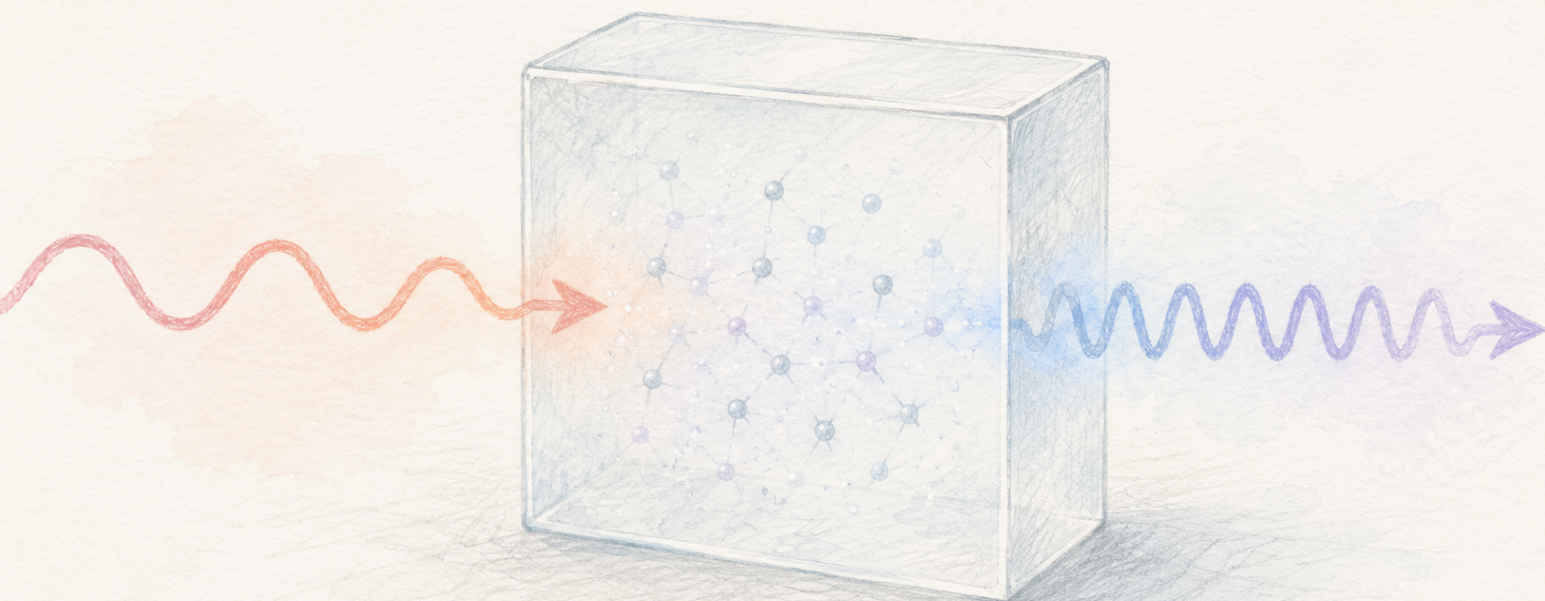




## The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

# 固体材料が太陽光レベルの強度で青色可視光を UV へ変換 — ただし太陽エネルギー装置では ない

研究者らは、 $\pi$  電子系を守りながら三重項エネルギー移動を妨げないアルキル側鎖を持つ *DHI* 系有機結晶を設計した。最良の *iBu-DHI/Ir(ppy)<sub>3</sub>* 固体膜は、可視  $\rightarrow$  UV の三重項消滅アップコンバージョンで絶対量子収率 1.9%、しきい値  $1.2 \text{ mW cm}^{-2}$  を示し、445 nm 付近の太陽放射照度に近い条件で動作した。固体フォトン・アップコンバージョンの本物の材料進展だが、完成した太陽光デバイスでも「無料の UV」でもなく、可視太陽光で有用な UV 化学を大規模に駆動できることの証明でもない。

---

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

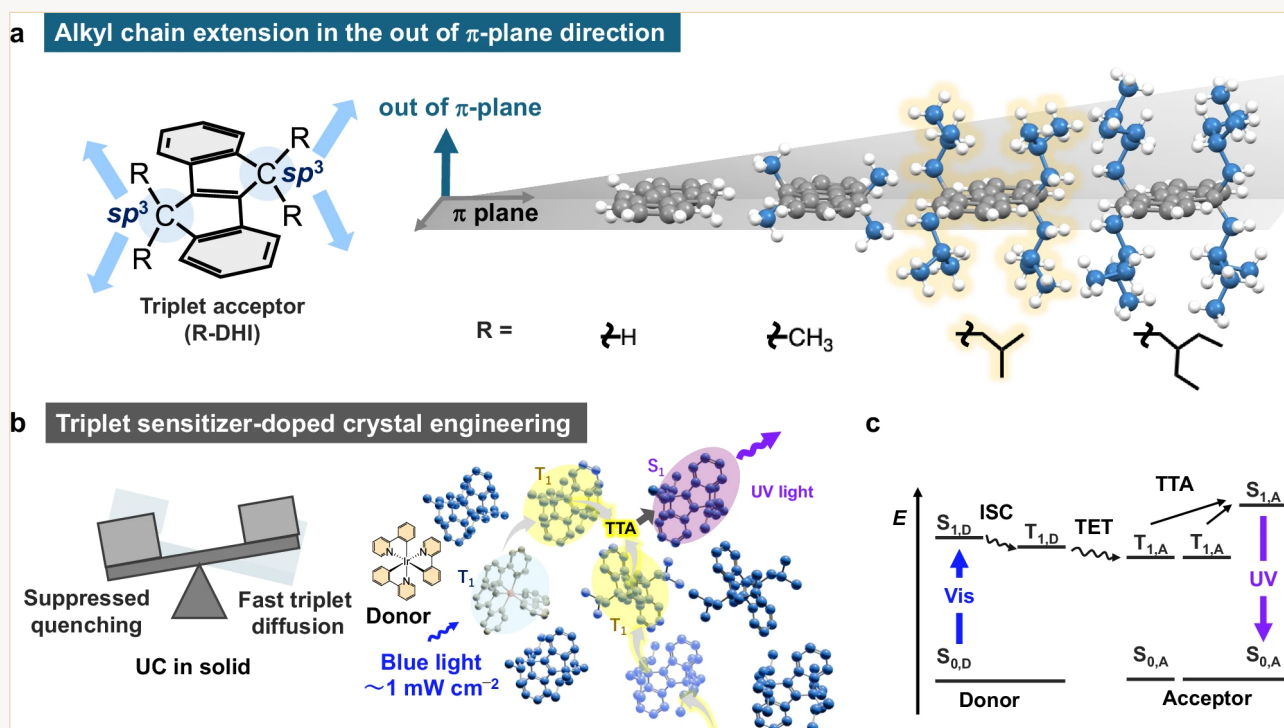
Paper: *Sterically protected  $\pi$ -electron systems for efficient solid-state photon upconversion*, Naoyuki Harada, Hayato Shoyama, Nutnicha Boonmong, Kiichi Mizukami, Yuya Watanabe, Pei Zhao, Masahiro Ehara, Yoichi Sasaki, and Nobuo Kimizuka, *Nature Communications* 17, 5134 (2026) · DOI: 10.1038/s41467-026-73898-0

# 太陽光レベルの光で起きる巧妙な変換 — ただし太陽エネルギー装置ではない

地球に届く太陽光の大部分は可視光と赤外線で、紫外線はその一部にすぎない。しかし紫外線の光子は化学的に強力な、より低エネルギーの可視光子では進みにくい反応を駆動できる。そこで魅力的になるのが**フォトン・アップコンバージョン**だ。もし二つの低エネルギー可視光子を一つの高エネルギー紫外光子へ変換できる材料があれば、通常は UV が必要な化学反応に可視太陽光を使えるかもしれない。

この論文が扱うのは、その中でも難しい課題である。自由に拡散する溶液中の分子に頼らず、**固体**のまま、しかも**太陽光レベルの強度**で可視光 → UV アップコンバージョンを行う。溶液系は高効率にできるが、デバイスには扱いにくい。溶媒は蒸発し、漏れ、長期利用を制限する。固体は実用的だが、アップコンバージョンに必要な励起状態を、分子同士の近接によって失わせやすい。

だから本当の成果は「太陽光から無料の UV」ではない。固体で生じる具体的な矛盾 — 三重項エネルギーが移動できるほど分子同士を近づけつつ、互いを消光するほどは近づけない — を材料化学で解いたことにある。



論文の設計思想を一枚にまとめた図。アクセプター分子へ、平坦な  $\pi$  電子面から上下へ突き出すアルキル側鎖を付け、結晶中での詰まり方を変える。目的は、三重項エネルギーが分子間を素早く移動できる一方で、消光によって失われにくい固体を作ることだ。まず増感剤が青色可視光を吸収し、三重項エネルギーをアクセプターへ渡す。励起された二つのアクセプターが出会うと、三重項-三重項消滅によってより高エネルギーの UV 光子を作る。この図は分子設計、固体でのトレードオフ、エネルギー移動経路を要約したもので、デバイス性能そのものの直接測定ではない。

## 著者たちは何をしたのか

使った機構は三重項-三重項消滅型フォトン・アップコンバージョン (TTA-UC) である。単純化すると、次のように進む。

1. ドナー分子が可視光を吸収し、寿命の長い三重項励起状態を作る。
2. その三重項エネルギーがアクセプター分子へ移る。
3. 励起されたアクセプター二個が出会う。
4. 二個分のエネルギーが一つの高エネルギー一重項状態へまとまる。
5. アクセプターが、より高エネルギーの光子——ここでは紫外光——を放つ。

液体では3番目を分子拡散が助ける。分子が動き回って衝突できるからだ。固体結晶では分子は動けない。代わりにエネルギーそのものが詰まった材料の中を移動しなければならず、分子の配置がちょうどよくなければならない。

著者らは **dihydroindeno[2,1-a]indene (DHI)** を骨格に持つ分子群を使った。設計の発想は概念的には単純だ。分子の  $\pi$  電子面の上下にアルキル鎖を取り付ける。側鎖はスペーサーやバンパーのように働き、蛍光を担う  $\pi$  系が過度に密接に積み重なるのを防いで消光を抑える。それでも三重項エネルギー移動に必要な軌道の接触は残す。

複数の誘導体を調べ、もっともバランスがよかったのがイソブチル置換体の **iBu-DHI** だった。三重項ドナー **Ir(ppy)<sub>3</sub>** と組み合わせ、スピコートまたはドロップキャストで結晶性固体膜を作り、蛍光、三重項寿命、三重項拡散挙動、アップコンバージョン量子収率、酸素耐性、励起強度のしきい値を測定した。

## 何が分かったのか

**側鎖は励起状態を保護した。**無置換 DHI は希薄溶液では非常によく蛍光するが、結晶にすると悪化し、蛍光量子収率は溶液中の 96% から結晶中では 10% へ落ちる。一方 iBu-DHI の結晶は強い蛍光を保ち、粉碎前で約 69%、粉碎後で 83% と、溶液中に近い値だった。これが仕掛けの第一段階である。固体が一重項励起状態を簡単には壊さなくなった。

**最良の固体膜は、低強度で可視光を UV へアップコンバートした。**スピコートした iBu-DHI/Ir(ppy)<sub>3</sub> 膜では、自己吸収補正後の絶対アップコンバージョン量子収率が **1.9%**、445 nm におけるしきい励起強度が **1.2 mW cm<sup>-2</sup>** と報告された。著者らはこれを、その波長付近の太陽放射照度——445 ± 5 nm で約 **1.4 mW cm<sup>-2</sup>**——と比較している。平たく言えば、非常に強いレーザーだけでなく、通常の太陽光に近い強度域で材料が動作した。

**固体性能は、単にかさ高い置換基を付ければよいのではなく、妥協点から生まれた。**分子同士を離せば消光は減るが、離しすぎると三重項エネルギーの移動が遅くなる。より大きな 2-EtBu-DHI 誘導体は三重項寿命が長かった一方、アップコンバージョンのしきい特性は悪かった。iBu-DHI 結晶は、有用な中間点に近いらしい。消光を抑えるのに十分な立体保護がありながら、三重項移動と三重項-三重項消滅に必要な分子接触も残っている。

単に「溶液系を凍らせた」材料ではなかった。論文は、結晶内の詰まり方、ドナーの均一分布、高密度な分子集合がすべて重要だと論じる。SEM-EDX マッピングでは、問題となる膜でマイクロメートルスケールのドナー偏析は見つからず、ドナーのリン光消光から効率的な三重項エネルギー移動も示された。補足資料には、結晶内の分子対について、三重項エネルギー移動時間と消滅時間の理論推定もある。

酸素存在下でも発光した。酸素は通常、三重項状態を消光するため TTA-UC の大きな厄介者だ。それでも高密度な固体膜は、初期の酸素消費を伴う立ち上がり期間の後、空气中でアップコンバージョンを示した。実用上重要だが、長期間の屋外デバイス安定性を証明したわけではない。

## これはおそらく何を意味するのか

堅実な読み方は、きれいな材料設計の成果だということだ。著者らは、有機  $\pi$  電子系の結晶内パッキングを調整し、通常は溶液のほうがはるかに容易な可視  $\rightarrow$  UV アップコンバージョンを固体で成立させる方法を見つけた。アップコンバージョンそのものを発見したわけではない。この固体系が、高い蛍光量子収率、長い三重項寿命、速い三重項拡散、酸素耐性、太陽放射照度に近い条件での動作という、通常は互いに両立しにくい性質を同時に持ったことが進展である。

より広い教訓は、この分子だけに限らない。固体 TTA-UC の問いは「どう励起状態を守るか」と「どう三重項エネルギーを動かすか」を別々に考えることではない。両方が同時に成立するよう分子間隔を設計することだ。iBu-DHI はその設計原理の具体例である。

誘惑されやすい過剰解釈も分かりやすい。可視太陽光から UV が出るなら、太陽光化学は解決した——という読み方だ。しかし論文はそこまで示していない。制御された膜と定められた光学条件で、特定の光物理機構と性能値を示した材料研究である。

## この研究からは言えないこと

- 太陽エネルギーデバイスではない。完成デバイスも、屋外モジュールも、システム全体のエネルギー収支も、この膜を使って有用な化学反応を駆動した実証もない。
- 「太陽光から無料の UV」ではない。固体でのアップコンバージョン量子収率は **1.9%** で、ほぼ完全な変換とは遠い。この材料群では意味のある値だが、入力光子の大半は UV 光子にならない。
- 実使用での広範な耐久性を示したわけではない。著者らは制御条件下で光安定性と酸素耐性を調べているが、熱、湿度、酸素、機械的応力、広帯域太陽光にさらされて数カ月・数年動くこととは別である。
- 特定のドナー-アクセプター材料系に依存する。最良結果は iBu-DHI と Ir(ppy)<sub>3</sub> の組み合わせであり、近縁な分子誘導体でもはるかに悪くなる例がある。したがって「アルキル鎖を付ければ何でもうまくいく」という一般レシピではない。
- すべての実用上の懸念が消えたわけではない。Ir(ppy)<sub>3</sub> はイリジウムを含む。補足実験では金属を含まない TADF ドナーによる増感も示しているが、見出しになる最良の固体性能は依然としてイリジウムドナー系である。
- 可視  $\rightarrow$  UV アップコンバージョンが、光触媒、ソーラー燃料、センシング、滅菌に経済的・技術

的に役立つことを証明したわけではない。それらは応用候補であって、この論文の結果ではない。

## 証拠をどう評価するか

中心的な光物理の主張については証拠は強い。吸収・発光測定、蛍光量子収率、三重項寿命、励起強度しきい値、アップコンバージョンスペクトル、絶対量子収率、結晶構造、ドナー分布確認、補足の元データ、提案されたパッキング機構を支える理論計算が互いに整合している。*Nature Communications* の論文はオープンアクセスで、補足情報とソースデータも公開されている。

主な注意点は適用範囲だ。もっとも強く言える結論は「実験室で評価された材料」についてである。「太陽光レベルの青色光で 1.9% の可視 → UV アップコンバージョンを示す固体膜」から「有用な太陽光技術」までは大きな距離がある。実用化には統合、安定性、有用な出力、スケーラブルな製造、そして対象化学反応を動かすのにアップコンバートした UV 光子を使う合理的な理由が必要だ。

表現上の微妙な点もある。「太陽光レベル」とは、実験で使った励起波長付近の強度を指すのであって、現実のデバイスで太陽スペクトル全体を高効率に利用できるという意味ではない。この区別は重要である。

## なぜ重要なのか

フォトン・アップコンバージョンは、雑に説明するのが簡単だ。「弱い光子を二つ入れると、強い光子が一つ出る」。しかし本当に難しいのはスローガンではない。実在する分子を、エネルギーが十分長く保存され、十分遠くまで移動し、熱として逃げる前に結合できるよう配置することだ。

この論文は、その難しさに具体的な材料の形を与えている。側鎖は飾りではない。分子アーキテクチャそのものだ。 $\pi$  系を上下から守って消光を抑えつつ、三重項エネルギーが進める道を残す。そこが教える価値のある部分で、「より良い材料」という曖昧な言葉を、読者がイメージできる物理的なトレードオフへ変えている。

将来、可視 → UV アップコンバージョンデバイスが実用的になるとしても、この論文から先には多くの段階が必要だ。しかし同時に、まさにこの種の分子制御も必要になるだろう。これはデバイスの突破口ではない。固体が通常なら邪魔する光物理的な芸当を、固体で成立させる方法の強い実証である。

## 要点

研究者らは、 $\pi$  電子面の上下をアルキル側鎖で遮蔽する DHI 系有機分子を設計した。最良例では、iBu-DHI と三重項ドナー Ir(ppy)<sub>3</sub> を混ぜた結晶性固体膜が、三重項-三重項消滅によって青色可視光を紫外発光へ変換した。絶対アップコンバージョン量子収率は **1.9%**、しきい励起強度は **1.2 mW**

$\text{cm}^{-2}$  で、445 nm の励起波長付近における太陽放射照度に近い。真の進展は分子パッキングにある。励起状態の消光を抑えるのに十分な間隔を保ちつつ、三重項エネルギー移動と拡散に必要な接触も残した。固体での可視  $\rightarrow$  UV フォトン・アップコンバージョンとして強い材料実証だが、太陽エネルギーデバイスでも「無料の UV」でも、実用技術の証明でもない。

## 冷静に見ると

**論文が示したこと：**特定の iBu-DHI/Ir(ppy)<sub>3</sub> 結晶性固体膜が、445 nm で絶対量子収率 1.9%、しきい強度  $1.2 \text{ mW cm}^{-2}$  の可視  $\rightarrow$  UV TTA フォトン・アップコンバージョンを示し、高い蛍光収率、長い三重項寿命、速い三重項拡散、一定の酸素耐性も保持した。設計原理は、 $\pi$  系を立体的に保護しながら有用な分子接触を維持することにある。

**もっともらしいが未証明のこと：**同じパッキング原理から、さらに高性能な固体アップコンバージョン材料を作れること。金属を含まない増感剤でも同等性能へ最適化できること。将来、こうした膜が光触媒や太陽光化学へ役立つこと。

**論文が示していないこと：**動作する完成デバイス。有用なソーラー燃料・光触媒出力。屋外耐久性。太陽スペクトル全体に対する高効率。経済性。任意の発色団に使える一般レシピ。

**主な限界：**実験室の膜、特定材料系、中程度の絶対量子収率、最良例ではイリジウムドナーを使用、制御された励起波長、デバイスレベルの実証なし。「太陽光レベル」は励起帯域付近の局所強度を指し、太陽光技術全体への主張ではない。

**一般読者はどの程度確信してよいか？**テストした系で、この分子設計が固体可視  $\rightarrow$  UV TTA-UC を改善し、科学的に意味のある成果であることには高い確信を持ってよい。実用的な太陽光技術へ近いという確信は低い。妥当な姿勢は、巧妙で本物の材料進展として評価し、応用の物語は大部分がこれからだと理解することだ。

---

## 出典

Nature Communications 17, 5134 (2026)

<https://doi.org/10.1038/s41467-026-73898-0>

Supplementary Information

[https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-026-73898-0/MediaObjects/41467\\_2026\\_73898\\_MOESM1\\_ESM.pdf](https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-026-73898-0/MediaObjects/41467_2026_73898_MOESM1_ESM.pdf)

Source Data

[https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-026-73898-0/MediaObjects/41467\\_2026\\_73898\\_MOESM3\\_ESM.xlsx](https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-026-73898-0/MediaObjects/41467_2026_73898_MOESM3_ESM.xlsx)