

核融合エネルギー基礎論

エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻

先進エネルギー評価論

地球環境学舎サステナビリティ学コース

未来エネルギーシステム技術とメタ評価

—革新エネルギー、核融合、地球環境、水素社会
その技術と経済、社会への適合—

14：エネルギーと持続可能性と経済成長

2021.7.19 前期 月曜 4限

工学部物理系校舎2階216講義室・web配信

京都大学エネルギー理工学研究所・エネルギー科学研究科

小西哲之・八木重郎

内容

1. 未来のエネルギーと環境

- ① エネルギー問題
- ② 地球環境問題
- ③ 未来エネルギーの考え方
- ④ なぜ核融合を研究するのか？
- ⑤ メタ評価とは何か？

2. 核融合入門

- ① 原理と特徴
- ② 開発の現状

3. 核融合エネルギー変換と炉設計

- ① トカマク炉設計
- ② エネルギープラント

4. 核融合工学

- ① 基本的な工学
- ② 核融合炉の構成機器
- ③ 工学研究の現状
- ④ 技術課題とトピック

5. 安全性

- ① 安全性の考え方
- ② 動力プラント安全
- ③ 廃棄物と材料
- ④ トリチウム、環境、生物
- ⑤ ベイズ理論
- ⑥ 安全保障

Physics Today, vol.55, No.4 (2002)



内容 2



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

6. 先進エネルギー変換

- ① サプライチェーン
- ② 核融合ブランケット工学

7. 未来のエネルギーと社会

- ① 未来型エネルギーシステム
- ② 電力システム
- ③ 二酸化炭素排出とCCS

8. 核エネルギーの利用

- ① 核融合と核分裂
- ② 核エネルギーによる水素製造
- ③ 水素製造とエネルギー源
- ④ エネルギーと水素社会

9. エネルギー研究と社会

- ① 研究開発と社会
- ② 経済効果と市場性
- ③ 外部性の概念
- ④ 知的財産権と企業・起業

10. 未来エネルギーと人類社会

- ① エネルギー開発戦略
- ② 未来のエネルギー市場
- ③ 環境対策とエネルギー
- ④ 社会への適合
- ⑤ **人類の持続可能性問題**

0. 連絡事項

1. お知らせ

- ・今回でおわりです。課題提出、出席、聴講回数は確認しました？

実は、ケースがかなり複雑で、追いついていません。
まず、自己で確認してください。

単位の確保、成績アップのためには、特別課題を準備します。

それ以外には、特に提出物はありません。

質問、疑問、あとは個別に対応します。

s-konishi@iae.Kyoto-u.ac.jp



イントロダクション (再掲)



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

もう一度、ポリシーを確認しますと。。

○本講義の目的

① 知識の伝達

—「先進エネルギー（核融合）」の「基礎」って何だ？

- ・新しい(まだない)エネルギーシステム研究開発の理解
- ・そもそもなんでエネルギー研究？目的は環境??
エネルギーシステムというもののとらえ方 \leftrightarrow 社会・環境・人類

② 考え方そのもの—考える方法と、考えるという行動。

—教えられるのではなく、自分で考えること。

- ・なぜエネルギー・環境問題を勉強するのか？
- ・どんなエネルギーがよいのか？環境との関係は？
- ・何をすればよいのか？

—研究(に限らず実は何でも)「何をやるのか」「何をを目指すのか」決めたところで、実は勝負は決まっている。



成績について



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

○こちらの伝えたいことを、すべて受け取っていただければいいです。

- ・出席状況に不安のある人について、(無断欠席含め) 代替措置は取ります。
- ・今日の指示以後、追加措置は個別に承ります。
- ・成績についての問い合わせには応じられません。

○試験、レポートはありません。

- ・すべて、これまでの授業に関連した提出物によってのみ、採点をして、成績を提出します。
- ・あとは、通常のルール通りです。

○アフターサービス

- ・この講義に関連していてもいなくても、質問は随時受け付けます。
- ・希望者には、質問・提出物にコメントして返します。メールください。



単位について(おまけ)



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

参考

・大学設置基準

第二十一条 各授業科目の単位数は、大学において定めるものとする。

2 **前項**の単位数を定めるに当たっては、一単位の授業科目を**四十五時間**の学修を必要とする内容をもつて構成することを標準とし、授業の方法に応じ、当該授業による教育効果、**授業時間外に必要な学修等**を考慮して、次の基準により単位数を計算するものとする。

一 講義及び演習については、十五時間から三十時間までの範囲で大学が定める時間の授業をもつて一単位とする。

つまり... 残りの時間は「**自習**」してください。

何をやって？

➡「エネルギー」「環境」について、調べ、考え、話す、ことで。



前回のまとめ



- 資源を消費する時代は終わった。
- 資源の節約、再生、循環、の時代もまた終わりつつある。
- これからは、**環境容量の創生**が新しいパラダイム。
- 人類はそのためのテクノロジーは手にしている
⇒ しかし、それを実現するのは社会。

ここまでの話の要点

1. エネルギーのメタ評価←一段上の視点から、全体を俯瞰する。
 - エネルギー技術を、開発側でなく社会の側から見ると、開発課題が違ふことがある。
 - 核融合は、資源、環境、社会への影響で有望な要素を持つ。
 - しかし今後のエネルギー市場の展開を考えると目標が変わる。
2. これからのエネルギーに要求されること
 - 地球環境問題への対応→脱炭素化
 - 途上国の経済開発での利用可能性、先進国の社会適合性
→さらに進めれば、社会を持続可能型に変革する力
 - 未来型エネルギーシステム—電気自動車？水素社会？



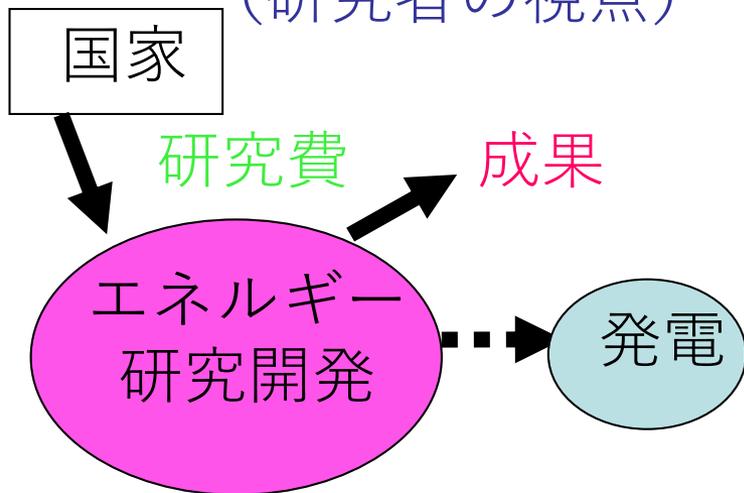
研究開発されるエネルギー

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



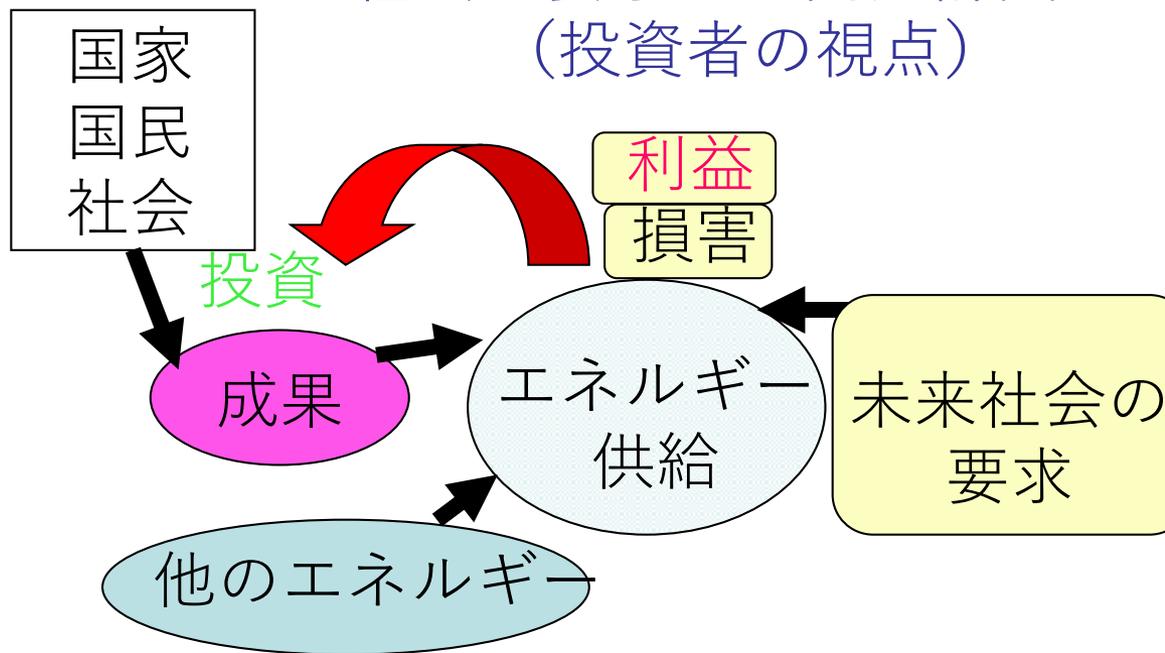
技術開発は進む
しかし研究者と社会の視点はちがう

研究開発計画
(研究者の視点)



エネルギー技術を研究論文を出す！

社会の要求する開発計画
(投資者の視点)



**エネルギー研究も社会活動のひとつ
未来にどんな世界をもたらすのか？**

残った問題

3. エネルギーは人類の持続を可能とするか？できるとしたら？

- ・エネルギー技術開発としての問題
- ・資源、環境、社会への影響評価と対応
- ・食料、水、資源、経済成長、人口。。。??

4. エネルギー技術専門家に要求される知識と判断

- ・エネルギー研究開発の意義
- ・エネルギー技術の理解と評価

→エネルギー研究は、今何を目指していて、これからどこへ行くのか？

人類の持続可能な発展が究極の目標？

前回の課題 1

確かに、歳をとると、メタボになったりするので、摂取カロリー減らしたほうが良かったりします。

- ①ダイエットに興味がある・やっている・やっている友人がいる、として。
人に勧めますか？
- ②健康のためには確かにいいんだけど、それをルールにしたり、政策的に誘導することはいいと思う？
(NYでは実際Lサイズドリンク禁止法案が出て、最高裁で差し止められた。)
- ③では、若くて（一見）健康な人が（将来デブになるのを防止するために）、思いっきり食べたいというのを止めますか？

前回の続き — コミュニタリアン vs. リバタリアン？

君たちは、成長期の終わりにいます。— 個人的にも、**人類的にも**。

① 栄養摂取のパターンを、**成長期から安定期**に合わせて
変えなければいけない。それは事実。

② 君たちの周りの年寄り（指導教員とか）は、すでに老境に
入り、その栄養摂取パターンを当たり前と思っている。
世の中の商品も、価値基準も、そちらに合ったものが多い。

③ ところが世の中には、まだ成長期の人もある。これから成長
する人もいる。資源の利用、環境影響、インフラは共通。

④ これからの世代、これからの社会、資源の分配、環境・社会への
影響を通じて我々は**相互に影響**しあっています。

おせっかいかもしれないが、「こっちの方がいいよ」と

いうことは、ありえます。今の国際社会はそうなってる。

だから（個人は自由主義でも）、**社会の仕組みはおせっかい。**

人類全体のコストとリスクを最小化し、資源を有効に使うため。

「公共財」「コモンズ」という考え方

実は、人類の共通的な生存のためのシステム、例えば

- －食料の生産と分配
- －水の供給
- －エネルギー（力、熱、光、移動。。）
- －情報、娯楽、

これらは、もともと、市場経済、社会制度、産業革命、などの発生以前から存在している。

サプライチェーンが成立していれば、限界費用はゼロに近かった。（資源の保存則、循環性、持続可能性があれば。）

だから、売買によらなくても入手できたし、サプライチェーンが機能しなければ買いたくても手に入らない。

ネット社会は、個人の自由は確保しても「おせっかい」はとめられない。

前回の課題 2

1. 人類が生きるためには、エネルギーだけでなく、食料も水も必要です。

- ①食糧生産は実は足りています。（量的には。）
では、現実には飢えて死ぬ人がたくさんいるのはどうして？
- ②今後の人類に、食料は足りるだろうか？食料が足りなくて人口が制約される？
- ③実は、水も足りない。この地球の表面にはこんなに豊富にあるのに。これはどうして？どうやったら水問題は解決できる？

そのために。それぞれの国、人類全体は、生存
インフラを構築する。。どのように？

- －限界費用 (marginal cost) ゼロ
- －ゼロエミッション
- －生存基盤としてのサプライチェーン

．．． 既にやってきたこと。

- －水、食糧、居住環境。
- －安全、医療、情報、交通。

回答. . . というほどではないんですが。

人類が真っ先に作ってきたのは、エネルギーでも交通でもなく、食料と水のサプライチェーンだったのです。（当然。）

①食糧生産は実は足りています。

— 「高度成長」社会で、生産量を大きく拡大した（技術革新）
耕作、灌漑、肥料. . . すべてエネルギーが拡大。

— 届くようなシステムを整備した（サプライチェーン）

— 生産量の拡大は、スループットの成長率で成長した
（マルサスの誤り⇒食料が指数関数的に増加したので
人口が増加した）

⇒不足するのは、常にサプライチェーンの不備な部分（政治）

②食料（のみならずすべての生産物は消費が減退すると余る）
人口増加の鈍化の方が先に来る。

←食料の限界費用がゼロに近づく

③水も、エネルギーと同じく、「保存されている。」

- 地表は水に覆われている。
- 人類は、水を処理して届けるシステムを構築してきた
- 水はエネルギーにより届けることができる
- サプライチェーンが不備な部分で人は水へのアクセスを得られない
- 水は、システムさえ構築すれば限界費用は極めて低い
—水道料金の伝票を見てごらん？電気代、ガス代でやってみたように。

- 水は、サプライチェーンの後ろ側の比重が重くなってきた。（下水料金の方が高い）

- 一番たくさん使う水（食料生産）は、「バーチャルウォーター」なので、物理的には移動していない。

➡要するに、これも人類の作ってきた社会システム

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、

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS 17 GOALS TO TRANSFORM OUR WORLD



前回の課題 2

2. 自分の修士論文。

(まだテーマ決まっていなかったら、単に興味のあるテーマ。研究テーマとして希望しているものでOK.)

その、エネルギー問題と地球環境問題での寄与を、3行くらいで書いてください。

(修論では、まるまる一章書くことになるが。)

これが書ければ、とりあえずこの授業の目的の一つは達成されるんですが。うまく書けそうかな？

—少なくとも、資源、エネルギー、環境について、今まで言われてたことが通用しなくなっていることは、考えといてくださいね。

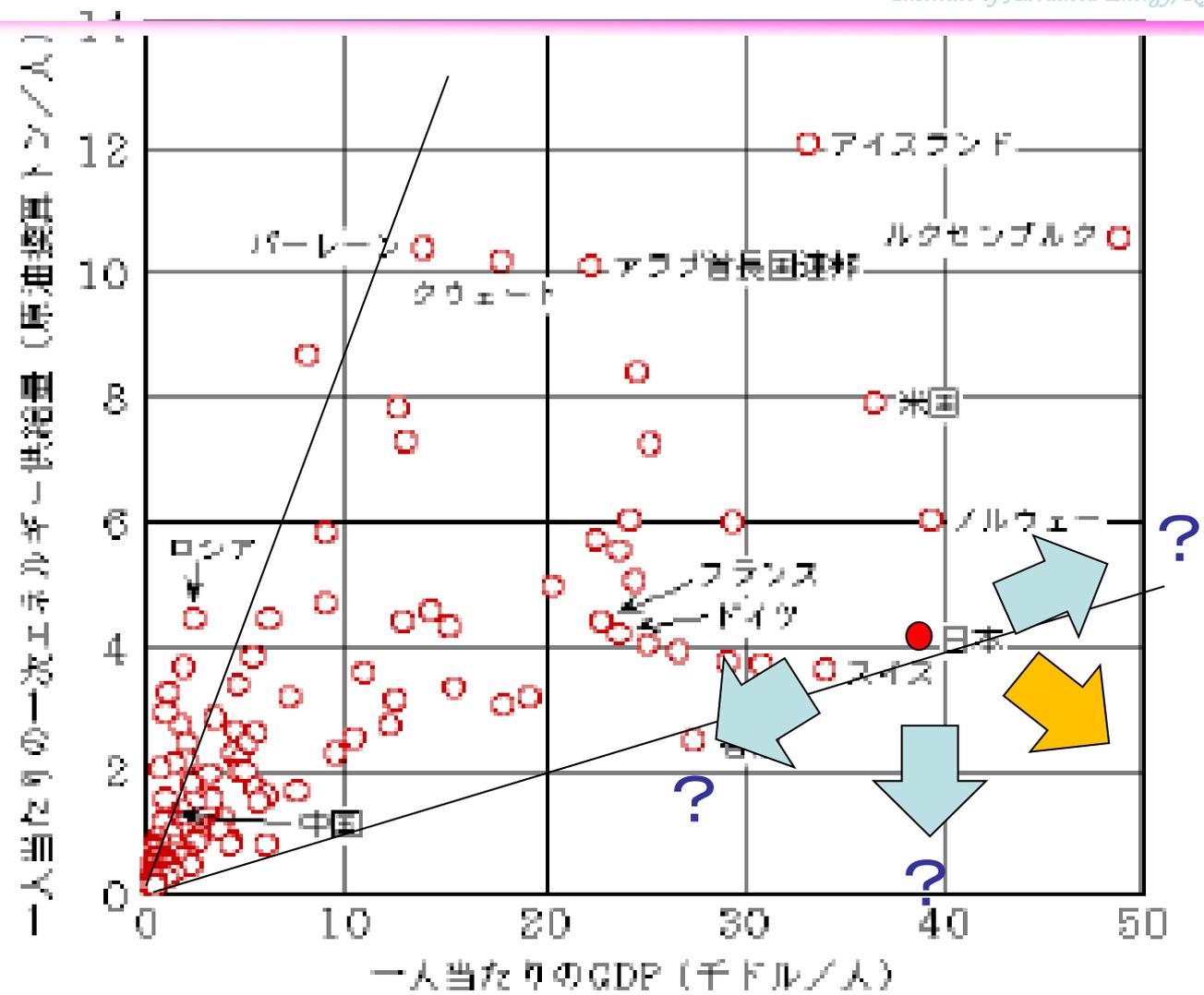
自分が今から1年半頑張ってることを、「時代遅れ」にしないためにも。

前回の課題 3

人類は発生以来、これまでずっと、経済成長を続けてきました。
今も、持続可能に「発展」したいといっています。

- ①何が成長を可能にしてきたんだらう？
- ②今後の人類は、どこまで成長できるんだらう？
- ③成長しなくてもいいのかな？

「**経済成長**」の本質を知らないで、
「**持続可能な成長**」
なんて、言えるわけないんだけど。。。??

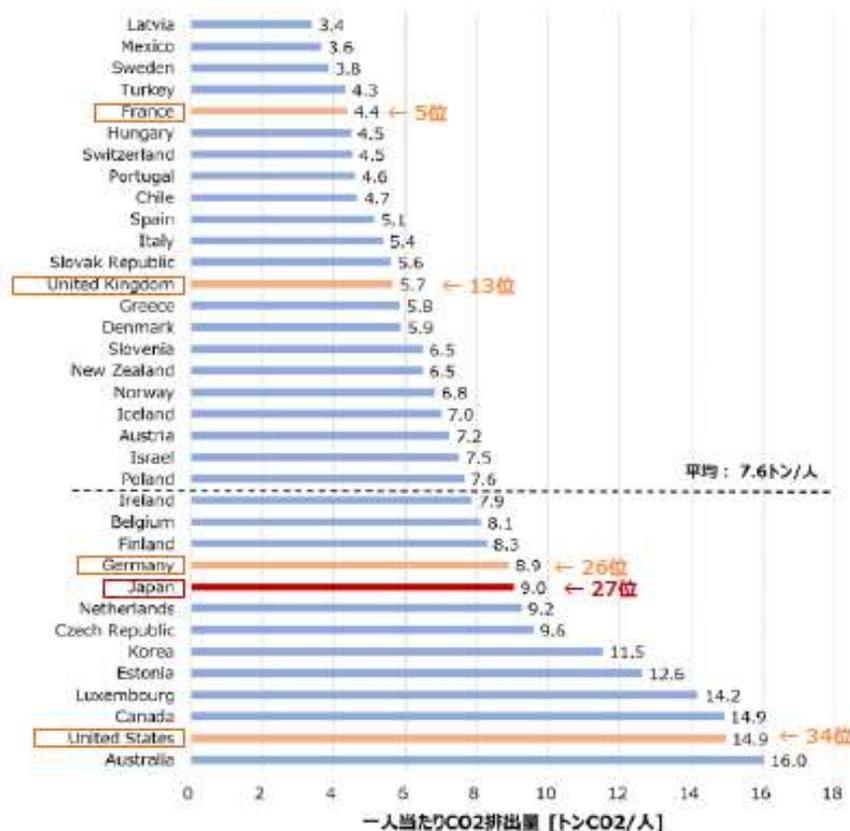


一人当たりのGDPとエネルギー原単位。
概ねエネルギー消費の多い国の方が豊かと言えるが、そのエネルギー消費には大きな開きがある。

各国の一人当たりCO2排出量と排出要因分解 (2016年)

- 日本のエネルギー起因CO2排出は年間一人当たり9トンでOECD35か国中27位。
- 排出要因を見ると、日本は**需要側に強み**がある一方、**供給側に弱み**。主要5か国中4位。
- 日本は**供給側のCO2排出削減を強化することが重要**。

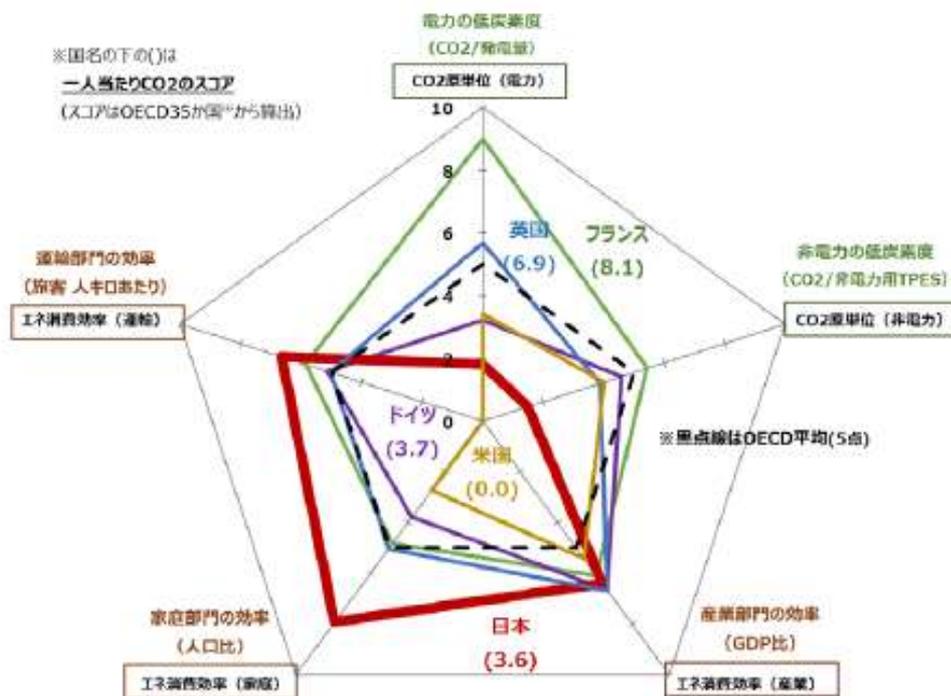
一人当たりCO2排出量 (OECD35か国※1)



※1: リトアニアは2018年加盟のため含まず

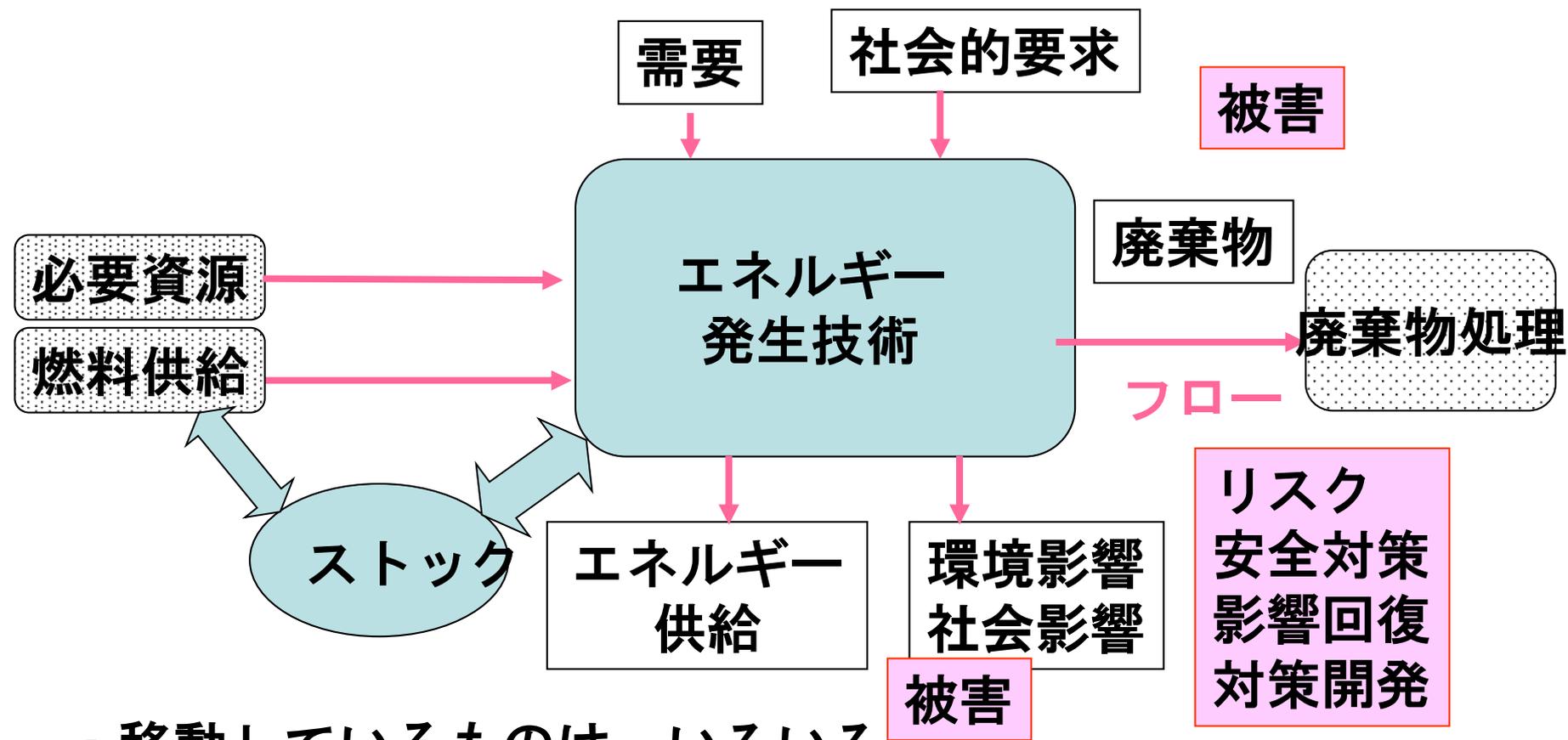
主要国のCO2排出要因分解 (日・仏・英・独・米)

$$\frac{CO2}{人口} = \frac{CO2}{エネルギー消費量} \times \sum_{Sector} \left(\frac{エネルギー消費量}{活動量(GDP, 人口, 輸送kmなど)} \times \frac{活動量}{人口} \right)$$



スコアの算出方法
OECD35か国の中で最善値を算出し、最善値35が0、最善値65が10となるように正規化 (最善値65以上は10、35以下は0)

でも、クリーンなエネルギーで
CO2排出がゼロになれば
それで何とかなるの??



- ・ 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？

ではなぜ火力には制約がないのか？

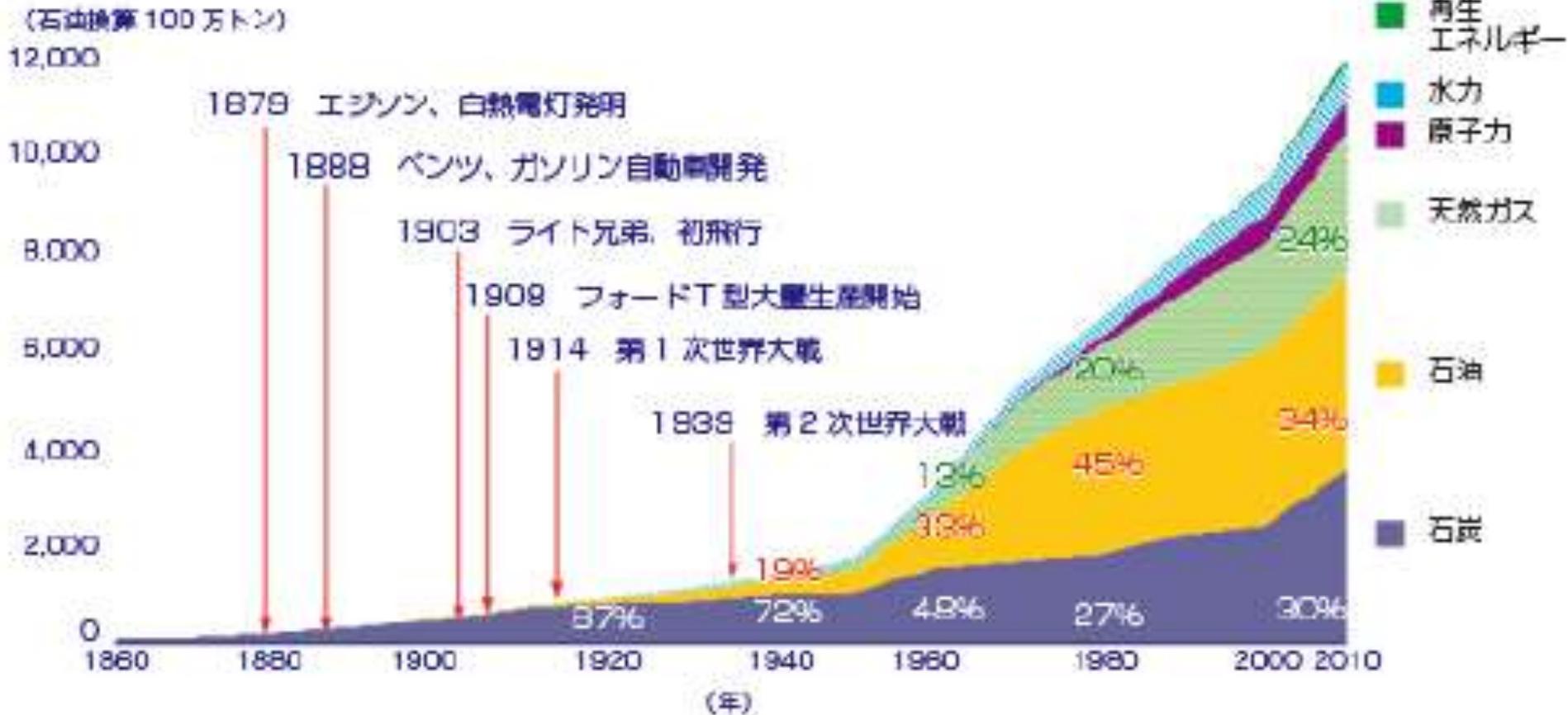
- ・「掘れば掘るだけ出てくる」燃料資源
 - ロジスティックスさえ確保すれば、供給制限が緩和できる
 - 石炭は、森林の成長で制約された薪資源を代替した。
 - ➡ その供給制限のなさが**産業革命**の起源
 - 石油、天然ガスは、大型タンカーやパイプラインで大量に輸送
 - ➡ 世界的な**高度成長の推進力**
- ・北米のシェールガス・シェールオイルも既存ロジスティックスの賜物
 - 投資してしまったため供給制約がなく、価格が下落

供給力(W)だけでなく、その増産速度(dW/dt)の制約も少ない

➡ これが、経済成長の原動力となった。

CO₂制約は人為的... でも、人類が滅びるレベルのリスクが背後に。

- ・政策や炭素税で恣意的に決められる
- ・たとえ回収しても、コストが上がるだけ
- ・CCSで、地中に貯留しようとする、容量的制約が発生



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



天然ガス (LNG) のインフラ

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



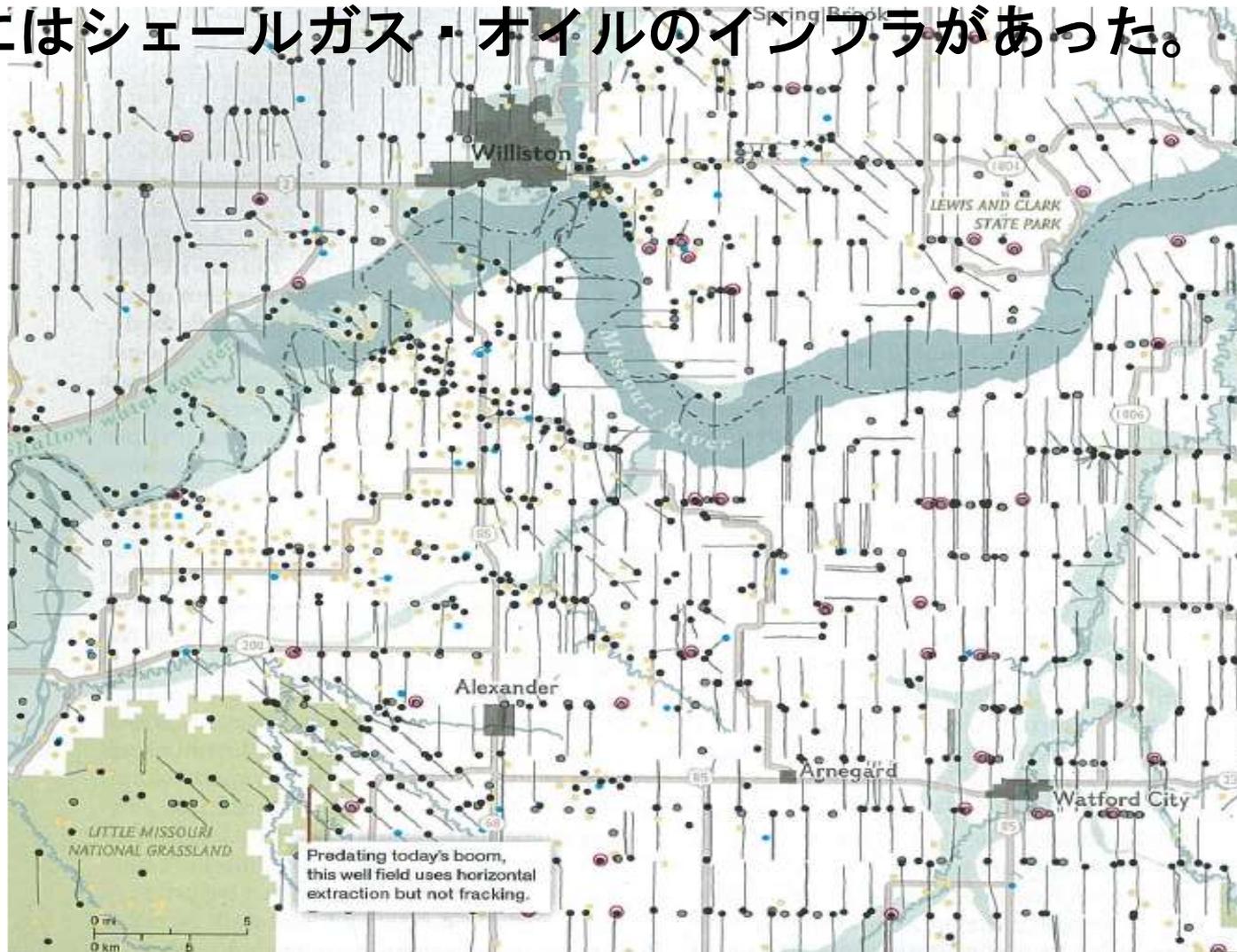
大型タンカー出光丸。30万トンの原油を約20日間で中東から運ぶ。
<http://www.idemitsu.co.jp/tanker/know/report/index.html>

ヨーロッパの天然ガスパイプライン。



http://ec.europa.eu/energy/international/russia/doc/2009_the_european_natural_gas_network.pdf

北米にはシェールガス・オイルのインフラがあった。



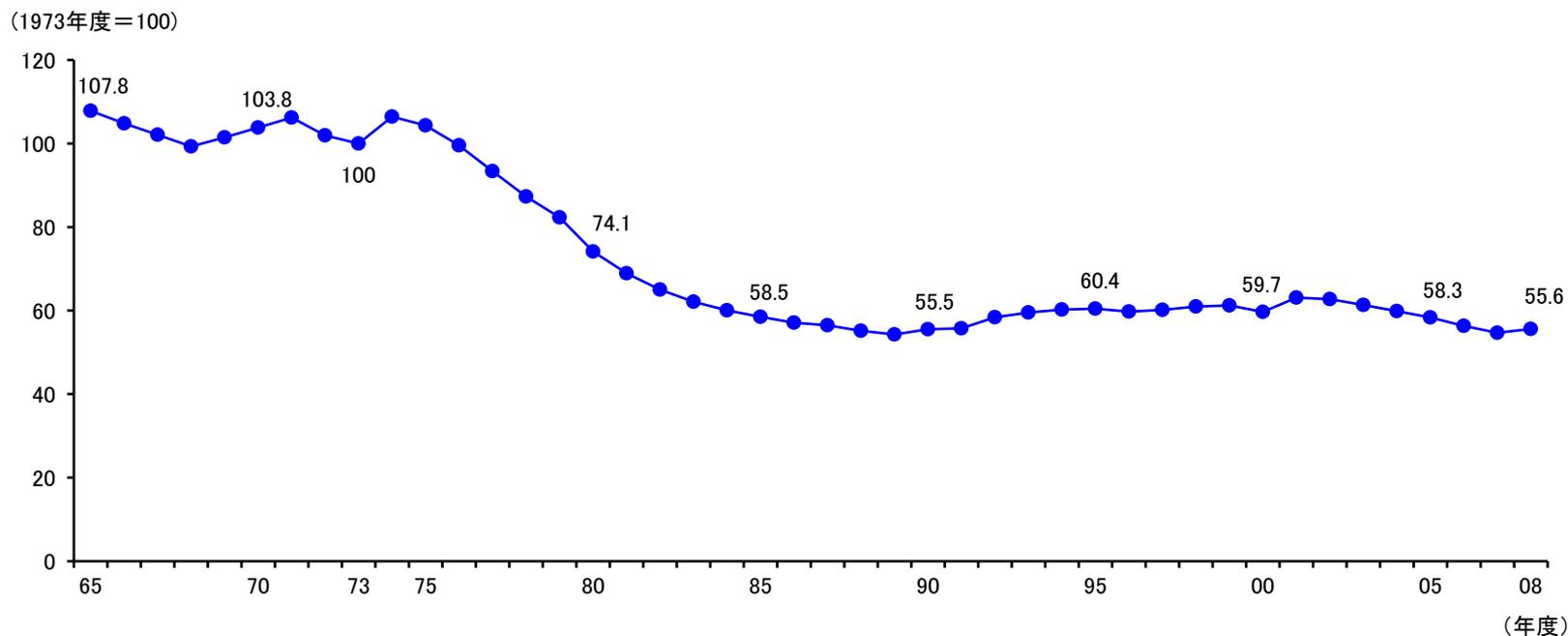
北米の原油の採掘。油田といっても、小さな坑道を掘り進め、高圧水や薬剤を注入することで回収される。(National Geographic, vol.223(3), 2013.)



省エネ国家：エネルギー原単位

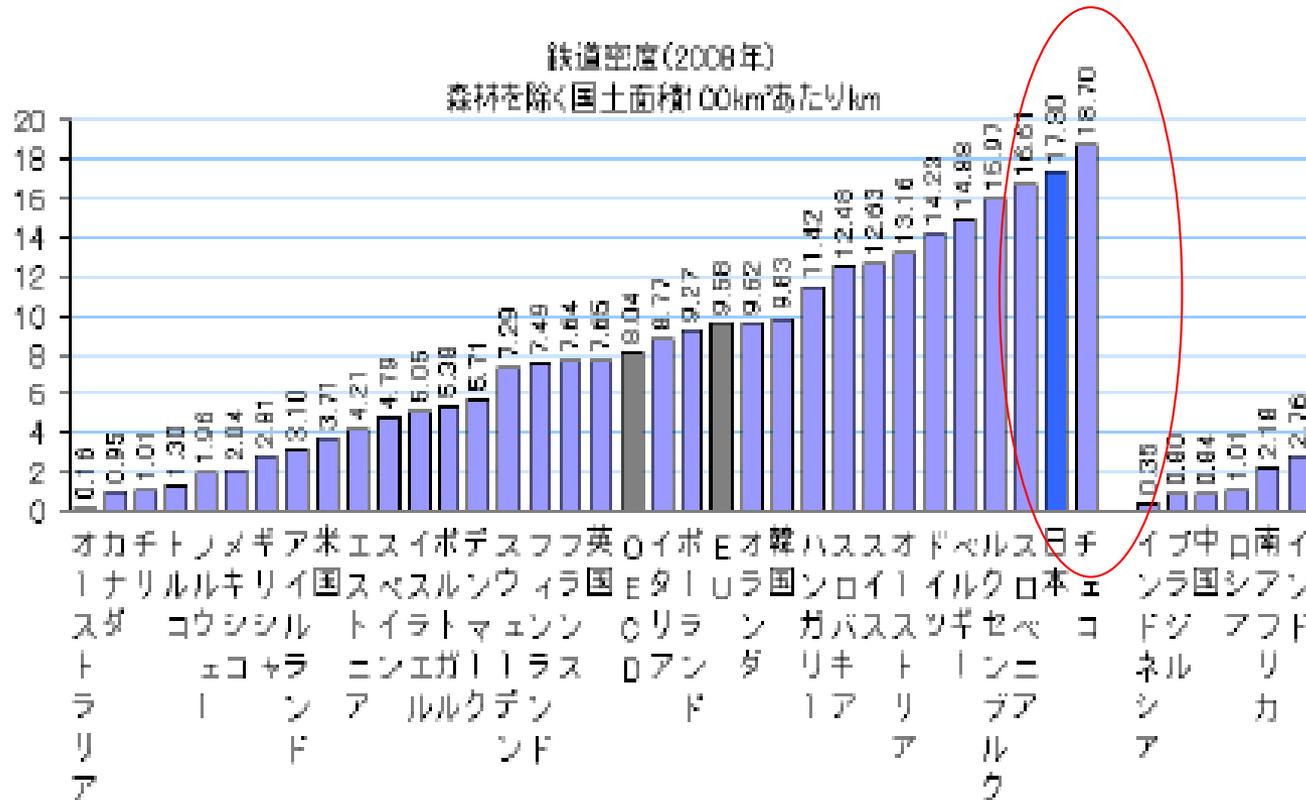


Institute of Advanced Energy, Kyoto University



わが国製造業のエネルギー消費原単位(資源エネルギー庁2010エネルギー白書)。わが国の製造業は大幅な省エネを達成している。

わが国は明治以来鉄道システムの拡充に努めた



(資料) OECD(2011), Economic Policy Reforms 2011: Going for Growth

各国の鉄道密度



インフラ整備と省エネ国家2

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



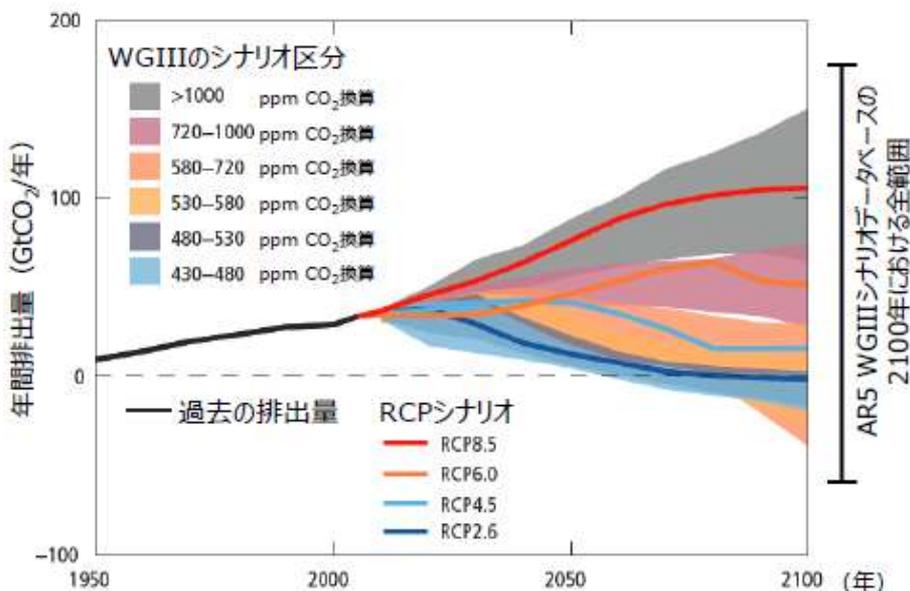
実は少し遅れたが、道路整備も世界トップレベルにある。
大陸国家以外では、道路延長は長く、密度は最も高い部類

国名	道路総延長	面積当たり	人口	一人当たり
日本	1,207,867	3.2	128	9436.461
インド	4109592	1.25	1241	3311.517
韓国	104983	1.05	48	2187.146
シンガポール	3356	4.73	5	671.2
中国	3860823	0.35	1348	2864.112
アメリカ合衆国	6545839	0.67	313	20913.22
ブラジル	1751868	0.21	197	8892.731
ドイツ	643969	1.8	82	7853.28
フランス	951260	1.73	628	1514.745
オランダ	136827	3.29	166	824.259
ベルギー	153872	5.04	107	1438.056
オーストラリア	817089	0.11	23	35525.61
カナダ	1409000	0.14	34	41441.18
ロシア	982000	0.06	143	6867.133

各国の道路延長(総務省統計局データ2012より)

人為起源CO₂累積排出量と気温上昇

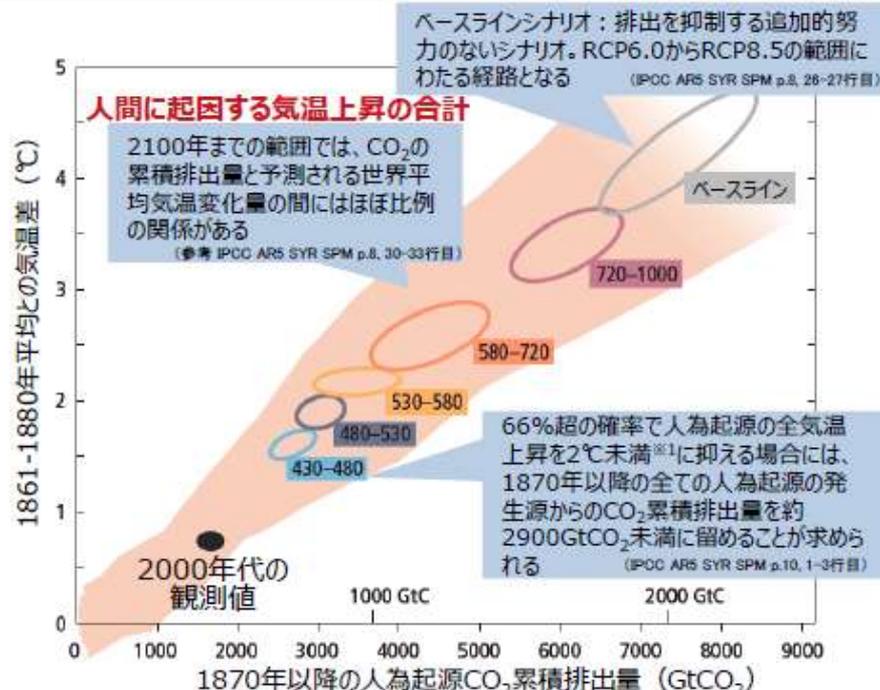
- 21世紀終盤、及びその後の世界平均の地表面の温暖化の大部分は、CO₂の累積排出量によって決められる (IPCC AR5 SYR SPM p.8, 19-20行目)
- GHG排出量の予測は、社会経済発展と気候政策に依存し、広範にわたる (IPCC AR5 SYR SPM p.8, 20-21行目)



- RCP8.5**：非常に高いGHG排出となるシナリオ
- RCP6.0, RCP4.5**：RCP2.6とRCP8.5の間の中間的なシナリオ
- RCP2.6**：厳しい緩和シナリオ。工業化以前に対する世界平均の気温上昇を高い可能性（66%超の確率）で2℃未満に維持することを目指すシナリオの代表 (IPCC AR5 SYR SPM p.8, 25-26行目、27-28行目)

図：人為起源のCO₂の年間排出量

代表的濃度経路シナリオ（線）及びWGIIIで用いられた関連するシナリオ区分におけるCO₂単独の排出量（着色部分は5～95%の範囲） (IPCC AR5 SYR SPM Fig. SPM.5キャプション)



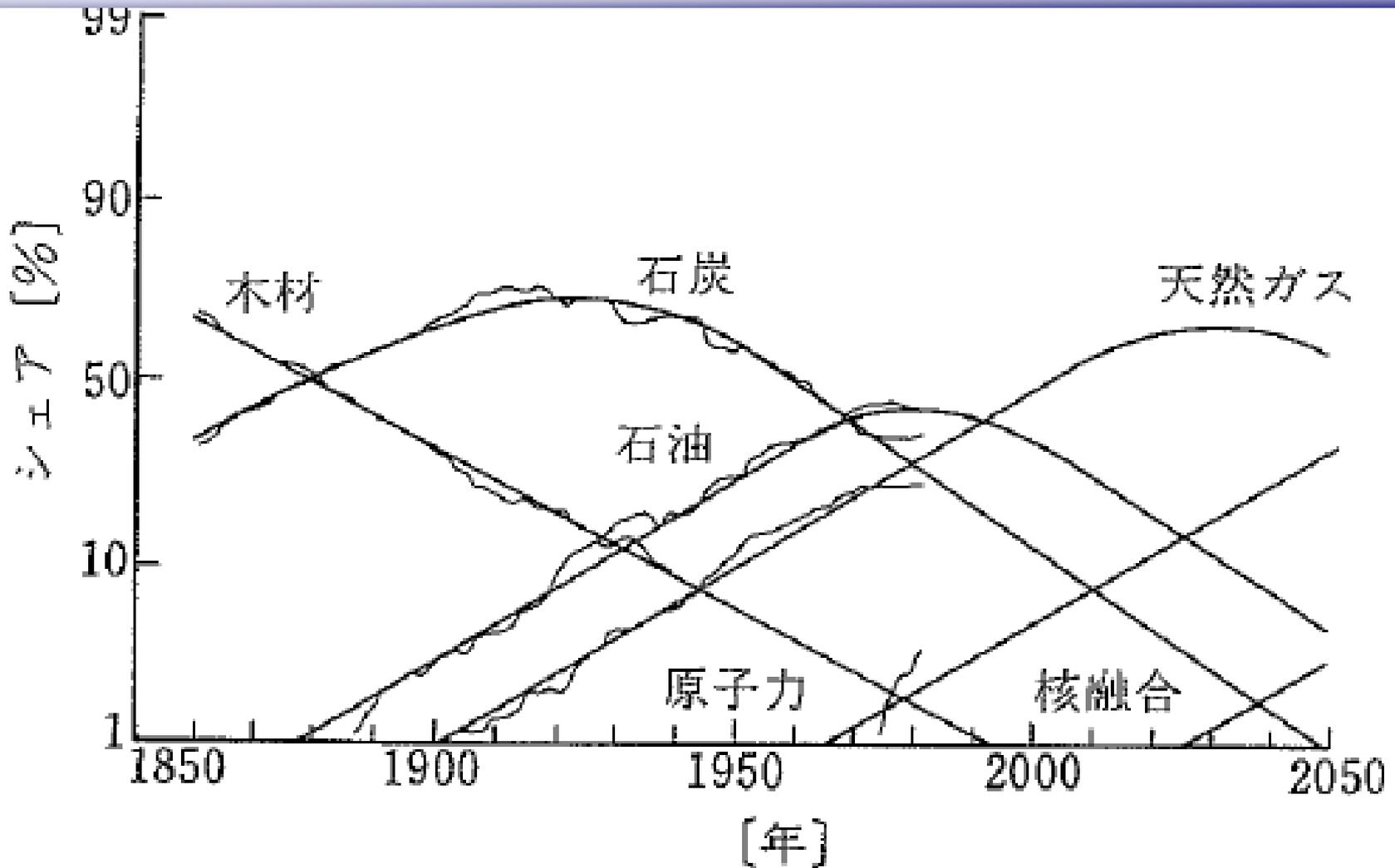
- オレンジ色の扇型の幅は、過去の排出量と2100年までの期間における4つのRCPシナリオを用いた様々な階層の気候-炭素循環モデルから得られる過去と将来予測の値の広がりを示し、利用できるモデルの数が減少するとともに色が薄くなっている
- 各楕円はWGIIIで用いられたシナリオ区分下での、簡易気候モデルから得られた1870年から2100年までのCO₂累積排出量に対する2100年の人為起源の全気温上昇量を示す (IPCC AR5 SYR SPM Fig. SPM.5キャプション)

図：気温上昇とCO₂累積排出量の関係

※1：1861-1880年平均と比較
* 図中の吹き出しは原図に追加したもの

エネルギー技術は変わる

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



エネルギー源の変遷。資源が無くなるからではなく、エネルギーの転換は起こっている。C. Marchetti "How to solve the CO2 problem without tears, IASA, 1988"

原子力発電の新規導入を企図する国及び地域



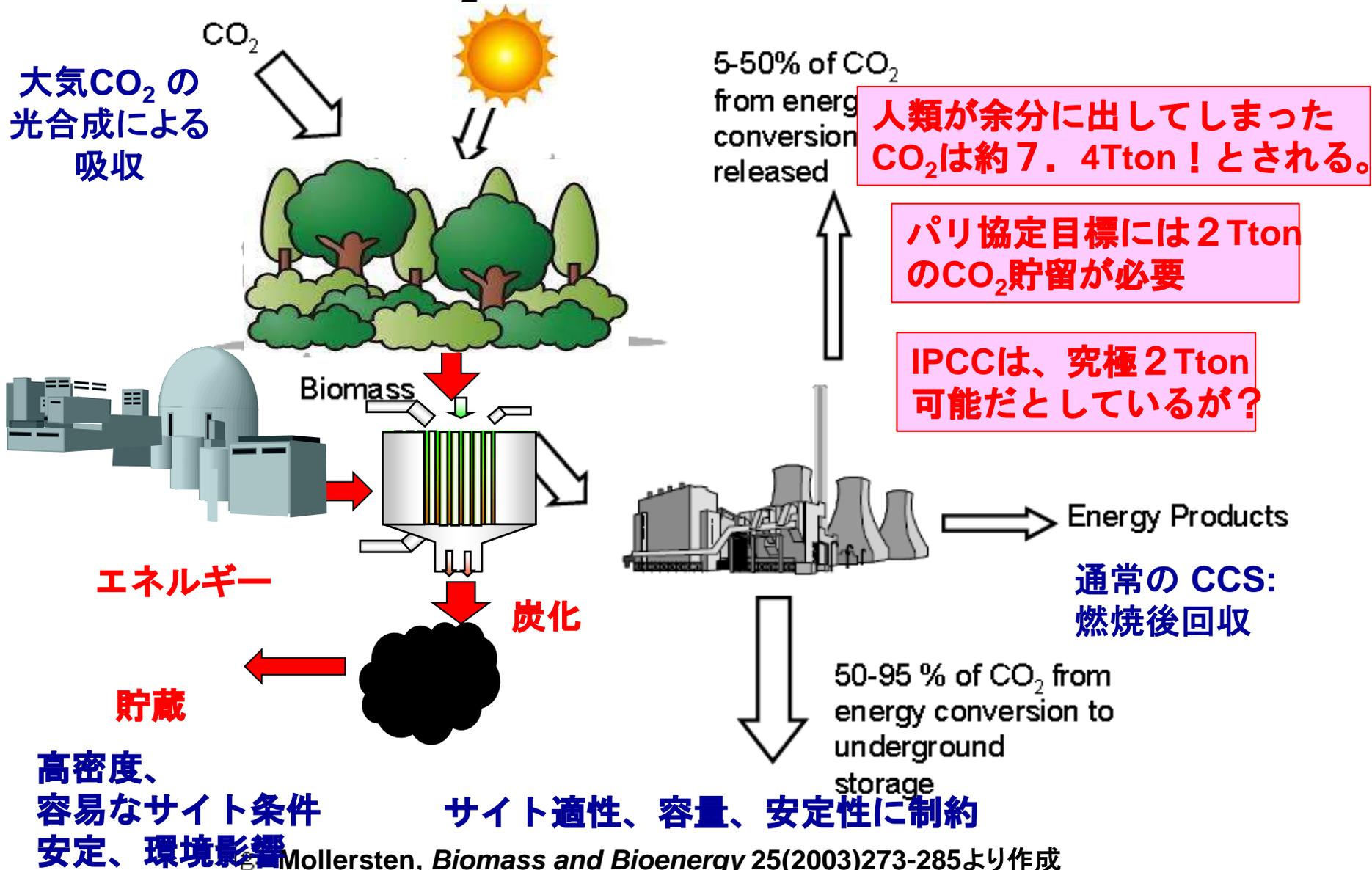
外務省及び内閣府作成

「地球温暖化対策としての原子力エネルギーの利用拡大のための取組について」 参考データ

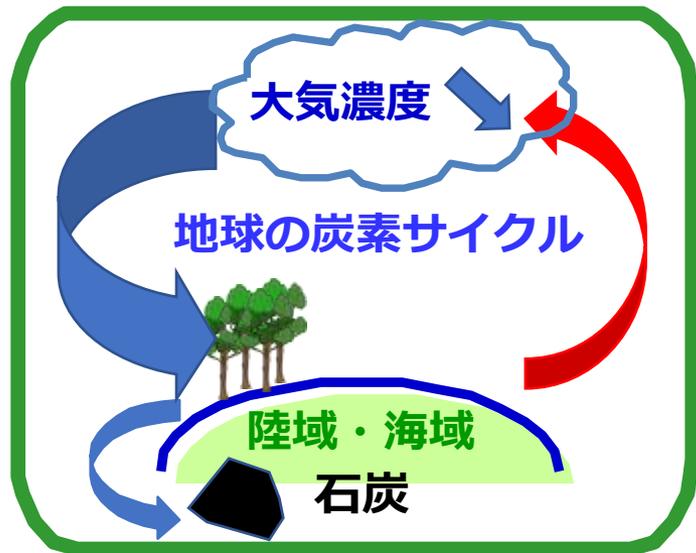
国家（公共）の意思としての原子力開発

- ・原子力は、実は恐ろしく燃料を使わない。（再エネに少し近い）
 - 少量あれば、数年電力供給ができる。
 - ➡安定電源・国産エネルギーとして期待する国は多い
- ・経済開発のためには、増産できるエネルギーが必要。
 - 濃縮ウランは特殊な技術なので、足りなければ決定的制約。
 - 「黒鉛炉」「重水炉」は天然ウランで動くので、制約されにくい。
 - このため、イギリス、カナダなど（当初の日本も）が選択。
- ➡現実には、濃縮ウランは慢性的供給力過剰。（限界費用低）
 - 同位体分離プラントは、一旦作ると必ず供給過剰になる。
- ・廃棄物（使用済み燃料）は何10年も貯蔵可能 ➡当分制約しない
- ・しかし、使用済み燃料の最終処分（それだって10万年の「地層処分」-つまり深い地中に隔離するだけ）を完成したのは1カ国。
 - ➡結局は、立地国の責任で処理処分することになる。

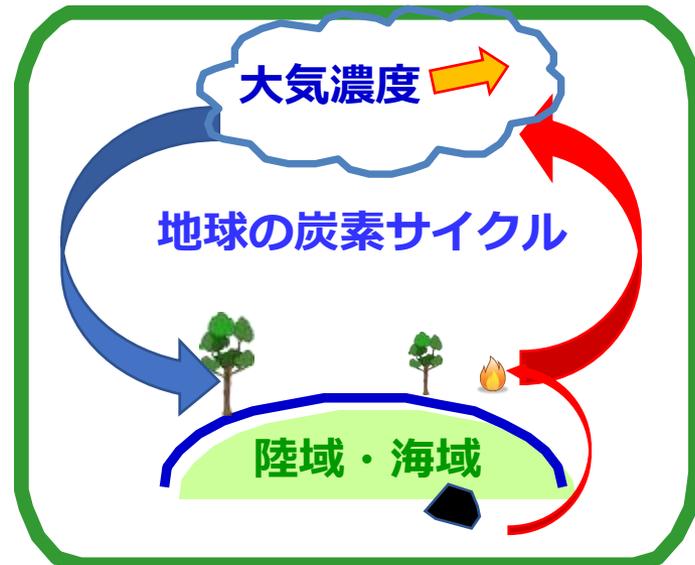
制約となるのは①CO₂貯留 → ②バイオマス処理 → ③森林成長



カーボンバジェットが次世代の資源と制約



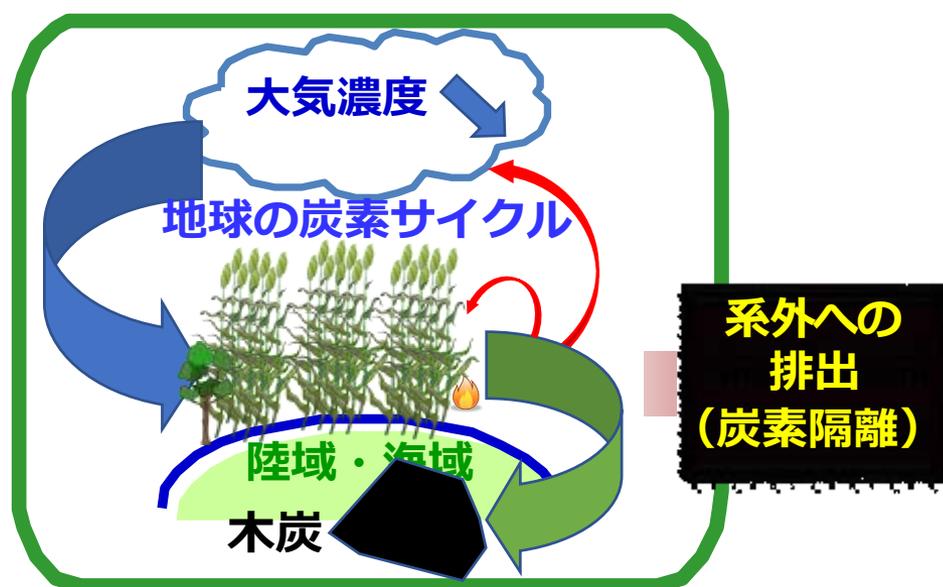
①化石燃料の生成（太古）



③再エネ省エネ（現在）

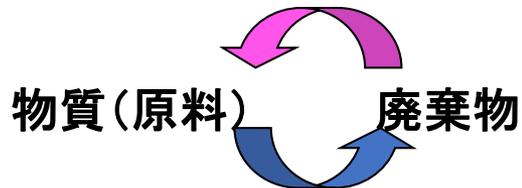
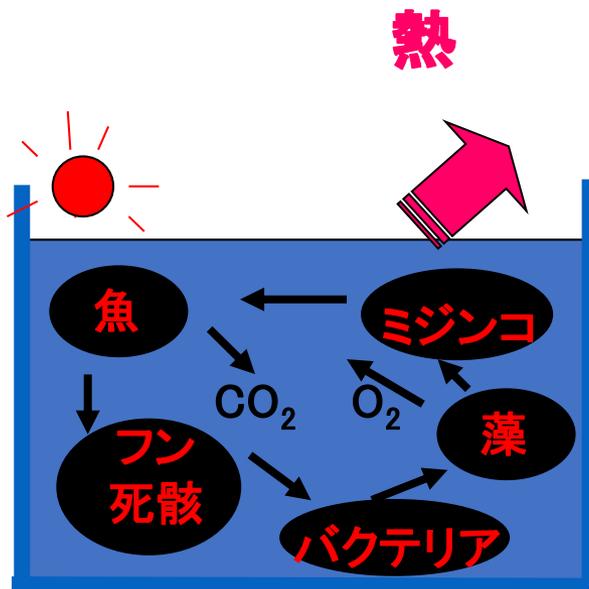


②産業革命後（過去300年）



④カーボンバジェット創出（未来）

- ・水槽の、藻、ミジンコ、魚でエネルギーさえあれば持続可能にできる



(1) エネルギーバランス

- ・エネルギーの入口: 光
- ・エネルギーの出口: 熱

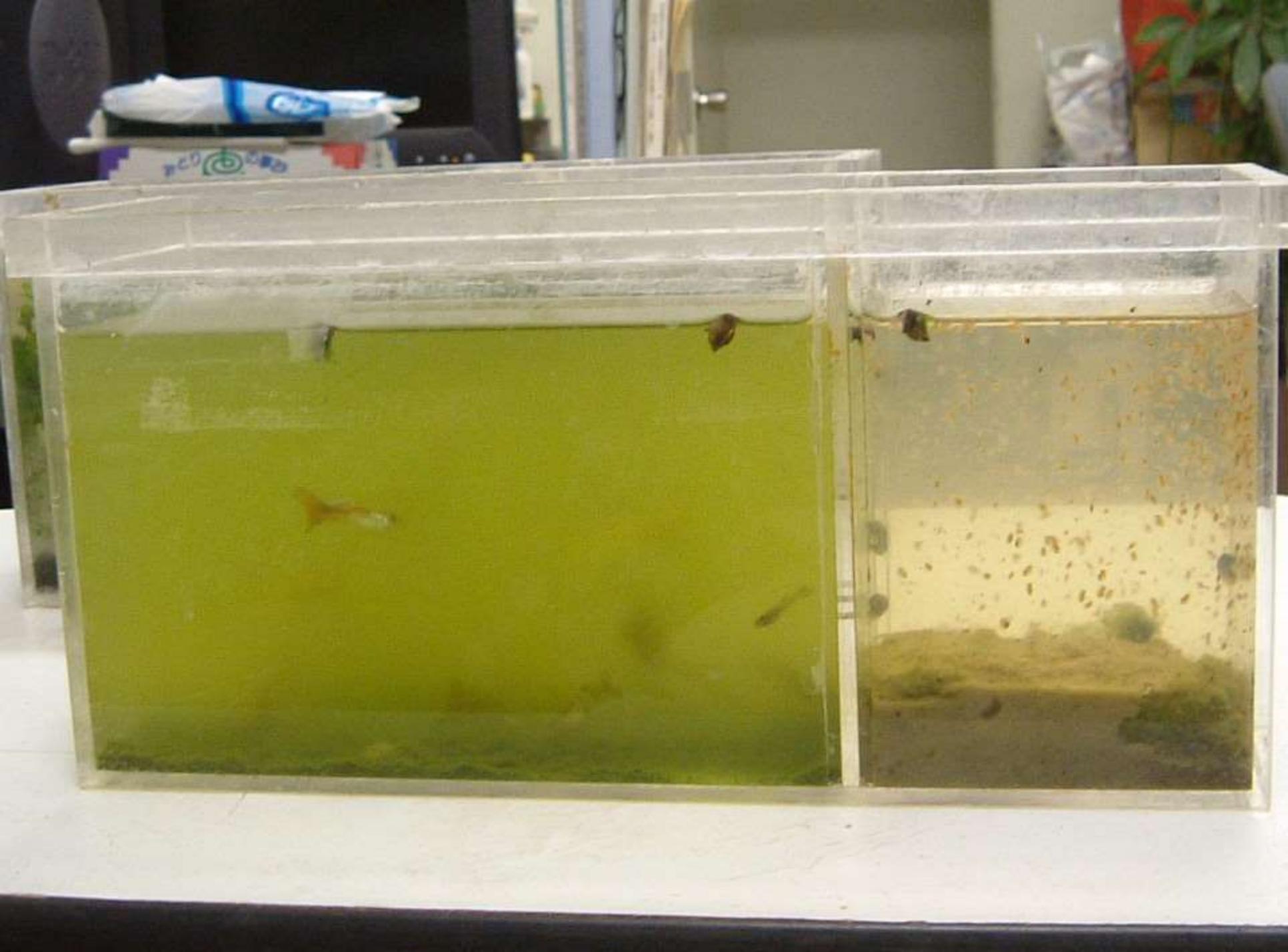
安定なシステム: 一定なエネルギー消費
入るエネルギー = 出るエネルギー

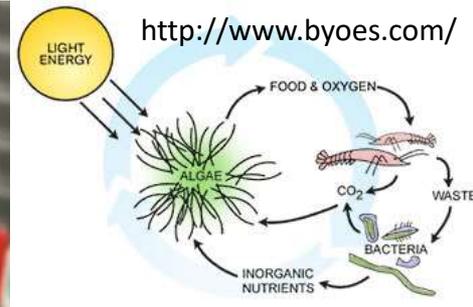
(2) 物質バランス

物質は循環する。
→ 廃棄物と原料は相対的なもの。
しかしリサイクルにはエネルギーを使う。

(3) 個体数、社会システム

- ・個体数は一定
- ・適切な個体構成





藻

バクテリア

エビ (3匹)

より良い「考える」エビ社会とは？

ゼロエミッションエネルギーシステムとしての地球

閉鎖系システム（物質の出入りはないがエネルギーの出入りはある）

太陽からのエネルギー
174PW

$(1.740 \times 10^{17} \text{ W})$
エネルギー dU_{in}

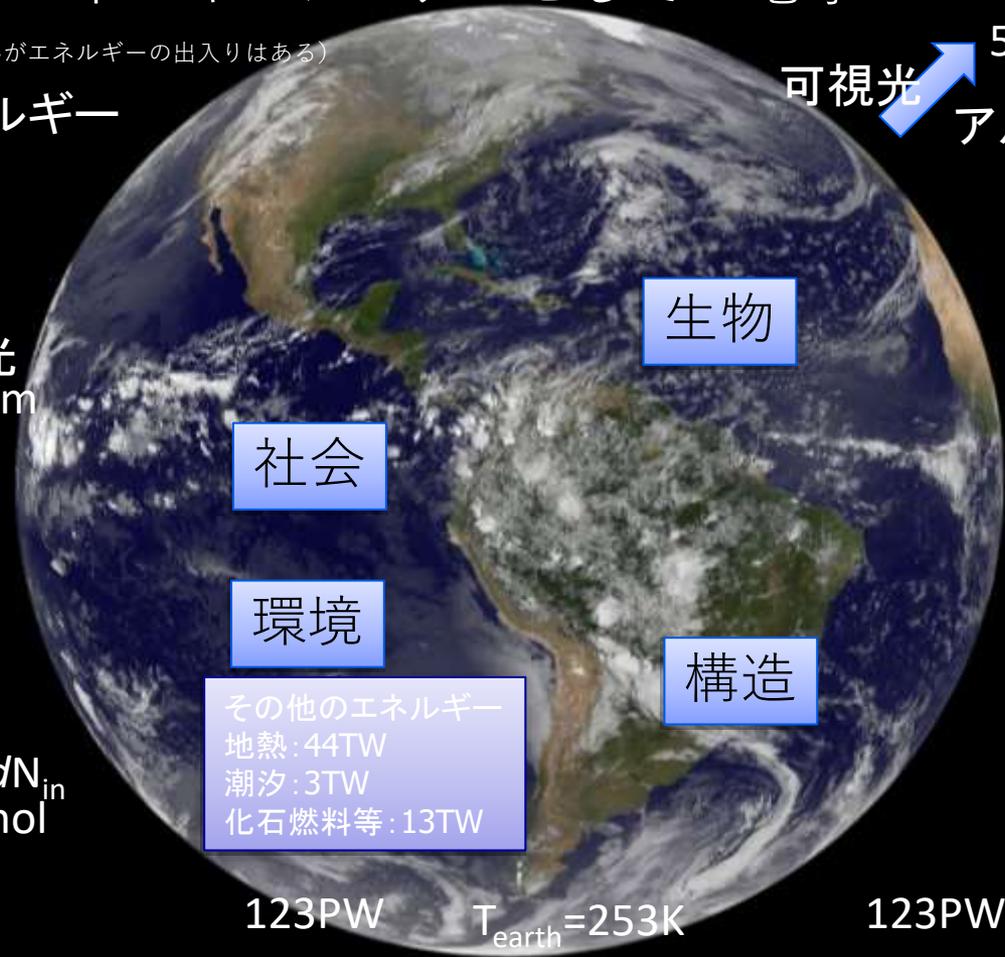
340 W/m^2

可視光
 $\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$

物質(原料) dN_{in}
0 mol

$T_{sun} = 5800\text{K}$

$dS_{sun}/dt = dU_{in}/T_{sun}$



可視光
51PW

アルベド(反射率): 29%

123PW
エネルギー dU_{out}
赤外線放射: 71%
 $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$

エントロピー dS_{out}

廃棄物 dN_{out}
0 mol

社会

環境

生物

構造

その他のエネルギー
地熱: 44TW
潮汐: 3TW
化石燃料等: 13TW

123PW

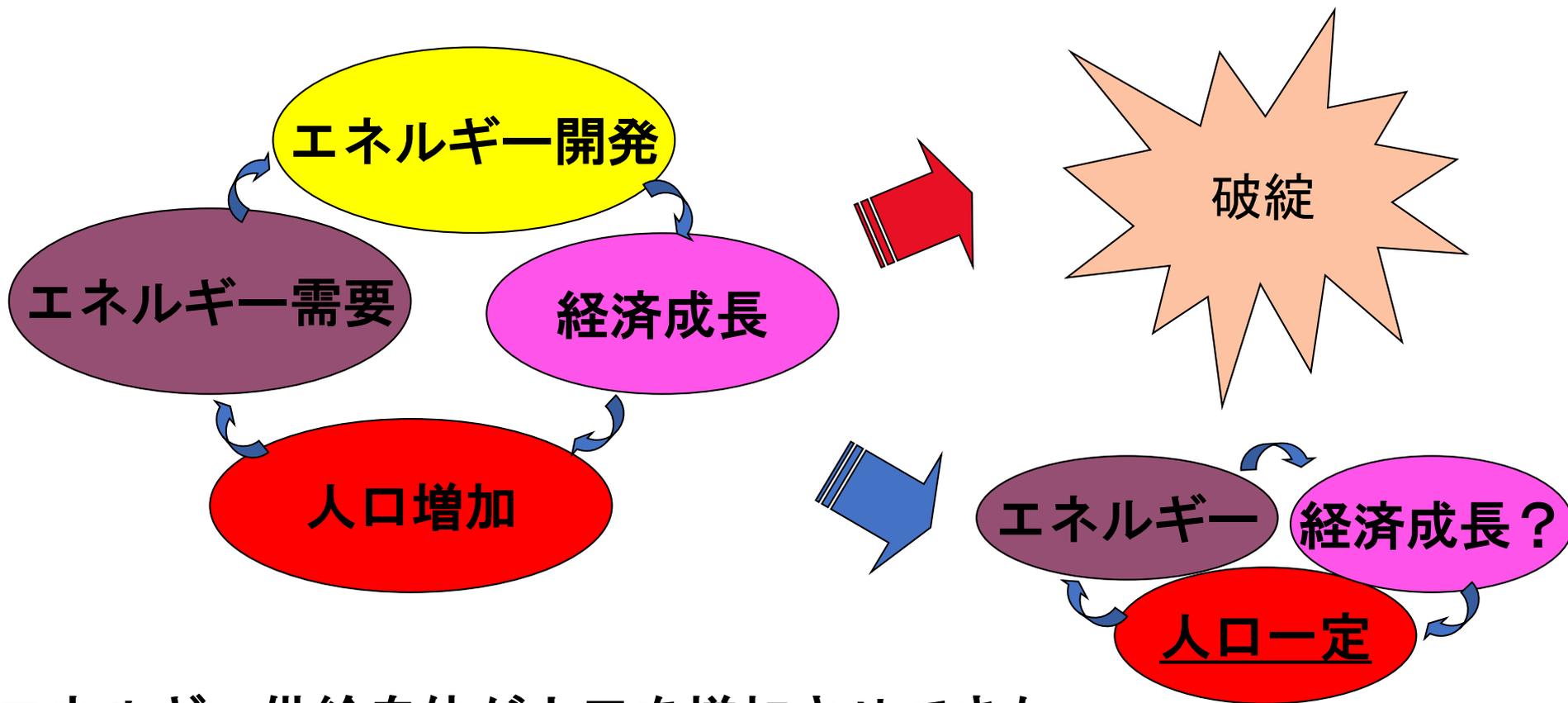
$T_{earth} = 253\text{K}$

$dS_{earth}/dt = (1 - \text{albedo}) * dU_{in} / T_{earth}$

123PW

$T_{universe} = 3\text{K}$

$dS_{universe}/dt = (1 - \text{albedo}) * dU_{in} / T_{universe}$



エネルギー供給自体が人口を増加させてきた。

それがエネルギー需要を作る。→自己撞着

産業革命以来、持続可能性を超えた成長が続いてきた。

安定解の必要条件是人口一定。→エネルギー=善ではない

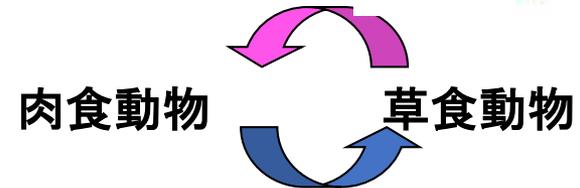
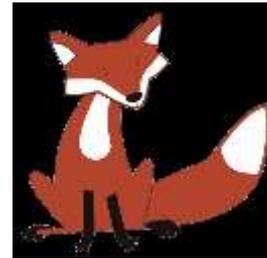
このとき経済成長は？ →持続可能な「発展」は未解決

個体数の一定、は自明ではない

思考実験

一草食動物しかいない島に肉食動物が漂着したら？

1. 草食動物全滅→肉食動物全滅
2. 肉食動物全滅
3. 適当なバランスで安定



食物連鎖

古典的ダーウィニズムでは

- ・生物は環境に適応する。
- ・より適応が進んだものが生き残る。



ネコとネズミ、どっちが強い？

実際には

- ・生物は生存環境と**相互作用**する。
- ・相互作用の結果、持続可能なシステムにバランスしたときだけ生き残る。

「持続可能」は、自明でも自然でもない。

すごく難しいかという。。?? — 実はどこにでも見られる、しかし。

サステナビリティ



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

基本テーマ：人類だけが、この地球上で
まだ「種」として確立していない

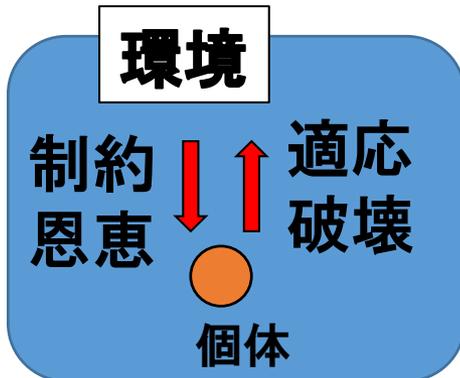
論点

- ・進化という現象
- ・新たな種の発生
- ・生活圏の変化
- ・他種、環境とのバランスの変化
- ・適応した組み合わせによる安定状態

Physics Today, vol.55, No.4 (2002)

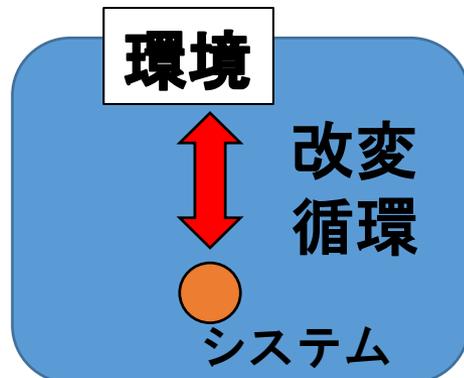
人工衛星(400個)の撮影画像から合成した地球の夜景

従来の考え方

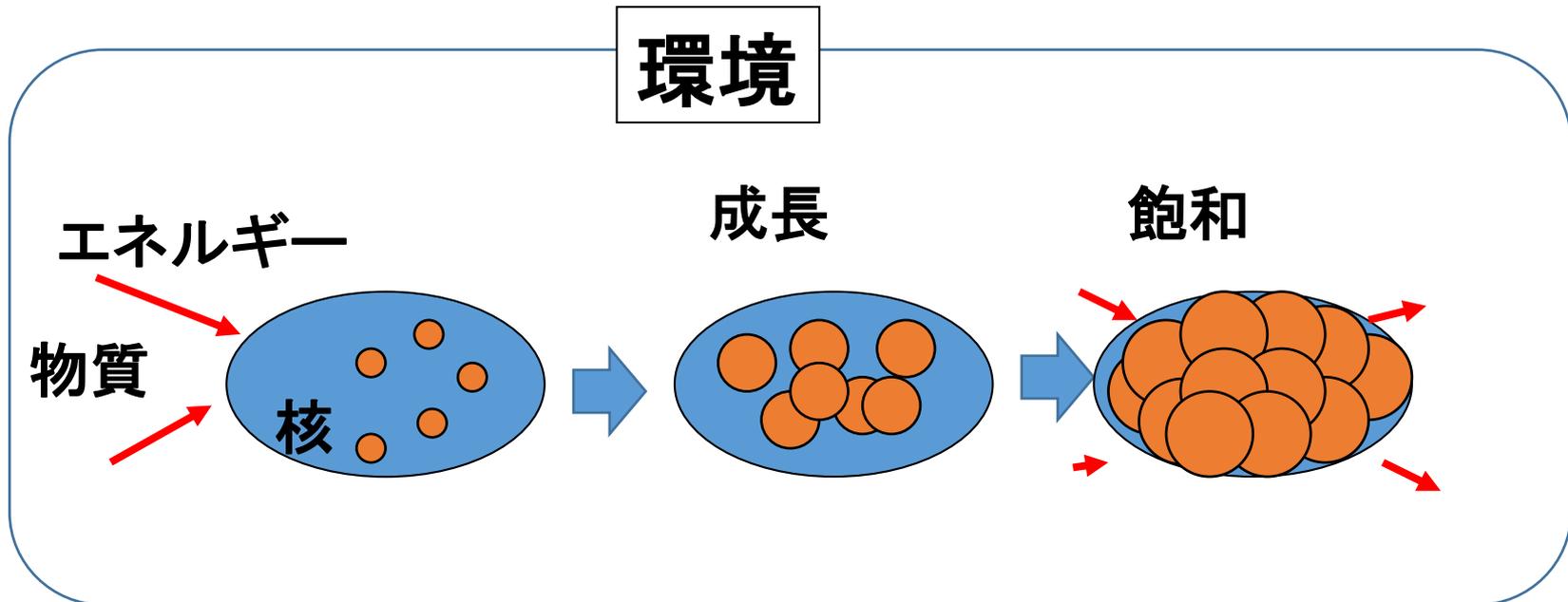


- ① 環境は不変。「手つかずの自然」が本来の姿。
- ② 生物個体は、環境条件に翻弄されて生きる。生物は、環境に恵みを受けて生きる。
- ③ より環境に適応した生物が生き残る
- ④ 生物は環境を破壊する。

ここでの考え方



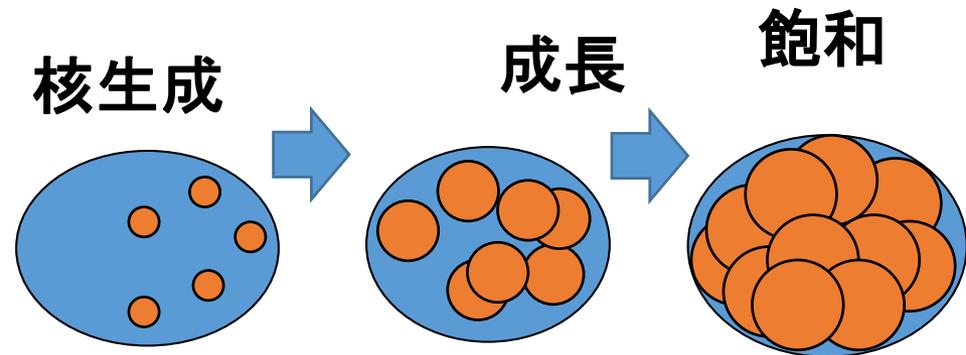
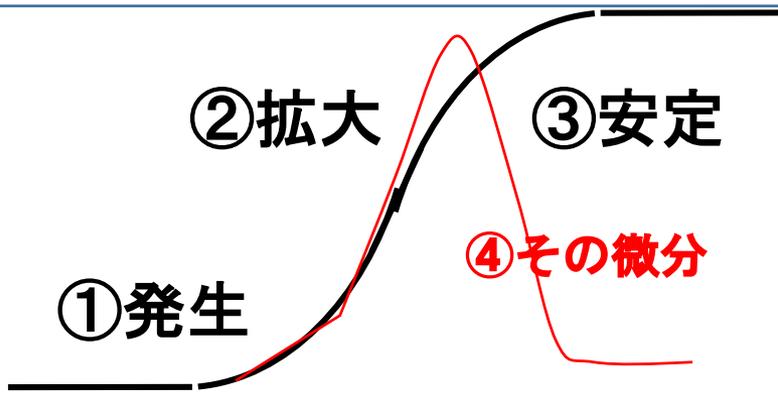
- ① 環境は生物とエネルギーおよび物質をやり取りして絶えず変化
- ② 生物システムは、自分の作り出した環境中に物質エネルギー循環を構築。
- ③ システムが自分に適合した生物が生き残る
- ④ 環境、他生物とシステムのバランスが取れるのは偶然



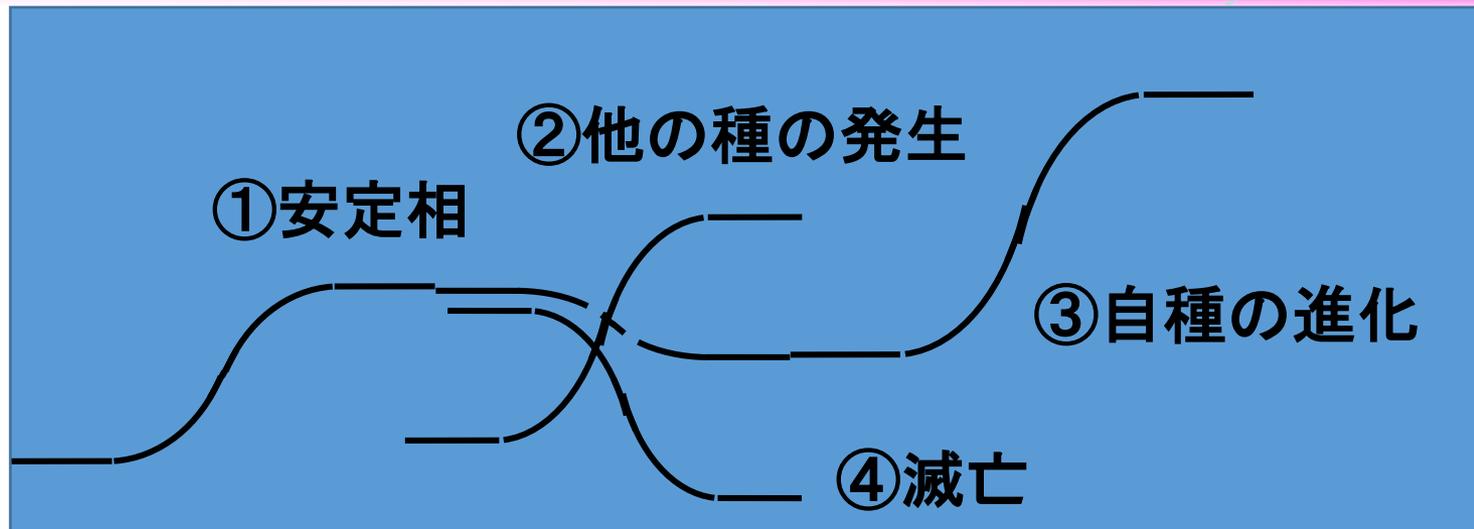
- ①それぞれのシステムは、有限な制約の中で、種の発生、拡大、安定の段階がある
- ②この成長速度は、概ねロジスティック曲線に従う
- ③安定段階は、資源制約、環境制約で収支量が決定される
- ④安定に達しなければ、生存（「種」としての成立）はない

$$dn/dt = rn(1 - n/L)$$

n: 個体数



- ①核となる存在が発生する、また小規模にそれぞれの核が成長
このとき、周りの環境や資源供給はほとんど制約しない
- ②拡大は自己増殖的に起るので、立ちあがりは指数関数的。
指数関数と間違えることもある。
- ③安定段階は、資源制約、環境制約で収支量が決定される。
新天地であったところが、ほとんど残量がなくなる。
- ④このモデルに解は3つある。この形(1)のほかは、(2)破たん、
(3)振動。

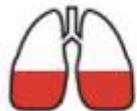


- ① 安定相になったシステム「種」が複数生成し、共存する。
- ② 新たな種の発生は、(遺伝子を共有しながら)生活圏の分離
(新天地への展開、ニッチへの侵入、食物、生活の変化)
- ③ 新たな種を加え、資源・環境の再配分が起る。
- ④ 新たな種は自分の生活環境を他の種との関係を含めて変化させ、それに適応できたとき新たなバランスができる。
- ⑤ 新たなバランスが成立しない場合、種としての成立は起きない。
- ⑥ 新たな「種」が確立すると、生活圏が分離するので交配不能

1. 死亡数は、コロナのみが著しく高いわけではない
 - ・ インフルエンザは、全米で毎年1~3万人 (CDC)
 - ・ 大気汚染による死亡は世界で年間700万人。
 - ・ ちなみに、スペイン風邪1億人
第二次大戦8000万人。
 - ・ ウィルス自体も、
進化と適応、妥協と
滅亡を進めている。

THE INVISIBLE KILLER

Air pollution may not always be visible, but it can be deadly.



29%

OF DEATHS FROM
LUNG CANCER



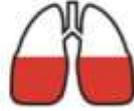
24%

OF DEATHS FROM
STROKE



25%

OF DEATHS FROM
HEART DISEASE



43%

OF DEATHS FROM
LUNG DISEASE



2. 社会のリスク

- ・ 医療システムへの負担
- ・ 感染症及び対策に伴う社会的負担
- ・ 経済的損失、失業、廃業、破綻...
- ・ 貧困化に伴う健康の悪化（自殺も含む）
- ・ その他、社会全体での損害

3. 社会の対応とレジリエンス（復元力、回復力、耐性）

- ・ **それぞれの国が、社会・経済と感染で被害の分配を決めた**
- ・ 社会的機能の維持と崩壊（特に、医療とサプライチェーン）
- ・ 経済成長への被害と健康被害
- ・ 「**自粛**」にはいろいろな意味がありうる。
少なくとも日本は、**外出制限は強制されなかった。**
なぜだろう？
- ・ 今後の「**持続可能な**」対応は？

→ワクチンの接種でまたリスクの配分が起こる。
個人と社会では、価値判断が異なる。



エネルギー技術は社会の投資により開発

- ・ 成果は投資者により、事後回収される
 - 事業として成立したものが残っている
 - 成熟した産業は**売り上げの3～20%**を開発に投資
 - 社会（公共）が投資したものもある（特に基礎研究）
 - 社会が成果を享受することもある（GDP増加等）
 - **投資の集積は必ず技術を進歩させている（性能↑コスト↓）**
- ・ 投資は、サプライチェーン全体に行われる
 - **社会インフラ、利用機器、後始末、損害回復**は大きな投資
 - 技術開発、環境、安全対策投資は損害防止にも使う
 - 損害（環境、人命含む）の低減も投資の効果

投資は成長のために行われる。



未来世代と現在の間での分配

Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



投資と効果の間には時間差がある

- ・ エネルギー投資は、回収に時間がかかる
 - －現在の繁栄は、過去の投資の結果
(過去世代の「恩」は、感じるより大きい)
- ・ 現在の投資は、未来に行くほど効果が小さくなる
 - －未来世代は、成長と投資、開発の効果により必ずより豊かになっている
- ・ 「割引率」効果は、損害に対しても適用される
 - －未来世代の損害コストは、現在に割り戻せば小さい
 - －きわめて遠い将来の損害はゼロに収れんする？
 - 「命の値段」であれば、単価も上っているが。。



エネルギーの影響



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

エネルギーは商品であるだけでなく、市場の外でヒト、社会、環境に影響を及ぼす。

- エネルギーは、**利益（命/金）も損害（命/金）も与える**
 - 取引関係者以外にも影響する
 - コストに反映されているものもある（内部化）
 - ダムや原発の立地、石炭採掘の人命損失など。
- **地球環境問題（いわゆる「温暖化」）は最大の外部性の一つ**
 - 2100年GDPの10%オーダーとされる
 - すでに人類はコストを払っている
 - すでに一部「内部化」されている。
- エネルギーは、廃棄物も含め人類全体が処分責任
 - しかし、一部の人を負う被害もある。



技術の効果

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



エネルギー供給は技術によって対応可能だが

- ・ 資源の制約は、技術によって置き換わる。
 - 資源ではなく、それを届けるシステムこそがエネルギー技術
 - エネルギー技術は、社会の要求に応じて開発される
- ・ 環境制約もサプライチェーンのひとつ。
 - エネルギーは、後始末まで考えなければ完結しない
 - エネルギーサプライチェーンのもっとも弱いところが制約

エネルギーは、社会が選択する

- ・ エネルギー技術への投資は過去の社会の選択の結果
 - 技術の選択は、将来の社会像も変える
- ・ 現在日本のエネルギー選択は世界標準ではない
 - **これからの主役は新興国→途上国（成長も被害も発生）**
社会が共通で責任を持って対処することになる



エネルギーのリスク



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

エネルギーは人命・環境・社会に損害を及ぼす

- ・ 対策、被害拡大防止、回復は技術だけではできない
 - 人命、通貨によるコストは、必ずしも受益者が払ってはいない
 - 他国、他地域、子孫世代が払うこともある
 - 被害も、仮想リスクも、**現実コストを発生する点で等価**
- ・ 人類の繁栄、幸福、発展もエネルギーによってもたらされた
 - エネルギー利用の便益は経済的利益だけではない
 - エネルギー利用による人間活動の増加自体が**持続性の危機**

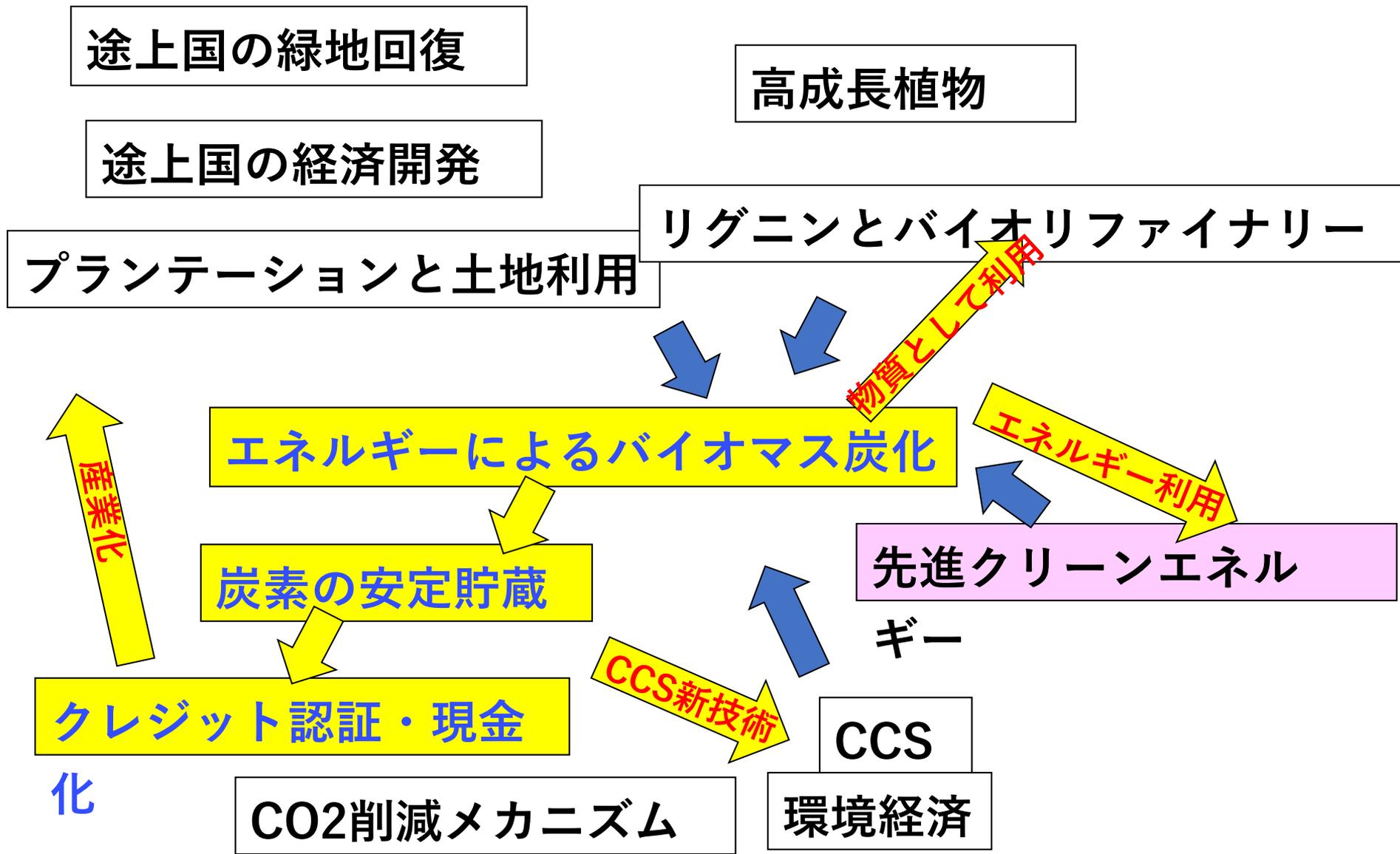
社会の選択は、結局人類の未来を決める

- ・ 投資効果の享受も地球環境影響も、未来世代が行う
 - 経済成長の効果も害も未来世代が受ける→割引率！
 - 人類全体の生存は、エネルギー選択によって決まる



二酸化炭素固定の全体システム

Institute of Advanced Energy, Kyoto U



**答えは、昔にあるのか？
未来にあるのか？**

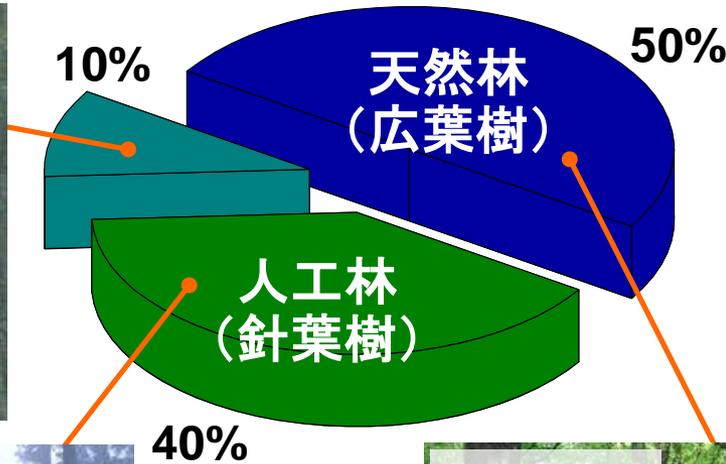
日本の森林

*「都道府県別森林率・人工林率(平成19年3月31日)／林野庁」

**「日本国温室効果ガスインベントリ報告書2010年4月, (独)国立環境研究所」より集計



竹林



針葉樹

(カラムツ、スギ、ヒノキ)



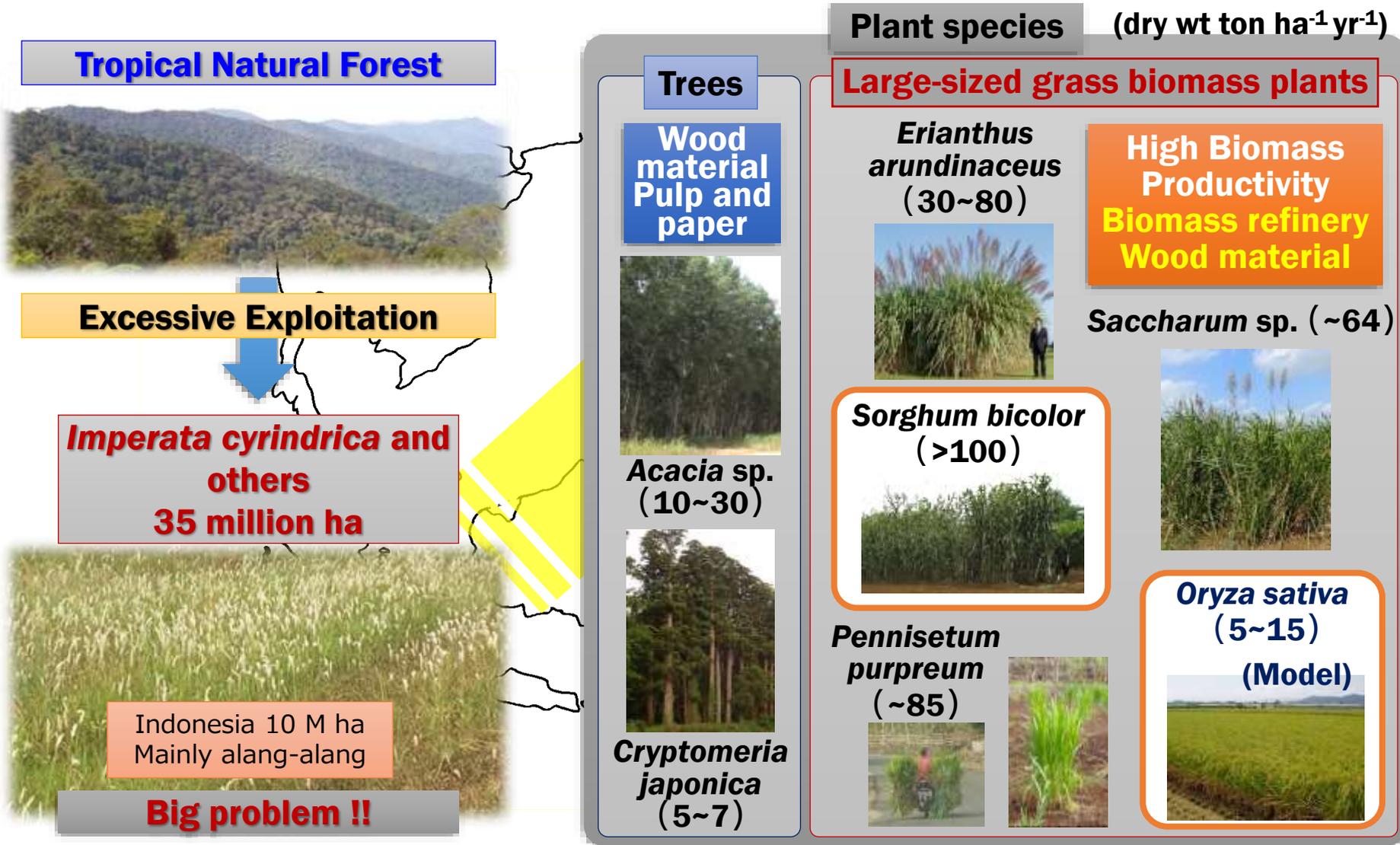
広葉樹

(サクラ、カエデ、カシ)

- 森林総面積: 2500万ha(国土面積の7割)*
 - ・6割(1500万ha): 天然林(広葉樹)、その他(無立木・竹林など)
 - ・4割(1000万ha): **人工林(針葉樹)**
- 森林によるCO₂吸収量: **0.834億トン**(2005-2008年平均)**
※全排出量(約13億トン)の6~7%に相当

熱帯のバイオマス生産

生存研, 梅澤教授資料より





生物資源探索(琵琶湖)



焼畑農業による資源の循環利用



アジアのコミュニティ



江戸時代ーサステイナビリティの文化



まとめ

Institute of Advanced Energy, Kyoto University

■ 全てのエネルギー開発は人類の生存インフラの一つ

- ・ エネルギー源としての特色（無尽蔵、クリーン、安全は当たり前）
- ・ 市場性、市場化の戦略→やがて、限界費用ゼロで社会が共有
- ・ 環境、安全性、生存リスク

未来エネルギーは人類の生存を保証する？

■ 21世紀はエネルギー源転換の時代

→ 人類の生き残りをかけたチャレンジが進行中
未来社会を変革するエネルギーは？

→ 環境問題の本質的解決

→ 資源リサイクル社会への転換

→ 高度成長社会、資源大量消費社会から、**持続可能な発展へ**

■ すべては人類の生存インフラの構築

エネルギー・環境研究者は、地球的な視点
で、

研究の意義を自ら見つけなければならない

エネルギー環境問題は、生きて動いているサイエンスです。

今日の常識は、明日には間違いになることもあります。

—最新の情報を得ること、自分の頭で考えること。

聴講、ありがとうございました。おつかれさま。

また、何かの折にお話しすることもあるでしょう

核融合、環境、エネルギーについて、聞きたいこと
話したいことありましたらいつでもどうぞ。

phone:0774-38-3430 宇治 小西研

s-konishi@iae.kyoto-u.a

今日の課題

感想書いてください。 .

- この講義で何を得られた？
- 自分はどう思った？
- わかった/わかんなかった
- 面白かった/つまんなかった

その他、なんでも。。

講義アンケートも忘れずに。

詳しくは、KULIQS にアクセスしてください。