

|||| 研究ノート ||||

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（I）

陳 禮 俊

Abstract

In 2020, global phenomena such as unprecedented scale forest fires, storms, melting glaciers, and dramatic declines in northern polar glaciers are very likely to be caused by climate change. By the middle of this century, it is becoming clear that it is not enough for Germany's greenhouse gas emissions to be cut by 80% compared to 1990 levels. In December 2015, to meet the climate targets agreed in the Paris agreement, stricter cuts from Germany are required, limiting global temperature rises to an average of 2°C (better 1.5°C) compared to pre-industrial levels. With regard to the transition of Germany's energy systems, this paper begins with a comprehensive model of the Germany power and thermal sector in future energy systems with a major contribution to renewable energy technologies. Based on REMod-D (Renewable Energy Model - Germany), the basic structure is summarized briefly. Then, we introduce some of the simulation results by REMod-D models by Philip et al. (2020). The aim is to assess the energy transition and the possibility of climate-neutral systems in Germany.

Keywords: Paris agreement, power and thermal sector, REMod-D model, future energy systems, climate-neutral system

はじめに

2011年に、ドイツ議会は、ドイツのエネルギーシステムの転換に向けた新たな野心的な目標を承認した。この転換に向けた重要な戦略は、再生可能エネルギー源からの電力供給の計画的な増加を義務付ける。第1に、再生可能エネルギー源からの電力供給の割合は、2050年に80%に増加する（2020年は35%，2030年は50%，2040年は65%）。第2に、ドイツの主要エネルギー需要を、2008年と比較して、2020年までに50%，2050年までに80%に削減する

ことが決定された (BMW i, 2012)。さらに、ドイツは、1990年と比較して、2050年までに、温室効果ガスの排出量を80~95%削減するというEUの目標を支持している (EC, 2011)。長期的な目標は、明確に定義されているが、これらの目標を達成するために、どの経路を歩むか？そして生産、転換、需要側の最適な組み合わせは何かについて、依然として大きな不確実性が存在する。しかし、需要面での省エネ、転換チェーンのエネルギー効率、生産側の再生可能エネルギー源から生産するエネルギーの大部分が、これらの長期的な目標を達成するための重要な要素であることは間違いない。

2020年に、前例のない規模の森林火災、嵐、融解氷河、北部極地の氷河の劇的な減少などの世界的な現象は、気候変動に起因する可能性が、非常に高い地球規模の気候の変化を強く示している。世界中の気候関連の微量ガス排出量を、大幅に削減するための大規模な政策転換と効果的な措置が求められている。今世紀半ばまでに、1990年の水準に比べて、ドイツの温室効果ガス排出量を、80%削減するだけでは、不十分であることが明らかになりつつある。2015年12月に、パリ協定 (Paris agreement) で合意された気候目標を達成するために、ドイツはより厳しい削減が必要であり、世界の気温上昇を工業以前の水準と比較して、平均2°C（より良い1.5°C）に制限する必要がある。2019年に、新たに設立された欧州委員会も欧州連合 (EU) の気候保護目標を引き上げており、いわゆる「欧洲グリーンディール (European Green Deal)」は、2050年までに、「気候中立の欧州 (climate-neutral Europe)」を達成することを目指している (EC, 2019)。

本稿は、ドイツのエネルギーシステムの転換に関して、まず、Henning and Palzer (2014) と Palzer and Henning (2014) による「再生可能エネルギー技術の主要な貢献を持つ将来のエネルギーシステムにおけるドイツの電力・熱部門の包括的モデル：REMod-D（再生可能エネルギーモデル－ドイツ）」に基づき、その基本構造を簡潔にまとめる¹⁾。次に、Philip et al. (2020) に

1) Henning and Palzer (2014) では、ドイツのエネルギーシステムの2つの主要部門、すなわち、電力部門と熱部門に対して、体系的な最適化を行う新開発モデルである

よる「気候中立エネルギーシステムへの道：社会の文脈におけるドイツのエネルギー転換」を検討し、REMod-Dモデルによるシミュレーション結果の一部を考察する。その目的は、ドイツにおけるエネルギー転換と気候中立システムの可能性を評価する。本稿は以下のように構成されている。第1節では、エネルギーシステムモデリングアプローチについて、簡潔にまとめる。第2節、第3節および第4節では、単独要素モデル、システムシミュレーションおよび最適化手法と計算性能について述べる。第5節と第6節では、REMod-Dモデルによるシナリオ分析と方法論について分析する。第7節では、そのシナリオシミュレーション結果の一部を考察し、最後に結論をまとめ、今後の課題について述べる。

1. エネルギーシステムモデリングアプローチ

再生可能エネルギーの普及を考慮した国家レベルのエネルギーシステムの様々なシミュレーションモデルが存在するが、電力部門と熱部門の両方からの需給を組み合わせることができるモデルはごくわずかである。過去に開発されたエネルギーシステムモデルの多くは、電力部門とその発展に焦点を当てているが、むしろ熱部門を無視したり、詳細にカバーしていない（Henning and Palzer, 2014）。

REMod-Dモデルは、システム費用を最適化し、数年の期間にわたって、エネルギーシステムの進化を表すために利用される。同等の目的を持つ他のモデルは、例えば、5年の時間ステップで、最大40年の最適化を行うIKARUS（Markewitz and Stein, 2003）またはPERSUSエネルギー供給システム関連支出の最小化に焦点を当てたである（Enzensberger et al., 2002）。これらの費用最適化ツールは、ある程度の熱部門をカバーしているが、建物の改裝や中央集中型システムのための代替将来の熱技術のような関連する影

「REMod-D（再生可能エネルギーモデル－ドイツ）」について、再生可能エネルギーの高い割合を特徴とする将来のエネルギーシステムに焦点を当てて説明した。Palzer and Henning（2014）では、ここで説明したモデルで行われたシミュレーションの結果を提示し、分析した。

響の詳細な説明はない。

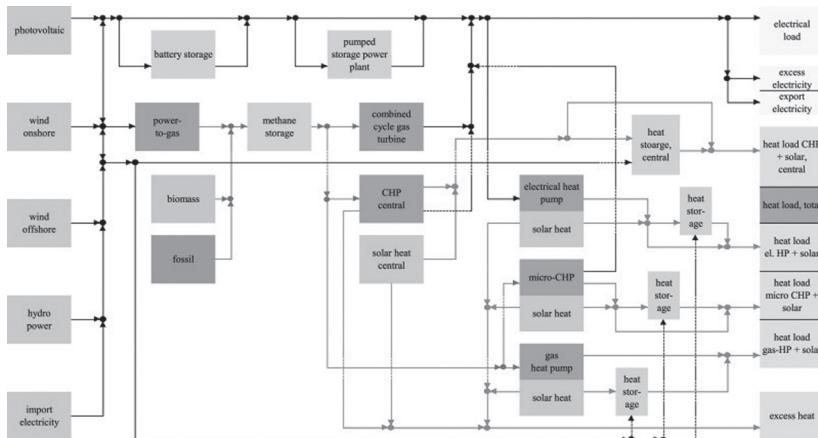
本稿で紹介する「REMod-Dモデル」は、電力と熱の両方を含む複雑なエネルギーシステムで、建物と電力部門の詳細なモデリングのギャップを埋める。また、再生可能エネルギー源の普及率が、高い複雑な将来エネルギーシステムの総費用最適化は、1年間のシミュレーションを経て、毎時の時間ステップで行われる (Henning and Palzer, 2014)。

REMod-Dモデルの基本的な概念は、エネルギー生産者、コンバータ、貯蔵設備 (storage devices)、消費者の固定トポロジー (topology) を設定し、年間全体の費用を最小限に抑えるという目標を達成するために、規模を最適化することである。

最初の事例として、ドイツで生産された再生可能エネルギーによって、電力・熱部門の需要を完全にカバーし、近隣諸国とのエネルギー交換が許可されるシステムが定義されている (さらに「100% シナリオ」と呼ばれる)。システムの概略を図1に示す。このシステムは、太陽光発電システム、陸上・洋上風力発電、水力発電所を一次発電機として含んでいる。太陽熱コレクタは、集中型熱システムまたは分散熱システムに接続され、一次熱発生器として機能する。二次発電機は、コジェネレーション (集中型、分散型) と複合サイクル発電所を組み合わせたものである。どちらも、バイオマスから得られたガスまたは一次再生可能電力 (power-to-gas) から生産されたガスのいずれかを利用する。電力負荷 (electric load) は、公共のグリッドに接続されているすべての電力消費者の総負荷によって与えられるが、これは、熱や温水に利用されるだけでなく、電気ヒートポンプによる電力負荷を加えたものである。熱負荷は、集中型熱生産 (地域熱ネットワーク) に接続された建物と分散型熱システムを備えた建物のために、別々に処理される。分散型熱システムを備えた建物では、電気ヒートポンプ、分散型コジェネレーション、ガスヒートポンプの3つの技術が区別される。後者は、主にドイツで、現在利用されるガスおよび石油ボイラー (凝縮、非凝縮) のフォローアップ技術として考えられている。モデルには、ポンプ式水力蓄電と電気の直接貯

蔵のための電池、再生可能エネルギー（power-to-gas）からのガス貯蔵（ドイツでは一般的に大きな洞窟）、集中型および分散型の蓄熱貯蔵の5つのタイプが含まれている。

図1 REMod-Dモデルのドイツのエネルギー・システム（電気・熱部門）モデルのトポロジー



出典：Henning and Palzer (2014)

2. 単独要素のモデル

以下では、Henning and Palzer (2014) によるすべての要素 (component) の利用モデルの仮定について説明する。費用の数値は、学習曲線モデルに基づく将来の予想費用に基づいている。これは、すべての技術に対して、大規模な生産と技術進歩による費用削減の可能性の広範な市場導入と、活用後に達成されると予想される将来の費用価値が評価されることを意味する。現在では、異なる技術が、開発の異なる段階を達成する。したがって、将来の費用価値を想定する値が異なっている。各技術に関する重要な文献を調査し、将来の費用が予想される場合は、モデルに平均値を利用する。

2.1 要素の読み込み

2.1.1 電力負荷 (Electric load)

計算に利用されるドイツの年間電力需要は、熱や温水に利用される電力なしで、500TWhに相当する。熱と温水の電気はシミュレーションによって決まる。この値は一定のままであると仮定され、すなわち、費用関連の効率測定はモデルに実践されておらず、最適化の対象となっていない。年間8,760時間を超える電力需要を分散させるために、「欧州電力送電システム事業者ネットワーク (European Network of Transmission System Operators for Electricity ; ENTSOE)」が発表した年度の毎時負荷プロファイルを利用する。このような負荷データは、送電ネットワークまたは流通ネットワークに接続されたすべての設置によって、吸収される毎時平均の有効電力 (active power) と呼ばれる。1時間毎の平均値として計算されるので、完全に正確ではなく、REMod-Dモデルの目的に十分な品質である (ENTSOE, 2011)。

2.1.2 熱負荷 (Heating load)

ドイツの建築ストック全体の年間熱エネルギーは、780.8TWh (2010) に相当する (BMWi, 2012)。この熱需要は、住宅、第3次および産業部門のすべての建物の総量に対応している。これらの建物は、すべて $6,300 \times 106 \text{ m}^2$ ($3,400 \times 106 \text{ m}^2$ 住宅 (Diefenbach et al., 2010), $2,300 \times 106 \text{ m}^2$ (Fraunhofer ISI et al., 2007), および独自の計算に基づいて、 $600 \times 106 \text{ m}^2$ の加熱された有用床面積を表す) (EC, 2011)。毎時の加熱需要である $P_{heating}$ は、次の式で簡単に計算される：

$$P_{heating} = \begin{cases} 0 & \text{if } T_{amb} > T_{set} \\ k(T_{set} - T_{amb}) & \text{if } T_{amb} \leq T_{set} \end{cases} \quad (1)$$

T_{amb} は、特定の時間の周囲の空気温度 (乾球温度) を示し、 T_{set} は加熱システムの動作に設定された温度を設定する。シミュレーションでは、 T_{set} は 15°C とした。 k は、全体の合計が年間値の合計を等しくなるような、選択さ

れた定数係数である。

ドイツのエネルギー政策では、省エネ建物の改造は、化石燃料および関連するCO₂排出量の削減のための重要な措置の1つと見なされている。REMod-Dモデルの最適化プロセスに、省エネ建物の改造を含めるため、レトロフィット対策の平均費用曲線が開発された。ドイツにおける省エネ建物の改造費用に関する多くの研究は、特定の費用、すなわち、エネルギー標準の達成レベルの増加に伴う投資額が増加することを示している（DENA, 2010；Kenkmann et al., 2011；DENA, 2011；Schulze and Neitzel, 2013）。

2.1.3 溫水負荷（Hot water load）

ドイツのエネルギー部門における2010年の温水の年間エネルギー需要は、105.3TWhに相当する（BMWi, 2012）。この温水需要は、住宅、第3次および産業部門のすべての建物の総量に対応している。単純な理由から、この値は、一年のすべての時間にわたって、均等に分配された、すなわち、各1時間の量は、1万2,015MWhである。この値は一定のままであると仮定し、すなわち、モデルには費用関連の効率測定が実践されていない。

2.2 生産要素

2.2.1 洋上風力

洋上風力発電所による発電を推定するために、2011年にTenneT TSOの送電網に接続された北海のすべてのドイツ洋上プラントの四分の1時間のフィードインを表すフィードイン曲線が利用される（TenneT TSO, 2011）。このフィードイン曲線は、1時間の四半期ごとに、加重された算術平均を構築し、すべての値を平均の設置設備容量で、正規化することで転換される。結果の曲線は、約3,500全負荷時間を表す。

2.2.2 陸上風力

2011年に、ドイツ陸上で風力発電を行う場合、上述と同様の方法を用い、

別の出典を適用する (EEEAG, 2011a)。連続的な設置と再生可能な電源が行われるため、フィードイン曲線は、対応する月の平均設置設備容量のすべての値を正規化することによって転換される。

2.2.3 太陽光発電システム

2011年に、ドイツで行われた太陽光発電の送電曲線の発電と変遷については、上述と同様の方法が用いられ、異なる出典 (EEEAG, 2011b) を適用する。

2.2.4 水力発電

水力発電所による発電を推定するために、2011年にドイツに設置された水力発電所の割合の毎時フィードインを表すフィードイン曲線を基礎として利用する (EEEAG, 2011c)。不完全なため、このフィードインの値は正規化され、設置された設備容量に対して、スケールアップされる。

2.2.5 太陽熱コレクタ

太陽熱コレクタシステムは、太陽エネルギーを熱に直接転換することができる。これらのシステムは、地域の熱ネットワークに接続するか、単一の建物の分散型の設置に設置することができる。このようなシステムは、温水負荷の一部と空間熱負荷の一部を賄うことができる。しかし、空間熱負荷と太陽光の恵みとの間の季節的な不一致のために、季節的な貯蔵を利用しない限り、熱への寄与は比較的小さい。太陽コレクタの場合、時間単位の有用なコレクタエネルギー出力 $Q_{use,i}$ は、太陽コレクタの実際の毎時平均地球放射 G_i 、および実際の貯蔵温度 T_{Stor} と実際の毎時平均周囲温度 T_{amb} の差に基づいて、時間ごとに計算される (BMU, 2010)。

$$Q_{use,i} = A_i \times G_i \times \eta_{coll,i} \times 3600 \text{ s} \quad \text{with} \\ \eta_{coll,i} = \left[c_0 - c_1 \times \left(\frac{T_{Stor} - T_{amb,i}}{G_i} \right) \right]^+ \quad (2)$$

$\eta_{coll,i}$ は、コレクタの光学効率と熱損失係数であるコレクタ効率と c_o および c_i をそれぞれ示す。2角かっここの“+”は、結果が“0”より大きく、それ以外の場合は“0”に設定されている場合にのみ式が利用されることを示す。指数*i*は、3つの異なる向き（南東、南、南西）と南ドイツ（Würzburg）とドイツ北部（Braunschweig）を表す2つの異なるサイトを表している。総コレクタ領域 A_{tot} は、6つの異なるサブエリアに分けられ、各領域について、傾いたコレクタ（45度の傾き）上の実際のグローバル放射線を、ソフトウェアDESIRE（Quaschning, 2008）を用いて、1時間ごとに計算する。各場所の周囲温度を利用して、コレクタ方程式が解かれ、各時間の有用なコレクタ出力の合計、 $Q_{use,tot}$ は、各サブエリア、 $Q_{use,i}$ の6つの単一値を合計して計算する。

$$Q_{use,tot} = \sum_{i=1}^6 Q_{use,i} \quad (3)$$

総コレクタ面積の50%が南部に位置し、50%がドイツ北部に位置すると仮定した。そして、総コレクタ面積の30%が南東向き、40%が南向き、30%が南西向きであると仮定した。このアプローチは、太陽熱コレクタシステムの空間分布と角分布を考慮するために適用される。

2.3 転換要素

図1のトポロジチャートに統いて、モデル化されたエネルギー・システムには、5つのエネルギー・コンバータがある。これらのコンバータは、以下に説明し、電力からガスへ（power-to-gas）、ガスから電力への転換（gas-to-power）、コジェネレーション（cogeneration）、電力から熱へ（power-to-heat）、およびガスから熱へ（gas-to-heat）の転換を意味する。

2.3.1 電力からガスへ（power-to-gas）

合成ガス（水素やメタンなど）の生産は、再生可能な電力から化学燃料を生産する選択肢の1つである。さらに、メタンに関しては、現在すでに利用

可能な流通および貯蔵システムを利用する可能性がある。特にドイツでは、再生可能エネルギーの利用可能性と負荷の季節的な不一致を克服するための選択肢として、合成燃料の生産に関する活発な議論が進行中である。また、水素を直接利用したり、メタンへのさらなる転換を行ったりすることの長所と短所も、積極的に議論されている (Beneking, 2011)。REMod-Dモデルでは、電力からガスへの0.60の一定の転換効率を仮定することによって、非常に簡単な方法で、一般的なpower-to-gas要素を実践した。これは、メタンへの電力の平均転換値であり、メタン生産に必要なCO₂源に大きく依存している (Sterner, 2009)。この技術の潜在的な長期的な将来の費用は、価値の広い範囲を持っている。

2.3.2 複合サイクル発電所 (gas-to-power)

複合サイクル発電所は、ガス（再生可能エネルギーからの天然ガスまたは合成ガス）を電気に転換するための大規模な高効率ユニットである。大規模な設備容量で設置されているため、廃熱を利用することが難しい場合が多い。また、廃熱量は、電力生産の転換効率が高いため、比較的少ないである。

2.3.3 コジェネレーション (cogeneration)

コジェネレーション (Combined heat and power plants ; CHP) を組み合わせて、ガス (power-to-gas : 再生可能エネルギーからの天然ガスまたは合成ガス) からの電力と熱の同時生産に利用される。REMod-Dモデルでは、2種類のCHP規模、すなわち、1つの建物に設置された地域熱ネットワークと小さなユニットと組み合わせて動作する大型ユニットを考える。大型システムでは、電力と熱を発生させる組み合わせモードで、または電気だけが生産されるモードで動作できると仮定する。最初の動作モードは、電気性能が低く、熱負荷を直接供給するか、集中型の蓄熱を充電することによって、熱を利用できる場合にのみ利用される。大規模システムと小規模システムは、転換効率と費用の両方で異なる。熱 (η_{Heat})、電力 ($\eta_{Electricity}$) の転換効率

値は、次のように定義される：

$$\eta_{Heat} = \frac{Q}{E_{Gas}} \quad \text{and} \quad \eta_{Electricity} = \frac{E_{electric}}{E_{Gas}} \quad (4)$$

E_{Gas} は、ガスのエネルギー含有量を示し、 Q と $E_{electric}$ は、それぞれ有用な熱出力または電気エネルギー出力を表す。

2.3.4 電気ヒートポンプ (power-to-heat)

電気ヒートポンプシステムは、熱湯の製造だけでなく、熱用途にも利用できる。この目的のために、これらは、地面、地下水や周囲の空気などの異なる熱源を利用することができる。これらのシステムは、電気抵抗に基づく簡単なヒーターと比較して、熱に電気のはるかに効率的な転換を可能にする。そのため、REMod-Dモデルでは、電気を熱に転換するためのヒートポンプのみが、電気式の加熱システムと考えられている。しかし、余剰電気を熱に転換するために、ヒートロッドを利用することができる。ドイツ全土の多くのヒートポンプシステムの長期モニタリングに基づいて、その長期的な性能についての詳細な数字が存在する (Miara et al., 2011a ; Miara et al., 2011b)。これらの結果に基づいて、REMod-Dモデルは、電気の熱への転換係数を仮定し、 E_{ehp} を (5) と定義する。

$$E_{ehp} = \frac{Q}{E_{electric}} \quad (5)$$

この要因は、建築部門のエネルギー基準に依存すると仮定した。これは、低温加熱システムが、低い熱需要を持つ建物で採用することができるという事実に基づいている。加熱システムの供給温度が低いほど、ヒートポンプのエネルギー性能が高くなる。利用する関数は、建物の熱需要の減少に伴い、温水需要の相対的な割合が増加することを考慮している。温水の生産は、常に約60°Cの温度を必要とし、建物のエネルギー基準に依存していない。

2.3.5 ガスヒートポンプ (gas-to-heat)

化石燃料を熱に転換するために、現在利用されている支配的な技術は、石油またはガスボイラーである。最大で、これらのシステムは、燃料内のエネルギーと同じ量の低温熱に転換する。熱市場に設置されるシステムの増加は、また、バーナーの排気ガス中の水蒸気の凝縮熱を利用するボイラーを凝縮している。最近、多くの開発は、より効率的なシステム、すなわち、燃料の「エクセルギー (exergy)」含有量を、より良く利用するシステムによって、この熱技術の置き換えに焦点を当てている。²⁾ 最初のフィールドテスト結果は、パフォーマンス値の係数である COP_{ghp} を式(6)に示す。

$$COP_{ghp} = \frac{Q}{E_{Gas}} \quad (6)$$

COP_{ghp} が最大1.4として定義されている (Krewitt, 2009; Schramek, 2007; BMVBS, 2012)。この技術はまだ初期段階にあるため、性能の大幅な向上が期待できる。すべての熱技術の費用は、標準的な集中型または分散型熱技術、それぞれ、地区熱またはオンサイト熱のためのガスを利用して、凝縮ボイラーの費用で計算の後半で削減されることを留意すべきである。これらの技術は、とにかく設置する必要があるため、標準参照技術の基本的な費用は考慮されない。しかし、将来のエネルギー・システムでは、主に再生可能エネルギーを利用して、合理的な熱力学的効率を実現する技術のみが、正当化されると考えている。与えられた費用には、熱源とその利用の費用が含ま

2) エクセルギー (exergy) とは、『系が外界との熱・仕事を交換しながら、外界と平衡するまで状態変化するとき、系から理論上取り出せる最大の仕事量』のことである。availability, available energy, 有効エネルギーなど、とよばれることもある。熱力学第2法則によると、熱を仕事に変換するには、常にカルノー効率による制約が伴うので、熱に関連したエネルギーを扱うときには、そのうちの有効に仕事に変換できる部分とできない部分とを区別して扱うことが必要である。前者がエクセルギーとよばれる。熱力学第1法則（エネルギー保存則）は、常に成り立つので、外界を含めた拡大系では、エネルギーの量は一定不变である。「省エネルギー」、「エネルギーを節約する」と言うときの「エネルギー」は、「エネルギーの価値」、「エネルギーの質」の意味であり、これがエクセルギーに対応していると考えられる。省エネルギーを念頭において、機器の開発や改良を行う際には、エクセルギーを用いた評価法は、極めて有力な手段となる。

れる。

2.4 貯蔵要素

貯蔵要素は、非送電可能な再生可能エネルギーの高い割合を持つ将来のエネルギー・システムの中心的な役割を果たす。REMod-Dモデルには、蓄電（ポンプ式水力蓄電、電池）、ガス貯蔵（洞窟）、蓄熱（集中型、分散型）の3つの主なタイプの貯蔵が含まれている。

2.4.1 ポンプ式水力貯蔵

ドイツのポンプ式水力貯蔵の設置貯蔵設備容量は、合計約40GWhで、最大総電力設備容量は、約6.7GWである（DENA, 2010）。既存の設置済み環境や新しい貯蔵システムの多くの拡張は、開発中または計画段階にある。今後は、電力設備容量10GWで、60GWhの総貯蔵設備容量が利用可能になると想定している。この数値は最適化の対象ではなく、すべてのシミュレーション実行で、定数として設定されている。貯蔵転換の効率は、全体として、0.8と想定される（SRU, 2011）。

これは、バッテリーが年間200日利用されると仮定して、約3,000単位の負荷サイクルに相当する。

2.4.2 電池

電池は電気化学プロセスで、電気を高効率で蓄せる。非送電可能な再生可能電力エネルギーの貯蔵の必要性と、自家用車の電気輸送コンセプトへの関心は、世界中の多くの研究開発活動を刺激し、この部門で強力な技術向上をもたらした。多くの研究は、バッテリーシステムの潜在的な将来の費用とパフォーマンスについて議論した（BMWi, 2009；Nielsen, 2011）。REMod-Dモデルでは、全体的な貯蔵効率のための単純な単一の値で、パフォーマンスを記述する非常に単純なバッテリーモデルを利用する。

2.4.3 ガス貯蔵

天然ガスの貯蔵のためのドイツの設備容量は、350TWhに相当する350億m³の範囲にある。REMod-Dモデルでは、この貯蔵設備容量は、「電力からガスへ（power-to-gas）」コンバータで、再生可能電力によって、生産された合成ガスの貯蔵に利用可能であると仮定する。シミュレーションの間、最適化の結果として、発生する必要なガス貯蔵設備容量が、この限界を超えないように制御しただけである。さらに、エネルギーの1%が、ガスネットワークの動作に失われたり、利用されたりすることと仮定し、既存のインフラのために余分な投資はないと仮定する（BDEW, 2011）。

2.4.4 集中型蓄熱

貯蔵媒体として、水を利用した集中型蓄熱は、熱部門における長期的な（季節的な）ミスマッチを克服するのに、役立つ長期貯蔵のための興味深い選択肢である。例えば、デンマークでは、非常に大規模な蓄熱設備が、ここ数年で実現され、最近では、さらに多くの設備が、それぞれ計画段階または建設段階にある（Braun, 2012）。これらの貯蔵施設は、すべて地域の熱ネットワークに接続され、多くの設置設備では、ヒートポンプやコジェネレーションの熱供給システムに加えて、大規模な太陽熱コレクタフィールドが設置されている。

REMod-Dシミュレーションで利用される物理モデルは、単純な单一ノードモデルである。したがって、太陽熱コレクタの性能に、特に有益な階層化のプラスの影響を過小評価している。蓄熱物のエネルギーバランスは、次の微分方程式によって与えられる：

$$C_{Stor} \frac{dT_{Stor}}{dt} = \eta_{charge} \times P_{charge} - P_{discharge} - P_{loss} \quad (7)$$

$$P_{loss} = UA_{Stor}(T_{Stor} - T_{amb,Stor}) = \frac{C_{Stor}}{\tau_{Stor}} \times (T_{Stor} - T_{amb,Stor}) \quad (8)$$

上記式の C_{Stor} は、貯蔵の総熱設備容量を示し、貯蔵温度を T_{Stor} 、保管時の

効率を η_{charge} （パイプ損失を考慮して）、 P_{charge} は貯蔵に供給される総熱量を充電し、 $P_{discharge}$ は貯蔵から取り除かれた総熱量を放電し、貯蔵損失を P_{loss} にし、 UA_{Stor} は総熱損失係数、 $T_{amb,Stor}$ は貯蔵周囲温度（地下の貯水所の場合は地上温度）と τ は自己放電のための貯蔵の時定数を表す。この微分方程式はオイラー法を用いて数値的に分解する。

2.4.5 分散型蓄熱

分散型蓄熱装置は、建物のエネルギーシステムに2つの主要な機能を持っている。太陽熱エネルギー供給と熱負荷の間の不一致を克服することができる。一方で、ヒートポンプを介して間接的に、または電力を熱に転換することによって、余分な再生可能な電力を吸収することができる。最後の選択肢は、他の熱力学的により有利な利用が、不可能な場合にのみ利用する必要がある。

2.5 その他の側面

エネルギーシステム全体のその他の構成要素は、電力（電気、ガス、熱）や、再生可能エネルギーが100%未満の場合には、バイオマスや化石燃料などの資源である。電力の輸出入は、欧州のトランクナルな電力網の一部を持ち、エネルギー管理の選択肢である。

2.5.1 電力網

既存のドイツ電力網（グリッド）の全長は178万キロメートル（km）で、そのうち、116万kmは低電圧レベルに属し、中電圧レベルには約50万7,210km、高電圧レベルは7万6,279km、超高電圧レベルは約3万5,708kmである（BDEW, 2011）。低および中型の電圧レベルの70%以上が、地下に設置されているが、高電圧レベルと超高電圧レベルの大部分は、架空線として設置されている。

電力網インフラの必要な拡大にかかる費用を考慮するために、さまざまな

データを簡素化するために、平均費用を計算する。

2.5.2 ガスネットワーク

既存のドイツの天然ガスネットワークの全長は、約44万3,000kmである。それは3つの異なる圧力レベルで作動する。REMod-Dモデルでは、ガスネットワークのO&Mに関連する費用を計算しない。ガス関連要素の規模の影響は、ガスネットワークのO&M全体の費用に関して、非常に小さいと仮定する。

2.5.3 热ネットワーク、地域热ネットワーク

地域熱ネットワークは、水または蒸気によって、熱伝達流体として、操作されるネットワークを介して、接続されている様々な熱生産者と消費者の共通の操作を可能にする。ここでは、大規模な蓄熱装置の統合が可能であり、熱生産と熱消費の間の不一致を克服する上で役に立つ。

地域熱ネットワークの主要な費用は、建物と建物内の熱伝達ユニットへの接続によるもので、広範囲に及ぶ中央ネットワークは、全体的な費用に寄与しない。REMod-Dモデルの分析では、集中型熱供給によって、カバーされる総最大熱能力（温水熱を含む）の関数として、地域熱ネットワークの全体的な費用を計算する。

2.5.4 バイオマス

エネルギー用途に、ドイツで利用されたバイオマスの総量は、2010年には、311TWhに及んだ（BMWi, 2012）。この約50%は、固体バイオマス（例えば、木材、木材チップ）、液体（例えば、バイオディーゼル）に18%，気体バイオマス（例えば、バイオガス、廃ガス）に32%に相当する。現在の視点から見ると、今後エネルギー目的で、どのくらいのバイオマスが利用できるかは、非常に不確実である。バイオマス製品は、ほとんどすべてのバイオマスを高温に転換できるため、エネルギー用途に利用される将来のバイオマ

スの大部分は、産業プロセスの熱生産、特に液体または気体の形態で、輸送部門に利用されると考えている。この不確実性のため、電力および熱部門では、50TWhが利用可能であり、熱力学的効率の高い転換プロセスと組み合わせてのみ利用されると仮定する。利用されるバイオマスの量は、すべてのシミュレーションにおいて、一定の値として扱われ、最適化の対象ではない。

2.5.5 電力の輸出入

2010年に、ドイツは59.9TWhの電力を輸出し、42.2TWhを輸入した(BMWi, 2012)。将来的には、欧州の電力網内の他の国との電力の輸出入を増やす興味深い選択肢かもしれない。これは特に、ある国の過剰生産が、異なる気象条件や需要や再生可能エネルギー源の変動による生産に影響を与えるその他の要因のために、他国（またはその逆）の不足に対応している場合に当てはまる。一般に、他国が大規模な長期保管能力（例えば、オーストリア、ノルウェー）を提供できる場合、交換は高い関心を持つ。しかし、基礎となる市場モデルや価格政策が不明なため、将来のエネルギーシステムが電力の輸出入に、どれだけ依存できるかを評価することは、非常に困難である。そこで、REMod-Dモデルでは、輸入可能な最大電力設備容量を定義することで、電気の輸出入を簡単に実施する。再生可能エネルギー源と集中型のコジェネレーションを組み合わせた電力生産が、実際の電力需要を下回る場合には、負荷複合サイクル発電所を満たすのに、十分な電力が利用できない場合のみ、前に定義された最大値まで電力を輸入する。感度分析により、主要要素の最適な規模、特にpower-to-gas、ガス貯蔵、複合サイクルサブシステムなどの長期貯蔵要素に対するこの運用戦略の影響を評価できる。

2.5.6 化石燃料

再生可能エネルギー源から供給される電力・熱部門のエネルギーシステムの組成を決定するために、REMod-Dモデルは、化石燃料の一部を含むよう拡張された。化石燃料は、熱力学的効率の高い転換プロセスと組み合わせ

て、利用されるだけであると仮定する。例えば、加熱用の化石燃料を燃やするための古典的なボイラーではなく、ガスヒートポンプが実践される。シミュレーションの開始時に、化石燃料の量を固定し、プログラムがすべてのコンバータの最適な組成を決定できるようにする。

3. システムシミュレーション

REMod-Dモデルは、図1に示す位相幾何学（topology）に従って、エネルギーシステムの毎時エネルギーバランスを計算することである。³⁾ この計算は、8,760時間（または1年）に対して繰り返される。年間シミュレーションの開始時と終了時に、集中型蓄熱が同様の温度になるまで、第1ループで合計年度の計算が繰り返される。第2ループは、ガス貯蔵の充填が年始と年末に、同じ値を有することを保証するために、太陽光発電変換器の必要な設備容量を決定するために実施される。すなわち、年間中性エネルギーバランスの基準が満たされる。次に、エネルギーシステムのこの組成に関連する年間総費用が計算される。

ここでは、実際の条件に応じて、毎時のエネルギーバランスを計算する順序を説明する。操作の一般的な概念は、常に最高の熱力学的効率を保証する転換を選好する戦略に従う。次に、最高レベルの熱力学効率を持つ次の転換選択肢は、コンバータまたは貯蔵の設備容量が限られているため、前のレベルでの転換が、不可能になった場合にのみ受け入れられる。

3.1 热サブシステム

4つの異なる技術システムが、電気ヒートポンプ (f_{eHPP})、ガスヒートポンプ (f_{gHPP})、分散熱と電力 (f_{dCHP})、集中化された熱と電力 (f_{cCHP}) の全建物部

3) 位相幾何学は、何らかの形（あるいは「空間」）を連續変形（伸ばしたり、曲げたりすることはするが、切ったり貼ったりはしないこと）しても保たれる性質（位相的性質または位相不変量）に焦点を当てたものである。位相的性質において、重要なものは、連結性およびコンパクト性などが挙げられる。位相幾何学は、空間、次元、変換といった概念の研究を通じて、幾何学および集合論から生じた分野である。

門の熱負荷をカバーするために、設置されていることに留意する必要がある。太陽熱コレクタは、さらに利用することができるが、熱および温水の需要の100%を供給することができないため、別々に処理される。1つのシミュレーションでは、いずれかの技術で、供給される建築部門全体の割合が固定されている。4つの技術の全ての割合の合計は、常に“1”でなければならぬ。

$$f_{elHP} + f_{GHP} + f_{dCHP} + f_{cCHP} = 1 \quad (9)$$

太陽熱コレクタについては、分散型熱システムを備えた建物に設置された太陽熱コレクタとは別に、集中型CHP (f_{cCHP}) および地域熱ネットワークと組み合わせて、設置された太陽熱コレクタを処理する。このように、単一のシミュレーションでは、太陽熱コレクタ領域は、地域熱と組み合わせて設置され、 $A_{coll, centralized}$ は、すべての分散熱システムに設置された太陽コレクタ領域、固定値を有する。分散熱システムを用いた建物部門の3つのアンサンブル間の太陽熱コレクタ面積の分布は、熱技術自体と同じである。したがって、

$$A_{coll, decentralized} = A_{coll, elHP} + A_{coll, GHP} + A_{coll, dCHP} \quad (10)$$

$$A_{coll, elHP} = f_{elHP} \times A_{coll, decentralized} \quad (11)$$

$$A_{coll, GHP} = f_{GHP} \times A_{coll, decentralized} \quad (12)$$

$$A_{coll, dCHP} = f_{dCHP} \times A_{coll, decentralized} \quad (13)$$

各サブシステムでは、実際の太陽熱発生の $P_{gen,sol}$ が特定のサブシステムの実際の熱負荷を超えるか下回るかによって、2つの主なケースを区別する必要がある。

3.1.1 電力サブシステム

最初のステップは、電力の総負荷 ($P_{load, el, tot}$) を計算することである。 $P_{load, el}$ は、非エネルギー利用による電力負荷で構成されている。 $P_{el, elHP}$ は、電気ヒートポンプを動作させるために必要な電力である。

$$P_{load,el,tot} = P_{load,el} + P_{el,elHP} \quad (14)$$

次のステップは、すべての再生可能エネルギー源、すなわち、洋上風力 ($P_{wind,offshare}$)、陸上風力 ($P_{wind,onshare}$)、太陽光 (P_{PV})、水力 (P_{hydro})、分散型 CHP ($P_{el,dCHP}$)、および集中型CHP ($P_{el,cCHP}$) によって、すべての電源 ($P_{gen,tot}$) を計算することである。それぞれ、それらが熱負荷を賄うために必要な場合、電力を生産する（熱サブシステムを参照してください）。

$$P_{gen,tot} = P_{wind,offshare} + P_{wind,onshare} + P_{PV} + P_{hydro} + P_{el,dCHP} + P_{el,cCHP} \quad (15)$$

2つの主な事例は、実際の生産、 $P_{gen,tot}$ が実際の負荷を超えているかどうかによって、区別されなければならない。したがって、十分な $P_{load,el,tot}$ または $P_{load,el,tot}$ の不足である。

4. 最適化手法と計算性能

前節では、単一ステップのシミュレーション、すなわち、すべての構成要素の規模の与えられた値を用いて、簡潔に説明した。ここでは、最適化の方法とそれに対応する計算パフォーマンスを示す。

4.1 年間総費用の計算

1つのシミュレーションを終えた後、対応する全体的な年間費用、 $C_{annual,tot}$ は、すべての要素の規模の与えられた値を持つエネルギーシステムのために決定される。この費用は、次の式を利用して計算される：

$$\begin{aligned} C_{annual,tot} = & \sum_{i=1}^N \left[C_{spec,i} \times P_i \times \left(\frac{1}{t_i} + m_i \right) \right] \\ & - \left[C_{spec,ref,heat,centr} \times P_{load,heat,max,centr} \times \left(\frac{1}{t_{ref,centr}} + m_{ref,centr} \right) \right] - C_{spec,ref,heat,decentr} \\ & \times P_{load,heat,max,decentr} \times \left(\frac{1}{t_{ref,decentr}} + m_{ref,decentr} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[Q_{heat,spec,ref} \times C_{esbr} \times A_{build,tot} \times \left(\frac{1}{t_{ref,esbr}} + m_{ref,esbr} \right) \right] \\
& + [E_{biomass} \times P_{biomass}] + [E_{fossil} \times P_{fossil}] \\
& + [E_{el,import} \times P_{el,import}] - [E_{el,export} \times P_{el,export}]
\end{aligned} \tag{16}$$

(16) 式の異なる行の意味は次のとおりである。

1行目の指数“*i*”を持つ各合計は、(16)式の最初の行の合計である。エネルギー・システムの各要素の年間費用に相当する。これらの要素は次のとおりである。

- 発電：洋上風力発電、陸上風力発電、太陽光発電システム、水力発電所
- 熱：地域熱システムに接続された太陽熱コレクタ、分散型太陽熱コレクタ
- 転換：power-to-gasコンバータ、複合サイクル発電所、集中型コジェネレーション（CHP）、分散型コジェネレーション、電気ヒートポンプ、ガスヒートポンプ
- 廉藏：電池、ポンプ式水力貯蔵、集中型蓄熱装置
- グリッド：電力網、地域熱ネットワーク

$C_{annual,tot}$ は、この要素の特定の費用を示し、 P_i は設置設備容量（それぞれ電力、エネルギー含有量または面積）、 t_i は寿命で、 m_i はO&M費用（投資費用の割合）を示す。すべての値は指定される。

式(16)の2行目と3行目では、それぞれ集中型と分散型の両方における参照熱技術の費用が差し引かれる。この費用は、最先端の技術を利用した完全に化石燃料ベースの熱部門でも必要である。それにより、高効率システム（電気ヒートポンプ、ガスヒートポンプ、コジェネレーション）の追加費用と標準の熱技術（凝縮ガスボイラー）と比較して、年間総費用を計算する際に考慮される。

4行目は、省エネ建物の改裝（略称“esbr”）を指す。 $Q_{heat,spec,ref}$ は、ベース値（2010）と C_{esbr} の対応する省エネ建物改造の特定の費用の割合として与え

られた建物ストックの平均特定の加熱需要である。 $A_{build,tot}$ は、建物ストックの総床面積である。

5行目で、バイオマスの費用が計算される。 $E_{biomass}$ は、1単位当たりの費用を利用するバイオマスと $P_{biomass}$ の年間エネルギー量である。気体バイオマスや液体バイオマスを生産する多様体の異なる生産技術があるため、単一の技術とそれに対応する費用パラメータは考慮されていないが、バイオマスの平均価格が取られている。同様の方法で、化石燃料の利用を可能にするシナリオの場合には、化石燃料の費用が計算される。6行目では、電気の輸出入の費用と収益は、輸入電力 ($E_{el,import}$)、および関連する平均費用 ($P_{el,import}$)、輸出電力 ($E_{el,export}$)、および対応する収益 ($P_{el,export}$)に基づいて計算される。

4.2 最適化手法

最適化プロセスは、変更された多次元のレギュラファルシアプローチ (regula falsi approach)に基づいている。基礎となる数学と数値解の基礎は、標準的な教科書 (例えば、Gohout, 2012) で見つけることができる。

このアプローチでは、最小値と最大値、 v_{min} と v_{max} は、最適化の対象となる各パラメータに対して、事前定義されなければならない。つまり、パラメータ範囲が定義される。ほとんどの場合、最小値として、ゼロを選択する。最大値は、その特定の要素の妥当な最大設備容量に設定される。建築部門の全体的な熱エネルギー需要については、基準年の水準の20%を、最小値として選択する。熱エネルギー需要の減少は非現実的であろう。最適化対象の各パラメータの最初の反復ループでは、1番目の低い値 v_1 と2番目の大きな値 v_2 ：

$$\begin{aligned} v_1 &= v_{min} + \left(\frac{1}{M} \right) \times (v_{max} - v_{min}) \\ v_2 &= v_{min} + \left(\frac{(M-1)}{M} \right) \times (v_{max} - v_{min}) \end{aligned} \quad (17)$$

式 (17) の2つの値で、年間シミュレーションが実行される。

$M = 3$, $M = 4$, $M = 10$ など、異なる値で作業し、結果を比較する。 M の

値が小さいほど、特定のパラメータの選択値が、パラメータ範囲の中間値に近づく。その逆に、 M の値が大きいほど、特定のパラメータの選択値が、パラメータ範囲の境界に近くなる。最適化の対象となる N 値の組み合わせにより、反復ループ当たり、 2^N の単一シミュレーションが実行される。「100%シリオ」を推定する際には、最適化の対象となる11個の自由なパラメータがあり、 $2^{11}=2,048$ の単一シミュレーションが行われる。1つのシミュレーションごとに、年間総費用が計算される。

最初の反復ループが終了した後、年間総費用の最小値につながるパラメータセットが決定される。次に、最適化対象となる各パラメータについて、パラメータ範囲が小さくなる。パラメータ*i*の値 v_1 が最小の年間費用につながった場合、パラメータ範囲 v_{min} の最小値は変わらず、パラメータ範囲の新しい最大値は次のとおりに減少する：

$$v_{min,new} = v_{min,old}$$

$$v_{min,new} = v_{min,old} + \frac{L}{(L+1)} \times (v_{max,old} - v_{min,old}) \quad (18)$$

パラメータ*i*の値 v_2 が、最小の年間費用につながった場合、パラメータ範囲の最小値である v_{min} が、対応する方法で増加し、 v_{max} は変更されないままである。繰り返すが、 $L=3$ 、 $L=10$ 、 $L=100$ など、異なる値の L でシミュレーションを実行する。 L が大きいほど、パラメータ空間の減少率は、反復ループの1つから次のループに近くなる。したがって、 L の値が大きい場合、 L の値を小さくして、達成されるパラメータ空間の同じ削減を達成するために、より多くの反復ステップが必要である。例えば、 L が3に設定されている場合、各反復で最適化対象となるパラメータごとに、パラメータ範囲が $2/3$ の係数で減少する。 K 反復ループの後、パラメータ範囲は $(2/3)K$ に縮小される。 $K=12$ 反復ループでは、最終的なパラメータ範囲は、最適化対象となる各パラメータの初期パラメータ範囲の約0.771%に等しくなる。

5. REMod-Dモデルによるシナリオ分析

エネルギー転換は、現在のエネルギー供給の大幅な再構築を義務付ける非常に複雑で、野心的な大規模プロジェクトである。REMod-Dモデルでは、現在から世紀半ばまでのドイツのエネルギーシステムの開発経路を検討し、野心に準拠する上記の目標を示す。ここでは、Philip et al. (2020)に基づき、2050年までに、エネルギー関連CO₂排出量を95%，100%削減するシナリオを検討し、シミュレーション結果の一部を紹介する。

現在、エネルギー関連のCO₂排出量は、ドイツの温室効果ガス排出量全体の約86%を占めている。したがって、気候中立エネルギー供給を達成するためのエネルギーシステムの再構築、いわゆる「エネルギー転換(Energiewende)」は、包括的な気候中立性に到達するための最も重要な措置である。その結果は、エネルギー関連CO₂排出にのみ関連しており、可能な転換パス(transformation paths)を計算するために、利用されるシミュレーションおよび最適化モデルREMod-Dは、エネルギー部門のみを完全にマッピングする。

技術的な実現可能性や費用の問題に加えて、社会的行動がエネルギー転換を実施できるかどうか、そして、どのような形で実現できるかにおいて、社会的行動が決定的な役割を果たしていることが、ますます明らかになってきている。公共の態度は、広いスペクトルで異なる。一方で、エネルギーの最も経済的な利用と、可能な限り少ない温室効果ガスの排出に続く行動や、ライフスタイルを引き受ける人が増えている。多くの場所で、風力発電や電力網、すなわち、エネルギーシステムの転換を成功させるために、不可欠なインフラのさらなる拡大に対する抵抗が生まれている。民間の投資決定においても、異なる傾向が観察され、エネルギー消費とCO₂排出量に大きな影響を及ぼし、多くの場合、純粋に経済的な考慮事項を超えた理由に基づいている。これらは、新しい技術(例えば、建築への熱供給や民間電気輸送)の利用に抵抗するかなり固執的な行動から、イニシアチブまで、エネルギー効率対策や民間、コミュニティ、市民レベルでの再生可能エネルギーシステムの

設置を求めるものである。

この側面を考慮に入れるために、ドイツは、特定の行動や態度が支配的な役割を果たす異なる物語に関する4つの主要なシナリオに基づいている。これらは、エネルギー転換の発展のための第2の枠組みを提供する。「固執シナリオ (Persistence scenario)」は、特に、民間部門における新技術の利用に対する強い抵抗、例えば、建物熱供給と民間電気輸送の両方のための燃焼技術への主張によって、特徴付けられる。「非受け入れシナリオ (Non-Acceptance scenario)」は、とりわけ、大規模なインフラ、特に風力タービンや電力網のさらなる拡大に対する強い抵抗、高速道路の上に架線を設置する反対などによって、特徴付けられる。「充足シナリオ (Sufficiency scenario)」は、社会の大部分で、行動の変化が有効になり、エネルギー消費が著しい削減となる発展を表している。気候変動がもたらす危険性に対する意識の高まりに伴う価値観の広範な変化は、例えば、そのような行動の変化をもたらす可能性がある (Philip et al., 2020)。

これらの3つのシナリオは、気候目標の達成を促進、または妨げる特定の条件が定義されていないシナリオとは対照的である「参照シナリオ (Reference scenario)」。

上記のシナリオを推定して、最適化するために、REMod-Dモデルを利用して計算する。REMod-Dモデルは、Fraunhofer太陽エネルギーシステム研究所 (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems; Fraunhofer ISE) で、約10年前に作成され、それ以来集中的に開発されている。

6. 方法論

REMod-Dモデルの基本的な考え方は、ドイツのエネルギーシステムに対して技術的、経済的に実現可能な転換パス (transformation paths) を特定することである。同時に、これらの経路は、エネルギー関連CO₂排出量の削減に関して、定義されている気候政策目標を遵守する。エネルギーシステム（電力、建物熱、産業プロセス熱、輸送）のすべての部門を同時に最適化す

ることにより、これらの部門の相互の影響を考慮に入れる。関連するすべてのエネルギー源、コンバータ、貯蔵施設、およびすべての消費部門が、モデルにマッピングされている。計算の目的は、各シナリオについて、指定される境界条件とパラメータで定義され、2050年までの現在のエネルギーシステムの転換のための費用最適化パスを記述することである（第2節を参照してください）。最終的なCO₂削減目標（例えば、1990年と比較して、95%削減）は、各年に与えられるCO₂パスによって定義される。このCO₂パスは、許容されるCO₂排出量の上限を表し、最適化の基本的な境界条件である。

6.1 再生可能エネルギーモデル

REMod-Dモデルの中心的な特徴は、エネルギーシステムの全消費部門の同時最適化であり、高い時間分解能を持つである（Palzer, 2016; Sterchele, 2019）。シミュレーションでは、現在から2050まで、あるすべての時間を考慮する。シナリオは、2050年までの特定のCO₂削減パスに準拠するドイツのエネルギーシステムの、技術的に可能な費用最適化転換パスを表す。様々な部門の発展に関する仮定に加えて、考慮された技術の費用と効率性に関するもっともらしい発展予測が保存されている。シナリオを作成するために、モデルは、すべての特定の境界条件を満たしながら、可能な限り最小限の費用を最適化するように、利用可能な技術に基づいて、エネルギーシステムの発展を最適化する。

計算に利用される投入データは、異なる時間選択肢の2つのグループに分けられる。2011年から2015年までの実際の気象データに基づく5つのデータセットは、毎時のプロファイルとして保存される。これらは、とりわけ、屋外温度、日照、天候依存の再生可能エネルギー源のフィードインプロファイル、輸送部門における熱需要または駆動プロファイルの時間的経過を記述する。2番目のデータベースには、技術とエネルギーキャリアの技術的および経済的パラメータだけでなく、1990年から2050年までの各年の境界条件が含まれている。ドイツのエネルギーシステムのストックは、1990年から2019年

にかけて提供される。例えば、年数、効率、設置設備容量または発電所やその他のエネルギー・コンバータの数、貯蔵施設、建築内の熱技術、建築や車両の数量が含まれている。2020年から2050年の間に、モデルで行われる最適化プロセスでは、利用可能なすべての技術の費用と効率の発展に関する仮定と、その技術的寿命時間が投入として利用される。また、化石燃料や再生可能エネルギーを利用した海外で生産されるエネルギー・キャリアの費用発展も、年単位で想定している。

このデータベースに基づいて、すべての部門にわたるプラントの将来の発展が最適化される。この最適化には、従来の発電所、変動性再生可能発電機、蓄電施設、熱および化学エネルギー・キャリア、異なるパワートレイン（powertrain）技術を持つ自動車やトラック、電気を水素（H₂）、メタン（CH₄）、液体燃料または熱に転換するためのさまざまな技術に分かれた車両が含まれる。⁴⁾ 最適化は、すべての技術設備が指定される寿命の終わりに、交換されることを前提としている。この時点で、最適化アルゴリズムは、例えば、空間熱部門で、ガスボイラーが別のガスボイラーに置き換えられるか、むしろヒートポンプによって置き換えられるかを決定する。発電所は、供給の安全（エネルギー・バランスは1時間ごとに満たされなければならない）、気候保護（CO₂パス）に基づいて、境界条件によって、制約される反復的な最適化プロセスを利用して、推定される指定された目標値と経済効率（2020年から2050年までの最適化期間全体の可能な限り低い費用）を遵守する必要がある。

6.2 気候政策目標の設定

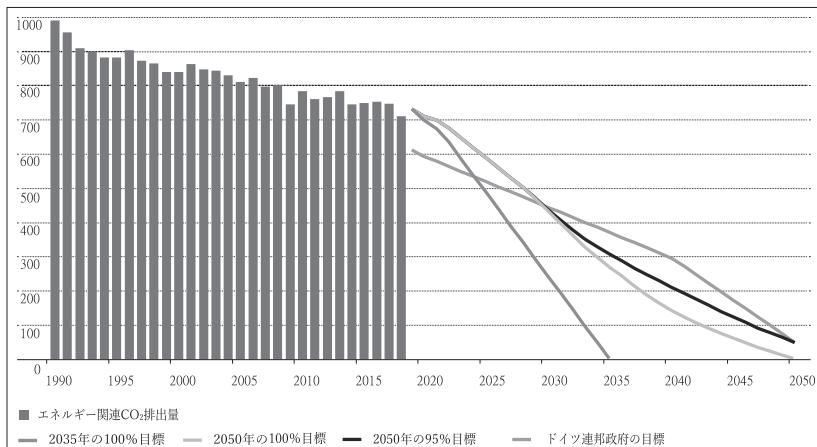
REMod-Dモデル計算は、ドイツ政府のCO₂削減目標に基づいている。モデリングは、エネルギー部門のみを対象とするため、エネルギー関連のCO₂

4) パワートレイン（powertrain）とは、エンジンで作られた回転力を駆動輪へと伝える役割を担っている装置類のことである。エンジンやクラッチ、トランスミッション（変速機）、プロペラシャフトなどを含む動力伝達装置のこと。

排出量のみがバランスに含まれる。この削減は、2050年までに、欧州委員会のグリーンディール目標である気候中立ヨーロッパの目標に最も近いため、エネルギー関連のCO₂排出量を1990年比で、95%削減することが最低目標と設定される。さらに、2050年までに、エネルギー関連CO₂排出量ゼロ（100%軽減）を考慮した2つのシナリオが、ここで計算される。

2019年のドイツのCO₂排出量は、1990年に比べて約35%減少した。⁵⁾したがって、2020年には、1990年の水準に比べて、CO₂排出量を40%削減するという目標が達成される可能性は低い（Eckert, 2020）。結果として生ずる追加排出量を考慮して、ここでは、CO₂削減経路とCO₂予算の組み合わせを利用する。2030年までに、55%の削減目標を達成するため、CO₂排出量を2020年から2030年まで線型的に削減する。しかし、これは、2020年から2030年にかけて、2020年に40%への削減がすでに達成された場合よりも、多くの排出量が放出されることを意味する（図2を参照してください。2020年から2035年の有線）。これらの追加排出量を補うために、2040年のCO₂削減目標と、2030年から2050年までのCO₂削減経路を調整し、ドイツ政府の当初の計画よりも急勾配になるようにした。その結果、2020年から2050年までの排出量の合計は、95%の目標に対する連邦政府の「エネルギー・コンセプト2010（Energy Concept 2010）」の合計に等しくなる（BMWi；BMU, 2010）。

5) 2019年の排出量削減は（BMWi, 2020）に基づいている。ドイツ連邦環境庁が決定した最終的な値は、今年はまだ利用できない。

図2 エネルギー関連CO₂排出量（Mt-eq.)

注：ドイツ連邦政府のCO₂削減目標は、1990年の水準と比較して95%であり、2050年までの調査で検討された目標である（BMWi, BMU, 2010）。

出典：Philip et al. (2020) より作成。

6.3 シナリオの構築

ドイツの現在の気候政策論争は、エネルギー転換が技術的、経済的実現可能性の問題であるだけでなく、社会的、政治的意志の問題であることを示している。消費者の行動などの変数に影響を与える影響、現在の技術の利用や変化への意欲、インフラの変化の受け入れ、消費の十分性と削減の側面、CO₂を持つ4つのシナリオを含むため、削減目標95%が定義されている。さらに、2つのシナリオに、主なシナリオから派生したCO₂削減目標が100%で示される。これらのシナリオの中心的な前提と、後で利用される対応する名前を表1に示す（Schuler, 2017；BMVI, 2015）。

表1 異なるシナリオにおける主要な境界条件

	参照 シナリオ	固執 シナリオ	非受け 入れ	充足 シナリオ	参照100	充足2035
CO ₂ 削減目標	95%	95%	95%	95%	100%	100%
GW _{el} の設置設備容量の上限						
太陽光発電	530 ⁶⁾	530	800 ⁷⁾	530	530	530
陸上風力	230	230	80	230	230	230
洋上風力	80	80	40	80	80	80
電力輸入	40	40	20	40	40	40
エネルギー消費の発展						
従来の電力用 途	定数	定数	定数	減少	定数	減少
輸送用途/ ガイドライン	増加	増加	増加	減少	増加	減少
	いくつか の内部の 燃焼	オーバー ライント ラックな し				
建築空間熱/ ガイドライン	増加	増加	増加	減少	増加	減少
	いくつか のガスボ イラー					
プロセス熱	わずかに 減少	わずかに 減少	わずかに 減少	減少	わずかに 減少	わずかに 減少

出典：Philipetal. (2020) より作成。

表1に示すシナリオについては、以下で詳しく説明する。すべてのシナリオ（参照シナリオを除く）については、参照シナリオとは異なる仮定のみが説明される。

6) 530GW制限は、地上型システム用の143GWと、屋根型システム用の387GWで構成されている。これらの値は、(Schuler et al. (2017)とBMVI (2015)に基づいている。しかし、土地電位の分析は異なり、そこから他の潜在的限界も導き出すことができる。

7) KITで行われたドイツの建築ストック（住宅、商業）のボトムアップ分析によると、特に屋根エリアは、他のほぼすべての出典で示されたよりも有意に高い可能性を有する(BMVI, 2015)。したがって、非受け入れシナリオでは、利用可能なポテンシャルは合計800GWに増加し、そのうち、190GWは地上型システム、610GWは、屋根型システムである。

6.3.1 参照シナリオ (Reference Scenario)

参照シナリオでは、エネルギー・システムの費用最適な転換は、変化の受け入れや消費の変化に関して、顕著な社会的行動を想定せずに、実験を実施する。このシナリオを特徴付ける主な前提は、以下の部門別に示されている。

エネルギー供給：太陽光発電システムの技術的な設置の可能性は、合計530GW_{el}である。これは、143GW_{el}地上型と387GW_{el}屋根型システムで構成され、南または東と西に向けることができる。陸上風力タービンの設置可能性は、23GW_{el}に設定される (Masurowski et al., 2016)。洋上風力エネルギー設備では、80GW_{el}という高いポテンシャルが想定されている。石炭火力発電は、2035年までに段階的に廃止され、2022年までに原子力発電が廃止される予定である (DB, 2011)⁸⁾。電気の輸入のためのインターラクタ設備容量は、現在の17GW_{el}から2050年に40GW_{el}に増加する (BBH ; LBST ; Fraunhofer ISE ; IKEM, 2018)。再生可能電力から海外で生産される合成燃料（水素、メタン、液体エネルギー・キャリア）は、2030年時点での輸入可能である。

電力部門：照明、冷却、情報通信技術 (information and communications technology : ICT) と機械エネルギーの電力需要は、2050年まで一定である。

輸送部門：中程度の発展である。2050年までに、民間電気輸送の総走行距離は3.5%，道路貨物輸送の走行距離は27%増加する (Schubert, 2014)。電動貨物輸送用の架空インフラが構築されている。バッテリー電気自動車は、年間の新規登録の80%を超えることはできない。⁹⁾ 10%のユーザーが、電気性負荷のバランスをとるために、車のバッテリー（グリッド間G2V、車両間V2G）の柔軟な制御に同意する (Senkpiel, 2020)。貸借対照表に記録されている航空交通は、2050年まで一定のままである。

8) 遅くとも2038年までに、ドイツでは、石炭火力発電所はグリッドにつながらない。2032年には、フェーズアウト日をオペレーターと合意して、早く2035年に倒しできるかどうかを見直す予定である。この研究の計算を準備する時点では、最終的な決定はまだ行われていなかった。

9) この仮定は決済である。純粹にバッテリー駆動は、さまざまな理由で、他のフォームを利用することを決定するユーザーが常にあるため、車の人口全体をカバーしないと仮定される（例えば、範囲、充電の持続時間、その他）。

建物熱：中程度の発展である。ドイツの熱生活地域は、現在と2050年の間に、合計8%増加する (Bürger et al., 2016)。ヒートポンプは、年間の新規設置の85%を超えることはできない。¹⁰⁾ 最大改修率は、検討期間中に1%から3%に増加する。

産業プロセス熱：中程度の開発である。技術革新と効率の可能性（最も利用可能な技術）の活用により、産業プロセスの熱需要は、年間0.5%減少している (Blesl, 2013)。

これらの仮定に基づいて、影響要因がそれぞれ特異的に変化する3つのシナリオが定義される。

6.3.2 固執シナリオ (Persistence Scenario)

このシナリオでは、新規技術に切り替える人口の意欲は、非常に限られていると仮定される。これは、新規技術の発展が大幅に遅れ、従来の技術、特に熱システムや、内燃機関を搭載した車両を利用し続けることを主張することを意味する。参照シナリオと比較した主な変更点は、次のとおりである。

輸送部門：保守的な発展。液体燃料に基づく従来の内燃機関は、民間電気輸送における年間新規登録の少なくとも半分を占めている。人口の中で、電力負荷のバランスをとるために、柔軟的に電気バッテリーを制御する意欲はない。

建物熱：保守的な発展。ガスボイラーは毎年新規設置の少なくとも半分を占めているが、電気ヒートポンプは20%に制限されている。エネルギー関連の建築の改装率は1%で一定である。

6.3.3 非受け入れシナリオ (Non-Acceptance Scenario)

複雑な承認手順と大規模なインフラ構造物（例えば、送電網や風力タービ

10) この仮定も妥協策である。電気ヒートポンプは、様々な理由で、他の加熱技術（例えば歴史的な温度要件）を利用するなどを決定するユーザーが常に存在するので、熱システムのストック全体を賄わないと仮定される。

ン）の拡大に対する局所的な抵抗のために、その膨張は、費用最適な発展に対応するよりも大幅に小さいかもしれない。このシナリオでは、より大きなインフラプロジェクトが、以前に想定されていた範囲で、エネルギーシステムのトランク形成に、貢献できない発展が想定される。参照シナリオと比較して、最も重要な変更点は次のとおりである。

エネルギー供給：陸上風力タービンの技術的設置の可能性は、 80GW_{el} に減少する。洋上風力エネルギーでは、 40GW_{el} の電位が想定されている(Masurowski et al., 2016)。再生可能エネルギー源が、電力供給に大きく貢献し続けることを確実にするために、太陽光発電の技術的設置能力は、 800GW_{el} に増加する(Fath, 2018)。電力輸入の相互接続能力は、2050年までに、わずか 20GW_{el} に上昇するが、これは同様のグリッドの広がりが想定されていたため、受け入れられない。

輸送部門：貨物輸送の場合、高速道路の架線を延長する選択肢はない。貨物輸送の総走行距離のごく一部だけがバッテリー電気自動車でカバーできる。

6.3.4 充足シナリオ (Sufficiency Scenario)

このシナリオでは、行動の変化が、大きなスケールに及ぼす影響を調べる。これらの変化は、エネルギー消費量の大幅な削減につながるほど大きいである。この有益な効果は、例えば、気候変動によって、引き起こされる極端な出来事の増加による値の強い変化から生ずる可能性がある。ドイツ連邦環境庁が携わった研究に基づく参照シナリオと比較して、充足シナリオの主な変化「充分な気候保護モデリングの改善」と以下の概要を示す(Zell and Föster, 2018; Bürger and Bern, 2009)。

電力需要：照明、冷却、ICT、機械エネルギーの電力需要は、現在の水準に比べて、45%減少すると想定されている。

輸送部門：効率的な発展である。現在の交通量に基づき、2050年までに、民間電気輸送と航空交通は、それぞれ30%と55%減少する見込みである。貨

物輸送の合計走行距離は、現在のレベルに留まる。さらに、エンドユーザーは、ロードバランシングのために、車のバッテリーを柔軟に制御することが期待されている。

建物熱：効率的な発展である。建築のエネルギー改造率は、2020年の1%から2050年には2%に増加し、エネルギー改修の可能な最大率は、1%から3%に増加する検討中の期間である。

産業プロセス熱：効率的な発展である。産業プロセス熱の需要は、2050年まで年間0.75%減少する。

6.3.5 参照100シナリオ (Reference100 Scenario)

参照100シナリオは、参照シナリオに基づいている。しかし、2050年までに、エネルギー関連CO₂排出量を完全に削減することは、境界条件（すなわち、1990年の値に対するマイナス100%）として指定されている。

6.3.6 充足2035シナリオ (Sufficiency2035 Scenario)

充足2035シナリオは、充足シナリオに基づいている。しかし、このシナリオでは、エネルギー関連CO₂排出量の完全な削減は、早ければ、2035年に達成されなければならないと想定している。