

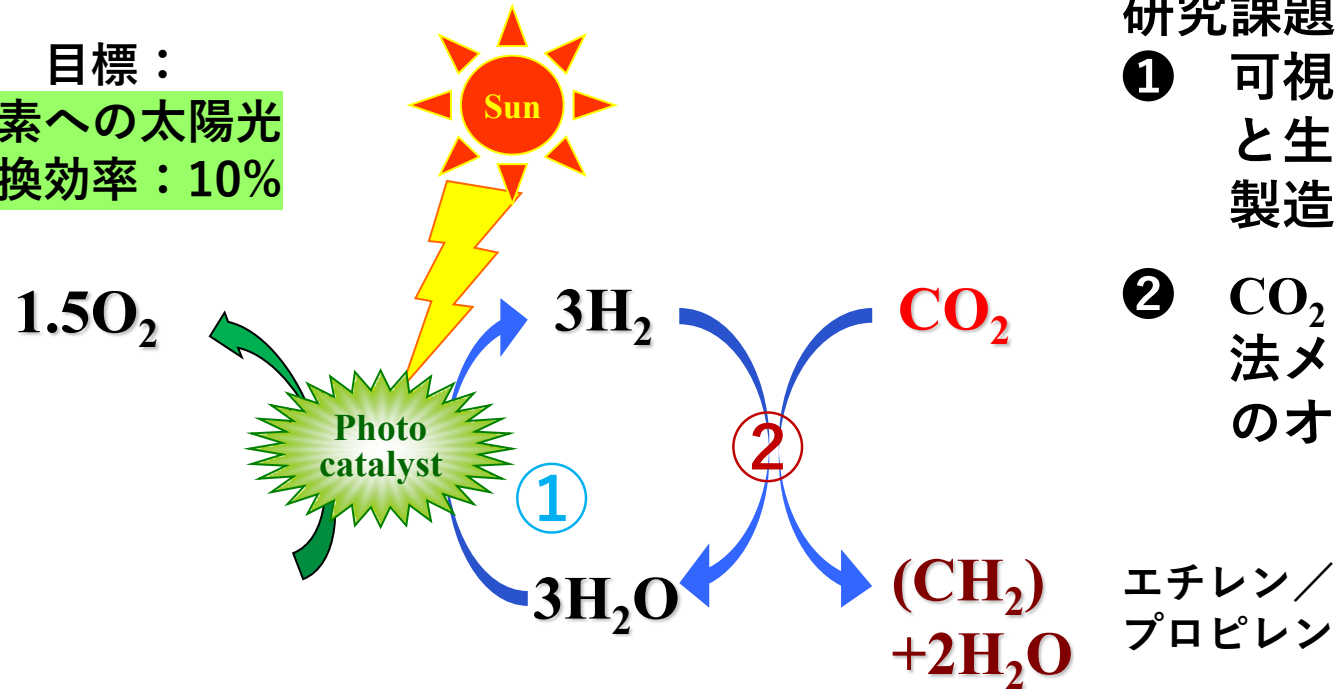
2026/09/17 13:00-13:20
NEDO-GI基金プロジェクト
成果報告会

グリーン水素(人工光合成等)からの化学原料製造技術の 開発・実証 & 今後の展望

人工光合成プロジェクト

ARPCChem

目標：
水素への太陽光
変換効率：10%



研究課題

- ① 可視光応答光半導体触媒による水の全分解と生成ガスからの選択的安全な膜分離水素製造プロセス
- ② CO_2 と水素からの平衡制約を破る反応分離法メタノール製造プロセス及びメタノールのオンデマンド型オレフィン製造プロセス

人工光合成化学プロセス Artificial Photo Synthetic Chemical Process(ARPCChem)

1st stage: 有望な光触媒や CO_2 固定化プロセスのベンチ規模実証・提案

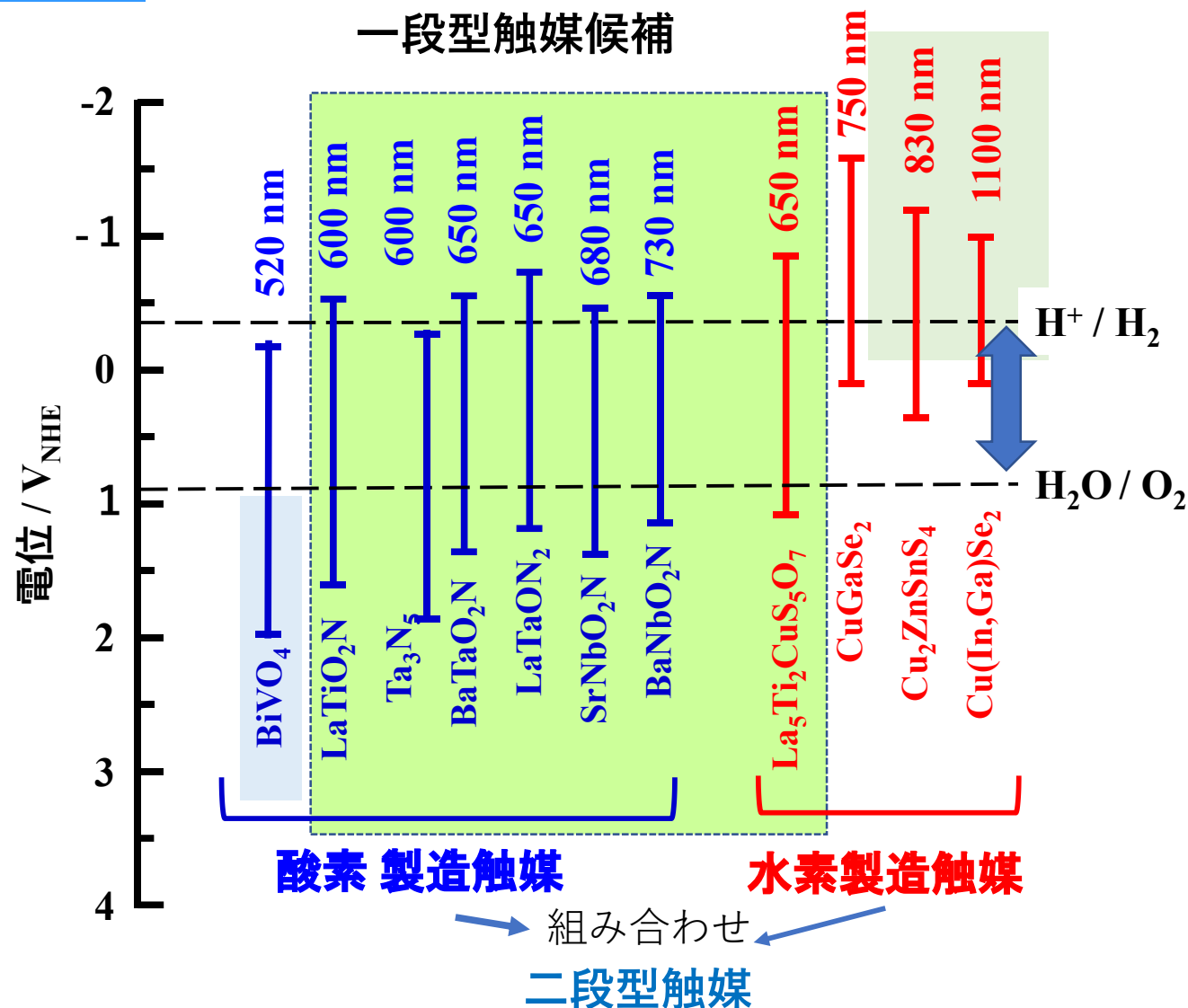
NEDO: (2012-2021)

2nd stage: 商業化可能な人工光合成プロセスの大型実証

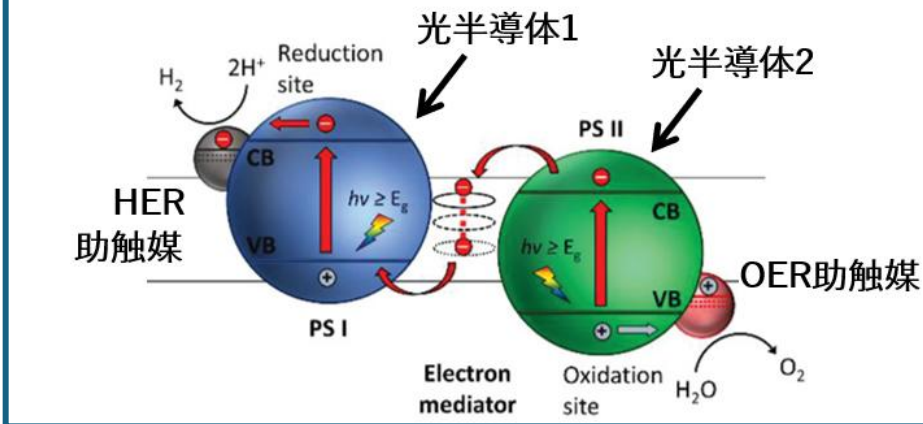
グリーンイノベーション 基金(2022-2025)

GI基金開始前までの達成状況

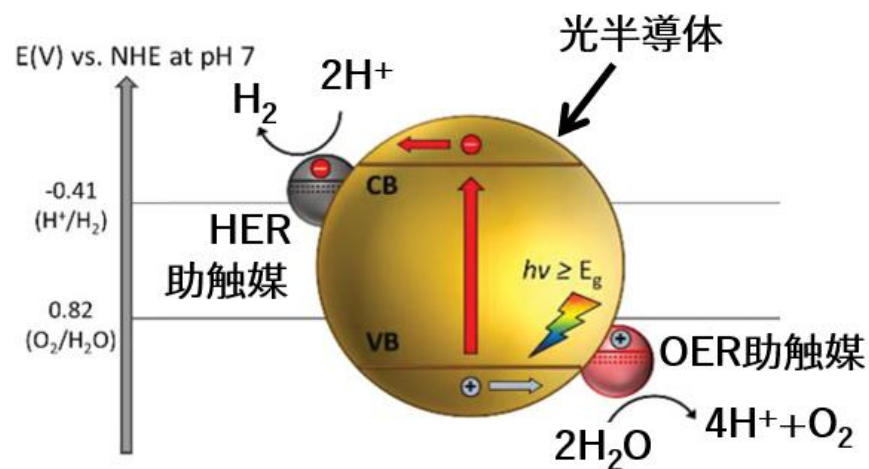
一段型触媒候補



2粒子全分解系 (Z-scheme型)

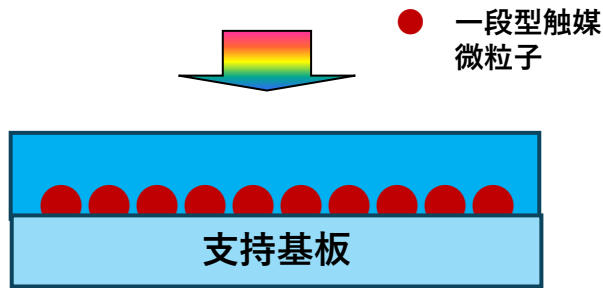


1粒子全分解系 (一段型)



プロジェクトの成果：一段型触媒での大きな発見

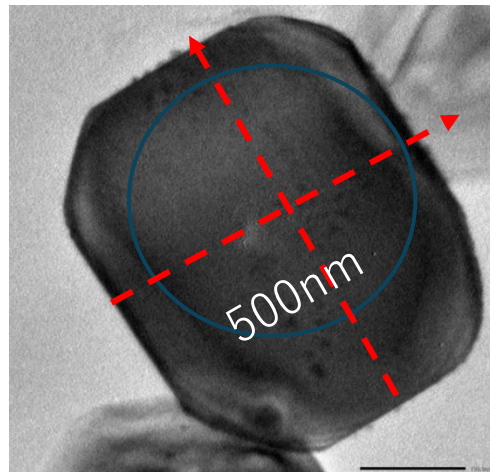
ARPCChem



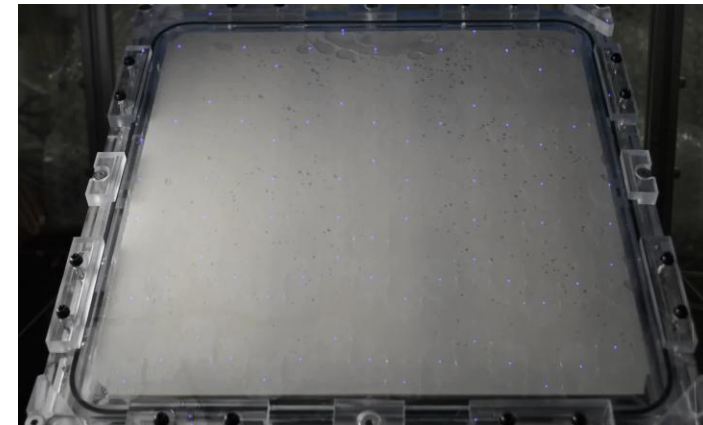
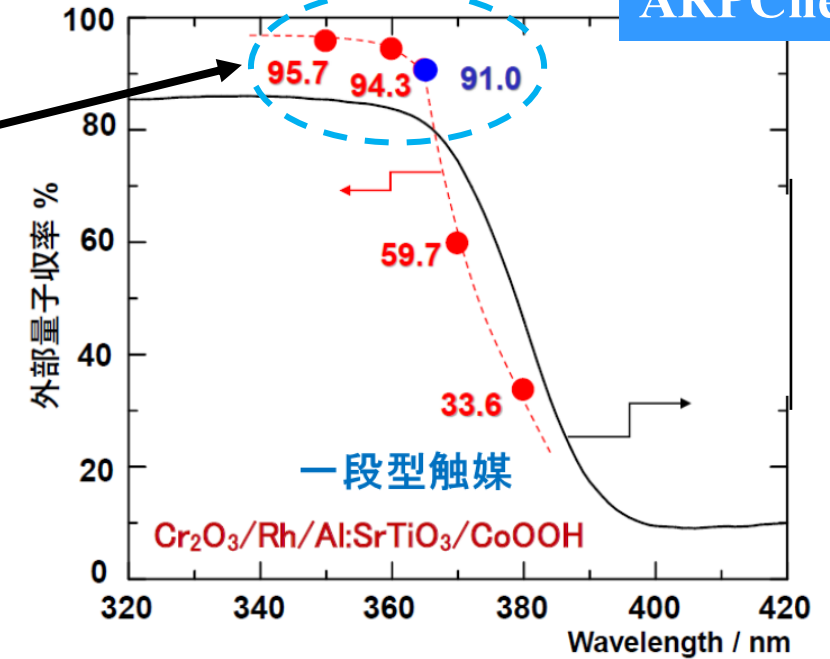
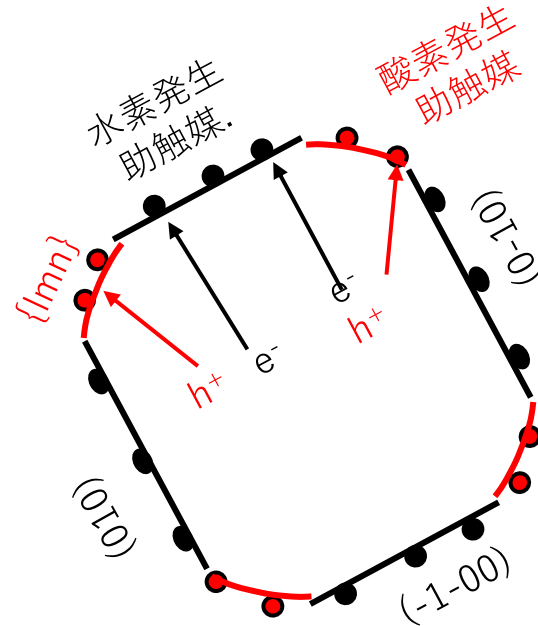
一段型触媒

Al-ドーブ^oSrTiO₃

太陽光に含まれる紫外線のほぼ
全量が水素製造に使われる！
＝太陽光で水を分解する触媒
の作り方の大きなヒント



- 高品質の光半導体微粒子
- 水素と酸素が分かれて発生
(水にもどらない)

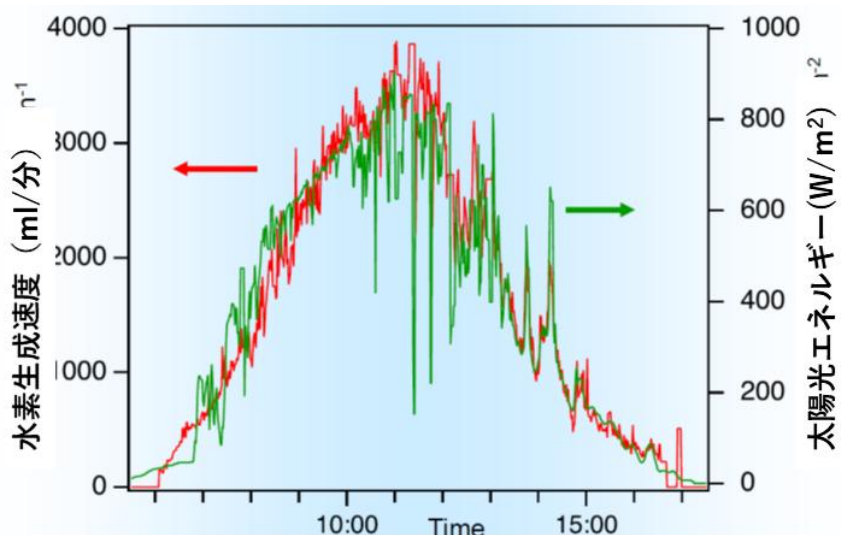


25cm角触媒シート (官邸デモ(2021))

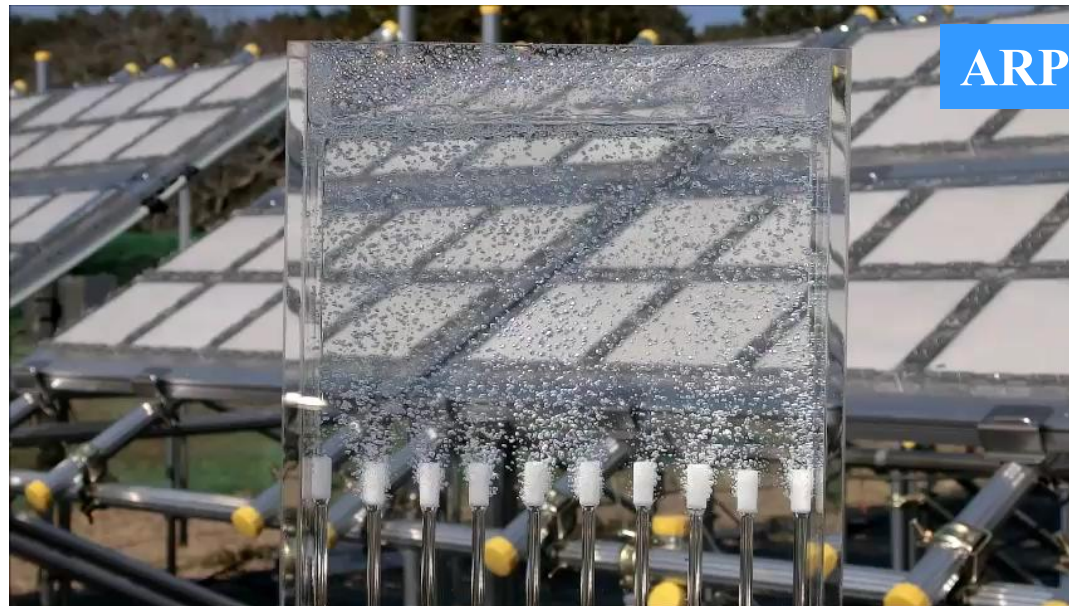


ガス分離
ユニット

Alをドーピングした SrTiO_3 pの光触媒シート
を内蔵した 100m^2 パネル設備の外観



太陽光照射量に追従した
水素の生成の確認



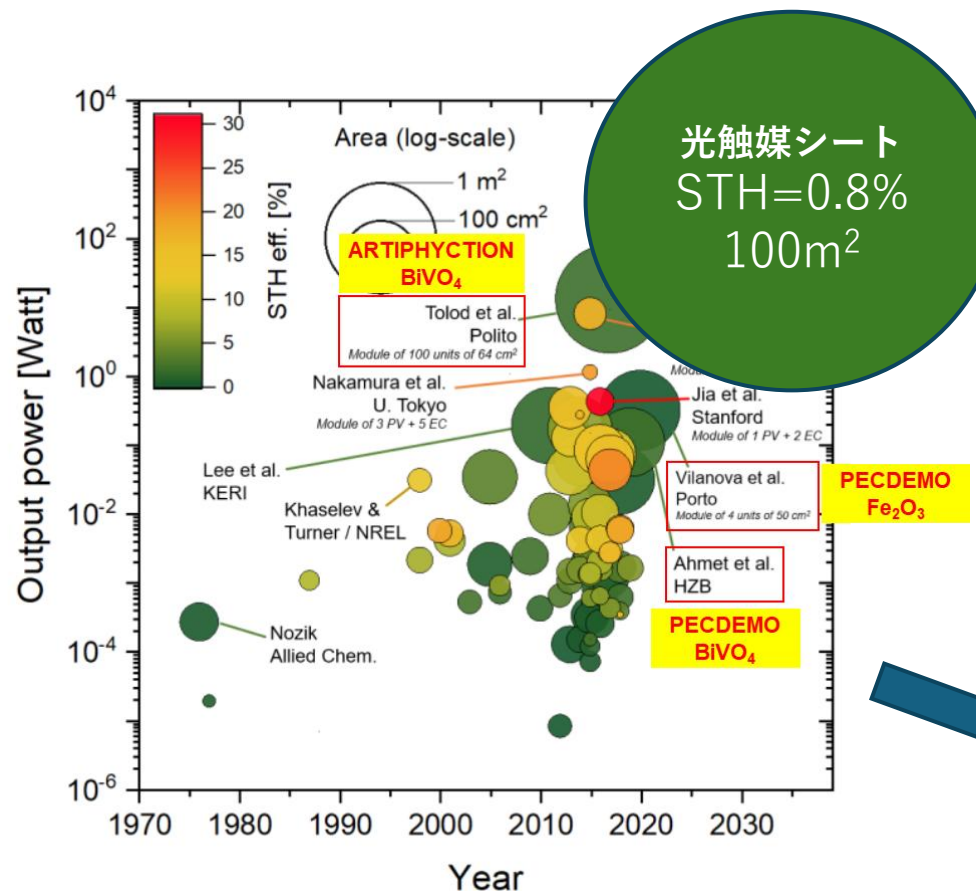
ARPCChem

3-4 リットル/分の水素が生成
最大 $1.8\text{Nm}^3/\text{日}$ の水素が製造（水 $1.5\text{kg}/\text{日}$
の触媒分解に相当）

植物の光合成の4倍程度の太陽光変換効率

水素生成挙動、太陽光照射に完全に追従！

- 水素は単純に光触媒のみの性能次第で発生。
- ➔ 機器数最小の水素製造装置に繋がる

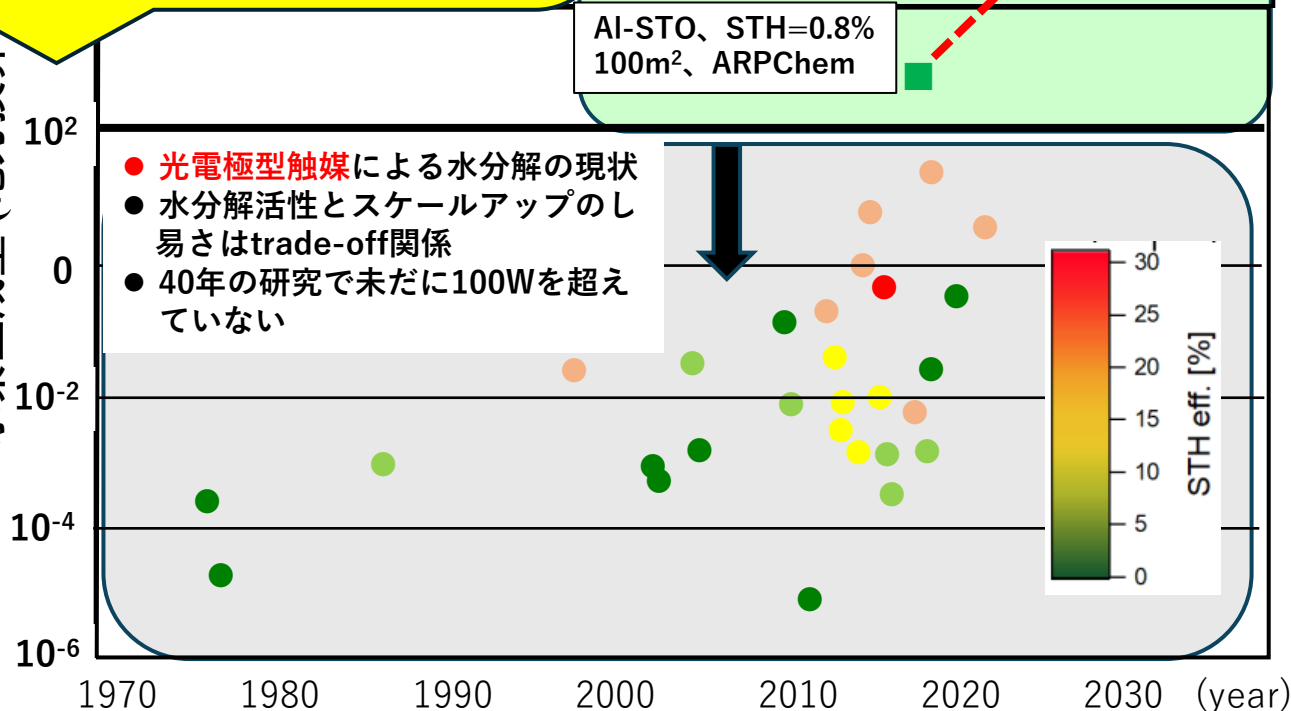


近紫外光応答のRh/CrOx-SrTiO₃で未だに世界最高
= 量子効率 × Scalability

Green-水素製造には不十分
= 可視光応答高活性触媒

光電極(含タンデム) : 100W/m² と
光触媒シート ; STH=10%/m² が
同等性能。面積を乗じると総水素
生成量になる
= スケールアップの容易性指標

水素生成量 (電力換算)



スケールアップのし易さの指標としての
各光触媒システムの総水素生成量比較

GI基金で達成できたこと

＜ステージgate目標：ラボスケールでのSTH～4%の達成＞

- STH4%は未達。 STH～0.5%が現状の到達レベル。
- STH:15～20%を狙える光触媒材料で、水の全分解は確認。
- 活性向上の阻害要因の解明は進んでおり、その対応案で活性向上効果は認められるが、性能向上は不十分。
- 触媒活性発現についての**包括的解釈案**を提示。今後の触媒設計に大きく影響を与える可能性がある。
- 安価な水素製造コスト実現に向けた、光触媒モジュールの基本構成要素（水素の安全分離、安価な光触媒シート光触媒パネル、輸送・貯蔵を含むsystem構成,etc）については開発が相応に進展。

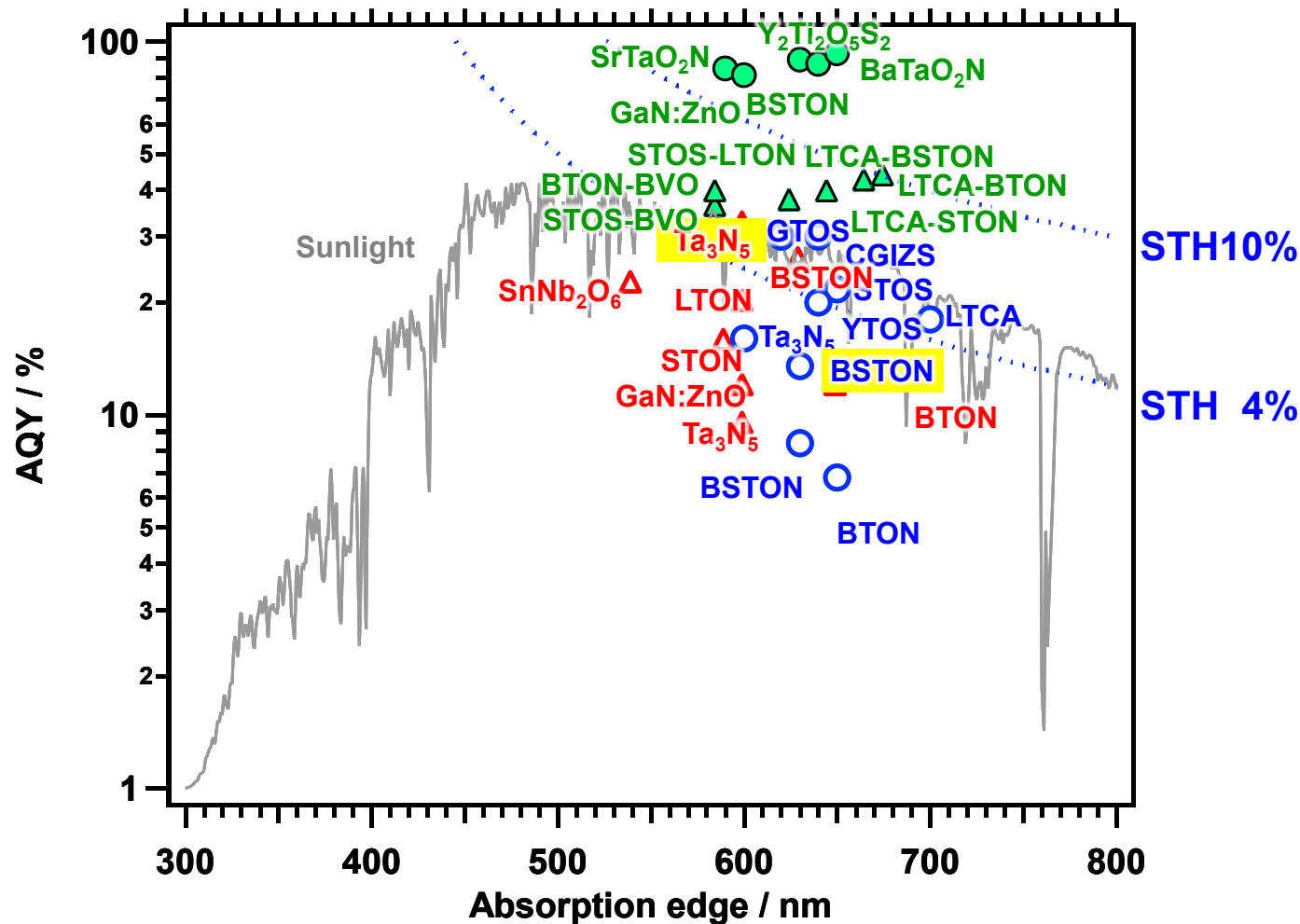
開発中の水分解光触媒のSTHの最大効率

一段階励起系

光触媒	STH最大効率 (A)	半反応AQY (B)	STH効率 (A × B)
SrTaO ₂ N	13.0%	15.7%	2.0%
GaN:ZnO	13.5%	11.9%	1.6%
Ta ₃ N ₅	15.7%	32.4%	5.1%
(Ba,Sr)TaO ₂ N	16.9%	26 %	4.4%
BaTaO ₂ N	19.2%	11.9%	2.3%
Y ₂ Ti ₂ O ₅ S ₂	17.2%	20 %	3.4%

- * 1 : 触媒性能STH>10%のpotentialあり。
- * 2 : 低活性ながら全分解が進行することは確認。
- * 3 : 二段階 (Z-scheme)でもSTH>10%可能な組み合わせは複数あり。

水分解光触媒の開発進捗(半反応)



GI基金事業後

○ 水素生成反応

△ 酸素生成反応

理論最大効率

● 一段階励起

▲ 二段階励起

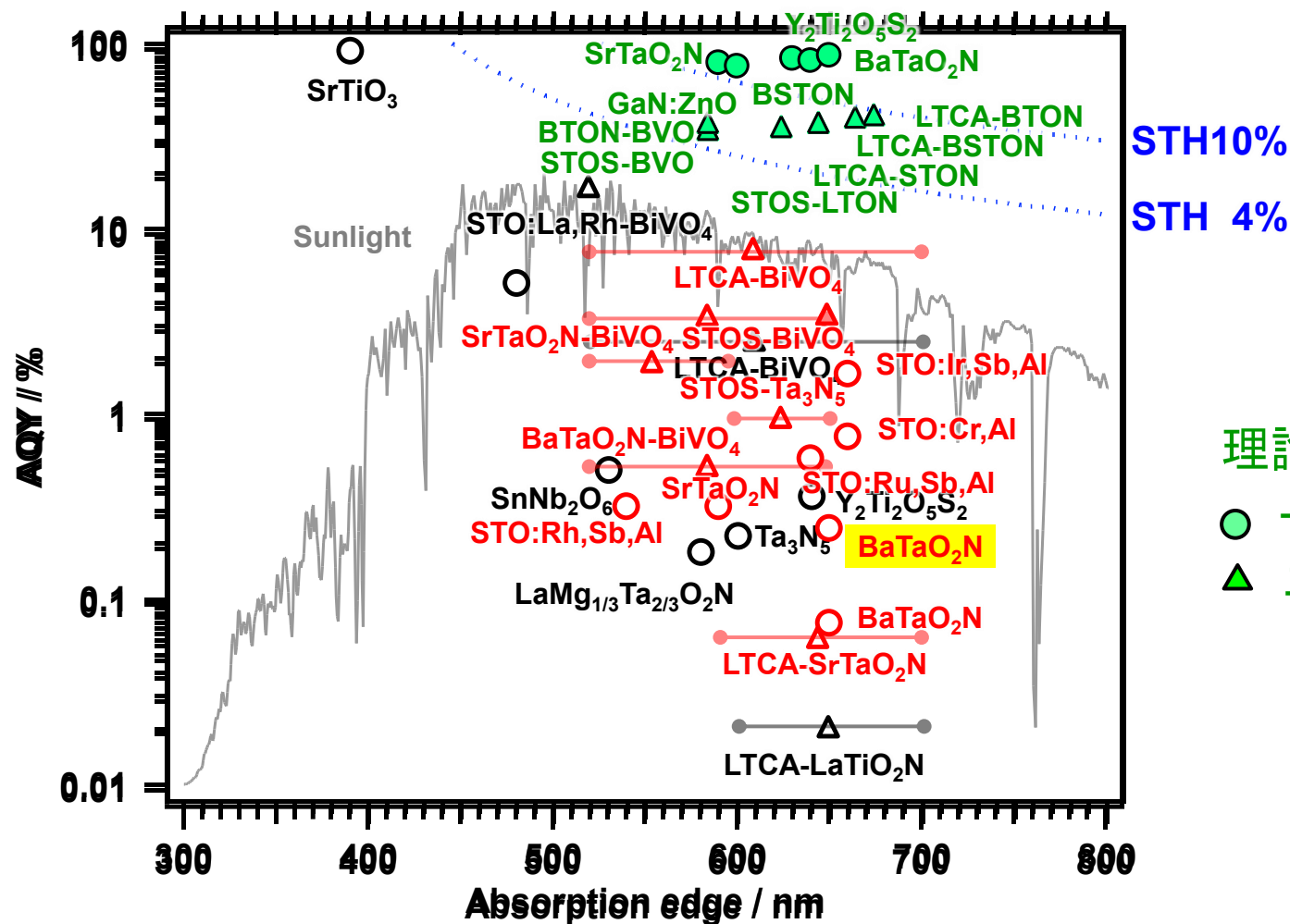
2025年度

BSTON、Ta₃N₅: STH4~10%を達成しうる材料

半反応ではSTH4%超相当の外部量子効率を達成

➔ 触媒外表面まで
キャリアは到達！

水分解光触媒の開発進捗



2025年度にBaTaO₂N(一段階)の活性を向上、ドーピングの効果を確認
Stage-gate目標STH4%に到達せず

➡ 全分解反応を阻害する要因がある！

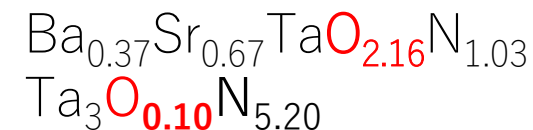
STH10%到達に向けた課題

外部量子収率>96%



特性	SrTiO ₃	Al:SrTiO ₃	BSTON (HER型)	BSTON (OER型)	Ta ₃ N ₅ (Ta ₂ O ₅)	Ta ₃ N ₅ (TaS ₂)
吸収端波長, λ_{abs} (nm)	390	390	620	620	600	600
最大STH効率 (%)	~1%	~1%	16.9	16.9	15.7	15.7
電子濃度, n_{eq} (cm ⁻³)	2.5×10^{17}	1×10^{15}	1.2×10^{19}	1.4×10^{19}	8×10^{20}	4.5×10^{20}
拡散長 L_d (nm)	883	14000	46	43	2	3

元素分析結果



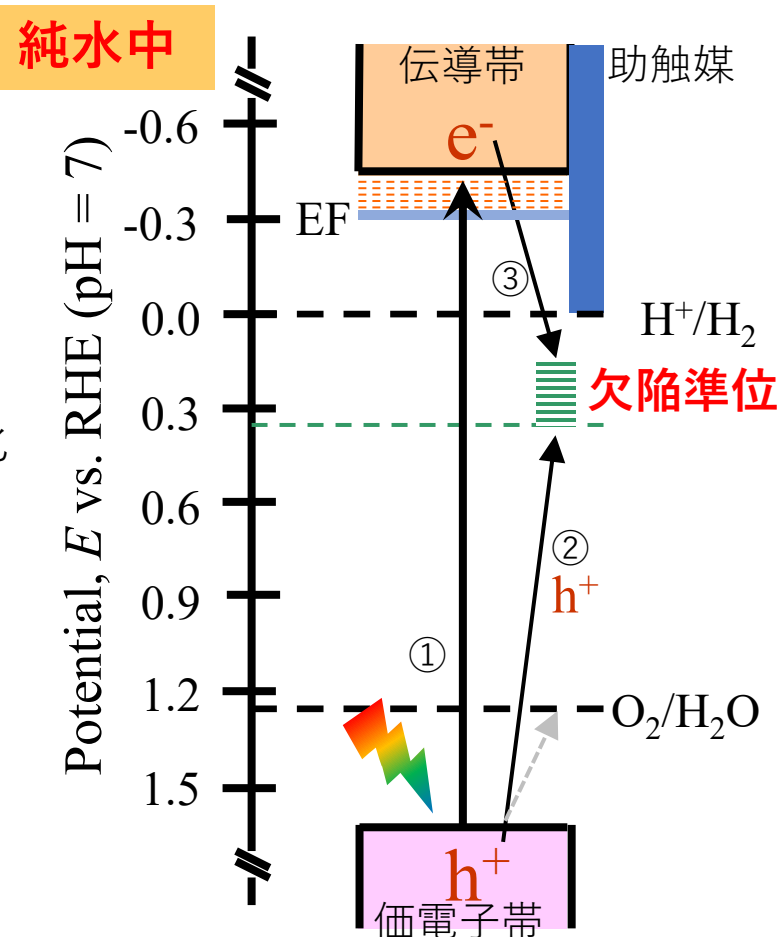
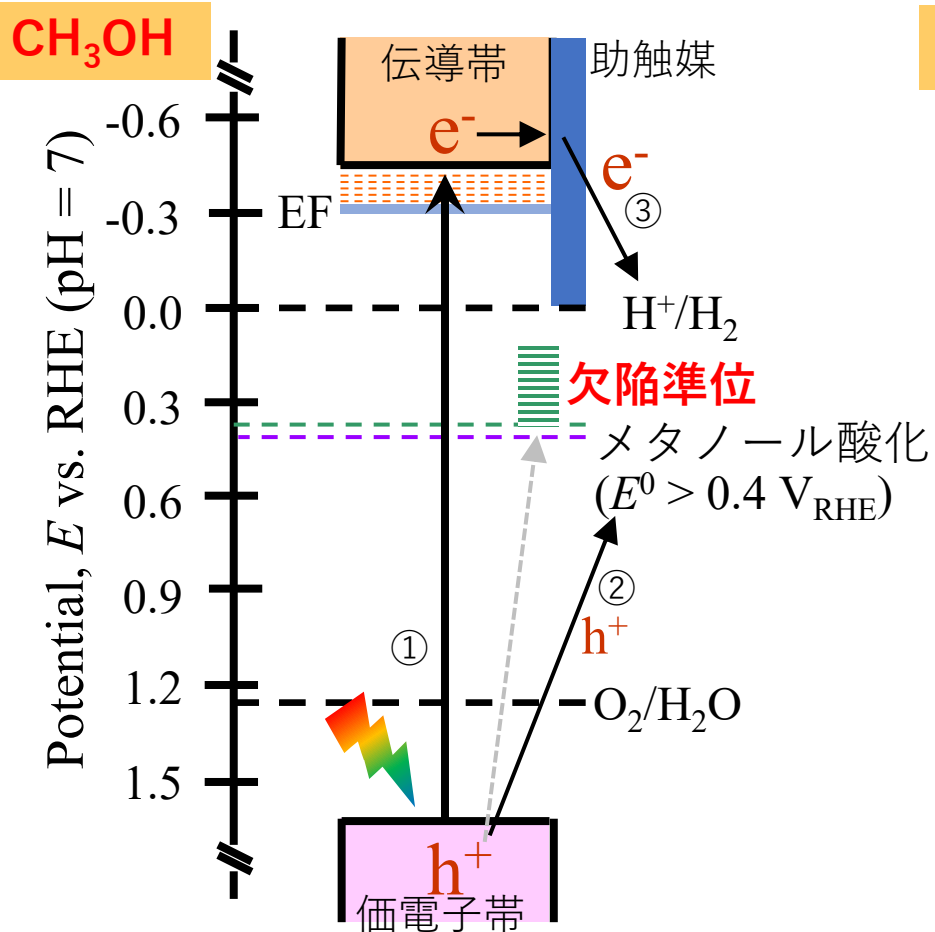
1%以上酸素が
過剰に存在

ドナー密度が高く正孔
の寿命・拡散長が短い

低電子濃度・キャリア長寿命化により
Al:SrTiO₃級の活性を実現できる可能性！

2025/10時点

水素生成用BSTONの反応特性

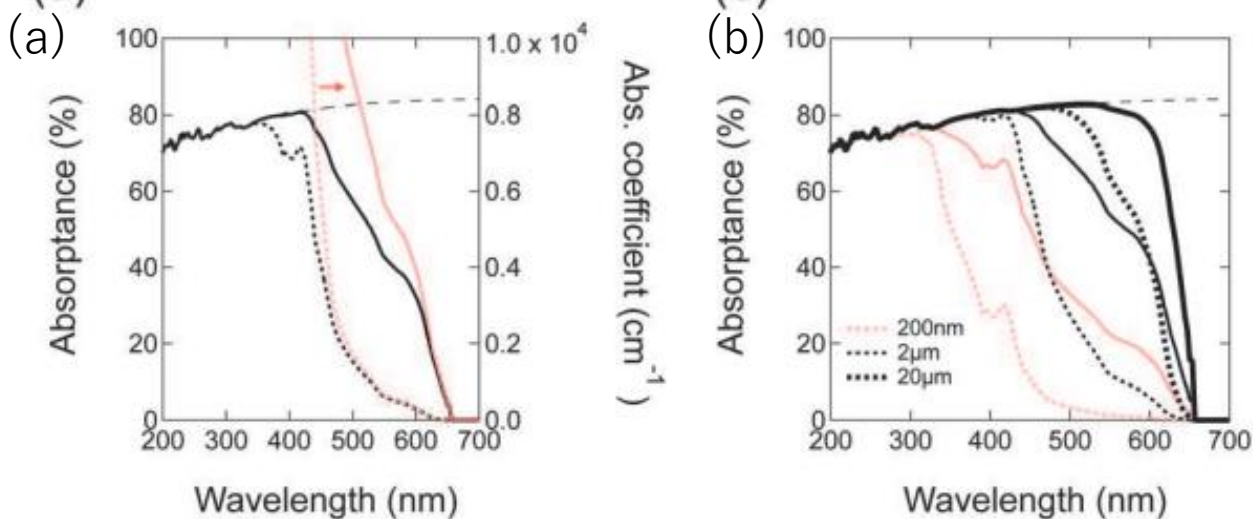


粉末光触媒粒子単独での
キャリア-dynamicsや
電気化学的解析 (CV)に
より、活性発現の有無の
説明はある程度できたが
**依然として不明な点が
幾つも存在**



**より包括的に活性発現
の有無を説明できる理論
が必要。**

効率的な正孔の抽出と欠陥密度の低下が課題



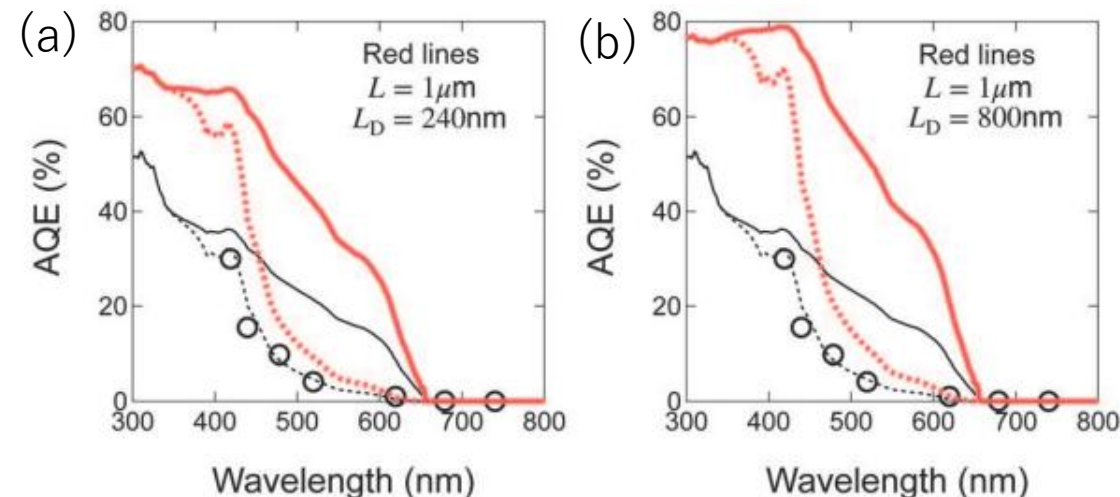
Gd₂Ti₂O₅S₂光吸収率

実線：. Solid lines: 無限積層構造/有効媒質モデル

短破線：一層構造モデル(長太破線：DFT計算値

(a) L = 1 mm. 赤細破線：DFT計算値、赤太破線：無限積層構造 規定

b) 厚さ L = 2 mm (最下端)、L = 20 mm (最上層); 赤細線: L = 200 nm



均一キャリア生成条件下での $L=1\mu\text{m}$ の場合の拡散長 L_D とAQEの関係

破線： 一層モデル

実線： 積層構造/有効媒体モデル

(a) $L_D = 240\text{ nm}$ (赤) vs. 80 nm (黒) (b) $L_D = 800\text{ nm}$ (赤) vs. 80 nm (黒)

○：実験で求めたAQE

J. Mater. Chem. A. 2025;14(8):4421-4432. 関、堂免,etal.

従来の粉末光触媒活性向上に
関する考え方 = なるべく微粒子化する × 反応条件最適化
× 触媒量を増やす

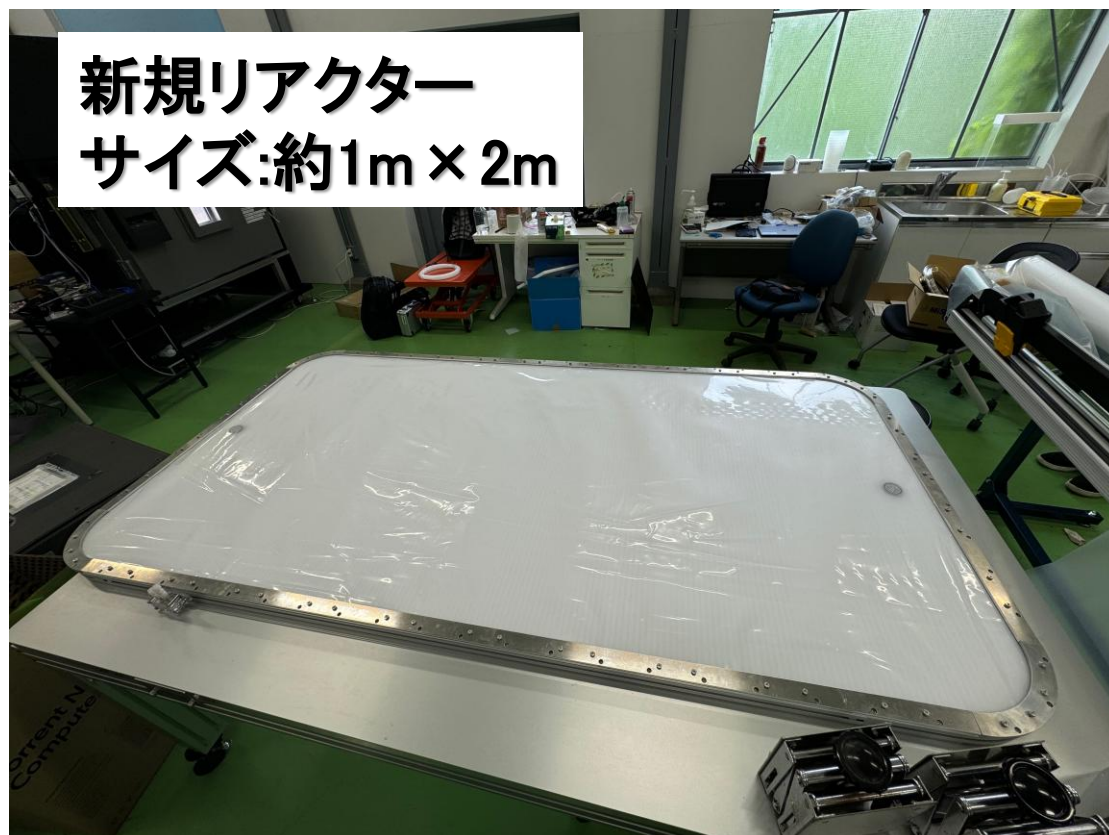
包括的設計指針



2026/04発表

第一原理計算による光学スペクトル、等方的でなく生成するキャリアの拡散、積層構造体の光学特性、規則性のない粒子凝集体の有効媒質モデルを考慮した包括的な体系

- 粒子径が光の拡散長よりも長い場合、光の吸収量が増加する為、STHは向上する場合がある。
- 見かけの量子収率は光学的な散乱とキャリア再結合の両方に制約される為、**粒子サイズと拡散長の最適化**により、光吸収と再結合のバランスを取ることが重要



大型・軽量光触媒Reactor
25cm角からのscale-up

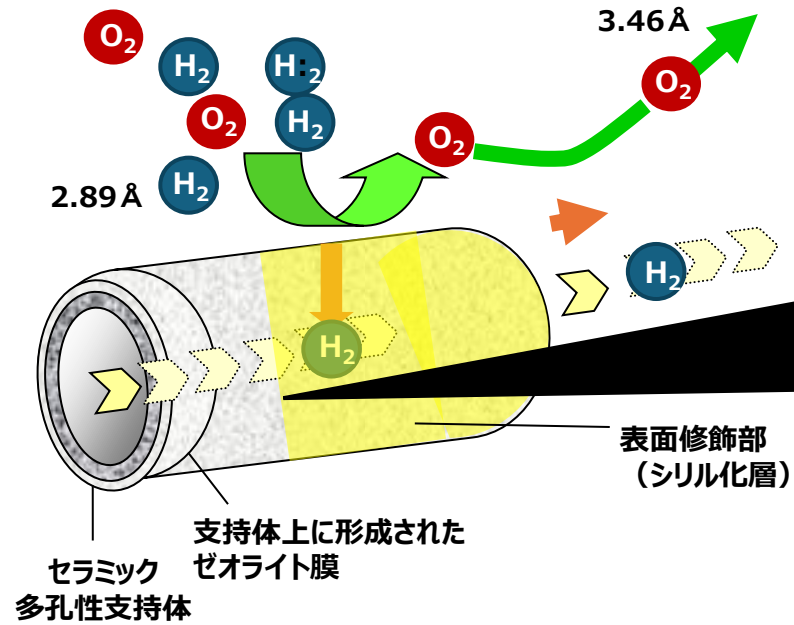


光触媒塗布用シートのR2R製造
一般的な工業化手法

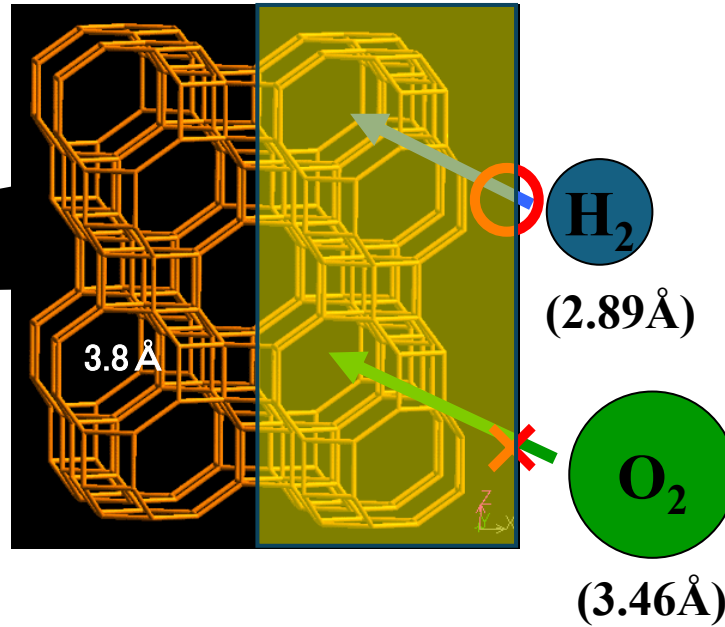
触媒パネルの安価製造法検討

水素分離技術開発

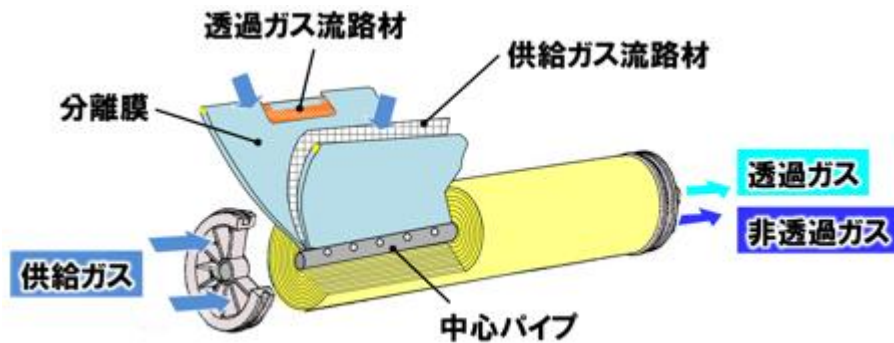
表面修飾CHA膜によって、
実ガスにて
 $\alpha_d(\text{H}_2/\text{O}_2) \sim 90$ (@90°C)
に達する高分離性能が実現



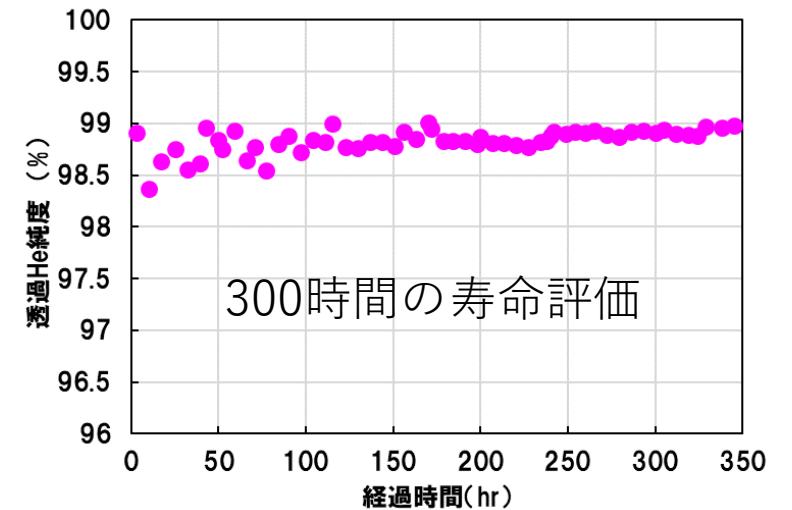
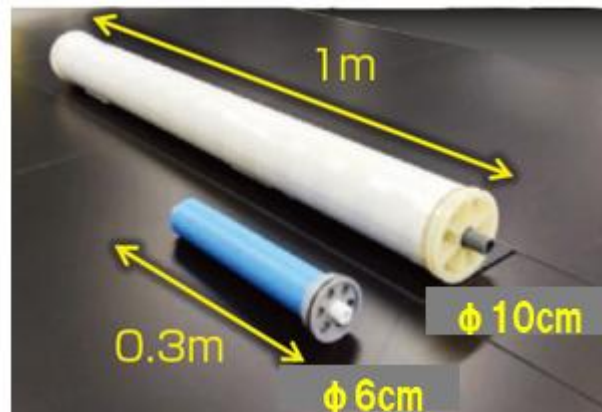
未修飾部の様子 修飾部の様子

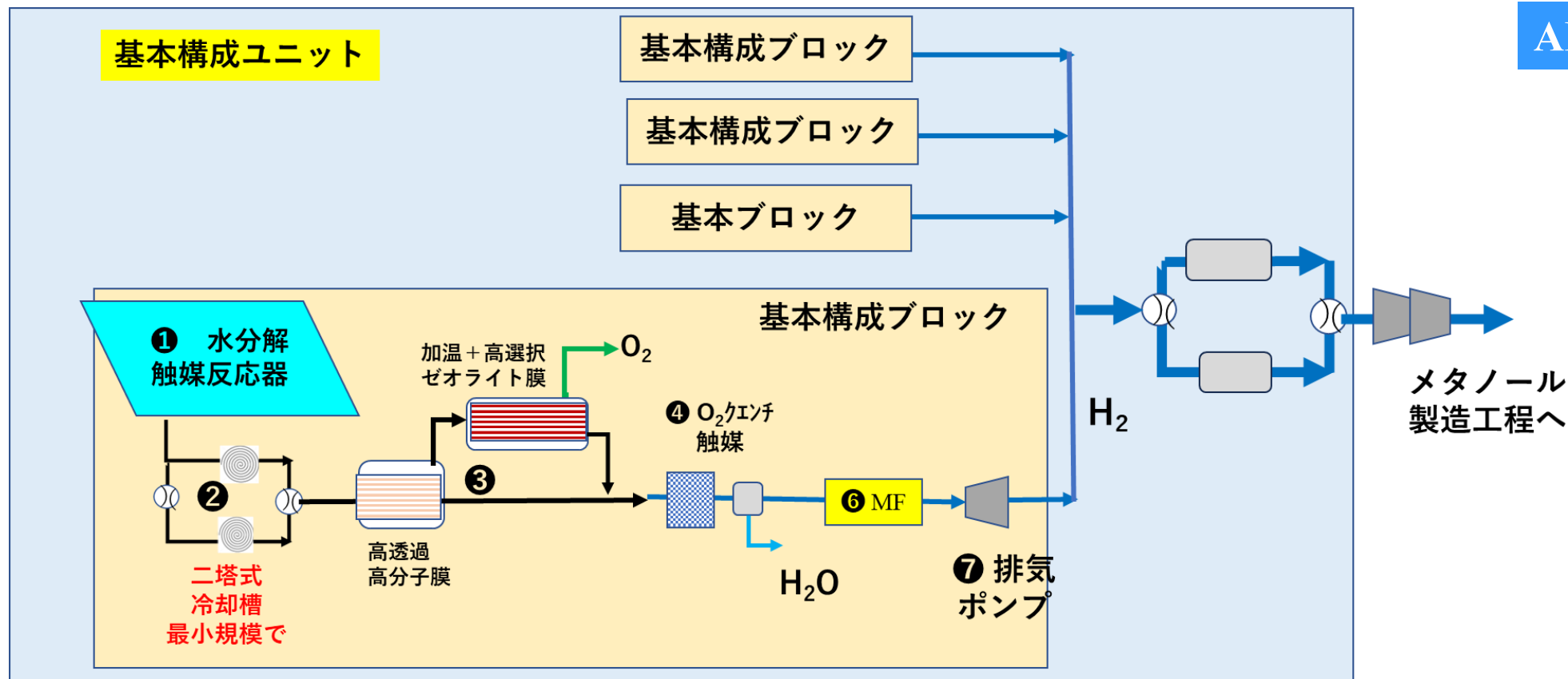


CHA型ゼオライト膜



高分子膜モジュール構造





光触媒水分解プロセスの基本構成

- 水分解触媒プロセスの基本構成はほぼ確定。 1 ユニットとして1ha規模を想定。
- 化学企業やエンジニアリング会社（国内）での**建設費見積もり**は非常に高額（化学プラント経験則ベース）
- PV低価格化に見られたサンベルト地域での低価格化と同様のことを想定すべき。→ 基本構成ユニットのコスト見積もり原案と最終コストの**Discount-rate**に根拠を与える作業が必要。

水素製造コスト見積もり

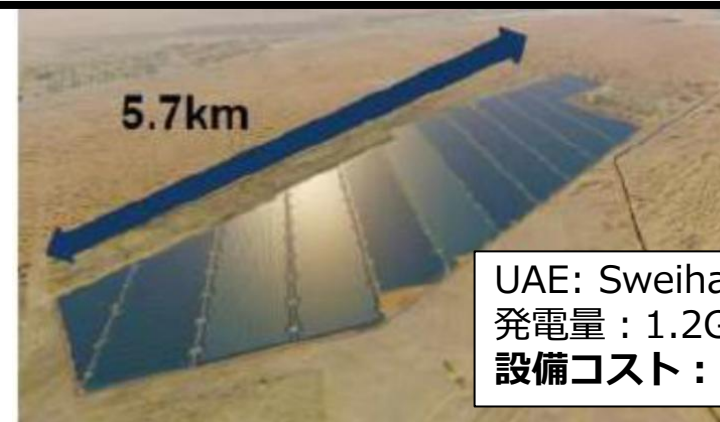
(10¥/Nm³以下を目指す)

安価な水素製造コストの実現には**STH $\geq$ 5%**の光触媒性能、実現が最優先事項 + 安価な光触媒モジュールの具体化が必要

立地(想定)		日本				
年間日射時間と日射量(想定)		2000時間 : 1,050 KWh/m ²			40	
太陽光変換効率 STH (%)		$\eta = 4\%$	$\eta = 7\%$	$\eta = 10\%$	$\eta = 4\%$	
水素製造量 (kg/m ² ・年)		1.3	2.3	3.2	2.4	
設置コスト 20,000¥/m ²	償却後(¥/Nm ³)	37	21	15	3	1
	30年平均(¥/Nm ³)	104	60	42	40	16
設置コスト 10,000¥/m ²	償却後(¥/Nm ³)	29	17	12	3	1
	30年平均(¥/Nm ³)	64	36	26	22	9
設置コスト 5,000¥/m ²	償却後(¥/Nm ³)	25	15	10	3	1
	30年平均(¥/Nm ³)	43	25	18	13	5
水素製造コスト(¥/Nm ³)						

※30年平均 = (償却中 × 17年 + 償却後 × 13年) ÷ 30年

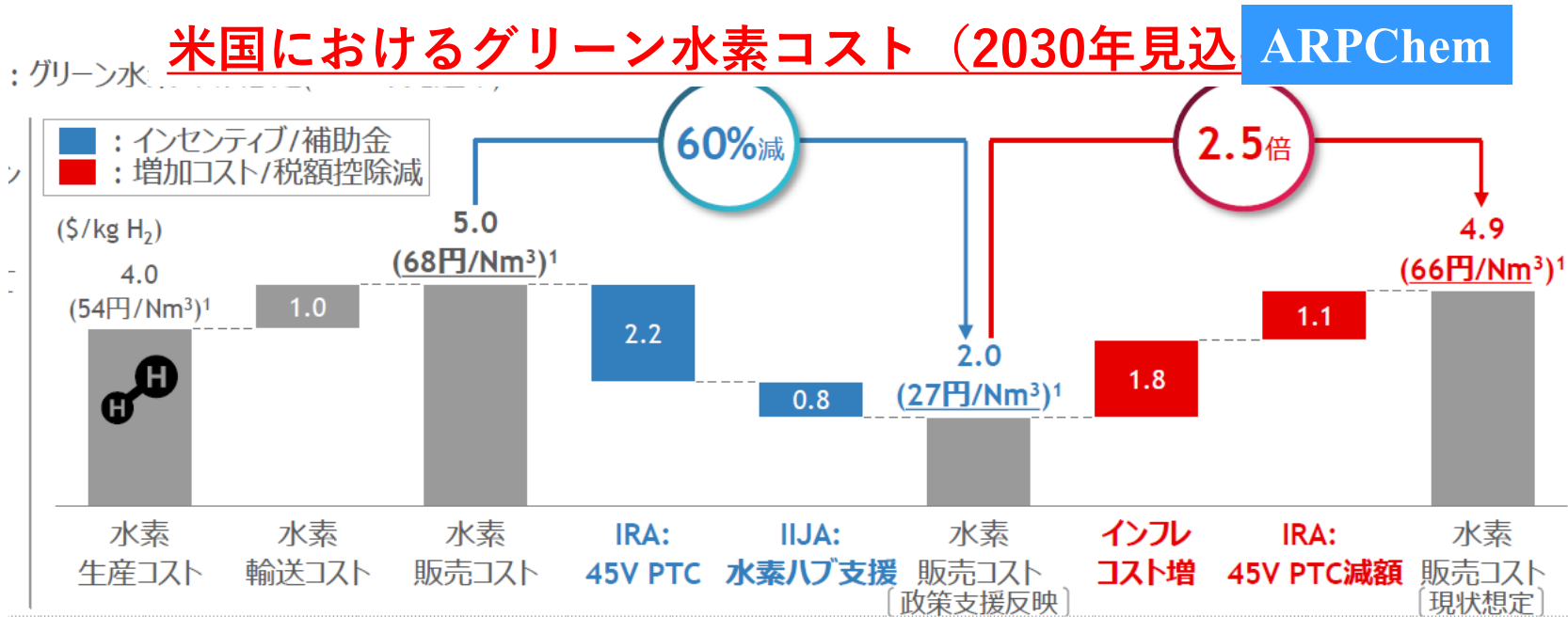
目標の水素製造コストに見合うモジュールコストの実現 = サンベルト(低緯度) + 設置コスト < 2万円/m²、STH ~ 10%



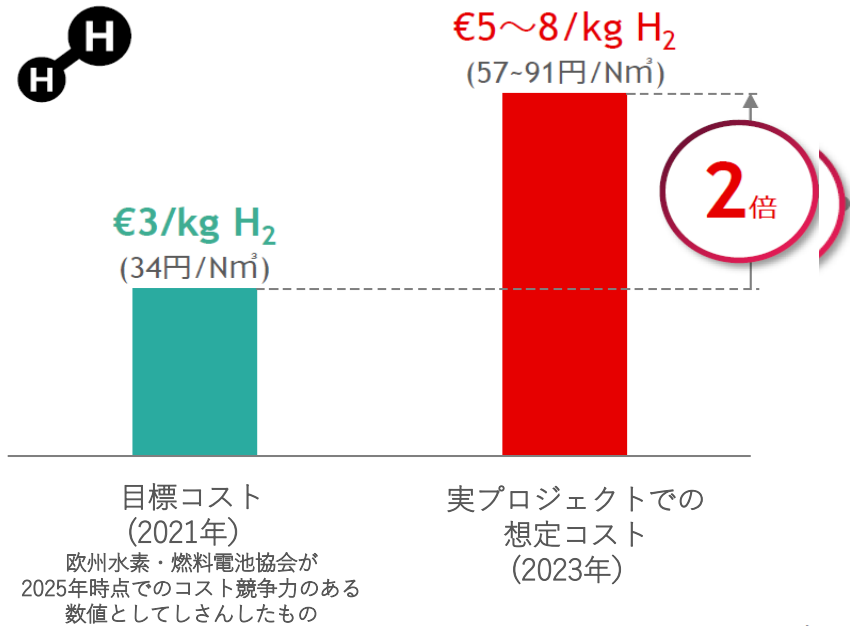
UAE: Sweihamの 太陽光発電所
発電量 : 1.2GW 面積 : 7.8km²
設備コスト : 1.5万円/m²

今後の展望

再エネ電力利用 電解水素の現状



欧州グリーン水素コスト (€/kg-H₂)



GX2040 リーダーズパネル

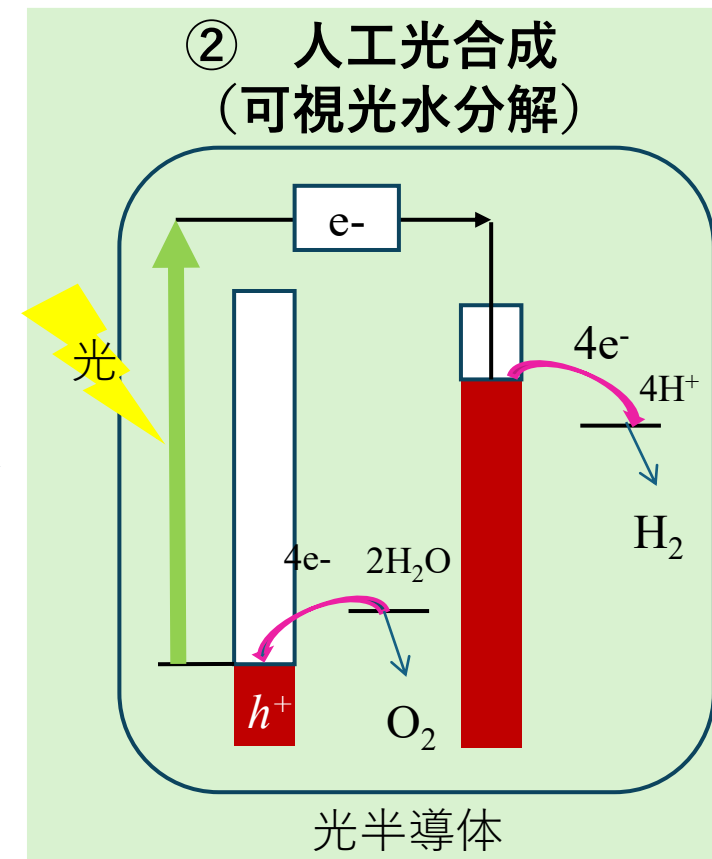
MUFG発表資料

Why almost nobody is buying green hydrogen?

(2024/08/20 Bloomberg)

- 米国、EU共にグリーン水素の調達を、再エネ電力を用いた電気分解法を想定していたが、インフレによる機材の高騰、過大な補助金依存のコスト構造が崩壊し商業化の動きが頓挫している。
- ➔ それみたことか！

② 人工光合成 (可視光水分解)



ひと手間 多い！

21世紀仕様

参照： 現状の電気代
～17円/KWh

光エネルギー照射により生じた一定のエネルギー準位にある h^+ 、 e^- がそれぞれ酸化剤、還元剤として作用。

① 高活性光触媒プロセスは開発段階。

高性能光触媒の性能、モジュール設計(安全な水素/酸素分離、低コスト化)

② 希薄な太陽光を利用する為、単位面積当たりの生成量に限界がある。

前提：水素への変換効率=10%

赤道直下 (日照：4000～時間/年) 水素：～6kg/m²・年 酸素：～48kg/m²・年

日本 (日照：～2000時間/年) 水素：～3kg/m²・年 酸素：～24kg/m²・年

③ 水素製造コストは単位面積当たりの水素製造量/単位面積モジュールコストでほぼ決定される。

前提：水素への変換効率=10%、モジュール製造コスト：1万円/m²、
モジュール寿命(償却期間)：10年(無利子)

→ 水素製造コスト下限値：～170円/kg-水素 (15円/Nm³) @ 赤道直下
330～円/kg-水素 (30円/Nm³) @ 日本

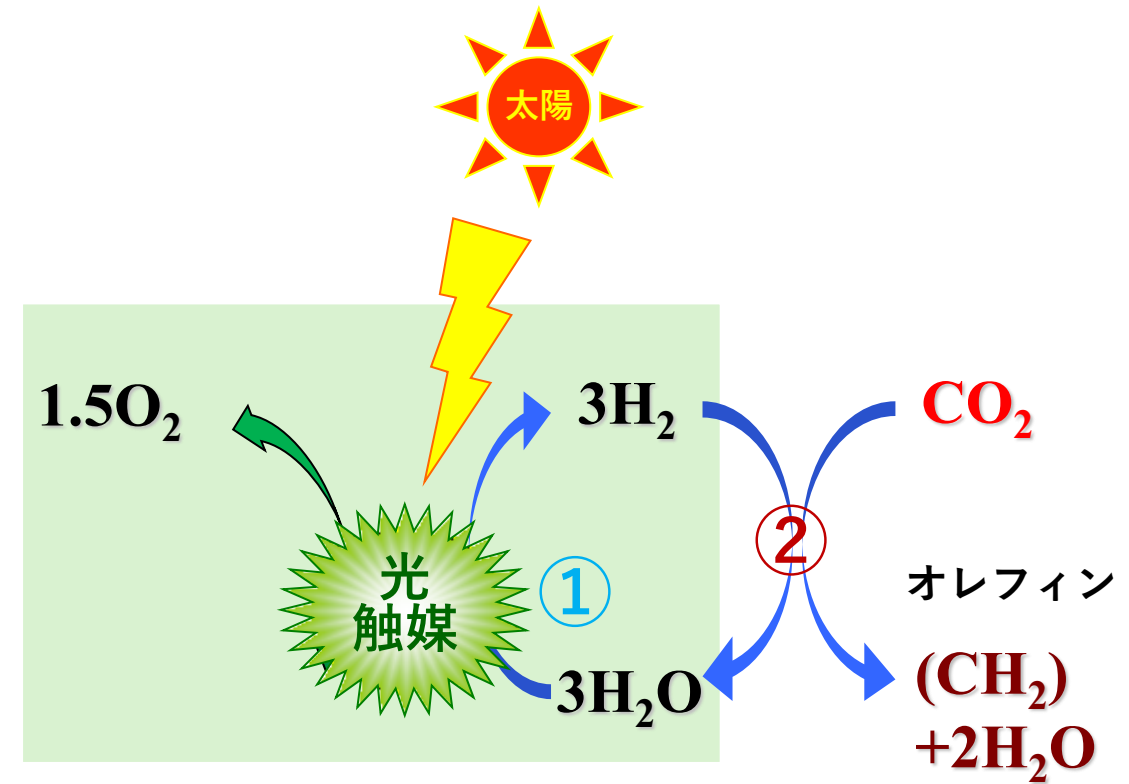
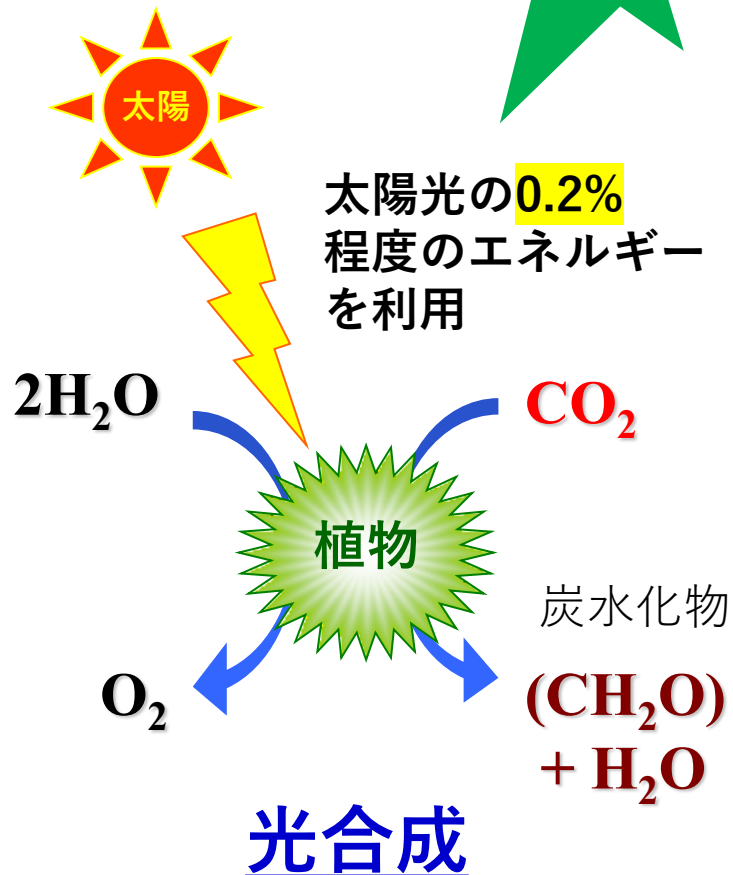
④ グリーン水素からの化学品、燃料への変換における水素使用量が大きすぎる。

製品	水素使用量(kg-水素/kg-製品)
メタン (LNG)	0.5
アンモニア	0.18
メタノール	0.19
エチレン	0.43
プロパン	0.04 (EtOH原料)

- ①の実現が必須だが、②、③はそれに付随する課題。
- 早期実用化を目指すには、④の課題解決が必要！→ 少ない水素使用量/多少高い水素でも許容。

二種類の人工光合成を組み合わせる

バイオマス改編による
人工光合成
(エネルギー穀物)



光半導体触媒による人工光合成

- ① 光触媒で水を分解して水素を作る
- ② 水素と二酸化炭素から化学原料を作る

化学品製造プロセスのLCA価値(一貫CO₂排出量)

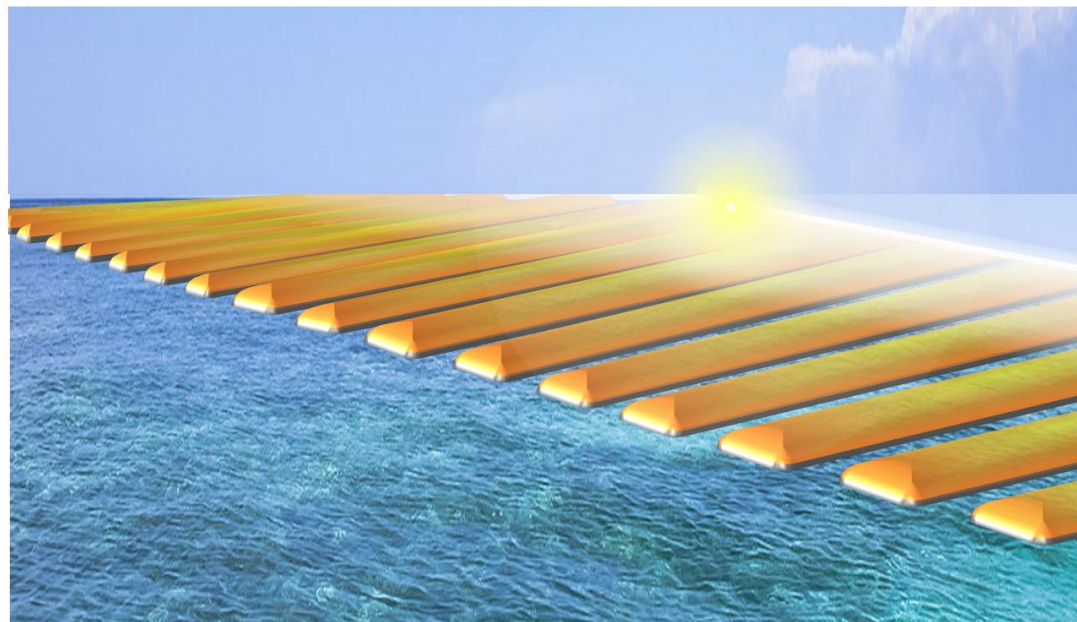
製造プロセス	Kg- CO ₂ /kg-オレフィン
ナフサCracker	4.5
プラリサイクル	6.5 - 3.1 × 回収率
CH ₄ 改質経由	
メタノール + MTO経由	6.9
CCS実施 + Blue- CO ₂	4.5
CCS実施 + Green- CO ₂	1.4
人工光合成H ₂	
+ Blue- CO ₂	3.0
+ Green- CO ₂	-3.1
バイオエタノール原料現状	1.5
バイオエタノール原料将来	2.0

カーボンpositiveだが
削減余地がある

止めの一撃！

唯一、**カーボンnegative**

バイオエタノールに期待
1億トン/年まで拡大
(削減余地有！)



半導体系人工光合成



植物系人工光合成

