

日本学術会議 公開シンポジウム 2023年5月12日
「カーボンニュートラル時代の熱エネルギー —革新議論と社会実装—」

断熱 / 放熱 および ぶく射輸送制御

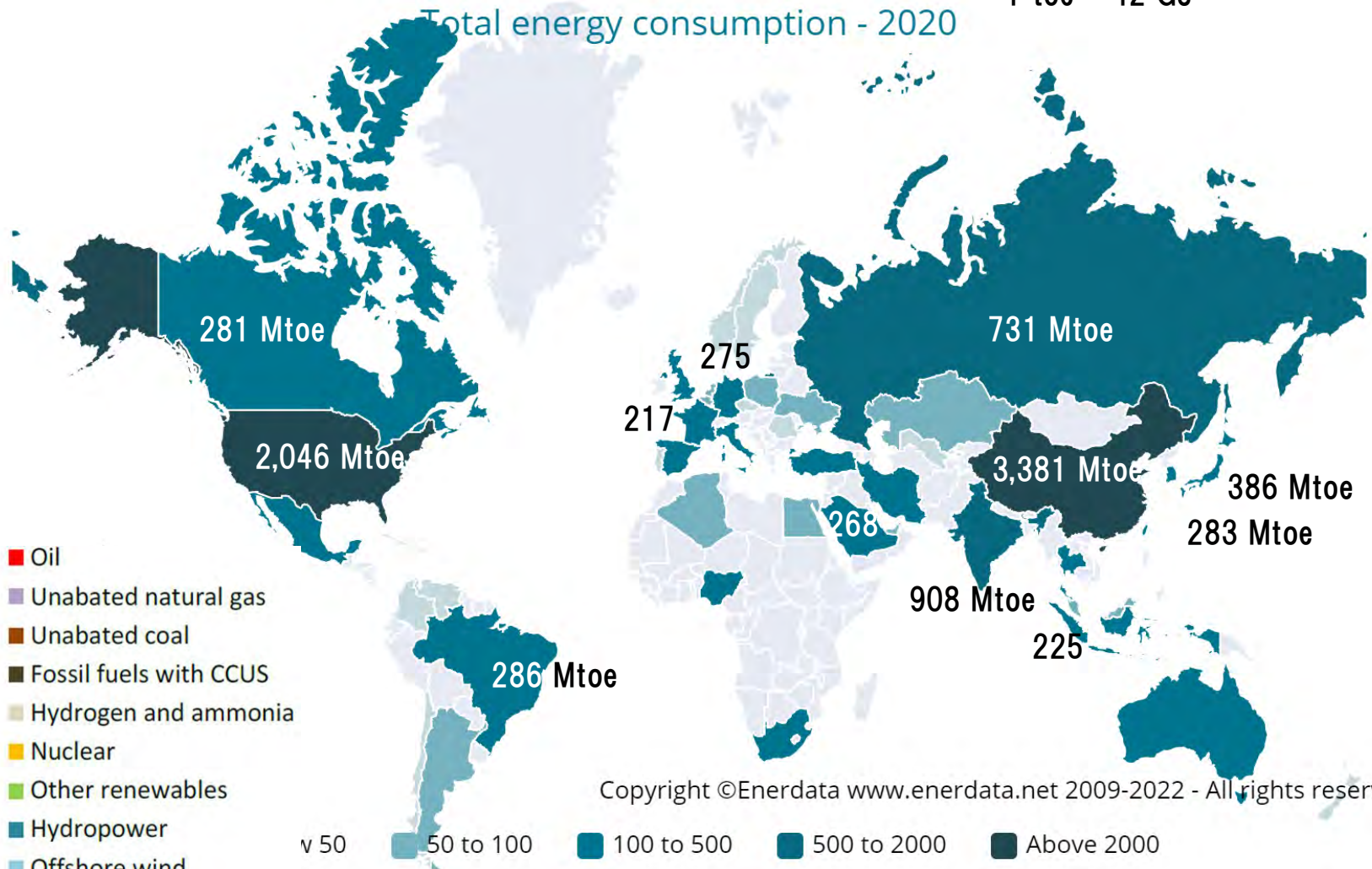
花村 克悟

東京工業大学 工学院

世界のエネルギー消費

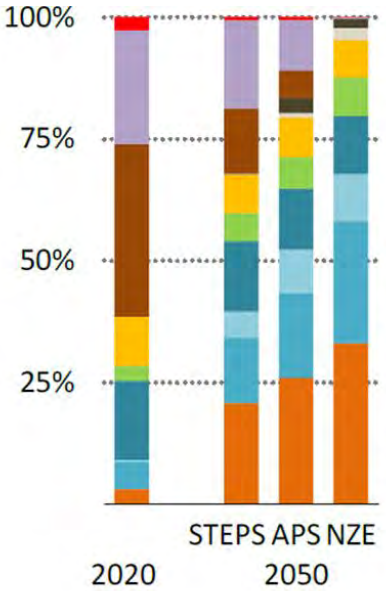
Mtoe: million tons of oil equivalent
1 toe = 42 GJ

Total energy consumption - 2020



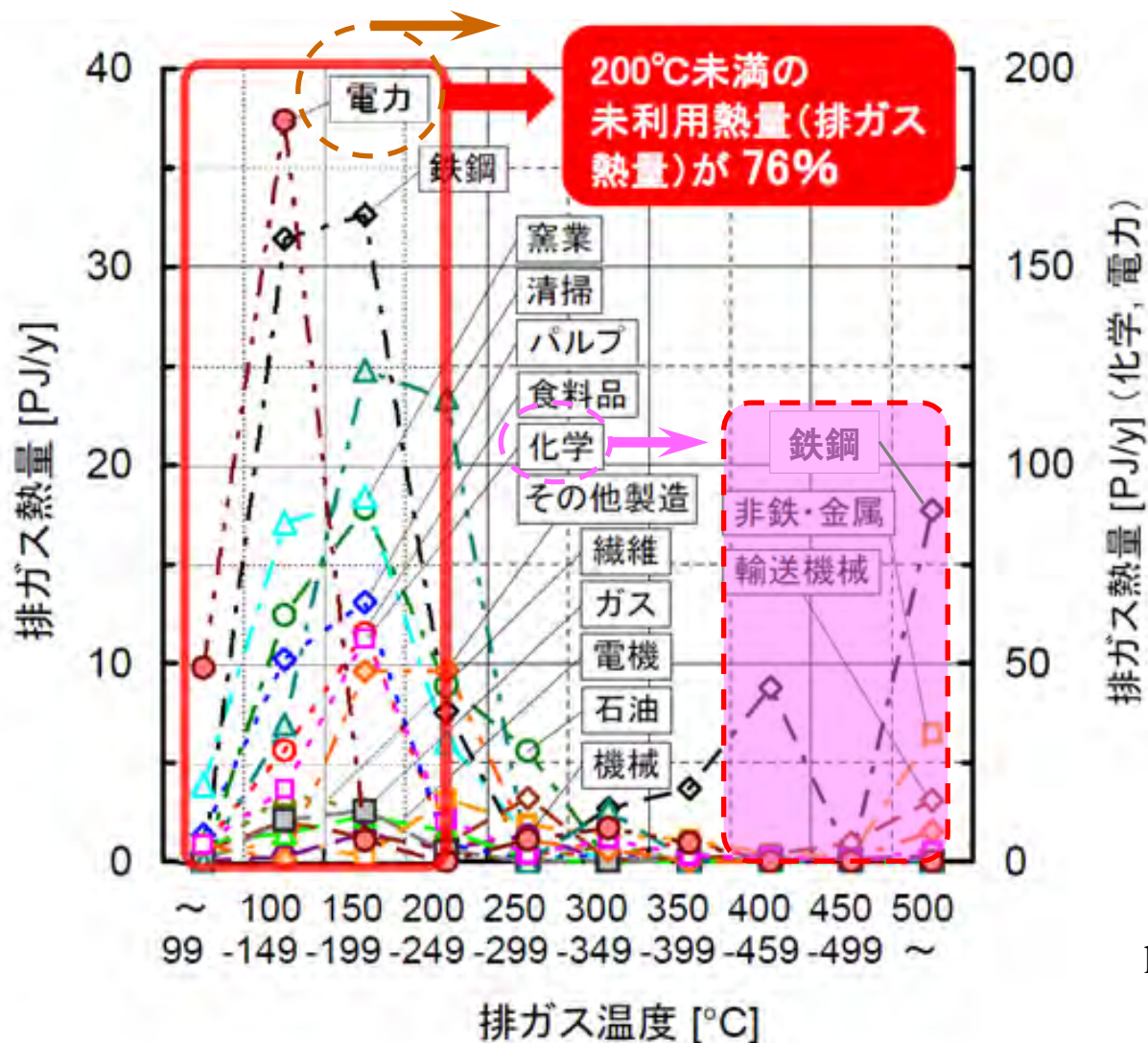
Copyright ©Enerdata www.enerdata.net 2009-2022 - All rights reserved

<https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>



Legend for map: v 50 50 to 100 100 to 500 500 to 2000 Above 2000

未利用エネルギー（排熱実態調査2019）



<http://thermat.jp/HainetsuChousa/>

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合(TherMAT) 15業種(1273事業所)の工場設備の排熱実態調査報告書を公表(2019)(NEDOとTherMATによる)

製鉄所におけるふく射による放熱(鉄鋼・非鉄金属)



スラブ加熱
~1400°C

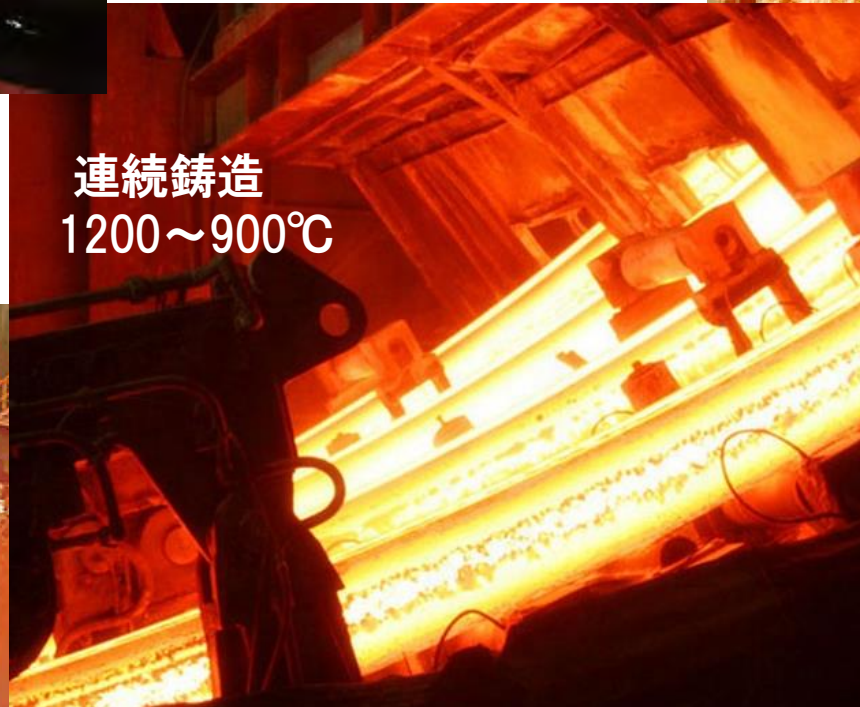
<https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=3ebtuL8N&id=B7CF595EAA92AA90BD40D2887C9A5282B419561D&thid=OIP.3ebtuL8N&uJ0nDdkjDyOAHaE&mediaurl=https%3A%2F%2Fdepositphotos.com%2F3942137%2F116571856-stock-photo-hot-slab-in-steel-plant.jpg&exph=363&expw=600&q=%e8%a3%bd%e9%89%84%e6%89%80%e5%86%99%e7%9c%9f&simid=608020309918025059&form=IRPRST&ck=00F405C40D95EC1462135694C912CDF7&selectedindex=275&ajaxhist=0&ajaxserp=0&vt=0&sim=11>

付加エネルギー：
製鉄工程全体の20%
(その半分は熱ふく射により放熱)

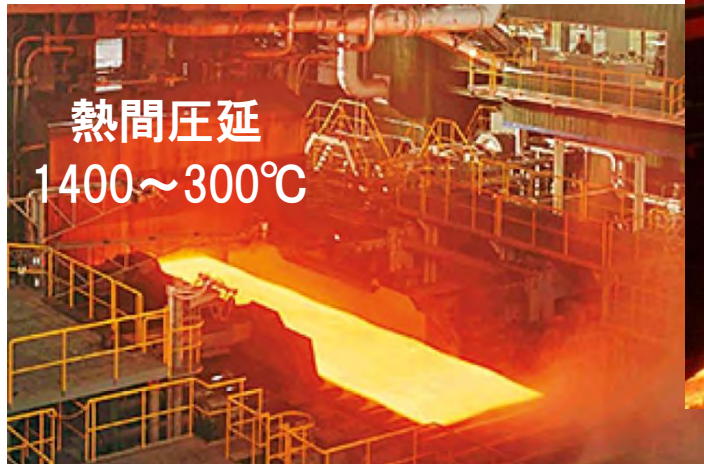


転炉
>1400°C

<https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=05bT2wL&id=1E15EA96C136D7C0FA1FA98422FF5741B46694C4&thid=OIP.05blT2wLdYFkrHirUgdAHaE8&mediaurl=https%3A%2F%2Fsustainablejapan.jp%2Fwp-content%2Fuploads%2F020%2F12%2Fsteel.jpg&exph=667&expw=1000&q=%e8%a3%bd%e9%89%84%e3%80%80%e5%86%99%e7%9c%9f&simid=608006063509539500&FORM=IRPRST&ck=B424C10ABB507D3CC2A8223B0DDDD4B2&selectedindex=0&ajaxhist=0&ajaxserp=0>

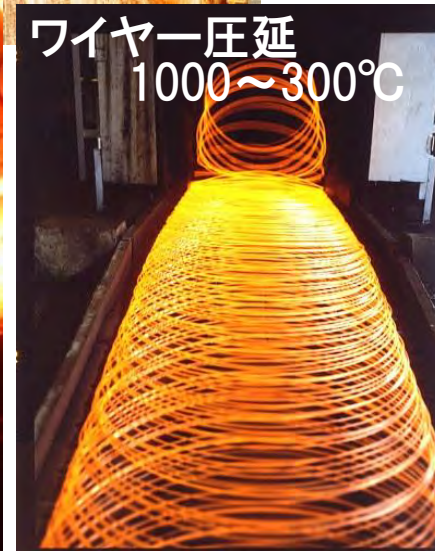


連続 casting
1200~900°C



熱間圧延
1400~300°C

https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=nM%2fOwNy&id=DAE0262169EE9B56EB4AD5C76D9E3BD32692008A&thid=OIP.nM_sOwNyvzqB5VZwJlx4YgHaHa&mediaurl=https%3A%2F%2Fcdn.goodao.net%2Fcmrolling%2FHTB1sDkXlfrK1Rjy1Xdg6yemFXaV.jpg&exph=750&expw=750&q=%e8%a3%bd%e9%89%84%e3%80%a3%e7%b6%9a%e9%8b%b3%e9%80%a0%e3%80%80%e5%86%99%e7%9c%9f&simid=608039474044103124&FORM=IRPRST&ck=E60A3BFFB177EF44515D6A30C634919&selectedindex=55&ajaxhist=0&ajaxserp=0

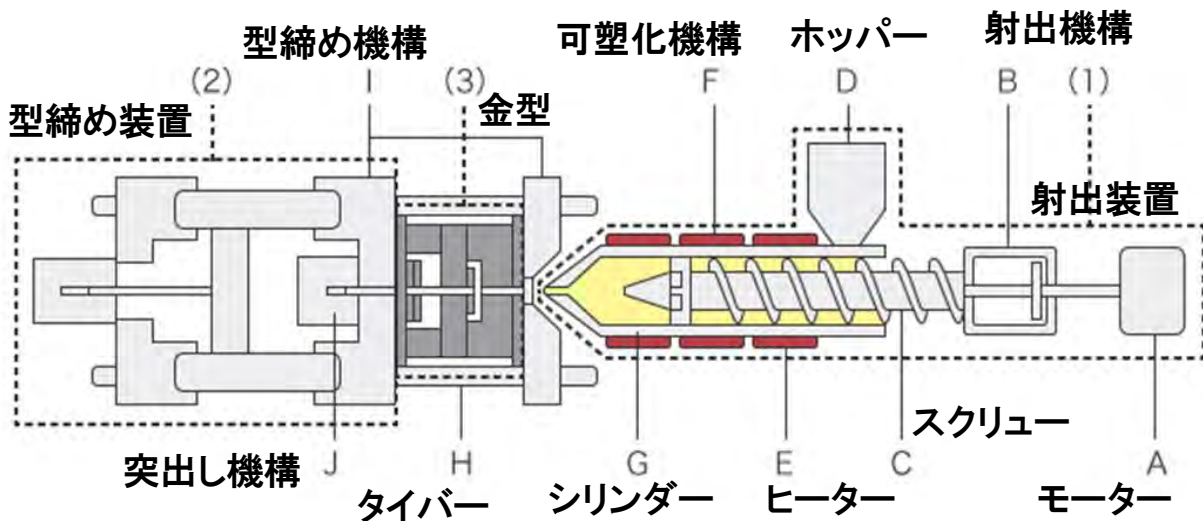


ワイヤー圧延
1000~300°C

https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=Wa3Ugpc&id=5BDD4C57E65D895062B8ACC894EA12C3EF38C5BD&thid=OIP.Wa3UgpcXmSn9WVz03-RWQH&G&mediaurl=https%3A%2F%2Fwww.townnews.co.jp%2F020206%2Fimages%2Fa000881915_01.jpg&exph=994&expw=1200&q=%e8%a3%bd%e9%89%84%e6%89%80%e5%86%99%e7%9c%9f&simid=608044275842036786&form=IRPRST&ck=C650137949FE98B5358E6AD05CA9FA3&selectedindex=10&ajaxhist=0&ajaxserp=0&vt=0&sim=11

射出成型工程における放熱(その他製造)

「射出成形機」

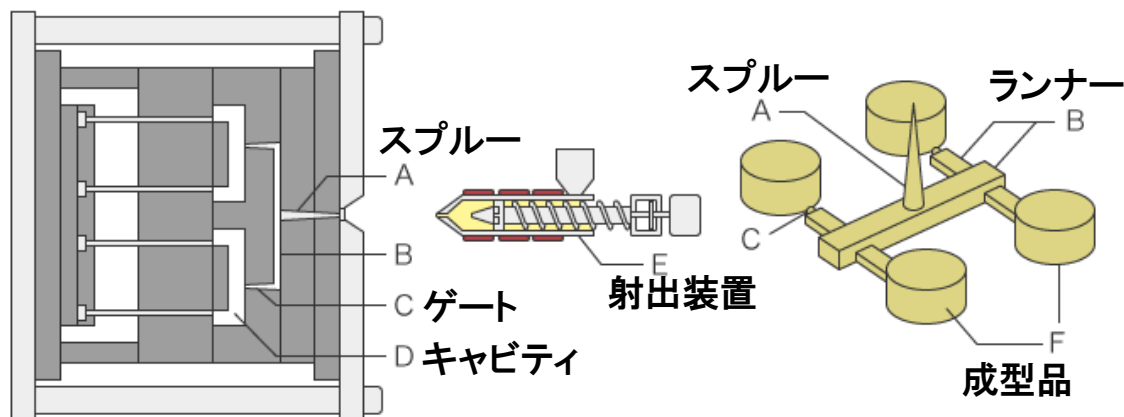


卵用パック

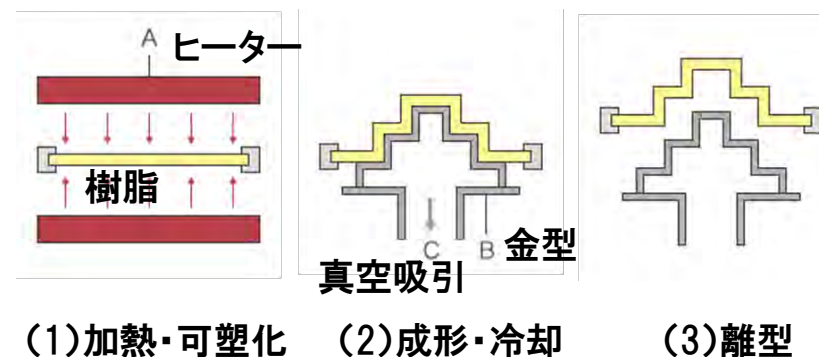


車用バンパー

「多数個取り」の金型と射出成形品の例



真空成形の装置・工程



内燃機関における熱管理(輸送機械)

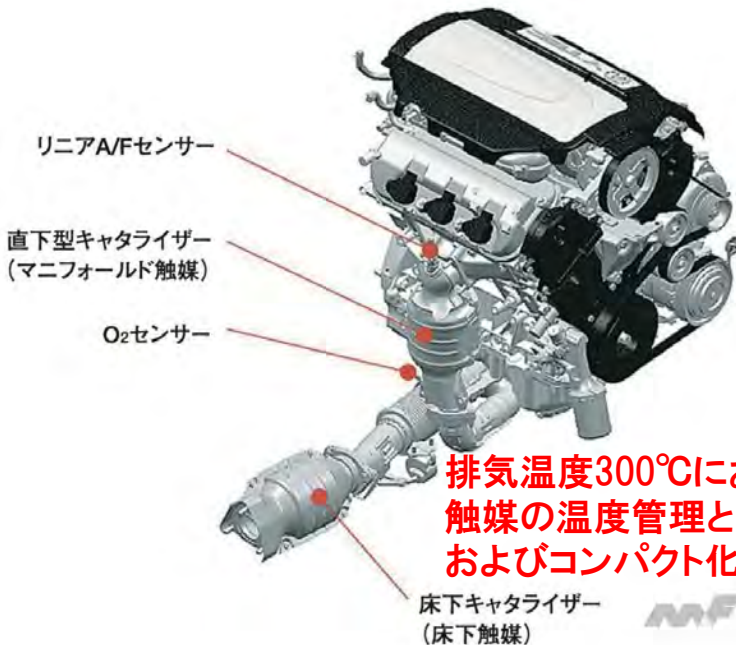


シリンダー温度均一冷却:
ピストンリング圧低減
(機械的摩擦損失低減)

<http://www.vwvortex.com>

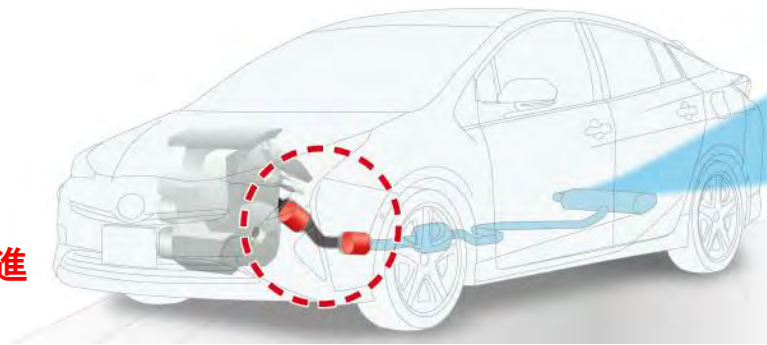


重量車: 正味熱効率55%へ!

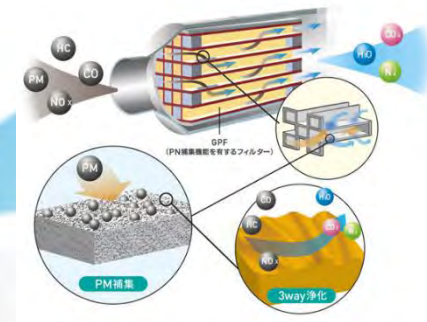


乗用車: 正味熱効率60%へ?!

排気温度300°Cにおける
触媒の温度管理と反応促進
およびコンパクト化



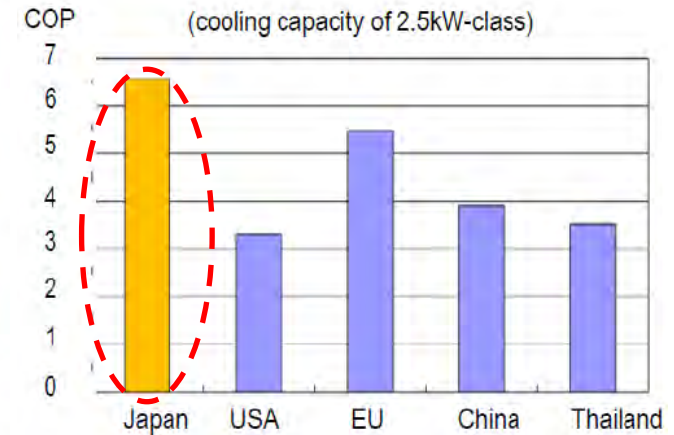
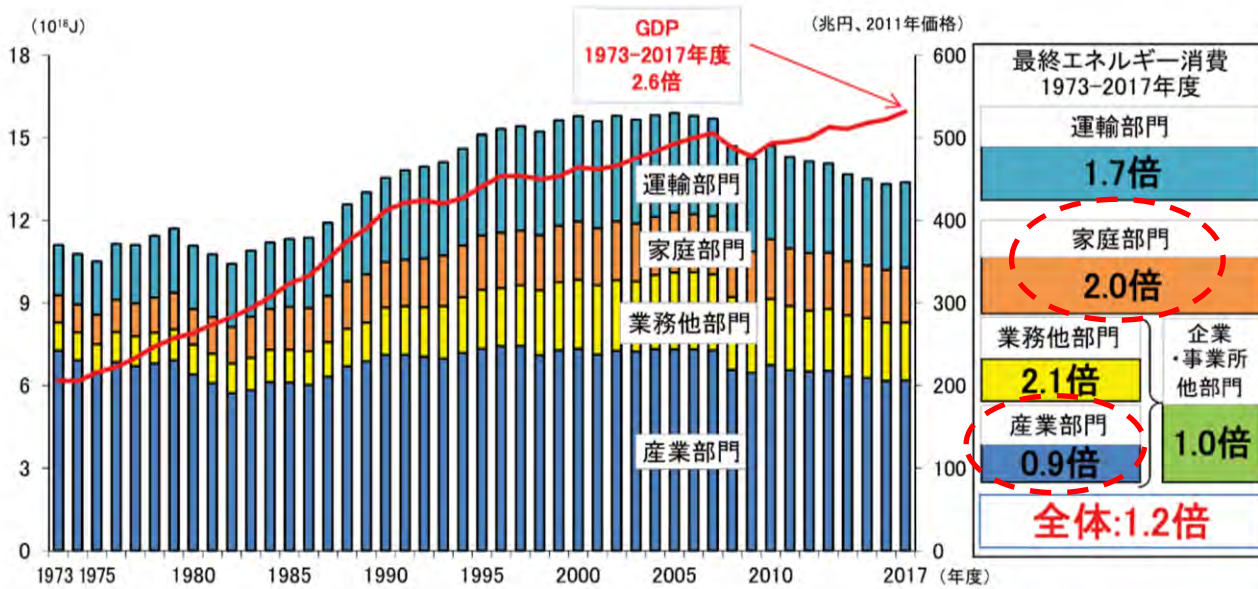
各種燃料についてゼロエミッションへ!



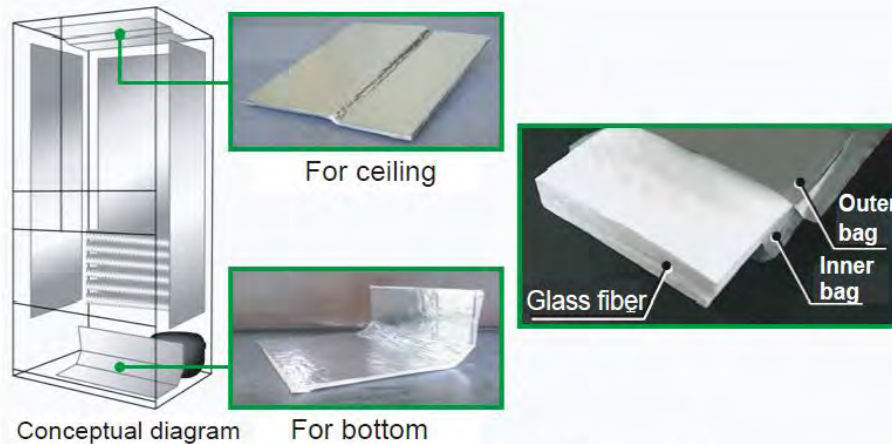
<https://motor-fan.jp/tech/article/9273/>

<https://www.cataler.co.jp/products/gasoline/gpf/>

民生機器におけるエネルギー消費



出典: 資源エネルギー庁



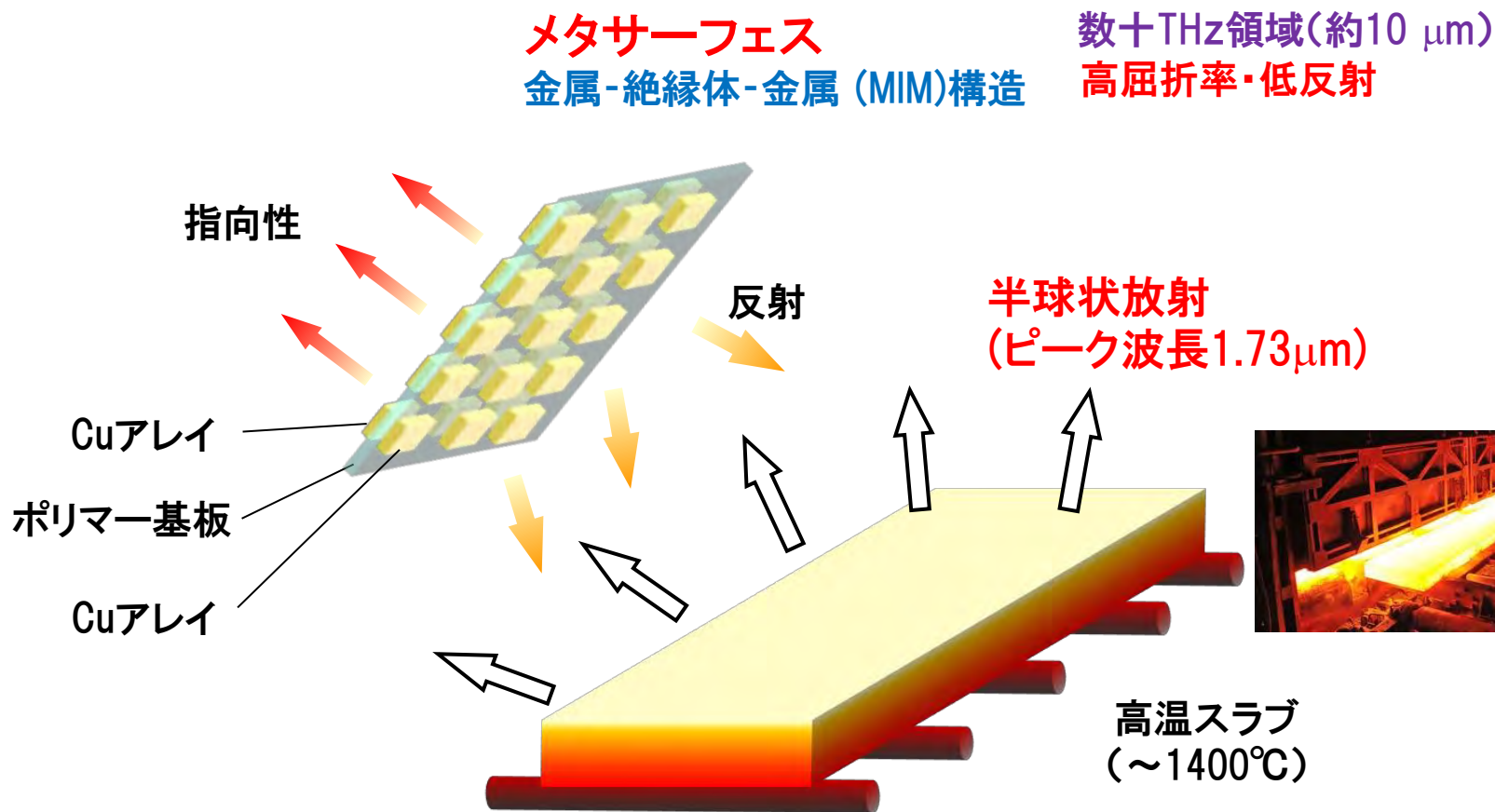
フレキシブル真空断熱パネル

日立アプライアンス(株)

熱伝導率
 空気: 0.024 W/mK
 真空断熱パネル: 0.004 W/mK

消費電力250kWh/年 ⇒ 平均~30W

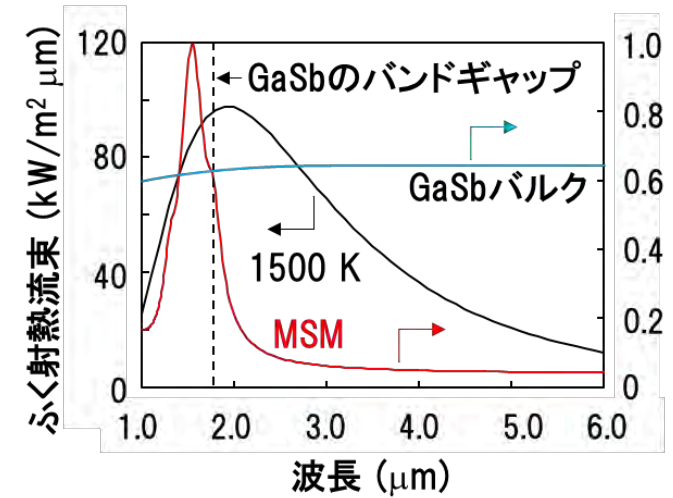
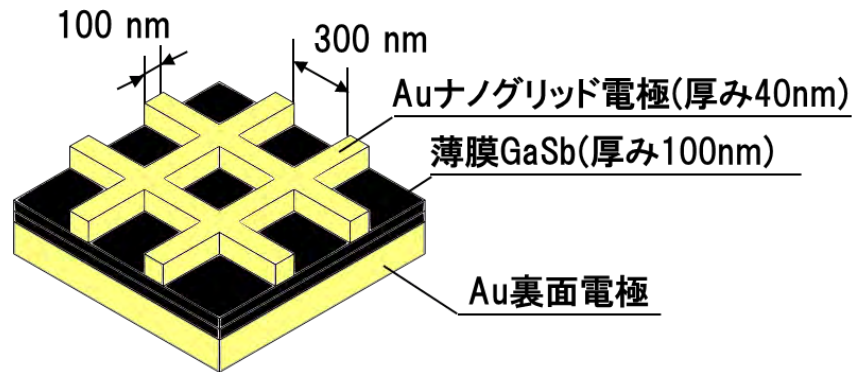
製鉄所におけるふく射輸送制御



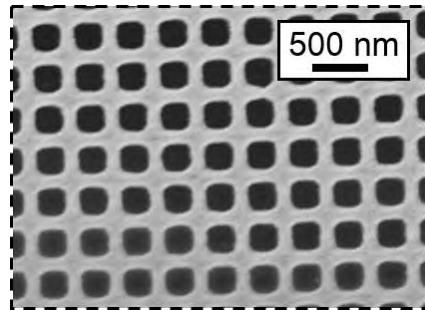
鈴木ら、Opt. Ex., vol.29, no.10, pp.14513, 2021.

電磁波(AGC) https://www.agc.com/news/detail/1201960_2148.html

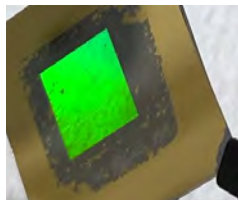
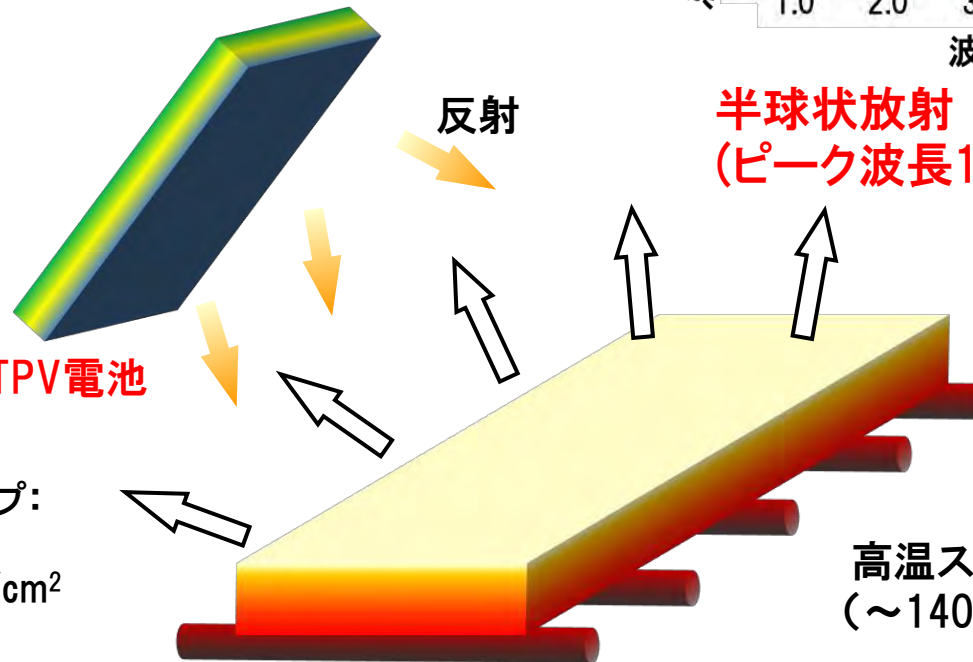
製鉄所におけるふく射の波長選択吸収と光起電力発電



吸収率 (-)



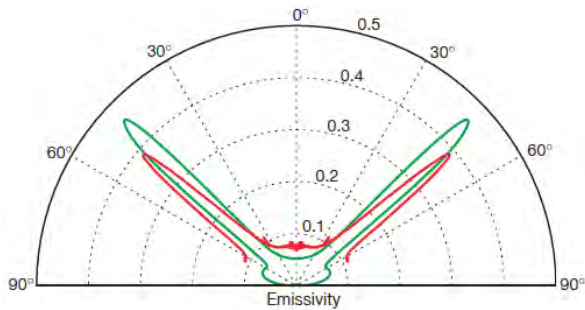
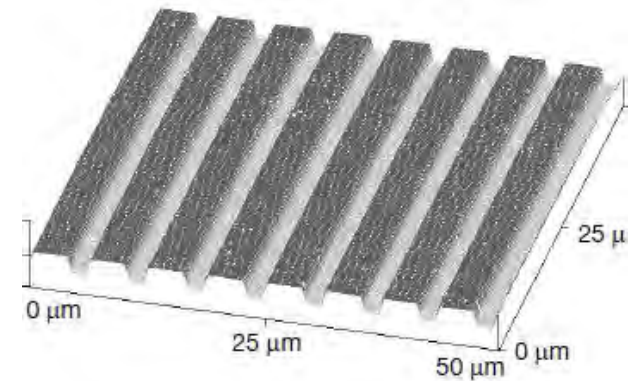
Au/GaSb/Au共振器TPV電池



500Wハロゲンランプ:
開放電圧 0.174V
短絡電流 $12.8\text{mA}/\text{cm}^2$

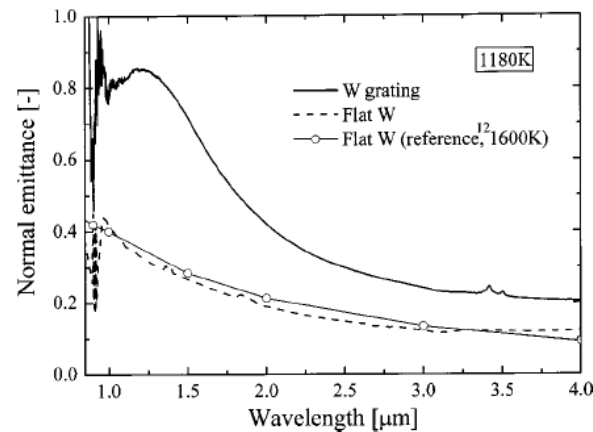
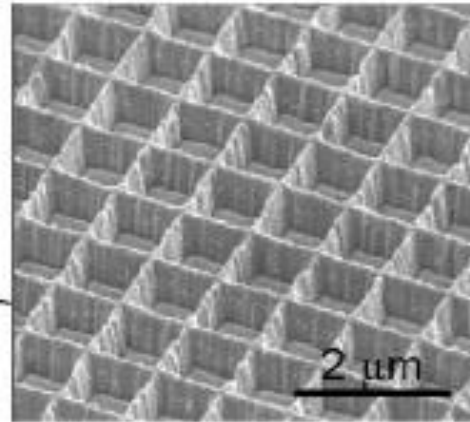
波長選択および指向性放射体(エミッター)

1D



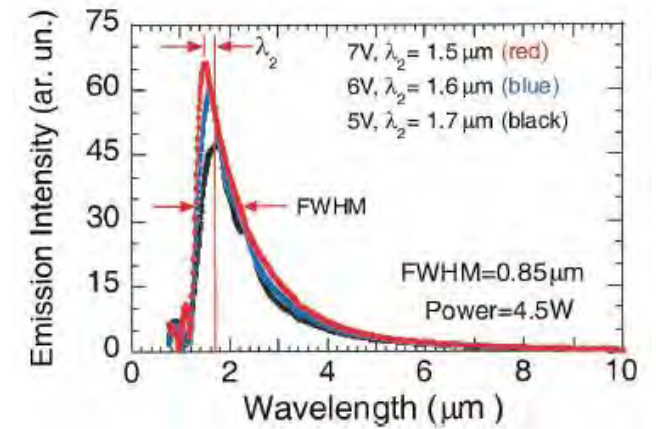
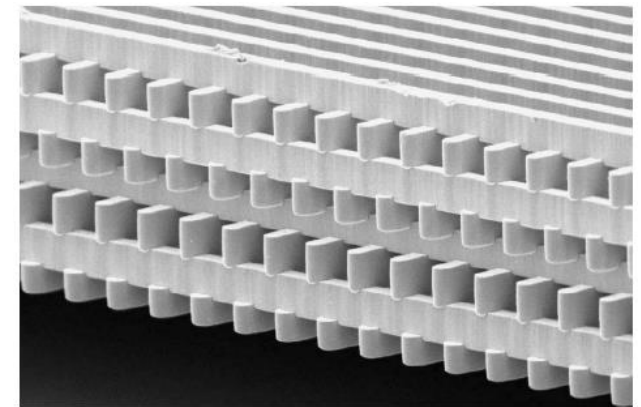
Greffet, et al., Nature 416, p.61, 2002.

2D



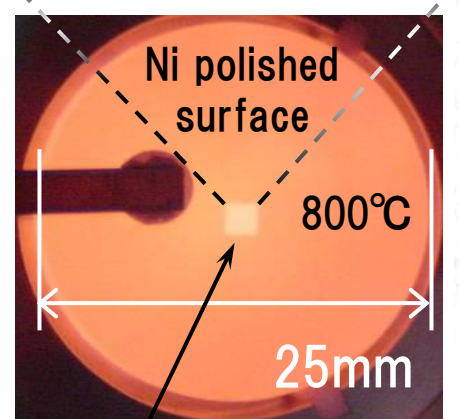
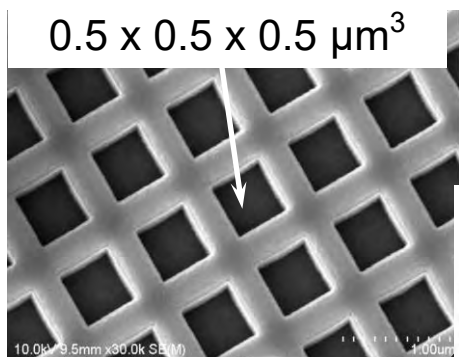
Sai, et al., App. Phys. Let. 82, p.1685, 2003.

3D

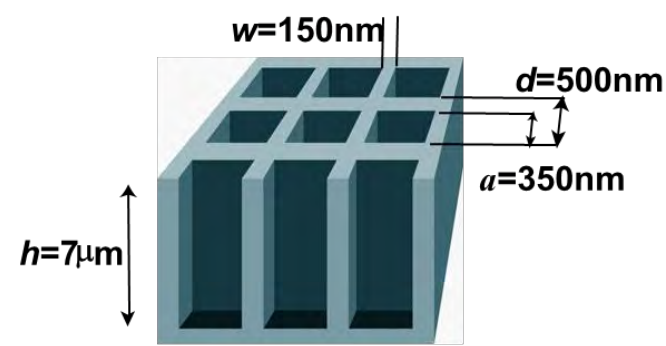
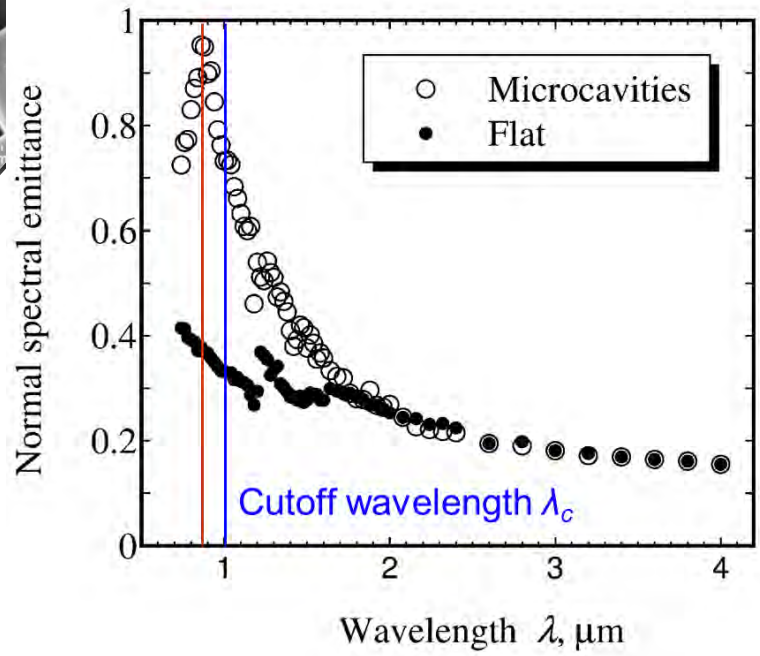


Lin, et al., Opt. Let. 28, p.1683, 2003.

波長選択放射体(エミッター)および照明への展開



2x2 mm²
矩形導波管アレイ

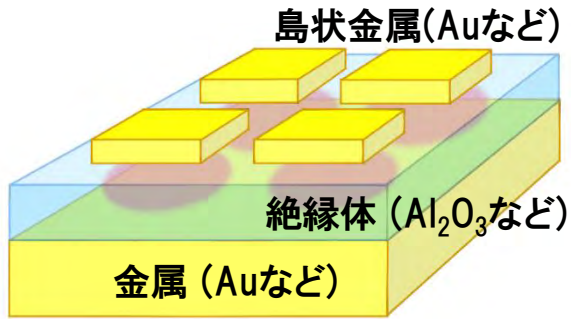


平島, et al., 熱物性, 22, p.167, 2008.

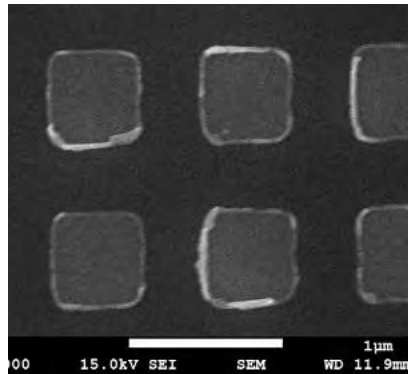
LEDを凌ぐ変換効率が期待

H. Toyoda, J. Takahara, et al., Photonics, 6(4), 105, 2019.

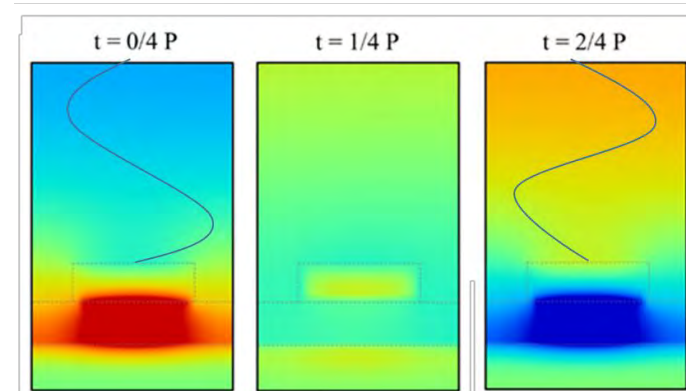
波長選択放射体(メタマテリアルエミッター)



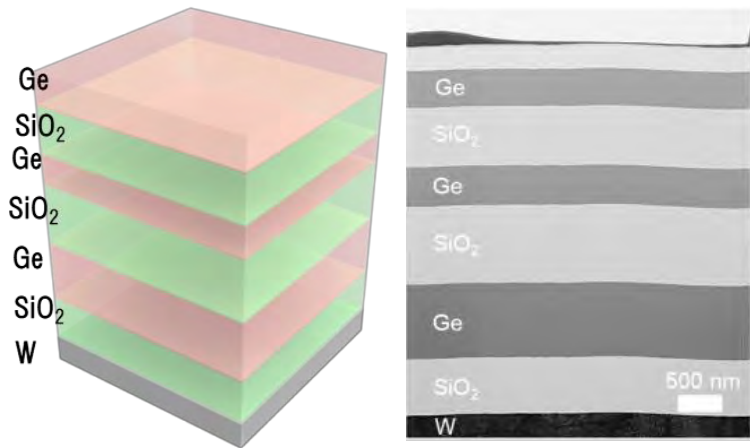
金属-絶縁体-金属(MIM)エミッター



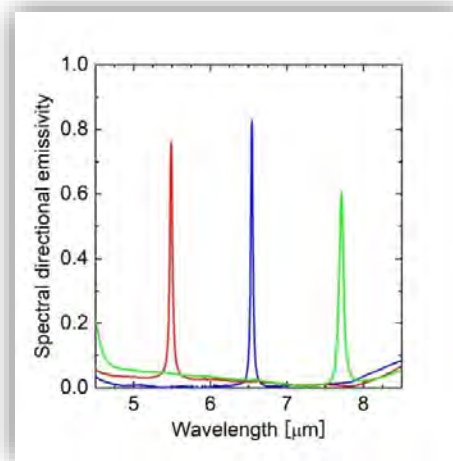
島状Au-Al₂O₃-Au放射体(SEM像)



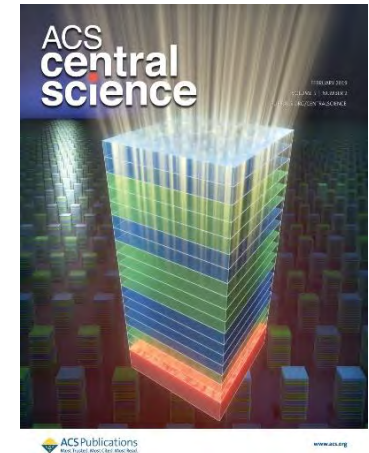
MIM構造によるふく射吸収機構



半導体-絶縁体多層膜エミッター

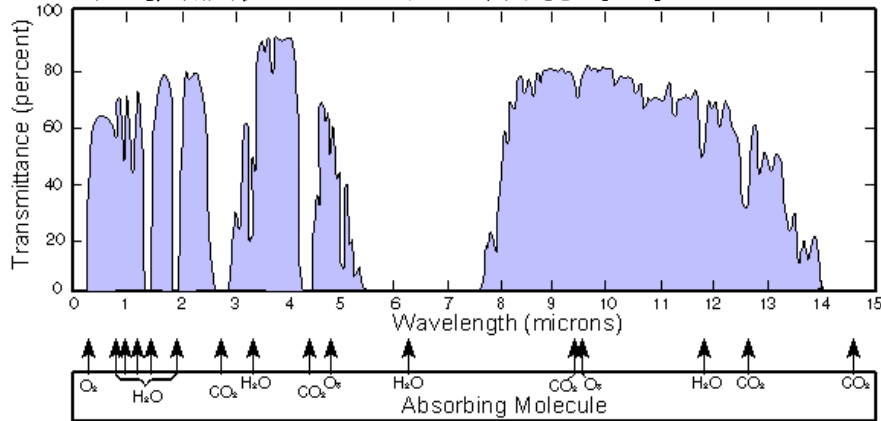


シャープな選択性放射(吸収) ASC Central Science の表紙(櫻井ら)
 検出器にも展開(ex. 放射率に依存しない赤外温度計)



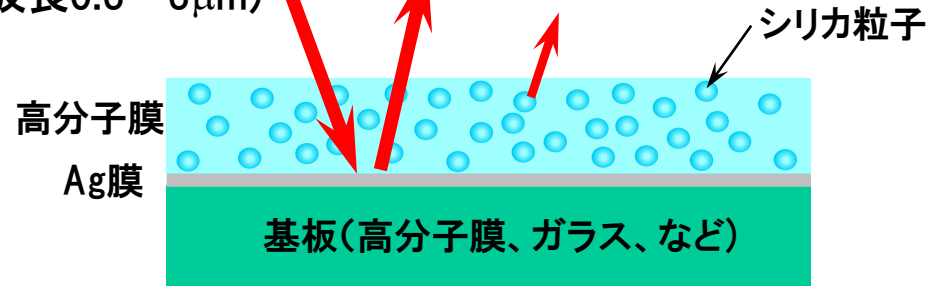
波長選択放射体(エミッター)と宇宙放射冷却

選択波長エミッター放射冷却



太陽光(ほぼ全反射)
(波長0.3~3 μ m)

熱ふく射(100W/m²)
(波長8~14 μ m)



↑ 放熱量(100W/m²)

https://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Atmosfaerisk_spredning.png

$q = 5.67 \times 10^{-8} \times 300^4 = 460 \text{ W/m}^2$ 、黒体放射分率 = $\sim 37\%$ (8~14 μ m)

透過率 = 80% 大きな面積が必要!

熱ふく射 100W/m²

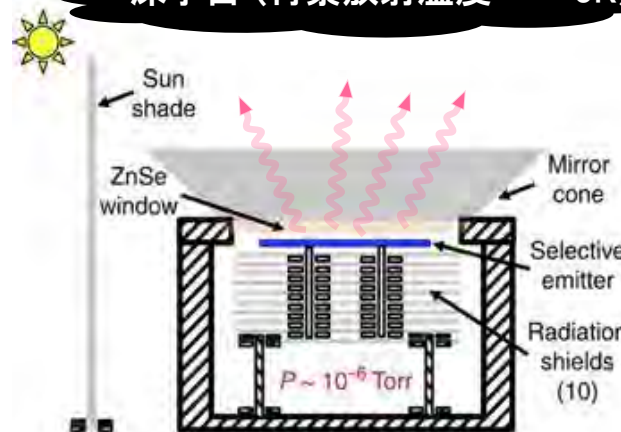
大気温度
 T_a

対流熱伝達 120W/m²

表面温度 T_s

$$q = h(T_a - T_s) = 30 \times (30 - 26) = 120 \text{ W/m}^2 (> 100 \text{ W/m}^2)$$

深宇宙(背景放射温度 = $\sim 3\text{K}$)

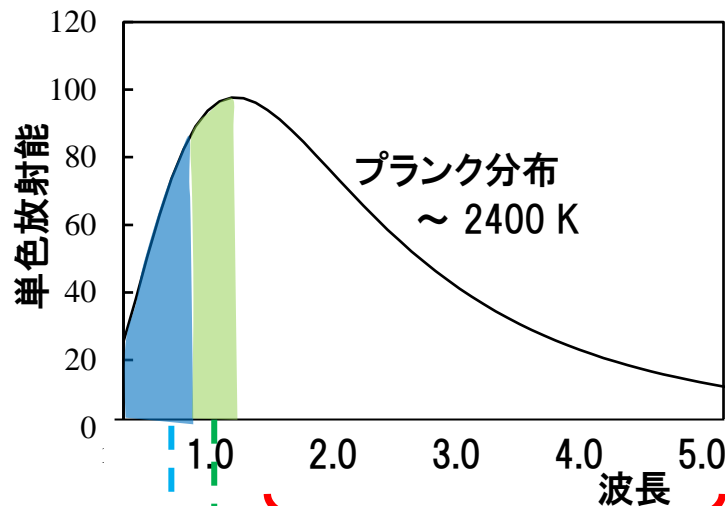
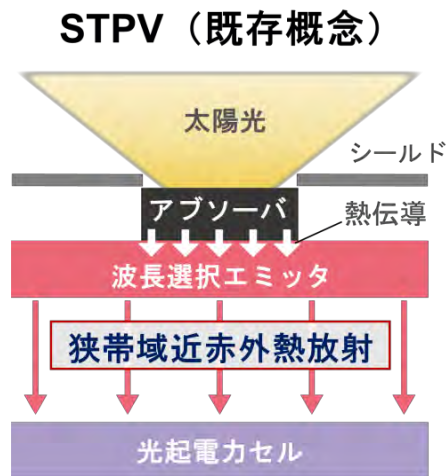


太陽光 反射(色により 25~90%)

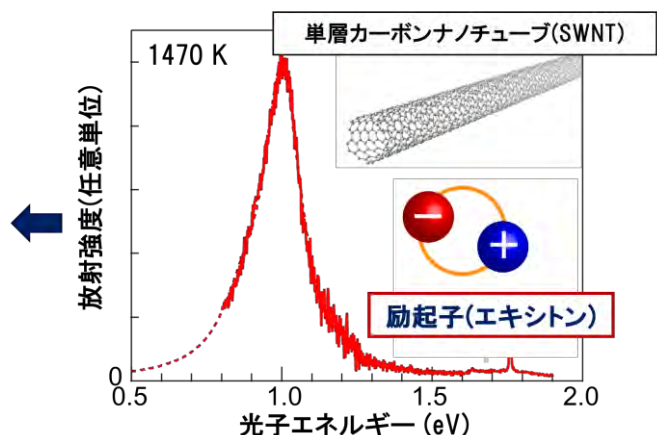
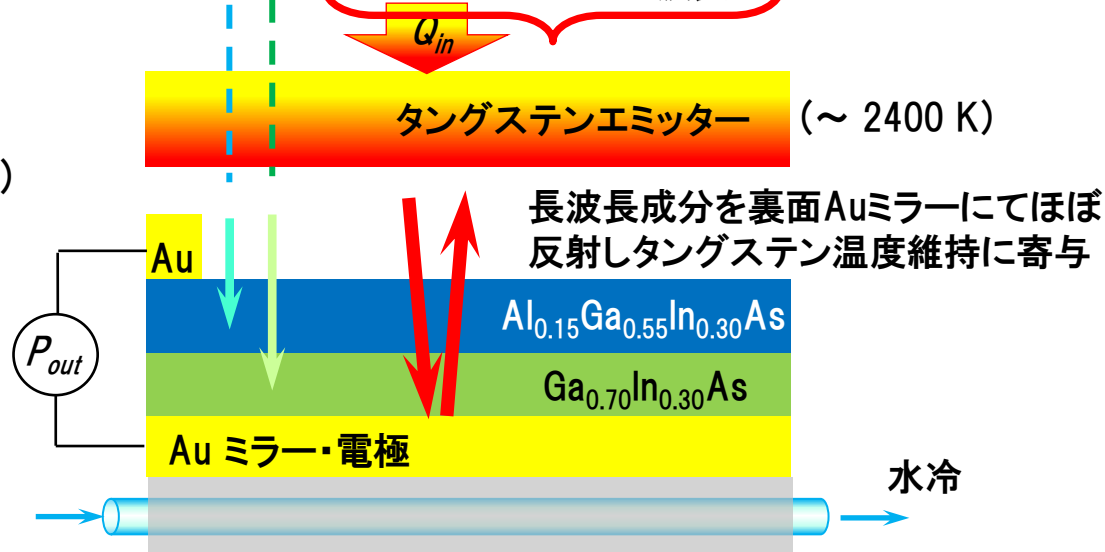


- ・アルミ箔も同効果
- ・車用日よけ

ソーラーTPV(熱光起電力)発電システム



Asegun Henry(MIT, NREL)、湯上・清水(東北大)、
宮内・西原(京大)、Alejandro Datas(マドリッド工科大)

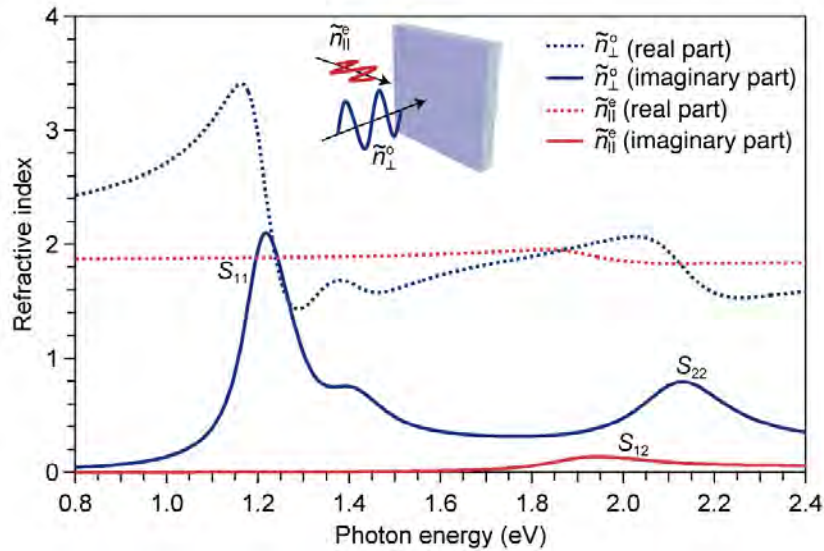


発電効率 (P_{out}/Q_{in}) 40%超

A. LaPotin, A. Henry, et al., Nature, 604, p.287, 2022.

T. Nishihara, A. Takakura, Y. Miyauchi*, K. Itami*,
Nature Commun. 2018, 9, 3144.

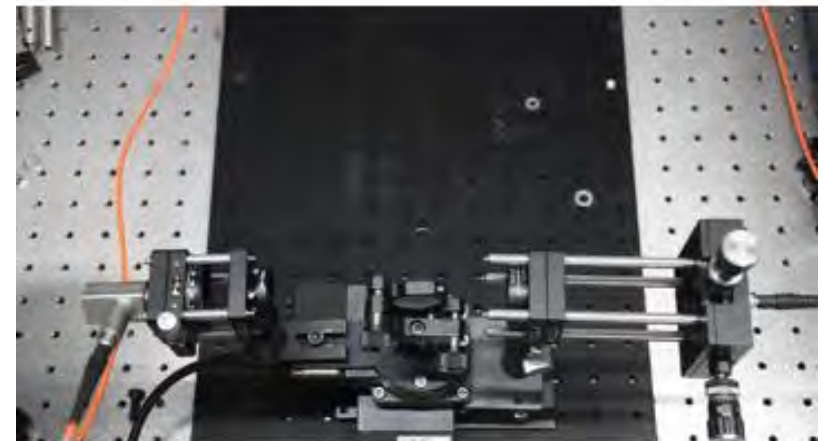
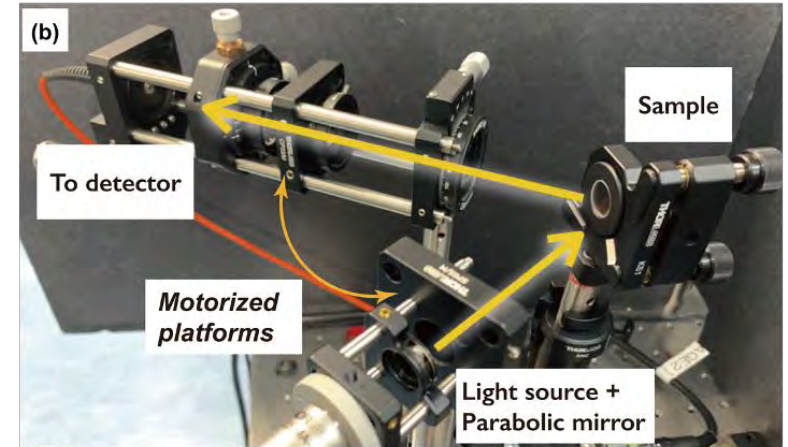
ソーラーTPV(熱光起電力)発電システム用波長選択エミッター



CNTメンブレンの光学物性



市販エリプソメーター



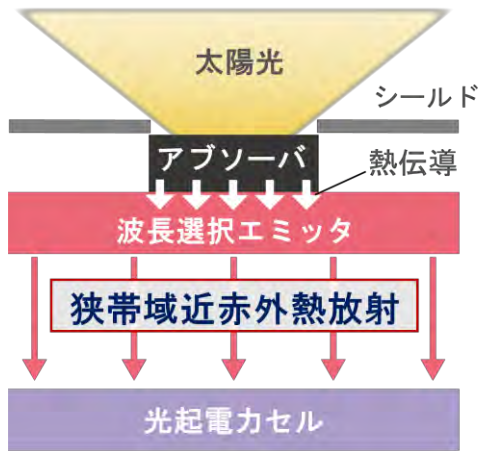
自作エリプソメーター
Nishihara, Miyauchi, et al., *to be submitted*

- ・ 近赤外域フォトマルチプライヤー (0.8 ~ 1.7 μm)
- ・ 中赤外光子カウンティング検出器 (2.2 ~ 5.0 μm)
- ・ 量子井戸(CSIP)検出器(梶原、東大生研、さがけ) (9, 11.2, 14.2 μm)

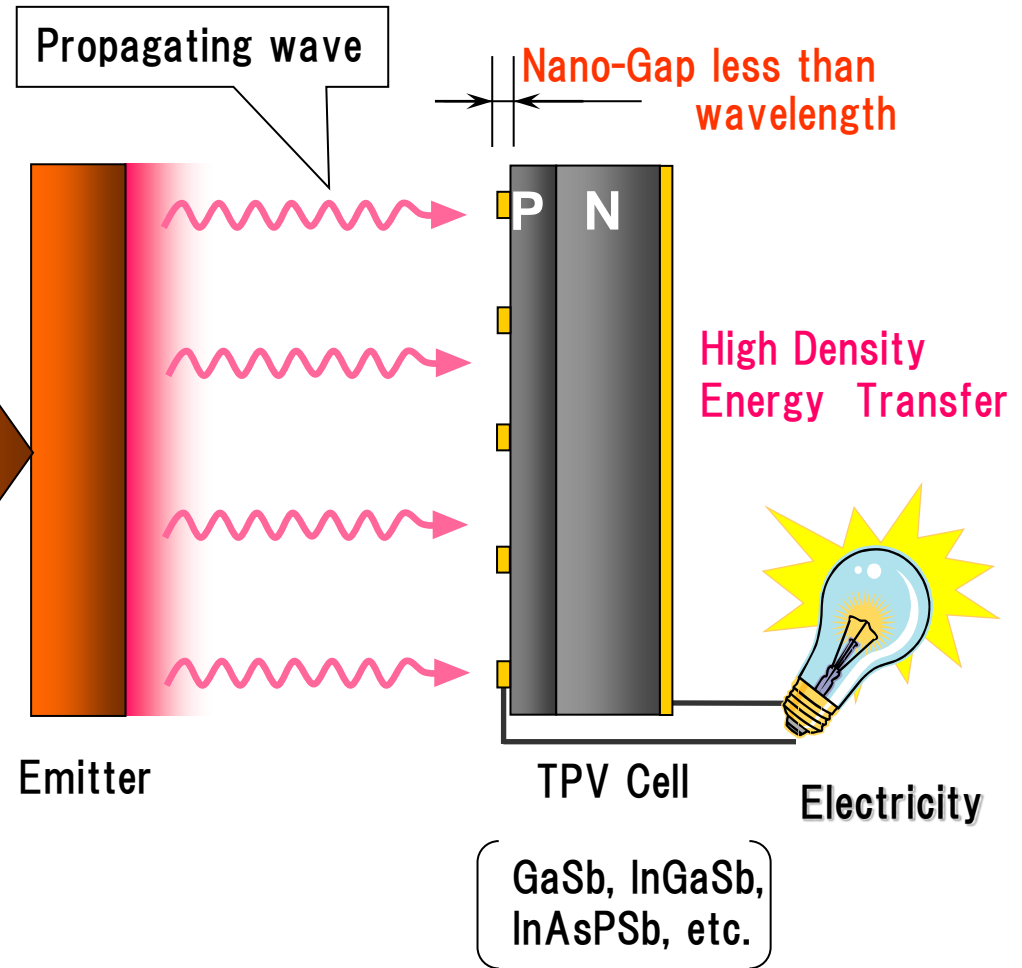
波長選択近接場光のTPV(熱光起電力)発電システム用への展開

ソーラーTPV発電システム

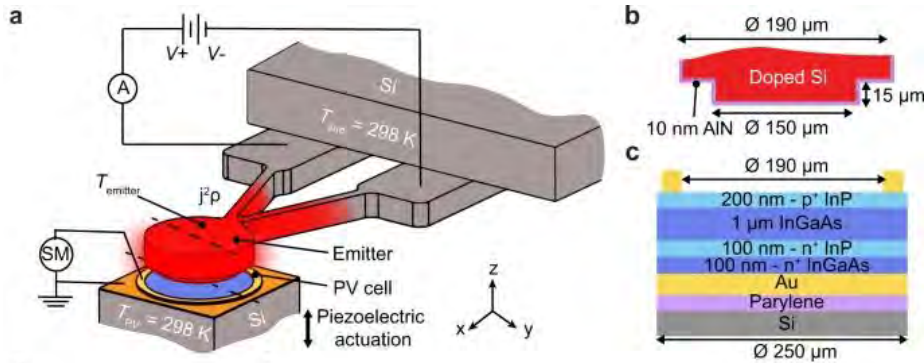
STPV (既存概念)



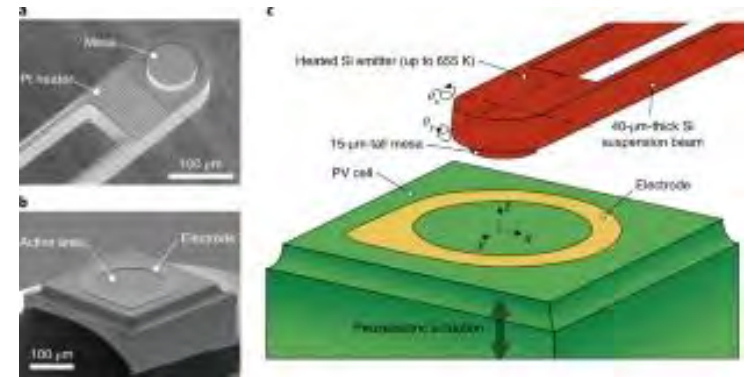
近接場光の利用



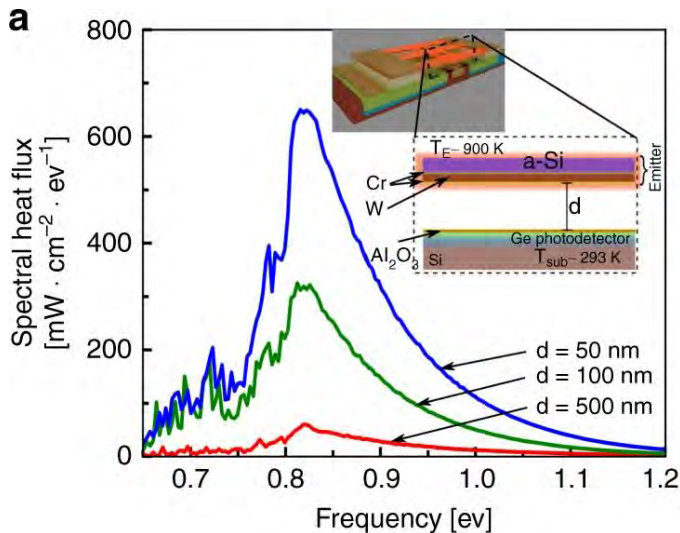
近接場光によるTPV(熱光起電力)発電システム



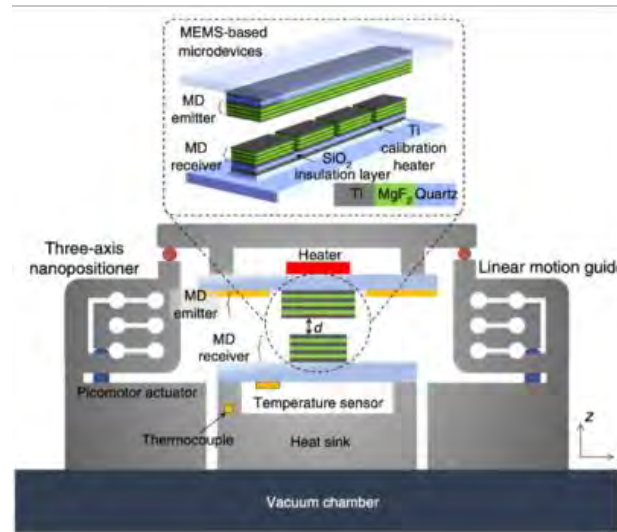
Rohith Mittapally, Pramod Reddy (Univ. of Michigan)
Nature Communications vol. 12, Article number: 4364, 2021.



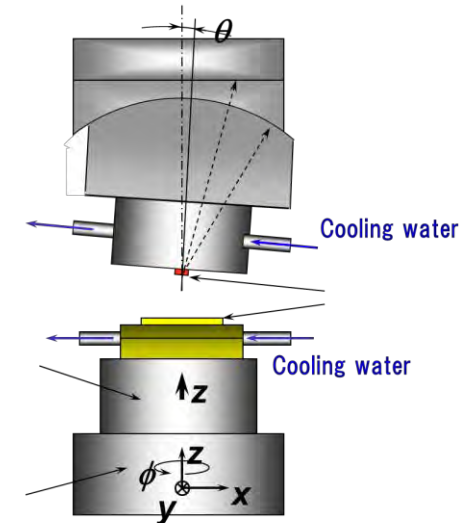
Anthony Fiorino, Pramod Reddy (Univ. of Michigan)
Nature Nanotechnology volume 13, p.806, 2018.



Gaurang R. Bhatt, Michal Lipson (Columbia Univ.)
Nature Communications vol. 11, Article number: 2545, 2020.

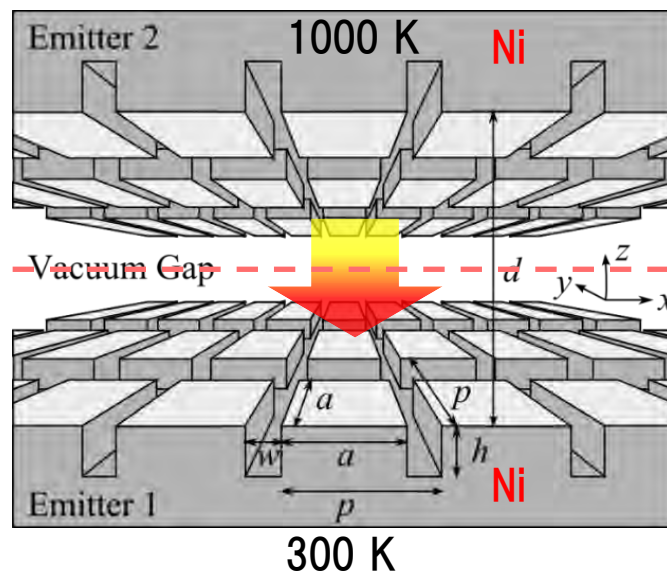
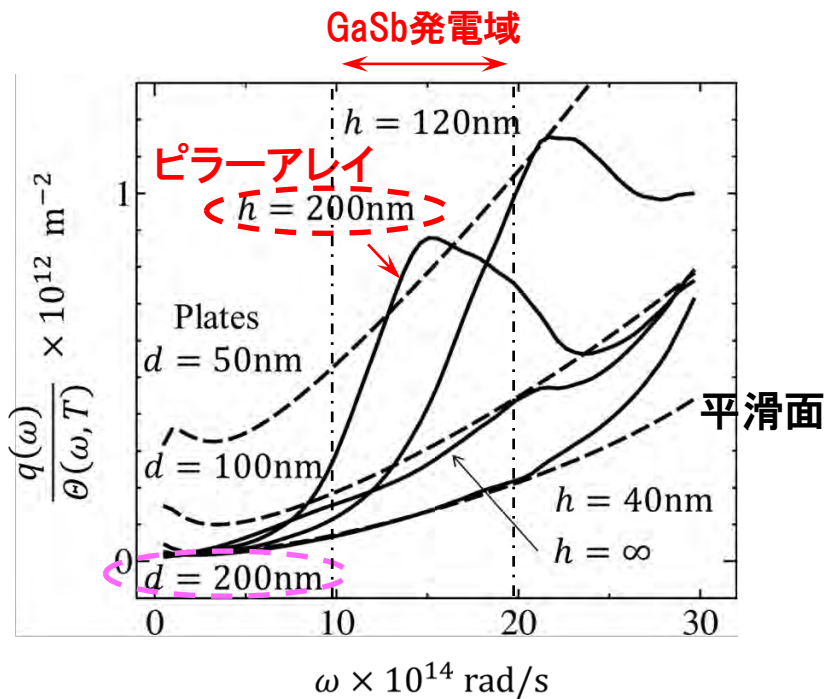


Bong Jae Lee (KAIST)
From Home Page of his laboratory

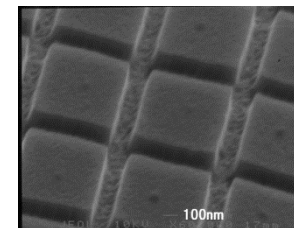


Y. Ashida, K. Hanamura (Tokyo Tech.)
JSME, vol.79, No.799, pp.229, 2013.

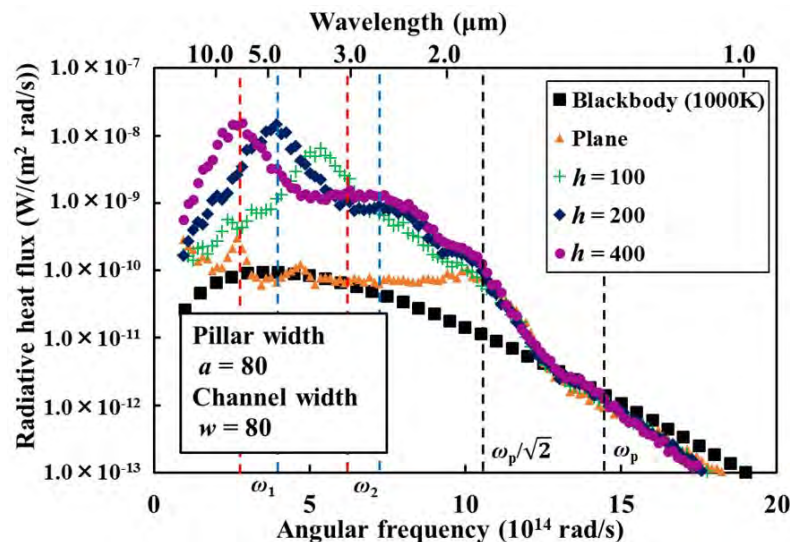
波長選択近接場光によるTPV(熱光起電力)発電システム



対向ピラーアレイ構造表面

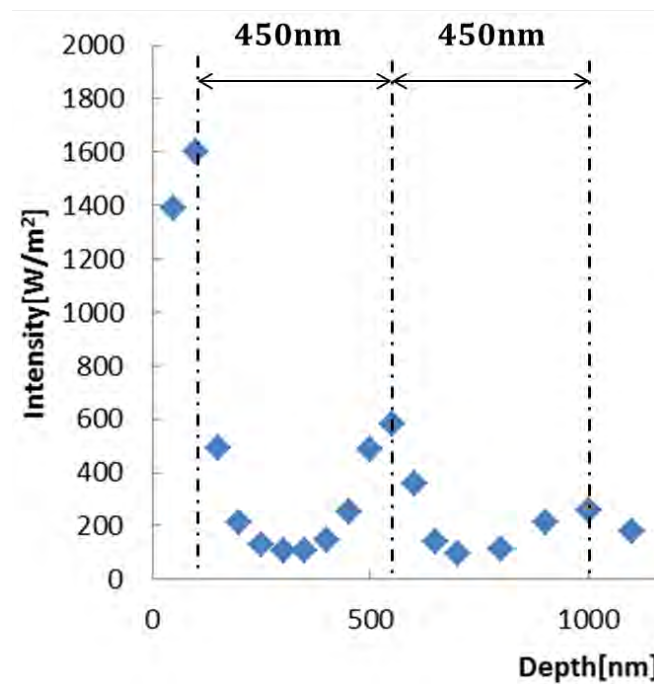
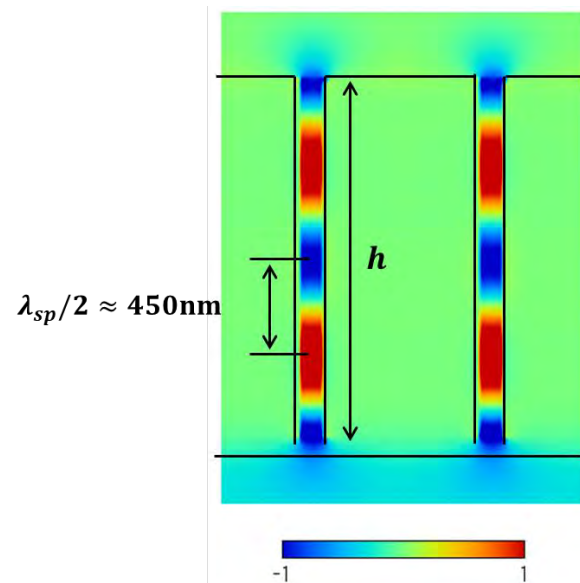
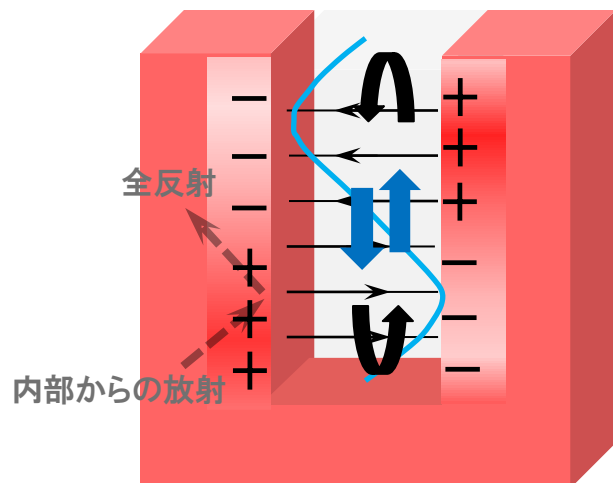


SEM像



Al ドープZnO製ピラーアレイ対向表面

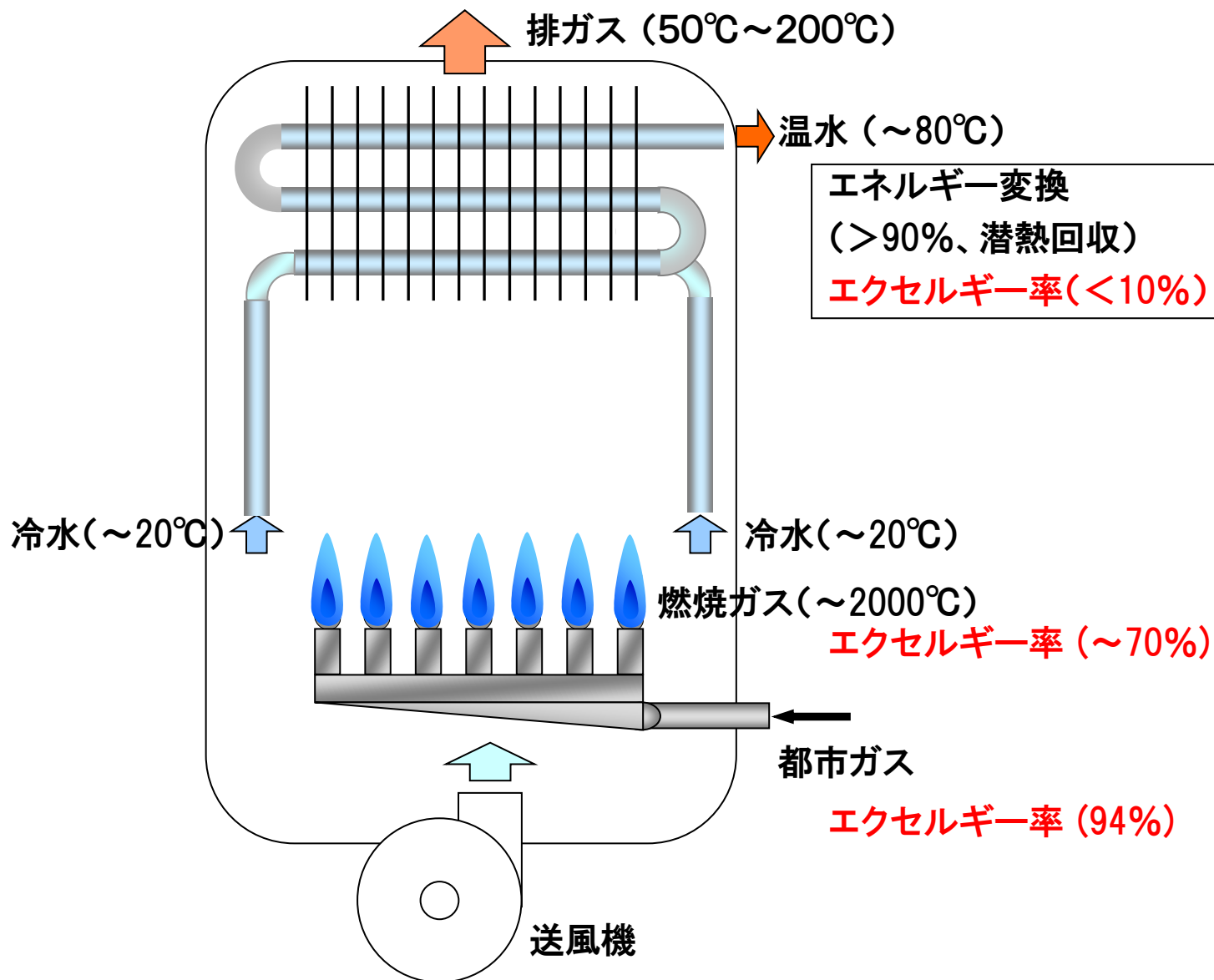
近接場光の波長制御機構



壁掛けコジェネへの応用



給湯器

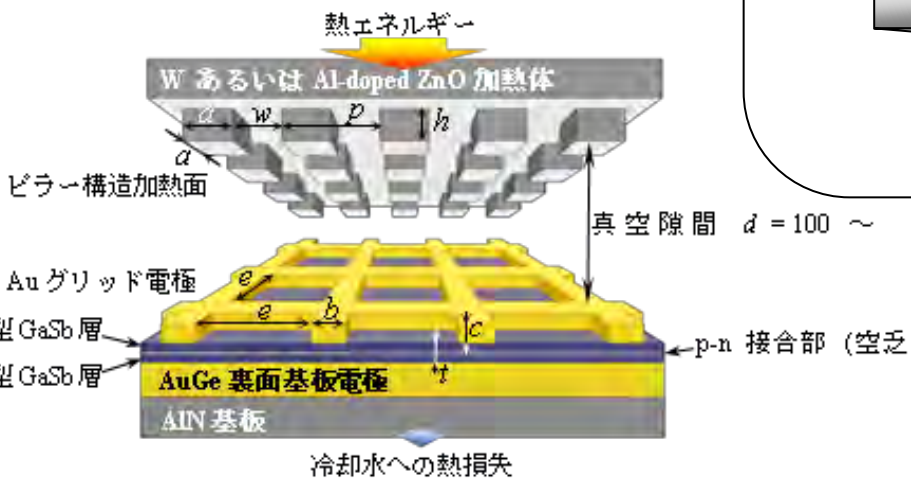
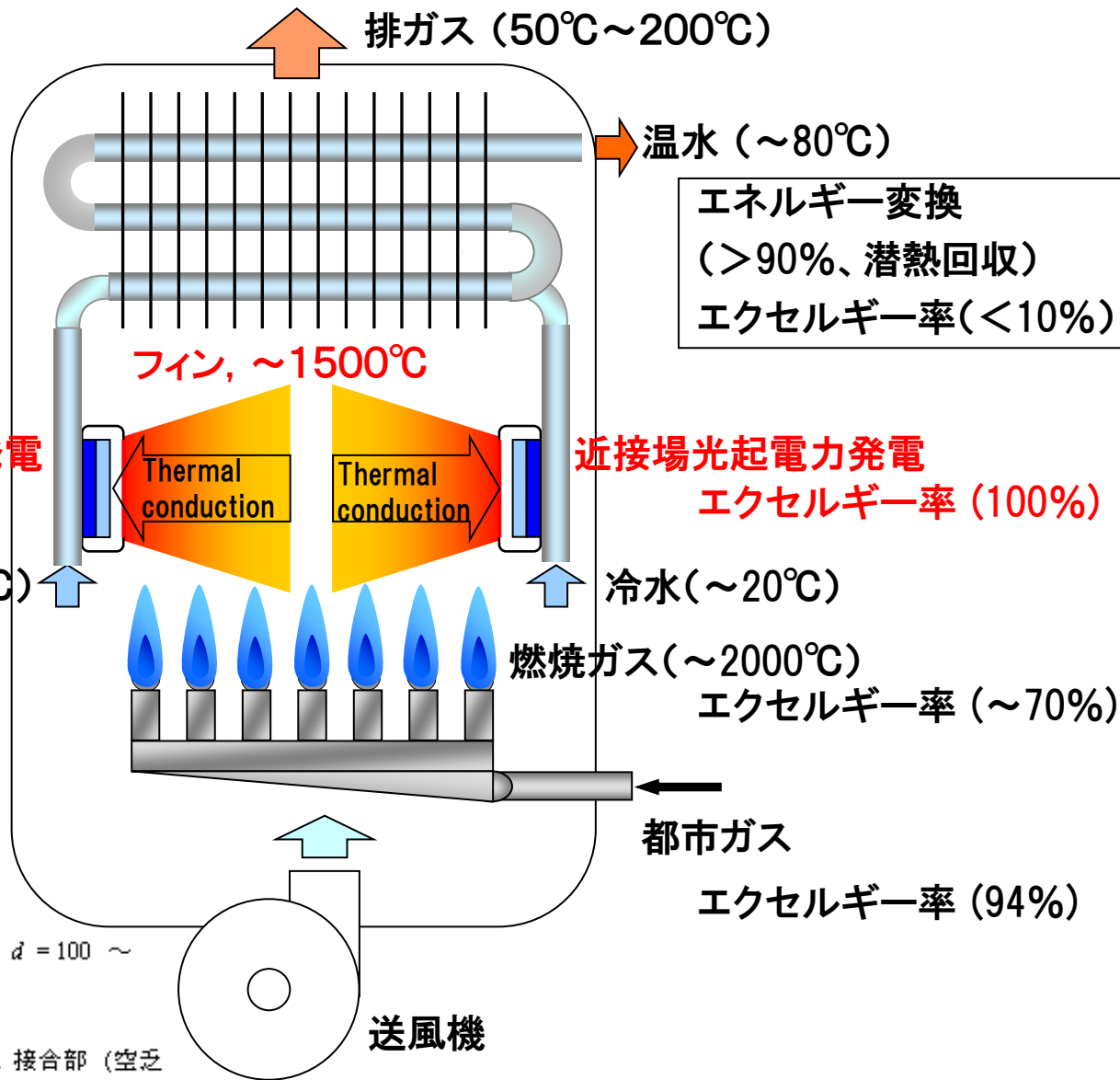


壁掛けコジェネへの応用

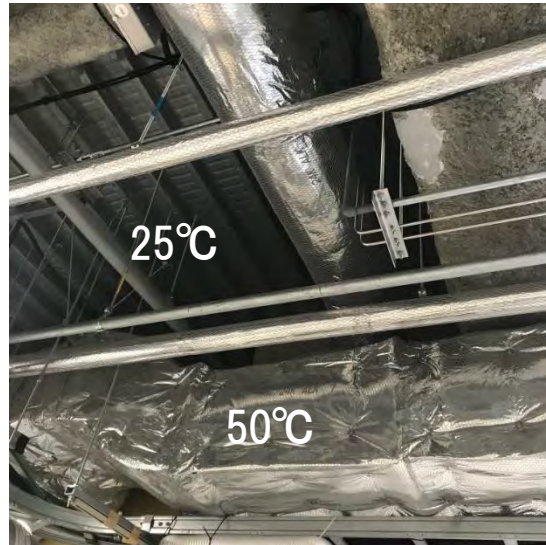


給湯器

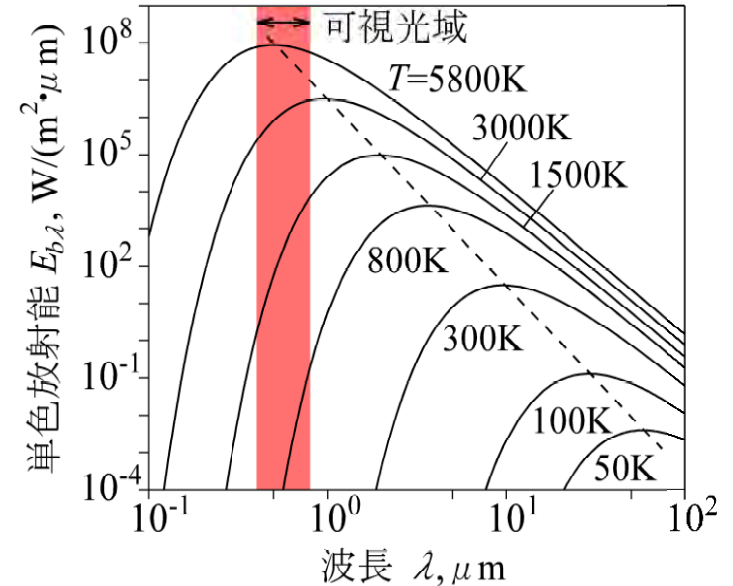
近接場光起電力発電



断熱材におけるふく射輸送の効果



一般ガラスウール断熱(空気層)
(東工大大岡山北3号館配管系)



プランク分布(JSMEテキストシリーズ、伝熱工学)

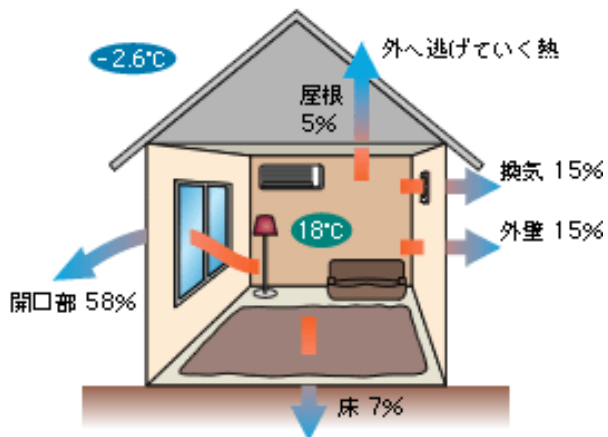
表面温度 T_s (50°C)、周囲温度 T_a (25°C)とすると、
 自然対流 = $h(T_s - T_a) = 10 \times (50 - 25) = 250 \text{ W/m}^2$
 真空断熱パネル = $250 \times 1/5 = 50 \text{ W/m}^2$
 黒体ふく射 = $5.67 \times 10^{-8} \times (323^4 - 298^4) = 170 \text{ W/m}^2$
 アルミ表面 = $(1 - 0.9) \times 170 = 17 \text{ W/m}^2$
 (反射率 ~ 0.9)



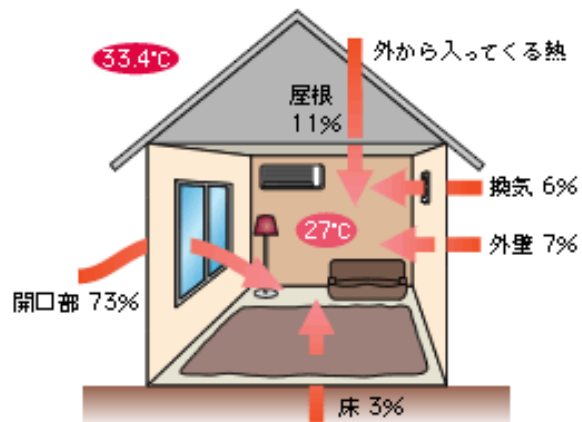
フレキシブル真空断熱パネル(冷蔵庫用)

窓におけるふく射輸送

■冬の暖房時の熱が
開口部から流失する割合 58%



■夏の冷房時(昼)に
開口部から熱が入る割合 73%

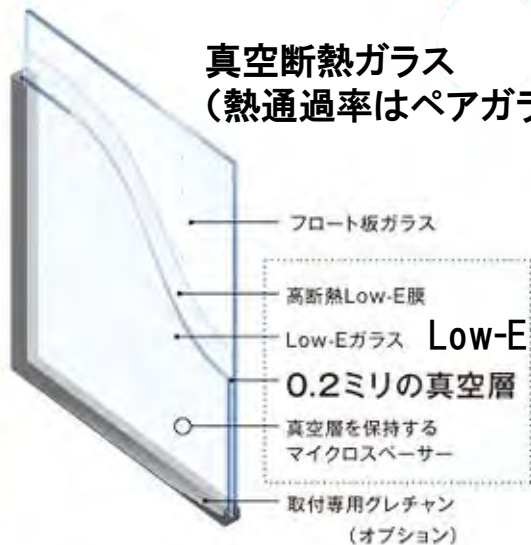


https://www.kensankyo.org/syoene/qanda/mado/a_9.html



構造図

真空断熱ガラス
(熱通過率はペアガラスの半分)



Low-Eガラス: low emissivity glass
(酸化錫膜 or 銀膜)

☆夏の太陽入射は屋根や庇(ヒサシ)により遮蔽

<https://shinku-glass.jp/contents/knowledge/lowe-eco/>



冬の窓用遮熱シート

https://www.inhome.jp/film-p-319903.html?skuid=000757672500028&item_id=319903-2&utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=BD_D_RMKT_ALL_inhome&utm_content=&utm_term=&msclkid=e2385adf246e185079a73e8faf7ed7f5

まとめ

- ソーラーTPV発電の可能性が高まりつつある
- 近接場効果やその波長制御は確認できているもののその社会実装にはハードルが高い
- 普及している製品(ex. Low-Eガラスや反射塗装など)についての断熱(遮熱)効果の明確化(物理)が必要(トータルの熱収支からふく射の断熱/放熱の効果の有無を判断)
- ふく射性質(物性)の測定が容易(ex. 自作エリプソメータや半球入射-半球反射測定など)になりつつある
- ふく射輸送(ex. 半球状に放射など)についての理解の普及が必要

謝辞

- ふく射勉強会メンバー(日本熱物性学会研究分科会、日本伝熱学会特定推進研究)
- JSTさきがけ「熱制御」メンバー

ご清聴ありがとうございました。