2023年5月26日

木材の効率的な利用と環境貢献

藤井　実
国立環境研究所社会システム領域・システムイノベーション研究室・室長
名古屋大学大学院環境学研究科・客員教授
東京大学大学院新領域創成科学研究科・客員教授

m-fujii@nies.go.jp

カーボンニュートラルに貢献する木材資源リサイクル
～サーマル利用におけるCO2削減効果について～
認定NPO法人全国木材資源リサイクル協会連合会
カーボンニュートラルワーキンググループ

報告書のまとめ

- 現在の建設系廃木材等のサーマル利用によるCO_2排出量は、森林及び木材としての炭素蓄積量が定常に維持されていれば、森林のCO_2吸収量と概ね等価になるため、化石燃料の代替効果分だけCO_2排出の削減に寄与している。
- 今後、Life Cycle GHG（ライフサイクルでの温室効果ガス排出量）分析に基づき、植林・育林・伐採から廃棄までのGHG収支の定量化を進めたい。

AR6 統合報告書 政策決定者向け要約（抜粋）

A.2 大気、海洋、雪氷圏、及び生物圏に広範かつ急速な変化が起こっている。人為的な気候変動は、既に世界中の全ての地域において多くの気象と気候の極端現象に影響を及ぼしている。このことは、自然と人々に対し広範な悪影響、及び関連する損失と損害をもたらしている（確信度が高い）。現在の気候変動への過去の寄与が最も少ない脆弱なコミュニティが不均衡に影響を受ける（確信度が高い）。

B.5 人為的な地球温暖化を抑制するには、正味ゼロのCO_2排出量が必要である。温暖化を1.5℃又は2℃に抑制しうるかは、主に正味ゼロのCO_2排出を達成する時期までの累積炭素排出量と、この10年の温室効果ガス排出削減の水準によって決まる（確信度が高い）。追加的な削減対策を講じていない既存の化石燃料インフラに由来するCO2排出量は、1.5℃（50%）の残余カーボンバジェットを超えると予測される（確信度が高い）。

環境省地球環境局国際連携課（2023）

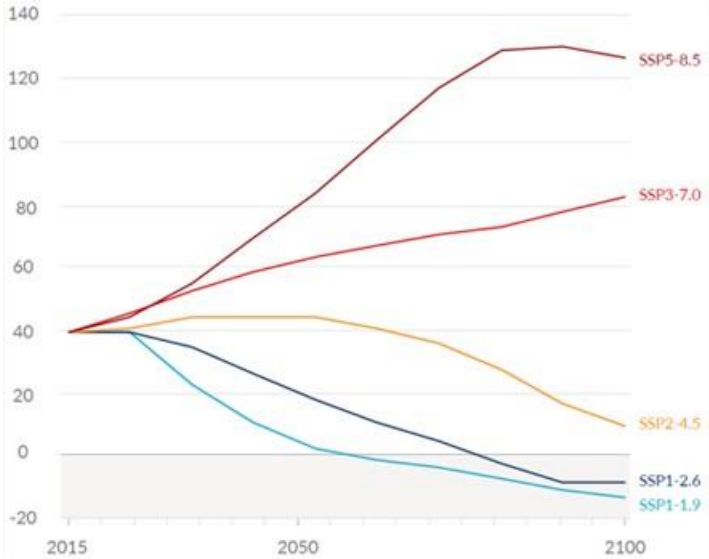
AR6 統合報告書 政策決定者向け要約（抜粋）

C.1 気候変動は人間の幸福 と惑星の健康に対する脅威である（確信度が非常に高い）。全ての人々にとって住みやすく持続可能な将来を確保するための機会の窓が急速に閉じている（確信度が非常に高い）。気候にレジリエントな開発は、適応と緩和を統合することで全ての人々にとって持続可能な開発を進展させ、特に脆弱な地域、部門及び集団に向けた十分な資金源へのアクセスの改善、包摂的なガバナンス、協調的な政策を含む国際協力の強化によって可能となる（確信度が高い）。この10年間に行う選択や実施する対策は、現在から数千年先まで影響を持つ（確信度が高い）。

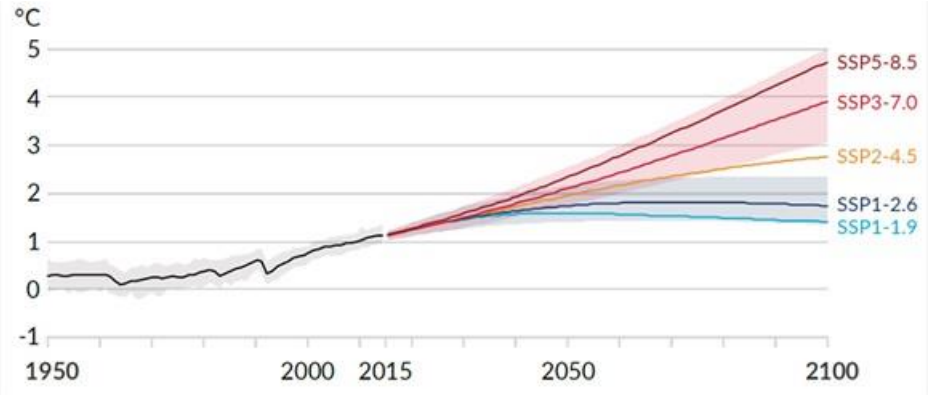
C.3 大幅かつ持続的な排出削減を達成し、全ての人々にとって住みやすく持続可能な将来を確保するためには、全ての部門及びシステムにわたる急速かつ広範囲に及ぶ移行が必要である。これらのシステム移行は、緩和と適応のオプションの広範なポートフォリオの大幅なアップスケールを伴う。実現可能で、効果的かつ低コストの緩和と適応のオプションは既に利用可能だが、システム及び地域にわたって差異がある。（確信度が高い）。

環境省地球環境局国際連携課（2023）

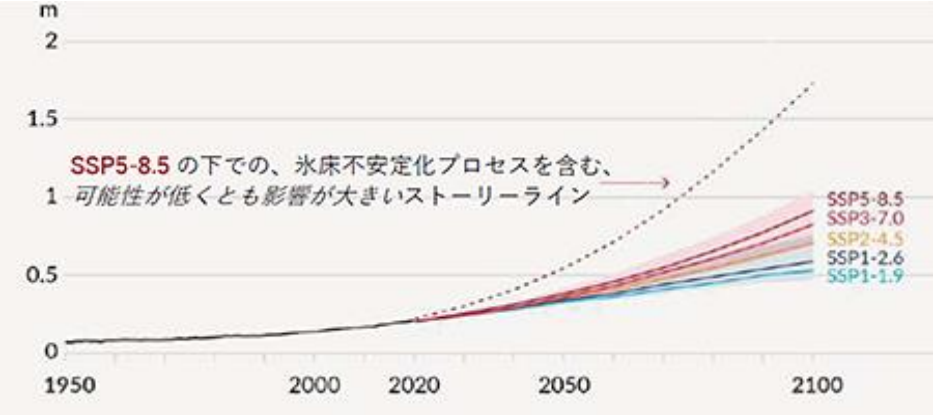
将来の気候変動



5つの例示的なシナリオにおける二酸化炭素の将来の年間排出量（GtCO2/年）（IPCC WG1 AR6 Figure SPM.4aより）



1850−1900年を基準とした世界平均気温の変化（IPCC WG1 AR6 Figure SPM.8aより）



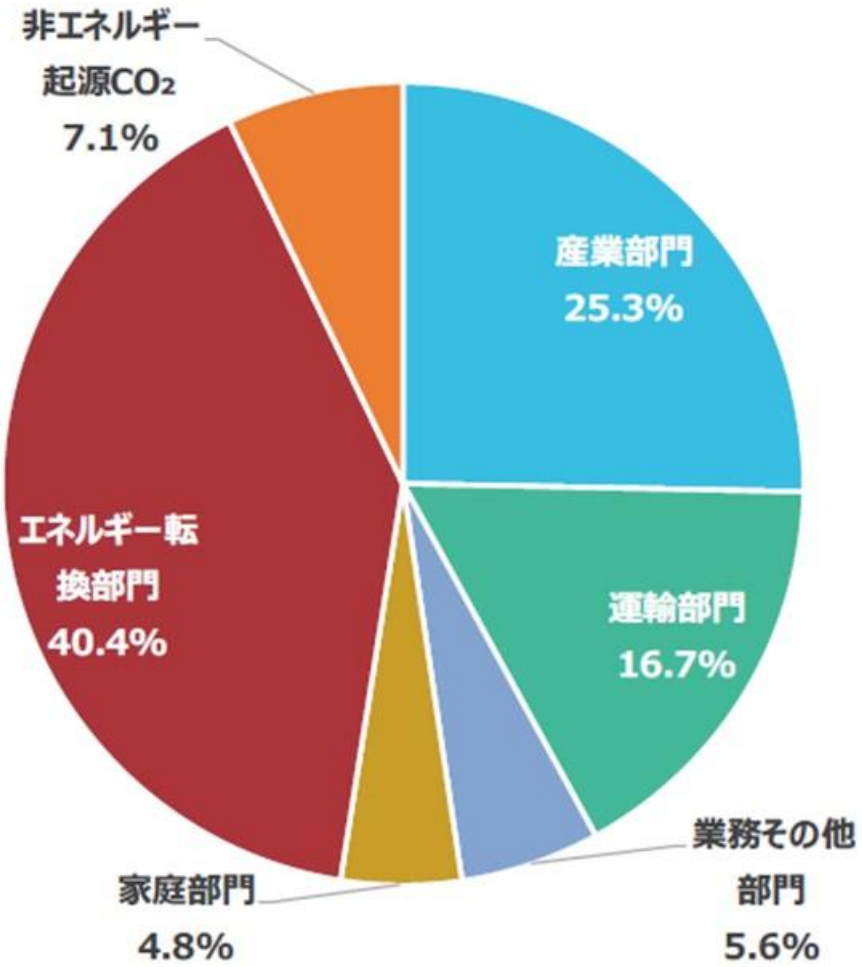
1900年を基準とした世界平均海面水位の変化（IPCC WG1 AR6 Figure SPM.8d気象庁暫定訳より）

「非常に高い」シナリオでは・・もしも南極大陸の氷床が不安定化して崩壊が始まると・・・例えば2300年には南極氷床の不安定化がある場合は15mの上昇もありうるとされました。・・・現時点の科学では不確かですが、生じる可能性を排除できません。・・・もし起こった場合には重大な影響をもたらすようなリスクには、アマゾンの熱帯雨林の枯死、北大西洋の海洋深層循環の停止などがあげられます。

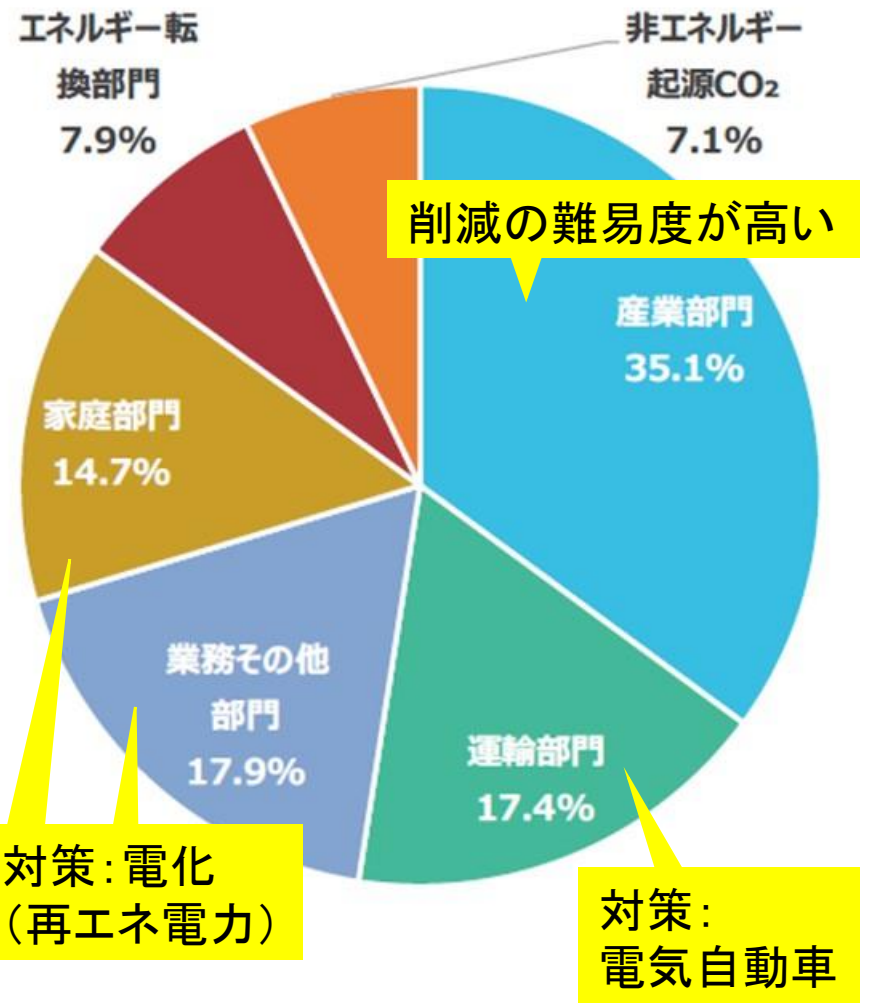
EICピックアップ：IPCC第6次評価報告書で明らかになった気候科学の最新知見（国立環境研究所・江守正多）

日本の部門別のCO_2排出量

【電気・熱配分前】



【電気・熱配分後】

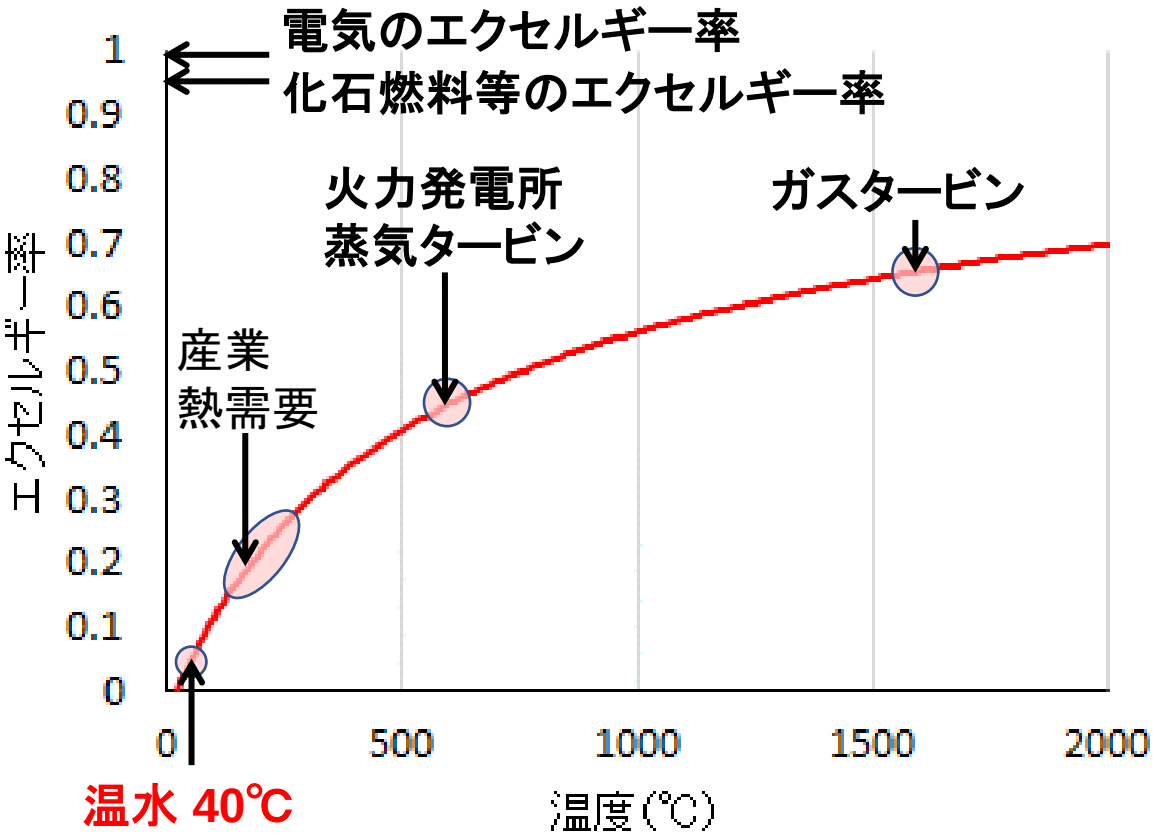


2021年度のCO_2排出量：10億6400万トン

環境省（2023）

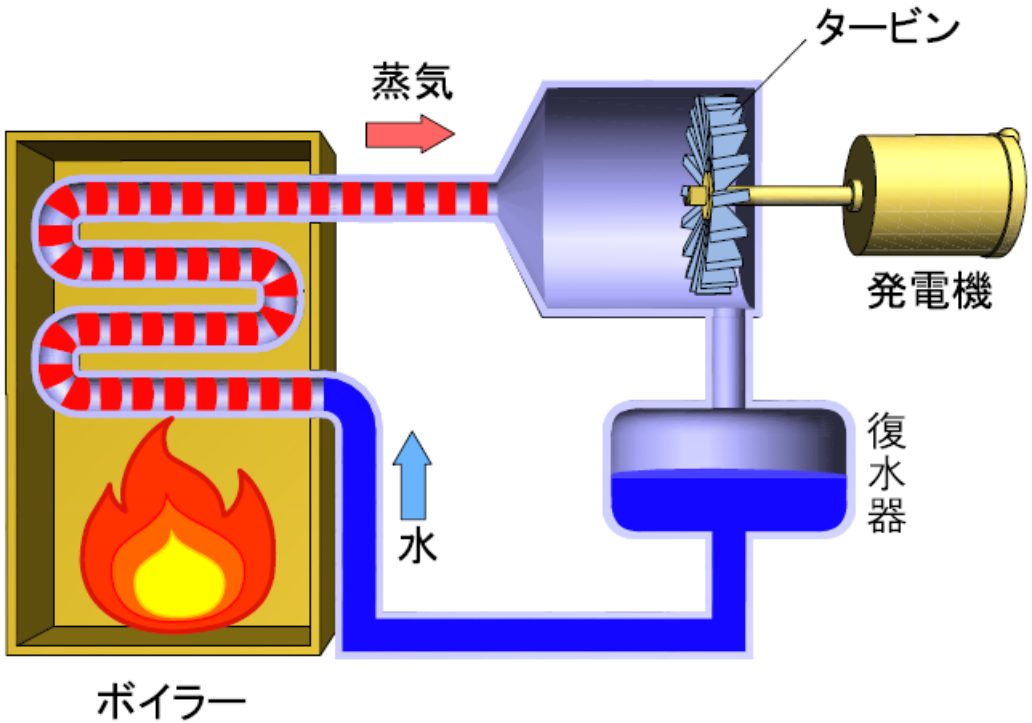
エネルギーの量と質（エクセルギー率）

電気：最も質の高いエネルギー（理論的には100%仕事に変換）
化石資源：質の高いエネルギー（エクセルギー率90%以上）
熱：環境との温度差によって仕事に変換できる割合が変化

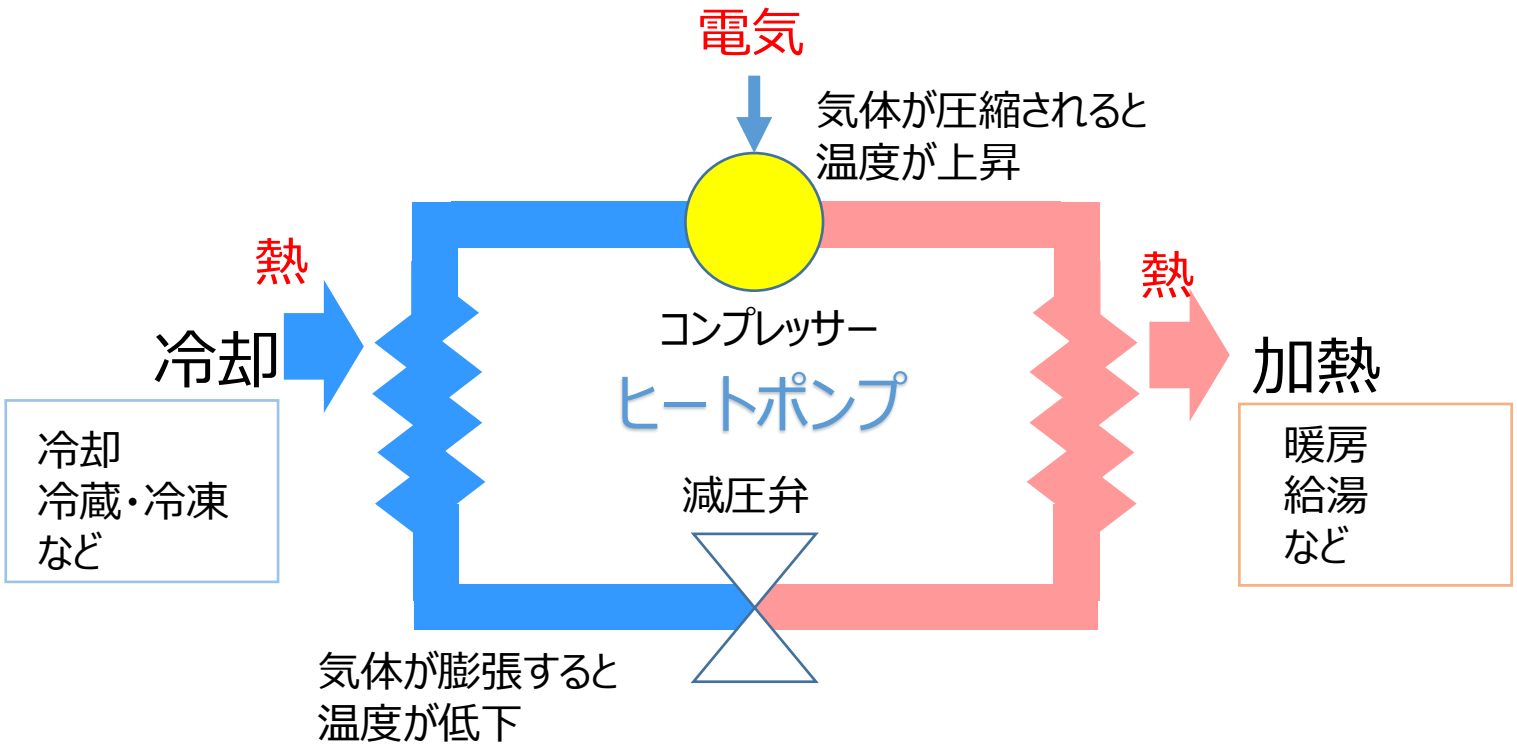


火力発電の原理

熱機関は熱を捨てることなく仕事（発電）をすることができない。



高効率な熱供給機器（ヒートポンプ）



1 MJの電気で，温度差により 3 MJから10 MJ以上の熱を供給

ヒートポンプの例

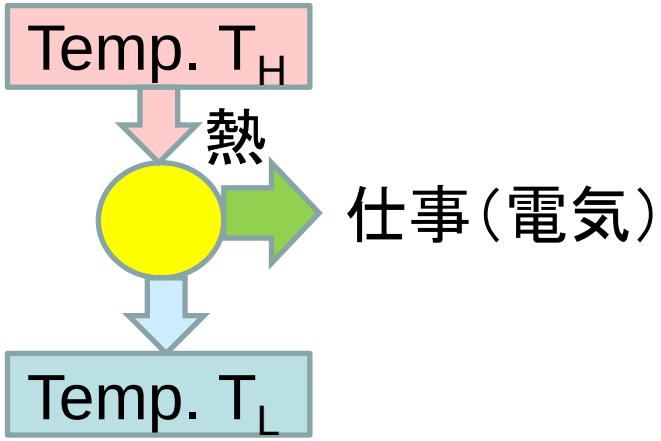
出典：ヒートポンプ・蓄熱センター

熱機関の効率

カルノーサイクル：熱を仕事に変える理想的な効率の熱機関の1つ

発電

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

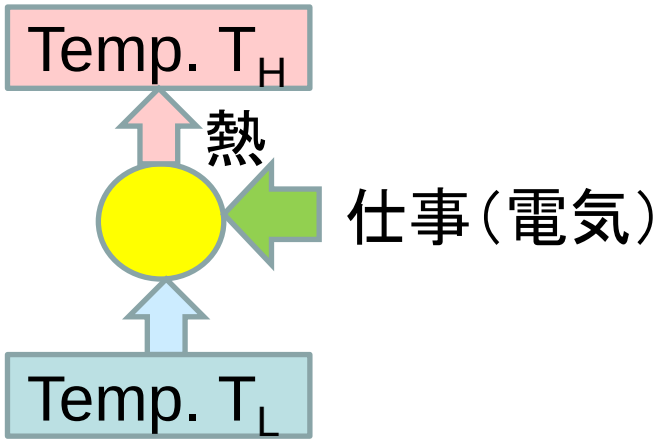


T: 絶対温度(K)

温度差が大きいほど発電効率が高くなる

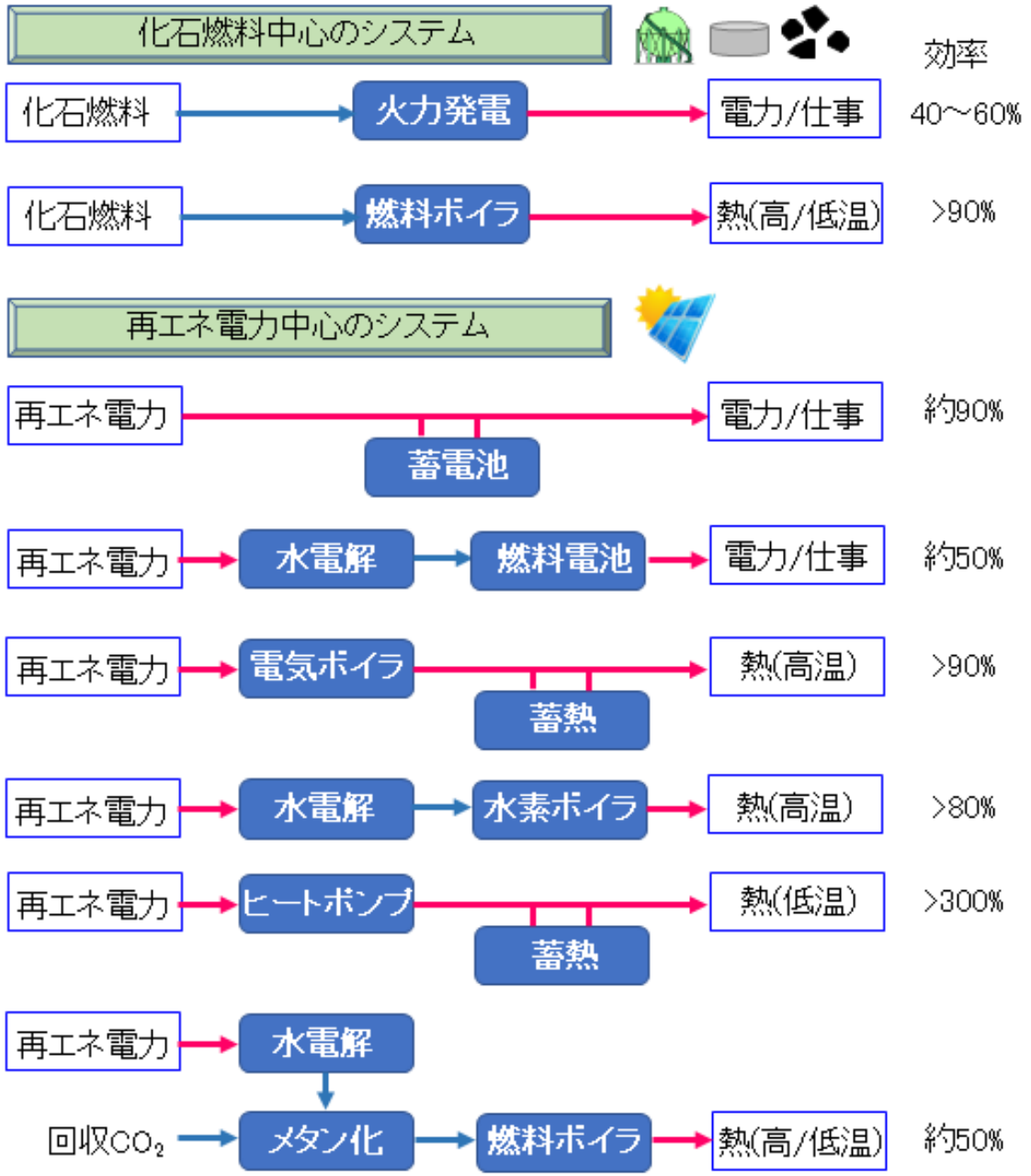
ヒートポンプ

$$COP = \frac{1}{\eta} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$



温度差が大きいほどヒートポンプの効率（成績係数）が下がる

現在・将来のエネルギーシステム



カーボンニュートラル社会実現に向けた木材の利用方法

木材＝常にカーボンニュートラルではない

定常的な利用（森林保全、炭素固定維持）と利用拡大との両立

木の特性を活かした使い方（成長速度、構造、組成、発熱量・・）

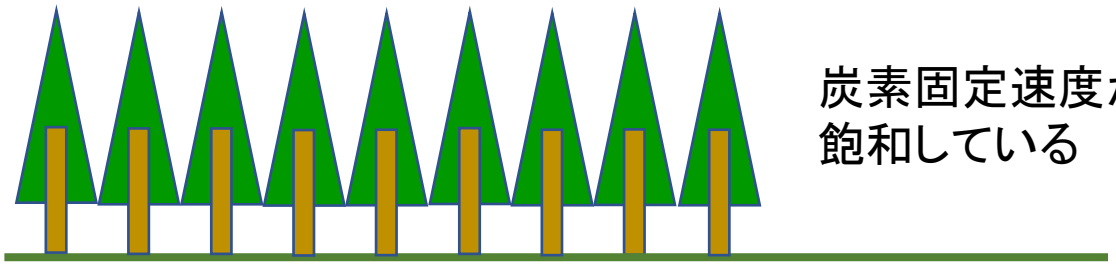
他の再生可能資源による供給が容易な用途は、それに任せる

産業部門（素材産業）のCO_2排出削減に貢献できると理想的

航空燃料、バイオマスプラスチック製造の技術開発

定常状態を維持した森林資源の利用が重要

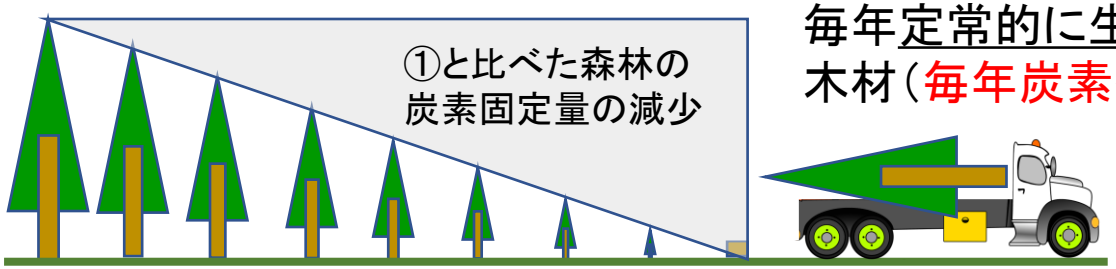
森林の炭素が維持された状態①（定常的**未利用**状態：静的定常状態）



炭素固定速度が遅いか
飽和している

木質バイオマスの利用拡大＝異なる定常状態への移行により森林の炭素蓄積量が減少する

森林の炭素が維持された状態②（定常的**利用**状態：動的定常状態）

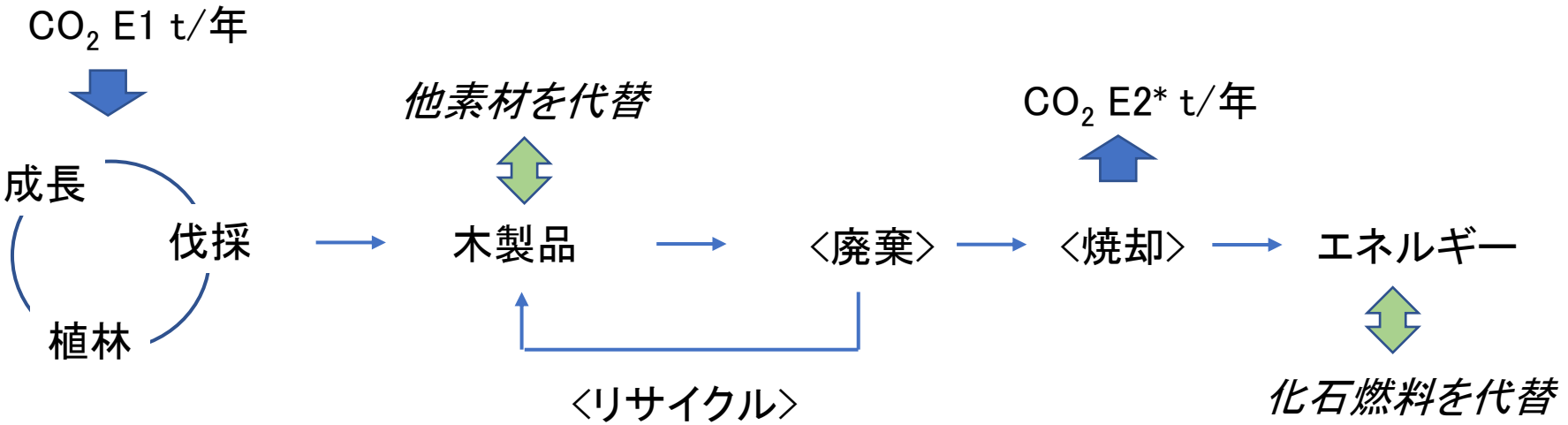


毎年定常的に生産される
木材（毎年炭素を固定化）

生産量が最大化されるペースで植林→育林→伐採の繰り返し

- ①の状態では、炭素の固定速度が遅いか、飽和している。
- かなり昔から②の状態にある森林バイオマスの利用はカーボンニュートラルであり、毎年生産される木材が化石資源等を代替することでCO_2排出量の削減に貢献する。既に②の状態にある森林の、現在の利用ペースを下げないことも重要。
- 木質バイオマスの利用拡大に伴い、①から②に移行する際の非定常な変化（森林の炭素固定量の減少）に対する緩和措置が必要であり、建材等として炭素を長期固定する用途に木材を利用した後、その廃棄物を燃料等に利用することが効率的。

木材・廃木材の利用に係るCO_2の収支

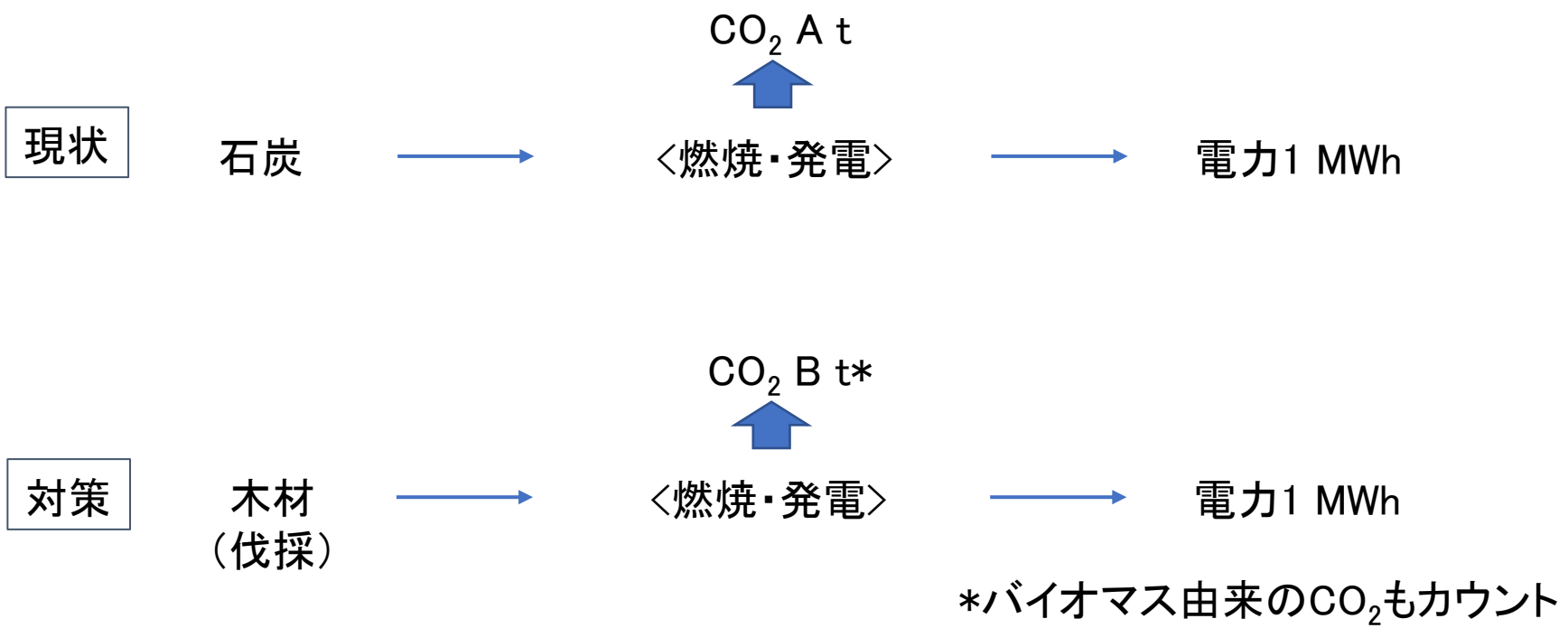


*バイオマス由来のCO_2もカウント

- 長年に渡って定常的に生産・利用されている木材は、CN（E1≒E2）。
- その木製品や廃棄時に回収されるエネルギーが、他の素材（金属やプラスチック等）の生産や、エネルギー生産に伴う化石資源消費を抑制することで、CO_2排出が削減されているが、削減効果が上積みされる訳ではない。
- 定常的な利用プロセスから、木製品の機能（他素材の代替効果）を高めたり、回収時のエネルギー効率を高める対策が取れれば、更にCO_2排出削減が可能。
  ⇒廃木材の高効率利用の推進がとても重要。

※木製品の生産や廃棄に必要な化石燃料消費に留意する必要がある。

木材利用拡大：木質バイオマスを化石燃料代替として利用する場合

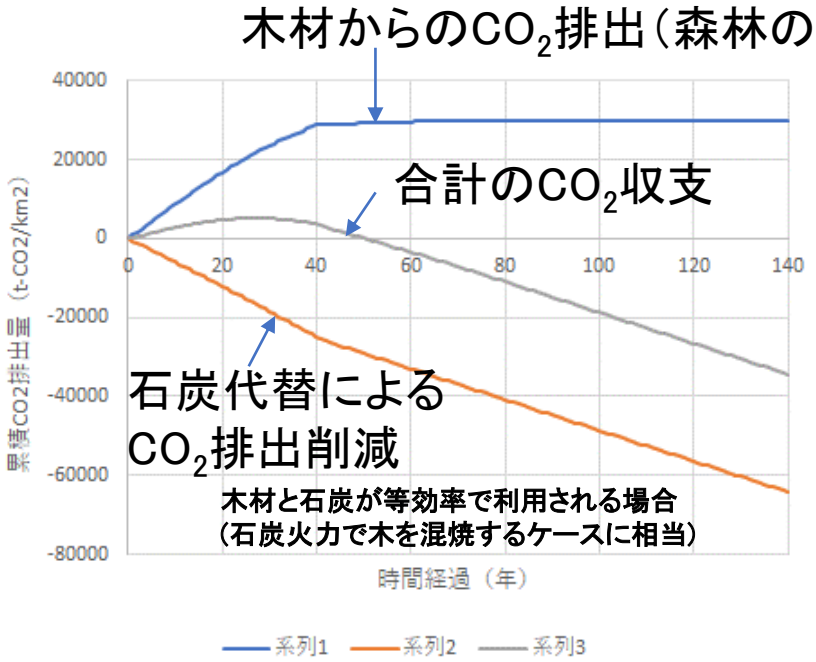


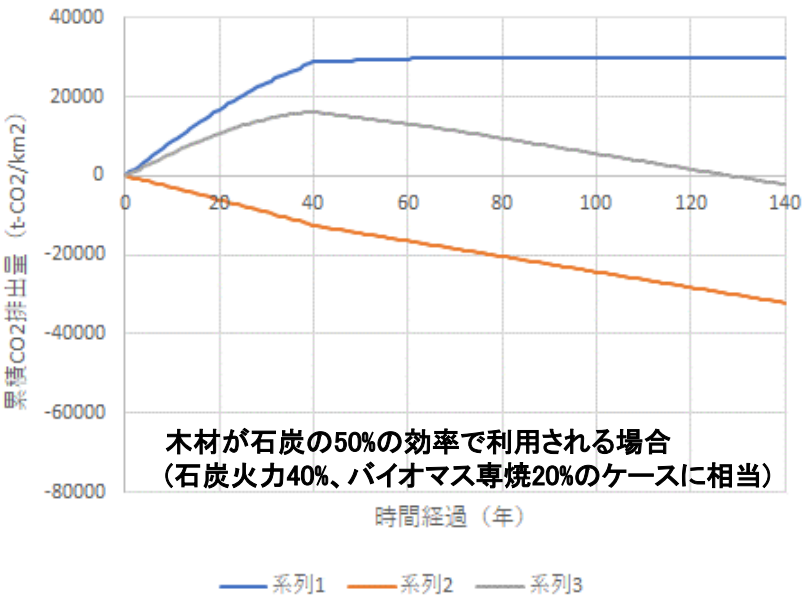
- 一般的に発熱量当たりのCO_2排出量が木材＞石炭（木材は石炭の1.5～2倍程度多くCO_2を発生）であるため、B>A。
- そのため石炭の木質バイオマスへの燃料転換は、一時的（数十年スケール）な大気中CO_2の増加に繋がり得る。
- 石炭に比べて木材のエネルギー転換効率（発電効率など）が劣る場合、更にBとAの差が大きくなり、大気中CO_2が増加する期間が長くなる。

木質バイオマスの利用を拡大した場合のCO_2収支の経年変化

（かなり単純化した計算）

新規に伐採した木材を総て石炭の代わりに燃料として利用した場合



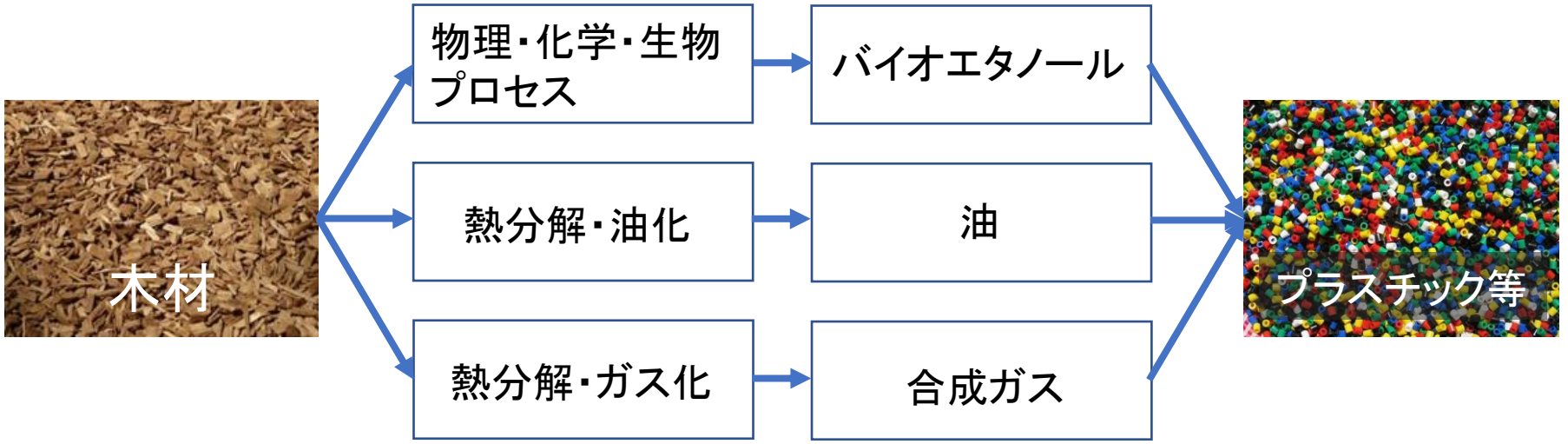


系列1：木材の伐採・燃焼・育林サイクルに伴う累積CO_2排出
系列2：木材で代替される石炭の累積CO_2排出変化
系列3：大気中CO_2量の変化（系列1と系列2の合計）

計算の前提

- 樹齢140年以降は木は成長しない（体積一定）。
- 樹齢70年の針葉樹を40年サイクル（毎年1/40の面積を伐採）で順次伐採、同じ種類の針葉樹の育林を続ける。
- 針葉樹炭素含有：0.165t-C/m3-wood
- 針葉樹比重：0.33t/m3-wood
- 針葉樹低位発熱量：13GJ/t-wood
- 木の伐採・輸送・乾燥等の燃料消費に伴うCO_2排出は非考慮

木材の化学原料としての活用



木材等からのプラスチック製造（理論値）

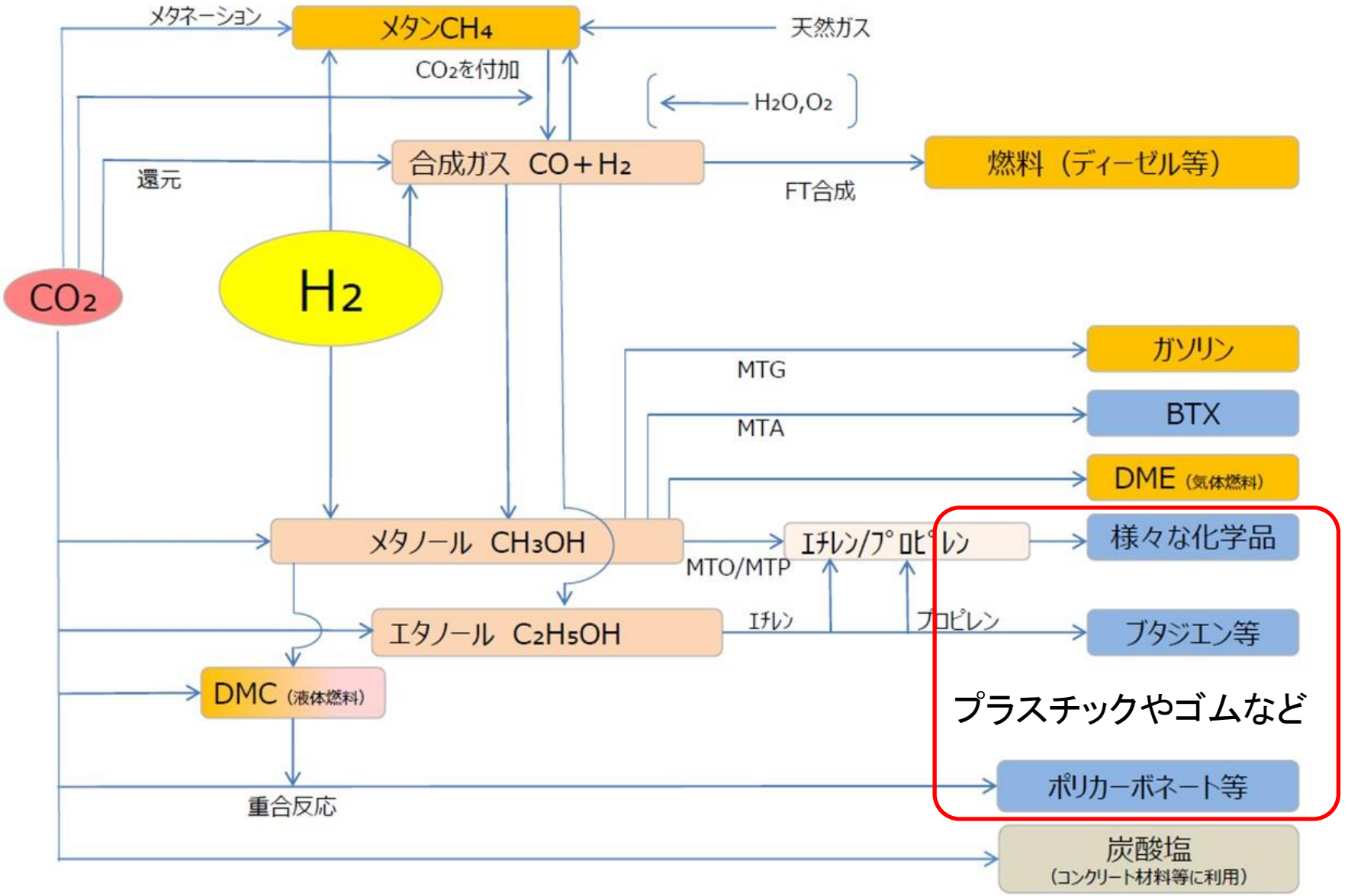
木材: $1/4nC_6H_{10}O_5 \rightarrow (CH_2)_n + 1/2nCO_2 + 1/4nH_2O$

木材＋水素: $1/6nC_6H_{10}O_5 + nH_2 \rightarrow (CH_2)_n + 5/6nH_2O$

CCU: $nCO_2 + 3nH_2 \rightarrow (CH_2)_n + 2nH_2O$

木材をセルロースの元素組成で表現（実際の組成とは少し異なる）

（参考）二酸化炭素と水素からのプラスチック製造



出典：経済産業省，カーボンリサイクル技術ロードマップ (2021改定）

木材の効率的な用途

再生可能電源
（＋蓄電池）を
優先

電力

HPによる
低温熱供給

家庭
部門

業務
部門

運輸
部門
（陸上）

定常的に利用
されている木材
（廃木材を含む）

素材

化学原料
／（航空燃料）

高温熱

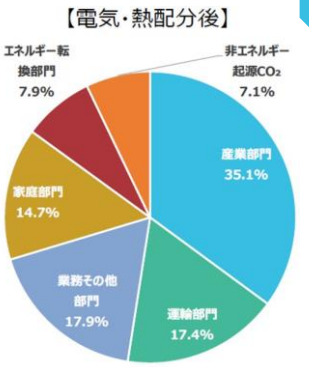
廃木材

産業
部門
（素材
産業）

利用を拡大する
木材

素材（新規需要開拓）

固定期間
数十年



環境省（2023）

カーボンニュートラルと持続可能性
SDGsを踏まえた上でエネルギー効率と経済性が重要

ポイント：太陽光のエネルギーを如何に上手く利用できるか
⇒太陽光は低エネルギー密度のため、利用に広い土地が必要

バイオマス
（変換効率1%前後）

変換効率は低いが
生態系と共存し得る

太陽光発電
（変換効率20～30%）

変換効率は高いが
不安定であり、自
然・景観破壊の懸念

限られた土地・自然をどのように適切、持続的、効率的に利用
するかが課題

木材利用によるCO2削減効果の最大化に向けて

地域と時代の条件に合わせて適切な利用方法を選択する必要があるが、将来目指す方向性としては・・・

- 木材の利用を拡大していくべきだが、むしろ長期間のCO_2の増加を招かないよう、使い方には注意が必要。
- （廃）木材は、素材やその原料としての利用を優先。木材の利用拡大には、長期使用する用途での新規開拓が重要。
- 暖房・給湯レベルの低温の熱供給はPV+ヒートポンプ＋蓄熱で効率的に脱炭素化が可能。木材をこの用途に用いるのはもったいない。
- ガス火力発電のような高温化・大規模化が難しいバイオマス発電は、あまり効率的とは言えない。
- 200℃程度の産業熱需要は、ヒートポンプの適用が難しいか、効率が低下するし、化石燃料ボイラーのエクセルギー効率も低い。このような用途に木材を利用するのは効率的。