

東京海上研究所 東京海上日動
オンラインセミナー「地球温暖化の最新知見と脱炭素社会に向けた企業の取組」
2021年10月21日

カーボンニュートラルの実現に 向けた展望と課題

(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



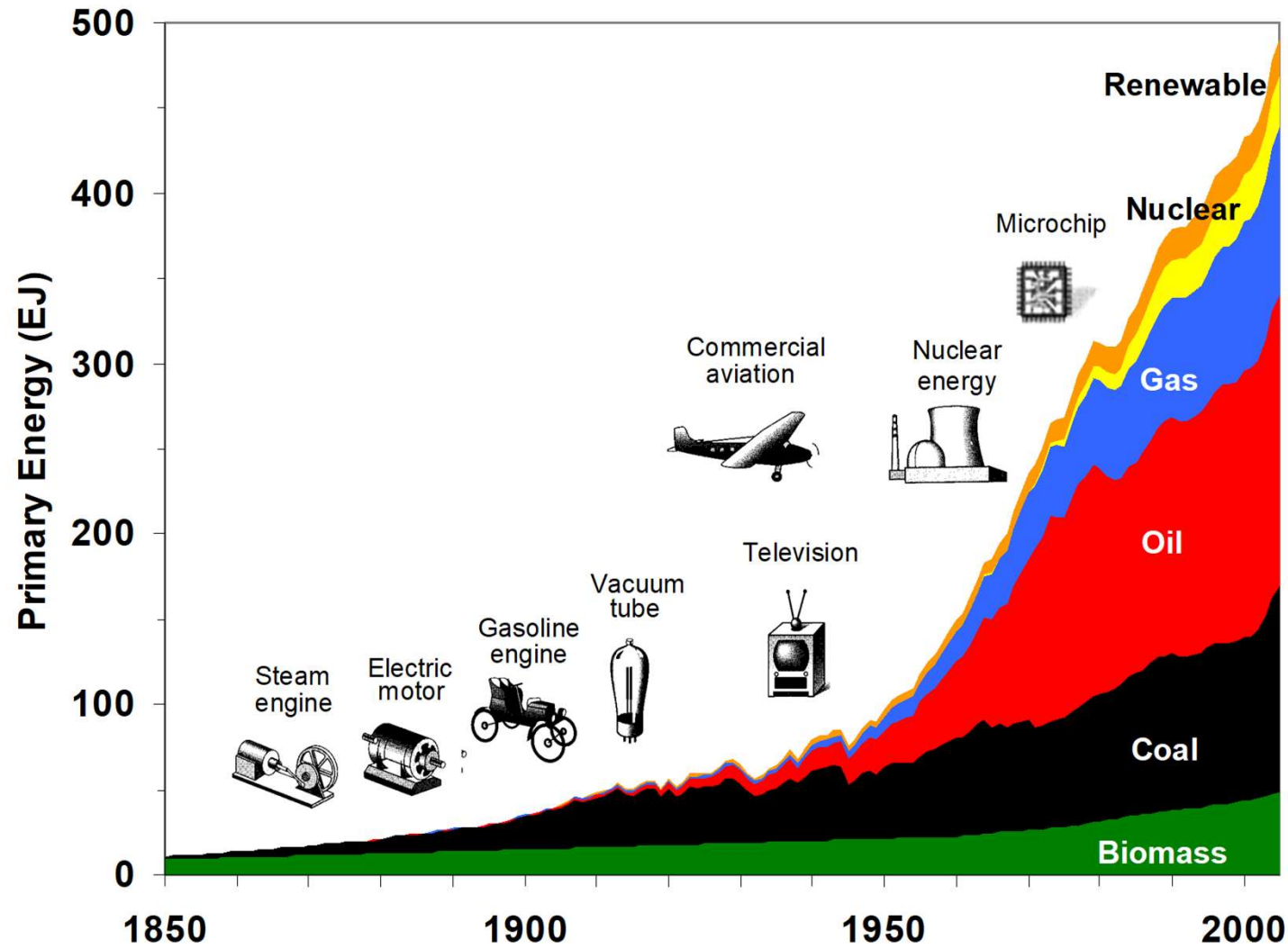
目次

1. **カーボンニュートラルに向けた対策の全体概要**
2. **カーボンニュートラルに向けた各種対策技術の役割と課題**
 - 2.1. **再生可能エネルギー、蓄電池、水素の役割と課題**
 - 2.2. **CCUS、DACの役割と課題**
 - 2.3. **原子力発電の役割と課題**
 - 2.4. **省エネ：DXによる低エネルギー需要社会の実現の可能性**
3. **日本の2050年カーボンニュートラルに向けたシナリオ分析例**
4. **2030年のエネルギー需給見通し**
5. **まとめ**

1. カーボンニュートラルに向けた 対策の全体概要

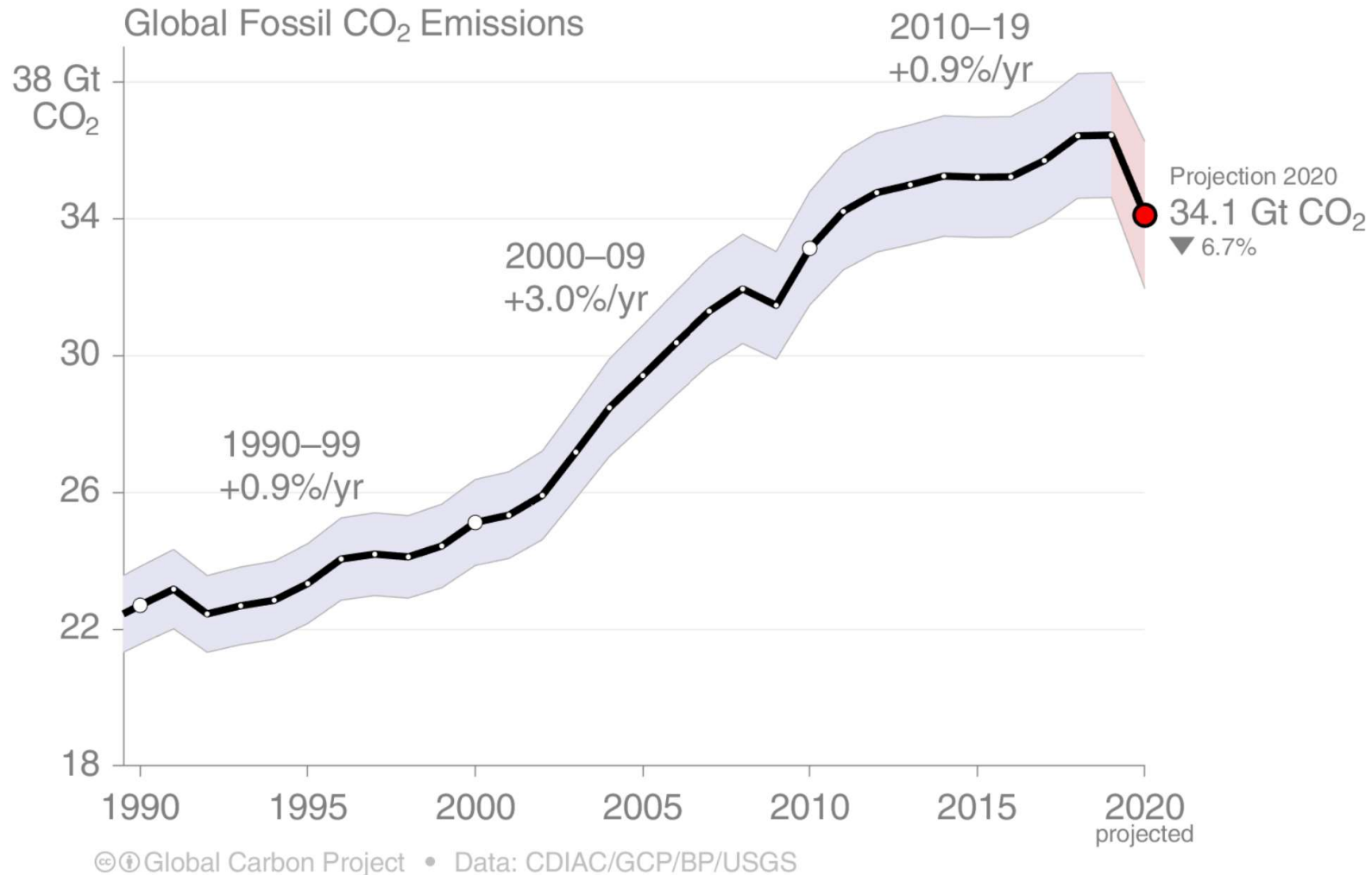


世界のエネルギー消費量の増大



出典) N. Nakicenovic

世界のCO₂排出量の推移

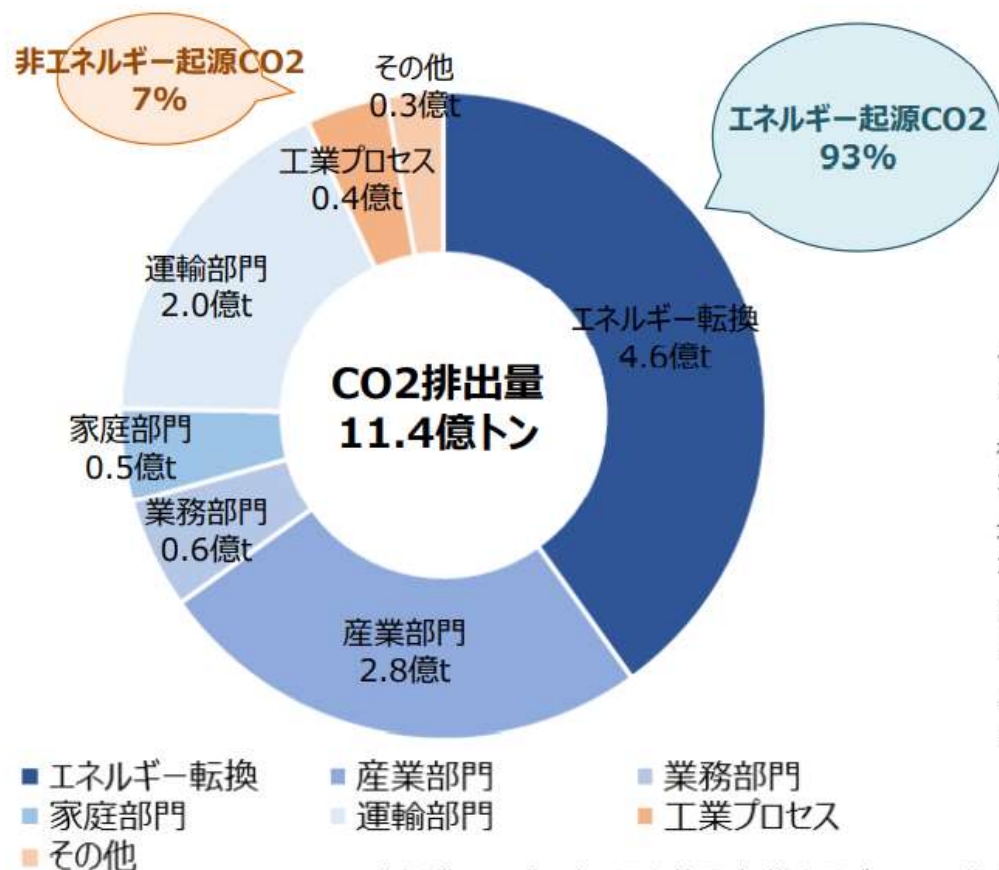


出典) Global Carbon Project

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

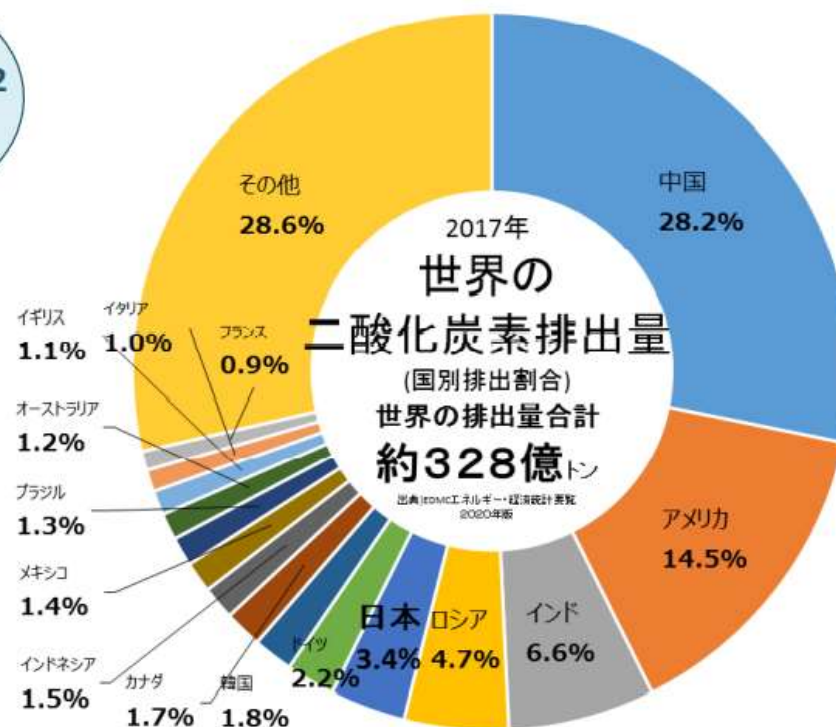
CO2排出量の状況

日本のCO2排出量 (2018)



(出所) GIO「日本の温室効果ガス排出量データ」より作成

世界のエネルギー起源CO2排出量 (2017)



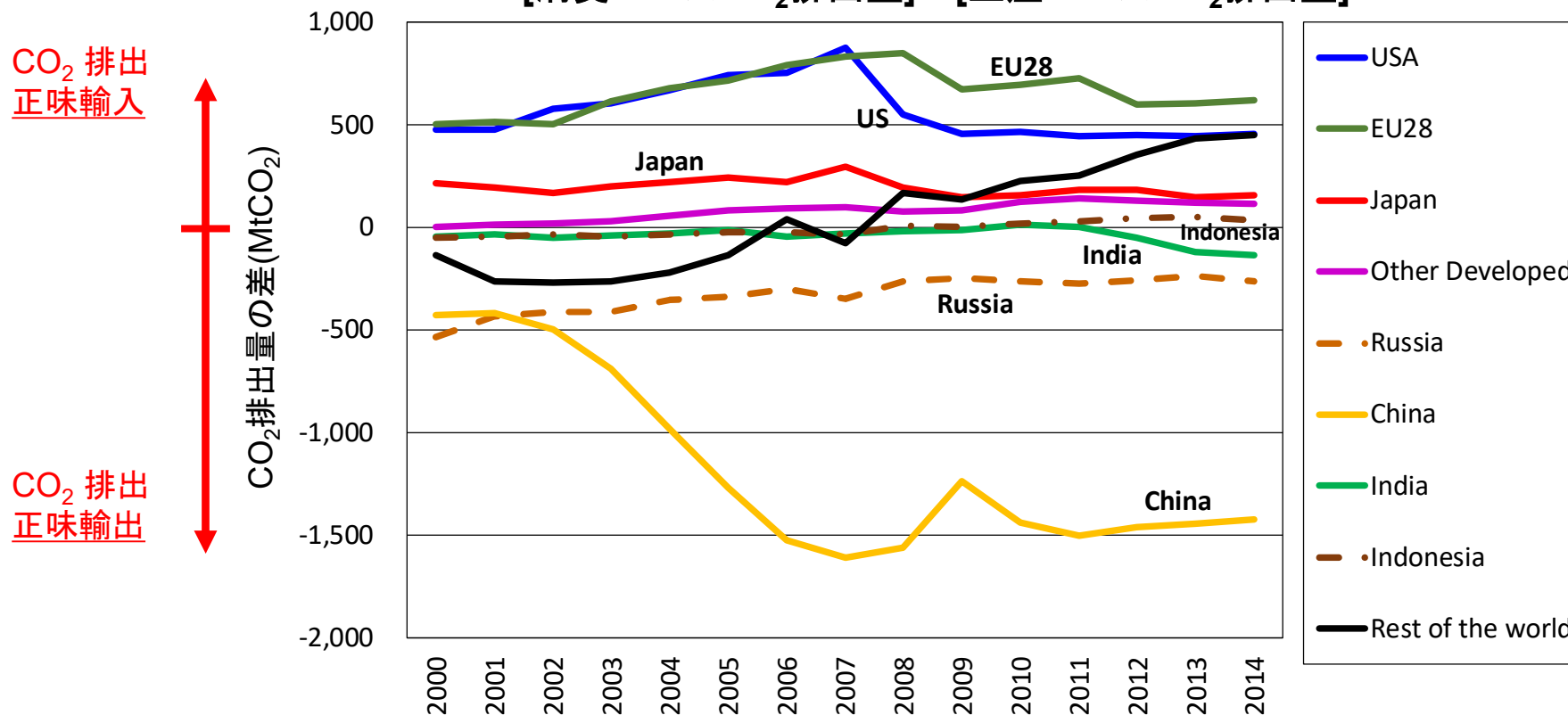
出典) 温室効果ガスインベントリオフィスより作成

出典) 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会資料 (2020年11月)

- ✓ 日本の排出量は、世界の3%程度であり、世界全体での協調と技術による世界への貢献が何よりも重要。
- ✓ 発電からのCO2に焦点が当たりやすいが、発電からのCO2(上記グラフでは「エネルギー転換」の多く)以外からのCO2排出量は多く、非電力部門の対策も重要。

生産ベースと消費ベースCO₂排出量の差： 貿易に体化されたCO₂排出量（2000～2014年）

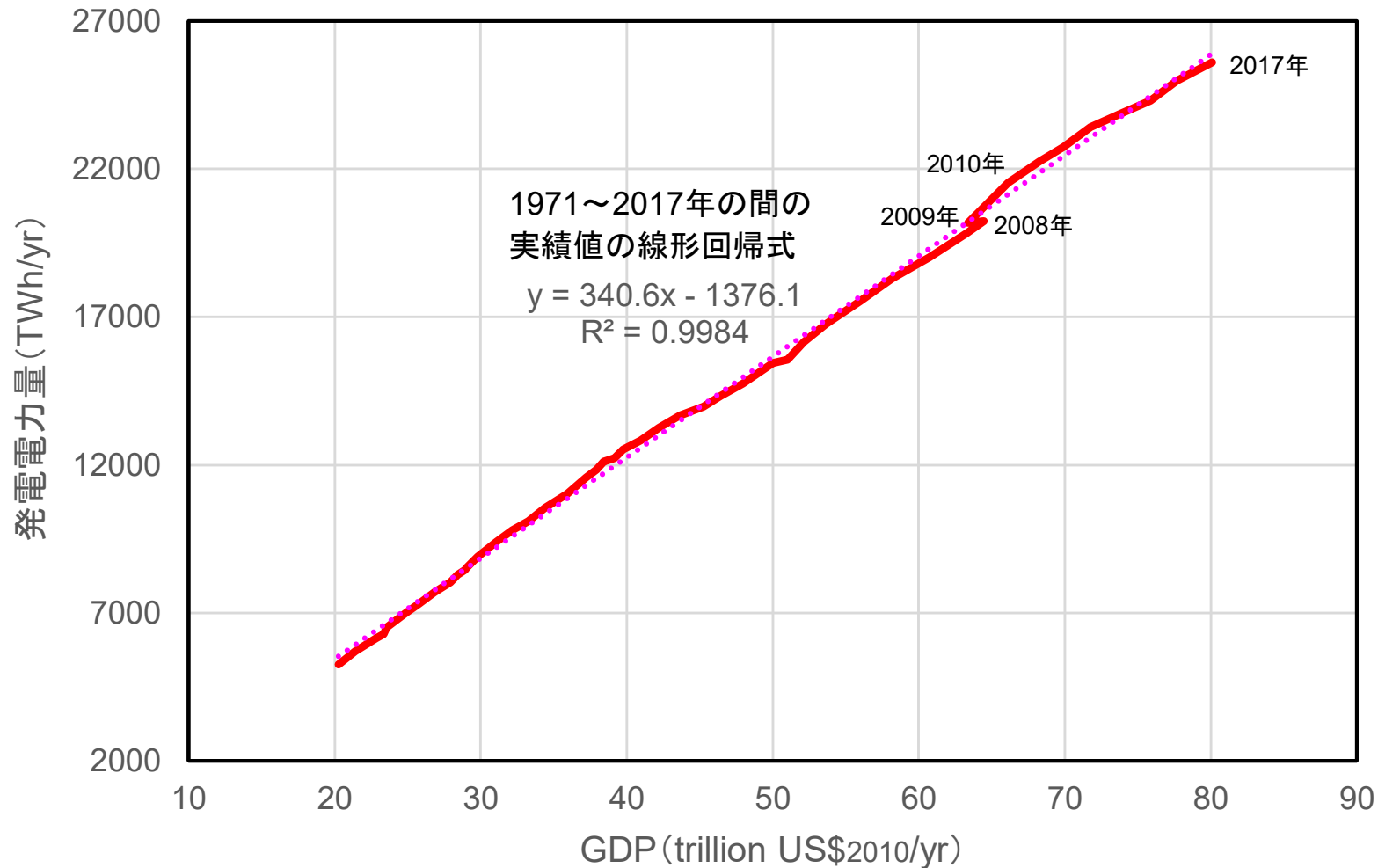
貿易に体化されたCO₂排出量：
[消費ベースCO₂排出量]－[生産ベースCO₂排出量]



出典) RITEによる推計、http://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/Analysis_Consumption-Based-CO2.pdf
本間他、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2019

ドイツを除けば、特にEUは、製造業を海外に依存し、サービス産業化する傾向が強まっている（貿易に体化されたCO₂は増大。近年、低下傾向が見られるが、体化されたCO₂の輸入元の中国等のCO₂原単位改善による部分が多い。）。一見、先進国を中心にCO₂が減っているように見えても、消費構造はあまり変化していない。日本など少数国がエネルギーコストを大きく上昇させた対策をとれば、生産拠点が変わるだけで、グローバルには排出減が進まない。

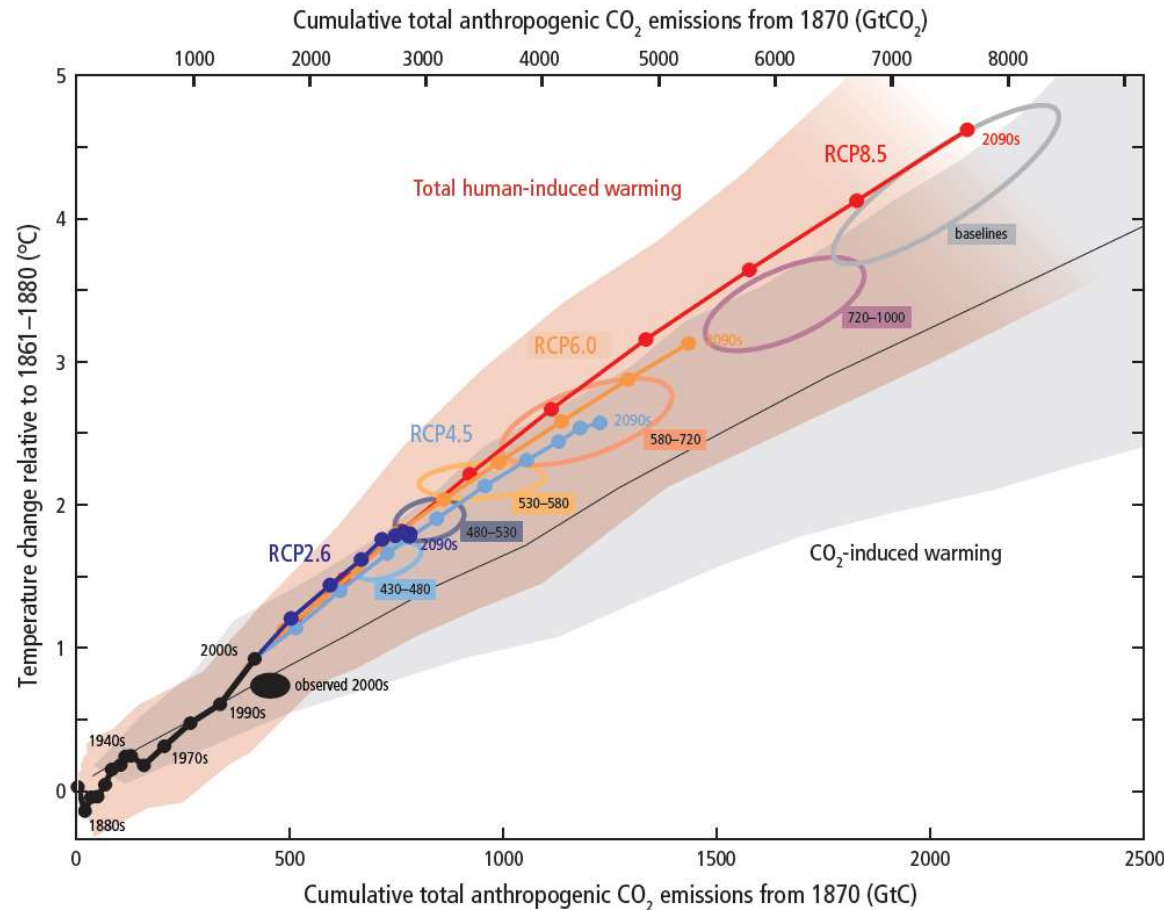
世界の経済成長と電力消費量の関係



出典) 国際エネルギー機関 (IEA) 統計、2019

世界GDP(経済成長)と電力消費量の関係は、強い正の相関関係が見られる。経済成長と電力消費量は密接な関係。

累積排出量と気温上昇の関係



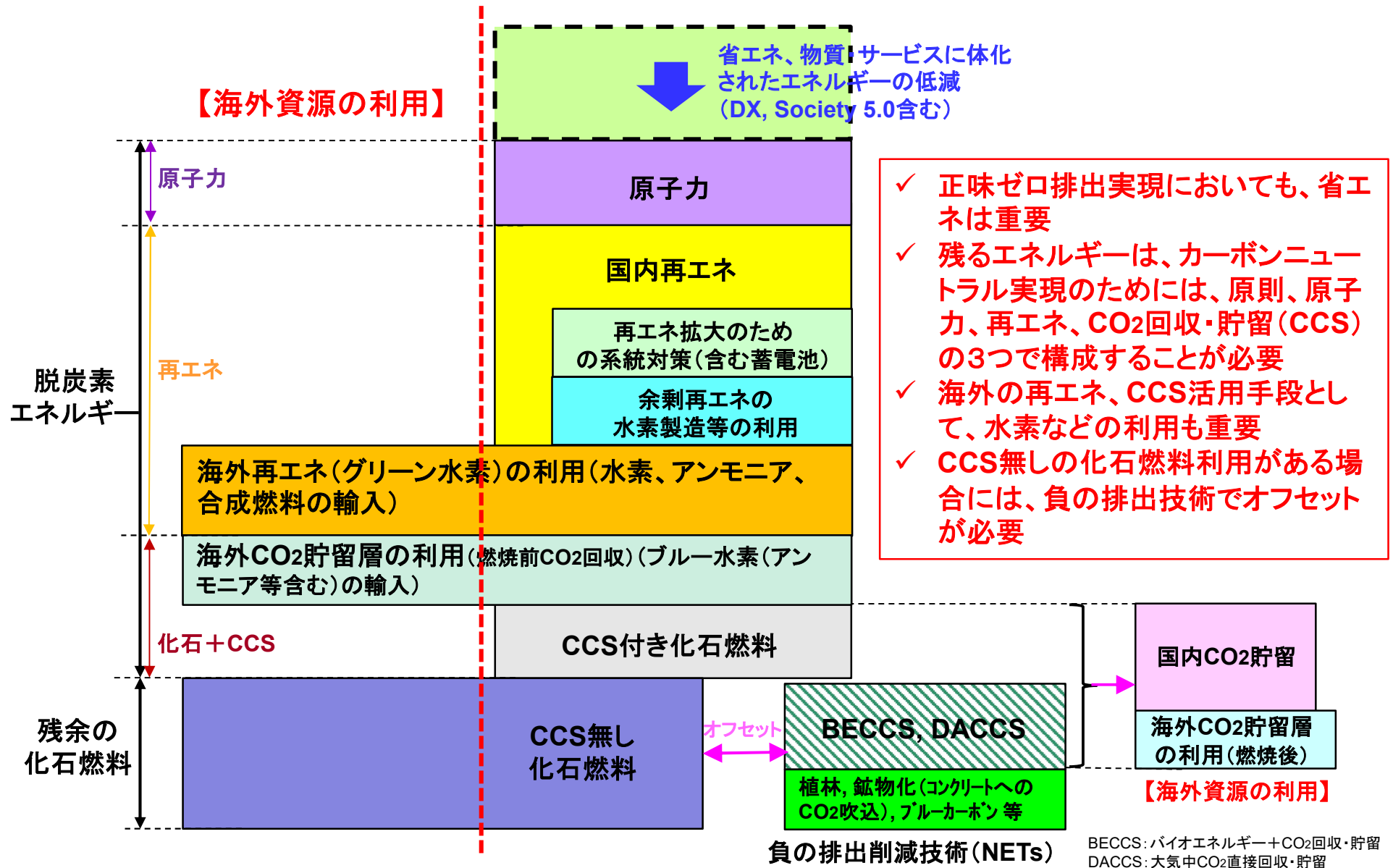
出典) IPCC AR5 統合報告書

【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るれば、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**

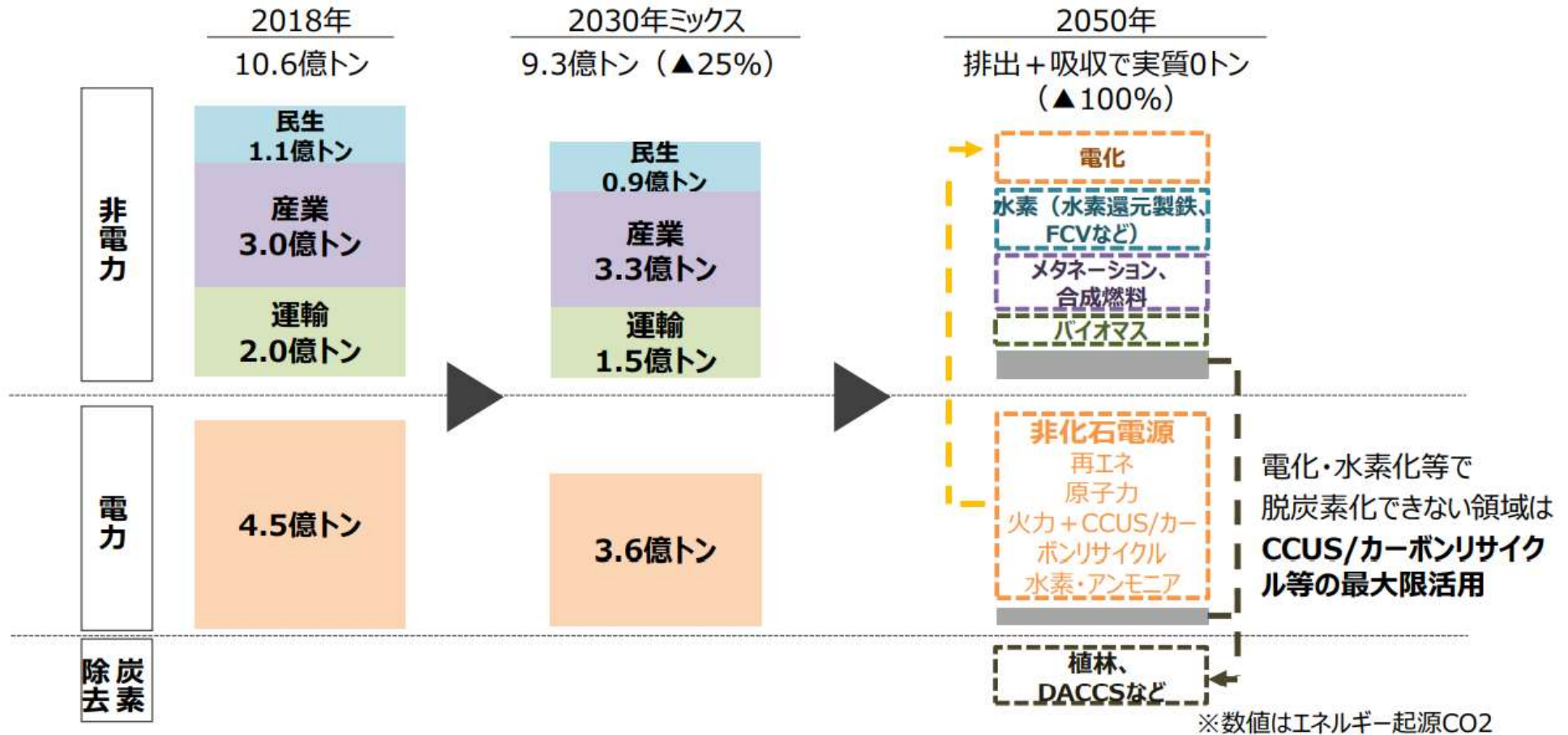
日本の正味ゼロ排出のイメージ (1/2)

【国内の一次エネルギー供給】

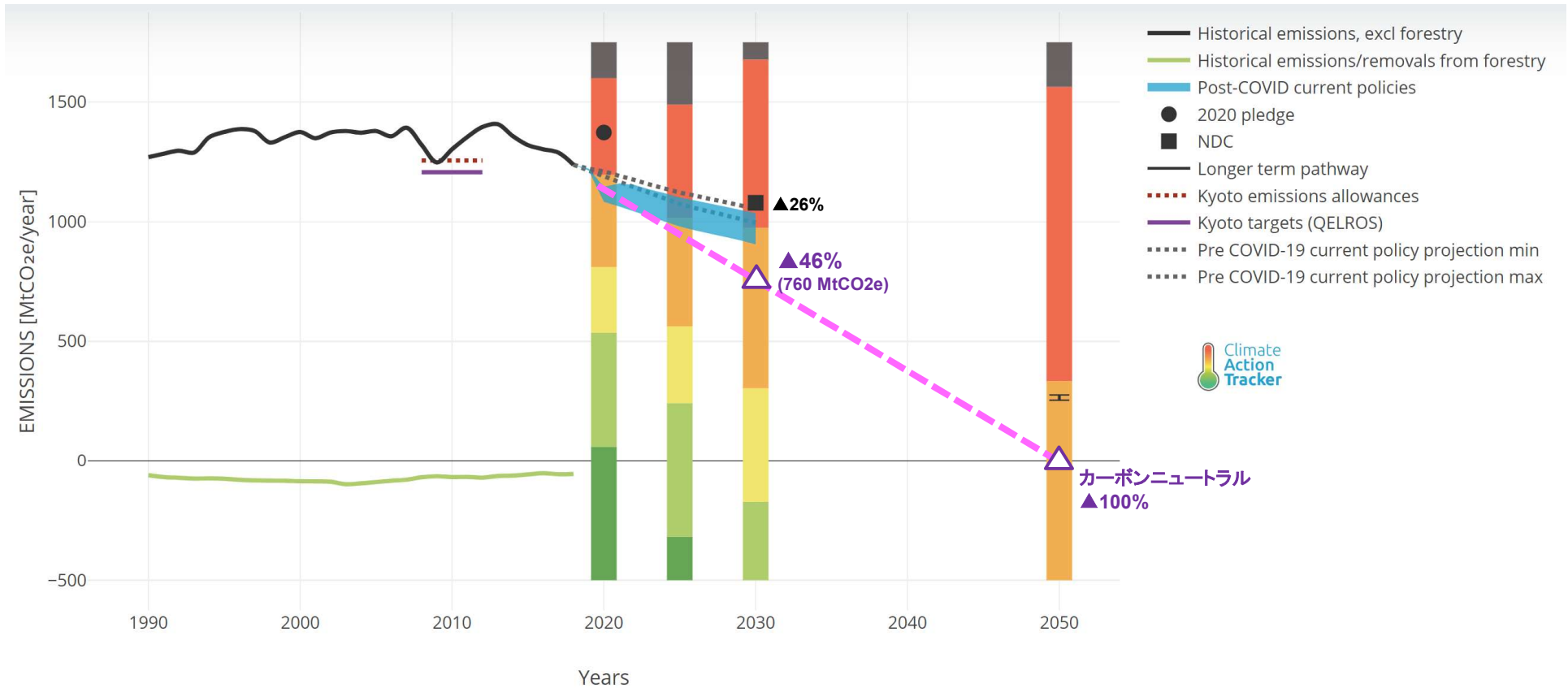


- ✓ 正味ゼロ排出実現においても、省エネは重要
- ✓ 残るエネルギーは、カーボンニュートラル実現のためには、原則、原子力、再エネ、CO₂回収・貯留(CCS)の3つで構成することが必要
- ✓ 海外の再エネ、CCS活用手段として、水素などの利用も重要
- ✓ CCS無しの化石燃料利用がある場合には、負の排出技術でオフセットが必要

日本の正味ゼロ排出のイメージ (2/2)



日本の2030年、2050年の温室効果ガス排出削減目標



出典) Climate Action Tracker(に加筆)

- ✓ 2030年▲46%は、2050年正味ゼロのほぼ線形での延長線上
- ✓ エネルギーインフラのストック、設備導入のリードタイム、イノベーションの余地が限定的なことなどからすると、2050年カーボンニュートラル以上に難しい目標と考えられる。

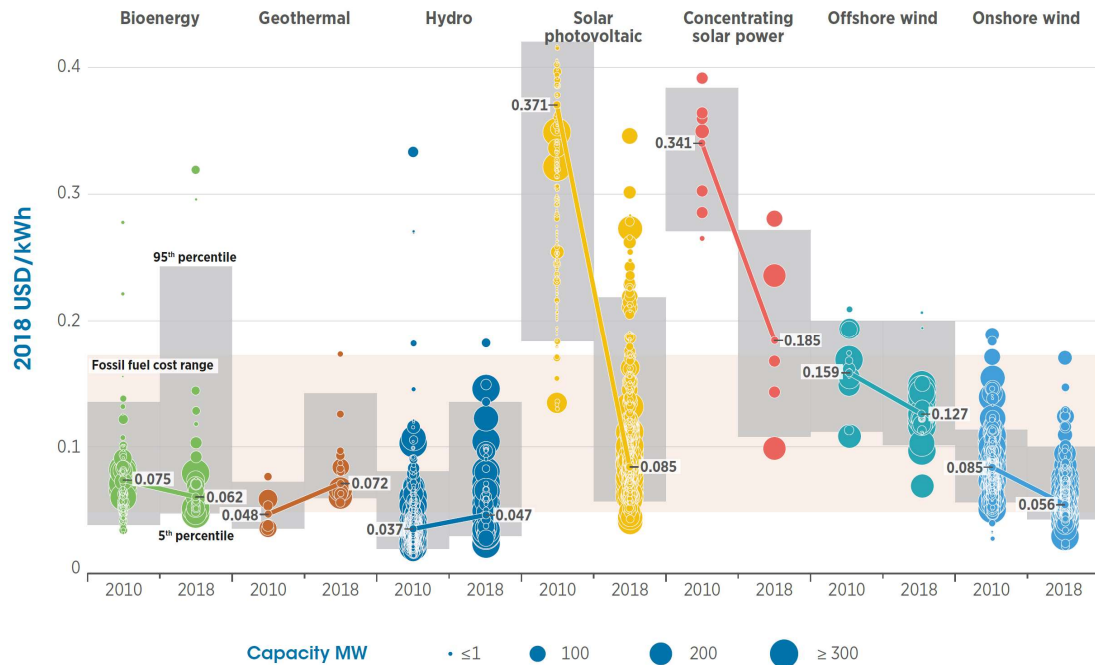
2. カーボンニュートラルに向けた 各種対策技術の役割と課題



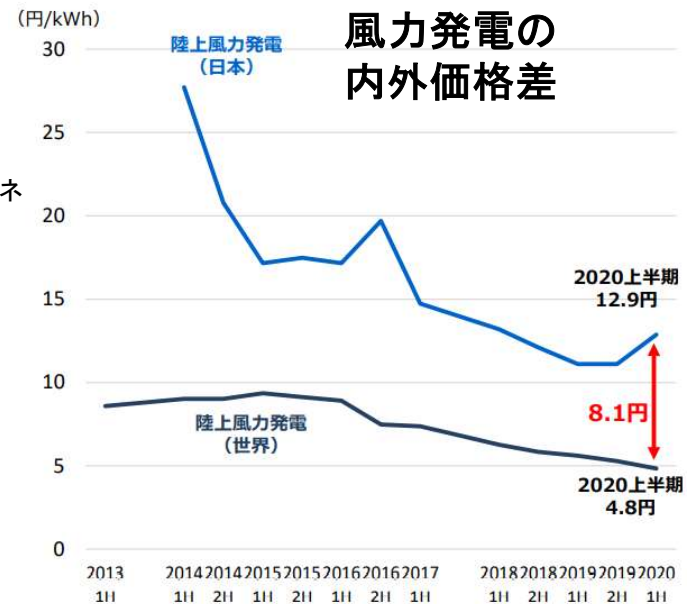
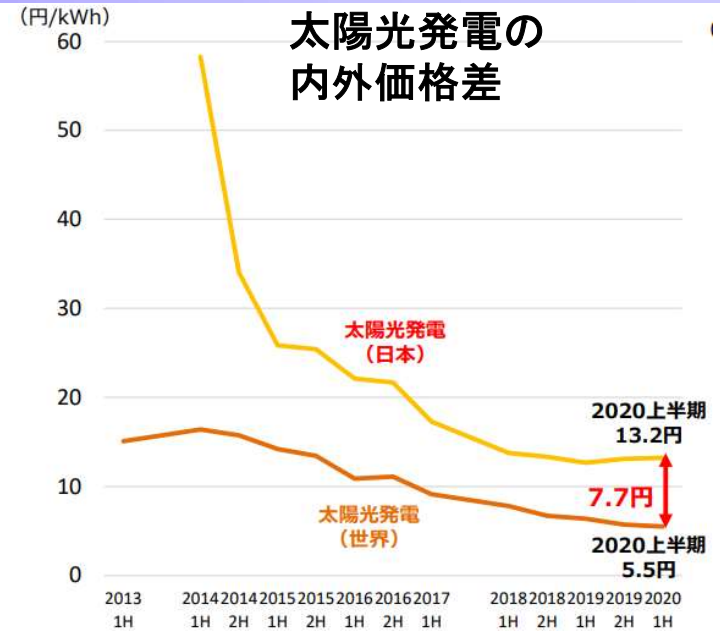
2.1. 再生可能エネルギー、蓄電池、 水素の役割と課題



世界の再生可能エネルギーの動向



出典) IRENA



出典) 総合資源エネルギー調査会

- ✓ 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。

日本の再生可能エネルギー導入急拡大のひずみ

発電電力量の国際比較（水力発電除く）

出典) 調達価格等算定委員会

単位: 億kWh

	2012年	2019年
日本	309	1,056 3.4倍
EU	3,967	6,600 1.7倍
ドイツ	1,213	2,227 1.8倍
イギリス	359	1,146 3.2倍
世界	10,586	27,938 2.8倍

出典: IEA データベースより資源エネルギー庁作成

災害に起因した太陽光発電設備に係る被害例



景観に影響を及ぼしている事例



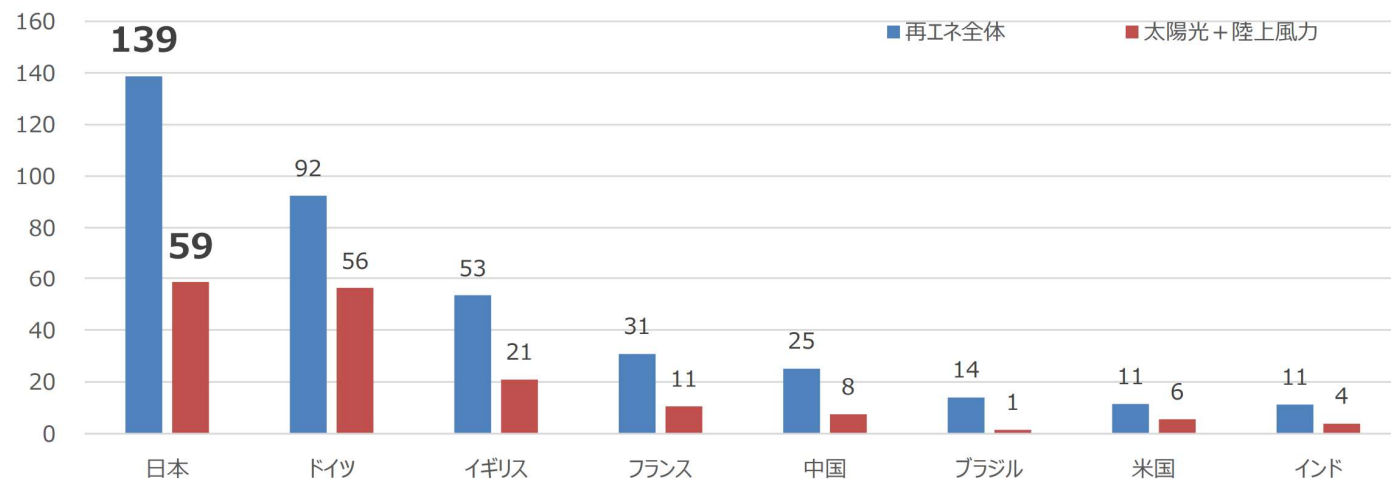
観光地へのアクセス道路からの景観



- 平地あたりの再エネ発電量でみると、**日本は世界最大。限られた国土の中で導入が進展。**

(万kWh/km²)

【平地面積あたりの各国再エネ／太陽光・陸上風力の発電量】



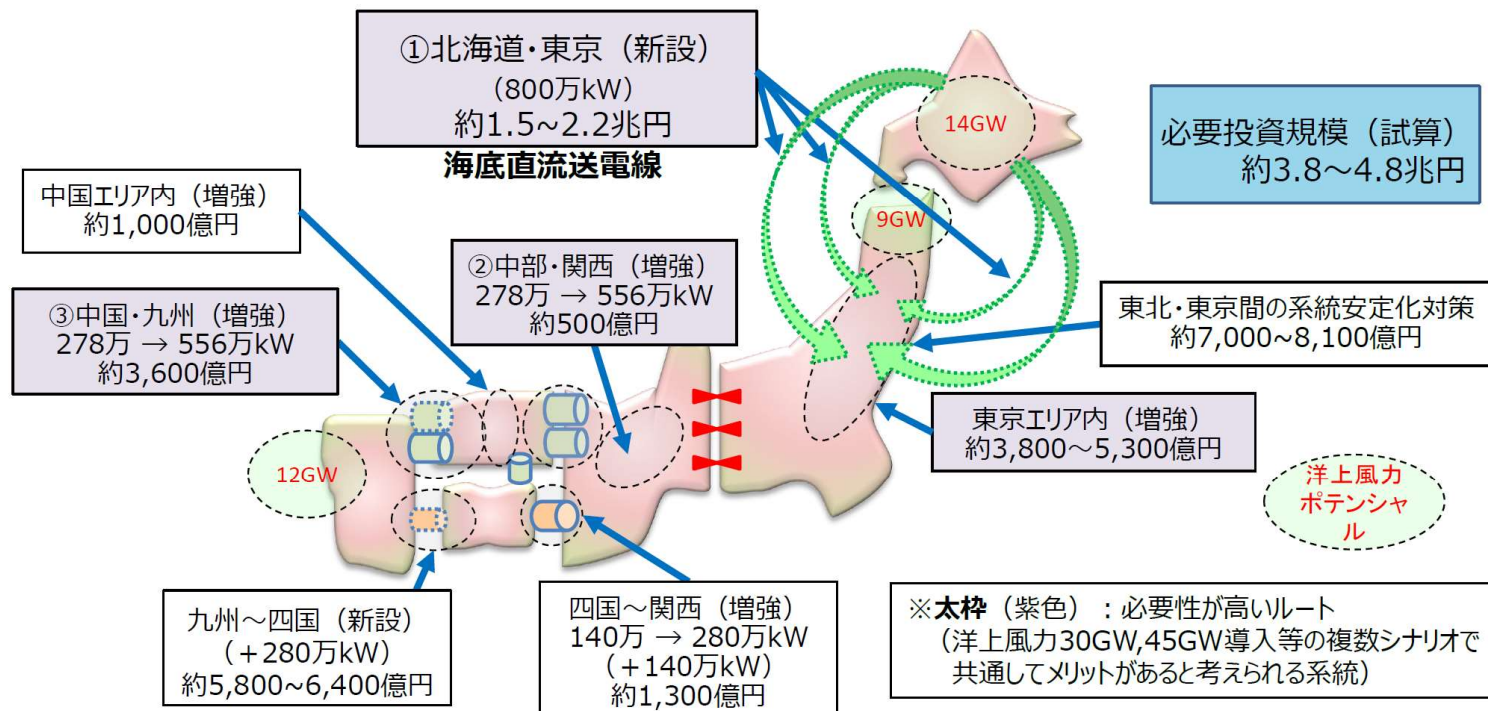
再エネの拡大は必須だが、国内での導入規模は楽観視できない。調和した拡大が必要

出典) 総合資源エネルギー調査会

再エネの拡大に向けて:プッシュ型の電力系統形成

- 再エネ主力電源化に向けて、系統制約を克服する取組は重要。
- 再エネポテンシャルへの対応、電力融通の円滑化によるレジリエンス向上に向けて、全国大での広域連系系統の形成を計画的に進めるため、マスタープランの中間整理を2021年5月にとりまとめた。新たなエネルギーミックス等をベースに、2022年度中を目途に完成を目指す。
- 北海道と本州を結ぶ海底直流送電等の必要性が高いルートは、順次、具体化を検討。

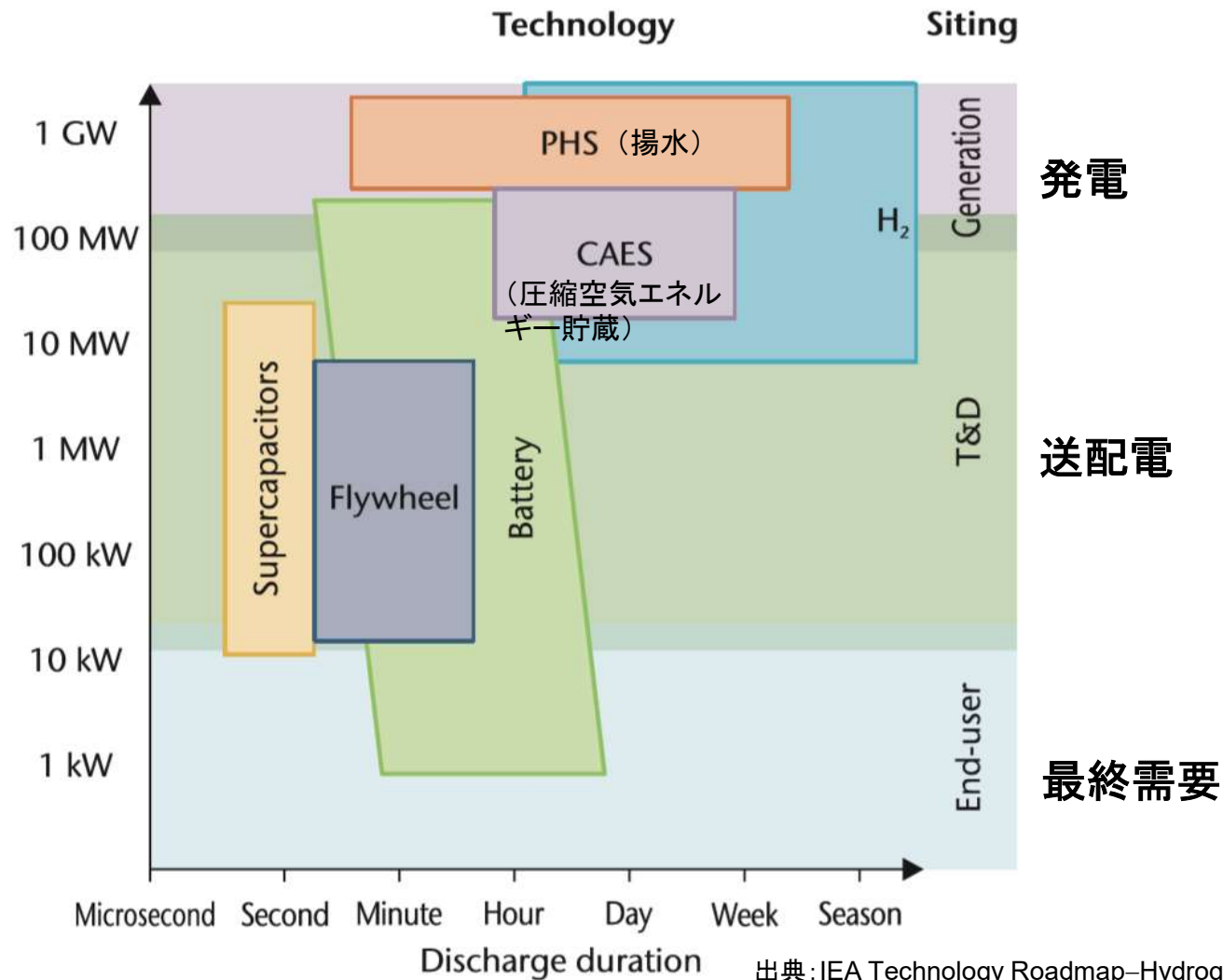
マスタープランの中間整理（電源偏在シナリオ45GWの例）



出典：広域連系系統のマスタープラン及び系統利用ルールの在り方等に関する検討委員会 中間整理

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）。偏在する再エネの大量導入によって、系統増強への大きな投資が必要（電力コスト増大のリスクもある一方、ビジネス機会でもある）。

変動性再エネの増加に伴うエネルギー貯蔵の重要性



- ✓ 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。
- ✓ 電子は移動がしやすいため、それを蓄電池という仕組みの中に抑え込むことは、原理的に困難さが増す。貯蔵の難しさ(コスト)は、電気(電子) > 水素 > 天然ガス > 石油 > 石炭 > ウラン のような順。

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“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

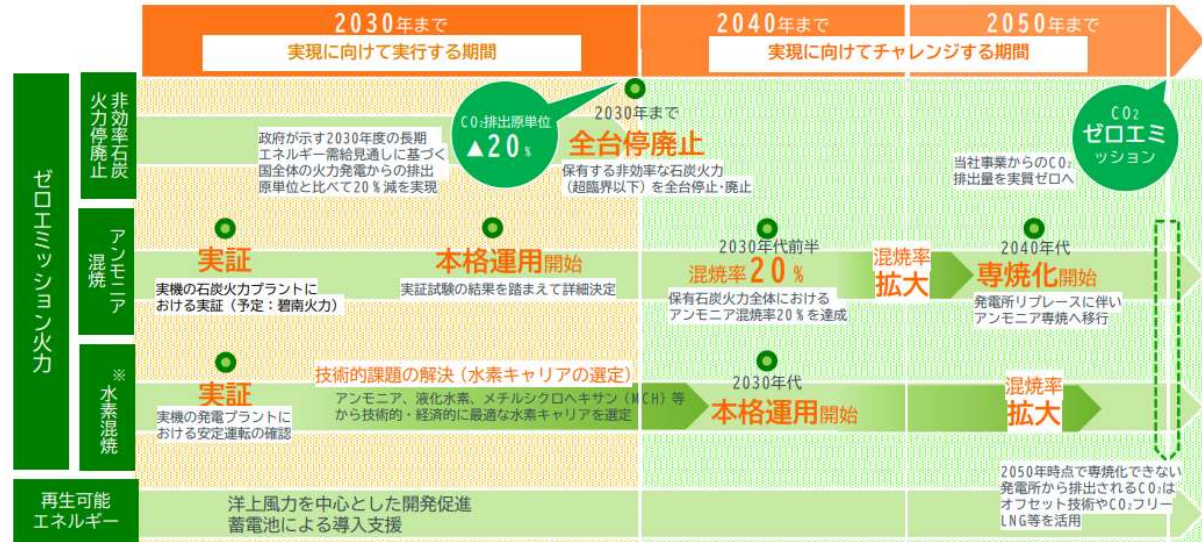
その他の施設の進捗

- 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)政府資料

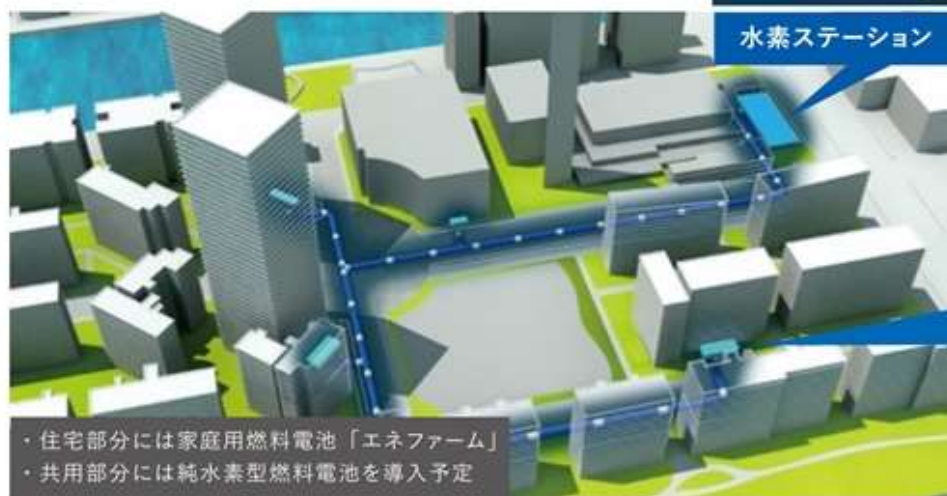


出典)JERA

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。 ※ CO₂フリーLNGの利用も考慮しております。

CN分散電源としての水素燃料電池の役割

出典)Panasonic

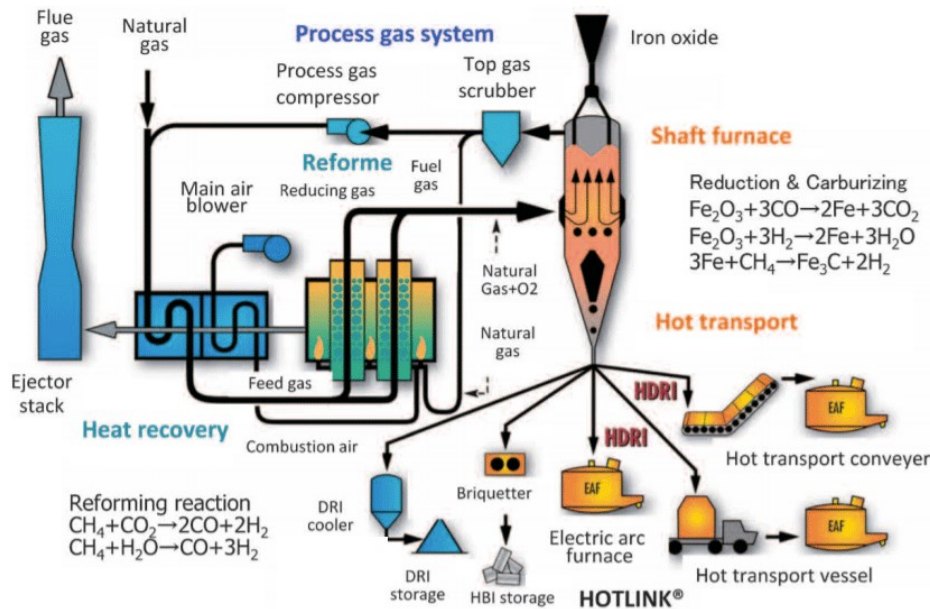


再エネポテンシャルの地理的偏りがある中、VREの拡大により、系統増強費用が大きくなる可能性もあることから、需要地近くへのCN分散電源の導入の経済性が大きくなる可能性がある。各種エネルギーのバランスのとれた導入が重要

水素直接還元製鉄の展望とモデル想定

- ✓ 直接還元鉄の製造において、現状では天然ガス(左図を参照)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である(右図を参照)
- ✓ 後述のDNE21+では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】
- ✓ **2031年から(同2040年以降)、新規建設・運開可能と想定**

天然ガスを利用した直接還元鉄の製鉄プロセスの例



J. Kopfle et al. Millenium Steel 2007, p.19

水素を利用した直接還元鉄の実証プラントの例

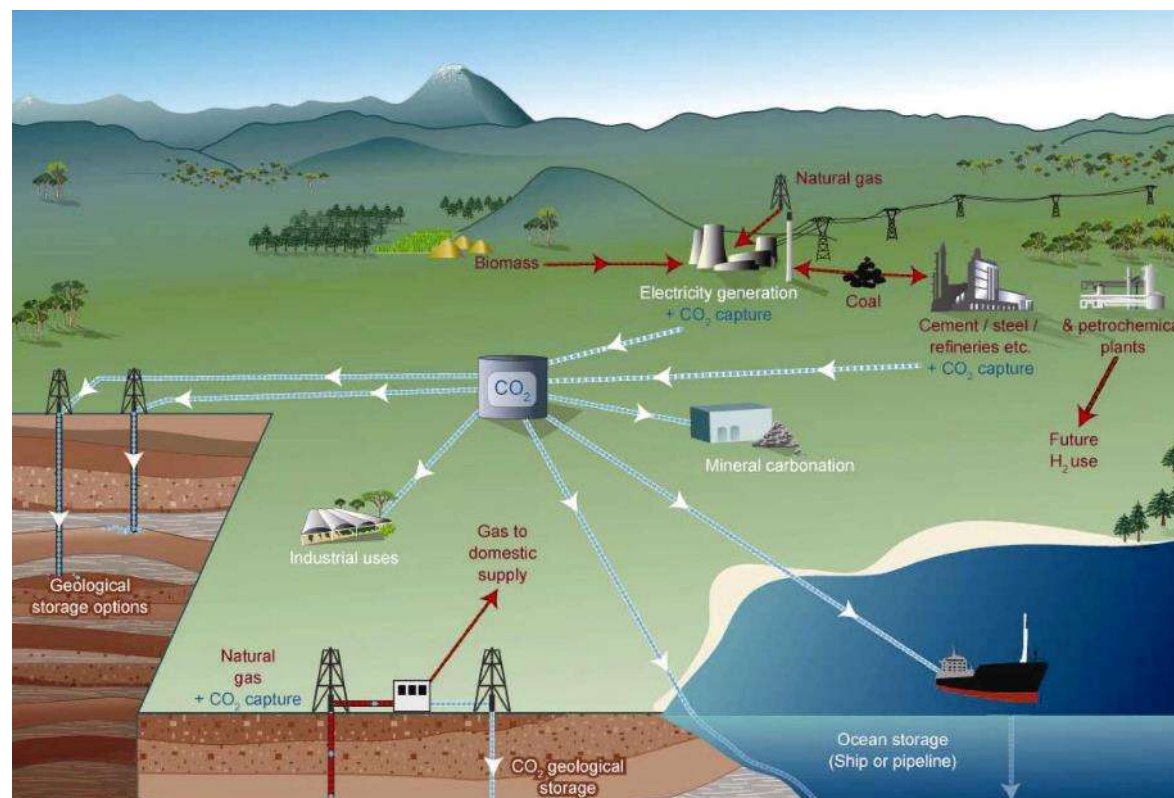


<https://www.midrex.com/>

https://www.kobelco.co.jp/releases/1201993_15541.html

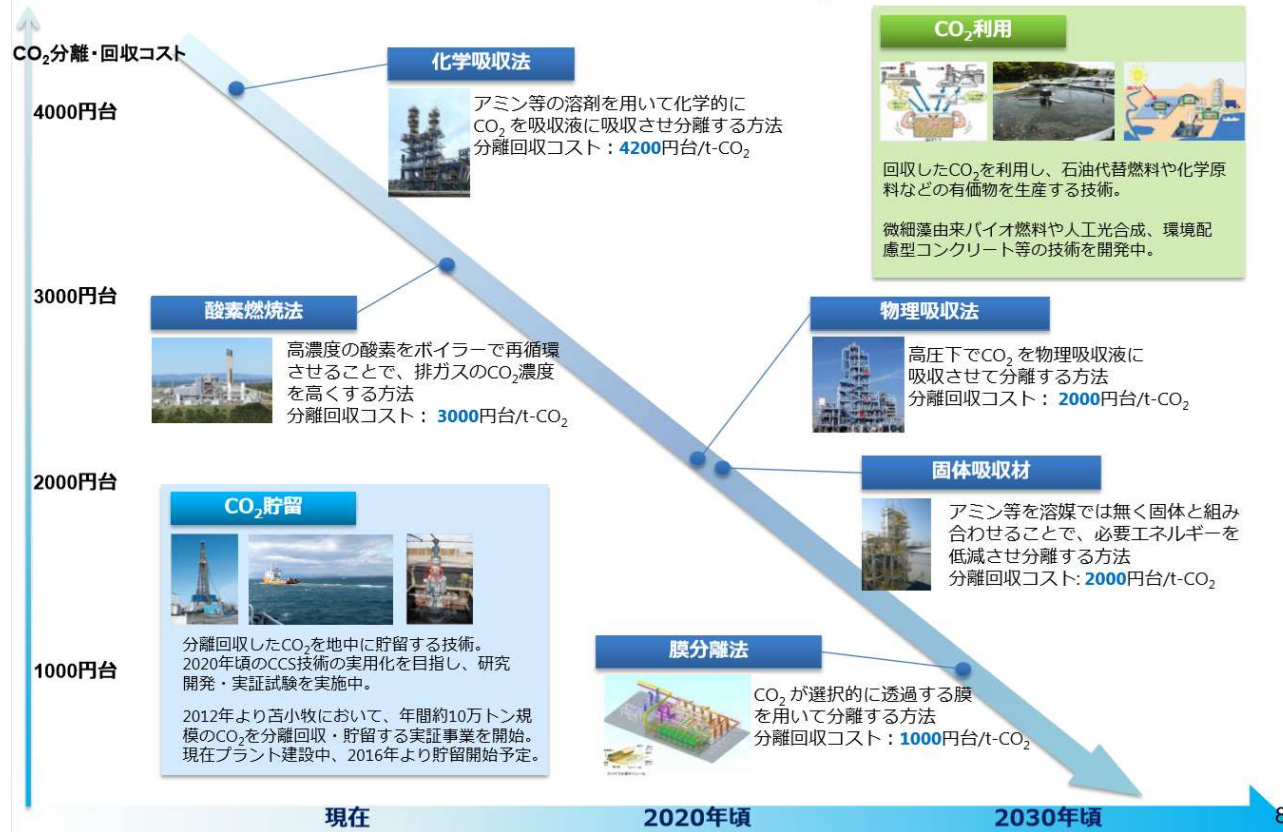
2.2. CCUS、DACの役割と課題

* CCUS: 二酸化炭素回収・利用・貯留、DAC: 大気中CO₂直接回収



CO2回収・貯留関連技術

出典) 資源エネルギー庁



注) 日本の技術的なポテンシャルとして、146 GtCO₂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 ₂)		【参考値】 IPCC SRCCS (2005) (GtCO ₂)	貯留費用 (\$/tCO ₂)* ¹
	日本	世界		
廃油田 (石油増進回収)	0.0	111.5	675-900	57 - 69* ²
廃ガス田	0.0	147.4 - 665.5		9 - 59
深部帯水層	11.4	3042.6	10 ³ -10 ⁴	5 - 38
炭層 (メタン増進回収)	0.0	143.4	3-200	27 - 122* ²

注1) 廃ガス田の貯留ポテンシャルの幅は、将来のガス探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。

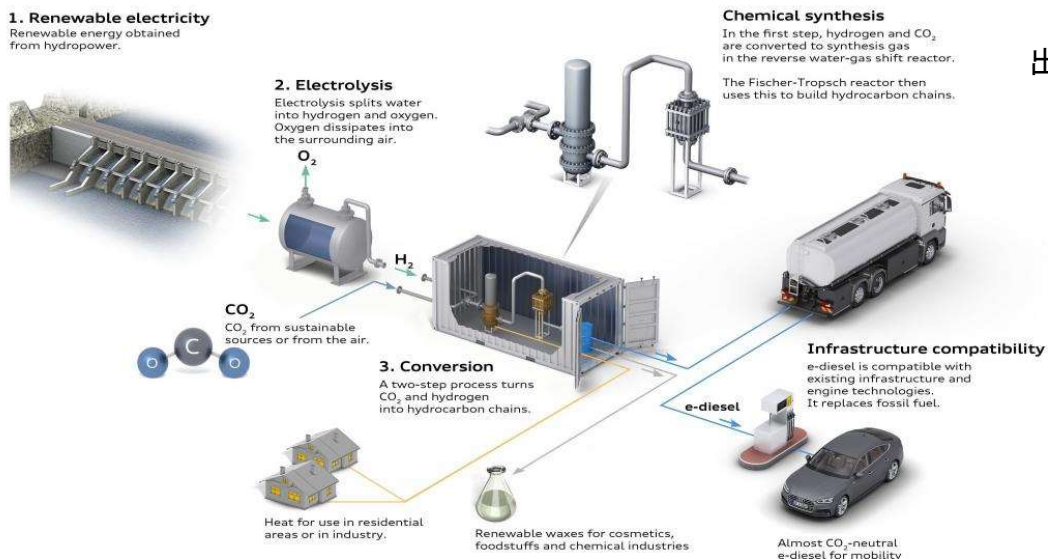
注2) 貯留費用の幅は、表中に示す範囲において累積貯留量の増大と共に上昇するように想定している。

*1 本数値にはCO₂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・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、合成石油・合成メタンも検討されている(既存インフラ、機器が利用可能)。
- ✓ 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。



出典) Audi

➤ 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

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

出典) ENEOS

日本ガス協会の2050年展望(目標)

	脱炭素化の手段	2050年※
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	

※上記数値はインベーシ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CO₂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。

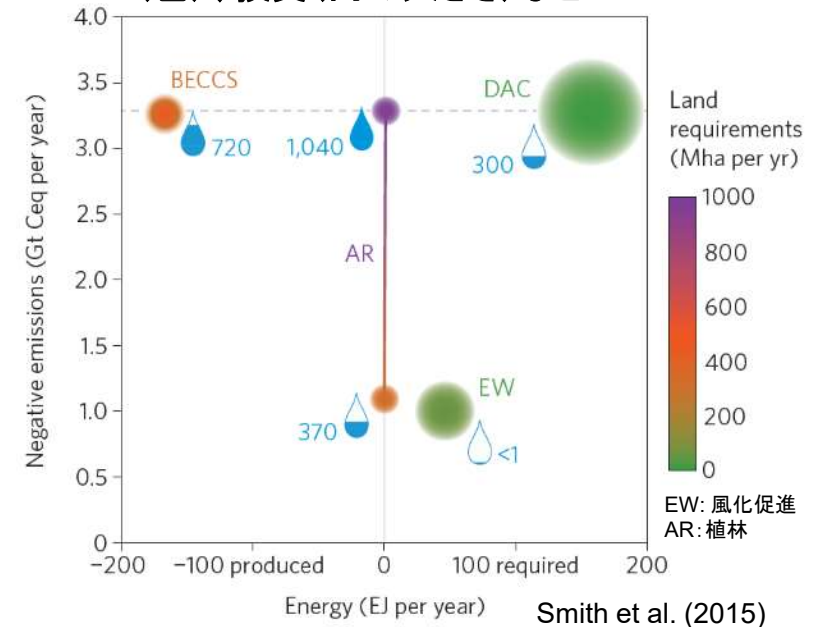
ICEFロードマップ2018 DACによる、DACのエネルギー消費量推計

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



Climeworks

必要エネルギー(横軸)、土地面積(色)、投資(円の大きさ)など



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))
	電力 (kWh)	熱 (GJ) (=1750 kWh)	
高温(電化)システム(HT DAC)	1535		815
低温システム(LT DAC)	250		730
		6.3	

2.3. 原子力発電の役割と課題



原子力の安定供給等における優位性

- 原子力は、燃料投入量に対するエネルギー出力が圧倒的に大きく（燃料交換後1年以上、発電の継続が可能）、数年にわたって国内保有燃料だけで生産が維持できる。

火力・原子力発電所(100万kW)と同量の発電量を得るための面積

原子力	約0.6km ²
火力	約0.5km ²
太陽光	約58km ² <small>※山手線の内側の面積が約63km²</small>
風力	約214km ²

原子力発電所(100万kW)の年間発電量を代替する場合に必要な燃料

原子力 (濃縮ウラン)	21トン
天然ガス	950,000トン
石油	1,550,000トン
石炭	2,350,000トン

国内在庫日数

原子力 (ウラン)	約2.9年分
天然ガス	約20日分
石油	約200日分
石炭	約29日分

原子力発電の審査と再稼働状況

再稼働
10基

稼働中 9基、停止中 1基 (起動日)

設置変更許可
6基

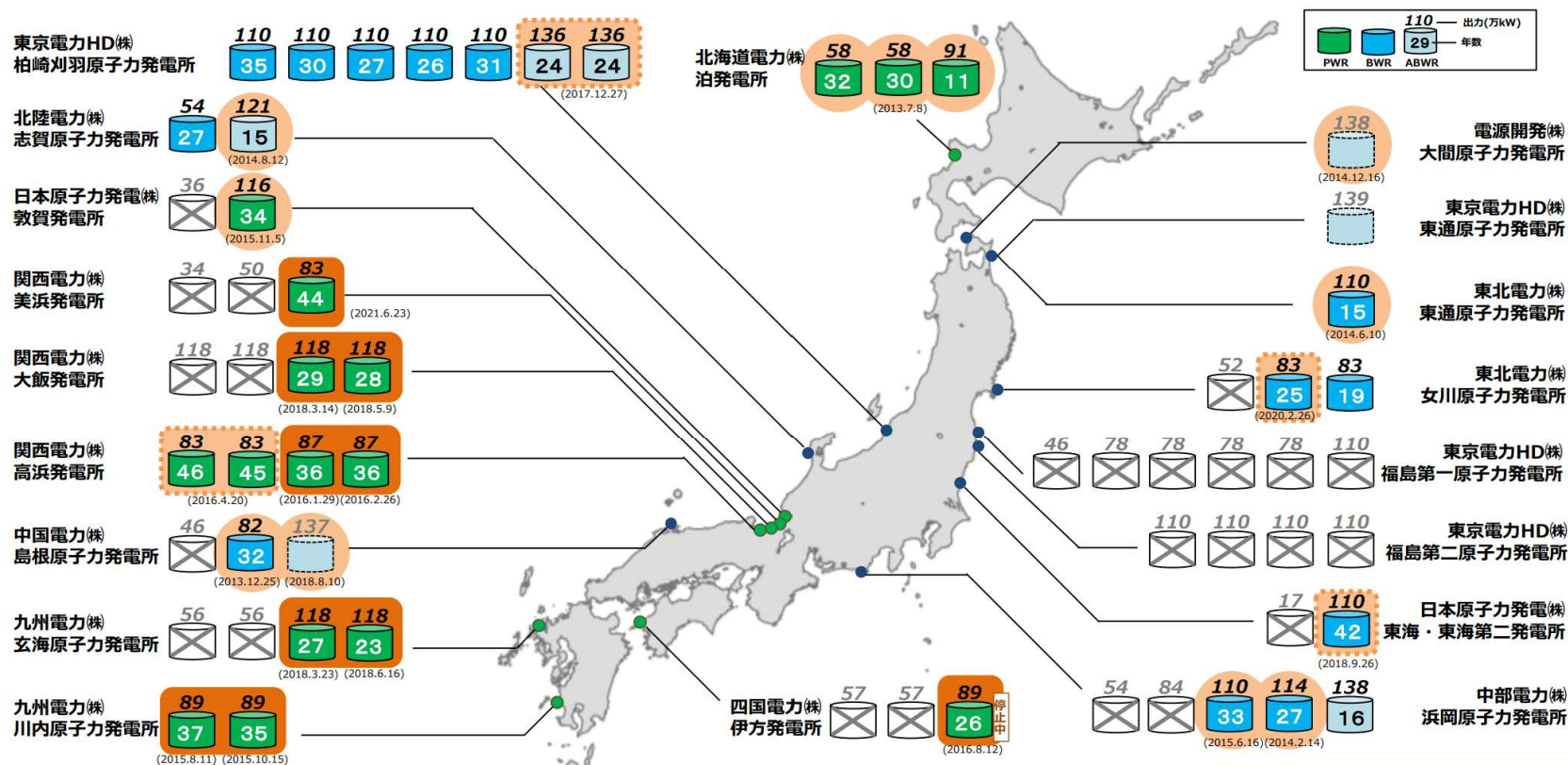
(許可日)

**新規制基準
審査中**
11基

(申請日)

未申請
9基

廃炉
24基



2021年7月5日現在

再稼働の影響

1基稼働：

燃料コスト → 350~630億円/年 削減※

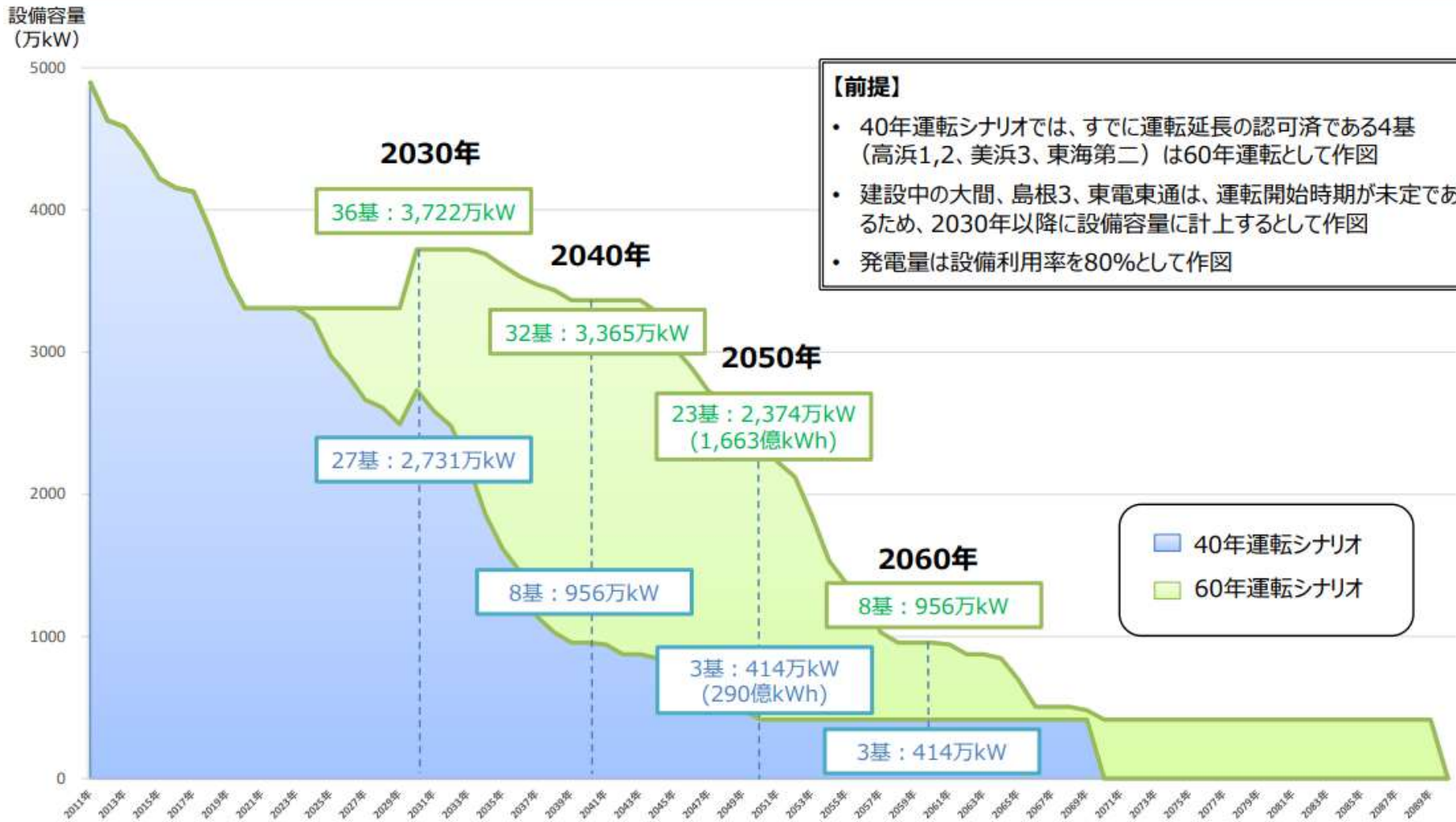
CO2 → 260~490万トン/年 削減※

(日本の年間CO2排出量：約11億トン)

※100万kW級原発(稼働率80%)がLNGまたは石油火力を代替した場合(2016年度推計値による)

日本の原子力発電容量の見通し

- 廃炉が決定されたものを除き、**36基の原子力発電所（建設中を含む）が60年運転すると仮定しても、自然体では、2040年代以降、設備容量は大幅に減少する見通し。**



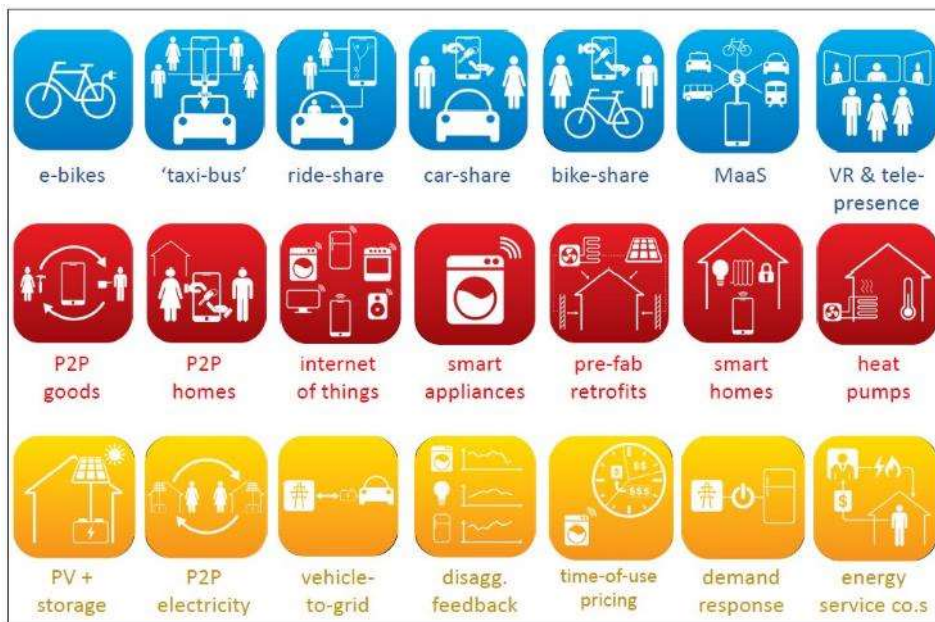
出典) 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会資料(2020)

2.4. 省エネ:DXによる低エネルギー 需要社会の実現の可能性

DX: デジタルトランスフォーメーション



エンドユース技術の破壊的イノベーション



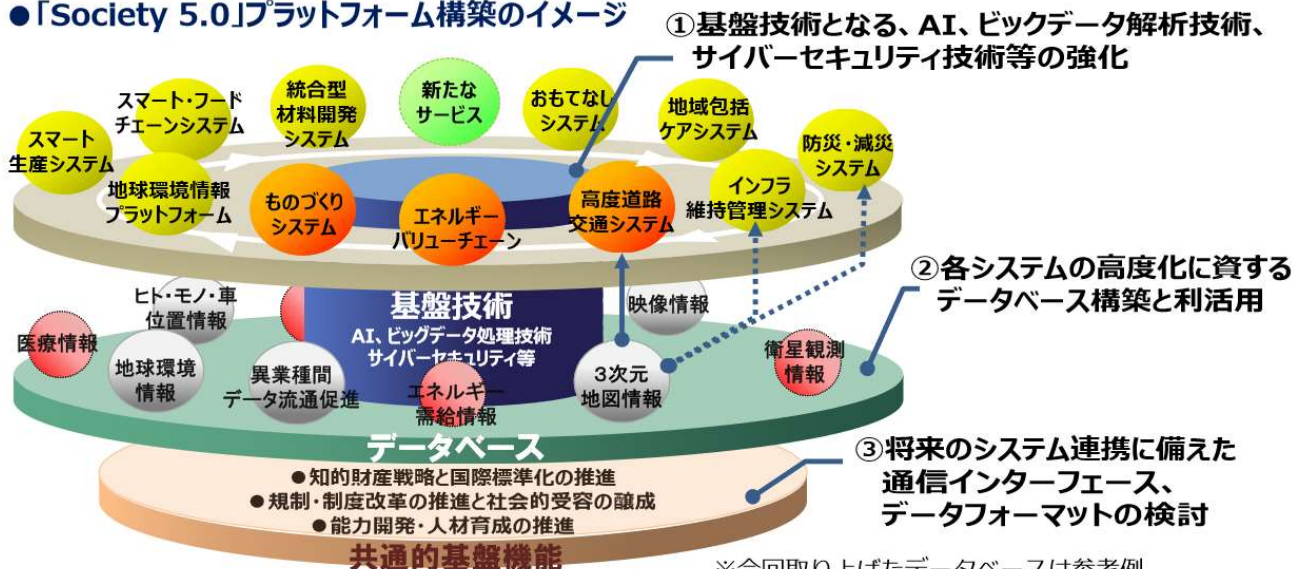
Source: C. Wilson (IIASA)

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

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

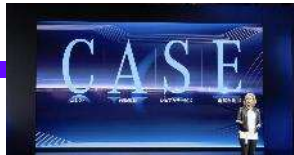
●「Society 5.0」プラットフォーム構築のイメージ



出典: 内閣府

※今回取り上げたデータベースは参考例

運輸部門: CASE



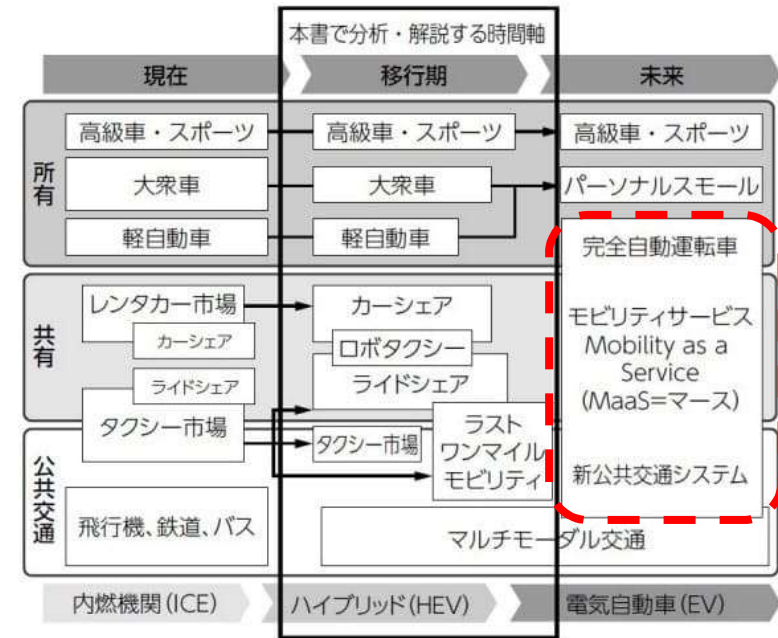
Connected; Service & Shared



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



Airbus, Audi

V2G



日産

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



出典) Jari Kauppila, ALPSシンポジウム(2019)

+20%
kerb-to-kerb street space

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

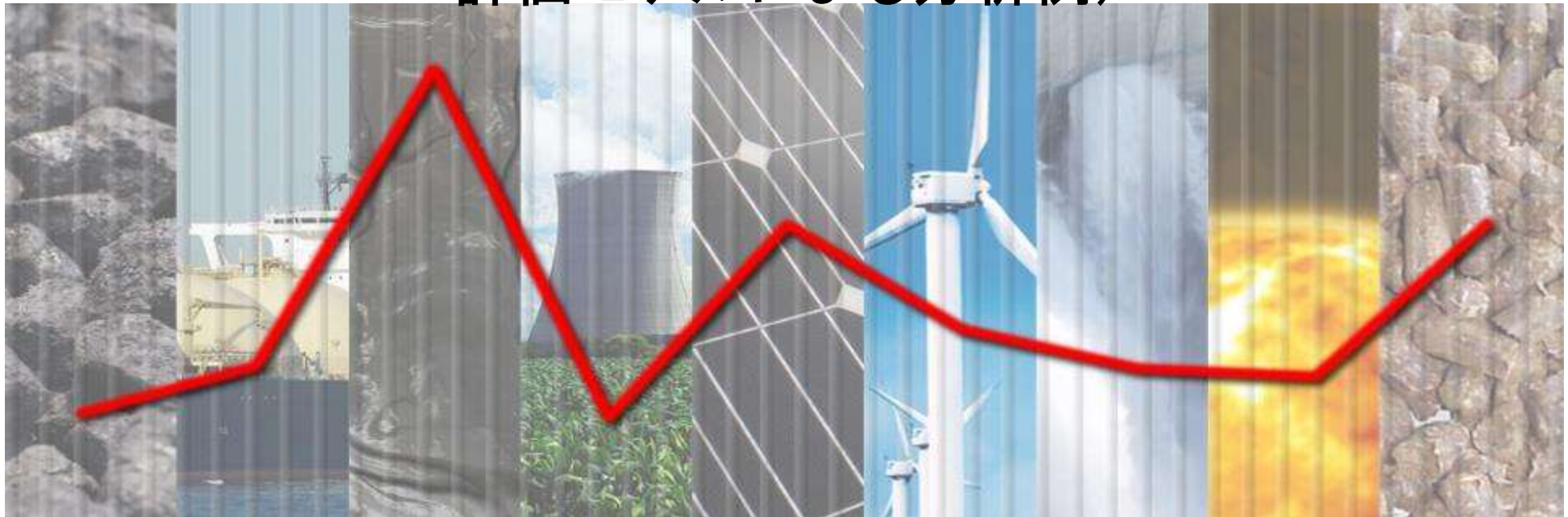
- 食料システムで排出されるGHGは30%前後(バウンダリーによっては更に大きい)とされる。一方、食品廃棄・ロス(世界全体では1/3にも上るとされる(ただし日本の食品廃棄・ロスは世界平均よりもずっと小さいとの評価有))。
- AI、ICTで食料需要をより正確に予測できるなどできれば、食品廃棄・ロスが減り、エネルギー消費・GHG排出の低減につながる可能性あり。
- プラスチック容器の低減、スーパーのスペース低減、冷蔵・冷凍エネルギー、輸送エネルギーの低減 などに波及し得る。



SDGsの同時達成にも大きな寄与となり得る。

3. 日本の2050年カーボンニュートラル に向けたシナリオ分析例

(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、設備寿命も考慮
- ◆ それ以外はトップダウン的モデル化(長期価格弾性値を用いて省エネ効果を推定)

- 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

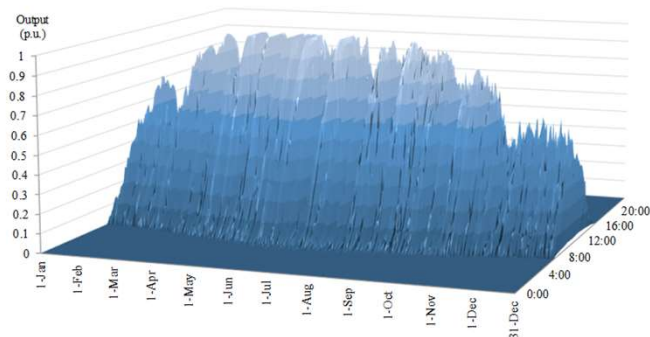
統合費用の想定：東大-IEEJ電源構成モデルの分析結果を活用

- ◆ DNE21+モデルは世界モデルであるため、国内の電力系統や再エネの国内での地域偏在性を考慮した分析は難しい。そこで系統対策費用については、別途、東京大学藤井・小宮山研究室および日本エネルギー経済研究所による最適電源構成モデルによる、変動性再生可能エネルギーが大量に導入された場合の電力システム費用の上昇分（統合費用）を推計結果を活用
- ◆ 全国のAMeDASデータ等をもとに変動性再生可能エネルギーの出力の時間変動をモデル化し、線形計画法によって電力部門の最適な設備構成（発電設備及び蓄電システム）及び年間の運用を推計
- ◆ 今回は日本全体を5地域（北海道、東北、東京、九州、その他）に区分し、1時間刻みのモデル化により計算を実施。発電コストや資源制約などの前提条件はDNE21+の想定に合わせて設定

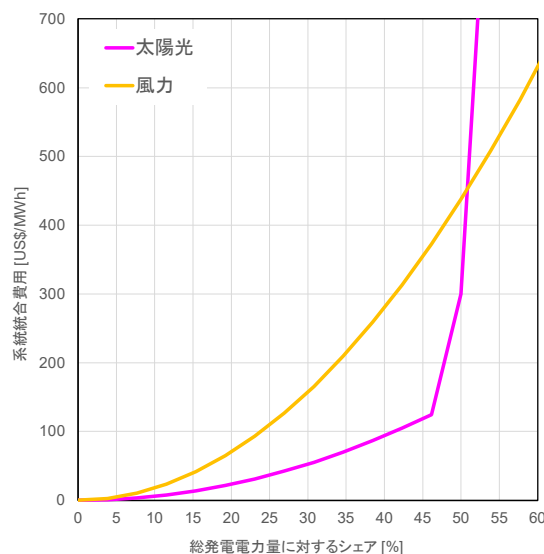
モデル計算で考慮されているもの・・・出力抑制、電力貯蔵システム（揚水発電、リチウムイオン電池、水素貯蔵）、発電設備の利用率低下、地域間連系線、貯蔵や送電に伴う電力ロス

モデル計算で考慮されていないもの・・・地内送電線、配電網、回転慣性の低下の影響、EVIによる系統電力貯蔵、再生可能エネルギー出力の予測誤差、曇天・無風の稀頻度リスクなど

東大-IEEJ電源構成モデルの分析結果から近似した系統統合費用
 =DNE21+で想定した系統統合費用の想定（各導入シェア実現時の**限界費用**）

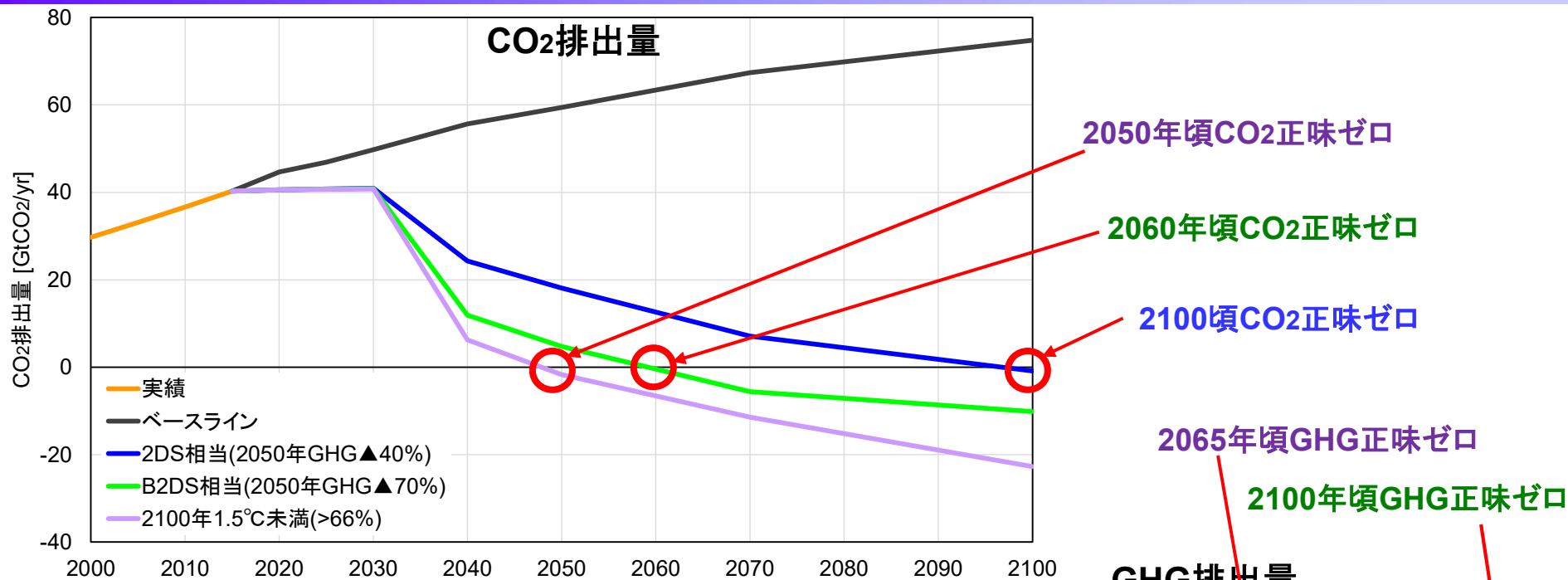


太陽光発電の出力例



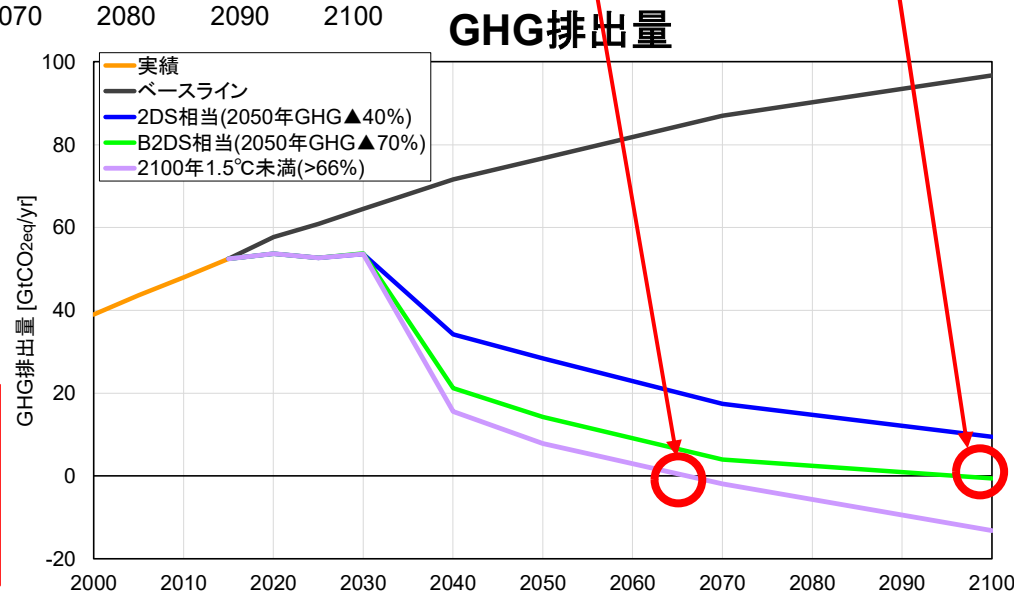
- VRE比率が高まると、**限界統合費用は比較的急速に上昇傾向有**。これは、既にVREが大量に導入されている状況で更に導入を進める場合、曇天・無風状態が数日以上継続するリスクに対応するため、利用頻度の低い蓄電システムや送電線を保持することが必要となることによる。
- 例えば、再エネ比率50%程度（太陽光約400TWh、風力約100TWh）のケースにおいては、蓄電池導入量は最適化計算の結果、**870GWh**、再エネ100%程度（VRE56%）のケースでは**3980GWh**程度となる。（足下導入量約10GWh程度）

ベースラインの世界排出量と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、B1.5OS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



日本の2050年カーボンニュートラルシナリオの分析では、日本の排出削減シナリオに加えて、世界全体について1.5°Cシナリオを併せて想定(世界のカーボンニュートラルエネルギー資源の取り合いも踏まえた分析)

【参考】資源エネルギー庁が提示の「参考値」

- 2050年カーボンニュートラルを目指す上で、脱炭素化された電力による安定的な電力供給は必要不可欠。3E+Sの観点も踏まえ、今後、以下に限定せず複数のシナリオ分析を行う。議論を深めて行くに当たり、それぞれの電源の位置づけをまずは以下のように整理してはどうか。

確立した脱炭素の電源	再エネ	<ul style="list-style-type: none"> 2050年における主力電源として、引き続き最大限の導入を目指す。 最大限導入を進めるため、調整力、送電容量、慣性力の確保、自然条件や社会制約への対応、コストを最大限抑制する一方、コスト増への社会的受容性を高めるといった課題に今から取り組む。 こうした課題への対応を進め、2050年には発電電力量（※1）の約5～6割を再エネで賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。 	
	原子力	<ul style="list-style-type: none"> 確立した脱炭素電源として、安全性を大前提に一定規模の活用を目指す。 国民の信頼を回復するためにも、安全性向上への取組み、立地地域の理解と協力を得ること、バックエンド問題の解決に向けた取組み、事業性の確保、人材・技術力の維持といった課題に今から取り組んでいく。2050年には、再エネ、水素・アンモニア以外のカーボンフリー電源として、化石+CCUS /カーボンリサイクルと併せて約3～4割を賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。 	
インベーションが必要な電源	火力	化石+CCUS	<ul style="list-style-type: none"> 供給力、調整力、慣性力の利点を持つ一方で、化石火力の脱炭素化が課題。 CCUS /カーボンリサイクルの実装に向け、技術や適地の開発、用途拡大、コスト低減などに今から取組み、一定規模の活用を目指す。2050年には、再エネ、水素・アンモニア以外のカーボンフリー電源として、原子力と併せて約3～4割を賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。
		水素・アンモニア	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼時に炭素を出さず、調整力、慣性力の利点を持つ一方で、大規模発電に向けた技術確立、コスト低減、供給量の確保が課題。今からガス火力、石炭火力への混焼を進め、需要・供給量を高め安定したサプライチェーンを構築にも取り組む。 産業・運輸需要との競合も踏まえつつ、カーボンフリー電源として一定規模の活用を目指す。水素基本戦略で将来の発電向けに必要な調達量が500～1000万トンとされていることを踏まえ、水素・アンモニアで2050年の発電電力量の約1割前後を賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。

※1：2050年の発電電力量は、第33回基本政策分科会で示したRITEによる発電電力推計を踏まえ、約1.3～1.5兆kWhを参考値（※2）とする。

※2：政府目標として定めたものではなく、今後議論を深めて行くための一つの目安・選択肢。今後、複数のシナリオを検討していく上で、まず検討を加えることになるもの。

シナリオ想定（概略）

		2050年GHG 排出削減	各種技術の想定 (コスト・性能)	各種技術の導入シナリオ
海外クレジット活用ケース(世界費用最小化＝世界限界削減費用均等化)		国内削減率はモデルで 内生的に決定	モデルの標準想定 (注:ただし、再エネ比率が高いシナリオでは、疑似慣性力が実現し、普及していることが暗黙の前提となる)	モデルで 内生的に決定 (コスト最小化)。ただし 原子力は上限10% で制約。 CO2貯留量制約 想定
参考値のケース		▲100%		再エネほぼ100% (原子力0%)
参考値のケースのモデル想定下で再エネ比率が変化した場合のコスト等を推計	① 再エネ100%	(日本以外については、欧米はそれぞれ▲100%、それ以外は、CO2について全体で▲100%を想定(GHGは2065年頃▲100%):1.5°Cシナリオ)		
それぞれの技術課題が克服され、より利用が拡大すると想定したシナリオ	② 再エネイノベ		再エネのコスト低減加速	モデルで 内生的に決定 。ただし原子力は上限10%で制約。 CO2貯留量制約 想定
	③ 原子力活用		原子力の導入拡大	モデルで 内生的に決定 。ただし 原子力の上限を20% と感度を想定。 CO2貯留量制約 想定
	④ 水素イノベ		水素のコスト低減加速	モデルで 内生的に決定 。ただし原子力は上限10%で制約。 CO2貯留量制約 想定
	⑤ CCUS活用		CO2貯留可能量拡大	モデルで 内生的に決定 。ただし原子力は上限10%で制約。 CCS可能量を大きく 想定
	⑥ 需要変容		カー・ライドシェア拡大	完全自動運転車実現・普及により、 カーシェア・ライドシェアが劇的に拡大 すると想定。その他は参照シナリオの想定と同じ

シナリオ想定と再エネ比率 (2050年)

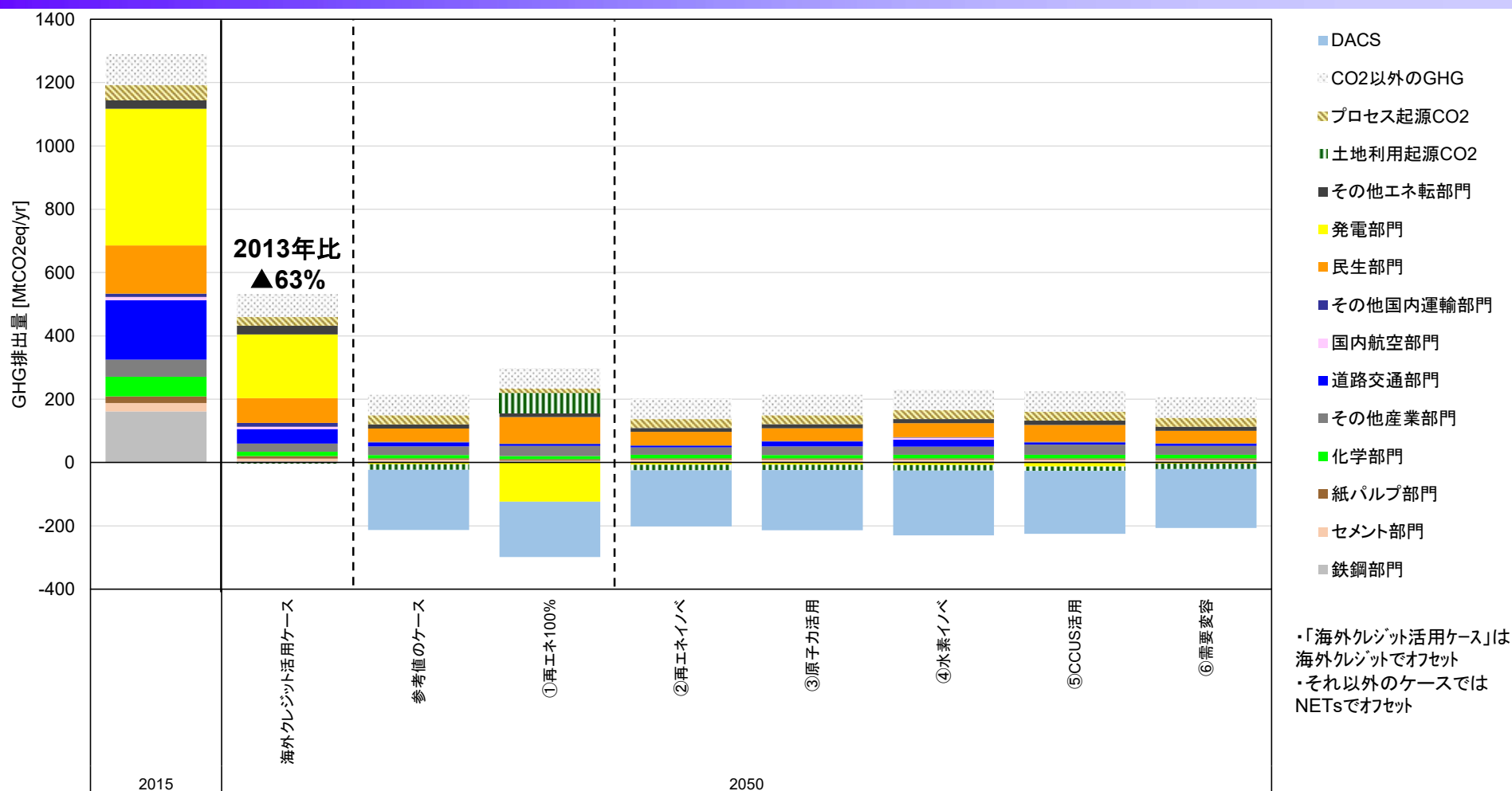
シナリオ名	再エネコスト	原子力比率	水素コスト	CCUS (貯留ポテンシャル)	完全自動運転 (カー・ライドシェア)	電源構成に占める再エネ比率
参考値のケース ^{*1}	標準コスト	10%	標準コスト	国内貯留: 91MtCO ₂ /yr、 海外への輸送: 235MtCO ₂ /yr	標準想定 (完全自動運転車実現・普及想定せず)	54% (最適化結果)
①再エネ100%		0%				ほぼ100% (シナリオ想定)
②再エネイノベ	低位コスト	10%				63% (最適化結果)
③原子力活用 ^{*2}	標準コスト	20%				53% (最適化結果)
④水素イノベ		水電解等の水素製造、水素液化設備費:半減				47% (最適化結果)
⑤CCUS活用		標準コスト				国内:273MtCO ₂ /yr、 海外:282MtCO ₂ /yr
⑥需要変容		標準コスト	国内91Mt、 海外235Mt	2030年以降完全自動運転実現・普及し、カー・ライドシェア拡大、自動車台数低減により素材生産量低下 51% (最適化結果)		

※需要サイドの変化については、カーシェアリング以外の要素も踏まえた更なるシナリオ分析を継続する。

*1: DAC無しでは実行可能解が無く、全てのシナリオでDACが利用可能と想定

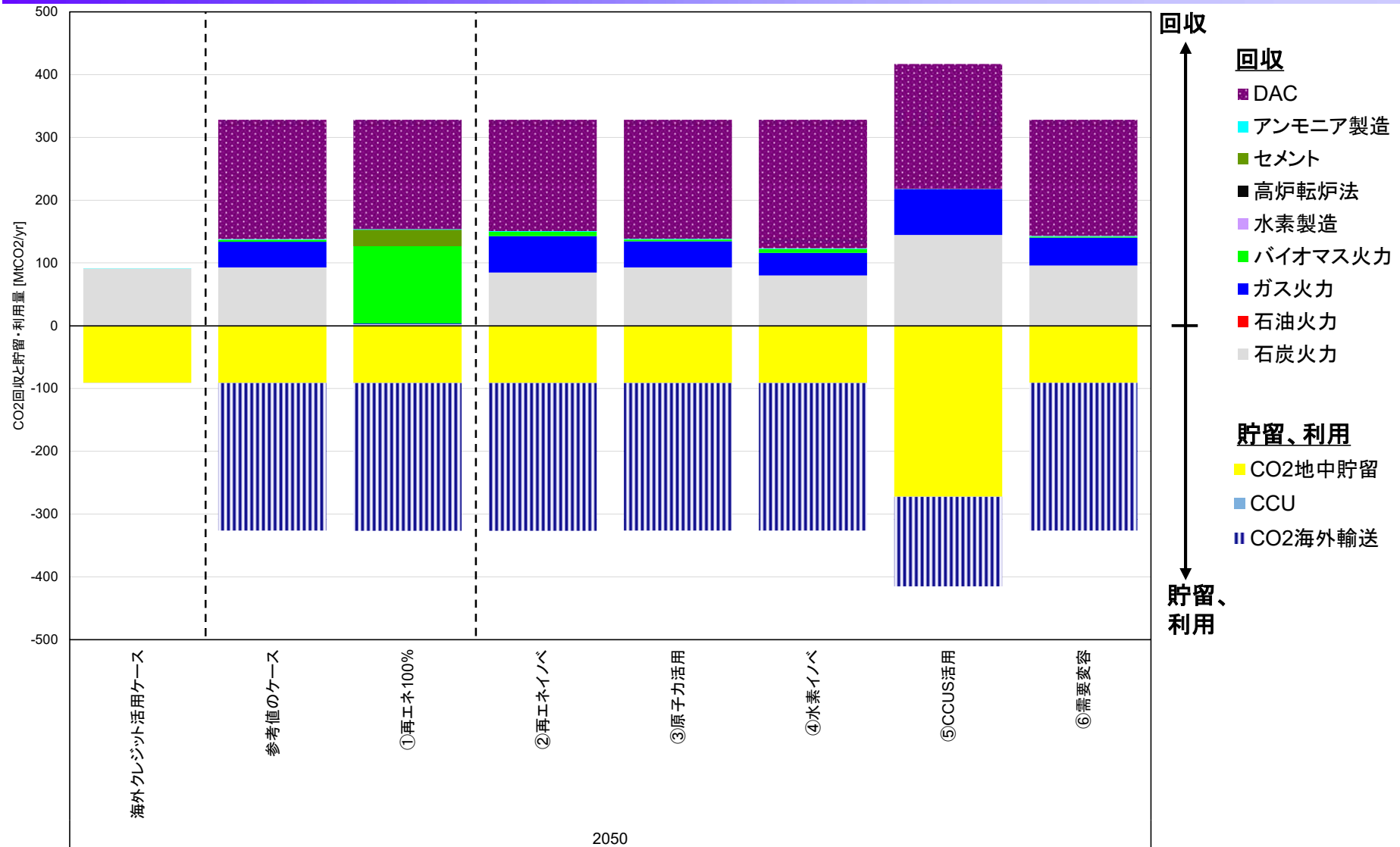
*2: 原子力活用シナリオは別途、比率50%まで分析を実施

日本の部門別GHG排出量（2050年）



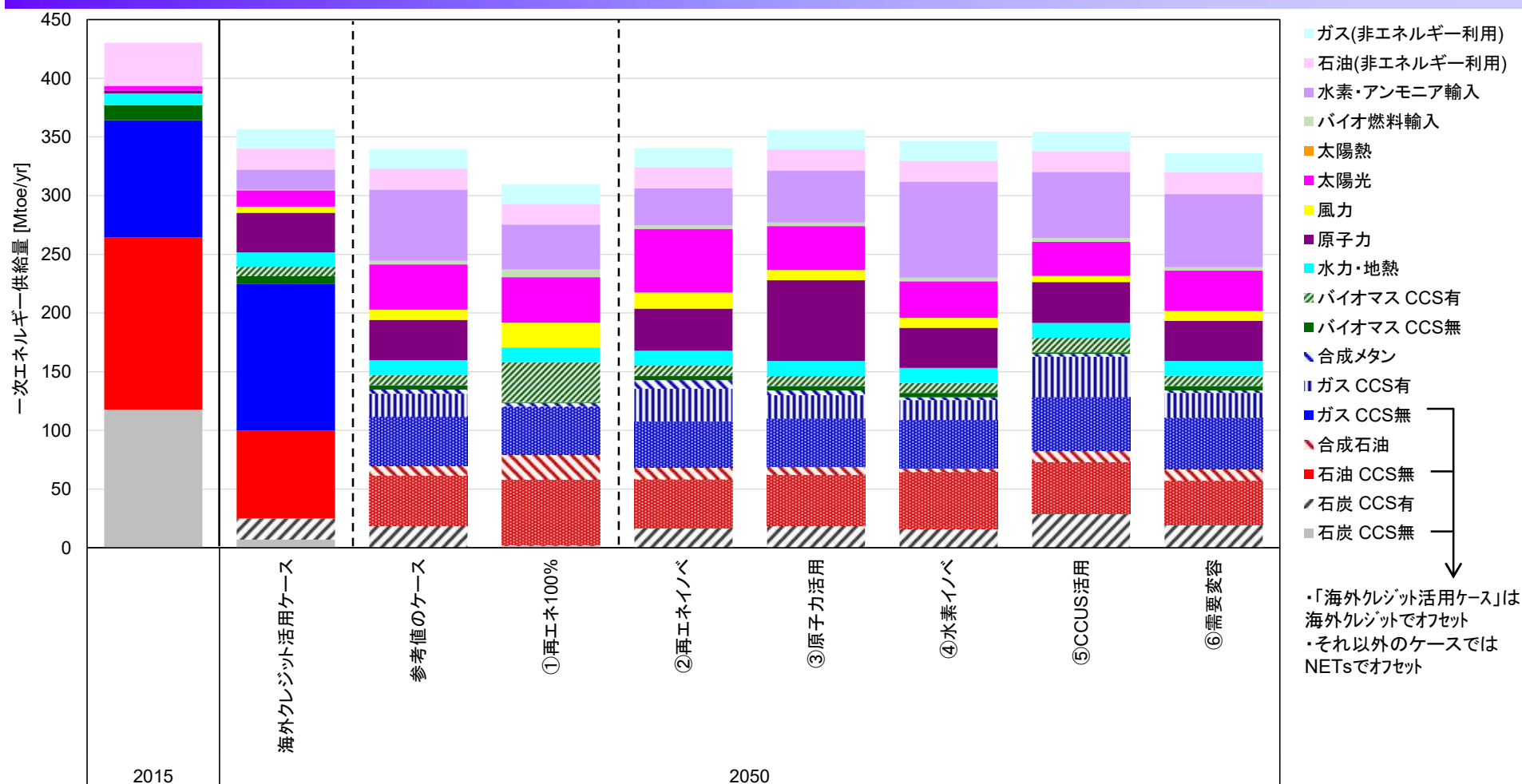
- ✓ 世界の限界削減費用均等化の「海外クレジット活用ケース」では、日本の2050年の正味GHG排出量は2013年比▲63%に留まる（海外に、国内▲63%を超える排出削減に対応する排出削減費用以下の、植林、BECCS、DACCS等のオプションが十分存在すると推計されるため）。
- ✓ その他のケースでは、いずれもDACCSの活用が見られる。（CO₂以外のGHG、プロセス起源CO₂排出量のオフセットも必要）

日本のCO2バランス（2050年）



- ✓ 「①再エネ100%」では、化石燃料発電+CCSは除かれるため、BECCSを利用
- ✓ 世界の限界削減費用均等化の「海外クレジット活用ケース」では、日本においてはDACは経済的なオプションにはなっていない。CO2の海外輸送も経済合理性はなくなる。

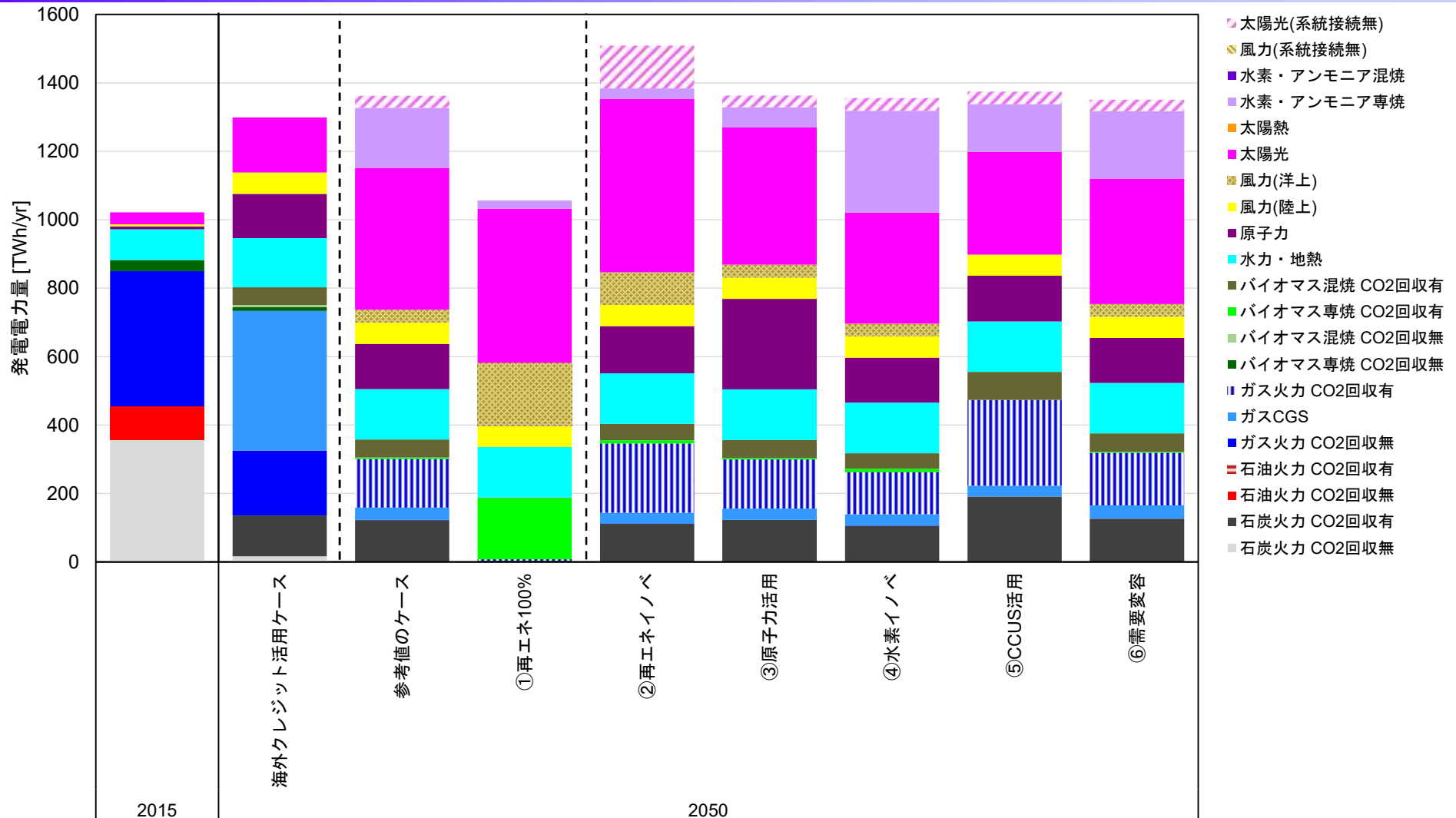
日本の一次エネルギー供給量（2050年）



注1) 一次エネルギー換算はIEA統計に準じている。バイオマス以外の再エネ: 1 TWh=0.086 Mtoe、原子力: 1TWh=0.086÷0.33 Mtoe
 注2) CCSなしの化石燃料は、負排出技術でオフセットされており、カーボンニュートラル化石燃料となっている。

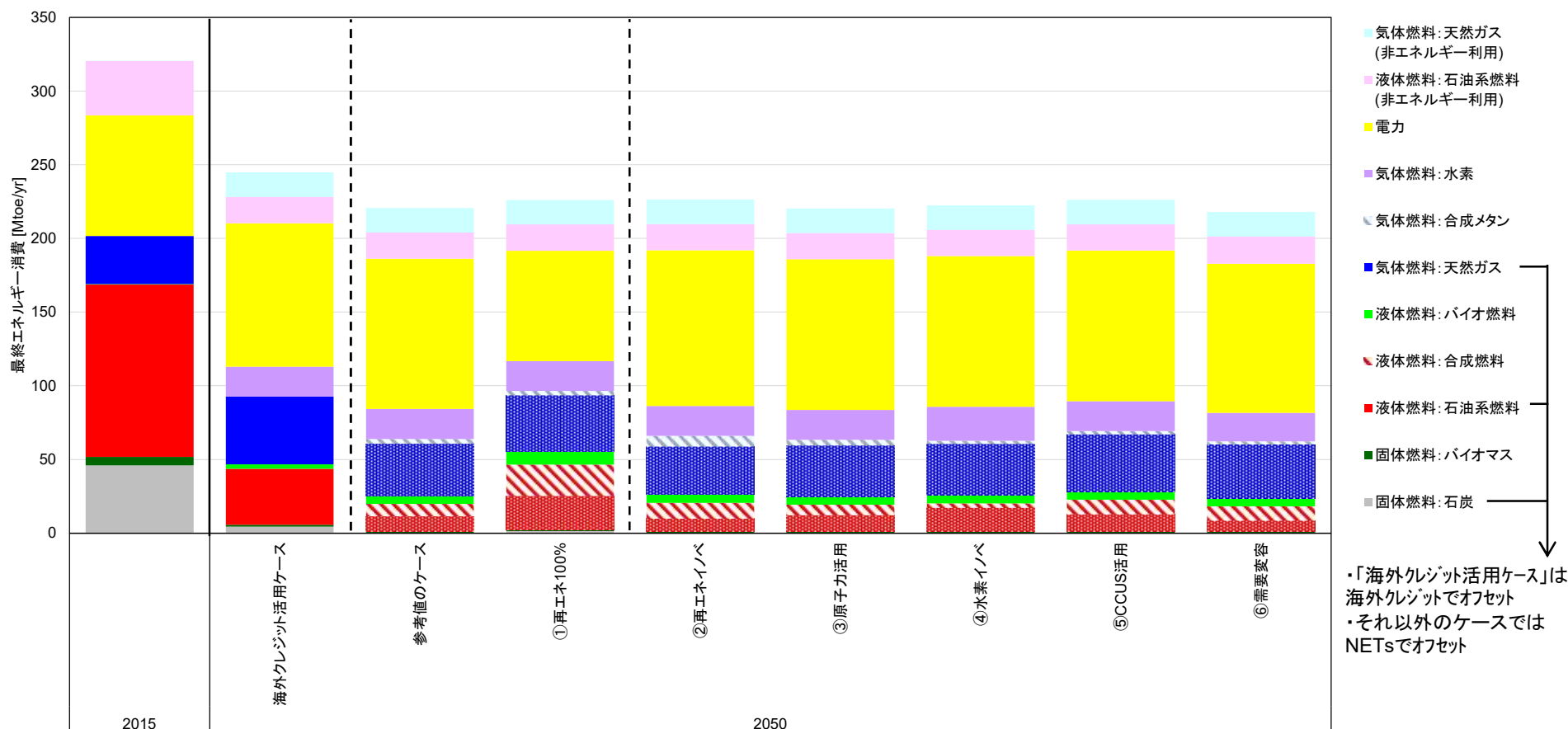
✓ ▲100%のいずれのシナリオにおいても、相当量の水素・アンモニア・合成燃料の輸入が見られる。

日本の発電電力量（2050年）



- ✓ 再エネ100%ケースのBECCSを含め、いずれもCCSは経済合理的なオプション
- ✓ 世界全体でCNを費用最小で実現するケース(海外クレジット活用ケース)ではCCS無のガス比率が高い。
- ✓ 再エネ比率が参考値のケースから上昇すると、統合費用が上昇。「①再エネ100%」では統合費用の急上昇により電力限界費用が相当上昇するため、電力需要が大きく低減。需給調整等のためBECCSが増大。

最終エネルギー消費量（2050年）



注) CCSなしの化石燃料は、負排出技術でオフセットされており、カーボンニュートラル化石燃料となっている。産業部門などでは石炭からガスへの転換が見られるが、電化が難しい部門もあり、ガスが残りやすい。

- ✓ 2050年▲100%ではいずれのシナリオでも相当大的な省エネルギーが見られる。
- ✓ 再エネ比率が参考値のケースから上昇すると、統合費用が上昇。特に「①再エネ100%」では電力供給の限界費用が相当上昇するため、電力需要を大きく低減させる結果に。民生部門などで、電化が進みにくく、参考値のケース比で石油需要が上昇。

CO2限界削減費用、エネルギーシステム総コスト、 電力限界費用：日本

	2050年のCO2限界 削減費用 [US\$/tCO2]	2050年の エネルギーシステムコスト [billion US\$/yr]*1		2050年の電力 限界費用 [US\$/MWh]*2
ベースライン (特段の排出制約無)	—	986	—	121
海外クレジット活用	168	1044	[+58]	184
参考値のケース	525	1179	[+193]	221
①再エネ100%	545	1284	[+299]	485
②再エネイノベ	469	1142	(-37)	198
③原子力活用*3	523~503	1166~1133	(-13~-45)	215~177
④水素イノベ	466	1160	(-19)	213
⑤CCUS活用	405	1150	(-29)	207
⑥需要変容	509	909	(-270)	221

*1 [](青字)はベースラインからのコスト増分。()赤字は「参考値のケース」からのコスト変化

*2 発電端での限界費用。ただし、系統統合費用は含む。2020年のモデル推計の電力限界費用は123 US\$/MWh

*3 原子力活用シナリオは、原子力比率20%~50%の下での結果

第6次エネルギー基本計画案：2050年CNに向けて

- 2050年に向けては、温室効果ガスの8割を占めるエネルギー分野の取組が重要。
 - ものづくり産業がGDPの2割を占める産業構造や自然条件を踏まえても、その実現は容易なものではなく、実現へのハードルを越えるためにも、産業界、消費者、政府など国民各層が総力を挙げた取組が必要。
- 電力部門は、再エネや原子力などの実用段階にある脱炭素電源を活用し着実に脱炭素化を進めるとともに、水素・アンモニア発電やCCUS/カーボンリサイクルによる炭素貯蔵・再利用を前提とした火力発電などのイノベーションを追求。
- 非電力部門は、脱炭素化された電力による電化を進める。電化が困難な部門（高温の熱需要等）では、水素や合成メタン、合成燃料の活用などにより脱炭素化。特に産業部門においては、水素還元製鉄や人工光合成などのイノベーションが不可欠。
 - 脱炭素イノベーションを日本の産業界競争力強化につなげるためにも、「グリーンイノベーション基金」などを活用し、総力を挙げて取り組む。
 - 最終的に、炭素の排出が避けられない分野については、DACCSやBECCS、植林などにより対応。
- 2050年カーボンニュートラルを目指す上でも、安全の確保を大前提に、安定的で安価なエネルギーの供給確保は重要。この前提に立ち、2050年カーボンニュートラルを実現するために、再エネについては、主力電源として最優先の原則のもとで最大限の導入に取り組み、水素・CCUSについては、社会実装を進めるとともに、原子力については、国民からの信頼確保に努め、安全性の確保を大前提に、必要な規模を持続的に活用していく。
- こうした取組など、安価で安定したエネルギー供給によって国際競争力の維持や国民負担の抑制を図りつつ2050年カーボンニュートラルを実現できるよう、あらゆる選択肢を追求する。

4. 2030年のエネルギー需給見通し



第6次エネルギー基本計画案における 2030年におけるエネルギー需給の見通し

出典)エネルギー基本計画(案)の概要(2021年9月)

- 今回の見通しは、2030年度の新たな削減目標を踏まえ、徹底した省エネルギーや非化石エネルギーの拡大を進める上での需給両面における様々な課題の克服を野心的に想定した場合に、どのようなエネルギー需給の見通しとなるかを示すもの。
- 今回の野心的な見通しに向けた施策の実施に当たっては、安定供給に支障が出ることのないよう、施策の強度、実施のタイミングなどは十分考慮する必要。(例えば、非化石電源が十分に導入される前の段階で、直ちに化石電源の抑制策を講じることになれば、電力の安定供給に支障が生じかねない。)

		(2019年 ⇒ 現行目標)	2030年ミックス (野心的な見通し)
省エネ		(1,655万kl ⇒ 5,030万kl)	6,200万kl
最終エネルギー消費 (省エネ前)		(35,000万kl ⇒ 37,700万kl)	35,000万kl
電源構成 発電電力量: 10,650億kWh ⇒ 約9,340 億kWh程度	再エネ	(18% ⇒ 22~24%)	36~38%* ※現在取り組んでいる再生可能エネルギーの研究開発の 成果の活用・実装が進んだ場合には、38%以上の高み を目指す。
	水素・アンモニア	(0% ⇒ 0%)	1% (再エネの内訳)
	原子力	(6% ⇒ 20~22%)	20~22% 太陽光 14~16%
	LNG	(37% ⇒ 27%)	20% 風力 5%
	石炭	(32% ⇒ 26%)	19% 地熱 1%
	石油等	(7% ⇒ 3%)	2% 水力 11%
	バイオマス	(2.6% ⇒ 3.7~4.6%)	5% バイオマス 5%
(+ 非エネルギー起源ガス・吸収源)			
温室効果ガス削減割合		(14% ⇒ 26%)	46% 更に50%の高みを目指す

2030年に関する第6次エネルギー基本計画案の記述： 基本方針と需要サイド

2030年に向けた政策対応のポイント【基本方針】

出典)エネルギー基本計画(案)の概要(2021年9月)

- エネルギー政策の要諦は、安全性を前提とした上で、エネルギーの安定供給を第一とし、経済効率性の向上による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合を図るS+3Eの実現のため、最大限の取組を行うこと。

2030年に向けた政策対応のポイント【需要サイドの取組】

- 徹底した省エネの更なる追求
 - 産業部門では、エネルギー消費原単位の改善を促すベンチマーク指標や目標値の見直し、「省エネ技術戦略」の改定による省エネ技術開発・導入支援の強化などに取り組む。
 - 業務・家庭部門では、2030年度以降に新築される住宅・建築物についてZEH・ZEB基準の水準の省エネ性能の確保を目指し、建築物省エネ法による省エネ基準適合義務化と基準引き下げ、建材・機器トップランナーの引き上げなどに取り組む。
 - 運輸部門では、電動車・インフラの導入拡大、電池等の電動車関連技術・サプライチェーンの強化、荷主・輸送事業者が連携した貨物輸送全体の最適化に向け、AI・IoTなどの新技術の導入支援などに取り組む。
- 需要サイドにおけるエネルギー転換を後押しするための省エネ法改正を視野に入れた制度的対応の検討
 - 化石エネルギーの使用の合理化を目的としている省エネ法について、非化石エネルギーも含むエネルギー全体の使用の合理化や、非化石エネルギーの導入拡大等を促す規制体系への見直しを検討。
→事業者による非化石エネルギーの導入比率の向上や、供給サイドの変動に合わせたダイヤモンドレスポンス等の需要の最適化を適切に評価する枠組みを構築。
- 蓄電池等の分散型エネルギーリソースの有効活用など二次エネルギー構造の高度化
 - 蓄電池等の分散型エネルギーリソースを活用したアグリゲーションビジネスを推進するとともに、マイクログリッドの構築によって、地産地消による効率的なエネルギー利用、レジリエンス強化、地域活性化を促進。

- グリーンか、否かの2元論で整理するEUタクソノミーへの対応として、脱炭素に向けた省エネやエネルギー転換などの「移行」に焦点を当て、そこに資金供給を促す、「トランジション・ファイナンス」を推進。
- 昨年12月の国際原則を踏まえて、金融庁・環境省・経産省で、トランジション・ボンドやトランジション・ローンとラベリングするための「基本指針」を今年5月に策定。

多排出産業が脱炭素に向けた道筋を描くための分野別のロードマップを策定。

クライメート・トランジション・ファイナンスに関する基本指針

2021年5月
金融庁・経済産業省・環境省



5. まとめ



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。
- ◆ 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。いずれにしてもこれら脱炭素の各種技術のミックスが重要
- ◆ 再エネの大幅な拡大は、必須であるとともに、頑強な見通しがある。しかし、様々な課題も存在しており、コストを見極めながら適正な拡大幅を模索することが重要。
- ◆ 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。更に、非電力部門で、再エネ、CCSを間接的に利用するためにも、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。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。
- ◆ 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等の負の排出技術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。
- ◆ デジタルの活用は重要。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。
- ◆ それぞれの技術に大きな課題が残っていることから、多くのオプションを持ち、開発成功のリスクヘッジをしつつ、全体のコスト抑制を図る必要あり。
- ◆ それでも、2050年正味ゼロ排出は大き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。真の国際協調が難しい中、このような高い費用負担が許容できるのか、カーボンリーケージの懸念もあり、真に温暖化抑制に効果を持つのかは慎重な見極めが必要であり、柔軟性を有したカーボンニュートラル戦略を持つておくことが重要。グローバルな削減の視点も重要。