

IPCCシンポジウム

「今、実施すべき気候変動の緩和対策」

2020年1月30日

持続可能な発展に向けたイノベーション の役割と気候変動リスクマネジメント

(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

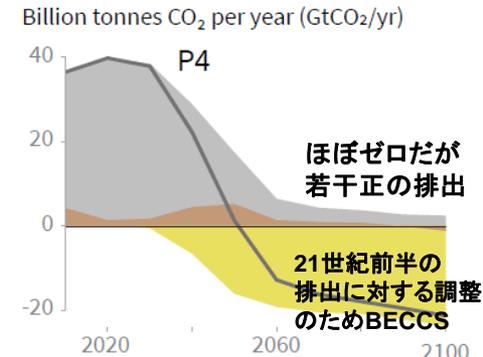
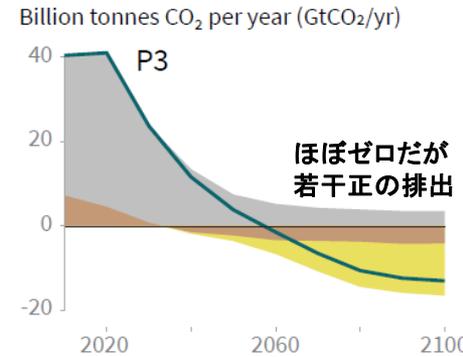
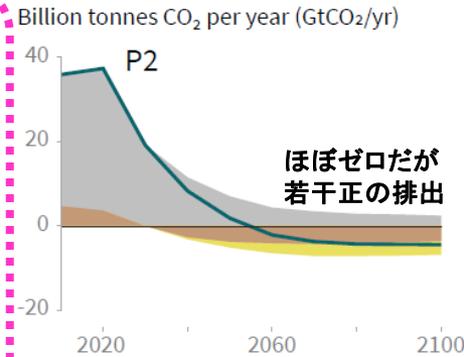
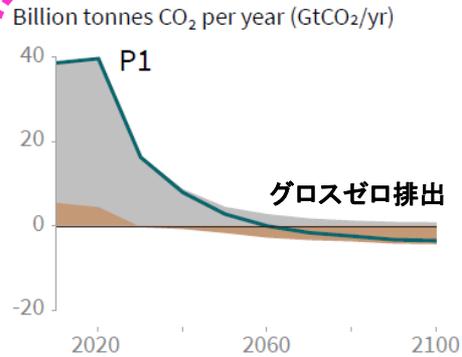
秋元 圭吾



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

● Fossil fuel and industry ● AFOLU ● BECCS

出典) IPCC 1.5°C特別報告書



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.

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.

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.

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.

SSP1よりも更に小さいエネルギー需要(LED)シナリオ

SSP1

SSP2 (中位シナリオ)

SSP5

小 ← → 大

最終エネルギー需要

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

- ✓ 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。
- ✓ 本発表では、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フォーカス

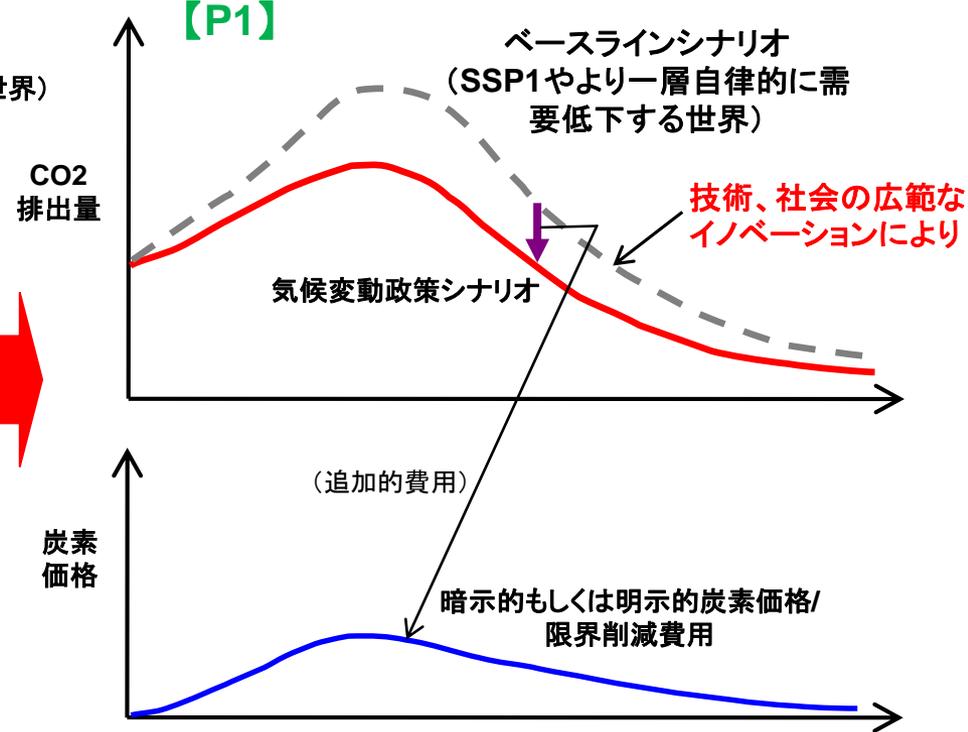
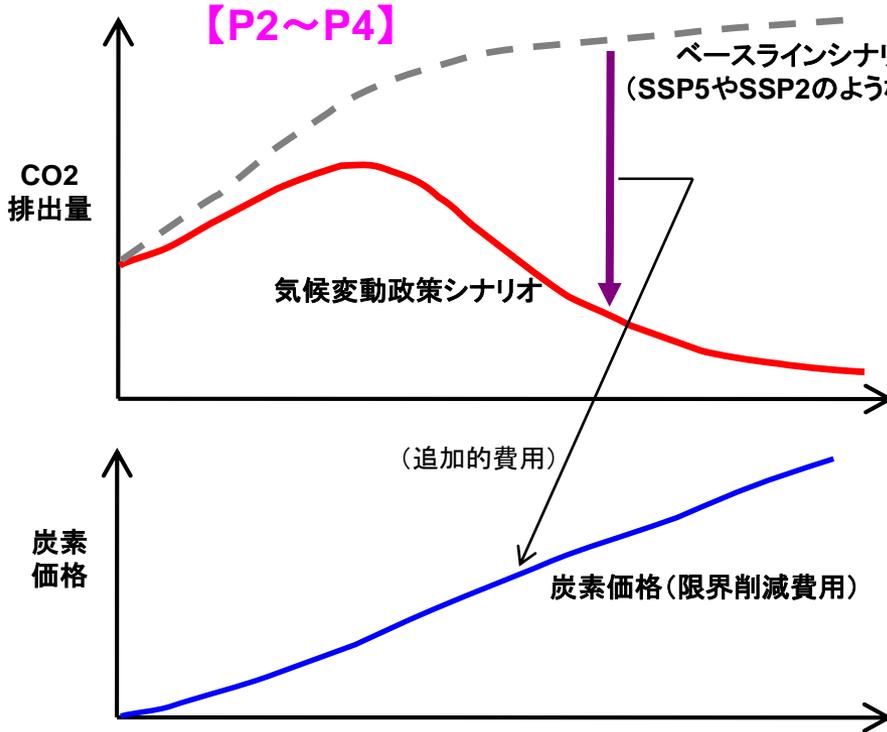
炭素価格大(炭素リーケージを防ぐためにも排出削減の強力な国際協調が不可欠)

気候リスク対応のためCDR(CCS, BECCS, DACS等)技術も大規模に利用

モデル分析によってIPCC等で示されてきた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

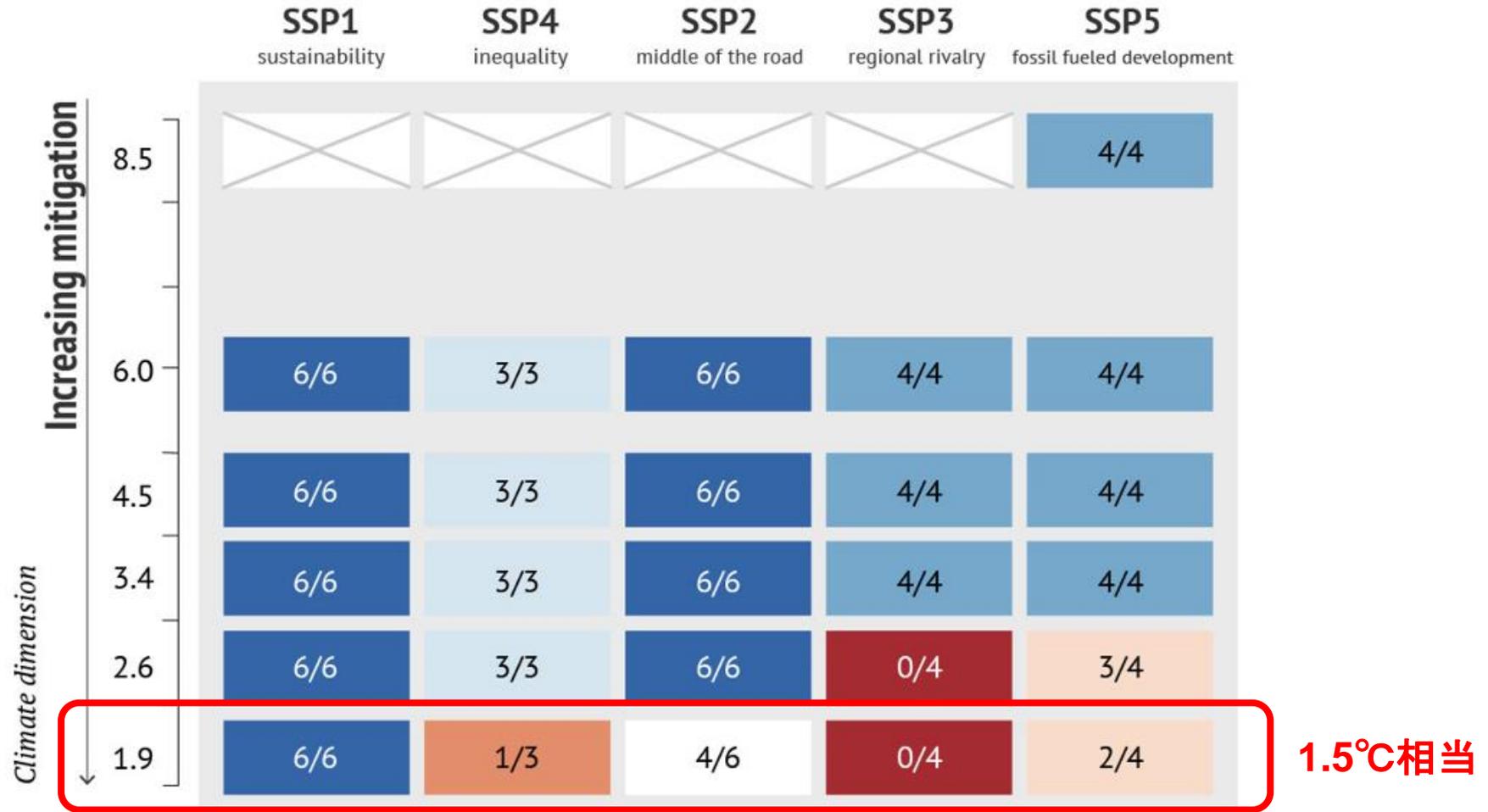


- 現実世界においては、高い明示的な炭素価格をつけるようなことは非現実的(世界で高い炭素価格で協調することは不可能であり、一方、国際協調無しに高い炭素価格付けを行えば、製造業は産業移転を起こし、炭素排出は他国にリーケージを起こし、温暖化抑制効果は期待できない)。
- 高くない(暗示的もしくは明示的な)炭素価格であっても(2次エネルギー価格の世界的な協調を含め)結果として、排出が大幅に減るように誘発するような技術、社会の大幅なイノベーションが起これなければ、現実世界では大幅な排出削減は不可能と考えられる。
- ただし、気候変動影響被害が極めて甚大、かつ、イノベーションがうまくいかなかったときの備えとしてのシナリオ検討、技術(BECCS, DACSなど)の準備は必要と考えられる。

社会経済シナリオ別のモデル分析の実行可能解

Socioeconomic dimension

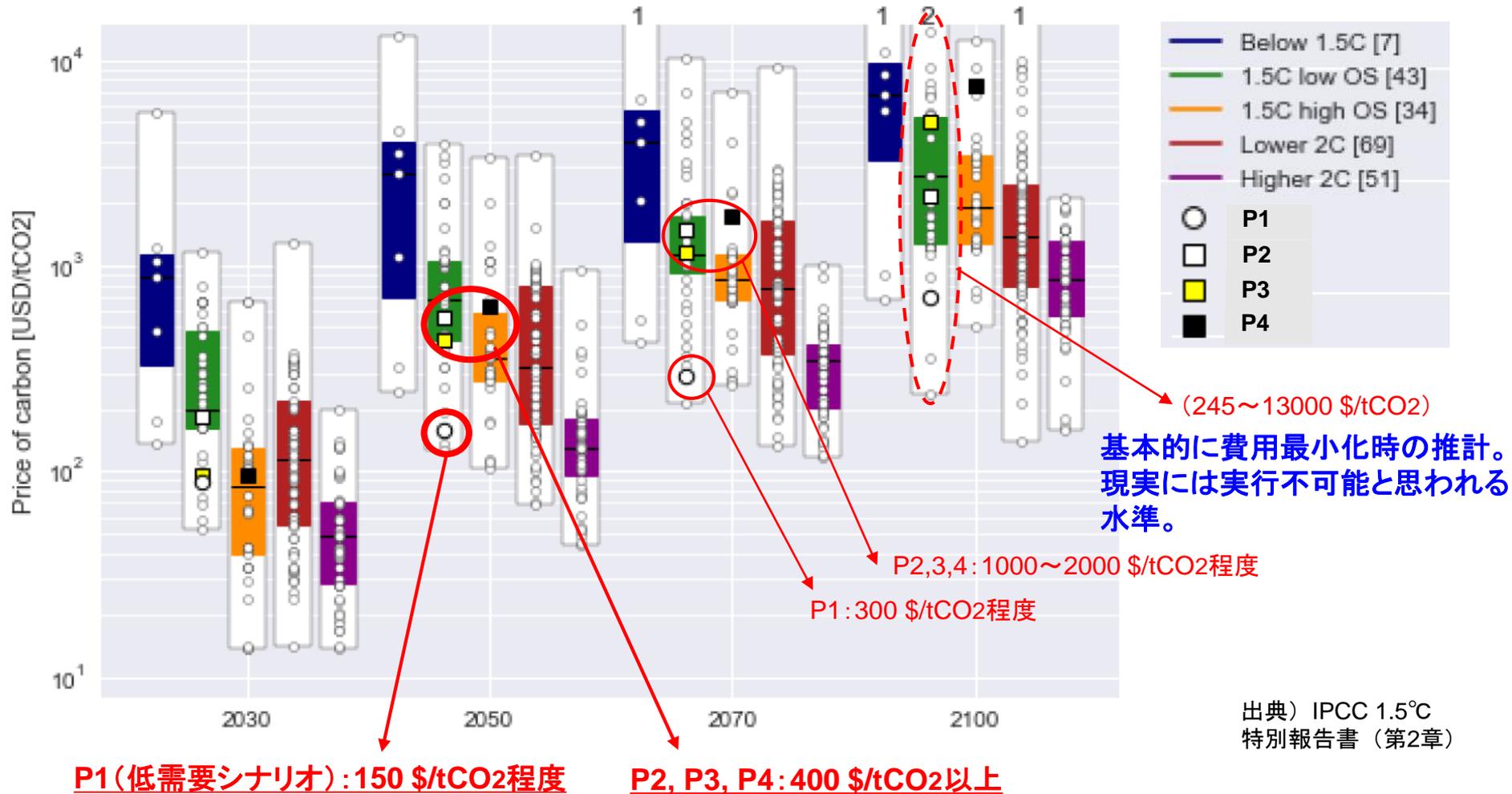
Mitigation challenges



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) 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)

国際政治、国内政治の複雑性

◆ 米国トランプ政権

- 米国の産業、経済、雇用に悪影響を与え、他国を有利にするものであるとの理由で、2017年6月にパリ協定から離脱する意向を正式に表明。（「自分を選んだのはピッツバーグ等の米国市民であり、パリの市民ではない」）
- 製造業労働者の雇用問題も一要因でトランプ政権誕生につながった。
- シェールガス開発、石炭利用など、エネルギー価格を安価に導く政策を推進。CO2排出規制的な政策は廃止の方向に。
- G20大阪サミットでも、気候変動に関する文言は最も調整が難航した議題となった。



◆ フランス イエローベスト運動

- 燃料税の引き上げに反対して、2018年11月から大規模な抗議活動に発展。特に車の代替手段が乏しい、地方の不満が噴出。
- グローバル化の中で、製造業の労働者（地方の中産階級）の雇用環境の悪化と連動していると見られ、米国トランプ政権、英国ブレグジットと似た背景がある。

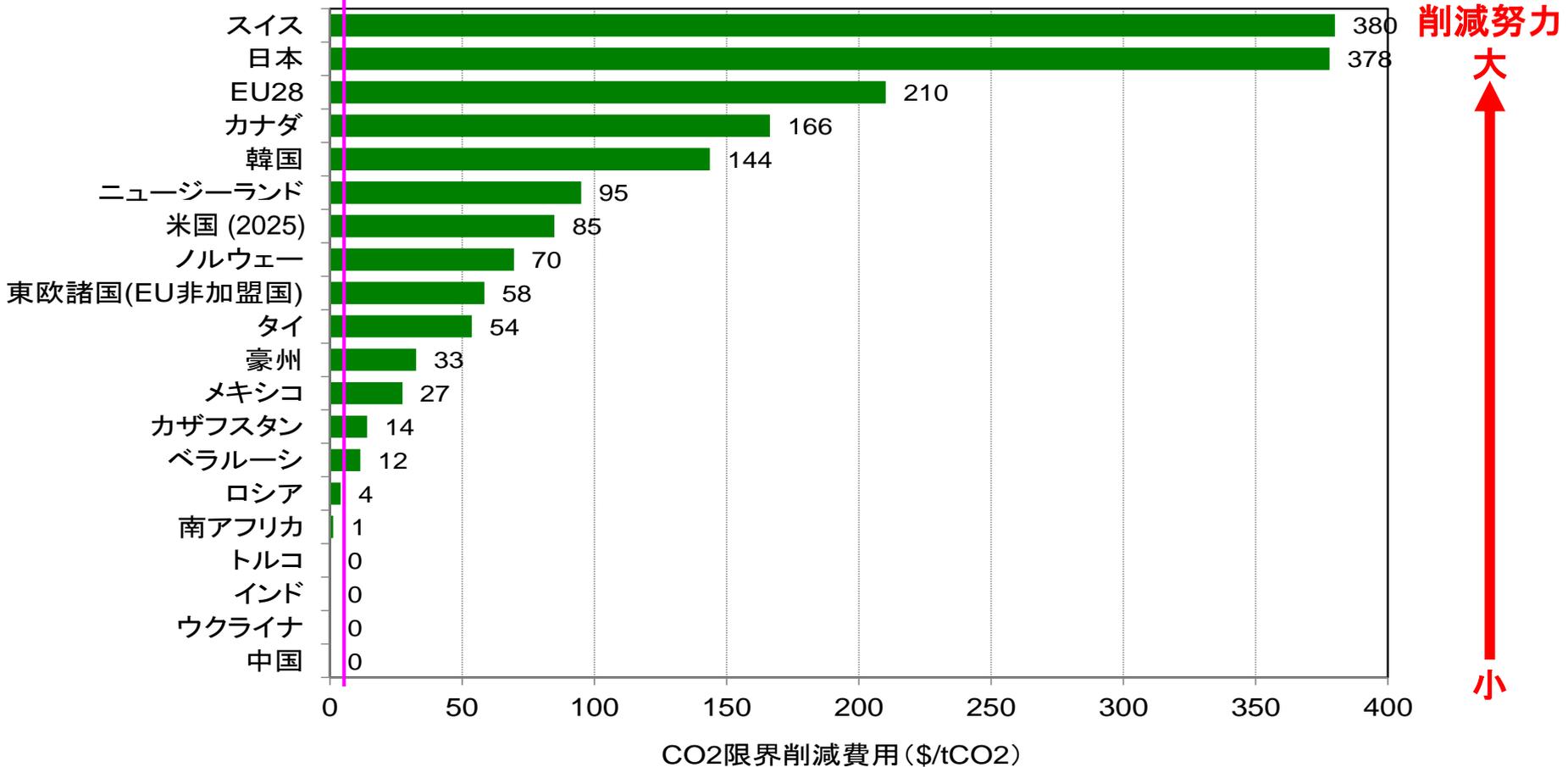


- 2019年1月に誕生したブラジルのボルソナロ政権も、パリ協定には否定的とされる。（本来、2019年のCOP25はブラジル開催が予定されていたが、チリに変更（その後、地下鉄運賃値上げに反対する暴動が原因で、開催地をスペインに変更））
- 2019年12月のCOP25も事実上、交渉は主要な論点で合意を見なかった。

NDCsのCO₂限界削減費用：国際的な協調の困難性からの費用増

【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

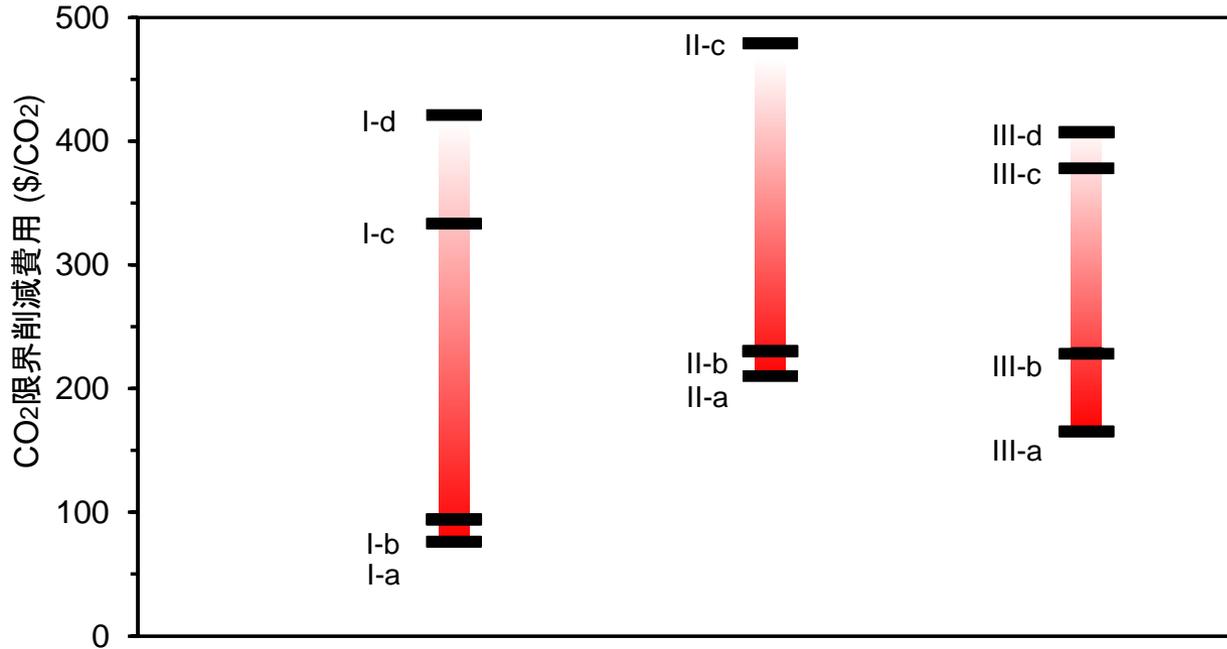


* 上下限で幅がある国は平均値を表示

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。

日米欧NDCsのCO2限界削減費用：国内政策の複雑性からの費用増



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

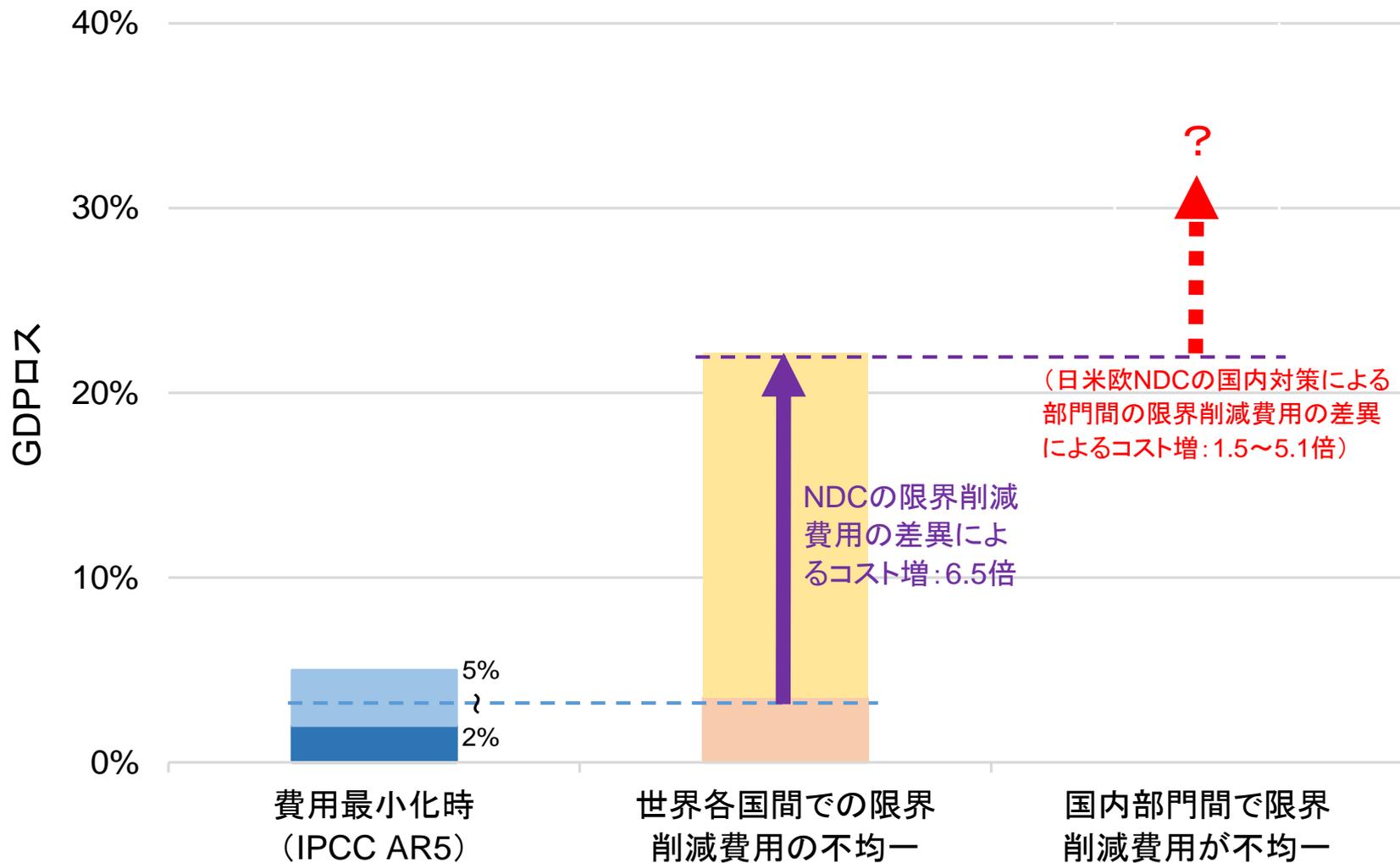
- II-a: 最小費用
- II-b: ブレグジット(英国が-40%に留まる場合の英国以外の限界削減費用)
- II-c: ETS部門での排出削減が計画に従った場合、非ETS部門での限界削減費用

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。

2°C目標時の2050年の世界GDPロスのイメージ



【資本のユーザーコスト】

Jorgensonの新古典派投資理論において企業の最適化行動を考慮して定式化された資本のユーザーコストは、資本財からのサービスを得るために投資家が支払わなければならない費用として定義

$$P_{kjt}^K = (r_{kjt} + \delta_{kj} - \pi_{kt}) \cdot P_{kt}^A$$

資本取得価格 (P_t^A)、 t 時点における実質利子率 (r_t)、減価償却率 (δ)、資本財価格の変化に伴うコスト (π)、資産の種類 (k)、国あるいは経済主体 (j)
資本取得価格 (P_t^A) に対する係数 ($r_{kjt} + \delta_{kj} - \pi_{kt}$) は通常、年次化要素 (annualization factor) と呼ばれる

【投資行動として観測される年経費率】

観測される投資の割引率 (γ) = 年次化要素 ($r + \delta - \pi$)
+ 投資・購買検討のための機会費用要素 (λ)
+ 限定合理性要素 (ρ)

【技術固有によるもの】

- 技術が必ずしも成熟していない場合（CCS等）や社会的受容面で課題がある技術のリスク場合（原子力等）は、投資しづらくなり、割引率は高くなる。[r , δ に影響]
- 将来コスト低減が期待できれば、投資を待つことが合理的となり、割引率は高くなる。[π に影響]
- 供給するサービスの将来変化：将来も同じような製品・サービスの提供が続くことが期待されれば、割引率は低くなり、逆の場合は高くなる。（電力等エネルギー供給<鉄、セメント等の素材供給（主にエネルギー多消費産業）<給湯、空調など（素材供給との大小関係は必ずしも明確ではない）<照明、冷蔵庫など<テレビ、自動車など）[δ に影響]

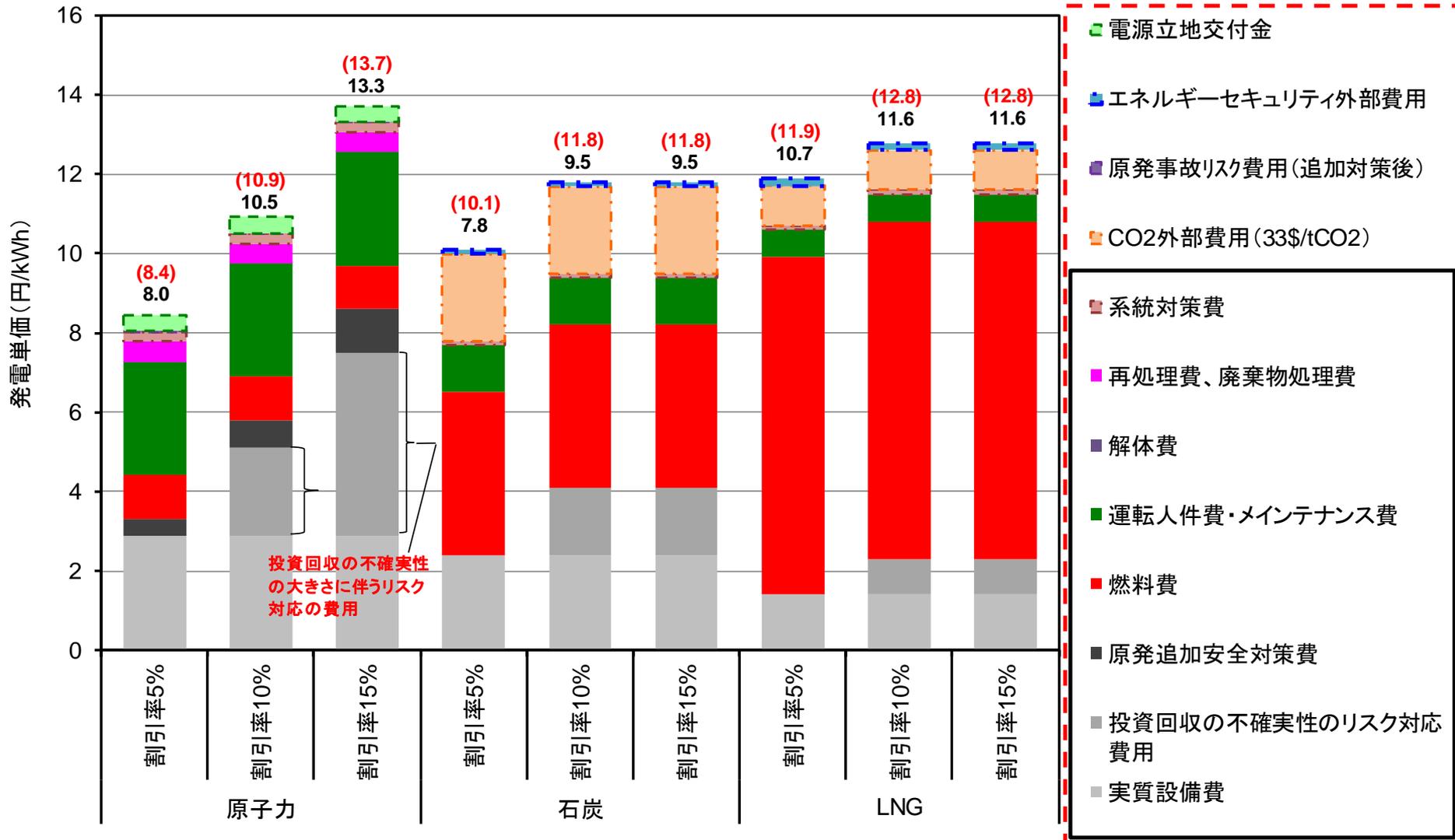
【投資者、消費者の選好等】

- 資金制約（大規模な投資はリスクが高い）、投資リターン（高いリターンの投資が優先されやすい）[r に影響]
- 隠れた費用（投資検討にあたっての機会費用等）[λ に影響]
- 消費者の選好：環境配慮型製品の購入（アーリーアダプター等）、（住宅等において）コベネフィットの強い認識など [ρ に影響]
- 住宅などで耐用年数よりも居住者の寿命の方が短いと考える場合、割引率は高くなる。[δ に影響]
- オーナー・テナント問題など（民生部門）[ρ に影響]
- 限定合理性（人々の情報処理・判断能力の限界など）[ρ に影響]

【取引市場、投資環境等、周辺制度によるもの】

- エネルギー・気候変動政策等の不確実性の大きさ[δ に影響]
- 炭素価格市場のボラティリティが高ければCCS投資はなされにくい [δ に影響]
- 電力自由化で価格指標のボラティリティが大きければ設備費の大きな電源投資はしにくい。[δ に影響]
- 四半期決算などの下では短期の投資回収が志向されやすい。[r に影響]

RITEによる2030年のコスト評価を基に試算したもの(2014)

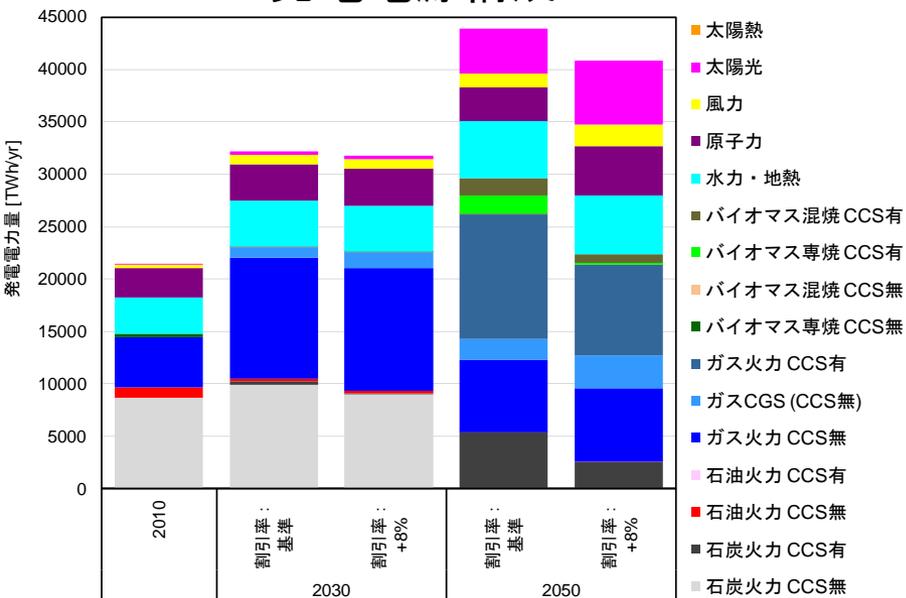


2°C目標相当の炭素価格下における 電源の投資割引率の差異によるCO₂排出量

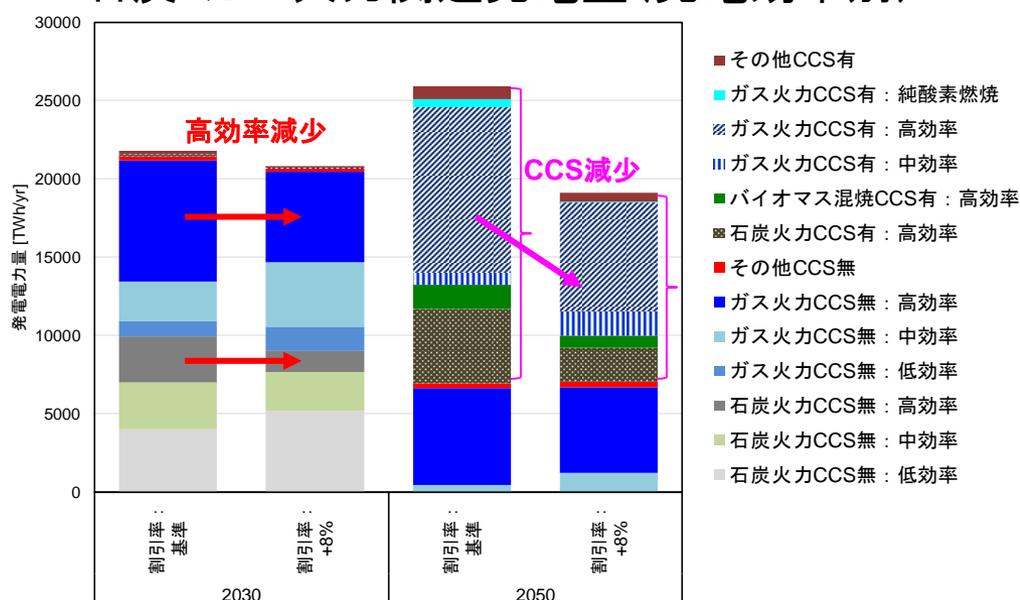
- 2°C目標と統合的な限界削減費用(2050年、154 \$/tCO₂)を想定
- 化石燃料発電について、高割引率ケースでは、CCS付発電が減少(2050年)。高効率発電の利用も減少し、ガス火力で中効率発電の利用が増加。
- 様々な不確実性による投資リスクが大きい環境下では、投資リスクが隠れたコストとなり、(一般的に低排出を実現する)相対的に資本費が高い対策の投資がされにくくなる。結果、同じ炭素価格の下ではCO₂排出量は増加。

CO ₂ 排出量 (GtCO ₂)	2030年		2050年	
	基準ケース	高割引率ケース(+8%)	基準ケース	高割引率ケース(+8%)
全CO ₂ 排出量	41.3	42.0	19.0	21.5
内 発電部門	15.1	15.7	0.6	3.3

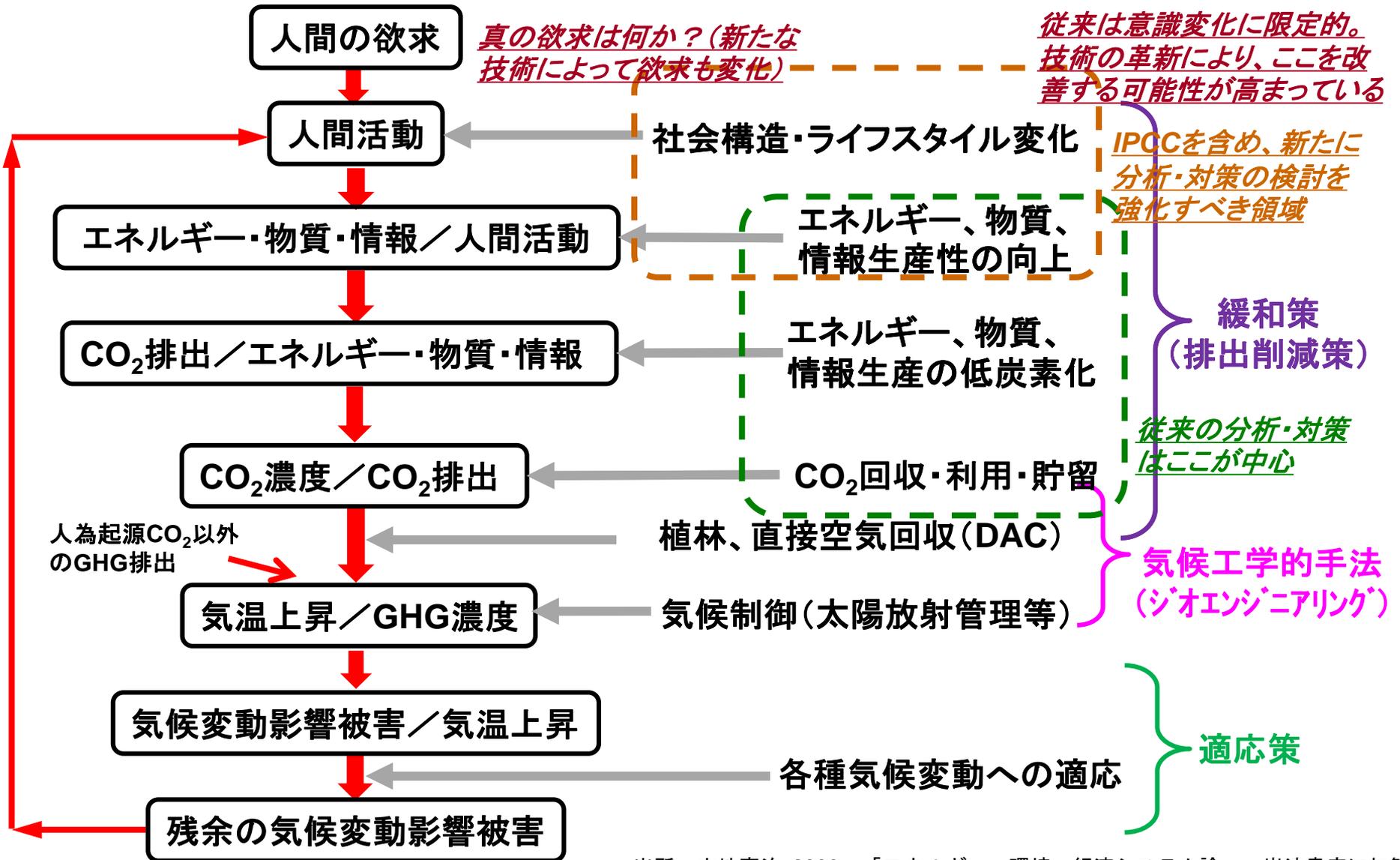
発電電源構成



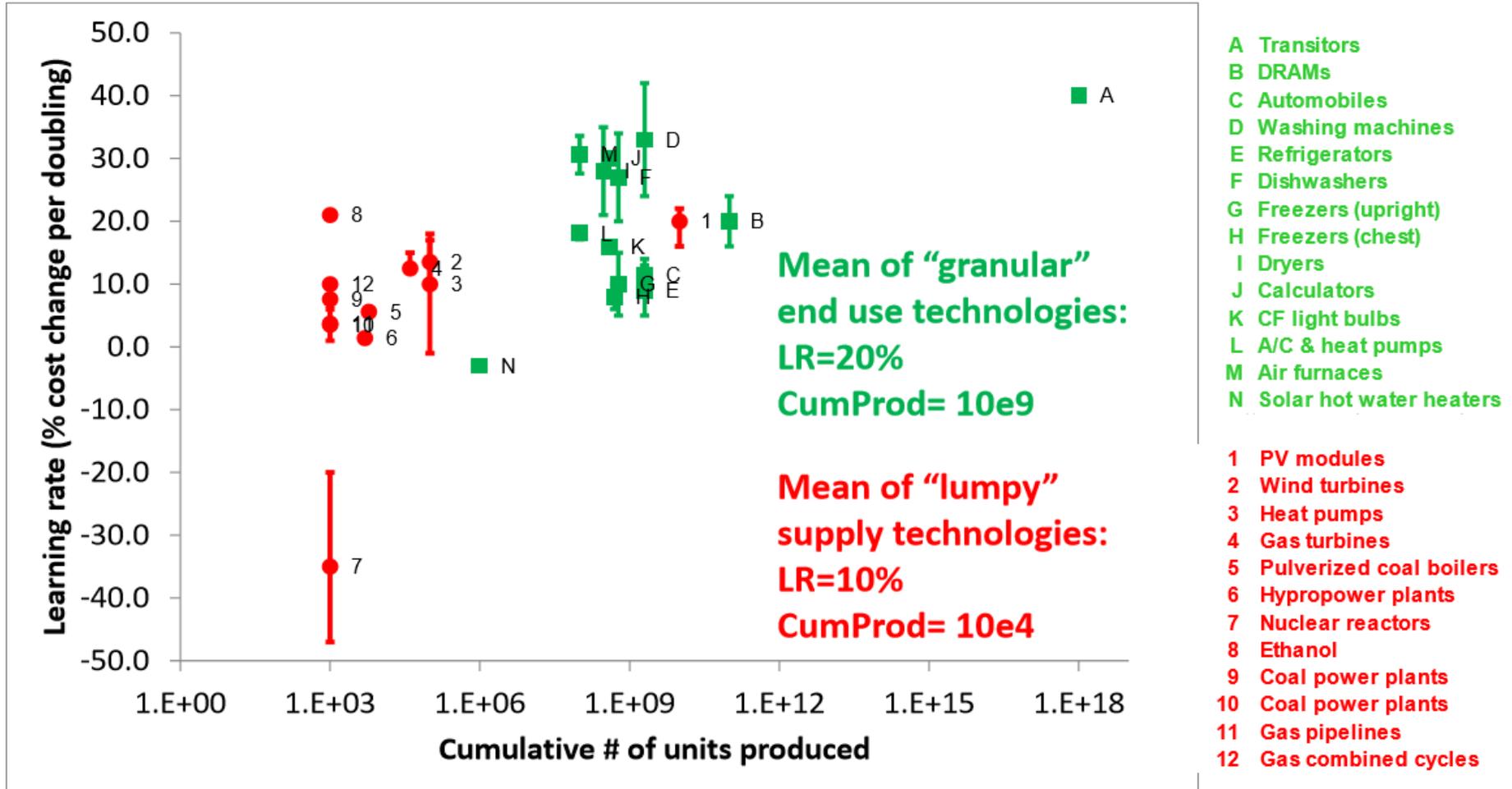
石炭・ガス火力関連発電量(発電効率別)



地球温暖化対策の基本構造を踏まえた 総合的なリスクマネジメント戦略



エネルギー関連技術の技術習熟率： エネルギー供給サイド技術と需要サイド技術

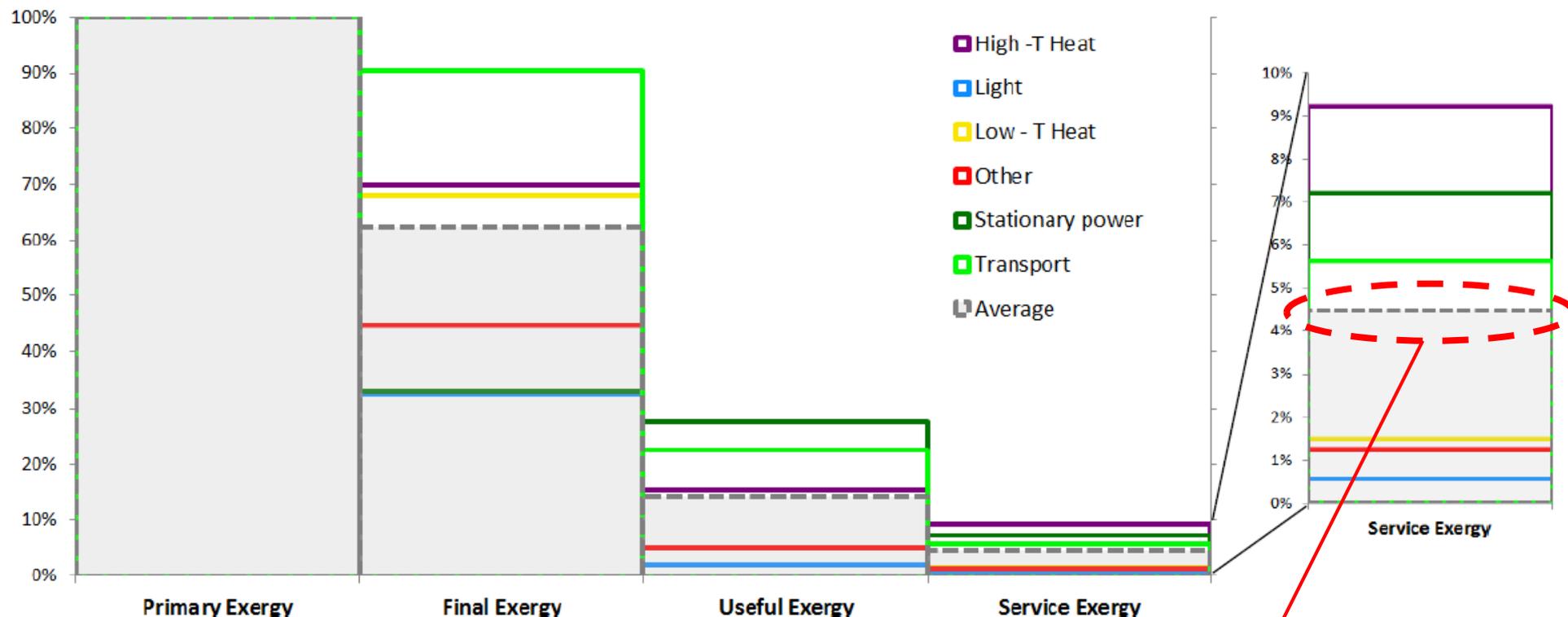


Wilson et al. Nature CC S1, 2012

一般的に、エネルギー需要サイドの技術の方が、エネルギー供給サイドの技術よりも習熟率が高い。

部門別の世界のエクセルギー効率

一次エネルギーのエクセルギーに対する比率

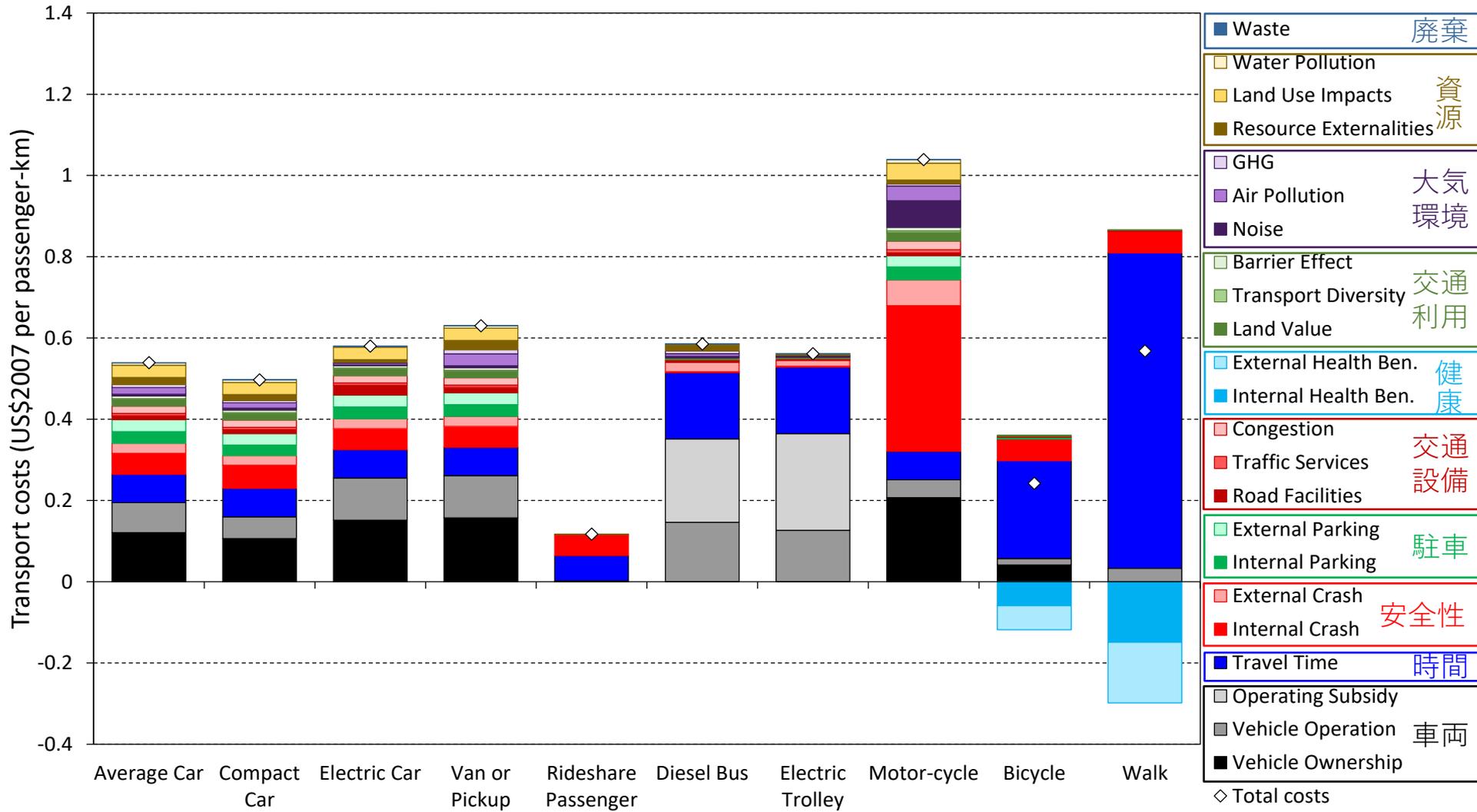


出典) A. Grubler, ALPSシンポジウム(2016)

最終的なサービスとしては、一次エネルギーの4~5%程度しか活用できていない。

エネルギー需要サイドに特に効率化の改善余地が大きい。従来は隠れたコストのような障壁があってその効率化は難しかったが、情報技術の発達によって、その改善の可能性が高まってきている。

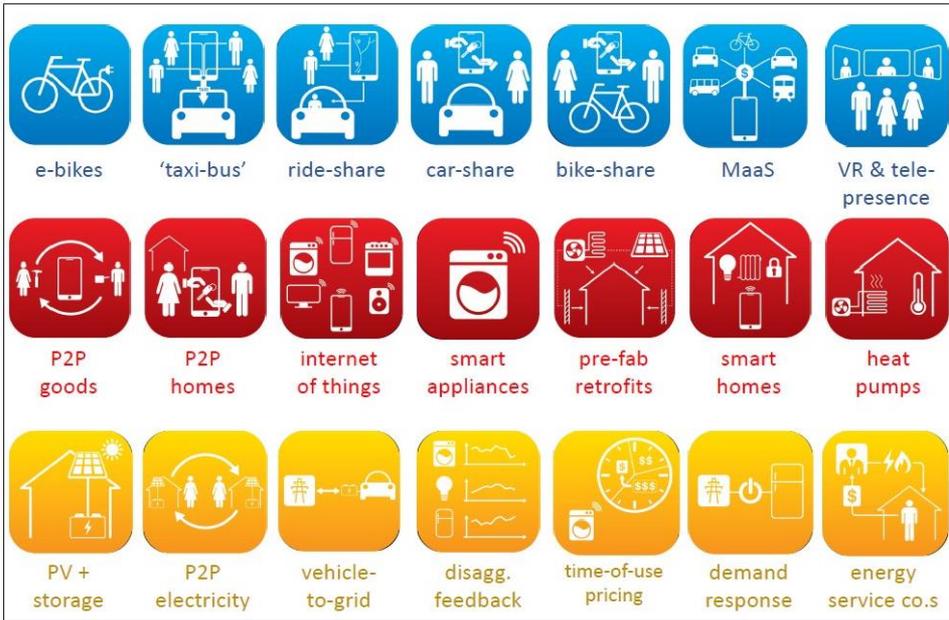
移送手段による移動距離当たりの平均コスト（項目別）



(データ出典) Litman, Transportation Cost and Benefit Analysis (2009, 2015, 2017, 2018)

例えば、運輸部門で見ると、車両関連コスト以外の要素のコストが相当大きい。現実社会における、自動車の種類やモビリティ選択を捉えようとする場合、車両関連コスト以外のコストの把握、分析が重要。

エンドユース技術の破壊的イノベーション

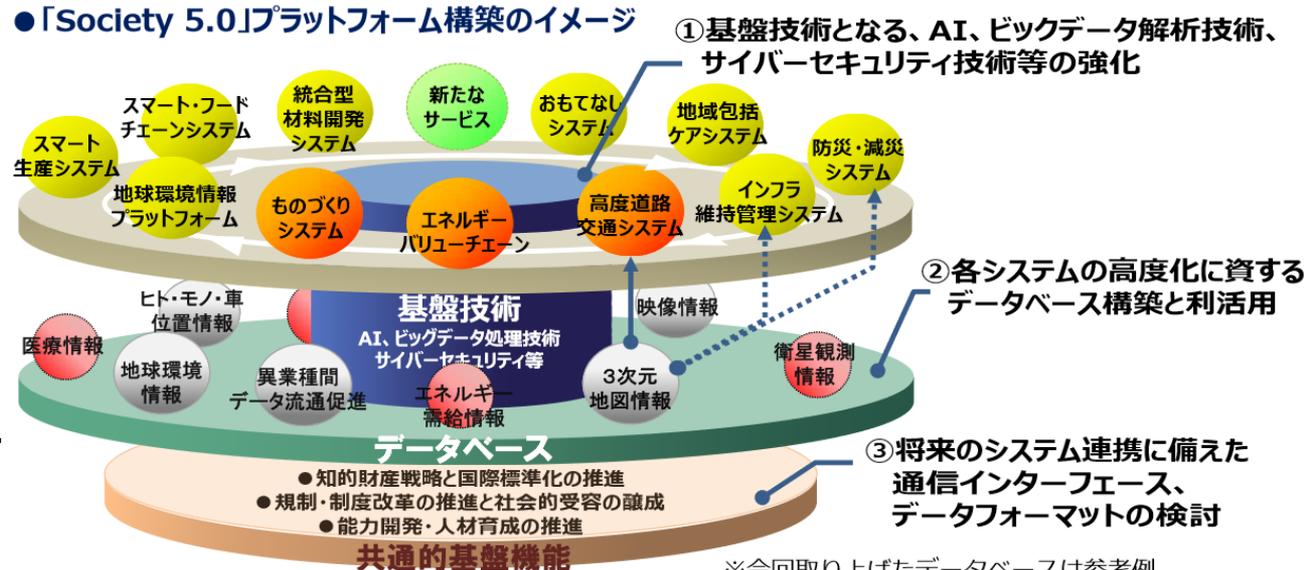


Source: C. Wilson (IIASA)

IoT, AI等の技術進展は、最終エネルギー需要側の社会イノベーションを誘発するポテンシャルあり

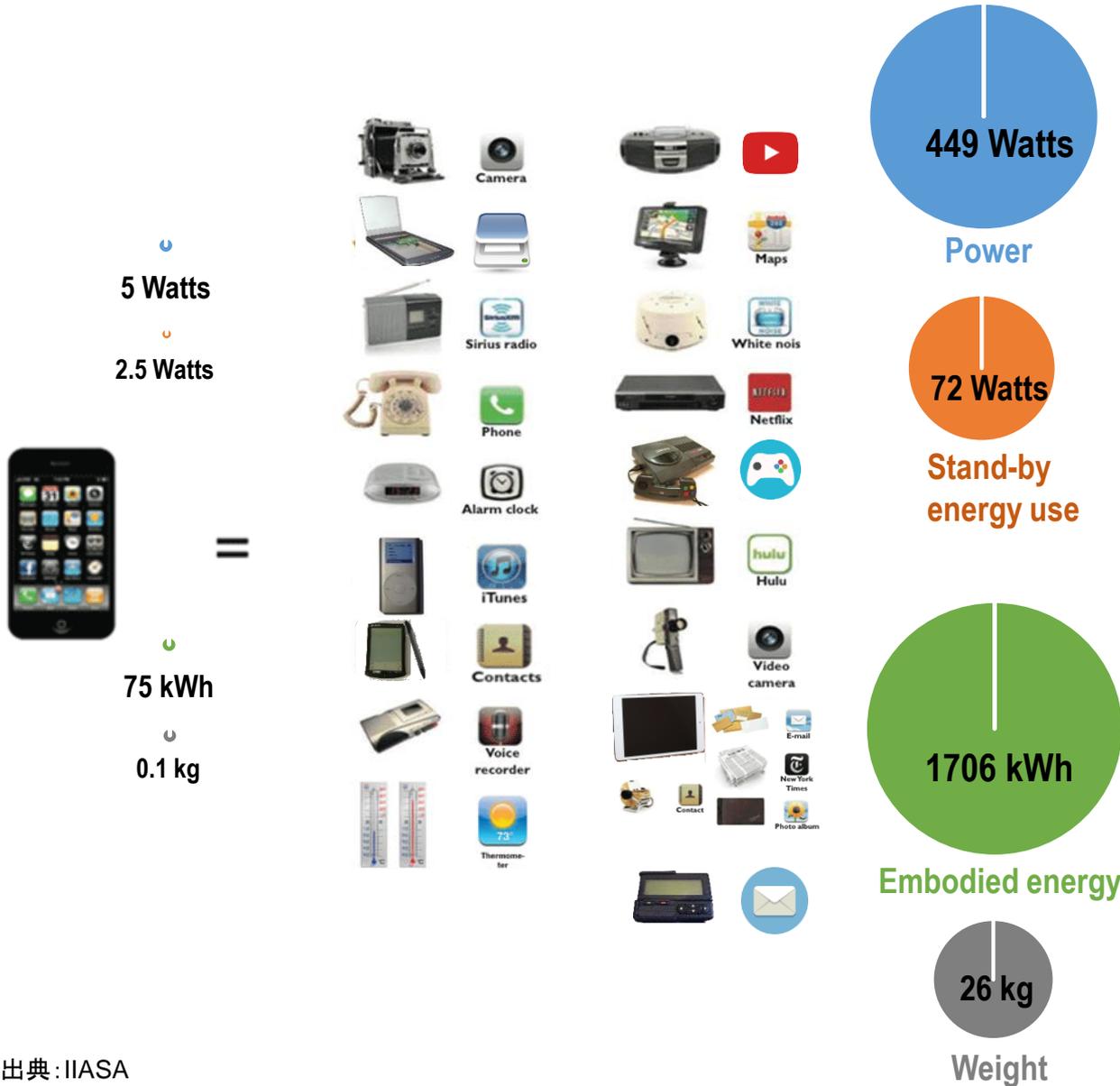
- 1) 独立した技術から、接続へ
- 2) 所有から、利用へ
- 3) シェアリングエコノミー、サーキュラーエコノミーの誘発

●「Society 5.0」プラットフォーム構築のイメージ



サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会

IT, AI等のデジタル技術による社会変化と 低エネルギー需要・低炭素排出社会の可能性



- 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。

運輸部門: CASE



Connected; Service & Shared



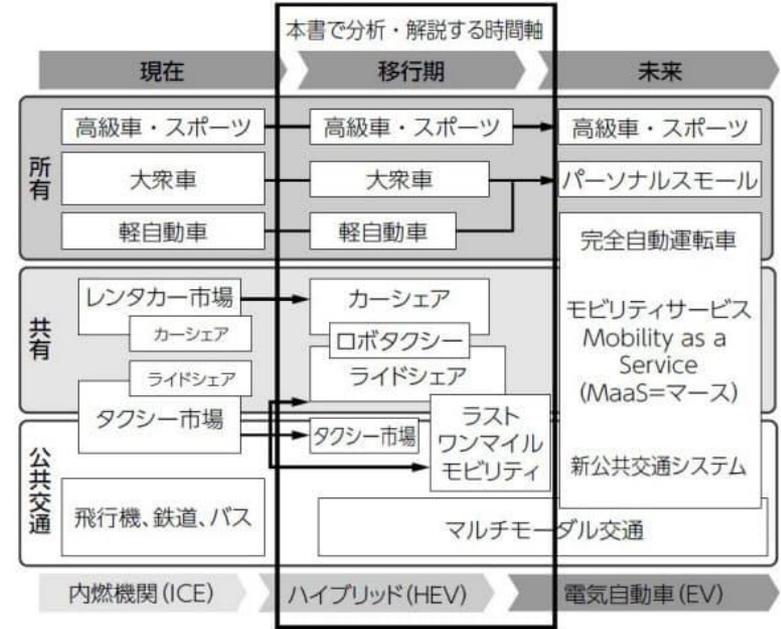
WHAT IF ALL
TRANSPORTATION
WAS
CONVERGED...



Autonomous; Electric



自家用車の稼働率は5%前後。
完全自動運転でシェアリングで
稼働率上昇の余地大



Autono-MaaS専用EV「e-Palette」

出所: ナカニシ自動車産業リサーチ

出典)トヨタ



車の形が変わる

自動車と近距離航空の
融合の可能性も

シェア化に伴い、車両台数低減
が、素材生産量を低減し、また
都市の形を変える可能性も



Airbus, Audi

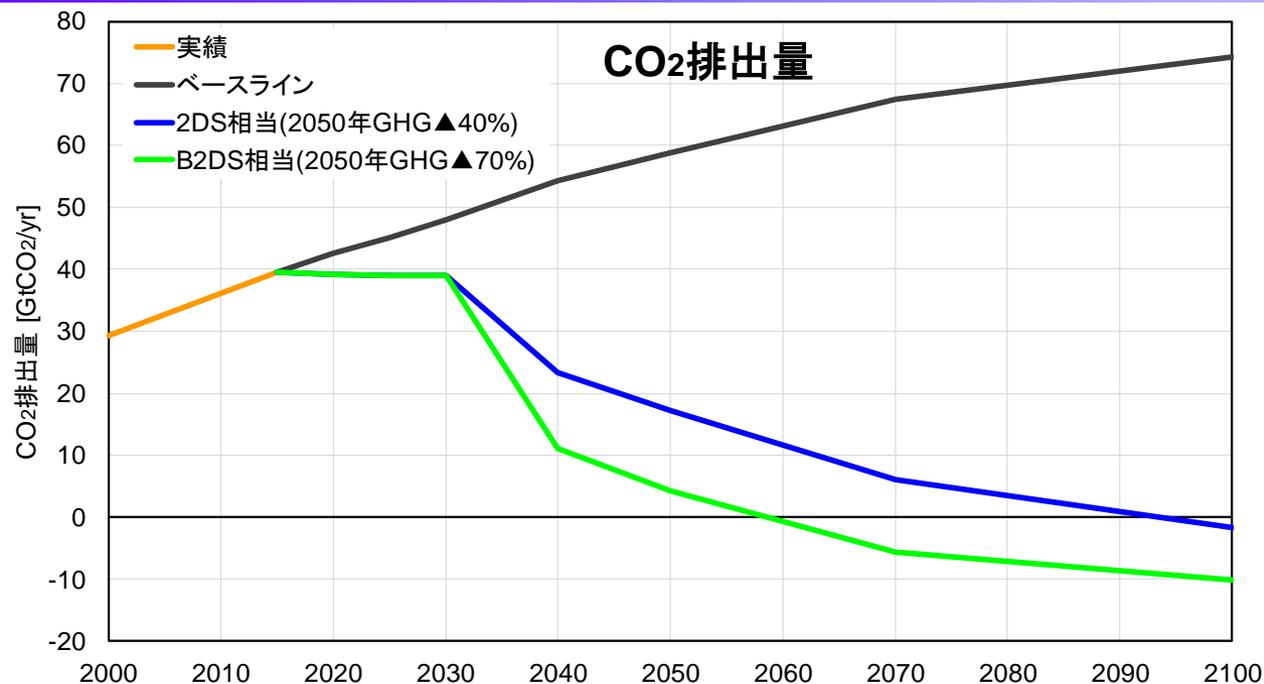


出典) Jari Kauppila, ALPSシンポジウム(2019)

モデル分析のシナリオ想定

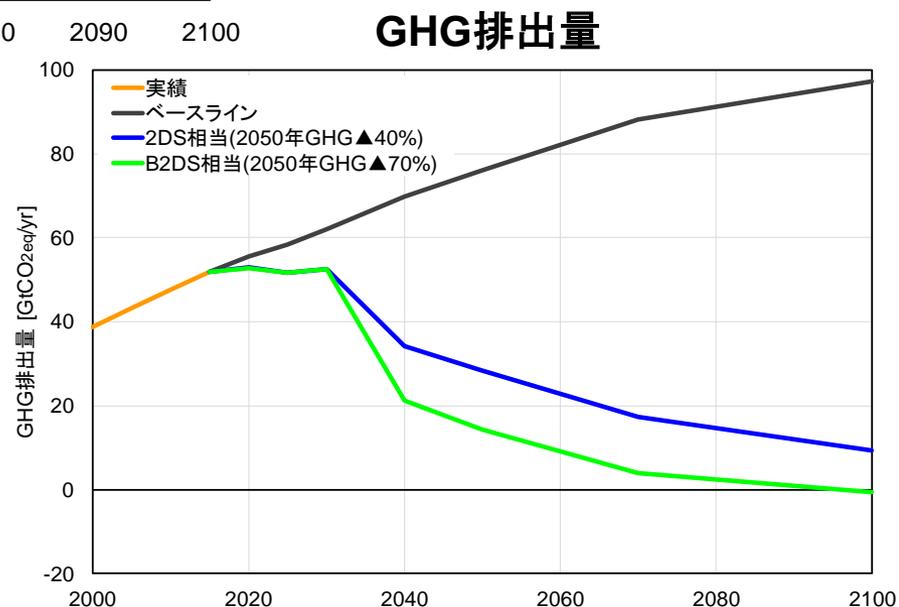
シナリオ名	世界排出シナリオ	再エネコスト (太陽光発電コスト)	シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)
REF_1	ベースライン (特段のCO ₂ 排出制約なし)	標準	想定せず
2DS_1	2°C未満(>50%): IEA ETP2017の [2DS]相当	標準	想定せず
2DS_2		低コスト(中東・北アフリカ中心に)	シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)
2DS_3			
B2DS_1	2°C未満(>66%): IEA ETP2017の [B2DS]相当	標準	想定せず
B2DS_2		低コスト(中東・北アフリカ中心に)	シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)
B2DS_3			

ベースラインの世界排出量と想定した2°C排出シナリオ



注)ベースライン排出量は前提とする想定シナリオではなく、モデル計算結果

※ 2DS、B2DSシナリオについては、2030年までは各国NDCs相当の排出制約を想定



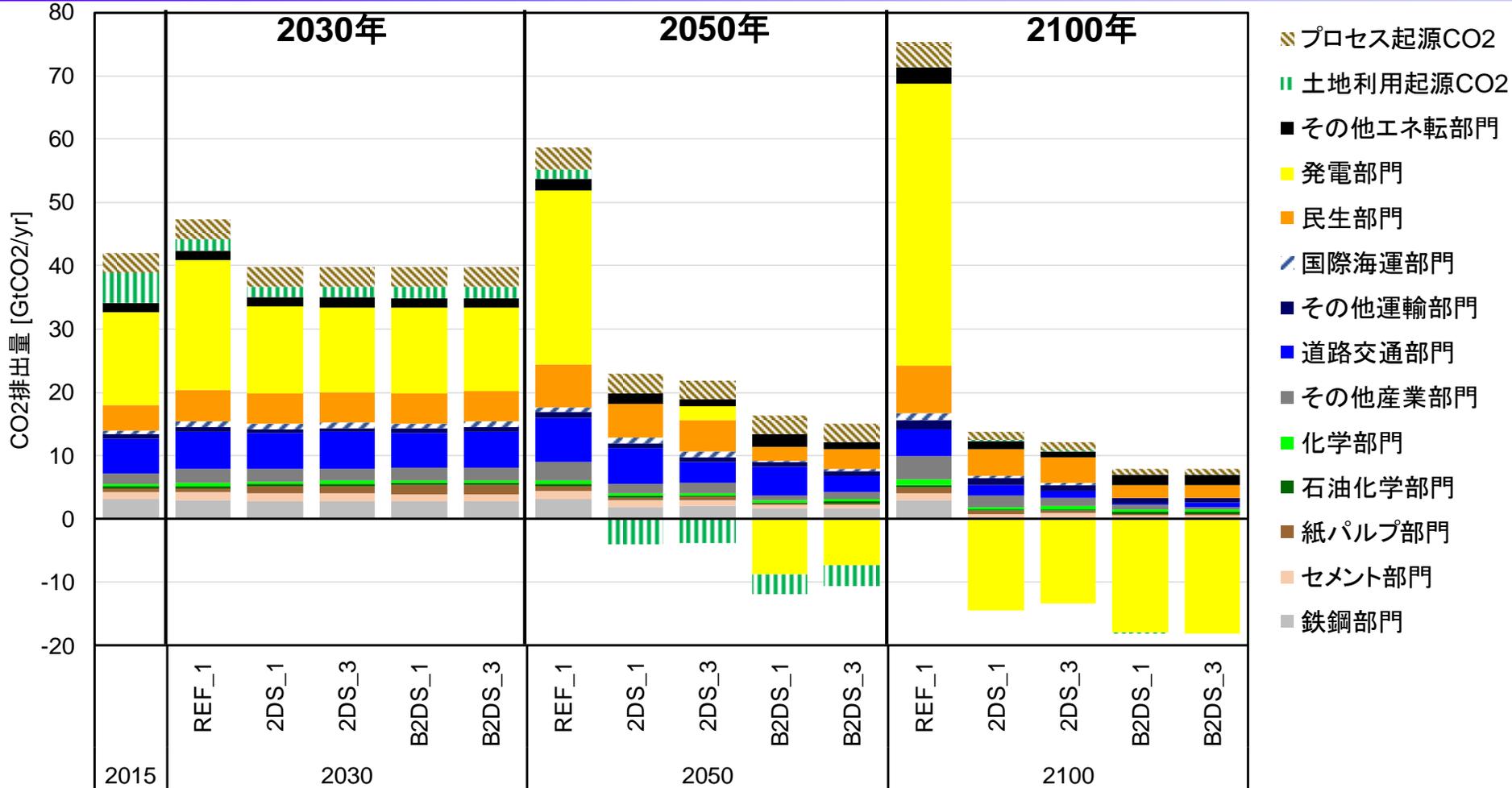
2050年の排出削減費用

	2DS_1	2DS_2	2DS_3	B2DS_1	B2DS_2	B2DS_3
CO ₂ 限界削減費用 (\$/tCO ₂)	161	157	132	528	477	295
CO ₂ 削減費用 (billion US\$/yr)	1603	1296	ネガティブ費用	5716	4164	ネガティブ費用

- ✓ 2°C目標でも、>50%確率(2DS)か、>66%確率(B2DS)かで世界の削減費用に大きな差あり。
- ✓ 中東等を中心とした再エネコスト低位ケースの場合(ケース2、3)、世界の対策費用低減に大きな効果あり。
- ✓ シェアモビリティ実現ケース(ケース3)では、シェアモビリティ非実現ケース比では負の費用に。

世界の部門別CO2排出量

(REF_1、2DS_1、2DS_3、B2DS_1、B2DS_3)



- ✓ 排出削減が厳しくなるにつれ、まず発電部門での削減(再エネ、原子力、CCS等)、また、植林でのCO2固定、運輸部門でのHV, PHVの拡大等が見られる。
- ✓ 更に厳しい削減が必要となると、BECCS、鉄鋼部門でのCCS、自動車のEV, FCV化等が費用効率的に。
- ✓ 更に厳しく正味ゼロから負CO2排出となると、運輸部門トラックのFCV化、メタネーション利用等が費用効率的に。
- ✓ シェアモビリティ想定ケースでは、特に2050年頃の発電での排出削減を緩和する。

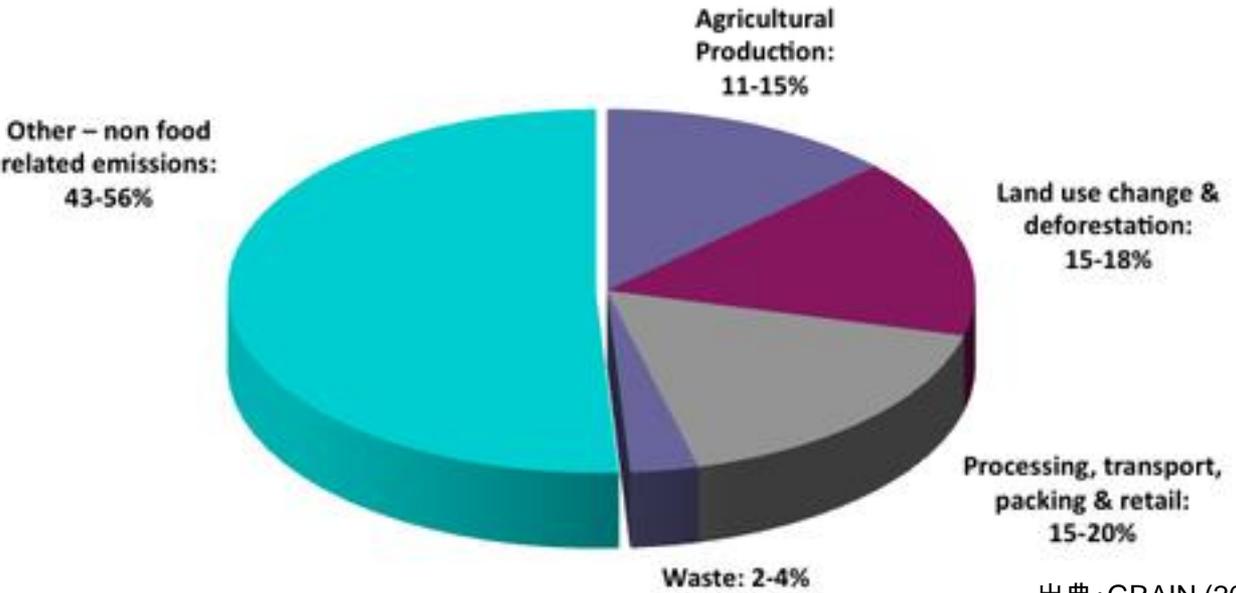
食料のライフサイクルにおけるエネルギー消費(米国)の推計例



米国での推計例では10.8 EJ/yr(1990年代)(エネルギー消費全体の12%程度)食料のライフサイクルにおける様々な工程でエネルギーが消費される。

出典 : <https://www.oregon.gov/deq/FilterDocs/PEF-FoodTransportation-FullReport.pdf>

GHG排出量に対する食料需給関連の寄与(世界)の推計例



食料のライフサイクルでは相当大きなエネルギー、GHG排出がなされている。
 食料ロス・廃棄を減らせられれば、生産量が減り、加工や輸送等におけるエネルギー消費、容器の低減とそれを製造するためのエネルギー消費、小売での保存、陳列の食料品減少によるエネルギー消費低下など、大きな波及効果が予想される。

出典 : GRAIN (2011) Food and climate change: the forgotten link

リバウンド効果

ただし、様々なリバウンド効果の可能性があり、要検討事項

◆ データセンター等での電力消費量の増大

⇒ **ただし、人はエネルギーの20%程度を脳で消費していることからすると、社会のより効率の良いエネルギー利用のために、脳にあたるAI, IoT等のある程度の消費増は合理的との見方も？**

◆ 公共交通機関から、ライドシェアへの移行等

⇒ **ヘルシンキのMaaSの取り組みでは、タクシーの利用は増大している。ただし、鉄道等の公共交通機関が存在する区間は、それに誘導するプライシングなどの対応はしやすい。**

◆ **経済自律的にシェアリング経済に移行できた場合、そこで浮いた所得は、新たな消費に向かい、エネルギー消費を増大させる可能性も(例:宇宙旅行)。**

◆ **仮に、(在宅勤務などで通勤時間が減り)時間が浮けば、その時間で別のエネルギー消費の増大がもたらされる可能性も。**



(出典) 経済産業省/グリーンIT推進協議会試算(2008)



まとめとIPCCの今後に向けて

- ◆ IAMsによる、 2°C や 1.5°C に対応した従来のシナリオは、排出削減費用が極めて高い結果を示しており、気候変動リスク対応としては考えておくべきシナリオではあるが、現実の国際情勢等を踏まえると、実現性は高くないシナリオと考えられる。また、SDGsの同時達成を困難とする可能性が高い。
- ◆ 更に、IAMsでは、特に長期については世界限界削減費用均等化を前提とした分析が中心となりやすいこともあり、推計される費用は、現実世界で必要となる費用よりも相当安価な可能性が高い。
- ◆ 現実社会では投資回収の不確実性が伴っており、制度、社会受容性等により、投資リスクが大きくなることが多い。投資リスクも事実上のコストである。これら投資リスクは様々な要因に依っており、統一的な整理は容易ではないが、IAMs等の分析においても配慮しなければ、現実社会とモデル提示のシナリオの大きなギャップを生みかねないので、IPCC報告書もこれに留意した記述が求められる。
- ◆ 一方、デジタル技術などの技術革新が進展してきており、若年層を中心に行動、嗜好の変容も相まって、シェアリングエコノミーなど、大きな社会変化を引き起こす可能性は出てきている。これらの総合的な研究はまだ十分なされておらず、IPCCでも十分扱えていないが、今後、充実させていくことが必要。これらの技術・社会変化は、排出削減費用を大きく低下させ 2°C 目標等の実現可能性向上を秘めている。
- ◆ 自然科学、影響被害、技術の見通しや国際協調など多くの不確実性が存在している中で、総合的な気候変動リスクマネジメントが求められており、複数のシナリオを参照しながら、リスクマネジメントを適切に行う示唆を提示できることがIPCC報告書として目指すべきであろう。

付録

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

Socio-economic
challenges for mitigation

★ **SSP 5:**
(Mit. Challenges Dominate)
Fossil-fueled
Development
Taking the Highway

★ **SSP 3:**
(High Challenges)
Regional Rivalry
A Rocky Road

中位

★ **SSP 2:**
(Intermediate Challenges)
Middle of the Road

★ **SSP 1:**
(Low Challenges)
Sustainability
Taking the Green Road

★ **SSP 4:**
(Adapt. Challenges Dominate)
Inequality
A Road Divided

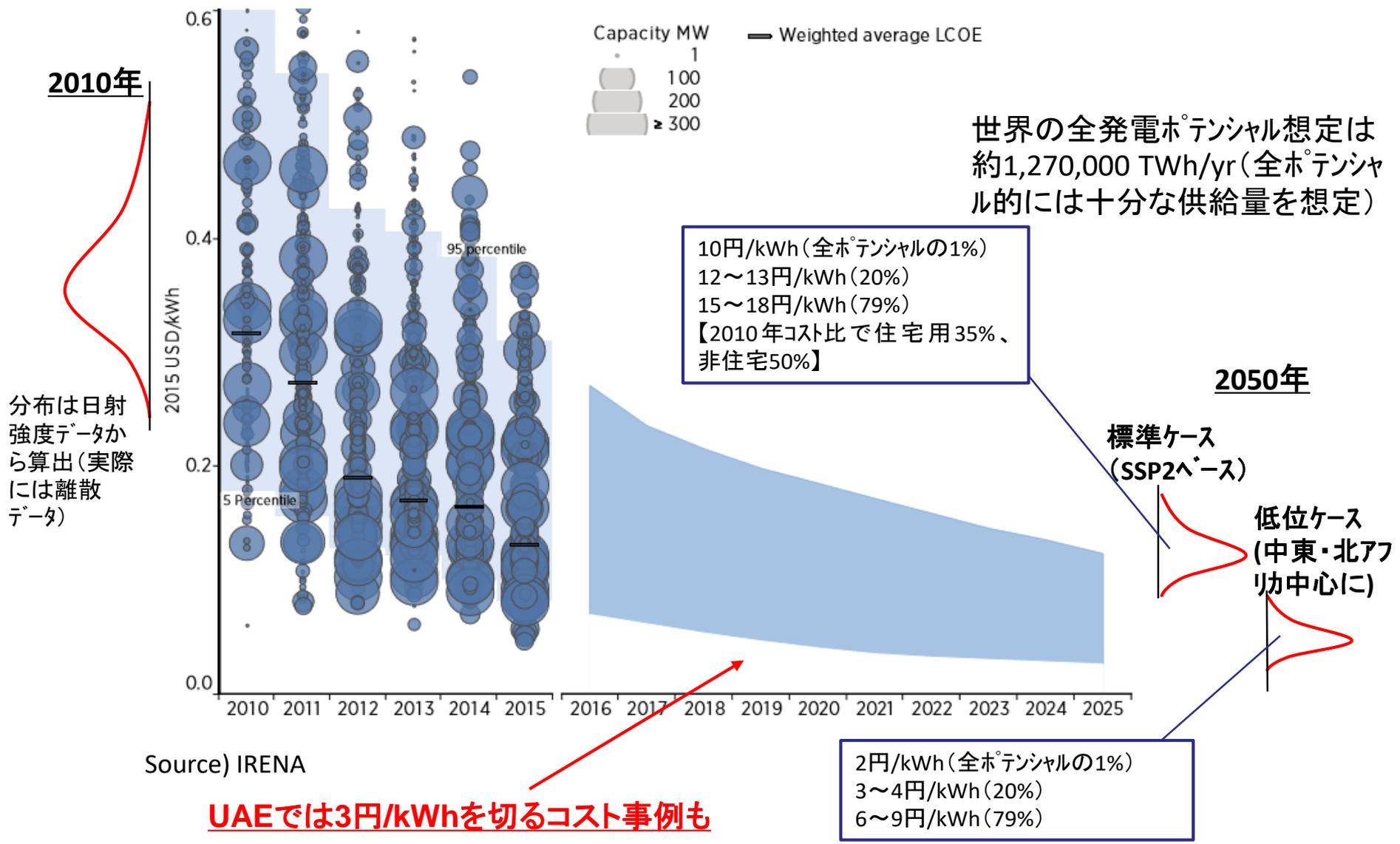
技術進展: 大;
大規模技術の社会的
受容性: 低;
人口: 低; GDP: 高

ガバナンス: 低;
化石燃料価格の地域間
格差: 大

Socio-economic challenges
for adaptation

SSPs: Shared Socioeconomic Pathways

太陽光発電コストのケース想定イメージ： 標準ケースとコスト低位ケース



※ なお、DNE21+モデルでは、VREのシェアが増すに従い、系統安定化のための追加費用が別途必要と想定している。

- ◆ 完全自動運転シェアカーは2030年以降利用可能と想定し、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
 - 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：国土面積当たりの自動車による旅客輸送サービス需要が多いほど、自動車の稼働率が高いと想定（国土面積当たり乗用車旅客輸送サービス需要と一台当たり年間走行距離の関係を想定）
 - 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6～20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
- ◆ 運転に要する時間の機会費用、安全性に関する費用を想定
- ◆ カーシェア・ライドシェアリングによる乗用車台数減少の影響を考慮
 - 【粗鋼生産】乗用車1台当たり1000kg、小型トラック2500kg、バス5000kg、大型トラック5000kgと想定(平戸他、2009)し、新車ベースの鉄重量に換算すると、78%程度に。全体の粗鋼生産は98%程度に。
 - 【エチレン・プロピレン生産量】エチレン・プロピレンに占めるプラスチックのシェアは85%、そのうち自動車のシェアは8%と想定。結果、エチレン・プロピレンの生産量は99%に（これに伴い、ナフサ、エタン共に減少）。