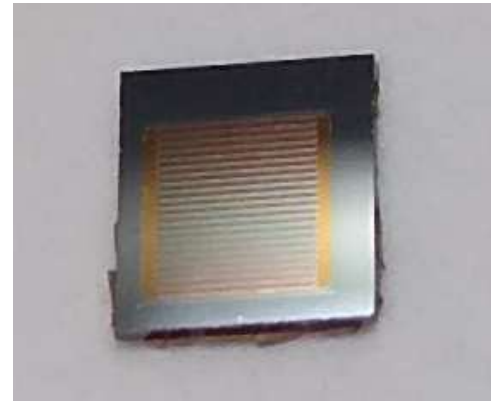


2026年10月24日
神戸大学工学部 公開講座
(太陽電池の物理と超高効率太陽電池)

神戸大学工学部 電気電子工学科
朝日 重雄



今回の講義では**超高効率太陽電池**の
物理と最新の研究開発について紹介します。

講義内容

1. 太陽電池の現状・太陽電池のしくみ
2. 単接合型太陽電池の理論変換効率
3. 単接合型太陽電池の理論変換効率を超えるアイデア
4. 太陽電池の周辺の他の技術開発・コンセプト
5. 我々の研究する超高効率太陽電池の紹介

1. 太陽電池の現状・太陽電池のしくみ
2. 単接合型太陽電池の理論変換効率
3. 単接合型太陽電池の理論変換効率を超えるアイデア
4. 太陽電池の周辺の他の技術開発・コンセプト
5. 我々の研究する超高効率太陽電池の紹介

太陽光発電

太陽から地球に降り注ぐ光エネルギーを電力に変換する。

- 地表に到達する太陽光エネルギーは**1m²あたり約1kW**（冷蔵庫: 0.3 kW、テレビ: 0.1 kW）。
- 地球に届く太陽エネルギー1時間分の量で世界全体が1年間に消費しているエネルギーすべてをまかなえる。
- 地球全体の1%の面積に太陽電池を設置すれば世界中が必要とする電力を創り出せる。
- 可動部分がない。

(図)

著作権保護のため配布資料では省略
出典：YouTube動画

サハラ砂漠のごく一部に太陽電池を敷き詰めれば、世界の電力需要をまかなえる。

<https://www.youtube.com/watch?v=62ASvupr8Zg&t=18s>

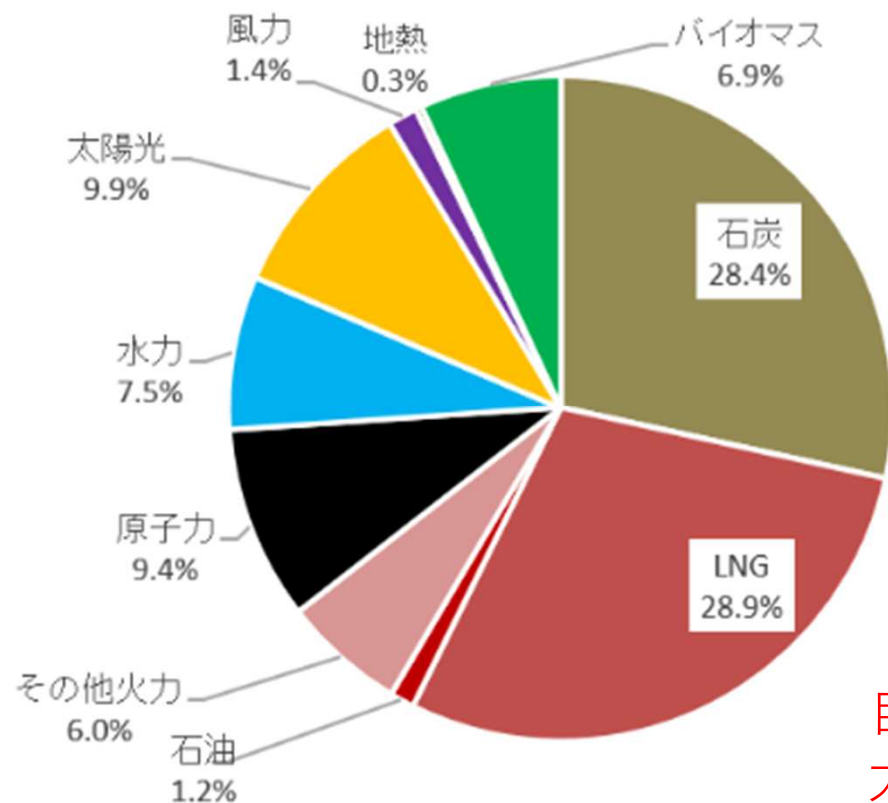
カーテンウォール屋根に太陽電池モジュール



神戸大工学部本館入口の太陽光パネル
(工学部Web pageより)

太陽光発電の現状（日本）

2025年の日本の電源構成



- 日本の2025年の全発電量に占める自然エネルギーの割合は26.1%
そのうち太陽光は9.9%
- 太陽光発電の普及による環境問題も発生
(メガソーラーによる森林伐採、
寿命を迎えたパネルの処理問題)

自然エネルギーを利用した発電は着実に増加
太陽光発電の普及により発生した問題に
対応する必要がある。

出典: 環境エネルギー政策研究所

<https://www.isep.or.jp>

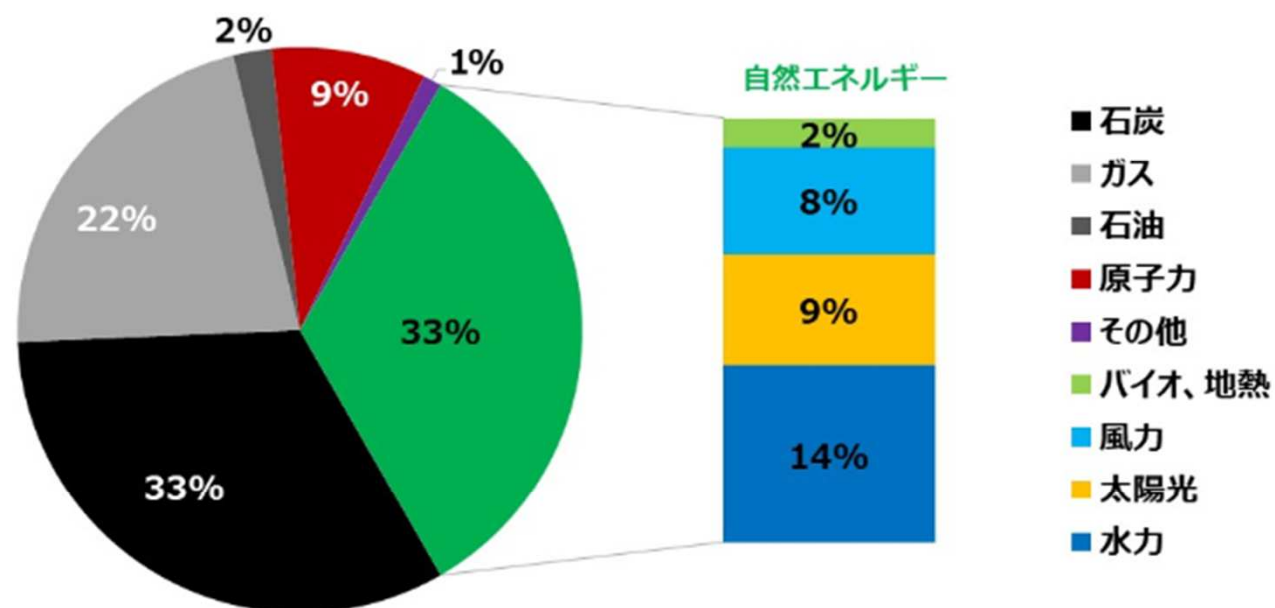
世界の自然エネルギーの状況

世界の電源構成

更新日：2026年7月1日

<2025年>

合計：32,202 TWh



注：その他とは、揚水発電、化石燃料からの発電および統計上の差異を含む。
グラフにおけるデータは総発電電力量に基づく。

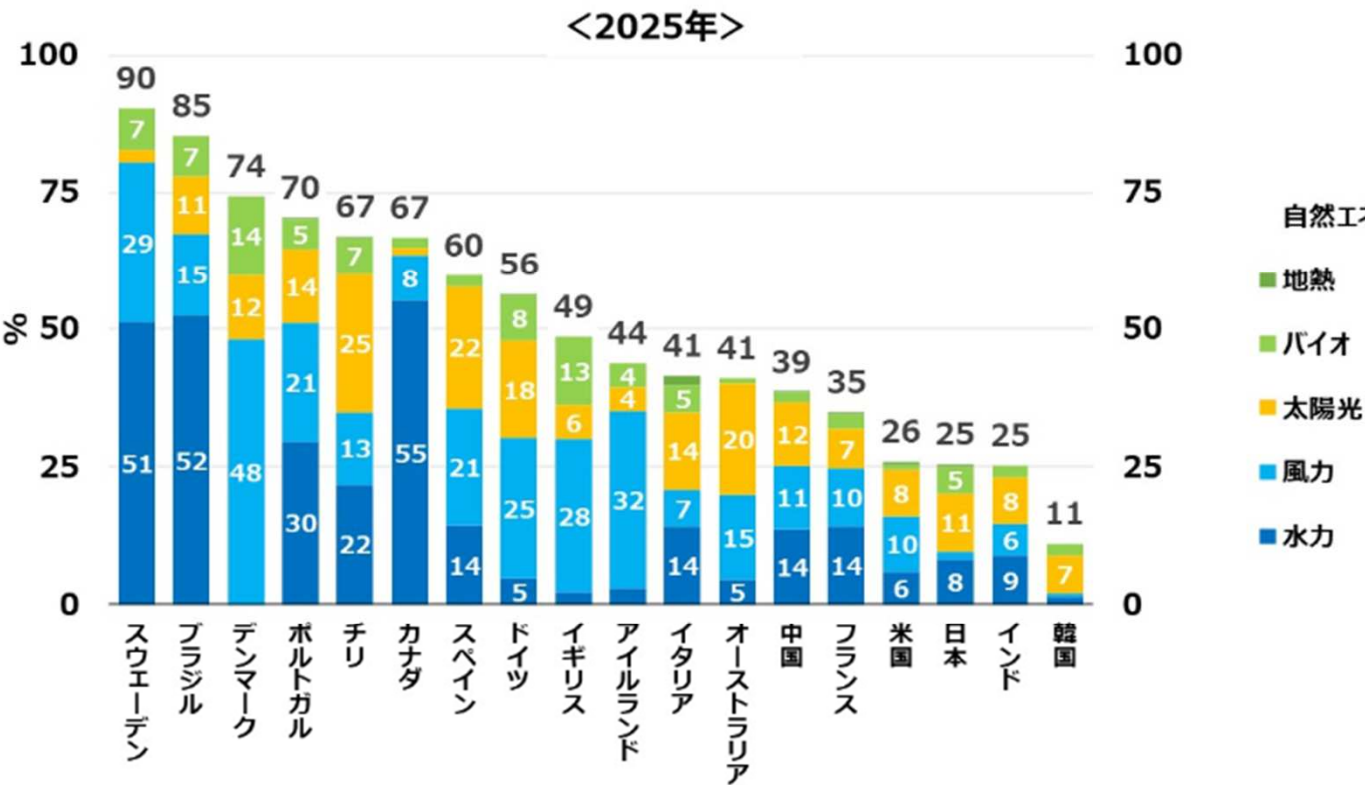
出典：Energy Institute, Statistical Review of World Energy 2026（2026年6月）

を基に自然エネルギー財団が作成（<https://www.renewable-ei.org/>）

全世界で見ると、約33%が
自然エネルギーで
電力が賄われている。
水力の割合が多いことが分かる。

国別の自然エネルギーの割合とその内訳

更新日：2026年3月24日



国のほとんどの電力を自然エネルギーで賄っている国が存在する。その多くは、水力・風力であり、太陽光発電はまだ多くない。日本は大型水力発電を設置できる水源は残っていないため、自然エネルギーの割合を増やすためには太陽光発電と風力発電を増やす必要がある。

注：各国の電力消費量 = [国内の発電電力量] + [他国からの輸入量] - [他国への輸出量]。
グラフにおけるデータは、所内電力量（ネット発電量）に基づく。
出典：International Energy Agency, Monthly Electricity Statistics - Data up to December 2025 (March 2026) を基に自然エネルギー財団作成。

(<https://www.renewable-ei.org/>)

1. 太陽電池の現状・太陽電池のしくみ

2. 単接合型太陽電池の理論変換効率

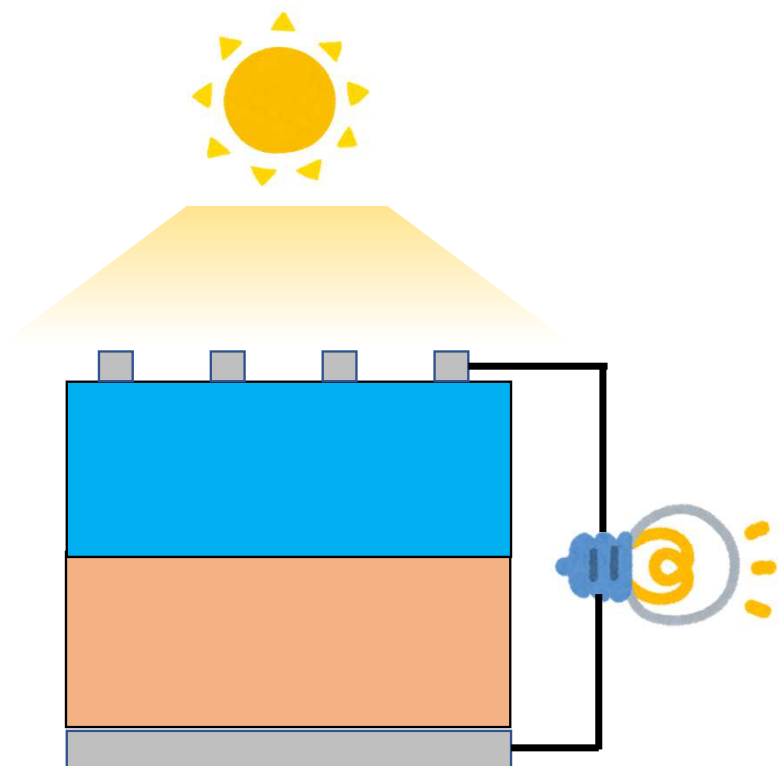
3. 単接合型太陽電池の理論変換効率を超えるアイデア

4. 太陽電池の周辺のための技術開発・コンセプト

5. 我々の研究する超高効率太陽電池の紹介

太陽電池のエネルギー変換効率

$$\text{変換効率(\%)} = \frac{\text{発電した量}}{\text{太陽から受け取った光のパワー}}$$



今の太陽電池の変換効率は何%？

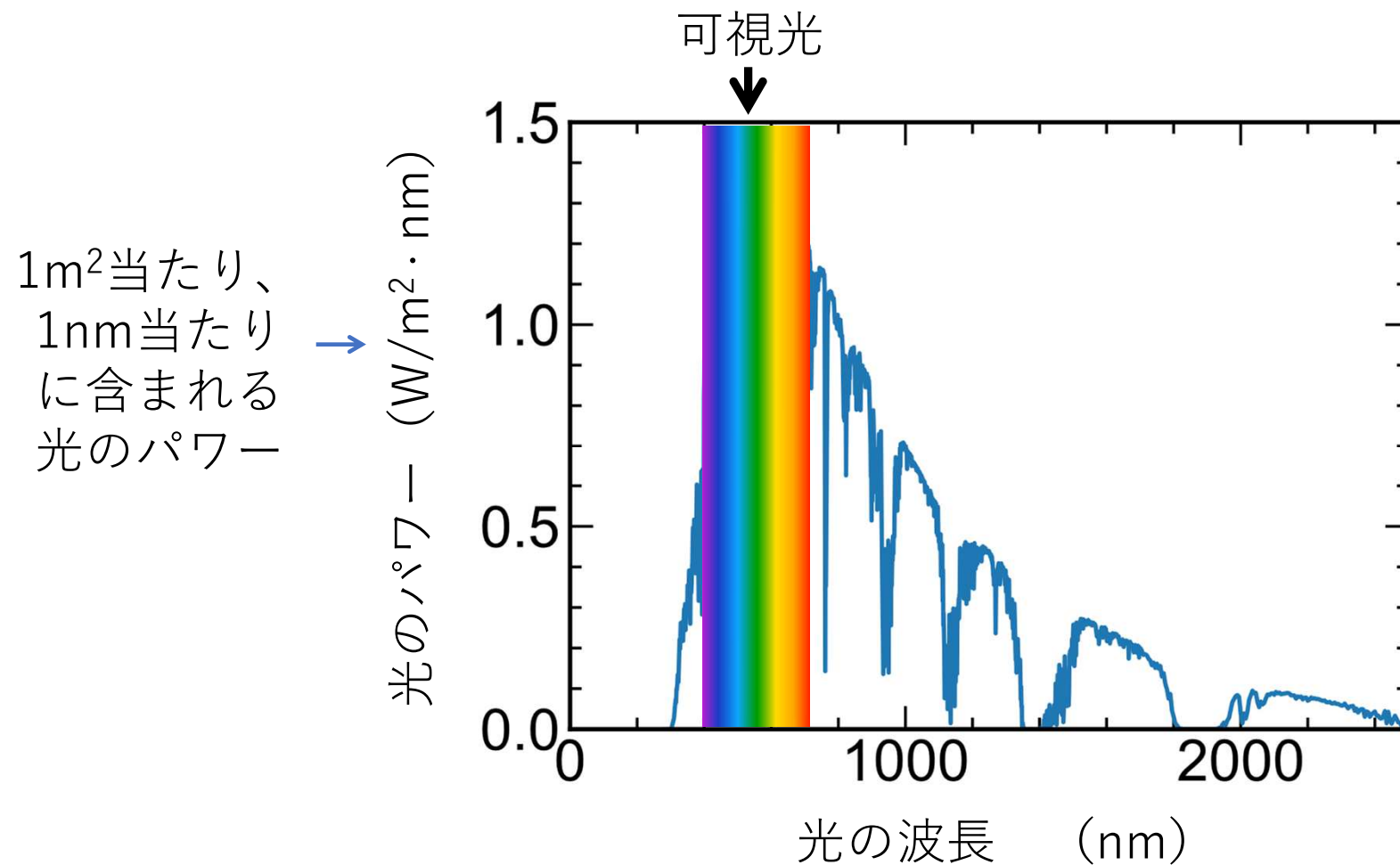
2026年太陽電池モジュールの変換効率

メーカー	変換効率
A社	24.4%
B社	24.8%
C社	23.5%
D社	23.0%

現在の太陽電池は理論的にも
約30%程度の変換効率

太陽電池の動作理解のための知識 – 太陽光のスペクトル

地表に降り注ぐ太陽光のスペクトル



太陽電池の動作理解のための知識 – 太陽光のスペクトル

地表に降り注ぐ太陽光のスペクトル

光は波であり粒子である
(**フォトン**)

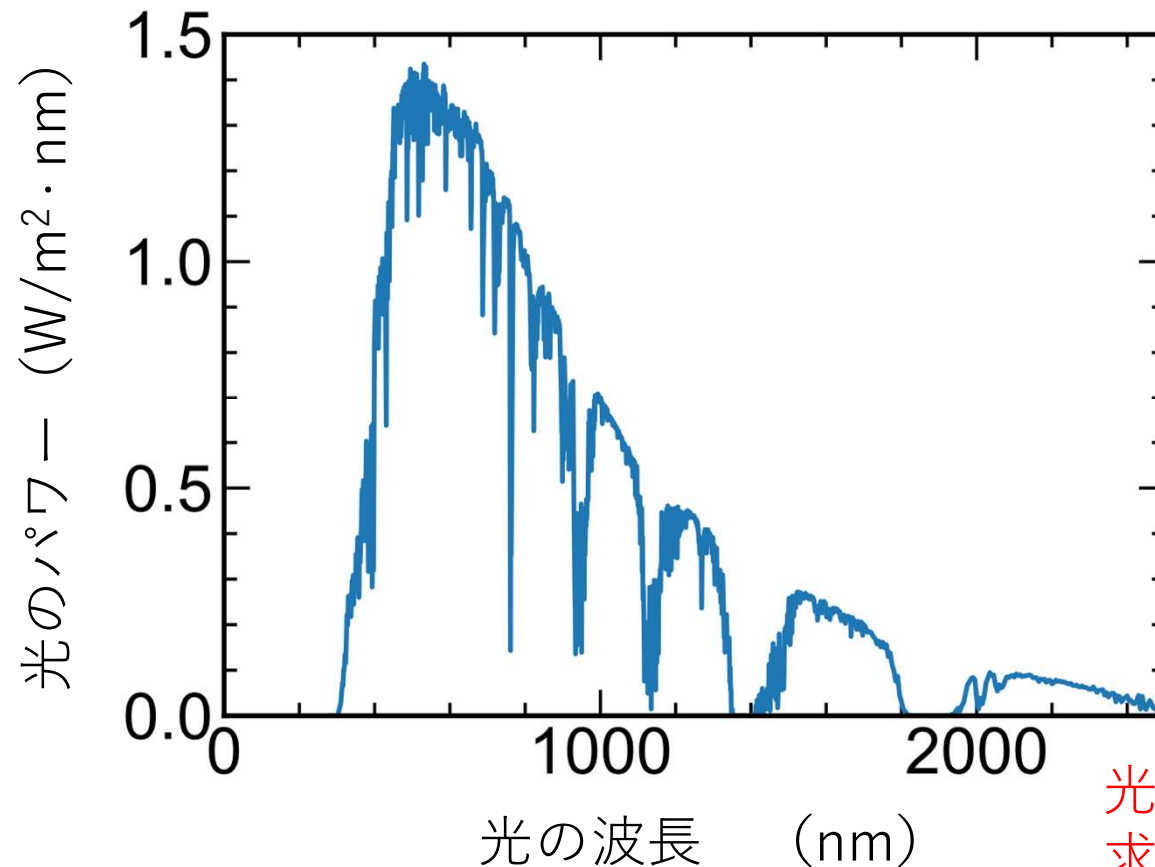
プランク定数
(物理定数)

光の速度
(物理定数)

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

フォトン1個の
エネルギー

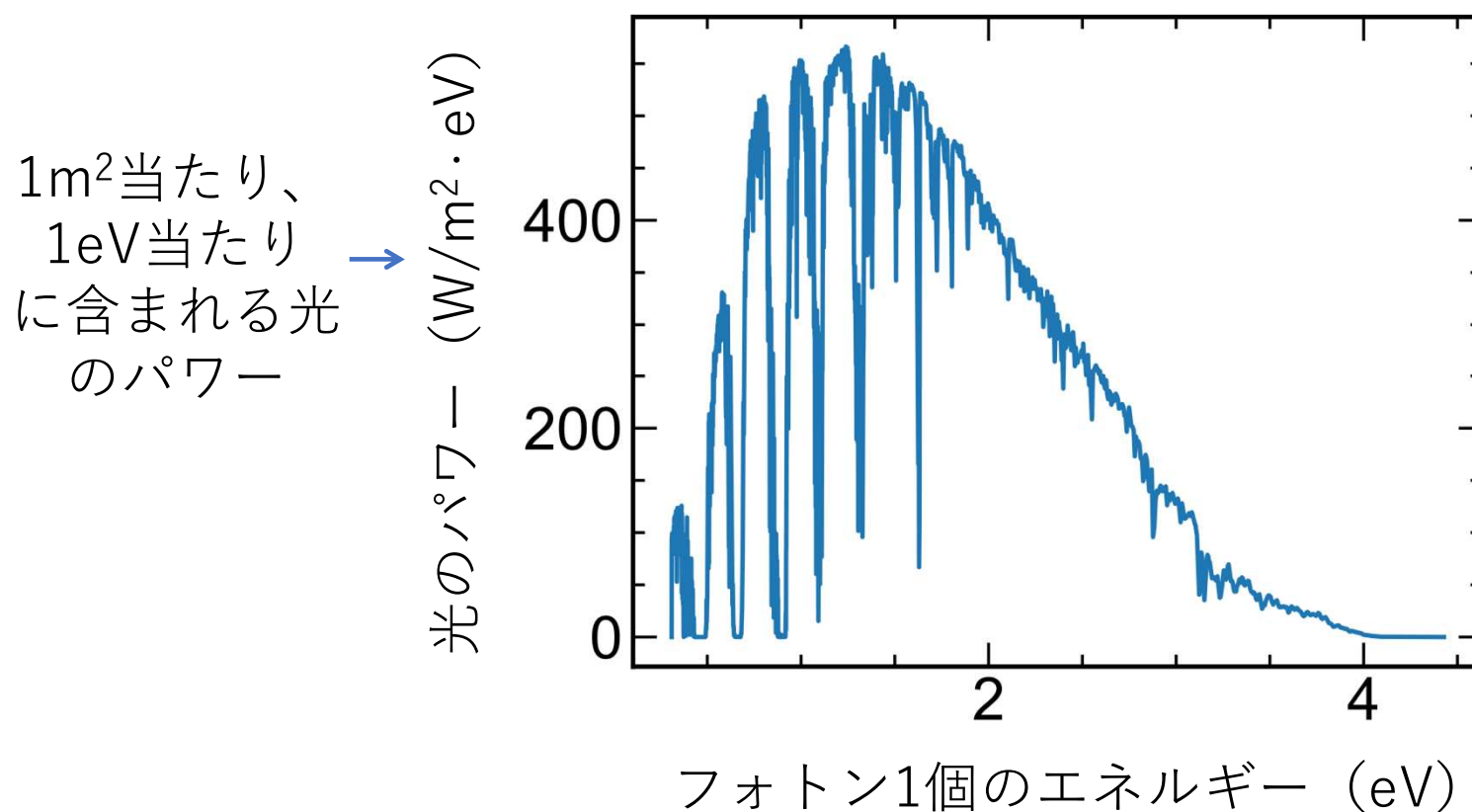
光の波長



光の波長からフォトンのエネルギーを求めることができる。
→ 横軸をエネルギーに変更する。

太陽電池の動作理解のための知識 – 太陽光のスペクトル

地表に降り注ぐ太陽光のスペクトル
(横軸は光子のエネルギー)



$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

波長が長い



エネルギーが小さい

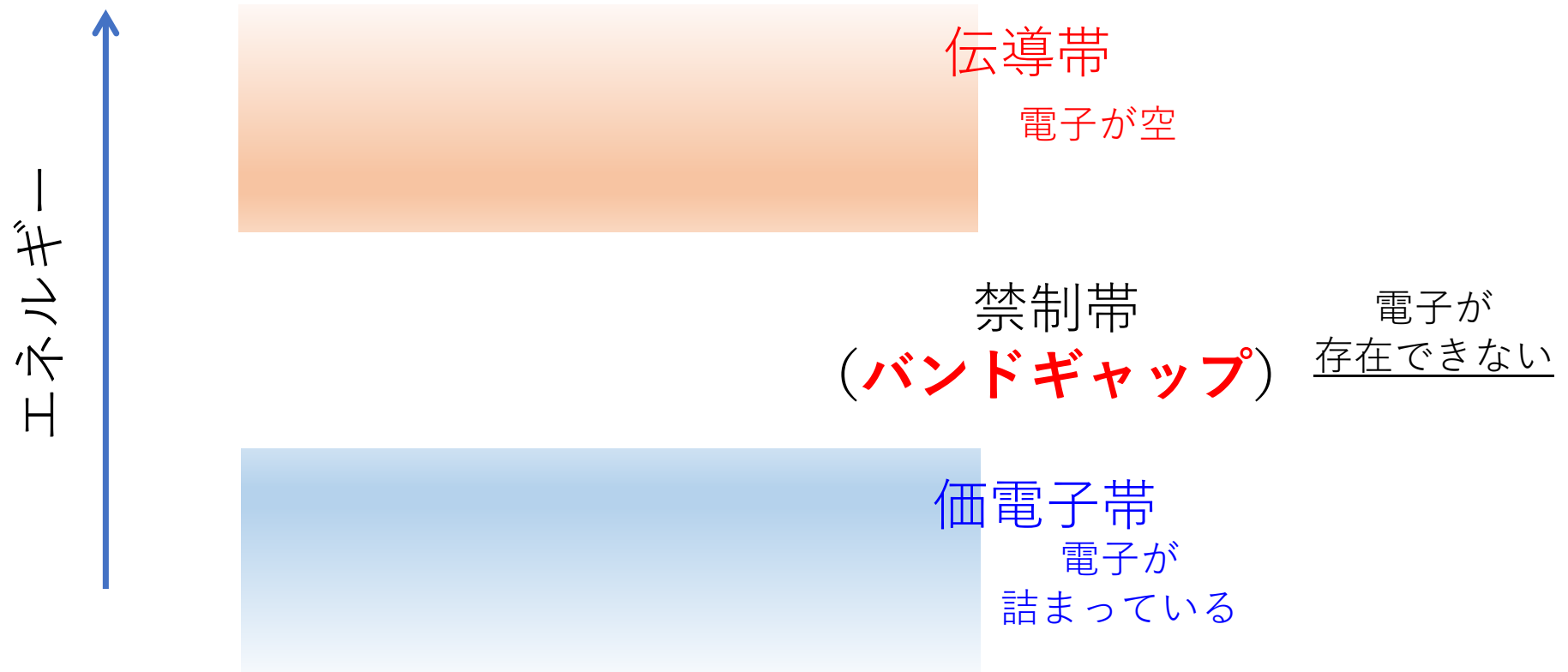
波長が短い



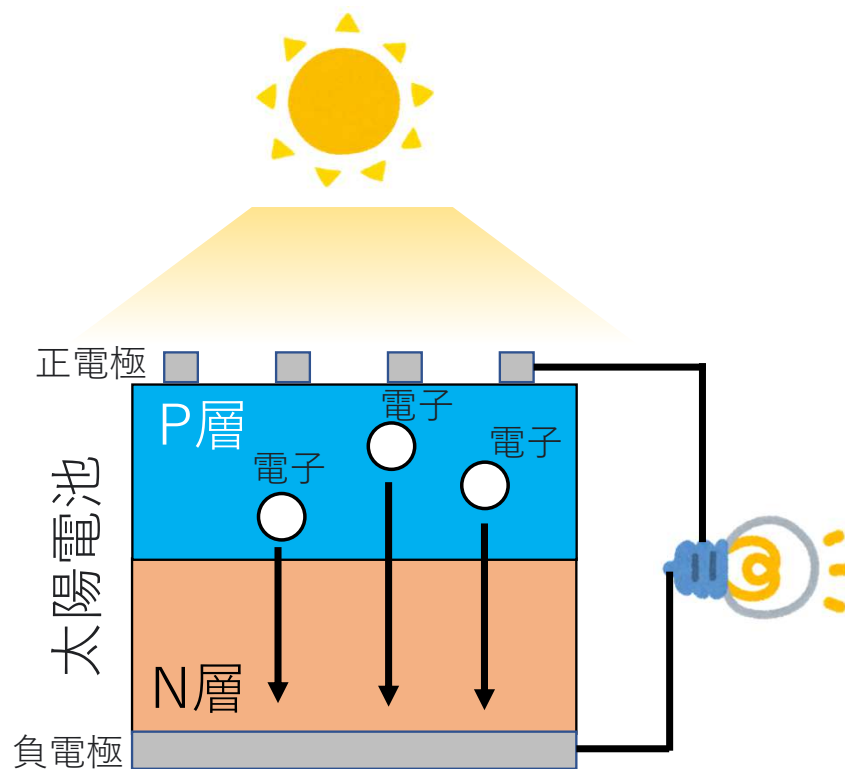
エネルギーが大きい

太陽電池の動作理解のための知識 – 半導体（太陽電池）のバンドギャップ

半導体（太陽電池）バンドダイアグラム 半導体の中の電子のエネルギー分布を示す図

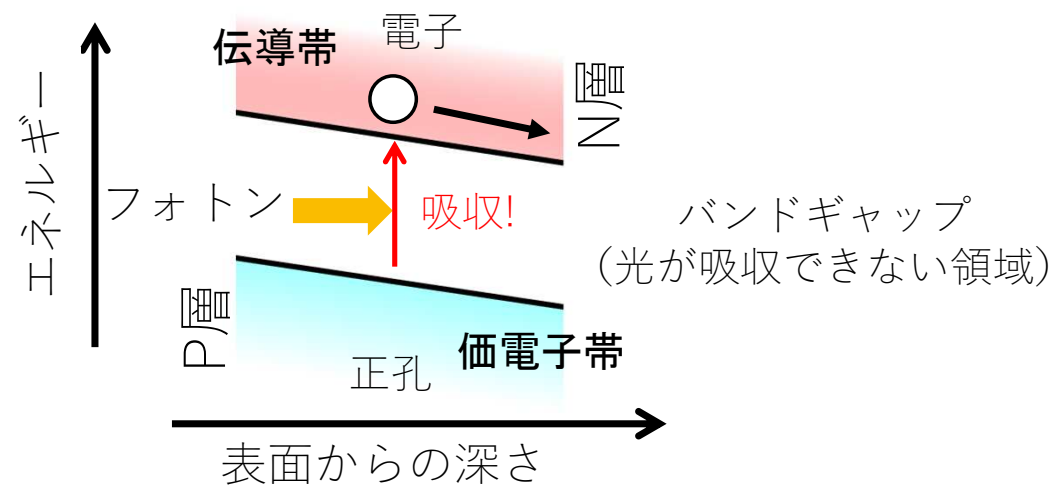


太陽電池の発電のしくみ



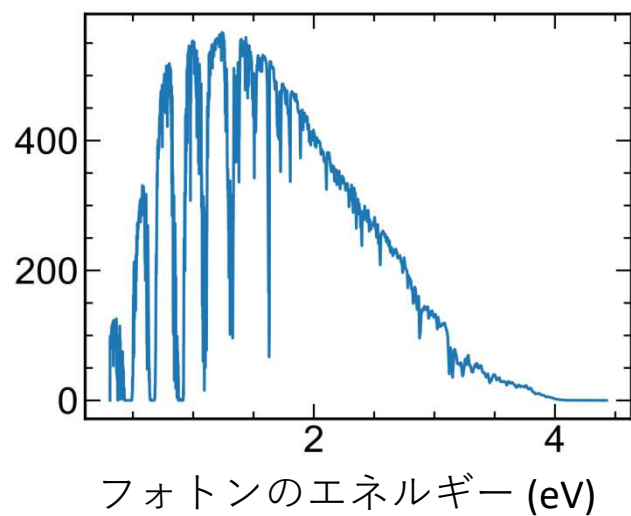
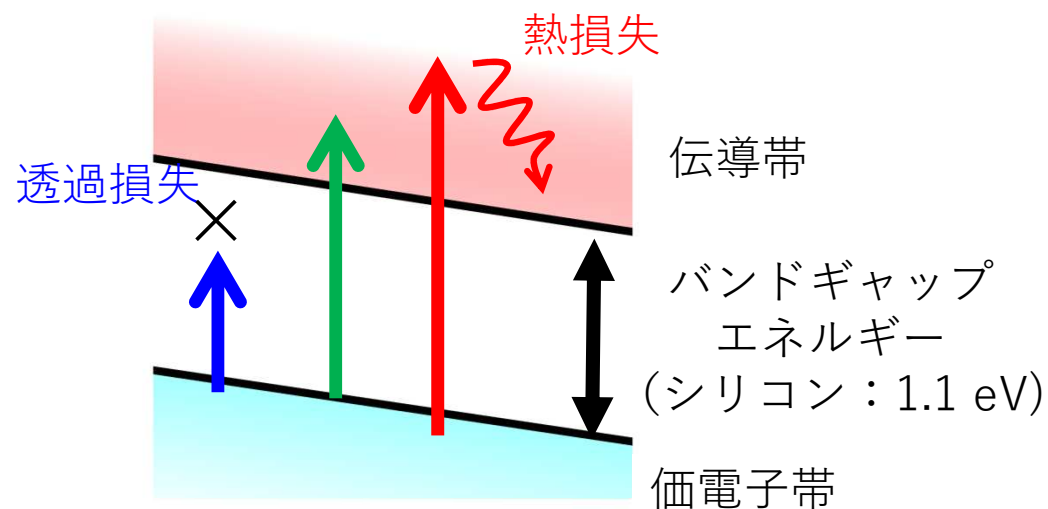
半導体内部の電子に太陽光が当たると太陽電池内部に**動ける電子**が発生。電子はマイナスの電荷を持つためプラスの電荷を持つN層に移動、最終的に電極でとりだされ、電流となる。

太陽電池（半導体）内部のエネルギーバンド図



太陽から来る光子を太陽電池（半導体）内部の電子が吸収すると、その電子は伝導帯に励起され、N層に移動、電極で取り出され、電流となる。
吸収には太陽電池のバンドギャップエネルギー以上のエネルギーが必要。

太陽電池で発生する損失



バンドギャップより小さな
エネルギーの光子



太陽電池で吸収できず透過

透過損失

バンドギャップより大きな
エネルギーの光子



太陽電池で吸収後すぐに
熱を出してエネルギー放出

熱損失

J. Appl. Phys., **32**, 510 (1961)

(単接合型) 太陽電池の理論変換効率

(図)

著作権保護のため配布資料では省略
出典：Prog. Photovolt. 9, 286 (2011)

Prog. Photovolt. 9 286-293 (2011)

バンドギャップエネルギーが
大きな太陽電池



透過損失が大きい

バンドギャップエネルギーが
小さな太陽電池



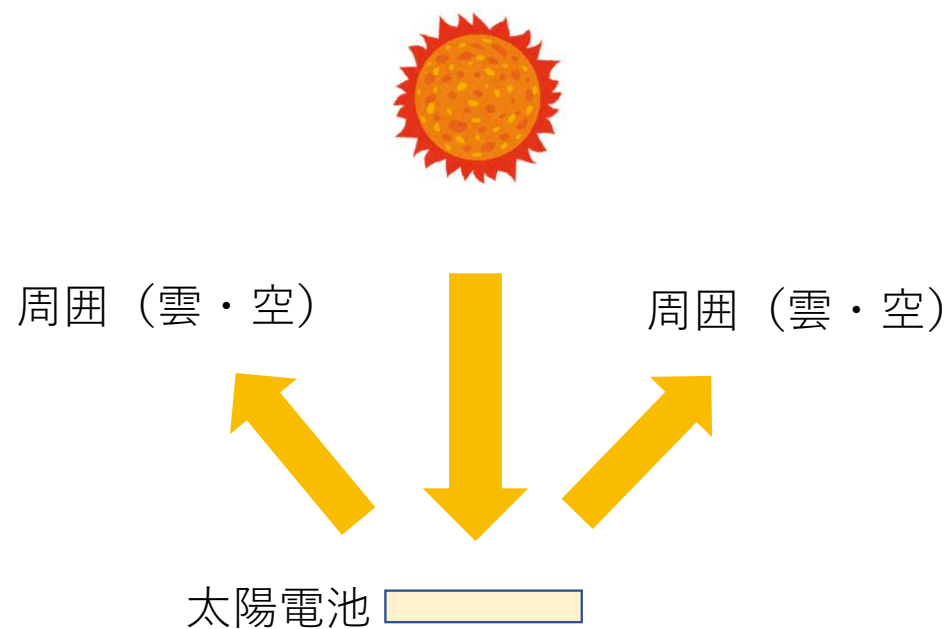
熱損失が大きい

シリコンのバンドギャップエネルギー：1.12 eV
シリコンの最大変換効率: 29.5%

あらゆる単接合型太陽電池の
最大変換効率：30.5%

ボルツマン損失～太陽以外の周囲にエネルギーを放出～

ボルツマン損失は周囲へ
エネルギーを放出することで発生



発電時に周囲にエネルギー放出

(図)

著作権保護のため配布資料では省略
出典：Prog. Photovolt. 9, 286 (2011)

Prog. Photovolt. **9** 286-293 (2011)

講義内容

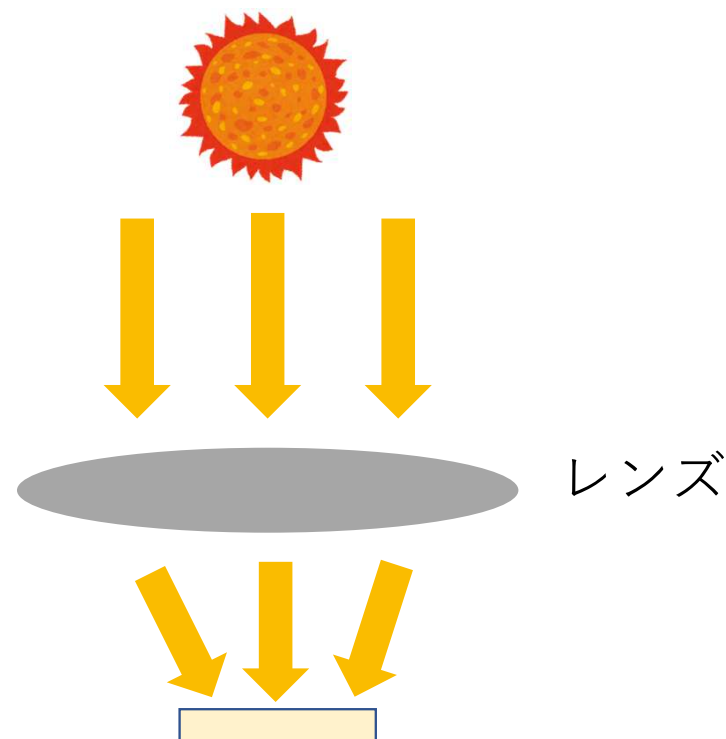
1. 太陽電池の現状・太陽電池のしくみ
2. 単接合型太陽電池の理論変換効率
- 3. 単接合型太陽電池の理論変換効率を超えるアイデア**
4. 太陽電池の周辺の他の技術開発・コンセプト
5. 我々の研究する超高効率太陽電池の紹介

集光太陽電池によるボルツマン損失の低減

(図)

著作権保護のため配布資料では省略
出典：Prog. Photovolt. 9, 286 (2011)

Kita et al., Energy conversion efficiency of solar cells (2019)



太陽電池から見て太陽が大きくなる
→周囲へのエネルギー放出が減る。

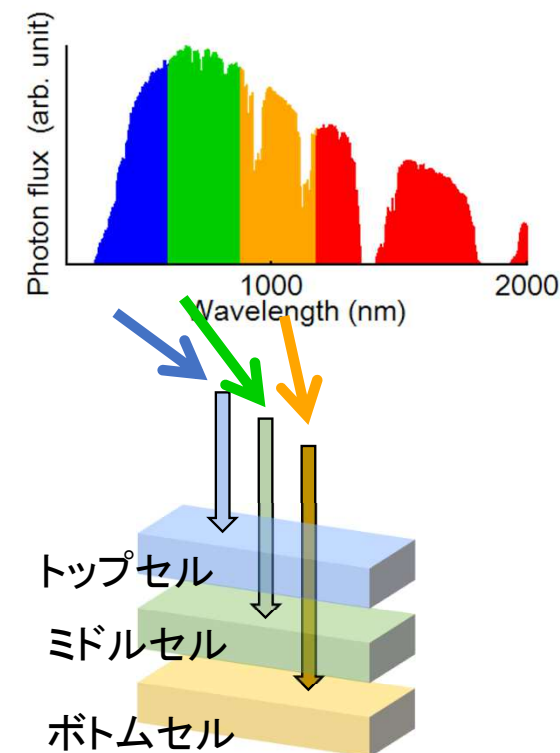
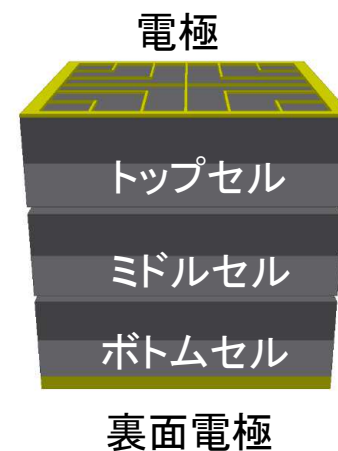
- 集光倍率増加により変換効率上昇
- ボルツマン損失の低減により
変換効率40%を超えることが可能

多接合型太陽電池

太陽電池を重ねることにより高効率化を狙う。

(図)
著作権保護のため配布資料では省略
出典：Prog. Photovolt. 9, 286 (2011)

三接合太陽電池の例



バンドギャップの異なる組み合わせで熱損失と透過損失の低減が可能。
さらに集光化することでボルツマン損失も低減可能。

Henry, J. Appl. Phys. **51**, 4494 (1980).

多接合型太陽電池の理論変換効率



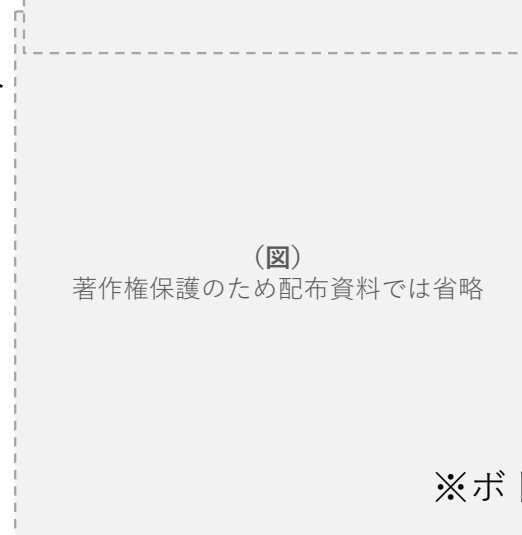
最大集光時の理論変換効率

2接合



最大集光 59.9%
(非集光で45.4%)

3接合



最大集光で66.4%
(非集光で50.3%)

※ボトムセルは0.66eV一定

接合数を増やせば増やすほど理論変換効率は向上する

多接合型太陽電池の理論変換効率

接合数を増やすほど理論変換効率は向上する（向上幅は減少する）。

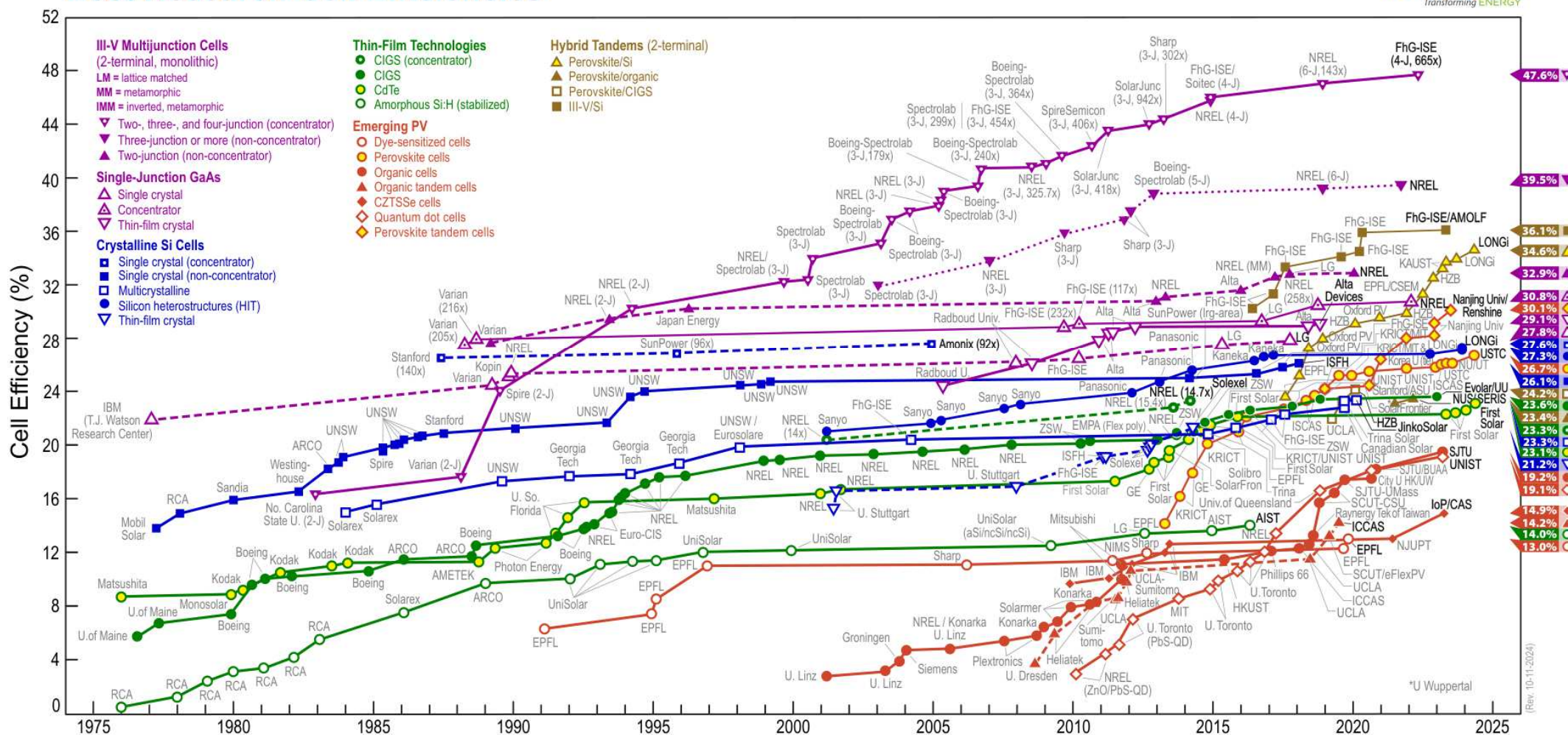


多接合型太陽電池の理論変換効率

接合数	集光/非集光	変換効率
4接合	非集光	53.3%
	最大集光	68.8%
5接合	非集光	56.0%
	最大集光	72.0%
∞ 接合	非集光	68.2%
	最大集光	86.8%

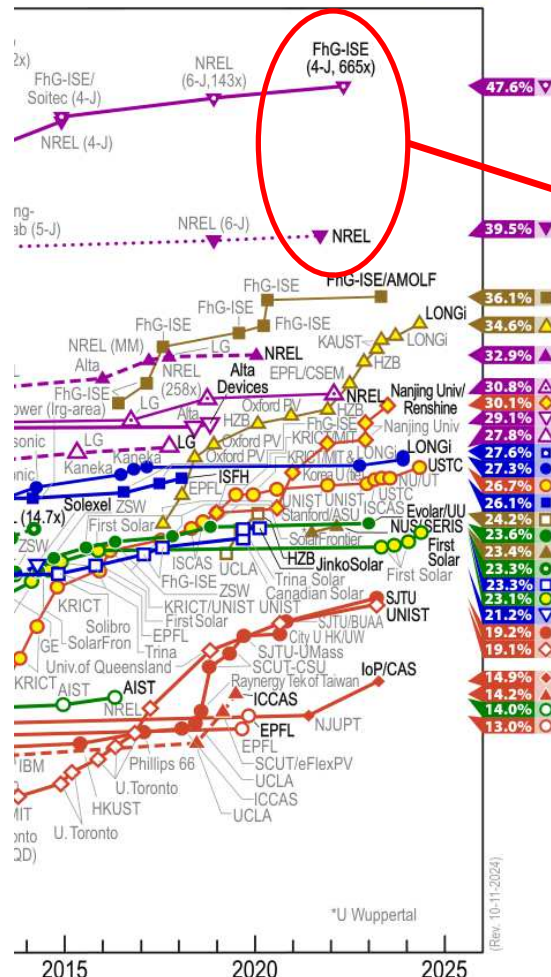
太陽電池の変換効率の推移

Best Research-Cell Efficiencies



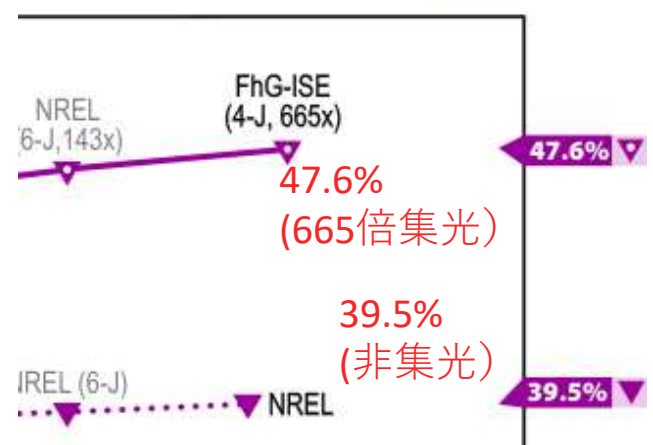
<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

多接合型太陽電池の世界最高効率



グラフ出典：NREL, Best Research-Cell Efficiency Chart

超多接合型太陽電池（4接合・6接合）



O. Höhn et al., IEEE PVSC 2024
R. France et al., Joule 6, 1121 (2022).

太陽電池構造



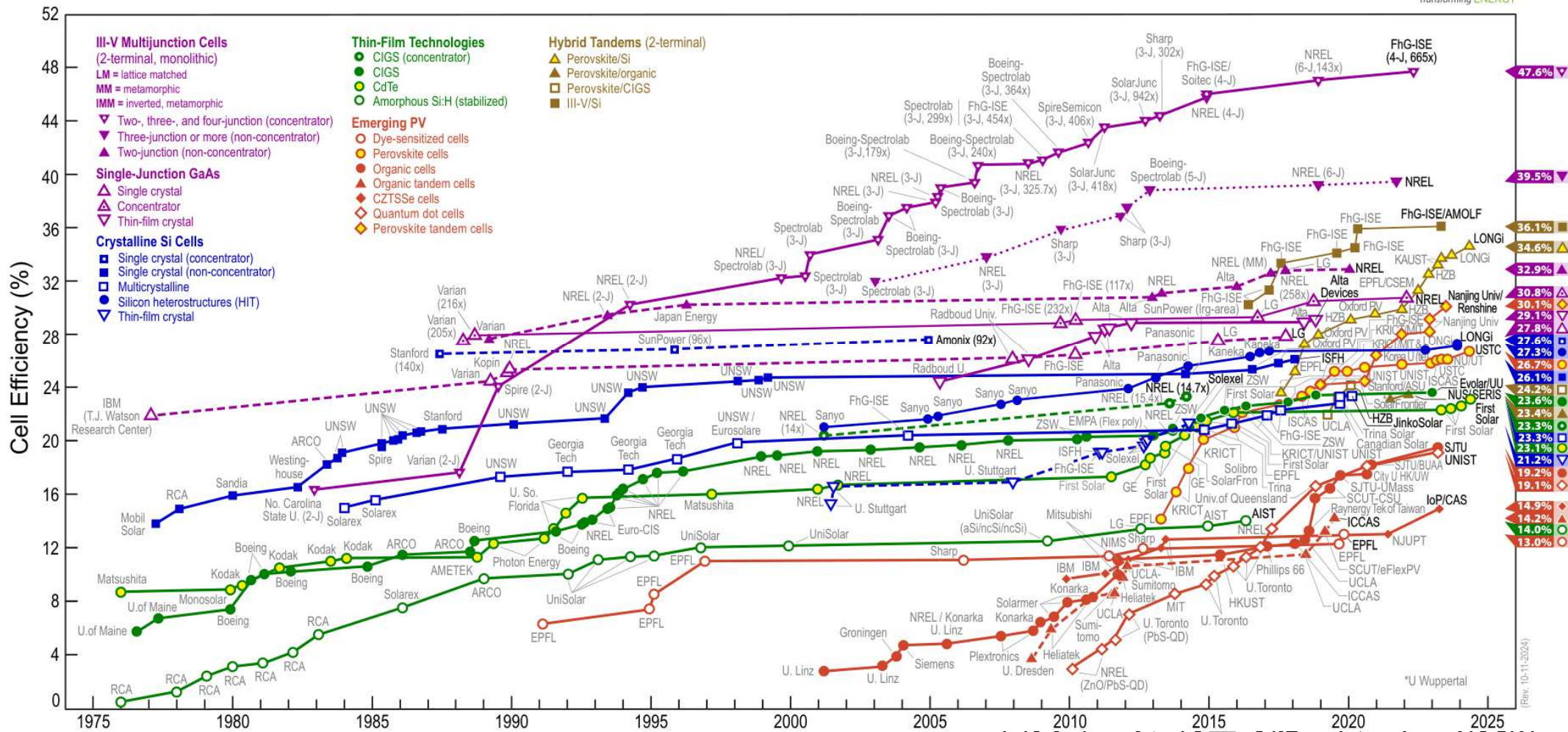
Geisz et al., Nat. Energy 5, 326 (2020).

13族と15族の化合物半導体で構成
少しずつバンドギャップを変える

効率50%が見えてきた。
低コスト化は難しい。

太陽電池の変換効率の推移

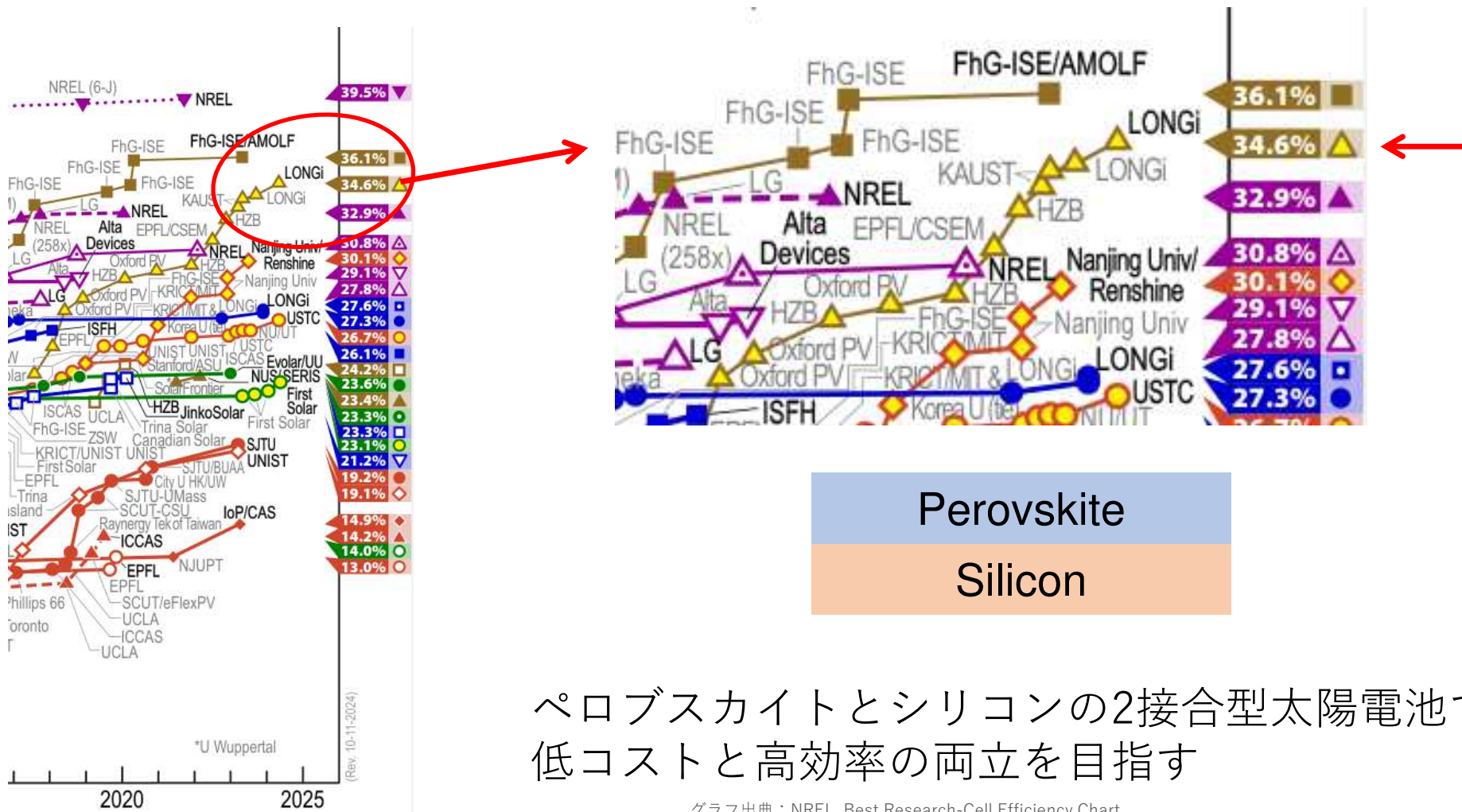
Best Research-Cell Efficiencies



<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

低コスト多接合型太陽電池

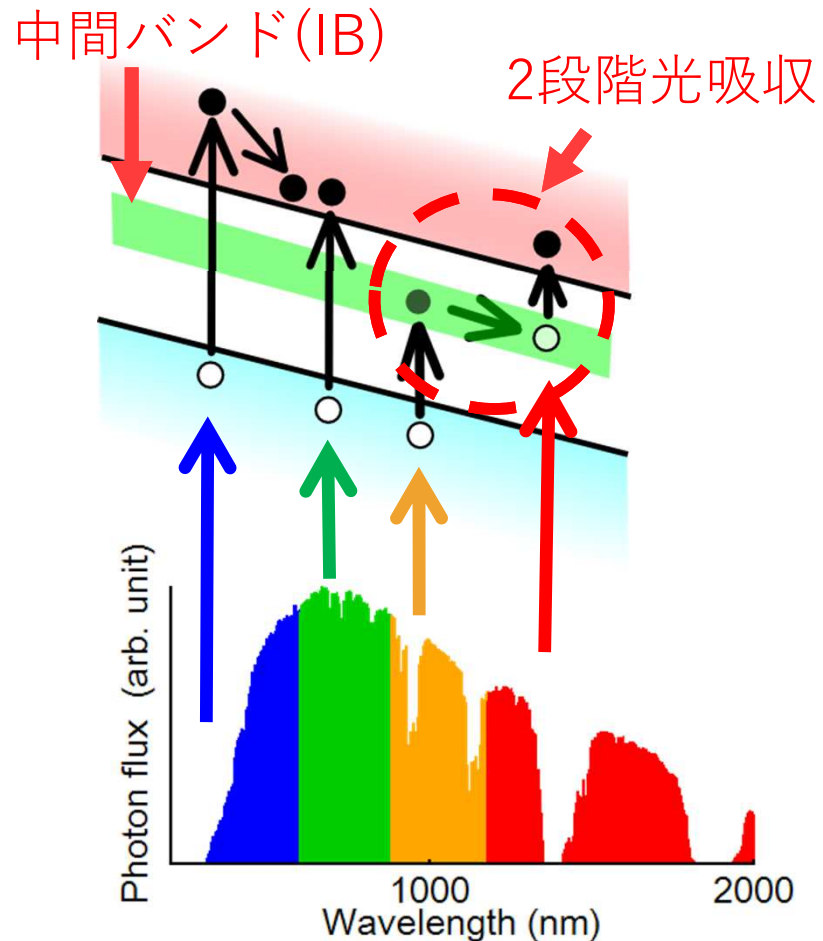
ペロブスカイト/シリコン2接合型太陽電池



グラフ出典：NREL, Best Research-Cell Efficiency Chart

多接合以外の太陽電池～中間バンド型太陽電池～

太陽電池のバンドギャップ内に中間バンドを作り2段階で光を吸収し、透過損失を低減する。



中間バンド型太陽電池の利点

- 多接合型太陽電池よりも低コスト化できる可能性。
- 太陽光スペクトル変化に対する効率低下が小さい。

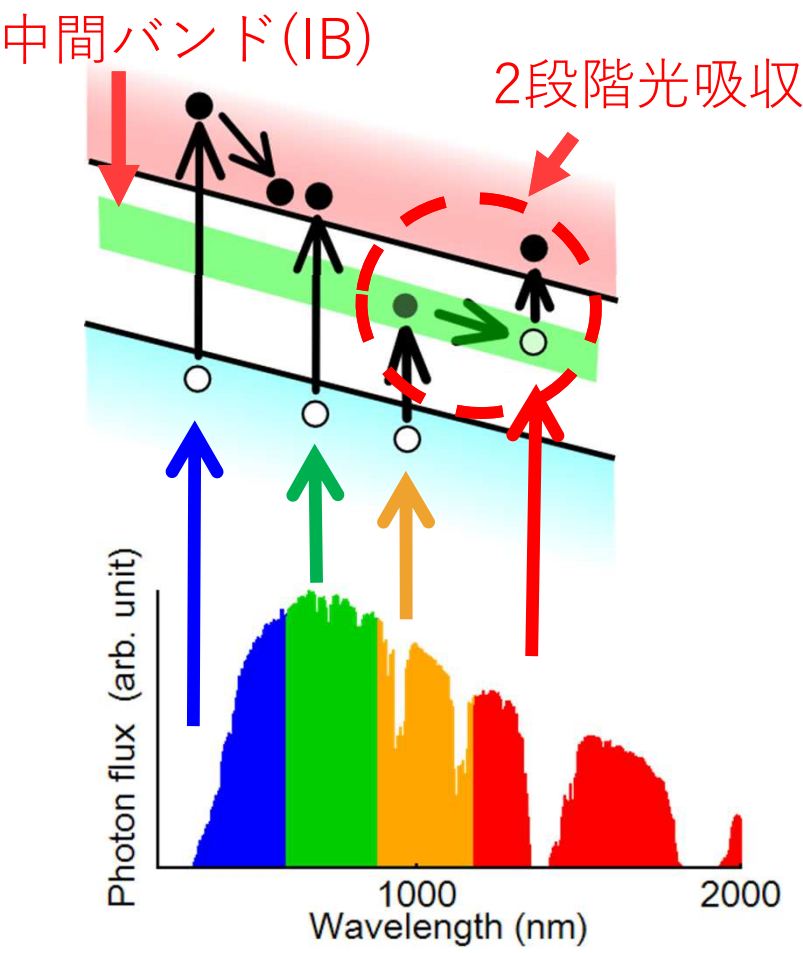
Phys. Rev. Lett. **78** 5014 (1997).

J. Appl. Phys. **99**, 094503 (2006).

Appl. Phys. Rev. **2**, 021302 (2015).

多接合以外の太陽電池～中間バンド型太陽電池～

太陽電池のバンドギャップ内に中間バンドを作り2段階で光を吸収し、透過損失を低減する。



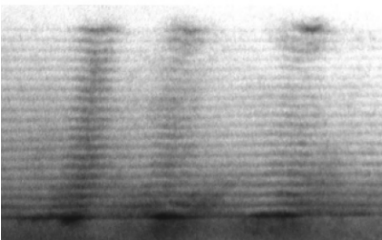
理論変換効率



最大集光で
67%

中間バンドの形成に量子ドットを使用

太陽電池の
断面顕微鏡画像



↑ ↑ ↑ 量子ドット

高効率太陽電池の実現はできていない。

Takahashi et al., *Phys. Rev. B.* **87** 235323 (2013).

ホットキャリア型太陽電池 – 究極の夢の太陽電池

(図)

著作権保護のため配布資料では省略
出典：D. König et al., Physica E 42, 2862 (2010)

太陽光を吸収する光吸収層を
2つのエネルギー選択電極で挟んだ構造。
吸収層で発生したエネルギーの高い電子と
正孔を高いエネルギーを維持したまま
エネルギー選択電極で取り出し、電力とする。
理論変換効率は非集光で65%、集光型で86%と、
理論的にも高い変換効率を示す夢の太陽電池。

吸収層で生成された電子と正孔が熱緩和する前に（熱損失が発生する前に）
電子と正孔をそれぞれのコンタクト層に運ぶ必要があり、
その部分の実現に大きな技術上の障壁がある。
ホットキャリアの電流取り出しの実験結果報告は
いくつか出ているが実際に高効率太陽電池の報告は今のところなし。

D. König et al, Physica E 42 (2010) 2862

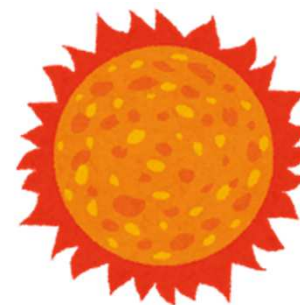
究極の太陽電池の発電効率は何%？

熱源からエネルギーを取り出す全ての装置の効率（最大熱効率）は
カルノー効率が上限となる。太陽電池も同じ。

地球の温度：
300K(27°C)



太陽の表面温度：6000K



$$\text{カルノー効率} = 1 - \frac{\text{地球の温度}}{\text{太陽の温度}} = ??$$

多接合型太陽電池・ホットキャリア型太陽電池の
理論変換効率が86%なので、
最大熱効率まであと少し。
新たなコンセプトで究極の変換効率に近づける？

講義内容

1. 太陽電池の現状・太陽電池のしくみ
2. 単接合型太陽電池の理論変換効率
3. 単接合型太陽電池の理論変換効率を超えるアイデア
- 4. 太陽電池の周辺の他の技術開発・コンセプト**
5. 我々の研究する超高効率太陽電池の紹介

夜間太陽電池 ～太陽が無くても発電する～

光を空に放出することで発電

- 太陽電池 → 太陽（高温熱源）から地球（低温熱源）に熱が移動する際にエネルギーを取り出す。
- 夜間太陽電池 → 地球（高温熱源）から宇宙（低温熱源）に熱が移動する際にエネルギーを取り出す。



ごく近年提案された新しい太陽電池。
最近実験的にも実証された

J. Appl. Phys. **117**, 055105 (2015)
Appl. Phys. Lett. **114**, 161102 (2019)
ACS Photon. **9**, 1535 (2022)

ダイソン球 ～太陽の周りに太陽電池を置こう～

地球直径1.3万km

太陽直径140万km



太陽エネルギーの
 5×10^{-8} %しか
地球に降り注いでいない！

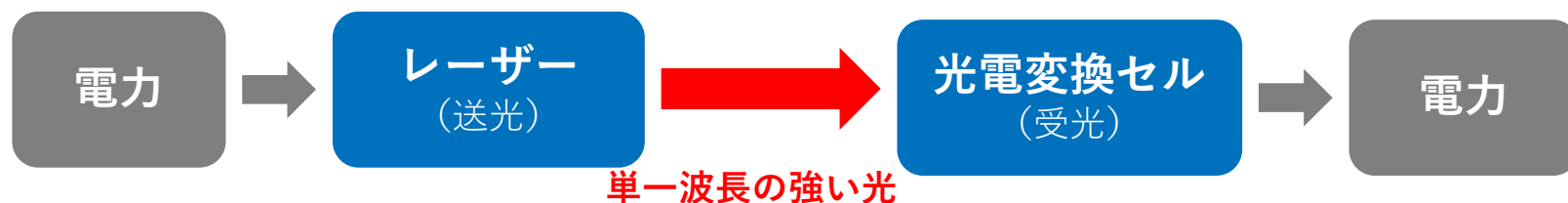
(図)
著作権保護のため配布資料では省略
出典：Wikimedia Commons

太陽の周りに太陽電池を設置する。
発電したエネルギーをレーザー光で輸送。
(レーザー給電)
膨大な太陽光エネルギーを利用可能。

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%80%E3%82%A4%E3%82%BD%E3%83%B3%E7%90%83>

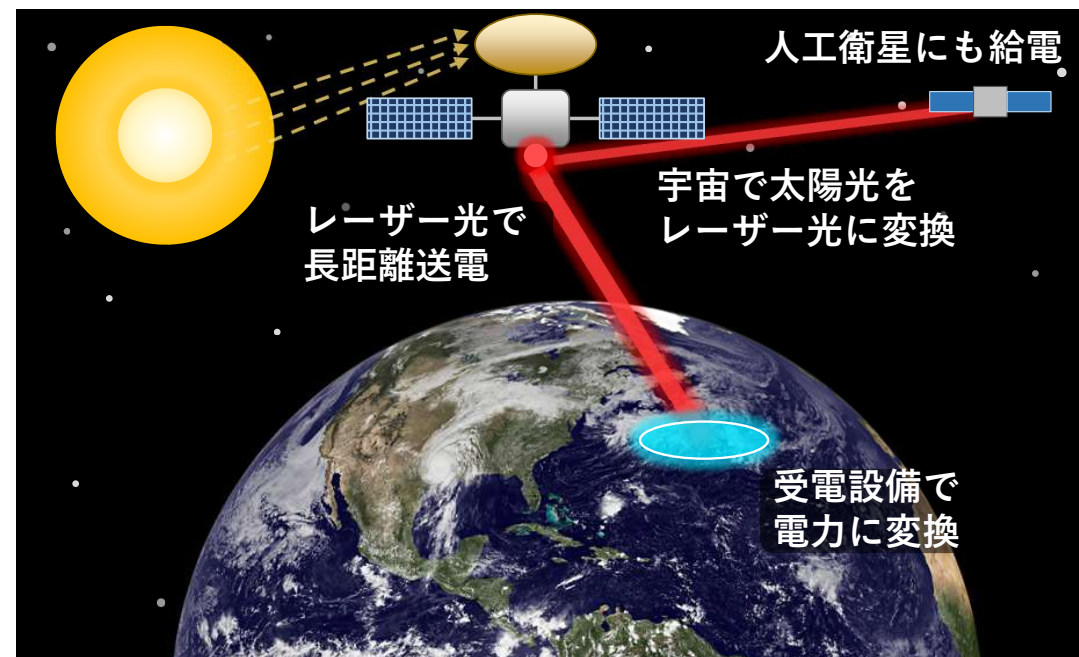
レーザー無線給電 ～光で電力を遠くへ届ける～

ダイソン球や宇宙で発電した電力を地上へ届ける方法のひとつ。
電力を**レーザー光**に変えて送り、受け側の**太陽電池（光電変換セル）**で再び電力に戻す。



なぜ高効率に変換できる？

- 太陽光：様々なエネルギーの光子を含む
→ 透過損失・熱損失が大きい（上限 約30%）
- レーザー光：光子のエネルギーがそろそろ
→ バンドギャップを合わせると損失が小さい
- GaAsセルで**変換効率68.9%**を達成
（波長858 nmのレーザー光）



Fraunhofer ISE プレスリリース（2021）／DARPA ニュース（2025）
／NTT・三菱重工 プレスリリース（2025）

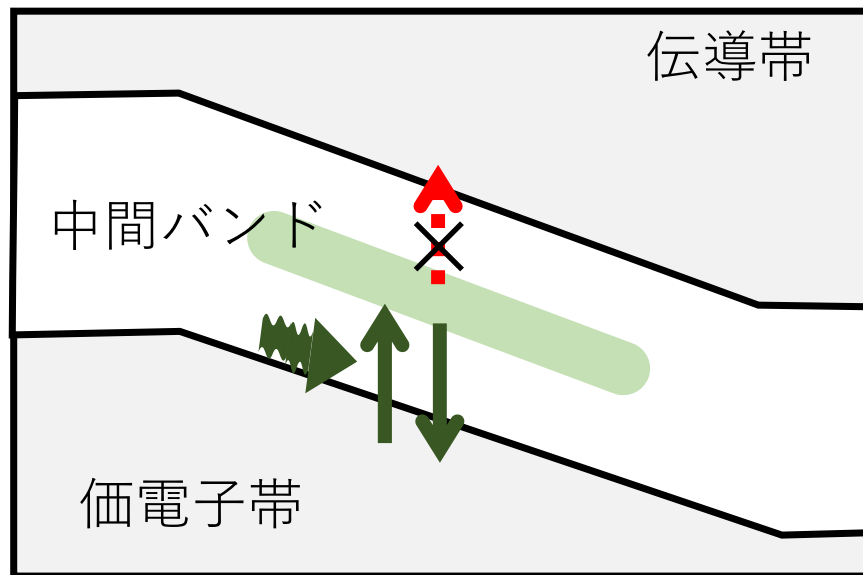
画像：NASA

講義内容

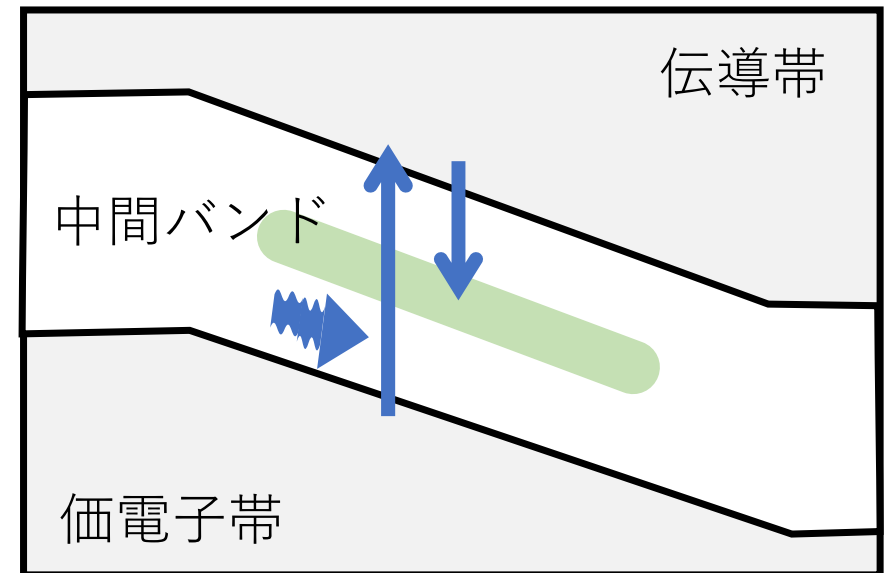
1. 太陽電池の現状・太陽電池のしくみ
2. 単接合型太陽電池の理論変換効率
3. 単接合型太陽電池の理論変換効率を超えるアイデア
4. 太陽電池の周辺の他の技術開発・コンセプト
- 5. 我々の研究する超高効率太陽電池の紹介**

中間バンド型太陽電池の課題

中間バンド中の電子の寿命が短く、すぐに再結合するため、中間バンドから伝導帯への遷移が小さい。

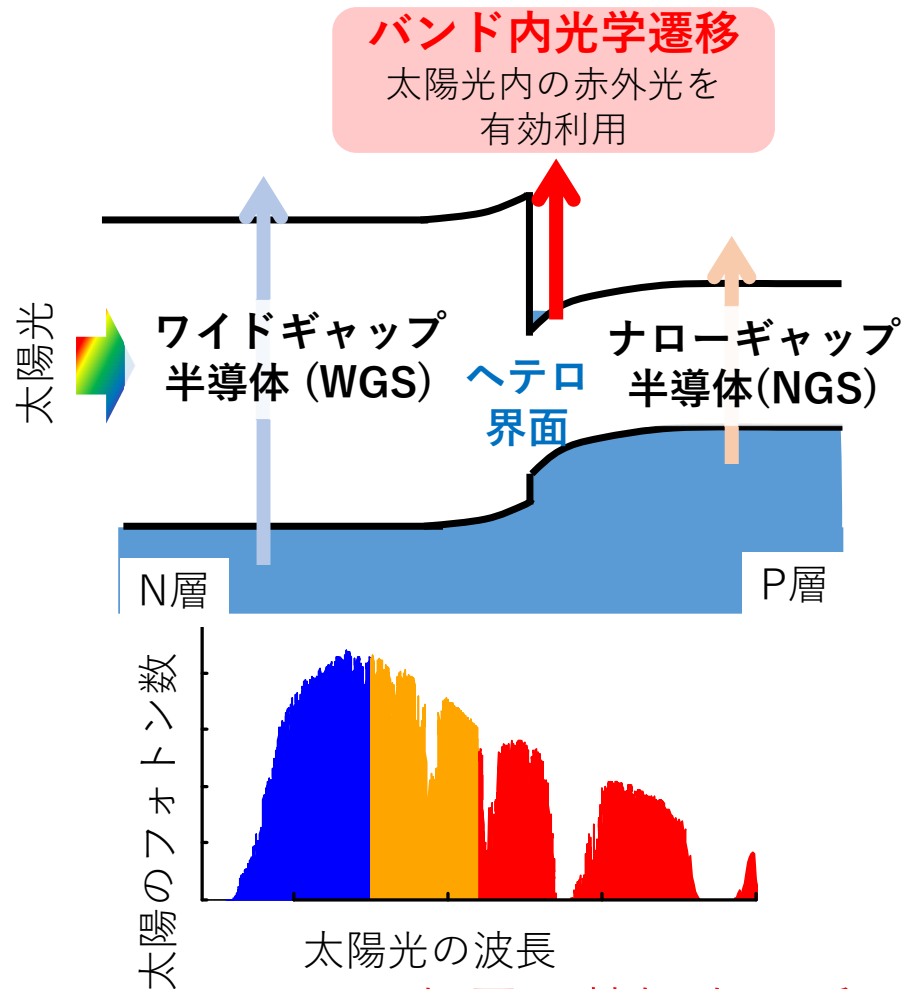


伝導帯の電子が中間バンドに再捕獲される。
→ エネルギー損失



2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池 (TPU-SC)

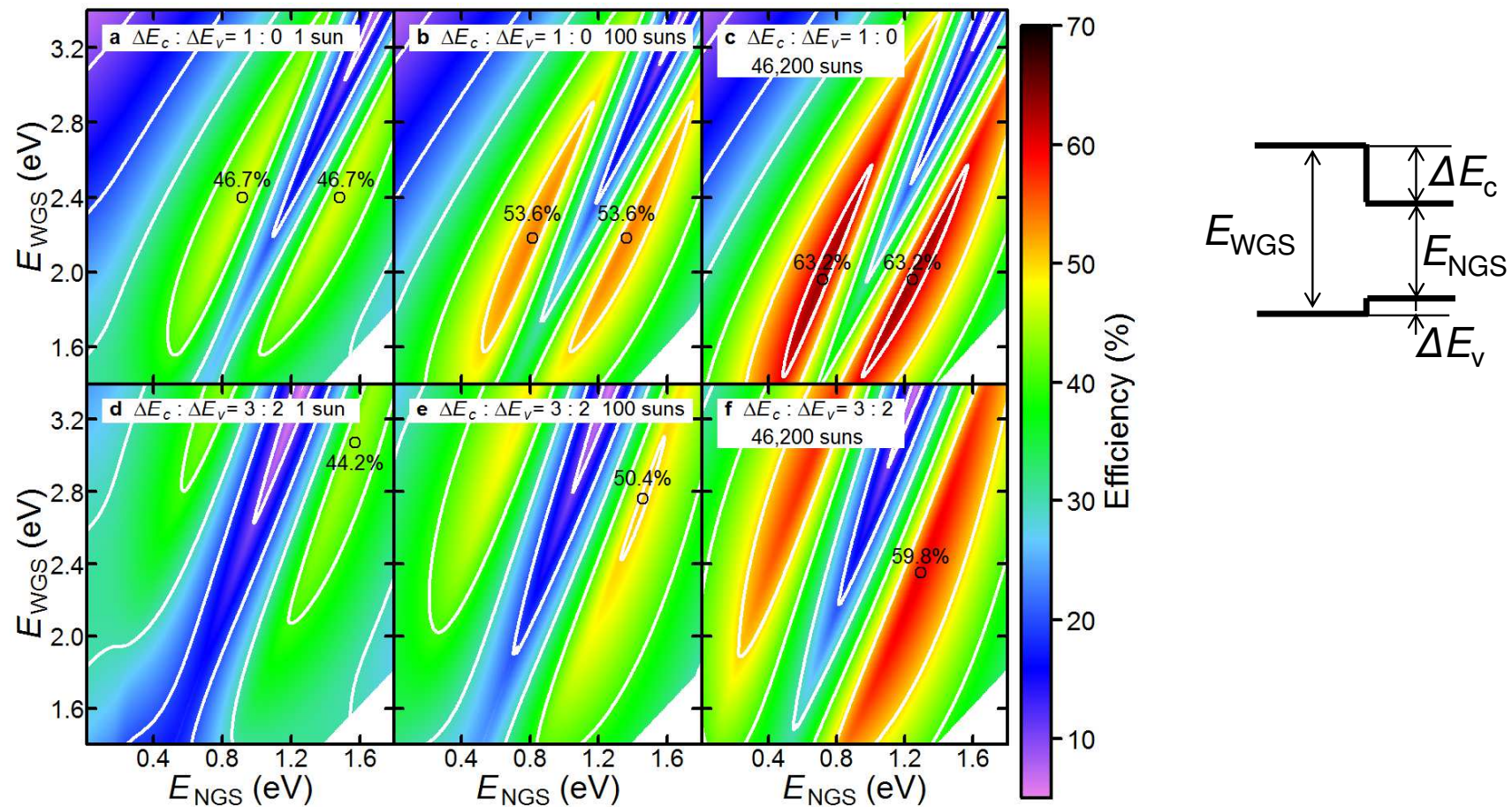
2017年に提案



- 高エネルギーフォトンがワイドギャップ半導体で吸収され、電流を取り出す。
- 低エネルギーフォトンがナローギャップ半導体で吸収され、ナローギャップ半導体とワイドギャップ半導体のヘテロ界面に電子を蓄積させる。
- さらに低エネルギーフォトンの吸収によりヘテロ界面に蓄積された電子を励起、高効率アップコンバージョンを起こす。
- ワイドギャップ半導体とナローギャップ半導体の境界に量子ドットを挿入しアップコンバージョンを増強する。

3つの吸収層で熱損失・透過損失を低減することで高効率を実現する。
多接合型太陽電池より簡単な構造で低コスト化が可能か？

アップコンバージョン太陽電池の理論変換効率



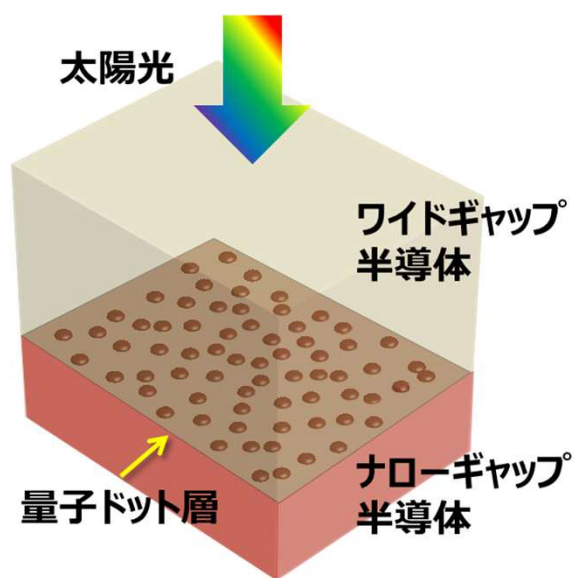
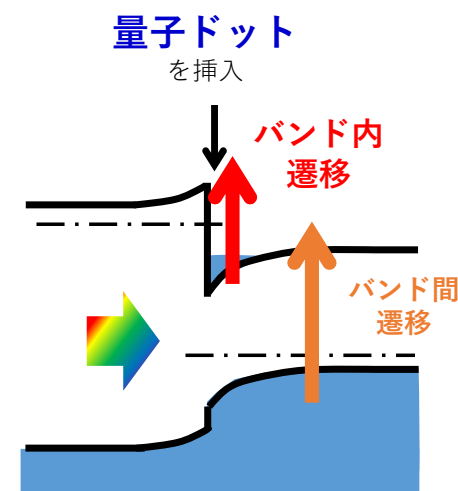
理論変換効率で最大**60%**到達可能

Sci. Rep. **8**, 872 (2018)

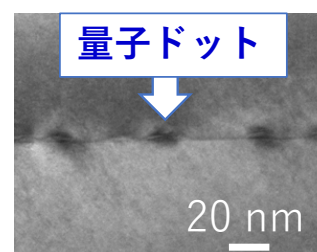
TPU-SCの効率的バンド内遷移のメカニズム

バンド間遷移とバンド内遷移を異なる位置で発現させる
→ バンド内遷移の始状態をキャリアで満たす

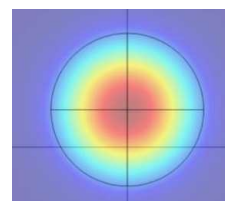
バンド内遷移の遷移選択則を緩和する
→ 量子ドットのキャリア面内閉じ込めにより
禁制遷移であるバンド内遷移を許容遷移に変化させる



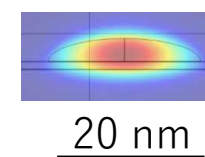
断面TEM像



上面

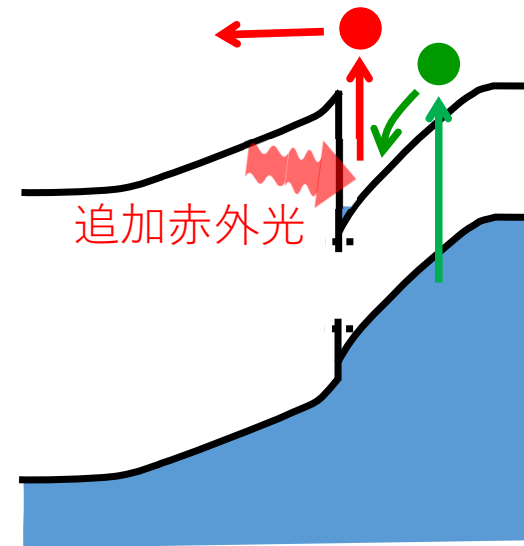
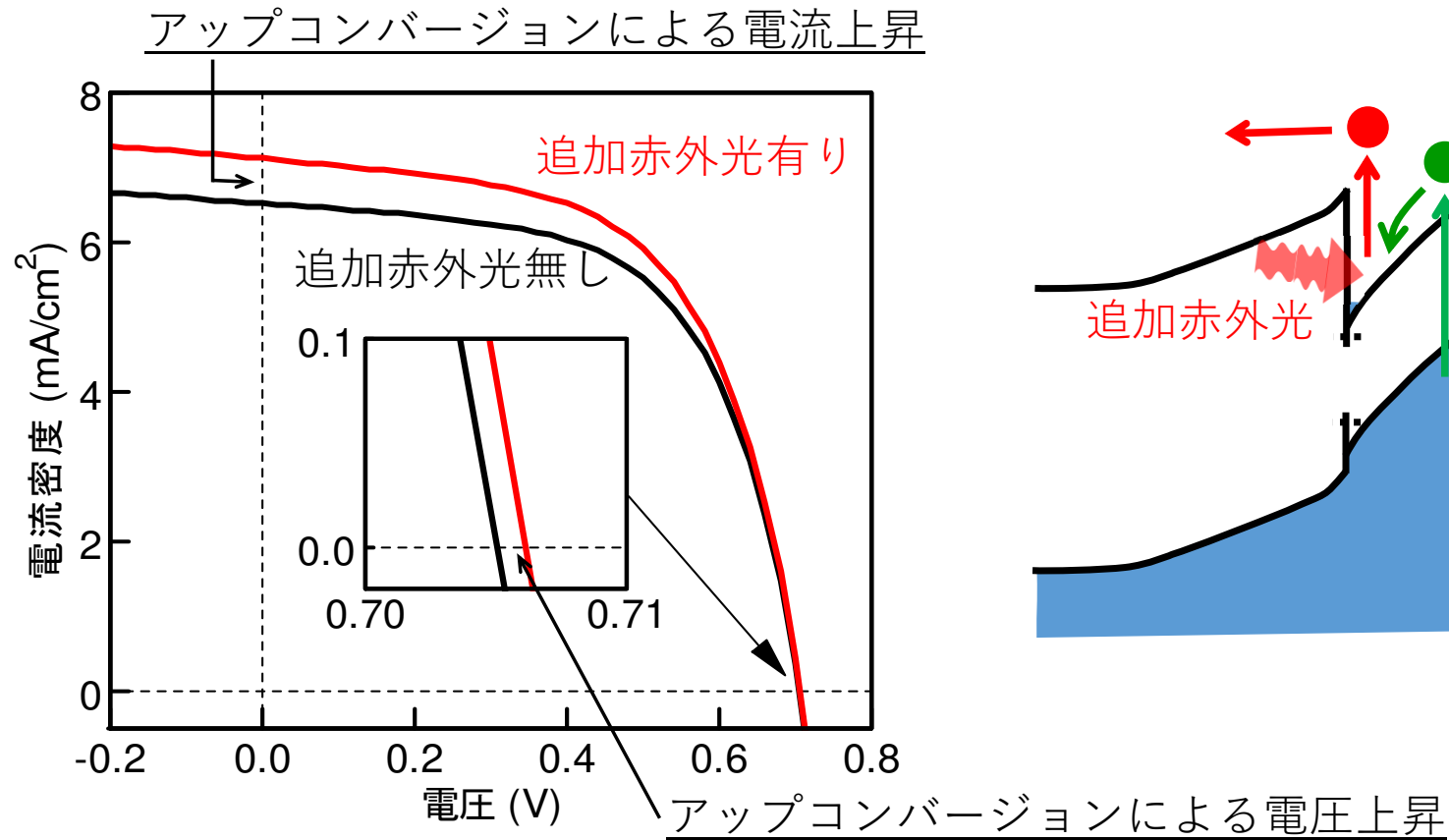


側面



量子ドット内の波動関数の閉じ込め

大きなアップコンバージョン電流の観測



低エネルギーフォトンによる電流上昇が既存技術の**100倍**以上向上。
低エネルギーフォトンによる電圧上昇を世界で初めて観測。
→ アップコンバージョン太陽電池が高効率太陽電池となり得ることを実験で実証。

まとめ

超高効率太陽電池を目指し、半導体ヘテロ界面と量子ドットを組み合わせた2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池を提案



- バンド内遷移による電流増加を観測（過去の報告より2桁以上向上）。
- バンド内遷移による開放電圧上昇の実験実証。
- 提案する構造で変換効率60%を達成可能であることを理論的に実証。

半導体バンド内遷移による光エネルギー変換の実験実証に成功
太陽電池の変換効率の向上にはさらなるブレイクスルーが必要

講義内容

1. 太陽電池の現状・太陽電池のしくみ
2. 単接合型太陽電池の理論変換効率
3. 単接合型太陽電池の理論変換効率を超えるアイデア
4. 太陽電池の周辺の他の技術開発・コンセプト
5. 我々の研究する超高効率太陽電池の紹介