

2022/01/25
NEDO人工光合成PJ
公開成果報告会

人工光合成プロセス技術開発

PJの成果・達成状況の考察 & 今後の展望

ARPCHEM-PJ
PL： 瀬戸山 亨

本日の講演内容

- ① PJの概要
- ② 光触媒及びプロセスの開発
 - ・ 可視光水分解触媒の開発
 - ・ 安全/選択的水素分離プロセスの開発
- ③ グリーン水素の製造コストについて
- ④ CO₂とグリーン水素からの化学品製造について
- ⑤ 社会実装に向けた課題
- ⑥ 今後の計画

情報

成果

考察

展望

- PJの成果のみでは完結しない場合が多い。
 - PJを補完する視点で他の技術開発を含め、考察・展望が必要。
- P毎に区別して、各項目について説明する構成。

PJの概要

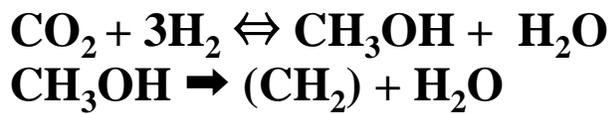
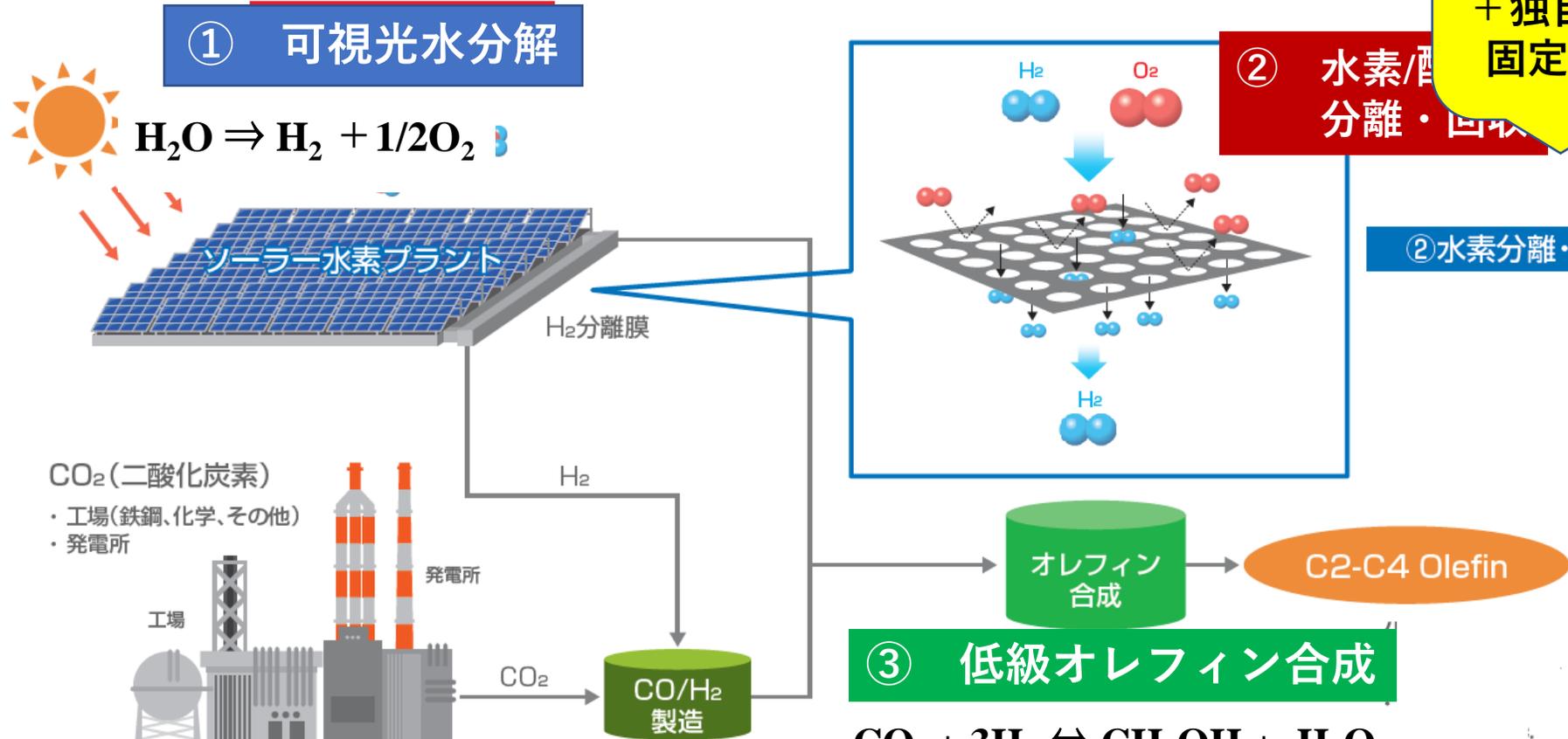
人工光合成(ARPCChem)PJ :カーボンリサイクルに向けた先覚的取り組み



(METI/NEDO, FY 2012-2021)
7大学+5民間企業への委託事業
~150億円

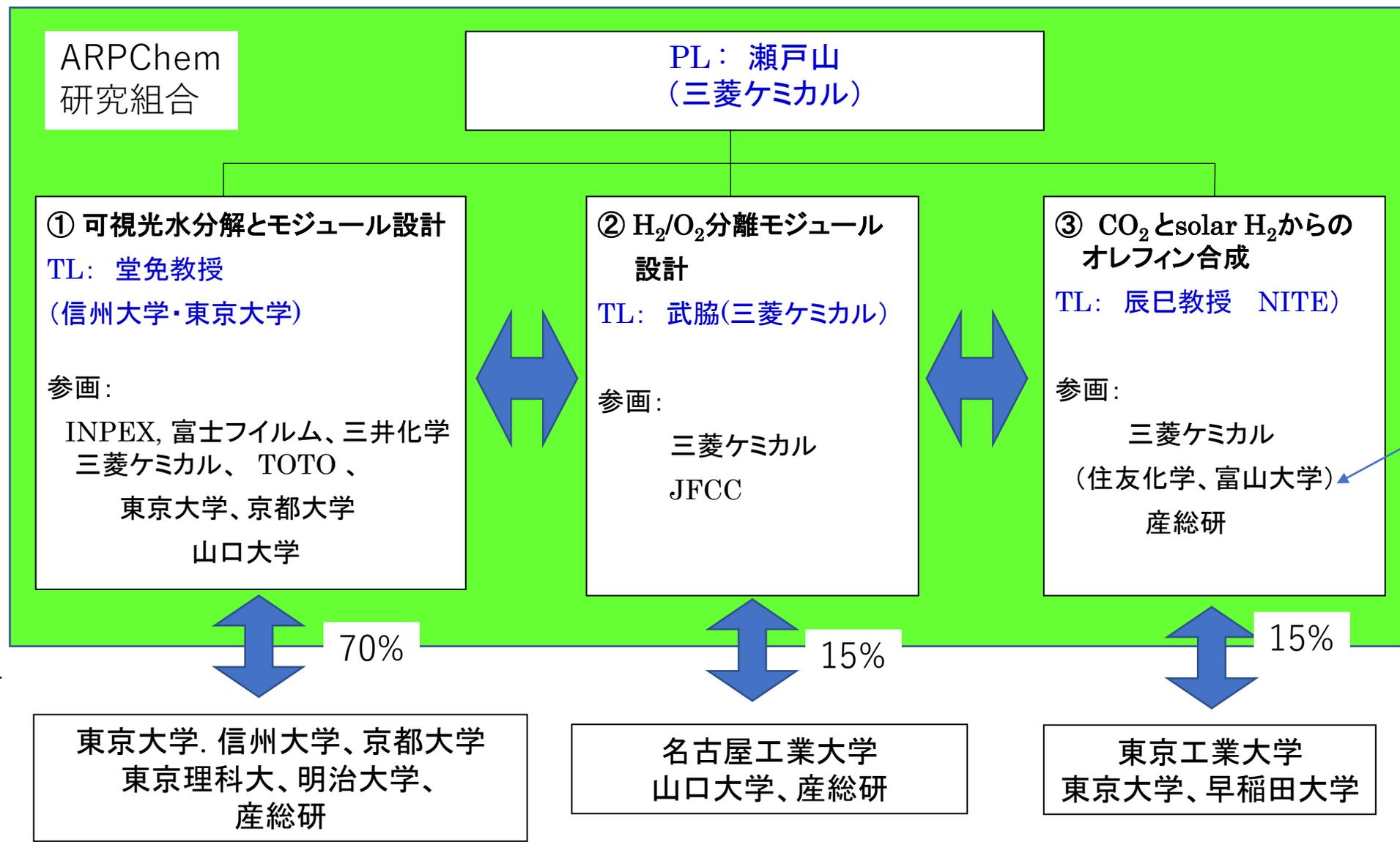
- ① 太陽光下、光触媒による水の分解で得た水素と酸素から
- ② 水素分離膜等を用いて水素を安全に分離
- ③ 水素と二酸化炭素からの低級オレフィンを製造するを目指す。

破壊的に安価なグリーン水素製造
+ 独自性の高いCO₂固定化技術の確立





ARPCChem研究組織



前半5年に参加

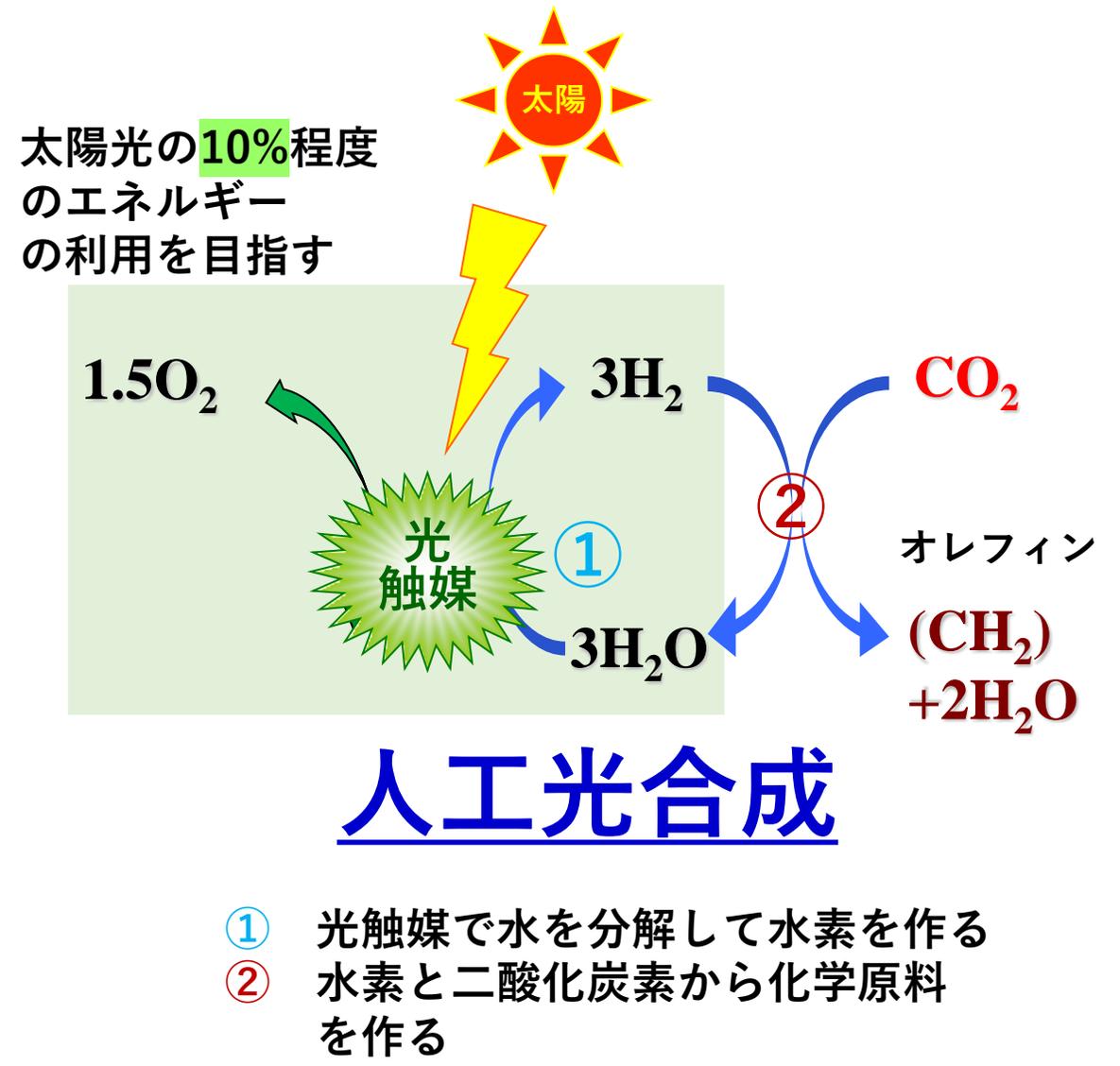
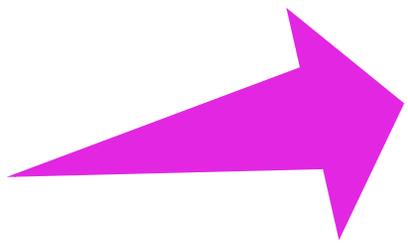
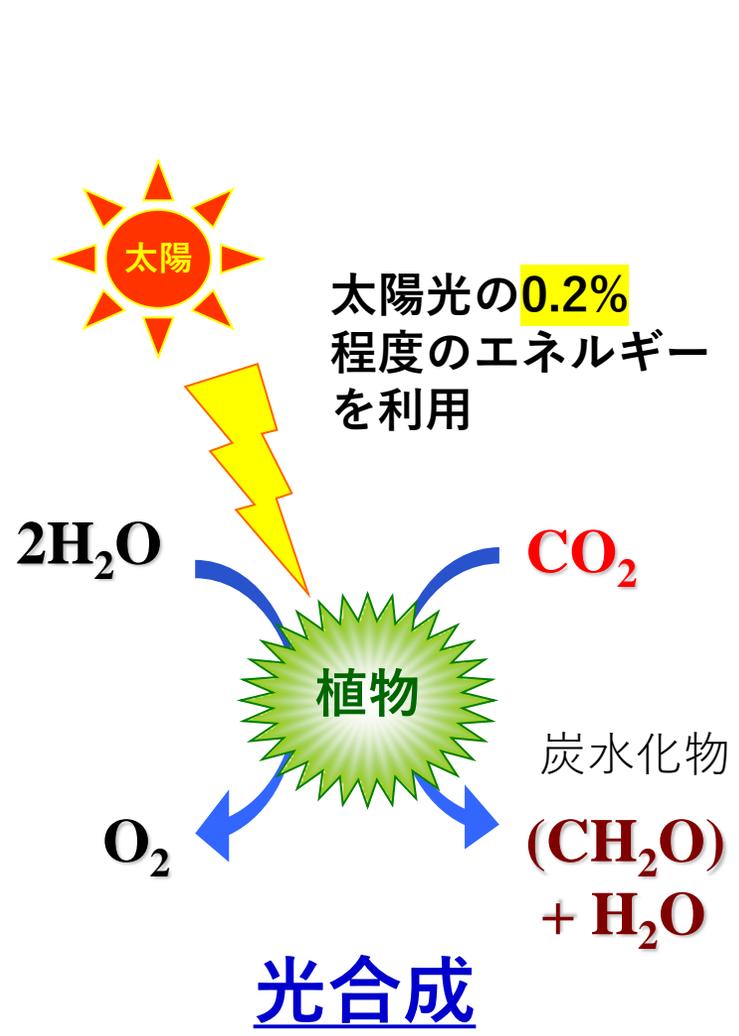
研究者割合

共同研究

* : 研究者総数 >150名

① 光触媒及びプロセスの開発
可視光応答水分解の開発

光触媒を用いた水分解による水素製造



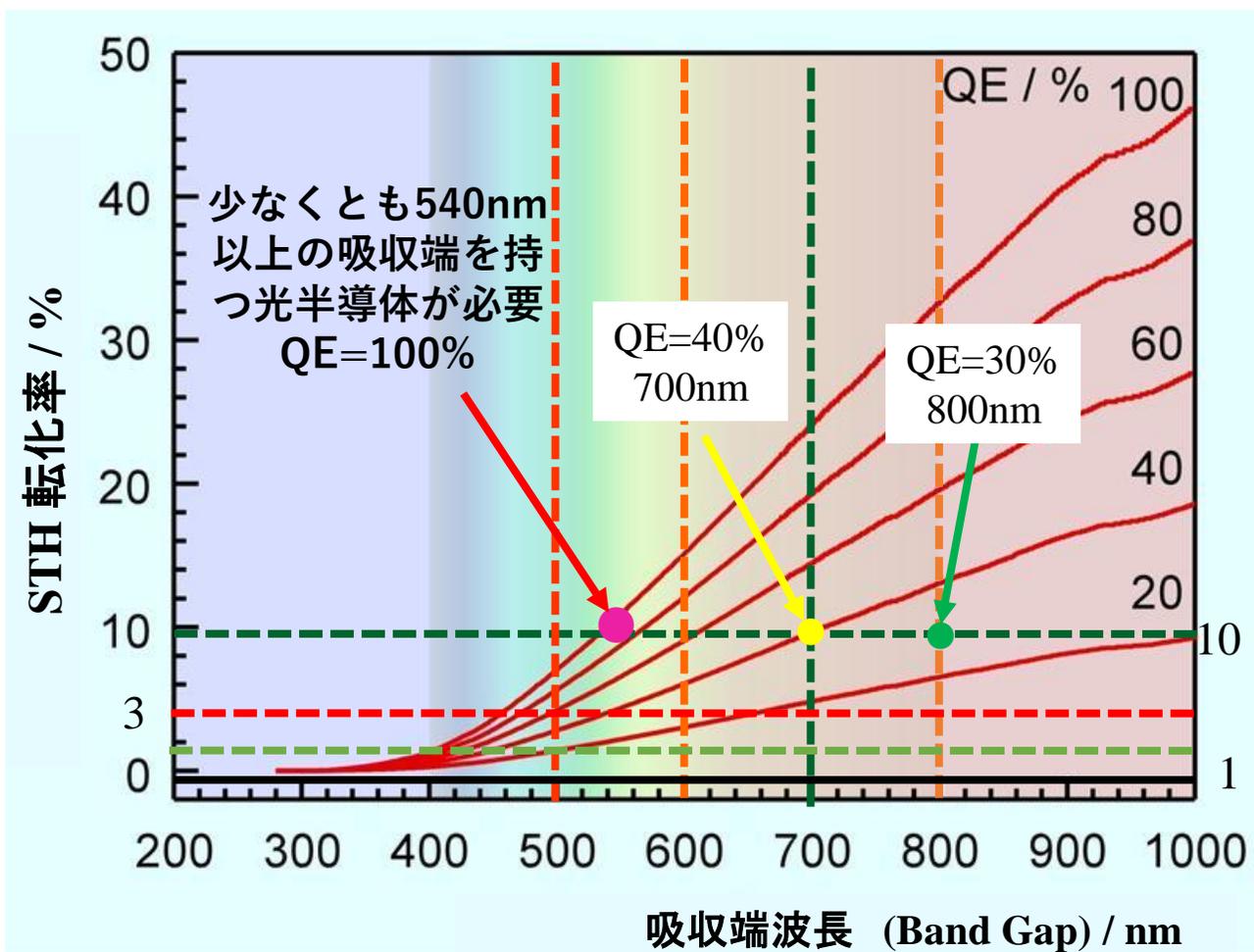
可視光水分解



$$\Delta G^0 = 238 \text{ kJmol}^{-1}$$

情報

大きなUp-hill反応
(非常に高難度)



最終目標

STH > 10%

QE: 量子収率 (pin-point)

STH: 太陽光(光子) の水素
への変換効率 (積分)

Sun light conversion to hydrogen

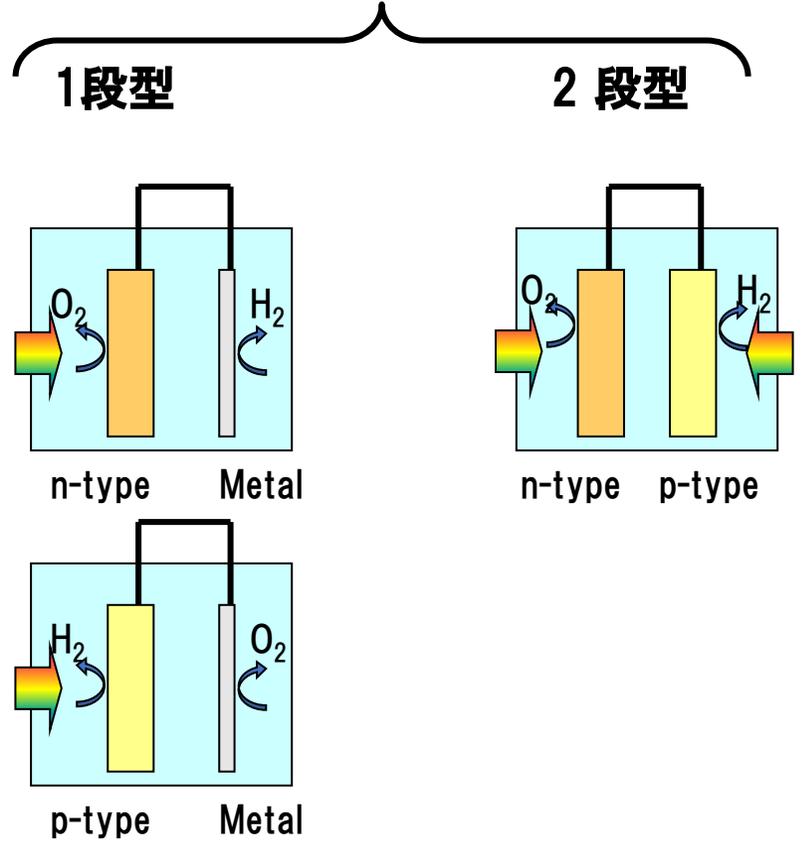
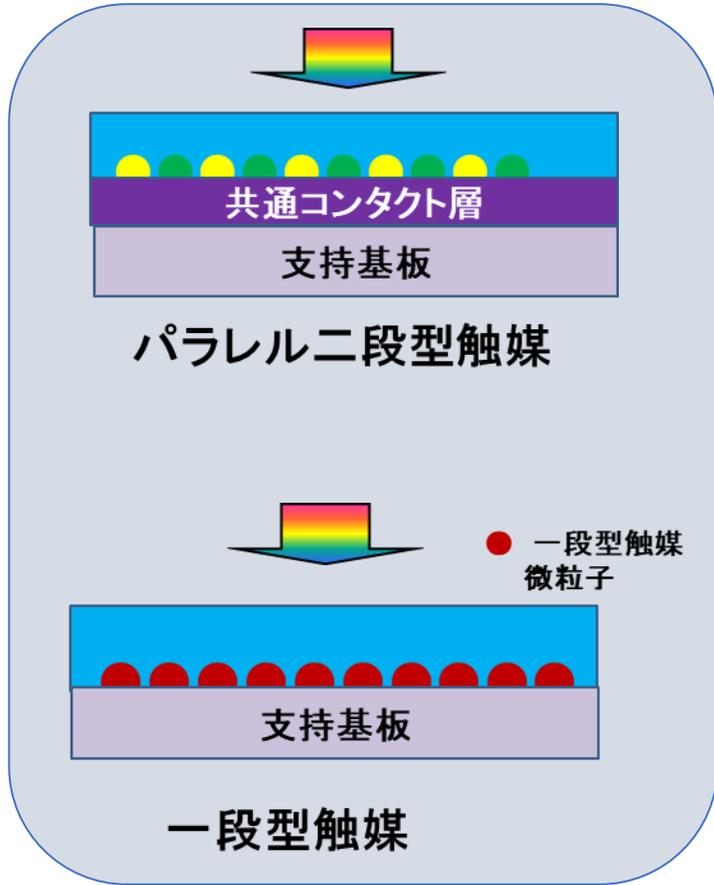
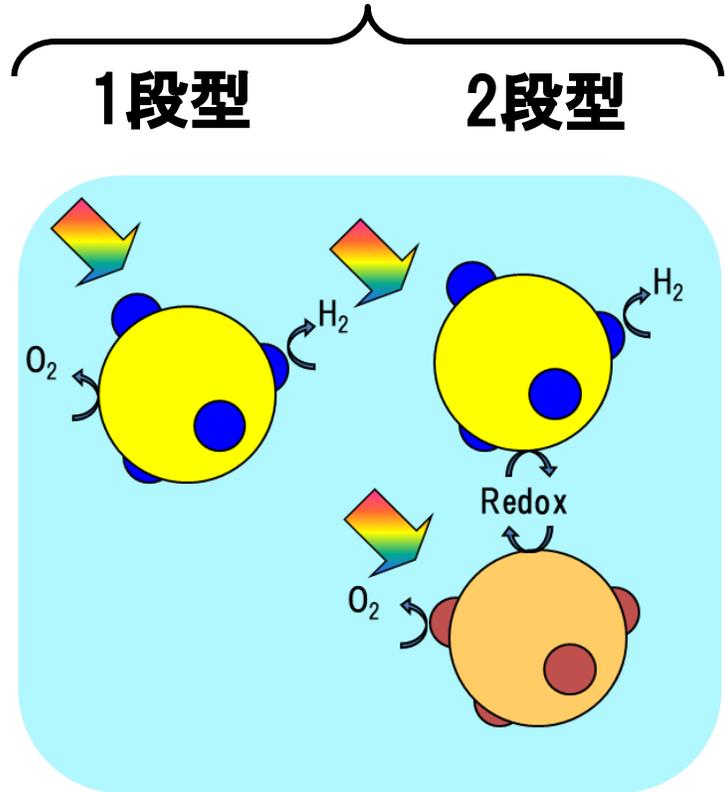
太陽光下での水分解光触媒の活性目標(STH=10% : PJ開始時)

光触媒・光電気化学的水分解法の分類

粉末懸濁系

光触媒シート

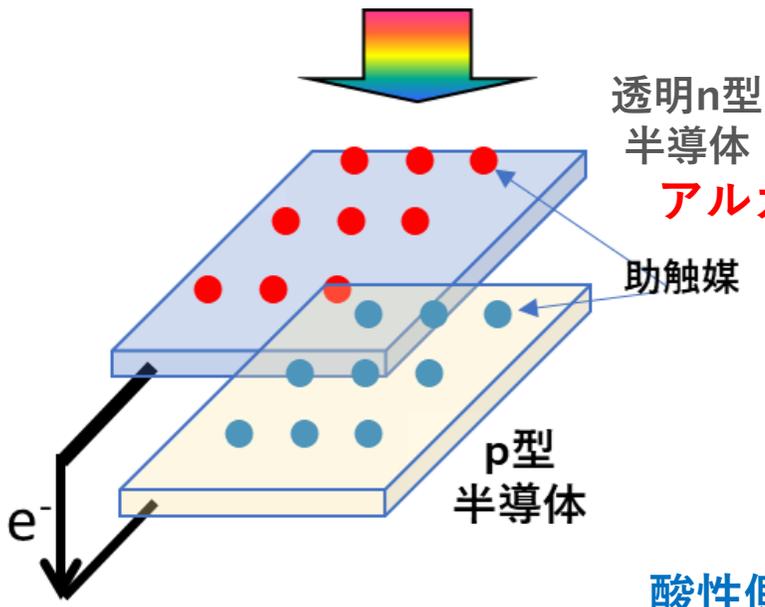
光電極系



本PJの開発対象

タンデム型光触媒

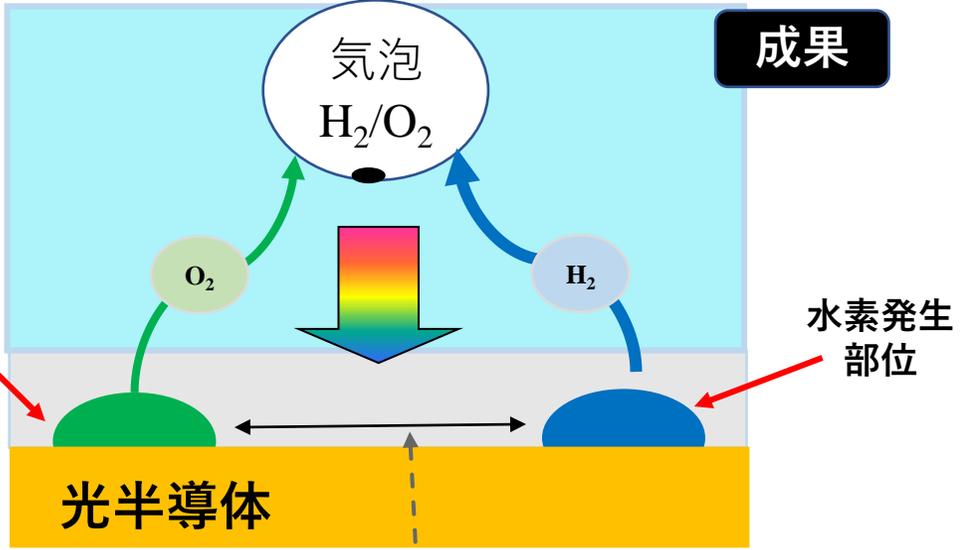
n型半導体は透明な数um厚の薄膜の大面積化が必要
BiVO₄:吸収端位置不足
Ta₃N₅:sputter法、不安定



アルカリ性側にシフト

反応を継続するには、水溶液を混合し中性化することが必要。
= 距離を縮める

酸性側にシフト



放置するとpH勾配が発生
ガス発生による自発的中性化が進行
水素/酸素発生サイトは一応分離できる

富士フィルム
東京大学

- 特にp型は高性能PV材が利用可能。
- p型、n型を独立で開発可能であり、高性能達成の可能性あり。

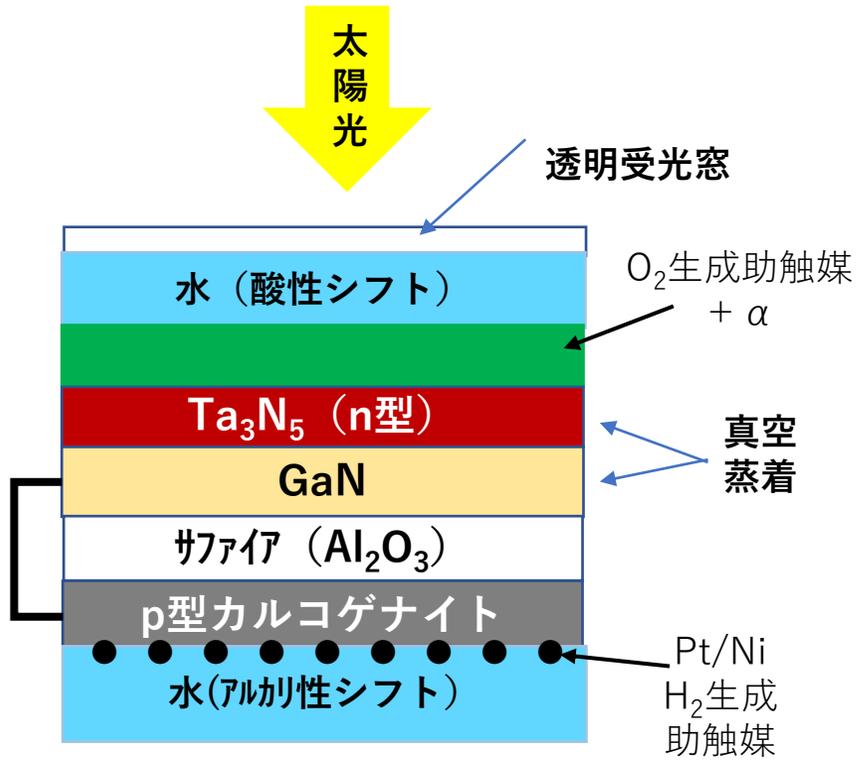
水素、酸素発生は助触媒設計で分離可能だが、水素、酸素共に水溶化し、気泡発生部位で混合ガスとして気泡が形成される
= 助触媒から気泡が発生する訳ではない。

H₂/O₂=2の混合ガスからの安全であり高選択的水素分離・精製技術の確立要。

1mm

タンデム二段型触媒の達成水準とその評価

STH=10%達成を目指した
Tandem型電極触媒の構成



Cell-size: 10 × 15mm

● 改良による性能向上は可能だが、課題解決ごとにコストが加算、安価device実現には非常に懐疑的。

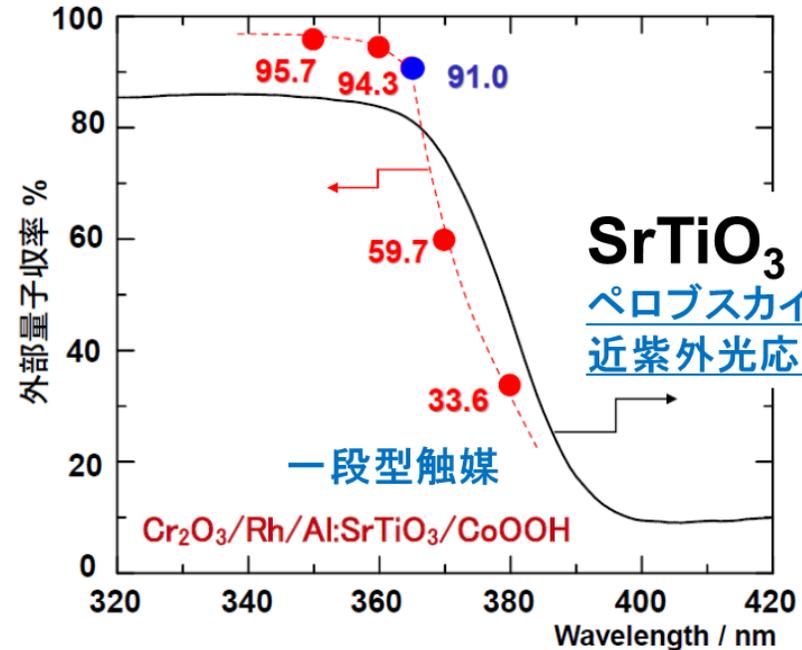
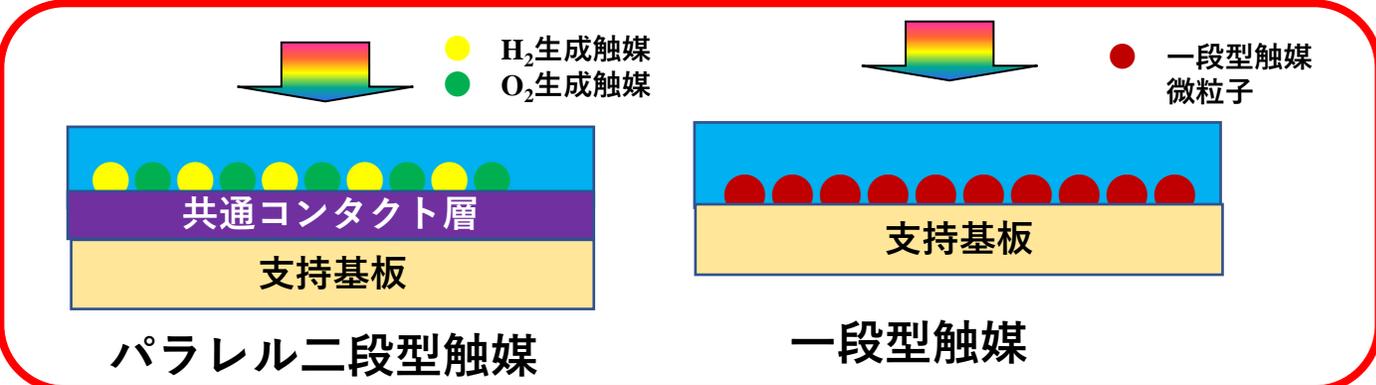
- Project開始時に高活性光触媒の実現を目指して光触媒電極の開発を実施。相応の性能は得ることができた。
- 極言すれば、Tandem型PVにH₂/O₂発生用助触媒を担持したようなものであり、**高製造コスト + 大面積化が難しい。**

➔ **結論：大量のGreen-水素製造の為の本命となる技術とは考えにくい。**

Tandem構造でSTH=10%を得るには**8.3mA/cm²要**
(初期性能では十分達成)

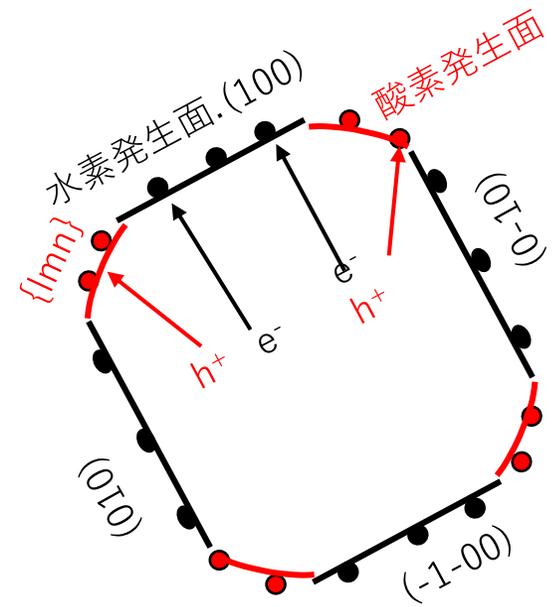
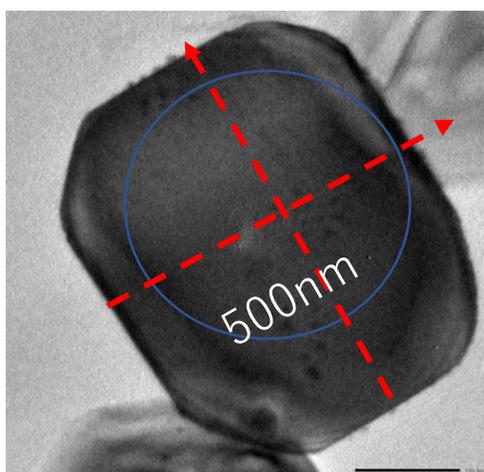
Target:光触媒シート

成果



Al-ドーブSrTiO₃

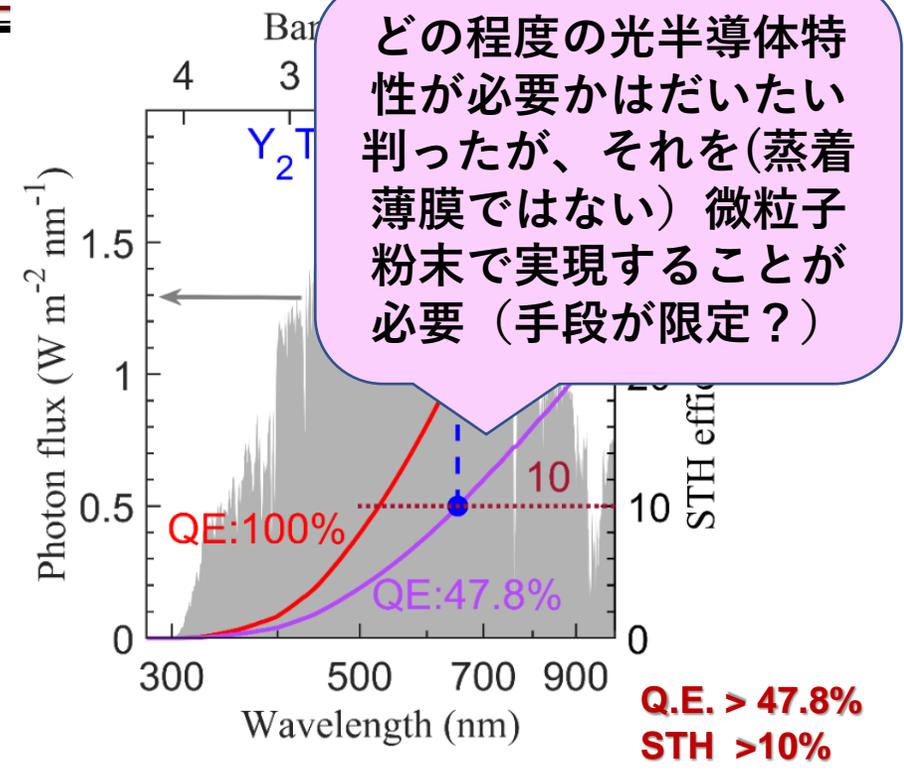
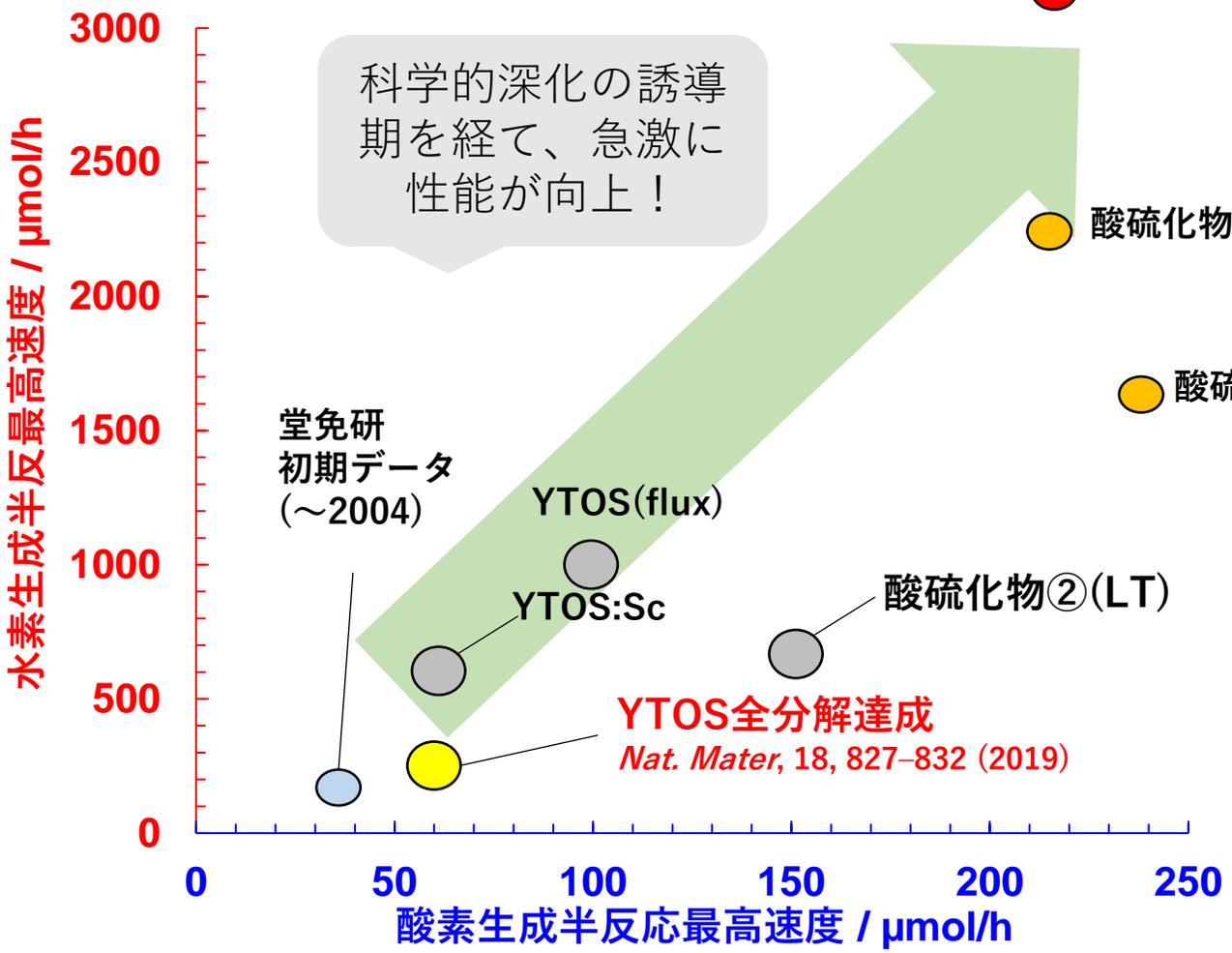
NUV応答のQE≒100%触媒の
開発とその解析 = 設計指針



近紫外応答ではあるが量子収率~100%相当の触媒の解析結果

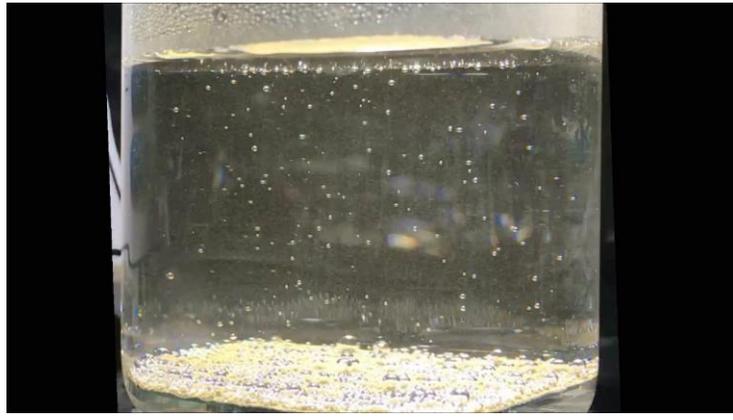
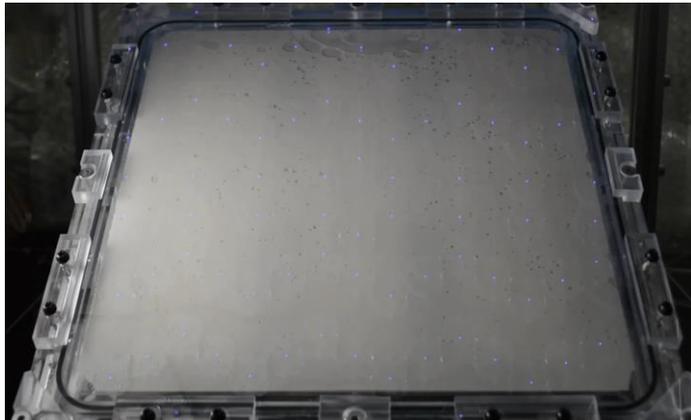
- 高結晶性微粒子であり、半導体内部で h^+ や e^- がそのまま表面に到達できる (**再結合が起きない**)
- 水素発生部位と酸素発生部位が完全に分離しており、水にもどる**逆反応が起こらない**
- ミリ秒レベルで助触媒一粒子上で、水分子が分解

YTOS,類縁体等の半反応活性の向上



YTOSの性能向上指針 by AIST

- 活性(Q.E.; STH)向上の指針
- 1) k_{et} (チャージキャリアの助触媒、反応物への移動の速度定数)の向上
 - 2) n_{eq} (ドナー濃度を1/100); N_t (ホールのトラップ濃度を1/10)に下げる
 - 3) E_0 (ホールトラップレベル平均エネルギー)の減少

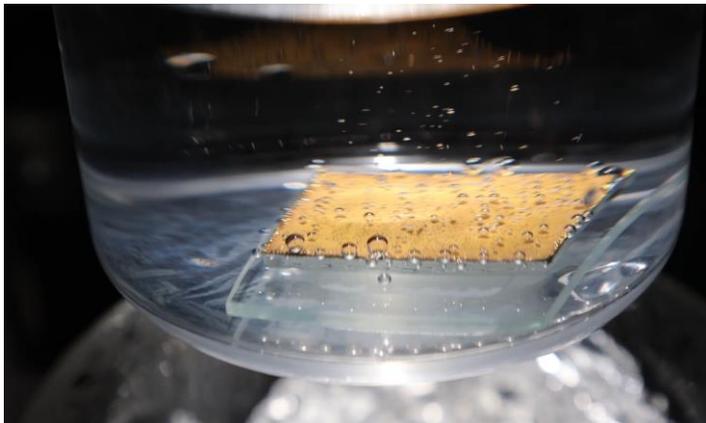


① **Al-STO**

全分解一段型
近紫外応答
QE≒100%にて、STH: ~0.8%
25cm角 → 100m²級へ

② **SrTiO₃:Rh, BiVO₄:Mo**

全分解二段型Z-scheme
(近紫外)+可視光-hybrid
QE=33.4% at 422nm STH=1.2%
TOTOにてscale-up検討

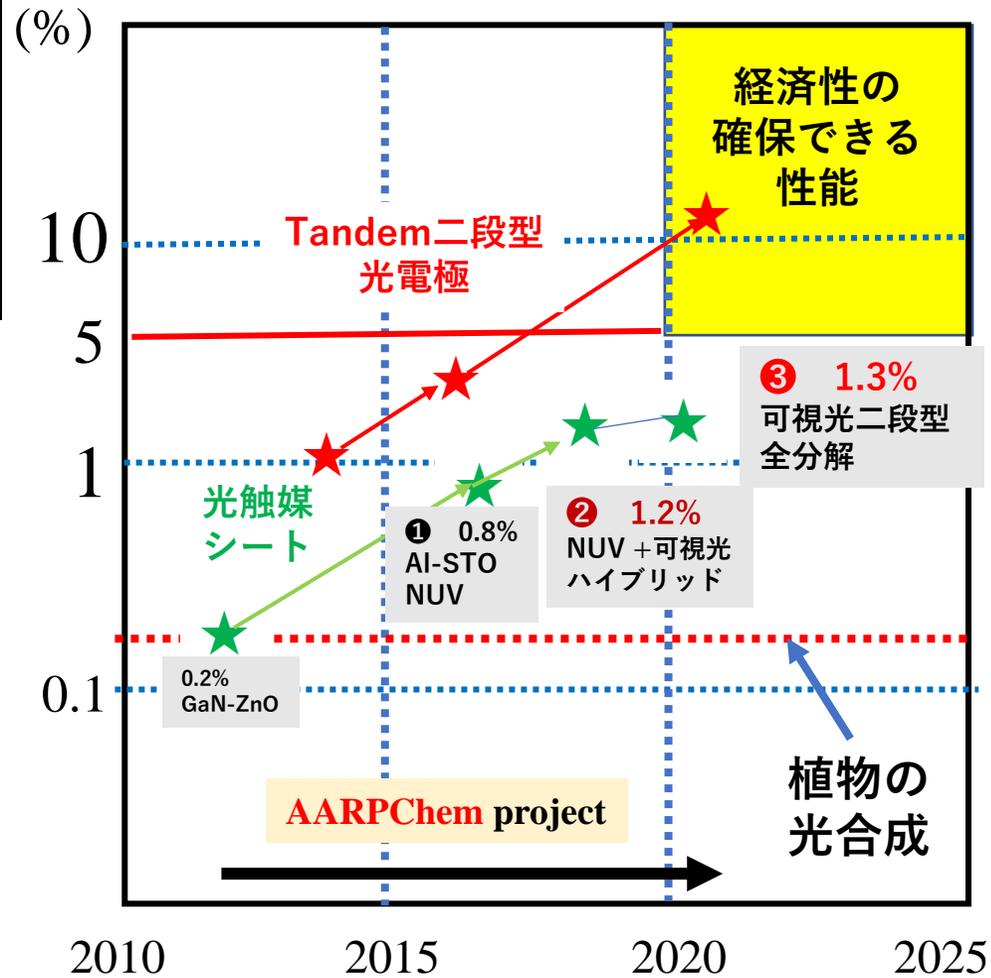


③ **LTCA-BiVO₄**

全分解二段型Z-scheme
可視光応答、STH=1.3%
STH=8~9.5%のpotential

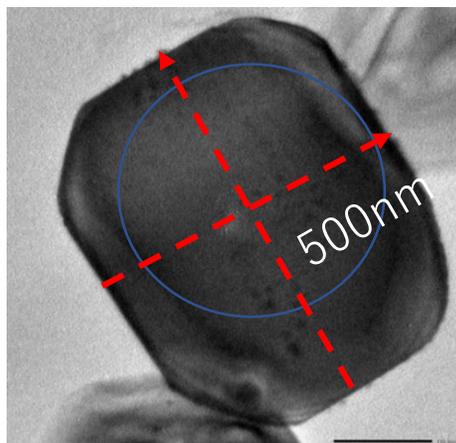
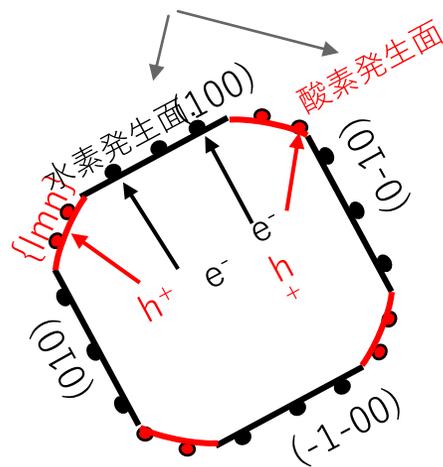
④ **酸硫化物触媒**

水素生成半反応、一段型触媒候補
可視光応答 >20%超のQE



光触媒性能の向上履歴

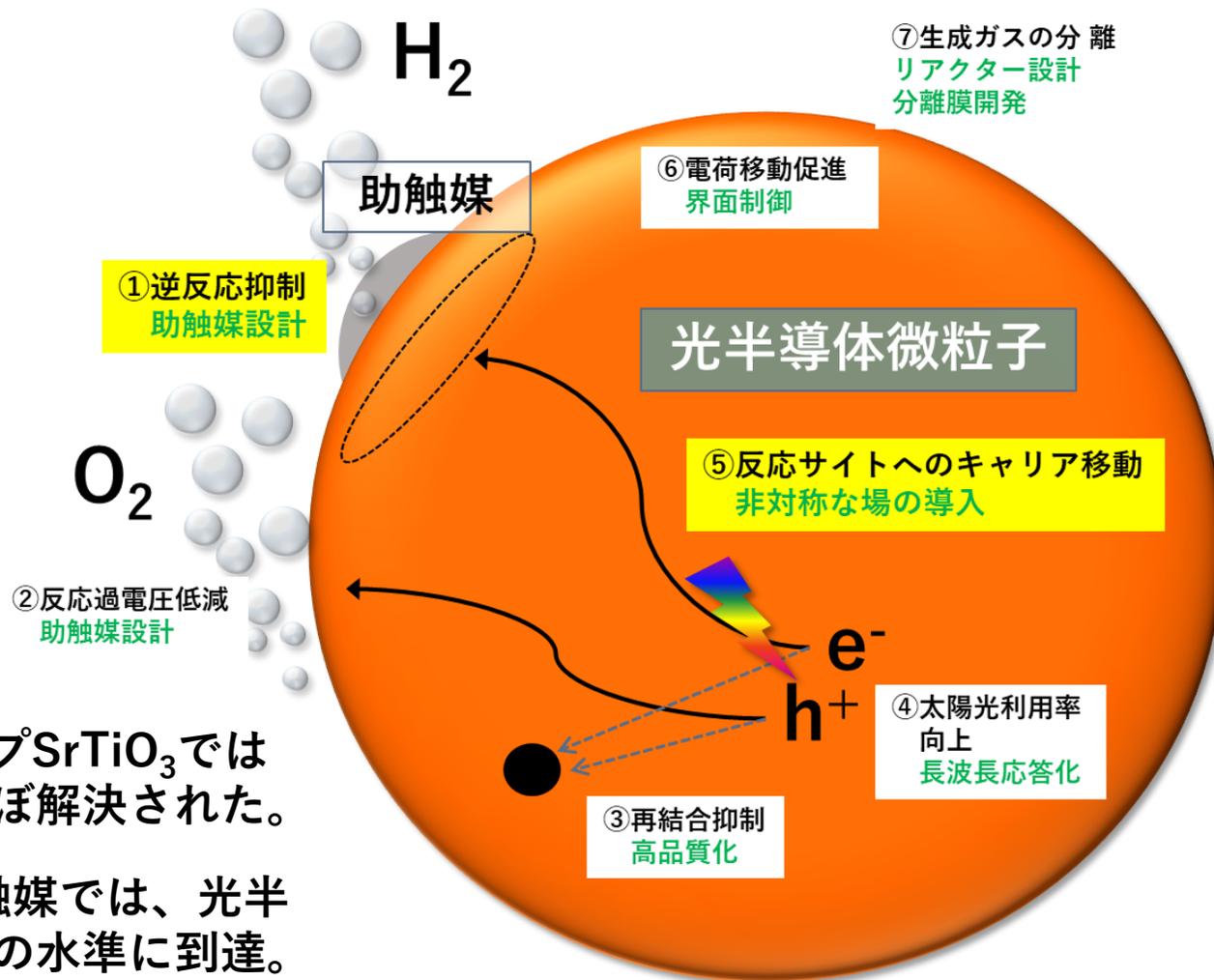
見事に分離



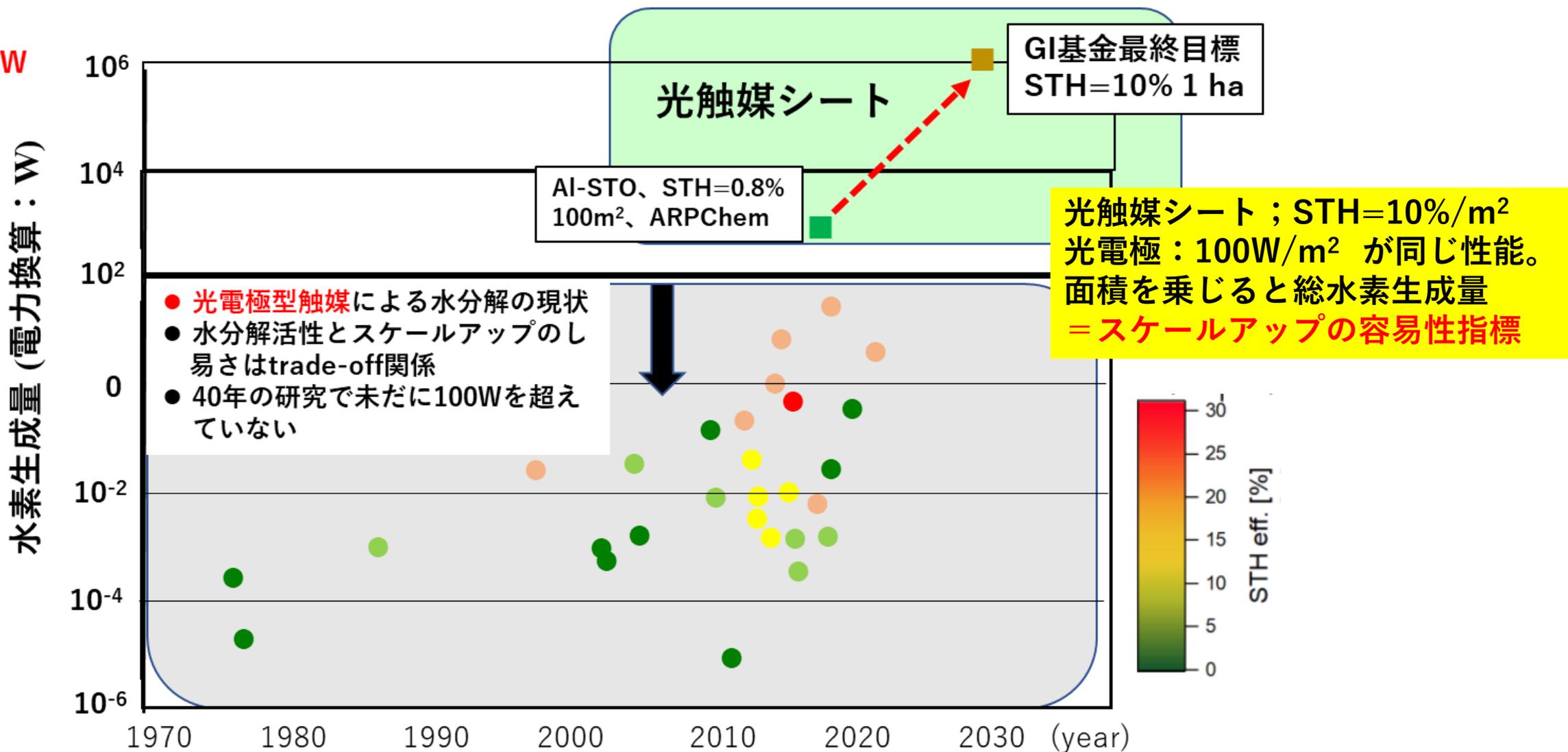
Al-ドープSrTiO₃
単純ペロブスカイト
NUV応答のQE ≒ 100%

信州大学・東京大学

- 近紫外光応答Al-ドープSrTiO₃では①～⑦の全課題が、ほぼ解決された。
- 可視光応答酸硫化物触媒では、光半導体自身の開発は相応の水準に到達。
- 活性発現には、特に①、⑤辺りの**助触媒との界面設計**が最優先課題)



1000KW



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

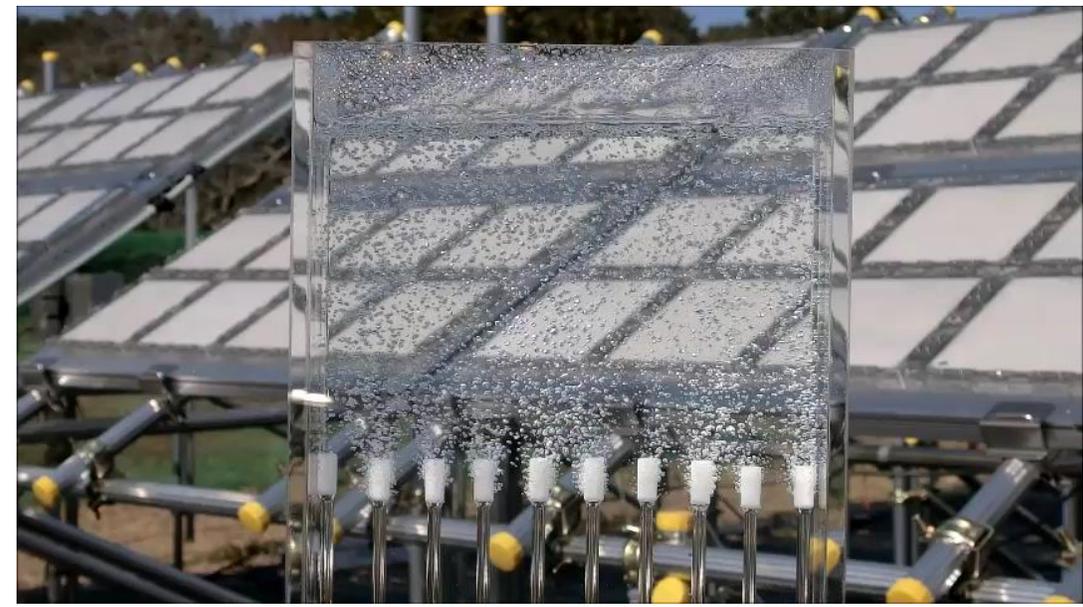
① 光触媒及びプロセスの開発
安全/選択的水素分離プロセス開発

ガス分離unit



柿岡爆発試験設備でのAl-STO触媒での
100m²級パネルでのField-test
3m² × 33 + 1 m² で構成

分離膜として高分子
中空糸膜を性能評価
(入手可能であり安価)



3 ~ L/min程度の水素が発生
STH : 0.6 ~ 0.8%相当
(近紫外光の限界)

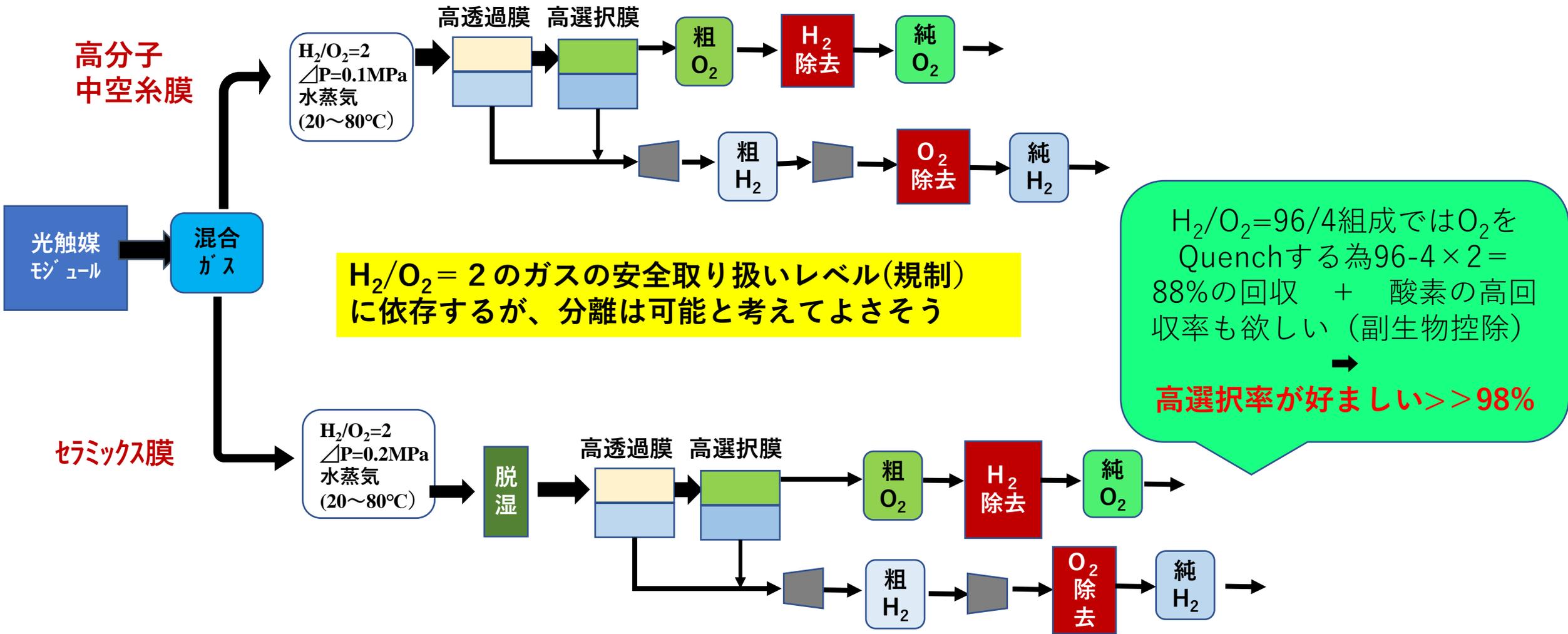
東京大学
信州大学
ARPCHEM

現状
水素濃度 > 95 %(>96%)
水素回収率 > 73 %(>90%)

← 現状では
不十分

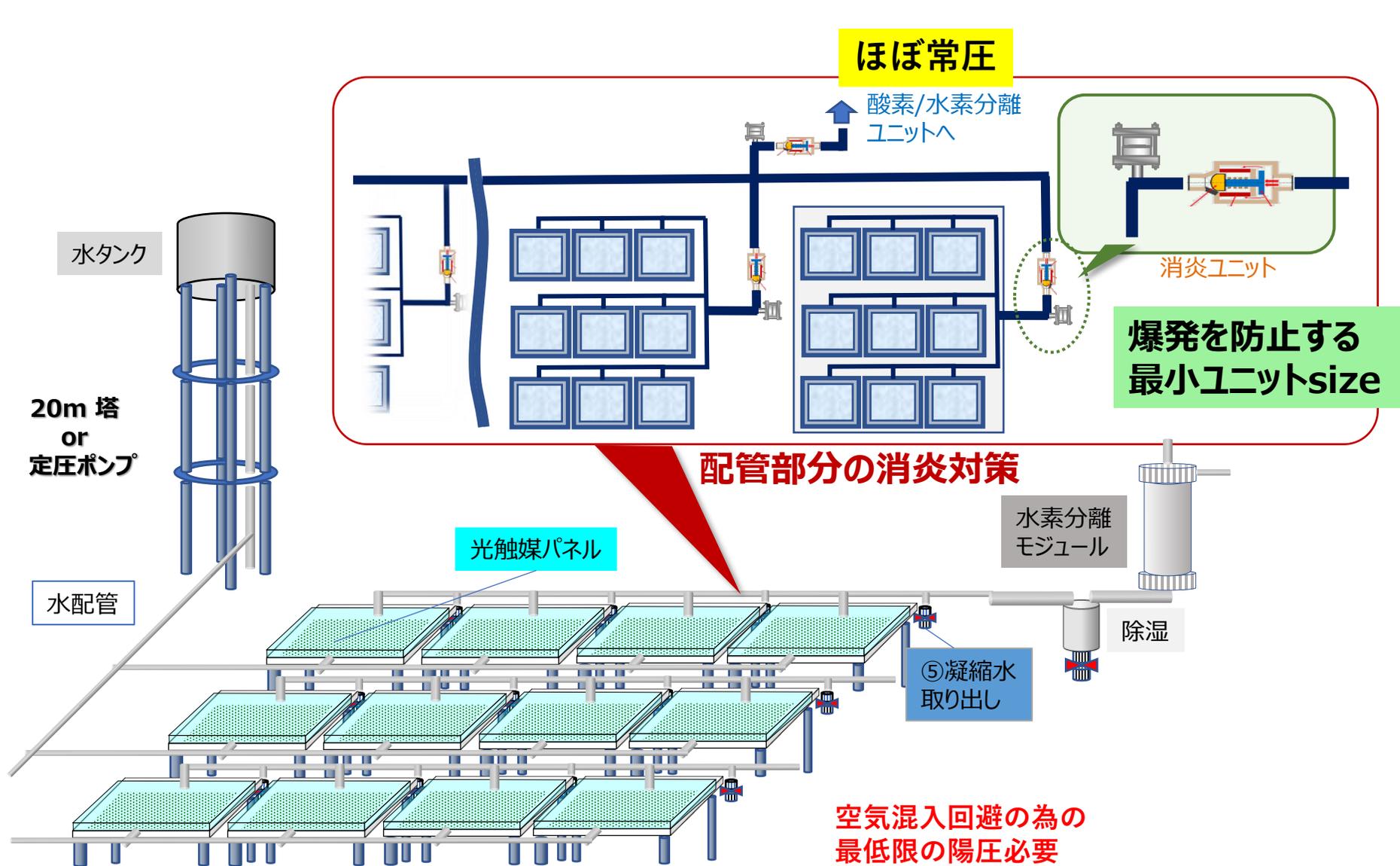
H₂/O₂分離膜の開発状況

水素純度~95%
水素回収率~73%

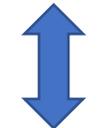


水分解プラントと安全systemのイメージ

成果
考察



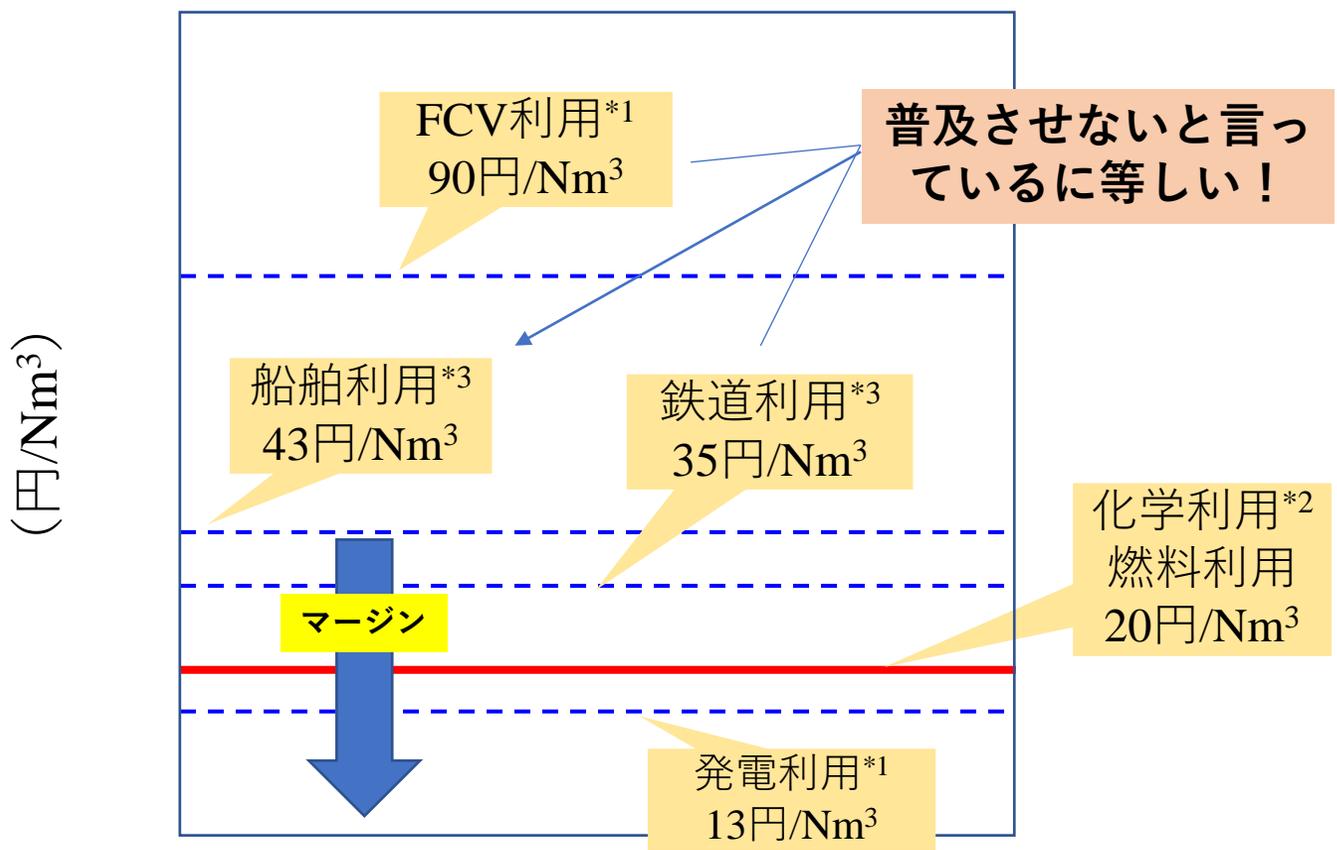
- 安全性のAuthorize要
- 実験規模、時期
- 規則(法) 整備



- 許容コスト
- 触媒シート
- 筐体
- 配管
- 安全設備
- 分離unit (膜+ポンプ,etc)

② グリーン水素製造コストについて

コストパリティ
(2050年)



グリーン水素が大量に普及するには、化石資源由来のブルー水素と等価程度の製造コストが必要！
 ~20円/Nm³
 好ましくは<10円/Nm³

化石資源由来の水素の製造コスト

前提：原油の国際取引価格とエネルギー等価な天然ガスからの水素の製造コスト

40\$/bbl → 200円/kg-H₂ (18円/Nm³-H₂)
 70\$/bbl → 350円/kg-H₂ (30円/Nm³-H₂)

改質経由でのgray-水素の一貫CO₂排出量
 ~8.9kg-CO₂/kg-H₂

褐炭ガス化経由のbrown-水素の一貫CO₂排出量
 ~20kg-CO₂/kg-H₂

いろいろな産業利用で要求される水素価格レベル？

*1：資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会資料 2050年カーボンニュートラルの実現に向け検討 https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/033/033_004.pdf

*2：経産省「令和元年 カーボンリサイクル技術ロードマップ」
<https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002-1.pdf>

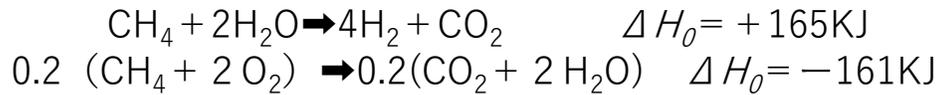
*3：in-house推算

水素の製造コスト、化学原料、燃料の製造コストイメージ

化石資源由来：**LNG：1トンと原油：1.25トンがカロリー等価**

① 原油価格：50 \$ /bbl = 370 \$ /トン ≒ 40¥/kg
ナフサ(取引) 価格 ≒ 43¥/kg
→ オレフィン(エレン、プロピレン) 製造コスト ≒ 75¥/kg

② エネルギー等価なLNG価格 ≒ 50¥/kg



1.2CH₄ + 1.6H₂O + 0.4O₂ ≒ 4 H₂ + 1.2CO₂
理想ケース：水素1kg製造で2.4kgのCH₄使用、6.6kgのCO₂が発生
工業プロセス：水素1kg製造で8.5~kgのCO₂が発生 (高温/高压運転用)
→ 水素1kg製造で、3.2kgのCH₄使用に相当

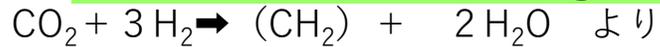
天然ガス由来水素製造コスト：160¥/kg (14¥/Nm³相当) (酸素(空気)の原料費ををゼロとして)

*：CH₄改質による合成ガス経由のオレフィン製造の

既存技術での一貫CO₂排出量：~ 7 kg-CO₂/kg-オレフィン (3.1kg-CO₂のオレフィン燃焼分を加算した値)



➤ **グリーン水素を160¥/kg(14¥/Nm³)**とし、CO₂を炭素源としてオレフィンを75¥/kgの製造コストで実現する



100%収率でのH₂使用量：0.43kg-H₂/kg-オレフィン → 水素原料費：69¥ (160¥/kg-H₂として)

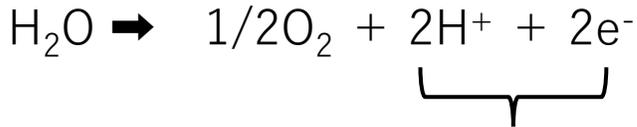
CO₂の使用量：3.14kg-CO₂/kg-オレフィン：削減効果の最大値 (我々の試算では2kg程度)

→ (75-69) / 3.14 ≒ **2 ¥/kg-CO₂**：安価なCO₂価格が必用 : CO₂回収コスト目標

再生エネルギーを利用したグリーン水素を利用する場合でも同等程度の製造コストでなければ、経済合理性は低くなる

電子1個の電気量 = $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$

ファラデー定数 (1モル分の電子量)
= $9.65 \times 10^4 \text{ C/mol}$



水素1モルの生成には
2モル分の電気量が必要

1 C(クーロン) × 1秒 = A (アンペア)
約1.5V: 水の電気分解に必要な電圧

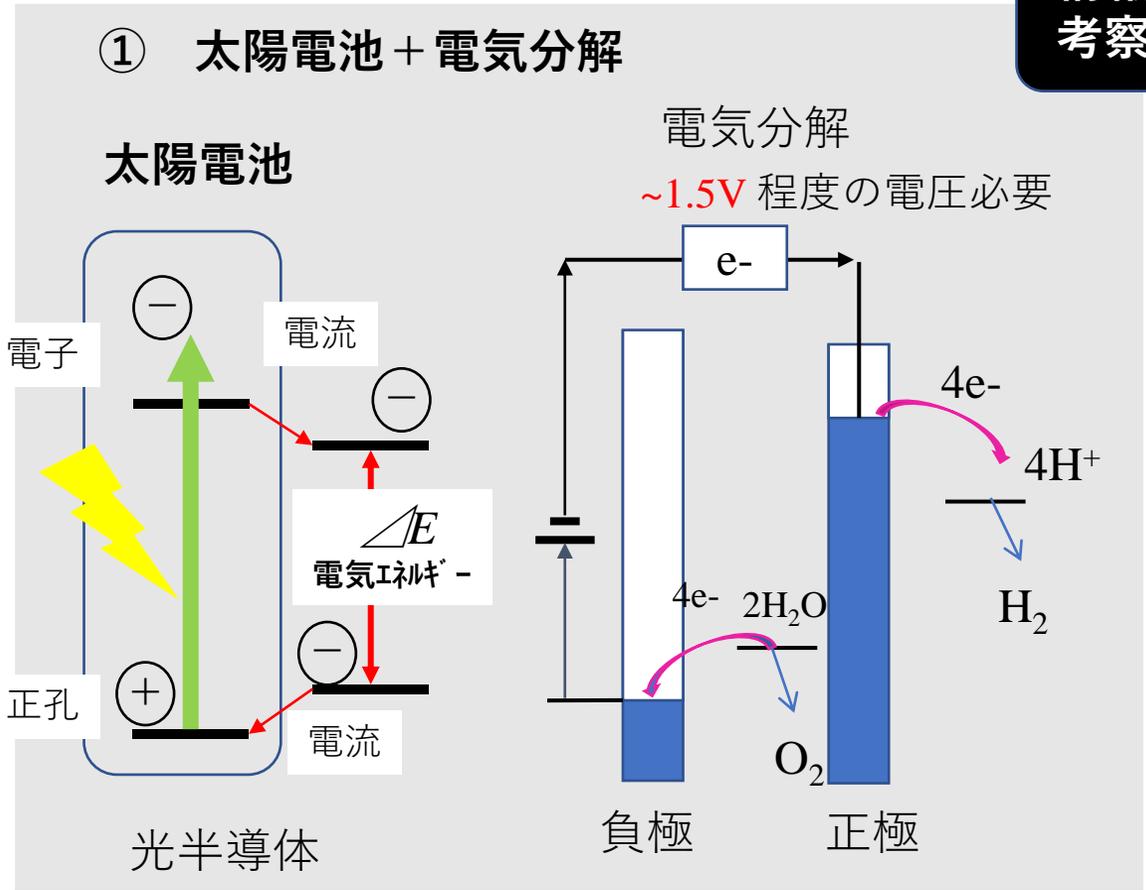


水素1kgを作るのに必要な電気量と
1.5Vの電圧の積が必要な電気Energy
> 50KWh(実際は55KWh程度)

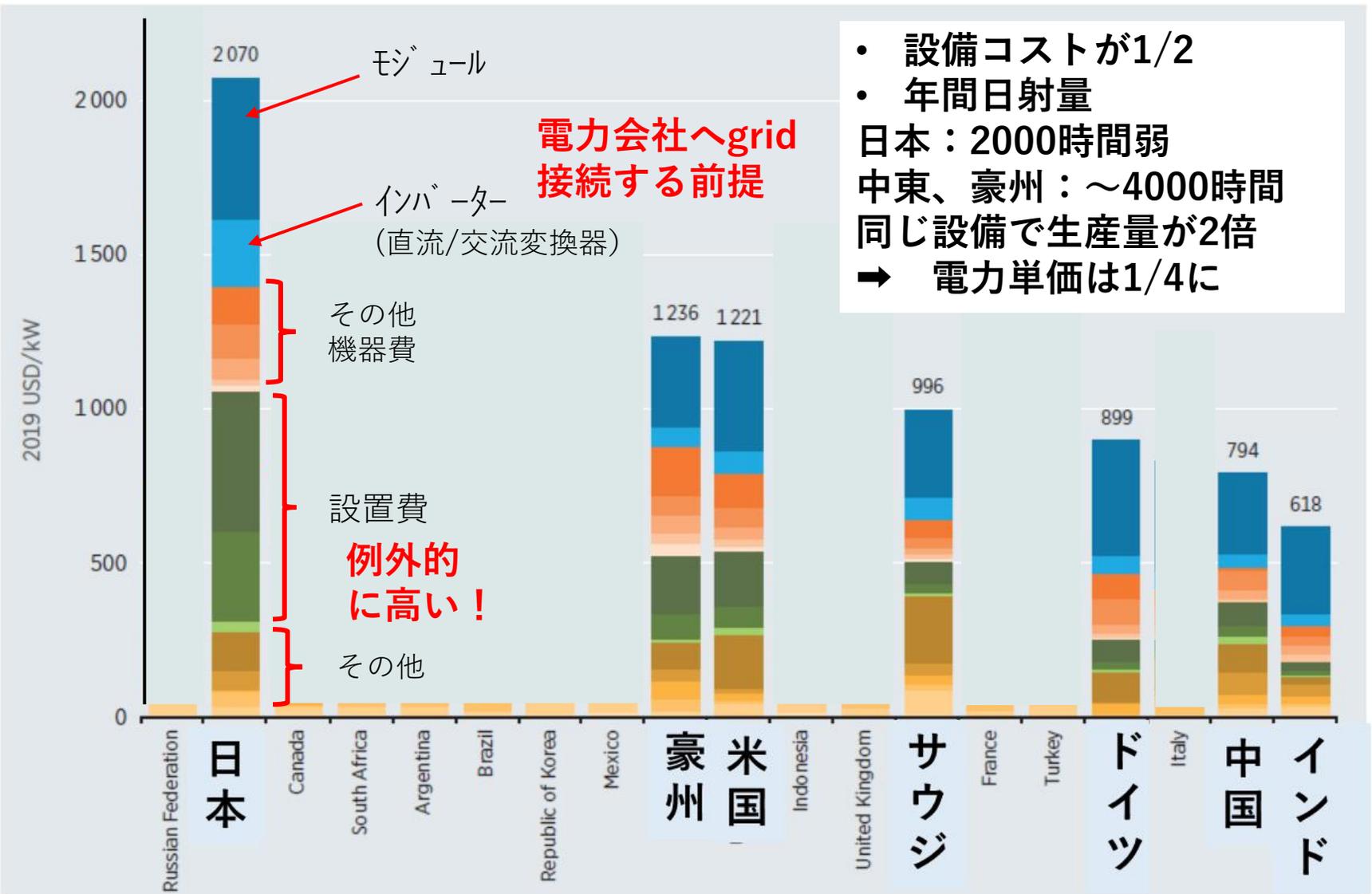
電力単価を8¥/KWhとしても、電気コストだけで440¥/kg-H₂



LNG: 50¥/kg時の化石資源由来H₂の製造コスト: 160¥/kg-H₂
(14¥/Nm³)



日本の再エネ電力コスト：太陽光発電設備の導入コスト構成(2019)



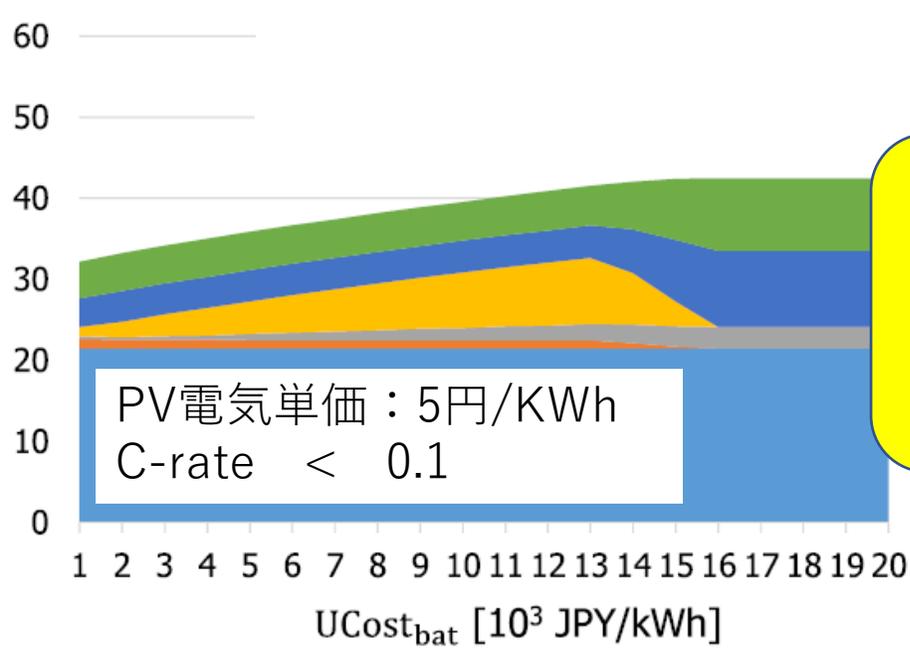
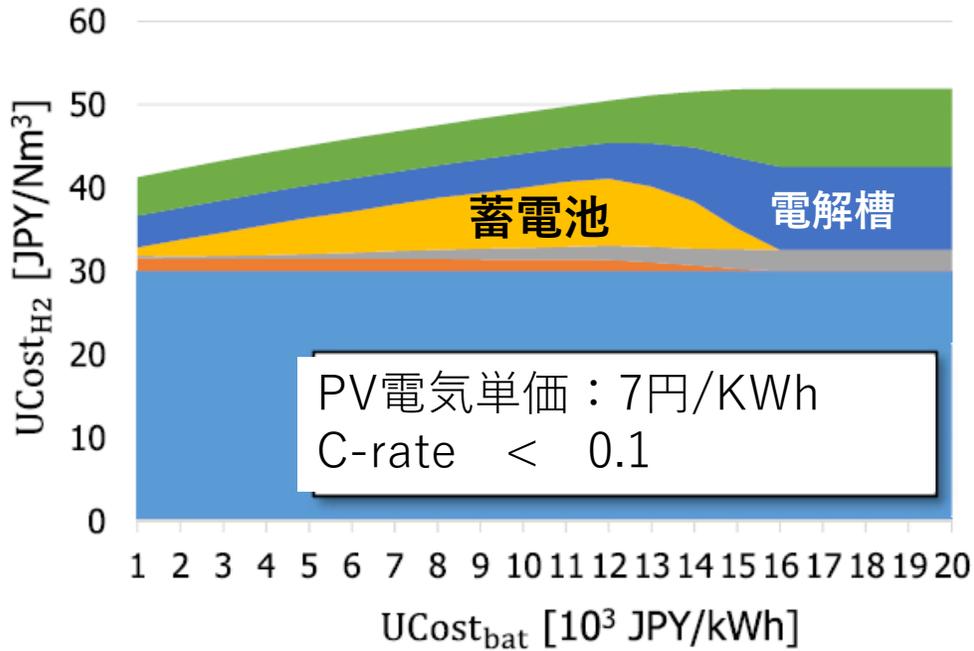
- 設備コストが1/2
- 年間日射量
日本：2000時間弱
中東、豪州：～4000時間
同じ設備で生産量が2倍
→ 電力単価は1/4に

再生可能電力の劇的な低下

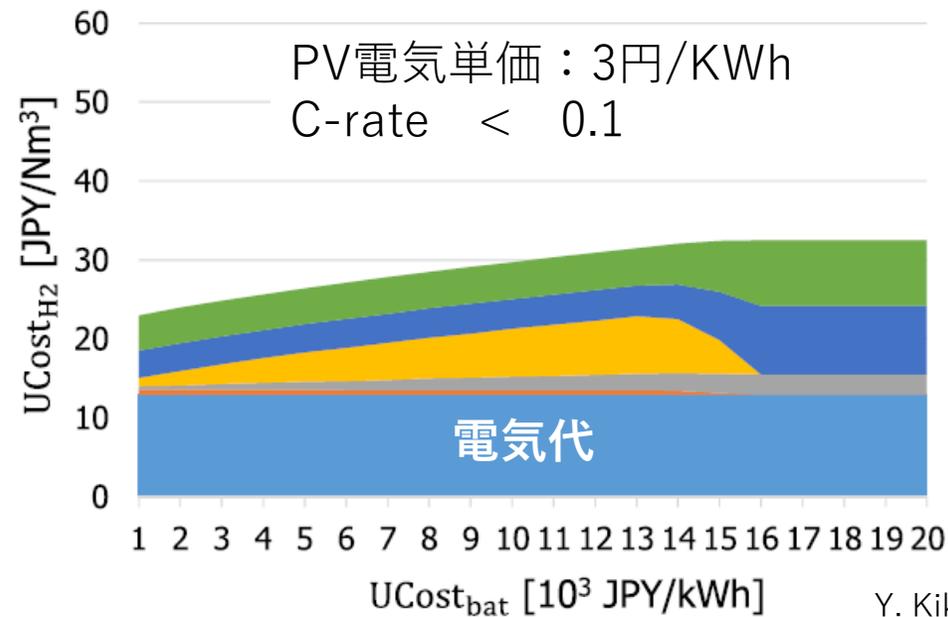
- 中東では1円台後半/KWh

PVグレードSi半導体の
コスト破壊：単結晶育成法
溶融Siの一方向凝固法

地域によっては電気代は安い。電気分解水素は安くなるか？



中東ではPV電力は1円台後半/KWh→水電解との組み合わせで200~円/kg(現地でのコスト)



水素製造コストのPV電気単価依存性

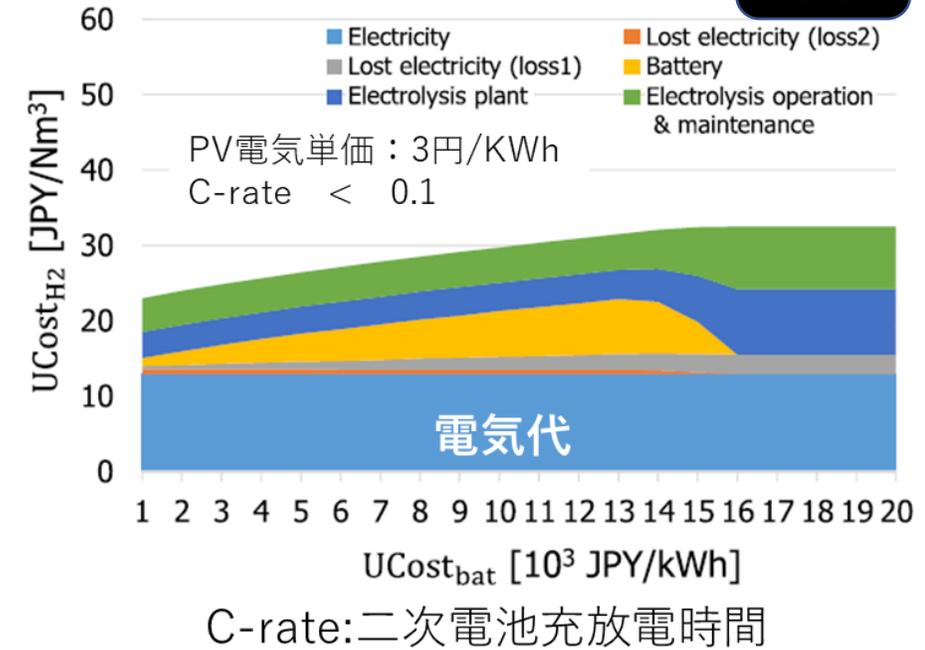
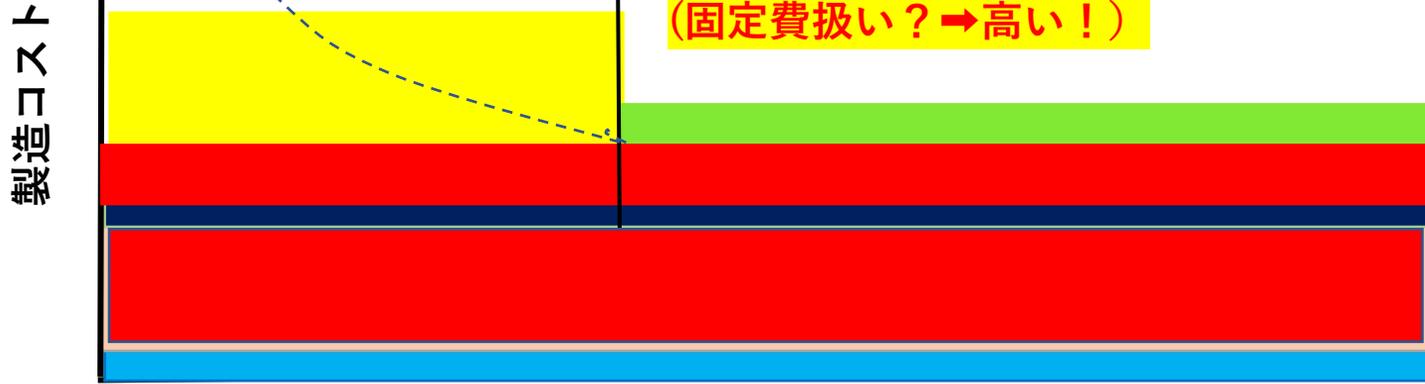
- 3円/KWhでも33円/Nm³(400円/kg-H₂)程度。サヘル地帯でも経済性はない! → 1.5円/KWh なら200円/kg-H₂程度になる。
- どの場合でも総コストは電気代の2倍近くになる。

PV電気単価が電解原単位：~50KWh/kg-H₂に反映されるので水素製造コストは下がらない。化石資源の原料費と同様に作用する!

太陽電池 + 電気分解

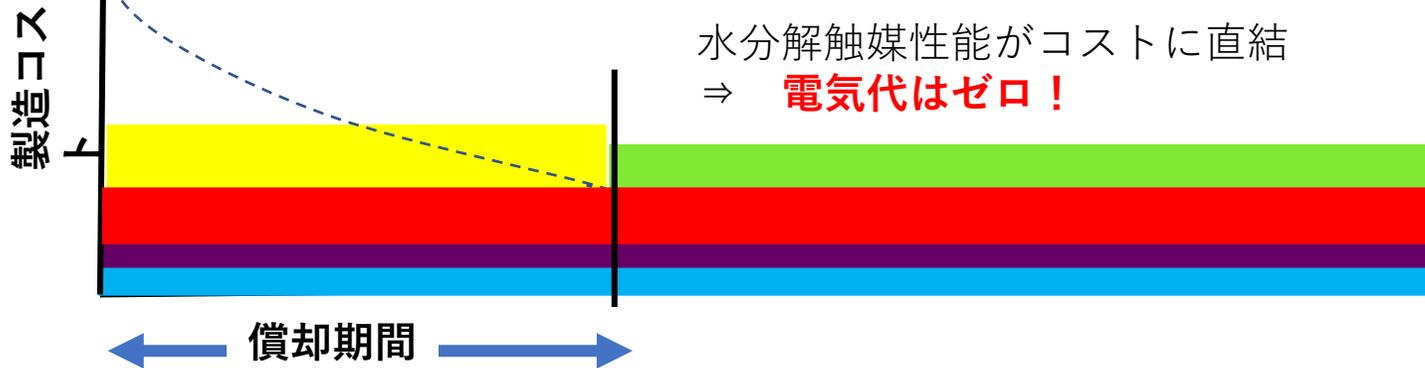
- 3円/KWhでも33円/Nm³(400円/kg-H₂)程度。サンベルト地帯でも経済性はない! → 1.5円/KWh なら200円/kg-H₂程度

50~KWh/kg-H₂の電気代が発生
電圧調整、蓄電池等付帯設備多い
電気代をカウントしない仕組み
(固定費扱い? → 高い!)



光触媒法水分解

水分解触媒性能がコストに直結
⇒ 電気代はゼロ!



ゼロ!

- : 平均償却費
- : 修繕費
- : 固定費
- : 運転エネルギー費
- : 電気代(電気分解)
- : 原料水コスト

究極のソーラー水素製造法 ⇒ 光触媒法水分解

表 Solar-H₂製造の立地依存性と経済性確保に必要な触媒活性、モジュールコスト

成果
考察

STH		10					5	10		15	
立地 年間日照時間		赤道直下(4000時間)						日本(1950時間)			
実質年間日射量(理論量×0.75)		1950 KWh/m ²						1050 KWh/m ²			
単位面積当たりの 年間ガス生成量kg/m ²	水素	5.93					2.96	3.22		4.83	
	酸素	47.4					23.7	25.8		38.7	
ガスの経済価値* ¹ 生産額/年・m ²	水素(350¥/kg)	2076(1186* ²)					1038	1127		1691	
	酸素(10¥/kg)	474(251)					237	258		387	
	合計(¥/年・m ²)	2550(1437)					1275	1385		2078	
償却条件 複利	金利(%)	4									
モジュールコスト	¥/年・m ²	3万円	2万円	2万円	1万円	1万円		1万円		2万円	
償却期間	年	20								15	
年平均償却費	¥/年・m ²	2160	1440	1440	720	720		720	720	1440	1780
年平均利益	¥/年・m ²	390	1110	-3	1830	555		665	1358	638	298
水素事業のみでの年平均利益	¥/年・m ²	-84	636	-254	1356	483		407	971	251	-89

* 1 : 原油70\$/bbl時のエネルギー等価LNGの改質により得られる水素コスト

* 2 : 原油価格がより安価で、水素製造コスト=200¥/kgにスライドさせた場合 (原油:40\$/bbl 相当)

償却期間20年とすると

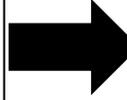
- 国内では (STH=10%、1万円/m²) or (STH=15%、2万円/m²) が目安。
- 海外では (STH=10%、2万円/m²) (STH=5%、1万円/m²) が目安。
- 水素単独での事業、触媒コスト (変動費扱い=短寿命時) の取り扱いの事業性感度が大きい。

原料コストについて

① 触媒コスト (+ 寿命)

目標性能に到達した粉末光触媒の予想される材料、形状等

- サブミクロンsizeの単分散に近い酸（窒化/硫化）物光半導体
- 異なる結晶面上にナノsizeの水素/酸素助触媒がそれぞれ担持



触媒シート
塗布法で2um厚
比重5.0で完全被覆としても
 $2 \times 10^{-4} \times 5 \times 10^4 = 10\text{g/m}^2$
充填率を考慮： **$\sim 5\text{g/m}^2$**

例えば0.1wt-Co (Ir) /0.1wt%-Pt/Y₂Ti₂O₅S₂の場合、触媒1kgあたりの主要金属使用量と購入コスト

Y含有量：426g/kg-cat → 4000円/kg × 0.426 ÷ 1700円/kg-触媒

Pt含有量：1g/kg-cat → 3500円/kg-cat、 Ir含有量：1g/kg-cat → 15000円/kg-cat (高い)

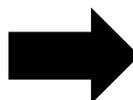
Co含有量：1g/kg-cat → 6円/kg-cat

：**原材料費**は高く見積もっても、**3万円/kg-cat.程度**

→ 製造コストとして10万円/kg としても、**500円/m²程度**にしかない。(寿命は一年でもよいが
回収・入れ替え？ 再生？)

② 水の原料コスト

- 9kg-H₂O/kg-H₂の使用
- 海水淡水化設備での淡水製造コスト
：80~120円/m² → ~0.1¥/kg
- 一般的な淡水化プラントの規模
：30~100万トン/日

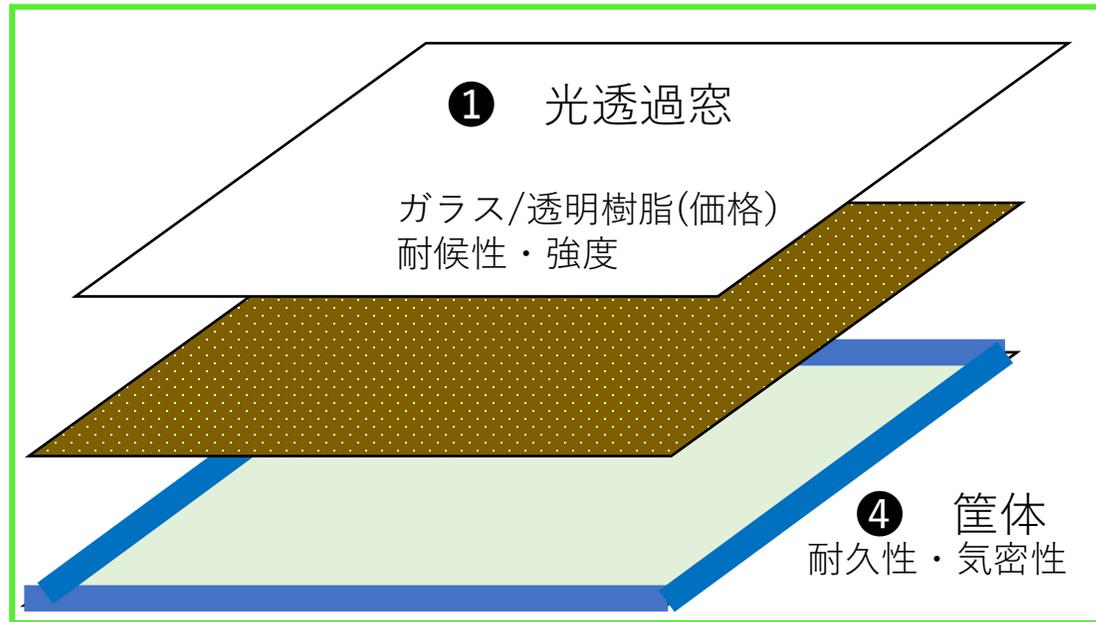


- 水の原料コスト：~1¥/kg-H₂ (**場所により販売価格は動く → 切り離す必要**)
- 10万トン-H₂/年の水素製造プラント
= 90万トン-H₂O/年 ÷ 2400トン/日

+ 微量でもCl⁻の除去は必用 (負担は小)

光触媒モジュールの構成

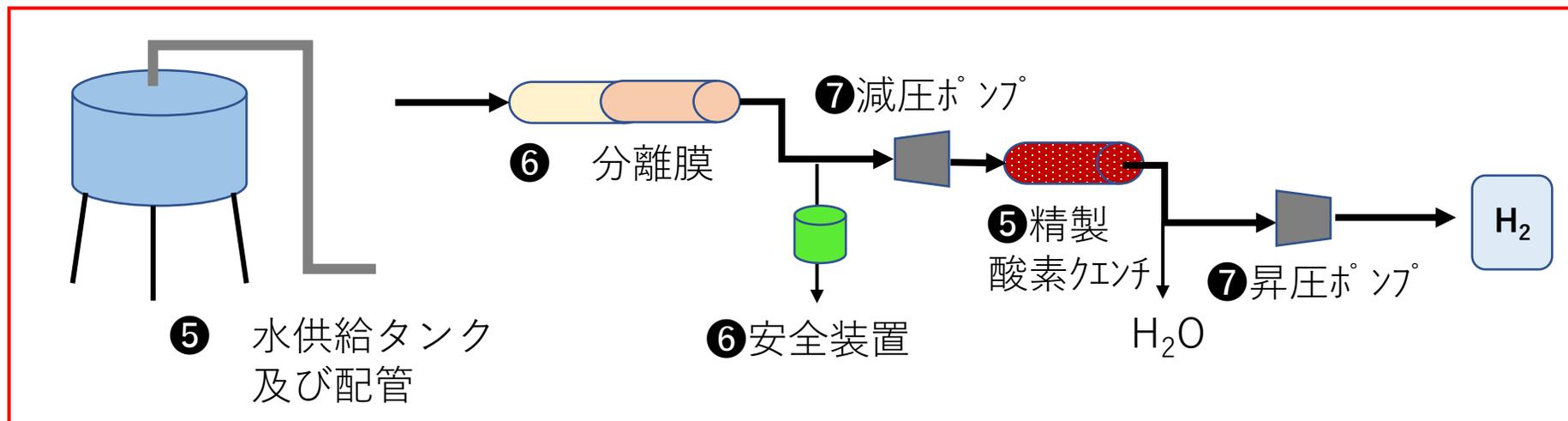
- ① 光透過窓
- ② 触媒
- ③ 触媒シート
- ④ 筐体
- ⑤ 水供給タンク及び配管
- ⑥ ガス分離膜及び配管
(含精製+安全装置)
- ⑦ 減圧/昇圧ポンプ



- ②光触媒 + ③触媒シート
触媒コスト(製造コスト+寿命)
シート材料コスト
塗布・成膜コスト

単位面積モジュール
として低コスト化する
Numbering-up

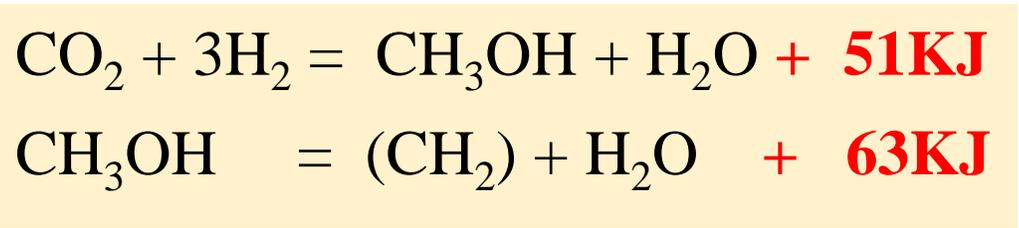
基本的に異なる
方法論の調和で
の設計が必要



集合設備を低コスト化
→ 面積単価を下げる
Scaling-up

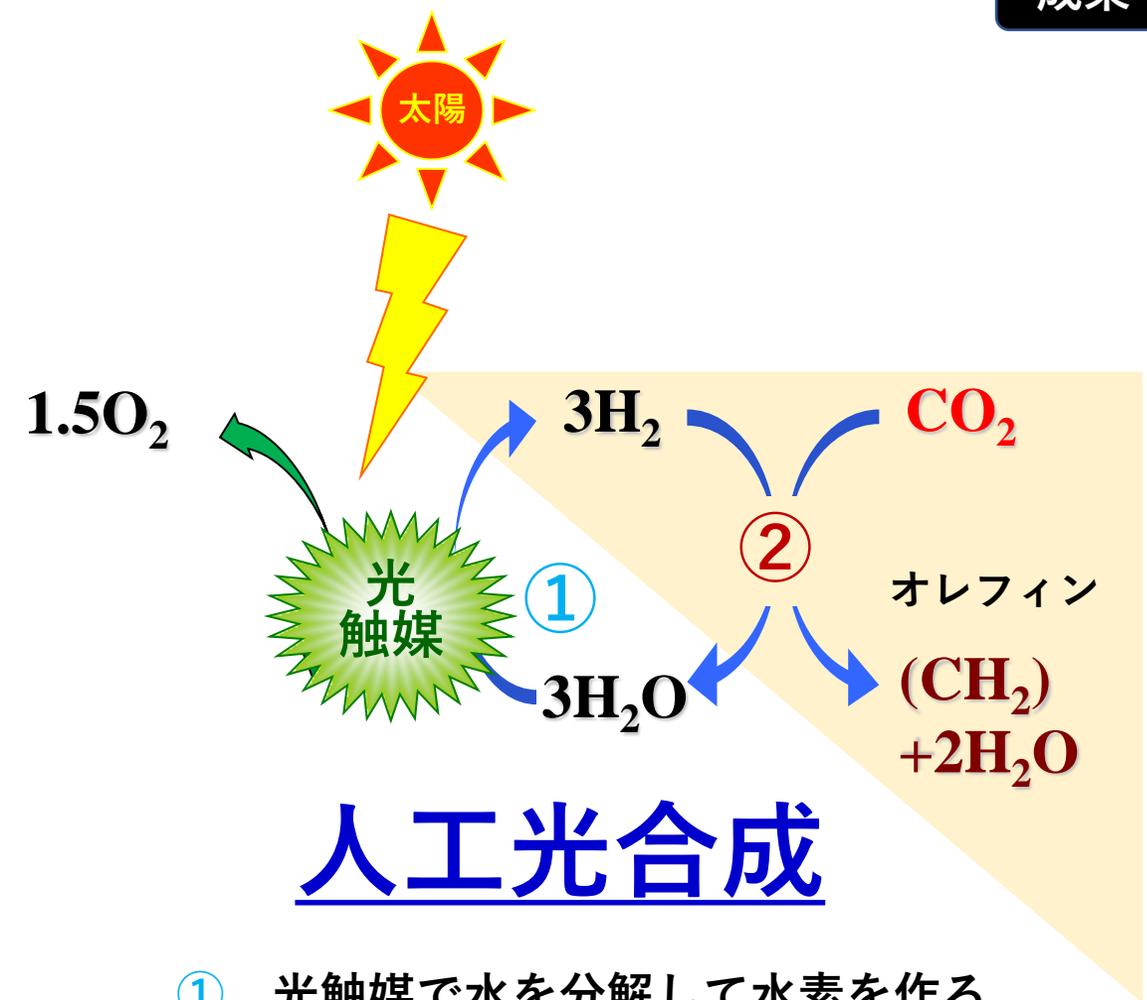
③ CO₂とグリーン水素からの化学品製造について

CO₂とH₂からの化学品製造



- いずれも発熱反応であり、**エネルギーとして回収可能** (Crackerと決定的に違う点)
- 可能な限りの省エネプロセスを追求し**CO₂排出ミニマム化**を目指す。

➔ **グリーン水素との組み合わせで、CO₂吸収の最大化を目指す。**

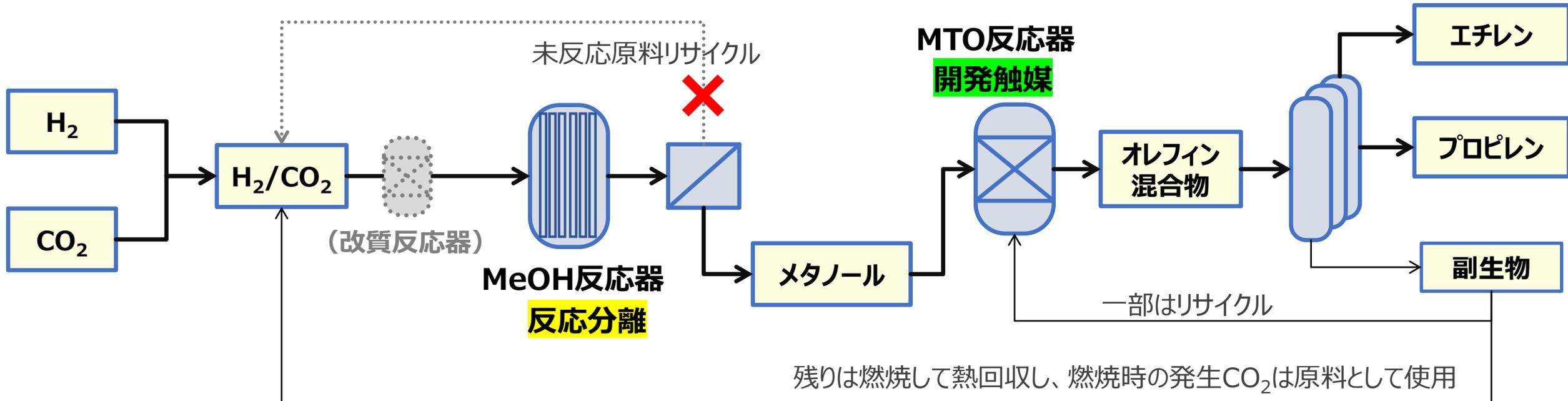


人工光合成

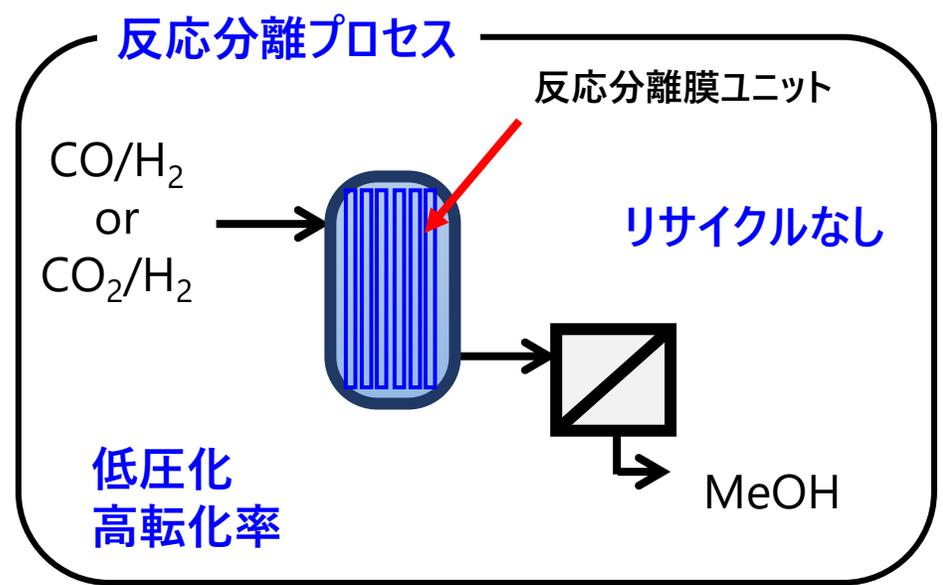
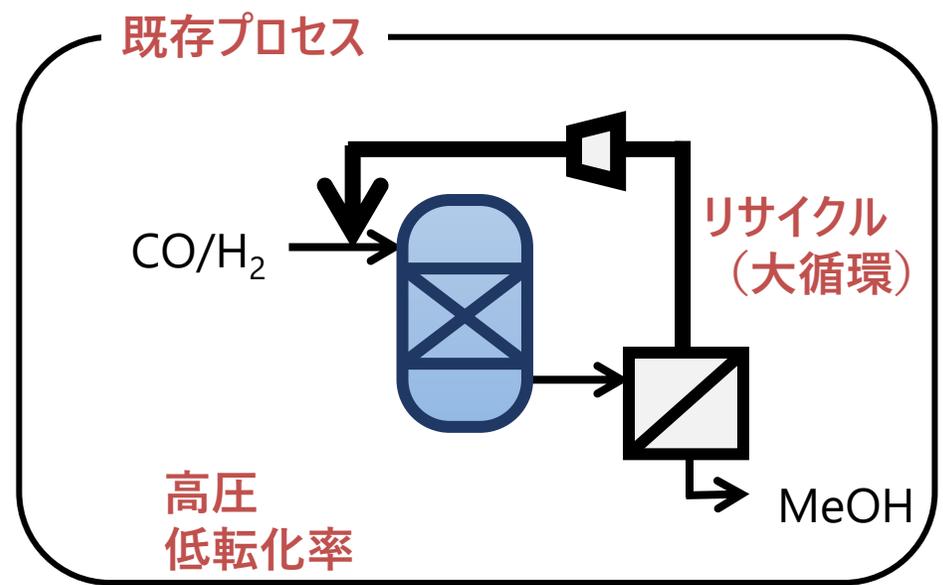
- ① 光触媒で水を分解して水素を作る
- ② 水素と二酸化炭素から化学原料を作る

メタノール反応分離プロセス + 革新的MTO触媒プロセス概要

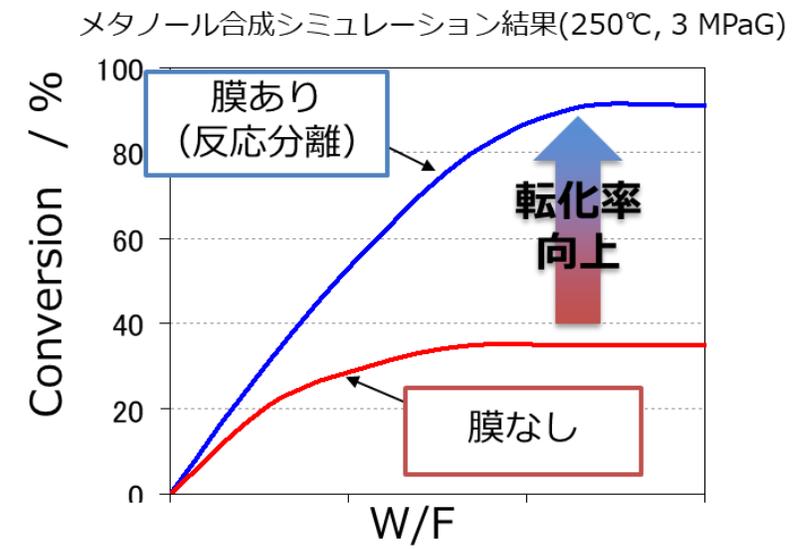
成果

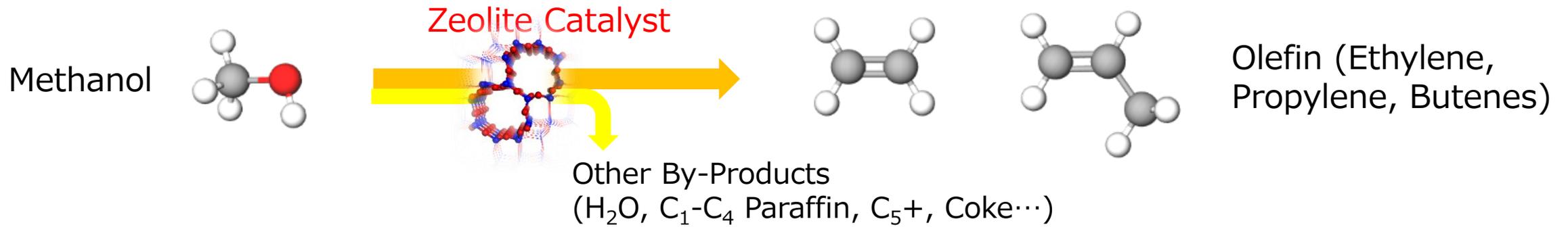


	既存プロセス	新規プロセス
MeOH	<ul style="list-style-type: none"> 現状は主に合成ガスCO/H₂原料を使用 CO₂/H₂原料では、反応効率悪く、高压条件(8~10MPa) & 未反応原料のリサイクル必要 副生水による触媒劣化も課題 	<ul style="list-style-type: none"> 反応器から膜でMeOH/H₂Oを抜き出すことで反応効率を大幅に向上 → 低圧化(<5MPa) & 未反応原料リサイクル低減 or ゼロを達成可能 ➔ 設備投資20%以上の削減
MTO	<ul style="list-style-type: none"> 目的とするオレフィンの生産性向上が課題 MTO エチレン/プロピレン比 = 0.5~1 MTP プロピレン65 - 70% 	<ul style="list-style-type: none"> 開発触媒により目的とするオレフィンの生産量を最大化 MTE エチレン/プロピレン比 = ~5, 収率 > 75% MTP プロピレン75%以上



- 既存プロセス (触媒のみ)
 熱力学的平衡により、転化率を高めることができない
 → 平衡収率30-40%で、未反応原料を大量にリサイクル
 (建設費 & 変動費大)
- 反応分離プロセス (触媒+膜)
 ゼオライト膜を用いて生成物を選択的に抜き出し、
 平衡以上の転化率を実現
 → **反応圧力の低圧化、転化率の大幅な向上が可能**
 (建設費・変動費を低減)





※IHSレポートを元に算出

※ラボワンパス選択率

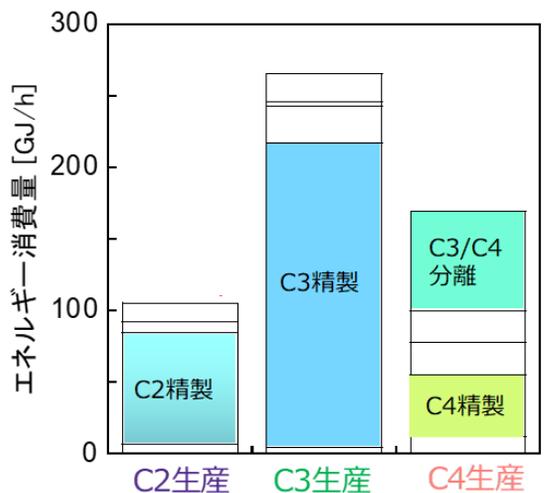
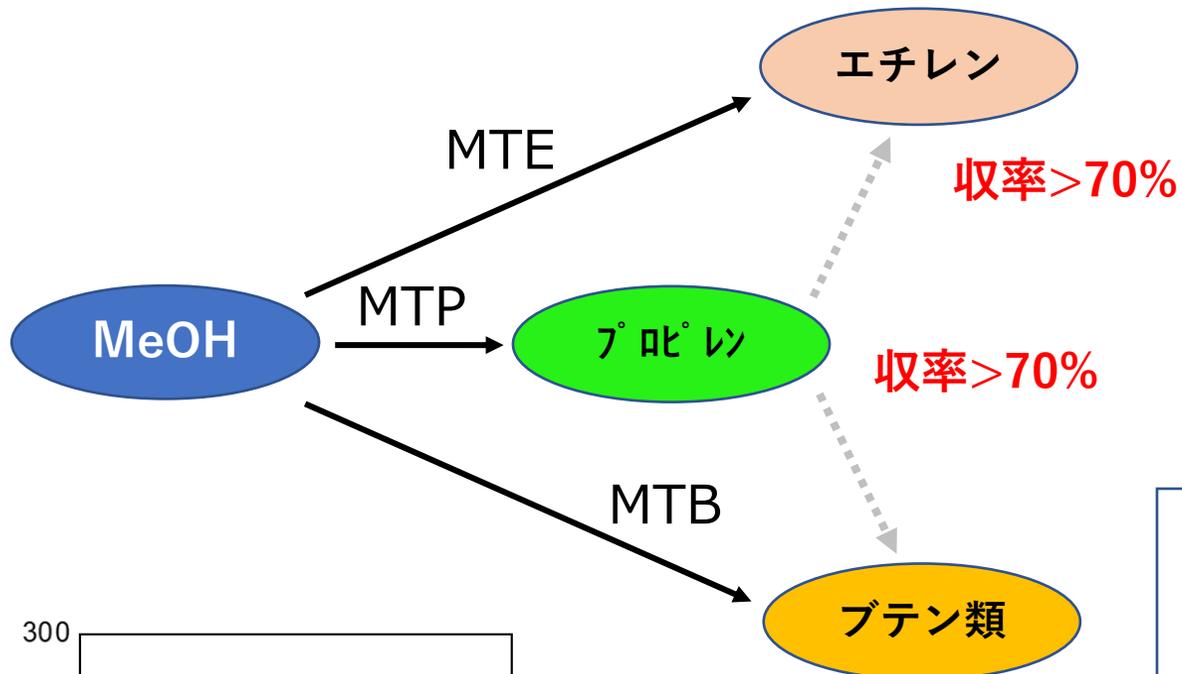
既存触媒	反応成績※
SAPO-34	エチレン39% プロピレン39%
ZSM-5	プロピレン65-70%



開発触媒	反応成績
MTE	エチレン > 70%※
MTP	プロピレン > 75%

Crackerでの**連産品呪縛**（コンビナート形態）から欲しい
オレフィンだけを生産する**On-demand型MTO**プロセスを目指す

蒸留 + 膜分離の組み合わせによる運転エネルギー推算

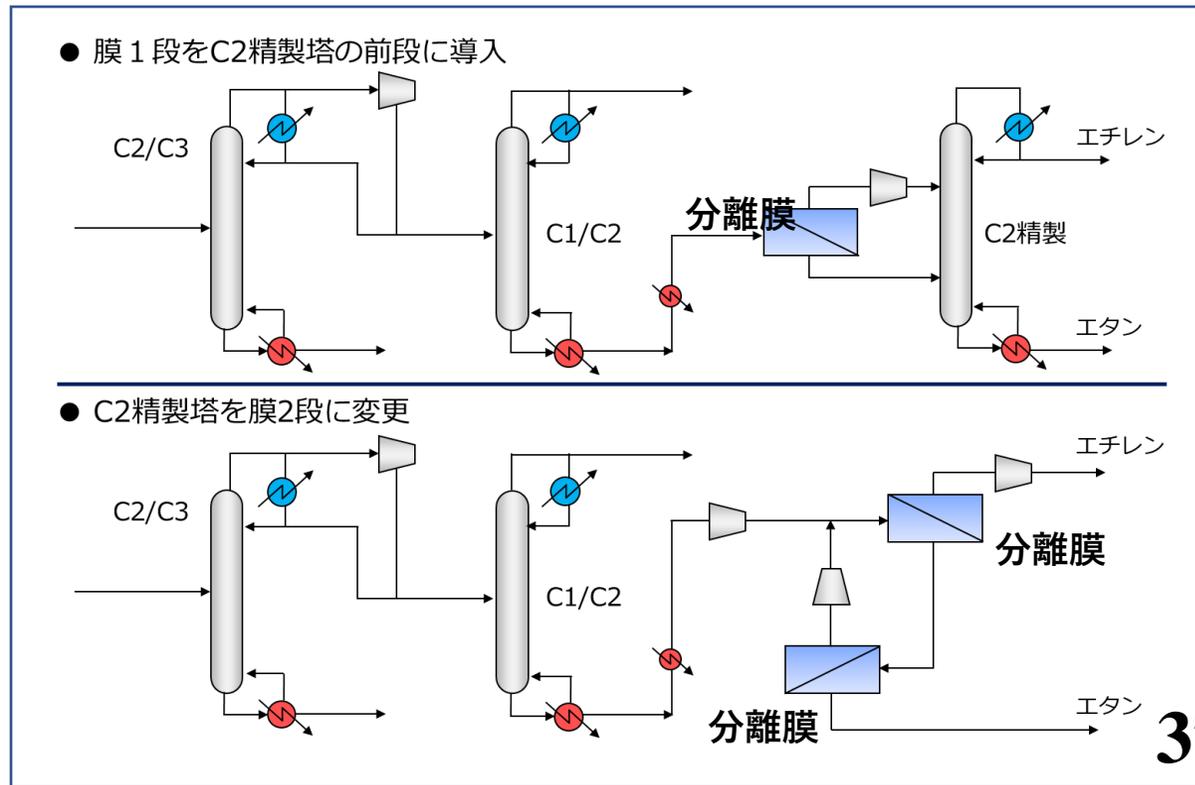


各オレフィン単産プロセス蒸留分離のエネルギー消費

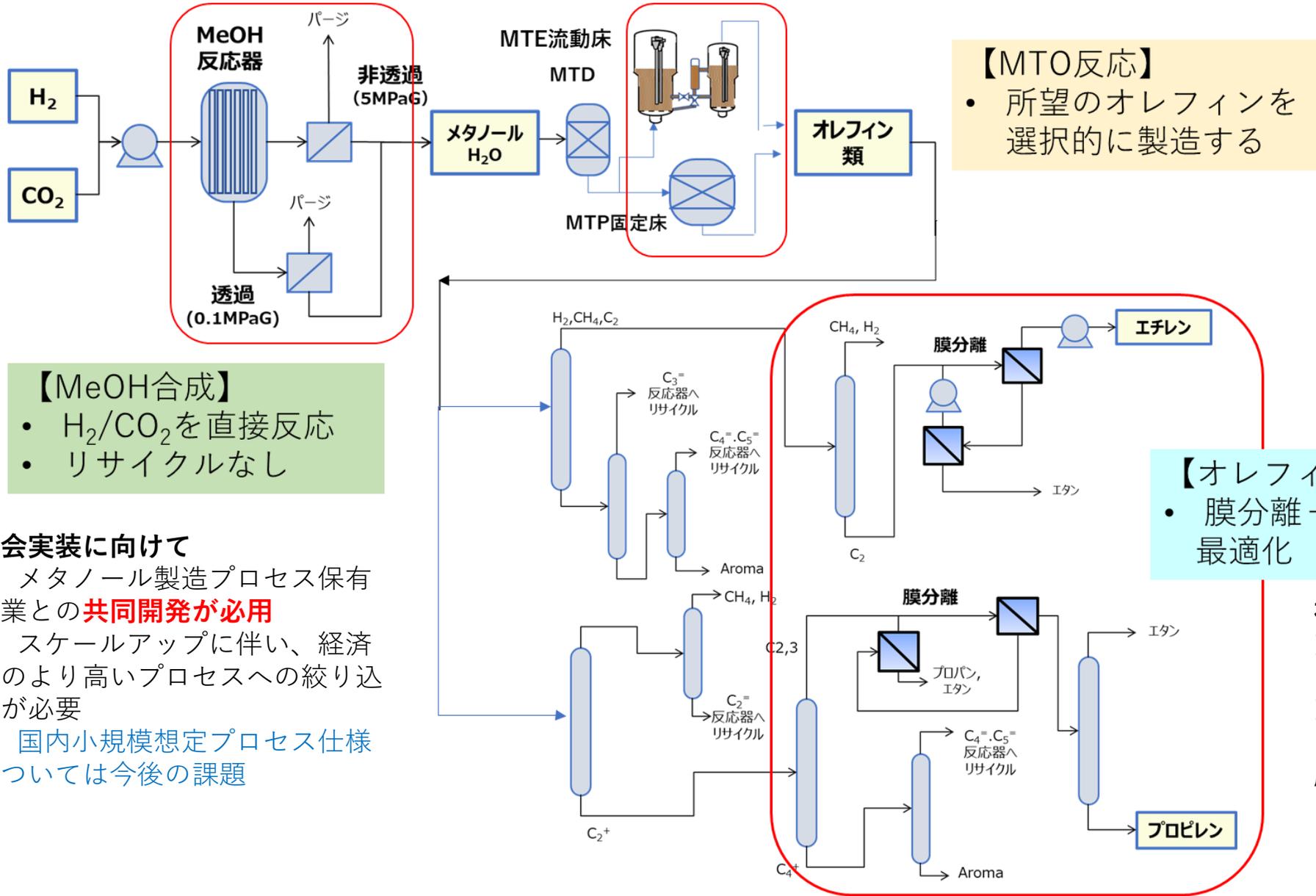
Cracker限定での省エネを極めるとい手法の最適解



On-demand型MTO反応によるオレフィン分離において、蒸留のみの分離に対して、蒸留分離 + 膜分離の組み合わせで大きな省エネ効果を期待？



CO₂/H₂からのオレフィン製造プロセスのまとめ & 課題



【MeOH合成】

- H₂/CO₂を直接反応
- リサイクルなし

社会実装に向けて

- メタノール製造プロセス保有企業との**共同開発が必用**
- スケールアップに伴い、経済性のより高いプロセスへの絞り込みが必要
- 国内小規模想定プロセス仕様については今後の課題

【MTO反応】

- 所望のオレフィンを選択的に製造する

社会実装に向けて

- MTPは開発実績のあるプロセスの触媒転換で対応可能。
- MTEは流動床プロセススケールアップ検討要

【オレフィン分離】

- 膜分離+蒸留での最適化

社会実装に向けて

- 大きな省エネ効果の確認が出来た段階
- スケールアップの方法論を詰める必要有り (処理量と膜必要量がimbalance) → MeOH合成、MTOの次？

⑤ 社会実装に向けた課題

そうは言ってもいろいろ課題有り・・・

+100
+90
+80
+70
+60
+50
+40
+30
+20
+10

1年あたりの
CO₂排出量
(Gigaトン)

Carbon Neutral の必要性

パリ合意以前の2014年時点では
世紀末までに4°C近い気温上昇が
起こる軌道にあった。

パリ宣言以前の方針：
2100年までに産業革命前
の3.5~4.2°Cの上昇と予測

地球全体での
蓄積排出量

現在の方針：
2.7~3.1°C程度の上昇に抑制

現状では急速なクリーンエネルギーの
普及のおかげで、世紀末には3°C程度
の上昇が予想されるが、それではまだ
破局的なレベル。

期待値：
2.1~2.4°C程度の上昇に抑制

多くの国で予想以上にCO₂排出削減
が進んでいる。これを全世界に展開
できれば世紀末では2~2.4°C程度の上昇に抑制できる。

1.5°C以下の温度上昇抑制の必要性

世界の多くの科学者や政治家は
大きな気温上昇はあまりにも危険
であり、1.5°Cの閾値以下までの
抑制を可能にする大きな方針転換
が必用であるとしている。

1990 2000 2010 2020 2030 2040 2050 2060 2070 2080 2090 2100

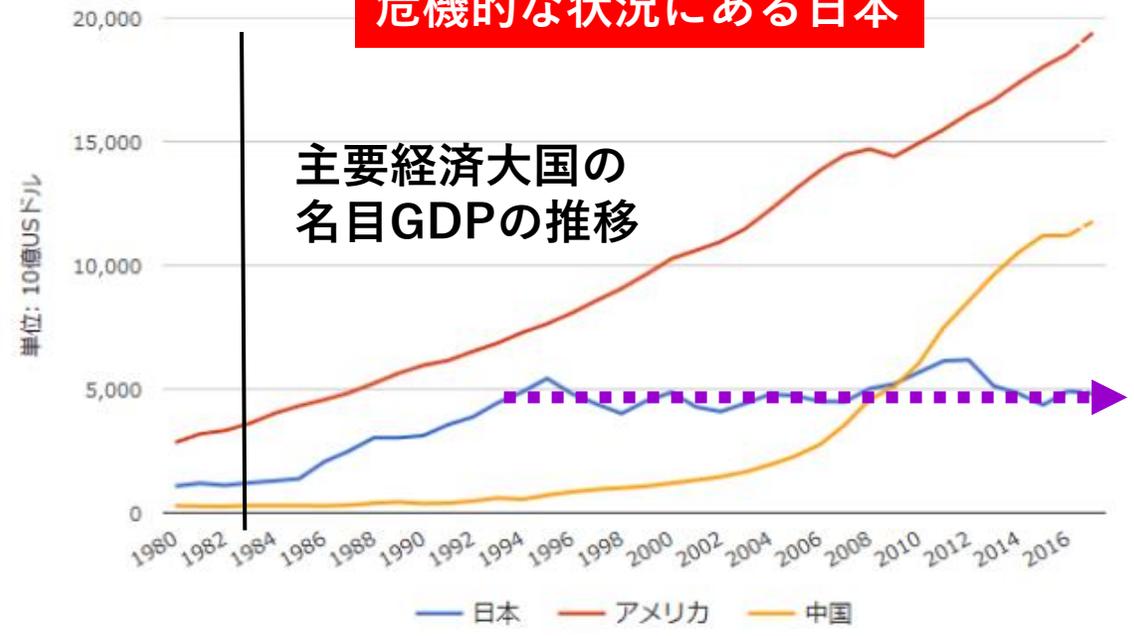
気候変動問題に関わる最近の動き

2030年までにCO₂排出を50%削減
2050年までにCarbon Neutralを目指す

米国：インフラ・環境対策への数100兆円の投資
EU水素戦略2030：2030年までに60兆円規模の投資
日本：METIを中心とした2兆円規模のGI基金

**急速な再エネ転換（付け焼刃＋経済性を無視した
技術導入＋化石資源divestmentによるエネルギー不足
・化石資源高騰、Supply-Chainの混乱**

危機的な状況にある日本



日本の化石資源輸入量(2019)

- 原油：1.5億トン
(ガソリン(自動車)：28%、JET燃料(航空):9%、ナフサ(化学)：10%)
 - 天然ガス：～0.8億トン(ほぼ発電)
 - 石炭：1.1～億トン
(45%：発電、35%:鉄鋼)
- 合計：3.5～億トン/年
→ **CO₂排出量：12億トン/年**

カーボンニュートラルの規模感

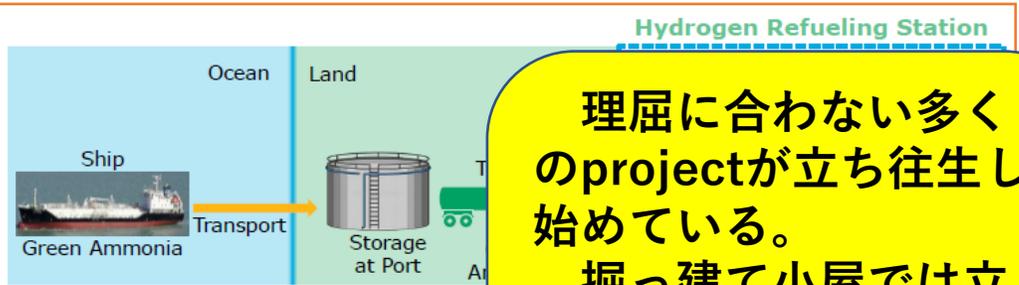
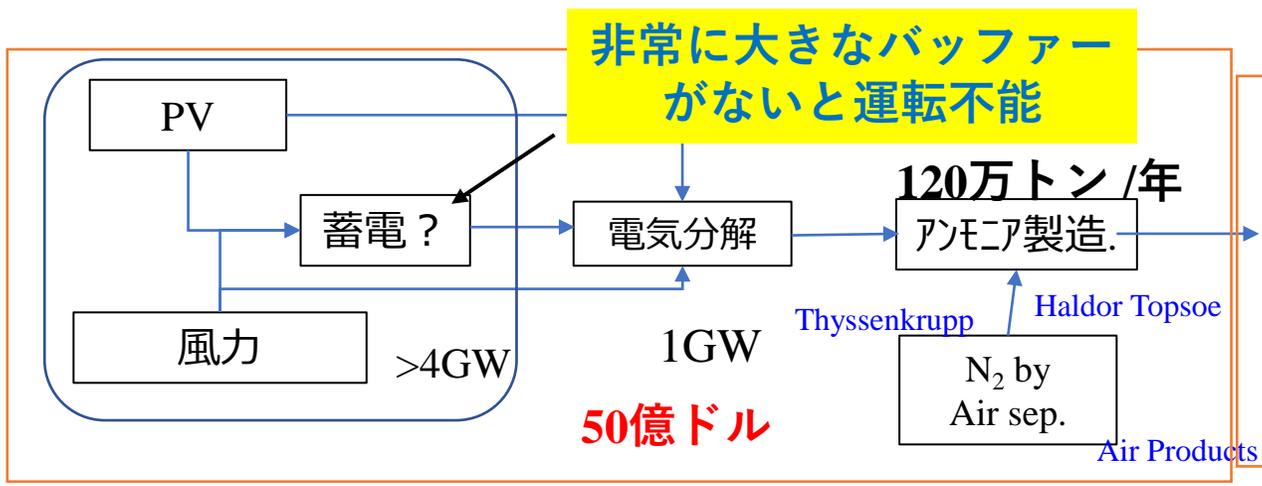
- △**CO₂:300億トン/年**
- CO₂回収費：2¥/kg としても
60兆円/年の回収費用
-
- 再生可能Energyへの転換
- G-H₂と組み合わせたCO₂の資源化(炭素循環)

革新的なCO₂削減技術が必用
だが、既存技術の延長線上での対応 = エネルギーインフラの再構築が必用であり、巨額の投資必要だが、世界への波及効果が大い
→ **日本経済復興の切り札になるはず！（欧米に追従しない差異化された技術戦略を作るべき）**

① サウジアラビアのNEOM -PJ

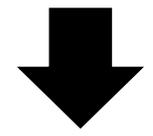
安定生産の問題？

大型plantは連続運転が必須



理屈に合わない多くのprojectが立ち往生し始めている。
掘っ建て小屋では立ち行かないはず・・・。
→ 世界に発信できるほどの技術を提供できるか？

20億ドル



水素キャリアの問題？
コスト、設備投資

② カーボンニュートラルに向けたEUの水素戦略2020

再エネ+水の電気分解で水素を製造する(大半は風力)： **6GW at 2024, 40GW at 2030**

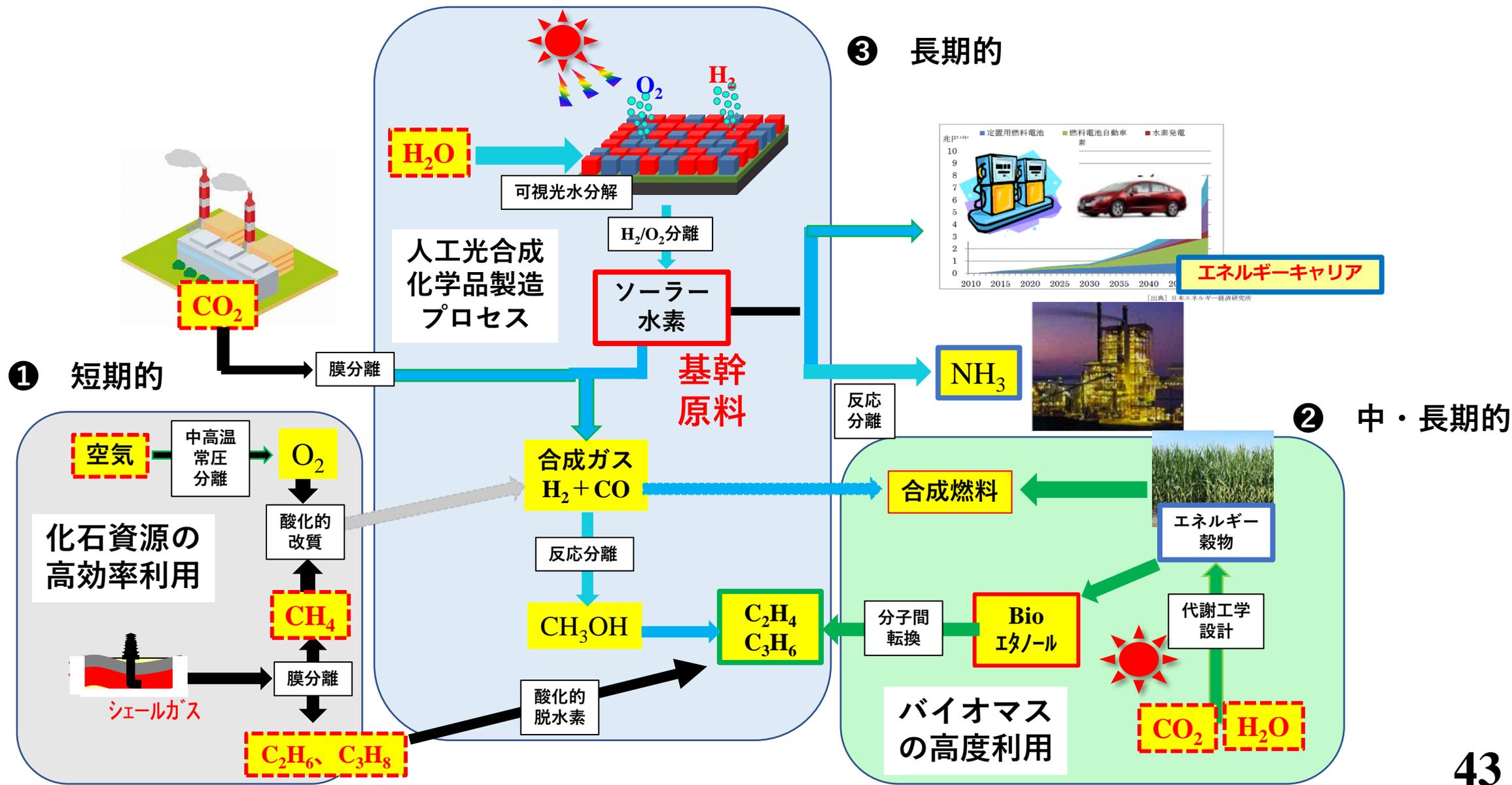
- 2030までの予想設備投資額 (€ = 125¥)
- 電気分解設備；2.4～5.5兆¥
 - 太陽電池/風力発電設備 (80-120GW)：27.5～42.5兆¥
 - 既存水素製造設備へのCCS導入：13.8兆¥
 - 水素移送/貯蔵/水素ステーション：8.1兆¥

- 用途展開
- 製造業 :短期： NH₃ & MeOH用水素製造、既設製油所の水素の一部置き換え → 中・長期：製鉄業でのゼロCO₂排出
 - 燃料 短期：電化が困難な地域でのバス、鉄道、タクシーでのE-fuel用原料 → 中・長期：大型輸送車両、船舶、航空機のE-fue 導入

産業活動により排出されたCO₂の排出量を大幅削減する革新技術

展望

Innovative Process for Eliminating Anthropogenic CO₂ Emission (IPEACE)



IPEACE(人工光合成を含む) 21世紀の人類社会に必然的に必要な技術

グリーンイノベーションの前提：化石資源(高濃度系) → 再生可能資源/エネルギー(希薄・分散)

高温 & 高圧	マイルドな温度.& 圧力
大規模(+ 移送可能)	小規模、地産地消
スケールアップ	低コスト化に不利だが、安くすべき
低コスト化に有利	

→ 従来の延長線上にない新しいプロセス技術が生まれて当たり前!

Example. **CH₄改質**

Black/Gray/Blue hydrogen vs

天然ガス・LNG：高圧ガス仕様
 → 吸熱反応に不利な加圧系を
 高温反応で補償



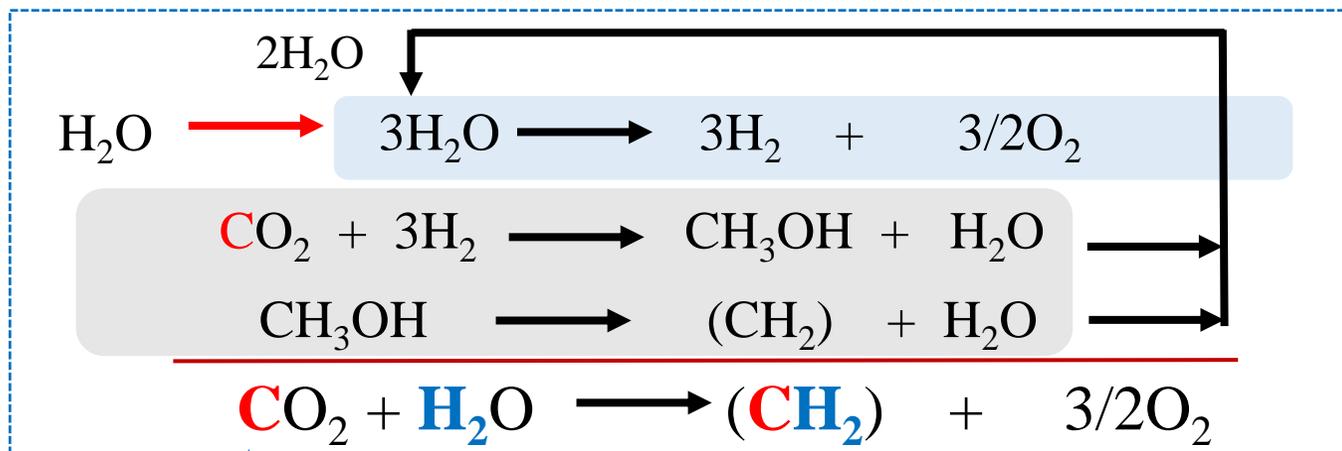
CO₂資源化

Green hydrogen

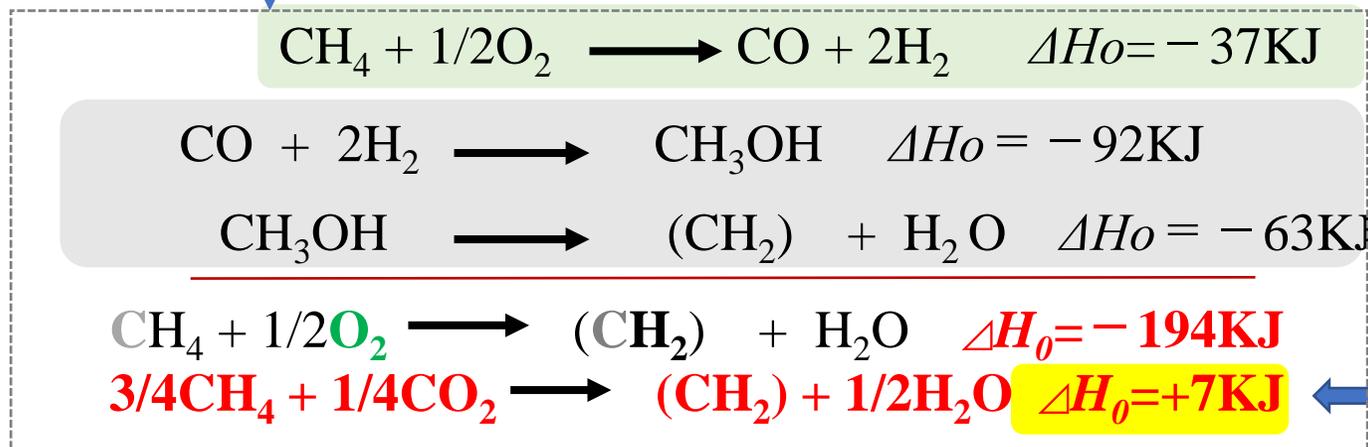
G-水素、G-CO₂
 バイオガス

：常圧仕様

高温・高圧でない
反応を目指すべき



ブルー水素からグリーン水素への
段階的転換の為の互換性プロセスが有効



CCSによるブルー水素からのブルー化学品

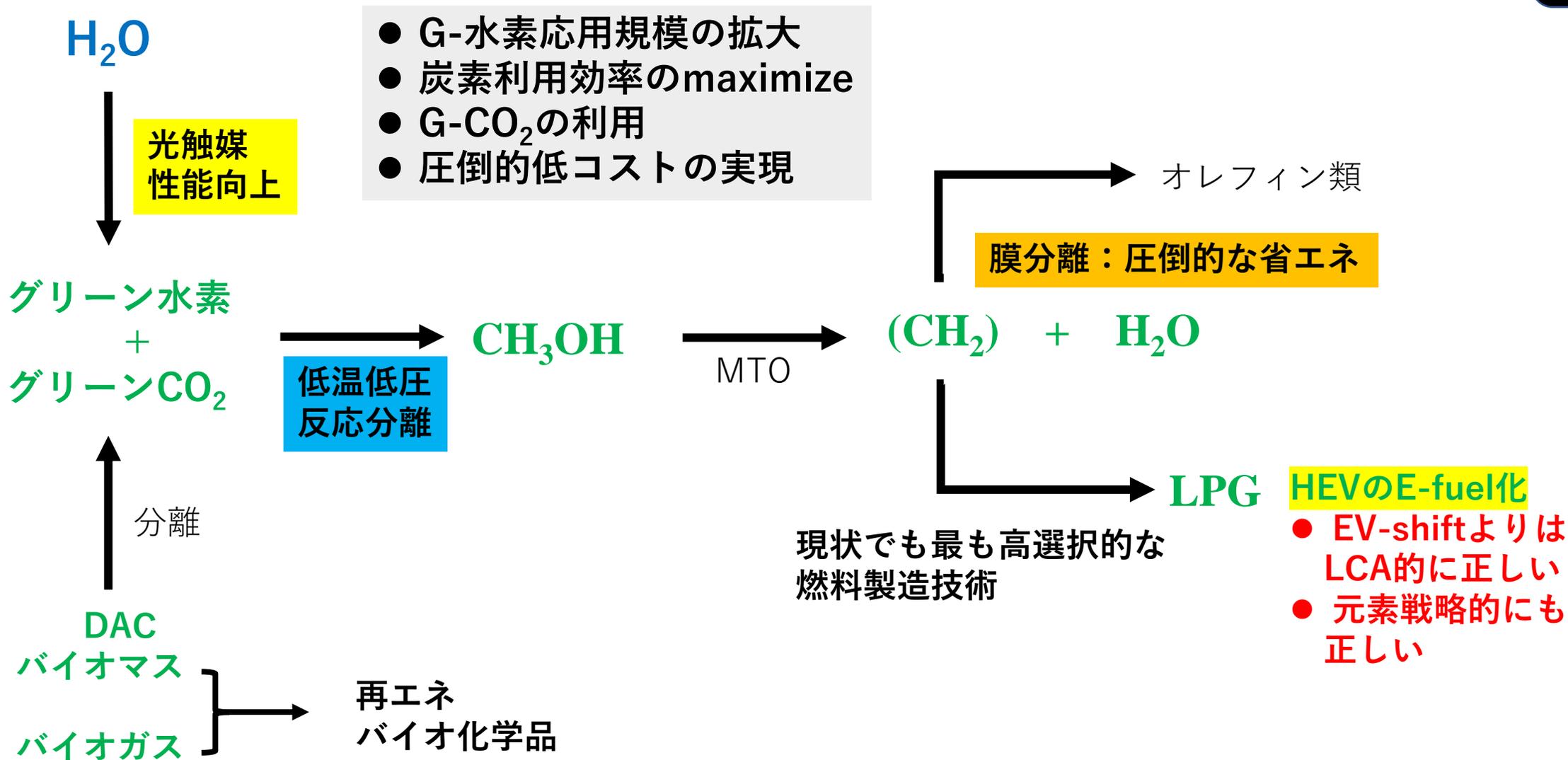
差異化の為の技術戦略

- **グリーン水素製造コストの価格破壊を目指す光触媒法水分解プロセス**
 - 二つを合理的に組み合わせる必要がある
 - 既存技術の組み合わせでの限界 → **新の革新技术による日本からの発信と経済再生戦略が必用**
- **運転動力を最小化する反応分離プロセス**
 - 平衡制約の回避
 - CH₃OH 製造
 - NH₃ 製造
- **メタン原料法水素でのCO₂削減余地はかなりある。**
- **CO₂はメタンの組み合わせでもゼロ排出=CO₂資源化できる。**
- **IPCC第6次報告書ではメタンLeakによる温暖化に強く言及**

最終的な絵姿：グリーン化学原料からグリーン燃料へ

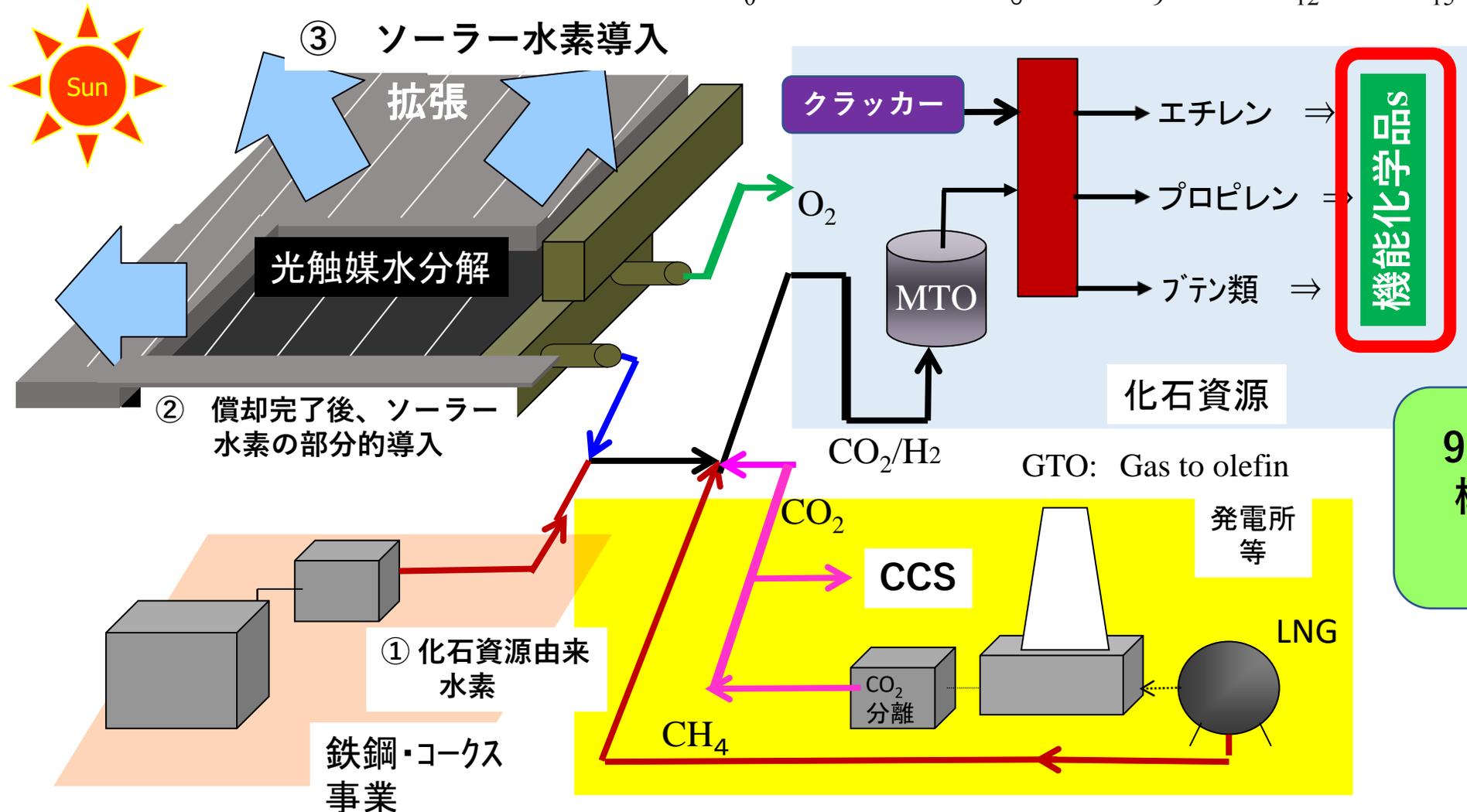
解決すべき課題例

結果
考察
展望



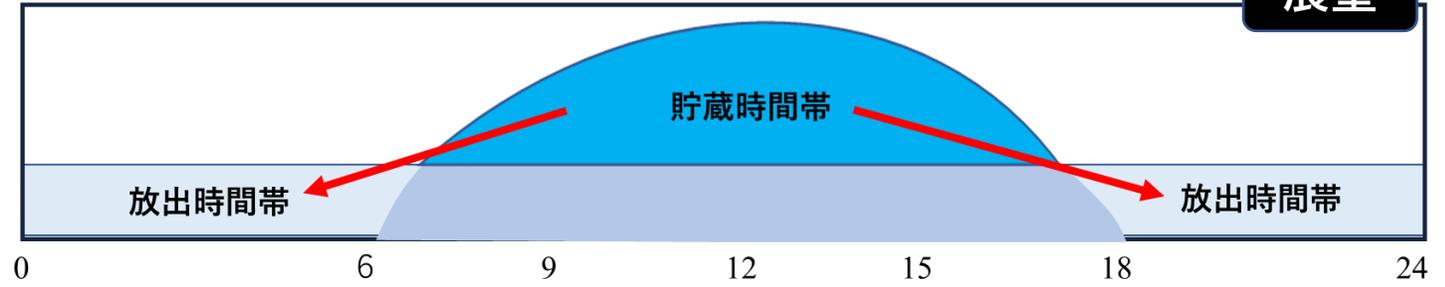
解決すべき課題-①

実用運転において必要なこと → C1化学プロセスとのHybrid運転



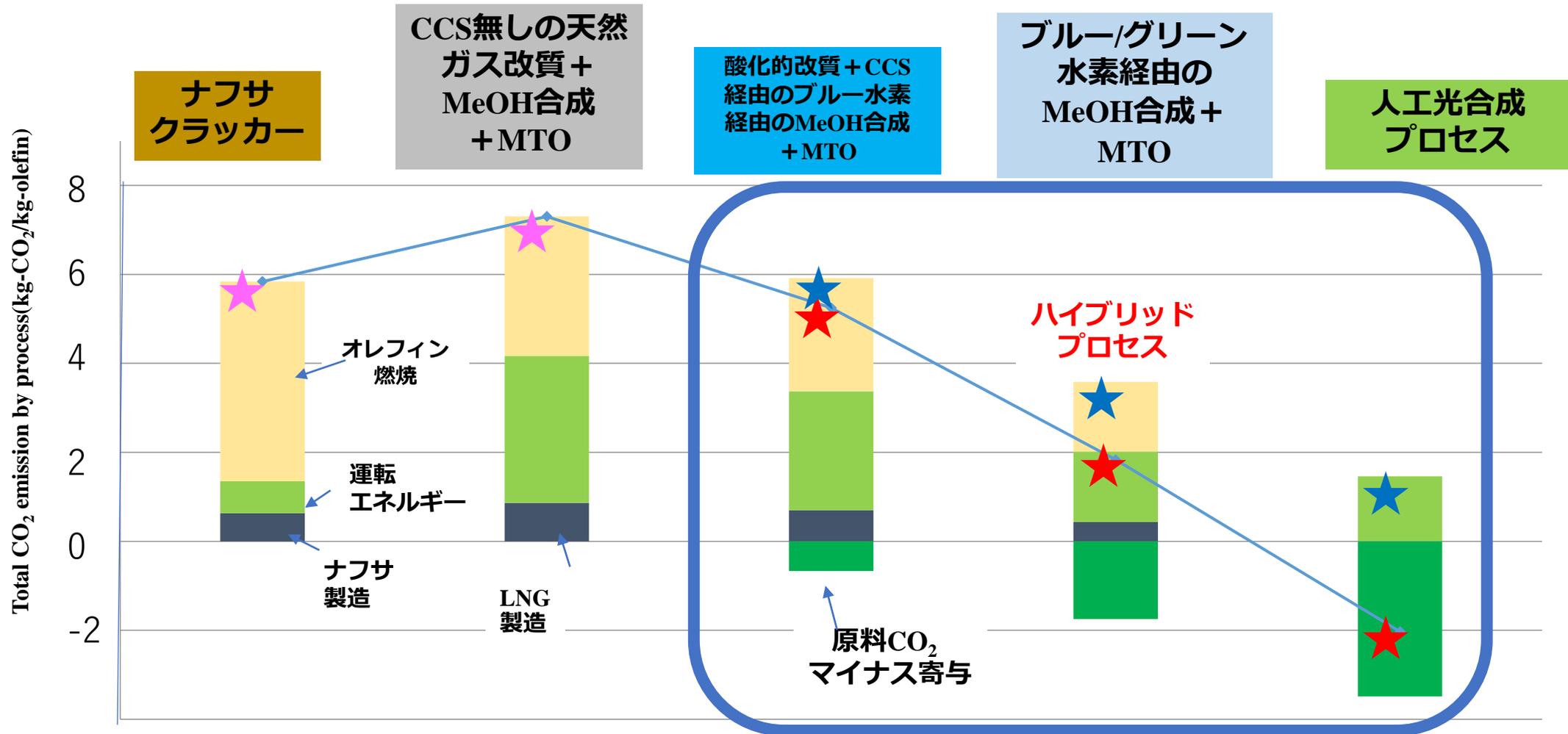
サンベルト地帯：最も日照時間が長い、水素発生不安定性の解消が必要

展望



9年前に描いたこの構図は単純すぎるかもしれない？

オレフィン製造プロセス毎のLCA比較



化石資源を用いCCSをやらない場合の一貫CO₂ 排出量: ★

化石資源を用い究極のCCSを実施した場合の一貫CO₂ 排出量: ★

グリーン-CO₂(バイオマス究極系, DAC): ★

解決すべき課題-②：水素の貯蔵/移送 各エネルギーキャリアの特徴

	液化水素	MCH(有機ヒドライド)	アンモニア	メタノール
体積密度	体積100Lあたり約7.1kg	体積100Lあたり約4.7kg	体積100Lあたり約12.1kg	体積100Lあたり約8.8kg
温度	-253°C	常温	常温	常温
長所	大規模な貯蔵・輸送に向いている。原料のまま高密度に貯蔵できる。海上輸送を除けば技術確立している。(⇒水素大量利用時に適している)	常温常圧で液体のため、扱いやすく安定である。(⇒長期貯蔵に最適)	常温高圧で液体のため、扱いやすい。輸送インフラは最も整っている。(⇒水素社会の実現に近道。火力発電等への混焼に親和性高)	常温常圧で液体のため、最も扱いやすい。輸送インフラは最も整っている。CO ₂ を固定化した形態
短所	低温にするためにエネルギーが必要、低温を維持するためにもエネルギーが必要。(⇒長期貯蔵や小規模利用に不向き。設備投資大)	水素精製にエネルギーが必要であり、輸送効率が低くなる。トルエンの運搬が必要。技術普及度が低い。(⇒大量利用やコスト競争において不利)	アンモニアは毒性ガスのため、取り扱いに注意を要する。(⇒国内のサプライチェーン構築には高い障壁)	燃料としては50%以上の水を含むことに相当
コストイメージ				
適した用途	FCV(普及時)、発電利用、産業利用	エネルギーの安定・長期貯蔵	発電利用、原料利用	化学品/燃料用原料

世界の全エネルギー消費を全て人工光合成でまかなうとした場合
どのくらいの面積が必要か？

太陽エネルギー変換効率 = 10% のとき



地球表面の 0.1% = 300,000 km²

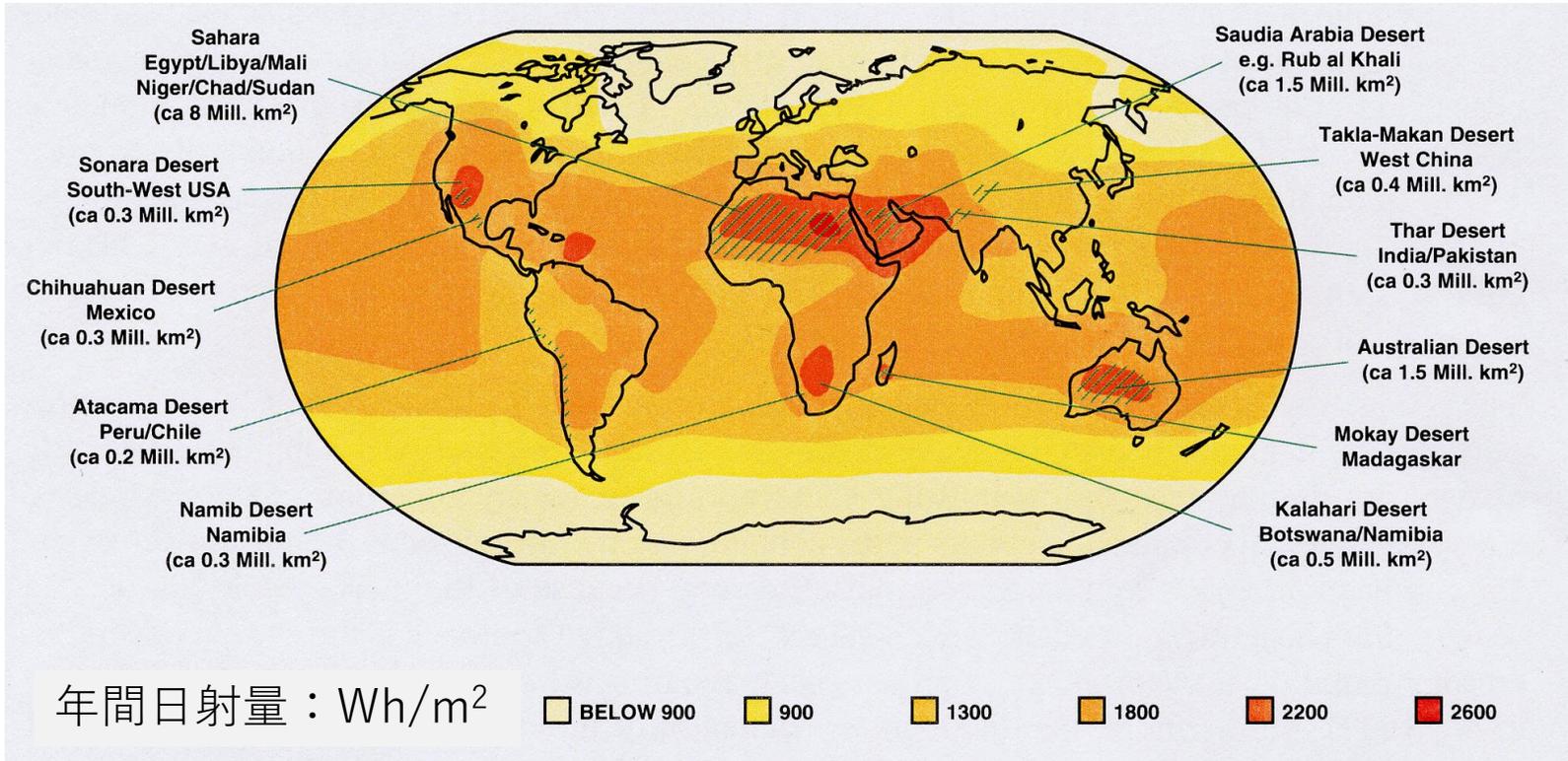
= サハラ砂漠(10,000,000 km²)の3% = 日本の面積の0.8倍

地球規模の問題として考えることが重要！

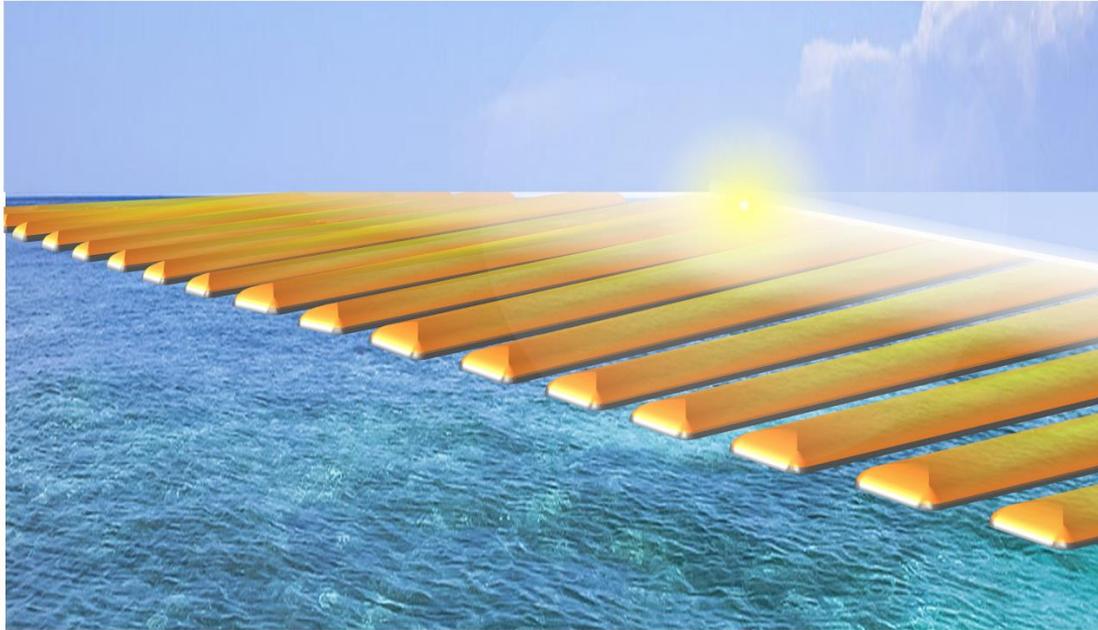
サハラ砂漠；4000時間/年
年間実質日射量：1950KWh/m²

VS

日本：1950時間/年
年間実質日射量：1050KWh/m²



太陽光エネルギーの利用は低緯度地域での実施が圧倒的に有利＝同じ設備で生産性は日本の二倍＝建設費が安ければその分安価な製造costに直結。



国内遊休地での展開

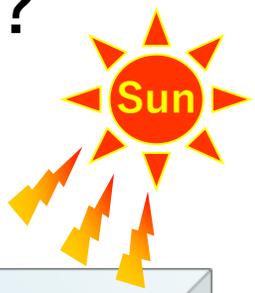
海外サンベルト地帯での大規模展開

プラント規模；>10km² Green水素>5万トン/年
メガメタノール、燃料用アンモニア製造
Refinery/化学コンビナートとのHybrid化
→ 更に大規模になれば、大量の水素の一部を
化学品事業に展開する（=Hybrid化は必要ない？）

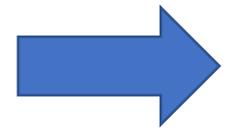
可視光水分解触媒シート of 最終系
人工水素ガス田

プラント規模；～数ヘクタール
水素station、小型燃料用アンモニア
バイオガスとのHybrid化？
国内での経済性確保は可能だろうか？

日本での導入可能性はあるか？ 水素StationへのDrop-in？



ソーラ水素プラント
：2ヘクタール



Hydrogen storage Station
300 – 500 Nm³/h (27 – 45 kg/h)
※NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ2010
圧縮水素供給技術/圧縮水素ステーション
2020年達成目標規模より

参考：2013年作成資料



ソーラ水素供給量は水素ステーション
(24h稼働) 供給能力の20 – 36% 相当

日本国内 (日照: 1,400 kWh/Y · m², 1,900 h/Y)
変換効率 $\eta = 10\%$ 想定時
水素生産量: 44.8 kg/h (233 kg/day)

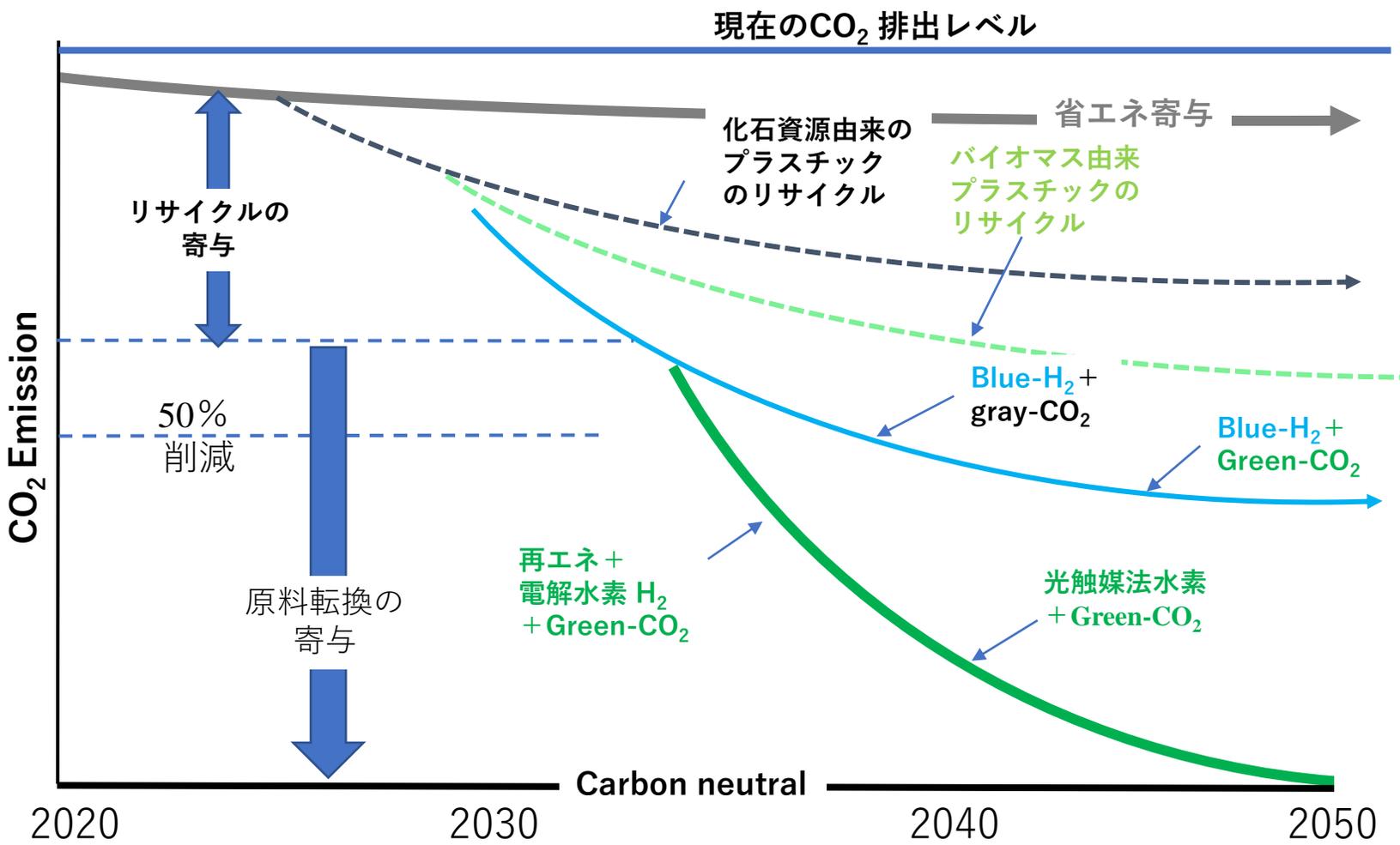


- 2ヘクタール 規模のソーラ水素プラントで水素ステーションの**20-36%**相当の水素を供給するが可能。
- **国内では、この規模での実用化技術か現実的か？**



ソーラ水素による
水素供給能力
約 43 台/日

圧縮水素タンク: 171 L, 35 MPa
(H₂ 重量換算で 5.4 kg/台)
1充填あたり走行距離: 620 km



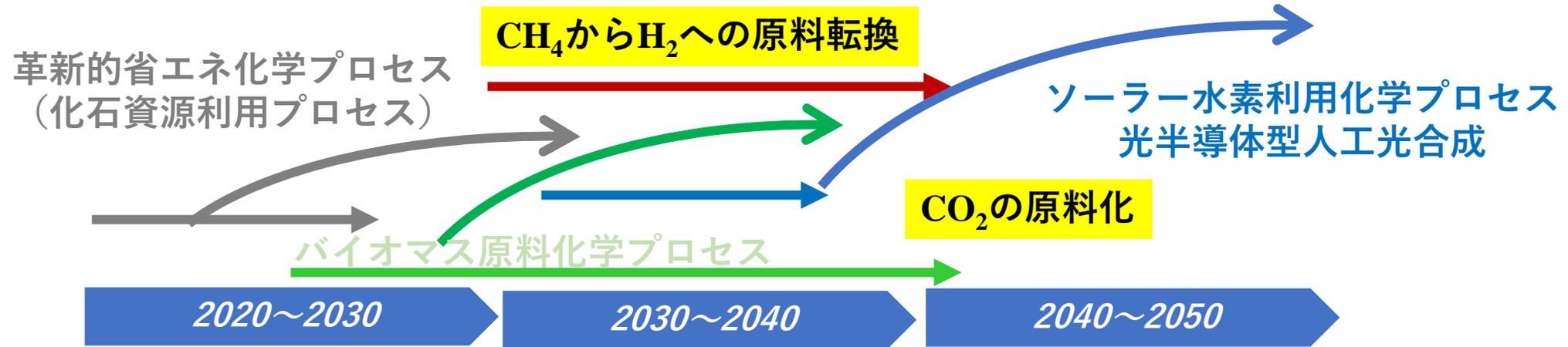
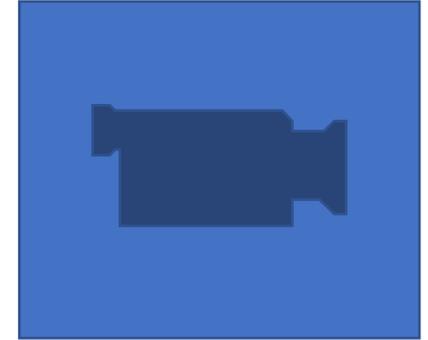
- カーボンニュートラル実現には、短・中・長期的な戦略の継続的な遂行が必用。
- 今できること、技術革新までの時間を考慮したきめ細かなRoad-Mapが必用。
- 事態の深刻さについての個人の気づきと、対応できることの実行が必用。

2050に向けたカーボンニュートラルへのロードマップ

⑥ 今後の計画(案)

Circular Economy実現に向けたRoad-Map

展望



- 化石資源利用省エネプロセスとソーラー水素利用化学プロセスは互換性が必需
- バイオマス原料化学プロセスは大規模展開可能な現実解かもしれない (EtOHコスト)
- CH₄の酸化的改質、膜分離、バイオマス生産性、光半導体(触媒)等の最先端科学の革新技术への昇華を通じて世界規模のゼロEmissionに貢献すべき

謝辞

- ARPChemに参画された研究者の皆さん： 常時～150 名

<アカデミア>

東京大学、信州大学、京都大学、東京工業大学、東京理科大、富山大学
山口大学、名古屋工業大学、早稲田大学、明治大学、産業技術総合研究所

<民間企業>

三菱ケミカル、三井化学、INPEX、富士フィルム、TOTO、
ファインセラミックスセンター、(住友化学：PJ前半)

<支援>

経済産業省(素材産業課)：開始から2年、直接運営

NEDO：3年目より経済産業省より引継ぎ

+

- 三菱ケミカルで本PJ及びIPEACE関連テーマに協力の皆さん