



RIETI Discussion Paper Series 26-J-043

脱炭素化とエネルギー安全保障を踏まえた エネルギー需給シナリオ分析

小宮山 涼一
東京大学



Research Institute of Economy, Trade & Industry, IAA

独立行政法人経済産業研究所

<https://www.rieti.go.jp/jp/>

脱炭素化とエネルギー安全保障を踏まえたエネルギー需給シナリオ分析*

小宮山涼一（東京大学）

要 旨

本稿では、カーボンニュートラルの実現とエネルギー安全保障の確保を見据え、最適化型エネルギー需給モデルを用いて、長期的なエネルギー技術選択やエネルギー需給構造に関して定量的に分析する。近年、地政学的リスクの高まりやエネルギー価格の変動に加え、脱炭素化に向けた政策が強化される中、温室効果ガス排出削減とエネルギー安定供給を両立するエネルギーシステムの構築が重要な課題となっている。本稿では、CO₂ 排出制約を設定の上、2050 年までの長期的なエネルギー需給を分析することで、一次エネルギー供給構成、電源構成、電力需要、エネルギー自給率、および CO₂ 限界削減費用等への影響を分析した。その結果、CO₂ 排出制約が強化されるにつれて、再生可能エネルギーの導入と電力化が進展し、エネルギー自給率も向上する傾向が示された。これは、脱炭素化が CO₂ 削減に加え、化石燃料輸入への依存度低減を通じて、エネルギー安全保障の強化にも貢献し得ることを示唆する。一方、電力化の進展に伴ってエネルギーシステムにおける電力の役割が一層高まることから、再生可能エネルギーの大量導入を含め、電力の安定供給を確保するための柔軟性・調整力等の確保がさらに重要となる。また、CO₂ 排出制約の強化は、CO₂ 限界削減費用やエネルギーシステム総コストの上昇を伴う可能性も示された。以上の結果は、将来のエネルギー需給構造を検討する際、脱炭素化、エネルギー安全保障および経済性を相互に関連する課題として考え、それらのバランスを考慮した政策設計が重要であることを示唆している。

キーワード：エネルギーシステム、脱炭素化、エネルギー安全保障、電力需給

JEL classification: Q40, Q41, Q42

RIETI ディスカッション・ペーパーは、専門論文の形式でまとめられた研究成果を公開し、活発な議論を喚起することを目的としています。論文に述べられている見解は執筆者個人の責任で発表するものであり、所属する組織及び（独）経済産業研究所としての見解を示すものではありません。

*本稿は、（独）経済産業研究所におけるプロジェクト「電力市場のシステム・デザインとわが国への示唆」の成果の一部である。本稿の原案は、経済産業研究所（RIETI）のディスカッション・ペーパー検討会で発表したものである。検討会参加者からの有益なコメントに感謝したい。

1. はじめに

日本の将来の電力需要見通しでは、データセンター等の建設や、需要家側での化石燃料から電気へのエネルギー転換等により、増加の見通しとなっている。日本の電力需要はこれまで、人口減少や省エネの進展により減少傾向が続いてきたが、日本の電力需要は増加傾向に転じるとの報告がなされ、将来の電力需給に対する見方が変化しつつある。長期的な展望では、2040年度の電力需要は9千億～1.1兆kWh、2050年度は9千5百億kWh～1.25兆kWhと想定されている(OCCTO, 2025a)。都市圏に近い千葉県印西市をはじめ、東京都や関西圏において、データセンターの集積に伴い、超高圧変電所の増強等が進められ、局所的な電力需要の増加が顕在化しつつある。一方、日本では家庭部門の電力需要は人口減少に伴い低下しており、日本全体の電力需要が今後どの程度のペースで増加するのか不確実性もあり、データセンター等の建設動向や様々な分野の電力需要動向を踏まえ、供給力の確保や電力系統の整備を計画的に進めていくことが重要になると考えられる。

また、国内のみならず、世界の電力需要も着実に増加している。IEA(IEA, 2026)によれば、世界の電力需要は2025年時点の28.2兆kWhから2030年には33.6兆kWhへ増加し、この間、年平均で約1.1兆kWh(日本の年間電力需要に匹敵する規模)増加すると見込まれている。電力需要の伸びが経済成長率を上回ることを踏まえ、「電力の時代(The Age of Electricity)」が到来しつつあるとも指摘されている(IEA, 2026)。データセンターに加えて、電気自動車(EV)、空調需要、産業部門の電化など、多様な分野における電力利用の拡大が挙げられている。今後、脱炭素化の取組が進展することで、化石燃料から電力への転換がさらに加速し、国際的にも一層の電力需要増加の可能性が考えられる。

そこで本稿では、エネルギーシステムモデルを用いて、一定の技術並びに経済的条件を仮定したシミュレーションにより、2050年までの脱炭素化が日本のエネルギー需給構造に与える影響を分析した。本分析は、将来像を予測や実証するものではなく、想定した条件下で、経済合理的な観点から、脱炭素化を進めた場合に、どのようなエネルギー需給構造がありえるのか、数理モデルにより思考実験的に試算したものである。

2. 最適化型エネルギー技術選択モデル

分析に際して、最適化型エネルギーシステムモデルを用いる(図1)。日本のエネルギーシステム全体を分析対象に、2050年までのエネルギーシステム総コスト最小化を通じた最適化計算によりCO₂排出制約の下での最適エネルギー需給構造を分析可能である(Kawakami, Komiyama and Fujii, 2018; 川上・小宮山・藤井, 2018; 今川・小宮山・藤井, 2023)。一次エネルギー、転換部門、最終消費部門(産業、家庭、業務、旅客、貨物)からなるエネルギーシステム全体を対象に分析可能である。また、太陽光発電や風力発電といった変動性再生可能エネルギーの主力電源化に伴い、電気出力の時間変動がエネルギーシ

テムに与える影響がより顕在化する。そこで、モデルでは、電力部門の詳細分析を可能としており、時間解像度は1時間値とし、年間8,760時間で分析可能であり、再エネ出力変動や、電力需要の時間変動を詳細に考慮可能としている。エネルギー供給側（一次/二次エネルギー）と需要側（鉄鋼、セメント、化学、民生、運輸など）を対象に個別技術の積み上げによる分析を行っており(技術ボトムアップでの分析)、カーボンニュートラル実現とそのトランジション(移行過程)でのエネルギー需給構造を整合的に分析可能としている。考慮する技術としては、既存の技術から革新的技術など300種類以上の技術要素やプロセスを考慮しており、次世代自動車(EV、FCV)、エネルギー貯蔵(蓄電池、高温蓄熱技術)、CCUS(大気中CO₂直接回収、メタネーション、FT合成)、エネルギーキャリア(水素、アンモニア、メタノール、合成ガス、合成石油)、発電技術(水素発電、アンモニア発電、洋上風力発電、燃料電池、蓄熱発電)、省エネ技術(ヒートポンプ、ハイブリッド自動車等)を考慮している。なおモデルでは、2050年までのエネルギーサービス需要(素材生産量、空調・照明・給湯・動力需要、輸送需要等)を所与として、2050年までのエネルギーシステム総コストを最小化することで、最適エネルギー需給を分析している。

なお、原子力発電の設備容量は60年運転を想定した設備容量を所与として想定し(2050年23.7GW)、輸入燃料価格はIEA WEO2025(IEA, 2025)の想定価格を参照の上にて設定し、輸入水素価格に関しては、文献(OCCTO, 2025b)での想定価格を参照の上にて設定した。また太陽光発電や風力発電、蓄電池等の主要技術のコストは、IEA WEO2025のNZEシナリオにおける2050年までの想定を参考に設定している。

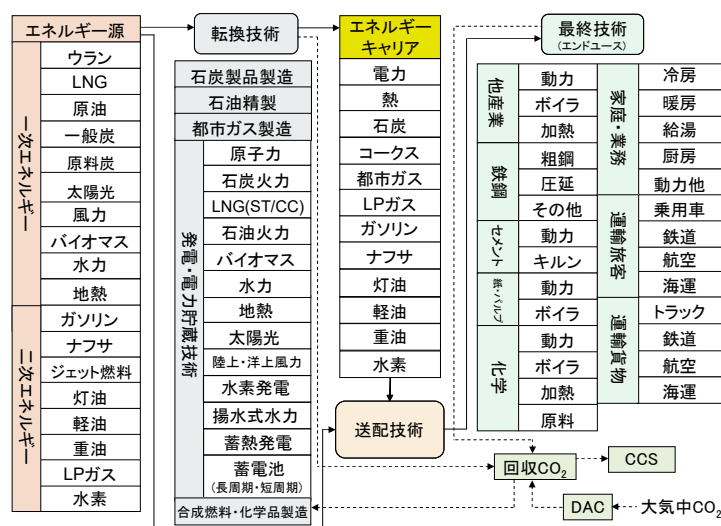


図1 最適化型エネルギー技術選択モデルの構造

本研究のモデル構造を一般化して定式化すると、式(1)～式(3)のように表される。本モデルは、エネルギー資源の生産・輸入から、転換、送配、最終需要部門での消費までのエネルギーシステム全体を対象として、線形計画法に基づく動学的最適化型モデルである。

各種制約条件の下で、2050 年までの割引現在価値換算後のエネルギーシステム総コストを目的関数として最小化し、最適なエネルギー需給構造と、それを支える各種技術の設備容量、投資量、運用等を内生的に決定する(式(1)～式(3))。制約条件は、技術の投資・設備ストックバランス、エネルギー・電力需給バランス、各技術の設備容量制約、エネルギー貯蔵技術に関する制約等より構成される。これらの制約条件の下で、目的関数であるエネルギーシステム総コスト(式(1))を最小化することにより、最適なエネルギー需給や技術の導入容量、投資量等が決定される(これらは内生変数ベクトル $\mathbf{u}$ に相当)。なお、本モデルの詳細な定式化に関しては、文献(Kawakami, Komiyama and Fujii, 2018; 川上・小宮山・藤井, 2018; 今川・小宮山・藤井, 2023)に記載している。

目的関数：

$$J = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^Y (1+d)^{Y(1-i)+1-j} \cdot C_i(\mathbf{u}) \rightarrow \min \quad (1)$$

制約条件

$$A\mathbf{u} = \mathbf{b} \quad (2)$$

$$\mathbf{u} \geq 0 \quad (3)$$

i ：期, j ：年, T ：期数, Y ：1 期当りの年数, d ：割引率, A ：制約条件行列, $\mathbf{b}$ ：制約条件定数項ベクトル, J ：目的関数, $\mathbf{u}$ ：変数ベクトル, $C_i(\mathbf{u})$ ：第 i 期のコスト関数

本研究の特徴は、2050 年までの日本のエネルギーシステム全体を対象に、各代表年の電力需給を年間 8,760 時間の高時間解像度で考慮し、再生可能エネルギーの出力変動と需要側の柔軟性を考慮した上で、エネルギーシステム全体の技術構成や設備投資を一体的に最適化する点にある。蓄電池、EV 充電、水電解、DAC、ヒートポンプ給湯器等の運用を内生的に最適化することで、再エネ大量導入下における需給調整に加え、時々刻々の需給を反映した電力スポット価格の変動も分析可能である。近年のエネルギーシステムモデル(MARKAL/TIMES 等)を用いた研究では、2050 年までの特定の地域や国を対象とした分析では、各年の時間解像度を年間 12 時点(Luxembourg et al., 2025)、48 時点(Ahang et al., 2025)とした分析や、エネルギーシステムモデルとそれを補完する詳細な電力モデルを複合的に利用した分析(Gaeta et al., 2022)、世界を対象にした年間 8 時点を基準としたモデル分析が行われている(Barnes., 2022)。これらの研究は、長期的なエネルギー需給構造に関する重要な知見を提供する一方、年間 8,760 時間での電力需給を含んだエネルギーシステム全体での長期的な技術投資が一体的に扱われていない。また本研究では、2050 年カーボンニュートラルに加え、2050 年の CO₂排出量を 2013 年比 70%、80%、90%削減する複数の排出制約を設定し、エネルギー需給構造に与える影響を比較分析する。Gonocruz et

al. (2025) は 2050 年カーボンニュートラルを中心とした複数シナリオを分析している。ただし、幅広い排出削減シナリオを考慮した既往研究も存在し、Kato and Kurosawa (2019) は TIMES-Japan を用いて 70% から 90% までの排出削減目標の比較分析を行い重要な知見を提供する一方、3 季節、各季節 2 時点での分析であり、時間解像度を簡易的に扱っている。本研究の独自性は、異なる削減目標を、年間 8,760 時間の高時間解像度での電力需給と需要側柔軟性を統合したエネルギーシステムモデルにより、電力部門も含めたエネルギー需給全体を分析する点にある。これにより、変動性再生可能エネルギーのエネルギー需給全体への影響を詳細に考慮の上、CO₂削減目標の強化に伴うエネルギー需給構造を評価可能となり、これを踏まえ、エネルギー・環境政策を検討する上での定量的情報を提供することに本研究の意義がある。

3. CO₂排出制約シナリオ

本稿では、脱炭素化の強化が日本のエネルギー需給構造や電力需要に与える影響を評価するため、複数の CO₂ 排出制約を想定する。近年、日本では 2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、脱炭素化に関する政策が強化されている。2030 年度については、2013 年度比 46% 削減、2040 年度 73% 削減、また、2050 年にはネットゼロの実現が目標とされており、これらの実現に向けて、様々な対策が進められている。

一方、2050 年に向けた CO₂ 排出削減の実現可能性や、そのために求められるエネルギー需給構造には、今後の技術進展、エネルギー価格、エネルギー需要、再生可能エネルギーの導入量等に関する不確実性が存在する。さらに、脱炭素化の進展に伴い、より高い CO₂ 限界削減費用を伴う対策の導入が必要となる可能性があり、脱炭素化の深度とエネルギーシステムの供給安定性や経済性との関係を定量的に分析することが重要となる。

そこで本稿では、CO₂ 削減の強化がエネルギーシステムに与える影響を体系的に理解するため、2050 年度の CO₂ 排出制約について、仮想的に、2013 年度比 70% 削減、80% 削減、90% 削減、およびネットゼロ（正味排出量ゼロ）の 4 ケースを想定し(図 2)、それぞれの排出制約について、数値シミュレーションを実施する。なお、全てのシナリオにおいて、2030 年度の CO₂ 排出制約については 2013 年度比 46% 削減を想定する。

その上にて、各ケースについて、最適化型エネルギー技術選択モデルを用いて、脱炭素化制約の強度に応じたエネルギー技術の選択やエネルギー需給構造を分析する。再生可能エネルギー等のエネルギー技術の導入構成に加え、電力需要や燃料需要の変化等を分析する。また、CO₂ 制約の強化に伴うエネルギーシステム総コストおよび CO₂ 限界削減費用を分析することで、追加的な排出削減を実現するために必要となる経済的負担についても定量的に評価する。さらに、エネルギー自給率や電力需給バランスを分析することにより、脱炭素化とエネルギー安全保障、電力安定供給との関係についても分析する。

以上を通じて、CO₂ 排出制約の強化が、エネルギー需給全般に与える影響をみるこ

で、脱炭素化、エネルギー安定供給および経済効率性の両立可能性について分析する。

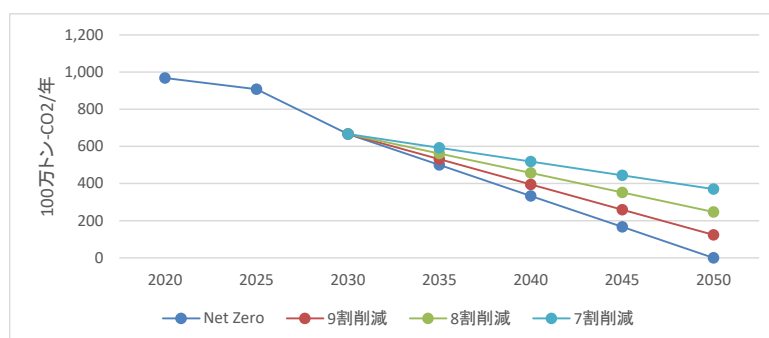


図2 CO₂排出制約シナリオ

4. 分析結果

各 CO₂ 排出制約ケースについて、一次エネルギー供給(図 3)、最終エネルギー消費(図 4)、電源構成(図 5)に関する計算結果を示し、CO₂ 排出制約と日本のエネルギー需給構造の関係性について分析する。2050 年に向けて CO₂ 排出制約の強化が、化石燃料から脱炭素エネルギーへの転換や電化の進展等に関して分析する。

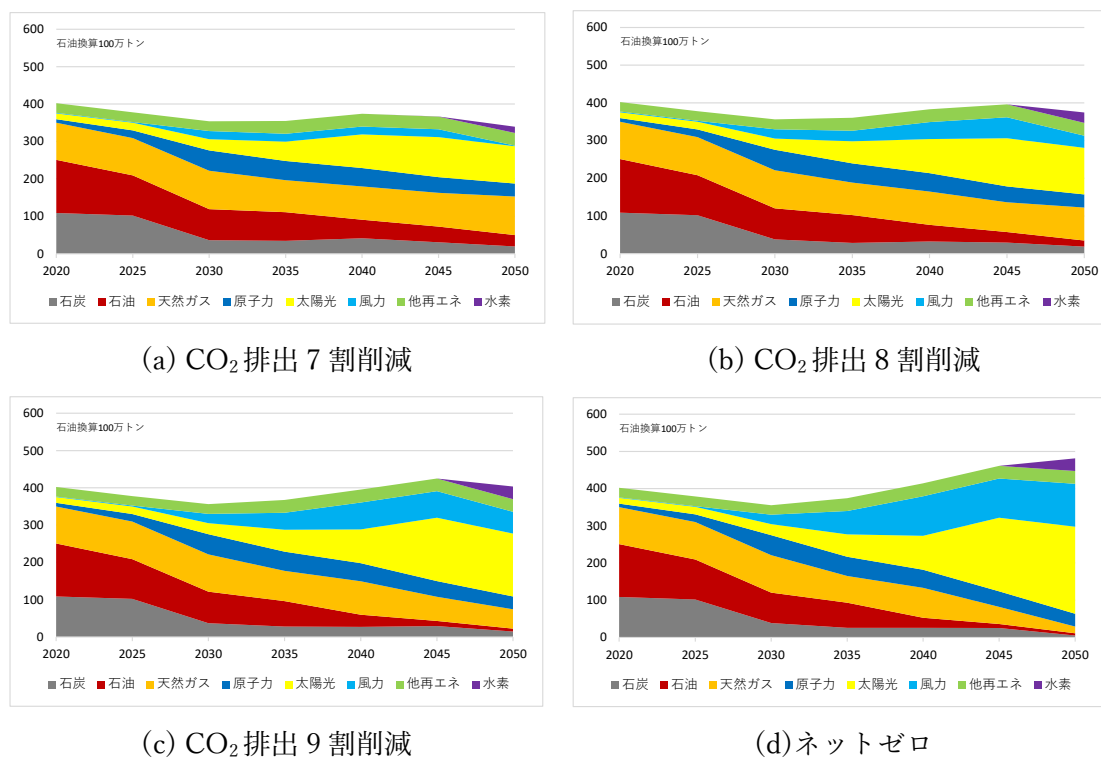


図3 一次エネルギー供給

一次エネルギー供給を見ると(図3)、CO₂排出制約が強化されるにつれて、2050年にかけて化石燃料の供給比率が低下する一方、太陽光や風力を中心とする再生可能エネルギーの供給比率が上昇する傾向となる。CO₂削減の進展に伴い、エネルギー供給側において化石燃料への依存度が低下し、脱炭素エネルギーへの転換が進む。特に、ネットゼロに近づくにつれて、化石燃料を利用するエネルギー技術の導入余地が限定されるため、再生可能エネルギーをはじめとする非化石エネルギーの重要性が高まる。また、変動性再生可能エネルギー導入拡大に伴い、電力システムの柔軟性の確保の重要性も高まると考えられる。

最終エネルギー消費については(図4)、省エネルギー技術の普及や人口減少等を背景として、最終エネルギー消費の総量は2050年にかけて減少する結果となる。一方、最終エネルギー消費に占める電力の比率(二次エネルギーの電化)は上昇する。産業、民生、運輸等の各部門において、化石燃料を直接利用する需要が電力へ転換される直接電化が進展することが背景にある。例えば、電気自動車、電炉やヒートポンプの導入は、輸送や熱需要での電力利用を押し上げる。また、CO₂制約の強化に伴い、水素等の脱炭素エネルギーの導入量も増加する。さらに、水素や合成燃料の製造には電力が必要となるため、最終エネルギー需要におけるこれらの燃料の増加は、需要家による直接的な電力利用に加えて、脱炭素燃料の製造を介した間接電化によってもシステム全体の電力消費は増加する。エネルギー需給構造全体の中で、電力化率の上昇は、エネルギーシステムでの電力の比重が高まるため、電力安定供給対策が将来、さらに重要になることを示唆していると考えられる。

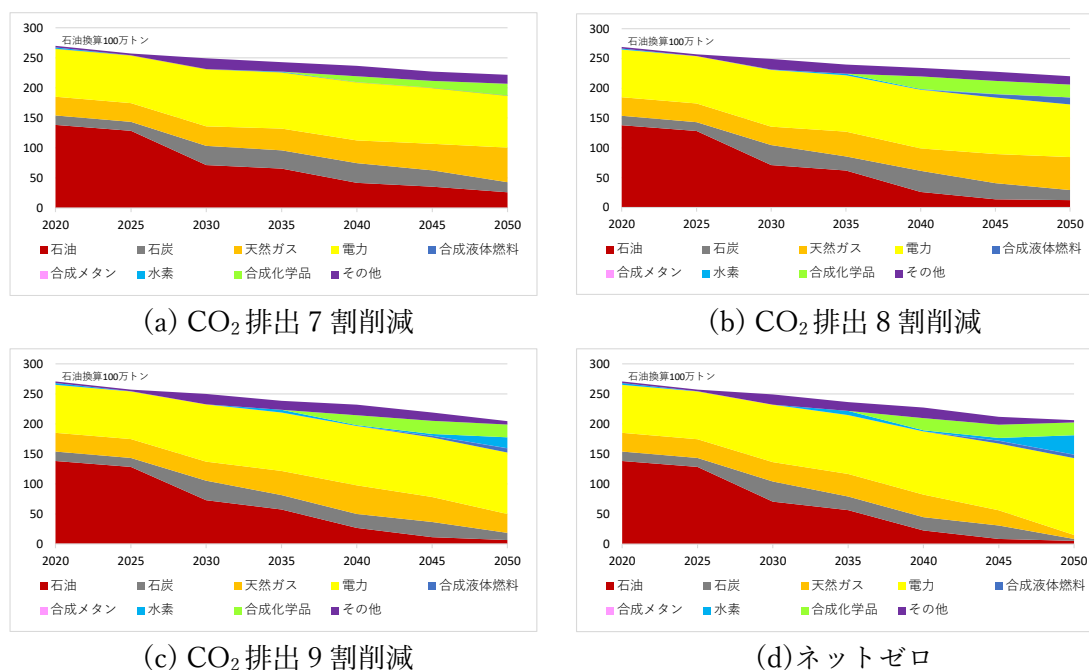


図4 最終エネルギー需要

電源構成は、CO₂制約の強化に伴い、2050年に向けて太陽光発電および風力発電の導入

量が拡大する結果となる(図5)。電力部門でのCO₂削減が進展する中、再生可能エネルギーが主要な脱炭素電源としての役割を担うためである。なお、原子力は前提条件の通り、60年運転シナリオを所与としている。特に、最終エネルギー需要の電化に加えて(直接電化)、水素等の製造に必要な電力需要が増加するため(間接電化)、脱炭素化の強化に伴い、電力部門では電源脱炭素化と供給力確保への対応が同時に求められることが示唆される。

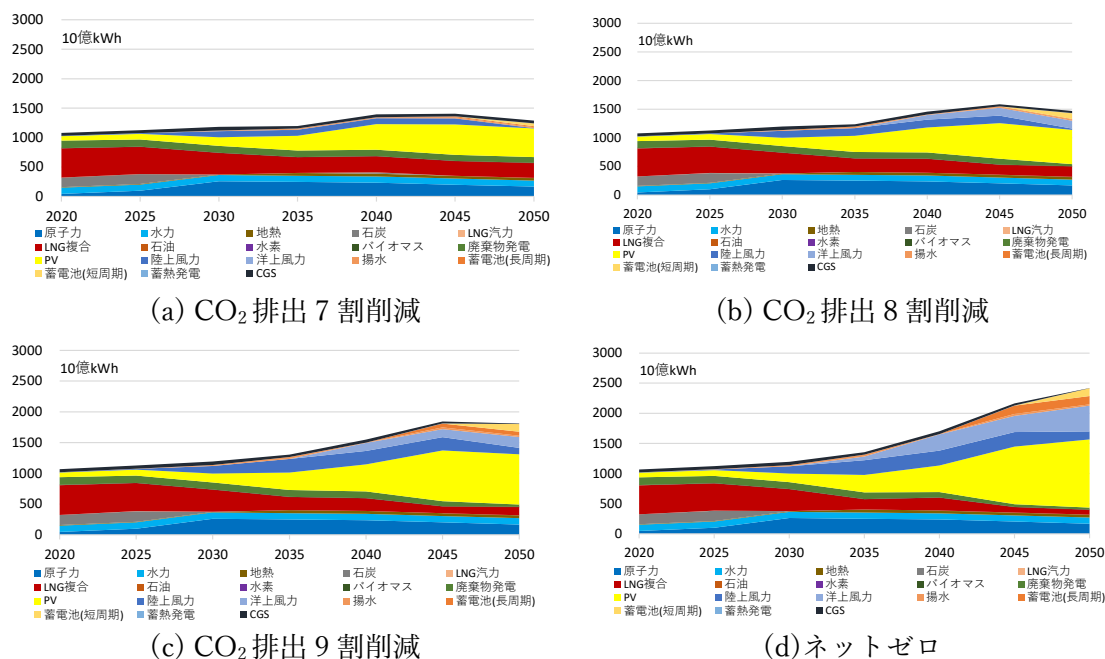
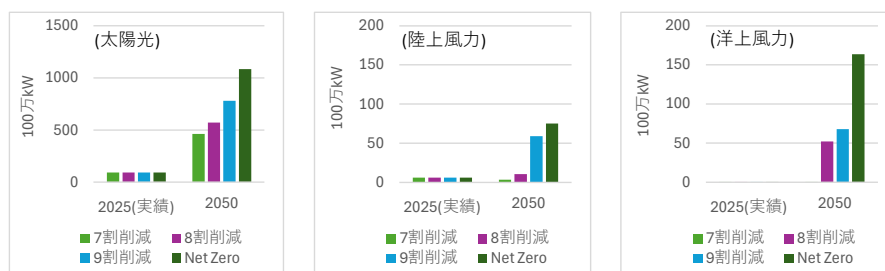


図5 電源構成

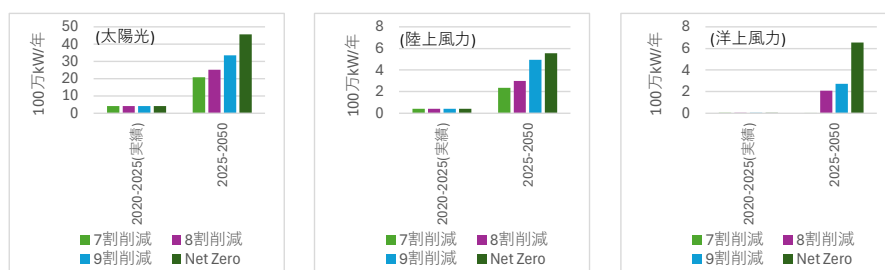
脱炭素化の中で、省エネルギーの進展や人口減少はエネルギー需要を抑制する方向に作用する一方、逆に電化の進展により電力需要を押し上げる方向に作用しうる。本分析では、後者の効果が顕在化し、最終エネルギー消費全体が減少する一方、電力需要は比較的堅調に推移し、CO₂制約が厳しいケースほど、電力需要が増加する結果となる。脱炭素化は、エネルギー需要の電力シフトを伴う構造変化として理解することが重要との示唆を与えるものと考えられる。

本モデルでは、年間8,760時間にわたり変動性再エネの出力変動を考慮の上、エネルギーシステム全体の最適化を通じて、再エネ導入量を評価している(図6(a))。導入量は各ケースで異なるが、2050年の導入量でみると、太陽光発電は4.6億kW～10.8億kW、陸上風力発電は3百万kW～7千5百万kW、洋上風力発電は0～1.6億kWにあり、CO₂排出制約の強度により、導入量に幅がみられる。2050年の導入量は現在に比べて、大幅な導入水準となる。また、2025年から2050年までの年平均の導入量(年平均の投資量)でみると(図6(b))、太陽光発電は年平均2千1百万kW～4千6百万kW、陸上風力発電は年平均2百万kW～6百万kW、洋上風力発電は年平均0～7百万kWとなった。太陽光発電は、実

績として 2020 年から 2025 年まで年平均 4 百万 kW で増加しているが、CO₂ 排出目標により、近年の実績の 5 倍から 11 倍のテンポで太陽光発電の導入拡大が必要なことが示唆され、陸上風力や洋上風力については、太陽光を上回るテンポでの導入拡大が示唆される結果となっている。また、電力貯蔵技術に関しても(図 7)、変動性再エネの導入拡大に伴って導入が進み、2050 年の導入量でみると、揚水発電、長周期および短周期の蓄電池のいずれについても、CO₂ 制約強化に伴い増加する傾向がみられた。



(a) 変動性再生可能エネルギーの累積導入量



(b) 変動性再生可能エネルギーの年平均導入量

図 6 変動性再生可能エネルギーの累積導入量と年平均導入量

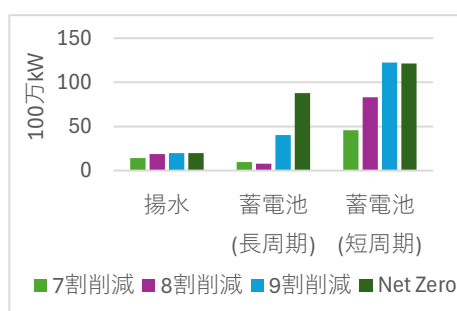


図 7 2050 年の電力貯蔵技術の累積導入量

また、各シナリオのエネルギー自給率を分析すると(図 8)、CO₂ 制約の強化に伴い、一次エネルギー供給に占める再生可能エネルギーの比率が拡大し、60 年運転想定原子力発電の供給も背景に、エネルギー自給率も上昇する結果となる。2024 年度現在、日本のエネルギー自給率は 2 割を下回る水準にあり、化石燃料の多くを海外からの輸入に依存してい

る。一方、本分析では、2050 年のエネルギー自給率は、2013 年度比 70%削減制約で約 50%、80%削減制約で約 60%、90%削減制約で約 70%、ネットゼロシナリオでは 90%近くまで上昇する結果となり、エネルギー自給率の面では、エネルギー安全保障の強化に貢献しうると考えられる。CO₂制約の強化に伴って、輸入化石燃料への依存度が低下する一方、太陽光、風力等の国内で利用可能な再エネ導入拡大を通じて、エネルギー自給率の向上にも貢献しうる。

この結果は、脱炭素化とエネルギー安全保障との間に一定の補完関係が存在することを示唆している。国際的なエネルギー価格の変動や地政学的リスクが顕在化する中、原子力発電と共に、再生可能エネルギー等を活用して輸入化石燃料への依存を低減することは、エネルギー安全保障の強化にもつながると考えられる。ただし、再生可能エネルギーの大量導入には、電力系統の整備や調整力の確保等が必要であり、エネルギー自給率の向上を実現するためには、これらを含むエネルギーシステム全体の高度化を進めることが重要であることを示唆していると考えられる。

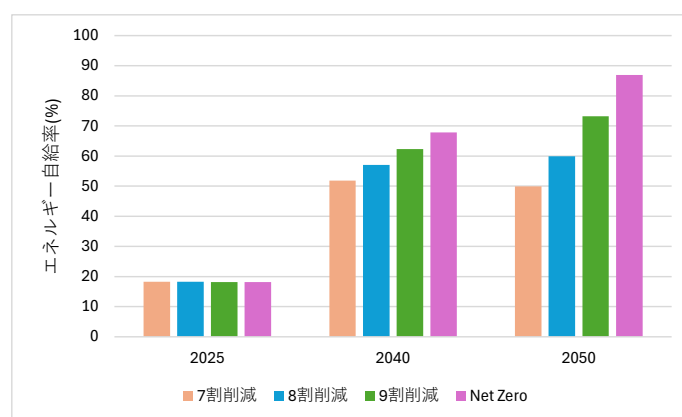


図 8 エネルギー自給率

また、各シナリオにおける 2050 年の CO₂ 限界削減費用を比較すると(図 9)、CO₂ 排出制約が強化されるにつれて、限界削減費用は上昇する結果となる。なお、CO₂ 限界削減費用は実質価格に相当する(図 9(a))。排出制約の強度が低い場合では、化石燃料利用と共に相対的に低コストで実施可能な低炭素技術が選択される一方、排出制約の強度が深まるにつれて、より高コストな脱炭素技術の導入やエネルギー転換が必要となることを反映している。2050 年の 2013 年度比 7 割削減では CO₂ 限界削減費用は 1 トン当たり約 3 万円であるのに対し、ネットゼロ制約では約 10 万円まで大幅に上昇する。排出削減目標に引き上げるほど、削減の限界的な経済負担が増大することを示唆している。また、2050 年のエネルギーシステム総コストについても、CO₂ 排出制約の強化に伴って増加する同様の傾向が確認される。ネットゼロ実現には、追加的な社会的コストを考慮することが重要であるとの示唆を与えていると考えられる。

脱炭素化政策では、CO₂削減目標の水準とともに、その達成に伴う限界削減費用やエネルギーシステム全体のコストを踏まえ、経済性と脱炭素化の両立を図ることが重要である。特に、削減目標が厳しくなるほど追加的な削減コストが増大することを踏まえ、低炭素技術の技術革新と普及を促進し、脱炭素化に伴う社会的コストを抑制する政策が求められる。また、国内の技術開発や導入に加え、各国の資源状況などを踏まえ、海外で比較的低コストに生産可能な水素や e-fuel 等の脱炭素資源の調達が可能である場合は、CO₂ 限界削減費用を抑制する選択肢となりうる。一方、海外輸入の脱炭素資源は、供給安定性や調達先の多様化などエネルギー安全保障の観点も併せて評価することが重要である。

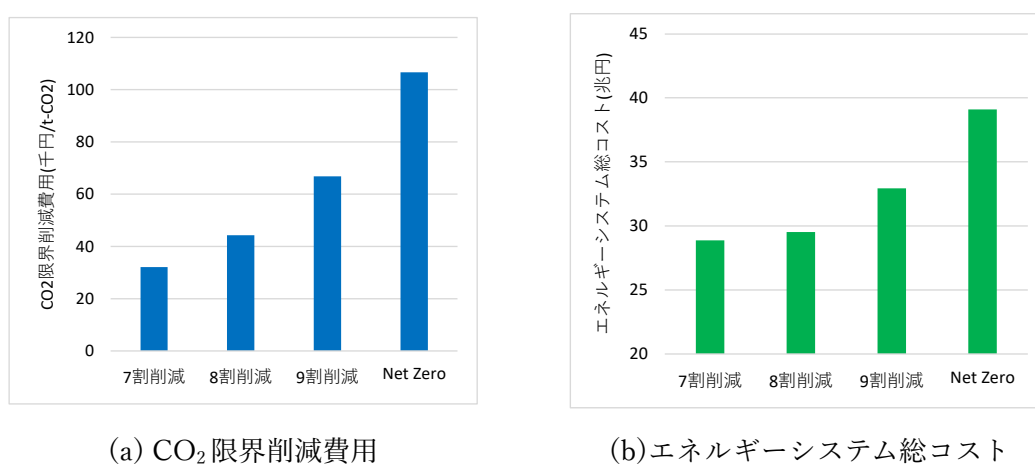


図9 エネルギーシステムのコスト

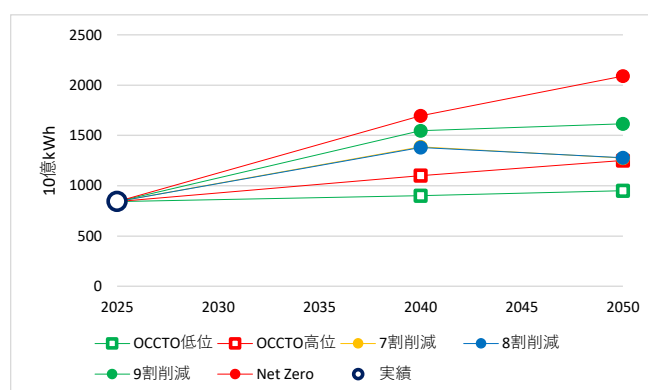


図10 電力需要のケース間比較

本モデルによる2040年および2050年の電力需要の推計結果を、電力広域的運営推進機関(OCCTO)が公表する電力需要シナリオ(OCCTO, 2026)と比較する(図10)。なお、本モデルでは、データセンターによる電力需要に関しては、OCCTOが想定する2040年600億~1,000億kWh、2050年900億~1,950億kWhのレンジの中間値を所与として設定している(OCCTO, 2026)。本モデルの計算結果では、CO₂制約の強化に伴い、2050年

に向けた電力需要の増加ペースが高まる傾向が確認される。各シナリオの電力需要は、2040年に約1兆4,000億～1兆7,000億kWh、2050年に約1兆3,000億～2兆1,000億kWhの範囲で推移する。特にネットゼロ制約では最も高水準となり、2040年に約1兆7,000億kWh、2050年には約2兆1,000億kWhまで増加する。

これは、脱炭素化の進展に伴って、最終エネルギー需要の電化に加え、水素や合成燃料等の製造に必要な電力需要も増加するためである(図11)。一方、OCCTOの想定では、2040年度の電力需要は約9,000億～1兆1,000億kWh、2050年度は約9,500億～1兆2,500億kWhとされている(OCCTO, 2026)。これと比較すると、本モデルの電力需要は、特にCO₂制約の強度の厳しいシナリオにおいて、OCCTOの想定を上回る水準となる。また、2050年の部門別電力需要の内訳をみると(図11)、CO₂制約の強化に伴い、運輸部門や産業部門での電化(直接電化)に加えて、水素・合成燃料やDACでの電力需要が増加する(間接電化)。ネットゼロ制約では、水素(水電解)での電力消費は4,500億kWhまで拡大する(現在の日本の電力需要の約半分の規模)。この結果は、脱炭素化の進展度合いが電力需要の規模にも影響し得ることを示唆しており、脱炭素化を指向した今後の電力需給計画においては、脱炭素化に伴う電化や水素・合成燃料等の新たな電力需要の動向を考慮することが大切であることを示唆しているものと考えられる。

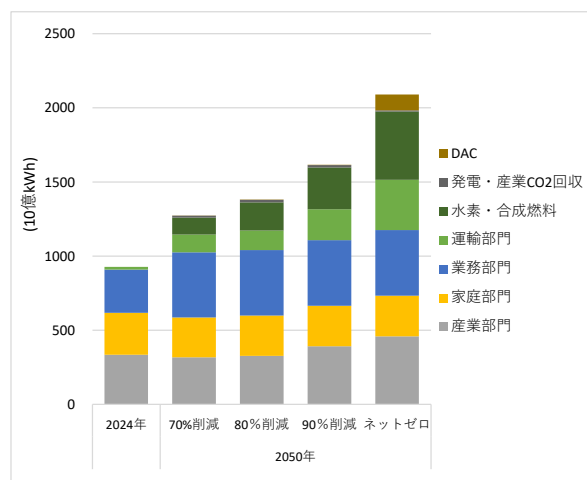


図11 2050年の部門別電力需要のケース間比較

図12に2050年5月の1週間の電源の最適出力配分の結果を図示する。CO₂排出制約が強化されるにつれ、電力化が進展し、エネルギーシステムでの電力の役割が一層高まり、その中で、変動性再生可能エネルギーの比率が拡大して再生可能エネルギーの大量導入が進むことから、電力の安定供給を確保するための電力システムの柔軟性、調整力等の確保が重要な課題となることが示唆される。特に、太陽光発電の大量導入が進むことから、CO₂排出制約が強化されるシナリオでは、晴天時に余剰電力が発生して昼間の卸電力価格(スポット価格)が大きく低下する傾向がうかがえ、天候不順の際は高騰する。適切な電力

価格シグナルの設計や、時間的な需給調整を促す市場メカニズムの設計等が重要になることが示唆されているものと考えられる。特に、太陽光や風力等の変動性再エネの導入拡大や、電力需要の増加が同時に進展する場合、電力需給の時間的、地域的なギャップが拡大する可能性もある。再生可能エネルギー等の脱炭素電源の導入拡大とともに、増加する電力需要に対応した十分な供給力の確保、電力系統の整備、調整力の確保等を一体的に進めることが重要になると考えられる。

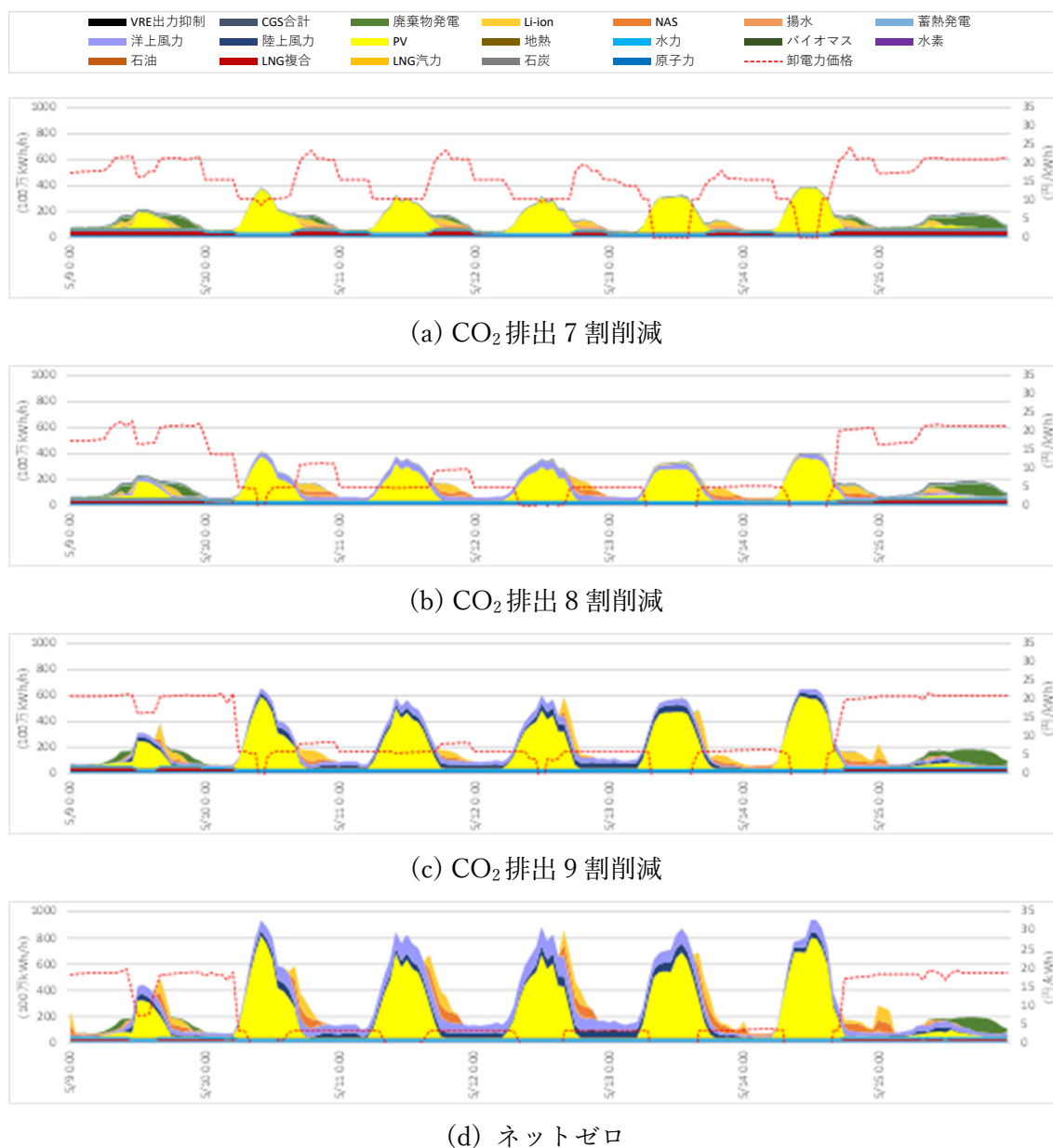


図 12 電力需給運用(電力供給、2050 年 5 月)

図 13 に 2050 年 5 月における 1 週間の電力需要ならびに需要側資源である蓄電池、水電

気分解装置、DAC（Direct Air Capture：大気中 CO₂ 直接回収）等の運用結果を示す。CO₂ 制約の強化に伴い、太陽光発電の導入が進むことから、CO₂ 制約が強化されるシナリオでは、晴天時に昼間の卸電力価格(スポット価格)が大きく低下するが、余剰電力が発生して電力価格が相対的に昼間に安価になることから、電力貯蔵技術による充電や、水電気分解、DAC 駆動による CO₂ 除去(CDR: Carbon Dioxide Removal)が実施されることで、電力需給バランスが確保される傾向がみられる。

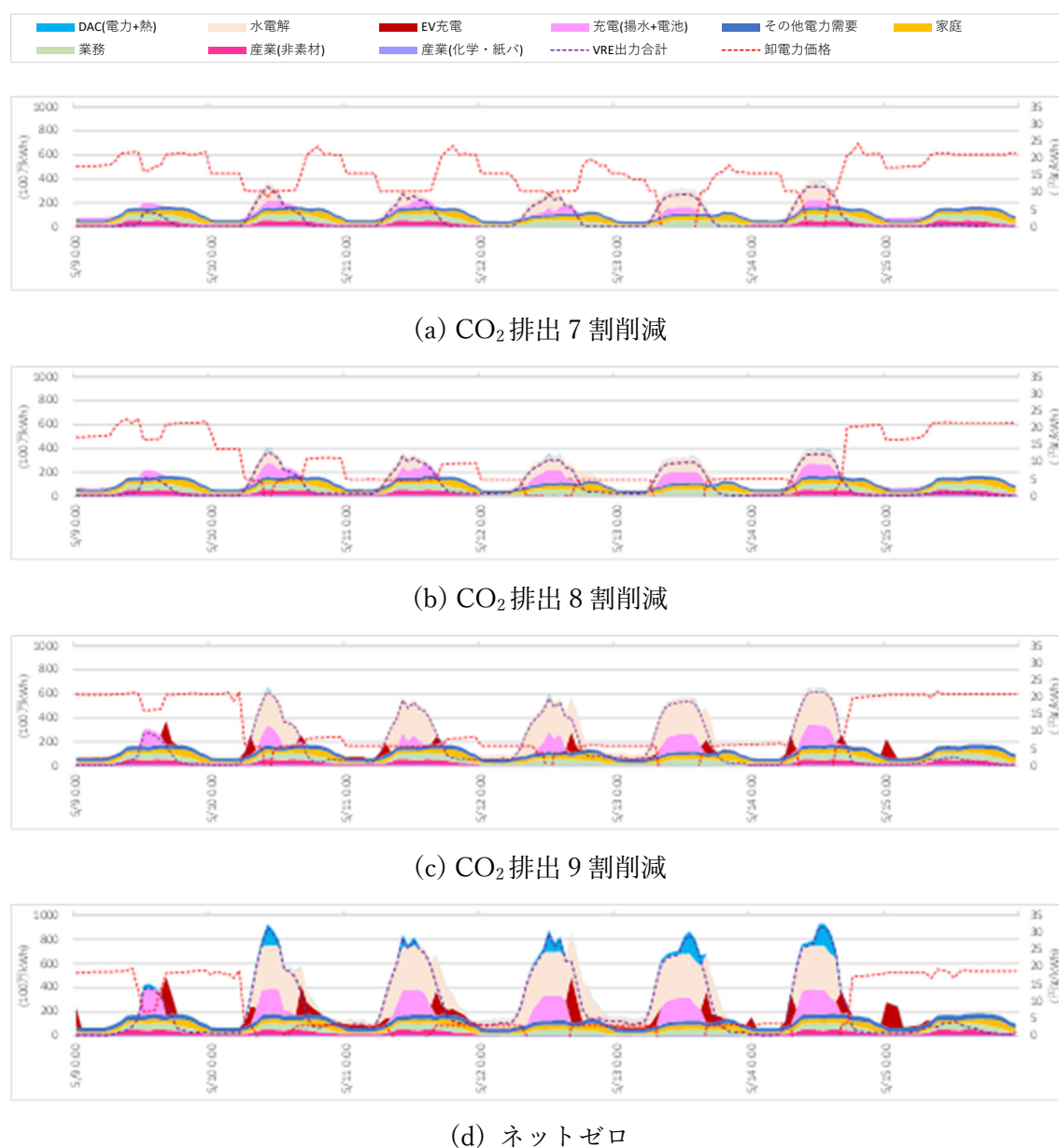


図 13 電力需給運用(電力需要、2050 年 5 月)

特に、脱炭素化を進める上で、再エネ出力が大きい時間帯での調整力資源の活用は、再

エネ出力抑制を回避し、その導入効果を高める上にて重要となる。調整力が高コストの場合は、再エネ出力抑制が拡大し、低コストになれば出力抑制が縮小するといったトレードオフ関係を踏まえることが重要となる。脱炭素化が進展する将来の電力システムでは、供給側の調整力に加えて、蓄電池や水素製造、DAC 等の多様な資源を活用した柔軟な需給調整が重要な役割を担うことを示唆している。また、エネルギーシステムにおいて電力が中核的な役割を担う中で、脱炭素化を強化する観点からは、電力システムには従来以上の調整力が求められることを示唆している。これらの資源を適切に市場参加可能な制度設計や、調整力等の確保を通じた電力システム全体の柔軟性向上が重要な課題となることが考えられる。

5. 総括

本稿では、カーボンニュートラルの実現に向けて、複数の CO₂ 排出制約を想定したエネルギー需給シミュレーションを実施し、脱炭素化が日本のエネルギーシステムに与える影響を分析した。分析結果より、CO₂ 制約の強化に伴い、化石燃料への依存度が低下する一方、変動性再生可能エネルギーの導入が拡大し、エネルギー自給率が向上することが示された。脱炭素化が気候変動対策に加えて、化石燃料への依存低減を通じて、エネルギー安全保障の強化にも資することを示唆していると考えられる。

なお、以上の結果は、将来のエネルギー需給の予測や実証ではなく、一定の前提条件下で得られたシミュレーション結果である。そのため、実際の 2050 年のエネルギー需給構造は、技術コスト、エネルギー価格、経済動向、技術革新、国際情勢、政策等によって大きく変化する点に留意が必要である。一方、本分析は、脱炭素化を大幅に進める場合に想定される再生可能エネルギー導入量、CO₂ 限界削減費用、電力需要増加の規模等を定量的に示すことで、今後のエネルギー政策や関連する制度を検討する際の一つの材料を提供するものである。

一方、脱炭素化の進展に伴い、需要家側での化石燃料から電力へのシフト(電化)が進むことで電力需要は増加し(直接電化)、さらに水素・合成燃料等の製造に伴う間接電化によって、電力のエネルギーシステムにおける比重が高まることから、電力システムの役割は、脱炭素化とエネルギー安全保障の強化を考える上で、一層重要になることが示唆される。また、再エネ大量導入に伴い、晴天時の日中に余剰電力が発生する一方、需給逼迫時には電力価格が上昇するなど、電力需給や価格の変動が拡大する可能性が示された。加えて、脱炭素化が進展する将来の電力システムでは、蓄電池や水素製造、DAC 等の多様な資源を活用した従来以上の柔軟な需給調整が重要な役割を担うことが示唆される結果となった。また、CO₂ 制約の強化に伴い、CO₂ 限界削減費用やエネルギーシステム総コストも上昇する結果となった。2050 年ネットゼロの実現には、脱炭素電源の導入拡大に加え、電力需要増加に対応した供給力、再エネ導入に伴う調整力の確保、それらに伴う社会的コスト

を踏まえた制度設計が重要になるものと考えられる。脱炭素化、エネルギー安全保障、経済効率性を総合的に考慮したエネルギーシステムの転換が、今後の重要な課題になる。

今後の分析課題として、脱炭素化に必要となる再生可能エネルギーや蓄電池等の製造に不可欠なレアアースをはじめとする重要鉱物資源の供給制約を考慮することが挙げられる。これらの資源は特定地域への生産や精製の集中が見られることから、重要鉱物資源の供給安定性やサプライチェーンの制約を分析に組み込み(藤原・小宮山・藤井, 2026)、脱炭素化とエネルギー安全保障の両立可能性をより包括的に評価することが重要になると考えられる。

References

Ahang, M., Seljom, P.M.S., Tomasgard, A. (2025) *Analysis of the impact of demand response on the Norwegian energy system*, Energy Systems, 16, 743–770.

Barnes, T., Shivakumar, A., Brinkerink, M., Niet, T. (2022) *OSeMOSYS Global, an open-source, open data global electricity system model generator*, Scientific Data, 9, 623.

IEA/OECD (2025) *World Energy Outlook 2025(WEO2025)*, IEA, Paris.

IEA/OECD (2026) *Electricity 2026*, IEA, Paris.

Gaeta, M., Nsangwe Businge, C., Gelmini, A. (2022) *Achieving Net Zero Emissions in Italy by 2050: Challenges and Opportunities*, Energies, 15(1), 46.

Luxembourg, S.L., Salim, S.S., Smekens, K., Longa, F.D., Zwaan, B. van der (2025) *TIMES-Europe: An Integrated Energy System Model for Analyzing Europe's Energy and Climate Challenges*, Environmental Modeling & Assessment, 30, 1–19.

Kato, E., Kurosawa, A. (2019) *Evaluation of Japanese energy system toward 2050 with TIMES-Japan – deep decarbonization pathways*, Energy Procedia, 158, 4141-4146.

Kawakami, Y., Komiyama, R. and Fujii, Y. (2018) *Penetration of Electric Vehicles toward 2050: Analysis Utilizing an Energy System Model Incorporating High-Temporal-Resolution Power Generation Sector*, IFAC-PapersOnLine, 51(28), 598-603.

Gonocruz, R.A., Ozawa, A., Kudoh, Y. (2025) *Japan's energy transition scenarios to achieve carbon neutrality under multiple energy service demand: Energy system analysis using the AIST-TIMES*

model, *Applied Energy*, 383, 125300.

今川智稀, 小宮山涼一, 藤井康正(2023)「CCU 技術を詳細化した技術選択モデルによる日本の 2050 年カーボンニュートラル実現可能性に関する分析」 エネルギー・資源学会論文誌, 44(1), 1-13.

川上恭章, 小宮山涼一, 藤井康正(2018)「高時間解像度の発電部門を持つエネルギーシステム技術選択モデルによる CO2 削減シナリオの分析」 電気学会論文誌 B , 138(5), 382-391.

電力広域的運営推進機関（OCCTO）（2025a）第 10 回 将来の電力需給シナリオに関する検討会 資料 2 報告書概要版（案）

電力広域的運営推進機関（OCCTO）（2025b）第 7 回 将来の電力需給シナリオに関する検討会 資料 2

電力広域的運営推進機関（OCCTO）（2026）将来の電力需給シナリオに関する検討会の報告書について

藤原陸, 小宮山涼一, 藤井康正(2026)「鉱物資源を考慮した動学的最適化型技術選択モデルによる 2050 年カーボンニュートラルに向けた電気自動車導入の分析」 エネルギー・資源学会論文誌, 47(1), 1-11.