

2021/11/10 15:00-15:40

RITE

“未来を拓く無機膜 環境・エネルギー
技術シンポジウム“

分離膜を用いた革新的な化学製品製造技術の開発

NEDO人工光合成PJ
PL 瀬戸山 亨
三菱ケミカル(株)
Executive Fellow

21世紀における革新的分離技術の重要性

① 気候変動の主要因である温暖化抑制の必要性

- CO₂排出削減
 - 化石資源 → 再生可能資源への燃料・原料転換
 - プロセスの高効率化、省エネ
- CO₂、CH₄、Nox等温暖化ガスの回収：希薄ガスの回収・分解

② Planetary Boundaries課題の深刻化

- Pの循環、Nの循環
- 生物多様性の瓦解
- 土壌、水質汚染

③ 資源枯渇の問題

- 希少金属の効率的精製、回収・recycle
 - ①、②の解決に必要なプロセス、製品に必須

殆どの課題に
分離/精製が関与

”分ける“
Key-word

C1. 1.5°Cの地球温暖化に整合する排出経路

2050年頃にCO₂排出量が正味ゼロに達する

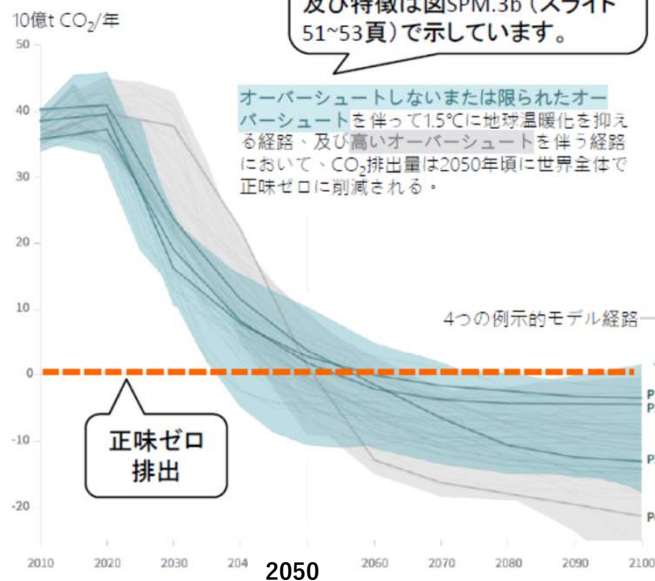
IPCC-第六次報告書
Executive Summaryより

■ 地球温暖化を1.5°Cに抑えるモデルの[排出]経路においては、世界全体の人為起源のCO₂の正味排出量が、2030年までに、2010年水準から約45%（四分位範囲40~60%）減少し、2050年前後に（四分位範囲2045~2055年）正味ゼロに達する。（確信度が高い）

(IPCC SR1.5 SPM C1.)

今後、CO₂以外のGHGの影響の精度が上がる(増える)につれて対策の先行するCO₂削減への要求は厳しい方向に向かう。

世界全体のCO₂正味排出量

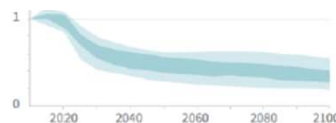


P1、P2、P3、P4 と表示されている4つの例示的モデル経路の説明及び特徴は図SPM.3b（スライド51~53頁）で示しています。

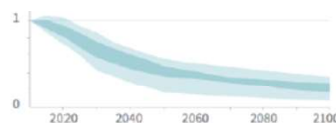
オーバーシュートしないまたは限られたオーバーシュートを伴って1.5°Cに地球温暖化を抑える経路、及び高いオーバーシュートを伴う経路において、CO₂排出量は2050年頃に世界全体で正味ゼロに削減される。

CO₂以外の放射強制力因子もオーバーシュートしないまたは限られたオーバーシュートを伴って1.5°Cに地球温暖化を抑える経路において削減または抑制されるが、世界全体でゼロに達することはない。

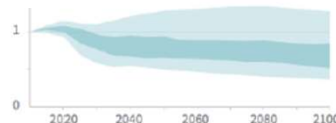
メタン排出量



ブラックカーボン排出量



N₂O排出量



● 地球温暖化を2°Cより低く抑えるためには、ほとんどの排出経路※において、CO₂排出量は2030年までに約25%（四分位範囲：10~30%）削減され、2070年前後に（四分位範囲：2065~2080年）正味ゼロに達すると予測される。（確信度が高い）

※ 66%の確率で地球温暖化が2°C未満にとどまることに基づく。

(IPCC SR1.5 SPM C1.)

各図の着色域は、地球温暖化を1.5°Cに抑える経路の5~95%の範囲（薄い着色域）及び四分位範囲（濃い着色域）を示す。下部の長方形と線の図は、各経路において世界全体のCO₂の排出水準が正味ゼロに達する時期を、少なくとも66%の確率で地球温暖化を2°Cに抑える経路と比較して示す。

(IPCC SR1.5 図SPM.3a)

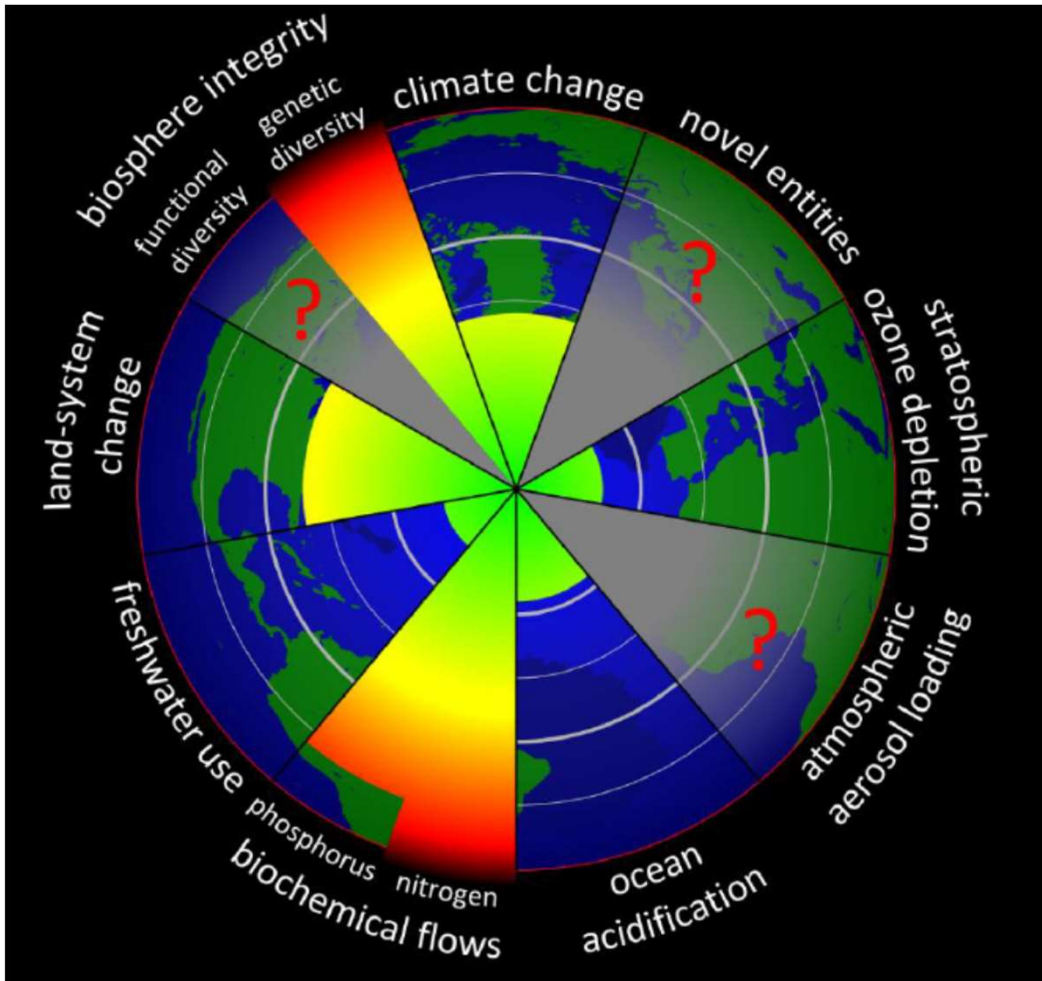
CO₂正味ゼロになる時期
線の幅はシナリオの5~95パーセンタイル及び25~75パーセンタイルを示す。

——— オーバーシュートなし、または限られたオーバーシュートで1.5°Cに地球温暖化を抑える経路
——— 高いオーバーシュートの経路
——— 2°Cより低く地球温暖化を抑える経路（上図になし）

出典：図、IPCC SR1.5 図SPM.3a

※図中の記号・文は原図に追加したもの

地球温暖化を1.5°Cによる生ずる排出経路と特徴



- 緑色の領域は安全なマージン内にある人類活動
- 黄色の領域は安全な領域を超えそうか、既に超えないかもしれない人間活動
- 赤い領域は安全な領域を超えた人間活動
- 赤い疑問符のついた領域は安全領域がまだ決定されていない



深刻さ順に

- ① 窒素循環
- ② 生物多様性
- ③ リン循環
- ④ 土地利用の変化
- ⑤ 気候変動

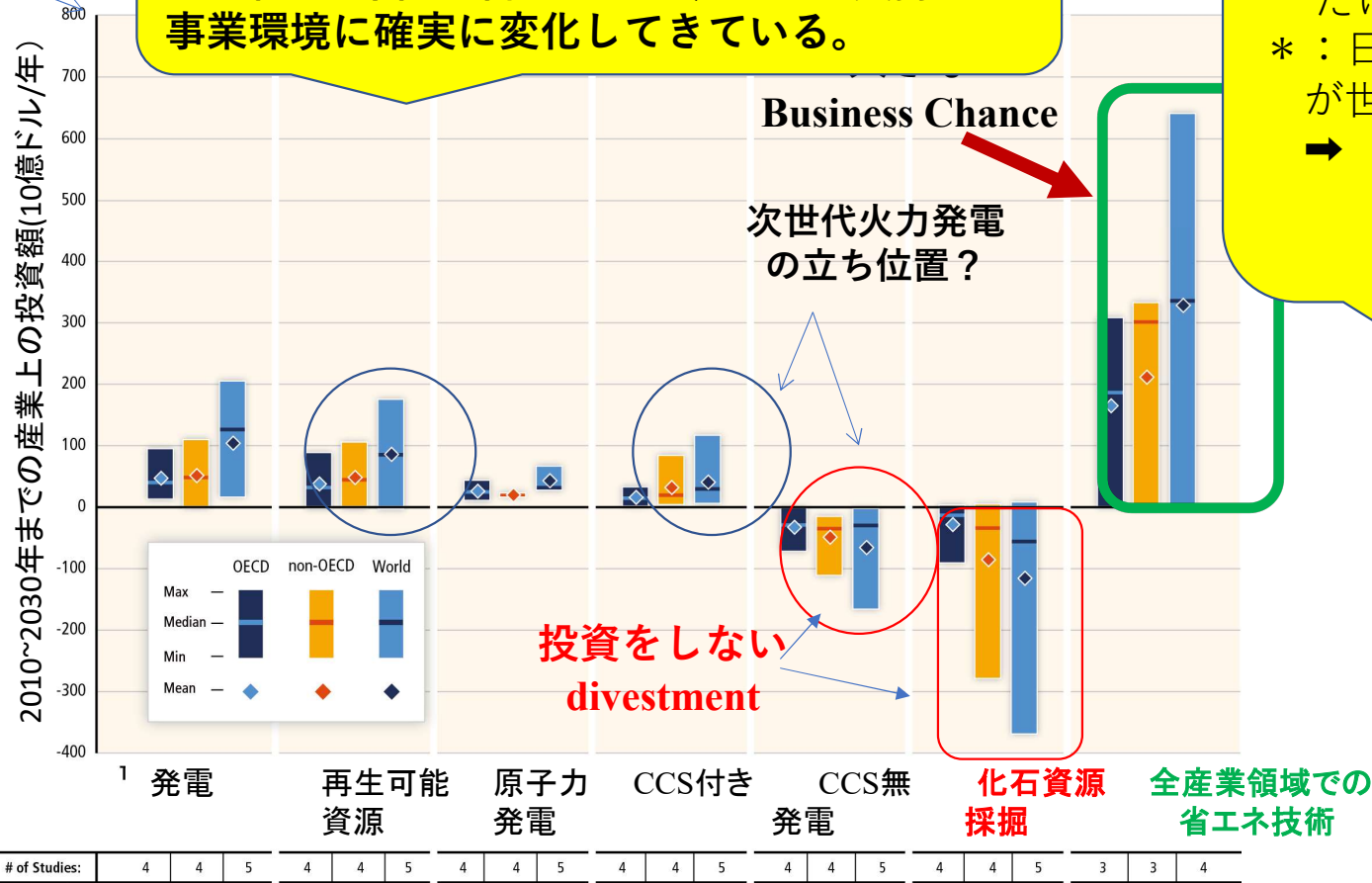
となっている。それ以外にも深刻だが、状況が把握できていない課題が幾つもある。

プラネタリーバウインダリーを知っていますか？

90兆円/年

革新的エネルギー関連技術（創エネ、蓄エネ、省エネ）は、21世紀最大の成長産業になる！
この絵は6年前に書かれたが、これを支持する事業環境に確実に変化してきている。

- 気温上昇の影響の深刻さはどれだけ認識されているか？
- *：日本は非常に感度が低かったが世界の状況に急に慌てている
→ 後手で世界並みでは日本は滅びます！



世界で今後起こる可能性／必然性の高い産業構造変化

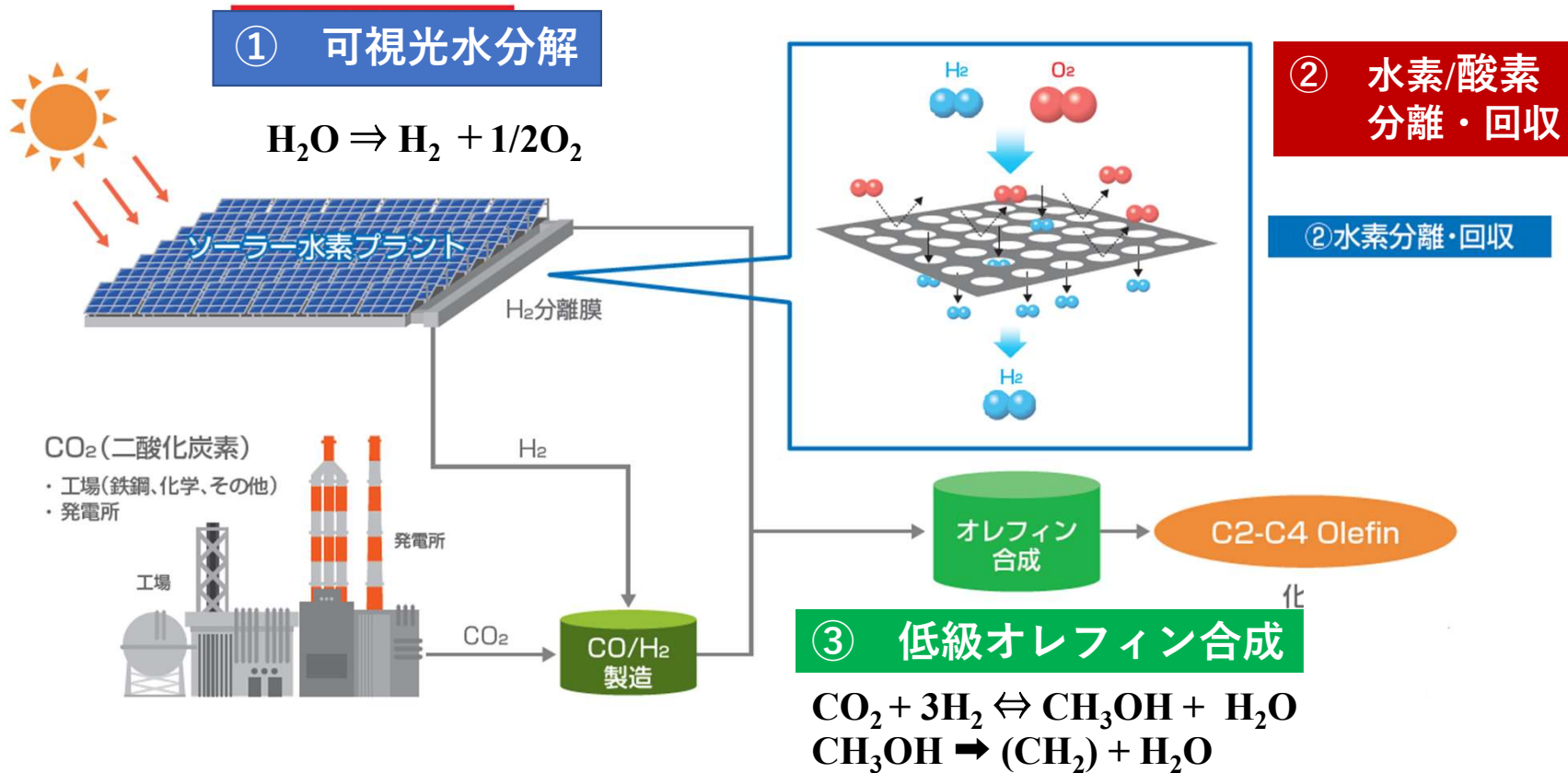
IPCC第五次報告書より

人工光合成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)

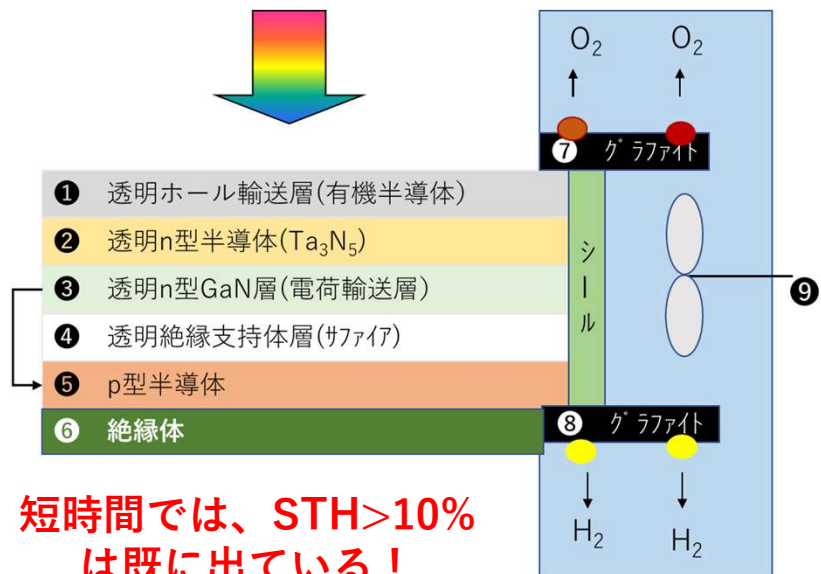
- 10 (大学 + 研究機関と 5民間企業がPJに参画)

- 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。



可視光水分解触媒の分類 (PJで検討)

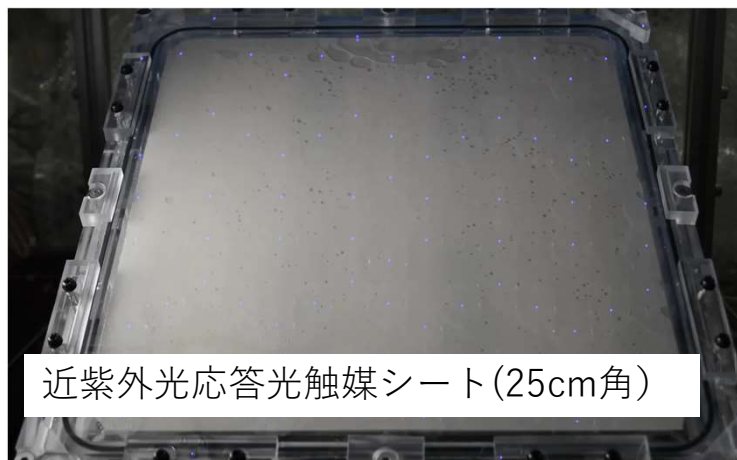
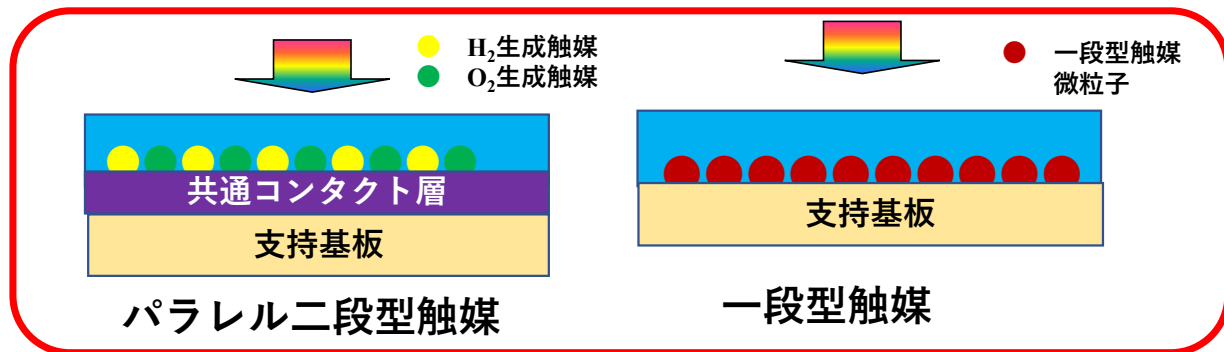
タンデム型光触媒電極



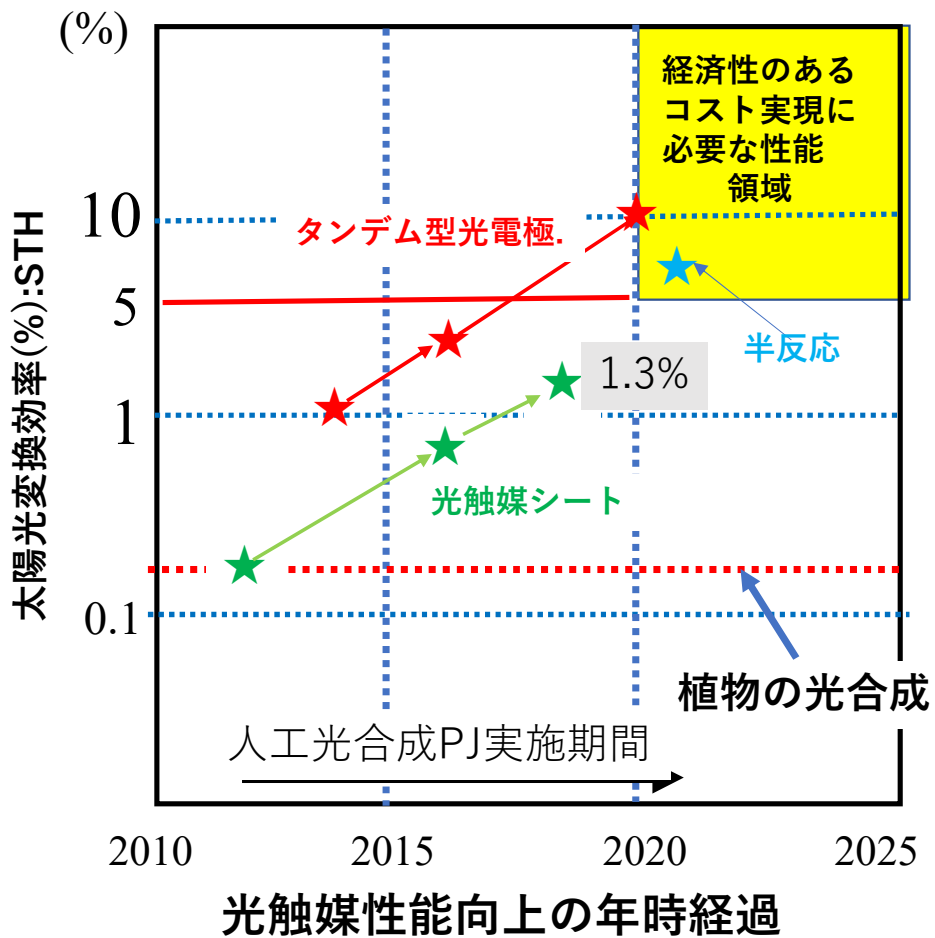
短時間では、STH>10%
は既に出ている！

光触媒シート

- 粉末触媒で性能が出れば、シート上に塗布するだけ！

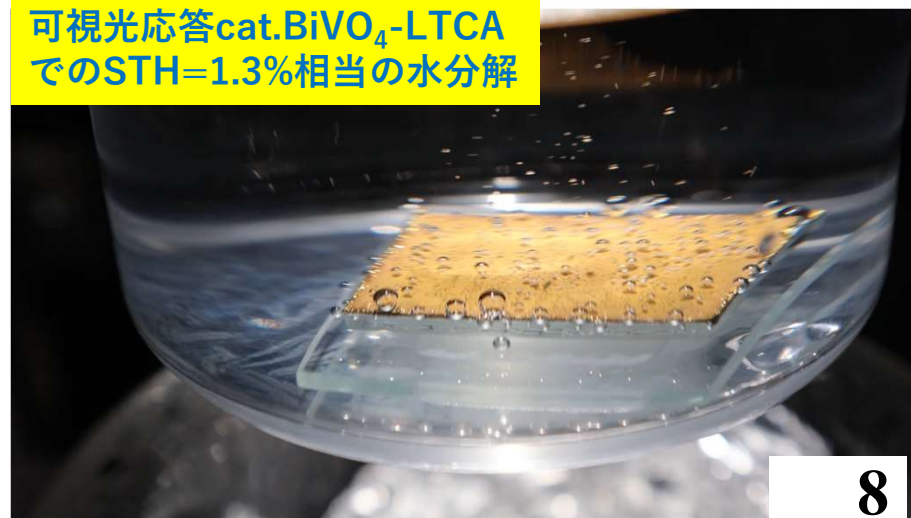


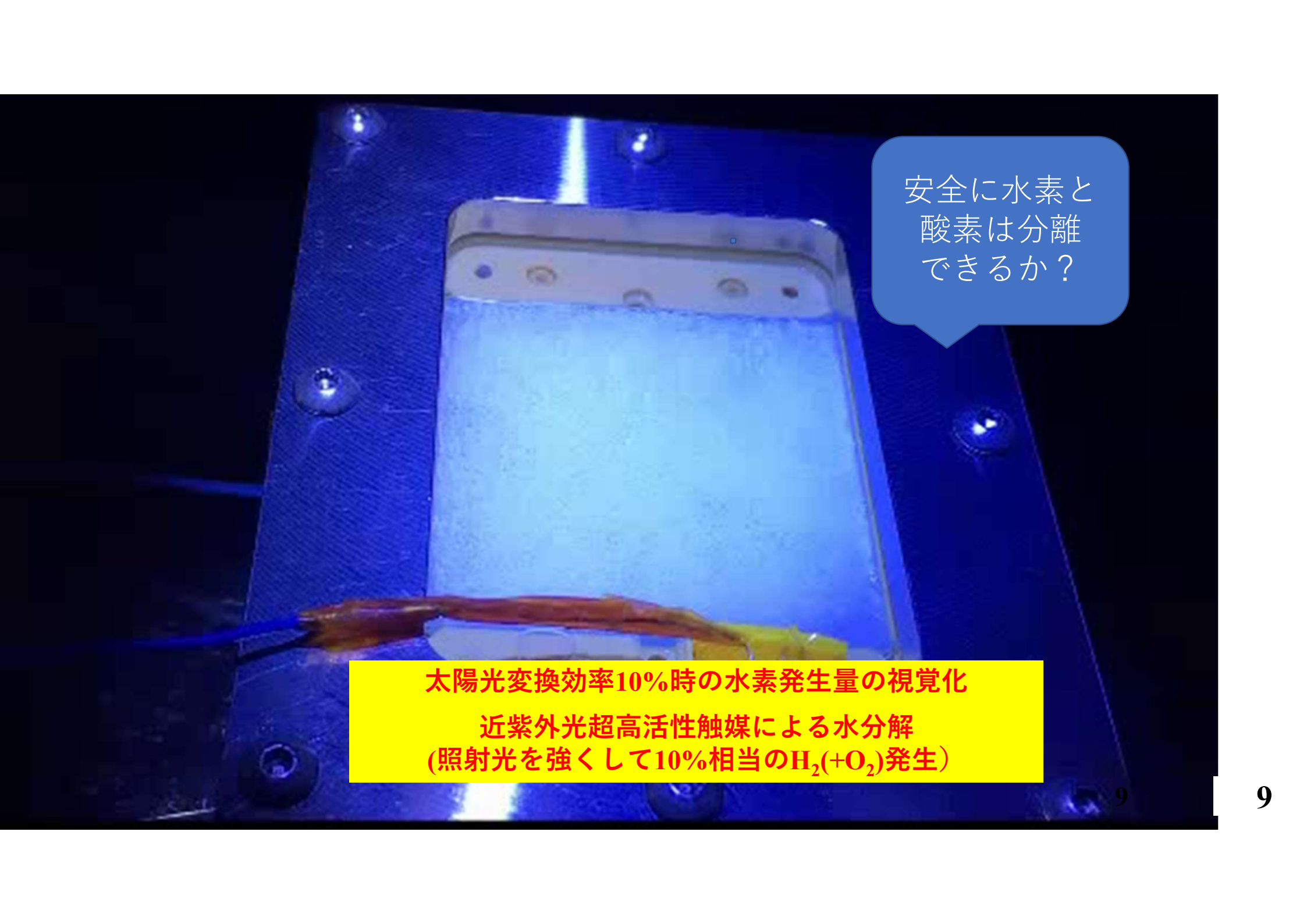
- 100m²のField
テスト実施



酸硫化物系触媒での犠牲試薬を用いた水素生成

可視光応答cat.BiVO₄-LTCA
でのSTH=1.3%相当の水分解





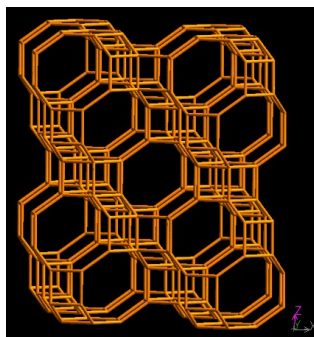
安全に水素と
酸素は分離
できるか？

太陽光変換効率10%時の水素発生量の視覚化

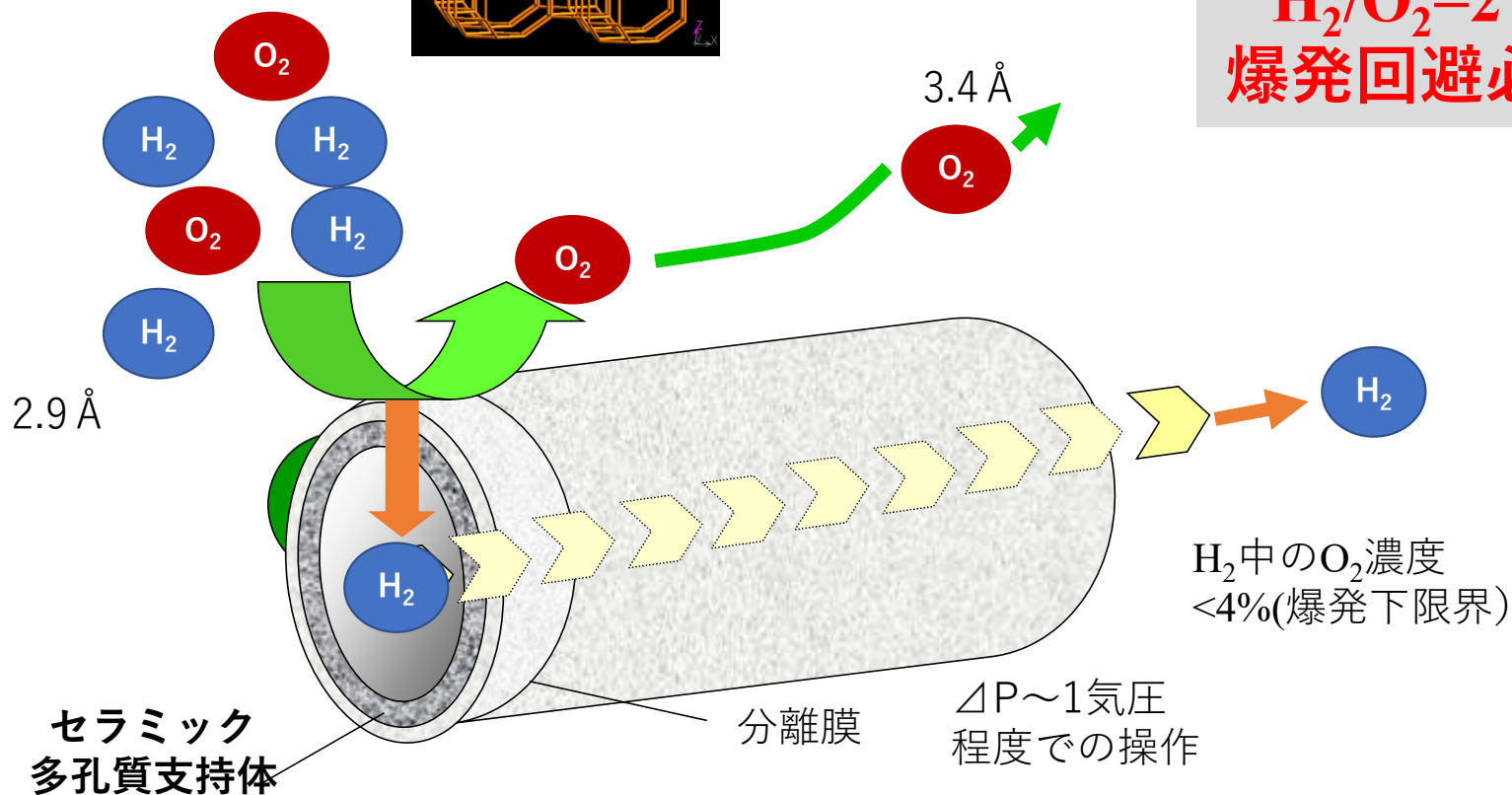
近紫外光超高活性触媒による水分解
(照射光を強くして10%相当の $\text{H}_2(+\text{O}_2)$ 発生)

H₂/O₂混合ガスの爆発範囲組成外への分離濃縮

分子篩機能による
分子サイズ認識



三次元Al-silicate
8員環細孔径
: 3.6~3.8Å



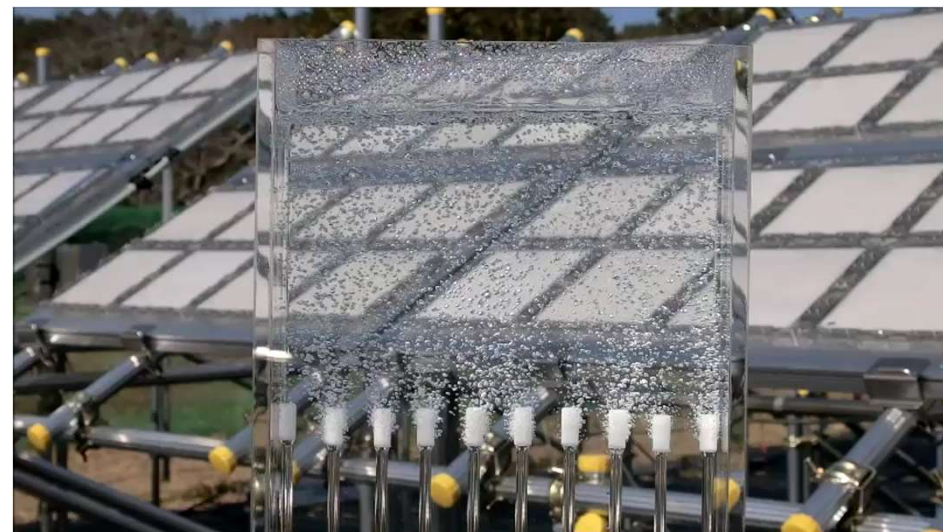
水分解で発生
の
H₂/O₂=2での
爆発回避必要!

10/17 NHK 朝
“おはよう日本”で紹介

ガス分離unit



3～7L/min程度の水素が発生

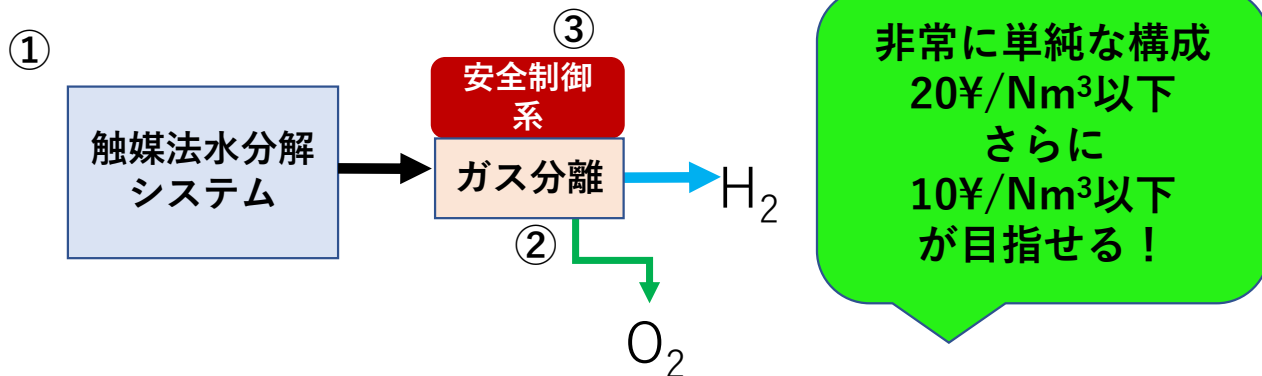


柿岡爆発試験設備でのAI-STO触媒での
100m²級パネルでの**Field-test**
3m² × 33 + 1 m² で構成

検討項目

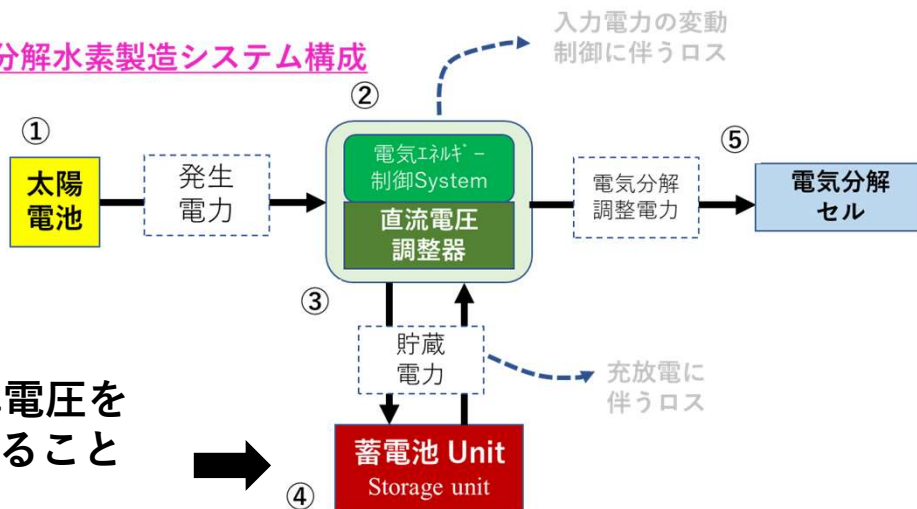
- ガスの安全分離
- 光触媒寿命
- モジュール耐久性

■ 人工光合成型水素製造システム構成



■ 太陽電池 + 電気分解水素製造システム構成

- 変換効率：20%
- 4～5万円/m²

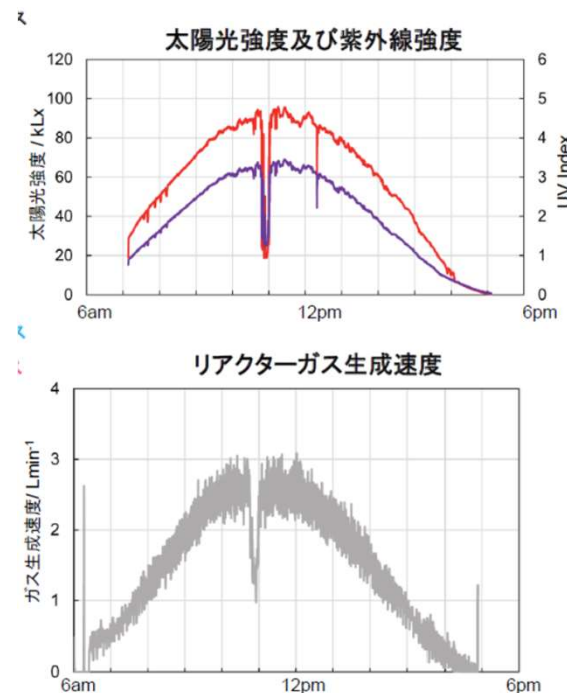


1.5Vの電解電圧を常に維持することが必要！

PV導入コストの約2倍程度の機器購入費が必要

→ 水素製造コストに直接反映

日照量に比例して水分解し水素が生成



柿岡試験場での光触媒法水分解Fieldテストの実績

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
 電力コスト：～2.5¥/KWh
 電解と組み合わせると
 440¥/kg-H₂ (38¥/Nm³)
高すぎて話にならない！

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、モジュールコスト試算(In-house)

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	

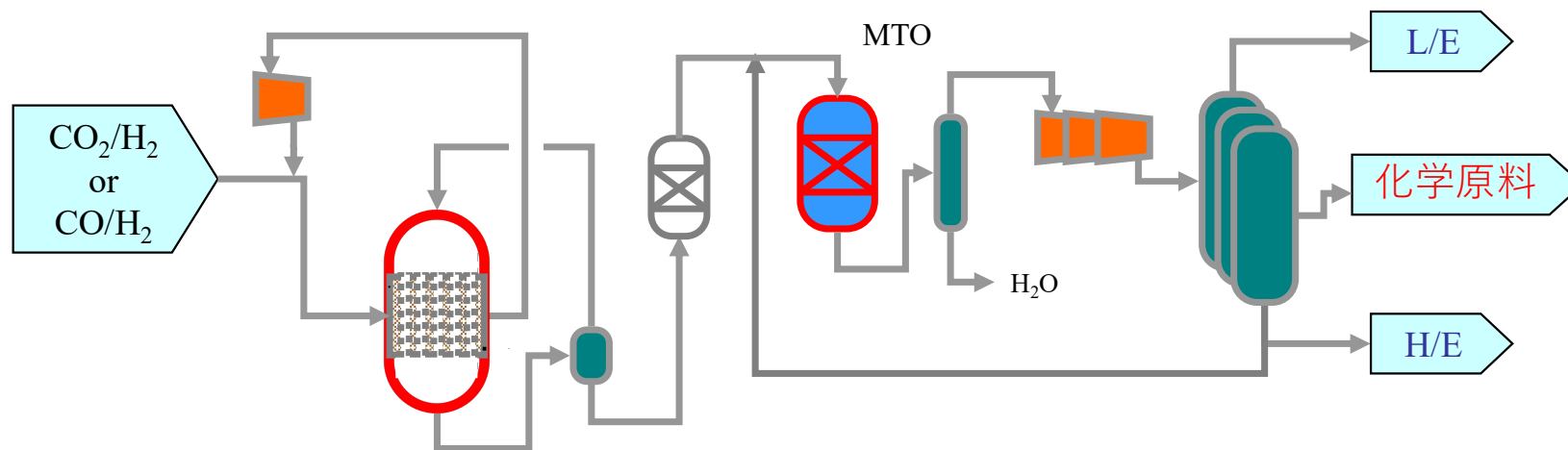
* 1 : 原油70\$/bbl時のエネルギー等価LNGの改質により得られる水素コスト

* 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。

CO₂/H₂から化学原料を製造する新プロセス開発 人工光合成／C1化学互換プロセス



① 高効率反応分離型メタノール合成プロセスの開発

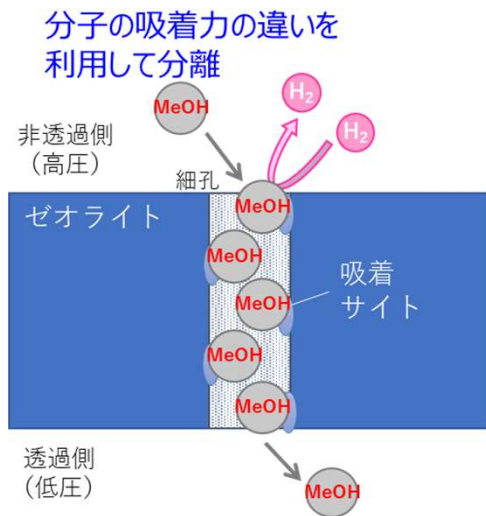
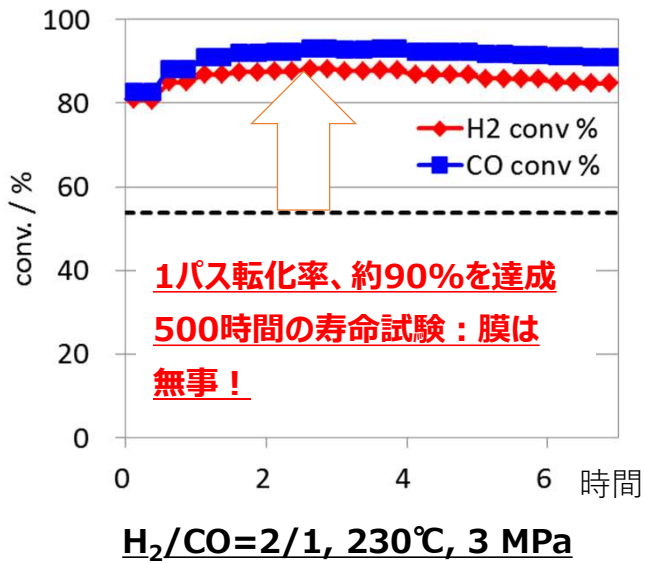
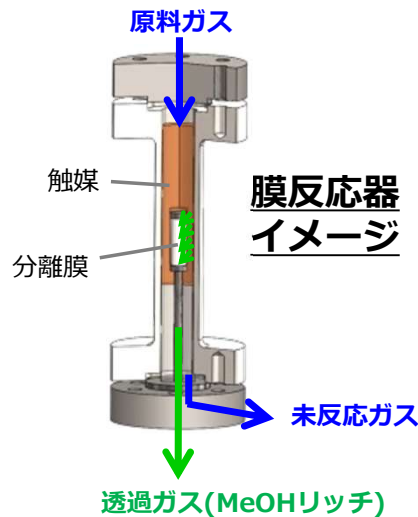
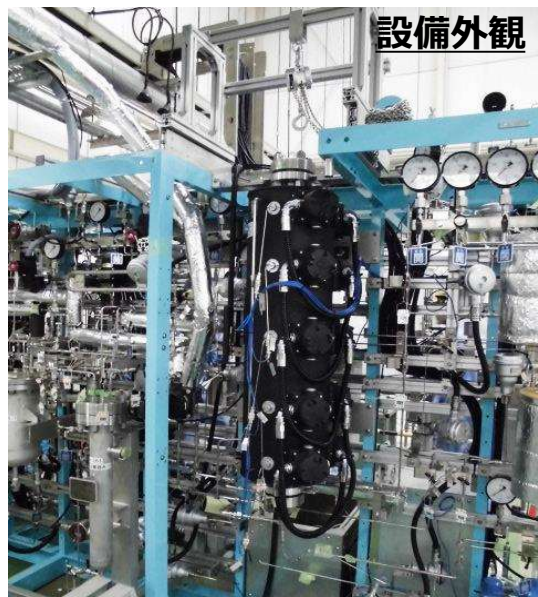
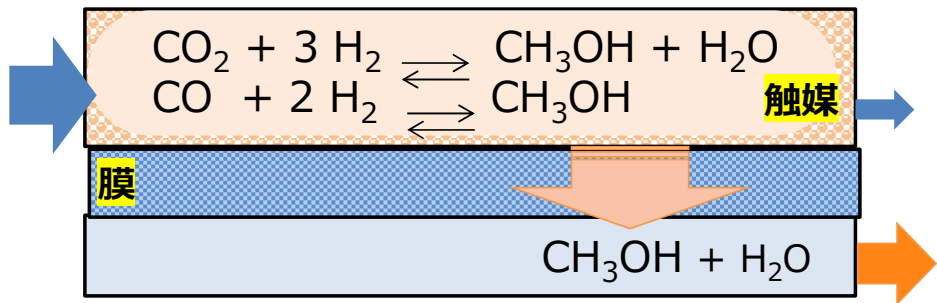
② 超高スチーム耐久性
オレフィン合成触媒の開発

世界で誰も出来ていない革新プロセスを作る！
真似できない触媒/プロセス + CO₂排出ミニマム + 収益性
燃料ではなく化学原料を目的とし高付加価値誘導品と繋ぐ！

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

→ 反応圧力の低下、転化率の大幅な向上



グリーン水素を利用した化学品製造

アンモニア: ~2億トン/年 ⇒ CO₂: 3.5億トン/年
 メタノール: 8千万トン/年 ⇒ CO₂: ~2億トン/年

従来技術 (メタン原料)
 高温・高圧/低収率 (平衡) / 運転エネルギー大

↓
20世紀の常識を超える!

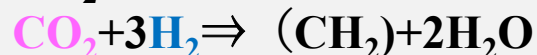
反応分離(メタン原料)
 低温化・低圧化/高収率 (平衡越) / 運転エネルギー小

互換性 ↓ **グリーン水素利用で更なるCO₂削減効果**

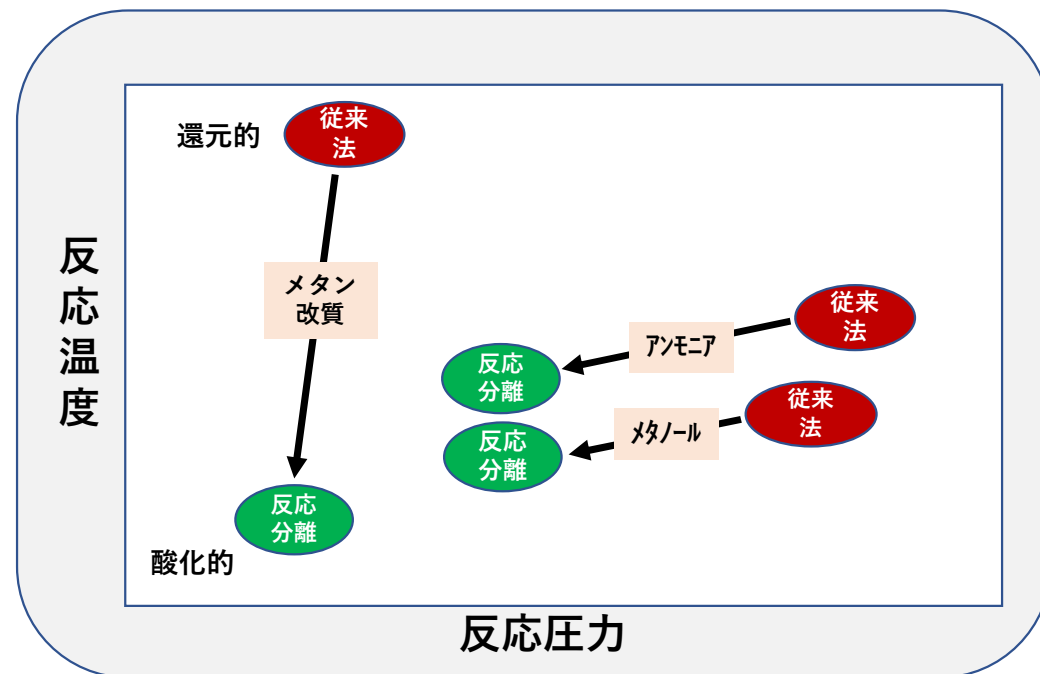
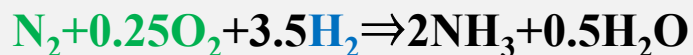
触媒的可視光水分解



CO₂とグリーン水素からの化学原料



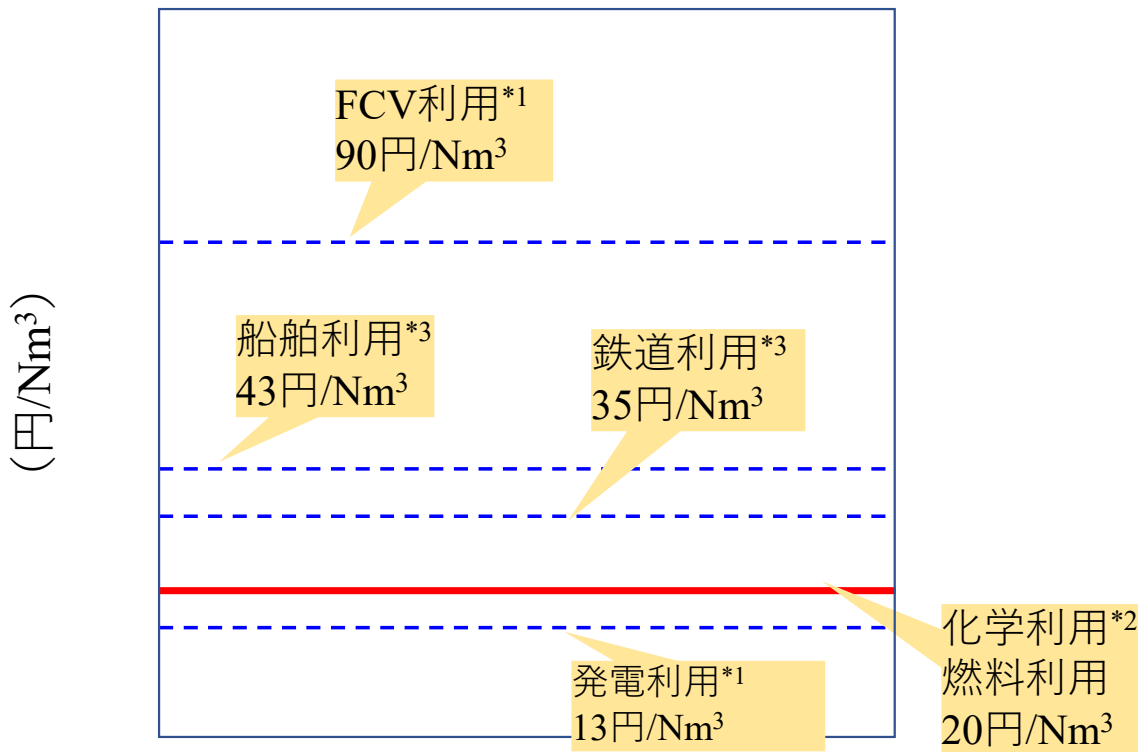
空気とグリーン水素からのアンモニア



CO₂削減効果の大きい化学プロセスでの実用化を! : 低温、低圧、低運転コストが可能

- : 性能向上 (処理量、選択率)
- △ : 安定性 (性能再現性、シール技術、長期寿命)
- △ : Scale-up

コストパリティ
(2050年)



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

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¥/Nm³

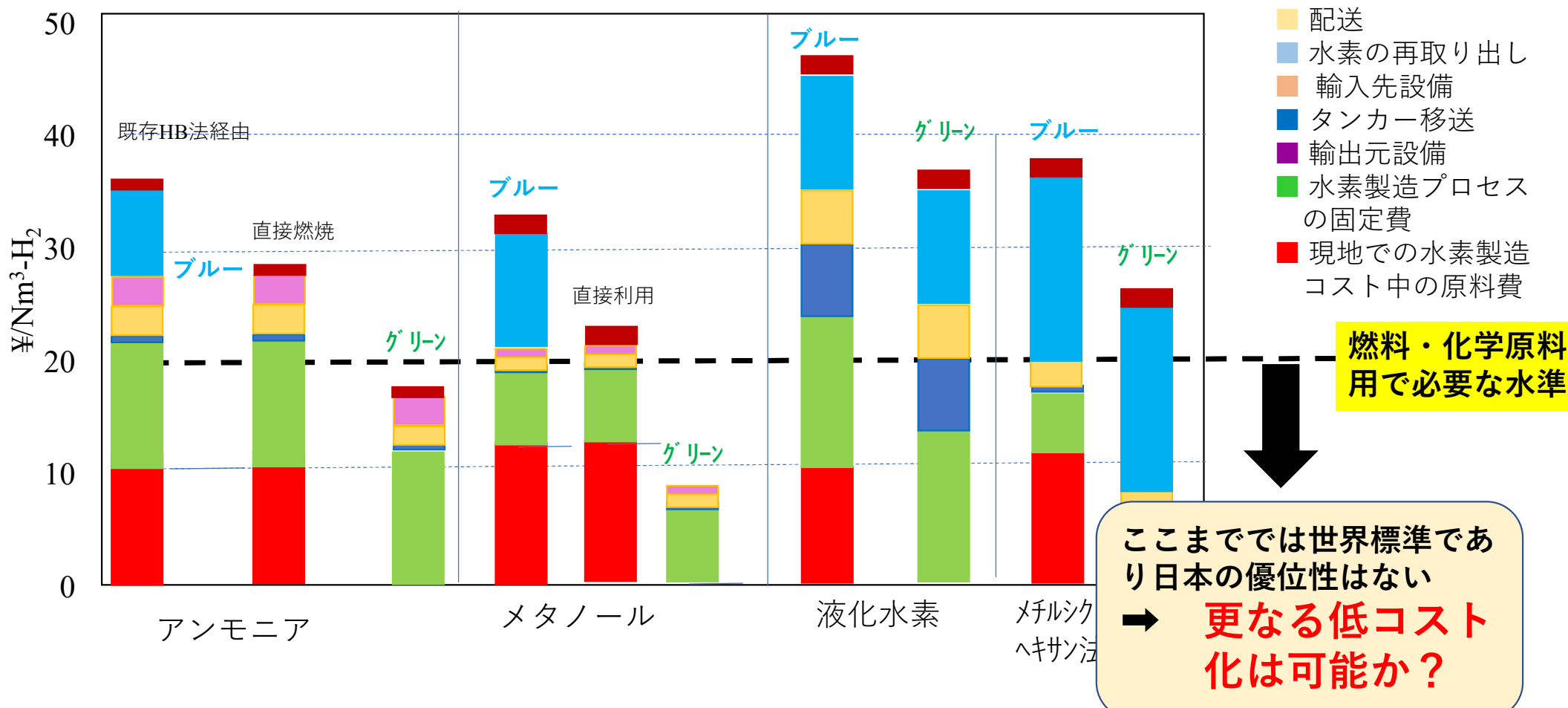
化石資源由来の水素の製造コスト

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¥/kg-H₂(18¥/Nm³-H₂)
70\$/bbl → 350¥/kg-H₂(30¥/Nm³-H₂)

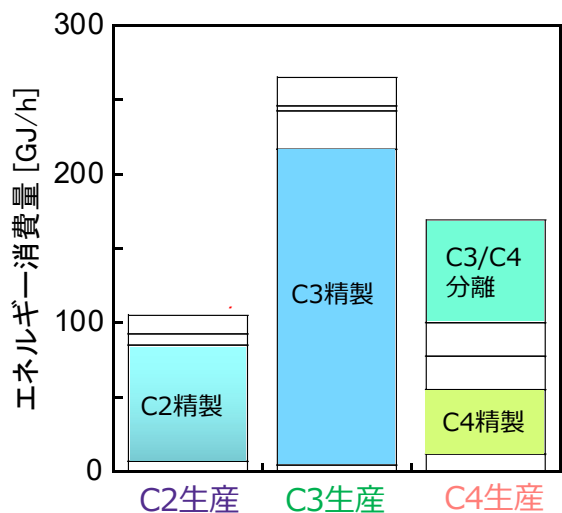
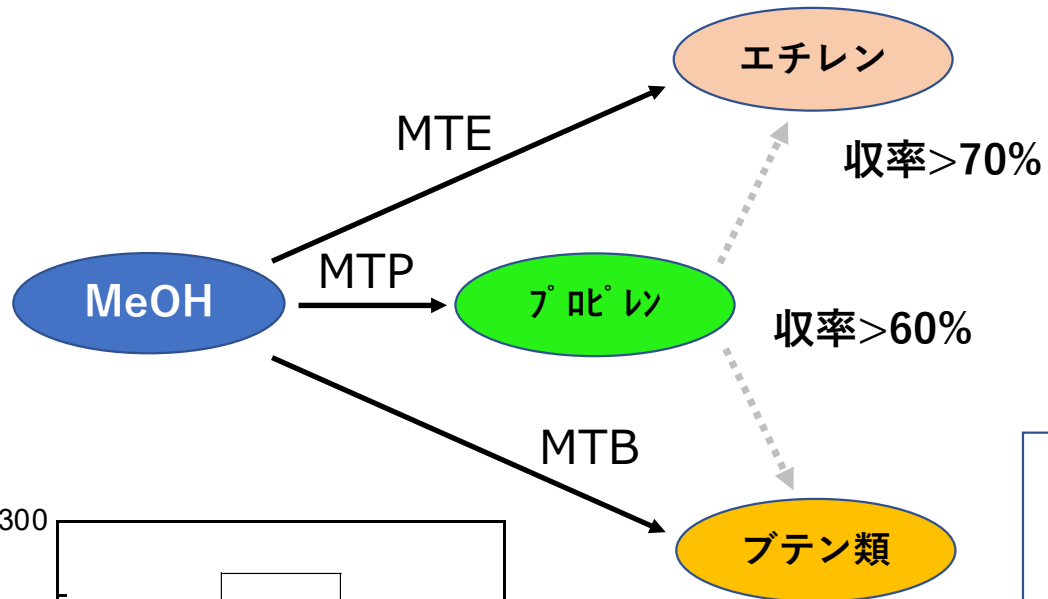
改質経由でのgray-水素の一貫CO₂排出量
~8.9kg-CO₂/kg-H₂

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

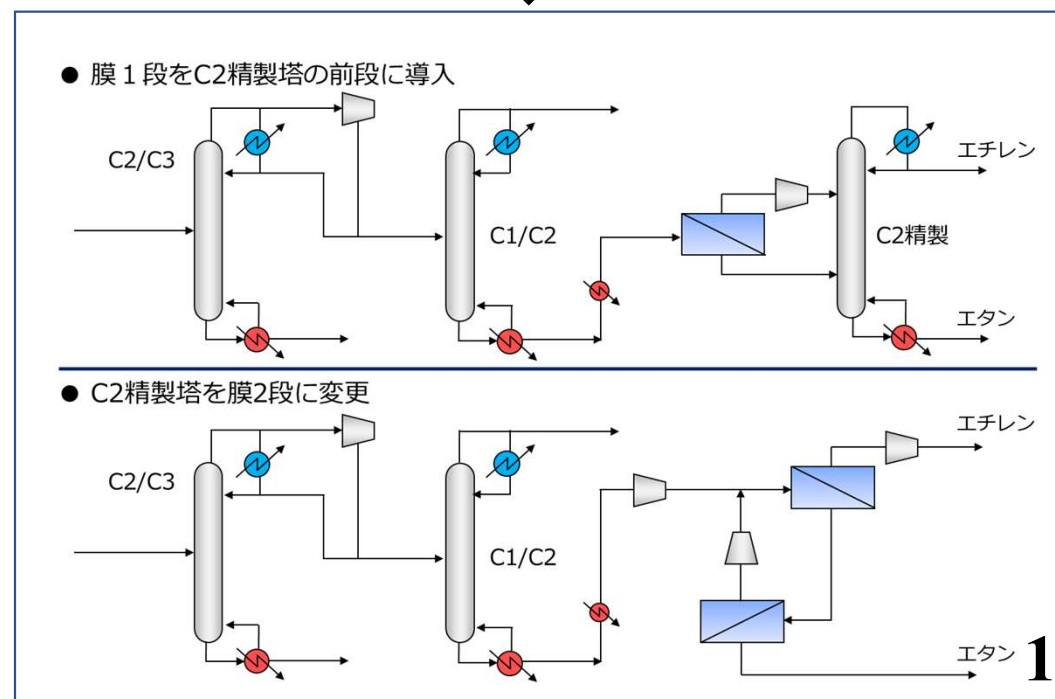
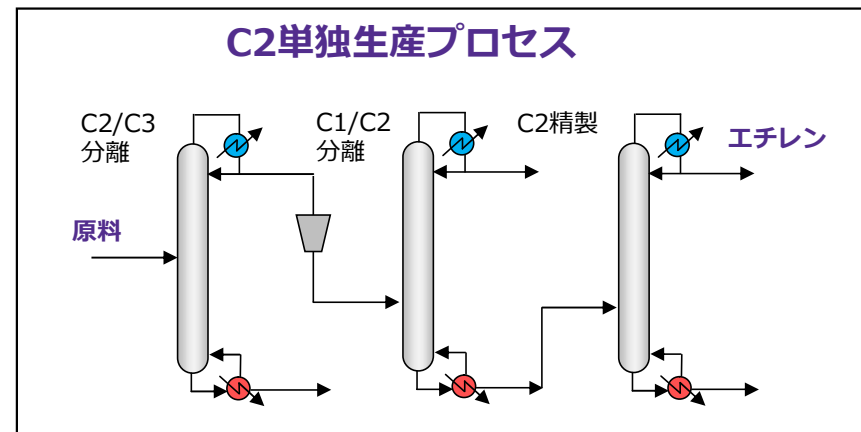


中東からのブルー/グリーン水素製造コストの水素キャリア毎の比較

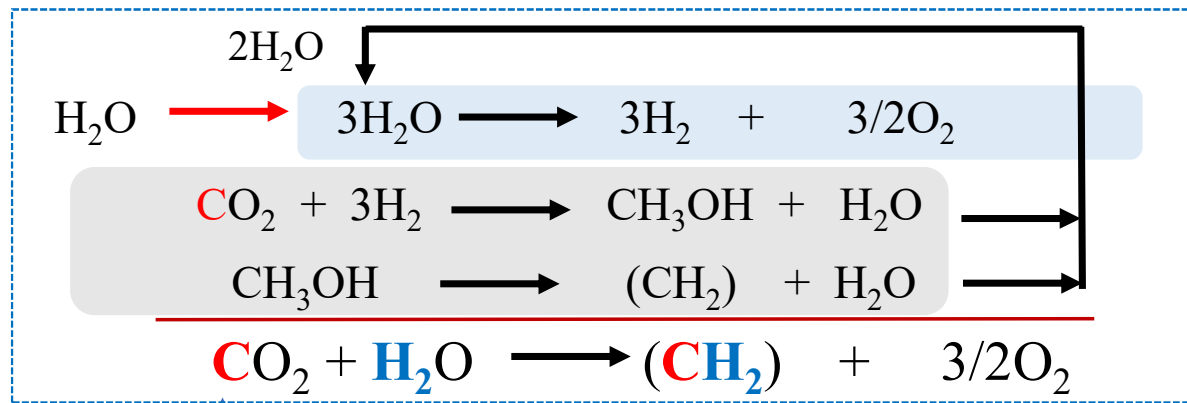
蒸留 + 膜分離の組み合わせによる運転エネルギー推算



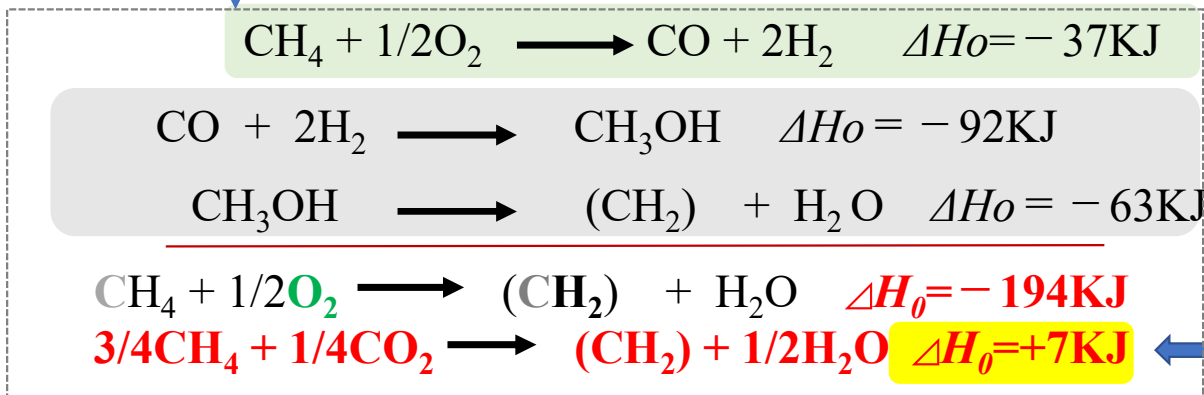
各オレフィン単産プロセス蒸留分離のエネルギー消費



グリーン水素からのグリーン化学品製造： 安定生産性の課題



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

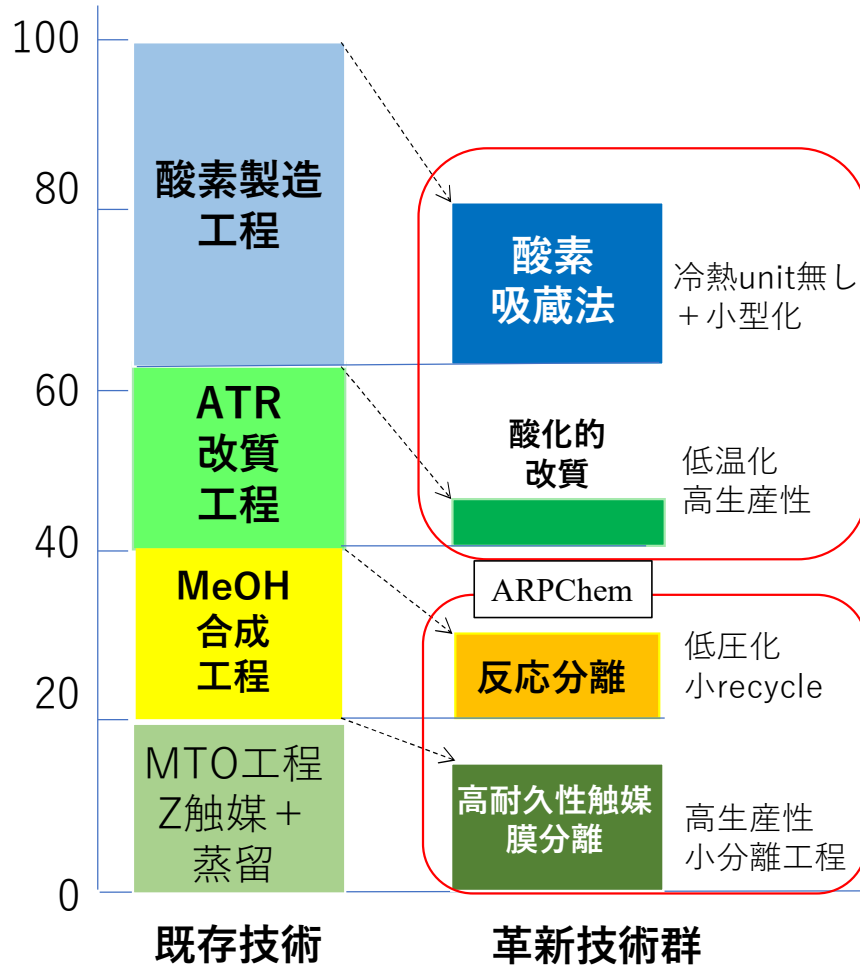


CCSによるブルー水素からのブルー化学品

差異化の為の技術戦略

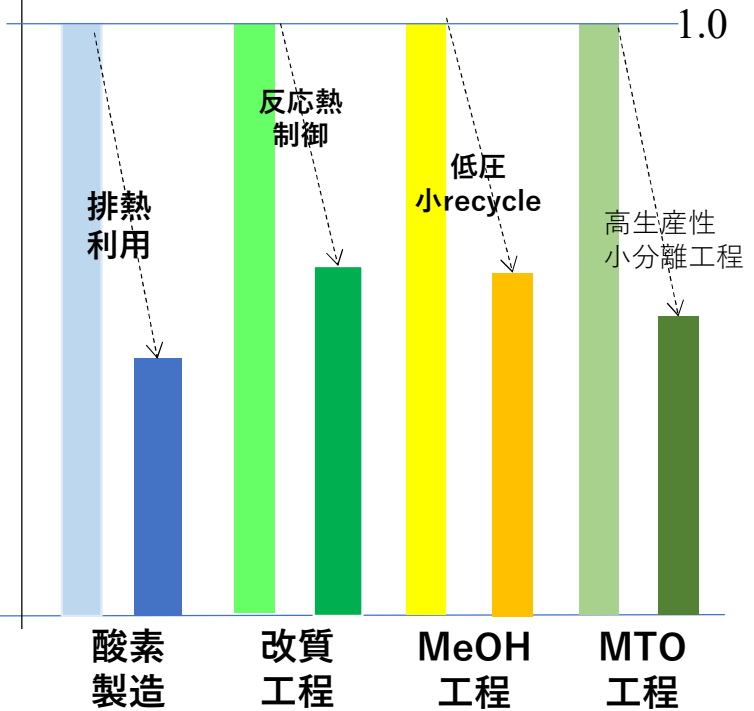
- **グリーン水素製造コストの価格破壊を目指す光触媒法水分解プロセス**
 - 二つを合理的に組み合わせる必要がある
 - 既存技術の組み合わせでの限界 → **新の革新技術による日本からの発信と経済再生戦略が必要**
- **運転動力を最小化する反応分離プロセス**
 - 平衡制約の回避
 - CH₃OH 製造
 - NH₃ 製造
- **メタン原料法水素でのCO₂削減余地はかなりある。**
- **CO₂はメタンの組み合わせでもゼロ排出=CO₂資源化できる。**
- **IPCC第6次報告書ではメタンLeakによる温暖化に強く言及**

建設費



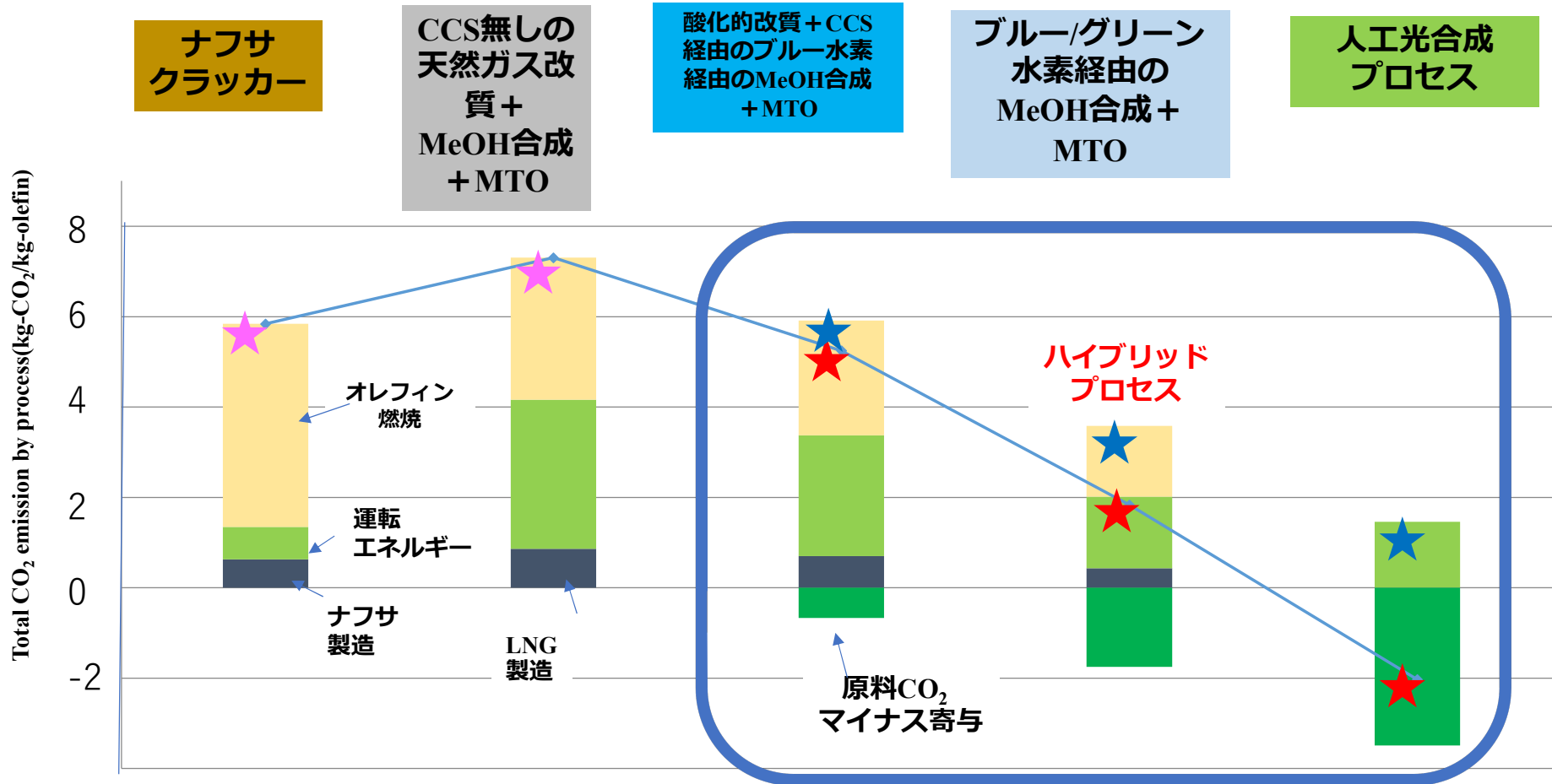
運転エネルギー

既存技術の運転エネルギーをそれぞれ1.0として



超高効率CH₄原料転換技術：投資最小化 + ΔCO₂最大化

オレフィン製造プロセス毎のLCA比較



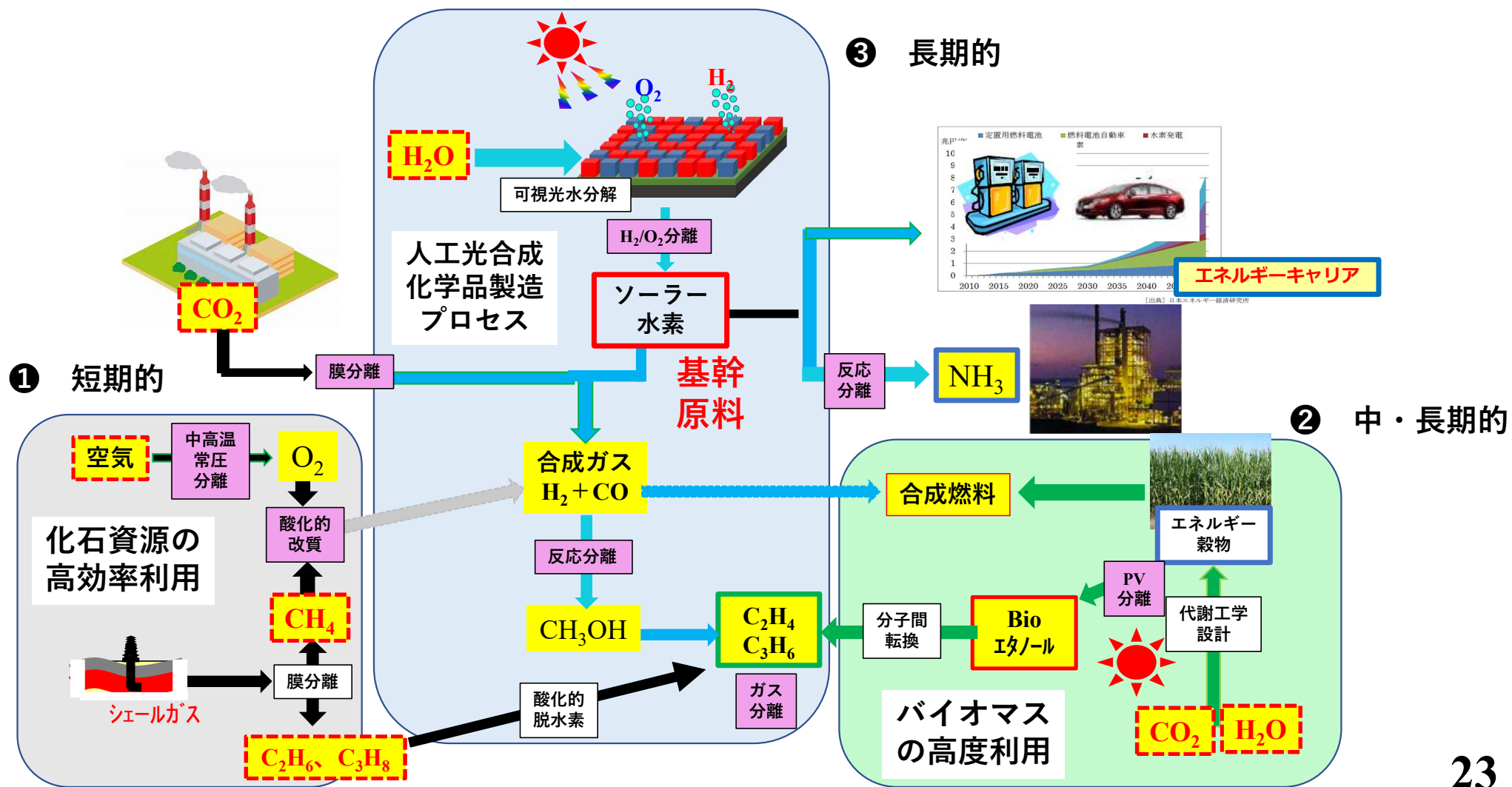
化石資源を用いCCSをやらない場合の一貫CO₂ 排出量: ★

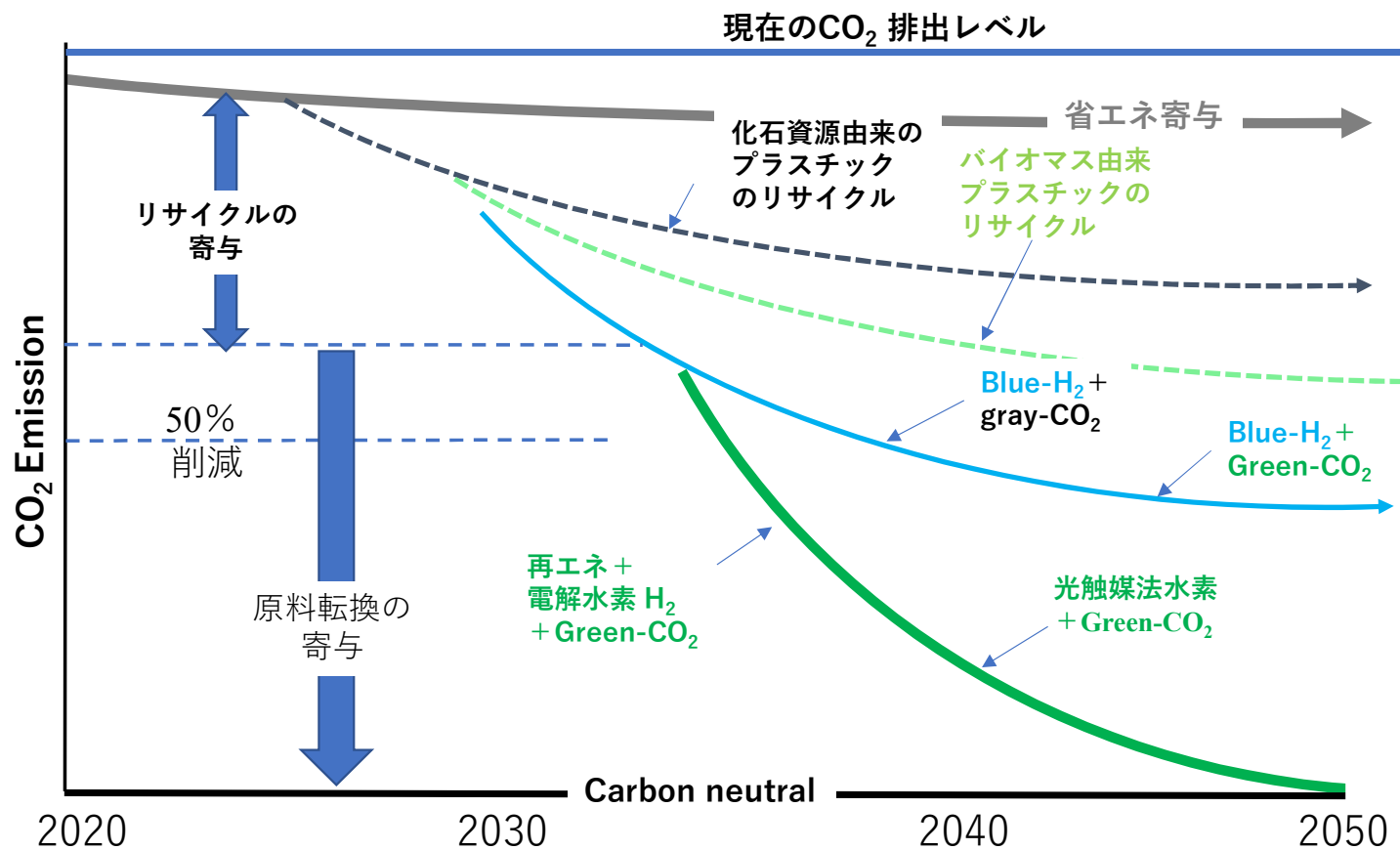
化石資源を用い究極のCCSを実施した場合の一貫CO₂ 排出量: ★

グリーン-CO₂ (バイオマス究極系, DAC): ★

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

Innovative Process for Eliminating Anthropogenic CO₂ Emission (IPEACE)





- 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要。
- 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が必要。
- 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要。

2050に向けたカーボンニュートラルへのロードマップ