

革新的環境技術シンポジウム2020
～ビヨンド・ゼロに向けたイノベーションの推進～
2020年12月9日

正味ゼロ排出実現に向けた
エネルギーシステムの評価

(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. 脱炭素化に向けた動向と対策の概要
2. 再生可能エネルギー、蓄電池、水素の役割と課題
3. CCU、DACの役割と課題
4. 全体システムの評価例
5. 国内の正味ゼロ排出のイメージ
6. まとめ

1. 脱炭素化に向けた動向と 対策の概要



【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): 現行エネルギー基本計画と整合的

- ◆ 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6月)

- ◆ 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。

【国連気候行動サミット】(2019年9月)

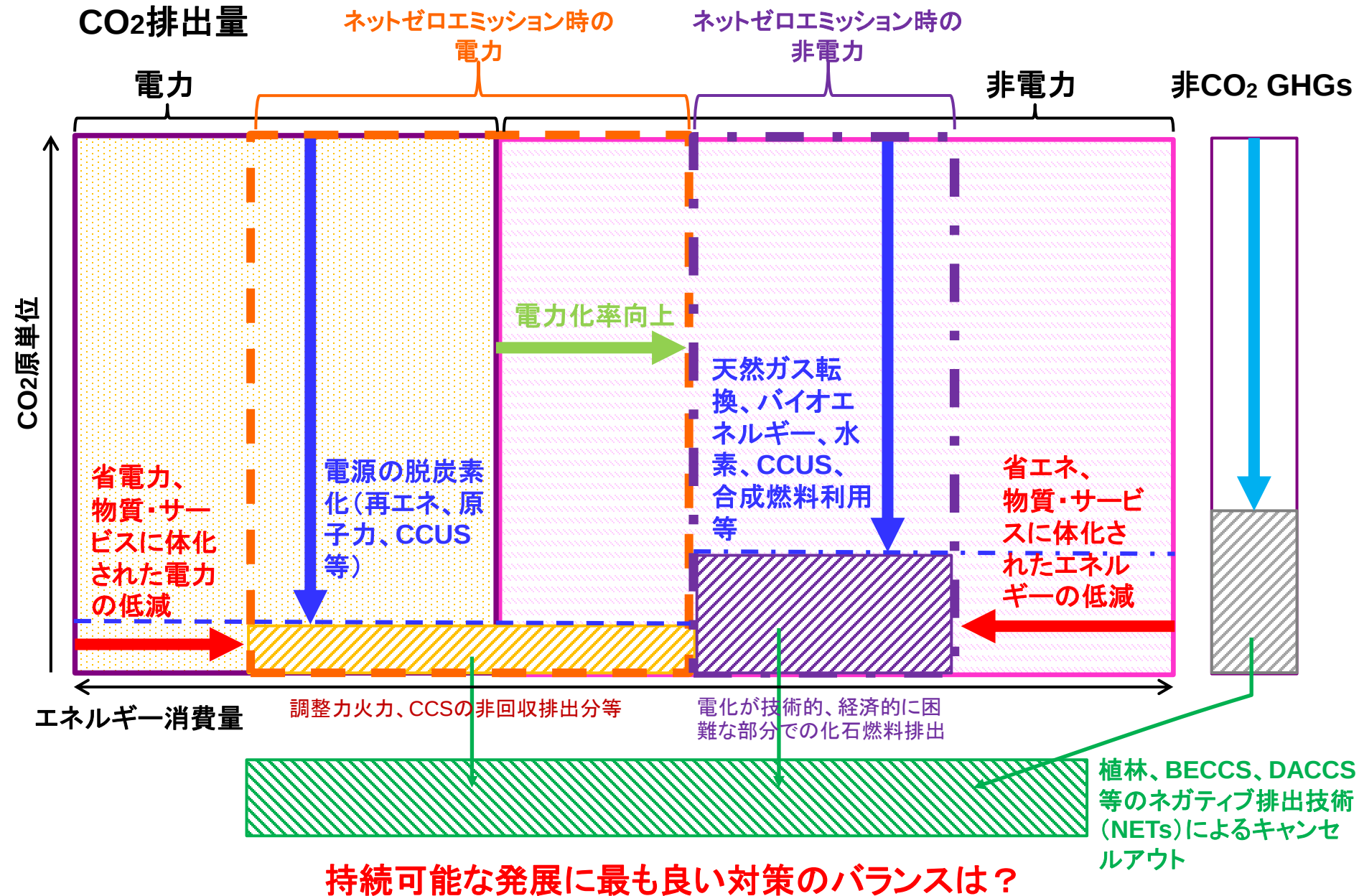
- ◆ 66カ国・地域が2050年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロにすると約束(ただし66カ国・地域の総排出量は、世界全体の排出量の13%程度(RITE推計))

【菅首相所信表明演説】(2020年10月)

- ◆ 「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」と宣言

- ◆ 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（合成メタンや合成液体燃料）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や既存の機器を活用できる利点有）
- ◆ 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）、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。
- ◆ 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、デジタル化技術等を活用した、（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

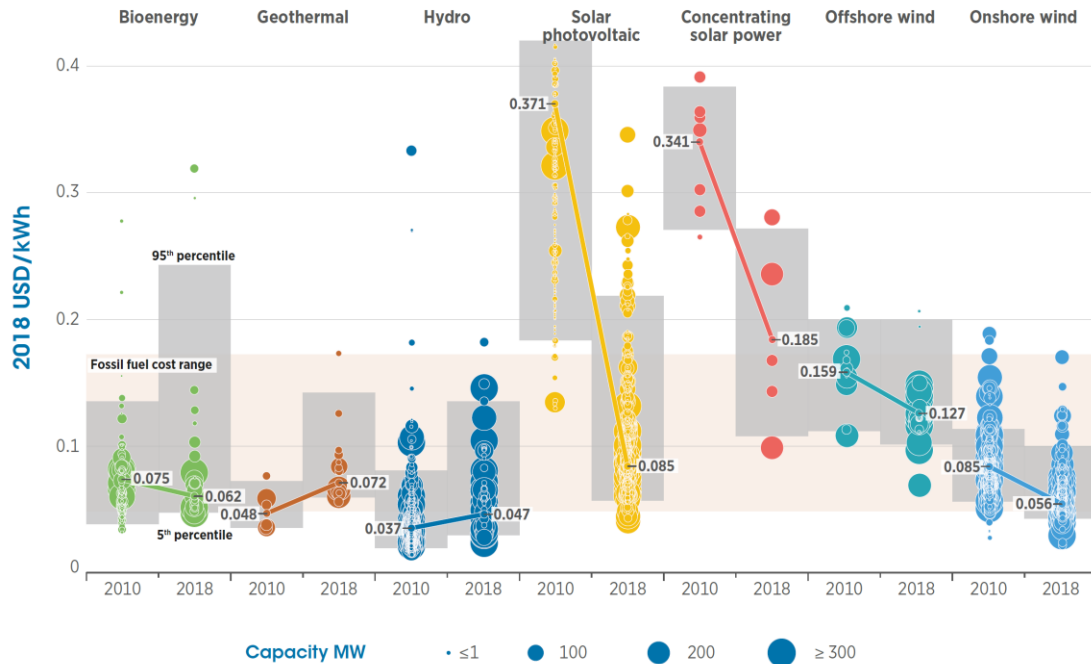
ネットゼロエミッションへの対策のイメージ



2. 再生可能エネルギー、蓄電池、 水素の役割と課題

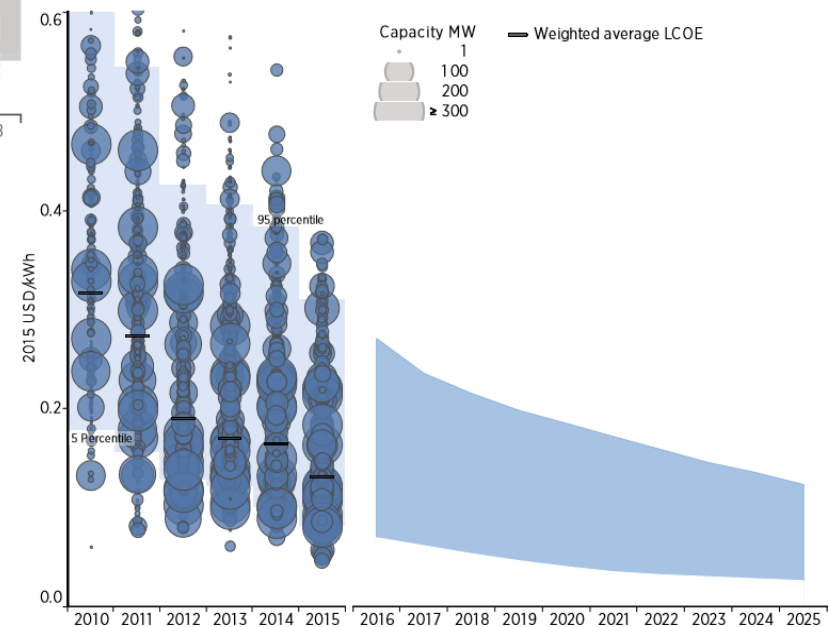


世界の再生可能エネルギーの動向



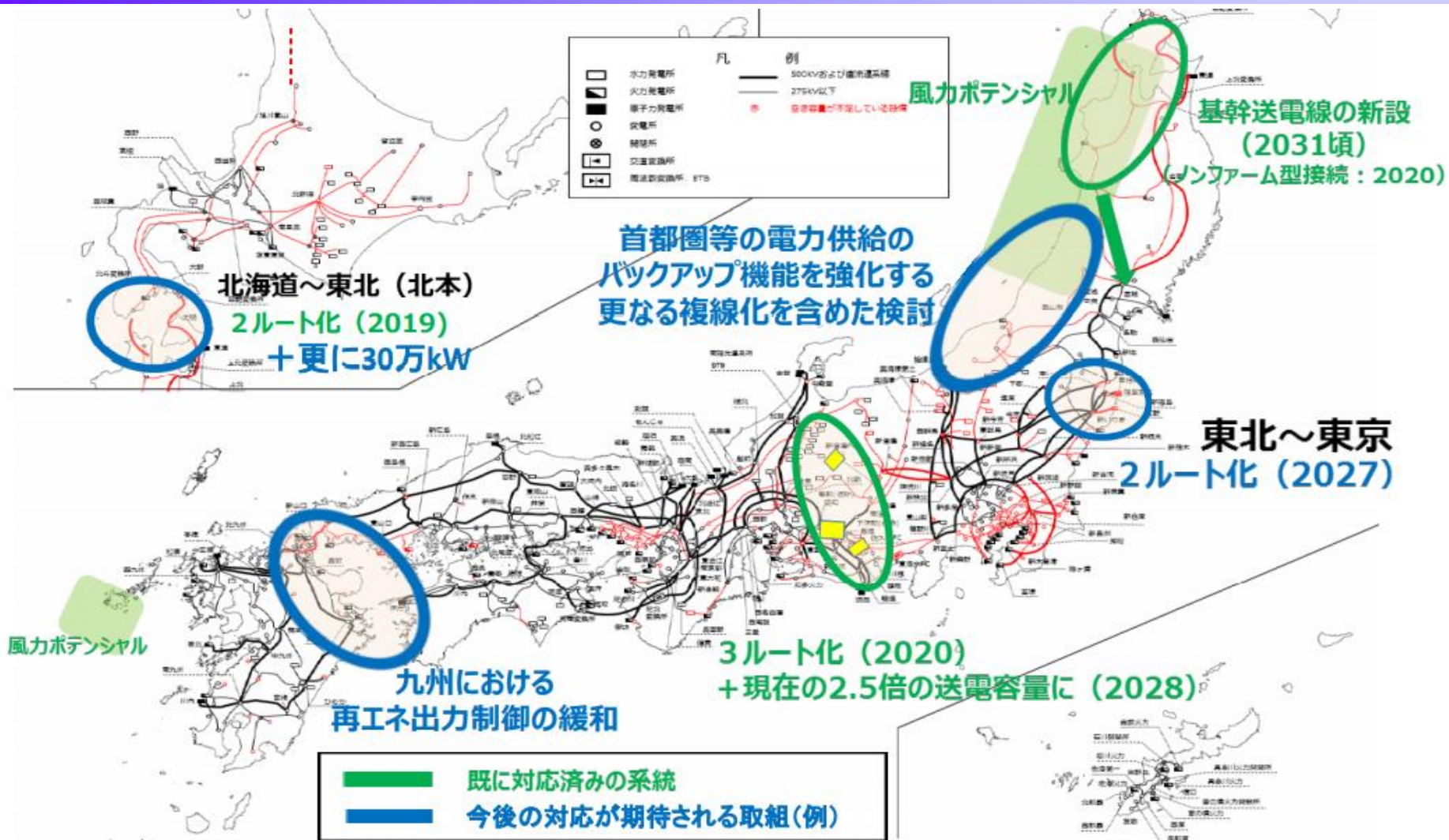
出典) IRENA

太陽光発電のコスト低減見通し



特に変動性再生可能エネルギー（太陽光、風力）のコスト低減は大きく進展してきている。
ただし、国によって大きなコストの差異が残っている（日本は高い）。

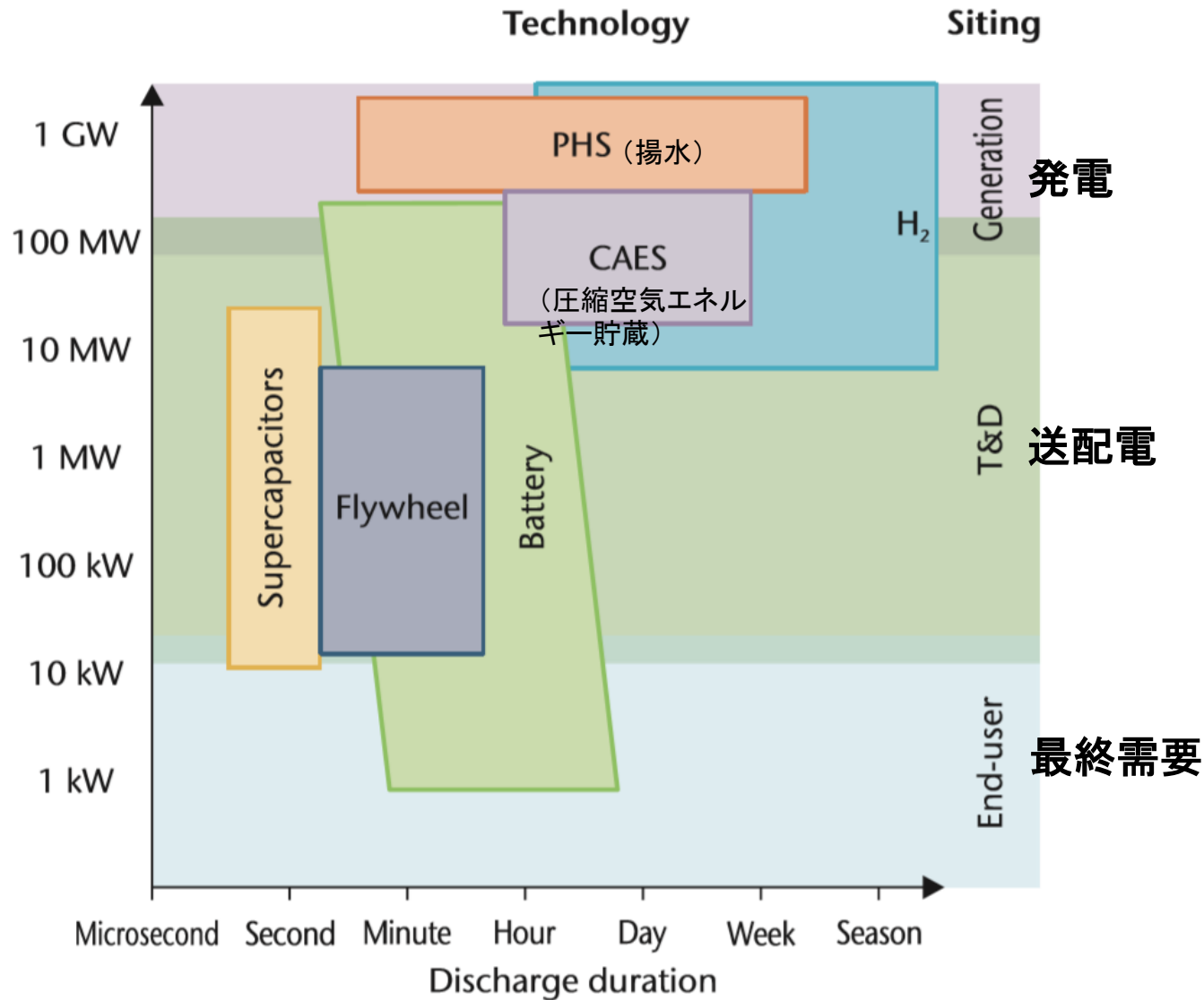
再エネの拡大に向けて:プッシュ型の電力系統形成



出典)再生可能エネルギー大量導入・次世代ネットワーク小委員会

プッシュ型での系統形成を行う方針(費用便益分析を実施)。次期エネルギー需給見通し(2030年以降のエネルギーミックス)等によってどう形成すべきかは異なってくる。

エネルギー貯蔵としての水素のカバー領域

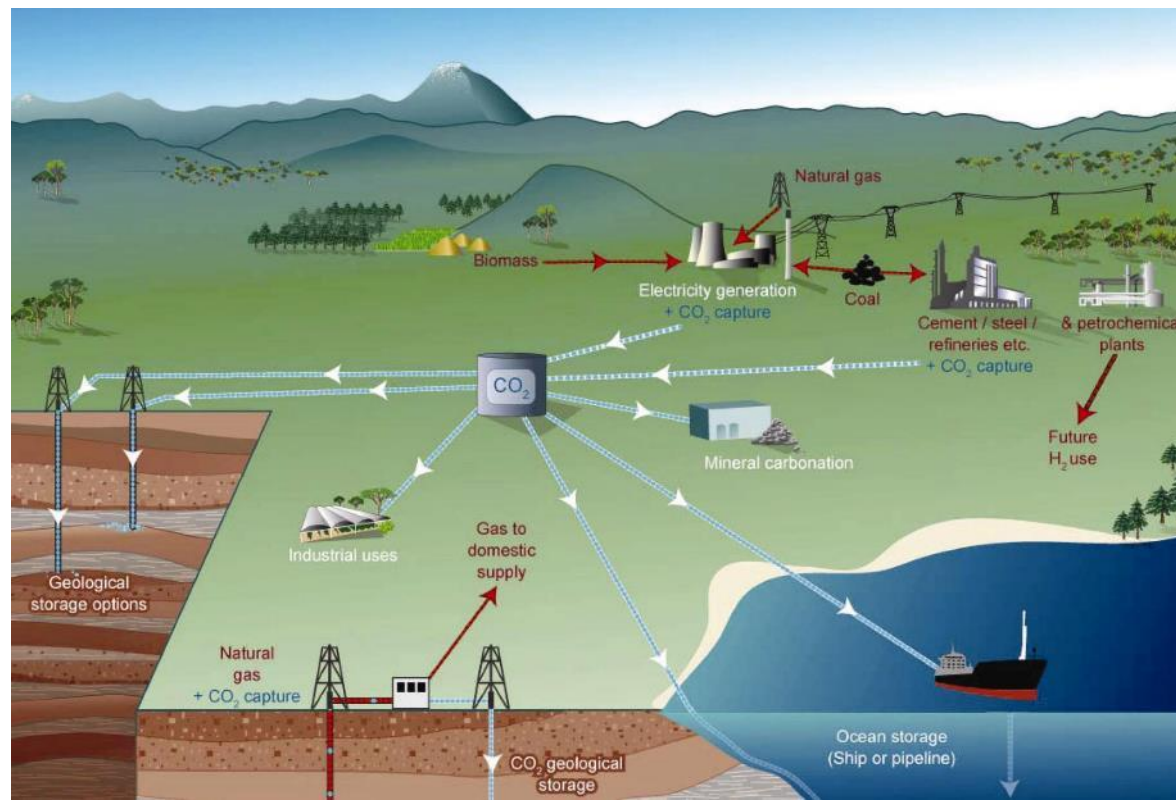


出典: IEA Technology Roadmap-Hydrogen and Fuel Cell, 2015

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。

3. CCU、DACの役割と課題

* CCU: 二酸化炭素回収・利用、DAC: 大気中CO₂回収



合成石油(エネルギー利用のCCU)

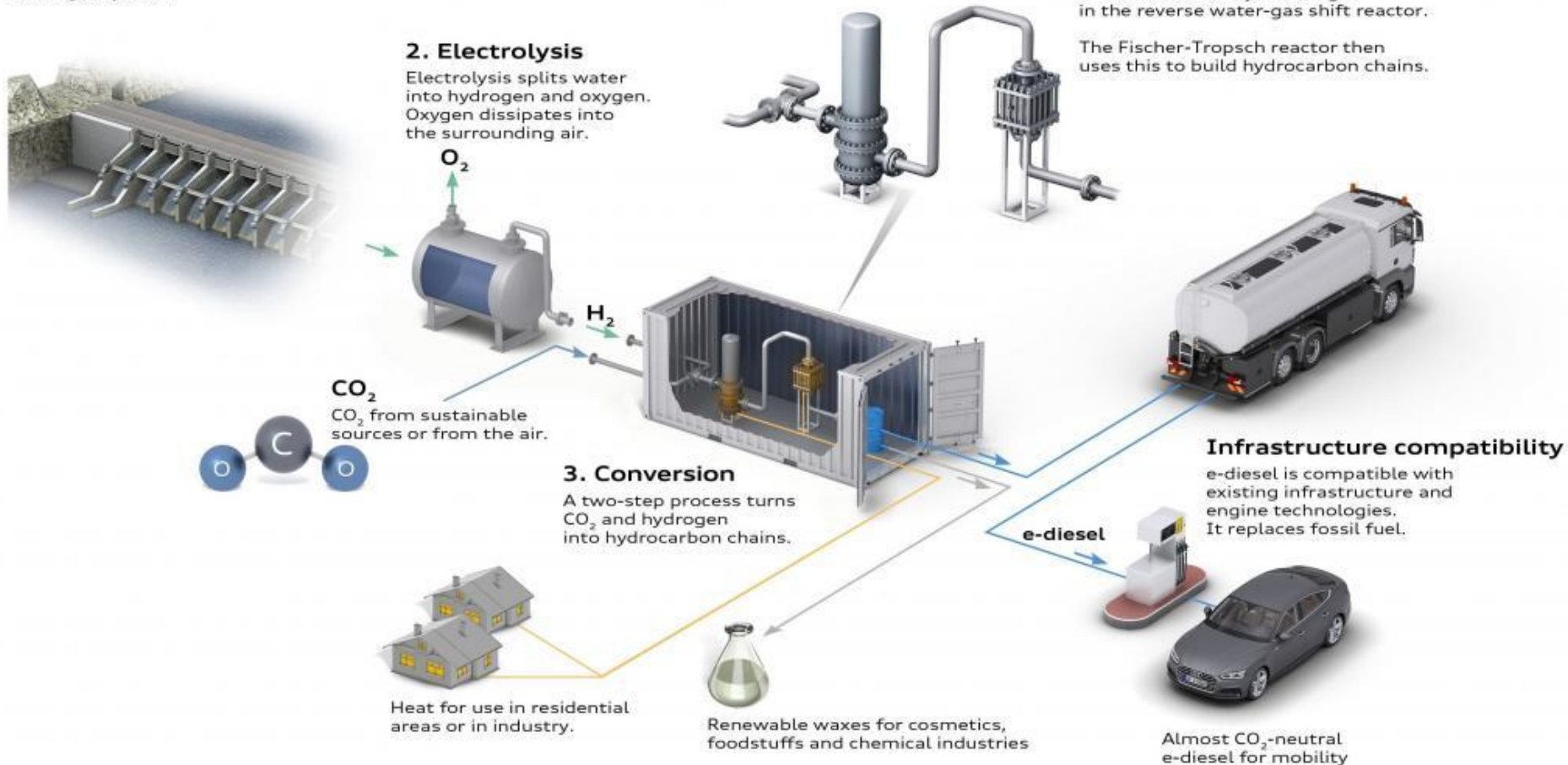
- ✓ 水素の更なる利便性向上のため、合成石油としての利用も検討されている(既存インフラ、機器が利用可能となる)。
- ✓ 合成に利用の回収CO₂は、化石燃料もしくはバイオマス燃焼排出、もしくはDACからのオプションあり。

1. Renewable electricity

Renewable energy obtained from hydropower.

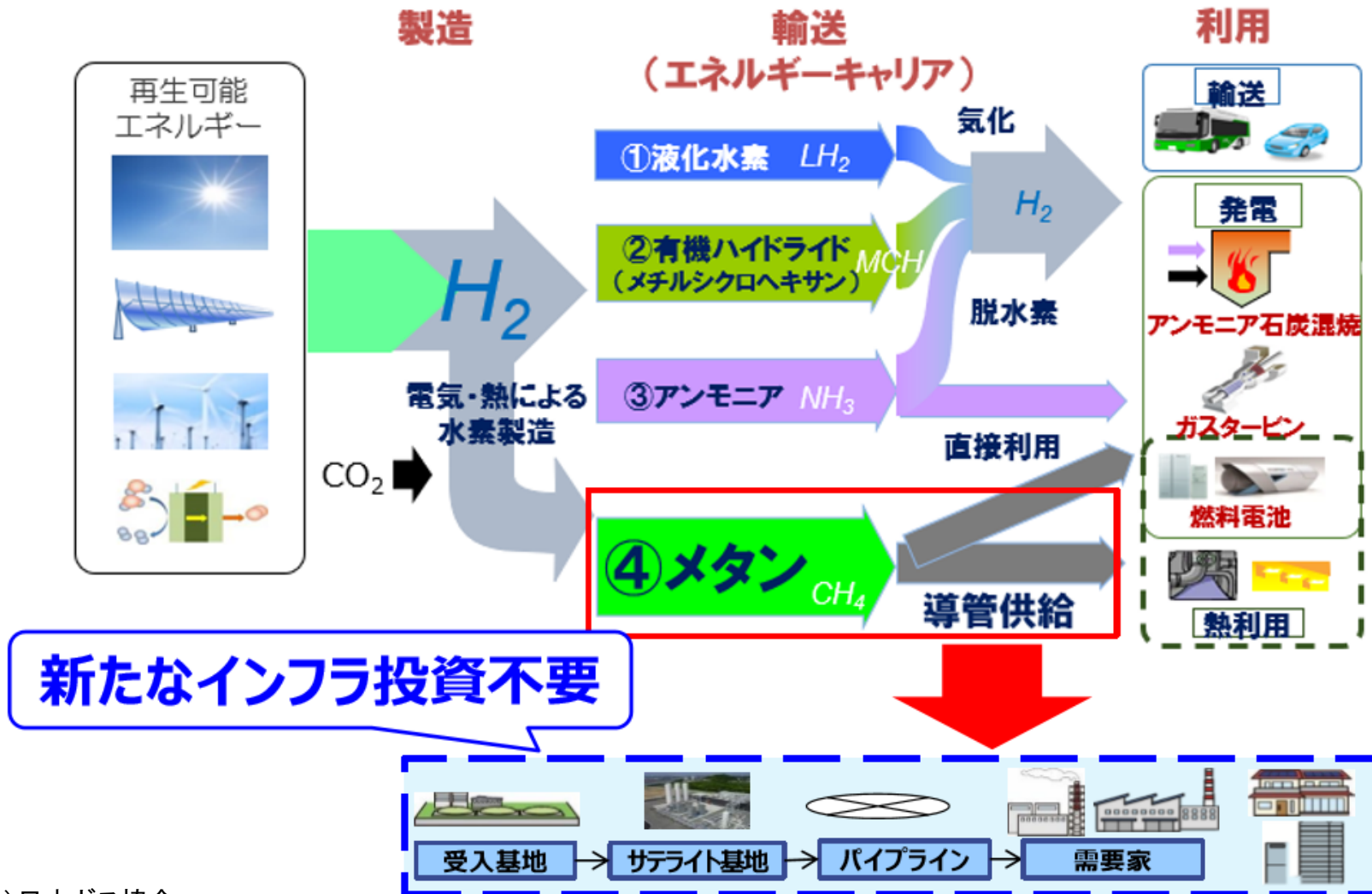
2. Electrolysis

Electrolysis splits water into hydrogen and oxygen. Oxygen dissipates into the surrounding air.



合成メタン(エネルギー利用のCCU)

- ✓ 水素の更なる利便性向上のため、合成メタンとしての利用も検討されている(既存インフラ、機器が利用可能となる)。
- ✓ 合成に利用の回収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。



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、化石燃料燃焼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。
- ただし、VREが余剰、安価となった場合などにおいて大きな役割も期待できるかもしれない。
- 一方、DACCS(貯留まで)をすれば、負排出となる。

ICEFロードマップ2018 DACによる、DACのエネルギー消費量推計

Company	Thermal energy/ tCO ₂ (GJ)	Power/ tCO ₂ (kWh)
Climeworks	9.0	450
Carbon Engineering	5.3	366
Global Thermostat	4.4	160
APS 2011 NaOH case	6.1	194

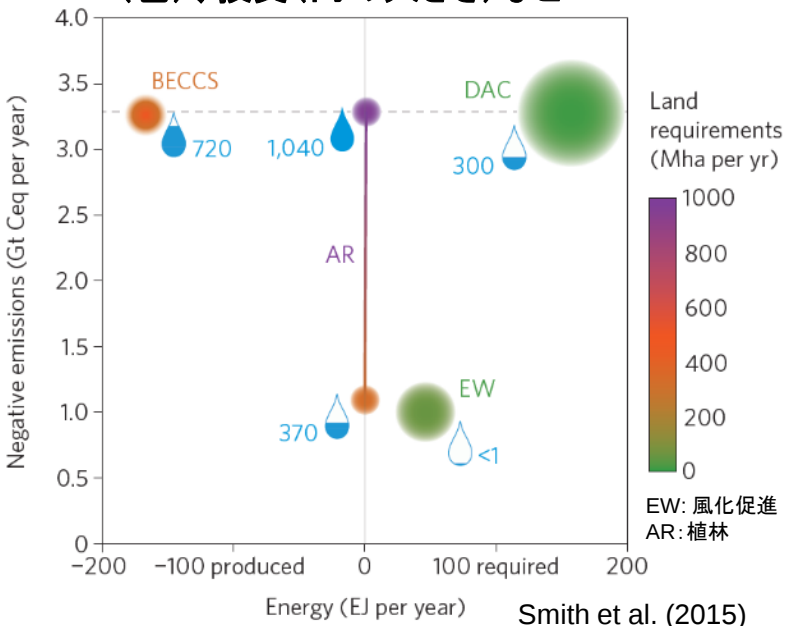
M. Fasihi et al., (2019)による2020年のDACのエネルギー消費量と設備費の推計

	エネルギー消費量 (tCO ₂)		設備費 (Euro/(tCO ₂ /yr))
高温(電化)システム(HT DAC)	電力 (kWh)	1535	815
低温システム(LT DAC)	熱 (GJ)	6.3 (=1750 kWh)	730
	電力 (kWh)	250	



Climeworks

必要エネルギー(横軸)、土地面積(色)、投資(円の大きさ)など



4. 全体システムの評価例

(世界エネルギーシステム・温暖化対策
評価モデルによる分析例)



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、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

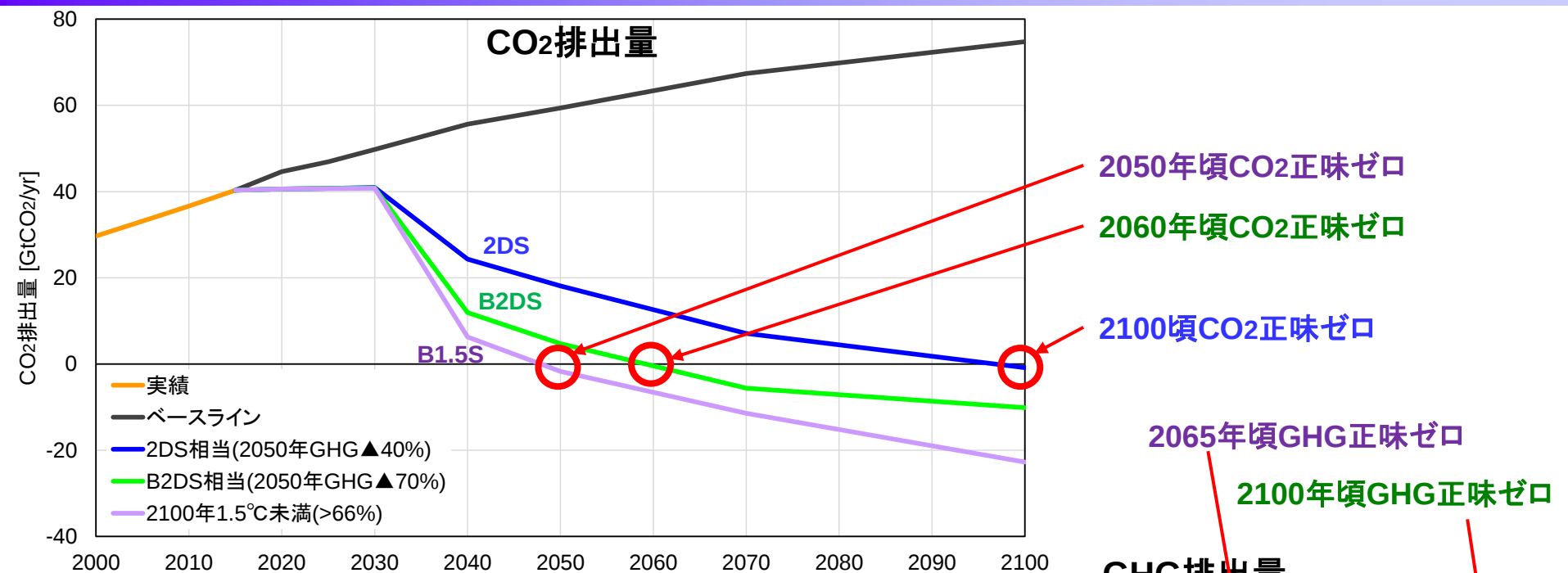
シナリオ名	世界排出シナリオ	【供給側】再エネコスト(太陽光発電コスト)	【需要側】シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)	【負排出技術】大気CO2直接回収技術(DAC)
REF_1	ベースライン (特段のCO2排出制約なし)	標準	想定せず	想定せず
2DS_1	2℃未満(>50%) : IEA ETP2017の [2DS]相当	標準	想定せず	想定せず
2DS_2		低コスト(中東・北アフリカ中心に)		
2DS_3			シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)	
B2DS_2	2℃未満(>66%) : IEA ETP2017の [B2DS]相当	低コスト(中東・北アフリカ中心に)	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)	
B1.5D_2	2100年1.5℃未満 (>66%) : 気温の オーバーシュート有	低コスト(中東・北アフリカ中心に)	想定せず	想定せず
B1.5D_3			シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)	
B1.5D_3_DAC				DAC実現(低位コスト)

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

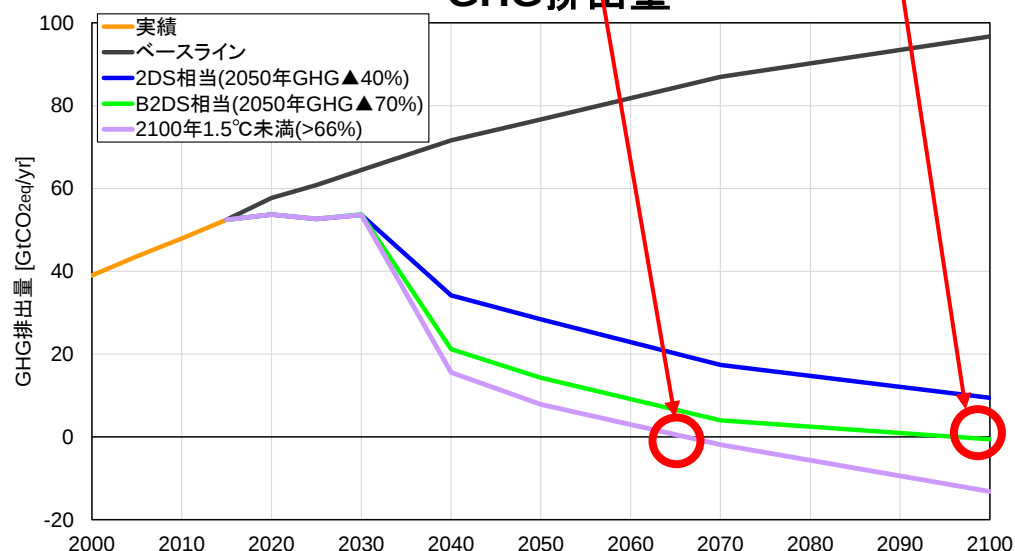
【社会経済シナリオ(SSPs: Shared Socioeconomic Pathways)】

■ **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、1.5°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 (SSP2シナリオを表示)



※ 2DS、B2DS、B1.5S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

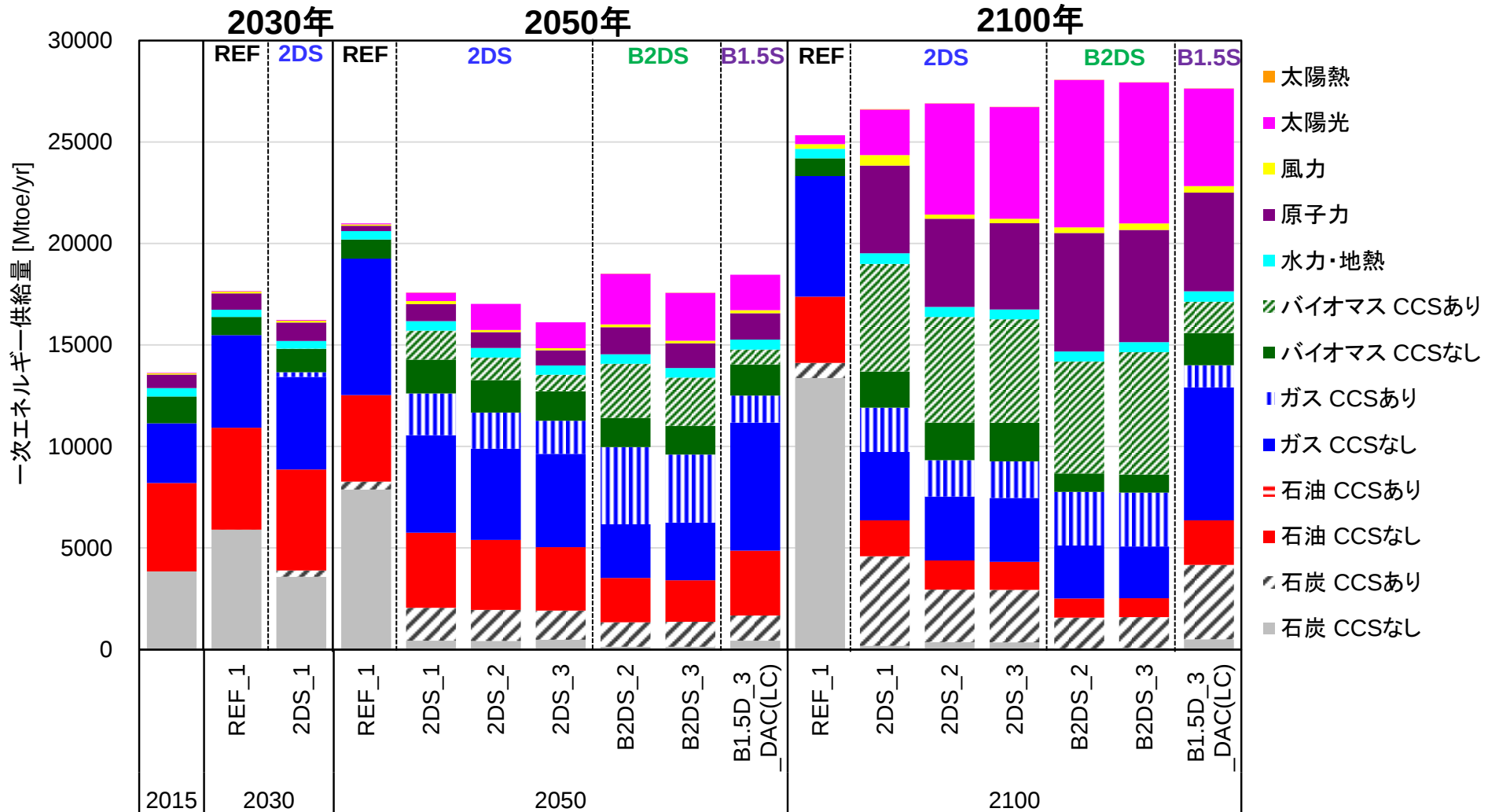
2050年の排出削減費用

	2°C、>50%			2°C、>66%		1.5°C in 2100 (OS)、>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)	B1.5D_2 (PVコスト低)	B1.5S_3 (+カーシェア)	B1.5S_3_ DAC(LC)
CO ₂ 限界 削減費用 (\$/tCO ₂)	183	169	152	524	430	実行可能 解無し	実行可能 解無し	151
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	実行可能 解無し	実行可能 解無し	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(効用の大きな低下を伴わずに、自動車台数の低減により全体費用の低減が可能となるため)。
- ✓ 1.5°Cシナリオについては、標準的な技術想定(REF_1)の下では、実行可能解が得られなかった。DACを想定した場合に限って実行可能解有。このとき、DACSのコストによって限界削減費用の上限がかなりの程度決まる。

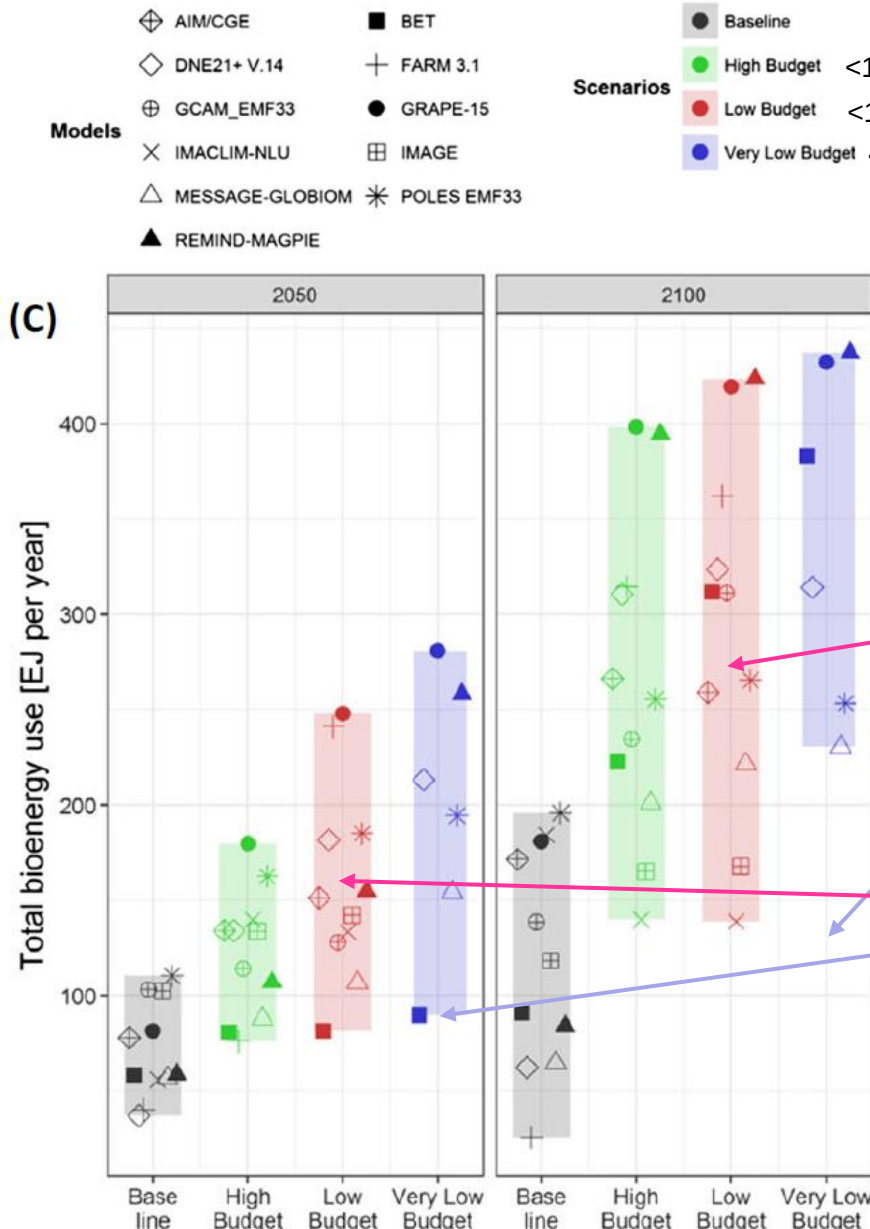
世界一次エネルギー生産量(長期展望: ~2100年)



- ✓ 2℃、1.5℃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)。
- ✓ DACを想定しなかった2℃目標下では、特に2100年では相当大きなBECCS利用が必要
- ✓ DACを想定した1.5℃目標では、BECCSの利用は大きく減少し、CCS無しの天然ガス利用もかなり残る。

【参考】国際モデル比較PJにおける排出削減水準別のバイオマスの経済的ポテンシャル

出典) N. Bauer et al., Climatic Change, 2018 (EMF33 study)



2°C、1.5°Cシナリオでは、
2050年で80～280 EJ/yr、2100年で150～430 EJ/yr程
度と推計されている。
バイオマスポテンシャル自体は相当大的な量が存在して
いると推計されている。

【2100年】

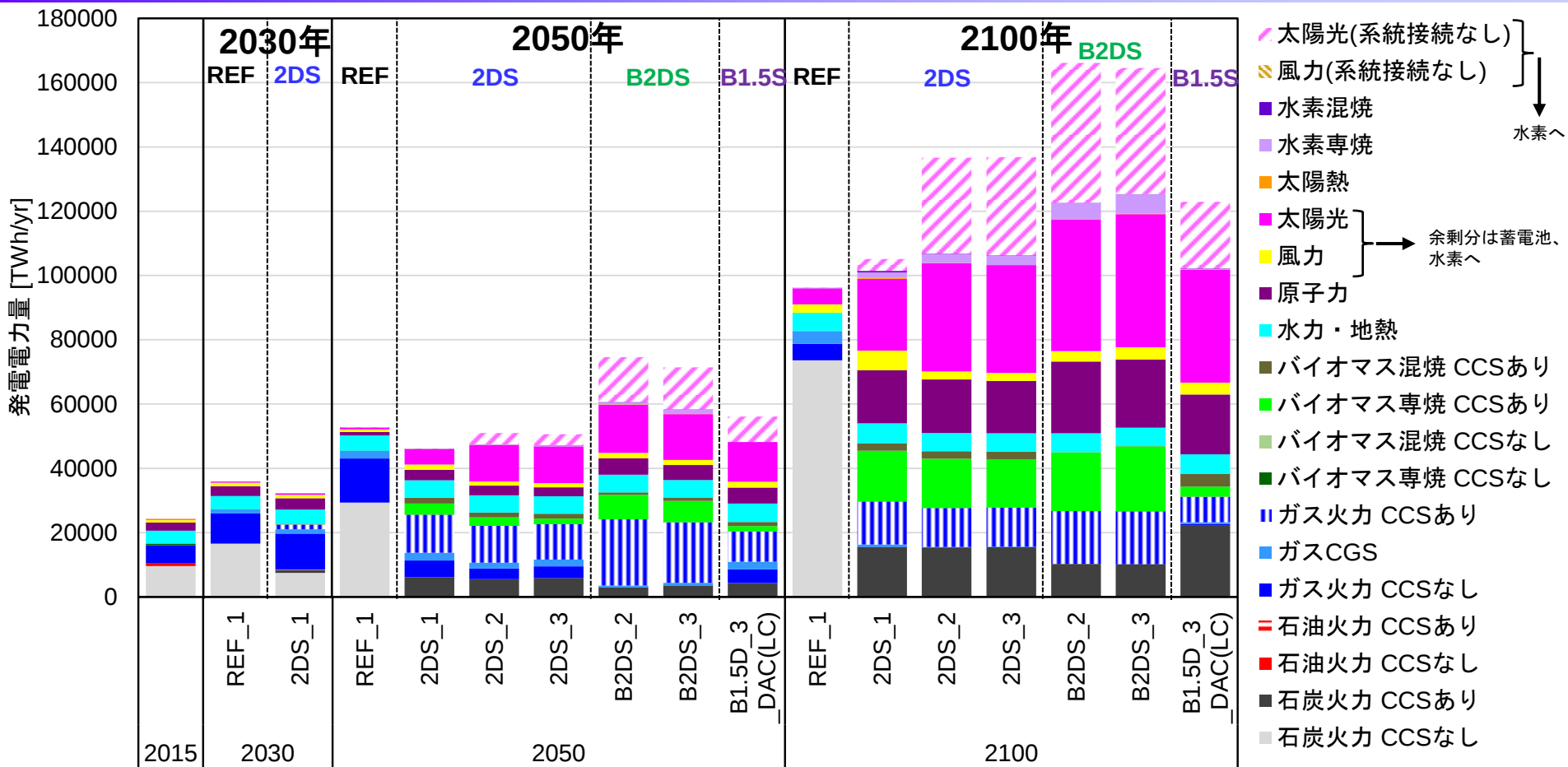
B2DS_2: 269 EJ/yr
B1.5D_3_DAC(LC): 131 EJ/yr

【2050年】

B2DS_2: 172 EJ/yr
B1.5D_3_DAC(LC): 95 EJ/yr

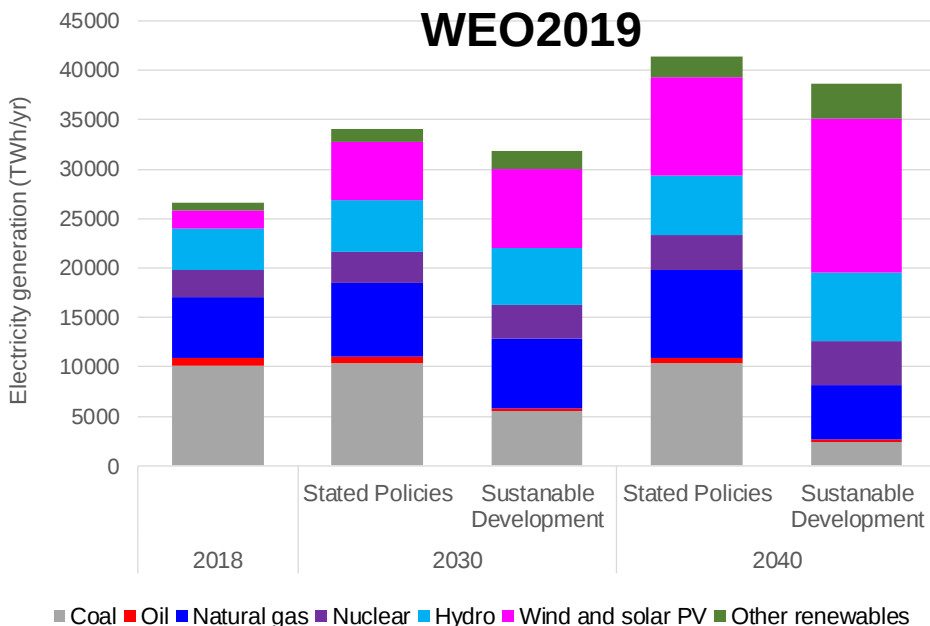
- ✓ 通常シナリオ想定では、国際的な報告における、バイオマス利用量の標準的な水準の結果
- ✓ DACのコストが特に低位の場合、報告値を大きく下回る水準。生物多様性への影響懸念が低下

世界発電電力量(長期展望: ~2100年)



- ✓ 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。
- ✓ 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
- ✓ B1.5Dでは、DACCSの利用により、BECCSの利用は減少。石炭CCSも増大傾向

【参考】IEA WEO2019、ETP2020の世界発電電力量

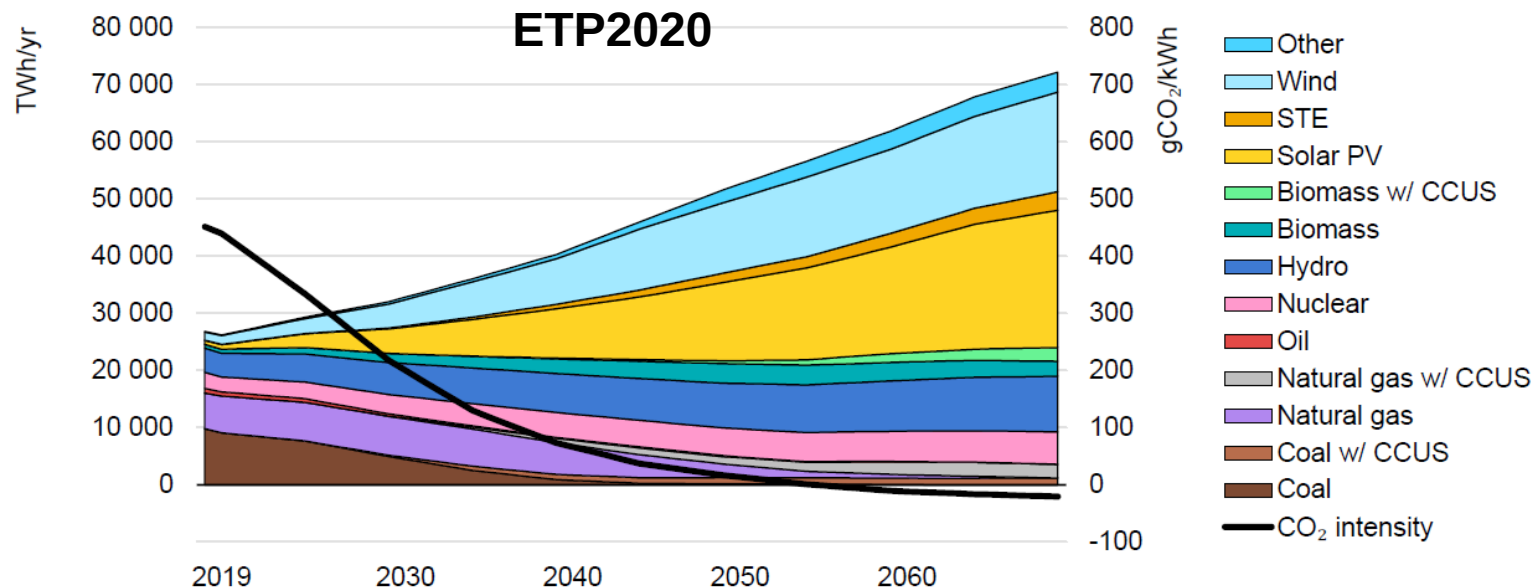


WEO2019

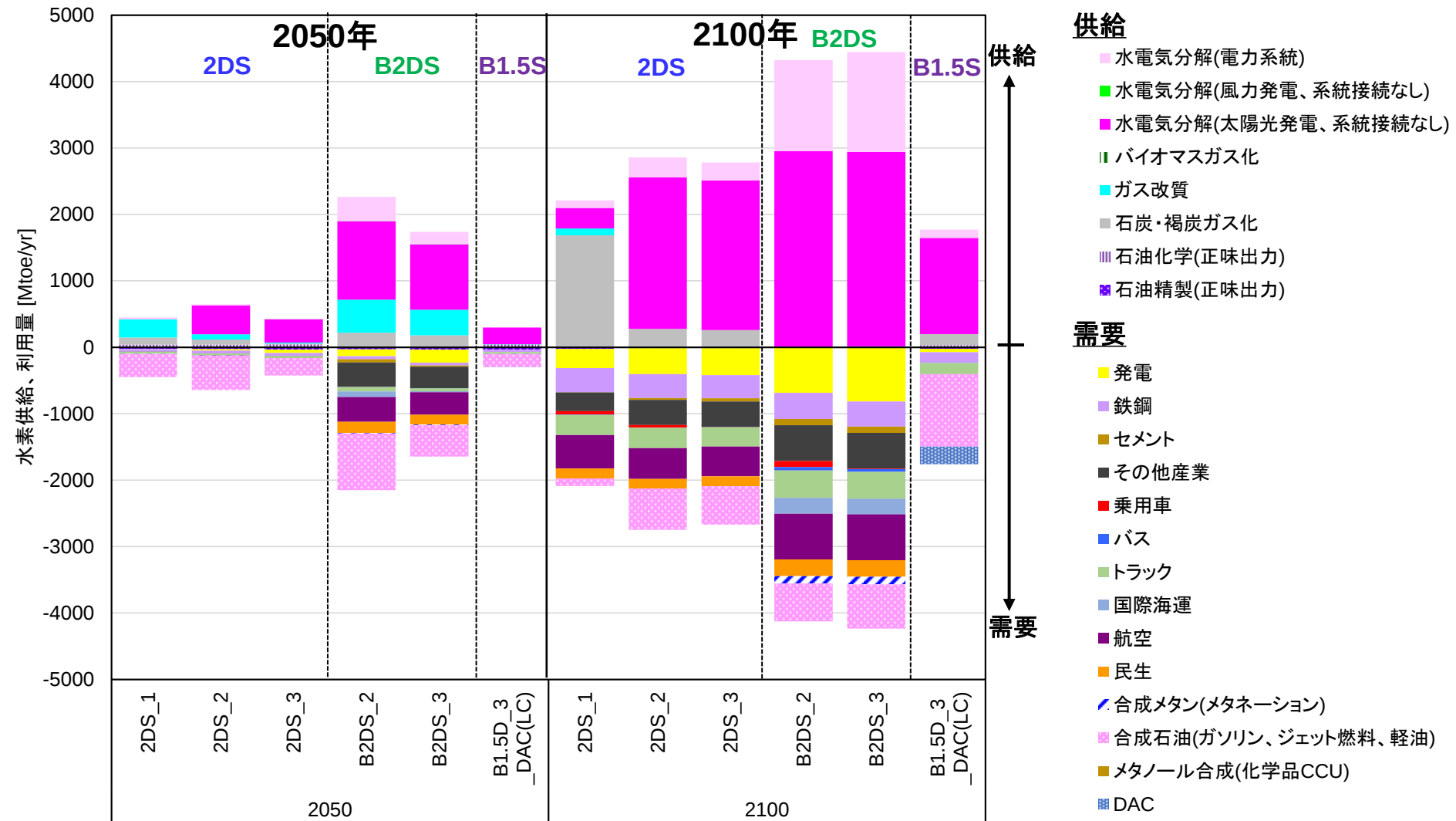
- DNE21+(B2DS)とWEO2019(Sustainable Developmentシナリオ)は比較的似通っている。
- ガス発電については、DNE21+の方が大きい傾向あり。

ETP2020

- DNE21+の方が、2050年に向けて発電電力量の伸びが大きい。
- ETPの方が原子力発電の伸びが若干大きい。また、水力発電の伸びも大きい。
- ETPの方が風力発電が大きい。一方、太陽光はDNE21+の方が大きい。
- ガス発電については、DNE21+の方が大きい。

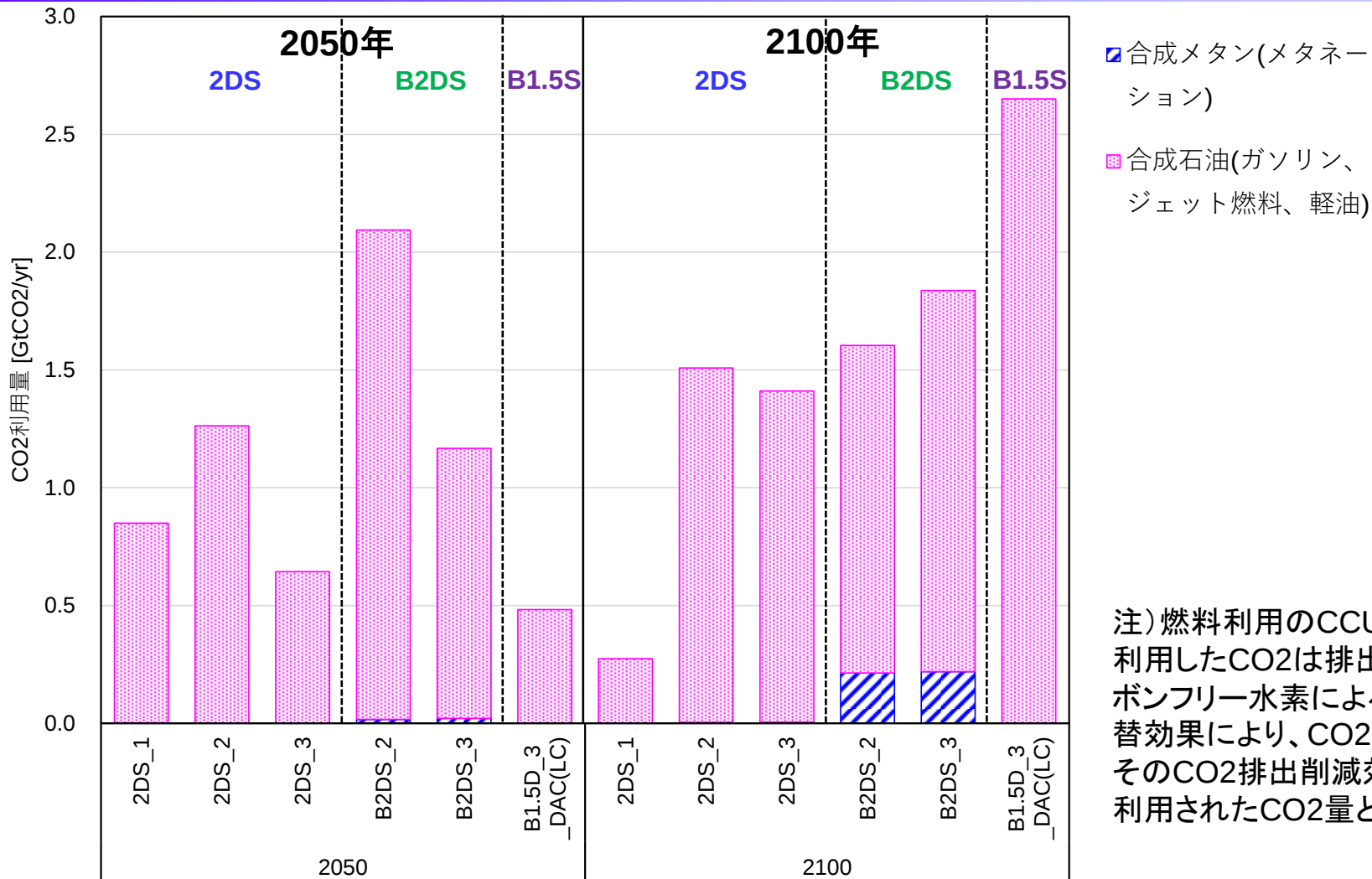


世界の水素需給バランス(長期展望: ~2100年)



- ✓ 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。
- ✓ 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。

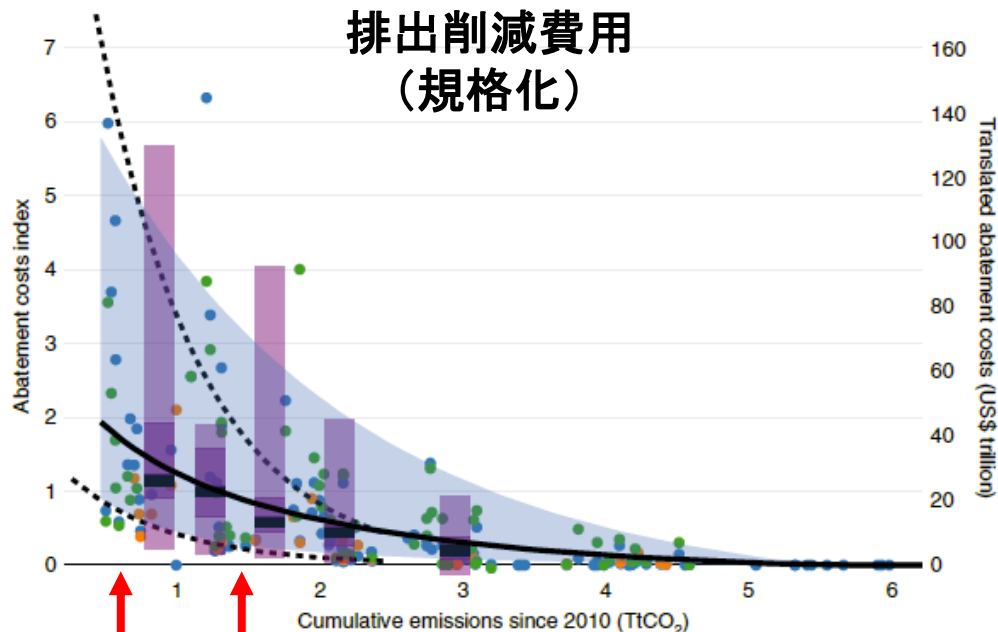
世界の合成燃料CCU（長期展望：～2100年）



注)燃料利用のCCUは、燃焼時に利用したCO2は排出されるが、カーボンフリー水素による化石燃料代替効果により、CO2は削減される。そのCO2排出削減効果は、合成に利用されたCO2量と同値となる。

今回の分析では、国間で限界削減費用均等化を想定したシナリオであるが、別途の試算によると、国間で限界削減費用に差異が大きい場合、合成メタンや合成石油が経済的になりやすい傾向あり。

【参考】累積排出量別のCO2排出削減費用



出典) D. van Vuuren et al., Nature Climate Change (2020)

1.5°C
程度

2°C
程度

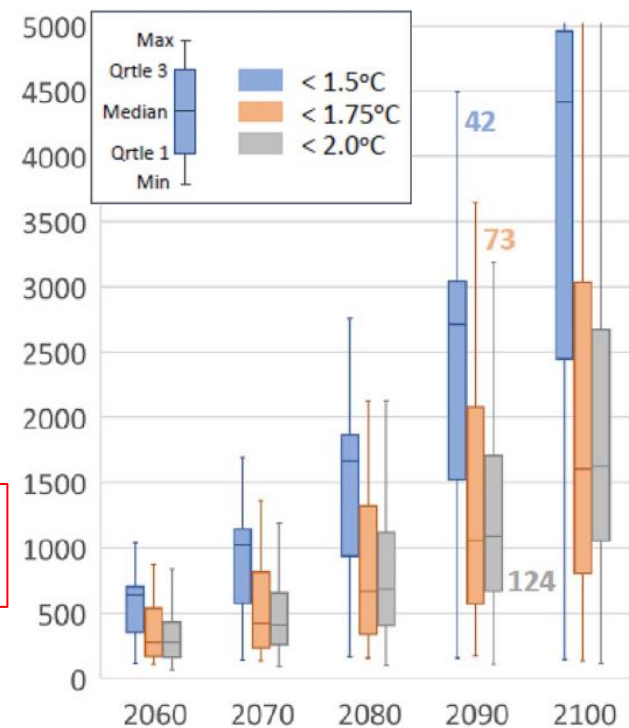
1.5°Cのような厳しい排出削減においては、モデルのコスト推計に大きな幅が生じている。

1.5°Cでは、1.75°Cや2.0°Cに比べ、
3倍程度の限界削減費用と推計

5種類のIAMsによる240程度のシナリオの結果

出典) A. Gambhir et al., Energy Strategy Reviews (2019)

CO2限界削減費用



モデル分析のシナリオ想定 (CCU, DAC関連)

	PV, シェアリングモ ビリティシナリオ	排出 経路	メネーション	合成石油	DAC コスト
前頁までのシナリオ	1~3	REF, 2DS, B2DS, B1.5D	利用可		想定無
	3	B1.5D			<u>低位</u>

CCU、DAC関連の感度解析シナリオ

B2DS_2_N-e-fuel	2 (PV: 低位コスト + 完全自動運 転車によって誘 発されるシェアリ ングモビリティは想定 せず)	B2DS	<u>利用不可</u>		想定無
B2DS_2_N-e-gas			<u>利用不可</u>	利用可	想定無
B2DS_2_N-e-liq			利用可	<u>利用不可</u>	想定無
B2DS_2_HC-DAC			利用可		<u>高位</u>
B2DS_2_LC-DAC			利用可		<u>低位</u>

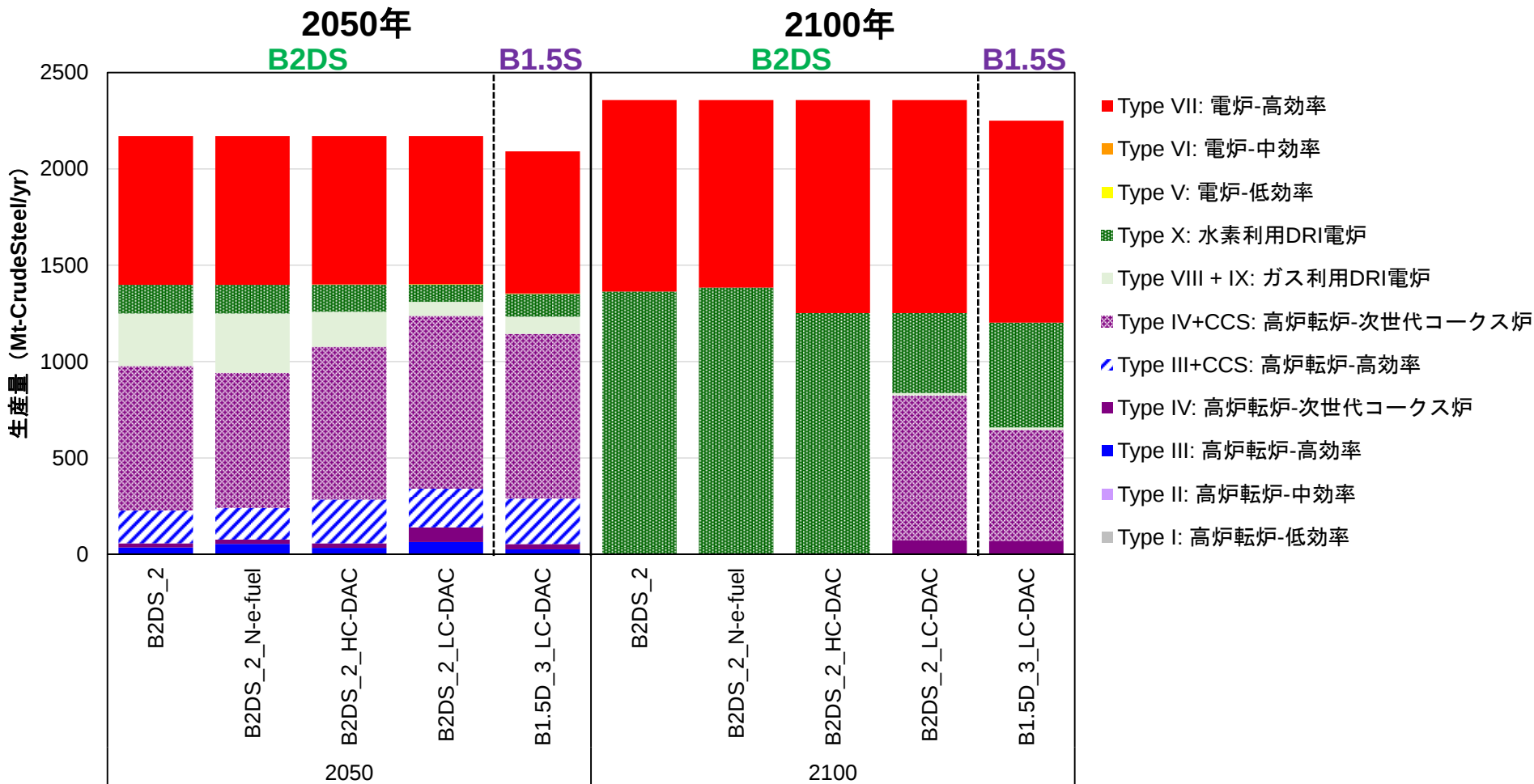
CO₂限界削減費用(CCU, DAC感度分析)

	2040年	2050年	2070年	2100年
B2DS_2	375	524	1133	1267
B2DS_2_N-e-fuel	377	555	1070	2053
B2DS_2_N-e-gas	376	523	1141	1283
B2DS_2_N-e-liq	378	555	1049	1565
B2DS_2_HC-DAC	325	211	246	214
B2DS_2_LC-DAC	248	118	120	106
B1.5D_3_LC-DAC	296	151	126	122

単位: US\$/tCO₂

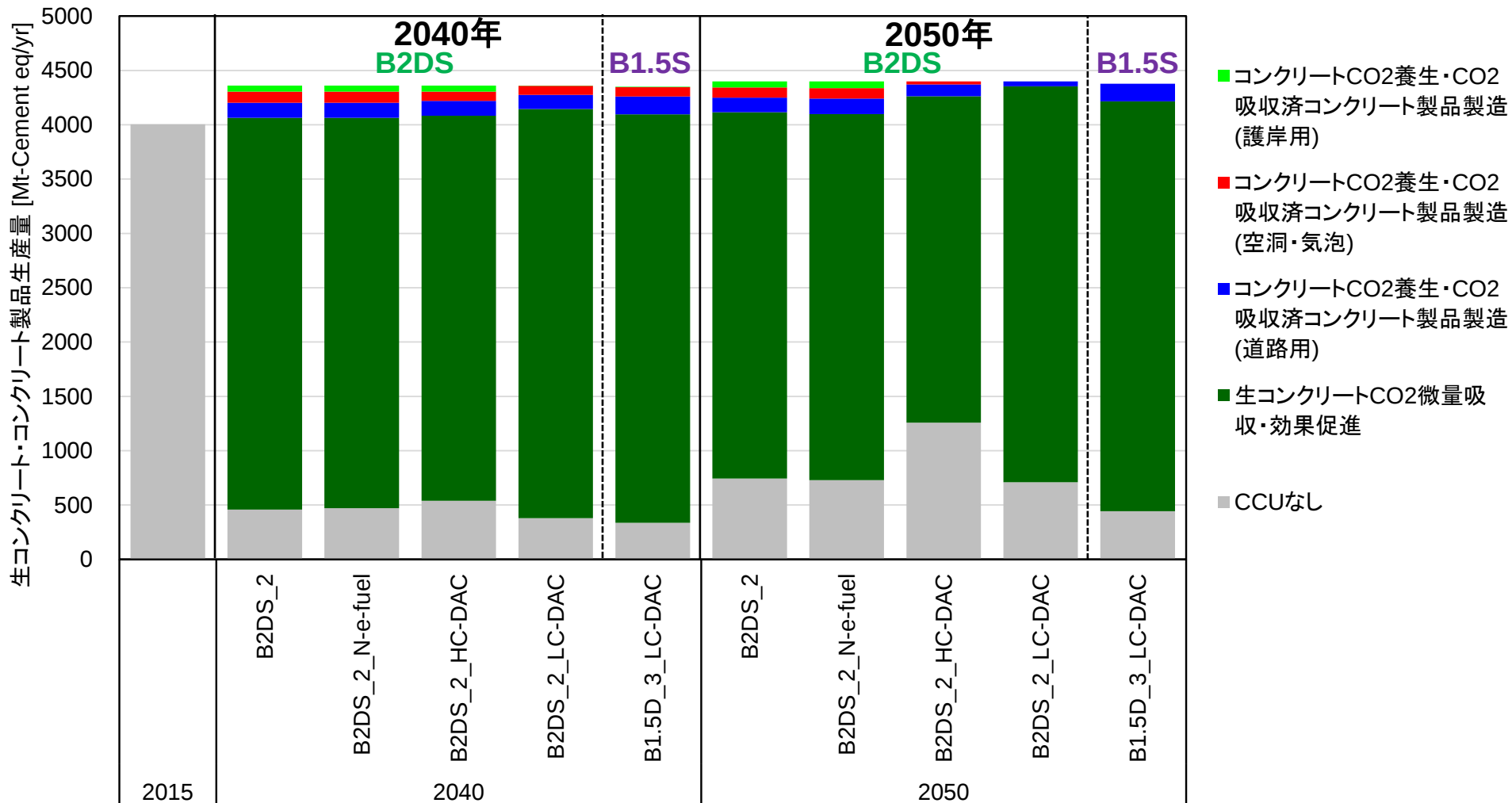
- ✓ 合成ガス、合成石油(主にe-fuel)が利用できないとしたケースでは特に2100年の費用上昇が大きい。
- ✓ 1.5℃シナリオについては、DACsを想定しないシナリオ下では、実行可能解が得られなかったが、DACsを想定すると解が得られる。また、B2DSシナリオ(2℃、>66%)では、限界削減費用は大きく抑制され得る(高位コストシナリオであっても)。

世界の技術別鉄鋼生産量(CCU, DAC感度分析)



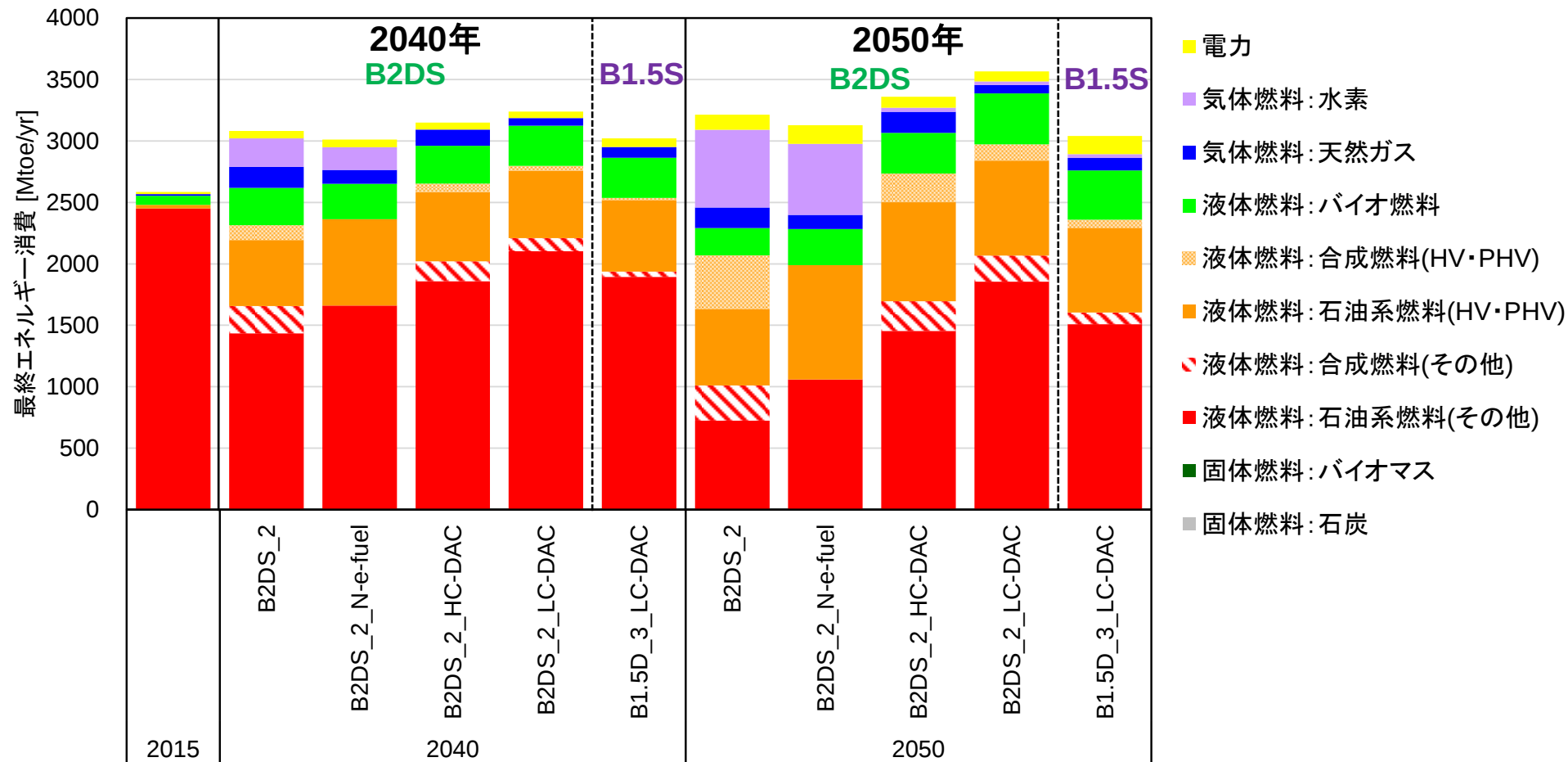
- ✓ 時点の経過とともに、電炉比率の上昇は見られるが、鉄スクラップの制約により、少なくとも、21世紀半ばまでは高炉転炉法が主流と見られる。
- ✓ 完全自動運転車によるカーシェアリング・ライドシェアリング想定シナリオ(シナリオ3)では、2050年の鉄鋼生産量は4%程度の低減を推計
- ✓ 2050年以降は、水素直接還元製鉄(水素DRI)が主流に

世界の技術別のコンクリート生産量 (CCU)



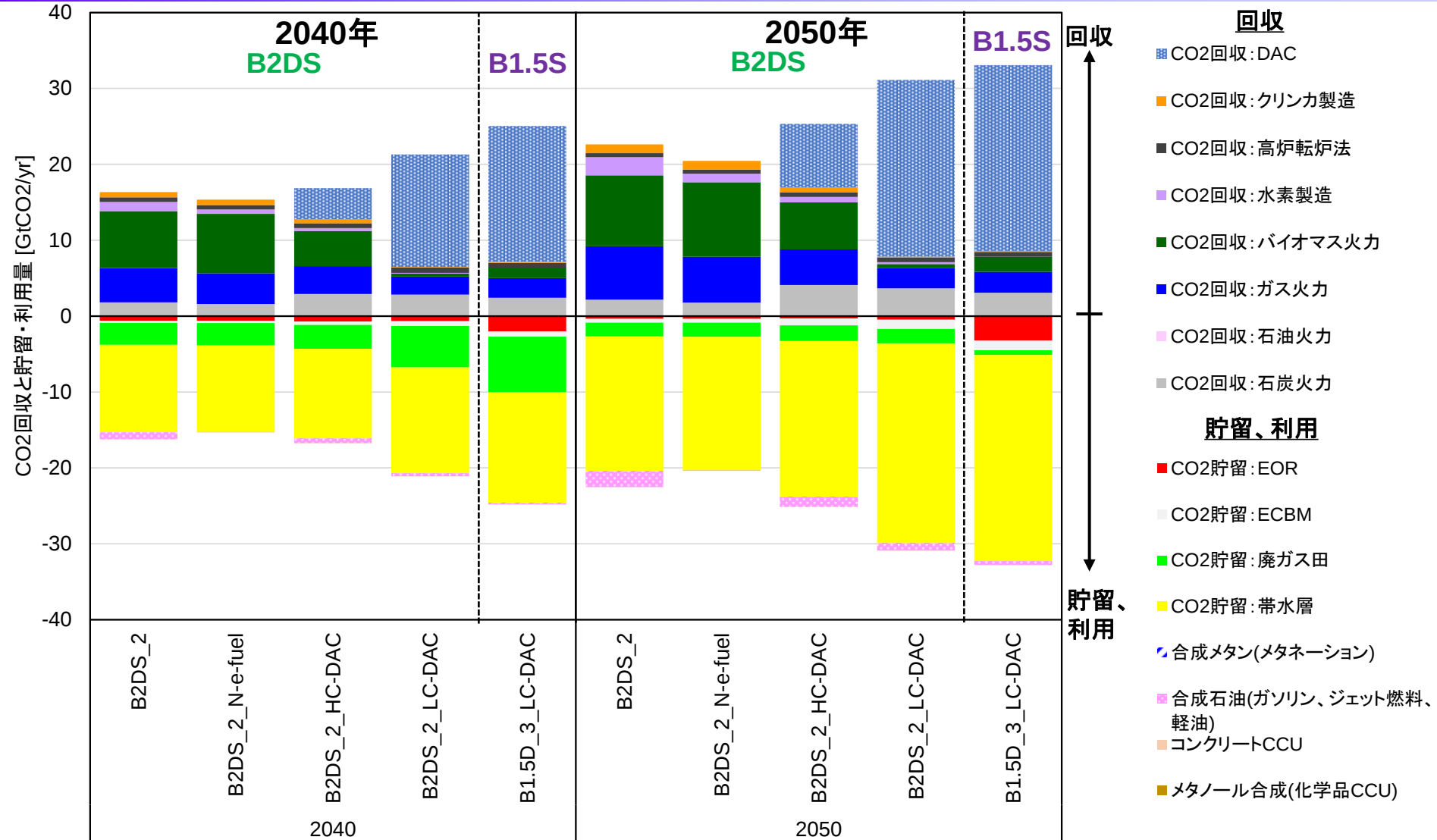
- ✓ 2℃シナリオ下では、コンクリートのCCUは経済合理的となりやすい。
- ✓ ただし、DAC有のシナリオでは、CO2限界削減費用が低下するため、生コンクリートCO2微量吸収・効果促進のオプション以外のCCUオプションについては、シナリオによっては、経済合理的とならなくなる場合も見られる(そのシナリオにおけるCO2限界削減費用よりも高価な対策)。

世界の運輸部門の最終エネルギー消費量 (CCU, DAC感度分析)



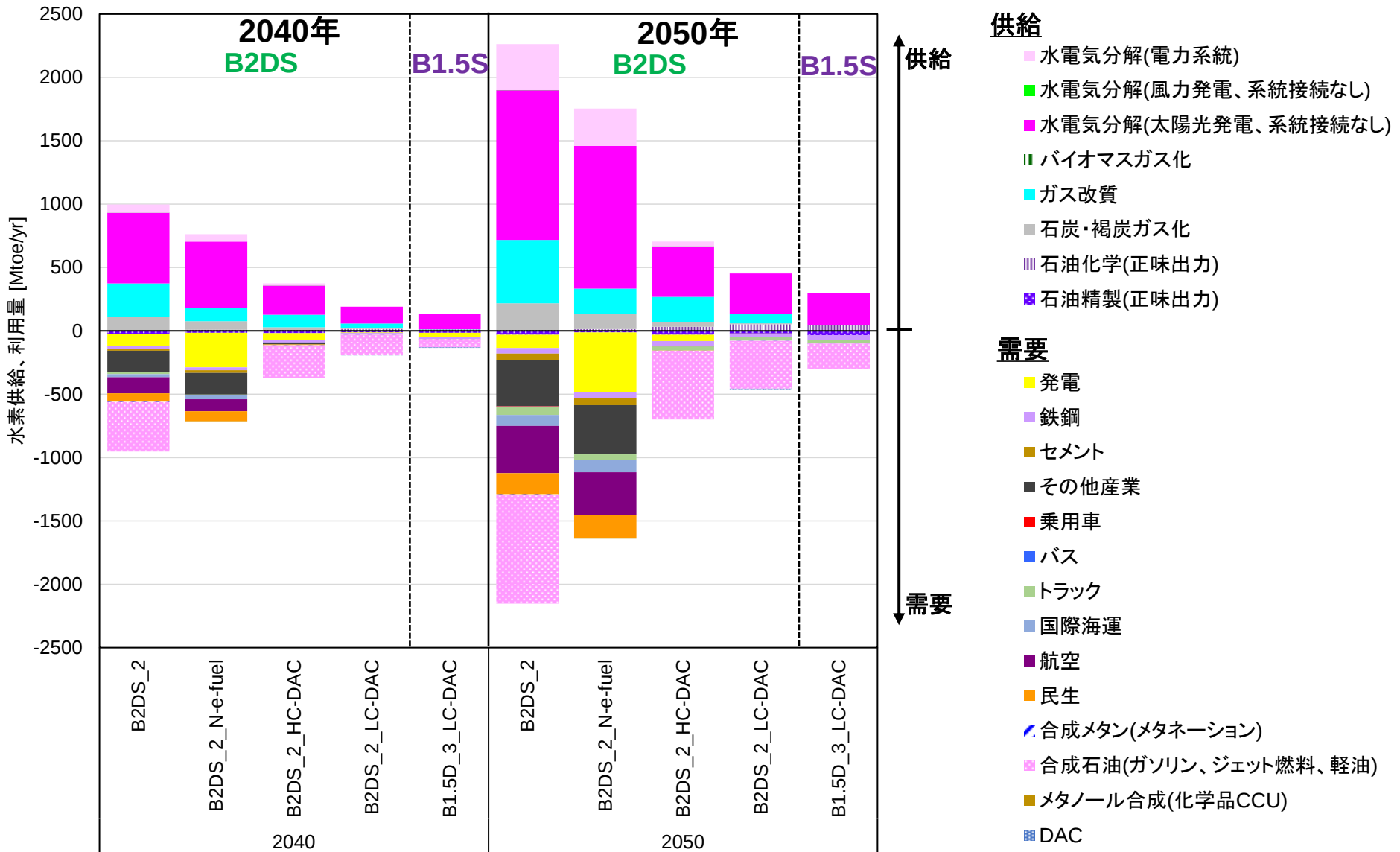
- ✓ DACS利用可のシナリオでは、利用不可のシナリオと比較すると、水素および電力の利用が減少し、石油系燃料など、液体燃料の利用が増加する。また、EVとFCVが高いシナリオでもその傾向が見られるが、CO₂限界削減費用が高いため、DACCS利用可のシナリオほど大きな変化ではない。
- ✓ 合成燃料利用不可のシナリオでは、利用可のシナリオと比較すると、液体燃料の利用が減少。
- ✓ シェアリングシナリオ(シナリオ3)では、運輸部門のエネルギー消費量が抑制される傾向が見られる。

世界のCO₂回収、利用、貯留バランス (CCU, DAC感度分析)



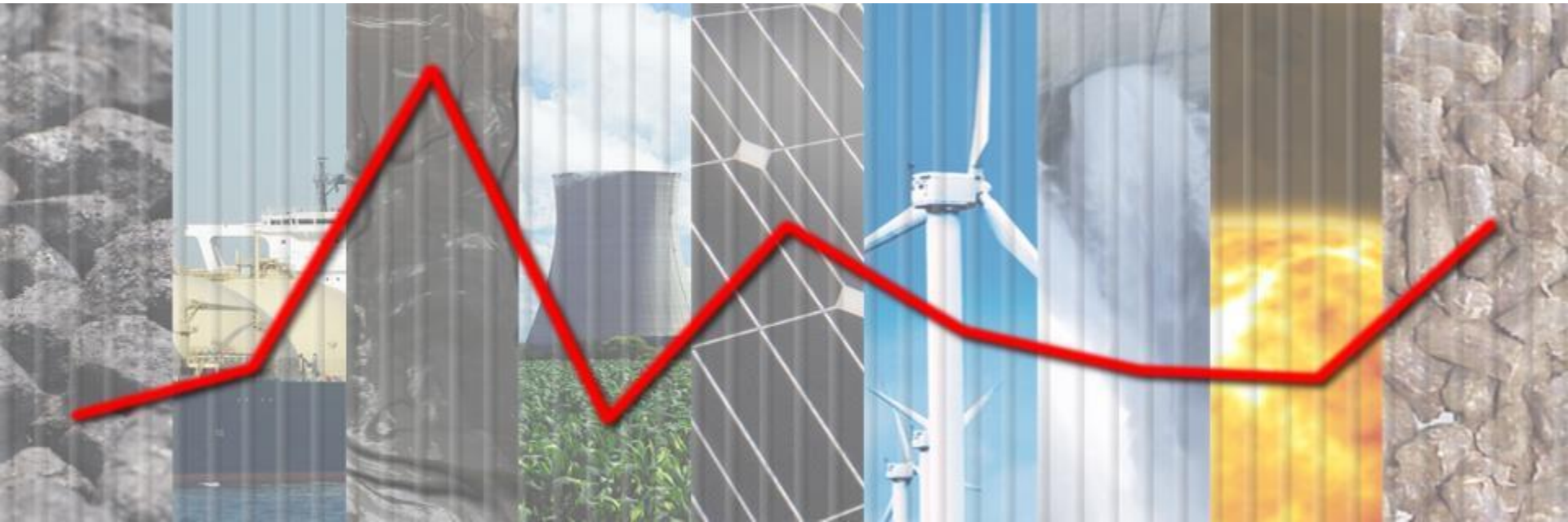
- ✓ DACS利用可のシナリオでは、利用不可のシナリオと比較すると、特にCCS付バイオマス発電が減少、CCS付石炭火力が増大。
- ✓ CCUとしての利用も見られるが、回収CO₂の大部分は貯留に。

世界の水素需給バランス(CCU, DAC感度分析)



✓ DACS利用可のシナリオでは、利用不可のシナリオと比較すると、水素需要が減少すると共に、合成燃料での利用が増加

5. 国内の正味ゼロ排出のイメージ

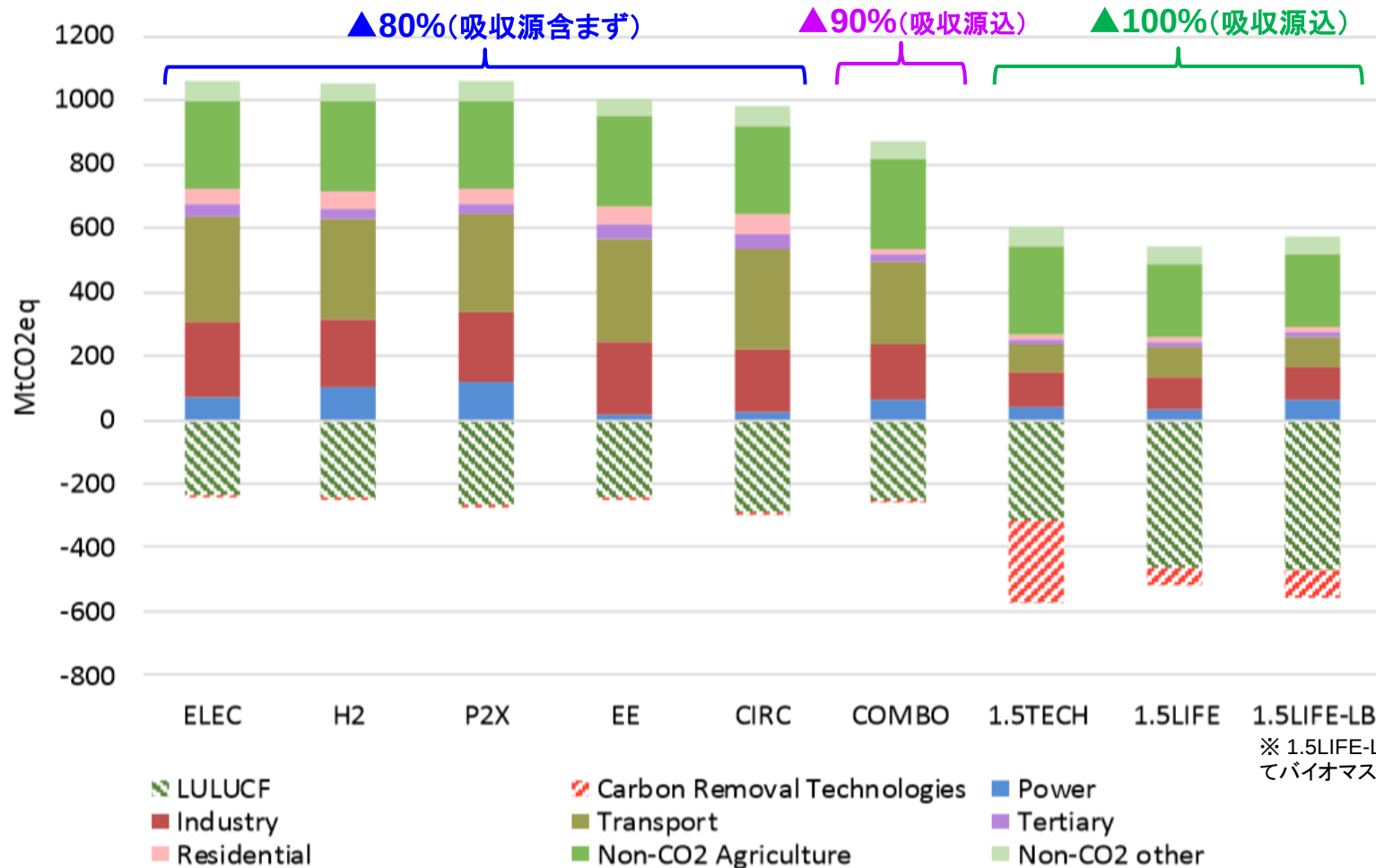


【参考】EUの長期戦略の想定シナリオ

長期戦略におけるオプション

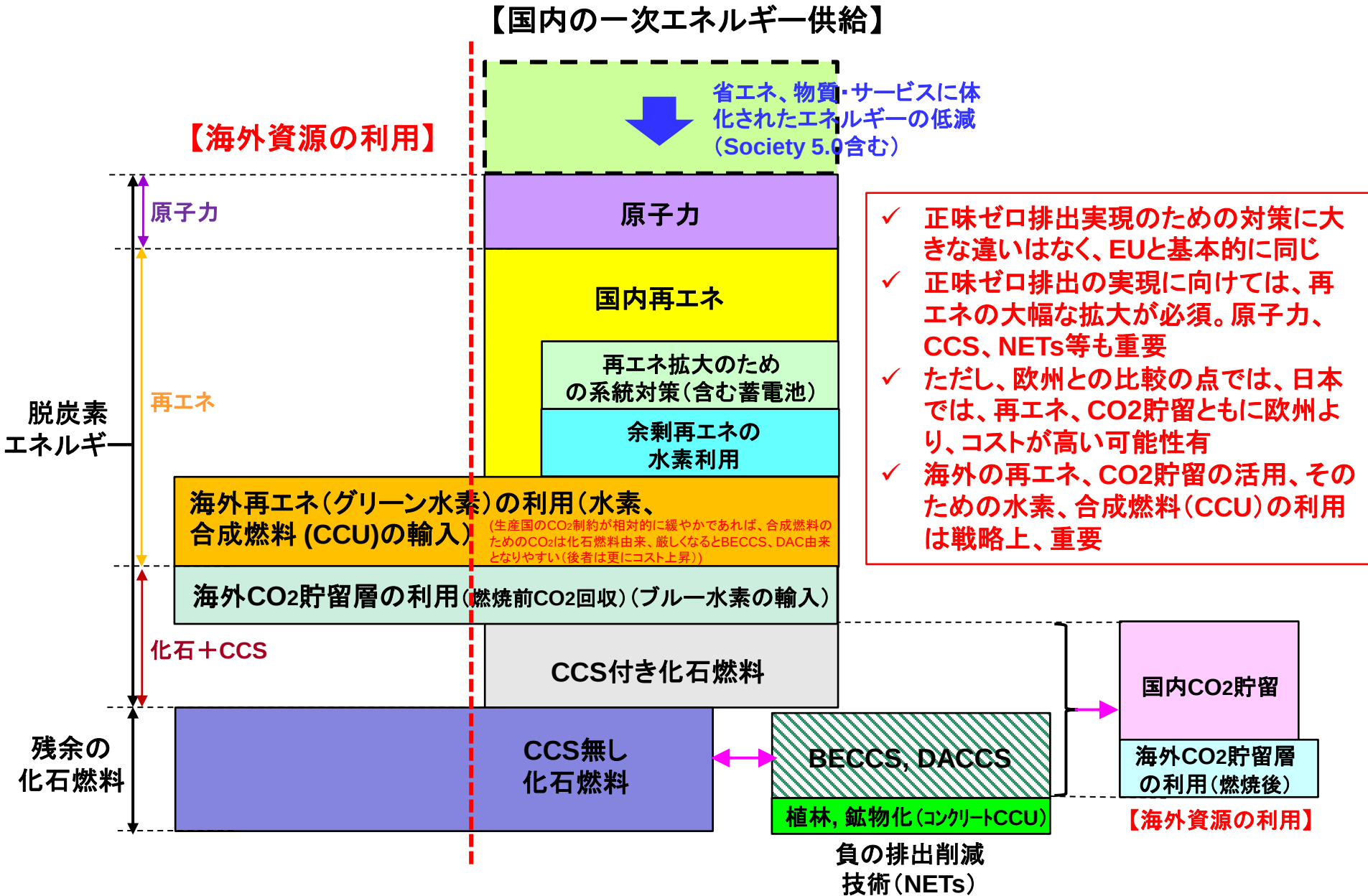
	電化 (ELEC)	水素 (H2)	Power-to-X (P2X)	省エネルギー (EE)	資源循環 (CIRC)	組み合わせ (COMBO)	1.5℃ 技術 (1.5TECH)	1.5℃ 行動変容 (1.5LIFE)
主要な要素	全てのセクターで電化を重点化	産業、輸送、建物での水素利用	産業、輸送、建物での合成燃料利用	全セクターでのエネルギー効率向上	資源、材料効率の向上	2℃シナリオから費用対効果の高い方法で組み合わせ	COMBOからBECCS、CCSの更なる利用	COMBOとCIRCからさらに行動変容
温室効果ガス2050年目標	-80%GHG（吸収源を除く） （“2℃を大きく下回る”野心）					-90%GHG（吸収源を含む）	-100%GHG（吸収源を含む） （“1.5℃”野心）	
主要仮説	・2030年以降の省エネの向上 ・持続可能、高度なバイオ燃料の展開 ・適度な資源循環対策 ・デジタル化					・インフラ配備のための市場調整 ・2℃シナリオ下ではBECCSは2050年以降のみに存在 ・低炭素技術について著しい learning by doing ・輸送システム効率の著しい改善		
電力部門	2050年までに電力はほぼ脱炭素化。システム最適化による再エネシステム施設の強力な浸透力（デマンドサイドレスポンス、貯蔵、相互接続、プロシューマーの役割）。原子力は依然として電力部門で役割を果たし、CCS配備は限界に直面。							
産業	プロセスの電化	対象アプリケーションでの水素利用	対象アプリケーションでの合成ガス利用	省エネによるエネルギー需要の減少	高いリサイクル率、代替材料、循環対策	対象アプリケーションでの“2℃を大きく下回る”シナリオから費用効果のあるオプションの組み合わせ	COMBOの強化	CIRC+COMBOの強化
建物	ヒートポンプの配備増加	暖房用水素の配備	暖房用合成ガスの配備	リノベーション率の向上	持続可能な建物			CIRC+COMBOの強化
輸送部門	全輸送方法用の電化の迅速化	HDVs（LDVs）用水素配備	全ての方法のための再生燃料配備	モーダルシフトの増加	サービスとしての可動性			CIRC+COMBOの強化 航空旅行の代替
他の要素		配ガス網における水素	配ガス網における合成ガス					自然吸収源の限定的向上
	80%減（2℃シナリオ） 異なる技術オプション					90%減 組合せ	ネットゼロ（1.5℃シナリオ） BECCS/CCS、行動変容	

【参考】EUの部門別排出量（2050年）

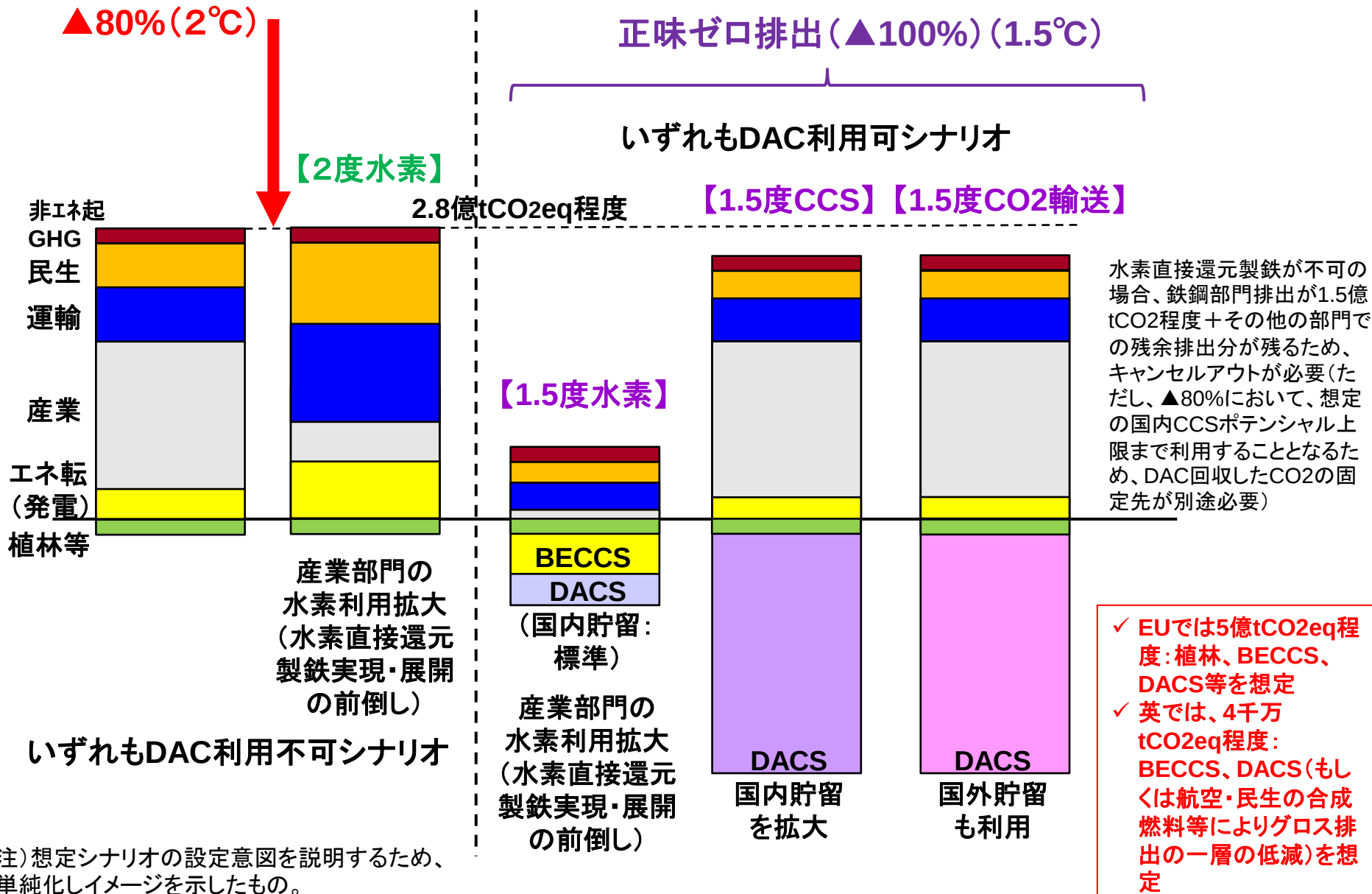


- ✓ EUは、日本よりも、農業部門における非CO₂ GHG排出量（正排出）が多い傾向。また、土地利用におけるCO₂固定量（負排出）も多い傾向（正味ゼロ排出シナリオでは3～5億tCO₂/yrにも）。
- ✓ 土地利用CO₂固定量は、過去の植林に伴うCO₂固定効果の継続が2050年で2.6億tCO₂/yr程度見込まれており、▲90%および正味ゼロ排出シナリオ（▲100%）では、これを含めての評価となっていることに留意が必要。

日本の正味ゼロ排出のイメージ：一次エネルギー



日本の正味ゼロ排出のイメージ：部門別排出量



6. まとめ

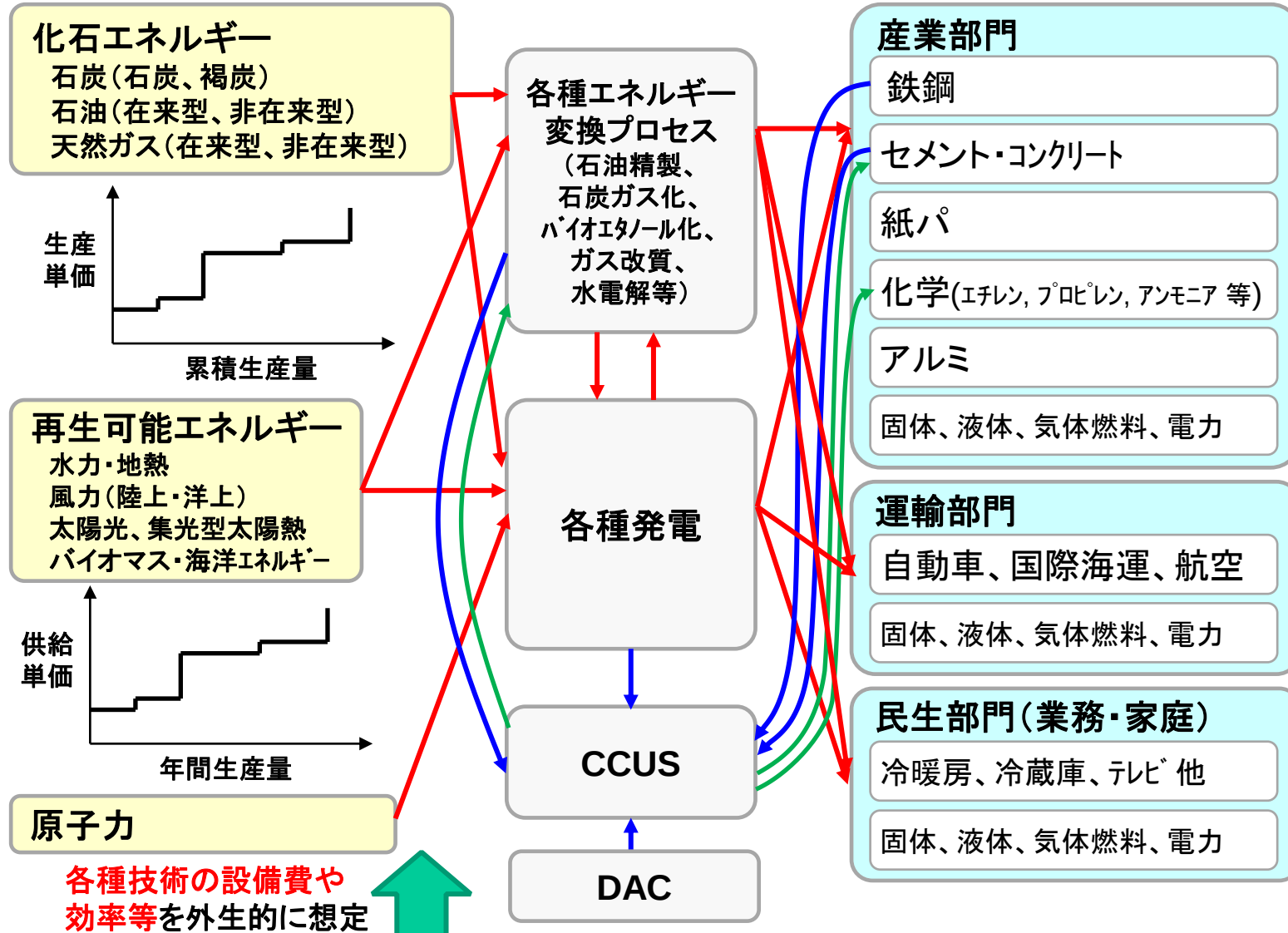


- ◆ パリ協定では、2°C目標、1.5°C目標や21世紀後半に実質ゼロ排出目標等と言及。また、早期のネットゼロエミッション実現への要請が強まっている。菅首相も2050年実質ゼロ宣言。
- ◆ 脱炭素化（ゼロ排出）のためには、原則的には、一次エネルギーは、再エネ、原子力、化石燃料＋CCSのみとすることが求められる。電力化率の向上と、低炭素、脱炭素電源化は、対策の重要な方向性
- ◆ 再エネの拡大が重要となる中、蓄電池、水素は重要なオプション。また、更に再エネの利用先を拡大するためにも、水素とCO₂からの合成燃料（CCU）も重要なオプションとなり得る。一方、いずれの技術も、コストの大幅な低減が不可欠。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。
- ◆ なお、CCUで、CCSを代替することは困難であり、CO₂貯留は重要（CCUの主な役割は再エネ由来のグリーン水素の利用拡大）。
- ◆ 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）。
- ◆ ネットゼロエミッションにおいては、化石燃料は一部利用しながら、BECCS, DACCS等で排出をキャンセルアウトする方が、費用対効果が高い対策となる可能性が高い。
- ◆ 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シェアリングエコノミー等の社会イノベーションも極めて重要。
- ◆ 2050年正味ゼロ排出は、技術的には実現可能と見られるが、漸進的な技術進展を見込んでも相当高い排出削減費用が必要と見られる。温暖化対策技術の様々な要素技術（材料技術、生産技術、シミュレーション技術など）開発を含めて多くの課題が残っている。

付録

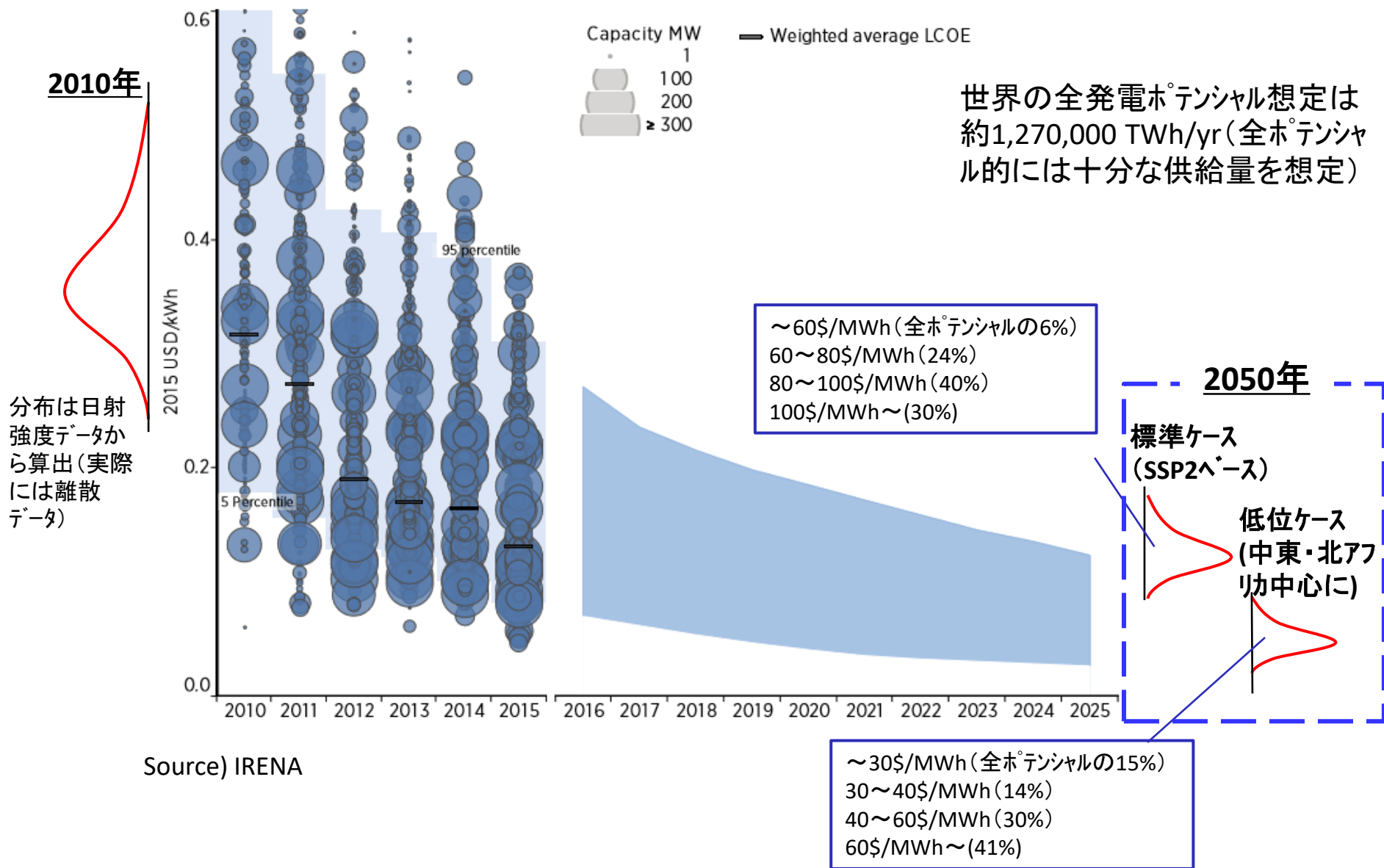
DNE21+のエネルギーフロー概略

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需要等)。

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

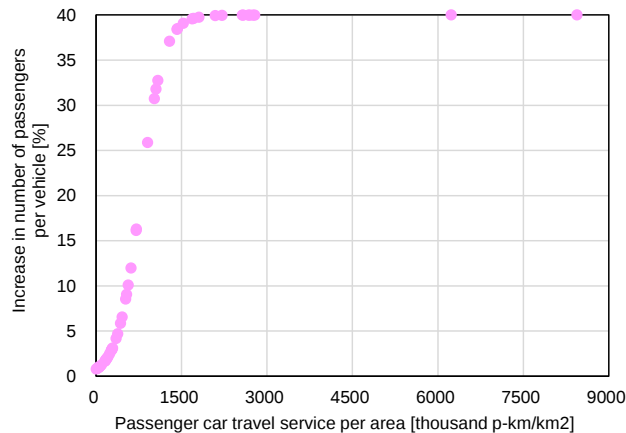


※ なお、DNE21+モデルでは、VREのシェアが増すに従い、系統安定化のための追加費用が別途必要と想定している。

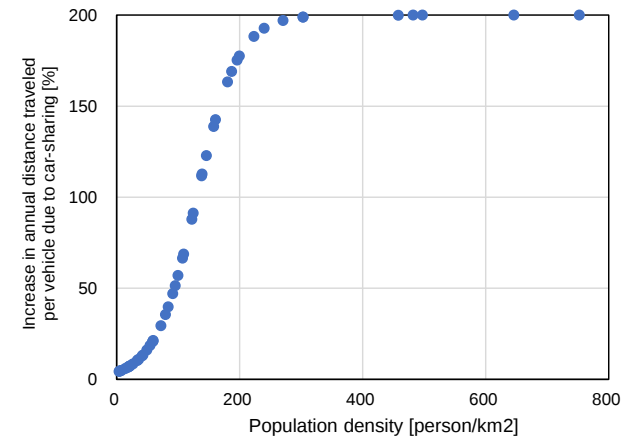
完全自動運転車と誘発されるシェアモビリティの想定

- ◆ 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

【参考】CCUの特徴・役割

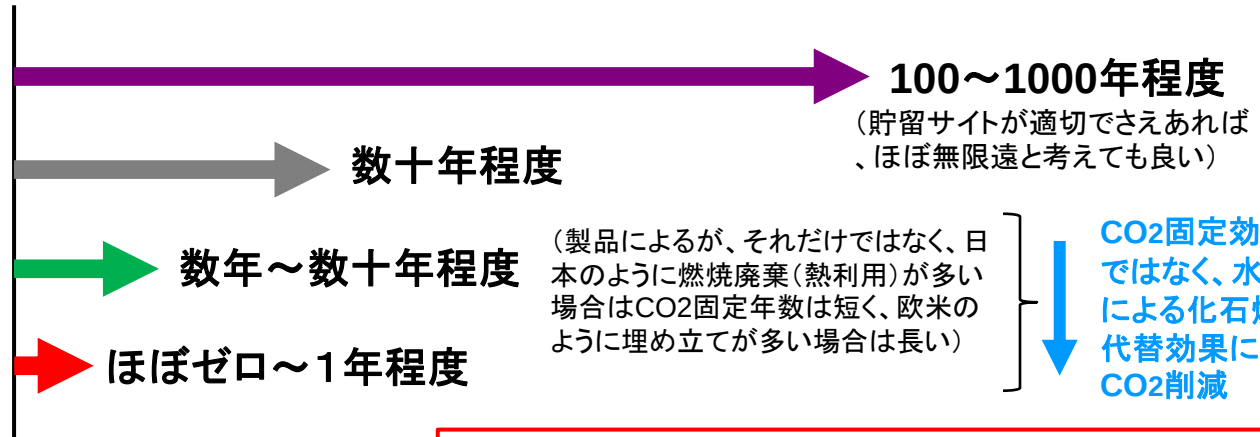
【CO₂固定効果(固定年数)】

■ CO₂貯留

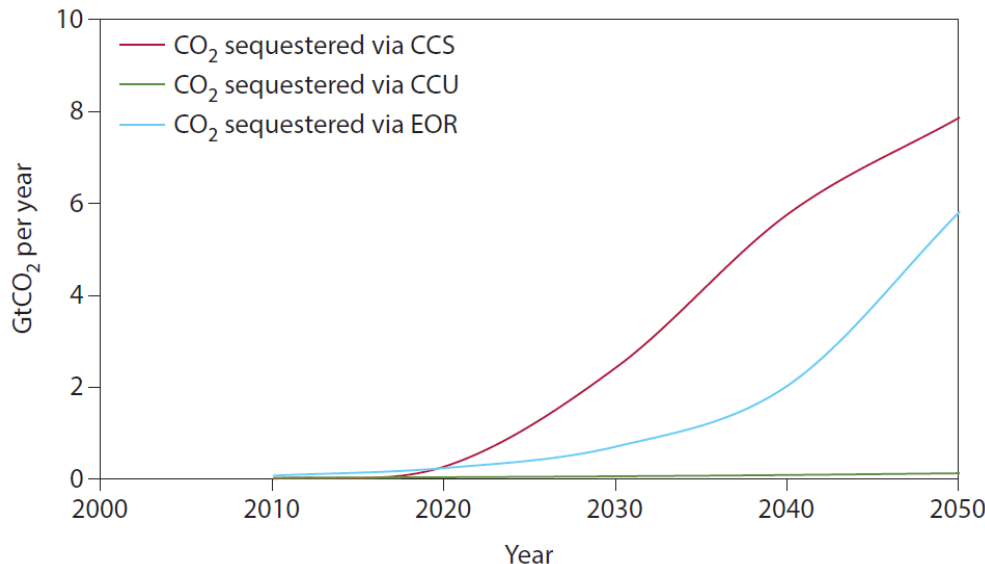
■ コンクリート(鉱物化)

■ 化学品

■ 燃料利用



CO₂固定効果
ではなく、水素
による化石燃料
代替効果による
CO₂削減



出典) N. Mac Dowell, Nature Climate Change, 2017

- ✓ CCUの場合、燃料利用ではCO₂固定効果はほぼゼロ、化学品でも貯留が300年固定、化学品のライフタイムが3年と仮にすると、化学品でのCCUは、CCSに比べ、CO₂固定効果は1/100となる。コンクリートでの鉱物化を除けば、多くのCCUは、CO₂固定効果はあまり見込めない。
- ✓ 例えば、N. Mac Dowell et al., Nature Climate Change (2017)論文でもその点が指摘されている(左図)。
- ✓ 特に、燃料利用等では、カーボンフリー水素利用の利便性を増すために、CCUの役割がある。よって、CO₂削減効果という点では水素利用の拡大という点での評価が必要(A. Kätelhön et al., PNAS (2019)等で指摘有)で、エネルギーシステム全体での整合的な分析が重要

大気CO₂直接回収(DAC)のモデル化・シナリオ

- ✓ DACについて、既往文献の広範なレビューを含め、包括的に評価が行われている査読論文 M. Fasihi et al., Journal of Cleaner Production (2019)に基づき、モデル化
- ✓ 論文では、典型的なDACシステムとして、2種類のモデルを提示しているため、2種類(高温水性DAC(投入エネルギーは電気のみ)、低温固体吸収DAC(投入エネルギーは電気と熱、熱はガスもしくは水素にて供給))を想定
- ✓ HT DAC, LT DACのそれぞれについて、高位コストシナリオと低位コストシナリオを想定して分析。なお、論文 M. Fasihi et al.,では、本分析での「低位コスト」シナリオをConservativeシナリオとし、更にコスト低減するシナリオを想定している。

想定したDACシステムのエネルギー消費量

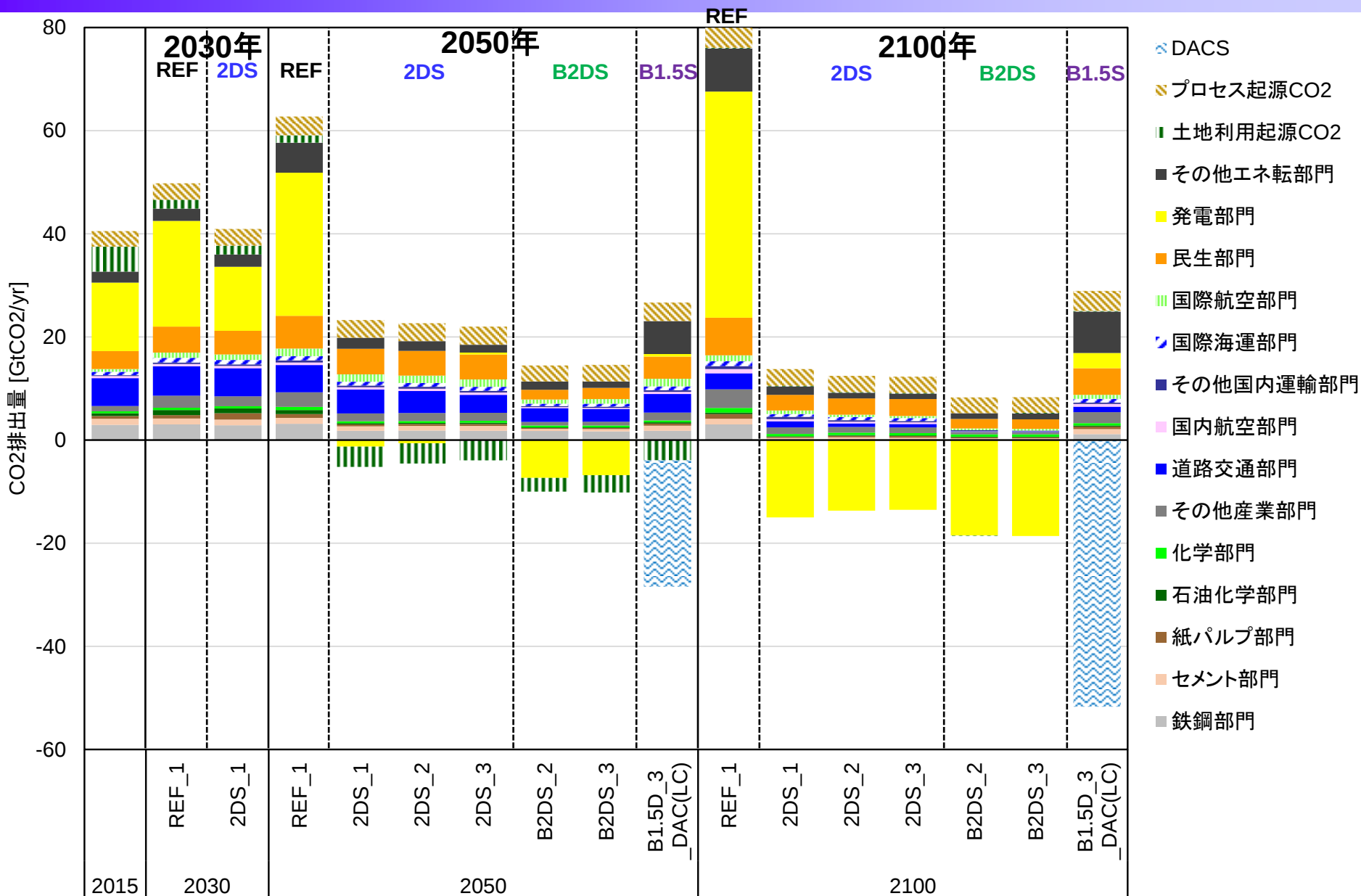
		ltCO ₂	2020	2050
高温(電化)システム(HT DAC)	高位コスト(標準)	電力 (kWh)	1535	(2020年と同じ)
	低位コスト	電力 (kWh)	—	1316
低温システム(LT DAC)	高位コスト(標準)	熱 (GJ)	6.3 (=1750 kWh)	(2020年と同じ)
		電力 (kWh)	250	
	低位コスト	熱 (GJ)	—	4.0
		電力 (kWh)	—	182

想定したDACシステムの設備費

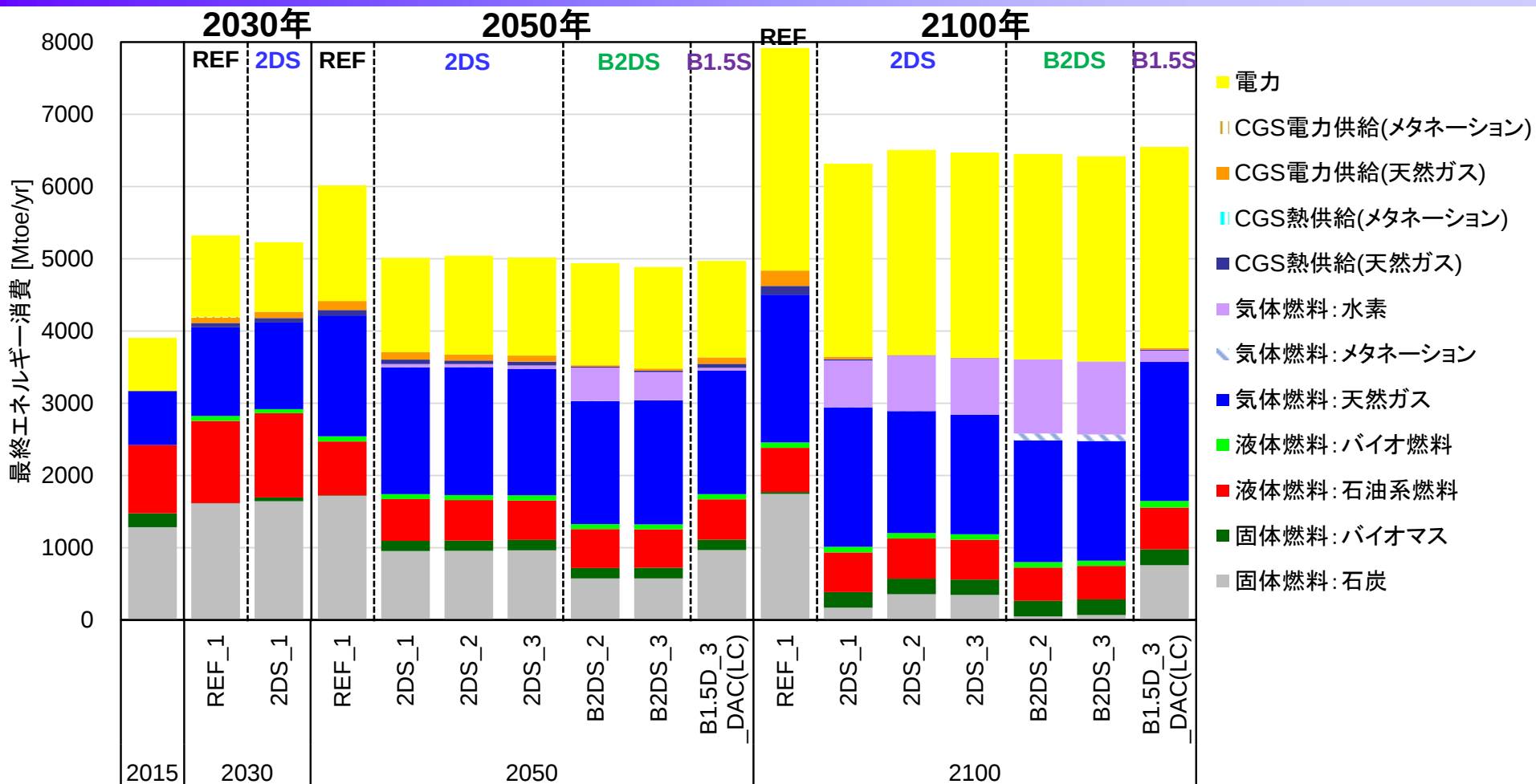
		2020	2050
高温(電化)システム(HT DAC)	高位コスト(標準)	815	(2020年と同じ)
	低位コスト	—	222
低温システム(LT DAC)	高位コスト(標準)	730	(2020年と同じ)
	低位コスト	—	199

単位: Euro₂₀₁₆/(tCO₂/yr)

世界の部門別CO₂排出量(長期展望: ~2100年)

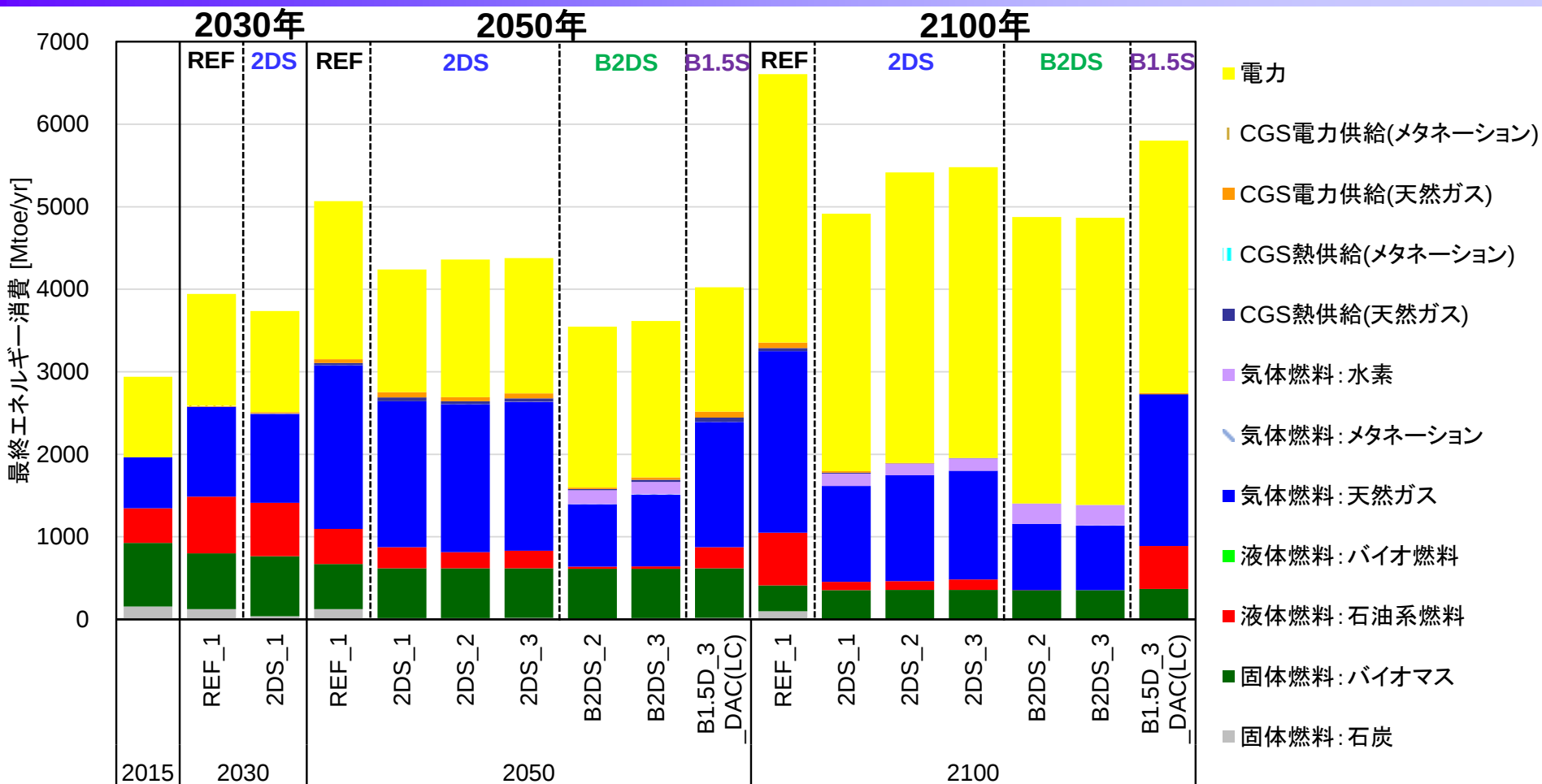


世界の産業部門の最終エネルギー消費量(長期展望: ~2100年)



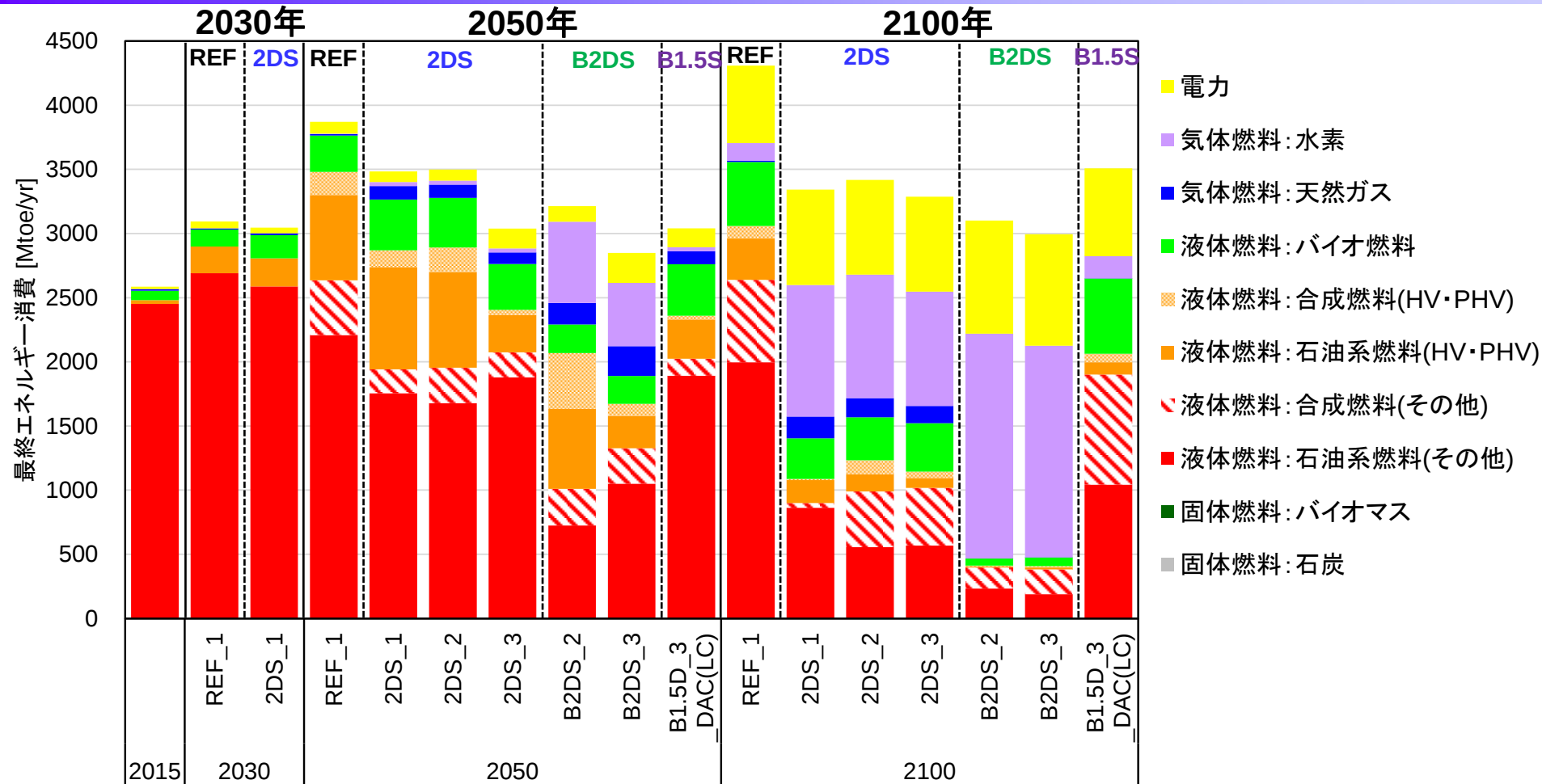
- ✓ 2°C、1.5°Cシナリオでは、電力化率の向上が見られる。
- ✓ ガスについても、コジェネの拡大を含め、拡大が見られる。
- ✓ 2050年頃からは、B2DSを中心に、水素の利用も見られる。
- ✓ 1.5°Cシナリオでは、DACを想定している違いにより、B2DS(DAC無し)に比べ、水素の比率が低下する傾向

世界の民生部門の最終エネルギー消費量(長期展望: ~2100年)



- ✓ 2°C、1.5°Cシナリオでは、電化の促進が見られる。
- ✓ 2DSでは、コジェネの拡大を含め、ガスの拡大も見られる(特に2050年に向けて)。
- ✓ 2050年頃からは、B2DSを中心に、水素の利用も見られる。
- ✓ 2°Cシナリオでは、石油需要は低下。しかし、1.5°Cシナリオでは、DACの想定により、石油需要は相応に残り得る。

世界の運輸部門の最終エネルギー消費量(長期展望: ~2100年)



- ✓ 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
- ✓ 2050年頃を中心に合成燃料の利用も見られる。
- ✓ 2°Cや1.5°Cシナリオ(1.5°CはDAC有)であっても、2050年頃は、石油の利用も結構残る。