

# カーボンニュートラルに向けた 技術的課題

(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

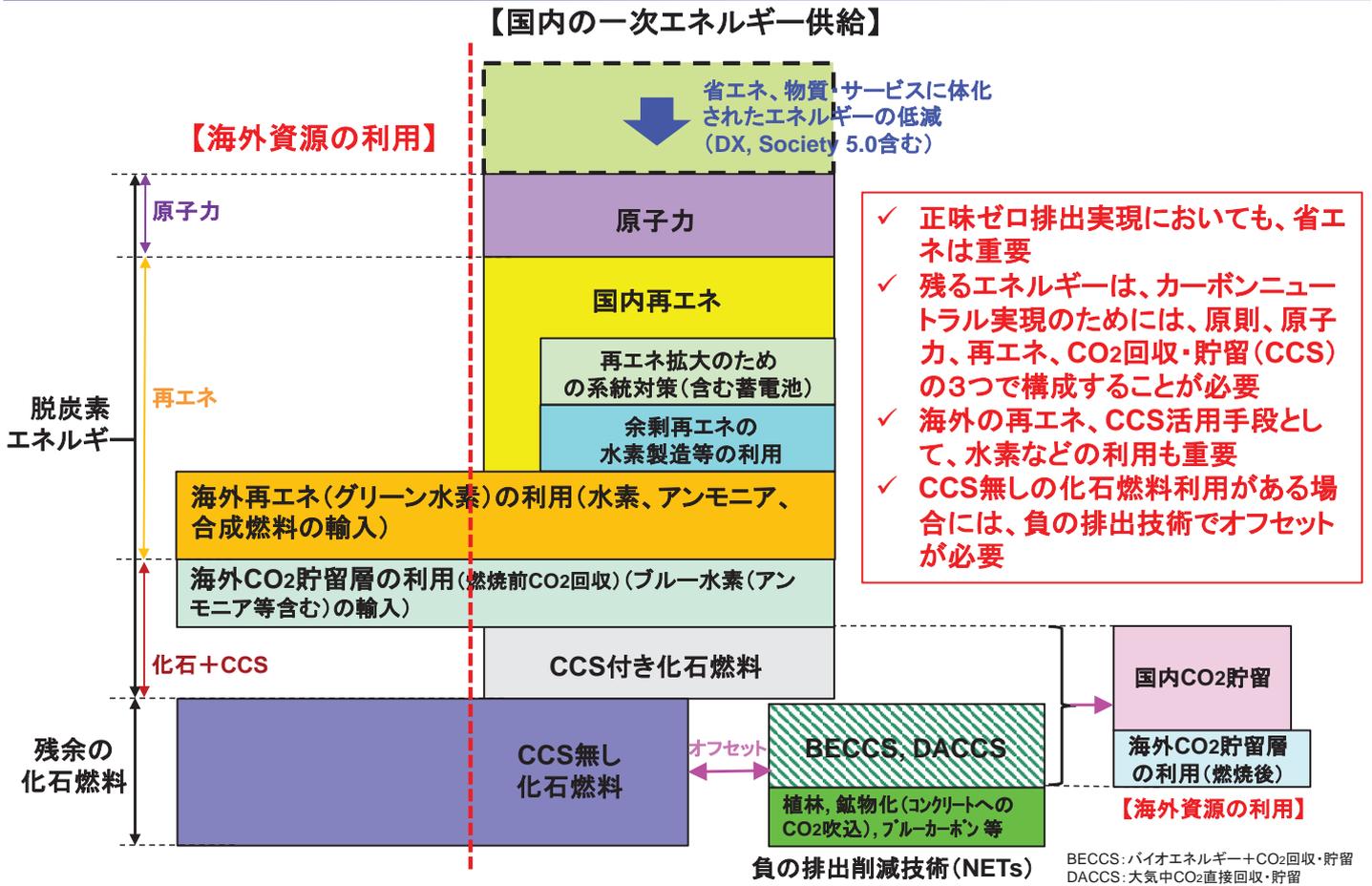
秋元 圭吾



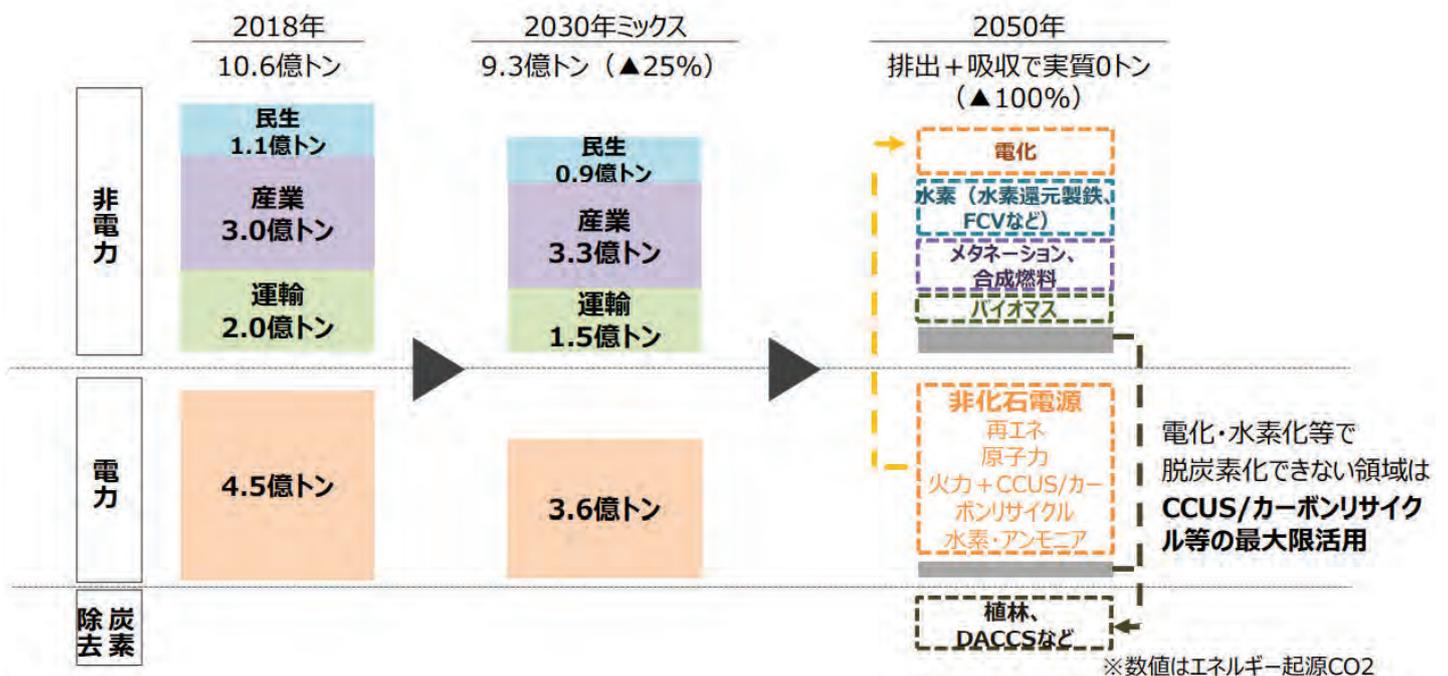
## 1. カーボンニュートラルに向けた 政策動向と対策の概要

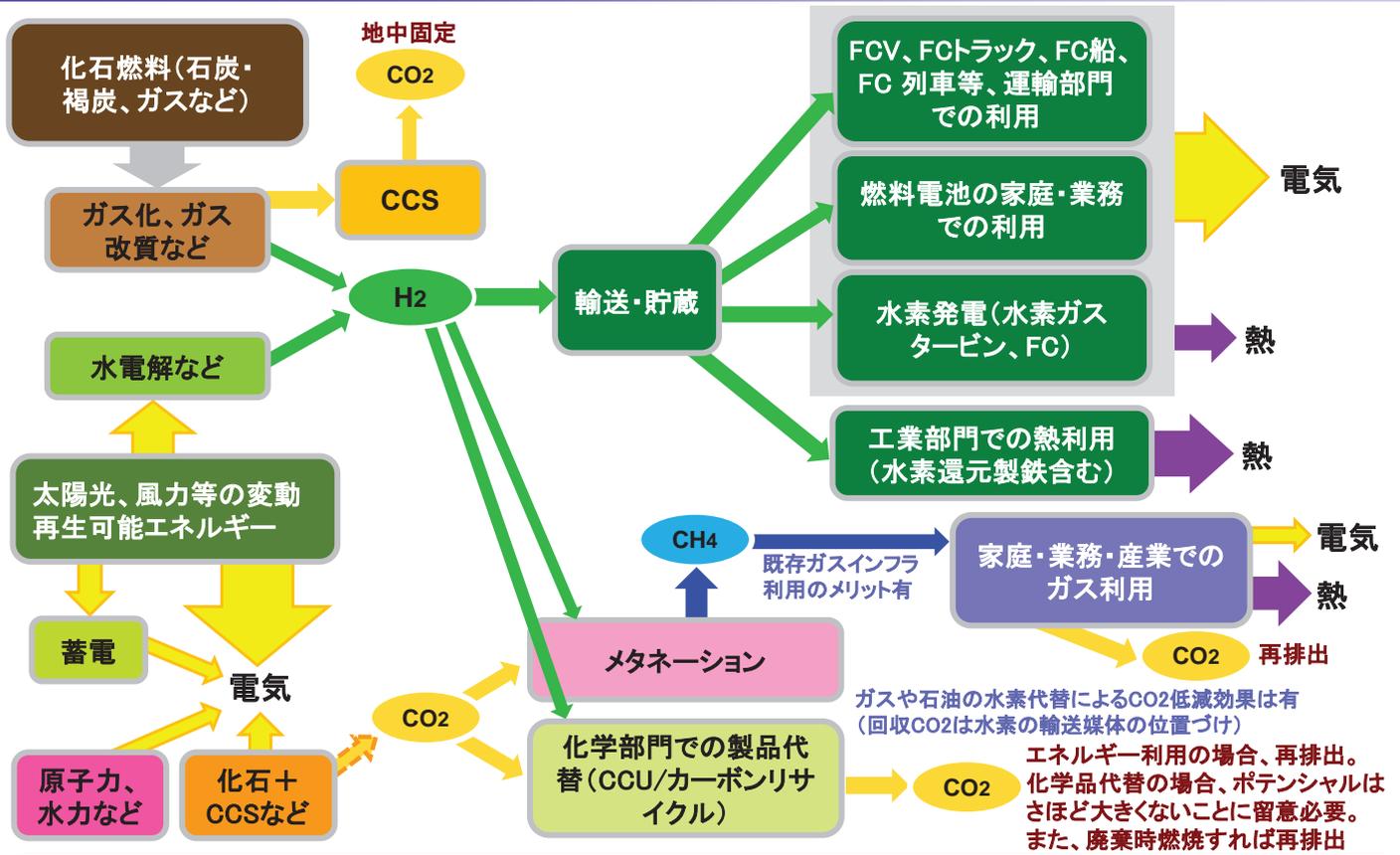


# 日本の正味ゼロ排出のイメージ (1/2)



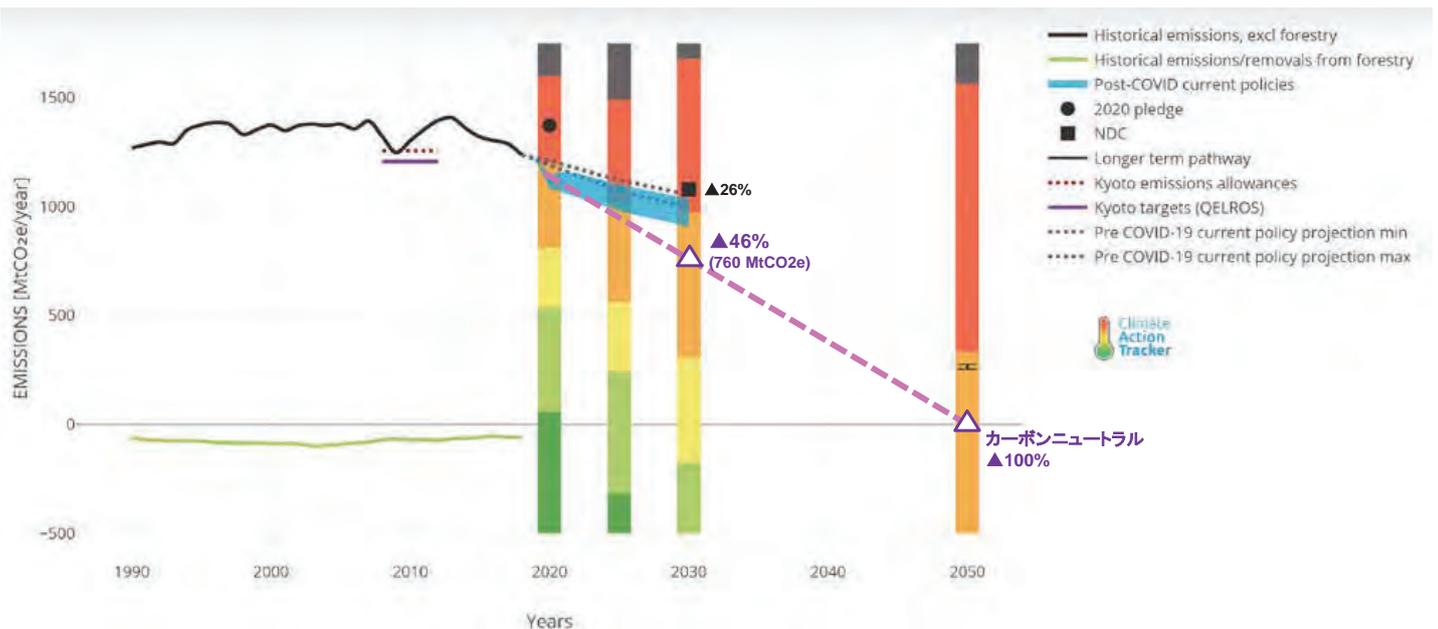
# 日本の正味ゼロ排出のイメージ (2/2)





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？

## 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。

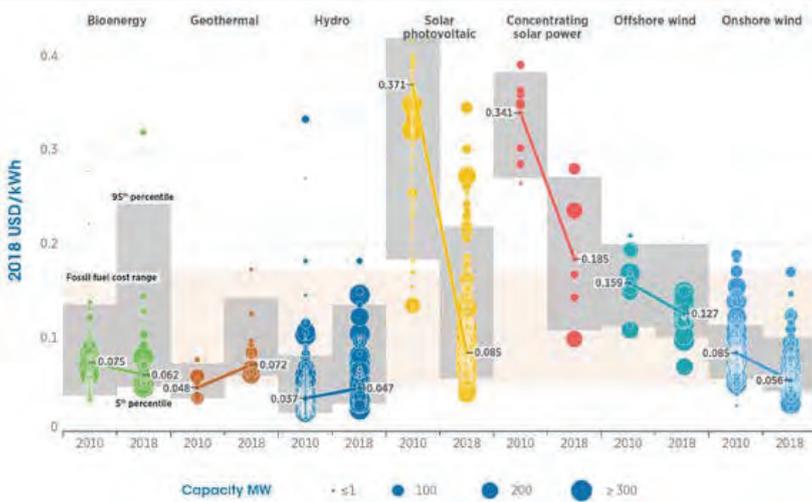
## 2. カーボンニュートラルに向けた 各種対策技術の役割と課題



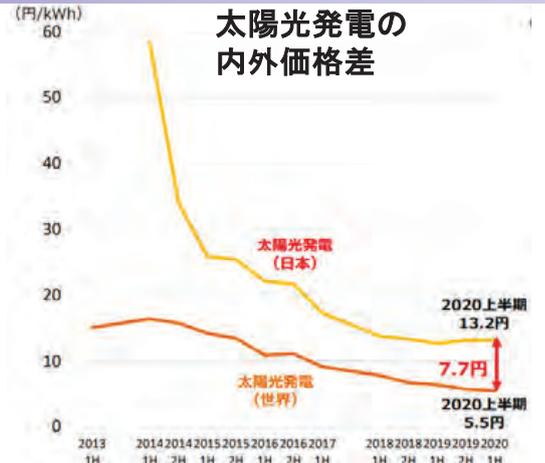
### 2.1. 再生可能エネルギー、蓄電池、 水素の役割と課題



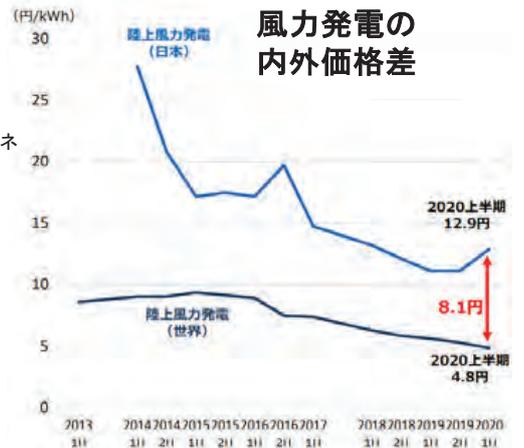
# 世界の再生可能エネルギーの動向



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)

|      | 2012年  | 2018年  |
|------|--------|--------|
| 日本   | 309    | 963    |
| EU   | 4,319  | 7,035  |
| ドイツ  | 1,217  | 2,068  |
| イギリス | 358    | 1,053  |
| 世界   | 10,693 | 24,862 |

単位: 億kWh

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



日本

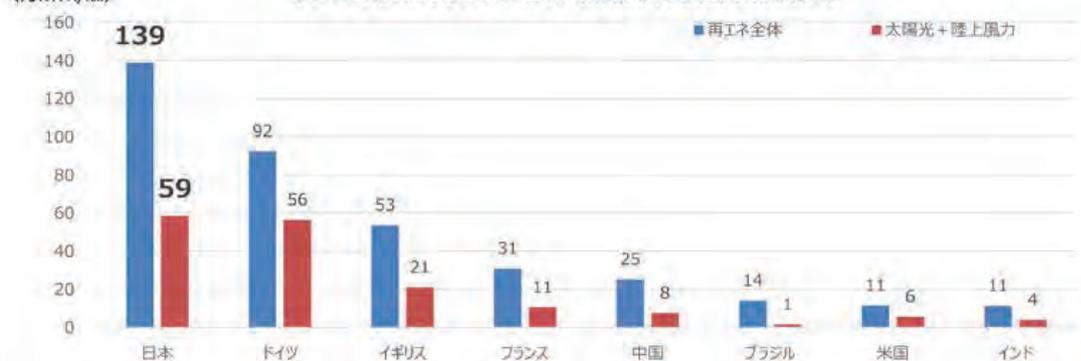


ドイツ



- 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。**

【平地面積あたりの各国再エネ/太陽光・陸上風力の発電量】

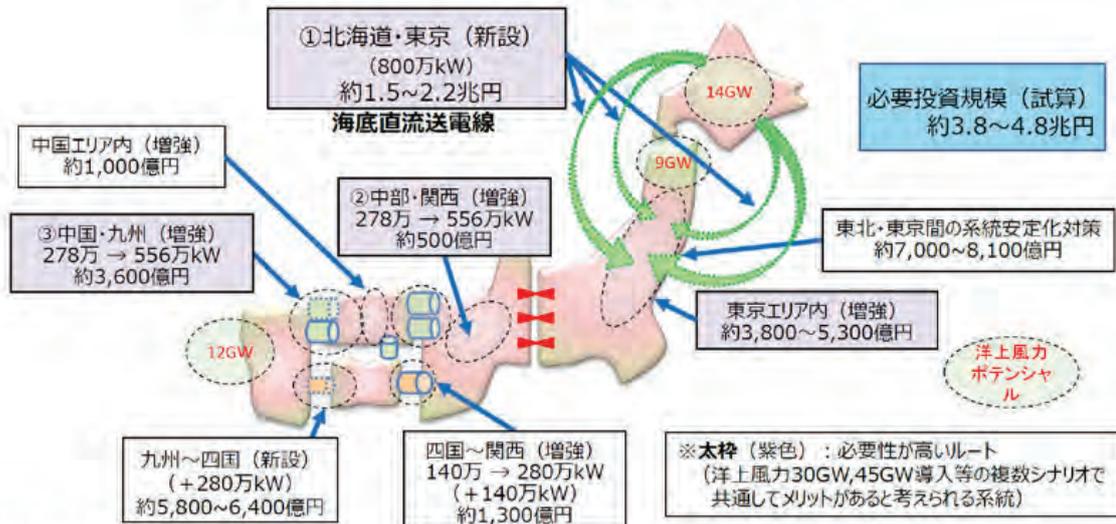


再エネの拡大は必須だが、国内での導入規模は楽観視できない。調和した拡大が必要

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システム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。

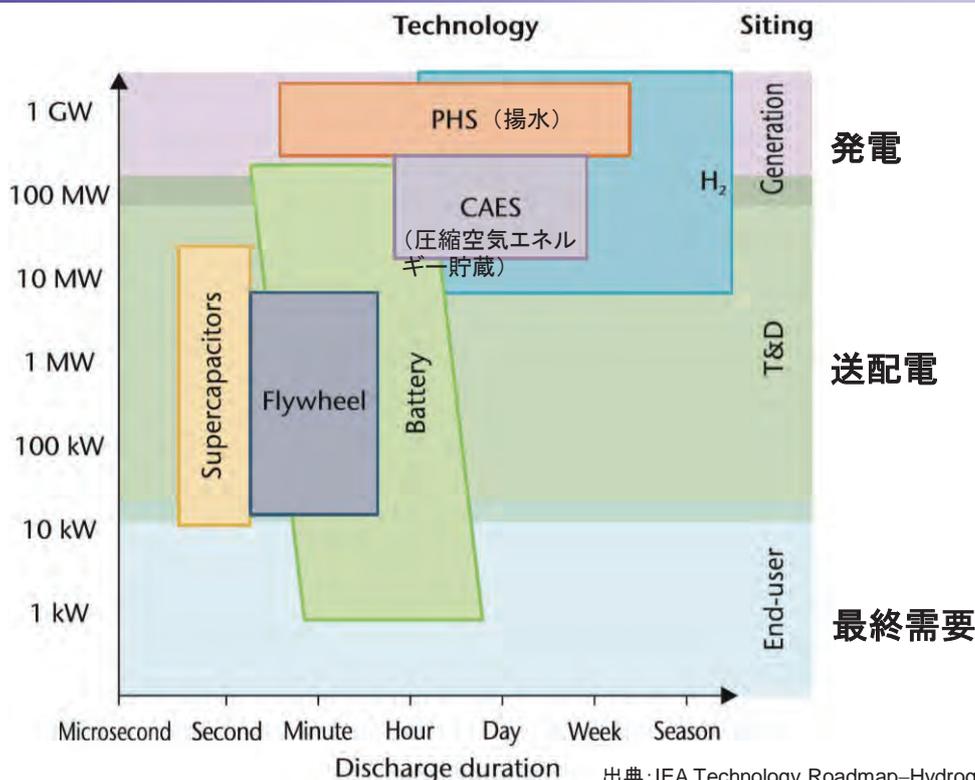
マスタープランの中間整理（電源偏在シナリオ45GWの例）



出典：広域連系システム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



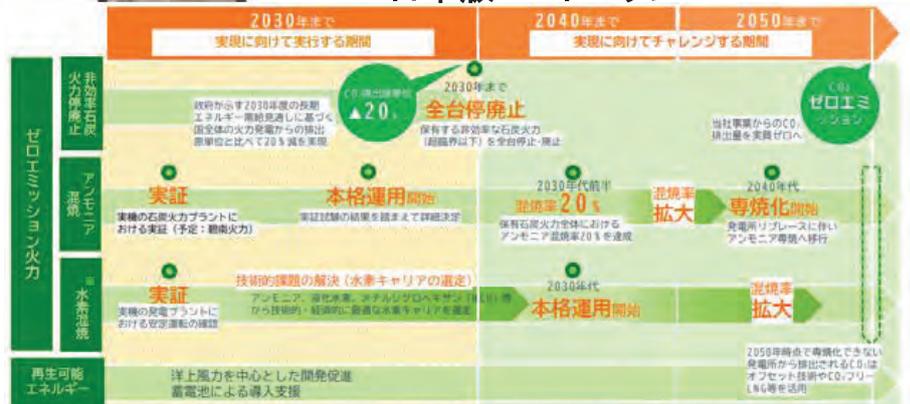
- ✓ 技術、エネルギー種によって、エネルギー貯蔵における得意領域は異なる。
- ✓ 電子は移動がしやすいため、それを蓄電池という仕組みの中に抑え込むことは、原理的に困難さが増す。貯蔵の難しさ（コスト）は、電気（電子）>水素>天然ガス>石油>石炭>ウラン のような順。

- 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                                    | その他の施設の進捗               |
|--|-------------------------|
| <p>2019年12月11日 川崎重工 神戸工場<br/>一般参加者を含め約4000人規模の式典</p> | ① 褐炭ガス化施設の完成<br>2020.10 |
|  | ② 豪州液化基地の完成<br>2020.6   |
|  | ③ 神戸荷役基地の完成<br>2020.6   |

出典) 政府資料

## JERAゼロエミッション2050 日本版ロードマップ

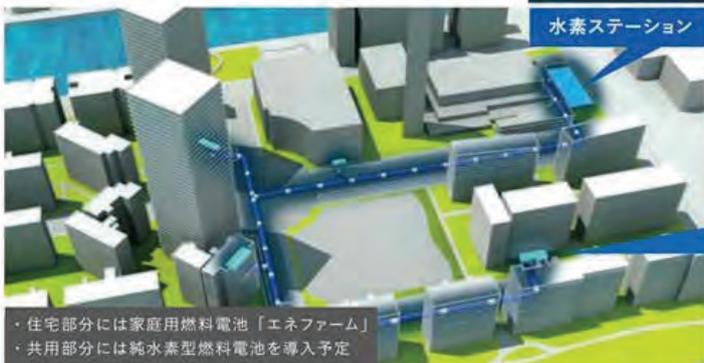


出典) JERA

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。

# CN分散電源としての水素燃料電池の役割

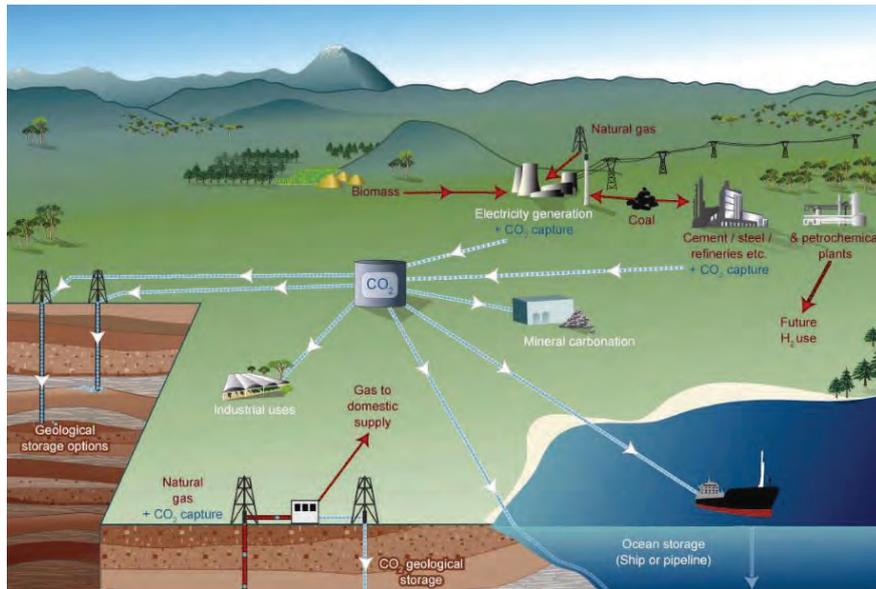
出典) Panasonic



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

## 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CO<sub>2</sub>回収



### CO<sub>2</sub>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 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>                    |

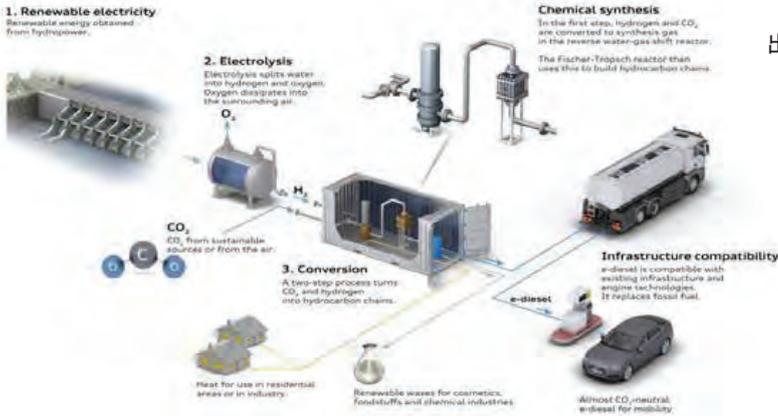
注1) 廃ガス田の貯留ポテンシャルの幅は、将来のガス探掘量が増加するに従って、表中の上限值までポテンシャルが増大し得ると想定している。

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。

- ✓ 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。



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 <sub>2</sub> 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 <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>再生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

## 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            |        |

※上記数値はイノ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CO<sub>2</sub>直接回収(DAC)技術

- DACは、大気中からCO<sub>2</sub>を回収する。400 ppm程度の濃度の低いCO<sub>2</sub>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。

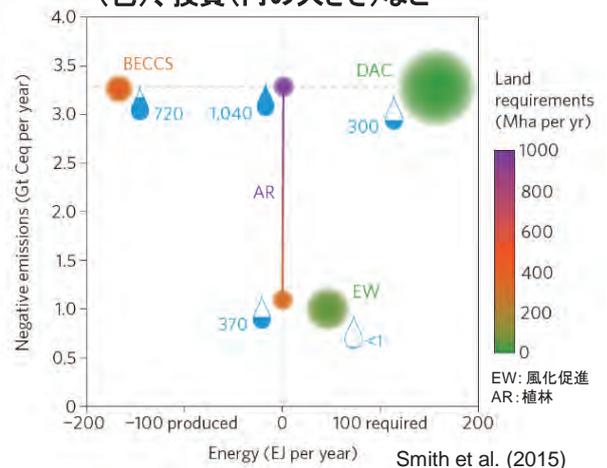
ICEFロードマップ2018 DACによる、DACのエネルギー消費量推計

| Company            | Thermal energy/ tCO <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                           |



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

## 2.3. 省エネ:DXによる低エネルギー需要社会の実現の可能性

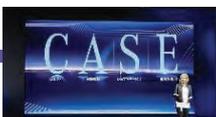
DX: デジタルトランスフォーメーション



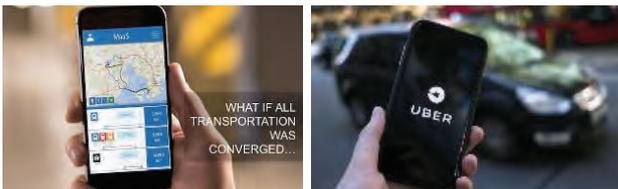
### 運輸部門: CASE



20



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」

出典)トヨタ



車の形が変わる

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

自動車と近距離航空の融合の可能性も



Airbus, Audi

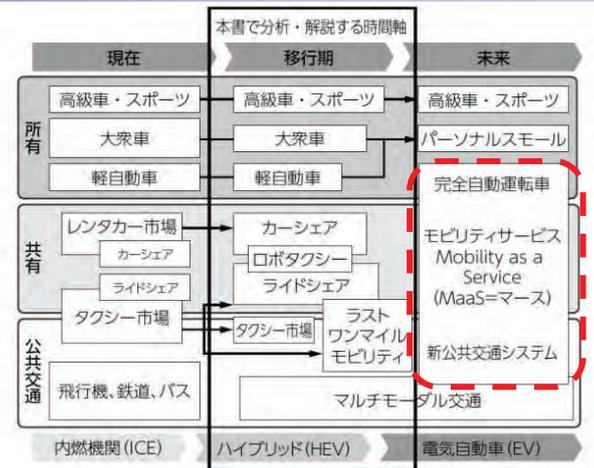
V2G



日産

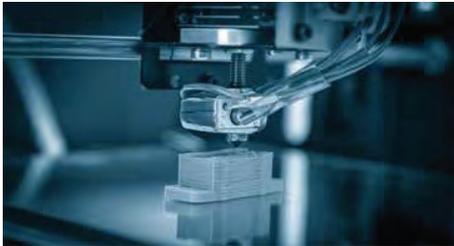


出典) Jari Kauppila, ALPSシンポジウム(2019)

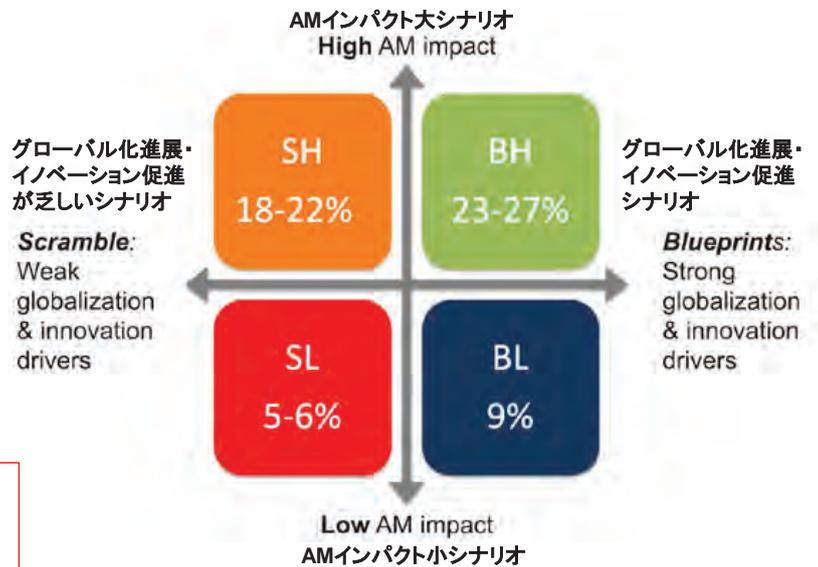


出所: ナカニシ自動車産業リサーチ

- 3Dプリンター (アディティブ・マニュファクチャリング: AM) が進展してきている。
- 金型を作った成形や切削による造形などに比べ、複雑な形状を作成でき、同じ強度でも軽い製品を作成できる場合が多くある。
- また、大量生産ではなく、それぞれのニーズに合わせた製品製造が可能で、大量生産、大量廃棄を避けることができる可能性有。



AMによる世界のエネルギー需要削減ポテンシャル



ライフサイクルでのエネルギー消費量低減、CO2排出削減に大きな効果を有する可能性有

出典) L.A. Verhoef et al., Energy Policy (2018)

## 3. 日本の2050年カーボンニュートラルに向けたシナリオ例

(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)

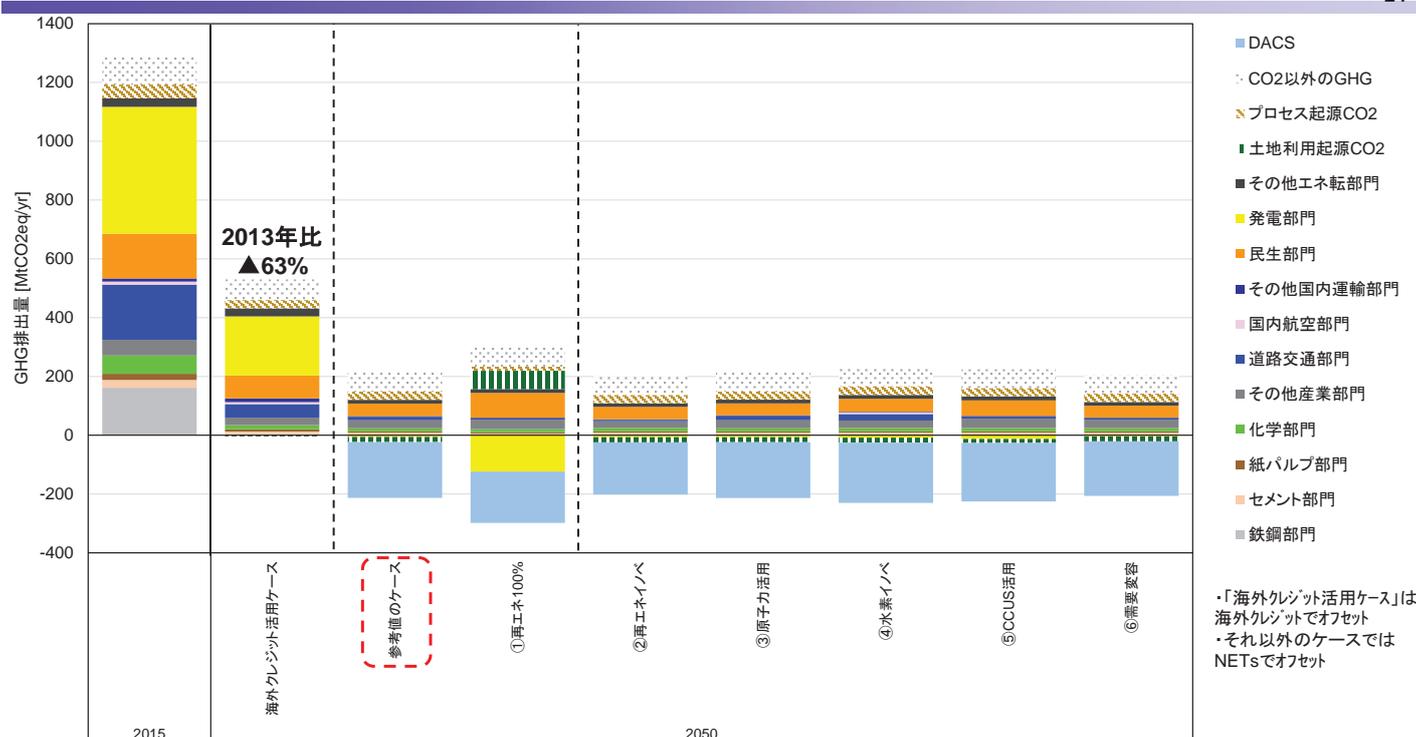
2021年5月13日の総合資源エネルギー調査会基本政策分科会に提示



# シナリオ想定（概略）

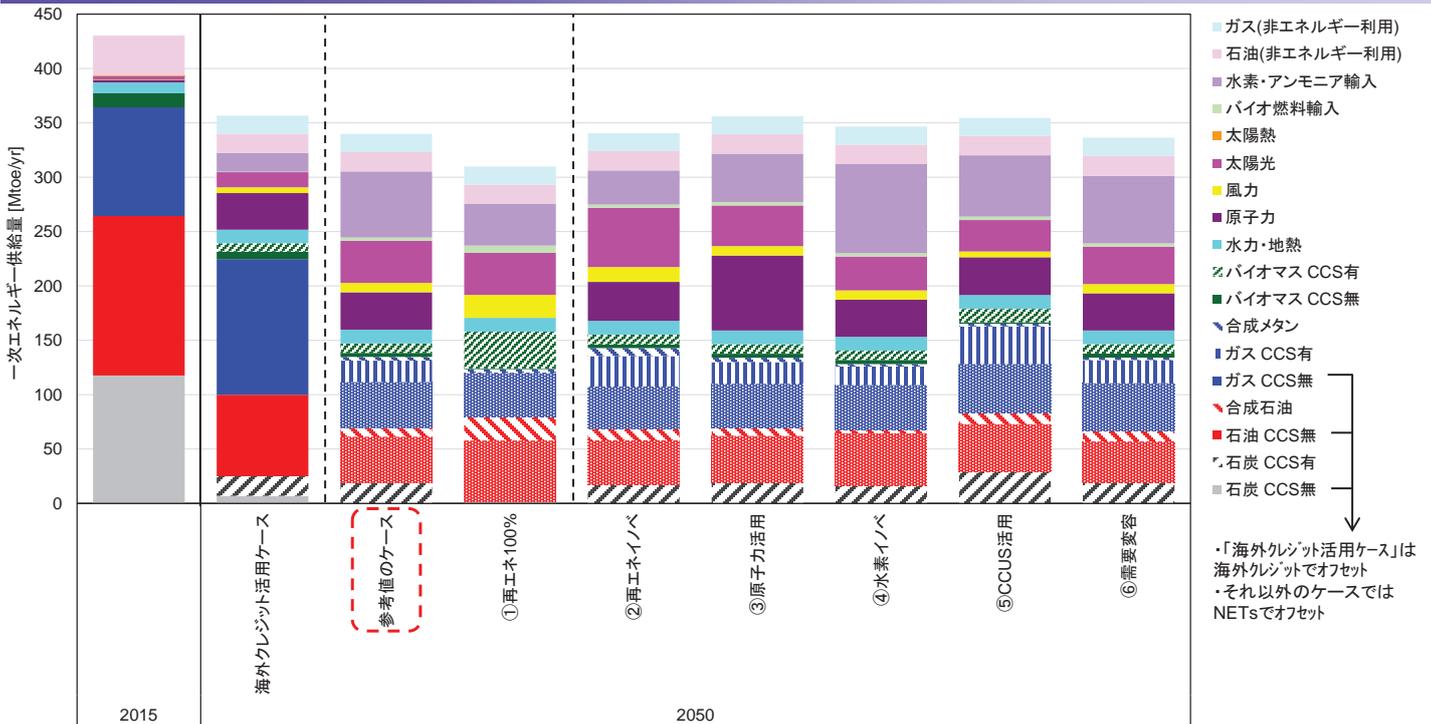
|                                     | 2050年GHG排出削減   | 各種技術の想定（コスト・性能）  | 各種技術の導入シナリオ   |                    |  |
|-------------------------------------|--|--|---|--------------------|--|
| 海外クレジット活用ケース（世界費用最小化＝世界限界削減費用均等化）   | 1.5°C未満。国内削減率はモデルで <b>内生的に決定</b>   | モデルの標準想定<br><br>(注:ただし、再エネ比率が高いシナリオでは、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 <b>内生的に決定</b> (コスト最小化)。ただし <b>原子力は上限10%</b> で制約。 <b>CO2貯留量制約想定</b> |                    |  |
| 参考値のケース（政府提示の「参考値」に近いケース）           | 国内▲100%  |  | <b>再エネほぼ100%</b> (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 | （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） |  | ① 再エネ100%   |                    |  |
| 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  | <b>再エネのコスト低減加速</b> | モデルで <b>内生的に決定</b> 。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   | <b>原子力の導入拡大</b>    | モデルで <b>内生的に決定</b> 。ただし <b>原子力の上限を20%</b> と感度を想定。CO2貯留量制約想定      |
|                                     |  |  | ④ 水素イノベ   | <b>水素のコスト低減加速</b>  | モデルで <b>内生的に決定</b> 。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  | <b>CO2貯留可能量拡大</b>  | モデルで <b>内生的に決定</b> 。ただし原子力は上限10%で制約。 <b>CCS可能量を大きく想定</b>         |
|                                     |  |  | ⑥ 需要変容  | <b>カー・ライドシェア拡大</b> | <b>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</b> 。その他は参照シナリオの想定と同じ |

# 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）

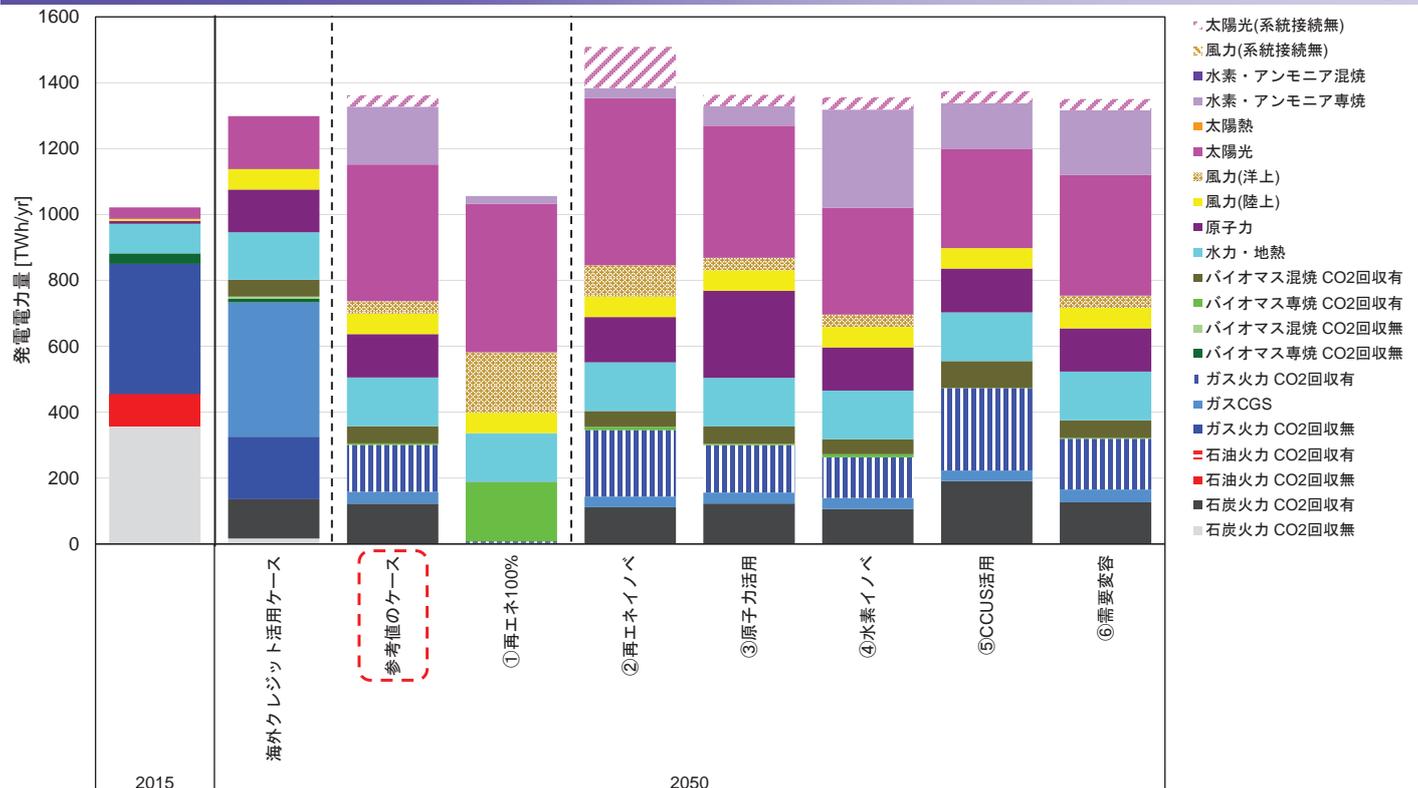
# 日本の一次エネルギー供給量（2050年）



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。

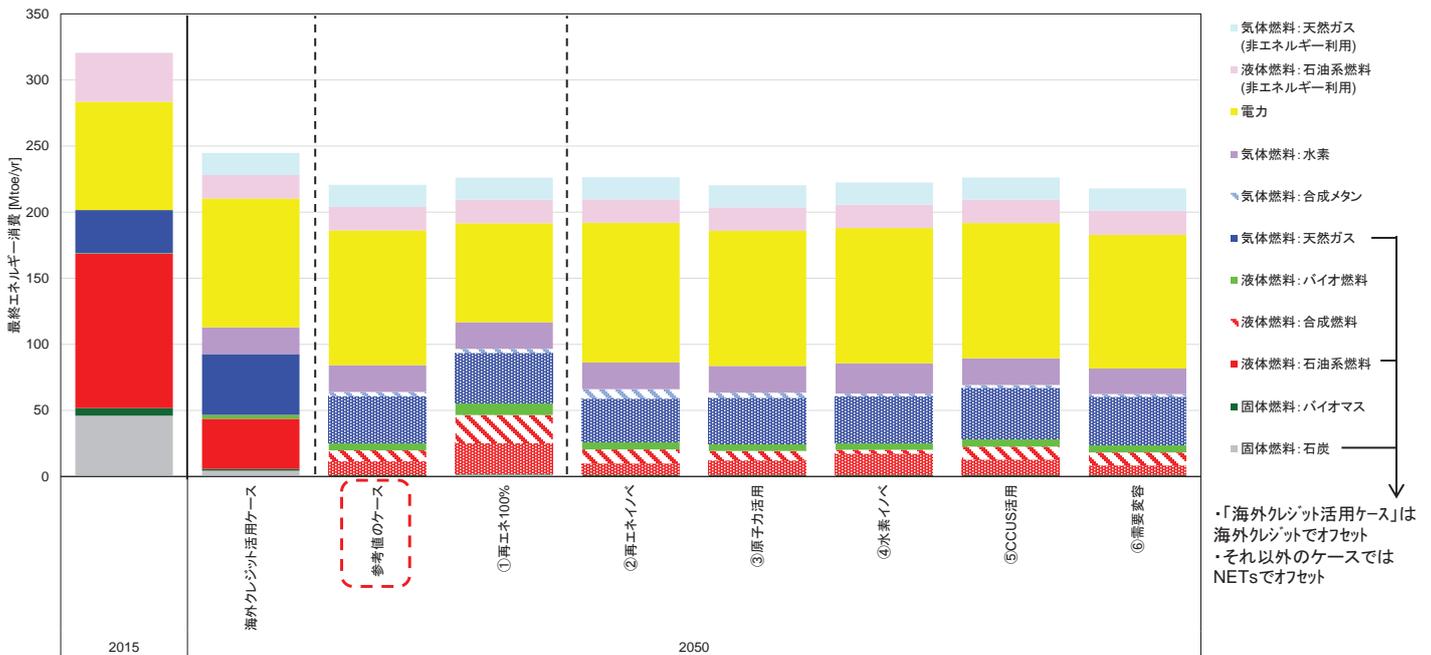
✓ ▲100%のいずれのシナリオにおいても、相当量の水素・アンモニア・合成燃料の輸入が見られる。

# 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き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\$/tCO <sub>2</sub> ] | 2050年のエネルギーシステムコスト [billion US\$/yr] <sup>*1</sup> |           | 2050年の電力限界費用 [US\$/MWh] <sup>*2</sup> |
|----------------------|--|--|-----------|---------------------------------------|
| ベースライン               | —  | 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 <sup>*3</sup> | 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

- 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**。

出典) 総合資源エネルギー調査会 (2021)

## グリーン成長戦略

- 温暖化への対応を、経済成長の制約やコストとする時代は終わり、「成長の機会」と捉える時代に突入している。
- 実際に、研究開発方針や経営方針の転換など、「ゲームチェンジ」が始まっている。この流れを加速すべく、グリーン成長戦略を推進する。
- 「イノベーション」を実現し、革新的技術を「社会実装」する。これを通じ、2050年カーボンニュートラルだけでなく、CO<sub>2</sub>排出削減にとどまらない「国民生活のメリット」も実現する。

### 2050年に向けて成長が期待される、14の重点分野を選定。

・ 高い目標を掲げ、技術のフェーズに応じて、実行計画を着実に実施し、国際競争力を強化。・ 2050年の経済効果は約290兆円、雇用効果は約1,800万人と試算。

|  |  |   |  |  |  |  |
|--|--|---|--|--|--|--|
| <b>1 洋上風力・太陽光・地熱</b><br>・2040年、3,000~4,500万kW導入(海上風力)<br>・2030年、発電コスト14円/kWhを視野(太陽光) | <b>2 水素・燃料アンモニア</b><br>・2050年、2,000万トン程度の導入(水素)<br>・東南アジアの5,000億円市場(燃料アンモニア) | <b>3 次世代熱エネルギー</b><br>・2050年、既存インフラに合成メタンを90%注入 | <b>4 原子力</b><br>・2030年、高温ガス炉のカーボンフリー水素製造技術を確立                                  | <b>5 自動車・蓄電池</b><br>・2035年、乗用車の新車販売で電動車100%                        | <b>6 半導体・情報通信</b><br>・2040年、半導体・情報通信産業のカーボンニュートラル化 | <b>7 船舶</b><br>・2028年より前倒しでゼロエミッション船の高業運航実現            |
| <b>8 物流・人流・土木インフラ</b><br>・2050年、カーボンニュートラルポートによる港湾や、建設施工等における脱炭素化を実現                 | <b>9 食料・農林水産業</b><br>・2050年、農林水産業における化石燃料起源のCO <sub>2</sub> ゼロエミッション化を実現     | <b>10 航空機</b><br>・2030年以降、電池などのコア技術を、段階的に技術搭載   | <b>11 カーボンリサイクル・マテリアル</b><br>・2050年、人工光合成プラを既製品並み(CR)<br>・ゼロカーボンスチールを実現(マテリアル) | <b>12 住宅・建築物・次世代電力マネジメント</b><br>・2030年、新築住宅・建築物の平均でZEH・ZEB(住宅・建築物) | <b>13 資源循環関連</b><br>・2030年、バイオマスプラスチックを約200万トン導入   | <b>14 ライフスタイル関連</b><br>・2050年、カーボンニュートラル、かつレジャーで快適な暮らし |

### 政策を総動員し、イノベーションに向けた、企業の前向きな挑戦を全力で後押し。

|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
| <b>1 予算</b><br>・グリーンイノベーション基金(2兆円の基金)<br>・経営者のコミットを促す仕掛け<br>・特に重要なプロジェクトに対する重点的投資 | <b>2 税制</b><br>・カーボンニュートラル投資促進税制(最大10%の税額控除・50%の特別償却)           | <b>3 金融</b><br>・多排出産業向け分野別ロードマップ<br>・TCFD等に基づく開示の質と量の充実<br>・グリーン国際金融センターの実現 | <b>4 規制改革・標準化</b><br>・新技術に対応する規制改革<br>・市場形成を見据えた標準化<br>・成長に資するカーボンファイナンス |
| <b>5 国際連携</b><br>・日米・日EU間の技術協力<br>・アジア・エネルギー・トランジション・イニシアティブ<br>・東京ビジョン・ゼロウィーク    | <b>6 大学における取組の推進等</b><br>・大学等における人材育成<br>・カーボンニュートラルに関する分析手法や統計 | <b>7 2025年日本国際博覧会</b><br>・革新的イノベーション技術の実証の場(未来社会の実験場)                       | <b>8 若手ワーキンググループ</b><br>・2050年時点での現役世代からの提言                              |

## 4. 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。日本政府も2050年実質ゼロを目標に。
- ◆ 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
- ◆ 再エネは多くの課題を抱えてはいるが、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。一方、変動性再エネの大幅な増大により、系統増強をはじめ、統合費用の増加が見込まれる(ビジネス機会でもある)。
- ◆ 統合費用低下のため、需給調整の重要性が拡大。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CO<sub>2</sub>からの合成燃料も重要なオプション。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(水素や合成燃料の生産方法を簡易に化学分析し証明するニーズなどもある)。
- ◆ 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高い費用対効果となる可能性もあり、様々な対策の活用が重要。
- ◆ 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。分散エネルギーシステムの統合においても必須。DX活用によるグリーントランスフォーメーション(GX)の機会も多くあり、SDGsの同時達成に資する可能性もある。
- ◆ 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、分析技術、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

## 温暖化対策評価モデルDNE21+の概要 (Dynamic New Earth 21+)



34

- ◆ 各種エネルギー・CO<sub>2</sub>削減技術のシステム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、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

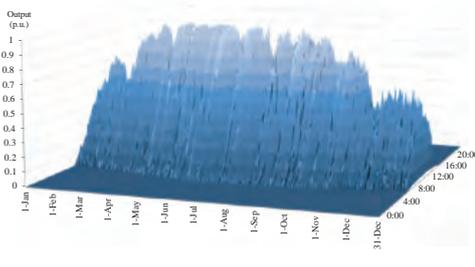
・中期目標検討委員会およびタスクフォースにおける分析・評価  
・国内排出量取引制度の検討における分析・評価  
・環境エネルギー技術革新計画における分析・評価  
はじめ、気候変動政策の主要な政府検討において活用されてきた。またIPCCシナリオ分析にも貢献

- ◆ 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

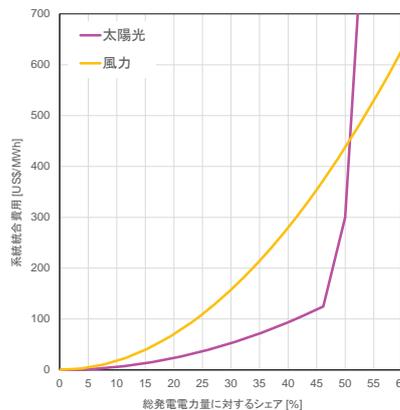
モデル計算で考慮されているもの・・・出力抑制、電力貯蔵システム(揚水発電、リチウムイオン電池、水素貯蔵)、発電設備の利用率低下、地域間連系線、貯蔵や送電に伴う電力ロス

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、EV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**)

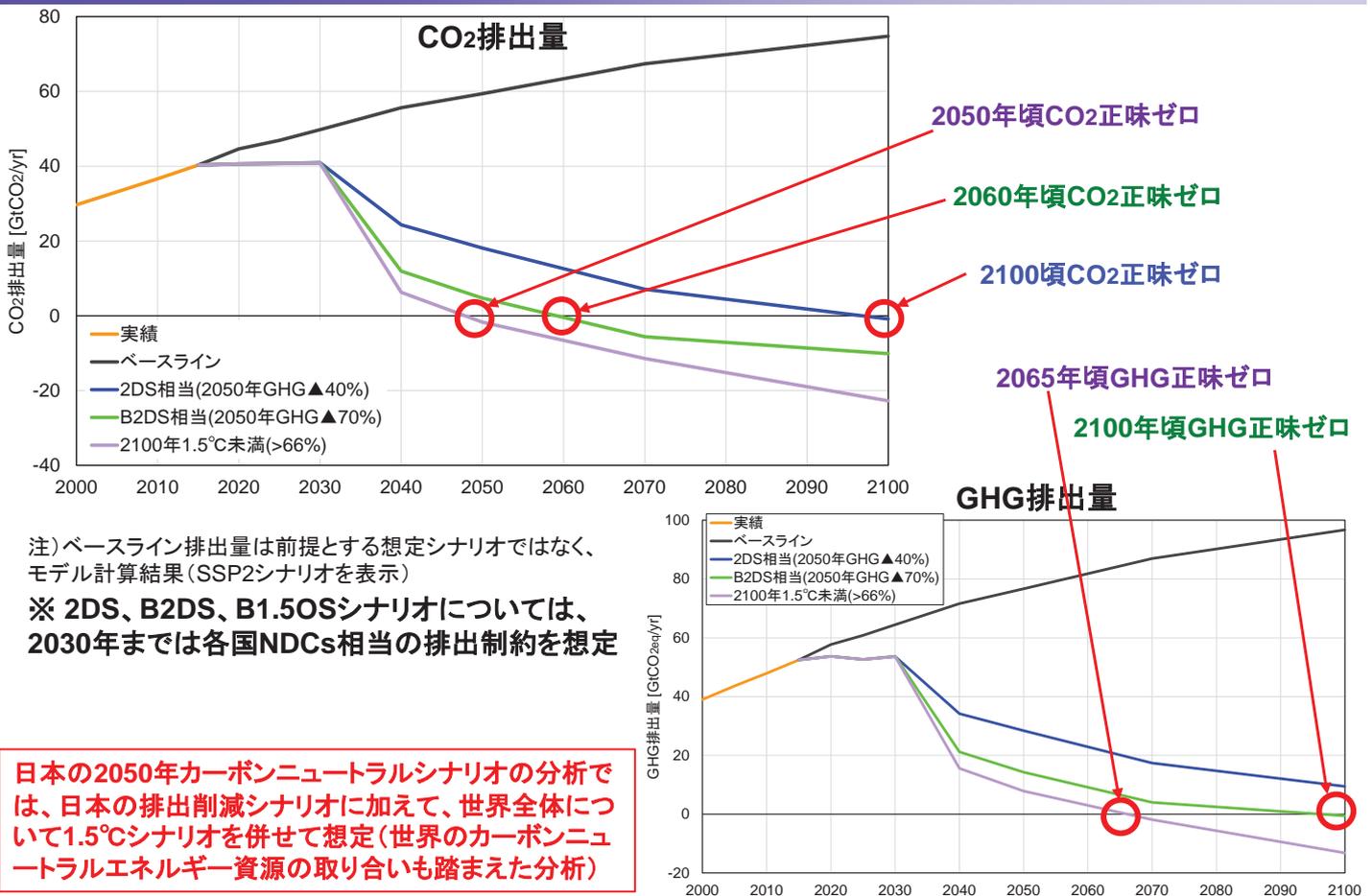


太陽光発電の出力例



- ▶ 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



# 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 <sup>1</sup> | 標準コスト  | 10%                  | 標準コスト   | 国内貯留:<br>91MtCO <sub>2</sub> /yr、<br>海外への輸送:<br>235MtCO <sub>2</sub> /yr | 標準想定<br>(完全自動運転車実現・普及想定せず) | 54%<br>(最適化結果)     |
| ①再エネ100%             |        | 0%                   |   |  |                            | ほぼ100%<br>(シナリオ想定) |
| ②再エネイノベ              | 低位コスト  | 10%                  |   |  |                            | 63%<br>(最適化結果)     |
| ③原子力活用 <sup>2</sup>  | 標準コスト  | 20%                  | 53%<br>(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%<br>(最適化結果)  |  |                            |                    |
| ⑤CCUS活用              |        | 10%                  | 国内:273MtCO <sub>2</sub> /yr、<br>海外:282MtCO <sub>2</sub> /yr | 44%<br>(最適化結果)   |                            |                    |
| ⑥需要変容                |        | 標準コスト                | 国内91Mt、<br>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%<br>(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