

快適な住環境を省エネで： 室温調節を指向したスマートマテリアル

S. Wang et al., *Science*, **347**, 1501-1504 (2021)

K. Tang et al., *Science*, **374**, 1504-1509 (2021)

1. イントロダクション：研究の背景

温暖化 & エネルギーの取り合いが問題となっている現代，省エネはますますその重要性を増している．

エネルギーは主として「産業」と「住環境・職場など生活の場」で消費されているが，特に冷暖房として消費されるエネルギーは無視できない量となっている．

例えば世界のエネルギー消費の約40%が建物内で使用されており，しかもその半分近くは冷暖房での消費だそうだ．

（今回の論文のIntroductionやそこでの参考文献を参照のこと）

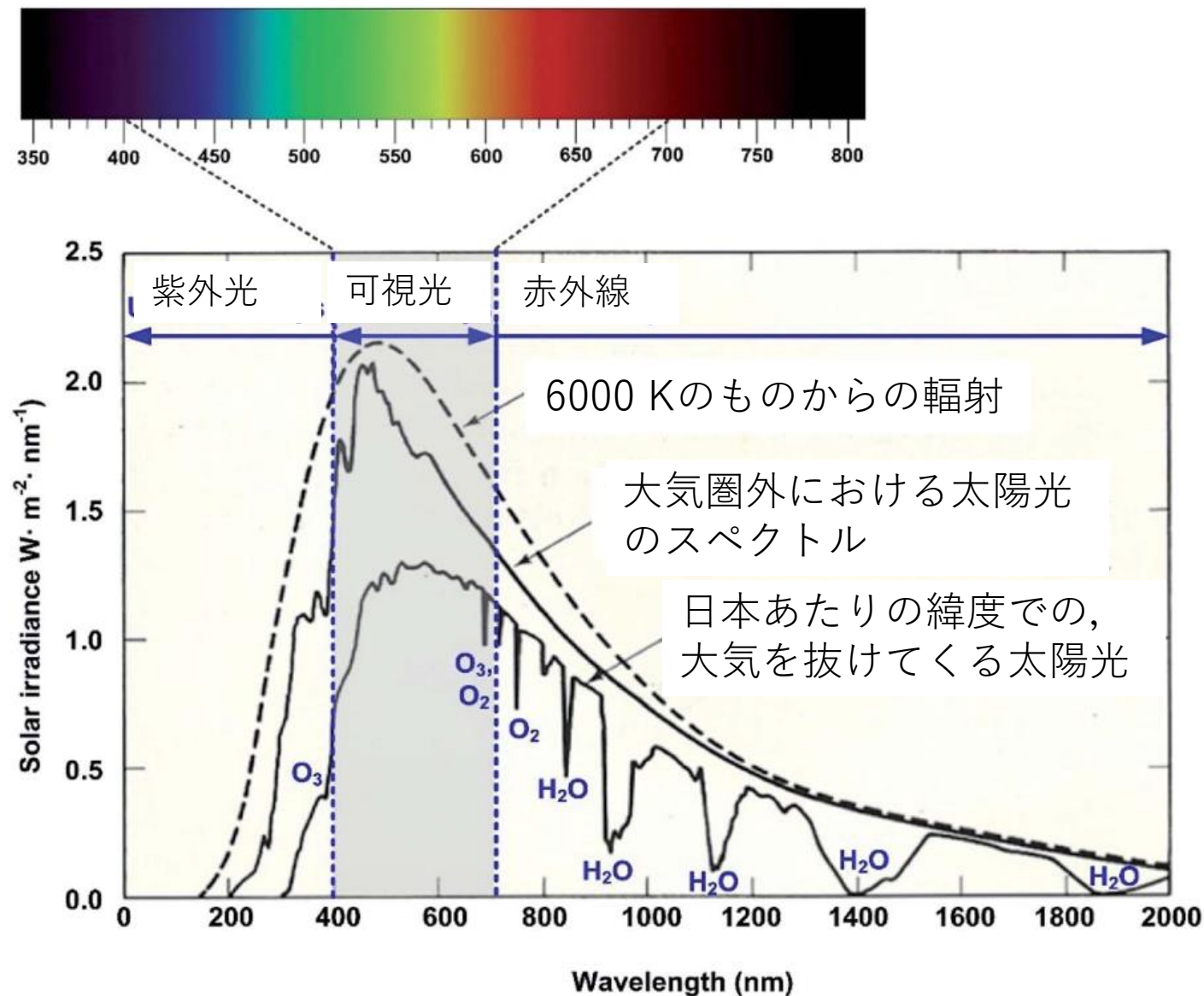
では，どのようにすれば冷暖房でのエネルギー消費を低減できるのだろうか？

まず重要になるのは、建物の断熱性である。この部分に関しては、断熱材の十分な使用や建築物の構造の見直し（適切な空間を部屋と屋根の間に作って断熱層にする、など）により、最近ではかなりの改善が見られている。

※ただし、日本の住居ではアルミサッシの多用による断熱性の低下も問題なので、まだ改善の余地はある。

その一方で、窓や壁、屋根による光の吸収（温度上昇をもたらす）や輻射（温度の低下をもたらす）は、単なる断熱とはまた別の影響をもたらす。例えば太陽光からの近赤外を反射しつつ遠赤外を吸収する材料は、熱せられにくさと放熱のしやすさを兼ね備えた材料となる。

参考：太陽光のスペクトル



太陽光のエネルギーは、
赤外の光がかなりの部分を担っている。
($\therefore$ 近赤外を遮ると遮熱によく効く)

参考：放射冷却

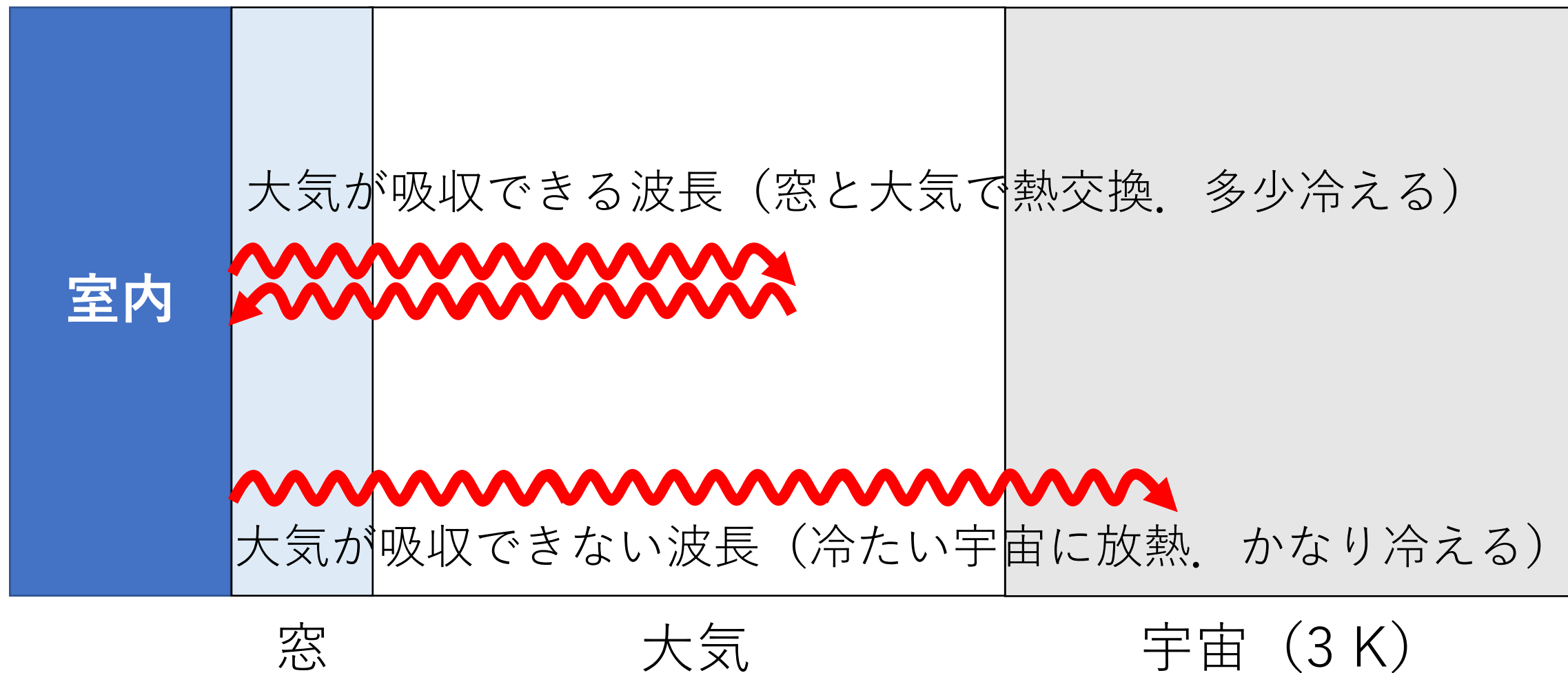
物体は、対流や伝導による熱交換以外にも、光の届く範囲の物体と輻射（光の放射）による熱交換を行っている。

（室温付近だとほぼ赤外線領域の輻射。高温ほど短波長）
熱いもののほど多くの光を放出し冷え、温度の低いものは（出す光が少ないので）差し引きで吸収する方が多くなり、温度が上がる。

窓（や壁とか屋根など）と室内は接触しているので、伝導や対流により室内と窓とで熱のやり取りが起こる。

この窓から放射される赤外線に注目すると、もし大気を通り抜けるような波長の赤外線が窓から出ていると、物体と宇宙（約3 K = 約-200 °Cと非常に冷たい）の間に輻射によって熱交換（放射冷却）が起こるので、窓は強く冷却される（=室内の熱が逃げていく）。

参考：放射冷却

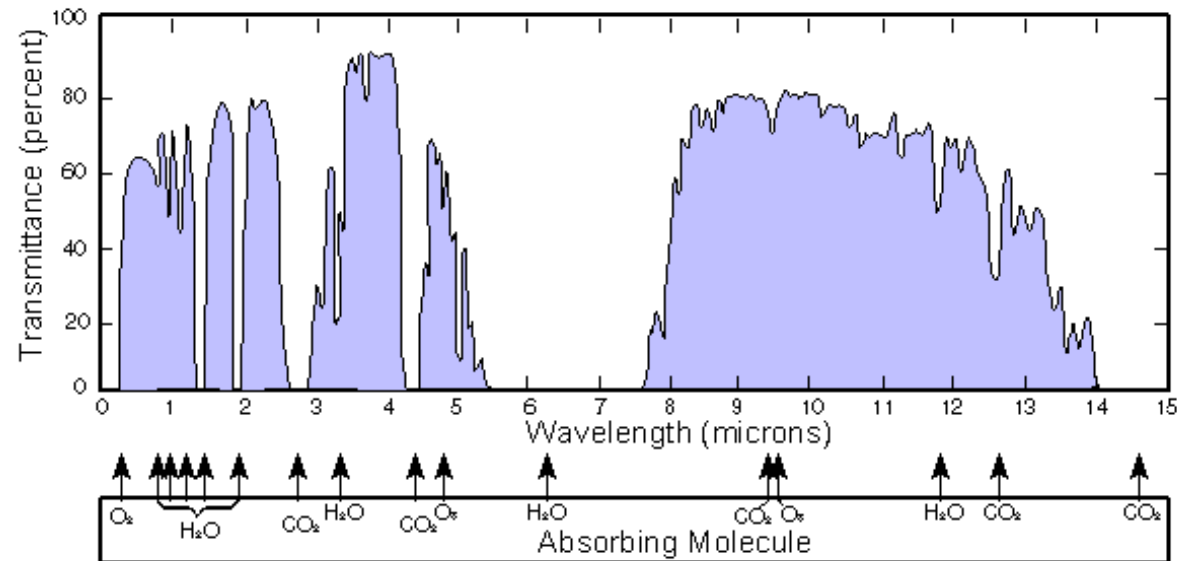


参考：放射冷却

つまり窓が「大気が吸収できない波長の赤外線」を放出できると、

- ・放射冷却でよく冷え，夏場では冷房が少なく済む
- ・放射冷却で熱が逃げ，冬場では暖房がより必要に

といったことが起こってくる。



参考：放射冷却

中～遠赤外は比較的溫度の低い物体からの赤外輻射に対応する．
溫度の高い太陽は近赤外を多く輻射し，中～遠赤外はそれほどは放出していない．

一方で室温付近の物体は，近赤外よりむしろ中～遠赤外の輻射によって冷える．このため，「近赤外を反射しながら，中～遠赤外をよく輻射する材料」を窓・壁・屋根に使うと，太陽からの熱を反射しつつ自身の熱は輻射で宇宙に捨てることができ，溫度が下がる．

※輻射と吸収は同じ過程を逆向きにしたものなので，「中～遠赤外を反射しつつ（＝吸収せず），中～遠赤外を放出する」という都合の良い物質は不可能．作れるのは「反射しつつ放射しない」か，「放射するけど吸収もする」という物質だけである．

「近赤外を反射しつつ，中～遠赤外を輻射する物質」

利点：太陽から熱を受けにくく，輻射で冷えやすい

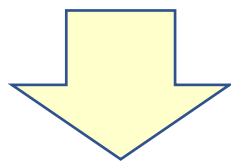
欠点：冬場は暖房がたくさん必要になる．

「近赤外を吸収しつつ，中～遠赤外を輻射しにくい物質」

利点：太陽から熱を受けやすく，輻射では冷えにくい

欠点：夏場は冷房がたくさん必要になる．

これら二つの利点を併せ持ちつつ，欠点を無くすような材料を作ることはできないのか？



相転移を利用した，スマートマテリアル

相転移：

温度変化（等）で，物質の状態がガラッと変わる．

ある温度以上と以下で，光の吸収率などが変わる材料を作れる．

スマートマテリアル：

温度や圧力などの周辺の状況の変化に応じて，（相転移などにより）特性が変化し，自動的に最適な状況を保つ．

例えば，「気温が高いと太陽光を遮断しつつ輻射を増やし冷却」しつつ「気温が下がると太陽光を吸収しつつ輻射を減らし保温」といった動作を実現することができる．

2. 今回の論文で使われている手法

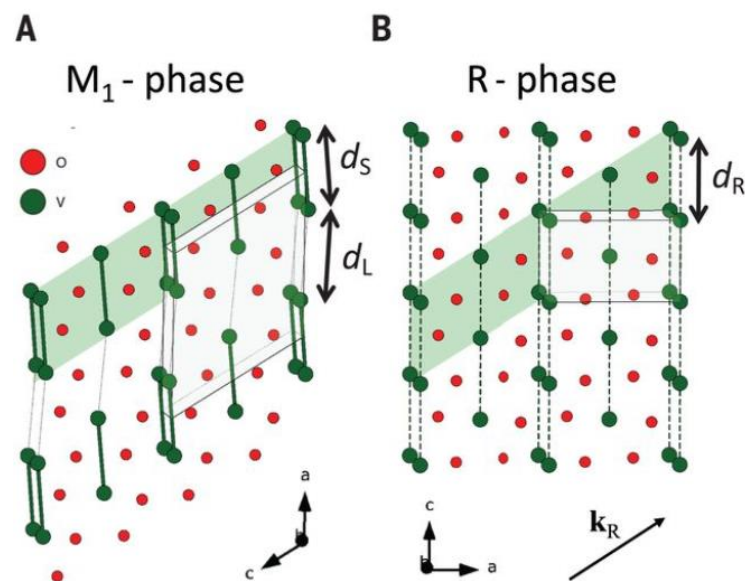
キーとなる物質：WをドープしたVO₂

VO₂はもともと，67 °Cあたりで構造相転移を起こす

低温：絶縁体（Vが二量化）

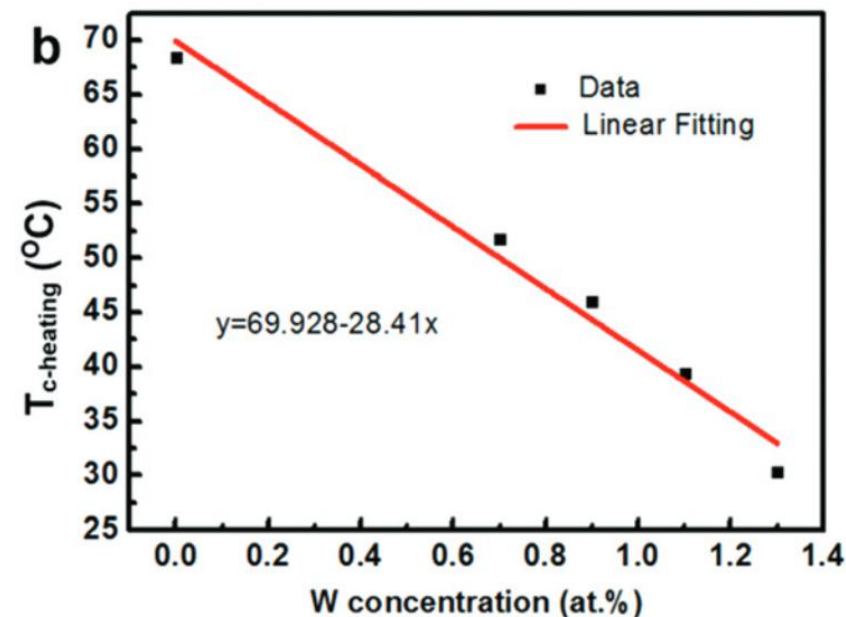
高温：金属（均一構造）

少量のWをドープすることで，転移温度を下げることができる。
（混ぜる量により，転移温度をコントロール可能）



室温（左，絶縁相）と高温（右，金属相）の構造

S. Wall et al., *Science*, **362**, 572-576 (2018)より



Wのドープとともに転移温度が低下

L. Zhang et al., *J. Mater. Chem. C*, **8**, 13396-13404 (2020)より

これを利用すると，室温付近のちょっと暑い温度と，ちょっと寒い温度との変化で相転移を起こすことが可能に

→ 室温付近の温度差で，輻射率の違う材料が可能に

こんな性質ができると理想的

暑いとき：太陽からの近赤外を反射（太陽熱を入れない）
建物からの中～遠赤外の輻射は増大（冷却を促進）

寒いとき：太陽からの近赤外を透過・吸収（太陽で温める）
建物からの中～遠赤外の輻射は減（熱を逃がさない）

こんな都合の良い構造をどうやって実現するか？

高温時に光をよく輻射する物体

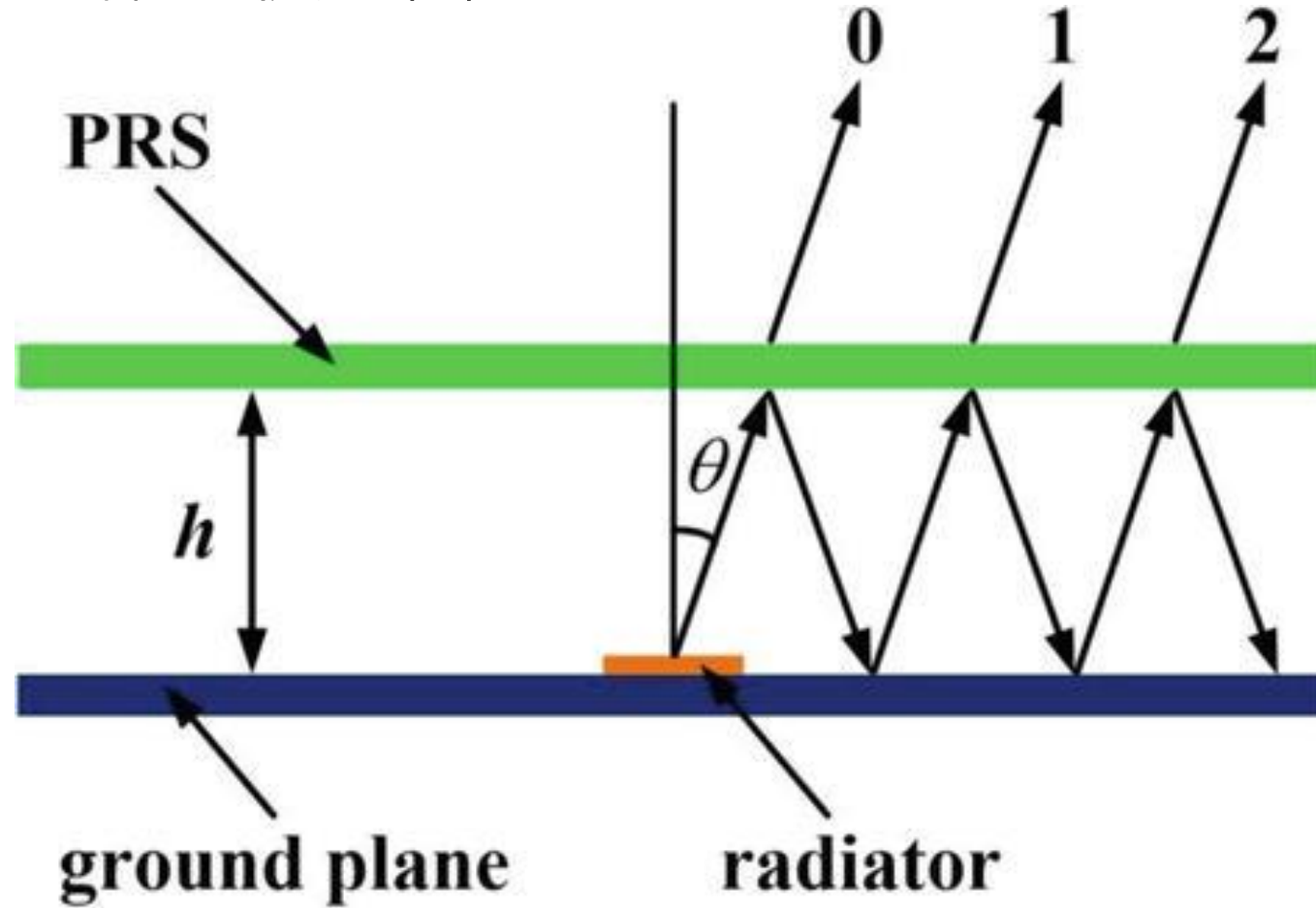
= 低温時にその光をよく吸収する物体（キルヒホッフの法則）

つまり，良く光を吸収できる構造を作ると，熱輻射も大きくなる．
今回の論文で用いられているのは，Fabry-Perot共振器と呼ばれるもので，単純に言えばわずかな隙間をあけて鏡を二枚設置したような構造となる．

VO_2 の金属-絶縁体転移を使うと，高温でのみ VO_2 が金属になり鏡となる（=Fabry-Perot共振器として働く）が，低温では VO_2 はただのそこそこ透明な絶縁体となるものが作れる．

これを利用して，光の吸収のしやすさ = 光の放出のしやすさを切り替えることができる．

Fabry-Perot共振器の模式図



<https://www.intechopen.com/chapters/72936> より

$h = \frac{\lambda}{4\pi}(\varphi_1 + \varphi_2) + \frac{N}{2}\lambda$ の時に輻射が強くなる．ここで N は正の整数， φ_1 と φ_2 は反射の際の位相変化．

構造 (VO_2 ともう一枚の鏡) の間隔をうまく (= 中～遠赤外を十分吸収できる間隔に) 調節すると……

低温: VO_2 は絶縁体 (ただの, 光を透過する板)

→ 中～遠赤外の輻射は少ない

(近赤外に関しては, 他のコーティング剤で吸わせられる)

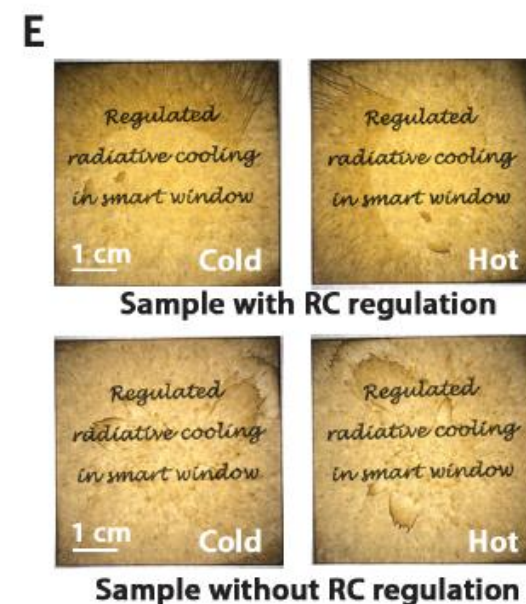
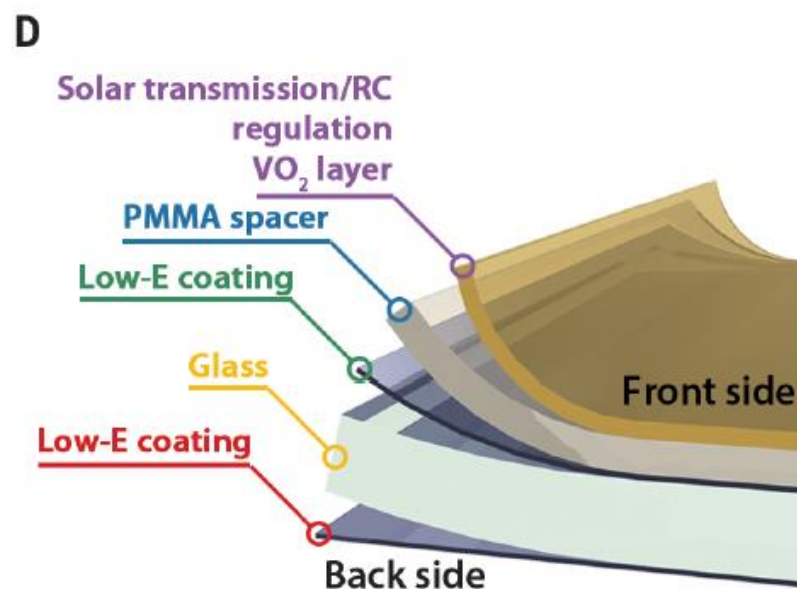
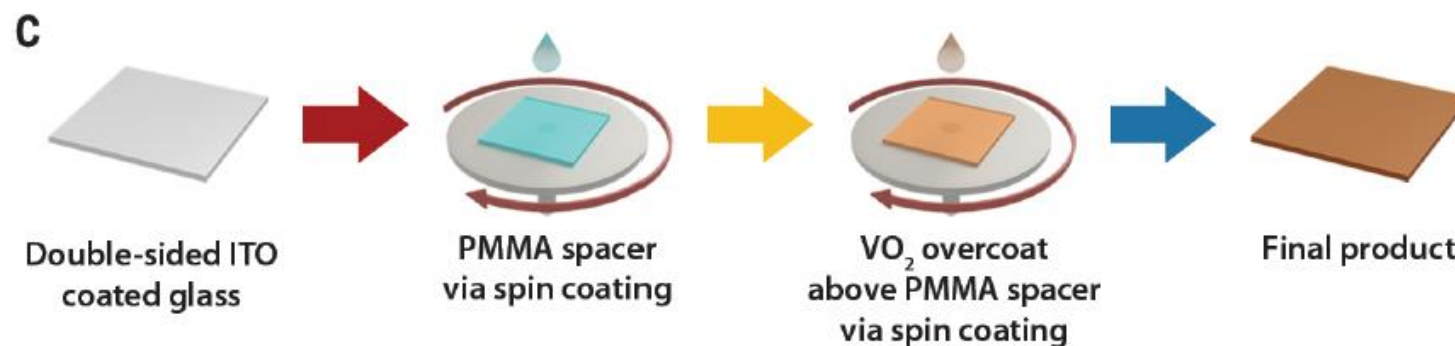
高温: VO_2 は金属 (光をそこそこ反射しやすい金属板に)

→ Fabry-Perot共振器となり, 中～遠赤外の輻射が増大
輻射により放熱力アップ

太陽からの近赤外に関しては, 共鳴しないので

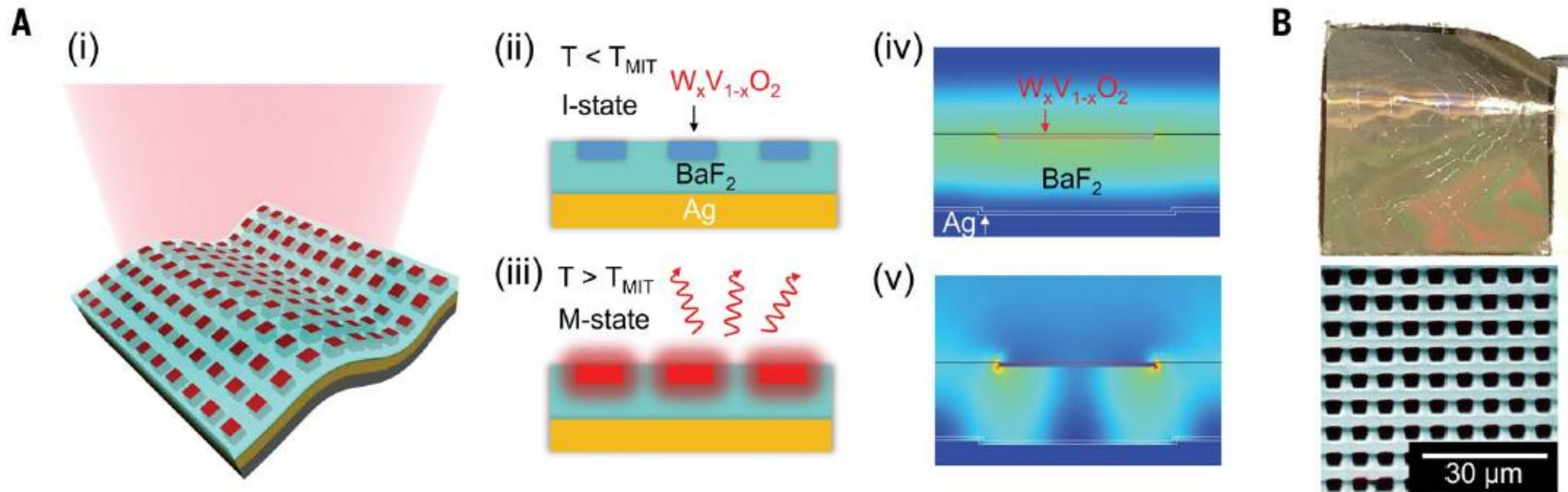
金属板として反射が増大 → 透過しにくい
(建物内が太陽光で温まりにくく, 涼しい)

実際の構造1 (S. Wangによる論文. 窓への適用)



スピンコート法で作れるので, コストは結構安い. そこそこ透明.

実際の構造2 (K. Tangによる論文. 屋根や壁への適用)



縦方向だけでなく，横方向にも共振器を構成.

実際の作成法（量産は可能だが、そこそこ手間はかかりそう）

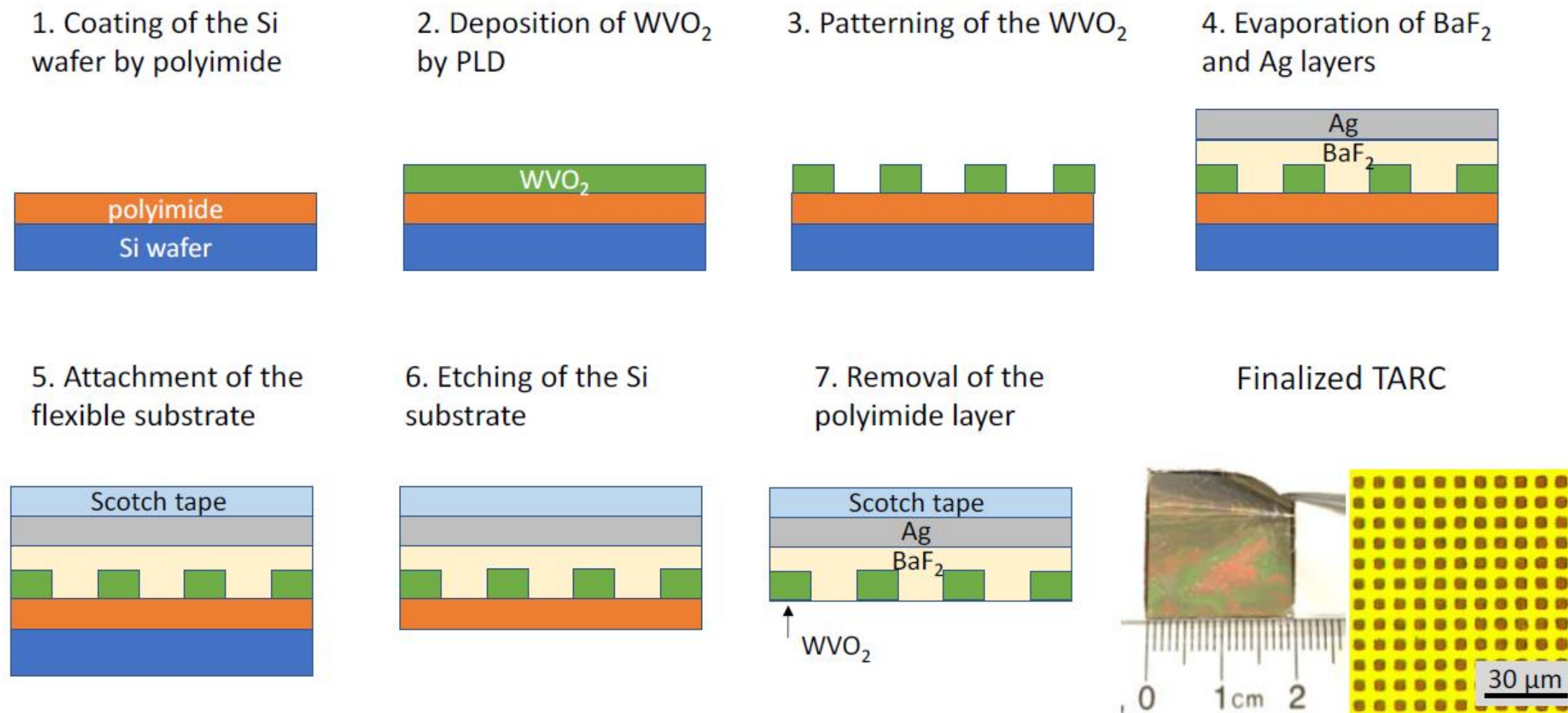


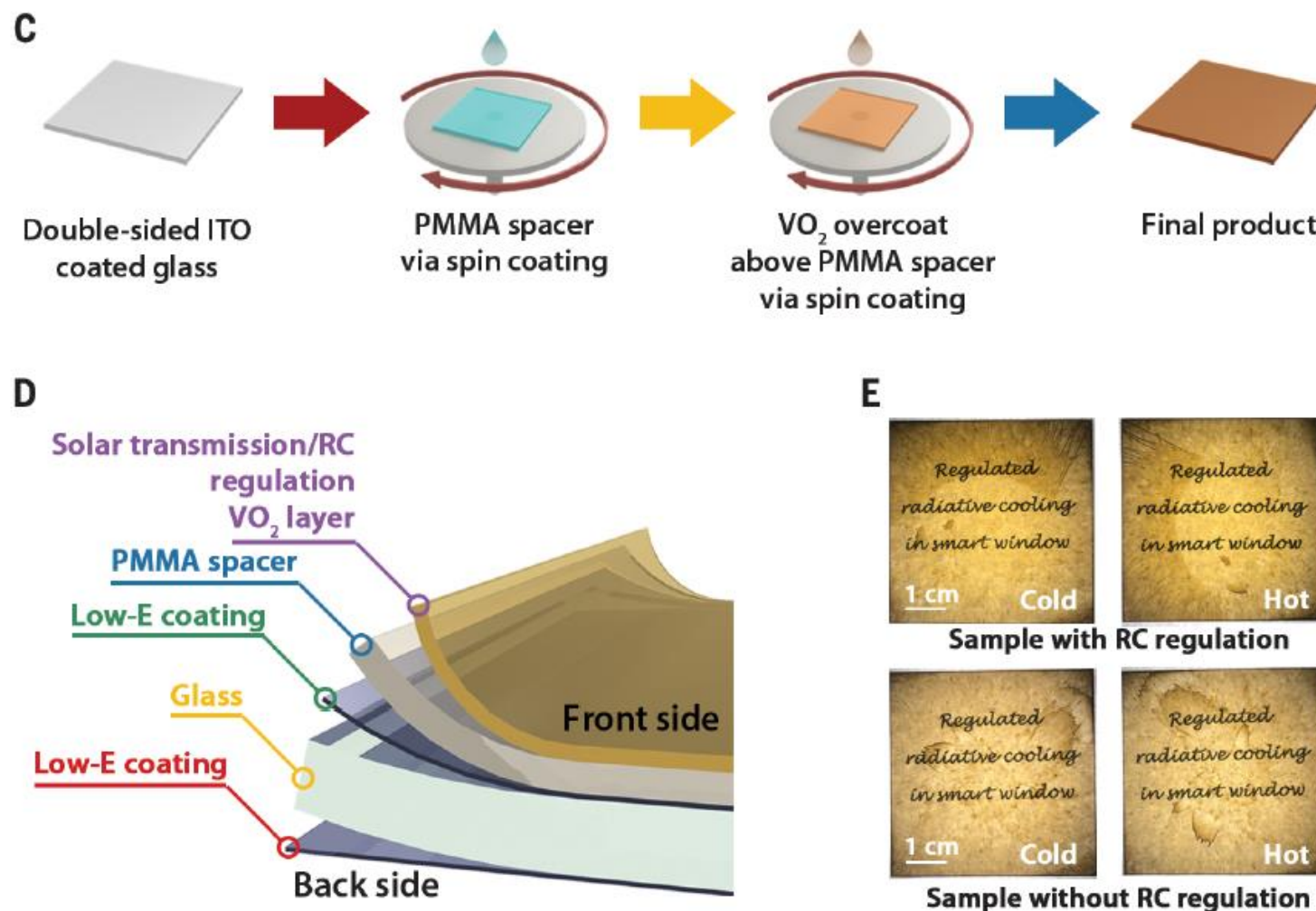
Figure S1. Schematics and pictures for the fabrication of TARC.

3-1. 実際の実験結果 (1)

S. Wangによる窓への適用

実際の構造1 (S. Wangによる論文. 窓への適用)

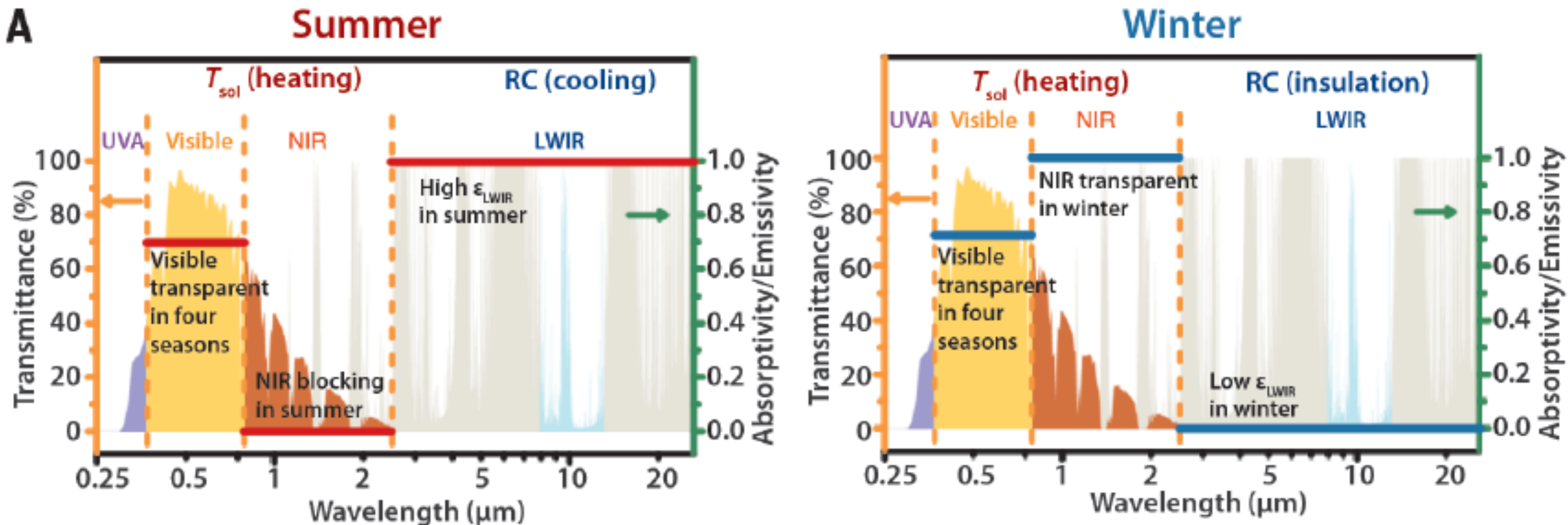
※再掲



スピンコート法で作れるので, コストは結構安い. そこそこ透明.

目指す理想的な透過率と熱輻射

A



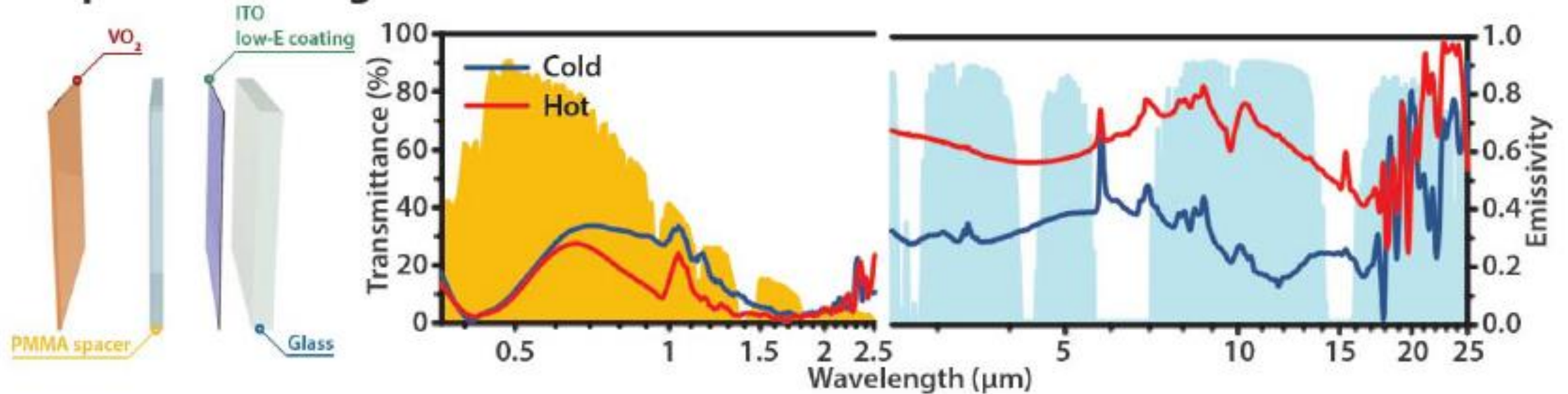
窓なので常に可視光は通す。

夏は近赤を遮断し中～遠赤をよく放出。

冬は近赤を部屋へとよく通し， 中～遠赤の放射は最低限に

実際の透過率と熱輻射

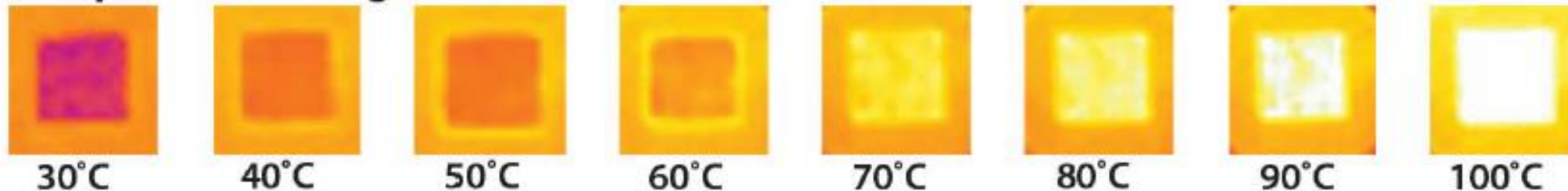
A Sample with RC regulation



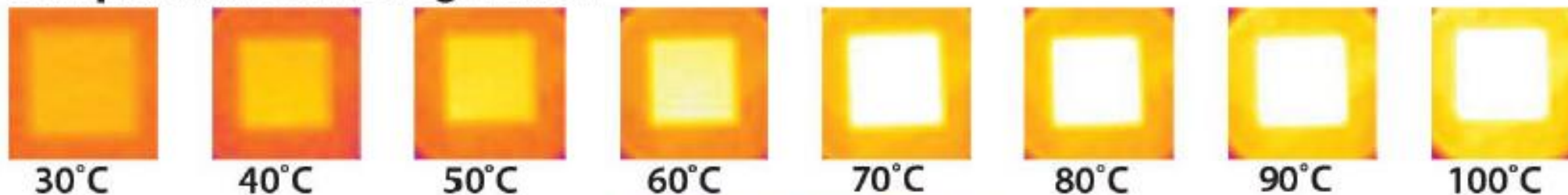
スイッチングの量にはやや不満は残るものの、傾向としては狙った通りのものができている。

輻射の様子

C Sample with RC regulation



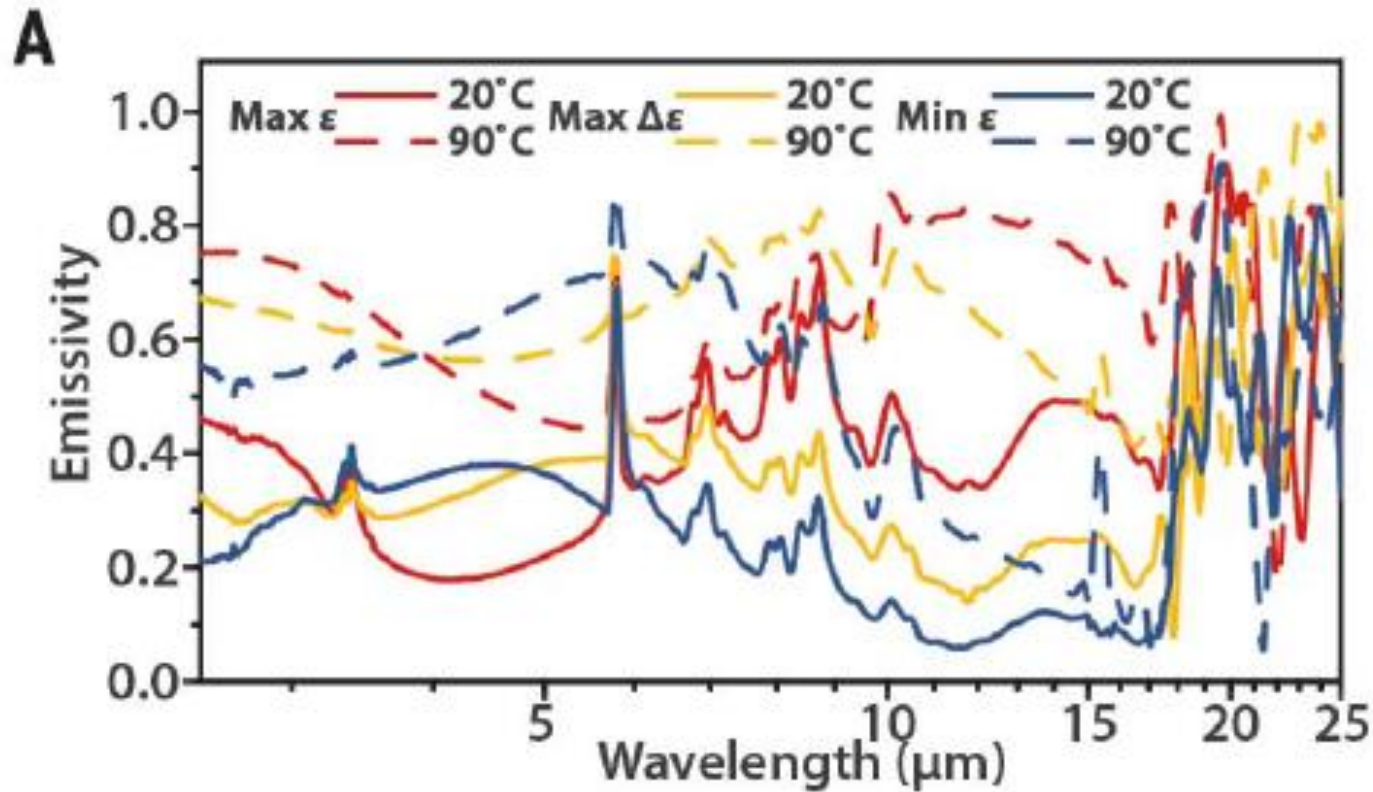
Sample without RC regulation



25°C  100°C

今回作成したサンプル（上段）では，低温では輻射が顕著に少なく（＝低温では熱を逃がさない），一方で高温では強い輻射がある（熱を逃がす）．一方，単に輻射を促進するだけの構造（下段）は低温時にも熱が逃げていってしまっている．

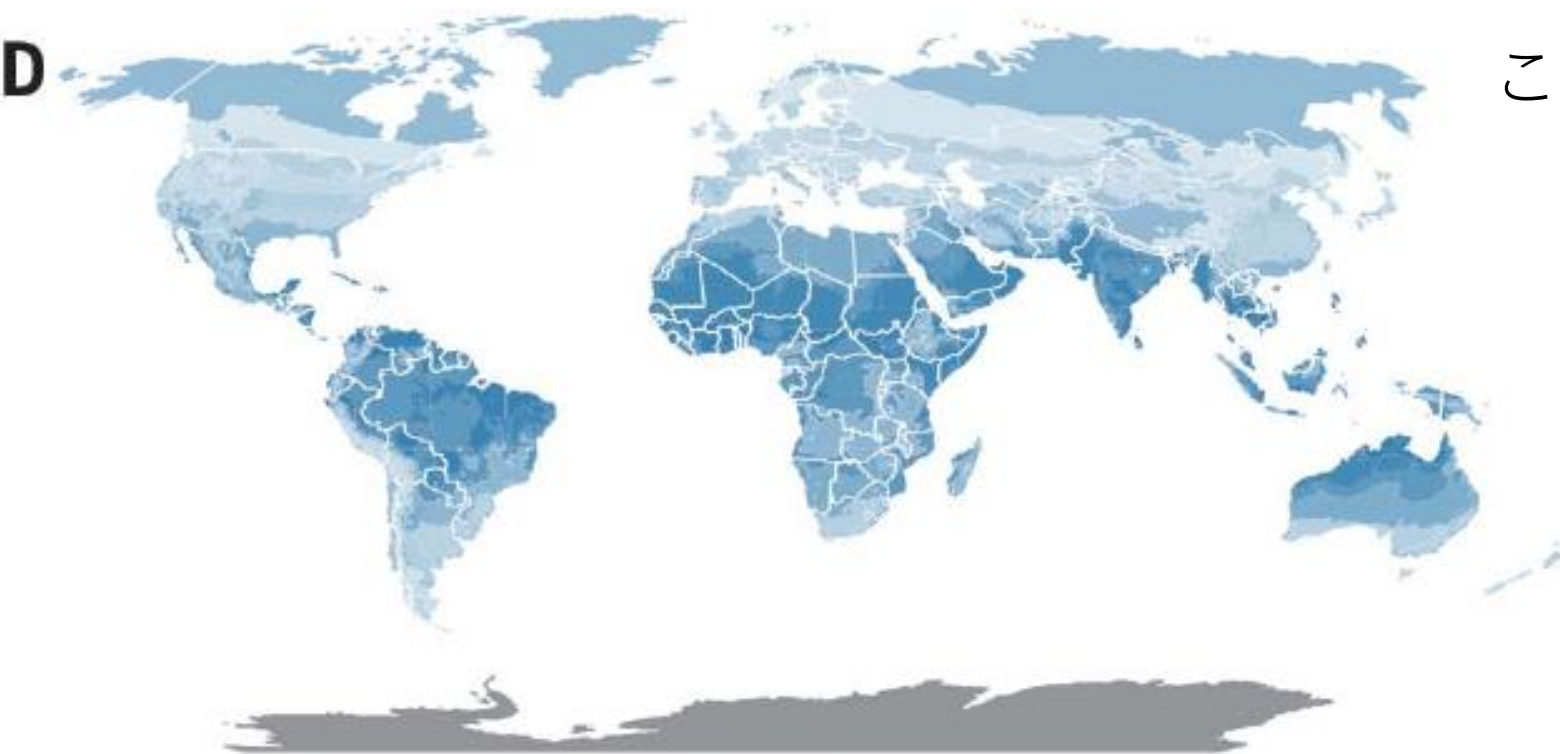
なお、こういった輻射特性にするかは、low-Eコートやポリマー部の量（厚み）、VO₂の配合量などで調整可能。



※3パターンの高温時（破線）と低温時（実線）の輻射のグラフ。
3パターン（線の色で区別）で大きく特徴を変えられている。

単なる遮熱ガラスに比べ， どのぐらいの省エネが期待できるか？

D

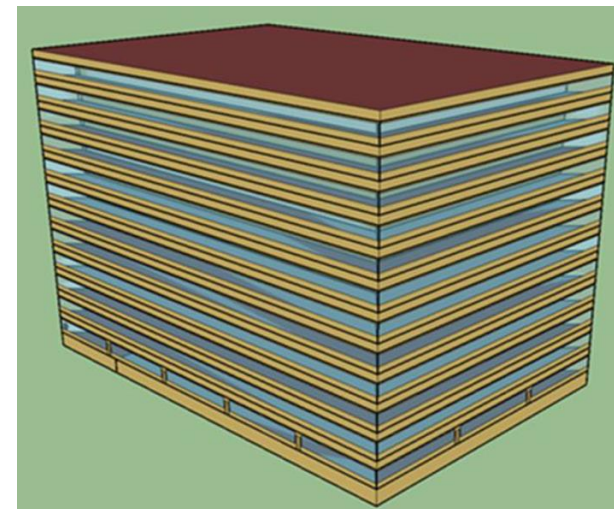


Heating/cooling energy saving
vs. commercial low-E glass



単位：MJ/m²

こんな建物を仮定しての計算



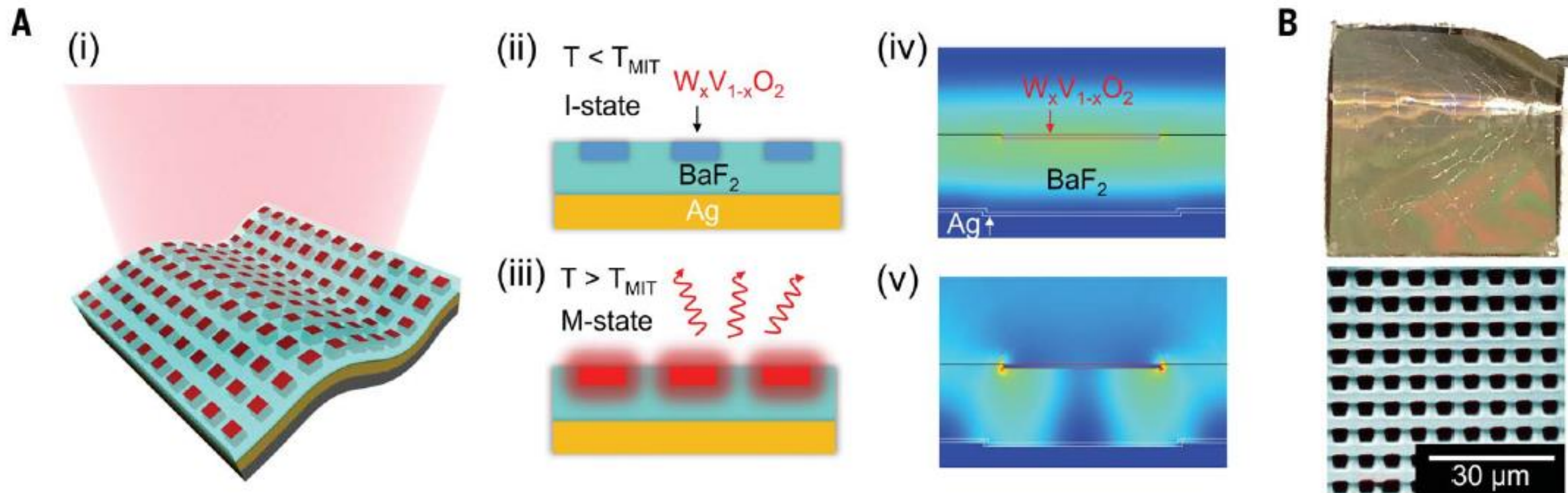
底面73 m × 49 m
各階4 mの12階
窓面積4636 m²

3-2. 実際の実験結果（2）

K. Tangによる屋根等への適用を目指した研究

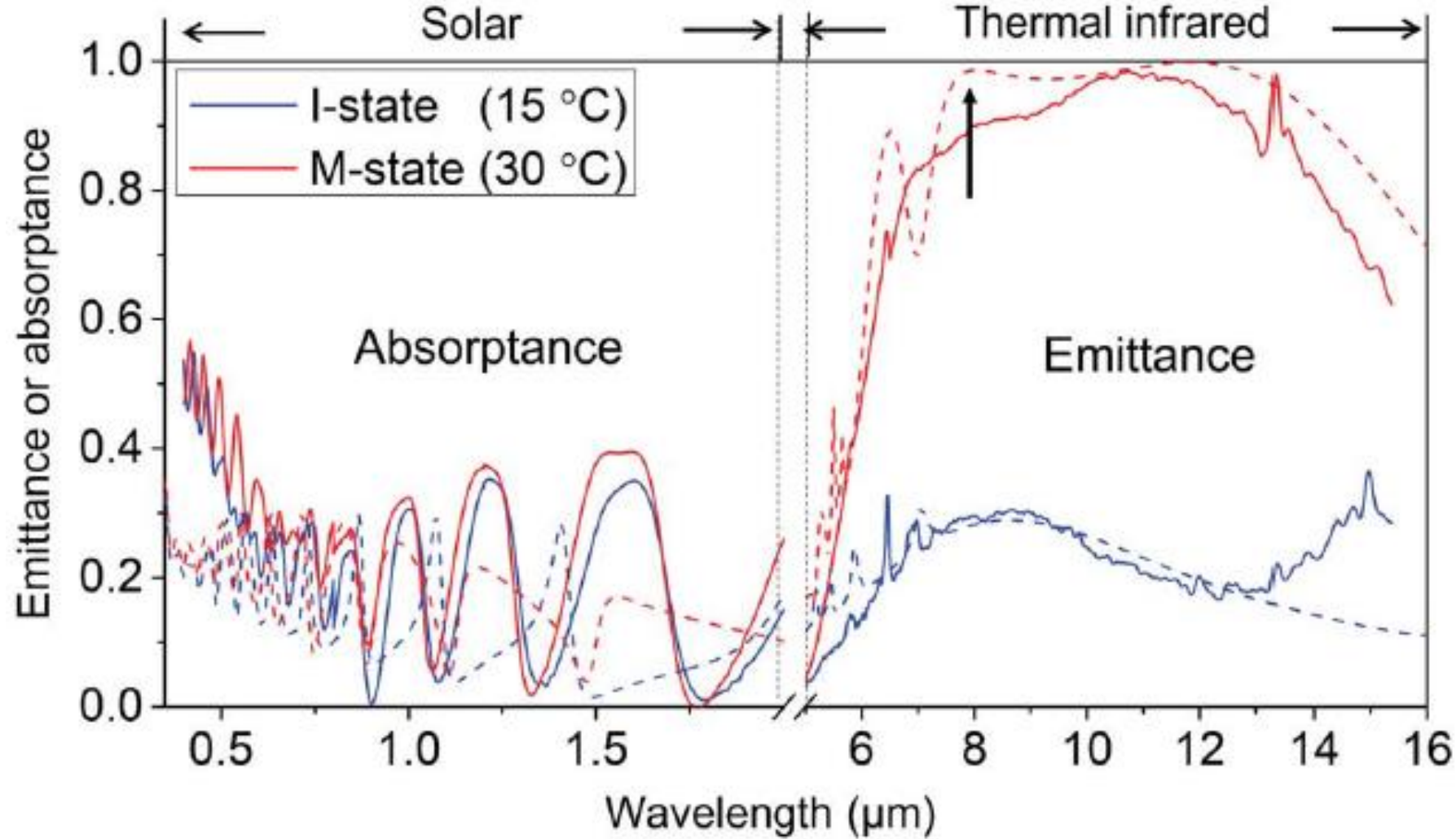
実際の構造2 (K. Tangによる論文. 屋根や壁への適用)

※再掲



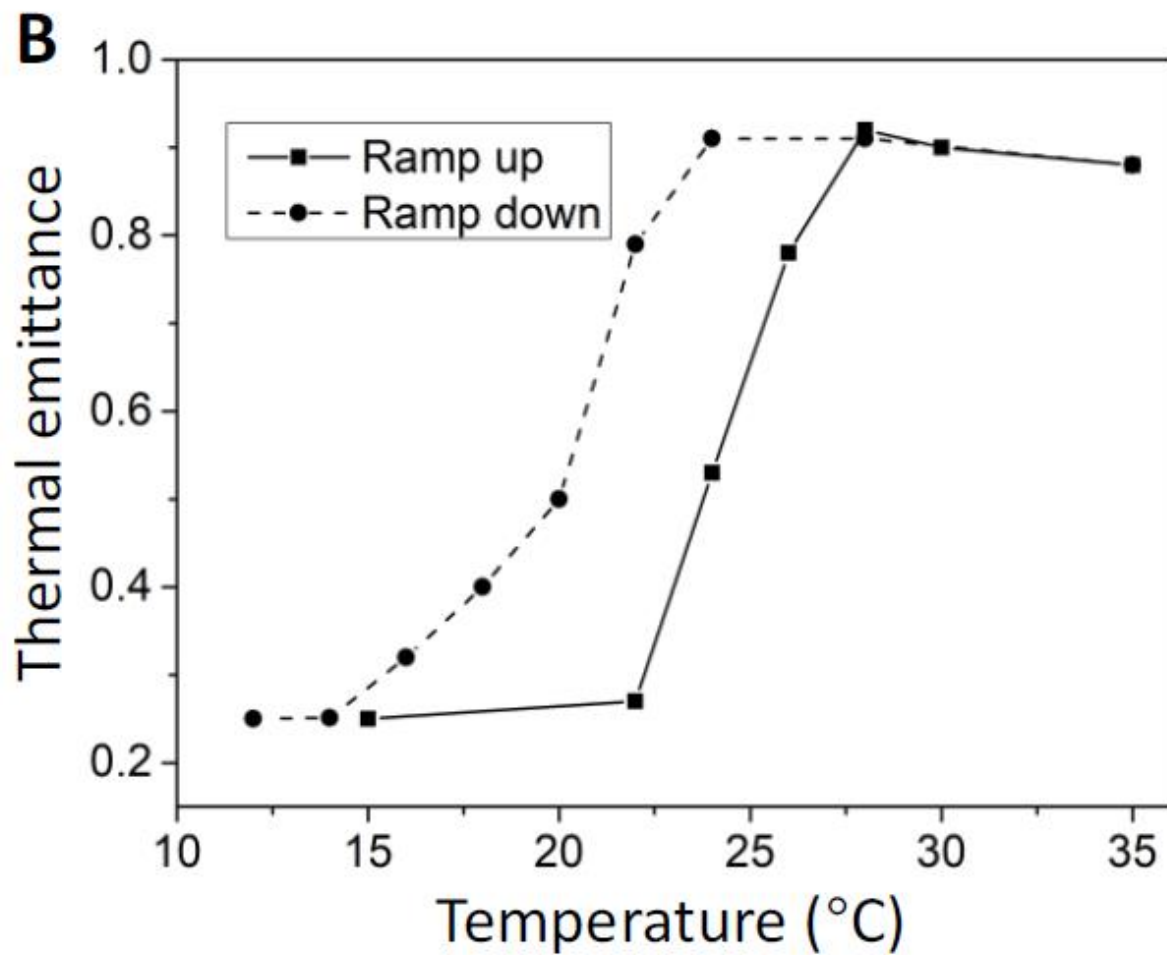
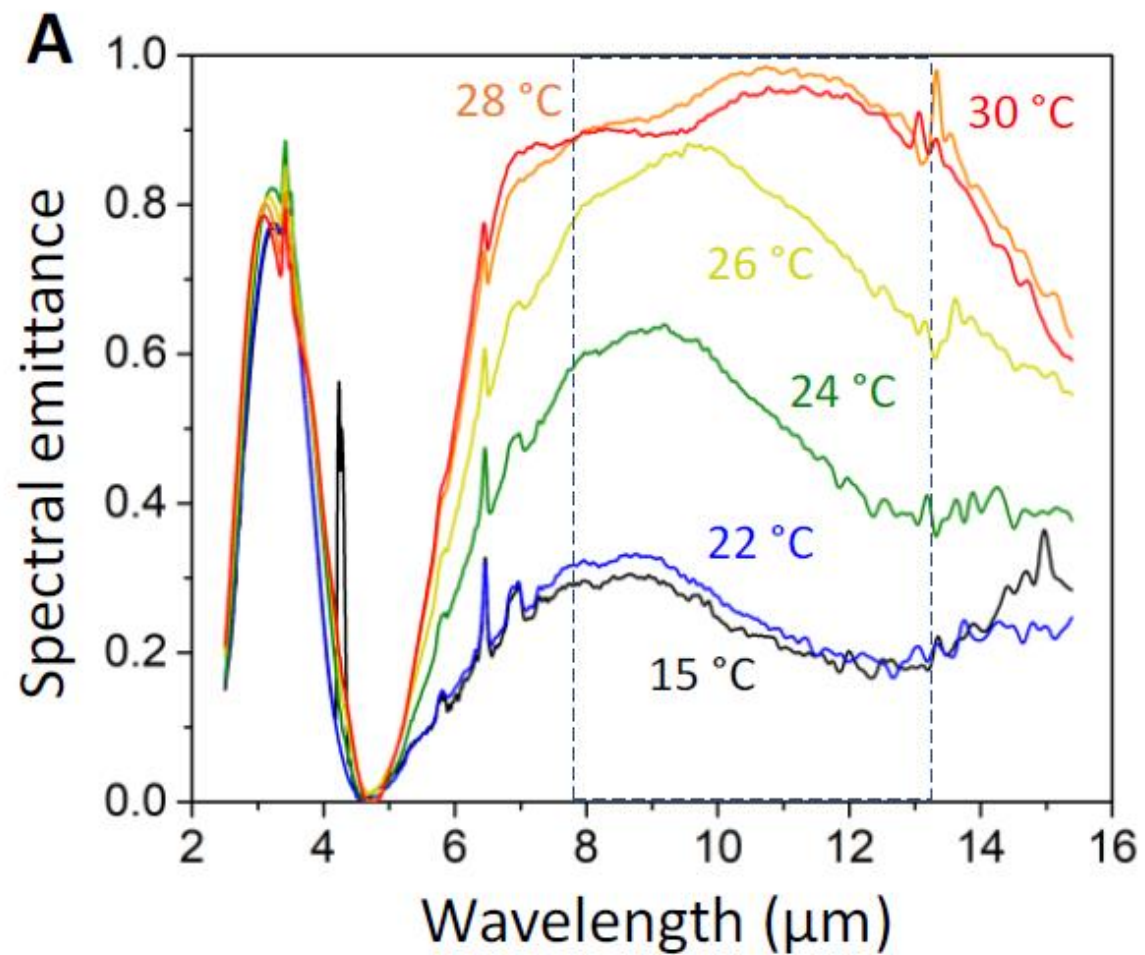
縦方向だけでなく，横方向にも共振器を構成.
(VO₂の島の間でも共鳴)

実際の透過率と熱輻射

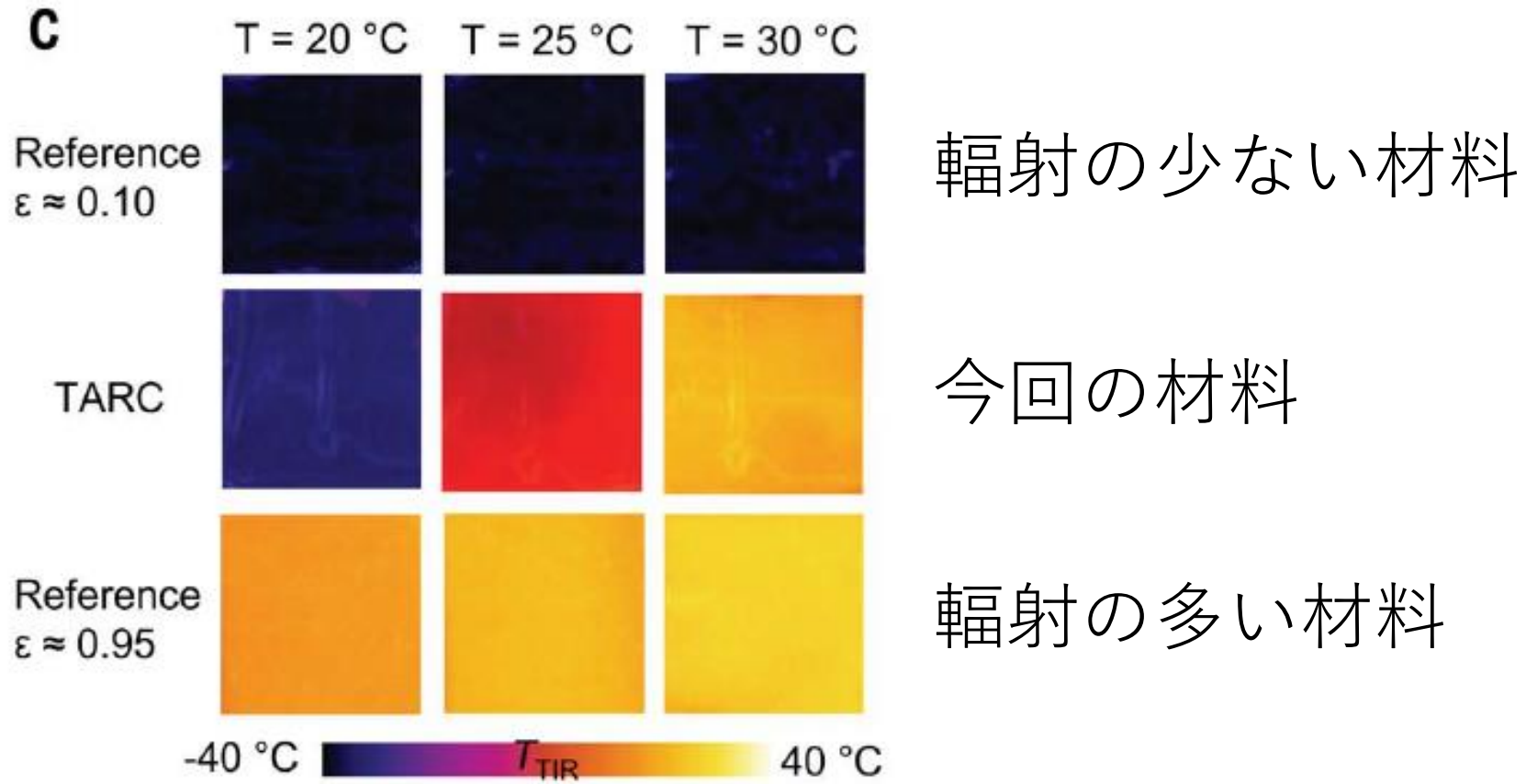


近赤外はあまり変わらないが，遠赤領域で輻射量が劇的に変化

輻射の温度依存性

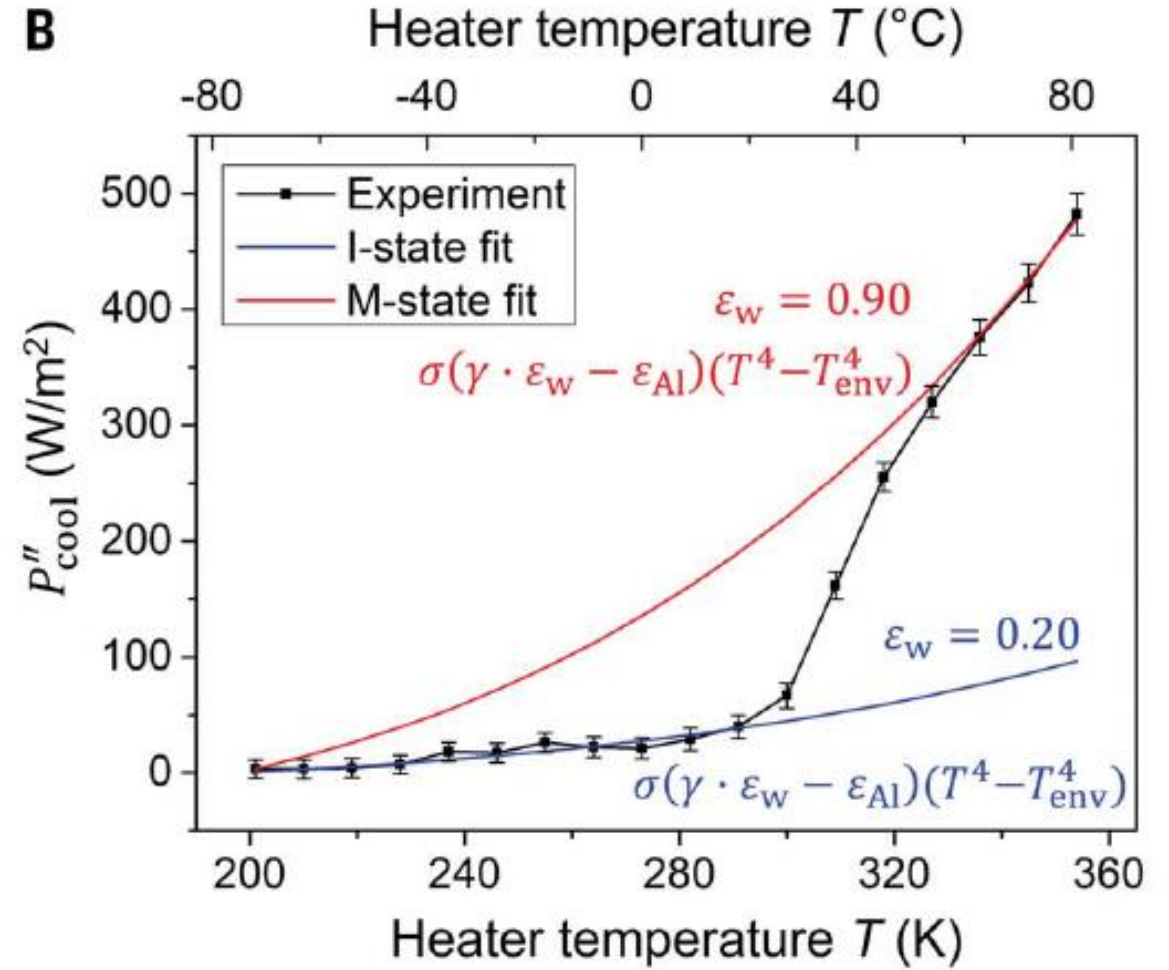
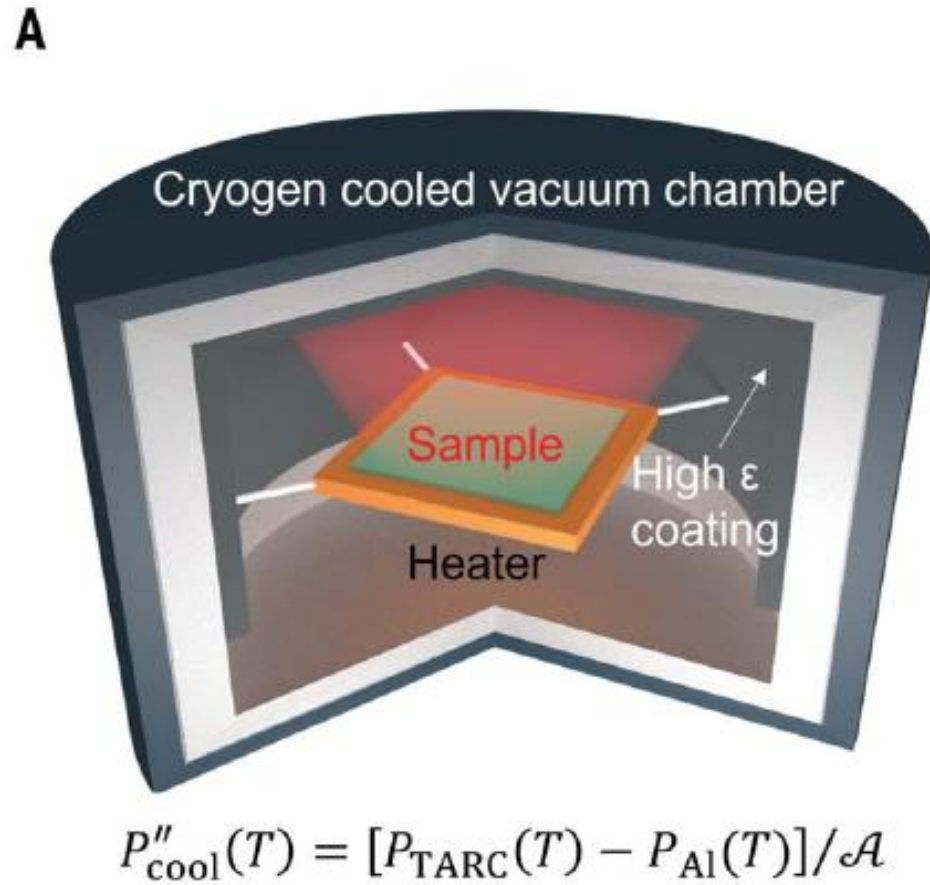


通常の部材との比較



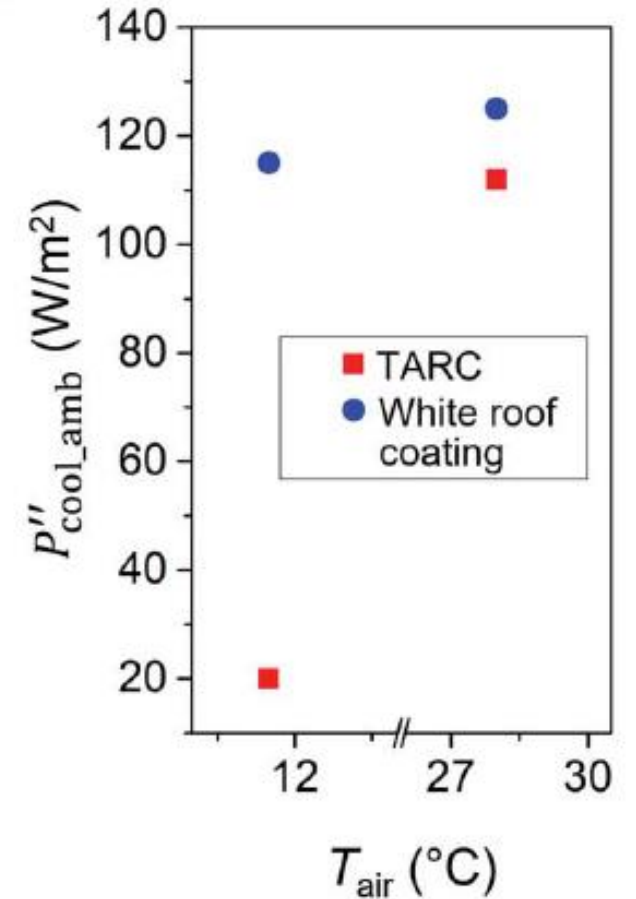
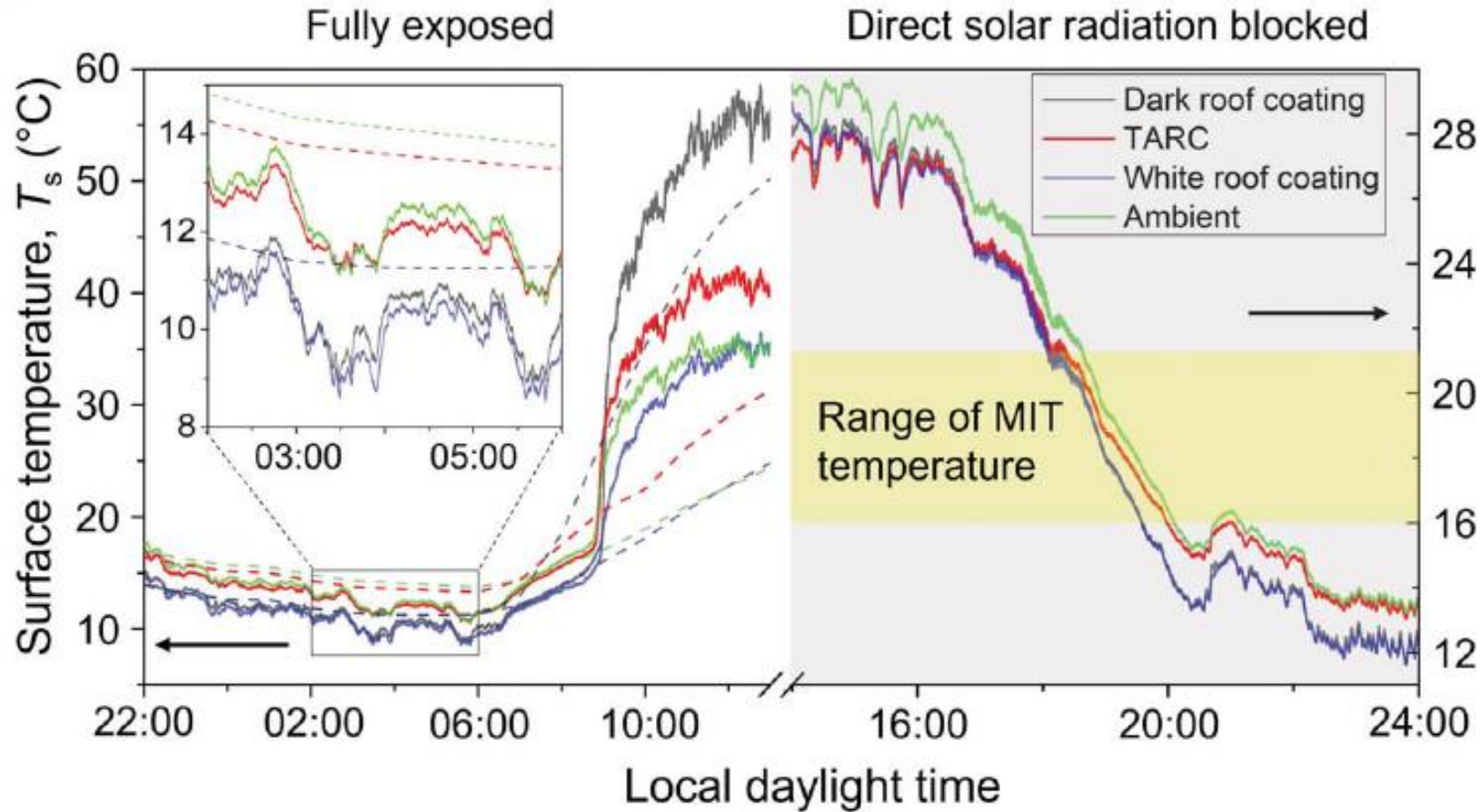
狙い通り，低温では輻射を減らし熱を保ち，
高温では輻射を増やし冷却に役立つ．

温度による輻射の変化



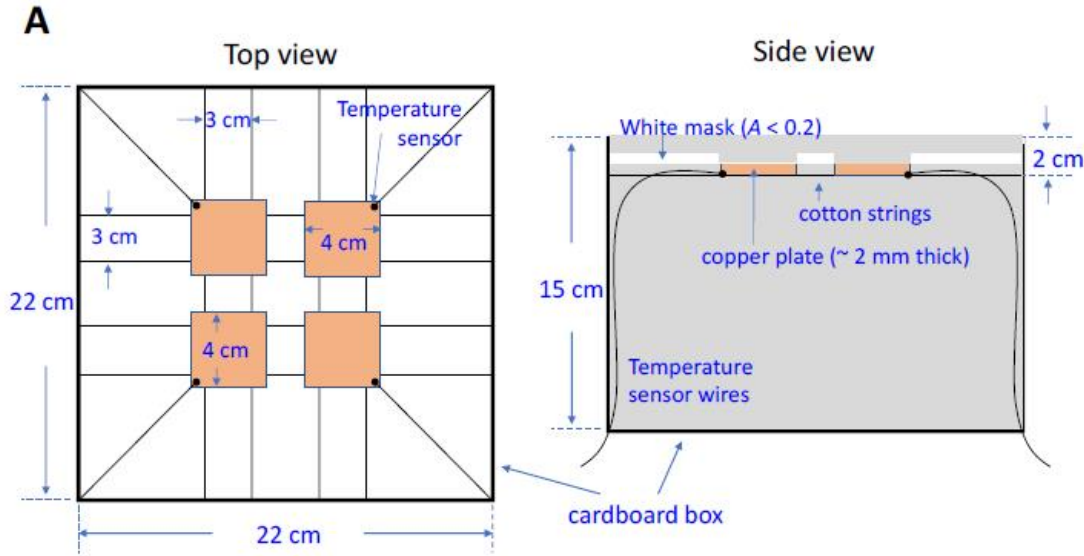
温度が上がると高輻射モードに切り替わっていることがわかる。

ただの黒いコーティングや白いコーティングとの比較 (TARCが今回の研究による材料)



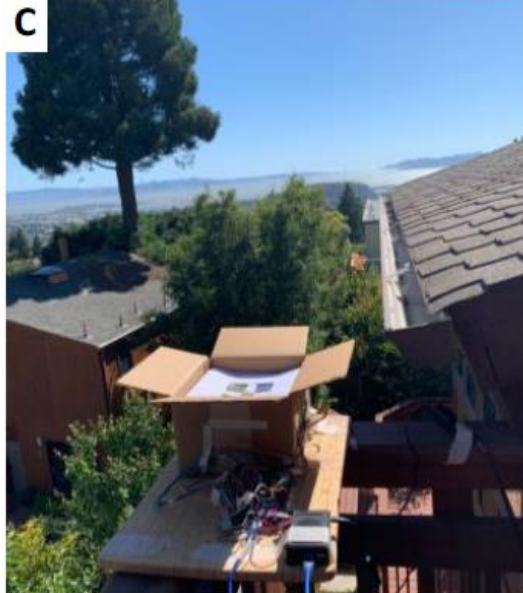
寒い夜には温度が2 °C高く， 熱い昼間にはそこそこ放熱に寄与

なお、実際の測定はこんな感じ



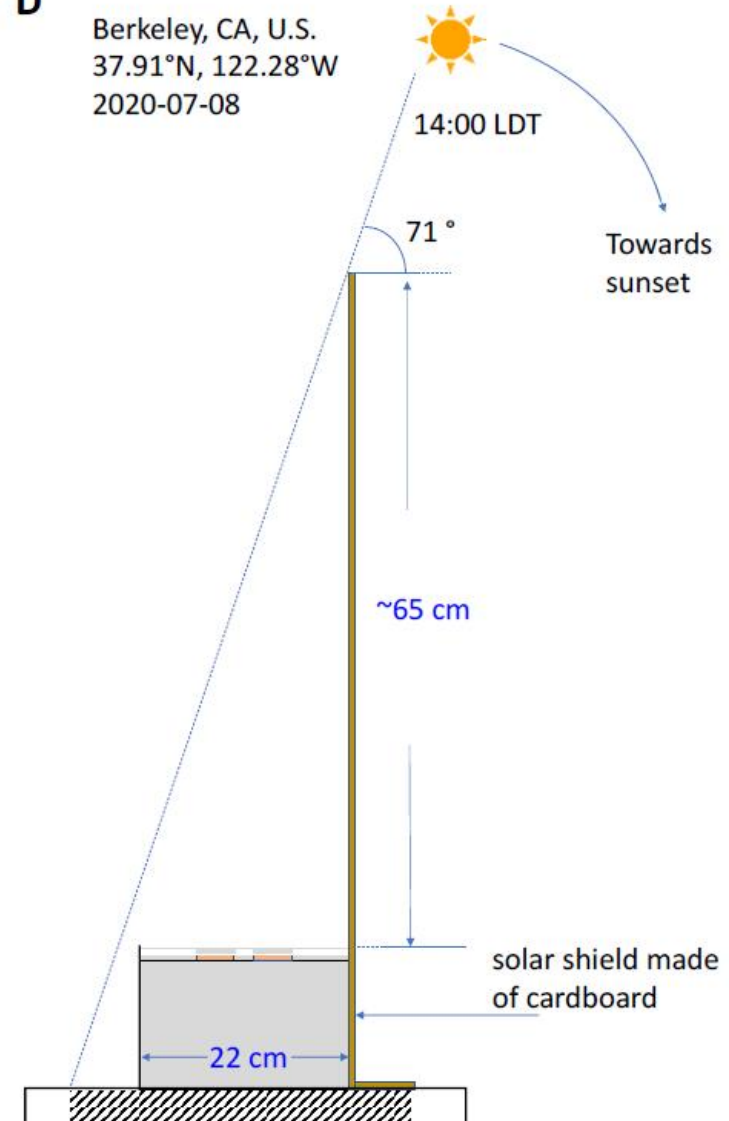
B

Coatings	A	ε_w
TARC	0.25	0.20 ↕ 0.90
White roof coating	0.15	0.95
Dark roof coating	0.70	0.95



D

Berkeley, CA, U.S.
37.91°N, 122.28°W
2020-07-08



もうちょっと簡便な量産手段も提案（ただし恐らく特性は落ちる）

I. Fabricate the mold on a Si wafer



II. Apply PE on the heated mold



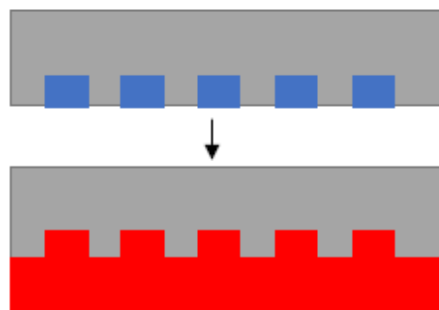
III. Cool and peel off the PE film



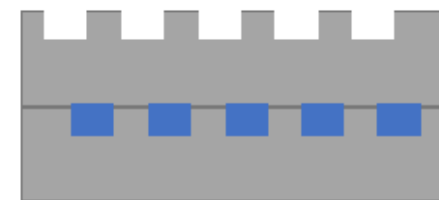
IV. Fill the holes in the PE film with VO_2 nanoparticles



V. Apply the first layer on another PE/mold structure



VI. Repeat process III-V to get multiple layers of VO_2 nanoparticle arrays embedded in the PE film



まとめ

コスト面などの検討は必要だが、温度による相転移が引き起こす物性の変化をうまく使うことで、暑いときと寒い時で動的に放熱性・透過性をコントロールできる材料が実現可能.

こういった「賢い材料」を使いこなせば、さらなる省エネや高効率化が見えてくる.