

2025年6月13日

第1回 ナイスステップな研究者2024講演会

**再生可能なグリーン水素製造用
粉末光触媒の開発**

久富隆史

信州大学 アクア・リジェネレーション機構 卓越教授
岡山大学 異分野基礎科学研究所 教授(特任)

自己紹介



久富隆史 (HISATOMI, Takashi)

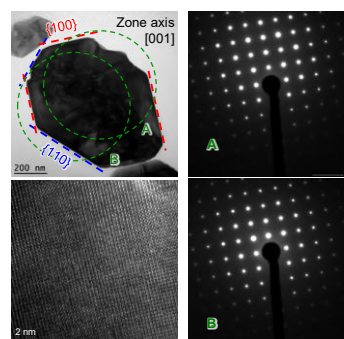
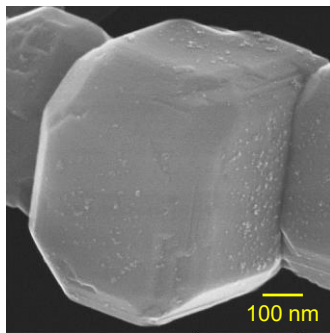
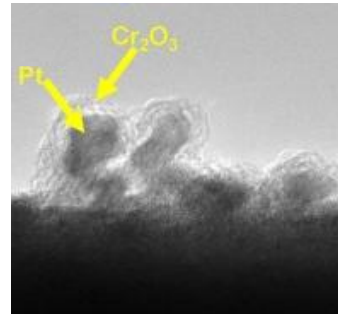
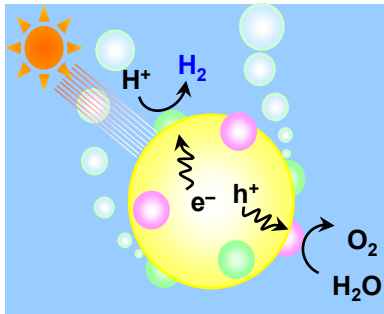
1982年8月3日生まれ(42歳)

趣味: 鳥の観察、ランニング、家族との時間

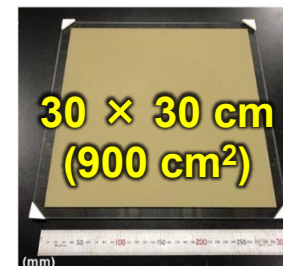
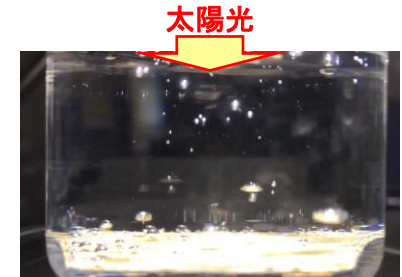
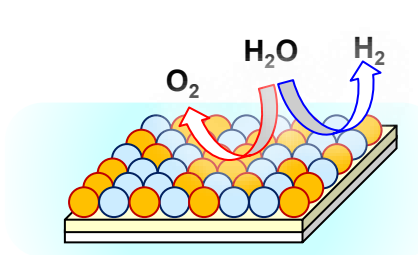
20年以上水分解用半導体材料を研究

飽きたことはない(辛いことはある)

可視光応答性光触媒材料



大規模水素製造システム



光触媒との出会い

学部1年生(2001年)

東京大学教養学部(駒場キャンパス)

夏学期

力学、熱力学、数学、...

ひたすら微積分、行列

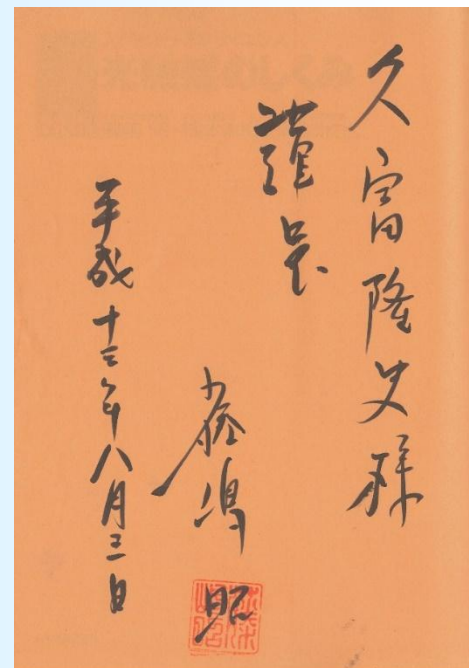
夏休み

全学自由研究ゼミナール

工学部応用化学科(本郷キャンパス)

環境浄化用光触媒(酸化チタン)

を用いたメチレンブルーの分解



学科・研究室配属

学部3年生(2003年)

東京大学工学部化学システム工学科

研究室配属説明会(12月)

新任着任教授

テーマ:エネルギー変換型光触媒、水分解反応



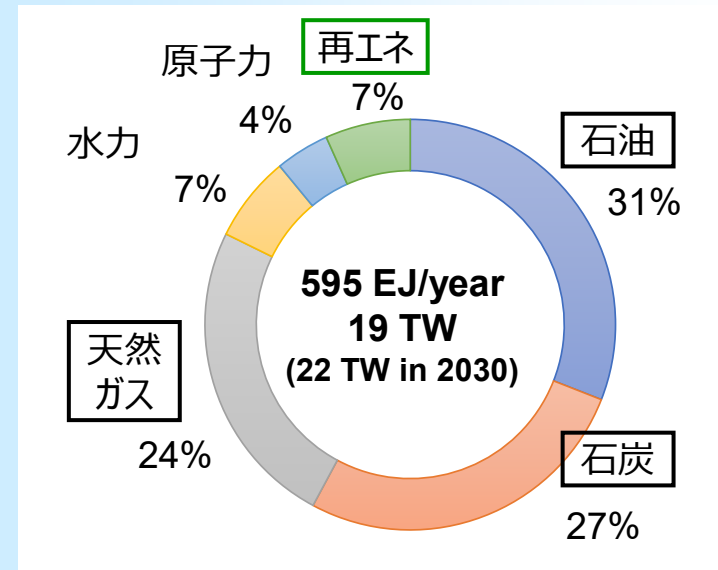
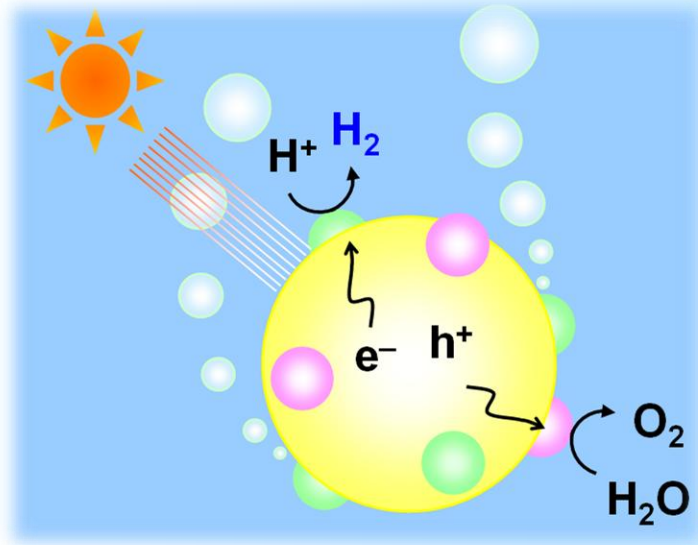
学部4年生(2004年4月～)

電話1台のみ、机・椅子無し
居室、実験設備の組み立て

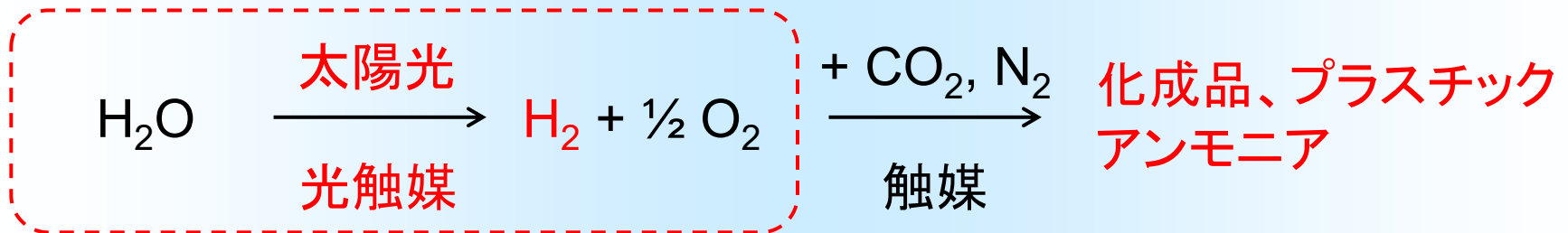
研究者人生は更地から始まった

堂免一成教授

粉末光触媒による水由来グリーン水素製造



BP Statistical Review (2022)

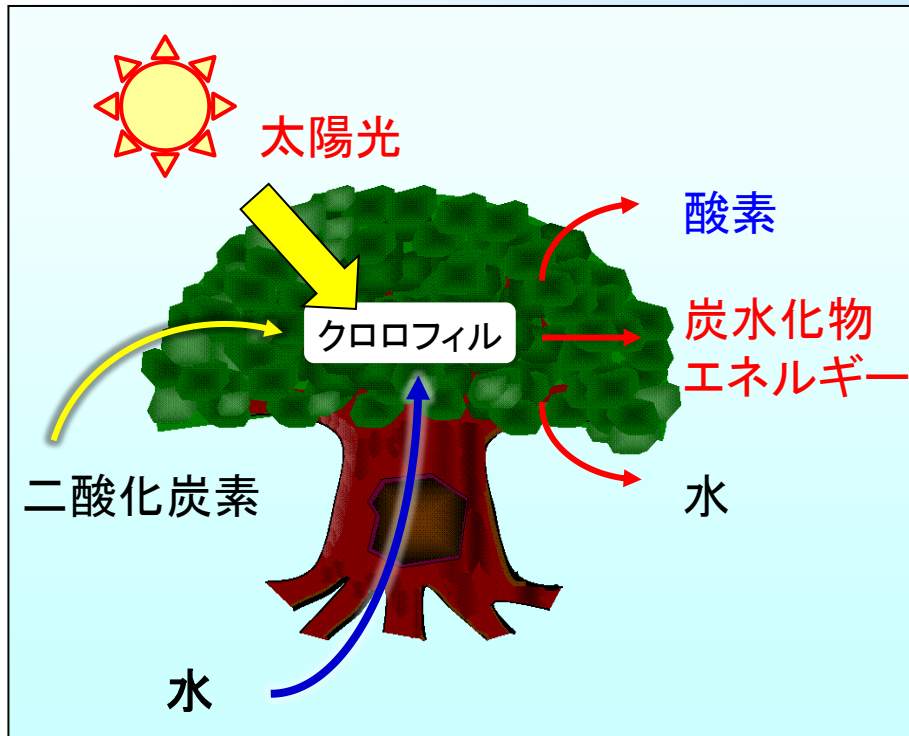


人工光合成の
基幹プロセス

再生可能な
資源・燃料

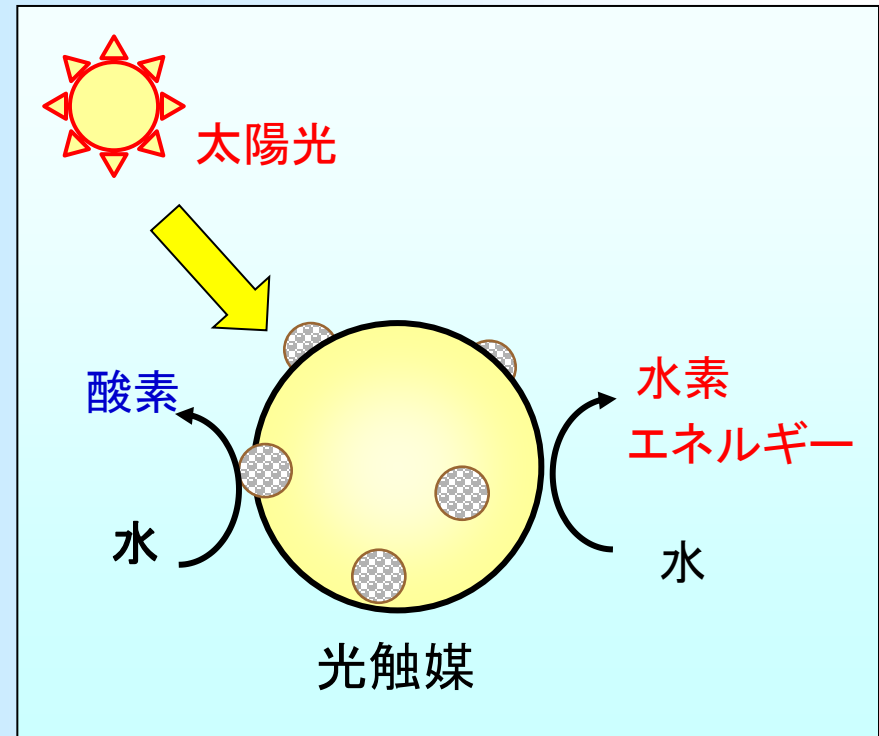
光合成と光触媒水分解の比較

植物の光合成



安定な二酸化炭素から
炭水化物などを生成

光触媒を用いた太陽光水分解 (人工光合成の例)



安定な水から水素を生成
化石資源を消費しない

水素利用の例

アンモニアの工業的製造

ハーバー・ボッシュ法(1908年～)



→ 肥料

空気(窒素)からパン(作物)を作る

天然ガスの水蒸気改質

空気の深冷分離

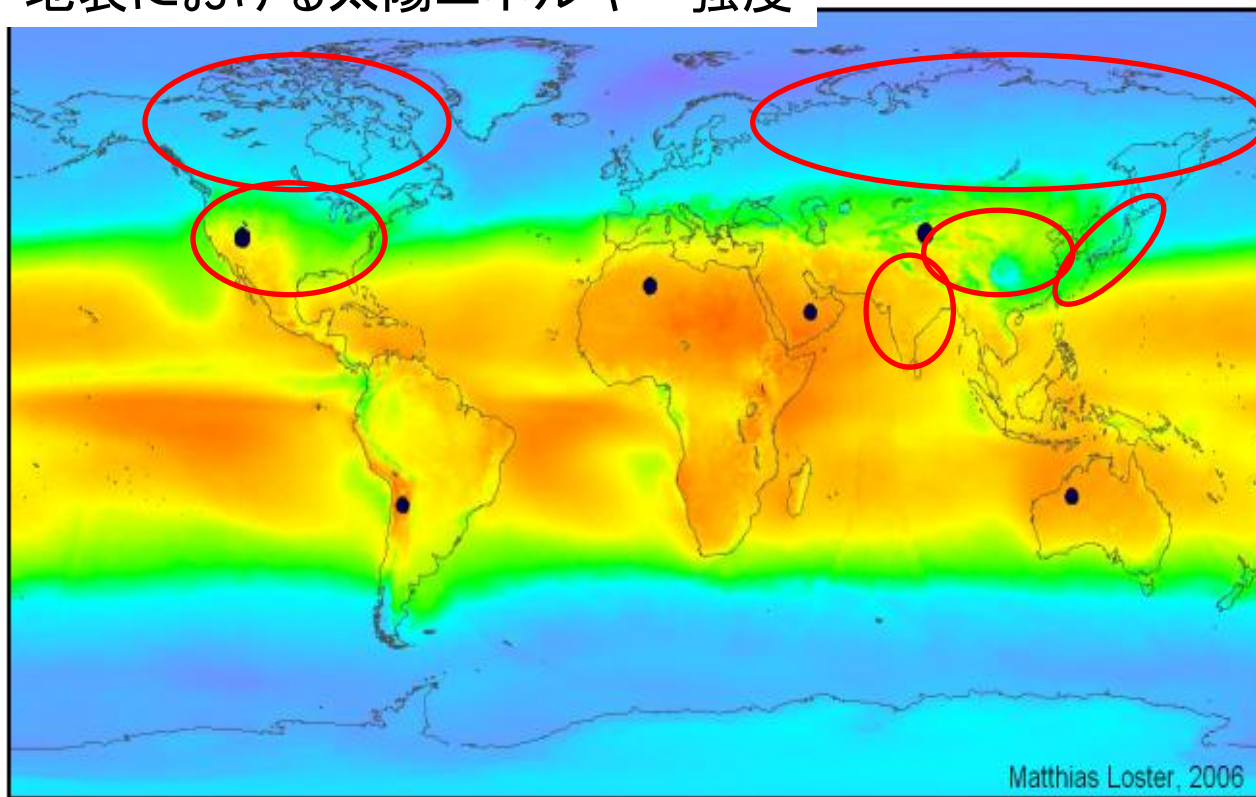
世界の一次エネルギー消費の1~2%

Justin et al. *Appl. Catal. A: Gen.* **2020**, 594, 117419.



太陽エネルギー分布

地表における太陽エネルギー強度



0 50 100 150 200 250 300 350 W/m²

$\Sigma \bullet = 18 \text{ TWe}$

国別1次エネルギー消費(2023年)

国	割合
中国	27.6% ↑
アメリカ	15.2%
インド	6.3% ↑
ロシア	5.0%
日本	2.8%
カナダ	2.3%

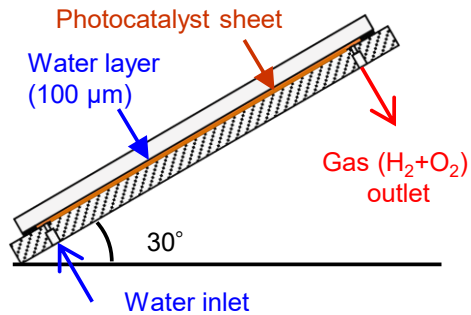
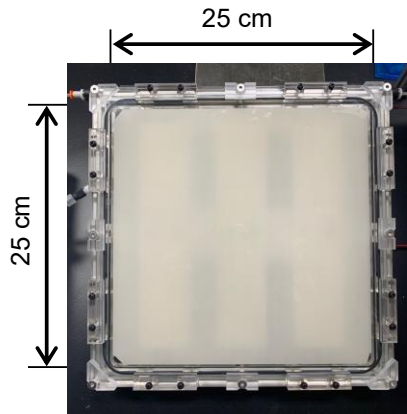
EI統計2024をもとに作成

貯蔵・輸送可能な
燃料への変換が
必要

エネルギー消費地域 ≠ 太陽エネルギー利用地域

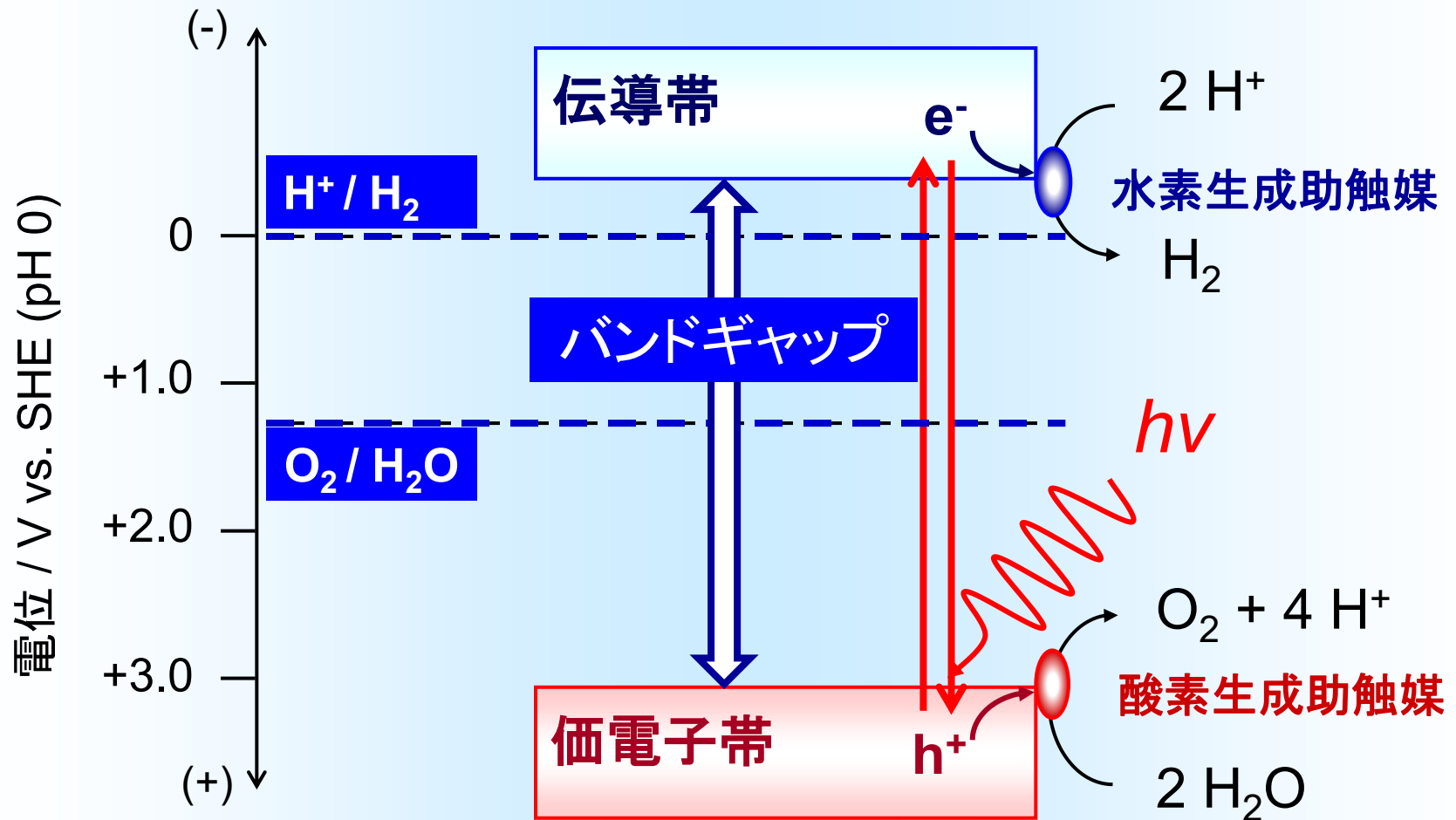
http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/ (Matthias Loster氏ウェブサイト)

水分解光触媒パネルによる水素製造 (100 m²スケール)

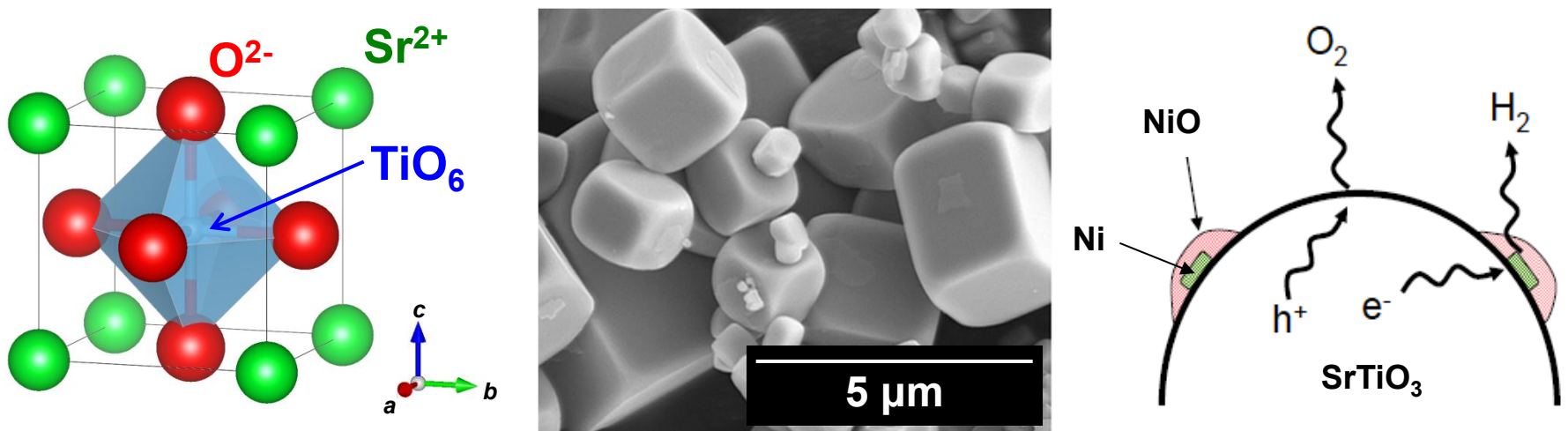


Nishiyama *et al.* *Nature* **2021**, 598, 304.

半導体光触媒による水分解反応のエネルギー図



チタン酸ストロンチウム (SrTiO_3) 光触媒



- ペロブスカイト型構造 (ABO_3)
- 高結晶微粒子を調製可能
- 紫外光照射下で水分解反応に活性 (1980~)

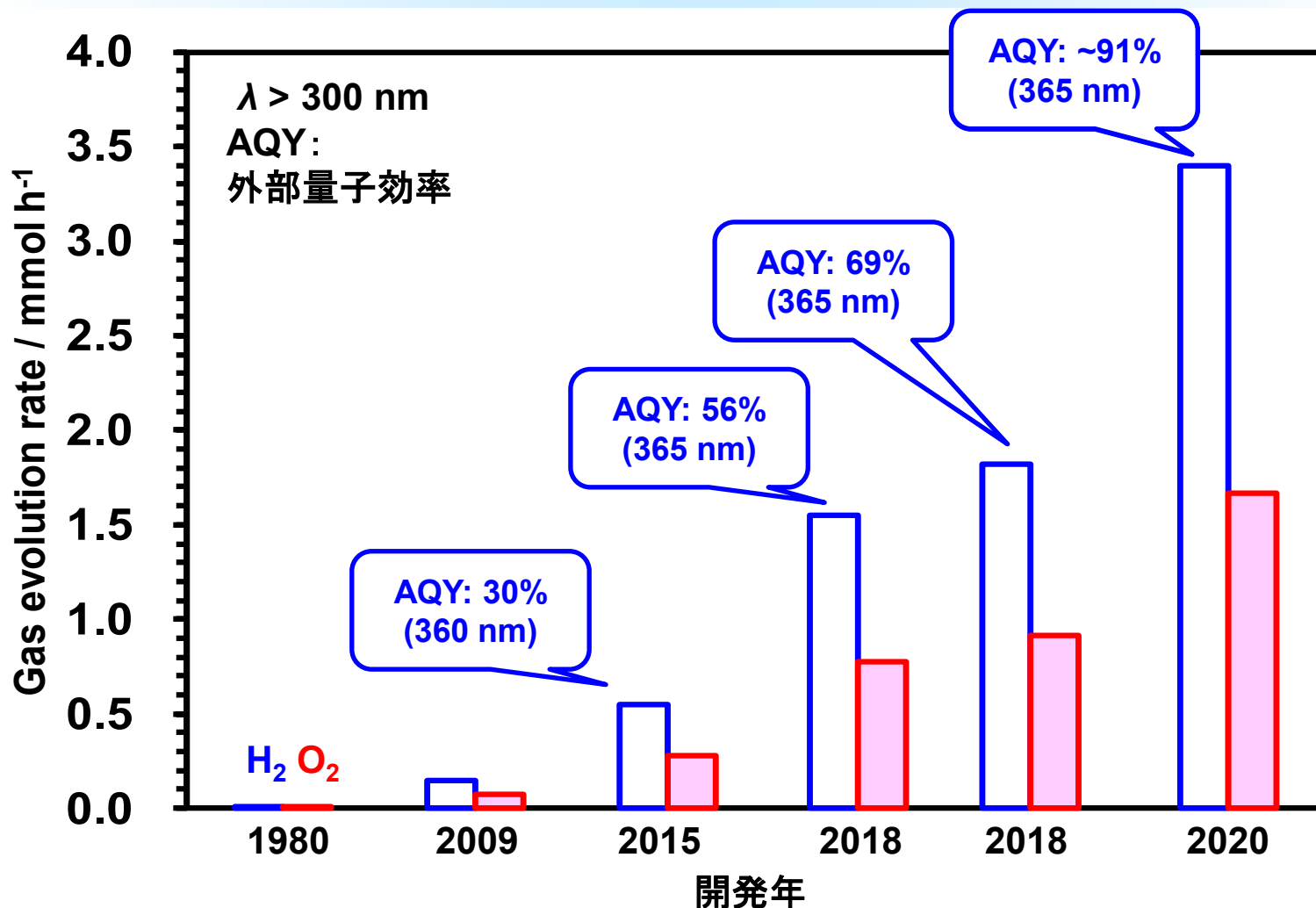
Domen *et al.* *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1980**, 543.

Ham *et al.* *J. Mater. Chem. A* **2016**, 4, 3027.

Takata *et al.* *J. Phys. Chem. C* **2009**, 133, 19386.

Takata *et al.* *Nature* **2020**, 581, 411.

水分解用SrTiO₃光触媒の開発の経過

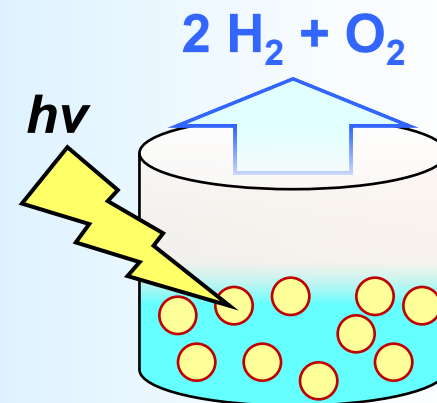


Takata et al. Nature 2020, 581, 411.

大面積展開に適したパネル型光触媒の開発

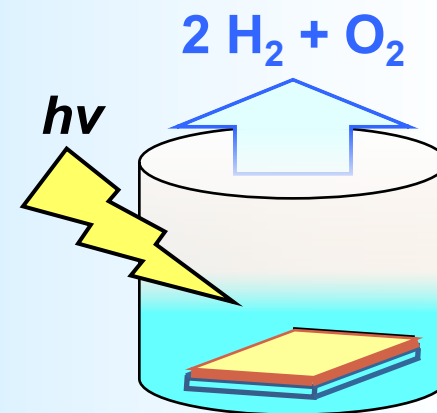
光触媒粉末懸濁液

- ・ 大量の懸濁液を保持可能な反応器の設計に課題
- ・ 光触媒の交換が困難



パネル型光触媒

- ・ 光触媒の交換が容易
- ・ モジュール化により大面積展開可能



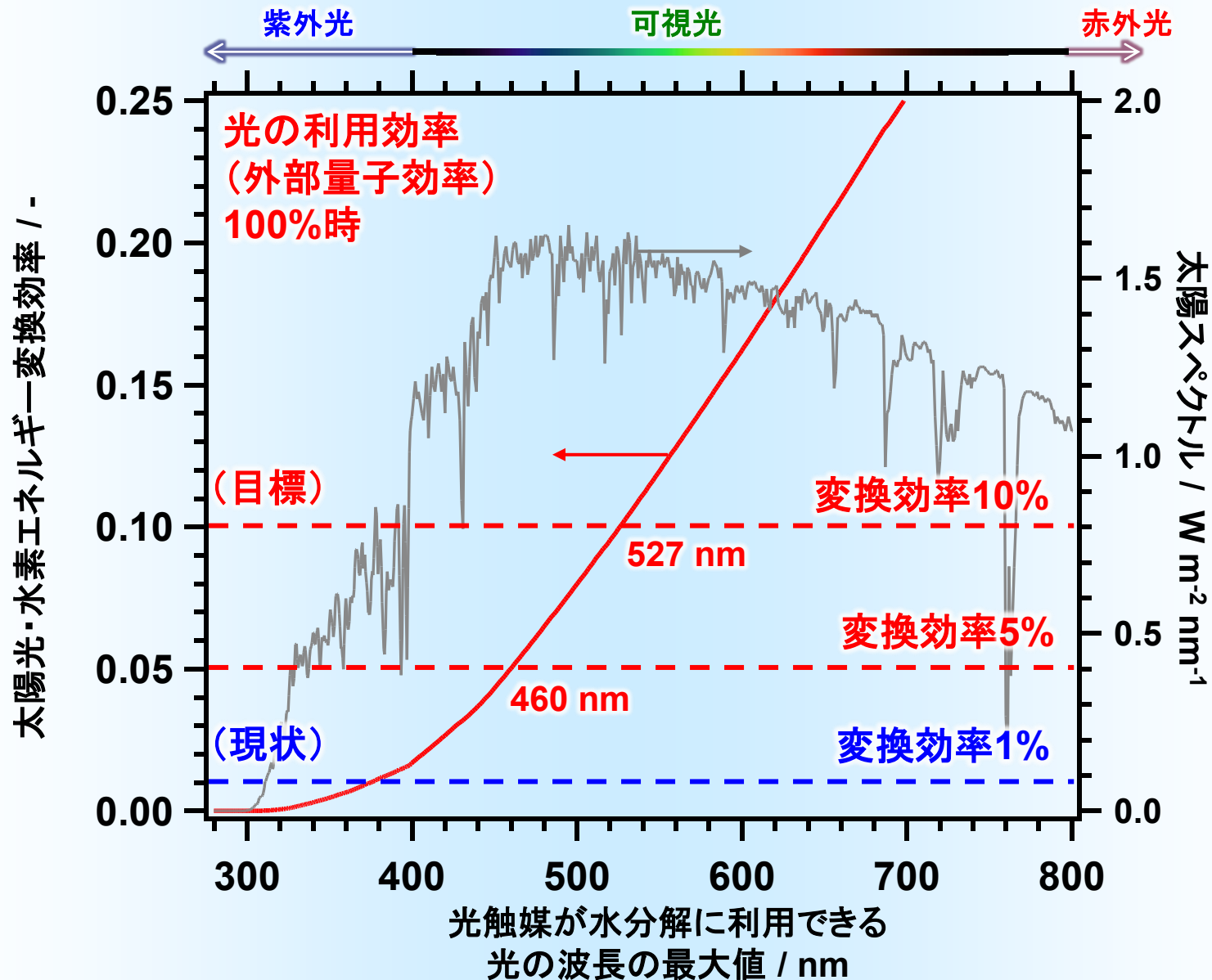
SrTiO₃光触媒シートの大面積展開



資源エネルギー庁ウェブサイト:

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/jinkoukougousei2021.html>

太陽光・水素エネルギー変換効率と 光触媒が利用できる光の波長の関係



様々な水分解用光触媒



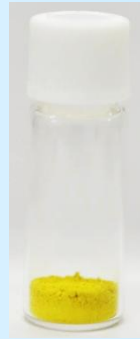
SrTiO_3



$\text{SrTiO}_3\text{:La,Rh}$



BiVO_4



TaON



GaN:ZnO



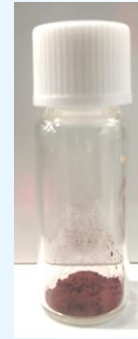
Ta_3N_5



LaTiO_2N



BaTaO_2N



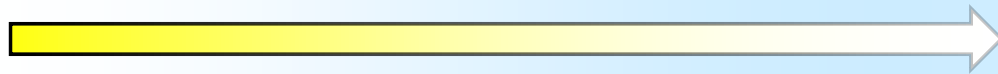
$\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_5\text{S}_2$



紫外光利用

可視光利用
($\sim 500 \text{ nm}$)

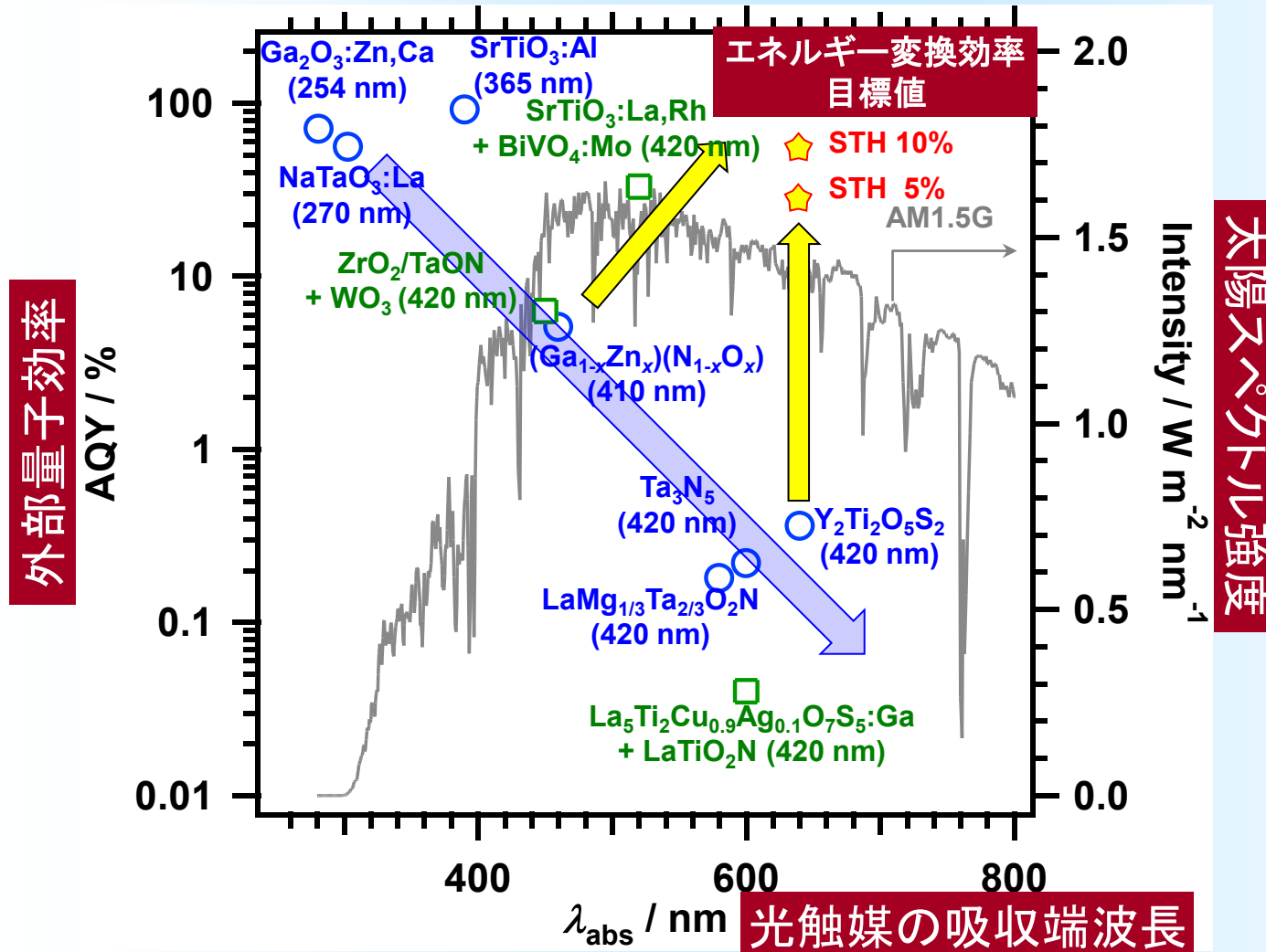
可視光利用
($\sim 600, 700 \text{ nm}$)



モデル系

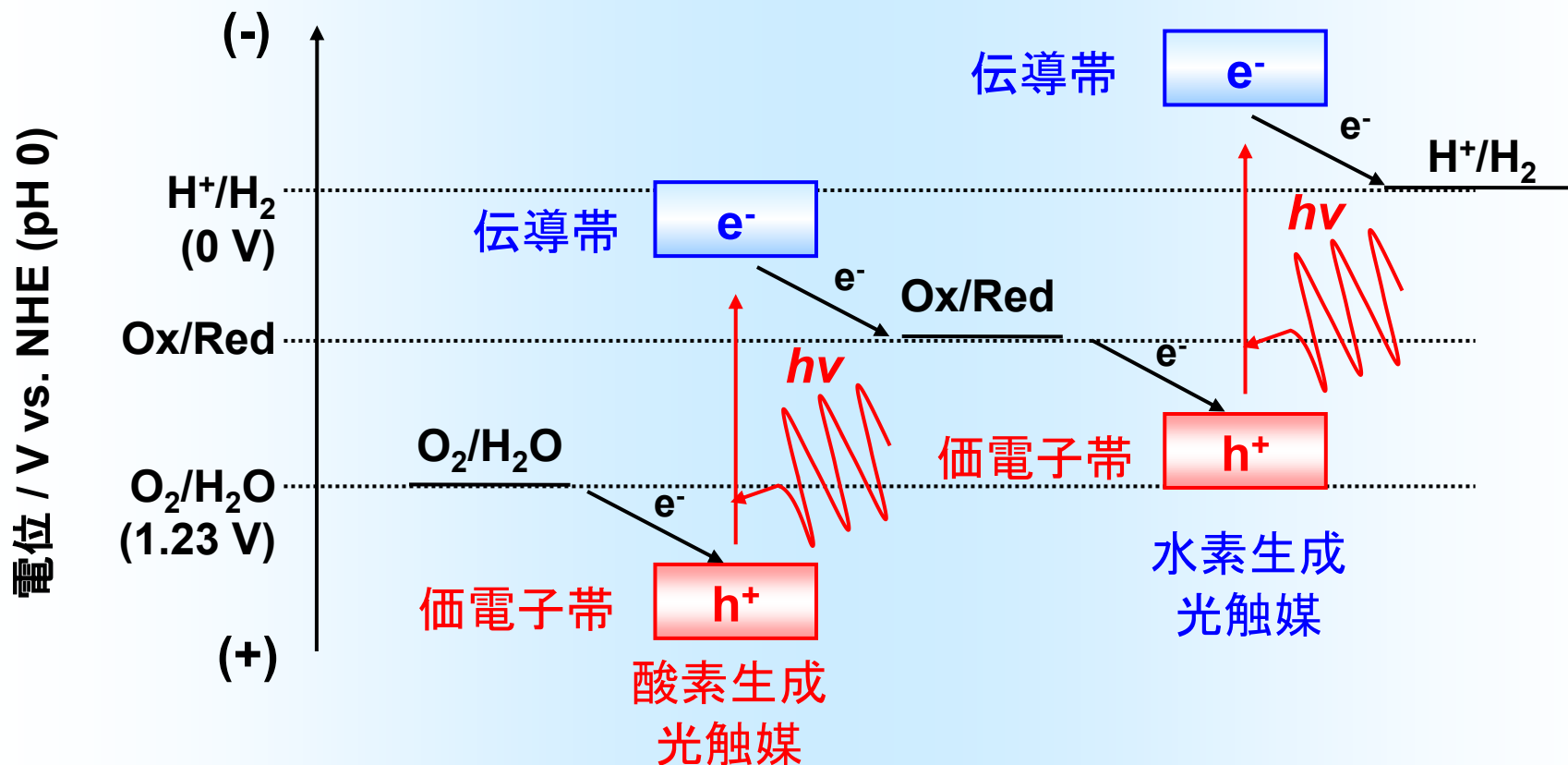
実用性

水分解光触媒の効率



高効率化
が必要

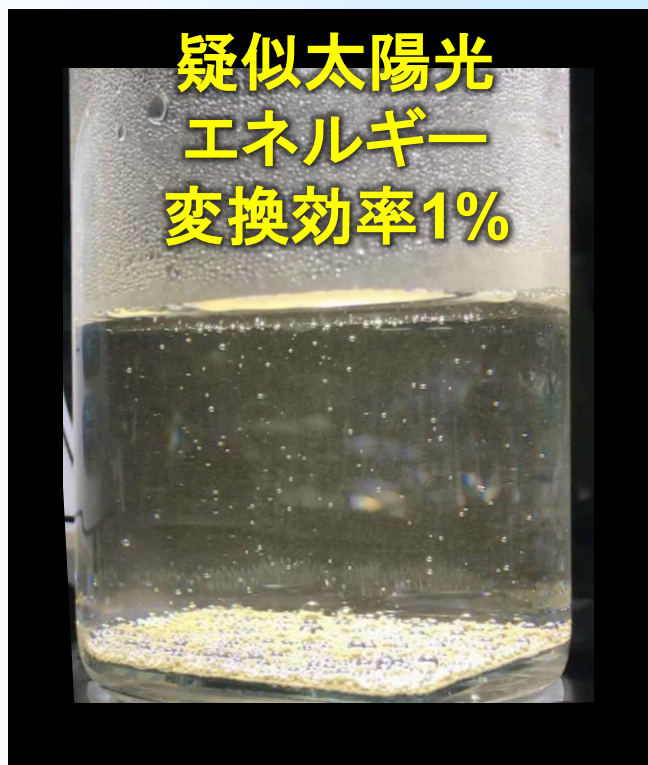
二段階励起型 (Zスキーム型) 水分解反応



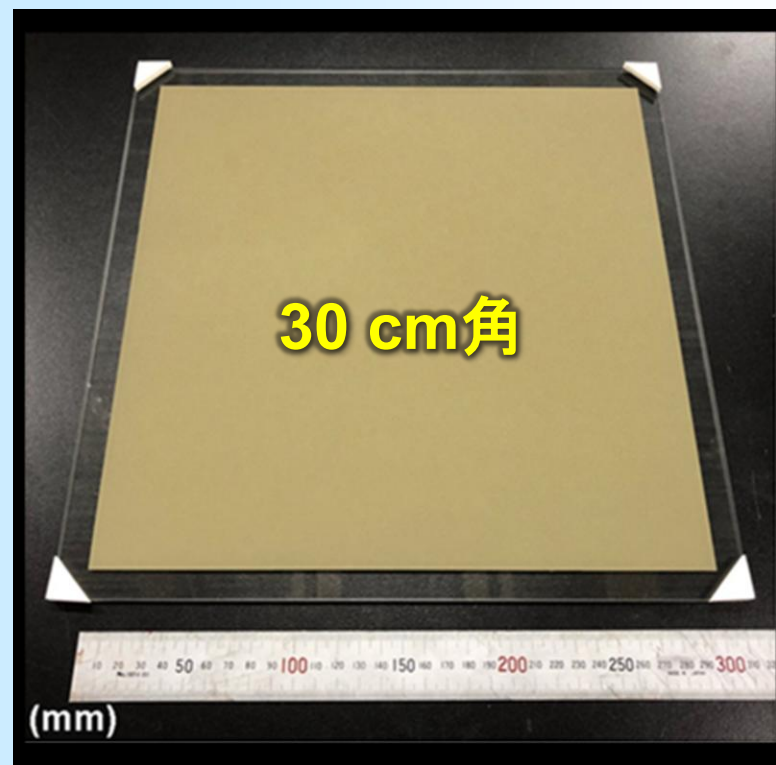
長波長光の利用に好適

可視光応答性Zスキーム型水分分解光触媒シート

$\text{SrTiO}_3\text{:La,Rh}$ + 導電材 + $\text{BiVO}_4\text{:Mo}$
(500 nm程度までの可視光を利用)



粒子転写法(高効率)
導電材:炭素



スクリーン印刷法(高面積)
導電材:ITO

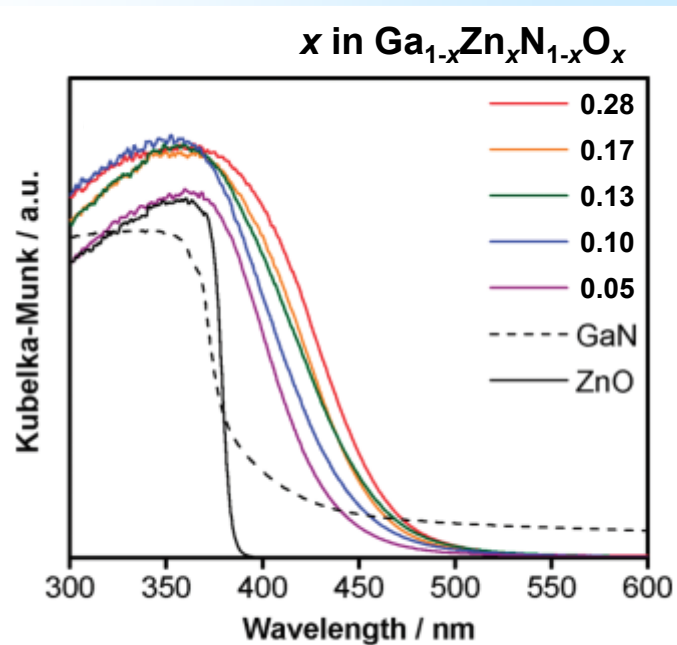
様々な水分分解用光触媒



GaN-ZnO固溶体 (GaN:ZnO)

従来技術とその課題

- ZnO濃度が高くなるにつれてバンドギャップが狭窄
- 可視光照射下で水の完全分解反応に活性
外部量子効率5.1% (410 nm)

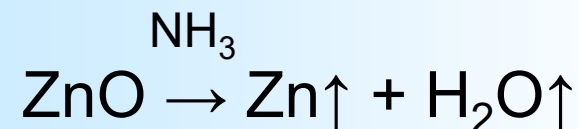


Maeda et al. Chem. Mater. 2010, 22, 612.

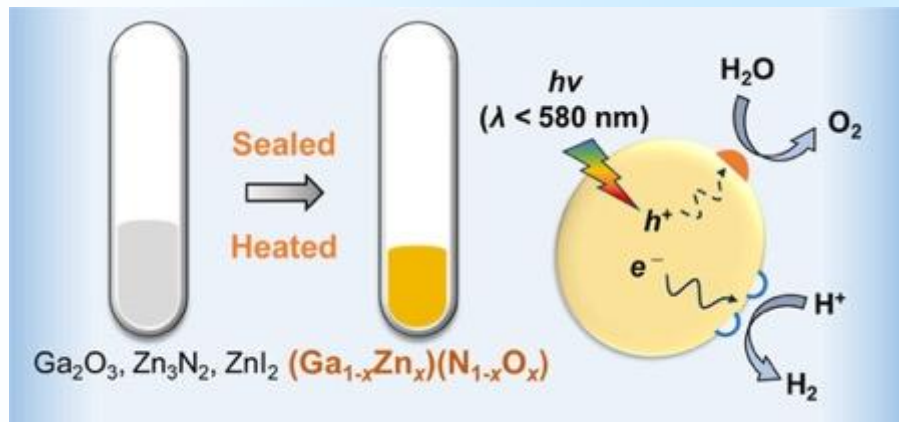
従来の合成法 (NH₃窒化)

- 高結晶性 (高量子効率)
- 高ZnO濃度 (可視光吸収)

両立困難



長波長光応答性GaN:ZnOの開発



Iwasa et al. Chem. Mater. 2024, 36, 2917.

窒化剤

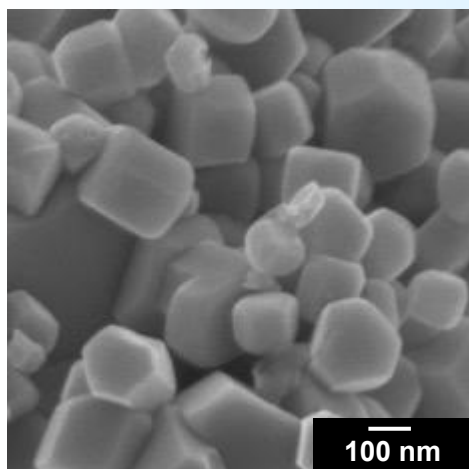
Zn_3N_2 (固体)

反応器

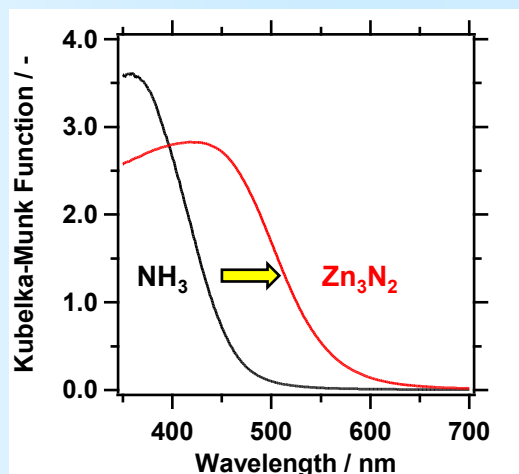
真空封管(閉鎖系)

**ZnOの蒸発の防止
グラムスケール合成可能**

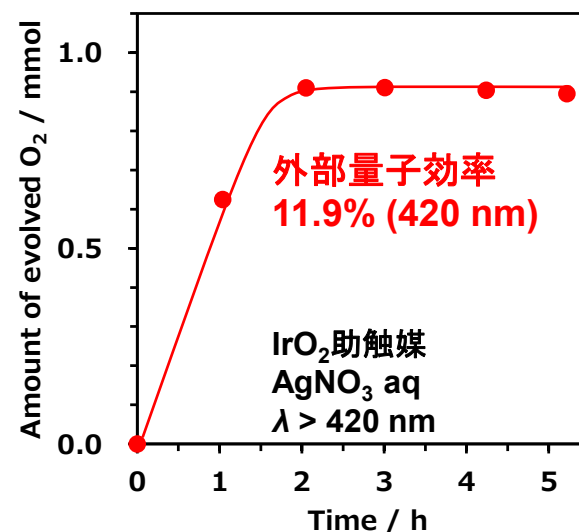
六角柱状粒子



吸収端 : 600 nm



酸素生成反応

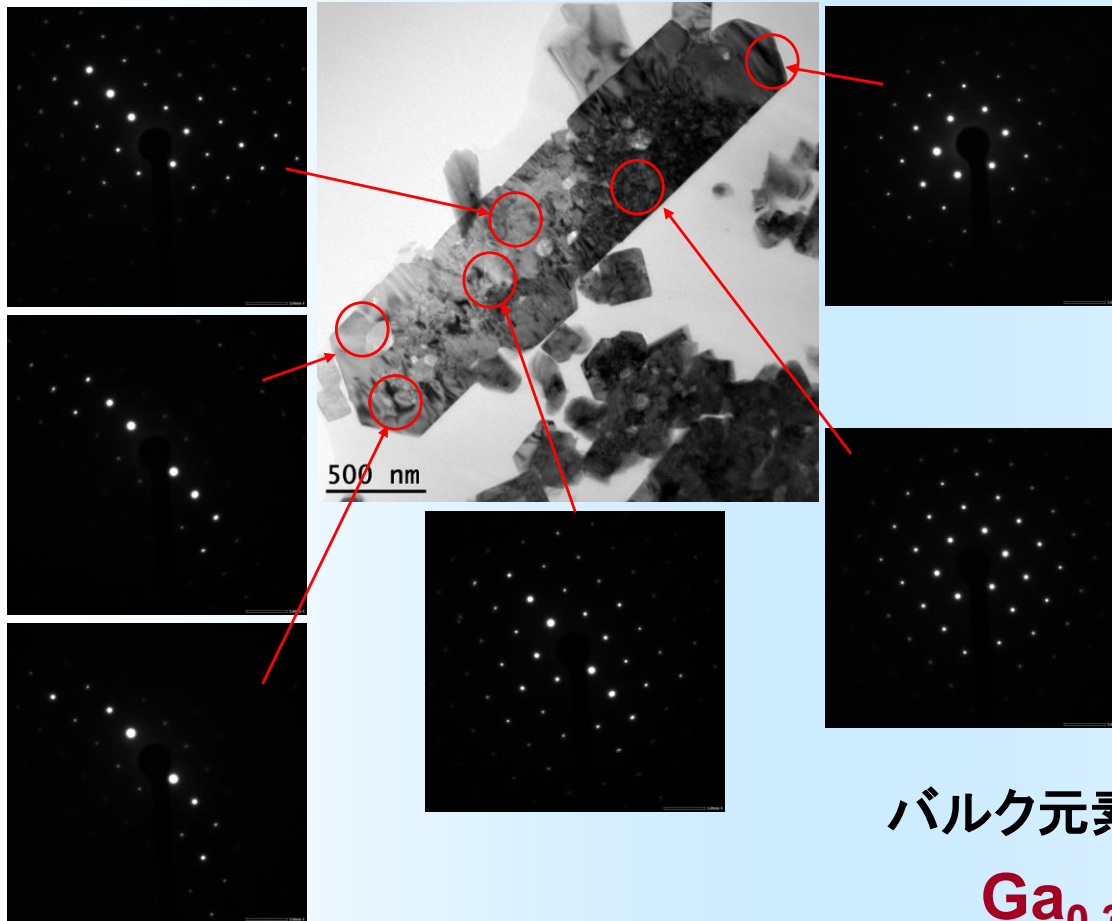


Iwasa et al. J. Mater. Chem. A 2024, 12, 20247.

Nandy et al. ACS Energy Lett. 2024, 9, 4708.

開発したGaN:ZnOの透過型電子顕微鏡像

出発原料: $\delta\text{-Ga}_2\text{O}_3 + 1.1 \text{Zn}_3\text{N}_2 + 2 \text{ZnI}_2 + \text{Zn}$



バルク元素分析結果

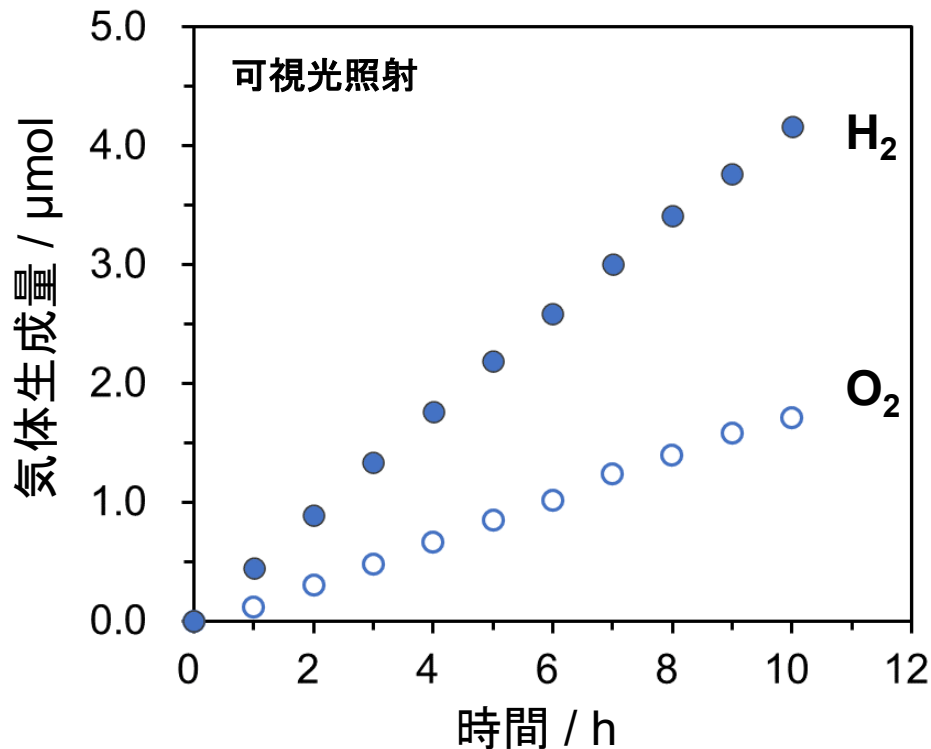


Iwasa et al. *J. Mater. Chem. A* **2024**, 12, 20247.

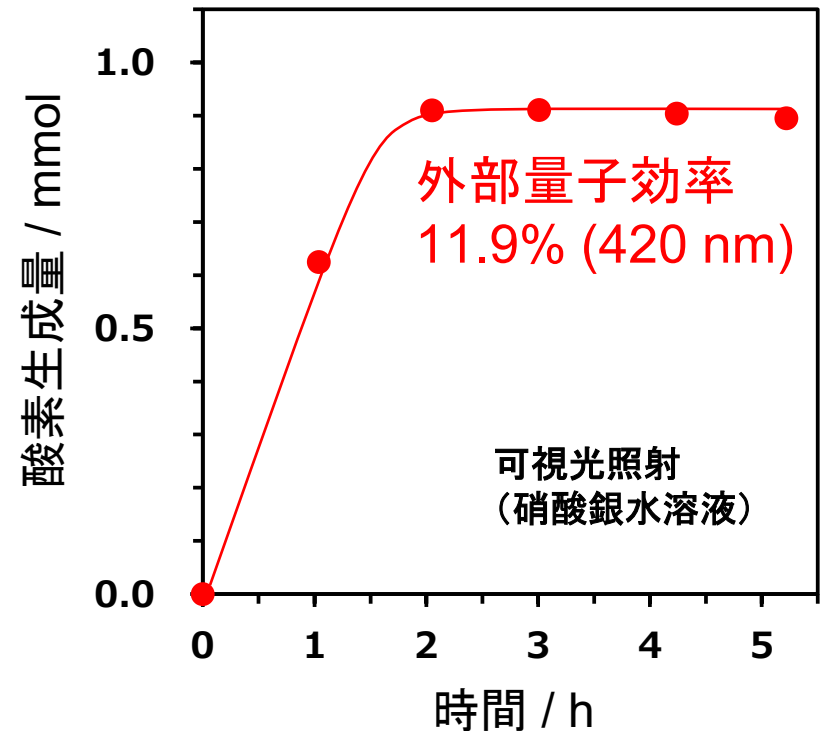
(化学量論的組成)

長波長光応答性GaN:ZnOの光触媒活性

可視光水分解に活性

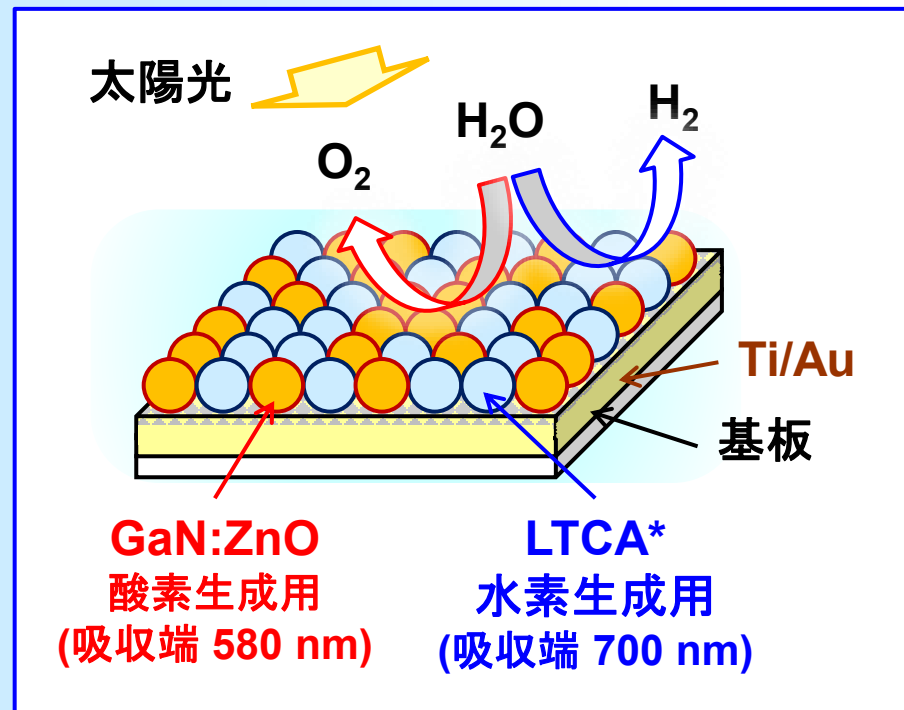
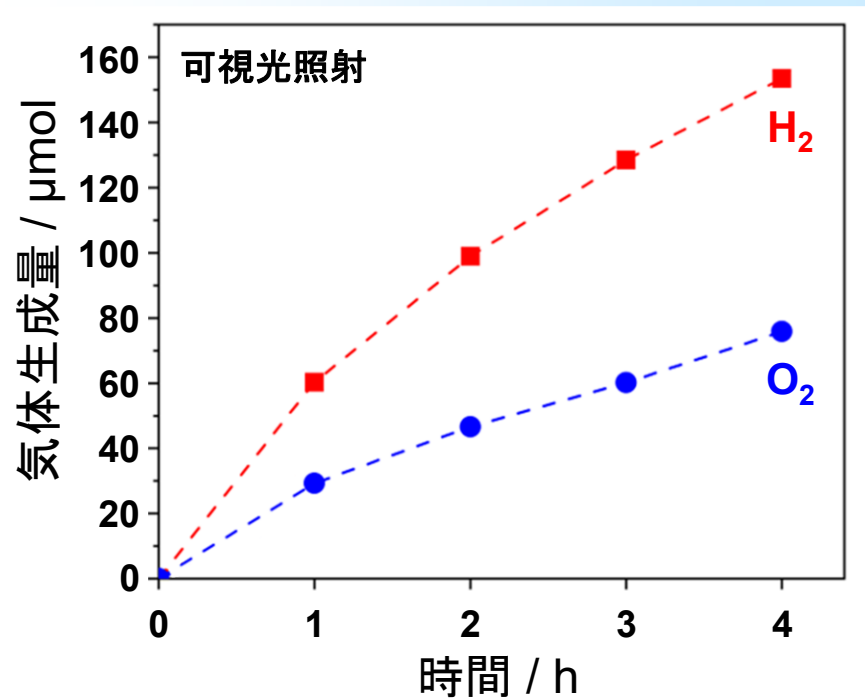


優れた酸素生成活性



長波長光応答性非酸化物光触媒による 二段階励起可視光水分解

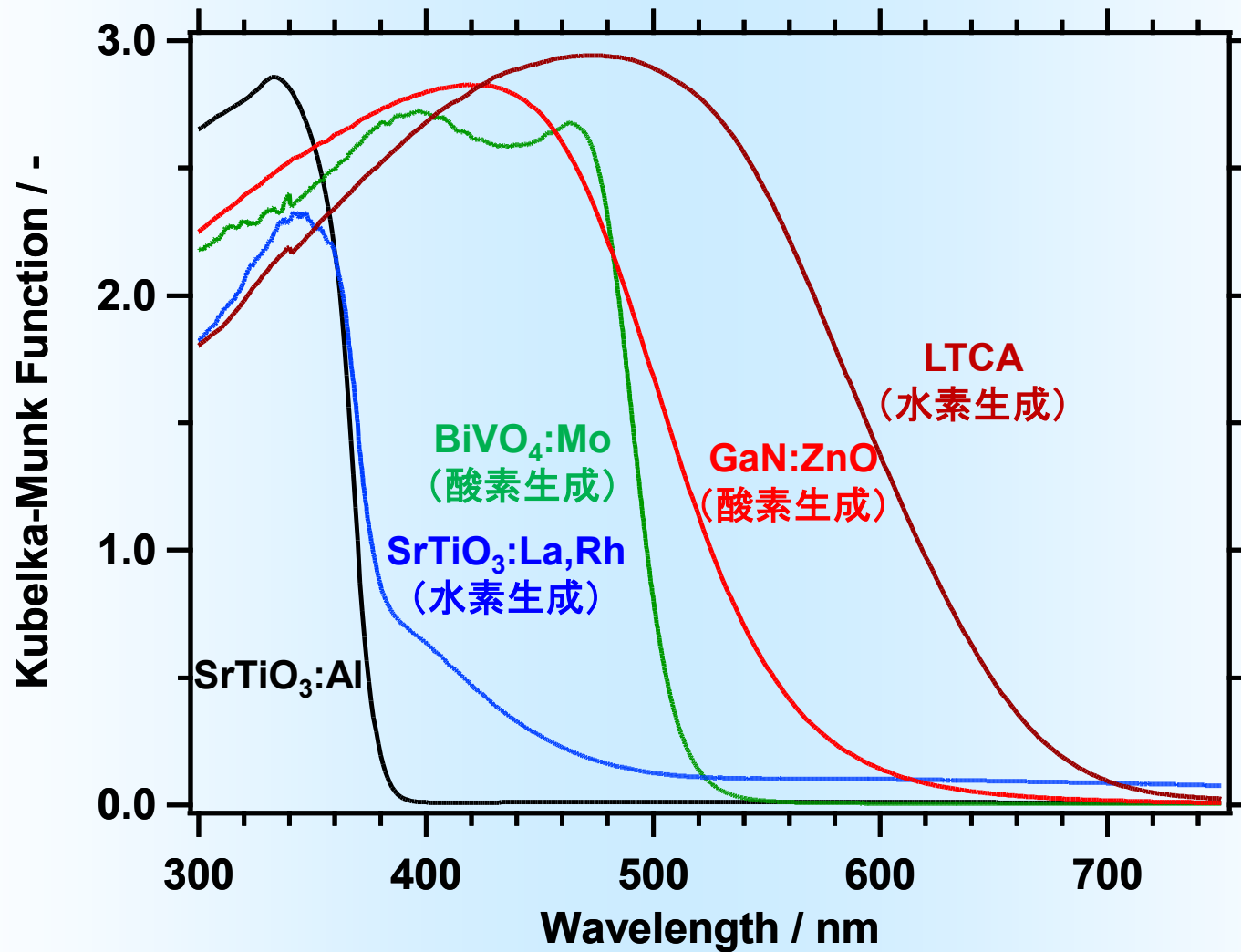
太陽エネルギー変換効率0.3%



*La₅Ti₂Cu_{0.9}Ag_{0.1}O₇S₅

Nandy et al. ACS Energy Lett. 2024, 9, 4708.

光触媒が水分解反応に利用できる 光の波長の長波長化



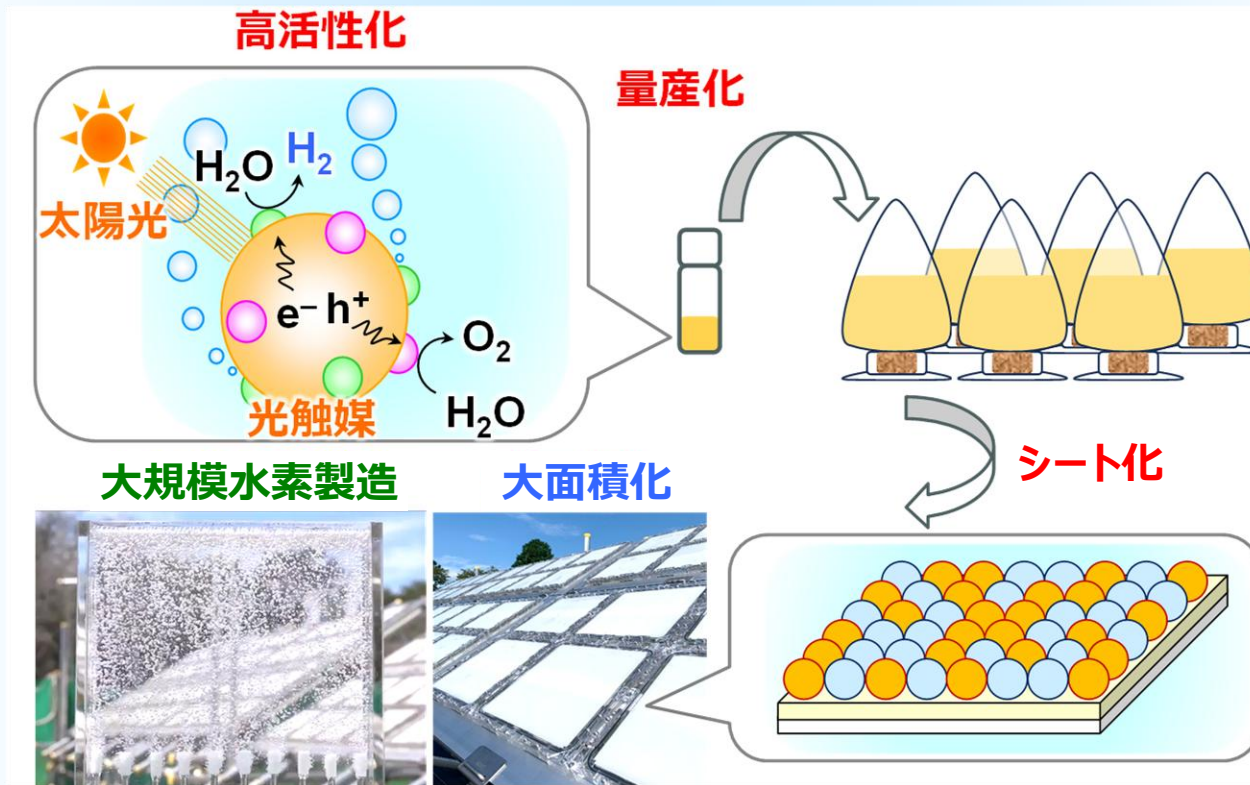
信州大学の『水素X実証タウン』構想

文部科学省 地域中核・特色ある研究大学強化促進事業(J-PEAKS) 令和5年12月に信州大学が採択



信州大学ウェブサイト (<https://www.shinshu-u.ac.jp/zukan/report/c-fronts.html>)

グリーン水素製造用粉末光触媒 今後の研究開発



長波長光応答性粉末光触媒の
高効率化・量産化・シート化技術の開発

信州大学『水素X実証タウン構想』を推進

講演のまとめ

この10年間で光触媒材料と反応システム開発が大きく進展

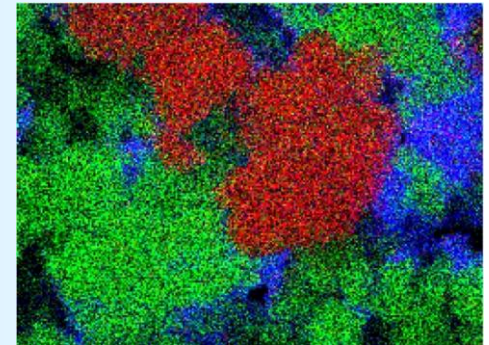
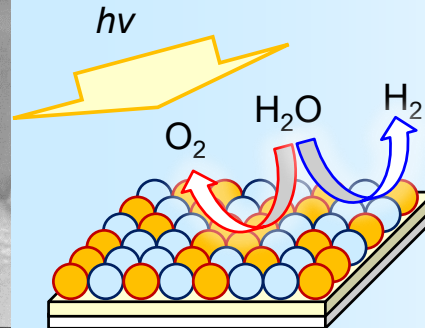
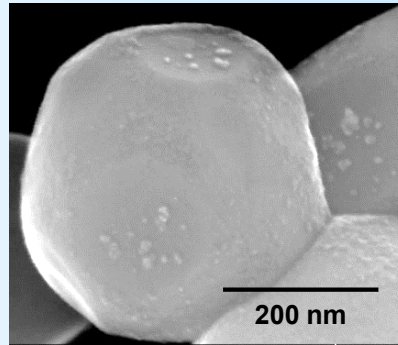
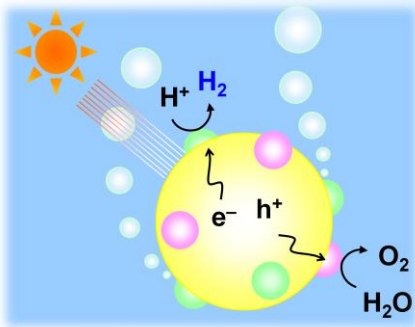
- ✓ 高効率化(エネルギー変換効率~1%)
- ✓ 大面積化(~100 m²)
- ✓ 長寿命化(~1年相当)

大規模実証には多くの課題

- 光触媒の高活性化・量産化・大面積化
- 反応システムの低コスト化
- ガス分離プロセスの高効率化
- 安全性の検証
- 法体系・社会受容性の整備

光触媒の高効率化研究の方向性

高効率水分解光触媒系



Takata et al. *Nature* **2020**, 581, 411; Wang et al. *J. Catal.* **2015**, 328, 308.

不均一性を巧みに利用

水中・光照射下(非平衡)での現象

- ✓ 電荷分離・電荷移動
- ✓ 酸化還元反応
- ✓ 物質輸送

暗中・真空中(大気中)での解析？

実反応環境下

- どこで(空間分解)
- いつ(時間分解)
- 何が/どのように(オペランド)

材料・反応・時空間解析 → 高効率光触媒の創出

謝辞

堂免 一成 特別栄誉教授(信州大・東京大)

西山 洋 教授(東京大)

高田 剛 博士(信州大)

山田 太郎 博士(東京大)

嶺岸 耕 准教授(東京大)

王 謙 准教授(名古屋大)

工藤 昭彦 教授(東京理科大)

徳留 弘優 博士(TOTO株式会社)

奥中 さゆり 准教授(東京都市大)

馬 貴軍 助教(上海科技大)

滕 鎮遠 博士(香港城市大)

Swarnava Nandy 博士(信州大)

岩佐 捺伽 博士(信州大)

阿部 慎太郎 氏(信州大)

三大寺 広花 氏(信州大)

中林 麻美子 博士(東京大)



JSPS 独立行政法人
日本学術振興会
Japan Society for the Promotion of Science

