

ALPS国際シンポジウム

2018年2月9日

長期CO₂ゼロエミッションに向けての 気候変動リスク対応戦略

(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

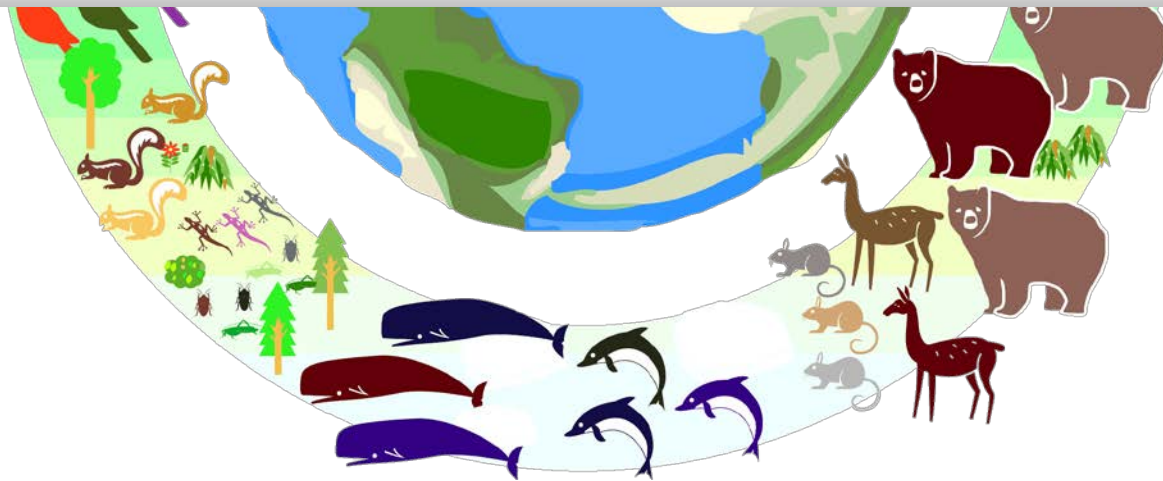
秋元 圭吾



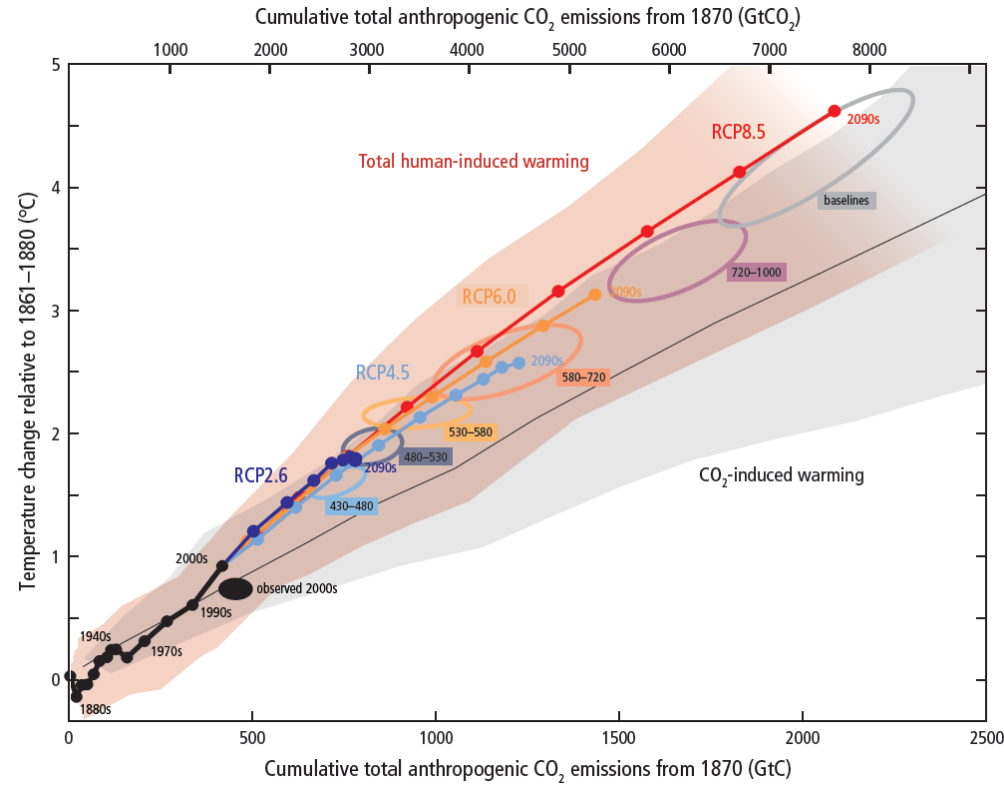
1. 必要な長期目標と短中期の排出経路の不確実性
2. 排出削減費用 – 理想的な費用と現実での費用のギャップ
3. 異なる社会経済シナリオの下での排出削減対策
4. 気候変動緩和と他の持続可能な発展目標のコベネフィットとトレードオフ
5. イノベーションと排出削減
6. まとめ



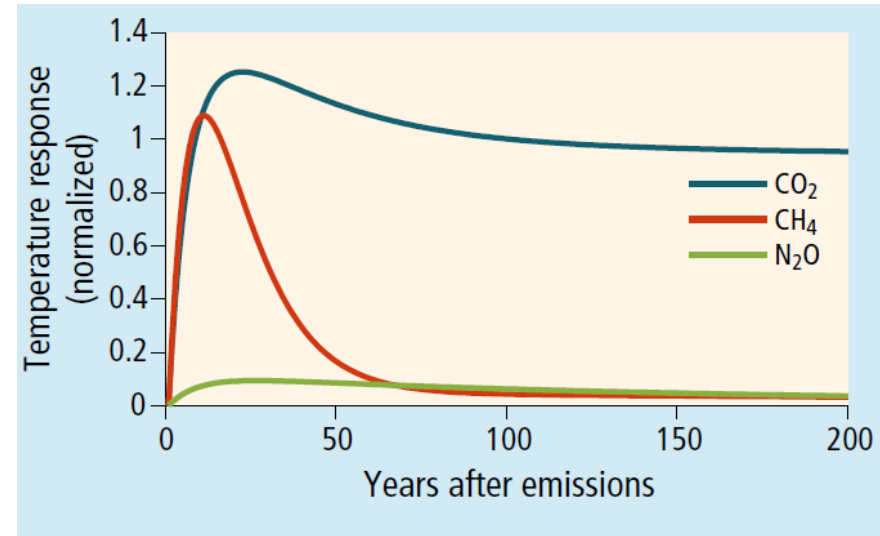
1. 必要な長期目標と短中期の 排出経路の不確実性



累積排出量と気温上昇の関係と排出に対する気温応答



出典) IPCC AR5 統合報告書



2010年排出に対する気温上昇応答。CO₂排出の100年後の寄与を1として規格化

- 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るれば、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)

気候感度の評価の変遷とIPCC WG3 第5次評価報告書の長期シナリオ推計で用いられた気候感度

	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

【WG1 第5次(政策決定者向け要約)における具体的な記述】

Likely in the range 1.5 °C to 4.5 °C (high confidence)

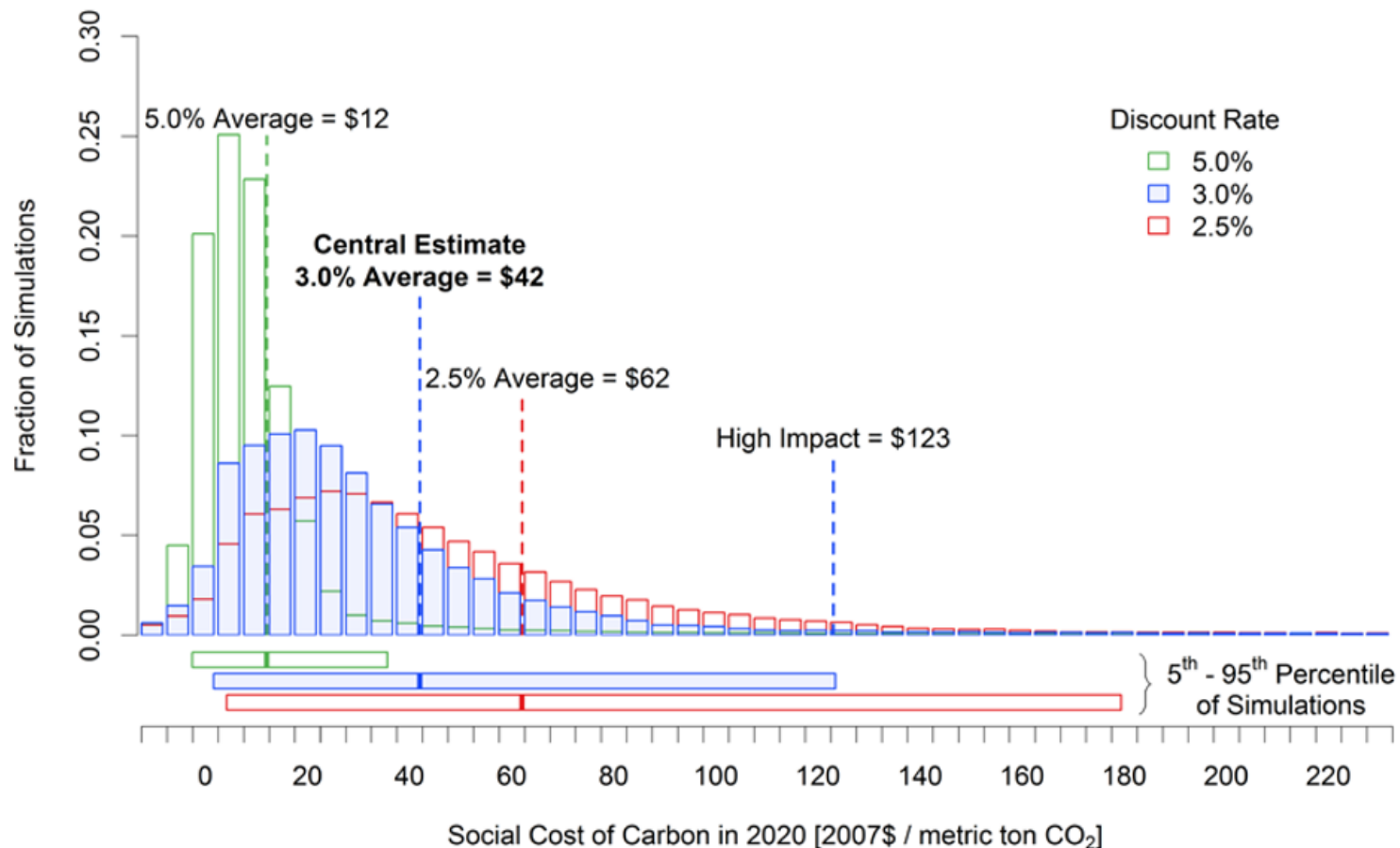
Extremely unlikely less than 1 °C (high confidence)

Very unlikely greater than 6 °C (medium confidence)

No best estimate for equilibrium climate sensitivity can now be given because of a lack of agreement on values across assessed lines of evidence and studies.

- ◆ 平衡気候感度(濃度が倍増し安定化したときの気温上昇の程度の指標)の不確実性は未だ大きい。
- ◆ AR5 WG1では観測データ派の気候感度評価を含めて各種分析を総合的に判断した結果、AR4よりも低位に修正(1.5~4.5°C)。
- ◆ しかし、AR5 WG3の長期排出経路の気温推計においてはAR4の気候感度(2.0~4.5°C、最良推計値3.0°C)を利用

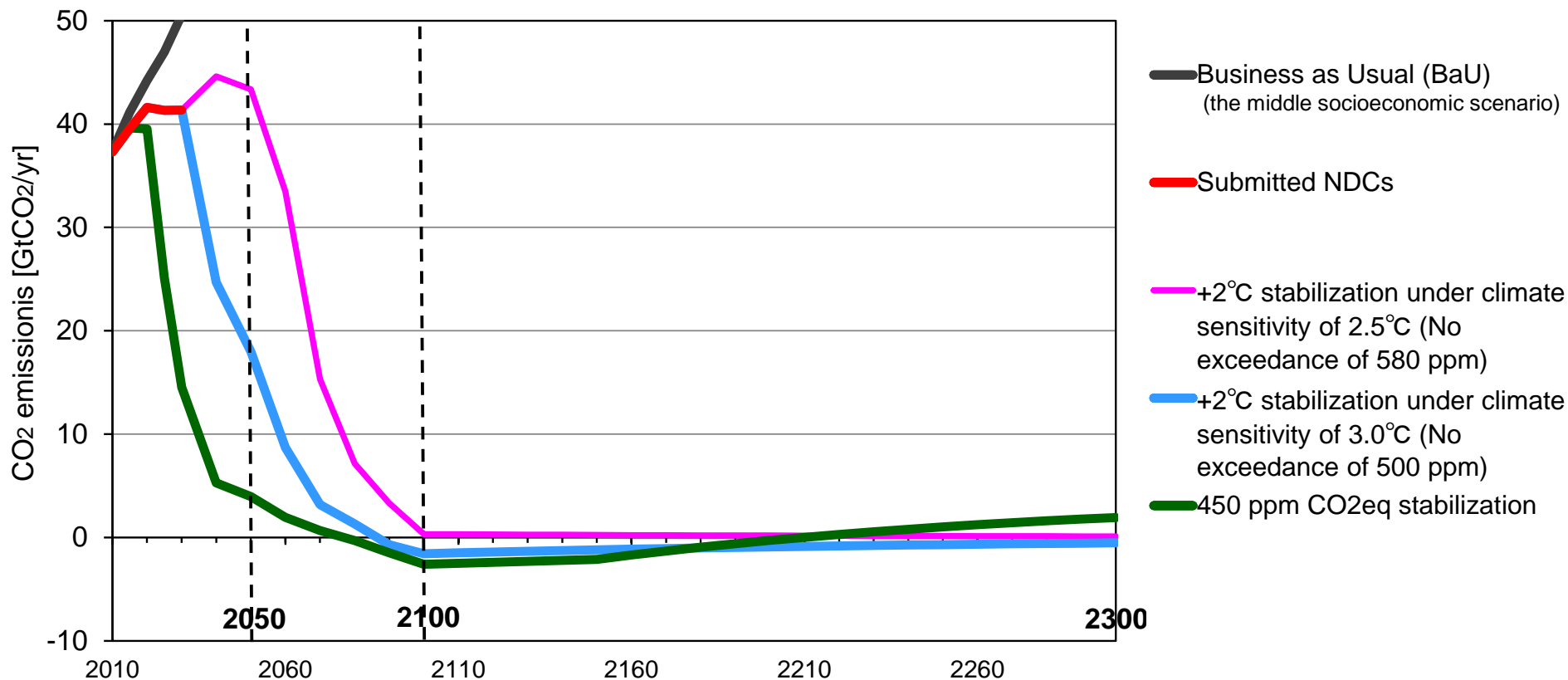
炭素の社会的費用 (SCC)



出典) Interagency working group on social cost of carbon, 2016

- Social cost of carbon is the marginal damage costs of CO₂ emissions.
- The estimation methods are very debatable, and the estimated distributions of the damage costs vary widely depending on the estimated models, climate sensitivity, discount rate etc. Therefore, it is not easy to determine the optimal temperature level.

各シナリオのCO₂排出量推移(～2300年)



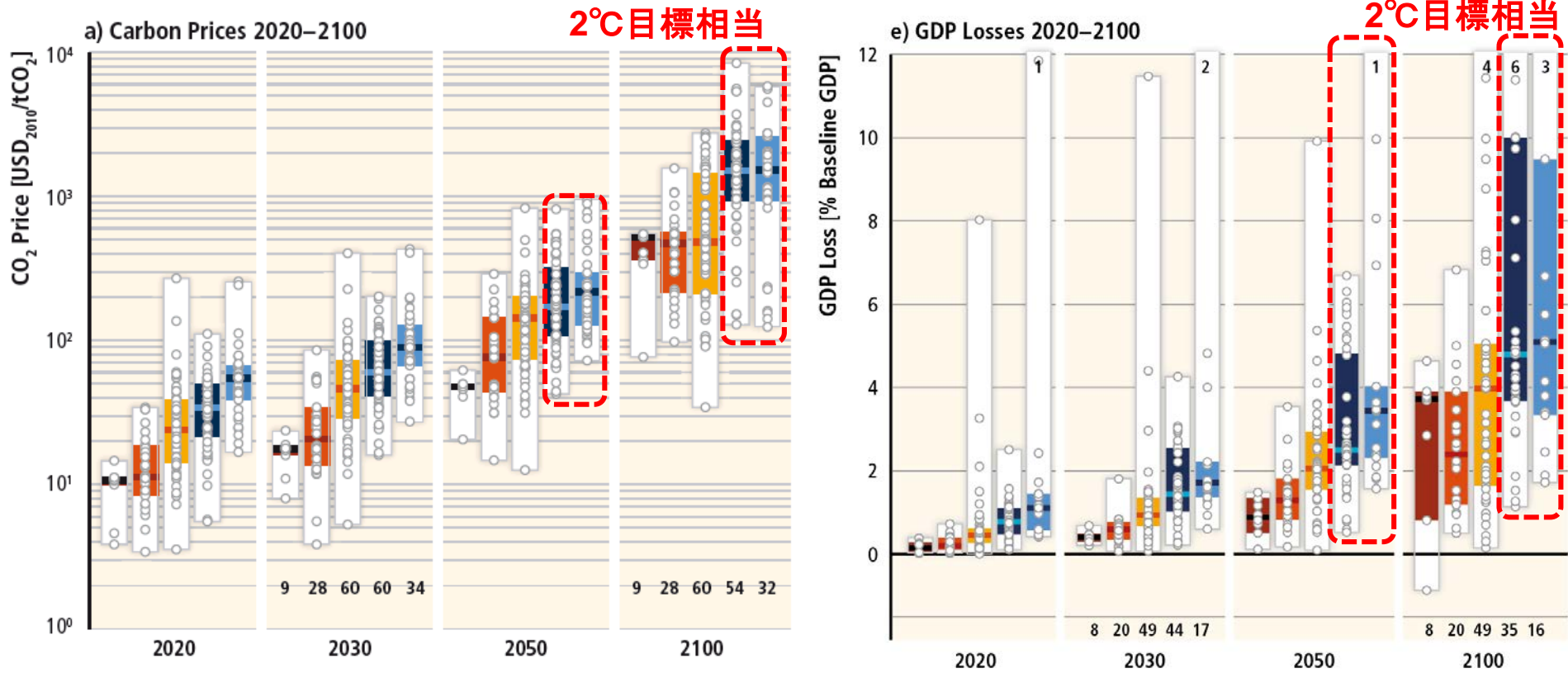
出典)MAGICC、DNE21+を用いてRITEにて試算

- いずれの排出経路をとっても、長期的(2100年以降)にはCO₂ゼロ排出は必要
- 一方、2050年頃にかけては、2°C目標としても、気候感度の不確実性で許容される世界排出量には大きな幅が生じる。不確実性を適切にマネジメントしながら、長期的に必要な正味ゼロCO₂排出に近い要求を満たすような技術、社会のイノベーションを進める必要あり。

2. 排出削減費用 – 理想的な費用と 現実での費用のギャップ



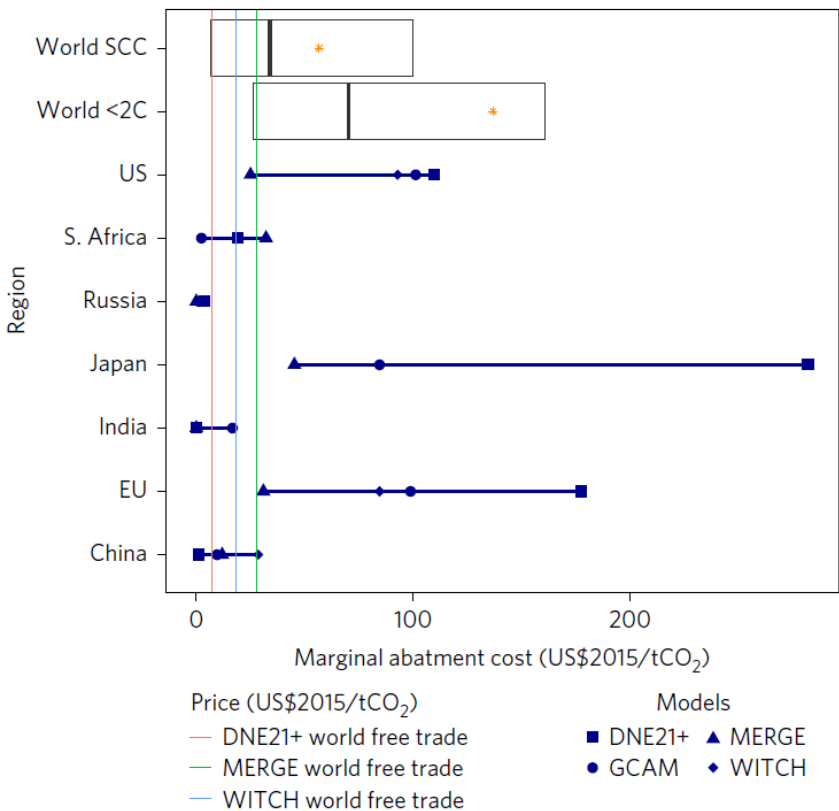
2°C目標の温暖化緩和コスト、経済影響は相当大きい



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(いずれも25-75パーセンタイル)、全モデルでは150~8000 \$/tCO₂程度が推計されている。モデル分析結果からは、世界GDPの10%以上の損失になる確率も25%程度存在していることが示されている。

しかも、これは世界全体で費用最小化の場合であり、各国の限界削減費用に差がある場合や、政策の非効率性を含めると、上限は更にFat tailに。

NDCsのCO2限界削減費用推計



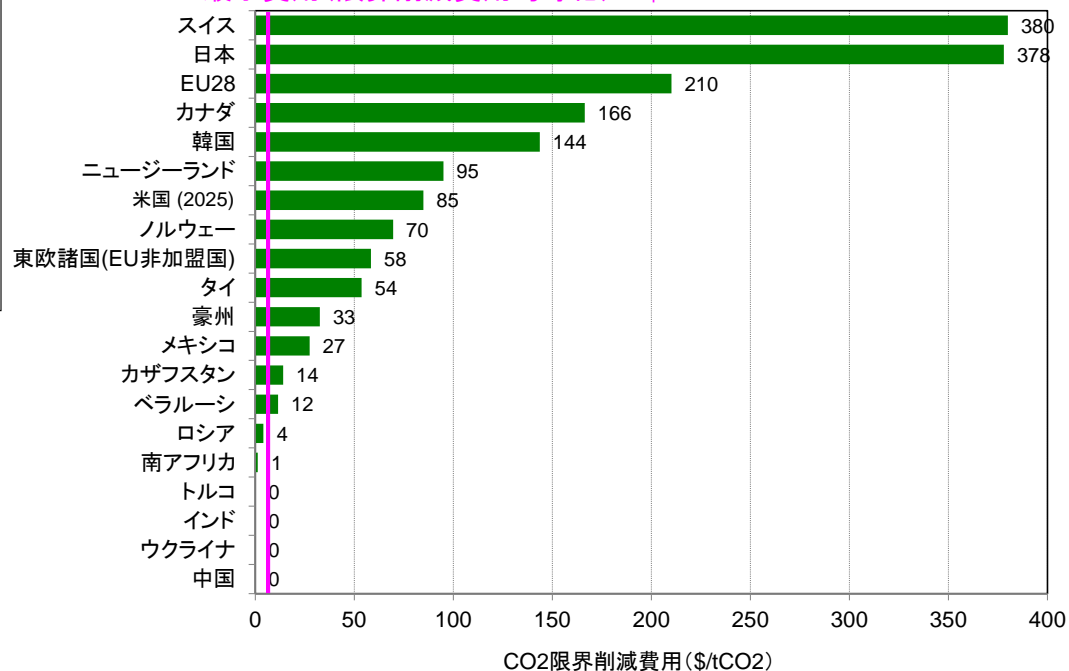
Source: J. Aldy et al., Nature Climate Change, 2016

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%

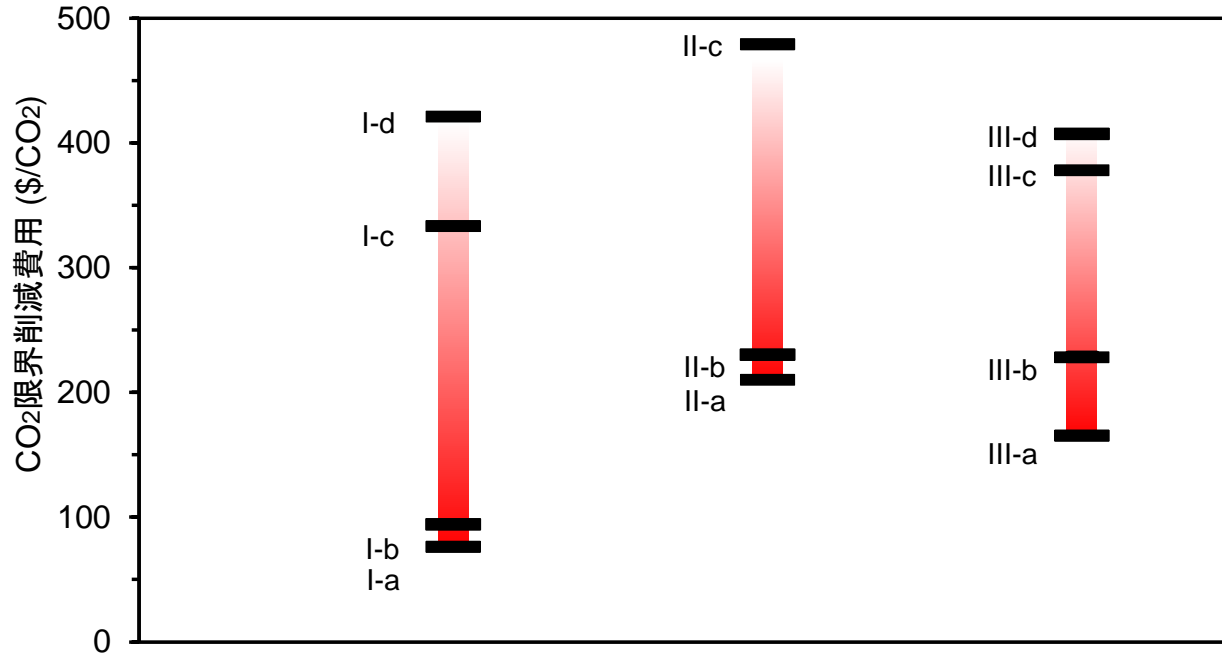
最小費用(限界削減費用均等化):6\$/tCO₂



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

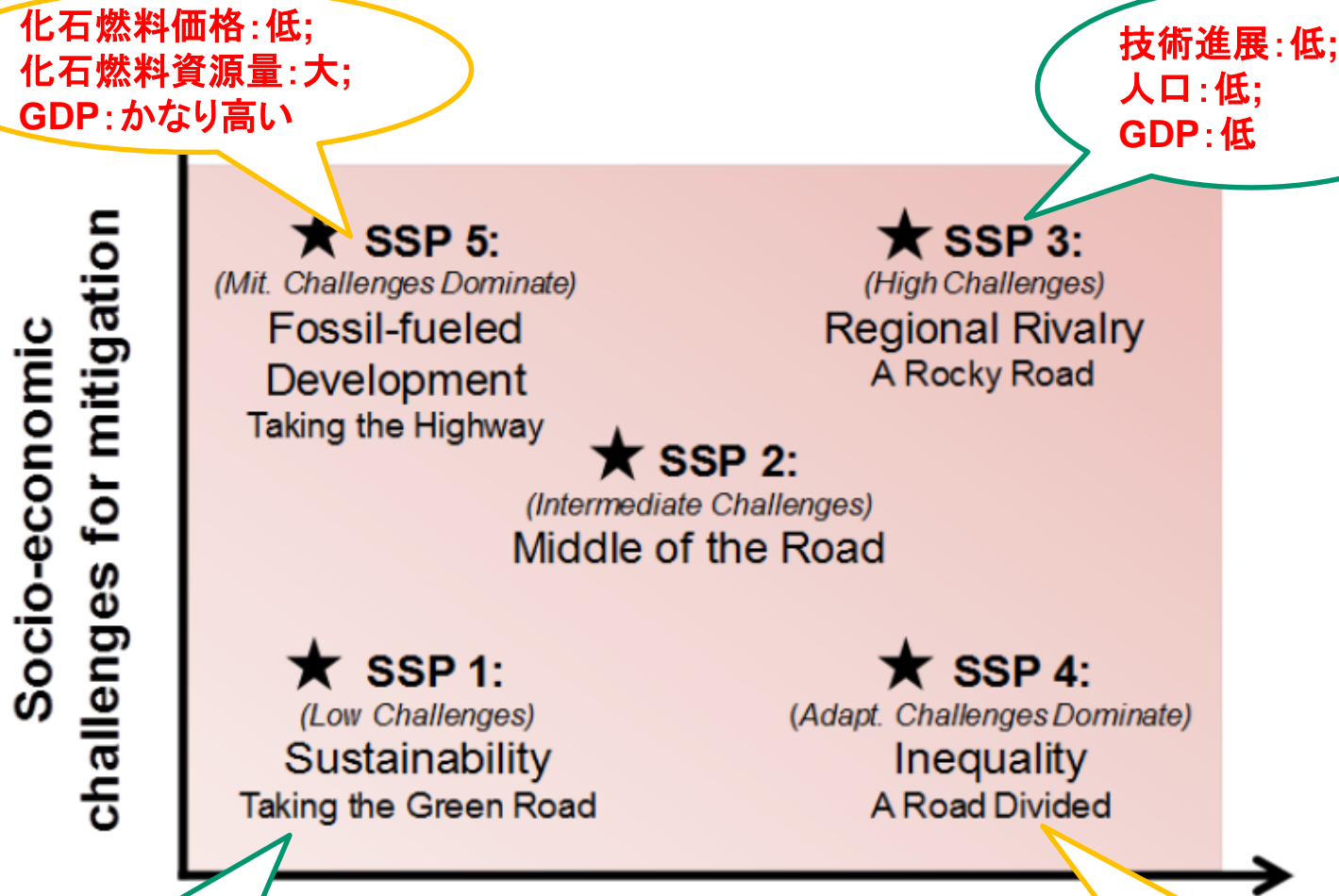
- III-a: 最小費用(ただし原子力比率は20%が上限の場合)
- III-b: 最小費用(ただし原子力比率は15%が上限の場合)
- III-c: 電源構成を含むNDC目標(原子力比率20%の場合)
- III-d: 電源構成を含むNDC目標(原子力比率15%の場合)

- 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。

3. 異なる社会経済シナリオの下での 排出削減対策



共有社会経済パス (SSPs) の概要



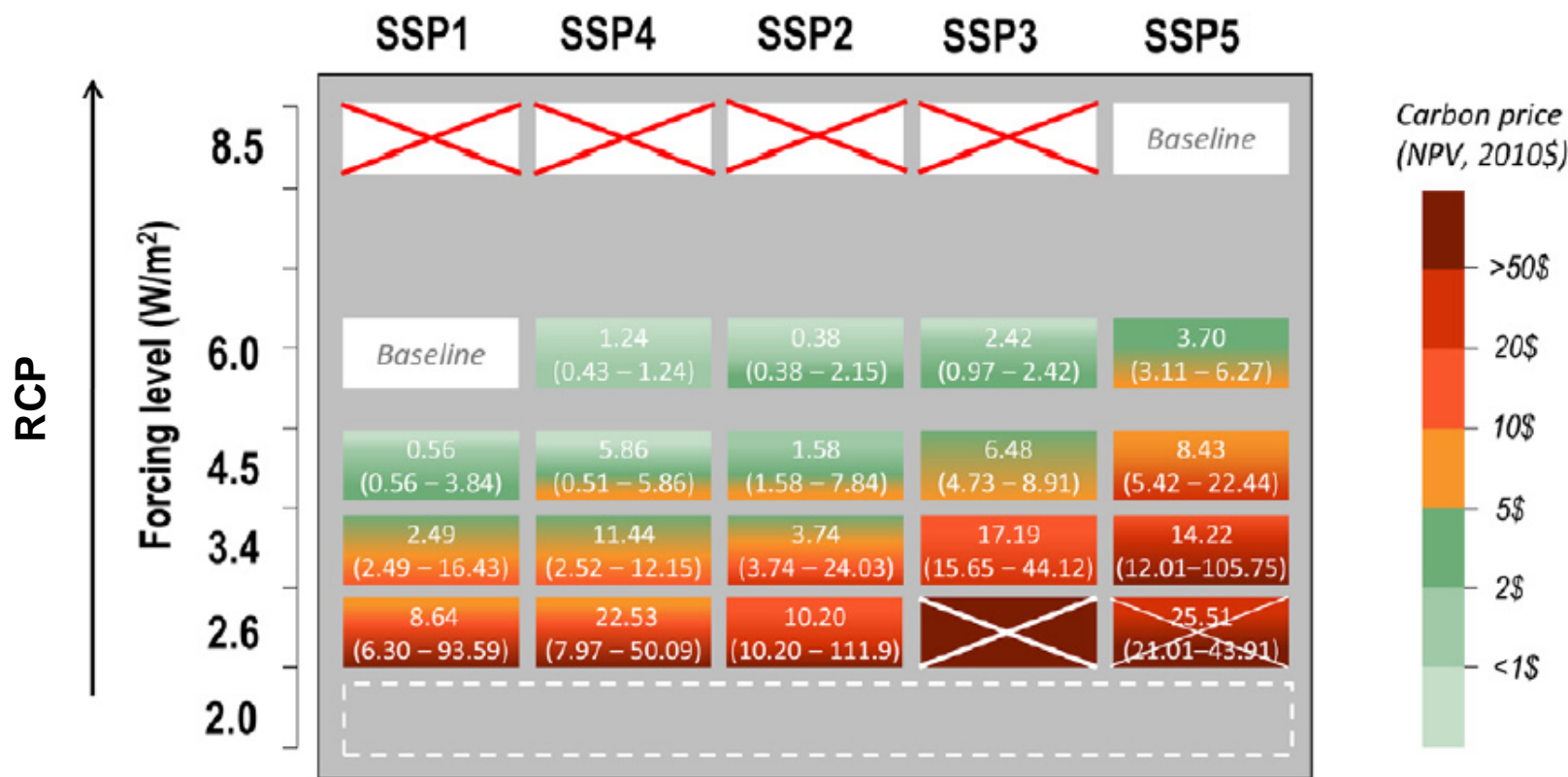
化石燃料価格: 低;
化石燃料資源量: 大;
GDP: かなり高い

技術進展: 低;
人口: 低;
GDP: 低

技術進展: 大;
大規模技術の社会的
受容性: 低;
人口: 低; GDP: 高

ガバナンス: 低;
化石燃料価格の地域間
格差: 大

SSPs: Shared Socioeconomic Pathways



注1) 2.6 W/m²は>66%で2100年に+2°C未満程度、3.4 W/m²は>50%で2100年に+2°C未満程度、4.5 W/m²は>50%で2100年に+2.5°C未満程度

注2) Carbon priceは割引率5%/yrで2010年価値換算されたもの。例えば、2010年換算された20\$/tCO₂は、2100年価格としては1800\$/tCO₂相当である。

(注は、RITEによるもの)

RCPs: Representative Concentration Pathways

温暖化対策評価モデルDNE21+の概要

(Dynamic New Earth 21+)

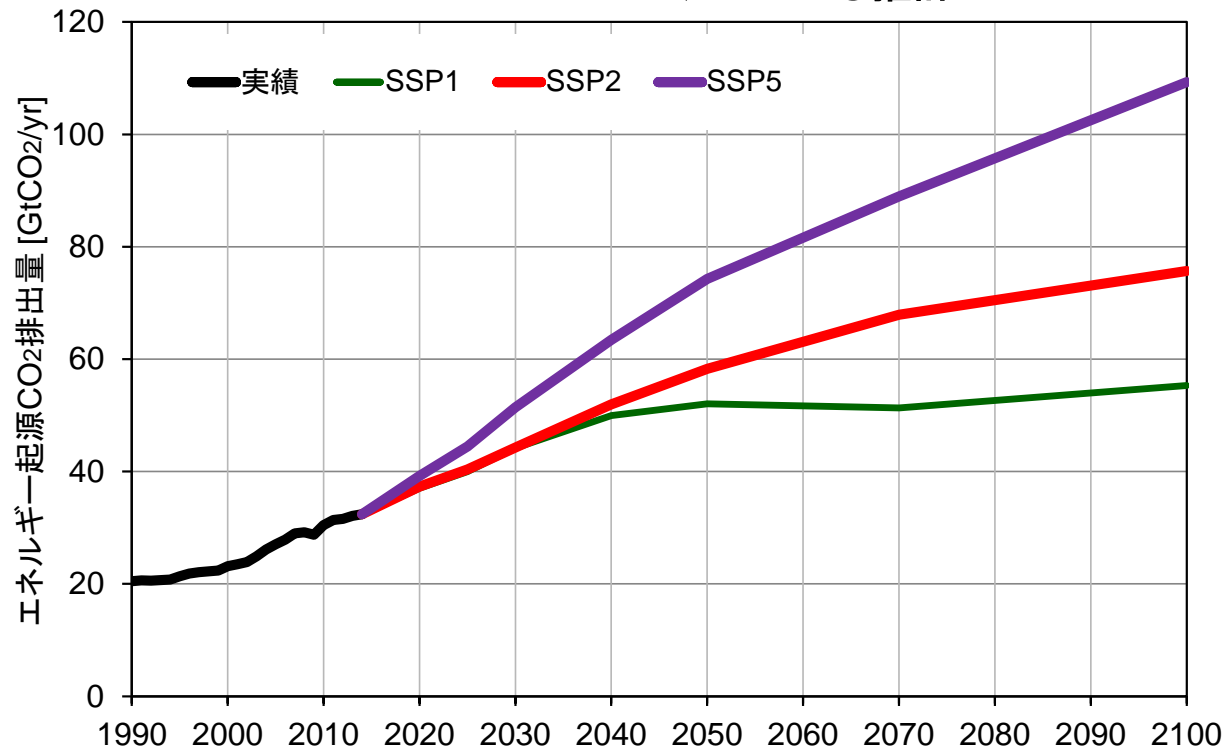
- ◆ 各種エネルギー・CO₂削減技術のシステム的なコスト評価が可能なモデル(ただしDEARSモデルのように経済全体を評価対象とはしていない)
- ◆ 線形計画モデル(エネルギーシステム総コスト最小化)
- ◆ モデル評価対象期間: 2000~2100年(代表時点: 2005, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 2100年)
- ◆ 世界地域分割: 54 地域分割(米国、中国等は1国内を更に分割。計77地域分割)
- ◆ 地域間輸送: 石炭、石油、天然ガス、電力、エタノール、水素、CO₂(ただしCO₂は国外への移動は不可を標準ケースとしている)、CO₂クレジット
- ◆ エネルギー供給(発電部門等)、CO₂回収貯留技術を、ボトムアップ的に(個別技術を積み上げて)モデル化
- ◆ エネルギー需要部門のうち、鉄鋼、セメント、紙パ、化学、アルミ、運輸、民生の一部について、ボトムアップ的にモデル化
- ◆ 300程度の技術を具体的にモデル化
- ◆ それ以外はトップダウン的モデル化(長期価格弾性値を用いて省エネ効果を推定)

地域別、部門別に技術の詳細な評価が可能。また、それらが統合的に評価可能

- ・中期目標検討委員会およびタスクフォースにおける分析・評価
 - ・国内排出量取引制度の検討における分析・評価
 - ・環境エネルギー技術革新計画における分析・評価
- はじめ、気候変動政策の主要な政府検討において活用されてきた。またIPCCシナリオ分析にも貢献

ベースラインにおける世界のCO2排出量見通し

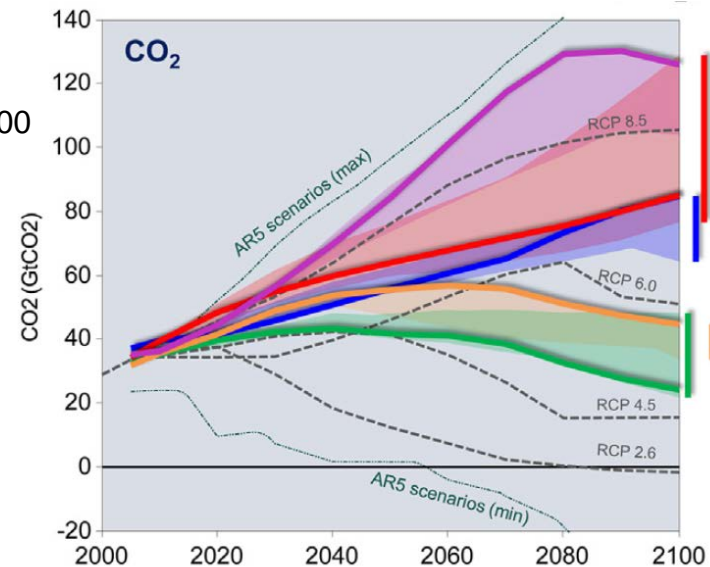
RITE DNE21+モデルによる推計



- Baseline emissions are very different depending on the future socioeconomic conditions including technology improvements.

他研究機関による推計例

K.Riahi et al., Global Environmental Change (2017)



2°C目標のためのCO₂限界削減費用（炭素価格）

SSP: “Shared Socioeconomic Pathways: 共有社会経済パス”

	SSP2 (Middle of the Road)			SSP1 (Sustainability)		
	+2°C安定化 (気候感度 2.5°C相当)	+2°C安定化 (気候感度 3.0°C相当)	450 ppm CO ₂ eq 安定化 (+2°C安定化; 気候感度3.4°C 相当)	+2°C安定化 (気候感度 2.5°C相当)	+2°C安定化 (気候感度 3.0°C相当)	450 ppm CO ₂ eq 安定化 (+2°C安定化; 気候感度 3.4°C相当)
2050	12	135	604	14	117	518
2100	408	427	457	134	140	143

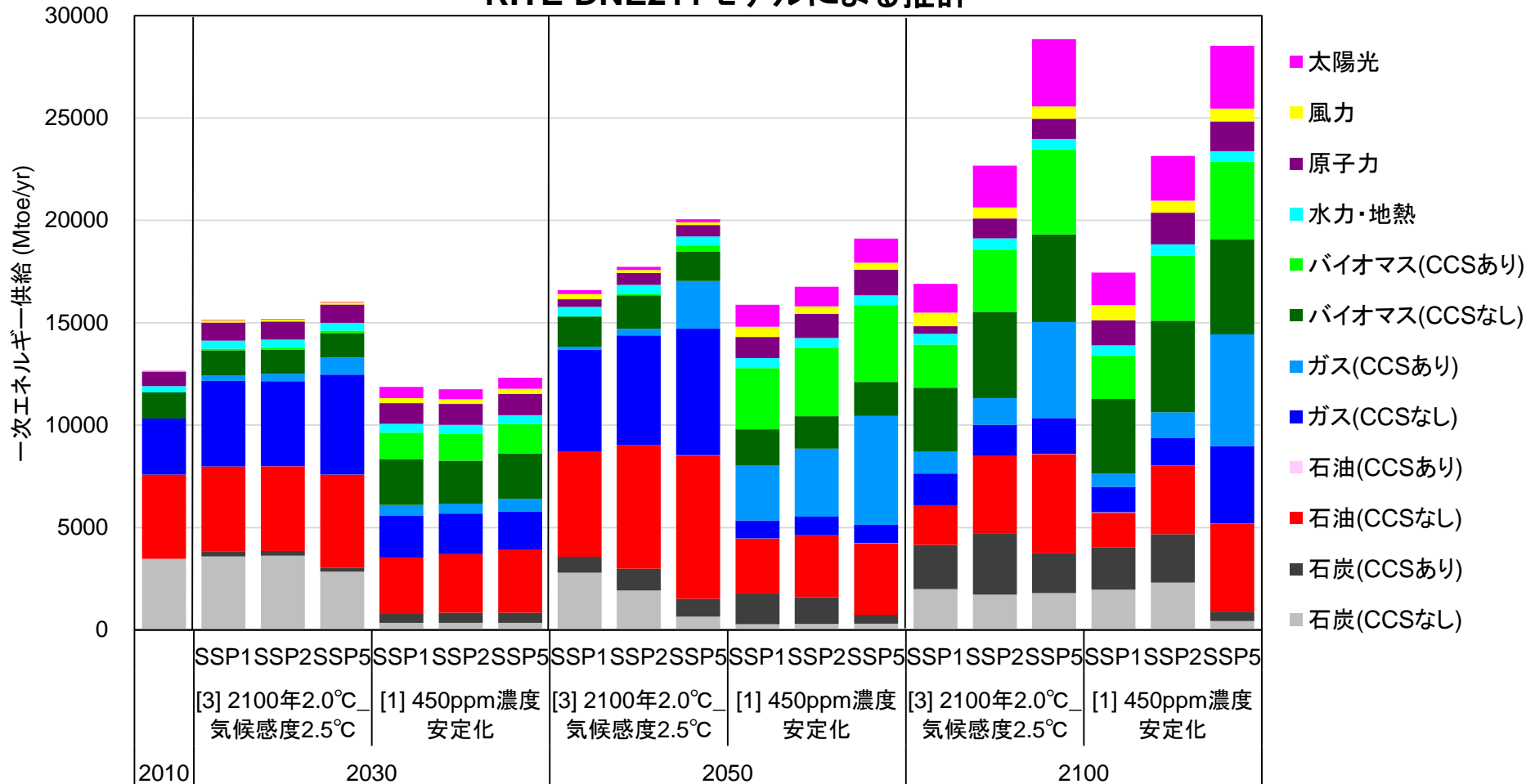
Unit: \$/tCO₂ (実質価格); 世界均一の炭素価格を想定

出典) RITE DNE21+モデルによる推計

- 気候感度が少し低い2.5°Cのケースの2050年までを除けば、世界全体の費用最小化(世界均一の炭素価格)を想定したとしても、2°C目標実現のための限界削減費用は相当高いと推計される。
- ただし、最終エネルギー消費が小さいシナリオであるSSP1(持続可能な発展シナリオ)の下での限界削減費用は、SSP2よりも相当小さくなる可能性はある。
- 気候変動対応以外の他の持続可能な発展目標(SDGs)と調和させながら、技術と社会の広範なるイノベーションを引き起こしていくことが、2°C目標達成のためには不可欠である。(例えば、現時点においてモデルでは十分考慮することが難しい、AIやIoTなどを利用した、新たに出現してくる可能性がある革新的な技術は、社会の大きな変化をもたらす可能性は秘めている。)

世界一次エネルギー供給量

RITE DNE21+モデルによる推計

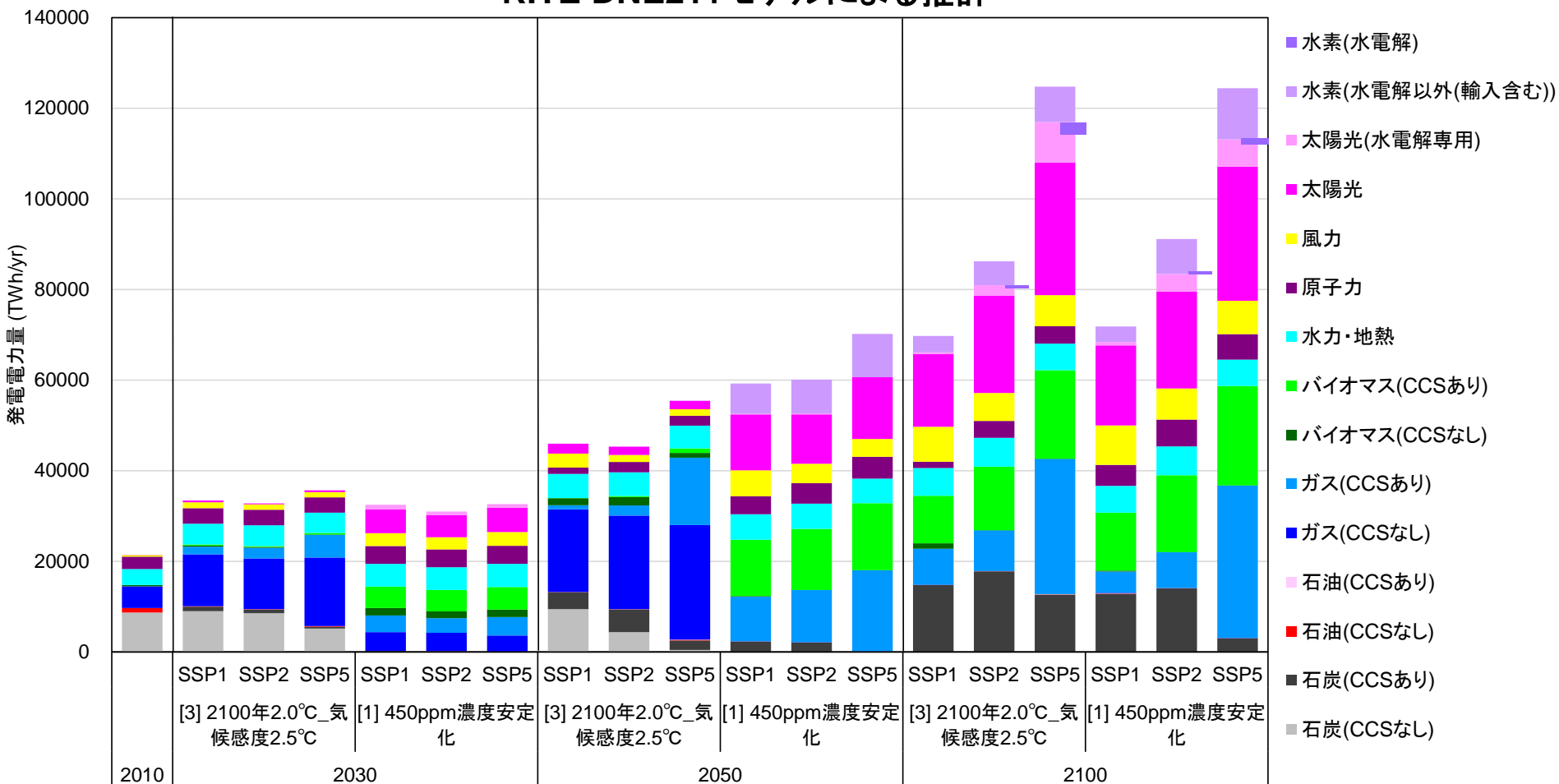


[2] 2.0°C安定化_気候感度3.0°Cは掲載していない。なお、本分析では原子力の拡大に上限制約を設けており、一部のシナリオでは上限に張り付いている。

- 2050年の一次エネルギー供給は、社会経済シナリオSSP、気候感度の違いによって、大きく異なる。
- SSP1シナリオにおける総一次エネルギー供給量は、SSP2やSSP5よりも相当小さい。

世界発電電力量

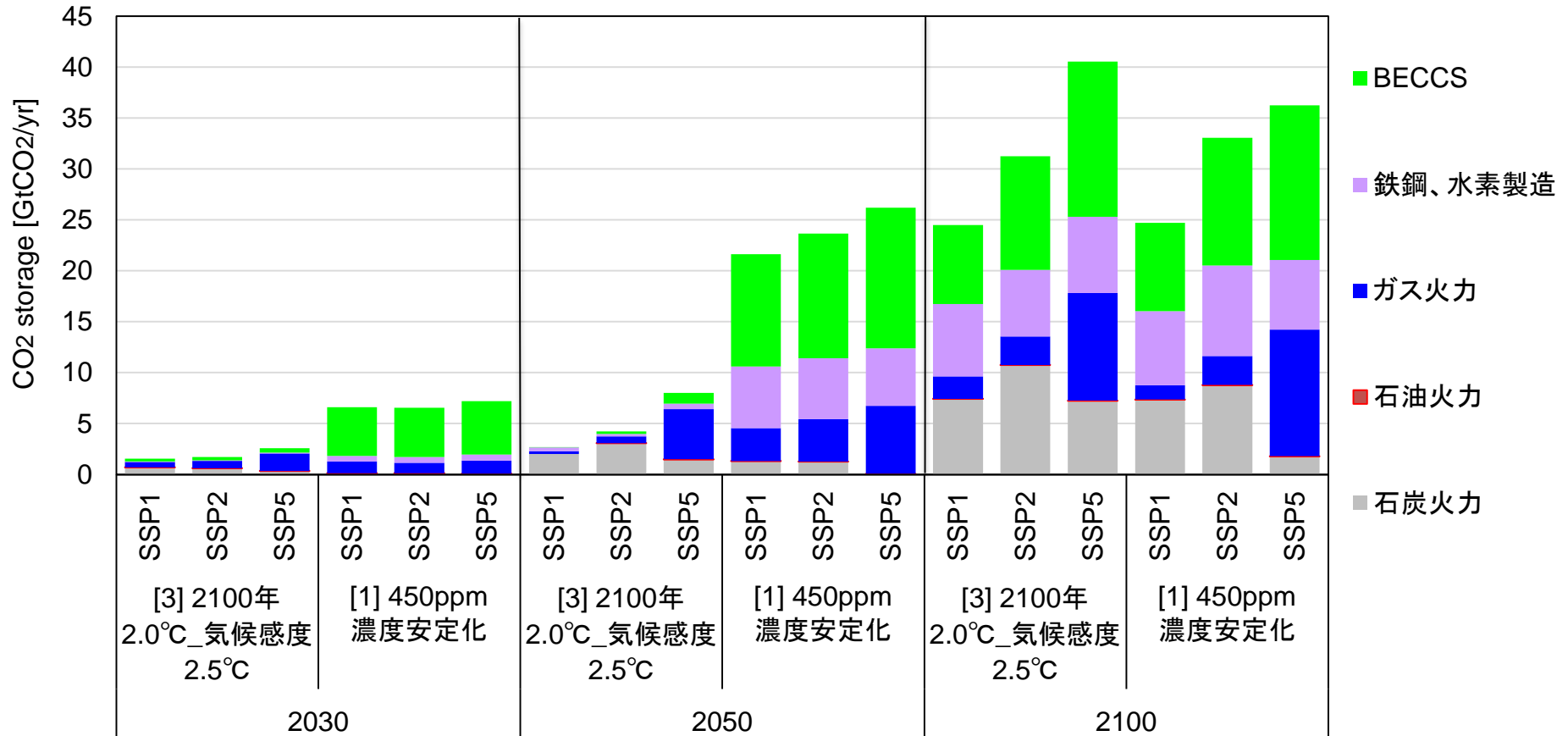
RITE DNE21+モデルによる推計



- 2050年頃までは、2°C目標シナリオであっても、世界の化石燃料発電電力量の増大(天然ガスの増大)が見られる。
- 2100年には、いずれの2°Cシナリオでも相当量のBECCSが必要となり、発電部門ではネガティブ排出(BECCSの現実性については議論の余地大)。

世界二酸化炭素回収・貯留量 (CCS)

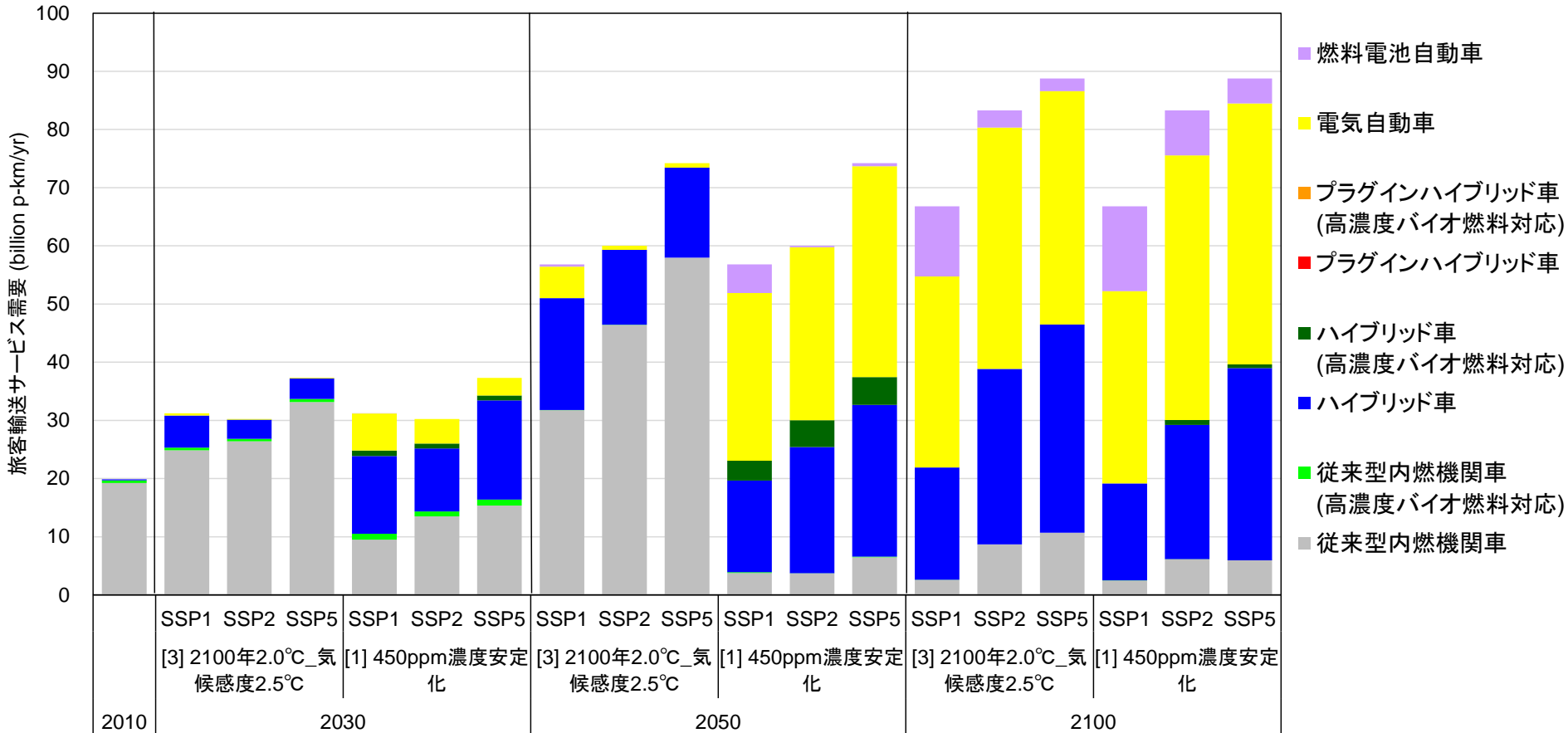
RITE DNE21+モデルによる推計



- 2050年のCCS利用量は、社会経済シナリオSSP、気候感度の違いによって、大きく異なる。
- 2100年ではBECCSも含めて相当量のCCSが、2°C目標達成のためには必要な分析結果

世界自動車輸送量

RITE DNE21+モデルによる推計

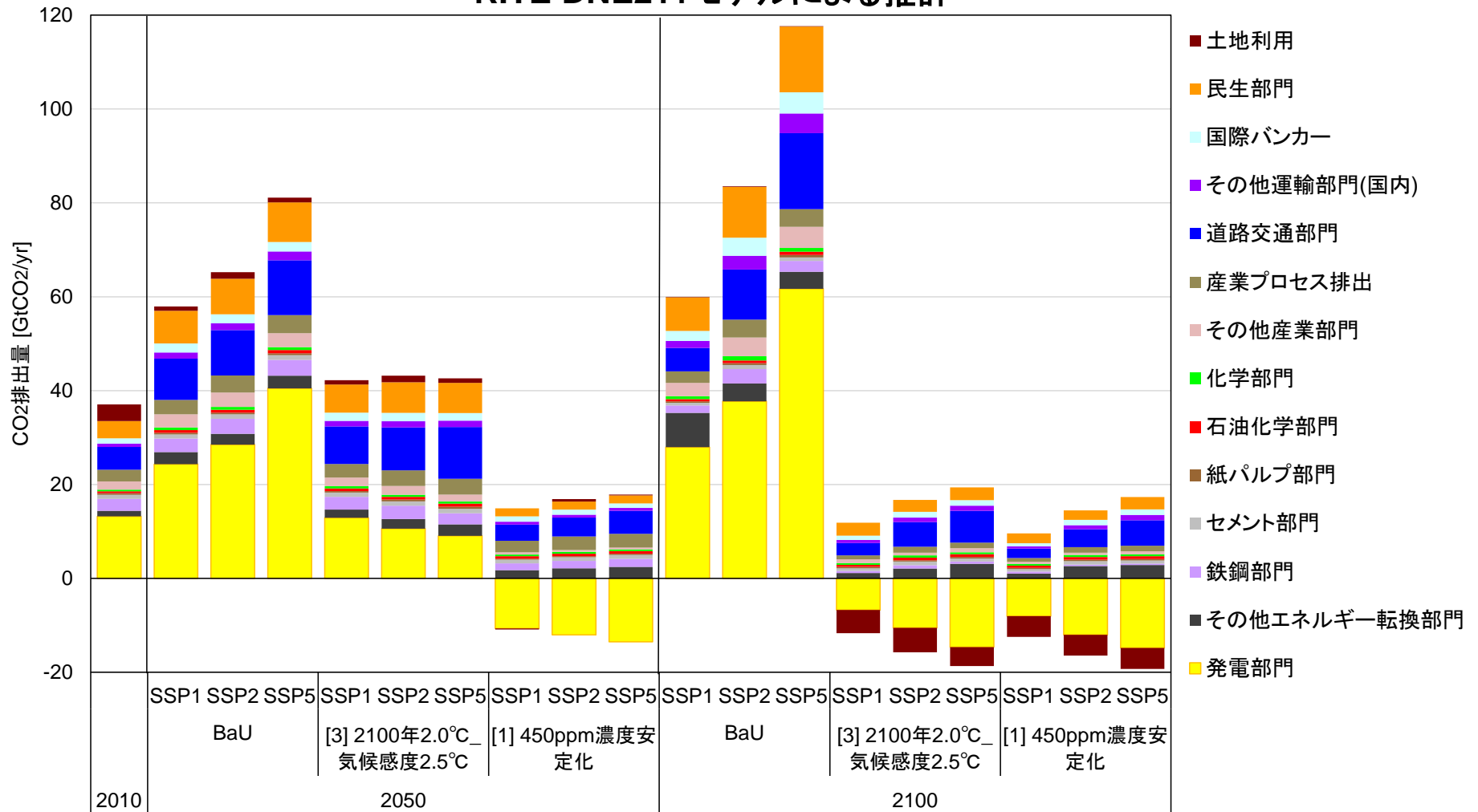


- 2050年における自動車技術は、社会経済シナリオと気候感度の不確実性(それに伴う必要排出削減量)によって大きく異なる。

- 2100年では、いずれの2°C目標シナリオにおいても、電気自動車(EV)、燃料電池自動車(FCV)が、ハイブリッド車とともに、相当大きなシェアを占めるという分析結果

世界の部門別CO₂排出量

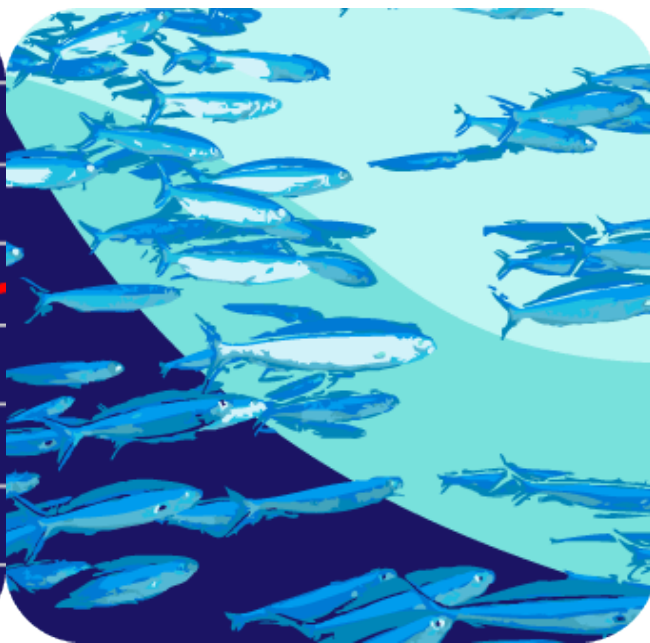
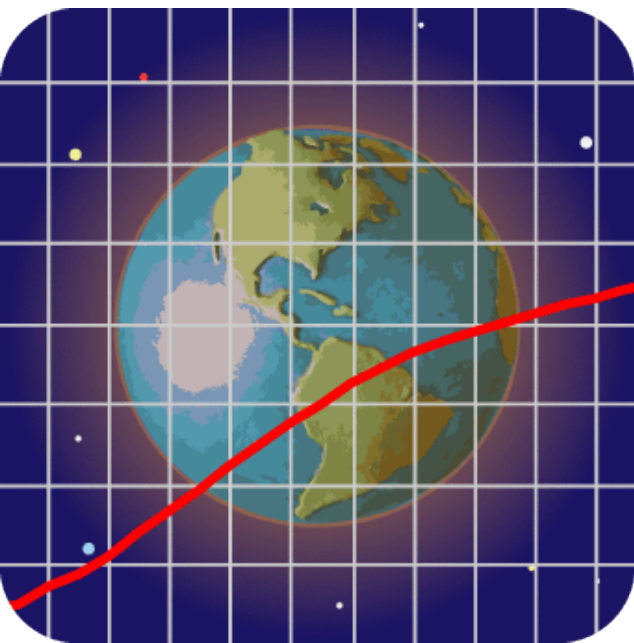
RITE DNE21+モデルによる推計



- 2°C目標において2100年のゼロCO₂排出のためには、年間10~20 GtCO₂程度の正の排出を許容し、その分、発電部門におけるBECCSや大規模植林で正味負の排出が求められる結果となっている。

- CO₂ゼロエミッションをより小さいBECCS依存で実現するには、SSP1を更に超えるような低需要な社会を実現するなどの技術革新が必要

4. 気候変動緩和と他の持続可能な発展 目標のコベネフィットとトレードオフ



より高位の大目的である持続可能発展と 調和した気候変動対応

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

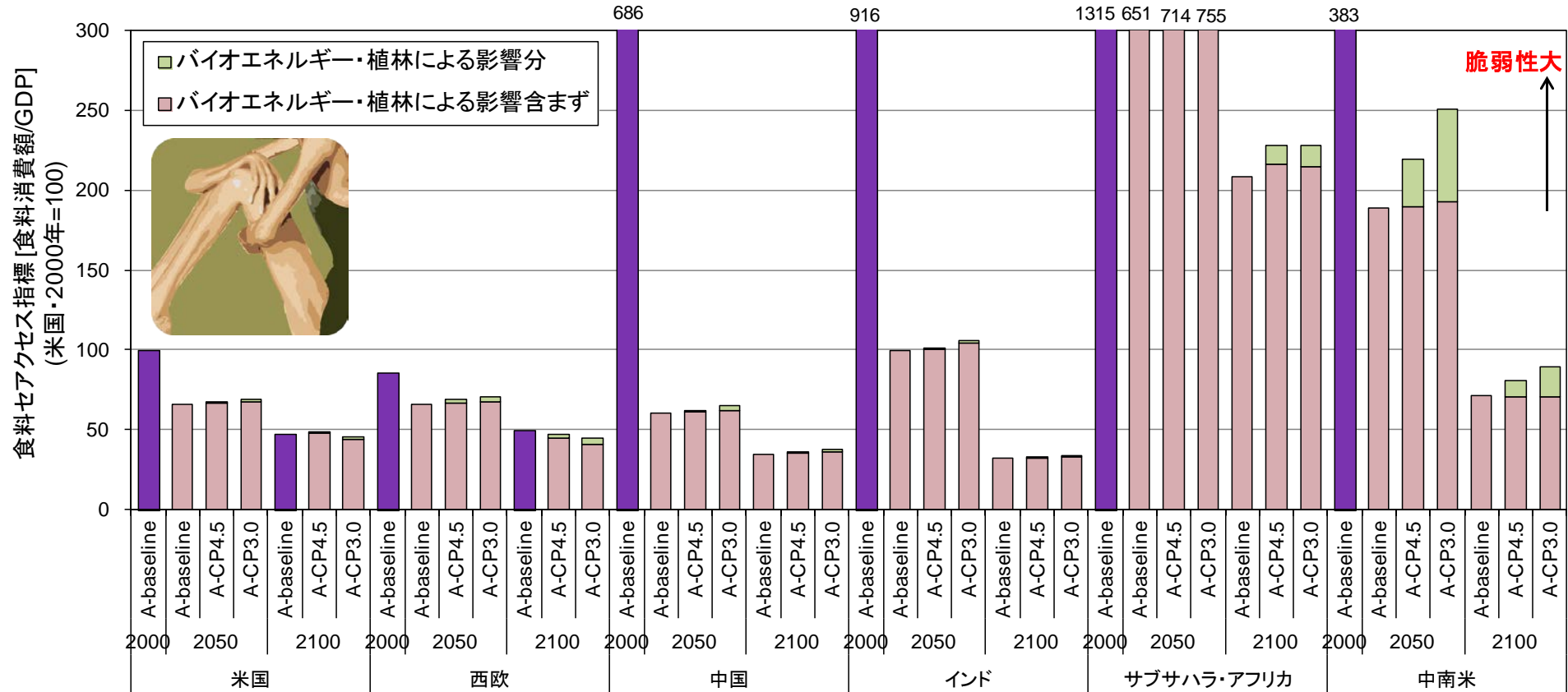
17 GOALS TO TRANSFORM OUR WORLD



社会には多くの解決すべき課題を有している。長期の大幅排出削減は、SDGsとの調和の中で達成されなければならない。逆にSDGsと調和しない排出削減策は、現実社会での実現は大変困難でもある。

温暖化緩和と食料アクセス(1/2)

食料アクセス指標(食料消費額/GDP)



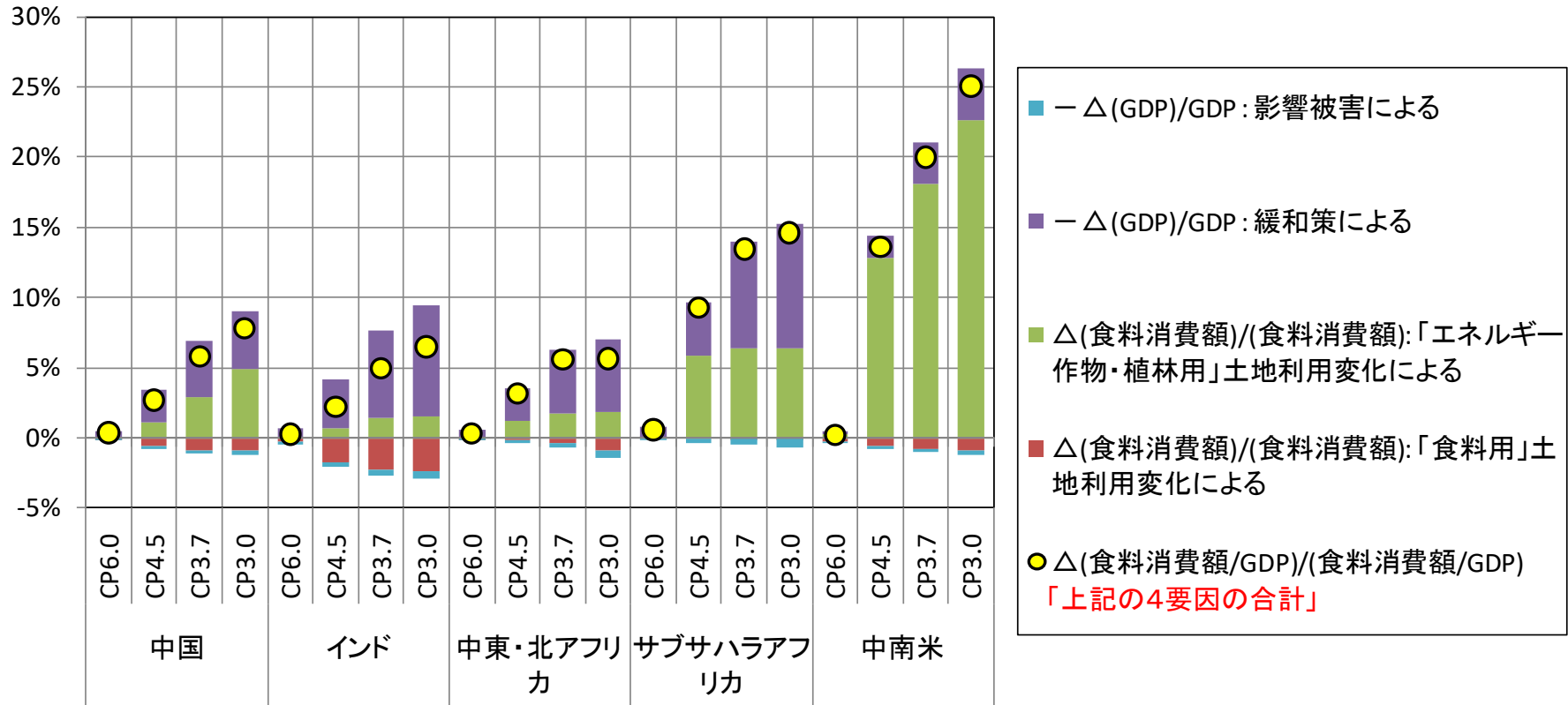
Source) K. Akimoto et al., Natural Resources Forum, 36(4), 231-244, 2012

- 長期的には、食料価格上昇や食料消費量の増加よりも、経済成長(GDP)は十分に大きいため、どの地域においても食料アクセスの脆弱性は小さくなる。
- 排出削減が厳しいケースでは、大規模な植林、バイオエネルギー利用が必要になり、むしろ食料セキュリティが脆弱になる可能性あり。

温暖化緩和と食料アクセス(2/2)

2050年の食料アクセス指標(食料消費額/GDP)の要因分解

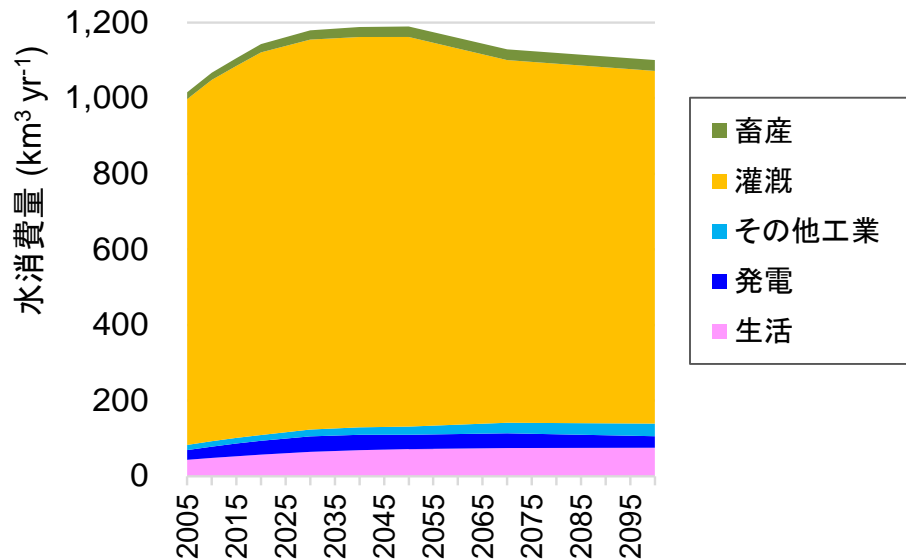
2050年の食料アクセス指標の変化率
(%,ベースライン比)



- 温暖化影響が食料アクセスの脆弱性に与える影響は比較的小さい。
- 排出削減が厳しいケースでは、大規模な植林、バイオエネルギー利用が必要になり、むしろ食料アクセスが脆弱になる可能性あり。
- 排出削減が厳しいケースでは緩和費用が大きくなり、それによって食料アクセスが悪化する可能性もあり。

温暖化緩和と水アクセス(1/2)

気候変動無(温暖化対策無し)ケース における部門別の水消費見通し

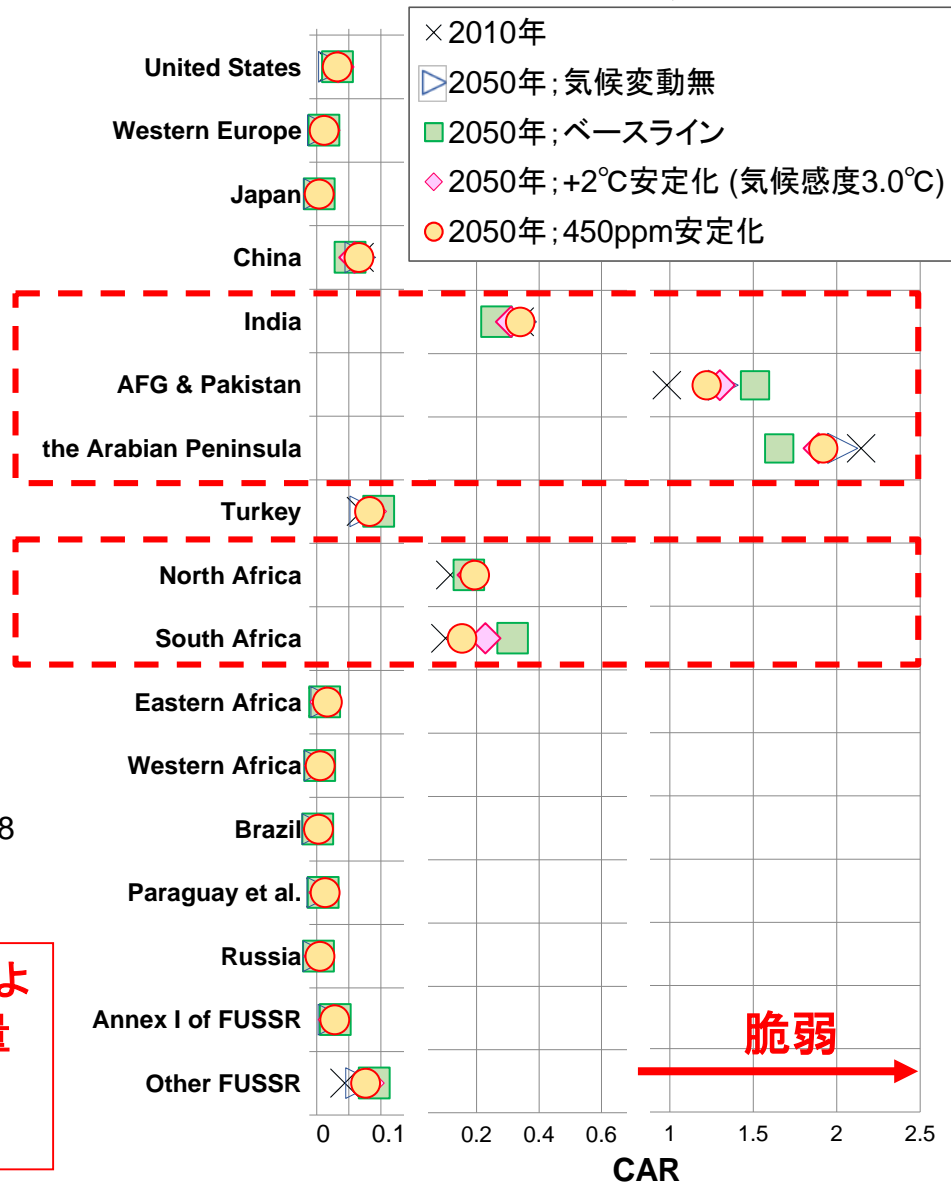


主要な水消費は灌漑

出典) A. Hayashi et al., Mitig Adapt Strateg Glob Change, 2018

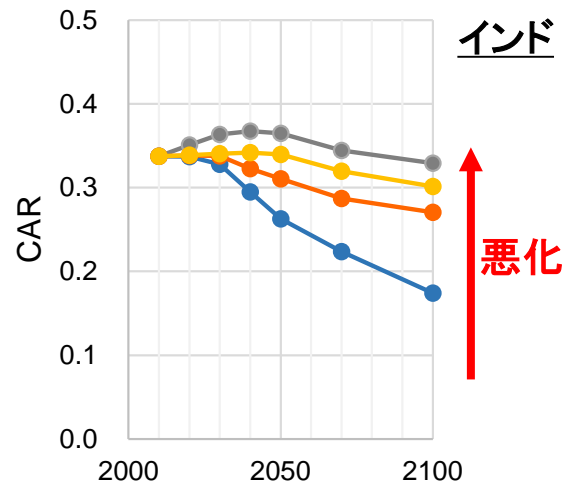
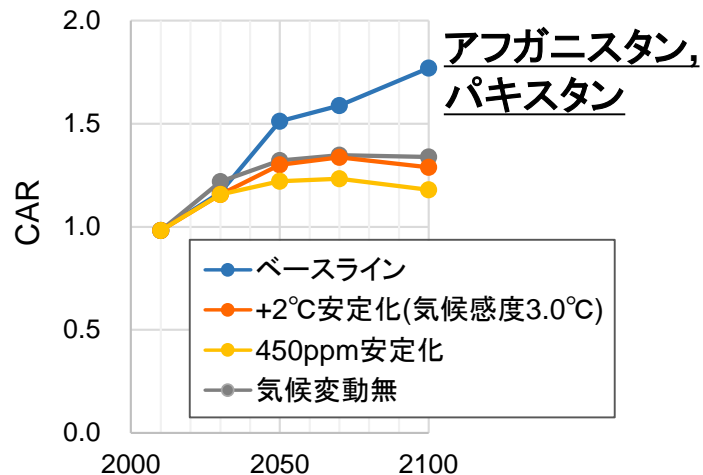
- いくつかの地域を除けば、全体として気候変動および緩和策に伴う淡水利用可能量に対する水消費量の比率(Consumption-to-availability ratio: CAR)に大きな変化はない。

淡水利用可能量に対する水消費量の比率



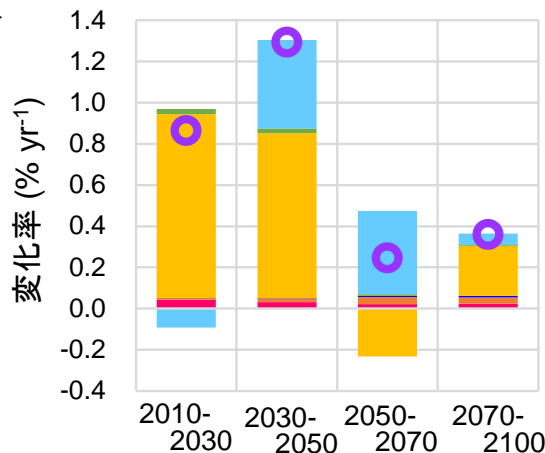
温暖化緩和と水アクセス(2/2)

淡水利用可能量に対する水消費の比率(CAR)の時間変化

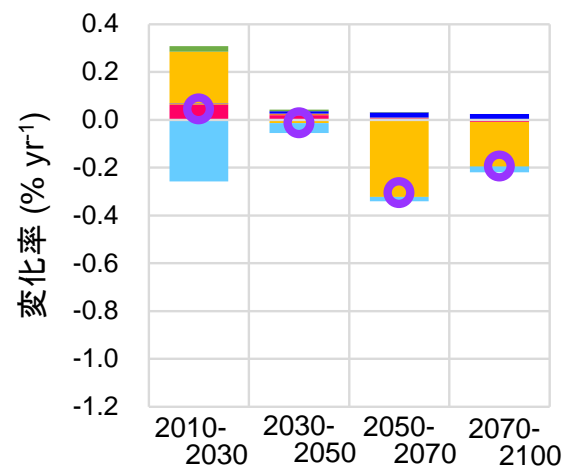
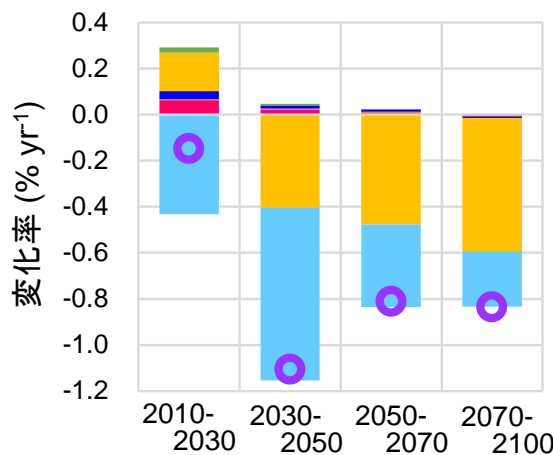
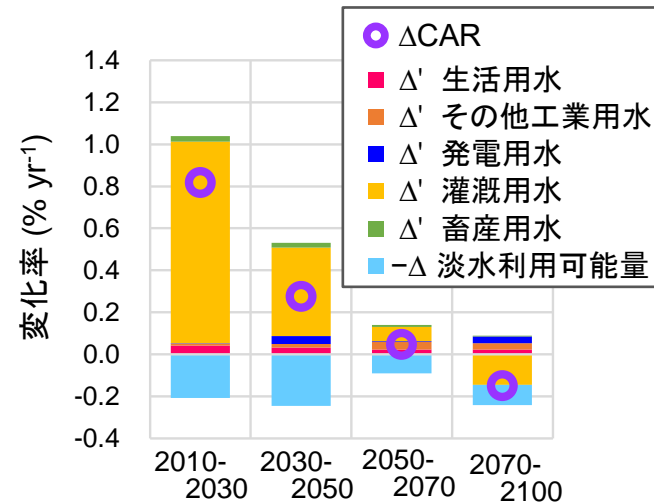


要因別のCAR変化率

ベースライン



450 ppm 濃度安定化ケース



Source) A. Hayashi et al., Mitig Adapt Strateg Glob Change, 2018

ベースラインケースで悪化するCARが緩和ケースでは改善する地域も見受けられる一方、逆の地域もある。なお、大幅な排出削減におけるBECCS等がCAR悪化に寄与する地域もあるが、灌漑水や淡水利用可能量変化の寄与度に比べると小さい。

5. イノベーションと排出削減



超スマート社会における低エネルギー需要・高サービスの実現に向けて

超スマート社会とは、
「必要なもの・サービスを、必要な人に、
必要な時に、必要なだけ提供し、社会
の様々なニーズにきめ細かに対応でき、
あらゆる人が質の高いサービスを受け
られ、年齢、性別、地域、言語といった
様々な違いを乗り越え、生き活きと快
適に暮らすことのできる社会」であり、
人々に豊かさをもたらすことが期待される



出典) 現代ビジネス "http://gendai.ismedia.jp/articles/-/50859"



- エネルギーは近代社会の基盤であり必要不可欠なもの。しかし、コモディティ商品であり(コストが重要)、それそのもので価値を高めていくことは難しい(発電のエネルギー効率向上、コスト低減の技術開発は重要ではあるが)。よって、他のサービスとの融合を志向し、新たな高付加価値なサービスの提供を目指すことは重要
- この進展が仮に成功すれば、大きなエネルギー需要の低下も期待できるかもしれない。しかし、それは現時点では約束された将来ではなく、現時点では多くのオプションを有しておくべき

AI + IoT + big data +

例えば自家用車の稼働率は4%といった水準であり、自動運転によりカーシェアリング、ライドシェアリングが進めば、エネルギー消費の大幅な低下、CO2排出量の大幅な低下も期待できる。ただし、リバウンド効果もあるため、期待し過ぎることも避けるべき

AI、IoT等の技術進歩がエネルギー需要に与えるインパクトから見たSSPs

RITEによる整理例

- AI
 - IoT
 - ICT
 - ビッグデータ
 - 自動運転車
 - AIロボット
- 等の技術の広範な進展

生活・社会面へ
の影響

産業・雇用面へ
の影響

シェアリング・エコノミー
テレワーキング
E-commerce, Net shopping
自動配達
等の大幅な進展

モノの需要、エネルギーの需要が減少
旅客減少、一方、貨物は上昇か？

SSP1

モノの需要、エネルギーの需要が増加

SSP5

産業の生産性向上
がモノやエネルギー
の需要減少をもたら
すか？

Y

N

ほとんどすべての産業で
生産性が向上
ヒトの作業・仕事を機械
がとってかわる

所得再分配・ワークシェア
リング等がうまく機能？

Y

N

余暇時間が拡大
豊かな社会

SSP1

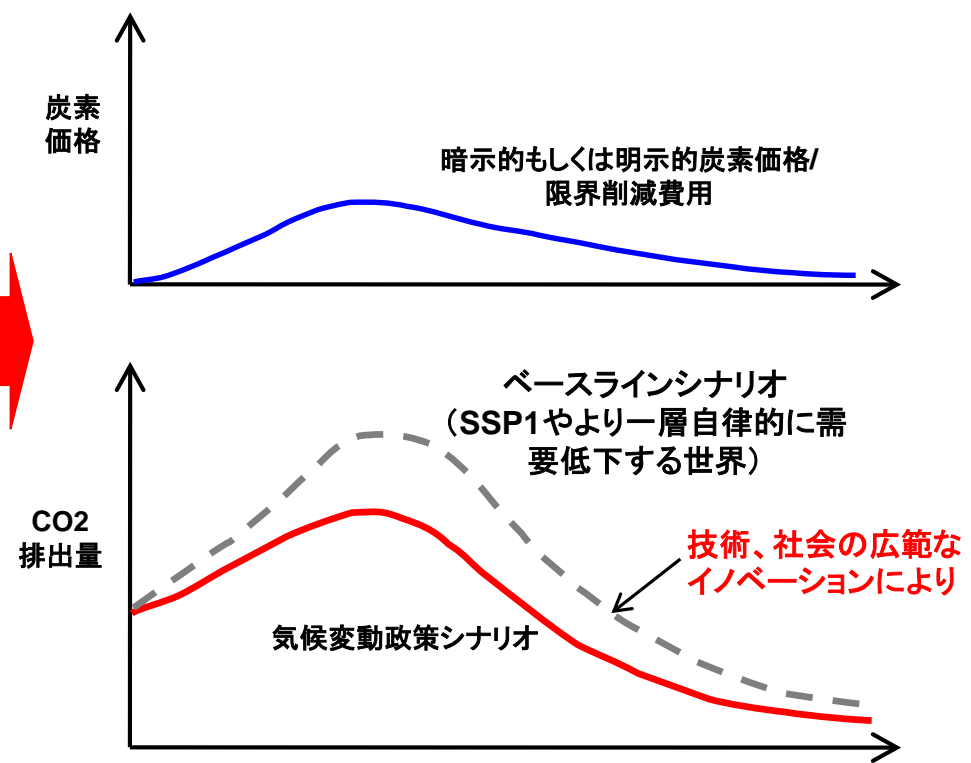
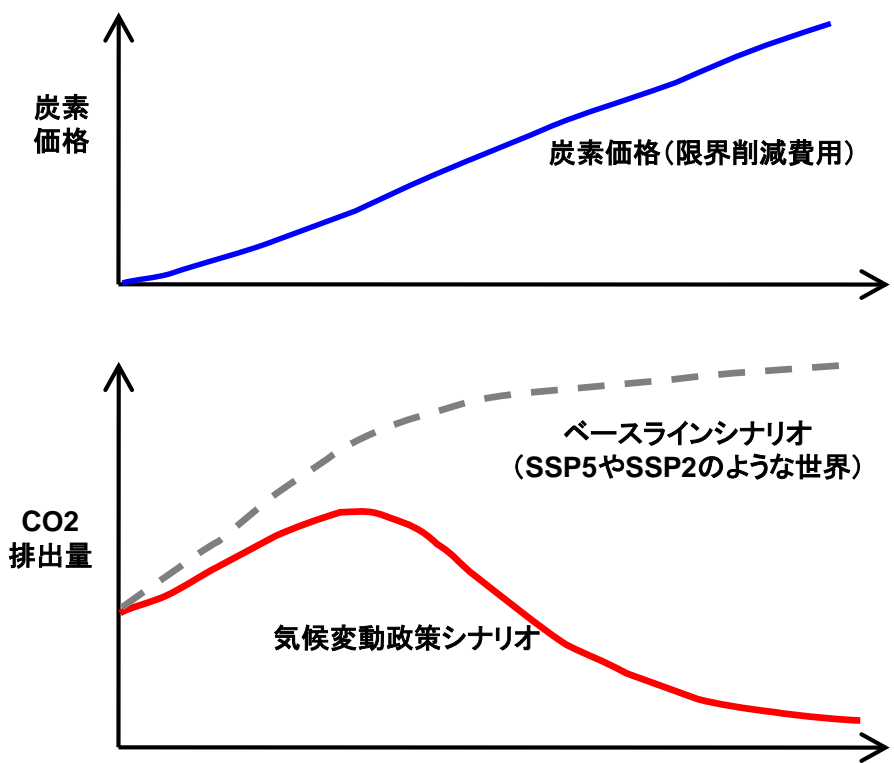
失業増大
格差拡大

SSP4

モデルによって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、実質価格で100\$/tCO₂を超えるような高い明示的な炭素価格をつけるようなことは非現実的。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。

6. まとめ



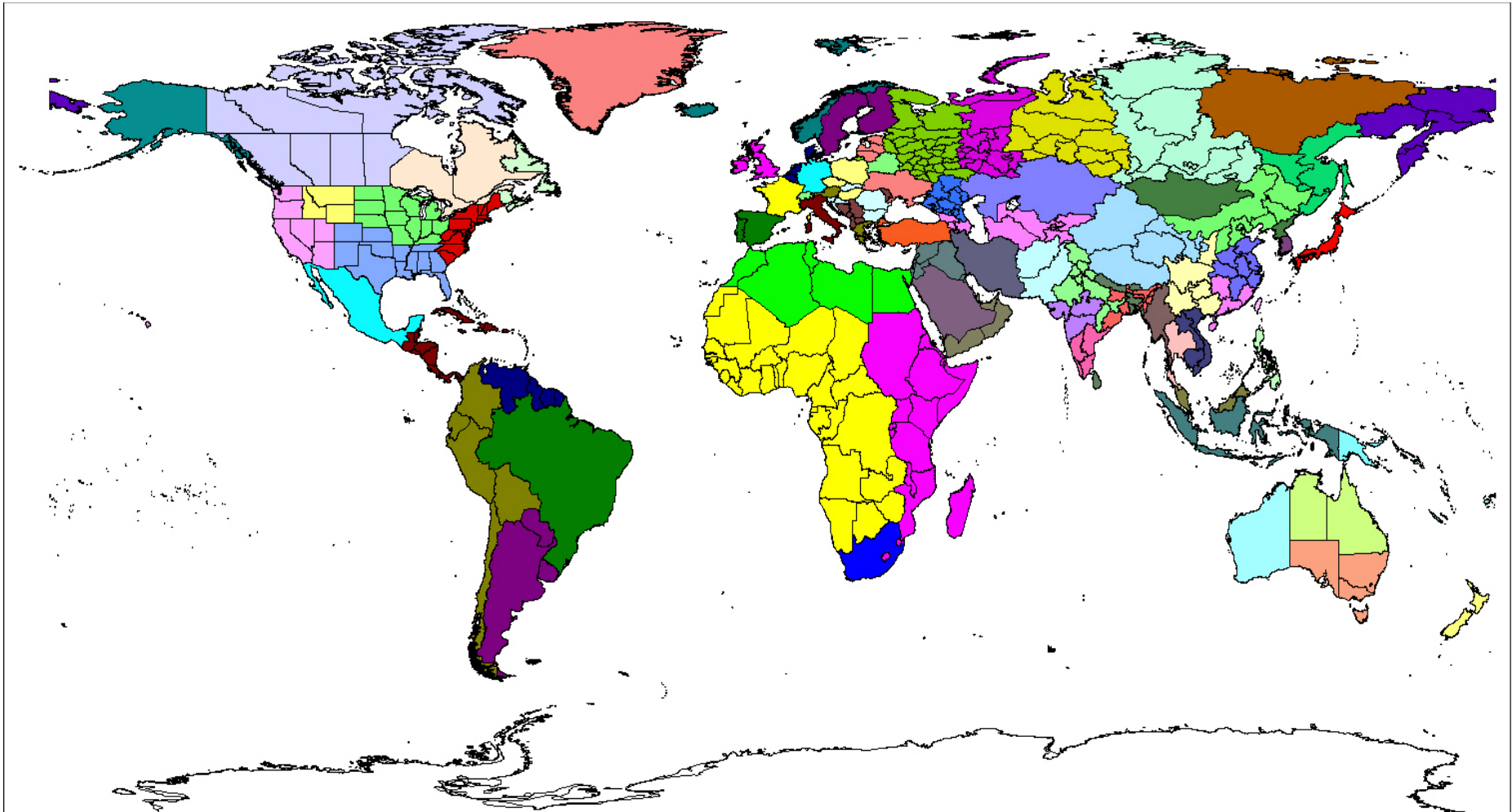
- ◆ 気温安定化のために、長期では正味CO₂排出量をほぼゼロにする必要あり
- ◆ しかし、様々な不確実性が存在しており、それら不確実性を認識し、総合的な視点をもって、より良いリスクマネージメントを行うべき
- ◆ 緩和費用の上昇要因は多くある（政治的要因（国際的なMAC均等化は実際には困難。トランプ政権など）、技術普及の社会的制約、非効率な政策等）
- ◆ 緩和費用の低下要因（現時点では考慮不可能なイノベーション）
- ◆ 様々な持続可能な発展目標とのコベネフィットの可能性があり追求すべき。ただしトレードオフとなるケースも多い。資源は限られており、総合的なリスク管理が必要。
- ◆ ゼロ排出実現のためにもイノベーションは不可欠。その中でも、IT, AI等に誘発された需要サイドの大きな変化は、エネルギー消費の低減とCO₂排出の大幅削減に大きな期待あり。ただし、現時点ではリバウンド効果も含め、不確実性は大きい。
- ◆ 逆説的に言えば、ゼロ排出のような大幅排出削減には、高い炭素価格が必要な世界で実現が困難であり、低い炭素価格の世界が実現したときに初めて、そのようなゼロ排出のような大幅排出削減が実現すると考えられる。

おわりに —本日のシンポジウムの要点—

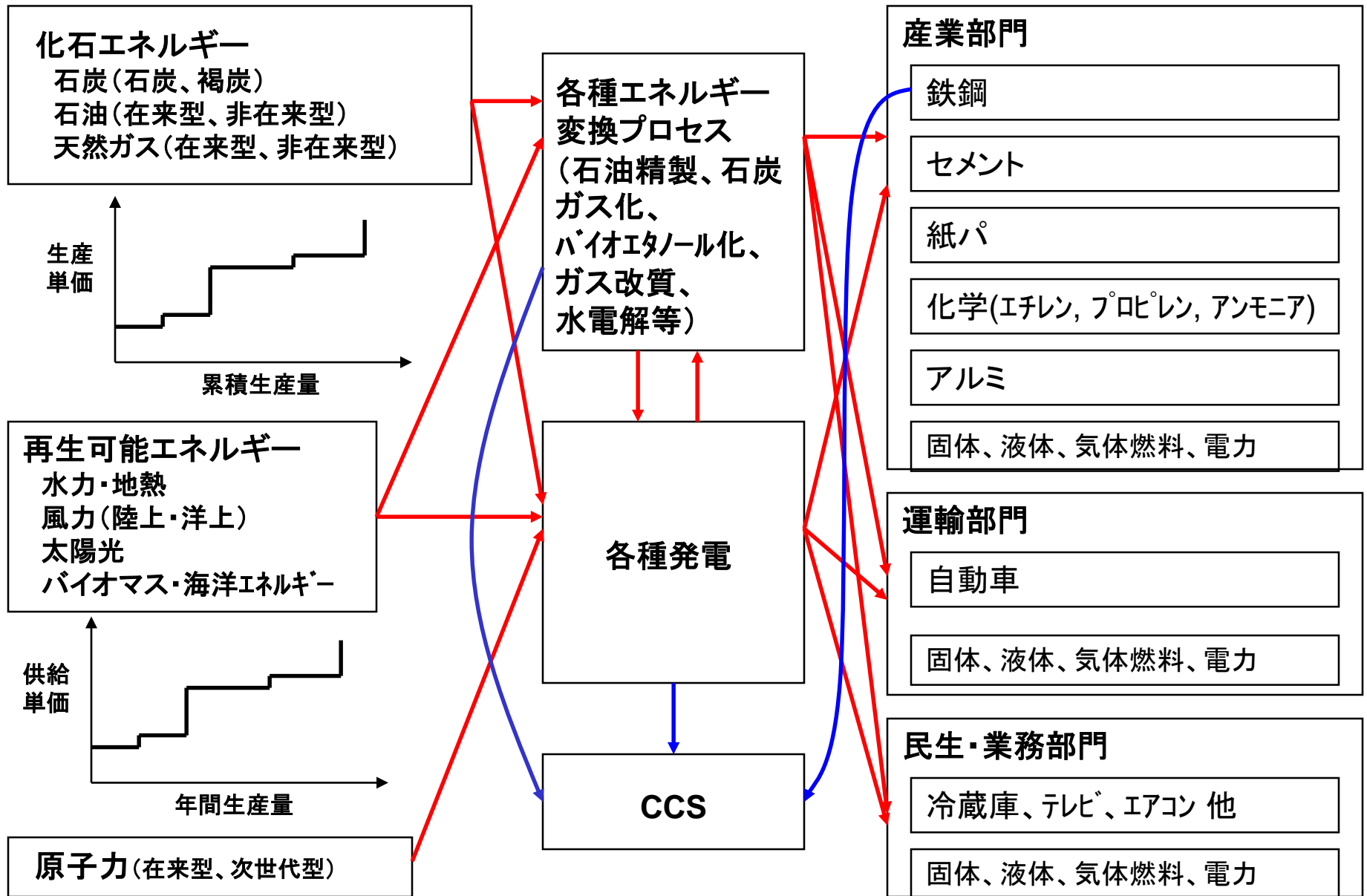
- ◆ 長期では正味CO2排出量をほぼゼロにする必要性（茅, Geden, 江守, 秋元）
- ◆ 近年、再エネ（主に太陽光）のコスト低減は大きく進展（Naki）。導入拡大（Cozzi）
- ◆ しかし、現状は甘くはなく、議論されている目標とのギャップが大変大きい。将来シナリオはそれに比して楽観的すぎる可能性。課題を正しく認識すべき（Pielke, Geden）
- ◆ 現実の緩和コストは、理想的なコストよりも相当高い可能性（秋元）
- ◆ 様々な不確実性が存在しており、それら不確実性を認識し、総合的な視点をもったリスクマネジメントが重要（江守, 秋元）
- ◆ 気温目標のみならず、何をやるべきかがわかるような行動オリエンティッドな目標が必要。正味ゼロエミッション目標は良い目標（Geden, 江守）
- ◆ 社会で受容される緩和コストに一定限の水準がありそう。それも踏まえるとBECCSの大幅導入シナリオの現実性への疑問も（Pielke, 秋元）
- ◆ 投資の問題（電力自由化の下での温暖化対策投資の困難さ）（Da Costa）
- ◆ 再エネ大幅導入に伴う電源の柔軟性欠如とその帰結の課題（Da Costa）
- ◆ 技術革新なくして大幅排出削減無し（Naki, Cozzi, Pielke, 江守, 秋元 他）
- ◆ 不確実性が大きいものの、技術革新による大幅排出削減の可能性、機会は存在している。（Naki, Cozzi, 秋元 他）
- ◆ SDGsとの調和が重要（Naki, Cozzi, 秋元）。

付録

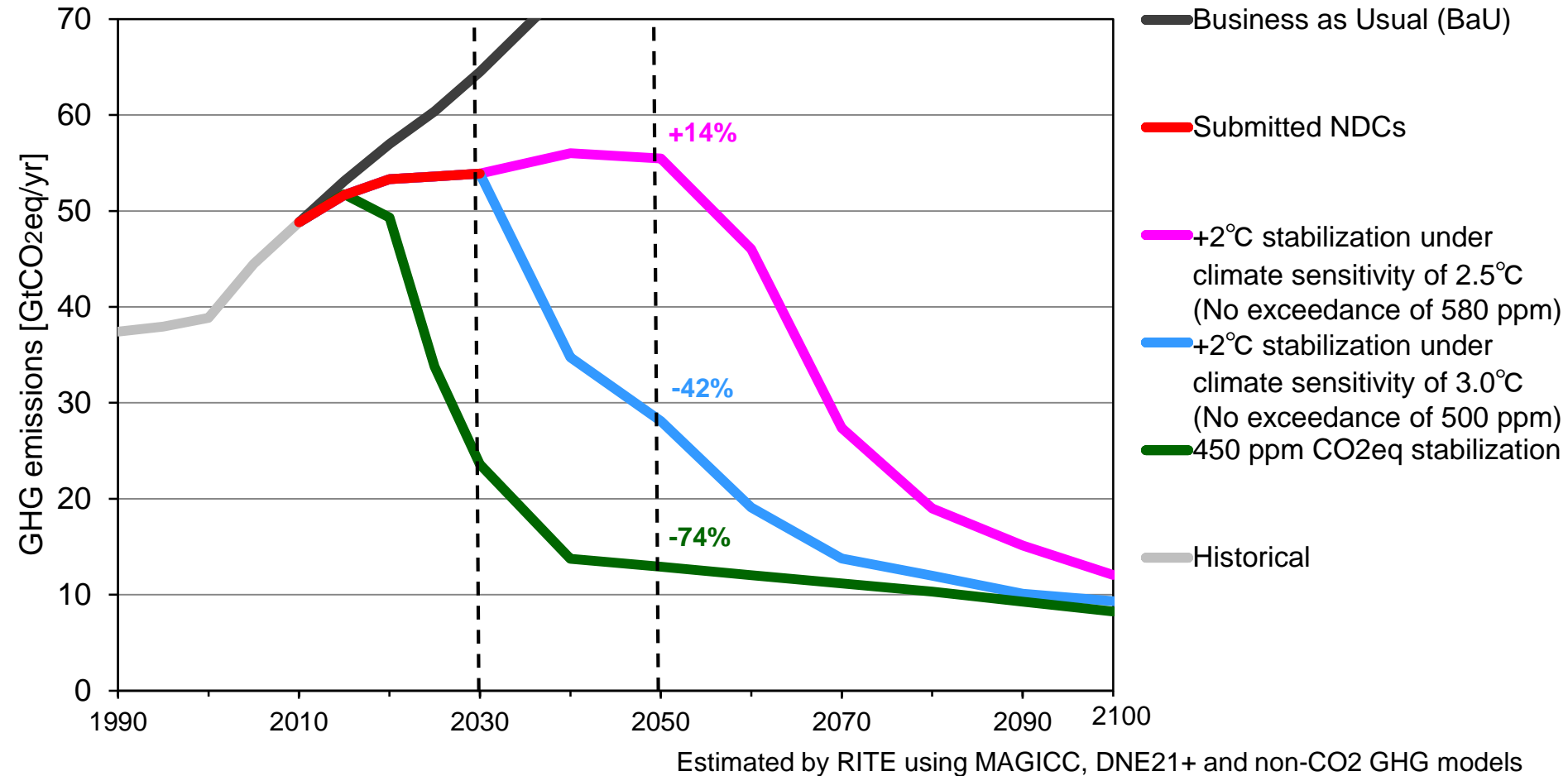
DNE21+モデルの世界地域分割



DNE21+のエネルギーフロー概略



2°C目標における世界の温室効果ガス排出経路 (~2100年)



- 2050年頃の世界排出量は、2°C目標といっても大きな幅がある。
- 約束草案から期待される2030年の世界排出量(米国が2005年比26~28%減目標達成も想定。現実にはトランプ政権誕生も手伝って、その達成は相当困難な可能性大)と、2.0°C以下(気候感度2.5°C)は概ね整合性あり。450 ppmシナリオとは大きなギャップあり。

温暖化緩和とエネルギー安全保障

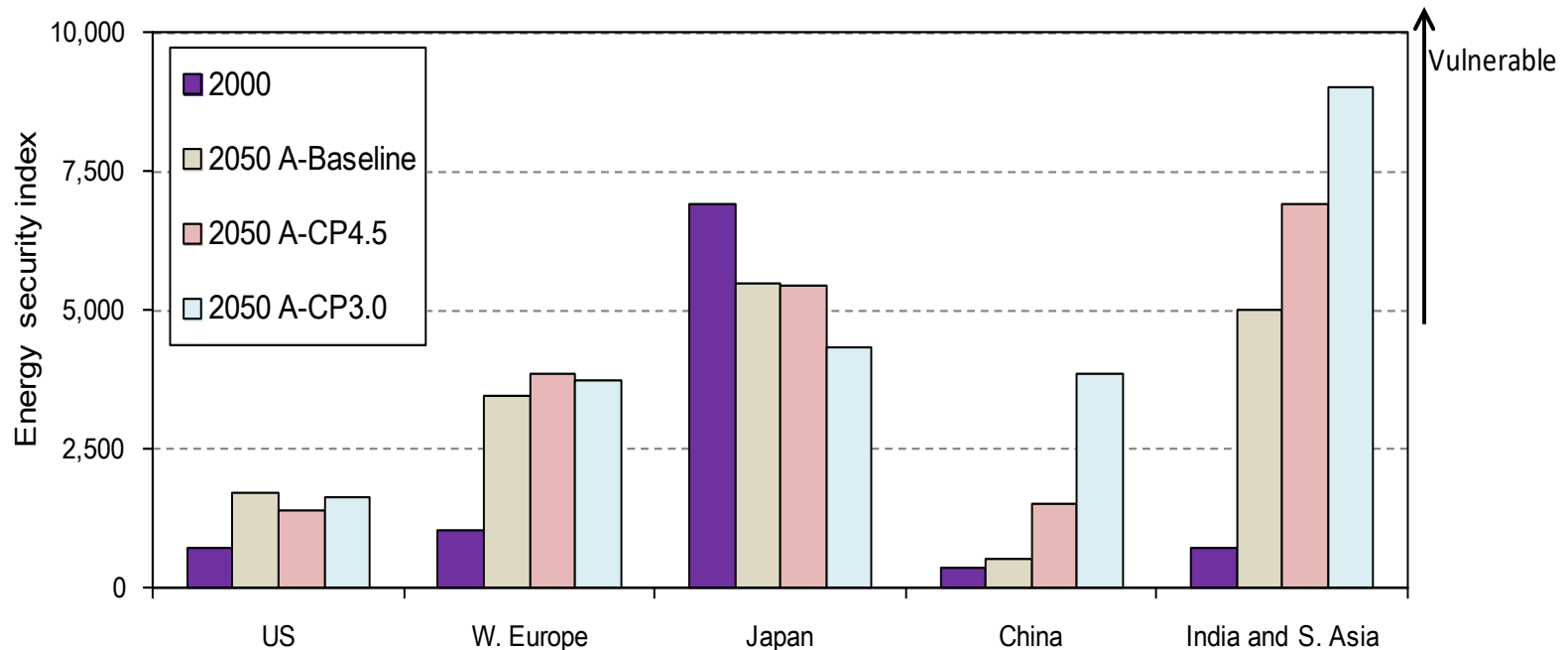
$$ESI = \frac{C_{oil}}{TPES} \sum_i \left(r_i \cdot S_{i,oil}^2 \right) + \frac{C_{gas}}{TPES} \sum_i \left(r_i \cdot S_{i,gas}^2 \right)$$

TPESの原油依存度

地域*i*の政治リスク指標

原油輸入に関する地域*i*への依存度

ESI = エネルギーセキュリティ指標 (energy security index)、TPES = 一次エネルギー総供給量 (total primary energy supply)
注) IEA, 2007に準拠した指標



Source) K. Akimoto et al., Natural Resources Forum, 36(4), 231-244, 2012

日本は、CP3.0のように厳しい削減目標下の方が、化石燃料消費の抑制によりセキュリティが増す結果となっているが、中国、インド等は、ガス利用の増大によりむしろ悪化傾向。厳しい削減ほど、エネルギーセキュリティが増すといった単純な関係にはない。