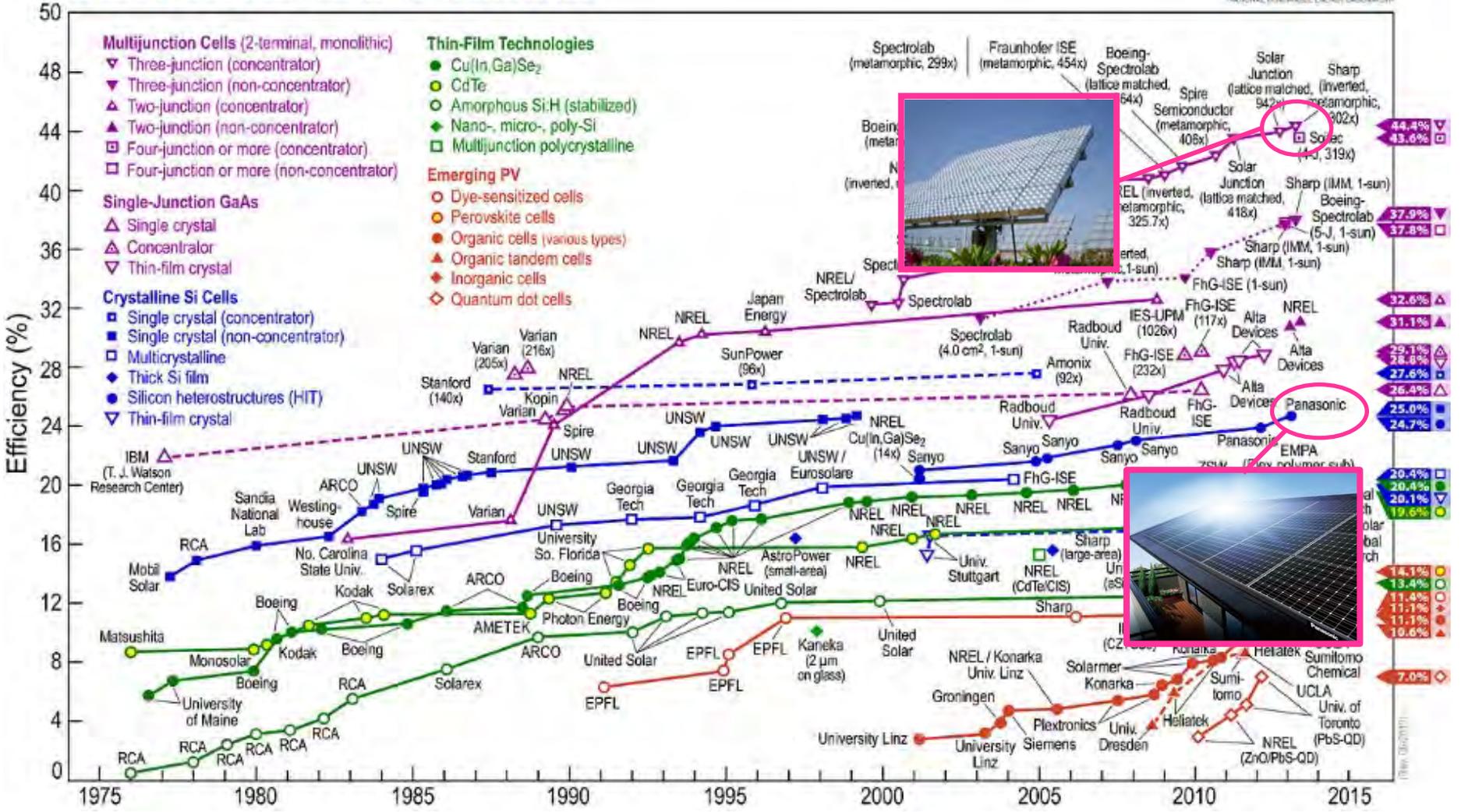
# 超高効率太陽電池の研究と 水素社会への展開



中野 義昭  
東京大学大学院工学系研究科

# 太陽電池の効率記録

## Best Research-Cell Efficiencies



# 集光型太陽電池

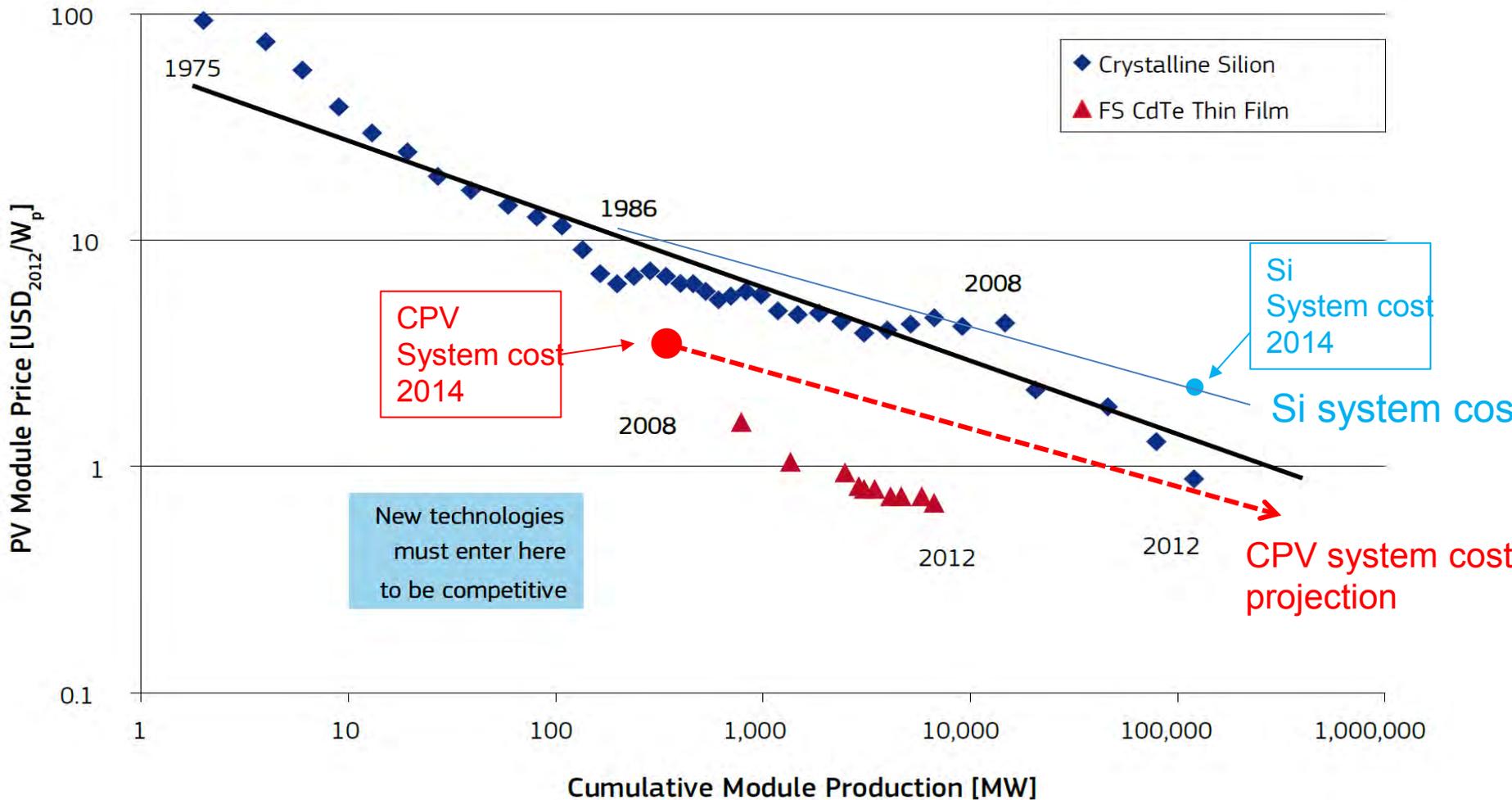


Puertollano and Seville (Spain)



[www.concentrix-solar.de](http://www.concentrix-solar.de)

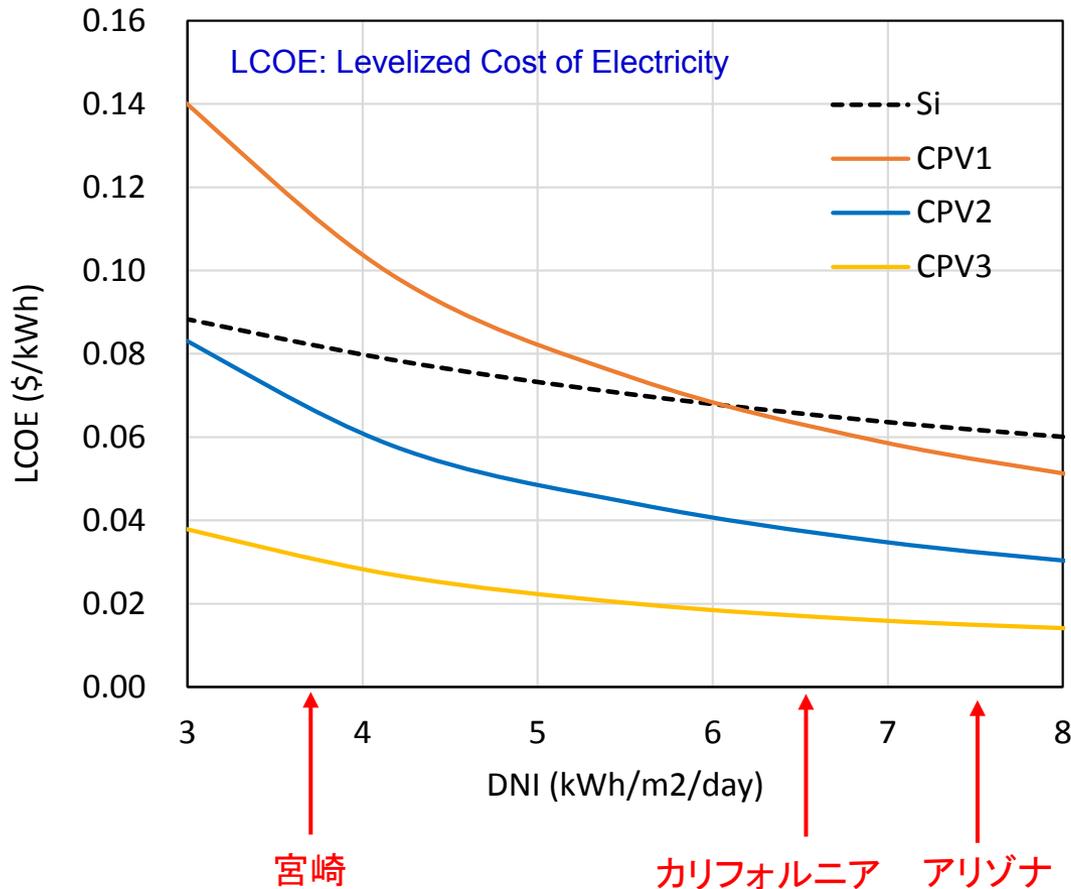
# PVコストのラーニングカーブ



出典: PV status report 2013, JRC Scientific and Policy Report  
CPVのデータを追記

Siパネルと同様のラーニングカーブを仮定すれば、CPVについて累積100GW導入時には\$1/Wp以下のシステムコストが可能

# CPVとSiモジュールの比較



CPV1: 現状  
 CPV2: 効率向上  
 CPV3: さらにコスト低減

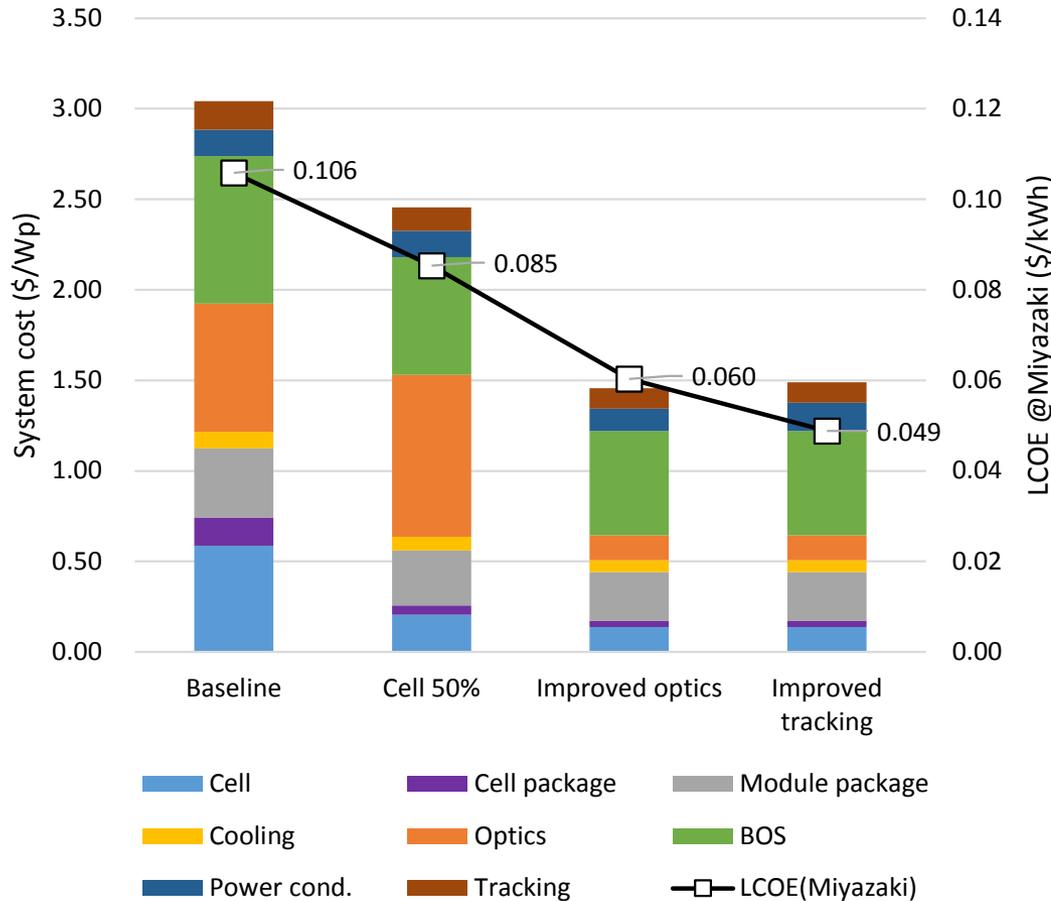
- 高照度地域では、現状でもCPVのほうが低LCOE
- 効率向上により、日本でもCPVにメリットが出る。
- さらなるコスト低減により、CPVは圧倒的なコスト優位性を発揮できる

CPVの発電量  
 $DNI \times \text{モジュール効率} \times PR$   
 Siパネルの発電量  
 $GHI \times \text{モジュール効率} \times PR$   
 PR: Performance ratio  
 耐久年数25年を仮定

低DNI地域:  $DNI < GHI$   
 高DNI地域では  $DNI > GHI$

	Cell eff.	Junction	Cell area (mm <sup>2</sup> )	Conc (suns)	Opt. eff.	PR	System cost (\$/Wp)
CPV1	40	3	50	400	80%	81%	3.04
CPV2	50	4	10	1000	85%	85%	1.90
CPV3	50	4	1	1500	90%	85%	0.88

# 効率向上によるコスト低減



## Cell 50%

4接合セルでセル効率50%  
集光倍率1000倍  
(集光レンズのコスト増)

## Improved Optics

セルサイズ縮小 (50 m<sup>2</sup> → 1 mm<sup>2</sup>)  
集光倍率を1500倍に  
(トラッキング不良によるPR悪化)

## Improve tracking

追尾精度向上  
レンズ表面汚染防止  
→PRを86%に改善

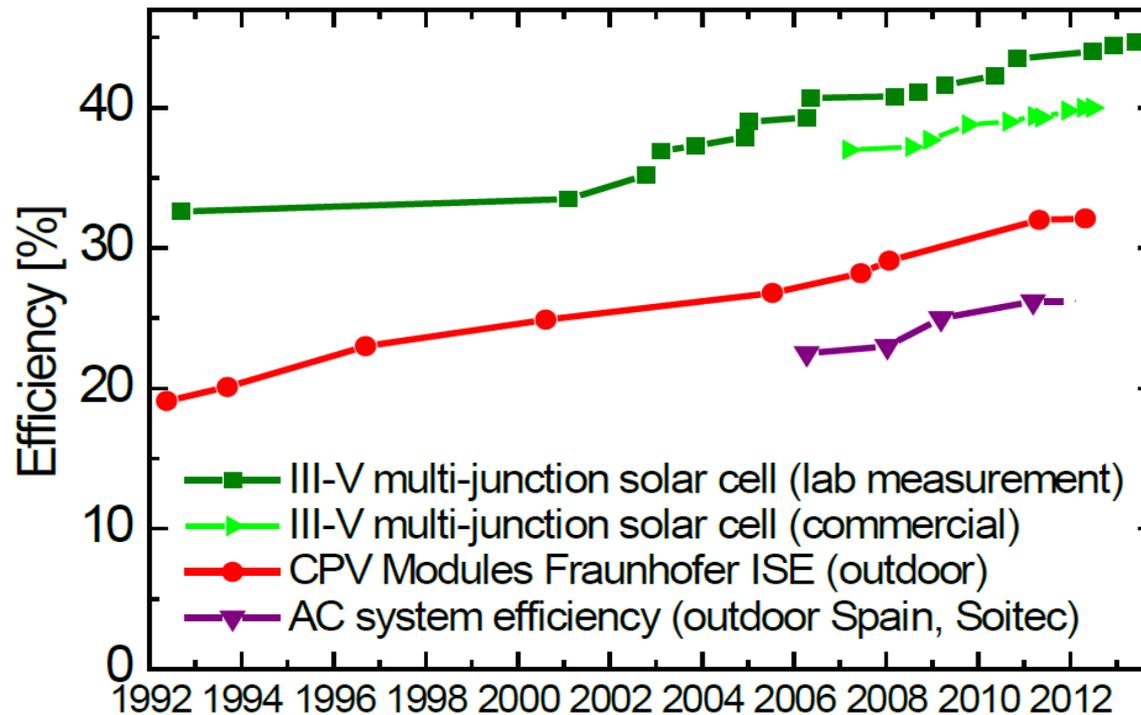
コストの仮定は以下の論文に基づく

R.R. King et al., "Solar cell generation over 40% efficiency" Prog. Photovolt: Res. Appl. 20 (2012)801.

BOS: cost of balance-of-system (BOS) excluding power conditioning  
e.g., support structures, wiring, installation, operations and maintenance, financing

	Cell eff.	Junctio n	Cell area (mm <sup>2</sup> )	Conc (suns)	Opt. eff.	PR	System cost (\$/Wp)
Baseline	40	3	50	400	80%	81%	3.05
Cell 50%	50	4	50	1000	80%	81%	2.45
Improved optics	50	4	1	1500	90%	68%	1.45
Improved tracking	50	4	1	1500	90%	86%	1.49

# セル効率とモジュール効率



Graphic: Fraunhofer ISE; Data for solar cell efficiencies: Green et al. Progress in Photovoltaics (1993-2013)

- セル効率だけでなく、モジュール効率の向上が課題.
- 光学効率の良い集光システムが必須.

# CPVの普及には日本の産業界の総合力が必要

現状CPVでは、効率のチャンピオン効率と、運用時のシステム効率の開きが大きい。

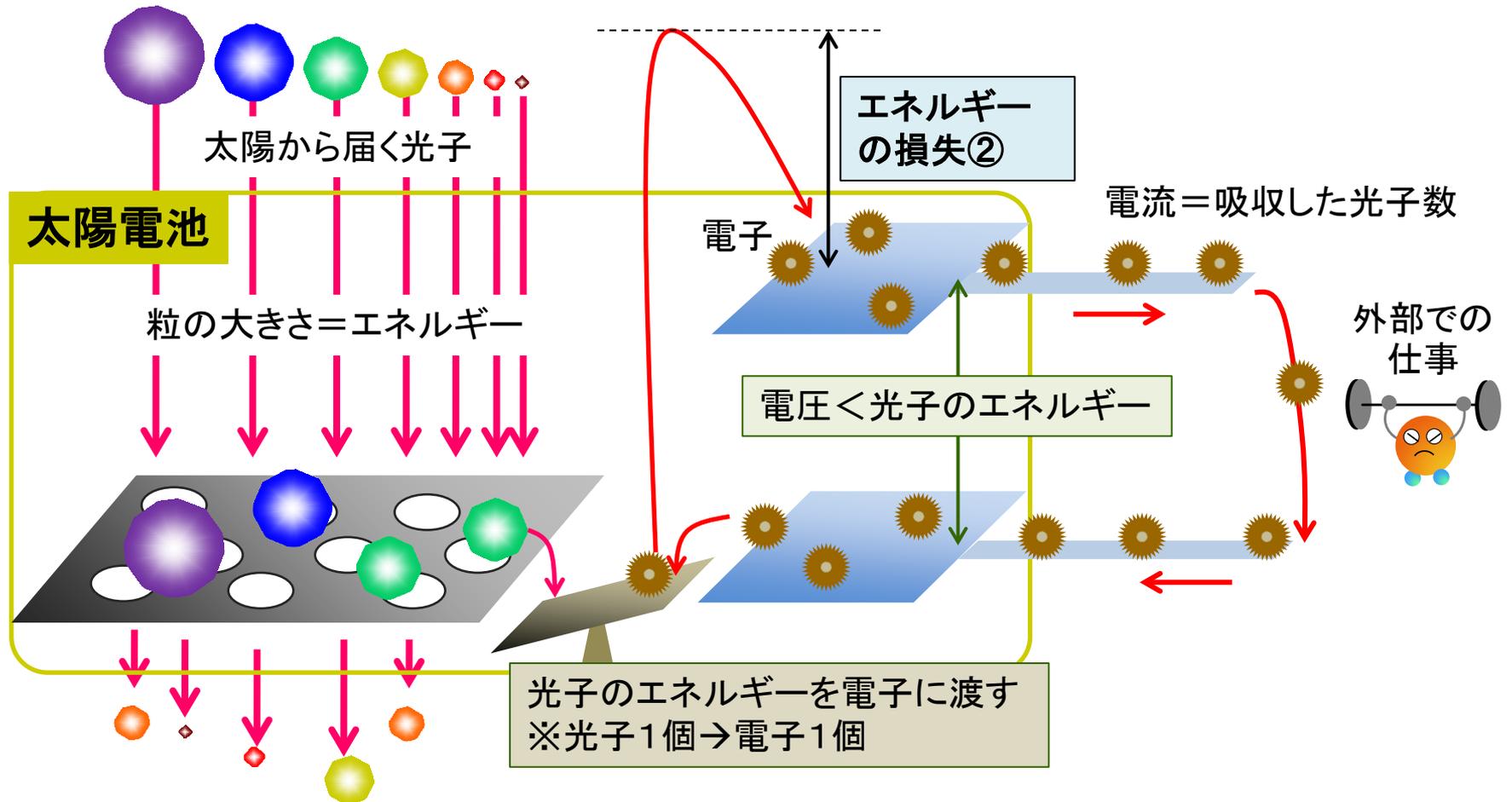
総合的な高効率・高信頼化の取り組みにより、長期運用でもっともパフォーマンスを発揮できるシステムを構築すべき。ターンキーモデルでは実現不可能。

**→日本の強みがもっとも活かされる分野！**

- 高効率化
  - セル効率
  - モジュール効率(光学技術・放熱技術)
  - システム効率(追尾精度)
  
- 低損失化
  - CPVでは表面汚染による光散乱の影響が、パネルよりも大きい
  - 防汚コーティング
  
- 長寿命化・高信頼性
  - 多数部品の摺合せ技術→日本の得意技
  
- メンテナンス・アフターサービス
  - 日本の得意技！

# 超高効率のための必須事項 ～集光～

# 太陽電池の動作原理(なぜ100%のエネルギー変換ができないか?)



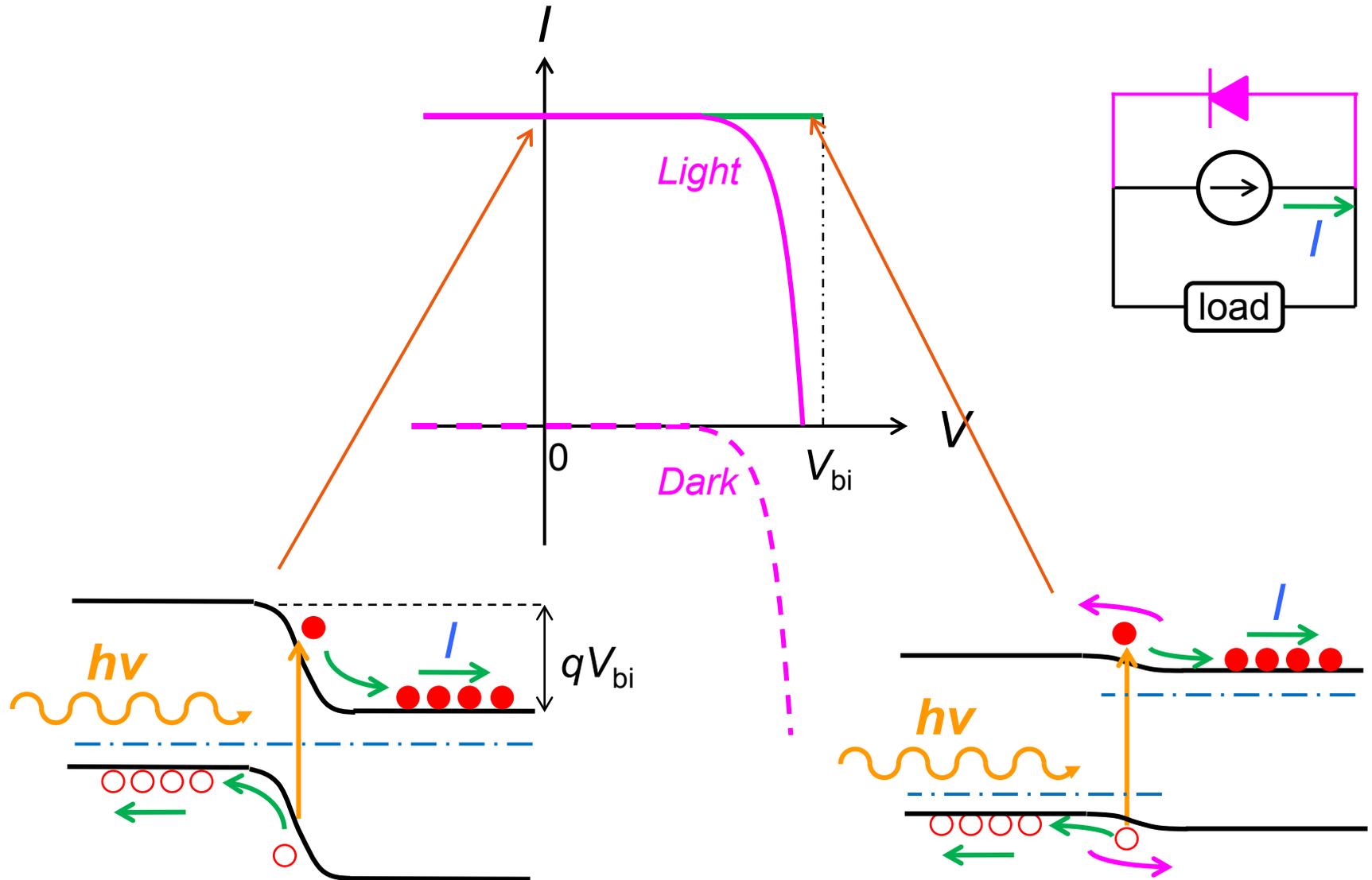
半導体は孔(バンドギャップ)より大きな光子しか吸収できない

エネルギーの損失①



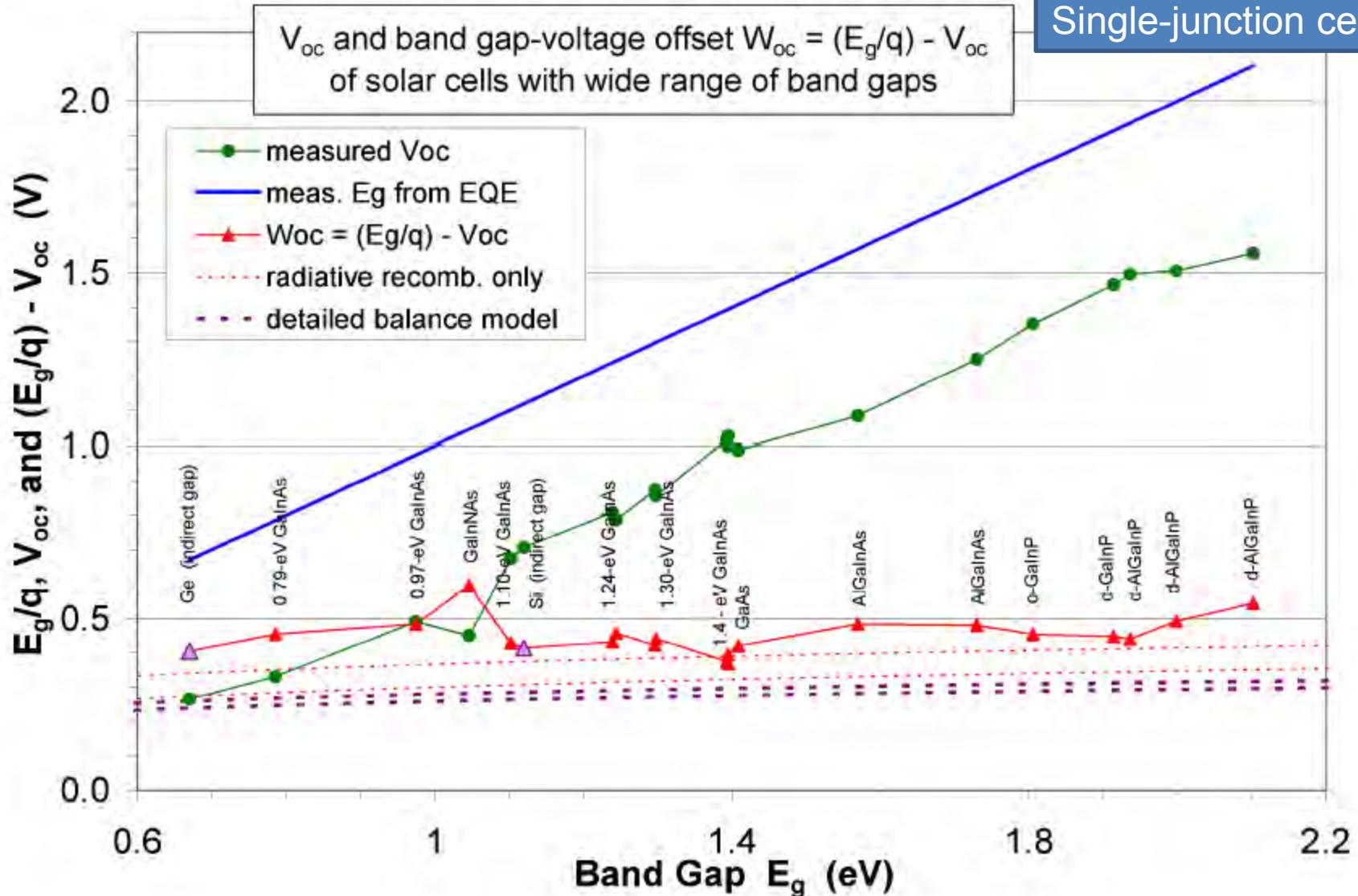
1種類の半導体を使った太陽電池では、2つのエネルギー損失要因により、変換効率は約30%にとどまる。

# 太陽電池の電流-電圧特性(非集光下)



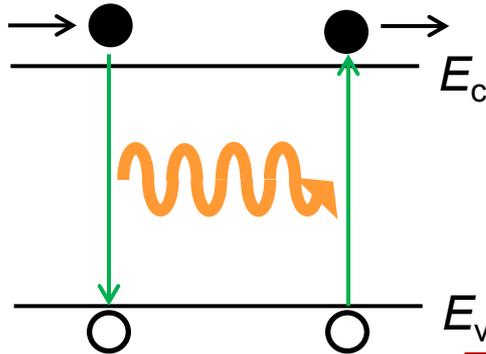
$$V_{oc} < E_g$$

Single-junction cells



# 光子のリサイクル

□ 発光再結合は変換効率を低下させない



電子・正孔 ⇔ 光  
エネルギー損失なし

非輻射損失の  
抑制が最重要

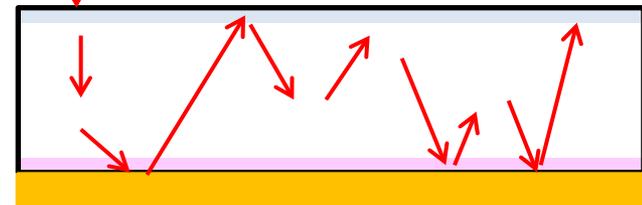
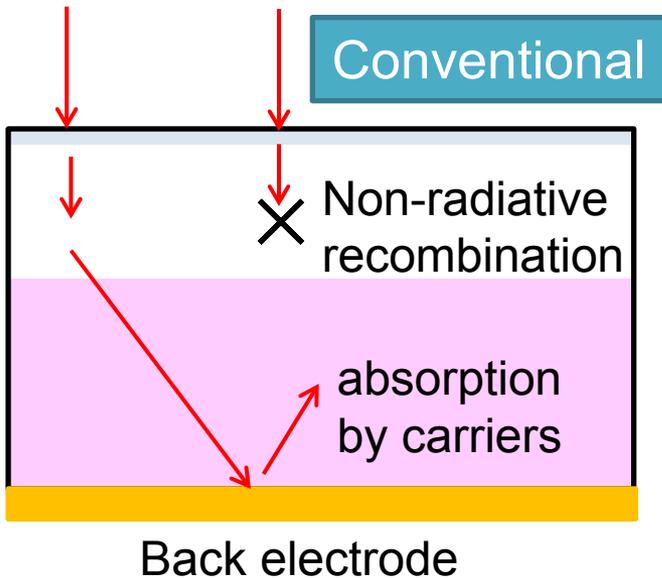
ALTADEVICES

Conversion efficiency  
28.8 %



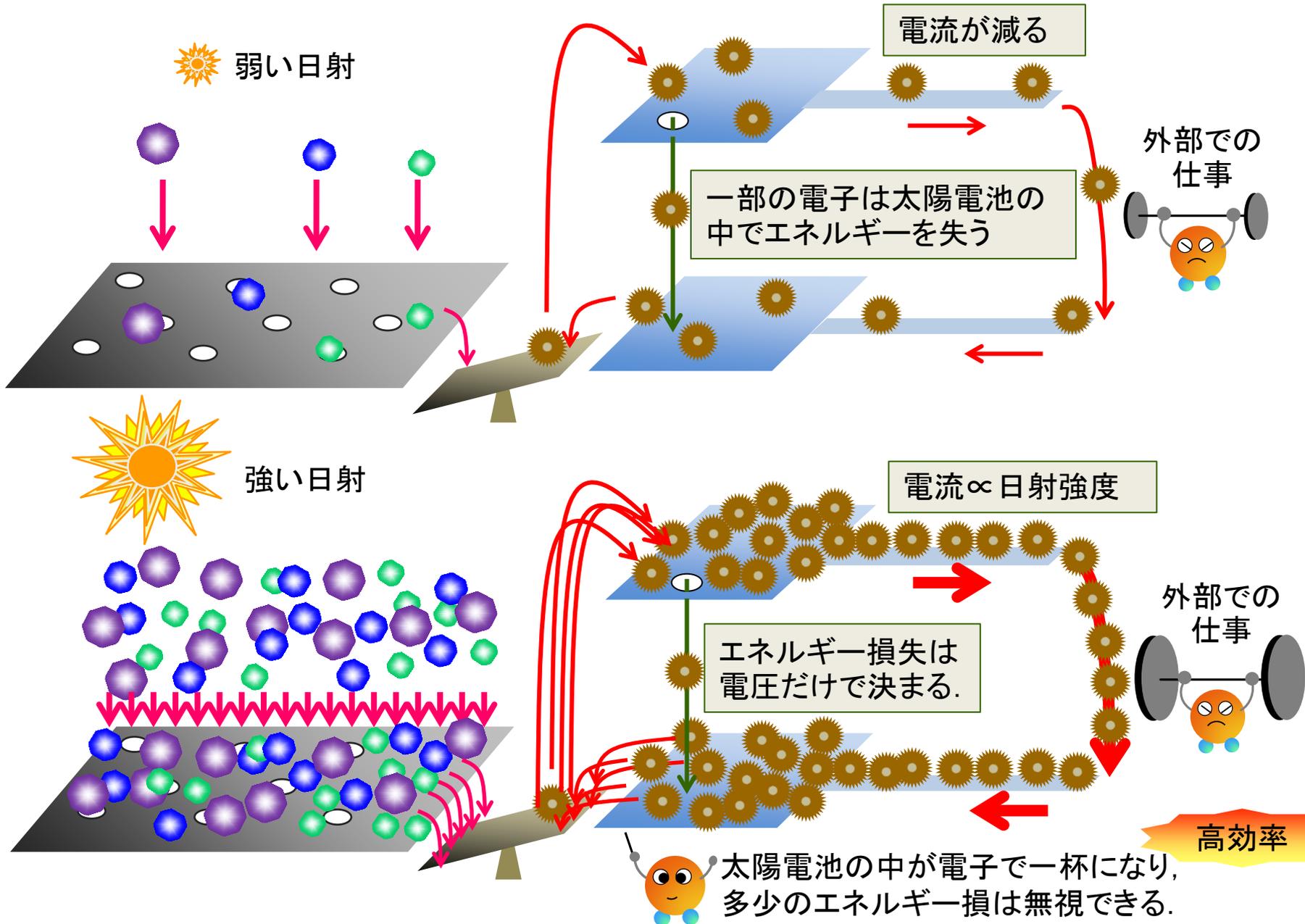
Light-trapping cell

- w/o substrate
- Negligible non-radiative recombination

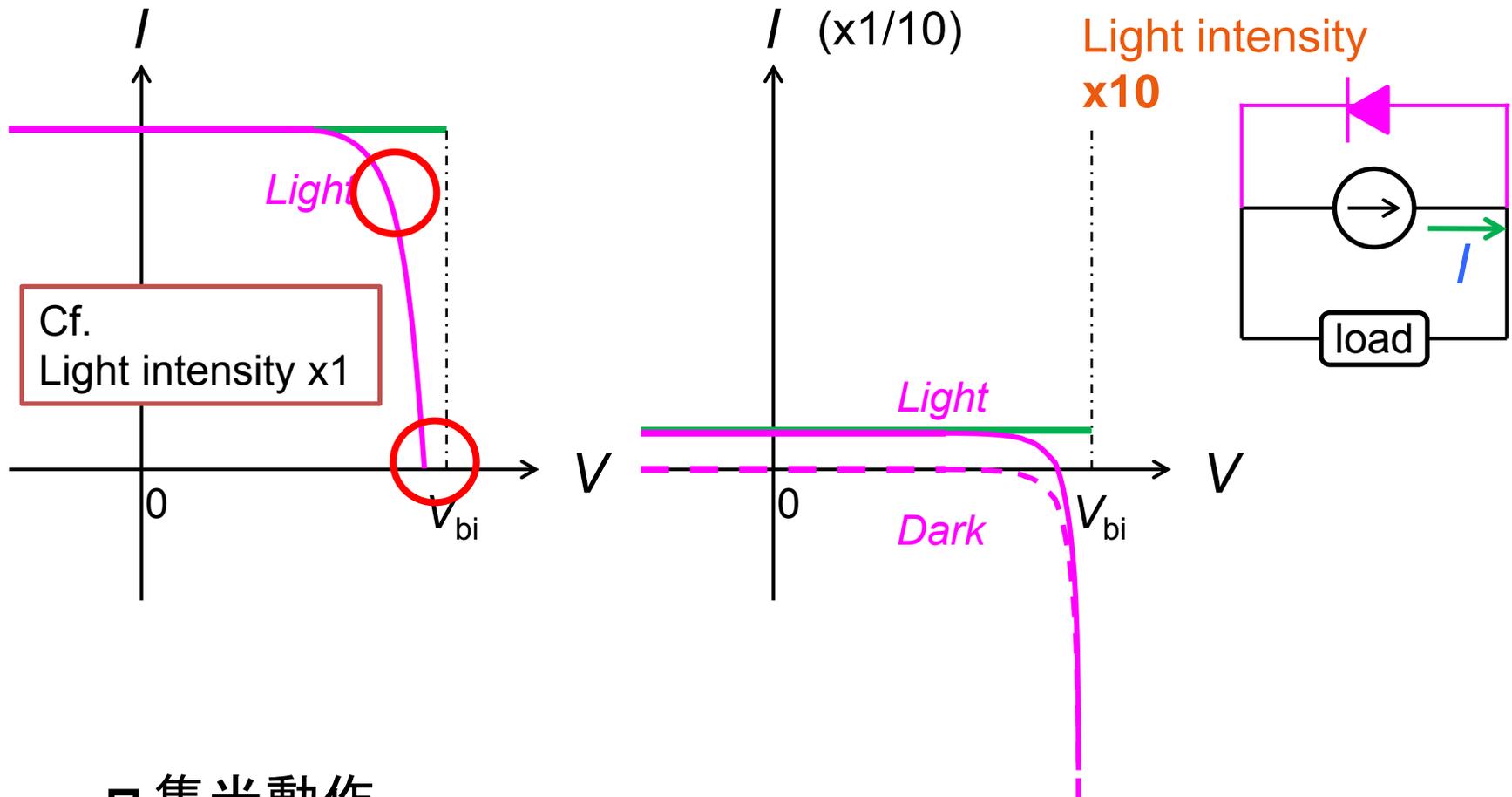


Absorption → emission  
effective light scattering

# なぜ集光すると高効率になるのか？



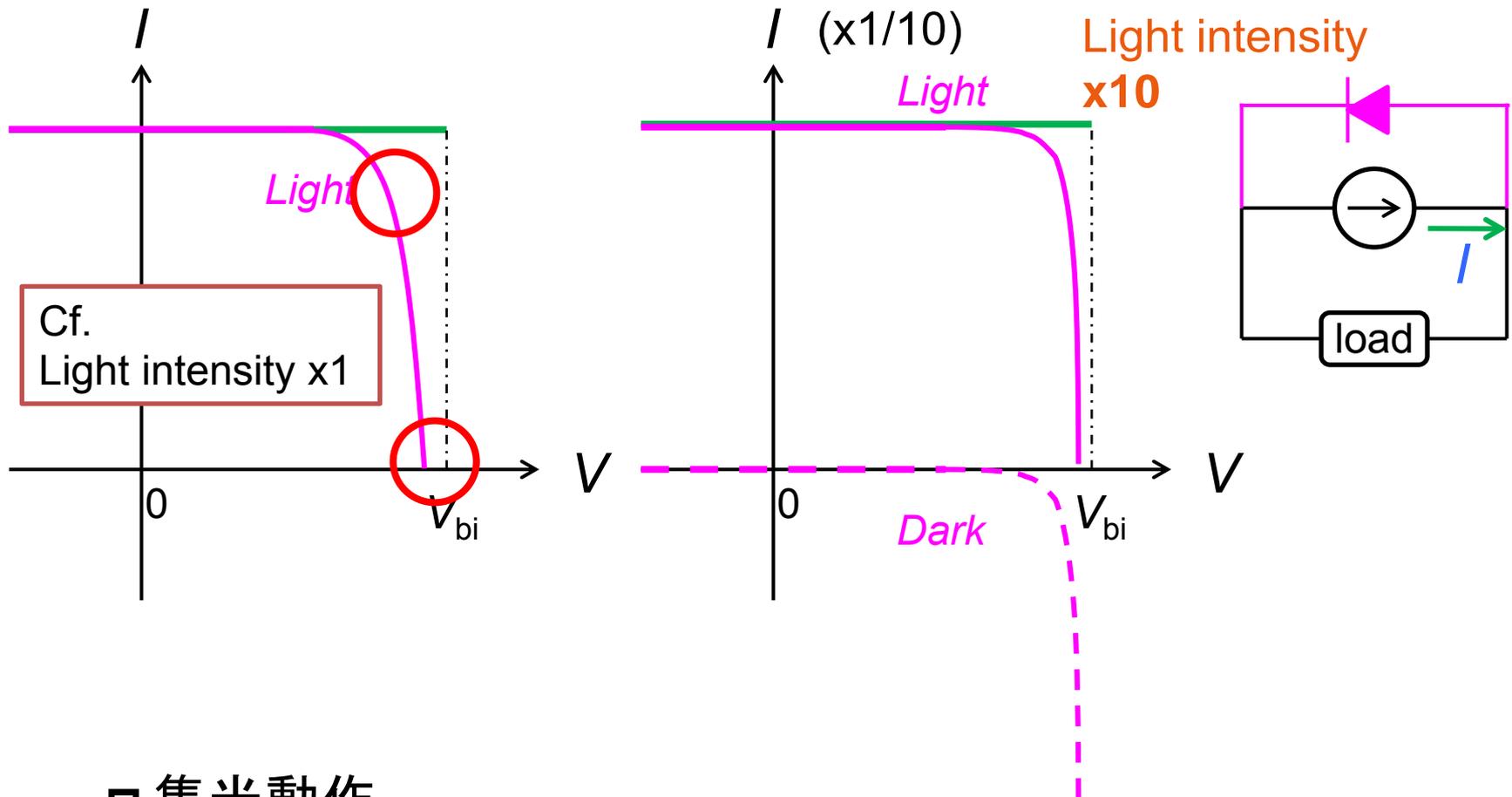
# 太陽電池の電流-電圧特性(集光下)



## □ 集光動作

- 開放電圧( $V_{oc}$ )の向上
- 曲線因子( $FF$ )の向上

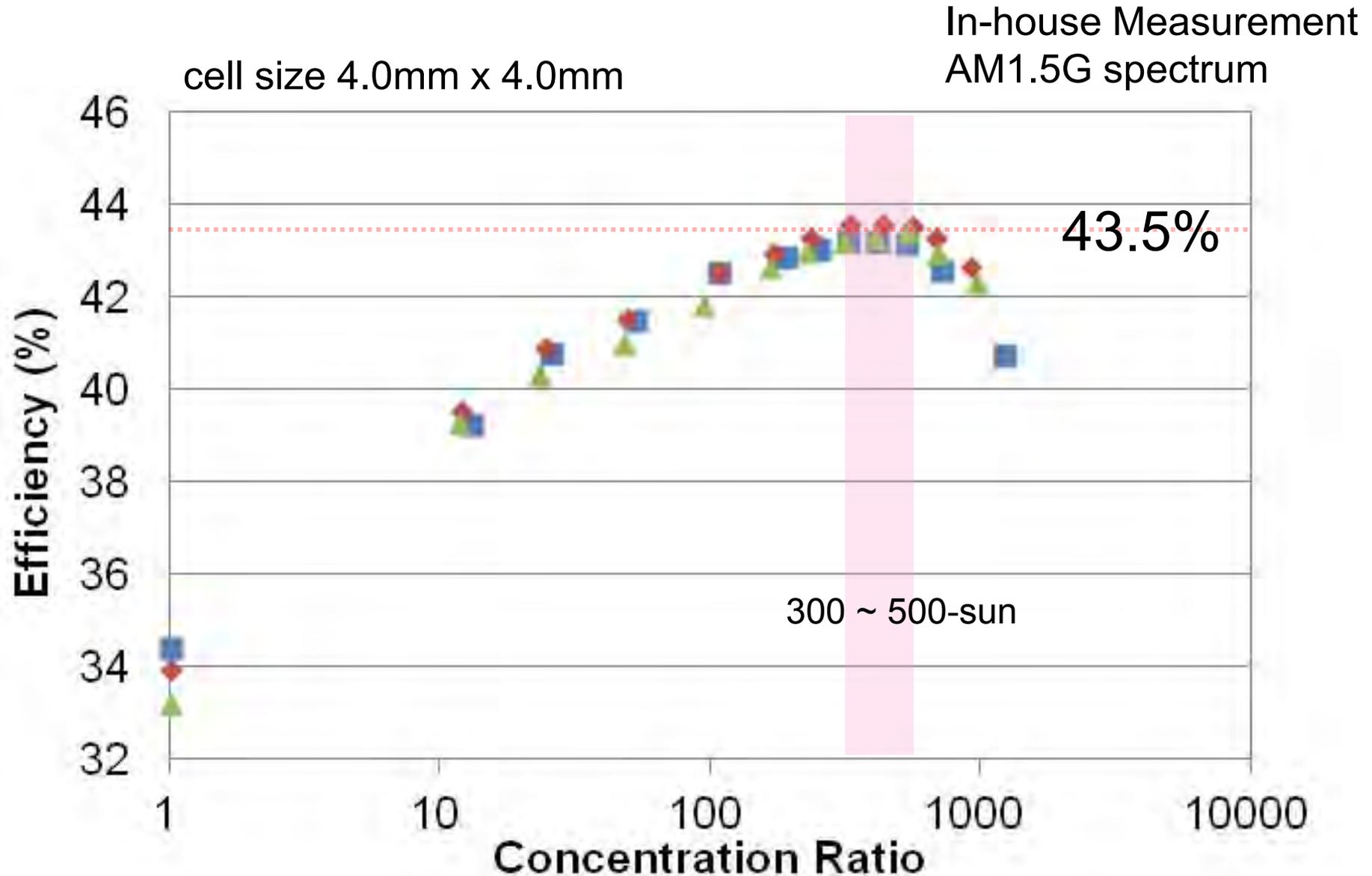
# 太陽電池の電流-電圧特性(集光下)



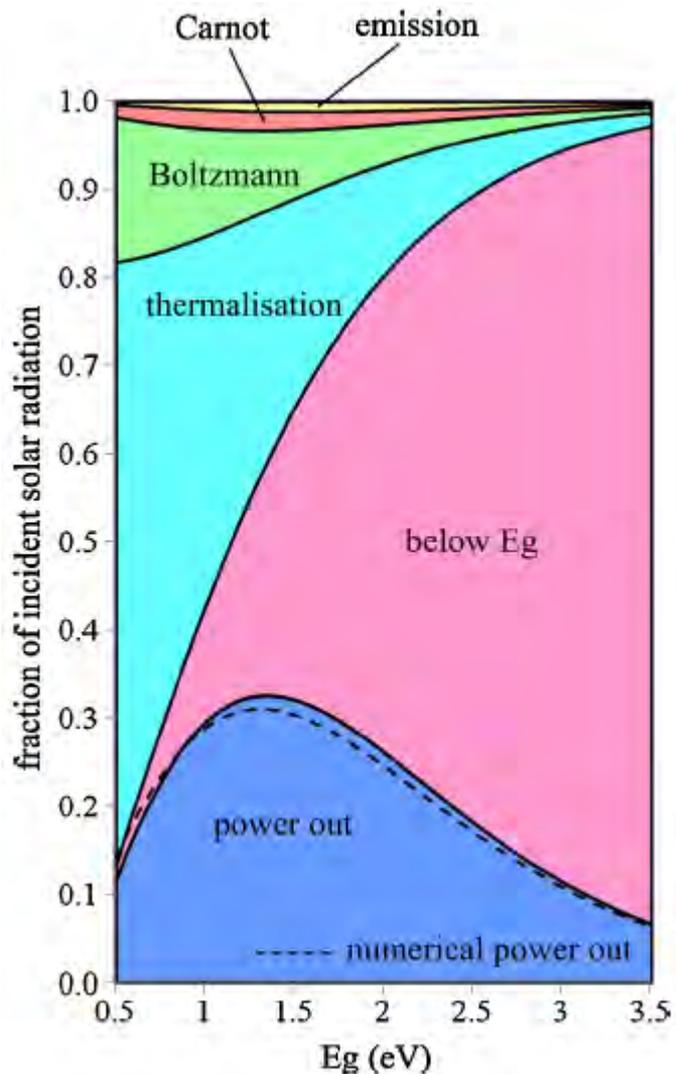
## □ 集光動作

- 開放電圧( $V_{oc}$ )の向上
- 曲線因子( $FF$ )の向上

# 集光による変換効率向上



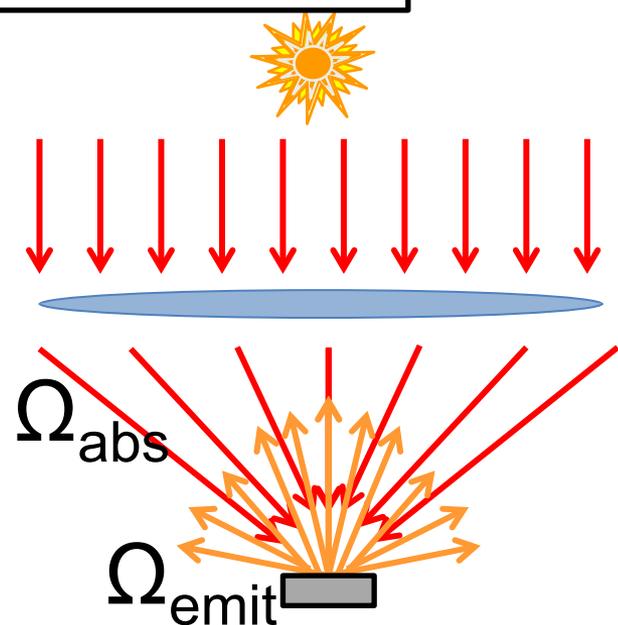
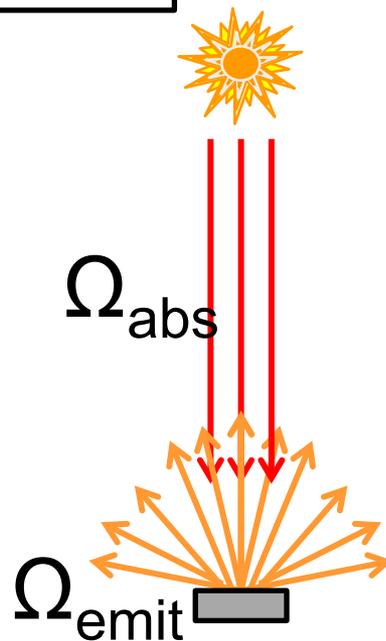
# 開放電圧低下の熱力学的解釈



$$eV_{\text{opt}} = \underbrace{E_g \left( 1 - \frac{T_A}{T_S} \right)}_{\text{Carnot}} - \underbrace{T_A k \ln \left( \frac{\Omega_{\text{emit}}}{\Omega_{\text{abs}}} \right)}_{\text{Boltzmann}}$$

1 sun

concentration

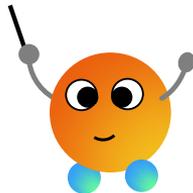
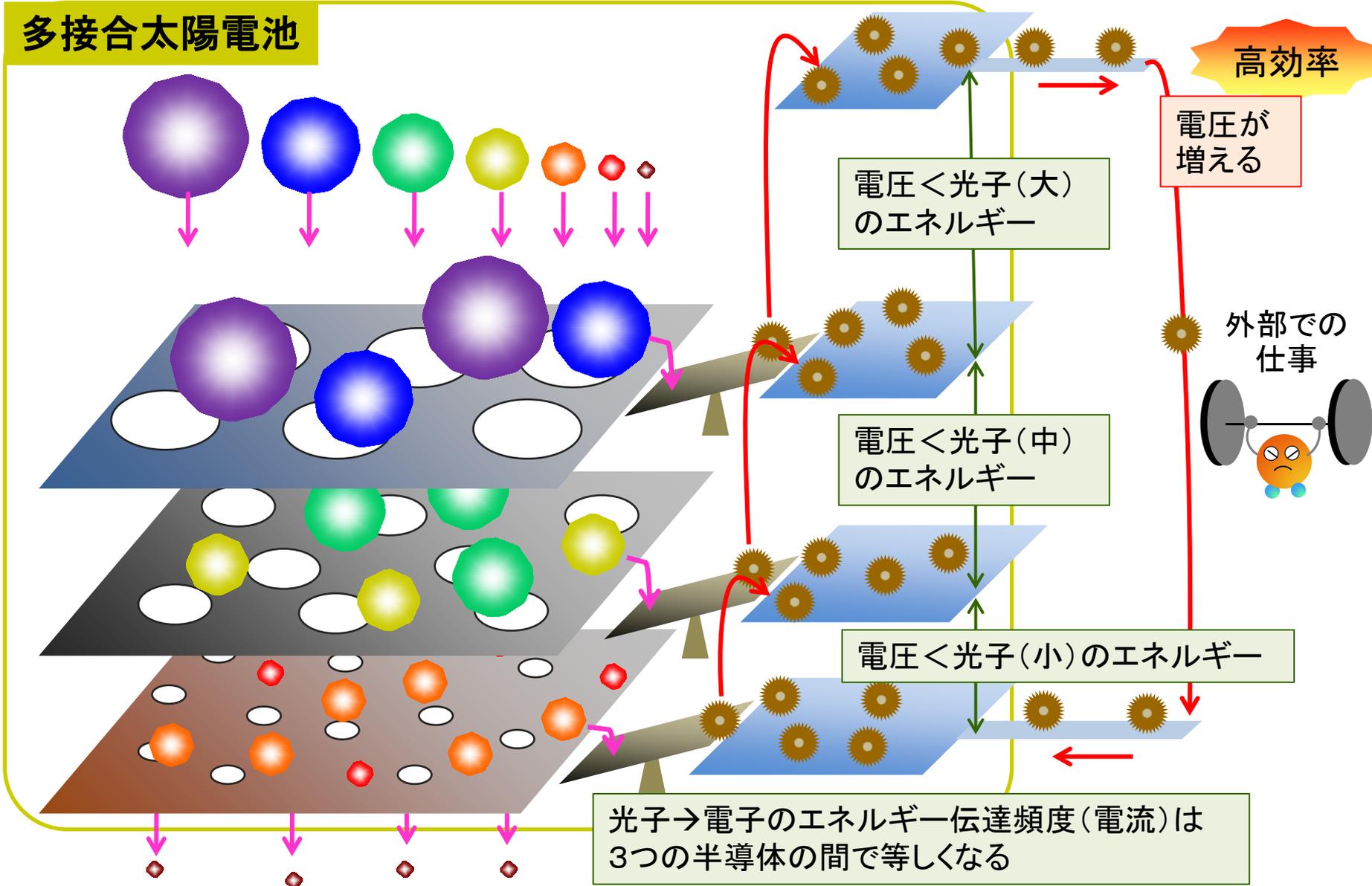


$$\Omega_{\text{abs}} \ll \Omega_{\text{emit}} \quad \Omega_{\text{abs}} < \Omega_{\text{emit}}$$

Hirst et al., Prog. Photovolt: Res. Appl. 2011; **19**: pp. 286–293

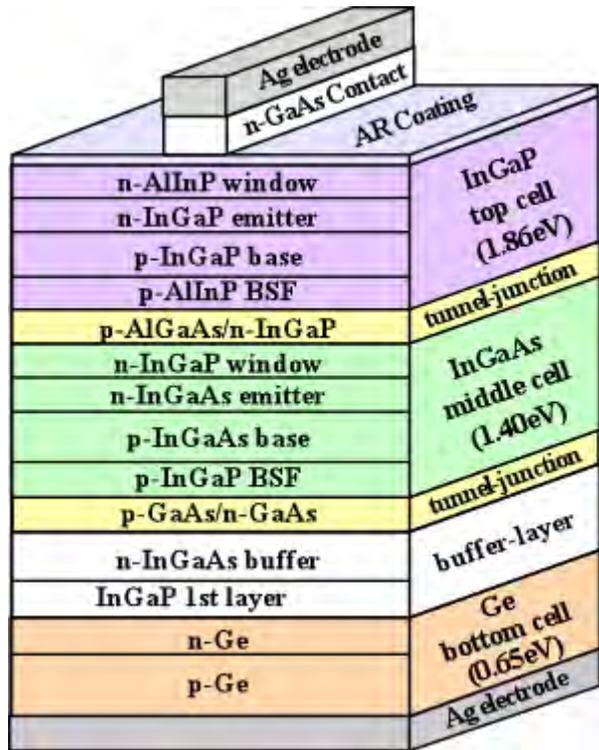
# 高効率化に向けた取り組み ～多接合太陽電池～

# 多接合太陽電池

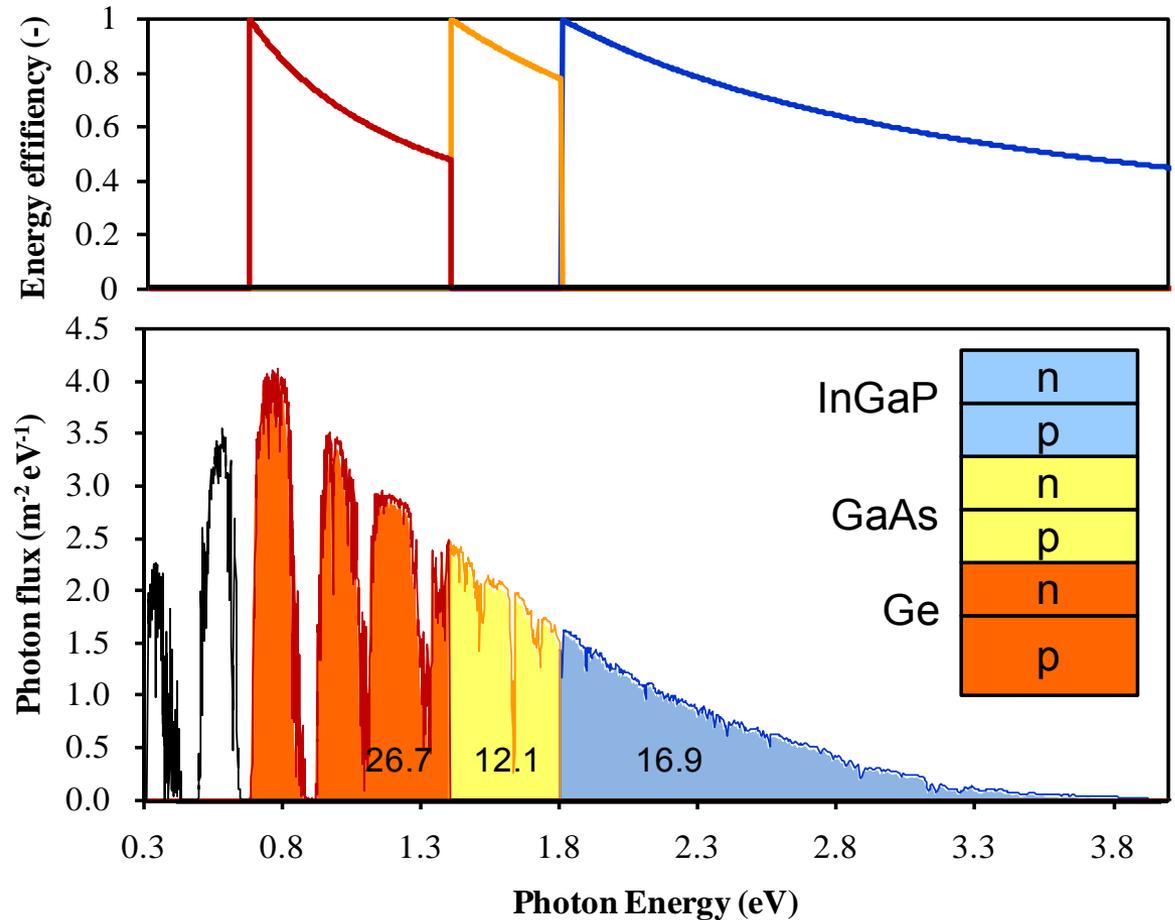


異種の半導体(孔の大きさが違う網)の重ね合わせ  
→ エネルギーの大きな光子から順に電力に変換  
(光子のエネルギーを無駄なく利用)

# 多接合太陽電池

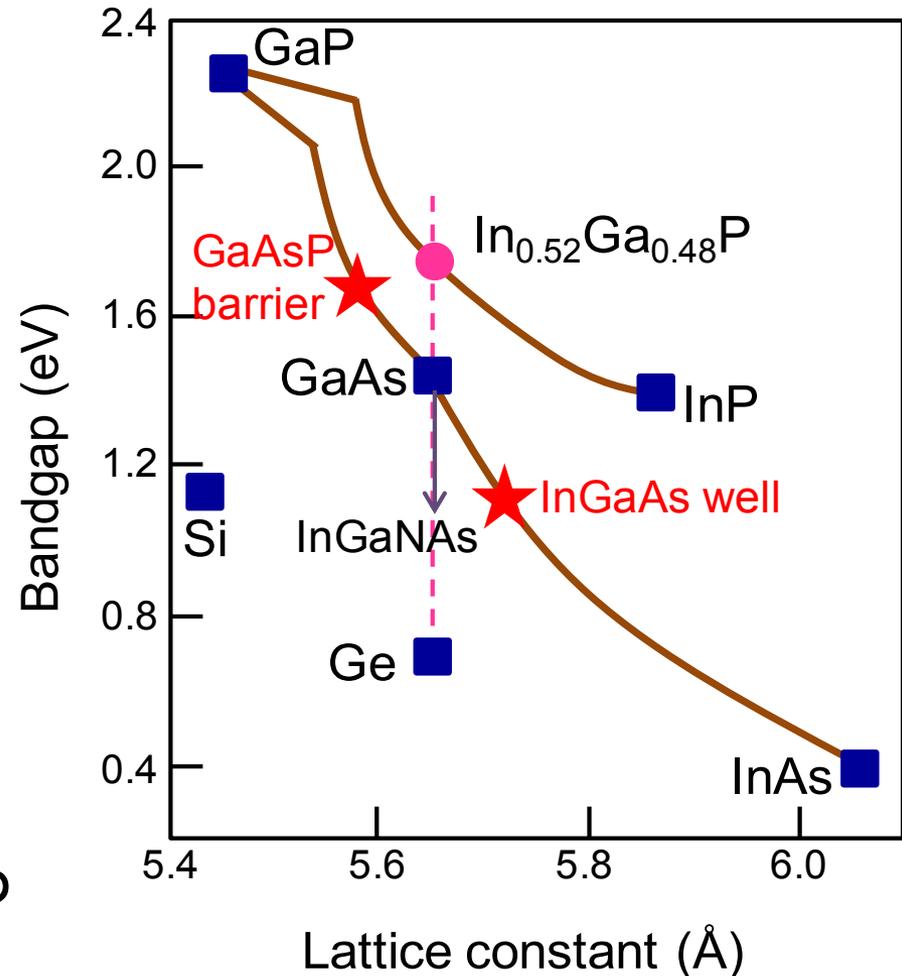
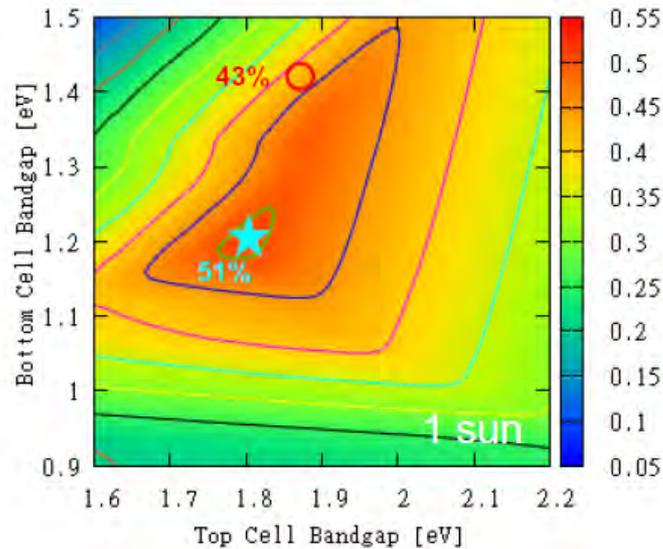


M. Yamaguchi et al.,  
Solar Energy 79 (2005) 78–85



□ 中間セルからの電流出力が全体の電流出力のボトルネック

# 3接合セルのさらなる高効率化



- 格子整合系材料 (InGaP/GaAs/Ge)  
→ 電流不整合
- 電流整合と最適 $E_g$ の組み合わせを両立する材料  
→ GaInNAs (結晶の質に難あり)

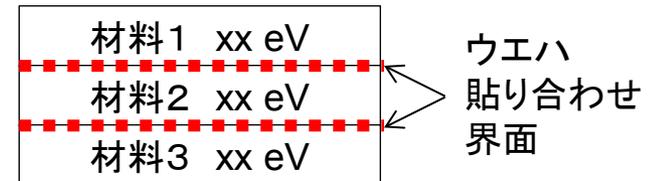
# 多接合セルの高効率化に向けた戦略



逆方向成長  
格子不整合型

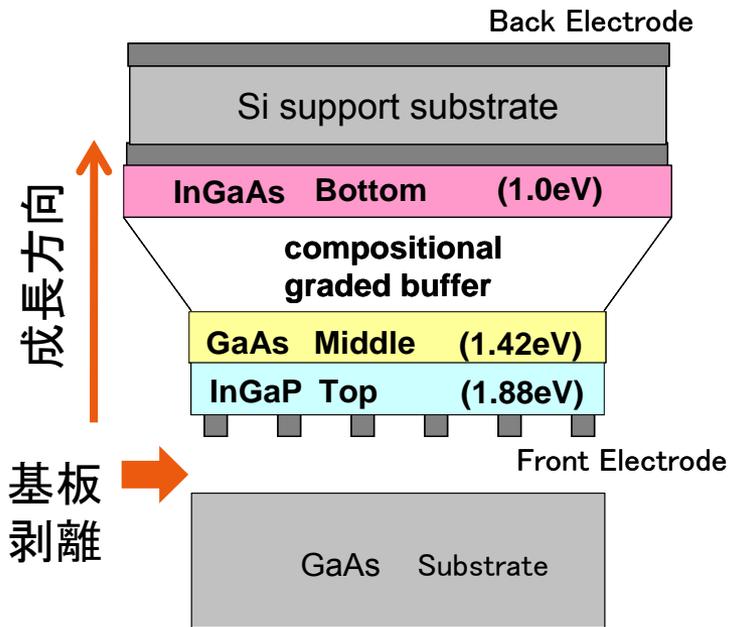


格子整合新材料型

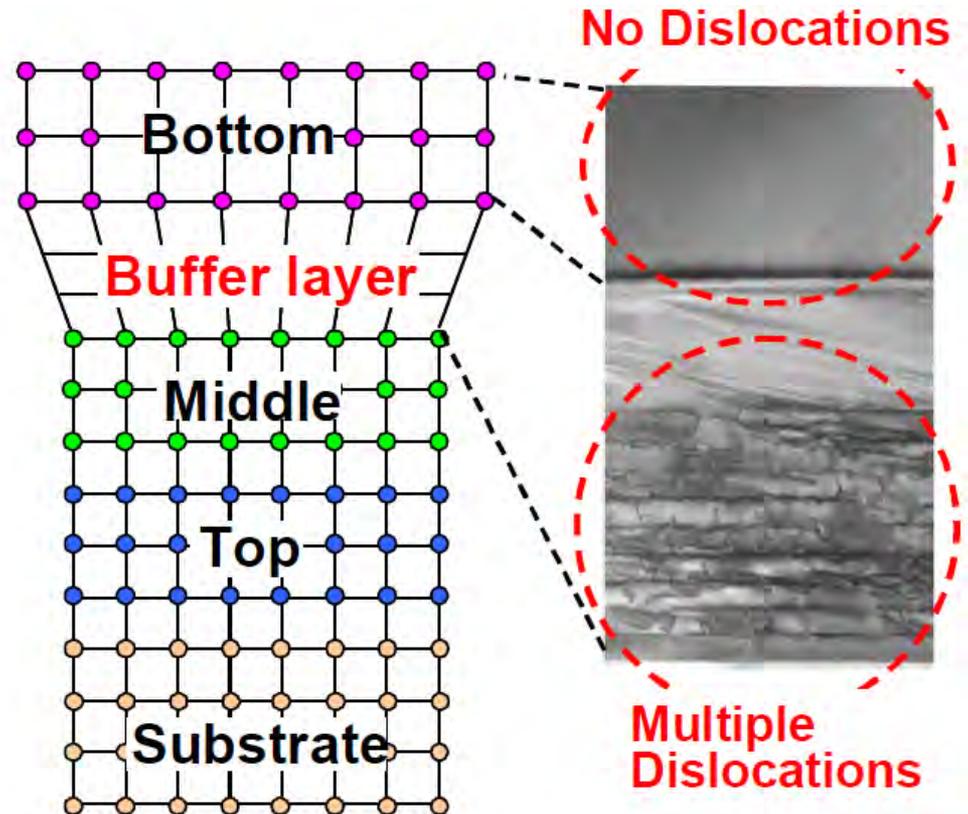


ウエハ貼り合わせ型

# 逆エピタキシャル成長+リフトオフ



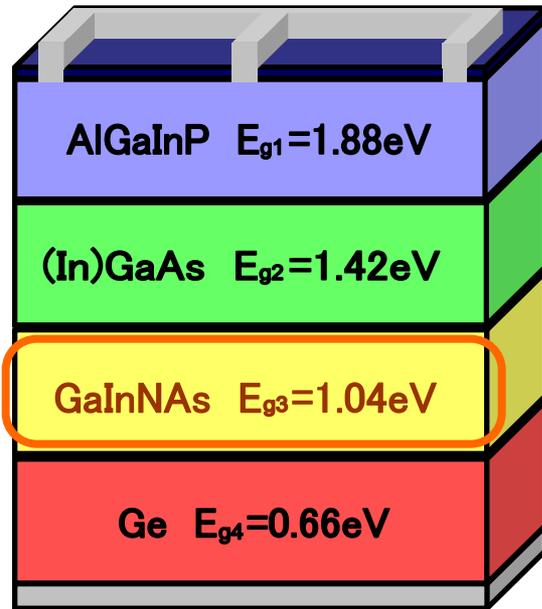
## 傾斜組成層の歪みマネジメント



T. Takamoto, et al, Proc. IEEE PVSC 35, pp. 412-417 (2010).

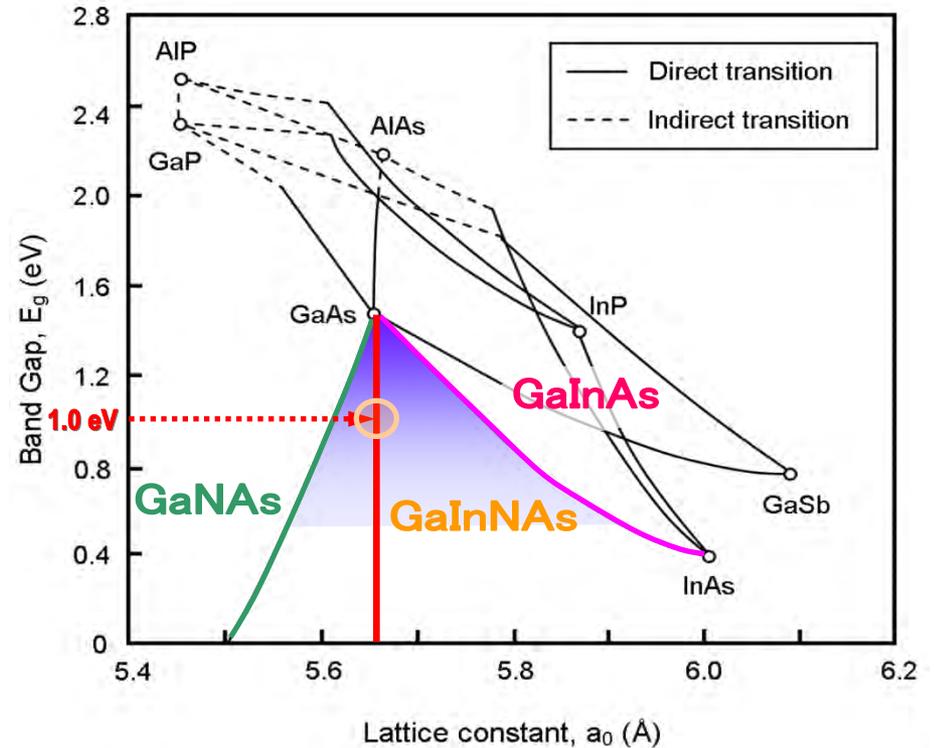
# GaInNAsを用いた中間セル

- ▶ Theoretical efficiency > 50%.  
(AM1.5, 1-sun)



Material for 3rd sub-cell: **GaInNAs**

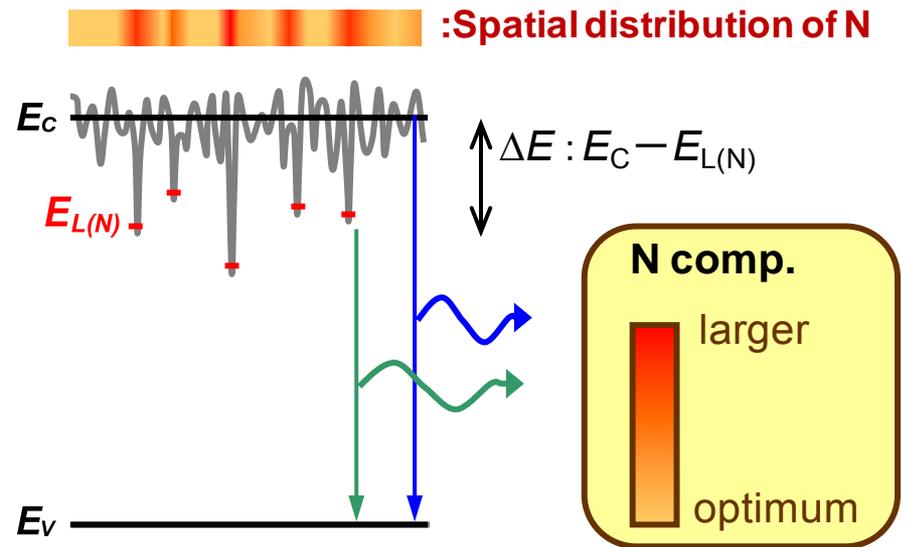
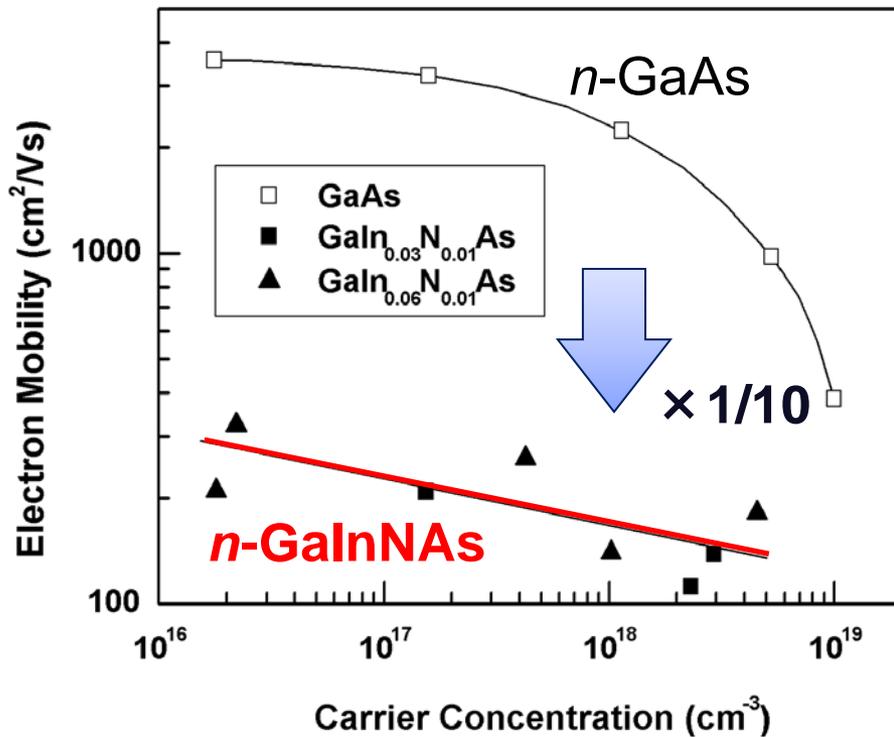
- ▶ ~1 eV bandgap.
- ▶ Lattice-match to GaAs, Ge.



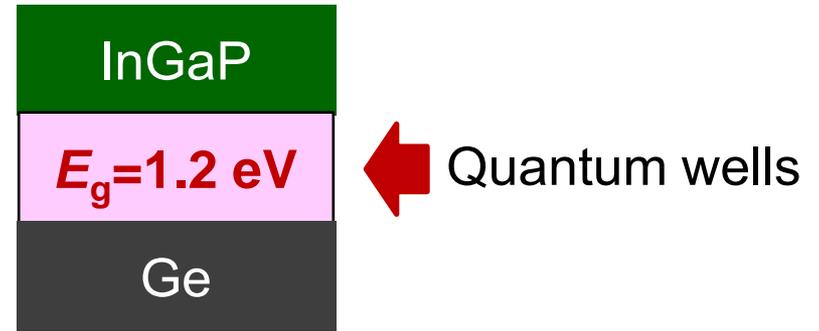
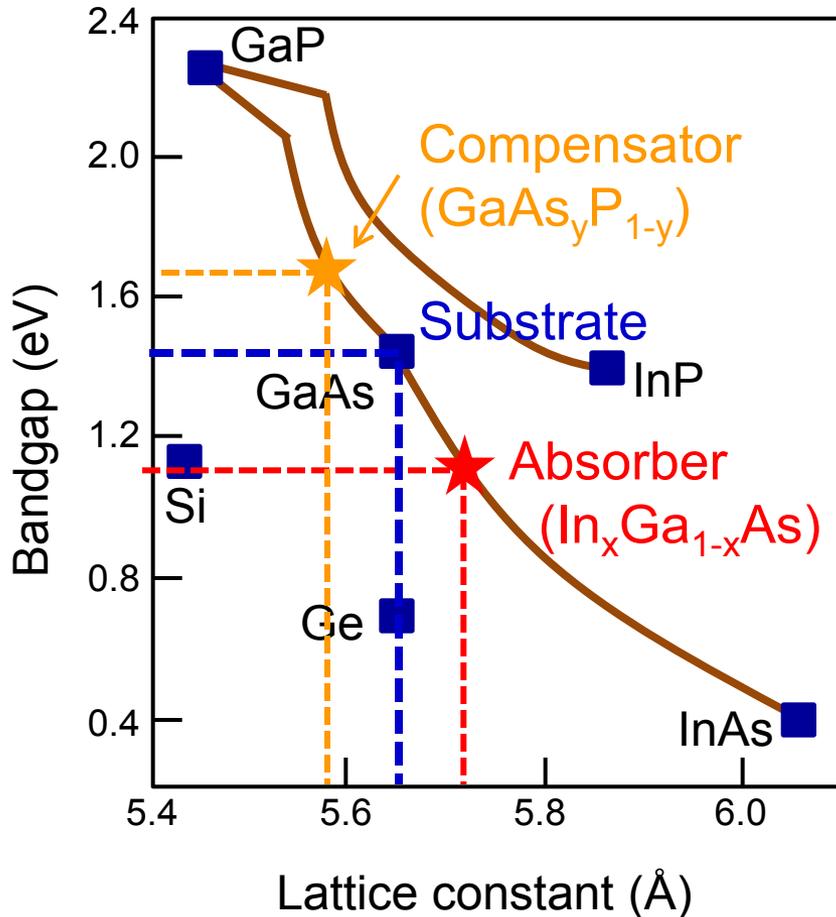
Control of In & N composition enables lattice-match to GaAs. ( [In]:[N] ~3:1 )

# GaNAsの結晶品位改善

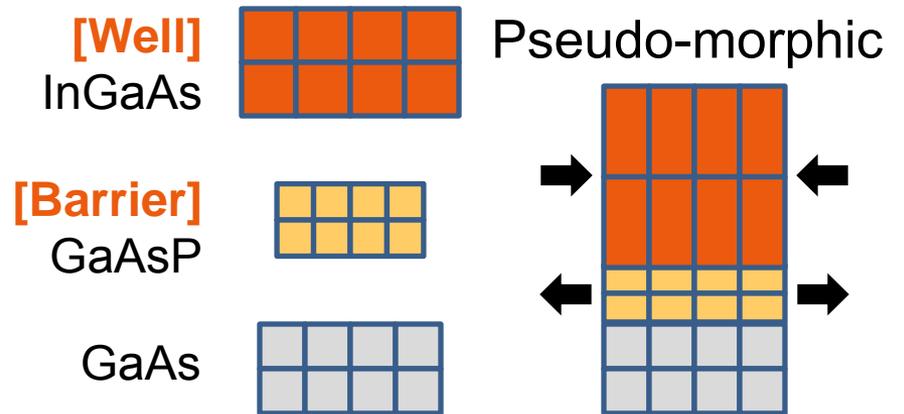
- N取り込みの不均一性がキャリア移動度を悪化させる  
→ 結晶成長プロセスの改善が必要 (Sbサーファクタントなど)



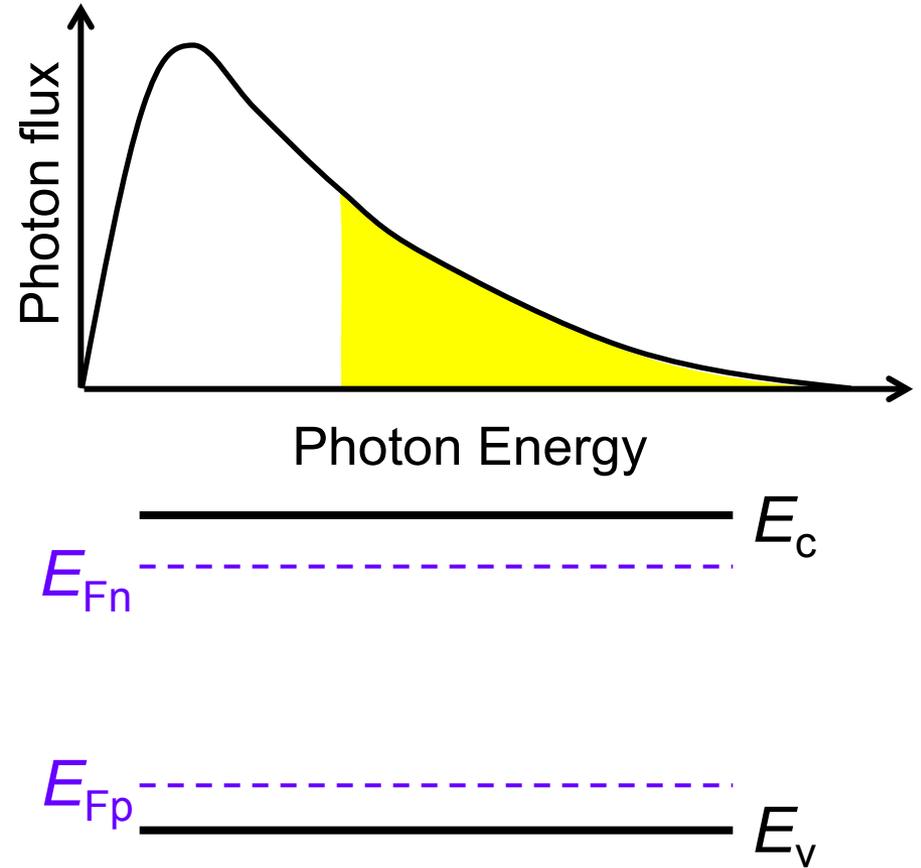
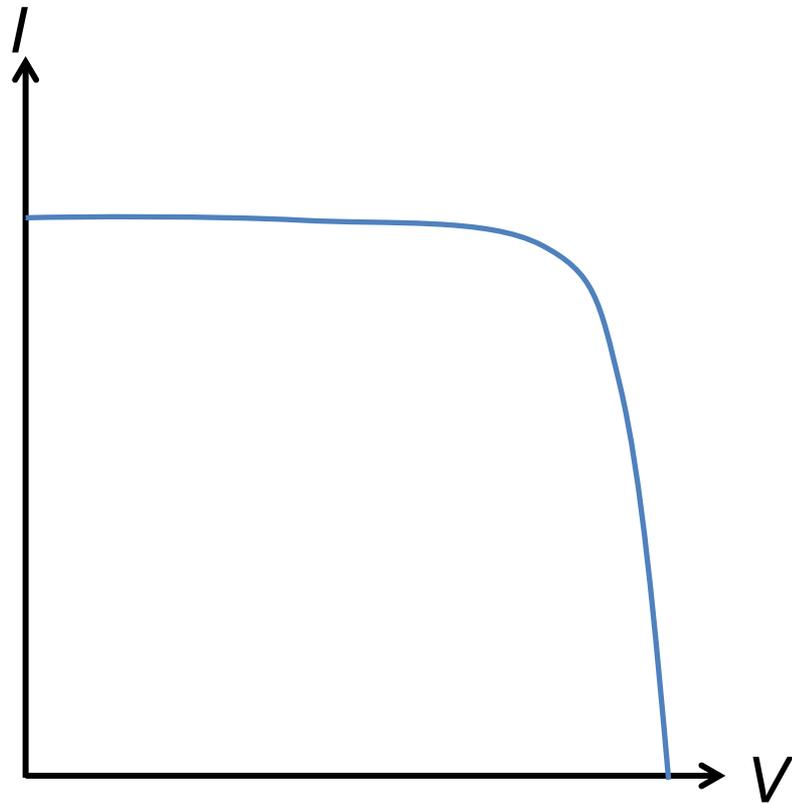
# 歪み補償量子井戸



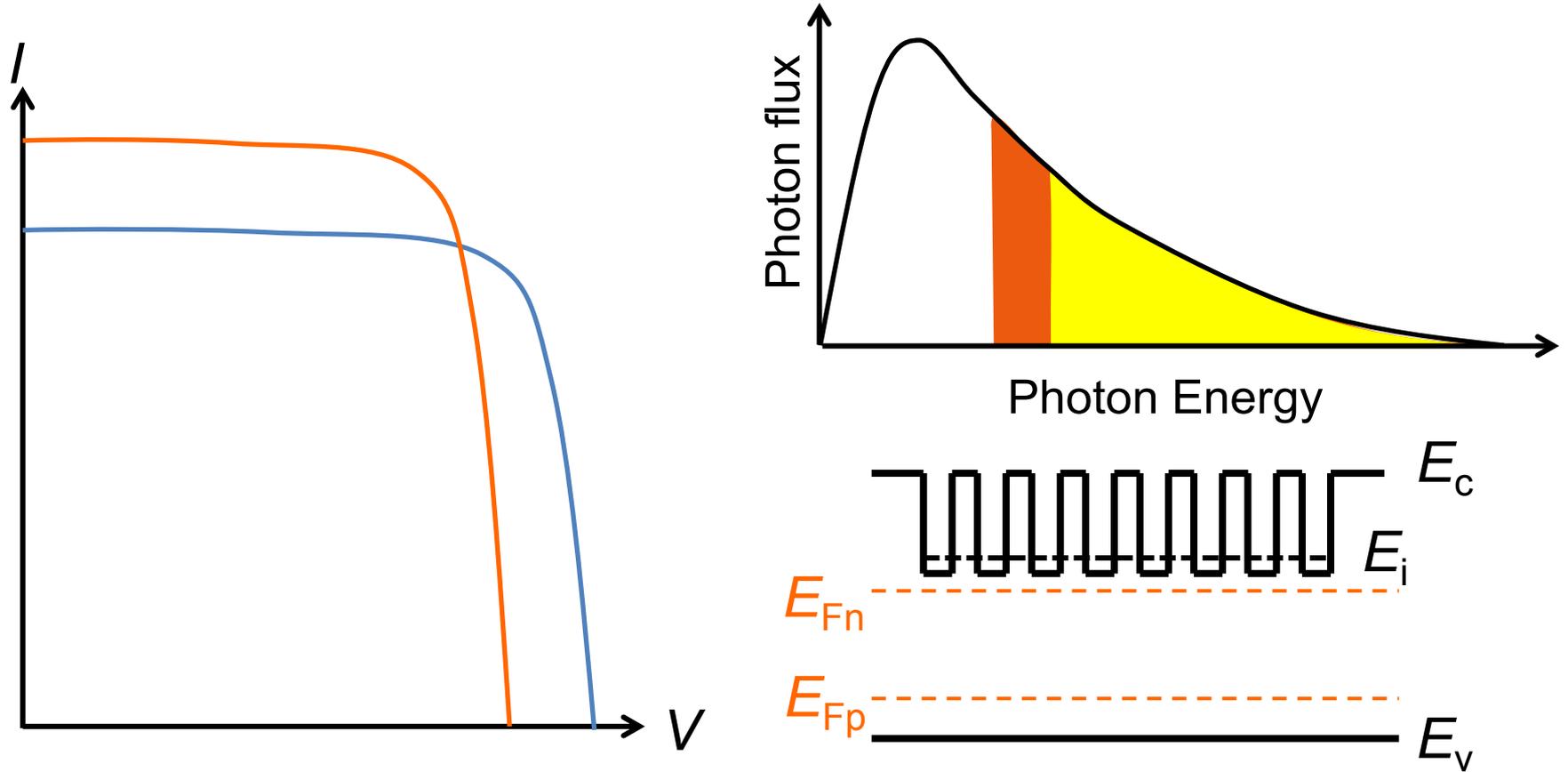
## A strain-balanced stack



# 単接合セル



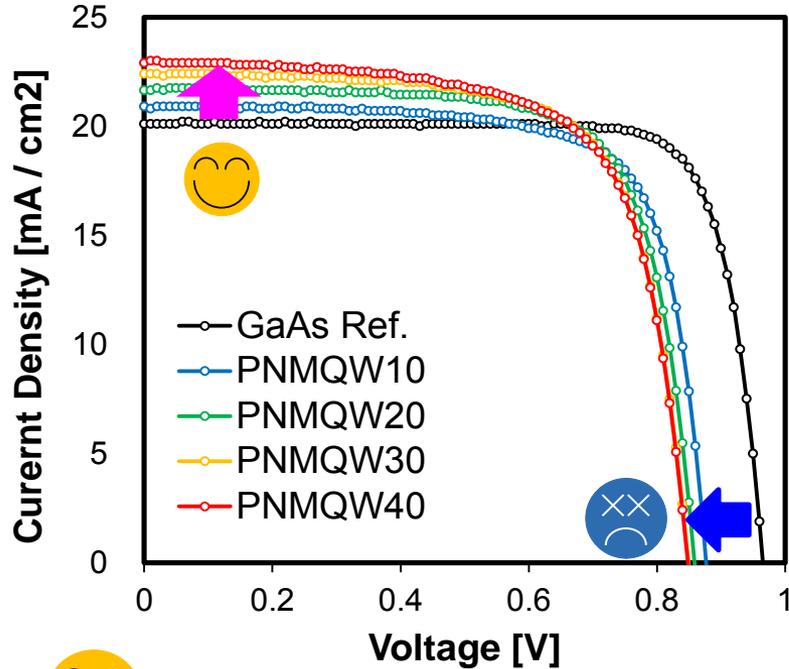
# 量子構造挿入セル



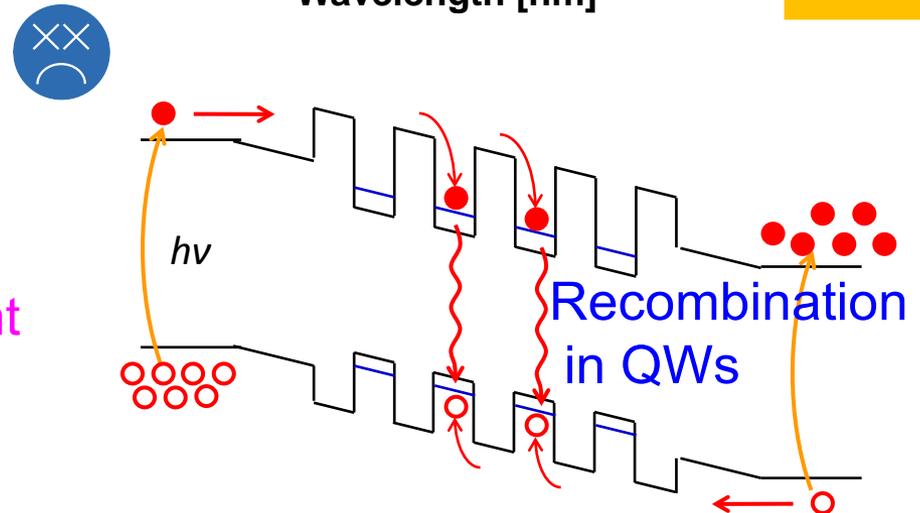
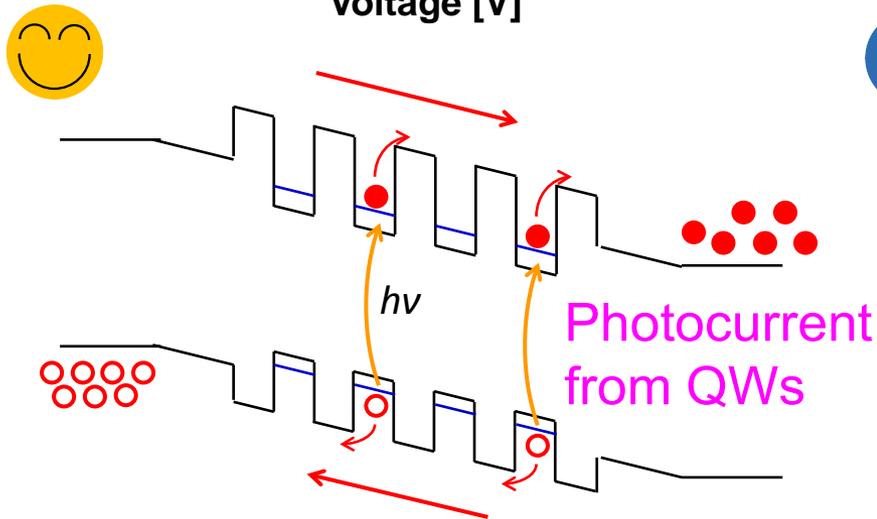
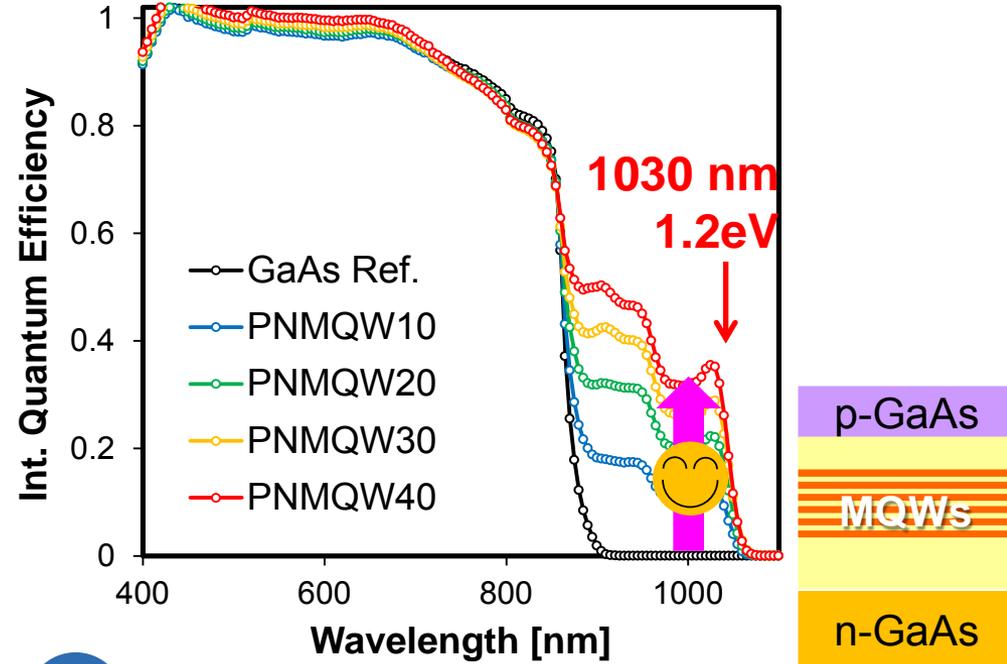
- 実効バンドギャップの減少 → 電流増大
- $\Delta\mu$ の減少 → 電圧低下

# 量子井戸挿入のメリット・デメリット

*I-V characteristic*



*QE @ 0V*



# 究極の量子井戸挿入セル

## □ 薄いInGaAs井戸

- 吸収端波長での吸収強度は井戸の厚さでなく数に比例
- 薄い井戸→歪みの蓄積が少ない

## □ GaAs緩衝層

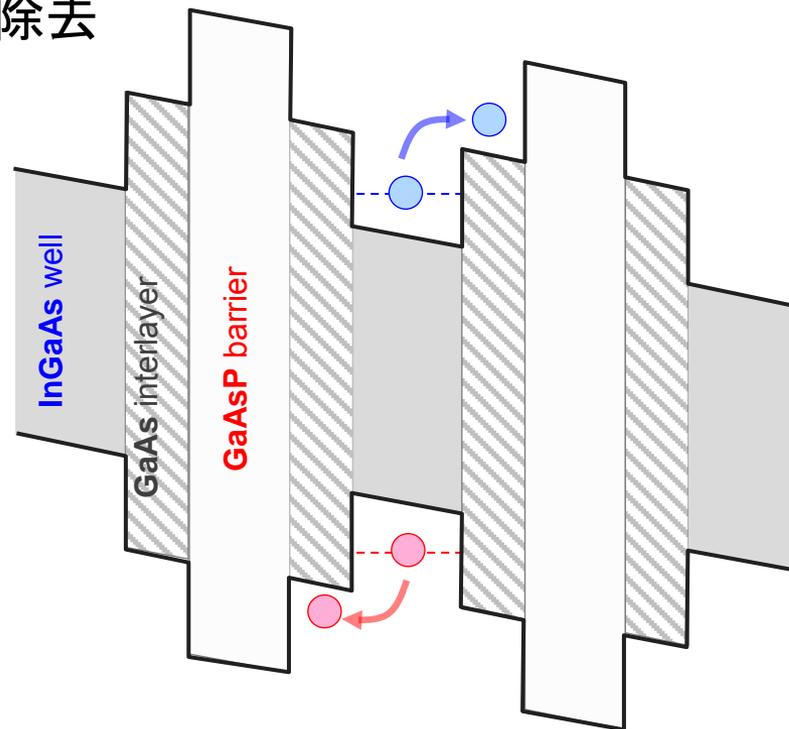
- 階段型ポテンシャル→キャリア脱出促進
- 結晶歪みの大きいヘテロ界面の除去

## □ 薄いGaAsP障壁層

- キャリアのトンネル輸送

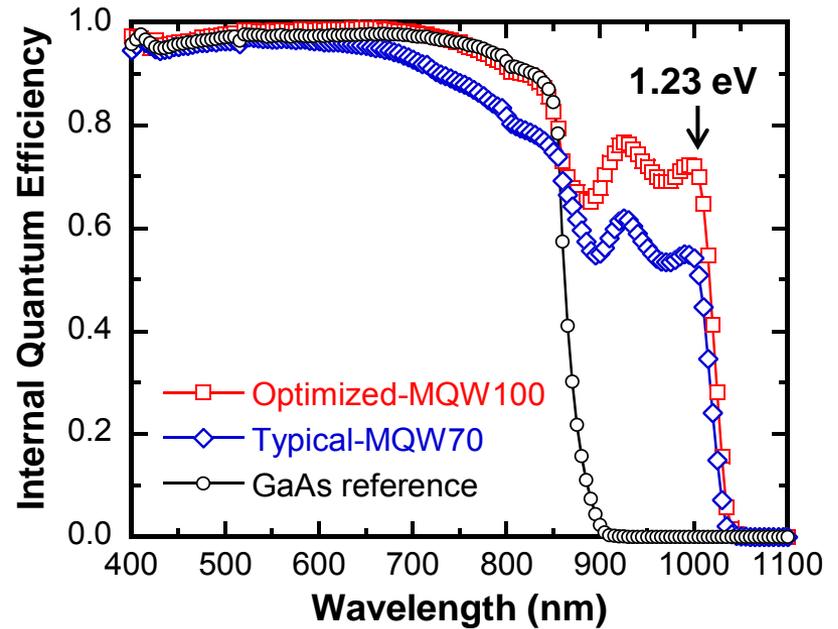
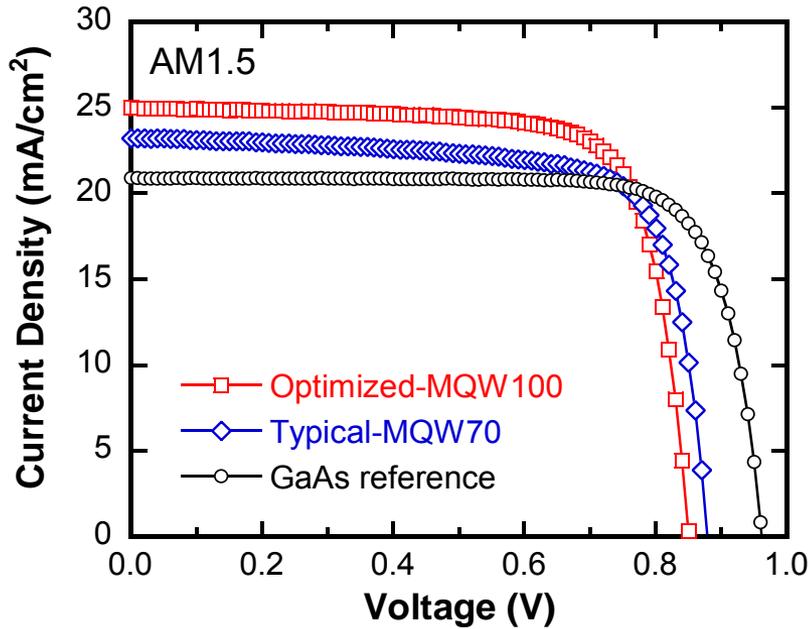
### ● 最適構造

In <sub>0.30</sub> GaAs	3.5 nm
GaAs	2.6 nm
GaAsP <sub>0.40</sub>	3.0 nm



# 究極の量子井戸セル

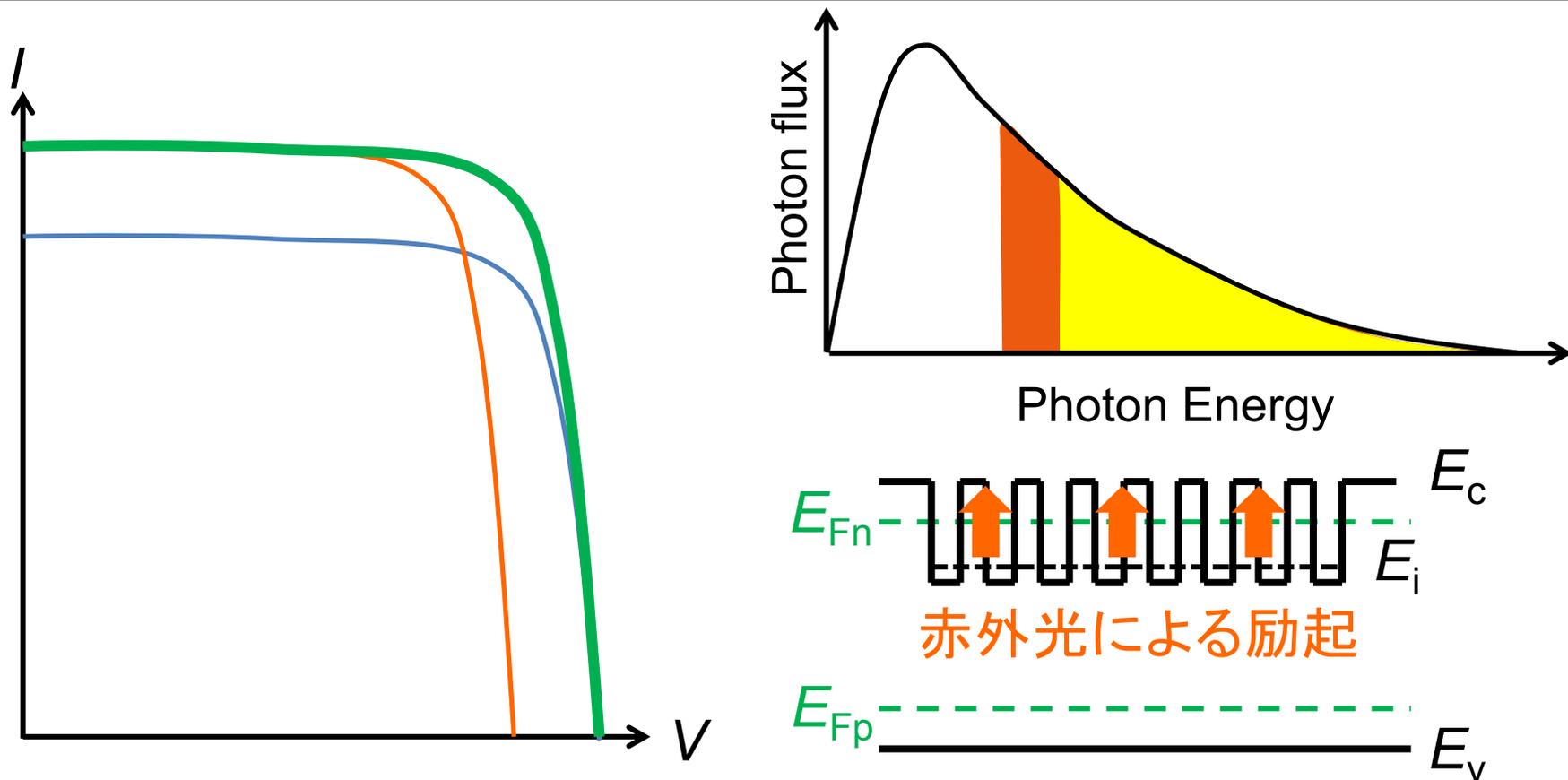
w/o anti-reflection coating



Structure (periods)	Well	Barrier	Interlayer	Total MQWs
Typical MQW(70)	In <sub>0.22</sub> Ga <sub>0.78</sub> As (7.5 nm)	GaAs <sub>0.60</sub> P <sub>0.40</sub> (8.0 nm)	GaAs (0.6 nm)	→ 525 nm
<b>Optimized MQW(100)</b>	<b>In<sub>0.30</sub>Ga<sub>0.70</sub>As (3.5 nm)</b>	<b>GaAs<sub>0.60</sub>P<sub>0.40</sub> (3.0 nm)</b>	<b>GaAs (2.7 nm)</b>	→ 350 nm

$J_{SC} = 18.6 \text{ mA/cm}^2$  expected under InGaP filter

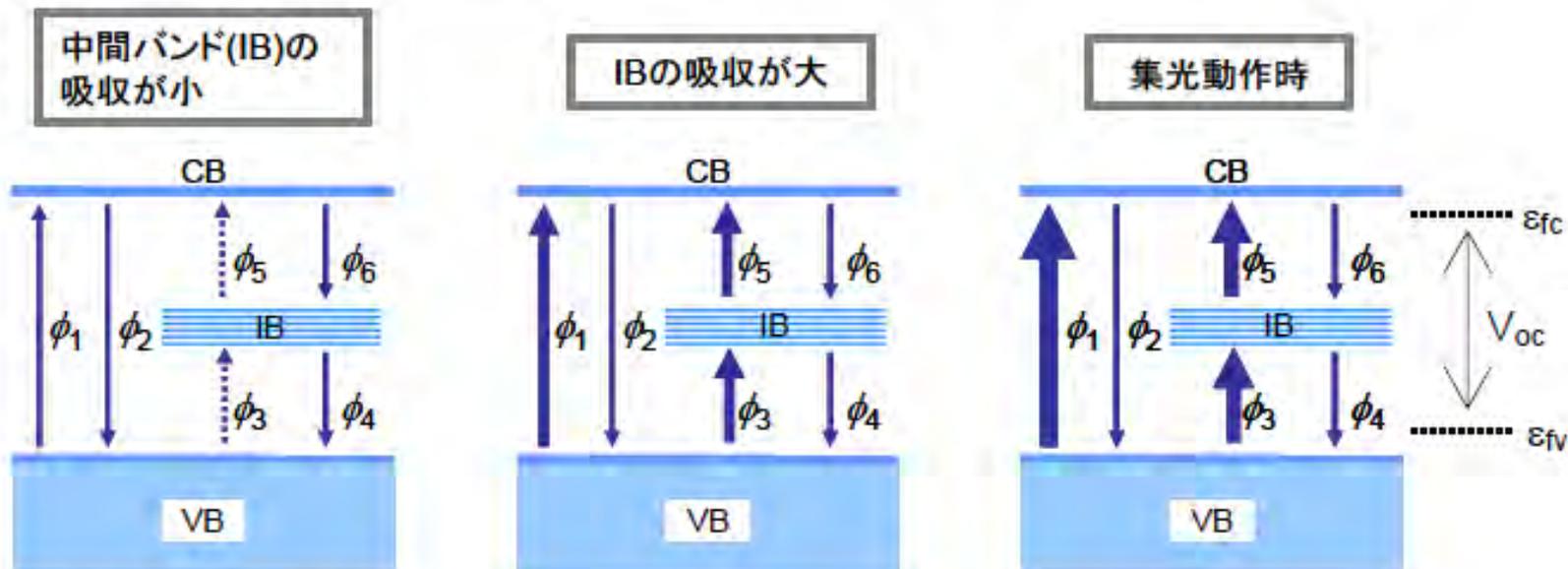
# 中間バンドセル



- 実効バンドギャップの減少 → 電流増大
- $E_i$ と $E_{Fn}$ を分離(赤外光励起) → 電圧低下せず

# 中間バンド動作実現のために

—— 中間バンド型太陽電池における変換効率増大のアプローチ ——>

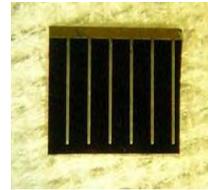
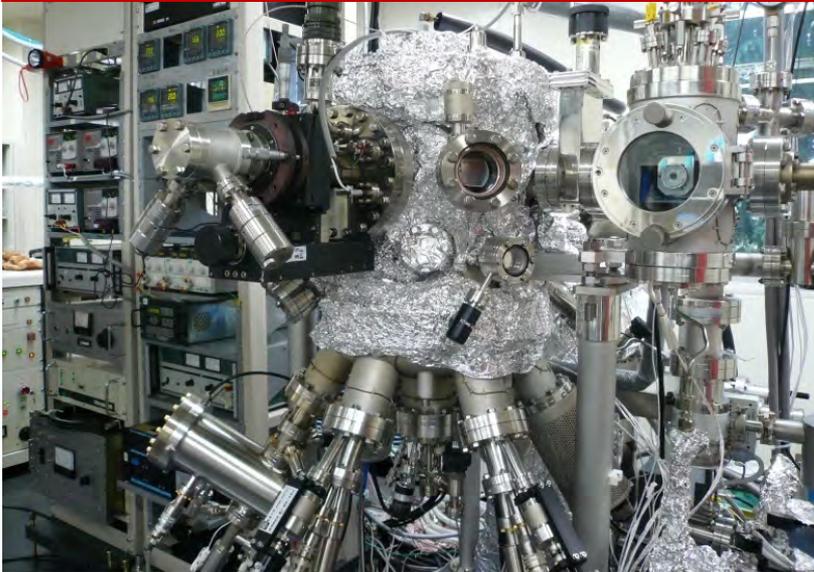


**最大化**  $\phi_3 - \phi_4 = \phi_5 - \phi_6$

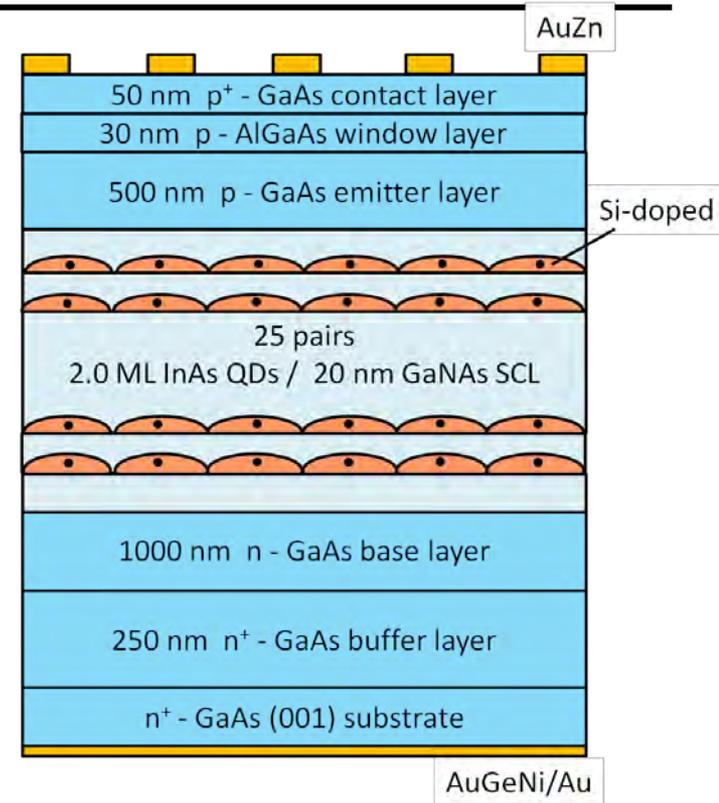
□ VB→IB, IB→CBの光吸収を最大化することがポイント

# MBEによる量子ドット成長

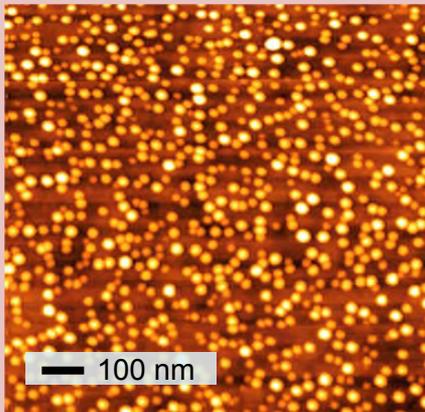
## Molecular Beam Epitaxy



Cell size:  
3mm × 3mm



## Structural parameter of QDs



Sheet density:  $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$

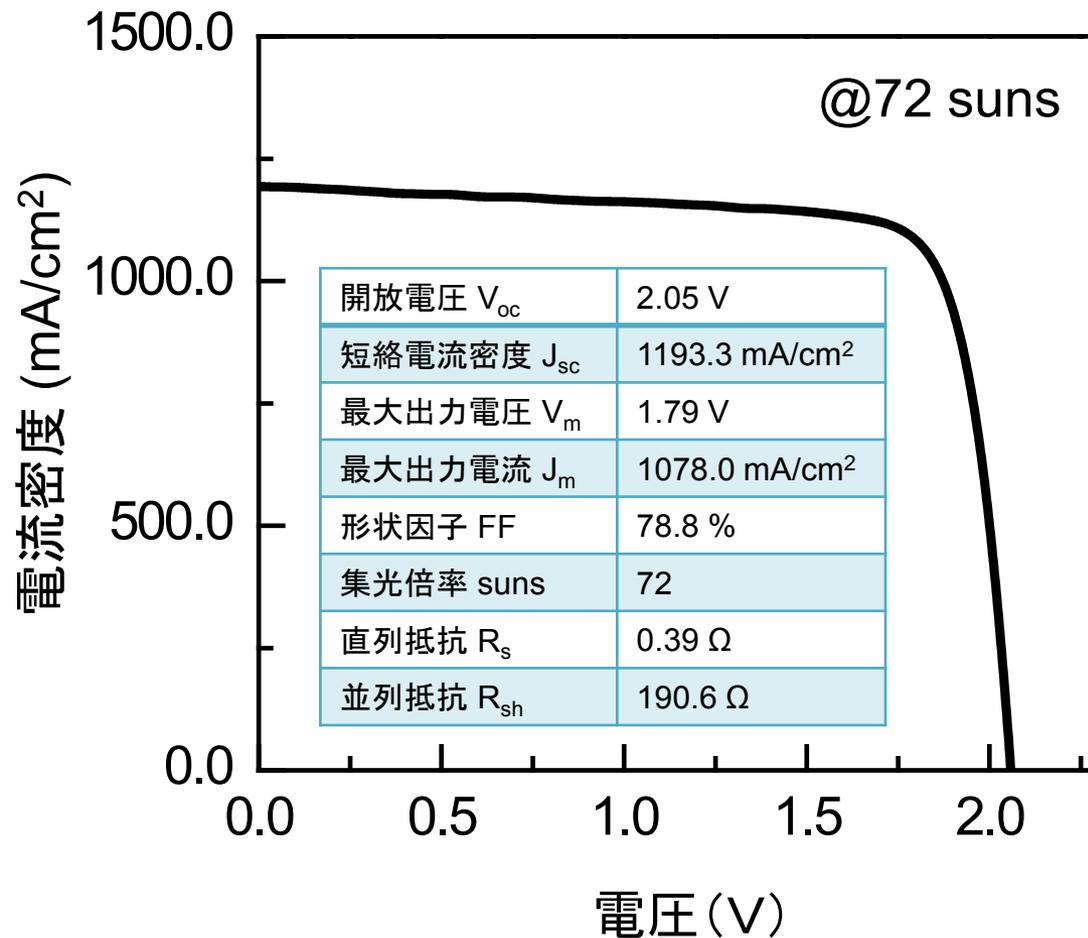
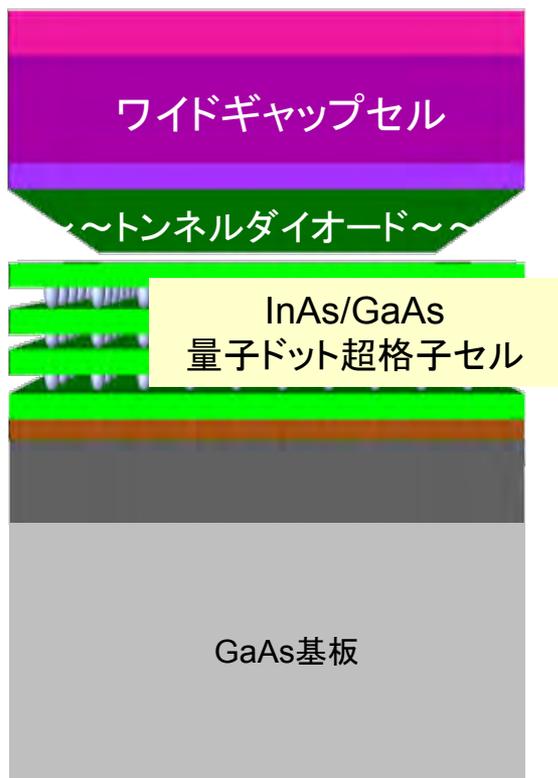
Mean diameter: 24.6 nm

Mean height: 4.7 nm

QDs layer: InAs 2 MLs with Si-doping

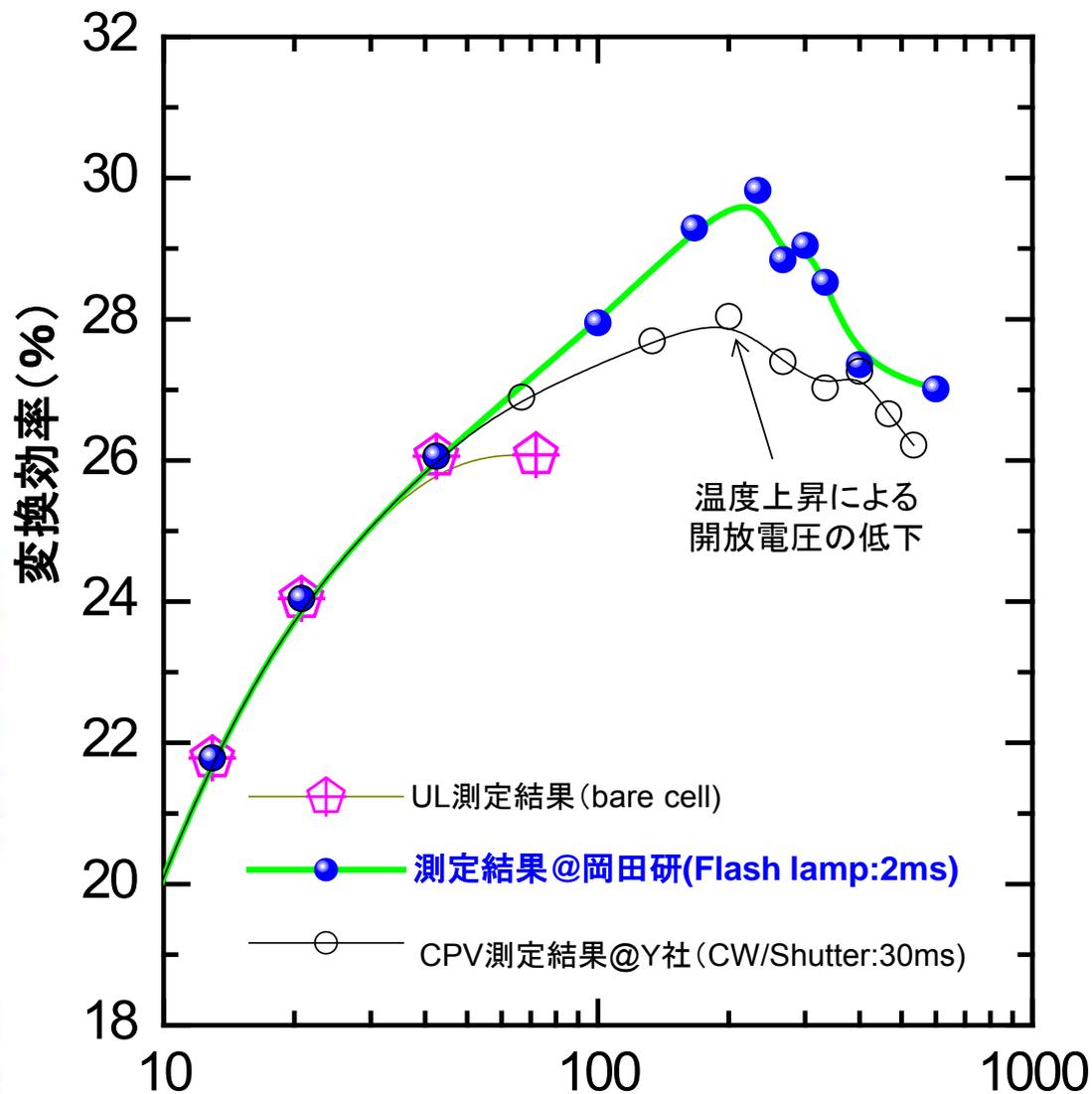
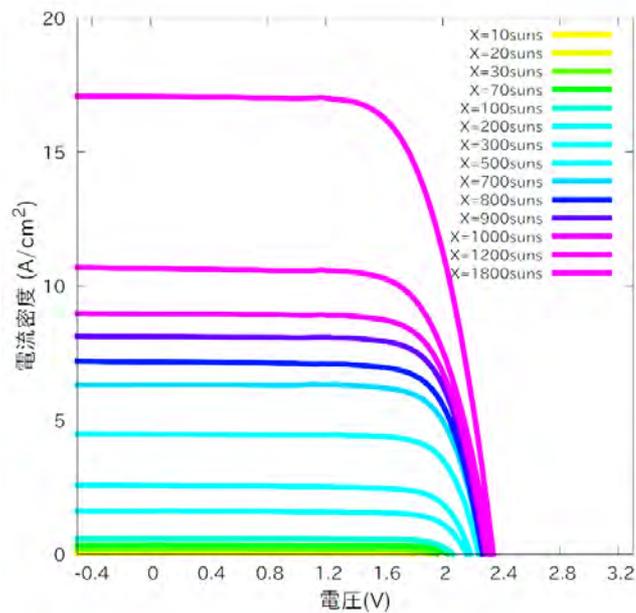
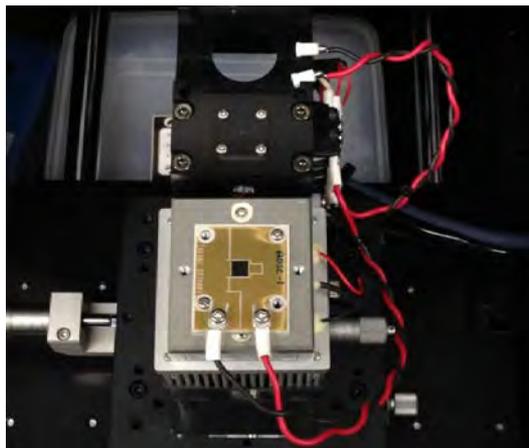
Barrier layer:  $\text{GaN}_{0.01}\text{As}_{0.99}$  20 nm

# 高電圧低電流量子ドット太陽電池



# 高倍集光下の特性

CPV実験セットアップ@岡田研



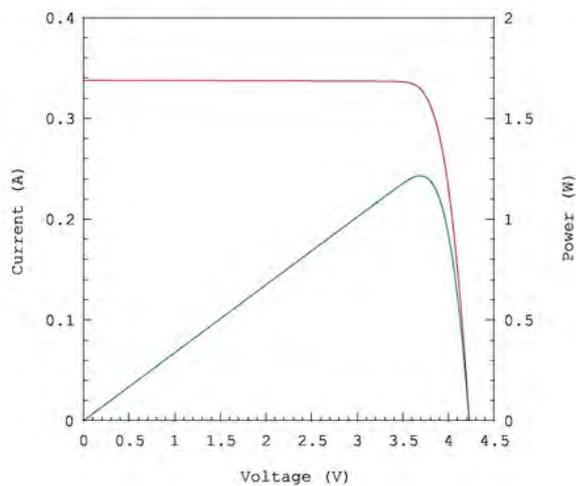
# 高効率化と低コスト化に向けた動向

# ウエハ接合による4接合セル

## III-V-based Multi-junction Solar Cell

**$\eta=46.0\%$  @508 suns**

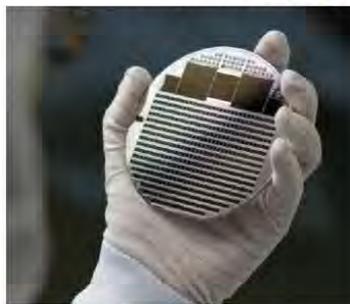
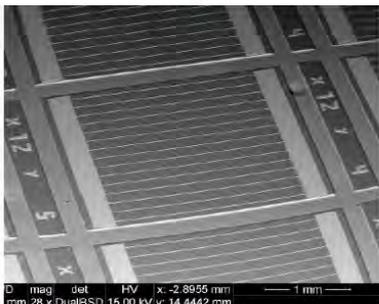
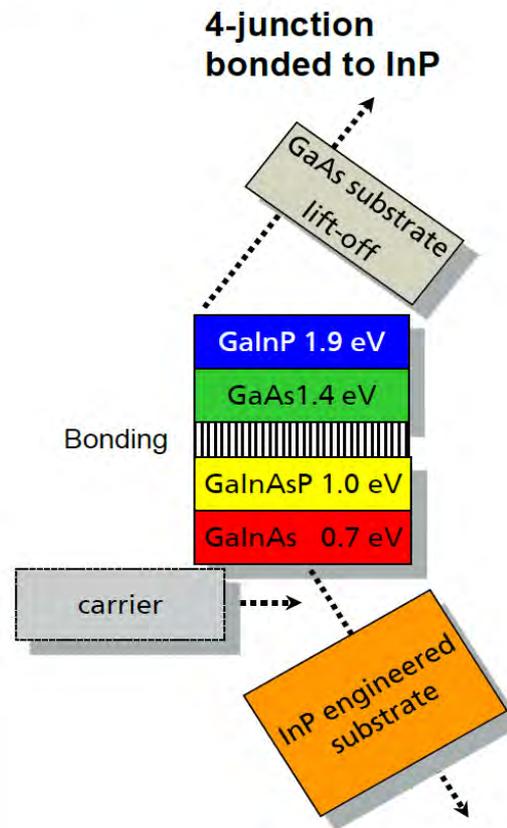
I-V CURVE  
ASTM E927-10 0.0520cm<sup>2</sup>(designated area) T-HIPSS



Date : 8 Oct 2014  
Data No : lot21-03-x19y04-01  
Sample No : lot21-03-x19y04  
Repeat Times : 9

Isc 337.9 mA  
Voc 4.227 V  
Pmax 1.215 W  
Ipmx 329.8 mA  
Vpmax 3.686 V  
F.F. 85.1 %  
Eff (da) 46.0 %  
DTemp. 25.0 °C  
MTemp. 24.6 °C  
DIrr. 50.8 W/cm<sup>2</sup>  
MIrr. 50.9 W/cm<sup>2</sup> (1st)  
50.8 W/cm<sup>2</sup> (2nd)  
50.0 W/cm<sup>2</sup> (3rd)  
50.9 W/cm<sup>2</sup> (4th)

Scan Mode  
Weighted average of  
(Isc to Voc) and  
(Voc to Isc)



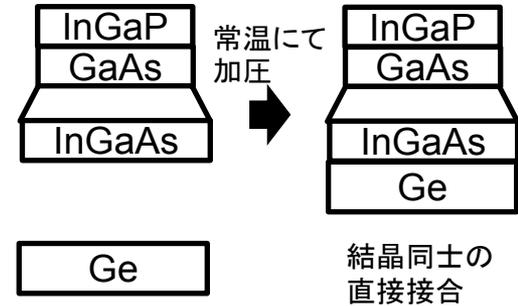
# 集光太陽電池の低コスト化に向けて



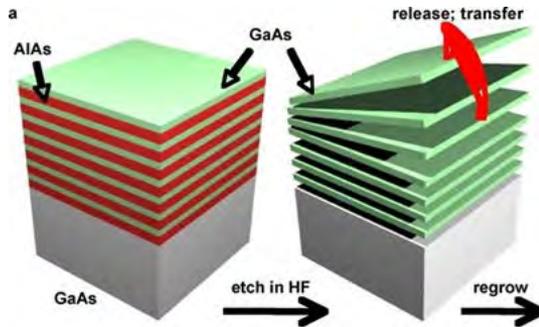
エピ<sup>o</sup>技術



on Si成長



ウエハ接合



- ・結晶層の剥離・薄層化
- ・基板リサイクル



SEMPRIUS

・LEDやヘッドライトの設計・製造技術を活用した集光モジュール設計



・高追尾精度 & 低コストな追尾メカ

□ 装置技術・実装技術の出番！

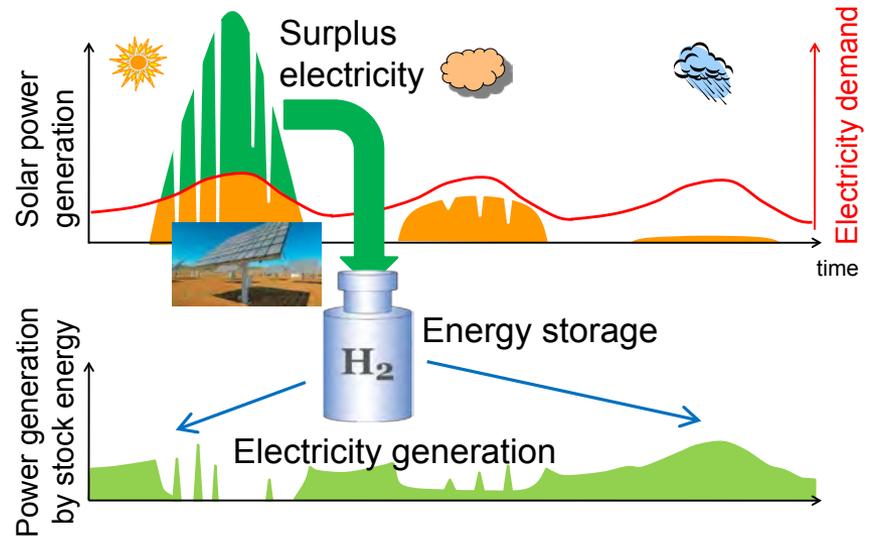
# まとめ：太陽電池の高効率化に向けて

---

- 集光＋非発光再結合の抑制（結晶欠陥抑制）が必須
- 多接合セルの高効率化
  - 格子整合条件⇔バンドギャップ組み合わせの最適化
  - GaInNAs: 結晶品位が向上すれば最適なミドルセル材料
  - 量子井戸セル: 基板の制約のなかでのバンドギャップ調整
    - ・ 歪み保障量子井戸→多数の井戸積層が可能→光吸収に有利
    - ・ 閉じ込め準位からのキャリア取り出しがつねに課題→薄い障壁層
- 中間バンドセル
  - バンドギャップ内中間準位の提供: 量子ドットなど  
→電圧をキープしたまま電流増大
- 集光太陽電池の低コスト化・普及に向けて
  - 高倍集光下では, III-V半導体コストではなく, モジュール実装コストや集光光学系・追尾系のコストが主要
  - 革新的技術の導入により, シリコンパネルと競争可能なコストを実現可能.

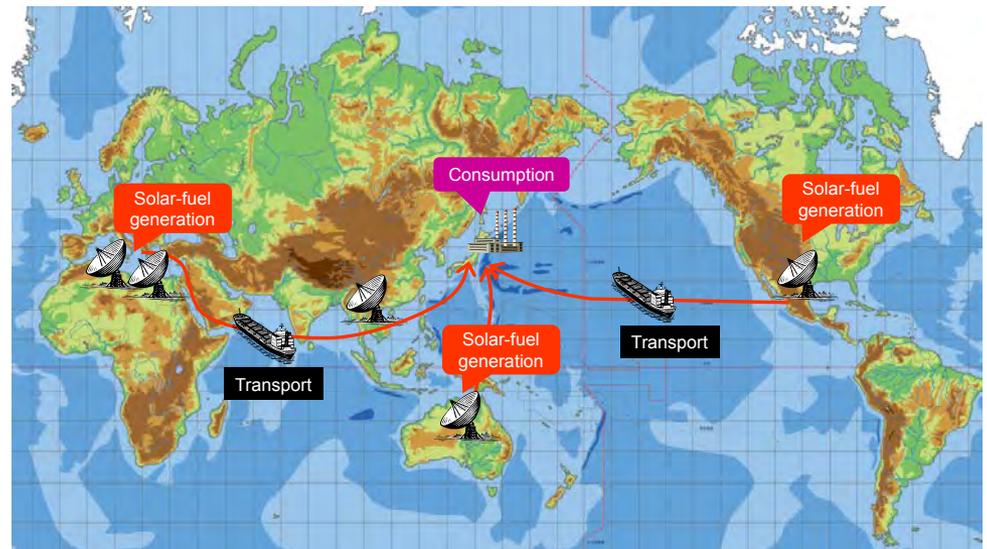
## ■ 定置型

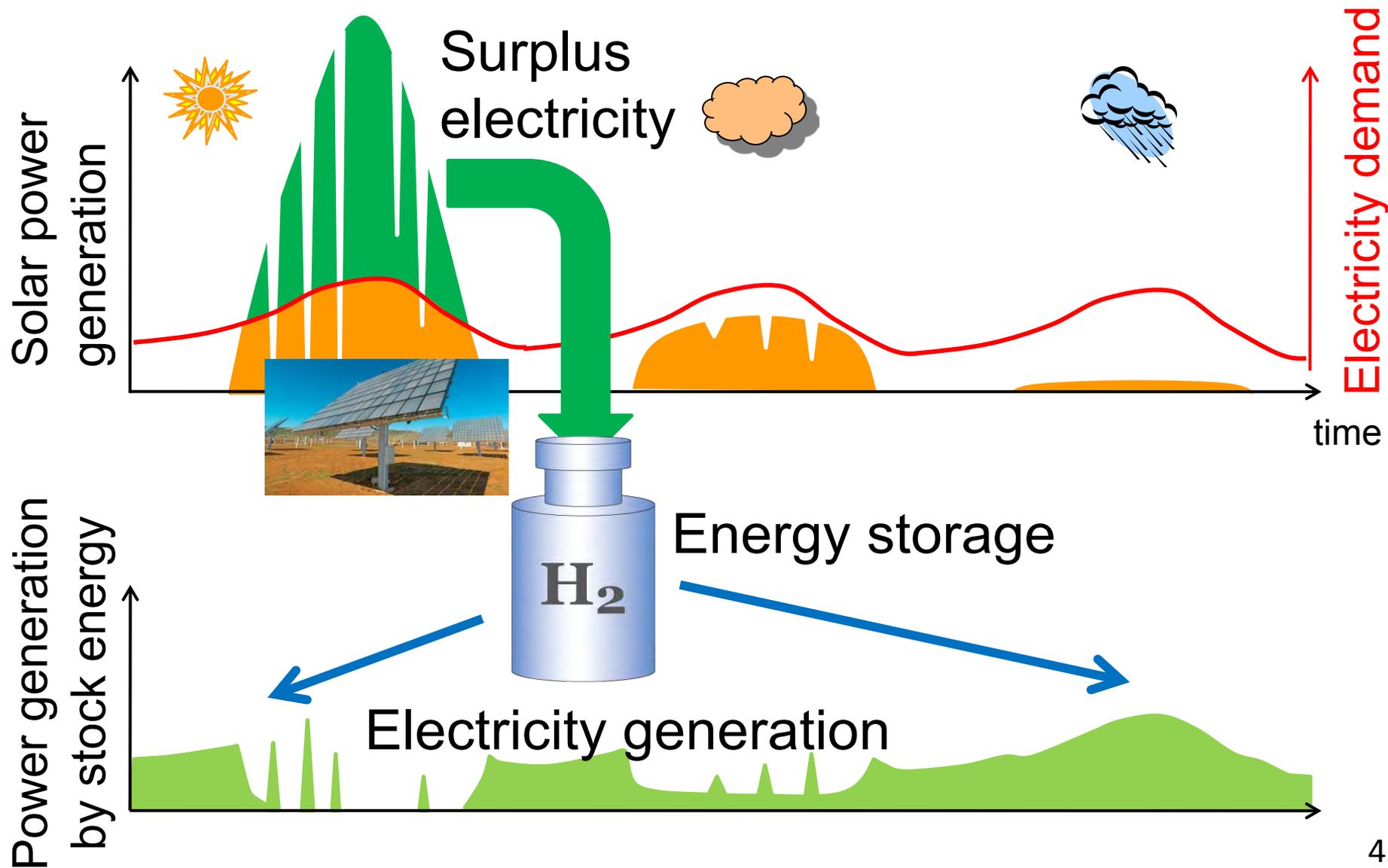
- 大容量を低コストで貯蔵



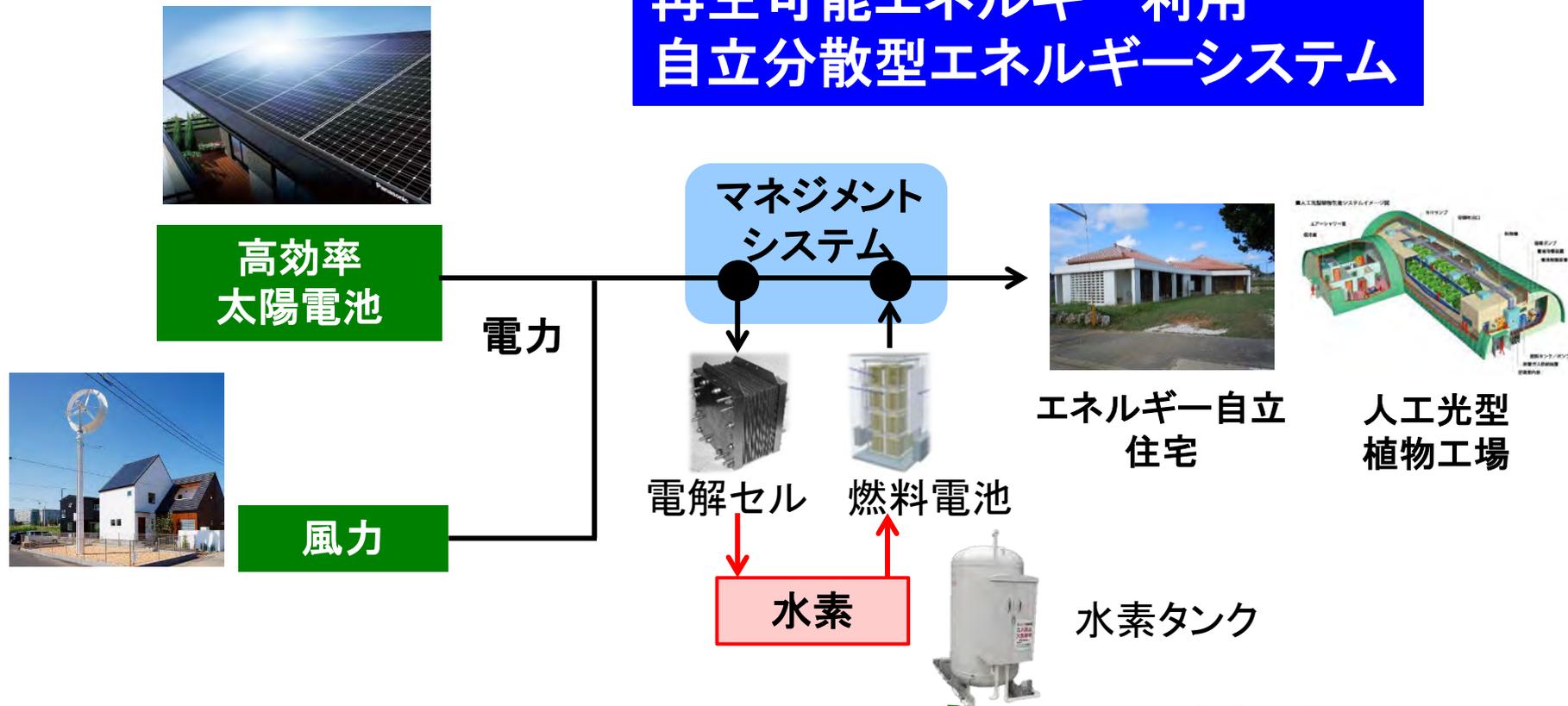
## ■ 長距離輸送型

- 高エネルギー密度 (体積ベース)
- 安定性





# 再生可能エネルギー利用 自立分散型エネルギーシステム



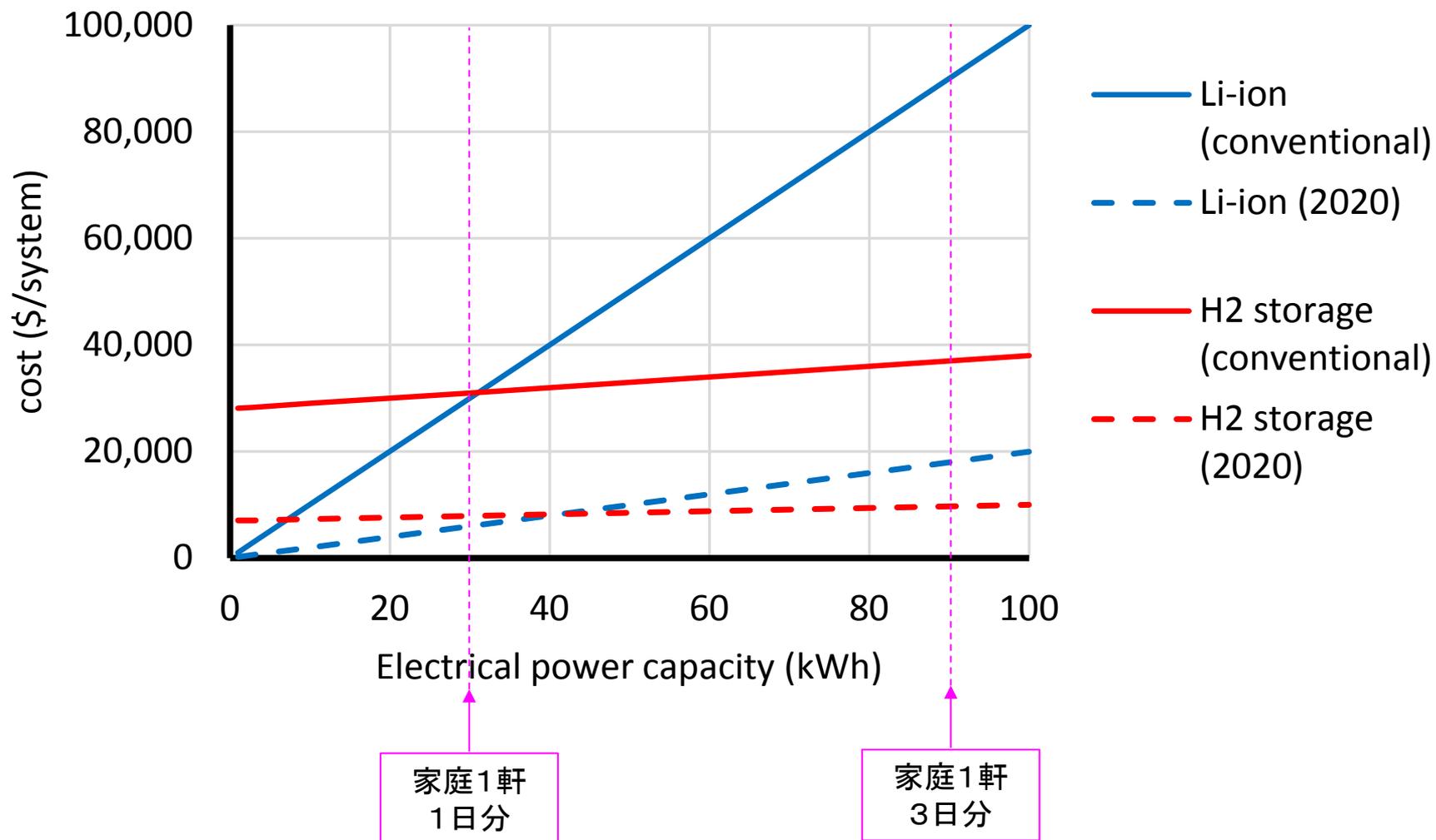
- 太陽電池の余剰発電量を高効率で水素に変換  
(太陽光から水素へのエネルギー変換効率 > 20%)
- 水素にエネルギーを貯蔵(家庭需要の3日以上)
- 燃料電池で発電・熱源として利用

電力系統に頼らない  
自立エネルギーシステム

系統の受け入れ能力に  
 制限されない大規模再生  
 可能エネルギー導入

エネルギー自立性の高い地方, 島嶼部に導入  
 → 新たなエネルギーシステムとして世界展開

# 水素蓄エネ技術の位置づけ



蓄電池：コスト $\propto$ エネルギー容量（大規模蓄エネほど高コスト）

水素蓄エネ：コスト $\propto$ エネルギー時間密度（大規模蓄エネでもコストはほぼ不変）

- The fraction of energy stored as  $\Delta G$  of hydrogen with respect to incident solar energy



(per unit area and time)

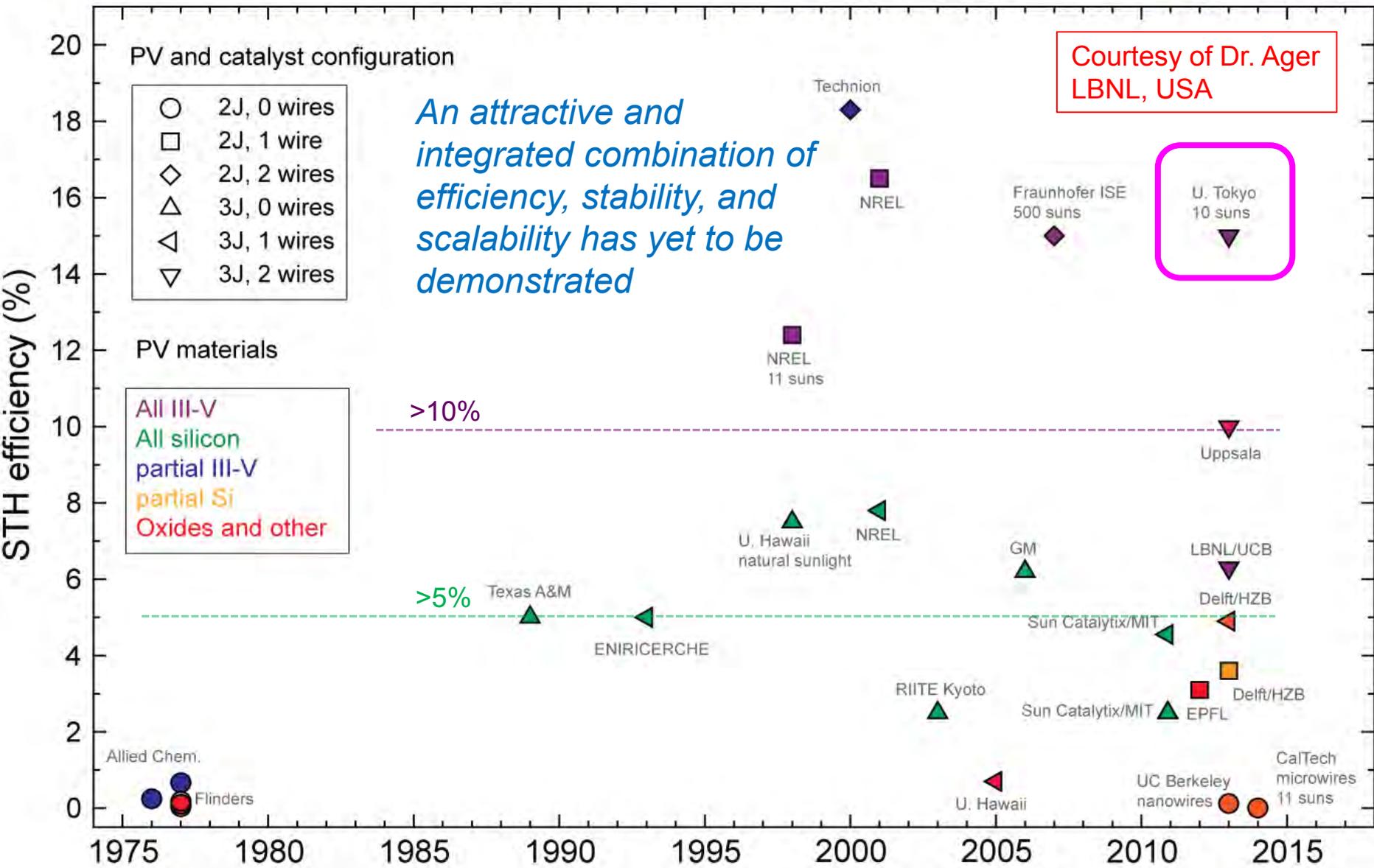
$$\eta_{\text{STH}} = \frac{(1.23 \text{ V})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(\# \text{ of H}_2 \text{ molecules obtained})}{\text{Incident solar energy (W m}^{-2}\text{)}}$$

# Reported Solar to Hydrogen Conversion Efficiencies

Courtesy of Dr. Ager  
LBNL, USA

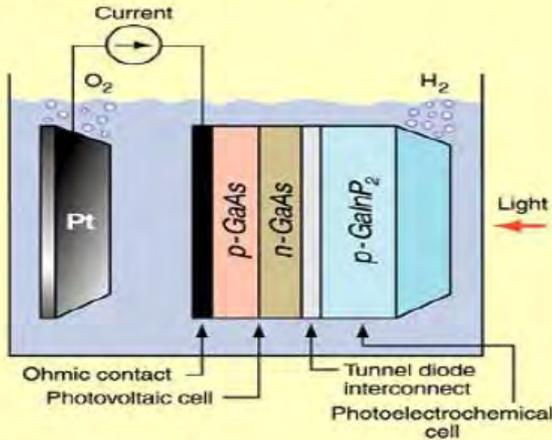
*An attractive and integrated combination of efficiency, stability, and scalability has yet to be demonstrated*

U. Tokyo  
10 suns



# Solar-to-hydrogen energy conversion

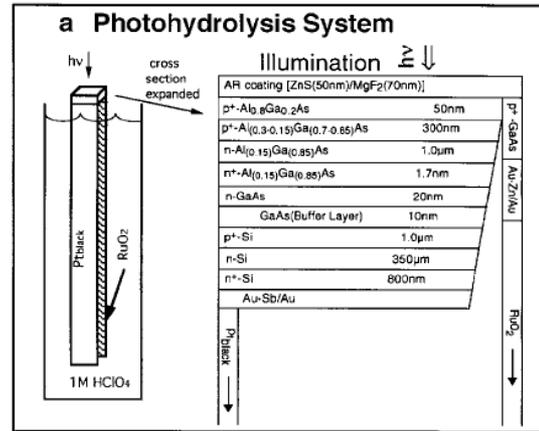
Novel cell uses light to produce H<sub>2</sub> at 12.4% efficiency



12% STH

Turner *et al.* (1998)

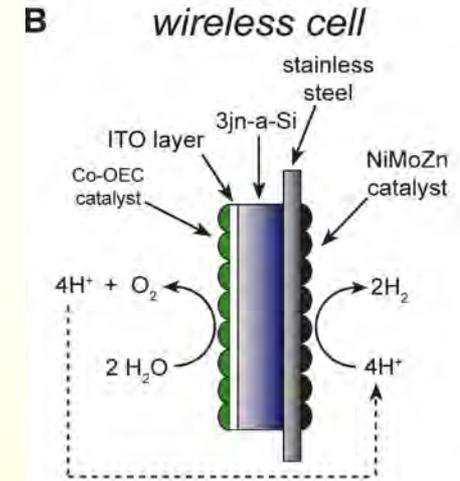
Pt/pn-GaAs//p-GaInP/Pt



18% STH

Licht *et al.* (2000)

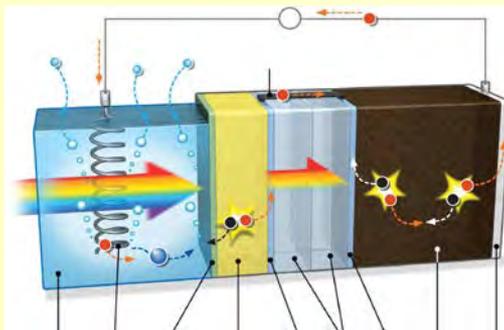
RuO<sub>2</sub>/pn-AlGaAs//pn-Si/Pt black



~3% STH

Nocera *et al.* (2011)

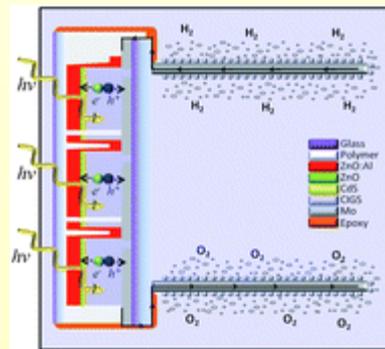
Co-Pi/3J-a-Si/NiMoZn



~5% STH

van de Krol *et al.* (2013)

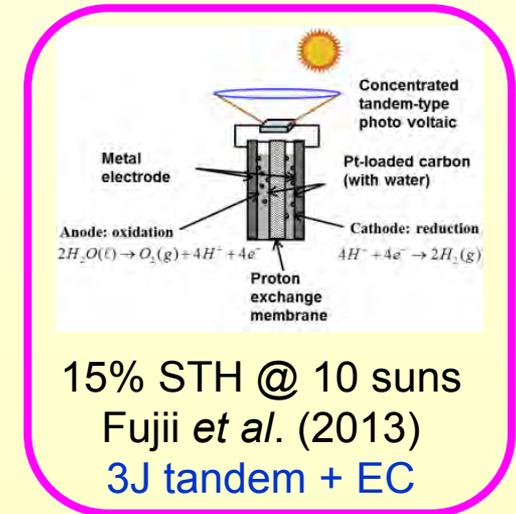
Co-Pi/BiVO<sub>4</sub>//2J-a-Si/Pt wire



10% STH

Jacobsson *et al.* (2013)

3xCISS tandem + Pt

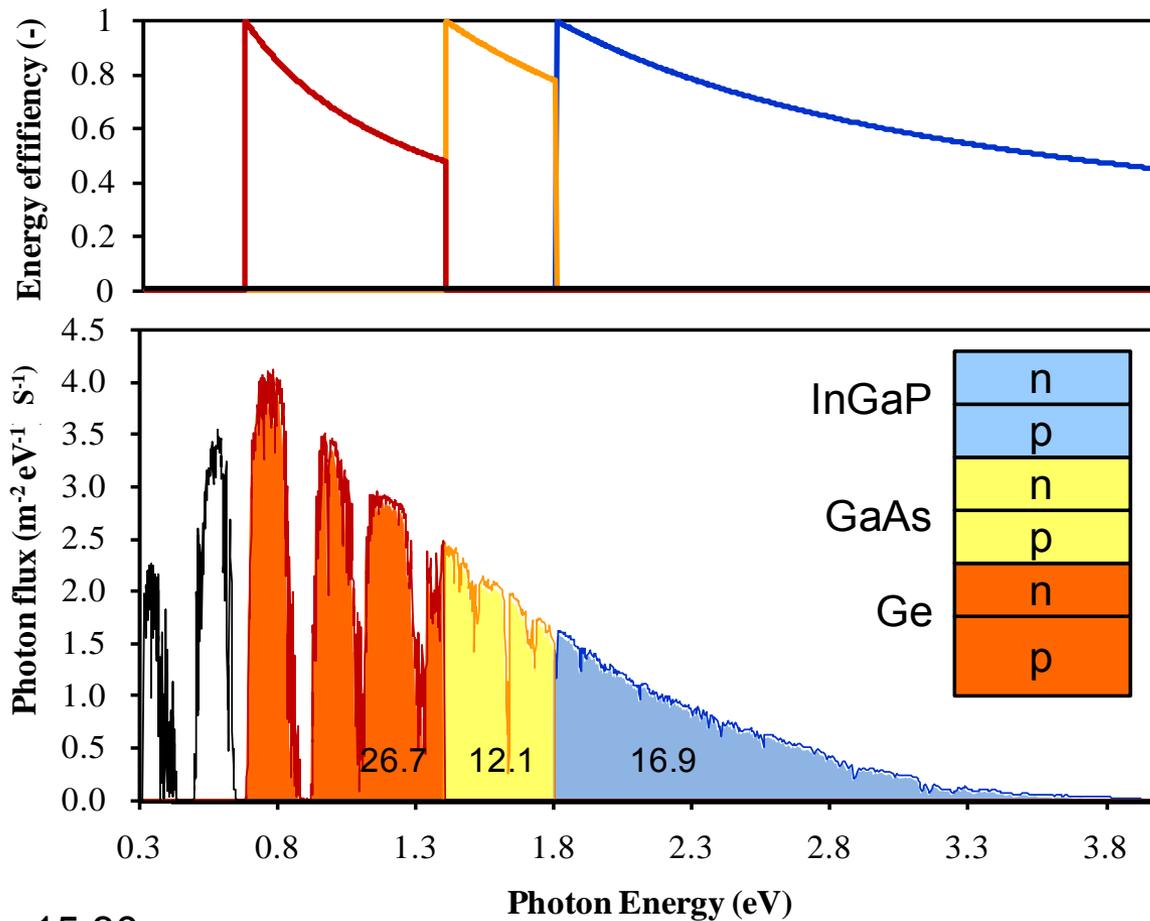
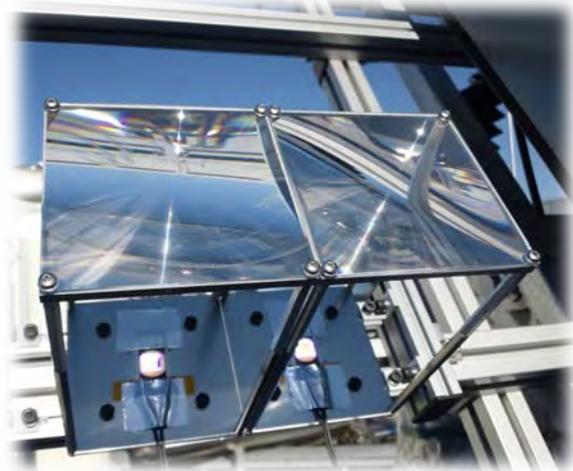


15% STH @ 10 suns

Fujii *et al.* (2013)

3J tandem + EC

# 集光多接合太陽電池



10:00

12:30

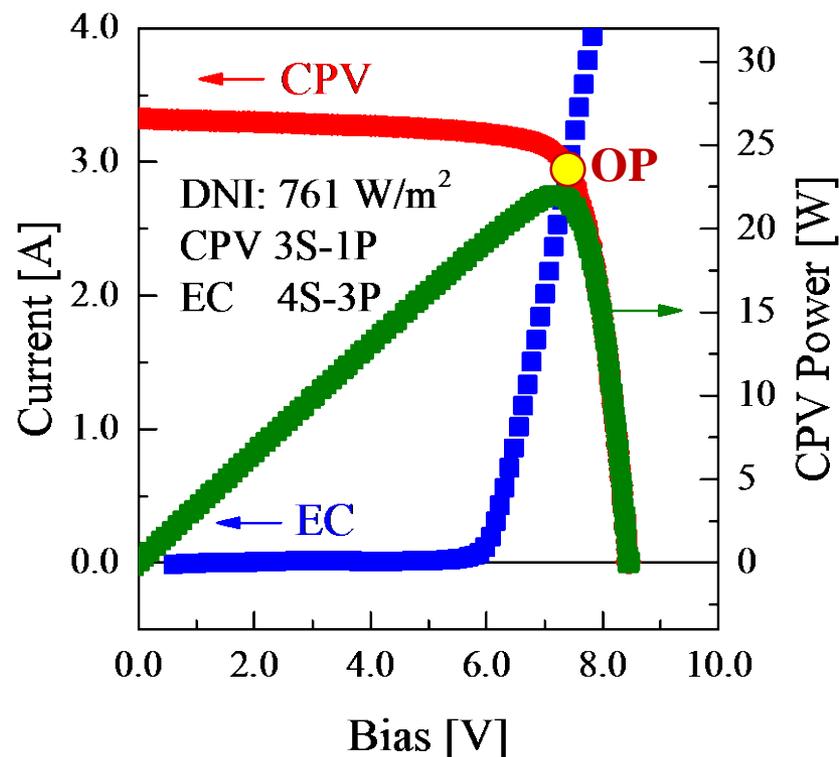
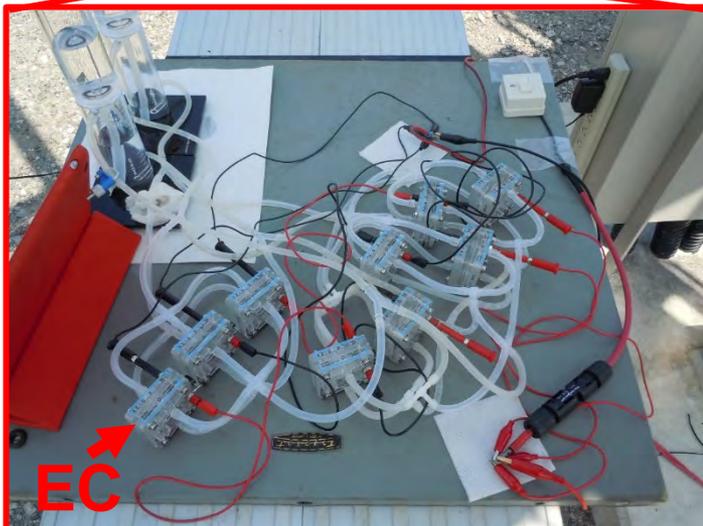
15:30



2014.08.27  
@ Miyazaki Univ.

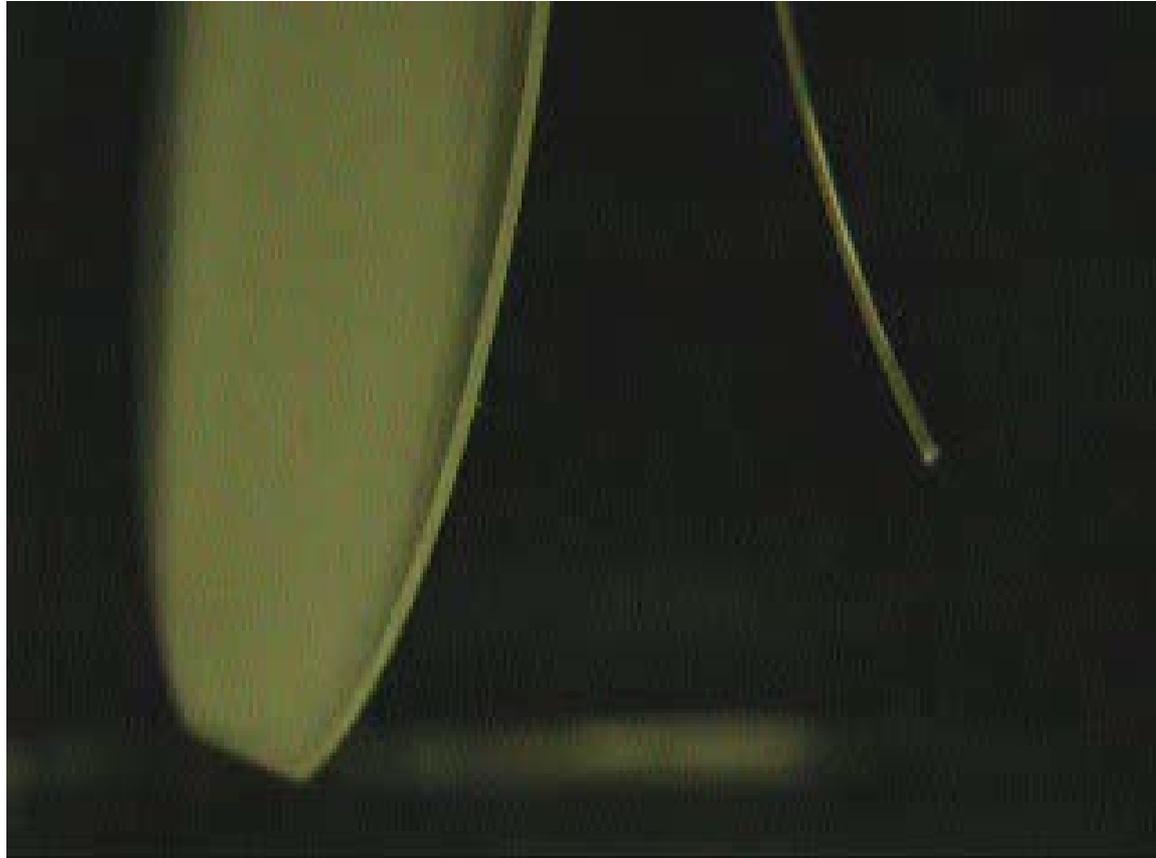
## 効率太陽電池と電解セルの直接接続

太陽電池と電解セルのI-V特性の交点が動作点になる



宮崎大学の天日条件でSTH=15.3%を達成.

光触媒: GaN on 2インチサファイアウエハ(20 cm<sup>2</sup>)

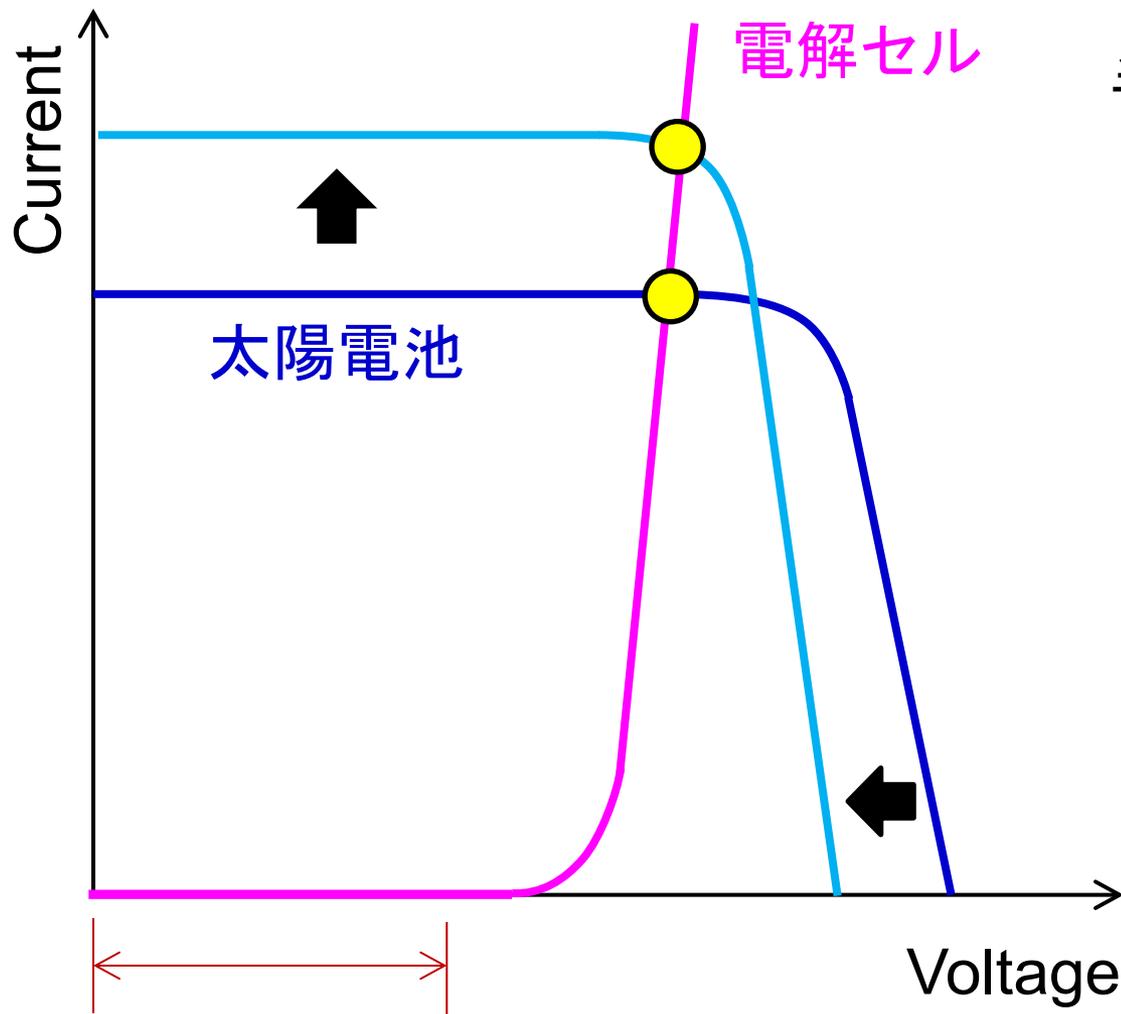


# 水素発生の様子(集光太陽電池+水電解)

太陽電池受光面積  $20 \times 20 \text{ cm}^2 \times 3 = 1200 \text{ cm}^2$



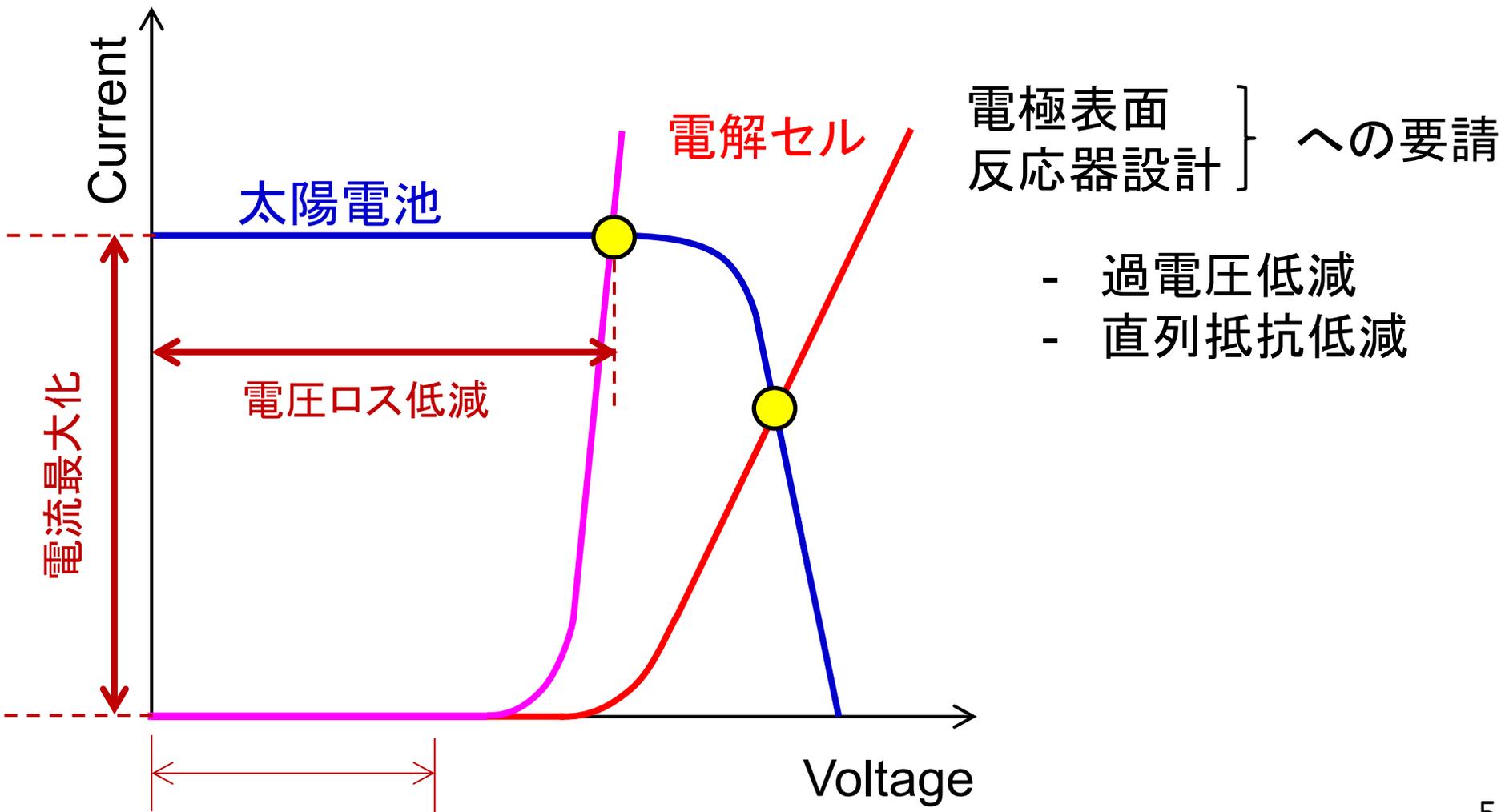
- 太陽電池＋水電解セルの直接接続は、太陽光から水素へのエネルギー変換効率を考えるための最適なモデルである。



半導体材料への要請

- 効率向上
- バンドギャップ最適化

- 太陽電池＋水電解セルの直接接続は、太陽光から水素へのエネルギー変換効率を考えるための最適なモデルである。

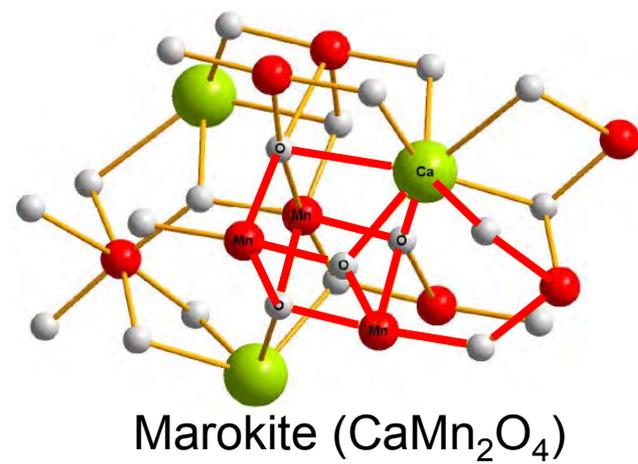
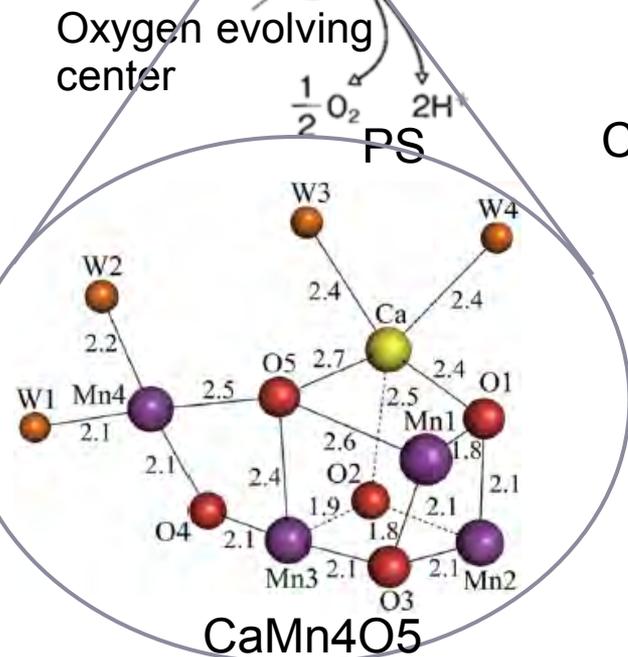
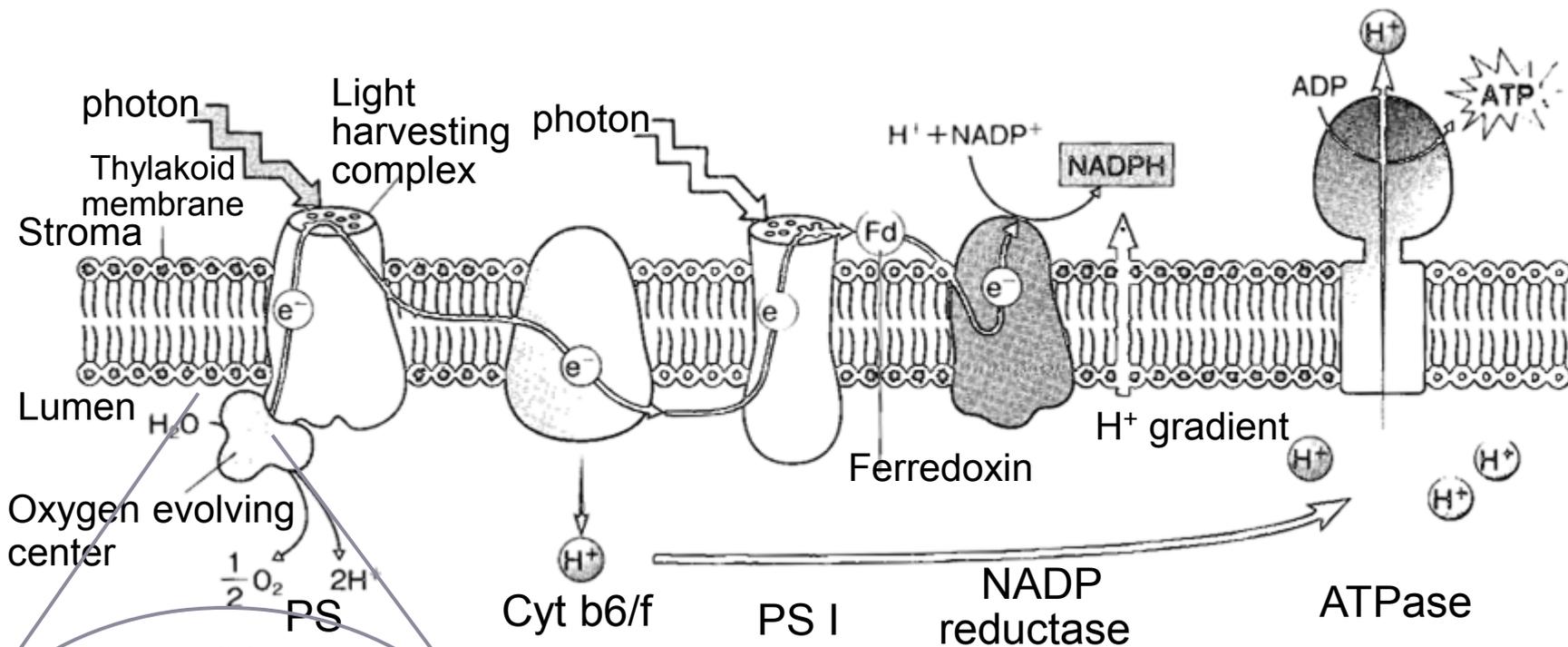


- $STH > 20\%$ は十分可能

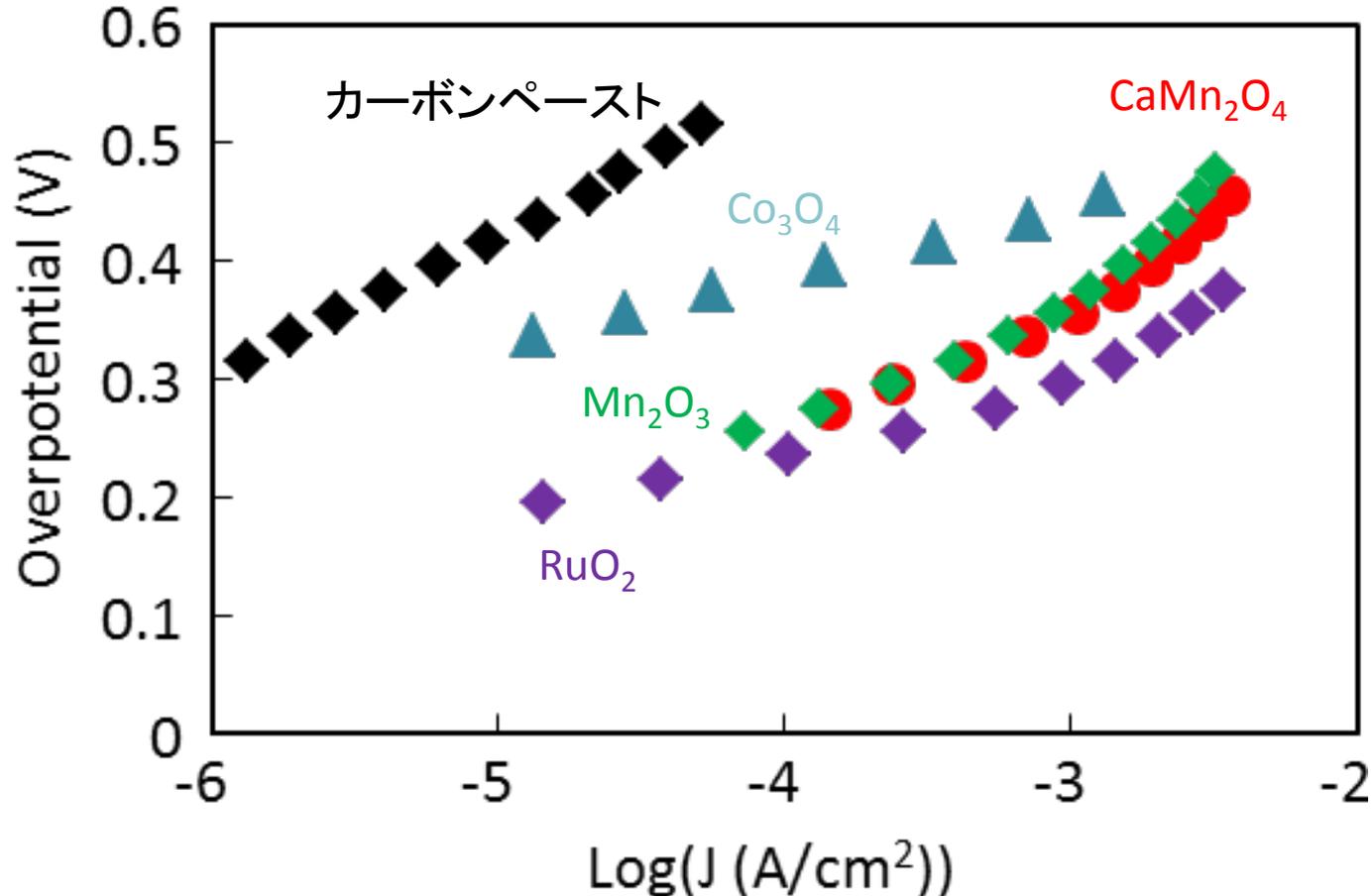
Fractional Efficiency [-]	Now	Target	Comment
Solar cell	0.24	0.30	Approximately 30% has been reported.
Pop/Pmax	0.92	0.95	By optimizing connection
$V(H_2)/V_{op}$	0.69	0.77	$\Delta G/\Delta H$ for $H_2O$ evolution is 0.83.
Faraday	1.00	1.00	
Total	0.15	0.22	

- 水素製造コスト\$2.2 /kg  
(オーストラリア等の日照条件の良い地域で)
- $CO_2$ からの太陽光燃料生成(人工光合成)の高効率化などさらにアグレッシブな目的には  
太陽電池と電気化学反応器を分離するアプローチが有効.

# 光合成(PS II)に学ぶ低過電圧電極



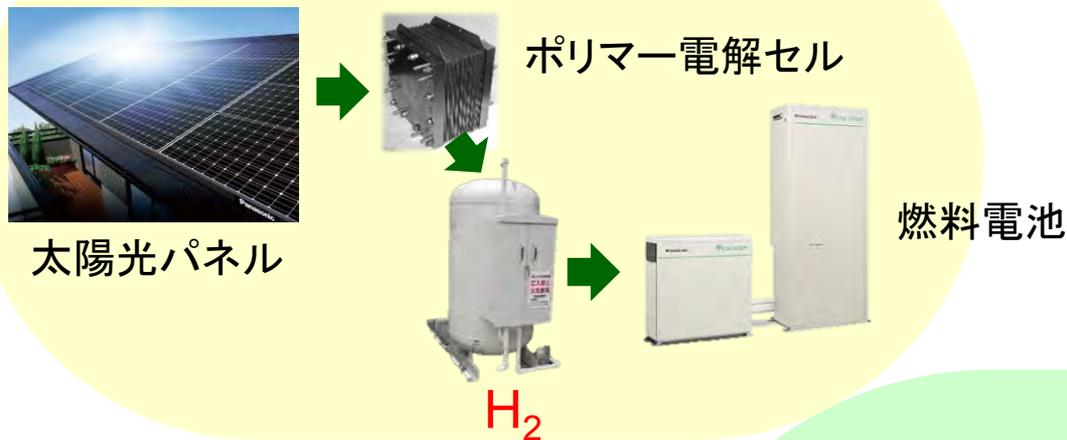
## 報告されている酸素生成触媒との比較



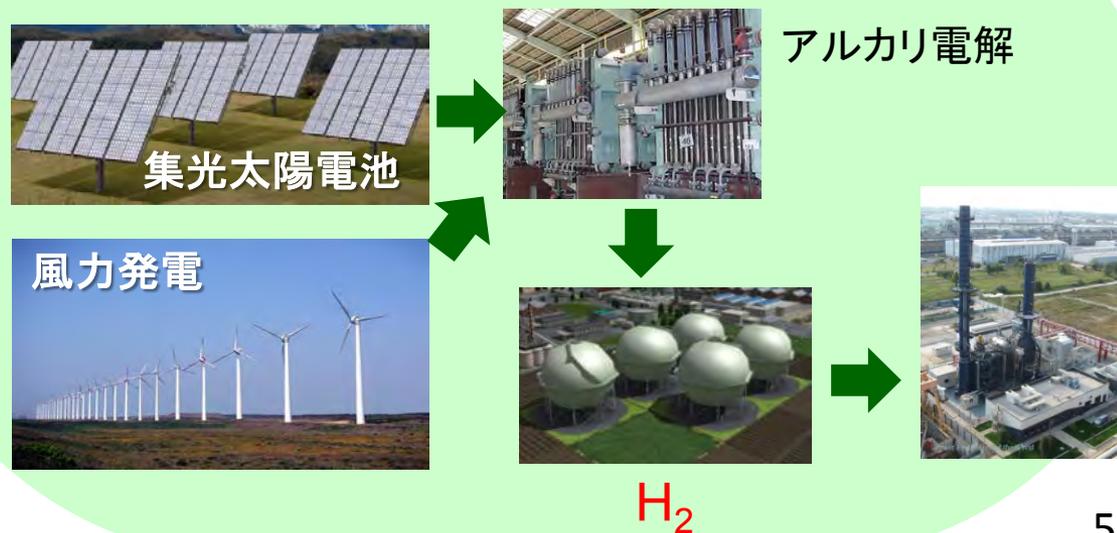
RuO<sub>2</sub> よりは大きいが、地球上に豊富な物質利用では最も小さい過電圧

# 水素蓄エネ技術はスケーラブル

## 家庭・コミュニティ用

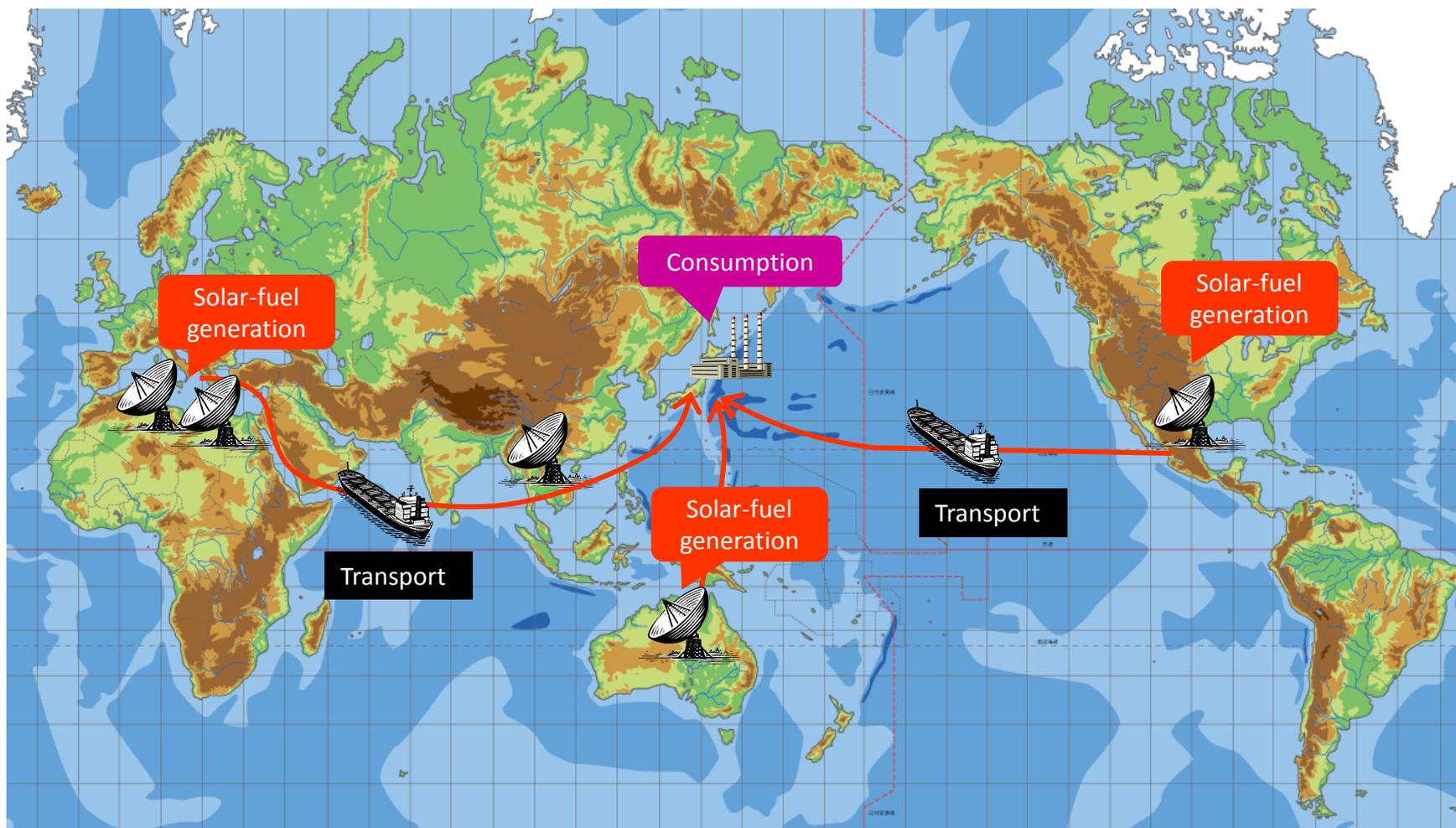


## 大規模産業用



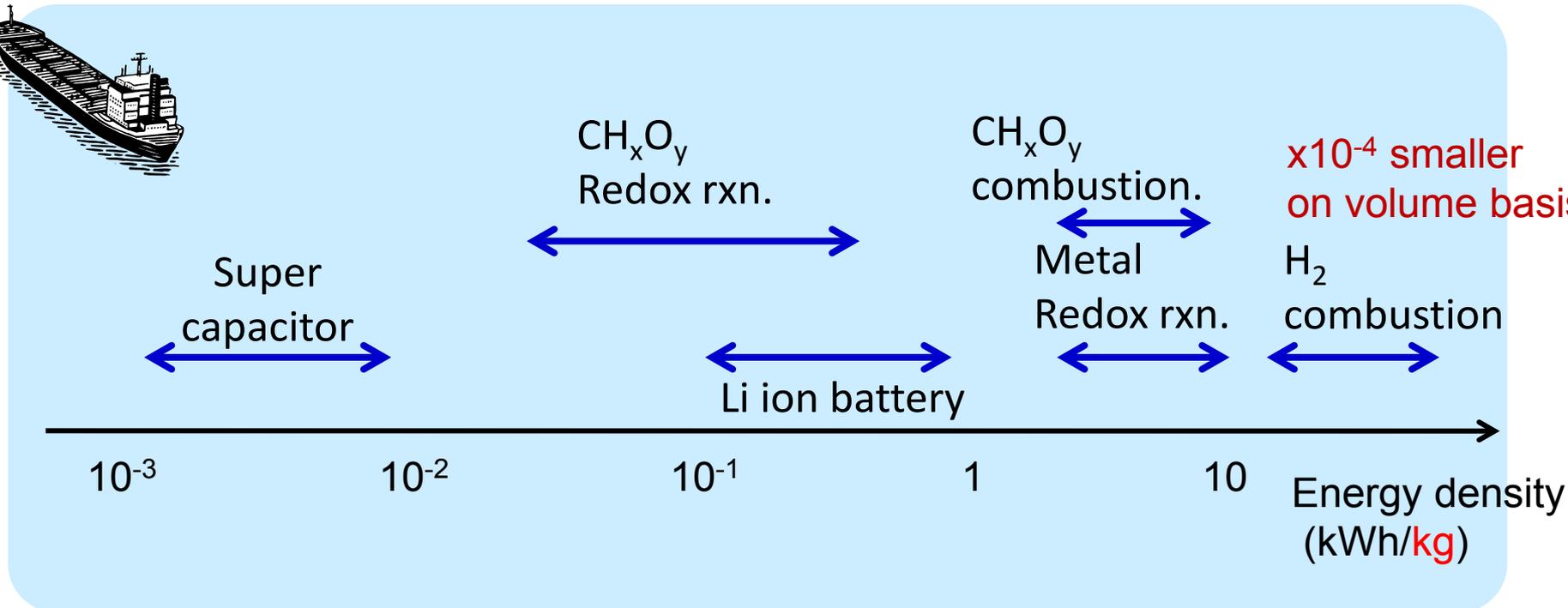
- 人口低密度地域，離島などに有効
  - 電力網整備コスト > 水素蓄エネのシステムコスト
- エネルギー自給自足の価値
- 農業などへの応用
  
- 今すぐ構築可能なシステム（でも，まだ存在しない．）
  - まずはデモンストレーションが必要

現在でも，地域条件により  
コストメリットあり



- 大規模エネルギー消費地 ≠ 日照条件の良い地域
- 太陽光エネルギーの蓄エネ，輸送が不可欠.

# Energy density in various storage media

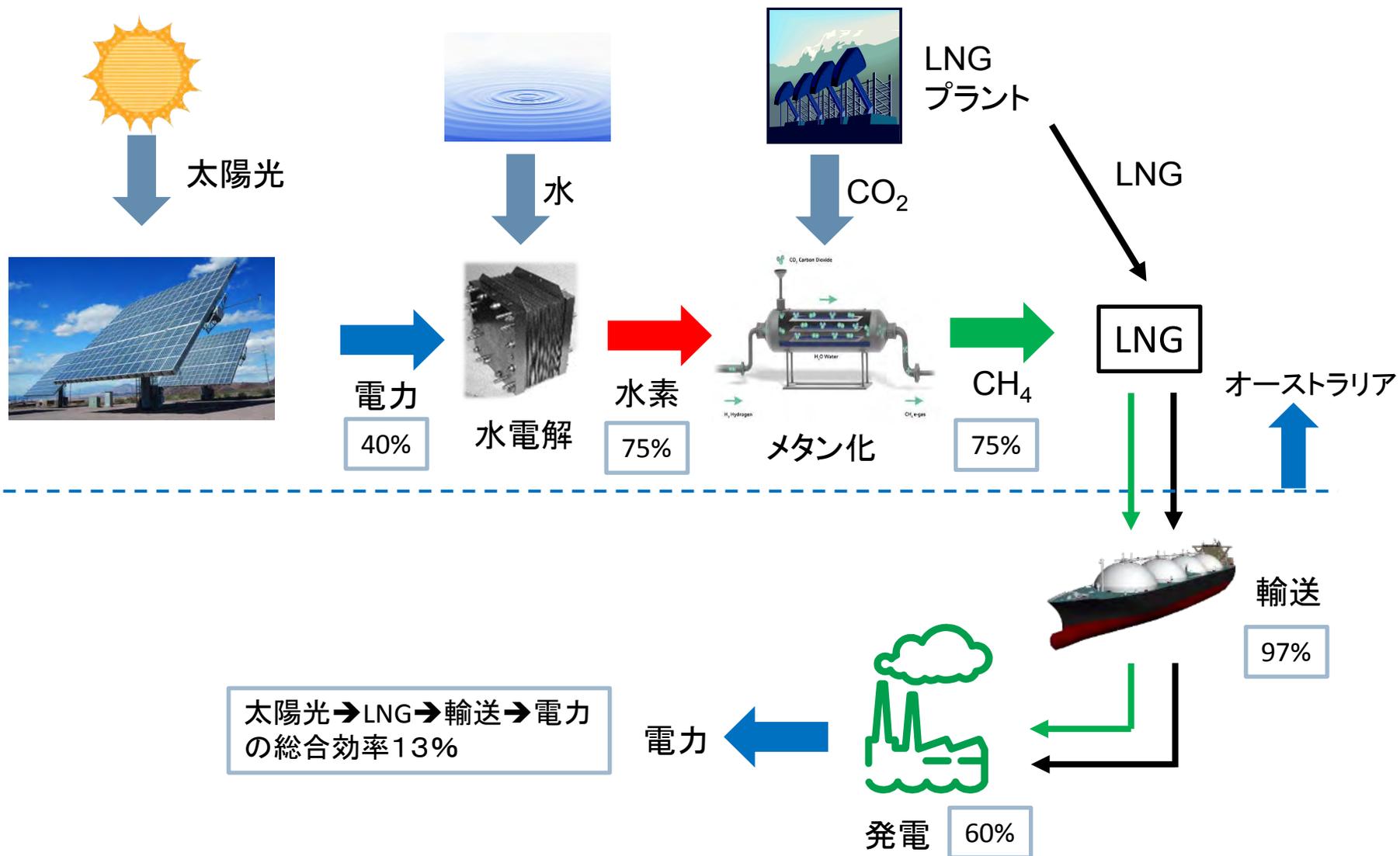


- Metal redox reaction
  - High energy density, ready for transport
- Hydrocarbon combustion
  - The same as existing fossil fuels
  - Solar synthesis of hydrocarbons is highly demanded.

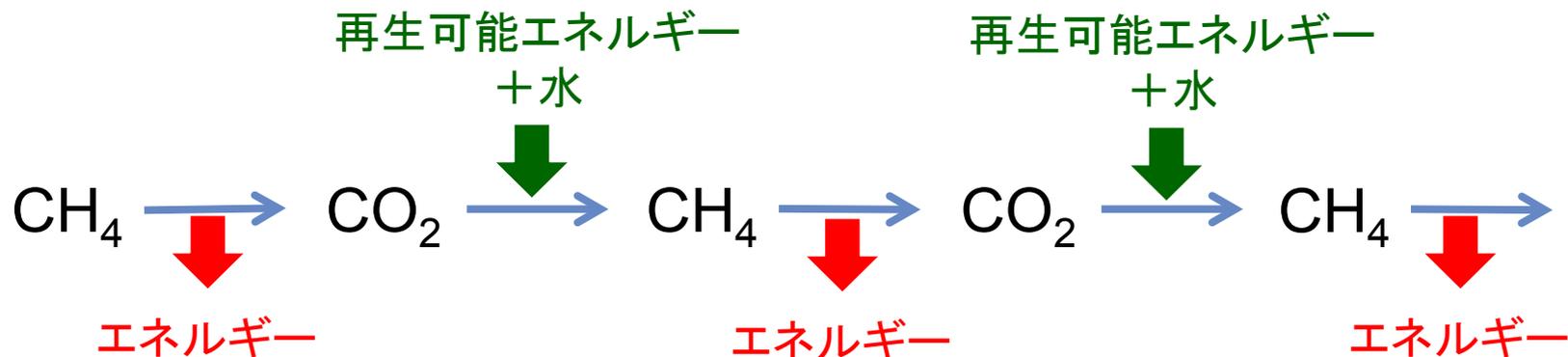
# 各媒体のエネルギー密度

	(kWh/kg)	(kWh/L)
ガソリン(燃焼)	12.2	9.7
メタノール(燃焼)	6.4	4.6
水素(150気圧)(燃焼)	39.5	0.5
メチルシクロヘキサン(H <sub>2</sub> キャリア)	2.4	1.86
アンモニア(H <sub>2</sub> キャリア)	7.0	4.5 (液化)
CH <sub>4</sub> (燃焼)	11.3	6.4 (液化)
Mg酸化	6.9	12.0

# CO<sub>2</sub>フリー天然ガスのエネルギー効率



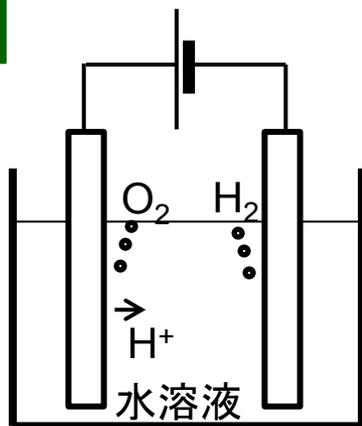
- 現状ではCO<sub>2</sub>は片道利用のみ
  - 次世代エネルギーキャリア出現までの現実的な「つなぎ」
- すぐに実現できる技術. まずは社会実装が優先.
- これからの技術開発
  - 低濃度CO<sub>2</sub>の濃縮
  - 低濃度CO<sub>2</sub>を効率よく還元する反応器 ←新技術が必要



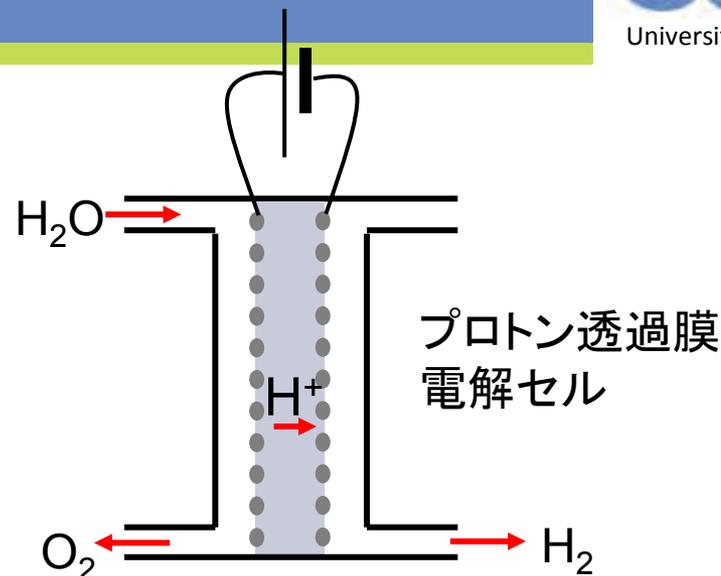
CO<sub>2</sub>が再利用可能なエネルギーキャリアになる！

# 低濃度CO<sub>2</sub>を効率よく還元する反応器

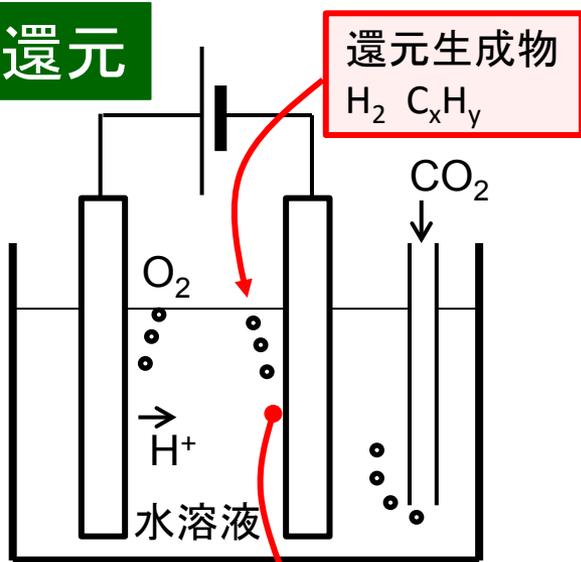
## 水電解



高効率化改良

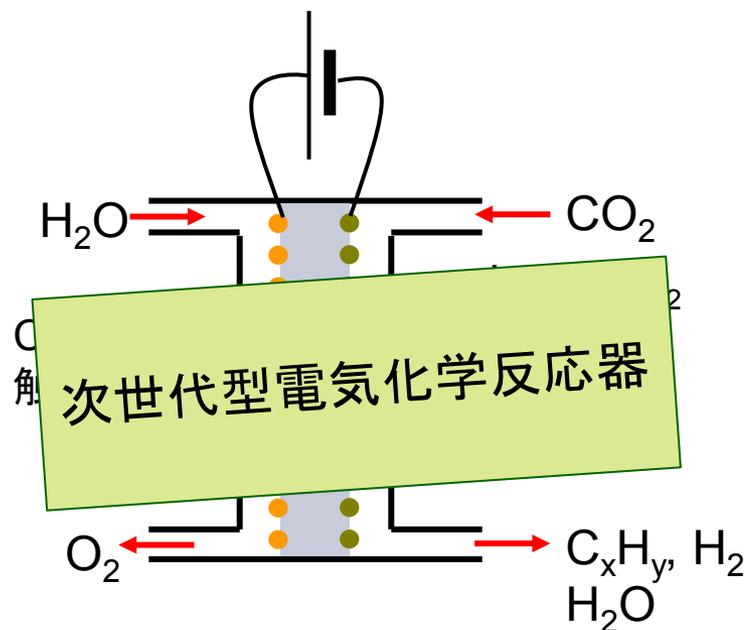


## CO<sub>2</sub>還元



溶液中濃度 H<sup>+</sup> CO<sub>2</sub>

これからの  
研究開発



# 高選択CO<sub>2</sub>還元サイト

