

1 時間値の電力需給を考慮した 大規模世界エネルギーシステムモデルの開発

Development of a Large-scale Global Energy System Model Considering an Hourly Electricity Supply and Demand Balance

大槻 貴司 *・小宮 山涼一 **・藤井 康正 ***
Takashi Otsuki Ryoichi Komiyama Yasumasa Fujii

Abstract

This study newly develops a recursive-dynamic global energy model with an hourly electricity supply and demand balance, aiming to assess the role of variable renewable energy (VRE) in a carbon-neutral world. This model, formulated as a large-scale linear programming model (number of variables and constraints are about 500 million each), calculates energy supply for 100 regions by 2050. The detailed temporal resolution enables the model to incorporate VRE's intermittency and system integration options, such as battery, water electrolysis, curtailment, and flexible charging of electric vehicles. Simulation results suggest that energy savings and end-use electrifications, coupled with decarbonized power supply, are a cost-effective mitigation strategy. Combining various power generation technologies, including VRE, nuclear, as well as biomass and fossil fuel power with carbon capture and storage, would contribute to curbing mitigation costs. Share of VRE in global power generation in 2050 is estimated to be 37% in a cost-effective case. The results also imply economic challenges for an energy system based on 100% renewable energy. Average and marginal CO₂ abatement cost significantly rises compared to the cost-effective case; for example, average mitigation cost in 2050 is 118USD/tCO₂ in the cost-effective case, while it increases to 292USD in the 100% renewable case.

Key words : Carbon neutral, Variable renewable energy, Energy system model, Recursive dynamic, Linear programming

1. はじめに

近年、世界的に気候変動政策の強化が図られている。欧州連合では 2021 年 9 月に気候法が成立し、2050 年までに温室効果ガス (GHG) を実質ゼロにすることが法制化された。また、米国や中国はそれぞれ 2050 年と 2060 年のカーボンニュートラル (CN) を宣言している。我が国においても菅前総理大臣が 2050 年までに CN を達成することを宣言した。CN への取組みは他の国々にも広がっており、2021 年 10 月時点において日本を含む 121 か国が 2050 年の CO₂ 正味ゼロ排出化に賛同している¹⁾。今後、各国にて CN に向けた具体的な計画が策定されることが見込まれる。

世界のエネルギー起源 CO₂ の正味ゼロ化の実現には、一次エネルギーを再生可能エネルギー、原子力、もしくは CO₂ 回収・貯留 (CCS) を利用した化石燃料で賄うことが必要となる (化石燃料の CO₂ を直接空気回収+CCS=DACCS 等のネガティブエミッション技術で相殺することも含む)。これらの対策のうち、政策的支援やコスト低下を背景に導入が進む技術が太陽光・風力発電 (VRE) である。2019 年時点の世界全体の太陽光発電の導入容量は 710GW、陸上風力発電は 698GW、洋上風力発電は 34GW に達した²⁾。例えば

2010 年時点の設備容量はそれぞれ 40GW、178GW、3GW であったことを踏まえると、急速な拡大といえる。CN の文脈において VRE への期待は更に高まっており、VRE による電力供給のみならず、その電力を活用した流体燃料製造 (水素製造や気体・液体燃料合成) も議論されている。

一方で、VRE と電力・エネルギー需要には時間的・地理的な乖離があり、それらへの対応費用 (余剰電力対応費用や電力系統増強費用など) が今後の VRE 大量導入への課題として指摘されている³⁾。将来の世界エネルギーシステムにおける VRE の役割を評価するためには、技術単体の費用のみならず、システム統合に係る費用も織込むことが重要である。このような観点から筆者らは地域細分化型⁴⁾や時間細分化型⁵⁾の世界エネルギーシステムモデル (世界モデル) の開発に取り組み、VRE の偏在性や変動性のモデル化を試みてきた。本研究では文献⁶⁾で構築した高時間解像度・逐次動学型世界モデル (発電部門の時間解像度: 3 時間値 = 年間 2920 時間帯分割) を更に詳細化し、世界 100 地域分割かつ発電部門を 1 時間値で表現したモデルを開発した。そして、開発モデルを用いて 2050 年のエネルギー起源 CO₂ を実質ゼロにする条件の下で、経済合理的なエネルギー需給を分析した。

既存の世界モデルにおいては LUT Energy System Transition Model が地域・時間解像度の点で群を抜く (世界 145 地域、時間解像度は 1 時間値)⁷⁾。しかしながら、当該モデルでは化石燃料の生産・貿易や、化石燃料からの水素

*一般財団法人日本エネルギー経済研究所 電力・新エネルギーユニット 兼 計量分析ユニット 主任研究員

**東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 准教授

***東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授

製造・貿易、CO₂回収・長距離輸送・貯留などの一部技術が未考慮もしくは簡略化され、技術オプションの包括性の点で課題が窺える。本研究の開発モデルは、エネルギー供給側技術を包括的に考慮しているモデルとしては有数の解像度を持つといえる。

2. 研究手法

2.1 高時間解像度・逐次動学型世界モデルの概要

本研究では文献⁹⁾の逐次動学的最適化型世界モデル NE5.0-R (New Earth 5.0-Recursive) の定式化を工夫し、変数や制約式の数を省いたモデル NE5.0-R2 を開発した(図1)。NE5.0-R (発電部門の時間解像度: 3時間値) のモデル規模は変数3億個、制約式4億本であったが、NE5.0-R2 では1時間値の時間解像度で変数5.1億個、制約式5.4億本に抑えられている。なお、NE5.0-R2 では定式化の工夫のみならず、自動車部門や直接空気回収等の革新的技術の新たなモデル化も実施したため、両モデルの規模は厳密には比較可能ではない点に留意されたい。

NE5.0-R2 モデルの分析対象期間は2015-2050年であり、代表時点として2015年、2020年、2030年、2040年、2050年のエネルギー需給を計算する。定式化手法は線形計画法に基づく。各時点の年間エネルギーシステムコスト最小化を時間軸方向に順次繰り返す仕組みである。1時点の計算時間は、CPUがIntel Xeon E5-2687W v4 (3.00GHz)の計算機環境で約24時間である。5時点計算の場合は、全体としてその5倍程度の時間を要する。最適化ソルバはCPLEX (求解アルゴリズム: 内点法) を使用した。計算時には約520GBのメモリが必要となる。

NE5.0-R2 の分析対象はエネルギーシステム全体であり、一次エネルギー生産、転換、輸送、貯蔵、消費のプロセスが考慮されている。表1にモデル化したエネルギー・技術リストを示す。最終需要は旅客自動車および貨物自動車はエネルギーサービス需要として、それ以外は燃料形態別需要(固体燃料、気体燃料、液体燃料、電力、商業熱)として集約的にモデル化している。自動車部門の省エネルギー

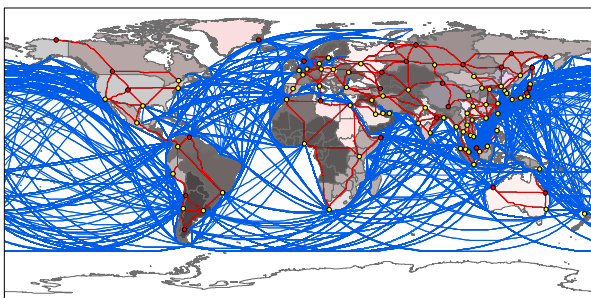


図1 NE5.0-R2モデルの地域分割(計100地域)と輸送経路の想定

(省エネ)は車種選択を通してボトムアップ的に推計される一方、それ以外については長期価格弾性値を用いてトッ

表1 NE5.0-R2モデルのシステム構成要素

カテゴリ	エネルギー・技術
一次エネルギー (13種類)	高品位炭, 低品位炭, 天然ガス, 原油, 原子力, 大型水力, 中小水力, 太陽光, 陸上風力, 木質バイオマス, エネルギー作物, バガス, 黒液
二次エネルギー (15種類)	高品位炭, 低品位炭, メタン, 液化メタン, ガソリン, 軽油, その他石油製品, 電力, 水素, 液化水素, 商業熱, メタノール (MeOH), エタノール, アンモニア (NH ₃), メチルシクロヘキサン (MCH)
最終需要 (7種類)	旅客自動車需要, 貨物自動車需要, 固体燃料, 気体燃料, 液体燃料, 電力, 商業熱
輸送可能品目と技術 (16種類)	高品位炭 (鉄道, 石炭船), 天然ガス (パイプライン, 液化メタンタンカー), 原油 (パイプライン, タンカー), 水素 (パイプライン, 液化水素タンカー), MeOH (パイプライン, タンカー), NH ₃ (鉄道, タンカー), MCH (タンカー), 電力 (高压直流), CO ₂ (パイプライン, タンカー)
主なエネルギー転換技術	発電・エネルギー貯蔵技術: 石炭火力, 石炭・NH ₃ 混焼, IGCC, ガス火力, ガス複合, 石油火力, 原子力, 大型水力, 中小水力, 太陽光, 陸上風力, バイオマス火力, 水素専焼火力, NH ₃ 専焼火力, 石炭熱電併給 (CHP), ガス CHP, 揚水式水力, 蓄電池, 水素貯蔵 水素製造技術: 石炭ガス化, メタン改質, 石油ガス化, シフト反応, 水電気分解 その他技術例: バイオエタノール製造, メタン合成, NH ₃ 合成, FT合成など
自動車技術 (乗用車・貨物車)	ガソリン内燃機関車 (ICEV), ガソリンハイブリッド車 (HEV), プラグイン HEV, 軽油 ICEV, 軽油 HEV, バイオ燃料 ICEV, バイオ燃料 HEV, 圧縮メタン ICEV, 圧縮メタン HEV, 燃料電池車, 電気自動車
CO ₂ 回収・貯留	回収技術: 直接空気回収, IGCC や水素製造プラントでの物理吸収法, 発電所 (石炭火力, ガス火力, ガス複合, バイオマス火力) での化学吸収法 貯留技術: 石油増進回収, 枯渇ガス田, コールベッドメタン増進回収, 帯水層

プダウン的に推計される。燃料形態別需要に関して、気体燃料と液体燃料の一部は民生部門や産業部門の低温熱需要と考えられることから、電化可能と仮定した（その際にはヒートポンプ給湯機の費用を計上している）。一次エネルギー生産や輸送、転換について技術積上げ的にモデル化した。温室効果ガスはエネルギー起源 CO₂のみ考慮している。

ところで、本モデルでは時点を越えた最適化を行わないが、各種プラントの年齢構成や枯渇性資源の減少等、時間軸方向の設備・資源残存量の整合性は確保している。また、逐次動学型モデルでは長期的な最適化の視点が抜け落ちるため、枯渇性資源の開発において極端に近視眼的な選択がなされる場合がある（ある時点で全ての枯渇性資源を開発する等）。本分析ではそのような解を防ぐため、ある時点 Y の資源開発水準をその時点から 50 年間は維持できるような制約を設けている（式 1）。この設定は暫定的なものであり、現実の資源開発状況等に応じて今後検証や再設定すべきものである。

$$\sum_{y=0}^{Y-1} P_{i,n,y} + P_{i,n,Y} \times F \leq R_{i,n} \quad (\text{式 1})$$

ここで、 i は枯渇性資源を表す添え字、 n はノード（地域）を表す添え字、 y は時点を表す添え字、 $P_{i,n,y}$ は時点 y ノード n における枯渇性資源 i の年間生産量、 F は生産量係数（50 年）、 $R_{i,n}$ はノード n における枯渇性資源 i の資源量を示す。

2.2 モデルの前提条件

一次エネルギーの資源量や生産費用、エネルギー転換技術・輸送技術・自動車の費用や効率、および最終需要（年間値）は文献⁴⁾⁵⁾⁶⁾にて整理したものをを用いた。VRE の資源量を例示すると、陸上風力資源量は世界計で 660PWh/yr、太陽光資源は各地域で上限無しとしている。また、原子力発電は各国の開発計画や政治状況等を基に上限（2050 年の世界計で 800GW）を与え、その範囲内で最適化をしている。

時間解像度の詳細化にあたっては、世界 100 地域・1 時間値の①VRE 出力波形と②電力負荷曲線形状が必要であるが、本分析では下記の通り設定した。VRE 出力波形については文献⁸⁾⁹⁾から抽出した。1 時間値の負荷曲線形状に関する情報公開は国により大きな差があるため、全世界の実データを収集することは容易ではない。また、負荷曲線の形状は各国の経済発展状況やライフスタイル、需要側の技術発展（情報通信技術等）の影響を受けるため、将来を見通すことも必ずしも容易ではない。このような背景から本研究では負荷曲線の精緻な推計は行わず、文献⁶⁾を踏襲して単純な想定を置くことにした。まず、年間 1 時間間隔の電力負荷実績値・推計値が得られた次の国については、現状の負荷曲線形状を 2050 年にも用いることとした：豪州、中国（推計値）、インドネシア、日本、韓国、マレーシア、

メキシコ、ペルー、ロシア、シンガポール、米国、ベトナム、ENTSO-E 管内の国々。これら以外の国々については、季節代表日の日負荷曲線を各季節一定で与えた。なお、本モデルでは自動車技術も最適化対象であるが、電気自動車の Flexible charging は織り込まれている。充電のタイミングや量は最適化で決定され、負荷曲線に上乘せされる仕組みである。他方、Vehicle to Grid (VtoG) は考慮されていない。

2.3 ケース設定

本研究では NoReg, FullTech, RE100 の 3 つのケースを分析した。NoReg は CO₂ 排出上限を考慮しないケースであり、FullTech および RE100 では 2050 年に世界全体のエネルギー起源 CO₂ を正味ゼロに制約した（国別には制約していない）。2020 年以降の排出削減パスは文献¹⁰⁾のものを利用している。FullTech と RE100 の違いは技術オプションの想定である。前者ではモデル化した全ての技術を利用可能とした。対して後者は 2050 年に原子力や CO₂ 貯留を利用せず、再生可能エネルギー（大型水力、中小水力、太陽光、陸上風力、CCS 無しのバイオマス系燃料）のみで正味ゼロ排出を達成するケースである。近年は洋上風力発電への注目が集まっているが、本分析では未考慮である点に注意されたい。また、計算時間の都合上、本研究では国際送電線の増強は考慮せず、国内送電網の増強のみ許容する（VRE 電力から水素等の燃料を製造して国際輸送することは可能となっている）。

3. 分析結果と考察

本章では各ケースの最終エネルギー消費、電源構成、一次エネルギー供給および CO₂ 削減費用の結果を示す。モデルからは地域毎の結果が出力されるが、本稿では主に世界合計の結果を議論する。

3.1 最終エネルギー消費

図 2 に世界全体の最終エネルギー消費を示す。NoReg ケースに比べ、正味ゼロ排出を達成する FullTech や RE100 においては省エネによる需要抑制および電力化の加速が窺える。次節にて示す通り、発電部門では脱炭素化が図られており、需要側の電力化と電源の脱炭素化の組合せは正味ゼロ

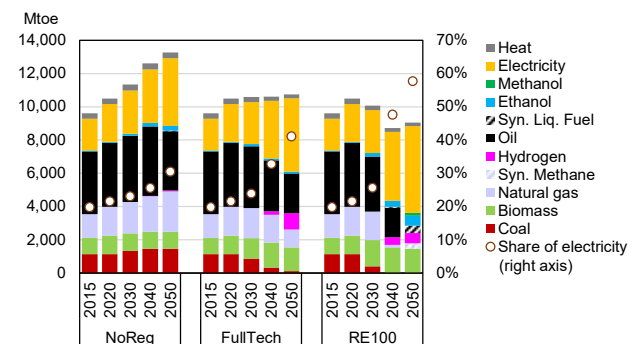


図 2 世界合計の最終エネルギー消費と電力化率

ロ排出化に向けて重要な戦略といえる。ただし、省エネルギーや電力化の度合いは FullTech と RE100 にて差があり、RE100 の方で省エネおよび電力化がより進む結果となった。これはネガティブエミッション技術の利用可能性が影響したと考えられる。FullTech では発電部門で CCS 付きバイオマス火力が導入され、そこで「負の排出」が生み出されることから、需要側では電力化を 2050 年でも 4 割程度に留め、既存インフラを活用した天然ガス・石油利用が可能となっている（付録の図 7）。このように、ネガティブエミッション技術が比較的安価・大量に利用可能な場合においては、それを組合わせて需要側の排出削減を図ることが経済

合理的となりうる。

対して、RE100 では CCS 付きバイオマス発電や DACCS といった負の排出技術の利用を想定していない。最終エネルギー消費全てをゼロエミッション燃料で賄う必要があることから、省エネと電力化の強化が選択されたと思われる。RE100 の 2050 年の電力化率は 6 割程度に達し、残りの最終需要には水素や合成メタン、固体バイオマス、バイオエタノール、FT 合成燃料が供給されている。特に合成メタンや FT 合成燃料、バイオエタノールは RE100 のみで選択されており、ネガティブエミッション技術の利用が困難な場合には重要な技術となる可能性がある。

3.2 電源構成

図 3 に世界合計の発電電力量を、図 4 に 1 時間値電力需給例として日本全体の FullTech および RE100 ケースの 5 月の結果を示す。FullTech の電源構成では VRE や CCS 付きのガス火力・バイオマス火力、水力、原子力が貢献している（図 3、2050 年の VRE 比率は 37%）。効率的な CO₂ 排出削減に向けては、再エネ資源量や CO₂ 貯留資源量の地域性を踏まえつつ、様々な技術オプションを組合せることが重要である。日本においては原子力や太陽光、ガス火力（CCS 付き）が主要電源として選択された。太陽光発電の昼間の出力増加に対しては揚水式水力・蓄電池の貯蔵および出力

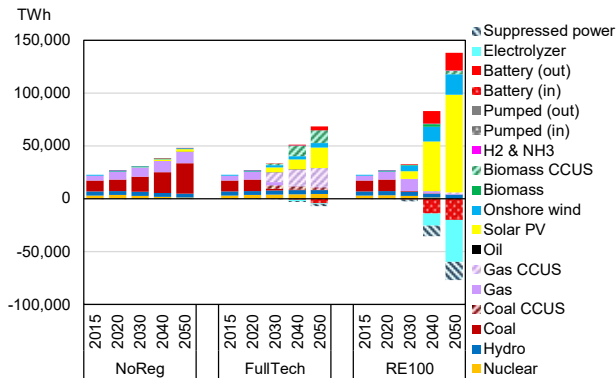
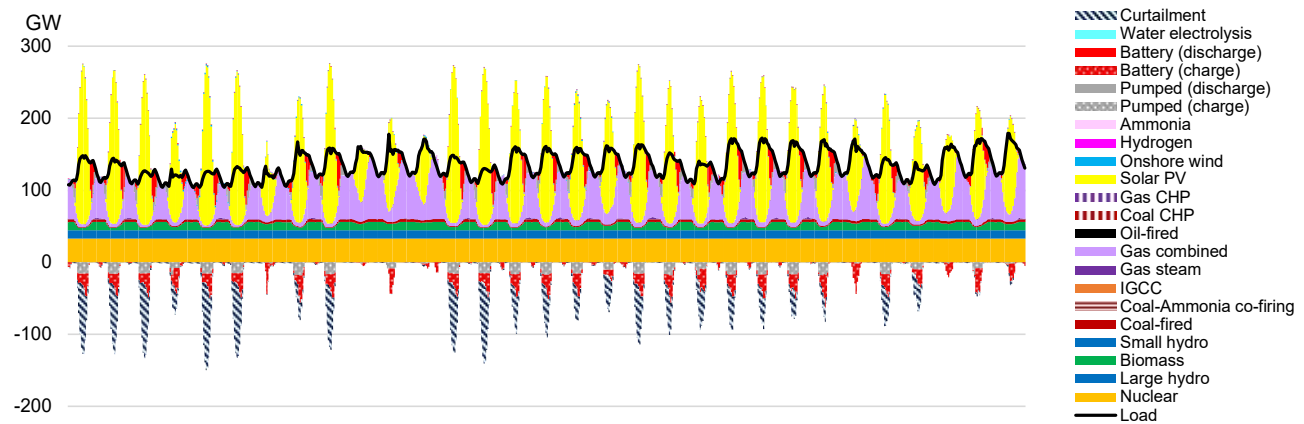
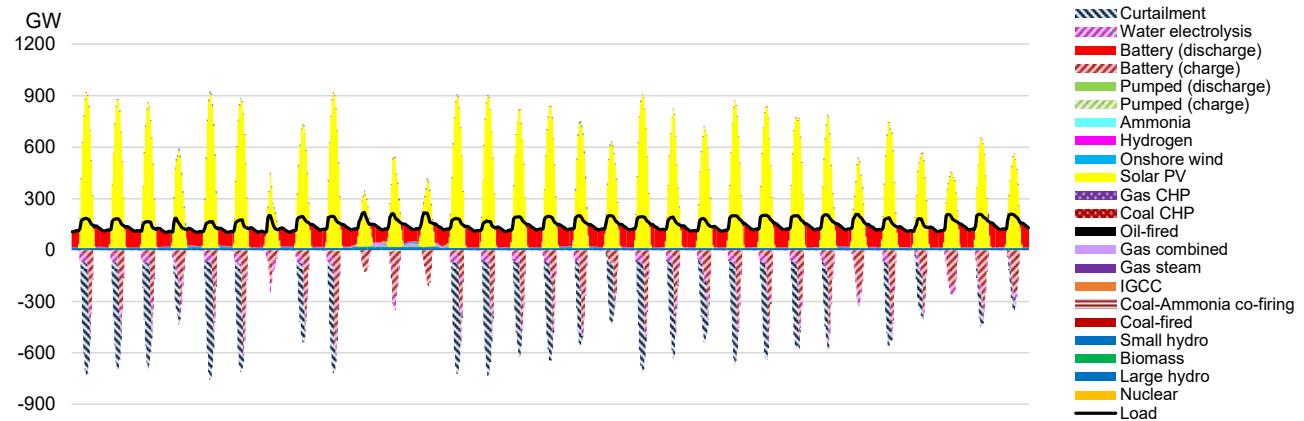


図 3 世界合計の発電電力量



(a) FullTech ケース



(b) RE100 ケース

図 4 日本全体の 5 月の 1 時間値電源運用

（注）NE5.0-R2 モデルは日本を 4 地域分割で表現している。この図は 4 地域の和を示している

制御が、そして夜間にはそれらの放電とガス火力の出力調整運転が電力需給バランス確保に貢献している (図 4a)。

RE100 ケースでは対照的に、VRE の大規模拡大が必要となる (図 3, 付録の図 7)。2050 年断面で VRE が発電電力量の 92% を占め、特に太陽光発電が顕著に拡大する結果となった。電力化の加速に加え、水電気分解への投入電力も相当量必要となることから、2050 年の RE100 の発電電力量は FullTech の倍程度に達している (FullTech は 64PWh/yr, RE100 は 121PWh/year)。現在のエネルギーシステムにおいて主な電力消費者は最終需要部門であるが、RE100 ケースではエネルギー転換部門 (水電気分解など) が新たな大規模消費者となり、電力需給構造が大きく変わりうる事が示唆されている。日本においては太陽光中心 (冬期などの太陽光出力が低下し、電力需要が増加する時期にはバイオマス火力併用) の電源構成となった (図 4b)。ただし、本計算では太陽光資源の上限を考慮していない点、また、系統慣性への影響は考慮していない点には注意が必要である。

3.3 一次エネルギー供給

図 5 に世界全体の一次エネルギー供給を示す。FullTech ケースでは 2030 年以降にバイオマスや太陽光が拡大するものの、化石燃料が大部分を占める構成となった。このようなエネルギー供給は大規模な CO₂ 貯留 (ガス火力発電やバイオマス火力発電での CCS 利用等) の上に成り立っており、その前提条件に関する感度分析が必要と思われる。

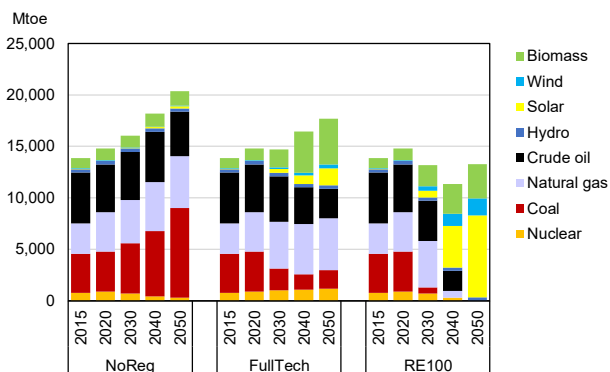


図 5 世界合計の一次エネルギー供給

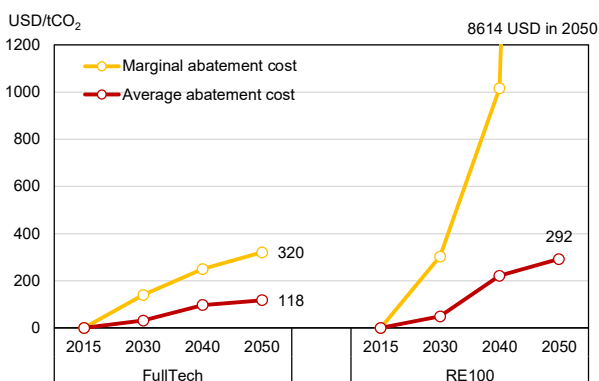


図 6 CO₂ 限界削減費用と平均削減費用

RE100 では 2030 年以降に化石燃料縮小と VRE 拡大が窺える。このエネルギー供給の実現には VRE やエネルギー貯蔵設備等の設置を急速に行う必要がある (付録の図 9-図 10)。土地利用の観点や、VRE 機器のサプライチェーン、蓄電池等に使用されるレアメタルの材料バランス等の観点から実現性に関する検討が必要であろう。

3.4 CO₂ 削減費用

世界全体での CO₂ の平均削減費用および限界削減費用を図 6 に示す。いずれの指標においても FullTech ケースの方が費用負担を大幅に抑えられる結果となった。前節で述べた通り、FullTech は大規模な CO₂ 貯留を前提とするものではあるが、エネルギー起源 CO₂ の正味ゼロ排出化に向けては CO₂ 貯留や原子力を含めた幅広い技術オプションを追求することが重要ということは指摘できるだろう。RE100 ケースでは限界削減費用が 2030 年以降に急激に増加する傾向が見られた。平均削減費用はそれ程の上昇とはなっていないことから、“ラストワンマイル” 的な削減が極めて困難となったと推察される。詳細は割愛するが、最終エネルギー消費 (図 2) や付録の部門別 CO₂ 排出や自動車構成の傾向 (図 7・図 8) を見ると、2040 年以降に排出削減が進んだ部門の一つは自動車であることから、そこで排出削減 (代替燃料車の普及や再生可能エネルギー由来の合成燃料製造など) が高価であったと推察される。

4. まとめ

本研究では 1 時間値の電力需給を考慮した世界モデル NE5.0-R2 を開発し、VRE 出力の時間変動性を明示的に考慮した上で、2050 年のエネルギー起源 CO₂ 正味ゼロ排出に向けたエネルギー需給を分析した。その結果、需要側での省エネルギー・電力化、および発電部門の脱炭素化が効率的な戦略であることが示唆された。発電部門の対策としては VRE のみならず CCS や原子力等の幅広いオプションを活用することが経済合理的となる可能性がある (FullTech ケース)。また、再生可能エネルギー 100% による正味ゼロ排出化は費用負担 (特に限界削減費用) が大きくなりうる可能性も示唆された。

ただし、本モデルには需要側技術を中心に簡略化された点が残っている。今後もモデルの拡張を進め、より包括的な分析を行う必要がある。具体的には自動車以外の最終消費部門の技術積上げのモデル化や、VtoG 等のダイヤモンドレスポンスの考慮が挙げられる。また、洋上風力発電のモデル化や、式 1 の前提条件の検証も必要である。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H02679, (独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (2-2104), 文部科学省原子カシ

システム研究開発事業 JPMXD0220354480 の助成を受けた。

参考文献

- 1) United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC); Climate Ambition Alliance: Net Zero 2050, <https://climateaction.unfccc.int/views/cooperative-initiative-details.html?id=95>, (アクセス日 2021.10.20)
- 2) IRENA; Data & Statistics, <https://www.irena.org/statistics>, (アクセス日 2021.10.27)
- 3) F. Ueckerdt, L. Hirth, G. Luderer, O. Edenhofer; System LCOE: What are the costs of variable renewables?, Energy, Volume 63, pp.61-75(2013)
- 4) 大槻貴司, 小宮山涼一, 藤井康正; 詳細地域分割に基づく世界エネルギーシステムモデルの開発と低炭素システムにおけるエネルギー・CO₂ 輸送の分析, エネルギー・資源学会論文誌, 40 巻, 5 号, pp.180-195(2019)
- 5) 大槻貴司, 小宮山涼一, 藤井康正; 発電・自動車用燃料としての水素の導入可能性: 地域細分化型世界エネルギーシステムモデルを用いた分析, 日本エネルギー学会誌, 98 巻, 4 号, pp.62-72(2019)
- 6) 大槻貴司, 小宮山涼一, 藤井康正; 高解像度世界エネルギーシステムモデルを用いた低炭素化技術の導入可能性: 逐次動的的手法による長期分析, 第 38 回エネルギー・資源学会研究発表会 (2019)
- 7) D. Bogdanov, J. Farfan,, K. Sadovskaia, A. Aghahosseini, M. Child, A. Gulagi, A. Oyewo, L. Barbosa, C. Breyer; Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps. Nat Commun 10, 1077 (2019)
- 8) S. Pfenninger, I. Staffell; Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data, Energy, Vol.114, pp.1251-1265, (2016)
- 9) I. Staffell, S. Pfenninger; Using Bias-Corrected Reanalysis to Simulate Current and Future Wind Power Output, Energy, Vol.114, pp.1224-1239, (2016)
- 10) IEA; Net Zero by 2050, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (アクセス日 2021.10.28)

付録 分析結果の補足図

図 7 に世界全体の部門別 CO₂ 排出量, 図 8 に世界全体の自動車構成(図中の LDV は Light Duty Vehicle, EV は Electric Vehicle, HEV は Hybrid Electric Vehicle, ICEV は Internal combustion engine vehicle の略), 図 9 に世界全体の発電設備容量, 図 10 に世界全体のエネルギー貯蔵容量の分析結果を示す。

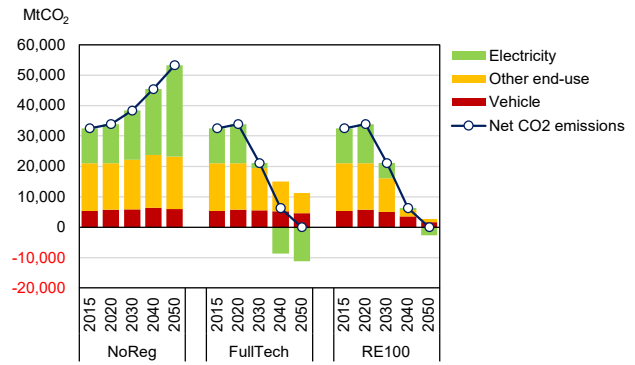


図 7 世界全体の部門別 CO₂ 排出量

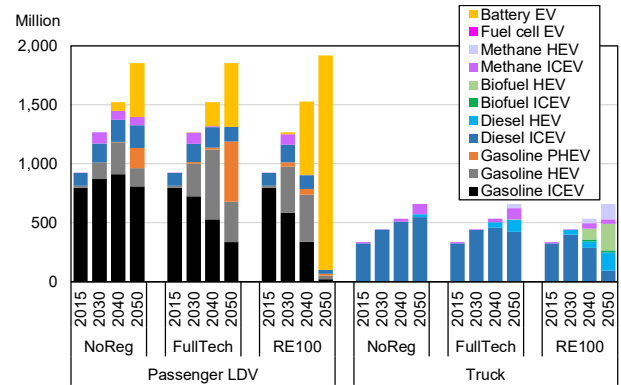


図 8 世界の自動車台数

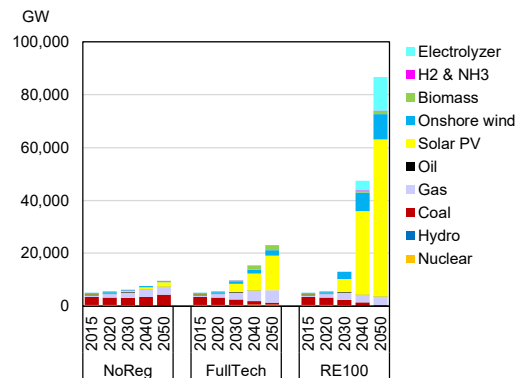


図 9 世界の発電設備容量

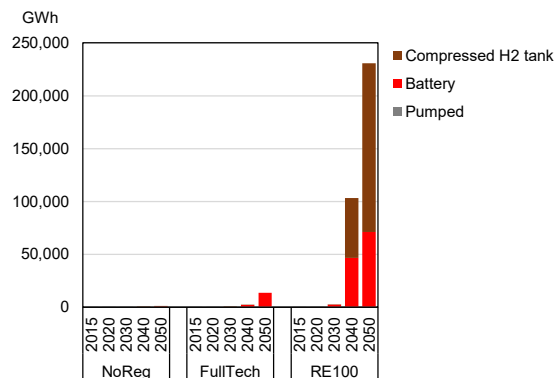


図 10 世界のエネルギー貯蔵容量