

III 研究ノート III

ドイツにおける気候中立エネルギーシステムの 政策分析：REMod-Dモデルによる示唆（Ⅱ）

陳 禮 俊

7. 結果

ここでは、2050年までに、ドイツのエネルギー関連CO₂排出量を95%削減する目標を持つ上述のシナリオ計算結果の一部を考察する（詳細は、Philip et al.（2020）を参照してください）。

7.1 エネルギー供給の推移

この節の目的は、エネルギーシステムにおけるエネルギー供給の変化を考察することである。再生可能エネルギー源からの電力が、最も重要な一次エネルギーになりつつあるため、現在の状況と比較して、一次エネルギーと最終エネルギーの構成を示すとともに、発電量をより詳細に分析する。

7.1.1 一次エネルギーと最終エネルギー

2018年のドイツの一次エネルギー消費量は3,641TWhであった（BMWi. 2019）。247TWhの非エネルギー消費を除くと、3,394TWhは、エネルギー部門における最終エネルギー利用と損耗に起因する。主なエネルギー源（化石燃料、原子力、バイオマス、変動性再生可能エネルギー（variable renewable energy：VRE）とその他の再生可能エネルギーキャリアからの電力である。最終エネルギー消費は2,494TWhで、低温熱（LT低温熱、空間熱と温水）、産業プロセスの主な用途に分けられている。輸送と電力の従来のアプリケーション（従来の電力）、変換効率は73%、27%はエネルギー部門の損耗であ

る。最大の割合は、従来の発電所で、燃料を電力に変換した結果が考えられる。

検討した4つのシナリオの中で、2050年の一次エネルギー消費量は現在のレベルの52%（充足シナリオ）から73%（固執シナリオ）に及び、現在より大幅に低くなっている。その理由は、より少ない最終エネルギー需要である。一方で、エネルギー部門の損耗を大幅に減少させる。損耗の減少は、電力のごく一部が、対応する損耗を伴う火力発電所で、発生するという事実によるものである。シナリオに応じて、変換効率は84%と92%の間である。現在、一次エネルギーの再生可能エネルギーの総割合は、約15%である。4つのシナリオでは、その割合は、一貫して90%前後であり、VRE、すなわち、太陽光発電と風力エネルギーが、50%から60%を占めている。

検討した4つのシナリオの最終エネルギー需要は、現在の値の60%（充足シナリオ）と90%（固執シナリオ）の間である。この削減は、特にヒートポンプの利用側や道路輸送における電気駆動装置の利用側の高効率、およびエネルギー関連の改装による空間熱要件の低減によるものである。これらのすべての措置は、固執シナリオでの影響がはるかに低いため、削減は著しく小さくなる。充足シナリオでは、行動の変化による消費の減少は、4つのシナリオの比較で、2050年の最終エネルギーの最低値を説明する追加の緩和効果を有する。

7.1.2 電力需要の推移

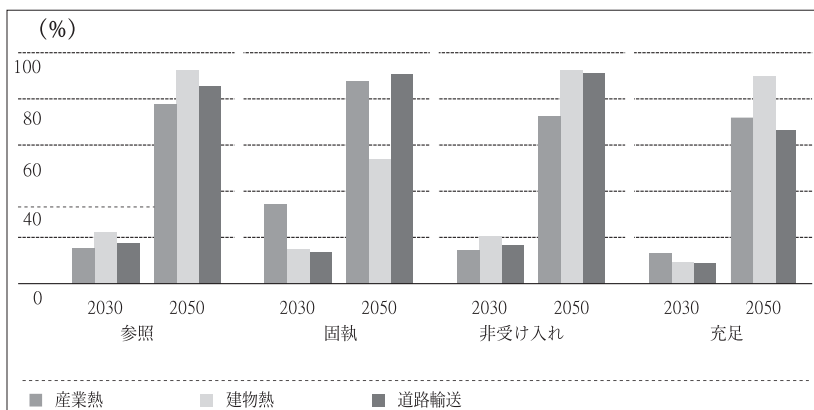
現在、ドイツのエネルギー関連CO₂排出量の約40%を電力部門が占めている（UBA, 2020）。プロセス熱、輸送、建物熱の部門からの排出量の約60%を削減するためには、化石燃料の利用から再生可能エネルギーへの根本的な転換が必要である。再生可能エネルギー源の最大の可能性は、風力エネルギーと太陽光エネルギーである。ここで、熱と輸送のための電気のより大きな利用は、賢明で必要な手段である。

電力ベースの代替手段を支持する従来の化石燃料技術の衰退は、電化率に

よって示すことができる。これは、個々の部門（輸送部門の牽引エネルギーまたは建築部門の空間熱）におけるエネルギー需要の割合を電力ベースの技術によって説明する。これには、各部門で直接電力として、利用される最終エネルギーの割合と、電力ベースのエネルギーを介して、間接的に利用される割合の両方が含まれる。このように、内燃機関を搭載した車両は、電力ベースのエネルギーを利用すると、電動化の度合いを高める。

プロセス熱と比較すると、2019年の道路輸送（1％未満）と建物熱供給（4％）の電化度は依然として非常に低い。その理由は、液体バーナーとガスおよび石油ボイラーの高い割合である。図3は、検討したシナリオにおける2030年と2050年のプロセス熱、輸送および空間加熱部門の電化率を示す。

図3 2030年と2050年の4つのシナリオの電化率



注：プロセス熱、空間熱（屋内熱水を含む）および道路輸送の供給のための電化率の推移である。直接電気利用に加えて、電化率は、電力ベースの燃料の利用を考慮に入れる。

出典：Philip et al. (2020) より作成。

この結果は、参照シナリオにおける部門の電化が、建物熱（熱と屋内熱水）の供給のために最初に実施され、その後に道路輸送およびプロセス熱が続くことを示している。道路輸送やプロセス熱供給を含む高度な電化は、2050年までに、これらの部門で電力の利用が、ますます重要になることを示

している。この変化は、対応する電力需要の増加につながり、表2の2030年と2050年の4つのシナリオを要約している。

表2 2030年と2050年の4つのシナリオの年間電力需要

電力需要 (TWh _{el})	参照	固執	非受け入れ	充足
2030	683	718	656	546
2050	1,447	1,464	1,282	1,068

注：「電力からX (power-to-X)」技術の電力需要を含む。

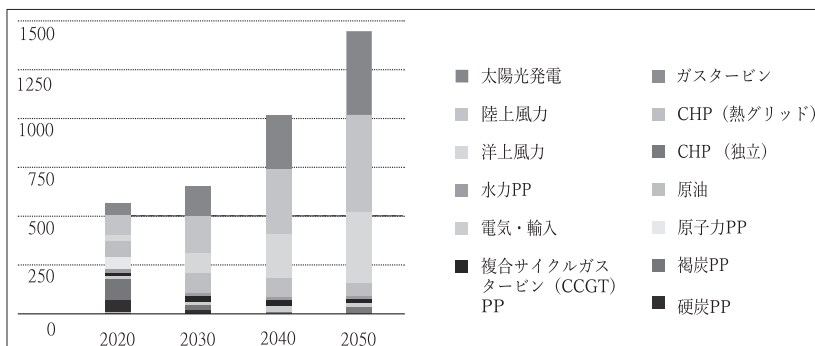
出典：Philip et al. (2020) より作成。

2030年の充足シナリオでは、2018年の需要 (597TWh_{el}) より、約120TWh_{el} 少ない483TWh_{el}で、最も少ない電力需要を示している (BMW, 2019)。これは、電力ベースの技術の増加が、電力需要の増加につながるという2つの反対の影響によるものである。一方、総エネルギー需要は、道路輸送、生活空間熱、産業プロセス熱の消費など、行動の変化によって大幅に減少する。しかし、他のシナリオでは、電力需要は継続的に増加する。充足シナリオでは、2050の電力需要は、現在の需要の1.7倍であり、固執シナリオでは2.5倍弱である (表2を参照してください)。この電力需要には、国内の水素変換やその他の合成エネルギーキャリア「電気からガス (Power-to-Gas)、電気から液体燃料 (Power-to-Liquid)」に、必要な直接電力と間接電力の両方が含まれる。間接電力の利用は、2050年に述べた電力需要の約4分の1を占める。

7.1.3 電力

エネルギーシステムの電力の増加は、電力需要が可能な限り、「排出フリー」で満たされている場合にのみ理にかなっている。参照シナリオの場合、電力供給の技術の概要 (TWh_{el}/年) を図4に示す。

図4 参照シナリオにおける技術による電力供給の推移



注：PP = 発電所

出典：Philip et al. (2020) より作成。

現在、総電力需要は約597TWh_{el}であり、原子力発電所だけでなく、褐炭火力発電所や石炭火力発電所によって賄われている。この計算が行われたとき、2022年までに、原子力発電を段階的に廃止することが決定された。しかし、遅くとも2038年までに、石炭火力発電を段階的に廃止する法律は、まだ採択されていなかった (BMW, 2020)。計算は、2035年までに、より厄介な石炭の段階的廃止を想定する。2030年頃から、失われる電力に代わる風力発電所や太陽光発電所の大幅な拡大に加え、電力の輸入が若干増加する予定である。追加の補償効果は、分散型CHPと燃料電池だけでなく、大規模な複合サイクルガスパラント (combined cycle gas plants; CCGT) による発電効果が高まり、コージェネレーションを稼働し、2030年以降の熱供給に貢献する。

電力供給におけるVREの割合は、検討中の期間にわたって、継続的に増加している。参照シナリオでは、再生可能な割合は、2019年の約40%から2030年には71%、2050年には93%に上昇する (Philip et al., 2020)。この転換の結果の1つは、2018年に462gCO₂/kWh_{el}から始まるCO₂係数が、2030年には147gCO₂/kWh_{el}で、半分以上に低下したということである。発電量は2050年にCO₂排出量がほぼなく、CO₂係数は3 gCO₂/kWh_{el}に減少する。

すべてのシナリオにおいて、CO₂係数は2030年に約150gCO₂/kWh_{el}、2050年には約5gCO₂/kWh_{el}で、同様の値を持っている。CO₂削減目標を達成するために、消費電力の減少を想定することなく、2030年の全てのシナリオで、70%以上の再生可能エネルギー割合を計算する（充足シナリオ）。ドイツ政府が設定した再生可能エネルギーの割合は、2030年に65%である（BMU, 2019）。この値が、全てのシナリオで超えているということは、1990年と比較して、CO₂排出量の目標55%削減を達成するのに、十分ではないことを示唆している。2050年でも、電力供給における80%の再生可能エネルギー割合の目標は、すべてのシナリオで、明らかに上回っている。平均割合は93%と計算される。風力と太陽エネルギーからの電気が中心的な役割を果たす。

2019年に、ドイツでは、約54GW_{el}の陸上および8GW_{el}の洋上風力と49GW_{el}の太陽光発電所が設置された（Philip et al., 2020）。これは、発電のためのVREの総容量111GW_{el}に相当する。シナリオの結果は、2030年までに、設置設備容量が倍増し、その結果は、充足シナリオを除いて示している。参照シナリオでは、これは、年間約9GW_{el}の太陽光発電能力の平均純増加と、現在の値に基づいて、陸上風力の場合は3GW_{el}、洋上風力の場合は1.5GW_{el}の年間増加を意味する。

シナリオでは、風力エネルギー（陸上および洋上）の設備容量は、約260GW_{el}に増加し、太陽光発電の設備容量は、2050年には約415GW_{el}に増加する。これは、太陽光発電や風力エネルギーシステムから、約1,300TWh_{el}の総発電量に相当する。充足シナリオでは、設置設備容量は約480GW_{el}、または約200GW_{el}低い設備容量である。これは、再生可能エネルギーシステム（renewable energy system ; RES）が提供する電力が、約30%少ないことを意味する。非受け入れシナリオで、想定される大規模なインフラの変化に対する受け入れがないため、ここでは、約140GW_{el}より少ない風力設備容量が設置されているが、参照シナリオと比較して、230GW_{el}の太陽光発電設備容量を追加する。その結果、RESの総設備容量は、参照シナリオよりも約90GW_{el}多い。風力タービンは太陽光発電システムよりも全負荷時間が長い

ため、設置設備容量が全体的に高いにもかかわらず、非受け入れシナリオよりも、RESから約230TWh_{el}未満の電力が提供されている。また、太陽光発電プラントからの発電は、日次および季節的なパターンが顕著であることを特徴としている。

これは、一年ごとに安全な供給を保証するために、非受け入れシナリオにさらなる課題をもたらす。したがって、風力エネルギーの限られた拡張を補うために、体系的に調整を行う必要がある。貯蔵および合成的に生産されるエネルギーキャリアに関して、これがシステム発展に、どのような影響を及ぼすかは、以下の節で詳しく説明する。

7.1.4 変動性電源のバランス

変動性再生可能エネルギー（VRE）は、エネルギー転換の成功に重要な役割を果たす。2050年には、エネルギー供給の主力となる。しかし、そのさらなる拡張は、VRE供給がエネルギーシステムで、感覚的に利用できることを必要とする。VREからの送電や、電池やポンプ貯水発電所などの短期貯蔵施設の放電が十分でない場合に、電力需要を満たすためには、制御可能な発電所の運転も長期的に必要である。2030年と2050年の場合、その設置設備容量を比較すると、ドイツの従来の発電所の累積設置容量は、現在約85GW_{el}である。

参照と固執シナリオでは、設置済み設備容量は2030年までに、それぞれ95GW_{el}と112GW_{el}に増加する。一方、非受け入れシナリオで、設置される設備容量は、現在のレベルとほぼ変わらない。このシナリオでは、風力タービンの拡張と近隣諸国との電力貿易の両方が制限されている。これは、太陽光発電システムと蓄電の両方の早期および拡大と組み合わせることで、制御可能な発電所の必要な設備容量の減少につながる。充足シナリオでは、すべての部門で、電力消費量が減少すると想定され、対応する発電所の設備容量がわずかに減少する。

2018年の45GW_{el}から2030年には25GW_{el}まで、石炭火力発電所が減少する

ほか、すべてのシナリオで、非常に柔軟なガスタービンが大幅に増加する。稼働の立ち上げ期間が比較的短いため、これらの技術は、主に再生可能エネルギーが特徴のシステムに関連するようになっている。これは、2050年により明らかになる。現時点では、石炭火力発電所は役割を果たさなくなっているため、制御可能な発電所の大部分は、複合サイクルガスタービンCCGT発電所とガスタービン発電所（熱回収の有無にかかわらず）によって、供給される。

全体として、2050年の制御可能な発電所の累積発電設備容量は、シナリオによって、 100GW_{el} と 160GW_{el} の間で変動する。20%の予備能力は、常に規模記入の基準として利用される。電力供給におけるVREの割合の増加とグリッドへの供給の優先順位付けは、制御可能な発電所団地（power plant park）の運営に大きな影響を与える。したがって、これらの仕事は、ベースロードの代わりに、ピークロードを網羅的に賄うこと、すなわち、「エネルギー」の代わりに、「電力」を供給することである。

ピークロードを賄う火力発電所以外にも、電気貯蔵システムを利用して、負荷と発電のバランスを取ることができる。現在すでに利用されているポンプ式蓄電発電所に加えて、電池（バッテリー）貯蔵システムは重要な選択肢である。

短期の蓄電は、すべてのシナリオで、重要な役割を果たす。貯蔵設備容量は、参照シナリオでは約 $150\text{GWh}_{\text{el}}$ に達する。2050年までに、充足シナリオでは約 50GWh_{el} に達するが、設置設備容量は固執シナリオでは $300\text{GWh}_{\text{el}}$ 、非受け入れシナリオでは $400\text{GWh}_{\text{el}}$ で、大幅に高くなっている。非受け入れシナリオにおけるこの高い値は、風力発電と太陽光発電の比率が最適ではなく、不均衡なエネルギー供給をもたらすという事実によるものである。

太陽光発電による発電の昼間のピークは、部分的に電池貯蔵によって取り込まれ、夕方と夜間へのシフトを達成することができる。このシナリオでは、近隣諸国への送電能力の限定的な拡大も想定される。その結果、負荷を分散するために、電気を輸入する可能性が低減される。ここでも、より多く

の貯蔵設備容量が状況を改善できる。

固執シナリオの電池貯蔵システムの比較的高い拡張はまた、負荷分散のための限られた選択肢に起因する。このシナリオでは、例えば、車両貯蔵ユニットを柔軟的な負荷および発電機として利用する。一方、充足シナリオでは、まず、電池貯蔵施設が検討期間の終わりに向かって必要になり、2050年の必要な貯蔵設備容量は、他のシナリオよりも大幅に低くなるように計算される。その理由は、従来の電力消費の減少に伴い、車両やヒートポンプが提供する柔軟性選択肢の高い受け入れであり、風力タービンや太陽光発電設備の拡大が著しく低下している。

電力負荷と発電のバランスをとるためのもう1つの選択肢は、水素、メタン、液体燃料などの電力ベースの燃料を製造するために、利用できる電解槽(electrolyzer)である。

エネルギーキャリアの合成生産は、2030年に依然として、従属的な役割を果たしているが、その重要性は10GW_{el}の貢献を持つ持続性シナリオで、すでに明らかである。2050年には、その発電能力は120GW_{el}以上に上昇する。道路輸送と建物の熱供給のために、このシナリオで想定される燃焼技術は、現在の利用と同等である。これらは、再生可能な合成エネルギーキャリアによる交換を必要とする。

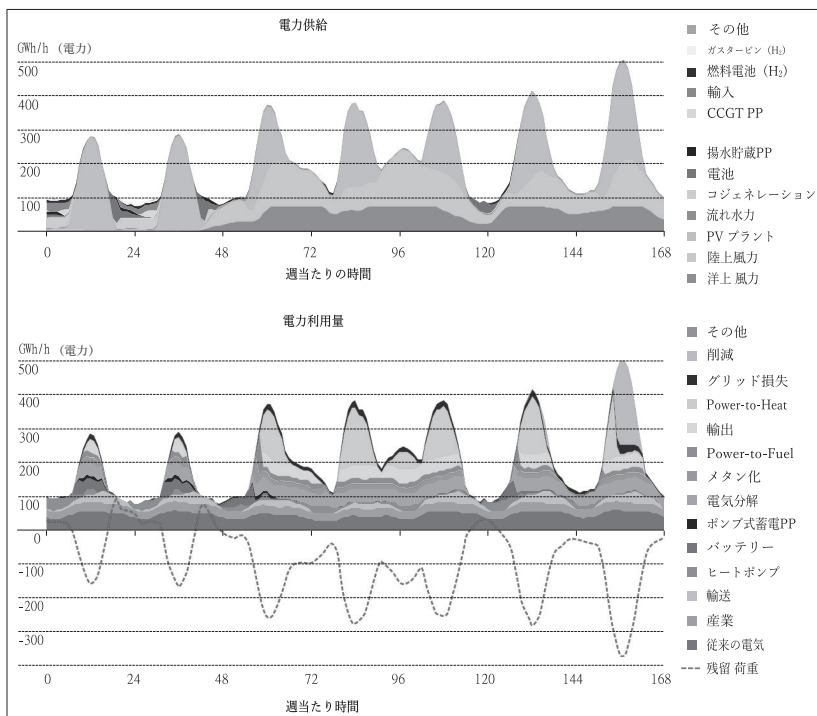
他のシナリオでは、2050年の電解槽の総設備容量は、50GW_{el}と75GW_{el}の間である。充足シナリオで想定される行動の変化と消費の減少が強く、また、再生可能な合成エネルギーキャリアを、海外から輸入する可能性があるにもかかわらず、国内の水素経済が示されている。化石燃料のない再生可能エネルギーシステムの有意義な一部である。

再生可能エネルギー源に対して、繰り返し提唱される議論の1つは、ベースロードを提供していないということである。しかし、現在、ドイツはエネルギー供給の根本的なパラダイムシフト(paradigm shift)を目撃している。過去に優勢であった大型発電所による需要ベースのエネルギー供給は、再生可能エネルギー源に基づくエネルギー供給のバランスが継続的に保たれるシ

システムに転換されつつある。これは、エネルギー供給と時間調整されるエネルギー利用（負荷シフト、需要対応）との間の複雑な相互作用をもたらし、電気、熱、輸送部門の強力な統合、柔軟性発電機の一時的な利用、様々なデザインの貯蔵施設を含む。図5は、例として、参照シナリオで計算した2050年4月の1週間の発電と消費のプロファイルを示している。このグラフは、将来のエネルギーシステムにおける太陽光発電と風力エネルギーの統合が、1時間ごとにどのように機能するかを示している（Philip et al., 2020）。

下のグラフでは、残存負荷とは、VREとの差として定義され、本質的に風力エネルギーと太陽光発電、および非シフト可能なベースロード（例えば、産業プロセス）が示されている。正の残留負荷は、VRE生産のために、電力が十分ではないことを意味する。負の残留負荷は、切り替え可能な負荷または貯蔵設備を充電するために、利用できる電力があることを意味する。日中の間に、太陽光発電フィードインがピークに達すると、短期記憶装置が、それに応じて充電され（バッテリー）、電力は合成エネルギーキャリアに転換されるか、可能であれば柔軟に変換される。熱発生器、例えば、蓄熱を充電する。この操作は、例えば、時間12および時間36で見ることができる。時間50以降、風力発電からの電気投入が高いため、残留負荷は長い期間にわたって、負の値になる。電解槽は、稼働が昼間のみである前の日より連続的に動作する。生産される水素と、メタンや液体エネルギーキャリアなどから生産される合成エネルギーキャリアは、より長い期間保存し、必要に応じて利用することができる。水素電解技術（空間やプロセス熱を提供する水素電気自動車、燃料電池、ボイラー）の追加により、電力の直接需要が減少する。発電でピークを利用するもう1つの選択肢は、電気エネルギーを加熱棒（時間160）で、熱エネルギーに変換することによって、熱エネルギー貯蔵（貯湯）の温度レベルを上げることである。すべての熱エネルギー貯蔵システムが満杯の場合は、余分な電力が輸出される。最後の選択肢として、システムはシャットダウンされる（時間156以降）。無風の夜など、再生可能なエネルギーからの電力供給が十分でない場合、電力需要は短期貯蔵タンク

図5 参照シナリオに対する2050年4月の電力需給を示す例示プロフィール



注：残存負荷は、風力と太陽光発電によって発生する毎時の電力と、送電網内のシフト不可のベースロードとの差である。

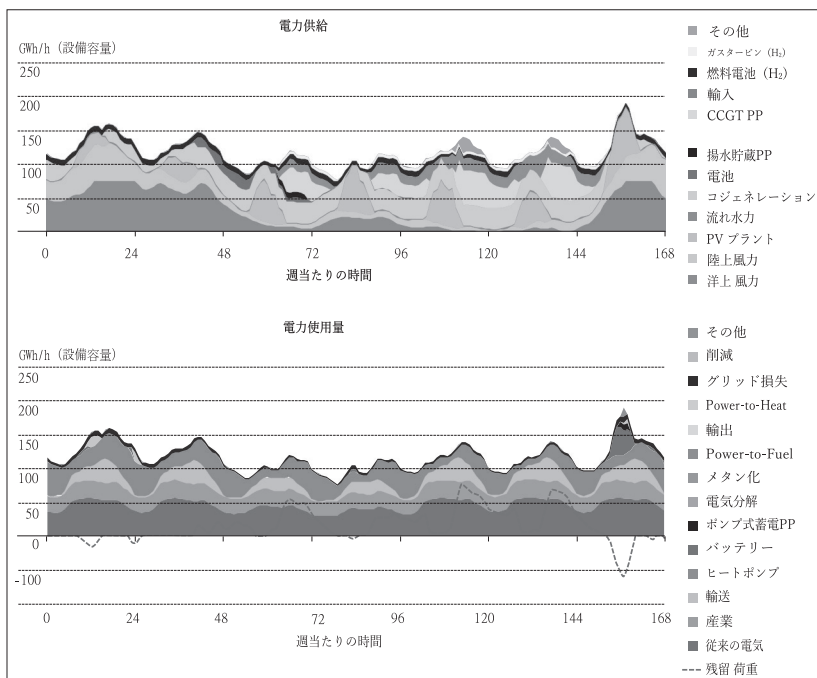
出典：Philip et al. (2020) より作成。

(時間20, 45)の出力，電気の輸入（時間24），または運転する火力発電所（時間27, CCGT）。

VREが数日間連続して，不十分な電力を供給する場合でも，安全な供給を保証するためには，制御可能な発電所を稼働させる必要がある。図6は，参照シナリオで計算した2050年10月の1週間の発電と消費量を示している。ピーク電力は，図5に示す例示的な4月の週に，ほぼ500GW_{el}に達するが，ここでは，示した週の風力と太陽光からの最大発電量唯一の180GW_{el}である。

示される週の最初の時間40では，電力負荷は主に風力と太陽光発電によっ

図6 参照シナリオの2050年10月における、3次的な需要を示す例示プロファイル



出典：Philip et al. (2020) より作成。

て、生産される電力によってバランスが取れている。残留負荷はゼロに近い。さらに、熱と発電所と水素ベースの燃料電池を組み合わせることで、熱負荷を賄う際に、同時に電気エネルギーを生産する。時間13と時間24には、電力の量が少し過剰なので、電力電池を充電、電力を熱に変換することができる。

太陽光発電や風力からの送り込みが減少した結果、発電は時間40以降の電力負荷を賄うのに十分ではなく、電力量は時間40以降の残留負荷は正になる。残留負荷のバランスを取るために、まずバッテリーが放電される。風力による電力の安定的な減少により、電力負荷時間は50から60までのフィードインピーク時にのみ、太陽光発電システムで賄うことができる。太陽光発電フィードインが衰えたら、他の発電所がバランシング機能を実行し、現在の

負荷を賄うために、電力を送る。ポンプ貯水発電所とガスタービン複合サイクル発電所（CCGT）を利用している。この間、ドイツの近隣諸国からも電気が輸入されている。

この状態は、風力と太陽光発電からの送電が再び増加し、時間153以降に負の残留負荷をもたらす時間150まで持続する。現在、バッテリーとポンプ貯蔵発電所が充電されている。

時系列は、現在と比較して、将来的に制御可能な発電所の大幅に変更された操作を表に示している。これらの発電所の柔軟性要件が増加する一方で、フルロード時間、ひいては燃料消費量が減少する。

7.1.5 化石・合成エネルギーキャリア

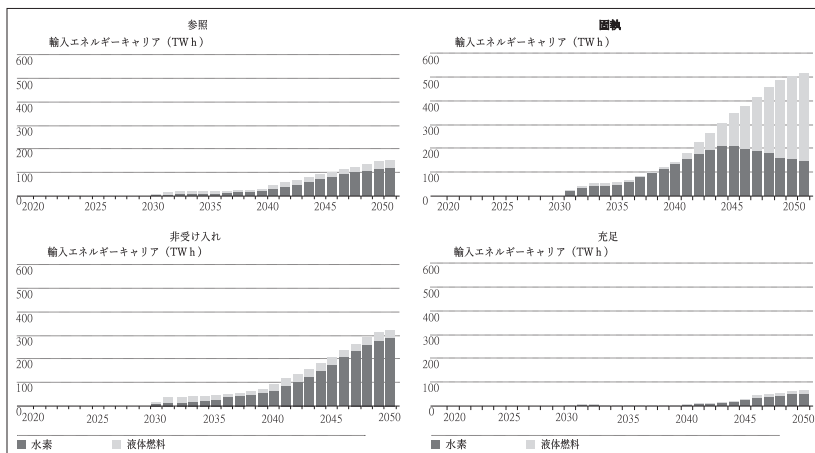
電気分解による合成エネルギーキャリアの国内生産に加えて、これらのエネルギーキャリアを海外から輸入する選択肢は、すべてのモデルで考慮されている。これらのエネルギーキャリアの価格発展は、連邦運輸・デジタルインフラ省（Ministry of Transport and Digital Infrastructure ; BMVI）が行われた調査から取得する。¹²⁾

合成エネルギーキャリアの輸入の可能性は、それぞれの量が大きく異なるが、すべてのシナリオで利用される。合成エネルギーキャリアの輸入は、国内生産を完全に転換するものではなく、むしろ追加的措置を表している。

したがって、再生可能エネルギー源から国内の同盟である合成エネルギーキャリアを生産するだけでなく、海外から輸入することも理にかなっている。国内のプラントのより低いフルロードオパーの時間は、前節で説明した体系的な利点によって、補償される以上のものである。国内電解プラントの利点は、CO₂-ニュートラルエネルギーキャリアの提供だけでなく、国内の再

12) 基礎となる価格は、北アフリカでの生産のために推計され、プラント費用だけでなく、大気からの炭素の捕獲のための費用（必要に応じて）との輸送が含まれている。それぞれのエネルギーキャリアは、タンカー（必要に応じて圧縮および液化化を含む）によって、ドイツに輸入される。輸出国の政治的（国内）の安定性から生ずる可能性のあるその他の取引費用または費用は、ここでは考慮されない。

図7 2020年から2050年まで再生可能エネルギーで水素に転換された輸入合成エネルギーキャリア



出典：Philip et al. (2020) より作成。

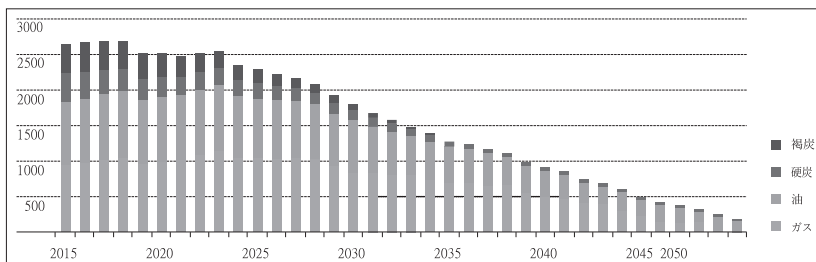
生可能電力を，より大きく利用できることにある（図7を参照してください）。

参照シナリオでは，輸入水素および合成液体燃料の量は，年間最大150TWhに達する。「充足」シナリオでは，輸入は約75TWhで，半分にしに達しない。一方，非受け入れと固執シナリオでは，輸入される量は300TWhと500TWhを超えて，大幅に高くなっている。様々なシナリオで，輸入量が異なっているにもかかわらず，合成エネルギーキャリアの輸入は，化石燃料の利用量の減少に関連して考慮されるべきである。参照シナリオの例として，図8は，2020年から2050年の間に利用される化石燃料の量を示している。

2018年には，約2,700TWhの化石燃料がドイツで利用された。これらの大部分は，天然ガス，鉱物油，硬質石炭および褐炭であった。国内資源の不足と硬炭採掘の段階的な削減により，これらのエネルギー源は海外からほぼ独占的に輸入されている（UBA, 2020）。エネルギー関連CO₂排出量削減目標を達成するために，化石燃料の輸入量は継続的に減少し，2050年の参照シナリオでは，輸入量の約7%に相当する。2050年には，約200TWhに達する。こ

れは、エネルギーシステムの再構築は、気候目標を達成することに加えて、他の国によるドイツのエネルギー依存を大幅に減らすことを示している（図8を参照してください）。

図8 化石エネルギーキャリア（TWh）



注：2015年から2050年までの参照シナリオの化石燃料利用。その大半が輸入される。

出典：Philip et al. (2020) より作成。

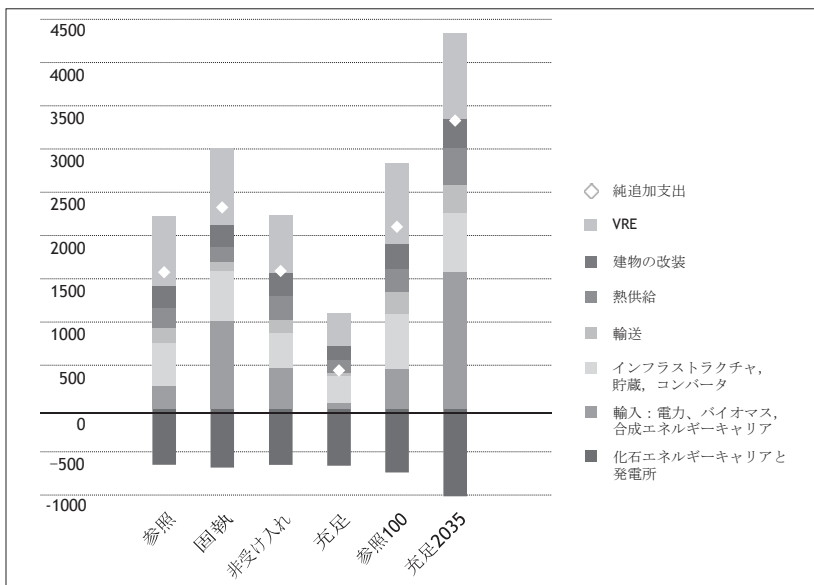
7.2 費用分析

7.2.1 エネルギー転換の累積支出の合計

前節では、ドイツのエネルギーシステムに対して、可能な転換パスが種々提示された。これらは、具体的に定義された境界条件によって、特徴付けられる社会の明確で、広く効果的な態度を考慮する。指定される境界条件下で、費用最適化を行った。投資（CAPEX）とすべての費用（OPEX：エネルギーキャリア、運営、保守、取引費用）で構成される。2020年から2050年までのエネルギーシステム全体の転換、拡張、運営のための累積支出が決定される。各シナリオの最適化計算によって最小化される。シナリオによって、この値は大きく異なる場合がある。図9は、シナリオと「通常通り（Business-as-Usual；BAU）」シナリオの違いを示している。BAUシナリオでは、システムの最適化、すなわち、エネルギーシステムの現在の状態が維持され、排出量は、推定効率の増加によって、わずかに減少する（技術学習曲線）。¹³⁾ 投資は、耐用年数の終わりに、システムを同様のシステムに置き換

13) 2022年に、ドイツで原子力発電を段階的に廃止するという法的決定もBAUシナリオで考慮される。

図9 異なるシナリオの支出 (10億ユーロ)



注：通常通り（BAU）シナリオに赤を示す。シナリオ当たりの純追加支出（ダイヤモンド）は、正の費用と負の費用（VRE：変動性再生可能エネルギー）を合計して計算される。
 出典：Philip et al. (2020) より作成。

えるために、独占的に行われる。

図9は、調査対象のすべてのシナリオの費用比較を示している。この図は、BAUシナリオと比較して、追加費用を示し、これらの追加費用が発生する領域に応じて区別される。負の値は、特にすべての気候保護の導入シナリオにおける化石燃料の輸入コストが低いため、支出の減少を表す。ハッシュマークで表される追加支出と削減支出の合計は、調査対象のシナリオの純追加支出を表す。

これらの純追加支出は、参照シナリオでは約1兆5,800億ユーロ、固執シナリオでは約2兆3,300億ユーロ、非受け入れシナリオでは約1兆5,900億ユーロ、充足シナリオでは約4,400億ユーロに達する。これらの4つのシナリオは、エネルギー関連CO₂排出量を1990年の値に対して、95%削減するこ

とで特徴付けられている。

また、エネルギー関連CO₂排出量の完全削減に至るシナリオの値も示している。2050年までに、エネルギー関連CO₂排出量の完全な削減が達成される参照100シナリオを対応する値は、約2兆1,000億ユーロに達する。2035年に、エネルギー関連CO₂排出量の完全削減が、既に達成されている充足2035シナリオの価値は、3,300億ユーロである。2020年から2050年までの全期間の年間平均年間追加支出は、充足シナリオでは、年間140億ユーロから1,070億ユーロである。2050年までに、エネルギー関連CO₂排出量が、95%削減される他のシナリオの対応する平均値は、参照シナリオと非受け入れシナリオでは、約510億ユーロ、固執シナリオでは約720億ユーロである。2019年のドイツの国内総生産（GDP）に関連して、純追加支出は0.4%（充足シナリオ）から1.5%（参照および非受け入れ）、約2%（固執と参照100シナリオ）および最大3.1%（充足2035シナリオ）までである。¹⁴⁾

BAUシナリオと比較した場合、参照シナリオは、追加の支出につながる主な貢献を説明するために利用される。VREへの投資に、約8,040億ユーロで、最高の追加支出が利用される。再生可能な電力（Power-to-Gas, Power-to-Fuel）からの合成エネルギーキャリアの生産のための貯蔵技術とコンバータは、合計約5,000億ユーロである。約2,550億ユーロの最大の追加支出は、建築部門のエネルギー改修に起因している。これには、ラジエーター加熱システムを低温（パネル）加熱システムに転換するための支出が含まれ、熱技術、特にヒートポンプをより効率的に利用できる。さらに、排出削減を基本としているシナリオでは、海外からの合成燃料の輸入は追加の支出を引き起こす。この支出額は、参照シナリオでは約2,600億ユーロである。最後に、約1,960億ユーロの追加支出は、熱（建築熱と工業プロセス熱）と輸送の1,700億ユーロの消費部門の転換技術に起因している。費用の傾向では、バッテ

14) 2019年のドイツの国内総生産は3兆4,360億ユーロであった。1991年以降の国内総生産（GDP）は、下記のウェブサイトを参照してください。<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1251/umfrage/entwicklung-des-bruttoinlandsprodukts-seit-dem-jahr-1991/>

リー電気自動車は早ければ2028年に、従来の燃焼車と費用均衡を達成するため、輸送部門の追加支出は主に貨物輸送に起因する。

非受け入れシナリオと参照シナリオにおける費用の違いは、わずかに異なるが、非受け入れシナリオでは、合成エネルギーキャリアを輸入する費用もわずかに高くなる。充足シナリオでは、全体的な差が最も小さくなる。約4,400億ユーロ弱で、これは参照シナリオの約30%と固執シナリオの20%である。充足シナリオで想定される消費の減少は、費用要素（cost components）の削減（図9を参照してください）につながり、化石燃料の節約をより大きくする。例えば、参照シナリオの節約額は、示されている追加費用の約30%に相当するが、充足シナリオでは、節約額は約40%になる。

参照100シナリオでは、2050年までに、エネルギー関連CO₂排出量を完全に削減する条件を境界条件として設定した。差異を見ると、累積支出の個々の原価項目の割合が、参照シナリオとほぼ同じになることが明らかになる。つまり、参照100シナリオでは、残りの化石エネルギー源を転換するために、参照シナリオの主な傾向が採用および強化される。より野心的なCO₂削減目標にもかかわらず、参照100シナリオの純追加支出は、固執シナリオの費用よりも低くなる。この結果は、費用の観点から、従来の技術（輸送および建設熱部門における特別燃焼技術）の主張は、気候保護目標を達成するために、かなりの追加支出が必要であることを明らかにしている。

最後に、2035年までに、エネルギー関連CO₂排出量を完全に削減するシナリオ「充足2035」を検討する。ここで、エネルギー消費量の減少を、充足シナリオで想定して、採用する。3兆3,300億ユーロの純追加支出は、参照シナリオの2倍以上であり、2035年までに、エネルギー関連のCO₂排出量を完全に削減することは、費用面でもでもかなりの追加支出に関連していることを示している。これは、合成エネルギーキャリアの輸入例を用いて説明することができる。これらは、このシナリオで、最大の費用ブロックを表す（図9を参照してください）。したがって、2035年の充足2035シナリオで輸入される合成エネルギーキャリアの量は、2050年の固執シナリオのそれと同様で

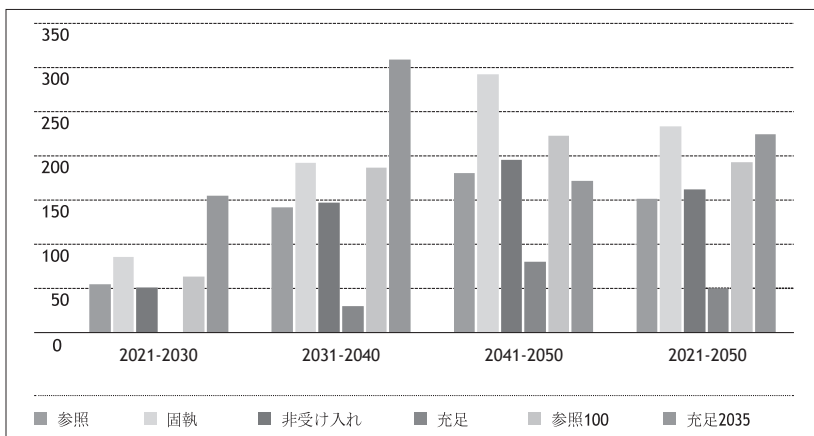
ある。検討中の期間全体の輸入量を比較した結果、この量は、固執シナリオよりも充足2035シナリオで、ほぼ3分の1多いことを示している。これは、2035年の合成エネルギーキャリアの輸入価格が、2050年よりも平均45%高いと仮定しているため、それに応じて、費用が高くなる。また、市場導入の初期段階にあり、さらなる技術開発や工業生産により、費用削減が期待できる多くの技術的な要素にも対応する。2035年までに、エネルギー関連CO₂排出量の完全削減への切り替えは、他のシナリオよりも早く発生するため、全体の費用は全体の期間にわたって高くなっている（Philip et al., 2020）。

7.2.2 CO₂削減費用

CO₂削減費用は、実行された計算の結果に基づいて計算することができる。この目的のために、シナリオに対して、生ずる純追加費用は、BAUシナリオと比較して、CO₂排出量の削減によって割られる。図10は、2021～2030年、2031～2040年、2041年～2050年の平均値、および2021年から2050年までの全期間の平均値として、示される6つのシナリオすべてに対応する値を示している。2021年から2050年までの期間全体の平均値と同様に考慮される。

充足2035シナリオを除き、他のすべてのシナリオにおけるCO₂削減費用は、考慮される30年間にわたって継続的に上昇する。これは、数学的最適化の原理、すなわち、最初に最も費用対効果の高い削減対策と関連投資を行い、その後、より高価な対策を実施する原理を反映している。充足2035シナリオは、再生可能な電力で、海外で生産される大量の輸入合成エネルギーキャリアが、2031年から2040年までの数年間で大きな影響を与える。この10年間で、300€/tCO₂以上の最高値が発生する。

充足シナリオでは、CO₂削減費用が最も低くなる。行動の変化によるエネルギー需要の減少は費用と関連していないので、これらはCO₂のトン当たり平均50€である。参照シナリオでは、平均費用は約150€/tCO₂で、2021～2030年の約50€/tCO₂から、2031～2040年には142€/tCO₂まで30年間で上昇

図10 CO₂削減費用 (€/tCO₂)

出典：Philip et al. (2020) より作成。

し、2041～2050年には180€/tCO₂を超える。非受け入れシナリオの発展と値の両方が、参照シナリオと同じ規模になる。検討中の全期間にわたって、CO₂削減費用は平均約162€/tCO₂である。したがって、参照シナリオよりも約7%高くなっている。

このモデルの結果を基に、参照100シナリオと同様に、2050年までに、エネルギー関連のCO₂排出量を完全に削減すると、2050年までに排出量が95%しか削減されていないのに比べて、約40€/tCO₂高いCO₂削減費用が発生する。最も高いコストは、熱供給や輸送部門のための燃焼技術など、今日の技術を利用し続けることを強く主張することによって、引き起こされる。固執シナリオでは、CO₂削減費用の平均は、233€/tCO₂で、これは、充足2035シナリオと同じ値になる。

ここで示すCO₂削減費用は、特に行動の変化がエネルギー転換の費用に、大きな影響を与える可能性があることを示している。エネルギーを節約し、社会の大部分の排出量を削減する集団的な社会行動は、例えば、価値観の変化によって、引き起こされるが、より少ない財政支出とより少ない投資を必要とするだけではない。また、将来のエネルギーシステムにおける再生可能

エネルギー設備やその他の技術機器の拡大が少なくなり、エネルギーシステムの転換に伴う変化の受け入れが大きくなる可能性が高まる（Philip et al., 2020）。

終わりに

本稿は、Fraunhofer ISEが開発したREMod-Dモデルによるドイツのエネルギーシステムのシナリオ分析と方法論について考察し、そのシミュレーション結果の一部を紹介した。主要な社会的行動や態度がエネルギー転換の進展に及ぼす影響と、エネルギーシステムの再構築に、どのような影響を与えるかを分析した。この結果は、再生可能エネルギー源に基づくエネルギー供給の気候保護目標を達成することは、技術的にも組織的にも可能であることを示している。今後の30年間毎時実施されるモデル計算は、電力供給における変動性再生可能エネルギー（VRE）の高い割合にもかかわらず、すべての消費部門全体で、安全なエネルギー供給が1時間ごとに保証されていることを示している。

また、さまざまなシナリオは、目標を達成するために、社会的行動や態度によって、大きく決定される枠組み条件に大きく依存していることを示している。例えば、燃焼ベースの技術を熱供給・輸送に利用することは、再生可能エネルギー発電所や、その他の関連技術施設に対する設備容量要件を、大幅に高める可能性がある。また、再生可能な電力を更新して、海外で生産される合成化学エネルギーキャリアの輸入も増加するだろう。このような固執的な行動は、エネルギー転換をより困難にする。

気候目標の高い達成のための必須の前提条件は、再生可能エネルギーの転換、貯蔵、流通、使用およびシステム統合のためのすべての関連技術の継続的な発展である。そうして初めて、パフォーマンスと寿命の増加を達成することが可能になる。本稿はまた、ドイツにおける熱および電気貯蔵システムの利用は、幅広い用途における水素の国内生産、処理および利用の確立と同じくらい有意義であることを明らかにした。国内市場の発展は、あらゆる

技術にとって重要であり、さらに、技術開発の成功に大きく貢献している。一方、現地メーカーの市場が創出され、一方で、対応するプラントとそのシステム統合で経験を積むことができる。

しかし、応用研究開発は要素発展で終わるものではない。また、市場統合の向上に、重要な貢献をすることができる。この体系化された太陽光発電の概念は、その一例である。オープンスペース太陽光発電システムの大規模な拡張は、紛争や受け入れ問題につながる可能性が予見可能である。一方、建築の外壁、車両の車体や道路、農地や水面への太陽光発電の統合は、太陽光発電の二重利用のために、他の目的のために既に利用されている巨大な領域を開く。これらのアプリケーションに適した製品とソリューションを作成することは、太陽光発電のさらなる発展において、重要な課題となり、国内生産の新たな機会を提示する。

将来のエネルギーシステムは、多数の相互接続されたシステムによって、特徴付けられるだろう。これらは相互に作用し、システムにできるだけ多くの動的サポートを提供するように動作する。太陽光発電システム、ヒートポンプ、電池貯蔵システム、電気自動車用充電ステーションだけでなく、小型電力範囲の多くの技術システムも、ここで特に重要である。今後数十年で、これらのシステムの数 は 2 桁の数百万台に達すると予想される。この背景に対して、効率的で安定した信頼性の高いシステム統合と、これらの多くの要素の行動のためのソリューションの開発は決定的な役割を果たしている。これは、情報通信技術（ICT）の最新の概念を利用することによってのみ達成することができる。

本稿の考察により、ドイツは、「再生可能エネルギー利用」と「エネルギー効率の高さ」という 2 つの柱に基づく、気候中立エネルギーシステムの実現可能性に関する議論に貴重なインプットを提供したいと考えている。これらの経験は、日本や台湾などのエネルギー転換政策に有意義な示唆を与えている。今後の課題として、日本や台湾における REMod-D モデルの適用を試み、東アジア地域におけるエネルギーガバナンスの政策分析に応用

することにした。

参考文献

BBH; LBST; Fraunhofer ISE; IKEM (2018) “Integriertes Energiekonzept 2050: Strom Wärme Verkehr Industrie”.

BDEW (2011) “BDEW-Fakten: Deutsches Stromnetz ist 1.78 Millionen Kilometer lang”. Available from: ([https://bdew.de/internet.nsf/id/DE_20100322_PM_Deutsches_Stromnetz_ist_178_Millionen_Kilometer_lang/\\$file/Fakten_BDEW_Stromnetze.pdf](https://bdew.de/internet.nsf/id/DE_20100322_PM_Deutsches_Stromnetz_ist_178_Millionen_Kilometer_lang/$file/Fakten_BDEW_Stromnetze.pdf)).

BLESL, Markus ; KESSLER, Alois (2013) “Energieeffizienz in der Industrie”. Berlin: Springer Verlag.

BMU (2019) “Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050”.

UMWELTBUNDESAMT: Primärenergieverbrauch. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/ primaerenergieverbrauch#textpart-1](https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#textpart-1)

BMVI (2015) “Räumlich differenzierte Flächenpotenziale für erneuerbare Energien in Deutschland”. Berlin.

BMWi (2009) “Gesamtausgabe der Energiedaten Datensammlung des BMWi”. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/ energiedaten-gesamt-xls.html>

BMWi, BMU (2010) “Energiekonzept: für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung”. München.

BMWi (2019) “Strommarkt der Zukunft: Stromerzeugung: Zahlen und Fakten”. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/strommarkt-der-zukunft.html>.

BMWi (2020) “Kohleausstieg und Strukturwandel”. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Wirtschaft/ kohleausstieg-und-strukturwandel.html>

Bundesministeriums für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2010) “Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie Schlussbericht”.

- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi, 2012) "Die Energiewende in Deutschland. Mit sicherer, bezahlbarer und umweltschonender Energie ins Jahr 2050", in Sonderheft Schlaglichter der Wirtschaftspolitik; BMWi, Öffentlichkeitsarbeit.
- BÜRGER, Veit; BERN, Mari Roald (Mitarb.) (2009) "Identifikation, Quantifizierung und Systematisierung technischer und verhaltensbedingter Stromeinsparpotenziale privater Haushalte. 3. Aufl. 2009
- BÜRGER, Veit; HESSE, Tilmann; PALZER, Andreas; HERKEL, Sebastian; ENGELMANN, Peter (2016) "Klimaneutraler Gebäudebestand 2050". Dessau Roßlau.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2011) "Artikel 1 Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes" (in Kraftgetr. am 2.7.2011). URL: <https://www.bmu.de/gesetz/13-gesetz-zur-aenderung-des-atomgesetzes/>
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2010) "Analyse der Notwendigkeit des Ausbaus von Pumpspeicherwerken und anderen Stromspeichern zur Integration der erneuerbaren Energien". (PSW-Integration EE). Abschlussbericht.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2010) "Bericht 2010. dena- Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand", Begleitforschung zum dena-Projekt "Niedrigenergiehaus im Bestand".
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2011) "Bericht 2011. dena- Sanierungsstudie. Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden", Begleitforschung zum dena-Projekt "Niedrigenergiehaus im Bestand".
- ECKERT, Werner (2020) "CO₂-Ausstoß überraschend stark gesunken". URL: [https://www.tagesschau.de/wirtschaft/CO₂-ausstoss-deutschland-101.html](https://www.tagesschau.de/wirtschaft/CO2-ausstoss-deutschland-101.html) –Überprüfungsdatum
- Enzensberger Z, et al. (2002) "PERSEUS-ZERT Systembeschreibung. Abschluss-Dokumentation einer Modellentwicklung für die RWE AG", Karlsruhe: Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion.
- European Commission, Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of

the Regions (2011) “A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050”, European Commission: Brussels.

European Energy Exchange AG-Transparency (2011a) “Actual wind power generation”. Available from: http://www.transparency.eex.com/de/daten_uebertragungsnetzbetreiber/stromerzeugung/tatsaechliche-produktion-wind (accessed 25.08.12).

European Energy Exchange AG-Transparency (2011b) “Actual solar power generation”. Available from: http://www.transparency.eex.com/de/daten_uebertragungsnetzbetreiber/stromerzeugung/tatsaechliche-produktion-solar (accessed 25.08.12).

European Energy Exchange AG-Transparency (2011c) “Generation on the previous day”. Available from: <http://www.transparency.eex.com/de/freiwilligeveroeffentlichungen-marktteilnehmer/stromerzeugung/Erzeugung-des-Vortages>.

European Network of Transmission System Operators for Electricity (2011).

Diefenbach N, et al. (2010) “Datenbasis Gebäudebestand-Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohn- gebäudebestand”.

EUROPÄISCHE KOMMISSION: Ein europäischer Grüner Deal: Erster klimaneutraler Kontinent werden. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de

FATH, Karoline (2018) “Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings”.

Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), et al. (2007) “Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010”, Bericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE (2020) “Energy Charts”. URL: <https://www.energy-charts.de/>

Gohout W. (2012) “Mathematik für Wirtschaft und Technik”, München: Oldenbourg-

Verlag.

Henning H-M and Palzer A. (2014) "A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies- Part I: Methodology", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 30, Pages 1003-1018.

Kenkmann T, et al. (2011) "Freiburg 2050-Auf dem Weg zur Klimaneutralität". Abschlussbericht; Öko-Institut e. V.

Markewitz P, Stein G. (2003) "Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland", in *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment*, Forschungszentrum Jülich.

MASUROWSKI, Frank; DRECHSLER, Martin; FRANK, Karin (2016) "A spatially explicit assessment of the wind energy potential in response to an increased distance between wind turbines and settlements in Germany".

Miara M, et al. (2011a) "Efficiency of heat pump systems under real operating conditions", In: 10th IEA heat pump conference, Tokyo.

Miara M, et al. (2011b) "Wärmepumpen Effizienz, Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb, Abschlussbericht".

Palzer A, Henning H-M. (2014) "A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies- Part II: Results", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 30, Pages 1019-1034.

Philip Sterchele, Julian Brandes, Judith Heilig, Daniel Wrede, Christoph Kost, Thomas Schlegl, Andreas Bett, Hans-Martin Henning (2020) "Paths to a Climate-Neutral Energy System: The German Energy Transition in its Social Context", Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg.

PALZER, Andreas: Sektorübergreifende Modellierung und Optimierung eines zukünftigen deutschen Energiesystems unter Berücksichtigung von Energieeffizienzmaßnahmen

- im Gebäudesektor. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie. Dissertation. 2016-04-28. URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-408742.html>
- Quaschning V. (2008) “Dynamisch erweiterbare Simulation von Photovoltaiksystemen mit DESIRE”. In: Photovoltaische Solarenergie/23. Symposium, March 5–7; 2008. Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2011) “Wege zur 100 % erneuer- baren Stromversorgung”, Sondergutachten, Berlin.
- SCHUBERT, Markus; KLUTH, Tobias; NEBAUER, Gregor; RATZENBERGER, Ralf; KOTZAGIORGIS, Stefanos; BUTZ, Bernd; SCHNEIDER, Walter; LEIBLE, Markus (2014) “Verkehrsverflechtungsprognose 2030”.
- SCHULER, Johannes; KRÄMER, Christine; HILDEBRANDT, Silvio; STEINHÄUBER, Reimund; STARICK, Anja; REUTTER, Michaela (2017) “Kumulative Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft”. Bonn: Bundesamt für Naturschutz, 2017 (BfN-Skripten 463).
- Schulze Darup B, Neitzel M. (2013) “Energieeffizienz mit städtebaulicher Breitenwirkung-Technische und wirtschaftliche Voraussetzungen zur flächenhaften Umsetzung von energetisch hochwertigen Modernisierungen in zusammen-hängenden Wohnquartieren”, Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V. (GdW): Berlin.
- SENKPIEL, C.; BERNEISER, J.; BAUMANN, D. (2020) “Open-source simulation of the long-term diffusion of alternative passenger cars on the basis of investment decisions of private persons: Transportation Research Part A Policy and Practice (publication planned)”.
- STERCHELE, Philip (2019) “Analysis of Technology Options to Balance Power Generation from Variable Renewable Energy: Case Study for the German Energy System with the Sector Coupling Model REMod”. 1. Auflage. Düren: Shaker (Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung).
- TenneT TSO GmbH. (2011) “Actual and forecast wind energy feed-in”. Available from:

〈<http://www.tennetso.de/site/en/Transparency/publications/network-figures/actual-and-forecast-wind-energy-feed-in>〉.

UMWELTBUNDESAMT (2020) “Energiebedingte Emissionen”. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#textpart-1>

UMWELTBUNDESAMT (2020) “Primärenergiegewinnung und -importe”. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe>

ZELL-ZIEGLER, C.; FÖRSTER, H.: (2018) “Mit Suffizienz mehr Klimaschutz modellieren: Zwischenbericht”.