

先進エネルギーシステム論

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—

12 : CCS、ゼロエミッションとカーボンネガティブ

2020.7.13 前期 月曜 4限 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)

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. 講義資料

- ・PandA で配信しています。
- ・授業資料も、受講者のみ閲覧可能です。配布しないでね。
- ・ストリーミングは受講者のみ視聴可能、ダウンロードはできません。

2. 本講義の終わり方

- ・成績は出席および小テストでつけてます。**期末試験、レポートなし！**
- ・Zoom視聴は、なるべく大画面で、資料見ながらがいいです。携帯、第2画面は有効に使いましょう。**チャットも使ってください**
- ・comment screen使用中。質問コメント歓迎です。

3. おしらせ

- ・次回でおわりです。課題提出、出席、聴講回数を自己で確認してください。当方、集計追いついてないです。

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？

考え方 — 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。一個人的にも、**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。

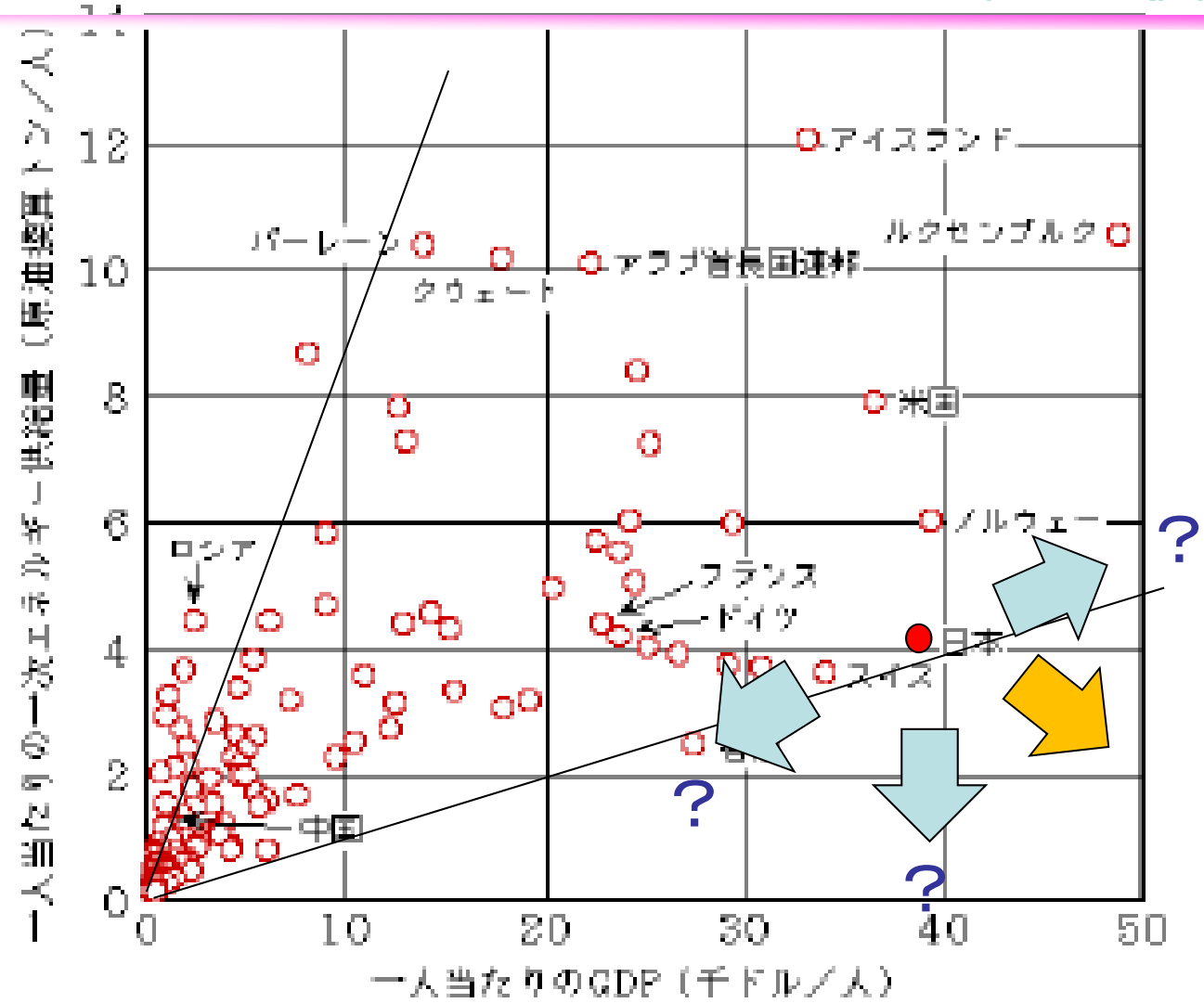
④これからの世代、これからの社会、資源の分配、環境・社会へ
の影響を通じて我々は**相互に影響**しあっています。

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。



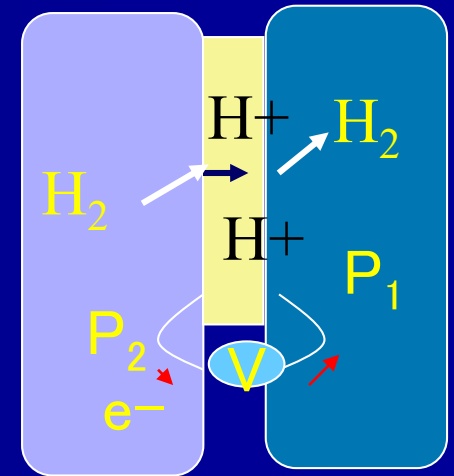
一人当たりのGDPとエネルギー原単位。
 概ねエネルギー消費の多い国の方が豊かと言えるが、そのエネルギー消費には大きな開きがある。

前回の課題2

- ①. 水素と酸素の結合による水の生成の ΔH は、 -285.8kJ/mol である。
すべて電気分解で供給すると、電圧は何V必要か？ファラデー定数 $96480\text{As/mol} \sim 10^5\text{As/mol}$ としてよい。

- ②. 濃淡電池の起電力は $E = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ と表される。
(図参照)

これは、前掲図 (SPE) での電解で、水素発生側と酸素側の間の水素分圧比と等価と理解される。
水の電気分解に1Vかかったとすると、300Kでは圧力の比として、何桁の違いがあることになるか？ $\ln(10) = 2.303 \sim 2$
 $R = 8.31\text{J/K} \cdot \text{mol} \sim 8$ とする。

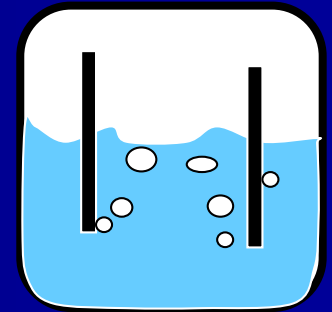


前回の課題2

- ①. 水素と酸素の結合による水の生成の ΔH は、 -285.8kJ/mol 。
すべて電気分解で供給すると、電圧は何V必要か？ファラデー定数 $96480\text{As/mol} \sim 10^5\text{As/mol}$ としてよい。

水の分解に使うエネルギーは $E=VIt$ だから、 $V=E/It$ 。
ただし1分子の水の分解には2電子使う。

$$\frac{-285.8\text{kJ/mol}}{96480\text{As/mol} \times 2} = 1.4\text{V}$$



注：電気分解に必要なエネルギーは正しくは ΔH ではなく自由エネルギー $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ 。
酸素と水素で燃料電池を作れば、これ以上の起電力は得られない。ところが、ここで聞いたのは、すべてのエネルギー。水を、1気圧の構成元素に戻すエネルギーを全て電気で供給することはできる。液体1molから1.5molのガスを発生するエントロピーは、熱で供給できるが、ここでは電気で供給されたことになる。

前回の課題2

②. 濃淡電池の起電力は $E = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ と表される。(下図参照)

これは、前掲図での電解で、水素発生側と酸素側の間に大きな水素分圧比があるのと等価と理解される。

水の電気分解に1Vかかったとすると、300Kでは圧力の比として、何桁の違いがあることになるか？

$\ln(10) = 2.303 \sim 2$ 、 $R = 8.31 \text{ J/mol} \sim 8$ とする。

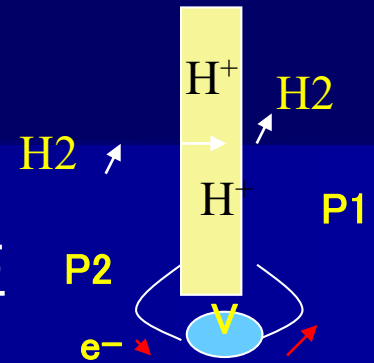
$$E = \ln\left(\frac{RT}{2F}\right) \frac{P_1}{P_2} = \frac{2.3 \times RT}{2F} \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad E = 1 \text{ V とすると、}$$

$$\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \frac{2 \times 96500}{2 \times 8.31 \times 300} = 33.6 \quad \text{約34 (計算によっては40) 桁、}$$

ということになる。

これは、途方もない圧力差で、物理的機械的方法では実現不可能。

「ありえない。」という回答あり。☞正しい。これに気が付いて欲しい

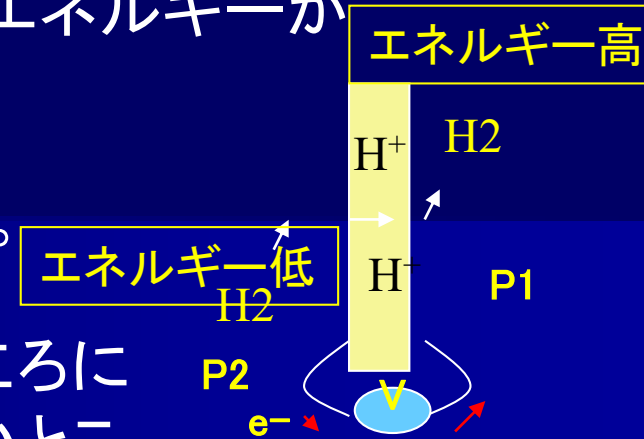


「エネルギー変換」の考え方

「モノ」をある状態から別の状態に移動するとエネルギーが(可逆的に)移動する(下図参照)

この図では、水素が圧力P1とP2の間で移動。

(当たり前だが)圧力が低いところから高いところに移動するときはエネルギーがいるし、逆に高いところから低いところに移動するならエネルギーが取り出せる。



水素にとっては、酸素との結合状態(すごくエネルギー的に「低い」と水素ガスとの間のエネルギー差が1Vってこと。燃料電池はこの原理。

エネルギーは(強さ) \times (量)の次元を持っている。

電圧 \times 電気量、圧力 \times 体積、力 \times 距離。。。

電気と燃料(化学)では、変換はできるが、「示強性」のレベルがちがう。



例によって教訓。

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



■ 化学エネルギーと電気エネルギー

エネルギーとして同じ次元(単位)で扱える量には歴然と不公平が存在している。

– ΔG は ΔH にできる。逆は真ではない。

たとえば燃料電池での発電はこの差を無駄にしている。コジェネでは有効に使っている。電気分解ではまったくの無駄。(電気分解の水素を燃料電池に使うのは?かなりバカ)

■ 対数的な効果。

– 桁に対する感覚を養ってください。40桁は宇宙的数字で、地上で経験することは大抵ありません。出たら普通は何かの間違い。(宇宙の大きさは? 100億光年でも $3 \times 10^{24} \text{m}$ 。)

一方、クオークとか、一番小さい粒子は $\text{アトm} \sim 10^{-15} \text{m}$)

– 電気が、他のエネルギーにはできないことができることを知ってください。

前回の課題 3

3. 「限界費用」という言葉があります。
要するに、供給曲線の接線の傾きのことで、追加的に生産するのに必要なコストのことだけど、これはゼロやマイナスになる例があります。

①君たちの実際経験している実例を挙げてください。

②それはどうやって、ビジネスとして成立している？

③エネルギーも、限界費用ゼロになることがあります。
その例を考えてください。

(実は、すごく多くのエネルギーが該当してます)

「マージナルコストゼロの社会」

①君たちの実際経験している実例を挙げてください。
なぜか、情報関係で先に成立してるけど、
パケホーダイ、食べホ飲みホ、みんなそうです。
よく見ると、コンビニやスーパーの食料品も、実は
モノそのものより、流通の方が経費が高い。

②それはどうやって、ビジネスとして成立している？
ービジネスとしてのコスト配分、利益配分は別。

（全体コストの分配法の問題）

ー社会的にも、浪費を助長しないため、という倫理的理由で
「従量制」は取られていることも多い。

結局、人類社会の極めて多くの局面で、消費していると思っ
ているものは、実は限界費用がとても小さな、物質とエネルギー一循
環システムの一部だったりする。

「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。

本日の課題 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？

CO2削減という目標

Zero-carbon energy Kyoto 2009



今や、CO2を出さない燃料、というだけでは不足

- ・ライフサイクルで、CO2を最小化
- ・しかも、CO2を回収してそれを隔離処理する
- ・全体としてCO2をゼロでなく減少する

バイオ燃料とCO2回収の組み合わせ: BECS

→ バイオマスフローのモデリングと炭素アカウンティングが必要。

→ 全球平均気温上昇のモデリング

(ゼロエミッションは何度上昇に相当するのか?)

ゼロエミッションシナリオの可能性

再生可能電源よりも燃料・熱供給が重要

- ・バイオエネルギーによる燃料のみがシンクとして機能
- ・CCS技術の役割は極めて大きい。
- ・バイオ資源の持続可能な利用がキー

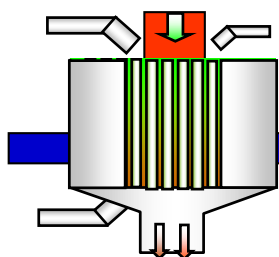
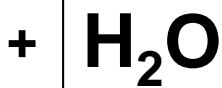
バイオマスの燃料化 v1

16MJ

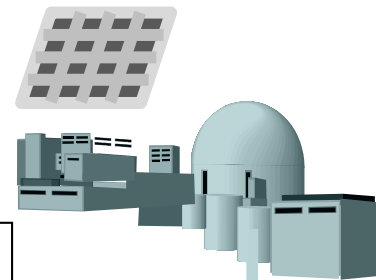
廃棄物
バイオマス
(1kg)



外部熱源, ~900°C



8.2MJ



24.2MJ

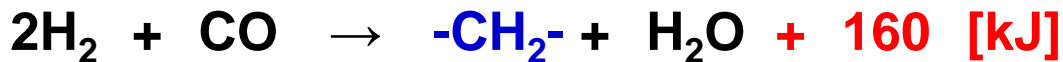
燃えるゴミのガス化



水素



合成石油を作る反応



熱利用(発電等)

8.1MJ

合成燃料(軽油)
約0.5リットル

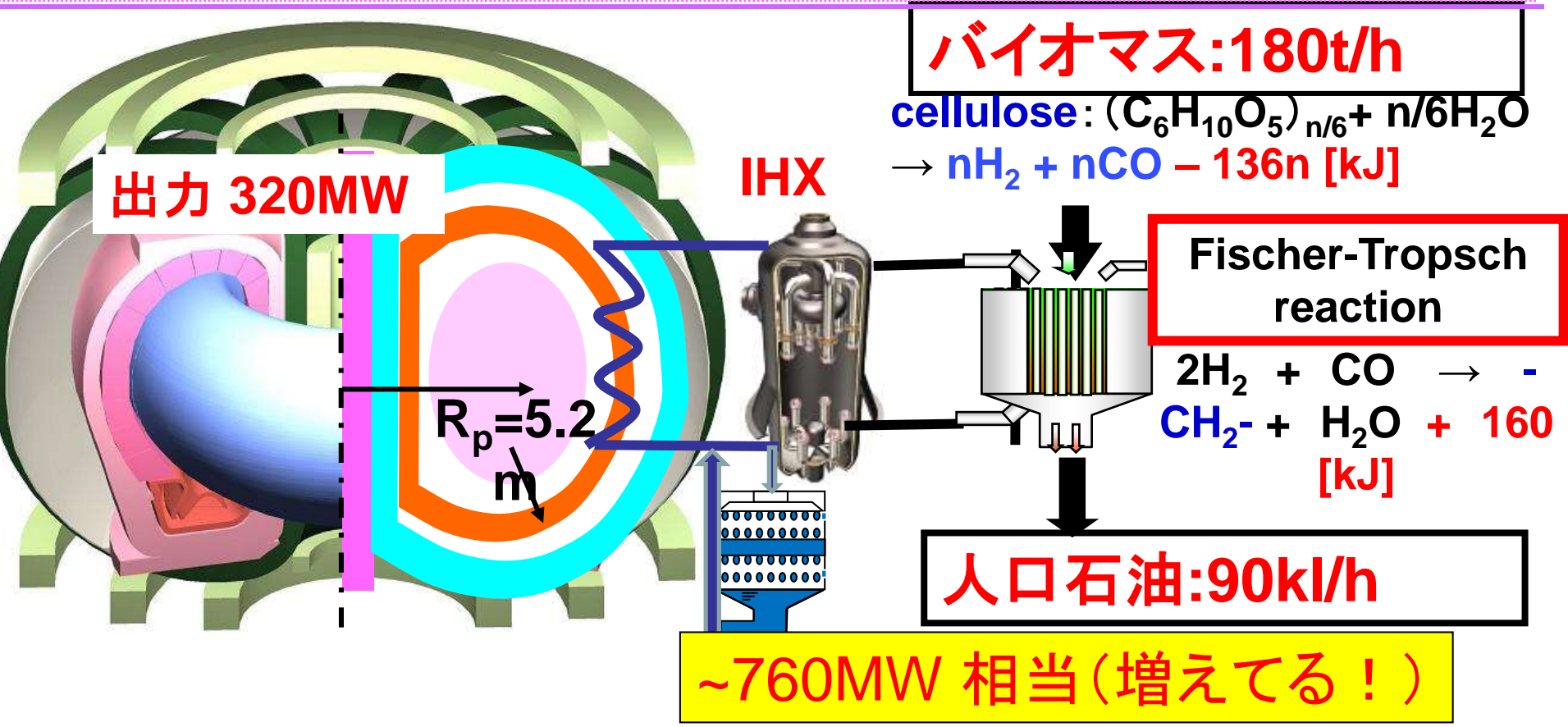
バイオマスエネルギー温存

カーボンニュートラル

15.6MJ



バイオマスと核融合のハイブリッド



なんで核融合?...実は炭素依存のないエネルギーなら
なんでもいい。太陽光、風力、原子力...
先進国でも途上国でも建設可能なら。
(実は先進国メリット。。日本で作って売りたいので)

水素燃料はクリーンだが、実は電力と同じ二次エネルギー

- 製造にはエネルギーが必要（エネルギー変換）
- 原料が必要。
- インフラが必要。サプライチェーンでは二酸化炭素も出る

- バイオマスの吸熱ガス化で水素や燃料が作れる
- バイオマスのエネルギーを使わず、外部熱源で有効利用が可能
- 核融合はバイオマスガス化の有望なエネルギー源になる

- 核融合は、**「バイオマスハイブリッド効果」**により
 - 実現が1桁以上容易になる
 - 燃料としてエネルギー市場は大きい
 - 燃料電池発電によりコジェネ、分散システムに適合
 - 起動電力、変動需要対応により電力システムに適合

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??

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、

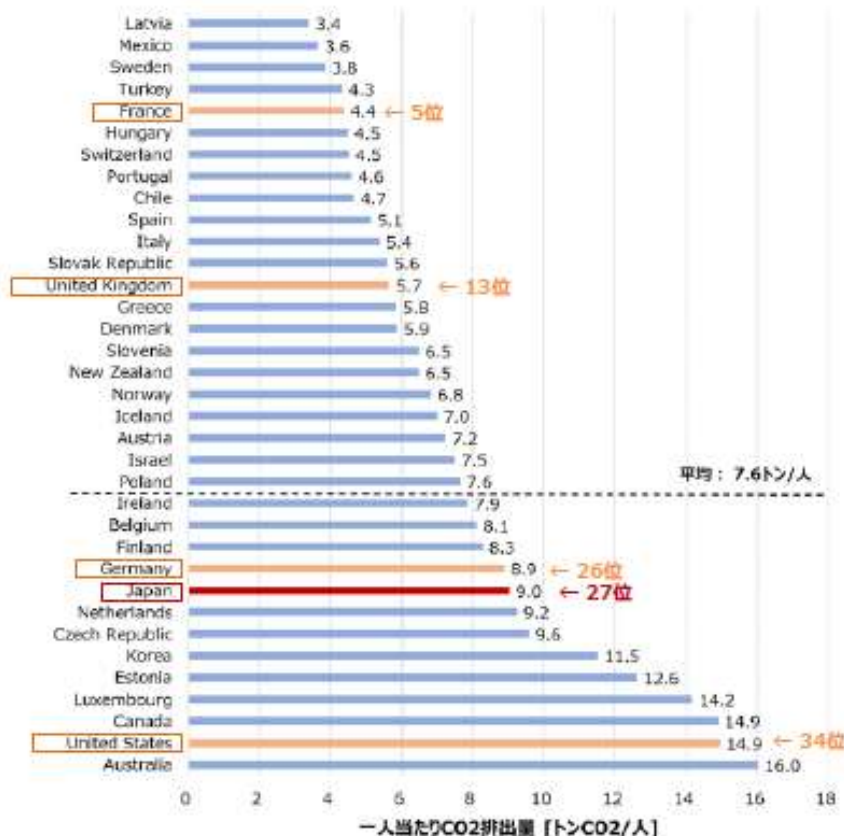
SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS 17 GOALS TO TRANSFORM OUR WORLD



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**。

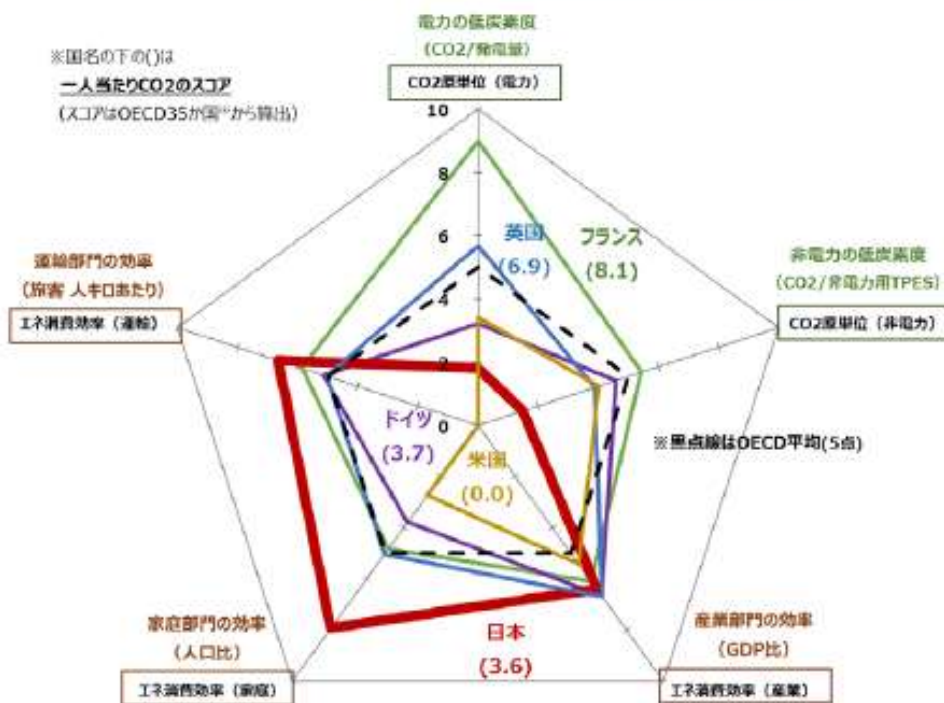
一人当たりCO2排出量 (OECD35か国※1)



※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か国の中で優等値を算出し、優等値35が0、優等値65が10となるように正規化 (優等値65以上は10、35以下は0)

国土面積と再エネ導入量 (2016年)

- 日本は面積あたり再エネ導入は高水準。他方、需要が大きいため再エネ比率は上げにくい。

	面積グループ① (日本と同程度)				面積グループ② (九州と同程度)		
	ドイツ	ノルウェー	日本	カリフォルニア	アルバニア	九州	デンマーク
国土面積	35万km ²	37万km ²	38万km ²	42万km ²	3万km ²	4万km ²	4万km ²
再エネ発電量	1,900億kWh 風力: 800 バイオマス: 500 太陽光: 400	1,450億kWh 水力: 1430 風力: 20	1,600億kWh 水力: 800 太陽光: 500 バイオマス: 200	800億kWh 水力: 300 太陽光: 200 風力: 100	80億kWh 水力: 80	170億kWh 太陽光: 80 水力: 50 バイオマス: 30	180億kWh 風力: 130 バイオマス: 50 太陽光: 10
面積当たり再エネ	54万kWh/km ² 風力: 22 バイオマス: 15 太陽光: 11	40万kWh/km ² 水力: 39 風力: 1	41万kWh/km ² 水力: 21 太陽光: 13 バイオマス: 4	19万kWh/km ² 水力: 7 太陽光: 4 風力: 3	28万kWh/km ² 水力: 28	40万kWh/km ² 太陽光: 18 水力: 13 バイオマス: 7	44万kWh/km ² 風力: 30 バイオマス: 12 太陽光: 2
需要規模 (純輸出入) <small>※需要は総発電量</small>	6,400億kWh (純輸出500億kWh)	1,500億kWh (純輸出200億kWh)	10,500億kWh (輸出入なし)	2,000億kWh (純輸入700億kWh)	80億kWh (純輸出0.4億kWh)	1,090億kWh (純輸出140億kWh)	310億kWh (純輸入50億kWh)
再エネ比率	29% 風力: 12% バイオマス: 8% 太陽光: 6%	98% 水力: 96% 風力: 1%	15% 水力: 8% 太陽光: 5% バイオマス: 2%	40% 水力: 15% 太陽光: 10% 風力: 7%	100% 水力: 100%	15% 太陽光: 7% 水力: 5% バイオマス: 3%	60% 風力: 42% バイオマス: 16% 太陽光: 2%
仮に日本の需要でそれぞれ再エネ比率を計算した場合				仮に九州の需要でそれぞれ再エネ比率を計算した場合			
	18%	14%	15%	7%	7%	15%	17%

IPCC「1.5°C特別報告書」の概要

本資料は、IPCC「1.5°C特別報告書」の政策決定者向け要約(SPM)及び特別報告書本体を基本とし、他に既存文献・資料を参考情報として作成しています。なお、資料中では各情報の出典を明示しています。

また、本資料は可能な限り原語に忠実な表現を用いて作成していますが、必要に応じて、[]内に語句を補っています。

2018年度 環境省

(2019年7月版)

ii. 1.5°C特別報告書の主なポイント

- 気候変動は、既に世界中の人々、生態系及び生計に影響を与えている。
 - 工業化以降、人間活動は約1.0°Cの地球温暖化をもたらしている。
 - 現在の進行速度では、地球温暖化は2030～2050年に1.5°Cに達する。
- 地球温暖化を1.5°Cに抑制することは不可能ではない※1。しかし、社会のあらゆる側面において前例のない移行が必要である。
 - CO₂排出量が2030年までに45%削減され、2050年頃には正味ゼロに達する必要がある。メタンなどのCO₂以外の排出量も大幅に削減される必要がある。
- 地球温暖化を2°C、またはそれ以上ではなく1.5°Cに抑制することには、明らかな便益※2がある。
- 地球温暖化を1.5°Cに抑制することは、持続可能な開発の達成や貧困の撲滅等、気候変動以外の世界的な目標とともに達成しうる。

(参考: IPCC 「Global Warming of 1.5°C Presentation to the wrap-up of the Talanoa Dialogue preparatory phase」)
なお 同資料は、IPCC事務局がCOP24においてSR1.5の内容を簡潔に説明するために作成したものである。

※1 ただし、その実現可能性について「単純な回答はない」ともされている(実現可能性についてはスライド70頁参照)。

(IPCC SR1.5 52頁 第1章 エグゼクティブサマリー)

※2 例えば、地球温暖化を1.5°Cに抑制する過程でもたらされる大気質の改善は、人々の健康面に直接的及び即時的な便益を与えることが示されている(スライド50頁参照)。ただし、地球温暖化を1.5°Cに抑制するために必要な総緩和費用に関する文献は限定的であり、1.5°C特別報告書では評価されていない(スライド62頁参照)。

vii. 1.5°C特別報告書において重要な中核的概念

GMST (global mean surface temperature)※

- 陸域及び海水の表面付近の気温と、海水のない海域の海面水温による世界全体の推定平均値。通常は、特定の基準期間の値からの偏差で表現された変化で推定される。GMSTの変化を推定する場合には、陸域及び海域の両方で表面付近の気温が用いられることもある。過去のIPCC報告書では、文献に基づき、GMSTの変化について近似的に同等な様々な計量法を用いている。

工業化以前 (pre-industrial)

- 大規模な産業活動が1750年頃に開始される以前の複数の世紀にわたる期間。工業化以前のGMST (Global Mean Surface Temperature) に近似する、1850～1900年を基準期間として用いる。

地球温暖化 (global warming)

- 30年の期間または特定の年もしくは10年を中心とした30年平均して推定されたGMST (Global Mean Surface Temperature) の上昇で、別に定めのない限り工業化以前の水準と比較する。過去及び将来にわたる30年の期間については、現在の数十年間の昇温傾向が継続すると想定される。

正味ゼロのCO₂排出 (net zero CO₂ emissions)

- 正味ゼロの二酸化炭素(CO₂)排出は、人為起源のCO₂排出が、特定の期間にわたる人為的なCO₂の除去によって、世界全体で均衡が取れたとき、実現される。

二酸化炭素除去 (CDR: carbon dioxide removal)

- CO₂を大気から除去し、地下、陸域もしくは海域の貯留層(リザーバ)または製品中に永久的に貯留する、人為的な活動。既存の及び潜在的な生物学的または地球化学的吸収源の人為的な強化、並びに直接空気回収・貯留も含むが、人為的な活動が直接的な原因にならない自然のCO₂の吸収は含まない。

総カーボンバジェット (total carbon budget) ※

- 工業化以前の期間から人為起源のCO₂排出量が正味ゼロに達する時点までに推定される、世界全体の正味のCO₂累積排出量で、他の人為起源の排出の影響も考慮しており、一定の確率において地球温暖化を所与の水準に抑えることにつながるだろう。

残余カーボンバジェット (remaining carbon budget) ※

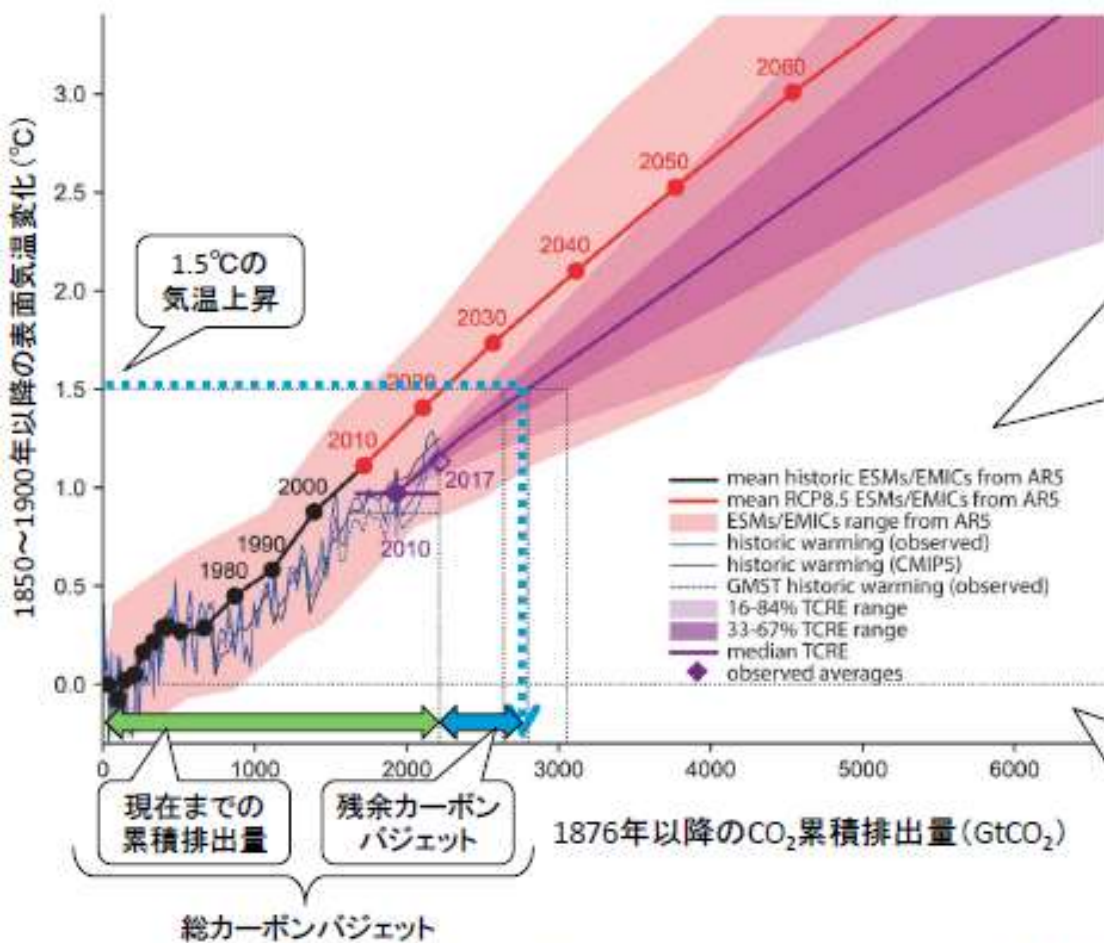
- 所与の起点から人為起源のCO₂排出量が正味ゼロに達する時点までに推定される、世界全体の正味のCO₂累積排出量で、他の人為起源の排出の影響も考慮しており、一定の確率において所与の水準に地球温暖化を抑えることにつながるだろう。

(IPCC SR1.5 SPM Box.1)

※ 「GMST」についてはスライド18頁及び47頁、「カーボンバジェット」についてはスライド11頁及び47頁も参照。

(参考) カーボンバジェットについて

- AR5では、気温上昇の量はCO₂の累積排出量によってほぼ決定され、地球温暖化を安定させるためには人為的発生源からのCO₂累積排出量を一定値に制限する(正味のCO₂排出をゼロの状態とする)必要があることが示された。
(参考: IPCC AR5 WG1 SPM p.27)



- 地球温暖化を所与の水準に抑えるためのCO₂累積排出量の上限 = 総カーボンバジェット
- ただし、カーボンバジェットの値には不確実性がある(スライド48頁参照)。

ドット付きの太線はAR5で示されたCO₂累積排出量とCO₂以外の因子に対する表面付近の気温に基づく世界全体の平均値 (globally averaged near-surface air temperature) の応答、細い黒色の実線は複数モデルのSAT (surface air temperature) の平均推計値を表す。

細い青色の点線は、GMST (global mean surface temperature) の観測値、紫色の実線及び陰影部は、SR1.5で採用されているCO₂累積排出量及びCO₂以外の因子に対する気温の応答を表す。

(参考: IPCC SR1.5 105頁 第2章 図2.3 キャプション)

AR5とSR1.5では残余カーボンバジェットを推計するための世界気温の計量法が異なる(スライド47頁参照)。

それ以外にも、最新の理解及び方法のさらなる進展により、AR5に比べて残余カーボンバジェットの推定値が約300GtCO₂増えている。(確信度が中程度)

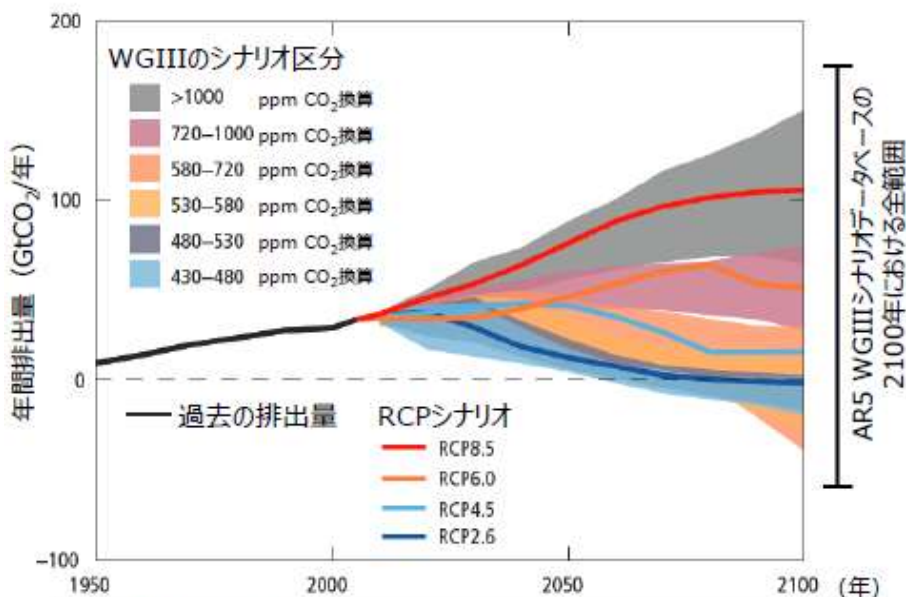
(参考: IPCC SR1.5 SPM 脚注14)

図. 1876年1月1日以降のCO₂累積排出量と1850~1900年以降の気温変化

2.1. 将来の気候の主要な駆動要因

人為起源CO₂累積排出量と気温上昇

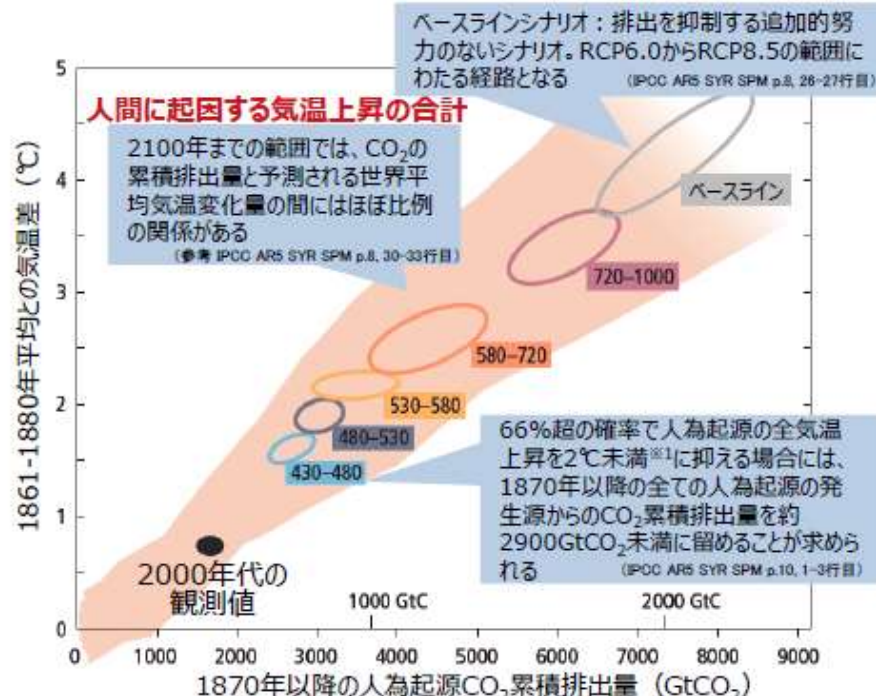
- 21世紀終盤、及びその後の世界平均の地表面の温暖化の大部分は、CO₂の累積排出量によって決められる (IPCC AR5 SYR SPM p.8, 19-20行目)
- GHG排出量の予測は、社会経済発展と気候政策に依存し、広範にわたる (IPCC AR5 SYR SPM p.8, 20-21行目)



- 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

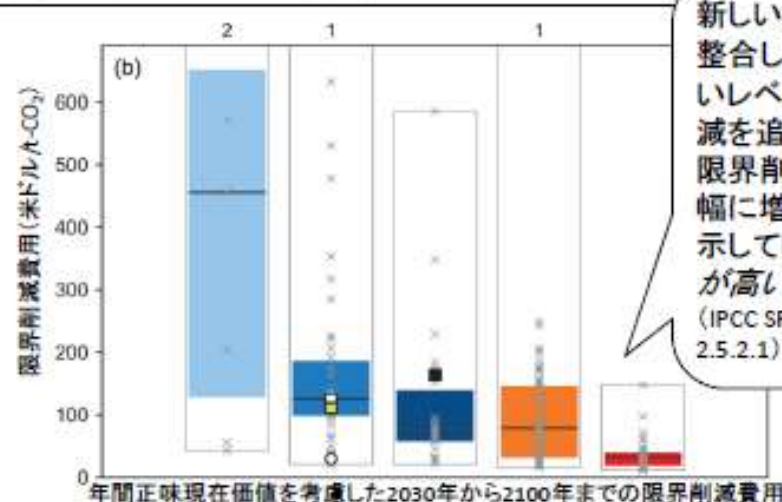
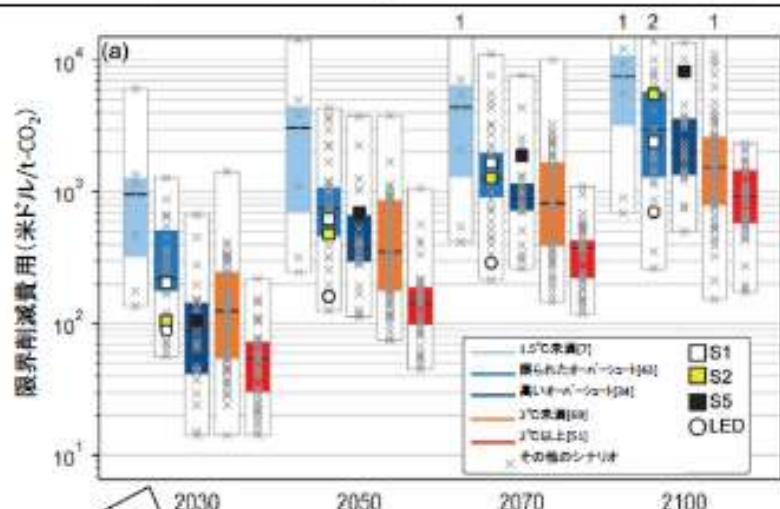
* 図中の吹き出しは原図に追加したもの

1.5℃経路における限界削減費用

- 地球温暖化を1.5℃に抑えるモデル経路は、広い範囲の21世紀にわたる割引限界削減費用※の世界平均を予測する。[地球温暖化を1.5℃に抑える]限界削減費用は、地球温暖化を2℃より低く抑える経路に比べて約3～4倍である(確信度が高い)。
- 1.5℃の緩和経路における総緩和費用に関する文献は限定的であり、本報告書では評価されていない。1.5℃に昇温を抑える経路に整合する、経済全体の費用及び緩和の便益の統合評価については知識ギャップ(知見不足や見解の不一致等)が残されている。

(IPCC SR1.5 SPM C2.7.)

※ 追加的な1単位分の排出量を削減するのにかかる費用。現在価値の割引率は5%に設定。



新しい分析はAR5と整合しており、より高いレベルの排出削減を追求する場合は限界削減費用が大幅に増加することを示している(確信度が高い)。(IPCC SR1.5 153頁 第2章 2.5.2.1)

費用の値は、モデル、シナリオ、社会・経済、技術及び政策の前提によって大幅に異なる。

(IPCC SR1.5 153頁 第2章 2.5.2.1)

図. 緩和経路と整合する世界全体の限界削減費用

左図は割引前の限界削減費用(2030～2100年)、右図は割引率5%の平均限界削減費用(2030～2100年)を示す。図上の黒い横棒は中央値、凡例中の括弧内にある数字は排出経路の数、それぞれの棒グラフの上にある数字は図上には示されていない排出経路の数を示す。

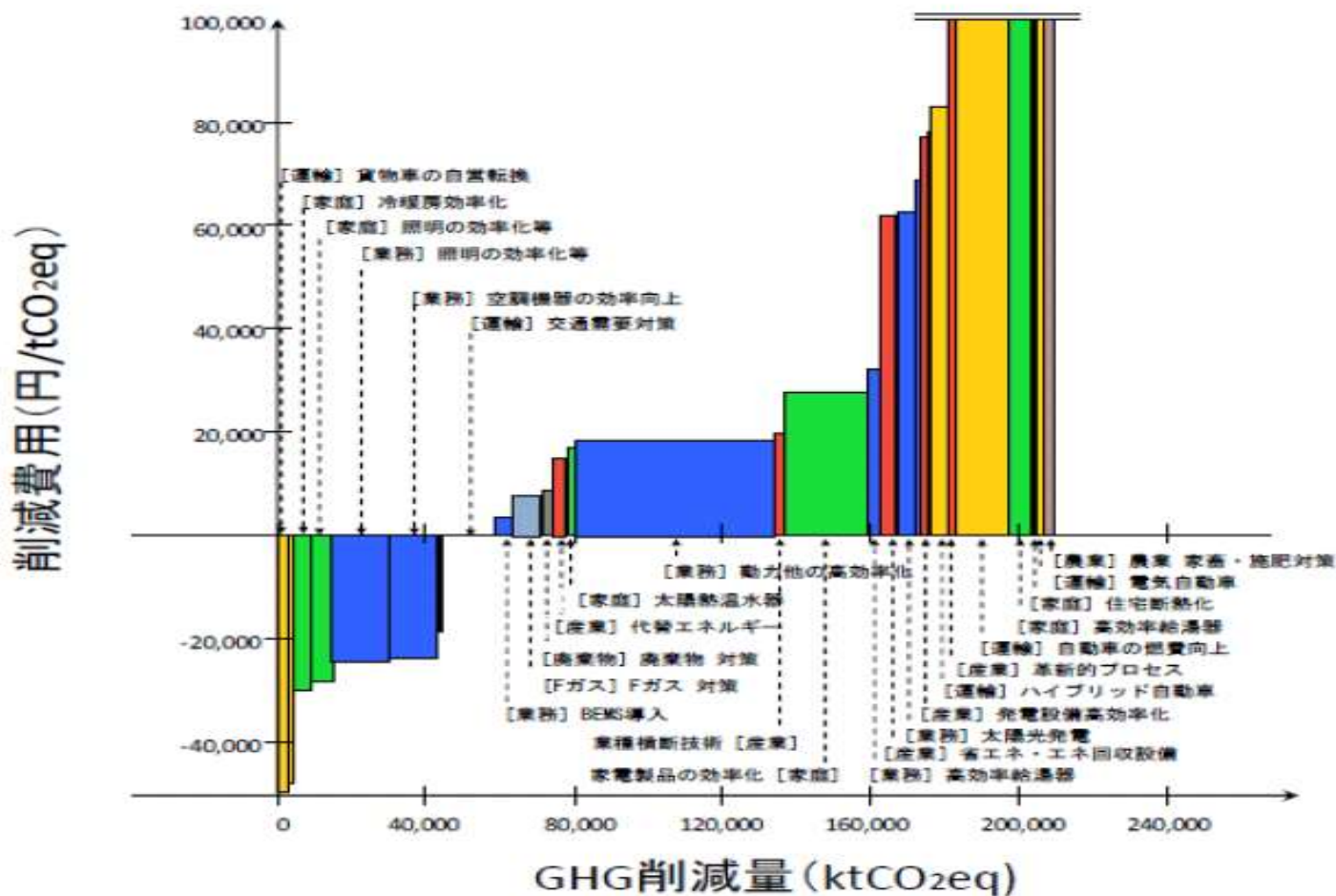
出典: 図, IPCC SR1.5 153頁 第2章 図2.26

※ 図中の記号・文は原図に追加したもの

(参考)

AR5は「緩和に係る総経済費用の推定値には大きな幅があり、モデルの構造と前提、及び導入される技術の性質や緩和のタイミングといったシナリオの仕様に大きく依拠している(IPCC AR5 WG3 SPM p.15)」と評価している。

二酸化炭素を減らすには、お金を得するものから多額の出費が必要なものまである。

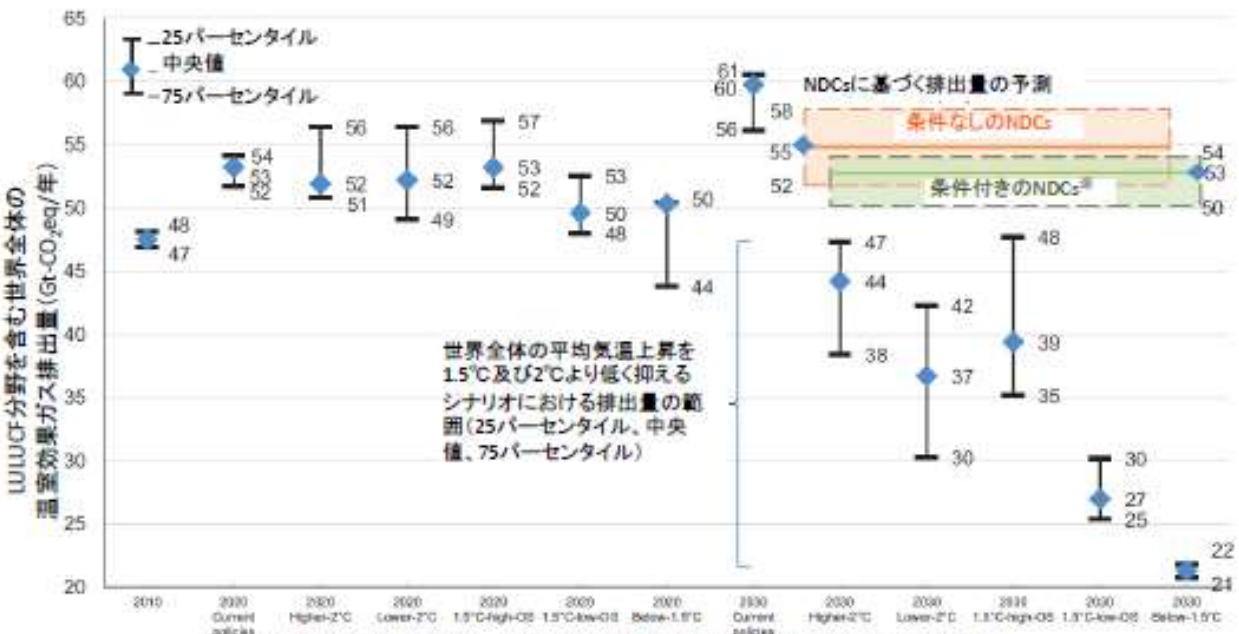


現在の各国目標では地球温暖化を1.5℃に抑制できないだろう

- 国別に宣言する、現在の緩和の2030年に向けた野心※を反映した排出経路は、2100年までに約3℃の地球温暖化をもたらし、その後も昇温が続く、費用対効果の高い排出経路と広く整合している（確信度が中程度）。
- これらの野心を反映した排出経路は、たとえ2030年以降の排出削減の規模と野心の挑戦的な引き上げによって補完されたとしても、地球温暖化を1.5℃に抑えることはないであろう（確信度が高い）。

(IPCC SR1.5 SPM D1., D1.1.)

※ 現在、各国はパリ協定の下で、2020年以降の排出削減目標として「自国が決定する貢献」(NDC)を提出している。



- パリ協定の下で提出された、国別に宣言する、現在の緩和（GHG削減）の野心の成果としての世界全体の排出量の推定値※は、2030年に52～58 GtCO₂eq/年になるであろう（確信度が中程度）。
- 地球温暖化を1.5℃に抑える排出経路は、2030年までに明確な排出削減を示す（確信度が高い）。1つを除くすべての排出経路において、世界全体の排出量は2030年に35 GtCO₂eq/年より低い水準まで削減され、利用可能な排出経路の半数は25～30 GtCO₂eq/年の範囲に（四分位範囲）に落ち着き、2010年水準から40～50%の削減となる（確信度が高い）。

※ 温室効果ガスの排出量は、IPCC第2次評価報告書において導入された、100年GWP値を用いて総計されている。

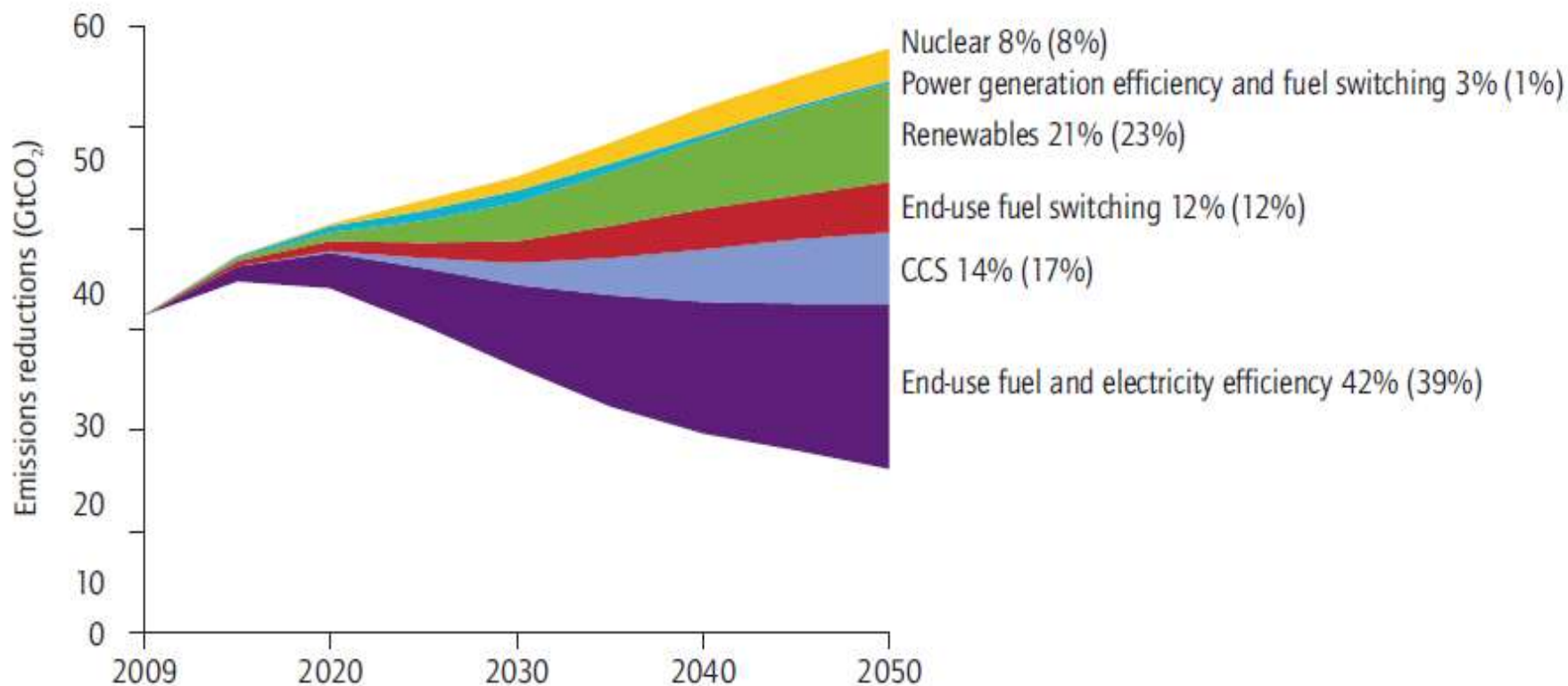
図. 温室効果ガス（GHG）排出量に対するNDCsの効果

※「条件付きのNDCs」とは、主に途上国が提出しており、資金・技術・能力構築等に対する支援が得られる等の条件を満たした場合に実施されるNDCを指す。

(IPCC SR1.5 SPM D1., D1.1.)

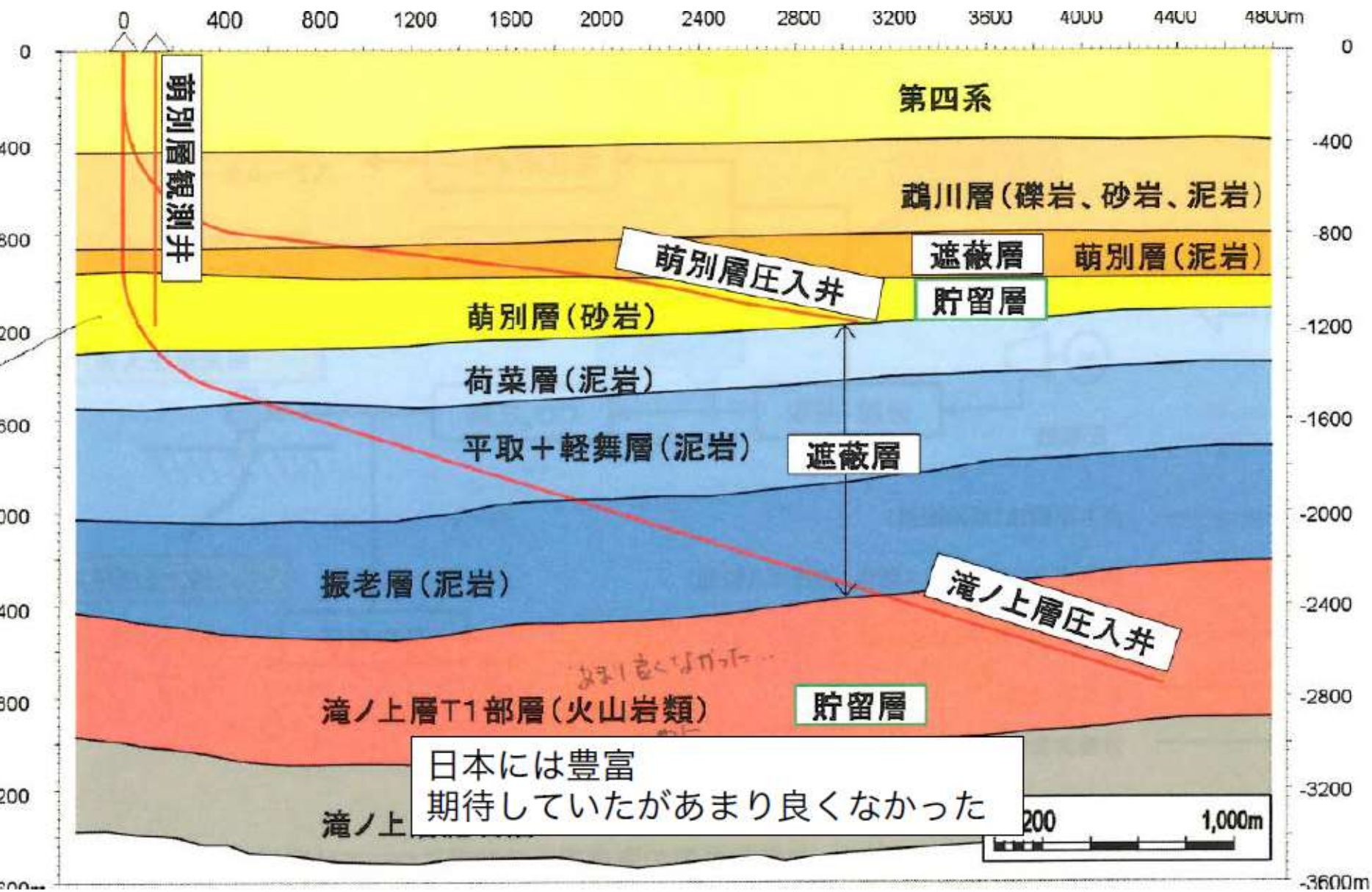
すでに、CCSはなくてはならない方法です。
というか、あるという前提で今後のエネルギーの話が進んでる。

Figure 6: CCS contributes 14% of total emission reductions through 2050 in 2DS compared to 6DS



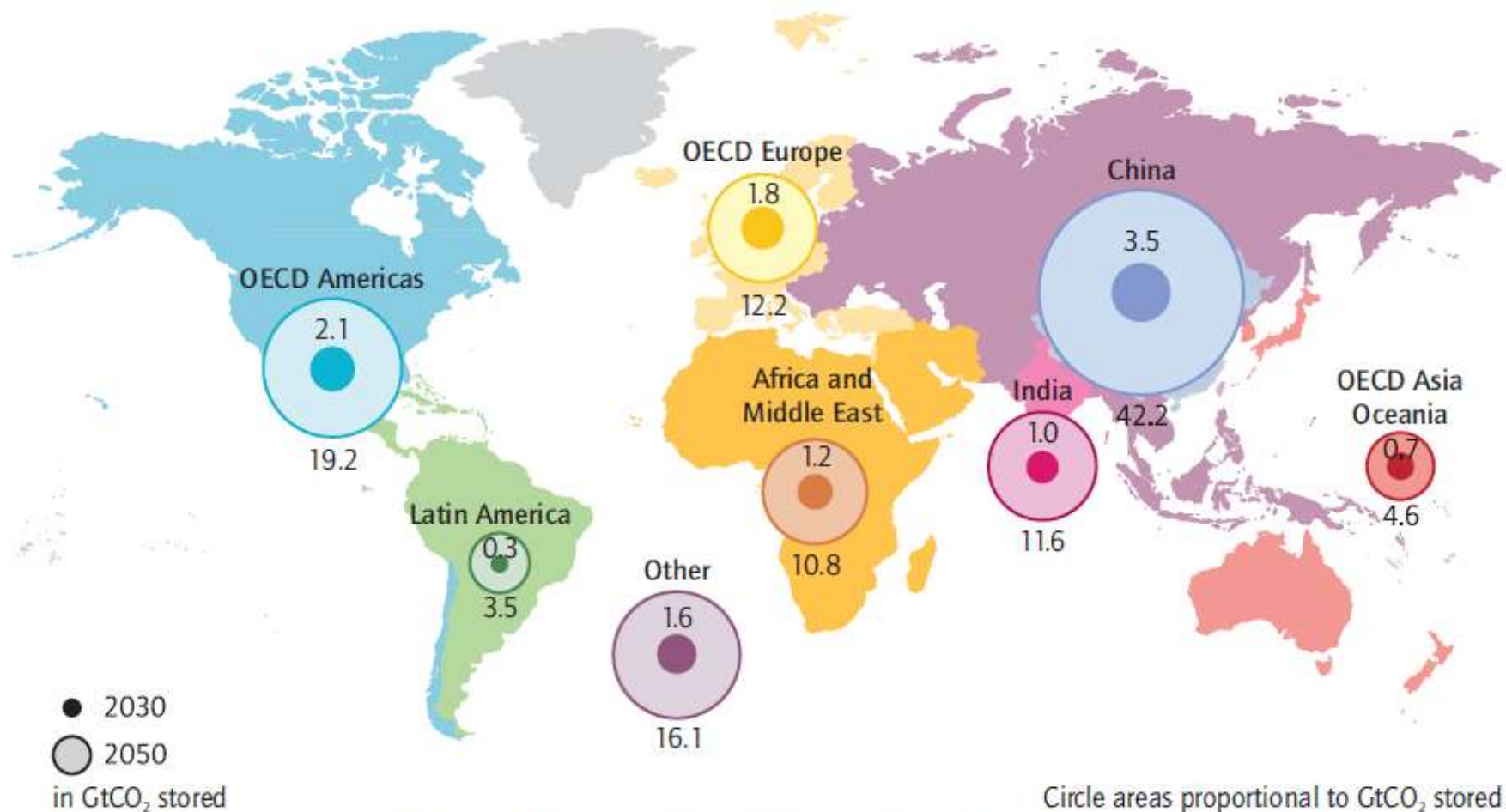
Note: numbers in brackets are shares in 2050. For example, 14% is the share of CCS in cumulative emission reductions through 2050, and 17% is the share of CCS in emission reductions in 2050, compared with the 6DS.

Source: IEA, 2012c.



でも、うめるところが本当にあるかはわからない。

Figure 5: Cumulative CO₂ captured 2015-30 and to 2050, by region in the 2DS



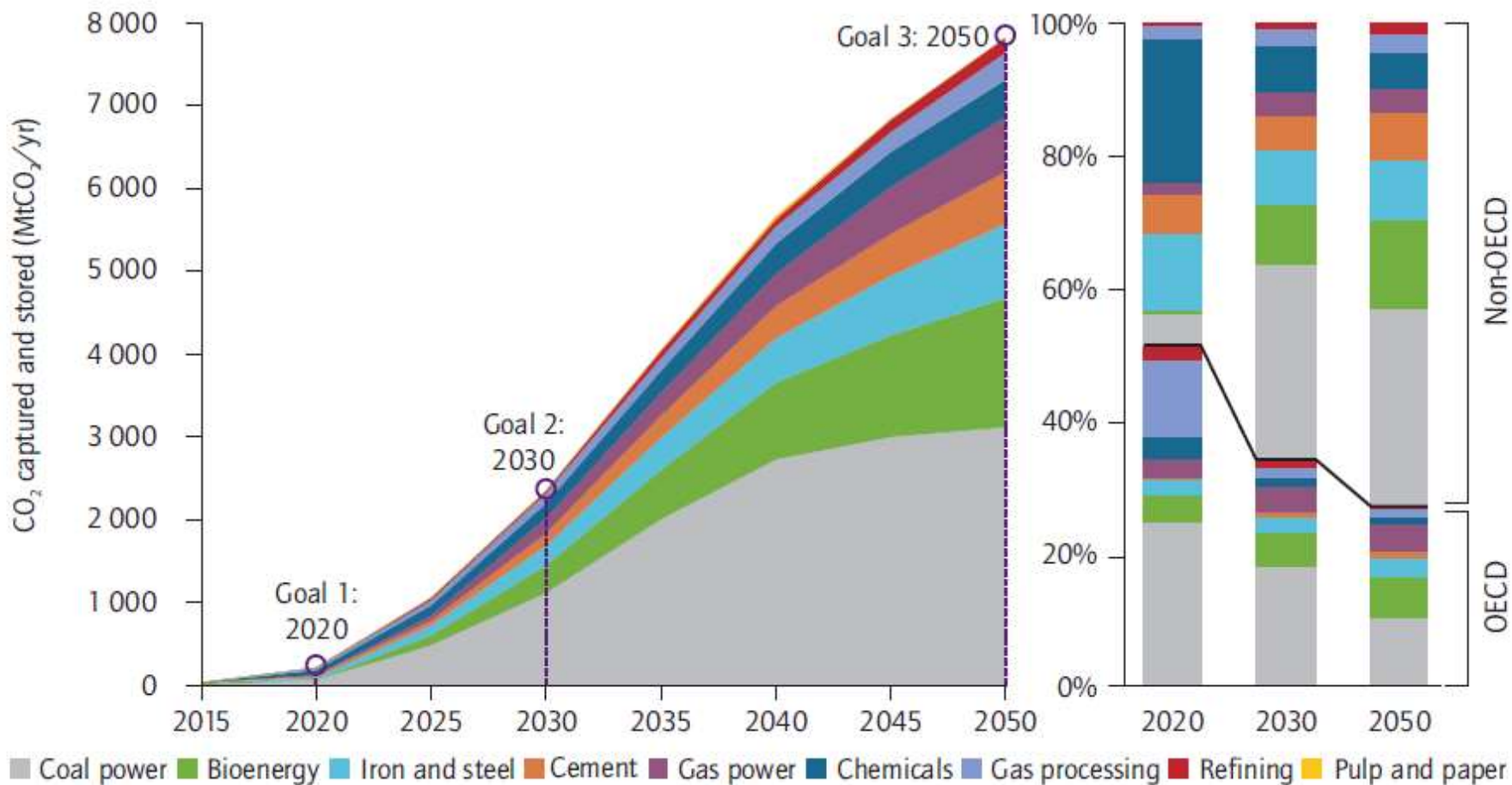
This map is without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries, and to the name of any territory, city or area.

Note: geographic distribution of cumulative captured CO₂ is aligned with locations of large point sources of CO₂ emissions.

Source: IEA, 2012c.

これだけの二酸化炭素が地下に処理される？

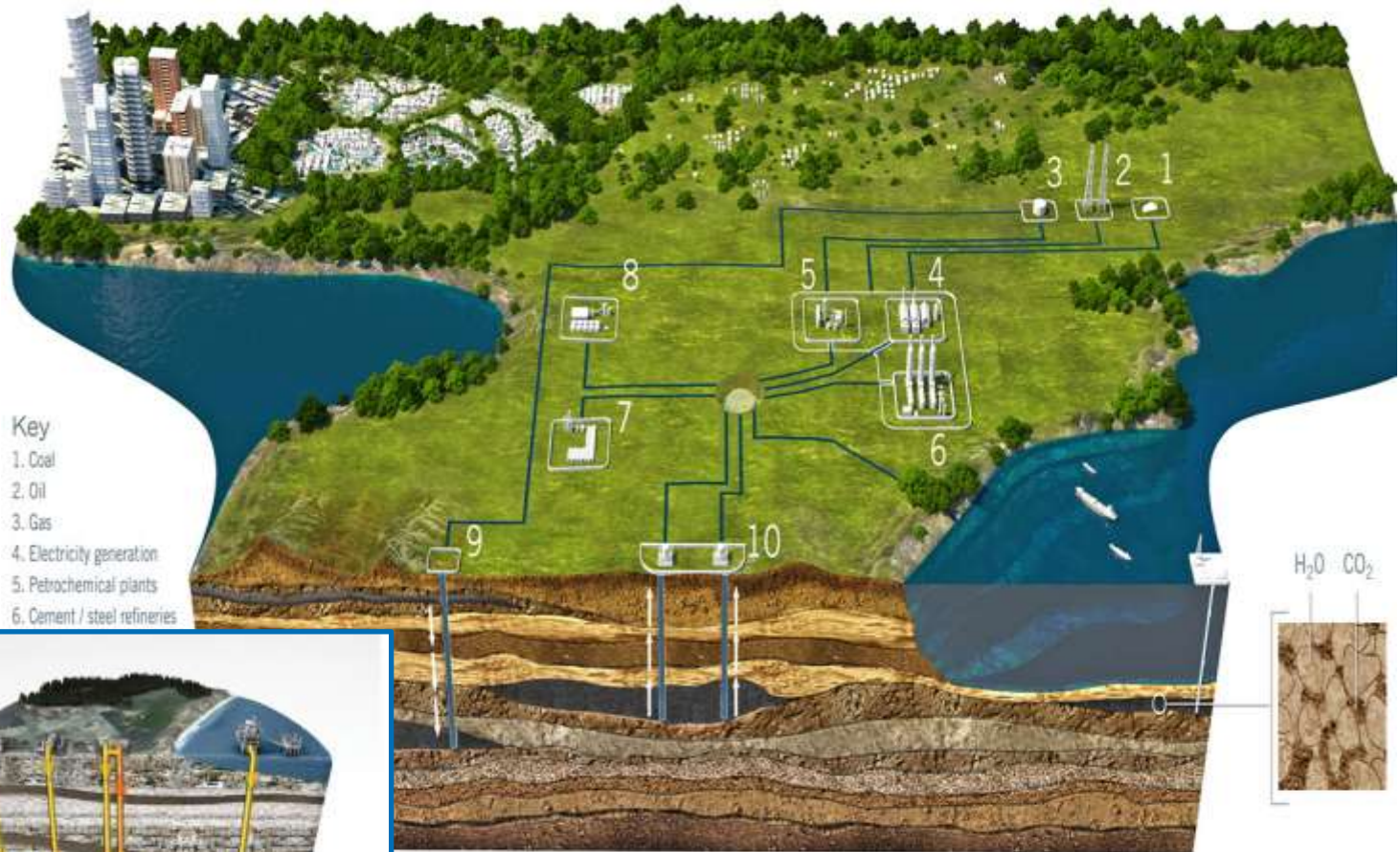
Figure 4. CCS in the power and industrial sectors in the 2DS



KEY POINT: the 2DS suggests a steep deployment path for CCS technologies applied to power generation and a number of industries. Over 70% of all CCS projects take place in non-OECD countries by 2050.

現在実績がないにもかかわらず、今後のCCS必要性は大きい

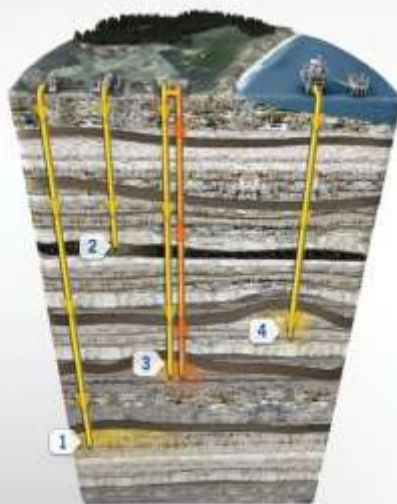
現在のCCS技術



STORAGE OVERVIEW

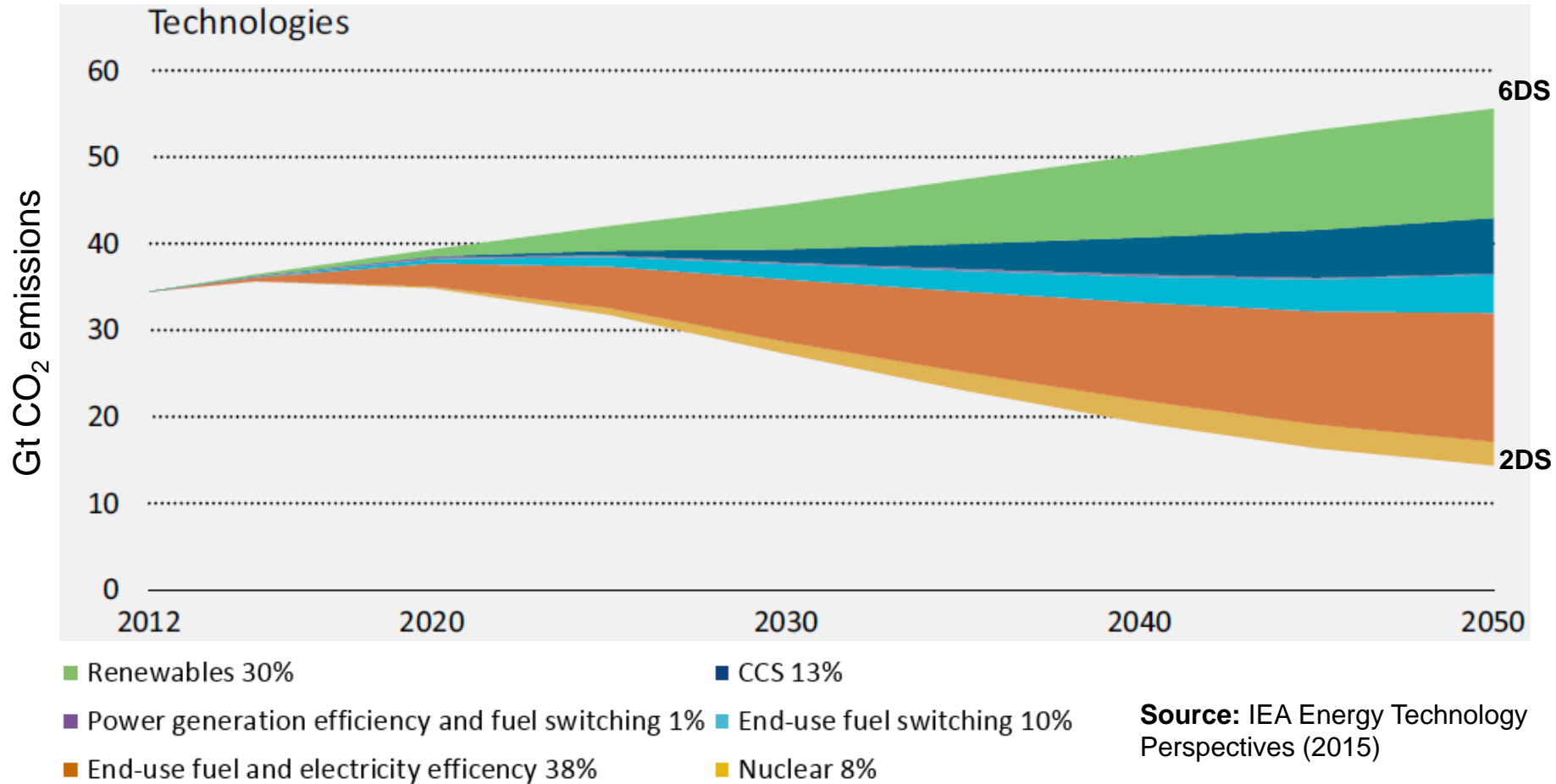
SITE OPTIONS

- 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

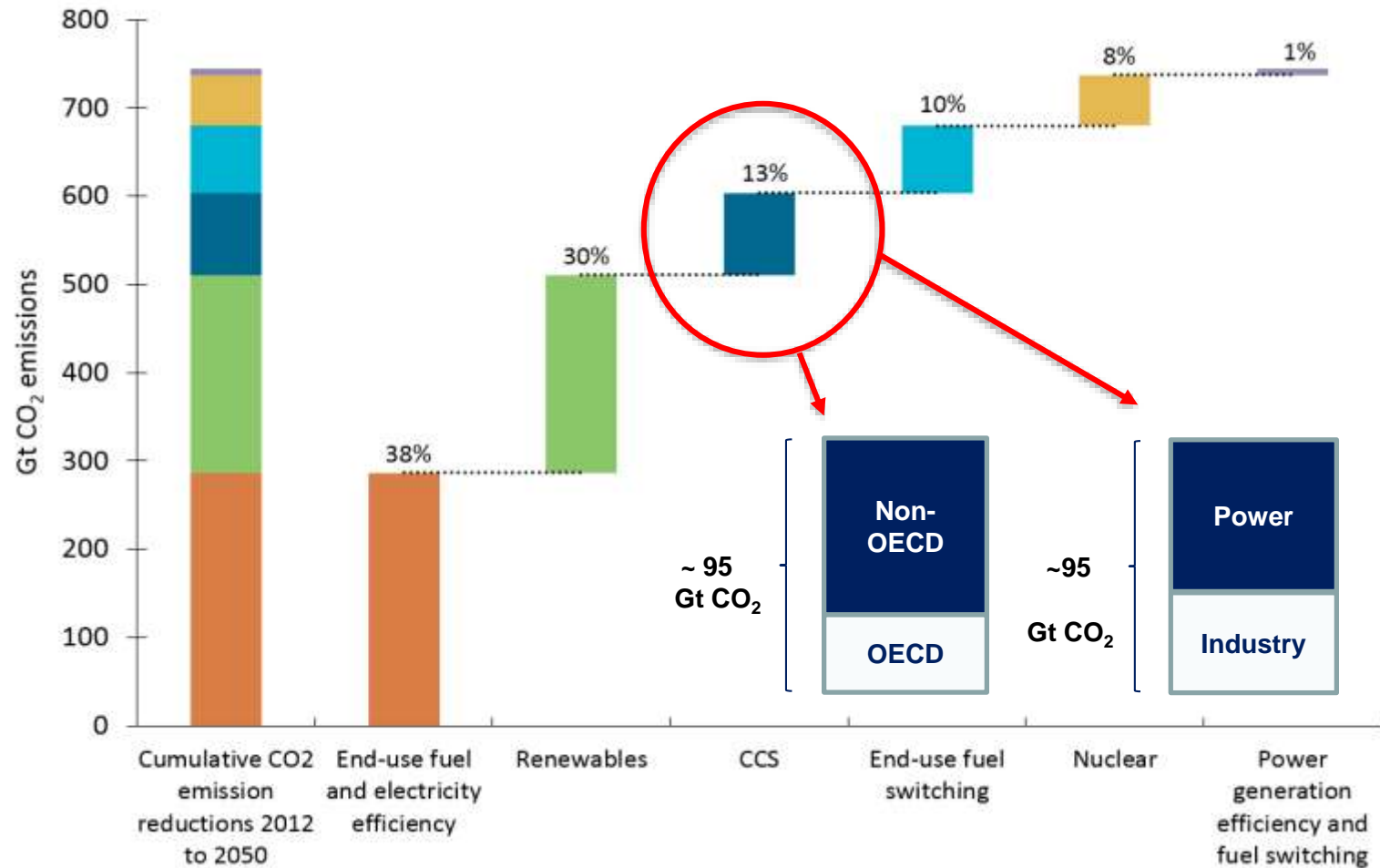
CCS is a vital element of a low-carbon energy future



A transformation in how we generate and use energy is needed

CCS is critical in a portfolio of low-carbon technologies

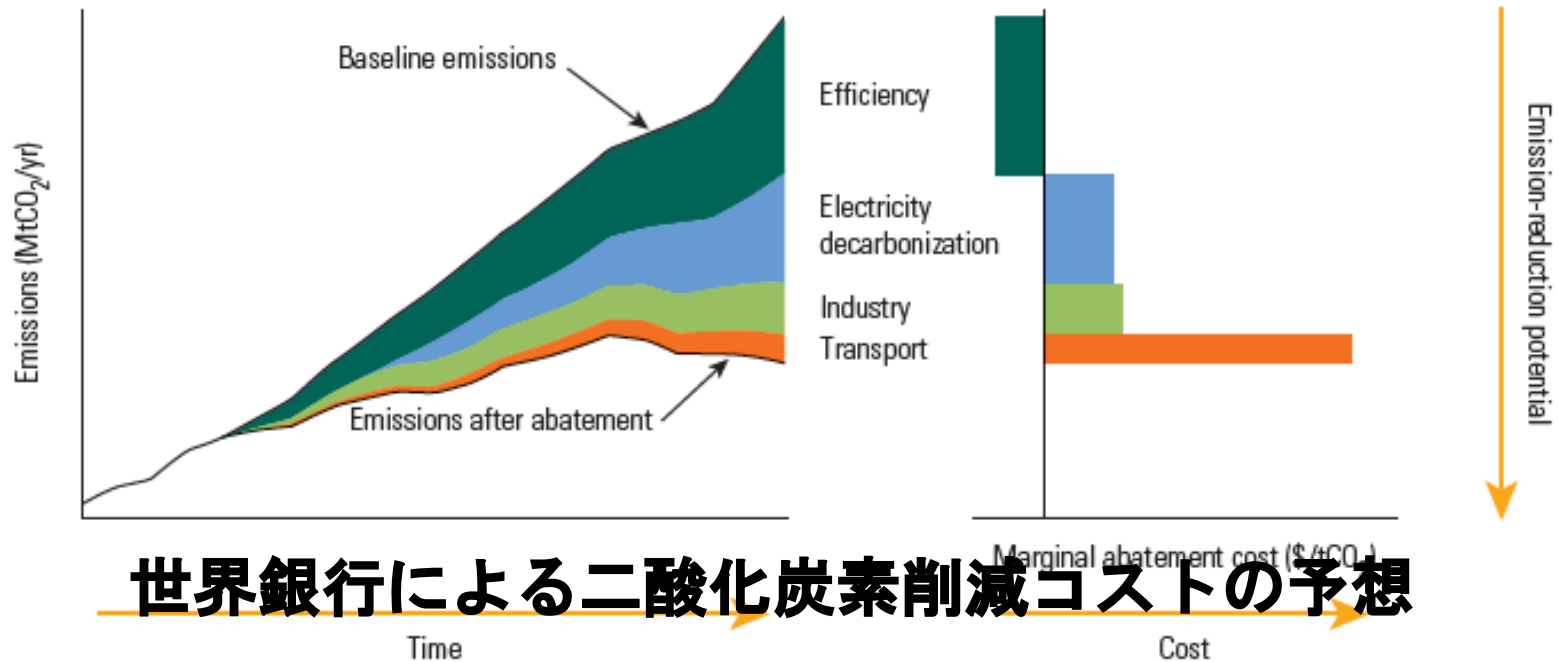
CCS contributes 13% of cumulative reductions required through 2050 in a 2DS world compared to 'business as usual'



Source: IEA, *Energy Technology Perspectives* (2015).

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 cost 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

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 caused by land use change, deforestation and poor agricultural practices. Boosting carbon sinks in 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



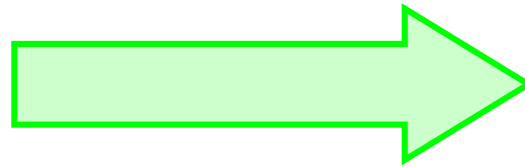
Source: Ecosystem Marketplace (2014)

バイオマス生育時のCO2吸収

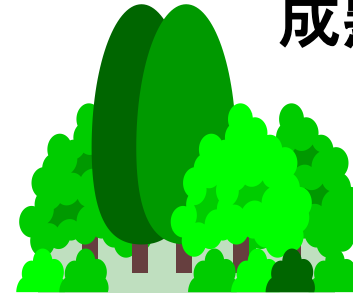
Zero-carbon energy Kyoto 2009



生育林



成熟林



成長年数
(20~60年)

×

蓄積速度
(tC/ha/yr)

= 成熟林の炭素蓄積量
(tC/ha)

実は、原生林はCO2を吸収しない

本日の課題 2

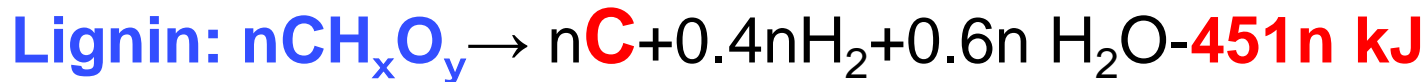
自分の修士論文。

（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。）

・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

室温

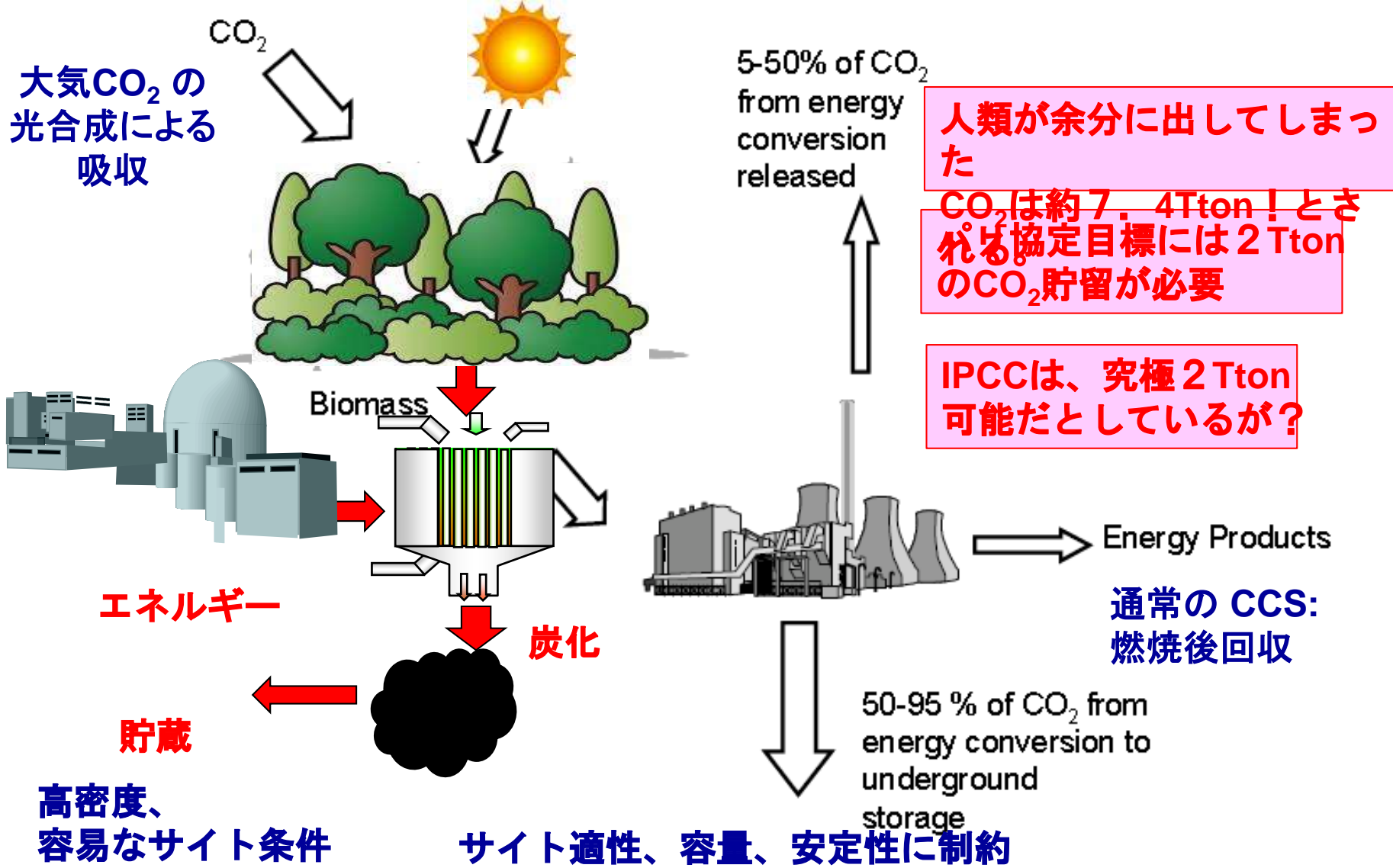
270°C

310°C

350°C

⇒ この過程で大きな吸熱が起こる

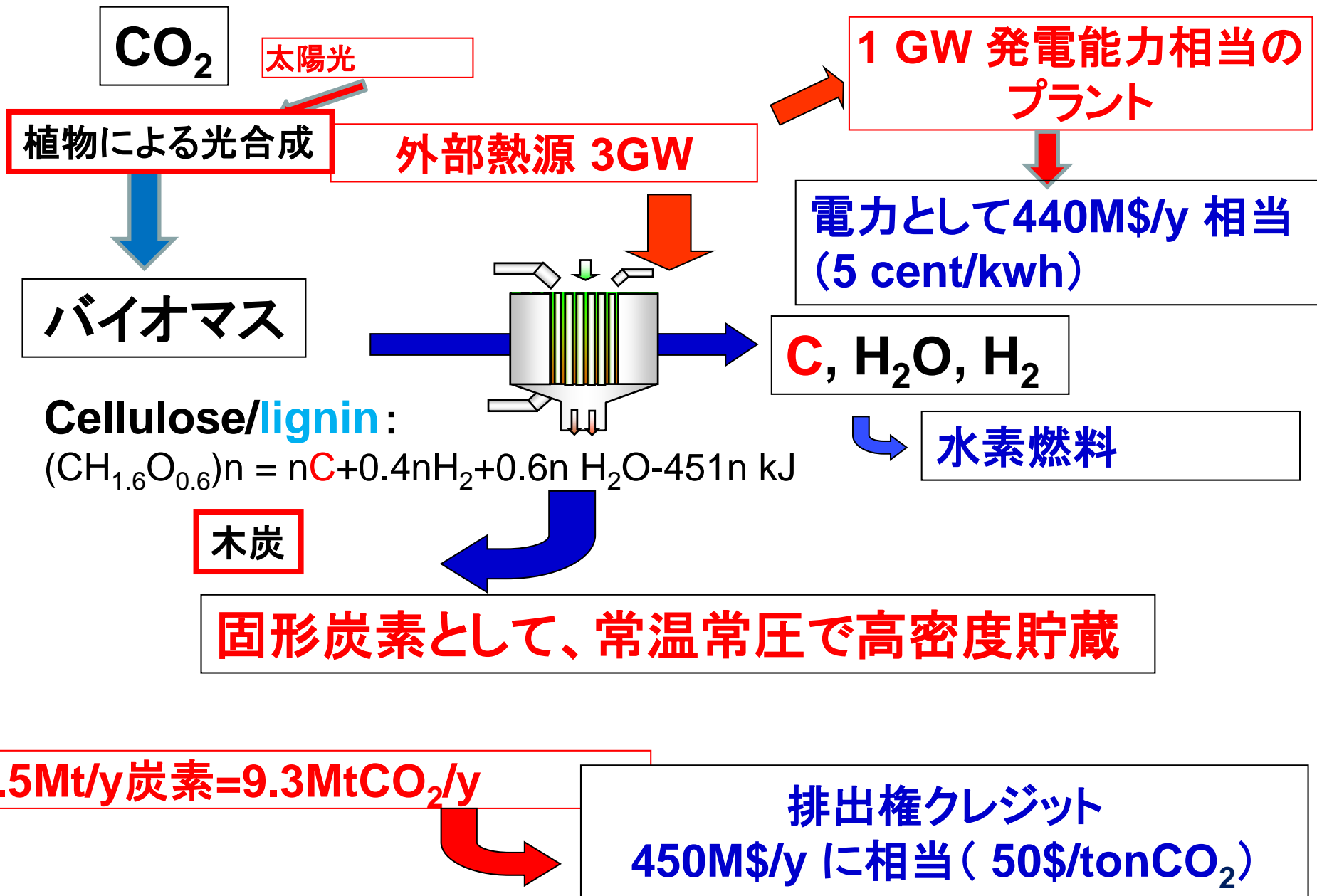
制約となるのは①CO₂貯留 → ②バイオマス処理 → ③森林成長



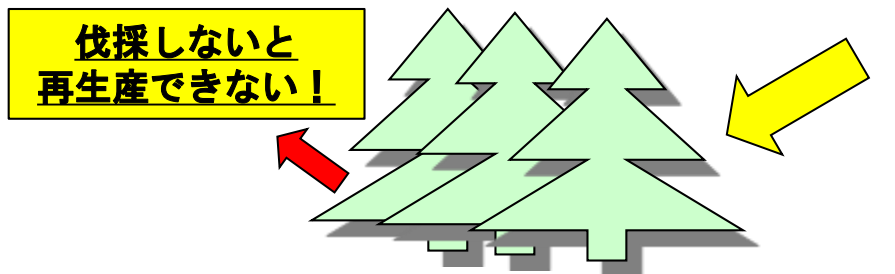
高密度、
容易なサイト条件
安定、環境影響

サイト適性、容量、安定性に制約

エネルギーのクレジット化



森林は二酸化炭素を吸収



「カーボンネガティブ」

CO₂ 吸収

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

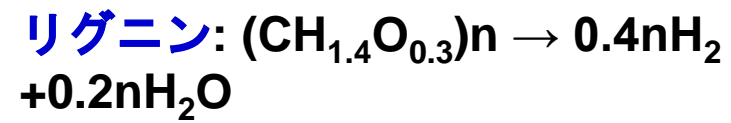
外部熱源

木炭に転換

炭素として保管

吸熱反応

燃料製造



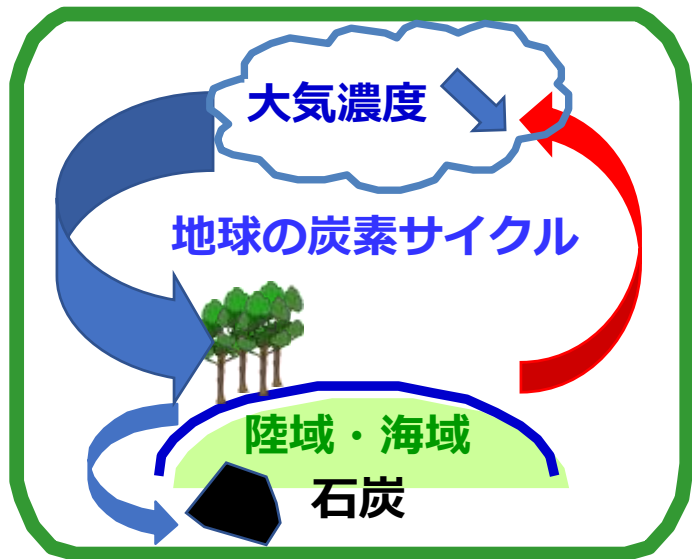
燃料消費

+ C

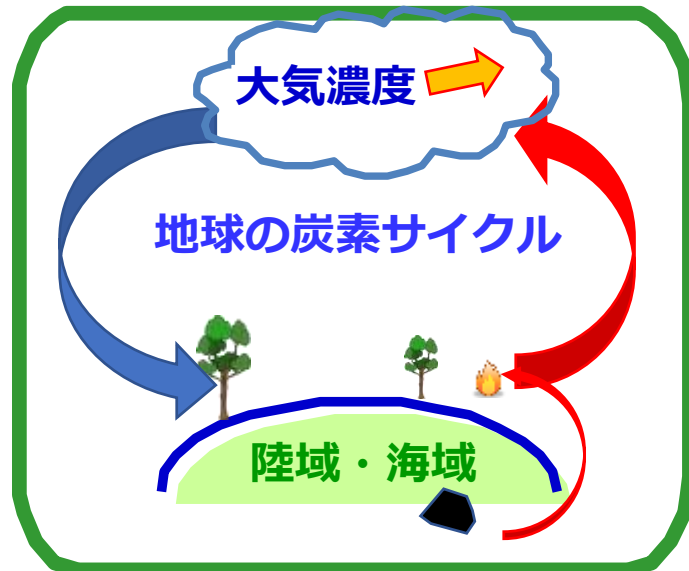
CO₂ 放出なし

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



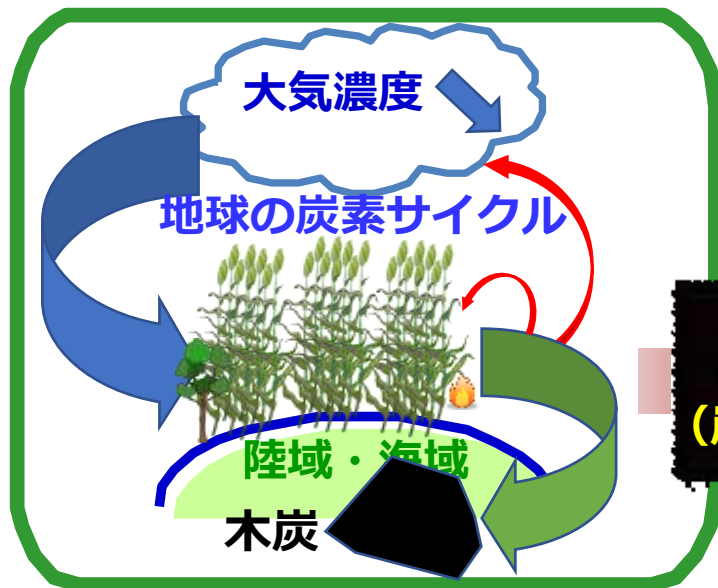
①化石燃料の生成（太古）



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）

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。。。

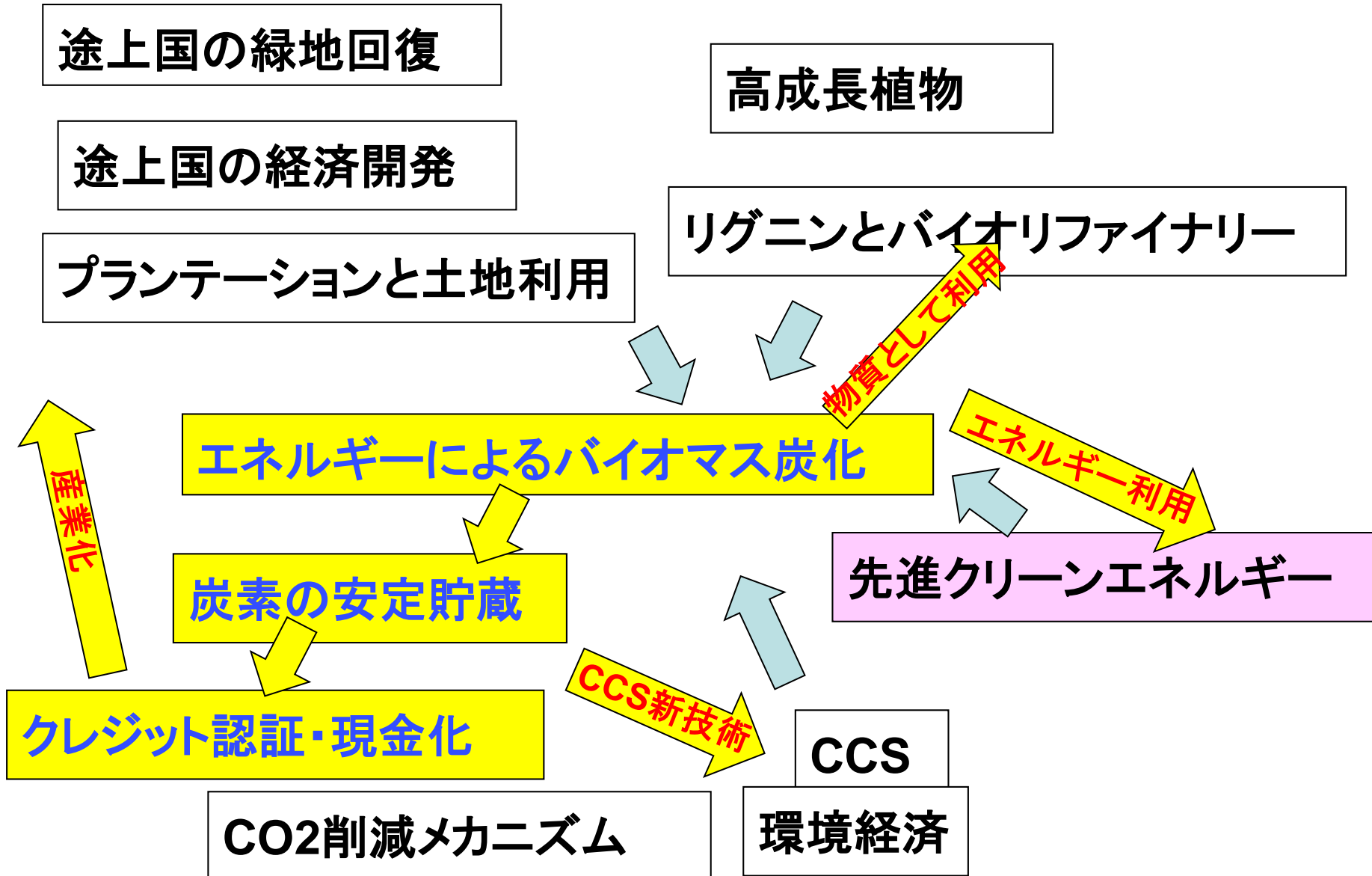
- 継続的なエネルギー転換が必要。(200年～)
- 生物による二酸化炭素固定は不可欠。しかし隔離法が問題。
- ゼロエミッションだけでは**CO₂を減らすことができない**。
➡先進エネルギーバイオマス熱分解は、エネルギー生産➡炭化利用
なので、**正味のCO₂削減となる**
(クリーンエネルギー供給もできる。)
- 灌漑を含む植林、緑地拡大、途上国開発との両立も重要
➡**途上国の産業として可能性**
- エネルギー消費を拡大し、特に途上国の成長を確保しながら
人類の持続が可能なオプションとなる。

「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



- 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。

本日の課題 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？