

—サーキュラーエコノミーの「なぜ？」を掘り下げる知の往還—
No.3

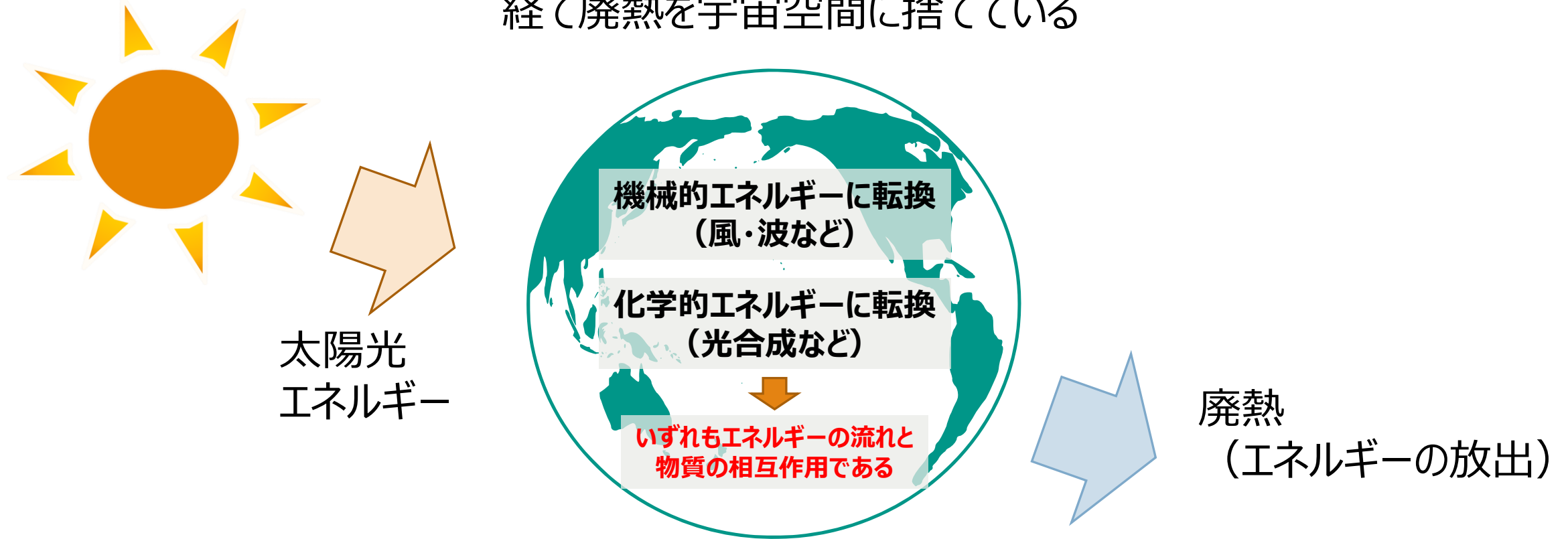
炭素循環

2026年6月30日

藤井 宏行

非定常開放系としての地球

地球は太陽よりエネルギーを受け、中での様々な活動（エネルギー転換）を経て廃熱を宇宙空間に捨てている

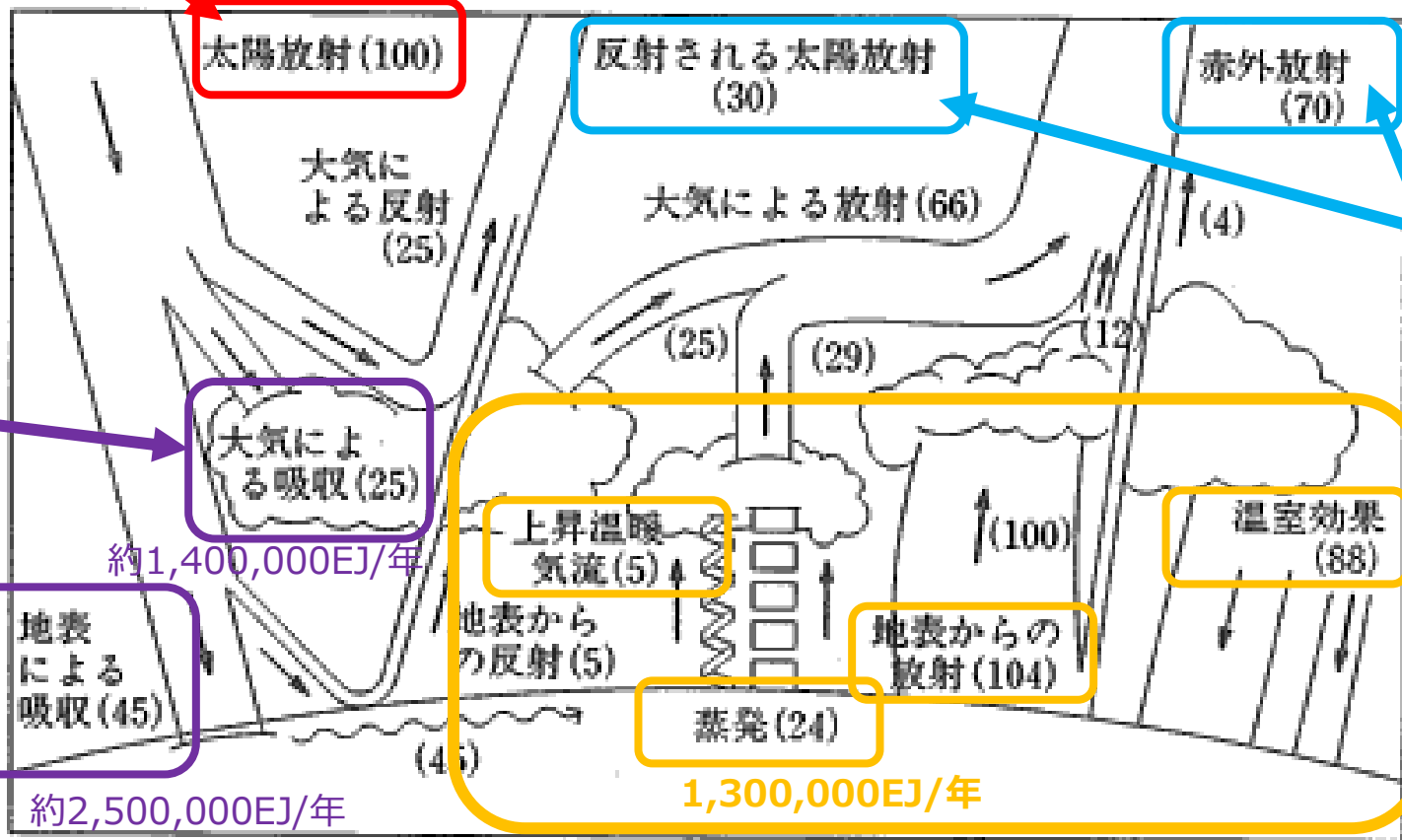


太陽から地球を貫くエネルギーの流れと、地球上の物質との相互作用で様々なダイナミクスが生まれる
⇒非平衡のダイナミック「システム」

地球のエネルギー収支

第序-2-10図 地球のエネルギーバランス

地球全体で約
5,500,000EJ/年



吸収されたエネルギーは物質状態の変化に使われる

合計
約3,900,000EJ/年
(地表を循環するエネルギー)

入射100とバランス = 反射30 + 赤外放射70

物質循環を伴う
地表のエネルギー循環
地表・大気に吸収された
約3,900,000EJ/年

地表上の様々なダイナミクスを生むエネルギーの源泉

出典：S.H.Schneider, Climate Modeling, Scientific American 256 :5,72-80,1987

環境省「環境白書(平成6年)」第2節3 エネルギーの循環等

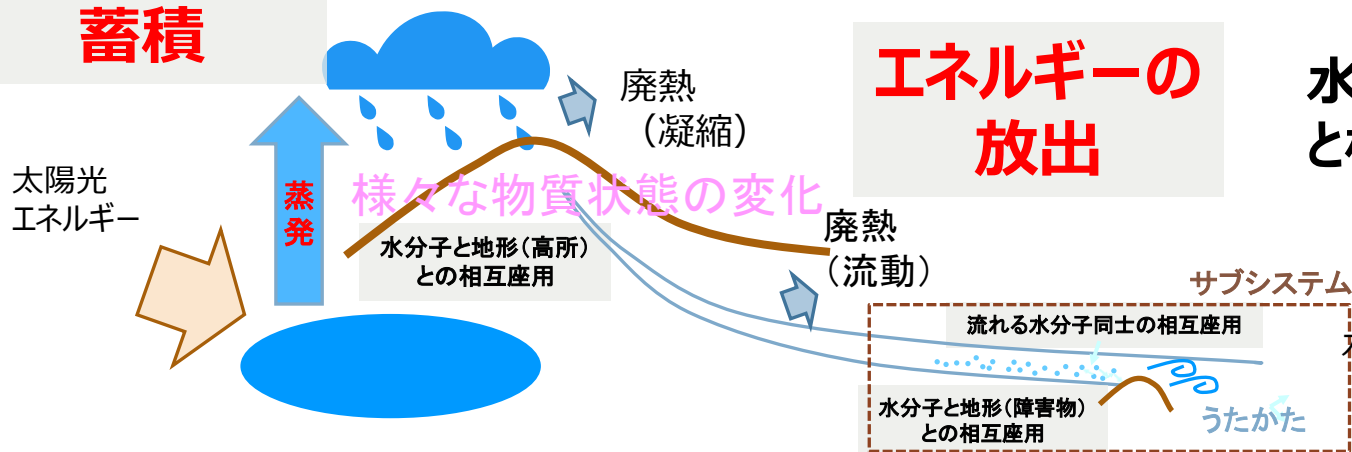
地表上の様々なダイナミックスの例

エネルギーの蓄積

エネルギーの放出

水分子が太陽光・大気・地形など様々な要素と相互作用し地表を廻る

⇒ 水循環「システム」

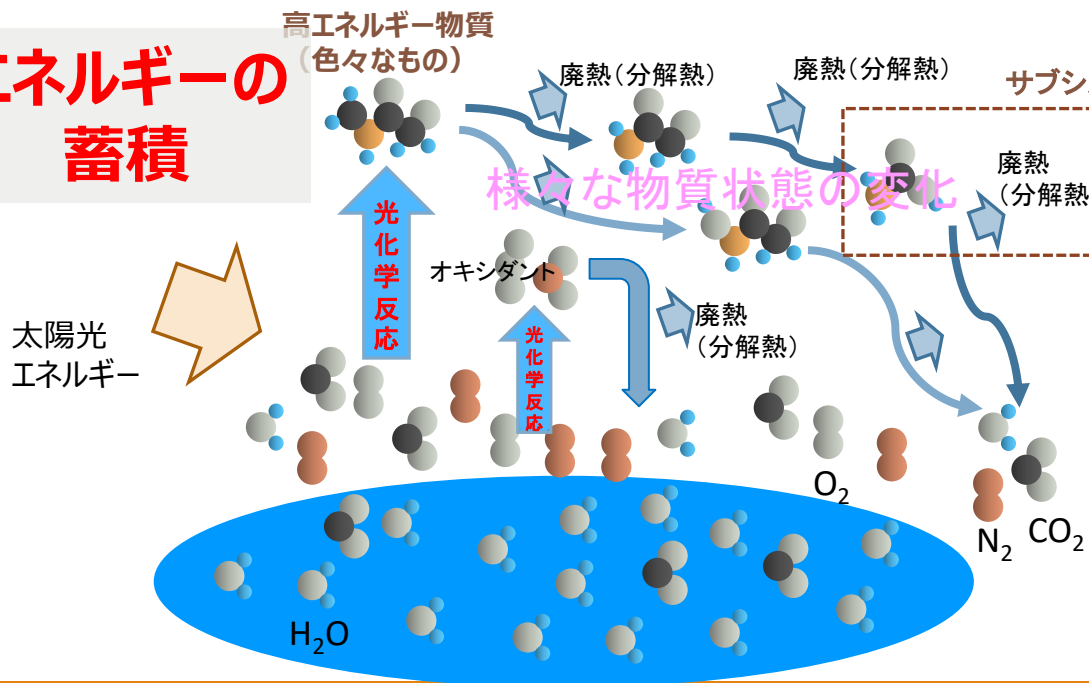


エネルギーの蓄積

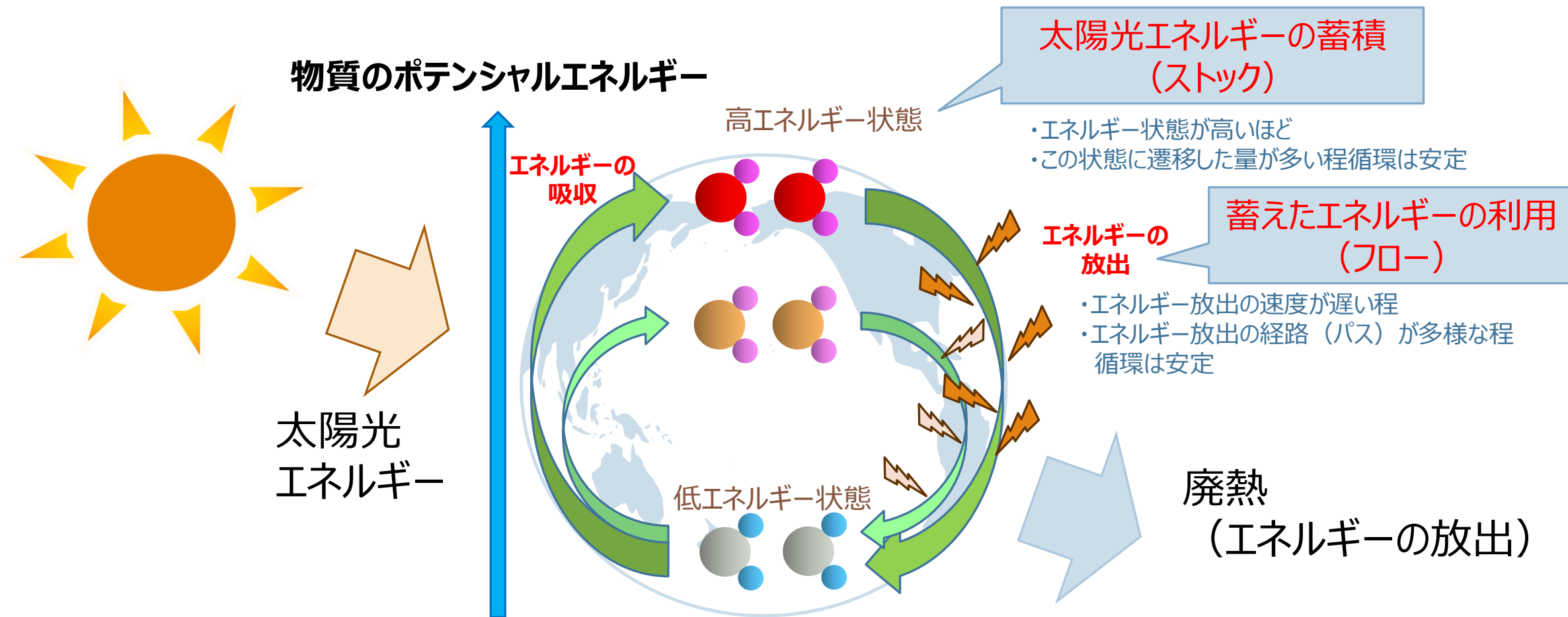
エネルギーの放出

地表の物質と太陽光との相互作用で生成した高エネルギー物質が他の物質や地表の環境との相互作用で分解・再生成を繰り返す

⇒ 物質循環「システム」



太陽光エネルギーによる地上のエネルギー・物質循環

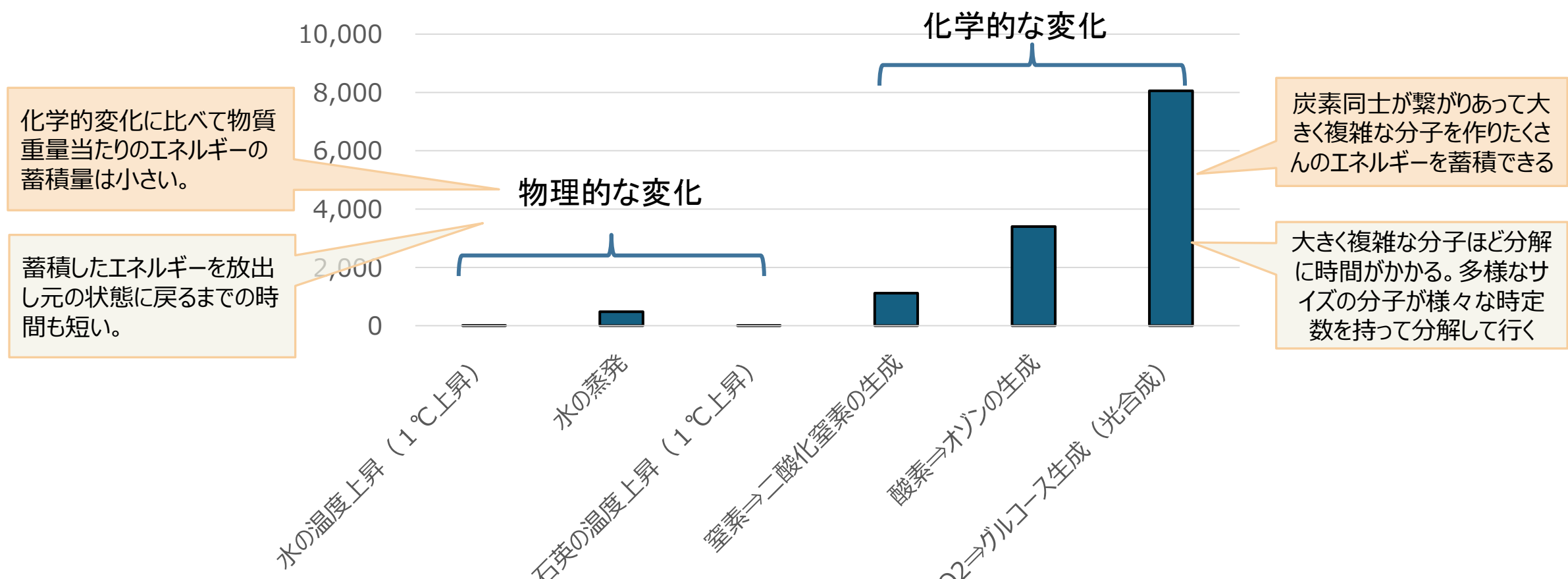


太陽光エネルギーを吸収した地表のすべての物質は高いエネルギー状態に遷移し、再び低いエネルギー状態に戻る際に蓄えたエネルギーを放出して様々な「仕事」をする。

このエネルギー循環を安定に永続させること = サステナビリティの本質 では？

同一質量当たりのエネルギー蓄積能力の差

太陽光エネルギーによって物質に蓄えられるエネルギー(kJ/kg)



化学的变化に比べて物質重量当たりのエネルギーの蓄積量は小さい。

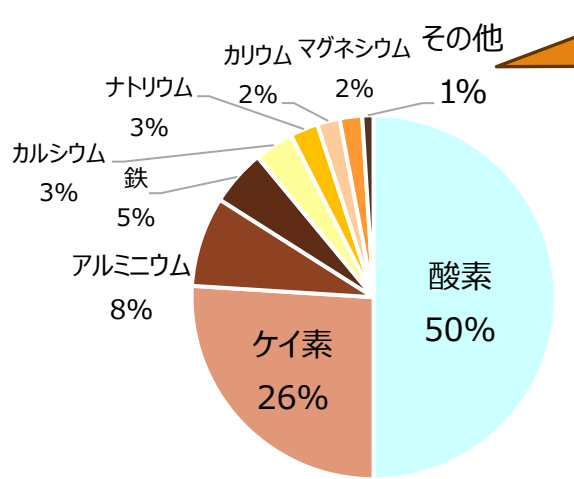
蓄積したエネルギーを放出し元の状態に戻るまでの時間も短い。

炭素同士が繋がりがあって大きく複雑な分子を作りたくさんのエネルギーを蓄積できる

大きく複雑な分子ほど分解に時間がかかる。多様なサイズの分子が様々な時定数を持って分解して行く

高分子炭素化合物による蓄エネが圧倒的に優れている

地表上の物質循環のコアとなった物質～炭素



地表上の元素重量比率 (クラーク数)

<https://ja.wikipedia.org/wiki/クラーク数>

地表上では希少な資源である炭素をキャリアとしたエネルギー循環システムが機能性・安定性からも卓越しており、他の物質循環を淘汰して生き残ったと考えられる。

うち炭素：
0.1%以下

炭素をコアとした物質を通じた
エネルギー循環が圧倒的優位

高エネルギーポテンシャル
の炭素化合物の蓄積

太陽光
エネルギー

炭素骨格の
高分子を
光合成

徐々に分解しつつ
エネルギー放出

⇒生命の「本質的」役割は
太陽光から得たエネルギーの
地上における「安定な循環」を
行うことである。

CO₂

多様でレジリエントな
エネルギー消費パス

CO₂

物質循環に伴うエネルギー蓄積

物質のポテンシャルエネルギー



エネルギー循環システムにおける炭素の役割

- ✓ 大量のエネルギーをその化合物中に蓄えることが可能なため、炭素をコアとした物質循環によって安定なエネルギー循環システムが形成され生命となった。
- ✓ 人間もまたこのエネルギー循環システム内を流れるエネルギーフローを利用して生命活動を行っている。
- ✓ エネルギー循環フローを安定にするためには、蓄積されているエネルギー量（ストック）がフローに比べて大きいことが重要。このエネルギーストックこそが生命のダイナミクスの源泉である「自然資本」なのではないか？
- ✓ 人間の活動を炭素の循環ではなく「炭素を媒介としたエネルギーのストックとフロー」という観点で考えて見ることにする。
- ✓ 炭素という優秀なエネルギー蓄積・輸送媒体を上手に活用するという観点から21世紀のライフスタイルの見直しのきっかけが作られるのではないか？

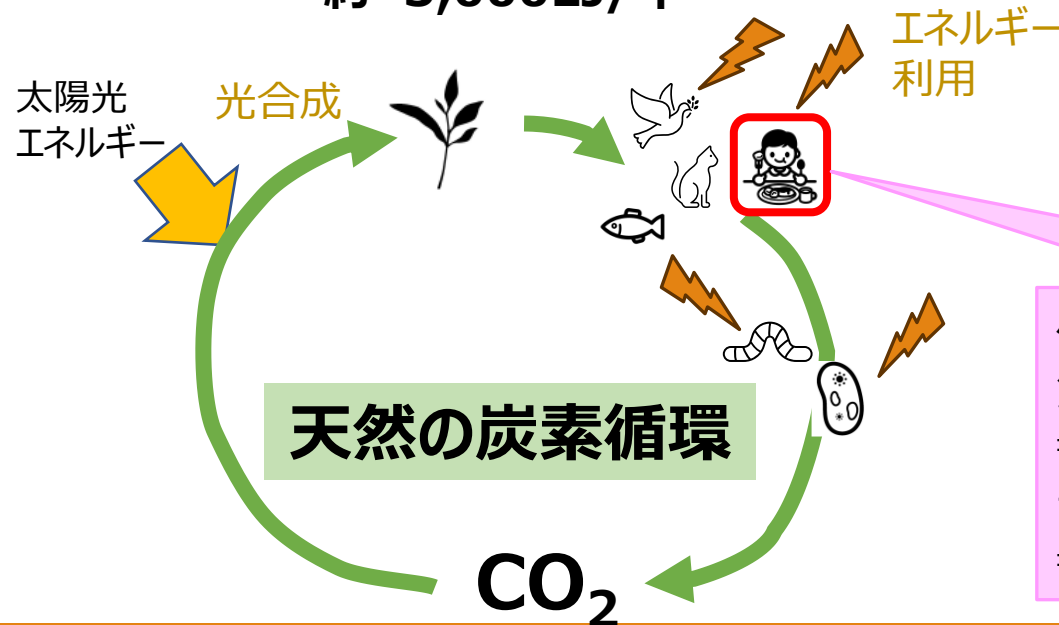
エネルギー循環サブシステムとしての人体のストックとフロー

物質のポテンシャルエネルギー

生物に取り込まれている地球上の炭素総重量
550GtC
そこに蓄積されているエネルギー（ストック）
約10,000EJ
年間の光合成量に伴うエネルギー蓄積（フロー）
約 3,000EJ/年

「生きる」とは地上で他の生物と協力して
人類がこれだけのエネルギーを循環させる
ことである。

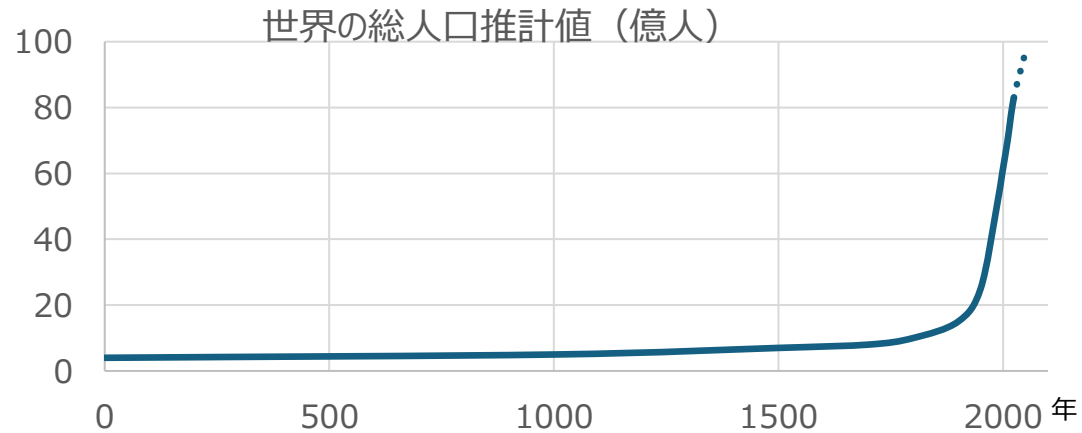
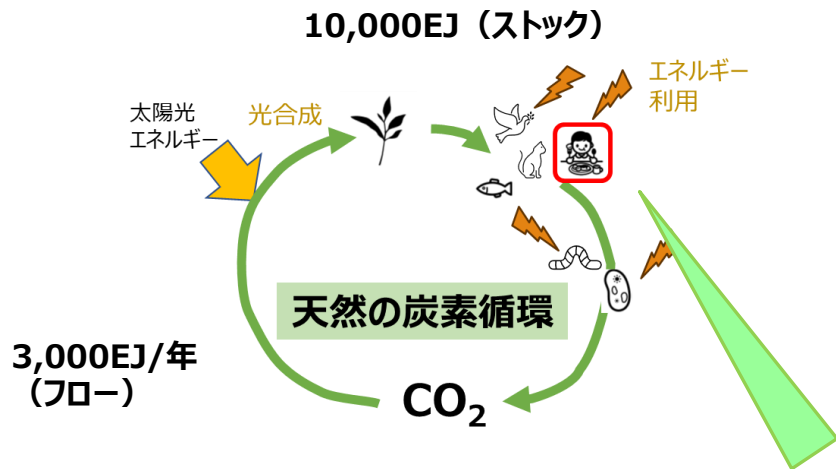
人体に蓄積されているエネルギー（ストック）
約 5.0EJ
年間の人類全体のエネルギー消費（フロー）
約 31EJ/年



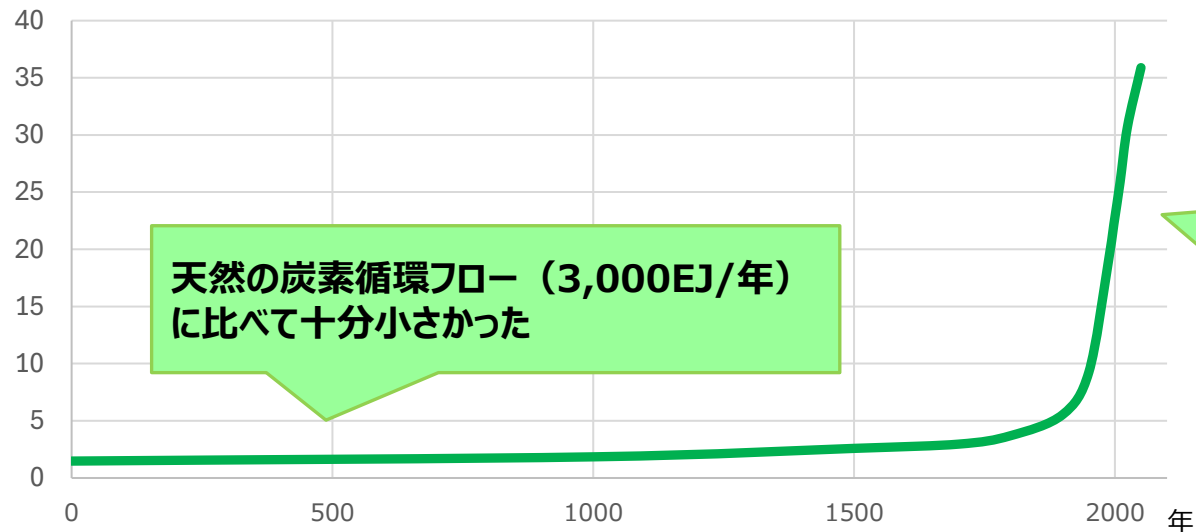
↑
×83億人で
炭素循環全体へ
人類の生存が与える
インパクトを見る

体重60kgの成人男性（18wt%脂質・蛋白質・0.5wt%炭水化物）
⇒蓄積エネルギー **0.6GJ/人**
一日の必要エネルギー摂取量 2500kcal/日
⇒ **3.8 GJ/人・年** 栄養学のデータより計算

人口の激増による天然の炭素循環の乱れ



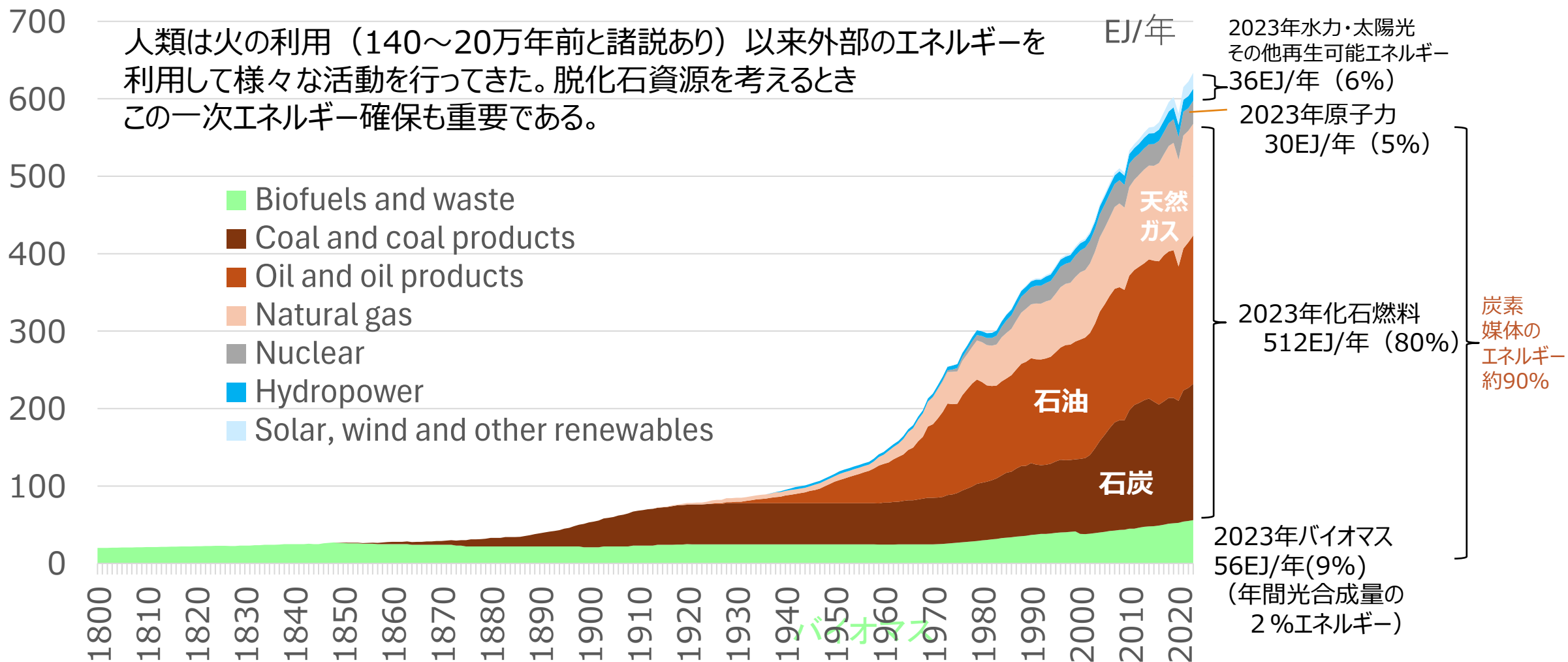
人類全体が食物から得るエネルギー消費量 (×EJ/年)



天然の炭素循環フロー (3,000EJ/年) の1%程度まで増大。その分生産量 (光合成量) を増やさないと、生態系にストックされている10,000EJを取り崩すこととなる

食料問題も見方を変えるとエネルギー循環の問題では？

人類の一次エネルギー利用



International Energy Agency total energy supply by source in World (1971～)
Smil (2017) 1800～1970

人類のエネルギー利用(2023年)

物質のポテンシャルエネルギー

現在の人類の抱える問題の本質は気候変動などではなく、地球が長年かけて蓄積した過去のエネルギー資産(ストック)を一気に食い潰しているところにあるのではないか？

地球が長期に渡って蓄えたエネルギーの遺産

エネルギーポテンシャル極めて高いが人類には安定した取り扱い難しい**ストック**？
(同一重量当たりで化石燃料の200万倍のエネルギーストック)

地中の化石資源

生物資源よりは高いエネルギーポテンシャルかつ扱いやすい**ストック**

掘削・輸送。精製にエネルギー投入

核燃料

化石燃料供給量
512EJ/年

化石燃料

大量の廉価で利便性の高いエネルギー
(経済活動に有効に活用)

一次エネルギー供給量
634EJ/年

再エネ(6%)
原子力(5%)

拡大

化石資源
(80%)

バイオマス(9%)

拡大

原子力からのエネルギー供給量
30EJ/年

核廃棄物

太陽光エネルギー

光合成

年間光合成量
3,000EJ

10~100年と比較的短期であるがこちらでもエネルギーストックを利用している

人類の利用分は光合成量の数%であるが生態系の微妙なバランスを崩しやすい

バイオマス燃料供給量
56EJ

エネルギー循環量は膨大であるがエネルギー密度低く取り出して蓄積するのは容易でない
(経済的で高効率な**ストック**技術要)

エネルギー循環
(大気・水...)

再エネ供給量
36EJ

CO₂

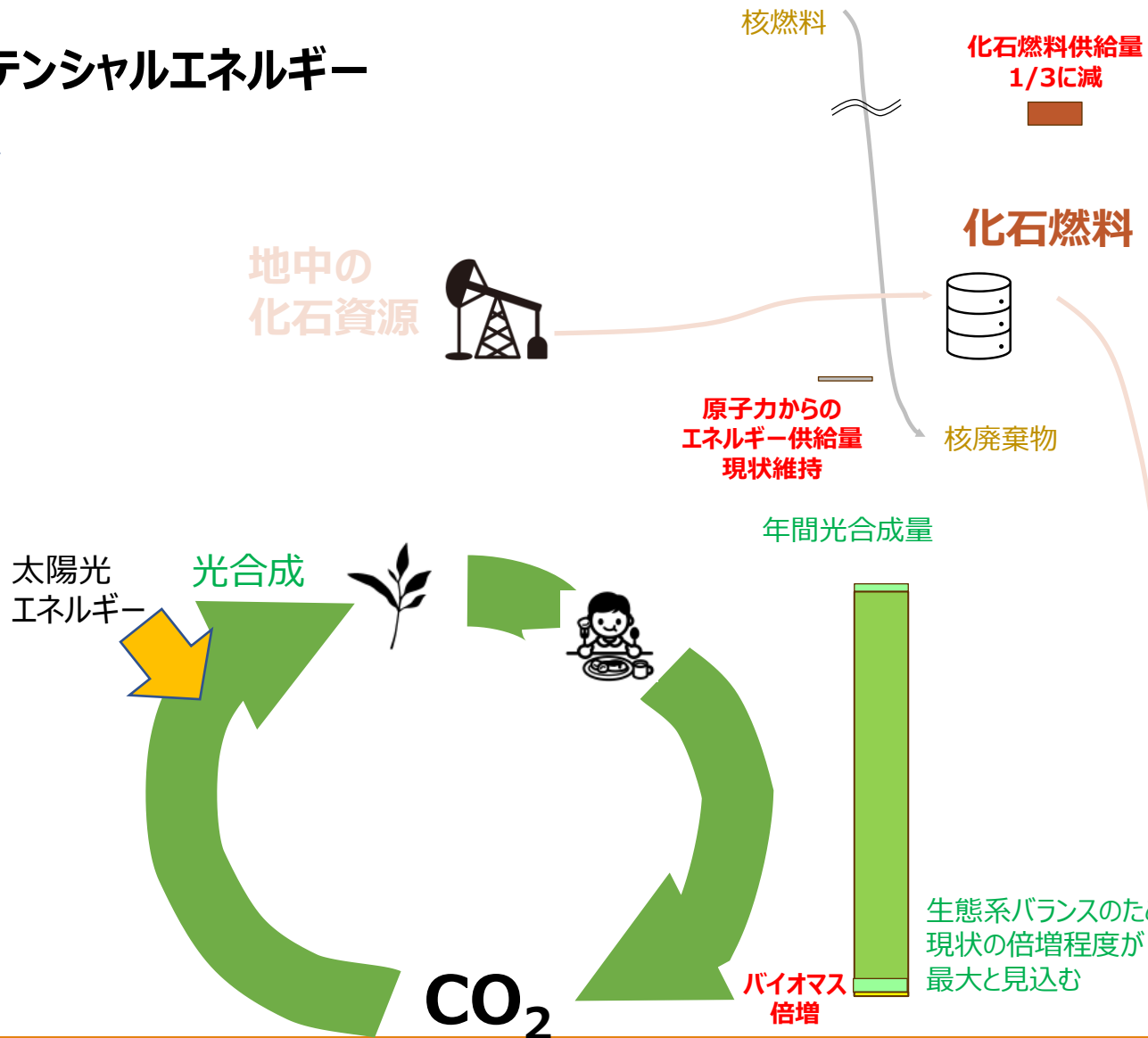
CO₂

将来のエネルギー利用シナリオ例

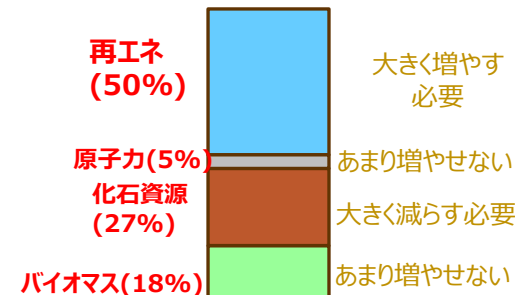
物質のポテンシャルエネルギー

過去の遺産で道楽三昧
 ⇒そろそろ資産も尽きて来た
 ⇒真面目に働く(自分に必要なエネルギーは自分で稼いで貯める)
 ⇒稼げそうな場合は再生可能エネルギーの領域

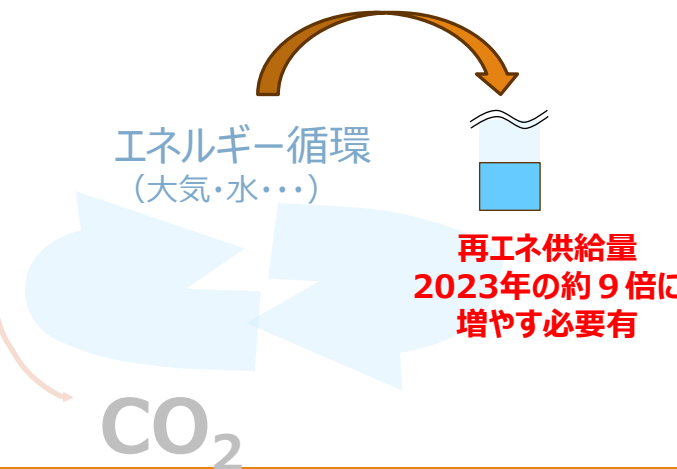
だがうまく行くのか？



一次エネルギー供給量 2023年同等とする



人間が使える形のエネルギーとして取り出し蓄積する技術が必要



再エネ活用拡大のシナリオ

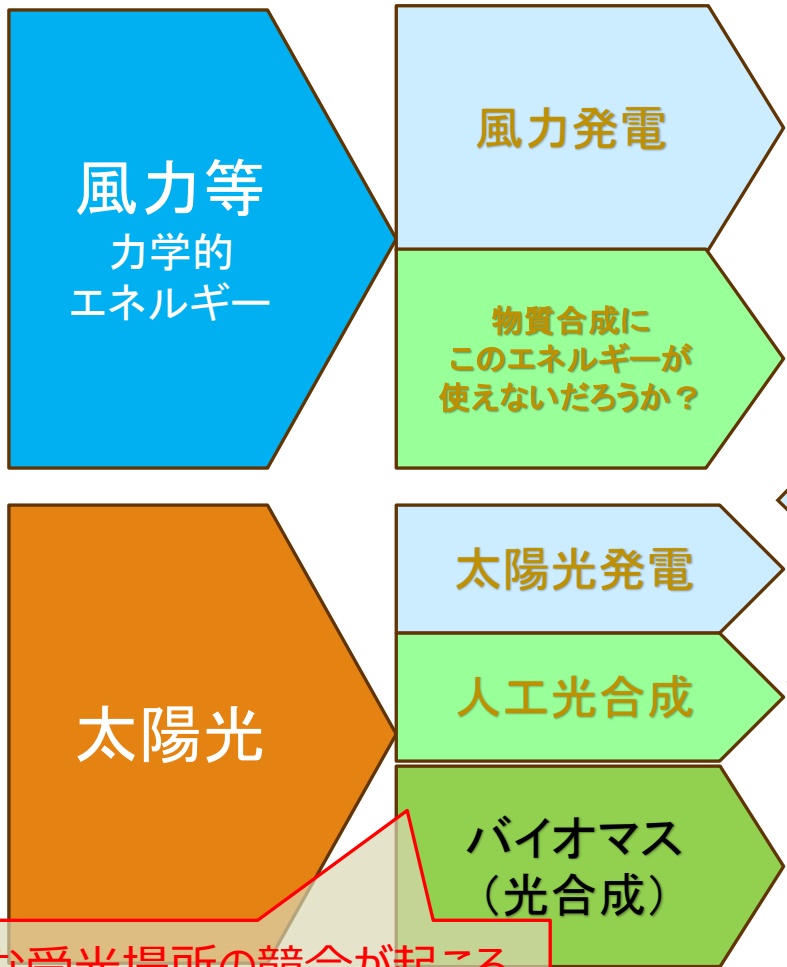
地表に注ぐ太陽光のエネルギーは確かに膨大ではあるが

人間が利用できるエネルギー形態に変換して取り出し

エネルギーを効率的に蓄積できることが必要である。

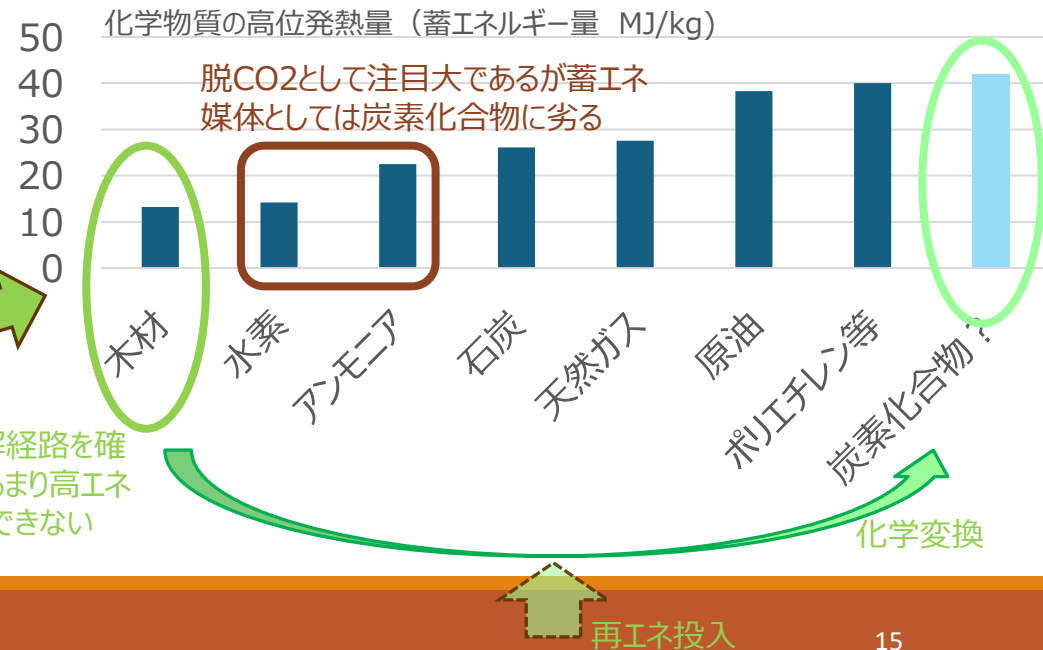
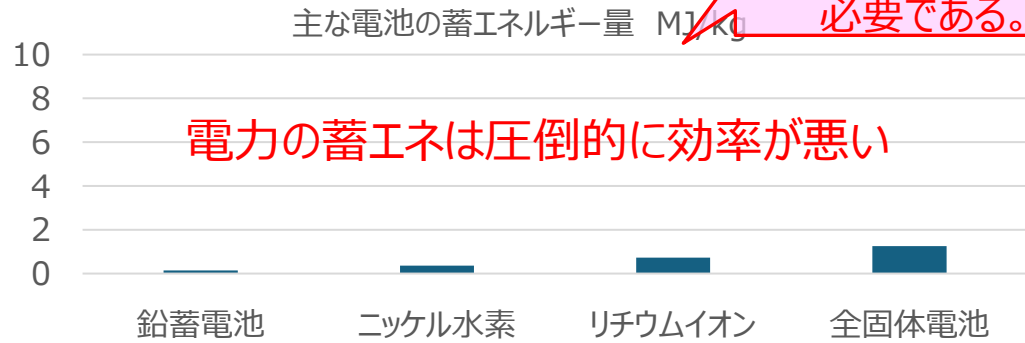
一次エネルギー

蓄エネ可能な形態にエネルギー転換



良好な受光場所の競合が起こる (ソーラーシェアリングに配慮要)

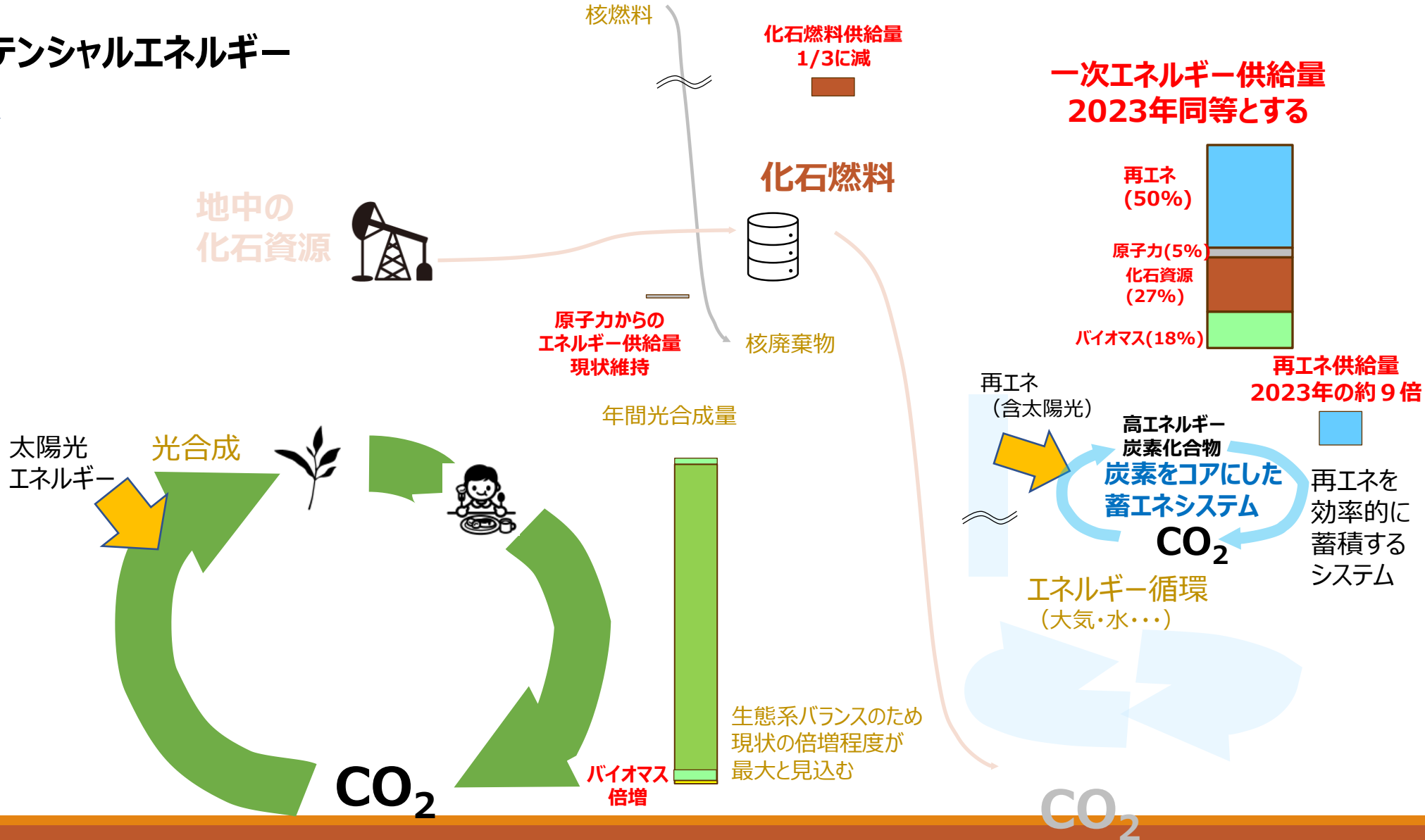
圧倒的に蓄エネ能力に優れる炭素にこれからも頼るしかないのでは？



再エネが効率的に利用できるには「蓄エネ」システムが必須

物質のポテンシャルエネルギー

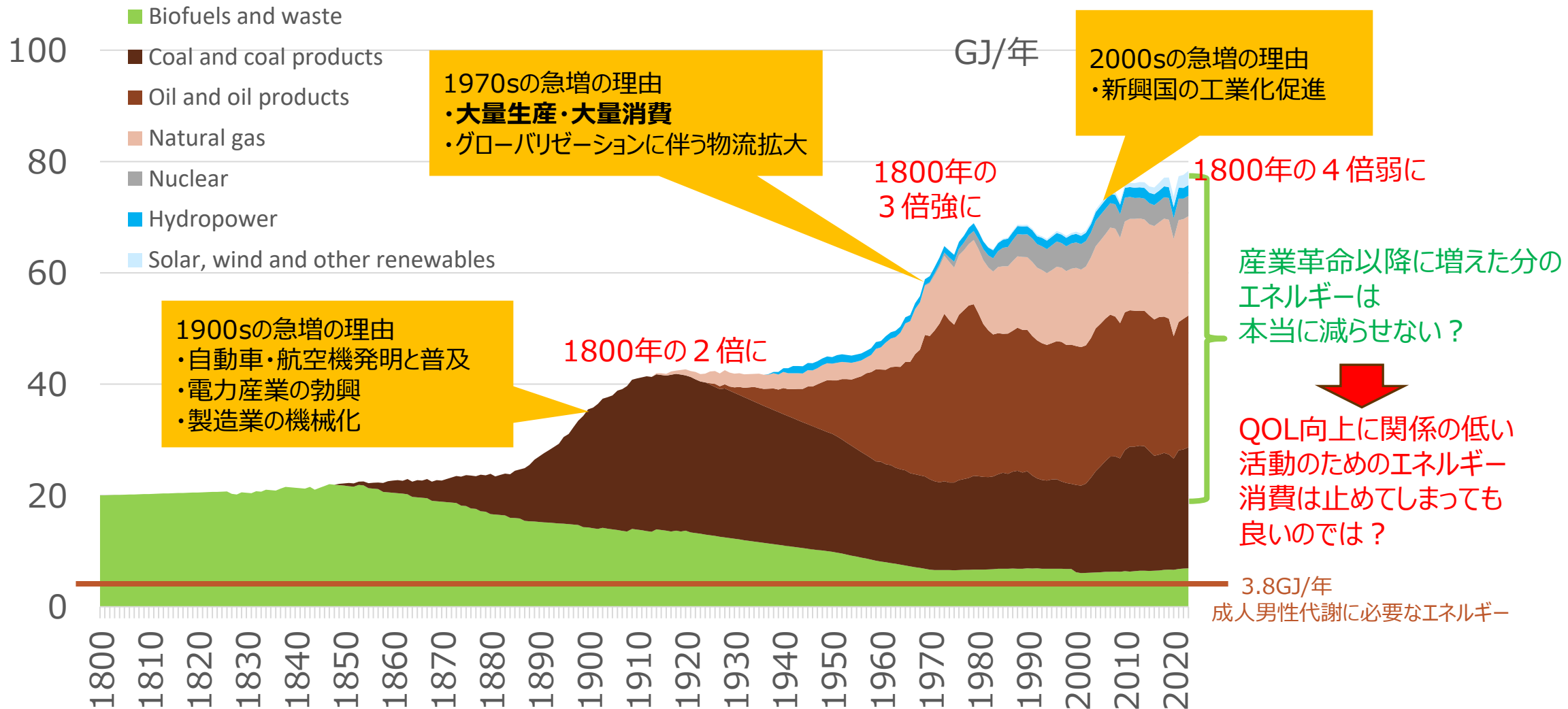
生命が地表では希少な資源である炭素を効率的なエネルギーストックのために活用したのと同様、人類の再エネの効果的活用のためには**炭素をコアとした人工蓄エネシステム**の存在が極めて重要である。



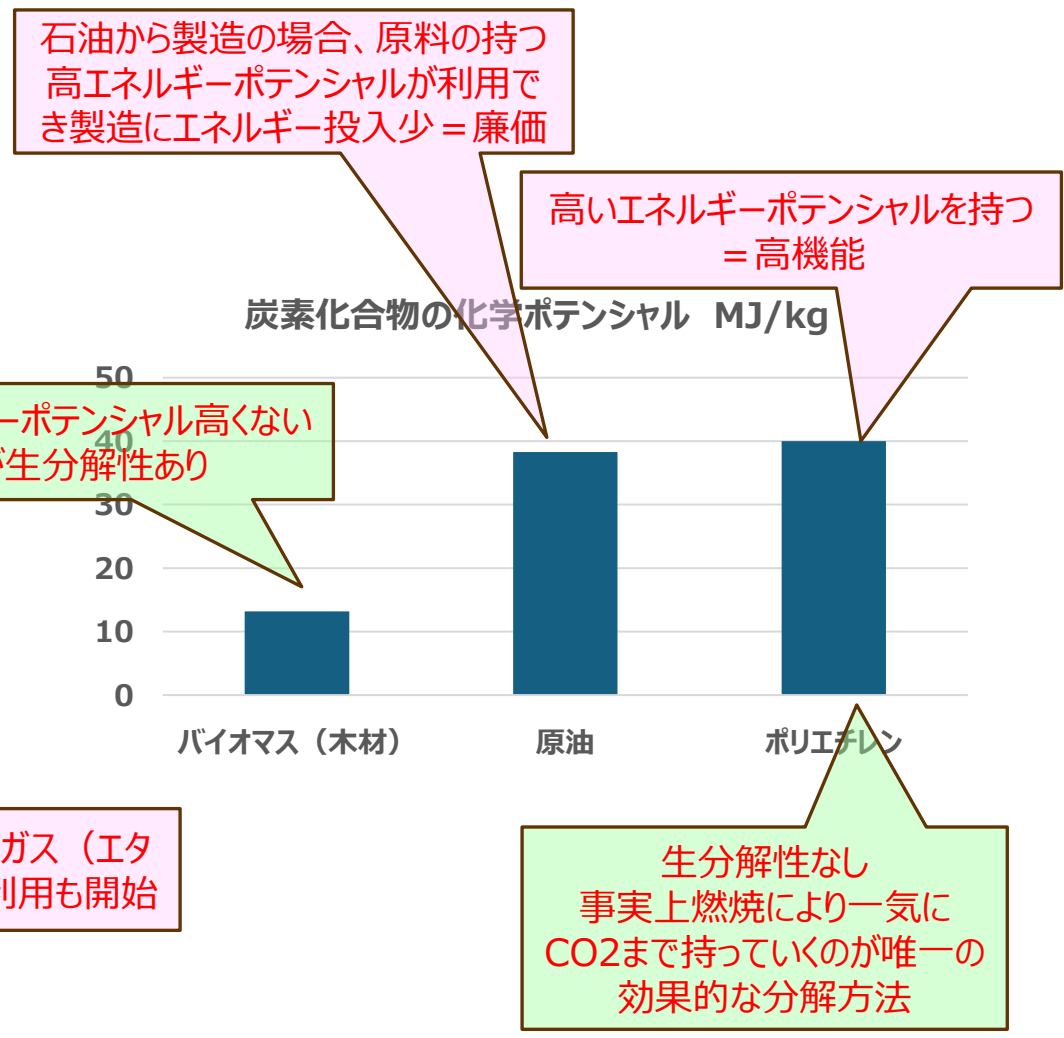
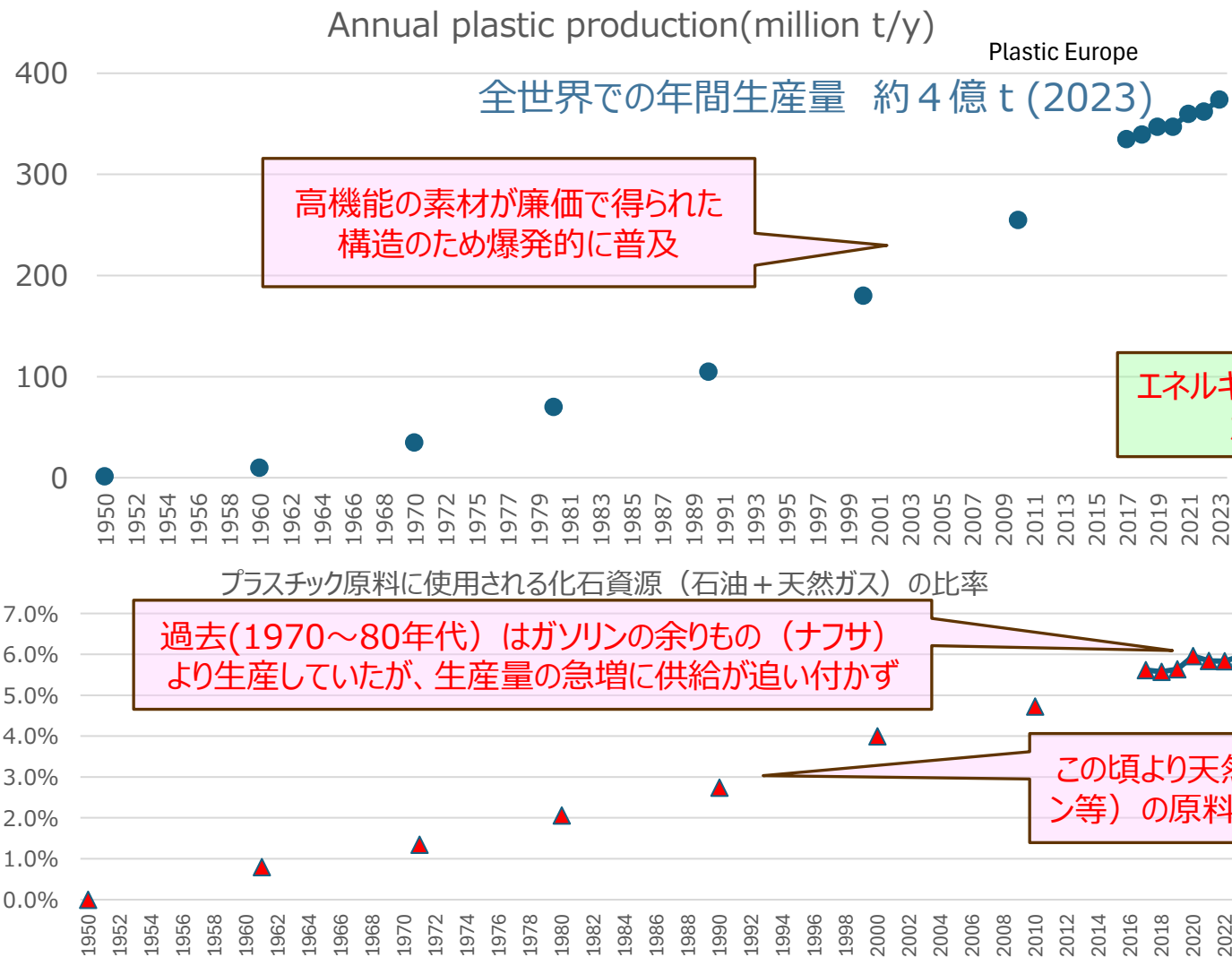
人類のエネルギー利用の観点からみた炭素循環

- ✓ 産業革命以降の人口爆発により人類が生存に利用するエネルギー消費は爆発的に増大。まだ生態系のエネルギー循環量の数%程度ではあるが循環のバランスの崩れにより炭素化合物として蓄積されたエネルギーのストック（自然資本？）が毀損されるリスクは高まっている。
- ✓ 一次エネルギーとして80%を化石資源に依存（2023）。これは地球が過去に蓄積したエネルギーストックを食い潰している状態でサステナブルでない。
- ✓ 化石資源を大きく減らし、なお一次エネルギーの需要が減らせないとすると、再エネの供給量を大きく増やす必要あり。そのためには太陽光エネルギーや大気・水循環エネルギーを蓄積可能なエネルギーに転換し、それを蓄積する効率的なシステムを構築する必要がある。
- ✓ このエネルギーシステム構築においても炭素の存在は重要であると思われる。
- ✓ **だが一次エネルギー消費は本当に減らせないのか？**

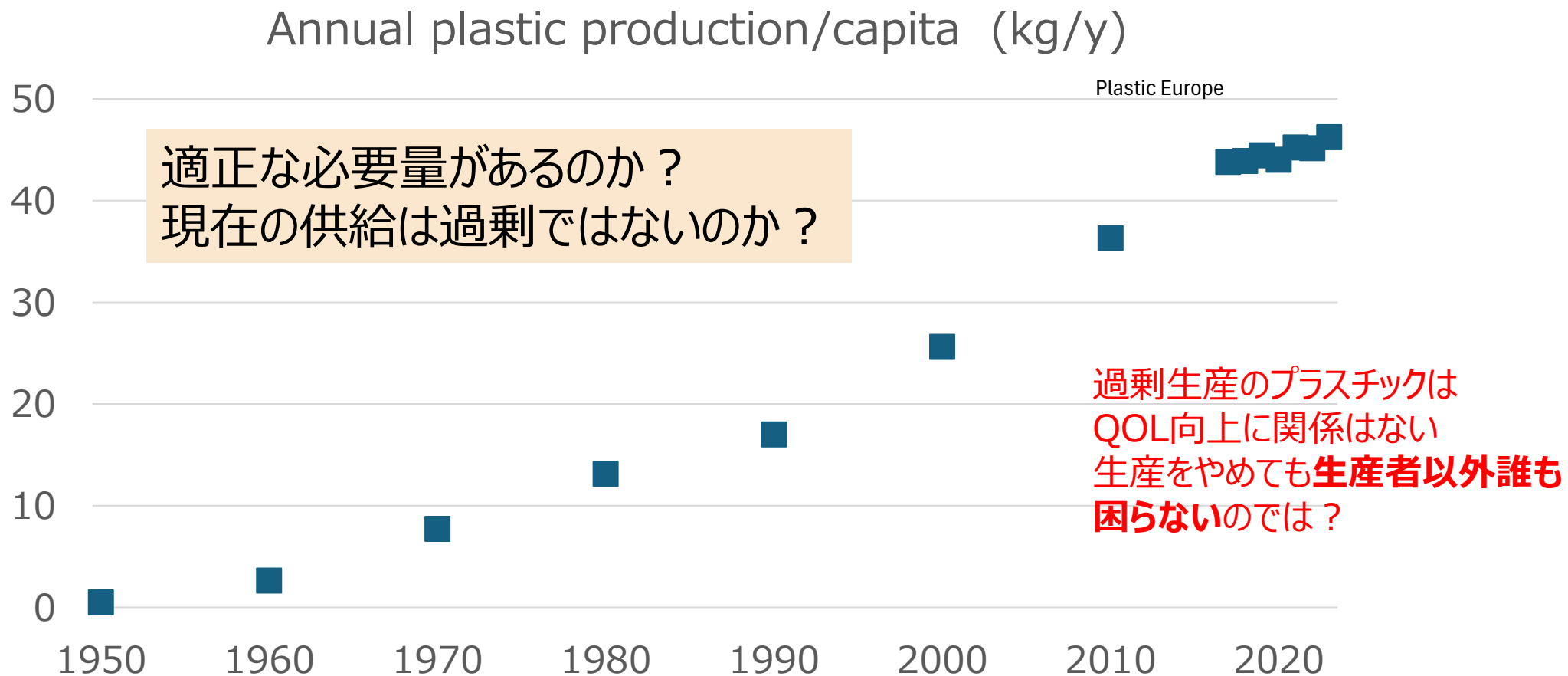
人口1人当たりエネルギー消費量推移



炭素利用の新しい形態 プラスチック

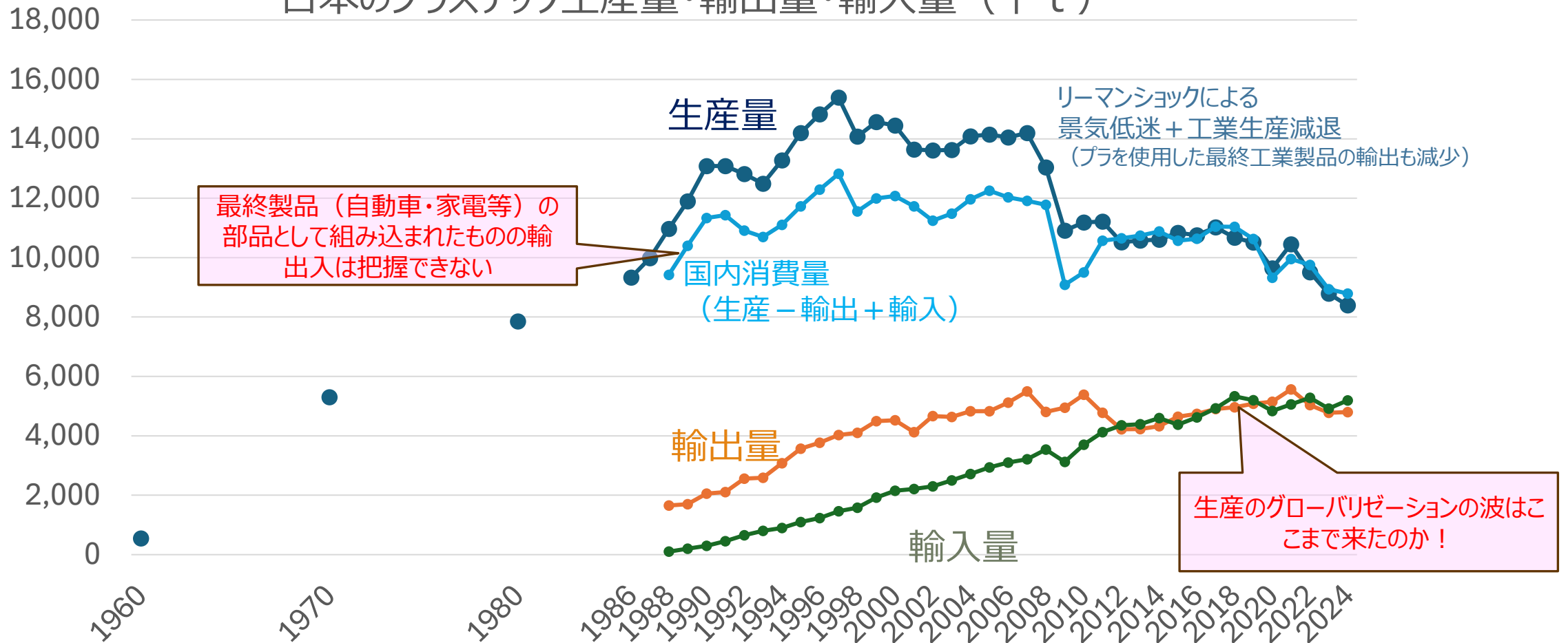


世界のプラスチック生産量 人口1人当たり



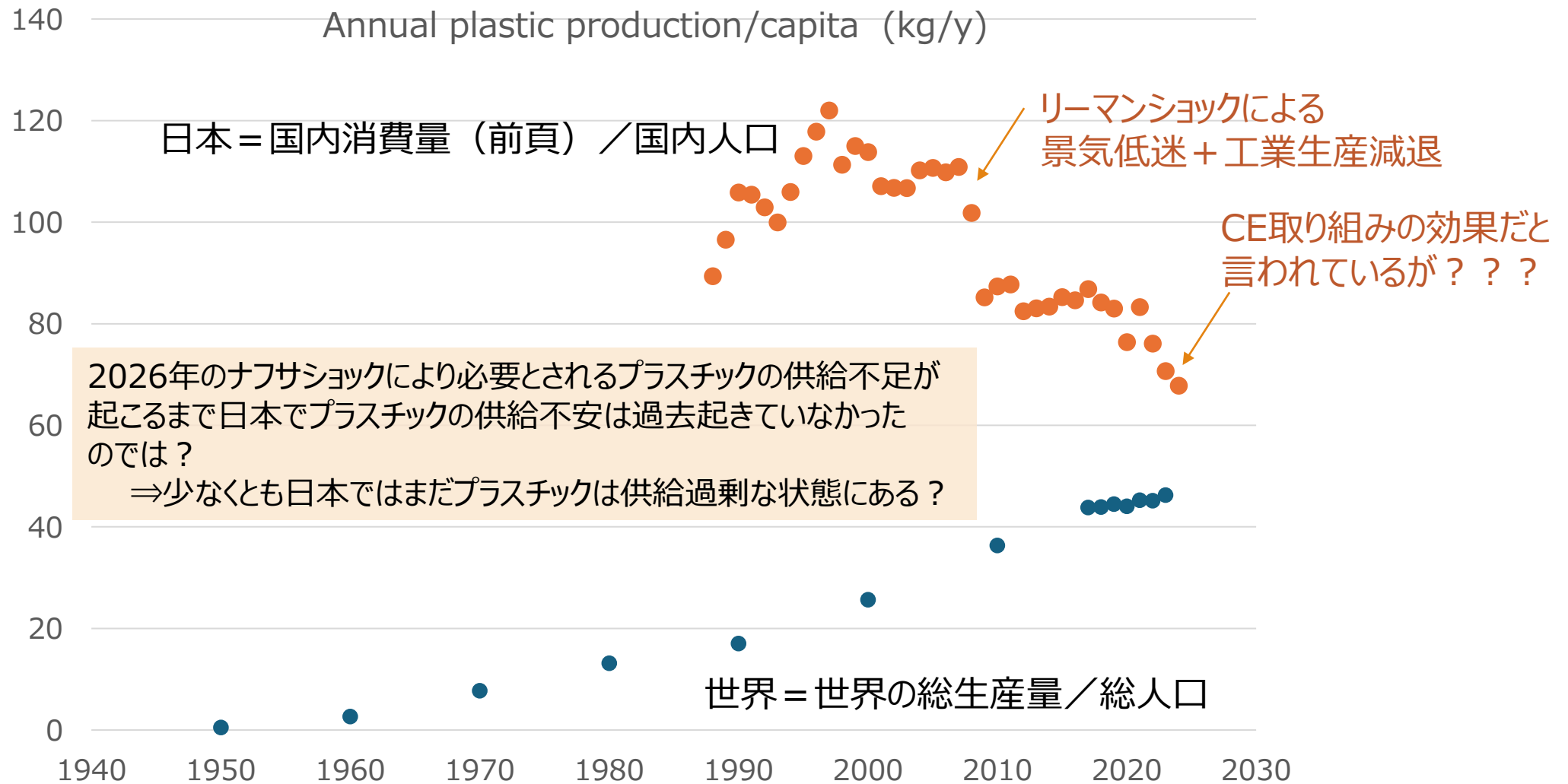
日本のプラスチック生産量

日本のプラスチック生産量・輸出量・輸入量（千 t）



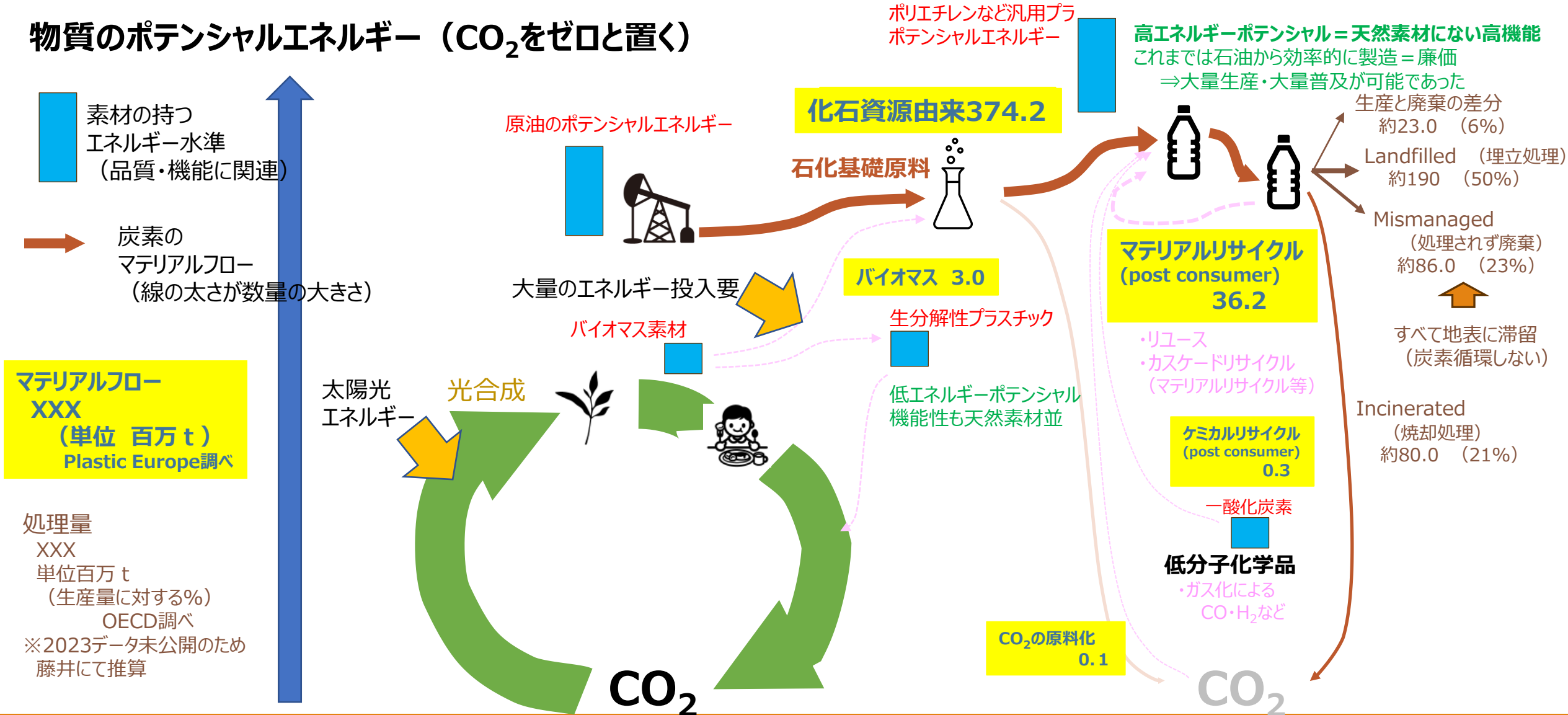
輸出量・輸入量については貿易統計をもとにプラ工連まとめ。プラスチック及びその加工品

プラスチック使用量 人口1人当たり



プラスチックのマテリアルフロー（2023 世界）

物質のポテンシャルエネルギー（CO₂をゼロと置く）



生物系の炭素循環とプラスチックの炭素フロー

物質のポテンシャルエネルギー

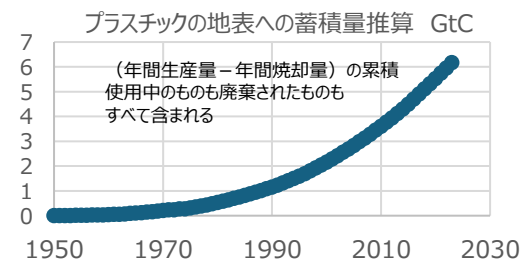
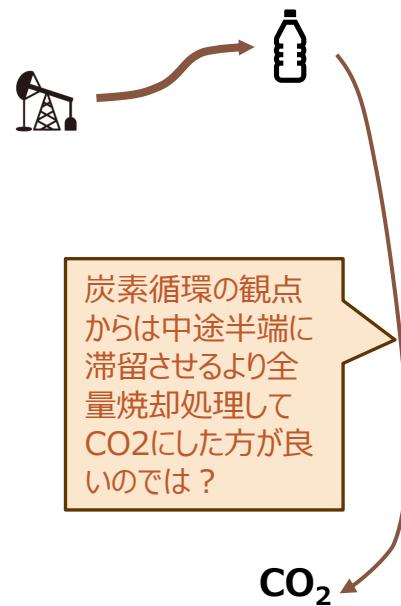
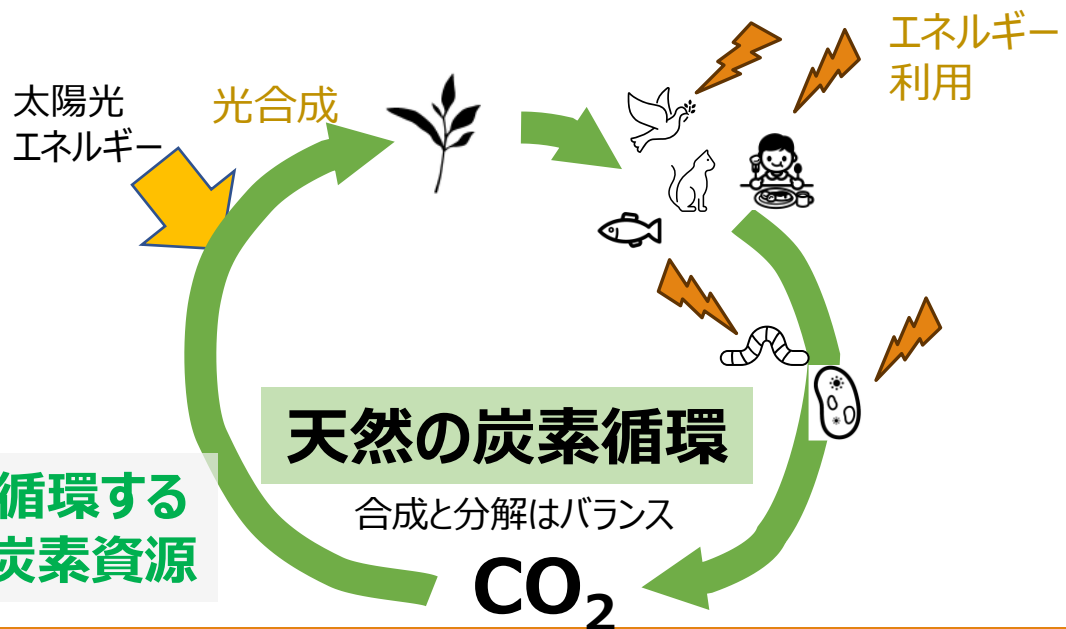
生物に取り込まれている地球上の炭素総重量
550GtC

そこに蓄積されているエネルギー量 (ストック)
約10,000EJ
年間の光合成量に伴うエネルギー蓄積 (フロー)
約 3,000EJ/年

プラスチックとして地表に蓄積している炭素重量
約6.0GtC 2023推計

そこに蓄積されているエネルギー量 (ストック)
約150EJ
年間の焼却によるエネルギー放出 (フロー)
約3EJ/年 2023推計

CO2換算で220億トンを貯留



化石資源より得られた高エネルギー炭素化合物の滞留

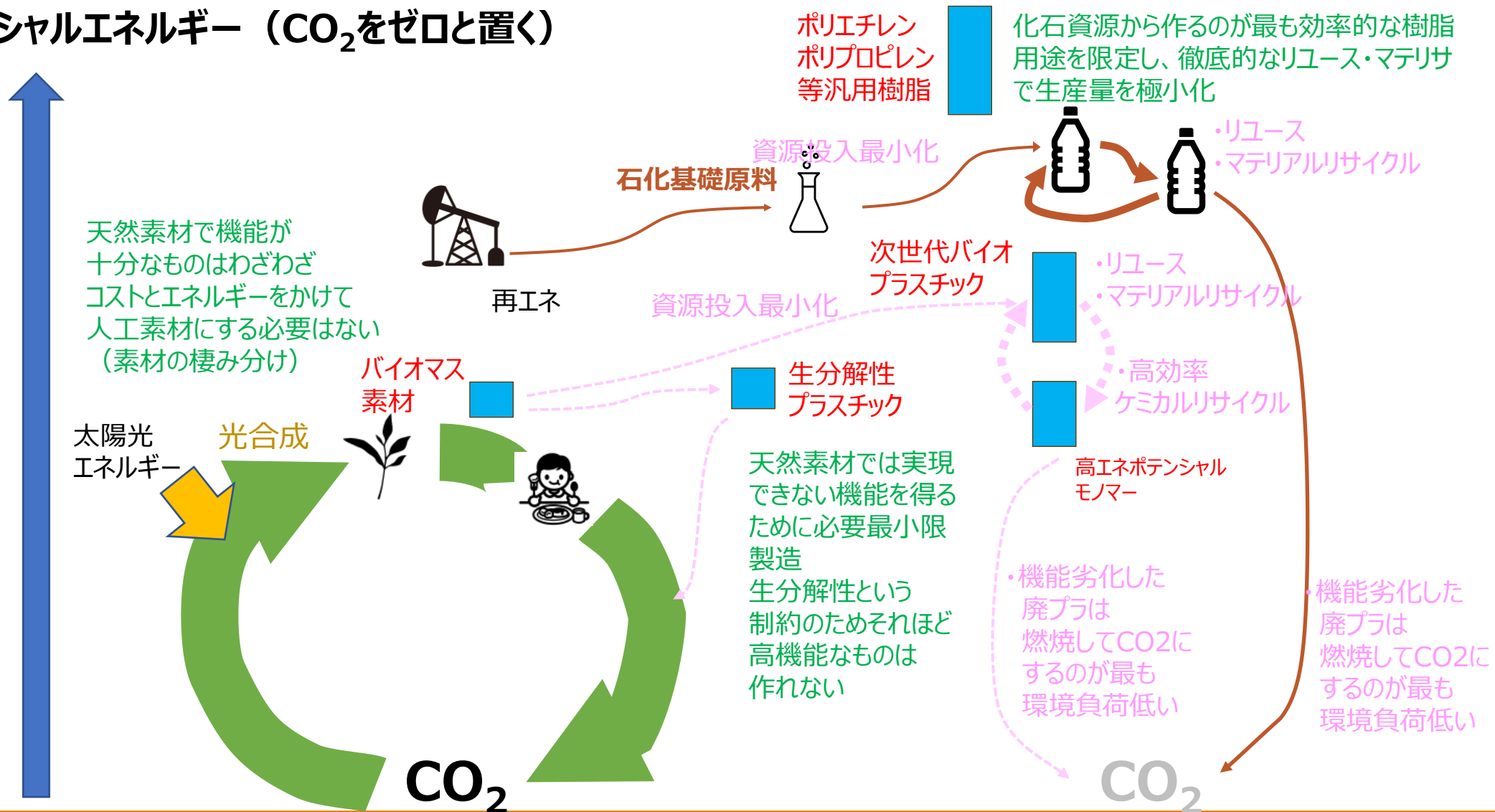
循環しない炭素資源

プラスチックの利用の観点から炭素循環を考える

- ✓ 化石資源の高いエネルギーポテンシャルを活かして高機能な新素材（プラスチック）が廉価で大量に供給できる構造が1970年代に形成された。
- ✓ 廉価で大量に製造できたために過剰供給となる。天然素材のシェアを奪い、また過剰包装等必要性の低い用途拡大を通じて過剰供給分を消費。
- ✓ 過剰供給はまた大量のプラゴミ問題を引き起こす。高エネルギーポテンシャルな物質のため容易に分解せず、過去生産分が環境中に蓄積している。
- ✓ 化石資源が原料として使えなくなったとき、バイオマス等他の炭素源から現在のような高機能なプラスチックを製造するには莫大なエネルギー投入が必要。現在のような廉価で大量生産ができる構造は成り立たなくなるであろう。
- ✓ 必要な機能を満足する（過剰品質でない）プラスチックを必要最小限生産し、できるだけ長く大切に使用して廃棄量を大きく減らすのが唯一の答？
- ✓ 高エネルギーポテンシャルのため容易に分解しない廃プラ。炭素循環の観点からは焼却してCO₂にするのが最適解。

プラスチックの将来シナリオ例

物質のポテンシャルエネルギー（CO₂をゼロと置く）



まとめ

- ✓ 気候変動問題への対策として、大気中のCO₂濃度をこれ以上増加させないために「脱炭素」が注目されているが、そもそも生命が地表では希少な「炭素」の利用を前提としているため、生命の存続においては「脱炭素」は不可能。
- ✓ 特に太陽光からエネルギーを取り出し蓄積する能力は炭素が圧倒的に高い。一次エネルギーが大量に必要な未来社会においても、炭素化合物を媒介としたエネルギー循環利用システムは必須となるものと考えられる。
- ✓ 炭素利用形態のひとつとして1960年代以降に登場したプラスチックは原料の化石資源の持つ高いエネルギーポテンシャルを強みに素材として高機能で廉価であったため爆発的に普及。過剰品質・過剰供給の状態が続いている。
- ✓ プラスチック原料に化石資源が使えなくなると、これまで通りの高機能を維持するためには製造に大量のエネルギー投入が必要。廉価で大量に供給することは不可能になる。過剰品質・過剰供給から決別した新たなビジネスモデルで価値の高いプラスチックを必要最小限提供する形に変化は不可避？