

未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西

2018年9月26日

パリ協定を踏まえた気候リスク対応 戦略と各種対策技術の役割

(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)

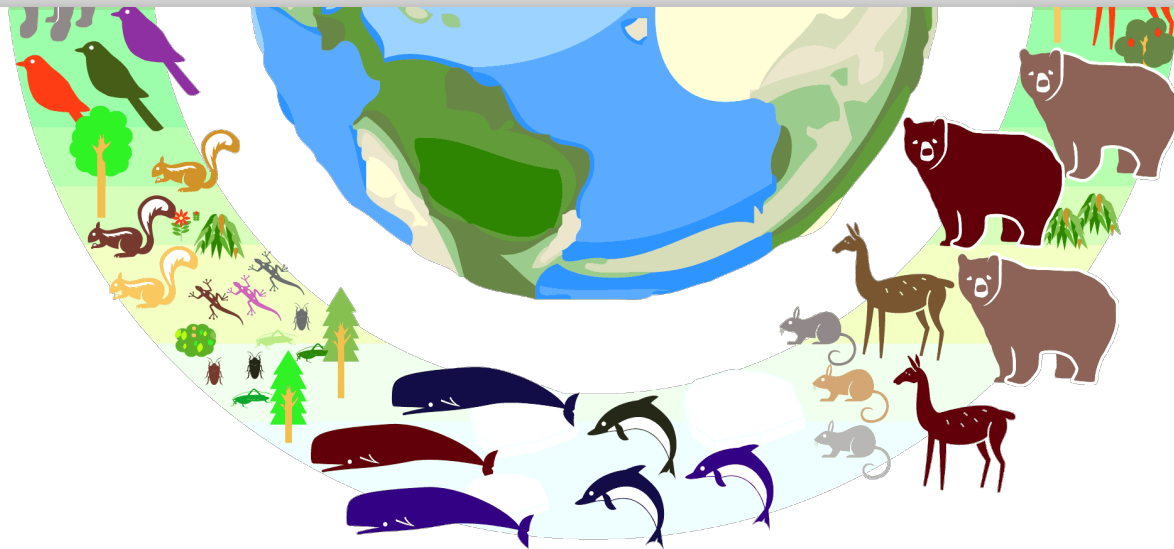
システム研究グループ グループリーダー

秋元 圭吾





1. はじめに



- ◆ 気候変動に関わる様々な不確実性をいかに適切に理解すべきか。
- ◆ 総合的にリスクをどう最小化していくべきか。
- ◆ 各種温暖化対策技術の長所、短所、可能性と限界をよく理解し、リスクマネジメント全体においていかに開発、展開していくべきか。

日本における豪雨、大型台風被害

地球温暖化で海水温が上昇
⇒海水の蒸発による大気中の水蒸気が増加
⇒豪雨や大型台風が多発

ただし、具体的な被害事例について、人為的なCO2排出との因果関係について明確に言うことはできず、大きな不確実性があることは認識することが必要



2017年7月 九州北部豪雨により福岡、大分で大きな被害、死者・行方不明：42名

出典)国土地理院



2014年8月 豪雨による広島土砂災害、死者・行方不明：74人 家屋全壊：133戸

出典)blog.livedoor.jp



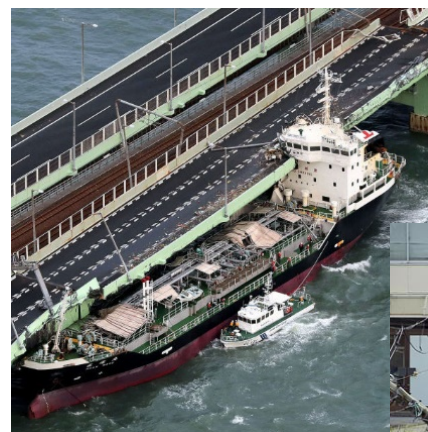
2018年7月 平成30年7月豪雨による災害、死者・行方不明：220人 家屋全壊：5200棟程度

出典)時事通信社



2015年9月 豪雨による鬼怒川堤防決壊、茨城・常総市の浸水被害：1万1000棟

出典)産経デジタル



2018年9月 台風21号により近畿地方に大きな被害、死者13名

出典)毎日新聞



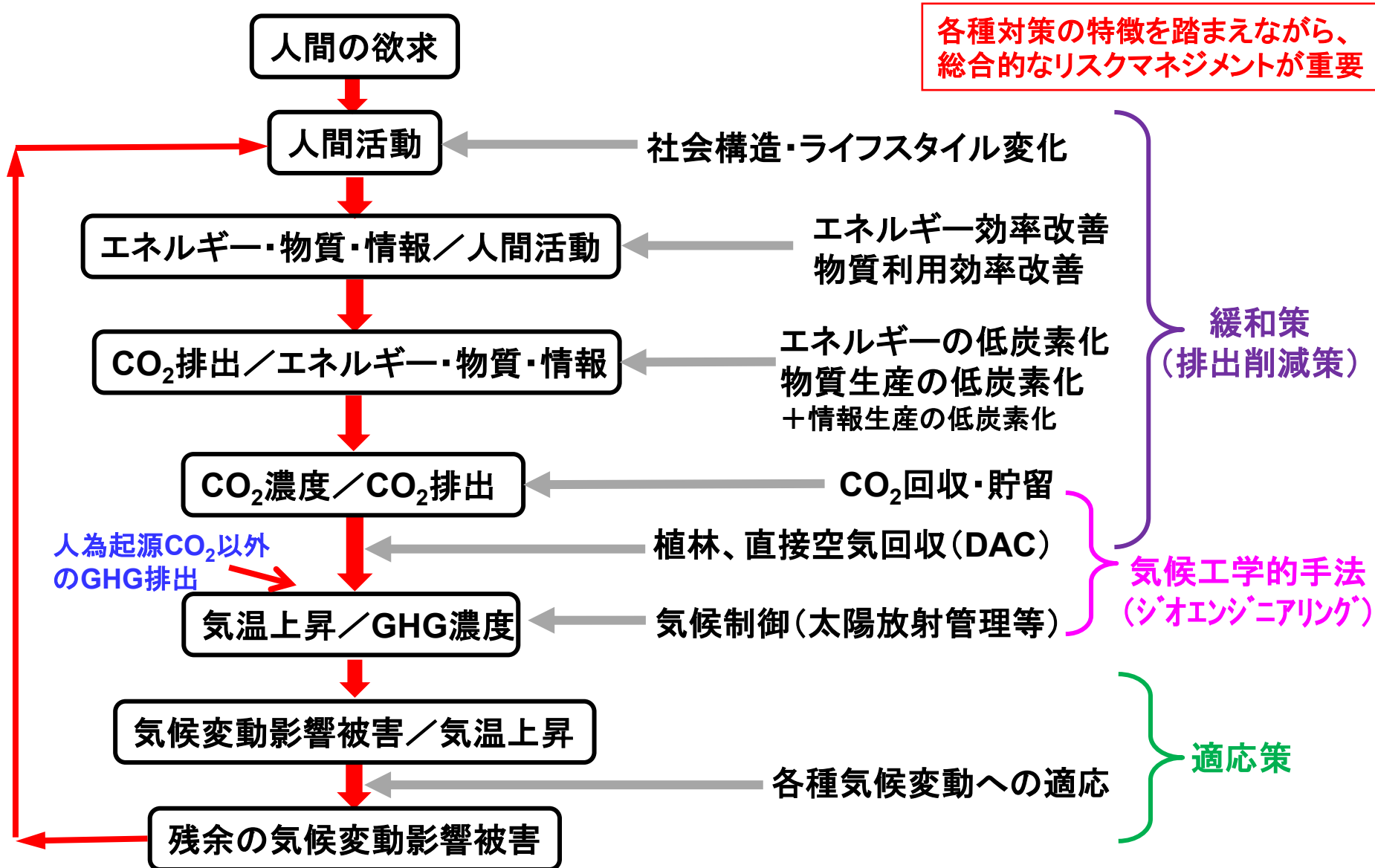
2016年8月 台風10号により岩手、北海道等で大きな被害、死者・行方不明：27名

出典)北海道開発局



出典)電気新聞デジタル

地球温暖化対策の基本構造



パリ協定



2015年11月30日～12月11日パリにて開催

予定を延長した12月12日に「歴史的」ともされる「パリ協定」を含むパリ合意を採択し終了

2016年11月4日発効

- ◆ すべての国が自主的に目標と達成方法を決め（国別貢献NDC）、5年ごとに提出する。なお、目標見直しにあたっては、従前の目標に比べて前進させるよう求めている。
- ◆ 効果的な実施を促すために、透明性を高めた形で、すべての国が共通かつ柔軟な方法でその実施状況を報告しレビューを受ける。
- ◆ 全球平均気温上昇を産業革命前に比べ2℃未満に十分に（"well below"）抑える。また1.5℃に抑えるような努力を追求する。
- ◆ 協定第2条の長期目標を達成するため、世界の温室効果ガス排出をできる限り早期にピークにする。その後、急速に削減し、今世紀後半には、温室効果ガスについて人為的起源排出とシンクによる吸収をバランスさせる。

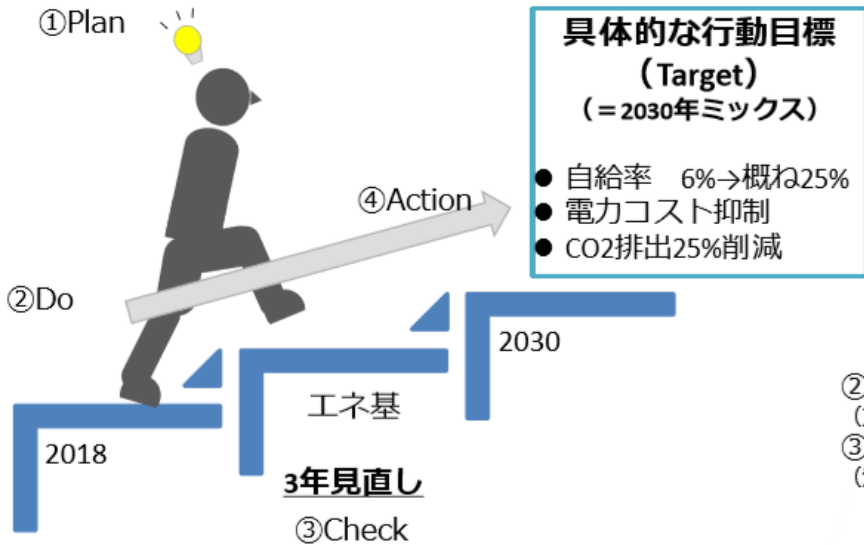
第5次エネルギー基本計画における2030、2050年への対応方針

2030年に向けて

- 相応の蓋然性をもって
予見可能な未来
(予見性⇔現実的)
- インフラ・システム所与
 - ✓ 既存の人材
 - ✓ 既存の技術
 - ✓ 既存のインフラ



実現重視の直線的取組
(PDCAサイクル)



2050年に向けて

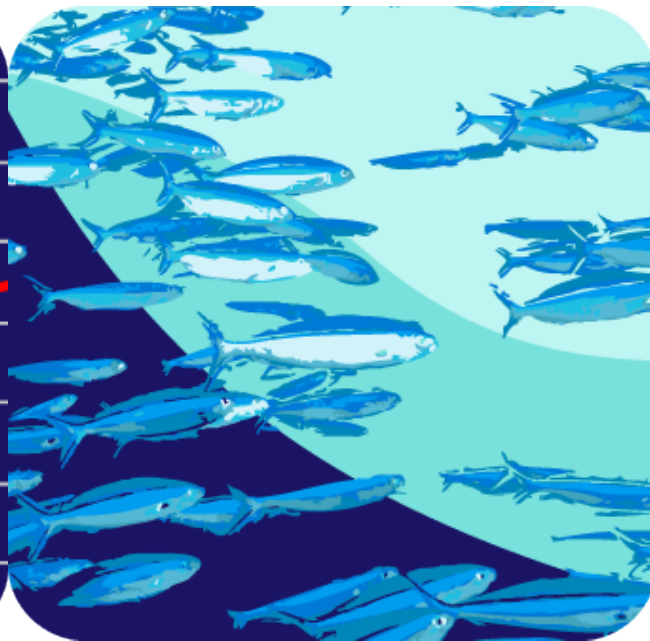
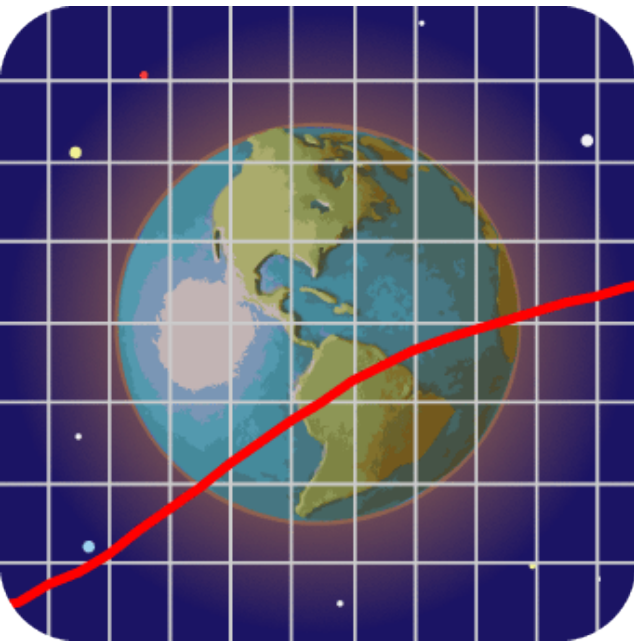
- 不確実であり、それゆえ
可能性もある未来
(不確実性⇔野心的)
(VUCA : Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity)
- インフラ・システム可変
 - ✓ 人材育成
 - ✓ 技術革新
 - ✓ インフラ更新



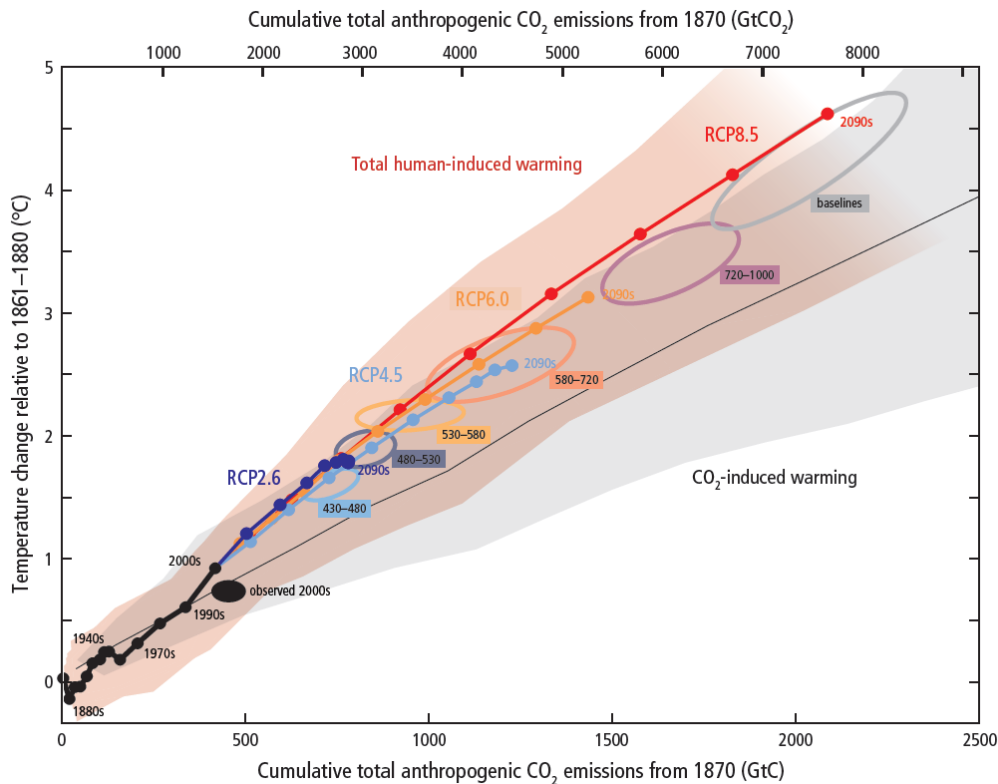
多様な選択肢による
複線シナリオ
(OODAサイクル)



2. 気候変動、対応に関わる 様々な不確実性

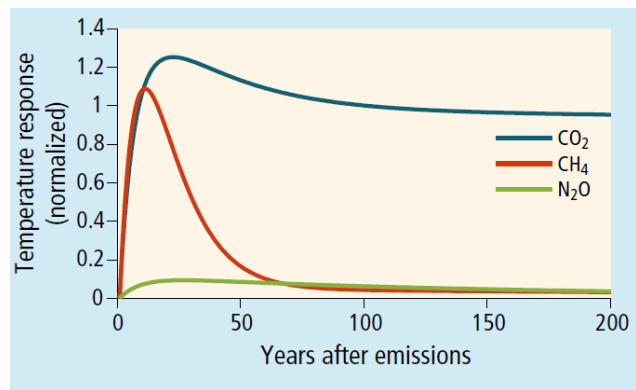


累積排出量と気温上昇の関係および排出に対する気温応答



出典) IPCC AR5 統合報告書

GHG排出の気温上昇へのインパクト



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

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)

便宜上、第4次の評価をそのまま利用

【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)

【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**

温暖化影響被害コストの推計

(Social Cost of Carbon (SCC): 米国政府利用の推計)

Social Cost of CO₂, 2015-2050^a (in 2007 dollars per metric ton CO₂)

Source: Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866 (May 2013, Revised August 2016)

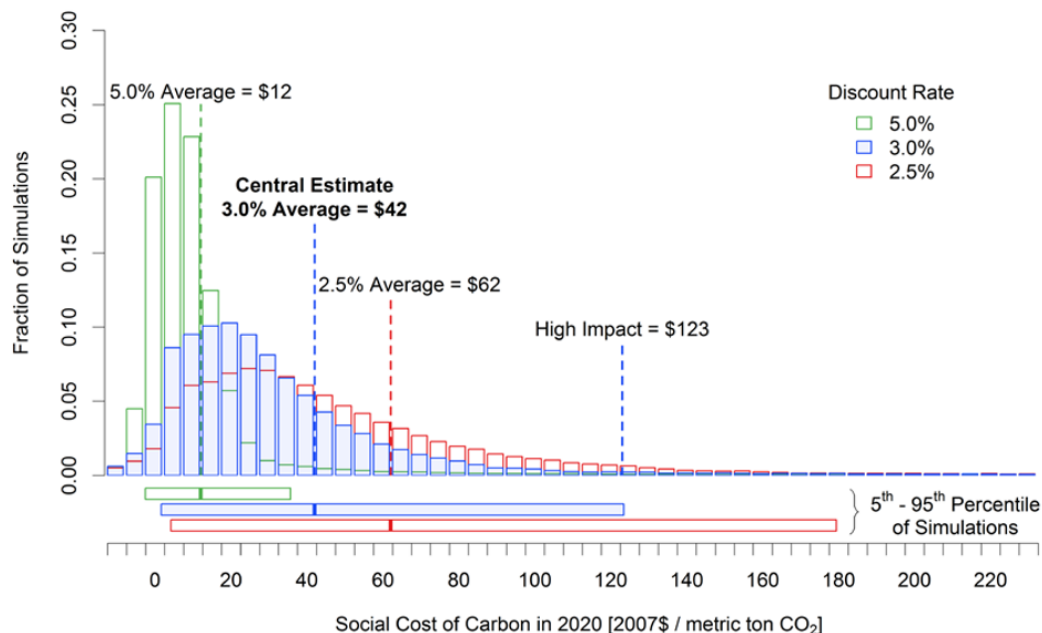
Discount Rate and Statistic

Year	5% Average	3% Average	2.5% Average	High Impact (3% 95 th percentile)
2015	\$11	\$36	\$56	\$105
2020	\$12	\$42	\$62	\$123
2025	\$14	\$46	\$68	\$138
2030	\$16	\$50	\$73	\$152
2035	\$18	\$55	\$78	\$168
2040	\$21	\$60	\$84	\$183
2045	\$23	\$64	\$89	\$197
2050	\$26	\$69	\$95	\$212

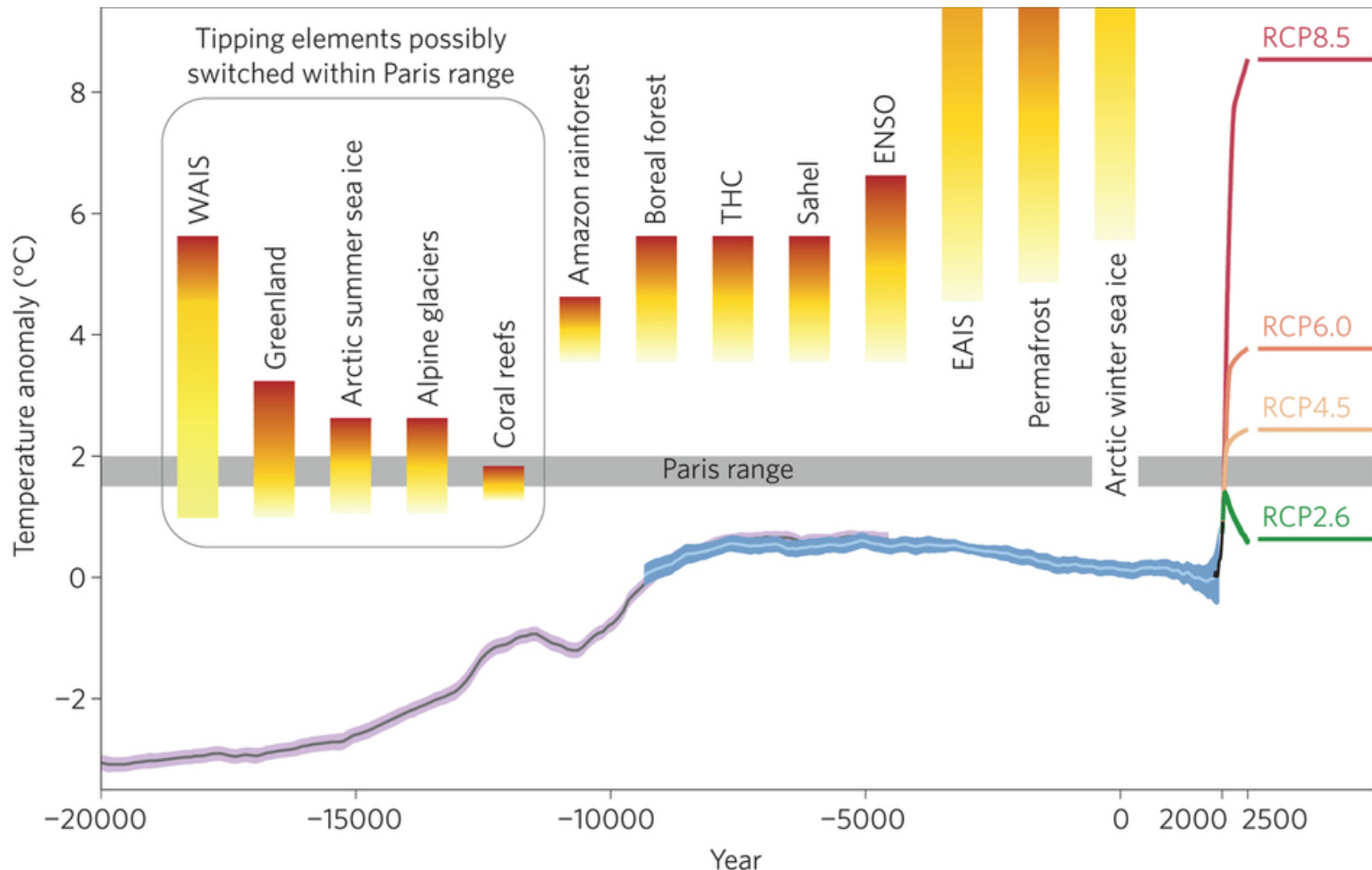
USG (2016)による世界のSCC
推計値 (2007年\$価格、\$/tCO₂)

- 温暖化影響被害費用(SCC)の推計には大きな幅がある。
- Fat tailの指摘もあり
- それでも政策決定の参考とする費用便益分析において、内部化すべき炭素価格水準としてSCCは米国で活用されている。(50\$/tCO₂前後は典型的な指標)

- DICE、PAGE、FUNDの3つのモデルを利用
- 経済成長、気候感度、割引率について複数のシナリオを想定して計算(150,000シナリオを推計)
- オバマ政権下では、3%の割引率ケースが標準で利用されてきた。



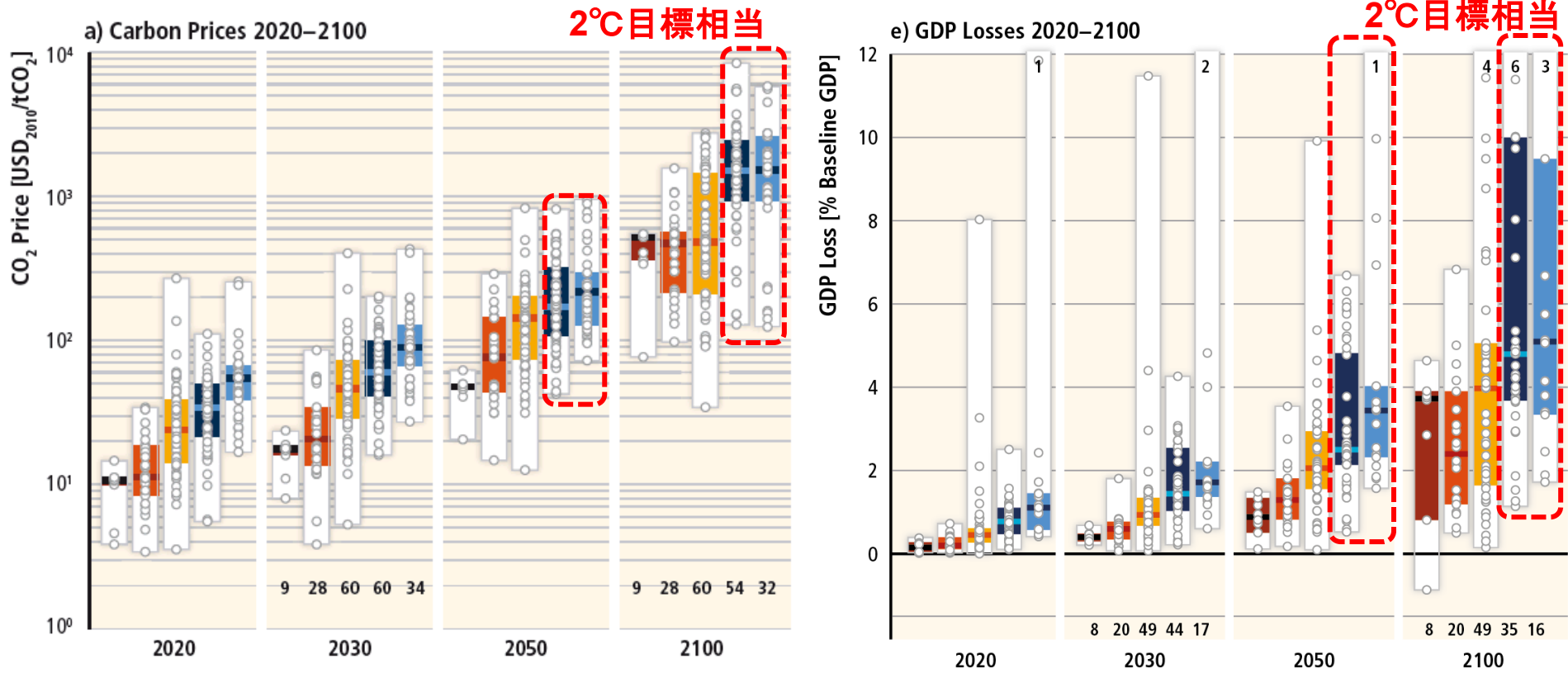
ティッピングエレメントの認識、リスク対応



出典) Schellnhuber et al., Nature Climate Change, 2016

パリ協定の長期目標(2°Cや1.5°C)でもリスクが顕在化する可能性があるtipping elementsの指摘もある。ただし、グリーンランド氷床融解など、その気温を超えたとしても、数百年もしくはそれ以上かけて完全に融解されるとされるものもある。

2°C目標の温暖化緩和コスト、経済影響は相当大きい



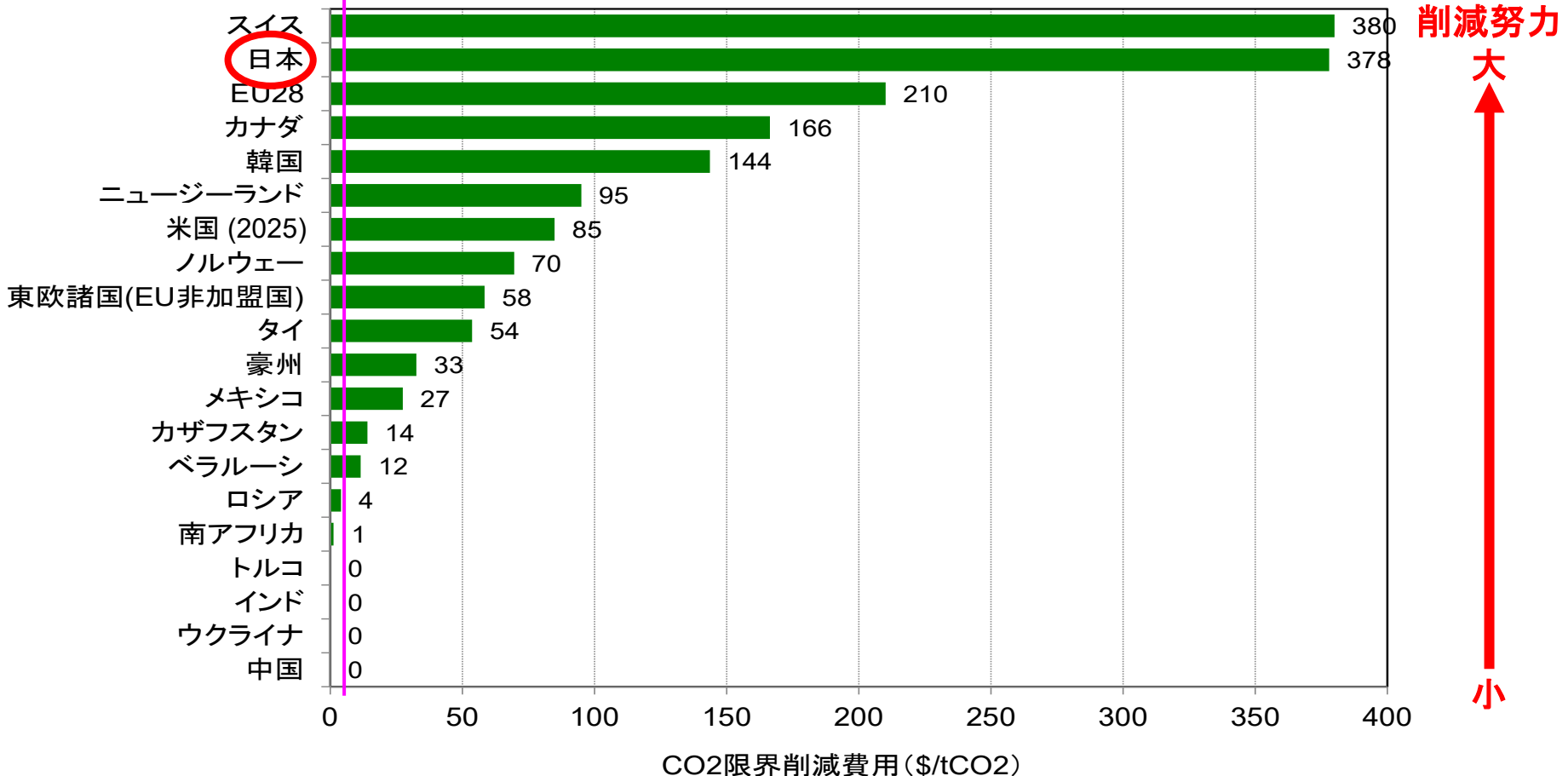
- CO₂限界削減費用(炭素価格)は、430-530 ppm CO₂eqシナリオの場合2100年では約1000~3000 \$/tCO₂(いずれも25-75パーセントイル)、全モデルでは150~8000 \$/tCO₂程度と推計。モデル分析結果からは、世界GDPの10%以上の損失になる確率も25%程度。

- 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(RITE推計)

【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

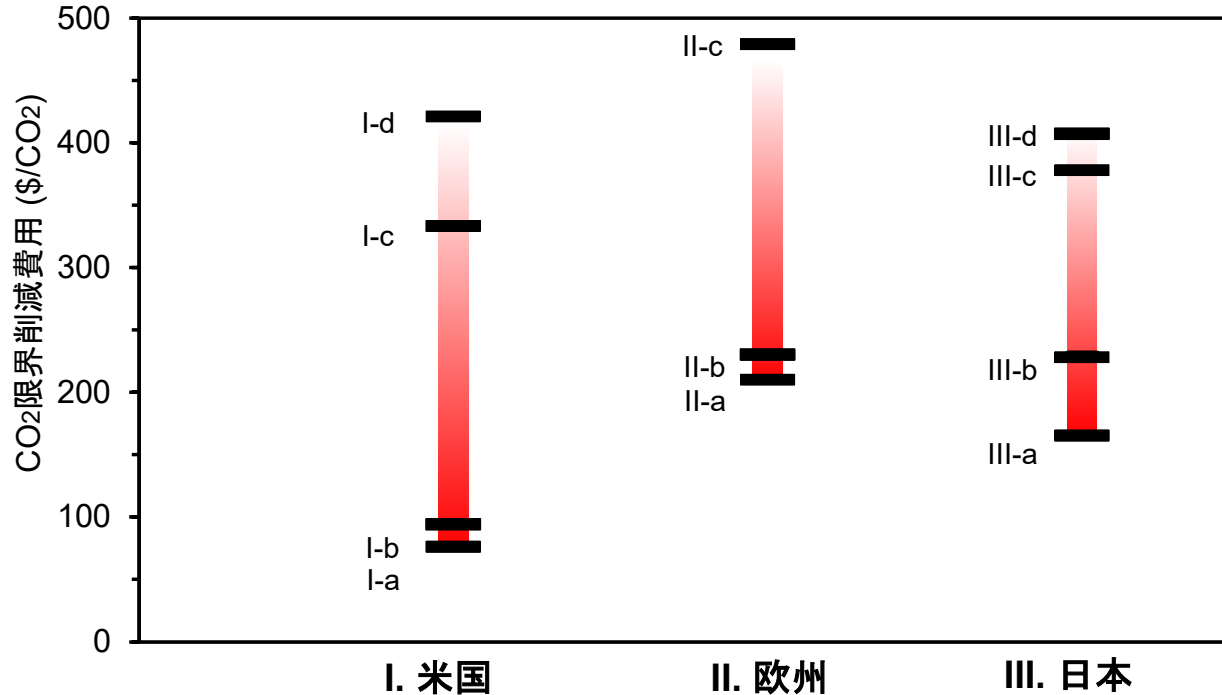


* 上下限で幅がある国は平均値を表示

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

- 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。
- 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-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-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-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、政治システムの制約などもあり、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。

- ◆ 気温上昇推計：平衡気候感度の不確実性 1.5~4.5°Cの確率が66%以上
- ◆ 気候変動による温暖化影響被害：推計には大きな幅あり
- ◆ 温暖化影響被害について、Tipping elementやFat tailと呼ばれる甚大な被害の可能性についても指摘あり

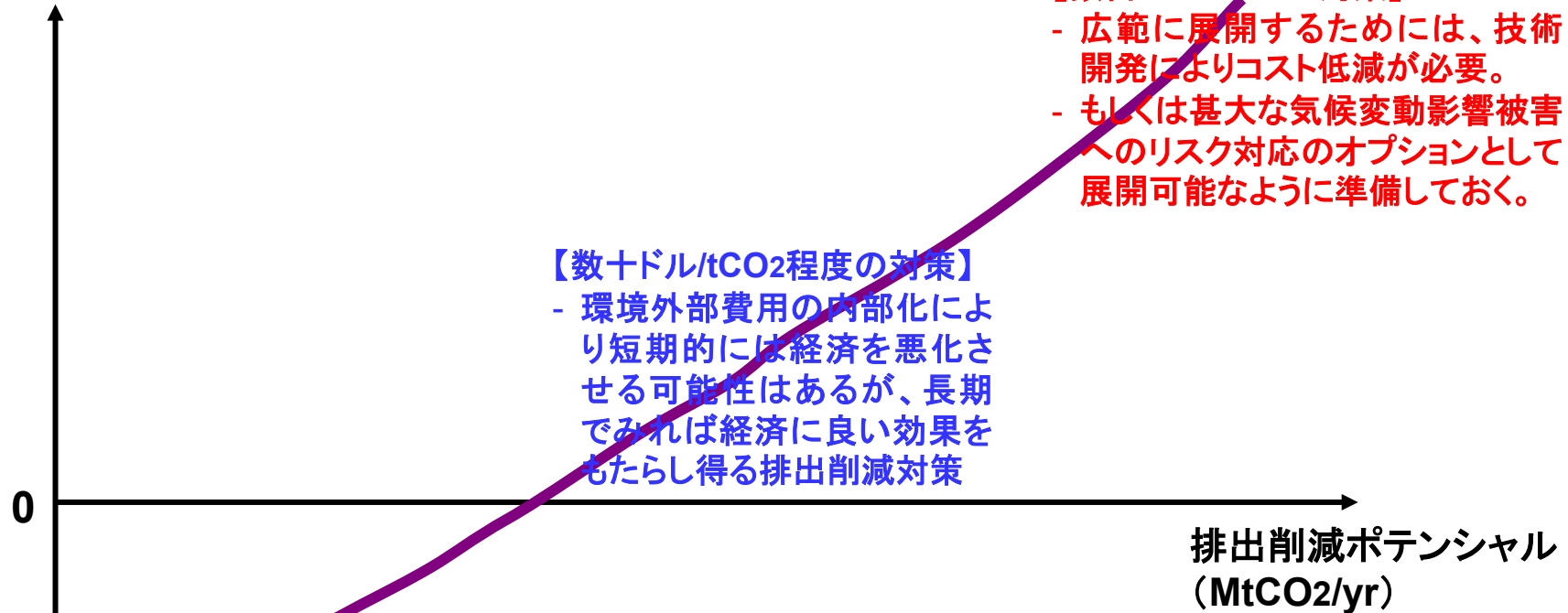
- ◆ 緩和費用については、2°C目標達成の排出削減費用は大変高いと推計されているが、技術、社会の見通しの違い等により、推計には大きな不確実性あり。
- ◆ また現実の対策は、モデル分析が示すような費用最小では達成できず、数倍の費用を要する可能性もあり、緩和費用についてもFat tailとなる可能性がある。

3. 限界削減費用別の温暖化対策



排出削減費用別の排出削減ポテンシャル曲線

単位排出削減費用 (\$/tCO₂)



【数百ドル/tCO₂の対策】

- 広範に展開するためには、技術開発によりコスト低減が必要。
- もしくは甚大な気候変動影響被害へのリスク対応のオプションとして展開可能なように準備しておく。

【数十ドル/tCO₂程度の対策】

- 環境外部費用の内部化により短期的には経済を悪化させる可能性はあるが、長期的にみれば経済に良い効果をもたらす得る排出削減対策

【負の費用の対策】

- 経済成長を実現可能な排出削減対策
- 現時点でマイナスの限界削減費用にも関わらず、広く展開されていない技術は何らかの隠れた費用が存在しており、それを除くことが可能な技術開発等が必要

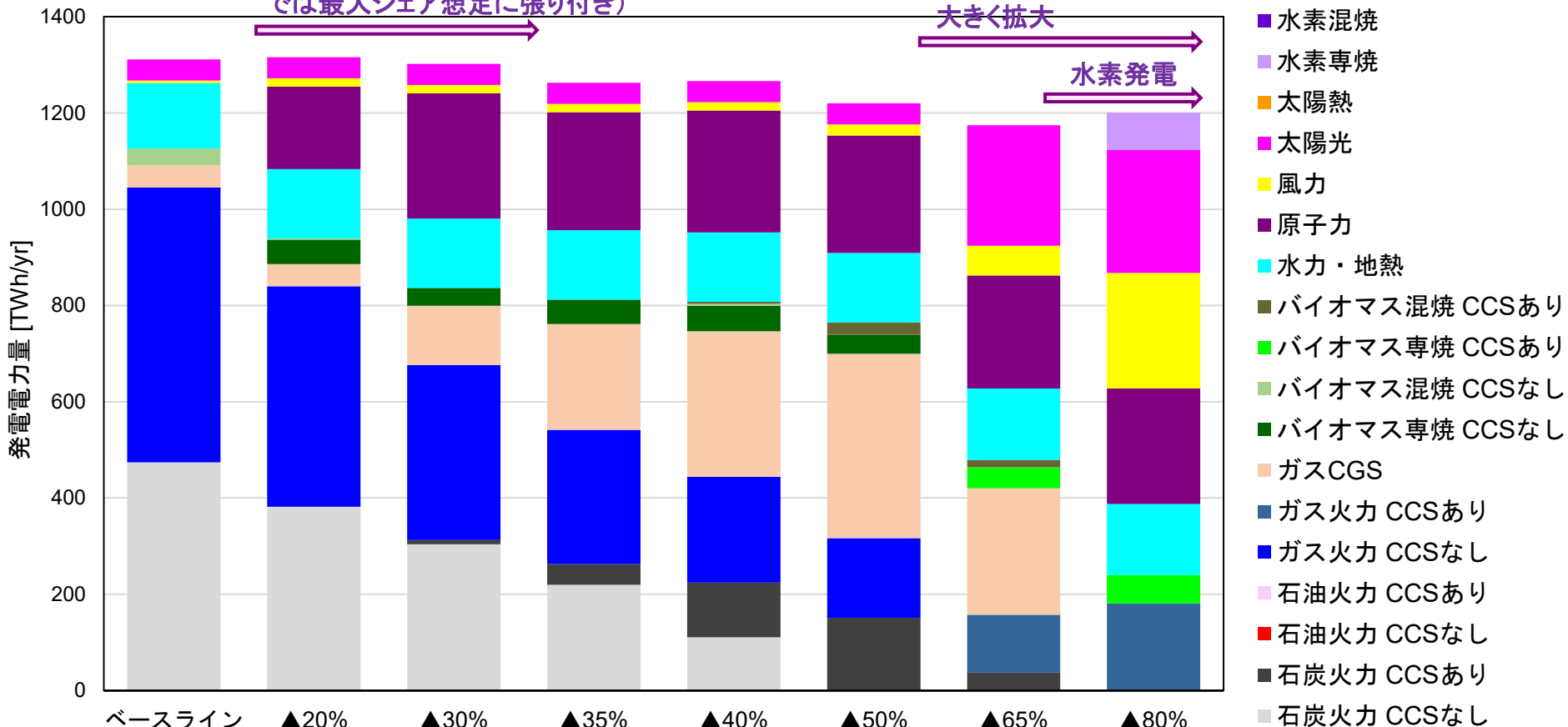
モデル分析による日本の2050年の電源構成

注) 原子力発電は最大20%シェアとした場合

原子力の経済性が拡大(▲30%以上
では最大シェア想定に張り付き)

太陽光、風力の経済性
大きく拡大

水素発電



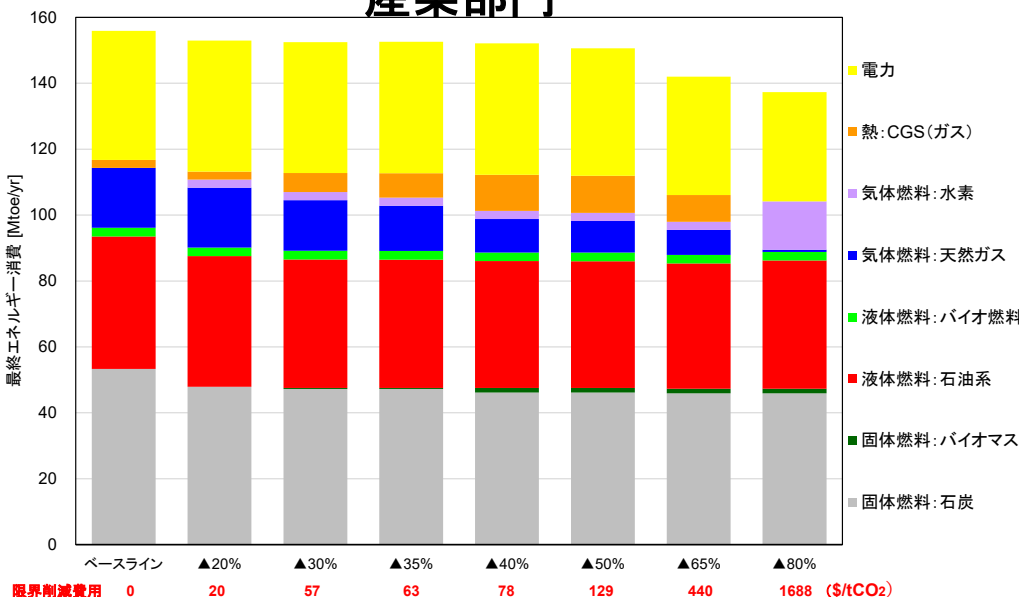
- 水素混焼
- 水素専焼
- 太陽熱
- 太陽光
- 風力
- 原子力
- 水力・地熱
- バイオマス混焼 CCSあり
- バイオマス専焼 CCSあり
- バイオマス混焼 CCSなし
- バイオマス専焼 CCSなし
- ガスCCS
- ガス火力 CCSあり
- ガス火力 CCSなし
- 石油火力 CCSあり
- 石油火力 CCSなし
- 石炭火力 CCSあり
- 石炭火力 CCSなし

限界削減費用 0 20 57 63 78 129 440 1688 (\$/tCO2)

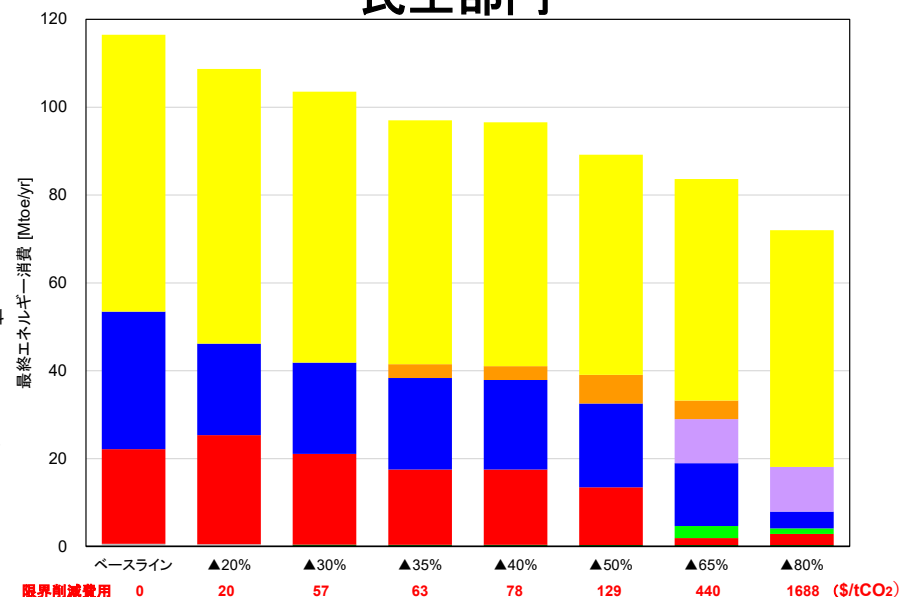
石炭CCS無、ガスCCS無が経済的
 石炭CCS(▲50%程度のとき最大)
 ガスCCS
 コジェネ(CGS)(▲50%(MAC 130\$/tCO2)程度のとき最大)

モデル分析による日本の2050年の最終エネルギー構成

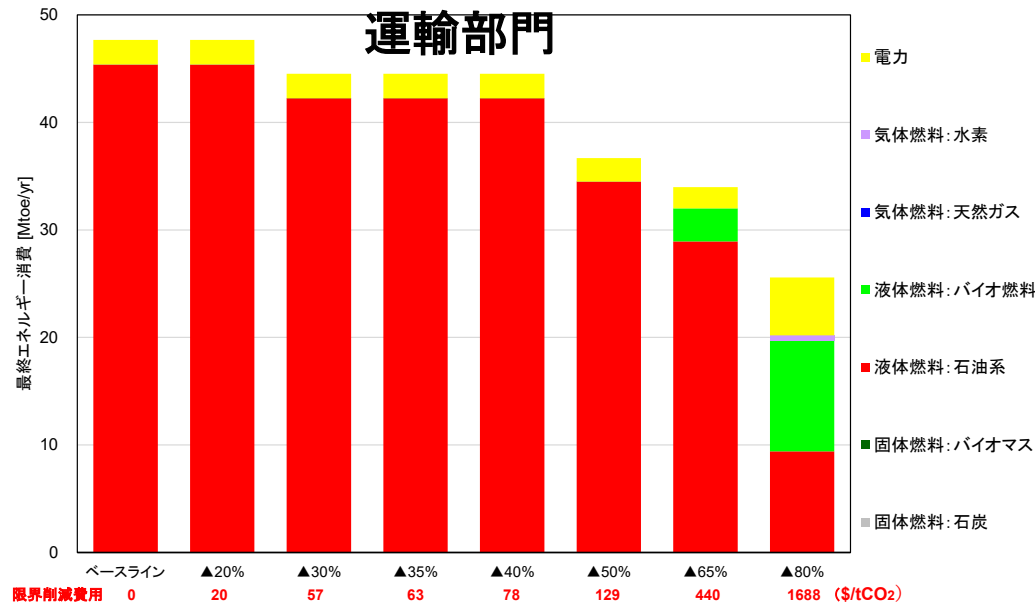
産業部門



民生部門



運輸部門



- 基本的に厳しい排出削減につれて電化比率は上昇
- コージェネ(CGS)は▲50%時程度までは拡大が経済合理的。それ以上の削減においては経済合理性が緩やかに低下
- 水素は▲60%～▲80%程度の厳しい排出削減時には経済合理的なオプションに
- 産業部門の石油需要のガスや電気への代替可能性は検討余地あり
- 産業部門の石炭利用(鉄鋼等)の比較的経済的な代替オプションは乏しい。

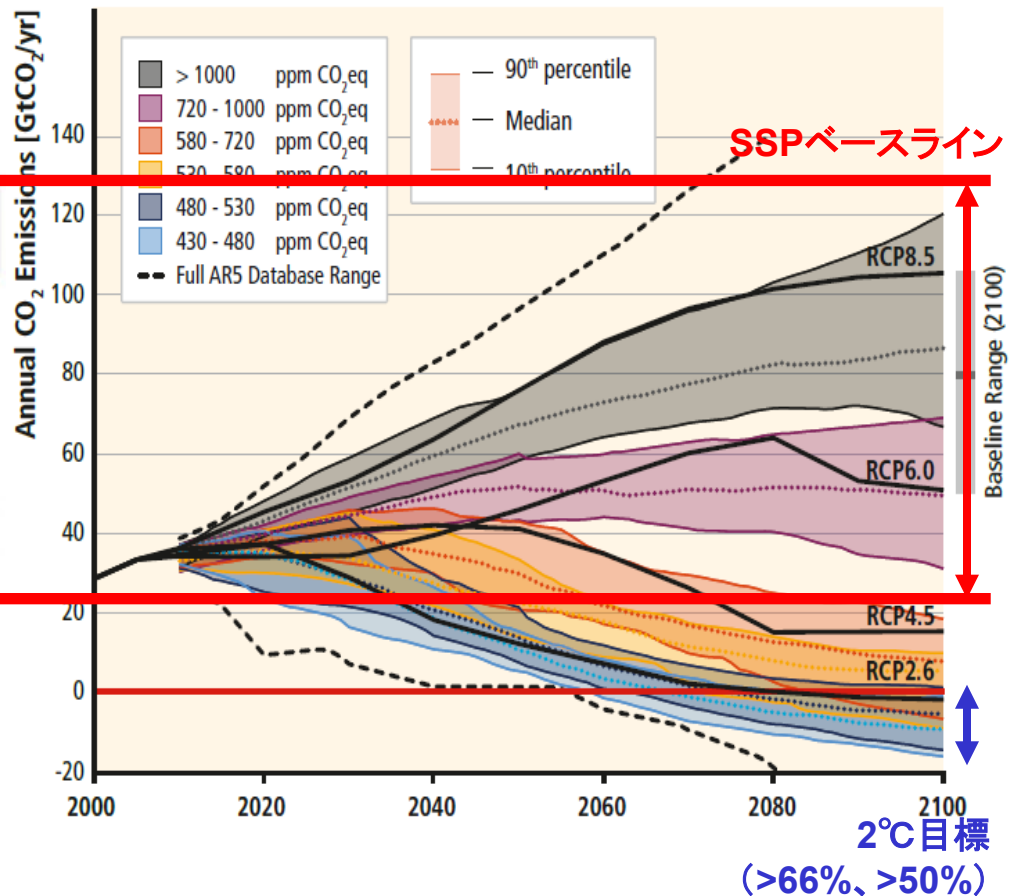
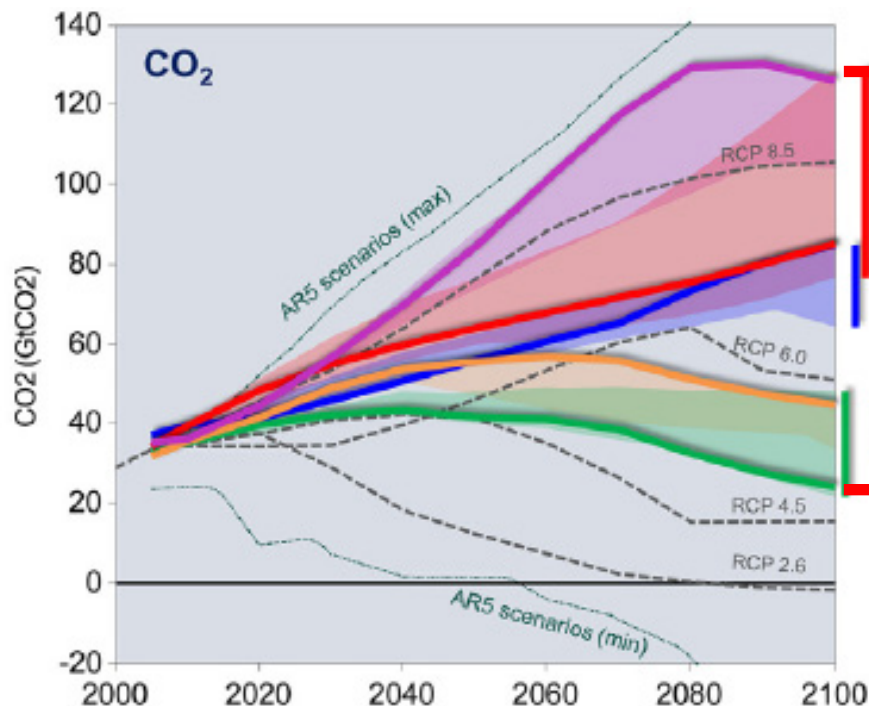
4. 技術革新により誘発される社会 経済の大きな変化の機会



社会経済シナリオの違いによるベースライン排出量と2°C目標の関係性

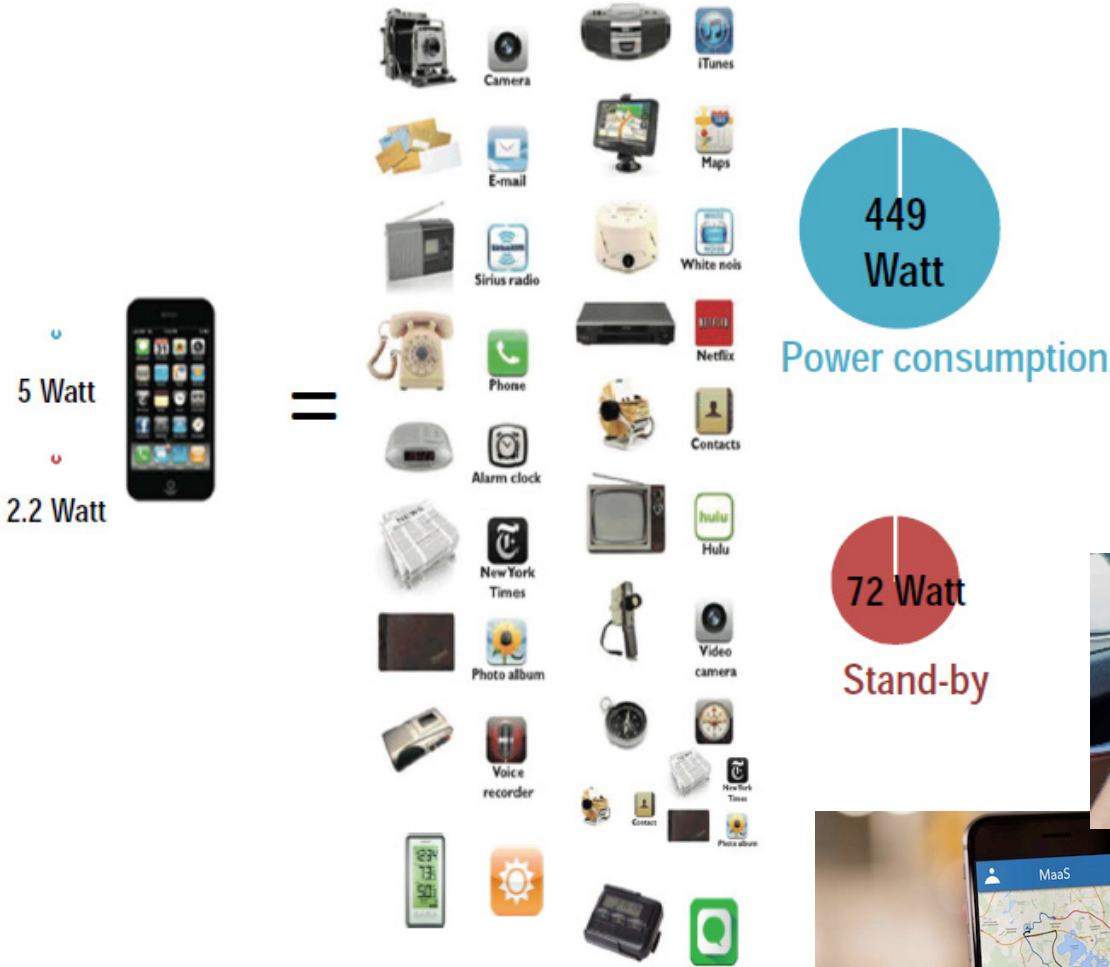
SSP: 共有社会経済パス
(IPCC等で利用予定)

Total CO₂ Emissions in all AR5 Scenarios

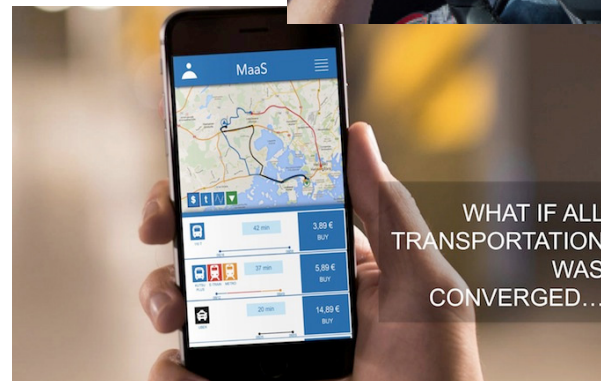


- ベースライン(社会経済の動向)の方が0.5°C前後(例えば1.5~2.5°C程度)の気温目標の差異よりも、ずっと大きな不確実性あり
- ベースライン(炭素価格ゼロ以下)をいかに低い排出量に導けるか(それに寄与する技術)は大変重要。

エンドユース技術の革新と社会変化



- 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。



自動運転+カーシェアリング+IoTによるサービス提供(MaaS等)などの連携による社会変化(AI, IoT, ビッグデータ等の進展による)

WHAT IF ALL
TRANSPORTATION
WAS
CONVERGED...

出典: IIASA

出典: フィンランド

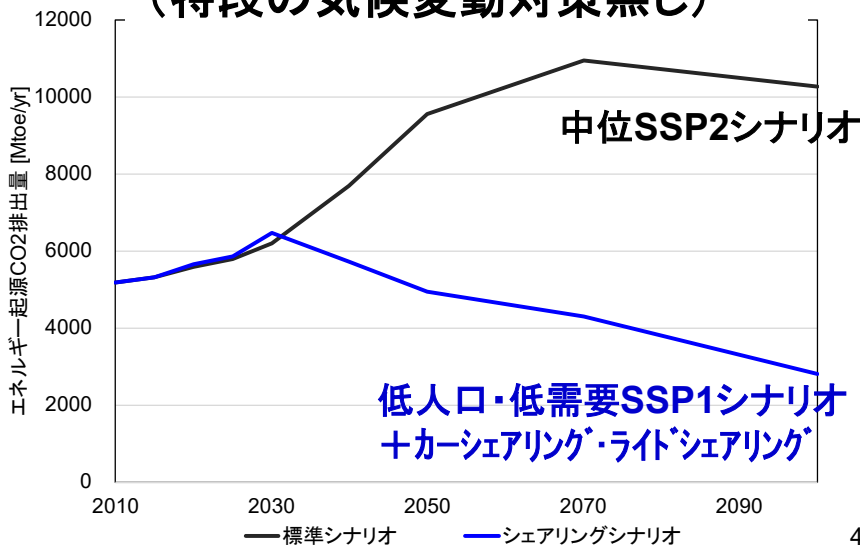
カーシェア、ライドシェアシナリオの試評価

- ◆ カーシェア・ライドシェアを明示的には考慮しないシナリオ（標準シナリオ）と以下のように考慮した場合（自動運転シェアカー普及シナリオ）について、DNE21+モデルによる試評価を実施した。
- ◆ 自動運転シェアカーは2030年以降利用可能とし、主要なパラメータはFulton他(2017)等を参考にしつつ、以下のように想定した。
 - 自動化の費用：自動化のために1台当たり10,000\$の費用と想定(2030年)。技術進歩による価格低減も見込んだ(2050年：5,000\$、2100年：2,800\$)。
 - 自動車の稼働率：シェアリングにより、従来の自家用車に比べ3倍と想定した(日本の場合、1台当たり年間走行距離を自家用車：約10,000km、シェアカー：約30,000kmと想定)。
 - 自動車の寿命：従来の自家用車を13～20年と想定しているのに対し、シェアカーは7～12年と想定。
 - 一台当たり乗車人数：従来の自家用車は将来に向けて乗車人数の低減を見込んでいるのに対し(2050年：1.1～1.5人、2100年：1.1～1.3人)、ライドシェアリングを見込み、シェアカーは2050年1.75人、2100年2人と想定。

【課題】

- ◆ 消費者・ユーザーの多様な嗜好の反映
- ◆ リバウンド効果の考慮
- ◆ 他の部門におけるシェアリング経済のモデル化・評価
- ◆ 変動性再エネ大量導入における電力系統安定化と自動車のバッテリー利用との関係性分析 等

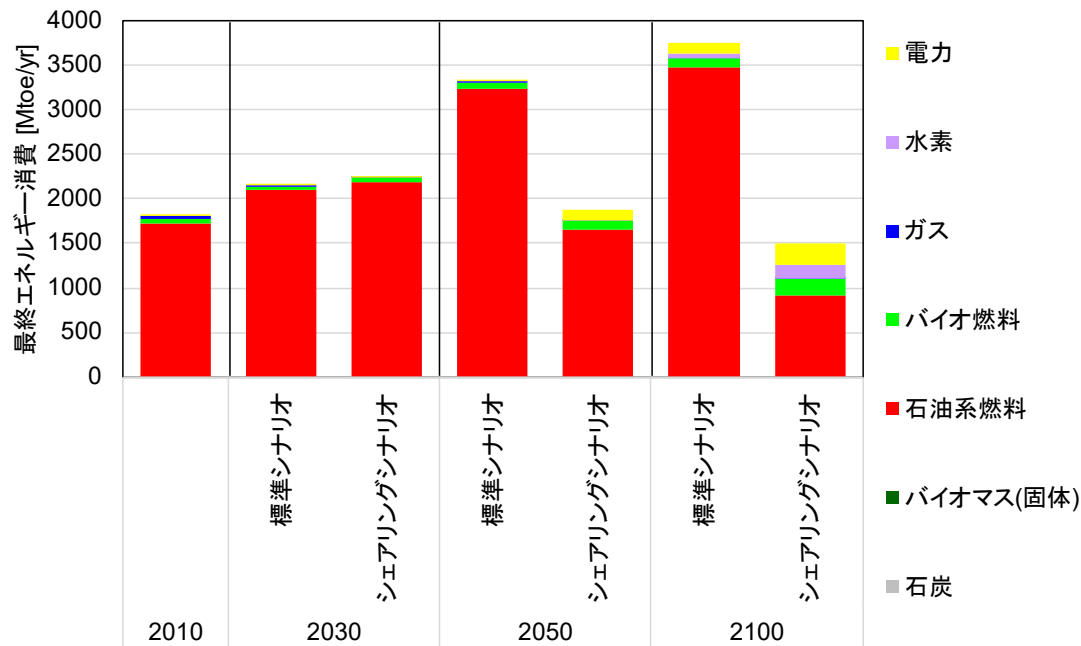
道路交通部門のCO₂排出量 (特段の気候変動対策無し)



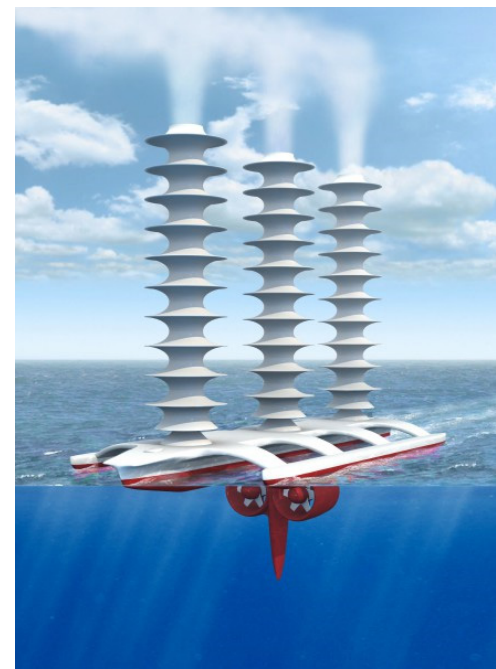
注: 直接排出(Tank to Wheel)

- 乗用車に関してシェアリングが進むこと等により、特段のCO₂排出削減政策を取らなくても(限界削減費用ゼロ)、道路交通部門において、2050年以降では、標準シナリオ比で40~70%程度の削減に。
- 自動車販売台数は2050年に▲50~▲60%程度に。
- ただしリバウンド効果など、詳細な分析が更に必要

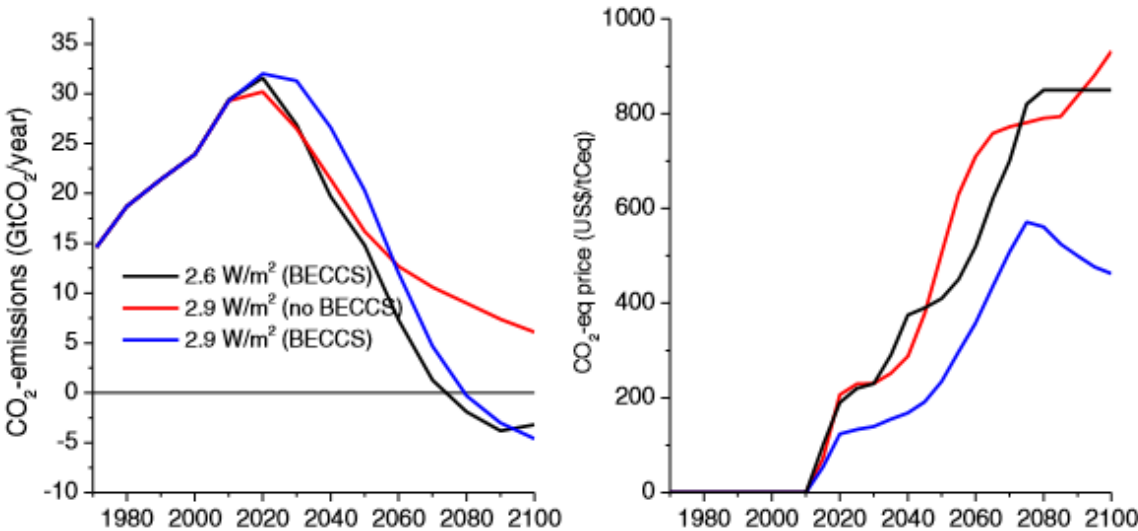
道路交通部門の最終エネルギー消費量 (特段の気候変動対策無し)



5. ネガティブエミッション技術、 SRMによるリスク対応



バイオマスCCS (BECCS) によるリスク対応

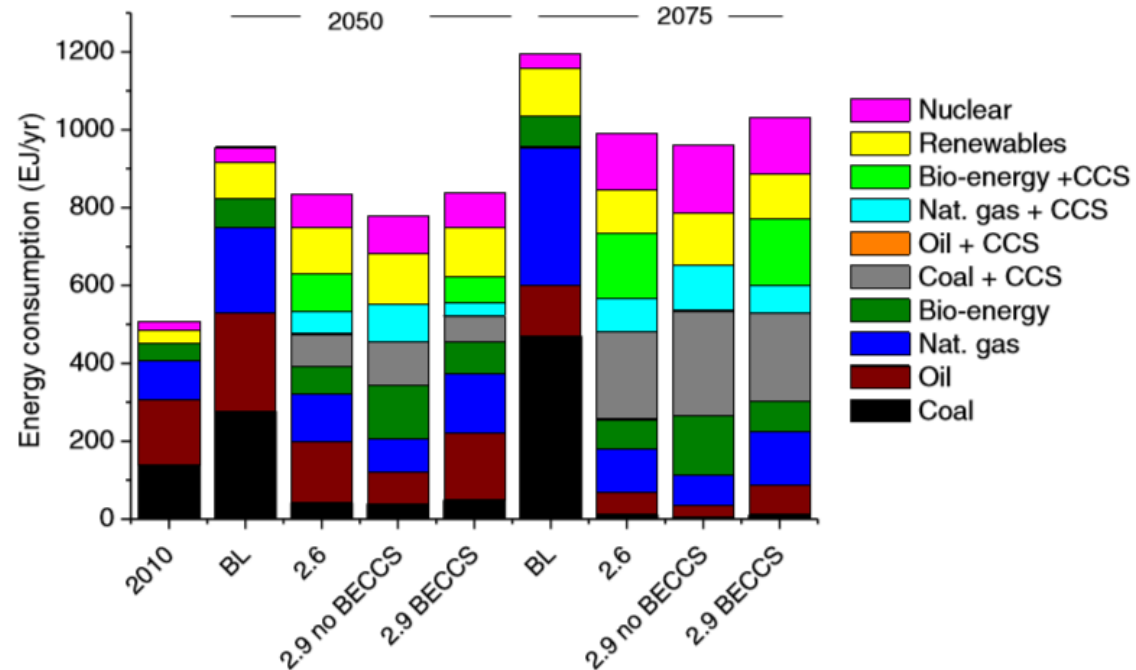


BECCS利用の有無によって排出経路、CO₂限界削減費用に大きな差異あり。
⇒ 本当に正味ゼロや正味ネガティブ排出のような排出削減が求められれば、BECCSの効果は大きい可能性あり。

2075年のバイオマス供給量は200EJ(=約4800Mtoe)を超えるような量

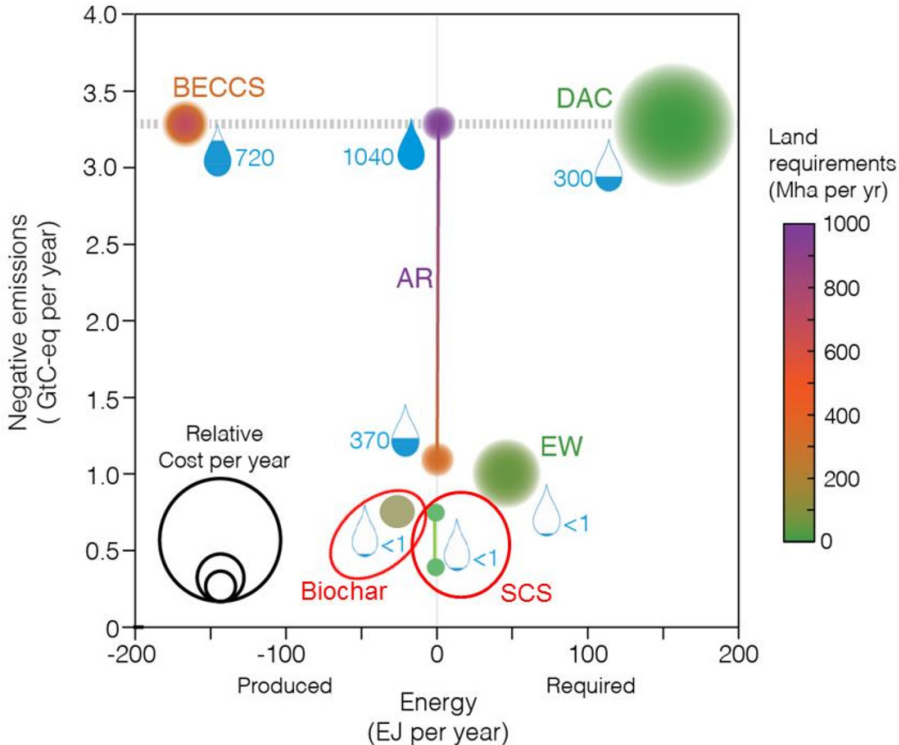
オランダPBL IMAGEモデルによる推計
出典)D.P. van Vuuren et al., 2013

こういったBECCS依存のシナリオに対して、例えば、R.Pielkeは、「IPCCのシナリオ分析では、2°C目標を達成するためにBECCSが中心的な役割を果たすこととされている。モデルにおいて大量のBECCSを想定する結果、より野心的な目標を達成するためのオプションが拡大することになる。モデルの世界で非現実的なオプションが創出され、緩和政策の実効性の欠如を覆い隠しており、大規模なBECCSはスターウオーズのライトセイバーのようなサイエンスフィクションだ」と批判している。



二酸化炭素直接回収（DAC）によるリスク対応

ネガティブ排出技術の比較(削減量、コスト、エネルギー、水、土地)

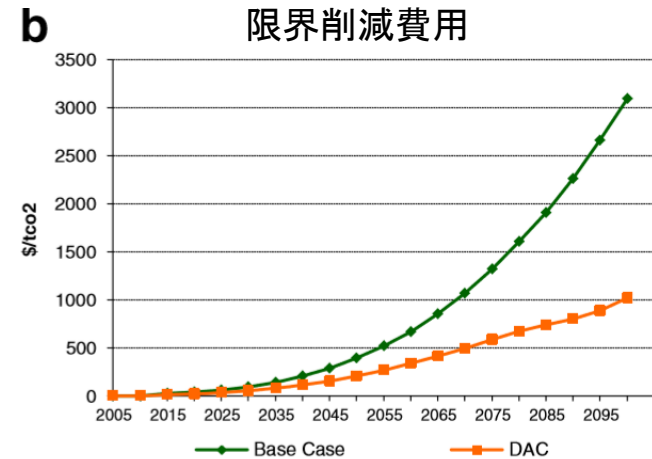
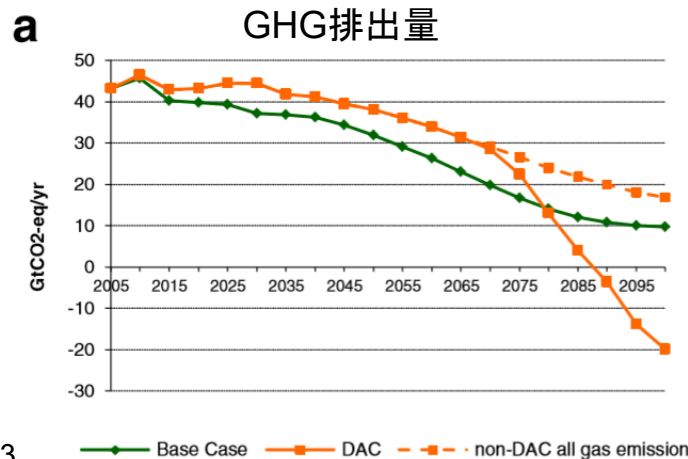


- DACはBECCS同様にネガティブ排出を実現できるため、特に正味ゼロに近い排出や正味ネガティブ排出時には有用なオプションの一つになる可能性あり。
- DACはエネルギー消費量が多くコストも高いと考えられているが、BECCSや植林・再植林(AR)よりも土地面積と水使用量は少なく済むため、食糧生産との土地競合の問題や生物多様性への悪影響を抑制できる可能性あり。
- CO₂回収に関して物理的上限がない特長あり。
- 厳しい排出削減目標下では、DACオプションが有る場合には、通常の緩和技術による排出削減が緩やかになり、CO₂限界削減費用上昇を抑制するなどの効果も推計されている。

AR: afforestation and reforestation
EW: enhanced weathering
SCS: soil carbon sequestration
出典) Smith, 2016

統合評価モデルWITCHIによるDACの評価 (2100年に490 ppm CO₂e制約下)

出典) Chen and Tavoni, 2013



太陽放射管理 (SRM) によるリスク対応

SRMの特質

即効的

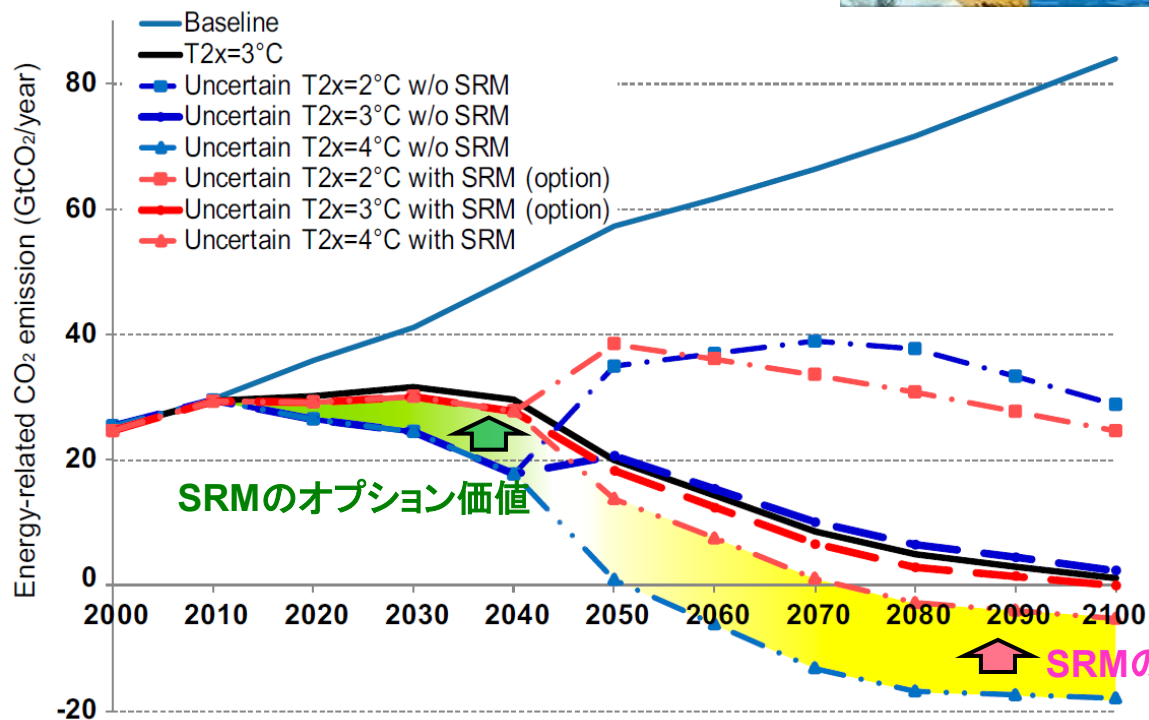
比較的安価

不完全(副作用など)

DACよりも副作用等の懸念が大きく、かつ海洋酸性化を直接的に抑制できないものの、気温上昇リスクに対する最終的なリスク対応策としてSRMオプションを保有しておくことで、気候変動の不確実性に対する多重的なリスク管理を実施できる可能性もある。



出典) Solar Feeds



気候感度の不確実性(～2050年)を踏まえた+2.5°C(2100年)目標下の世界CO₂排出パス

6. まとめ



- ◆ 気温安定化のためには、世界のCO₂排出量を正味でゼロにする必要あり。
(ゼロ排出技術、正味で負の排出にできるような技術の役割)
- ◆ 一方、気候変動に関わる様々な不確実性が存在。気候変動推計、影響被害の不確実性は大きい。更には、気候変動緩和についても、技術的、政治的、社会的な制約等により緩和費用は大きく異なり得る。
- ◆ 様々な不確実性をよく理解した上での総合的なリスクマネジメントは重要
- ◆ 各種の温暖化対策技術のコスト、ポテンシャル、どういった場面で重要な役割を果たし得る技術なのか、等を見極め、それぞれの技術の活用を考えることは重要
- ◆ 低炭素排出エネルギー供給・利用の温暖化対策技術開発は重要
- ◆ ただし、イノベーションは様々な技術等の新たな繋がりで生まれる。直接的な温暖化対策技術ではない技術の進展が新たな結合を生み、社会を変化させ、大きな温暖化対策になる可能性もある。一見、エネルギー、温暖化対策技術と認識されないような様々な技術の開発・発展、それを促す政策措置も重要