

カーボンニュートラルを支える科学技術

- 地球温暖化、緩和、技術、社会 -

科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター
研究統括／上席研究員 森 俊介

2021／11／6 サイエンスアゴラ2021

「みんなで語ろう カーボンニュートラルの社会と暮らし」

はじめにー地球温暖化はなぜおこるか？

太陽光が地表と大気を暖める

温まった地球は**赤外線**を宇宙に放出

太陽光が地表と大気を暖める

温室効果ガスが赤外線を吸収・再放出→地表への戻り放出熱が発生

地表

地表

エネルギー入力=出力で温度が平衡。温室効果ガスがなければ**-18°C**が平衡温度

温室効果ガスが赤外線を吸収・再放出⇒放射熱の一部が地表に戻る⇒地表が温まり、赤外線放出も宇宙への放射も増加⇒やがて新たな平衡温度に到達

- ・ 19世紀初頭のフーリエによる気体の赤外線吸収効果の発見
- ・ 19世紀末-20世紀初頭のアレニウスによる二酸化炭素温室効果とCO2濃度倍増時の4-5度上昇の予測 → CO2の吸収は地表で飽和との批判に答えられない
- ・ 20世紀半ば、プラスは空気の薄い対流圏上層では吸収が未飽和な点を指摘
- ・ 1969年、**真鍋**は海洋ー大気の結合循環モデルを開発。温暖化を警告
- ・ 1970年代、温暖化の影響と緩和評価研究がなされる(**W.Nordhaus**他)
- ・ 1980年代以降温暖化の研究が進展。1989年には**IPCC**設立。今日に至る

温暖化ガスの排出と気候変動について、科学者はどのように見てきたか

1990年第一次評価報告書 「人為起源の温室効果ガスは気候変動を生じさせる恐れがある」

1995年第二次評価報告書 「識別可能な人為的影響が全球の気候に現れている」

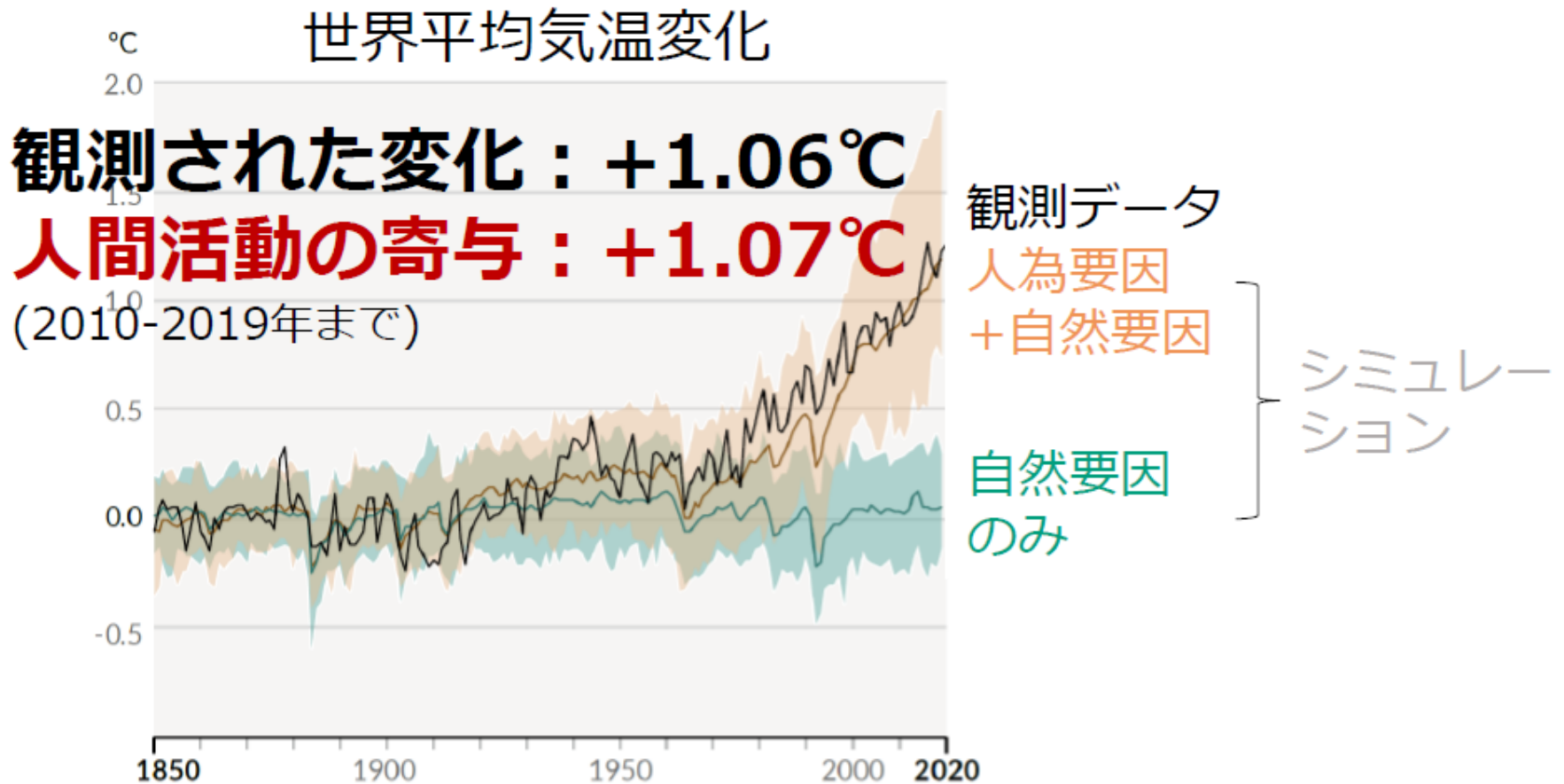
2001年第三次評価報告書 「過去50年に観測された温暖化の大部分は、温室効果ガスの濃度の増加によるものだった可能性が高い(確信度66%以上)」

2007年第四次評価報告書 「温暖化には疑う余地がない。20世紀半ば以降の温暖化のほとんどが人為起源の温室効果ガスの濃度の増加による可能性が非常に高い(確信度90%以上)」

2013年第五次評価報告書 「温暖化には疑う余地がない。20世紀半ば以降の温暖化のほとんどが人為起源の温室効果ガスの濃度の増加による可能性が極めて高い(確信度95%以上)」

2021年第六次評価報告書 「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない。」

気候変動への人間の関与はどれほど大きいのか？気候モデルによる科学者の見積もり



(IPCC WGI AR6 Figure SPM.1bより)

6. 極端現象

極端現象※に変化が現れている

(※) 極端現象とは、一般的には過去に経験した気候状態から大きく外れた気象を意味し、大雨や強風などの短時間の激しい気象から、数か月も続く干ばつ、冷夏などの気候異常を含む

- “気候に対する人為的影響は、大気と海洋の温暖化、世界の水循環の変化、雪氷の縮小、世界平均海面水位の上昇、及びいくつかの気候の極端現象の変化において検出されている。”

(IPCC AR5 WG1 SPM p.SPM-12, 24行目)

表. 気象および気候の極端現象

現象及び変化傾向	変化発生の評価 (特記ない限り1950年以降)	観測された変化に対する人間 活動の寄与の評価
ほとんどの陸域で寒い日や寒い夜の頻度の減少や昇温	可能性が非常に高い	可能性が非常に高い
ほとんどの陸域で暑い日や暑い夜の頻度の増加や昇温	可能性が非常に高い	可能性が非常に高い
ほとんどの陸域で継続的な高温/熱波の頻度や持続期間の増加	世界規模で確信度が中程度。ヨーロッパ、アジア、オーストラリアの大部分で可能性が高い	可能性が高い
大雨の頻度、強度、大雨の降水量の増加	減少している陸域より増加している陸域のほうが多い可能性が高い	確信度が中程度

ほぼ確実:>99%,可能性が非常に高い:>90%,可能性が高い:>66%,どちらかといえば:>50%

確信度(証拠の量と一致度):非常に高い>高い>中程度>低い>非常に低い

出典:表. IPCC AR5 WG1 政策決定者向け要約 Table SPM.1

極端現象に変化が現れている

表. 気象および気候の極端現象

現象及び傾向	生じた変化の評価 (特記ない限り1950年以降の典型)	人為的影響の可能性
干ばつの強度や持続期間の増加	世界規模で確信度が低い。幾つかの地域で変化した可能性が高い	確信度が低い
強い熱帯低気圧の活動度の増加	長期(百年規模)変化の確信度が低い。1970年以降北大西洋で、ほぼ確実	確信度が低い
極端な高い潮位の発生や高さの増加	可能性が高い(1970年以降)	可能性が高い

ほぼ確実:>99%,可能性が非常に高い:>90%,可能性が高い:>66%,どちらかといえば:>50%

確信度(証拠の量と一致度):非常に高い>高い>中程度>低い>非常に低い

出典:表. IPCC AR5 WG1 政策決定者向け要約 Table SPM.1

気候変動はどう現れてきたのか、またどう変化するか

約 0.5 °C の地球温暖化が生じた 1960-1979 年と 1991-2010 年間の観測分析から、極端な気温や強い降水現象に関する指標の変化を検出することができる。【確信度が高い】(IPCC SR1.5 188 頁 第 3 章 3.3.1)

現象	過去30年に観測された変化	平均2°C上昇と1.5°C上昇世界
極端な気温	世界的に暑い昼・夜日数が増加(VL)	1.5°C上昇世界では、極端な熱波にさらされる人口を4.2億人減らせる(M)
強い降水現象	強い降水の頻度が増加した地域が減少した地域より多い(L)	2°C世界は1.5°C世界より強い降水の日数が増加(M)
干ばつ・降水不足	一部地域(南欧／中東／北アフリカ)に乾燥傾向(H)	地中海，北アフリカでは乾燥傾向が強まる(M)
洪水	一部地域では洪水頻度や流量増加がある。それ以外では有意ではない	1976-2005年基準とすると影響を受ける人口は1.5°C世界で100%増加，2°C世界で170%増加
熱帯低気圧	明確な変化の確信度は低い	熱帯低気圧数は2°C世界で減少，ただし強度は増加(証拠は限定的)

VL：可能性が非常に高い L：可能性が高い H：確信度が高い M：確信度が中程度
(*) 洪水は一部地域以外，熱帯低気圧について確信度は低い

リスク要因	1.5°C上昇世界と2°C上昇世界のリスク
海水面上昇	海水面は、1.5°C世界で1986-2005年より0.26-0.77m上昇。2°C世界より約0.1m低い。最大1000万人がリスクを回避できる。
海氷の消失	北極海の海氷は2°C世界で10年に一度、1.5°C世界で100年に一度の割合で焼失(M)
生物圏への影響	1.5°C世界でも多くの海洋生物種の移動と消失が発生。2°C世界ではさらに危険が高まる(H)
漁獲量の損失	1.5°C世界で海洋漁業に150万トン、2°C世界で300万トンの損失(M)
不利な条件・脆弱な人々	不利な立場の脆弱な人々、一部の先住民、沿岸域、農業の受ける悪影響は偏って大きい。
健康影響	温暖化の健康影響は一義的に負。1.5°C世界では、マラリヤ等感染症、暑熱影響リスクが低い。
食糧安全保障	1.5°C世界では2°C世界より穀物生産の減少や栄養の質の低下を抑えられる。サヘル、アフリカ南部、中東では食料入手困難性を抑えられる
水ストレス	地球温暖化を1.5°Cに抑えると水ストレスの増加に曝される人口割合を最大 50% まで抑えうる。ただし地域間で大幅なばらつきがある。(M)

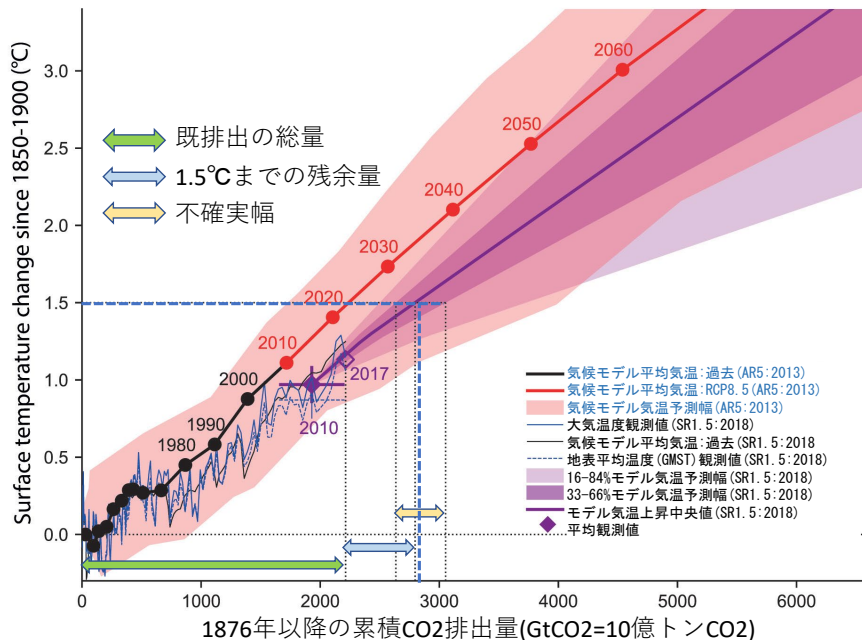
環境省、IPCC「1.5度特別報告書」の概要(2019年7月版)から抜粋

<chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2F>

www.env.go.jp%2Fearth%2Fipcc%2F6th%2Far6_sr1.5_overview_presentation.pdf&cflen=6813407&chunk=true

人類に残された時間はどの程度か

- ・ CO2排出量(メタン他も温室効果で換算して合計)と大気温度上昇の関係は本来は複雑. ← 温暖化ガスは人為起源以外の自然循環のほうがずっと多い
- ・ しかし研究者は, その中で産業革命以降の人為起源CO2排出量累積値と大気温度上昇値の間にわかりやすい近似関係があることを見出した.
- ・ これにより, 2100年の温度上昇を 1.5°C にするためには, あとどの程度の排出が許されるかの簡易見積りが出せるようになった. (ただし, 見積もりの幅は大きい)

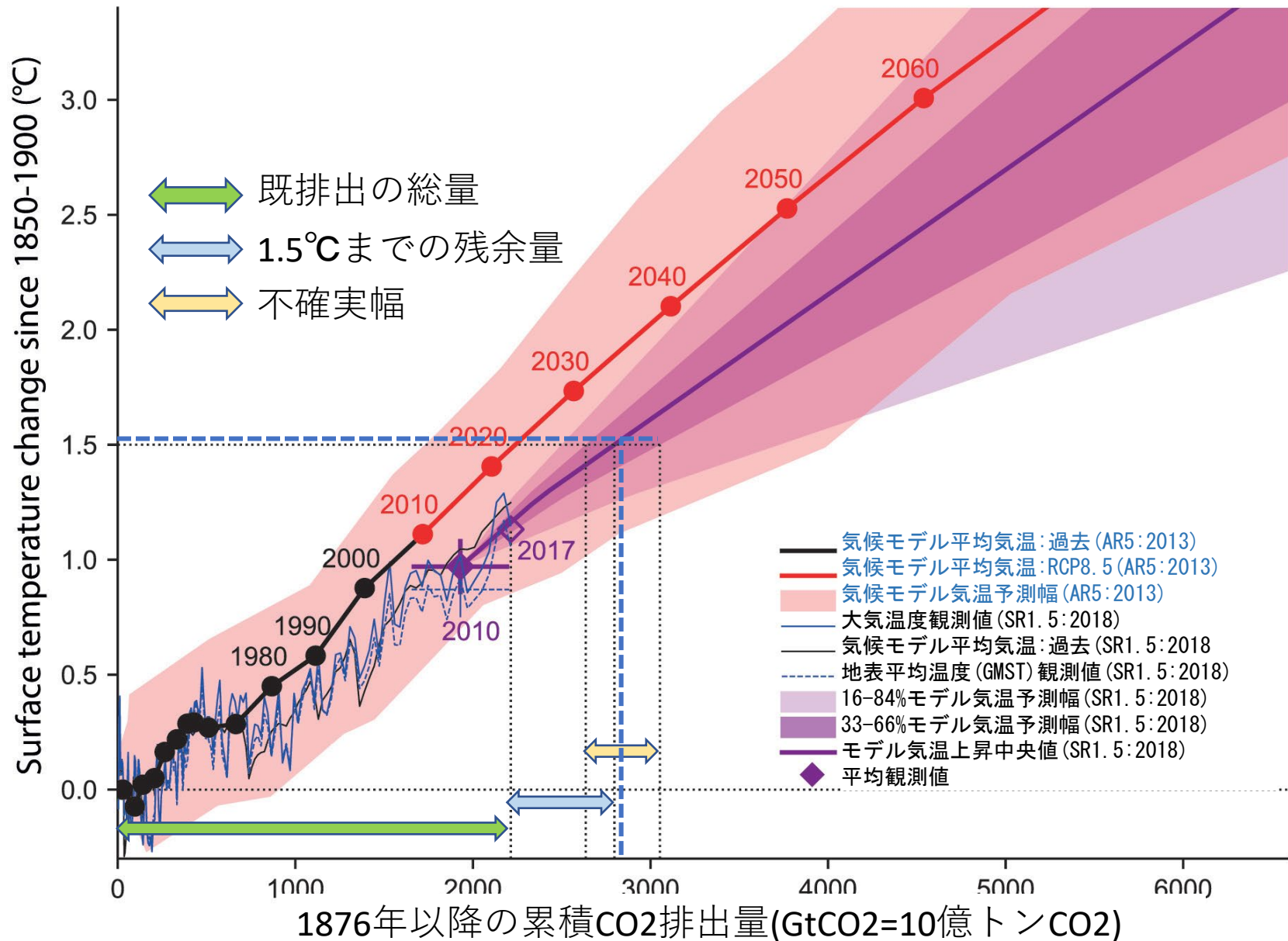


(注) AR5(2013年)とSR1.5(2018年)間では, 研究の進展や地表平均気温に海水表面水温を取り入れた指標(GMST)を用いたことで, 結果に違いが出ている。

- ・ 見積もり幅は, 1.5°C 制約では残り420GtCO₂~580GtCO₂(SR1.5)。2 $^{\circ}\text{C}$ 制約の場合790GtCO₂~820GtCO₂(AR5)。

→ 幅は目標達成確率66%と50%の違い

- ・ なお, 2019年の世界温暖化ガス排出量はCO₂換算で**33.3**GtCO₂.
- ・ 現状では, 最悪あと**13年**で残された排出枠を使い切る! 2 $^{\circ}\text{C}$ 上昇に緩めてもなお, ゆとりは**25年**しかない!

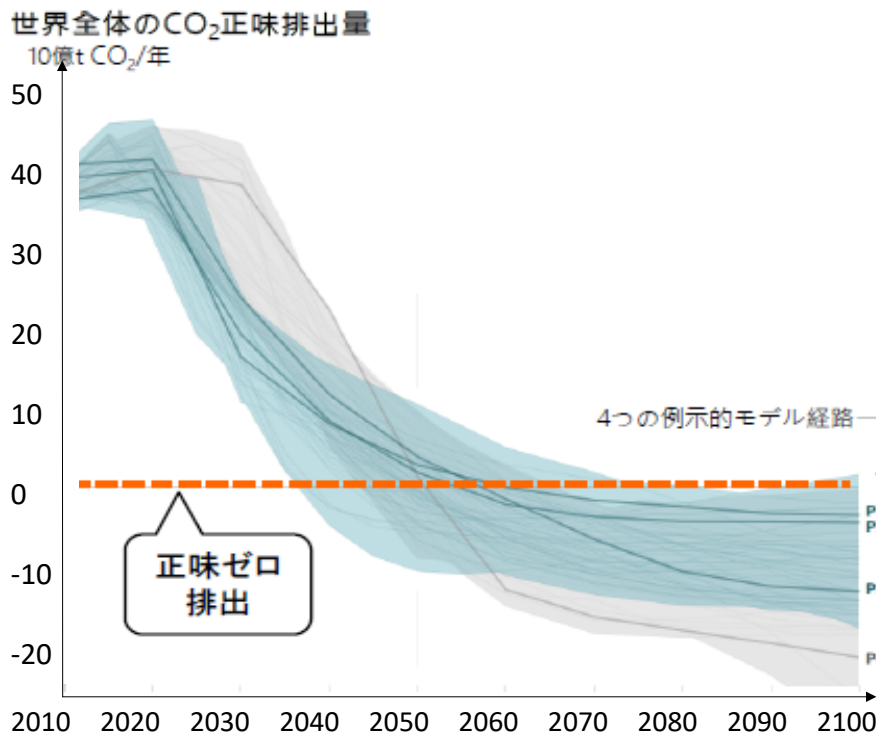


(注) AR5(2013年)とSR1.5(2018年)間に研究が進み、また地表平均気温に海水表面水温を取り入れた指標(GMST)を用いたことで、結果に違いが出ている。

https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg1_overview_presentation.pdf

1.5°C上昇達成のために，残された枠をどのように使うか

- ・ 電力，自動車，製鉄，暖房・・・便利な化石燃料に頼っている生活や産業を，2100年までにどうやって減らしていくか？いまある設備もすぐには減らせない．
- ・ 世界のどの国も人々も，何かを作って売り，交換していかなければ衣・食・住を確保できない．どのような世界で生きていくのか？どのようにして生活していくのか？
- ・ それでも，「残り13年分」を80年に延ばし，その先の社会を維持する必要．



・ さまざまなモデルが，実際のエネルギーシステムやエネルギー機器の構成を考え、「80年間引き延ばす」道筋を求めた．

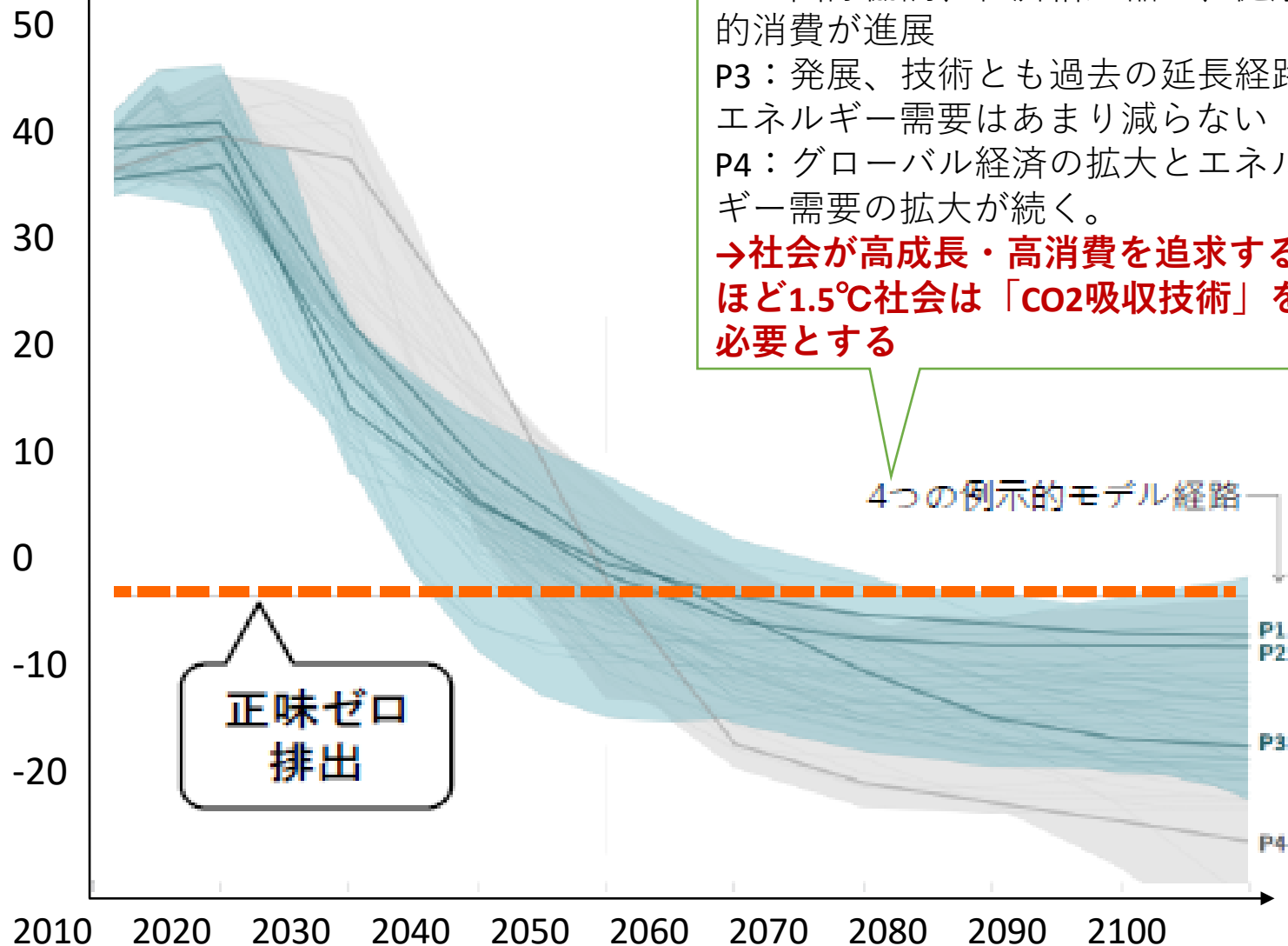
・ 「減らす」技術はいろいろあったが，「無くす」技術は限られる．

・ そのため，いろいろな可能性を考えても，**2050年には排出を0にし**，さらにその後は「排出」でなく「吸収」の技術が必要

→ **カーボンニュートラル(炭素の正味排出が0)社会の必要性**

世界全体のCO₂正味排出量

10億t CO₂/年



P1: イノベーションが特に南で進み、生活向上と省エネ・脱炭素化が進む

P2: 国際協調、経済格差縮小、健康的消費が進展

P3: 発展、技術とも過去の延長経路。エネルギー需要はあまり減らない

P4: グローバル経済の拡大とエネルギー需要の拡大が続く。

→社会が高成長・高消費を追求するほど1.5℃社会は「CO₂吸収技術」を必要とする

世界は、日本はどう動いたか？

2016年11月 パリ協定発効 「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする」(日本も参加)

2019年5月時点の世界の動き (資源エネルギー庁HP)

日本「目標：2030年度に26%のGHG削減（2013年度比）」に対して、2016年度時点で7%の削減実績。目標ラインと同水準で、最近の動きは削減の傾向。

英国「目標：2030年度に57%のGHG削減（1990年比）」に対して、2016年時点で41%の削減実績。目標ラインと同水準で、最近の動きは削減の傾向。

米国「目標：2025年に26～28%のGHG削減（2005年比）」に対して、2016年時点で12%の削減実績。目標ラインから上ぶれ、最近の動きは削減の傾向。

フランス「目標：2030年に40%のGHG削減（1990年比）」に対して、2016年時点で18%の削減実績。目標ラインから上ぶれ、削減傾向は横ばい。

ドイツ「目標：2030年に55%のGHG削減（1990年比）」に対して、2016年時点で27%の削減実績。目標ラインから上ぶれ、削減傾向は横ばい。

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/pariskyotei_sintyoku1.html

2020年9月 中国「2060年に温暖化ガス排出を実質0にする」

2021年10月 インド「2070年に温暖化ガス排出を実質0にする」

2020年10月 菅首相の公約 「2050年に温暖化ガス排出を実質0にする」

「カーボンニュートラル社会」実現にどのような手段があるか？

A：炭素排出を「減らす」技術

- ・ 省エネルギー（利用効率を上げる）：LED照明、高効率エンジン、ハイブリッド自動車、建物断熱化
- ・ 燃料転換：石炭から天然ガスへの移行など
- ・ 炭素回収隔離（CCS）：燃焼で出たCO₂を回収して地中・海中に埋める
- ・ BEMS/HEMS/スマートシティなどエネルギー管理の高度化

B：炭素排出を「しない」技術

- ・ 太陽熱、太陽電池、風力、水力、バイオマスなど再生可能エネルギー利用 → 電力利用が多い
- ・ 水素、アンモニアなど無炭素燃料の利用

C：大気中の炭素を「なくす」技術

- ・ 大規模植林と木材利用を拡大する（成長過程の木のみ吸収する）
- ・ 植物を燃料とし、排出のCO₂を地中、海中に埋める（BECCS）
- ・ 大気から直接CO₂を回収し、地中、海中に埋める（DAC）

⇒1.5℃目標達成にはCも必要。

キーポイントのいくつか

- ・「置き換え」にはいくつもレベルがある

従来機器の置き換え → 関連設備・運用の置き換え → 地域／社会のシステム変革 → 価値観／ライフスタイルの変化

- ・「減らす」が進めば「なくす」も楽になる

「減らす」は「我慢」とは限らない。(多機能スマホ)
高効率化は時にリバウンドを招く。(液晶TV:省エネだが大画面化)

- ・良いものでも、新しいシステムは最初はず費用が必要

あまりに高価だと使ってもらえない。しかし普及が広まれば費用が下がるものも多い。

⇒ どうすれば広く使ってもらえるか?

- ・「置き換え」の決定が遅れ古いものに投資してしまうと、新しいものへの置き換えられなくなる (ロックイン)

将来は不確実である。その中でどのような決定をしていくべきか



A.Gruebler, et.al, Nature Energy 3, 515/527,
<https://db1.ene.iiasa.ac.at/LEDDB/dsd?Action=htmlpage&page=10>

政府の「ネットゼロカーボン社会」実現策はどのようなものか？

第1章

背景

概要

革新的環境イノベーション戦略の全体像

- エネルギー供給技術の変革だけでなく、産業・運輸・民生など需要サイドの体系的な変革の必要性
 - 排出削減だけでなく、排出後の回収・貯留・再利用にも言及
- ⇒ 個別削減から社会全体的な脱炭素化への対応

第2章

イノベーション・アクションプラン	11	IV. 業務・家庭・その他・横断領域	46
イノベーション・アクションプランの重点領域	12	9. 最先端のGHG削減技術の活用	46
I. エネルギー転換	16	10. ビッグデータ、AI、分散管理技術等を用いた都市マネジメントの変革	50
1. 再生可能エネルギーを主力電源に	17	11. シェアリングエコノミーによる省エネ／テレワーク、働き方改革、行動変容の促進	51
2. デジタル技術を用いた強靱な電力ネットワークの構築	17	12. GHG削減効果の検証に貢献する科学的知見の充実	52
3. 低コストな水素サプライチェーンの構築	21	V. 農林水産業・吸収源	53
4. 革新的原子力技術／核融合の実現	25	13. 最先端のバイオ技術等を活用した資源利用及び農地・森林・海洋へのCO ₂ 吸収・固定	53
5. CCUS／カーボンリサイクルを見据えた低コストでのCO ₂ 分離回収	29	14. 農畜産業からのメタン・N ₂ O排出削減	59
II. 運輸	31	15. 農林水産業における再生可能エネルギーの活用&スマート農林水産業	60
6. 多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立	33	16. 大気中のCO ₂ の回収	62
III. 産業	38		
7. 化石資源依存からの脱却（再生可能エネルギー由来の電力や水素の活用）	38		
8. カーボンリサイクル技術によるCO ₂ の原燃料化など	41		

低炭素社会戦略センターは何に着目しているか？

技術は科学に基づき、費用を通して社会に広まり、生活を変える

エネルギー技術の特性とコスト評価（一例：詳細はHP参照）

太陽光発電 → どのような方式、製造法でどこまで安くできるか？

地熱発電 → 高温岩体発電の開発とコスト

燃料電池 → セル設計とコスト評価

蓄電池 → 様々なタイプの蓄電池のコスト解析と今後

ゼロカーボンエネルギーキャリア

アンモニア直接燃焼タービンの解析と経済性

カーボンフリー水素製造の経済性と特性

二酸化炭素の大気直接回収法(DAC)のコスト評価

二酸化炭素回収隔離の展望

電力系統の評価

ゼロエミッション電源システムの安定化と技術・経済性評価

主要な再生可能エネルギー源の地域分布

情報化社会と電力消費

情報機器の電力消費と将来の省電力化

インターネット使用とテレワークによる情報量変化とCO2排出への影響

その他

生活、産業、輸送、様々な場で電力は主役となる

電力部門におけるゼロエミッション化実現のための革新技术の寄与

シナリオ		1	2	3	4	5	6	7	8
CO2削減率		2018実績	100%	100%	90%	95%	100%	90%	100%
電力需要(TWh)		1,107	1,200	1,500	1,800	1,800	1,800	2,000	2,000
発電電力量(TWh/年)	原子力	62							
	石炭他	566							
	LNG	360			128	64		128	
	水力	75	140	140	140	140	140	140	140
	太陽光	65	480	480	686	686	480	480	480
	風力	11	544	889	834	921	1,391	1,260	1,776
	地熱	2	212	212	212	212	212	212	212
	バイオマス	20	31	31	31	31	31	31	31
	合計	1,162	1,407	1,752	2,030	2,053	2,254	2,250	2,638
利用量(TWh/年)	蓄電池		184	158	241	242	136	151	119
	揚水発電	10	80	191	177	233	271	241	314
	水素					1	11	32	32
発電コスト(¥/kWh)		14.9	13.3	14.9	13.1	13.8	17.1	14.7	19.6

2021年度LCSウェビナー「2030年、温室効果ガス46%減社会の姿」

<https://www.jst.go.jp/lcs/relations/events/webinar20210611.html> 2018年は電力調査会による実績値

まとめ

- ・カーボンニュートラル社会の実現には、従来の趨勢を変えていく革新的技術開発が不可欠。
- ・個別技術開発だけでなく、その技術が社会に広く受け入れられるためには費用は大事。さらに社会の在り方と、そこへ至る道筋も重要。
- ・LCS は、科学とエンジニアリングに基づくコスト予測は、受け入れの道筋を探るための基本的情報を与えてきた。
- ・カーボンニュートラル社会が持続可能であるためには、エネルギー技術だけでなく、情報技術の寄与、地域の自立と地域資源の利活用、住まい方とモビリティの在り方など、分野間の相乗作用と地域と全体の統合化視点が重要である。
- ・イノベーションは社会のビジョンから生まれる。それが「明るく豊かな社会」でなければ、カーボンニュートラル社会は誰も受け入れない。