
長期気候緩和シナリオ研究と カーボンニュートラル

2021年9月

京都大学大学院工学研究科

都市環境工学専攻

藤森真一郎

学術講演会「カーボンニュートラル：2050年までに何をすべきか」



アウトライン

- カーボンニュートラルにしないといけないのか？
- どうやってカーボンニュートラルにするのか？
- カーボンニュートラルだけでいいのか？
- カーボンニュートラルにしようとするときに他に考えることはないか？

全球平均気温の過去推移と将来予測

- 産業革命以前からおよそ 1°C 全球平均気温は上昇してきた
- 将来このまま対策を講じなければ、現状から今世紀末で $+4^{\circ}\text{C}$ 、対策を講じれば $+1^{\circ}\text{C}$ の上昇

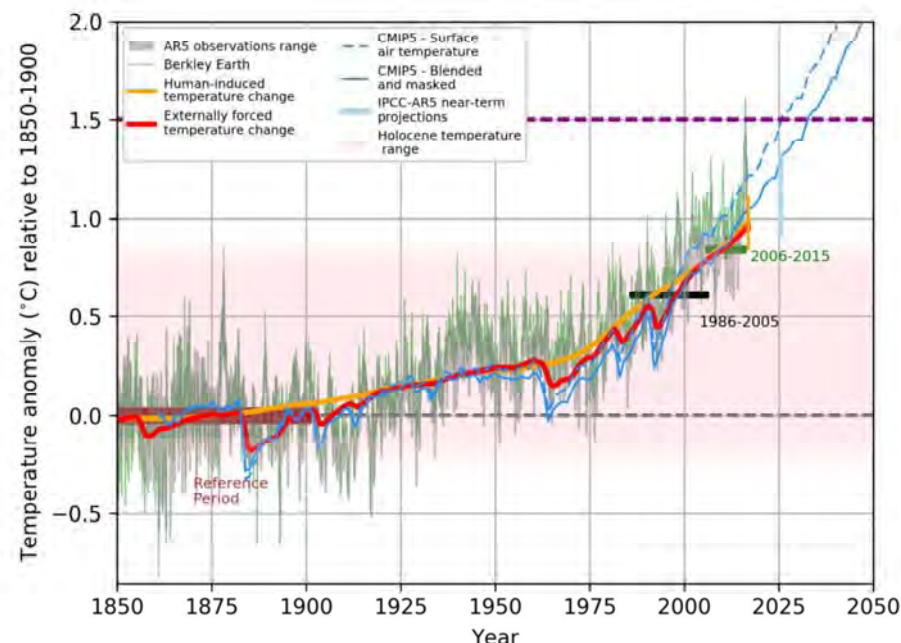
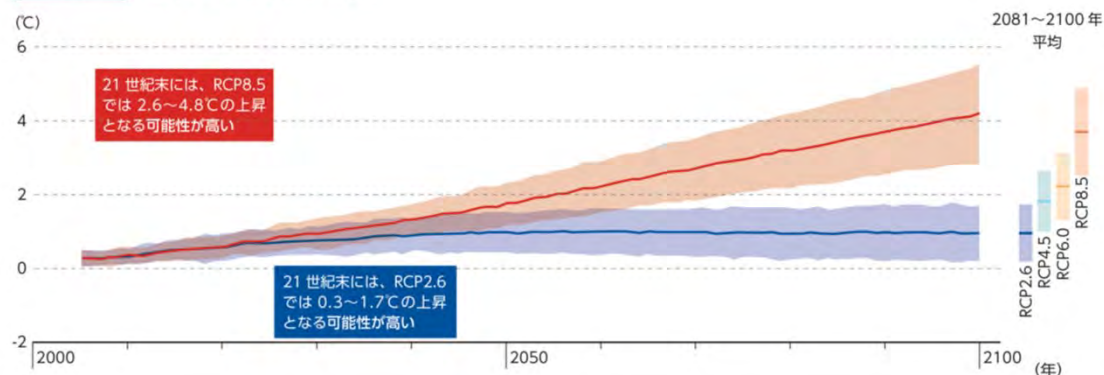


Figure 1.2: Evolution of global mean surface temperature (GMST) over the period of instrumental

図 1-2-9 世界平均地上気温の変化



注：1986～2005年平均からの変化。

資料：気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 「第5次評価報告書統合報告書政策決定者要約」より環境省作成

現状の観測された気候変動に由来する と考えられる異常気象

北極圏

森林火災

2019年を通じてシベリア、アラスカなどの極地で火災が発生。北極圏の夏期森林火災によるCO₂排出量はここ17年間で最高を記録。

北極の海氷面積の縮小

2019年9月に日あたり海氷面積が、衛星観測記録史上2番目に小さい値を記録。

欧州

熱波

6月にフランス南部で46.0℃を記録（観測史上最高）他6カ国でも最高記録を更新。

高潮

11月にベネチアで高潮により水位が1.85m上昇（1966年以降最高）。

北米

大雨・洪水

2018年7月～2019年6月の米国における平均降水量は史上最高。ミシシッピ流域ルイジアナ州で7ヶ月の長期的洪水。カナダオタワ地域では6,000世帯が浸水。

竜巻

2011年以来最も活発な竜巻シーズンを経験。5月だけで556個発生（月単位としては史上2番目）。

アフリカ

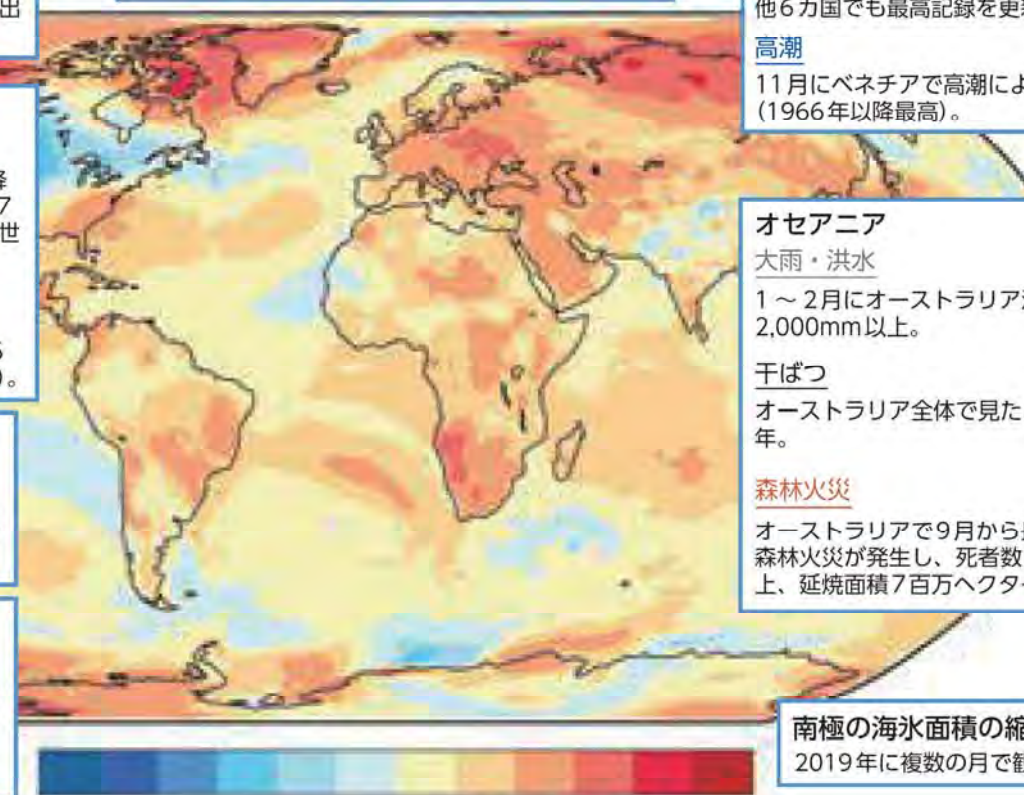
熱帯低気圧

3月にモザンビーク、ジンバブエで関連の死者数900人以上。南半球熱帯低気圧によるものとしては過去100年間で最悪の被害。

アジア

大雨・洪水

インドでは夏期のモンスーン季に繰り返し洪水が発生し、史上最も遅い雨期明け。インド、ネパール、バングラデシュ、及びミャンマーにおいて、洪水によって死者数2,200人以上。



-10 -5 -3 -2 -1 -0.5 0 0.5 1 2 3 5 10℃

2019年の平均気温と1981-2010年の平均気温との差（℃）

オセアニア

大雨・洪水

1～2月にオーストラリア沿岸地域で10日間の降水量が2,000mm以上。

干ばつ

オーストラリア全体で見たときに、史上最も乾燥した一年。

森林火災

オーストラリアで9月から長期的かつ広範囲にわたって森林火災が発生し、死者数33名、住宅焼失2,000軒以上、延焼面積7百万ヘクタール（2020年初めの時点）。

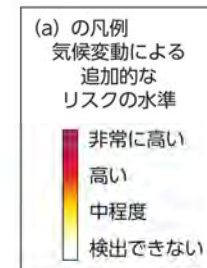
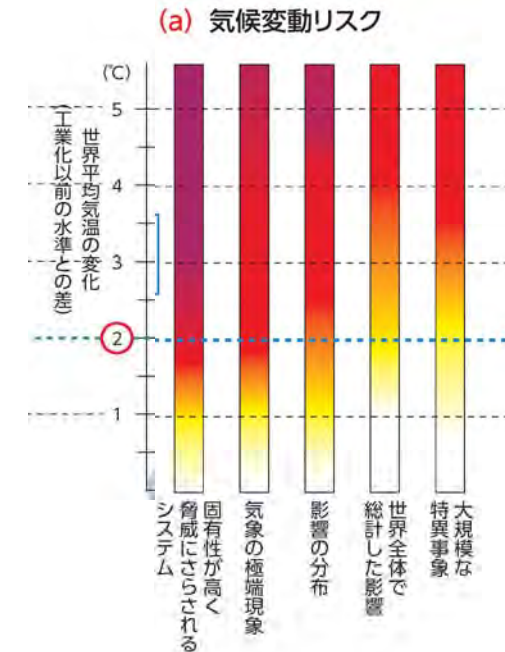
南極の海氷面積の縮小

2019年に複数の月で観測史上最低値を記録。

資料：「WMO State of Global Climate in 2019」から環境省作成

どこまで気候変動を許容するか

- 2000年代後半から全球平均気温上昇は 2°C くらいが許容範囲なのではないかという論調が増えてきた
 - ✓ 不可逆的な事象(海面上昇)
 - ✓ ティッピングポイントを超えると大惨事となりうる事象の発生確率の上昇
 - ✓ 全体として負の影響が大きくなる
 - ✓ 負の影響は貧困地域や脆弱な地域に偏る
- 2°C を一つのポイントとして、リスク管理を考えたときに、我々はどこまで排出削減をしなくてはならないのだろうか？



パリ協定

- 2015年の気候変動に関する国際合意
- 産業革命前からの世界の平均気温上昇を「**2度未満**」に抑える。
加えて平均気温上昇「**1.5度未満**」を目指す（第2条1項）
- 「**今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡を達成するために、**（中略）世界全体の温室効果ガスの排出量が出来る限り速やかにピークに達すること及びその後は利用可能な最良の科学に基づいて迅速な削減に取り組むことを目的」としており（第4条1項）



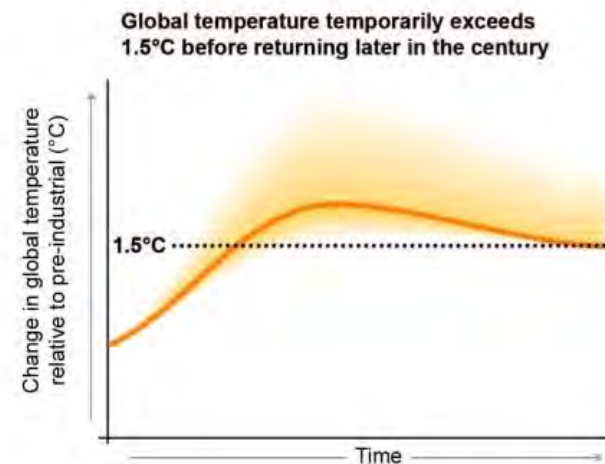
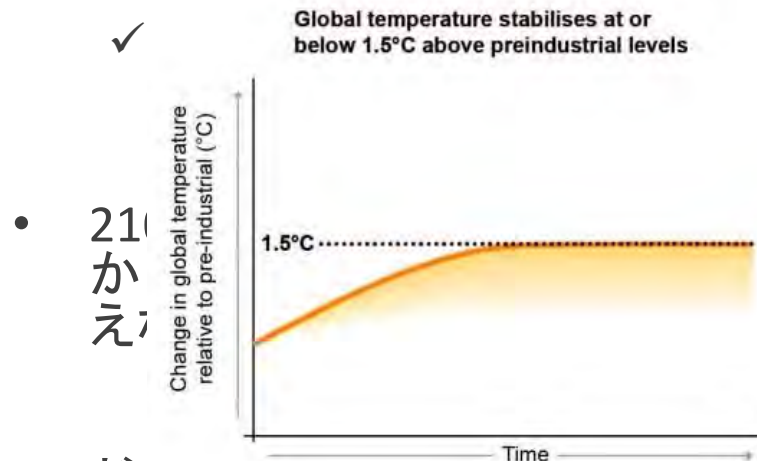
出典：写真 IISD, <http://enb.iisd.org/climate/cop21/>

気候の不確実性とそれに対するリスク管理：どうやって排出量を決める？

- 地球システムが持っている不確実性
 - ✓ 仮に排出量がある水準に決めたとしても、現在の我々の気候に対する理解



- この20年間でこの不確実性は大きくは変わらなかった
前提に



を
2°Cを
が合理

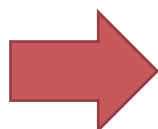
21
かえ

- ど
を
を
か？
 - ✓ 100%絶対に2°Cを下回るを目標とするか？
 - ✓ 50%くらいならいいか？



- 50%という2回に1回失敗するというのは少し問題。
- 66%程度？

のは条

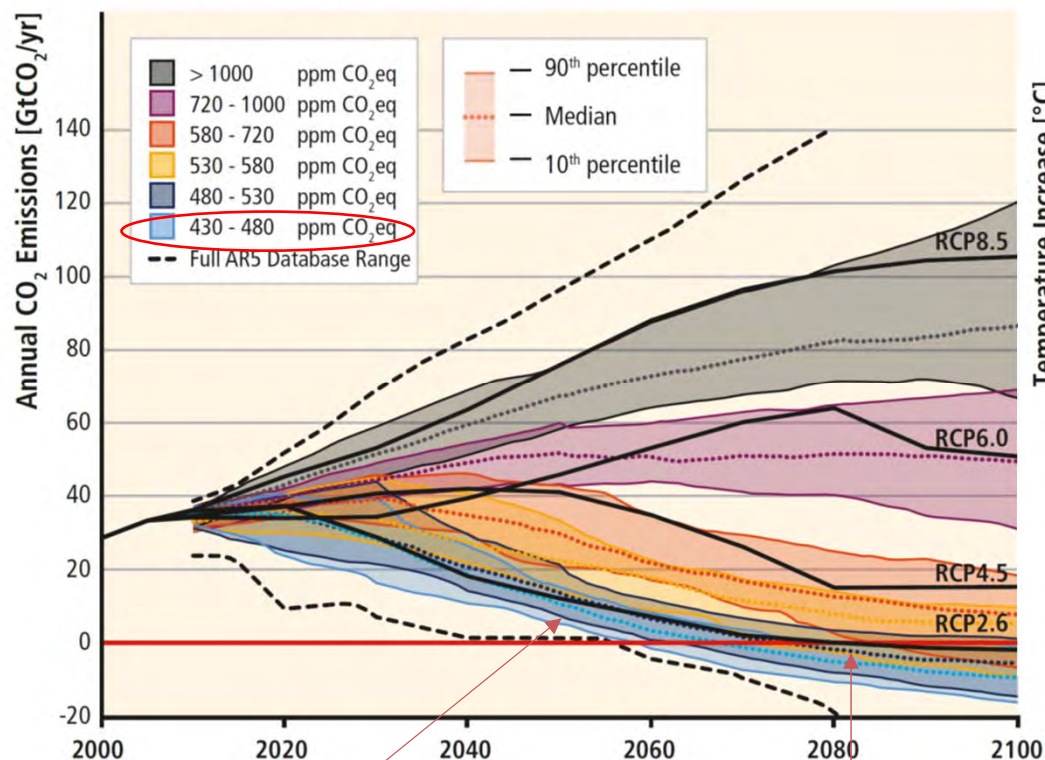


今世紀中の気温上昇が2°Cを超過しない確率を66%以上とするような排出削減経路は？

- 2100年の全球の平均気温上昇で言うと1.6-1.7°C
- CO2の累積排出量(2011-2100年)で言うとおよそ1000GtCO2

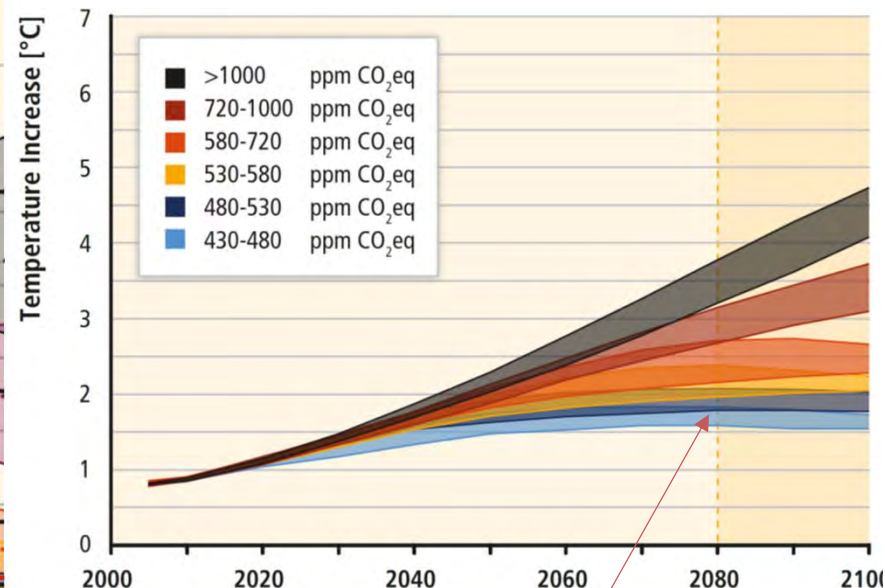
気温上昇を2°C以下に抑えるCO₂排出量のシナリオ

Total CO₂ Emissions in all AR5 Scenarios



2050年付近ではおよそ現状の1/3程度に

今世紀後半はCO₂排出がゼロから負の排出へ突入

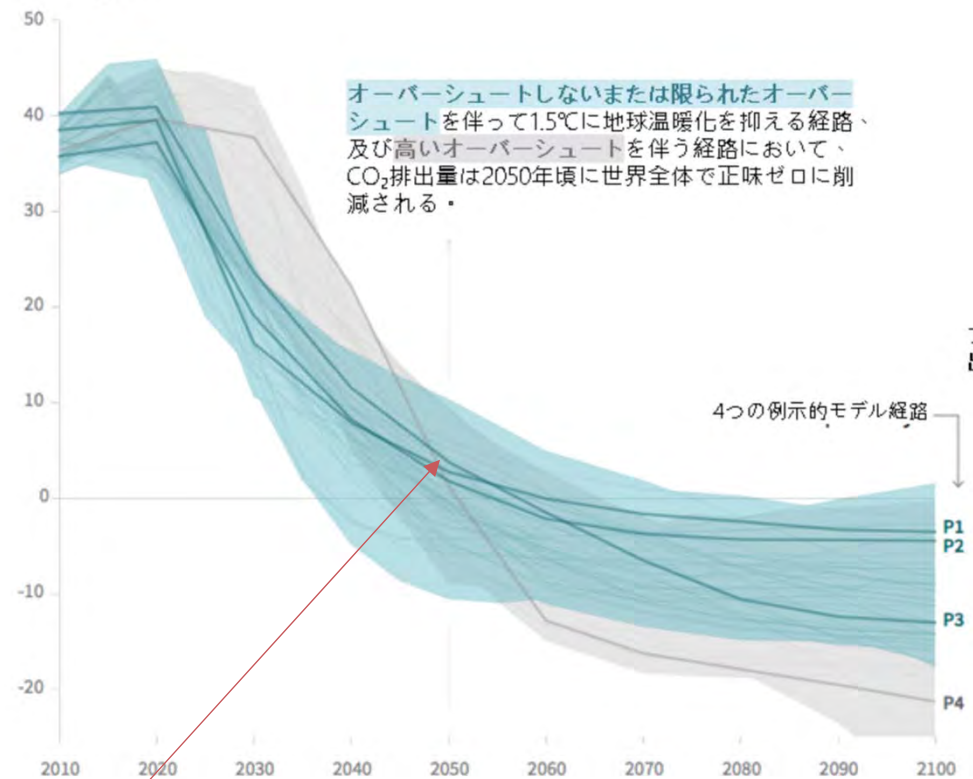


一時的に今世紀後半に気温上昇はわずかにピークを取り、その後下がって目標を達成

さらに1.5°Cを目標として目指すのであれば

世界全体のCO₂正味排出量

10億CO₂トン/年



2050年付近ではもう一段階削減が必要。
現状の約1/6

IGES (2019)

世界全体と各国の分担：経済合理的な解と衡平性

- 世界全体の排出量が決まったとして（仮に2050年に現状の1/3-1/6とするとする）
- 各国の分担は？
 - ✓ 経済合理性で安いところで削減すべき
 - ✓ 過去に排出してきた先進国が責任を負うべき
 - ✓ 途上国の経済発展の機会を損なわないような配慮が必要
 - ✓ 大気へのCO₂排出を人類共通に持つ権利とするなら、一人当たり排出量を等しくすべき



排出削減の割り当て方法はいくつか提案されているが、いずれにしても先進国は2050年で70%から100%以上の削減が必須

カーボンニュートラルにしないといけないのか？

- 世界全体の全球平均気温を2°Cを超えてくると、様々な懸念が生じる
- 上記目標温度以下に抑えるために、2050年に世界全体のCO₂排出量は、およそ1/3以下にする必要がある
- 国間での公平性を考えると、先進国は途上国よりも削減割合を大きくとる必要がある
- 日本の2050年の排出量は必ずしもゼロにしなければならないわけではないが、70%から100%といった大幅削減

アウトライン

- カーボンニュートラルにしないといけないのか？
- どうやってカーボンニュートラルにするのか？

- 化石燃料起源の燃料消費をやめ、電化を促進する
- 発電の中身を脱炭素化していく(再エネ)
- どうしても残ってしまう排出をオフセットするために大気中から取る

- エネルギー消費量を抑える
- 電化が難しいところは水素などで代替する

エネルギーの歴史

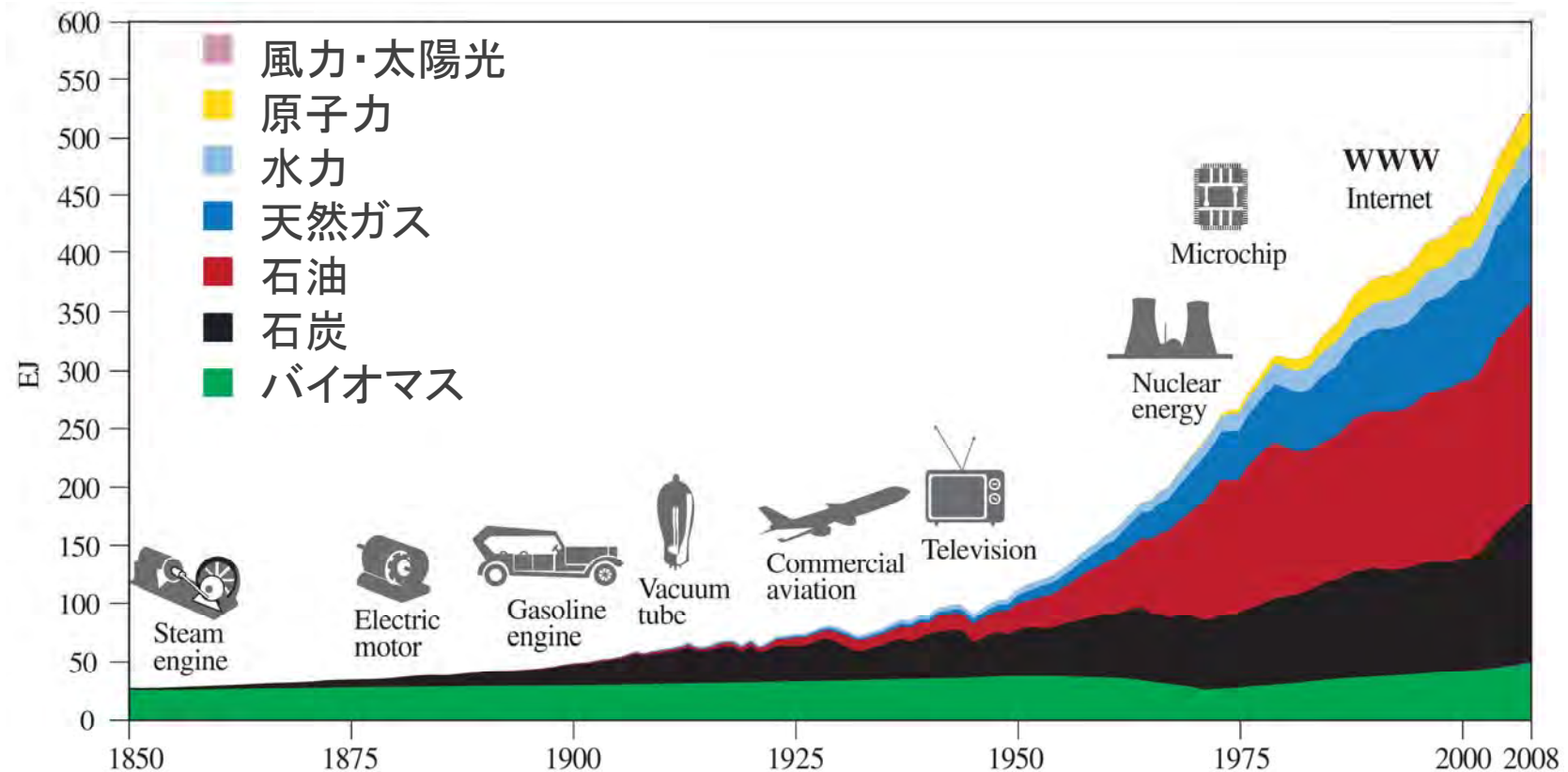
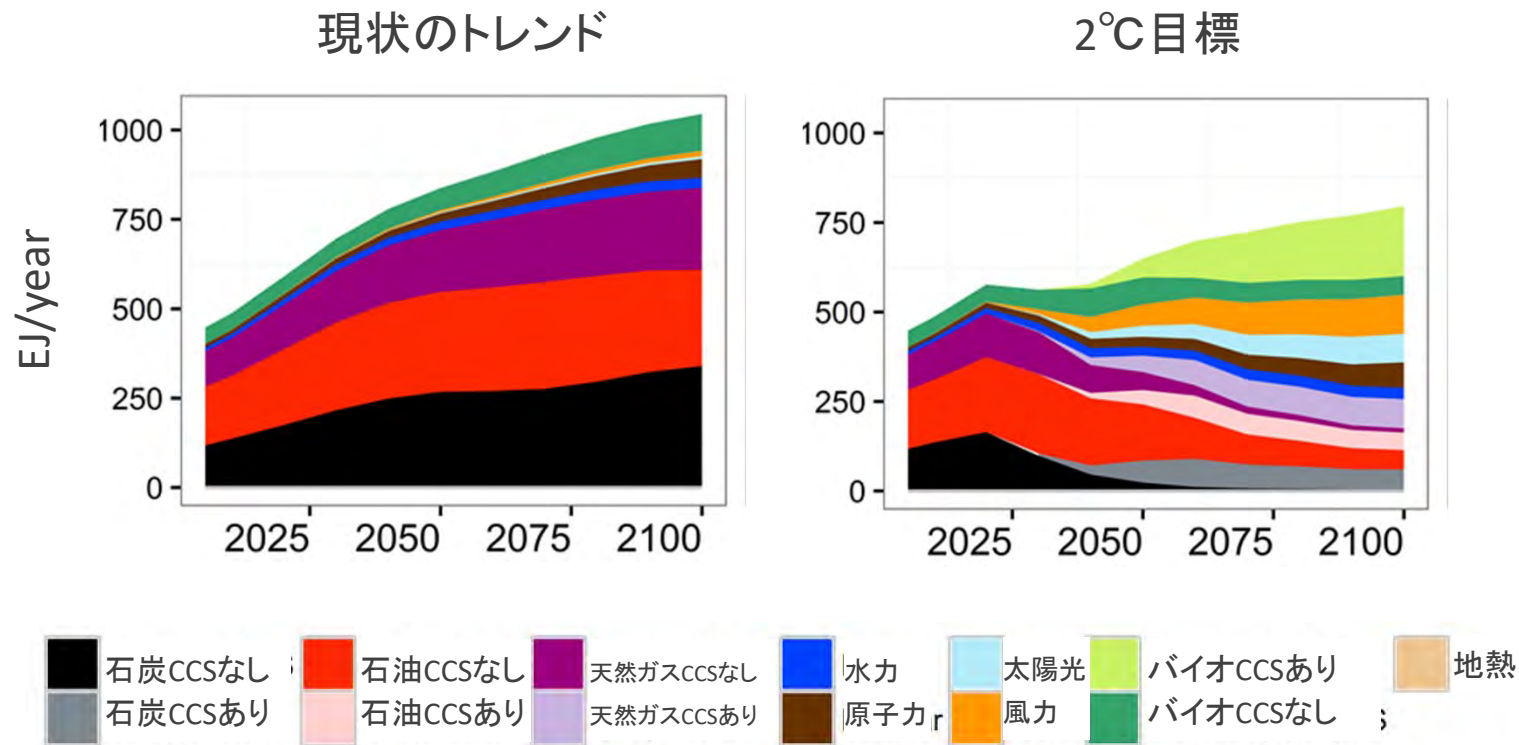


Figure 1.9 | History of world primary energy use, by Source (in EJ). Source: updated from Nakicenovic et al., 1998 and Grubler, 2008.

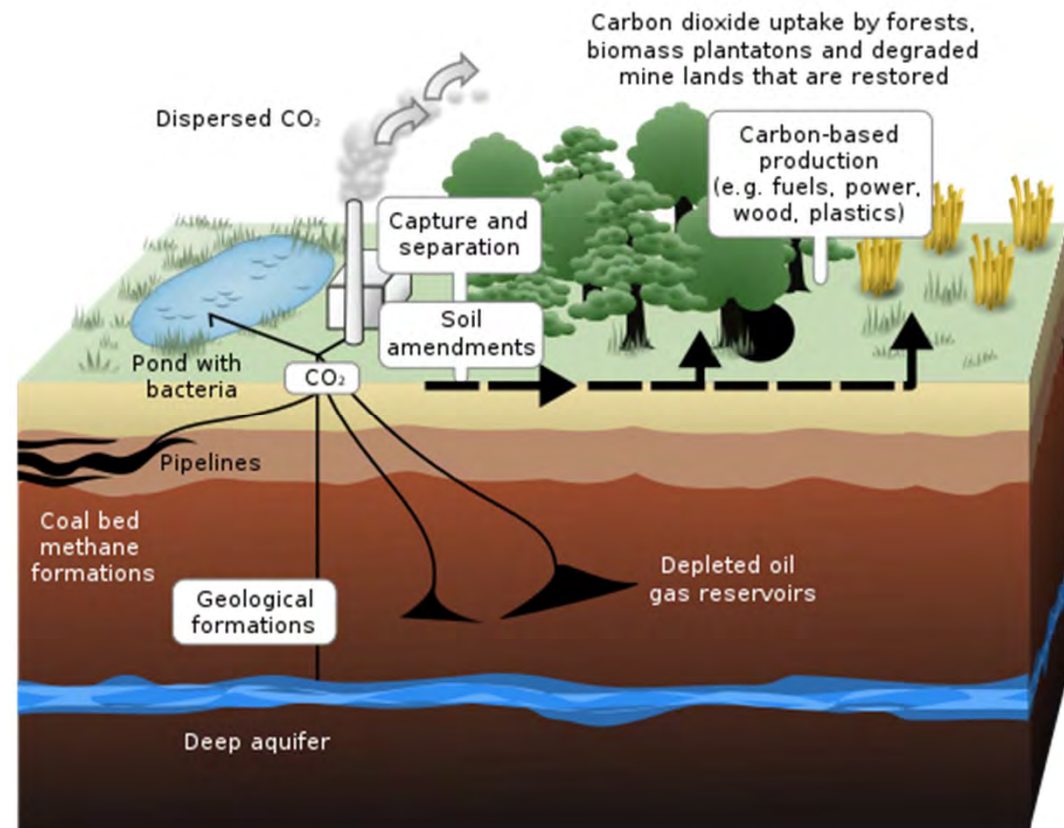
エネルギーシステムの大規模変化



- 現状トレンドを維持すると化石燃料依存
- 2°C目標に準じると再生可能エネルギーへのシフト、CCSの利用

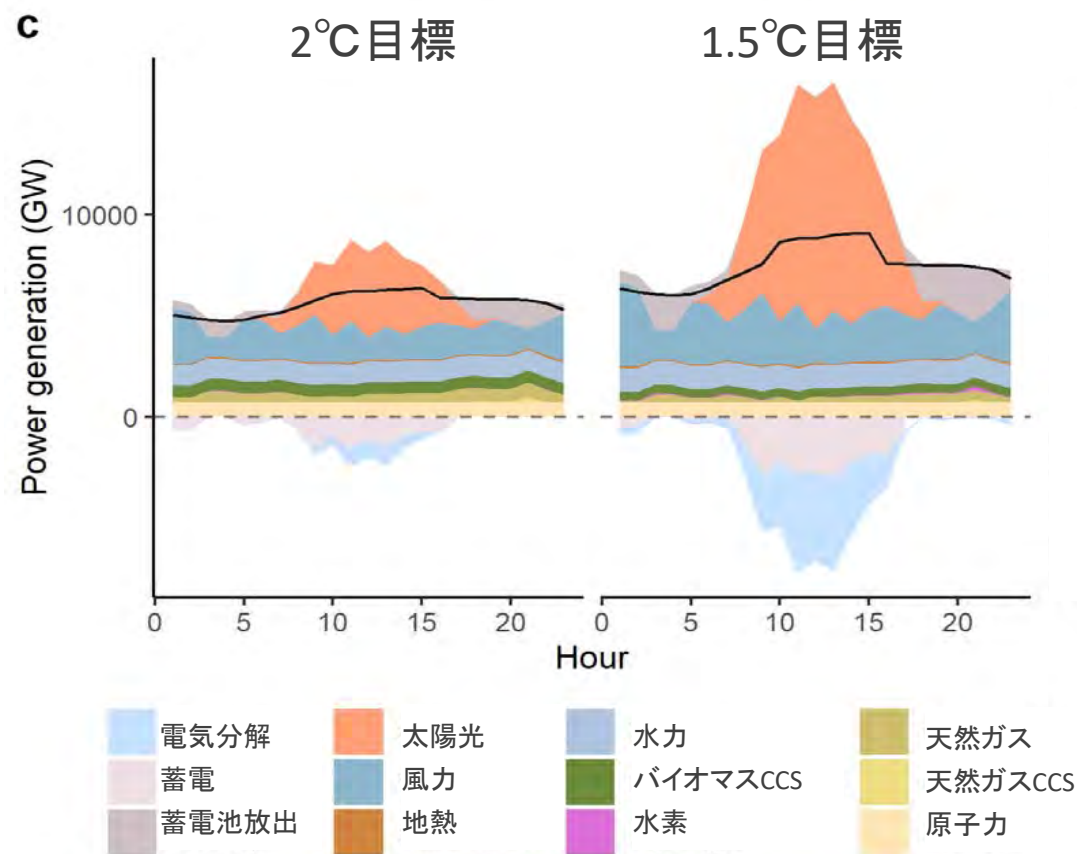
炭素隔離貯蔵 (CCS: carbon capture and storage)

- CCS は主としてCO₂の大規模排出源に対して装着して、CO₂を集め、地下もしくは海洋に貯蔵する技術
- CCS はだいたい石炭火力の費用を2倍にする
- 80 ~ 90 % のCO₂はCCSにて除去されるが、若干漏洩する
- 技術はあっても社会的に受容できるか？



wikipedia

発電システムは大きく様変わり



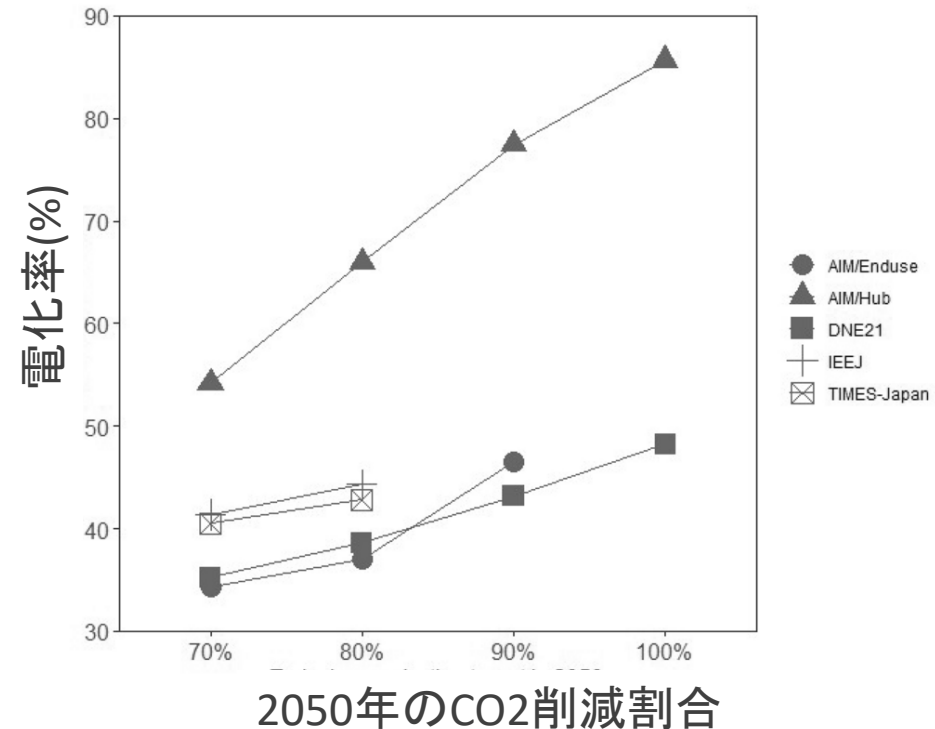
大城、藤森(受理済)

世界全体の発電の時間別プロフィール

- 化石燃料を退出させて、再生可能エネルギーを導入する
- 太陽光を蓄電や電気分解して水素を取り出す等が大きくなっていく
- 再エネと蓄電や電気分解での技術が進まないと費用がかかることになる

エネルギー消費の戦略

- エネルギー消費側の基本的戦略は**省エネ**と**電化**
 - ✓ 発電さえ再エネなどに変えればOK
- 費用を考えると現在のところ水素よりも電化の方が有力
- どうしても電化できないところを水素やバイオ燃料等で賄う
 - ✓ 航空機、高熱が必要な工業炉等
- ライフスタイルの変革が必要(?)



日本の2050年70-100%削減時の電化率

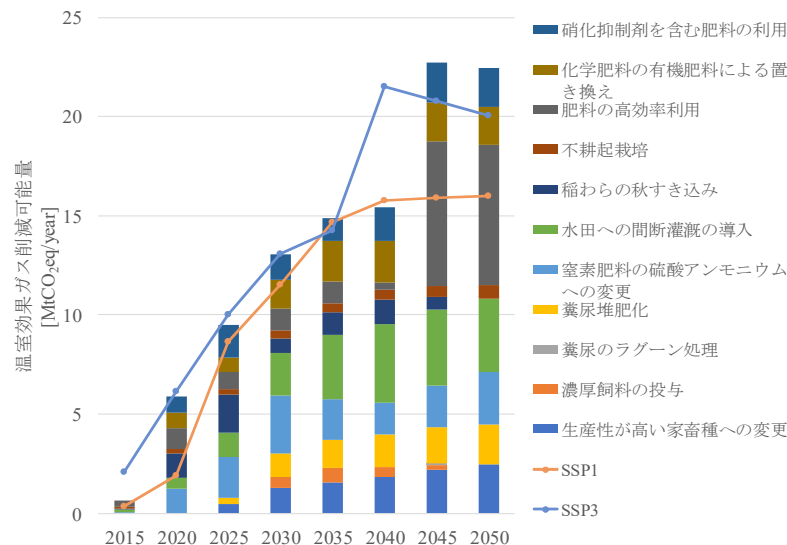
Sakamoto et al.(2021)

農業・土地利用の変革

- CH₄(水田、畜産由来)、N₂O(肥料散布、畜産)が主要なソース
- これらを削減する農業技術は存在し、それらを導入していくのが基本的な戦略

日本の農業起源GHG削減の推計

2050年: **20.1MtCO₂eq** (16.0~22.4MtCO₂eq)



榎山、長谷川(2020)

✓ 有効な対策

- ・ 窒素肥料の硫酸アンモニウムへの変更
- ・ 水田への間断灌漑の導入
- ・ 肥料の高効率利用

エンドオブパイプではなく、そもそも需要自体を減らせれないか？



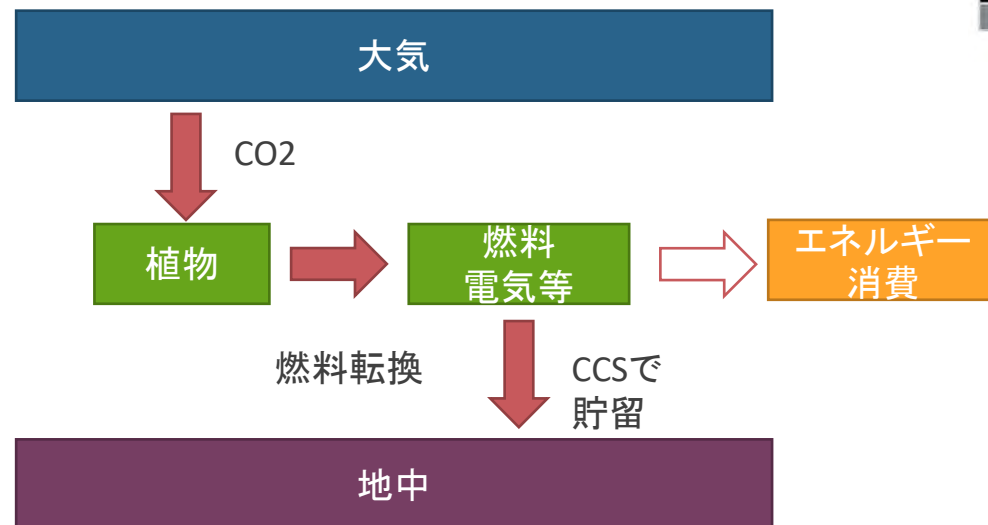
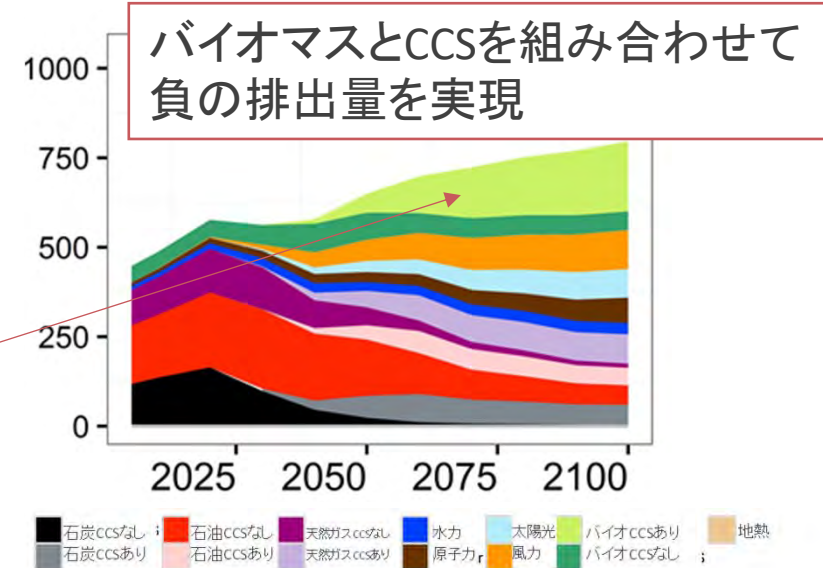
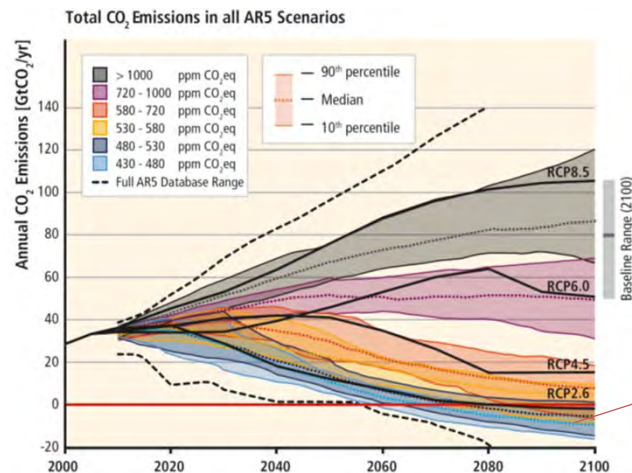
カーボンニュートラルだけでいいのか？

- CO₂削減だけでは足りない
- メタン(CH₄)や亜酸化に窒素(N₂O)、代替フロン(Fガス)の削減も必要
- これらはCO₂と違いゼロとすることが難しく技術のみに依存した場合は削減量が限られる
- 食事の中身を見直すライフスタイルの変化も考えることが必要なのではないだろうか？

それ以外の波及効果・懸念は

- ある程度のCCSへの依存は必要になるがよいか？
- GHG削減費用は世界平均ではGDPの3-5%。日本等の先進国ではもう少し小さいが、それを許容できるか？
- GHG削減により大気汚染は改善し、GHG削減費用と単純に比較しても大きな便益
- GHG削減の相乗効果とトレードオフを理解し、トレードオフはどうやって解消するか、相乗効果をより引き出すにはどうするか考える
- シナリオ研究の実現可能性を検討する必要がある

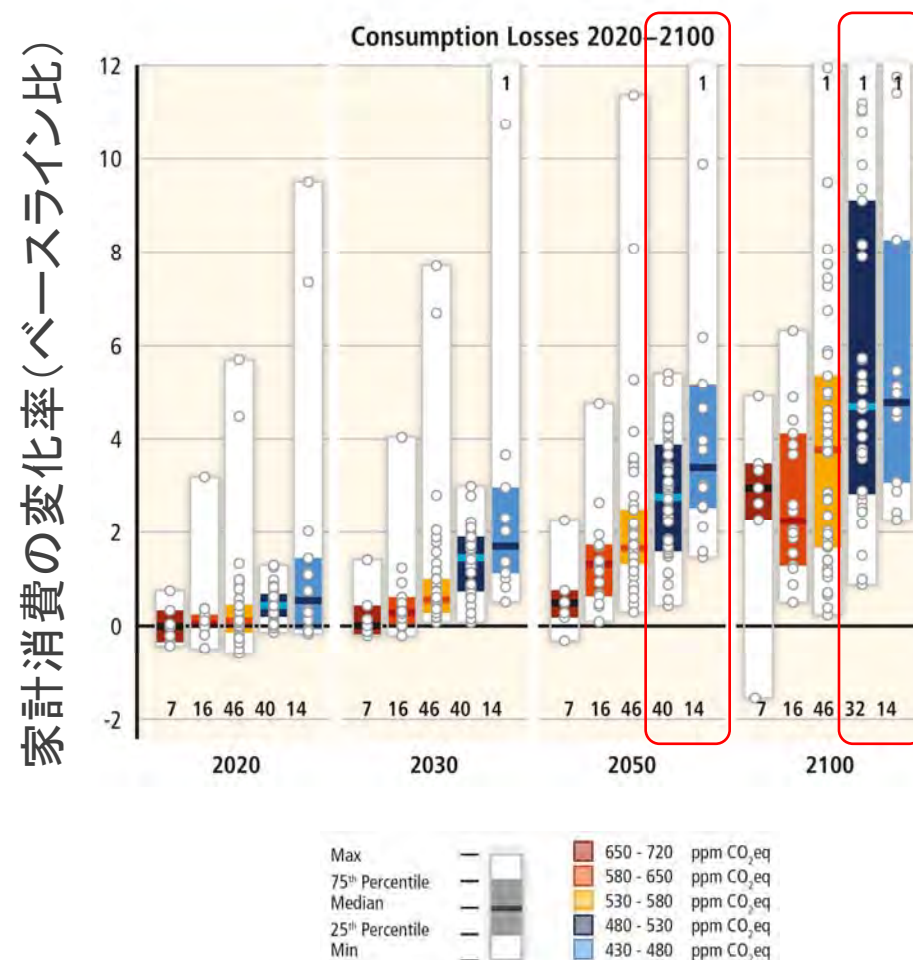
多くの場合負の排出に頼ることになる



<https://www.lettuceclub.net/news/article/119053/>
<http://www.biofuels.co.jp/page5.html>
<https://www.cnn.co.jp/fringe/35020107.html>

大規模排出量削減の経済的な意味

- 2°C目標に対応する費用はおよそ3%(2050年)程度
- 先進国、途上国によって異なり、削減負担をどこが担うかによっても異なる



IPCC 第5次評価報告書第6章

まとめ

- カーボンニュートラルにしないといけないのか？
 - ✓ 将来の気候と気候変動影響を考えると世界全体で2050年にかなり削減、衡平性の観点から先進国では排出量がゼロ近くになる必要あり
- どうやってカーボンニュートラルにするのか？
 - ✓ エネルギー供給では再生可能エネルギーとCCSの導入
 - ✓ エネルギー消費では徹底した省エネと電化。必要に応じて水素等のキャリア
- カーボンニュートラルだけでいいのか？
 - ✓ 問題はCO₂だけではなく。CH₄、N₂O等も削減が必要。農業や土地利用、我々の食生活ともかかわる社会のデザインが必要
- カーボンニュートラルにしようとするときに他に考えることはないか？
 - ✓ GHG削減にはいいこと、悪いことがあり、それらを把握、理解することで、賢明な政策がとれる

本発表は (独)環境再生保全機構環境研究総合推進費
(JPMEERF20211001, JPMEERF20202002) の支援を受け、国民対話の
一環として研究内容等を紹介しました。

ご清聴ありがとうございました
Thank you for your attention

