

革新的環境技術シンポジウム2019

2019年12月18日

脱炭素社会に向けたエネルギー システムの変遷の評価

(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. 背景：地球温暖化対応の動向
2. 大幅排出削減下における電化率向上の方向性
3. 再生可能エネルギーの役割と課題
4. 水素エネルギーの役割
5. IoT, AI等のデジタル技術の進展による社会構造変化の可能性
6. RITEモデルによる脱炭素化に向けたシステム変遷の分析
7. まとめ



1. 背景：地球温暖化対応の動向



【パリ協定】（2015年）

- ◆ 全球平均気温上昇を産業革命前に比べ2°C未満に十分に低く（"well below"）抑える。また1.5°Cに抑えるような努力を追求する。
- ◆ 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。

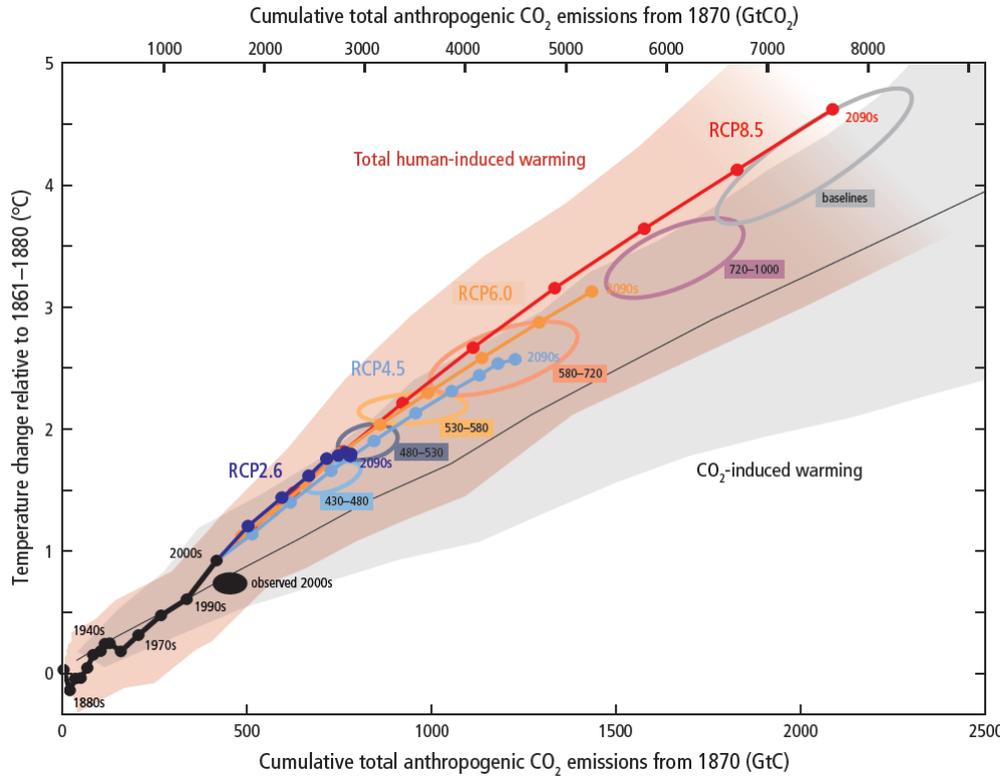
【地球温暖化対策計画】（2016年）

- ◆ パリ協定を踏まえ、全ての主要国が参加する公平かつ実効性ある国際枠組みの下、主要排出国がその能力に応じた排出削減に取り組むよう国際社会を主導し、地球温暖化対策と経済成長を両立させながら、長期的目標として2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す。

【パリ協定に基づく長期戦略】（2019年）

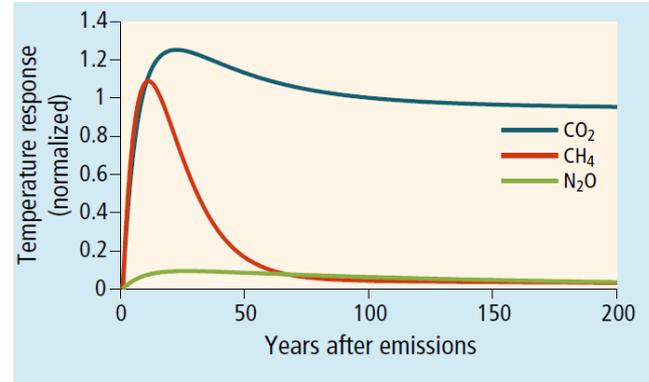
- ◆ 最終到達点としての「脱炭素社会」を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指す。

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)

“likely”レンジが同じ

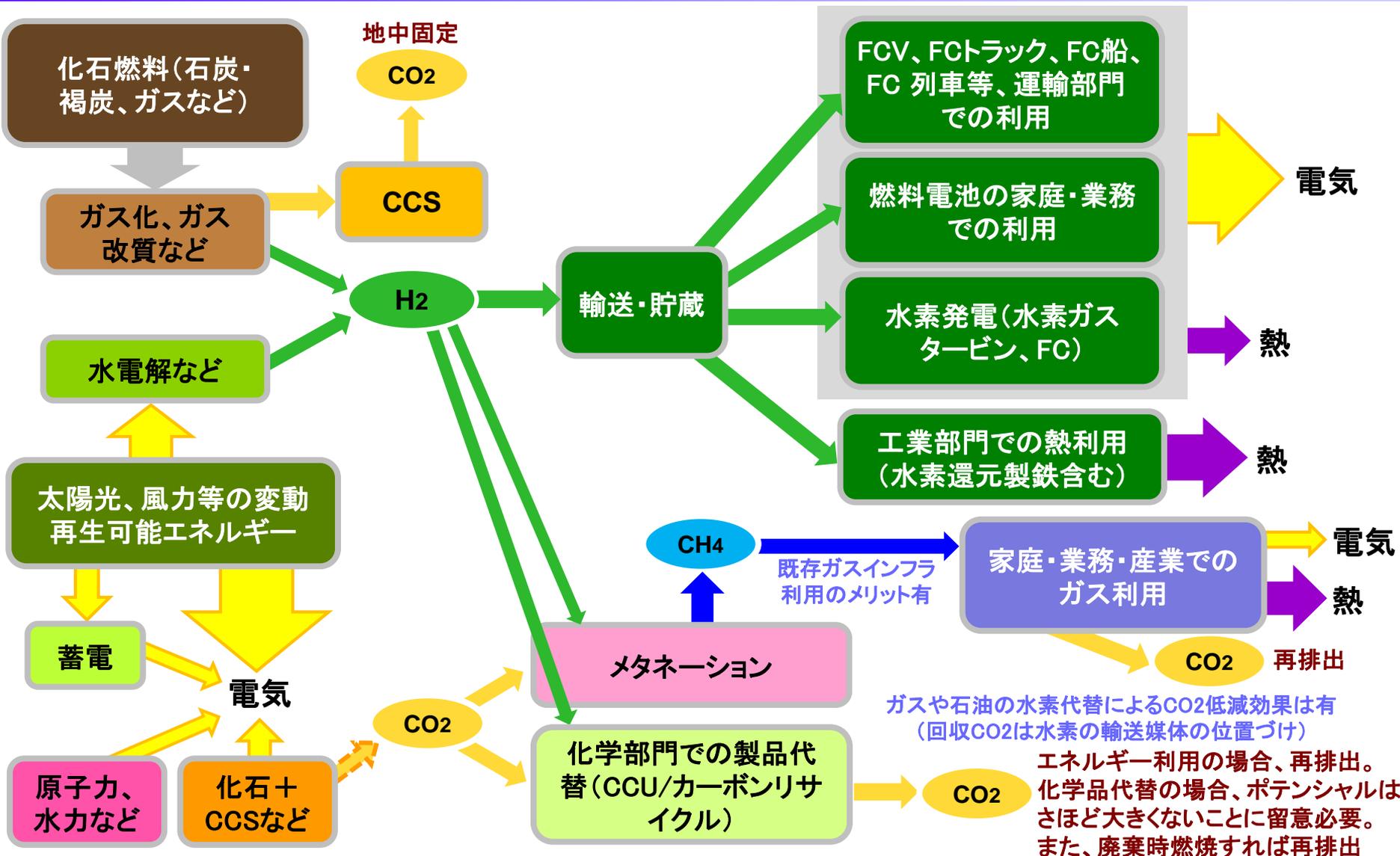
便宜上、第4次の評価をそのまま利用

【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**

- ◆ 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。
- ◆ ただし、CO₂フリー水素と回収CO₂によってメタネーション（CCU）したメタンでの利用は可（このとき、回収CO₂は水素の輸送媒体の役割を果たす。事実上、都市ガスをCO₂フリー水素で代替した効果でCO₂の削減となる。）
- ◆ 電気、水素製造においては、脱炭素化が必要（再生可能エネルギー、原子力、CCS）。
- ◆ 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）、DACCS（直接大気回収・貯留）等の負の排出技術（NETs）活用はあり得る。

脱炭素化における電気、水素システム

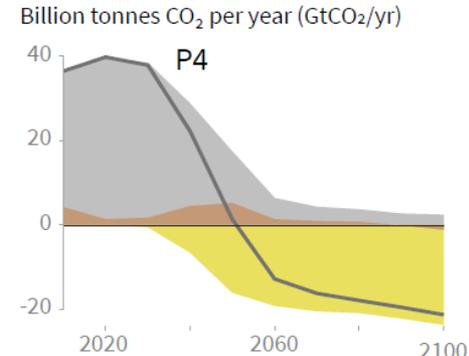
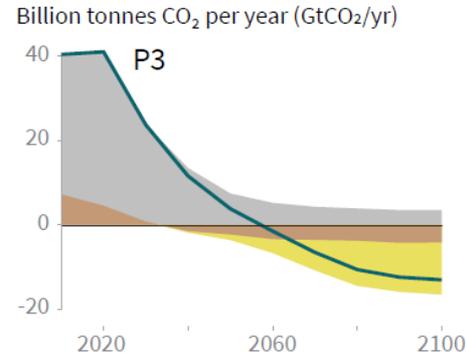
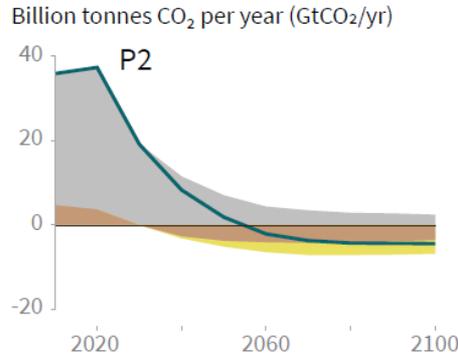
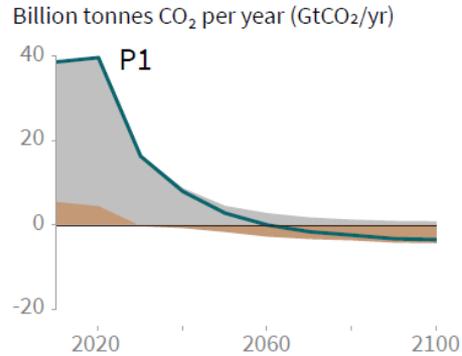


水素も最終利用段階では電気利用形態が多い。どのようなエネルギーキャリアを選択し、どの段階で炭素を抜いていくのが費用対効果が高いか？

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 ← 最終エネルギー需要 → 大

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)

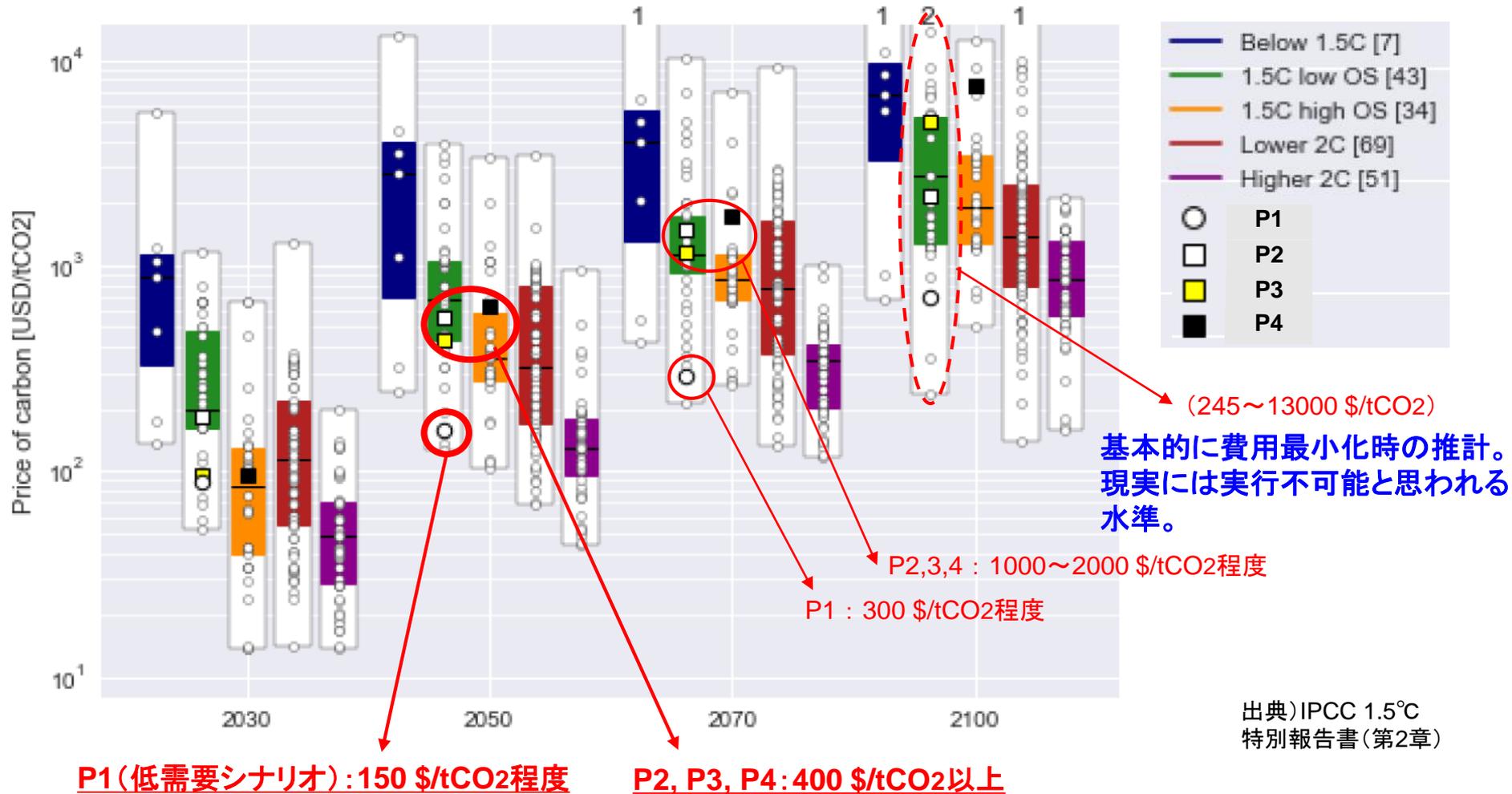
エンドユースの技術革新により経済自律的にエネルギー需要が大きく低下

✓ 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。

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

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)

CO2排出量を大幅に削減できる技術分野（政府資料）

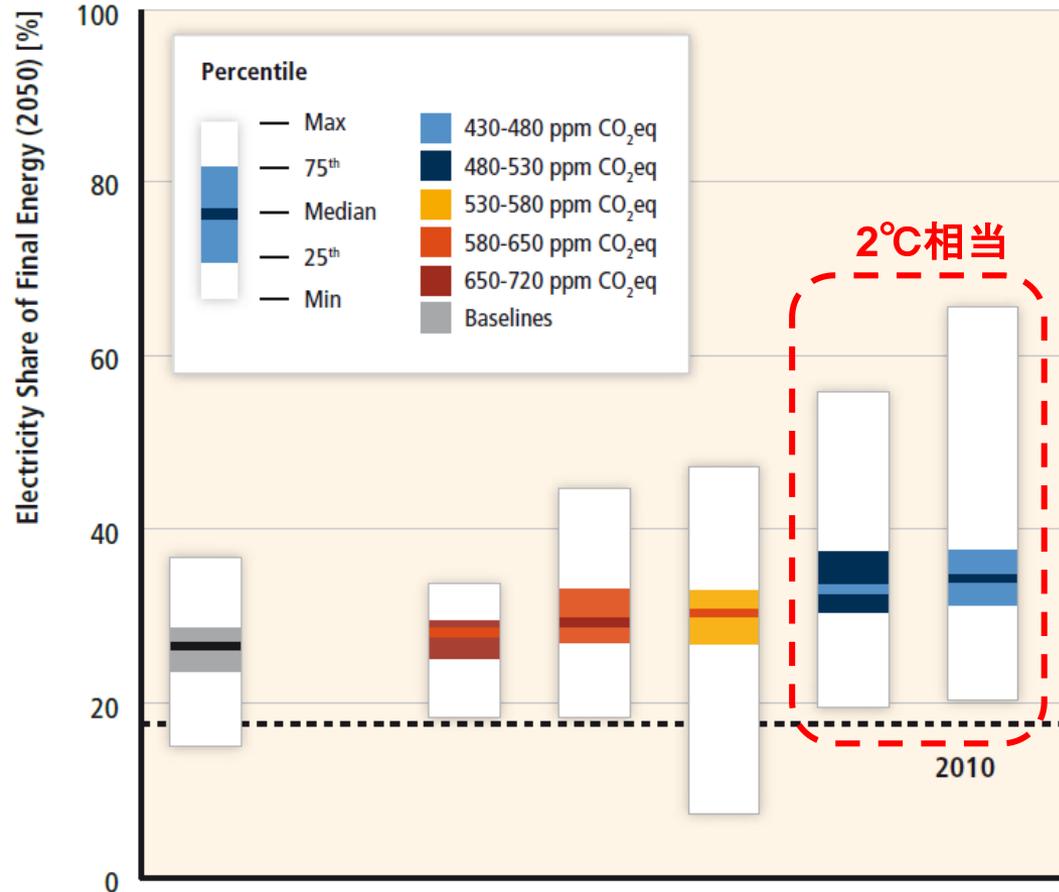
CO ₂ 大量排出セクター	プロセス・製品	排出量	主要な排出要因	代替技術例	技術分野
電力	火力発電	4.6億トン	✓ 石炭・石油の燃焼	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 再エネ・蓄エネ ✓ CCS ✓ パワエレ ✓ 原子力 	
自動車	内燃機関	1.86億トン	✓ ガソリン・ディーゼルの燃焼	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 電気自動車 ✓ 燃料電池 	
鉄鋼	高炉	1.2億トン	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 石炭の燃焼 ✓ 石炭による還元 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ CCS ✓ 水素還元 	
	電炉	0.07億トン	✓ 電気の使用	✓ 再生可能エネルギー	
化学	石油化学	0.31億トン	✓ ナフサの分解	<ul style="list-style-type: none"> ✓ CCU ✓ CO₂フリー水素 	
	アンモニア	0.03億トン	✓ 水素製造のための天然ガス改質	✓ CO ₂ フリー水素	
窯業・土石	セメント	0.4億トン	✓ 炭酸カルシウムの焼成	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 燃焼灰 + CCU ✓ CCS 	
合計		8.2億トン	※電力と各セクターとのCO ₂ 排出量の重複分は除いて集計		

2. 大幅排出削減下における 電化率向上の方向性

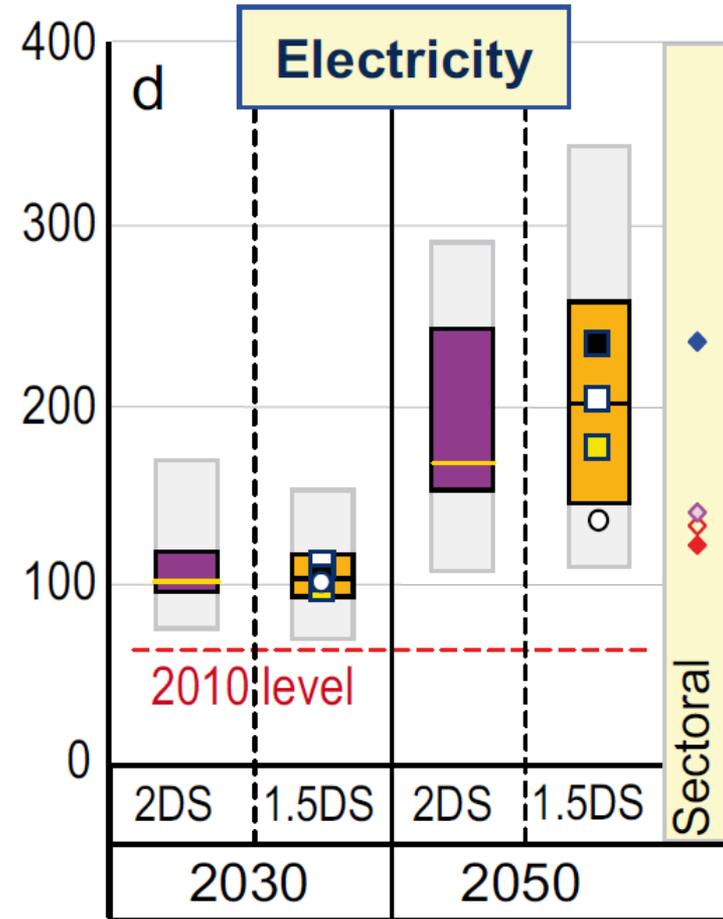


大幅排出削減における電力需要

各種排出レベルにおける最終エネルギー消費における電力化率 (IPCC AR5)



世界の電力消費量 (2°C、1.5°Cシナリオ) (IPCC SR15)



厳しい排出削減ほど、電力化率の向上が求められる傾向あり。

3. 再生可能エネルギーの役割と課題



国際連系と再エネ比率

		デンマーク	ドイツ	英国	日本
需要規模 (年間発電量)		<u>300</u> 億kWh	<u>6,000</u> 億kWh	<u>3,000</u> 億kWh	<u>11,000</u> 億kWh (1.1兆kWh)
変動再エネ 比率		<u>51%</u> (太陽光2% 風力49%)	<u>18%</u> (太陽光6% 風力12%)	<u>14%</u> (太陽光2% 風力12%)	<u>6%</u> (太陽光5% 風力1%)
国際連系線 (設備容量に対する 連系線の容量)		<u>44%</u>	<u>10%</u>	<u>6%</u>	連系線 なし
【kW】 調整力の 国外依存 (再エネ比率が 高い日の輸出入)		<u>80%</u> (430万kW 輸出: 280万kW 輸入: 150万kW)	<u>40%</u> (1,600万kW 輸出: 1200万kW 輸入: 400万kW)	<u>35%</u> (850万kW 輸出: 320万kW 輸入: 530万kW)	輸出入 なし
電力輸出入	輸出	<u>33%</u> (100億kWh)	<u>13%</u> (850億kWh)	<u>1%</u> (20億kWh)	輸出入 なし
	輸入	<u>55%</u> (160億kWh)	<u>5%</u> (340億kWh)	<u>8%</u> (240億kWh)	輸出入 なし

※Interconnection level

(出所) ENTSO-E “Transparency Platform”, “Statistical Factsheet”, 欧州委員会資料等より作成

電源別系統対策費の推計例

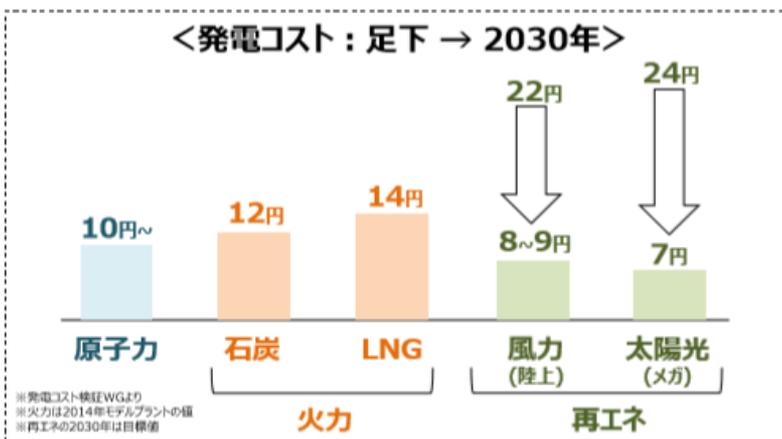
Germany												
Technology	Nuclear		Coal		Gas		Onshore wind		Offshore wind		Solar	
	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%
Penetration level												
Back-up costs (adequacy)	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	7.96	8.84	7.96	8.84	19.22	19.71
Balancing costs	0.52	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	3.30	6.41	3.30	6.41	3.30	6.41
Grid connection	1.90	1.90	0.93	0.93	0.54	0.54	6.37	6.37	15.71	15.71	9.44	9.44
Grid reinforcement and extension	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.73	22.23	0.92	11.89	3.69	47.40
Total grid-level system costs	2.42	2.25	0.97	0.97	0.54	0.54	19.36	43.85	27.90	42.85	35.64	82.95

United Kingdom												
Technology	Nuclear		Coal		Gas		Onshore wind		Offshore wind		Solar	
	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%
Penetration level												
Back-up costs (adequacy)	0.00	0.00	0.06	0.06	0.00	0.00	4.05	6.92	4.05	6.92	26.08	26.82
Balancing costs	0.88	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	7.63	14.15	7.63	14.15	7.63	14.15
Grid connection	2.23	2.23	1.27	1.27	0.56	0.56	3.96	3.96	19.81	19.81	15.55	15.55
Grid reinforcement and extension	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.95	5.20	2.57	4.52	8.62	15.18
Total grid-level system costs	3.10	2.76	1.34	1.34	0.56	0.56	18.60	30.23	34.05	45.39	57.89	71.71

単位 : US\$/MWh

システムコストとしての評価（政府試算）

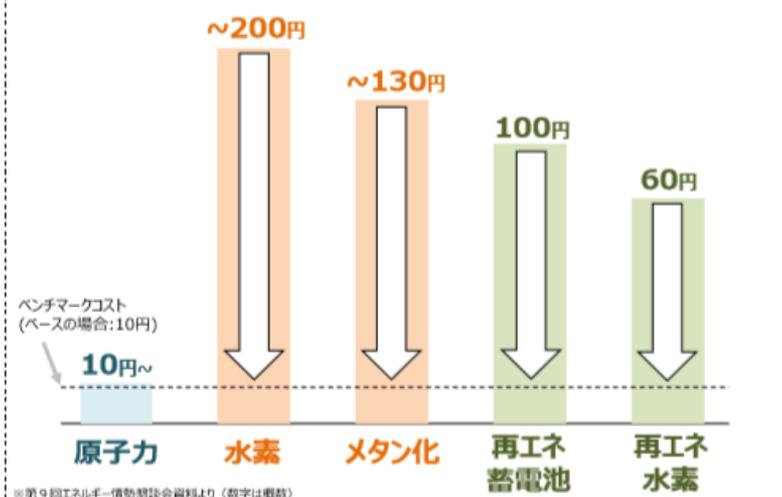
発電コストからシステムコスト検証へ



安全性・経済性・機動性向上
 水素・メタン化等でゼロエミ化
 蓄電池・水素利用等で脱火力依存・ゼロエミ化

発電コストから
脱炭素化システムコスト検証へ

<システムコスト：足下→2050年>

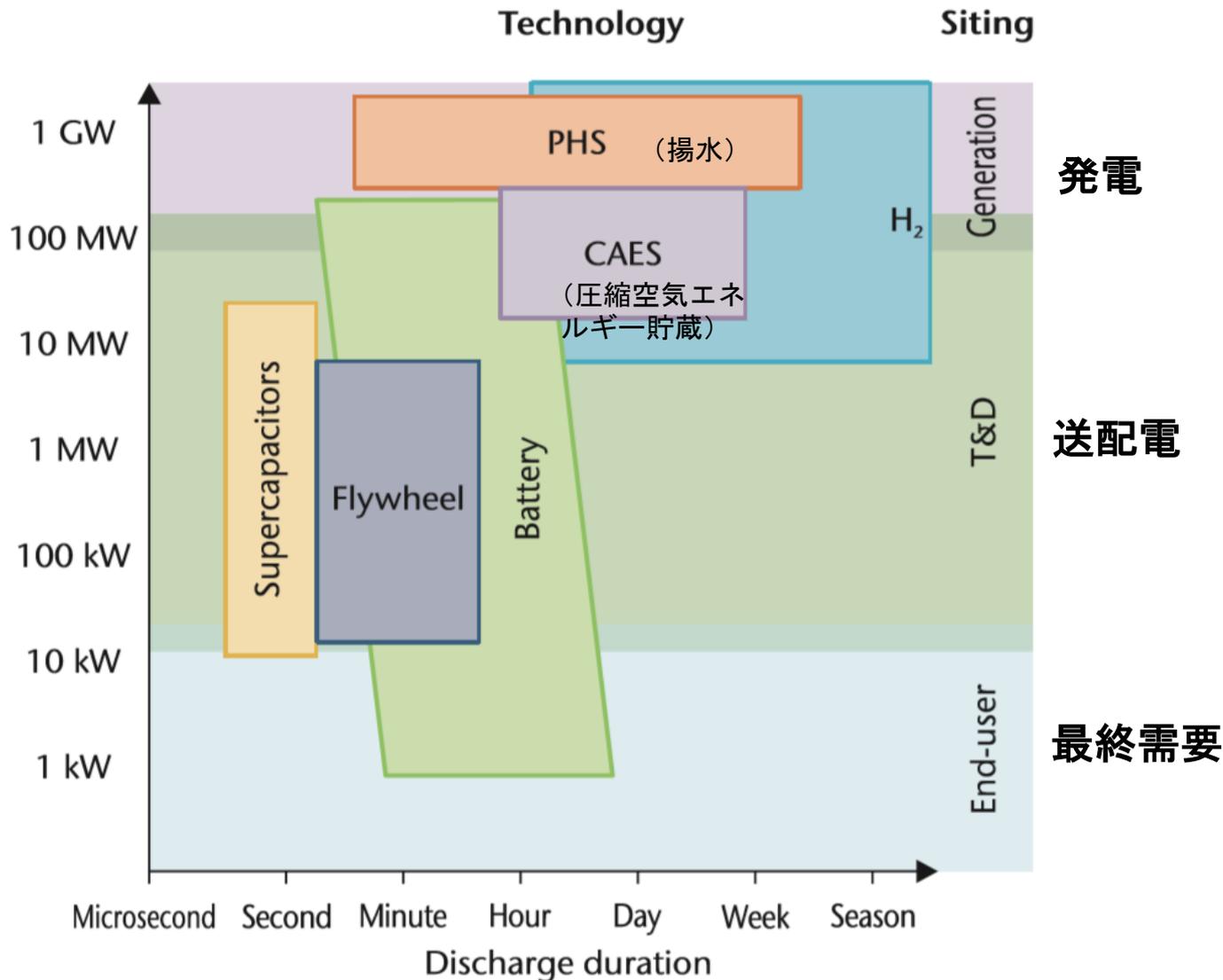


第5次エネルギー基本計画では、再生可能エネルギーの拡大に合わせて、電源別発電コストからシステムコスト（系統安定化のためのコストを含めた総コスト）重視の姿勢に

4. 水素エネルギーの役割



エネルギー貯蔵としての水素のカバー領域

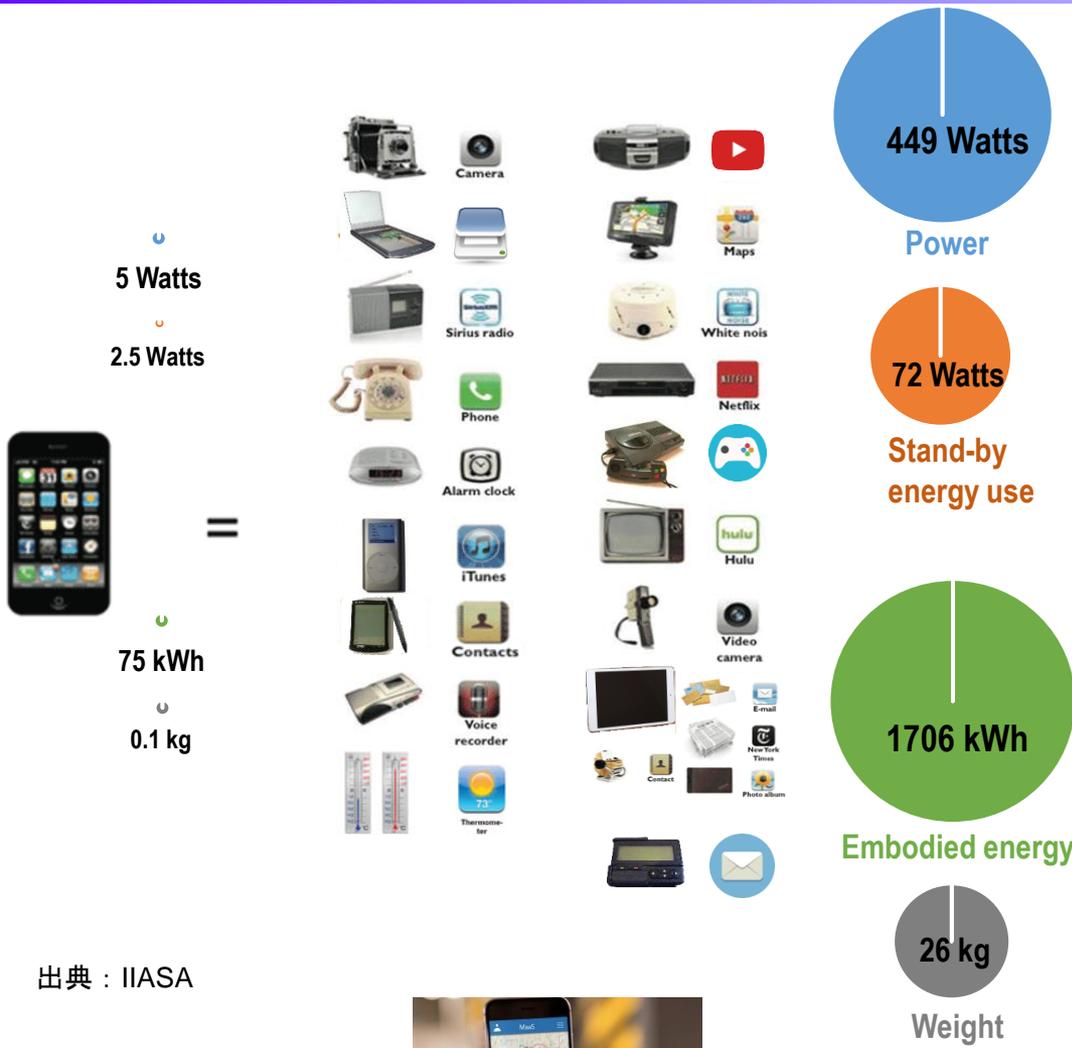


出典：IEA Technology Roadmap-Hydrogen and Fuel Cell、2015

技術、エネルギー種によって、エネルギー貯蔵における得意領域は異なる。

5. IoT, AI等のデジタル技術の進展 による社会構造変化の可能性





- 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。

- 完全自動運転等で、AI, IoTの革新が社会変化を誘発し、エネルギー効率向上をもたらす機会は多く存在
- シェアリングによって、自動車台数の低減、素材消費、ひいてはエネルギー消費の低減が期待できる。

出典：IIASA

例えば自家用車の稼働率は5%前後であり、完全自動運転でシェアリングとなれば大きな変化をもたらされ得る。



6. RITEモデルによる脱炭素化に向けたシステム変遷の分析



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、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)、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
- ◆ 国際海運についても、ボトムアップ的にモデル化
- ◆ 400以上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

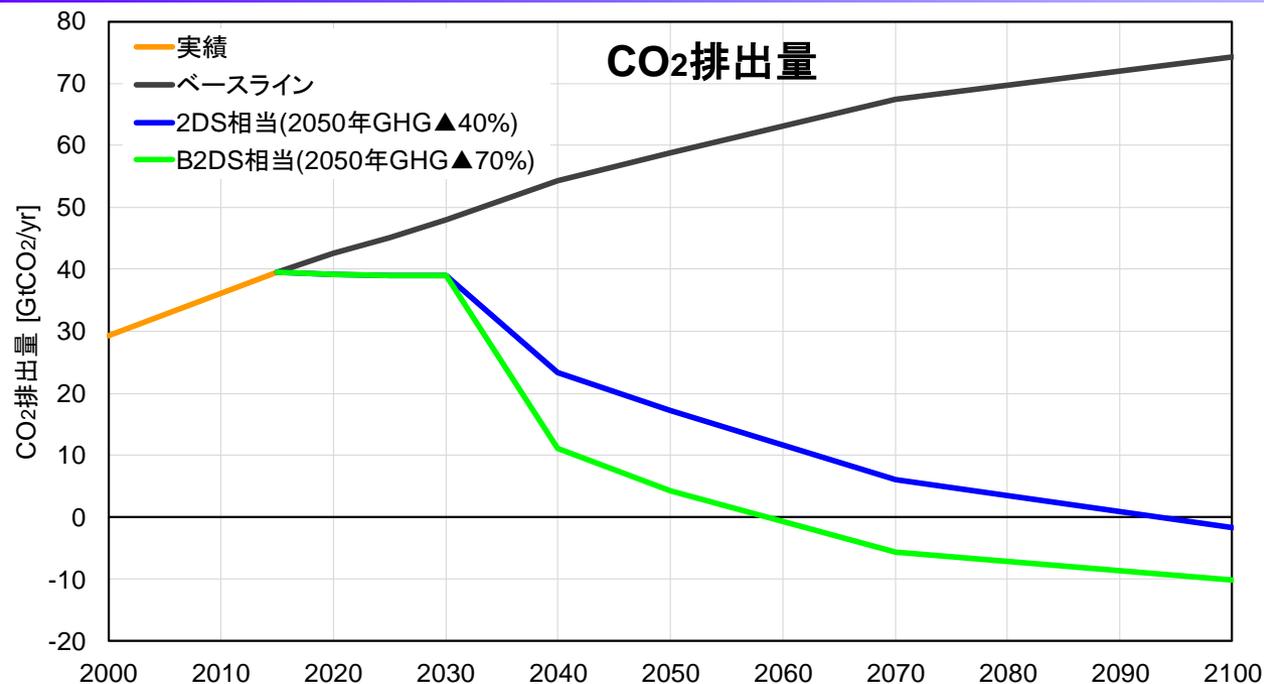
- ・中期目標検討委員会およびタスクフォースにおける分析・評価
- ・国内排出量取引制度の検討における分析・評価
- ・環境エネルギー技術革新計画における分析・評価

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

モデル分析のシナリオ想定

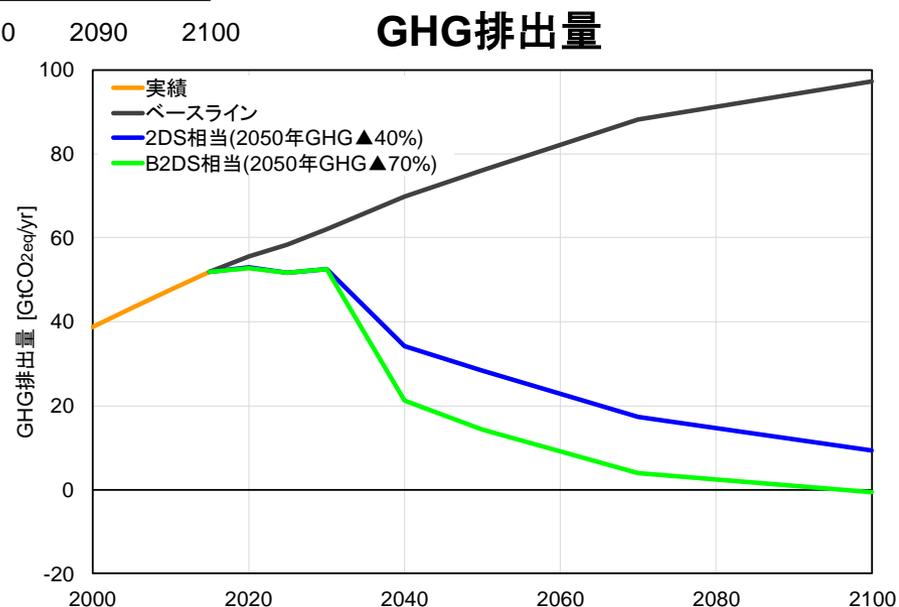
シナリオ名	世界排出シナリオ	G7排出シナリオ	再エネコスト	シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)
REF_1	ベースライン (特段のCO2排出制約なし)		標準	想定せず
2DS-a_1	2°C未満 (>50%): [2DS]相当	[a]▲80% in 2050	標準	想定せず
2DS-a_2			低コスト(中東・北アフリカ中心に)	
2DS-b_1		[b]世界限界削減 費用均等化(費用 最小)	標準	想定せず
2DS-b_2	低コスト(中東・北アフリカ中心に)			
2DS-b_3	シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)			
B2DS-b_1	2°C未満 (>66%): [B2DS]相当	[b]世界限界削減 費用均等化(費用 最小)	標準	想定せず
B2DS-b_2			低コスト(中東・北アフリカ中心に)	
B2DS-b_3			シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)	

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

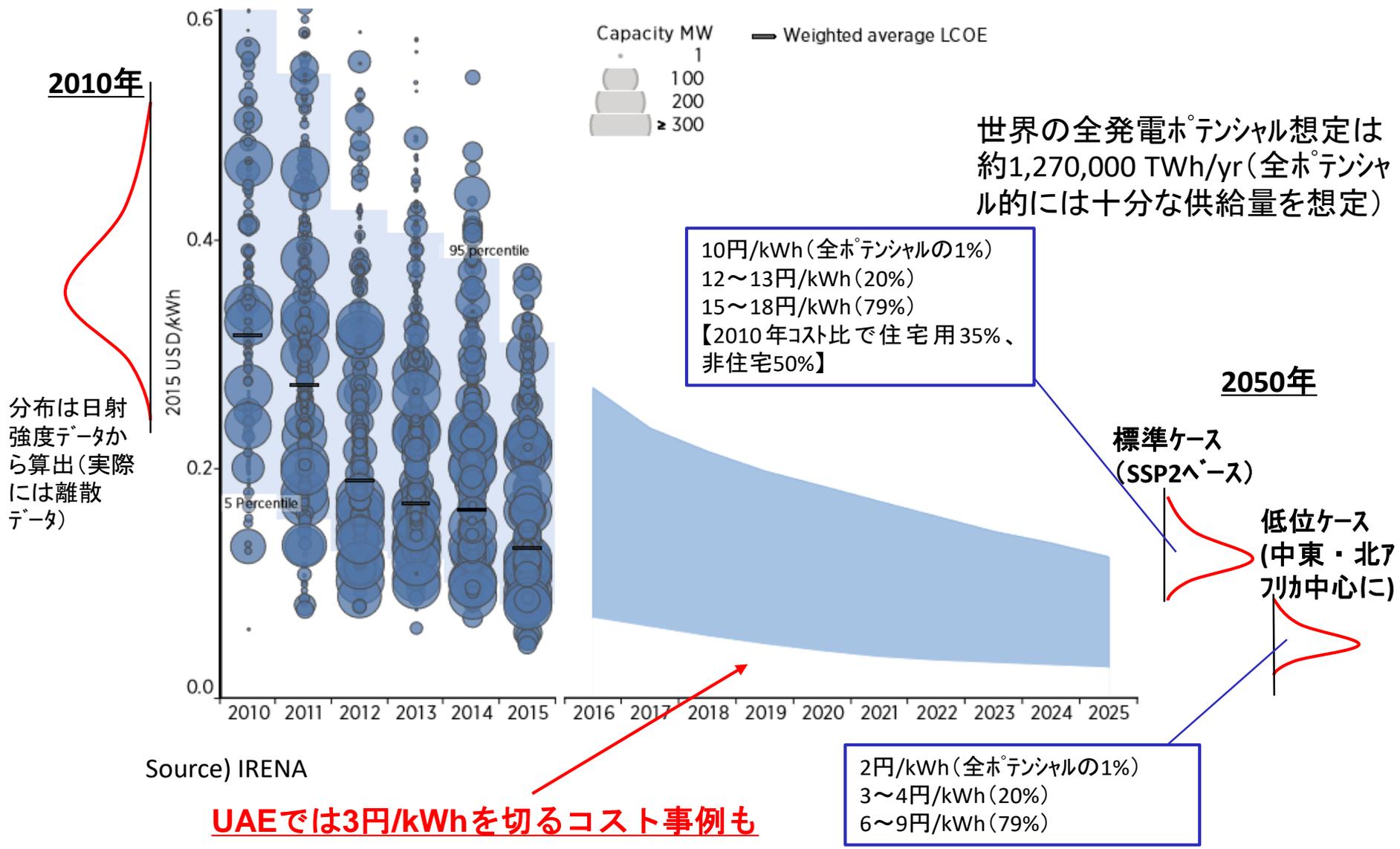


注) ベースライン排出量は前提とする想定シナリオではなく、モデル計算結果

※ 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）。

2050年の排出削減費用

CO₂限界削減費用 (\$/tCO₂)

	2DS-a_1	2DS-a_2	2DS-b_1	2DS-b_2	2DS-b_3	B2DS-b_1	B2DS-b_2	B2DS-b_3
日本	552	512	161	157	132	528	477	295
その他の国	153	143						

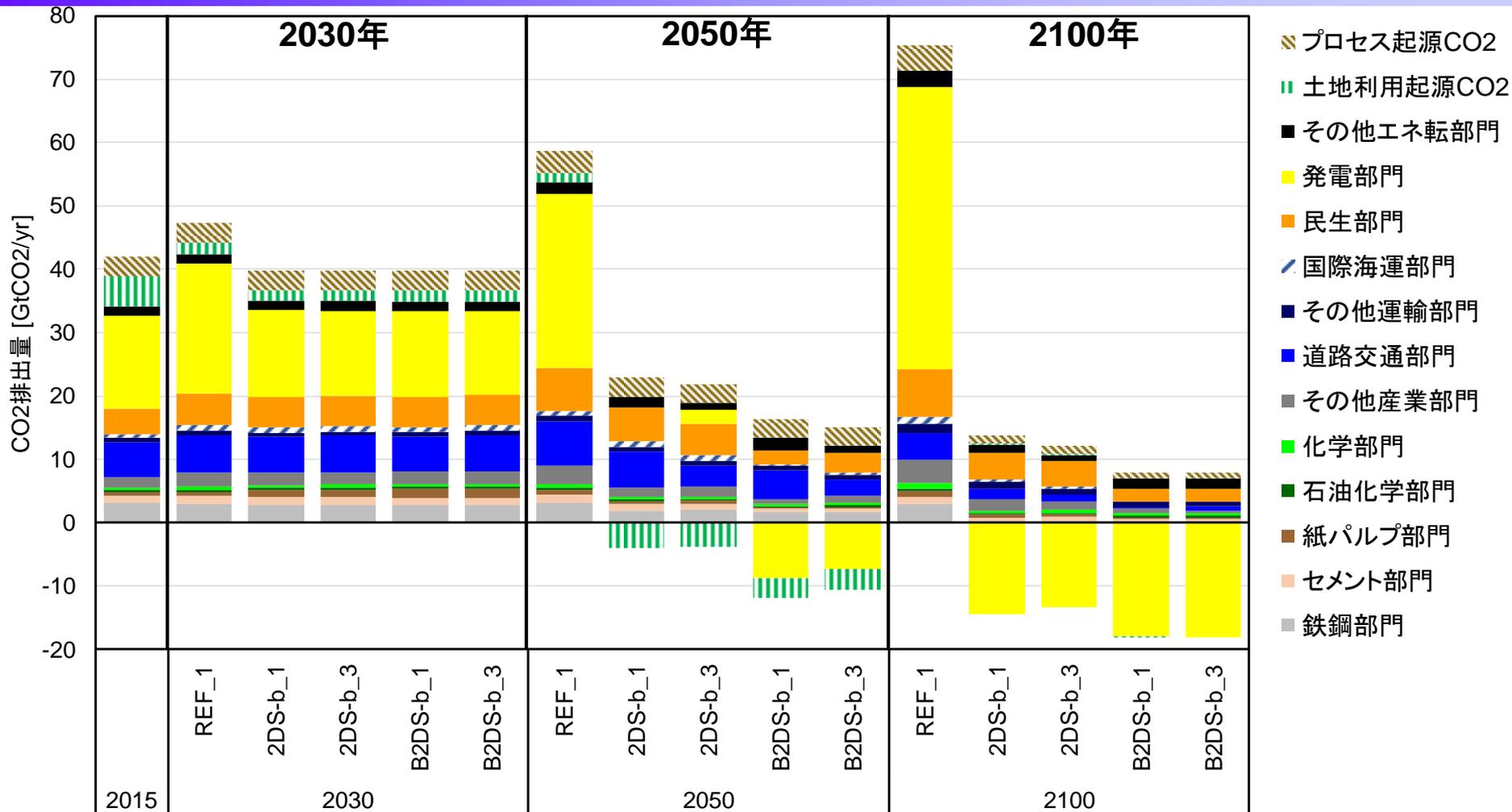
CO₂削減費用 (billion US\$/yr)

	2DS-a_1	2DS-a_2	2DS-b_1	2DS-b_2	2DS-b_3	B2DS-b_1	B2DS-b_2	B2DS-b_3
日本	110	82	24	27	ネガティブ費用	71	60	ネガティブ費用
世界全体	2102	1654	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。
- ✓ 国内の▲80%は相当コスト増 ⇒ 国内での削減率の引き上げだけでなく世界貢献も含めた削減が求められる。B2DS（2050年世界排出量▲70%）は、世界限界削減費用均等化時では日本は▲70%程度が求められる。
- ✓ 中東等を中心とした再エネコスト低位ケースの場合、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（b_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。

世界の部門別排出量

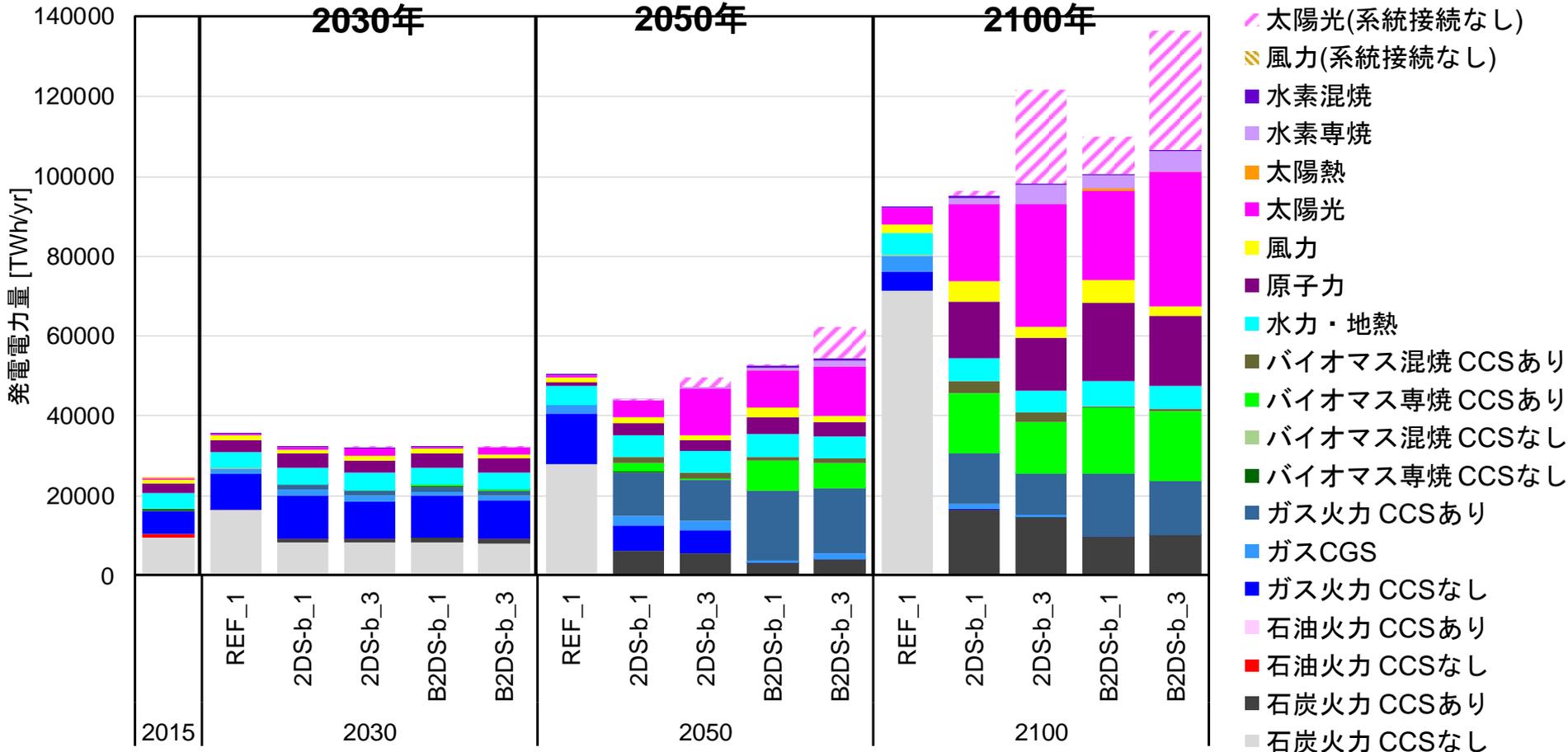
(REF_1、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3)



- ✓ 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。

世界発電電力量

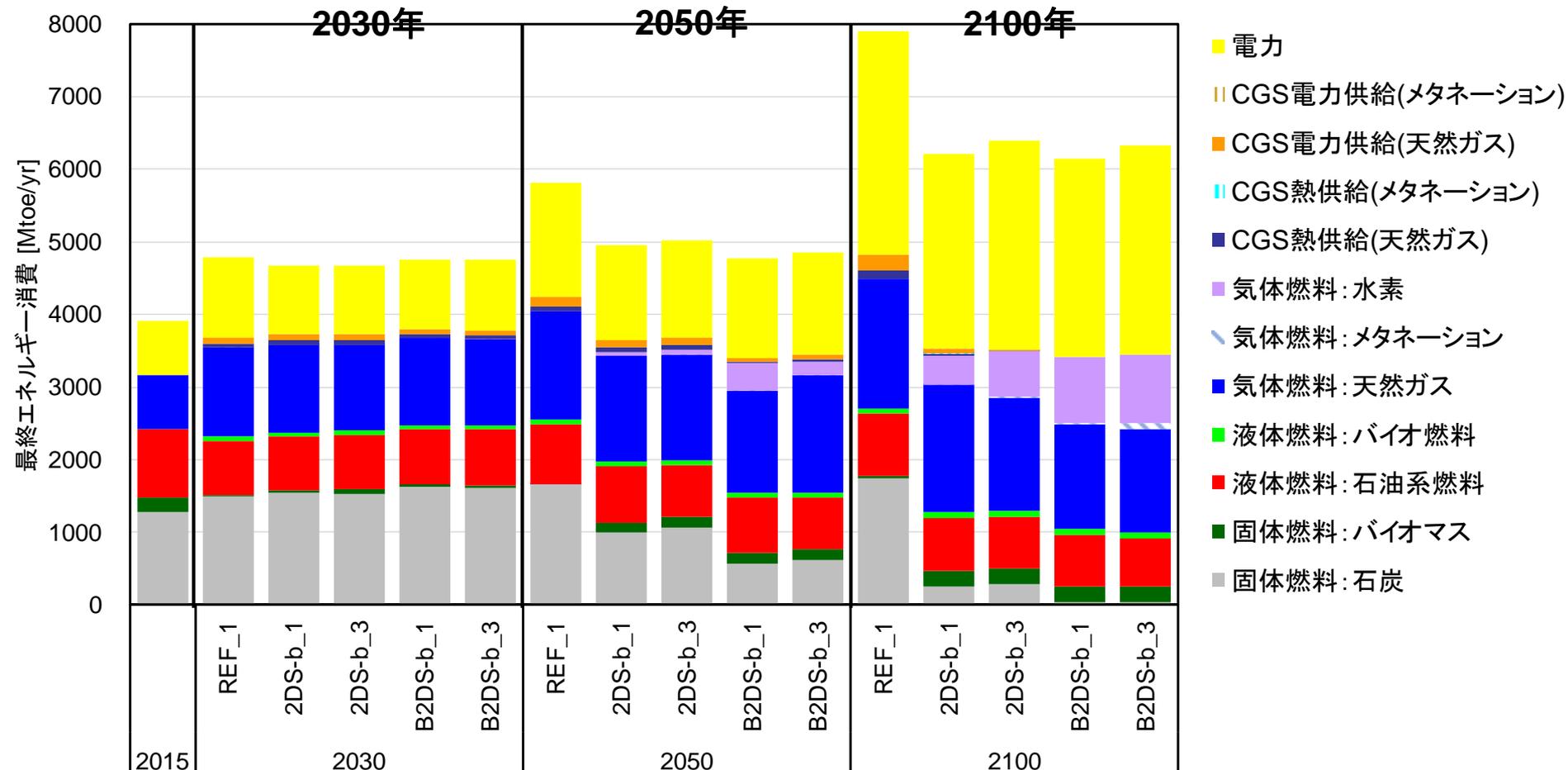
(REF_1、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3)



- ✓ 世界の発電電力量の伸びは大きい。
- ✓ 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2070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)
- ✓ シャアモビリティエースでは、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

世界の部門別の最終エネルギー消費量：産業部門

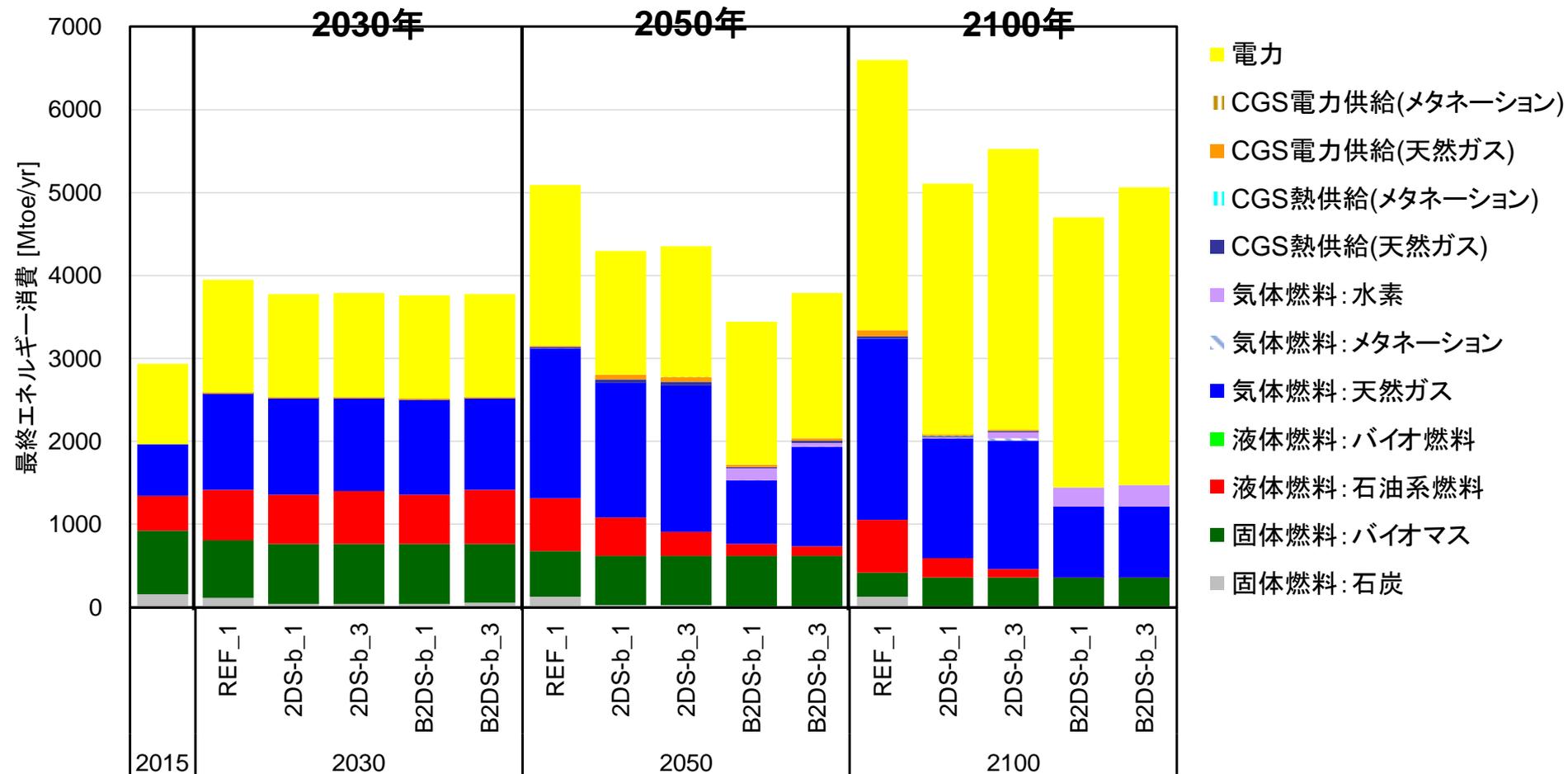
(REF_1、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3)



- ✓ 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（B2DSにおける2100年頃のガスは除く）。
- ✓ 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）。
- ✓ 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。
- ✓ 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

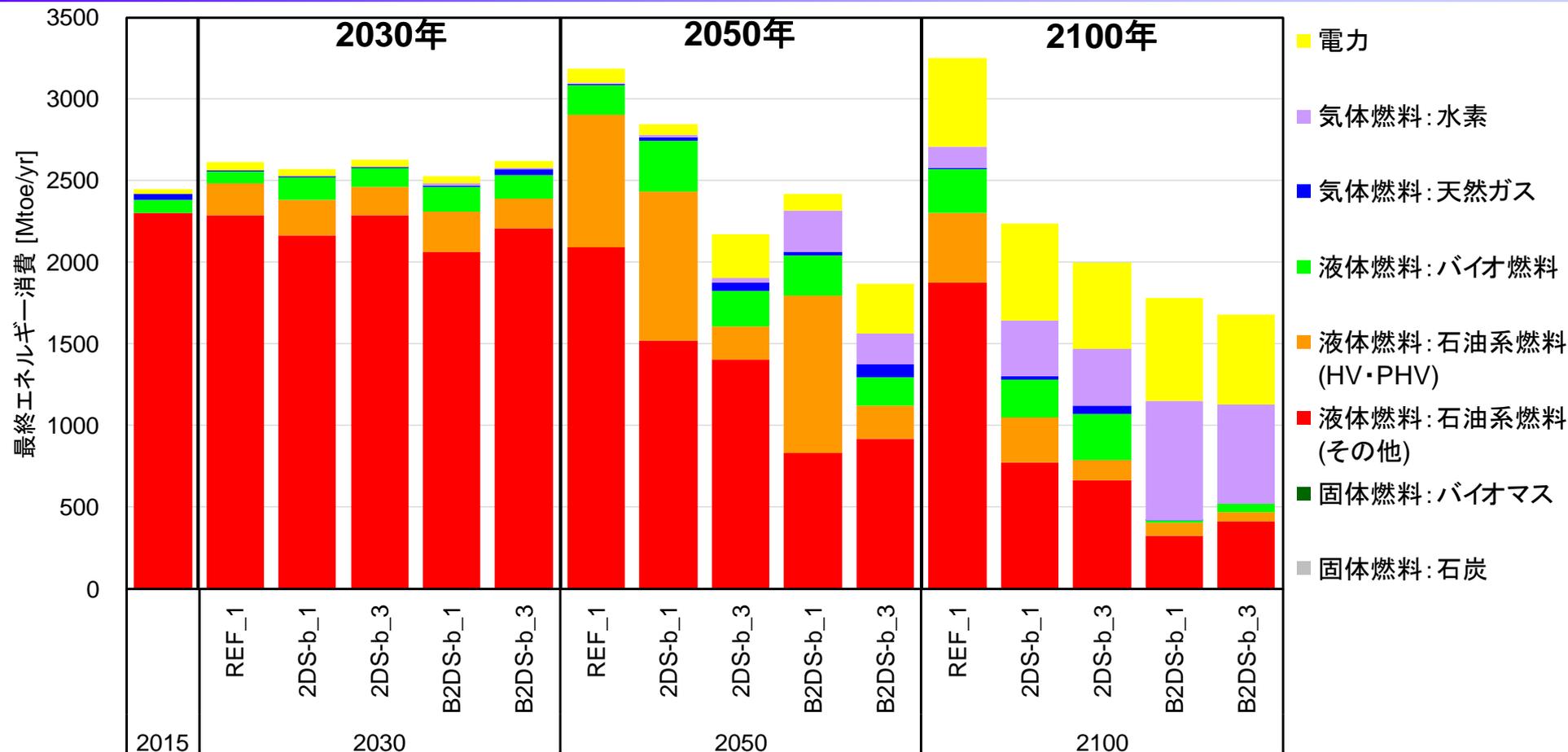
(REF_1、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3)



- ✓ 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 (b_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。
- ✓ 2°Cシナリオで再エネコスト低位のケースでは、2100年頃には都市ガスの一部をメタネーション利用に

世界の部門別の最終エネルギー消費量：運輸部門

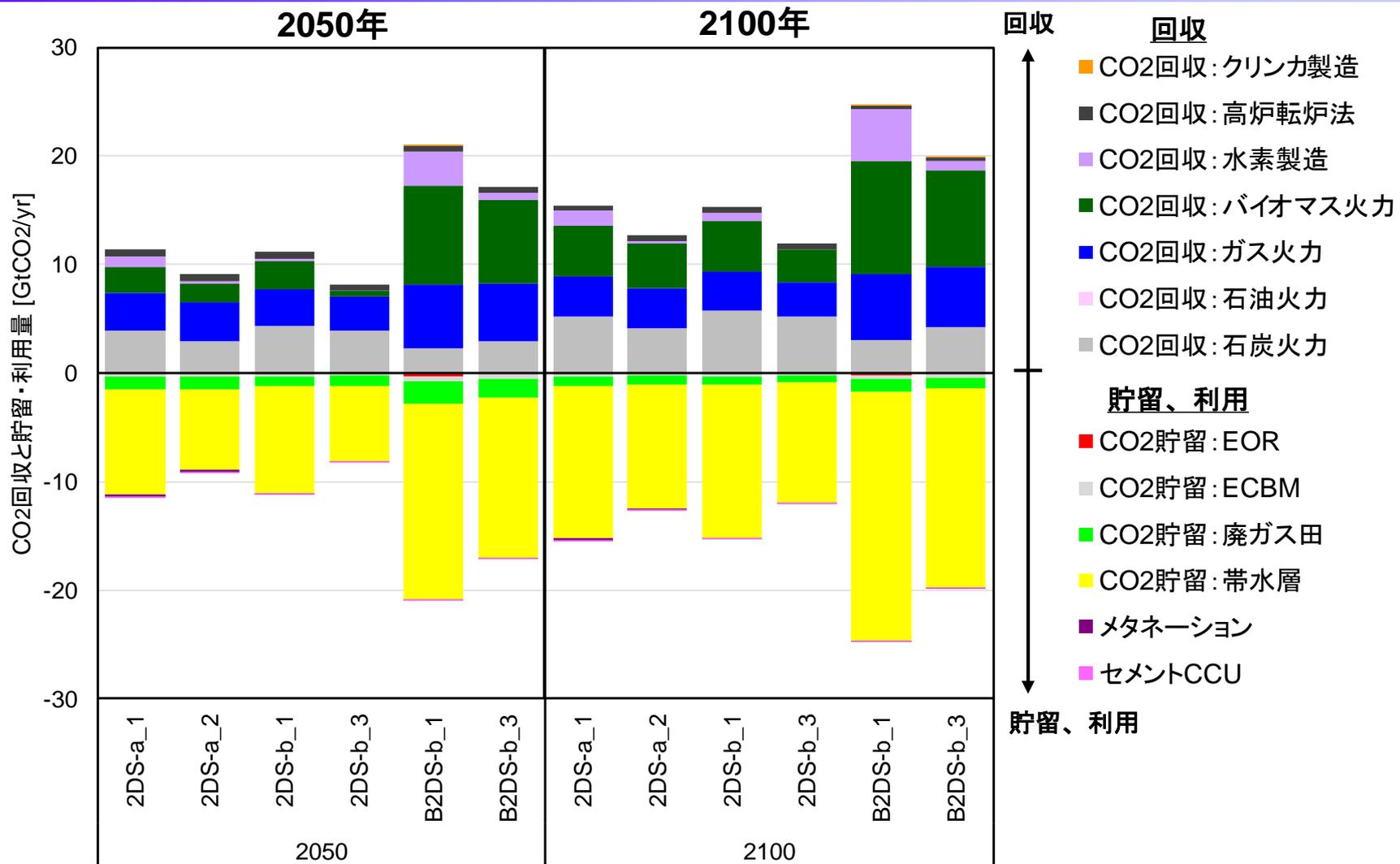
(REF_1、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3)



- ✓ 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、FC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等に変遷。
- ✓ B2DSの2100年になるとバイオ燃料が減少。発電部門でのBECCS利用が費用対効果高いため
- ✓ 運輸部門全体では、最終利用段階での電気利用（HV、PHV、EV、FCV）は、2050年には2DSで35%、B2DSで55%程度。

世界のCO₂回収、利用、貯留バランス（2050、2100年）

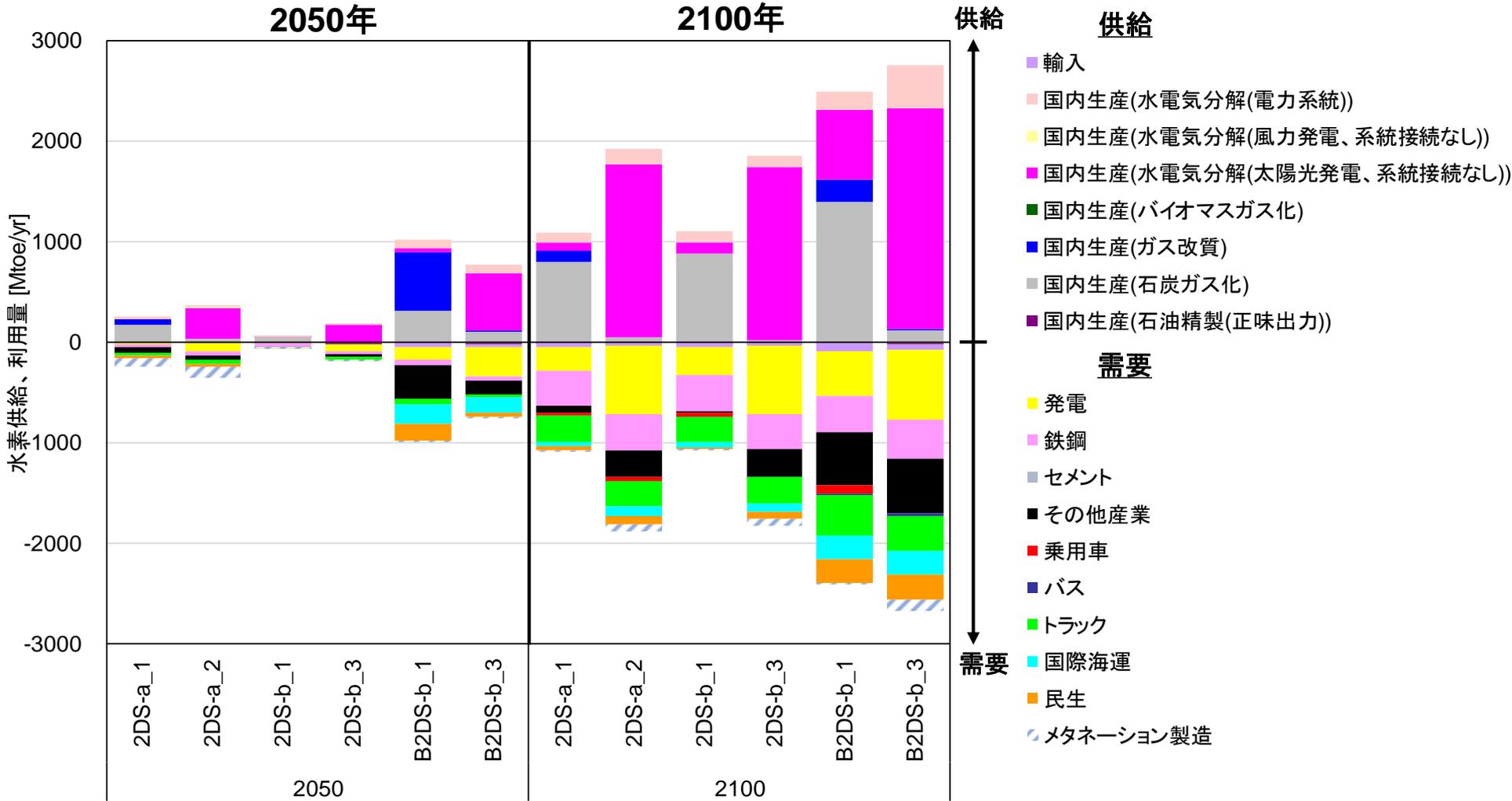
（2DS-a_1、2DS-a_2、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3）



- ✓ 当然ながら、排出削減が厳しいB2DSでは、CO₂回収量が増加する傾向あり（特にBECCS）。
- ✓ 完全自動運転車実現、シェアモビリティを想定したケース（b_3）では、CO₂限界削減費用が低下し、バイオマス発電からのCO₂回収や、水素製造時におけるCO₂回収量が減少し、CO₂貯留が低下する傾向に。

世界の水素需給バランス（2050、2100年）

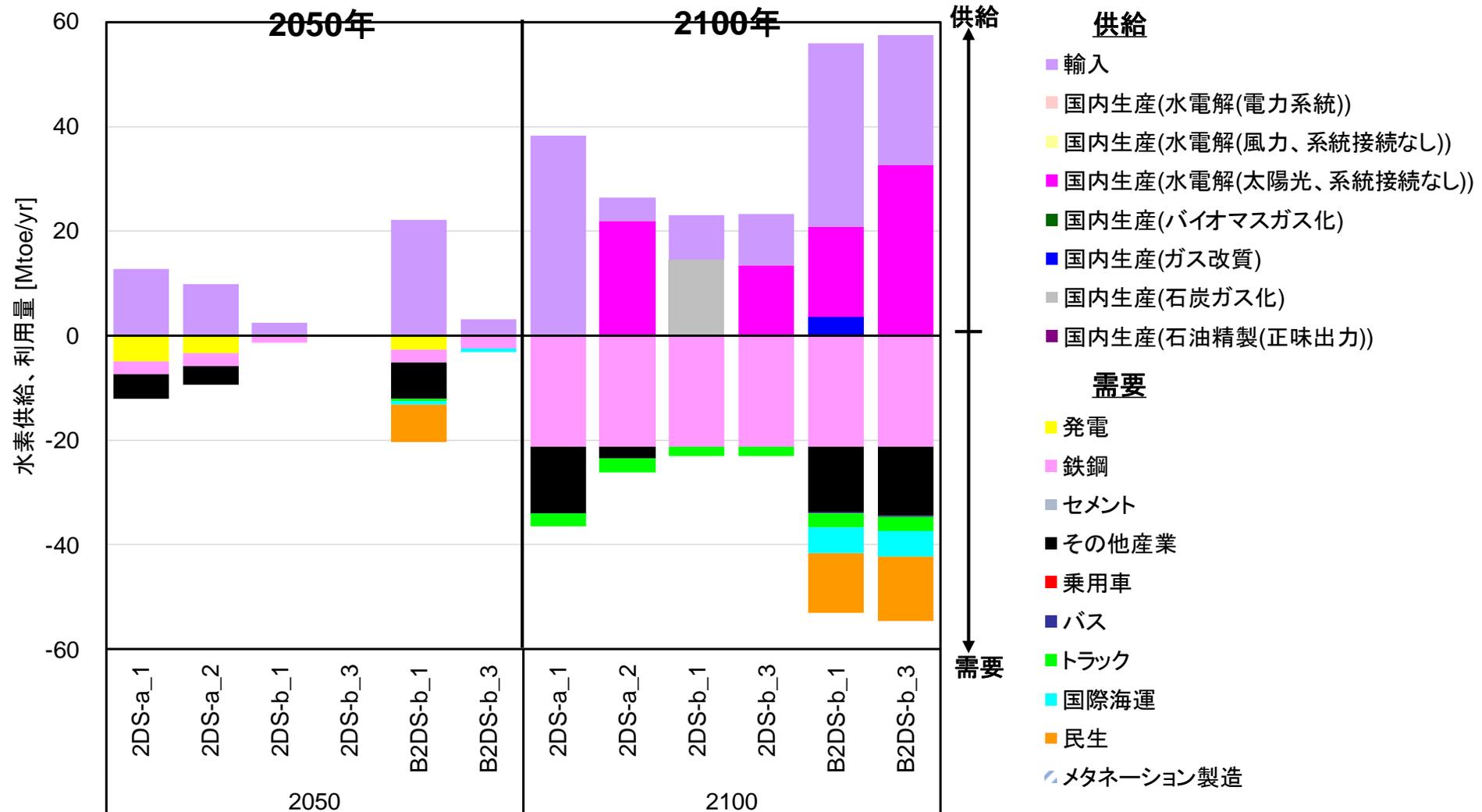
（2DS-a_1、2DS-a_2、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3）



- ✓ 水素製造は、PVコストが標準ケースの場合は、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は、PV+水電解が経済合理的な傾向あり。
- ✓ 水素利用先は多様。

日本の水素需給バランス（2050、2100年）

(2DS-a_1、2DS-a_2、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3)



- ✓ 日本では、基本的に、輸入水素（海外で石炭（褐炭含む）+CCSもしくは再エネ+水電解）の利用が多い。
- ✓ ただし、2100年では水素直接還元製鉄での水素利用のため、石炭ガス化やガス改質（いずれもCCS付）での水素製造も費用効率的なオプションとなり得る（限界削減費用は相当高いことには注意）。

7. まとめ

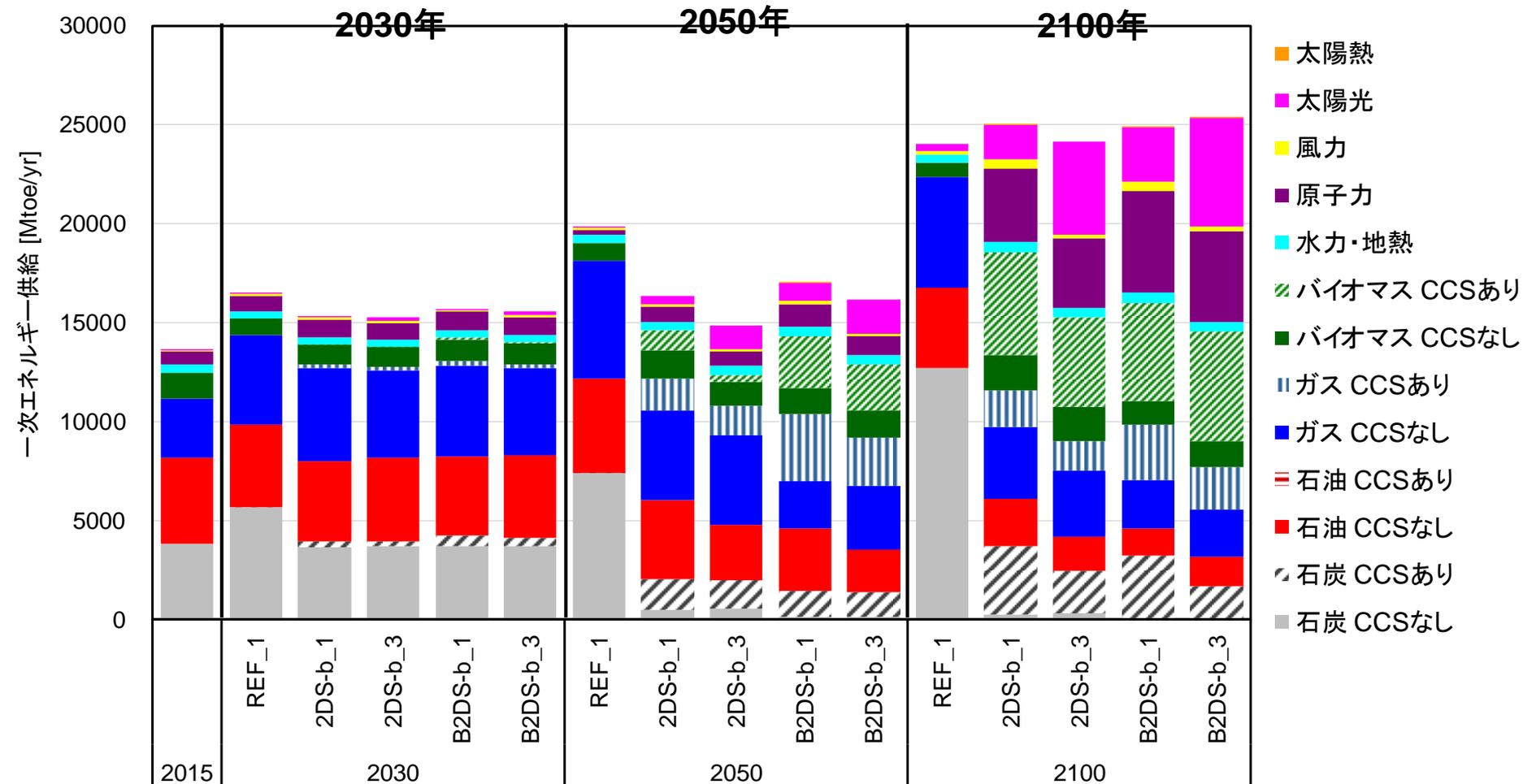


- ◆ パリ協定では、2℃目標や21世紀後半に実質ゼロ排出目標等而言及。ただし、2℃目標としても、その排出許容量には大きな不確実性がある。また国際政治情勢も不確実性が大きい。不確実性を前提としつつ、賢いリスクマネジメントが必要。ただし、気温安定化のためにはいずれは排出ゼロが必要。
- ◆ 電力化率の向上と、低炭素、脱炭素電源化は、対策の重要な方向性。最終的には電気利用の大幅拡大が重要だが、どのエネルギーキャリアをどの段階で利用すべきかは、全体システムで評価することが重要。
- ◆ 脱炭素化に向けた各種技術の有用性は、想定する排出削減シナリオ、各技術の将来見通し等によって異なる。現時点では、気候変動科学、気候変動影響、気候変動対応の国際情勢を見極めながら、低炭素化を進める過程の中で、複数のオプションについて技術開発を行って、経済性の成立を徐々に見極めていくというリスクヘッジをせざるを得ない。
- ◆ 水素も、エネルギー、電力の脱炭素において重要なオプション。一方、水素を現実に大規模に展開するためには、コストの大幅な低減が不可欠。ただし需要が拡大しなければ、コスト低減は容易ではなく、コストを見極めながら、適切な需要拡大を志向することは重要。
- ◆ 莫大な投資が求められる一方で、電力自由化の下で脱炭素化を進めていくことが必要となっており、資本集約的な（初期投資額が大きく、民間企業にとっては投資リスクが大きい）原子力、再エネ（+系統増強）、水素、CCS等に投資がしやすいような環境整備は重要。投資回収の予見性が高い政策措置は重要。
- ◆ 2℃目標、実質ゼロ排出等のためには、この分析で想定した以上の広範なイノベーションが必須。エネルギー供給サイドは無論のこと、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社会イノベーションは極めて重要。

付録

世界一次エネルギー生産量

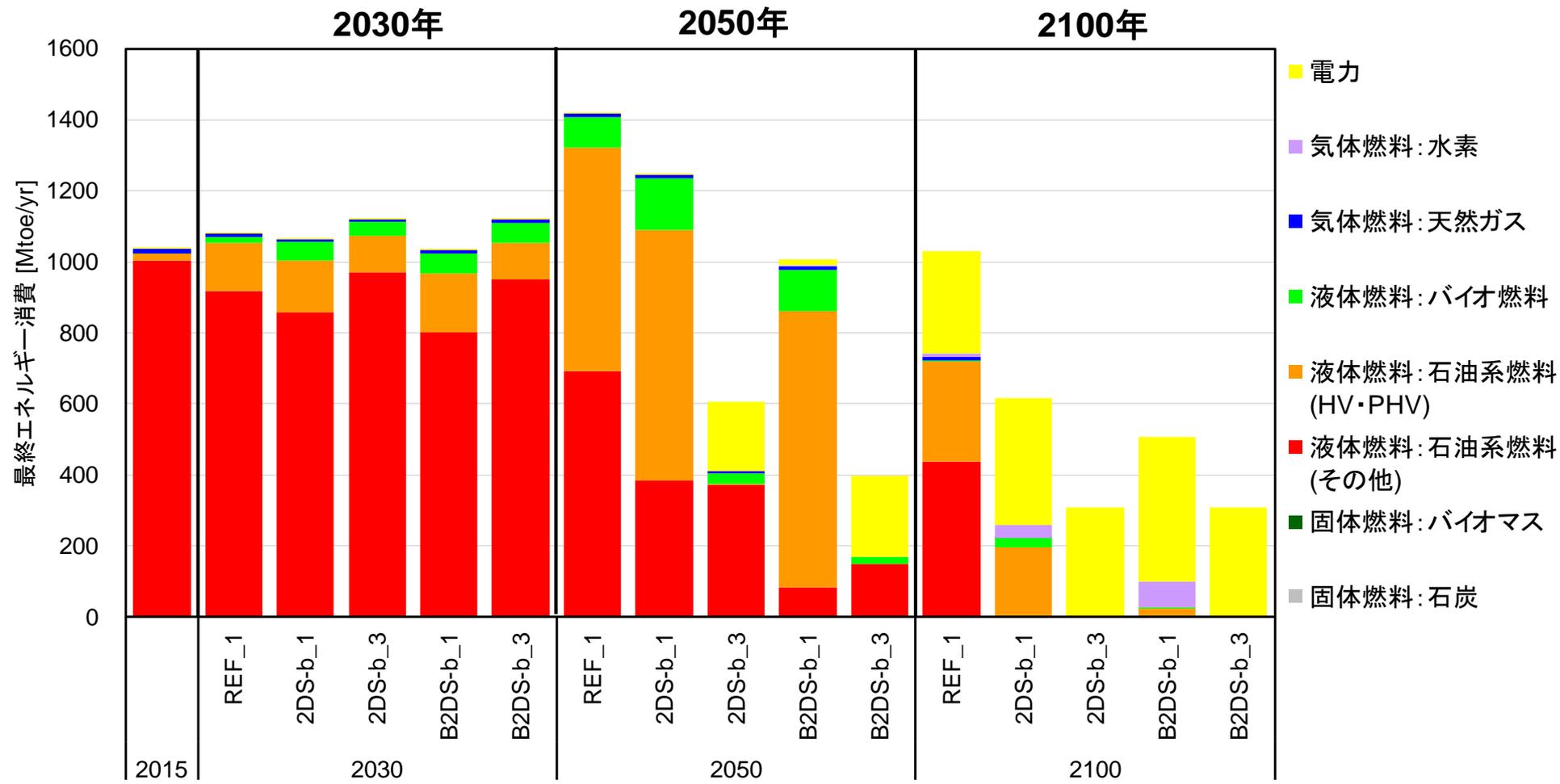
(REF_1、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3)



- ✓ 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。

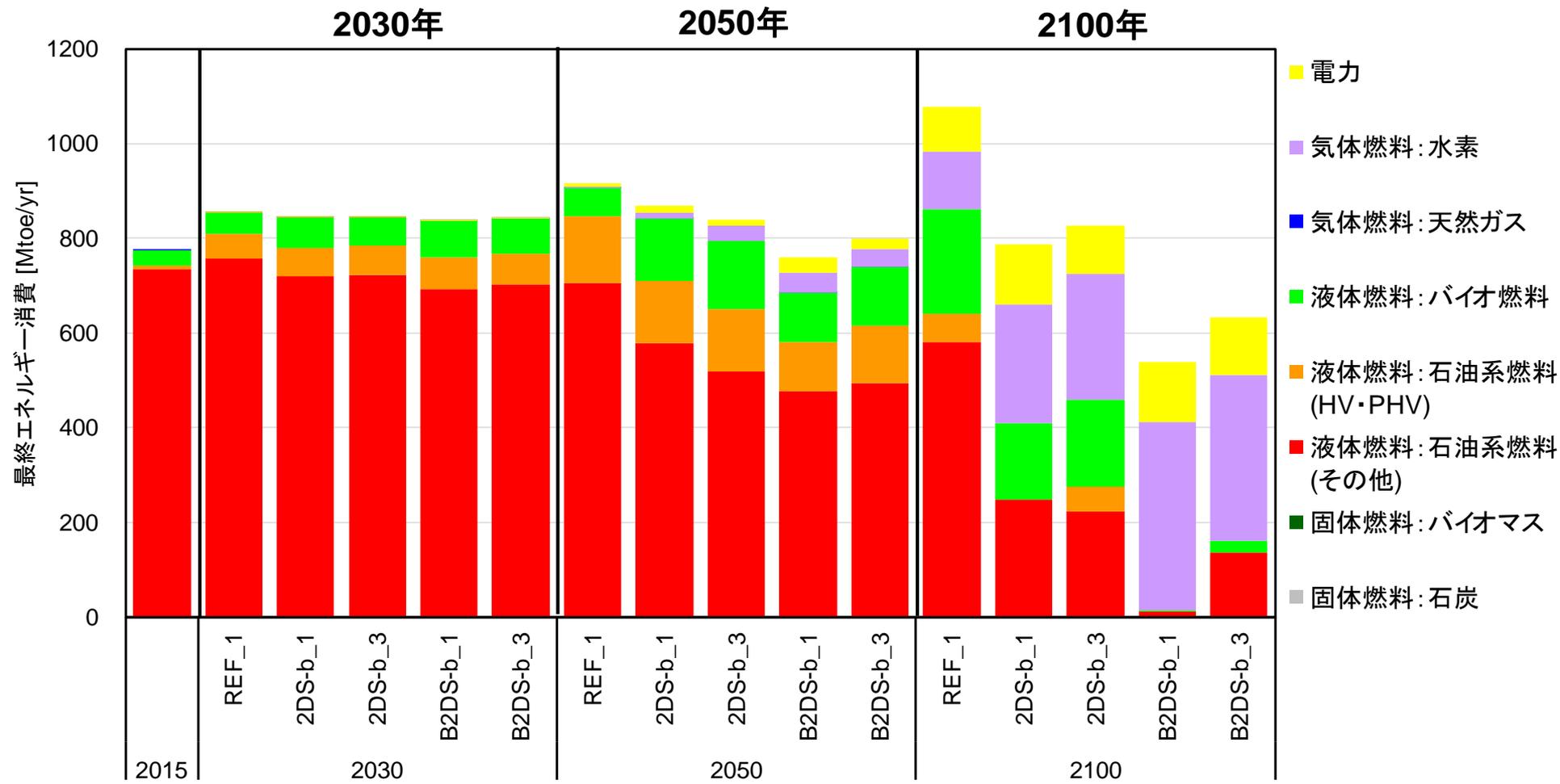
世界の部門別の最終エネルギー消費量：乗用車

(REF_1、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3)



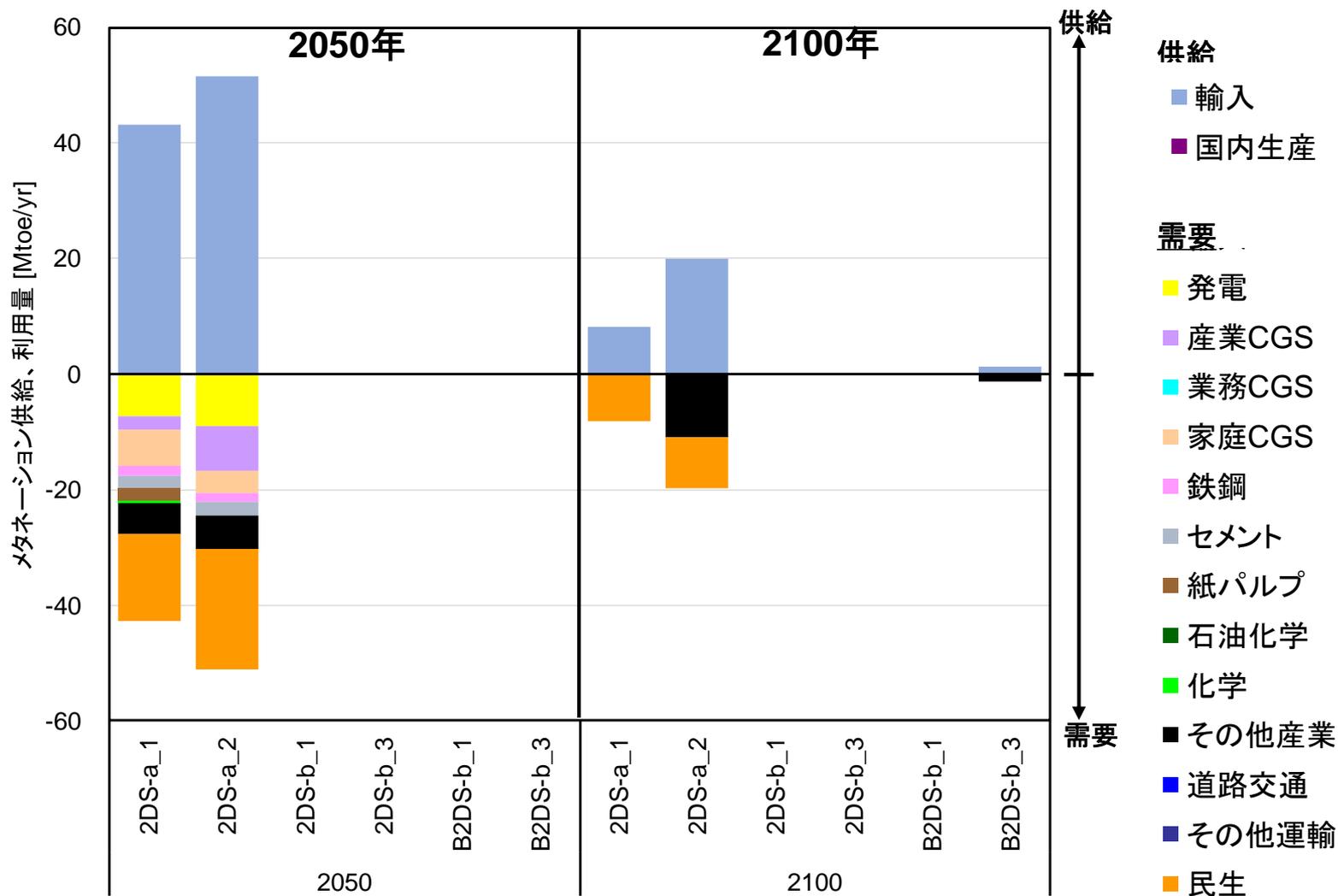
世界の部門別の最終エネルギー消費量：トラック

(REF_1、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3)



日本のメタネーションバランス（2050、2100年）

（2DS-a_1、2DS-a_2、2DS-b_1、2DS-b_3、B2DS-b_1、B2DS-b_3）



- ✓ 国間で限界削減費用に差が大きいケースで、特にメタネーションは経済合理的になりやすい。
- ✓ 世界全体で限界削減費用が均等化するケースでも、排出削減が厳しいB2DSでは、量的には大きくないが、メタネーションが経済合理性を有するようになって、利用が見られる。