

ドイツにおけるエネルギー転換と気候政策の 政策分析：電力部門を中心に

陳 禮 俊

Abstract

Germany's energy transition (Energiewende) is a paradigm shift into a low-carbon and nuclear-free economy. As part of the European Union's climate neutralization drive, aiming to reduce greenhouse gases to net-zero by the middle of the century. Generous financial support for wind and solar power has boosted renewable energy to produce more electricity than fossil fuels for the first time in 2020. Germany's energy transition is not a policy shift after the Fukushima nuclear disaster, but a long-term process of policy making in response to public opinion and technological trends. Germany's energy transition is still underway and needs to be extended beyond the power supply. However, it may already be pushing more thoroughly through pricing and volume regulations, such as the European Emissions Trading Scheme (EU-ETS) and changes to the carbon tax, which provides incentives for changes to low-carbon technologies. This paper analyses Germany's energy transition and climate policy. The purpose of this paper is to clarify the actual conditions and issues of the reduction effects of greenhouse gas emissions, which are the main policy issues of the energy conversion policy that has been developed mainly on renewable energy for these 20 years.

Keywords: energy transition, renewable energy, Energiewende, greenhouse gases, EU-ETS

はじめに

ドイツのエネルギー転換（Energiewende）は、ドイツが低炭素で原子力エネルギーに依存しない経済に転換することである。欧州連合（EU）の気候中立化推進の一環として、気候に有害な温室効果ガスを世紀半ばまでに、ネットゼロ（net-zero）にすることを目指す。この政策は現在、原子力発電を段階的に廃止しながら、再生可能エネルギーの拡大をはるかに超えている。¹⁾

1) ドイツ語源の「Energiewende」は、文字通り「エネルギー転換」であり、原子力エネルギーに頼ることなく、気候にダメージを与える温室効果ガスを削減する取り組みである。

画期的な「パリ気候協定 (Paris Agreement)」では、世界中の国々が気候変動を抑制するために、排出削減を約束した。ドイツ政府は、EUと同様に、野心的な国際行動に対して、強い声を上げてきた。EUは、「グリーンディール (green deal)」政策プログラムで、エネルギー転換を推進している。2050年までに気候中立を目指している。多くの環境保護主義者は、先進国が成長を犠牲にすることなく、化石燃料を脱却できる証拠として、ドイツを挙げている。反対者は、ドイツの経験は、このような変革が需要家や産業に、高いコストで由来することを批判し、自主的に二酸化炭素 (CO₂) 排出量を削減しないと主張している。何年もの間、「Energiewende」は主に電力部門に焦点を当ててきた。²⁾ ドイツは2038年までに、石炭火力を段階的に廃止することを決めたが、新しい気候目標と高い炭素価格は、より早い段階で廃止を実現すること可能性が高い。

風力と太陽光発電に対する寛大な財政支援は、2020年に初めて、化石燃料よりも多くの電力を生産するために、再生可能エネルギーを押し上げた。天候に依存する分散型の小規模発電を電力システムに統合することは、電力網など、依然として大きな課題を抱えている。同時に、ドイツはエネルギー転換の範囲を拡大し、主要な気候法を持つ各部門の排出削減目標と、輸送および熱燃料の炭素価格を導入している。これは、ほぼ完全に再生可能エネルギーで産業、輸送、建物に電力を供給することを目指している。

ドイツのエネルギー転換は、福島原発事故後の政策転換ではなく、世論や技術動向に応える政策決定の長期的なプロセスである。この転換過程は、市民によって支持されているが、同時に多くの課題に直面している。エネルギー転換政策の開始に先立ち、ドイツは、再生可能エネルギー発展や原子力

2) ドイツのエネルギー転換は、温暖化効果ガス削減のための固定価格買取から始まり、後に市場プレミアムと入札制度に変わった。風力発電や太陽光発電などは、その時は高価すぎると考えられていた複数の技術のうち、外部性を考慮しなくても、石油、石炭火力、ガス火力、原子力を発電用に利用するよりも安価であることが判明した。ドイツの最低価格政策は競争的な方法で扉を開き、数多くの新規電気事業者を創出し、電力部門の市場参入者を増やした。これらの新規電気事業者が分散され、非同期的で天候に依存しているという事実は、論争と特定の課題を引き起こした。

発展などのエネルギー問題との相性から、住民運動、反原発運動、コミュニティ転換などの課題に克服しつつある。ドイツは、過去の環境紛争から、草の根からのアイデアの提示まで、多くの技術的・社会的イノベーションを展示し、福島原発事故後の政府の政策転換に弾み、再生可能エネルギーに裏付けた温室効果ガスの削減と生産への転換に社会全体を後押しした。これに対応して、政府は再生可能エネルギーを促進し、原子力発電を段階的に廃止する法律を可決した。一言で言えば、ドイツのエネルギー転換は、1990年代に始まり、2050年までの長期エネルギーと気候戦略であり、気候変動との闘い、原発事故の回避、エネルギー安全保障の改善、競争力と開発の確保などの政治的目標に結びついている (Agora Energiewende, 2015)。³⁾

ドイツのエネルギー転換はまだ進行中で、電力供給を超えて拡張する必要がある。すでに、欧州排出量取引制度 (European Emissions Trading Scheme ; EU ETS) や、低炭素技術の転換に対するインセンティブを提供する炭素税の改正など、価格と量の規制をより徹底的に進めている可能性がある。経済手段の支持者は、しばしば、価格を通じて、外部性を内部化するのに十分であると考え、その後、「市場の目に見えない手 (invisible hand of the market)」⁴⁾が、外部性が合理的な程度に消えるようにすべてを行う。

本稿は、ドイツのエネルギー転換と気候政策を検討する。その目的は、2000年に、再生可能エネルギーを中心に展開してきた「Energiewende」政策は、20年間を経過した現在、その主要政策課題である温暖化効果ガスの削減効果の実態と課題を明らかにしたい。本稿の論考は、ドイツのエネルギー転換と気候政策に関わる各関連機関の統計データ・報告書、および先行研究の二次資料に基づくものである。第1節では、欧州および国際的な文脈にお

3) 大気中の温室効果ガスの継続的な増加は、環境政策に従事する多くの人々にとって、懸念の原因である。ドイツのエネルギー転換は、新しい政策アプローチの模範的なモデルであり、再生可能エネルギー源による発電費用の大幅な削減を実現した。変動性と再生可能なエネルギーの低い限界価格のために、柔軟性、部門統合および市場の再編はエネルギー転換を論理的に補完し、輸送、熱および産業部門のエネルギー供給を変えた。再生可能なエネルギーの価格下落は、国内外のエネルギーシステムと貿易を変化させており、最終的には世界中の化石燃料の利用を減らすことができる。

けるエネルギー転換と気候政策を簡潔にまとめる。第2節では、ドイツのエネルギー転換と再生可能エネルギーについて考察する。第3節では、ドイツの温暖化効果ガスの削減について分析する。最後に、本稿の結論をまとめ、ドイツにおけるエネルギー転換と気候政策を評価し、今後の研究課題を提示することにした。

1. 欧州および国際的な文脈におけるエネルギー転換と気候政策

欧州連合(EU)は、2020年のエネルギー政策と気候目標を達成するために、根本的に軌道に乗っている。温室効果ガス削減に関しては、EU-ETSの対象となる部門とEUレベルの非ETS部門の両方が、それぞれ21%と10%低い排出量の目標をすでに上回っている。特に、ドイツは、EU加盟国別の2020年目標に基づくコミットメントを達成するために、非ETS部門の温室効果ガス排出量と一次、および最終エネルギー消費量の削減に取り組む必要がある。すべてのヨーロッパのためのクリーンエネルギー立法パッケージは、欧州のエネルギー枠組みを再構築する。また、国家エネルギーと気候政策に、戦略的に重要である。エネルギー効率と再生可能エネルギーに関するガイドラインを改訂したことで、EUはエネルギー効率(2030年には少なくとも32.5%)と再生可能エネルギー(2030年には少なくとも32%)の拡大に向けて、野心的な目標を設定した。初めて、熱、輸送部門における再生可能エネルギーの拡大に関する具体的な目標もEUレベルで適用されている。欧州の電力部門の法的枠組みや幅広い協力形態により、近隣諸国との電力取引や交流を強化し、供給の高い水準に貢献している(BMWi, 2021a)。

再生可能エネルギーの拡大やエネルギー効率の向上は、世界中で進んでおり、ドイツとの国際協力への関心は依然として高いままである。2020年9月17日に、欧州委員会(EC)はいわゆる「2030年の気候目標計画(The 2030 Climate Target Plan)」を公表した。その中で、1990年と比較して、EU-GHG削減目標を現在の40%削減から、2030年までに少なくとも55%削減に引き上げることを提案している。この目標は、2020年12月に欧州理事会で採

択され、EUによる「パリ協定 (Paris Agreement)」への新たな貢献として、気候変動枠組事務局に寄託された (EC, 2020)。

2020年6月に、ドイツ連邦政府は最終的な「国家エネルギー・気候計画 (National Energy and Climate Plan : NECP)」をEU委員会に提出した (BMW, 2020a)。この計画は、ドイツのエネルギー・気候政策を定め、特にドイツが、再生可能エネルギーとエネルギー効率のEU目標と2030年までに、温室効果ガス排出量の削減に、どのように貢献するかを強調している。また、2020年9月に、EUは加盟国のNECPsの集計評価を公表し、EUのエネルギー目標2030の達成に対するEU加盟国の貢献を評価した。したがって、加盟国は、2030年の再生可能エネルギーの拡大に向けたEU目標を達成するために、軌道に乗っている (EU目標：少なくとも32%；NECP評価：33.7%)。一方、2030年のエネルギー効率を高めるEU目標は、27のEPS (EU目標：少なくとも32.5%) で述べたように、まだ達成されていない (NECP評価：29.5%)。EUは、加盟国の計画に関する情報しか提供しないため、NECP進捗報告書の目標の実際の達成は依然としてモニタリングされ、待たされている。さらに、欧州委員会のエネルギー連合に関するコミュニケーションは、2020年10月14日に公表された。とりわけ、ECは、Covid-19パンデミック後の経済復興を視野に入れて、どのようなエネルギー政策と気候政策を実施すべきかについて、各EU加盟国に勧告した (BMW, 2021a)。

2019年12月に、EUが「グリーンディール (Green Deal)」を発表した。その後、ヨーロッパは2050年までに、「最初の気候中立大陸 (first climate neutral continent)」になる予定である。関連する構造変化は、特に影響を受ける地域や部門で、特に「ジャストランジション (Just Transition)」メカニズムである。2050年のEU温室効果ガス中立性目標は、欧州委員会が2020年3月に提案を提出した「欧州気候法」に盛り込まれた。

1.1 欧州のエネルギー・気候政策

EUは、GHG排出量を20%削減する目標 (1990年と比較して)、エネルギー

供給における再生可能エネルギーの共有、一次エネルギー消費量の20%削減（基準傾向と比較して）に既に近づいているか、一部の地域で早期に達成している。ただし、残りのギャップを埋める時間はほとんどない。特に、省エネに関しては、さらなる行動が必要である。

温室効果ガス削減のイメージは、ポジティブである。2018年の排出量は、EU経済の成長は続いているものの、前年比約2.1%減少した。環境エネルギー庁（European Environment Agency；EEA）の速報値によると、1990年より23%減少した（EEA, 2019）。これは、京都議定書の気候変動枠組条約に基づき、EUが合意した20%の目標を超えた。1990年以降に、排出量が増加した唯一の部門は輸送部門である。これは、EU全体のすべての温室効果ガス排出量の25%を占めている。

2018年には、EU全体で約18%となり、欧州のエネルギーシステムの脱炭素化に大きく貢献した。総最終エネルギー消費量における再生可能エネルギーのEU全体の割合は、もはや20%のマークからそれほど遠くない。23の加盟国の明らかな過半数は、再生可能エネルギー指令に基づく国家的指標目標を上回った。ドイツはまた、2017年と2018年の平均として、13.7%の総最終エネルギー消費量で、再生可能エネルギーの割合を提供する再生可能エネルギー指令からの指標目標を達成している。実際、ドイツは2018年に、16.5%を達成した（EUの方法論に基づく計算される）。ドイツは、2020年の最終エネルギー消費量に占める再生可能な割合は19.6%で、目標の18%を超えた（図1を参照して下さい）。

EU全体として、再生可能エネルギーの利用に関する2020年の部門10%目標を達成するためには、輸送部門にさらなる取り組みが必要である。2018年には、8%を超える割合が実現した。再生可能エネルギーは、2018年のEUの総電力消費量の約3分の1であり、その傾向は増加している。風力エネルギーは現在、これに最大の貢献をしている。

エネルギー効率の分野では、2015年以降に観測されているEUのエネルギー消費量の増加傾向は、2018年には続いていなかった。その背景は、2018

年の比較的暖かい冬と、加盟国による削減策である。全体として、EUの一次エネルギー消費量は、2017年と比較して、約0.7%減少した。2005年から2018年までの間に、ほぼ10%の減少であった。しかし、2018年のEU全体の一次エネルギー消費量64.97EJは、2020年の目標を約4.6%上回った(62.09 EJ未満)。この増加は、主に輸送(輸送活動の増加、SUVの市場割合の増加による燃費の低下)と産業(経済活動の増加)に起因する可能性がある。このような背景から、EUが2020年のエネルギー効率目標を達成するためには、さらなる努力が必要になる可能性がある。しかし、2020年のCovid-19パンデミックとそれに伴う消費削減は、まだ考慮に含まれていないことを念頭に置く必要がある(BMWi, 2020a)。

エネルギー需要を満たすために、EUは非EU諸国からの輸入に、58%以上依存している。エネルギー安全保障に関しては、EUは今後より協調的なアプローチが必要であると考えている。特に石油・ガスに依存が強い。例えば、純輸入は、2018年の原油・石油製品の内地総消費量(EU-28)の約87%、天然ガスの77%を占めた。石油とガスの(純)輸入のほとんどはロシアから由来した(それぞれ約40%)。

すべてのヨーロッパ人のための包括的なクリーンエネルギーの立法パッケージは、2019年に発効した。このパッケージは、欧州のエネルギー転換の基盤であり、2030年までに欧州のエネルギー枠組みを再構築する。重要な要素は、エネルギー連合のガバナンスシステム(エネルギー連合のガバナンスシステムに関するEU規制、いわゆるガバナンス規制)、新しいEU電力市場設計(電力市場指令、電力市場規制、ACER規制およびリスク備え規制)、および再生可能エネルギー効率と建物に関する指令の改訂である。連邦政府は現在、EUの要件を国内法に転換するために取り組んでいる。

温室効果ガスの排出を少なくとも55%削減する目標(1990年と比較)は、2020年12月に、欧州理事会によって採択された。欧州委員会の提案に沿った「気候目標計画」である。再生可能エネルギーの総最終エネルギー消費量は、少なくとも32%の割合で、これは自発的な国家目標提出によって達成され

る。改訂された「再生可能エネルギー指令 (Renewable Energy Directive ; RED II)」は、様々な分野における再生可能エネルギーの割合を拡大するための措置も提供する (EC, 2019)。

1.2 国際エネルギー政策と気候変動

2015年に、世界のCO₂排出量の短期的な減少後、排出量は2016年以来再び増加し、2019年には380億トンを超える過去最高水準に達した。中国は依然として、最大の排出国であり、世界の排出量のほぼ3分の1を占めている。その次、米国が中国の排出量の半分弱、世界シェアが10%以下のEUが続く。中国が世界の排出量に与える影響は、これに応じて大きく、2015年と2016年の小さな増加は、中国の排出量がほとんど増加していなかったという事実によるものであった。しかし、この発展は、主に石炭火力発電の拡大により、翌年に続かなかった。2018年の世界的な成長傾向は、総排出量の最大の割合を占めるエネルギー関連のCO₂排出量で続き、具体的には、国際エネルギー機関 (International Energy Agency ; IEA) は、約2%の増加を見込んでいた。この増加は主に中国、インド、米国によるもので、EUの排出量は世界的な傾向に反して減少した (IEA, 2019)。しかし、IEA (2020a) によると、2019年の排出量はほぼ一定のままである。

全体として、世界的なエネルギー転換は、エネルギー供給の低下に向けて進んでいるが、ペースが不十分で地域的な違いがあった。例えば、「REN21 グローバル・ステータス・レポート (Renewable 2020 Global Status Report)」によると、再生可能エネルギー (大規模水力発電を除く) への投資は、2018年に減少した後、2019年には約3,020億ドルに、約2%増加した。大規模な水力発電を含め、約3,170億米ドルであった (REN21, 2020)。この増加の主な理由は、特に世界の再生可能エネルギー投資の大部分を占める中国の投資減少が、米国や米州の他の国々の大幅な増加によって、世界の他の地域で過剰に補償されているからである。風力エネルギーと太陽光エネルギーは、この投資の大半を占めた。世界の多くの地域 (中国、EU、インド、米国を含

む)では、従来の石炭火力発電所の操業を続けるよりも、新しい風力発電所や太陽光発電プラントに投資する方が安くなっている。

IRENA (2020a)によると、2019年に、176GWの再生可能エネルギー電源設備容量が新たに設置された。その結果、2019年末には、約2,533GWの再生可能エネルギー電源設備容量（大型水力を含む）が利用可能になった。これは前年に比べて、約7.5%の増加である。新たに設置した電源設備容量の70%を占める再生可能エネルギーは、化石燃料と原子力を合わせた電源設備容量を5年連続で上回っている。2019年も地理的に均等に分配される投資の傾向が続いていた。

石炭火力発電の排出量が増加しているにもかかわらず、世界的な石炭火力の段階的廃止は勢いを増している。「世界エネルギー見通し2020 (World Energy Outlook 2020)」では、IEA (2020a)は、石炭のピーク利用量に既に達していると予測している。COVID-19パンデミックは、石炭火力発電の市場状況を世界的に困難にしている。2019年に、ドイツは125GW以上の再生可能エネルギーを設置した欧州のリーダーであった。これは、EU全体の設置設備容量の約25%弱を占めた (REN21, 2020)。

2018年には、世界の一次エネルギー消費量のほぼ7分の1が再生可能エネルギー源でカバーされた。最終エネルギー消費量では、シェアは約17%であったか、従来のバイオマスがなければ10%であった。一方、風力および太陽エネルギーに関する急速に成長している現代の再生可能エネルギーは、世界的にわずかに減少している従来のバイオマスよりも大きな重量を持っている (REN21, 2019 ; REN21, 2020)。

エネルギー効率に関しては、国際環境の中で若干の進歩が見られた。IEA (2020a)によると、2019年の一次エネルギー強度は、前年比約2%減少した。2018年と2019年のエネルギー効率投資は、全世界で約2,500億米ドルであったが、前年の水準とほとんど変わっていなかった。欧州は、中国に先駆けて、エネルギー効率投資の最大の割合を占めた。エネルギー効率の進歩にもかかわらず、2018年の世界の一次エネルギー需要は前年に比べて、約2.4%

増加した。これは主に世界経済の成長によるものであった。しかし、その翌年の経済発展が大きく減速する中、IEA (2020b) は、2019年の一次エネルギー需要の増加は2018年に比べて減速し、0.7%程度になると予想している。

2016年11月に発効したパリ協定は、世界的なエネルギー転換のための広範な枠組みを定めている。主な目的は3つである。

- 地球温暖化を工業前の水準を 2°C 以下に抑え、 1.5°C の気温上昇を抑える努力をする。
- 気候変動の悪影響への適応性を高め、気候変動や低GHG開発への強靱性を促進する。
- GHG排出量の少ない、気候変動に強い開発とキャッシュフローを調整する。

この条約は現在、EUとドイツを含む気候変動枠組条約の197の締約国のうち、189カ国によって批准されている。この協定では、すべての締約国が、国の気候貢献 (INDC-国家的に決定された貢献) の発展と伝達にコミットしている。ドイツ連邦政府は、様々な措置で、世界中のINDCの迅速なプレゼンテーションと実施をサポートしている。

2018年10月に、 1.5°C 地球温暖化の影響に関する気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の特別報告書の公表は、気候変動に関する議論にさらなる刺激を与えた (IPCC, 2018)。この報告書は、地球温暖化の 1.5°C から 2°C の間の自然と人間に対するリスクが、以前に知られていたよりも高いことを示している。IPCCが 1.5°C の制限を考慮した削減経路には、2030年までに世界の CO_2 排出量を2010年比で約45%削減し、2050年までに「ネットゼロエミッション (net zero emission)」に達する可能性がある。 2°C 未満の制限では、2030年までに25%の CO_2 削減が必要であり、2070年までにネットゼロエミッションが増加する。現在の温暖化効果ガスの排出傾向では、2040年代 (2030年から2050年の間) に、 1.5°C の温暖化が達成されるだろう。IPCC

(2018)によると、2030年にこれまでに発表されたINDCの排出削減レベルは、地球温暖化を工業前の水準を大幅に下回る2℃を下回る限り十分ではない。UNEPによると、各国はパリ協定の1.5℃目標を超えないように、少なくとも5倍の野心を持たなければならない。そのためには、排出量は2020年から毎年7.6%削減する必要がある (UN, 2019)。

IRENAはまた、パリの気候協定の目的を達成するために、契約国の不十分な野心を指摘している。目標を達成するために、世界のエネルギー需要は増加しない見込みである (IRENA, 2020)。現在の計画に基づいて、2040年までに2000年に比べて、25%の大幅な増加が見られるだろう。

2019年9月に、ニューヨークで開催された国連事務総長の気候サミットでは、66カ国がパリの気候目標を達成する野心を高めると発表した。ドイツは、2050年までに温室効果ガスの中立性を長期的な目標として、努力する意向を確認した。現在、70カ国以上が2050年までに気候中立を目指している。2020年に、日韓は2050年までに、カーボンニュートラルを達成するという政治的目標を最後に宣言した。アメリカのバイデン大統領もこの目標に対する価値を約束した。中国は2060年までに、カーボンニュートラルになりたいと考えている。経済にも同様の取り組みがあり、例えば、2050年までに、大手国際企業を含む世界中から、87社がネットゼロエミッションの達成に取り組んでいる。

2020年12月12日のパリ協定5周年に国連、英国、イタリア、チリ、フランスが主催する「気候野心サミット (Climate Ambition Summit 2020)」では、グラスゴー気候会議までに、さらに45カ国がより高いINDCを発表し、さらに25カ国が2050年までに、ネットゼロエミッションを発表した。ドイツは既存のコミットメントを超えて、気候金融貢献を増やすことを約束している。EUは2050年までに、気候中立性の目標と両立する排出開発経路に着手するために、2030年までに1990年と比較して、少なくとも55%のGHG排出削減の更新INDCを発表した。日本も同様に「気候野心 (Climate Ambition)」を発表した。⁴⁾

2019年12月に、マドリッドで開催された第25回世界気候会議（COP25）では、パリ気候協定の実施に大きな進展はなかった（IPCC, 2019）。したがって、契約国は、GHG排出量を削減するために、国際市場メカニズムを利用する共通の規則に合意できなかった。このような市場メカニズムにより、各国は海外で気候保護プロジェクトを実施し、結果として、発生するCO₂貯蓄を自国の気候目標に対して相殺することができる。EU-INDCは、EU内で達成されなければならない。2020年に、パリ協定は、各国がINDCを改訂し、1.5℃目標に適応し、すべての国が気候中立性を視野に入れて、長期的な気候期間戦略を提出することを義務付けている。EUは、2050年までに気候中立になるための長期戦略を3月に国連気候枠組事務局に提出し、12月には少なくとも55%の温室効果ガス排出削減のINDCを更新した。第26回世界気候会議（COP26）は、長期的な気候目標に向けた進捗状況を評価することを目的として、2021年11月にグラスゴーで開催される予定である。

2018年12月にカトヴィツェ（Katowice）で開催された第24回世界気候会議に向けて、ドイツは、他の先進国の中でも、気候変動の影響に対してより多くの支援を与えると発表していた（BMW, 2019a）。例えば、2019年から15億ユーロという以前の2倍の予算が「グリーン気候基金（Green Climate Fund）」に支払われた。グリーン気候基金は、開発途上国や新興国が温室効果ガスの排出を削減し、気候変動の既に顕著な結果に適応するのを支援している。全体として、ドイツ連邦政府は、2018年の33億ユーロに対し、2020年までに国際気候金融を予算資源から40億ユーロ（開発ローンの予算および贈与相当額）に倍増した。EU全体として、地球規模の気候金融の40%以上を供給していた。2018年には210億ユーロ以上、2019年には約220億ユーロを超

4) 2020年12月12日に、パリ協定の採択から5周年を記念して行われた「気候野心サミット（Climate Ambition Summit 2020）」において、日本の菅総理がビデオメッセージによるスピーチを実施した。スピーチでは、温室効果ガス排出を2050年までに、実質ゼロにする方針と、それに沿った新たな2030年削減目標について、2021年11月に予定されているCOP26までに国連に提出する意向を表明した。その上で「脱炭素社会の実現のため、指導力を発揮していく」と決意を述べるとともに、2019年のCOP25で結成された「気候野心同盟（Climate Ambition Alliance）」への参加を表明した。

えた (BMW, 2019b)。

2. ドイツのエネルギー転換と再生可能エネルギー

2.1 再生可能エネルギーに関わる政策手段

ドイツのエネルギー転換において、「再生可能エネルギー法 (Erneuerbare Energien Gesetz ; EEG)」は、中心的な政策手段である。2000年の導入以来、法律は継続的に発展されている。2004年、2009年、2012年、EEG 2014、およびEEG 2017の改正である。EEG 2017は、2018年に「エネルギー収集法 (Energiesammelgesetz)」と、さらに2019年と2020年に改正された。EEGは、2020年12月に最後に包括的に改正された。EEG 2021は、ドイツの新年度の1番目の法律になり、2021年1月1日に発効された (BMW, 2021b)。

再生可能エネルギーの推進におけるパラダイムシフト (paradigm shift) は、政府が管理する固定価格買取 (Feed in Tariff ; FIT) から、EEG 2017で行われた競争的資金調達への転換であり、再生可能エネルギーの市場統合を進める上で重要なステップであった。陸上風力エネルギー、洋上風力エネルギー、大規模な太陽光発電システム、特に野外PVとバイオマスは、それ以来入札で競争しなければならなかった。最も費用対効果の高い入札のみが適用される。

「洋上風力エネルギー法 (Windenergie-auf-See-Gesetz ; WindSeeG)」は、2017年に必要な洋上グリッド接続 (Offshore-Netzanbindungen) に沿った政府指定、予備調査、地域の入札の中央システムを導入した (BWO, 2017)。2020年のWindSeeG改正は、2030年の拡張目標を15GWから20GWに引き上げ、2040年までに40GWの長期目標を決定し、目標を達成するために、必要な最大値や特定の実施期限などの一定の調整を行った。EEG 2017とWindSeeGの創設により、政治的に決定された資金調達レベルを持つ技術促進の段階は終わりに近づいている。水力発電、地熱エネルギー、中小型太陽光発電システムに対する固定価格買取 (Einspeisevergütungen) が依然として実施されている。このステップは、再生可能エネルギーの費用対効果の

高い拡大につながっている。このため、風力および太陽光発電プロジェクトの効果的な入札競争も重要な前提条件であった。陸上風力エネルギーの分野では、入札制度は2018年から適用されている。

市場プレミアムなどの「直接市場 (Direktvermarktung)」を通じた支援を受けて、強制的な直接市場が導入されて以来、再生可能エネルギーは市場にますます統合されつつある。システムの関連する技術接続は、システム統合の改善に並行して導く。さらに、オペレータはこれらのプラントに対して全責任を負う。

総電源設備容量に関連して、市場プレミアムのネットワーク事業者に報告された電源設備容量の割合は、2013年の43%から2019年には約65%に増加した。2019年末の直接市場の電源設備容量は、80GW弱 (2018年: 74GW) に過ぎなかった。再生可能エネルギーから直接販売される電力のポートフォリオは、約51GWで、風力エネルギーによって引き続き強く決定された。2019年末の太陽光発電の出力は約14GWで、報告されたバイオマスの生産量は約6.5GWで、陸上風力タービンの設備容量の94%、洋上市場での風力エネルギー100%、市場プレミアムを介した電力であった。この割合はバイオマスで約85%、太陽光が約29%であった。

2012年以降、支援対象電力などの直接市場の総電力量は着実に増加している。これは、直接市場義務の限度額が徐々に減少し、一方で既存の資産をこの処分形態に変更することに起因する可能性がある。さらに、新しく建設された風力発電所の大半と太陽光発電設備の割合の増加は、現在、これら2つの部門内で電力を販売している。数量は部門固有であり、2012年から2019年にかけて、177,000 GWhを超えている。これは、2019年にEEGで販売された電力全体の80% (約222,000 GWh) に相当した。市場プレミアムに対する財政支援は、2019年に163億ユーロ (2018年: 139億ユーロ) に達した。

2014年と2017年のEEG改正に続く風力エネルギーと太陽光発電の拡大に向けた競争入札の結果は、エネルギー転換の成功に向けた重要なステップとして改革を確認した。入札は、特に太陽光発電と洋上風力エネルギーの生産

コストの大幅な削減につながっている。

また、気候保護目標の達成に貢献するため、2019年から陸上および太陽光発電風力発電に対する特別入札も実施している。2019年から2021年の間に、陸上風力エネルギーと太陽光発電の合計4GWが入札に出される予定である。競争の高いレベルを達成するために、陸上風力タービンと太陽光発電の入札件数は、2019年の1GWから、2020年には1.4GW、2021年にはそれぞれ1.6GWに徐々に増加する。また、EEGでは、イノベーションコールの規制認可が調整される。2020年には、イノベーションコールの一環として、650MWが入札に出され、2021年には500MWが入札に出される予定である。イノベーションコールの量は、太陽光および陸上風力タービンの通常の入札量から差し引かれ、より多くの競争、より多くのグリッド、およびシステム効率のためのテストフィールドとして機能する。

2020年7月3日に、石炭火力の段階的廃止の過程で、連邦議会と連邦政府は、2030年までにドイツの電力消費量の65%を再生可能エネルギーが占めるべきだと判断した。評価年の2030年は、連邦政府の気候保護プログラムで合意されており、EEG 2017第1条第2項第1款の改正し、実施される。エネルギー転換(Energiewende)と気候保護政策(Klimaschutzpolitik)を成功させるための前提条件は、再生可能エネルギーのもう1つの効率的でグリッド同期的で、ますます市場志向の拡大である。ここで行われた改正は、再生可能エネルギー源法2021の包括的な改正、連邦要件計画法、および上記の要件に従って、再生可能エネルギー全体のさらなる拡大のための枠組みを形作ることを目的としたその他の法律を見越したものである。この65%目標を達成するための具体的な再生可能な道筋は、EEG 2021で定義された。しかし、EU委員会の立法案は現在利用できないので、拡大経路はまだ強化されたEU気候目標を考慮していない。開発経路は、EEG 2021の連立グループの決議を考慮して、2030年のより高いEU気候目標に照らして再開されなければならない。EEG賦課金(EEG-Umlage)の増加は排除されなければならない(BMWi, 2021a)。

2.2 再生エネルギー統計

ドイツにおける再生可能エネルギーの発展に関する統計データは、エネルギー転換を評価する上で重要な要素である。再生可能エネルギー統計ワーキンググループ（Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik；AGEE-Stat）は、これらのデータを提供し、再生可能エネルギーデータベースの継続的なさらなる発展に取り組んでいる（AGEE-Stat, 2021）。2020年には、ドイツの最終エネルギー消費量の19.6%が再生可能エネルギーで賄われた。ドイツは、再生可能エネルギーの促進に関するEU指令（2009/28/EC）に基づき、目標の18%を超えている。再生可能エネルギー源からは合計で、2,510億キロワット時（kWh）の電力が生産された。このエネルギー量のうち、約53%が電力部門、約38%が熱部門、約8%が輸送部門のバイオジェニック燃料で占めた（表1と図1を参照してください）。

全体として、バイオマス分野（固体燃料、バイオ燃料、バイオガスの形で）の多様な用途により、最終エネルギー供給における52%の割合は依然として、最も重要な再生可能エネルギー源である。風力エネルギーが2位に続き、28%の割合を占めている。近年、再生可能エネルギーの割合は、継続的に前向きに発展している。再生可能エネルギーの割合は、総電力消費量速報データによると、過去10年間で2倍以上に増加し、2020年には既に45.4%に達した。熱部門（15.2%）と輸送部門（7.3%）の割合は、数年間ゆっくりとしか発展し続かなかった（BMW, 2021c）。

ドイツの「エネルギー収集法（Energiesammelgesetz）」は、気候保護目標にさらなる貢献をするために、2019年から2021年にかけて、太陽光発電と風力エネルギーの特別入札を陸上風力に導入した。2020年8月に、「建築エネルギー法（Gebäudeenergiegesetz；GEG）」は、太陽光発電（PV）の52GW拡張上限を解除し、連邦州が風力タービンの最小距離を1,000m以下に設定する機会を許可した。同時に、「石炭火力廃止法（Kohleverstromungsbeendigungsgesetz；KVBG）」は、2030年までに、再生可能エネルギー源から生産される電力の総消費量を65%に引き上げた（BMW, 2021c）。2020年12

月に、「海洋風力エネルギー法（Windenergie-auf-See-Gesetz：WindSeeG）」は、2030年の拡張目標を15GWから20GWに引き上げ、2040年までに40GWの長期目標を採択した。2020年末に改正されたEEG 2021には、とりわけ、目標の65%を達成するための拡張経路と、ドイツで発電または消費されるすべての電力を、2050年までに温室効果ガス中立的な方法で生産する必要があるという長期的な目標が含まれている（表1を参照して下さい）。

表1 総最終エネルギー消費における再生可能エネルギーの割合（%）

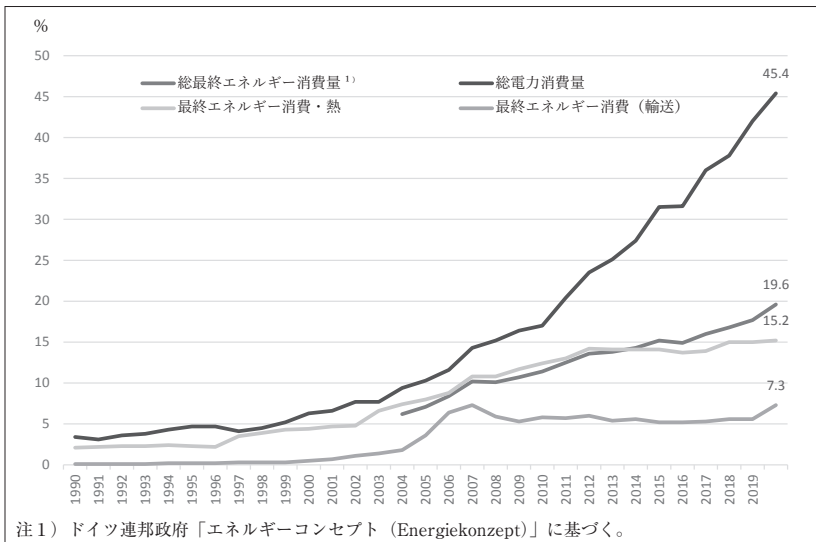
	2018	2019	2020	2030	2040	2050
再生可能エネルギー						
総最終エネルギー消費量の割合	16.8%	17.4%	19.6%	30%	45%	60%
総電力消費量の割合	37.8%	42.0%	45.4%	65%*		**
最終エネルギー消費熱の割合	14.8%	14.7%	15.2%			

注：*2030年の「気候保護プログラム」と「EEG-2021」に基づく目標を達成。今後数年間で再生可能エネルギーの効率的、グリッド同期化、ますます市場志向の拡大が前提条件である。

**EEG 2021は、2050年までにドイツで発電または消費される電力が、温室効果ガスに中立的な方法で生産されることを目標としている。

出典：AGEE-Stat (2021) より作成。

図1 ドイツのエネルギー構成における再生可能エネルギーの割合

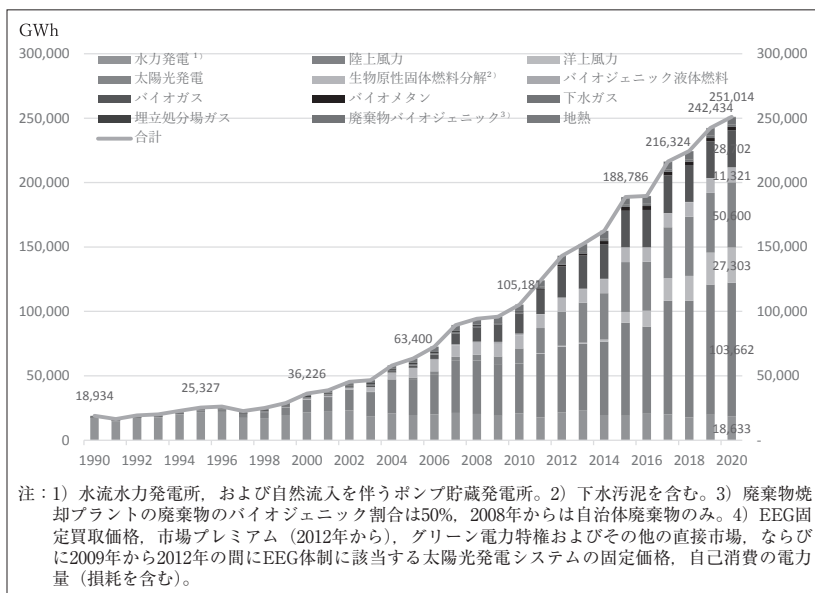


出典：BMWi (2021)「Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung」より作成。

2.3 再生可能エネルギーからの電力

電力部門の再生可能エネルギーの割合は、総電力消費量の42.0%（2019年）から45.4%（2020年）に上昇した。2020年には、再生可能エネルギー源から、約2,510億kWhの電力が生産された。これは、前年より約90億kWh増（+4%）であった。2020年には、再生可能エネルギーからの発電が、化石燃料（石炭、ガス、石油）からの発電量を初めて上回った。現在の増加は、主に良好な気候条件と太陽光エネルギーシステムの拡大が増加したためであった。特に2020年上半期には、平均以上の日射量と良好な風の状態が、風力および太陽光エネルギーシステムの両方で成長を寄与した（図2を参照してください）。

図2 ドイツの再生可能エネルギーからの総発電量



出典：AGEE-Stat（2021）より作成（一部速報値）。

2.3.1 風力エネルギー

約1,310億kWhの発電量を有する風力エネルギーは、再生可能エネルギーからの発電に最大の貢献をした（2019年：1,259億kWh）。2015年のフィードイン（feed-in）は、まだ806億kWhであった。それ以来、風力発電は60%以上増加している。陸上および洋上風力エネルギーの設備容量は、2020年にわずかに1,446メガワット（MW）増加した。これは、前年（2019年：2,000MW）に比べて、減少した。

2.3.2 太陽光エネルギー

太陽光エネルギー（PV）からの発電は、2019年と2020年の高い拡張と非常に良好な気候であった。2020年には、太陽光エネルギーシステムから、約506億kWhの電力が生産された。これは、2019年と比較して、約9%増の大幅な成長に相当する。2015年と比較して、すなわち過去5年間で、発電量の増加は31%であった。2015年の太陽光エネルギーシステムからの発電量は、約387億kWhであった。

2012年から2013年の間に急激に減少した後、新規太陽光エネルギー設備容量の拡大は、数年前から着実に増加している。2020年の太陽光エネルギーシステムの設備容量は4,801MWで、2019年（3,889MW）に比べて、ほぼ25%増加した。過去5年間で設置されたPV設備容量の合計は、39,224 MW（2015年）から53,848 MW（2020年）に、約37%増加した。

2.3.3 バイオマス

バイオマスとバイオジェニック廃棄物は、2020年に約506億kWhの電力を供給した。2019年（502億kWh）と比較すると、約1%増加した。バイオマスからの発電は、バイオガス（287億kWh）、固体バイオマス（113億kWh）、廃棄物のバイオジェニックシェア（57億kWh）であった。バイオマス発電は、この5年間で、同程度の水準となっている。

2020年の設備容量は、約4%増の10,385MWで、2015年と比較すると、設備容量の増加率は23%にもなる。しかし、近年のバイオマスプラントの設備容量の拡大は、発電の柔軟性を高める役割を果たしてきた。いわゆる「過

剩供給」は、2015年以降の年間発電量の増加にはほとんどつながっていないが、需要に合わせて再生可能電力を柔軟に供給できることを保証している（例えば、風力や太陽光エネルギーの低い時期）。

2.3.4 水力・地熱エネルギー

水力発電の発電量は186億kWhで、干ばつにより、前年（197億kWh）に比べて、再び大幅に減少した。天候に応じて、年間フィードインは長年にわたって、最大約200億kWhの比較的一定の値を達成している。水力発電の設備容量は近年わずかに変化し、2020年末には5,606MWに上った。地熱エネルギーによる発電量は、前年の約10%（2020年：0.2億kWh）を上回ったが、再生可能エネルギー発電に貢献し続けている。

2.4 再生可能エネルギーからの熱供給

近年、熱部門における再生可能エネルギーの発展は、あまりダイナミックではなかった。

再生可能エネルギーにおける最終エネルギー消費・熱の割合は、前年比0.2%上昇して、15.2%となった。再生可能な熱の絶対消費量は、前年比約1%減の1,799億kWhであったが、熱部門では化石燃料が少なくなった。

全体として、バイオマスの様々な形態が再生可能な熱供給を支配している。固体バイオマス、すなわち木材はさまざまな用途で、再生可能な熱の最大の割合を占めている。しかし、再生可能な熱全体における固体バイオマスの割合は、2000年の86%から2020年には65%に減少していた。2020年の最終エネルギー消費量は、固体バイオマスは1,167億kWhの貢献を果たした。液体バイオ燃料は31億kWh、気体バイオマスは192億kWh、バイオジェニック廃棄物はさらに147億kWhに貢献した。

バイオマスに加えて、太陽熱や地熱発電所でも再生可能な熱が発生する。太陽光エネルギーの割合は、2000年から2020年の間に再生可能熱全体の2～5%に増加した。2020年の太陽光エネルギーの寄与度は87億kWhであったが、太陽光が減少したため、2018年ピーク時（89億kWh）に比べて低くなっ

ていた。2020年には環境熱と地熱エネルギーによる熱の供給が一層重要となり、175億kWhで前年を大幅に上回った（9%以上）。合計で、再生可能熱の約10%は地熱エネルギーと環境熱から発生した。

2.5 輸送部門における再生可能エネルギー

輸送部門は、再生可能エネルギー源の割合が最も低い部門である。鉄道や道路輸送における再生可能エネルギーによる電力消費を含め、2020年のシェアは7.3%に上った。しかし、これは2019年と比較して、大幅に増加した。輸送部門におけるバイオ燃料の利用は、主に法定機関によって決定される。温室効果ガス2020年には4%から6%に増加し、バイオ燃料の販売が大幅に増加した。

2020年に、再生可能エネルギーは合計441億kWhが輸送部門で利用され、前年比約22%以上増加した。このうち、約54億kWhは再生可能エネルギー源（10%増）の電力に起因し、約388億kWhはバイオ燃料（24%増）に起因した。最も重要なバイオ燃料は298億kWh（35%増）のバイオディーゼルで、次いでバイオエタノールが81億kWh（3%減）であった。バイオメタン（0.9億kWh）と植物油（0.01億kWh）はバイオ燃料に比較的少ない貢献をしていた。

2019年の輸送部門の総電力消費量は約120億kWhで、そのうち、約54億kWhは再生可能エネルギー源から供給された。再生可能な電力の割合が高まっているにもかかわらず、輸送部門の総エネルギー消費量に1%未満を占めており、現在は鉄道輸送で95%以上利用されている。

2.6 再生可能エネルギー電源設備容量

新規陸上風力タービンの建設は、2018年以来大幅に減速している。解体されたプラント生産能力を考慮すると、2019年の純増は886MWで、前年に比べて、約61%減少した（2018年は2,273MW）。2017年から2019年までの年間総建設経路は、EEG 2017で定義され、年間2,800MWの年間総建設経路は、

2年間とも落ち込んだ。その理由は、計画法の下で新規分野の躊躇する指定とライセンス法の課題であった。一方、入札システムの導入時に、いわゆる「市民エネルギー企業」を優遇した結果、2017年の入札額はほぼ全てが、不作為管理承認を受けず、4.5年という長い実施期間を持つプロジェクトに授与された。

2018年には、総設備容量990MWの風力タービンが洋上で建設され、2019年には1,111MWの総設備容量が確保された。2019年末の洋上風力発電設備の総設備容量は、約7,507MWに達した。これはすでに2017年のEEGの2020年目標である6,500MWをはるかに上回っている。

太陽光発電は2019年に、46.4TWhに成長した（2018年：45.8 TWh）。2018年は2,888MW、2019年は3,857MWの大幅な増加により、EEG 2017の拡張回廊（Ausbaukorridor）を超えた。バイオマス、水力、地熱エネルギーは、2019年に約70.3 TWhの電力を生産した（2018年：69.0 TWh）。わずかな増加は、主に2018年の乾燥後の2019年の降雨量の増加によるもので、バイオマス発電は減少した。地熱エネルギーによる発電の重要性は0.2TWhで、低いままであった（表2を参照してください）。

3. ドイツの温暖化効果ガスの削減

過去10年間、ドイツの再生可能エネルギーの拡大はダイナミックであった。最終エネルギー総消費量（EU指令 2009/28/EC）に基づく、その割合は、2007年の10.0%から2020年には19.6%に上昇した（図1を参照してください）。

2018年に、ドイツの総電力消費量の再生可能エネルギーの割合が急激に増加した後、2019年の42.0%から2020年の45.4%に、約3.4%上昇した。2020年の熱部門の再生可能エネルギーの割合は15.2%に上昇し、2018年と2019年と同様の水準に達した。輸送部門では、前年に比べて1.7%の増加があり、2020年の割合は7.3%に達した（BMWi, 2021a；AGEE-Stat, 2021）。

ドイツ連邦環境庁によると、ドイツの総電力消費量における再生可能エ

表2 2018年および2019年の特別入札および実際の新規設置を含むEEG 2017拡張回廊
(2020年6月現在)

技術	EEG 2017第4条およびエネルギー回収法に基づき設置設備容量を増強する目標	年度別の新規設置（実績）	
		2018	2019
陸上風力発電	2020年から2,900MW（合計）、 2,800MW（ネット） プラス2019年の特別入札： +1,000MW 2020：+1,400MW	2,457MW（合計） 2,273MW（ネット）	963MW（合計） 886MW（ネット）
洋上風力発電	2020年までに合計6,500MW	990MW	1,111MW
太陽光発電	2019年の年間2,500MW（合計）+ 特別入札：+1,000MW 2020：+1,400MW	2,888MW（合計）	3,857MW（合計） 3,835MW（ネット）
バイオマス	年間最大150MW（合計）	43MW（合計）*	87MW（合計）*

注：*バイオマスからの設備容量の総増加は、主にEEG補償資格を有するバイオマスプラントの柔軟性に対する非発電の性能の変化により、2018年には428MW（ネット）、2019年には328MW（ネット）に相当する。

出典：AGEE-Stat（2020）より作成。

エネルギーの割合は、2025年までに40～45％に上昇すると予想されている（UBA, 2019）。2014年に「再生可能エネルギー源法（Erneuerbare-Energien-Gesetz；EEG）」の改正が行われた。その理由は、特に再生可能エネルギーのさらなる拡大を最適化し、良好な技術に集中し、特により良く資源を配分することによって、コストを削減することであった。さらに、再生可能エネルギーからの発電は、「直接市場（Direktvermarktung）」を通じて、市場に統合される必要がある（BMW, 2014a）。2017年1月1日のEEG改正以降、再生可能エネルギーからの電力に対する買取価格は、もはや以前のように政府によって決定されるのではなく、入札によって決定される。これは、現在の排出バランスの結果にまだ影響を与えない。

熱部門における再生可能エネルギーの割合は、近年、電力部門の再生可能エネルギーよりもゆっくりと成長している。技術はすでに成熟しつつあるが、まだ十分に市場に浸透していない。「熱部門における再生可能エネルギーの促進に関する法律（ErneuerbarenEnergien-Wärmegesetzes；

EEWärmeG, 2008)」の主な目標は、2020年までにドイツの熱消費量における再生可能エネルギーの割合を14%に引き上げることであった。⁵⁾ この法律は、新しい建物のすべての所有者に、再生可能エネルギーに比例して、熱エネルギー要件をカバーすることを義務付けている。EEWärmeGは、再生可能エネルギーの利用における建物所有者を財政的に支援するために、再生可能エネルギーの市場インセンティブプログラムを通じて、資金調達を提供している。

輸送部門では、再生可能エネルギー源からのエネルギー利用促進に関するEU指令（指令 2009/28/EC）は、2020年の輸送における最終エネルギー消費における再生可能エネルギーの10%の割合のすべての加盟国に拘束力のある目標を設定した。この中で、ドイツ連邦政府は、化石燃料の利用に比べて、温室効果ガスの排出量が6%削減される程度に、2020年までに、バイオ燃料の割合を増やすという目標を追求している（BMEL, BMU, 2009）。

具体的には、2009年7月21日に施行されたバイオ燃料の普及法改正法に基づき、2015年から「ネット（net）」気候保護貢献（脱炭素化）として、割合を設定している。したがって、温室効果ガスの排出量は、法律で定義された参照値と比較して、2015年から3.5%、2017年から4%、2020年から6%削減することが規定されている（Bundesregierung, 2014）。指令 2009/28/EC はまた、バイオ燃料および液体燃料の持続可能性基準を定義する。これらには、農地の持続可能な管理、自然生息地の保護、従来の燃料の利用と比較した温室効果ガス排出量の削減のための最低限の要件が含まれる。

ドイツの法律で、持続可能性基準を実施するために、「バイオ燃料の持続可能な生産に関する要件に関する条例（Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung Biokraft-NachV；Biokraft-NachV）」と「発電のための液体バイオマ

5) 熱部門における再生可能エネルギーの促進に関する法律（ErneuerbarenEnergien-Wärmegesetzes；EEWärmeG）は、2008年8月7日（連邦法官報 I p.1658）は、2015年10月20日に同法第9条で最後に改正された。2020年8月8日に（連邦法官報 I p.1728）の建物の省エネ法の統一およびその他の法律改正に関する法律第10条は、2020年11月1日に適用を中止し、「省エネルギー法」と「建物の熱のための再生可能エネルギーの使用法（Gebäudeenergiegesetz；GEG）」に置き換えられた。

スの持続可能な生産に関する要件に関する条例」(Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung BioSt-NachV ; BioSt-NachV) の2つの「サステナビリティ条例 (Nachhaltigkeitsverordnungen)」が発効されている。バイオ燃料生産の環境への影響に関する議論は、再生可能エネルギーの拡大は、選択された利用経路に応じて、マイナスの結果をもたらす可能性があることを例示している。望ましくない開発を良い時期に特定するためには、エネルギー源のライフサイクル全体にわたって、発生する環境影響の総合的なライフサイクル評価分析が不可欠である (WBGU, 2008)。

一方、大気汚染物質の環境関連排出量を見ると、より差別化された画像が浮かび上がる。ここでは、個々の汚染物質の排出削減は、他の汚染物質の増加によって相殺される。現在の純収支は、化石燃料の供給の代替によって、削減される温室効果ガスと大気汚染物質の排出量と、再生可能エネルギーの利用による排出の両方を考慮に入れている。

以下では、ドイツ連邦環境庁 (UBA, 2019) に基づき、2020年の再生可能エネルギーの方法、利用されるデータ出典、および排出バランスの結果を考察する。

3.1 方法論

ここでは、ドイツ連邦環境庁の温暖化効果ガス評価手法を簡潔に紹介する (UBA, 2019)。本稿は、再生可能エネルギーの利用によって、または対応する化石燃料の代替によって削減され、選択された温室効果ガスおよび大気汚染物質の排出を説明するものとする。

ドイツの温室効果ガス評価は、ライフサイクル分析の方法論的原則に基づいて、化石燃料またはバイオジェニック燃料の燃焼中の一次エネルギー源の変換の過程で引き起こされる直接排出と、いわゆる上流排出の変換プロセス外で発生する間接的な排出が考慮される (Klöpffer & Grahl, 2009)。これには、発電経路に直接関連する外部から供給される補助エネルギーからの排出も含まれる。その結果、再生可能エネルギーからのエネルギー供給の過程で

発生する排出量が、代替された排出量に対して相殺され、化石燃料エネルギー供給による排出を削減した正味バランスシートが示されている。

3.1.1 温室効果ガスと大気汚染物質

関連性が異なり、特にデータ状況の一部が不十分のため、排出バランスの焦点は、表3に示す温室効果ガスと大気汚染物質に焦点を当てている。

考慮される8つの汚染物質または汚染物質の合計は、気候変動と大気質に対する再生可能エネルギーの拡大の影響を確実に提示できる「環境指標のコアリスト」を表している。さらに、京都議定書、大気汚染防止に関するジュネーブ条約、EU指令および規制に関連して、気候変動枠組条約に基づく国内および国際的な削減目標とそれに対応する報告義務がある。

例えば、NH₃やフッ素化された温室効果ガスによる汚染物質の拡張や、粒子サイズに応じた粉塵排出量のさらなる分化（PM10, PM2.5）では、ライフサイクル評価データベースの大幅な改善が必要である。考えられる温室効果ガスと酸性化物質の違いは、地球温暖化や酸性化にさまざまな方法で貢献していると考えられている。個々のガスの効果を比較できるようにするために、それらは、参考物質二酸化炭素（CO₂）または酸性化ポテンシャルに基づく「温室効果ガスの相対的なポテンシャル（Treibhausgaspotenzia；THP）」ま

表3 温室効果ガスと大気汚染物質の概要

カテゴリ	温室効果ガス・大気汚染物質	略称	相対的な温室効果ガスまたは酸性化の可能性	
温室効果ガス	二酸化炭素	CO ₂	1	CO ₂ -eq.
	メタン	CH ₄	25	
	亜酸化窒素	N ₂ O	298	
酸形成汚染物質	二酸化硫黄	SO ₂	1	SO ₂ -eq.
	窒素酸化物	NO _x	0.696	
その他の大気汚染物質	粉塵	—	—	
	一酸化炭素	CO	—	
	揮発性有機化合物（メタンなし）	NM VOC	—	

出典：ドイツ連邦環境庁（UBA, 2019）より作成。

たは二酸化硫黄 (SO_2) の「酸性化ポテンシャル (Versauerungspotenzial ; VP)」の係数を割り当てられる。温室効果ガスまたは温室効果ガス酸性化ポテンシャルは、同じ温室効果ガスまたは温室効果ガスの100年の期間における CO_2 または SO_2 の量を示す。酸性化効果は、検討中の基準ガスのように展開するであろう。個々のガスの排出データは、それぞれの同等係数を掛けた後に加算することができるので、温室効果ガスの合計を二酸化炭素換算 ($\text{CO}_2\text{-eq.}$) と見ることができる。同様に、 SO_2 および NO_x の酸性化ポテンシャルが決定され、これは SO_2 換算 ($\text{SO}_2\text{-eq.}$) として与えられる。

3.2 温室効果ガス排出と削減

この節では、再生可能エネルギー源の排出バランスの結果を要約する。

前節に示すように、本稿は、再生可能エネルギー源からの排出量と化石燃料をベースとする代替エネルギー生産からの排出量を対比する。基礎となる計算は、上記のドイツにおける再生可能エネルギーの利用に関する現在のデータとその具体的な代替効果に基づいている。原則として、エネルギー源の生産と供給のためのすべての上流排出が考慮され、排出効果の包括的な構造が得られる。

ドイツ連邦環境庁 (UBA, 2021) によると、2019年の温室効果ガス排出量 (土地利用の変化を除く) は、1990年と比較して、合計で約35.1%減少した。その結果、2019年の排出量は2018年に比べて、約5.4%減少した。特に、エネルギー分野におけるGHG排出量の急激な減少がこれに寄与した。しかし、輸送や建築物からの排出量は、前年に比べて増加した。Covid-19パンデミックが2020年の目標達成に及ぼす影響 (1990年と比較して少なくとも40%の減少) はまだ推定できない。パンデミックはさらなる減少に寄与することが期待される。

パリ気候変動協定の結果を踏まえ、ドイツ政府は2016年11月に、「気候行動計画2050」を採択した。これは、ドイツ連邦政府の国家長期戦略であり、2020年以降の期間に重要な方向性を提供し、2030年までに個々の排出部門

の具体的な目標を設定している。これらの部門目標は、現在のEU目標にも従っている。

2019年には、気候変動に関する内閣委員会、いわゆる「気候内閣」が招集された。2050年の気候行動計画の2030年を目標とする部門目標を確実に達成するために、ドイツ連邦政府は、多数の温室効果ガス削減措置と連邦気候保護法を用いて、2030年の気候保護計画を採択した。また、「気候行動計画2050」に基づき、連邦気候保護法は、2030年まで全ての部門の年間排出量を規定している。連邦政府は、気候行動計画2020の実施を引き続きモニタリングし、その緩和効果を評価する。

行動計画の実施の状態、すなわち「気候行動計画2030」だけでなく、連邦気候保護法に基づく連邦政府の可能な将来の即時プログラムと措置は、将来の気候保護報告書の文脈で評価される。すべての措置は、経済的、環境的、社会的影響の観点から科学的に評価される。ドイツの温室効果ガス排出削減目標について、表4を参照してください。

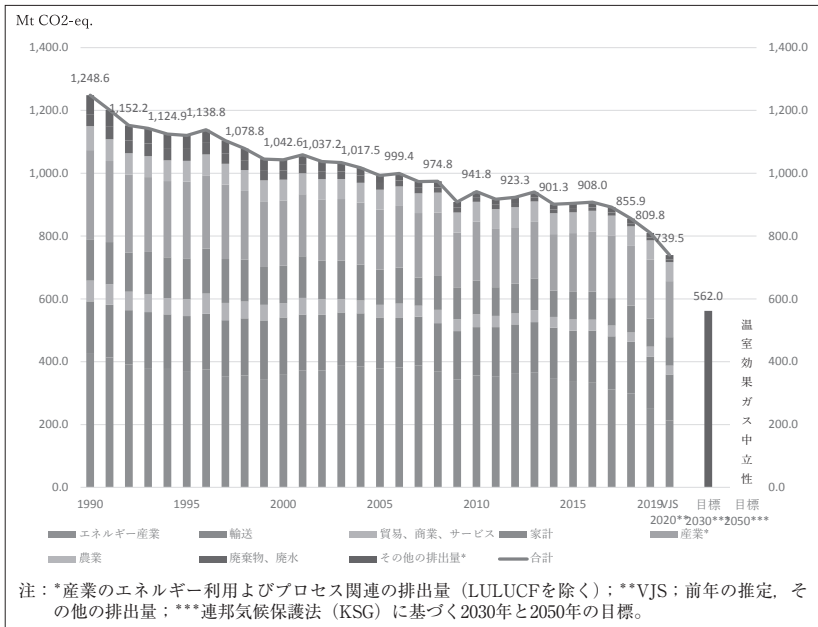
ドイツでは、1990年以降、温室効果ガスの排出量が大幅に削減されている。二酸化炭素換算（CO₂-eq.）で総排出量（土地利用、土地利用の変更、および林業；LULUCFを除く）は、2019年までに約4億3,900万tCO₂-eq.または35.1%削減した。2019年の総排出量は約8億980万tCO₂-eq.で、排出量は前年を大幅に下回っている。連邦環境庁（UBA, 2021）の推計によると、温室効果ガスの排出量は2020年に再び減少し、2019年と比較して8.7%減少した。エネルギー部門で最大の削減が見られた。その原因は、欧州の排出量取引システムの改革、低炭素価格、風力および太陽エネルギーの拡大、および最初

表4 温室効果ガス排出削減目標

	2018	2019	2020	2030	2040	2050
温室効果ガス排出削減目標						
温室効果ガス排出量 (1990年)	-31.5%	-35.1%	-40%	-55%		温室効果 ガス 中立性

出典：ドイツ連邦環境庁（UBA, 2018）より作成。

図3 ドイツの温室効果ガス排出の推移



出典：ドイツ連邦環境庁（2021）「National Inventory Reports for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 to 2019」より作成。

の石炭火力発電所の廃止であった（図3を参照してください）。

エネルギー部門は、2019年の総排出量の中で最大の割合を占め、31.9%であった。2番目は産業部門で23.1%，次いで輸送部門が20.3%，建築部門が15.2%であった。農業部門は約8.4%を占めていた。残りの1%は、廃棄物やその他の排出物によって発生した（図3を参照してください）。

輸送部門は、前年よりも多くの温室効果ガス排出量を排出している。全体として、輸送部門は2019年に、約1億6,430万tCO₂-eq.以上の温室効果ガスを排出し、2018年より170万tCO₂-eq.多かった。輸送部門の持続的な高い排出量は、主に道路輸送と、運転性能が全体的に増加するにつれて、車やトラックの在庫の増加によるものであった。

しかし、2018年と比較すると、エネルギー産業の温室効果ガス排出量は、

2019年に再び大幅に減少し、5,100万tCO₂-eq. (16.6%) を超えた。その結果、部門の排出量削減は、前年に比べてかなり加速していた。特に、風力発電の高い生産性と石炭火力発電所の大幅な減少によるものであった。

個々の温室効果ガスと比較して、主に燃焼プロセスによって発生されたCO₂が支配的であった。その他の温室効果ガスの平均以上の減少により、CO₂排出量の割合は1990年から3.6%増加し、約87.9%となった。2019年のメタン排出量 (CH₄) の割合は約6.1%、亜酸化窒素 (N₂O) の排出量は4.3%であった。フッ素化温室効果ガスは約1.7%を占めた。温室効果ガスの排出のこの分布スペクトルは、高度に工業化された国の典型的なものであった。

3.2.1 エネルギー関連の温室効果ガス排出量

ドイツ連邦環境庁 (UBA, 2021) の計算によると、2019年のドイツのエネルギー関連温室効果ガスの排出は、前年に比べて約4,320万tCO₂-eq. (約6%) 減少し、6億7,740万tCO₂-eq.に達した。これらは、電力や熱を発生させる燃焼プロセス、エンジン内の燃料、および拡散排出によって引き起こされた。したがって、エネルギー関連の排出量には、エネルギー、建築、輸送部門、産業および農業部門からの排出量が含まれる。エネルギー関連排出量の約98%がCO₂であるため、以下の考察はCO₂に焦点を当てている。

全体として、エネルギー関連の排出量は1990年以来、大幅に減少している。これらのエネルギー関連CO₂排出量の大部分は、電力と熱の生産と輸送のための化石燃料の燃焼から由来する。全体として、2020年のCO₂ (推定) は大幅に減少し、とりわけ、エネルギー産業の大幅な減少 (15.0%減少) が主要な焦点である。トレンド産業においても、CO₂排出量は大幅に減少している。コロナパンデミックの複雑な特殊要因に加えて、気候の影響もある。気象条件の変化 (例えば、熱部門行動の変化) に合わせて、調整された排出量は、ここで示す実際の排出量とは異なるため、注意が必要である。しかし、天候関連の値は、実際の排出量を評価するため、目標の達成に関連していないが、排出削減措置の実際の有効性を示す可能性がある。その結果、主

に貿易、商業、サービス部門の大規模な低迷により、家計および小口需要家の減少傾向が、前年に比べて13.5%減少する。

長期的な視点では下降傾向を示している。その主な理由は、1990年代の排出集約型褐炭火力発電所の廃炉と、より効率の良い効率の発電所による段階的な代替である。もう1つの理由は、再生可能エネルギーの拡大と、天然ガスなどの低排出燃料への転換である。一方、輸送部門、家計、小口需要家の排出量は増加する。その他のエネルギー関連排出量は、例えば、パイプの損耗など、拡散排出で構成され、前年に比べてほぼ一定のままである。

メタン (CH_4) 排出量は、1990年から2009年の間にほぼ半減した。2012年の時代に、排出量は1990年以来毎年減少しており、近年では約5,300万t $\text{CO}_2\text{-eq}$ に達していた。2018年以降、排出量は徐々に減少し、2020年まで続いた。亜酸化窒素 (N_2O) の排出源は、1990年には、50%以上が農業、36%の産業であった。2020年までに、総排出量は約47.5%減少したと推定されている。

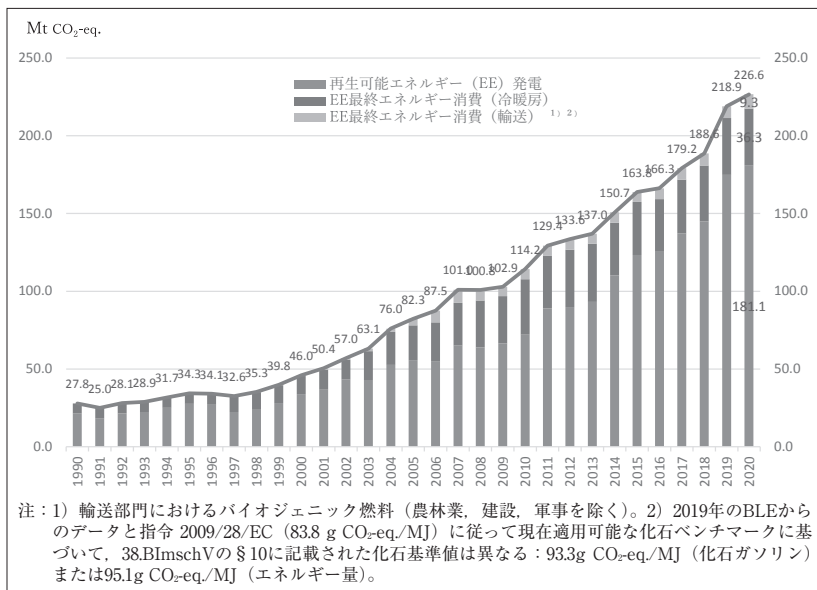
3.2.2 再生可能エネルギーによる温室効果ガス排出の削減

石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料は、ドイツや世界の主要なエネルギー源である。化石燃料を燃焼することにより、地球規模の気候変動の原因である温室効果ガスが排出される。したがって、気候を保護する重要な方法の1つは、よりクリーンなエネルギー、特に再生可能エネルギーに転換する方法である。この指標は、再生可能エネルギー源が温室効果ガス排出量の削減と気候保護目標の達成に貢献したことを示している。

多くの地域で、化石燃料を転換し、排出を削減していた。ほとんどの排出量は、再生可能な発電によって削減されたが、再生可能エネルギーは、熱および輸送部門の気候保護にも貢献していた。2020年には、約2億2,660万t $\text{CO}_2\text{-eq}$ が削減された。2000年以降、この値はほぼ5倍に増加している（図4を参照してください）。

温室効果ガスの排出を削減する上で、最も重要な再生可能エネルギーは、風力である。専ら発電に利用されている。2番目に重要なエネルギー源は、

図4 ドイツの再生可能エネルギーによる温暖効果ガス削減



出典：AGEE-Stat (2021) より作成。

* 4 捨 5 入による合計（一部速報値）。

バイオマスで，特に再生可能な熱供給だけでなく，再生可能な燃料もバイオマスに依存している。しかし，発電所でも，バイオマスまたはコジェネレーション（CHP）電力を利用している。

再生可能エネルギーの利用による排出削減の計算は，「ネット（net）削減」の視座に基づいている。その際，再生可能エネルギーからの最終エネルギー供給によって発生する排出量は，化石燃料の代替によって，大幅に削減されるものに対して相殺される。国際的な拘束力のある規則に従って決定されたGHGインベントリのGHG排出量とは対照的に，エネルギー源の抽出と供給，および工場の生産と運営のためのすべての「上流排出量（廃炉なし）」が考慮される。再生可能エネルギーからの排出削減を計算する方法論は，EU再生可能エネルギー指令（RL 2009/28/EC）の要件に基づいている。

風力エネルギーは，再生可能エネルギーによる排出削減の最大の割合を占

め、その次にバイオマスが続く。2019年には、風力エネルギーの利用により約8,900万tCO₂-eq., 太陽光発電を通じて約2,800万tCO₂-eq., 水力発電所を通じて約1,500万tCO₂-eq.を削減した。2019年には、特に木質エネルギーなどの固体バイオマス、および3つの消費分野すべてで、液体または気体バイオマスを利用して、約6,500万tCO₂-eq.が削減された。これにより、バイオマスは第2位の再生可能エネルギーになった。ドイツ連邦政府は「気候行動計画2050」に述べている：エネルギー供給は、遅くとも2050年までに、ほぼ完全に脱炭素化されなければならないので、食糧のための土地の負担の結果として、成長する質量からのバイオエネルギーの気候行動貢献の重要性は限界に来るだろう。2030年の気候行動計画では、ドイツのバイオエネルギーに利用可能なバイオマスの最大量は、すべての側面を考慮して、約1,000~1200 PJ/年に設定されている。ここに含まれる残留材料と廃棄物の利用は、部門間のエネルギー供給に重要な貢献をしている。また、削減効果を考慮する際には、LULUCF部門の一部のバイオマスカリヤによって、発生する排出量は考慮されない。その他の再生可能エネルギー（風力発電、太陽光発電、環境熱など）も、熱市場にとってますます重要になる。

おわりに

本稿は、ドイツの電力部門を中心に、エネルギー転換と気候政策を検討した。再生可能エネルギーを利用し、化石燃料を転換することにより、温室効果ガスを削減し、気候政策に寄与したことを明らかにした。

ドイツでは、ここ数十年で再生可能エネルギーの利用が大幅に拡大している。2020年再生可能エネルギーの利用により、約2億2,660万二酸化炭素換算トン（tCO₂-eq.）が削減された。そうでなければ、これらの排出量は化石燃料の利用によって発生するであろう。再生可能エネルギーからの発電は、排出削減量のほぼ80%を占めている。残りの16%は熱部門に起因し、4%は再生可能エネルギー（バイオ燃料）の利用を通じて、輸送部門から由来する。ドイツの温室効果ガス排出量は、1990年以降、1990年の12億4,860tCO₂-

eq.から、2019年には8億980万tCO₂-eq.に減少し、1990年以来最低の水準となった。これは35%以上の削減に相当する。ドイツ連邦気候保護法の要件の下での前年の推定は、2020年の急激な減少（7億3,950万tCO₂-eq.）を再び示し、1990年と比較して、約40.8%削減し、目標値の40%を達成した。1990年と比較して、2020年の削減量のうち、電力部門の再生可能エネルギーは、ドイツの全体削減量の約44.5%を貢献している。2009年の危機年の低い値を除いて、指標は長期的な下降傾向に続く。2018年と2019年の間、排出量は、主に排出量取引証明書価格の上昇、低ガス価格、再生可能エネルギーの拡大により大幅に減少していた。この傾向は2020年も続くが、この傾向に大きな影響を与える様々な異常な要因もあった。

2015年末には、京都議定書の後継合意（ポスト京都）がパリ条約と合意した。これまでの発展は、目標を達成するために気候保護の集中的な取り組みが必要であることを明らかにしている。ドイツ政府は、「気候行動計画2020」と「気候行動計画2030」の形で対策を開始した。2019年の「連邦気候変動法」では、2019年の年間排出量と、2030年までに温室効果ガス削減目標を「55%削減」にすることを確実にするために、個々の部門のモニタリングと行動のメカニズムが合意された。「気候行動計画2030」の現在の分析は、55%の目標へのギャップは、その措置によって減少するが、完全には閉じられていないことを示している。この予測によると、2030年までに、51%のGHG削減が達成されるが、約7,000万tCO₂-eq.のギャップが残っている。また、「気候行動計画2050」によると、排出量は2050年までに80～95%削減される予定である。特に再生可能エネルギーは、これらの目標達成に重要な貢献をすることが期待される。例えば、2030年までに総電力消費量の65%、最終エネルギー消費量の30%に占める割合は、再生可能エネルギーで賄われる予定である。2050年までに、ドイツの電力の発電と消費の両方が温室効果ガスに中立になる（EEG 2021）。これらの目標を達成するには、さらなる努力が必要である。

参考文献

- AGEE-Stat (2021) “Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland”. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2020.pdf?sessionid=A41646706478F65D7E040811890D3712?__blob=publicationFile&v=31
- Agora Energiewende (2015) “Understanding the Energiewende FAQ on the ongoing transition of the German power system”. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2015/Understanding_the_EW/Agora_Understanding_the_Energiewende.pdf
- BMEL, BMU (2009) “Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland”. http://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/_texte/Biomasseaktionsplan.html abgerufen
- BMWi (2014) “Wir haben etwas an der Energiewende gestrichen: Nachteile EEG-Reform”. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/das-erneuerbare-energien-gesetz-2014.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- BMWi (2017) “The Working Group on Renewable Energy Statistics”. <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Textsammlungen/Energy/working-group-renewable-energy-statistics.html>
- BMWi (2019a) “An overview Climate Action Programme 2030”. <https://www.bundesregierung.de/breg-en/issues/climate-action/klimaschutzprogramm-2030-1674080>
- BMWi (2019b) “2019 budget Departmental budget 09: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy”. <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Artikel/Ministry/budget-2019.html>
- BMWi (2020a) “Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan”. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/integrierter-nationaler-energie-klimaplan.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- BMWi (2020b) “Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung (Kohleverstromungsbeendigungsgesetz-KVBG”. <https://www.gesetze-im-internet.de/>

kvbg/BJNR181810020.html

BMWi (2021a) “Die Energie der Zukunft 8. Monitoring-Bericht zur Energiewende Berichtsjahre 2018 und 2019”. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/achter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.html>

BMWi (2021b) “Das Erneuerbare-Energien-Gesetz”. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html?cms_docId=73930

BMWi (2021c) “Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi”. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.html>

Bundesregierung (2014) “Zwölftes Gesetz zur Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes”, 20. November 2014. https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2014/0401-0500/473-14.pdf?__blob=publicationFile&v=1

BWO (2017) “Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (Windenergie-auf-See-Gesetz-WindSeeG)”. <https://www.gesetze-im-internet.de/windseeg/WindSeeG.pdf>

Climate Ambition Summit (2020) “Climate Ambition Summit 2020”. <https://www.climateambitionsummit2020.org/index.php#home>

EC (2020) “COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Stepping up Europe's 2030 climate ambition - Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people”, COM (2020) 562 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0562>

EC (2019) “Renewable Energy Directive ; RED II ”. <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii>

EEA (2019) “The European environment-state and outlook 2020 Knowledge for transition to a sustainable Europe”. <https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020>

IFEU (2016) “*Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)*”. <https://www.umweltbundesamt.de/>

sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_09_2016_aktualisierung_der_eingangsdaten_und_emissionsbilanzen_wesentlicher_biogener_energienutzungspfade_1.pdf

International Energy Agency (2019) "World Energy Outlook 2019", Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>

International Energy Agency (2020a) "World Energy Outlook 2020", Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>

International Energy Agency (2020b) "World Energy Investment 2020", Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020>

IPCC (2018) "SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 °C". <https://www.ipcc.ch/sr15/>

IPCC (2019) "SESSIONS COP 25". <https://unfccc.int/event/cop-25>

IRENA (2020a) "Renewable Capacity Statistics 2020". <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>

IRENA (2020b) "Renewable energy statistics 2020". <https://irena.org/publications/2020/Jul/Renewable-energy-statistics-2020>

REN21 (2019) "Renewables 2019 Global Status Report". <https://www.ren21.net/gsr-2019/>

REN21 (2020) "Renewables 2020 Global Status Report". <https://www.ren21.net/gsr-2020/>

StBa (2018) "066 Erhebung über die Elektrizitätsversorgung der Netzbetreiber. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt".

Thomas Lauf, Michael Memmler, Sven Schneider (2019) "Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018", Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

UBA (2018) "Emissionbilanz erneuerbarer Energieträger Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2017", Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-10-22_climate-change_23-2018_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2017_fin.pdf

UBA (2019) "Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018". <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/>

medien/1410/publikationen/2019-11-07_cc-37-2019_emissionsbilanz-erneuerbarer-energien_2018.pdf

UBA (2021) “Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück Große Minderungen im Energiesektor, Anstieg im Gebäudesektor und Verkehr”. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent>

United National (2019) “2019 Climate Action Summit”. <https://www.un.org/en/climate-change/2019-climate-action-summit>

Walter Klöpffer und Birgit Grahl (2009) “Ökobilanz (LCA) Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf”, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/4079/03/L-G-0000407903-0002356590.pdf>

WBGU (2008) “Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung”. Berlin: WBGU Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2008/pdf/wbgu_jg2008.pdf