

気候変動の緩和策について考えよう
—IPCC 1.5°C特別報告書と第6次評価報告書—

2019年3月6日

1.5°C排出経路および緩和費用と 低エネルギー需要社会実現のインパクト

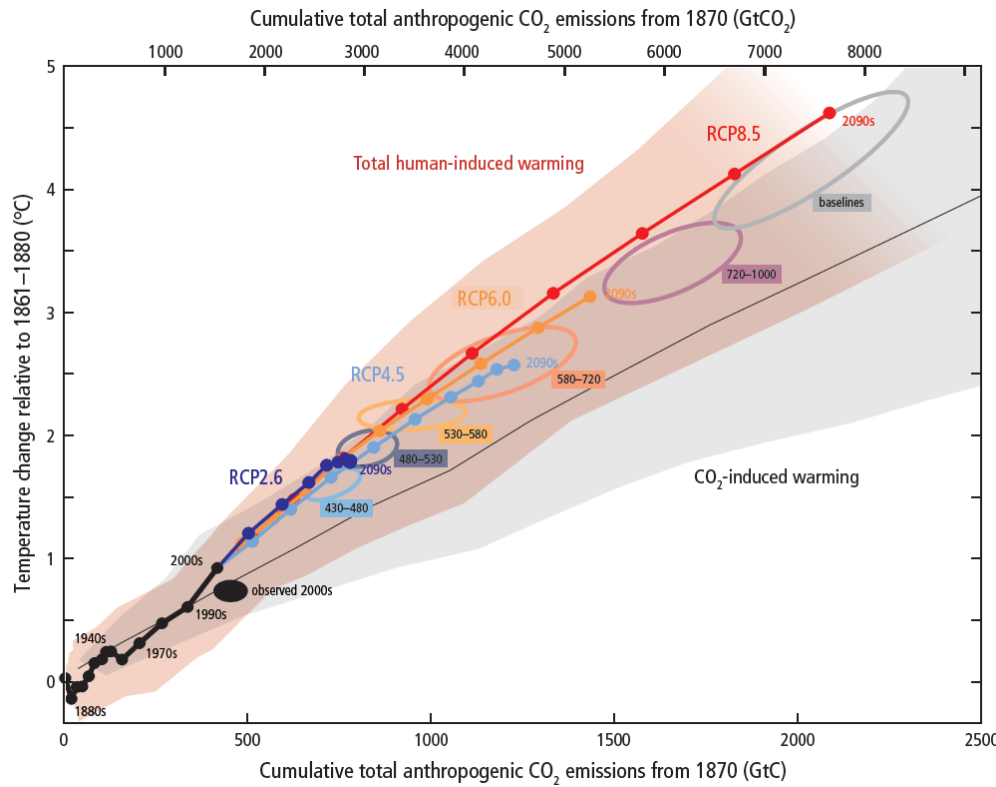
(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)

システム研究グループ グループリーダー

秋元 圭吾



累積排出量と気温上昇の関係および気候感度の不確実性



出典) IPCC AR5 統合報告書

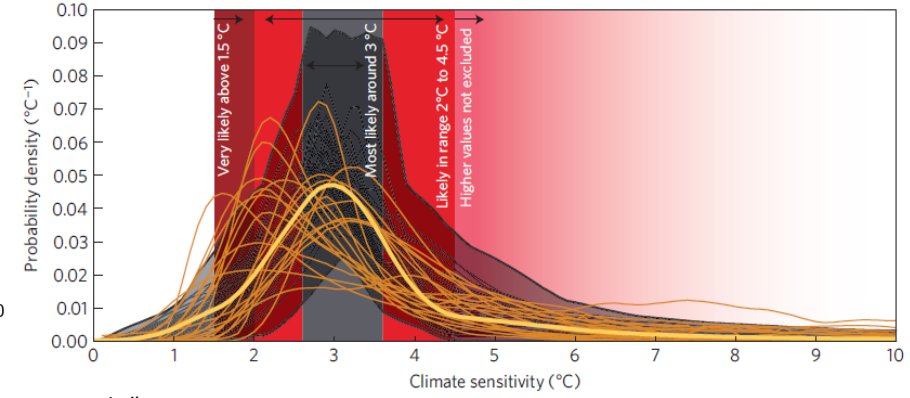
気候感度(濃度倍増時の気温上昇)推計の変遷(IPCC)

	平衡気候感度 (likely(>66%)レンジ) (括弧は最良推計値もしくはmedian等)
IPCC WG1 第4次(AR4) 以前	1.5~4.5°C (2.5°C)
IPCC WG1 第4次(AR4) (2007)	2.0~4.5°C (3.0°C)
IPCC WG1 第5次(AR5) (2013)	1.5~4.5°C (合意できず)
IPCC WG3 第5次(AR5) シナリオ 気温推計(MAGICCモデル) (2014)	2.0~4.5°C (3.0°C)

“likely”レンジが同じ

便宜上、第4次の評価をそのまま利用

WG3 AR5の気候感度の確率密度関数



出典: J. Rogelj et al., 2012

【長期のビジョン】 累積排出量と気温上昇には線形に近い関係が見られる。CO2排出に対する気温応答は減衰に非常に長い時間を要する。すなわち、いずれのレベルであろうとも、**気温を安定化しようとすれば、いずれはCO2の正味ゼロに近い排出が必要**。長期的には正味でCO2排出をゼロに近づけていくことは重要(時間スケールの問題は残る)

【現実におけるとるべき方策】 一方、気候感度には大きな不確実性あり。長期でCO2正味ゼロ排出に近づけていく**過程は大きな排出経路の幅が存在し得る。総合的なリスクマネジメントが重要。**

2°Cおよび1.5°C目標と整合した排出シナリオ —想定シナリオの位置づけ—

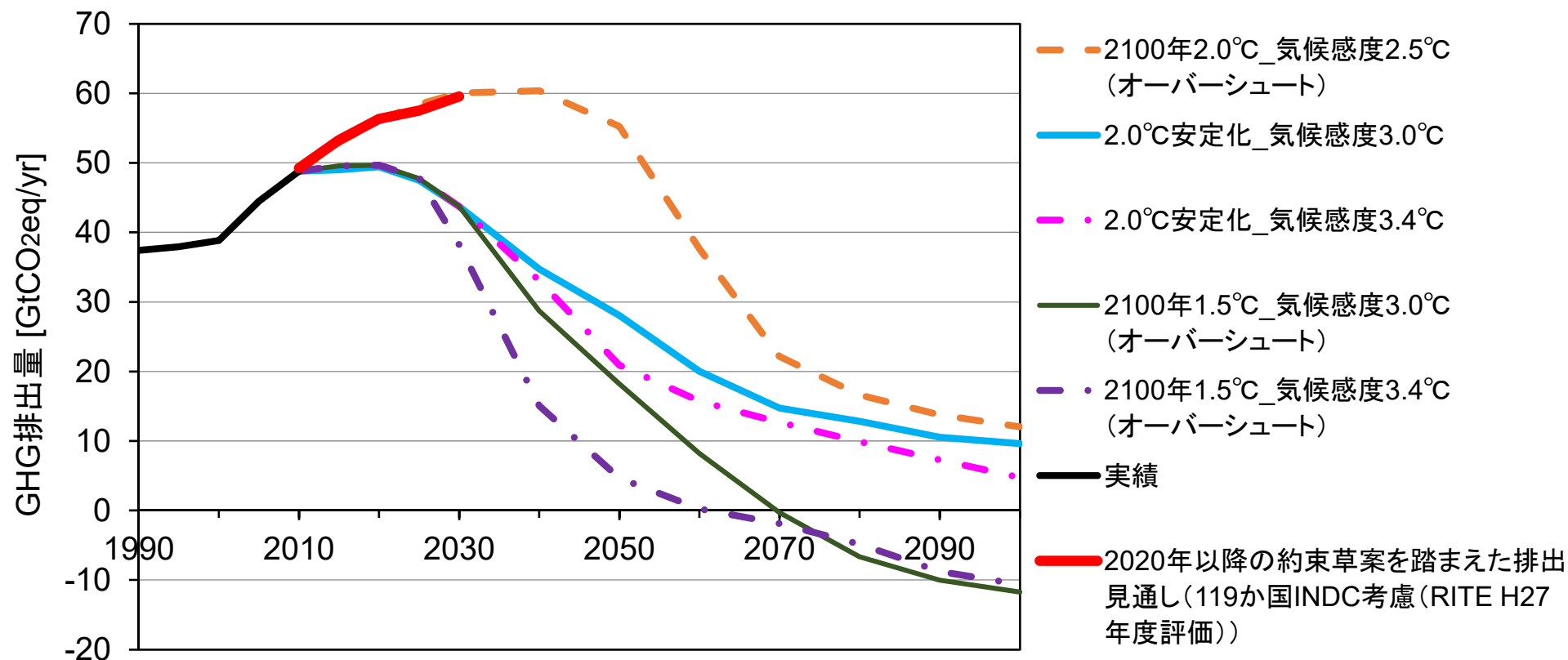
IPCC第4次(=WG3 第5次
およびSR15)の気候感度
(2.0-4.5°C、最頻値3.0°C)

IPCC WG1第5次+第3次
の気候感度(1.5-4.5°C、
最頻値2.5°C)

2100年の等価CO2 濃度カテゴリー (ppm CO2eq)	サブカテゴリー	2050年世 界排出 (2010年 比)	2100年気温 (°C、1850- 1900年比)	21世紀中に当該気温 (1850-1900年比)を 超えない確率		21世紀中に当該気 温(1850-1900年比) を超えない確率*	
				1.5°C	2.0°C	1.5°C	2.0°C
[0] <430	極めて限定的な数の分析報告しか存在しない (AR5シナリオデータベースへの登録はなし)			50%以上*		66%以上	
[1] 450 (430-480)	—	-72~-41%	1.5~1.7°C (1.0~2.8)		66%以上	50%以上	
[2] 500 (480-530)	[2a] 530 ppm CO2eqを超えない	-57~-42%	1.7~1.9°C (1.2~2.9)		50%以上		66%以上
	[2b] 2100年までの間 に530 ppm CO2eq を一旦超える	-55~-25%	1.8~2.0°C (1.2~3.3)				
[3] 550 (530-580)	[3a] 580 ppm CO2eqを超えない	-47~-19%	2.0~2.2°C (1.4~3.6)				50%以上
	[3b] 2100年までの間 に580 ppm CO2eq を一旦超える	-16~+7%	2.1~2.3°C (1.4~3.6)				

出典)IPCC AR5; *はRITEによる概算

気候感度の不確実性によるGHG排出量推移

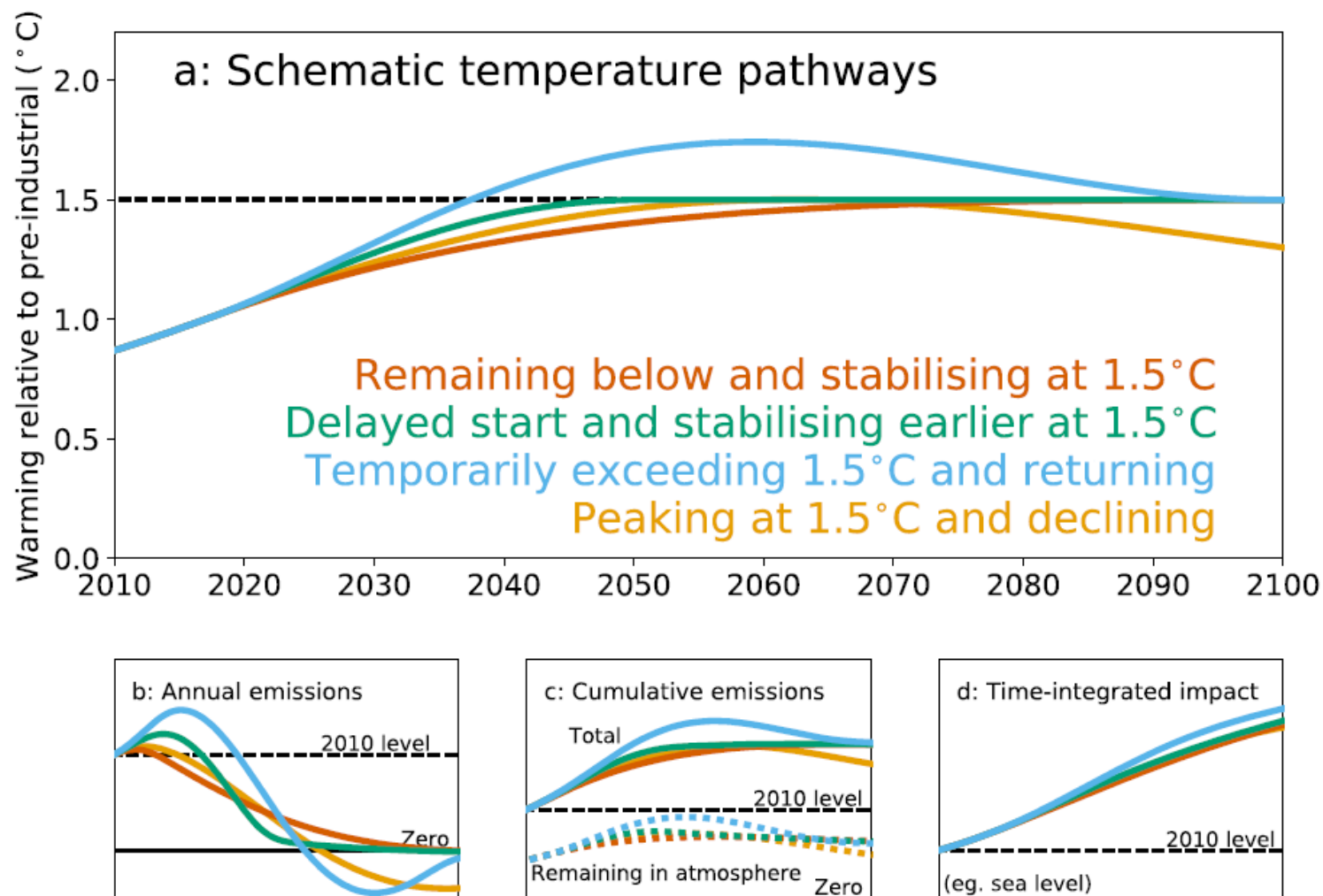


注) 一旦ネガティブCO₂排出となる経路も含めて、いずれの排出経路もCO₂では2300年にはほぼ排出ゼロ

出典) MAGICC、DNE21+を用いてRITEにて試算

- 気候感度の0.5°C程度の違いで排出経路にかなり差異が生じる。

1.5°Cに向けた取り得る様々な排出経路



出典) IPCC 1.5°C特別報告書(第1章)

気候感度の不確実性がないと仮にしても、1.5°C目標達成には様々な気温経路および排出経路が考えられる。

1.5°C目標に対する残余カーボンバジェットの比較

1.5°C目標に対する残余カーボンバジェット(単位:GtCO₂)

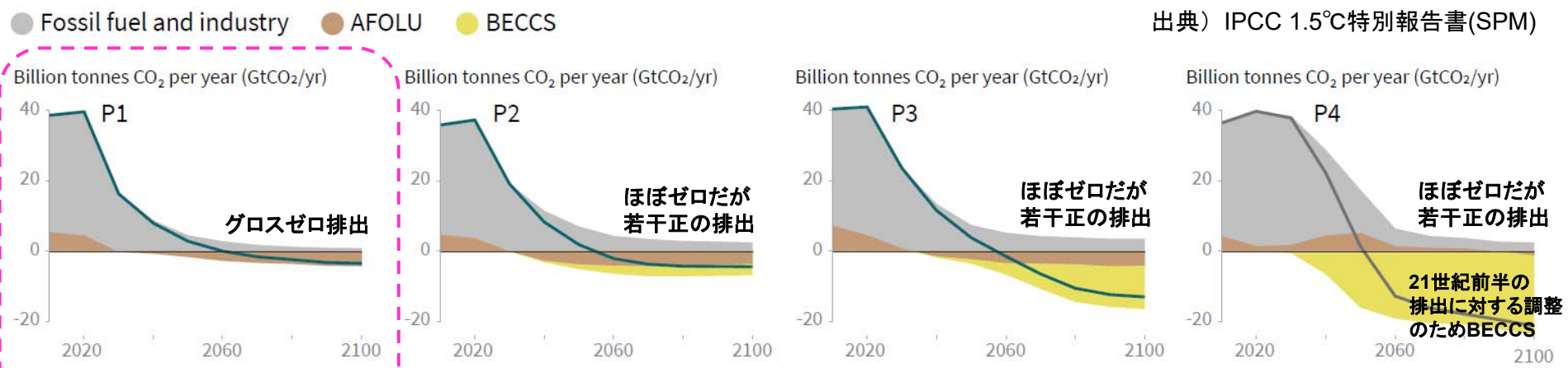
	1.5°C報告書		第5次報告書	
	GMSTベース (2018年起点)	SATベース (2018年起点)	SATベース (2018年起点)	SATベース (2011年起点)
確率 66%	570	420	110	400
確率 50%	770	580	260	550

太字の数値は1.5°C報告書の政策決定者向け要約に記載されたもの。世界平均気温の定義の違いによる2通りの数値が示されている。GMST (Global Mean Surface Temperature) は陸上気温と海面水温の観測データから算出される世界平均気温。SAT (Surface Air Temperature) は気候モデル計算の気温データから算出される世界平均気温。第5次報告書にはSATベースでの2011年起点の数値が記載されている。この表では比較のため、2011-2017年の排出量を290 GtCO₂として2018年起点に換算した数値も載せている。二つの報告書はSATベースの2018年起点の数値が比較対象となる。

出典)電中研筒井、<https://criepi.denken.or.jp/jp/env/research/eetw/201812.html>

- カーボンバジェットに関しての不確実性は相当大きく(まして2°Cや1.5°Cのような厳しい排出削減(小さなカーボンバジェット)においては相対的に不確実性の影響が大きくなる)、バジェットで排出を管理しようとするリスク管理は意味が乏しいと言わざるを得ない。

大幅排出削減(1.5°Cシナリオ)の排出削減シナリオの類型化



出典) IPCC 1.5°C特別報告書(SPM)

P1: A scenario in which social, business, and technological innovations result in lower energy demand up to 2050 while living standards rise, especially in the global South. A down-sized energy system enables rapid decarbonisation of energy supply. Afforestation is the only CDR option considered; neither fossil fuels with CCS nor BECCS are used.

SSP1よりも更に小さいエネルギー需要シナリオ

炭素価格小(排出削減の国際協調が緩やかでも民間主導で対策が進展)
 エンドユースの技術革新により経済自律的にエネルギー需要が大きく低下

P2: A scenario with a broad focus on sustainability including energy intensity, human development, economic convergence and international cooperation, as well as shifts towards sustainable and healthy consumption patterns, low-carbon technology innovation, and well-managed land systems with limited societal acceptability for BECCS.

SSP1

P3: A middle-of-the-road scenario in which societal as well as technological development follows historical patterns. Emissions reductions are mainly achieved by changing the way in which energy and products are produced, and to a lesser degree by reductions in demand.

SSP2

(中位シナリオ)

P4: A resource and energy-intensive scenario in which economic growth and globalization lead to widespread adoption of greenhouse-gas intensive lifestyles, including high demand for transportation fuels and livestock products. Emissions reductions are mainly achieved through technological means, making strong use of CDR through the deployment of BECCS.

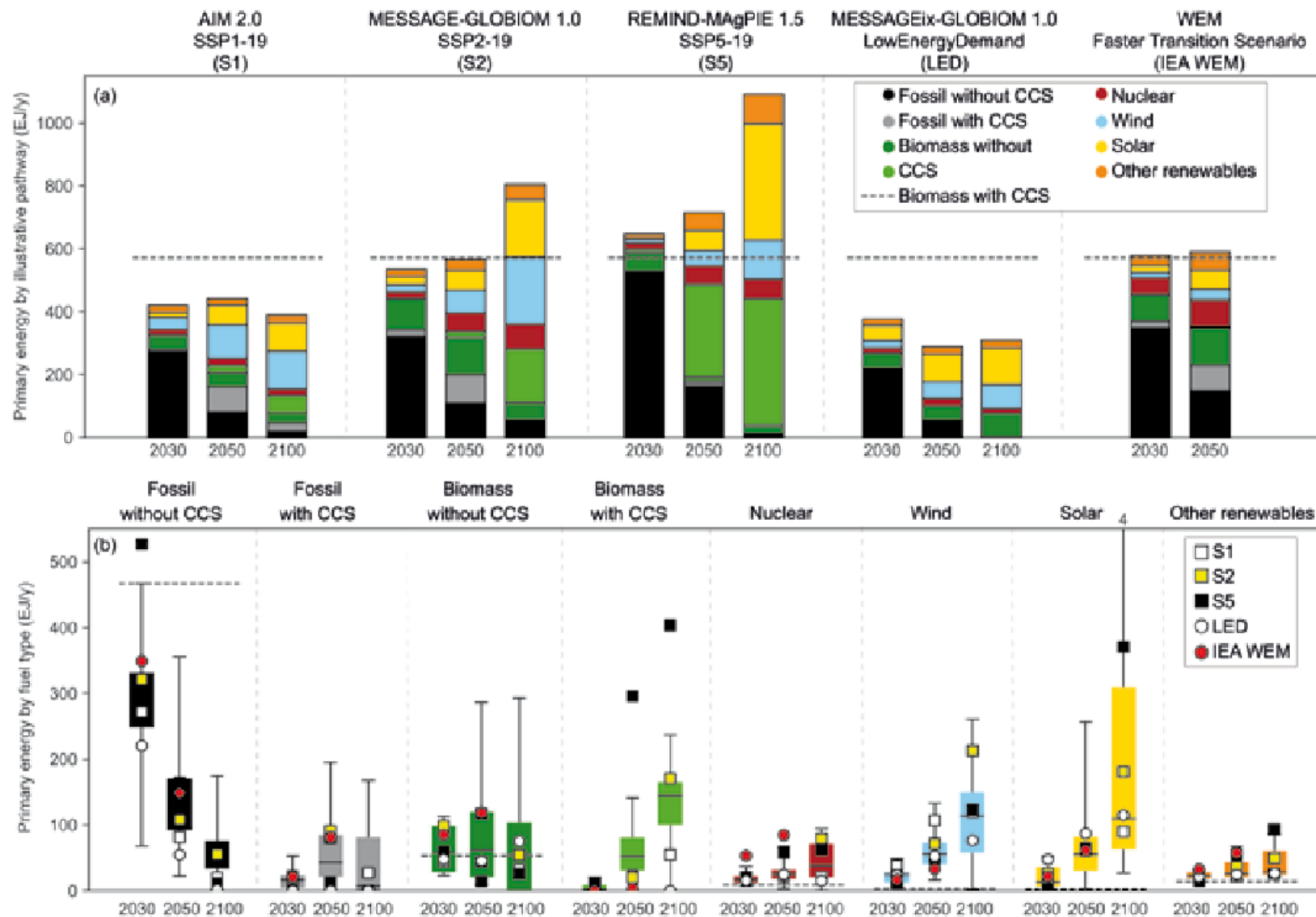
SSP5



- ✓ 全体のリスクマネジメントが重要であり、各技術に役割有。
- ✓ 一方、エンドユースの技術革新とそれによるエネルギー需要低下の可能性とその気候変動対策全体への効果について注目すべき(P1)

炭素価格大(炭素リーケージを防ぐためにも排出削減の強力な国際協調が不可欠)
 気候リスク対応のためCDR(CCS, BECCS, DACS等)技術も大規模に利用

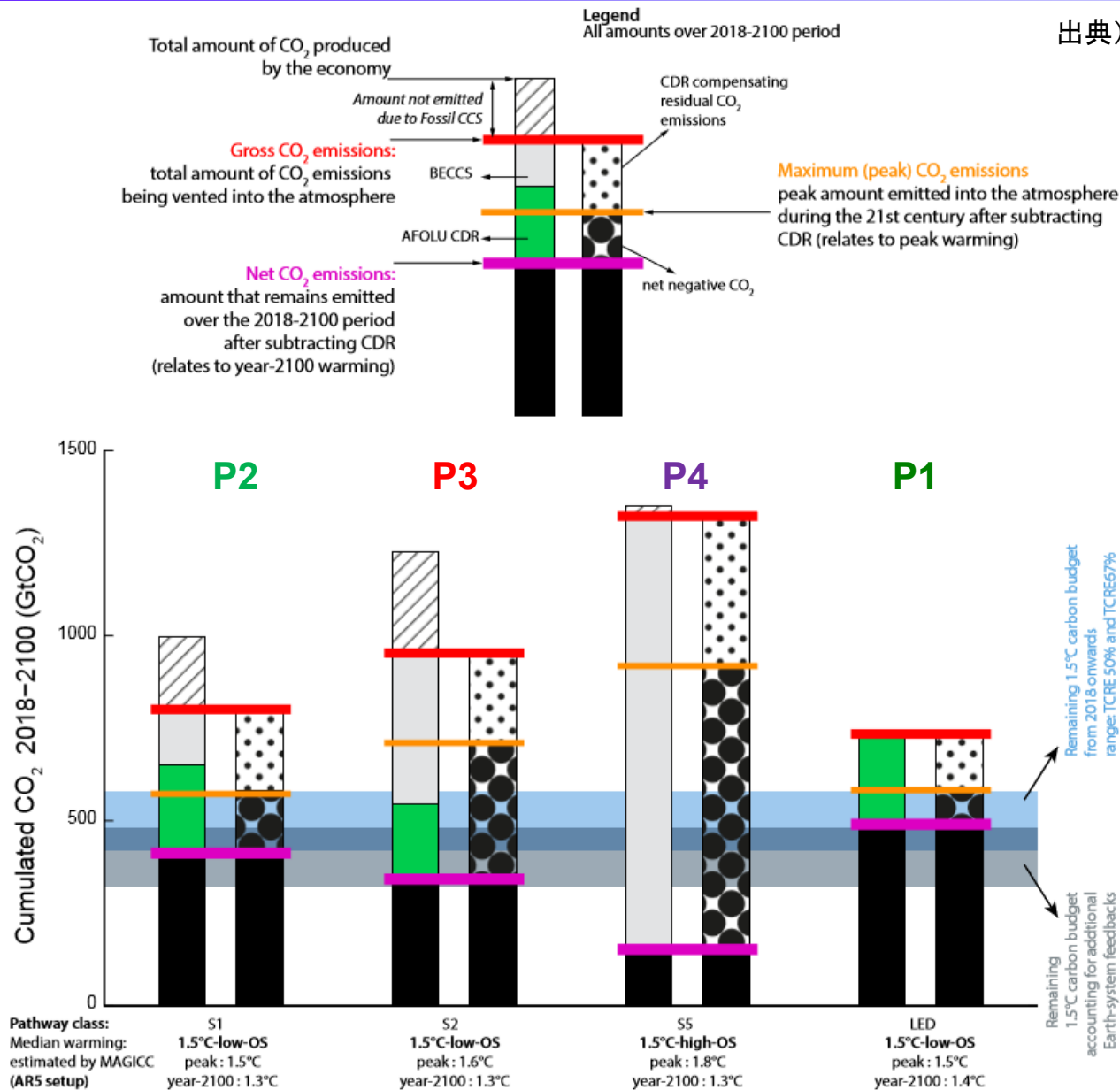
1.5°C排出削減におけるシナリオ形態別の対応オプション



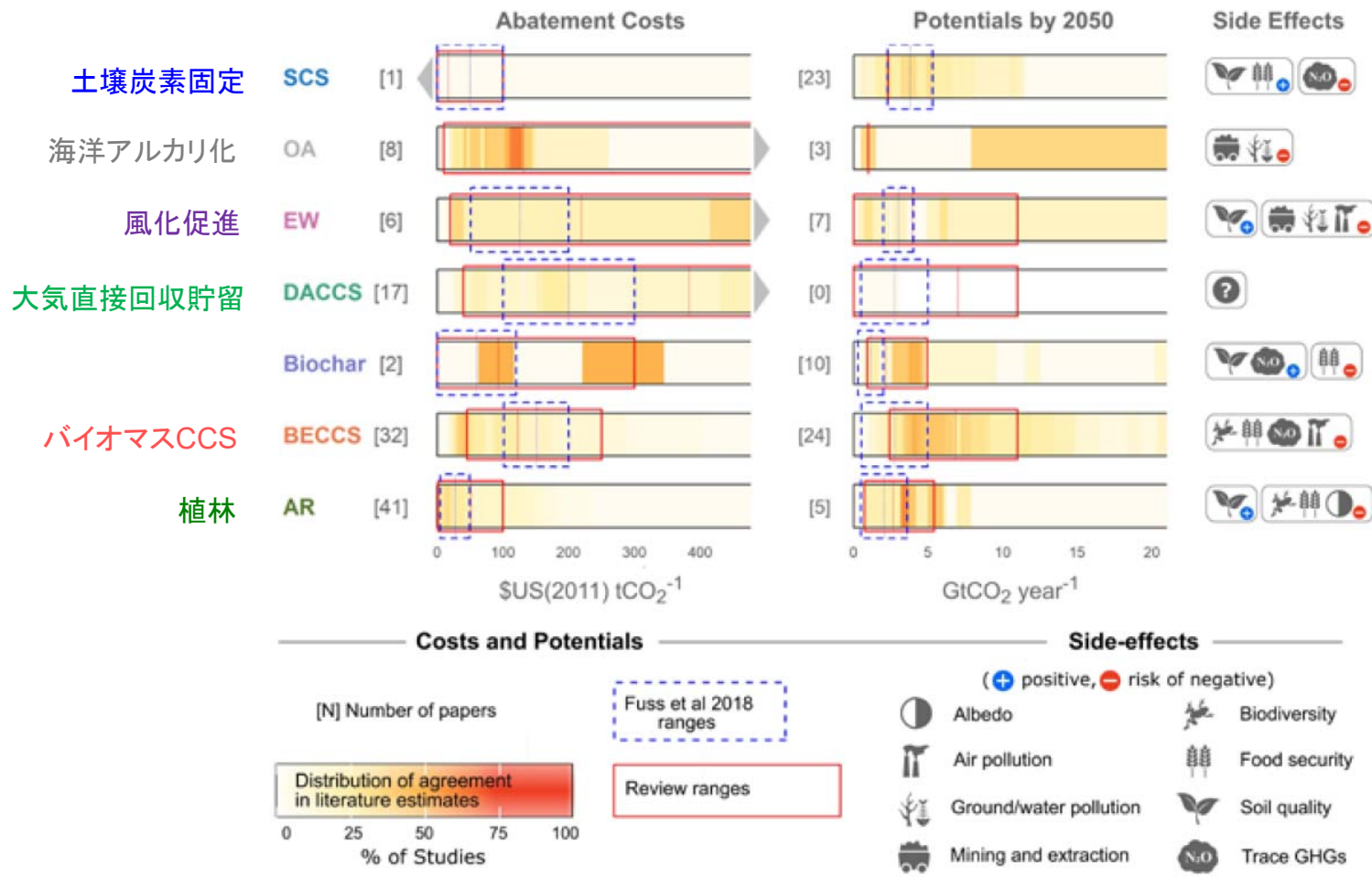
出典) IPCC 1.5°C特別報告書(第2章)

1.5°C排出削減におけるシナリオ形態別の CDR (Carbon Dioxide Removal) の寄与

出典) IPCC 1.5°C特別報告書 (第2章)



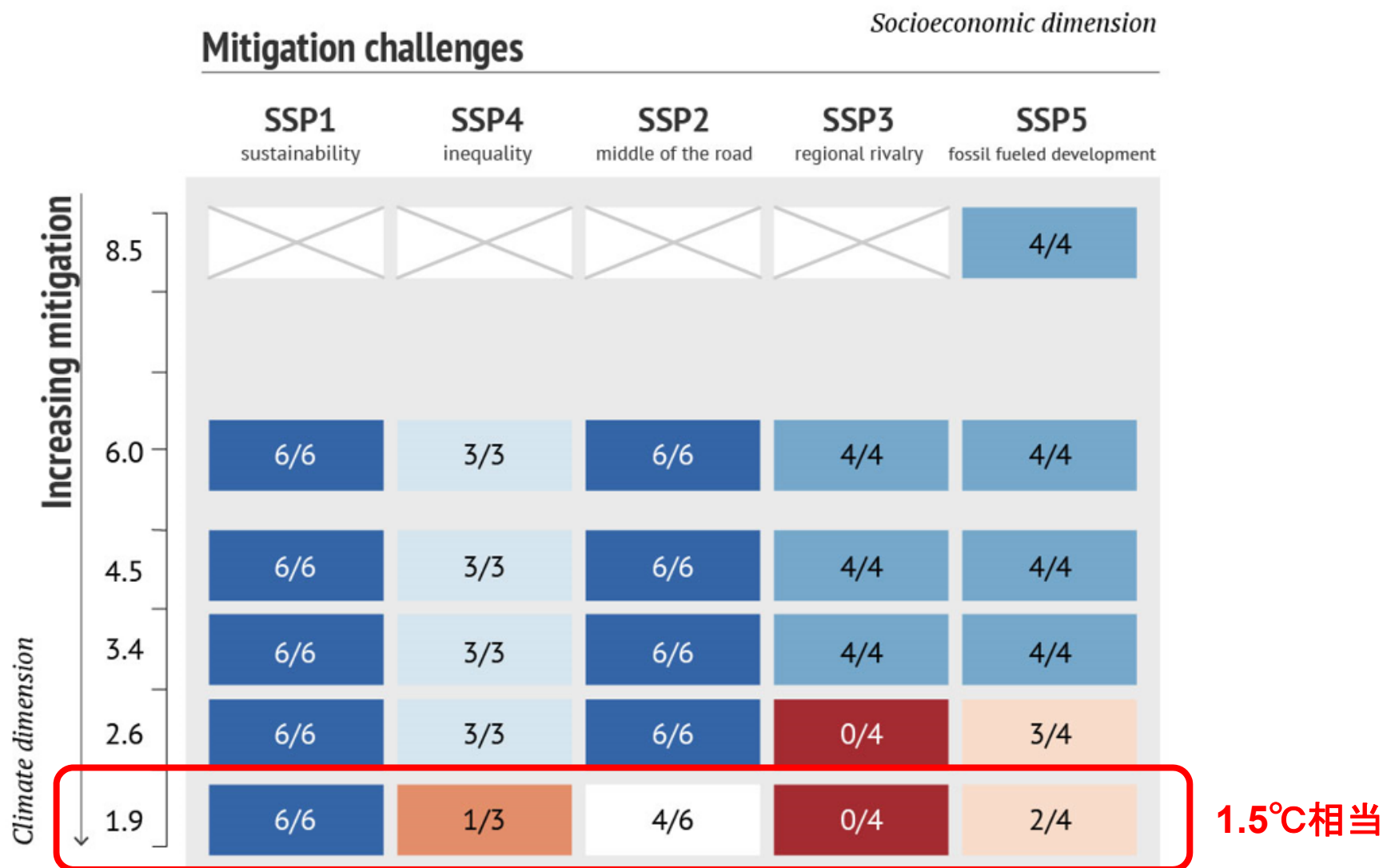
CDR (Carbon Dioxide Removal) のコストとポテンシャル (2050年時点)



出典) IPCC 1.5°C
特別報告書(第4章)

- BECCSで50～250 \$/tCO₂程度、年間3～11 GtCO₂/yr程度と推計
- 植林は数ドル～100 \$/tCO₂程度、年間1～5 GtCO₂/yr程度と推計
- 2100年に向けて、人口低下、生産性の向上が見込まれると、更にコスト低下、ポテンシャル増の推計も

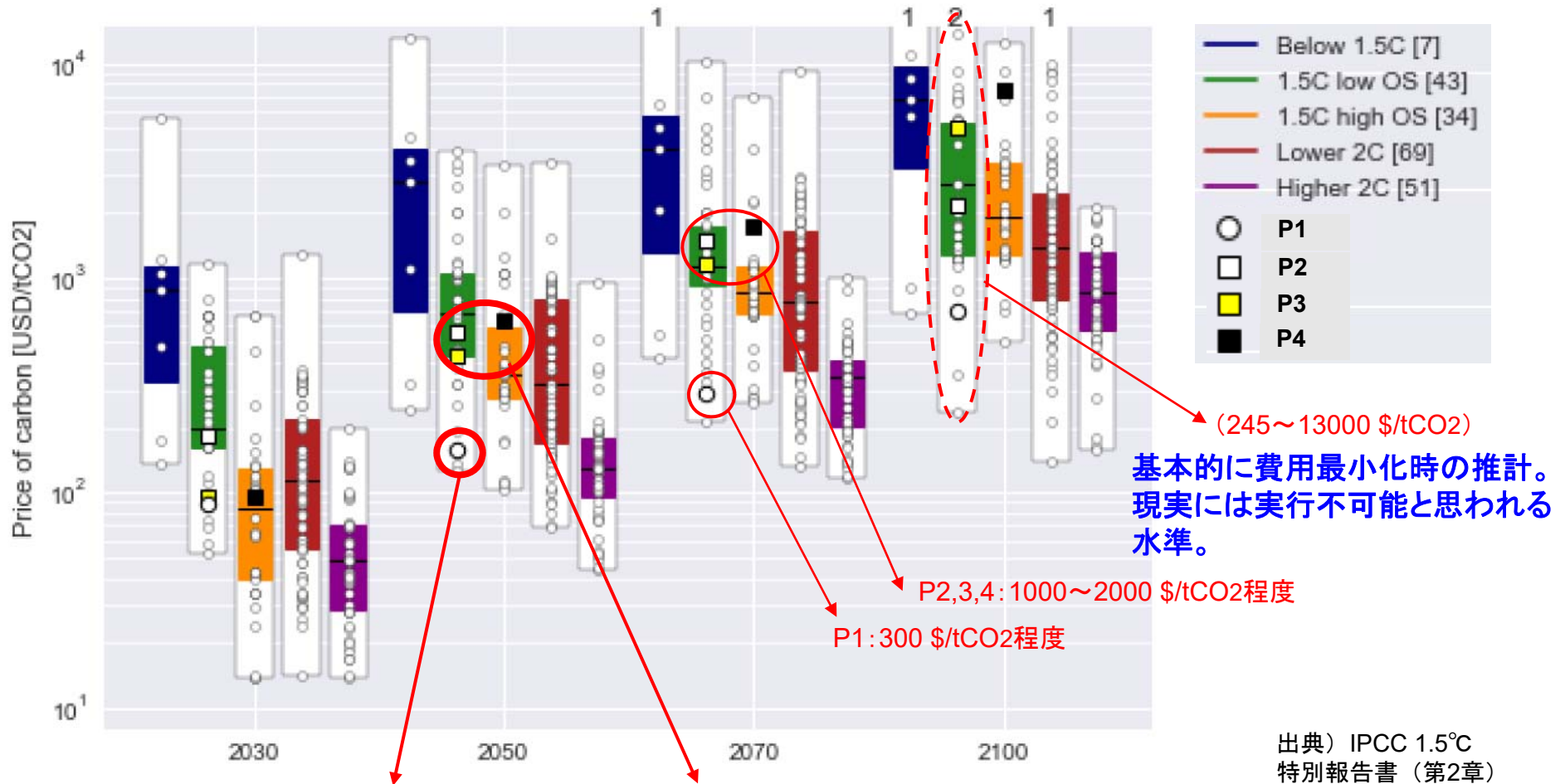
社会経済シナリオ別のモデル分析の実行可能解



6つのモデルによる評価結果

SSP1以外では、1.5°Cでは解が得られなかったモデルも多い。

1.5°C、2°CシナリオのCO2限界削減費用(炭素価格)

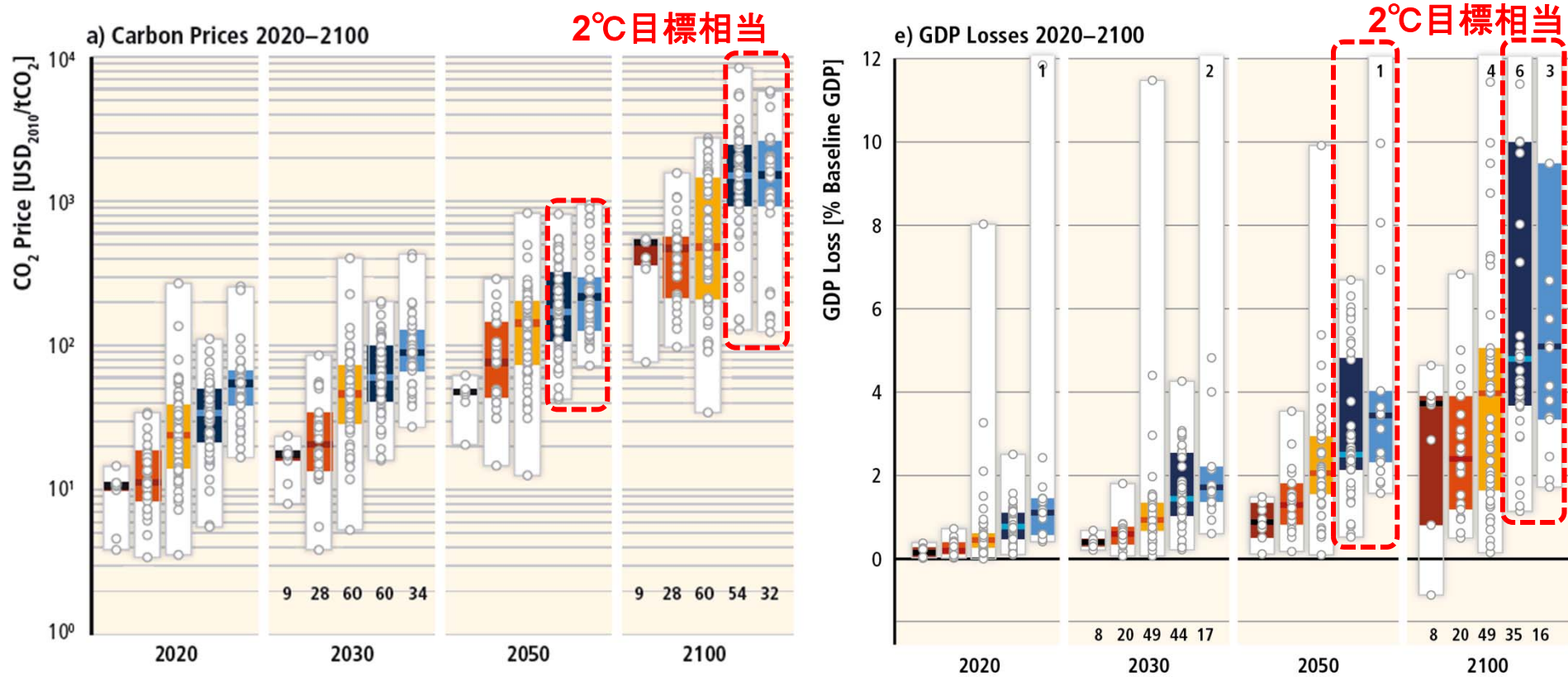


P1 (低需要シナリオ): 150 \$/tCO₂程度 **P2, P3, P4: 400 \$/tCO₂以上**

✓ **P1 (低需要シナリオ)ではかなり限界削減費用(炭素価格)が低く実現できる可能性は示されている。**

注) IPCC SR1.5では、1.5°C目標の炭素価格は、2°C目標の炭素価格の3~4倍程度と評価されている。
 (ただし、解が得られたモデルでの比較であり、1.5°C目標では解が得られなかったシナリオ分析も多いことに留意が必要)

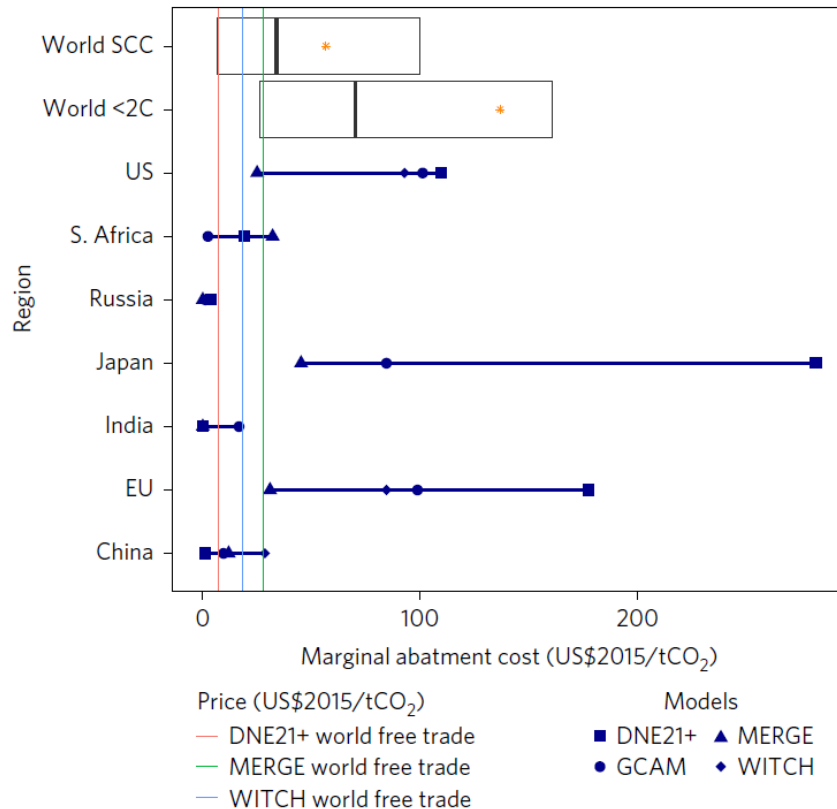
2°C目標の温暖化緩和コストと経済影響 (IPCC AR5)



出典) IPCC 第5次評価報告書

- CO₂限界削減費用(炭素価格)は、430-530 ppm CO₂eqシナリオの場合、2100年では約1000～3000 \$/tCO₂(25-75パーセントイル)、全モデルでは150～8000 \$/tCO₂程度が推計。
- 世界GDPは4～10%程度(25-75パーセントイル)の損失と推計

NDCsのCO2限界削減費用推計



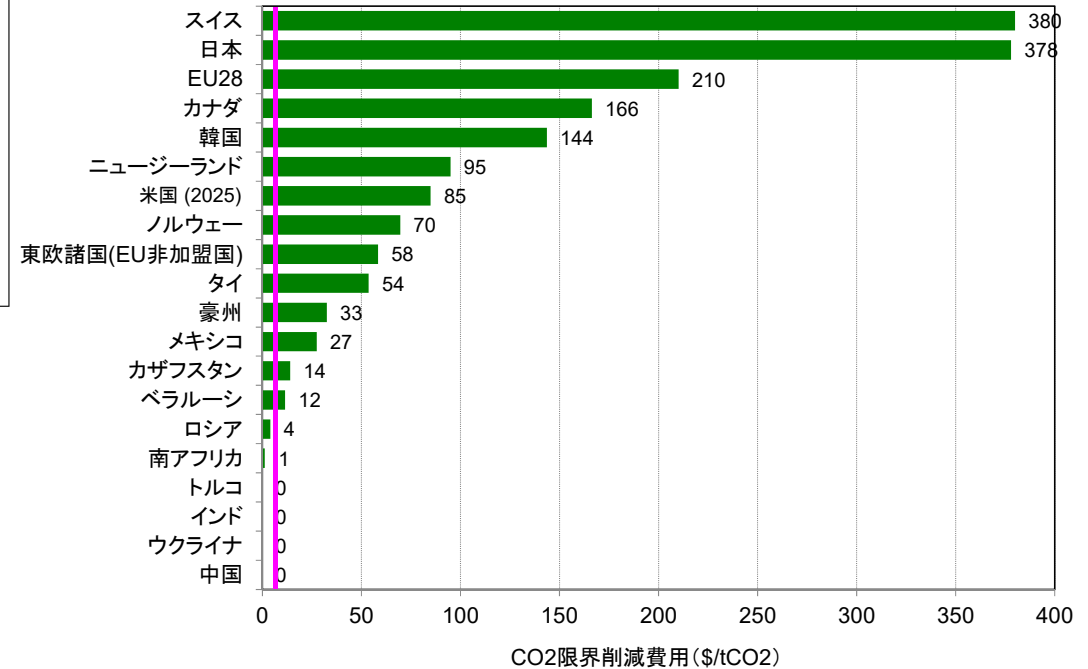
Source: J. Aldy et al., Nature Climate Change, 2016

2025-30年平均値

2030年(米国のみ2025年)

【世界GDP比削減費用】NDCs:0.38%、最小費用:0.06%

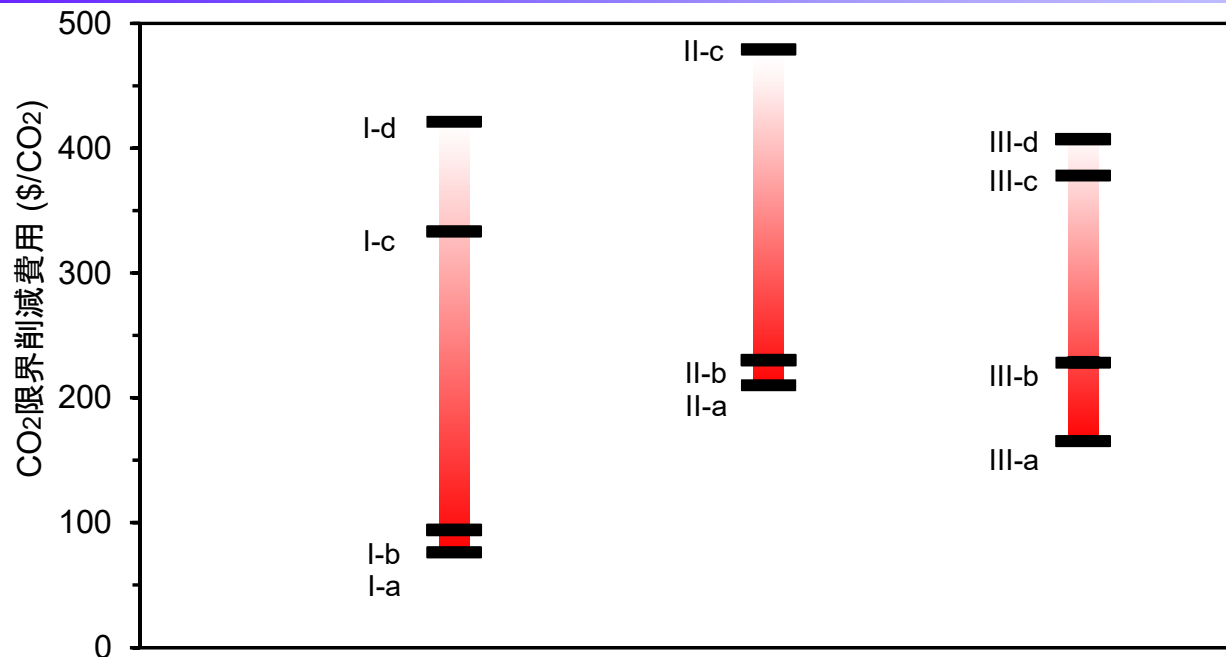
最小費用(限界削減費用均等化):6\$/tCO₂



Source: K. Akimoto et al., Evol. Inst. Econ. Rev., 2016

- 約束草案NDCsの排出削減費用は各国間で大きな差異あり。もしNDCsで期待できる世界全体での排出削減を費用最小化(限界削減費用均等化)で実現できるとすれば、RITEモデルでは限界削減費用6\$/tCO₂で済む。また、2030年時点の総削減費用は費用最小化に比べ6.5倍程度高い。
- 通常の長期モデル分析では、世界での費用最小化時の費用を推計しており、現実の費用はもっと大きい(実際には国内対策も費用最小化では達成できず、各国の費用も現実にはもっと大きい可能性あり)。

日米欧NDCsのCO2限界削減費用(各種制約による差)



Source: RITE DNE21+
モデルによる推計

I. 米国

- I-a: -26%; 最小費用
- I-b: -28%; 最小費用
- I-c: -26%; 発電部門がCPPに従った場合の非発電部門の限界削減費用
- I-d: -28%; 発電部門がCPPに従った場合の非発電部門の限界削減費用

II. 欧州

- II-a: 最小費用
- II-b: ブレグジット(英国が-40%に留まる場合の英国以外の限界削減費用)
- II-c: ETS部門での排出削減が計画に従った場合、非ETS部門での限界削減費用

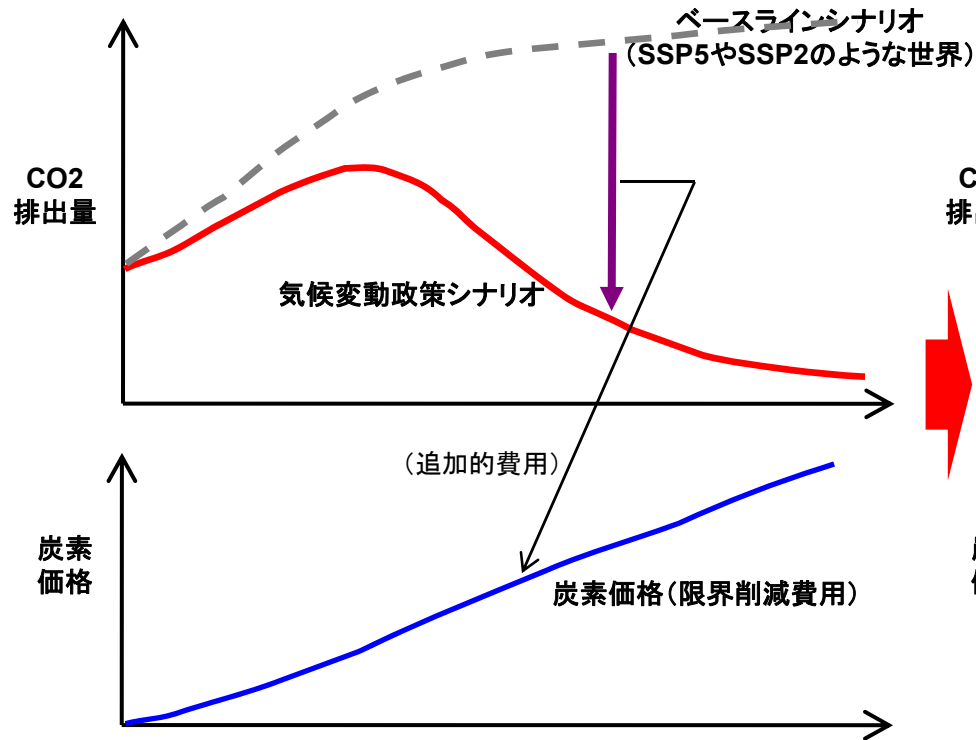
III. 日本

- III-a: 最小費用(ただし原子力比率は20%が上限の場合)
- III-b: 最小費用(ただし原子力比率は15%が上限の場合)
- III-c: 電源構成を含むNDC目標(原子力比率20%の場合)
- III-d: 電源構成を含むNDC目標(原子力比率15%の場合)

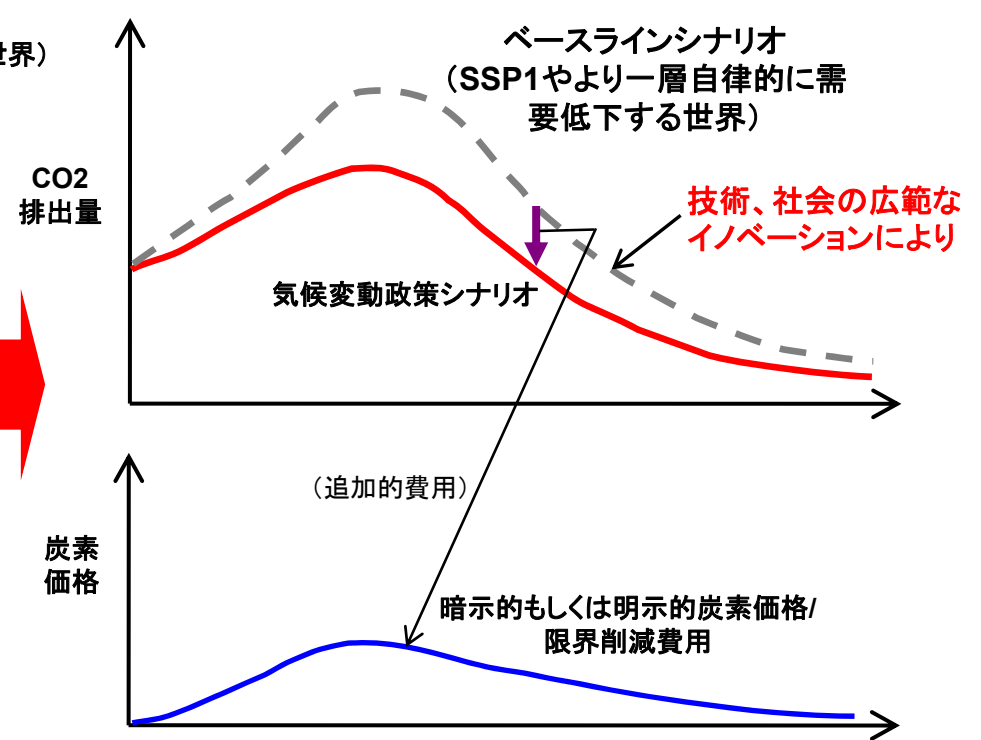
- 各国の対策について、現実には、社会的な制約や、政治システム的な制約などもあり、費用最小となる効率的な対策をとることは容易ではない。
 - 通常の長期モデル分析で示されるような費用で排出削減はできず、ずっと大きな費用が必要となる可能性も高い。

モデル分析によってIPCC等で通常示される大幅排出削減シナリオと現実社会でよりあり得る大幅排出削減シナリオ

モデル分析による典型的シナリオ: 通常の技術進展の想定

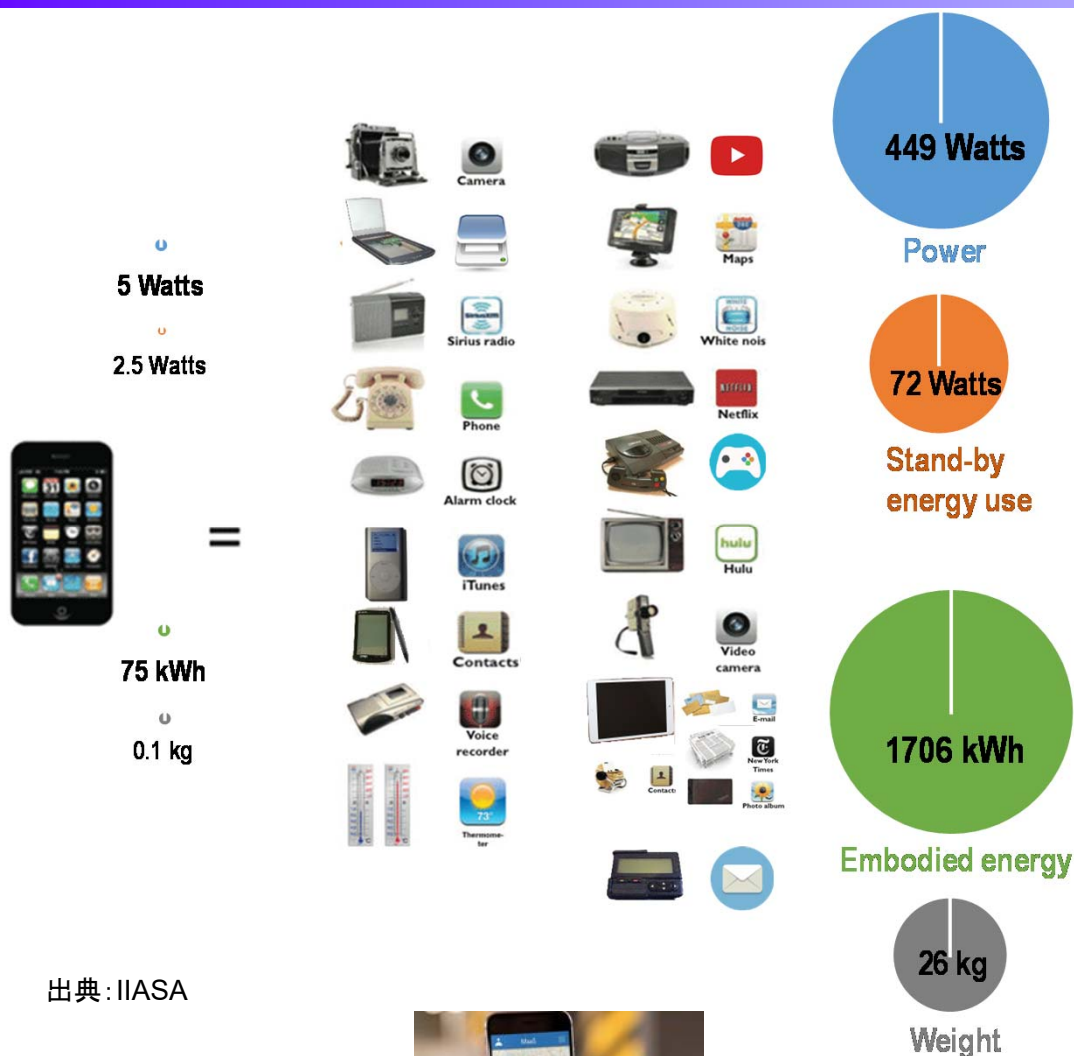


現実社会で要求される世界: 技術革新がより大きく誘発、実現される必要あり



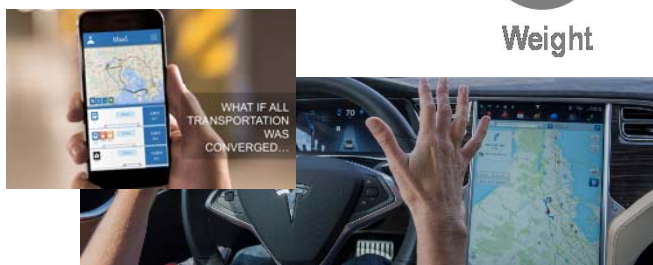
- 現実世界においては、高い明示的な炭素価格をつけるようなことは非現実的(世界で高い炭素価格で協調することは不可能であり、一方、国際協調無しに高い炭素価格付けを行えば、製造業は産業移転を起こし、炭素排出は他国にリーケージを起こし、温暖化抑制効果は期待できない)。
- 高くない(暗示的もしくは明示的な)炭素価格であっても(2次エネルギー価格の世界的な協調を含め)結果として、排出が大幅に減るように誘発するような技術、社会の大幅なイノベーションが起こらなければ、現実世界では大幅な排出削減は不可能と考えられる。

IT, AI等のエンドユース技術の革新と社会変化



出典: IIASA

例えば自家用車の稼働率は5%前後であり、完全自動運転でシェアリングとなれば大きな変化をもたらされ得る。



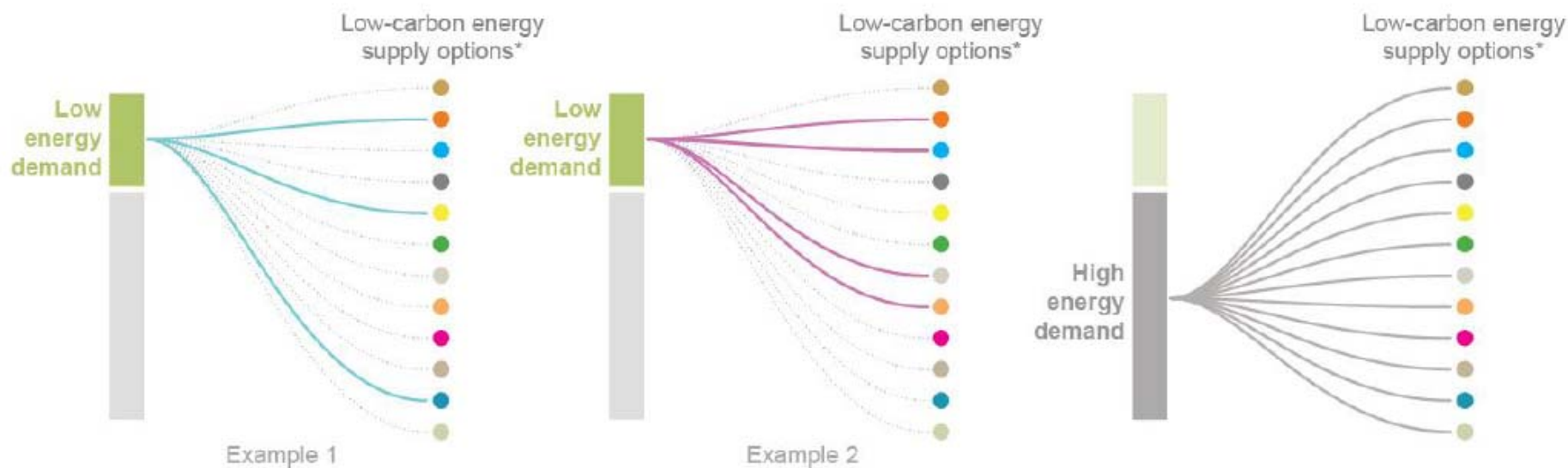
- 社会はエネルギー消費を目的にエネルギーを消費しているわけではない。製品・サービスが効用増をもたらすため、それに体化されたエネルギーを消費しているに過ぎない。
- 効用増をもたらす製品・サービスの展開は急速な場合が多く、それに付随したエネルギー・CO2排出低減は急速になる可能性あり。

完全自動運転等で、AI, IoTの革新が社会変化を誘発し、エネルギー効率向上をもたらす機会は多く存在

低エネルギー需要をもたらす技術イノベーションは エネルギー供給サイドの技術選択に柔軟性をもたらす

Low energy demand allows more choice about which low-carbon energy supply options to use to limit warming to 1.5°C.

With **high energy demand**, there is less flexibility as virtually all available options would need to be considered.



* Options include renewable energy (such as bioenergy, hydro, wind and solar), nuclear and the use of carbon dioxide removal techniques

出典) IPCC 1.5°C特別報告書(第2章)

- 高エネルギー需要の下では、1.5°C以内を達成しようとするれば、BECCS等に頼ることが不可欠になってしまう。
- 低エネルギー需要の下では、CO2限界削減費用も低下し、エネルギー供給サイドの技術選択に柔軟性がもたらされる。

IPCC WG3 AR6の構成 (Co-vice chair: Diana Urge-Vorsatz 氏資料より)

Framing (1 chapter)	
1. Introduction and framing	
High-level assessment of emission trends, drivers and pathways (3 chapters)	
2. Emissions trends and drivers	
3. Mitigation pathways compatible with long-term goals	
4. Mitigation and development pathways in the near- to mid-term	
Sectoral chapters (8 chapters)	
5. Demand, services and social aspects of mitigation	
6. Energy systems	9. Buildings
7. Agriculture, Forestry, and Other Land Uses	10. Transport
8. Urban systems and other settlements	11. Industry
12. Cross sectoral perspectives	
Institutional drivers (2 chapters)	
13. National and sub-national policies and institutions	
14. International cooperation	
Financial and technological drivers (2 chapters)	
15. Investment and finance	
16. Innovation, technology development and transfer	
Synthesis (1 chapter)	
17. Accelerating the transition in the context of sustainable development	

AR6で特に新しいとされている章

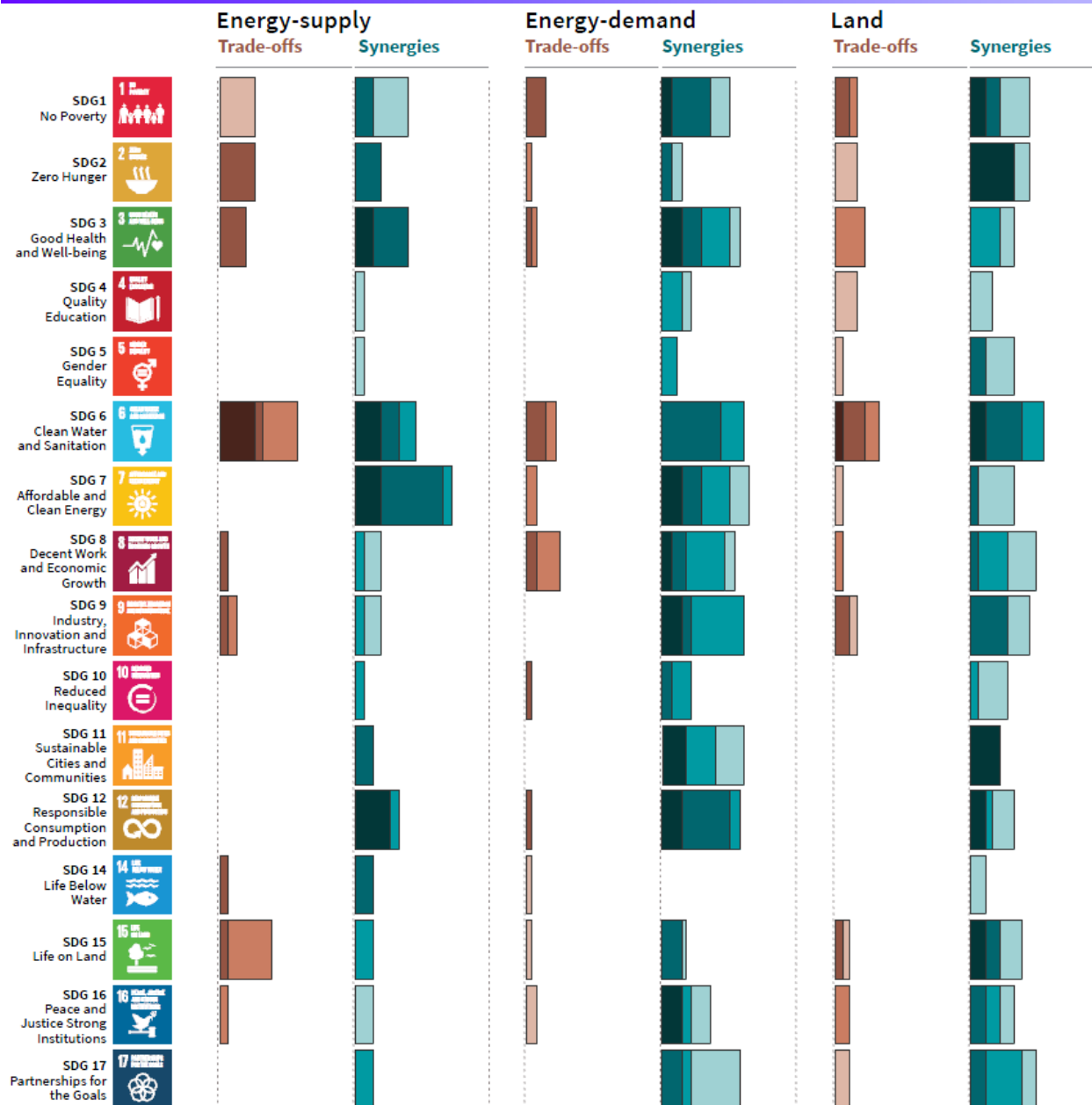
Chapter 5: Demand, services and social aspects of mitigation

- ❖ Mitigation, sustainable development and the SDGs (human needs, access to **services**, and affordability)
- ❖ *Patterns of development* and **indicators of wellbeing**
- ❖ *Sustainable consumption and production*
- ❖ Culture, social norms, practices and behavioural changes for lower resource requirements
- ❖ Sharing economy, collaborative consumption, community energy
- ❖ Implications of **information and communication technologies for mitigation** opportunities taking account of social change
- ❖ **Circular economy** (maximising material and resource efficiency, closing loops): and insights from life cycle assessment and material flow analysis
- ❖ Social acceptability of supply and demand solutions
- ❖ Leapfrogging, capacity for change, feasible rates of change and lock-ins
- ❖ Identifying actors, their roles and relationships
- ❖ Impacts of non-mitigation policies (welfare, housing, land use, employment, etc.)
- ❖ Policies facilitating **behavioural and lifestyle change**

Chapter 12: cross-sectoral perspectives

- ❖ Summary of **sectoral costs and potentials**
- ❖ Comparison of sectoral costs and potentials with integrated assessments
- ❖ Summary of sectoral **co-benefits and trade-offs**
- ❖ Aspects of **GHG removal techniques** not covered in chapters 6 to 11 (land based, ocean based, direct air capture): status, costs, potentials, governance, risks and impacts, co-benefits, trade-offs and spill-over effects, and their role within mitigation pathways
- ❖ Impacts, risks and opportunities from large-scale land-based mitigation: land, water, food security; use of shared resources; management and governance
- ❖ Emissions intensity of **food systems** and mitigation opportunities across the food system (production, supply chain, demand and consumption) including emerging food technologies
- ❖ Policies related to food system and food security including food waste and food demand
- ❖ Links to adaptation and sustainable development (including co-benefits, synergies and trade-offs)

緩和と持続可能な発展指標 (SDGs) の関係性



Length shows strength of connection



The overall size of the coloured bars depict the relative for synergies and trade-offs between the sectoral mitigation options and the SDGs.

Shades show level of confidence



The shades depict the level of confidence of the assessed potential for Trade-offs/Synergies.

出典) IPCC 1.5°C特別報告書 (SPM)

- 1.5°C目標を達成すると、SDGsにトレードオフよりもシナジーが多いように受け取れる図の整理となっている。

- しかし、大幅な費用が発生する緩和策をとれば(2100年の限界削減費用は245~13000 \$/tCO2)、所得が減少し、結果、SDG 1(貧困)やSDG 2(飢餓)などにネガティブな影響があるはずだが、図には、そのネガティブ影響は表示されていない。

- スコアリングは文献の数を基にしていたり、また、それは1.5°Cとは異なる気温水準の評価結果を利用していたり、あまり学術的な整理となっていない。

IPCCのSR15の解説としてのCOP24でのプレゼン資料

Climate change is already affecting people, ecosystems and livelihoods around the world

Limiting global warming to 1.5°C is not impossible – but it would require unprecedented transitions in all aspects of society

“is not impossible”はSR15での記載のニュアンスと異なる。

There are clear benefits to keeping warming to 1.5°C rather than 2°C or higher

影響被害面だけからの知見だが、その明記がない。

SPMでは、“This excludes the costs of mitigation, adaptation investments and the benefits of adaptation.”と記載

Limiting warming to 1.5°C can go hand in hand with achieving other world goals

ipcc

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change

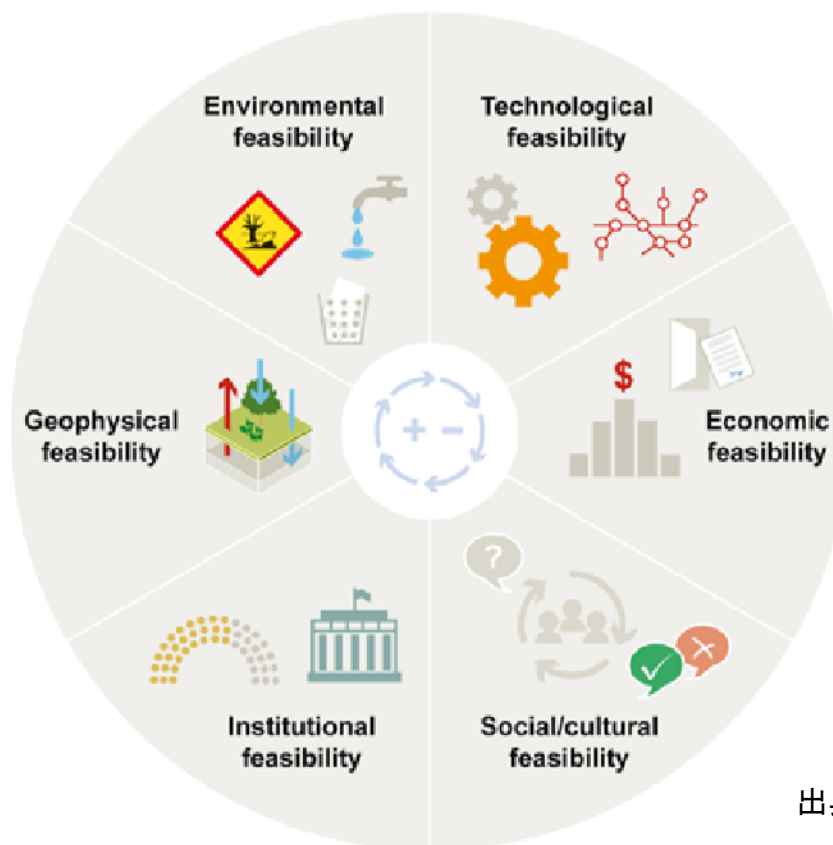


COP24プレゼン資料全体として、緩和費用に関する記載が一切なされていない。(SR15には、一応はSPMにも記載があるものの)

1.5°C排出目標の実現可能性

FAQ4.1: The different feasibility dimensions towards limiting warming to 1.5°C

Assessing the feasibility of different adaptation and mitigation options/actions requires consideration across six dimensions.



出典) IPCC 1.5°C特別報告書(第4章)

- 実現可能性については、様々なレベルでの実現可能性があり、1.5°Cが実現可能か、不可能かは一概に言うことはできない。(第1章ES: "There is no single answer to the question of whether it is feasible to limit warming to 1.5 °C and adapt to the consequences.")
- しかし、緩和費用の推計結果からは、極めて難しいというのが現実である。(ただし、IPCCは、"not policy prescriptive"の制約の下で、それを率直に伝えることはできない制約がかかっている。)

- ◆ IPCC報告書は査読論文を基本としている。
- ◆ IPCCの原則は”not policy prescriptive but policy relevant”
- ◆ これら原則自体は必ずしも不適切とは思わないが、一方、これら原則によって、現実の経済的、社会的、政治的制約を踏まえた、現実社会で実現性の高い解決策を提示しにくい面もあり、IPCCの有する課題と言える。
- ◆ 費用便益分析は困難であるとしても、影響被害、適応費用、緩和費用の総合的なリスク分析の結果として、より妥当性の高い排出削減の対応方策が見えてくる。また、総合的な分析は、不確実性が大きく、明確なことが言えない場合は、無理な記述をせず、それを率直に認め、正しく伝わるような記述を行うことが重要（特にアウトリーチ）。
- ◆ 原子力については温暖化対策として重要にも関わらず、IPCCはこれまで避けている感がある。総合的なリスク対応として幅広いオプションの検討が重要。
- ◆ 需要サイドのイノベーションの可能性と、その部門横断的な排出削減および排出削減費用への影響の評価は、今後、研究の拡大が大変重要。

付録

共有社会経済パス (SSPs) の概要

