

2019年11月7日

未来を拓く無機膜

水素・炭化水素・二酸化炭素に関連した固体触媒プロセスと膜応用の可能性

関根 泰

早稲田大学先進理工 教授

日本学術会議特任連携会員

JSTフェロー さきがけ「反応制御」領域総括

# 地球は閉鎖系



- ✓ 人間は生活を営む上で様々な物質や資源を利用・消費
- ✓ 地球上のあらゆる物質や資源は基本的に有限
- ✓ 物質・資源利用の持続可能性向上のためには各々のバリューチェーン全体を考慮に入れた循環的利用の視点が重要
- ✓ 自然界における人間の営みに関わる物質循環を考えた場合、圧倒的に量が多い元素は水素・酸素・炭素・窒素の4つ



宇宙から見れば 「閉じた惑星」 である地球

現在は化石資源（いわば太古の遺産）を燃やして  
生き延びている

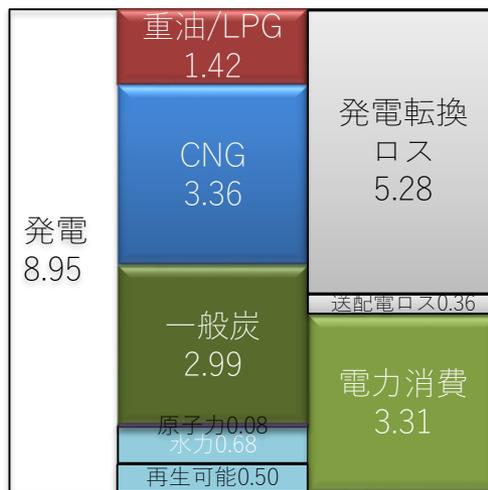
外から来る唯一のエネルギー 太陽光

未来においてはかならずこれに依存する必要あり  
現時点ではエネルギーの太宗を担うとは言えない

©JAXA/NHK

縦スケール  
10<sup>19</sup> J  
10<sup>12</sup> kWh

一次エネルギー



現在は国内で年間に20 EJを超える化石資源を輸入し、エネルギーと物質として利用



天然ガス

石油

石炭

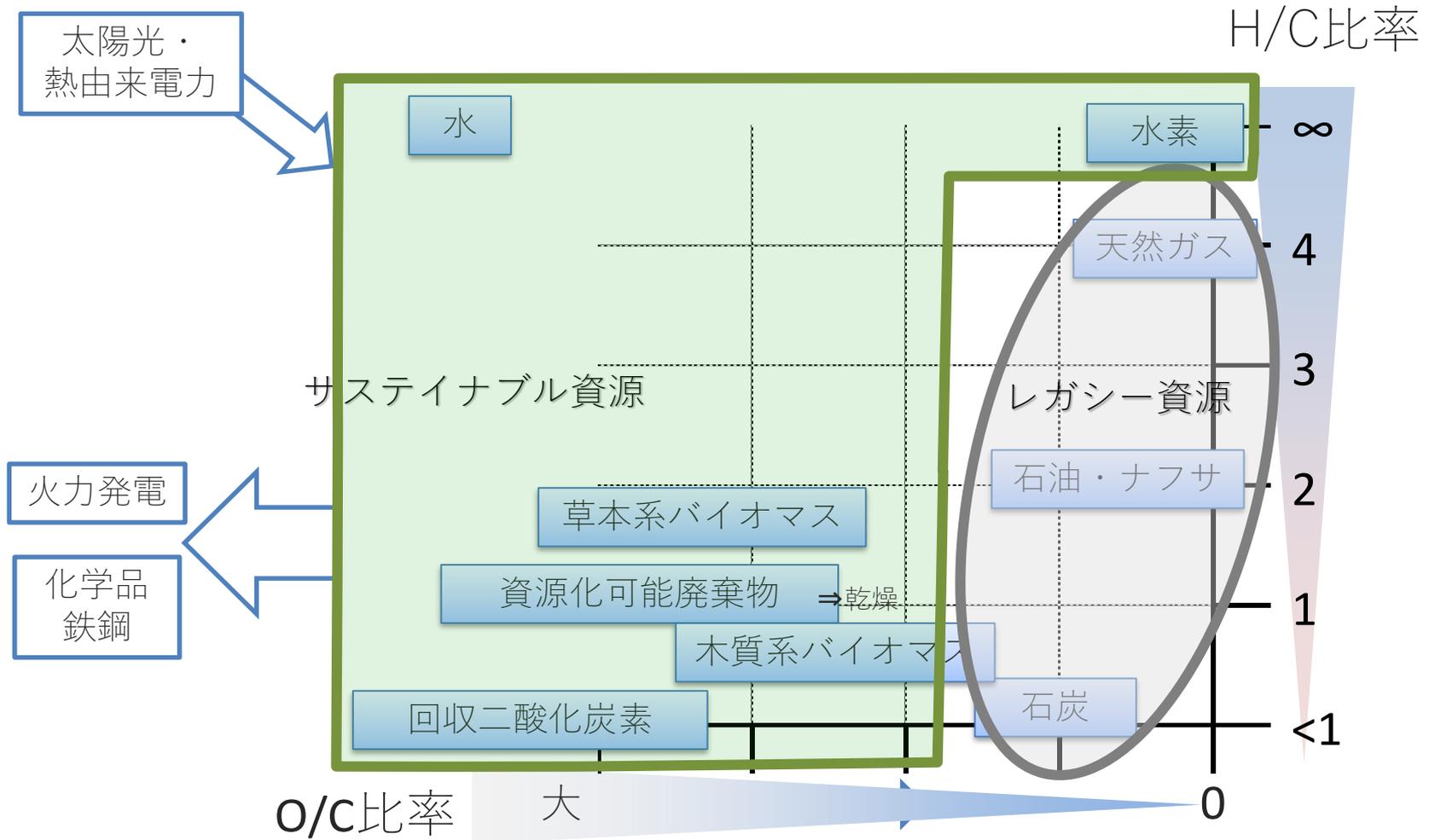
原子力

物質変換

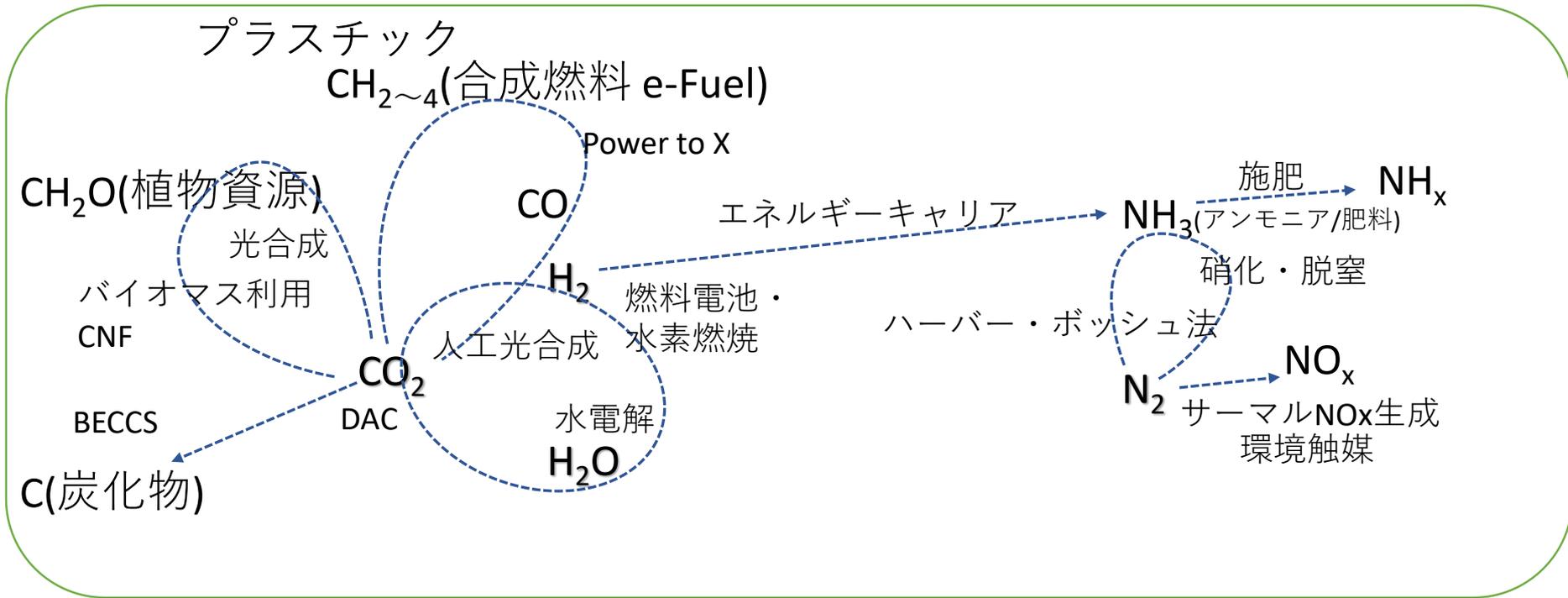
電力

4 凡例

# C/H/O比率と未来のエネルギー・資源



- ✓ 自然界における人間の営みに関わる物質循環を考えた場合、圧倒的に量が多い元素は水素・酸素・炭素・窒素の4つ

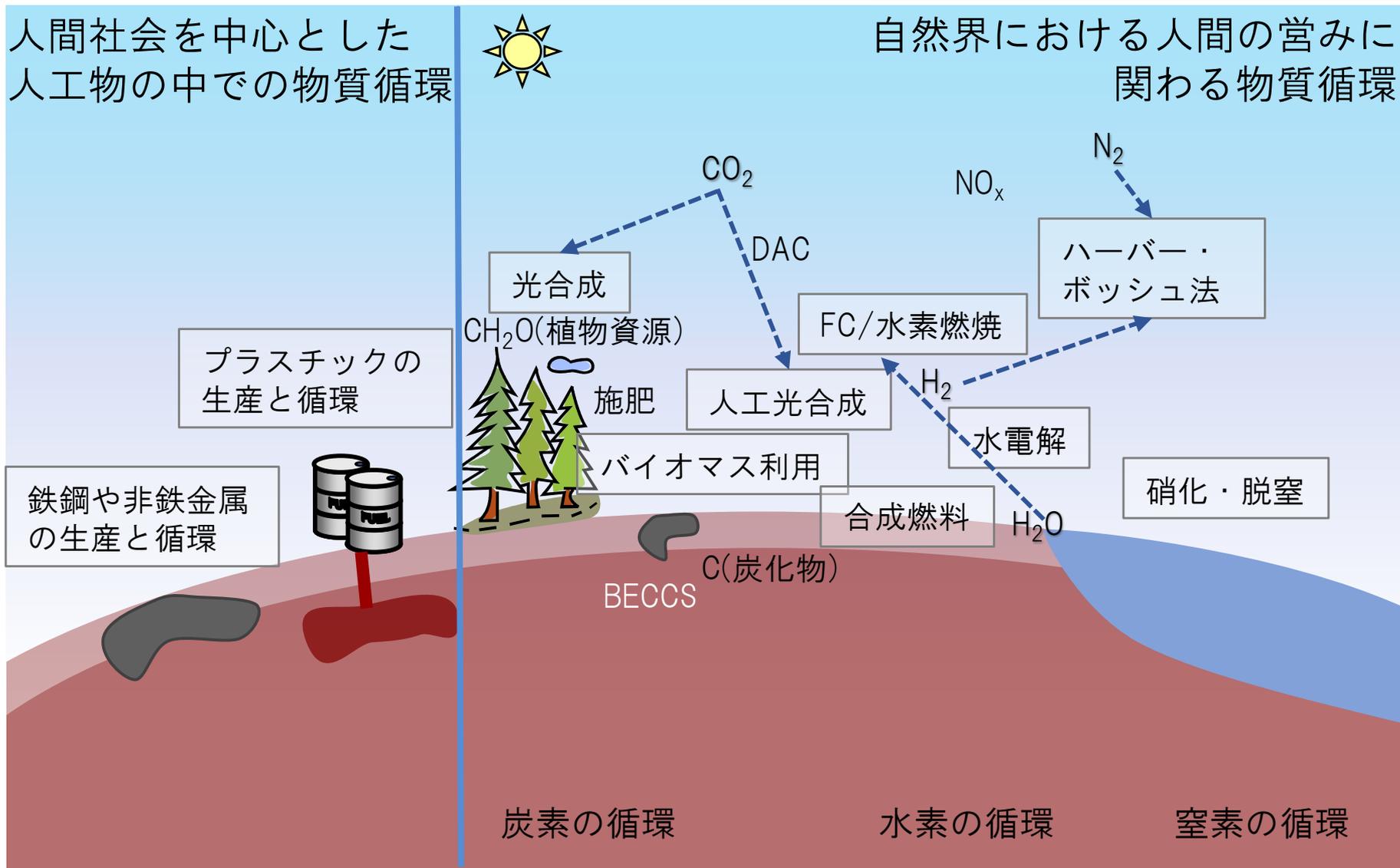


炭素・水素・酸素・窒素の未来の循環と関連する技術・課題

# 自然界での循環と人工物の循環

人間社会を中心とした人工物の中での物質循環

自然界における人間の営みに関する物質循環



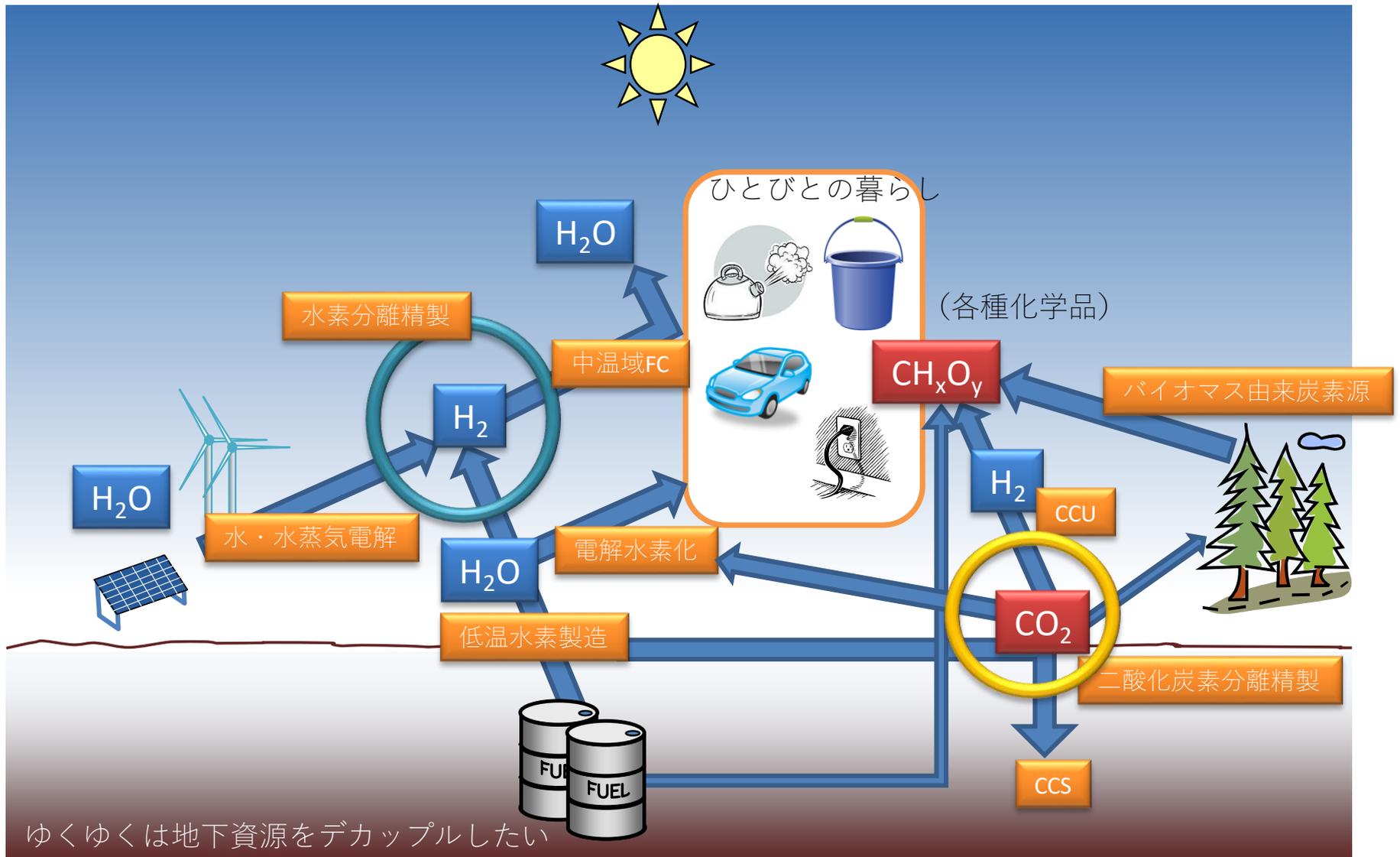
## 現在

- 炭素・水素・酸素については、人間の営みによって、化石資源を燃料や化学工業の原料として用いることにより、最終的には燃焼され、二酸化炭素として大気中に大量に放出され、地球温暖化の一因となっている
- 化石資源の約1割はプラスチック合成などにも用いられ、一部は分解されずに環境に排出

## 今後

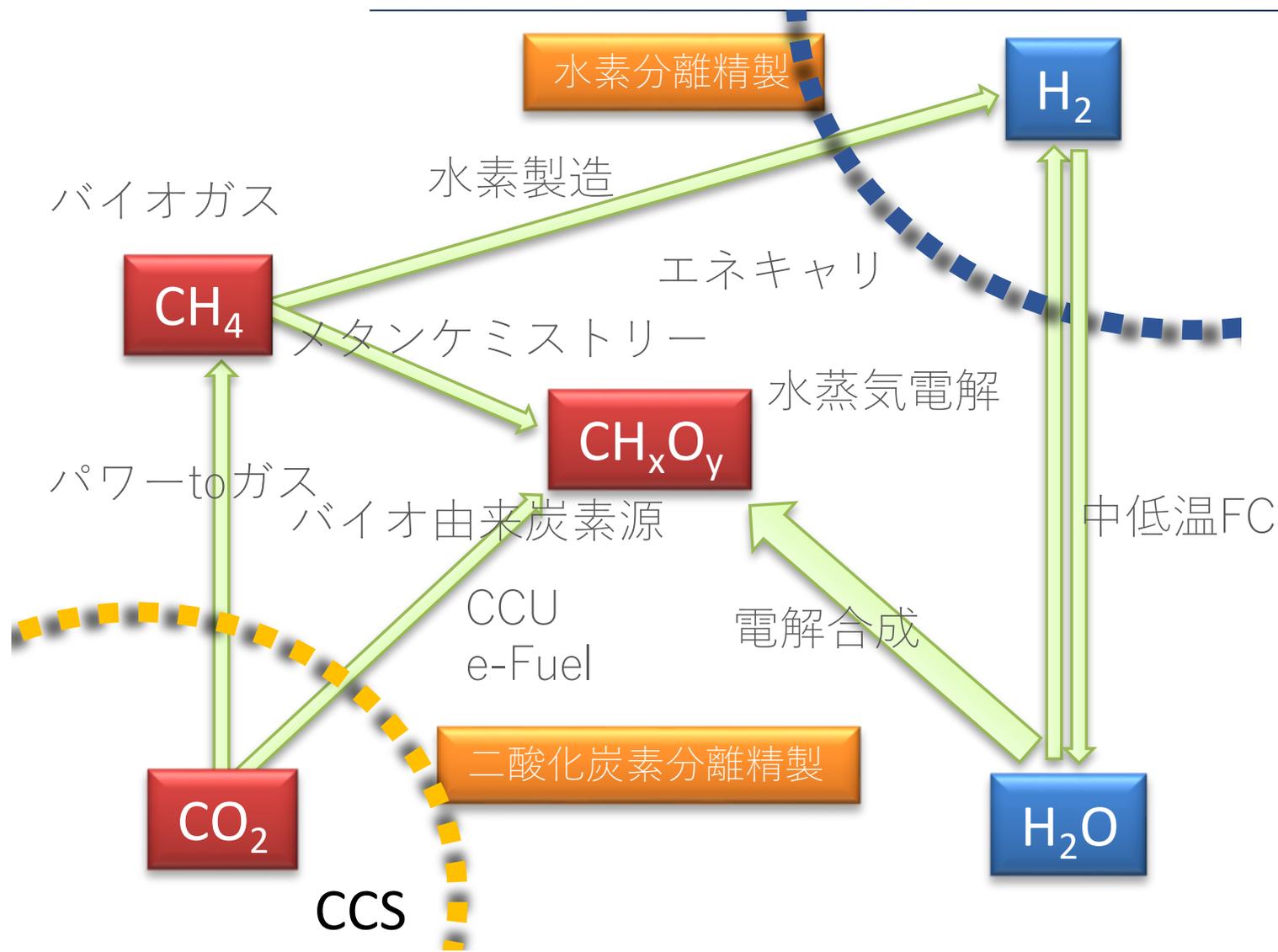
- 炭素の循環の中で、水と二酸化炭素からCCUSや光合成を介して有機物へと変換、水素、酸素との組み合わせ（C/H/O）を様々に変化させる形で循環
- 水の電解、人工光合成やCCU（二酸化炭素回収資源化）の研究が進み、水や二酸化炭素から有用なものへの転換によって、炭素や水素の新たな循環系が構築
- プラスチックはレデュース・リユースとサーマルなどのリサイクルが肝要
- DAC（二酸化炭素回収）やP2G、CCUS、e-Fuelによって化石資源に頼らずとも、今と同じ暮らしを実現可能に

# 高度な炭素循環に資する革新的反応



ゆくゆくは地下資源をデカップルしたい

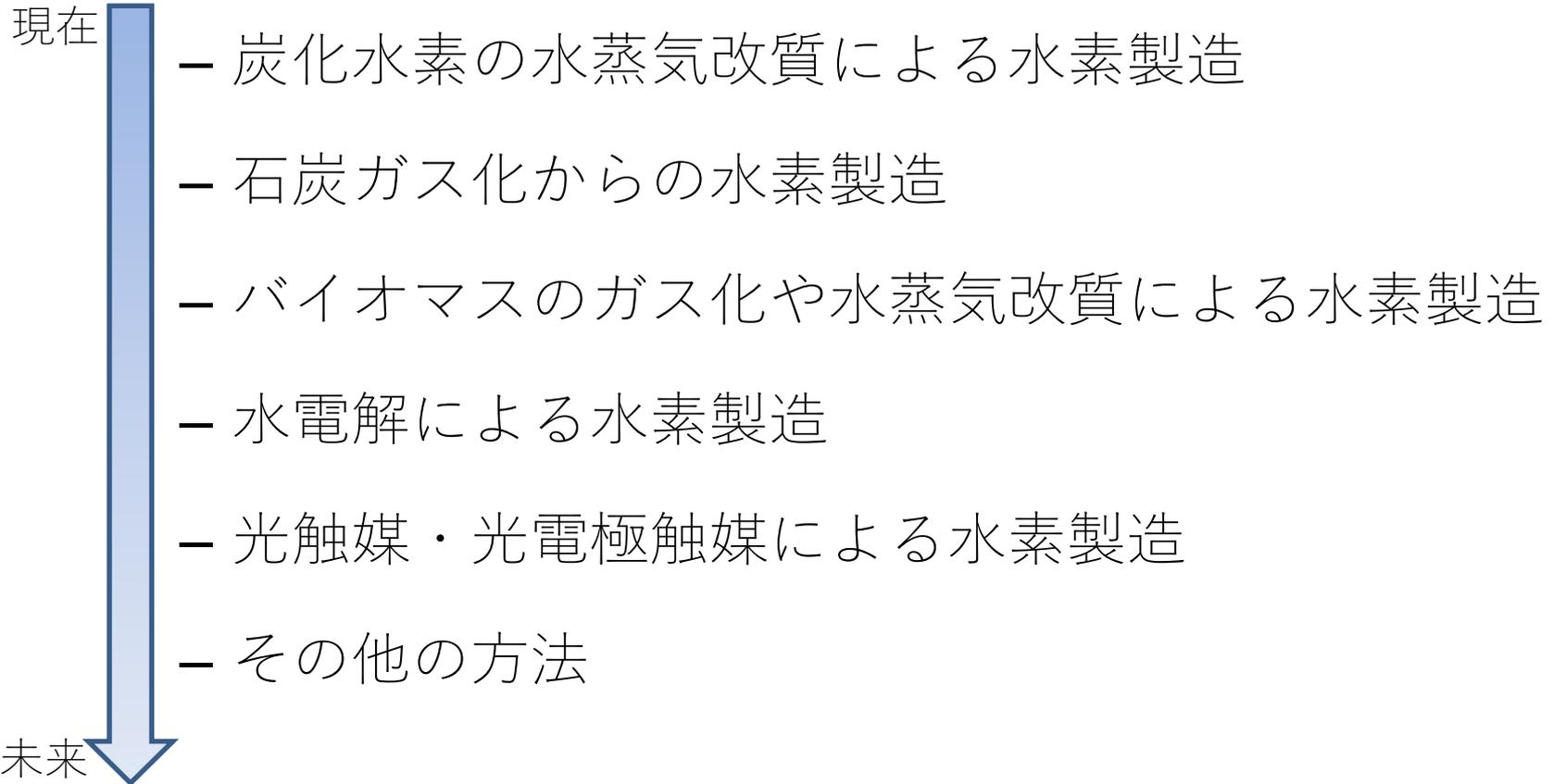
# 空気分離・二酸化炭素分離・水素分離が喫緊の課題

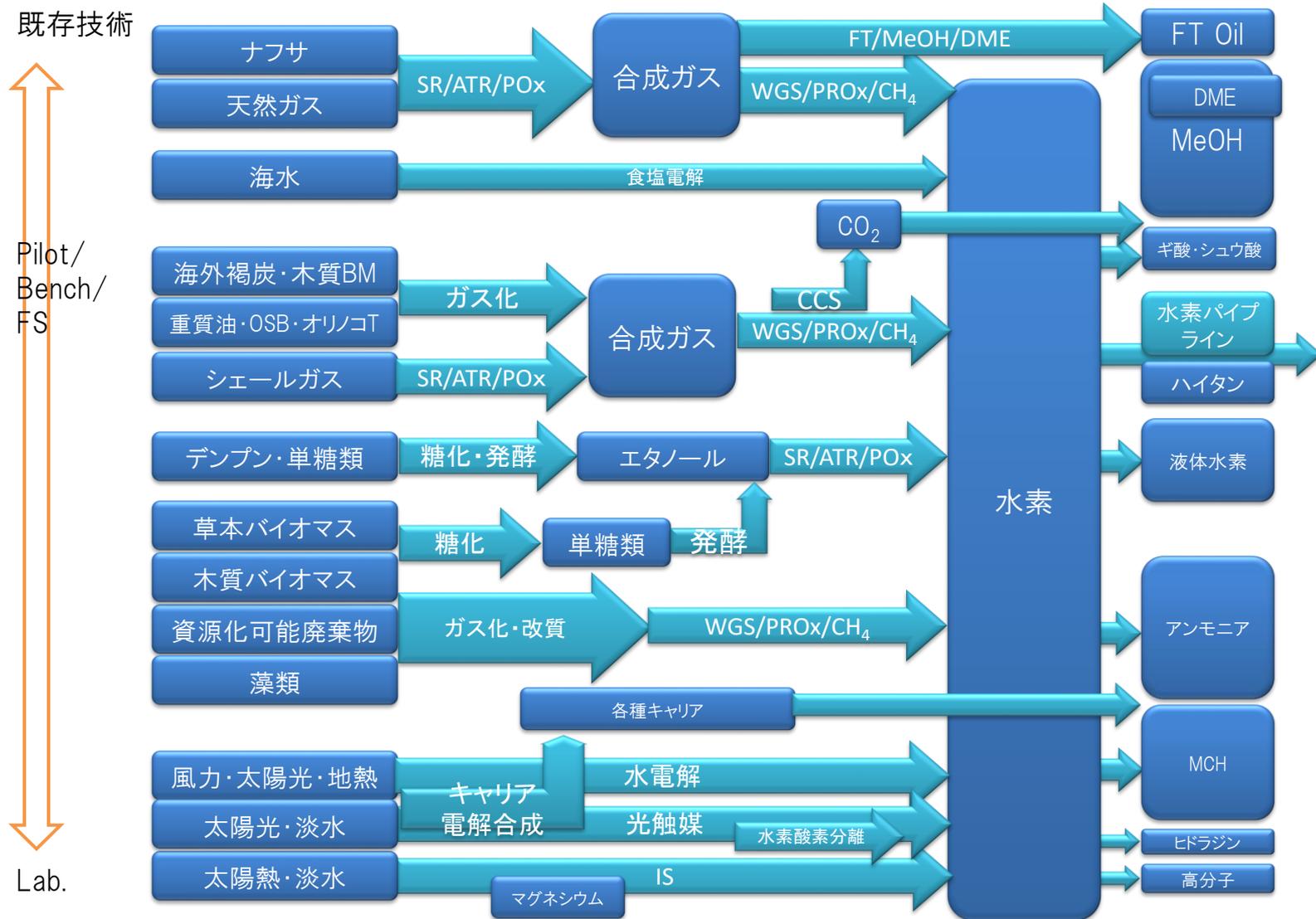


- 水素は使えるエネルギーになりうるか？
  - エクセルギー率低い（83%）
  - 拡散しやすい
  - エネルギー密度低い
  - 良い貯蔵法がない
- 水素社会は本当に来るか？
  - 化石資源由来水素の時代と再生可能エネルギー由来の水素の時代
  - いずれ来る化石資源脱却（100年?200年?500年?後）の時点では、再生可能エネルギーから得られる電力（を2次電池で貯める?）と、水から作る水素だけが使用可能な2次エネルギー
  - どう造り、どう貯めるか、どう利用するか
    - それも、いままでに提案されてきた方法だけではない、Game Changingな手法が必要か？

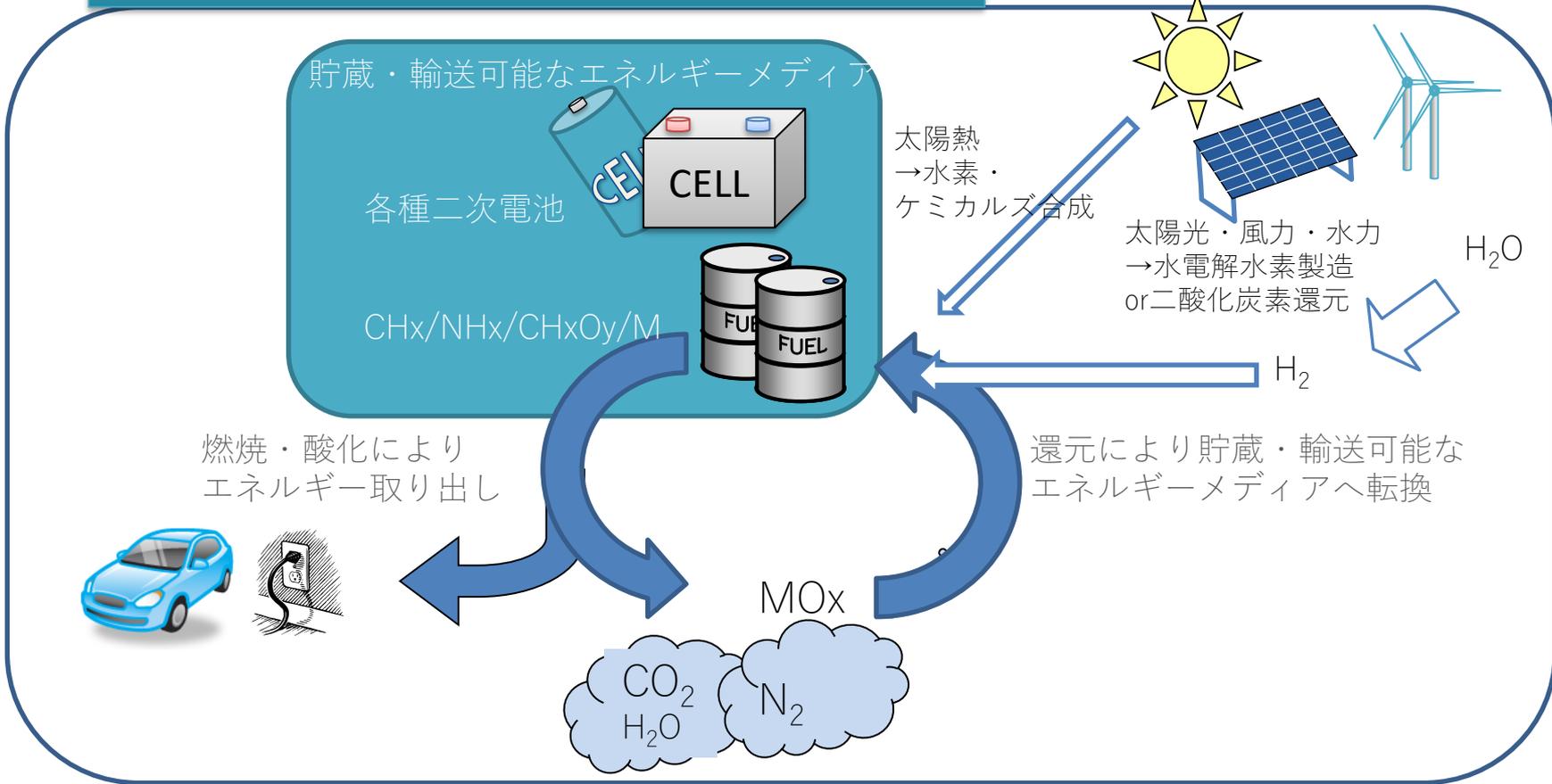
- 水素は、もっとも軽い元素である水素原子が2つくっついた分子
- 自然界にはほとんど存在しない分子
- 世界的な水素の需要
  - アンモニア合成が50%、石油精製が35%、メタノール合成が9%
- わが国では、これら工業用水素に加えて、
  - エネファーム（家庭用燃料電池）ならびにFCV（燃料電池自動車）を中心に燃料電池の市場化が進む
- エネファームは政府目標として2030年までに530万台、FCVは2025年までに200万台
- これらが導入された場合、エネファーム530万台は国内全エネルギー消費を0.6%程度削減、FCV200万台は国内全エネルギー消費を1.4%程度削減する量に相当

- 水素を作る方法





太陽光などの自然エネルギー→  
エネルギーメディアに転換・貯蔵→利用



# 再生可能エネルギーキャリアの長期間貯蔵

日本の電力需要

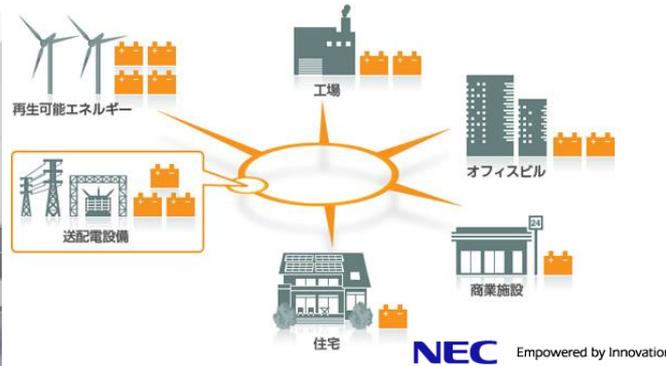
$4.0 \times 10^{18} \text{J}$  (11,000億kWh)

2010年度国内電力需要(METI)

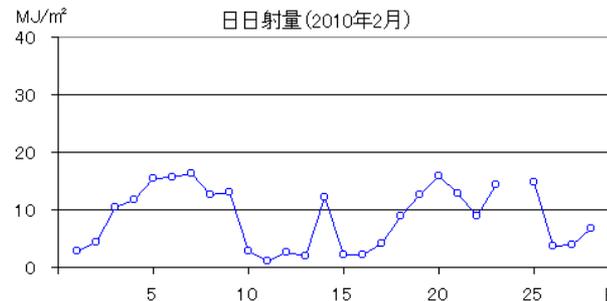
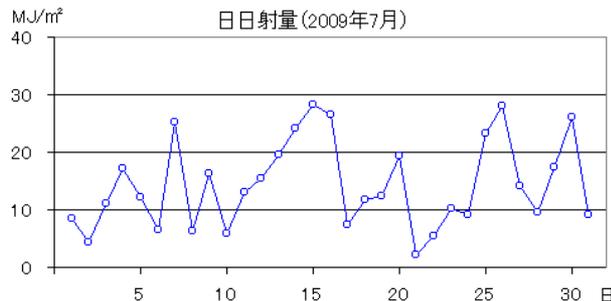
2030年まで30%を再生可能へ  $\Rightarrow 1.2 \times 10^{18} \text{J}$  (3,300億kWh)

1ヵ月分の備蓄 =  $0.1 \times 10^{18} \text{J}$  ← 蓄電池 2.3億ton

リチウムイオン電池: 120 Wh/kg (432 J/g)、NaS電池: 110 Wh/kg (396 J/g) \*NEDO資料  
エネルギーの長期間・大量備蓄には不適



日刊工業新聞 <http://www.nikkan.co.jp/dennavi/news/nkx0320120604atki.html>



横浜市  
City of Yokohama

環境創造局

# 再生可能エネルギーキャリアの長期間貯蔵

日本の電力需要

$4.0 \times 10^{18} \text{J}$  (11,000億kWh)

2010年度国内電力需要(METI)

2030年まで30%を再生可能へ  $\Rightarrow 1.2 \times 10^{18} \text{J}$  (3,300億kWh)

1ヵ月分の備蓄 =  $0.1 \times 10^{18} \text{J}$   $\leftarrow$  水素71万ton

$\text{H}_2 = 141800 \text{ J/g}$

水素 71万ton

= アンモニア 400万 ton

= メチルシクロヘキサン 1200万 ton

但し水素重量基準

日本の石油備蓄  
8327万kl(199日分)  
<http://www.enecho.meti.go.jp/>

苫小牧東部国家石油備蓄基地

容量640万klの備蓄スケール。タンク57基。敷地面積274万㎡。



ENEOS TOKYO 30万ton

JX 日鉱日石タンカー



 苫東石油備蓄株式会社

# 再生可能エネルギーの大量導入に向けて

## 再生可能エネルギー電力

太陽熱発電  
太陽光発電  
風力発電  
水力発電  
地熱発電  
波力・潮力発電

電気化学反応  
光化学反応  
熱化学反応

## 化学エネルギー

水素  
有機ヒドライド  
アンモニア・ヒドラジン  
メタノール・ジメチルエーテル  
炭化水素  
金属・金属酸化物  
相互変換

燃焼機関  
燃料電池

電力  
動力  
熱

## 再生可能エネルギー

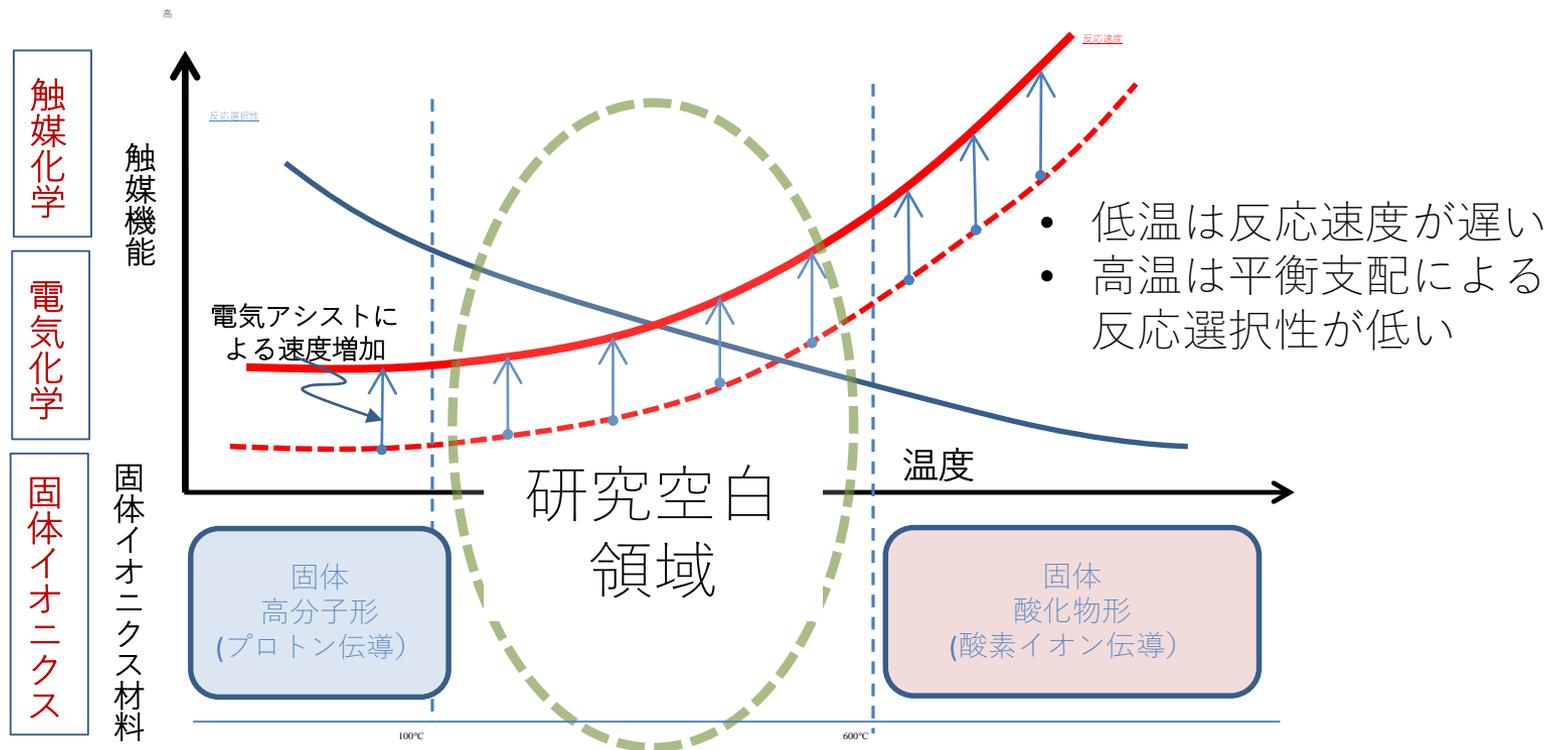
太陽熱  
太陽光

## 変動・偏在

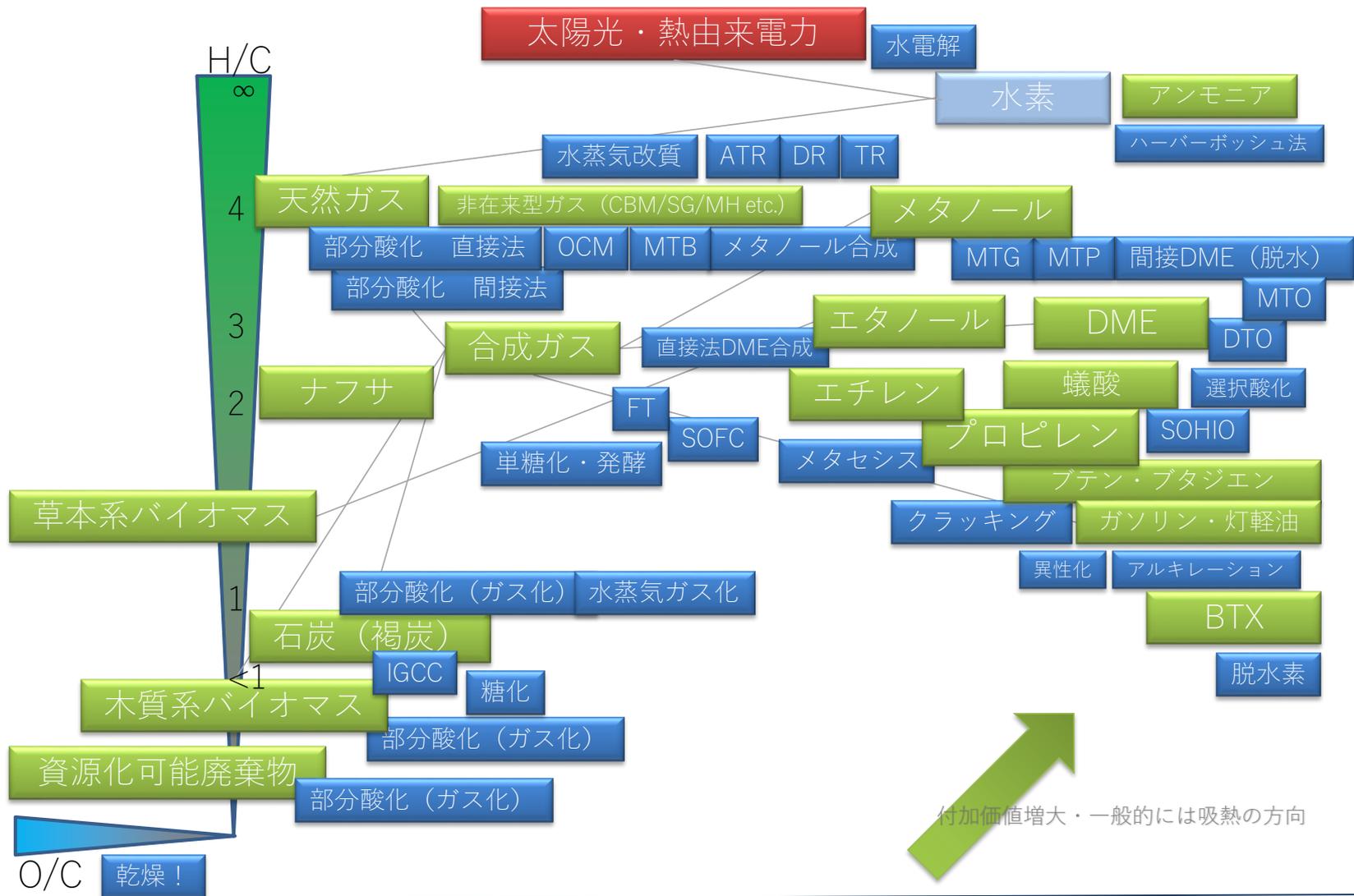
時間 貯蔵  
空間 輸送

1. エネルギー密度
2. 安定性
3. コスト (CAPEX/OPEX)
4. 利用条件 (温度・圧力)
5. 安全性

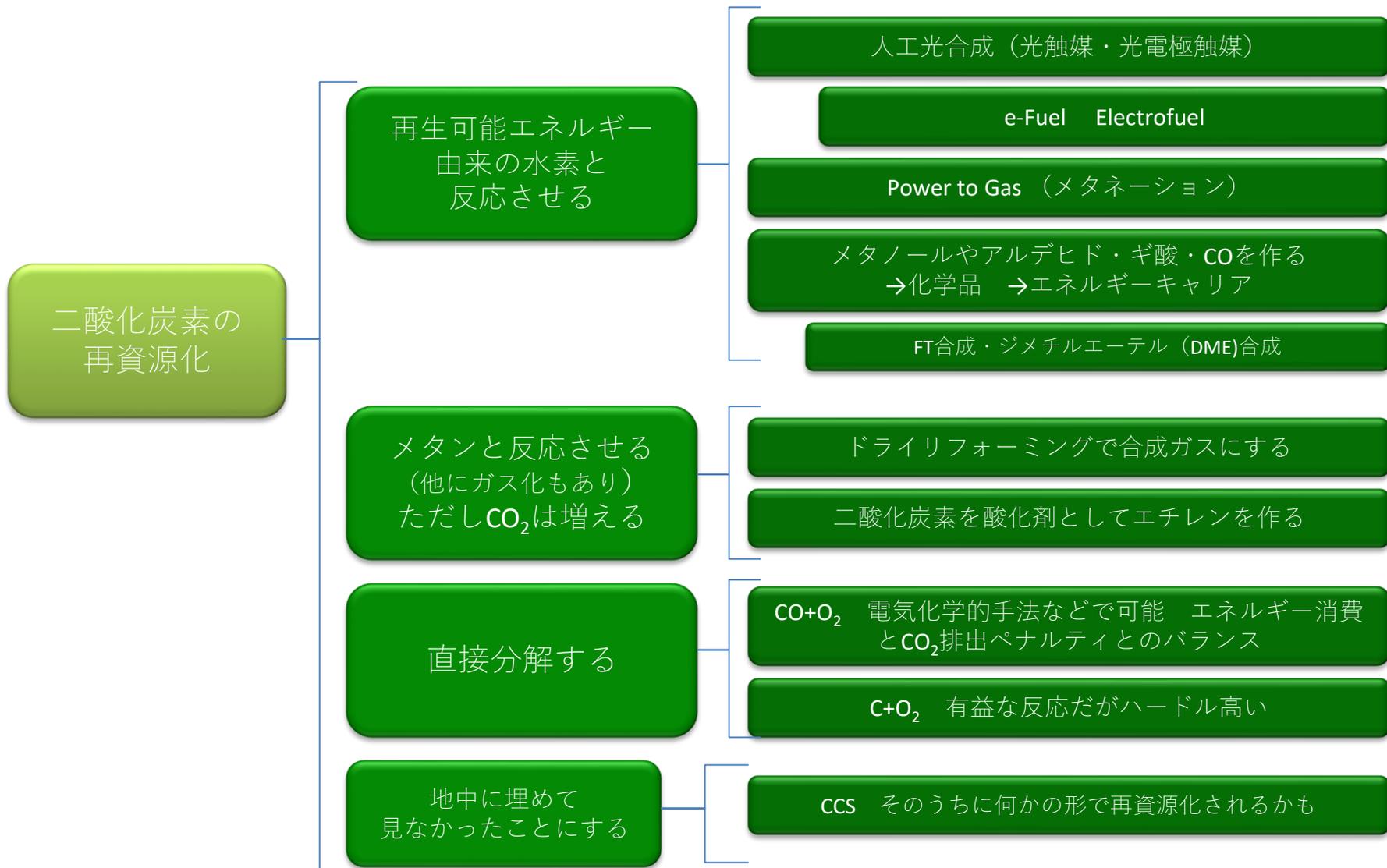
- 固体イオニクスを用いた電気化学における化学反応の触媒機能を強化するには中低温域の温度条件が最適
- しかしこれまで中低温域で作動する固体イオニクス材料がなく、研究空白領域の状況



# 各種化学反応のプロセスと原料・生成物



# 二酸化炭素の再資源化(CCU)



炭素・水素・酸素・窒素の4つの元素について

- サステイナブルな社会実現のために自然界と科学技術の両者に着目した循環利用と制御が重要
- 自然界の循環と人工的な技術との調和が求められる