

非在来型触媒でエネルギーと環境の未来をつくる

早大の次代中核研究者に選定

2020年度 科学技術賞 文部科学大臣表彰  
受賞

2018年度 日本化学会 学術賞受賞



グリーンイノベ戦略会議・WG座長  
JSTフェロー

Elsevier “Fuel”誌 編集責任者

JSTさきがけ「反応制御」領域総括

NEDO未踏チャレンジ2050 領域総括

国際天然ガス転換会議 日本代表

日本学術会議 特任連携会員

# 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

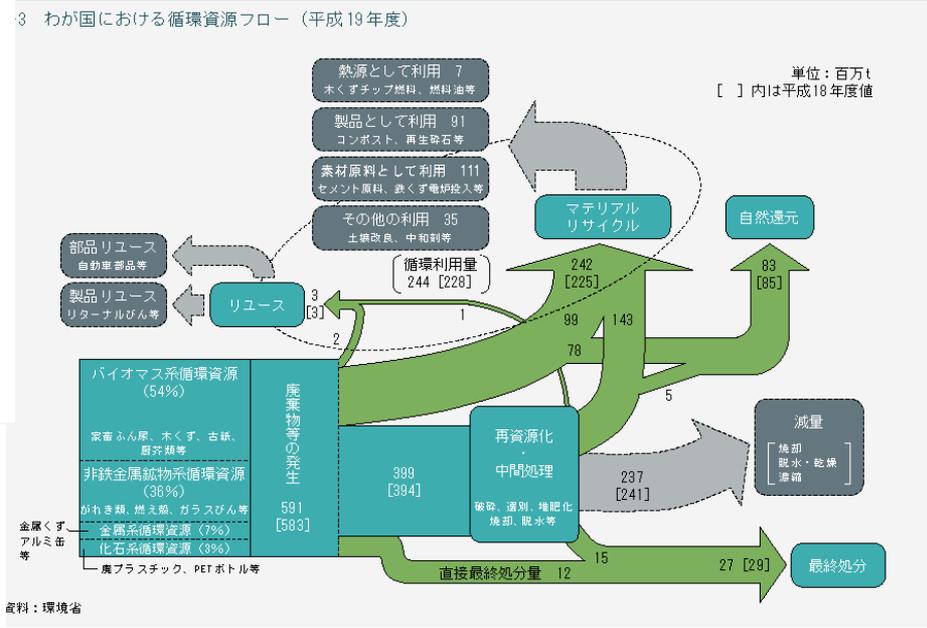
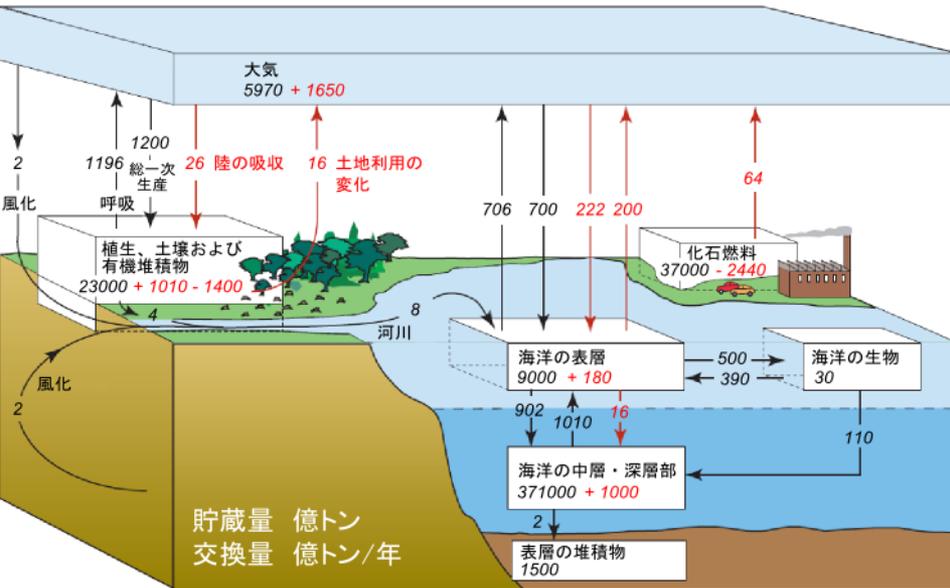
# 2つの物質循環

1. 人間社会を中心とした物質の動態  
(マテリアル・フロー)

→ 人工循環系が中心。

2. 自然界の物質の動態  
(生物地球化学的サイクル)

→ 自然と人為の循環が相互に関与。



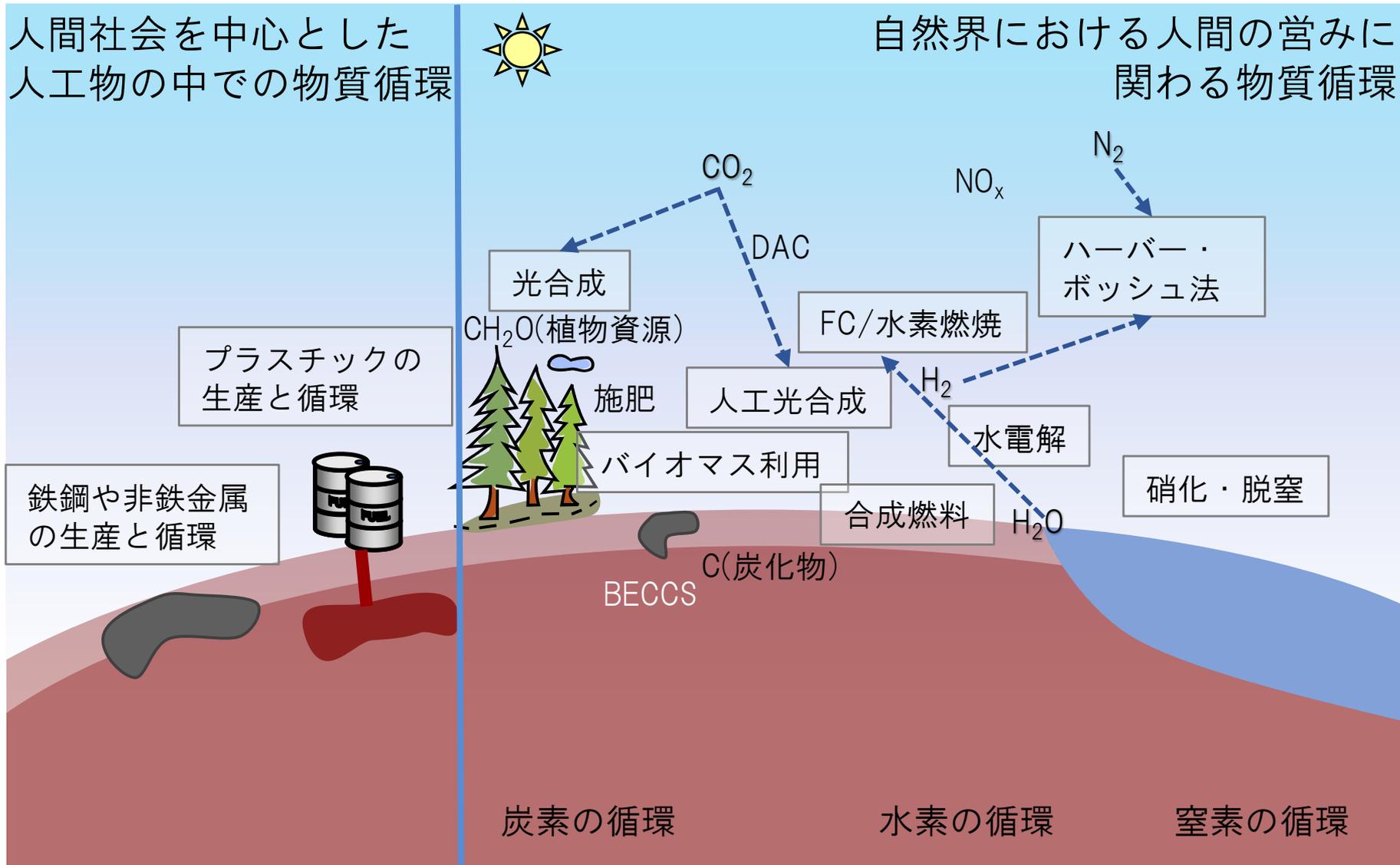
上図: 日本の循環資源フロー (環境省白書から図引用)

左図: 炭素循環 (気象庁から図引用)

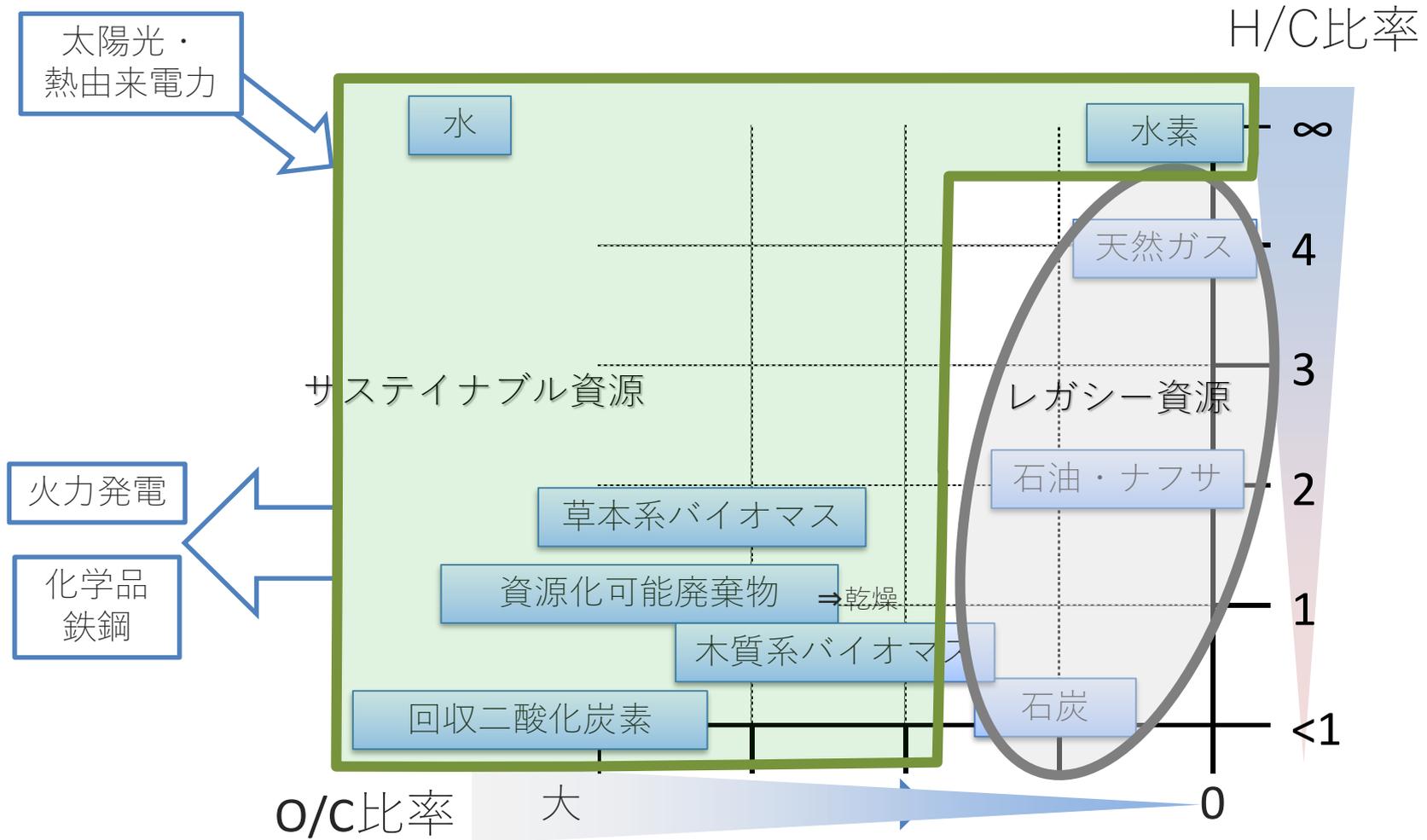
# 自然界での循環と人工物の循環

人間社会を中心とした人工物の中での物質循環

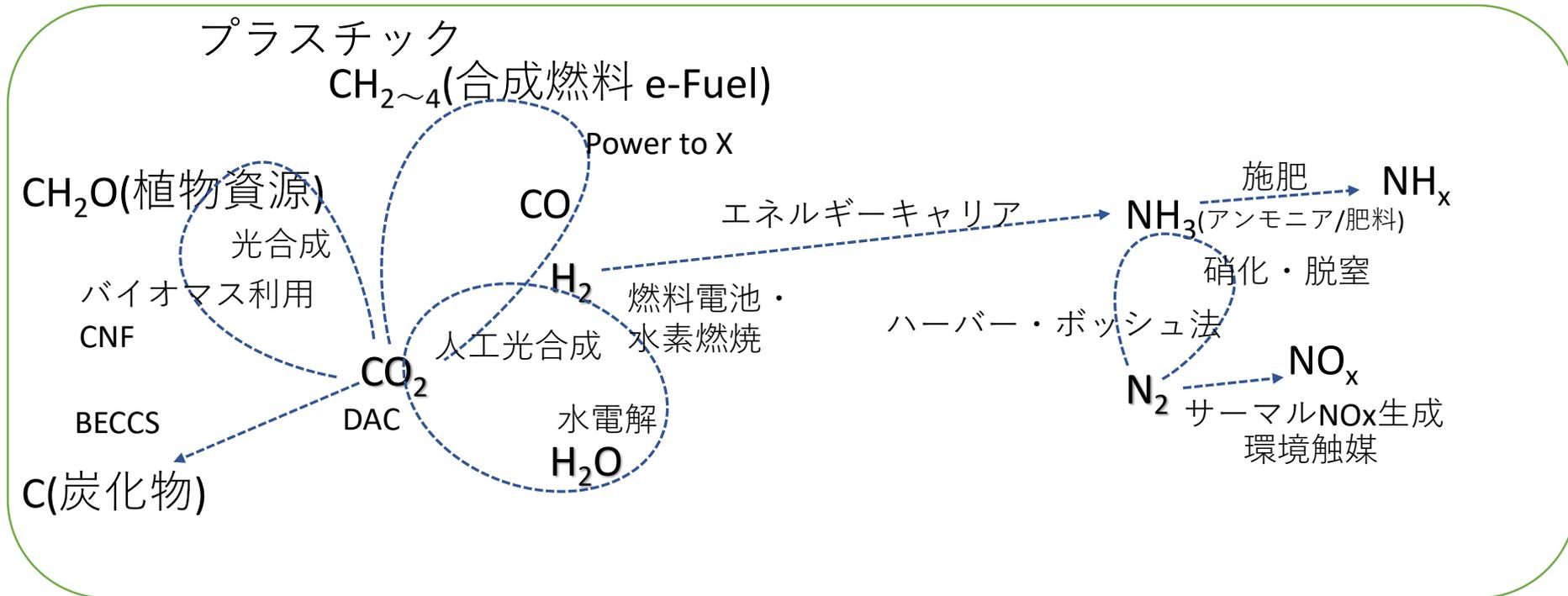
自然界における人間の営みに関する物質循環



# 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

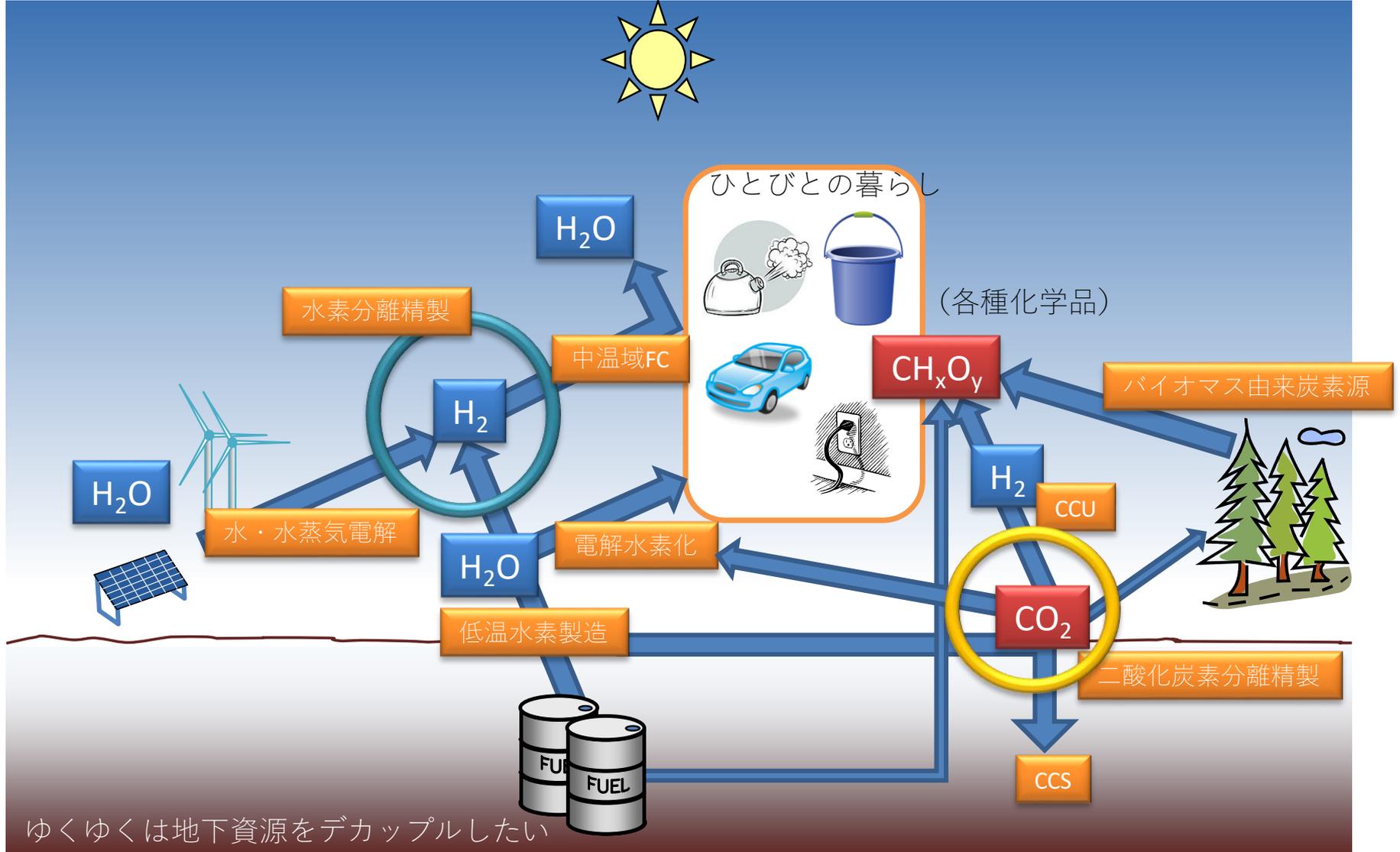
## 現在

- 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



一次エネルギー

縦スケール

10<sup>19</sup> J

10<sup>12</sup> kWh

天然ガス

石油

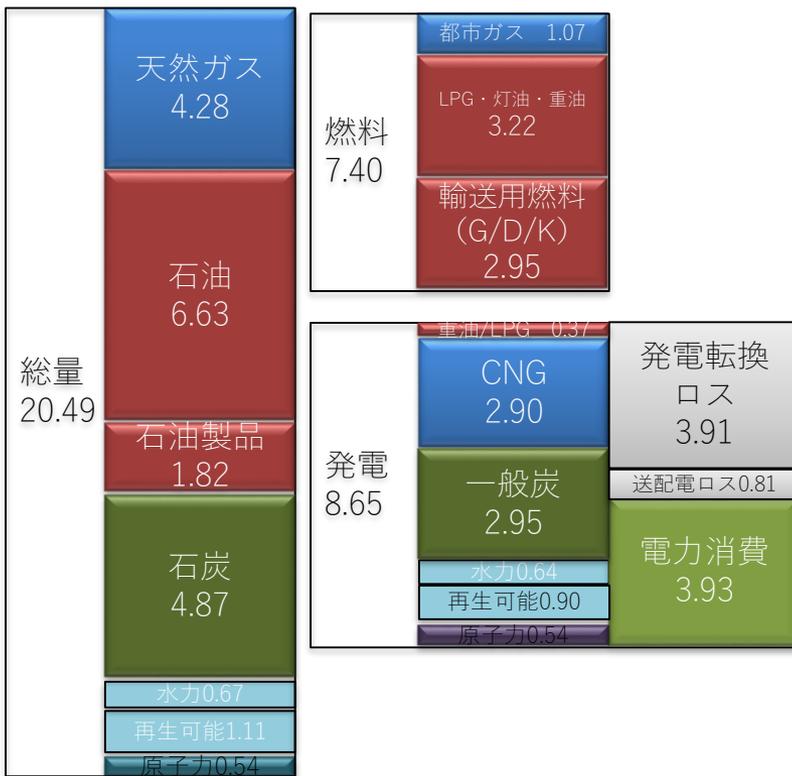
石炭

原子力

物質変換

電力

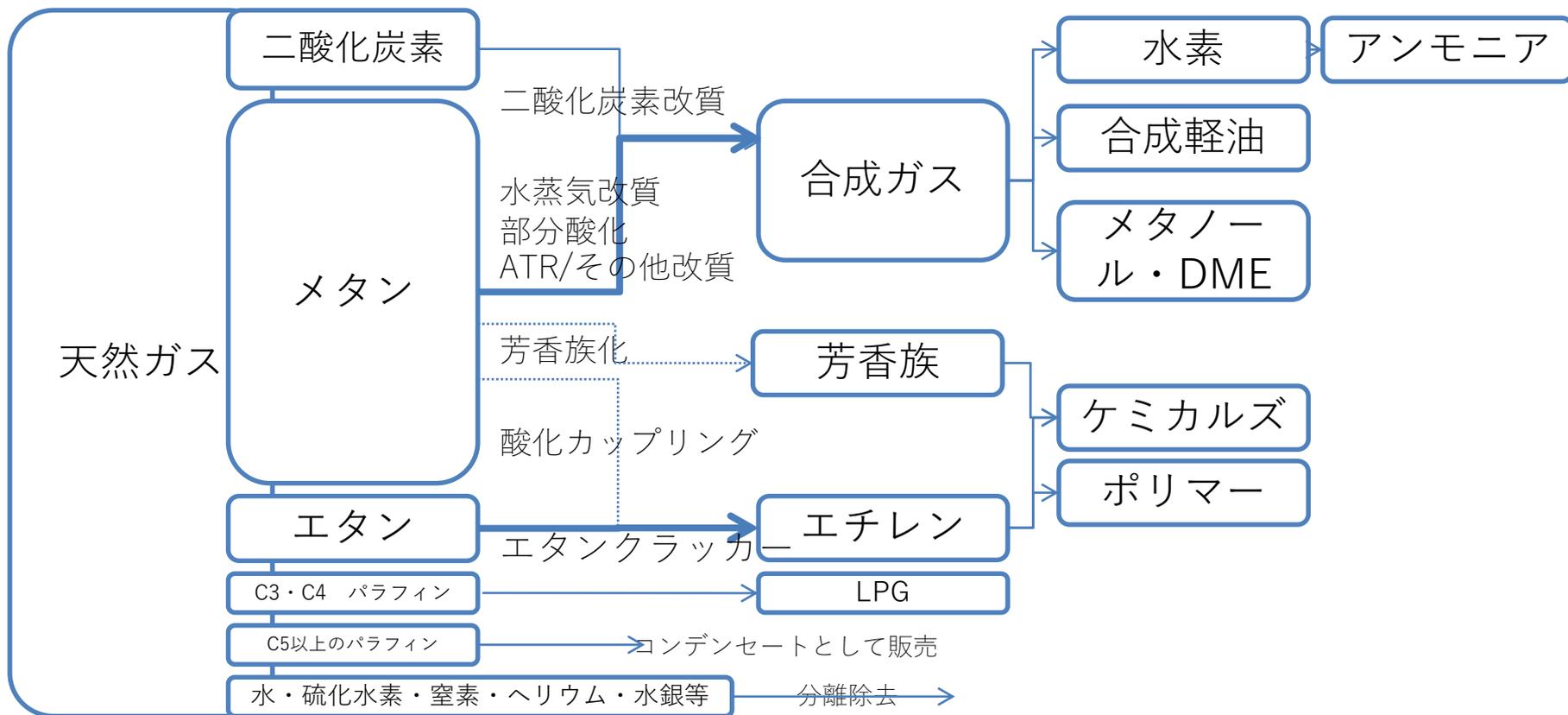
凡例

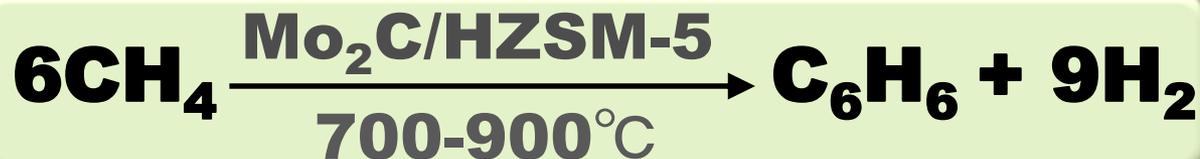


LPGの用途  
タクシー 0.03

北東家庭 0.04  
中央家庭 0.11  
南西家庭 0.05

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





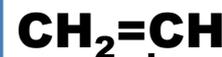
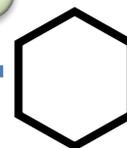
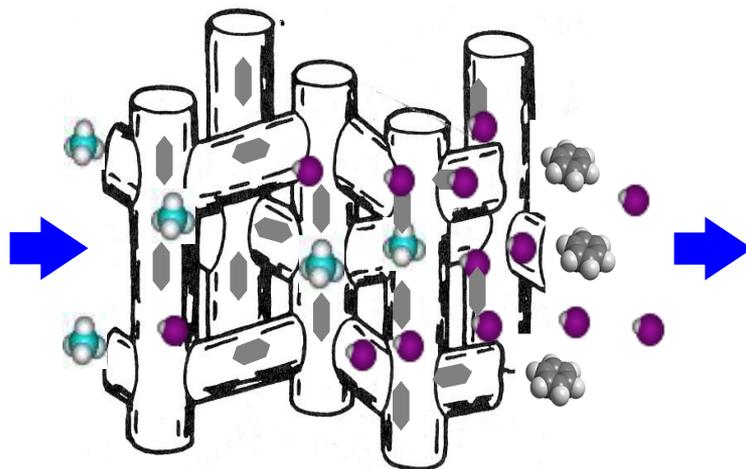
Shale Gas

Natural Gas

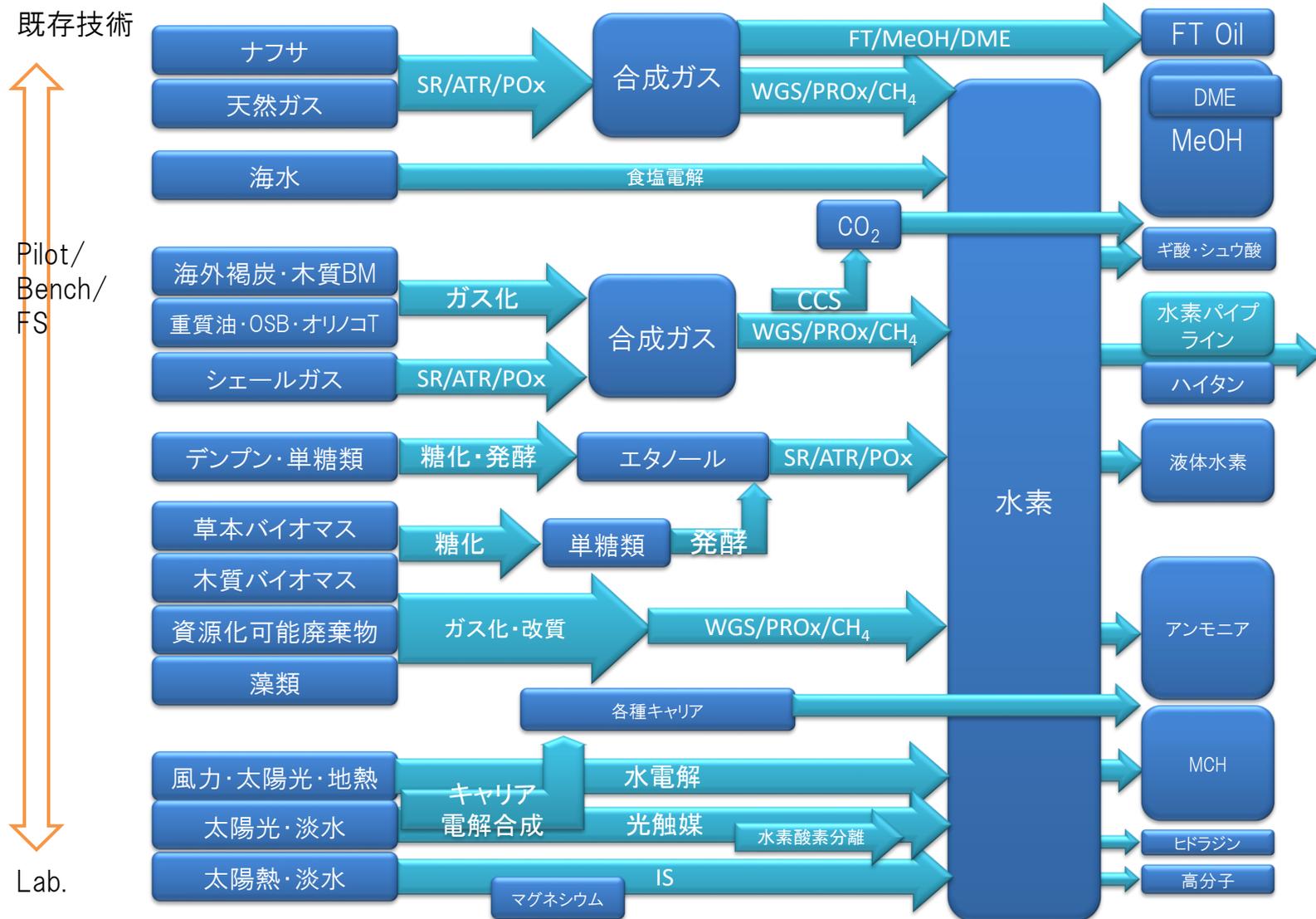
Methane hydrate

Biogas

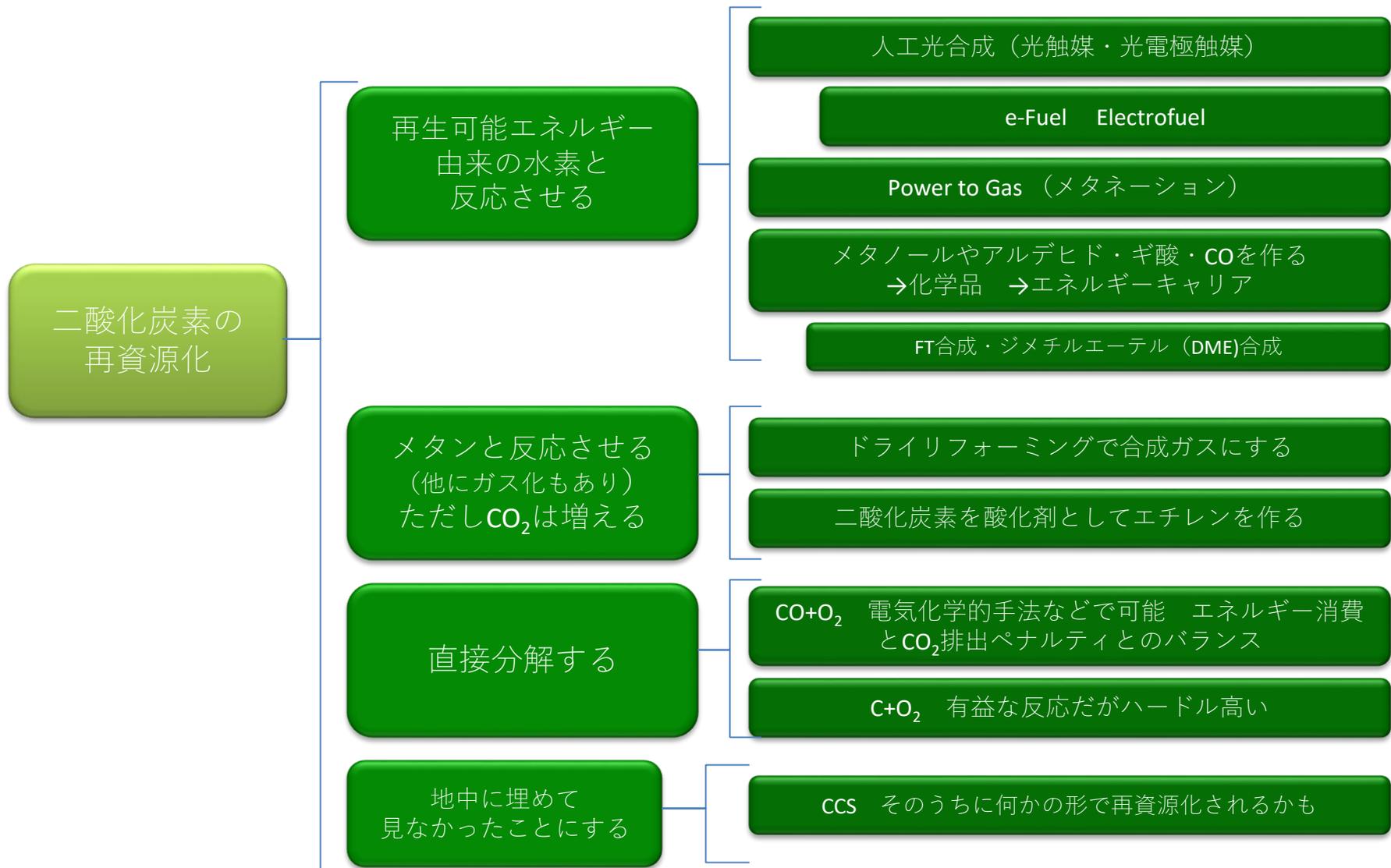
CBM



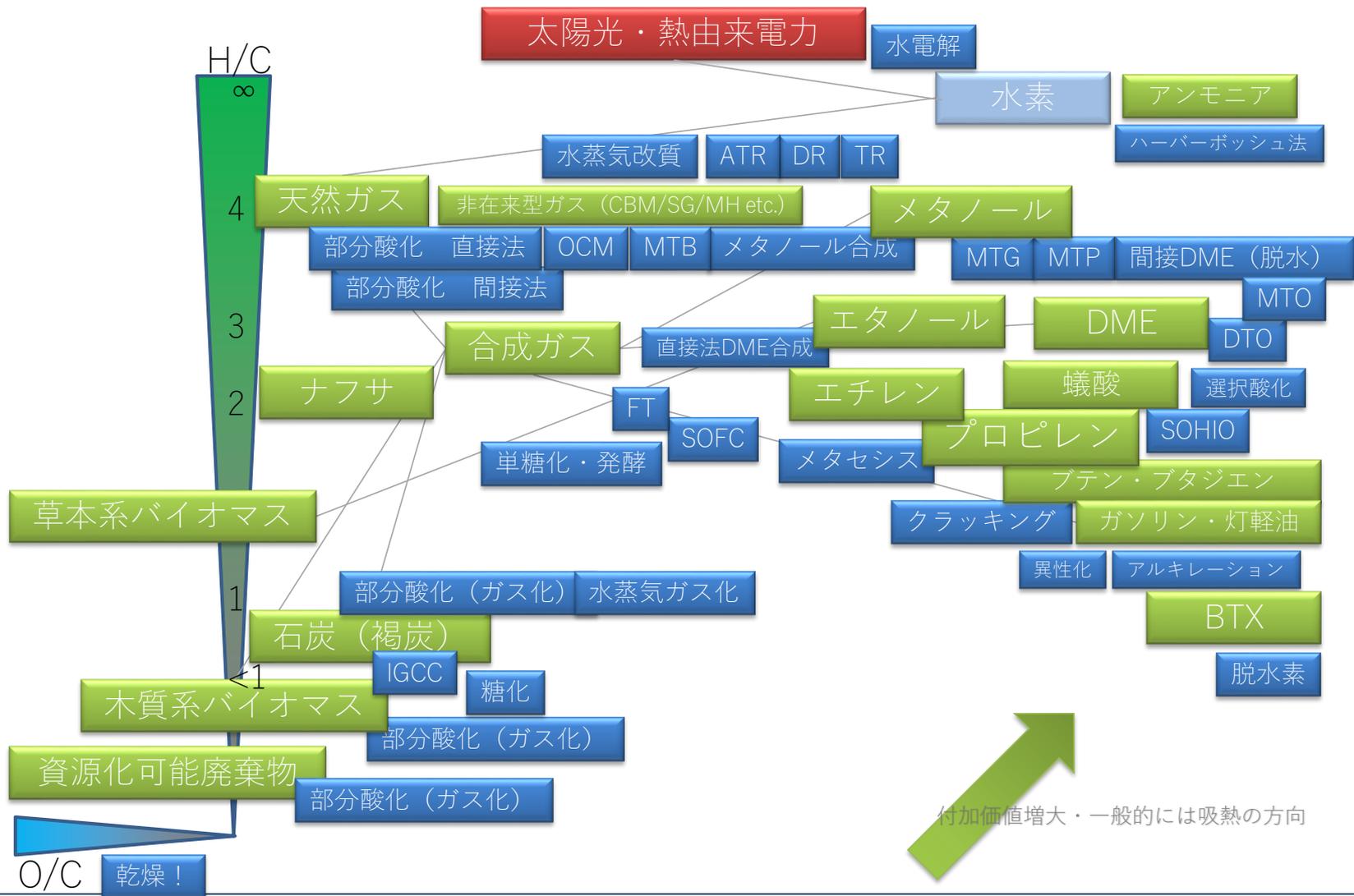
**Catalyst Development**



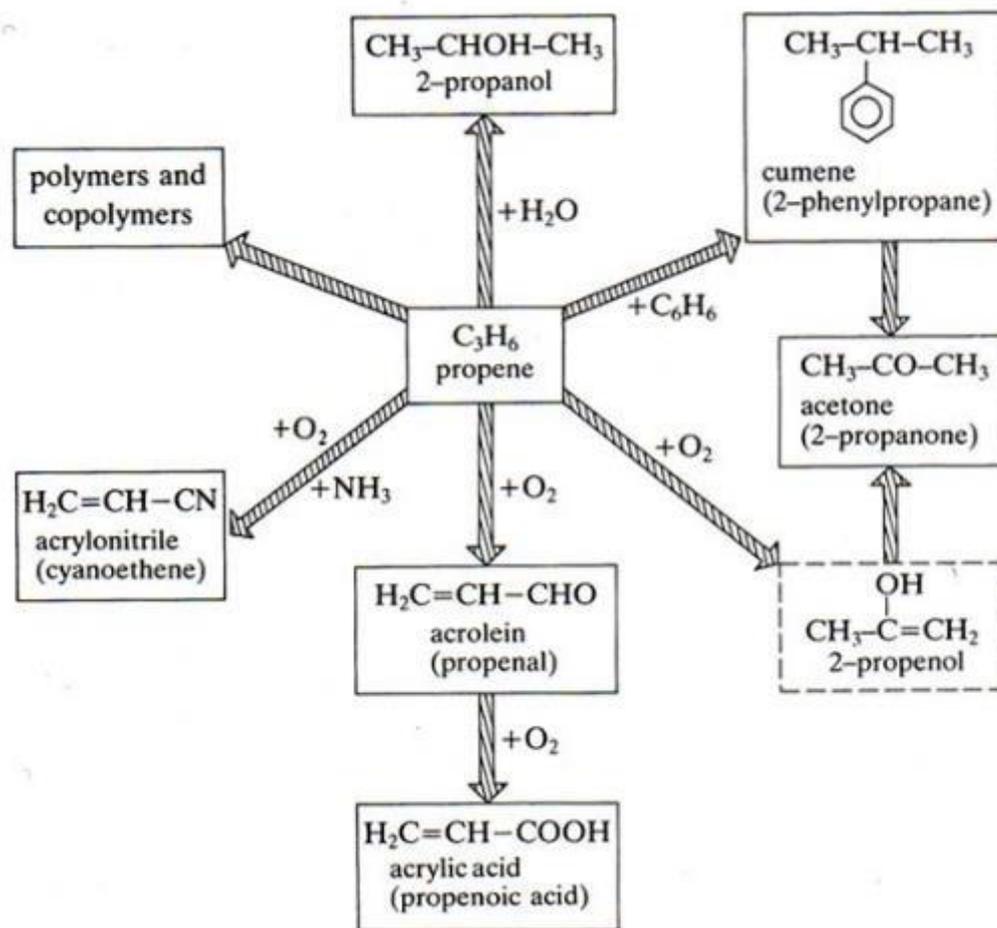
# 二酸化炭素の再資源化(CCU)



# 各種化学反応のプロセスと原料・生成物



付加価値増大・一般的には吸熱の方向



- ドイツが精力的に検討
- ETOGAS（旧SolarFuel）社が開発を進めている
- 再生可能エネルギーの電力によって電解水素を製造、メタンに変換
- オーストリアRohol Aufsuchungs Aktiengesellschaft（RAG）は、天然ガスの地中貯蔵設備を活用するプロジェクト「Underground Sun Storage」とのリンクを展開(600 kW規模)
  
- メタン化の反応は、電解水素と二酸化炭素からまず一酸化炭素（CO）を合成（逆シフト反応）、次いで一酸化炭素と水素からメタンを合成する（メタネーション反応）2段階反応がメインで検討される
- ETOGASはニッケル系の触媒を使うことでコストダウン
- 電解水素製造においても非貴金属系のアルカリ型を採用

■ CO<sub>2</sub>を減らそうと思えば、

– これ以上増やさない為の方法は以下の方法

- 化石資源を使わず再生可能エネルギーを使う（CO<sub>2</sub>には手を出さない）
- 再生可能エネルギー由来水素と二酸化炭素で燃料を作って使う  
（従来インフラが使える。二酸化炭素回収濃縮と転換利用にエネルギーが余計に必要）
- 廃熱を使ってCO<sub>2</sub>を転換利用（ただし200度程度の廃熱で駆動できる二酸化炭素利用可能な吸熱反応は殆ど無い）

– いまある二酸化炭素を減らす方法は以下の4通りのみ

- CO<sub>2</sub>ごと埋めて見なかったことにする(旧来のCCS)
- バイオマスの熱分解・炭化とその埋蔵(燃やすと元の木阿弥)
- CO<sub>2</sub>原料で固体炭素源（プラスチックなど）を作って未来永劫使う、バイオマスを未来永劫使う（正倉院）→ライフサイクルから言って無理
- 大気中からCO<sub>2</sub>を回収して再生可能エネルギーを使って炭素と酸素に分解し炭素を埋める  
→回収技術がない

---

---

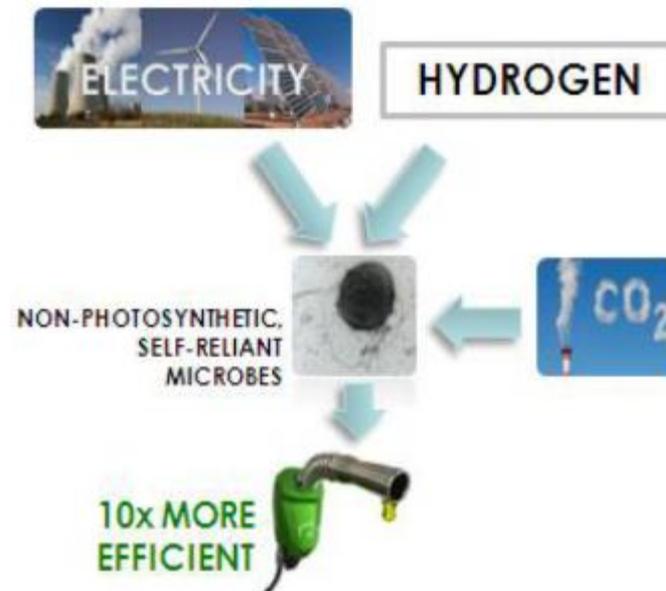
## 今後のプロセス

- ▶ アメリカDOE（エネルギー省）の ARPA-Eプログラムの重点分野の一つ
- ▶ Electrofuelは、従来のバイオ燃料の10倍の効率を目指して検討が進められている
- ▶ 13のプロジェクトに対して3年で40億のファンド
- ▶ 多くはバクテリアを利用して、電気と二酸化炭素と水素から合成燃料を得る試み
- ▶ 高温タイプや好気嫌気併用など多くのパターンあり

U.S. DEPARTMENT OF  
**ENERGY**

**arpa-e**

Advanced Research Projects Agency • ENERGY



## なぜバイオ燃料ではなく Electrofuelなのか？

---

- ▶これまでのバイオ燃料は光合成から生まれた植物を用いて発酵などで作られた
- ▶光合成は効率が低く、得られた植物からバイオ燃料を作るとさらに効率が低下
  
- ▶現在のバイオ燃料製造はさらに、肥料や土地、水、日照条件などが必要
- ▶Electrofuelはこれらを不要とするプロセス
- ▶嫌気・暗中で活性を有する微生物を用いる
- ▶ここで用いる微生物は電力、水素と二酸化炭素を直接エネルギーとして用いることができることが重要
- ▶微生物の遺伝子改変でさらなる性能向上が可能
- ▶農地を必要としない新たなバイオ燃料の創出を狙う

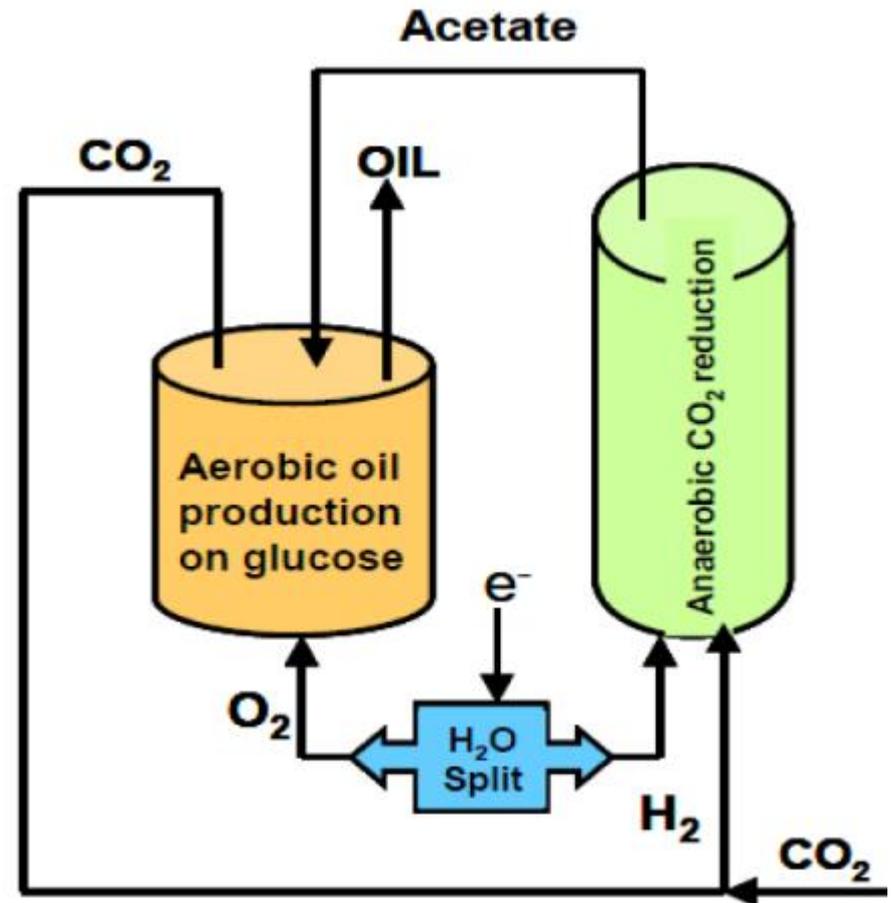
自然由来電力作った水素と、二酸化炭素を用いてアルコールを作る

✓アルコールから炭化水素へさらにアップグレード

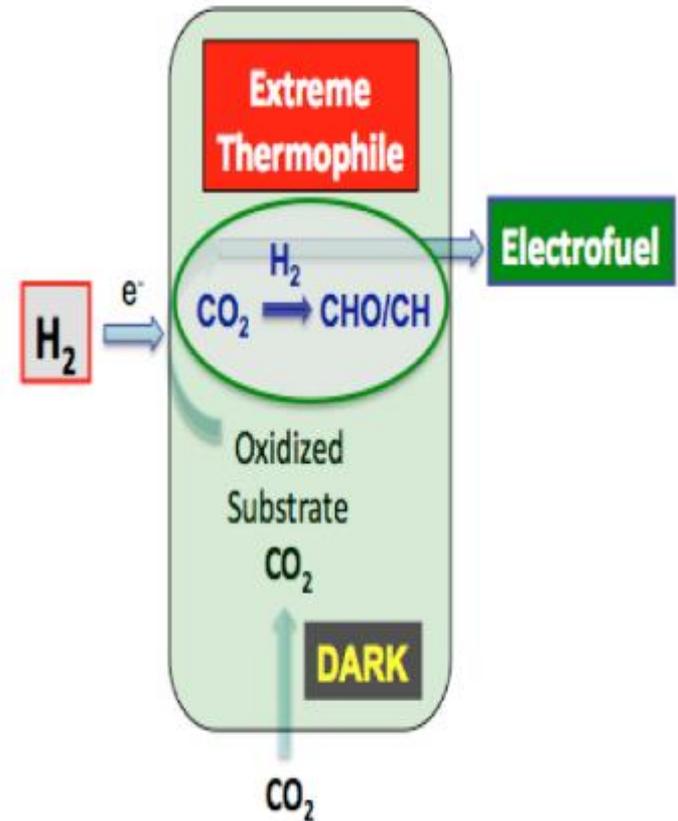
✓2段法、1段目では水素と二酸化炭素と微生物からアセテート系の炭素が二つの化合物を作る

✓2段目ではアセテート系の生成物と微生物から好氣的に炭化水素油を作る

✓電力と二酸化炭素は廃棄物の燃焼と発電から作れる

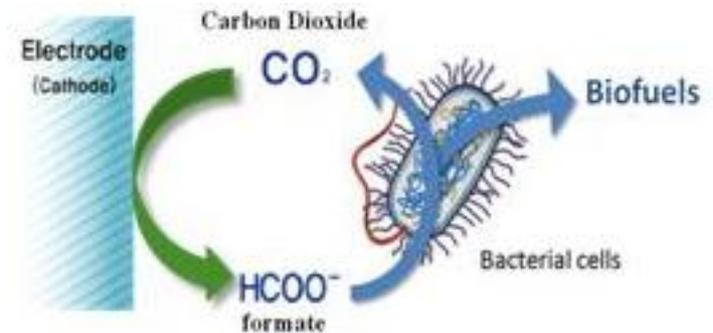


- ✓75-100°Cの高温環境でも耐性を有する
- 微生物を用いたElectrofuel合成
- ✓微生物は遺伝子操作により改良し、水素を用いて二酸化炭素からアルコール燃料へと転換可能に
- ✓バイオ燃料は一般には脱水や蒸留が必要だが、このケースでは生きたまま脱水蒸留するので効率向上 (?)
- ✓光を用いず地中などで生産

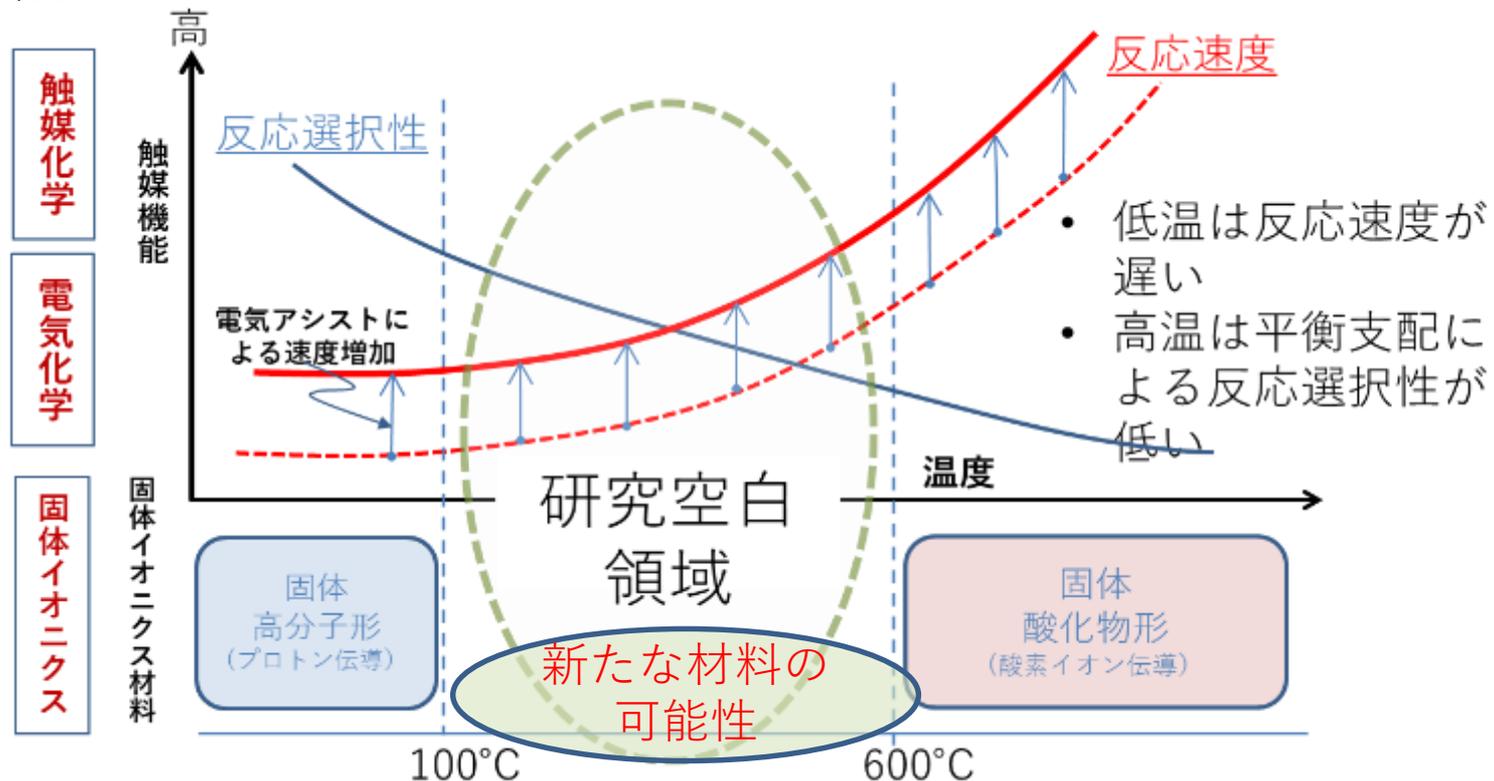


Ralstonia eutrophaというバクテリアを  
遺伝子操作により性能向上

- ✓再生可能エネルギーから作り出した  
電力と二酸化炭素から蟻酸を作り出す
- ✓得られた蟻酸とバクテリアから  
バイオ燃料を作り出す
- ✓得られた燃料のエネルギー密度の高さ  
から考えて、もとの電力  
(バッテリー) などよりも  
効率は高いとのこと

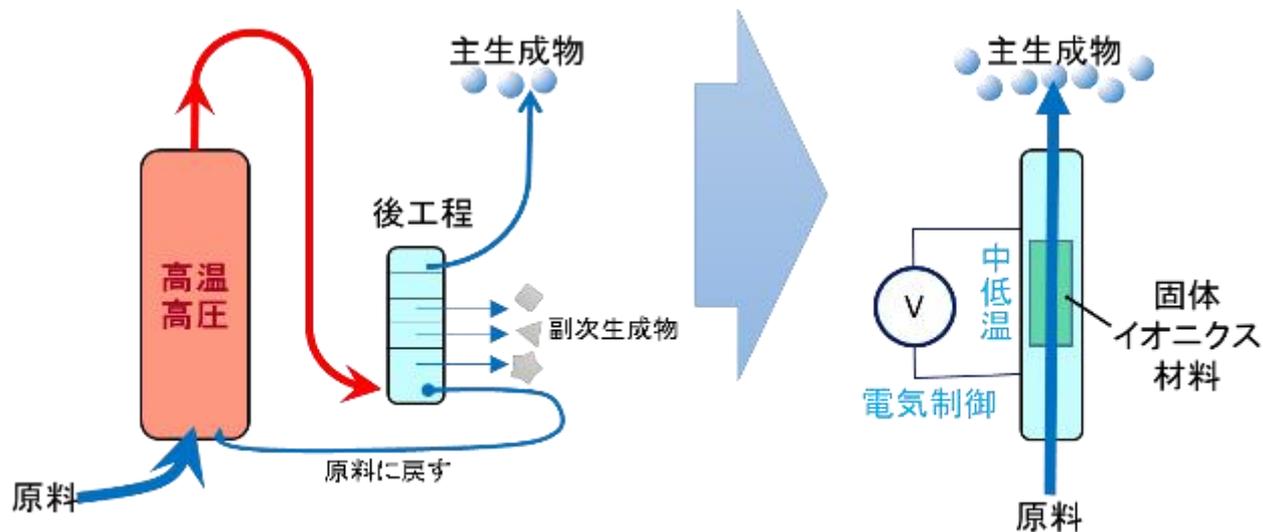
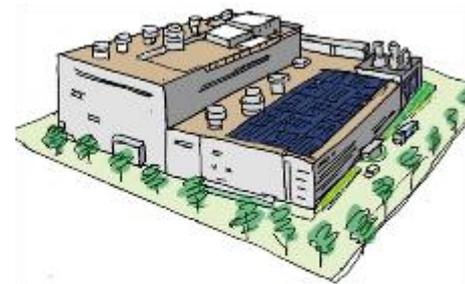
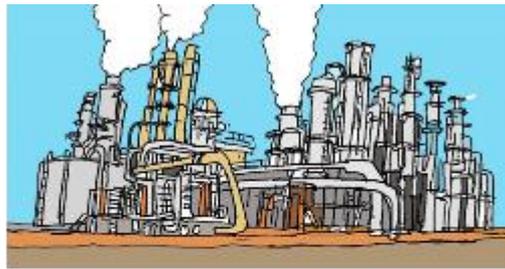


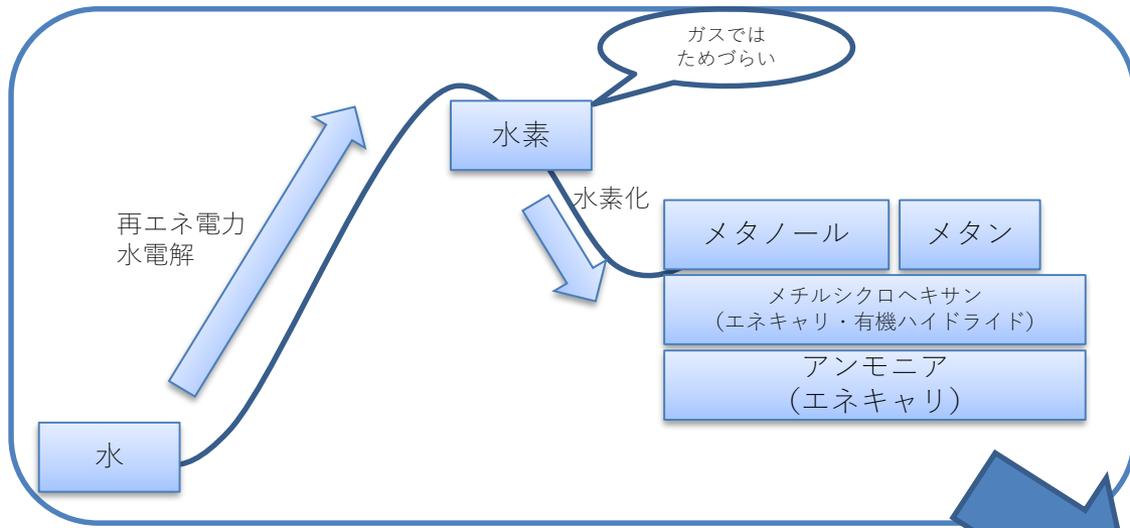
- 固体イオニクスを用いた電気化学における化学反応の触媒機能を強化するには中低温域の温度条件が最適
- しかしこれまで中低温域で作動する固体イオニクス材料がなく、研究空白領域の状況



## 高い反応選択性の効果

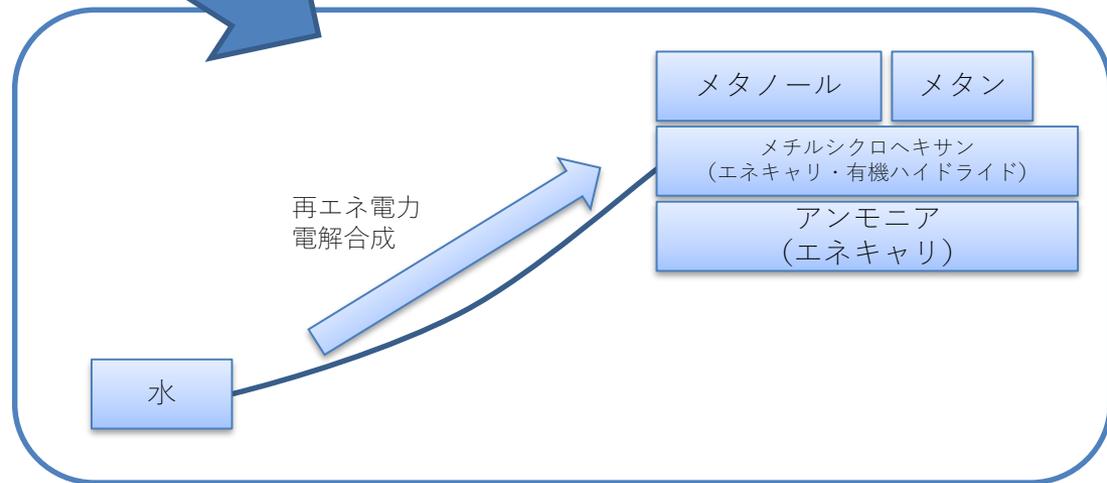
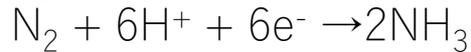
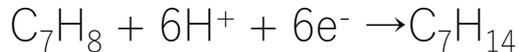
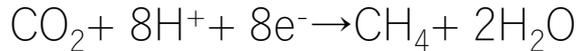
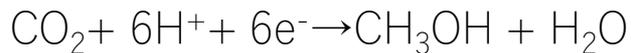
- 後工程の分離・精製プロセスなどの工程が大幅に簡略化でき、設備費削減、用益削減による省エネ効果・費用削減





過電圧は別として、吸熱と発熱を別々に行うのは大きなエネルギー損失を伴う可能性がある（熱交換など複雑な装置を伴わない限り）

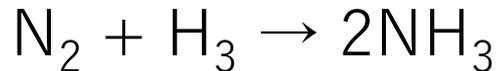
電解合成で直接プロトン化するルート



## □ 低圧化の効果

- ▶ たとえばアンモニア合成反応における反応条件の圧力(25MPa)が緩和できると設備簡素化、それによる設備費削減が可能

**ハーバーボッシュ法**



温度：～350℃

圧力：25 MPa以上

## □ 低温化の効果

- ▶ 熱と電気の併用プロセスであることから、たとえば複数の化学反応プロセス間のエネルギー相互利用が容易になる

