

令和4年度シンバイオ社会研究会第1回講演会

歴史的転換期に入った エネルギー環境問題

- ・エネルギーと地球環境問題
- ・これからのエネルギーシステム
- ・二酸化炭素とエネルギー

2022年5月11日
京大宇治キャンパス
総合研究実験1号棟HW401

小西哲之

京都大学名誉教授

京都フュージョニアリング（株）創業者・取締役



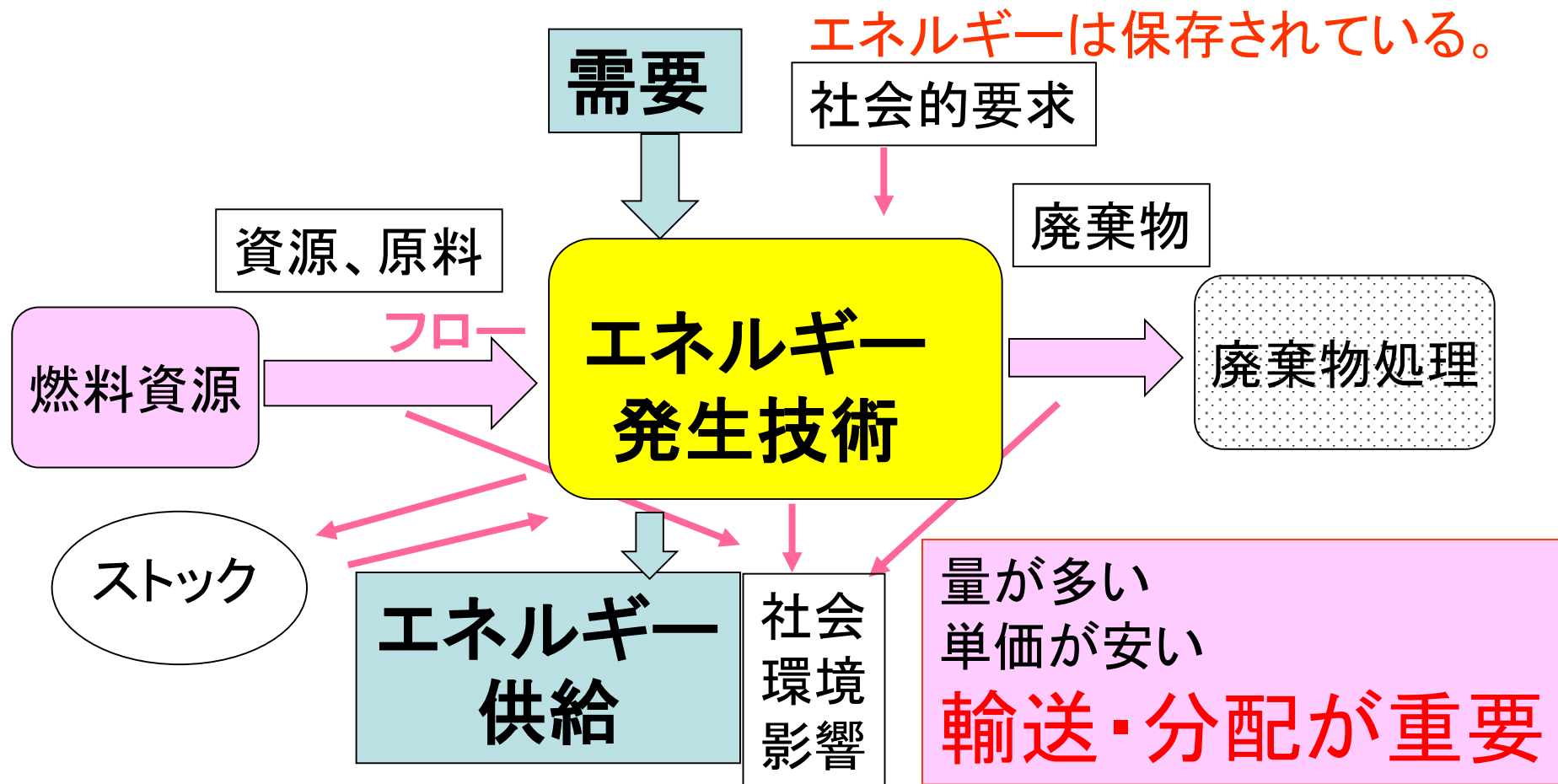
はじめに

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



- エネルギーと環境と社会の関係が、この数年で大きく変わりました。
- 日本と世界のこれからのエネルギーはどうなるのか？
- 将来のエネルギーをどう考えればいいのか？
- 私たちとエネルギーの関係はどう変わるのか？
- 新しいエネルギーは何を目指すべきなのか？

考えてみましょう。



このどこが止まっても使えない！

- 資源豊富/エミッション少 でも制約されることがある
- 物質によらない制約もある。(需要等) **使えないものもある**

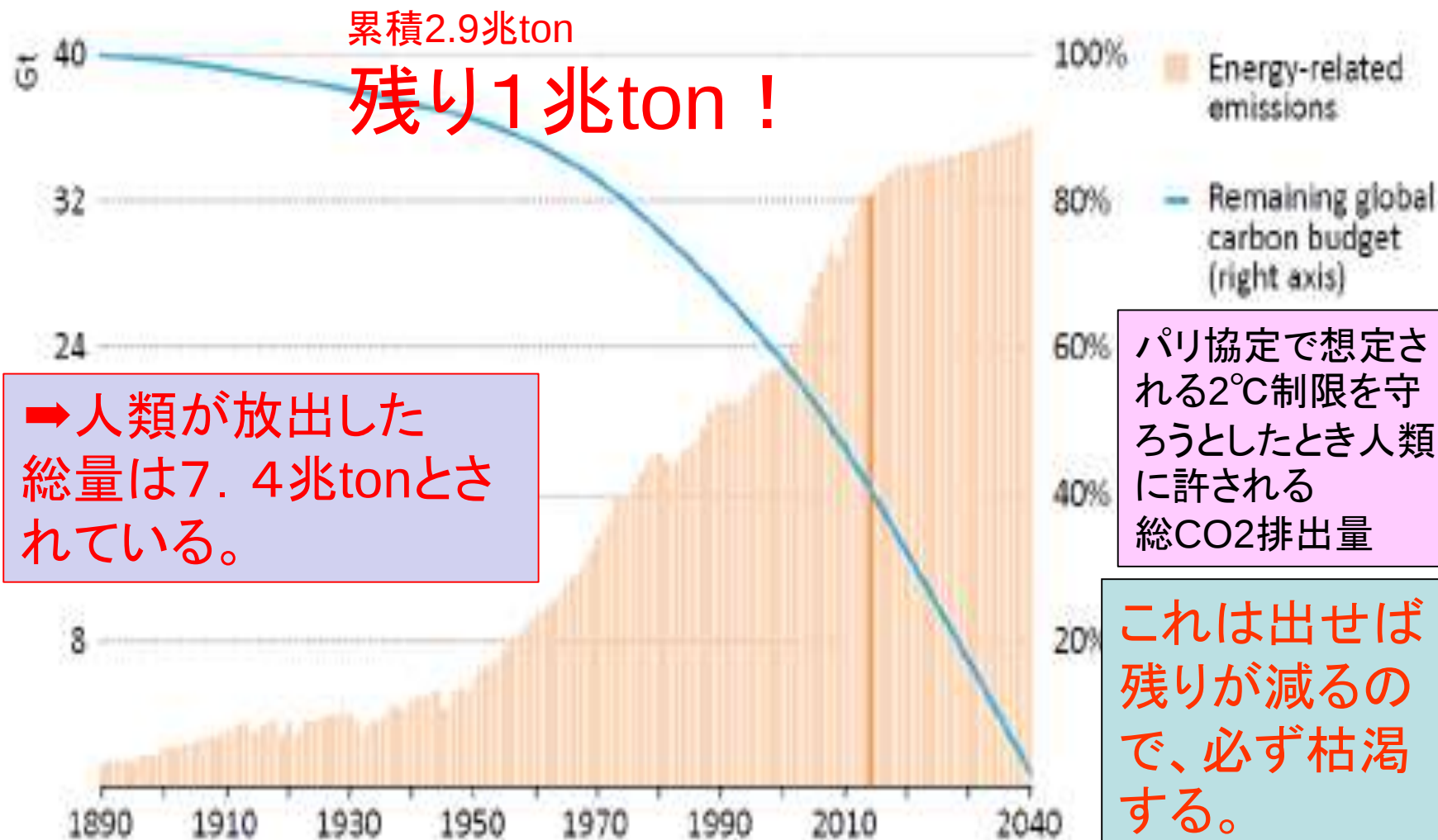
大きく変わりつつあるエネルギー問題



- ・エネルギー開発の本来目的は、人類の“**持続可能な発展**”。(電力供給に限らない)
 - ➡エネルギー技術は現在および将来のエネルギー市場、地球環境問題への対応が必要。
- ・パリ協定に大部分の国が調印したことで、人類とエネルギーの関係は歴史上初めての局面。
 - ➡**カーボンバジェット**を近い将来使い切る(**2040**)。
- ・一方、エネルギーは再エネにより枯渇の恐れは当面ない。
- ・それどころか、供給過剰、自由化市場で電力卸売り価格はゼロ円以下になることがある。
- ・エネルギーは、「ないこと」より「あとしまつ」が問題
 - ➡真に枯渇性なのは二酸化炭素削減容量。



カーボンバジェット (by IEA)



毎年の二酸化炭素放出量と残された許容量(カーボンバジェット): IEA資料から

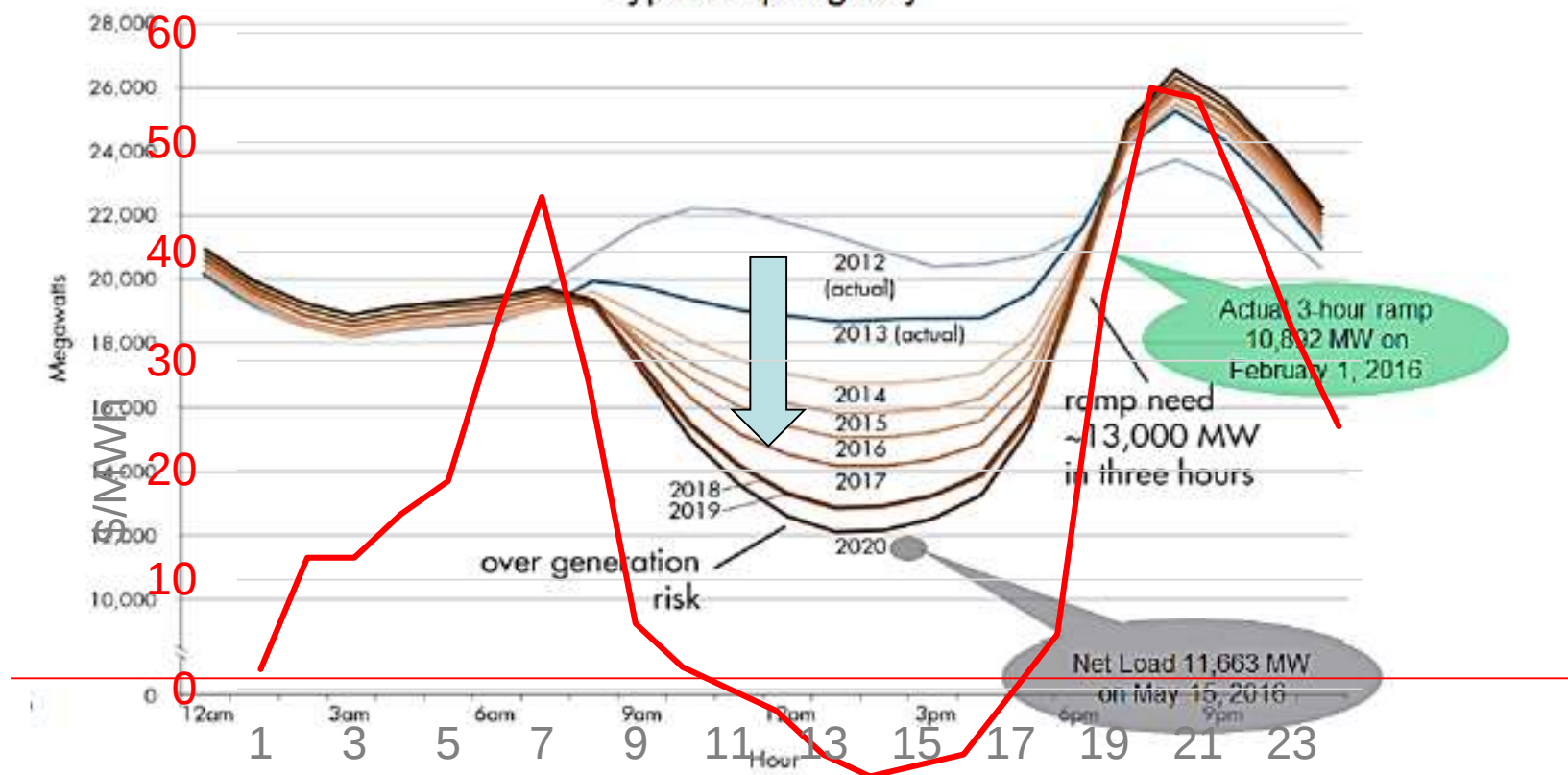
Source: IEA (2015). Global energy-related CO₂ emissions extrapolating from current national emissions pledges under the remaining carbon budget for a less than 50% chance of keeping to 2°C.

電力需給は、きっちり供給に合わせないと使えない。

→すでに余る時代に入っている

California Independent System Operator

Typical Spring Day



これがCalifornia Duck.すでに電力市場の崩壊が始まっている
時間帯によっては接続拒否、電力価格ゼロになることも。

Time of the Day



今起きていること



- ・エネルギー技術の本来目的は、人類の“**持続可能な発展**”。
➡エネルギー技術は現在および将来のエネルギー市場、地球環境問題への対応が必要。
- ・エネルギーは本当に足りない？
← **実は枯渇の恐れは当面ない。**
- ・それどころか、供給過剰、自由化市場で電力卸売り価格はゼロ円以下になることも。(エネルギー自体の価値下落)
- ・パリ協定に大部分の国が調印し、削減目標に合意。
人類は**カーボンバジェット**を近い将来使い切る**(2040)**。
- ・➡**二酸化炭素「削減」の方がエネルギー問題の主役**

人類は本当に、
生き残れるのか、
滅亡するのか、の
わかれ道にいる。

最近のIEAレポート

Net Zero by 2050

A Roadmap for the
Global Energy
Sector

International
Energy Agency

IEA Net Zero by 2050 報告書

COPがIEAに依頼した検討。

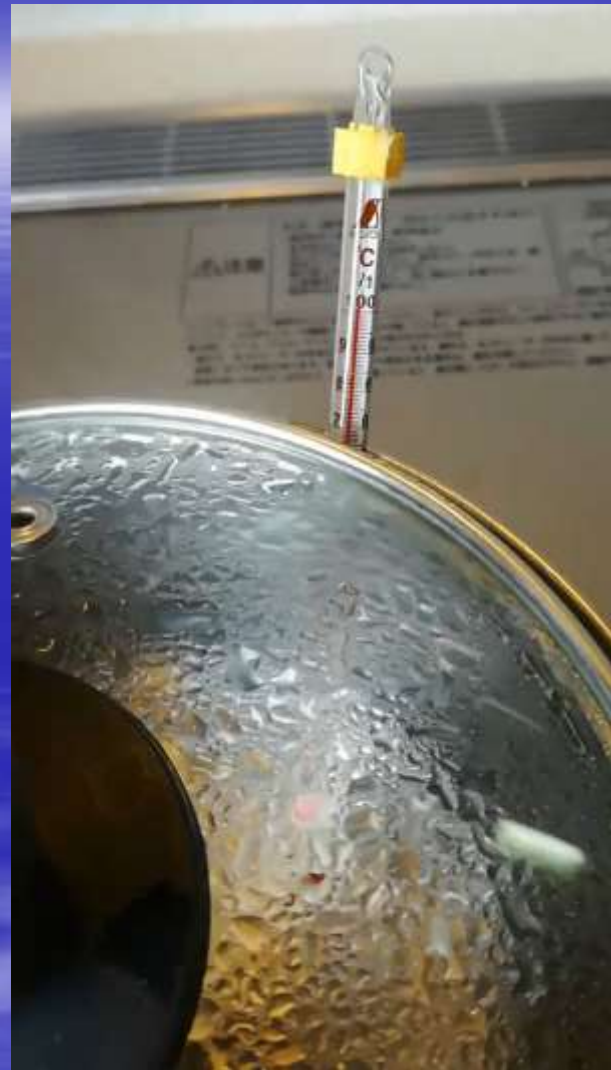
「世界全体で、エネルギーばかりでなく、産業からのCO₂排出量をネットゼロにする。」

それを達成するためのロードマップを、技術、産業分野別に、それぞれのマイルストーンを置いて示す。

まず、クリーンエネルギーの導入。これは2030年までがひとつのターゲット。でもそれだけでは全然足りない。

2050年までには大きなイノベーションが必要。それは、今後の技術開発努力に大きく依存している。

さらに、社会の選択、協力が不可欠。

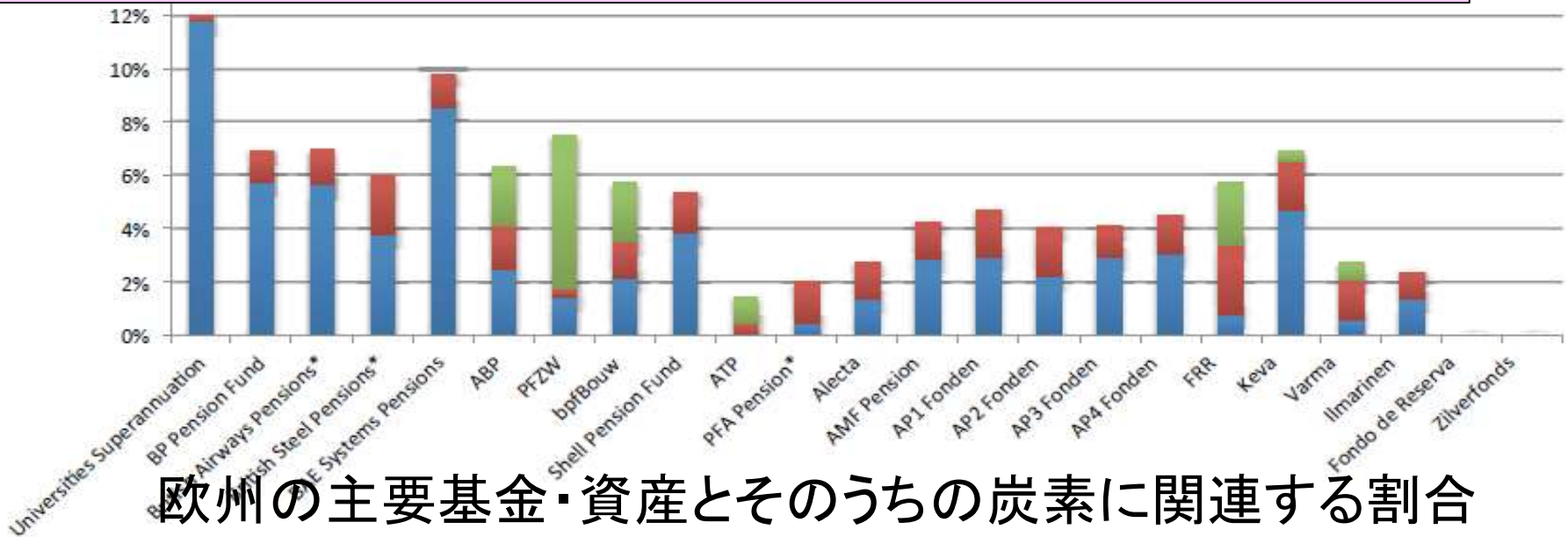


- 鍋にふたをすると
 - 案外温度は変わらない
 - 沸騰ははげしくなる
 - 温度の低いところは高くなる

Figure 4: Share of high-carbon investments in total assets

The Price of Doing
Too Little Too Late

- ・二酸化炭素排出を伴う資産は将来価値を失う恐れ
- ・気候変動を悪化させる方向への公的資金の倫理的問題



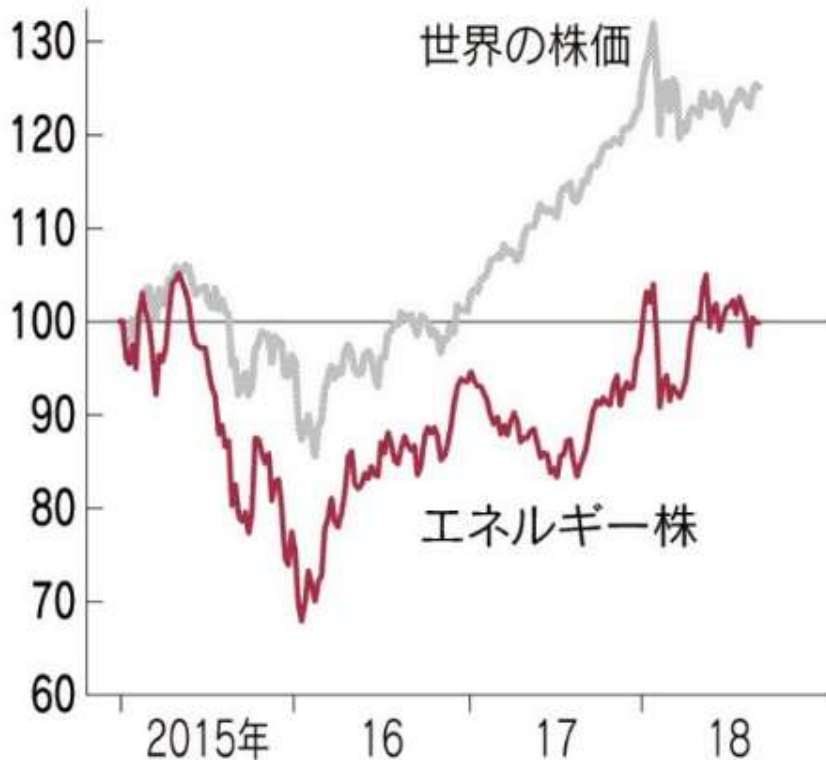
欧州の主要基金・資産とそのうちの炭素に関連する割合

- ・すでに資本の非炭素技術への移行は始まっている
- ・大規模資産、機関投資家、特に年金資金は、長期価値の維持が必要
 - ➡CO₂排出できないことで化石資源資産は今後価値を保てない
- ・CO₂削減技術・資源への資本移行は今後より大規模になる

Divestment (投資引き揚げ)

日経2018.9.5より

エネルギー関連株の値動きは見劣りする



(注) MSCIの世界株指数と同エネルギー株指数。
2014年末=100

ダイベストメントの
対象となっている主な企業

石炭・火力発電	グレンコア (スイス)
	コール・インディア (印)
	中国神華能源 (中)
	中国電力など電力各社 (日)
	Jパワー (日)
石油・ガス	エクソンモービル (米)
	ロイヤル・ダッチ・シェル (英蘭)
	ガスプロム (ロシア)
	中国石油化工 (シノペック=中)
	国際石油開発帝石 (日)

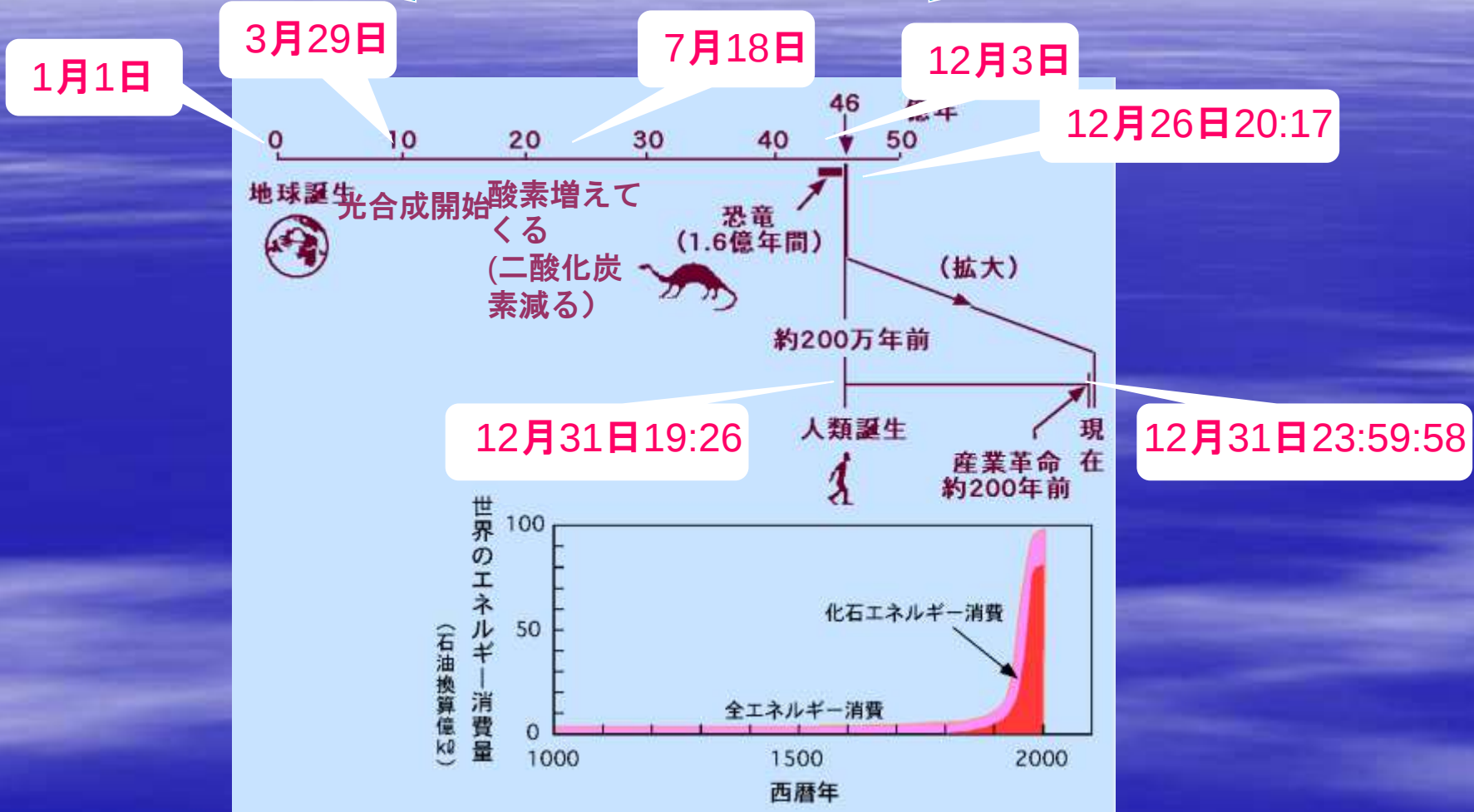
(注) ノルウェー公的年金などの開示情報

欧州議会では議決・法制化で数10兆円相当がすでに動いている
売られた分は買われるので、環境への効果は疑問とされる

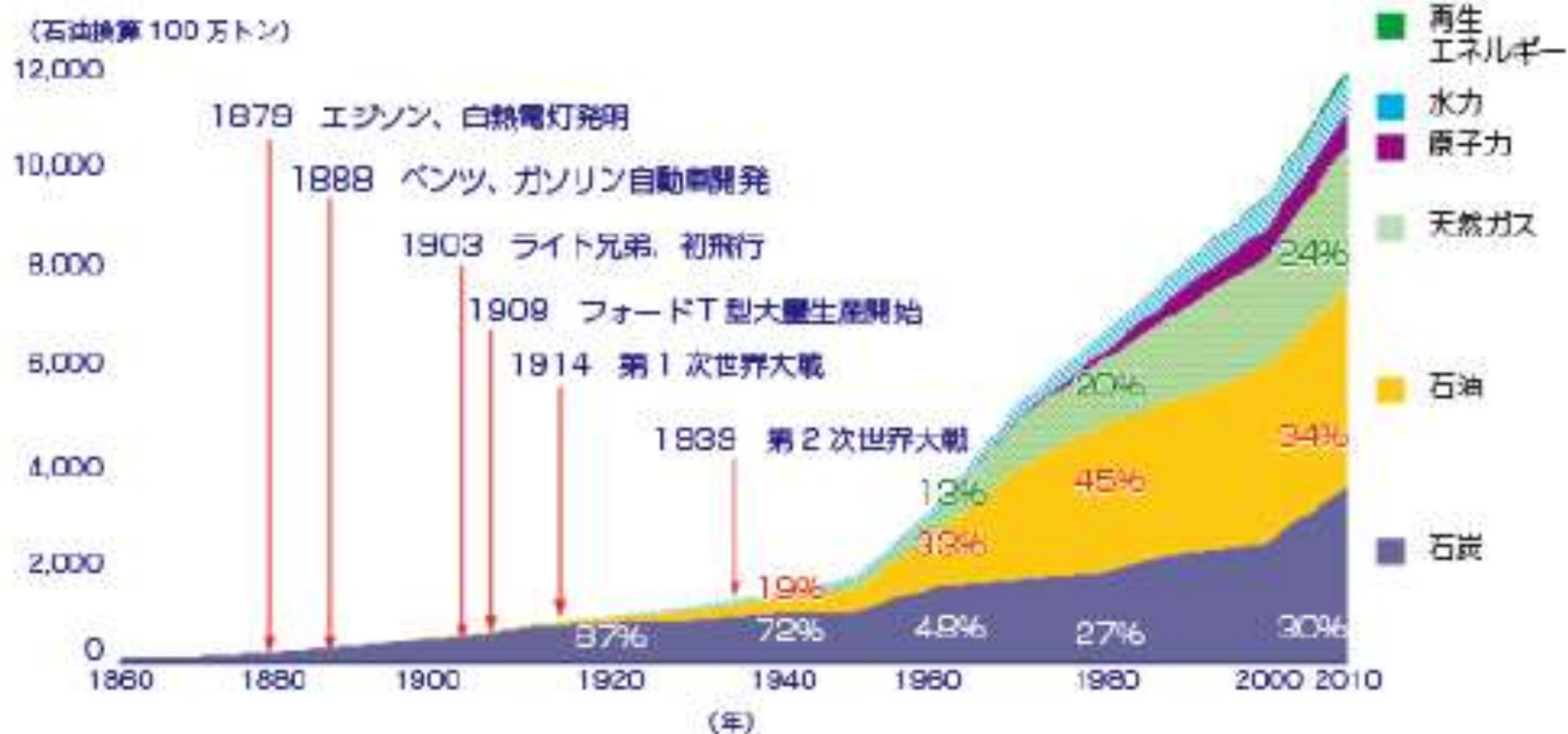


人口増加とエネルギー

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



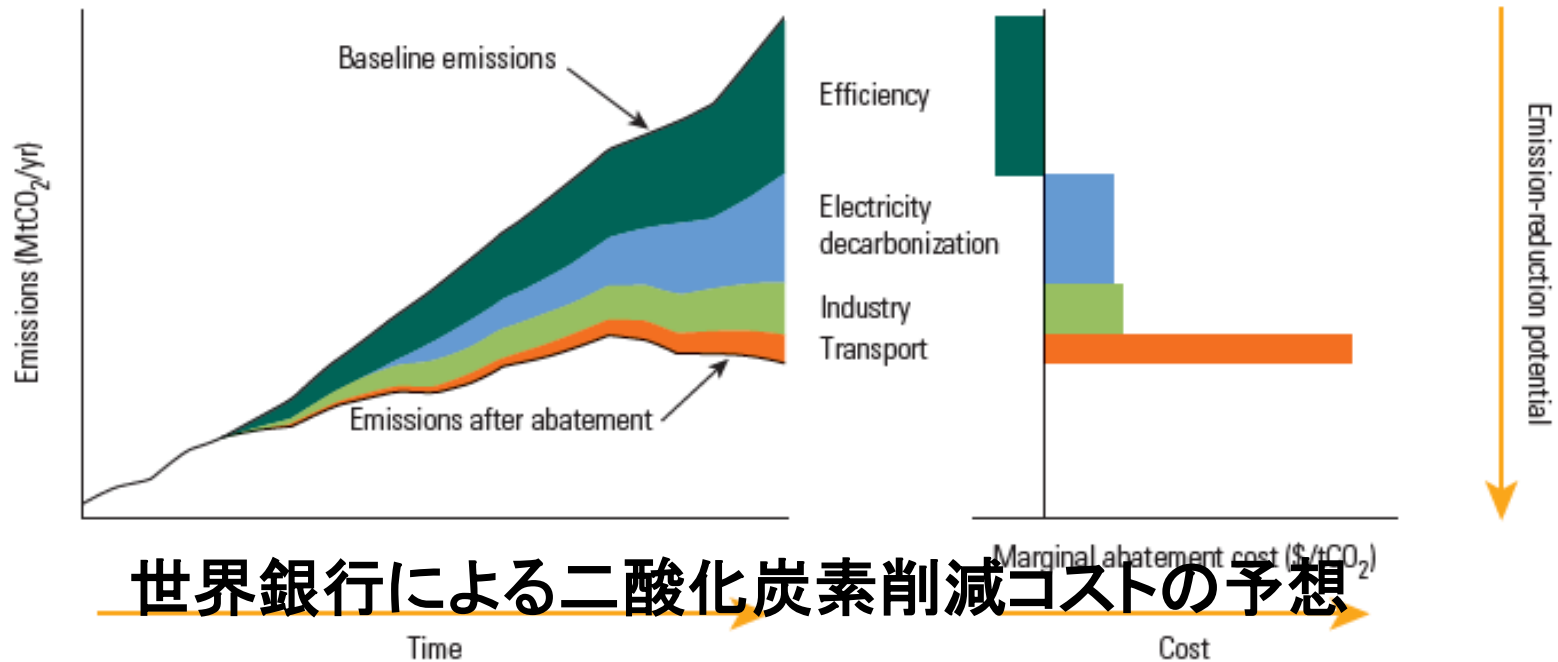
- 化石エネルギーは生物が数10億年かけて蓄積
→人類のたった1回の増加で化石エネルギー資源を使い尽くす



(出所) Jenkins, G., Oil Economists' Handbook, BP, Statistical Review of World Energy 2011 等をもとに作成

世界の資産は化石資源から炭素削減能力に移る

FIGURE 0.3 Devising a Strategy Requires Information on Time, Cost, and Emission-Reduction Potential



世界銀行による二酸化炭素削減コストの予想

Note: The “wedge curve” on the left shows emission-reduction potential as well as the time it takes to roll out a particular option (such as efficiency or electricity decarbonization). It is combined with a marginal abatement cost curve that shows emission-reduction potential and their cost, so that the three key dimensions of emission-reduction options—time, cost, and potential—can be displayed simultaneously. Numbers displayed are purely illustrative. The two graphs are certainly not sufficient to develop a full strategy. More information is needed on obstacles to implementation (such as why negative costs options have not been implemented already), but they do help highlight the need for looking at the three key dimensions simultaneously.

⇒エネルギーより二酸化炭素削減にお金がかかる



石油は「枯渇」しない

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



「枯渇」は物理的な欠乏ではない

- ・可採年数R/P比とは、つまり探す理由の切実さ。
 - 今見つけた資源は、可採年数後までお金にならないかも。
 - **可採年数が減れば、資源探査が進み、見つかる。**
- ・高くなれば不採算で資源とみなされなかったものが算入され、資源は何もしなくても**自動的に増加**する。(遠隔、低品位、非在来。。。)
- ・高くなれば**消費が抑制**され、可採年数は伸びる。
- ・採掘技術、生成・精製技術、利用**技術が進歩**する。(量、効率増加)
- ・**代替**される。(技術が進む。)

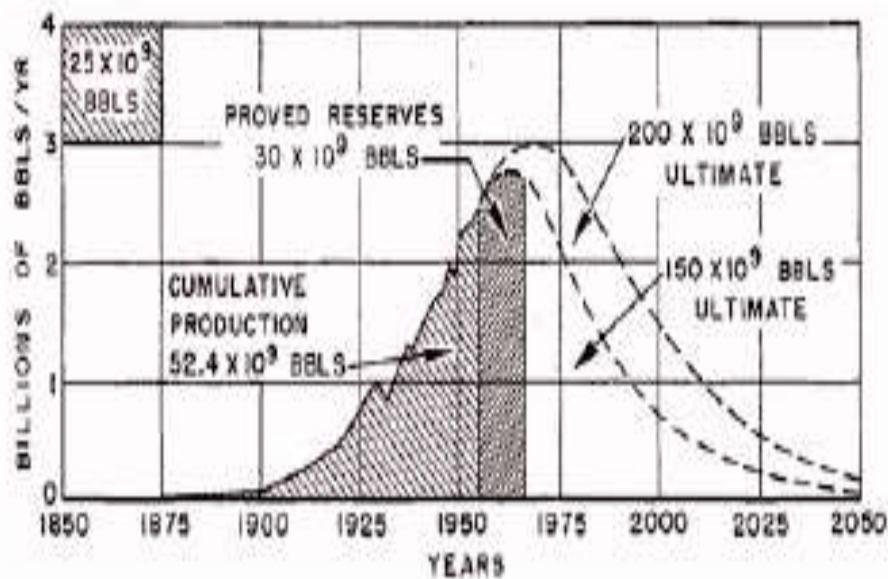
「石器時代が終わったのは石がなくなったからではない」

— Ahmad Zakī Yamānī、元サウジ石油大臣

→ にもかかわらず、「**枯渇？『〇〇がない！』**」は起こるし、**資源制約**も存在する。

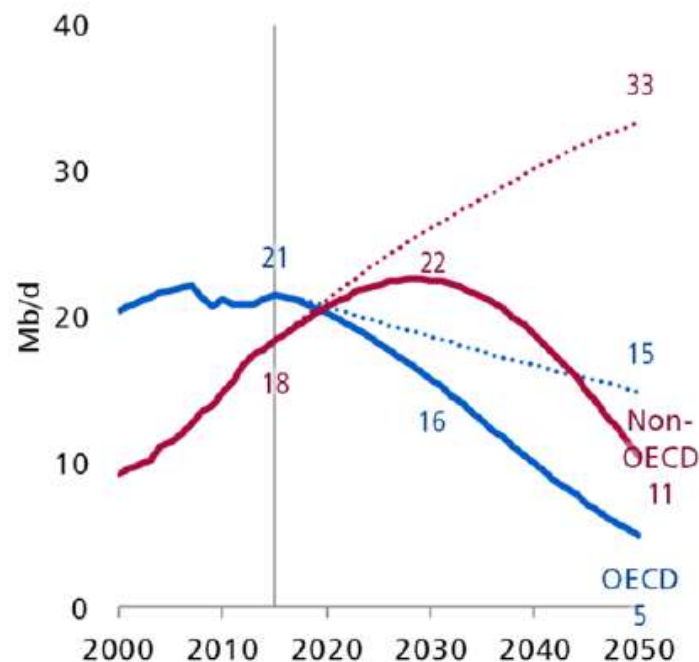
昔は、石油生産は遠からずピークを迎えると言われていた
(枯渇により)

今は、需要ピークと言われる。
そろそろピークらしいが
技術革新と消費動向次第



北米の石油生産, Hubbert, 1956

Oil for Road [Peak Oil Demand Case]



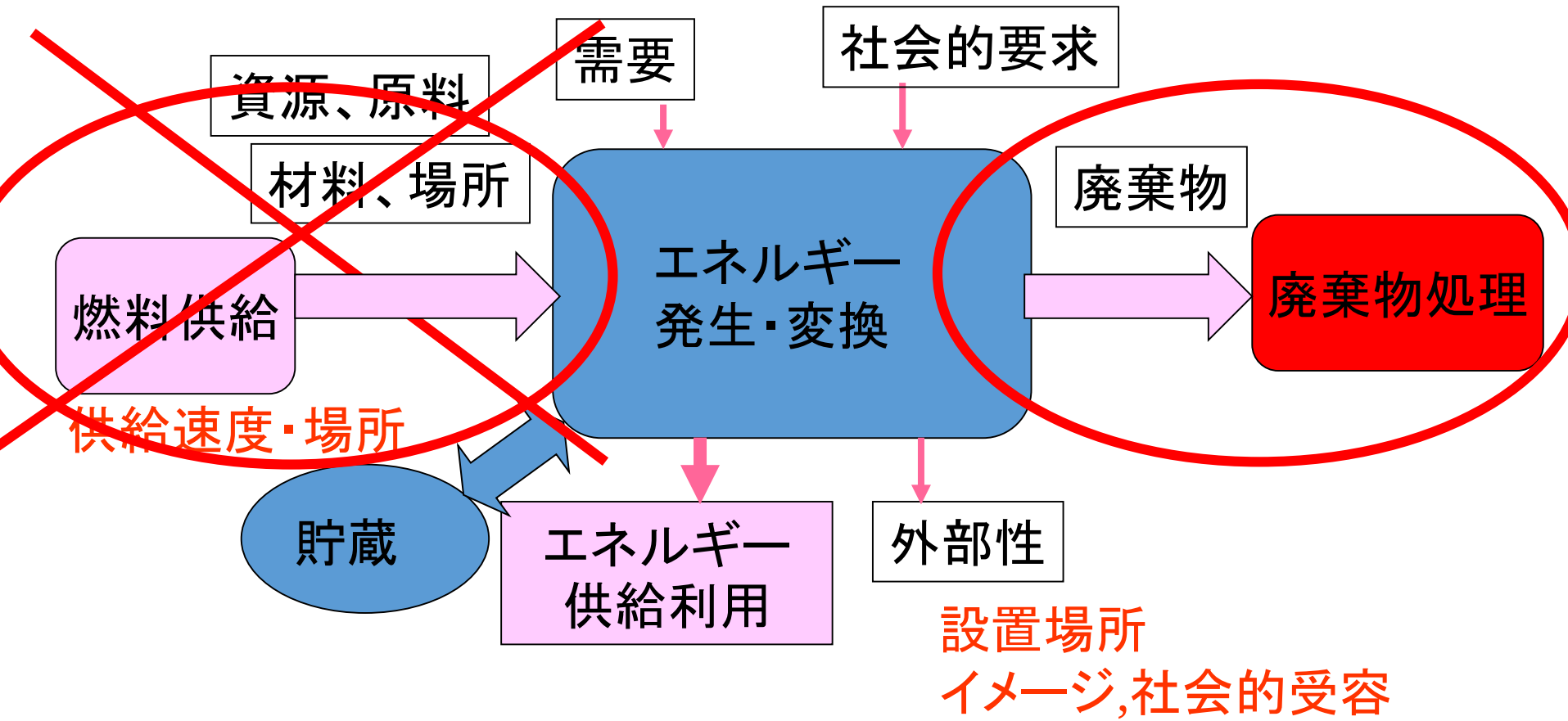
IEEJ, 2018

資源は枯渇しない。需要の減少の方が先。



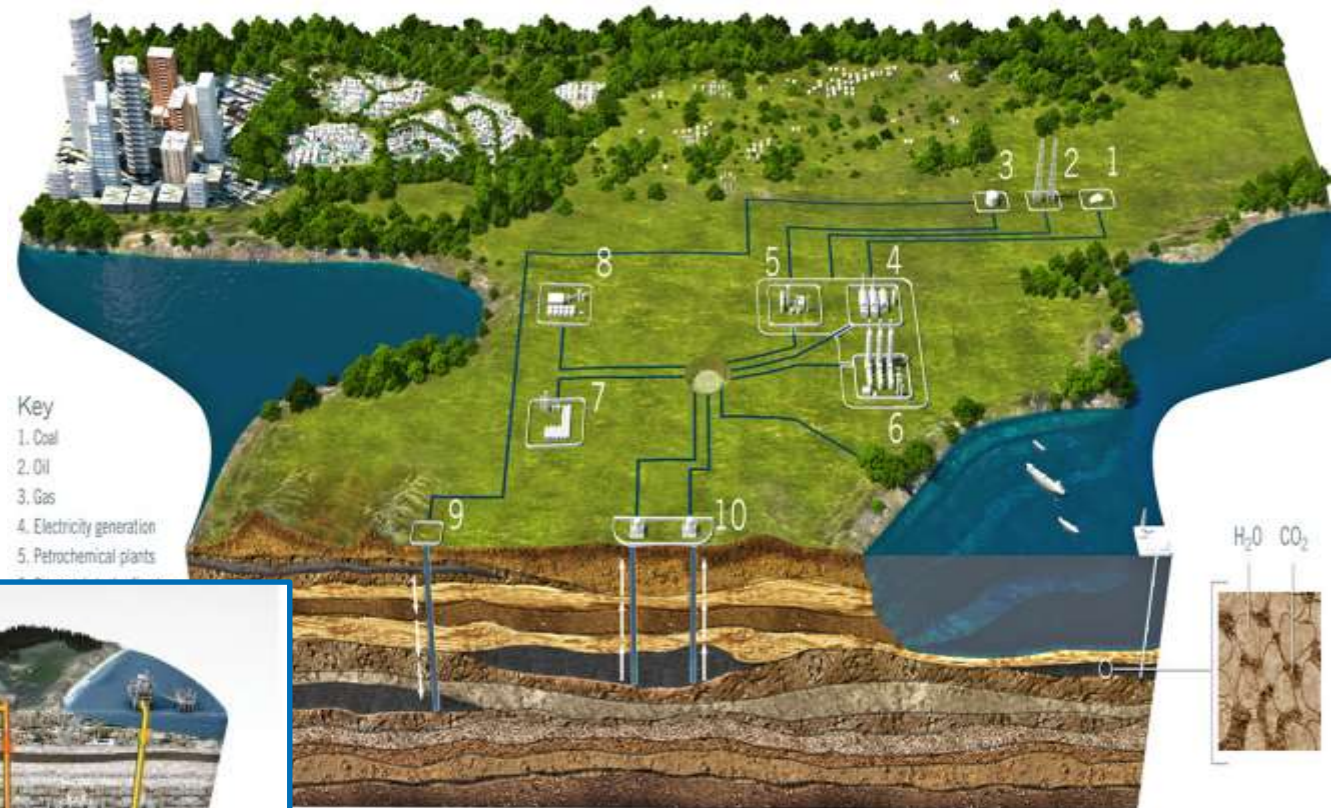
Institute of Advanced Energy, Kyoto University

石油が使えないのは資源でも価格でもない。。「あとしまつ」問題



➡どれか一番少ないものが全体を止める。

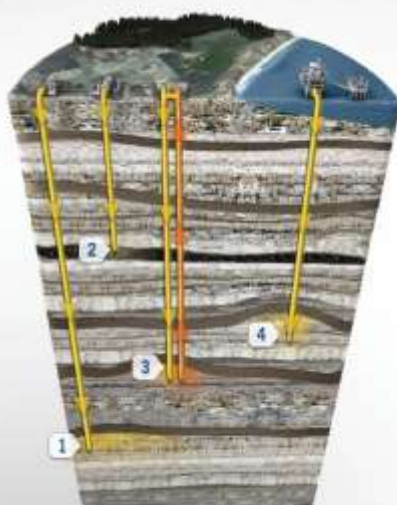
「資源」から「環境」に歴史上初めて、問題が移った。



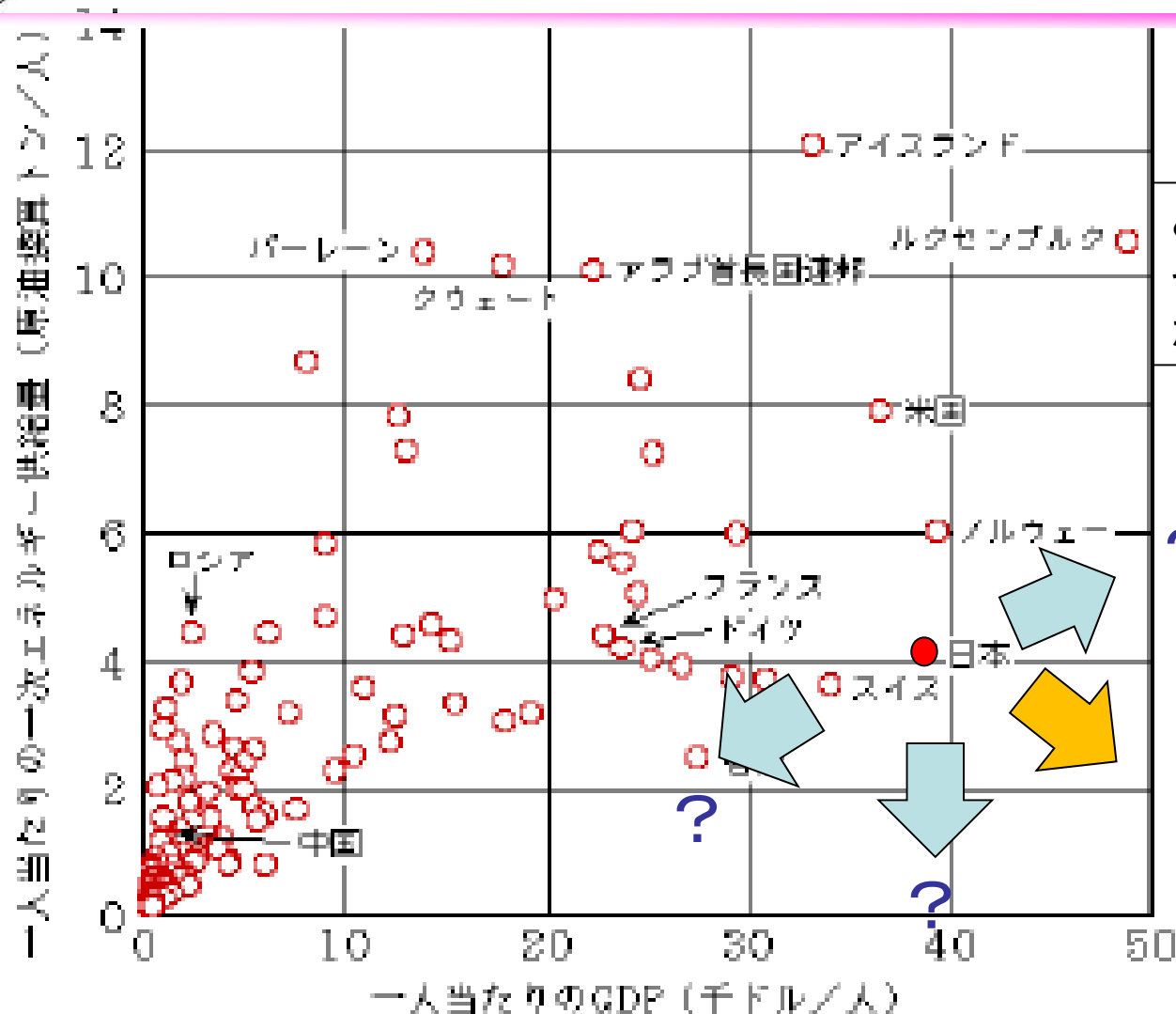
STORAGE OVERVIEW

SITE OPTIONS

- 1 Saline formations
- 2 Injection into deep unmineable coal seams or ECBM
- 3 Use of CO₂ in enhanced oil recovery
- 4 Depleted oil and gas reservoirs



地中貯留は技術的には十分可能
 — 適当な地層(帯水層)は限られる
 — 容量限界がある
 — 移送、圧入が必要
 — 安定性も問題



どの国も豊かになりたい。
そのためにはエネルギー
がいる。

?

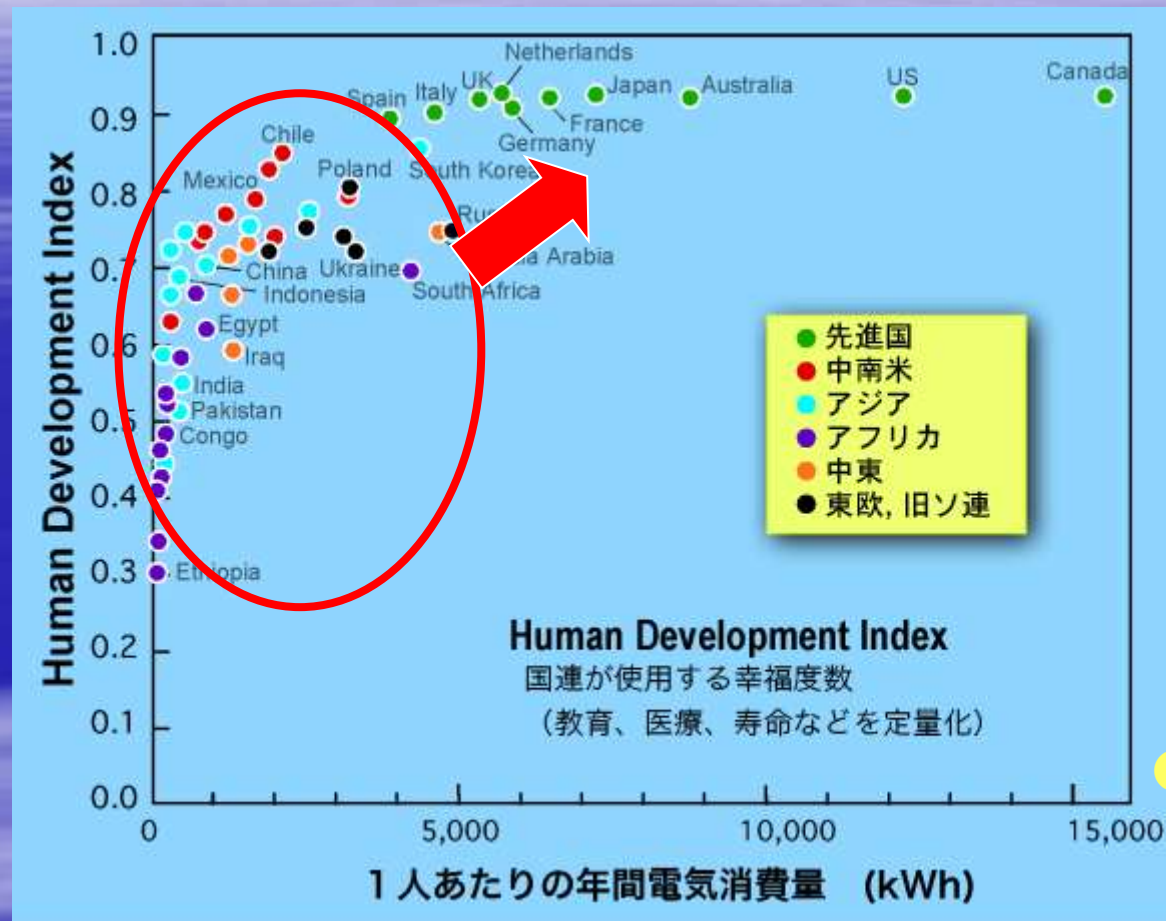
?

?



電力消費と生活水準

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



● 4,000kWhまでは、
電力消費の増加とと
もに生活水準が向上

(日本は浪費気味)

● 発展途上国は、電力
消費4,000kWh程度の
生活を求めるはず

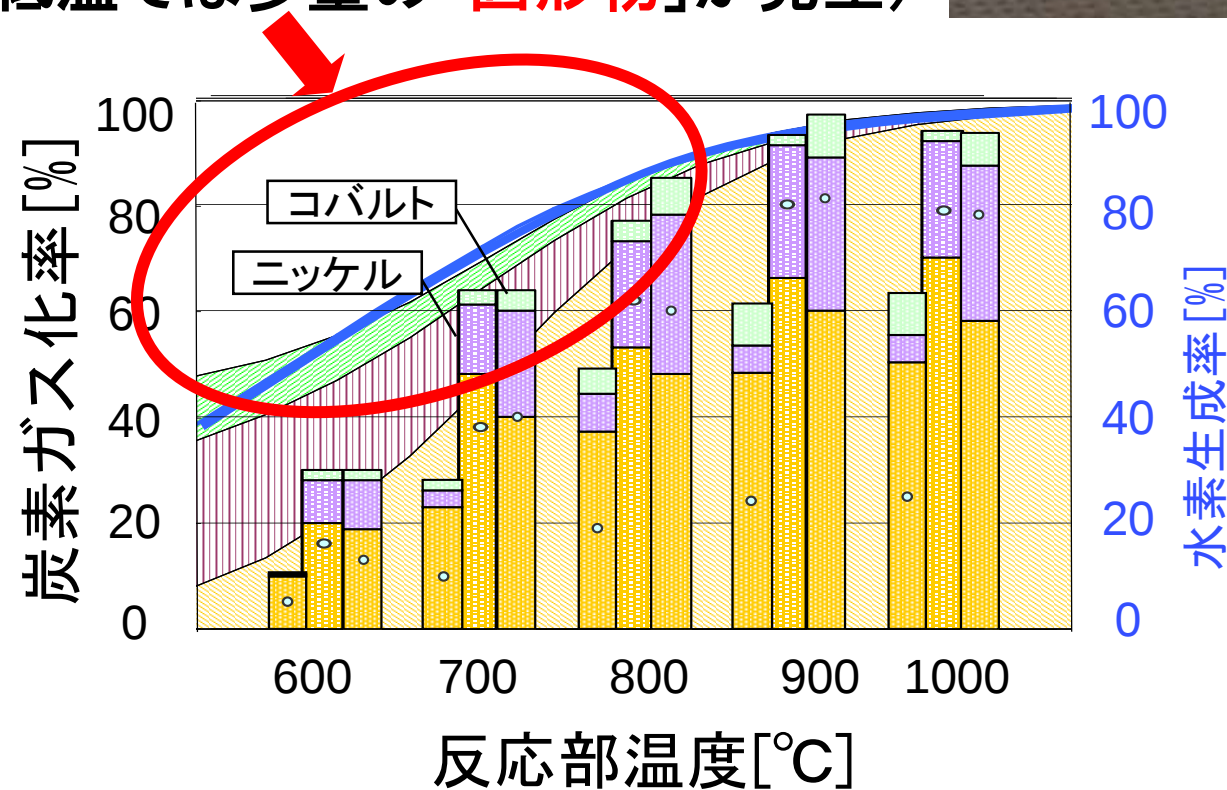
● ある程度までの電力
インフラは、今や人類
共通の権利
(にもかかわらず、電気
に

アクセスのない人は何
10億人もいる。)

～900℃でバイオマスは
ほぼ完全にガス化



低温では多量の「**固形物**」が発生)



炭素化合物組成
理論 実験

CH ₄	CH ₄
CO ₂	CO ₂
CO	CO

フィッシャートロプッシュ合成
による石油化に適した組成



無触媒、ニッケル、コバルト使用時の
反応温度に対するガス化効率の比較



バイオマスの燃料化

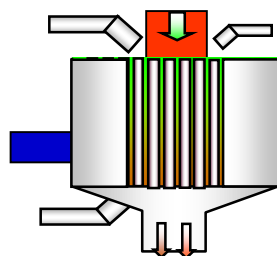
16MJ

廃棄物
バイオマ
ス



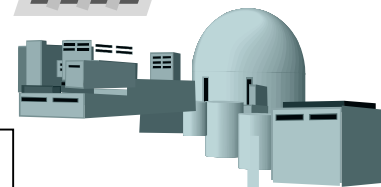
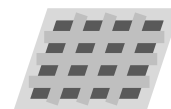
外部熱源, $\sim 900^{\circ}\text{C}$

+ H_2O



8.2MJ

H_2, CO



24.2MJ

燃えるゴミのガス化

セルロース: $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_{n/6} + n/6\text{H}_2\text{O} \rightarrow n\text{H}_2 + n\text{CO} - 136n [\text{kJ}]$

リグニン: $(\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.3})_n + 0.7n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 1.4n\text{H}_2 + n\text{CO}$

水素

水素を作る反応 $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}_2 + 32 [\text{kJ}]$



合成石油を作る反応

$2\text{H}_2 + \text{CO} \rightarrow -\text{CH}_2- + \text{H}_2\text{O} + 160 [\text{kJ}]$

熱利用(発電等)

8.1MJ

合成燃料(軽油)
約0.5リットル

カーボンニュートラル

バイオマスエネルギー温

存

15.6MJ



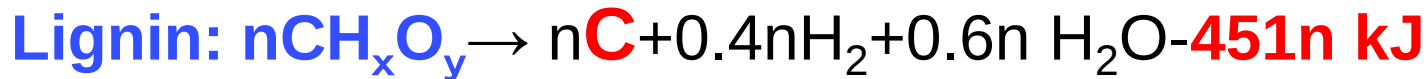


炭をつくる反応

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



- ・バイオマスの主成分はセルロースとリグニン



⇒ 二酸化炭素隔離

熱分解により残る固形残差は
ほぼ炭素

炭化が起きるのは300°C近傍の
極めて狭い範囲

⇒ これだけなら原子力でも可能



液体、ガスはより高温で
より小さな分子に分解する

⇒ この過程で大きな吸熱が起こる

室温

270°C

310°C

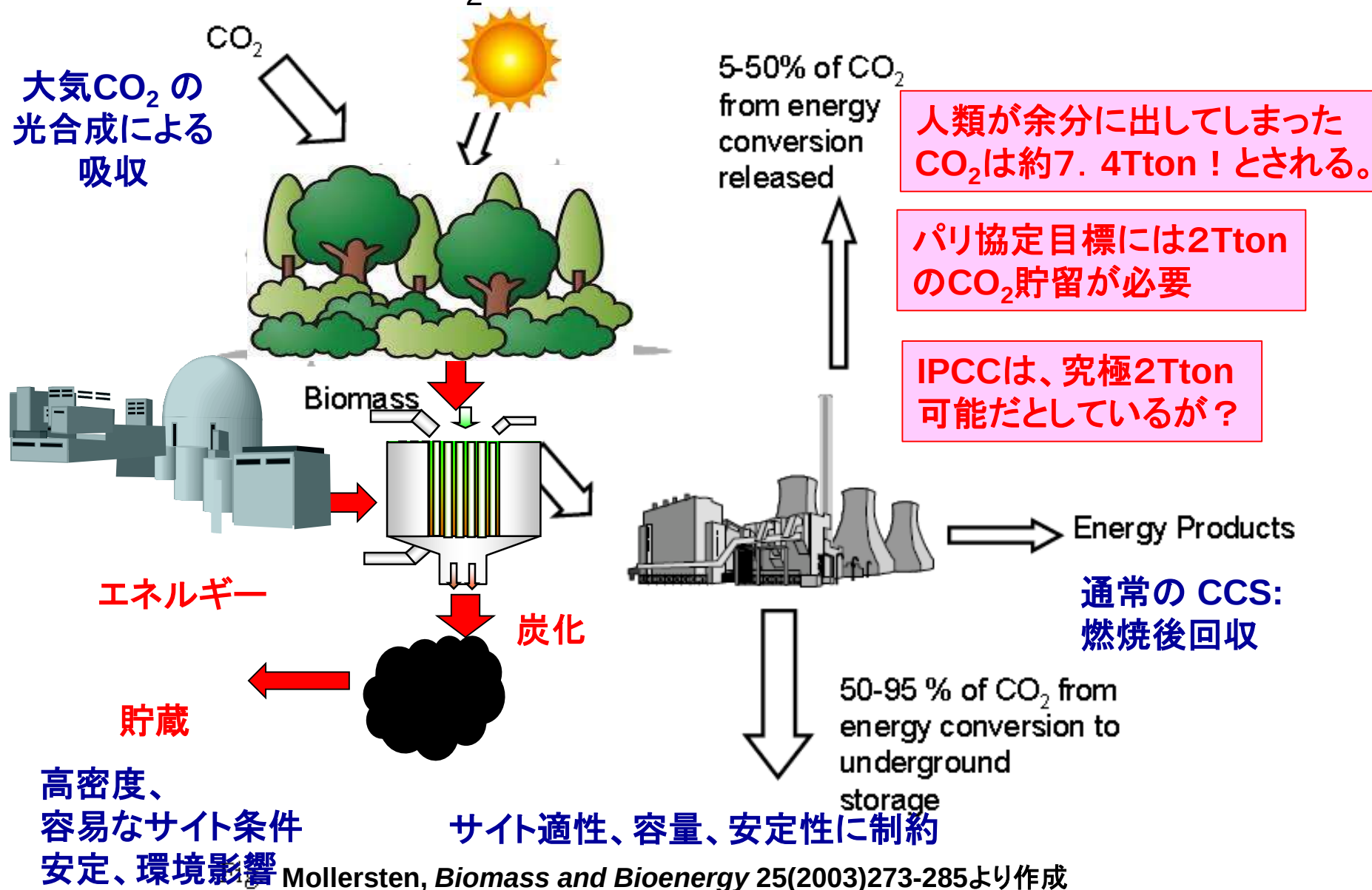
350°C



バイオマスと 先進エネルギー

Institute of Advanced Energy, Kyoto University

制約となるのは①CO₂貯留 ➡ ②バイオマス処理 ➡ ③森林成長





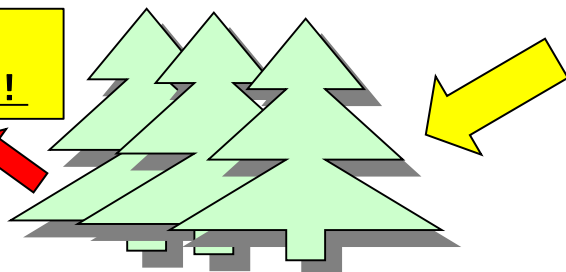
二酸化炭素の燃料化と固定

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



森林は二酸化炭素を吸収

伐採しないと
再生産できない！



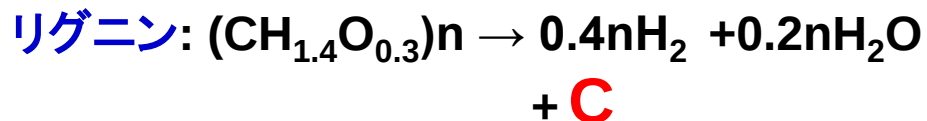
CO₂
吸収

「カーボンネガティ

クレジットとして販売

人工林を育成して
バイオマスを製造

炭素として保管



外部熱源

木炭に転換

吸熱反応

燃料製造

燃料消費

CO₂ 放出なし

石油を代替

先進エネルギーでバイオマスを炭化すれば、二酸化炭素を出さず、
二酸化炭素を吸収し、
二酸化炭素を恒久的に大気から隔離できる

Verified Carbon Standard:

すでに国際的に炭素隔離量は認証する制度がある⇒主として植林

VCS AFOLU Requirements: Crediting GHG Emission Reductions from Agriculture, Forestry, and Other Land Use



Roughly thirty percent of global greenhouse gas (GHG) emissions are from land use change, deforestation and forest destruction and poor agricultural practices. Boosting carbon sinks through the Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) sector can help to reduce and remove emissions.

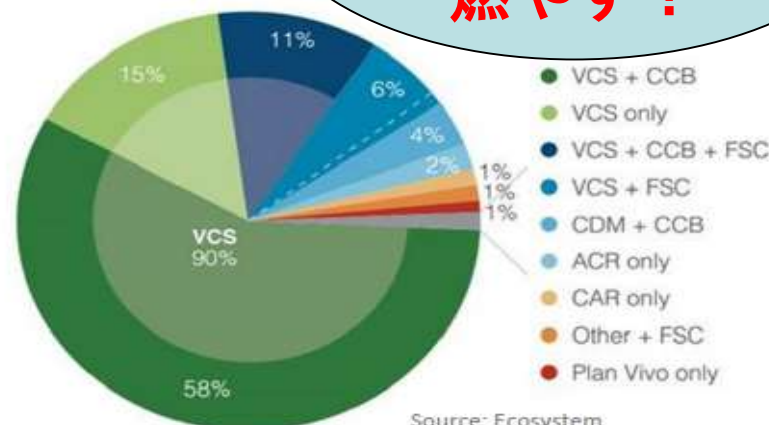
でも木を植えたら
その先どうするのか？
燃やす？

Leading the AFOLU Sector

VCS leads the way in developing frameworks to unlock the carbon reduction power of AFOLU projects. The Verified Carbon Standard was among the first global standards to develop robust requirements for crediting AFOLU projects, notably projects that Reduce Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD).

All AFOLU requirements have been developed in collaboration with the VCS AFOLU Steering Committee and other working groups of leading international forest and agriculture experts. In just a few short years, VCS has become the most widely used standard in the sector.

Market Share of

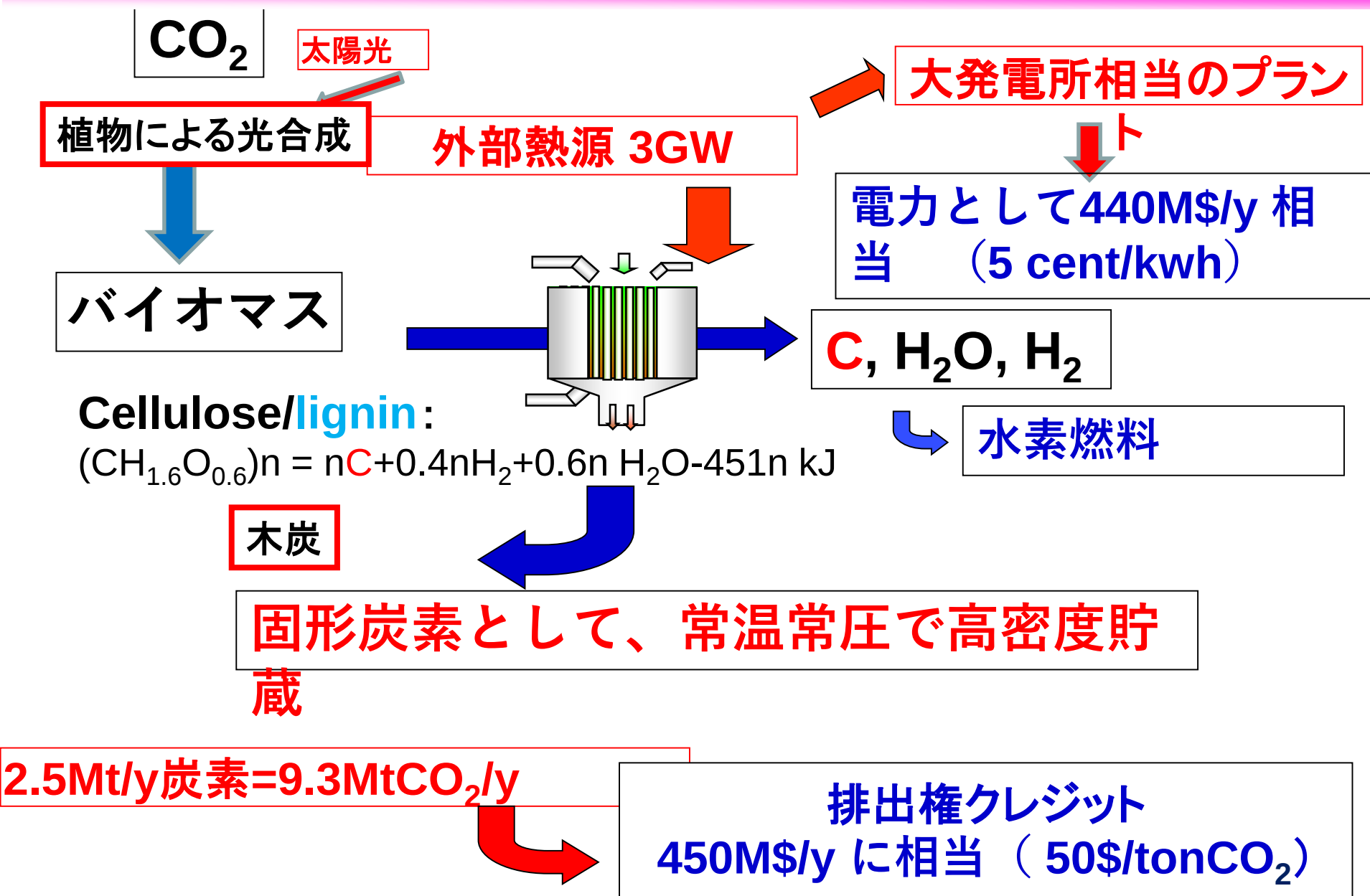


Source: Ecosystem Marketplace (2014)



エネルギーのクレジット化

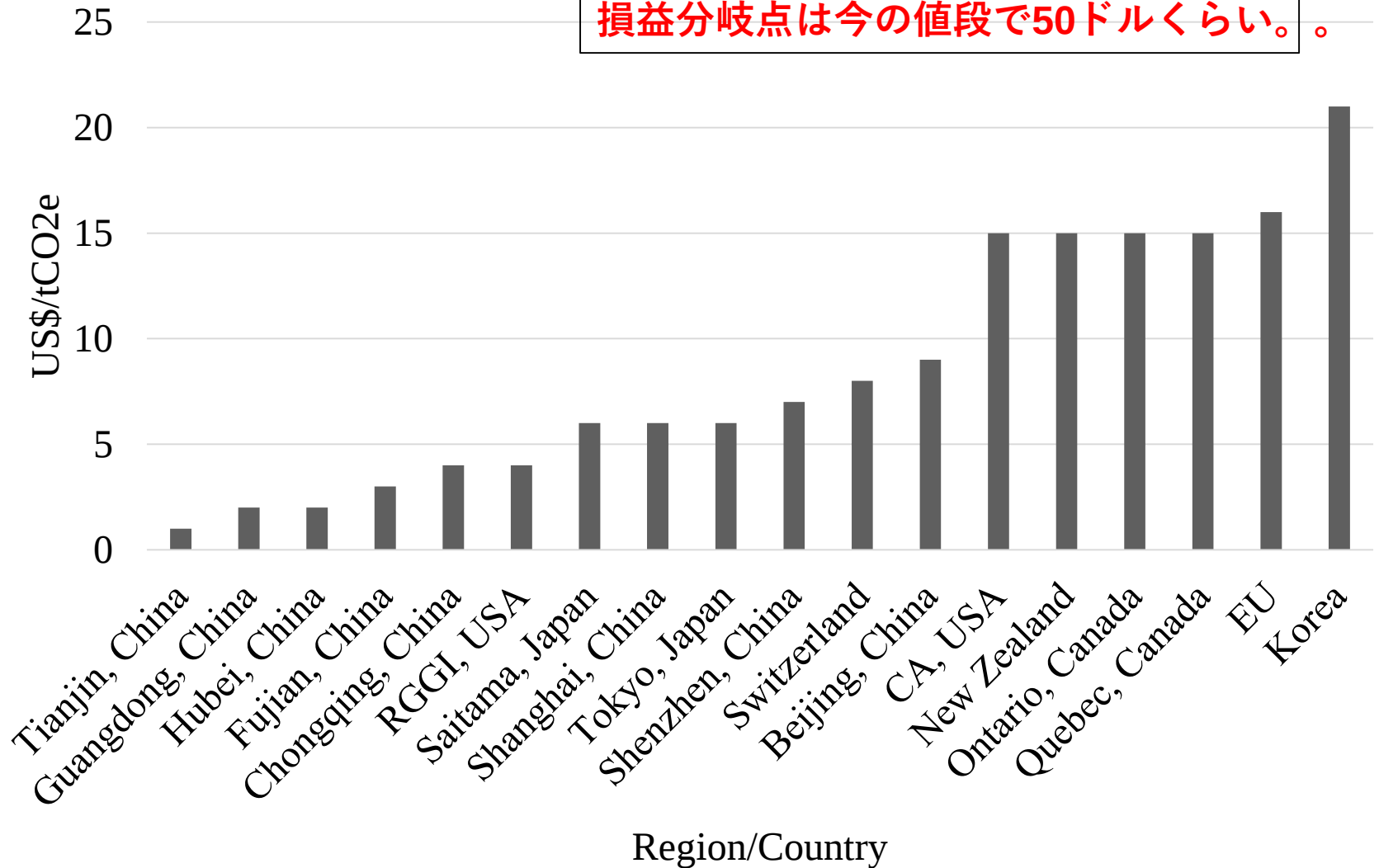
Institute of Advanced Energy, Kyoto University



現在の炭素価格



損益分岐点は今の値段で50ドルくらい。。



核融合とバイオマスの組み合わせ



国際協力で建設中の核融合炉



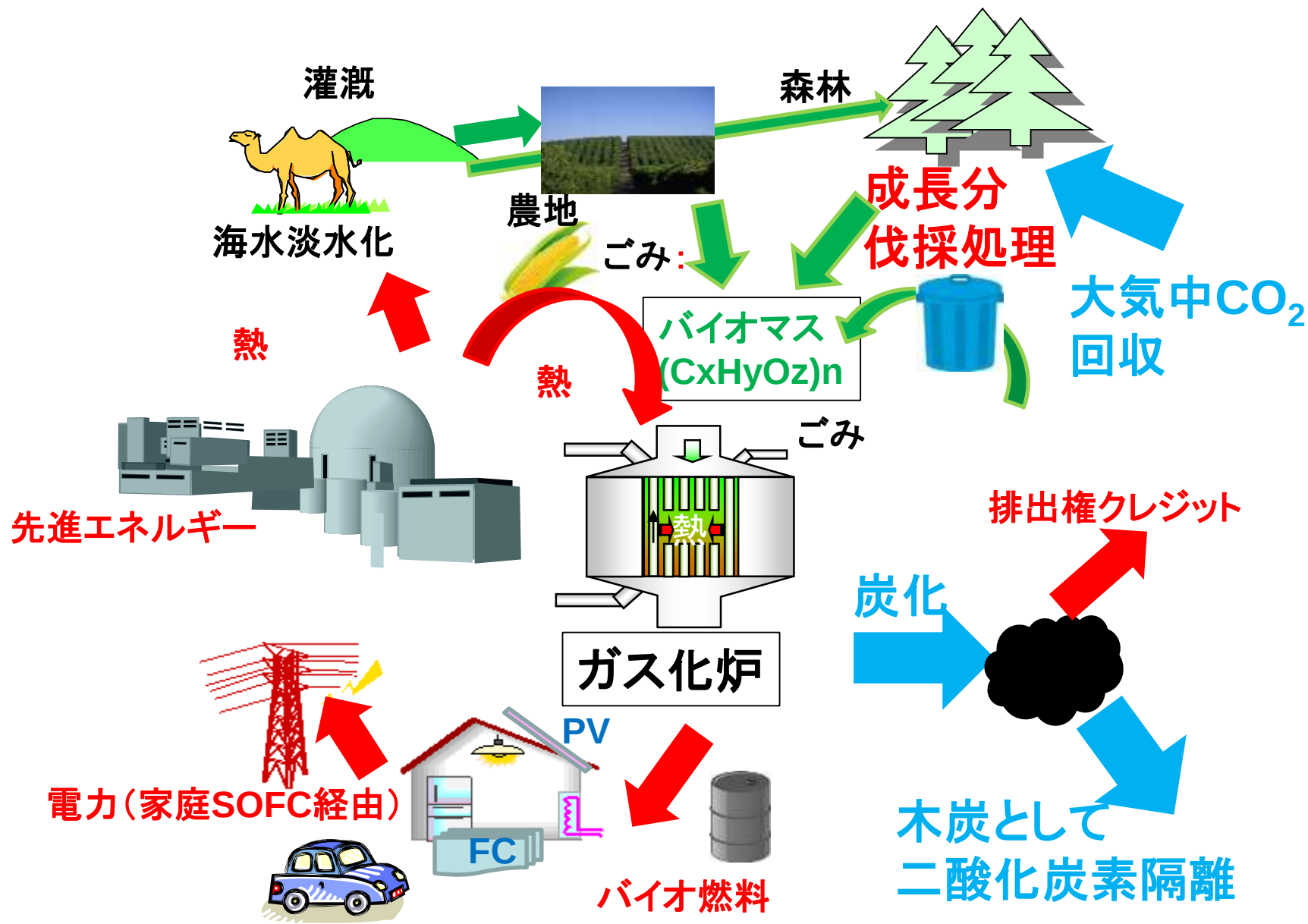
インドネシアの森林と草原

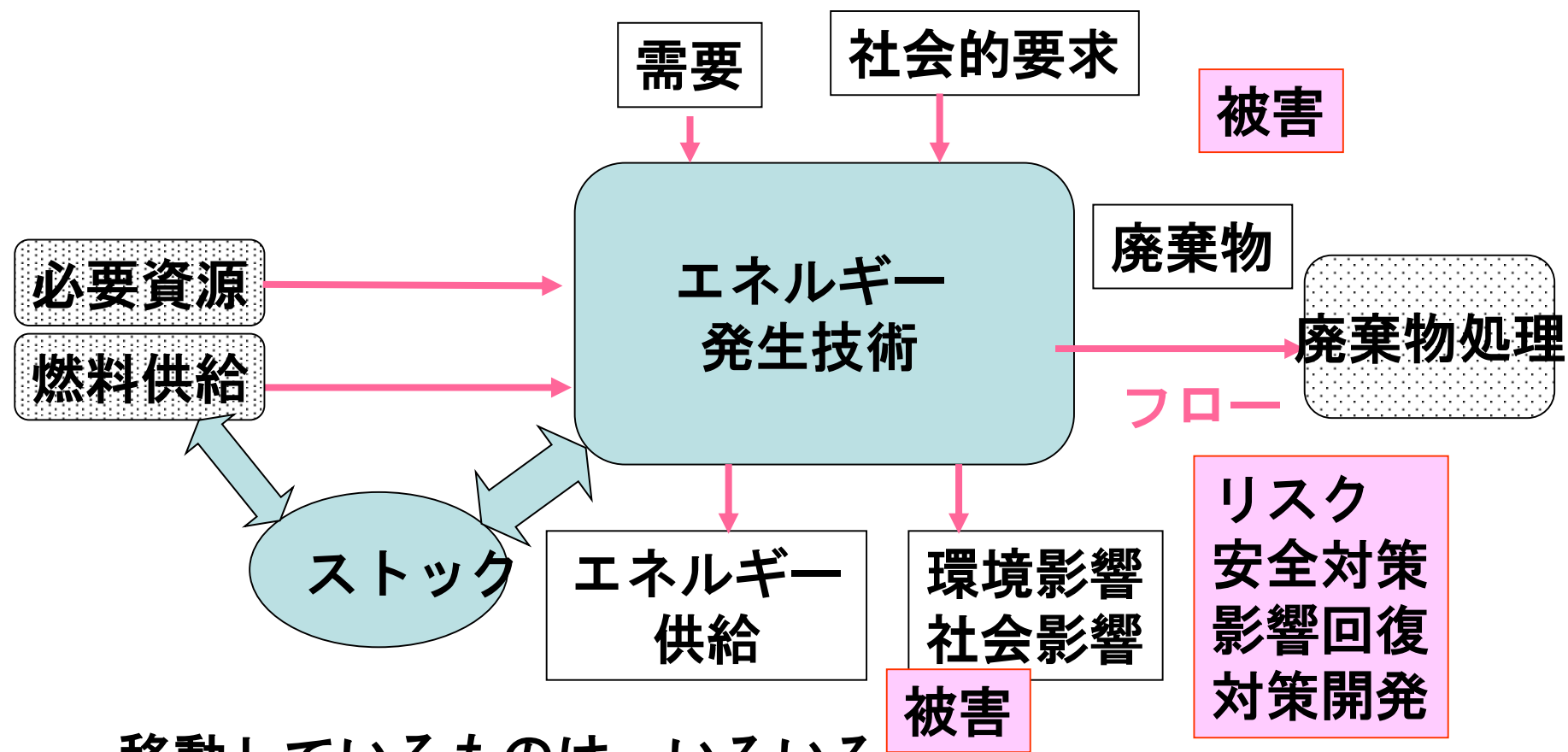




ゼロエミッションからさらに先へ...

Institute of Advanced Energy, Kyoto University





- ・ 移動しているものは、いろいろ。
- ・ 仮想的なものもある。

動的なシステムです。線がつながっていても、タイミングや速度が合わないこともある。

→ **成長速度も制約されうる。** → **経済は「成長率」で測る！**
→ **資源豊富/エミッション少でも制約されるものがある**

同じ図を使って、ここでは、その2回微分を
考えてみます。

- ・「経済成長」は、GDPの増加率で計量される。
- ・エネルギーのロジスティックスは、フロー、つまり、「 W ＝単位時間あたりのエネルギー量」で表現される。

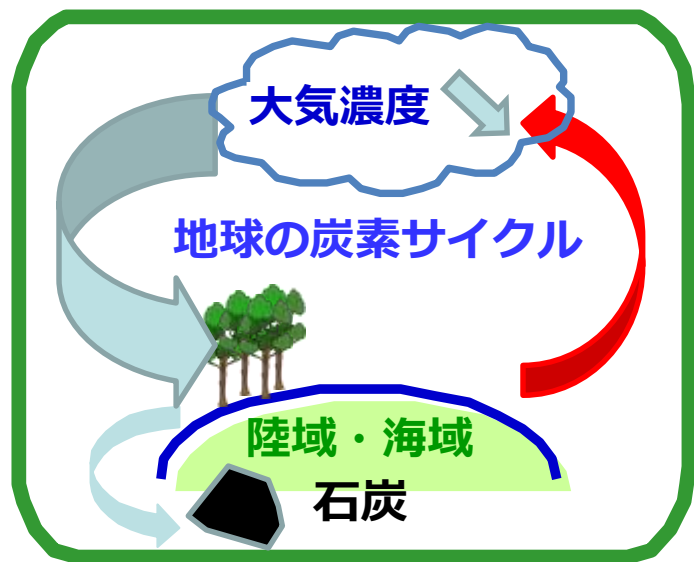
➡これが、増やせないと、「エネルギー原単位」が増えない。

➡エネルギー原単位が増えないと、GDPが増えない。

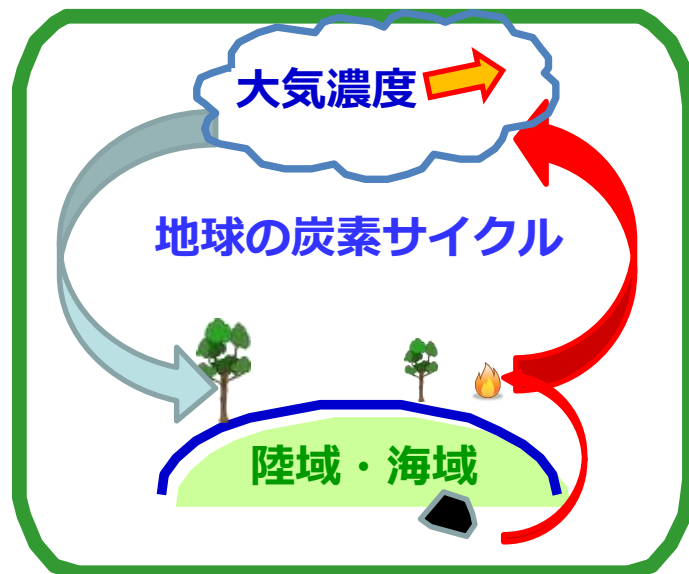
「高度成長社会」は、エネルギー供給の急激な増加によって初めて可能になった。」火力＝化石資源の特性として。

「高度成長社会」は、人類の目指す社会なのか？

エネルギー革命、産業革命で始まった一過性の現象では？



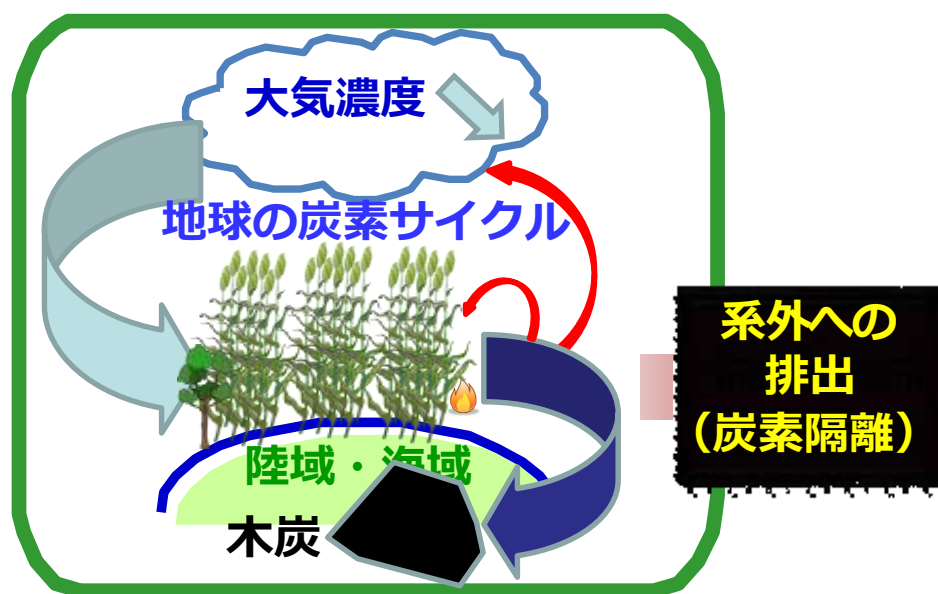
①化石燃料の生成（太古）



③再エネ省エネ（現在）



②産業革命後（過去300年）



④カーボンバジェット創出（未来）

- 先進エネルギーの利用法として、バイオマスの熱分解が可能。
吸熱反応であり、石油代替燃料がつかれる。
- エネルギーによる吸熱バイオマス分解は代替燃料として
二酸化炭素を出さない燃料を供給する(ゼロエミッション)
- さらに木炭にすれば二酸化炭素固定となる(マイナスのエミッション)

隔離された二酸化炭素 ➡ 排出権クレジットとして 市場で販売できる
ーただしクレジット価格を認証する機構が必要 ➡ 途上国開発に適合

社会的環境的には、二酸化炭素を出さないだけでは意義が小さい
➡ 最終目標は「人類の脱炭素化」

- 木炭製造によるバイオマスの転換は カーボンマイナス技術として
大きな可能性を持つ ➡ 重要なエネルギー利用技術となる
(1GWプラントで年間10MtonCO₂相当 ➡ 大規模エネルギーが必要)



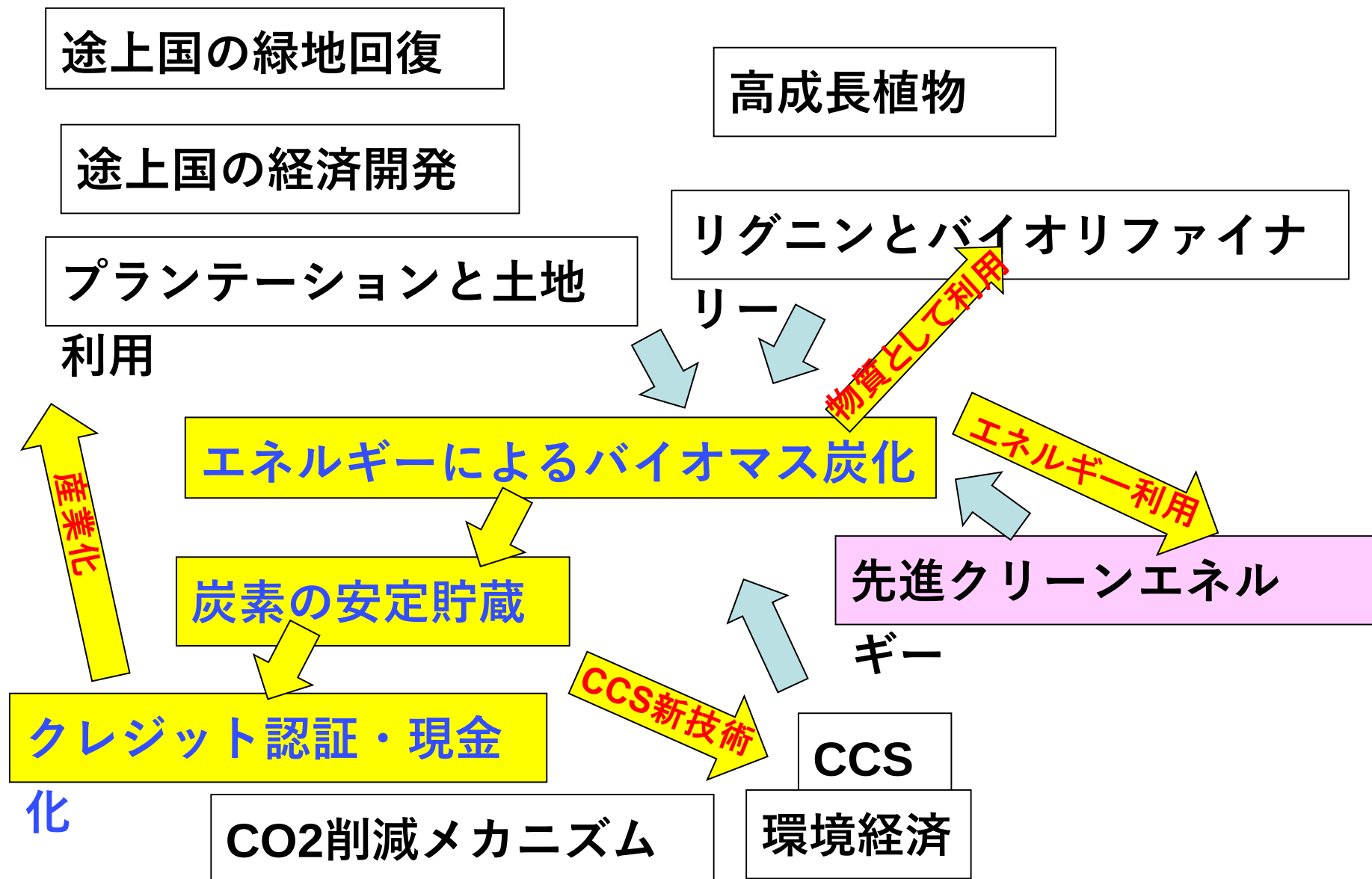
まとめ2

人類活動による二酸化炭素排出を減少し、**最終的に大気中濃度を産業革命前レベルに戻すことが目標**なら。。。

- 継続的なエネルギー転換が必要。(200年～)
 - 生物による二酸化炭素固定は不可欠。しかし隔離法が問題。
 - ゼロエミッションだけでは**CO₂を減らすことができない**。
➡先進エネルギーバイオマス熱分解は、エネルギー生産➡炭化利用
なので、**正味のCO₂削減となる**
(クリーンエネルギー供給もできる。)
 - 灌漑を含む植林、緑地拡大、途上国開発との両立も重要
➡**途上国の産業として可能性**
 - エネルギー消費を拡大し、特に途上国の成長を確保しながら
人類の持続が可能なオプションとなる。
- 「歴史的なCO₂放出の逆転固定」**

二酸化炭素固定の全体システム

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



SDGs-現在の価値観の枠組み

Sustainable Development Goals :SDGs

国連の Sustainable development Summit 2015 で採択。
2030 アジェンダとして 2016 から 2030に達成すべき 17 のゴール
が設定された。

⑦エネルギーをみんなに
そしてクリーンに

⑧働きがいも経済成長も

⑨産業と技術革新の基盤を
つくろう

⑪住み続けられる街づくりを

⑫つくる責任つかう責任

他にもいろいろ関連するが...





実はずっと持続可能だった昔の日本. . .

ありがとうございました。ご質問等は、HPまたは
s-konishi@iae.Kyoto-u.ac.jp まで。

わが国初の核融合ベンチャー！？

日本経済新聞

朝刊・夕刊 ストーリー Myニュース 日経会社情報

トップ 速報 経済・金融 政治 ビジネス マーケット テクノロジー 国際 オピニオン

自動車・機械 関西 京都

保存 共有 印刷 27 27 7% 18 58 その他

核融合発電向け主要部品を設計・開発する京都大学発のスタートアップがこのほど誕生した。京都フュージョニアリング（京都府宇治市）で、核融合研究の第一人者である京大エネルギー理工学研究所の小西哲之教授の研究成果を基に液体金属を使って熱交換率が高い方法で高温プラズマからエネルギーを取り出す「ブランケット」という部品の開発・設計を担う。

小西氏ら社員は4人で資本金は4千万円。京大が全額出資する京都大学イノベーションキャピタルが約8000万円を出資した。



出資者：京都大学イノベーションキャピタル
（文科省の政策・大学による学内ベンチャー支援）
総額 7,530 万円 投資
社外取締役 1 名 派遣



京都大学から日本初の核融合スタートアップが誕生した



2050年カーボンニュートラルに伴う グリーン成長戦略

④原子力産業

- ◆ 原子力は、実用段階にある脱炭素の選択肢。国内での着実な再稼働の進展とともに、海外（米・英・加等）で進む次世代革新炉開発に、高い製造能力を持つ日本企業も連携して参画し、多様な原子力技術のイノベーションを加速化していく。

	現状と課題	今後の取組
小型炉 (SMR)	各種要素技術の開発が必要 ・海外での実証プロジェクトと連携した基本設計・開発。 ・日本企業独自で多様なニーズを見据えた小型炉を自主開発。 革新的技術の安全性や経済性を検証 ・安全性は、米・英・加等と連携して検証。 ・経済性は、米・英・加等と連携して検証。	国際連携プロジェクトへの参画 ・2020年代末の運転開始を目指す海外の実証プロジェクトと連携した日本企業の取組に対し、安全性・経済性・サプライチェーン構築・規制対応を念頭に置きつつ支援を行う。 ・海外で先行する規制策定を踏まえ、技術開発・実証に参画。 脱炭素技術であるSMRの2020年代末の海外での実証プロジェクトの確立。

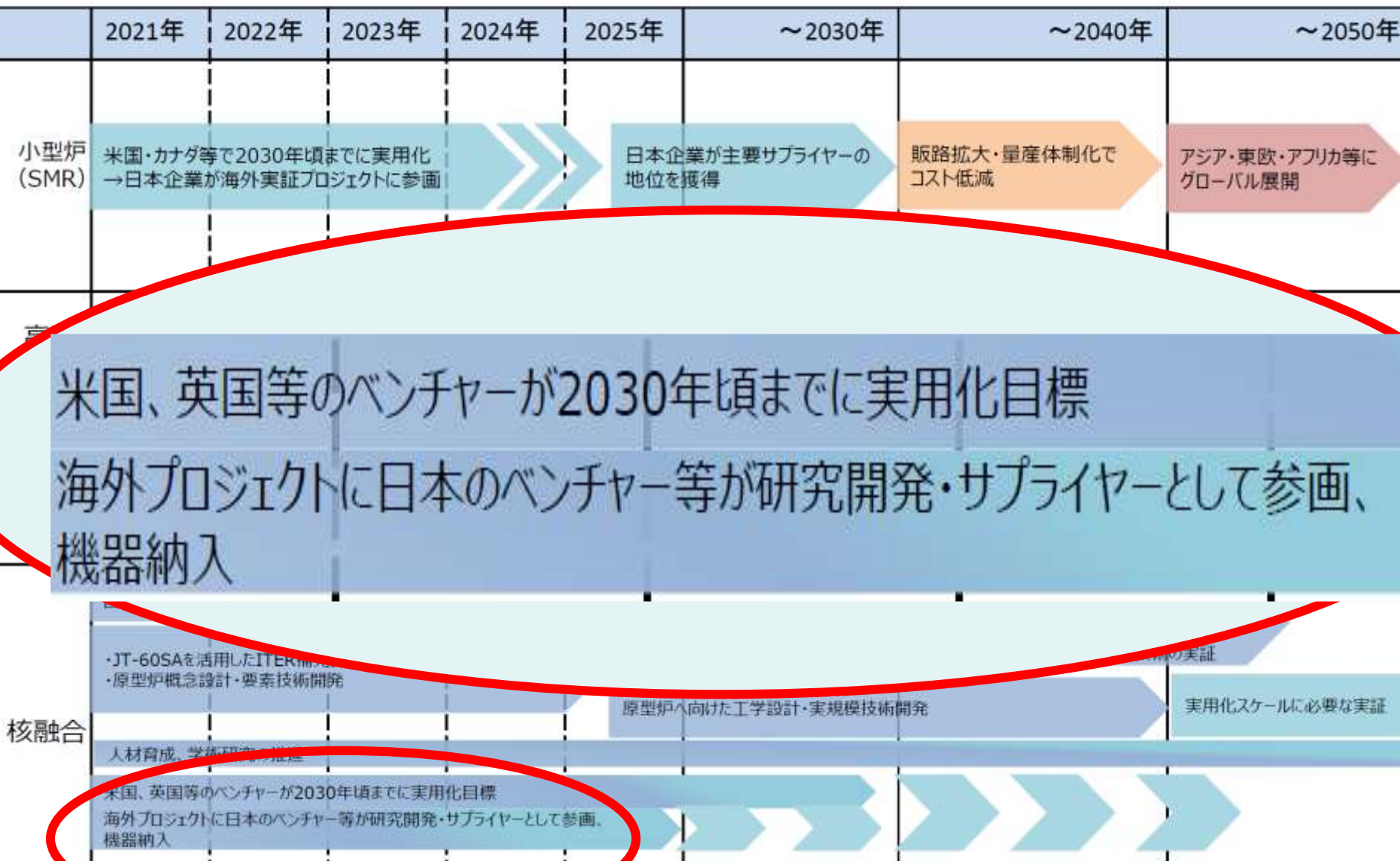
2030年頃の実用化を目指す米・英のベンチャーと日本のベンチャー・メーカー等が連携を加速。

核融合炉の高温熱を活用したカーボンフリーな水素製造技術の開発を推進。

核融合	・プラズマ制御技術の高度化に向けた試験。 ・ITER本体の組立・据付開始、コイル等主要機器を日本から納入。 ・安全で安定稼働できる核融合原型炉の設計。	核融合原型炉の建設計画に反映。 ・2030年頃の実用化を目指す米・英のベンチャーと日本のベンチャー・メーカー等が連携を加速。 ・核融合炉の高温熱を活用したカーボンフリーな水素製造技術の開発を推進。
-----	---	---

④原子力産業の 成長戦略「工程表」

- 導入フェーズ： 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 等価減価コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ
- 具体化するべき政策手法： ①目標、②法制度（規制改革等）、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達



すべての研究開発投資は，成果を目指す。
（一部の投資のみが成果を生み出すが）

成果は投資者（公費なら社会）に，還元される

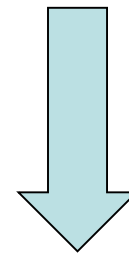


研究はそれを実体化する主体があって初めて社会的存在となる
「大学」は，研究機能に特化している。

➡「大学発ベンチャー」は，研究実体化機能を補完



かつて利益を生まない基礎研究は公費によった。
今は公的プロジェクトも大企業も失敗できない



「イノベーション」はスタートアップの機能