

未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西
～ビヨンド・ゼロの実現に向けて～

2020年9月24日

最終需要における技術革新と 社会変化による温暖化対策の可能性

(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. 地球温暖化対応の状況と方向性
2. 最終需要の現状
3. デジタル技術の進展による社会構造変化の可能性
4. 長期排出削減のシステム分析：シェアリングモビリティの効果等
5. まとめ

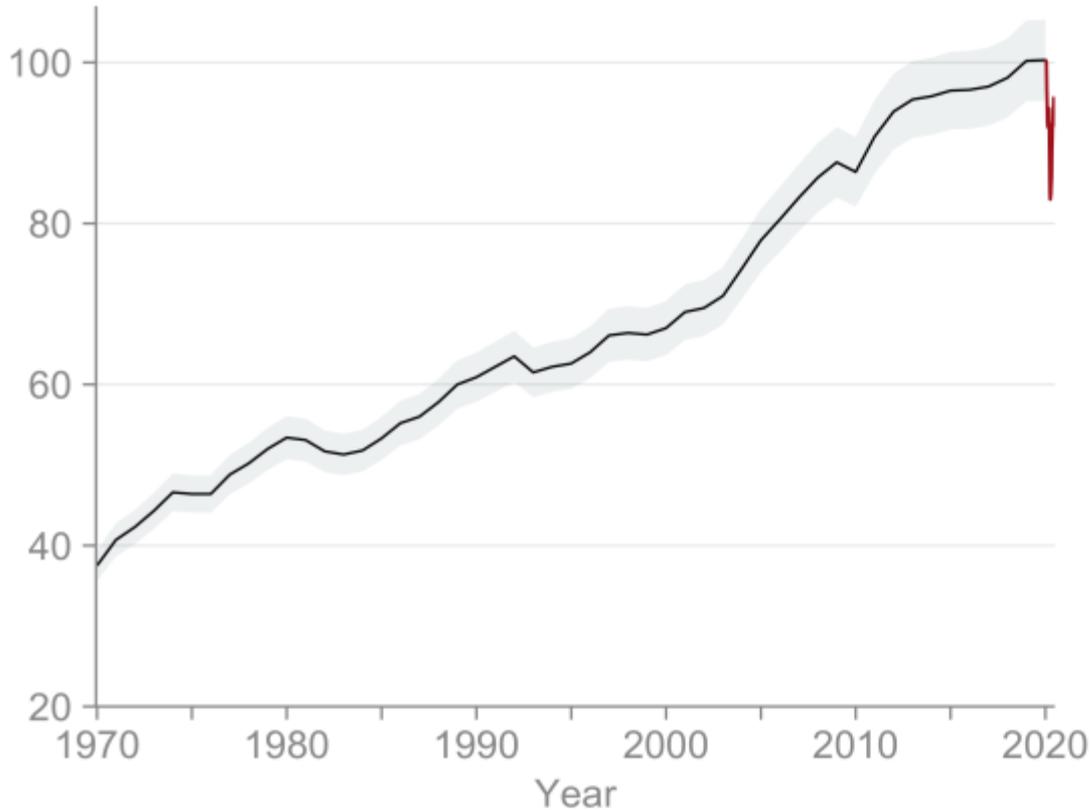


1. 地球温暖化対応の状況と方向性

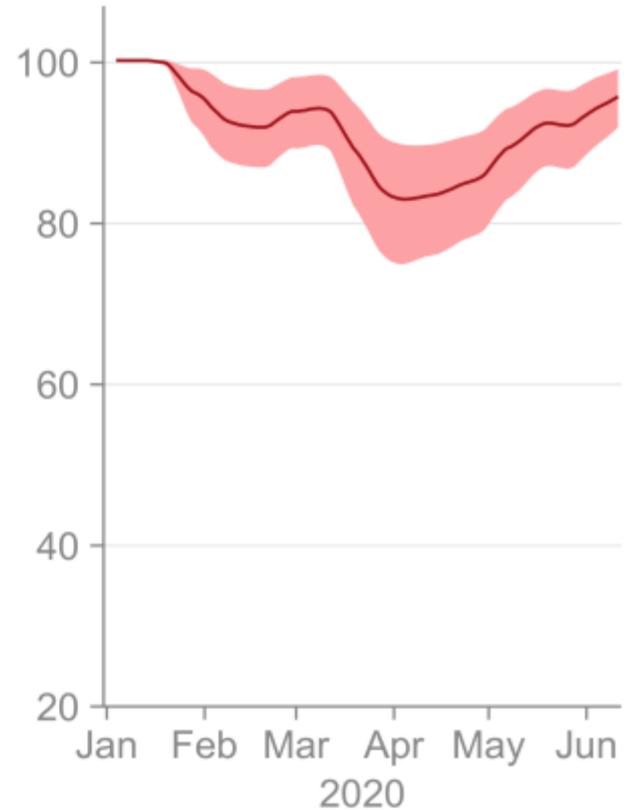


世界のCO₂排出量の推移

Global daily fossil CO₂ emissions
MtCO₂ day⁻¹



MtCO₂ day⁻¹

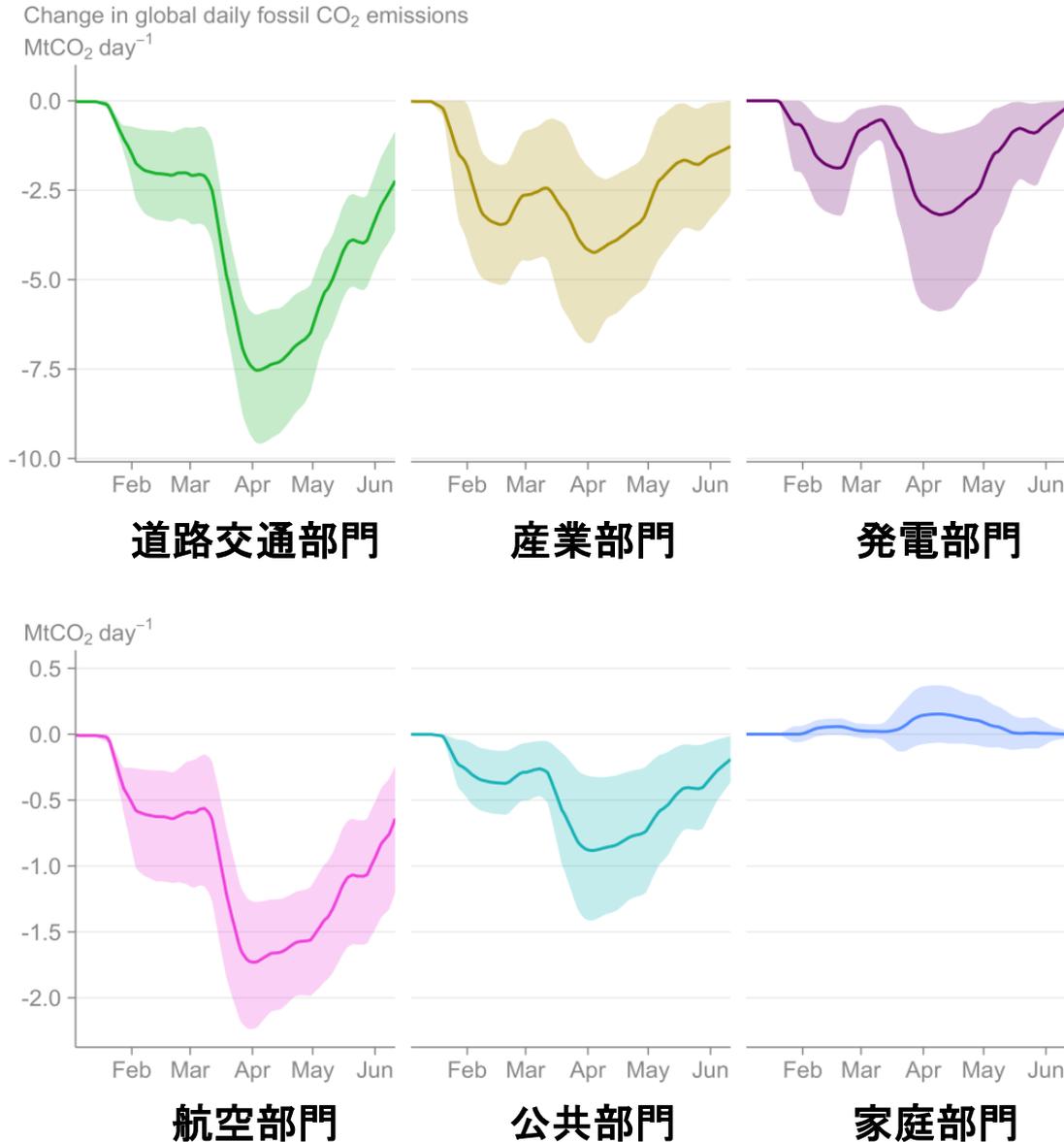


© ⓘ Source: Le Quéré et al. Nature Climate Change (2020); Global Carbon Project

出典) Global Carbon Project

■ 経済とCO₂排出量のカップリングは続いている。

COVID-19以降の世界の部門別CO₂排出量の推移



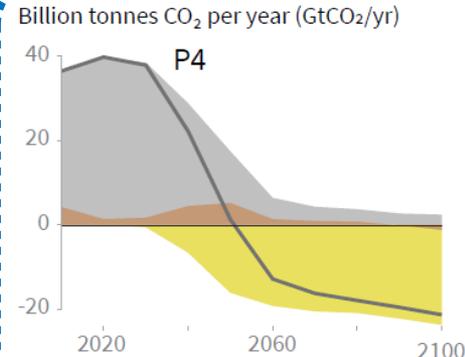
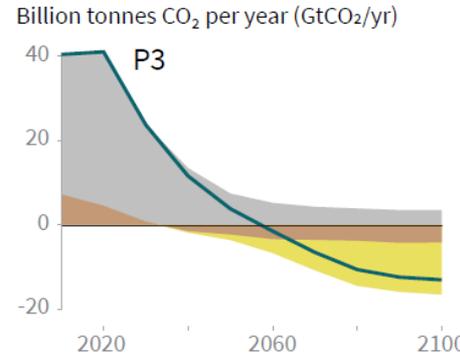
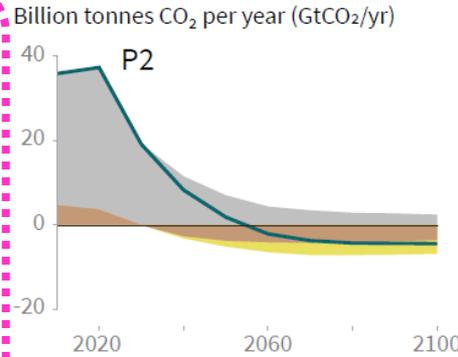
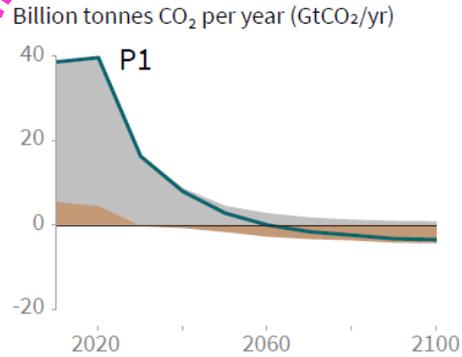
在宅勤務を含む移動の抑制により、量的には道路交通部門でのCO₂低減が大きかった（低減率としては航空部門）。

- ◆ 最終エネルギーは、原則、電気か、水素（+バイオエネルギーおよび太陽熱等の直接熱利用）の利用とする必要あり。なお、水素も燃料電池で利用するケースは多く、この場合、最終的な利用形態は電気とも言える。
- ◆ ただし、CO₂フリー水素と回収CO₂による合成燃料（メタンや石油）での利用（CCU）は可（水素の形を変えた利用形態の一つ。水素よりも貯蔵しやすく、都市ガスやガソリン等の既存の供給インフラ、また、既存の機器を活用できる利点あり）
- ◆ 電気、水素製造においては、脱炭素化が必要であり、一次エネルギーとしては、再生可能エネルギー、原子力、化石燃料+CCSのみで構成が必要。
- ◆ なお、完全に炭化水素を使わないことは現実的ではないので、正味ゼロ排出においても、ある程度の排出は許容し、植林、バイオエネルギーCCS（BECCS）、DACs（直接大気回収・貯留）等の負の排出技術（NETs）活用はあり得る。
- ◆ 一方、NETsに過度に依存するシナリオは、実現可能性が低くなる可能性や生物多様性への悪影響の可能性もある。よって、脱炭素社会実現のためには、（経済自律的な）低エネルギー需要社会の実現も重要
- ◆ 脱炭素化に向けた移行過程も重要。気候変動影響被害、技術発展動向に伴う緩和費用を総合的に考え、実効ある低炭素化を進めることが必要

- ◆ とりわけ先進国では、人口の低下と、サービス産業化の進展によって、総エネルギー需要の潜在的な増加は止まってきている。
- ◆ そのような中、右肩上がりの需要増大局面と異なり、長期の大規模な投資リスクを取りにくくなってきている。
- ◆ また、エネルギーシステム改革は、短期的な効率性の追求には良いが、長期の大規模な投資は過小になりやすい。
- ◆ 一方、デジタル化技術は着実に進展。分散リソースをより安価に活用できる可能性が高まってきている。
- ◆ 大規模なエネルギー供給技術は引き続き重要であるが(政府の適切な政策、支援が必要)、分散化とそれをつなぐデジタル化技術の役割が増している。
- ◆ COVID-19によって、デジタル化の進展は一層加速する可能性あり。ただし、シェアリングエコノミーの進展は停滞もしくは加速両方の可能性あり。

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.

SSP1よりも更に小さいエネルギー需要(LED)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

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)

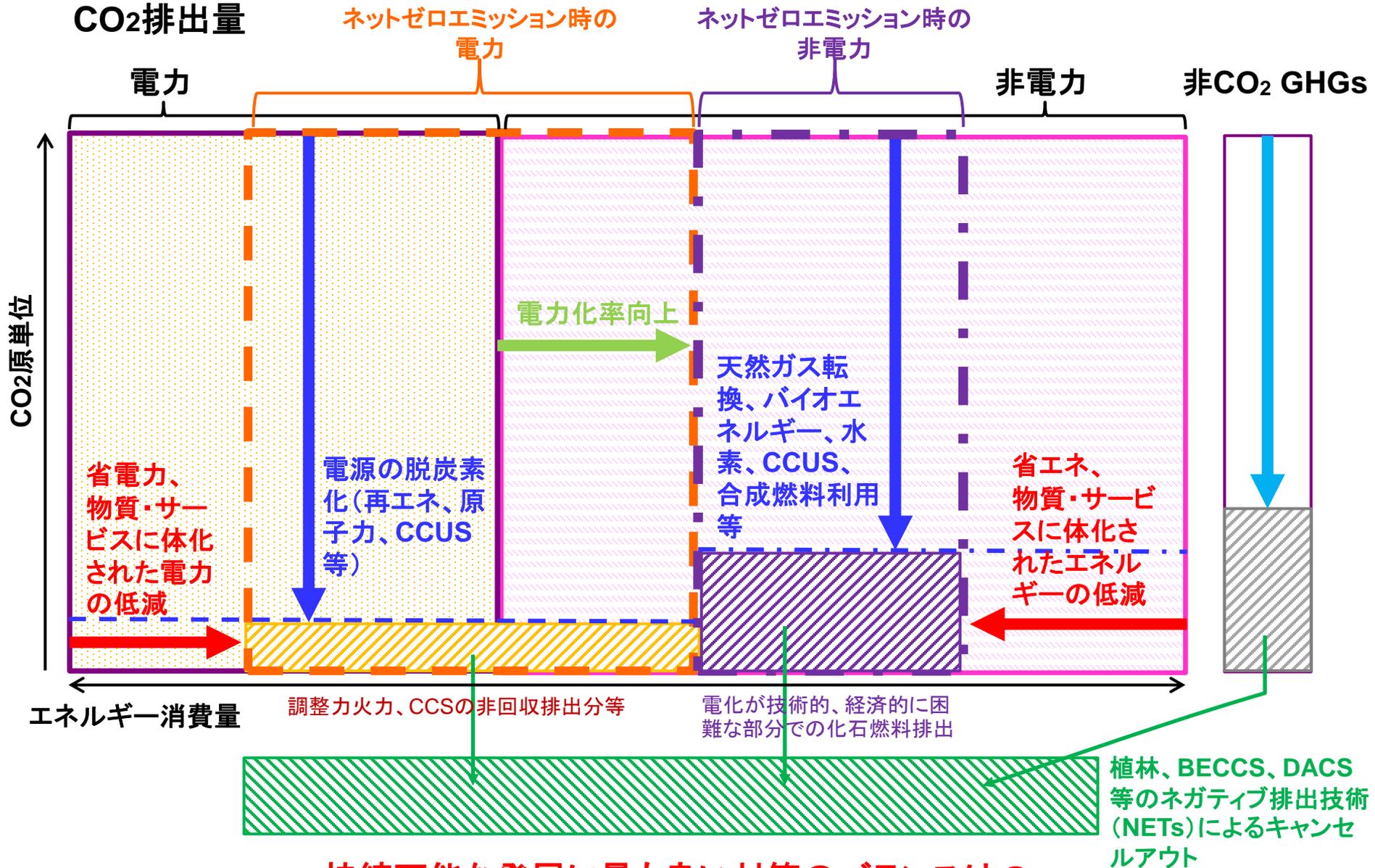
CDR (CCS, BECCS等)技術も大規模に利用

従来NETsとしては、BECCSが大部分。炭素価格を抑制し得るDACsの可能性?

小 ← 最終エネルギー需要 → 大

- ✓ 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。
- ✓ IPCCでも、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されている。

ネットゼロエミッションへの対策のイメージ



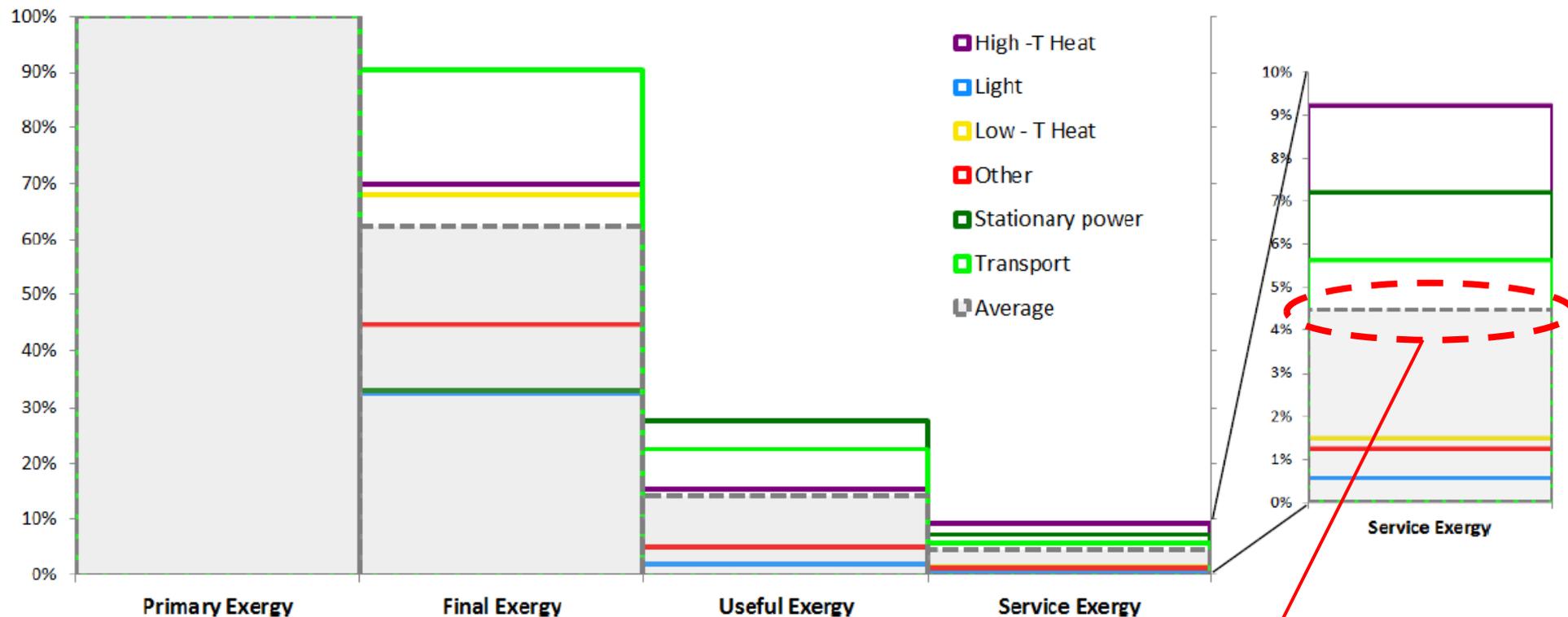
持続可能な発展に最も良い対策のバランスは？

2. 最終需要の現状



利用段階別の世界のエネルギー利用量

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)

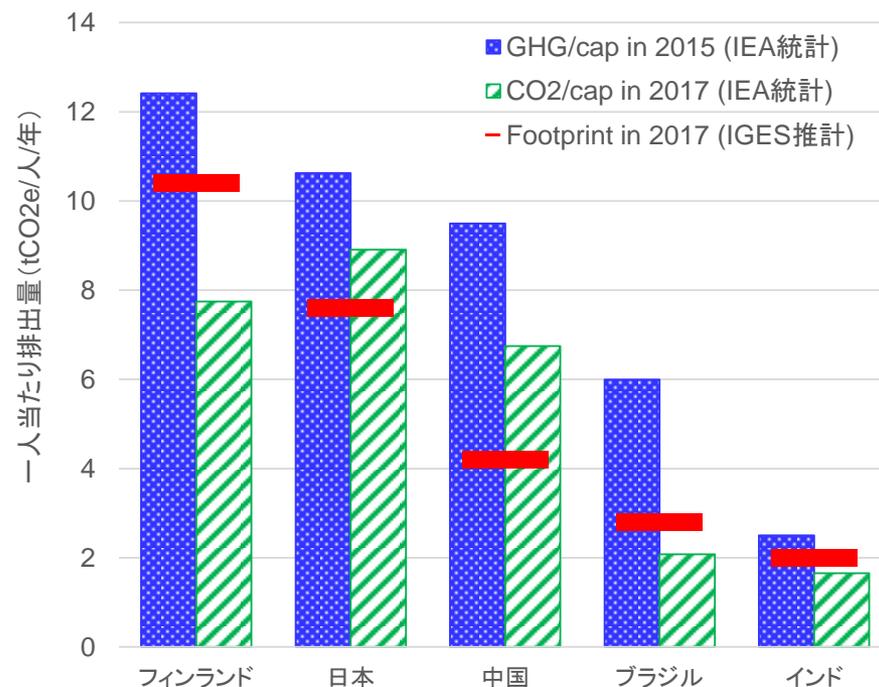
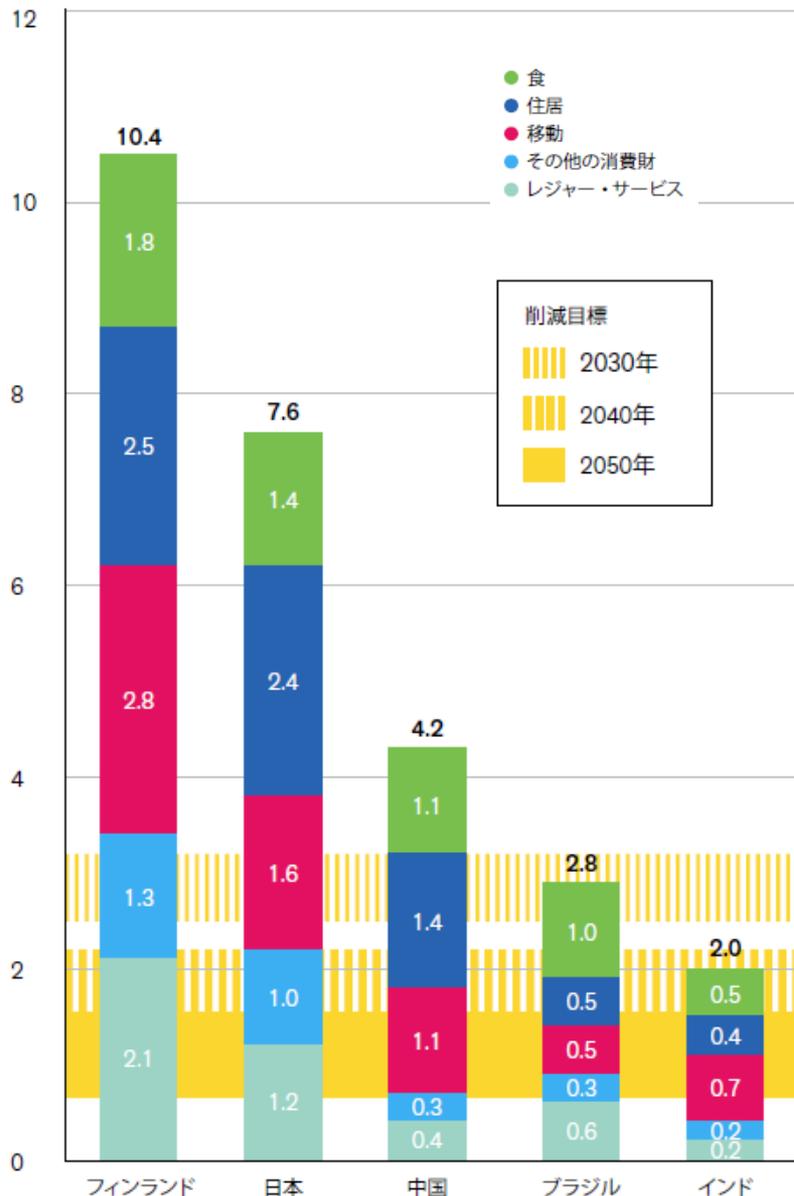
最終的なサービスとしては、一次エネルギーの4~5%程度しか活用できていない。

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。

ライフスタイルによるカーボンフットプリント(1/2)

ライフスタイル・カーボンフットプリント (tCO₂e/人/年)

2017年



- ✓ フィンランドでは、日本よりも移動、レジャー・サービス関連の排出が多い。
- ✓ フィンランド、日本は、中国と比較して住居、その他の消費財関連の排出が多い。
- ✓ 中国、ブラジルは、ライフスタイル・カーボンフットプリントは、生産ベース排出量と比べ小さい。(ブラジルはメタン排出が多い。) ⇒ 工業、農業の世界の生産拠点的

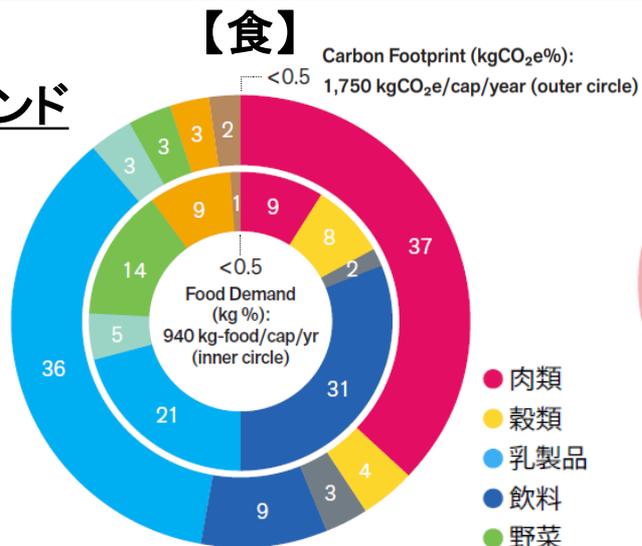
※ 主要な領域(食、住居、移動)は主にライフサイクルインベントリデータベースを用いてボトムアップ的に分析し、その他の領域はトップダウン(産業連関分析)を用いて推計

[出典] IGES, Aalto University, D-mat Ltd., 1.5-Degree Lifestyles: Targets and Options for Reducing Lifestyle Carbon Footprints (2019)

ライフスタイルによるカーボンフットプリント(2/2)

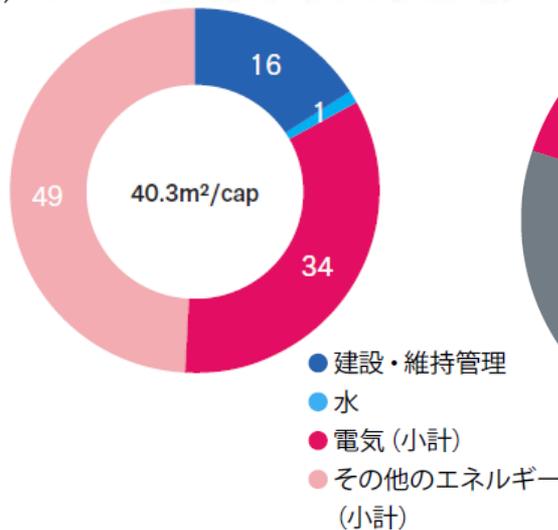
[出典] IGES (2019)

フィンランド



【住居】

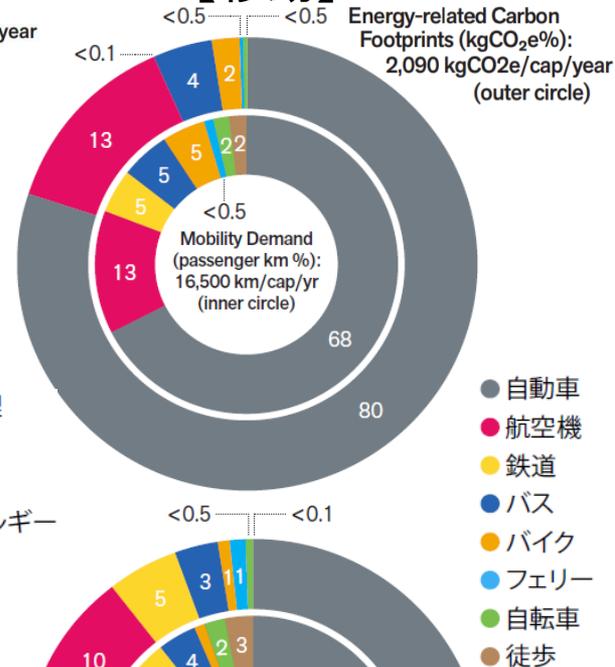
Carbon Footprint (kgCO₂e%): 2,500 kgCO₂e/cap/year



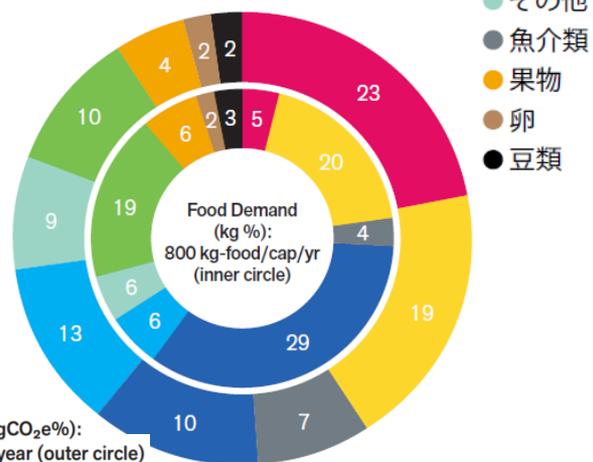
【移動】

Energy-related Carbon Footprints (kgCO₂e%):
2,090 kgCO₂e/cap/year (outer circle)

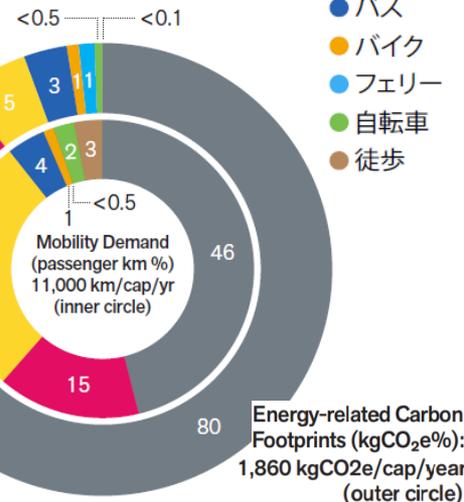
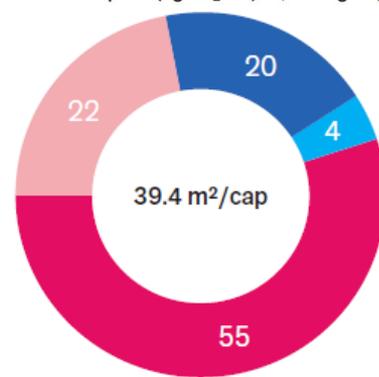
Mobility Demand (passenger km %):
16,500 km/cap/yr (inner circle)



日本



Carbon Footprint (kgCO₂e%): 2,400 kgCO₂e/cap/year

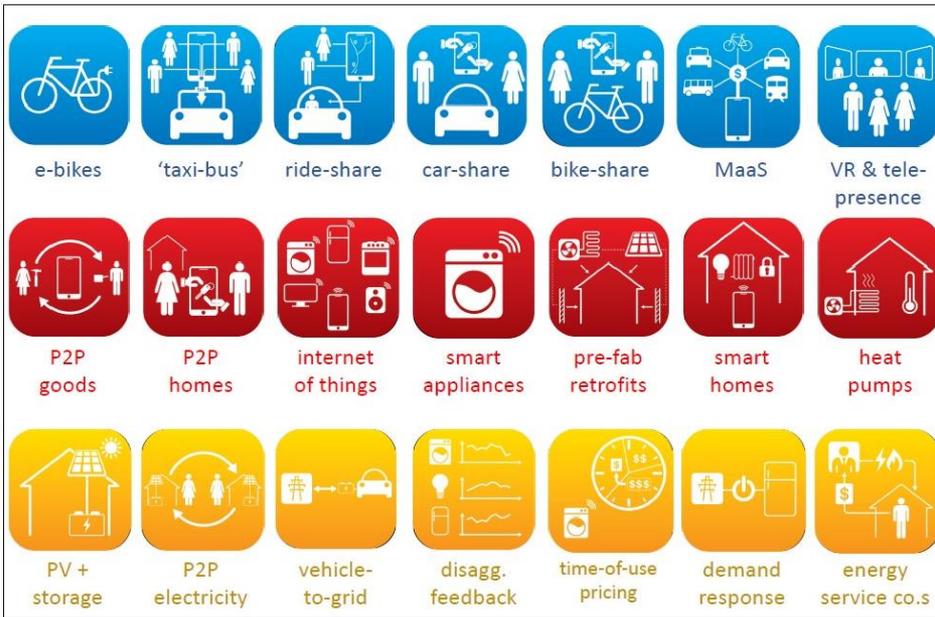


- ✓ 日本は、食では肉・乳製品の消費、住居は化石燃料由来のエネルギー、移動は自動車の使用による排出が大。
- ✓ 食では、日本は米の影響が大きい一方、フィンランドは牛肉やチーズ・牛乳の排出が大きい。
- ✓ 住居では、日本は電力の排出が大きく、フィンランドは暖房での排出が大きい。
- ✓ 移動では、日本は鉄道利用が多く、結果、カーボンフットプリントが小さい傾向有。

3. デジタル技術の進展による 社会構造変化の可能性



エンドユース技術の破壊的イノベーション

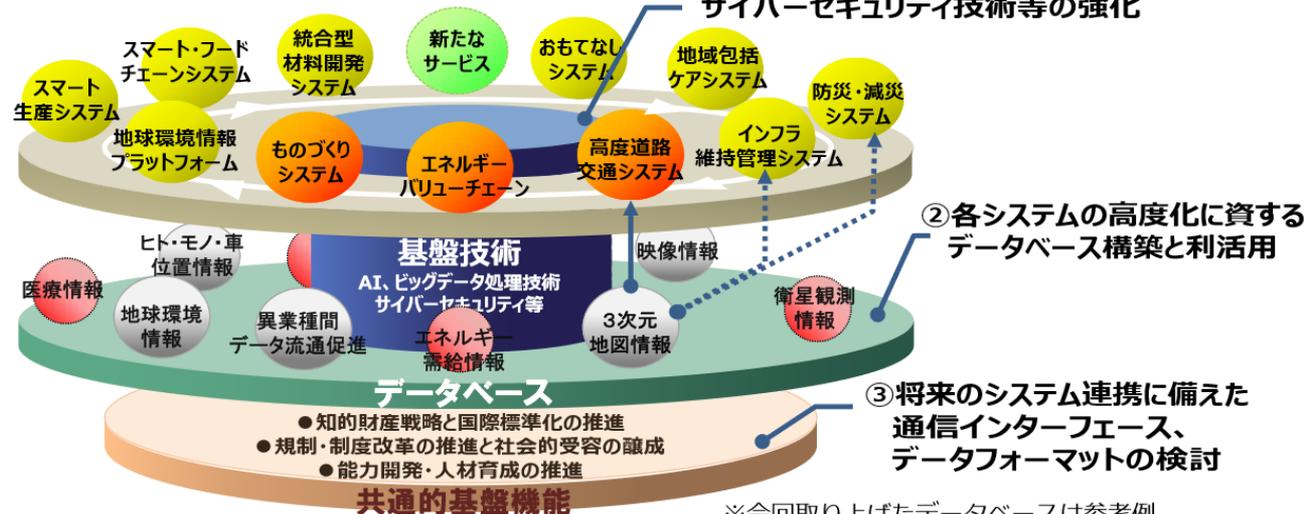


Source: C. Wilson (IIASA)

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

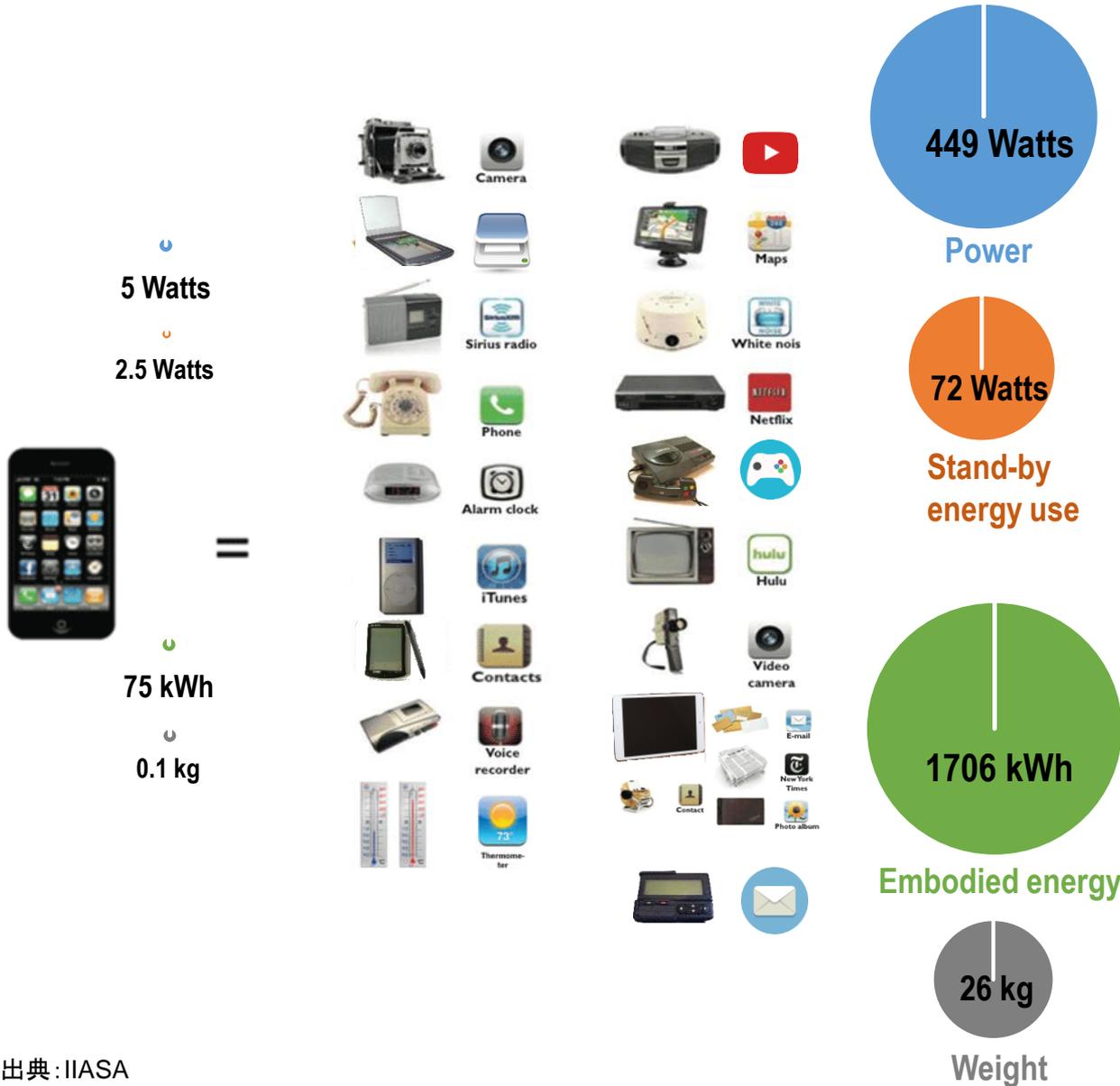
- 1) 独立した技術から、接続へ
- 2) 所有から、利用へ
- 3) シェアリングエコノミー、サーキュラーエコノミーの誘発

●「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

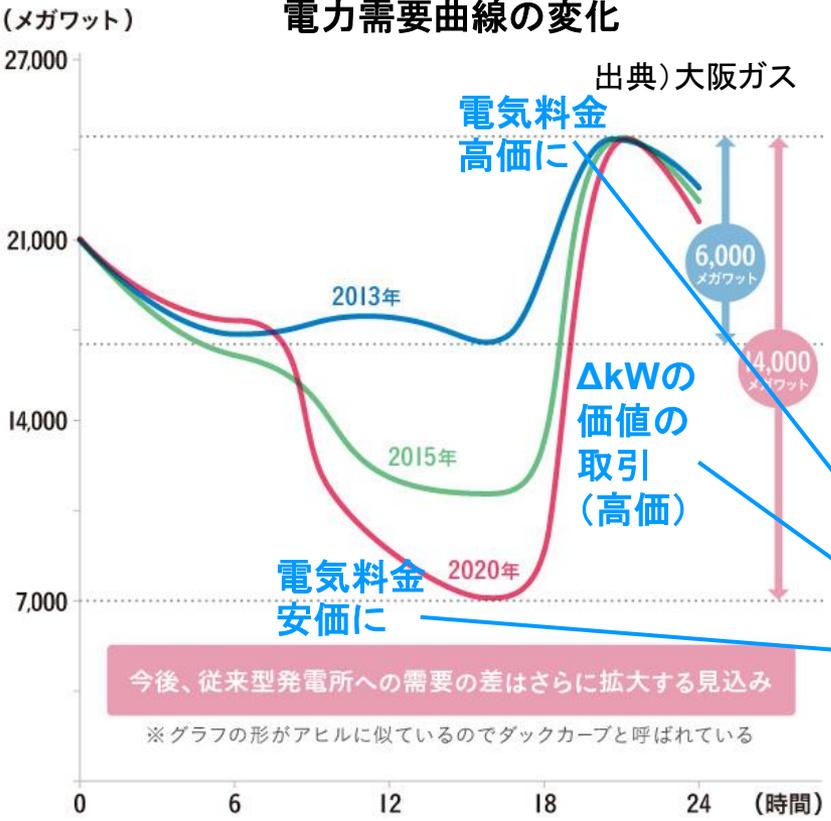
IT, AI等のデジタル技術による社会変化と 低エネルギー需要・低炭素排出社会の可能性



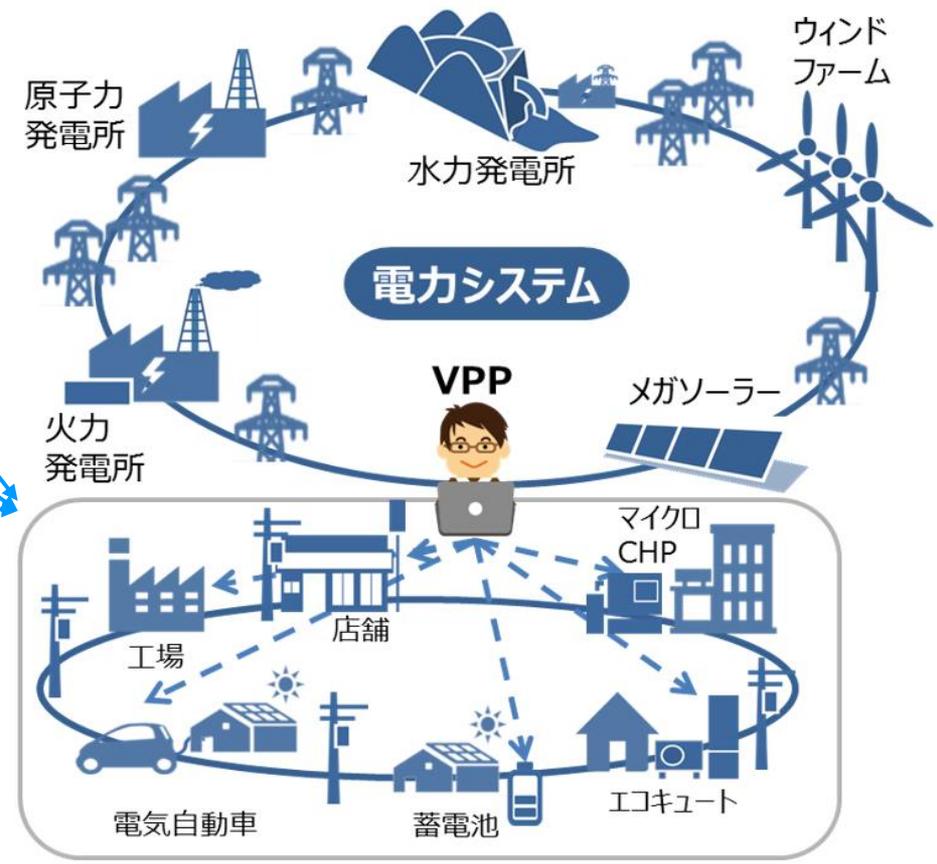
- 社会はエネルギー消費を目的にエネルギーを消費しているわけではない。製品・サービスが効用増をもたらすため、それに体化されたエネルギーを消費しているに過ぎない。
- 効用増をもたらす製品・サービスの展開は急速な場合が多く、それに付随したエネルギー・CO₂排出低減は急速になる可能性あり。

仮想発電所 (VPP)、ディマンドレスポンス (DR)

電力需要曲線の変化



太陽光発電の大量導入により電力系統の需要曲線が変化



出典) 経済産業省

デジタル技術を活用しながら、VPPやDRといった手法を用いて、電力需要を適切に制御することで、価値を創出

運輸部門: CASE



Connected; Service & Shared



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

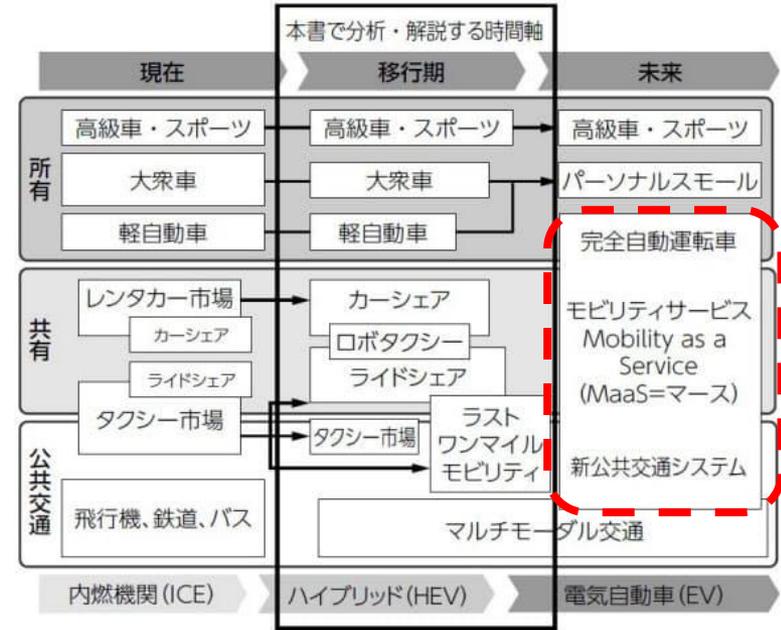
シェア化に伴い、車両台数低減が、素材生産量を低減し、また都市の形を変える可能性も



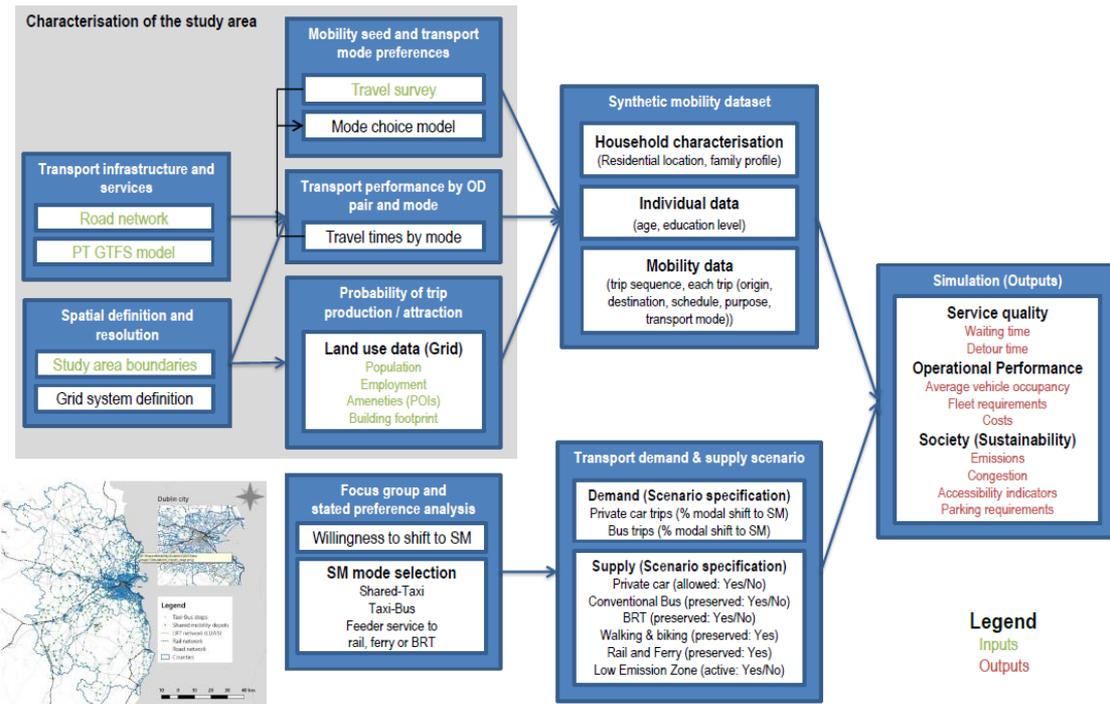
Airbus, Audi



出典) Jari Kauppila, ALPSシンポジウム(2019)



シェアカーによる必要車両台数等の推計例：ダブリンの例



- 実際のデータ(人口分布、道路・公共交通ネットワーク、平日のトリップ需要(時間帯、OD)、トリップ選好等)に基づいてモデルを構築
- アイルランド ダブリンの場合、全ての自家用車をシェアカーに置き換えた場合はその2%弱の車両台数で現在のモビリティを供給できる。
- 自家用車の20%を置換した場合は(EV無しでも)CO₂排出量が▲22%に。

[出典] OECD/ITF, Shared Mobility Simulations for Dublin (2018)

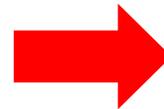
シナリオ設定			シミュレーション結果：Baseline比の変化率 [%]					
#	Bus	Car	Passenger-km	Vehicle-km	CO ₂ emissions	Congestion	Travel time	Equivalent private car vehicles
1	100% Replacement	100% of trips replaced	+51	▲38	▲31	▲37	+72	▲98
2	Keep		+32	▲42	▲31	▲43	+134	▲99
4	100% Replacement	20% of trips replaced	+16	▲23	▲22	▲7	+6	▲18
6	Keep trips where Bus with headway < 5min		+13	▲25	▲23	▲9	+6	▲18

アパレル関連

- 服の50%は使われずに廃棄されているとも言われている。
- 若年層を中心とした嗜好の変化(スーツをあまり着なくなった等)、Eコマースの進展(百貨店以上になんでも手に入る。移動の不便を解消 等)
- AI、ICTを使った、必要なだけ生産できるような技術変化(需要を的確に把握可能に。大量生産で価格を下げる必要性の低下)
- 百貨店などでは、「見せる」ために多くのスペースを用意、そしてその建設に体化されるエネルギー、設備利用率が低いにも関わらず暖冷房、といったエネルギーの削減に。
- また、百貨店や大型ショッピングセンターが求められなくなると、そこへの移動のマイカーも求められなくなり、一層、シェアカーを促すようになり得る。



Eコマース
(中古品の売買(事実上のアパレル製品のシェア化)を含む)



**百貨店、大型
ショッピングセ
ンターの变化**



温暖化対策とはほぼ無関係の技術変化、社会変化。COVID-19で加速される可能性も。

食品関連

- 食料システムで排出されるGHGは30%前後（バウンダリーによっては更に大きい）とされる。一方、食品廃棄・ロスの世界全体では1/3にも上るとされる（ただし日本の食品廃棄・ロスは世界平均よりもずっと小さいとの評価有）。
- AI、ICTで食料需要をより正確に予測できるなどできれば、食品廃棄・ロスが減り、エネルギー消費・GHG排出の低減につながる可能性あり。
- プラスチック容器の低減、スーパーのスペース低減、冷蔵・冷凍エネルギー、輸送エネルギーの低減 などに波及し得る。



SDGsの同時達成にも大きな寄与となり得る。

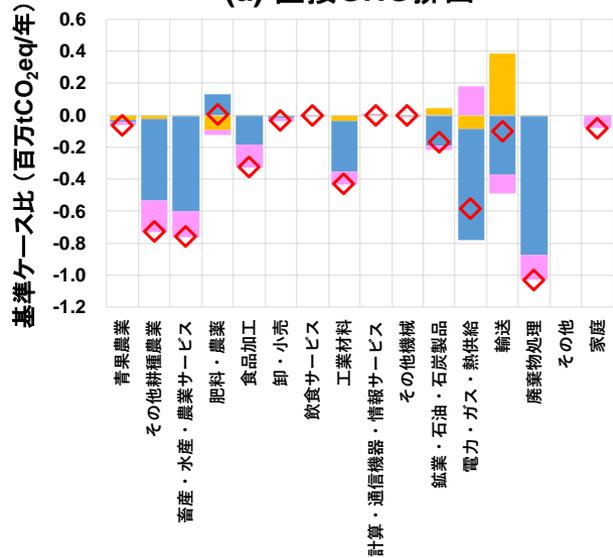
食品廃棄低減による効果の分析例

食品廃棄を低減する部門	食品廃棄の主な理由	情報技術等の想定
F: 青果農業	・規格外品(収穫後, 未出荷)	・卸市場, 小売を経由しない個別販売・冷蔵貯蔵
I: 食品業(食品加工, 卸, 小売)	・需給見込み違いによる過剰生産, 返品	・POSシステム, 気象予測情報を用いた高度需要予測
I: 食品業(飲食サービス)	・材料の保管期限切れ, 過剰調理 ・食べ残し	・POSシステム, SNS広告 ・小ポーション
M: 家庭	・過剰除去 ・食べ残し	・買い物, 献立管理アプリの活用

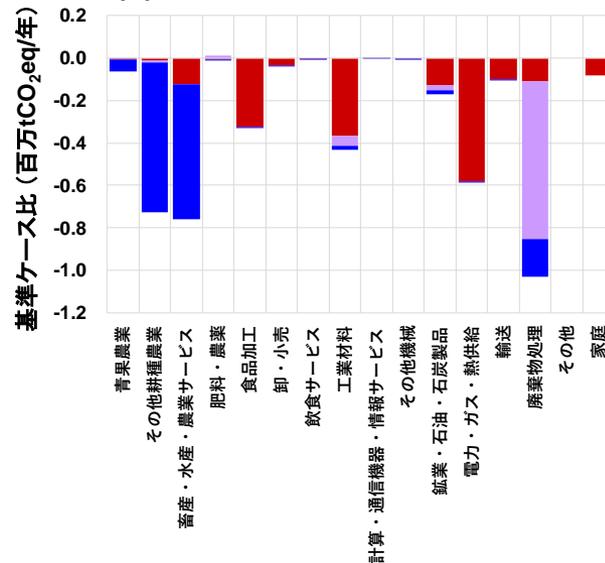
産業連関表を用い、他の部門への波及効果も考慮してエネルギー消費・GHG排出の削減効果を算定

各部門で食品廃棄を30%低減できた場合

(a) 直接GHG排出



(b) ガス種別の正味の直接GHG排出



図(a)凡例 ■ 青果農業(F)で30%低減 ■ 食品業(I)で30%低減 ■ 家庭(M)で30%低減 ◇ FIMの全部門で30%低減

図(b)凡例 ■ 非CO2 ■ CO2(エネルギー起源) ■ CO2(非エネルギー起源)

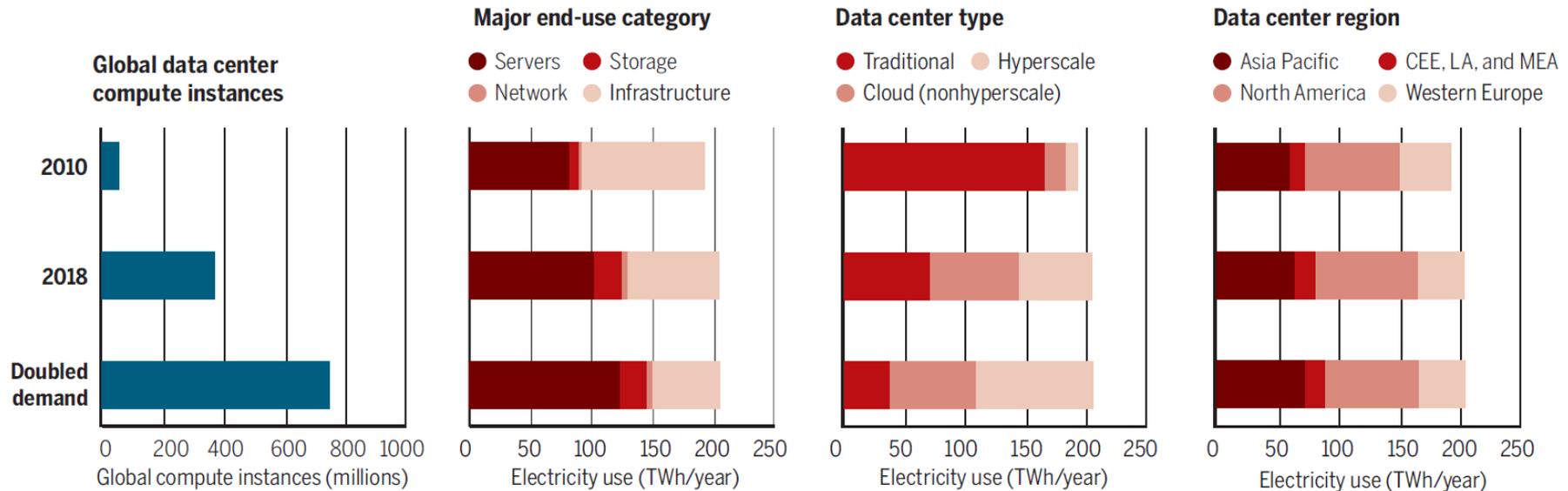
- ✓ FIMの全部門での食品廃棄を半減した場合、日本の総エネルギー消費は **0.04 ~ 0.08 EJ/年** (日本の一次エネルギー供給の **0.2 ~ 0.4%** に相当)、GHG 総排出は **5.9 ~ 8.4 百万 tCO₂eq/年** (日本のGHG総排出の **0.5 ~ 0.6%** に相当) 減少する。
- ✓ 食品廃棄低減による日本のGHG削減の比率(対GHG総排出)が1%未満と、既往の世界全体に対する評価(3%減程度等の推計例有)に比べ小さい理由は、日本の食品廃棄率が低く、また、廃棄物の焼却処分・余熱利用が進められており単位廃棄量当たりのGHG削減ポテンシャルが小さい等による。

[出典] 林礼美 他、エネルギー・資源 (2020)

リバウンド効果：データセンターの電力消費

Historical energy usage and projected energy usage under doubled computing demand

Doubled demand (relative to 2018) reflects current efficiency trends continuing alongside predicted growth in compute instances.



CEE, LA, and MEA, Central and Eastern Europe, Latin America, and Middle East and Africa; TWh, terrawatt-hour.

[出典] Masanet et al., "Recalibrating global data center energy-use estimates", Science (2020)

- 世界のデータセンターの電力消費量は2010年に194 TWhであり、2018年には205 TWh(世界全体の電力消費量の約1%)に増加したと推計。同時期の計算インスタンスは+550%になったのに対し、電力消費量は+6%。
- エネルギー効率向上の主な要因は、サーバー効率化、仮想サーバー化、ストレージドライブ効率化・高密度化、データセンターインフラの効率化、サーバータイプの変化
- 数年先まではデータセンターによる電力消費の増加はさほど大きくないと推計されるが、将来に向けては、政策補助、新規技術への公的投資、公的なデータ取得・モデリング能力の増強、といった政策立案者の行動も重要になるとされている。

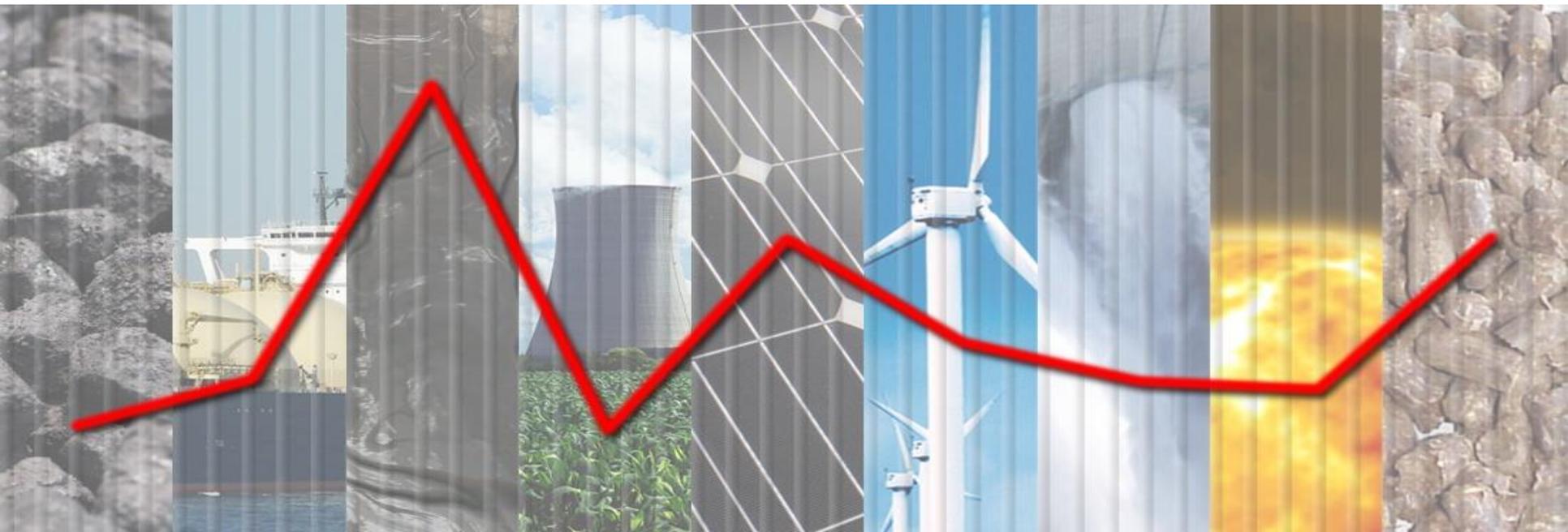
デジタル化によるエネルギー消費量変化の推計 (文献レビュー)

対象	エネルギー消費の変化; [代表値]
E-publication	-90% to +3000%; [-70%]
E-news	-1400% to +550%; [-70%]
E-business	-91% to +179%; (Insufficient evidence)
E-music	-87% to +235%; [-60%]
E-videos and e-games	-70% to +450%; [0%]
Teleworking	-15% to -0.01%
Vehicle distance travelled	-20% to +3.9%
Person distance travelled	-19% to -11.9%

- ✓ 基本的には、デジタル化によって、エネルギー消費量の低下が推計されている。
- ✓ しかし、どのような代替を想定するか、リバウンド効果の範囲をどう想定するか等により、エネルギー消費の変化量の推計は大きく異なる。

[出典] Court et al., “Digitalisation of goods: a systematic review of the determinants and magnitude of the impacts on energy consumption”, Environmental Research Letters (2020); Hook et al., “A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking”, Environmental Research Letters (2020)

4. 長期排出削減のシステム分析： シェアリングモビリティの効果等



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・合成石油、天然ガス・合成メタン、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)
- ◆ 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
- ◆ 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、それらが整合的に評価可能
- 非CO₂ GHGについては、別途、米EPAの技術・コストポテンシャル推計を基にしてRITEで開発したモデルを利用

- 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

モデル分析のシナリオ想定

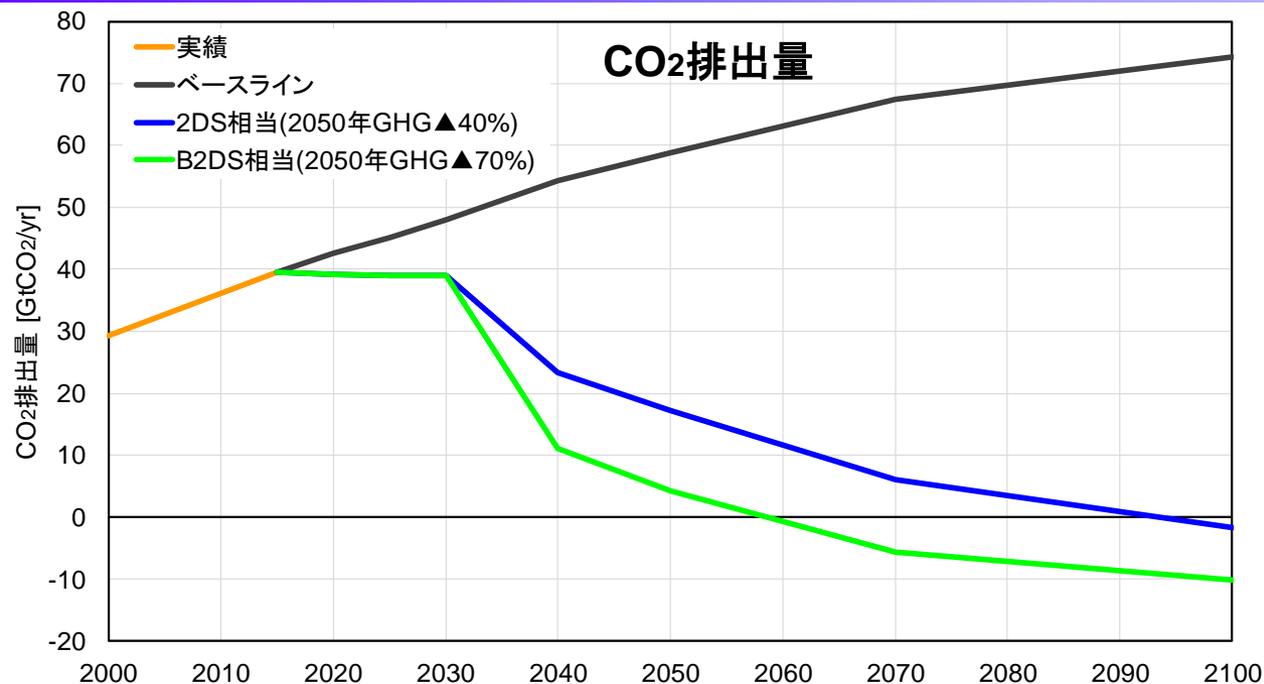
シナリオ名	世界排出シナリオ	再エネコスト (太陽光発電コスト)	シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)	大気CO ₂ 直接回収技術(DAC)
REF_1	ベースライン (特段のCO ₂ 排出 制約なし)	標準	想定せず	想定せず
2DS_1	2°C未満 (>50%): IEA ETP2017の [2DS]相当	標準	想定せず	想定せず
2DS_2		低コスト(中東・北ア フリカ中心に)	シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)	
2DS_3				
B2DS_2	2°C未満 (>66%): IEA ETP2017の [B2DS]相当	低コスト(中東・北ア フリカ中心に)	想定せず	想定せず
B2DS_3			シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)	
B2DS_3_DAC			DAC実現	

注)いずれのシナリオも、世界の限界削減費用均等化(費用最小)を想定

【社会経済シナリオ(SSPs: Shared Socioeconomic Pathways)】

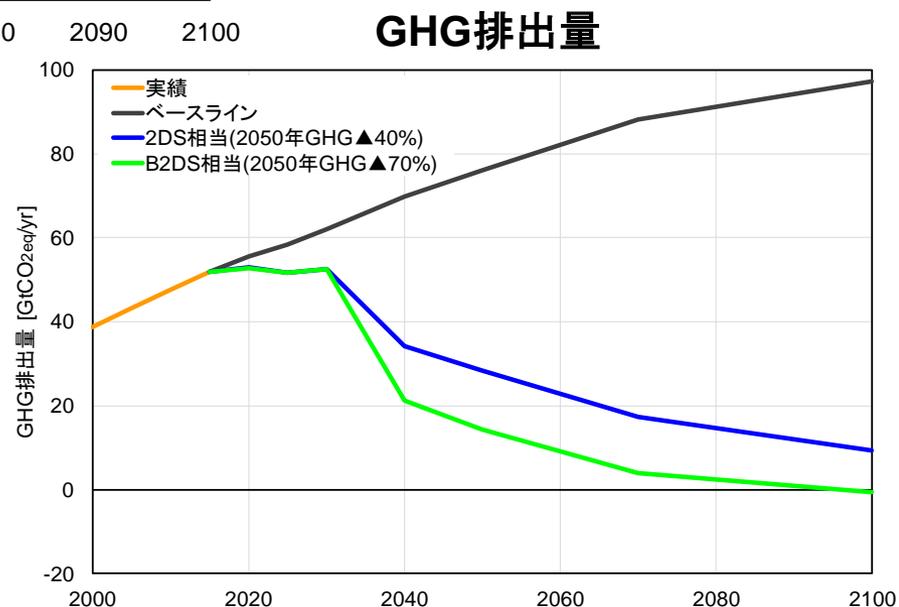
■ **SSP2(中位シナリオ)ベース:** 世界人口 92億人 in 2050、世界GDP成長率 2.4%/yr(2000-50年)をベースに分析

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

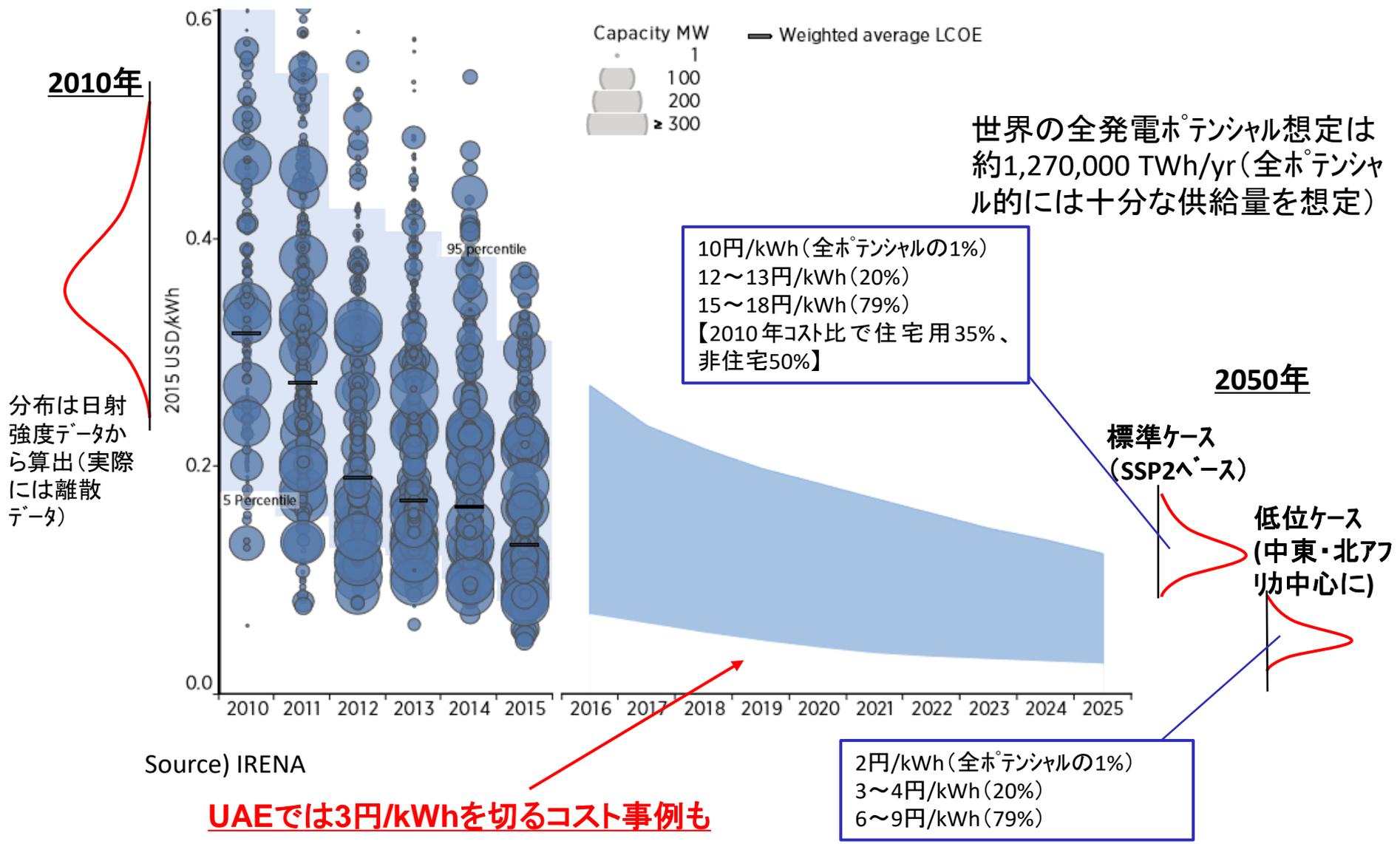


注)ベースライン排出量は前提とする想定シナリオではなく、モデル計算結果

※ 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



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

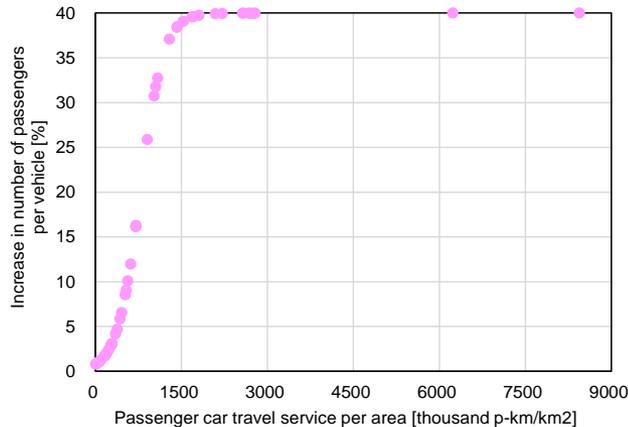


※ なお、DNE21+モデルでは、VREのシェアが増すに従い、系統安定化のための追加費用が別途必要と想定している。

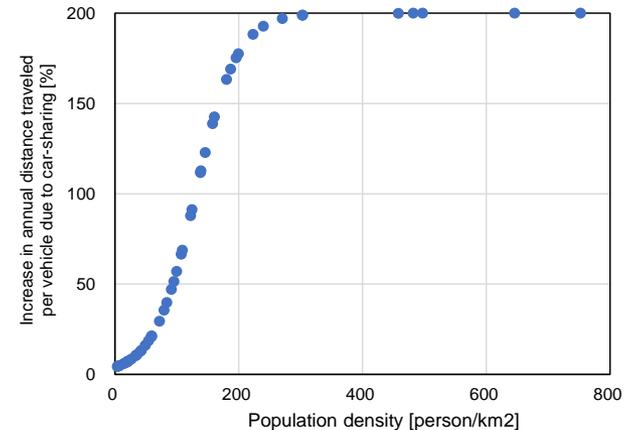
完全自動運転車と誘発されるシェアモビリティの想定

- ◆ 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

完全自動運転車によるライドシェア誘発の想定



完全自動運転車によるカーシェア誘発の想定



	非完全自動運転車(自家用車)	完全自動運転車(シェアカー)
車両価格	別途、車両タイプにより、それぞれ車両価格を想定	2030: +10000\$ 2050: +5000\$ 2100: +2800\$ (非完全自動運転車比)
車の寿命	13-20年	4-19年
一台あたり平均乗車人数	2050: 1.1-1.5人 2100: 1.1-1.3人	2050: 1.17-2.06人 2100: 1.11-1.89人

- ◆ 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

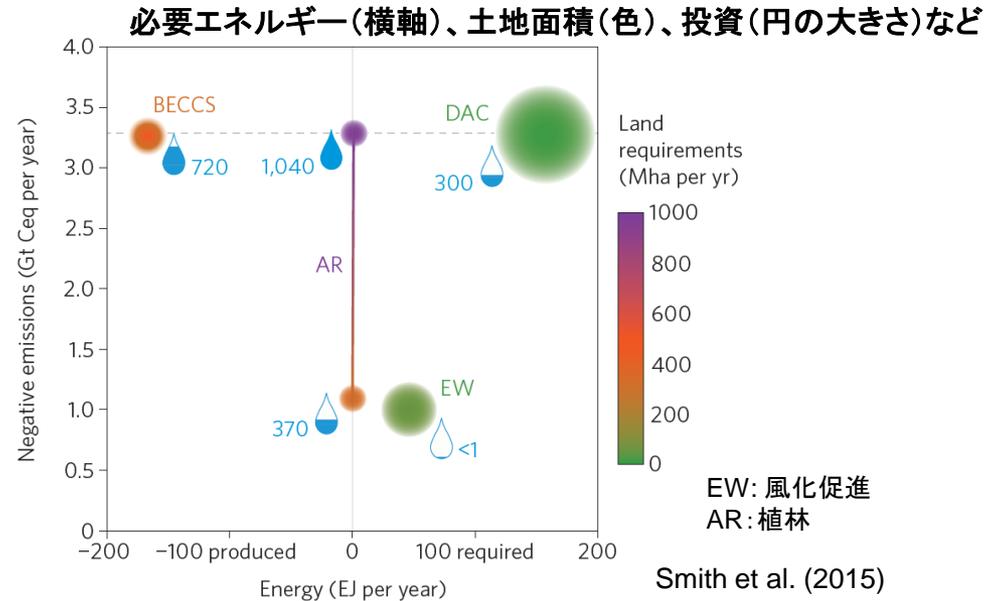
乗用車台数の減少による①鉄鋼製品とプラスチック製品の減少、②立体駐車場スペースの低下に伴うコンクリートと鉄鋼製品の減少を考慮

大気CO2直接回収（DAC）技術

- DACは、大気中からCO2を回収する。400 ppm程度の濃度の低いCO2を回収するため、化石燃料燃料時排ガス等からの回収と比べ、より大きなエネルギーが必要。
- 一方、DACs(貯留まで)をすれば、負排出となる。
- CO2貯留層に近く、エネルギーが安価に入手できる地域(安価なPV供給が可能な地域など)での実施が経済的



Climateworks



M. Fasihi et al., (2019)における02020年時点のDACのエネルギー消費量と設備費の推計:

本モデル分析では、Fasihi et al.らによるBaseとConservative 2種類のシナリオのうち、Conservativeを採用

	エネルギー消費量 (tCO2)		設備費 (Euro/(tCO2/yr))		
		2020年	2050年	2020年	2050年
高温(電化)システム(HT DAC)	電力 (kWh)	1535	1316	815	222
低温システム(LT DAC)	熱 (GJ)	6.3 (=1750 kWh)	4.0	730	199
	電力 (kWh)	250	182		

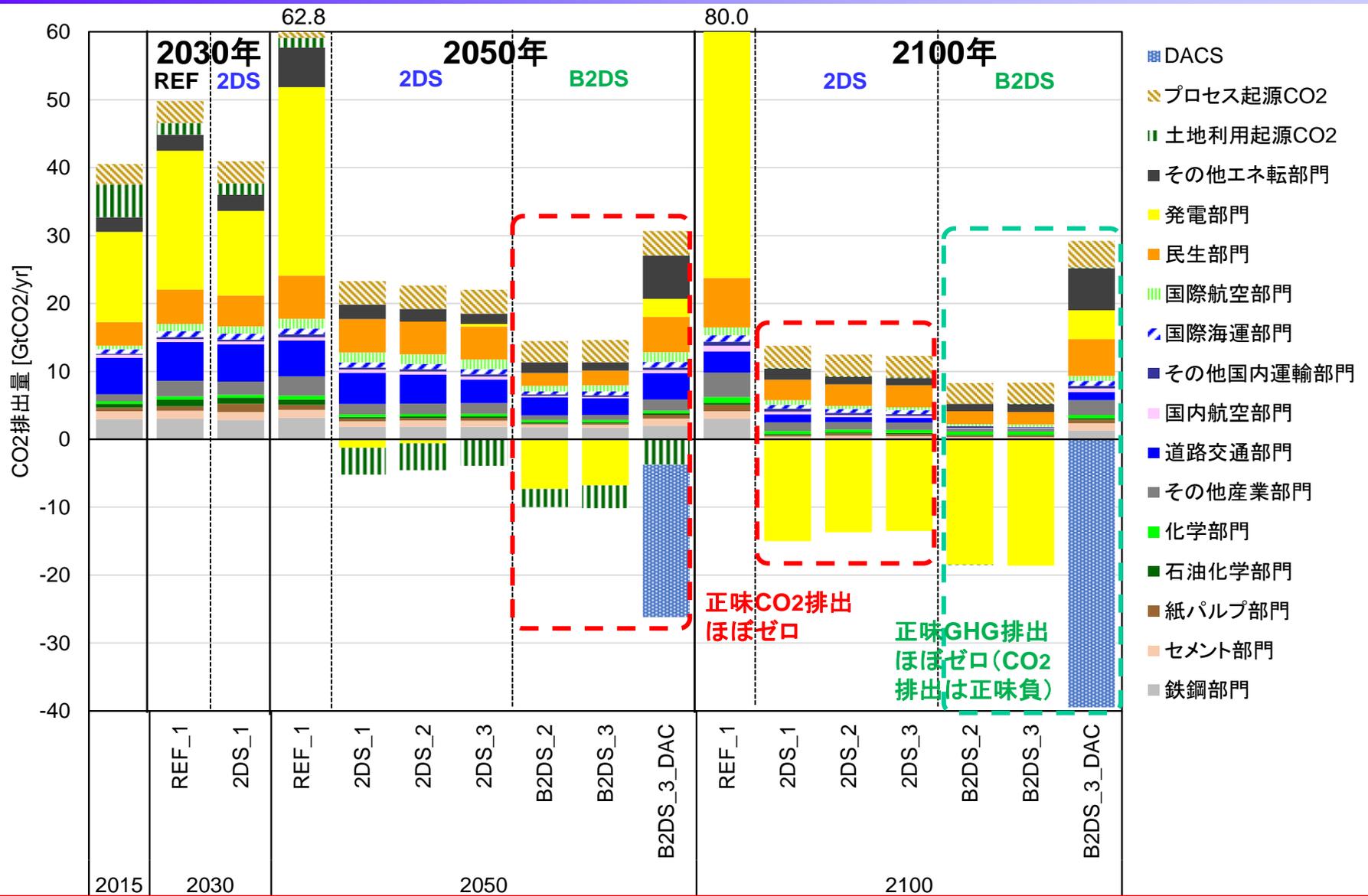
2050年の排出削減費用

	2°C、>50%			2°C、>66%		
	2DS_1 (標準)	2DS_2 (PVコスト低)	2DS_3 (+カーシェア)	B2DS_2 (PVコスト低)	B2DS_3 (+カーシェア)	B2DS_3_DAC (+DAC)
CO ₂ 限界削減費用 (\$/tCO ₂)	183	169	152	524	430	99
CO ₂ 削減費用 (billion US\$/yr)	2097	1585	ネガティブ費用	5650	ネガティブ費用	ネガティブ費用

※ CO₂削減費用は、いずれもREF_1シナリオ比での記載。シェアモビリティ進展を想定したシナリオ3では、CO₂削減の限界削減費用は正に留まるものの、技術進展に伴って誘発されるシェアモビリティ進展による自動車台数の低減とそれによって誘発される素材生産低減に伴うコスト低下が、限界費用までの積分値である排出削減費用を上回る結果となっていることを示す。

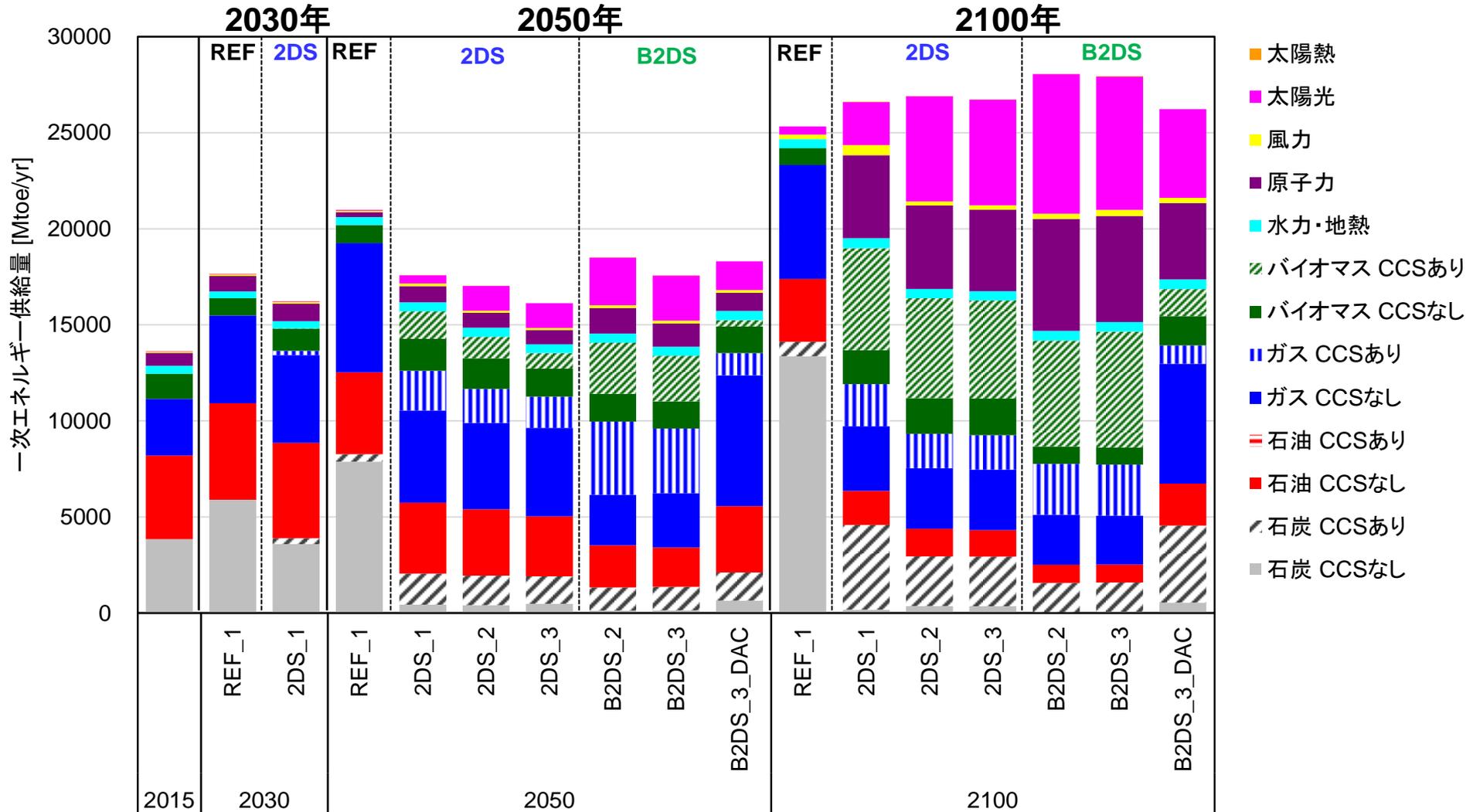
- ✓ 2°C目標でも、>50%確率(2DS)か、>66%確率(B2DS)かで世界の削減費用に大きな差あり。
- ✓ 中東等を中心とした再エネコスト低位ケースの場合(ケース2、3)、世界の対策費用低減に大きな効果あり。
- ✓ シェアモビリティ実現ケース(ケース3)では、限界削減費用が大きく低下し、シェアモビリティ非実現ケース比では負の削減費用に。
- ✓ DAC想定ケースでは、更に限界削減費用は大きく抑制される結果に。

世界の部門別CO₂排出量



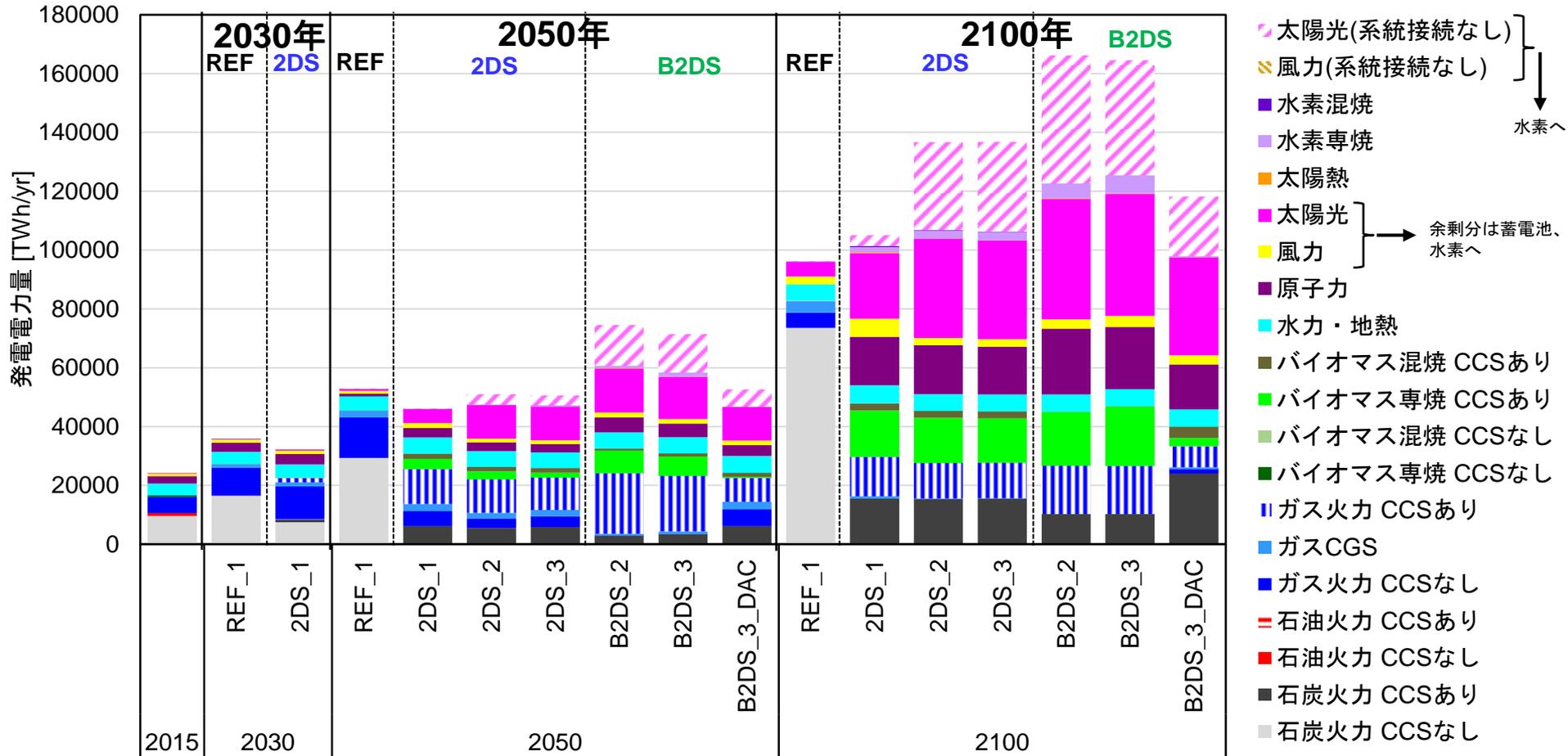
✓ シェアモビリティ実現ケース(ケース3)では、道路交通部門の排出が減少に、BECCSへの依存低下
 ✓ B2DSのDAC想定ケースでは、大規模なDACsが経済合理的に。その分、化石燃料利用が許容

世界一次エネルギー生産量



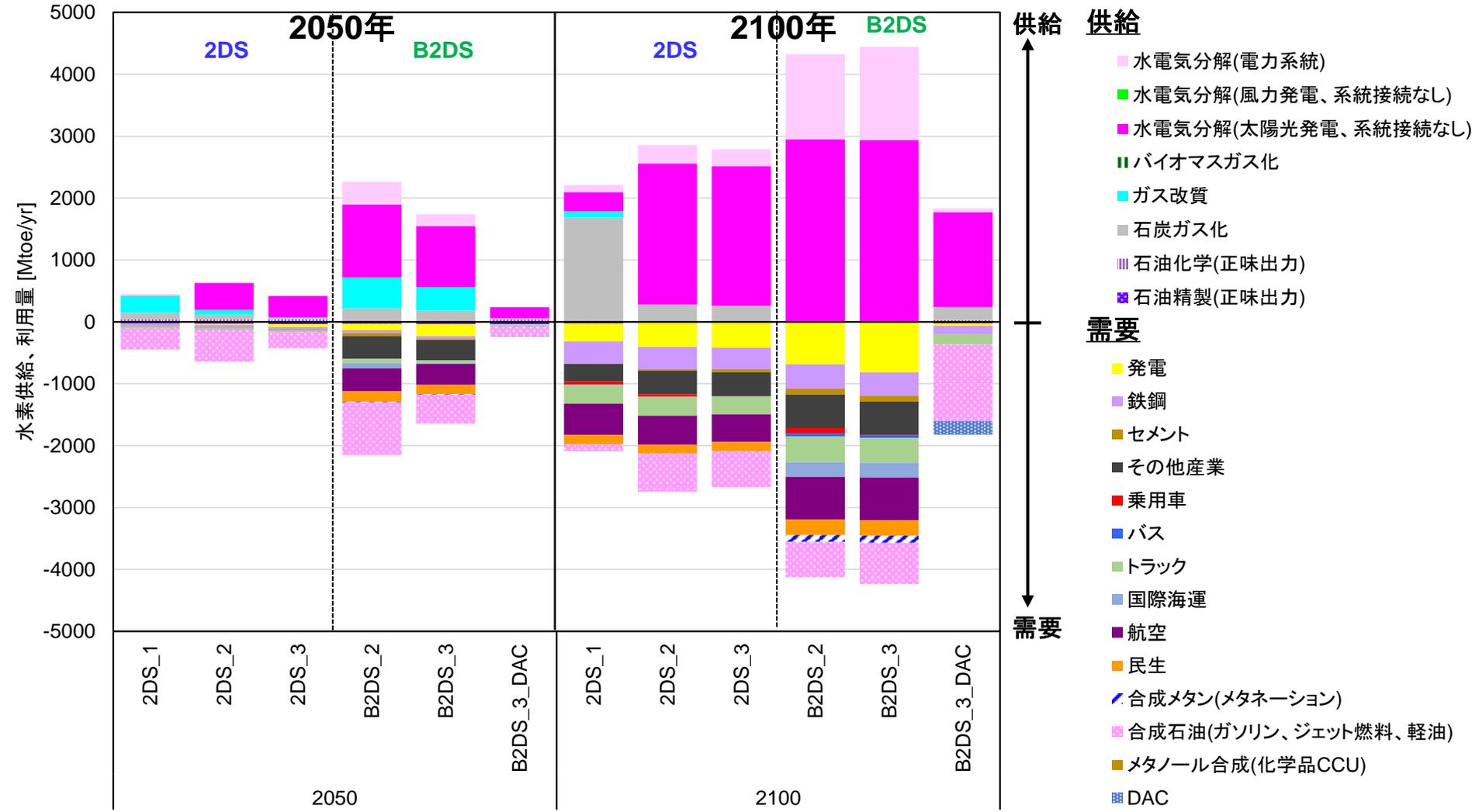
- ✓ 2℃目標のいずれのシナリオにおいても、2100年に向けて、再エネ、原子力、CCSの拡大が見られる。
- ✓ ただし、2100年においても、CCS無しの化石燃料利用は一定量残る(BECCSでキャンセルアウト)。
- ✓ 特に2100年では相当大きなBECCS利用が必要。ただし、DAC有のシナリオではBECCSが相当抑制される。

世界発電電力量



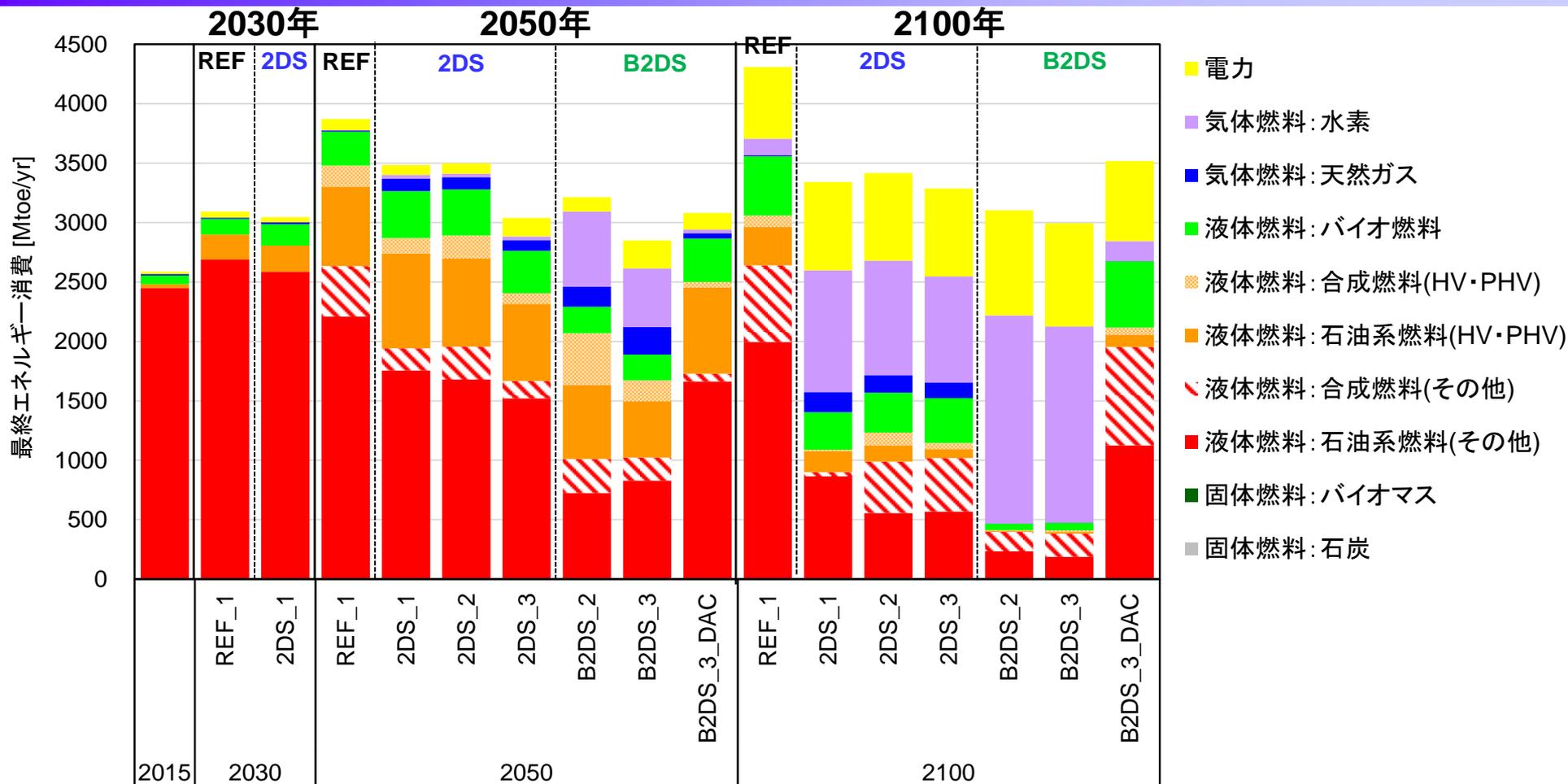
- ✓ 世界の発電電力量の伸びは大きい(特に厳しい排出削減目標下ほど大きくなる傾向有)。
- ✓ 2°Cシナリオでは、2030年に向けてはガスの拡大、2050年以降は、再エネ、原子力の拡大、CCS利用が費用効率的に。2DSでは特に2050年に向けてコジェネの役割の重要性が増す。
- ✓ 2DSでは2100年頃、B2DSでは2060年頃のCO2排出ゼロに対応して、BECCSの利用の増大が見られる。(現実的にこのような大規模なBECCS利用が可能かどうかは検討、議論が必要。DACは、BECCSの代替となり得る可能性有。)
- ✓ シェアモビリティケースでは、特に2050年前後においてはBECCSの役割が低下
- ✓ 特にPVコスト低位シナリオでは、水素製造用も含め、2100年の太陽光発電のシェアは大きく増大

世界の水素需給バランス (2050、2100年)



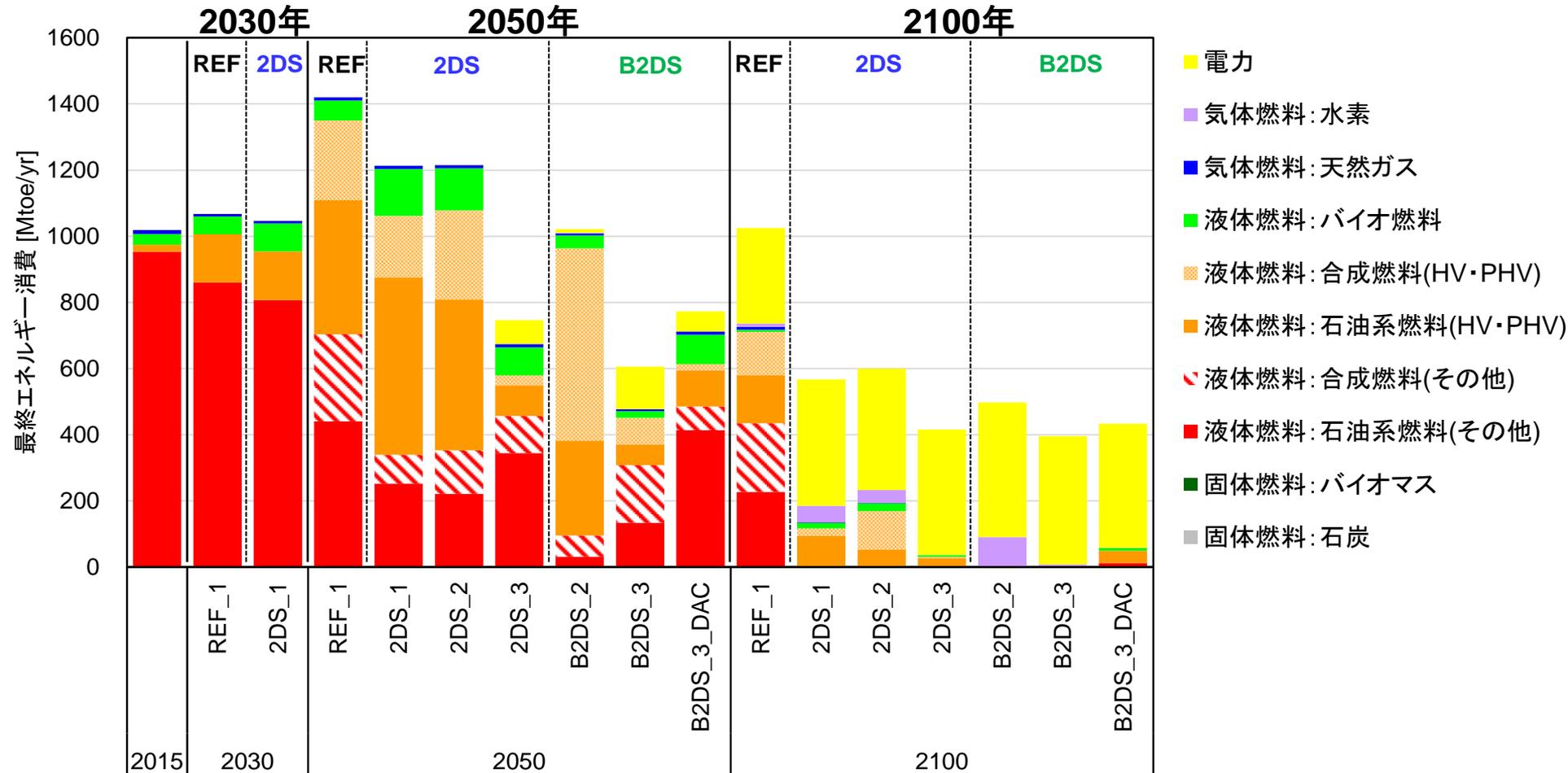
- ✓ 水素製造は、PVコストが標準ケースの場合(ケース1)は、石炭(褐炭含む)からのガス化+CCSが経済合理的な傾向。一方、PVコスト低位ケースの場合(ケース2、3)は、PV+水電解が経済合理的な傾向あり。
- ✓ 2°Cシナリオ下では、水素利用先は多様。合成石油、合成メタン(メタネーション)での利用も経済合理的に。

世界の部門別の最終エネルギー消費量：運輸部門



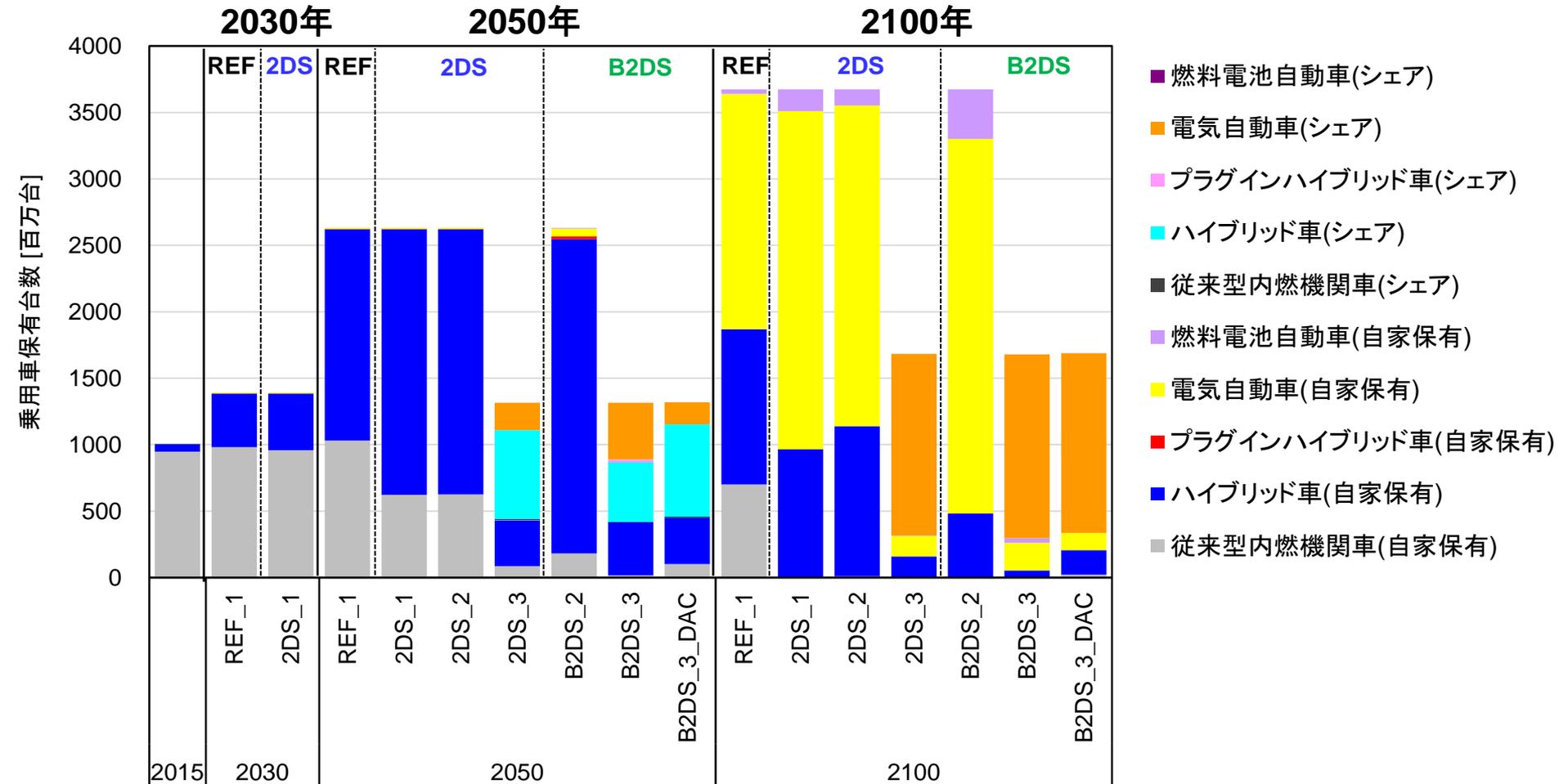
- ✓ 2°Cシナリオでは、EV、燃料電池自動車(FCV)、バイオ燃料の拡大が見られる。
- ✓ 特にB2DSの2050年以降は、FCTトラックを含め水素燃料の利用が拡大
- ✓ 2050年頃の一部ガス利用は国際海運での利用が主。2100年に向けては水素利用が主に。
- ✓ B2DSの2100年になるとバイオ燃料が減少。厳しい排出削減下で、発電部門でのBECCS利用が費用対効果高くなるため。
- ✓ DACS利用可シナリオでは、水素および電力の利用が減少し、石油系燃料など、液体燃料の利用が増加する。

世界の部門別の最終エネルギー消費量：乗用車（運輸部門の内数）



- ✓ 2°Cシナリオでも、2050年頃までは石油系燃料、合成燃料(HV, PHV)が主流のシナリオが多い。
- ✓ シェアリング想定シナリオ(ケース3)では、EVの比率が増大。
- ✓ 2050年ではバイオ燃料利用が一定程度見られるが、2100年では利用量低下。発電におけるBECCS利用が増加(負排出のため)
- ✓ 2100年では、EVが主に。ただし、DAC利用可のシナリオでは、一部HV, PHVも費用対効果がある結果に。

世界の乗用車保有台数



- ✓ シェアリング想定シナリオ(ケース3)では、乗用車保有台数が大幅に低下(ただし、現状よりは増大)。ただし、2050, 2100年ともに現状との比較では、保有台数は増加。
- ✓ 特に2050年ではEVが増大(稼働率の上昇により、初期コストが高くて経済性を有しやすくなるため)。

5. まとめ

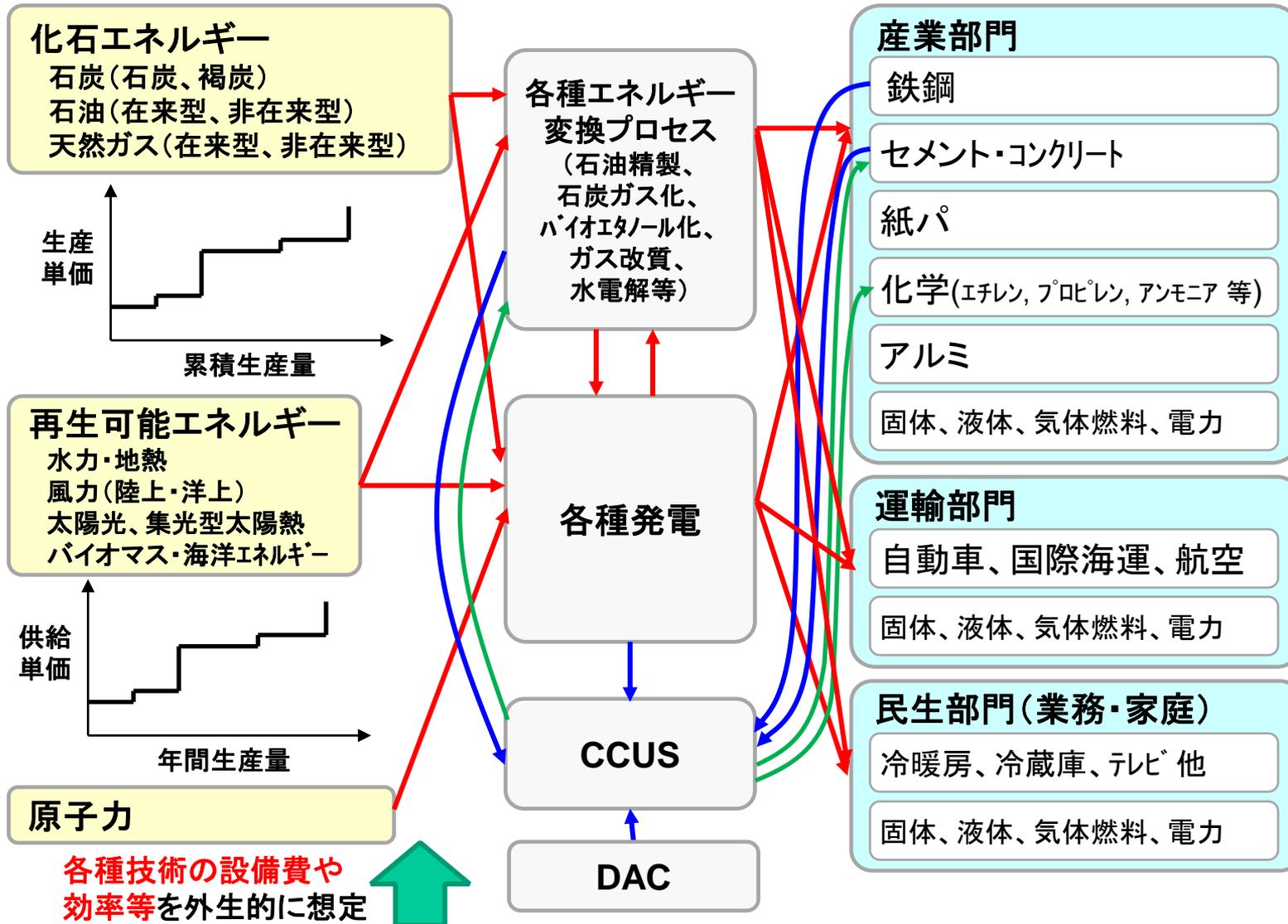


- ◆ パリ協定では、2°C目標、1.5°C目標や21世紀後半に実質ゼロ排出目標等而言及。ただし、例えば2°C目標としても、気候変動科学の不確実性によって、その排出許容量には大きな幅がある。また国際政治情勢も不確実性が大きい。不確実性を前提としつつ、賢いリスクマネジメントが必要。
- ◆ ネットゼロエミッションに向けては、電力化率の向上と、低炭素、脱炭素電源化は、対策の重要な方向性。最終的には電気利用の大幅拡大が重要だが、どのエネルギーキャリアをどの段階で利用すべきかは、全体システムで評価することが重要。
- ◆ デジタル技術等を利用したエネルギー需要サイドの技術イノベーションとそれに誘発されるシェアリングエコノミーなどの社会イノベーションも極めて重要。この芽は、気候変動対策とは離れてビジネスベースで(経済自律的に)、既に育ちつつあり、それを加速させることが重要。これらは、従来の個別機器の省エネルギーを超え、社会システムを大きく変えながら、システム全体として省エネルギーを実現する大きな潜在力を有している。
- ◆ COVID-19は、デジタル化を加速すると考えられる。グリーンリカバリーとしても有用。
- ◆ 厳しい排出削減シナリオ下では、合成燃料(e-fuel等)のCCU技術も経済合理性を有すると評価されるが、排出削減ポテンシャルの規模としてCO₂貯留(S)は重要。E-fuel利用のCO₂を化石燃料燃焼由来とすれば、世界全体でネットゼロのためには、世界のどこかでBECCS, DACSで排出をキャンセルアウトしておくことも必要なので、その点でも貯留は不可避。
- ◆ DACSは、コストの不確実性は大きいものの、ネガティブ排出を実現できるため、ネットゼロエミッション目標下では重要な役割となる可能性有(ゲームチェンジャーになり得る。限界削減費用の低下に伴い、2次エネルギーの形態なども大きく変化する可能性も)。
- ◆ 各技術間の相互関係を含めた全体システムの定量的かつ包括的な分析は、経済合理的な気候変動対応戦略の検討に重要。

付録

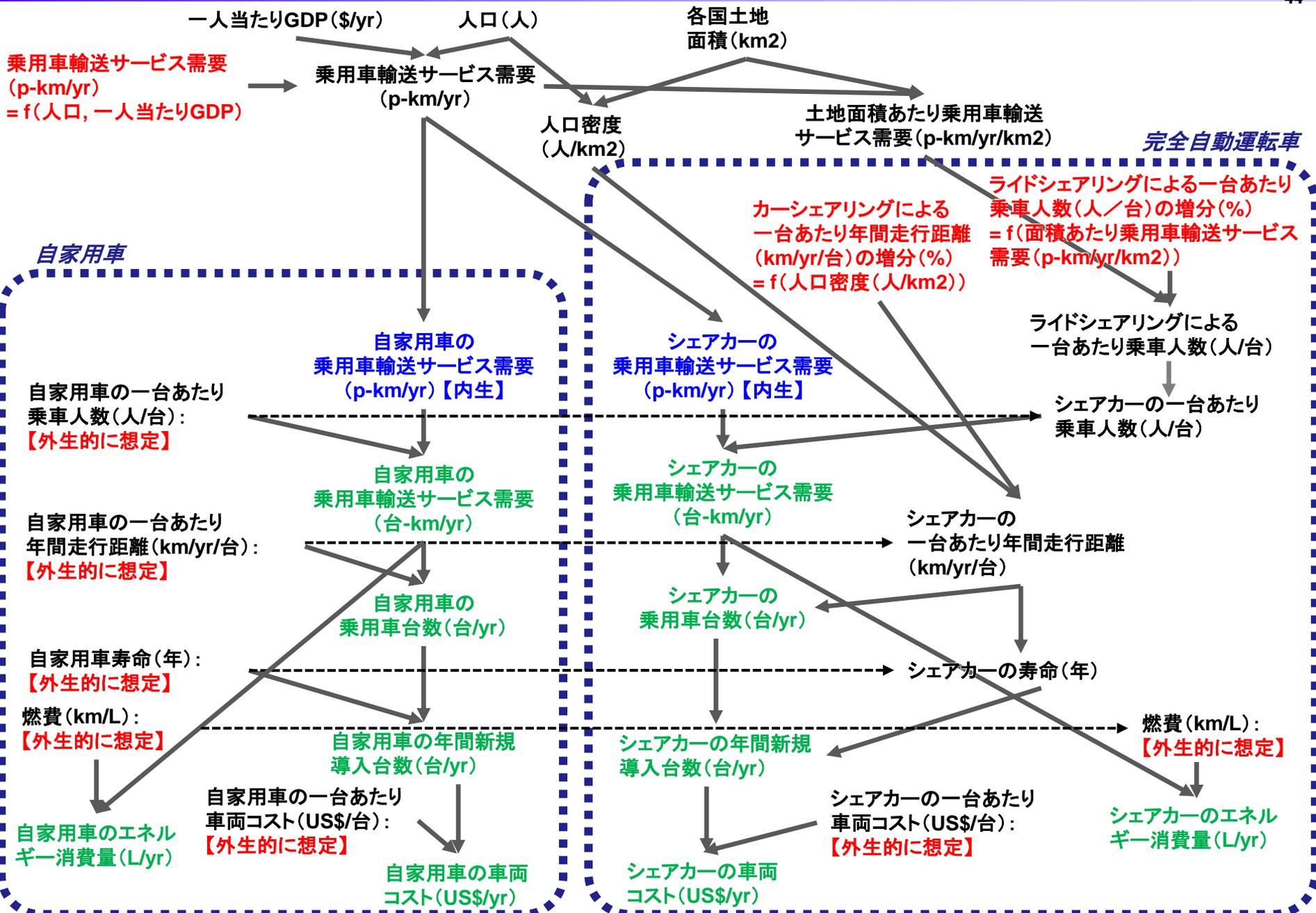
DNE21+のエネルギーフロー概略

温暖化対策を想定しないベースラインにおける化石燃料価格は外生的に想定し、生産単価や利権料等のその他価格要因を調整する。排出削減を想定したケースでは、それに伴う化石燃料利用量の変化に従って、モデルで内生的に価格が決定される。



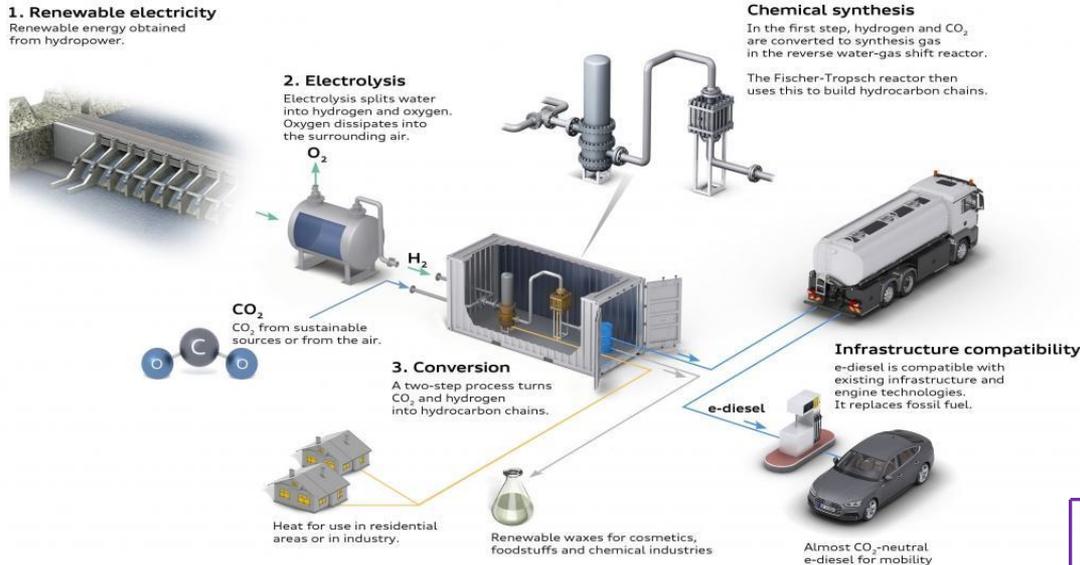
ボトムアップ的にモデル化している主要な部門については、**経済活動量やサービス需要**を外生的に想定してモデルに入力する(例:粗鋼やセメント生産量、乗用車の旅客サービスの需要等)。

完全自動運転車と誘発されるシェアモビリティの想定(各パラメータの関係)



合成石油のモデル化

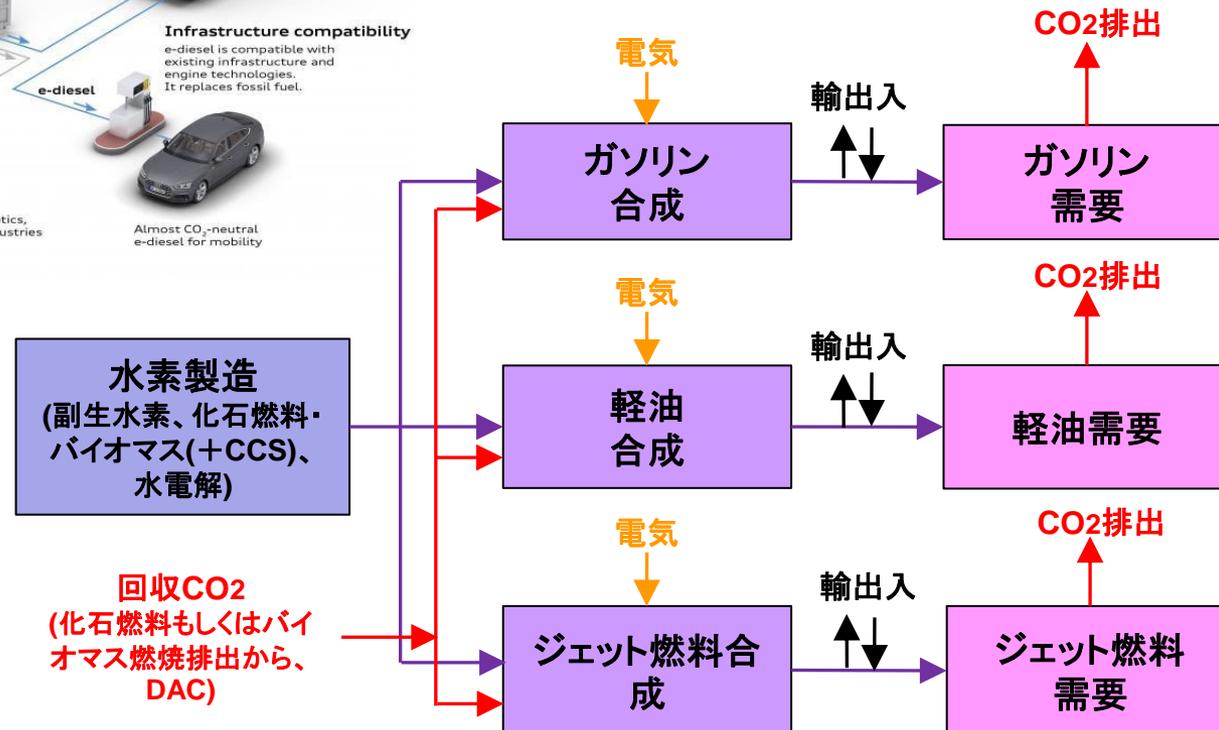
- ✓ 水素は、再エネ水素(e-liquid)に限定していない。想定したシナリオに応じて経済合理的に選択
- ✓ 回収CO₂は、化石燃料もしくはバイオマス燃焼排出、もしくはDACからのオプションあり。想定したシナリオに応じて経済合理的に選択



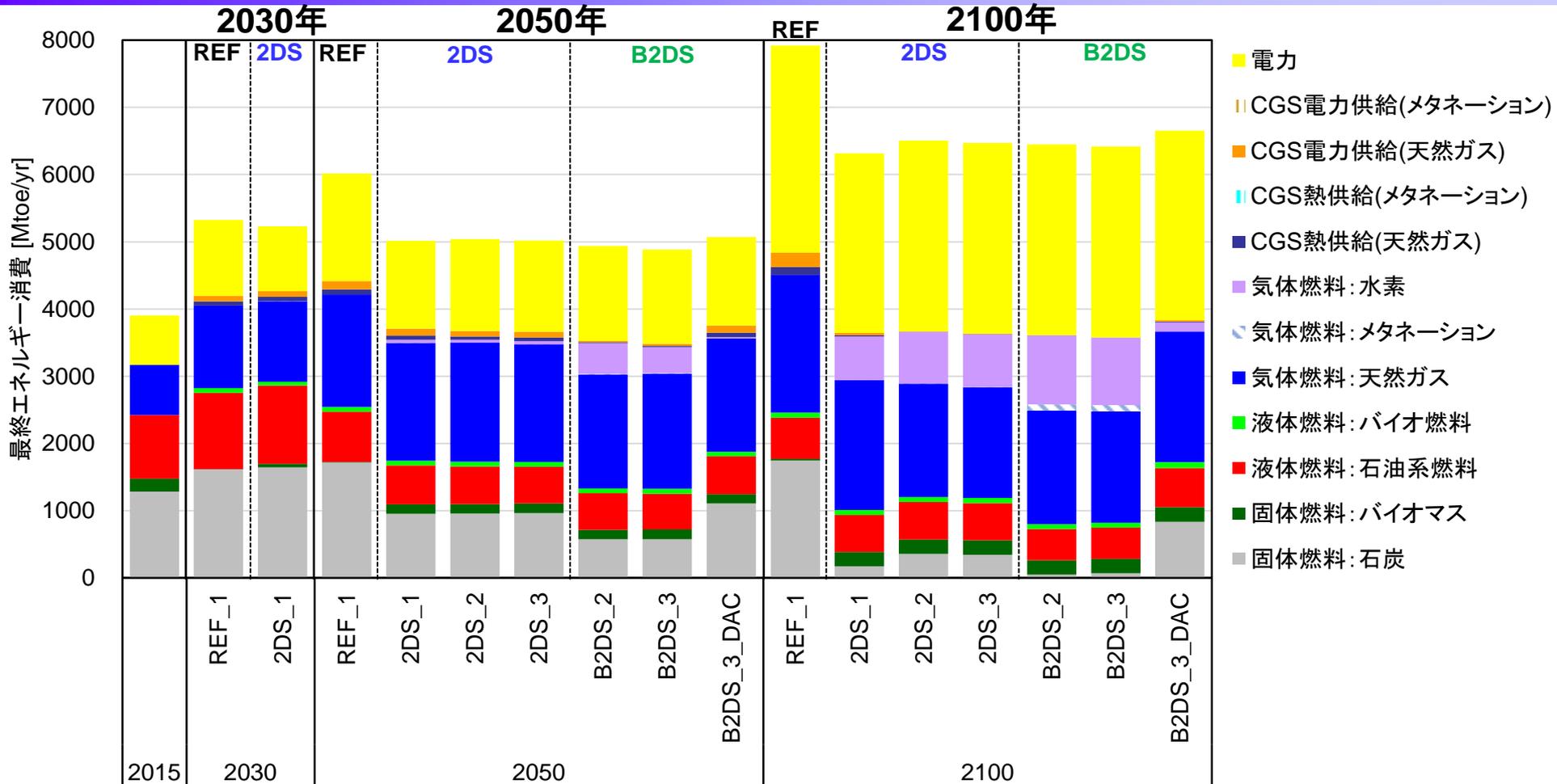
合成石油生成におけるバランス

水素	1.19 toe	⇒	合成 石油	1 toe
CO ₂	2.89 tCO ₂			
電気	0.14 toe			

Audi e-diesel

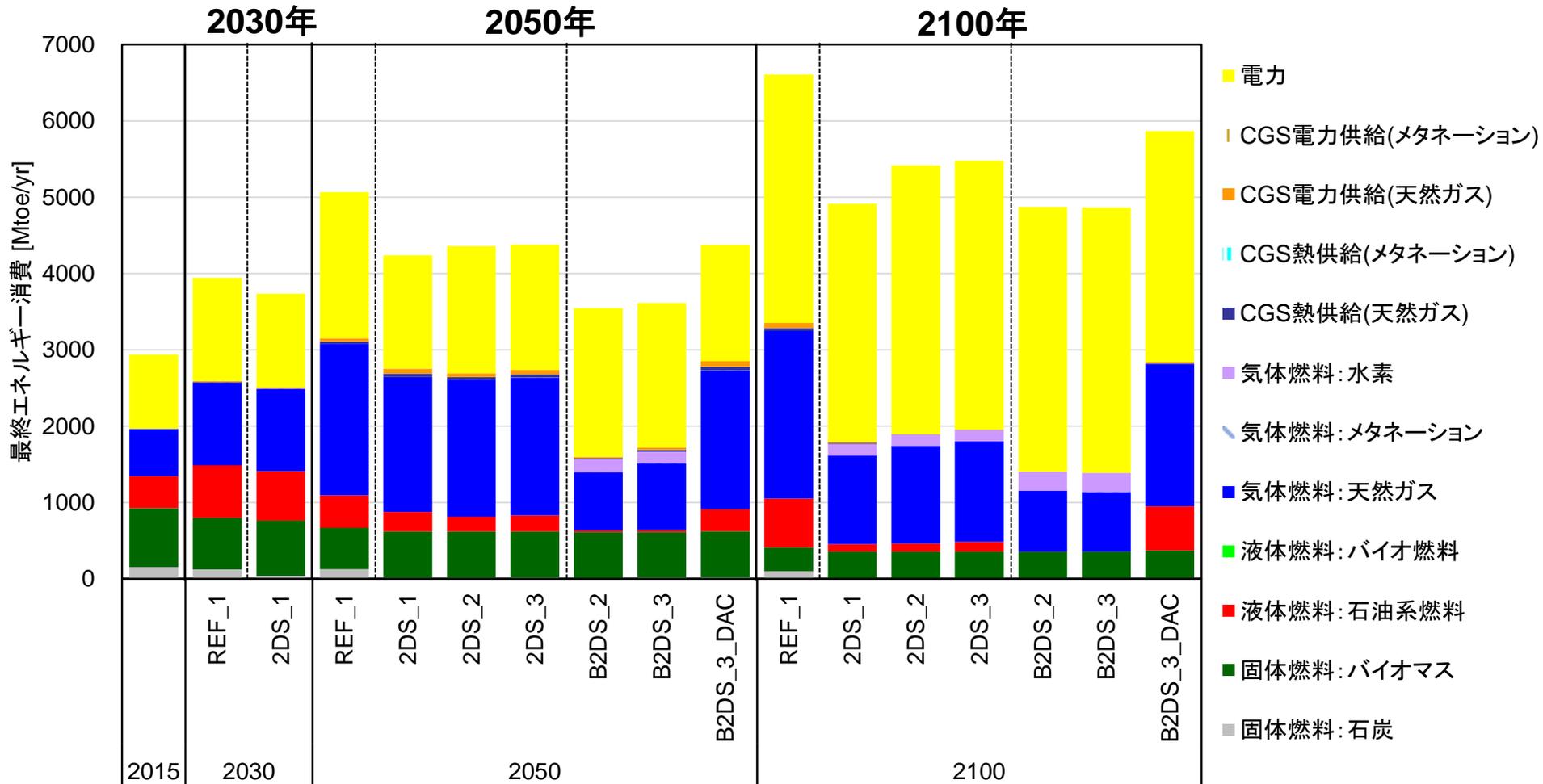


世界の部門別の最終エネルギー消費量：産業部門



- ✓ いずれのシナリオにおいても、電力、ガス比率の増大が見られる。
- ✓ 2°Cシナリオでは、21世紀後半では、鉄鋼部門で、高炉・転炉法から直接水素還元製鉄への転換も見られる(石炭から水素利用に)。ただし、DAC利用可のシナリオでは、高炉・転炉法が残る結果。
- ✓ 2°Cシナリオでは、21世紀半ば頃から、セメント生産のガス利用増大が見られる。
- ✓ B2DSでは、2100年に向けて、一部メタネーションの利用も見られる。

世界の部門別の最終エネルギー消費量：民生部門



- ✓ いずれのシナリオにおいても、電力、ガス比率の増大が見られる。
- ✓ 2°Cシナリオでは、REFシナリオに比べ、特に電力化比率の増大が見られる。
- ✓ B2DSになると、2050年以降、ガス利用は相当抑制が必要になってくる。シェアモビリティを想定したケース3では特に2050年において、MAC低下することでガス利用に余裕が生まれる。