



サロン

エネルギー問題についてドイツでの最近の動き —再生可能エネルギー大量導入により生じている問題点—

Recent Developments in the German Energy Sector

—Issues Arising from the Large-Scale Deployment of Renewable Energies—

村岡克紀

MURAOKA Katsunori

九州大学名誉教授

(原稿受付：2026年3月9日)

1. まえがき

ドイツは日本では「環境先進国」と見なされて、その政策は日本のモデルになると考える人が多いようです。しかし、そのドイツの現実をよく見ると、最適解を求めて常に試行錯誤を繰り返している様子こそ参考になります。たとえば、本稿の主題である再生可能エネルギー大量導入による問題点が意識され、改善策が検討されています。そのようなドイツの具体的内容に入る前に、まず私が理解している世界の環境問題への認識を述べます。

地球環境、特に温暖化の深刻さが一般に認識されるようになったのは20世紀末になってからです。具体的には(色々な萌芽の動きを経て)国連の「気候変動枠組条約」の締約国会議(COP)が1995年から毎年1回行われるようになって1997年の京都會議COP3に繋がり[1]、また地球温暖化についての科学的な研究結果の収録・整理のための専門家会議IPCCの評価報告書が随時出されて、世界中の多くの人々が強い関心をもって迎えるようになりました。IPCCの報告書でだんだん確信を強くして述べられてきたのは、「人為的な行動が地球温暖化の元凶である」ということです。具体的には「世界の人類を動かしているエネルギー源の約80%が化石燃料燃焼によるものであることによって、その際発生する炭酸ガスが大気中に放出されて大気中に滞留するのが地球温暖化の主原因である」ことです[2]。

それ以来、この「炭酸ガス」を放出しないエネルギー源を求めている議論や試行が行われてきました。それらの中で私が最も強く影響を受けたのは、2009年に刊行された‘Sustainable Energy – Without the Hot Air’ [3]でした。ここで私自身のことを記(しる)せば、九州大学に初めての大学院だけの総合理工学研究科ができ、その一専攻エネルギー変換工学に所属してエネルギーに関する諸問題を講義しました。2004年に九大を定年退職して当時の学長・飯吉先生の招きで中部大学に赴任し、担当講義科目の一つとして新入生対象の「地球環境論」を担当しまし

た。そこで初めて「環境問題」を真正面から取り扱ったのですが、地球環境は地球を挟んでエネルギー問題と表裏一体で分離不可能なものであることを強く認識しました。

その経験を深めている中で上記書籍[3]が刊行された旨の書評がイギリス物理学会誌に「地球環境とエネルギー問題について稀にみる良書」として紹介されていたので、すぐ入手して読みました。この本の著者デービッド・マッケイ(David MacKay)氏はケンブリッジ大学の物理学者で、同書は論旨が極めてクリアでした。そこでは、地球全体のエネルギーの動きを論ずると膨大な数字になって直感に訴えないのに対して、マッケイ氏は「1人あたりおよび1日あたりのエネルギー[kWh/人/日]で表すとわかりやすい」として、この本を通じて具体例を挙げて詳細に示しました。幸いこの本を出版直後に入手しましたので、すぐに邦訳して出版しました[4]([『持続可能なエネルギー—「数値」で見るその可能性』産業図書2010年11月刊)。この訳本は本文392ページの大冊になって価格も4600円(税抜き)になりましたが、幸い多くの方々から求めていただいたのは環境問題への一般の関心の深さの表れでしょう。

その直後2011年3月11日の東日本大震災が起り、原子炉がメルトダウンする大災害に至りました。その結果、日本の将来のエネルギーのあり方について多方面で侃侃諤諤の議論がなされました。そこで私は日本のデータを用いて、マッケイ氏がイギリスのデータを用いて上述の本で論じたのと同じ趣旨の検討を行い、『これからのエネルギー』[5]という小冊子を出しました。マッケイ氏はそのころには英国政府エネルギーおよび気候変動省・首席科学顧問になって活躍されており、この拙著の巻頭に「刊行に寄せて—数値で検討する重要性」をもらって交流を深めていました。しかし、2016年4月に48歳という若さで癌のために逝去されたのは地球環境の追究にとっても極めて残念なことでした。

このマッケイ氏の著書出版とほぼ同時期の2012年に、ドイツのフリッツ・ワグナー(Fritz Wagner)氏が同国

author's e-mail: muraokakatsunori10_15@ybb.ne.jp

の配電会社から公表されている送配電データを用いて、最初の公表論文で再生可能エネルギーのうちで風力と太陽光発電量の同時導入時の最適混合比を求めています[6]。この最適混合比は時間的に不規則に変化する再生可能エネルギーによる出力が電力負荷に足りないときには他のエネルギー源から供給するためのバックアップ電力は小さいほうがいいので、それを最小にする条件により決まるとして、何年か分のデータを解析して太陽光発電：風力＝75%：25%が最適混合比になることを示しています。このワグナー博士はトカマク放電でのHモードの発見[7]に至る極めて緻密な検討でよく知られていますが、それと同様の作業がなされたのは、地球温暖化理解の進展のために幸いでした。その後ワグナー氏は同様な解析をスウェーデンはじめヨーロッパ各国への適用[8]や、私との共同研究で日本のエネルギー諸問題を論じてきました[9, 10]。最近ではドイツの日々のデータを用いて、再生可能エネルギーの大量導入の問題点を論じています[11]。それが本解説の主題ですから、次の第2節で背景と問題点を詳しく述べます。第3節はその内容を受けて、日本の問題への教訓を述べます。

なお、温室効果ガス削減について世界の国々を挙げての取り組み「パリ協定」が2016年11月4日に発効し[12]、今後各国はそれぞれが決める目標の達成義務を負うことになりました。しかし、周知のようにトランプ大統領はその協定から脱退すると宣言しました[13]。将来世代への環境負荷を減らす人類を挙げての努力に是非協力してほしいところですが、それはアメリカの次世代に期待するよりほかにはないようです。

2. エネルギー問題についてのドイツの現状と今後

ドイツのメルケル前政権は、上記2011年3月11日の東日本大震災での深刻な原子炉事故を受けて「2021年までに原子力発電を全廃する」と決めました（その実行時期はその後の政権が2023年に延長）[14]。そして、その原子力発電と従来からの化石燃料燃焼発電とに替わるエネルギー源として再生可能エネルギーに期待する‘Energie-Wende’と題するエネルギー大転換に踏み切り、その構想を2050年に完成するとして大規模な予算措置を行ってきました[15]。それは前項で述べた拙著[5]での日本への主張と近かったので、その進展に注目してきました。その中間報告的な論文が本年秋にワグナー博士により著された論考[11]です。その概要は次のように約言できます。

「再生可能エネルギーのうちで風力発電と太陽光発電は地表面での密度は薄いながら、それに大きな面積を割けば量的には現代の産業化社会のエネルギー需要に応えられる可能性がある（それは英国について、上記マッケイの論考でも示された）。しかし、この両者とも出力が天候によって時々刻々変化するので、その瞬時値がエネルギー需要の瞬時値に比して大き過ぎまたは小さ過ぎることによって新たな問題が起こっている。また、ドイツの再生可能エネルギーの全電力消費量に占める年間割合が2040年には約60%になる大量導入になって、あらかじめ予想しない問題も起こっている」

以下には論文[11]に示された具体例を中心にしながら、上記約言の中身の説明を行います。なお、本稿に載せた図の多くはワグナー氏の許可を得てこの論文[11]の投稿に使われた図を載せて、必要ならドイツ語の訳文をキャプションに記しました。

2.1 最終エネルギー消費量と総電力消費量

まず、ドイツのエネルギー消費と電力消費の概要を見ておきます。図1はドイツの最終エネルギー消費量（Endenergie）と総電力消費量（Bruttostromverbrauch）の経年変化で、2024年までは実測値、それ以降については政治的な論争の結果として法規で決まった値で、このうち総電力消費量は異なる電力網設置計画に対応する範囲をハッチング領域で示します[16]。2019年以降の電力消費量は低下しているの、現時点（2025年）までは青点線で示し、2030年には後述の予定値750 TWhに直線的に繋がるとしています。

図1のように、2045年の最終エネルギー消費は多くが電力を通じて行われる（＝100%の場合で、総電力消費量は1351 TWh）か、または約70%（＝1000/1425）がそうであるとしています（この70%～100%の差の原因は電化率と水素利用の程度などをどう決めるかによっています）。以降の検討は、2025年から2045年が対象になります。

2.2 ドイツの電力源と使用量の時間変化パターンについて実測結果（2023年）と予測（2045年）

ドイツでの日々の電力負荷の時間変化パターンにおいて、負荷電力に対して再生可能エネルギーの不足時にバックアップ電力を準備しなければなりません。その検討の一例として、図2に2023年の実測結果（上段）と2045年の予測（下段）の一週間分；それぞれ冬季a)とc)、夏季b)とd)を示します。下段の2045年分は2023年の15分毎のデータを基にして、再生可能エネルギーの拡大目標に合わせて求めています（2045年の予測は図1の総電力消費量が1179 TWhという斜線部の中間的シナリオの場合）。2045年の日々の電力源と消費パターンがほぼ20年前と似ているとは思えませんが、あくまでも検討資料としての値です。黒の曲線は負荷電力を示しており、また見やすくするためにバイオマスと水力を合わせて一定値7.2 GW（緑で示す）の上に陸上風力（濃い青）、洋上風力（薄い青）、太

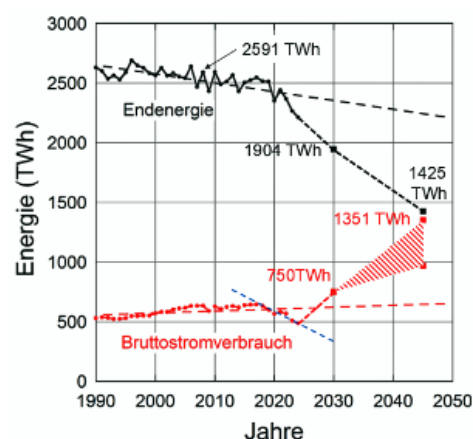


図1 最終エネルギー消費量（上部の黒線）と総電力消費量（下部の赤線）の値（本文参照）[11]。

太陽光発電（オレンジ色）で示しています。

図2から負荷電力の時間プロファイルは規則的であって土日には減り、冬季には夏季より高く、冬季の夕方に第二の消費ピークがあるような典型的な日々のパターンが読み取れます。また、風力と太陽光発電には次の2つの大きな問題点があります：(1)密度が小さいために、ドイツでは風車は森のような環境問題上貴重な空間にも設置していること；(2)出力が間欠的であること—風力は変動幅が大きく、太陽光発電は大まかに決まった変動パターンに従うのに加えて、日々の天候によるもっと短時間の変動が加わる。この(2)のような不安定な出力によって大容量の送配電設備が必要になり、その結果として建設費が高い電力網の充実が必要になり、2025年以降にはそのための支出は2倍の年間370億ユーロへ増やさないといけないようです。

図2から太陽光発電による余剰電力が夏季に大きいことが分かりますし、冬季には風力による電力発生が大きいにも関わらず太陽放射光が弱いためにほとんど余剰電力が生じていません。負荷曲線の下に白い面積部分は電力供給不足分を表しており、何らかの方法で補うためのバックアップ電力を準備しなければなりません。

再生可能エネルギーによる電力供給の理想化したモデルでは、夏季の太陽光発電による余剰電力を水素製造に用い、それを貯蔵して必要な時に二次電力へ変換するとしています。しかしながら、2045年に計画されている風力と太陽光発電の最大限活用においても、まだかなり大きな電力供給不足があります。さらに加えて、不足電力を供給するためのバックアップ電力には後に述べるような新技術が必要です。

2.3 暗い風 (Dunkelflaute; 英語では Dark doldrums)

日本では太陽光発電に比して風力発電による電力がまだ余り大きくないために問題になることはありませんが、ドイツでは風力電力が大きな割合を占めています。そのために、バックアップ電力の必要な機能に関心が持たれてきました。すなわち、「暗い風」と呼ばれる、天候に関連して風力と太陽光発電の出力がなくなる現象はドイツで2024年/2025年の冬期にしばしば発生したのに関連した現象に

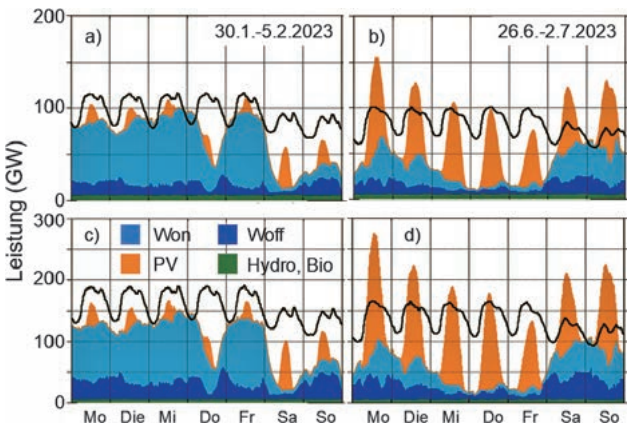


図2 ドイツの2023年 (a, b) と2045年 (c, d) の冬 (左列) と夏 (右列) の1日ずつの、それぞれ15分毎の実測 (上段) および予測 (下段) の電力[11]. [縦軸は電力 (Leistung), 横軸は左から順に月火水木金土日 (Mo Die ...)].

からむものです。

図3はその一例として2024年11月2日から8日の間の週について観測された、風力発電がかなりの時間の間小さい場合について示しています[17]. 11月6-7日の夜には風力発電出力は70 MWに落ちており、これは現在の負荷電力の0.1%であって、このことは風力+太陽光発電でベース負荷を負担するという考えが成立しないことを示しています[18]. ちなみにこの週のエネルギー収支は、負荷電力量9.2 TWh, 風力+太陽光発電の電力量1.3 TWh, 化石燃料燃焼発電の電力量5 TWh, および輸入電力量1.5 TWhでした. 残り (1.4 TWh) は水力発電, バイオマスおよび廃棄物発電によっていました. したがって、化石燃料燃焼発電は現状では不可欠なのです。

図3b)はドイツの隣国での暗い風を示しています。ここでは、風力と太陽光による発電を加え合わせて示しています。したがって、この図からドイツでの暗い風の発生時の再生可能エネルギーの不足分を近隣国のそれによって補うことはできないことが分かりますが、それは風力と太陽光による発電は大規模な気象条件で決まることから驚くべきことではありません (文献[17]の解析参照)。

図3a)に示すドイツのこの週の最大負荷は70 GWをちょっと下回るぐらいでしたが、その40%は化石燃料燃焼火力発電により、17 GWは輸入によっていました。後者の電力輸入は補助用石炭火力発電所を使わずに済むことではいいのですが、ドイツの経済性を損なう問題があります。とにかく、ドイツの炭酸ガス排出量はこの週に500 g/kWhぐらいに上昇していますが、ドイツへの主要な電力輸出国のフランスとスイスのそれはドイツのほぼ10%と小さいものでした。今後同様な天候条件になった場合には

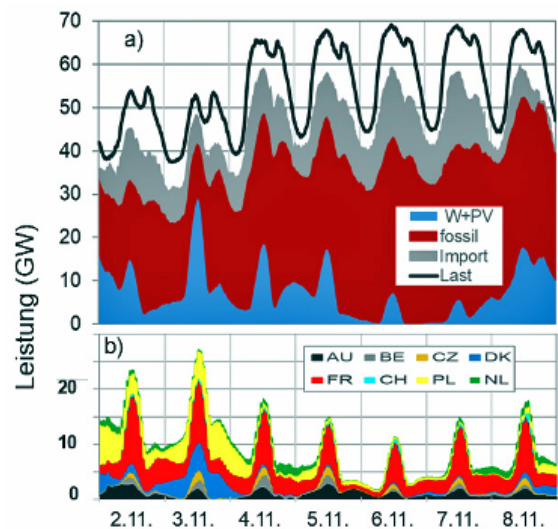


図3 この図には11月6日あたりではっきりした暗い風を示しています [縦軸は電力 (Leistung)] [11]. 図a)では、下から順に次の値が示されています：風力+太陽光による電力 (青), 化石燃料による発電電力 (茶色), 輸入電力 (青緑); また黒線は負荷曲線を示しています. 一方で図b)では次の値が示されています：ドイツの隣国 (インセット中の左上からオーストリア, ベルギー, チェコ, デンマーク; 左下からフランス, スイス, ポルトガル, オランダ; ただし、隣国でもルクセンブルグは除く) の風力と太陽光発電の電力.

バックアップ電力は最大負荷から水力とバイオマス発電を引いたもの、および9.5 GWの化石燃料燃焼発電も引いたものが必要になります。2030年に向けての総電力発生量の目標（第四次メルケル政府の655 TWhや「復活祭パッケージ」と呼ばれる計画[19]の750 TWh）に対しては最大負荷87-99 GWになりますが、電力輸入をしない場合には別の89 GWだけの確実な電源が必要です。

2.4 ドイツの短期的および長期的な電力容量予測

今後の電力容量を予測するとき、電力の必要量を短時間に供給できる「確実な電力容量」と、再生可能エネルギーによる短時間に大きく変動する「変動性電力容量」を分けて考える必要があります。前者は化石燃料燃焼発電や原子力発電など、従来から用いられてきた大部分の電源がそれに当たります。他方後者には負荷電力に足りない場合には不足分を補うためのバックアップ電力が不可欠です。

水素およびGWh級のバッテリーの貯蔵は、2030年までには必要量が確保できるとは考えられません。他方2045年については、貯蔵の役割が重要になると考えられます。

2.4.1 2030年の確実な電力容量

図4は過去の電力負荷の最大値（ピンク線）と2030年までの予測値（点線）を示しています。確実な電力容量のうち褐炭と石炭はドイツ国内法により2030年までにそれぞれ8および9 GWに減らすように決められています。天然ガス燃焼発電所の拡大には、そのための法的な規制がないので実現に疑問があります（国会での査問[20]では2030年までに天然ガス燃焼発電所の目標を36.62 GWとしていますが、これはほぼ現状レベルです）。もし計画されている天然ガス燃焼発電所が2030年までにどれも運転に入っていないければ、確実な電力約65 GWの供給が不足します。

近年、ドイツの最大負荷は81.6 GW（2021年12月30日）から73.8 GW（2023年12月4日）の間にあります。それは太陽光発電の寄与がほとんどない冬季の夕刻に起こります。これを2030年に外挿して109 GWという図4の目標値

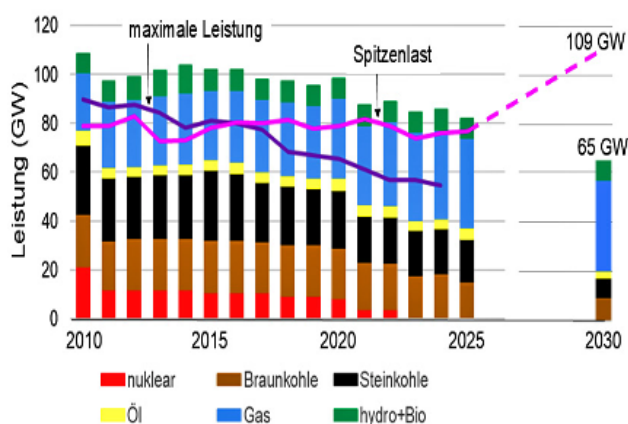


図4 棒線グラフは2025年までの確実な電力容量 [下から原子力発電 (2023年に閉鎖), 化石燃料 (下から順に褐炭, 石炭, 石油, 天然ガス) 燃焼発電, バイオマスプラス水力] を示し, その後の2030年までは予測を示しています[11]. ピンク曲線は最大負荷 (Spitzenlast) を示しています. 紫色曲線はここで考えている制御可能な発電所の年間の最大容量 (maximale Leistung) を示しています.

が得られます。2023年12月4日には、再生可能エネルギーは負荷の40%を負担していました。もし暗い風が起これば電力供給不足になります—その不足分は、シナリオによって22 GW（「第四次メルケル政府」によるシナリオ）から34 GW（前述の「復活祭パッケージ」シナリオ）になります。それに加えて、もし石炭火力発電が2030年までに完全に閉鎖されれば、確実な電力容量はさらに17 GWだけ減ります。しかしながら、実際の電力供給事情はもっと厳しい状況にあります：すなわち、バックアップ電力の最大容量は設置容量以下になります（図4の紫色参照）が、その理由の一部はすべてのプラントがいつも最大容量で運転できるわけではないからです（典型的な不良率は10%です）。

2030年でのシナリオ次第によっては44 GWにもものぼる不足分は輸入によってはカバーできません。更に文献[21]によれば、不足分は57 GWにも達するとしています。エネルギー転換モニターに関する専門委員会は、2025年3月の報告で次のように警告しています[22]：“上述の制御できる電源容量の減少は、確実な供給にとって大きな課題になるでしょう”。

2.4.2 2045年の貯蔵作業について

図2d)の右列から、2045年の夏季の典型的な日夜の電力生成と消費および余剰電力生成のプロファイルが読み取れます。ここでは太陽光発電の余剰電力を日中に貯めて、それを夜間の電力網に供給する短期貯蔵の理想的な場合を考えています。ここでワグナー氏は基準として、2種の貯蔵を考えています：(1)短期貯蔵—たとえば、効率 $\eta = 85\%$ と仮定したバッテリー貯蔵；(2)長期貯蔵—余剰電力を水素に変換 ($\eta = 70\%$) し、続いて必要な時に電力に変換 ($\eta = 50\%$)。

ワグナー氏は貯蔵の解析について、仮定した再生可能エネルギー生成と負荷プロファイルについてのモデル計算を行っています。しかし今後20年間で大きく変化すると考えられる電力供給や利用事情には不確定因子が大きいため、ここではこれ以上は触れないことにします。

2.5 電力の販売価格

電力の販売価格には一般の関心が高く、ネット情報などには「ドイツの電力価格は他のヨーロッパ諸国の約2倍、それが同国の産業競争力を弱めている」などと喧伝されています[23]。その実情を見てみましょう。電力価格高騰の原因の一部にはコロナ禍やウクライナ戦争のような外部危機によっています。たとえば、2022年にはドイツでの最大販売価格は800ユーロ/MWh以上にもなりました。2024年には平均値が78.5ユーロ/MWhでしたが、これでも2019年の上記危機以前のレベル38ユーロ/MWhよりかなり高いです。これら外部要因に加えて天候がますます重要性を増していますが、これが本稿で関心を払うところ

です。以前は、たとえば夜間には価格が安くなるような設定による「電力需要」が価格を決めていたのですが、今は「電力供給量」が価格を決めるようになってきました。すなわち、再生可能エネルギーが拡大したことで価格変動が大きくなり、電力供給と消費の間、ないし揚水電力貯蔵の販売価格

への影響がますます大きくなってきています。たとえば、2024年には貯蔵電力価格は43ユーロ/MWhでしたが、その放出電力は114ユーロ/MWhにもなりました。電力売買もこの流れを反映していて、2024年には41 TWhの電力量は平均価格が102ユーロ/MWhで輸入され、他方12 TWhが32ユーロ/MWhで輸出されました。比較のために示せば、2017年には平均輸入価格は38ユーロ/MWh、輸出価格は34ユーロ/MWhでした。ところが2024年には、電力発生量の約5%を電力網に乗せて輸出するのに負の代金を払わせられました。この傾向は2025年にも続いており、電力価格が0以下（すなわち、電力を輸出するのに支払いが必要！）の時間は2024年に比べて60%も上昇しました。以下に具体例を数値によって示します。

図5は2024年7月15日の電気料金の変化を、その料金に影響を及ぼす因子との関係で示しています。その価格変動は太陽光発電による供給に依存するところが大きいのです。すなわち、夏季の太陽光発電出力が増えると価格は下がります。日中には値段が負になりますが、その時点では太陽光発電は望ましからざる、損失を生むものになっているのです。夕方にはまた価格が上がり始めて午後8時ごろに第二の最大値になって、その後下がって夜間レベル価格になります。これにより、図5に示す次の4つの価格帯に分けられることがわかります：Ⅰ－価格変動が穏やかな夜間価格帯、Ⅱ－朝の高価格帯、Ⅲ－大きな太陽光発電出力によって生じる低価格帯、Ⅳ－夕刻の高価格帯。

この図のように、低価格帯Ⅲでは揚水発電設備に水を貯めると同時に電力輸出もなされています。ここでは太陽光発電の供給がなされるにも拘わらず化石燃料燃焼発電も続けられますが、その理由の一部は多くの発電設備は技術的な理由によって簡単にオンオフすることができないからで、太陽光発電の供給が止まったときにその化石燃料燃焼発電の出力をまた大きく上げる必要もあるからです。化石燃料燃焼発電の割合は図5のⅡとⅣの価格高騰時に特に大きくなって、高価な負荷駆動電力として価格高騰につながります。また図5のように、電力は朝、夕刻、夜に連続し

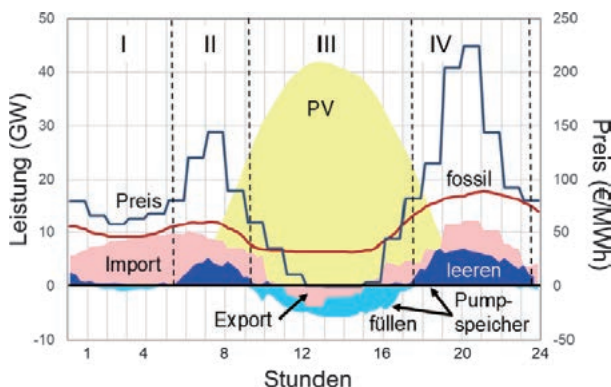


図5 2024年7月15日の電気料金 (Preis, 図中の青線, 右縦軸) に関する諸因子への依存性を示しており、左縦軸は電力 (Leistung, 図中の赤線)。Ⅰ～Ⅳの4つの価格帯が認められます [11]。この図中の他の諸因子は、電力輸出入 (Export と Import はオレンジ色部)、太陽光発電出力 (PV, 黄色部)、揚水発電 (Pump-speicher) の充填時 (füllen, コバルトブルー部) と放出時 (leeren, 青部) です。

て輸入されていますが、それは夏季で太陽光発電の供給があるのにも関わらず起こります。この傾向は日ごとだけでなく年間を通じて行った平均としても価格のピークが朝と夕刻に起こっており、ほぼ一定の輸入量（ただし日中を除く）、および決まったように揚水発電の作動が起こっています。

図6は電力料金の日々の4つの領域について一年にわたる結果を示しています。Ⅲ領域 (図6では赤線で示した「日中」) は日々の太陽光発電料金の最大値の10%に達した「朝」に始まり、「夕刻」になってこのレベル以下になった時に終わるとして示しています—したがって、その長さは季節的に変わる一日の長さを示すこととなります。領域Ⅲについてはデータ点を繋いだ曲線と同時に、各時刻における価格も示していますが、それらは大きく変動しており負の値をとることもあります。特に夏季ではそうになっています。一年の終わりの12月末には、日中と夕方の価格は一致していますが、夏季にはそれらの差は80ユーロ/MWhにも達しています。

2.6 ドイツの再生可能エネルギーについての検討とまとめ

風力と太陽光発電出力が時間的に変動するため、2種の異なる電力供給技術が必要になります。すなわち、発生電力に過不足が生じがちな安価な再生可能エネルギー源と、需要に対応できる高価な電力源です。また、需要に対応するために輸入する電力と、余剰電力が発生したときに輸出する電力の間には大きな価格差があります。

ドイツの前政府は図2に示すように2030年までに総電力発生量750 TWhを目標にしていました。年間電力発生量は最近になってかなり減少しています (図1の青線) が、それにしても僅か6年以内に再生可能エネルギーによる年間電力量600 TWhを発生しなければなりません。そのために必要な拡大率は、既存の太陽光発電について大略2倍に、洋上風力発電は7倍以上を目指す必要があります。これは特に陸上および洋上風力について最近達成されたことがないものです。したがって、2030年の目標は達成できないように思われ、そのことは分野間の繋がり目標にも影響

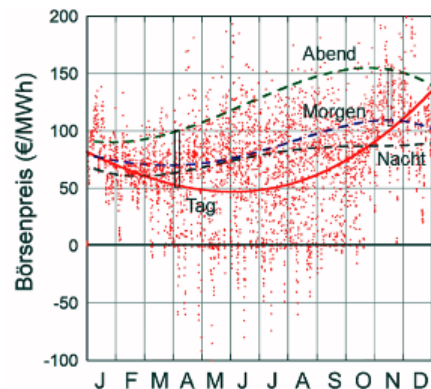


図6 前図5で定義した4つの価格帯Ⅰ～Ⅳ内の2024年の取引所価格 (縦軸 Börsenpreis) 「日中 (Tag)」の価格帯について、個々のデータ (赤点) とともに多項式のフィット曲線 (第4次多項式; 赤線) も示し、他の価格帯 (Abend 夕刻, Morgen 朝, Nacht 夜間) については見やすくするためにデータ点を繋いだフィット曲線だけを示しています。横軸は左から順に1月 (J), 2月 (F) ……、12月 (D) [11]。

します。すなわち、そのような努力は電力網の拡大と同期しないことには無意味なものです。連邦検査庁は7年間の遅れを予想しています[24]。このような遅れは高価なボトルネック効果につながるでしょう。2024年には電力量9.4 TWhがそのようにして使われなくなって電力運転者が補償をせざるを得なくなり（太陽光発電量1.4 TWhを含みます）、その補償費は1年以内に倍増しました。その今後の電力網拡大について地下配電網か架空線が良いかとかの議論をしていたり、最大配電会社がそのドイツの投資会社に売却しようとしていることも併せて考えると、見通しは楽観視できないようです。

さらにまた、最近の暗い風の解析からわかったように、2030年における電力量の供給不足の恐れがあります。ヨーロッパの電力網から120 – 200 TWhのバックアップ電力を得ることは期待できませんし、100-110 GWの最大需要は残りの確実な電力容量65 GWを上回っています。他方、国の水素製造は2030年には何らかの役割を果たしそうもありません。その結果、電力は2030年には不足する高価な資源になり、そのことは通信分野、AI、大型コンピューター、およびスマートシステムにおける現代技術の発展に非常に重大な結果をもたらす恐れがあります。また、供給の安全性を維持するために古い石炭火力発電を使い続けざるを得ないことから、炭酸ガスの削減目標も達成できないでしょう。ドイツは今ではヨーロッパの人口が多い国の中ではポーランドとチェコに次いで3番目に1人当たりの炭酸ガスの放出量が多い国になっています（あとで示す図8参照）。2000年にはドイツは5位だったのですが、その後の環境問題への全力での取り組みにもかかわらず位置を悪化させていますが、これは施策の選び方が間違えていたことを示唆しています。

図7は図の右に示されたヨーロッパ各国を中心とした国々の全電力消費量 E_{tot} 当たりの炭酸ガス排出量の1975年以降の変化を示しています。ドイツはヨーロッパの中では電力を大部分低品質の石炭火力発電によっているポーランドに次いで大きな値を示しています。図7の他のヨーロッパ各国の事情は次の通りです：フランスは1970年代から原子力発電に注力し、2024年現在電力の約71%が原子力によっています；デンマークは陸上および洋上風力を中心とする再生可能エネルギーの比率が高いと同時に、ノルウェーなど他のスカンジナビア諸国の水力を中心とするバックアップ電力と緊密な電力網を介して組み合わせた柔軟な運用で再生可能エネルギーの最大の問題を回避できています；英国は洋上風力を中心とする再生可能エネルギーについてドイツとほぼ同等ですが、加えて原子力発電にも注力してきました。

2045年の電力需要量ははっきりしませんが、ドイツ前政府は風力と太陽光発電について明確で法制上の規約に縛られた拡大目標を設定しました（もっとも、現在運転中の設備はそのころにはもう動いてないでしょうが）。ドイツのもっと野心的な電力消費目標はすぐにヨーロッパの供給能力を超えてしまいます。したがって、唯一の解決策は水素またはそれから得られる物質を多量に輸入して、それ

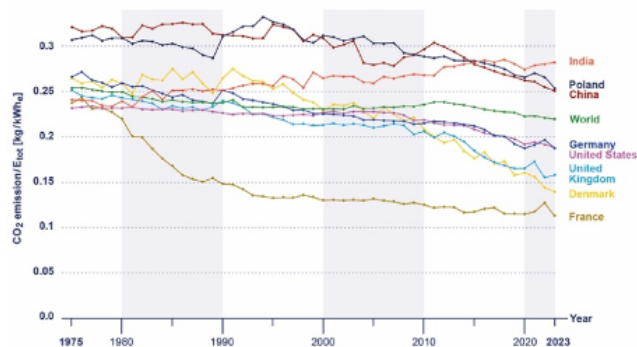


図7 2023年の全電力消費量 E_{tot} 当たりの炭酸ガス排出量[25]。右側の国名は下からフランス、デンマーク、英国、ドイツ、世界平均、中国、ポーランド、インド。

を各場所で電力にすることです。この場合の決め手になるのは各輸出国の電気分解装置の数量より、輸入と輸送および貯蔵のインフラ設備になるでしょう。現存するガス貯蔵能力233 TWhの中で32 TWhだけが水素に使用できるだけです—2045年にもこのうちで25 TWhが利用できるでしょう[21]。したがって、貯蔵設備の大規模な拡大が必要ですが、大部分は輸入水素に用いるものです。しかしながら、その水素が必要な量だけ世界中で調達できるかどうかは分かりません。そのような供給国になる可能性がある国はかなり大きな風力と太陽光発電設備を導入する必要がありますが、その拡大の程度は現状のドイツ程度の大きなものでしょう。そのような設備を設けるのに障害になるのは、各国にインフラがないこと、輸出国になるための信用度の問題、その国の天然ガス製造との競合、それに何よりその国の経済発展のための電力の必要性への対応が問題です。ワグナー氏の意見では、2050年のグローバルな気候問題の視点からは他のそれぞれの国が自分の国の水素供給拡大を図るべきで、その立場からドイツが大量に輸入できないとしています。

気候状況が電力販売価格に大きく関係し、一日を通じての高い変動率を示します（図5参照）。そこでは太陽光発電の供給量が日々の電力価格の変動に大きな影響を及ぼします：すなわち、電力販売価格には4つの価格帯があり、朝および特に夕方には高価になります—そうすると、供給可能な電力に代わって電力需要によって販売価格が決まることとなります。太陽光発電の供給が安価であるため、多くの活動を日中の特に夏季に移動させ、また可能なら電気自動車の充電を仕事に行うことで、状況が許す限り高価な朝や夕刻が避けるようにすることになるでしょう。電力販売価格が高いと投資活動が不活発になり、また価格変動が大きいと経済予測が難しくなります。このような動きは需要側管理（DMS）や負荷を削減するような戦略にも影響を及ぼします。価格の不確定性が高いと、すでに動向調査で明らかになったように多くのDMS利用可能者へのためらいを生じさせます。需要対応の一つの形態として、すべての経済活動に週末を含める可能性があります。

図8はヨーロッパ各国のエネルギー消費状況と、その際のCO₂排出量について興味深い内容を示しています[26]。すなわちこの図から、ドイツとフランスはほぼ同じエネルギー

ギー消費量なのにドイツのCO₂排出量が大きくてその分布が広いこと（ドイツの風力と太陽光発電、およびバックアップ電源の化石燃料燃焼による）や、ポーランドのエネルギー消費は小さいのにCO₂排出量が際立って大きいのは大部分のエネルギー源が低品位化石燃料によるためです。その他、スカンジナビア諸国（ノルウェーやスウェーデンなどは人口が多くないためエネルギー消費量が小さくて、水力も含めた再生可能エネルギーと原子力によるCO₂排出量が小さいので、縦横軸とも原点に近いところに分布しています。

さて、電力供給を安価な源から電力需要によって決まる高価なものに日々スイッチすることにより、負荷の時間的プロファイルを大きく変化させることになるでしょう。加えて、電気自動車などの電氣的輸送法や電氣的加熱法の大規模な導入により新しい最大負荷が発生する時間が現れるでしょう。それによって、これまでの電力モデル計算の基礎が変わることになります。したがって、本解説に引用した図は正確な予測を示すとは考えられません。ここで主目的としたのは、天候によって決まる電力供給の諸因子への依存性や限界を浮き上がらせることでした。

電氣的エネルギーの安定した供給は、経済と社会にとって必要不可欠であり続けると考えられます。大袈裟な、あるいはイデオロギーに影響されたような提案は有効な政治的決断をしようとする努力を台無しにし、最終的にはドイツの企業活動を危うくします。今後必要なことは、現実的で現下の問題に向けての文献[21]にあるような解析、またはエネルギー転換のモニタリングに関する専門家委員会報告のような公式的書類に依拠するのが良いと考えられます。

エネルギー転換に関して正しく評価すれば、他の急を要する事項へも関心を向ける必要性があることが浮かび上がります。それらは、具体的には気候変動の農業や森林業、食料保障、水供給、健康問題、都市開発などへの対応策、並びにその経済性などです。

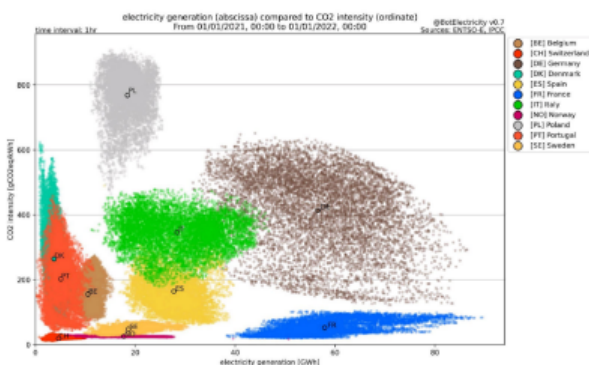


図8 ヨーロッパ各国の1時間毎のエネルギー消費状況（横軸：GWh）とその際の炭酸ガス排出量（縦軸：kWh当たりの炭酸ガス排出量）。色分けされた国々は右欄外の上から順にベルギー BE（茶）、スイス CH（赤）、ドイツ DE（濃い茶）、デンマーク DK（緑）、スペイン ES（黄）、フランス FR（青）、イタリア IT（薄緑）、ノルウェー NO（濃い赤）、ポーランド PL（灰色）、ポルトガル PT（薄茶）、スウェーデン SE（濃い茶）を示しています。

3. 以上のドイツのエネルギー問題から日本への教訓

本稿の本趣である「再生可能エネルギーの大量導入」について、私たちはレターを最近英字誌に投稿し出版されました[27]。それは言わば「ゼロ次元近似」とでも称するので、エネルギー発生もその消費も集中した一点で行われるとしています。また、エネルギー貯蔵には水素を介するのが最適としています。再生可能エネルギーから水素へ、水素から他のエネルギーへも仮定した変換効率で変化するとしたゼロ次元近似です。この単純化の下でも、再生可能エネルギーだけで現代社会の巨大なエネルギー消費を支えるのはなかなか難しいというのが上記レターの結論でした。現実にはエネルギー発生源も消費対象も国内外に広く分布しており、それらを輸送し利用するにはさらに格段の困難が加わります。

この困難についての再生可能エネルギー導入の先進国ドイツの現状を述べるのが本稿の目的でした。その背景になる数値は、ドイツと日本は人口、国土面積、エネルギー消費量、電力消費量などについてほぼ1.5前後の因子の国です。ただ、ドイツは平坦で多くが内陸にある北国に対して日本は多くが山地であって周りが海洋で南北に長いという、今後の主力エネルギー源になるべき風力と太陽光発電の条件を異にします。

エネルギー問題についてドイツと日本での類似点として、再生可能エネルギーの風力と太陽光発電に必須のバックアップ電源として現状では主に化石燃料燃焼発電によっています。しかし、今後十数年で脱炭素を目指す必要があり、それを実現するための一つの代替エネルギー源としての原子力の日独事情については、本稿の最後に触れます。他の大きな可能性に水素利用がありますが、これについて日独とも大きな計画を示しています。まず日本政府は2017年に世界に先駆けて「水素基本戦略」を作成してグレー水素（化石燃料から得る：製造過程で炭酸ガスを放出）、ブルー水素（化石燃料を使って得るが放出される炭酸ガスは炭素捕獲貯蔵により大気中に排出しない）、グリーン水素（再生可能エネルギーを使って得る：クリーン）製造の年次計画を立てて実施しています[27]。その内容を2023年に改訂して、水素の製造・輸送・利用の各側面でも2050年までに国を挙げて実行するとしています[28]。しかしながら、最終段階でグリーン水素を得るのに必要な再生可能エネルギー量を得るのは困難だと思われています[27]。一方ドイツも2023年に「国家水素戦略」を策定して、2045年には温室効果ガスのゼロ排出を目指して水素の製造・輸送・利用の各側面で国を挙げて取り組む具体策を決めています[29]。それを実現するのに水素を他国から大量に輸入することにしていますが、これはワグナー氏の本稿2.6項で述べたこととは異なります。

エネルギー問題についてドイツと日本の異なる点には、前者ではヨーロッパ全域の緊密な送配電網で結ばれているのに対して、日本は島国で送配電網は国内だけで閉じていることがあります。従って、たとえばドイツの電力需給が逼迫すれば、原子力大国フランスとの電力の輸出入で対応

できますが、日本ではそれができません。しかも日本の地域電力会社間の送電網は細いため、地域電力会社内で対処する必要があります（たとえば、九州の夏季の豊富な太陽光発電出力を絞る「出力制御」をする必要性など）。この点では、ドイツの電力源が豊富な北部から大消費地が多い南部への南北送電網が不十分な様子に近いでしょう。ヨーロッパ全域での緊密な送配電網で結ばれていても、その中でヨーロッパの大国であるドイツの電力発生量および消費量が周辺諸国のそれに比して大きいことにより問題が生じます。たとえば、風力発電量が豊富なデンマークの需給バランスをノルウェーなどの水力発電をバックアップ電力とすることも、ドイツにはできません。

電気料金について、ドイツでは日本と同じように燃料価格や再生可能エネルギー賦課金などが反映されること以外に、**図5**や**図6**のように価格が日々刻々と変化させています。日本ではまだこのような変化はしていませんが、最近では需要と供給で価格を変えるのがJR列車料金やホテルなど宿泊施設でも一般化していることを思えば、電気料金も早晚そうなるでしょう。その際、ヨーロッパでは緊密な送配電網で結ばれているので、電力の過剰生産は**図5**や**図6**のような「マイナス価格で輸出」（すなわち、電力を輸出するのにお金を払う）がある程度はできますが、日本では今のところ「出力制御」するしかありません。それではせっかくの設備を休ませることになりますので、今後電力会社間の連携強化を行ってヨーロッパの送配電網に近づける方向の努力をすることが考えられます。また余剰電力を有効に利用する方策、たとえば水素製造設備の高効率化と大規模化が行えれば、電力の地産地消に近づけることができます。

本節の最初に述べた原子力発電についてごく簡単に触れます。2011.3.11の東日本大震災による原発事故後の対応は、日本とドイツでは大きく異なりました。日本では事故の厳しさをみて多くの人々がなるべく早い時間に完全廃止を望みつつ、当面のエネルギー供給への配慮から「可及的速やかに廃止」と決めました[30]。他方ドイツは、当時のメルケル首相の強いリーダーシップのもとで「2021年に廃止」と決めました（その後2回の延期を経て、2023年に廃止実施[31]）。

それから十数年経った現在、この両国とも上記決定を見直す機運にあります。それには、脱化石燃料の候補であった風力と太陽光発電という再生可能エネルギーの両エースには大規模なバックアップ電力、送配電網や電力貯蔵設備の整備が必要であることが明らかになったことがあります。日本では最近のエネルギー基本計画から「原子力の可及的速やかな廃止」の記述が消え、建て替えの可能性にも言及しています[28]。ドイツでは同様の法制化にはまだ至っていませんが、学会レベルではその方向での活発な検討が行われています[31]。

以上は主として原子力の安全性の視点からの経過ですが、原子力には他に「高レベル廃棄物の処理」という難物が控えています。この点で日本はNUMOを通じて、地下深くに長期保存する候補地の選定に当たっています[32]。

ドイツもほぼ同様な段階ですが、学会段階では核変換により無害化あるいは影響の低下を目指した研究が進んでいるようです[31]。

いずれにしても、2050年での脱炭素を目指したパリ協定[12]をにらんで当面を乗り切ることが目下の最大関心事で、そのための政策立案および実行がなされています。

本稿の準備の最終段階になって、本稿とほぼ同じ目的と趣旨で書かれた小野 透氏による解説があることに気づきました[33]。この小野氏の論稿はフランホファー機構（Fraunhofer Gesellschaft、学問の産業応用を目指したドイツの国立研究組織で、日本の「産業技術総合研究所」に近い）から出された報告書に載せられた図表を用いて、ドイツ全体のエネルギー問題を論じています。それに対して、本稿で主として引用したワグナー氏の論調は具体的な目前の問題の外挿で2050年に向けた脱炭素への展望を描こうとしています。すなわち、本稿と小野氏の論稿は相補的で、両者を比較検討することにより問題の所在がより明確になると考えられます。

謝 辞

本稿をまとめるに当たり、ドイツ在住の旧友2人にひとかたならぬお世話になりました。まずフリッツ・ワグナーさん（マックスプランク機構プラズマ物理学研究所元所長）とは、1980年代からプラズマについていろいろな意見交換をしてきました。2012年に文献[6]で同氏初のエネルギー問題についての論文が公表されたのに対して、私が長文の質問を出して丁寧な返事をもって以降、同氏が公表されようとするエネルギー関連論文を投稿前にあらかじめ送って意見を聞いてこられるのが常になりました。本報のベースになった文献[11]の原稿案も2025年4月にもらって私がマイナーな指摘を3点行った結果、印刷された論文では正されました。

もう一人のトニー・ドンネさん（2023年末までヨーロッパ核融合研究機構の元締めのプログラマネージャーを務めたオランダ人）とは1983年に九州大学で私たちが創始して、以降隔年に開催してきて2025年に第21回を開いた「レーザー応用プラズマ計測国際会議（Laser-Aided Plasma Diagnostics; LAPD）」の中心メンバーとして二人三脚でプロモートしてきました。また十数年前からは‘Weekly mail’と称してプラズマからエネルギー問題、果ては人生論にわたる意見交換をほぼ週一回行ってきました。本報についても同氏からいろいろの情報をもらってきましたが、特に**図8**は同氏から送られてきたものでした。

このようなことで本報はこのお二人との共同研究の結果であるとも言えるもので、ここに記して深くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyokiko/cop3/index.html>
- [2] <https://www.env.go.jp/earth/ipcc/7th/index.html>

- [3] D. Mackay, *Sustainable Energy – Without the Hot Air* (UIT Press, 2009).
- [4] 村岡克紀和訳: 持続可能なエネルギー (産業図書, 2010).
- [5] 村岡克紀: これからのエネルギー (産業図書, 2012).
- [6] F. Wagner, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik IPP Report (2012); *Eur. Phys. J. Phys.* 129, 20 (2014), DOI:10.1140/epjp/i2014-14020-8
- [7] https://www.ipp.mpg.de/5280411/05_22
- [8] F. Wagner, The use of intermittent sources for electricity production in Germany, Sweden, Europe, Lecture note at the workshop in Les Houches, 6-13 March (2016).
- [9] 村岡克紀, フリードリヒ・ワグナー, 山形幸彦, 原田達朗: 日本エネルギー学会誌 98, 9-16 (2019).
- [10] K. Muraoka, F. Wagner, Y. Yamagata, A.J.H. Donné, *EPJ Web of Conferences* (2016), doi:10.1088/1748-0221/11/01/C01082
- [11] F. Wagner, *Physik Journal* 24, 28-34 (2025).
- [12] <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement/>
- [13] [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2025/767230/EPPS_ATA\(2025\)767230_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2025/767230/EPPS_ATA(2025)767230_EN.pdf)
- [14] <https://world-nuclear.org/information-library/country.policy/countries-n/germany>
- [15] <https://www.dw.com/en/energiewende.transition-to-nuclear-power-sources/t-17351905>
- [16] <https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2025>
- [17] https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/verschiedenes/20241217_Dunkelflaute_im_November.html
- [18] Th. Linnemann and G. S. Vallana, *VGB PowerTech*, Issue 6/2017, pages 63-73, and *VGB PowerTech*, Issue 10/2018, pages 68-86.
- [19] <https://energiewende.bundeswirtschaftsministerium.de/EWD/Redaktion/EN/NEWSLETTER/2022/04/Meldung/topthema.html>
- [20] <https://dserver.bundestag.de/btd/20/054/2005400.pdf>
- [21] M. Löffler, Systemtechnische Grauzonen der Energiewende (System-related gray areas of the energy transition), *vgbe energy journal* 10, 2023, 63
- [22] https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/statusupdate-zum-stand-der-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- [23] https://ec.europa.eu/eurostat/web/products_eurostat_news/w/ddn-20251029-2
- [24] <https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/2024/energiewende/kurzmeldung.html>
- [25] Our World in Data_Research and data to make progress against the world's largest problems
- [26] https://www.reddit.com/r/belgium/comments/ry5inv/interesting_perspective/#lightbox
- [27] K. Muraoka, Y. Yamagata, R. Abe, <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-0406-8>
- [28] https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_01.pdf
- [29] https://www.bundeswiltshaftministerium.de/Redaktion/EN/Hydrogen/Dossiers/National_hydrogen_strategy.html
- [30] https://www.enecho.meti.go.jp/committee/commercial/basic_policy-subcommittee/mitoshi/pdf/request_01.pdf
- [31] S. Paul, *et al.*, eds. *Novel Nuclear Technologies*, TUM University Press – Towards a Greenhouse Gas-Free Basic Energy Supply -2025.
- [32] https://www.numo.or.jp/chisoushobun/survey_status/about.html
- [33] 小野 透: 『省エネ先進国』ドイツにおける電力需給の実態からの学び (国際環境経済研究所報告, 2025).