

講座 データで学ぶエネルギーとカーボンニュートラル
第8回 カーボンニュートラルの世界（その2）

キヤノングローバル戦略研究所 エネルギー教育研究会 座長 中山寿美枝
同 幹事 杉山大志
2025 年 6 月 5 日

カーボンニュートラルの世界については、本講座の第3回で国際エネルギー機関（IEA）のシナリオ NZE（2050 年世界の CO₂ 排出量ネットゼロ）が想定している 7 つの CO₂ 排出削減手段とそのマイルストーン、バックキャスト型シナリオの特性、産業と運輸部門の課題、などを紹介しました。今回は、NZE が想定する 7 つの削減手段のうち「電化」について見ていきたいと思います。

以下のグラフは、NZE シナリオにおいて 2050 年 CO₂ 排出ネットゼロをどのような削減手段別で達成するかを定量的に示したものです。全ての削減手段の中で、電化（図中の水色部分）が削減に最も大きく寄与しています。

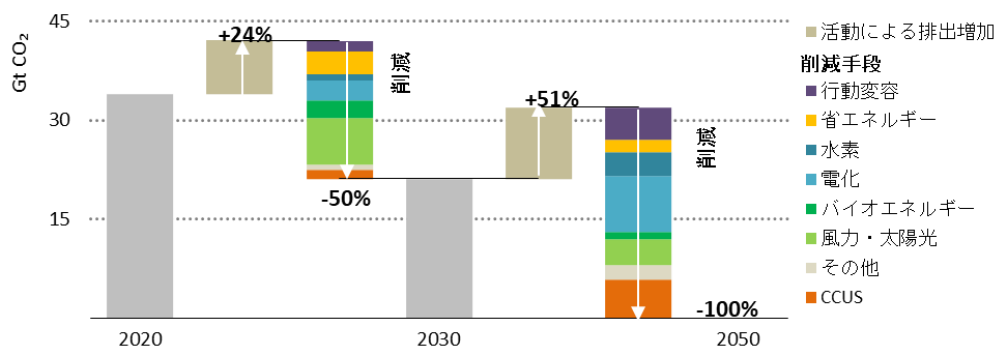


図 1 NZE における削減手段別の排出削減（NZE 報告書の図 2.12）

NZE で電化が大活躍するのは何故でしょうか？ それには訳があります。NZE が想定する 2050 年までの電源タイプ別の発電電力量と電力の CO₂ 排出係数（1kWh あたりの CO₂ 排出量）ⁱを図 2 に示します。この図で最も目を引くのは、CO₂ 排出係数（図中の赤線）が急激に低下して 2040 年頃にはゼロになっているようことではないでしょうか。これは、NZE が想定している電源構成の変化によるものです。

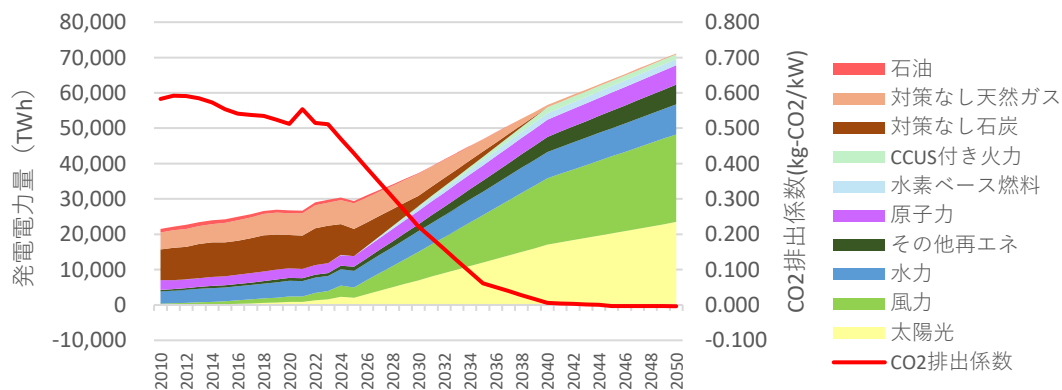


図 2 NZE の電源タイプ別の発電電力量と電力 CO₂ 排出係数

現状では、世界の発電電力量の 6 割以上を化石燃料が占めています（本講座 第 7 回を参照）が、NZE では今後、削減対策なしの石炭およびガスは急激に減少していった 2040 年頃にはほぼゼロになり、一方で太陽光と風力の激増、その他再生可能エネルギーと原子力の増加により、総発電電力量は 2050 年には現状の 3 倍に増加します。電力の CO2 排出係数は、分子（CO2 排出量）の減少と分母（発電電力量の増加）が同時に進行するので、大きく低下し続けます。そして、バイオマス発電由来の CO2 を回収・貯留する「BECCS」の負の排出効果で 2040 年にはマイナスになります。つまり、NZE の世界では 2040 年以降の電気は「使えば使うほど CO2 排出が減る」エネルギーなので、電化を進めることは最も容易かつ効果的な CO2 排出削減対策ということになり、図 1 のように 2050 年カーボンニュートラルに電化が大きく貢献する、というわけです。

図 2 で激増している太陽光発電と風力発電は、再生可能エネルギーの中でも「変動性再エネ（VRE）」と呼ばれ、天候により発電電力量が変動し、正確な予測が難しいという特徴があることから、変動量に合わせた調整力（変動分のしわ取りをする土のマージン）の確保が必要です。この変動性再エネの発電設備容量が現状の合計 1,500GW から NZE では 2050 年には 23,000GW に増加し、また、変動性再エネの発電電力量が全体に占める割合は、現状の 9%から NZE では大きく増加して 2050 年には 68%に達する、と想定されています。（図 3）

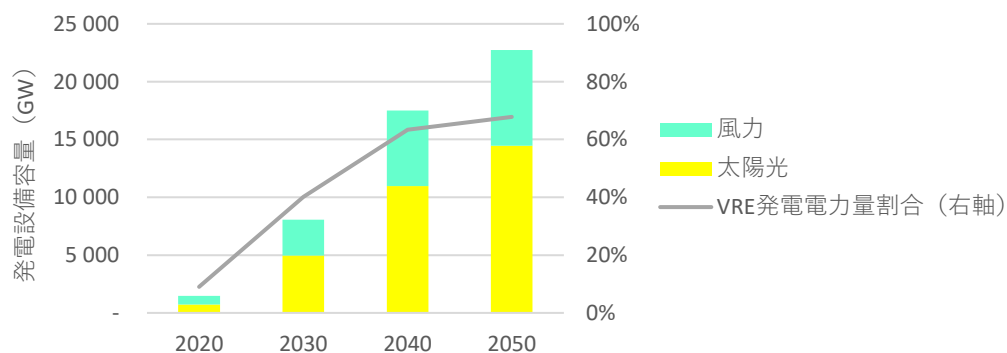


図 3 NZE の太陽光と風力の発電設備容量と VRE 発電電力量割合

変動性再エネの導入量が増えるほど、調整力ニーズも大きくなります。調整力を供給できるのは、①制御可能な発電設備、②貯蔵設備（蓄電池、揚水発電所）、③系統連系線、④利用設備（水素製造装置など）、⑤デマンド・レスポンス、です。

現状では、総発電電力量に占める割合として、変動性再エネが 9%、制御可能な発電設備が 81%という状況であり、変動性再エネが必要とする調整力のほとんどを制御可能な発電設備が供給可能ですⁱⁱ。VRE 出力の変動幅を仮に発電出力（瞬時の発電電力量）の 30%ⁱⁱⁱ、制御可能な発電設備が供給できる調整力を仮に発電出力の 5%^{iv}とすると、変動量（9%×15%=1.35%）＜調整力（81%×5%=4.05%）であり、変動量に対して十分な調整力があることがわかります。しかし、NZE が想定する「変動性再エネの発電電力量割合が 68%」という 2050 年カーボンニュートラルの世界では、変動量と調整力の関係はどうなっているのでしょうか。

NZE 報告書では、変動性再エネ増加に伴う調整力ニーズ増大を課題の一つとして扱っていて、調整力の供給源として前述の①～⑤を列挙しています。また、NZE では 2050 年の電力システムにおける調整力

は現状の 4 倍に増加する、と記載されていますが、その根拠は示されていません。そこで、各所に分散して記載されている調整力の供給源の想定に基づいて、調整力を定量的に評価してみようと思います。NZE 報告書では、①～⑤の調整力の提供源について、以下のように想定されています。

① 制御可能な発電設備：

制御可能な発電設備としては、火力発電所、水力発電所（流れ込み式除く）、地熱発電所、バイオマス発電所が挙げられます。NZE の世界では CO₂ を排出しない発電所であることが条件なので、火力発電所としては、水素系燃料を使っている発電所、および CO₂ を CCS でオフセットしている化石燃料の発電所（火力発電）が該当します。これらについては図 4 のように、2050 年には現状の 1500GW から 6000GW への増加が想定されています。CCUS なしの火力発電（CO₂ 排出あり）を含めた制御可能な発電設備による発電電力量の割合は 2020 年には 81% ですが、NZE では大きく低下して 2050 年には 22% になっています。

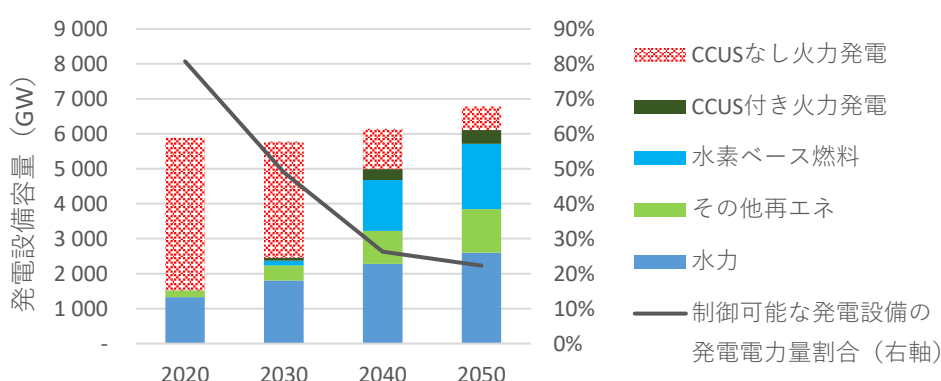


図 4 NZE の制御可能な発電設備容量と発電電力量割合

② 貯蔵設備：

貯蔵設備については、蓄電池が現状の 18GW から 2050 年には 3,100GW、発電設備容量合計の 9.3%に増加することが想定されています。貯蔵設備に関しては、充電状態（SOC）がゼロであれば容量の 100%を上げ方向に利用可能ですが下げ方向には対応できず、SOC がフルであれば容量の 100%を下げ方向に利用可能ですが上げ方向には対応できない、という特性があります。

③ 系統連系：

系統連系については、電力システムへの合計投資額について、現状の年間 260 兆ドルから今後は 2050 年まで年間 800 兆ドルの規模を維持する、変電所の容量が 2050 年には今の 5 倍の規模に増加すると想定されていますが、調整力に関する定量的な影響については不明です。

④ 利用設備：

水素製造装置については、現状のほぼゼロから 2050 年には 3,600GW、発電設備容量合計に対して 11%に増加すると想定されています。利用設備は、休止中（スタンバイ状態）であれば 100%を上げ方向に利用可能ですが下げ方向には対応できず、フル稼働中であれば容量の 100%を下げ方向に利用可能ですが上げ方向には対応できない、という特性があります。

⑤ ディマンド・レスポンス：

ディマンド・レスポンスについては、EV 充放電と建物の電力使用がディマンド・レスポンスに貢献すると記載されていますが、定量的な効果は不明です。

これらに基づいて、定量評価可能な①、②、④が 2050 年に供給可能な調整力を以下のように想定して試算してみました。

- ・制御可能な発電設備が提供できる調整力は出力の 5%と仮定（現状の調整力評価の仮定と同様）
- ・貯蔵設備が提供できる調整力は SOC に依存するので設備容量の 50%と仮定
- ・水素製造装置が提供できる調整力は設備稼働状態に依存するので設備容量の 50%と仮定

試算した調整力を、変動性再エネの変動量、NZE 報告書記載の「2050 年には現状の 4 倍」の調整力と比較したものが図 5 です。

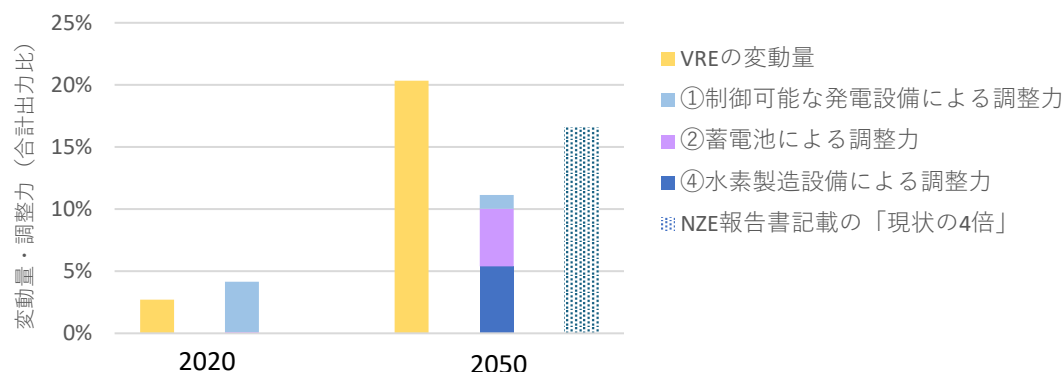


図 5 現状（2020 年）と NZE2050 年の VRE 変動量と調整力

①、②、④の合計調整力では NZE 報告書記載の「現状の 4 倍」には届きません。不足している調整力は、定量的に評価できなかった③系統連系と⑤のディマンド・レスポンスにより提供されている、とも考えられます。

また、現状の 4 倍の調整力でも変動性再エネの変動量より小さい（不足している）ことが示されています。これは、変動性再エネの変動幅の考え方が現状から変化して、VRE 発電電力量あたりの変動量が低下していることを示唆しています。その要因としては、予測精度の向上、変動性再エネが（ある程度）制御可能になる、などが考えられます。しかし、NZE 報告書には記載がないので、実際はどうかかわりません。

一つ確かなことは、変動性再エネの大量（ここでは約 7 割）導入で CO2 排出係数が低下して、電化が有効な排出削減手段になるというシナリオでは、変動量に見合う調整力を確保するために、膨大な数と規模の蓄電池や水素製造装置を必要とするだけでなく、火力発電所を（全廃するのではなく）水素燃料に転換または CCS をつけて制御可能な発電所として維持する必要があることです。「再エネ 100%」の電気の世界は現実的でない、ということがわかります。

今回は、NZE シナリオで正に「伝家の宝刀的」的に使われている「電化」について、排出係数をマイナスにするような電源構成はどのようなものか見てきました。そして、変動性再エネが 7 割を占める世界の変動量と調整力についてデータによる検証を試みました。

-
- i CO2 排出係数は、実績値は IEA の GHG Emission from Fuel Combustion 2024 の電力由来の CO2 排出量と発電電力量から、2030 年以降の値は NZE 報告書の付表に記載された電力由来の CO2 排出量と発電電力量から計算。
- ii 実際には、電力系統ごとに変動量と調整力のバランスが必要であり、世界合計値で議論すべきものではない。現実には、VRE 導入割合が高い一部の電力系統では調整力不足が発生している。しかし、IEA は NZE に関して世界合計値しか公開していないので、ここでは指標として世界合計値での変動量、一次調整力の評価を試みている。なお、単位として使用している%は総発電電力量に対する割合である。
- iii 需給調整力市場における調整力の必要量は、調整力の商品（応動時間、継続時間等で区分）によって異なる。概ね再エネ発電量の 3σ （ σ は標準偏差、平均値 $\pm 3\sigma$ で数値分布範囲の 99.7% をカバーする）を基本として考えられており、ここでは簡便性のために 30% と仮定した。
- 日本の調整力の考え方については、電力広域的推進機関の資料「調整力必要量の考え方について」を参照されたい。
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/jukyuchousei/2023/files/jukyu_shijyo_38_02.pdf
- iv 稼働中の火力、地熱、バイオマス発電は発電出力の $\pm 5\%$ の調整力を、水力発電、揚水発電は $\pm 20\%$ の調整力を有している。ただし、稼働中の発電所のみが調整力を有しており、合計出力の何%という関係ではないが、ここでは簡便性のために出力の 5% と仮定した。
- v 水力発電については、貯水式のみを制御可能な発電所としてカウントすべきであるが、流れ込み式と貯水式の合計値しかないため、過大になっている点に留意が必要。