

財務省ランチミーティング  
～2050年カーボンニュートラルに向けた今後の戦略～  
2021年3月18日

---

# 2050年カーボンニュートラルに向けた エネルギー戦略

---

(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

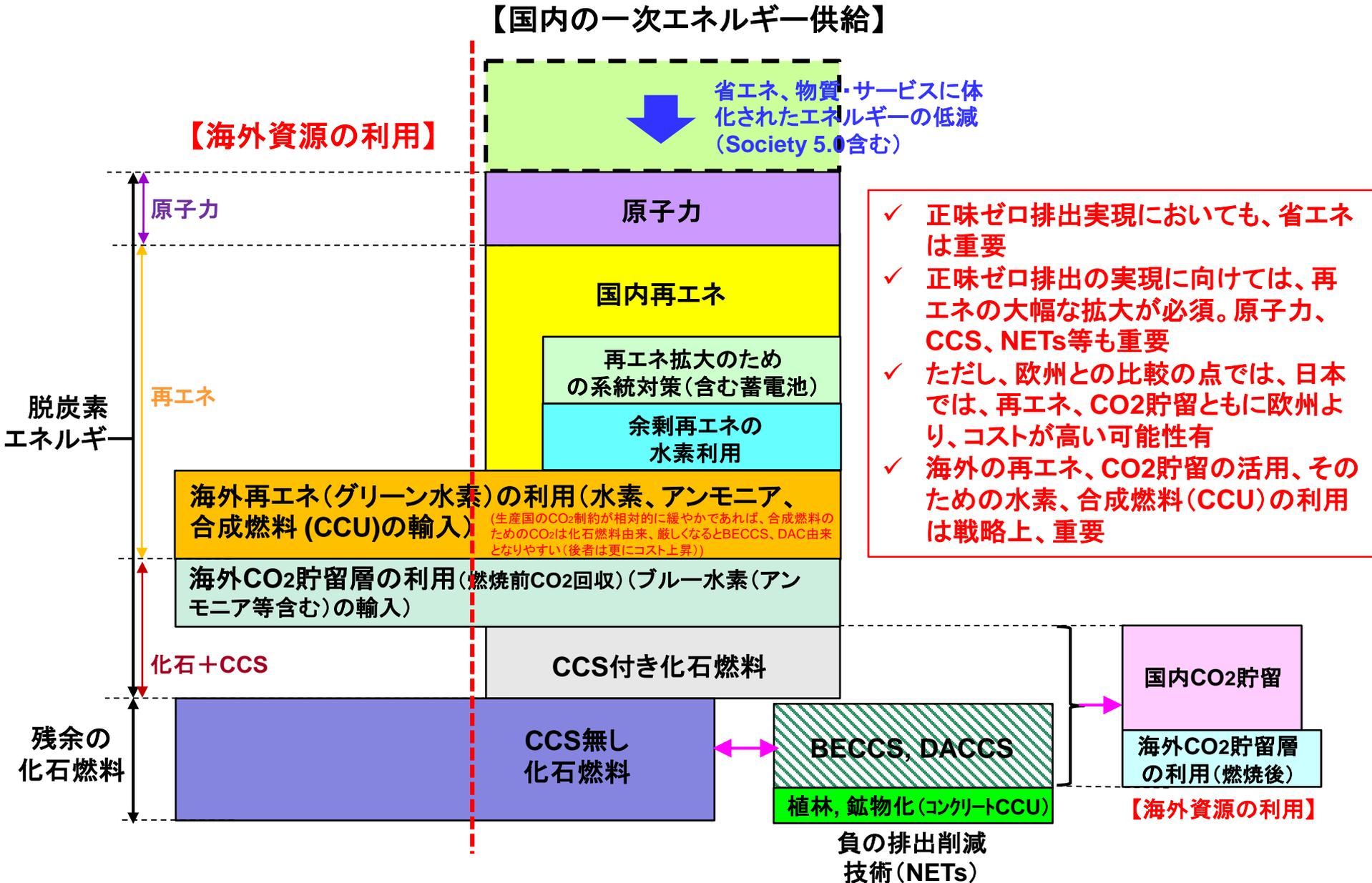


1. **カーボンニュートラルに向けた展望**
2. **再生可能エネルギー、蓄電池、水素の役割と課題**
3. **CCUS、DACの役割と課題**
4. **省エネ:DXによる低エネルギー需要社会の実現の可能性**
5. **カーボンニュートラルに向けた定量的シナリオ分析**
6. **日本国内のカーボンニュートラルのイメージ**
7. **まとめ**

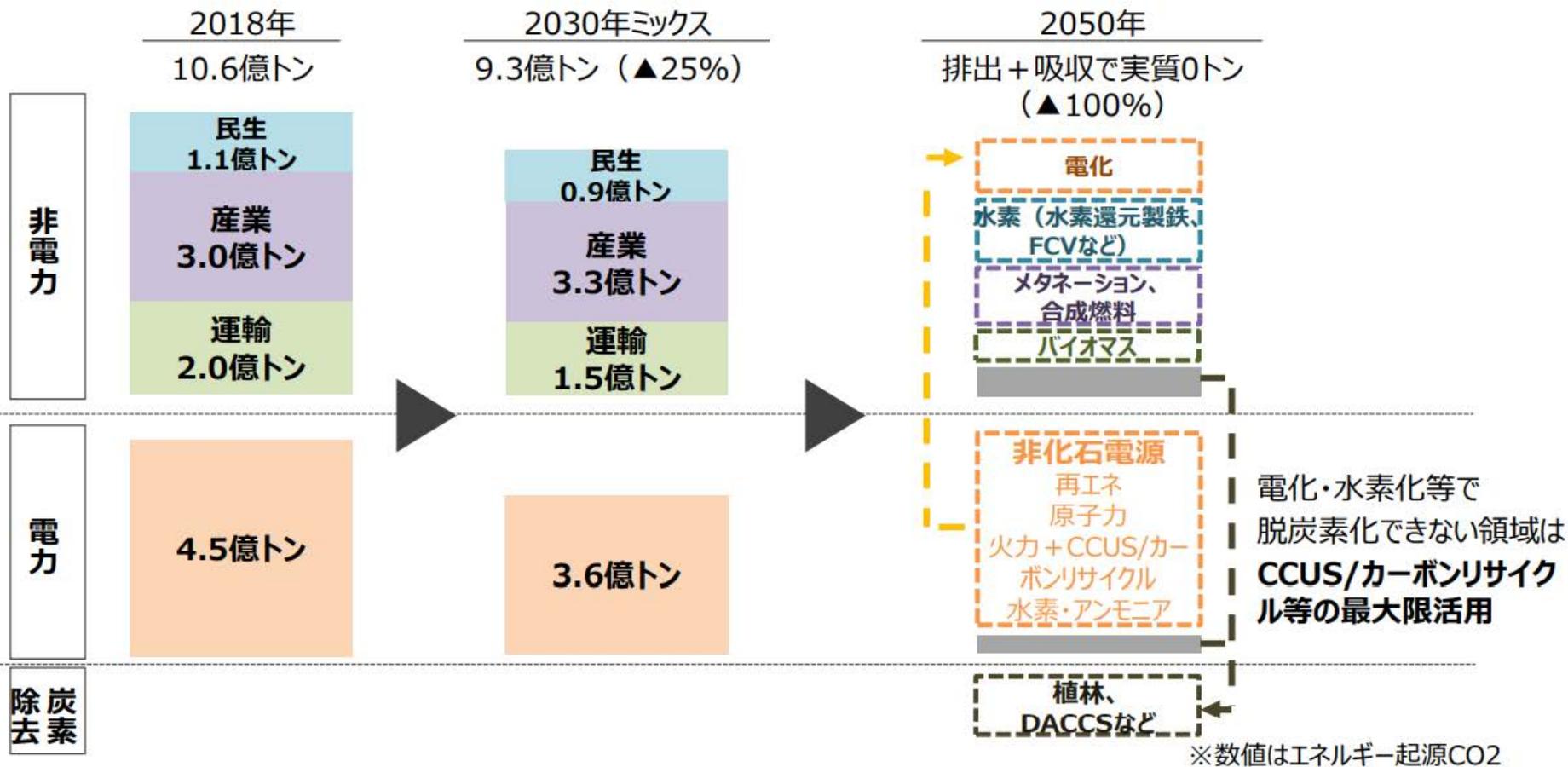
# 1. カーボンニュートラルに向けた展望



# 日本の正味ゼロ排出のイメージ (1/2)



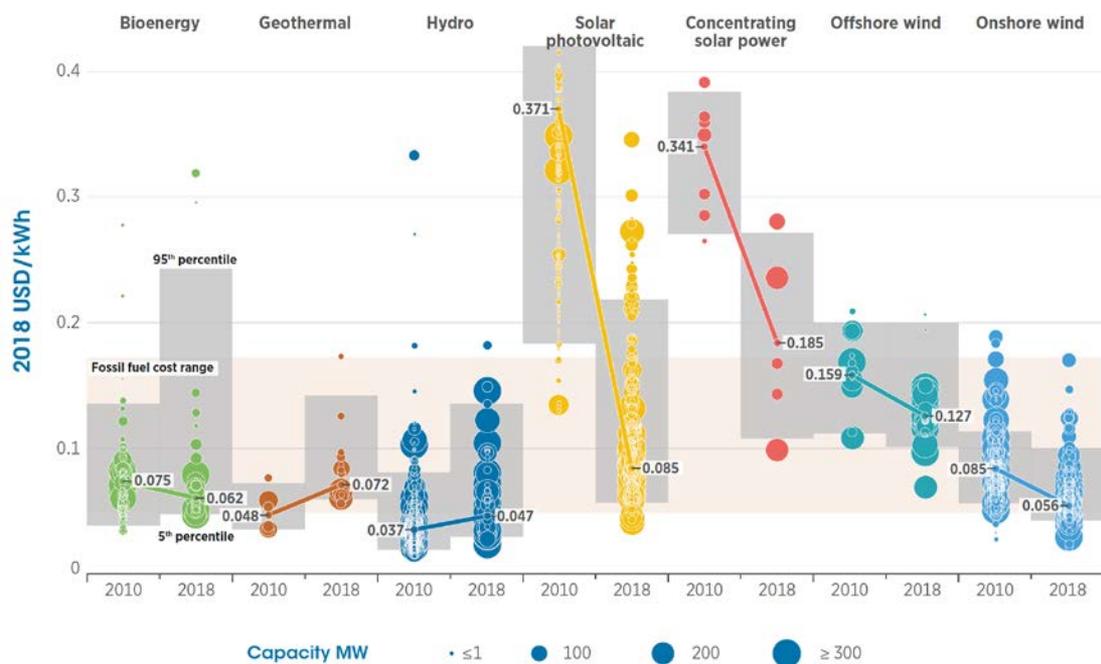
# 日本の正味ゼロ排出のイメージ (2/2)



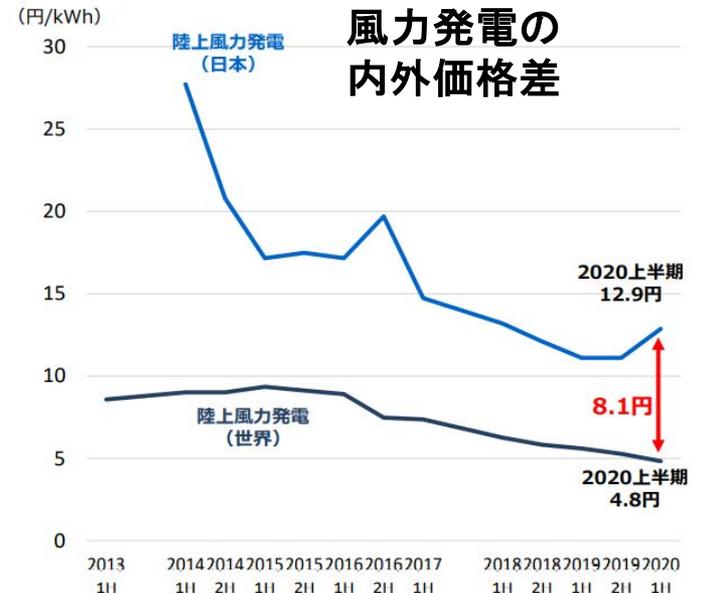
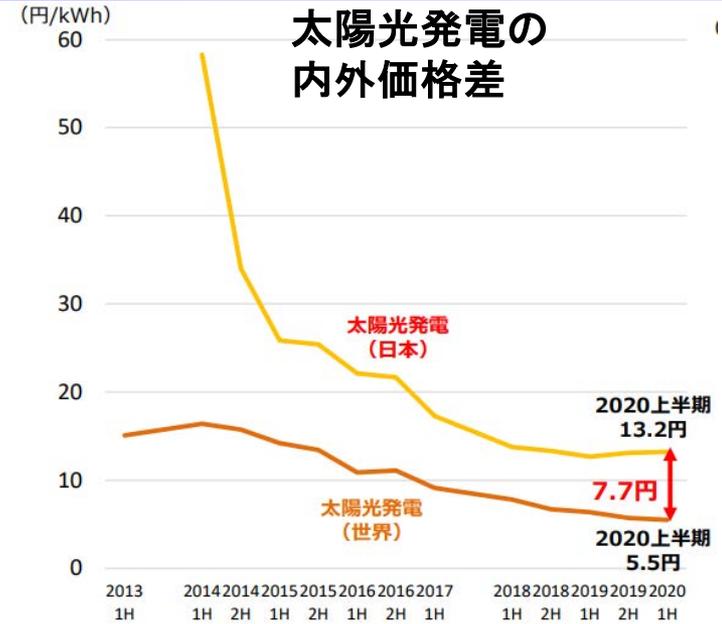
## 2. 再生可能エネルギー、蓄電池、 水素の役割と課題



# 世界の再生可能エネルギーの動向

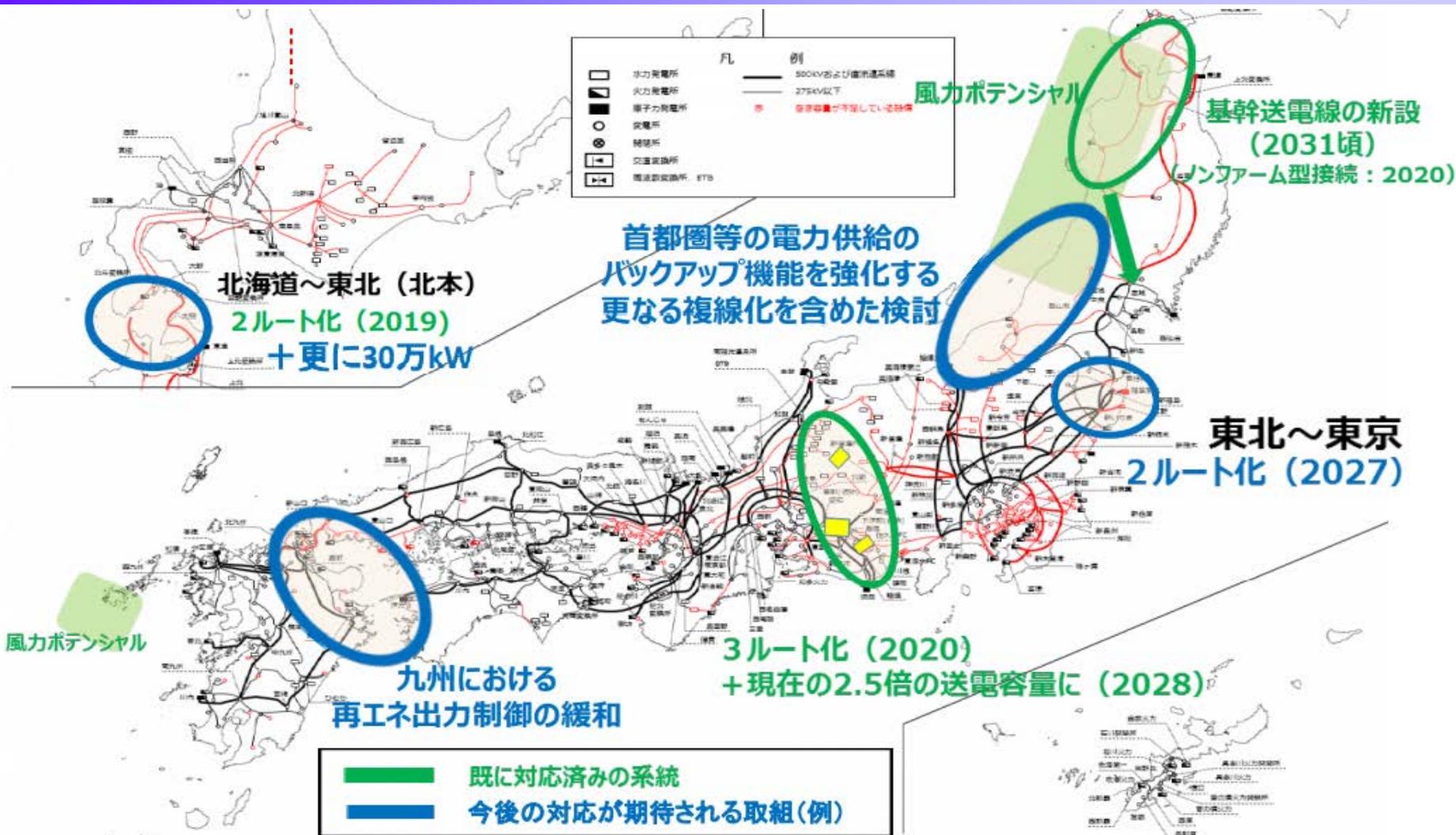


出典) IRENA



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、国間によって大きなコストの差異があり、日本の価格は依然として高い。

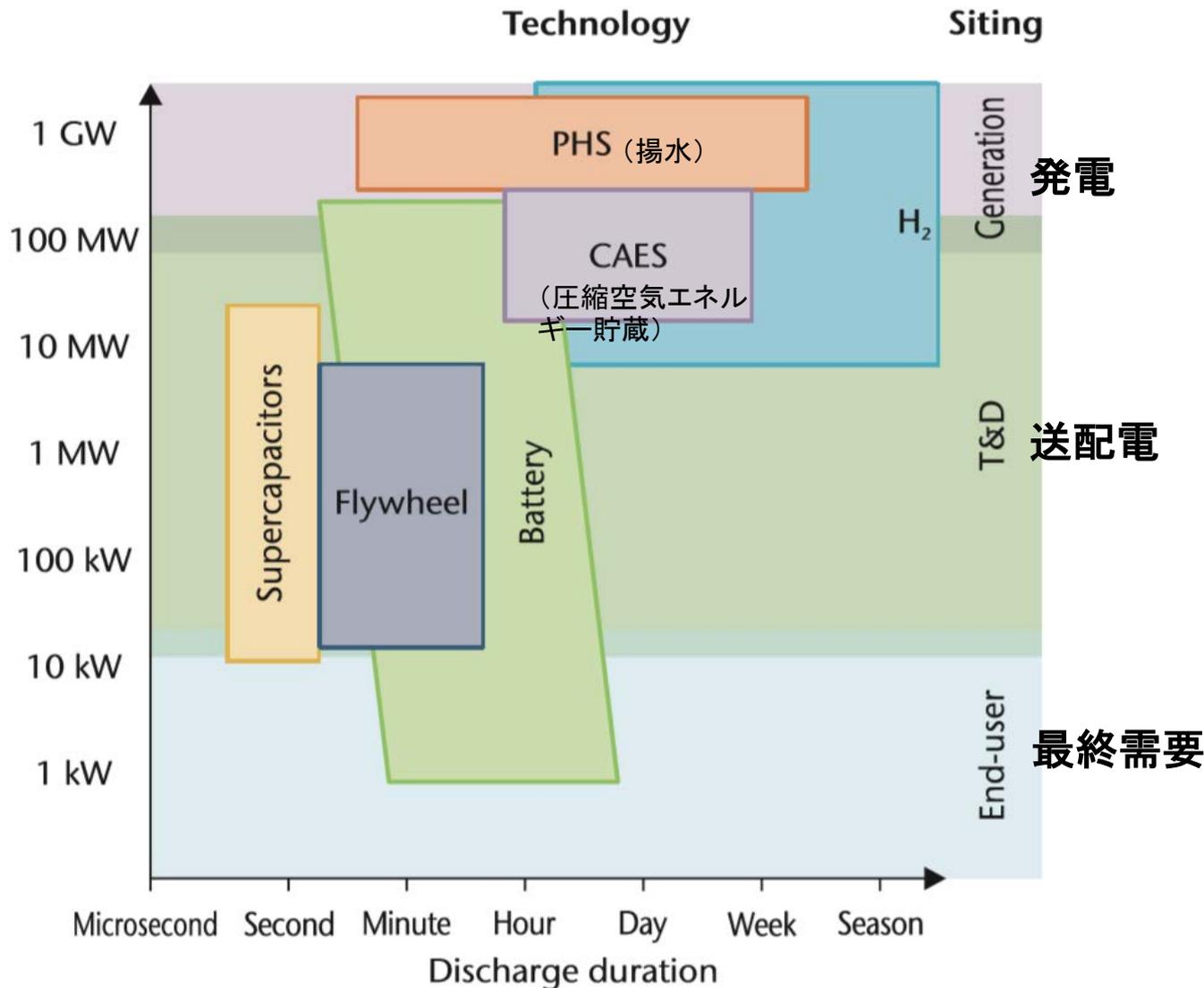
# 再エネの拡大に向けて:プッシュ型の電力系統形成



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

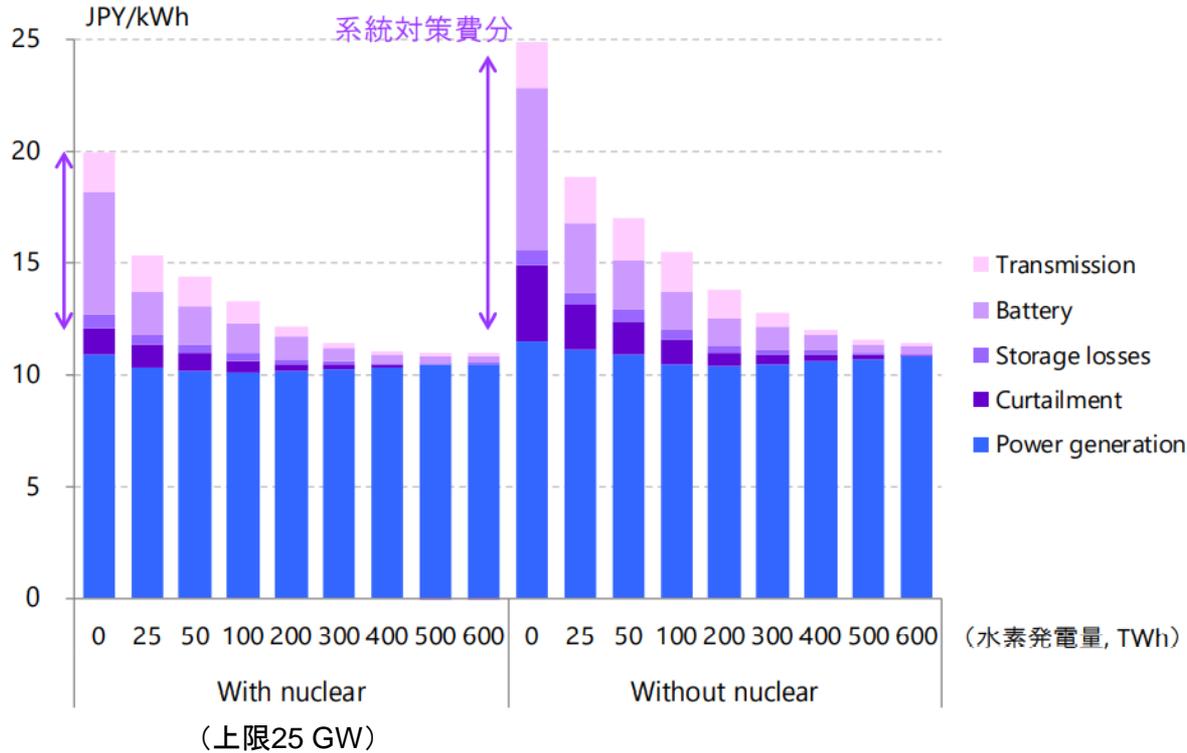


出典: IEA Technology Roadmap-Hydrogen and Fuel Cell, 2015

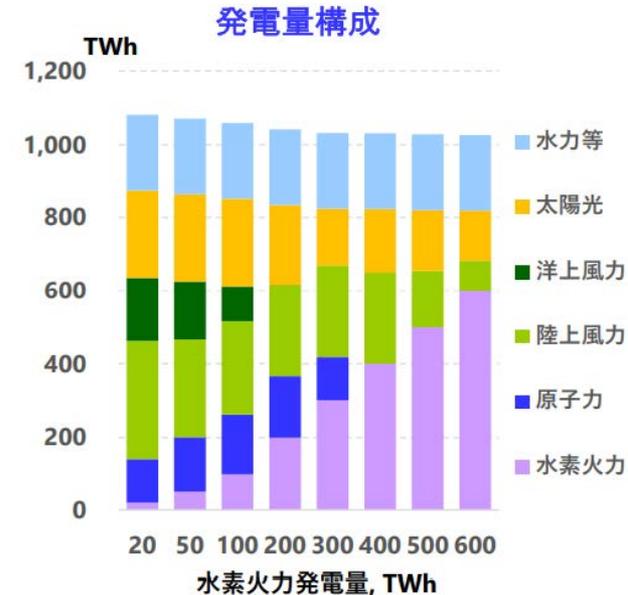
技術、エネルギー種によって、エネルギー貯蔵における得意領域は異なる。

# 日本国内の系統対策費用の推計例(エネ研)

ゼロ・エミッション火力(ここでは水素火力と想定)の発電量が小さくなると、蓄電システムや送電線増強、出力制御等のコストが追加的に必要となり、総システムコストが急速に上昇する。



出典) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会資料、2020



- ✓ 日本国内を地域分割し、時間ステップも細かく評価可能なモデルを用いた推計。電力需給の同時同量制約を、電力系統制約も踏まえながら、より精緻に評価可能。
- ✓ 一定程度の調整電源がなければ、系統対策費が急激に上昇する可能性有

# 水素・アンモニアの技術開発、展望等

- 液化水素による国際輸送実証を実施中（実施主体：技術研究組合CO2フリー水素サプライチェーン推進機構<sup>ハイストラ</sup>“HySTRA”）。
- 2019年12月11日に液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」の命名・進水式を開催。
- 褐炭ガス化炉（豪州）、液化積荷基地（豪州）、荷役基地（神戸）が竣工し、実証運転を開始している。「すいそ ふろんていあ」は、今後、**世界初の液化水素の大規模海上輸送による褐炭水素を日本に輸送**する予定。

## 液化水素運搬船 命名・進水式の様子



2019年12月11日 川崎重工 神戸工場  
・一般参加者を含め約4000人規模の式典

## その他の施設の進捗

① 褐炭ガス化  
施設の完成  
2020.10



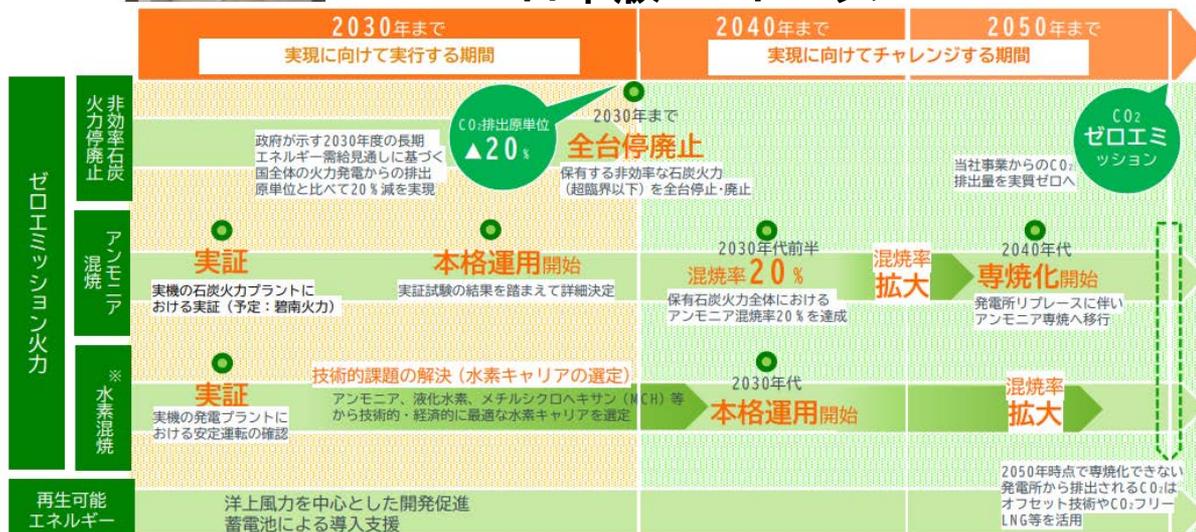
② 豪州液化基地  
の完成  
2020.6



③ 神戸荷役基地  
の完成  
2020.6



## JERAゼロエミッション2050 日本版ロードマップ



出典)JERA

本ロードマップは、政策等の前提条件を踏まえて段階的に詳細化していきます。前提が大幅に変更される場合はロードマップの見直しを行います。 ※ CO<sub>2</sub>フリーLNGの利用も考慮しております。

出典)政府資料

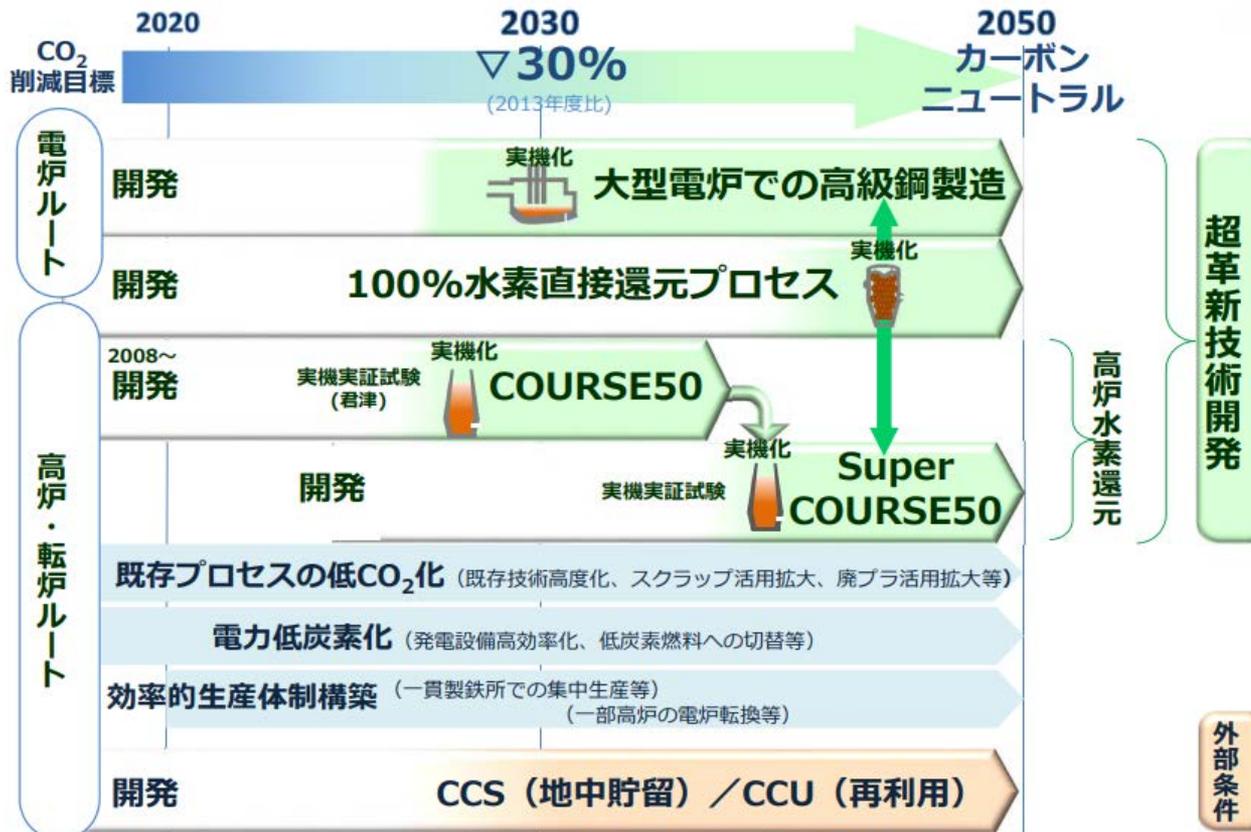
# 鉄鋼分野における水素の活用： 高炉水素還元、水素直接還元

- ✓ 直接還元鉄の製造において、現状では天然ガス等を利用。水素直接還元製鉄は燃料を水素に代替したプロセス
- ✓ DNE21+では、従来から水素直接還元製鉄の製造プロセスに加え電炉・熱間圧延までのプロセス一式を集約しモデル化【資本費:438.1\$/(t-cs/yr)、水素消費:12.1GJ/t-cs、電力消費:695kWh/t-cs】

## 日本製鉄カーボンニュートラルビジョン2050～ゼロカーボン・スチールへの挑戦～

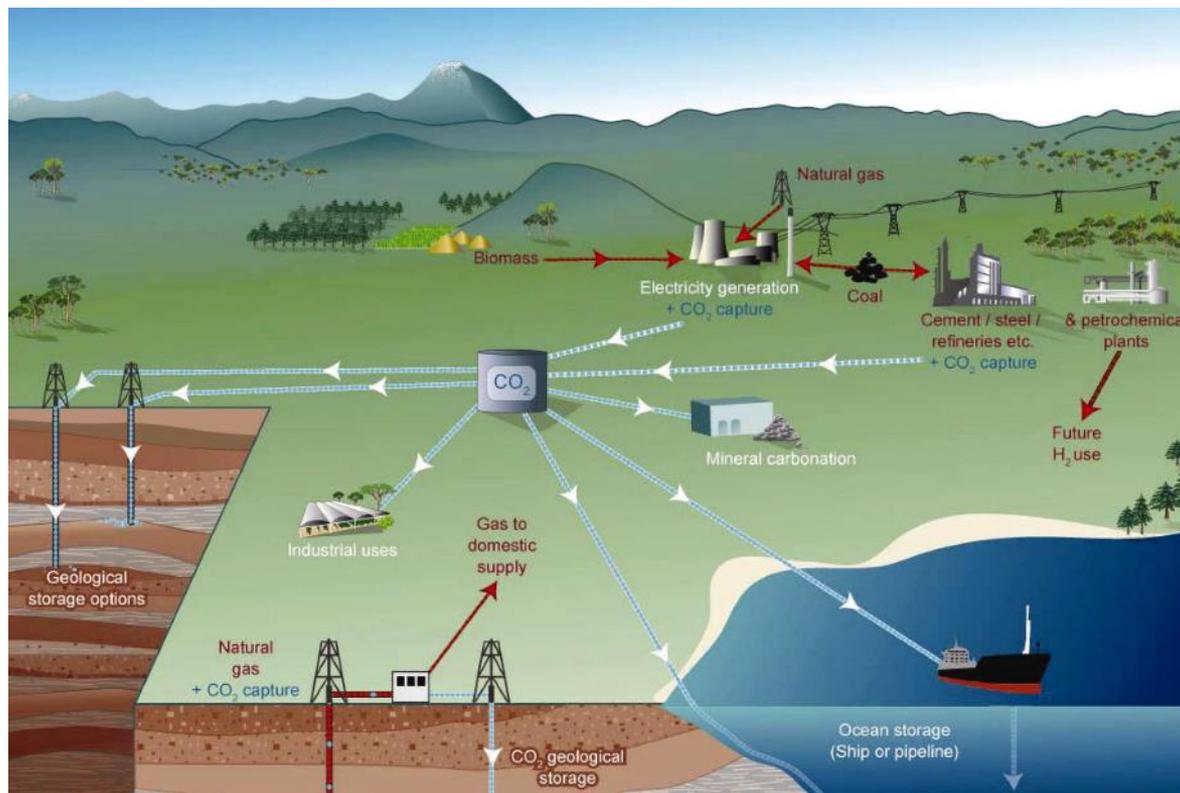


出典)日本製鉄

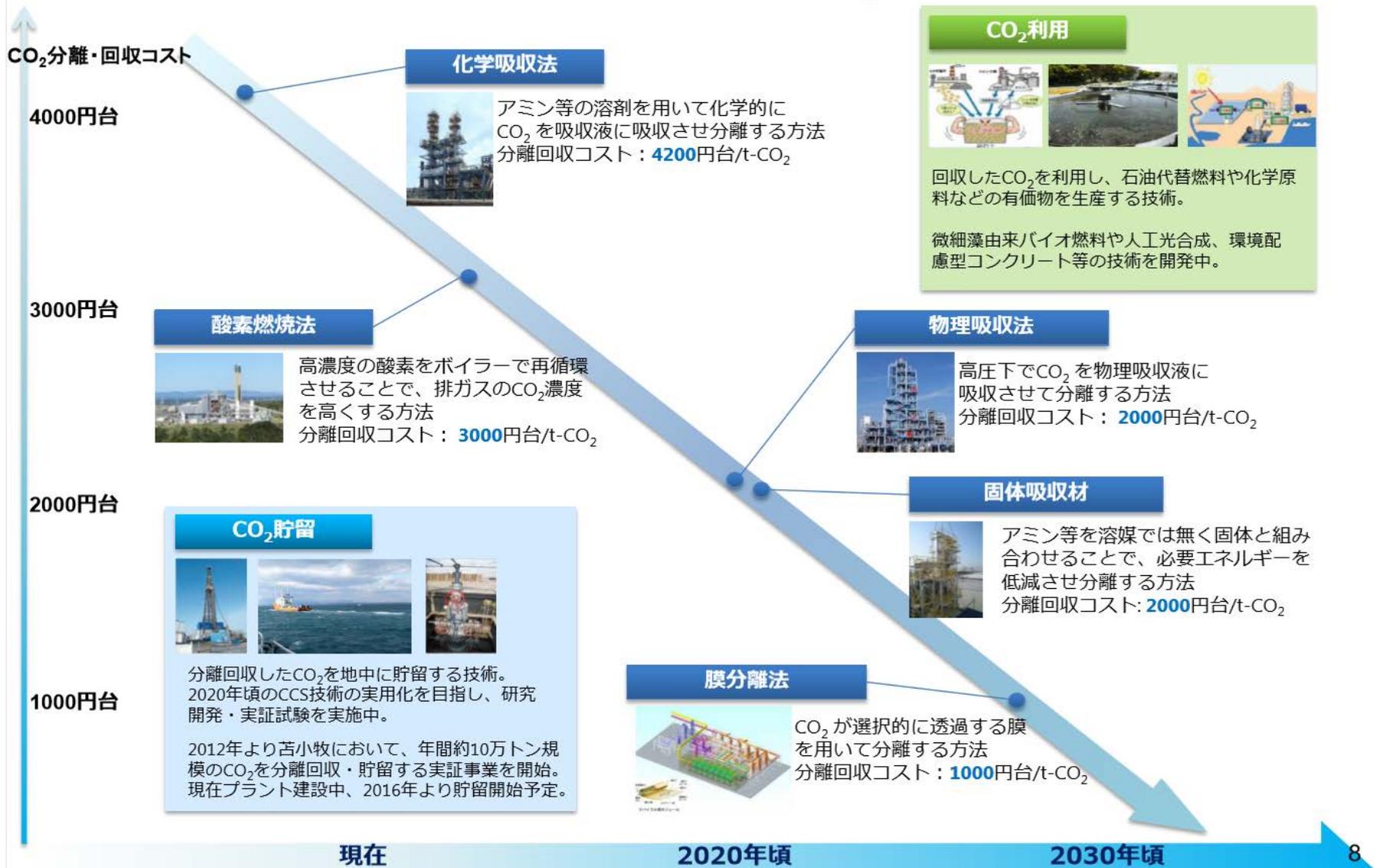


# 3. CCUS、DACの役割と課題

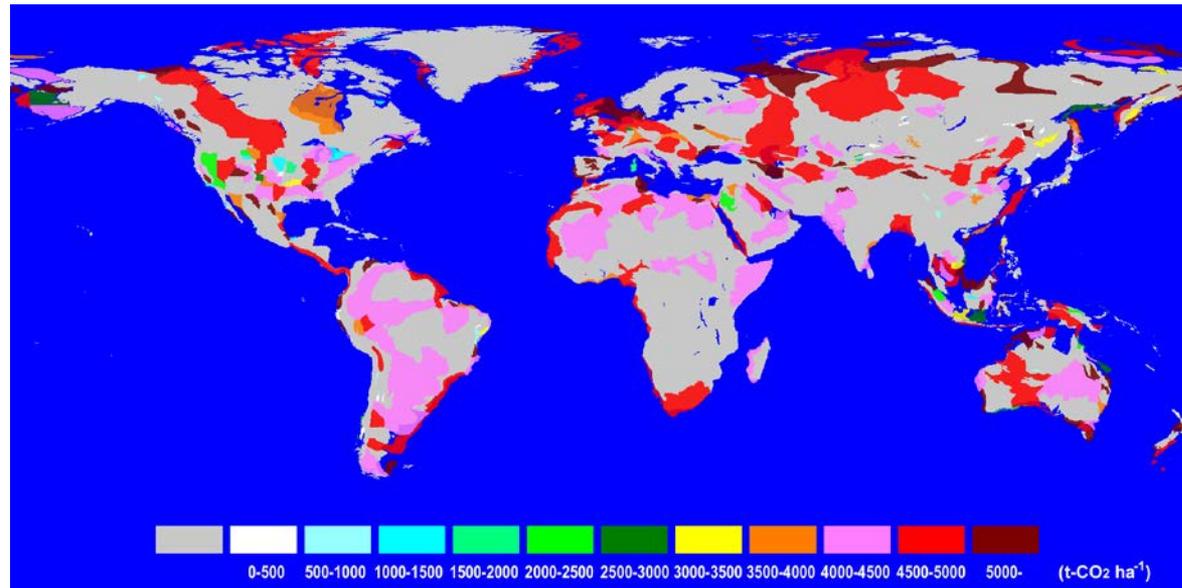
\* CCUS: 二酸化炭素回収・利用・貯留、DAC: 大気中CO<sub>2</sub>回収



# CO<sub>2</sub>回収関連技術の概要



# 世界のCO<sub>2</sub>貯留ポテンシャルの推定とモデルでの想定



出典) K. Akimoto et al., GHGT-7, 2004: USGSデータ等を用いて推計したもの。図では理想的に利用可能なポテンシャルを表示している(理論的ポテンシャルのうち、陸域の10%、海域の20%を実際のポテンシャルと想定した場合のポテンシャル推計値が下表)。

注) 日本の技術的なポテンシャルとして、146 GtCO<sub>2</sub>といった推計(2005)もあるが、実際的なポテンシャルは不透明で詰めていく必要有

	貯留ポテンシャル (GtCO <sub>2</sub> )		【参考値】 IPCC SRCCS (2005) (GtCO <sub>2</sub> )	貯留費用 (\$/tCO <sub>2</sub> )* <sup>1</sup>
	日本	世界		
廃油田 (石油増進回収)	0.0	111.5	675-900	57 - 69* <sup>2</sup>
廃ガス田	0.0	147.4 - 665.5		9 - 59
深部帯水層	11.4	3042.6	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	5 - 38
炭層 (メタン増進回収)	0.0	143.4	3-200	27 - 122* <sup>2</sup>

注1) 廃ガス田の貯留ポテンシャルの幅は、将来のガス採掘量が増加するに従って、表中の上限値までポテンシャルが増大し得ると想定している。

注2) 貯留費用の幅は、表中に示す範囲において累積貯留量の増大と共に上昇するように想定している。

\*1 本数値にはCO<sub>2</sub>回収費用は含まれていない。別途想定している。

\*2 石油増進回収、メタン増進回収における石油やガスの利益は本数値に含めていないが、別途考慮している。

# 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CO<sub>2</sub>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.

## Chemical synthesis

In the first step, hydrogen and CO<sub>2</sub> are converted to synthesis gas in the reverse water-gas shift reactor.

The Fischer-Tropsch reactor then uses this to build hydrocarbon chains.

## 3. Conversion

A two-step process turns CO<sub>2</sub> and hydrogen into hydrocarbon chains.

## Infrastructure compatibility

e-diesel is compatible with existing infrastructure and engine technologies. It replaces fossil fuel.

Heat for use in residential areas or in industry.

Renewable waxes for cosmetics, foodstuffs and chemical industries

Almost CO<sub>2</sub>-neutral e-diesel for mobility

➤ 2030年頃の商用化・規格認定を目指し、実証等の取組みを推進

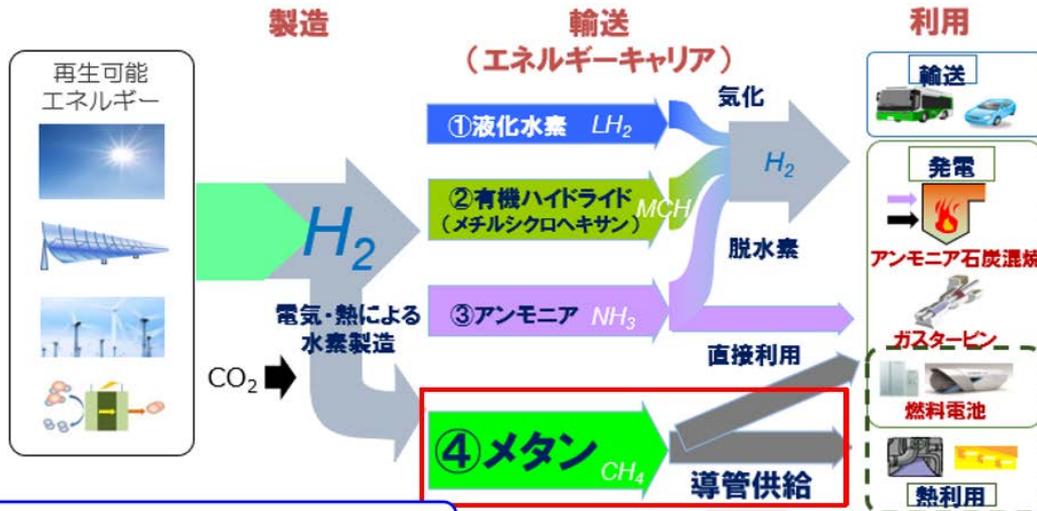
出典) Audi

	2022~	2025~	2030~
規模	~1 BPD	~100 BPD	~10,000 BPD
H <sub>2</sub> 水素源	国内再エネ電力 + 水電解	海外再エネ電力 + 水電解 + 大規模輸送	
CO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> 源	製油所 (ポンベ)	製油所 (排ガス)	
装置イメージ			
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>●リアクター形状</li> <li>●再エネ合成燃料の性状確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●プロセス最適化</li> <li>●規格適合性検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●商用化</li> <li>●規格認定</li> </ul>

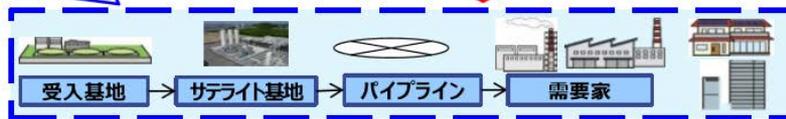
出典) ENEOS

# 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CO<sub>2</sub>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。



新たなインフラ投資不要



出典) 日本ガス協会

## 日本ガス協会の2050年展望 (目標)

脱炭素化の手段		2050年※
ガス自体の脱炭素化	水素 (直接利用)	5%
	カーボンニュートラルメタン	90%
	バイオガス	
脱炭素化に資する手立て	天然ガス+CCUS	5%
	カーボンニュートラルLNG	
	海外貢献	
	DACCS	
	植林	

※上記数値はインバージョンが順調に進んだ場合の到達点の一例を示すもの  
水素やCO<sub>2</sub>等は政策等と連動し、経済的・物理的にアクセス可能であるという前提

# 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、DACS(貯留まで)をすれば、負排出となる。



Climeworks

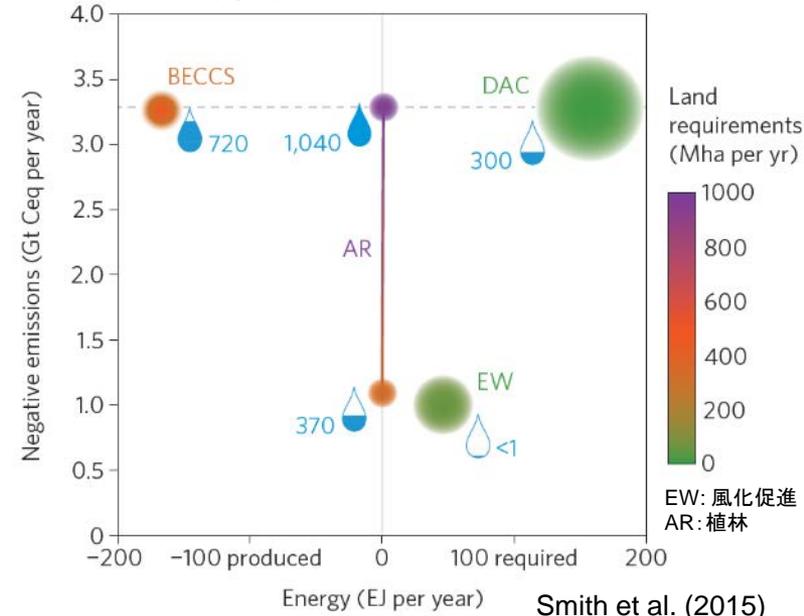
ICEFロードマップ2018 DACによる、DACのエネルギー消費量推計

Company	Thermal energy/ tCO <sub>2</sub> (GJ)	Power/ tCO <sub>2</sub> (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 (tCO2)		設備費 (Euro/(tCO2/yr))
	電力 (kWh)	熱 (GJ)	
高温(電化)システム(HT DAC)	1535		815
低温システム(LT DAC)		6.3 (=1750 kWh)	730
	電力 (kWh)	250	

必要エネルギー(横軸)、土地面積(色)、投資(円の大きさ)など



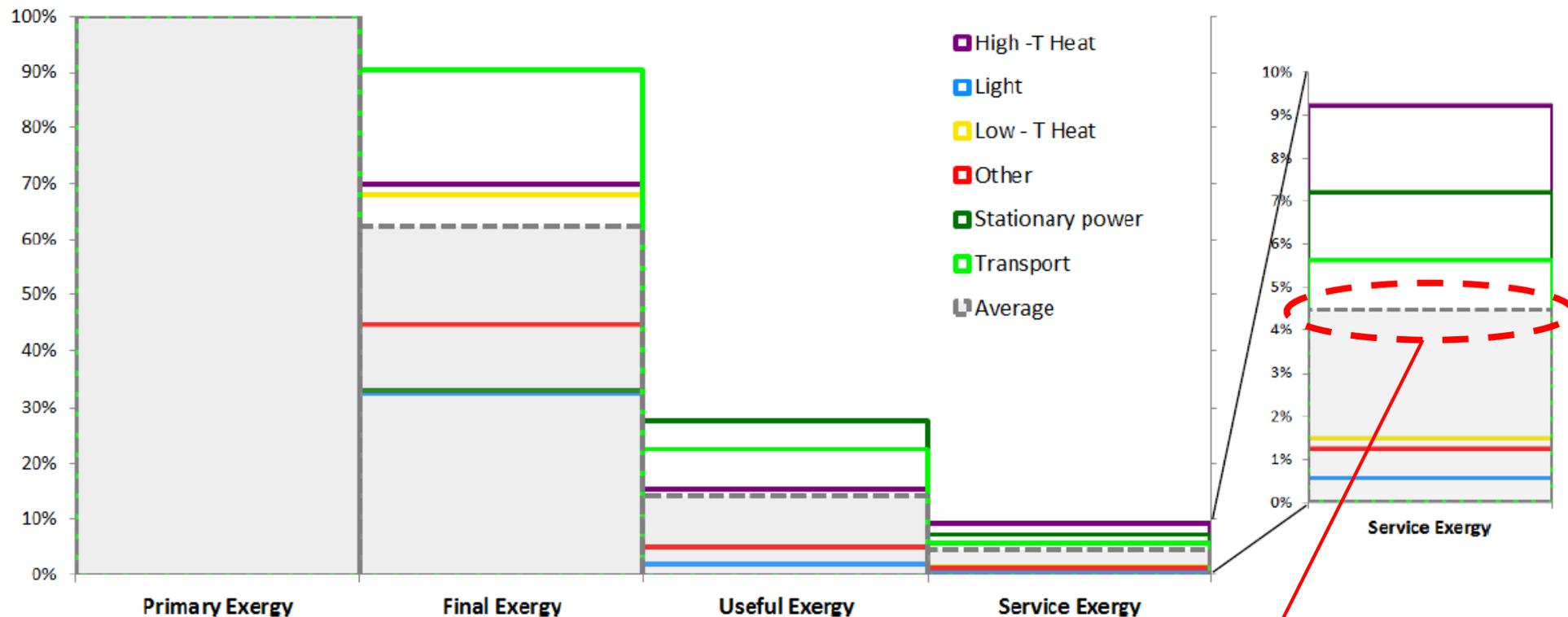
# 4. 省エネ:DXによる低エネルギー 需要社会の実現の可能性

情報による、資本、労働、エネルギーの代替



# 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

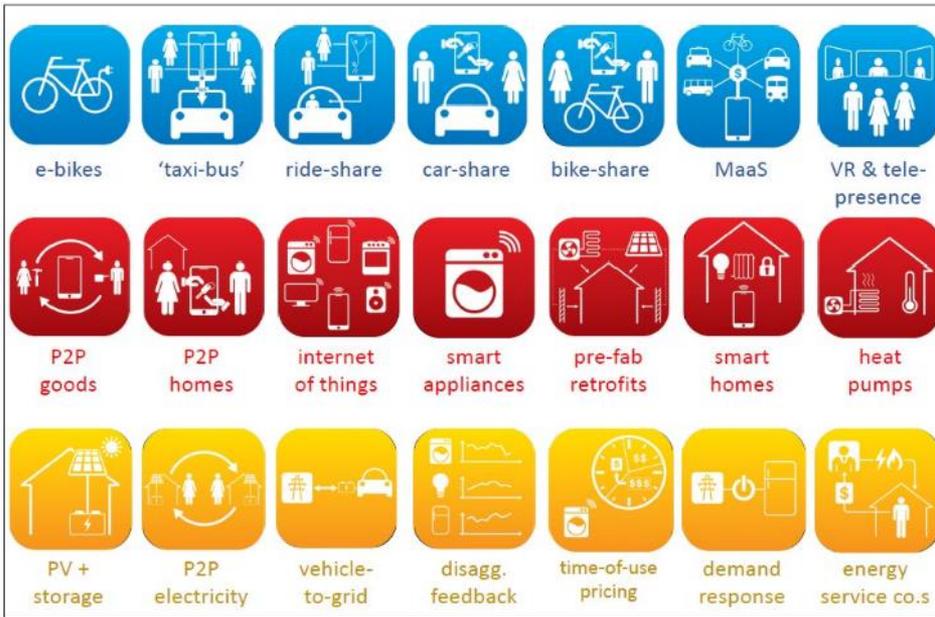


出典) A. Grubler, ALPSシンポジウム(2016)

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。

# エンドユース技術の破壊的イノベーション

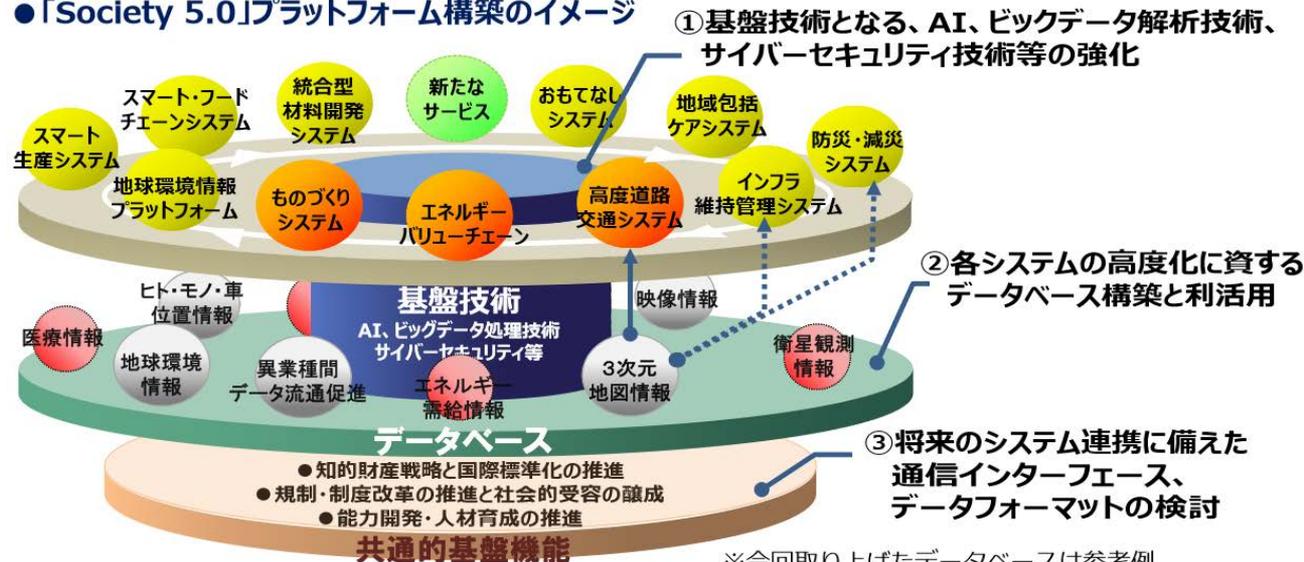


Source: C. Wilson (IIASA)

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

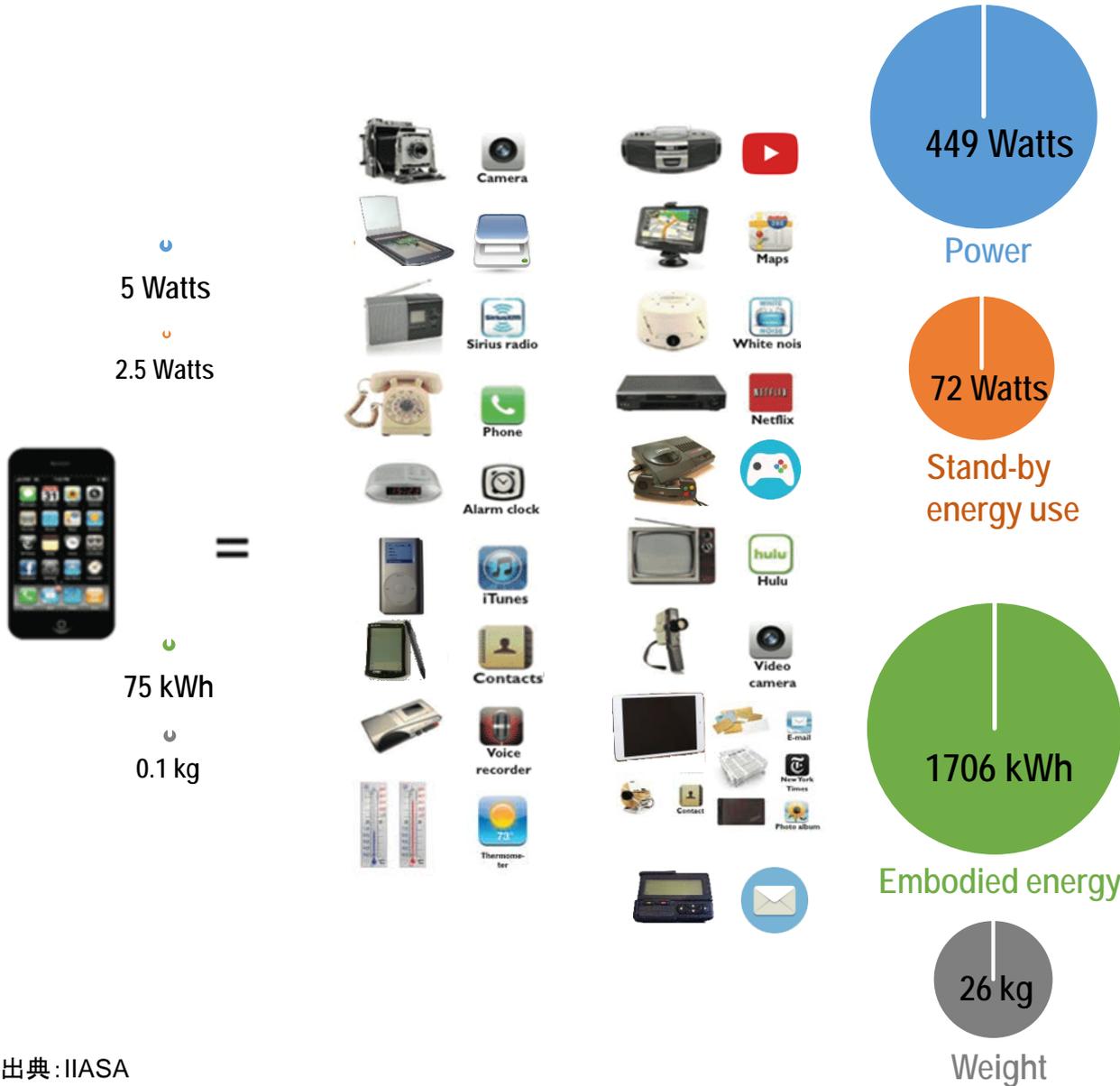
- 1) 独立した技術から、接続へ
- 2) 所有から、利用へ
- 3) シェアリングエコノミー、サーキュラーエコノミーの誘発

## ●「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・CO<sub>2</sub>排出低減は急速になる可能性あり。

# 運輸部門: CASE



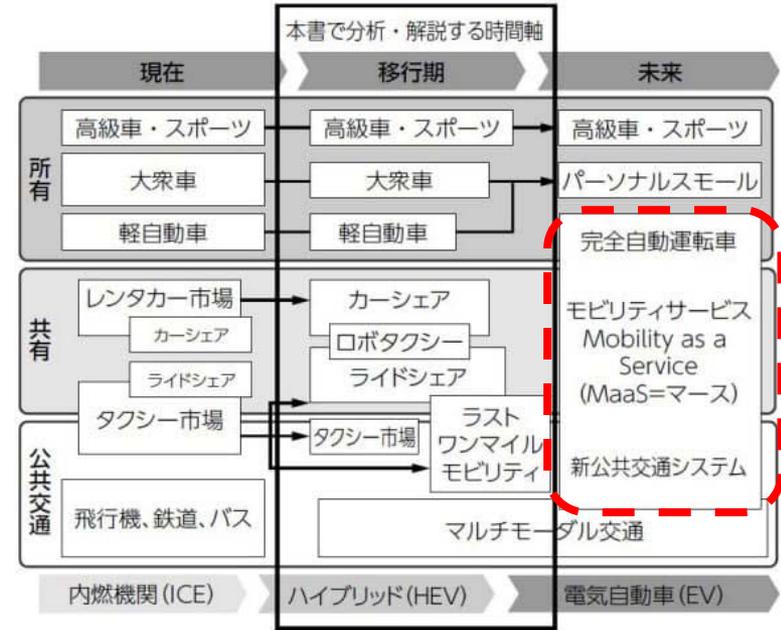
## Connected; Service & Shared



## 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)

# 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  
ンターの変化**



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。

# 5. カーボンニュートラルに向けた 定量的シナリオ分析

(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)



- ◆ 参考値（再エネ約5～6割、水素・アンモニア約1割、CCUS+化石火力と原子力で約3～4割）の水準を2050年に達成するためには、これまでに示したような課題の克服が必要。
- ◆ こうした前提に立った上で、これまでの分科会における議論を踏まえ、例えば、以下のようなシナリオを含め、どのようなシナリオが考えられるか御意見をいただきたい。
- ◆ 各シナリオについて、公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）において分析を進めてもらい、その結果を、分析の前提や諸元とともに示してもらうこととしてはどうか。

## 【これまでの御意見】

- ◎ 100%も可能だという提案もあったわけなので、それに従った数値も検討して欲しい。  
→例 再エネ100%、水素・アンモニア0%、CCUS+化石火力0%、原子力0%
- ◎ 再エネがより大きい比率、再エネが少ない比率のものもお願いしたい。  
→例 再エネ70%、水素・アンモニア10%、CCUS+化石火力10%、原子力10%  
再エネ40%、水素・アンモニア20%、CCUS+化石火力20%、原子力20%
- ◎ 原子力は最低、今のエネルギーミックスの20～22%を維持すべきではないか。  
→例 再エネ60%、水素・アンモニア10%、CCUS+化石火力10%、原子力20%
- ◎ 水素やCCUS付火力の選択肢も幅広く考えるべき。  
→例 再エネ60%、水素・アンモニア20%、CCUS+化石火力10%、原子力10%  
再エネ60%、水素・アンモニア10%、CCUS+化石火力20%、原子力10%
- ◎ 産業側のデジタル化や社会変容といった需要側のシナリオを複数設けるべきではないか。  
→例 デジタル化による電力需要増・省エネ進展、社会変容による省エネ進展など

- RITEモデルは、世界全体を対象に、「エネルギーシステムモデル」を中心に、「エネルギー起源CO2以外の温室効果ガス評価モデル」と「気候変動モデル」を統合し、各種エネルギー・CO2削減技術のシステム的なコスト評価（コスト最小化）を実施。その結果を踏まえ、カーボンニュートラルを実現するエネルギー・産業社会はどのようになっているのかを分析。
- また、分析に際しては、日本エネルギー経済研究所の変動再エネ統合費用を活用。

出典) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会資料、2021

**現在、明示的にモデル想定 of 技術を追加、モデル前提条件の調整等を行っているところ。以下に示すモデル分析は、既往の分析で、公表ベースのもの。**

# 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・CO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>(ただしCO<sub>2</sub>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)、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub> 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

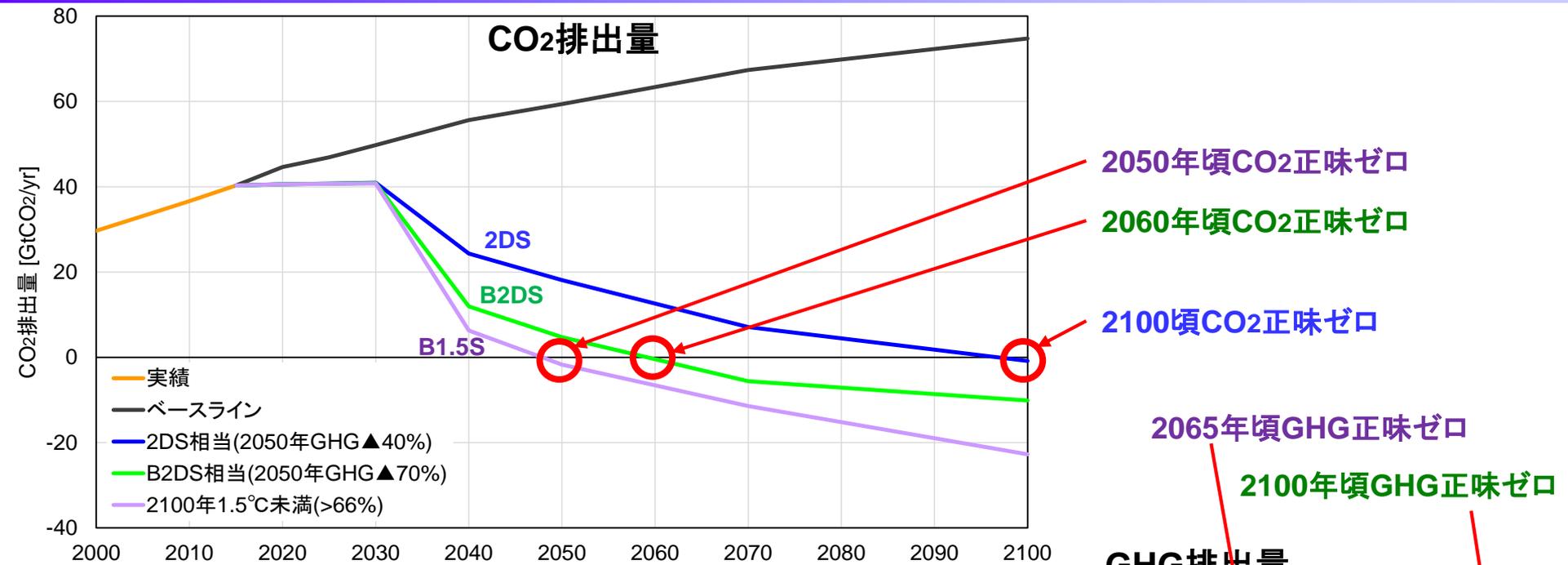
シナリオ名	世界排出シナリオ	【供給側】再エネコスト(太陽光発電コスト)	【需要側】シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)	【負排出技術】大気CO <sub>2</sub> 直接回収技術(DAC)
REF_1	ベースライン (特段のCO <sub>2</sub> 排出制約なし)	標準	想定せず	想定せず
2DS_1	2°C未満(>50%): IEA ETP2017の [2DS]相当	標準	想定せず	想定せず
2DS_2		低コスト(中東・北アフリカ中心に)	シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)	
2DS_3				
B2DS_2	2°C未満(>66%): IEA ETP2017の [B2DS]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

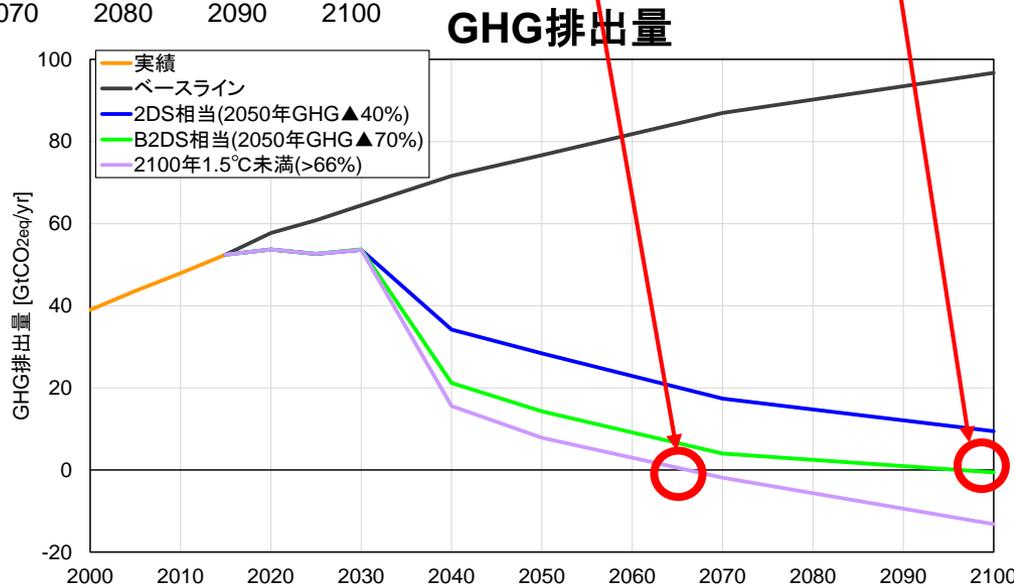
## 【社会経済シナリオ(SSPs: Shared Socioeconomic Pathways)】

■ **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

# 【参考】想定した2°C、1.5°C排出シナリオ

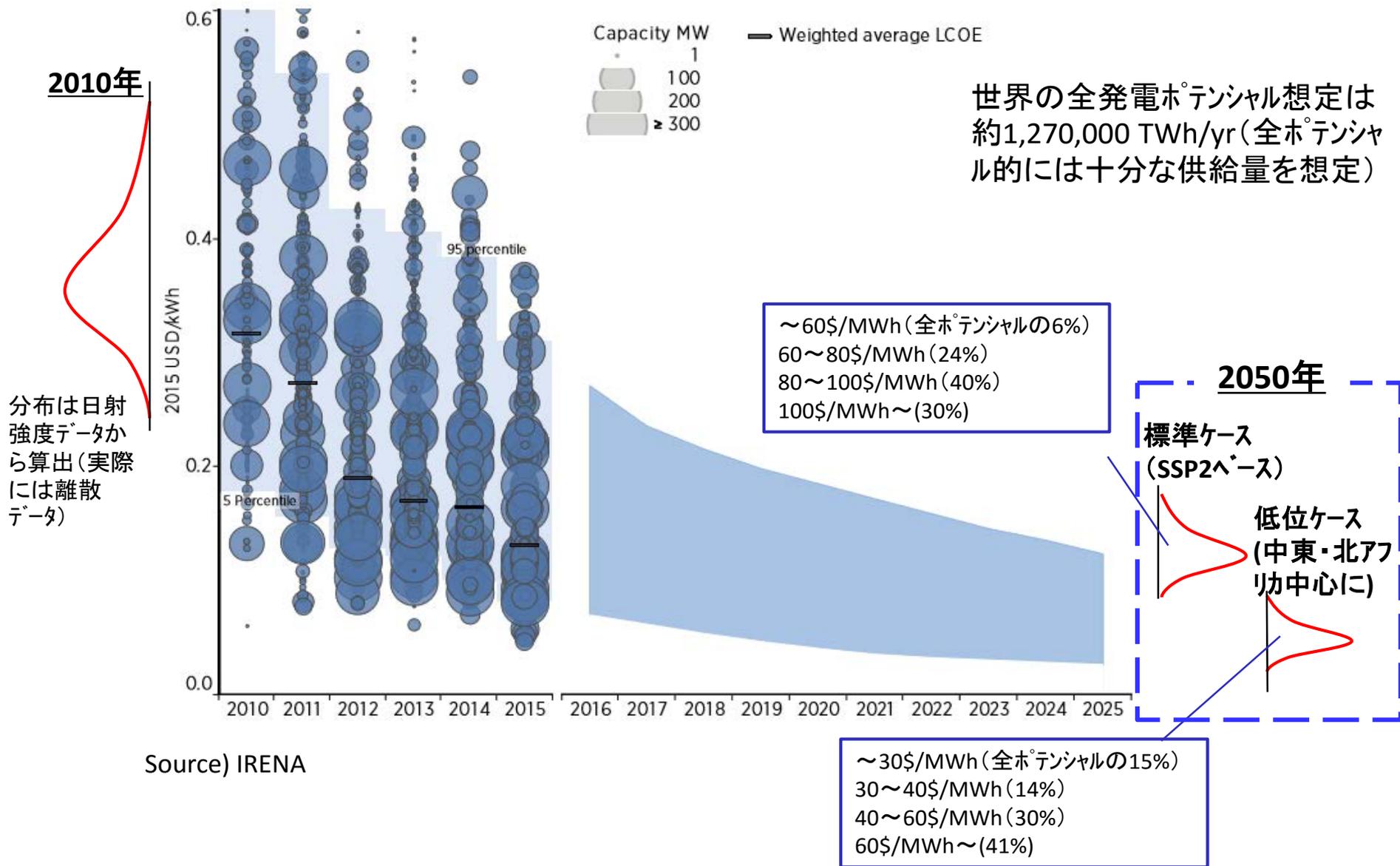


注) ベースライン排出量は前提とする想定シナリオではなく、モデル計算結果 (SSP2シナリオを表示)



※ 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

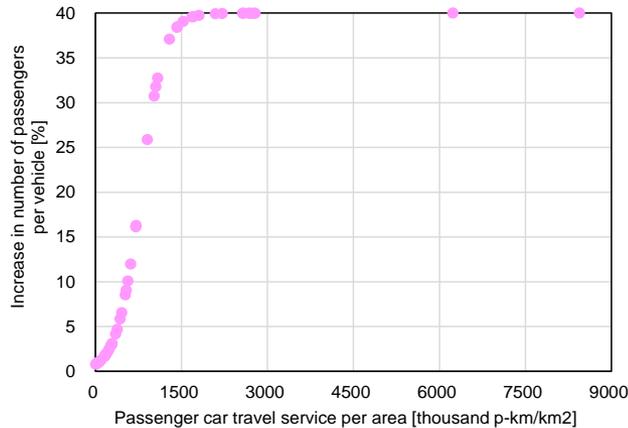
# 【参考】太陽光発電コストのケース想定イメージ： 標準ケースとコスト低位ケース



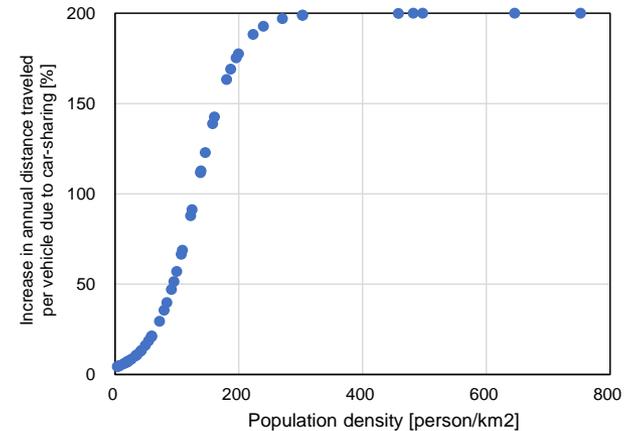
※ なお、DNE21+モデルでは、VREのシェアが増すに従い、系統安定化のための追加費用が別途必要と想定している。

- ◆ **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

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】大気CO<sub>2</sub>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

		/tCO <sub>2</sub>	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: Euro<sub>2016</sub>/(tCO<sub>2</sub>/yr)

**以下は「低位コスト」想定の結果のみ提示**

# 2050年の排出削減費用

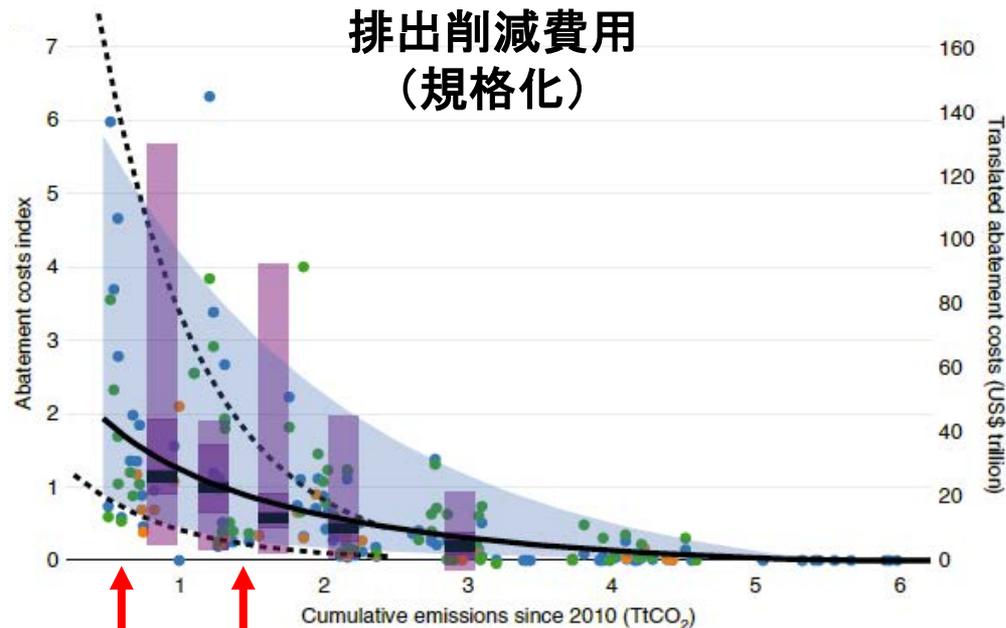
	2°C、>50%			2°C、>66%		1.5°C in 2100 (OS)、>66%		
	2DS_1 (標準)	2DS_2 (PVコスト低)	2DS_3 (+カーシェア)	B2DS_2 (PVコスト低)	B2DS_3 (+カーシェア)	B1.5D_2 (PVコスト低)	B1.5S_3 (+カーシェア)	B1.5S_3_ DAC(LC)
CO <sub>2</sub> 限界削減費用 (\$/tCO <sub>2</sub> )	183	169	152	524	430	実行可能 解無し	実行可能 解無し	151
CO <sub>2</sub> 削減費用 (billion US\$/yr)	2097	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

※ CO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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(シナリオの下)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。

# 【参考】累積排出量別のCO2排出削減費用

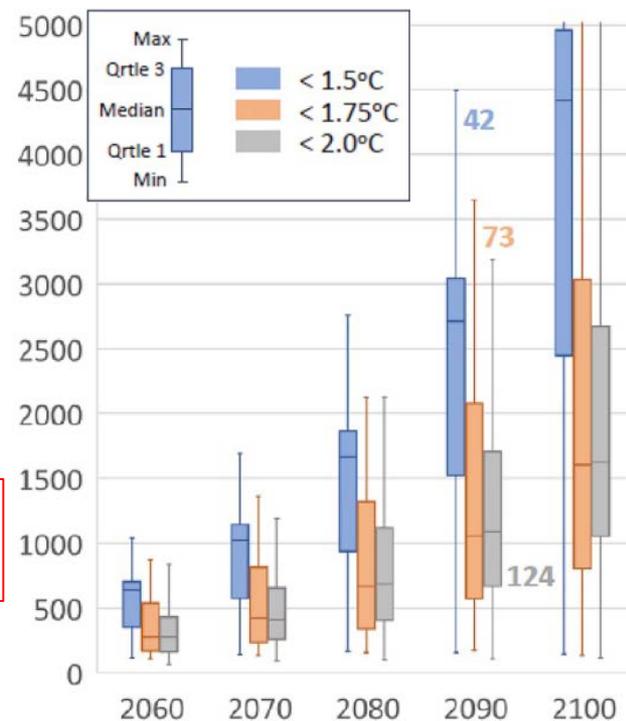
## 排出削減費用 (規格化)



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

- SR1.5: 5-95th percentile
- AR5: median
- AR5: 25-75th percentile
- AR5: full range
- Model: median
- Model: 5-95th percentile
- SSP: consumption loss
- SSP: abatement costs
- SSP: cost estimate

## CO2限界削減費用



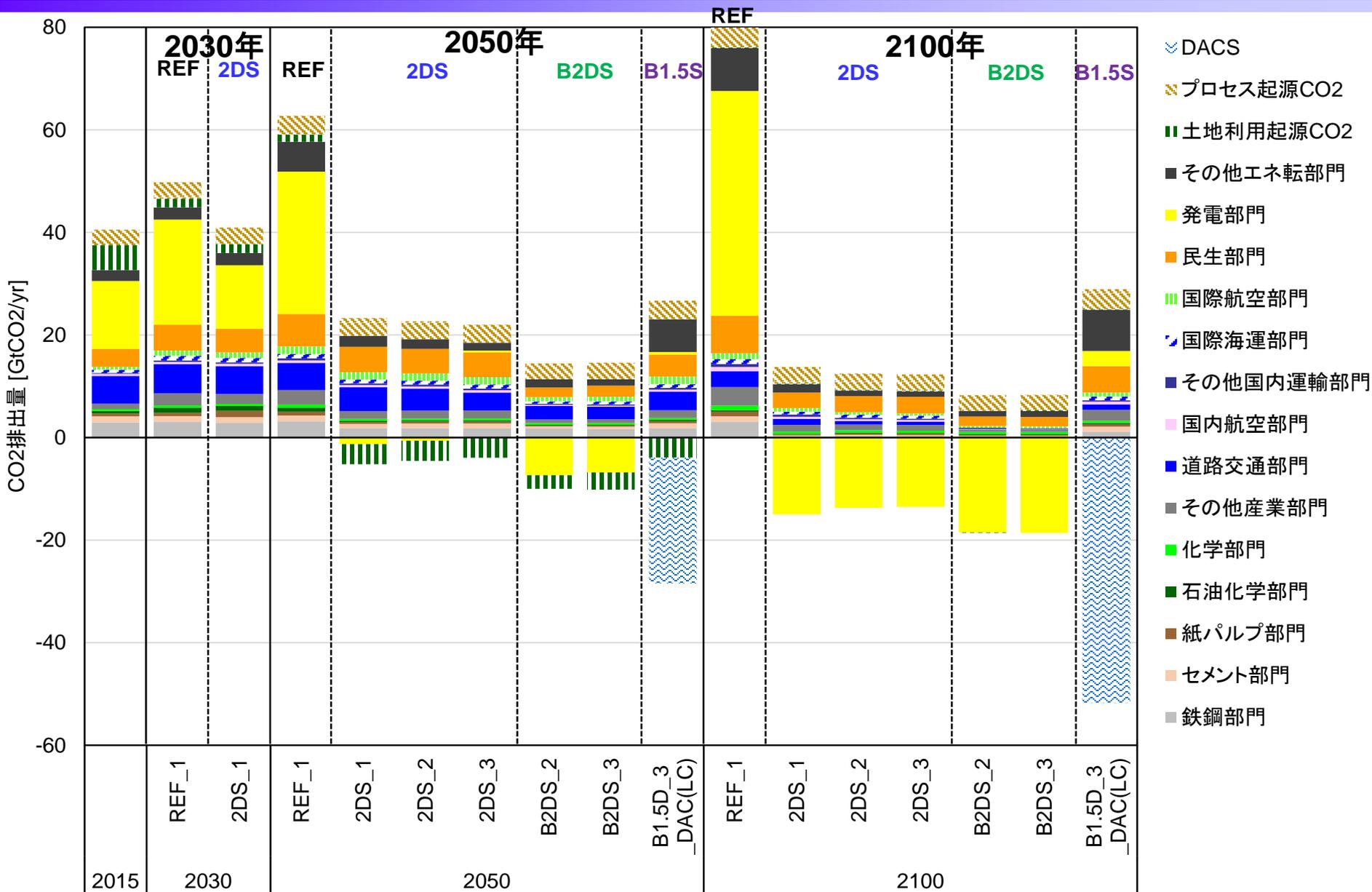
1.5°Cのような厳しい排出削減においては、モデルのコスト推計に大きな幅が生じている。

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

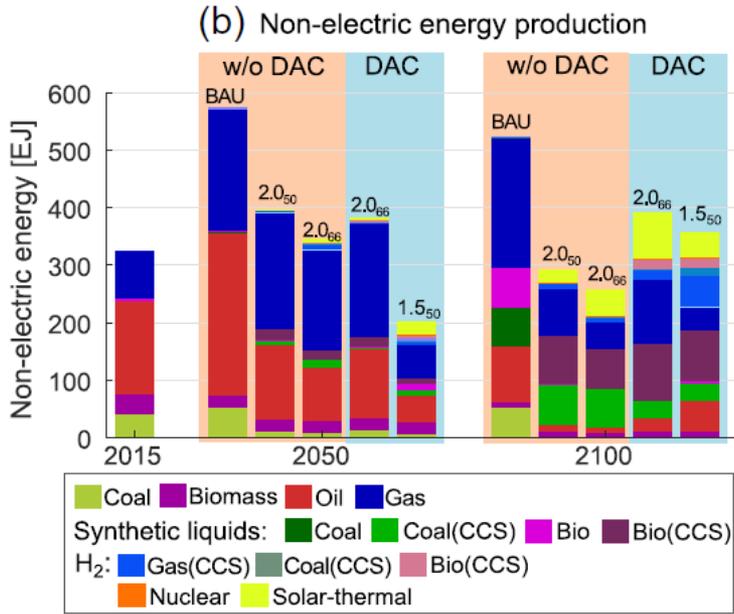
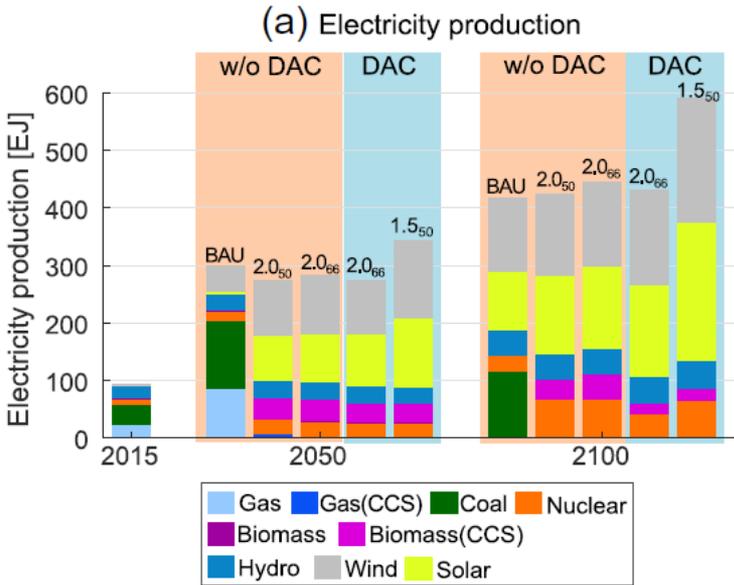
5種類のIAMsによる240程度のシナリオの結果

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

# 世界の部門別CO2排出量(長期展望: ~2100年)



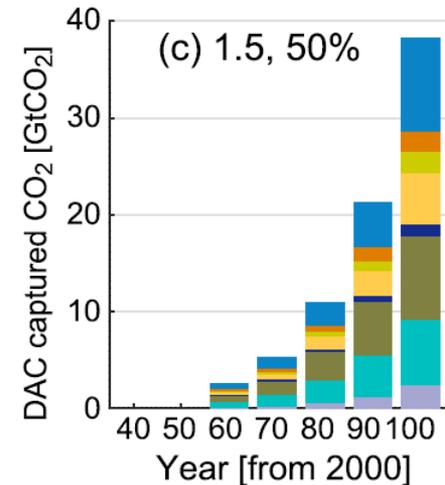
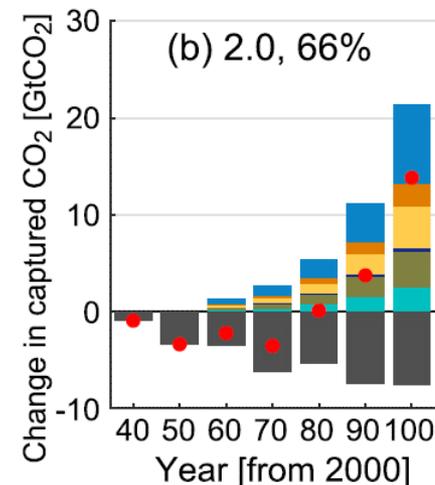
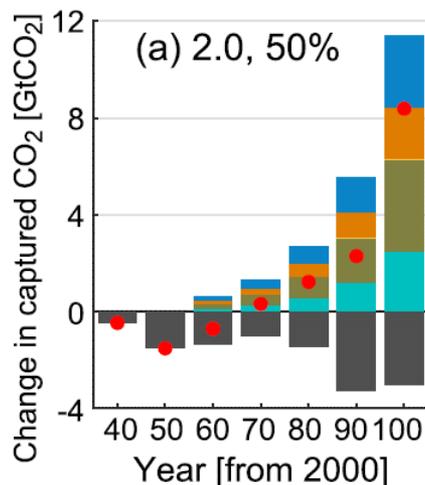
# 【参考】 既往のDACCSのシナリオ分析例 (MERGE-ETL)



世界のエネルギー供給量(電力、非電力)

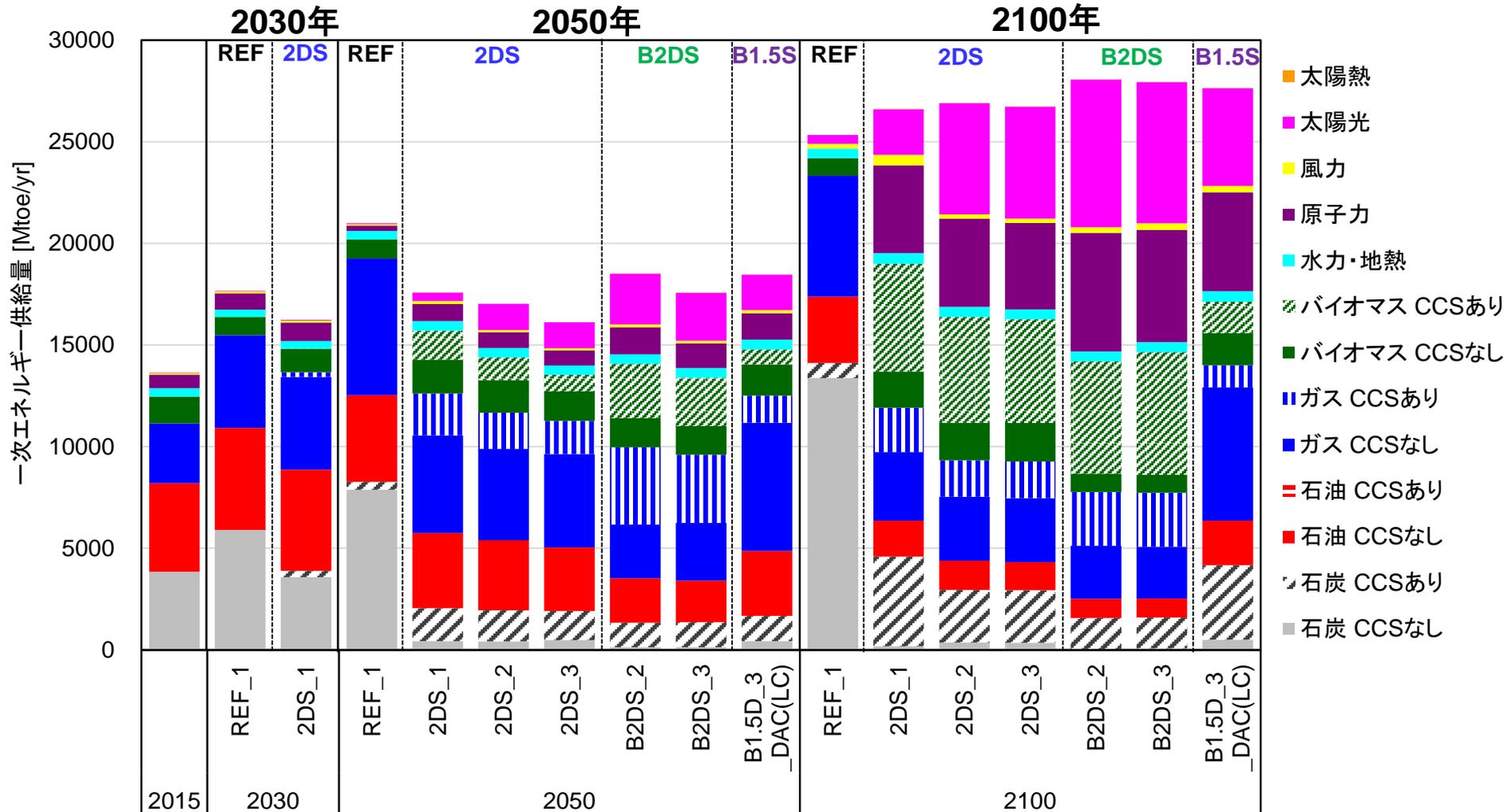


世界のCO<sub>2</sub>回収量 (DAC有 - DAC無)



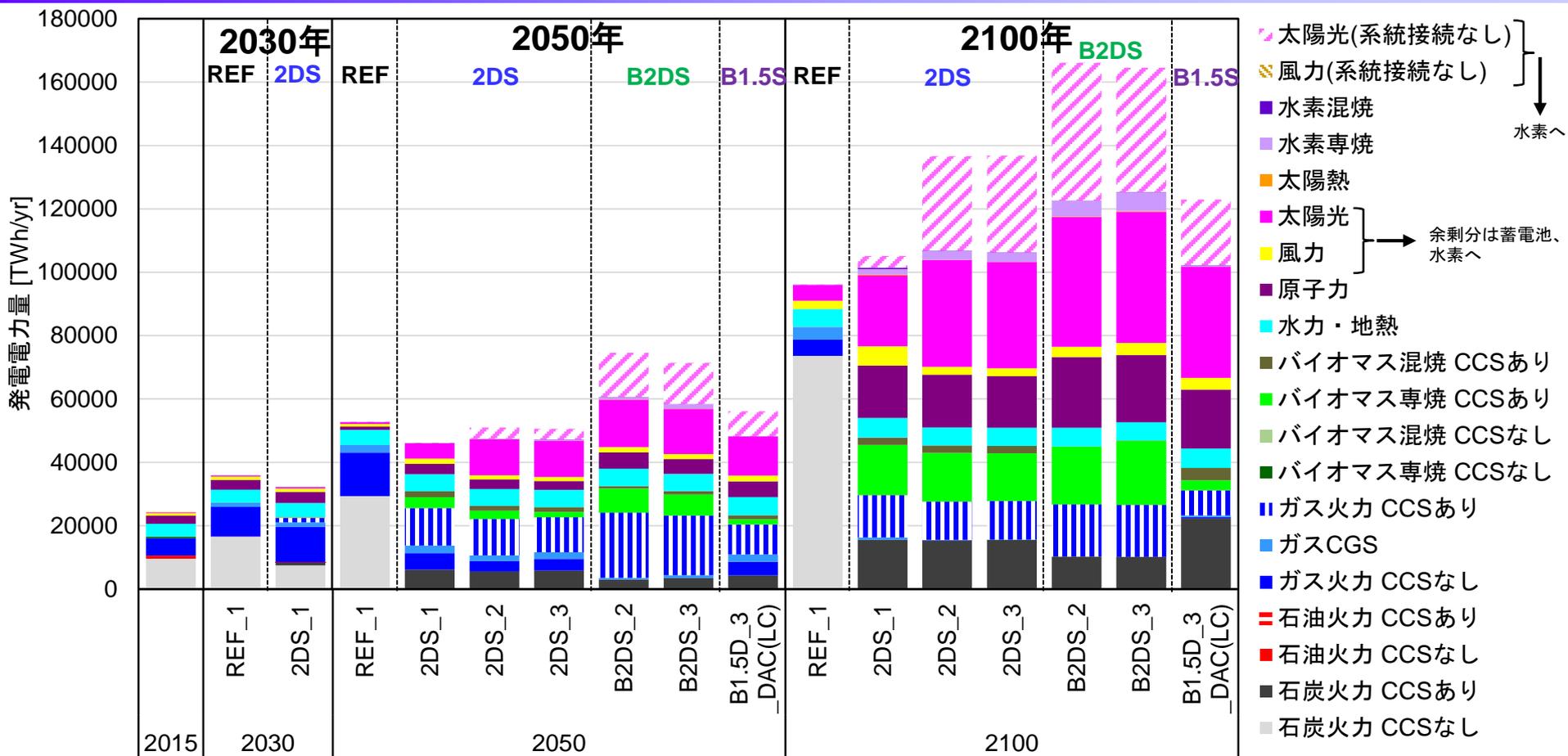
出典) Marcucci et al., Climatic Change (2017)

# 世界一次エネルギー生産量(長期展望: ~2100年)



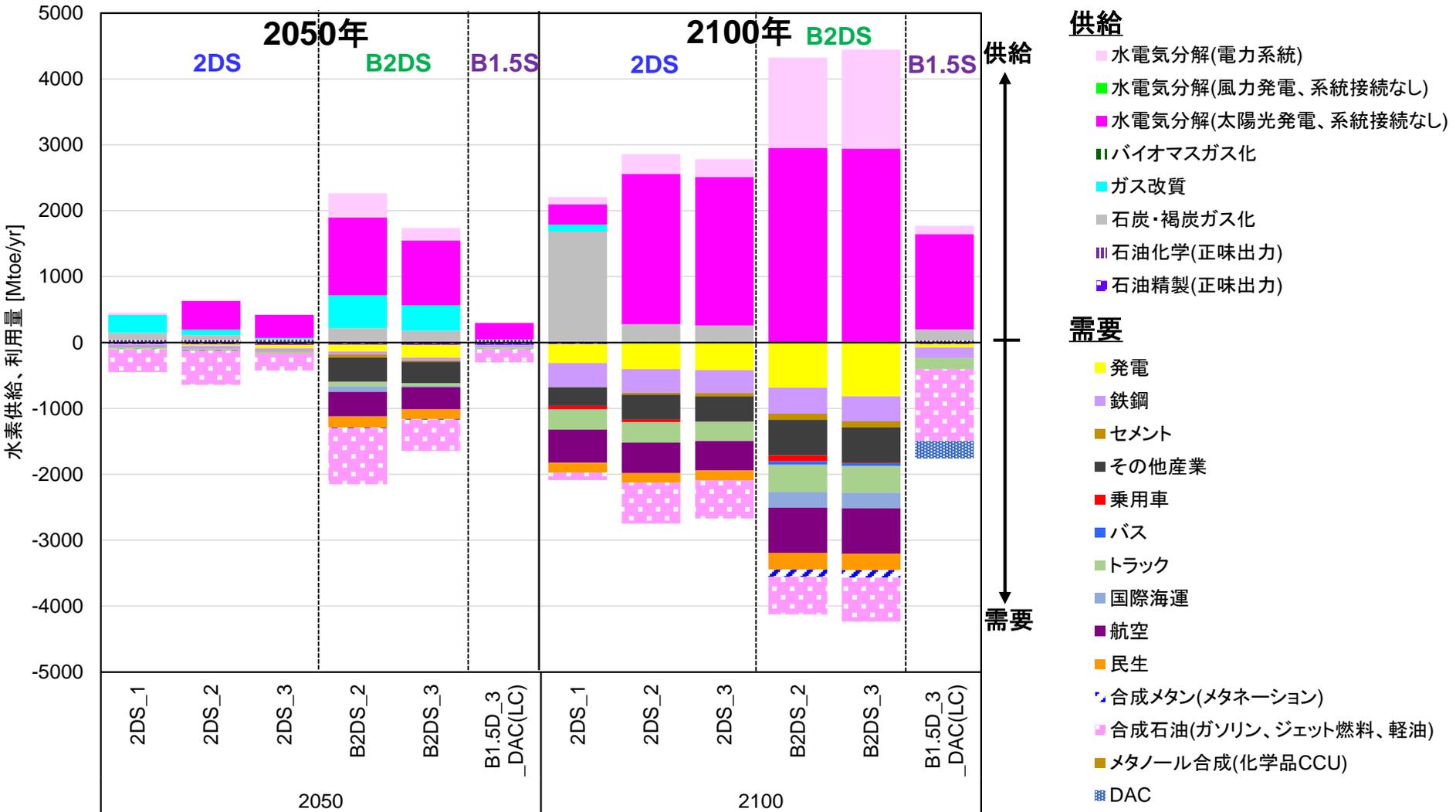
- ✓ 2°C、1.5°C目標のいずれのシナリオにおいても、2100年に向けて、再エネ、原子力、CCSの拡大が見られる。
- ✓ ただし、2100年においても、CCS無しの化石燃料利用は一定量残る(BECCSでキャンセルアウト)。
- ✓ DACを想定しなかった2°C目標下では、特に2100年には相当大きなBECCS利用が必要
- ✓ DACを想定した1.5°C目標では、BECCSの利用は大きく減少し、CCS無しの天然ガス利用もかなり残る。

# 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、DACsの利用により、BECCSの利用は減少。石炭CCSも増大傾向

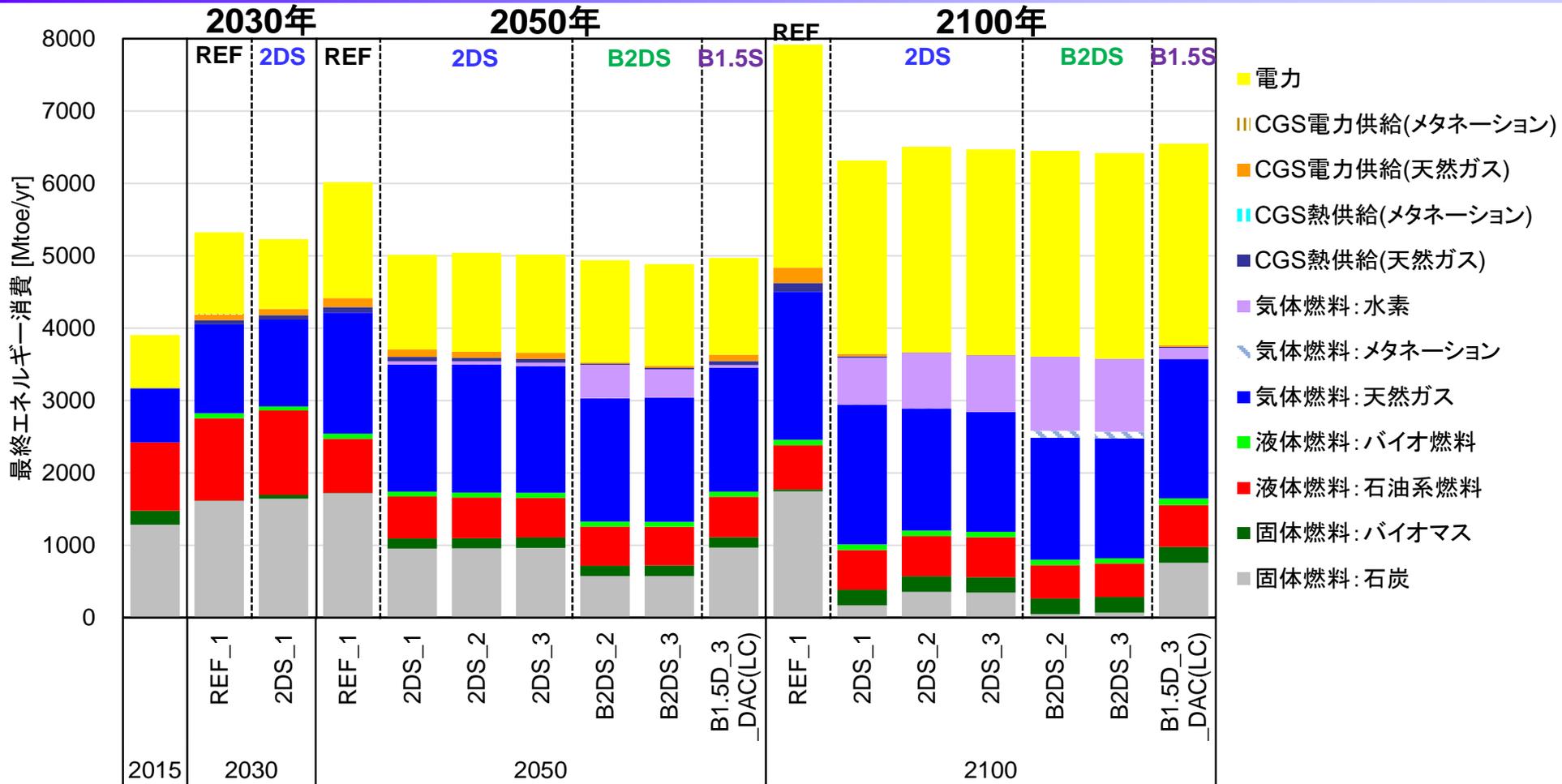
# 世界の水素需給バランス(長期展望: ~2100年)



✓ 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。

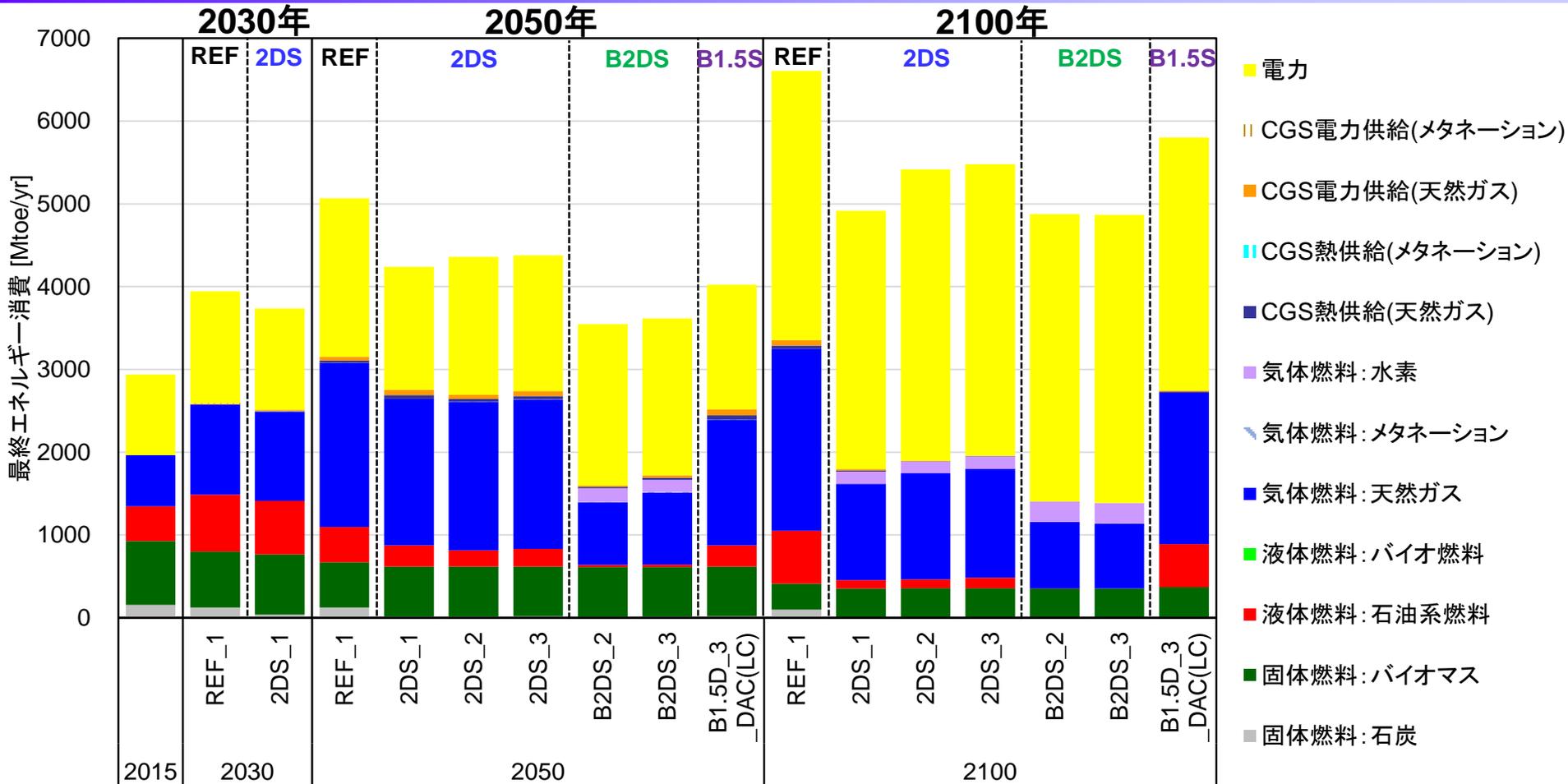
✓ 水素利用先は多様。合成石油、合成メタン(メタネーション)での利用も経済合理的に。

# 世界の産業部門の最終エネルギー消費量(長期展望: ~2100年)



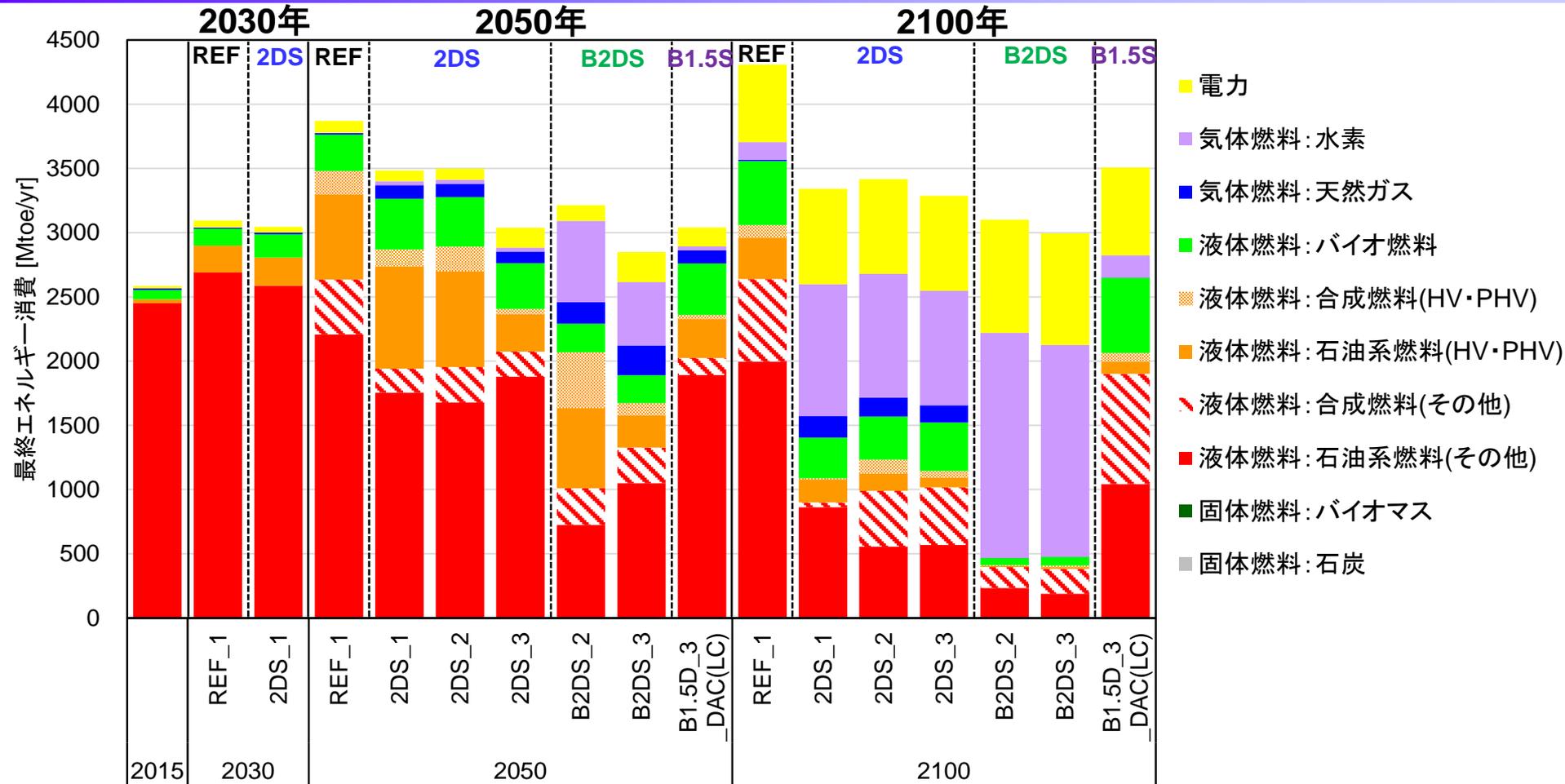
- ✓ 2°C、1.5°Cシナリオでは、電力化率の向上が見られる。
- ✓ ガスについても、コジェネの拡大を含め、拡大が見られる。
- ✓ 2050年頃からは、B2DSを中心に、水素の利用も見られる。
- ✓ 1.5°Cシナリオでは、DACを想定している違いにより、B2DS(DAC無し)に比べ、水素の比率が低下する傾向

# 世界の民生部門の最終エネルギー消費量(長期展望: ~2100年)



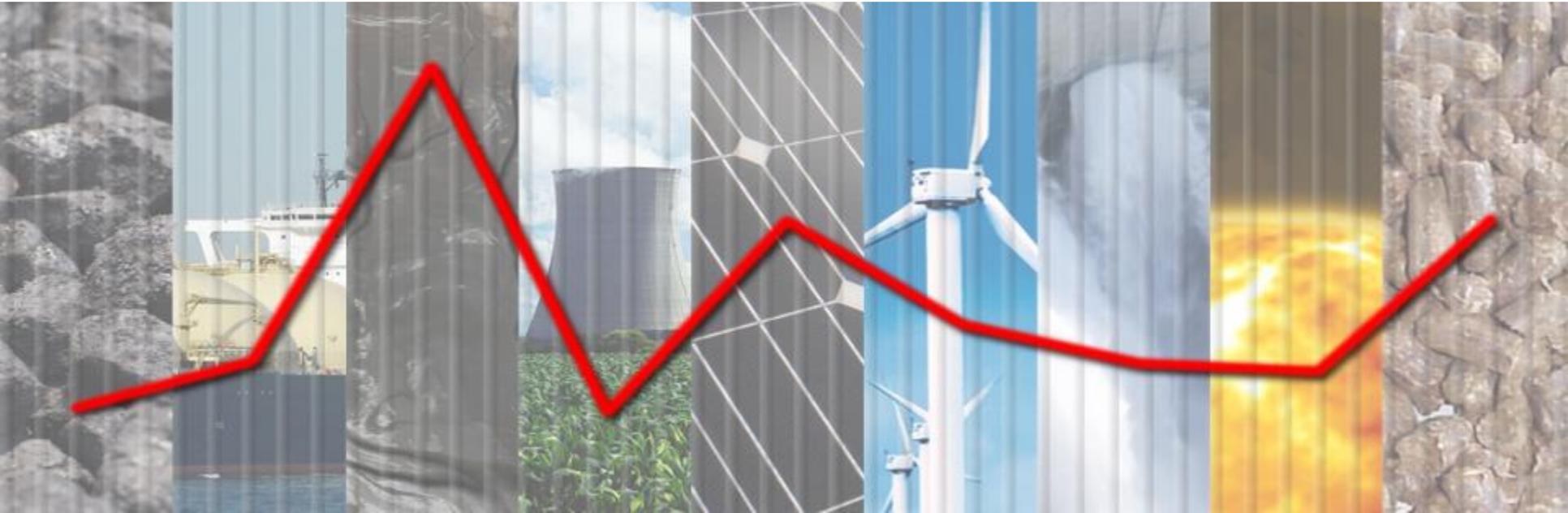
- ✓ 2°C、1.5°Cシナリオでは、電化の促進が見られる。
- ✓ 2DSでは、コジェネの拡大を含め、ガスの拡大も見られる(特に2050年に向けて)。
- ✓ 2050年頃からは、B2DSを中心に、水素の利用も見られる。
- ✓ 2°Cシナリオでは、石油需要は低下。しかし、1.5°Cシナリオでは、DACの想定により、石油需要は相応に残り得る。

# 世界の運輸部門の最終エネルギー消費量(長期展望: ~2100年)

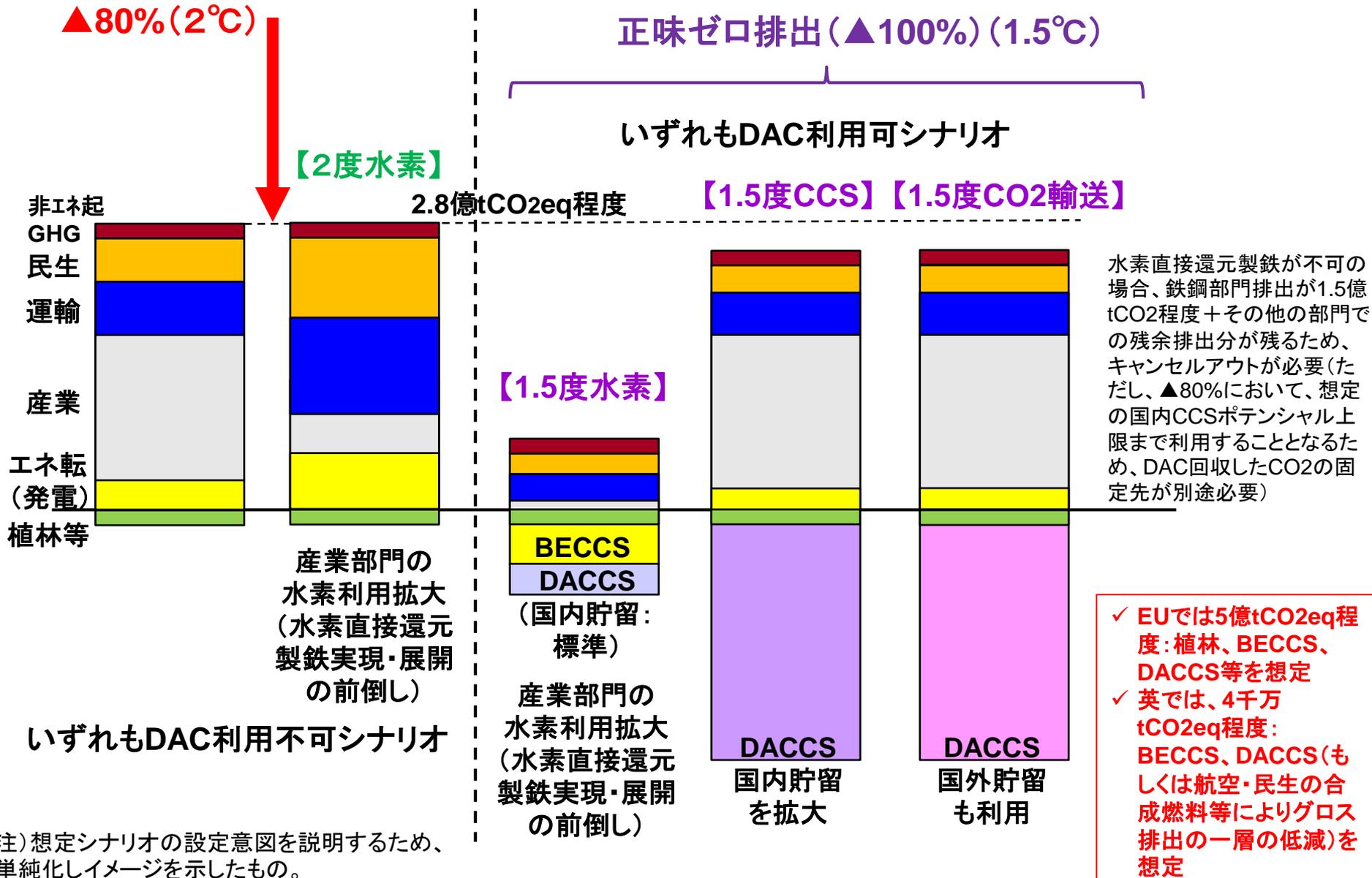


- ✓ 2°Cシナリオでは、EV、燃料電池自動車(FCV)、バイオ燃料の拡大が見られる。
- ✓ 特にB2DSの2050年以降は、FCTトラックを含め水素燃料の利用が拡大
- ✓ 2050年頃の一部ガス利用は国際海運での利用が主。2100年に向けては水素利用等に変遷。
- ✓ B2DSの2100年になるとバイオ燃料が減少。発電部門でのBECCS利用が費用対効果高いため
- ✓ 2050年頃を中心に合成燃料の利用も見られる。
- ✓ 2°Cや1.5°Cシナリオ(1.5°CはDAC有)であっても、2050年頃は、石油の利用も結構残る。

## 6. 日本国内のカーボンニュートラルのイメージ



# 日本の正味ゼロ排出のイメージ：部門別排出量

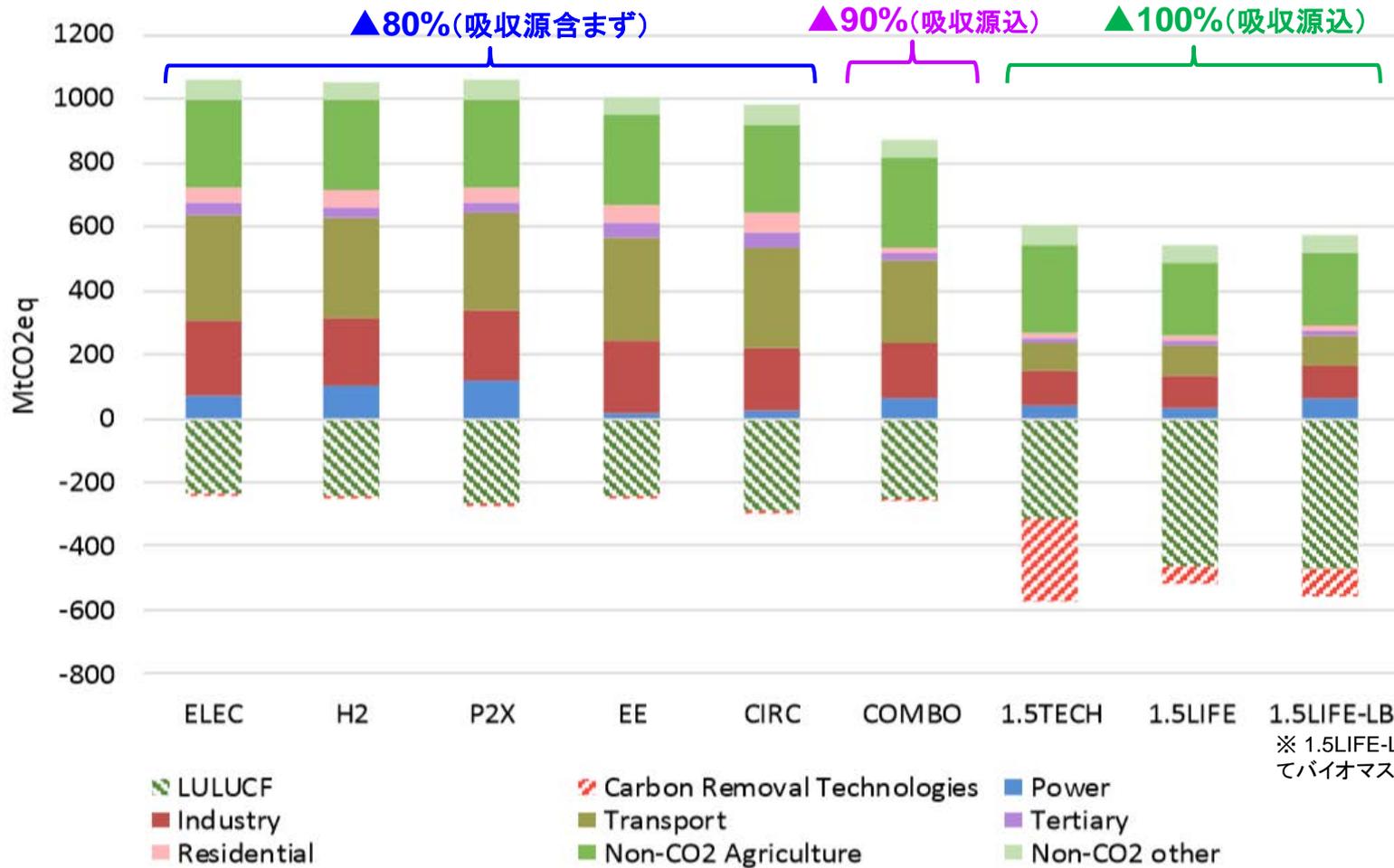


# 【参考】EUの長期戦略の想定シナリオ

## 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°C 技術 (1.5TECH)	1.5°C 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°C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°C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°C"野心)	
主要仮説	<ul style="list-style-type: none"> <li>2030年以降の省エネの向上</li> <li>持続可能、高度なバイオ燃料の展開</li> <li>適度な資源循環対策</li> <li>デジタル化</li> </ul>					<ul style="list-style-type: none"> <li>インフラ設備のための市場調整</li> <li>2°Cシナリオ下ではBECCSは2050年以降のみに存在</li> <li>低炭素技術について着しい learning by doing</li> <li>輸送システム効率の着しい改善</li> </ul>		
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生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 設備は限界に直面。							
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°C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	ヒートポンプの設備増加	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	<ul style="list-style-type: none"> <li>食生活の変化</li> <li>自然吸収源の向上</li> </ul>	
80%減 (2°C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°C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CO<sub>2</sub> GHG排出量(正排出)が多い傾向。また、土地利用におけるCO<sub>2</sub>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tCO<sub>2</sub>/yrにも)。
- ✓ 土地利用CO<sub>2</sub>固定量は、過去の植林に伴うCO<sub>2</sub>固定効果の継続が2050年で2.6億tCO<sub>2</sub>/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。

# 7. 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(アンモニア含む)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CO<sub>2</sub>からの合成燃料(CCU)も重要なオプションとなり得る。特に日本の場合、再エネ、CCSともに、海外と比較してコスト高と見られるため、海外再エネ、海外CCS活用手段として、水素、合成燃料等はとりわけ重要性が高い。
- ◆ なお、CCUで、CCSを代替することは困難であり、CO<sub>2</sub>貯留は重要
- ◆ DACCS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。

