

革新的環境技術シンポジウム2023

2023年12月20日

排出削減ポテンシャルとコスト — IPCC報告書等の検証と含意 —

(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



本日の講演の課題認識

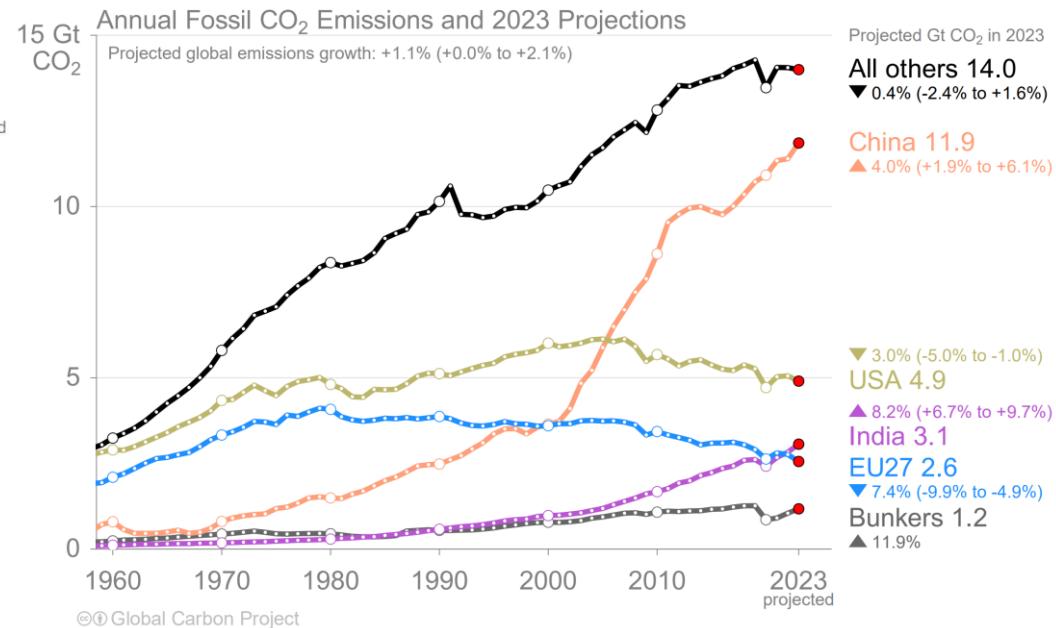
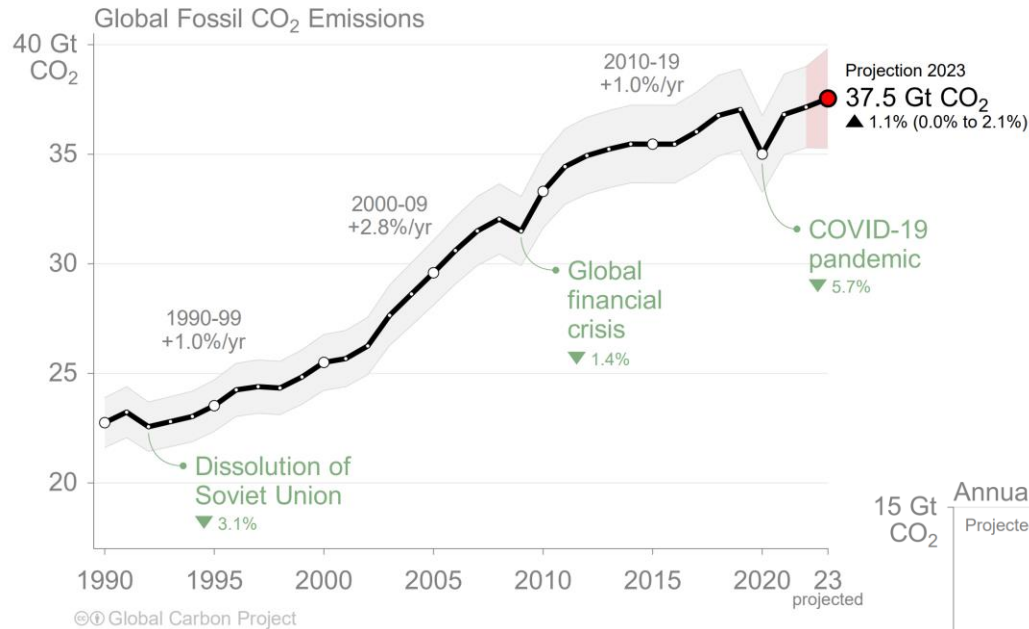
- ◆ IPCC第6次評価報告書(AR6)では、技術積み上げ評価の結果として、「100 \$/tCO₂eq以下のコストの緩和オプションで、世界全体GHG排出量を2030年までに少なくとも2019年レベルの半分に削減しうる。その削減ポテンシャルの半分以上は、20 \$/tCO₂eq以下」とした。
- ◆ 他方、同じAR6では、統合評価モデルIAMsによる、多数のモデルのシナリオ分析からは、これよりも相当小さな削減ポテンシャルが提示された。
- ◆ 技術積み上げ評価と現実で観測される投資行動、機器選択とのギャップや、技術積み上げ評価とIAMsの分析・評価におけるギャップについては、従来から、主観的割引率(Implicit Discount Rate: IDR)を中心とした論点で、多くの論考が存在する。しかし、AR6では第12章Cross-sectoral perspectivesにおいては、技術積み上げ評価とIAMsの分析の差異についての検討はなされているものの、IDRの視点での論考はほとんど見られない。
- ◆ なお、IPCC第5次評価報告書では、IDR等の点から、技術積み上げ評価は誤解を与えたとの指摘が執筆者会合で多く出され、採用しないこととした。
- ◆ 他方、経済学では「資本のユーザーコスト」という概念が提示されており、資本を利用する際に、経済合理的に、年間支払うべきコストが算定され、経済指標からの具体的な算定も多くなされてきている。しかし、エネルギー、気候変動対策評価の分野では、IDRは比較的議論されるものの、資本のユーザーコストと関連づけた議論はあまり見受けられない。
- ◆ このような状況において、AR6のコスト・ポテンシャル推計を中心にしつつ検証・考察する。

1. 世界および各国の排出動向
2. IPCC第6次評価報告書におけるコスト・ポテンシャル推計の記載
3. 主観的割引率と資本のユーザーコスト
4. DNE21+モデルによる排出削減ポテンシャル・コストの分析とIPCCとの比較
5. まとめ

1. 世界および各国の排出動向



世界のCO₂排出量の推移

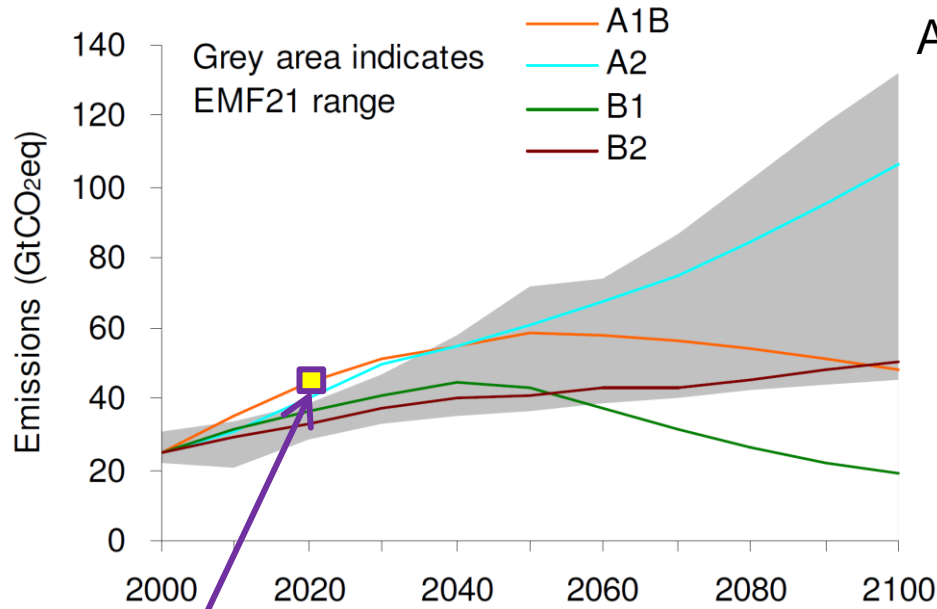


出典) Global Carbon Project, 2023

- 経済とCO₂排出量のカップリングは続いている。CO₂排出も大きく減少したときは、経済(GDP、所得)も悪化している状態。世界の排出量を簡単に減らせる状況にはない。

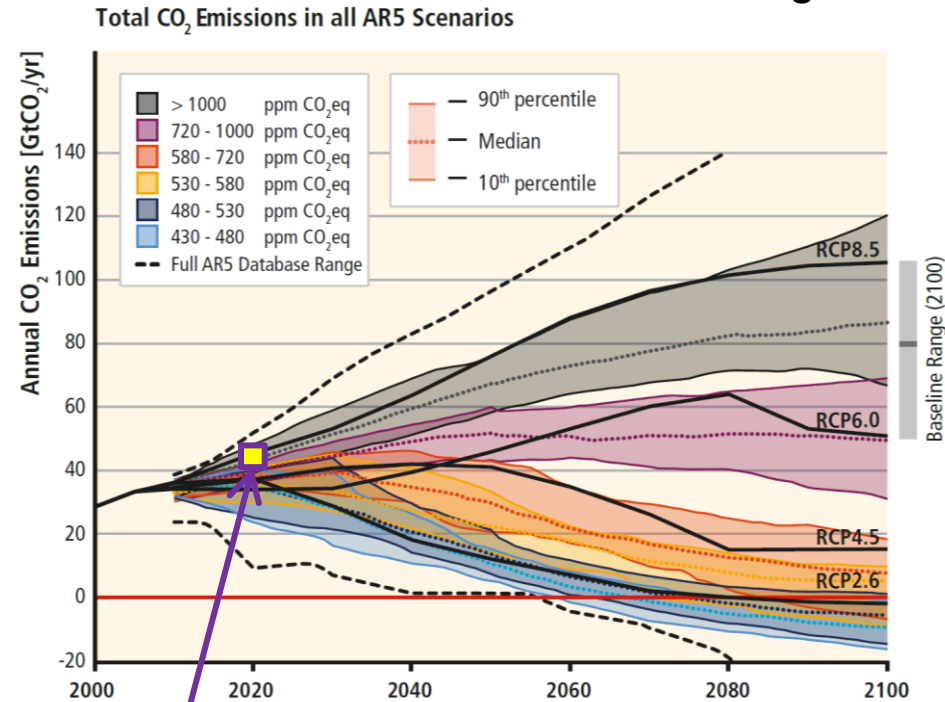
世界のCO₂排出量推計と2019年実績値： IPCC第4次（2007年）、第5次（2014年）評価報告書

AR4, Fig. 3.11



2019年CO₂排出量: 45 GtCO₂/yr

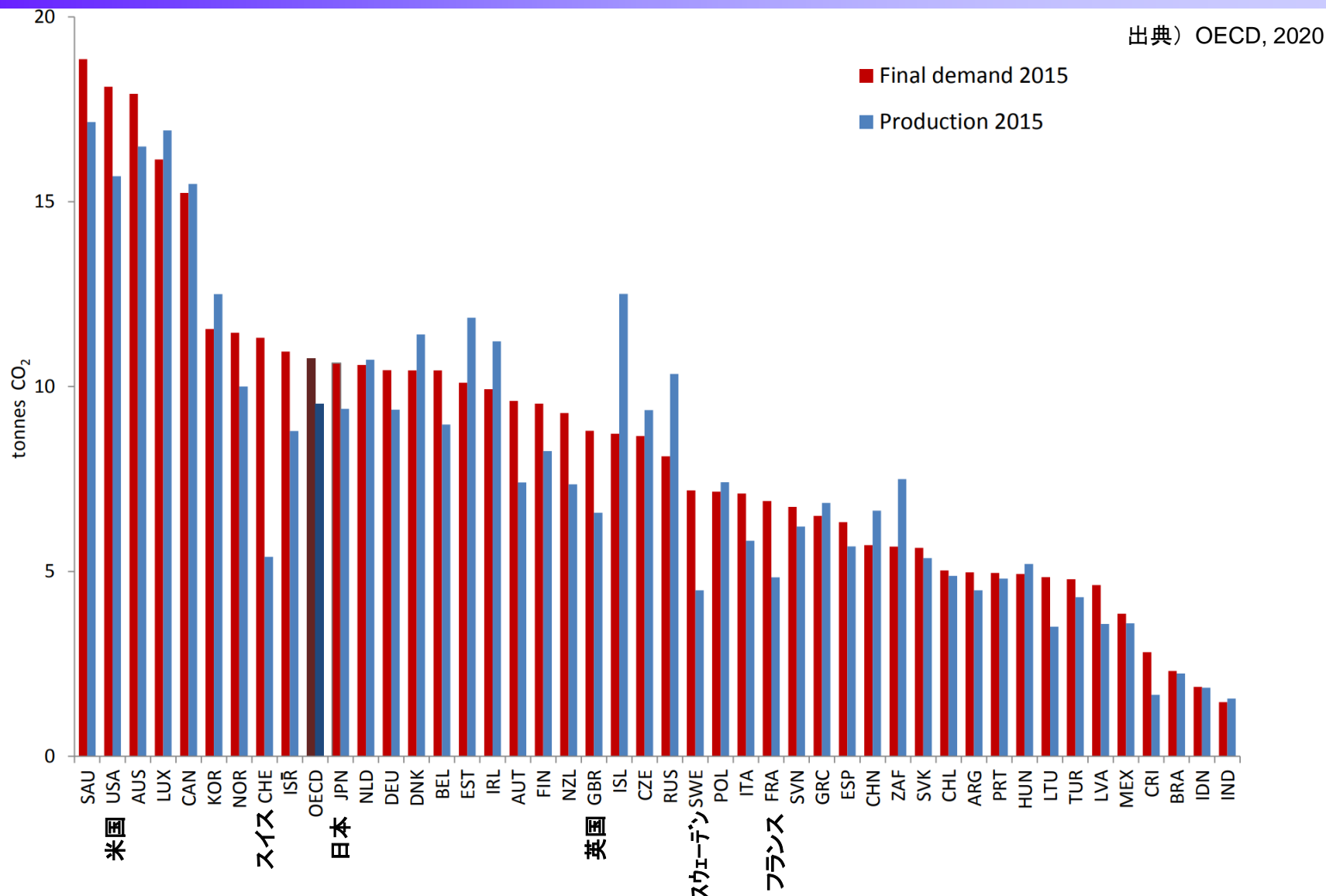
AR5, Fig. 6.7



2019年CO₂排出量: 45 GtCO₂/yr

実際の排出は、過去のベースライン排出量の上限程度を推移。意欲的な目標と、実績との間のギャップが広がっている。

一人当たりCO₂排出量：生産ベースvs消費ベース



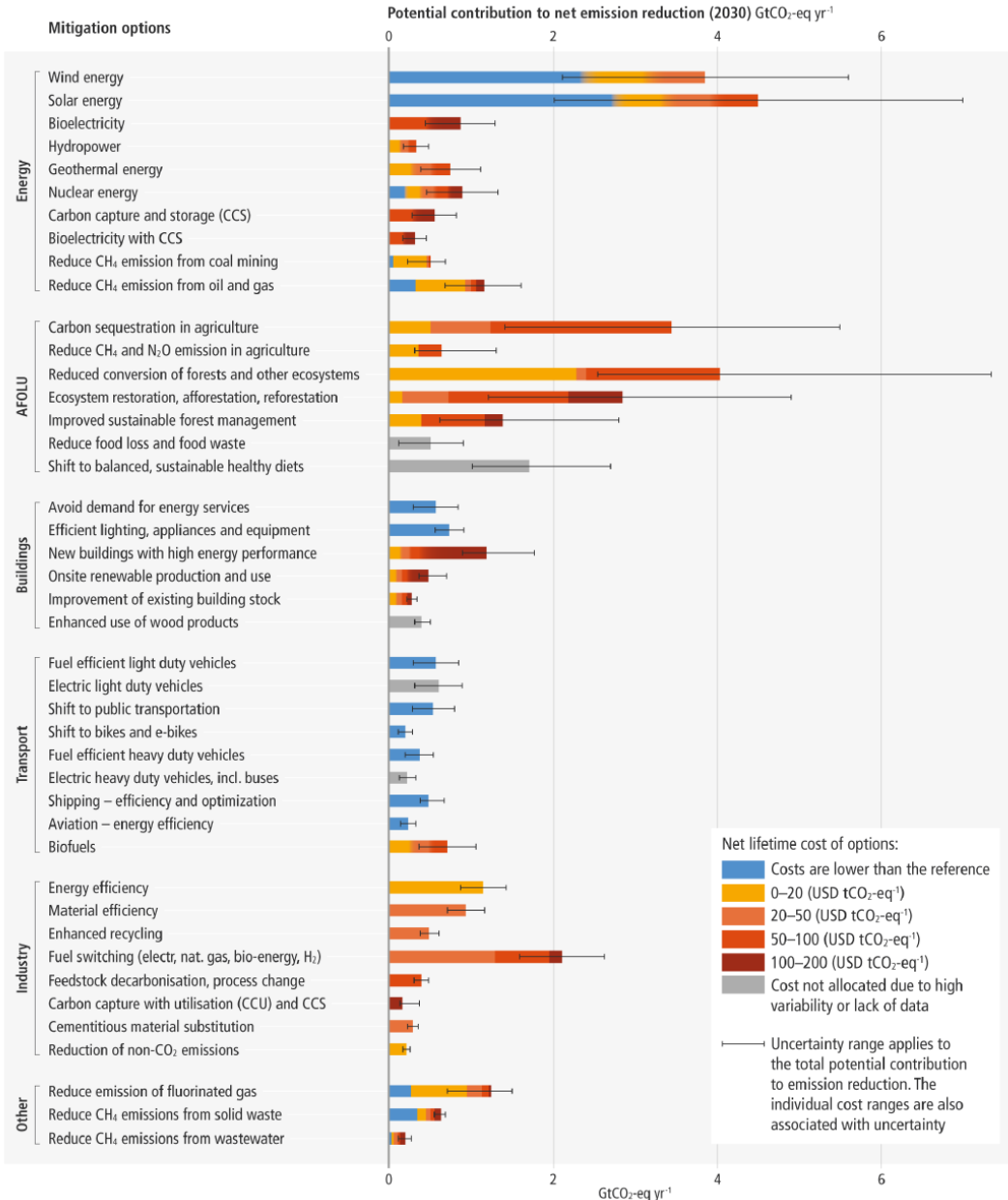
■ 多くの先進国では、生産ベースよりも消費ベースの排出量が多い。スイス、スウェーデン、英国、フランス、米国などで特に差異が大きい。



2. IPCC第6次評価 報告書におけるコスト・ ポテンシャル推計の記載

世界の2030年の技術別のCO2削減費用とポテンシャル推計

WG3, Fig. SPM.7



SPM C12.1
 (部門別、技術別の積み上げ評価から)
 ✓ 100 \$/tCO₂eq以下のコストの緩和オプションで、世界全体GHG排出量を2030年までに少なくとも2019年レベルの半分に削減しうるだろう(確信度中位)。
 ✓ その削減ポテンシャルの半分以上は、20 \$/tCO₂eq以下

Figure SPM.7 (continued): Overview of mitigation options and their estimated ranges of costs and potentials in 2030. Costs shown are net lifetime costs of avoided greenhouse gas emissions. Costs are calculated relative to a reference technology. The assessments per sector were carried out using a common methodology, including definition of potentials, target year, reference scenarios, and cost definitions. The mitigation potential (shown in the horizontal axis) is the quantity of net GHG emission reductions that can be achieved by a given mitigation option relative to a specified emission baseline. Net GHG emission reductions are the sum of reduced emissions and/or enhanced sinks. The baseline used consists of current policy (around 2019) reference scenarios from the AR6 scenarios database (25/75 percentile values). The assessment relies on approximately 175 underlying sources, that together give a fair representation of emission reduction potentials across all regions. The mitigation potentials are assessed independently for each option and are not necessarily additive. {12.2.1, 12.2.2} The length of the solid bars represents the mitigation potential of an option. The error bars display the full ranges of the estimates for the total mitigation potentials. Sources of uncertainty for the cost estimates include assumptions on the rate of technological advancement, regional differences, and economies of scale, among others. Those uncertainties are not displayed in the figure. Potentials are broken down into cost categories, indicated by different colours (see legend). Only discounted lifetime monetary costs are considered. Where a gradual colour transition is shown, the breakdown of the potential into cost categories is not well known or depends heavily on factors such as geographical location, resource availability, and regional circumstances, and the colours indicate the range of estimates. Costs were taken directly from the underlying studies (mostly in the period 2015–2020) or recent datasets. No correction for inflation was applied, given the wide cost ranges used. The cost of the reference technologies were also taken from the underlying studies and recent datasets. Cost reductions through technological learning are taken into account.⁶⁹

- When interpreting this figure, the following should be taken into account:
- The mitigation potential is uncertain, as it will depend on the reference technology (and emissions) being displaced, the rate of new technology adoption, and several other factors.
- Cost and mitigation potential estimates were extrapolated from available sectoral studies. Actual costs and potentials would vary by place, context and time.
- Beyond 2030, the relative importance of the assessed mitigation options is expected to change, in particular while pursuing long-term mitigation goals, recognising also that the emphasis for particular options will vary across regions (for specific mitigation options see SPM Sections C4.1, C5.2, C7.3, C8.3 and C9.1).
- Different options have different feasibilities beyond the cost aspects, which are not reflected in the figure (compare with SPM Section E.1).
- The potentials in the cost range USD100–200 tCO₂-eq⁻¹ may be underestimated for some options.
- Costs for accommodating the integration of variable renewable energy sources in electricity systems are expected to be modest until 2030, and are not included because of complexities in attributing such costs to individual technology options.
- Cost range categories are ordered from low to high. This order does not imply any sequence of implementation.
- Externalities are not taken into account. {12.2, Table 12.3, 6.4, Table 7.3, Supplementary Material Table 9.SM.2, Supplementary Material Table 9.SM.3, 10.6, 11.4, Figure 11.13, Supplementary Material 12.SM.1.2.3}

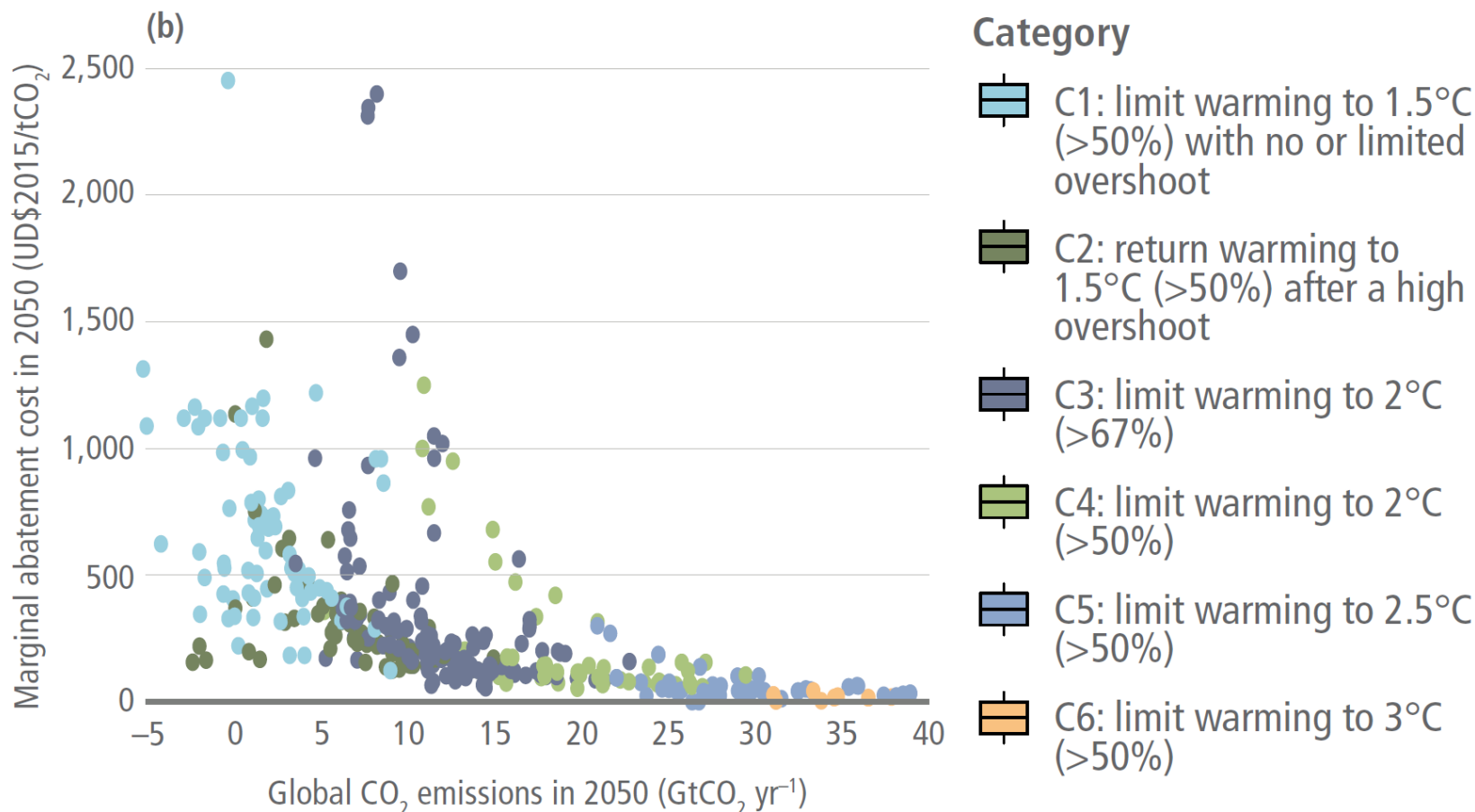
相当多くの注釈
が入れられて
いる。

(注釈の例)

- ✓ 技術進展の想定、地域的な差異、設備規模などによって、コスト・ポテンシャルの不確実性は大きい。
- ✓ 代替元の技術(参照技術)の想定次第では、コスト・ポテンシャルは変化する。
- ✓ VREの系統統合費用は2030年までは大きくはないと想定し、統合費用は加えていない。
- ✓ 外部費用については加えていない。
- ✓ 原子力には、放射性廃棄物処分費用は入っている。(ただし”modeled costs”)

IAMsによる各シナリオのCO₂限界削減費用(2050年)

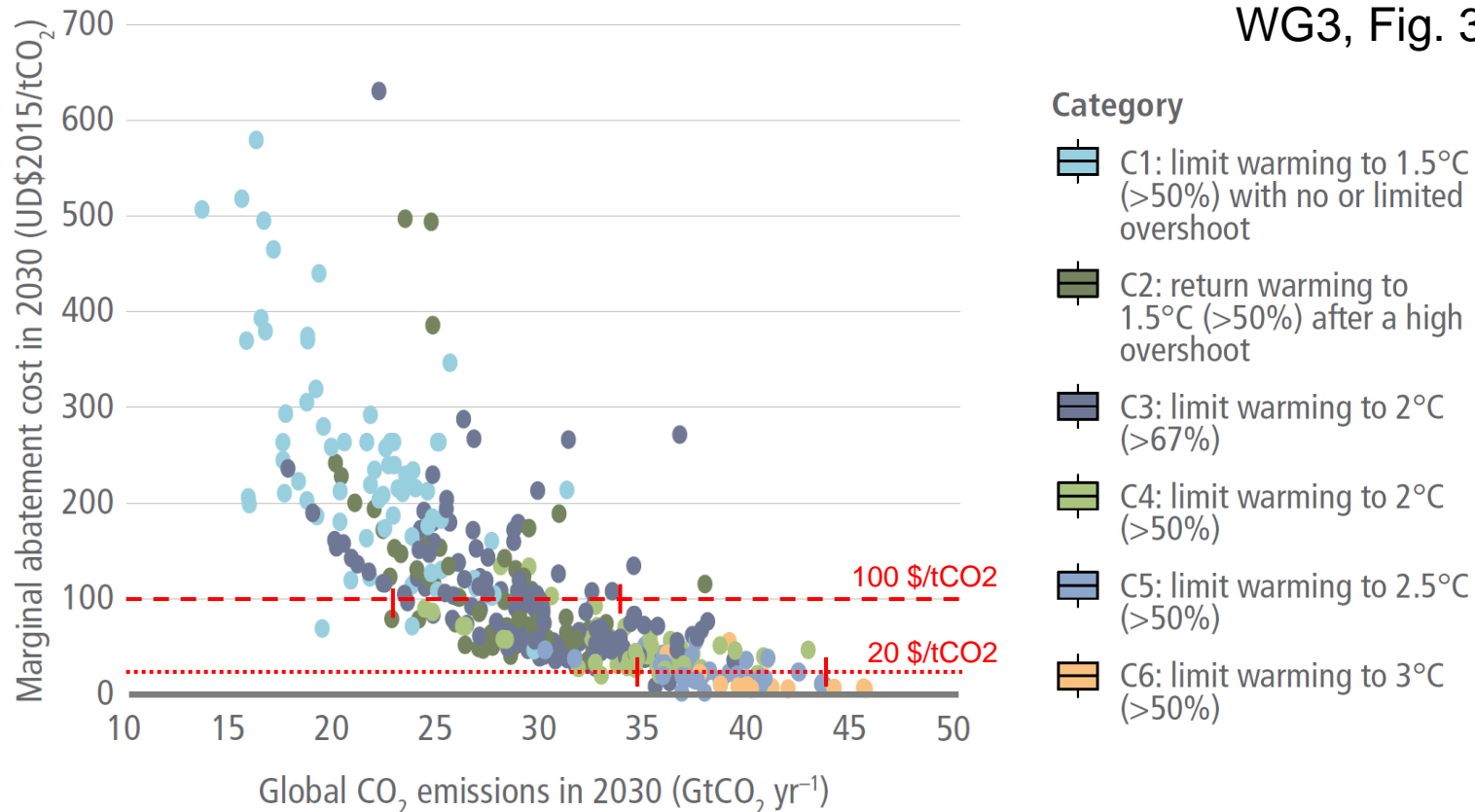
WG3, Fig. 3.33



✓ CNのような厳しい排出削減では、限界削減費用推計の幅も大きい。DACCS等の想定にも依る？

IAMsによる各シナリオのCO2限界削減費用(2030年)

WG3, Fig. 3.33



- ✓ 部門、技術積み上げのコスト評価のFig. SPM7では、2030年の**100 \$/tCO₂eq**以下のポテンシャルは、2019年排出量の少なくとも半分と評価(2019年排出量を59 GtCO₂eq/yrとすると、**29.5 GtCO₂eq/yr**)。20 \$/tCO₂eqで少なくともその半分のポテンシャルとしており**44.3 GtCO₂eq/yr**。
- ✓ 上記のグラフは、CO₂なので、GHGとの2019年時点での差分 14 GtCO₂eq/yr程度を単純に追加すると、**100 \$/tCO₂**で、**37~48 GtCO₂eq/yr**程度。20 \$/tCO₂程度では、**49~58 GtCO₂eq/yr**程度であり、統合評価モデルIAMの分析と、部門、技術積み上げのコスト評価のFig. SPM7では、かなり大きな評価のギャップが見られる。(Fig. SPM7はかなり楽観的にコスト・ポテンシャルを推計)

IPCC AR6の部門積み上げと統合評価モデルIAMの コスト・ポテンシャルの評価の差異：2030年世界排出量見通し

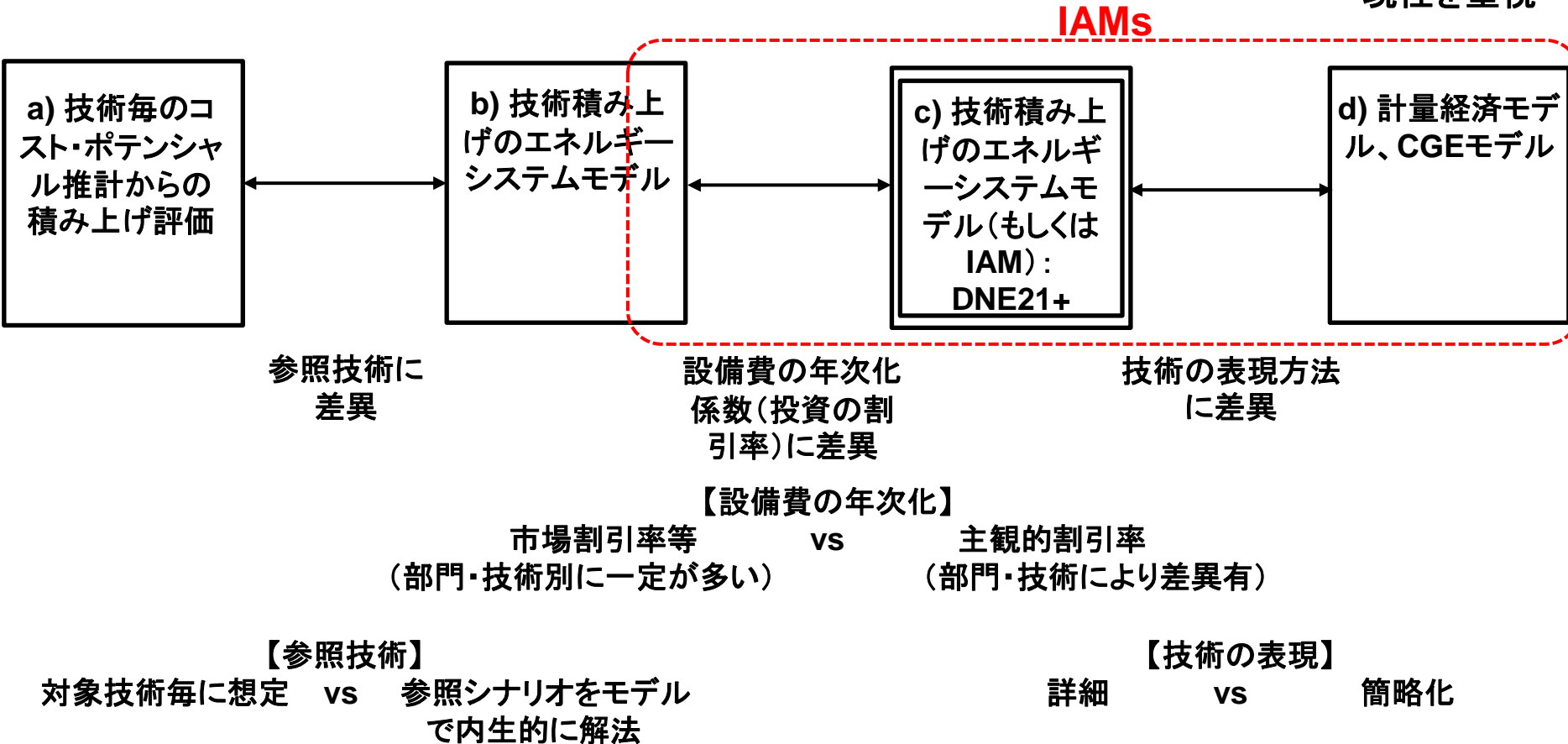
		Bottom-up studies (IPCC Fig. SPM7)	IAMs (IPCC Fig.3.33)
Below 20 USD/tCO ₂ eq	CO ₂	(30.3 GtCO ₂ /yr)	35~44 GtCO ₂ /yr
	GHGs	44.3 GtCO ₂ eq/yr	(49~58 GtCO ₂ eq/yr)
Below 100 USD/tCO ₂ eq	CO ₂	(15.5 GtCO ₂ /yr)	23~34 GtCO ₂ /yr
	GHGs	29.5 GtCO ₂ eq/yr [ベースラインからの削減ポテンシャル： 38 GtCO ₂ eq/yr (32~44 GtCO ₂ eq/yr)]	(37~48 GtCO ₂ eq/yr)

注) CO₂とGHG排出量の括弧の数字は、単純に2019年の世界排出量の差の実績値(14 GtCO₂/yr)を用いて、報告書記載の数値をCO₂もしくはGHGに変換したもの

コスト・ポテンシャル推計のギャップ

個別技術の
特性を重視

観測されるマ
クロ指標の再
現性を重視



コスト・ポテンシャル推計の課題：技術積み上げ vs IAMs

	技術積み上げ	IAMs	
			DNE21+
経路依存性の考慮、異時点間の相互依存性の考慮	×	○	○
エネルギーシステム全体・緩和対策間の整合性、部門間での2重計上の回避	×	○	○
ベースラインとの整合性	×	○	○
技術的詳細さ	○	×～○ モデルによる	○
合理的なエージェントの想定ではなく、現実の歪みを考慮	×	×～○ モデルによる	○
マクロ経済のフィードバック、リバウンド効果等	×	△～○ モデルによる	△
副次便益の考慮	△ 基本的には未考慮だが、考慮は可能	△ 基本的には未考慮だが、考慮は可能	△

注) F. Kesicki, UCL (2011)を参考にRITEで整理

3. 主観的割引率と資本の ユーザーコスト



投資の割引率の影響因子例

【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場合（原子力等）は、技術のリスクが高いことから、高い投資リターンが求められる
- 製品価値の減耗：新たな製品・サービスへの変化が早ければ、当該製品の価値の減耗は早くなり、割引率は高くなる。逆の場合は低くなる。（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）
- 将来価格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

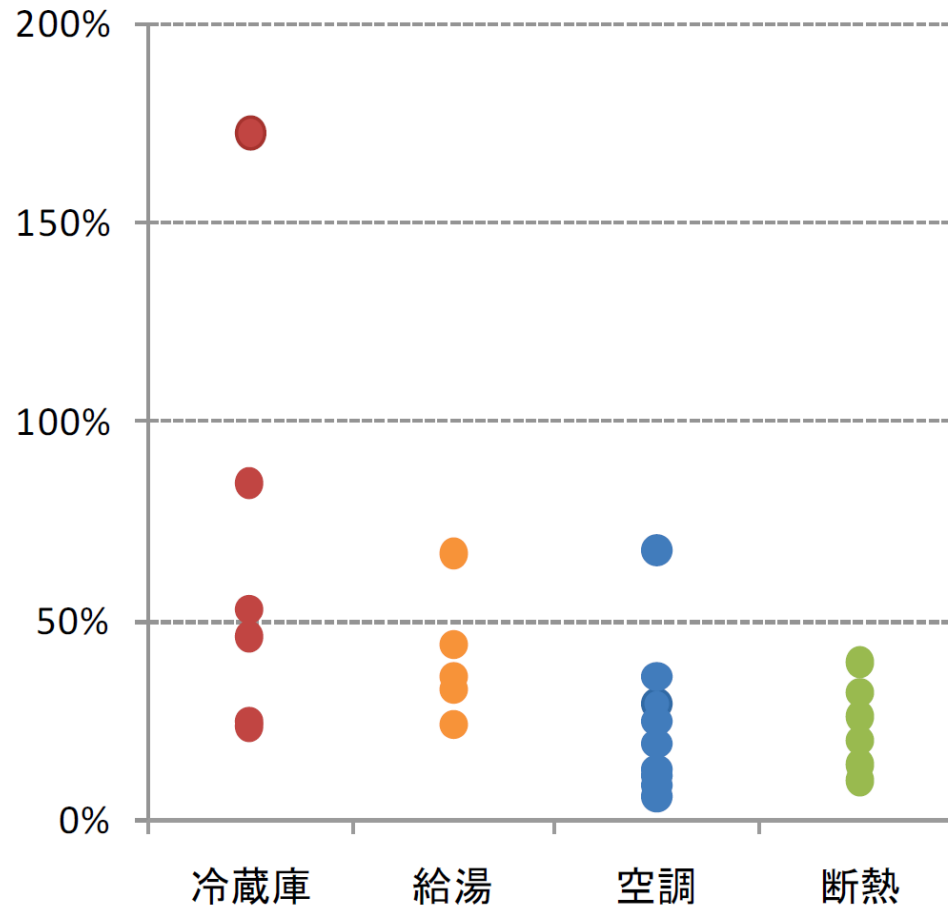
【投資者，消費者の選好等】

- 資金制約、別の投資先のリターンが高ければ、その期待利益率が参照される
- 隠れた費用（投資検討にあたっての機会費用等）
- 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
- 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
- オーナー・テナント問題など（民生部門）
- 限定合理性（人々の情報処理・判断能力の限界など）

【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が大きい場合、気候変動対策投資に対して、より大きなリターンが求められる
- 炭素価格市場のボラティリティが高ければ、低炭素・脱炭素投資により大きなリターンが求められる
- 電力自由化の下、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（低炭素・脱炭素電源）への投資には、より大きなリターンが求められる
- 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

主観的割引率の計測例（家庭用機器等）



出典) 和田他、Anderson、Dubinをもとに作成

✓ 通常の割引率(5%/yrなど)とは異なり、かなり高い主観的割引率が計測されている。

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され、以下の式で表される（一部、簡略化して表示）。機器のレンタル価格にも相当する。

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

資本のユーザーコスト(P_t^K)、資本取得価格(P_t^A)、 t 時点における実質利子率等(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

- ✓ 経済指標と統合的な形で、様々な資本のユーザーコストの推計もなされている。
- ✓ 「主観的割引率」は、機器等の導入側や制度面に主に焦点を当て、限定合理的な行動等から生じる高割引率について説明を試みているが、「資本のユーザーコスト」は、主に資本財に焦点を当て、合理的な割引率について論じている。
- ✓ 「資本のユーザーコスト」の計測においては、「主観的割引率」で論じられる、限定合理的な要素等は、 r , δ , π それぞれのパラメータの数値に内包された形で、推計されていると考えられる。

4. DNE21+モデルによる排出削減ポテンシャル・コストの分析とIPCCとの比較



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の的なコスト評価が可能なモデル
- ◆ 線形計画モデル(エネルギーシステム総コスト最小化。決定変数:約1千万個、制約条件:約1千万本)
- ◆ 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、原油・各種石油製品・e-fuels、天然ガス・e-methane、電力、エタノール、水素、アンモニア、CO₂
- ◆ エネルギー供給(発電部門等)、CO₂回収・利用・貯留技術(CCUS)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。その他産業や民生においてCGSの明示的考慮
- ◆ 国際海運、国際航空についても、ボトムアップ的にモデル化
- ◆ 500程度の技術を具体的にモデル化、設備寿命も考慮
- ◆ 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)

・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

・第6次エネルギー基本計画検討における2050年CN分析

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

DNE21+における投資の割引率の想定

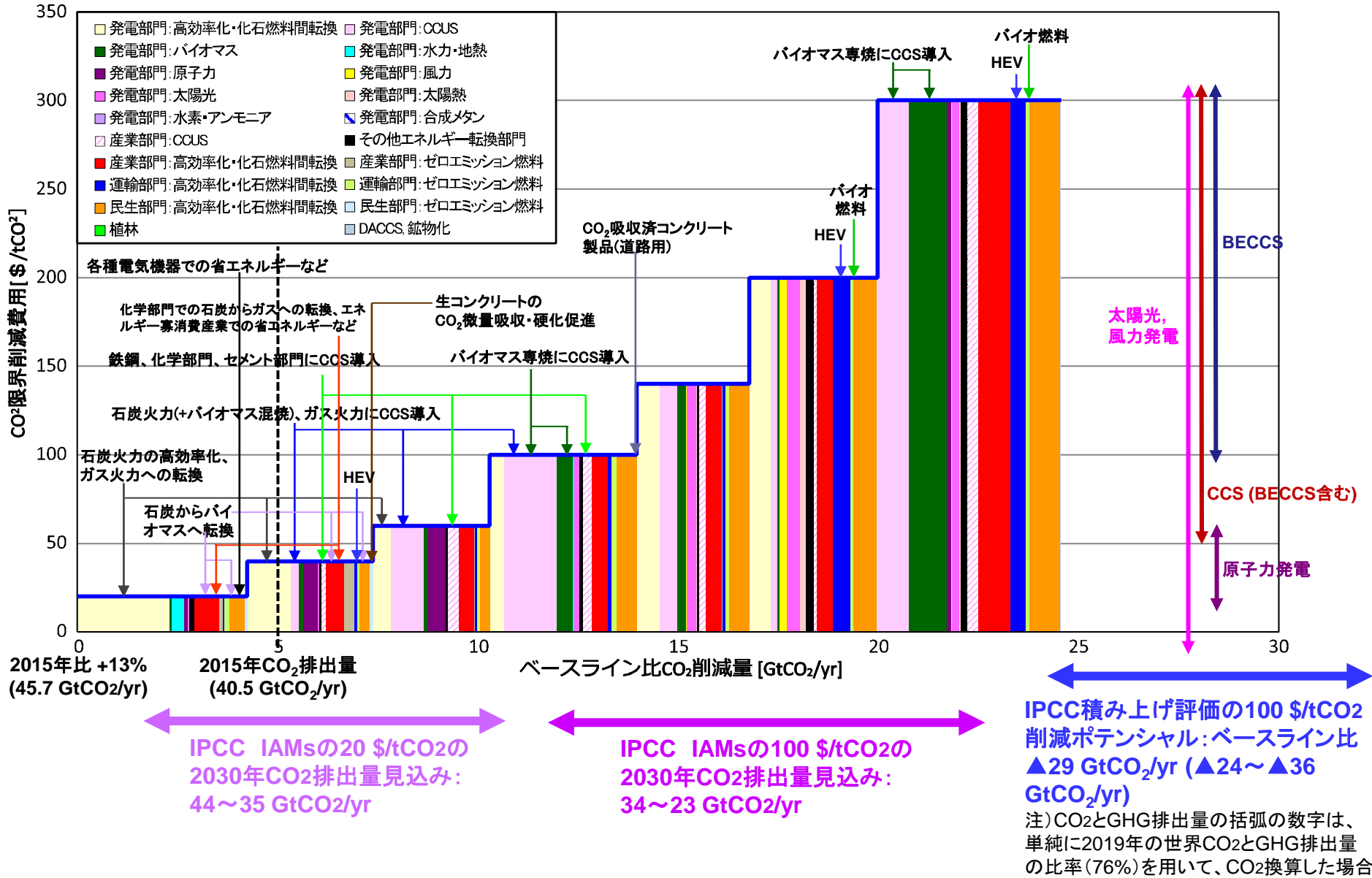
投資の割引率(「資本のユーザーコスト」における年次化要素に相当)の想定

		モデル標準想定 of 割引率
発電		8% ~ 20%
その他エネルギー転換		15% ~ 25%
エネルギー集約産業		15% ~ 25%
運輸	自動車	30% ~ 45%
	(環境購買層)	10%
	トラック、バス等	20% ~ 35%
民生(業務・家庭)	コジェネ	15% ~ 25%
	給湯、冷暖房等	20% ~ 35%
	冷蔵庫、照明等	25% ~ 40%

注) 一人当たりGDPに応じ、地域別・時点別に記載の範囲内で想定。日本は時点に依らず、下限値(赤字)

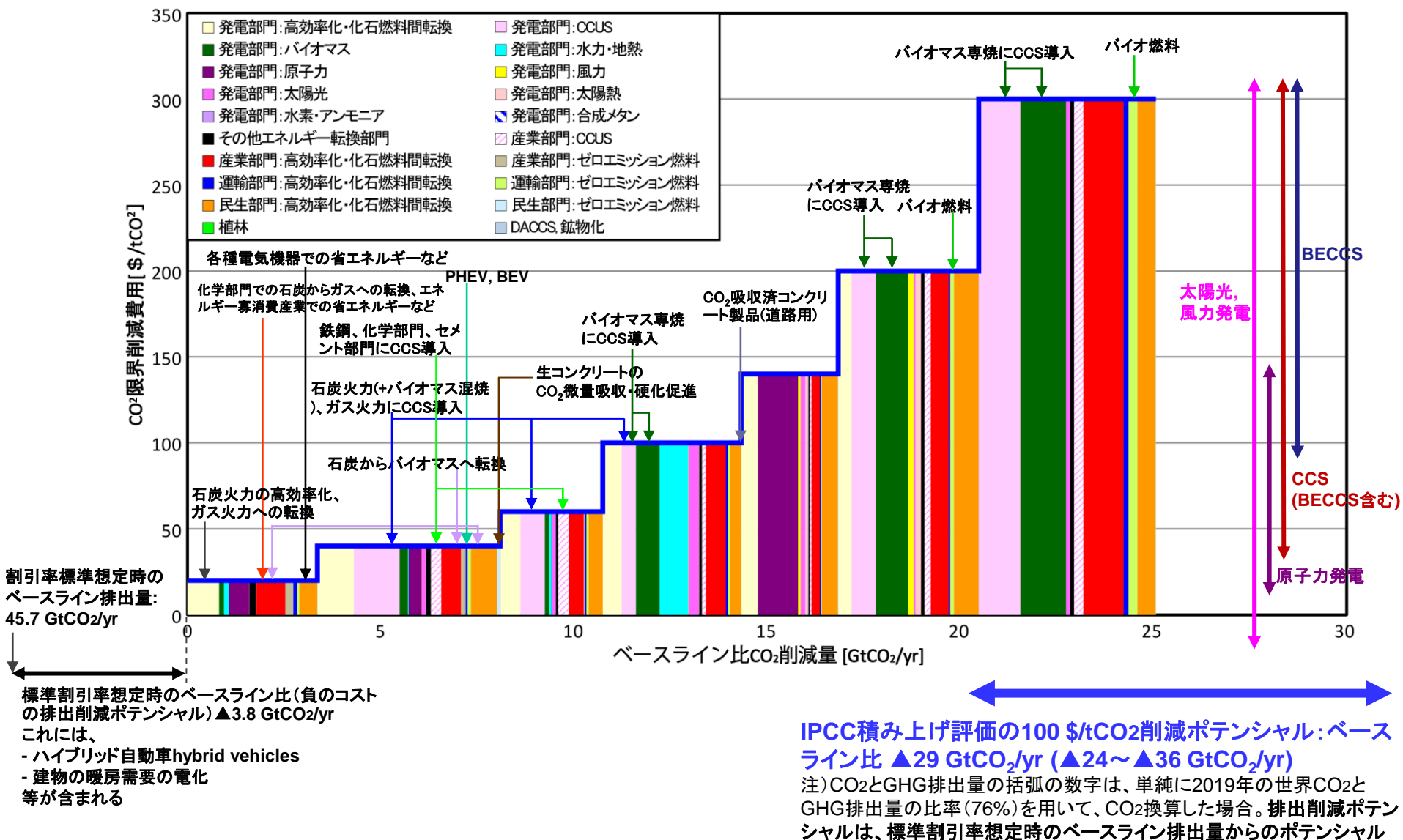
- ✓ 先述のように、「主観的割引率」の用語は、限定合理的な行動等から生じる高割引率について説明がなされることが多いが、マクロ経済全体との整合性については焦点が当てられていない。他方、「資本のユーザーコスト」における年次化要素(割引率相当)は、経済指標と整合的な形で計測がなされており、より包括的と考えられる。
- ✓ DNE21+はエネルギーシステムとしての全体整合性を重視していることから、誤解を避けるために、ここでは「主観的割引率」とはせず、年次化要素にあたる「投資の割引率」として記載している。

世界の2030年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト —標準技術シナリオ・標準割引率—



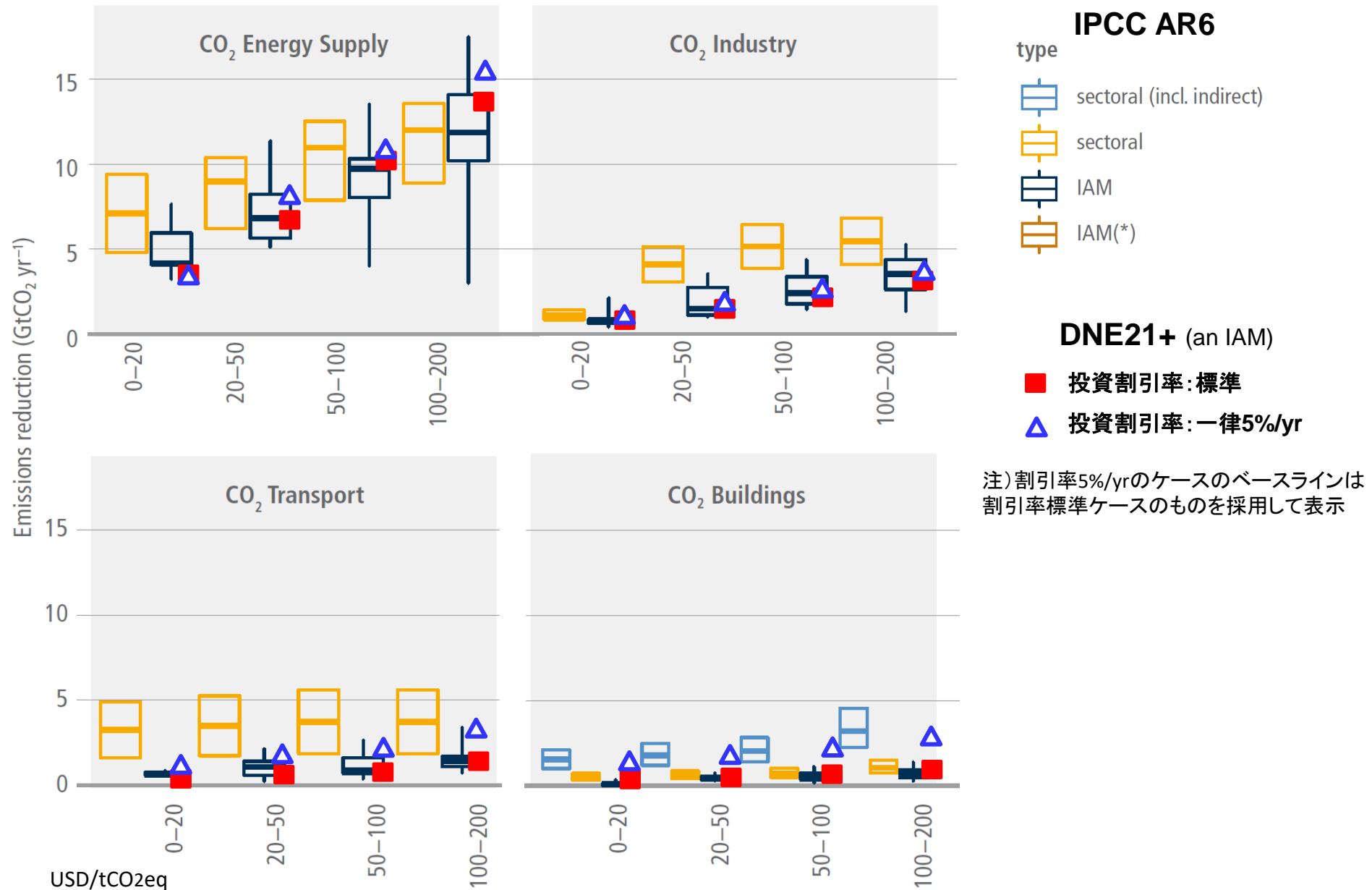
世界の2030年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト

—標準技術シナリオ・割引率5%/yr—



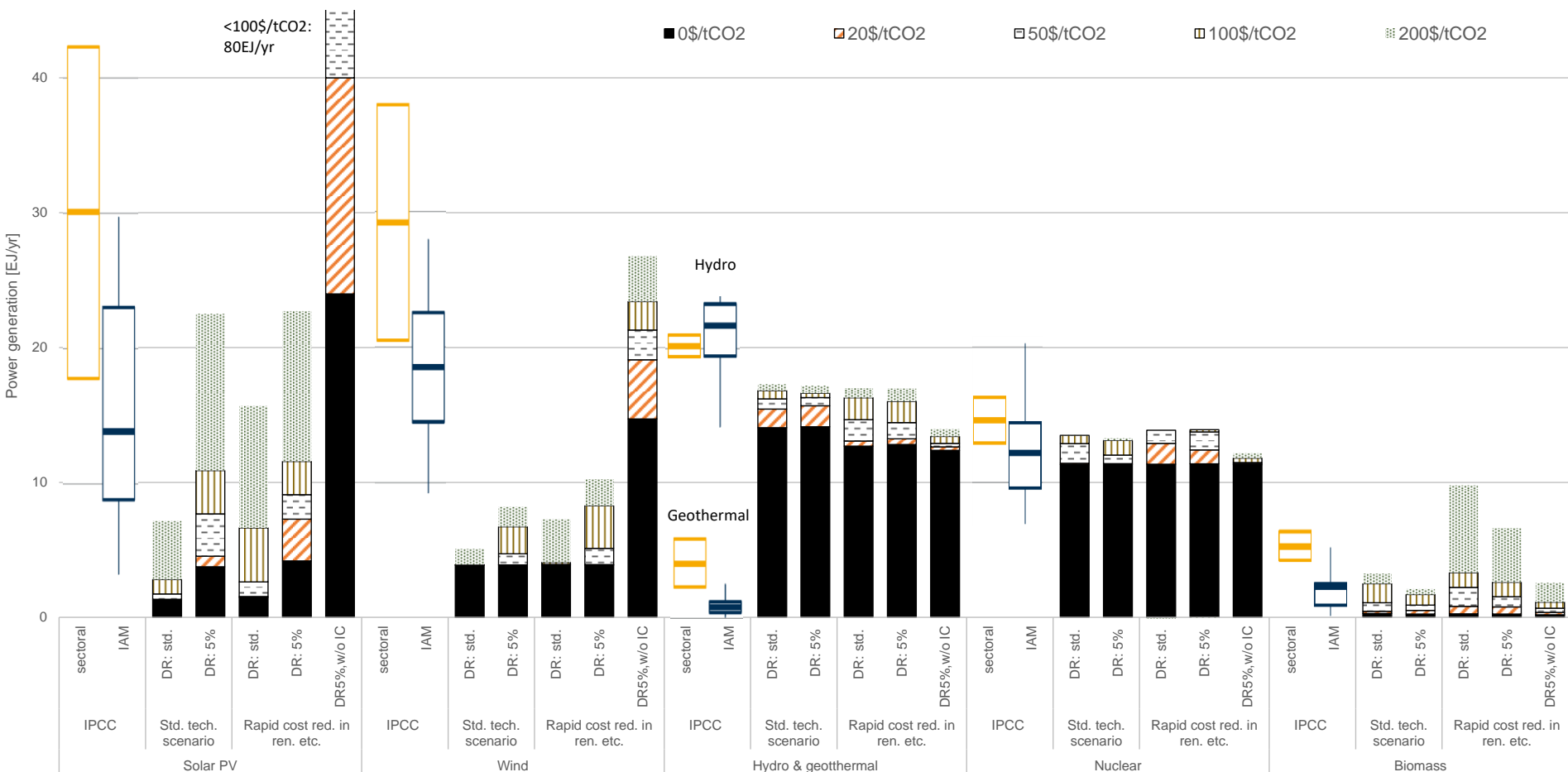
2030年の部門別の排出削減ポテンシャル・コスト: IPCC比較

—標準技術シナリオ—



2030年の各種エネルギー供給技術の導入量:IPCC比較

一標準技術シナリオ・再エネ等コスト低減シナリオ



- ✓ RITEの推計は、IPCC IAMsと整合的な水準
- ✓ 割引率を5%/yrと想定すると、IPCC部門別・技術別推計に近くなる。
- ✓ ただし、DNE21+モデルでは、系統対策費用の考慮があるため、太陽光、風力発電については、若干、小さい推計となる傾向有。系統統合費用をゼロと想定すると(IPCCの積み上げ評価と同様)、IPCC積み上げ評価と同等以上の太陽光、風力発電の経済的ポテンシャルが推計される。

An aerial photograph of a cityscape. In the foreground, there is a large green golf course with several trees and a winding road. To the right, there are several modern, multi-story buildings, including a prominent white one with a swimming pool on its roof. The background shows a dense urban area with many high-rise buildings under a clear blue sky. The text '5. まとめ' is overlaid in the center of the image.

5. まとめ

IPCC報告書で言及の技術積み上げ評価と IAMs推計の差異の理由

IPCC AR6の第12章では技術積み上げ評価とIAMs推計の差異として以下の理由が挙げられている。

【エネルギー供給部門】

- ◆ IAMsのシナリオ登録は2015年からなされており、最新の太陽光や風力のコスト低減の状況が十分反映されていないため

【民生部門・運輸部門】

- ◆ IAMsでは負のコストの排出削減ポテンシャルはベースラインに含まれているため
- ◆ IAMsではエネルギーサービス需要の低下やモーダルシフトはあまり想定されていないため

【産業部門】

- ◆ 技術積み上げ評価では、資源循環を想定しているケースが多い一方、IAMsの多くでは未考慮なため

【全般】

- ◆ 全体として、IAMsでは一部の技術について考慮されていないため

本分析から推察される技術積み上げ評価とIAMs推計の排出削減ポテンシャルの差異の主な理由(RITEの見方)

本分析等を踏まえると、(IPCC AR6などで示されている)技術積み上げ評価とIAMs推計の差異の主要な理由として以下が考えられる。

【全般】

- ◆ 全体として、技術積み上げ評価では、現実の社会に存在している、様々な技術普及障壁が考慮されていないため

【エネルギー供給部門】

- ◆ 技術積み上げ評価では、太陽光や風力の系統統合費用が考慮されていないため

【民生部門・運輸部門】

- ◆ IAMsでは負のコストの排出削減ポテンシャルはベースラインに含まれているにも関わらず、技術積み上げ評価ではIAMのベースライン排出を利用しており、技術積み上げ評価ではダブルカウントしているため
- ◆ IAMで低割引率想定をすると、電化の対策(EV、HP暖房・給湯、CGSなど)がより進展する結果とはなるが、現実には初期費用が高い技術は導入されにくい

【産業部門】

- ◆ 技術積み上げ評価では、資源循環を想定しているケースが多い一方、IAMsの多くでは未考慮なため、IAMsでは削減ポテンシャルを過小評価しているかもしれない。他方、技術積み上げ評価では、世界全体での鉄スクラップ量の制約などが未考慮であって、技術積み上げ評価の方が、現実よりも過大な削減ポテンシャル推計となっている可能性も十分に高い

- ◆ IPCC報告書が提示した部門・技術積み上げの排出削減ポテンシャル・コスト推計は、低コストでかなり大きな排出削減ポテンシャルを提示している。しかし、世界排出量は増大しているほか、実態とかけ離れた推計と見られる。
- ◆ また、同じIPCC報告書でも、統合評価モデルIAMsは、保守的な排出削減ポテンシャルを推計しており、大きな乖離が見られる。
- ◆ 従来から、部門・技術積み上げの排出削減ポテンシャル・コスト推計は過大な排出削減ポテンシャルを示す点について、とりわけ「主観的割引率」によって説明がなされてきた。
- ◆ 他方、気候変動対策の研究コミュニティでは、あまり議論がなされないものの、「資本のユーザーコスト」として、より経済全般にわたる整合性との関係から投資の割引率が以前から議論がなされ、各種計測もなされている。
- ◆ 本報告では、技術積み上げ評価モデルであるDNE21+の推計が、IPCC報告書のIAMs推計の中位的な推計結果を示していることを確認した上で、投資の割引率の想定を、国・部門・技術・利用者によって差異のある割引率から、部門・技術積み上げ評価でよく利用される、5%/yrで一律に設定した場合の試算を実施。このとき、とりわけ、運輸部門の推計は、IPCC報告書が提示した部門・技術積み上げの排出削減ポテンシャル・コスト推計に近づくことを確認した。
- ◆ また、変動性再生可能エネルギーの経済的ポテンシャル推計は、系統統合費用の考慮の有無の影響が極めて大きいことを確認した。
- ◆ 個別技術のコスト低減だけではなく、DX等によって低廉に「隠れたコスト」を低減する方策を見つけ、実施していくことが、大幅な排出削減を実現するために極めて重要
- ◆ 排出削減ポテンシャル・コスト推計は、技術選択、政策検討の基礎となるもの。誤った理解に基づく推計は、コスト効率的な対策、そしてそのための政策を歪めかねないので注意が必要