

2050年ネットゼロ排出に向けたシナリオ分析

2021年10月8日

ウェビナー「2050年ネットゼロ排出に向けたシナリオ分析」

尾羽 秀晃

一般財団法人 日本エネルギー経済研究所

計量分析ユニット エネルギー・経済分析グループ 研究員 / 博士(工学)

背景: ネットゼロ排出達成時に想定される影響

2050年までにGHGのネットゼロ排出を目指すという野心的な目標が掲げられている一方、**抜本的なエネルギー転換**に伴い様々な影響が生じることが予想される。

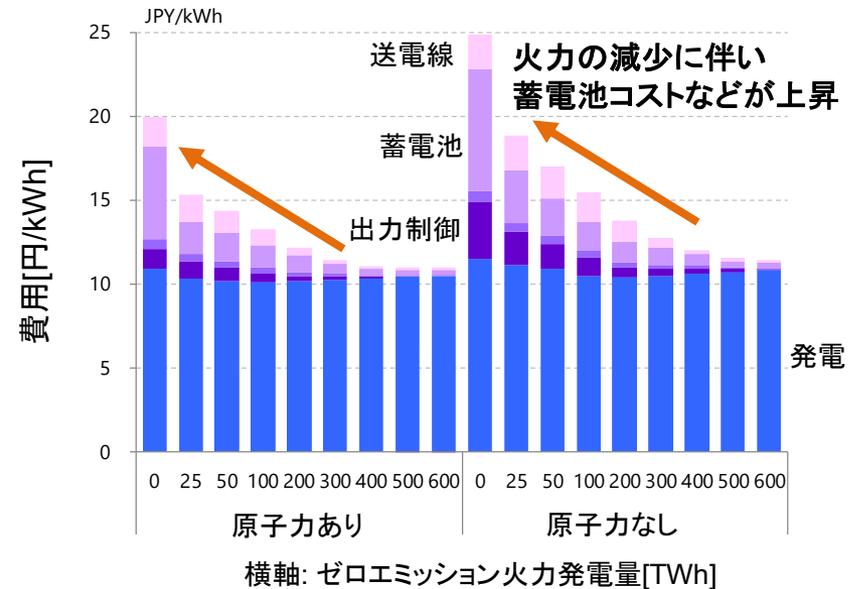
ネットゼロ排出の達成に向けて想定される影響

(A) 再エネ設置に伴う立地影響



図の出展: GoogleMap

(B) エネルギーシステム全体に生じる費用の増大



図の出展: Y.Matsuo et al[1]

本分析の目的

様々な技術を用いてネットゼロ排出を達成する場合の影響を定量的に評価し、**ネットゼロを達成するために必要な政策の在り方を明らかにする。**

IEEJ-NEモデルを用いたシナリオ分析

Input

エネルギー技術(約300種類)

- ・ 量的制約(複数のシナリオを想定)
- ・ 資本費
- ・ 変動費(維持費)

燃料費

- ・ LNG価格
- ・ 石炭価格
- ・ 水素価格 など

需要

- ・ 家庭需要(冷暖房・給湯など)
- ・ 民生需要(冷暖房・給湯など)
- ・ 交通需要(自動車数・航空機数など)

→ 主要なエネルギー技術の量的制約についてシナリオを設定

(再エネ導入可能量・原子力の稼働・CCSのCO₂貯蔵量など)

Model

$$\min J = \sum_{y=1}^{y_e} \sum_{i=1}^k \left(\underbrace{Fix_{y,i}}_{\text{固定費}} + \underbrace{Fuel_{y,i}}_{\text{燃料費}} + \underbrace{Variable_{y,i}}_{\text{変動費}} \right) \cdot \underbrace{r_y}_{\text{割引係数}}$$

主な制約条件:

サービス需要
CO₂排出量
電力需給バランス
供給予備力制約など

→ CO₂排出制約などを満たすことを前提に各技術のシステム費用を最小化

Output

- ・ 各エネルギー技術が導入される数量 → 立地影響などを推定
- ・ 各エネルギー技術のシステム費用 → ネットゼロ排出の達成に必要な費用

本報告の流れ

1. 前提条件

- どのようなシナリオを設定するか
- 再生可能エネルギーの導入量上限やコストをどのように考えるか

2. 試算結果

- 2050年の電源構成はどのようになるか
- 再生可能エネルギーの設置に伴う立地影響はどの程度か
- シナリオに応じて各種費用はどのように変化するか

3. シナリオ分析による示唆

- ネットゼロ排出を達成するために必要な方策の在り方は

1. 前提条件

シナリオ設定(2050年断面の想定)

本分析では、CCSのCO₂貯蔵可能量, 原子力の稼働状況, 火力発電の利用可否, 再生可能エネルギーの立地条件に応じて、6種類のシナリオの想定を行った。

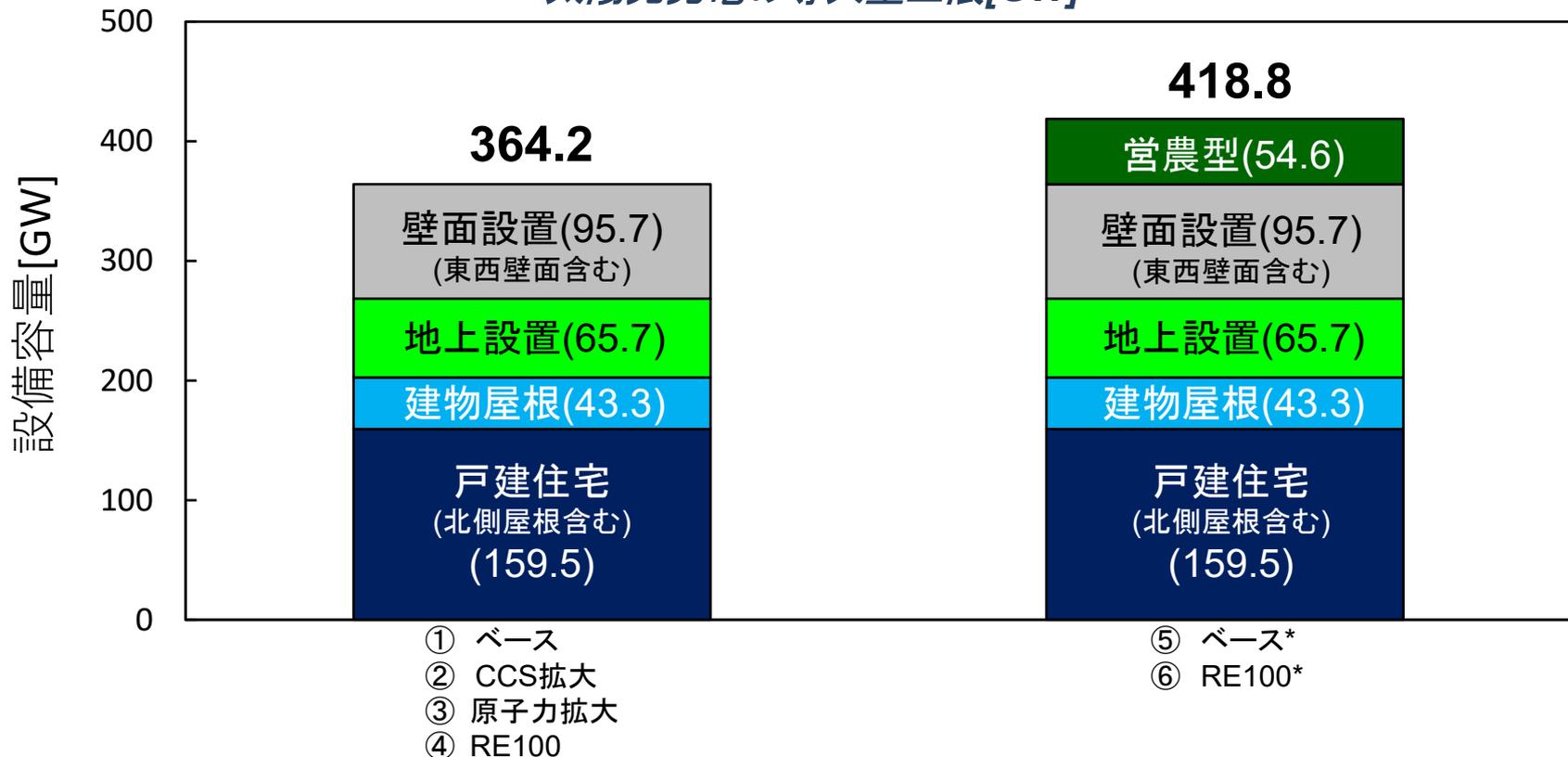
シナリオ名	CCS	原子力	火力発電	陸上風力	洋上風力	営農型太陽光*4
①ベース	国内:1億tCO ₂ /年 国外:1.5億tCO ₂ /年	60年運転・ 建設中3基新設	あり	森林設置 なし	領海内 (~22.2km)	なし
②CCS拡大	国内:2億tCO ₂ /年 国外:3億tCO ₂ /年					
③原子力拡大	国内:1億tCO ₂ /年 国外:1.5億tCO ₂ /年	ベースの2倍の 設備容量へ拡大	廃止	バイオマス 火力のみ*1		
④RE100		廃止				
⑤ベース* (VRE上限拡大)		60年運転・ 建設中3基新設	あり	森林設置 あり*3		
⑥RE100* (VRE上限拡大)	廃止	バイオマス 火力のみ*1				

* 圧縮水素貯蔵から発電する際には水素専焼火力を利用可能とした。

太陽光発電の導入量上限

- シナリオ①～④では、陸上風力と競合しない雑草地や建物の屋根・壁面に設置することを想定し、上限は合計**364.2GW**とした。
- シナリオ⑤,⑥は耕地にも営農型太陽光発電を設置するとし、合計**418.8GW**とした。

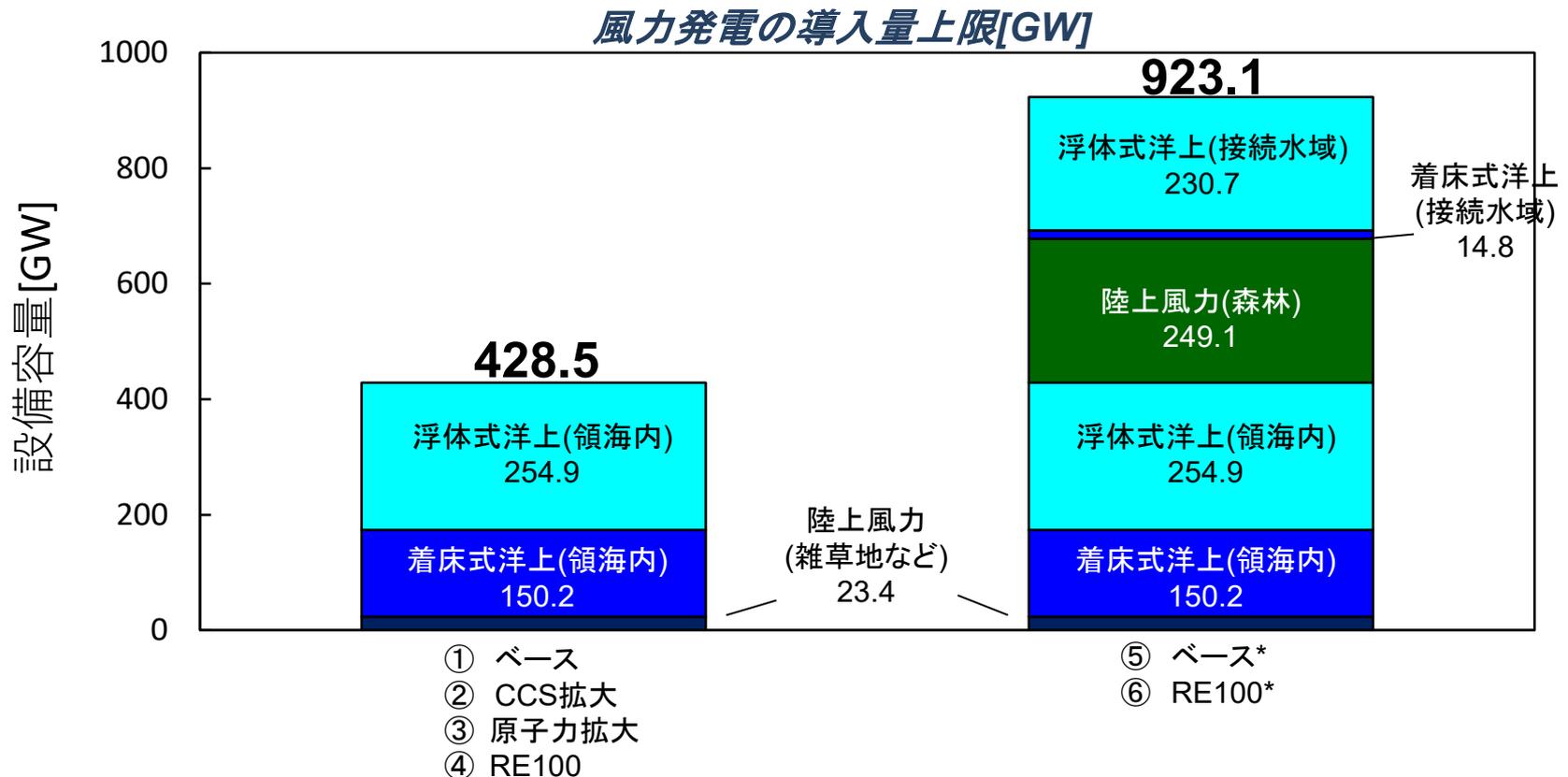
太陽光発電の導入量上限[GW]



- 戸建住宅・建物屋根(戸建住宅)・壁面設置の導入量上限は環境省[2]を基に設定。
- 地上設置型の上限は尾羽他(電中研報告)[3], H.Obane et al[4]の考え方に基づき、100mメッシュを用いたGISデータによって推計した値を基に設定。
- 営農型の導入量上限は、朝野他[5]を参考に、2020年時点の全ての農業経営体がそれぞれ50kWのシステムを設置するとした。

風力発電の導入量上限

- シナリオ①～④では、太陽光と競合しない雑草地などにおける陸上風力23.4GW、再エネ海域利用法に基づく「促進区域」の対象海域における洋上風力405.1GWとした。
- シナリオ⑤,⑥は自然環境への影響が懸念される森林や、再エネ海域利用法の管轄外である接続水域にまで洋上風力を設置する前提とした。



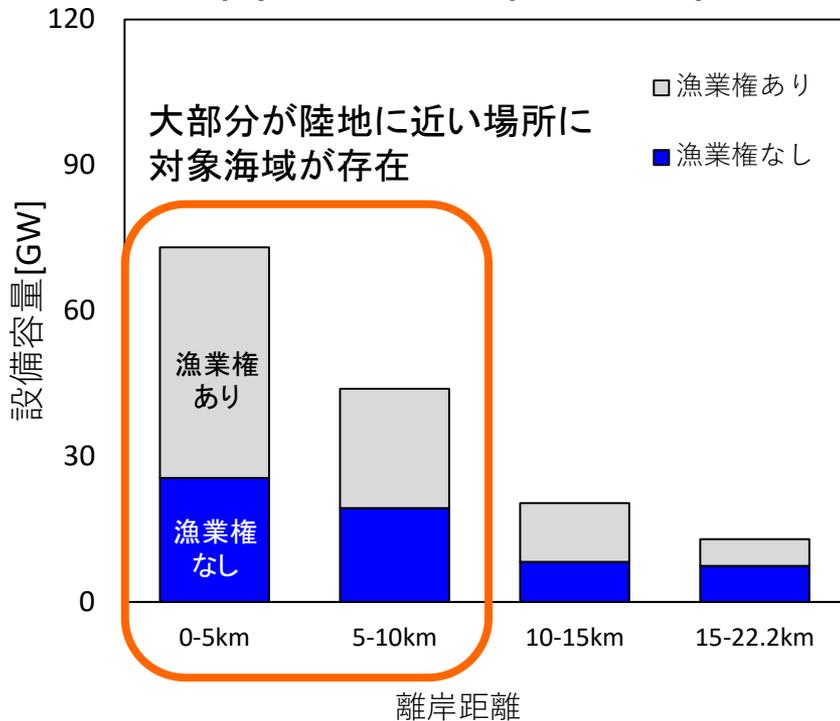
- 陸上風力の上限は尾羽他(電中研報告)[3], H.Obane et al[4]の考え方にに基づき、100mメッシュを用いたGISデータによって推計した値を基に設定。
- 洋上風力の上限は尾羽他(社経研 研究資料)[6], H.Obane et al[7]の考え方にに基づき、GISデータによって推計した値を基に設定。

洋上風力の導入量想定の留意点

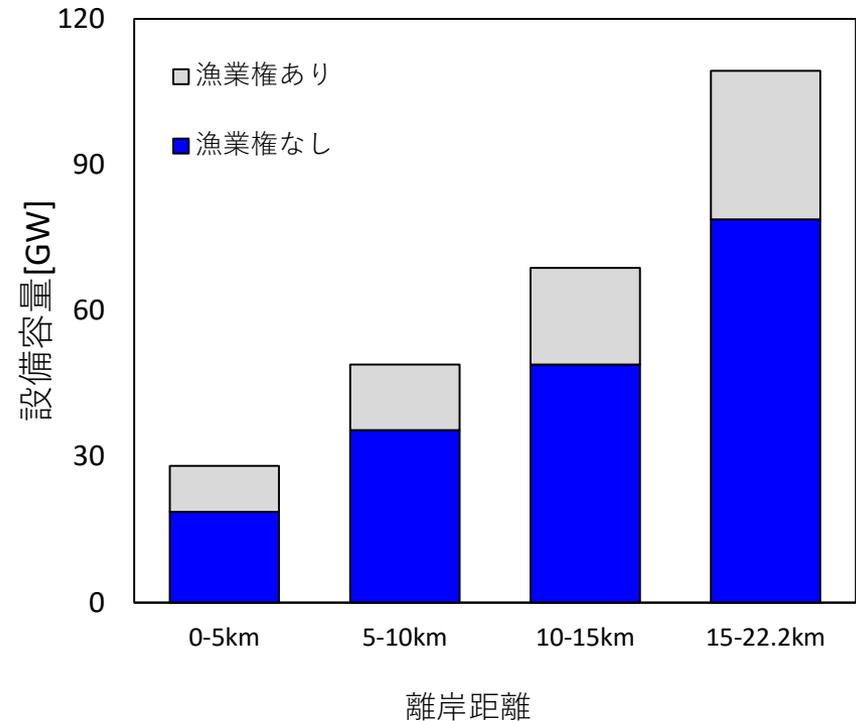
- 洋上風力の導入量上限値(405.9GW)は、**漁業権が設定されている海域や、景観・騒音などへの影響が懸念される陸地に近い海域**までも設置する前提となっている*1。
- 既に反対運動などが生じている事例がある中で(秋田県由利本荘沖・北海道乙部町など)、洋上風力の導入量の増大に伴い**社会的制約がより課題となり得る**。

離岸距離に応じた洋上風力設備容量*1 [GW]

(A) 着床式風車(150.2GW)



(B) 浮体式風車(254.9GW)



*1 尾羽他(電力中央研究所 社会経済研究所 研究資料)[5]を参考に作成。

英国(Round2)では8-13km以上、中国では10km以上、デンマークでは12.5km以上に設置されている。

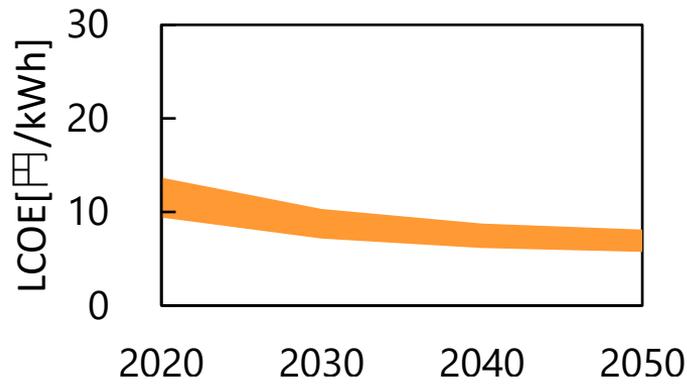
太陽光・風力発電の均等化発電原価(LCOE)

太陽光・風力発電については、調達価格等算定委員会で示されている資本費を基準に学習曲線に基づき資本費が低減していくことを想定した。

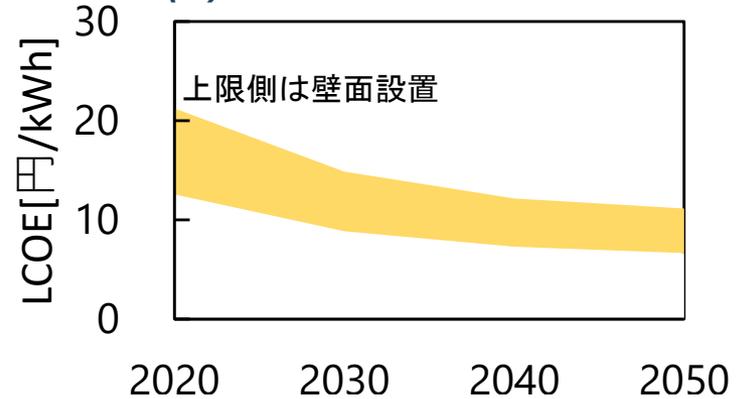
LCOEに換算した場合、立地場所の違いによりLCOEは大きく異なる。

太陽光発電・風力発電のLCOE

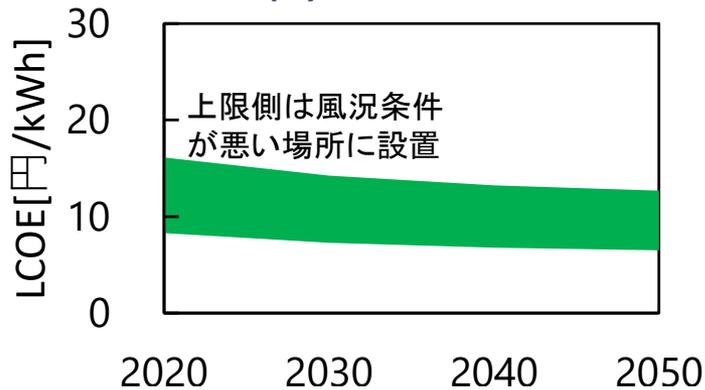
(A) 地上設置型太陽光発電



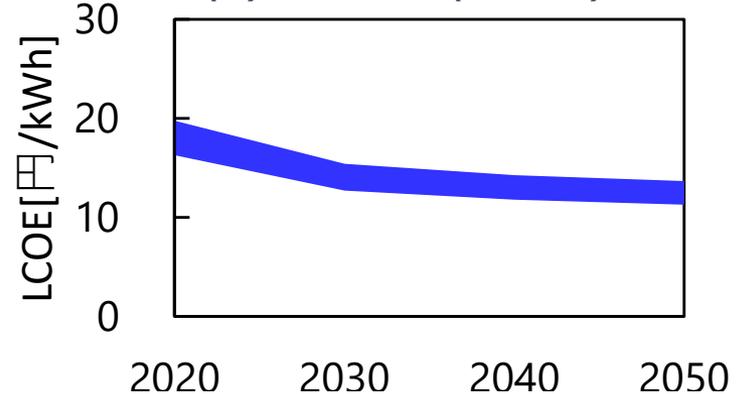
(B) 建物設置型太陽光発電



(C) 陸上風力



(D) 洋上風力(着床式)



エネルギー貯蔵技術の想定

- エネルギー貯蔵技術として、揚水式水力発電、系統用蓄電池、自動車用蓄電池、圧縮水素貯蔵、ヒートポンプ給湯器の技術を想定した。
- 自動車用蓄電池とヒートポンプ給湯器については、各機器の所有者が必要な際に電力・熱エネルギーが使用される必要があるため、**0時における蓄電容量が翌日の0時の蓄電容量と等しくなる単日制約**を課している。
- 自動車用蓄電池については、**自動車保有者の50%が系統側の需給調整のために充放電を行う想定**を置いた。

想定したエネルギー貯蔵技術の一例

自動車用蓄電池



単日制約あり
保有者の50%が需給調整

ヒートポンプ給湯器



* 図の出展: 三菱電機

単日制約あり

圧縮水素貯蔵

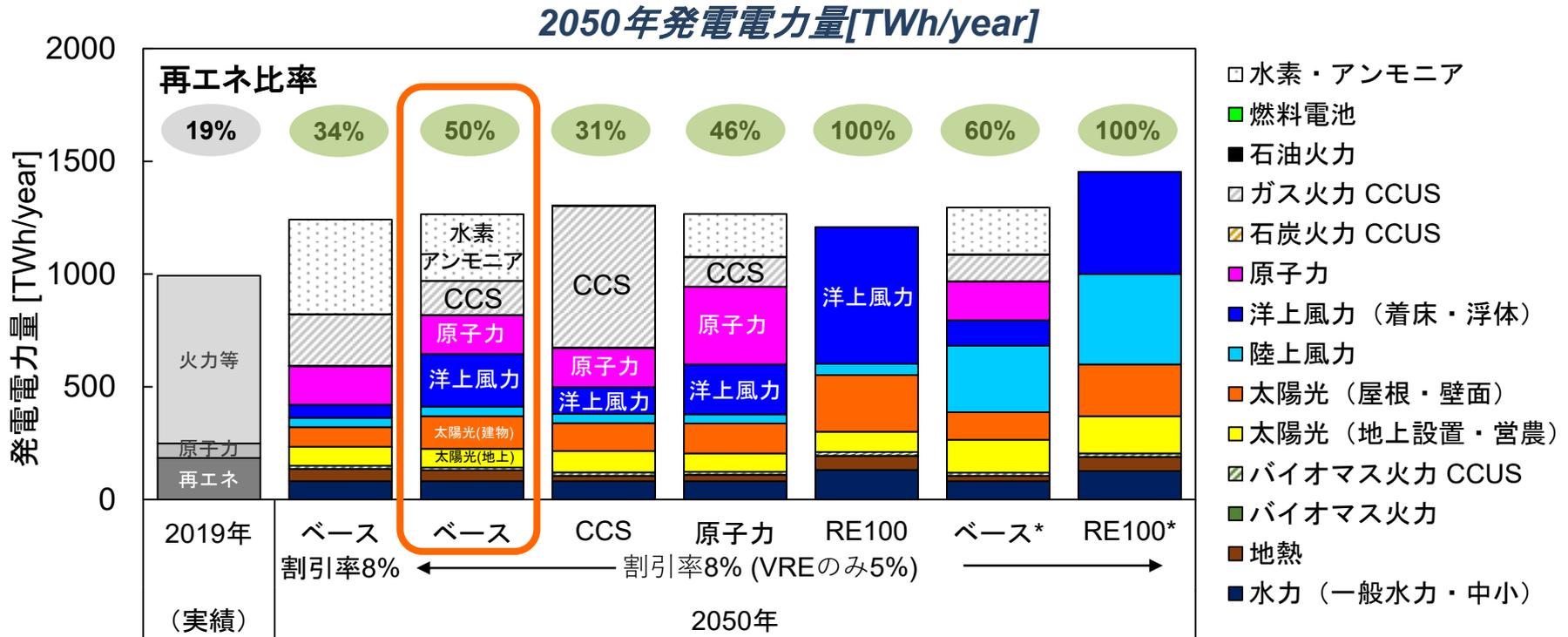


* 図の出展: TUV sud

2. 試算結果

2050年電源構成(発電電力量)

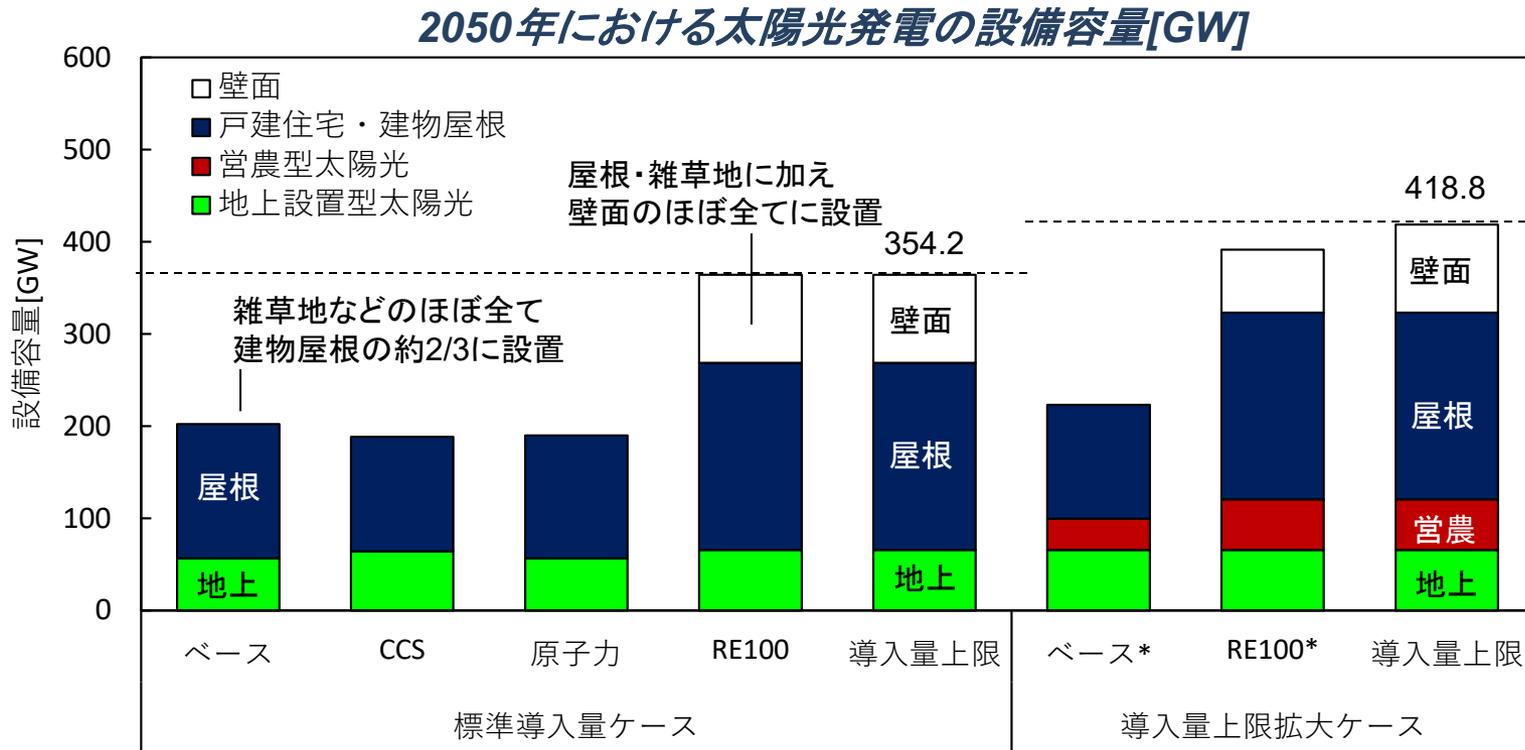
エネルギーシステム全体へ生じる費用が最小となる場合における発電電力量を示す。



ベースシナリオにおいては再エネ比率は50%となり、残りは原子力, CCS付火力, 水素・アンモニア発電によって電力が賄われる。

太陽光発電の設備容量

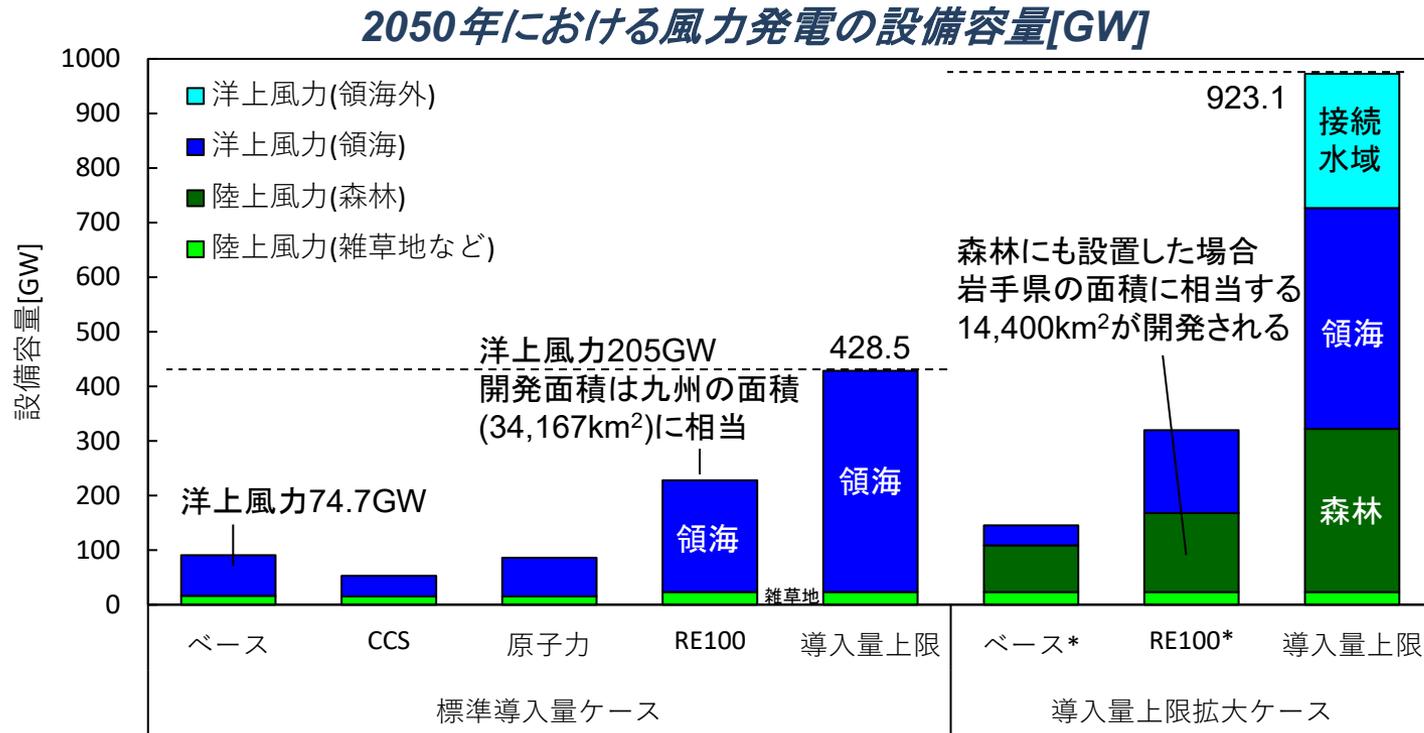
2050年における太陽光発電の設備容量を以下に示す。



RE100シナリオでは建物屋根および雑草地に加え、壁面のほぼ全てに太陽光発電が導入されることとなる(北側屋根や東西壁面含む)。
 → 太陽光発電の運転期間が20-30年とされている中で、大量廃棄の問題も懸念される。

風力発電の設備容量

2050年における風力発電の設備容量を以下に示す。



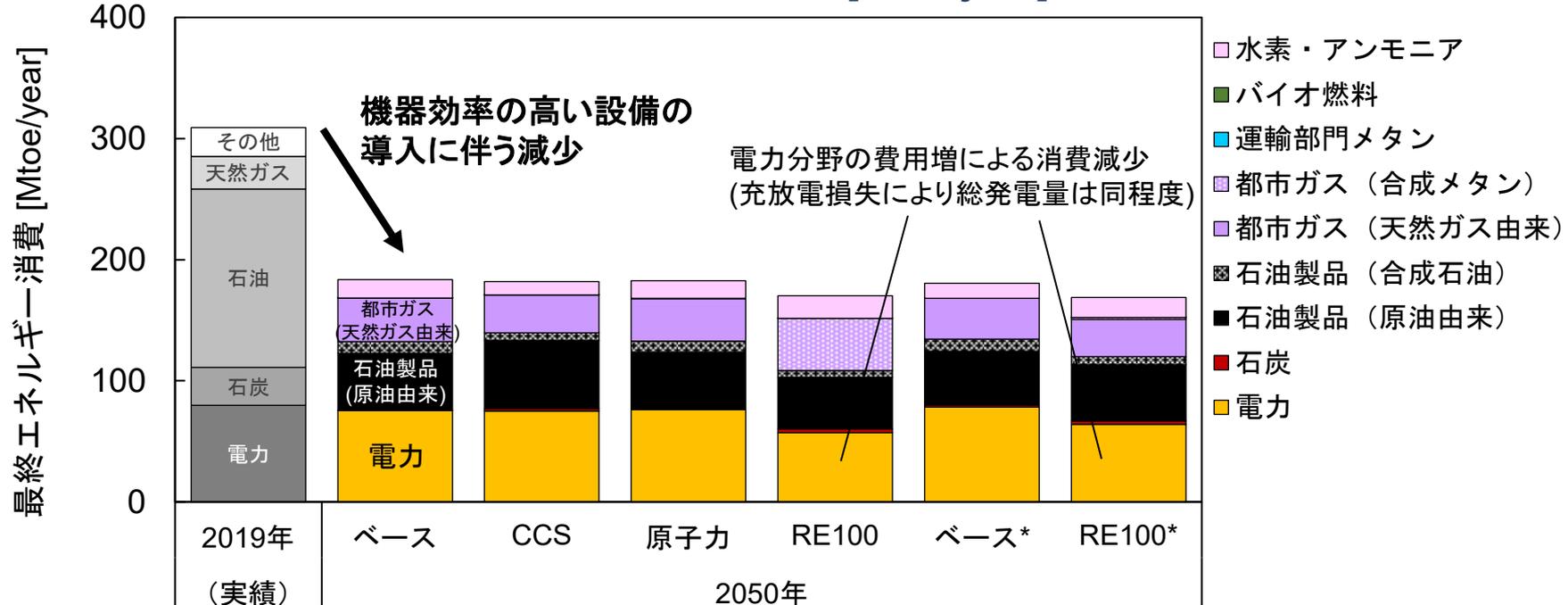
RE100シナリオでは領海内に205GWの洋上風力が導入されることとなり、ほぼ九州の面積に相当する海域(34,167km²)が開発されることとなる。

→ 利害関係者との調整がより重要となる海域にまで風車を導入せざるえなくなる。

最終エネルギー消費

日本全国における最終エネルギー消費を以下に示す。

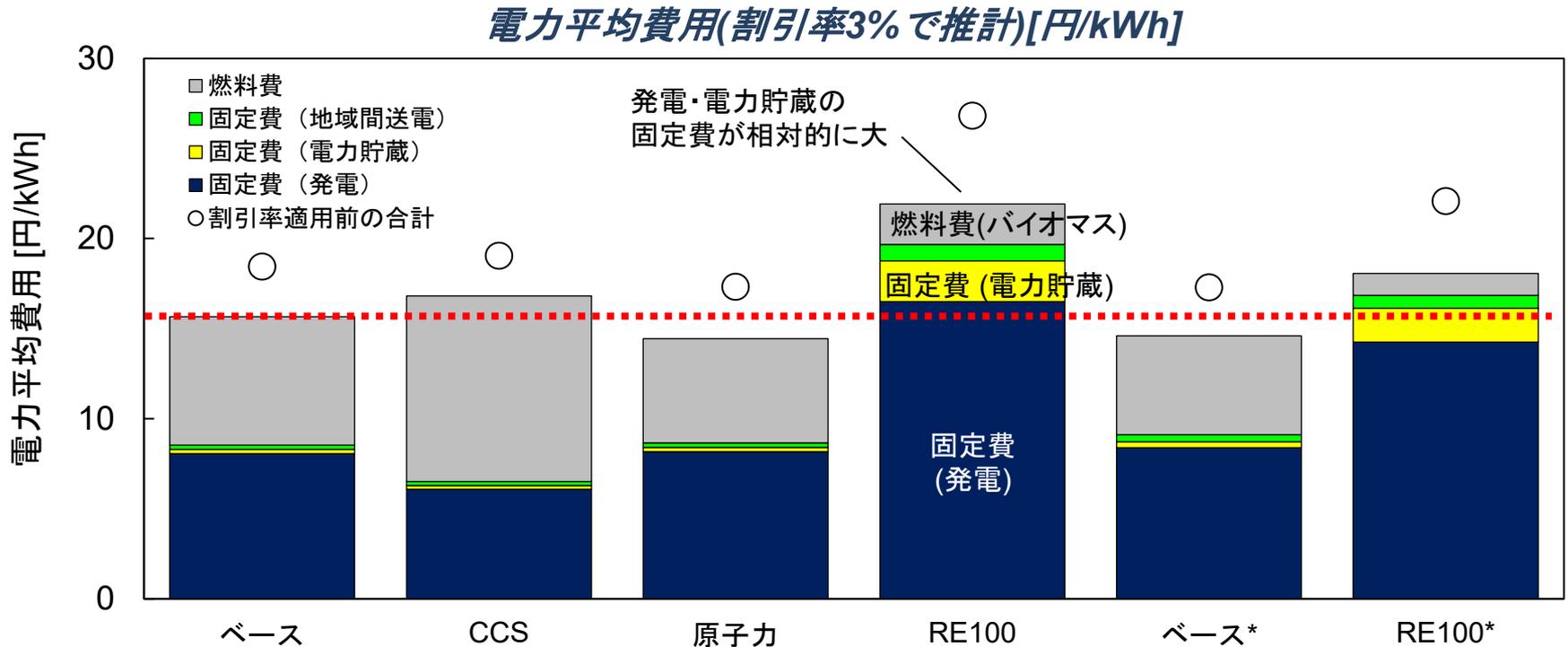
最終エネルギー消費[Mtoe/year]



全シナリオにおいて機器効率の高い設備が導入されることにより、最終エネルギー消費は2/3程度にまで減少すると推計された。

電力平均費用

各シナリオにおける電力平均費用(電力1kWh消費するのに必要な費用)の相対的な関係性を以下に示す。



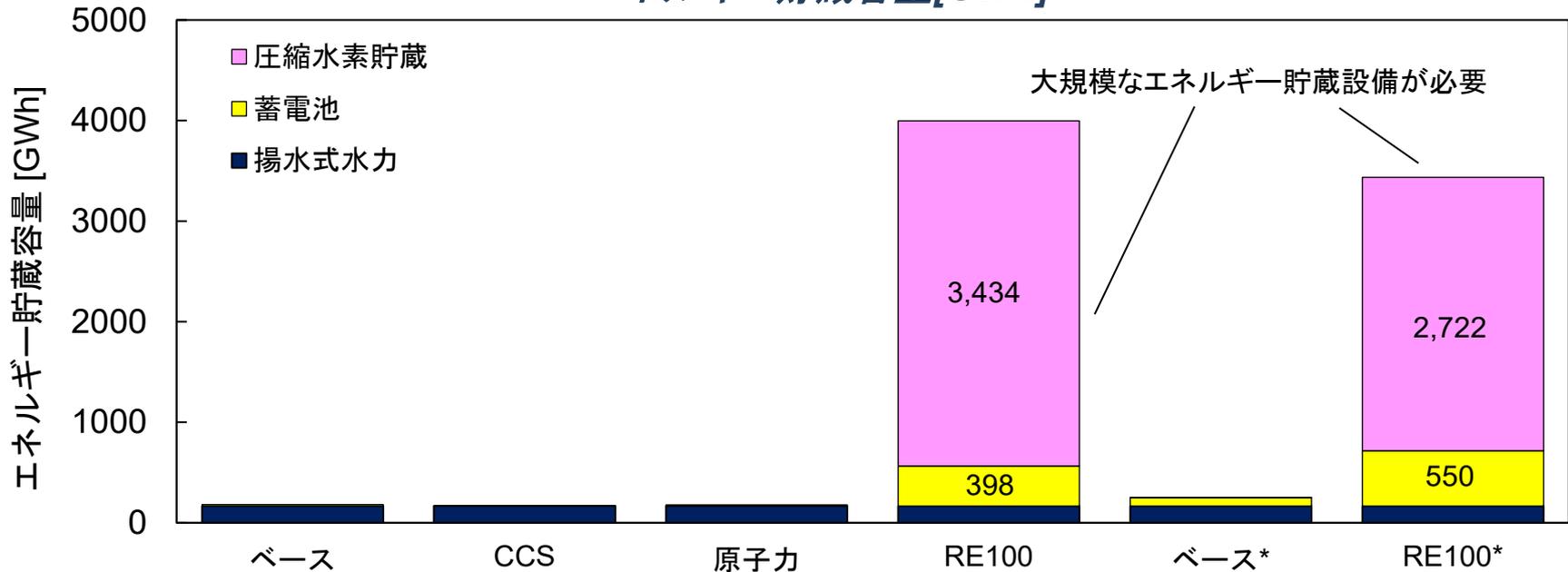
RE100・RE100*シナリオにおいては、他シナリオと比較して燃料費は減少する一方で、**発電・電力貯蔵に関わる固定費**が相対的に上回る。

→ 洋上風力の資本費や蓄電池などの需給調整の必要性な費用の低減が重要

エネルギー貯蔵容量

電力需給を維持するのに必要なエネルギー貯蔵容量を示す。

エネルギー貯蔵容量[GWh]

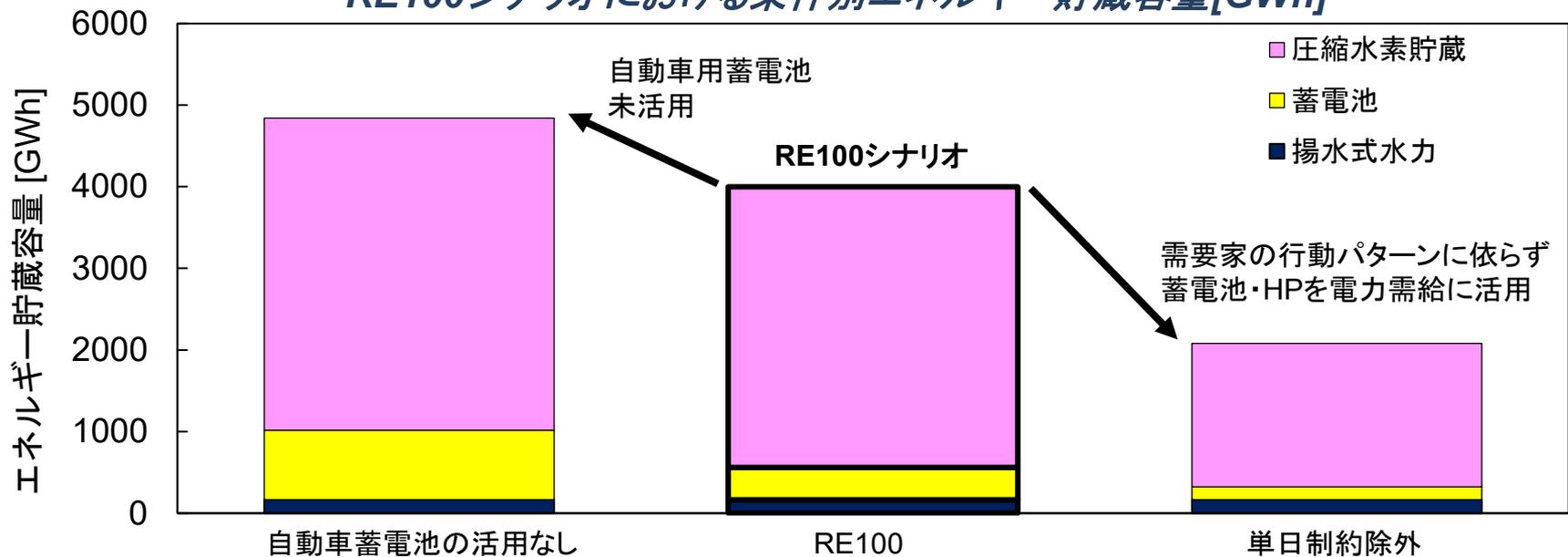


RE100・RE100*シナリオでは、**大規模なエネルギー貯蔵設備**が必要となり、必要な蓄電池の貯蔵容量は398~550GWhと推計された。
(現在の戸建住宅(2650万世帯)の全てに10kWhの蓄電池を設置した場合265GWh)

RE100シナリオにおける条件別のエネルギー貯蔵容量

RE100シナリオを対象に、自動車の蓄電池やヒートポンプ給湯器の運用パターンの違いによる、エネルギー貯蔵容量の推計を行った。

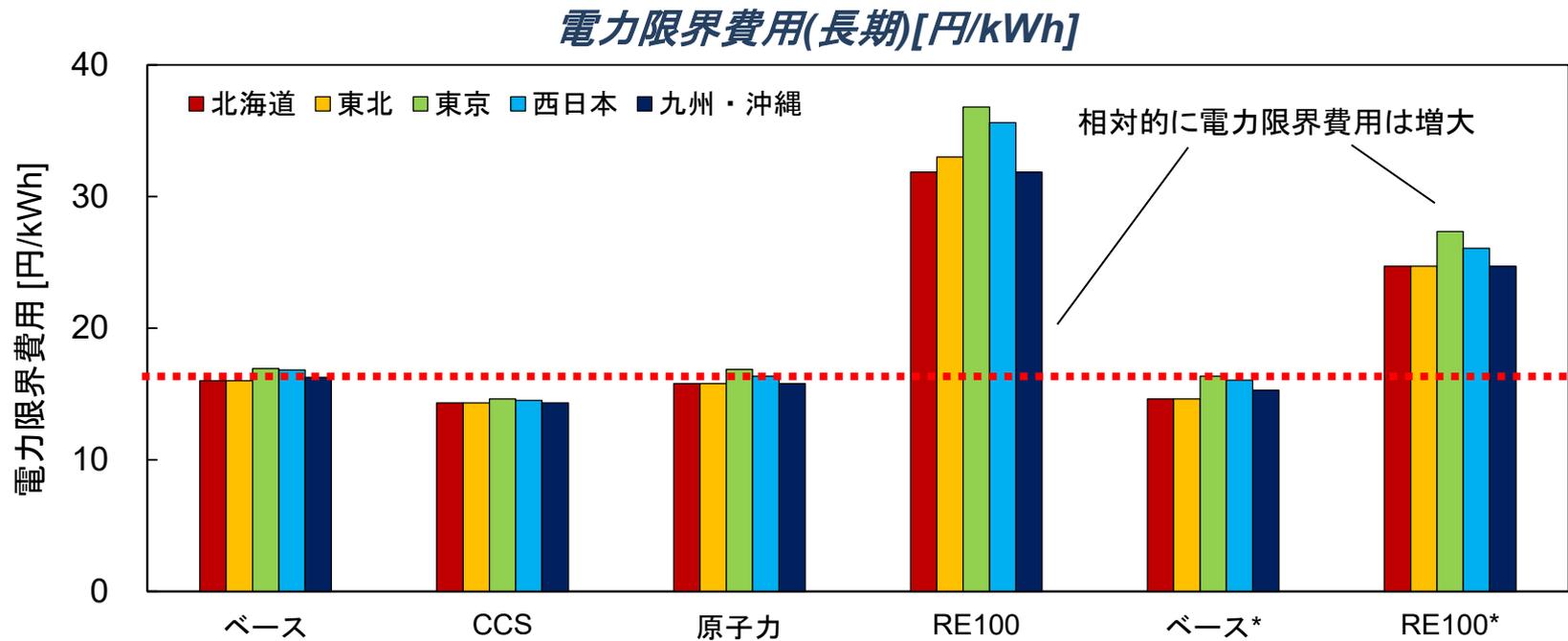
RE100シナリオにおける条件別エネルギー貯蔵容量[GWh]



必要なエネルギー貯蔵容量は運用パターンにより大きく依存することに留意が必要。
ただし、単日制約を除外した場合でも、大容量のエネルギー貯蔵容量が必要となりうる。

電力限界費用(長期)

各シナリオにおける、電力1単位を追加的に生産する際に必要な電力限界費用の相対的な関係性を評価した。(ただし必ずしも電力限界費用≒小売電気料金とはならない)

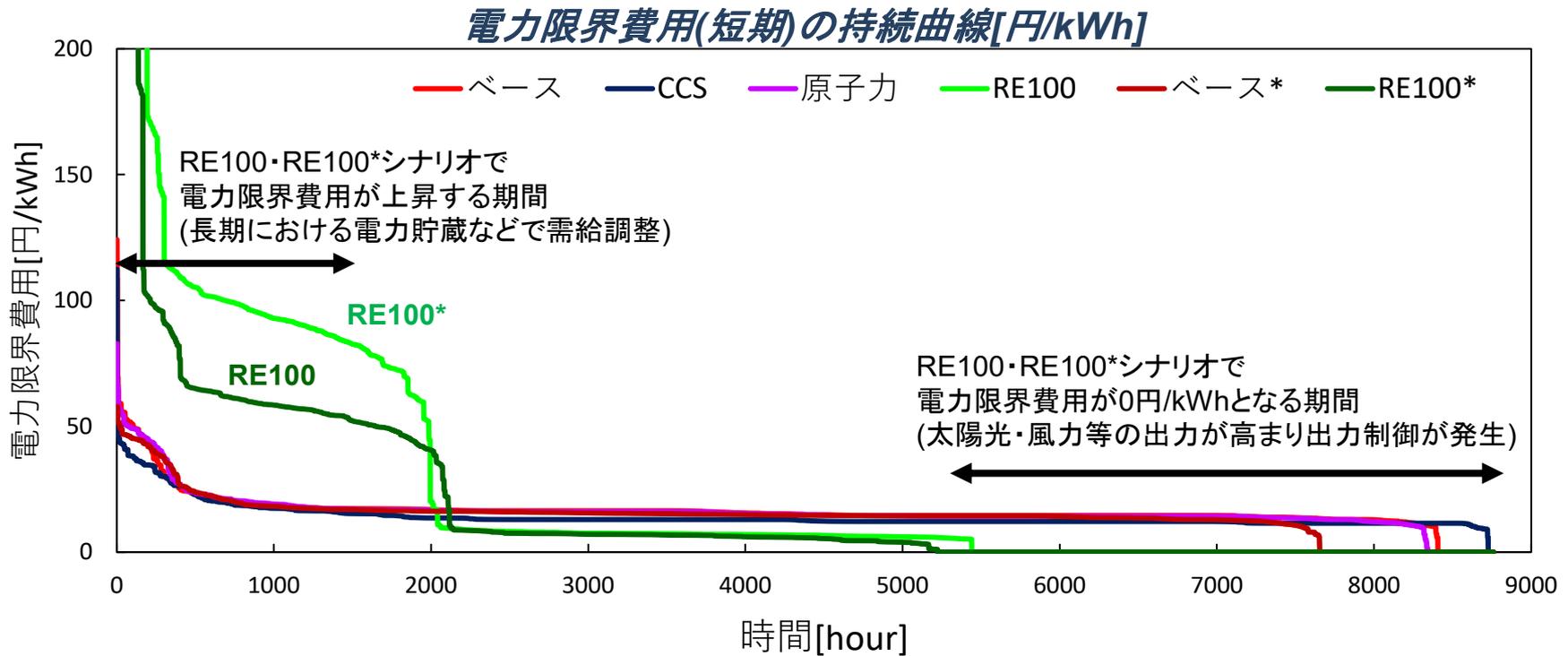


RE100・RE100*シナリオでは、ベースシナリオと比較して相対的に電力限界費用は上回る(想定した燃料費などの条件では約1.5-2.0倍)

→ 電力限界費用が増大する要因について検証することが必要

電力限界費用(短期)の持続曲線

各時間(8760時間)における(短期)電力限界費用の持続曲線を推計した。



RE100シナリオでは、風況条件などが悪化する季節において、電力限界費用が大幅に上昇し、100円/kWh以上の時間帯は約1.2か月分(877時間)に達している。

→ 再エネの大量導入時には、**長期間の電力貯蔵に関わる費用の削減**が課題となる。

3. シナリオ分析による示唆

シナリオ分析による示唆

ネットゼロ排出における立地影響

- ネットゼロ排出を達成しようとした場合、原子力やCCS火力を活用するベースケースにおいても太陽光・風力発電が大量に導入されることとなり、**立地への影響は小さい**。
- 発電電力量の全てを再エネで賄う場合、**建物(壁面含む)のほぼ全てに太陽光発電が設置されることに加え、漁業権が設定されている海域や陸地に近い海域などにも大量の風車を設置されることとなるため、大量廃棄や利害調整の在り方が課題となる。**

ネットゼロ排出における各種費用

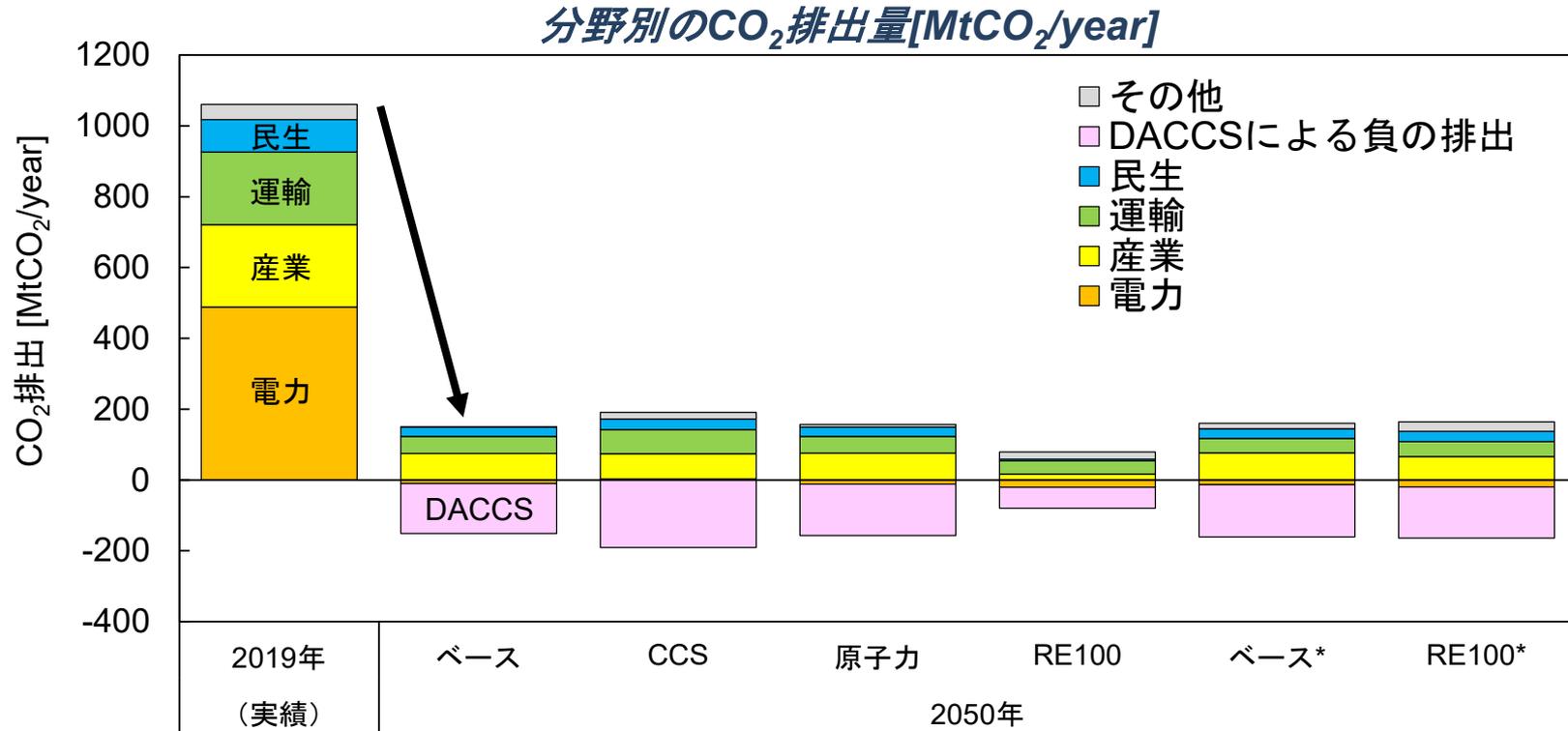
- 再エネ比率が増大した場合には電力平均費用・電力限界費用などの**各種費用は増大する傾向**が示唆された。これらの費用を低減させる上では、洋上風力やエネルギー貯蔵技術などの資本費の削減を図ることが課題となる。
- エネルギー貯蔵に関わる技術は、**運用方法に大きく依存するものの、再エネ比率が著しく増大した場合には、必要なエネルギー貯蔵容量は大きく増大する傾向**が示された。そのため、大容量のエネルギー貯蔵設備の確保も課題となる。

ネットゼロ達成のためのハードルは高く、各技術の成熟度や技術導入に関わる社会的受容性などの不確実性を考えると、現時点においては多様なオプションを追求し、**バランスのとれたエネルギーミックスを目指すことが望まれる。**

参考資料

分野別のCO₂排出量

分野別におけるCO₂排出量を以下に示す。

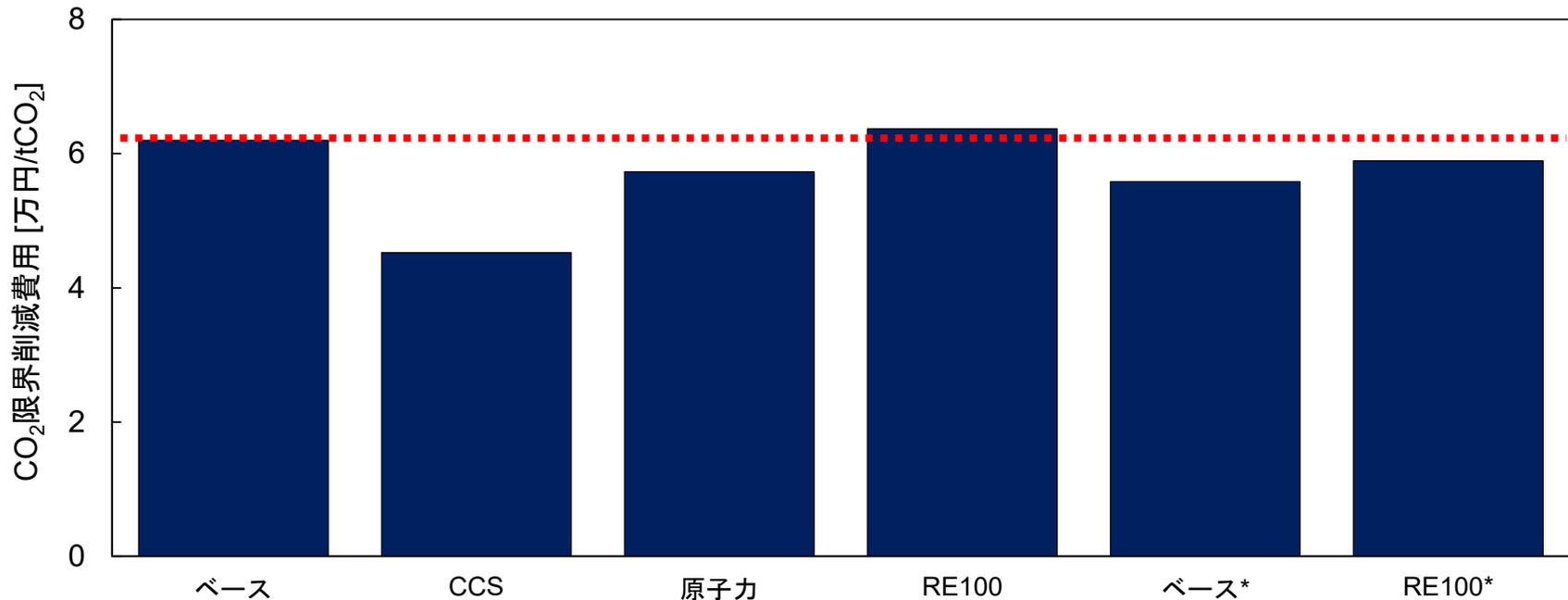


電力分野に加え、産業・運輸・民生におけるCO₂の削減も重要となり、ネットゼロ排出を達成する上では**直接空気回収技術(DACCS)の長期的な技術開発も重要**となる。

CO₂排出限界削減費用

CO₂を追加的に1t削減するのに必要なCO₂排出限界削減費用を以下に示す。

2050年におけるCO₂排出削減費用[万円/tCO₂]

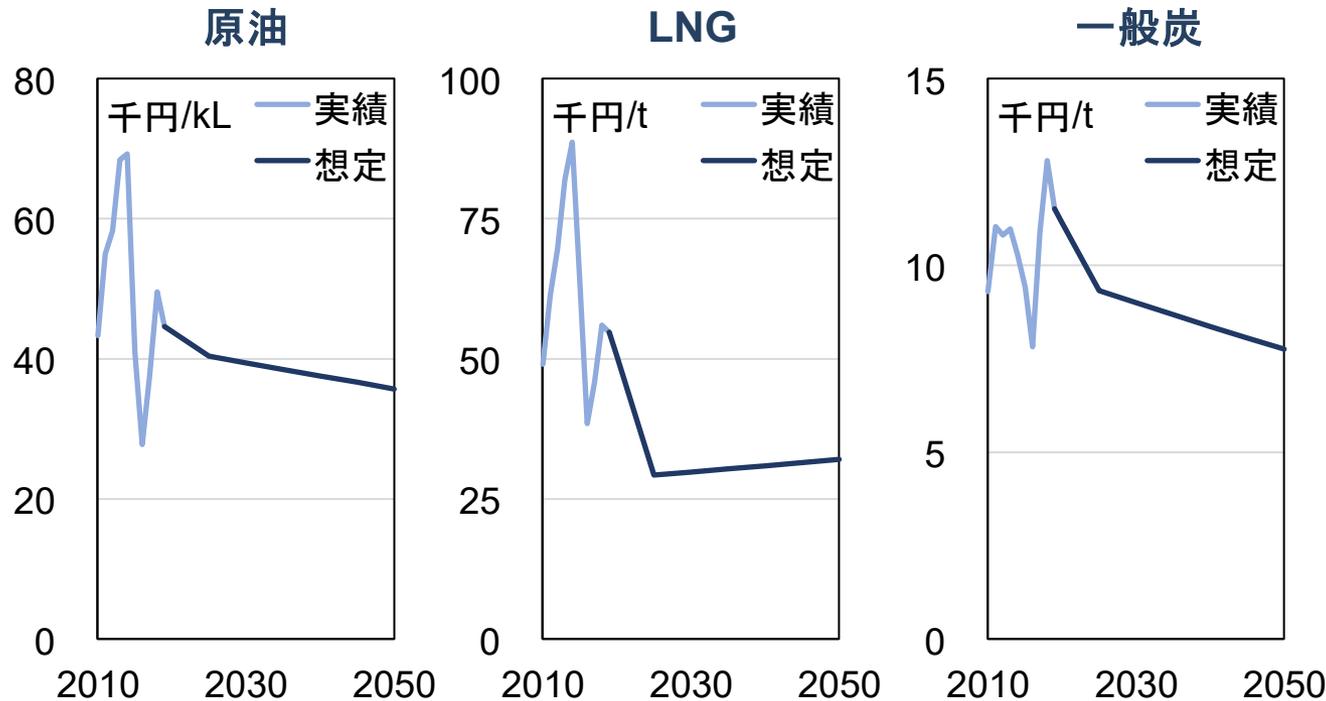


CO₂限界削減費用を削減する上では、**CCSの活用が特に有効**とされる。
→ CCSは電力供給のみならず、需要側のCO₂相殺にも貢献可能であるため、比較的大きな効果が得られる。

エネルギー輸入の想定

- 化石燃料の輸入価格は、IEA WEO2020のSustainable Development Scenarioに基づき、原油・LNG・一般炭のいずれとも**2020年比で減少**する想定を置いた。
- 水素・アンモニアは、技術動向を勘案し、コストを積み上げることによって推計した。
(2050年断面で水素:11.7万円/toe, アンモニア:9.9万円/toe)

化石燃料輸入価格の想定(原油・LNG・一般炭)



水素・アンモニア等

(2050年断面想定値)

水素	11.7万円/toe (30円/Nm ³ -H ₂)
アンモニア	9.9万円/toe (43,780円/t)
合成メタン	17.6万円/toe (40US\$/Mbtu)
合成石油	19.3万円/toe

* 実績値はEDMCデータバンク(日本貿易月表)。WEO2020=World Energy Outlook 2020。価格はいずれも2014年日本円での表示。

太陽光発電の導入量上限

- シナリオ①～④では、雑草地や建物の屋根・壁面に設置することを想定し、上限は合計**364.2GW(赤枠部)**とした。
- シナリオ⑤,⑥は耕地にも営農型太陽光発電を設置するとし、合計418.8GWとした。

区分	上限値 [GW]	考え方
地上設置型太陽光 (メガソーラー)	赤枠:シナリオ①～④の想定 65.7	雑草地・裸地・しのみ地・再生困難な荒廃農地に設置する想定。 陸上風力との競合場所を除外 *1。
屋根設置型太陽光 (公共系建物・集合住宅)	43.3	建物の屋根全てに設置。 環境省調査[11]のレベル1の値を採用*2。
壁面設置型太陽光 (公共系建物・集合住宅)	95.7	東西壁面・窓10m²以上 に設置。 環境省調査[11]のレベル3とレベル1の差分を採用*2。
戸建住宅太陽光	159.5	戸建住宅(全方位)の全てに設置。 環境省調査[11]のレベル3の値を採用。
営農型太陽光	54.6	2020年度における全農業経営体(109万経営体)が50kWの太陽光発電システムを設置する想定*3。

*1 尾羽他(電中研報告)[3], H.Obane.et.al[4]の考え方に基づき、2021年4月時点のGISデータを利用し、100mメッシュで推計。

*2 レベル1「屋根150m²以上・設置しやすいところに設置」レベル2「屋根20m²以上・南壁面・窓20m²以上・多少の架台設置は可」レベル3「東西壁面・窓10m²以上・敷地内空地なども積極的に活用」と定義され[3]、本推計では公共系建物・共同住宅のレベル3とレベル1の差分を概ね壁面として扱った。

*3 朝野他[4]の考え方を参考に、2020年度における農林業センサスにおける農業経営体数(109万経営体)×50kWとした。

なお、2050年度における農業経営体数は都府県合計で約16.4万経営体に大幅に減少する見込みが示されているが[4]、過大側の設定を定めた。

風力発電の導入量上限

- シナリオ①～④では、雑草地などにおける陸上風力23.4GW, 再エネ海域利用法に基づく「促進区域」の対象となる海域における洋上風力405.1GWとした。
- シナリオ⑤,⑥は自然環境への影響が懸念される森林や、再エネ海域利用法の管轄外である接続水域にまで洋上風力を設置する前提とした。

区分	上限値 [GW]	考え方
陸上風力 (森林以外)	赤枠:シナリオ①～④の想定 23.4	年間平均風速5.0m/s以上の雑草地・裸地・しの地・ 荒廃農地に設置*1。
着床式洋上風力 (領海内)	150.2	再エネ海域利用法における「促進区域」の指定対象 となる海域のうち水深0-60mの海域に設置*2。
浮体式洋上風力 (領海内)	254.9	「促進区域」の指定対象となる海域のうち水深60- 200mの海域に設置*2。
陸上風力 (森林)	249.1	環境省調査[11]の条件を参考に、保安林を除く民有 林・国有林のうち年間平均風速5.5m/s以上・傾斜角 20度未満の場所に設置する前提の下、GISで推計。
着床式洋上風力 (接続水域)	14.8	「促進区域」の指定要件を接続水域にまで適用する 仮定に基づきGISで推計。
浮体式洋上風力 (接続水域)	230.7	「促進区域」の指定要件を接続水域にまで適用する 仮定に基づきGISで推計。

*1 尾羽他(電中研報告)[3], H.Obane.et.al[4]の考え方に基づき、2021年4月時点のGISデータを利用し、100mメッシュで推計。

*2 尾羽他(社経研研究資料)[6], H.Obane.et al[7]の考え方に基づき、GISを用いて推計(2017年度の船舶通行量を使用)。

参考文献

- [1] Y. Matsuo, S. Endo, Y. Nagatomi, Y. Shibata, R. Komiyama, Y. Fujii, Investigating the economics of the power sector under high penetration of variable renewable energies, Applied Energy, vol 267, 2020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919316435>
- [2] 環境省, 令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書
<http://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/report/r01.html>
- [3] 尾羽秀晃, 永井雄宇, 朝野賢司, 「土地利用を考慮した太陽光発電および陸上風力の導入ポテンシャル評価」, 電力中央研究所報告, Y18003, 2019
<https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/Y18003.html>
- [4] H.Obane, Y.Nagai, K.Asano, Assessing land use and potential conflict in solar and onshore wind energy in Japan, Renewable Energy, Vol160, pp842-851,2020
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120309125>
- [5] 朝野賢司, 永井雄宇, 尾羽秀晃, 「ネットゼロ実現に向けた風力発電・太陽光発電を対象とした大量導入シナリオの検討」, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (第34回会合)資料
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/034/
- [6] 尾羽秀晃, 永井雄宇, 豊永晋輔, 朝野賢司, 「再エネ海域利用法を考慮した洋上風力発電の利用対象海域に関する考察」, 社会経済研究所研究資料 Y19502, 2019
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/source/Y19502.html>
- [7] H.Obane, Y.Nagai, K.Asano, Assessing the potential areas for developing offshore wind energy in Japanese territorial waters considering national zoning and possible social conflicts, Marine Policy, Vol 129, 2021
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308597X21001251>