

放射冷却による 暑さ対策と環境発電

物質・材料研究機構

ナノアーキテクトニクス材料研究センター

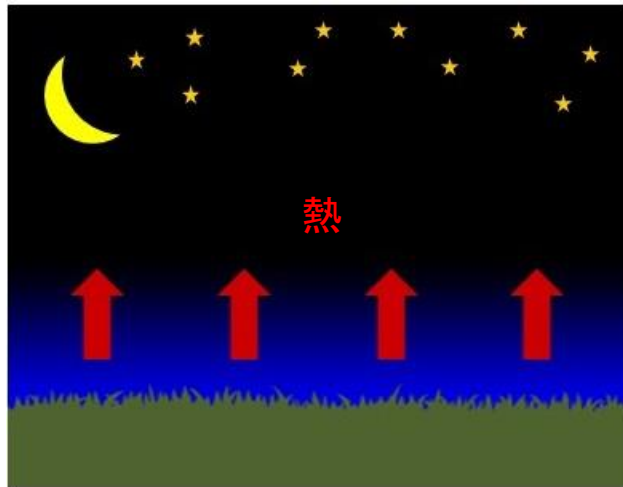
チームリーダー 石井智

2024年6月18日

放射冷却

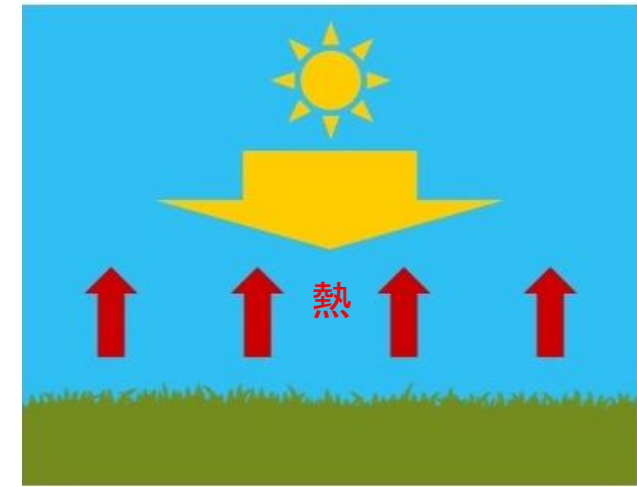
夜間

- 地表の熱が熱放射で上空へ
⇒ 放射冷却



日中

- 日中も上空に熱放射
- 太陽光による地表の加熱
- 太陽熱 > 熱放射 ⇒ 冷却されない

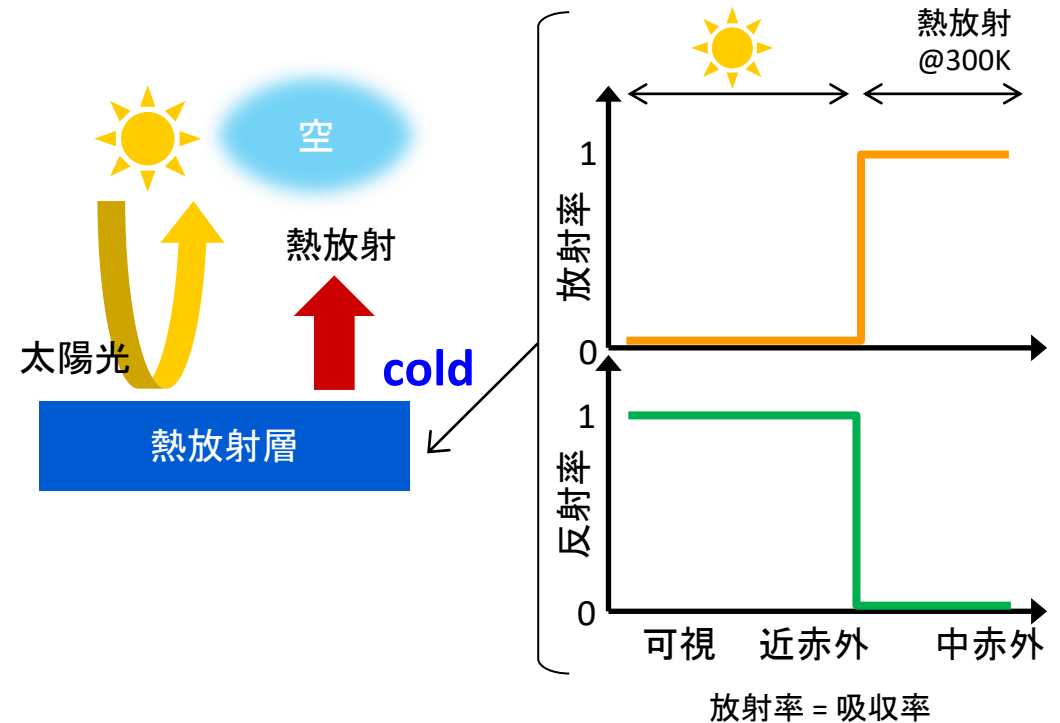


日中放射冷却

日中放射冷却の条件

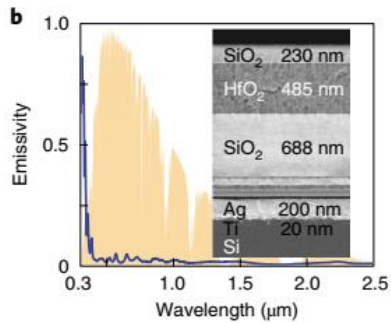
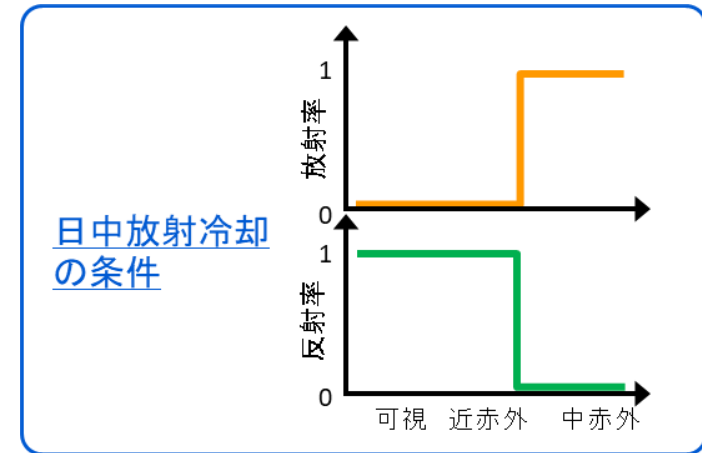
- 太陽光を吸収せず反射
 - 太陽熱による加熱抑制
- 空(宇宙)に熱放射
 - 夜間の放射冷却と同じ状態

↳ 条件を満たすと日中でも
受動的に冷却

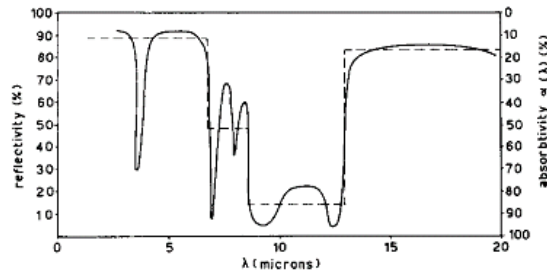


日中放射冷却の実証と応用

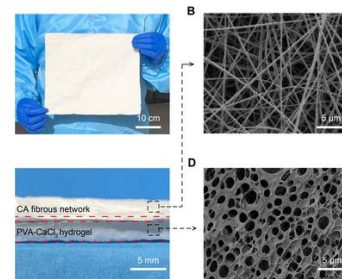
- 反射率と放射率が日中放射冷却の条件を満たせば、材質や構造は不問
- 多数の実証報告
 - 研究機関だけでなくベンチャーも



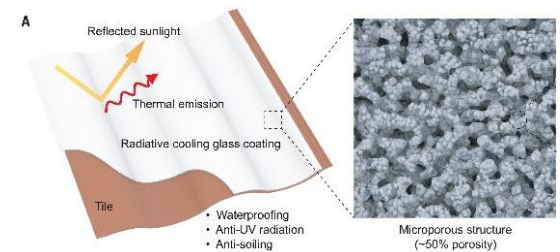
Raman, et al, Nature (2014)



S. Catalanotti, et al, Sol. Energy (1975)



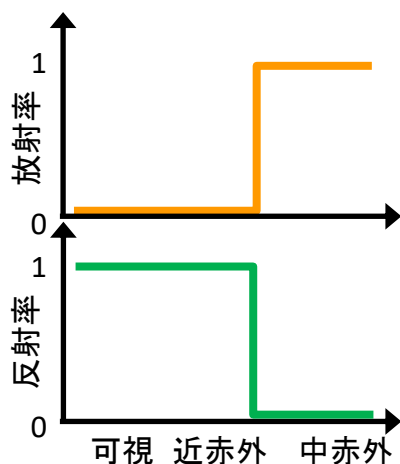
J. Li, et al, Science (2022)



Z. Zhao, et al, Science (2023)

太陽光と熱放射

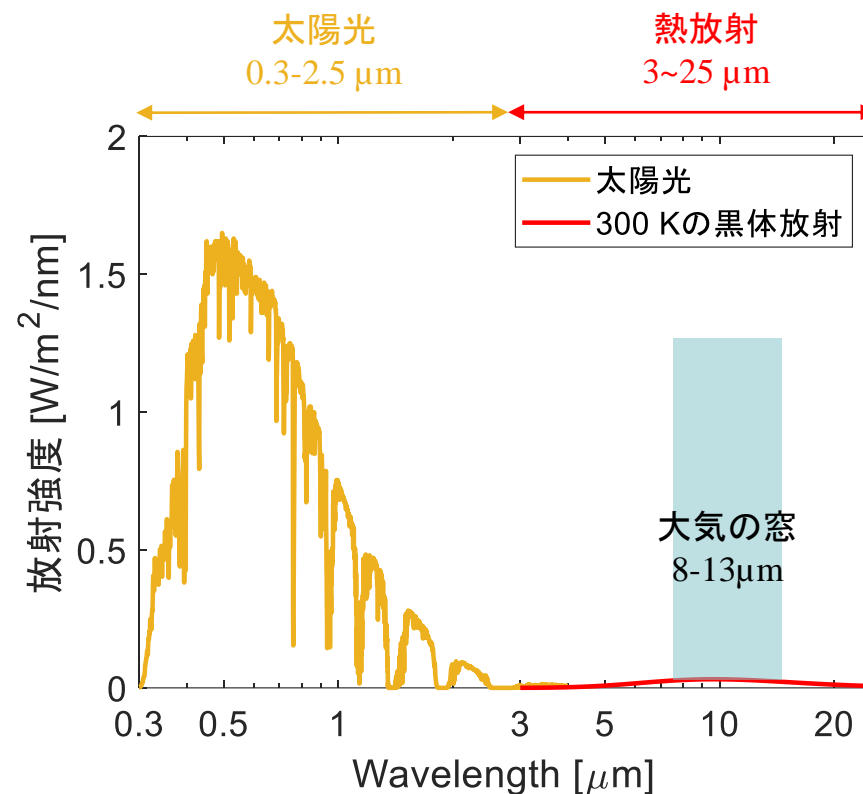
日中放射 冷却の条件



理想的な条件:

- 太陽光反射率: 1
- 中赤外放射率: 1

← 現実には両立は難



放射強度: 太陽光 > 熱放射


⇒ 高い太陽光反射率がより重要

冷却能力への影響:

太陽光反射率1%↑ ≒ 放射率10%↑

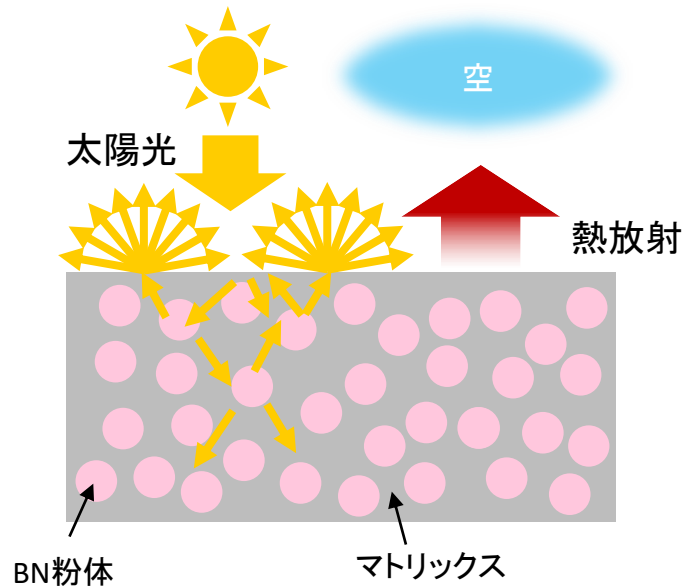
従来技術とその問題点

- 既存の日中放射冷却材は太陽光反射率が十分高くないため、冷却効果が不十分
- 日中放射冷却の用途は冷却や放熱に限定



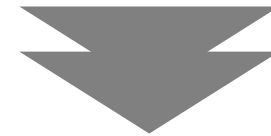
環境発電：
屋外で24時間常時発電
する手法が未開拓

本研究の日中放射冷却膜



日中放射冷却で用いる粉体の条件

- 高屈折率の粉体
- 太陽光の吸収無し
- 高い熱伝導率

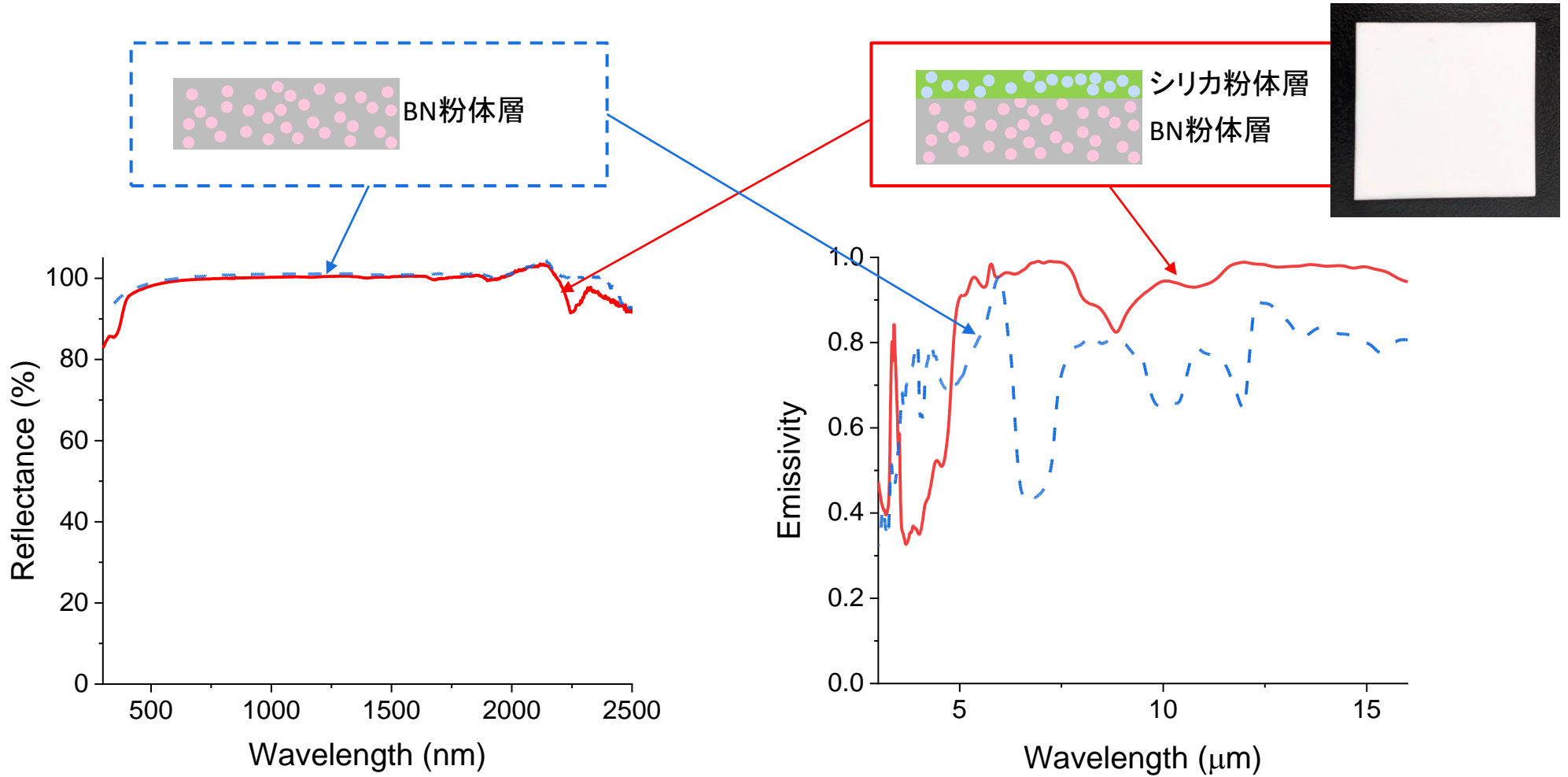


本研究:

⇒ 窒化ホウ素(BN)粉体

- 高い屈折率: > 2
- 大きなバンドギャップ: $> 6 \text{ eV}$
- 高い熱伝導率: $40\text{-}80 \text{ W/m/K}$

反射率と放射率

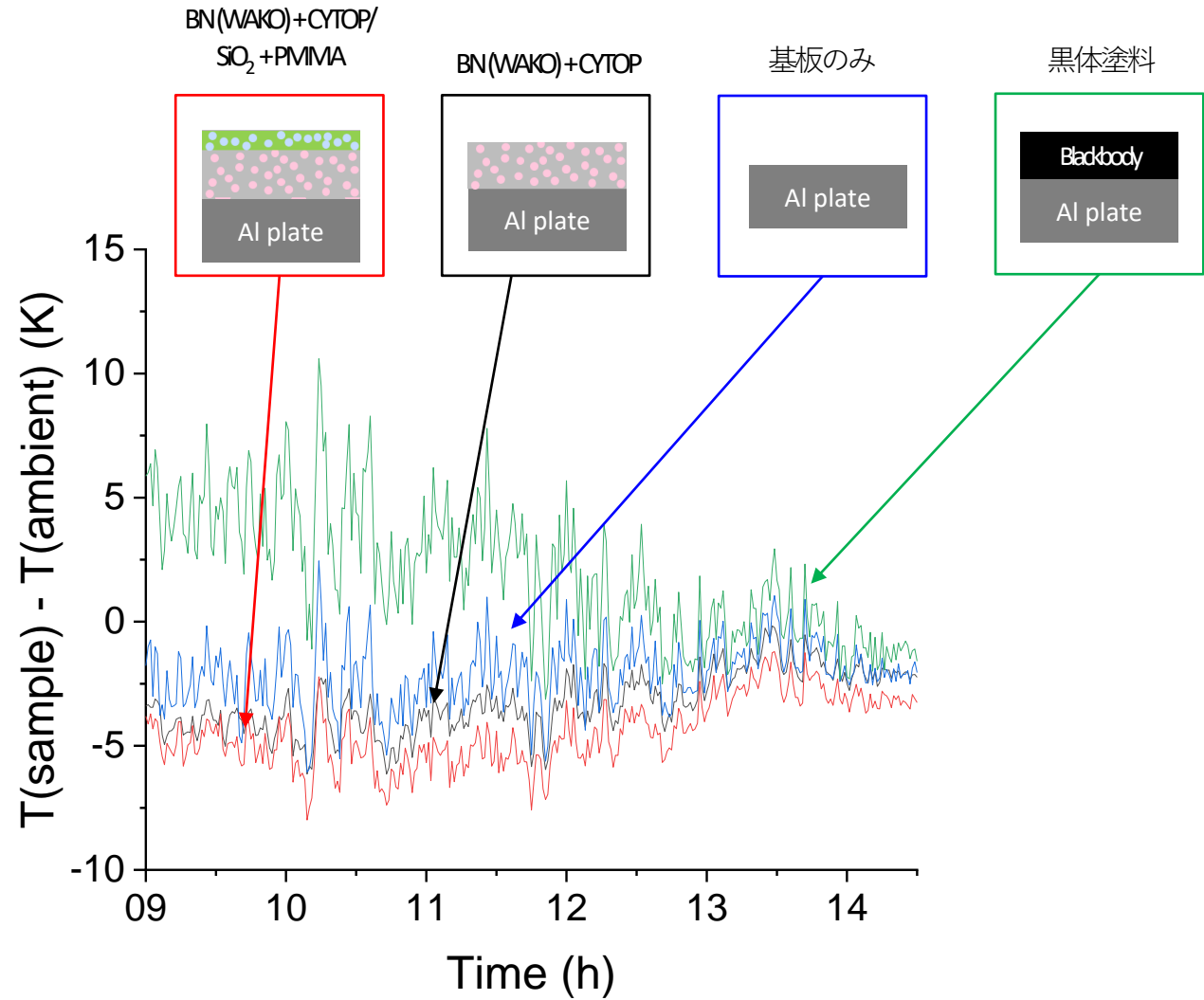
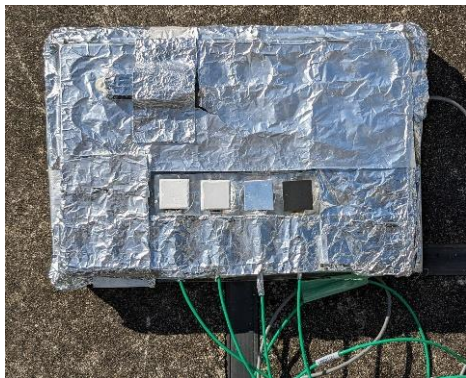


2層にすることで高い反射率と高い放射率を達成

* UV-VIS-NIRの反射率はスペクトラロン®で規格化

屋外測定

2022/10/21@茨城県つくば市



2層構造は日中最も低温

日中放射冷却材の評価

冷却能力の報告値: 数十W/m²~百強W/m²

測定地域と測定日の天候に大きく依存



性能指数(FoM)による評価と比較

$$FoM = \varepsilon_{\text{sky}} - 10(1 - R_{\text{solar}})$$

平均放射率: 大気の窓(波長8-13 μm)での放射率の平均

$$\varepsilon_{\text{sky}} = \frac{\int_{8\mu\text{m}}^{13\mu\text{m}} I_{\text{BB}}(T, \lambda) \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\int_{8\mu\text{m}}^{13\mu\text{m}} I_{\text{BB}}(T, \lambda) d\lambda}$$

I_{BB} : エアマス1.5の太陽光スペクトル
 ε : 試料の反射率

太陽光反射率: 太陽光(波長0.3-2.5 μm)を反射する割合

$$R_{\text{solar}} = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{AM1.5}}(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{AM1.5}}(\lambda) d\lambda}$$

$I_{\text{AM1.5}}$: エアマス1.5の太陽光スペクトル
 $R(\lambda)$: 試料の反射率

比較

	太陽光反射率(%), R_{solar}	平均放射率, ε_{sky}	性能指数 (FoM)
本成果	98.9	0.93	0.82
硫酸バリウム塗料 Ref. 1	98.1	0.95	0.76
Radi-Cool®製品	0.76~0.85	>0.9	> -0.6
Space Cool®製品	>0.95	>0.95	> 0.45

ギネス
記録

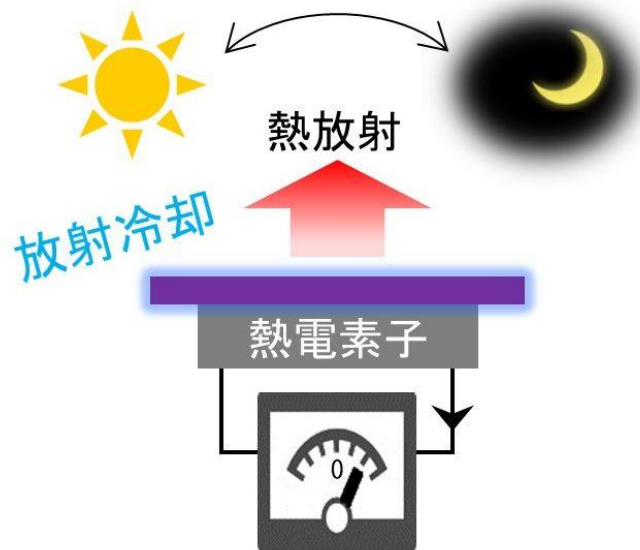
最高の性能指数を達成

放射冷却による熱電発電

放射冷却により気温に対して温度差(ΔT)発生



温度差(ΔT)を熱電発電に利用＝環境発電



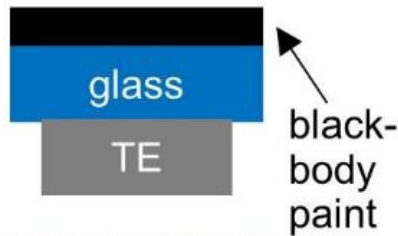
熱電発電用試料

日中放射冷却材

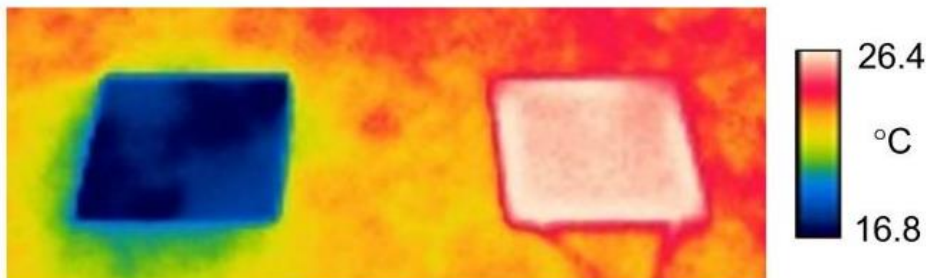
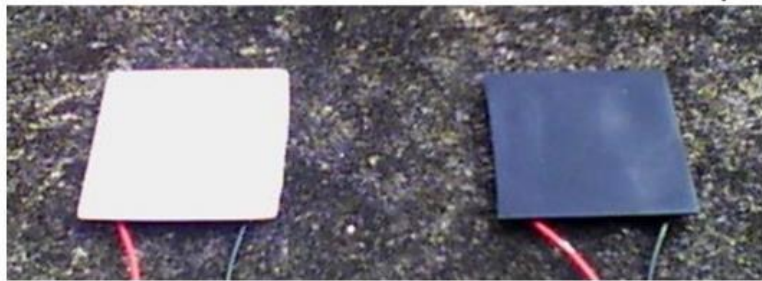
glass/Al

黒体塗料

blackbody



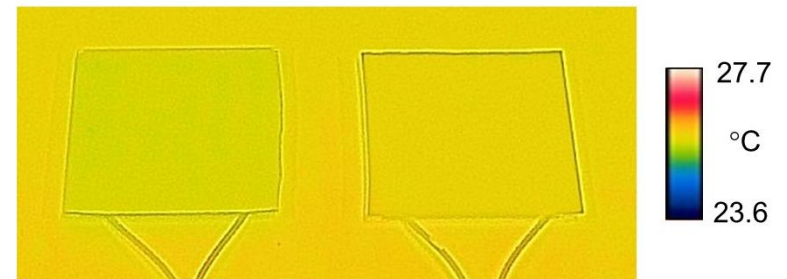
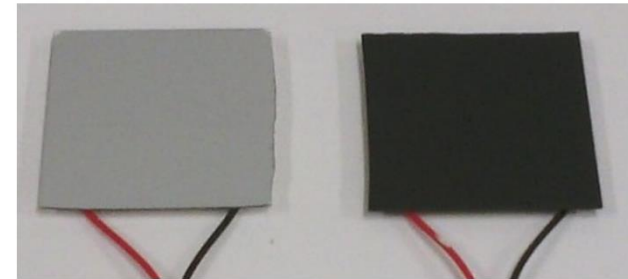
Thermo-electric module



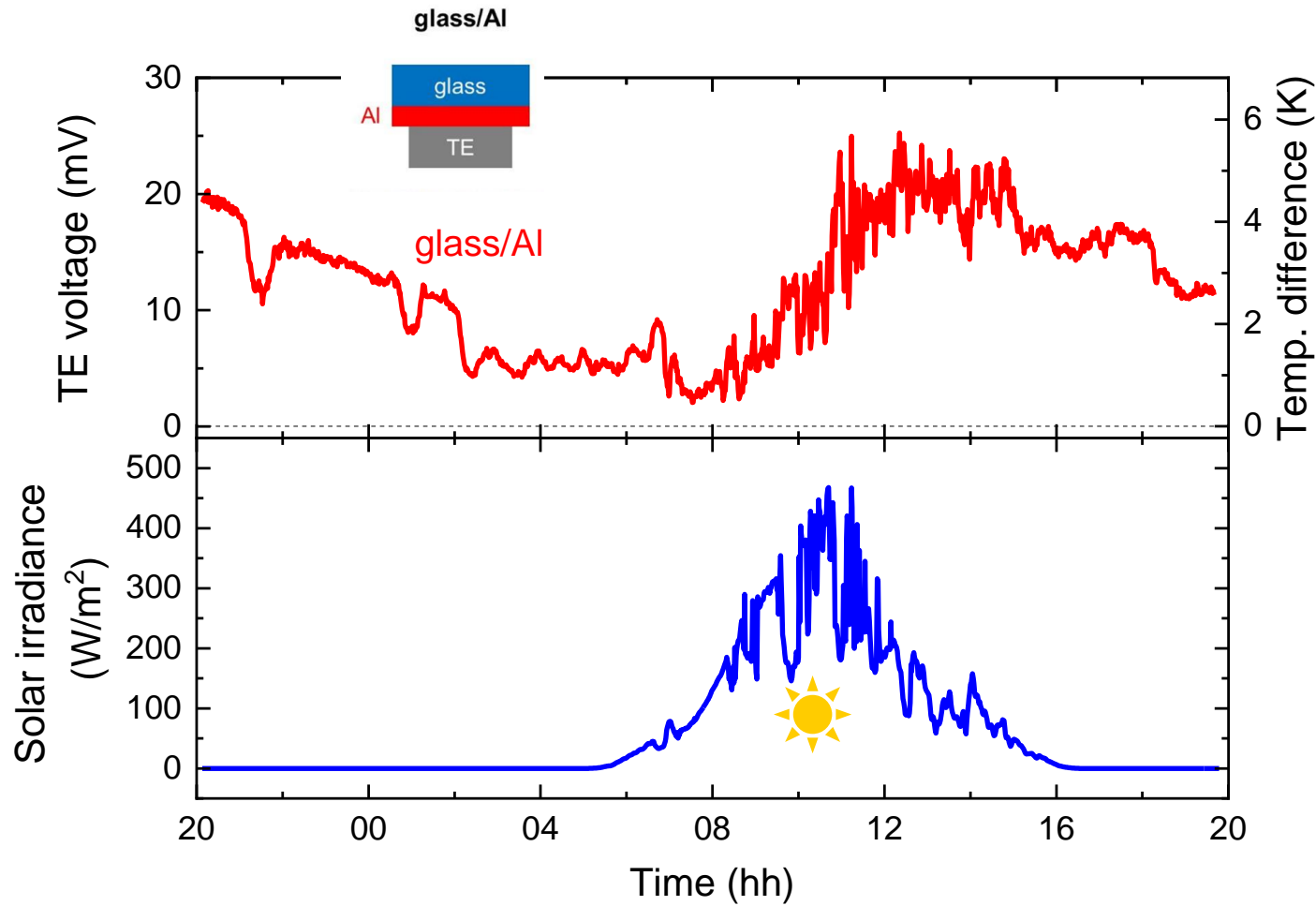
屋内

glass/Al

blackbody

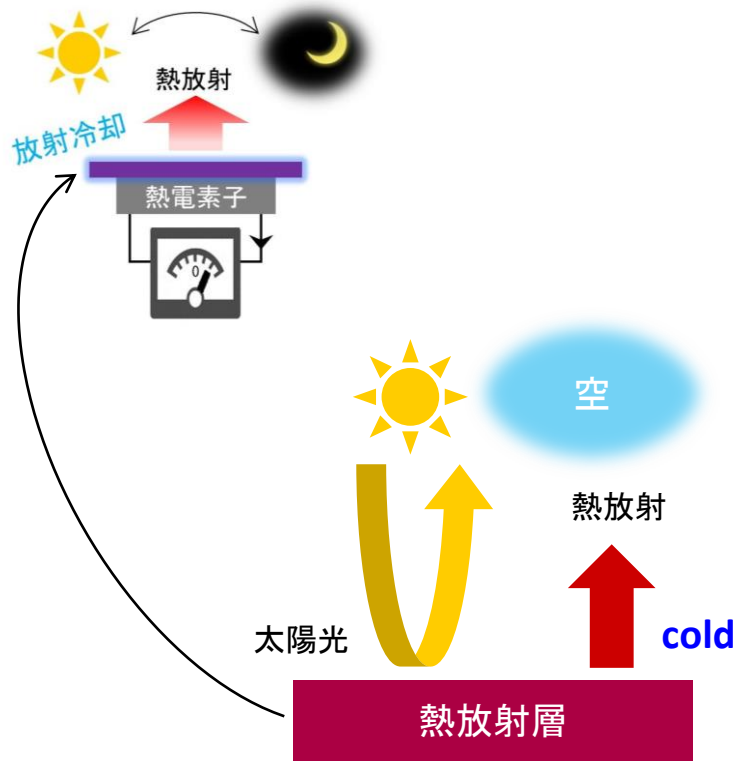


屋外での熱起電力測定

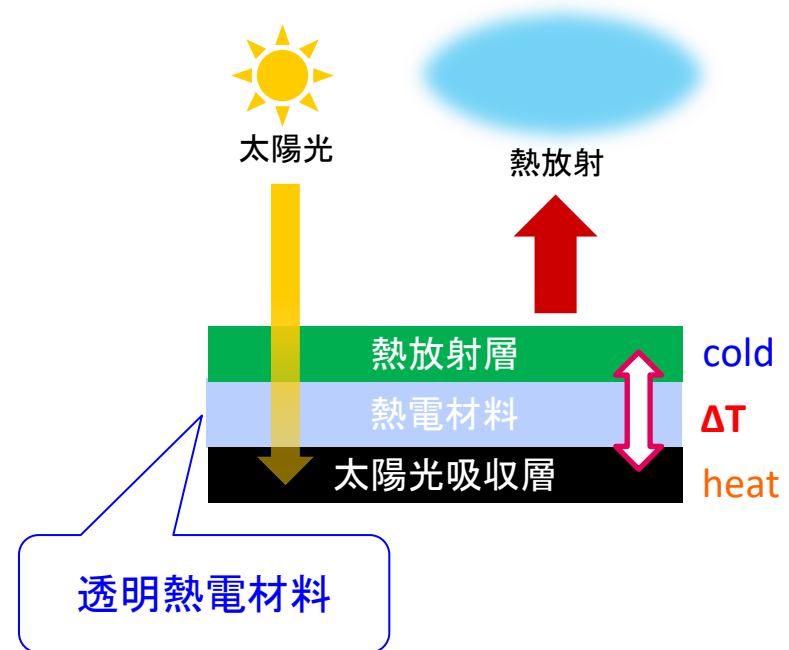


放射冷却により24時間継続して熱電発電

太陽熱と放射冷却の同時利用

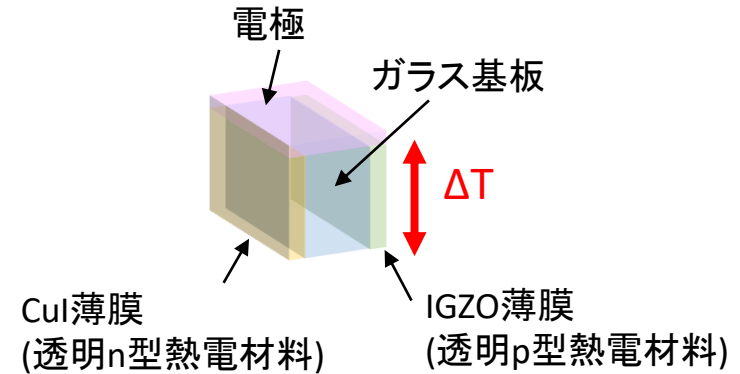
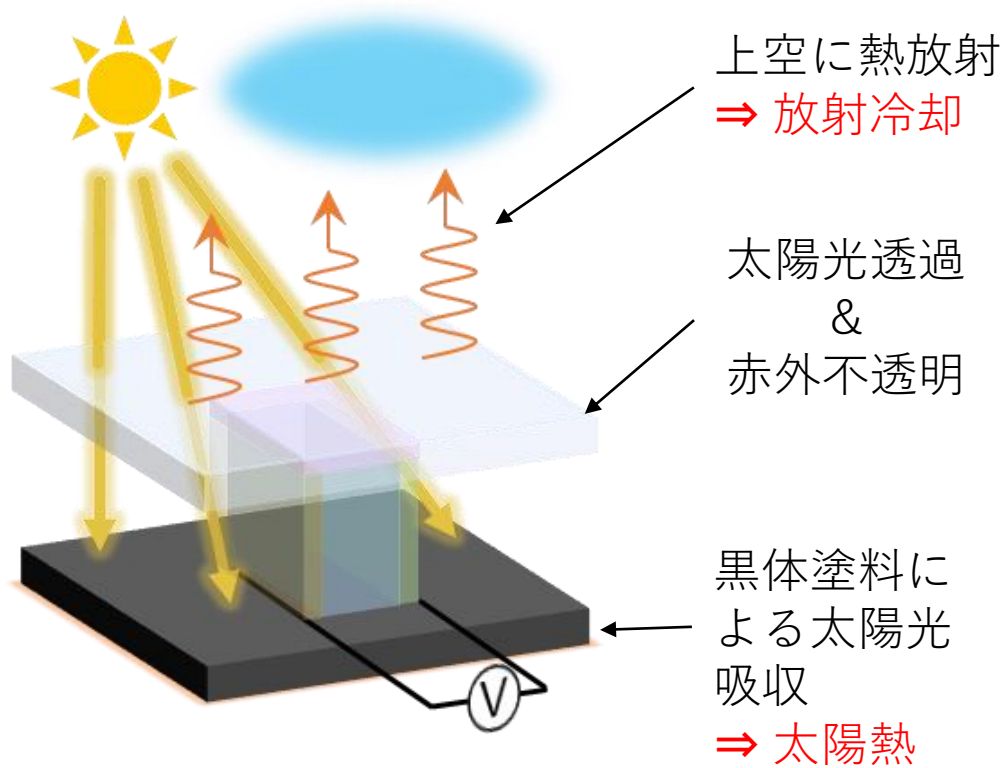


日中放射冷却構造:
→ 太陽熱は未利用

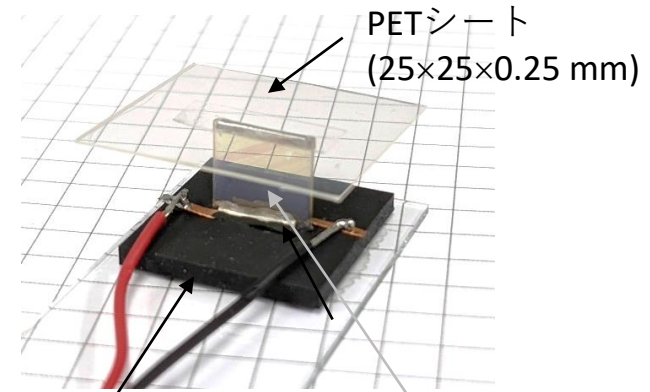


太陽熱と放射冷却を同時利用
して熱電発電するには透明な
熱電材料が必要

太陽熱と放射冷却による熱電発電



1つのp-n接合



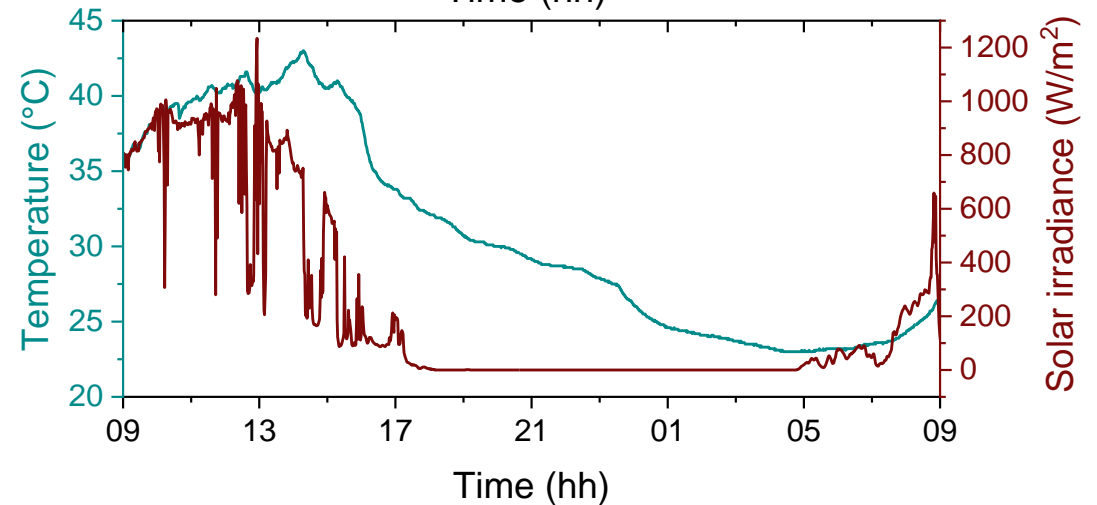
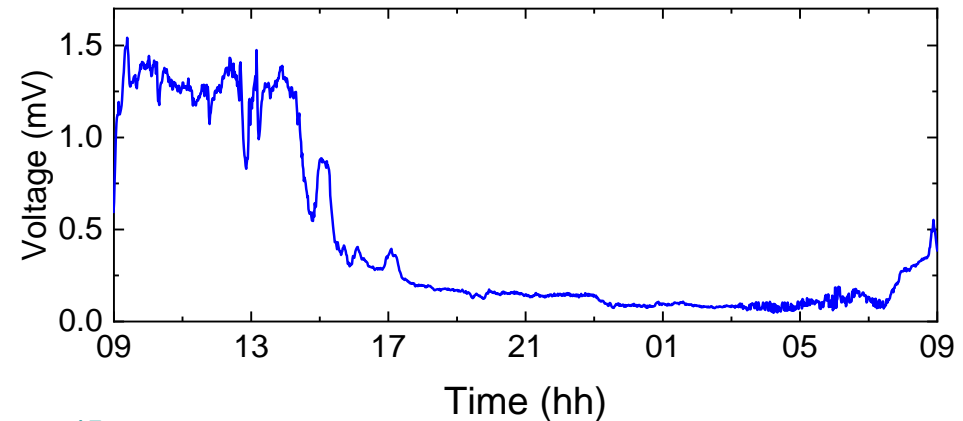
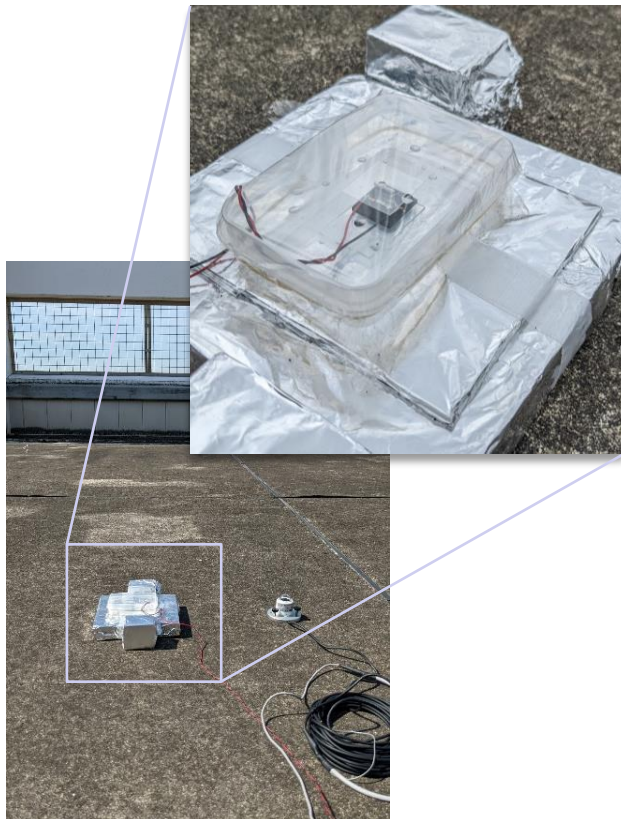
黒体塗料塗布アクリル板 (18×18×1 mm)

IGZO/glass/CuI
Glass: 10×10×0.7 mm

太陽熱と放射冷却による熱電発電

屋外での熱起電力測定

2022/8/3-4@茨城県つくば市



- 24時間発電
- 太陽熱により昼は起電力増加

新技術の特徴・従来技術との比較

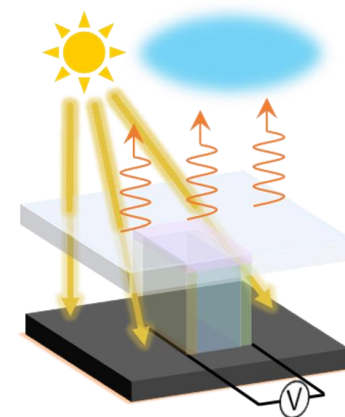
日中放射冷却材：

- 従来品より高い性能指数(FoM)をもつため、より大きな放射冷却効果が得られる



環境発電：

- 屋外で24時間発電することが可能



想定される用途

日中放射冷却材：

- 一年中放熱する必要のある機器や設備の冷却
 - 通信基地局、分電盤、冷蔵倉庫

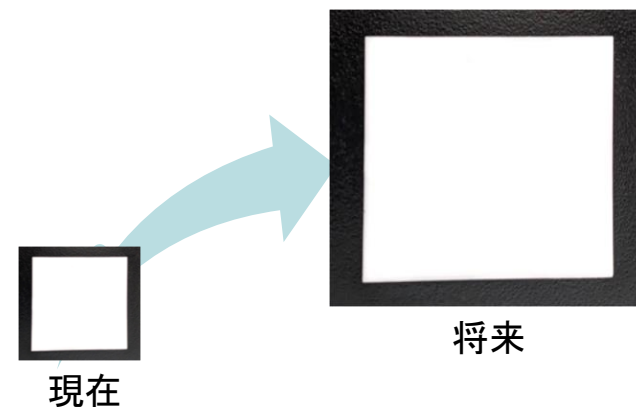
環境発電：

- 屋外設置の小型センサーの自立電源
 - IoT化に伴うオフグリッドのセンサーの増加

実用化に向けた課題

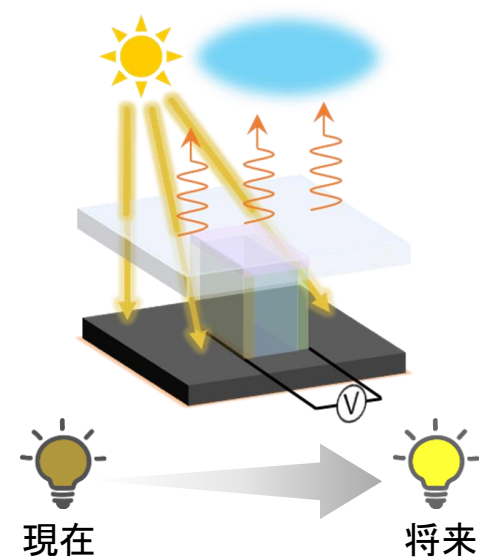
日中放射冷却材：

- 大面積化
- 耐久性の評価と向上
- フィルムの開発



環境発電：

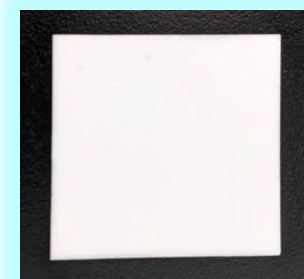
- 発電量の向上
- 素子の堅牢可
- 耐久性の評価と向上



企業への期待

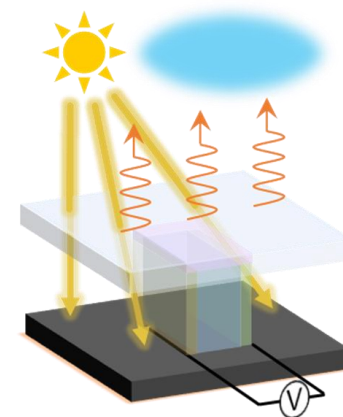
日中放射冷却材：

- 粉体をシートやフィルムに混ぜて製造できる企業との共同研究を希望



環境発電：

- センサーモジュール等小型電子機器や電気回路設計の開発ができる企業との共同を希望



企業への貢献、PRポイント

日中放射冷却材・環境発電共通：

- 本技術の検討に当たり、必要な追加実験や技術指導を行うことが可能

本技術に関する知的財産権

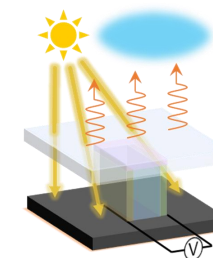
日中放射冷却材

- 発明の名称 : **放射冷却シートおよびその製造方法**
- 出願番号 : 特願2023-189862
- 出願人 : 物質・材料研究機構、デンカ株式会社
- 発明者 : 石井智、鳶田悦子、盛岡実、深澤元晴、川崎卓



環境発電

- 発明の名称 : **発電装置**
 - 出願番号 : 特許7090904号
 - 出願人 : 物質・材料研究機構
 - 発明者 : 石井智、長尾忠昭
- 発明の名称 : **発電装置、および、それを用いた発電システム**
 - 出願番号 : 特願2022-119167
 - 出願人 : 物質・材料研究機構
 - 発明者 : 石井智、森孝雄、ブールジュ・クロード



お問い合わせ先

国立研究開発法人物質・材料研究機構
外部連携部門 企業連携室

企業様向け総合窓口HP(スマホ対応)

<https://technology-transfer.nims.go.jp/>

