

	排出削減目標				電源構成中の再エネ比率	
	ガス種別	基準年	2035年	2040年	2035年	2040年
経団連	GHG	2013年	▲60%	▲73%	—	—
RITE（再エネシナリオ）	GHG	2013年	▲60% (*1)	▲73%	—	54%
IGES（早期削減シナリオ）	GHG	2013年	▲76%	▲89%	61% (*2)	79%
JCLP	GHG	2013年	▲75%以上	—	60%以上	—
自然エネルギー財団	エネ起源CO2	2019年	▲65%	▲80%	80%	95%
Climate Integrate	GHG	2013年	▲70%	▲80%	85%以上	ほぼ100%
WWFジャパン	GHG	2013年	▲68%	▲81%	77%	90%

(*1) 経産省からの依頼内容では「2030年度46%削減から2050年ネットゼロへと現在の削減トレンドを直線的に削減が進んだケースを分析に含めること」とされていることから当該数値であるものとした。

(*2) JCLP『脱炭素加速に向けたJCLPからの提言 別添資料』でIGESの「1.5℃ロードマップでの電源構成」として提示されている数値を参照した。

< 出典 >

- ・ 経団連（2024）『エネルギー基本計画の見直しに向けた提言』
- ・ RITE（2024）『2050年カーボンニュートラルに向けた我が国のエネルギー需給分析』（総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 第66回会合 資料4）
 - ・ 〔参考〕資源エネルギー庁（2024）『シナリオ分析について』（総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 第66回会合 資料1）
- ・ IGES（2023）『IGES シナリオ分析概要』（総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 第66回会合 資料5）
 - ・ 〔参考〕JCLP（2024）『脱炭素加速に向けたJCLPからの提言 別添資料』
- ・ JCLP（2024）『脱炭素加速に向けたJCLPからの提言』
- ・ 自然エネルギー財団（2024）『脱炭素へのエネルギー転換シナリオ（詳細版）』
 - ・ 〔参考〕同（2024）『自然エネルギーによる エネルギー転換シナリオ 2040年に向けての展望（第1版）』
- ・ Climate Integrate（2023）『2035年電力システム 脱炭素化への政策転換』
- ・ WWFジャパン（2024）『脱炭素社会に向けた2050年ゼロシナリオ（2024年版）』

各機関・団体が示す排出削減の水準

	ガス種別	基準年：2013年		基準年：2019年	
		2035年	2040年	2035年	2040年
IPCC AR6 の水準	GHG	▲66% (*1)	▲73% (*1)	▲60%	▲69%
	CO2	▲71% (*1)	▲83% (*1)	▲65%	▲80%
経団連	GHG	▲60%	▲73%	▲53% (*1)	▲69% (*1)
RITE（再エネシナリオ）	GHG	▲60% (*2)	▲73%	▲53% (*1)	▲69% (*1)
IGES（早期削減シナリオ）	GHG	▲76%	▲89%	▲71%	▲87% (*1)
JCLP	GHG	▲75%以上	—	▲71%以上 (*1)	—
自然エネルギー財団	エネ起源CO2	▲71% (*1)	▲83% (*1)	▲65%	▲80%
Climate Integrate	GHG	▲70%	▲80%	▲65% (*1)	▲77% (*1)
WWFジャパン	GHG	▲68%	▲81%	▲63%	▲77%

(*1) 各機関・団体の示す削減水準を日本の排出量実績に基づいて換算。
(*2) 経産省からの依頼内容では「2030年度46%削減から2050年ネットゼロへと現在の削減トレンドを直線的に削減が進んだケースを分析に含めること」とされていることから当該数値であるものとした。

<出典>

- ・ 経団連（2024）『エネルギー基本計画の見直しに向けた提言』
- ・ RITE（2024）『2050年カーボンニュートラルに向けた我が国のエネルギー需給分析』（総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 第66回会合 資料4）
 - ・ 〔参考〕資源エネルギー庁（2024）『シナリオ分析について』（総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 第66回会合 資料1）
- ・ JCLP（2024）『脱炭素加速に向けたJCLPからの提言』
- ・ IGES（2023）『IGES 1.5℃ロードマップ』
- ・ 自然エネルギー財団（2024）『脱炭素へのエネルギー転換シナリオ（詳細版）』
 - ・ 〔参考〕同（2024）『自然エネルギーによる エネルギー転換シナリオ 2040年に向けての展望（第1版）』
- ・ Climate Integrate（2023）『2035年電力システム 脱炭素化への政策転換』
- ・ WWFジャパン（2024）『脱炭素社会に向けた2050年ゼロシナリオ（2024年版）』

2050年脱炭素社会WWFジャパン 100%自然エネルギーシナリオ



中央環境審議会地球環境部会
2050年ネットゼロ実現に向けた気候
変動対策検討小委員会・産業構造
審議会イノベーション・環境分科会
地球環境小員会中長期地球温暖化
対策検討WG

2024年12月20日

システム技術研究所
所長 槌屋 治紀

目次

- 1) WWFシナリオの概要
- 2) 最終エネルギー需要
- 3) エネルギー供給構成
- 4) 費用の推定
- 5) CO2削減率
- 6) まとめ

WWFシナリオは、WWFジャパンの依頼で当研究所が作成した「2050年脱炭素社会に向けた100%自然エネルギーシナリオ」(2021-2024)」である。その内容はWWFジャパンのサイトから入手可能である。

WWFシナリオの概要

WWFシナリオは2050年に再エネ100%を実現する方法について検討。太陽光と風力の野心的な導入を想定し、気象データを使って1時間ごとの1年間の電力需給ダイナミックシミュレーションを行っている。

2021-2024年に発表したWWFシナリオでは、以下のようなCOP28の要請を満たしている。

- 1) 2030年に2019年比で再エネ容量を3倍にする
- 2) 2035年CO2削減率を2019年比で65%以上にする
さらにIPCCは以下の要請を行っているが、
WWFシナリオはこれも満たしている。
- 3) 2040年CO2削減率を2019年比で80%以上にする
- 4) 90%以上の削減を2050年より前倒しにする。

WWFシナリオ 将来のエネルギー需要の推定方法

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{将来のエネルギー需要} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{基準年のエネルギー需要} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline \text{活動度変化} \\ \text{人口、素材輸出、建物の長寿命化、情報化} \\ \text{(ペーパーレス)} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline \text{効率向上} \\ \text{断熱住宅、LED照明、ヒートポンプ、電気自動車など} \\ \hline \end{array}$$

将来の最終エネルギー需要は、基準年のエネルギー需要、将来の活動度変化、効率向上の積でできる。活動度は、最終用途ごとに適切な指標から推定する。

WWFエネルギーシナリオ

	2035年	2050年
目標	2019年レベルからCO2排出のおおよそ65%を削減する	すべてのエネルギー用途に再エネを供給し、CO2排出をゼロにする
エネルギー需要	人口減少により活動度が減少、効率化が進み、これに比例してエネルギー需要も減少してゆく	人口減少83%と産業構造変化に伴って活動度はさらに減少、合わせてエネルギー効率向上により半分以下に減少
エネルギー供給	電力はおよそ75%を再エネから、残りをガス、石油、原子力(*)から供給。石炭火力を廃止する。	太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス、周囲熱など、100%再エネ電力を熱・燃料需要にも供給
民生部門	効率のよい家電製品が普及。暖房・温水需要にヒートポンプが増加	暖房・温水には再エネ電力+ヒートポンプまたは太陽熱を供給
産業部門	産業構造変化が進展。石炭を鉄鋼・紙パルプ・セメント産業に、ガスを熱需要に供給	産業構造変化がさらに進展。再エネ電力から水素を生産して鉄鋼業に、さらに電力を直接加熱またはヒートポンプにより熱需要に供給
運輸部門	乗用車のEV化が進展する。トラック、船舶の電動化が始まる	車上PVが普及。乗用車はEVに、トラックはEVとFCVになる。再エネ電力から水素を生産して船舶、航空機に供給

(*)原子力については2021年時点ですでに再稼働決定したもの、および適合性審査完了済・申請済は稼働するが、30年以上経過したものは稼働せず、新規建設はしない。2030年には3基のみ322万kW(泊、東通、志賀)が稼働、2038年以降ゼロになると想定した。

WWFシナリオ

産業部門のエネルギー需要構造変化の推定

総合変化量＝人口減少＊素材輸出減少＊建物長寿命化＊情報化

	活動量の要因別変化量(%)				
2015年→2050年	人口減少	輸出増減	建物の長寿命化	情報化	総合変化量
産業					
農林水産鉱建設業	83%	100%	100%	100%	83.0%
製造業					
食品飲料製造業	83%	100%	100%	100%	83.0%
繊維工業	83%	100%	100%	100%	83.0%
パルプ・紙・紙加工品製造業	83%	95%	98%	85%	65.7%
化学工業 (含 石油石炭製品)	83%	70%	98%	100%	56.9%
プラスチック・ゴム・皮革製品製造業	83%	70%	98%	100%	56.9%
窯業・土石製品製造業	83%	90%	80%	100%	59.8%
鉄鋼・非鉄・金属製品製造業	83%	70%	95%	100%	55.2%
機械製造業	83%	150%	100%	120%	149.4%

AIがデータセンターの電力消費を増大させるか？

AIモデルの電力消費とCO2排出量

Artificial Intelligence Report 2023, Stanford University 2023

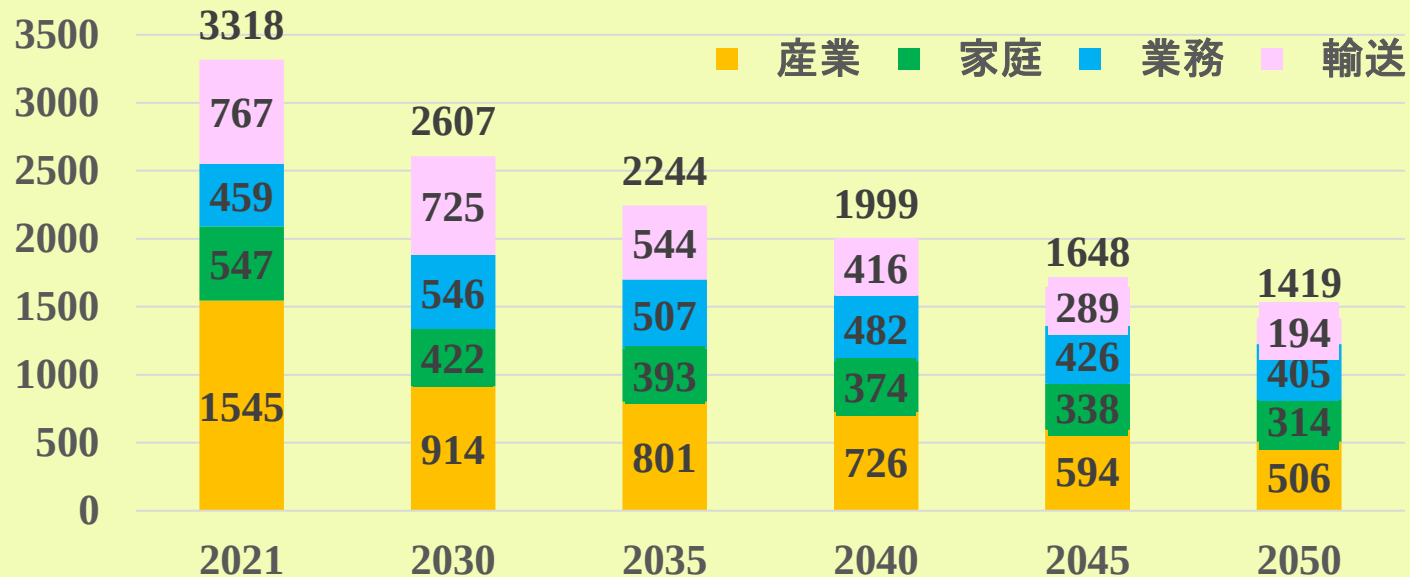
モデル	電力消費 (MWh)	CO2排出係数(g/kWh)	CO2排出量(トン)
Gopher	1066	330	352
BLOOM	433	57	25
GPT-3	1287	429	502
OPT	324	231	70

これまでも新技術が電力消費を増大させるという説は繰り返しあった。1980年代末には高温超電導が発見され、電力消費が指数関数的に増大するという予測が行なわれたが、そうならなかった。インターネットの普及、仮想通貨のマイニングなどでも増加が予想されたがそうならなかった。。

電力消費削減の技術開発もある。政府出資のラピダスは、電力消費を1/10にする省エネ半導体を開発して、データセンターの電力消費を抑制すると発表。

最終エネルギー需要の推定

WWFシナリオ 最終エネルギー需要(TWh)



WWFシナリオの最終エネルギー需要は2021年比で、2035年には67%に、2050年にはさらに43%に減少する。産業部門の減少が大きく、またEVの導入により自動車の効率が3～4倍になるため運輸部門の減少が特に大きい。

主要な再エネ容量の想定

シナリオ	容量(GW)	2021-22	2030	2035	2040	2050
WWFシナリオ	風力	4.5	40	61	109	153
	太陽光	62	161	280	360	413

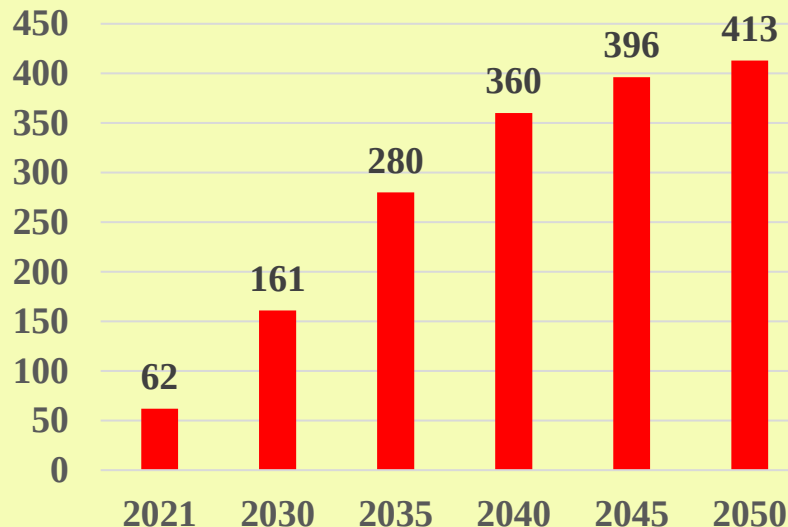
WWFシナリオでは、上記のように風力と太陽光を将来の主要なエネルギー供給源として設定している。参考までに両業界のエネルギービジョンを示すと以下のようにになっている。

(1) JWPA(風力発電協会)の風力ビジョンでは2050年に陸上40GW、洋上着床40GW、洋上浮体60GW、合計140GWとなっている。

(2) JPEA(太陽光発電協会)のPVビジョンでは、2050年に太陽光を400GWとしている。

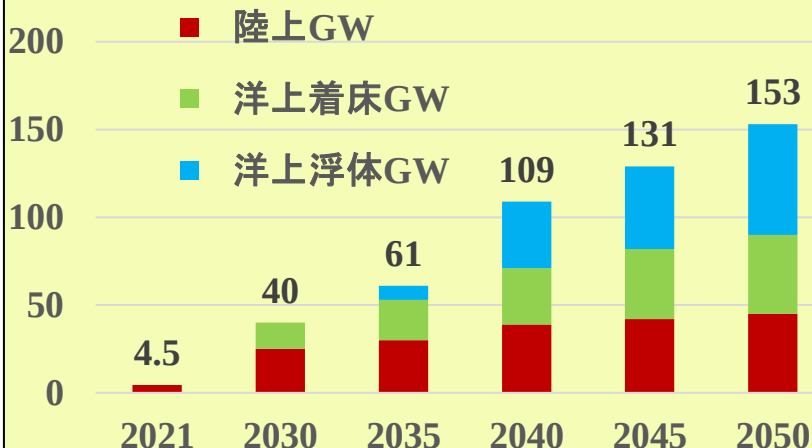
WWFシナリオ 太陽光と風力の想定

太陽光発電容量(GW)



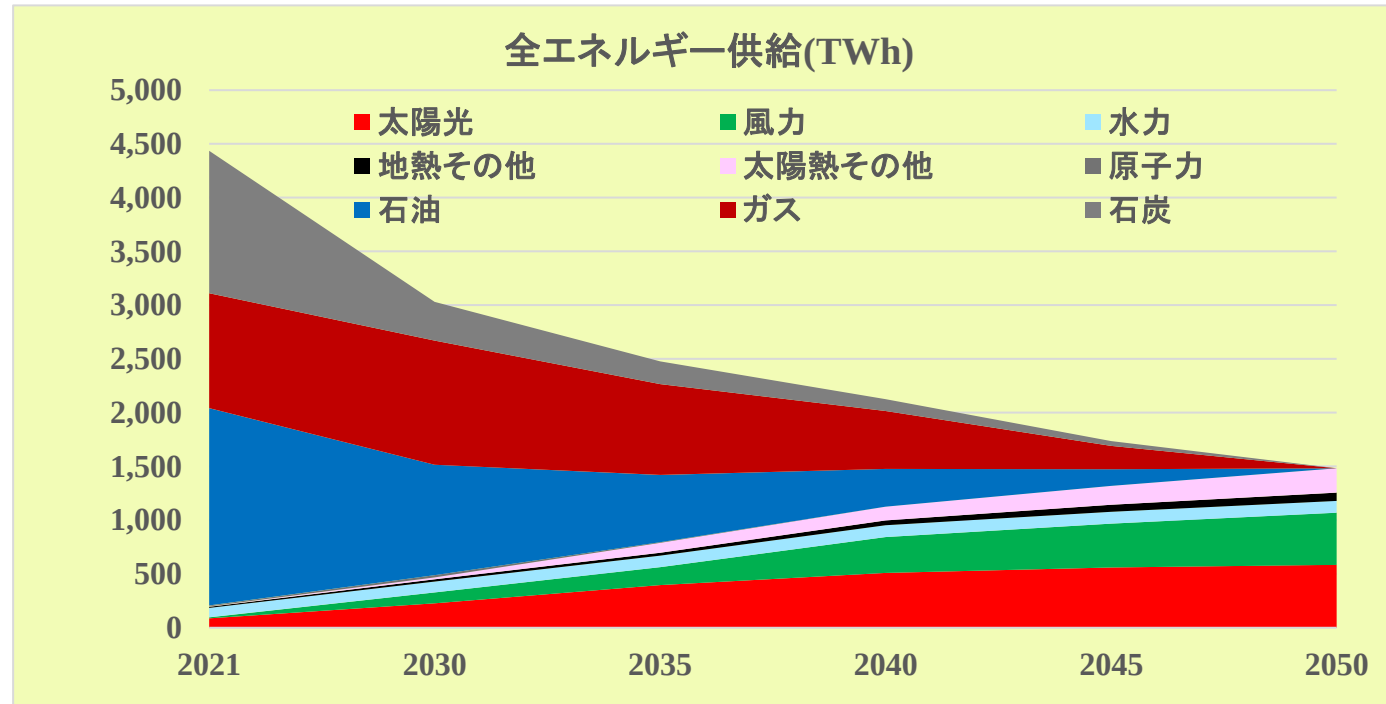
太陽光発電(PV)は2050年には413GWに達する。住宅など建物に付属するものと、事業用として大規模なものとの比を4:6と想定した。

風力容量(GW)



風力発電は2050年には153GWになると想定した。内訳は陸上45GW、洋上着床45GW、洋上浮体63GWである。

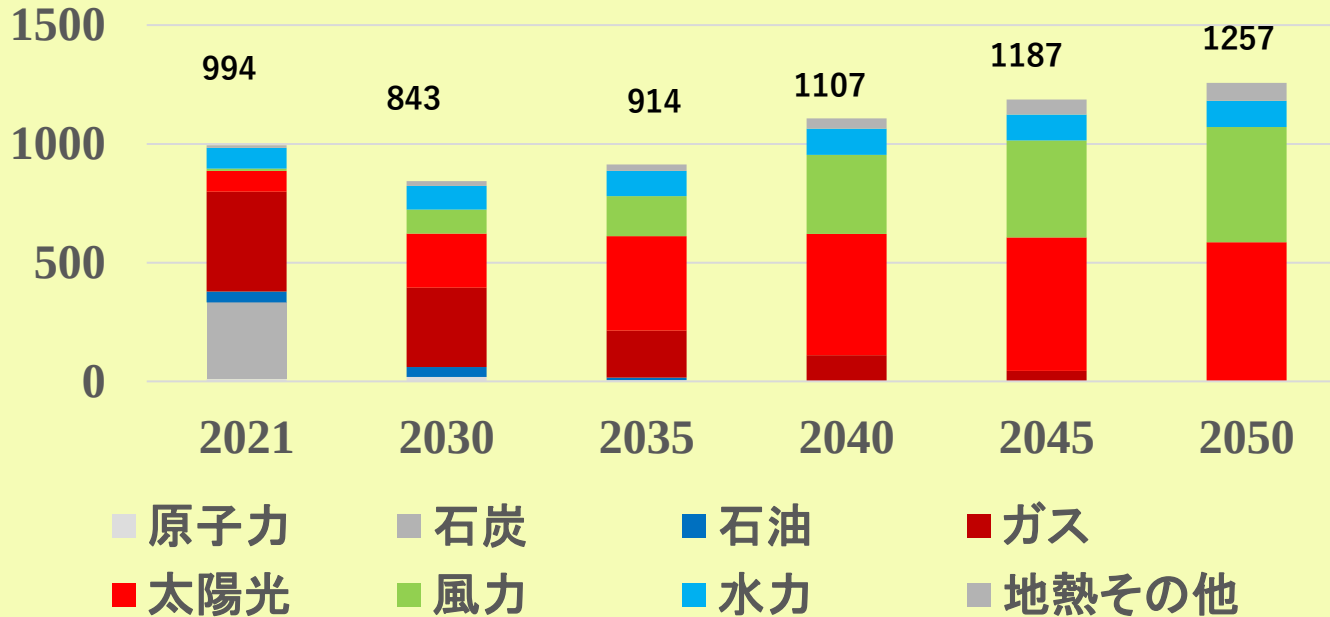
WWFシナリオ 全エネルギー供給の構成変化



現状ではCO₂を排出する化石燃料が主要な構成要素であるが、2035年にむけて石炭火力が大きく減少する。さらに2050年にむけて、太陽光や風力などの再生可能エネルギーに転換してゆくことを想定している。

WWFシナリオ 電力供給構成

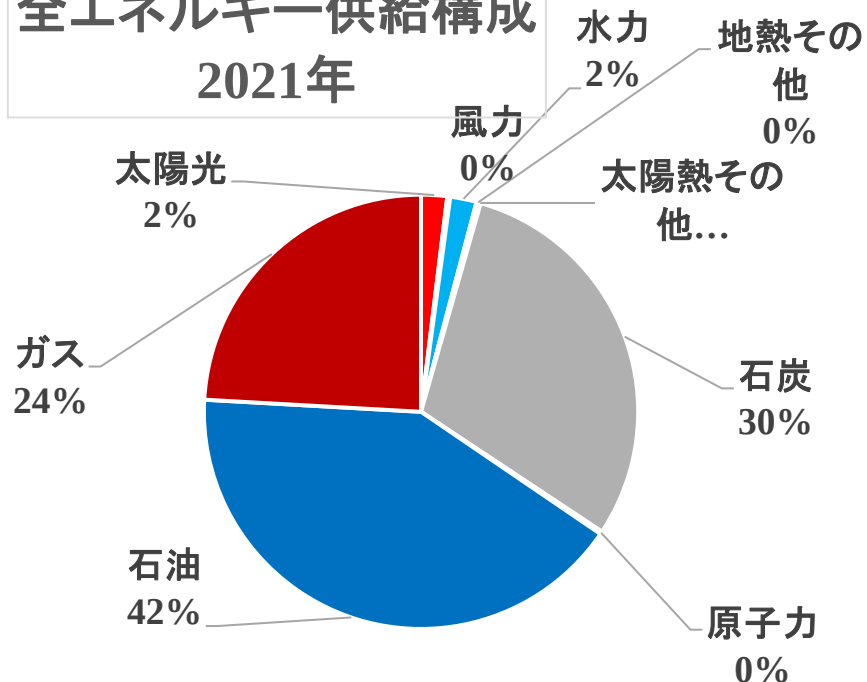
電力供給構成(TWh)



電力供給は2030年まで減少するが、その後は、再エネ発電が増加して、EV、電力加熱、水素製鉄、ヒートポンプなど、これまでは電力の用途ではなかった分野に電力供給が増加してゆく。地熱その他には、バイオマス発電と車上PVが含まれている

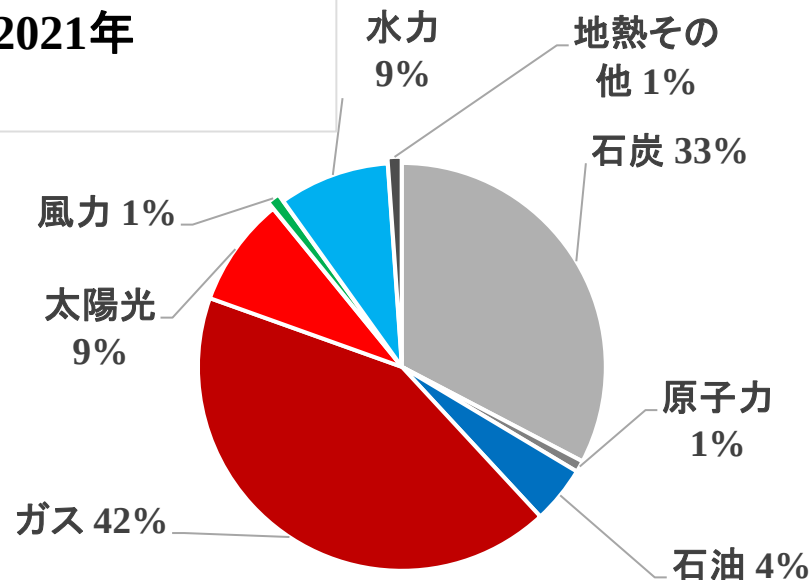
WWFシナリオ エネルギー供給構成 2021年

全エネルギー供給構成
2021年



全エネルギー供給をみると、ガス、石油、石炭が多くあり、太陽光や風力はごく一部の供給にとどまっている。

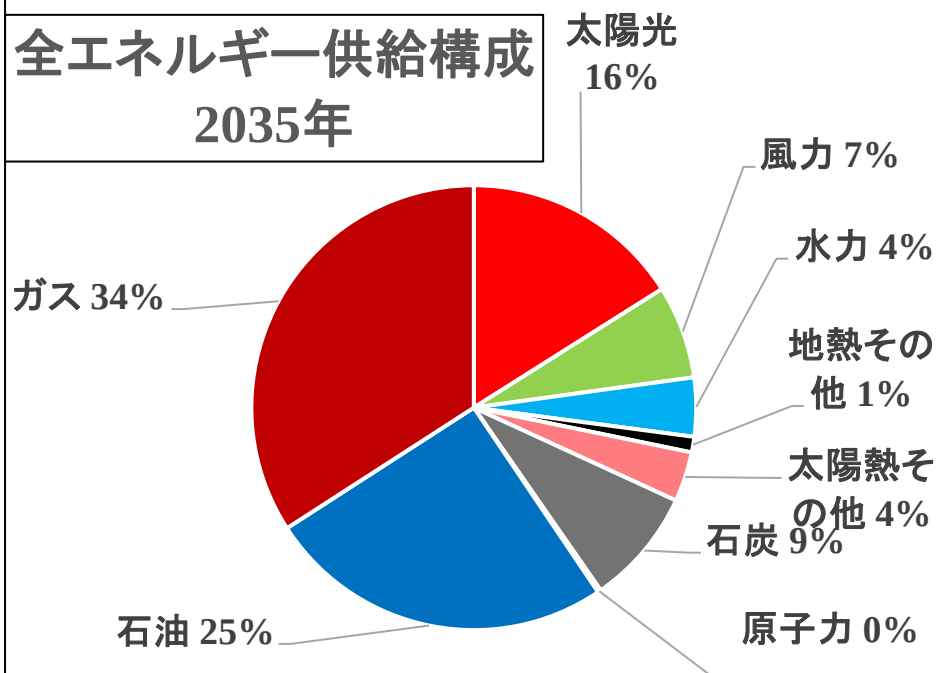
電力供給構成
2021年



電力供給をみると、最大はガス火力であり、石炭火力も大きい。

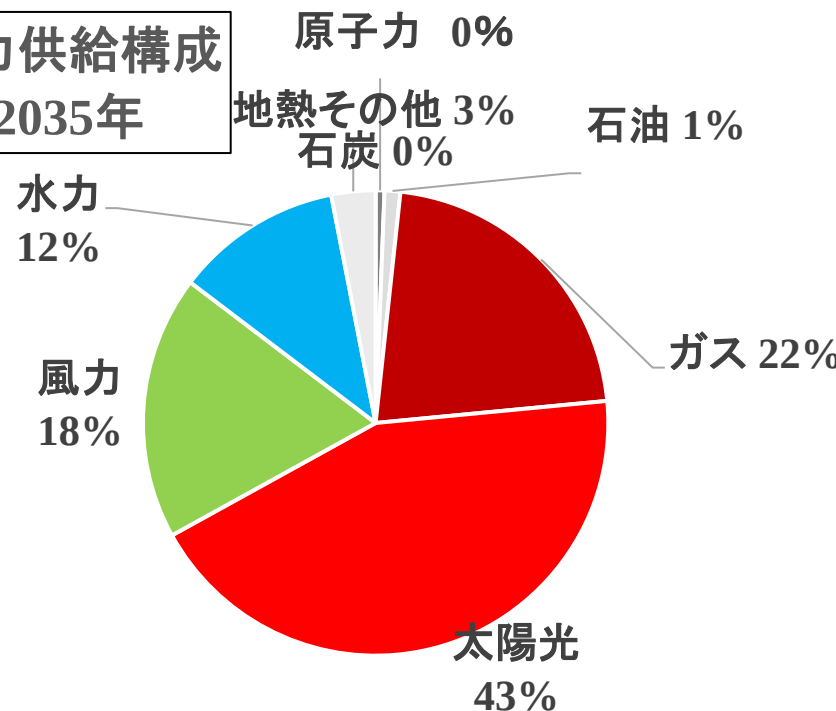
WWFシナリオ エネルギー供給構成 2035年

全エネルギー供給構成
2035年



全エネルギー供給をみると、まだガス、石油が多いが、太陽光や風力が増加している。

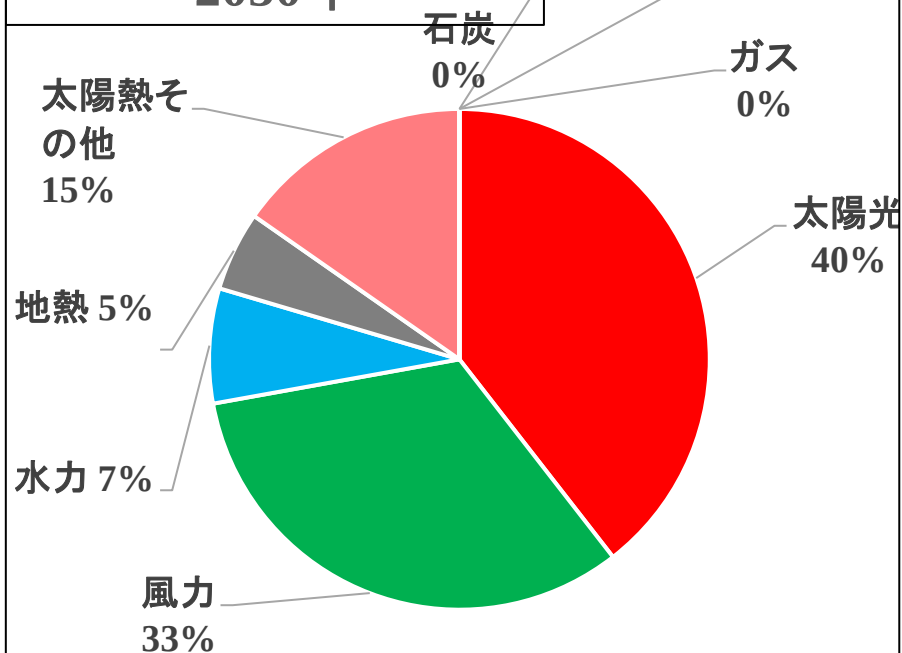
電力供給構成
2035年



電力供給をみると、石炭がゼロになり、原子力はすこし残っている。ガスより太陽光が大きくなっており、風力も増加しつつある

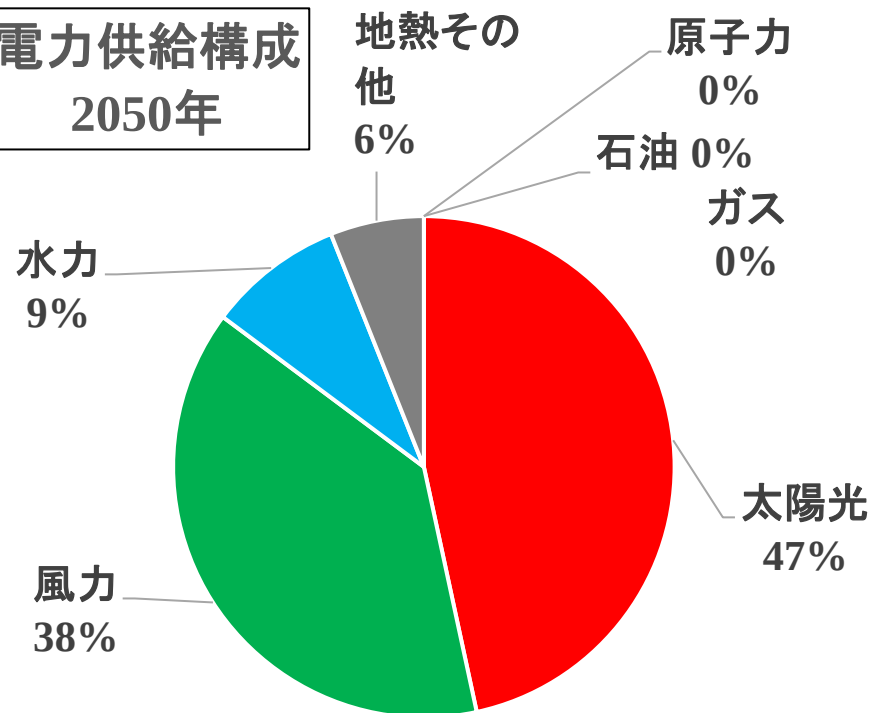
WWFシナリオ エネルギー供給構成 2050年

全エネルギー供給構成
2050年



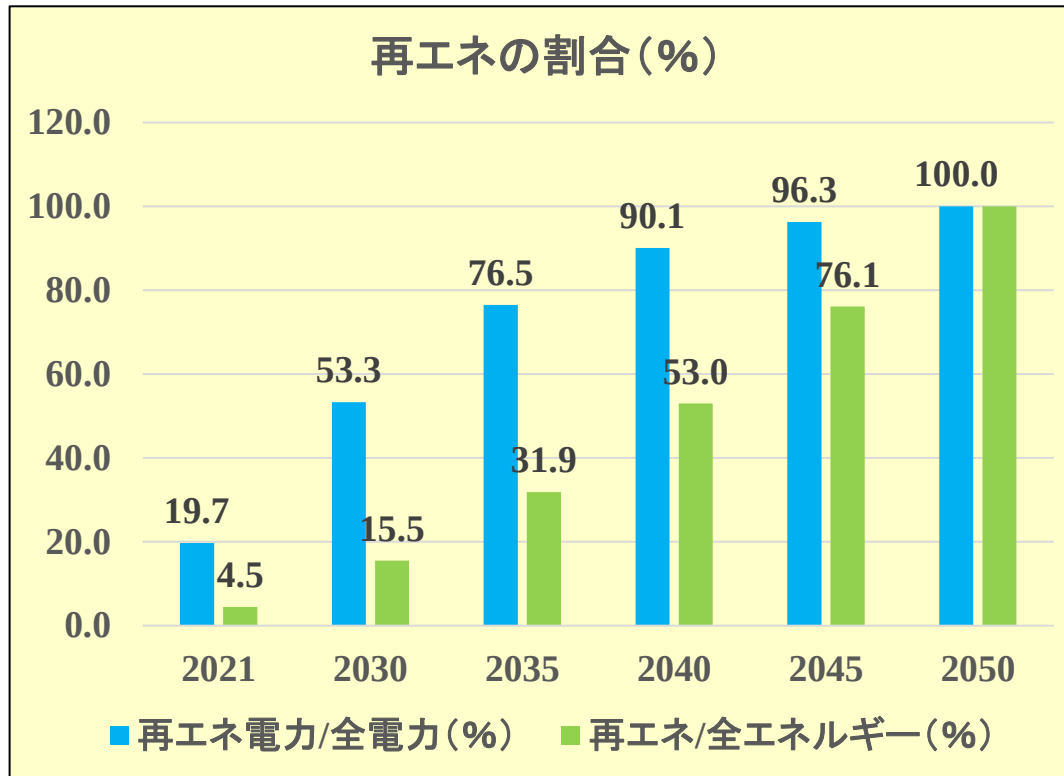
全エネルギー供給をみると、化石燃料はゼロとなり、太陽光が最大、風力がその次になっている。

電力供給構成
2050年



電力供給をみると、太陽光と風力が主要な供給源になっており、水力、地熱その他も有効に寄与している

再エネの割合(%)



年	再エネ電力/全電力(%)	再エネ/全エネルギー(%)
2021	19.7	4.5
2030	53.3	15.5
2035	76.5	31.9
2040	90.1	53.0
2045	96.3	76.1
2050	100.0	100.0

再エネの割合は2021年には、電力については19.7%であるが、2035年には79.5%に達する。これに対して全エネルギーに対する再エネの割合は、2021年には4.5%であり、2035年でも31.9%と、その増加速度は緩やかである。双方とも2050年には100%に達する。

WWFシナリオ 再生可能エネルギーの供給

(2050年、数値はTWh)

再エネ発電

水力、太陽光、風力、
地熱(3GW)、バイオ
マス(5GW)

余剰電力

太陽光、風力

太陽熱(76)、バイオマ
ス熱(70)、周囲熱(81)
車上PV(40)

電力需要Bは、熱・燃料需要に対
して供給する電力であり、時間的
に柔軟にシフト可能な需要であり、
デマンドレスポンス、天気予報に応
じて生産調整を行う。

電力需要

照明、モータ、エアコ
ン、エレクトロニクス

電力需要B

EV(49)・FCV(23)、水素
製鉄(70)、船舶(20)、
中温・高温熱(173)、
航空機燃料(20)

低温熱、ヒートポンプ(31、民生用C
OP=5, 産業用COP=3)、家庭・
業務用

年間平均投資額の推定

単位:兆円	GX(政府)	WWFシナリオ
年平均投資額	15	8.5
再エネ投資/年	2	5.8
省エネ投資/年	4	2.7

WWFシナリオの年間平均費用は2020-2050年の30年間について総投資額254兆円(再エネ172兆円+省エネ81.7兆円)から算出した。それぞれのシナリオについての算定種目は同一ではない。

CO2排出量

	2013	2019	2030	2035	2040	2050
COP28目標 (CO2 Mton)	1,235	1,028	534	360		
WWFシナリオの CO2排出量(Mton)			534	349	205	0
WWFシナリオの 2013年比削減率(%)			56.7	71.7	83.4	100
WWFシナリオの 2019年比削減率(%)			48.0	66.1	80.1	100

WWFシナリオのCO2排出の削減率は2013年比で、2035年に72%、2040年に83%、2050年に100%となる。2019年比で、2035年に66%、2040年に80%、2050年に100%となる。

まとめ

適切な政策によって2050年に向かってエネルギー需要が減少する。再エネのコストが低下しており、再エネを主体にしたエネルギー政策は経済性が高く2050年にはCO₂を100%削減できる。再エネ産業は日本の将来の産業構造の主要な担い手になる。

CO₂排出量を大きく削減するには、毎年的大幅な効率改善や再エネ導入が必要。それには、資源リサイクルやペーパーレス、原材料輸出の減少、建物の長寿命化の推進、再エネの優先的扱い、再エネ関連企業の育成、洋上風力産業の推進、送電網の柔軟な利用促進、断熱住宅やEVの普及、水素製鉄の実現など、気候変動に対抗するイノベーションを進展させる政府の適切な政策が必要である。



自然エネルギー財団
RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

自然エネルギーによる エネルギー転換シナリオ 2040年に向けての展望 (第1版)

概要の説明

2024年12月



資料のポイント

<モデル計算を政策の参考とする際の留意点>

- 気候変動政策決定に活用されるモデル手法はさまざまなものがあり、分析目的に応じて手法を選択する。
- 巨大なブラックボックスモデルよりも、目的に応じた透明性・再現性の高い分析をすることが重要との考え方もある。複雑な関係性を分析する場合は、十分な透明性が必須である。
 - 例えば、コスト最小化型の技術選択モデルは、コストをどう設定するかで結果が大きく異なる。加えて、多くの上限・成長率やシェアといった外生的制約が入っている。これらを全て吟味した上で結果を議論する必要がある。
- 限界削減コストはコスト前提によって値が大きく異なる。特に電力セクターについては低コストの柔軟性を考慮しないで、コストが高いというのは恣意的である。前提を完全に透明化した上で議論しないとミスリーディングとなる。

<自然エネルギー財団による手法選択と結果の概要>

- 今回は、できるだけ現実的な施策と日本独自の自然エネルギーポテンシャルの状況を反映すべく、ヒアリングやデータ解析等を事前に行い（別途3報告書を公表）、現実的な電化・効率化施策と、設備導入量の想定を行った（ボトムアップ普及モデル）。
- ボトムアップ普及モデルから得た電力需要について、9エリア8760時間の電力需給シミュレーションを行った。それによって、2040年には90%以上を自然エネルギーによる供給で安定供給が可能であることが示された。
- 発電コストは、連系線を大幅に増強(OCCTOマスタープランを上回る増強¹)し、蓄電池を100GW(3時間容量)導入しても、“統合コスト²”込みでウクライナ侵攻前の水準となる。“統合コスト”計算の前提の恣意性も吟味する必要がある。

1. 連系線容量は無制限ケースによる設備利用率より稼働率から増強容量を算出した。2. 統合コストという考え方については、元の火力中心のシステムを前提とするものであり、自然エネルギーを基幹とする電力システムとは固定電話とスマートフォンに類似する考え方の違いがあることから、あまり適しない概念とされている。

モデル分析とは**仮定のもと計算するためどの手法にも恣意性が含まれ**、方法によって長所・課題がある

- よって、重要なのは**透明性**（一般均衡の動学化など理論なき巨大化はブラックボックス化を招く。**シンプル**または普及しているツールを使うのも一つの手法。）
- 科学の視点からは、**再現性**が重要。（**シンプル**な方が再現性があるがどこまでの波及を考慮するかとのトレードオフ。よって**複雑化した場合は高い透明性が必須**。）

気候変動政策決定に活用される様々なモデル手法の**長所**と**課題**の例

技術の仮定・予想を根拠とする手法(RITE, AIM等)

技術選択モデル（コスト最小化）

コスト想定が吟味された上であればその条件での最小コストの経路が示される。透明性が重要。

コスト以外にも上限や増加率制約などを恣意的に入れないと現実的姿が描けない。現実の再現性は低い¹。**制約の多くが恣意性高い**。

現実の電力システムを模擬した手法(PROMOD等)

広域的電力需給解析モデル

電力システム固有の制約を考慮した上で、設備導入がされた状態での運用最適化の粒度の細かい時間単位(1時間など)での現実と近い負荷配分をコスト最小化にて示すことができる。

最適成長論のもと気候変動の損害・対策までを含む(DICE²等)

統合モデル(IAM)

最適成長論の根拠がある。気候、経済などをシンプルに扱っていることから、透明性が高い。

最適成長論は結局は**技術進歩**（と人口）によって経済成長が決まることから、内生的とはいえ想定に左右される（恣意性）。

規制や現場の制約から技術導入を積み上げる手法

ボトムアップ普及モデル（積み上げ）

現実を出発点とし、何をしたらどうなるか 必ずしも**コスト最小化にはならない**。を定量的に示すことができる。

現実の社会の過去の反応を根拠とする手法

計量モデル

過去の社会経済の反応を統計的に推計していることから、パラメーターに根拠がある。

社会のダイナミックな変容や新たな技術の爆発的普及などは予想できない。

均衡にショックを与えた次の均衡を計算する (GTAP等)

応用一般均衡モデル(CGE)

ミクロ経済学の根拠がある。均衡の存在は数学的に証明されている。通常の産業連関分析では扱えない複雑な波及関係を考慮できる。

パラメータや関数形に実証性が低く恣意性が高い。**解の単一性は証明されていない³**。ある均衡から次の均衡への過渡や長期的分析には向かない。**透明性**にも課題がある。

1.高瀬香絵、藤井康正、茅陽一、「コスト以外の燃料選択基準をシャドウプライスとして評価するエネルギーシナリオ構築手法」電気学会論文誌C, Vol.118-C, No.10, Oct., 1998

2.W.D.ノードハウス、「地球温暖化の経済学」(1994) 3. Timothy J. Kehoe, John Whalley, Uniqueness of equilibrium in large-scale numerical general equilibrium models, Journal of Public Economics, Volume 28, Issue 2, 1985.

今回の2040年モデル分析の“問い”と手法選択



どうやったら2040年に2019年比80%減できるのか？（現実的施策は？）
電力の安定供給は大丈夫なのか？その際の発電コストはどうなるのか？

こうやったらできる！（電化・効率化）

日本が国際責任と競争力を保てる水準まで脱炭素化するためには、現実を出発点として、どのような技術がどのくらい導入していなくてはならないか？（バックカスティング、かつ現実を反映）

電力の安定供給は大丈夫？発電コストは？

OCCTOマスタープランの参考シミュレーションに用いられている“現実的”電力システムを模したシミュレーションにて安定供給ができるかを計算。その際の発電コストを計算。

こうやったらできる！（自然エネルギー導入）

地域別ポテンシャル、送電線状況、OCCTOマスタープラン等政府計画をもとに、最大限自然エネルギーを導入するプランを、必要量からバックカスティング的に設定

エネルギー全体

ボトムアップ普及モデル（積み上げ）

+ 事業者等ヒアリング、規制・基準調査

電力需要

電力

広域的電力需給解析モデル

設備容量

（専門家との対話のもとイテレーション）

自然エネルギー等設備導入量等

ボトムアップ普及モデル（積み上げ）

+ 地域別エネルギー別ポテンシャル、送電線状況等の現状
OCCTOマスタープラン等

ボトムアップ普及モデル：現状から現実的導入を積み上げ計算

？ どうやったら求められるエネルギー起源CO₂排出量削減が“現実的に”できるのか？

前提：具体的な施策の浸透率や技術導入率を想定

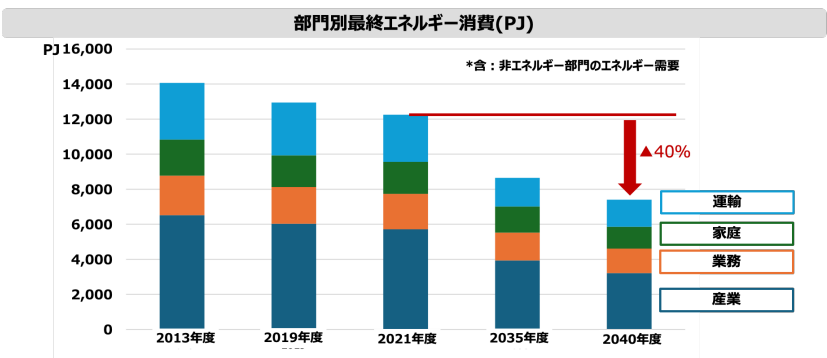
主要な想定

- 鉄鋼生産電炉比率：38%(2021)→53%(2040)
- 乗用車EV率(ストック)：0%→30%
- 産業熱の電化(中温・低温中心)：0-5%→23-70%
- 産業省エネベンチマーク達成率(電気)：1-5%→5-30%
- 産業省エネベンチマーク達成率(熱)：1-5%→5-45%

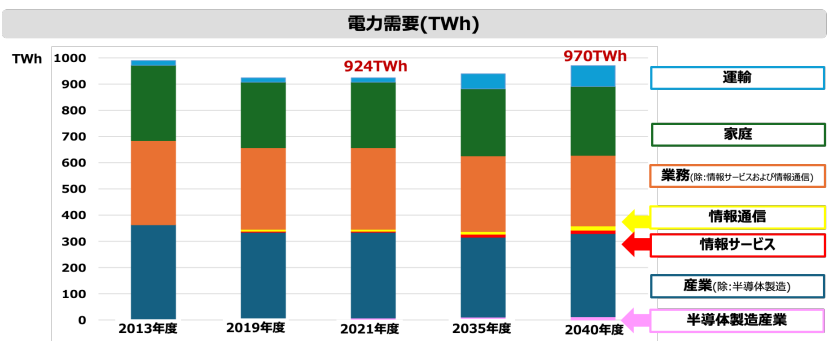
詳細

分野	2040年度の想定
産業部門	- 業種・用途(空調等設備用途、生産用途(低温、それ以外))ごとに省エネ率設定(例：素材産業・生産設備10%、素材以外の生産設備25%、空調・照明32%) - 省エネ法ベンチマーク対象業種は、その達成を目安に省エネ率を設定(5~30%) - 電化は、業種・用途により設定(10%~50%) - 鉄鋼業における高炉の電炉シフトは2030年度までの計画をさらに進め、電化率33%
業務部門	- 国交省による建築ストックの省エネ性能割合の進展想定を基に、建築性能ごとの対策による削減率、導入率を想定 - 導入率は機器等の平均使用年数を考慮し、更新時期で導入 - 削減率は、技術ごとのスペックの効率向上を見込む
家庭部門	- 国交省による住宅ストックの省エネ性能割合の想定を基に、集合・戸建別に住宅性能ごとの対策による削減率、導入率を想定 - 導入率は機器等の平均使用年数を考慮し、更新時期で導入 - 削減率は、技術ごとのスペックの効率向上を見込む
運輸部門	- モード別エネルギー効率(燃費)向上想定(15%~45%) - 電化想定は、ストック比で、乗用車30%など、大きく拡大を見込む - 電化による省エネ率設定は、乗用車で-60% - モード別エネルギー効率(燃費)向上(鉄道以外、15%~48%) - 電化設定ストック比で、貨物車30%など、大きく拡大を見込む - 電化による省エネ率設定は、乗用車で貨物車で-60%

最終エネルギー消費は40%減



電力需要は増加(970TWh)



施策と整合的な形での2040年度エネルギーバランス表を推計

ボトムアップ普及モデル：ポテンシャル・必要量から必要導入量を推計

？ 自然エネルギーポテンシャルのどの部分をどれだけ導入する必要があるか？

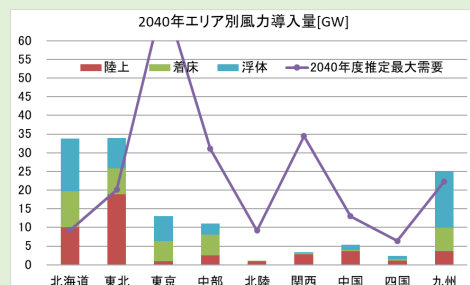
自然エネルギー等設備導入量等

ボトムアップ普及モデル（積み上げ）

風力発電：風速ごととポテンシャルを前提としたエリア別導入量を推計
詳細分析は別途公表



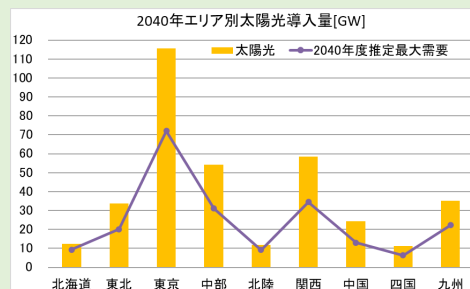
2023年11月



太陽光発電：分野別ポテンシャル・JPEA等見通しより必要導入量を推計
詳細分析は別途公表

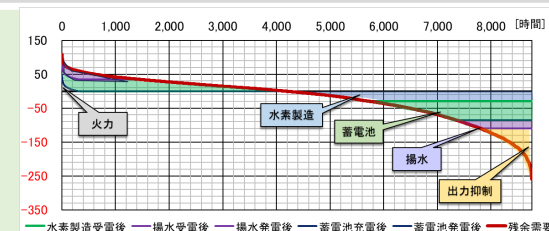


2023年5月



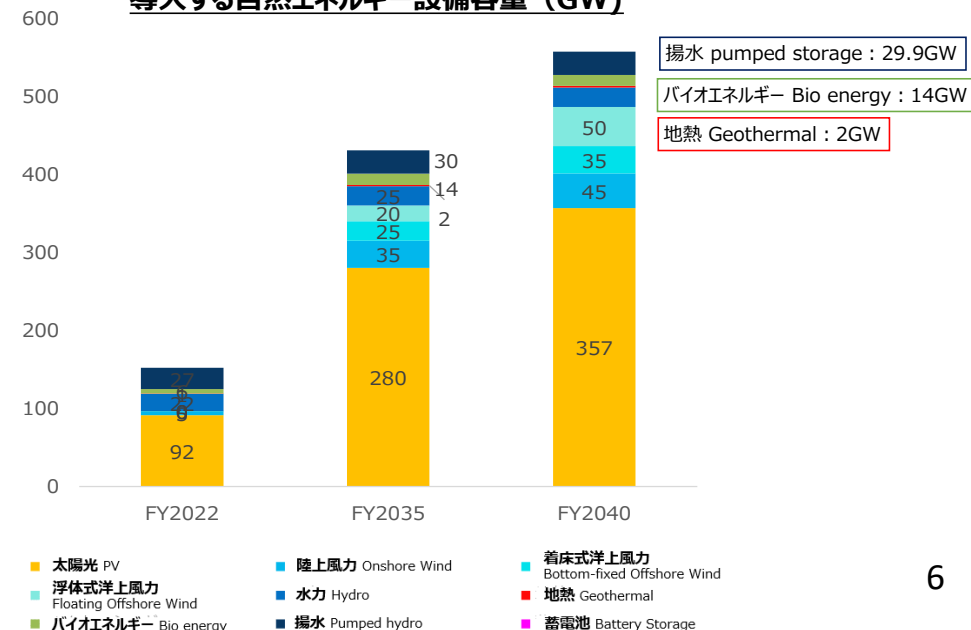
蓄電池等必要量

残余需要デュレーション分析



必要な設備容量

導入する自然エネルギー設備容量 (GW)



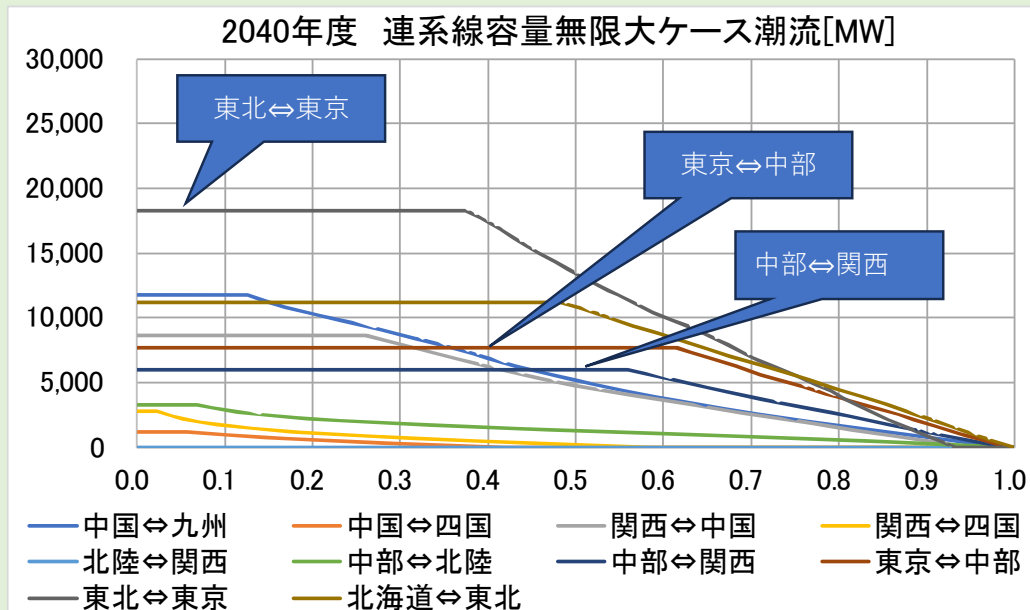
(他自然エネルギーについても報告書内にて検討結果を公表)

必要かつ経済的な連系線増強は？

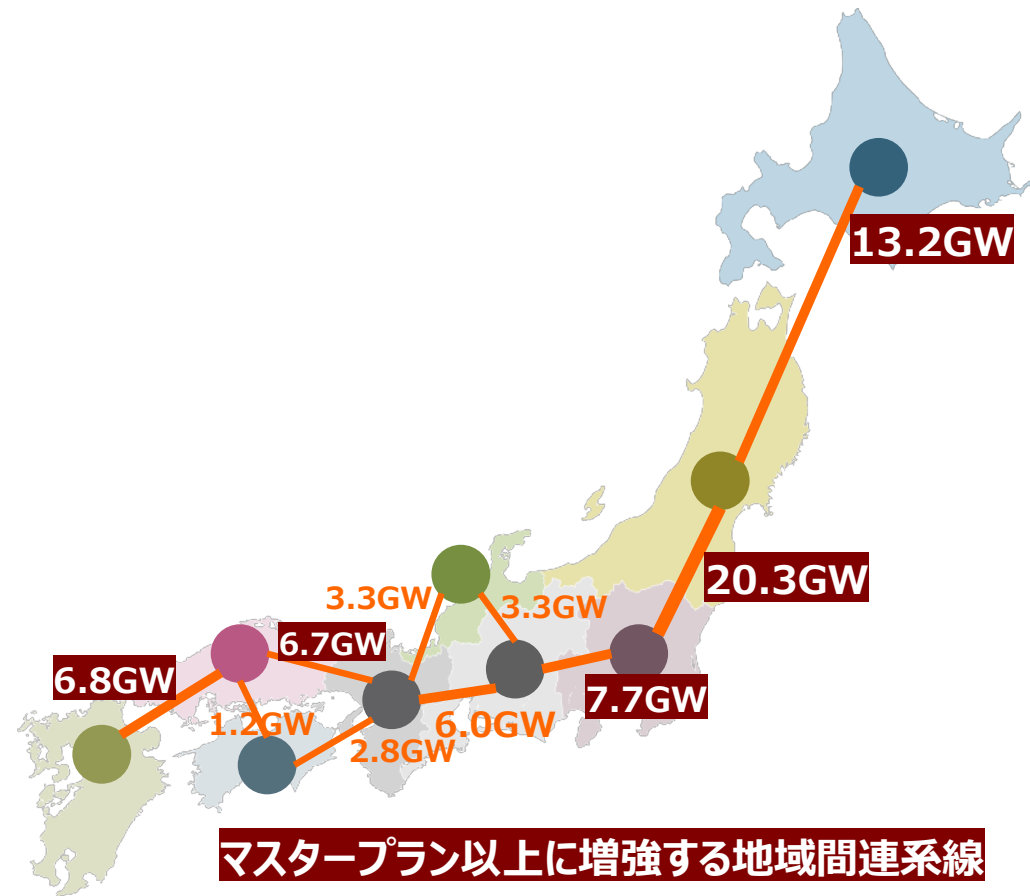
？ 想定した設備導入から**経済的に成立**する（つまり有効な）連系線増強はどのくらいか？

広域的電力需給解析モデル

導入した設備において連系線制約を外した状態での各連系線の潮流を分析し、連系線増強が経済的に成立しえる稼働率を元に増強の想定を行った。



マスタープランを超える送電線投資



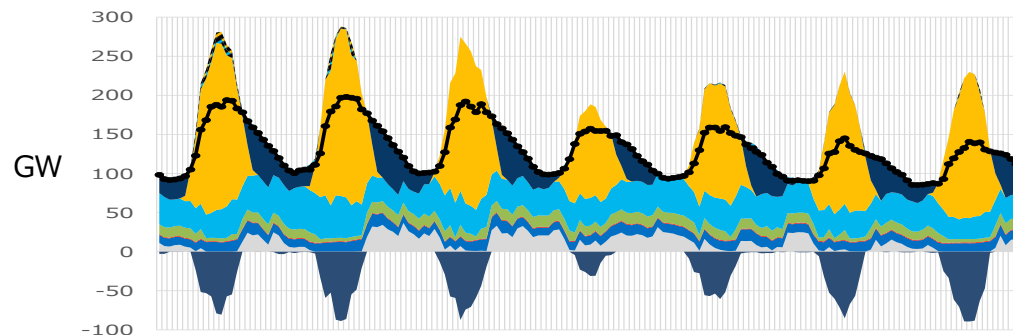
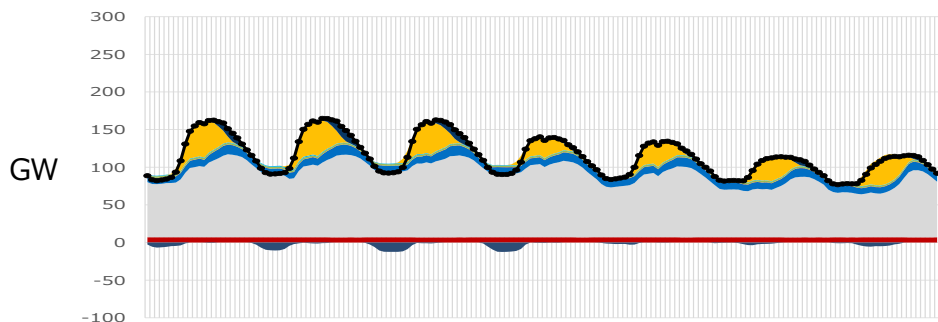
(PROMODシミュレーションによる結果を
PROMODシミュレーションに活用)

1時間ごとの電力需給シミュレーション結果

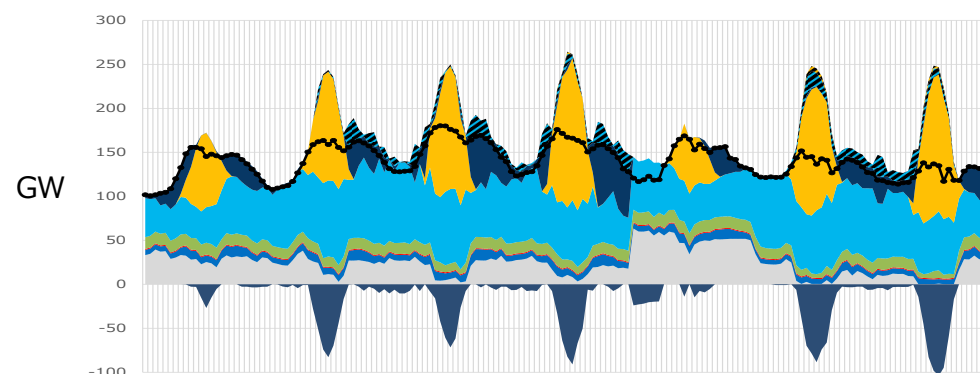
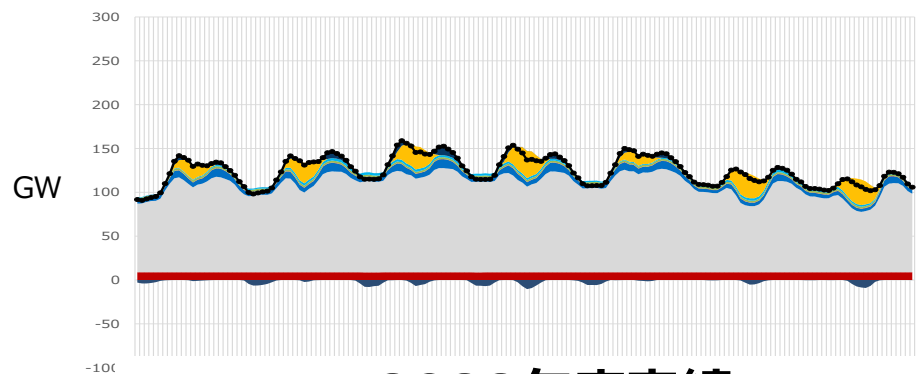
? 推計された設備・連系線容量によって電力の安定供給はできるのか？

A. 最大限の自然エネルギー設備導入に加えて、蓄電池と連系線、EVなどの
デマンド・レスポンスによって、8760時間安定供給ができることが確認
された。

夏のピーク含む1週間(全国)



冬のピーク含む1週間(全国)

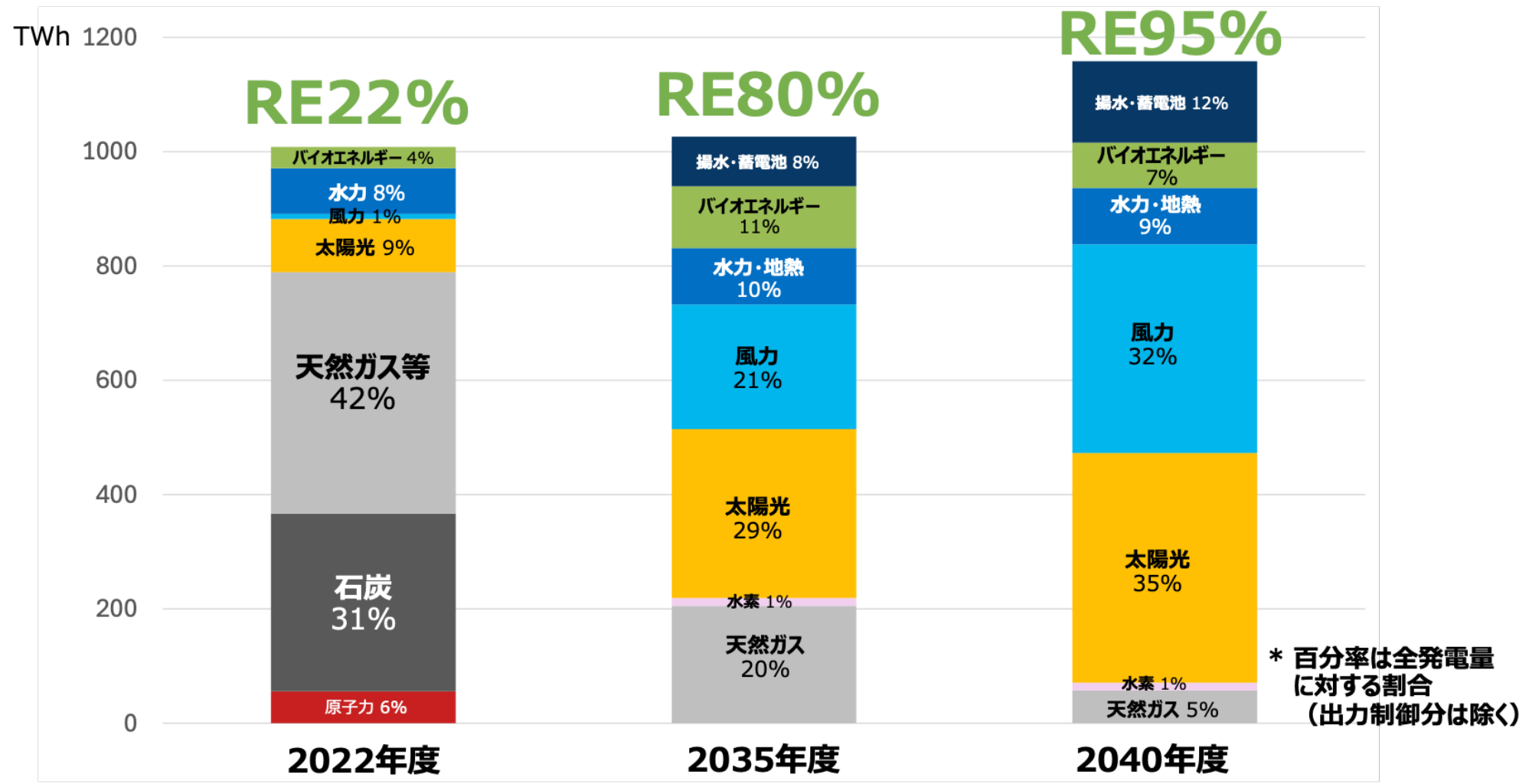


2022年度実績

2040年度シミュレーション結果

8760時間を足し合わせた電源構成計算結果

電力の脱炭素化と自給率の向上



自給率	電力セクター エネルギー全体	28%	80%	95%	*自然エネルギーと原子力の比率
		14%	40%	60%	

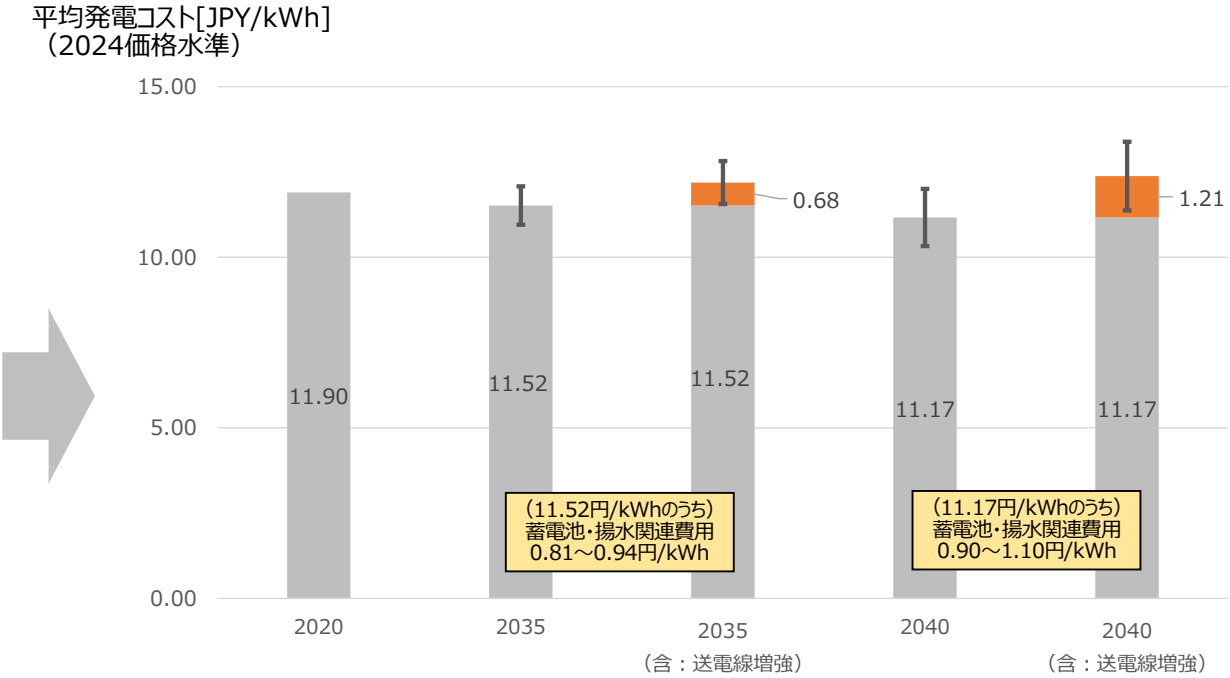
発電コスト

？ それだけ自然エネルギーを導入した時の**発電コスト**はどうなるのか？

A. 蓄電池費用・連系線増強費用を入れても、ウクライナ侵攻による化石燃料価格等高騰前の水準に収まる。（モデル全体で計算すると“**統合費用¹**”はそれほど大きくならない。）

発電コスト計算想定

2024年価格水準	水力	地熱	バイオ エネルギー	太陽光	陸上風力	洋上風力	天然ガス	水素	揚水 (変換部)	揚水 (貯水部)	蓄電池 (変換部)	蓄電池 (蓄電部)
CAPEX [円/kW]	640,000	1,143,000	394,772	117,000～ 169,500	210,546～ 271,000	354,000～ 617,000	161,000	161,000	640,000	1,848 円/kWh	4,440～ 9,120	9,120～ 18,720 円/kWh
OPEX [円/kW/year]	9,140	24,200	25,506	3,000～ 3,700	6,604～ 8,500	12,600	8,050	8,050	9,140	320円/kWh	112～164	228～337 円/kWh
燃料費	N/A	N/A	1000円/GJ	N/A	N/A	N/A	LNG: 5.6USD/ mmBTU 炭素価格: 20\$USD/ ton-CO2	30円/ Nm3-H2	N/A	N/A	N/A	N/A
運転期間	60年	40年	25年	30年	25年		35年	35年	60年	60年	20年	20年
(参考) 設備利用率	41%	49%	63%	13%	32%		12%	12%	N/A	N/A	N/A	N/A



“**統合コスト¹**” は、2040年段階で**2円/kWh**程度。
太陽光・風力コストが低く安定していることで全体として低コストかつレジリエントに。

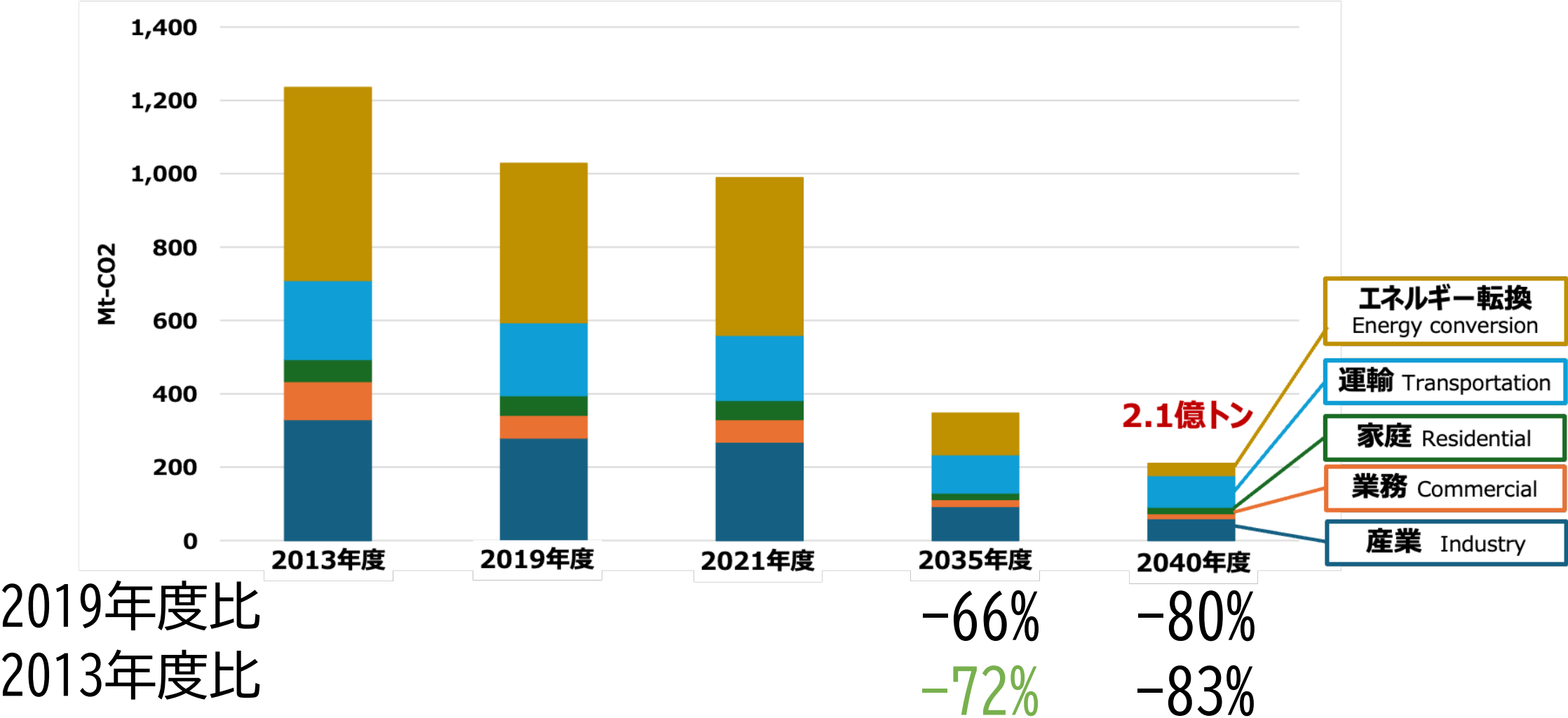
1. 統合コストという考え方については、元の火力中心のシステムを前提とするものであり、自然エネルギーを基幹とする電力システムは固定電話とスマートフォンに類似する違いがあり、あまり適しない概念とされている。

10

エネルギー起源CO₂排出量

2013年度比では、2035年度**72%減**、2040年度**83%減**

エネルギー起源CO₂排出量

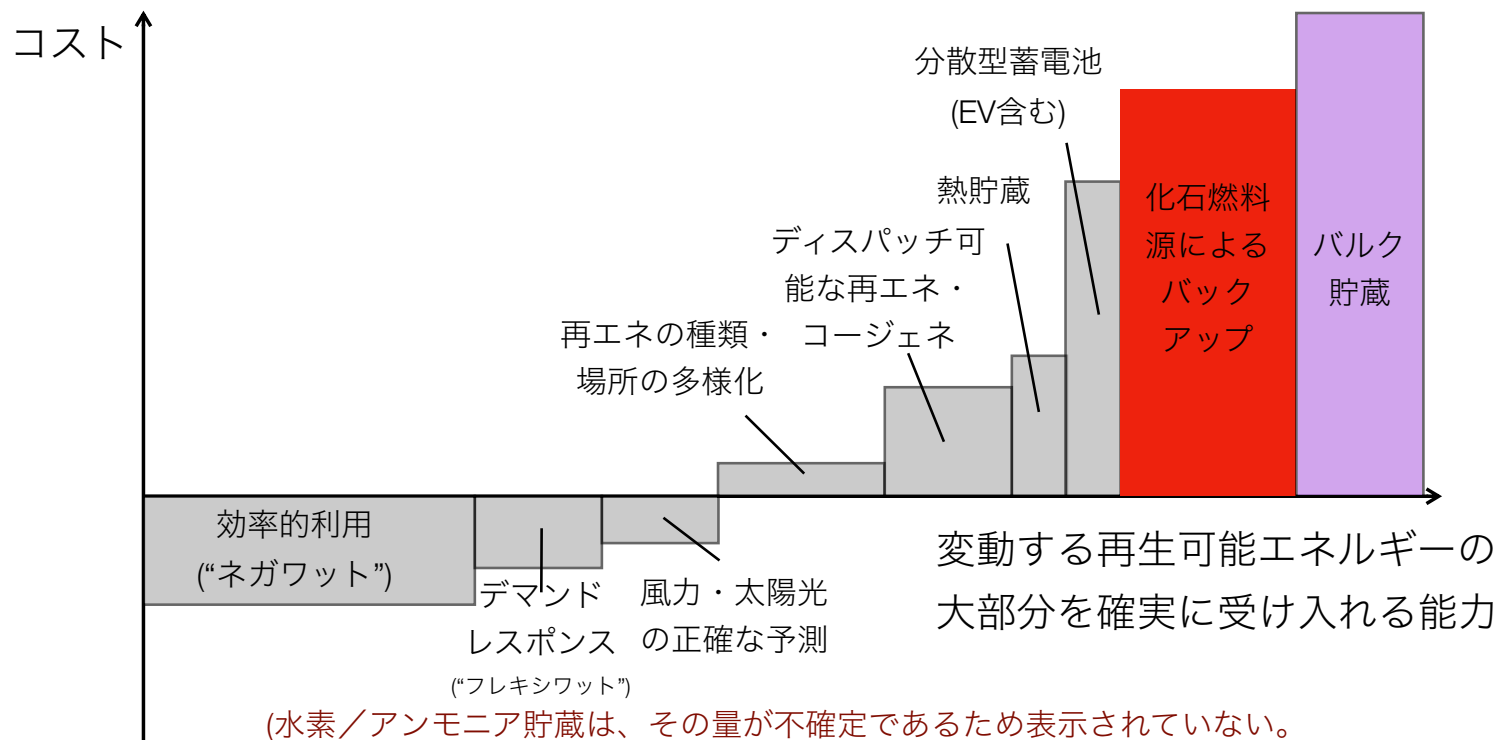


参考：電力セクターの限界削減費用が高くなる理由

■左側のコストの低い柔軟性を考慮していないことから、電力セクターの限界削減コスト、そして“統合コスト”が高いものとなる。

系統の柔軟性資源

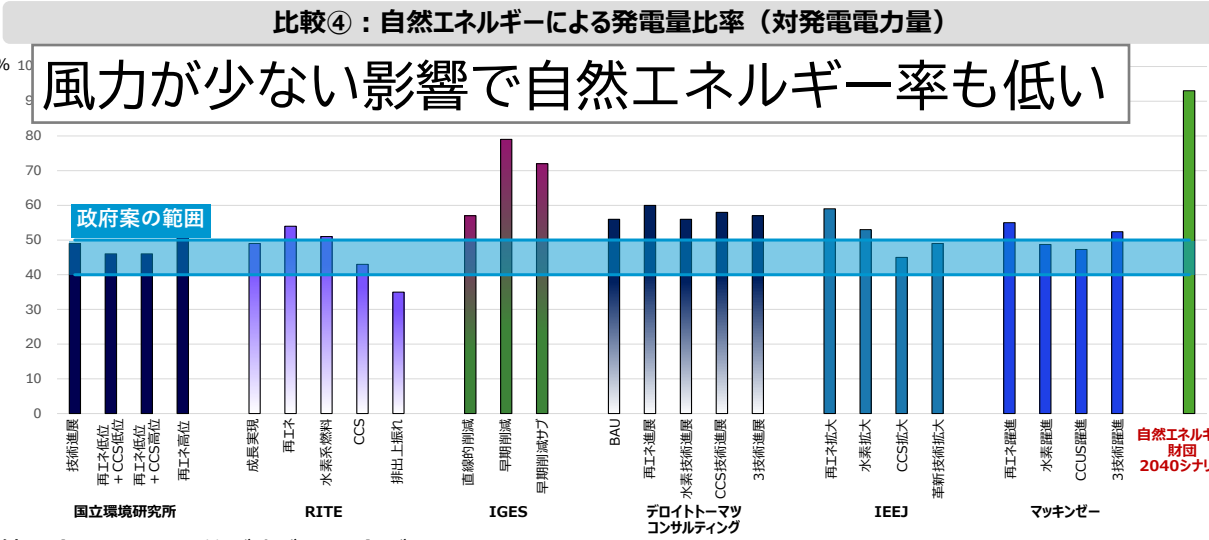
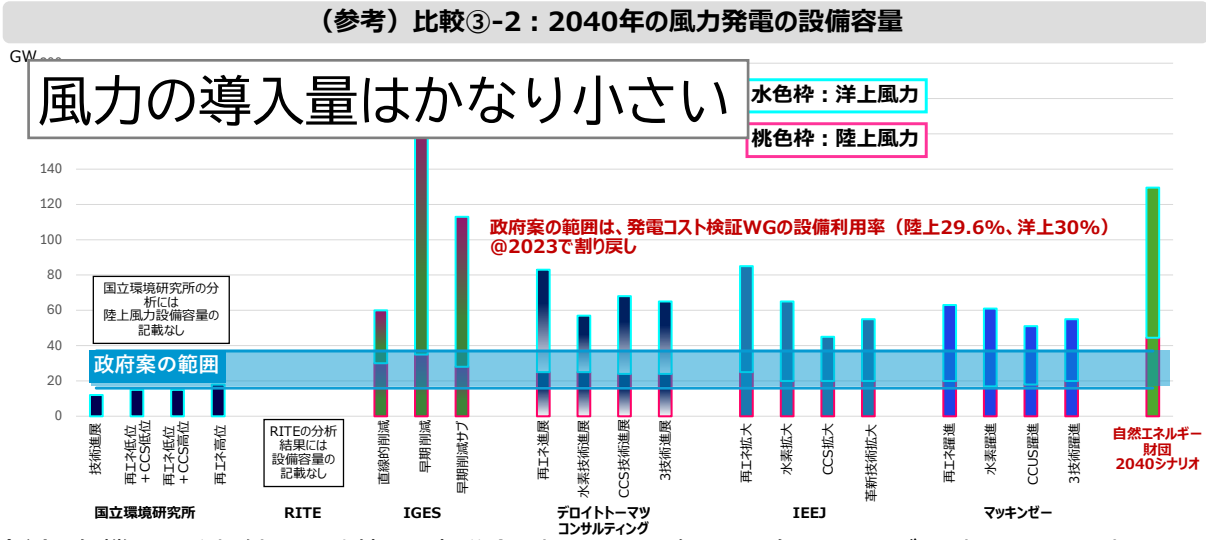
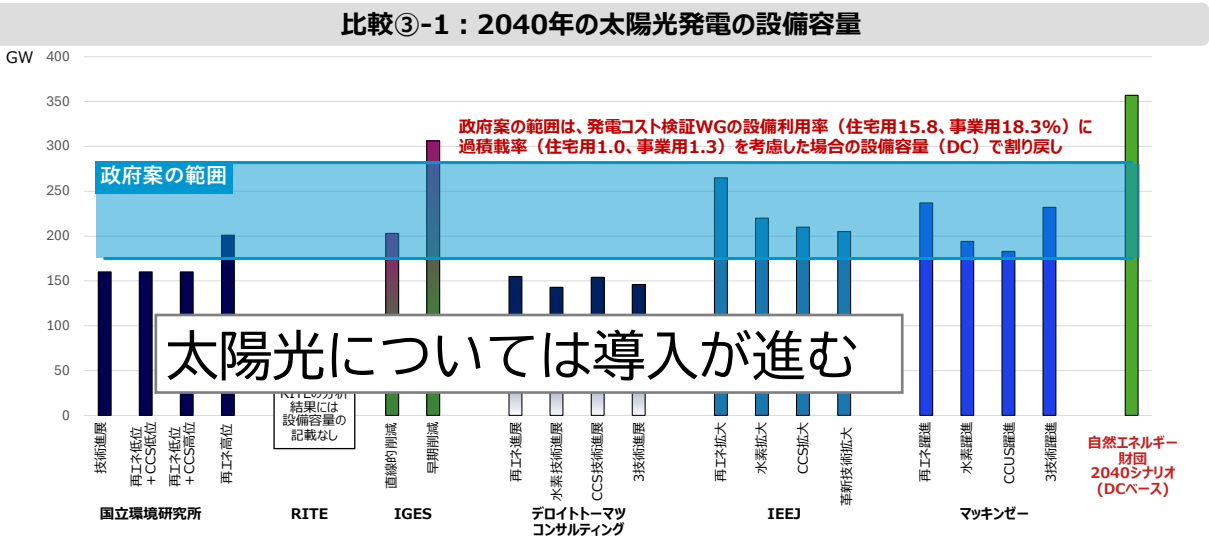
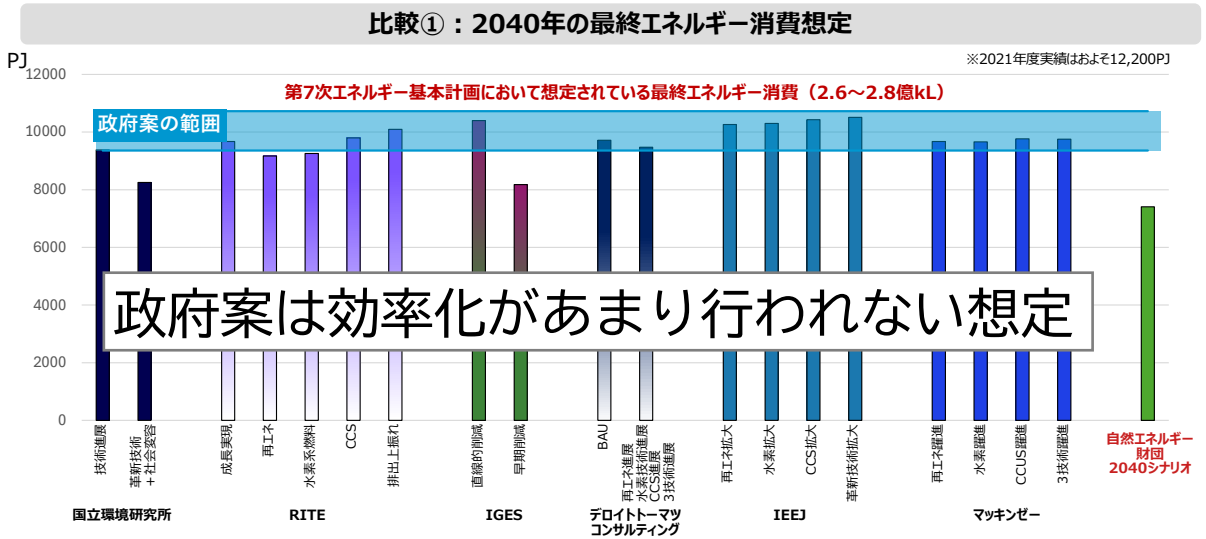
(全ての値は概念的で概念的なものであり、例示である)



「バルク貯蔵」は、蓄電池と揚水発電、圧縮空気、重力などを組み合わせたものである)

参考：エネルギー基本計画検討モデル結果・政府案との比較

■エネルギー効率化・風力導入量について、政府案の値が低い。



(注) 各機関の分析結果の数値は、審議会に提出された資料より自然エネルギー財団において読み取った値を含むため、誤差が生じる場合がある。出典：基本政策分解除（第66回）資料より自然エネルギー財団作成
分析全体については、[自然エネルギー財団、「自然エネルギーによるエネルギー転換シナリオ（第1版）」\(2024年12月\)](#)に掲載。

- 米国ローレンス・バークレー国立研究所⁽²⁾のシナリオ分析を参照

研究方法

- 最新の最適設備計画モデルと経済給電モデルによる発電、蓄電、送電に関する毎年の設備投資と毎時間の運用の最適化（費用最小化）
- 2030年にエネルギー基本計画を達成し、2035年にクリーンエネルギー90%となるような中核シナリオ（クリーンエネルギーシナリオ）の実現可能性と信頼性を検討
- 本研究で、クリーンエネルギーとは直接的にCO₂を排出しない電源（再エネ、原発、水素）と定義。

仮定と感度分析

- エネルギー基本計画の電源構成を2030年に達成
- 2035年にクリーンエネルギーを90%に引き上げ、石炭火力の稼働ゼロ
- 化石燃料価格はウクライナ侵攻以前の10年間の平均を使用
- 石炭火力、天然ガス火力は運転開始後50年間で廃炉
- 既存の原発は適合性審査中のものは全て再稼働かつ20年の運転延長
- コストは2021発電コスト検証WG等、日本のデータを使用。ただし太陽光、風力、蓄電池は米国国立再エネ研（NREL）の将来技術見通し（ATB）を日本向けに調整
- 一つだけ仮定を変えた5つの感度分析を実施（（再エネ及び蓄電池のコスト（高コスト、低コスト）、化石燃料価格（2022年水準）、電力需要、原発の稼働年数（既に認可を受けた炉以外は20年延長なし）

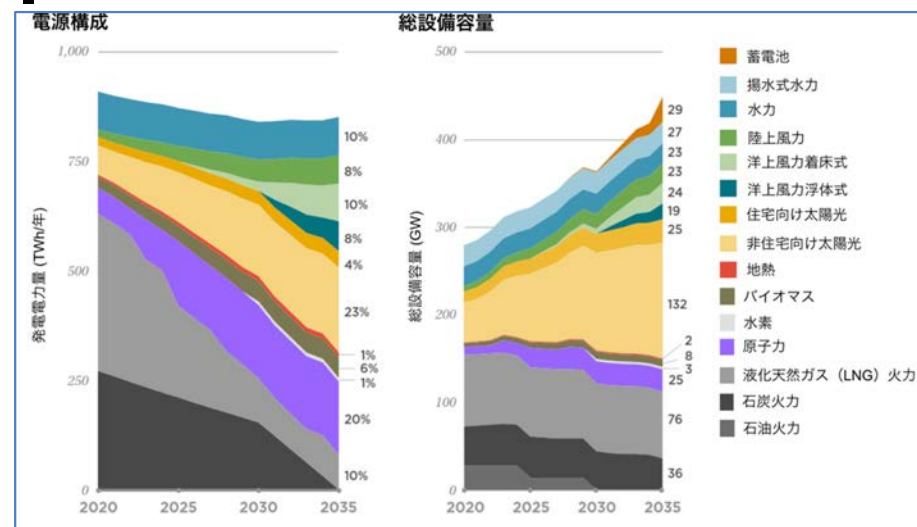
結果

- 費用最小化計算の結果、最も安価なのは太陽光・風力の導入加速
- 蓄電池、送電線、既存火力の活用により、電力の安定供給が可能
- 電力部門のCO₂ 92%削減・電力コスト 6%削減（2020年比）
- 化石燃料輸入額85%削減（3.3兆円）（2020年比）
- シナリオの実現には再エネ導入加速や柔軟性強化等の政策対応が必要

(1) 2022年設立の気候政策シンクタンク

(2) 1931年設立の米国エネルギー省（DOE）の国立研究所

電源構成と総設備容量（2035年バークレー研シナリオ）



出典：米国ローレンス・バークレー国立研究所

- 本シナリオの2035年7割再エネ実現によりコストが低下し、電力自給率が向上
- 排出原単位が約9割減少し、電力部門の排出削減および低炭素電力による他部門の電化の効果により、下に凸のGHG削減経路に大きく貢献

Climate Integrate 提出資料 エネルギー基本計画原案（2040年）について



● 低い風力発電割合

・2040年政府原案の風力（電源構成4～8%）が極めて低く、下限値は2030年目標水準と同程度。2035年バークレー研の66～75GWと比べても大きく下回る。

● 電源構成

・2040年の電源構成における再エネ割合（4～5割）は、2035年バークレー研の7割との比較でも極めて小さい。

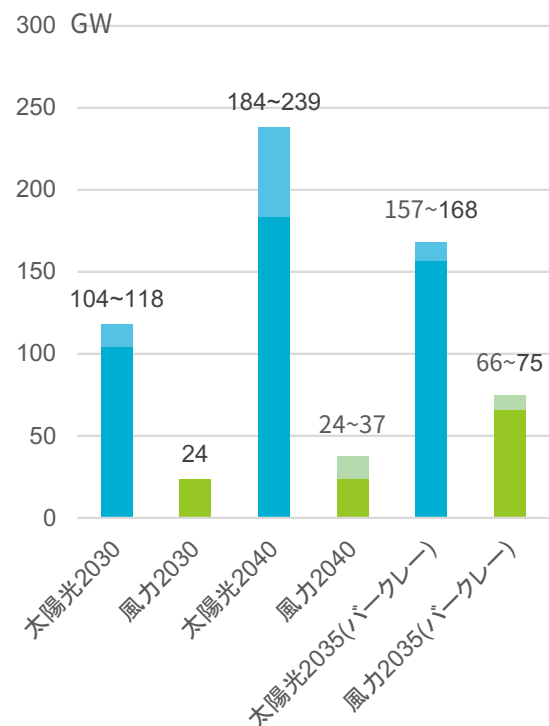
● 統合コスト

・出力変動（日中及び季節）が負の相関を持つ太陽光と風力の発電電力量のバランスをとることで、統合コストの低下が図られる。太陽光への投資集中は統合コスト増加の要因。

・変動性再エネの統合コストは政策的に低減可能。システムの柔軟性向上や、料金体系やDR等による需要シフトなど供給・需要両面からの政策的誘導すべき。

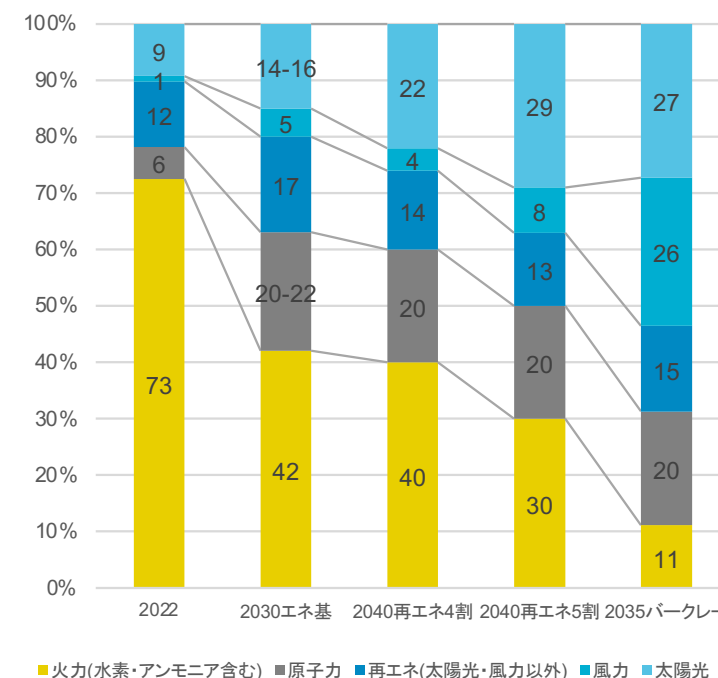
・安定供給や温室効果ガス排出削減の制約の下で、費用を最小化する経路は、**バランスのとれた再エネ導入の加速。その実現のための政策の強が3Eの観点から必要。**

太陽光・風力の設備容量見通し



Climate Integrate作成

電源構成



Climate Integrate作成

参考資料：再エネの供給力拡大の強み

経済性 一安価な再エネの活用により、電気代を低く安定させる

課題

輸入石炭とLNGの価格高騰による電気代の大幅な上昇で、政府の補助金支出が続く。海外のエネルギー危機に対する脆弱さに加え、日本では脱炭素目標に見合った炭素価格はまだ導入されていない。

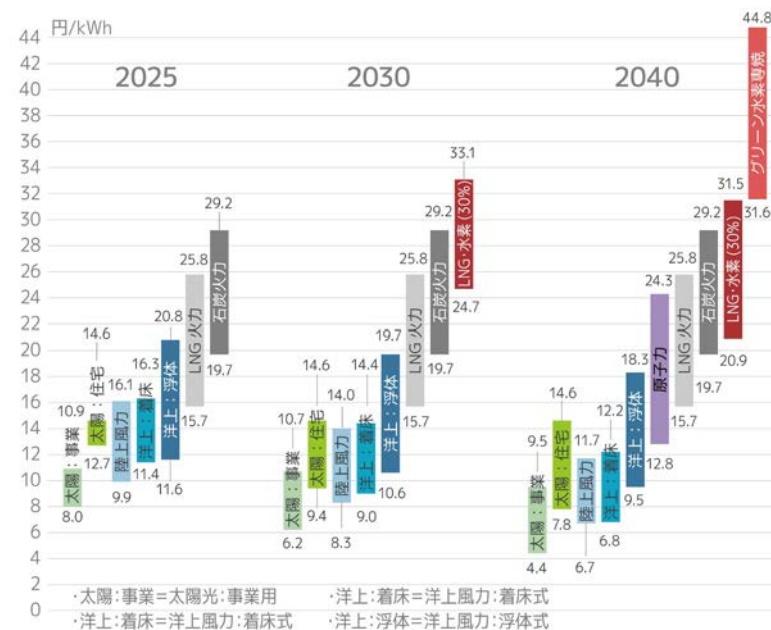
- 石炭・LNG火力の発電コストは、現状の極めて低い炭素価格でも、太陽光・風力と同程度かそれ以上に高い(1)
- 日本の炭素価格：289円/t-CO₂ (2)
- 欧州の炭素価格(EU-ETS)：約13,000円/t-CO₂ (3)
- 火力発電所の新設は、新設の再エネよりも大幅にコスト高に
- 2022年のようなエネルギー危機の再来は今後も十分に起こりうる

再エネによる供給力拡大の強み

太陽光・風力の発電コストの大幅な低下が続いており、今後の急速なイノベーションと規模の経済により、さらなるコスト低下が想定される。安価な再エネの活用によって、電気代を低く安定させることができる。(1)

- 太陽光や風力発電は燃料費がゼロ。燃料費変動によらず、電気代を低く安定
- 発電効率の向上、生産や発電の大規模化、モジュール化、生産効率の向上等により、再エネの発電コストの継続的な低下が予測
- LNG火力へのグリーン水素混焼・専焼の発電コストは高くなる見通し
- 太陽光と風力をバランスよく導入することで、システムコストが低下

日本の発電コスト（新設）の見通し (バークレー研究所の論文に基づく試算)



出典：太陽光・風力・水素は、[K. Shiraishi et al. 2023](#), [K. Shiraishi et al. 2024](#)。火力は[資源エネルギー庁資料](#)を基に、白石賢司（バークレー研究所）計算。炭素価格は1.3万円/t-CO₂（EU-ETSの排出枠価格を参照。石炭10円/kWh、LNG4円/kWh相当）で計算、水素は、カーボンニュートラルを前提にグリーン水素を想定。以上を基に、Climate Integrate作成

参考資料：再エネの供給力拡大の強み

ポテンシャル ー太陽光発電と風力発電に大きな可能性

課題

国土の約7割を森林が占める。ゾーニング（土地利用制度）の不整備により、適さない場所に発電所を建設する例があり、景観への影響や安全面の懸念から地域トラブルが発生している。

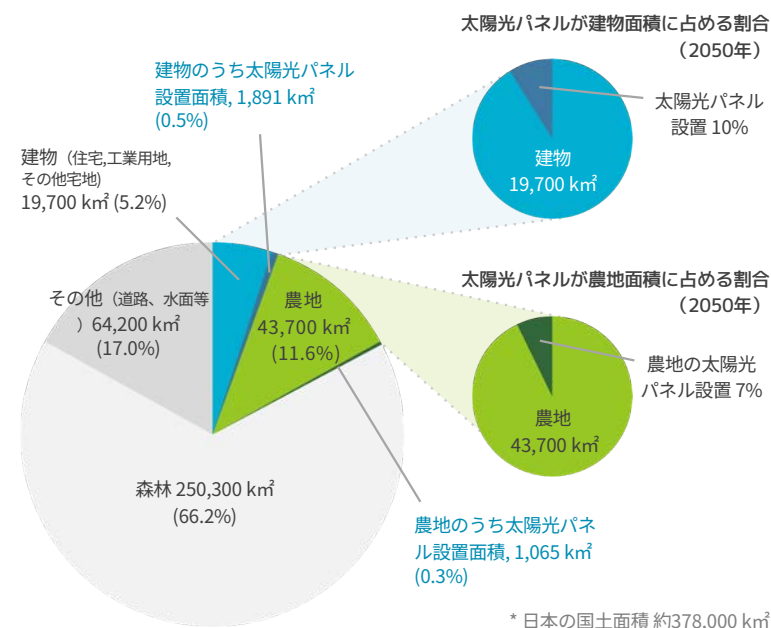
- 山林に太陽光発電所を建設するなど環境破壊型の事業や、地域との合意形成の欠如などが各地で問題に
- 地域共生が図れない場所での、太陽光や陸上風力の導入速度が低下

再エネによる供給力拡大の強み

日本の太陽光・風力発電のポテンシャルは大きく、土地や屋根の一部や海域を活用し、適所に導入すれば、電力需要を十分に満たせる。

- JPEAの2050年ビジョン（400GW）達成の場合（1）
 - ・ 太陽光パネルの国土面積に占める割合は**約1%**（全て平地設置と仮定の場合）
 - ・ 営農型太陽光発電（ソーラーシェアリング）（107GW・遮光率35%）が農地面積に占める割合は**7%**
 - ・ 建物に設置する太陽光パネル（228GW）が建物屋根面積に占める割合は**10%**（壁面分の面積は除く）
- JWPAの2050年導入目標（140GW）達成の場合（2）
 - ・ 世界第6位の海域を有する日本の洋上風力に大きなポテンシャル（3）

太陽光パネルが国土面積に占める割合 （JPEAの2050年ビジョン（400GW）を達成した場合）



出典：国土交通省、JPEAの資料等を基にClimate Integrate 試算・作成
| 協力：歌川学（産業技術総合研究所）

参考資料：再エネの供給力拡大の強み

柔軟性 一変動性に対応し、コストを低減させながら再エネ導入を拡大



課題

太陽光・風力発電の出力や、需給の変動に対応する電力システムの柔軟性（フレキシビリティ）の考え方が浸透しておらず、調整力の多くを火力に依存している。

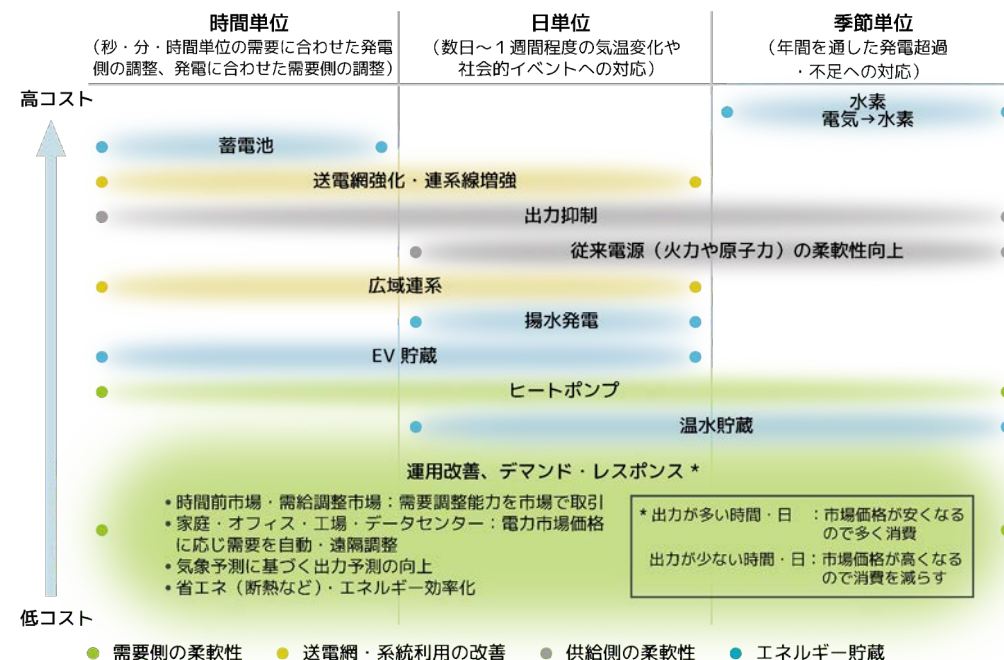
- 2022年度の電源構成 (1)
 - ・ 火力 72.8%
 - ・ 原子力 5.5%
 - ・ 変動型再エネ（太陽光・風力） 10.1 %

再エネによる供給力拡大の強み

費用対効果の高い方法で柔軟性を高めることで、再エネを効果的に利用し、火力発電が提供する柔軟性への依存を減らせる。

- 電力システム（系統）の柔軟性の向上で、再エネを大量に電力系統に受け入れ可能
- 再エネの時間・日・季節ごとの変動を管理する柔軟性の選択肢は多様
- 再エネも一部柔軟性を供給できる
- 技術革新、市場や規制の改革などの様々な手段を組み合わせでコスト低減

電力システムの柔軟性を向上させる各種手段



出典：IEA、IRENA資料等よりClimate Integrate作成（コストは目安であり、条件や普及等により変化する）| 協力：安田陽（ストラスクライド大学）



参考資料：再エネの供給力拡大の強み

産業技術 一国内のサプライチェーン形成で迅速に普及

課題

太陽光パネル調達の海外依存に懸念があるが、コスト構造全体に占める割合は必ずしも高くない。洋上風力のサプライチェーンはまだ国内では構築されていない。

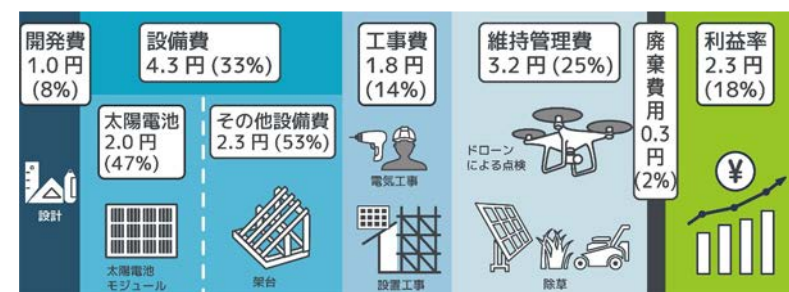
- 太陽光発電にかかるコスト（LCOE）のうち、太陽光パネルの占める割合は**約15%**（2円÷13円）（2023年10月運転開始の高圧案件の場合）（1）
- 大形風車メーカーは現在国内で生産していないが、構成部品は国内で製造可能

再エネによる供給力拡大の強み

既存の技術で、迅速に導入可能。日本の産業振興・雇用創出・地方創生の機会をもたらす。洋上風力は、アジア太平洋地域での事業展開のチャンスがある。

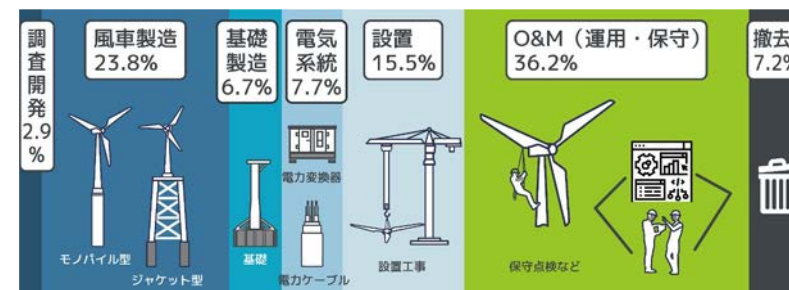
- 短い開発・建設期間（太陽光・陸上風力は1-3年、洋上風力は5年程度（IRENA）（2））
- 部品の製造、運用・保守業務などへの地元企業の参入機会創出
- 浮体式洋上風力用浮体、ペロブスカイト太陽電池も技術開発中
- 洋上風力は部品が多く（**3万点**）、産業の裾野も広いため地域活性化に寄与
- 部品、造船、O&M分野で企業の参入が始まっている（3）

太陽光のコスト構造（LCOE 全体：13円/kWh、2023.10.運転開始の高圧案件の場合）



出典：太陽光発電協会（JPEA）資料を基にClimate Integrate作成

着床式洋上風力のコスト構造



出典：内閣官房GX実行推進室 資料を基にClimate Integrate作成

参考資料

変動する再エネ電気の有効利用

短中長期の変動に合わせた多様な対応方法がある

現状

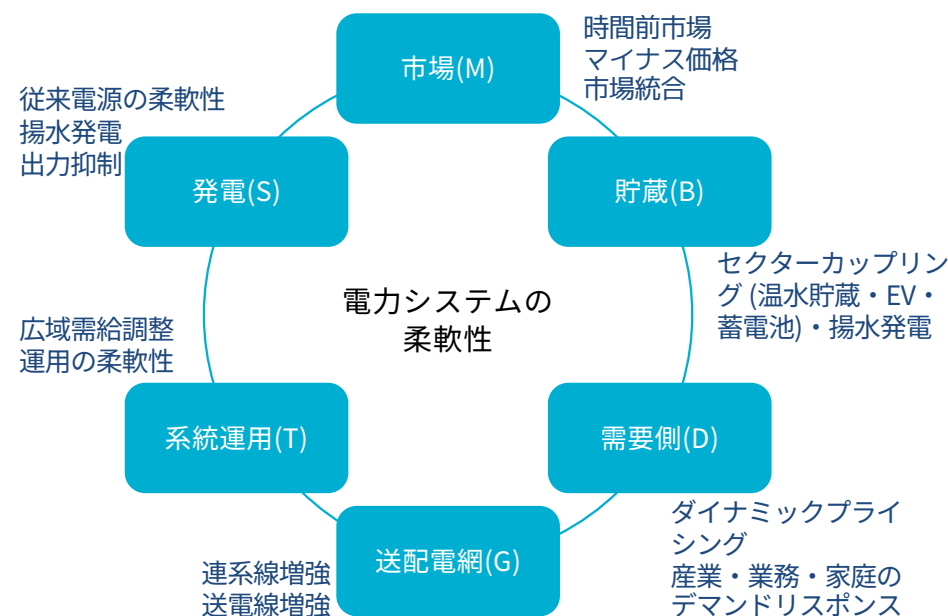
- 2022年度の再エネ22%実績のうち、変動性再エネは10%（太陽光9%・風力1%）。
- 日本型コネクト＆マネージでノンファーム型接続開始。需給調整、系統混雑解消などで出力抑制が行われる。

課題

- 変動性再エネの拡大で、供給の不安定さが一部で指摘されるが、柔軟性の概念に基づく市場やシステム設計が希薄で、再エネの供給力を活かしていない。
- 過剰な出力抑制のおそれ。

対策の方向性

- 電力システムの柔軟性の多様な方法を実施し、再エネ大量導入を加速。



【時間単位】

1日のうち需要が高低する時間帯

- (D) ダイナミックプライシング
- (M) 時間前市場・マイナス価格
- (B) 温水貯蔵・EV・蓄電池（セクターカップリング）
- (S) 揚水発電・従来電源の柔軟性
- (S) 出力抑制

【日単位】

曇天/晴天の日、無風/強風の日

- (S) 気象予測による再エネ出力予測
- (S) 揚水発電・従来電源の柔軟性
- (T) 広域的な連系
- (B) 温水貯蔵・EV・蓄電池（セクターカップリング）
- (S) 出力抑制

【季節単位】

季節による変動

- (S) 太陽光（夏の昼間に多く発電）と風力（冬の夜間に多く発電）の両方をバランスよく推進
- (B) 温水貯蔵・水素（セクターカップリング）
- (D) データセンター等の柔軟な運用
- (D) 断熱強化によるピーク時の冷暖房需要の低減

参考資料

再エネ大量導入に関する障壁と対策 市場システム・制度を見直し、着実な推進へ

論点	課題	対策
導入の規模とペース	低い目標、系統連系の審査・工事の遅れによる導入の遅れ 再エネ海域利用法改正（浮体式洋上風力をEEZに設置するための法改正）、サプライチェーン構築の遅れ	意欲的な導入目標設定。 導入が遅れる太陽光・風力の案件の早期運転開始とさらなる促進 再エネ海域利用法改正法案の早期成立とEEZにおける洋上風力の案件形成
中立・公正な自由競争市場	旧一電の内部取引・発販一体の継続。差別的で参入障壁がある競争環境、調達・託送・料金設定の地域間格差	非差別性の撤廃、FIP制度の事業性向上 送配電エリア広域統合
火力・原子力	容量市場・長期脱炭素電源オークションにおける火力・原子力へのインセンティブ	長期脱炭素電源オークション制度の見直し
受容性	地域住民の反対 地域への利益非還元	ゾーニング・合意形成による地域共生の確保 地域への利益還元
再エネ事業者負担	新電力による託送料金負担（原子力負担等含む） 新電力による系統連系・基幹系統費用負担 従来事業者と新規事業者の間のファーム・ノンファーム契約の不平等、旧一電（グループ内に発電・小売の両方を持つ）と比較して、新電力には追加負担	発電側課金制度、系統接続ルール、ノンファーム契約、容量市場拠出金負担における再エネ導入への障壁の撤廃
系統接続	系統制約・不足 基幹系統・ローカル系統整備の遅れ	系統整備・増強の前倒し
需給調整・柔軟性	不透明・無報酬の出力抑制・原発優先給電 市場価格設定による歪み 柔軟性対応の不足	再エネ優先給電、需給情報の情報開示 ネガティブプライス導入 デマンドレスポンス・セクターカップリングの拡大
情報開示・価値やコスト表示	再エネ賦課金・燃料調整費・託送料金や原価負担の不透明性 再エネ電源の選択肢・情報の不足 FIT電源に環境価値が付与されない 再エネと原発・水力の一体的扱い	電気料金表示の見直し 消費者向けのサービスメニュー拡大 情報公開・透明性の拡大 環境価値の説明・非化石証書における再エネとの区別

出典：Climate Integrate作成、協力：安田陽（ストラスクライド大学）