

カーボンリサイクル特別講座

2025. 5. 13 広島大学

カーボンリサイクルを学ぶための基礎知識 (公開版)

望月和博

Kazuhiro Mochidzuki

広島大学 A-ESG科学技術研究センター

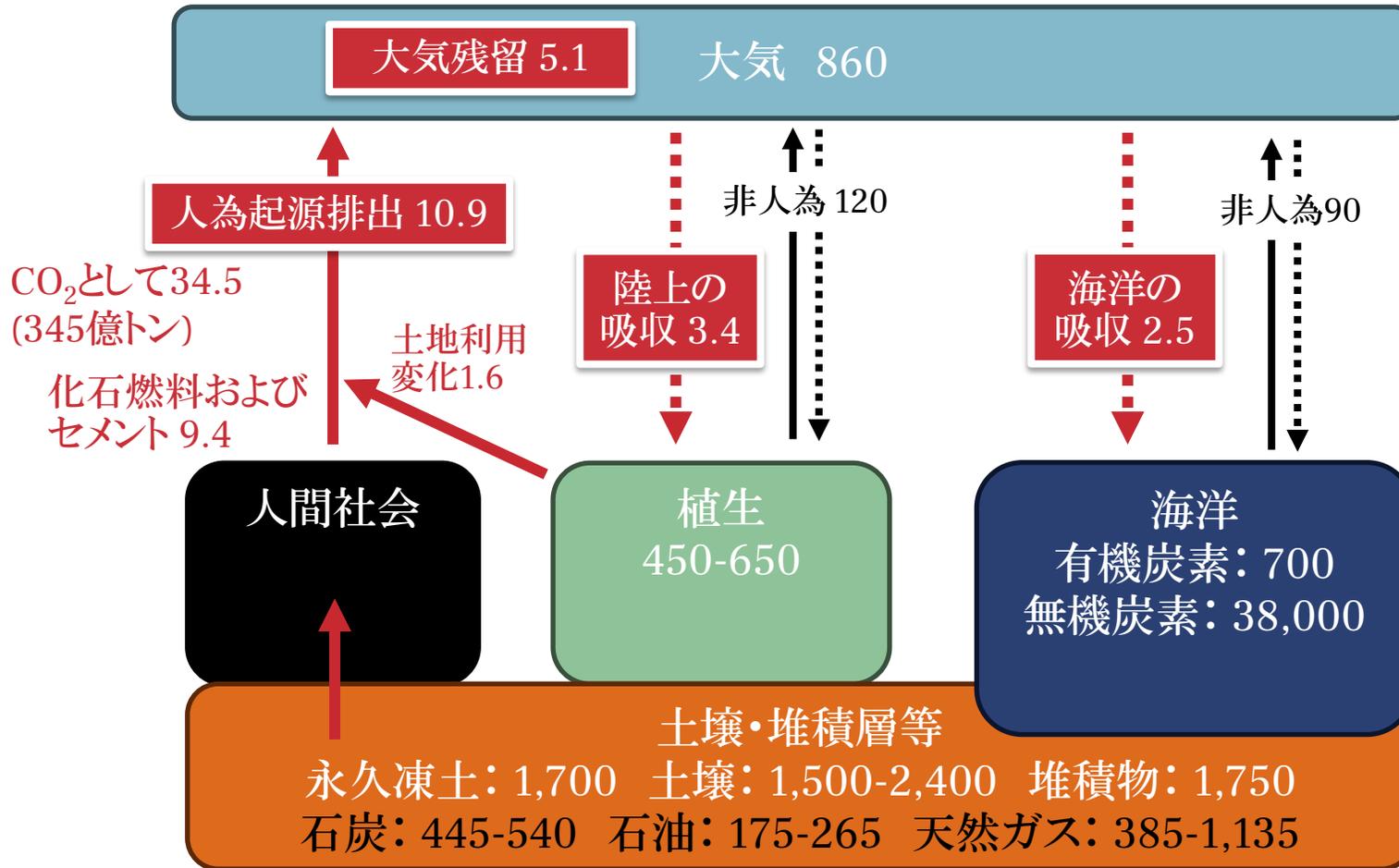
カーボンサイクルとカーボンリサイクル

- **カーボンサイクル(地球規模の炭素循環)**
 - 炭素が大気、海洋、堆積層、陸域生物圏・人間社会の間を移動するサイクル
 - 二酸化炭素(温室効果ガス)の増加と気候変動
 - 二酸化炭素の放出と固定をバランスさせることがカーボンニュートラル実現に向けた課題
- **カーボンリサイクル(=炭素の再生利用)**
 - 二酸化炭素の排出を削減し、カーボンニュートラルを実現するためのキーテクノロジーのひとつ(人間社会のストックから炭素を出さない)
 - 二酸化炭素を資源としてとらえ、分離・回収してさまざまな製品や燃料に再利用すること
 - リサイクルプロセスに必要なエネルギーを合理的に確保することが重要

サー本サイクル：地球全体の炭素循環の概要

2010-2019年の平均

【単位】ストック Gt(10億トン)-C, フロー Gt(10億トン)-C/年



IPCCの報告によると、産業革命以降、1750-2019年の総計では大気中の二酸化炭素は2,850億トン-C(10,450億トン-CO₂)の増加。

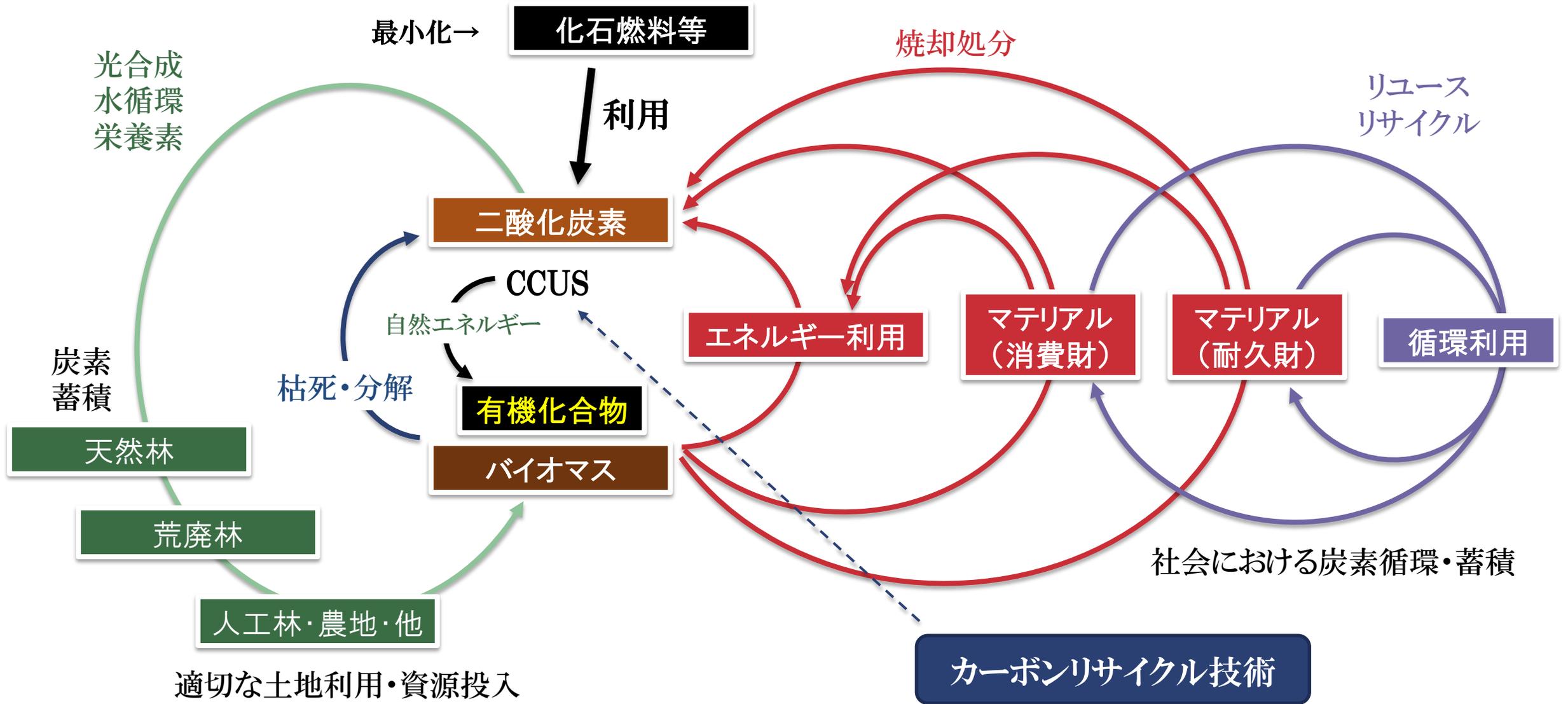
大気量(4.1×10¹⁸ m³)から計算すると、130 ppmの濃度上昇に相当する。
280 ppm → 410 ppm

2010年代平均の増加量51億トン-C(187億トン-CO₂)は年間2.3 ppmの濃度上昇。

世界全体のバイオマスエネルギー利用は44 EJ(約11億トン-Cに相当)、最終エネルギー消費の12%を占める(REN21)。

P. Friedlingstein, et al. (2020): *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340 より

カーボンサイクルとカーボンリサイクル



炭素（カーボン）について

無機炭素	有機炭素
単体炭素： グラファイト ダイヤモンド (石炭 木炭 活性炭 炭素繊維)	化石資源： 石油 天然ガス バイオマス： 動植物
炭化物・炭酸塩： (炭化ケイ素 炭酸カルシウム 重曹)	燃料： ガソリン 軽油 重油 航空燃料 灯油 都市ガス LPG
ガス： 二酸化炭素 一酸化炭素	化学製品： プラスチック 溶剤 界面活性剤 潤滑剤 医薬品

炭素資源としての二酸化炭素の理解

- 有機物の分解（酸化・燃焼）によって得られる
- 標準生成エンタルピーが低い安定な物質（化学エネルギーを持たない）

カーボンリサイクルについて

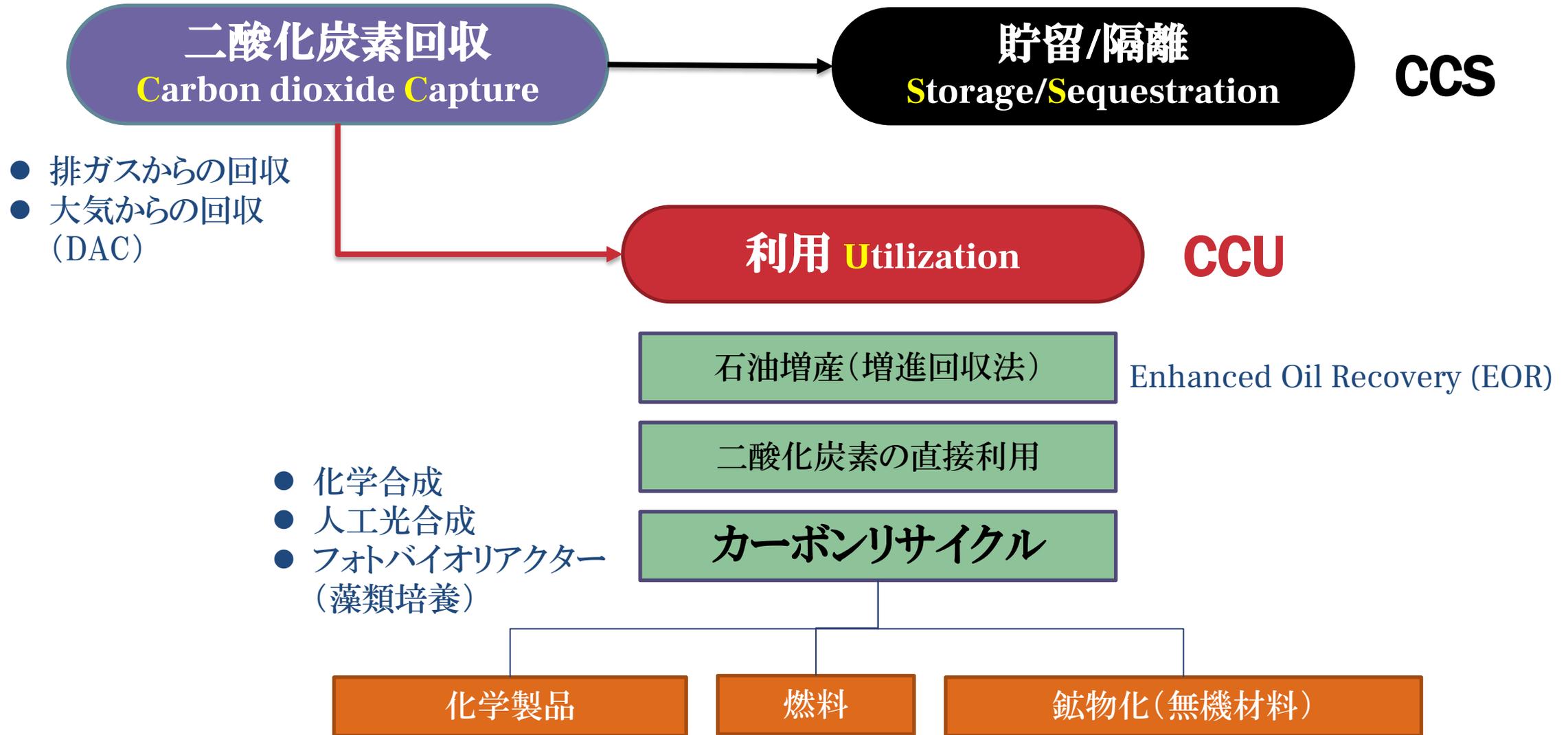
- CO₂を炭素資源(カーボン)と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用(リサイクル)するカーボンリサイクルを推進します。カーボンリサイクルの着実な推進を通じ、大気中に放出されるCO₂の削減を図り、気候変動問題の解決に貢献、また新たな資源の安定的な供給源の確保につなげます。

(経済産業省・資源エネルギー庁:

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/)

- 二酸化炭素の回収：大気中への排出削減
- 回収した二酸化炭素の有効利用：化石資源に依存しない持続可能な炭素資源利用

CCUSとカーボンリサイクル



カーボンリサイクルに必要性

化石資源からの脱却を考えると、有機物を得るためにはカーボンリサイクルかバイオマス利用しかない

- 資源エネルギー庁の説明によると
(www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/)
 - 2050年に向けて化石燃料の利用に伴うCO₂の排出を大幅に削減 ⇒ CO₂の分離・回収や利用に係る技術は、将来、有望な選択肢の一つであり、そのイノベーションが重要
 - CO₂をカーボン資源と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用する
- 長期的には化石燃料の利用はフェードアウト ⇒ BECCS ⇒ BECCU
- バイオマス利用や有機性廃棄物処理におけるカーボンリサイクル
- 大気中からの二酸化炭素の回収(DAC)・利用

カーボンリサイクル技術の基本

二酸化炭素分離技術

- 化学吸収
- 物理吸収
- 吸着
- 膜分離

分離
回収
濃縮

二酸化炭素

エネルギー変換
水素製造

水素

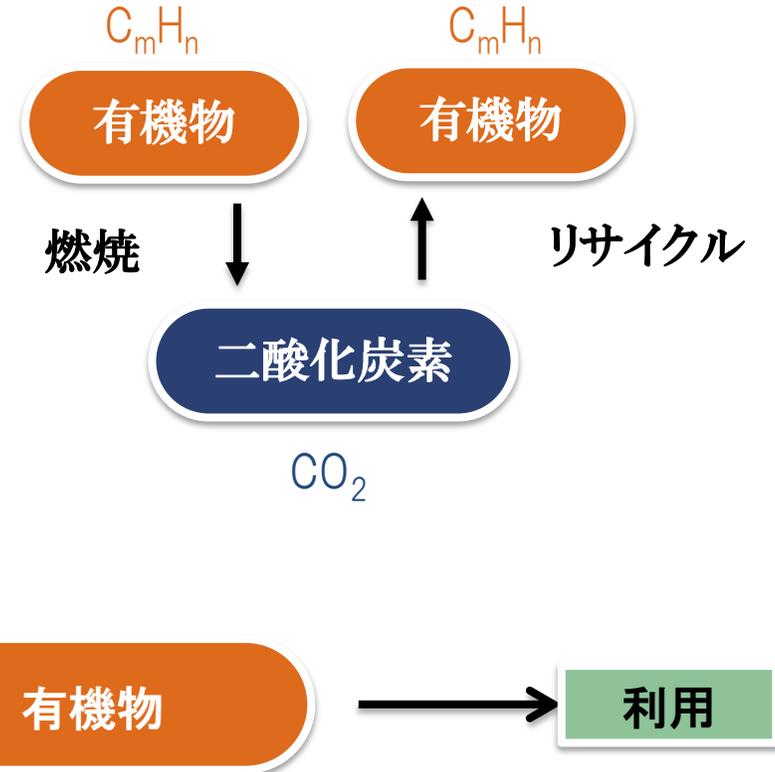
エネルギー

反応技術

- 触媒反応
- 微生物反応

反応制御・装置設計

プロセス設計・システム設計

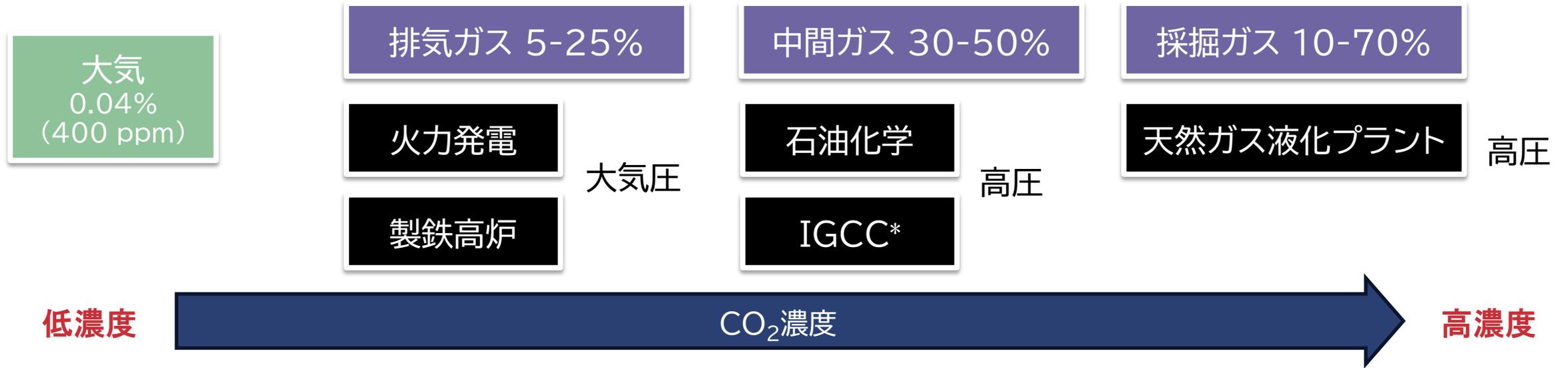


二酸化炭素を集めて使う

- 「どこから」「どのように」集める？
- 「どうすれば」「なにに」使えるようになる？

二酸化炭素排出源

* IGCC:石炭ガス化複合発電



大気から非常に低濃度の二酸化炭素回収は難易度が高い。
⇒基礎研究・実証

10%前後の排気ガスからの分離における効率化が課題。

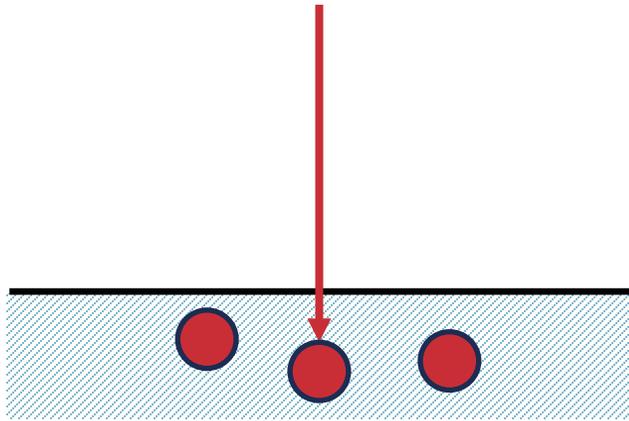
高濃度・高圧での二酸化炭素排出は分離回収に有利。
⇒商用化が進んでいる

二酸化炭素分離技術

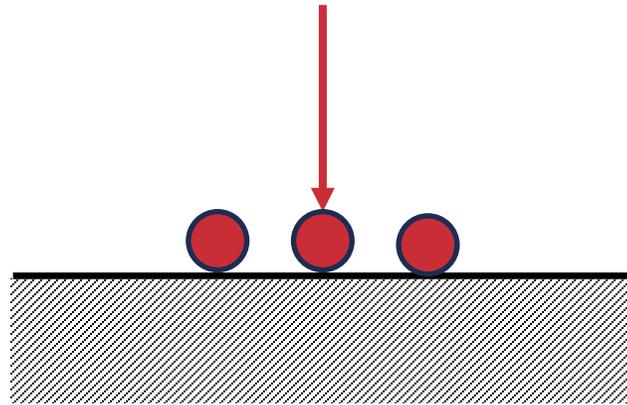
技術	駆動力	概要
化学吸収	温度差	二酸化炭素と結合(イオン結合)しやすい成分を含む吸収液を用いる分離。モノエタノールアミンなどを吸収液とするアミン法が代表的。低分圧の二酸化炭素にも効果的。40-50℃で吸収、110℃以上に加熱して放散。多くの実績があるが、加熱のために大きなエネルギー投入を要する。
物理吸収	分圧差	二酸化炭素の溶解度が大きい吸収液(メタノールなど)を用い、高圧・低温で二酸化炭素を物理的に吸収させ、減圧(および加温)することで二酸化炭素を回収する。高分圧の二酸化炭素に適する。
膜分離	分圧差	二酸化炭素を選択的に透過させる膜を用いる。大きな加減圧や加熱は必要ないため、エネルギー消費が少ないが、高濃度の二酸化炭素を得ることは難しい。小規模装置に向いている(大規模化は困難)。
吸着	分圧差/温度差	二酸化炭素に対する親和性が高い吸着材を用い、低温・高圧で吸着、高温・低圧で脱着する。吸脱着の圧力のみを操作する方法をPSA(圧力スイング吸着)、温度のみを操作する方法をTSA(温度スイング吸着)、双方を操作する方法をPTSAという。吸着量・吸着速度が高く長寿命な吸着材の開発が課題。

吸着と吸収

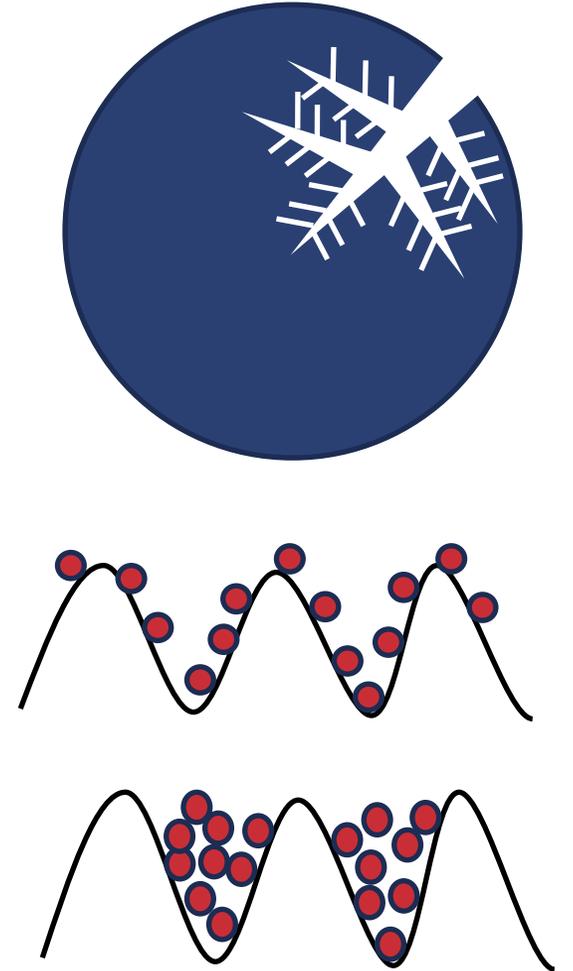
吸収はある物質(二酸化炭素)が他の物質(吸収液)の内部に入り込む現象、
吸着は他の物質(吸着材)の表面に捕らわれる現象。



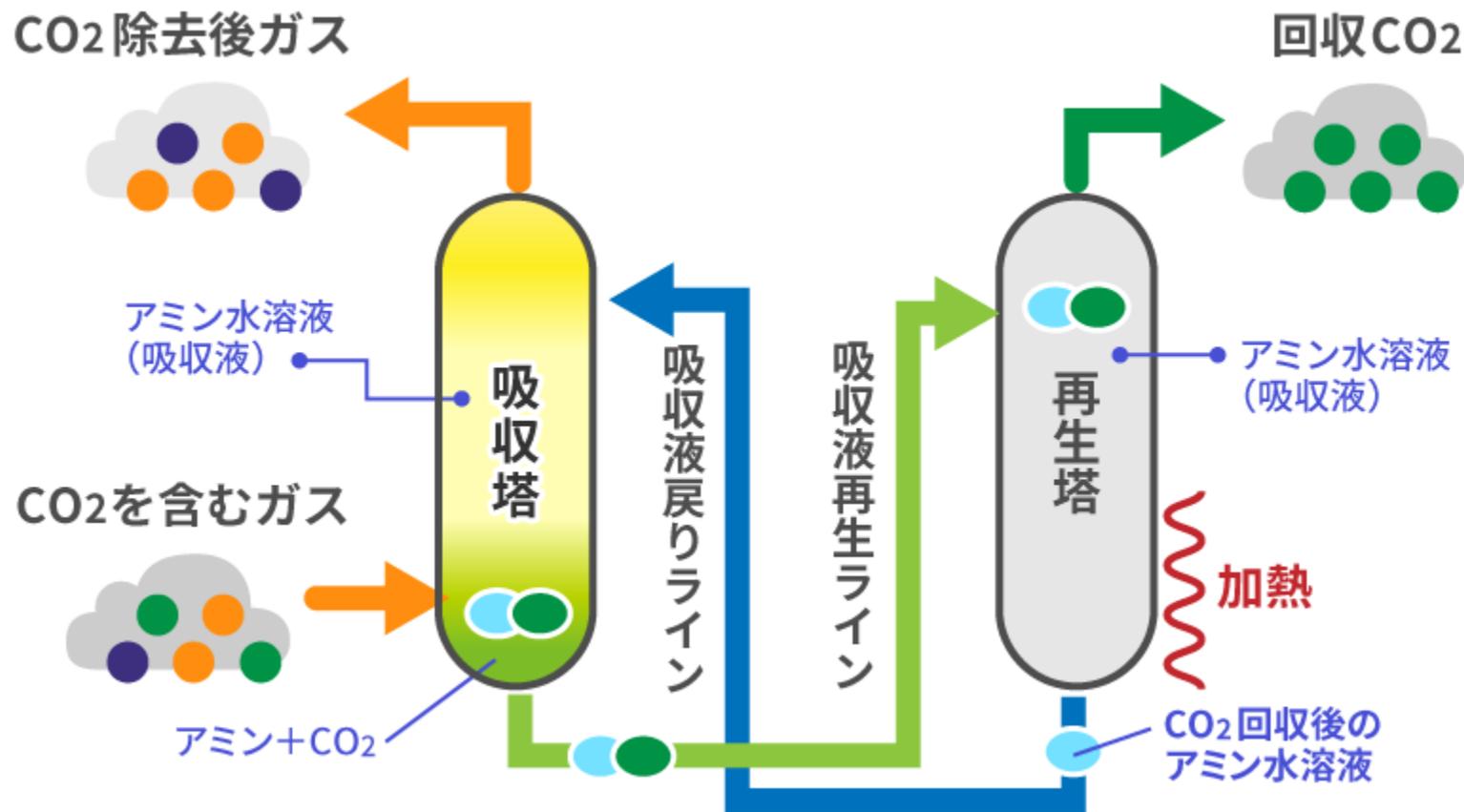
例：液中への吸収
Absorption into liquid



例：固体表面への吸着
Adsorption onto solid surface

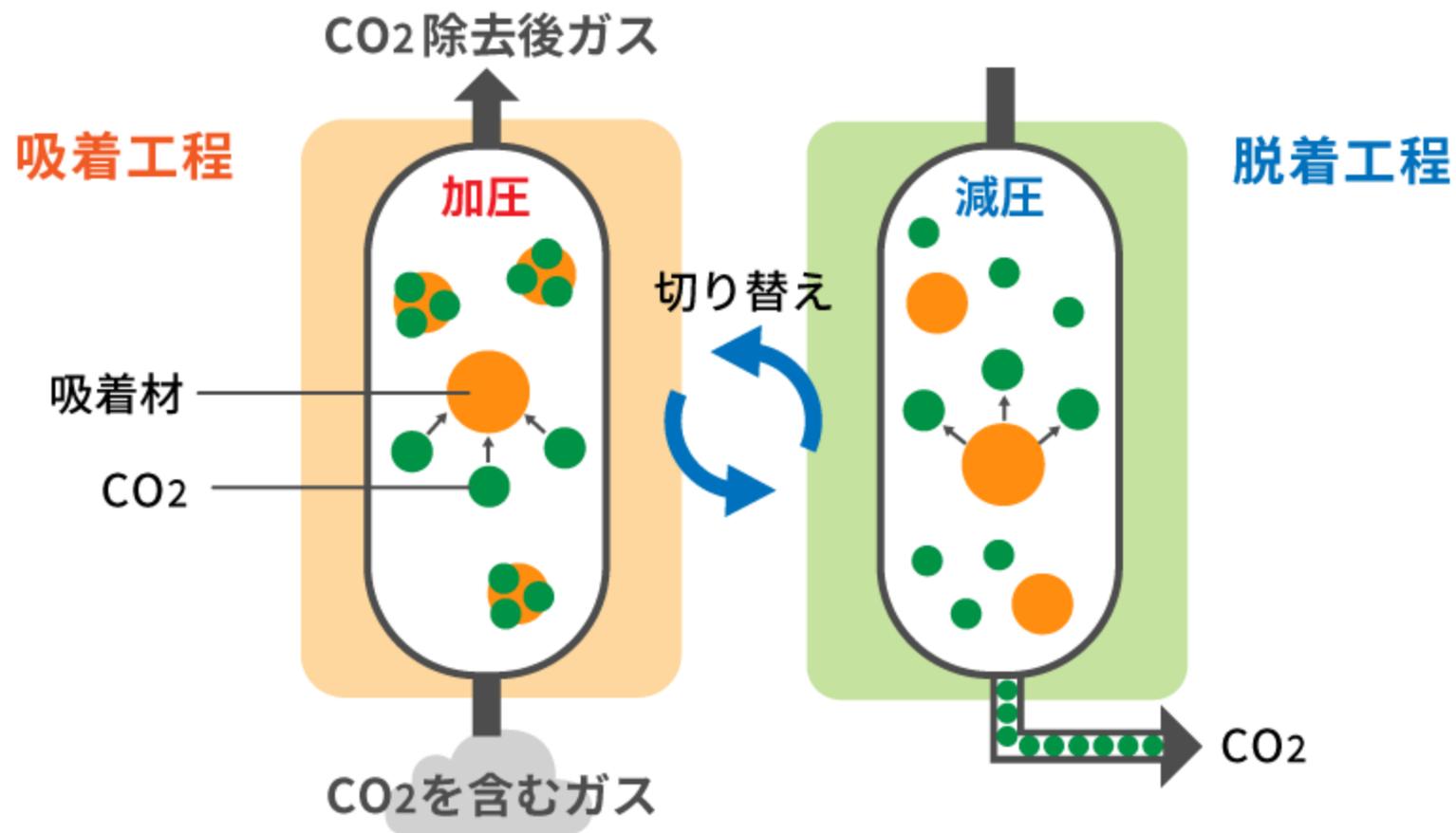


化学吸収法



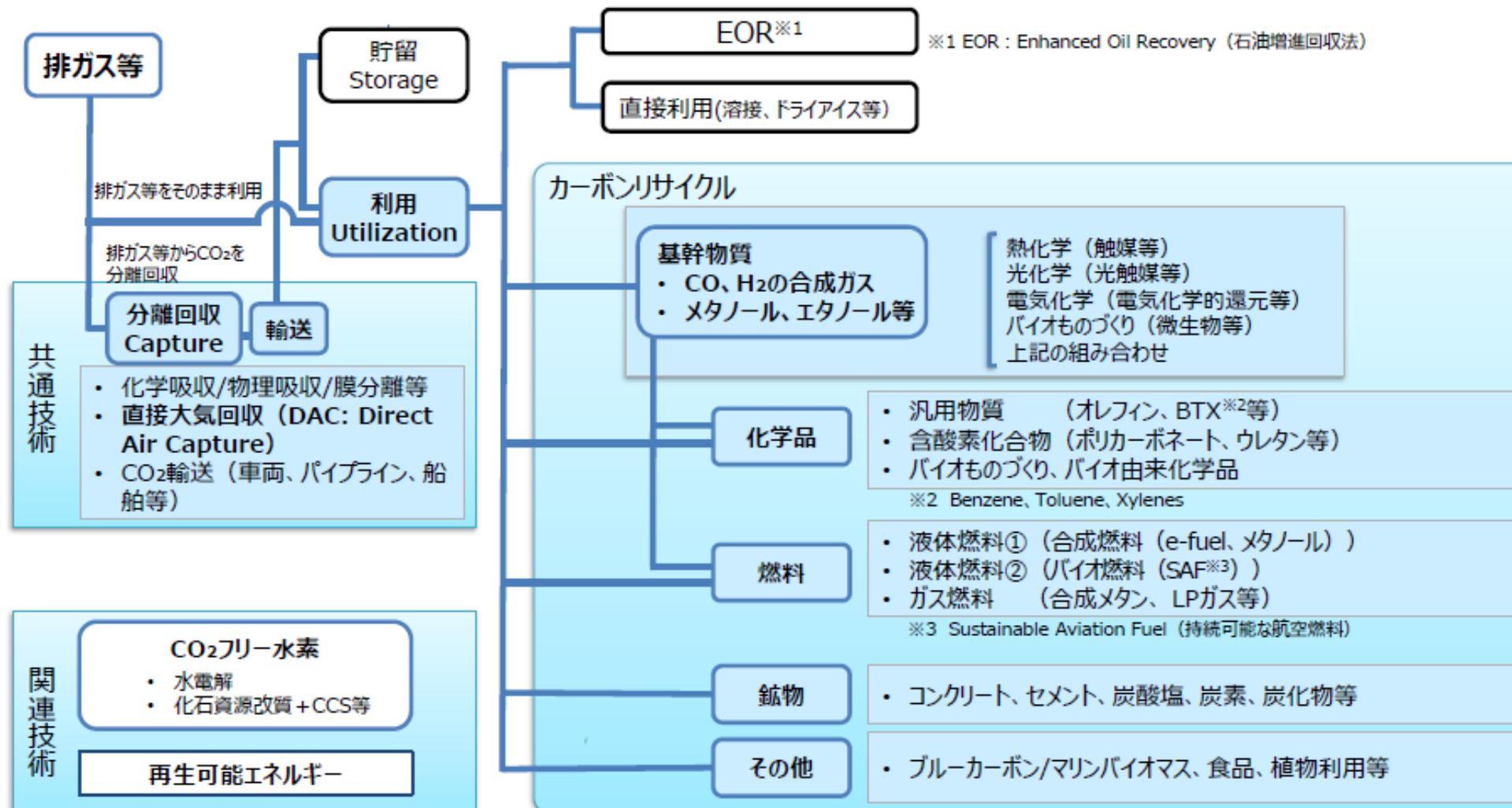
NEDO特集記事 <https://green-innovation.nedo.go.jp/article/co2-separate/>

物理吸着法



NEDO特集記事 <https://green-innovation.nedo.go.jp/article/co2-separate/>

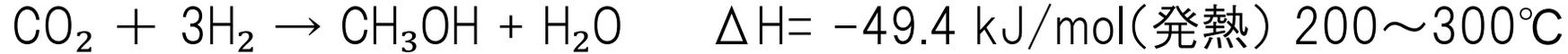
二酸化炭素の回収と利用



カーボンリサイクルロードマップ https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/pdf/20230623_01.pdf

カーボンリサイクルに関する主な化学反応

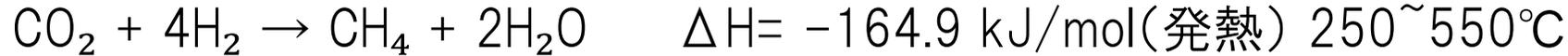
二酸化炭素からメタノール



二酸化炭素からエタノール



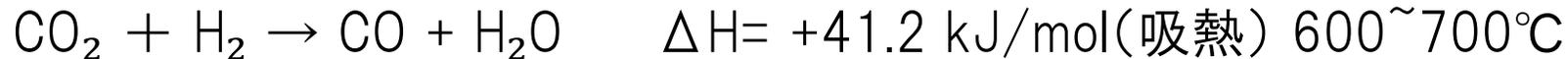
二酸化炭素からメタン (メタネーション=サバティエ反応)



メタンと二酸化炭素で合成ガス(一酸化炭素と水素の混合ガス) (ドライリフォーミング)



二酸化炭素から一酸化炭素 (逆シフト反応)



一酸化炭素(合成ガス)からメタノール



一酸化炭素(合成ガス)から炭化水素 (FT合成)



メタネーション (e-methane)

メタネーションの反応(サバティエ反応)



$\Delta H = -164.9 \text{ kJ/mol}$ (発熱)

250-550°C

メタン関連の諸反応

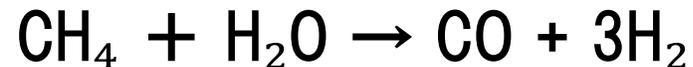
・ドライリフォーミング



$\Delta H = +247 \text{ kJ/mol}$ (吸熱)

800°C以上

・スチームリフォーミング



$\Delta H = +206 \text{ kJ/mol}$ (吸熱)

750-900°C

液体合成燃料（e-fuel）：FT合成経由

CO₂からCO(逆シフト反応)



$\Delta H = +41.2 \text{ kJ/mol}$ (吸熱)

FT合成反応(フィッシャー・トロプシュ)

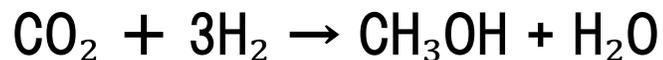


$\Delta H = -167 \text{ kJ/mol-CO}$ (発熱)

液体合成燃料（e-fuel）：メタノール経由

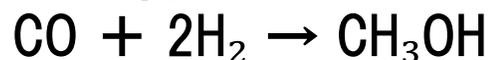
メタノール合成反応

・CO₂から



$\Delta H = -49.4 \text{ kJ/mol}$ (発熱)

・CO(合成ガス)から

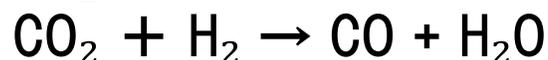


$\Delta H = -90.6 \text{ kJ/mol}$ (発熱)

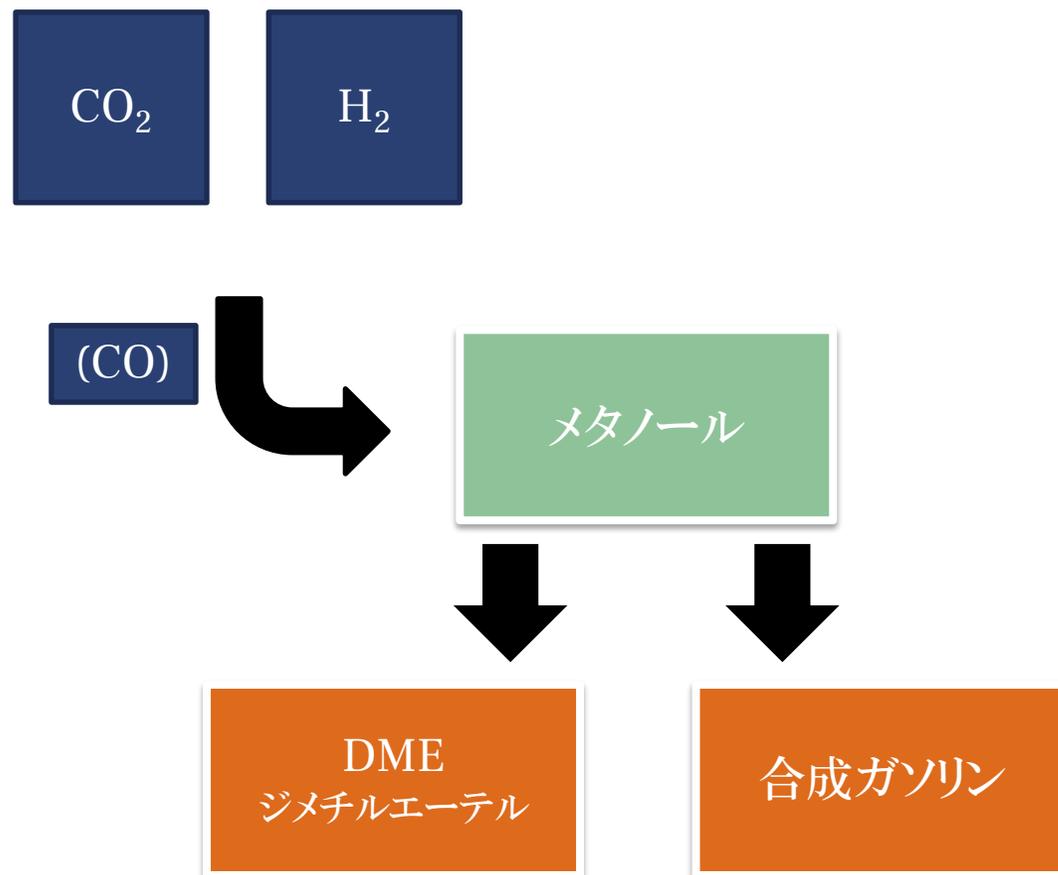
MTG(methanol-to-gasoline)反応



CO₂からCO(逆シフト反応)



$\Delta H = +41.2 \text{ kJ/mol}$ (吸熱)



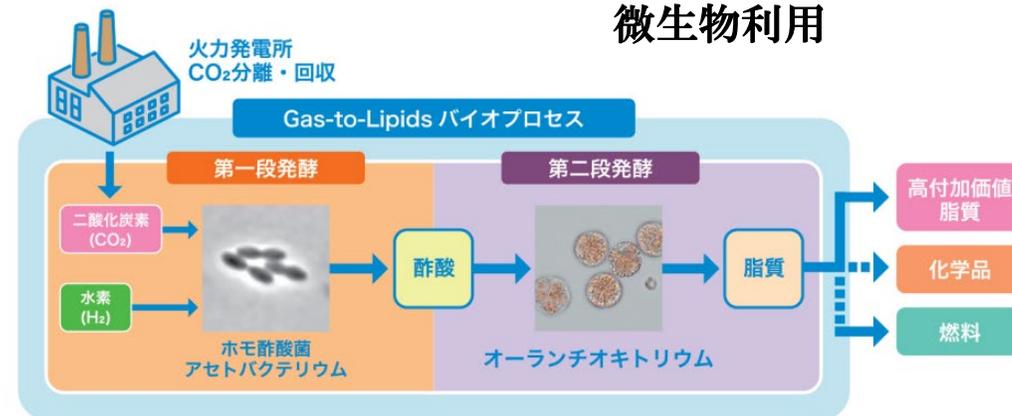
- 光触媒によって水を水素と酸素に分解
- 水素・酸素混合ガスから水素を分離
- 水素と二酸化炭素を反応させて有機物(オレフィンなど)を合成

大崎上島カーボンリサイクル実証研究拠点での研究プロジェクト

藻類培養・フォトバイオリクター



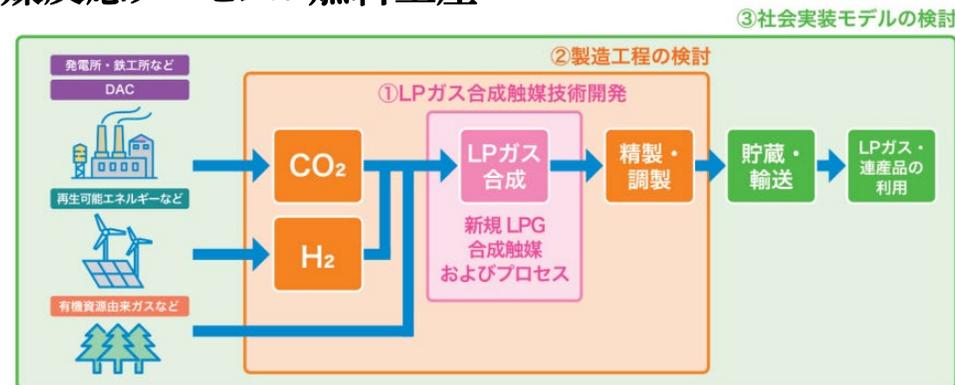
微生物利用



触媒反応プロセス：化学製品生産



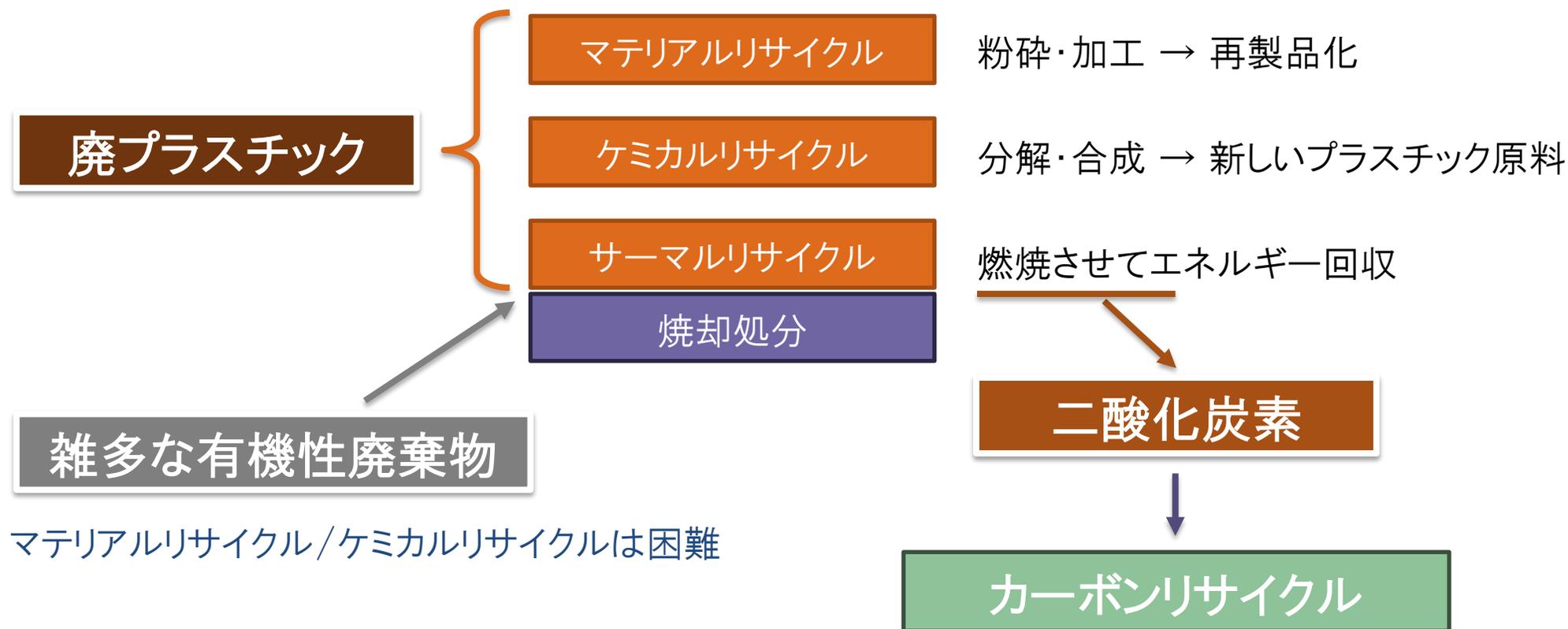
触媒反応プロセス：燃料生産



物質収支・エネルギー収支と水素

- 有機物を構成する水素
- エネルギーとしての水素

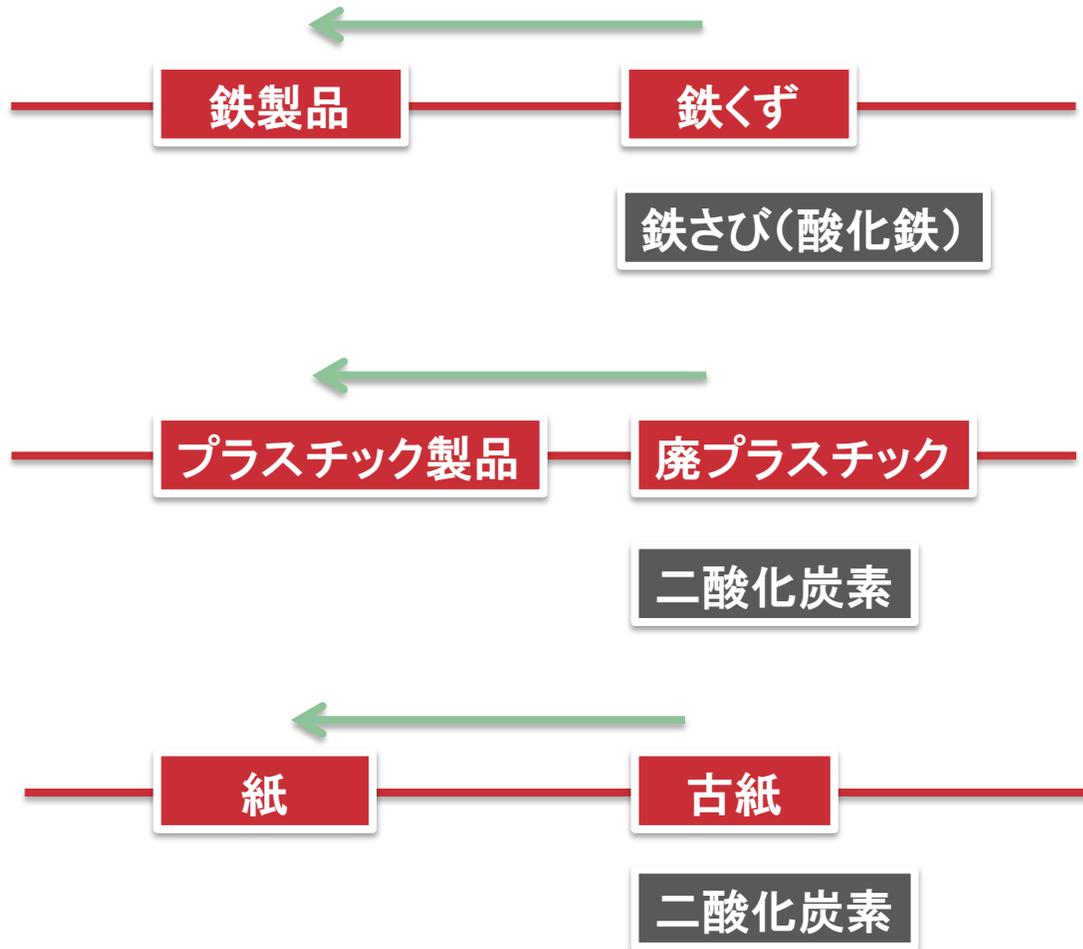
リサイクルの考え方の比較



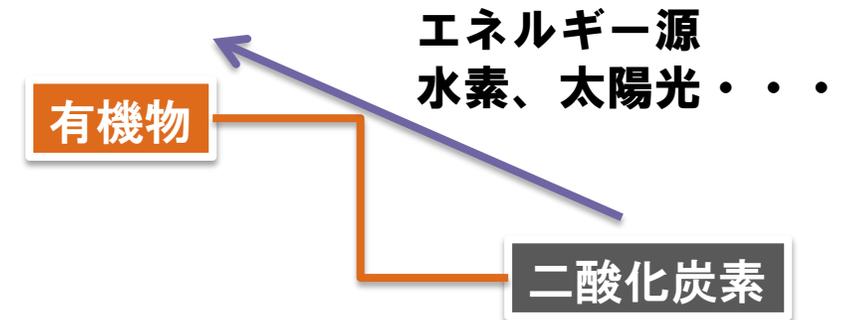
カーボンリサイクルの実現は総合的なリサイクル率向上に貢献する

リサイクルと化学エネルギー

用途を終えても化学エネルギーは失わない



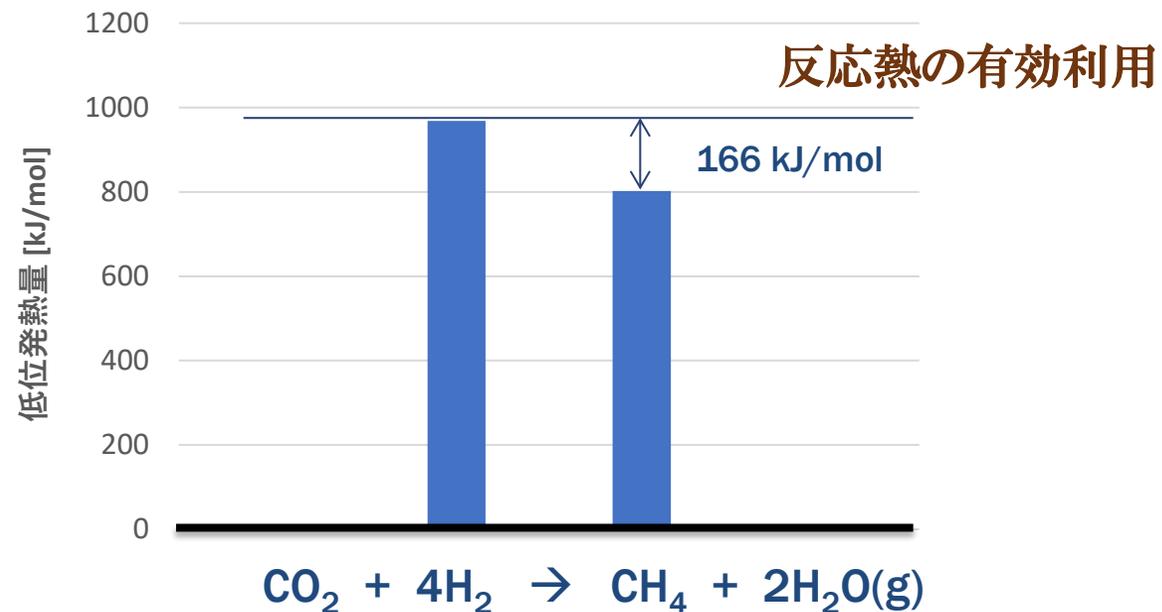
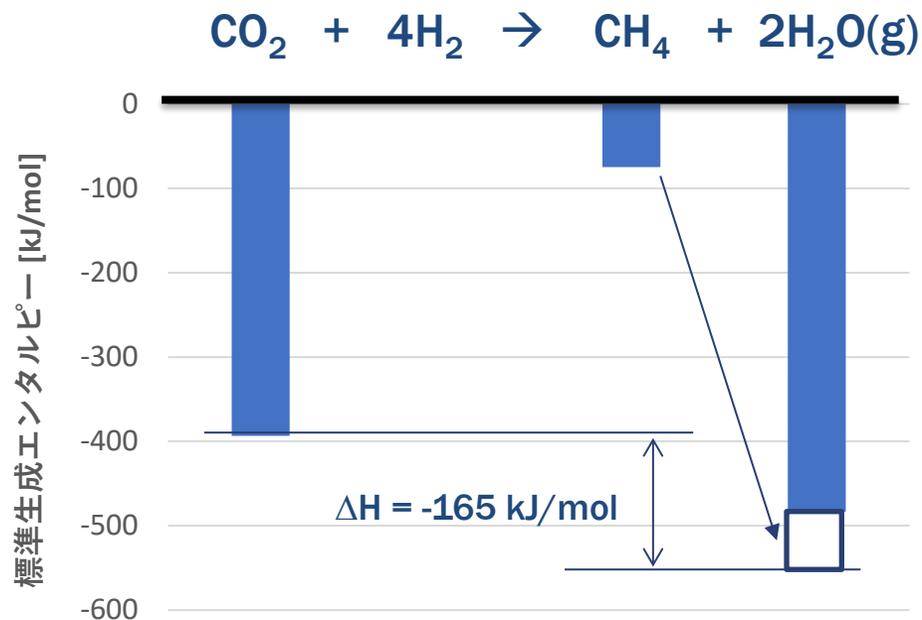
燃料利用や焼却処分の過程で化学エネルギーを失う



とはいえ...

- ✓ 既往のリサイクルでも化学エネルギーのメイクアップ以外にも多量のエネルギーが必要
- ✓ 「有機物→二酸化炭素」が焼却処理ならエネルギー回収も可能
- ✓ 二酸化炭素を出発とする反応はシンプル(ケミカルリサイクルなどより扱いやすい?)

例：メタネーションの化学反応



発熱反応：低温
分子数減少：高圧

触媒で高効率反応

カーボンとエネルギーを合理的に扱う技術開発
プロセス・システム設計

水素を得るためのエネルギー確保

【カーボン】

二酸化炭素 → メタン

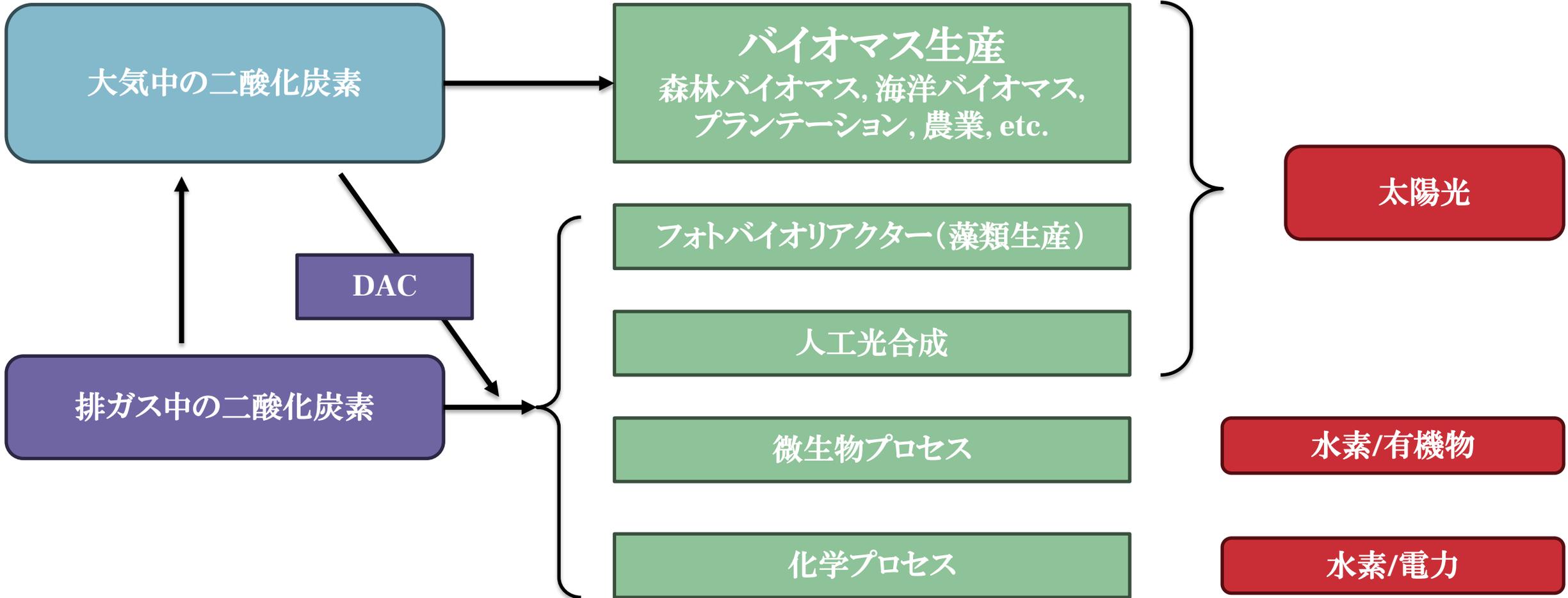
【エネルギー】

電気(余剰再生可能電力) → 水素 → メタン

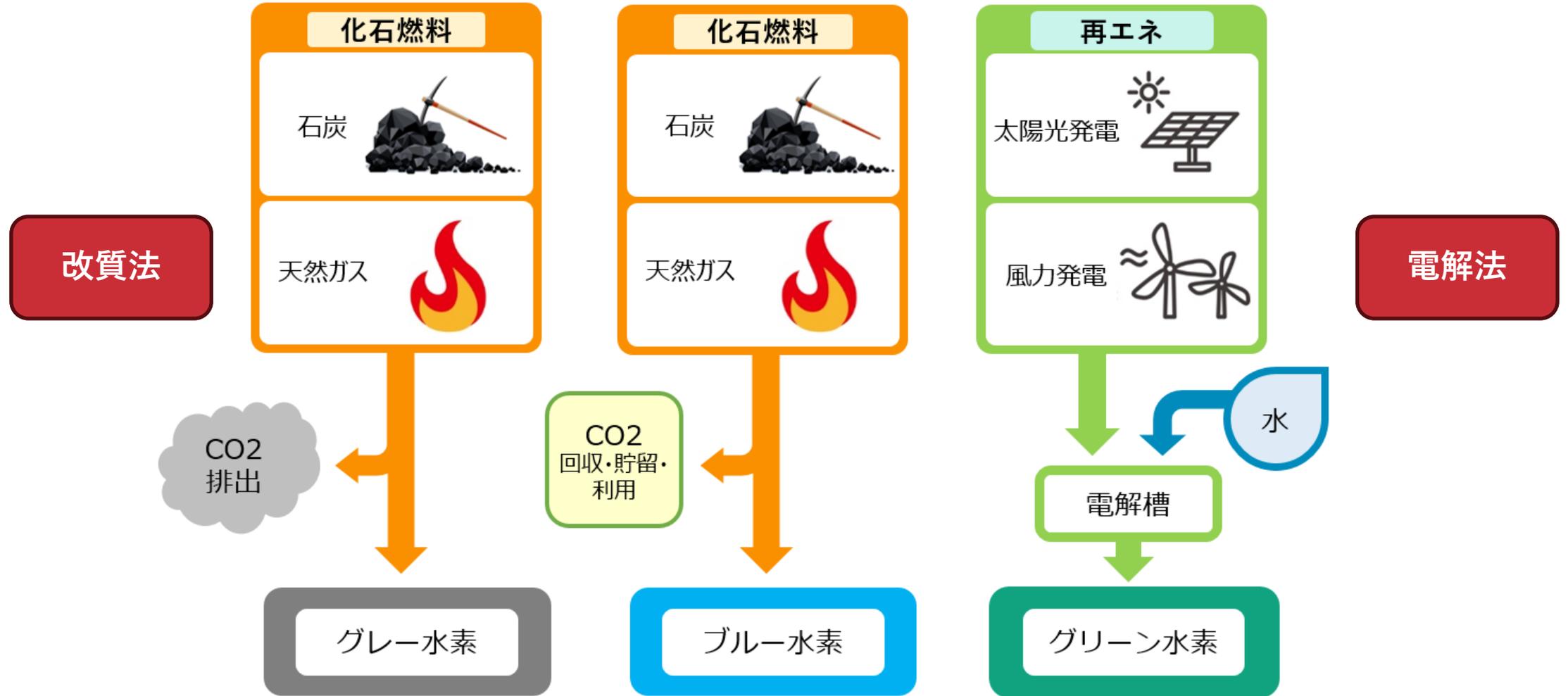
カーボンリサイクルにおけるエネルギー源

二酸化炭素源

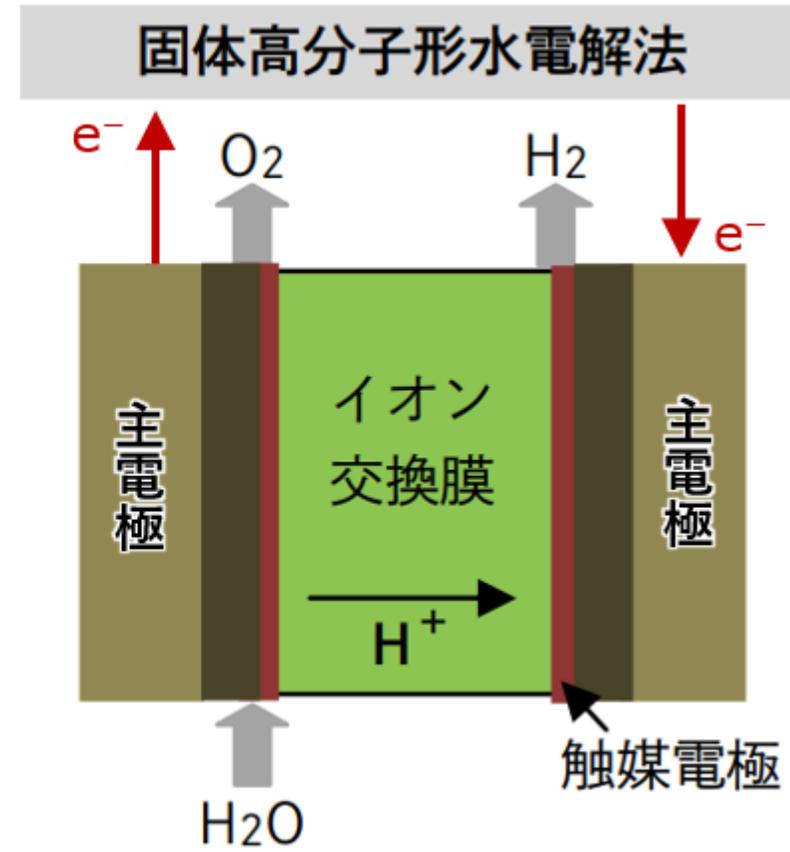
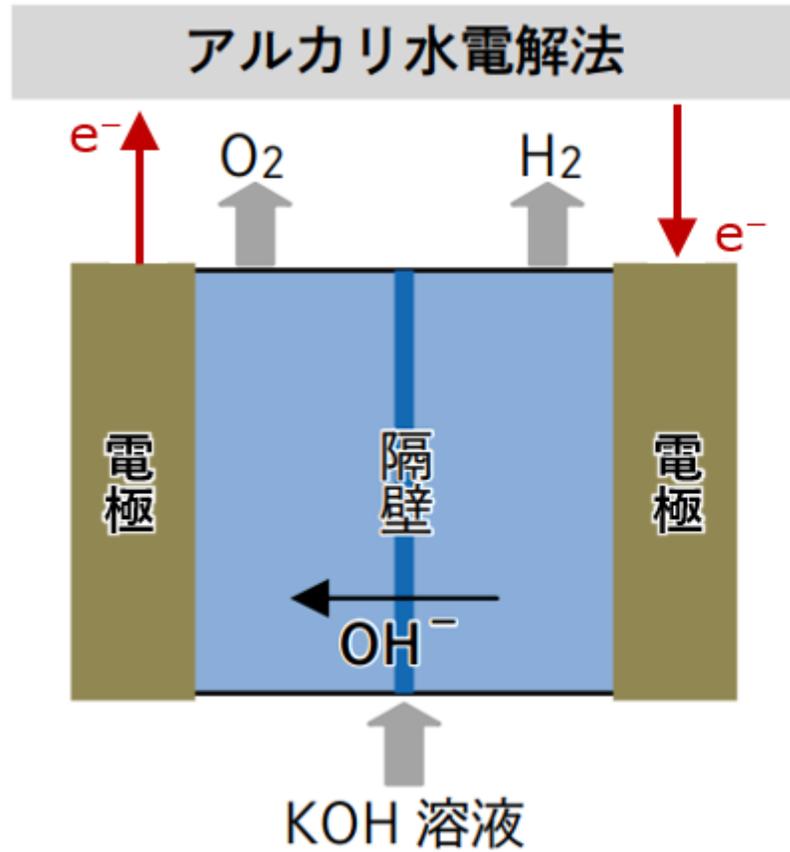
エネルギー源



水素生産

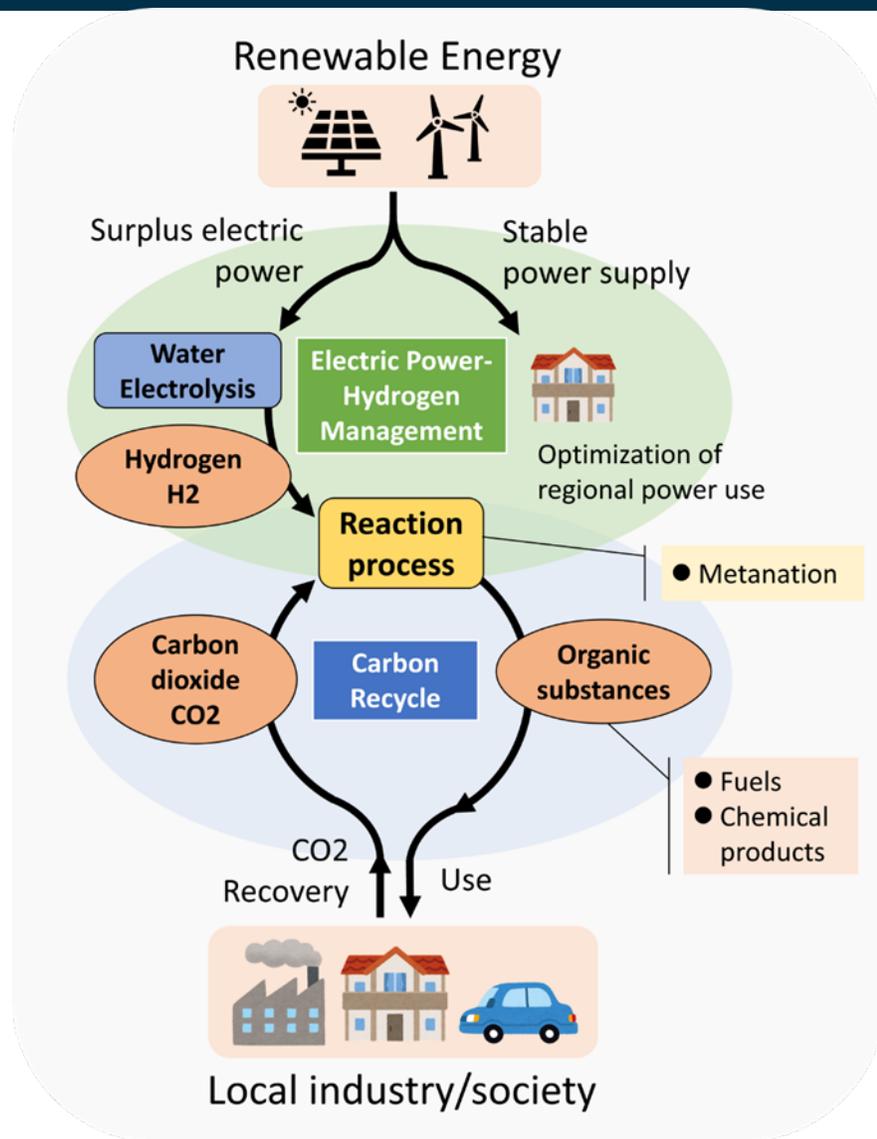


電解法の概要



資源エネルギー庁 https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/suiso_tukurikata.html

地域分散型カーボンリサイクルと電力・水素マネジメント



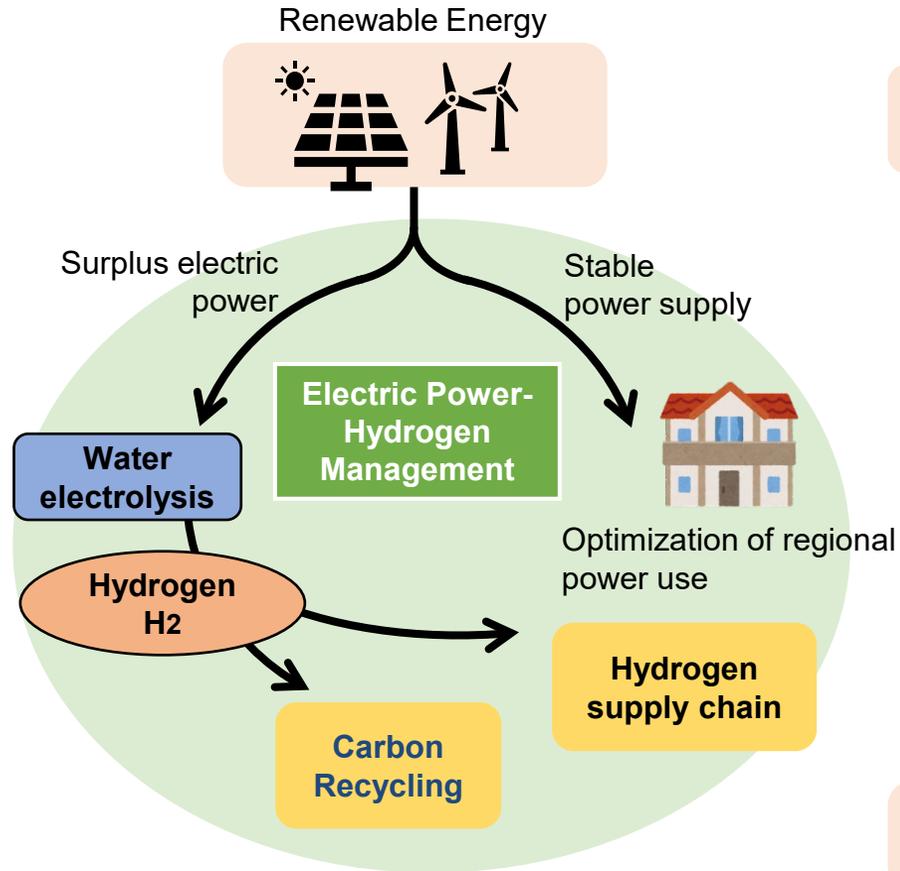
再生可能エネルギーの効率的な利用

+

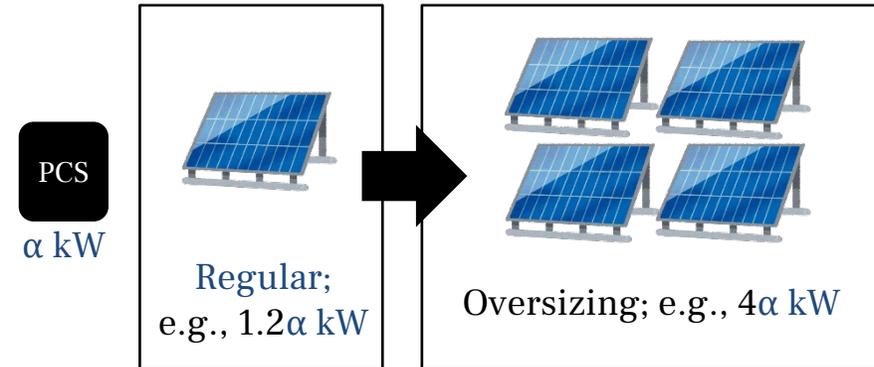
カーボンリサイクル(メタネーション)

PV過積載と電力・水素マネジメント

余剰電力利用による安価な水素生産の可能性



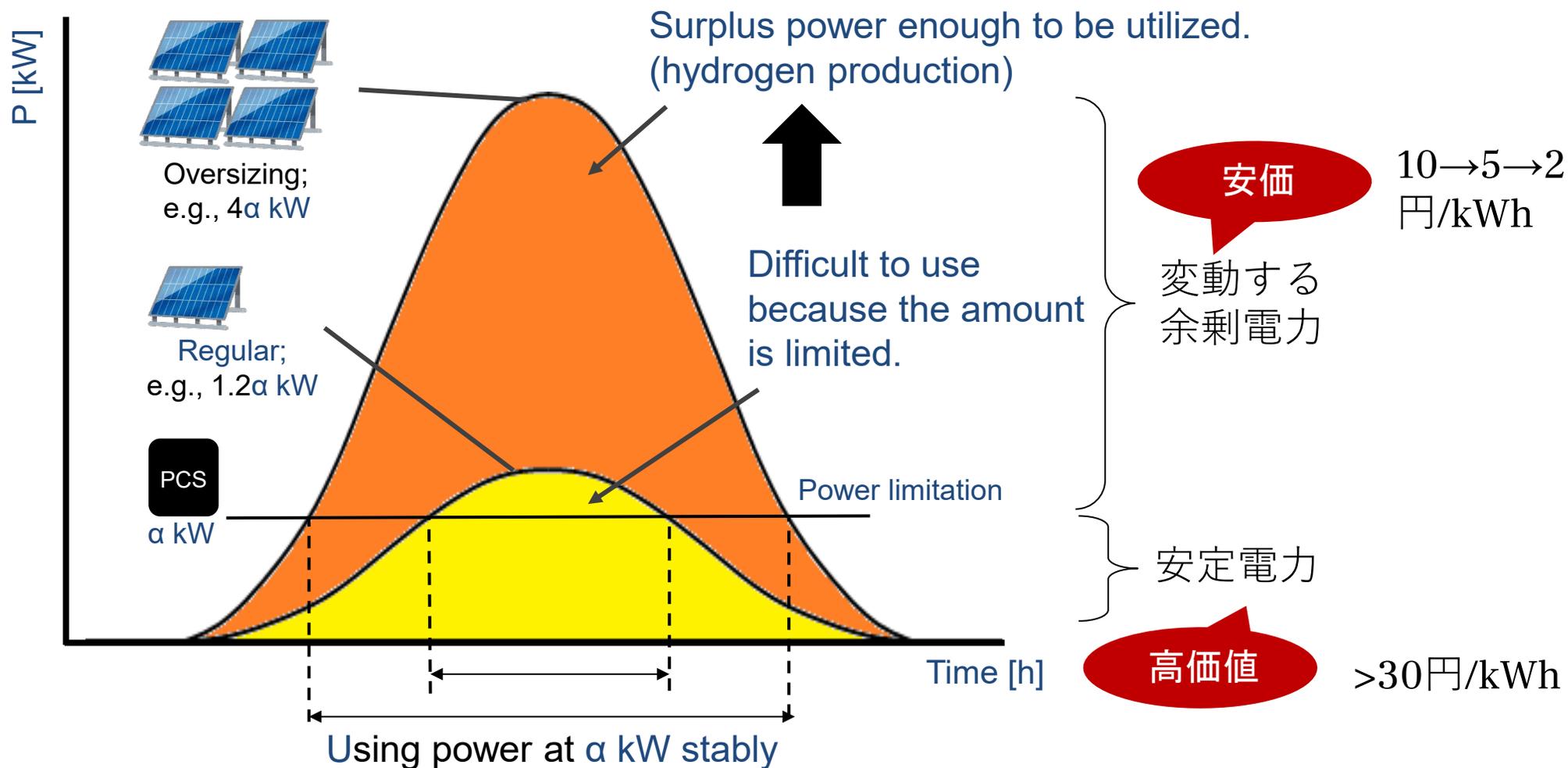
PVの意図的な過積載



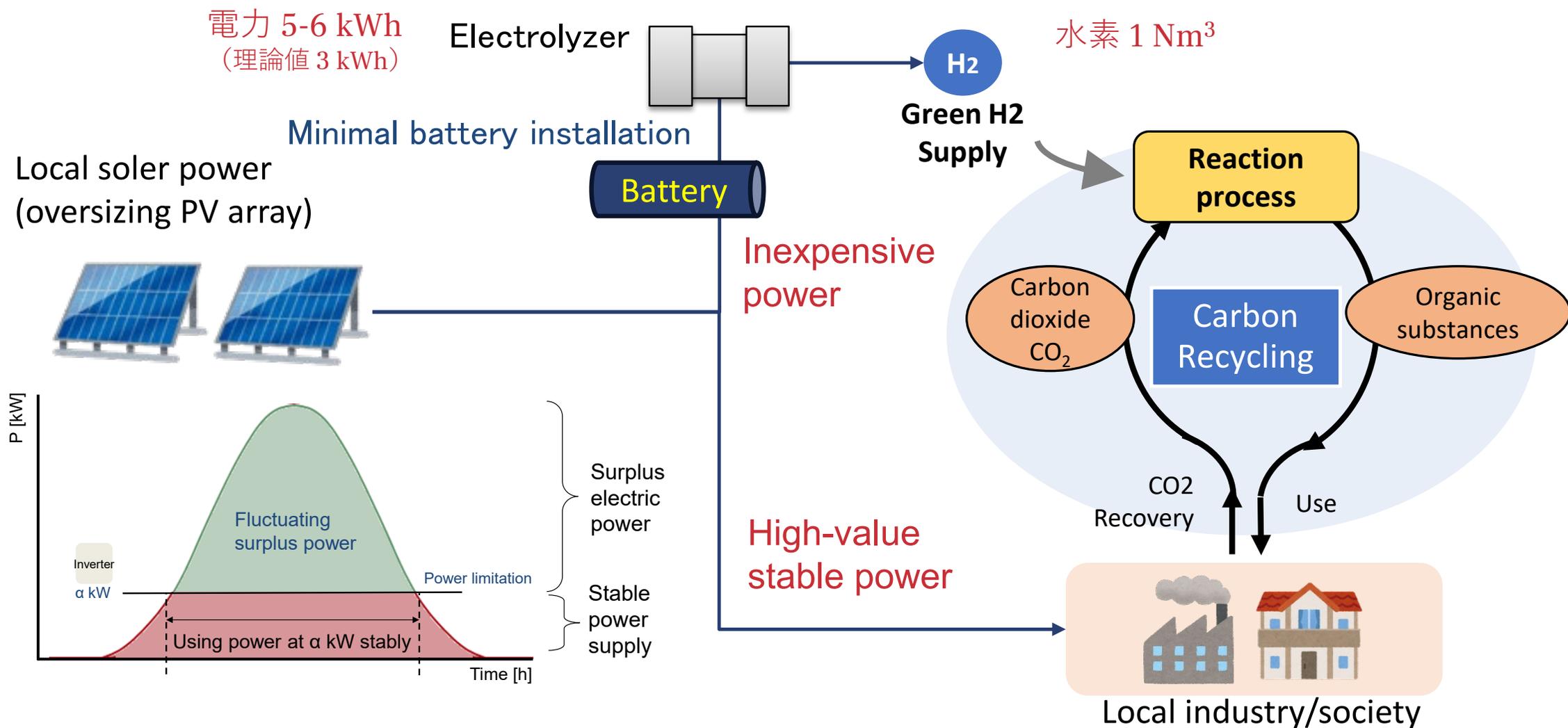
- ✓ 安定電力↑
- ✓ 余剰電力↑

価値（価格）による電力の分離

電力価値に応じたマネジメント



地域分散型水素製造とカーボンリサイクル



- 二酸化炭素について
- カーボンニュートラルと循環型社会について
- リサイクルについて
- カーボンリサイクルについて