



日本学術会議シンポジウム 2022/7/30

物質閉鎖系である地球における適材適所の化学技術



2021/3 イギリス王立化学会フェロー
2020/4 文部科学大臣表彰科学技術賞 受賞
2019/1 日本化学会 学術賞 受賞

産業構造審議会グリーンイノベ部会委員
政府グリーンイノベ戦略会議議員・WG座長
政府グリーンエネルギー戦略委員
文科省環境エネルギー委員会委員
JSTさがけ「反応制御」領域総括
JSTフェロー
Elsevier “Fuel”誌 編集責任者
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

2022年2月2日参議院参考人招致の様様

地球は閉鎖系



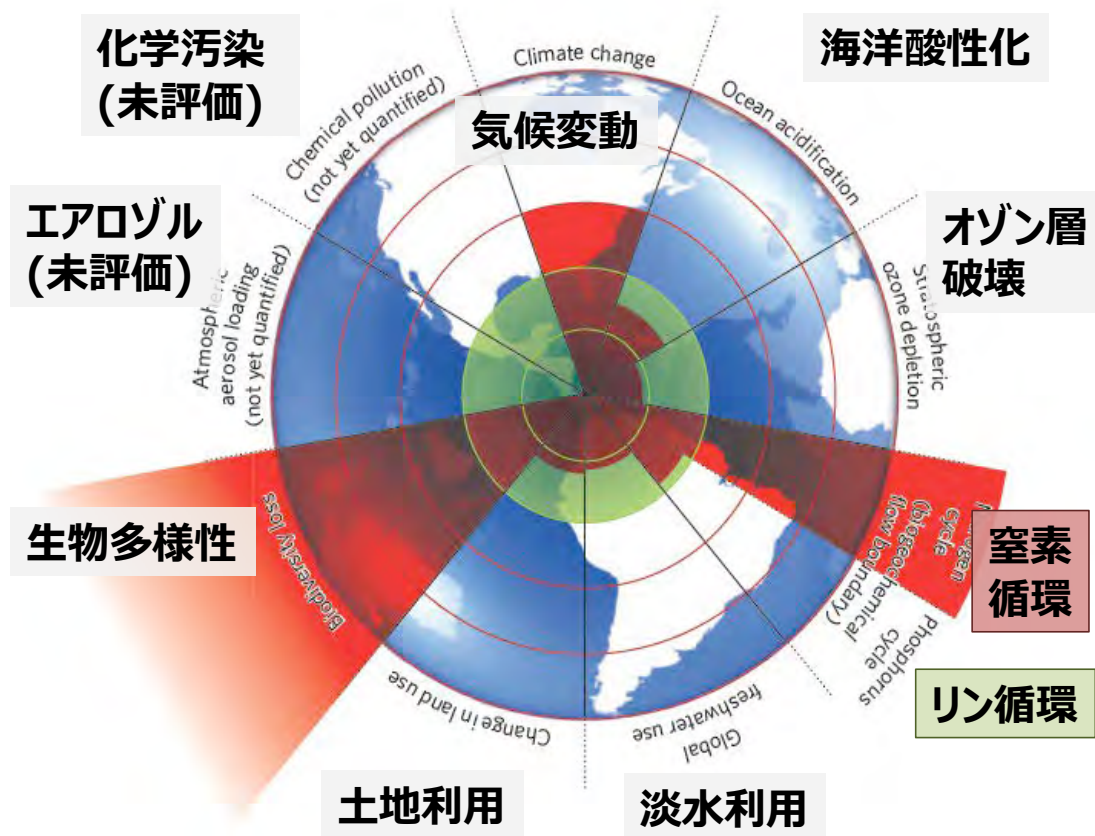
宇宙から見れば「閉じた惑星」である地球

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大宗を担うとは言えない

- ✓ 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

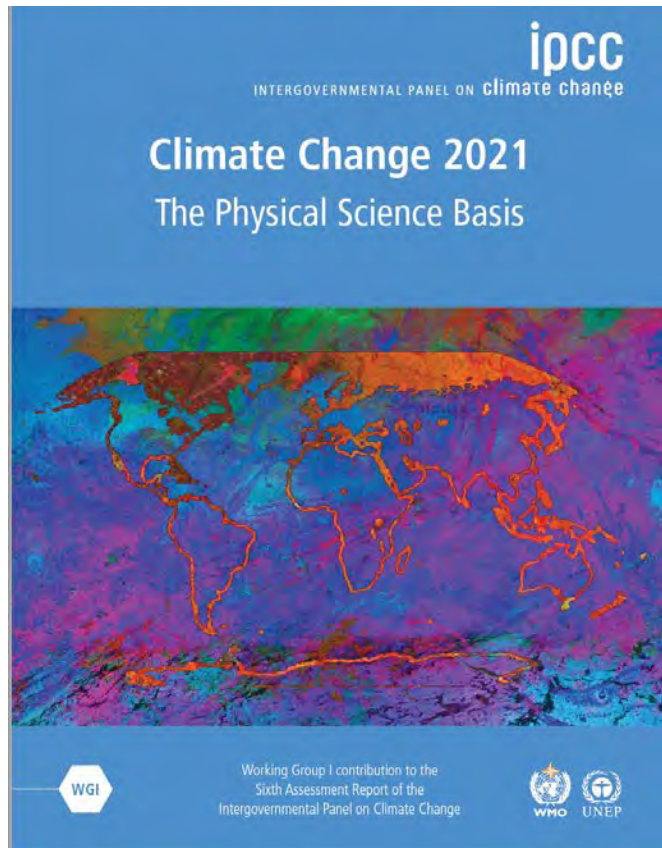
©JAXA/NHK



窒素循環は生物多様性とならんで、「すでに限界を超えている」と評価されている。

ただし、「限界」の定量的評価の根拠はあまり明確でない。

中央部（緑）の円内に納まる状態は自然環境の許容範囲（限界値）内。
円から逸脱するほど許容範囲を超えていることを示す。



Climate change is already affecting every inhabited region across the globe with human influence contributing to many observed changes in weather and climate extremes

気候変動は、すでに世界中のあらゆる地域に影響を及ぼしており、人間の影響が、気象や気候の極端な変化の多くをもたらしています。

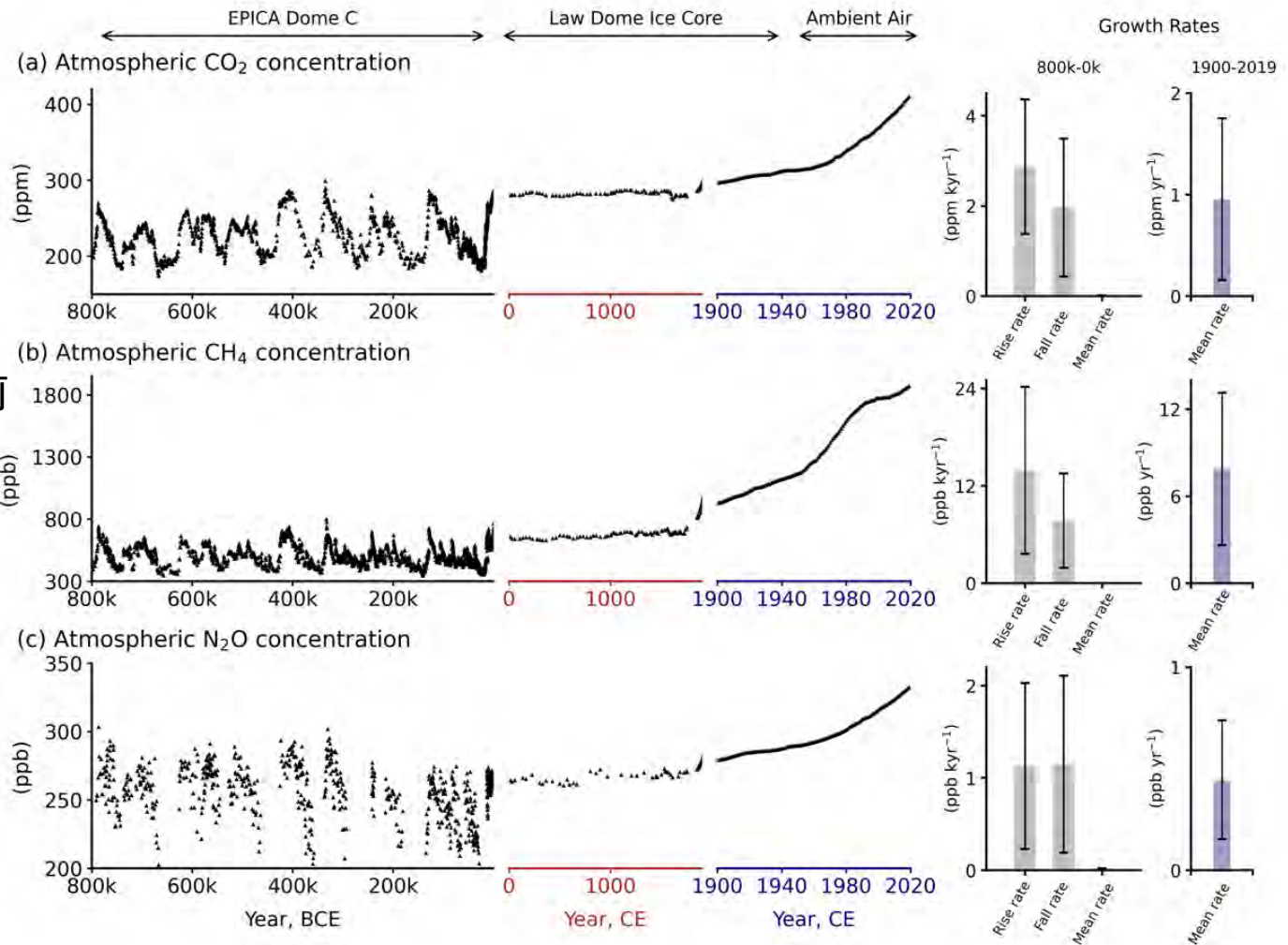
Every tonne of CO₂ emissions adds to global warming

1トン1トンずつのCO₂排出量が1歩ずつ地球温暖化につながる



アイスコア中の気泡やクラスレート結晶に含まれるCO₂、CH₄、N₂Oの大気中濃度

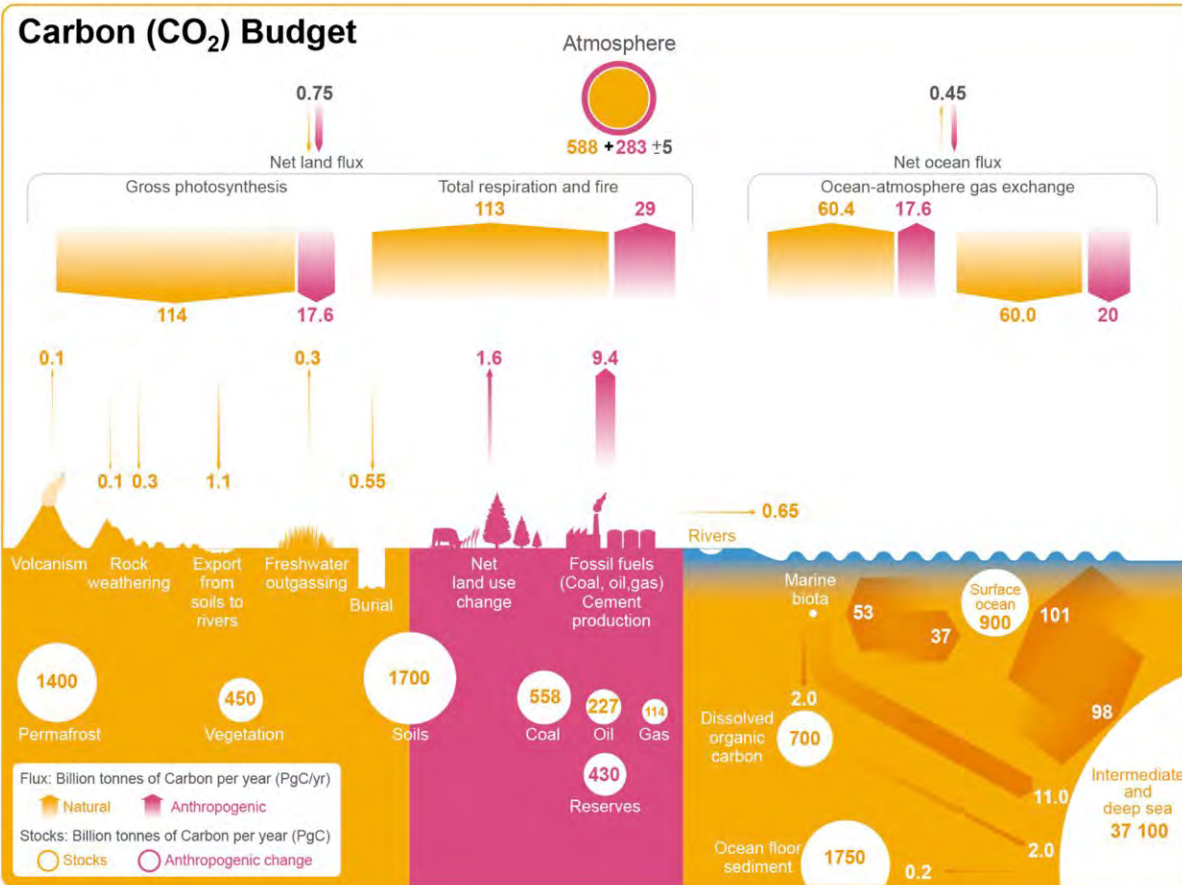
異なる期間（紀元前80万年～紀元前1900年、紀元前1900年～紀元前2017年）における千年単位の線形成長率を時間積分して示した。





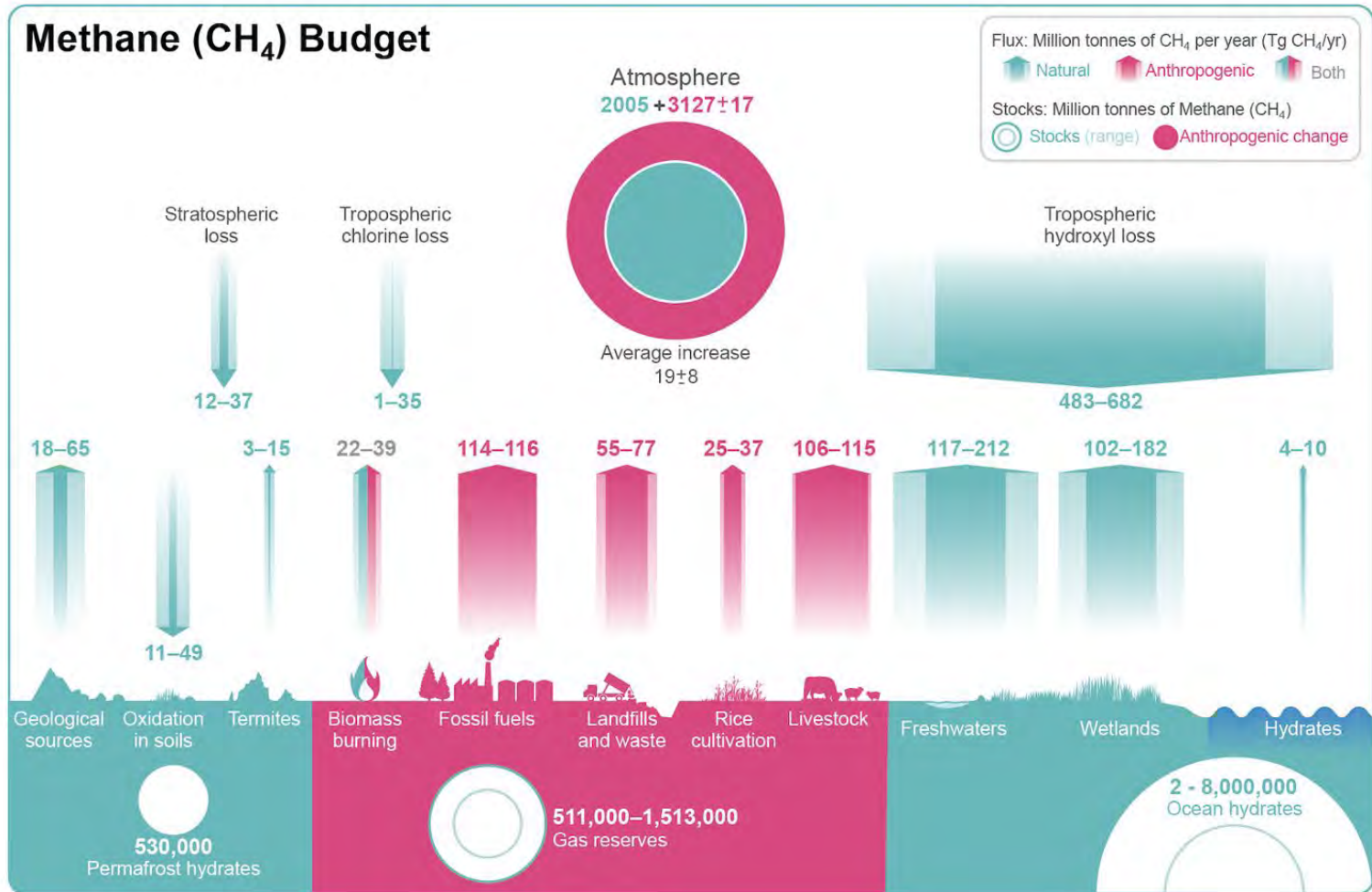
世界の炭素 (CO₂) 循環 (2010-2019)

世界の炭素 (CO₂) 循環 (2010-2019年)。黄色の矢印は、産業革命以前の1750年頃に推定された自然の炭素循環に伴う年間の炭素フラックス (単位: Pg-C/yr) を表す。ピンクの矢印は、2010年から2019年の期間で平均化された人為的なフラックスを表す。大気中の炭素蓄積速度は、土地管理を含む土地利用変化による正味の排出量と化石燃料の排出量を合わせたものから、陸と海の正味の吸収量を差し引いたものに等しい。黄色の円は産業革命前の炭素蓄積量 (PgC) を表し、ピンクの円は1750年以降の人為的な炭素蓄積量の変化 (累積人為的フラックス) を表す。





世界のメタンの流れ (2008-2017)

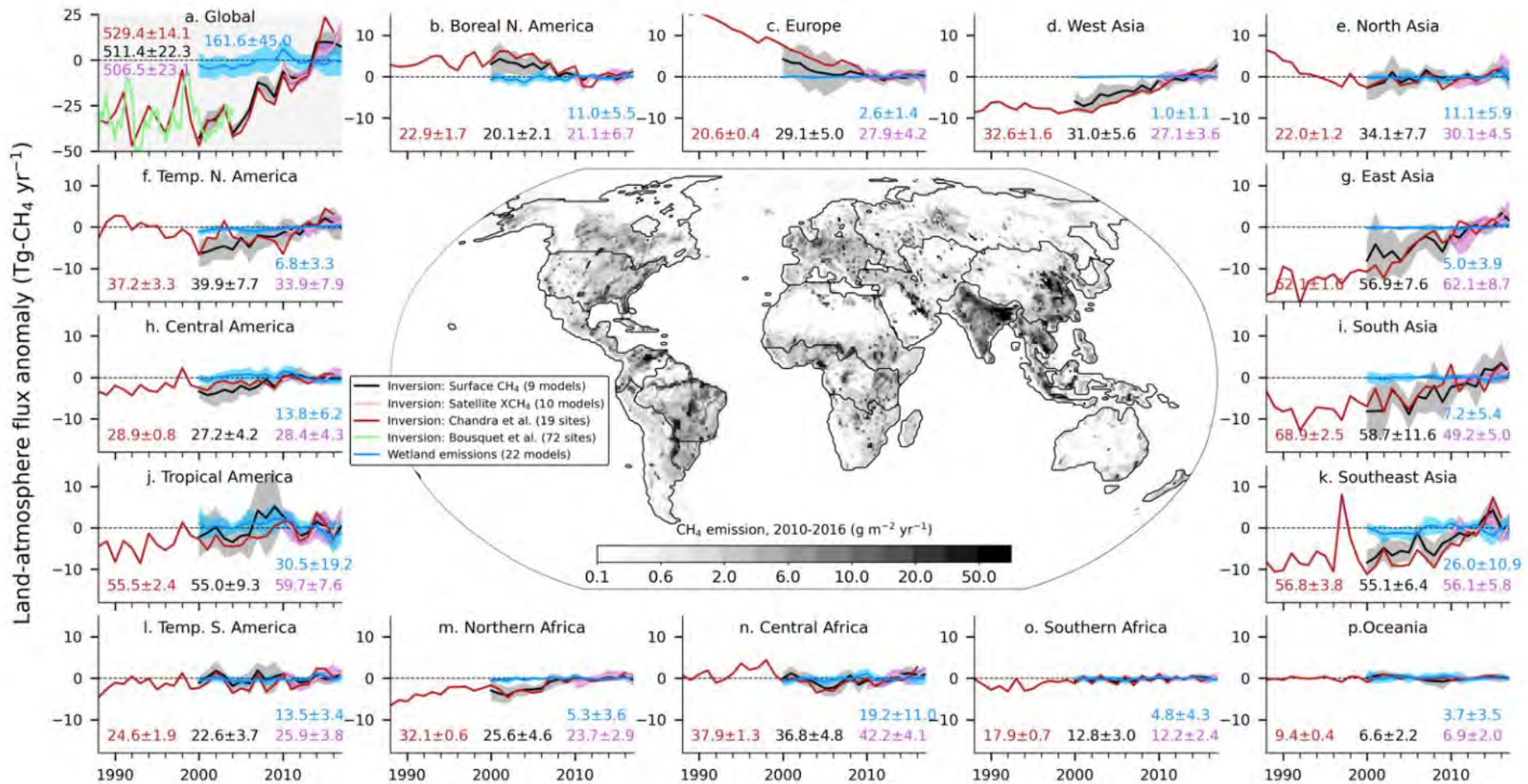


大気中のストックは、平均CH₄濃度から、全球平均CH₄の不確実性を考慮した係数に乗じて算出。

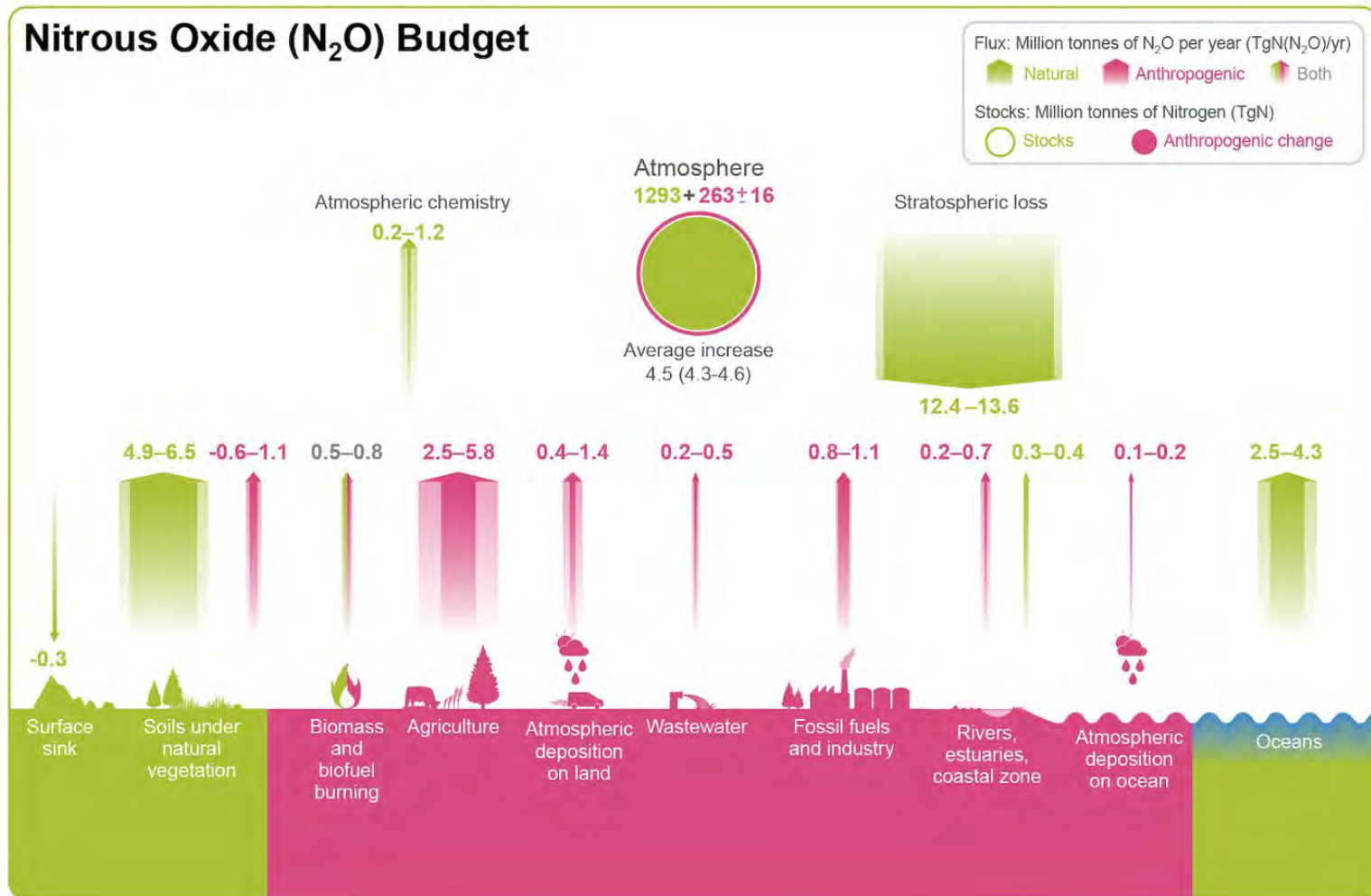
出典 IPCC AR6



1988-2017年の世界および地域のメタン排出量



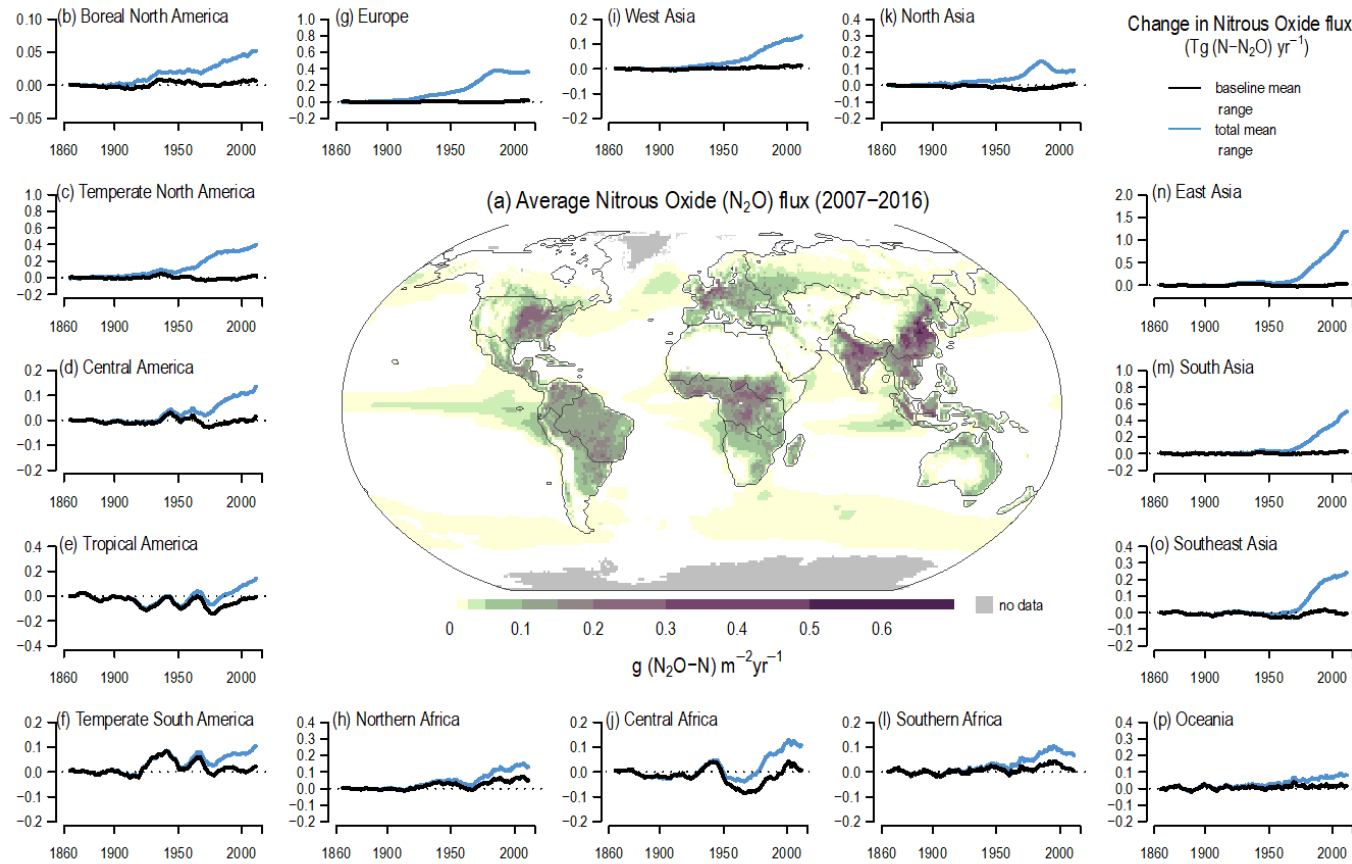
中央の地図は2010-2016年のCH₄排出量の平均値。



大気中のストックは，平均N₂O濃度に係数を乗じて算出した



2007年から2016年までの10年平均の N_2O 排出量と1850年以降の変化

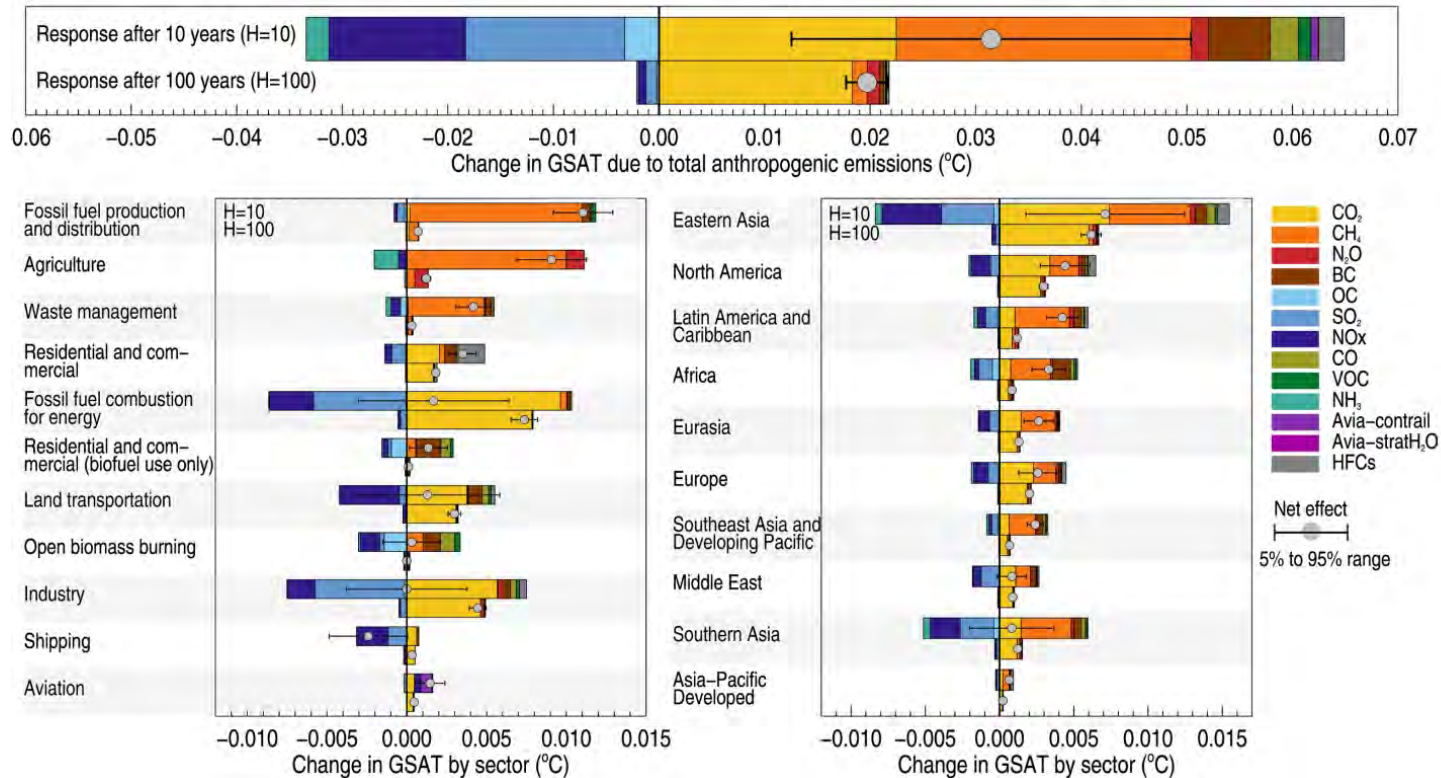


大気中の CO_2 濃度の変化や気候変動によるバックグラウンドフラックスに対して、人為的な窒素添加（大気からの降下、屎尿・肥料使用、土地使用）による影響を含めた総合的な影響を評価した。フラックスは、陸域生物圏モデルの N_2O および3つの海洋生物地球化学モデルから得られたもの



現在の排出量に基づいた1年後、10年後 および100年後の世界平均気温への影響

Effect of a one year pulse of present-day emissions on global surface temperature



温度応答は個々に分類され、人為的な総排出量（上）、セクター別排出量（左）、地域別排出量（右）で示す。セクターと地域は、10年単位での正味の温度効果が大いものから小さいものへと並べられている。上段のエラーバーは、放射強制力のための不確実性による正味の温度効果の不確実性（5-95%の間隔）を示す。開放型バイオマスの燃焼と家庭用バイオ燃料の使用によるCO₂排出量は、不確実性のため除外した。



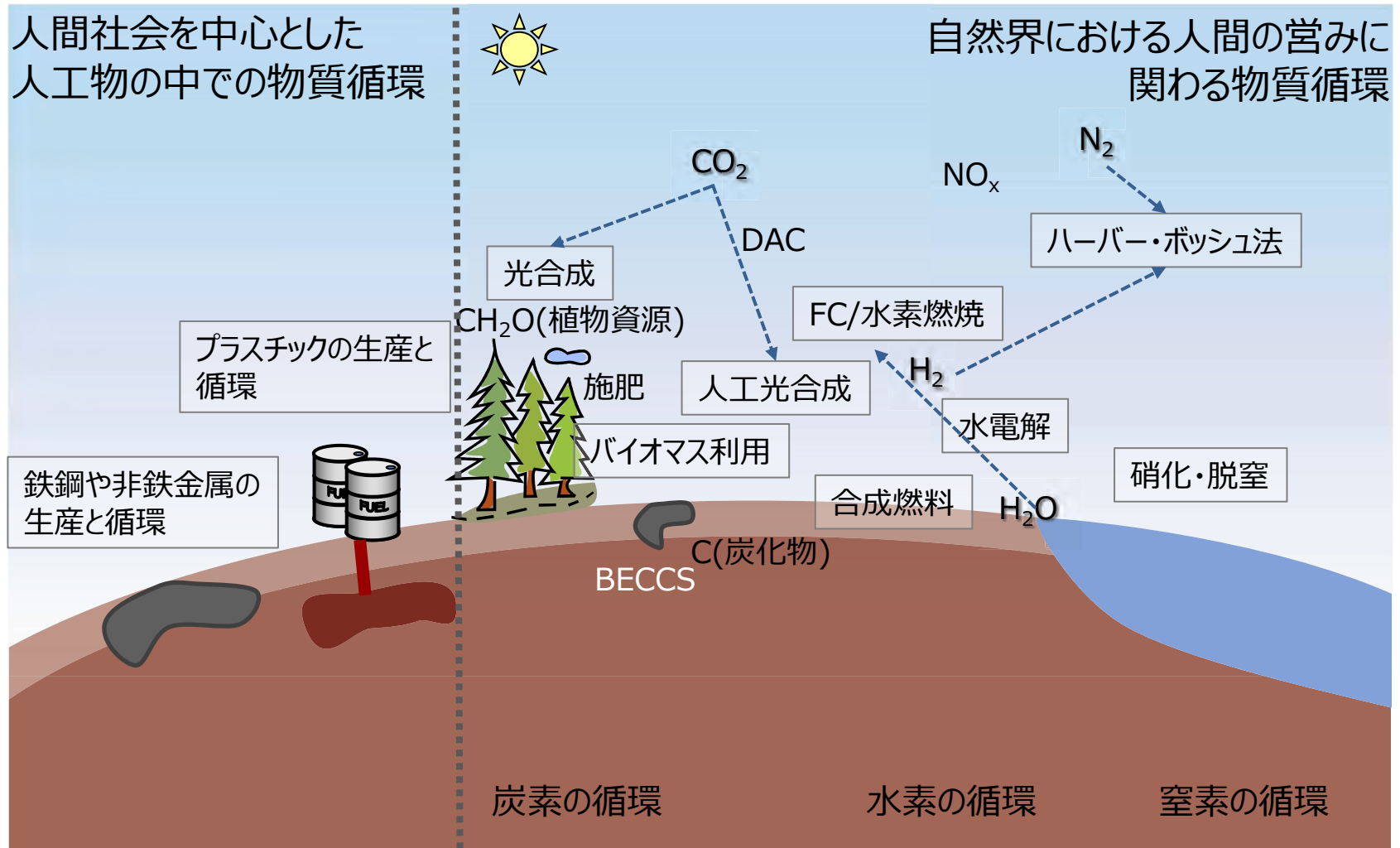
二酸化炭素排出抑制のみに
目を奪われていてはいけない

これからは N_2O と CH_4 の排出規制も厳しくなる

$\text{N}_2\text{O} \cdot \text{CH}_4$ 排出の抑制は喫緊の課題

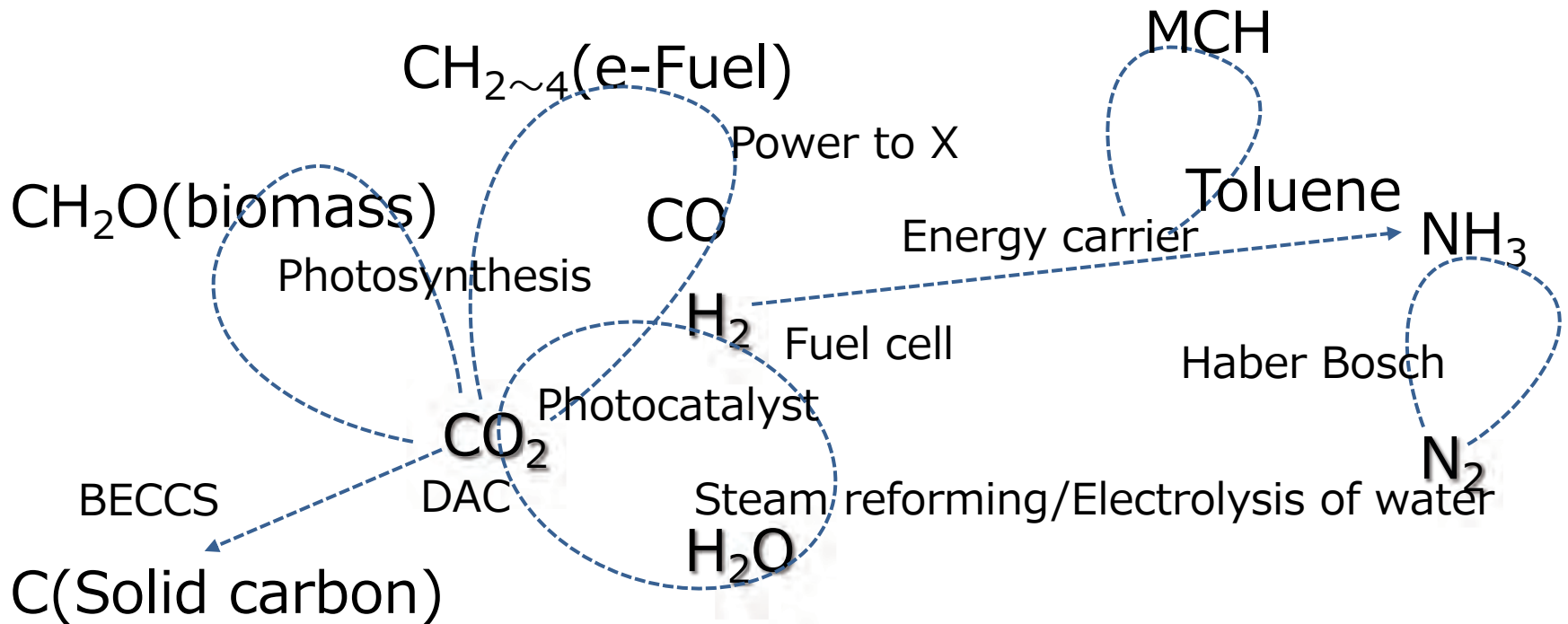


自然界での循環と人工物の循環





- ✓ 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、e-Fuel、SAF、グリーンLPG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



エネルギーや基幹化学品はほかの物質と異なり

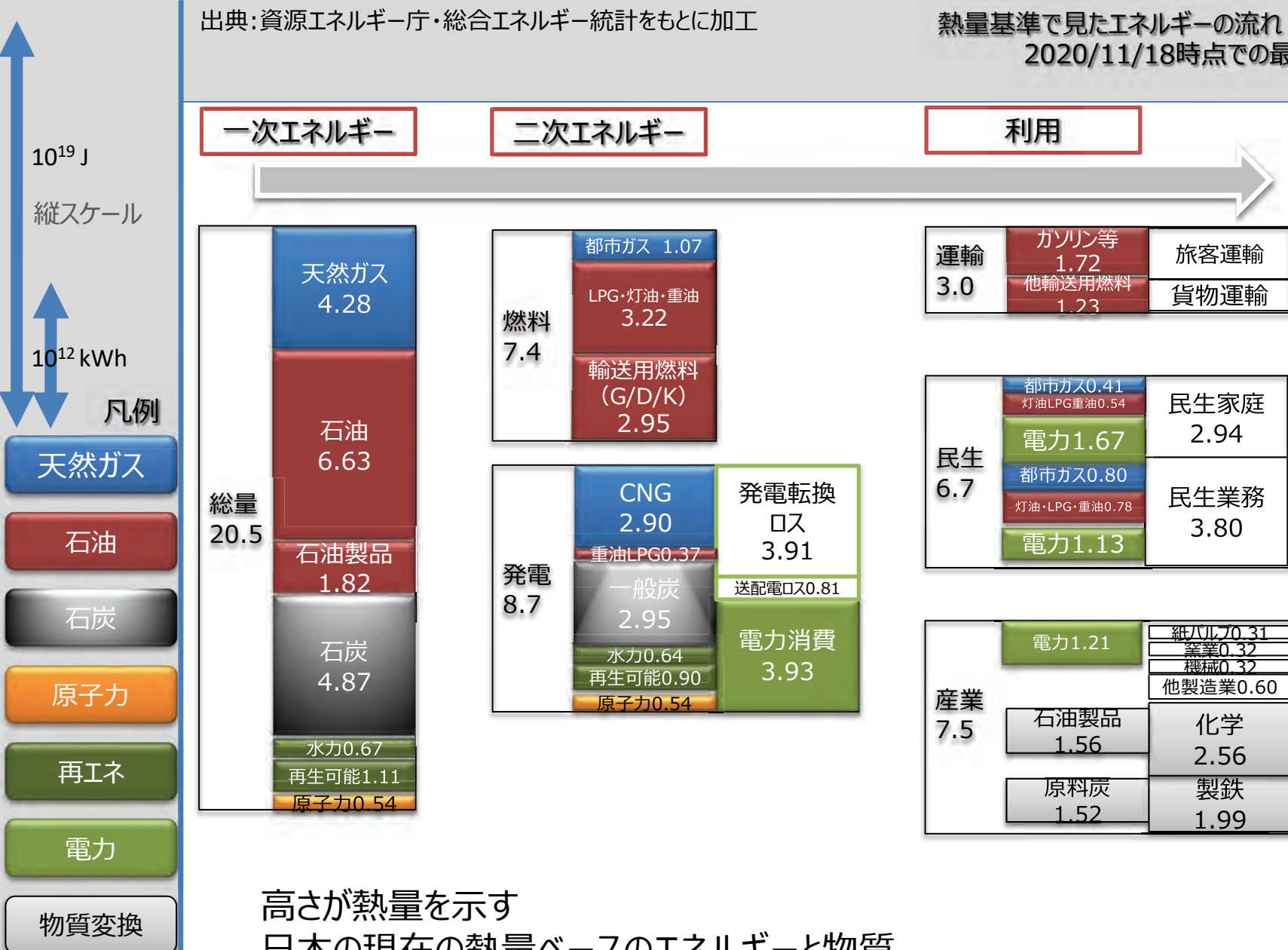
エネルギーは安く・多量に・いつでも 使えることが重要

基幹化学品は安く・純度よく・安定に供給されることが重要
そこに付加価値はあるか？

→エネルギーや基幹化学品を考える基準となる物差しは何か？

価格 ÷ 熱量 ÷ 二酸化炭素排出

(石炭は安め・排出多め、天然ガスは高め・排出少なめ)

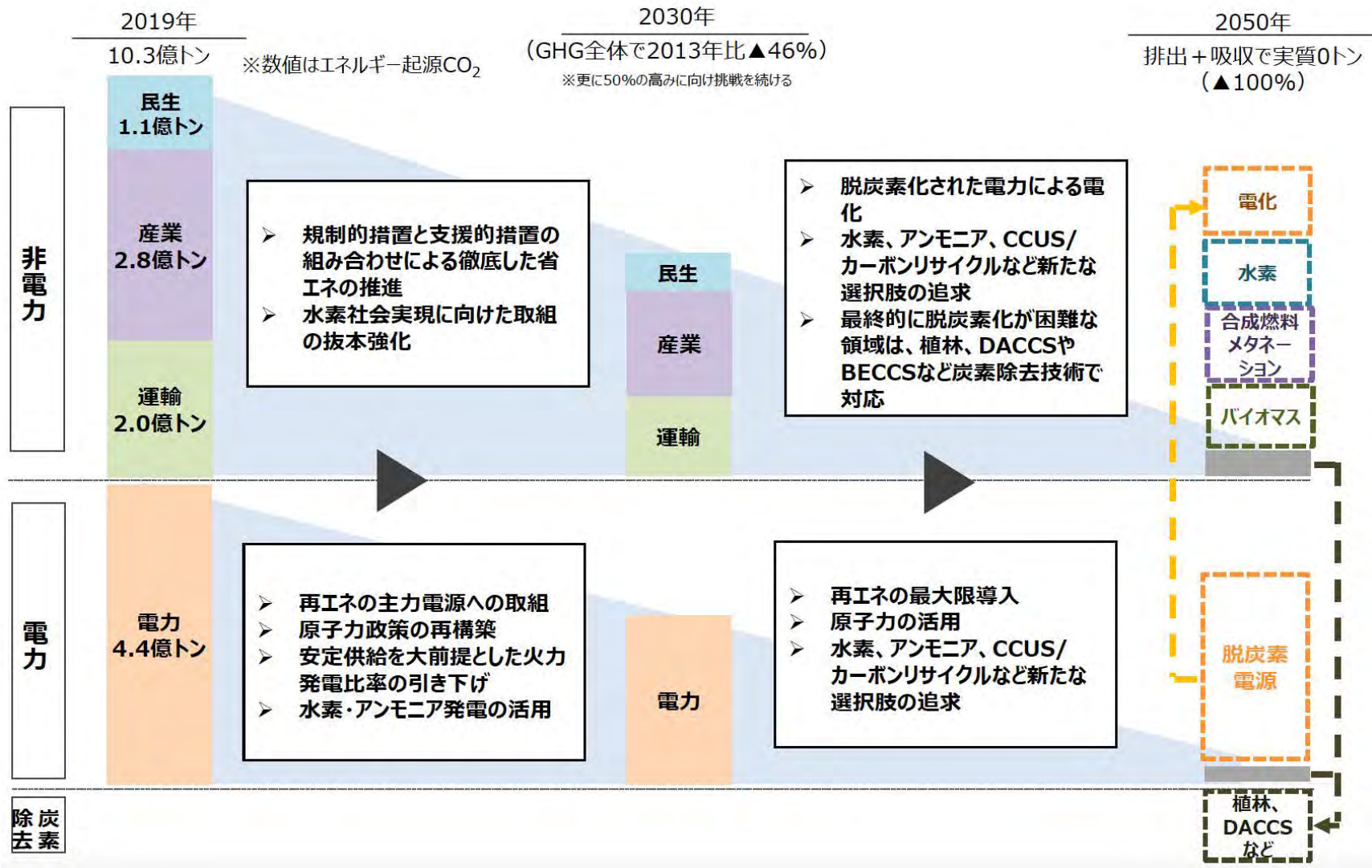


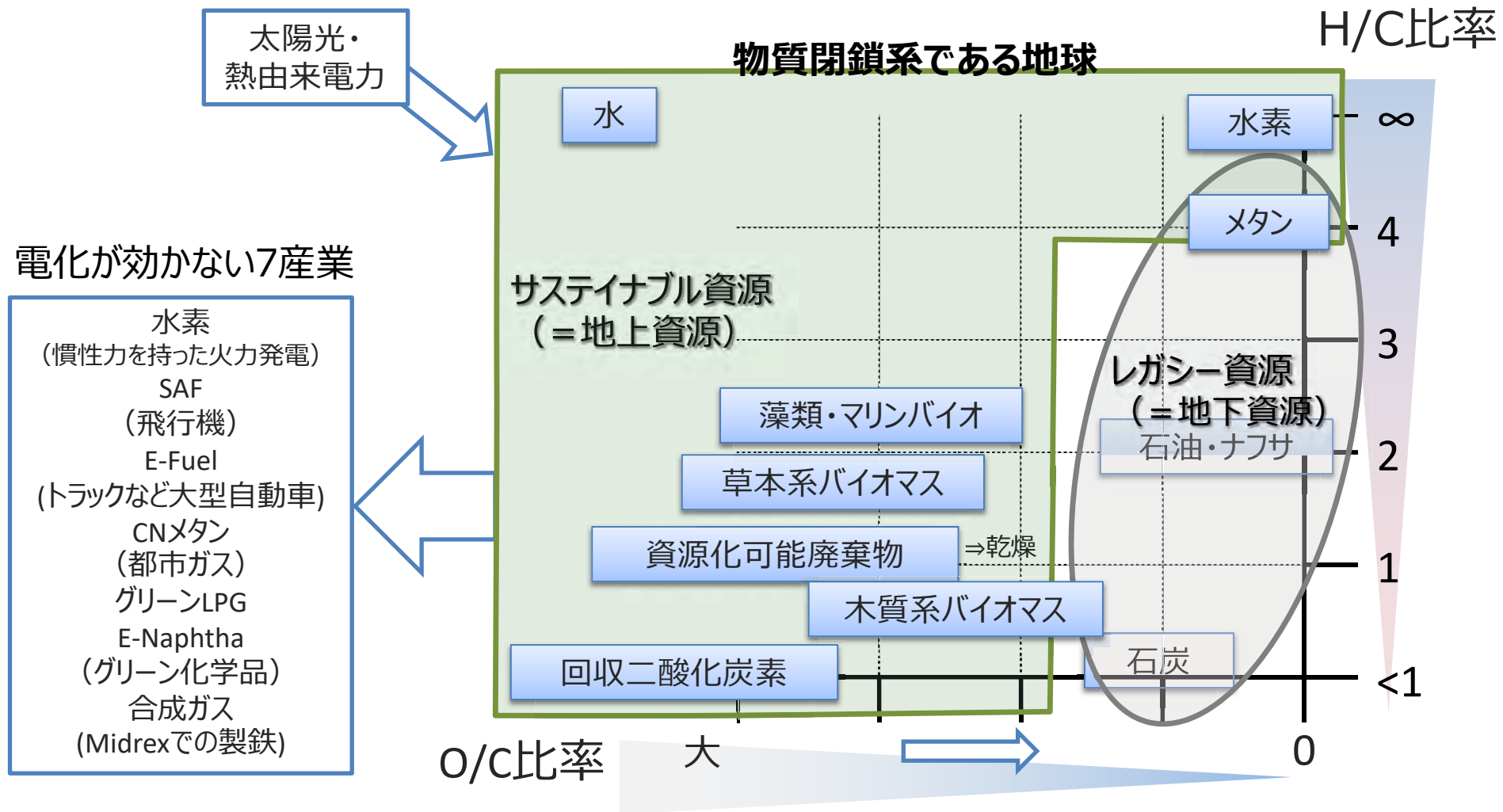
高さが熱量を示す

日本の現在の熱量ベースのエネルギーと物質

現在は国内で年間に20 EJ近い化石資源を輸入し、

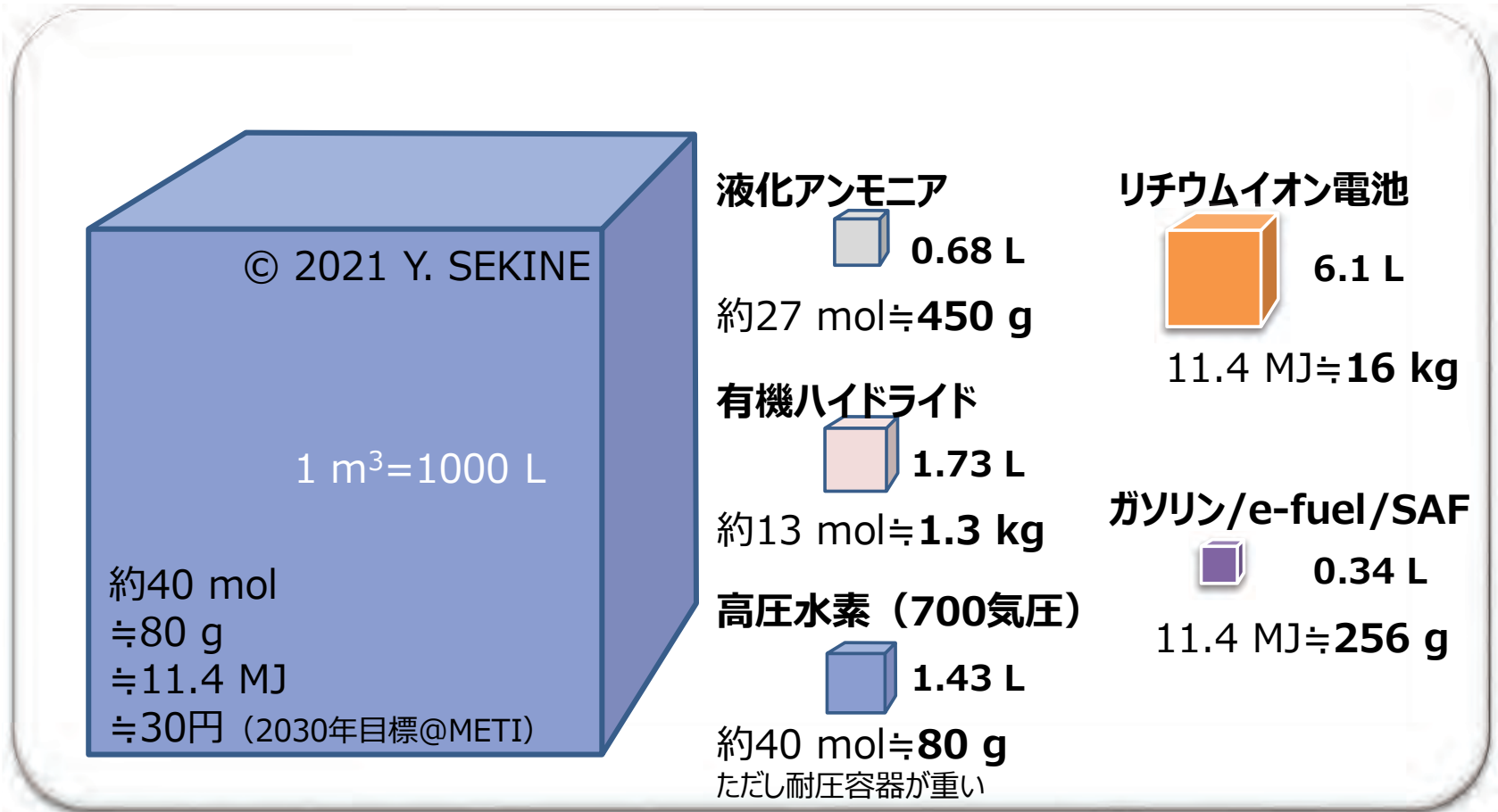
エネルギーと物質として利用 再エネはまだ1 EJ程度→拡大が必要







1気圧の水素1 m³と等しいエネルギーを持つのは？
(図中、立方体の大きさは体積に沿って正確に作図してある)





6 Lの体積のリチウムイオン電池(重さ16 kg)に貯められるエネルギー

＝ 等しい



300 ccの体積の液体炭化水素燃料が
持つエネルギー



石炭（発電・コークス
による製鉄）

都市ガス（メタン）

LPG（プロパン）

ガソリン（>C6）

灯軽油（>C12）

石油化学工業
（ナフサ）



水素
アンモニア

電池

PtoG/バイオメタン

グリーンLPG

E-fuel（MTG etc. >C6）

E-fuel（FT >C12）

グリーンナフサ
（CO₂からの合成ナフサ）
バイオマス由来化合物利用



- 閉じた物質系である地球に於いて、未来の化学とエネルギーは
 - 太陽エネルギー由来の電力・熱・光を駆動源とし
 - バイオマスや水・二酸化炭素・バイオメタン・廃棄物を原料とし
 - ほしいときにほしただけ駆動できるオンデマンド・分散型の
 - 電化できない7つの産業に向けたプロセス

が期待される



- 第一法則
 - エネルギーは保存する
- 第二法則
 - エントロピーは増大する
- これらを併せて考えると・・・
 - 閉じた殻の地球において今ある物質やエネルギーは有限、化石資源は使うと最後は熱になり廃棄される
 - 月給と遺産で考えると太陽は月給、化石資源・ウランは遺産
 - ヒトが活着している限り、エントロピーは増大し、全ては熱になる→外力で修復するには月給 = 太陽光を使う以外無い



- 閉じた地球という殻の中でのエネルギー・化学を考えると・・・
ゆくゆくは太陽光にフルに頼らなくてははいけない→技術開発が望まれる
- 後世の人類に迷惑をなるべくかけないエネルギー・化学技術が重要
 $\text{N}_2\text{O}/\text{CH}_4$ の排出抑制は今後厳しくなる スマート農業に期待がかかる
- 橋渡しの技術として
再生可能と間をつなぐために水素の二次エネルギーとしての利用
- 化学品は原料の脱化石資源化が待ったなし
- 外部水素のいらないバイオマス技術も期待
- 熱力学的視点が重要
やりたいからやるのではなく、やるべきだからやる
- **カーボンニュートラル実現のためには、
適材適所でのエネルギー・物質を考える事が重要**