

# 熱回収型太陽電池の原理提案

再生可能エネルギー研究センター  
太陽光チーム  
上出 健仁

望月 敏光<sup>1</sup>、秋山 英文<sup>2,3</sup>、高遠 秀尚<sup>1</sup>

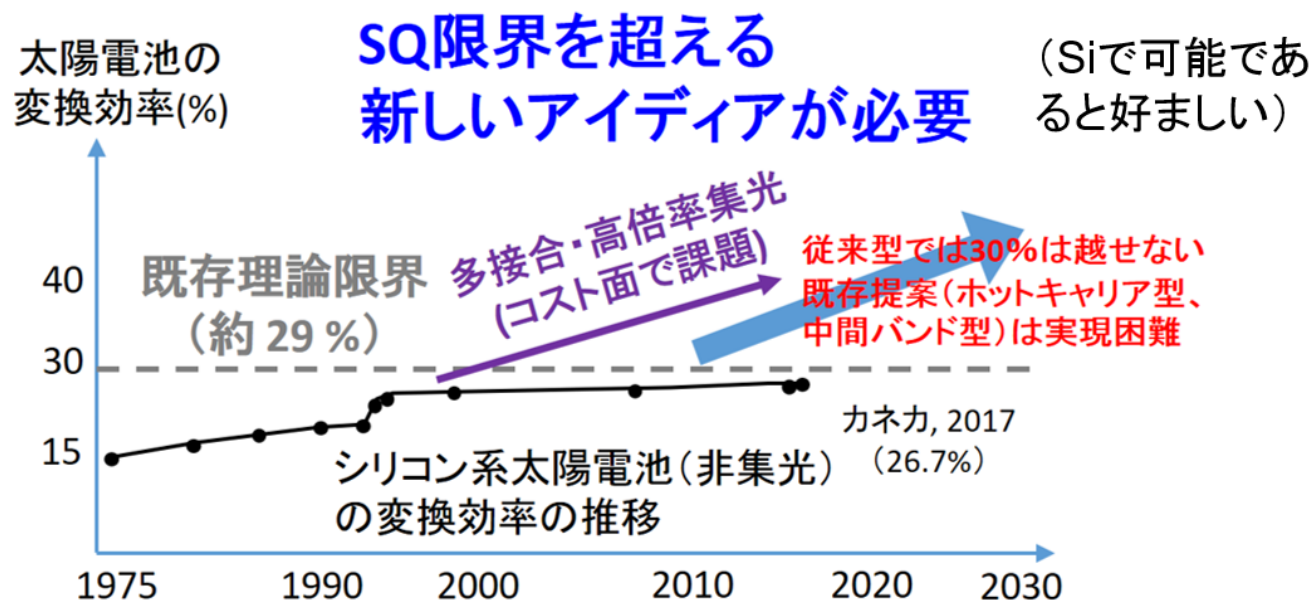
<sup>1</sup>産業技術総合研究所、  
<sup>2</sup>東京大学物性研究所、<sup>3</sup>OPERANDO-OIL

# 今なぜ新提案が必要か

- シリコン太陽電池(単一吸収体)の変換効率は研究レベルで詳細釣り合い限界(SQ限界\*はシリコンで29%程度)に近い値まで到達した(現在セル効率最高報告値はカネカの26.7%\*\*)
- シリコン太陽電池を今後さらに向上させるためには、詳細釣り合いに制限されない新しい動作原理に基づく太陽電池の開発が必要

\* W. Shockley and H. J. Queisser, *J. Appl. Phys.*, 32, 510 (1961).

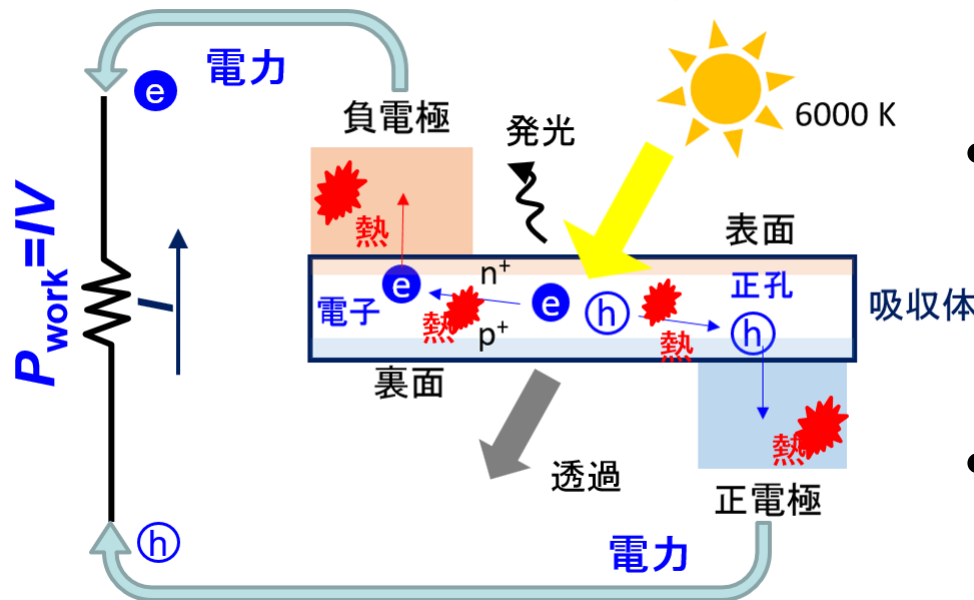
\*\* M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, and A. W. Y. Ho-Baillie, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.* 26, 427 (2018).



# SQ限界を超える方法は？

SQモデルにおけるエネルギーバランス（シリコン・非集光・最大電力点）

取り出し電力	約30%
透過損失	約20%
発光損失	数%
熱損失	45-50%



- SQ限界を与える状況でも、入射太陽光の約50%のエネルギーが熱として失われる
- 熱を回収する方法を見つけるのが筋が良さそう

\* W. Shockley and H. J. Queisser, *J. Appl. Phys.*, 32, 510 (1961).

# 既存提案：ホットキャリア太陽電池

R. T. Ross and A. J. Nozik, *J. Appl. Phys.*, 53, 3813 (1982).

- ホットキャリア型太陽電池は、光生成直後に6000 K(太陽光温度)を持つキャリアが熱緩和する前に電極へ取り出すことで、入射エネルギーの50%に相当する熱損失を回避し、高い変換効率を得ようというコンセプト(非平衡条件  $T_{\text{carrier}} > T_{\text{PH}}$  を利用)
- 通常の結晶材料では、熱化時間はピコ秒以下なので、それよりも短い時間で取り出す必要がある
- 1ピコ秒でキャリアが熱速度( $10^5$  m/s)で進める距離は100 nm (=0.1  $\mu\text{m}$ )なので、キャリア取り出し時間がピコ秒を下回るためには、それ以下の厚みの吸収体で太陽電池をつくる必要がある

ホットキャリア太陽電池は結晶シリコンには適用できない\*

\*ただし、ナノ構造などで熱緩和時間を延ばせば可能かもしれない

# これまでの成果

シリコン吸収体でも実現可能なSQ限界を超える  
非平衡太陽電池

## 「熱回収型太陽電池」

のコンセプトを提案した

\* 上出他、特願2017-241808.

- シミュレーション(非平衡理論)により理想デバイス特性を解明
- 高温吸収体で高効率化が得られる仕組みを解明(熱電効果)

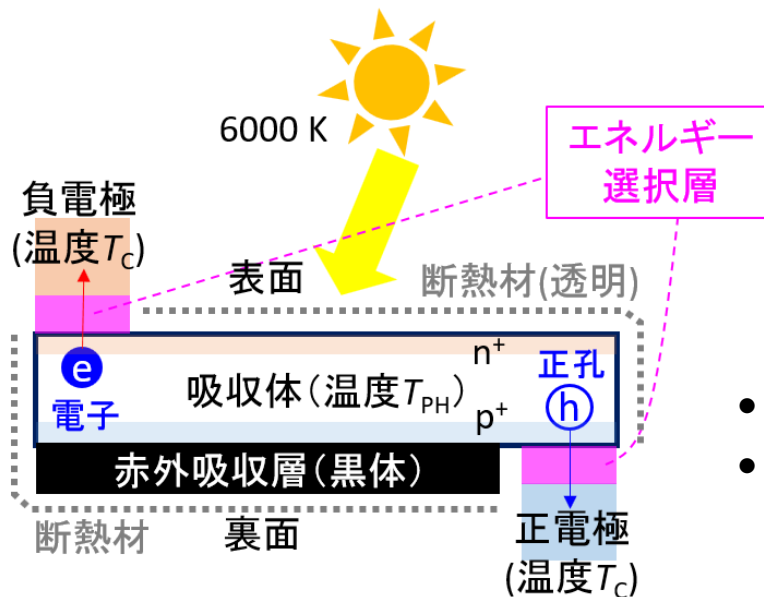
- 上出他、特願2017-241808.
- 上出他、第65回応用物理学会春季学術講演会、17a-D101-6 (2018).
- K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato, *Proc. 45th IEEE PVSC* (2018).
- 上出他、第79回応用物理学会秋季学術講演会、20a-136-7 (2018).

# 熱回収型太陽電池とは

光吸収体に熱を蓄え、高エネルギーキャリアを選択して取り出すことにより、従来棄てられていた熱が回収され高いエネルギー変換効率が得られる太陽電池

[必要条件1] 吸収体温度 > 電極温度 ( $T_{PH} > T_C$ )・・・(非平衡動作)

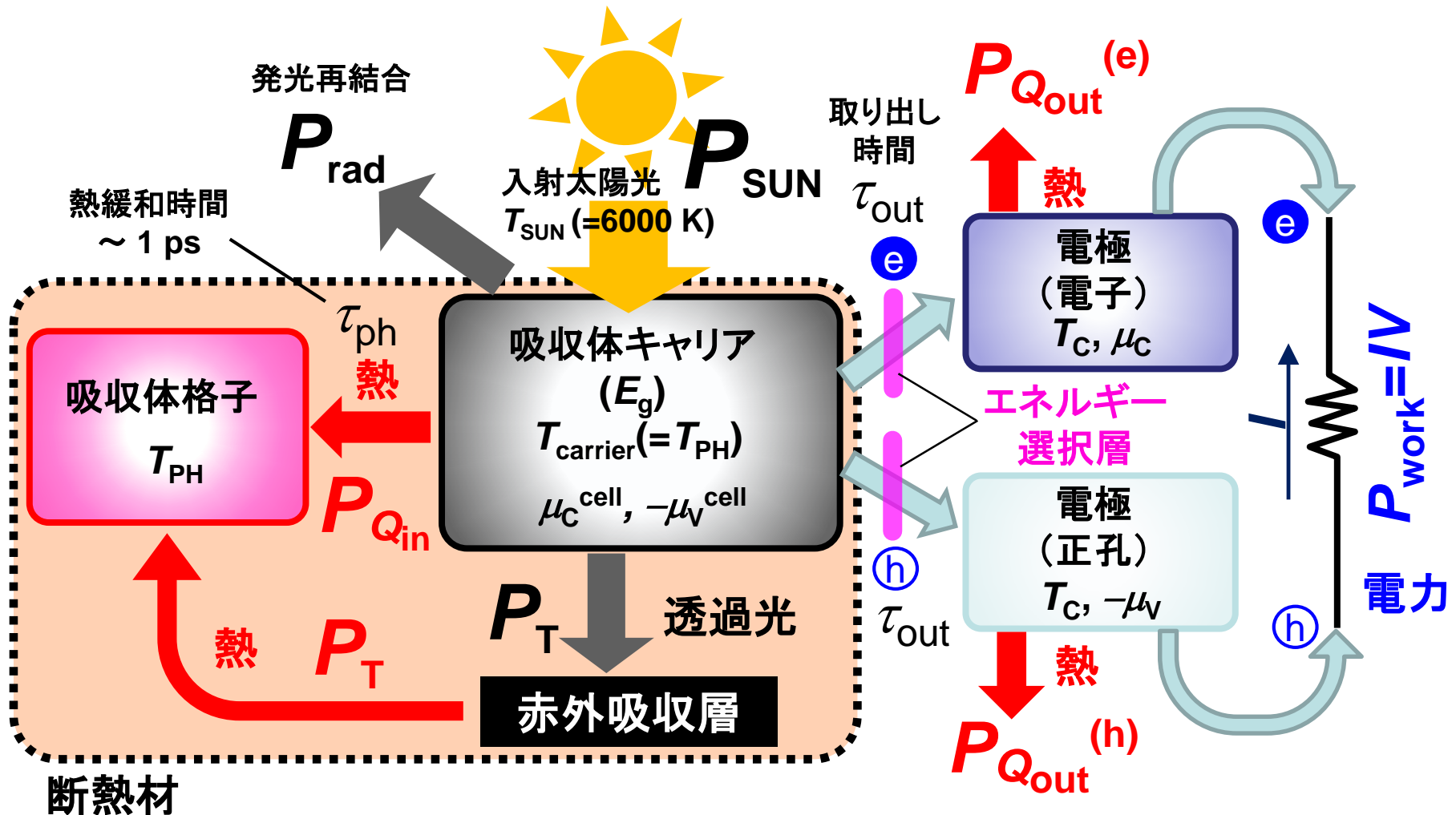
[必要条件2] キャリアエネルギーを選択して取り出すエネルギー選択層



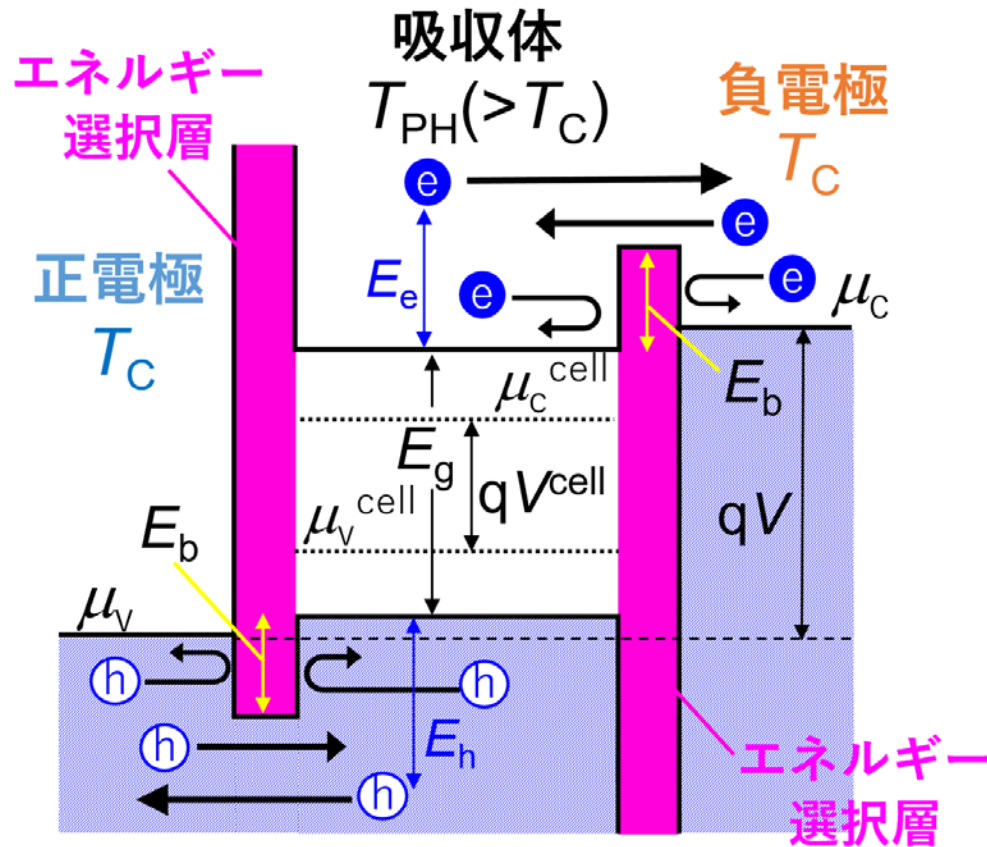
- エネルギー選択層
- 赤外吸収層はあった方が好ましい

# 熱回収型太陽電池におけるエネルギー一流

[動作条件] 吸収体格子に熱流があれば吸収体は温まる ( $P_{Qin} + P_T > 0$ )



# キャリアエネルギー選択層



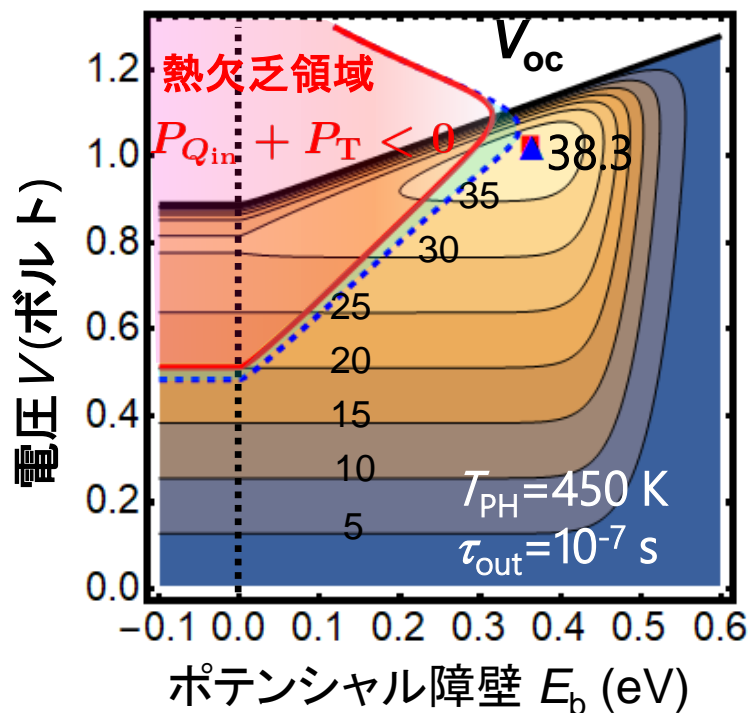
ポテンシャル障壁  $E_b$  を超えるエネルギー ( $E_e$ ,  $E_h$ ) を持つキャリアだけ電極と行き来できる



～非平衡理論を用いたシミュレーション結果～

## 熱回収型太陽電池デバイス特性(吸収体=100 μm厚シリコン)

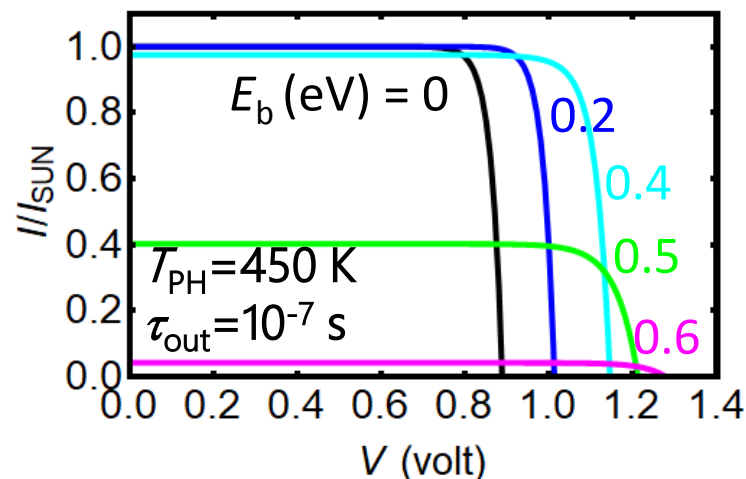
変換効率(%)の等高線プロット



吸収体温度 (450 K) > 電極温度 (300 K)

電流-電圧特性

(吸収された全光子流  $I_{sun}$  で規格化)



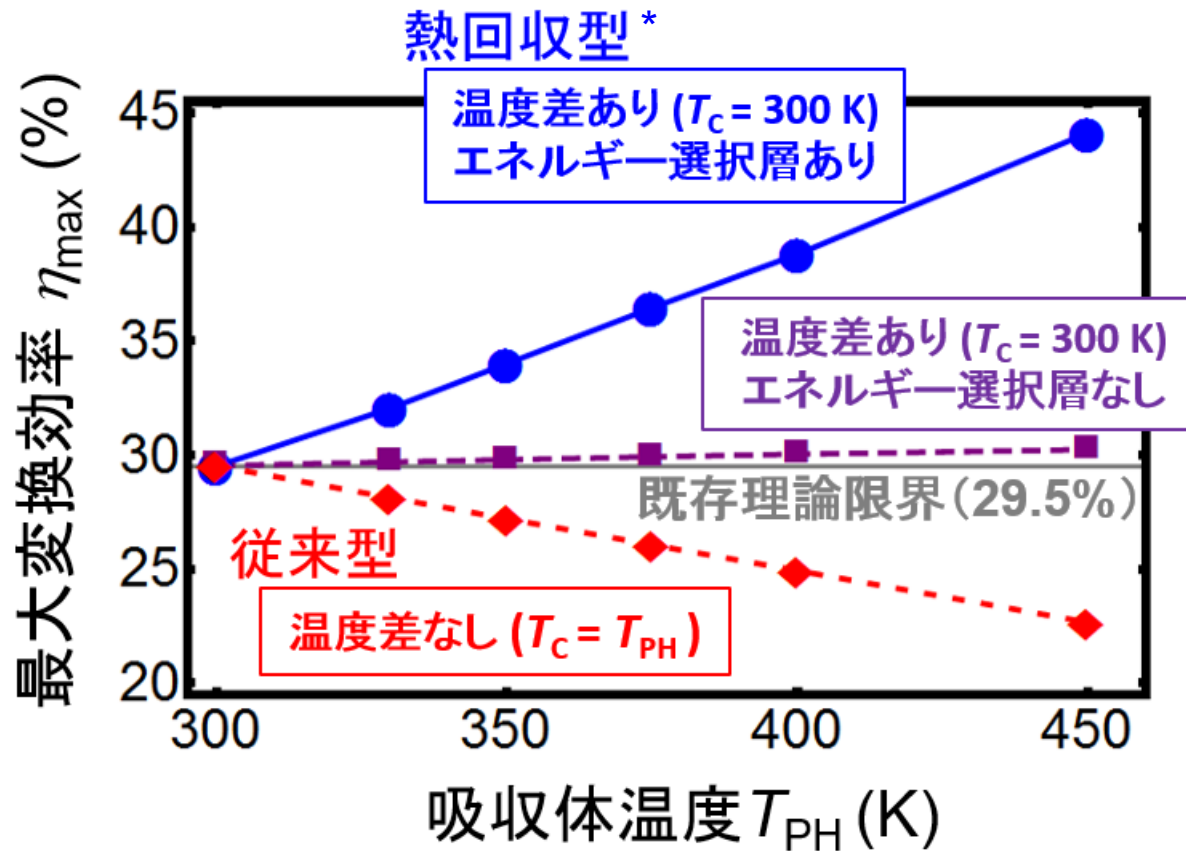
取り出し時間が熱緩和時間(1 ps)より5桁遅い取り出しでもSQ限界(このモデルで29.5%)を大きく超える効率38.3%が得られた

短絡電流が下がる障壁高さまで、開放電圧は障壁  $E_b$  とともに増加する

～非平衡理論を用いたシミュレーション結果～

## 熱回収型太陽電池の効率限界 (吸収体=100 μm厚シリコン)

\*パラメタ ( $V$ ,  $E_b$ ,  $\tau_{out}$ ) を最適化した結果

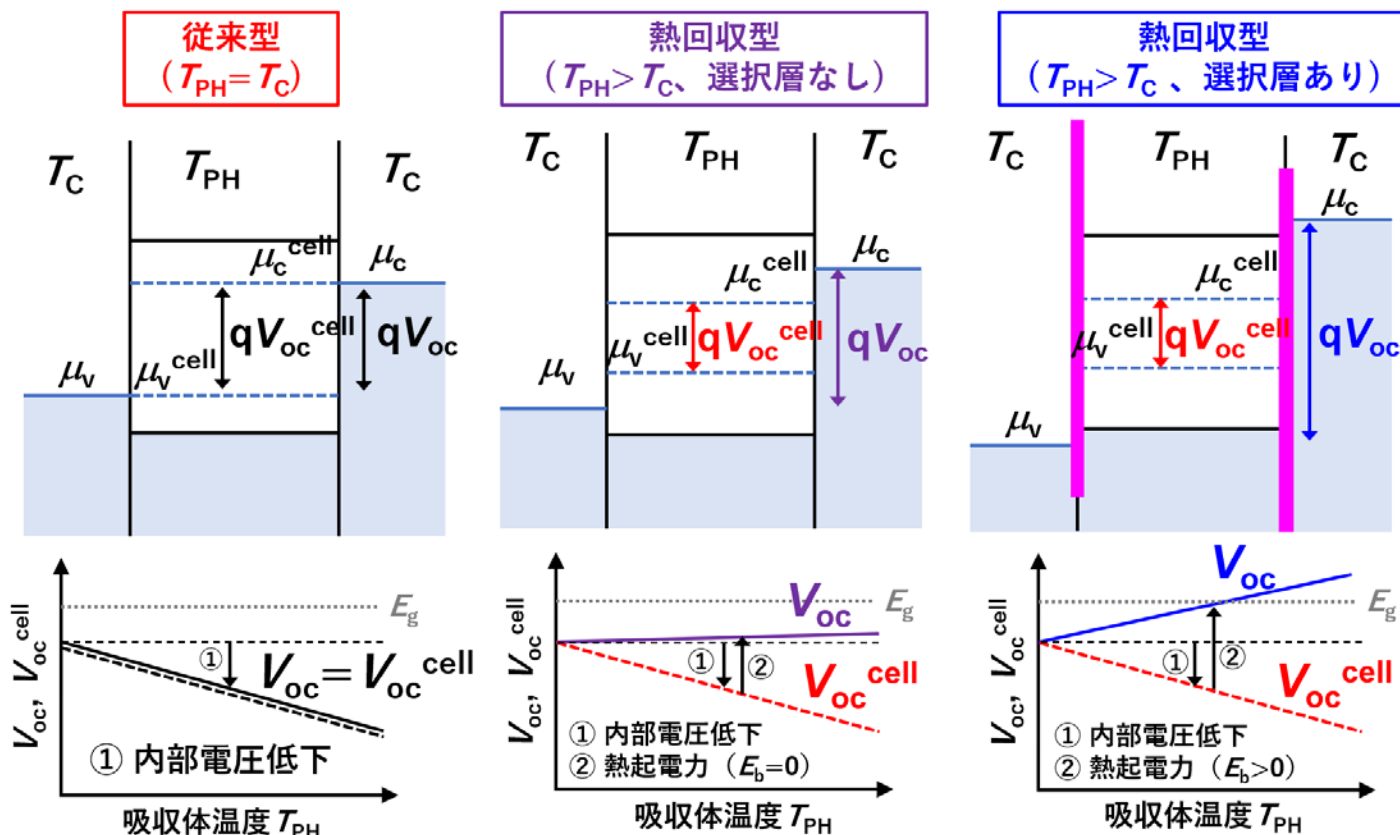


$\Delta T=10$  K あたり  
約1%の上昇!

- 温度差  $\Delta T$  により効率が上昇
- エネルギー選択層は効率をさらに改善

# なぜ吸収体が高温化して効率が上がるか？

開放条件の電圧(内部・外部)の温度変化(熱回収型と従来型の比較)



- 吸収体の温度上昇で内部電圧は下がるが、温度差で発生した熱起電力がそれを補償する
- エネルギー選択層の利用で、大きな正の温度特性が得られる

# 他提案との比較

種類	平衡／非平衡	原理 /動作条件	限界効率 ( $\eta_{max}$ )	長短・課題	実施状況
中間バンド型 (1997, Luque他 <sup>1</sup> )	熱平衡	中間準位を介した二段階光吸収 (アップコンバージョン)	46.8% (1LV), 53.0% (2LV), 56.8% (4LV) @非集光 +20%程度@全集光	高効率・高コスト (中間準位による十分な吸収などが課題)	量子ドットやヘテロ界面準位 <sup>4</sup> による光電流増大が報告されている(東大・神戸大)
ホットキャリア型 (1982, Ross他 <sup>2</sup> )	非平衡 ( $T_{carrier} > T_{PH} = T_c$ )	キャリア高速取り出し + エネルギー選択	67% (非集光) 85% (全集光)	バルク結晶では厚さ0.1 $\mu m$ 以下の吸収体など物理的制限が強い(シリコンは不可)	ペロブスカイト <sup>5</sup> 、量子ドット、量子井戸 <sup>6</sup> による緩和時間増大が報告されている
熱回収型 (2018, 上出他 <sup>3</sup> )	非平衡 ( $T_{carrier} = T_{PH} > T_c$ )	蓄熱+熱回収 (低熱伝導度吸収体 + エネルギー選択)	限界値は $\Delta T = T_{PH} - T_c$ に依存 $\Delta T = 10 K$ あたり 効率は約1%上昇	シリコンでも実現可能	未実施

[1] A. Luque and A. Martí, *Phys. Rev. Lett.*, 78, 5014 (1997). [2] R. T. Ross and A. J. Nozik, *J. Appl. Phys.*, 53, 3813 (1982). [3] K. Kamide *et al.*, *Proc. 45th IEEE PVSC* (2018). [4] S. Asahi *et al.*, *Nat. Commun.*, 8, 14962 (2017). [5] H.-H. Fang *et al.*, *Nat. Commun.*, 9, 243 (2018). [6] D.-T. Nguyen *et al.*, *Nat. Energy*, 3, 236 (2018).

# 結論

## 「熱回収型太陽電池」を理論提案

- 吸収体と電極の温度差とエネルギー選択層を利用することで、熱が回収されSQ限界を超える高い変換効率を得られる
- 熱緩和より速い高速キャリア取り出しは不要のため、吸収体はシリコン単体でも実現可能
- 温度差10 Kあたり約1%の効率上昇が見積もられる
- 正の温度特性が得られる要因は、温度差により発生する熱起電力である

## 実現に向けた要素技術

- 熱を吸収体に留めより大きな温度差を得ることが重要かつ課題