

京都大学大学院経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座
ディスカッションペーパー

日本の 2050 年カーボンニュートラルの実現がエネルギー構成及びマクロ経済へ与える
影響分析

— E3ME マクロ計量経済モデルを用いた分析 —

Study on Energy and Economic Impact by 2050 Carbon Neutral in Japan

-Analysis using E3ME Macro Econometric Model-



2021 年 5 月

May 2021

名城大学経済学部産業社会学科 教授 李秀澈

Soocheol Lee, Professor, Faculty of Economics, Meijo University

追手門学院大学経済学部 講師 何彦旻

Yanmin He, Lecturer, Faculty of Economic, Otemon Gakuin University

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 准教授 昔宣希

Sunhee Suk, Associate Professor, Graduate School of Fisheries and Environmental
Sciences, Nagasaki University

京都大学大学院地球環境学堂/経済学研究科 教授 諸富徹

Toru Morotomi, Professor, Graduate School of Economics & Graduate School of
Global Environmental Studies, Kyoto University

Unnada Chewprecha, Principal Modeler, Cambridge Econometrics

記：本稿は、京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座とイギリスのケンブリッジエコノメトリックスとの共同研究の成果である。

Note: This study is collaboration work of Renewable Energy Economic Course, Kyoto University and Cambridge Econometrics.



日本の 2050 年カーボンニュートラルの実現がエネルギー構成及びマクロ経済に与える 影響分析

— E3ME マクロ計量経済モデルを用いた分析 —

Study on Energy and Economic Impact by 2050 Carbon Neutral in Japan

-Analysis using E3ME Macro Econometric Model-

李秀澈^a・何彦旻^b・昔宣希^c・諸富徹^d・Unnada Chewpreecha^e

^a名城大学経済学部産業社会学科 教授

^b追手門学院大学経済学部 講師

^c長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 准教授

^d京都大学大学院地球環境学堂/経済学研究科 教授

^e Principal Modeler, Cambridge Econometrics

Abstract

This study simulates what Japan's macro economy would look like if Japan achieves carbon neutrality in 2050, and how Japan's energy composition would change at that time, using the E3ME macro econometric model. As a result, it was found that in terms of power supply configuration in 2050, renewable energy accounts for about 90%, assuming nuclear power plants are phased out by 2040. It is predicted that GDP will increase by 4.0 to 4.5% compared to the baseline scenario, and employment will improve by 1.5 to 2.0%, resulting in simultaneous achievement of carbon neutrality and an economic boom. The key factor revealed is that carbon neutrality promotes decarbonization technological innovation in each sector of the economy, which ultimately eases the energy cost burden.

Keywords: 2050 Carbon neutral, E3ME macro-econometric model, Energy mix, Decarbon technology innovation, Japanese economic impact

要旨

本研究は、日本が 2050 年カーボンニュートラルを達成した場合、マクロ経済は、どのような姿を見せるのか、またその際の日本のエネルギー構成はどのように変化するのかについて E3ME マクロ計量経済モデルを用いてシミュレーションを行った。その結果、2050 年の電源構成（原発 2040 年フェーズアウトケース）は再生可能エネルギーが約 90%を占めることになり、GDP はベースラインシナリオより 4.0~4.5%ほど増加し、雇用も 1.5~2.0%ほど改善されるなど、カーボンニュートラルと経済成長は同時に達成可能であるとの予測結果になった。その主な要因は、カーボンニュートラルが、経済の各部門で脱炭素技術革新を促し、究極的にはエネルギー費用負担の増加傾向を大きく緩和するためであることが判明した。

キーワード: 2050 年カーボンニュートラル、E3ME マクロ計量経済モデル、エネルギーミックス、脱炭素技術革新、日本経済影響

1. はじめに

本研究の目的は、日本が 2050 年カーボンニュートラルを達成した場合、マクロ経済（GDP、消費、投資、貿易、雇用など）は、どのような姿を見せるのか、またその際の日本のエネルギー構成はどのように変化するのか、について定量的に推定するために E3ME（Energy-Economy-Environment Macro Econometrics）マクロ計量経済モデル（以下、E3ME モデル）を用いてシミュレーションを行うことである。E3ME モデルは、低・脱炭素技術革新がボトムアップで内生的に決まる FTT（Future Technology Transformation）サブモデルを装着しており、カーボンニュートラルが進む場合、経済各部門での低・脱炭素技術革新の効果が経済に適切に反映されるメカニズムを持っている。

世界の温暖化対策は、2050 年脱炭素化に向けて舵を切っている。Climate Ambition Alliance によれば 2020 年 12 月末基準で、世界の 123 カ国・1 地域が 2050 年に二酸化炭素の排出分と吸収分が同量になる「カーボンニュートラル（Carbon neutral）」を宣言した。EU は、2019 年 12 月に「欧州グリーンディール（European Green Deal）」を公表し、2050 年までにカーボンニュートラルを達成するためのロードマップを示した。さらに EU は、2020 年 3 月に長期戦略を提出し「2050 年までに気候中立（Climate Neutrality）達成」を確固たるものとした。イギリスは、気候変動法（2019 年 6 月改正）の中で、2050 年カーボンニュートラルを規定している。アメリカのバイデン大統領も、2035 年の電力脱炭素の達成、2050 年以前のネット排出ゼロを表明している。

東アジアでも、中国の習近平主席は、2020 年 9 月の国連総会の演説で、2060 年までにカーボンニュートラルを目指すことを表明した。日本の菅義偉総理は、10 月 26 日就任後の所信表明演説で「2050 年までに温室効果ガスの排出実質ゼロ（カーボンニュートラル）を目指す」と宣言した。日本に続き、韓国の文在寅大統領も 10 月 28 日の国会施政方針演説で「2050 年に国内の温室効果ガス排出をゼロにする目標を挙げる」と表明した。このように世界各国が相次いでカーボンニュートラルを打ち出していることは、パリ協定が目標としている世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して 2°C 未満に抑える、そして可能な限り 1.5°C 未満を目指すためには、今世紀中早期のカーボンニュートラルの達成を避けては通れないことが共通の認識となったためであろう。実際に IPCC(2018)の「1.5 度特別報告書」によれば、世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して、2°C 未満に抑えるためには、2075 年頃には脱炭素化する必要があり、さらに努力目標である 1.5°C に抑えるためには、2050 年に脱炭素化が必要であるという。

一方、世界の総エネルギー消費の中で占める化石エネルギーの割合は、2018 年に約 85%（BP, 2020）を占めており、日本の一次エネルギー供給に占める化石エネルギーの割合も 85.5%（経済産業省, 2019）と、世界とほぼ同じ水準である。現在の温室効果ガス削減技術や選択可能な政策手段を考えると、2050 年カーボンニュートラルの



実現の道のりは決してやさしくないといえる。まだ、エネルギー消費の大半を占めている化石エネルギーを、今後 40 年間にほぼゼロまで削減することは、相当な経済的負担を強いることになると考えられる。

ただし、近年再生可能エネルギーや電気自動車、水素製造など多様な形態の低・脱炭素技術の急速な進展は、カーボンニュートラルの道程に希望の灯りとなっている。実際に EU がいち早くカーボンニュートラルを宣言した背景には、その過程で生まれる低・脱炭素技術革新は、EU の産業競争力を強め、世界の経済をリードする主体とすることを確信しているためである (European Commission, 2018)。

以下、第 2 章では本研究の背景と関連した文献レビューを行い、第 3 章で E3ME モデルの概要について説明する。第 4 章では E3ME モデルシミュレーションのためのベースラインの設定と 2050 年カーボンニュートラル達成のための政策シナリオの設定について論じる。第 5 章では 2050 年カーボンニュートラル達成時のエネルギー構成と経済への影響について E3ME モデルの推定結果を示し、考察を行う。第 6 章ではまとめと今後の課題とする。

2. 研究の背景と先行研究レビュー

2020 年以降の世界の温暖化対策を定めているパリ協定では、加盟国に温室効果ガスの削減目標 (NDC: Nationally Determined Contribution) の提出を求めており、実際に 197 カ国・地域の殆どの加盟国は削減目標を公表している。ただし、上述の IPCC の「1.5 度特別報告書」によれば、現在の経済活動が続けば、早ければ 2030 年には 1.5°C の上昇に達し、2050 年には 4°C 程度の気温上昇が見込まれている。そして、パリ協定の NDC 目標が達成されたとしても、今世紀中の気温は 3°C 程度まで上昇するという。この IPCC の「1.5 度特別報告書」を契機に、欧州をはじめ世界はカーボンニュートラルへの動きが加速している。

日本の場合、前述のように 2020 年 10 月 26 日、菅義偉総理が国会演説でカーボンニュートラルを表明した後、2020 年 12 月に 内閣官房/成長戦略会議 (2020) が 2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定した。ここでは、特に産業としての成長が期待され、温室効果ガスの排出削減の観点からも取り組みが不可欠な 14 の重要分野毎に高い目標を設定する実行計画が盛り込まれている (図 1)。そして日本政府は、2050 年カーボンニュートラル実現のために、240 兆円の民間企業保有現預金の活用を促し、雇用と成長を生み出すとしており、2050 年で年額 190 兆円程度の経済効果を見込んでいる。また、水素などの脱炭素燃料、化石燃料からの CO₂ の回収・再利用も活用し、電力部門においては脱炭素化を大前提とした上で、産業・運輸・家庭部門の電化により、2050 年の電力需要が現状から 30~50%増加するとの試算に基づき、発電量に占める再生可能エネルギーの比率を約 50~60%に引き上げることを目標としている (図 2)。そ

して実行計画により社会実装が順調に進むことを前提として、水素・アンモニア発電10%程度、原子力・CO₂回収前提の火力発電30~40%程度を参考値としている。



図1 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」における重点14成長分野
出所：内閣官房/成長戦略会議(2020)

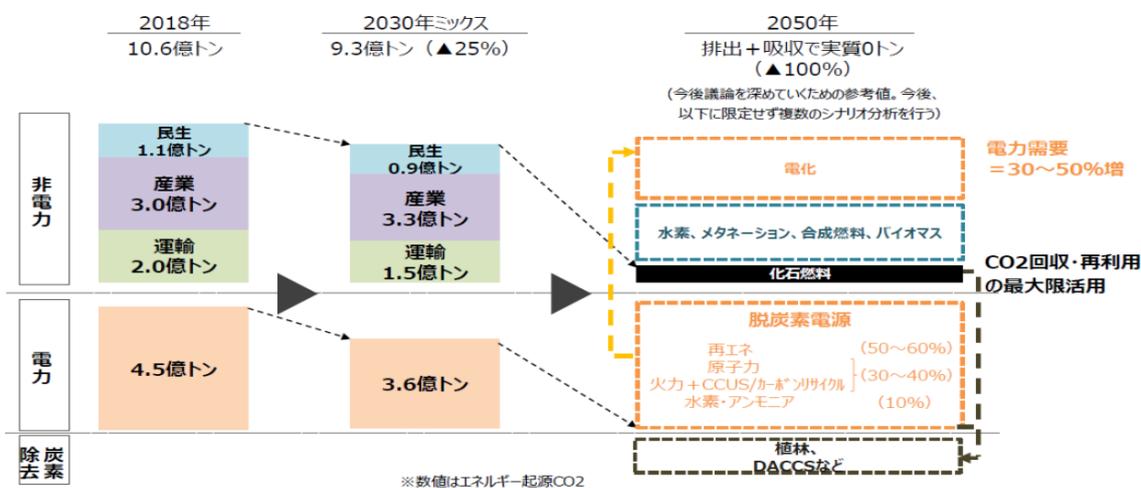


図2 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」における部門別
2050年カーボンニュートラルの勘定

注：数値はエネルギー起源二酸化炭素排出量

出所：内閣官房/成長戦略会議 (2020)

一方、本研究のように、2050年にカーボンニュートラルが実現された場合、経済及びエネルギーミックスに与える影響に関する計量モデルシミュレーション予測に関する研究はあまり見当たらない。本研究グループが中心となり、東アジア（日中韓台

湾) の国・地域で2050年の温室効果ガス80%削減が、経済や低炭素技術革新に与える影響について、E3MEモデルを用いて2050年までにシミュレーションした研究はあるが、同研究はカーボンニュートラルによる影響までには至っていない (Lee, et al. (eds), 2019)。

EU では、European Commission (2018)が、今世紀中地球気温上昇 1.5°C以下に抑えるためには、2050年までにカーボンニュートラルの実現は不可欠であると判断し、その際の経済予測をマクロ計量経済モデルである E3ME モデルと一般均衡モデルである GEM-E3 モデルの両方によるシミュレーション結果について比較考察を行った。その結果、E3ME モデルでは、ベースラインシナリオ¹と比較して、EUのみカーボンニュートラル達成時には GDP の 1.48%上昇、世界が同時にカーボンニュートラル達成時には 2.19%上昇といずれも経済には良い影響を与えることと予測された (図3)。

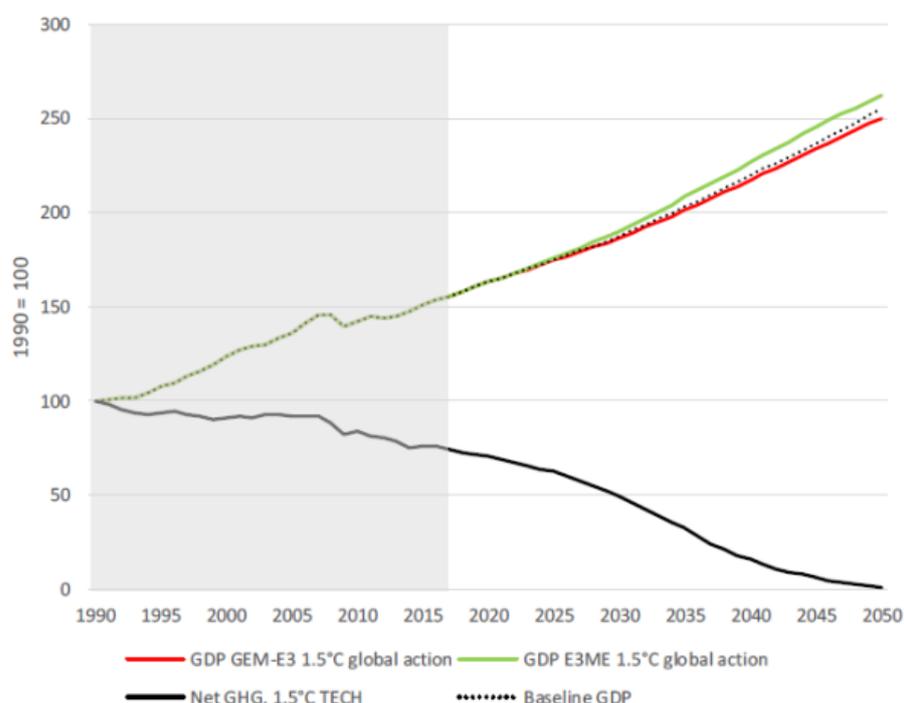


図3 EUにおける2050年カーボンニュートラル達成時のGDP予測

出所：European Commission(2018)

一方で GEM-E3 モデルでは、EUのみカーボンニュートラル達成時には GDP の 0.63%下落、世界が同時にカーボンニュートラル達成時には 1.3%下落といずれも経済にベースラインシナリオに比べてマイナス影響を与えることが予測された。この差は、後述するようにモデルの理論的バックグラウンドやメカニズムの差に起因しているが、確かなことは、いずれのモデルにおいても EU が 2050 年のカーボンニュートラ

¹ ここで、ベースラインシナリオは、EU が現状以上の特別な温暖化政策を実施しない場合の経済成長経路をいう。

ルを達成しても、経済成長経路はベースラインを大きく外れることなく成長し続け、いわゆるデカップリングの達成は可能であることを示している。

国内で本研究と関連した研究は、李ほか(2020)がある。この研究は、発電部門の石炭火力・原発のフェーズアウト時に2050年のマクロ経済と電源構成についてE3MEモデルを用いてシミュレーションを行った。その結果、両電源を2050年前までにフェーズアウトしても、経済（GDP、雇用などマクロ経済）に悪い影響はほとんど与えないことが確認された。ただし、電源部門の二酸化炭素排出は、原発と石炭火力の代替電源として再生可能エネルギー発電（以下、再エネ発電）より、LNG火力の方がより伸びるので、ベースラインシナリオに比べて20%削減に留まることも判明された。この研究は、石炭火力の早期フェーズアウトの経済影響を予測する点では意義があったと言えるが発電部門のみを対象にしており、また政策シミュレーションの設定においても石炭火力と原発のみ政策手段として採用しているという限界がある。

以上から、本研究は日本が2050年カーボンニュートラル達成のために必要となる政策手段のパッケージと、これらの政策が実施された時に日本のエネルギー構成とマクロ経済に与える影響について、大規模計量モデルで予測する点においては、先駆性と独創性を持っているといえる。

3. E3ME モデルの概要²

筆者らは、石炭火力と原発のフェーズアウトが長期的に日本の経済と電源構成、そして二酸化炭素排出量にどのような影響を与えるかという問いに答えるために、イギリスのケンブリッジ・エコノメトリックス研究所（CE: Cambridge Econometrics）が開発・運営しているE3MEモデルを活用した。同モデルは、エネルギー環境政策の経済・環境影響分析に優れた機能を有しており、既述のようにEuropean Commissionとイギリス政府のエネルギー・気候変動政策・制度設計に重用されている³。従来、同モデルの主な分析対象国はEU諸国であったが、筆者らの所属の「東アジア環境政策研究会」とCEとの共同モデル改訂作業により、日本・中国・韓国・台湾など主要アジア諸国に対してもEU諸国と同様の分析が可能となった（詳しくは、Lee, et al.(eds.), 2015; Lee, et al.(eds.), 2019を参照）⁴。

² 本節のE3MEモデルに対する説明は、李ほか(2020)に基づいている。

³ 例えば、EUの2050年温室効果ガス実質ゼロ政策の土台となるEuropean Commission (2018)の報告書では、E3MEモデルによるシミュレーション結果を重用している。

⁴ E3MEモデルの詳細、例えば構成、扱う範囲、シミュレーションの手順、コストや効率など技術パラメータの設定などについては、下記のE3MEマニュアル(英語版および日本語翻訳版)をご参照。

E3MEモデルのマニュアル(Version 6.1 (September 2019)オリジナル英語版)

<https://www.e3me.com/wp-content/uploads/2019/09/E3ME-Technical-Manual-v6.1-onlineSML.pdf>

日本語翻訳版 (Version 6.0 (April 2014))

http://www.reeps.org/top_news/201805/E3ME_Manual%20ver6.0_jpn_%202018.pdf

また、GGEモデルとE3MEモデルの比較については、第2回「政府税制全体のグリーン化推進検討会参考資料」(<https://www.env.go.jp/policy/tax/conf/conf01-11/ref01.pdf>)を参照。



E3ME モデルは、分析対象国の経済・産業分類がなされた国民所得勘定と産業連関表を用いて構築されている。さらに、計量経済モデルにリンクされたエネルギーサブモデルによって、エネルギー需要および CO₂ などの環境負荷物質排出量を算出する。労働市場も詳細にカバーしており、失業に関わる推定も可能である。E3ME モデルの方程式体系には、国別・部門別に、GDP の構成要素（消費、投資、国際貿易）、各種価格、エネルギー需要、主要鉱物資源需要を求める方程式が含まれている。

E3ME モデルは、日本を含む 59 カ国・地域のマクロ経済部門（投資、消費、貿易、雇用、物価、政府部門）と 42 産業（産業連関表が E3ME モデルに接続されている）、12 種の燃料（石炭、石油、電力、ガス、熱など）、24 の電源（原発、石炭、ガス、石油など 7 つの従来型電源、太陽光、風力など 12 の再エネ電源を含む）で構成された大規模連立方程式体系となっている。各種のエネルギー環境政策変化をモデルが内生的に解くことで、2050 年までに経済と産業、二酸化炭素排出に与える影響に関する定量分析が可能となる。さらに、このモデルは、電源、産業、交通などの部門で起きる様々な低炭素技術革新効果（それによる低炭素技術のコストダウン効果）がボトムアップで内生的に決定される最先端の 4 つの FTT (Future Technology Transformation) サブモデルを装着している⁵。4 つの FTT サブモデルは、E3ME 本体とハードリンクされている。例えば、発電部門の FTT-Power サブモデルの場合、E3ME 本体から年度別経済活動の結果必要となる電力需要が決まれば、それが FTT-Power へ伝達される。FTT-Power は E3ME 本体で決まった電力量を所要とし、FTT-Power のデータベースにある各電源別発電単価と単価分散、耐用年数、建設期間、学習曲線（成熟電源であるほど技術革新スピード（単価下落）が遅くなり、新電源であるほど早くなる）と政策変数（例えばカーボンプライシングや固定価格買取制度（以下、FIT））を勘案した電源ミックスを年度別に内生的に決定する。

そして FTT-Power では、年度別決定された電源ミックスにより各電源の新たな発電単価と電源の平均単価が内生的に決定され、E3ME 本体に伝達する。E3ME 本体は、この電源平均単価に基づいてエネルギーコストを計算しており、この新たなエネルギーコストによる経済活動の結果決まった電力需要量を FTT-Power へ伝達する、というシミュレーションを年度別に 2050 年まで繰り返している。カーボンプライシングにより FTT-Power で電源平均単価が高くなると、E3ME 本体ではそれを受けてエネルギーコストが高くなり、経済へのマイナス影響とエネルギー需要が減ることになるが、一方では低炭素投資が内生的に増える効果も現れることになる。

エネルギー環境政策の効果分析には、一般均衡(CGE)モデルが広く使われている。E3ME モデルは、経済は不均衡が一般的であり、有効需要が GDP を決定するというポストケインジアン理論に基づいている。すなわち、遊休資本が存在する場合に投資や消費など有効需要が増加しても他の部門が縮小するクラウディングアウト

⁵ 4 つの FTT サブモデルは、(1)発電部門の 24 種類の電源となっている FTT-Power、(2)鉄鋼部門の 7 種類の製鉄技術と構成されている FTT-Steel、(3)交通部門の 9 種類の交通機関と構成されている FTT-Transport、(4)建物(熱)部門の 7 種類の空調技術となっている FTT-Heat である。FTT サブモデルのメカニズムやシミュレーションについては、Lee, et al.(eds)(2019)を参照。

(Crowding Out)効果は起き難く、経済へのプラス効果が表れるという。これに比べて新古典派の経済理論に基づいている CGE モデルの場合、経済は常に均衡状態にあり、ある部門の需要増加は他部門の需要を減らすクラウディングアウト効果を引き起こすので需要牽引の経済刺激効果は限定的となる。

従って、CGE モデルは低炭素化政策の投資促進効果よりは、コスト側面が強調され、政策の経済へのネガティブな影響が出やすい面がある。E3ME モデルは、低炭素政策の技術革新効果(それによるコストダウン)と新規投資(有効需要)がより、エネルギーコストの変化が起きると、各産業のエネルギー投入係数を年度別に 2050 年までに内生的に変化させ、それによる資本とエネルギーの投入率を変え、低炭素エネルギー産業構造への転換を促し、経済を刺激するメカニズムを持っている。E3ME モデルのこうしたメカニズムは、CGE モデルではあまり見られない特色と⁶いえる。

4. ベースライン及び政策シナリオの設定

4.1 ベースラインシナリオ

本研究の政策シナリオ、すなわち 2050 年カーボンニュートラルを達成させるための政策パッケージが E3ME モデルシミュレーションのためのシナリオとして選択された場合、エネルギー構成と経済に与える影響の度合いを測るための比較となる基準シナリオ（以下、ベースラインシナリオ）の設定が必要である。ベースラインシナリオは、通常、現行の政策以外の特別な政策が実施されない場合のエネルギー構成、経済、環境（例えば、二酸化炭素排出）などの推移を表すシナリオとなる。

本研究でのベースラインシナリオは、日本エネルギー経済研究所(2020)刊行の「IEEJ OUTLOOK 2021」（以下、OUTLOOK2021）のレファレンスシナリオを採用した。このレファレンスシナリオは、日本が現行以上の特別政策が行われない場合の経済（GDP など）、環境（二酸化炭素排出量など）、そして電源構成などエネルギー関連指標の 2050 年までの推移を予測している。

OUTLOOK2021 レファレンスシナリオでは、GDP の場合、2018 年 6.2 兆米ドル(2010 年価格) から年平均 0.7%成長し、2050 年には約 7.7 兆米ドル(2010 年価格)となり、最終エネルギー消費は 2050 年に 2018 年より 20.8%削減する 224 百万 toe、発電量は 2050 年に 2018 年より 3.0%増加する 1,082TWh、そしてエネルギー起源の二酸化炭素排出量は 2050 年に 2018 年の 1,081 百万 t より 31.7%減少する 738 百万 t と予測されている（表 1）。

⁶ ただし 2つのモデルは、いずれも経済学理論に基づいており、どちらのモデルが優位であるという論議はあまり意味がない。こうして点で EU ではエネルギー・気候変動政策策定の際には、参考モデルとして E3ME のような計量経済モデルと CGE モデルを共に重用し、比較参考している。



表1 OUTLOOK2021 レファレンスシナリオ上の主要指標の見通し

出所：日本エネルギー経済研究所(2020)

指標	2018年	2030年	2040年	2050年
GDP(10億US\$,2010年価格)	6,190	6,693	7,234	7,744
最終エネルギー消費(百万toe)	283	263	244	224
発電量(TWh)	1,050	1,079	1,093	1,082
(原発)	65	157	141	141
(再エネ発電)	154	202	241.7	294
(石炭火力)	339	291	289	262
二酸化炭素排出量(百万CO ₂ t)	1,081	940	852	738

そして電源構成の場合、石炭火力は2018年に32%から2050年には24%へ縮小、LNG火力は2018年に36%から2050年に27%へ縮小する一方で、原発は2018年に6.2%から2050年に13%へ上昇、そして再エネ発電（大型水力含む）は2018年に18.8%から33.8%へ拡大することが予想されている。

4.2 政策シナリオ

本研究では、2050年カーボンニュートラルを達成させる政策シナリオ作成において、カーボンプライシングなど、ある特定の手段に依存する方法は取らなかった。むしろカーボンプライシングとともに、複数の政策のポリシーミックスで実現する方法を採用した。その理由として、カーボンプライシング（本研究では、炭素税）のみ依存する場合、必要とする税率が政治的に受容困難な高効率の税率になりやすいためである。もう一つの理由としては、カーボンニュートラルの達成には、現実的にも主体別の多様な低・脱炭素行動が必要であり、これらの行動を促す政策手段としては、カーボンプライシングのほかにも、規制・基準設定、補助金など多岐にわたるためである。本研究では、こうした考え方に基づいて、以下のように、日本が2050年カーボンニュートラルを達成できる多様な政策パッケージによる政策シナリオパッケージを設定した（表2）⁷。

部門別政策シナリオの設定において、まず、原発の存続は市場で決まるよりは政策要素が強いので、本研究では政策シナリオとして設定をした。その際に、原発について次の2つのケースを想定した。1つ目は、電源の中で原発のシェアをOUTLOOK2021のレファレンスシナリオに従わせることである。すなわち、原発電源シェアが2018年に6.2%から2050年に13%（発電量は、141TWh）へ拡大することを想定するシナリオである。そして、2つ目は、原発を2040年にフェーズアウトするシナリオである。このシナリオは2018年以降原発の新規建設は行われず、稼働歴が基

⁷ 本研究で、部門別・技術別に政策シナリオが設定可能なのは、前述のように4つのFTTサブモデルがあるためである。

本的に 40 年に達する順で廃止するシナリオである⁸。したがって、本研究の政策シナリオは、原発ありの政策パッケージシナリオ、そして原発無しの政策パッケージシナリオの 2 つの政策シナリオによって構成される。

表 2 政策シナリオの内容

注 1 : 発電部門での太陽光は、2020 年より 250kW 以上は、固定価格買取から入札へ変更されている。

2 : 交通部門での燃料電池車は、データ制約により政策シナリオ対象となっていない。

3 : E3ME モデルを用いた政策シナリオの設定は、Lee, et al.(eds)(2015)、Lee, et al.(eds)(2019)などでも参照できるが、カーボンニュートラルに向けた政策シナリオの設定は本研究独自のものである。

出所：本研究の設定による。

設定項目		シナリオ設定内容	備考
炭素税		○税率は 2021 年に 50 米ドル/CO ₂ ・t から比例的に増加し、2040 年には 400 米ドル/CO ₂ ・t になるように設定。2041 年から 2050 年までには、400 米ドル/CO ₂ ・t を維持。	○炭素税収は、税込中立に基づき、低炭素投資、FIT、火力発電フェーズアウトに伴う費用に充当
発電部門	原子力発電	○OUTLOOK2021 のレファレンスシナリオ ○2040 年フェーズアウト	○2050 年電源割合：13% ○2040 年電源割合：ゼロ
	石炭火力	○2040 年にフェーズアウト	○2040 年電源割合：ゼロ
	再エネ発電	○2021 年～2035 年に、風力、バイオマス発電に FIT を適用 ○バイオマス+CCS は、スタートアップ電源として補助政策を採用	○太陽光は FIT を設定しない ○2030 年までに初期投資の 60%を補助
交通部門	乗用車販売	○2035 年からガソリン・ディーゼル車販売規制	○ハイブリッド車は販売維持
	EV 補助金	○2025 年までに車両購入補助金維持	○8,000～13,000 米ドルを補助
	Bio-fuel mandate	○貨物自動車と航空機の燃料にバイオ燃料義務率を設定	○2021 年に 5%から徐々に増やし、2050 年 100%設定
鉄鋼部門		○2050 年までに高炉から排出をゼロとする	
ビルのボイラー		○2050 年までに化石燃料のボイラーをフェーズアウトする	

以上の 2 つの原発シナリオを前提に、2050 年カーボンニュートラル達成のための政策シナリオは、次のように設定した (表 2)。まず炭素税は、既存の「地球温暖化対策税」に加え、2021 年から 50 米ドル/CO₂・t の税率を比例的に増加し、2040 年には 400 米ドル/CO₂・t になるように設定し、2041 年から 2050 年までには、400 米ドル/CO₂・t を維持することとした (図 4)。この炭素税シナリオの下で発生する税収は、

⁸ このシナリオの設定方法について詳しくは、李ほか(2020)を参照。

税込中立原則に基づき、低・脱炭素投資、FIT、火力発電フェーズアウトに伴う費用に充当する(図 5)⁹。

(単位：2010 年米ドル)

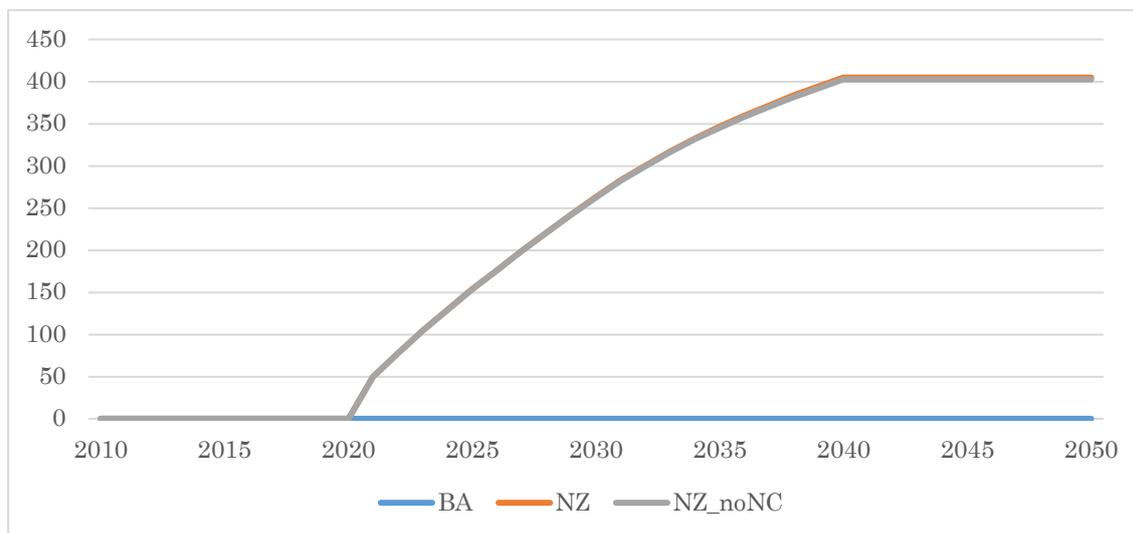


図 4 炭素税の税率経路

注：BA はベースラインシナリオ（炭素税率はゼロ）、NZ は原発を OUTLOOK2021 のベースラインシナリオに設定した場合の政策シナリオ、NZ_noNC は原発を 2040 年フェーズアウトした場合の政策シナリオを表している。図では、二つの政策シナリオの炭素税率経路は一致している。

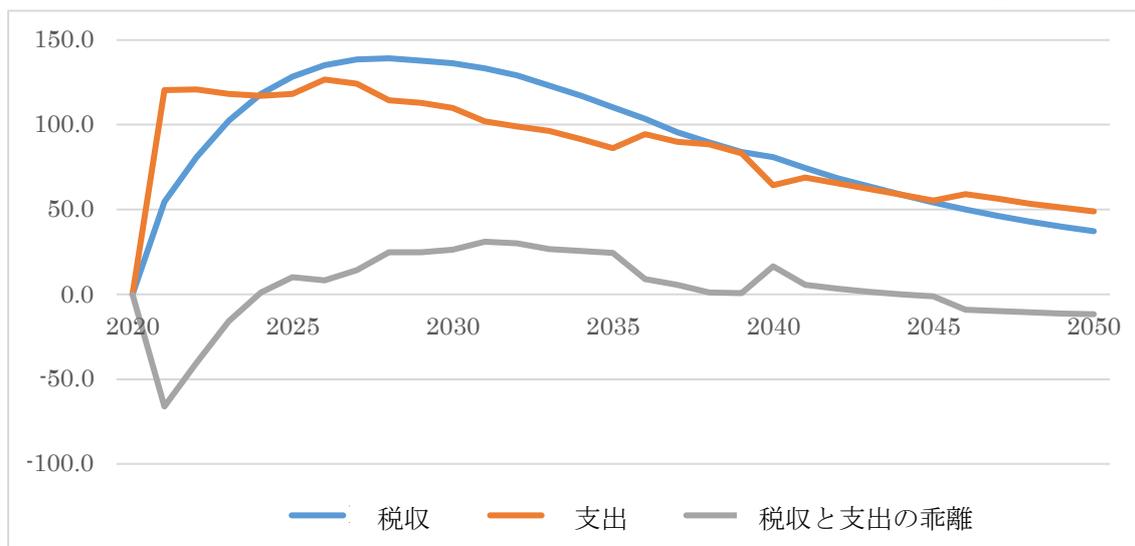
出所：本研究の E3ME モデル推定による。

各部門別においては、まず発電部門では、2050 年カーボンニュートラル実現のためには石炭火力発電の早期フェーズアウトは欠かせないと判断し、石炭火力は、2021 年から非効率的かつ稼働歴の長いもの順に廃止し、2040 年にはフェーズアウトするシナリオを設定した¹⁰。再エネ発電については、風力、バイオマス発電には、2021 年～2035 年に現行の FIT を適用し、太陽光と水力発電には FIT を適用しないシナリオを設定した。これら 2 つの電源について FIT が適用されていない理由は、太陽光発電の場合、2020 年から 250kW 以上のものについては、FIT から入札へ制度変更されており、水力発電の場合、まだ FIT 対象となっている小水力は、E3ME モデル上では大型水力と分離されておらず、小水力のみの FIT 設定は困難であるためである。

⁹ 図 5 で、炭素税からの支出を税込にぴったり合わせるのには、モデル技術上難点があり、2021 年～2050 年の全期間中の税込と支出を合わせる事となっている。

¹⁰ 電源部門の規制シナリオは、E3ME モデルのサブモデルである FTT-Power で設定可能である。そして石炭火力フェーズアウトシナリオは、日本に稼働中の 151 基の石炭火力発電所を、稼働 40 年以上が経過する亜臨界 Sub-C は 2025 年度、超臨界 SC は 2027 年度末までに廃止し、2030 年度までに現状の 3 分の 1 の設備利用率まで低下させる。その上で、新規の石炭火力発電所（現在建設中の USC/IGCC）については、稼働年を最長 15 年とし、2040 年までにフェーズアウトするシナリオである。このシナリオ設定について詳しくは、李ほか（2020）を参照。

(単位：10 億米ドル)


図5 炭素税の税収と支出額の予想経路

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

交通部門においては、2020年12月に日本政府の2030年代半ばにガソリン車の販売を禁止する方針に従い、本研究においても2035年内燃機関のみの乗用車は販売しないように設定した¹¹。また、電気自動車（EV）については、2025年までに購入時に搭載蓄電池容量によって一台当たり8,000～13,000米ドルまで支給するように設定した。自治体の場合もEV補助金を支給しているが、支給額が自治体によって様々なので、自治体補助金は政策シナリオとして採用しなかった。そして貨物自動車と航空機燃料については、2050年までバイオ燃料の使用義務を設定した。

産業部門については、経済全体のエネルギー起源二酸化炭素排出量の12.7%、産業部門中では約40%を占めている鉄鋼部門のみ対象にして政策シナリオの設定を行った¹²。鉄鋼部門では、高炉部門の二酸化炭素排出量を2050年までにフェーズアウトする規制シナリオを設定した¹³。最後に、ビル部門のボイラー燃料については、FTT-Heatを用いて、化石燃料を使用するボイラーを2050年までにフェーズアウトするように設定した。

¹¹ 2035年に内燃機関自動車の販売禁止、EV補助金、バイオ燃料規制などは、E3MEモデルのサブモデルであるFTT-Transportで設定可能である。また水素燃料電池自動車については、FTT-Transportサブモデルで新規技術として構築中であり、シナリオ設定については今後の課題とする。

¹² 2018年に経済全体のエネルギー起源二酸化炭素排出量は12億4400万トンであるが、産業部門からは3億9600万トン、そして鉄鋼部門からは1億5800万トンが排出された(環境省(2020))。E3MEモデルにおいて、産業部門のFTTサブモデルでは、多様な技術データの入手困難性などのため、鉄鋼部門(FTT-Steel)のみ構築されている。産業部門における鉄鋼部門以外の技術革新はE3MEモデルの本体でトップダウン方式により決まっている。セメントや化学など他の産業部門の場合、二酸化炭素排出量は使用原材料の属性にも大きく依存する傾向があり、技術革新がボトムアップで決定されるFTTモデルの採用のメリットがまだ少ないこともあり、FTTモデルの適用は今後の課題としている。

¹³ FTT-Steelでは、水素還元、直接還元、電気炉など25の技術がボトムアップで決まる構造となっており、補助金など経済的手法や技術革新スピードを調整するシナリオの設定も可能であるが、シナリオの複雑性を避けるために、今回は高炉に対する直接規制シナリオを採用した。多様な製鉄技術のボトムアップシナリオの設定については、今後の課題としたい。



本研究では、原発の電源シェアを OUTLOOK2021 のベースラインシナリオに従いながら表 2 のすべての政策を採用するシナリオを政策シナリオI (各図では、NZ として表記)、そして原発を 2040 年フェーズアウトの前提で表 2 のすべての政策を採用するシナリオを、政策シナリオII (各図では、NZ_noNC として表記) として表記する。

5. 2050 年カーボンニュートラルのエネルギー構成および経済への影響

5.1 二酸化炭素排出経路および電源構成への影響

本研究では、以上のような 2050 年にカーボンニュートラルが達成できる政策シナリオIと、政策シナリオIIの 2つのシナリオについて、E3ME モデルシミュレーションを行った。

まず二酸化炭素排出経路については、ベースラインシナリオは、前述のように 2050 年に 2018 年に比較して 31.7%減少する OUTLOOK2021 に従っている。政策シナリオIおよびIIの場合、図 6 のような減少経路に辿り 2050 年に約 8000 万トンまで減少することになる。2050 年の二酸化炭素の排出分 8000 万トンは、土地利用・土地利用変化及び林業による吸収分 (LULUCF : Land use, land-use change, and forestry) により相殺されることになる¹⁴。そして本研究の政策シミュレーションによる二酸化炭素の 2030 年削減経路は、2013 年より 63.7%削減された 4 億 3 千万と推定されており (図 6)、日本の新 2030 年温室効果ガス削減目標である 46%より約 18%もギャップがあることが示された。これは新 2030 年削減目標が達成されても 2050 年カーボンニュートラル達成への道程は決してやさしくはないことを物語っている。

そして、2050 年に二酸化炭素の部門別削減率は、ベースラインシナリオの排出量 (2018 年対比 2050 年に 20.8%削減されるシナリオ) に比べて、電源部門と道路交通部門は 100%削減されるが、産業部門は約 50%、道路以外の交通部門は 60%、住宅部門は 85%削減に留まる (図 7)。前述のように発電部門と道路交通以外から排出される残量分 8000 万トンは、吸収源により相殺されることになり、全体的にカーボンニュートラルが達成されるようになる。2050 年の残量分 8000 万トンは、2018 年排出量対比では、92.4%削減された水準である。そして、部門別 2030 年、そして 2050 年までの二酸化炭素排出の削減量は図 8 で示されている。

¹⁴ 環境省(2020)によれば、2018 年の日本の吸収源による吸収分は 5600 万トンであった。本研究では、植林技術の向上などを勘案し 2050 年までに 8000 万トンの二酸化炭素が吸収源により吸収できることを想定した。

(単位：百万二酸化炭素トン)

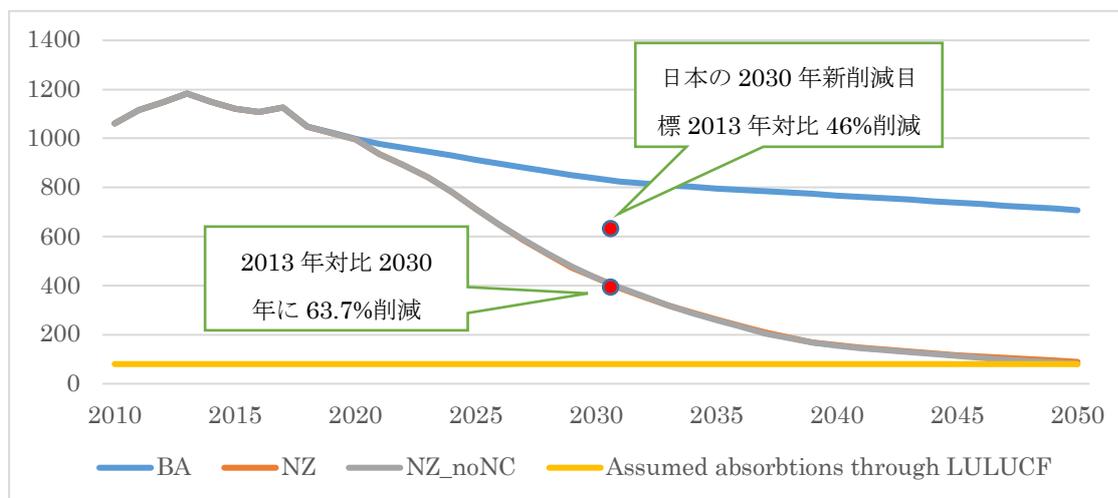


図6 2050年カーボンニュートラル達成における二酸化炭素排出経路

注：政策シナリオIおよびIIは殆ど同じ削減経路となっている。

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

2050年のベースライン二酸化炭素排出量は約7億トンであるが、本研究の政策シナリオによる排出量はすでに示されたようにそれより6.2億トン削減された約0.8億トンとなる。部門別に削減量が最も多かったのがエネルギー転換部門(発電部門)の3.1億トン削減で全体の50.2%を占めた(図8)。そして産業部門が14.0%、道路交通部門が13.2%、その他の交通部門が3.5%、家庭部門が3.2%、非エネルギー起源が8.2%を占める結果となった。

(ベースライン対比 2030年および2050年削減率、%)

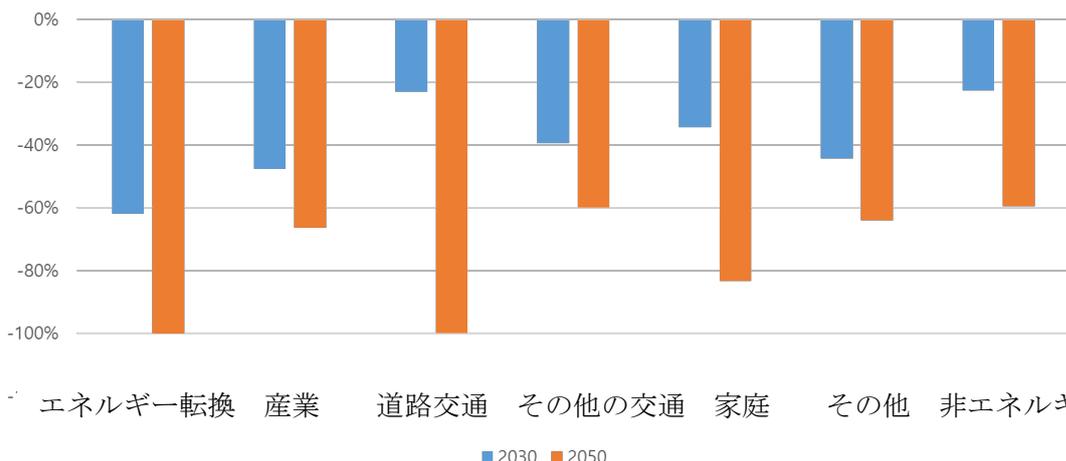


図7 政策シナリオによる部門別二酸化炭素削減率

注：政策シナリオIおよびIIは殆ど同じ削減経路となっている。

出所：本研究のE3MEモデル推定による。



一方、カーボンニュートラルの実現には、EV など交通部門と家庭部門の電化が進み、電力需要量はベースラインシナリオに比べて、2030年には約4%、2050年には10～12%ほど増加することが予測された(図9)。そして政策シナリオI(2050年原発の電源シェア13%シナリオ)は、政策シナリオII(2050年原発の電源シェア0%シナリオ)の電力需要量より僅差ではあるが、原発シェア拡大の影響により1%ポイントほど高く表れた。

(ベースライン対比 2030年および2050年 削減量、百万CO2トン)

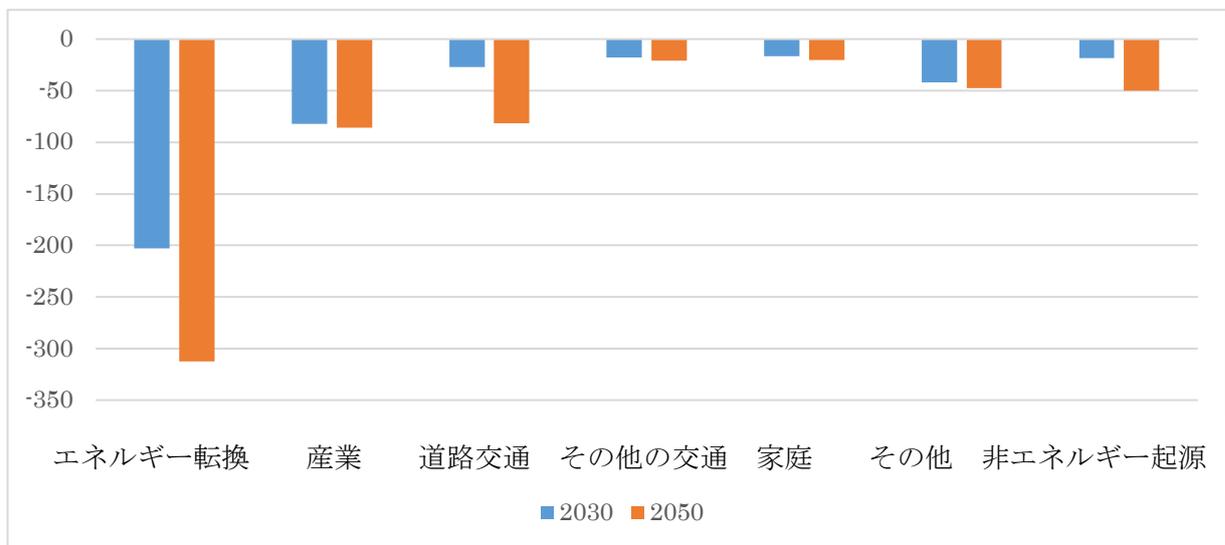


図8 政策シナリオによる部門別二酸化炭素削減量

注：政策シナリオIおよびIIは殆ど同じ削減経路となっている。

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

(ベースライン対比、%)

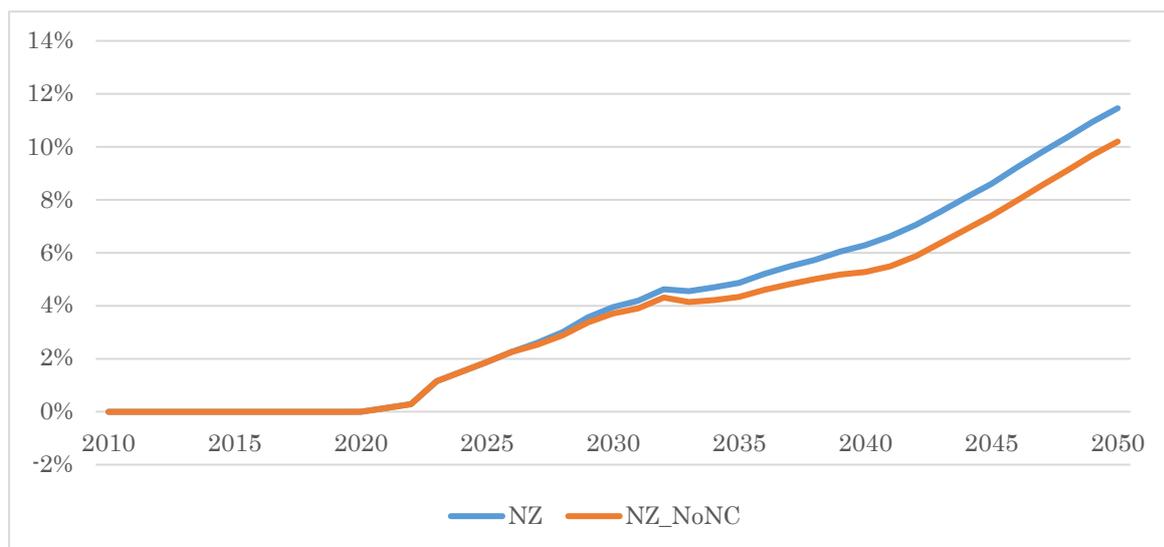


図9 政策シナリオによる電力需要予測

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

2030年電源構成については、政策シナリオIの場合、再エネ電源の割合が59.5%、LNG火力が11.9%、原発が12.9%、調整電源として石油火力が3.7%、そしてその他の電源が2.9%として予測される（図10、表3）。再エネ電源の中では太陽光が29.8%、風力が10.4%であり、再エネ発電の大半を占めることが予想される。政策シナリオIIの場合、再エネ電源の割合が63.3%、LNG火力が12.3%、原発が8.1%、調整電源として石油火力が4.0%、そしてその他の電源が3.2%として予測される（図10、表3）。そして政策シナリオIIでは原発割合が縮小された分（12.9%→8.1%）、再エネ電源の割合は政策シナリオIよりもさらに増える（59.5%→63.3%）ことが予想される。また、バイオマス+CCSの電源シェアは、ベースラインシナリオではゼロであったが、スタートアップ補助の影響により、いずれの政策シナリオでも2030年には2.6~2.8%へ増えることが予測される。

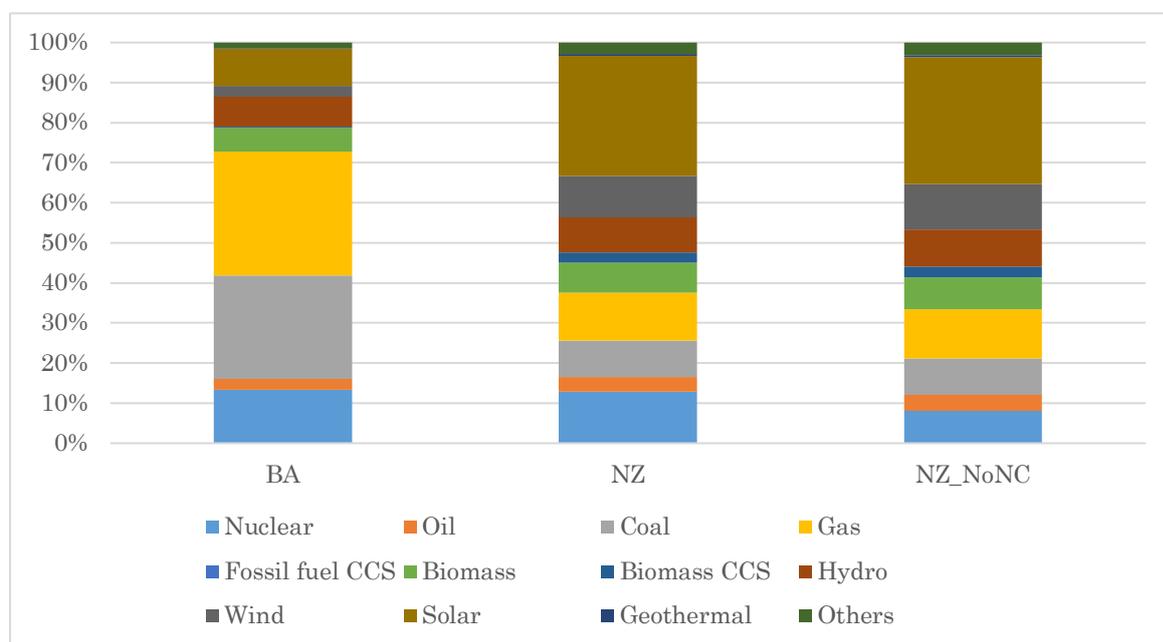


図10 2050年カーボンニュートラルの2030年電源構成への影響

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

2050年電源構成については、政策シナリオIの場合、再エネ電源の割合が77%、LNG火力が3.8%、原発が10.5%、調整電源として石油火力が4.1%¹⁵、そしてその他の電源が4.7%として予測された（図11、表4）。再エネ電源の中では風力が27.7%、太陽光が25.4%であり、再エネ発電の大半を占めることが予想された。地熱と水力発電は、ポテンシャルの限界により、ベースラインシナリオ以上に伸びることは難しいことが

¹⁵ FTT-Powerサブモデルでは、再生可能エネルギーが大きく伸びると、石油発電は競争力を失っても一定容量は調整電源として生き残る構造となっている。そして政策シナリオIは、原発ベースライン維持（2050年13%）シナリオであるが、FTT-Powerサブモデルのシミュレーションする過程で、モデル内生的な調整により、原発シェアが10.5%へ多少の変動が起きることになった。



示された。そしてバイオマス+CCS 電源シェアは、政策シナリオでのスタートアップ補助の影響により、2050年には5.5%まで伸びることが予測された。

政策シナリオIIの場合、再エネ電源の割合が89.1%、LNG火力が2.3%、原発が0%、調整電源として石油火力が3.5%、そしてその他の電源が5.2%として予測された（図11、表4）。再エネ電源の中では風力が39.8%、太陽光が25.8%であり、政策シナリオIよりもさらに増えることが予想された。特に政策シナリオIIでは、原発のフェーズアウトした分は、殆ど風力に代替されることになるが、代替分の多くはポテンシャルの高い洋上風力になることが予想される。地熱と水力発電は、政策シナリオIIにおいても、ポテンシャルの限界により、ベースラインシナリオ以上に伸びることは難しいことが示された。そしてバイオマス+CCSは、同じくスタートアップ補助の影響により、2050年には政策シナリオIとほぼ同じ水準である5.4%まで伸びることが予測された。

表3 2050年カーボンニュートラルの2030年電源構成への影響

注：（ ）の中は、電源割合。

出所：本研究のE3MEモデルシミュレーションによる。

(単位：TWh、%)

	2018年	2030年		
		BA	政策シナリオI	政策シナリオII
石炭火力	339(32)	293.5(25.9)	107.1(9.1)	107.1(9.1)
石油火力	52(4.9)	30.4(2.7)	43.7(3.7)	46.7(4.0)
LNG火力	378(36)	353.1(31.2)	140.1(11.9)	144.1(12.3)
原発	65(6.2)	151.8(13.4)	151.6(12.9)	95.6(8.1)
再エネ発電	198(18.8)	288.9(25.5)	701.1(59.5)	744.6(63.3)
水力	81(7.7)	84.4(7.4)	102.9(8.7)	107.4(9.1)
地熱	2.5(0.2)	2.5(0.2)	5.5(0.5)	6.0(0.5)
太陽光	63(6.0)	104.7(9.2)	351.5(29.8)	371.7(31.6)
風力	7.5(0.7)	31.4(2.8)	122.1(10.4)	134.0(11.4)
バイオマス	44(4.2)	65.9(5.8)	88.8(7.5)	92.9(7.9)
バイオマス+CCS	-	-	30.3(2.6)	32.6(2.8)
その他	19(1.8)	15.2(1.3)	34.1(2.9)	37.3(3.2)
合計	1050(100.0)	1132.9()	1177.7(100.0)	1175.4(100.0)

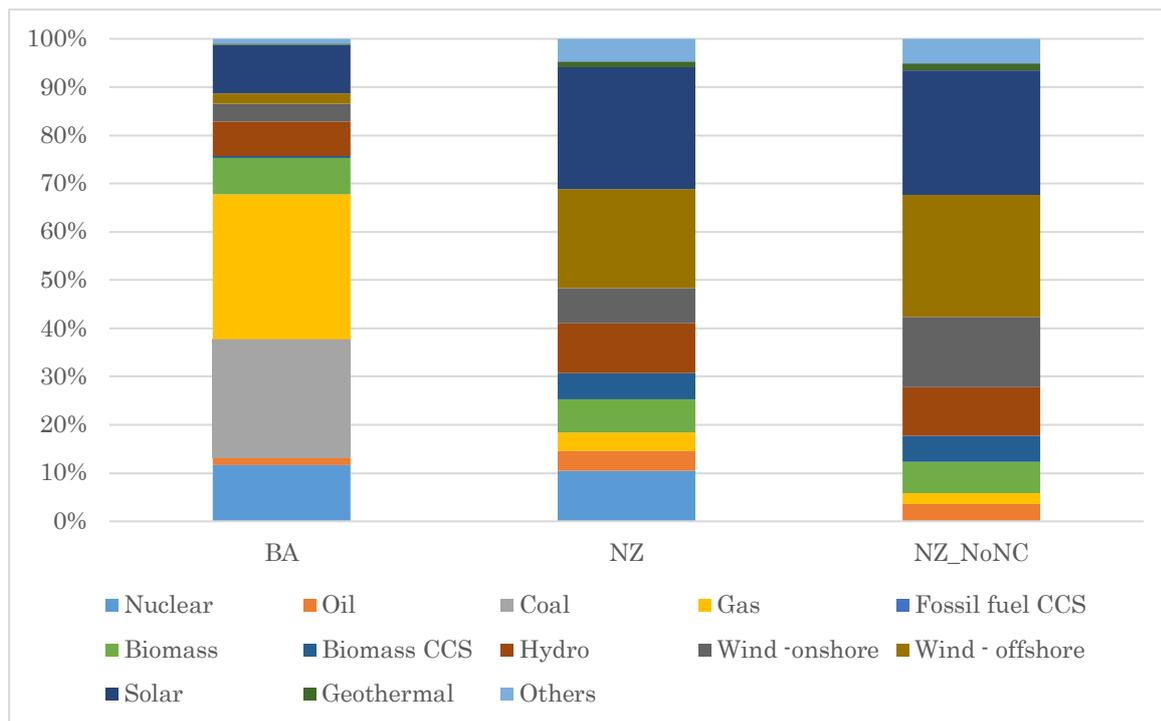


図 11 2050 年カーボンニュートラルの 2050 年電源構成への影響

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

表 4 2050 年カーボンニュートラルの 2050 年電源構成への影響

注：() の中は、電源割合。

出所：本研究の E3ME モデルシミュレーションによる。

(単位：TWh、%)

	2018 年	2050 年		
		BA	政策シナリオI	政策シナリオII
石炭火力	339(32)	262(24)	-	-
石油火力	52(4.9)	-	55(4.1)	47(3.5)
LNG 火力	378(36)	288(27)	51(3.8)	30(2.3)
原発	65(6.2)	141(13)	140(10.5)	-
再エネ発電	198(18.8)	372(34.4)	1029(77.0)	1181(89.1)
水力	81(7.7)	94(8.7)	138(10.3)	133(10.0)
地熱	2.5(0.2)	13(1.2)	16(1.2)	19(1.4)
太陽光	63(6.0)	123(11)	339(25.4)	342(25.8)
風力	7.5(0.7)	64(5.9)	371(27.7)	528(39.8)
バイオマス	44(4.2)	78(7.2)	91(6.8)	87(6.6)
バイオマス+CCS	-	-	74(5.5)	72(5.4)
その他	19(1.8)	19(1.8)	62(4.7)	67(5.2)
合計	1050(100.0)	1082(100.0)	1337(100.0)	1325(100.0)



5.2 経済への影響

2050年カーボンニュートラル達成のための政策シナリオは、政策シナリオIおよびIIともにベースラインシナリオに比べてGDPを押し上げることが予測された。2つの政策シナリオによるE3MEモデルシミュレーションでは、2030年ごろまでにGDPがベースラインシナリオに比べて3%近く上昇した後、2050年には4~4.5%上昇する見通しとなっている（表5、図12）。政策シナリオIとIIのGDP効果は、2030年から2050年に至るまでに政策シナリオIIの方がIより0.1~0.2%ほど上回るが（表5、図12）、これは、原発の代替電源としての再エネ発電のコストが十分に下がり、また原発を代替する再エネ投資などのよる投資効果が経済を刺激することにより、原発無しの方が原発ありの方より経済パフォーマンスは良いことを物語っている。

表5 2050年カーボンニュートラルのマクロ経済への影響

出所：本研究のE3MEモデルシミュレーションによる。

(単位：%、ベースラインシナリオからの乖離)

	2030年		2050年	
	政策シナリオI	政策シナリオII	政策シナリオI	政策シナリオII
GDP	2.7	2.9	4.3	4.4
消費	1.1	1.1	3.9	4.0
投資	9.9	10.5	8.1	8.6
輸出	-0.5	-0.6	-0.3	-0.4
輸入	0.5	0.6	-2.3	-2.1
雇用	1.5	1.5	1.9	1.9
消費者物価	3.3	3.3	-0.4	0.1

2050年カーボンニュートラル達成におけるGDPの上昇の要因としては、経済各部門からの低・脱炭素投資需要拡大（ベースラインに比べて約8%上昇）、そして雇用増加とそれによる賃金上昇の消費需要刺激（ベースラインに比べて約4%上昇）がエネルギーコスト負担を上回ることに起因している（表5、図12、図13）。さらに化石エネルギー輸入需要の減少による貿易バランスの改善もGDPを押し上げる要因と予想されている（表5、図12、図13）¹⁶。

¹⁶ 例えば、日本の原油、LNG、石炭など化石エネルギー輸入額は2018年に19.3兆円（輸入額の約20%、資源エネルギー庁「エネルギー白書2020」）に達しており、この輸入額の激減は貿易バランス向上に大きく貢献できる。

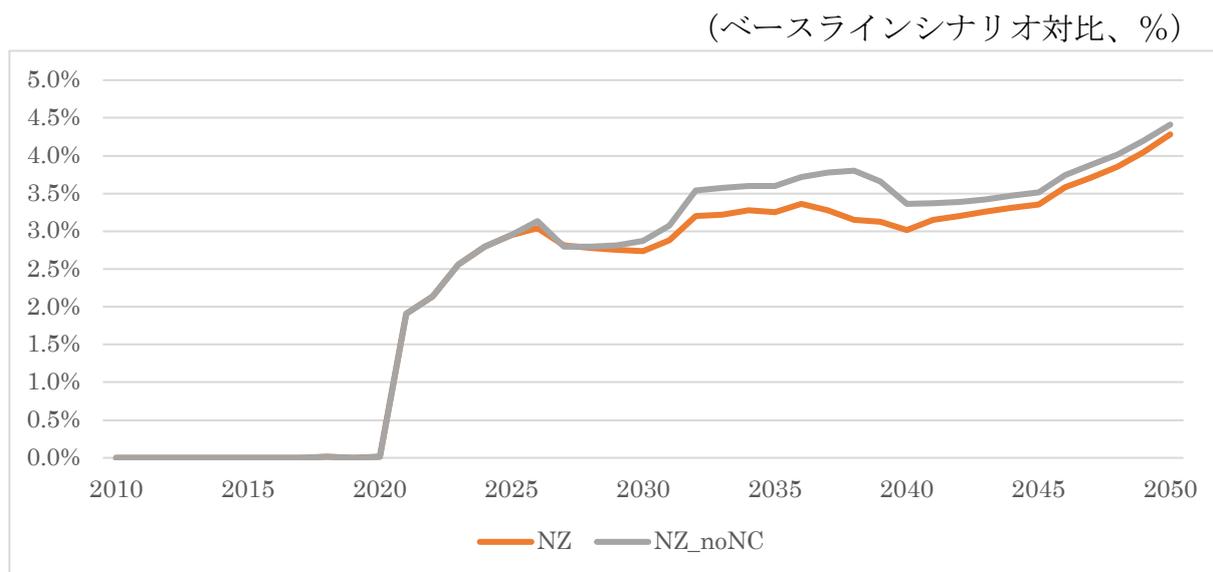


図 12 2050 年カーボンニュートラル達成における GDP の経路

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

そして、投資需要上昇分の約 8%の内訳（割合）は、発電部門の再エネ発電関連投資が約 30%、産業部門の低・脱炭素投資が約 50%、交通部門などその他の部門の低・脱炭素投資が約 20%を占めることと予測されている（図 14）。すなわち 2050 年カーボンニュートラル実現に向けた低・脱炭素政策の実施は、図 15 のように電力コストがベースラインシナリオに比べて政策シナリオIの場合 2030 年に約 11%、2050 年に約 45%、政策シナリオIIの場合、2030 年に約 12%、2050 年に約 55%上昇するなどエネルギーコストの上昇を伴うが、それを上回る再生可能エネルギー及び多様な形態の低・脱炭素投資の活性化が需要側面から経済を刺激する一方で、化石エネルギー費用がゼロ水準近くまでに削減されることになり、全体エネルギー費用側面からの経済への負担もベースラインシナリオより縮小されることになる¹⁷。また図 16 で示されているように、雇用の場合も、投資拡大と GDP の増加に伴い、ベースラインシナリオより 2030 年に 1.5%、そして 2050 年には 2%程度向上されることが予想される。

¹⁷ たとえば、家計部門のエネルギー費用負担は、電力コストの上昇にもかかわらず、ガス・石油など総エネルギー需要の減少により、2050 年にはベースラインシナリオに比べて 41%減少することに予想される。



(ベースラインシナリオ対比、%)

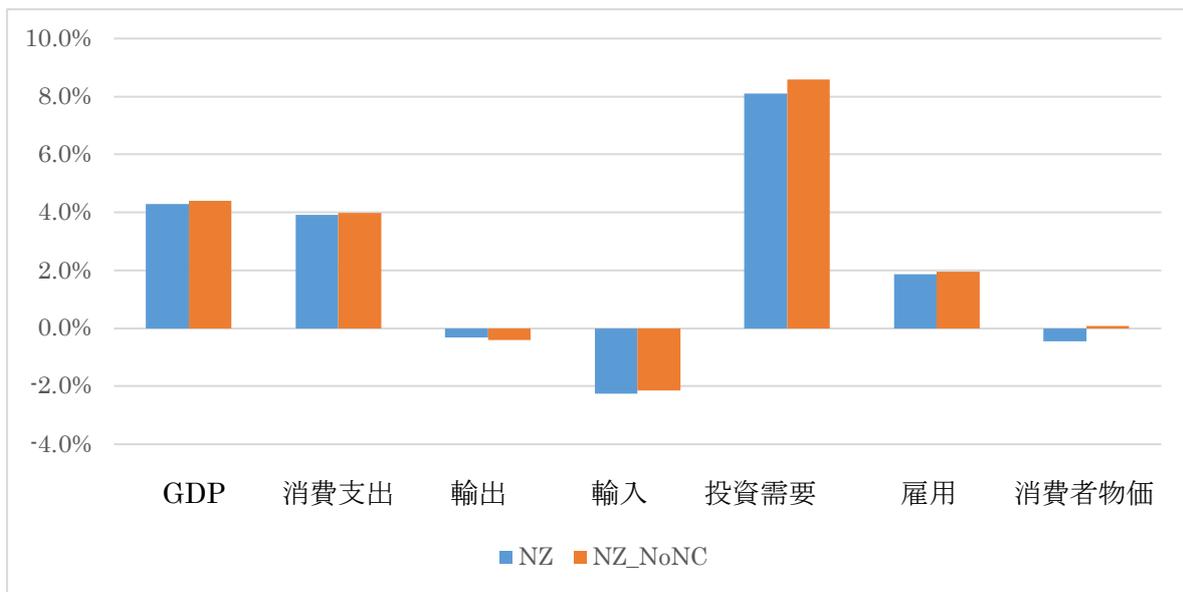


図 13 2050 年カーボンニュートラル達成におけるマクロ経済の経路

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

(ベースラインシナリオ対比、%)

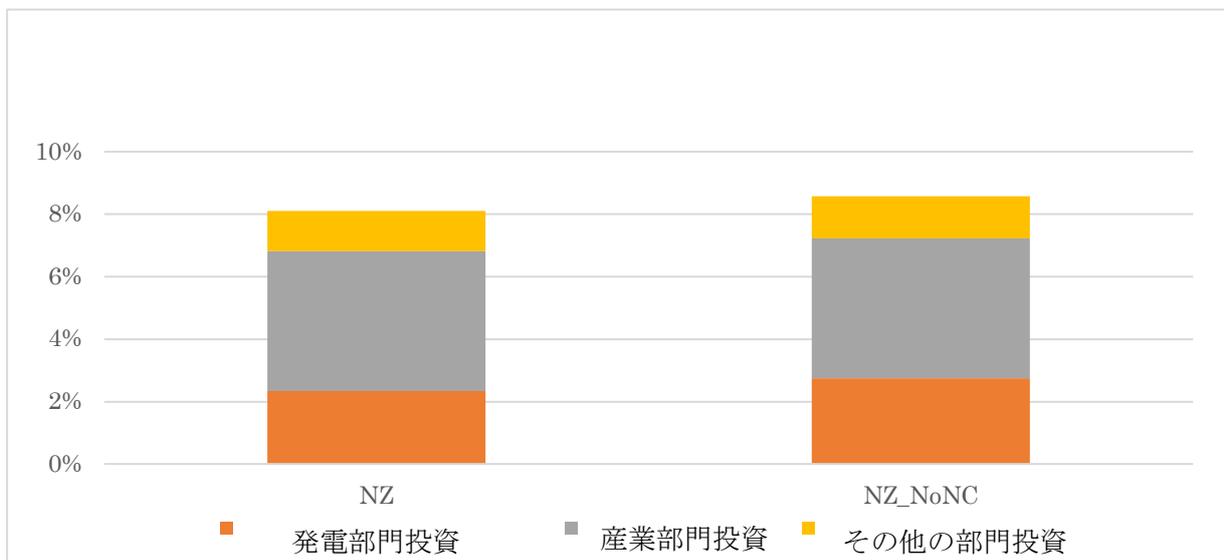


図 14 2050 年カーボンニュートラル達成が投資に及ぼす影響

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

(ベースラインシナリオ対比、%)

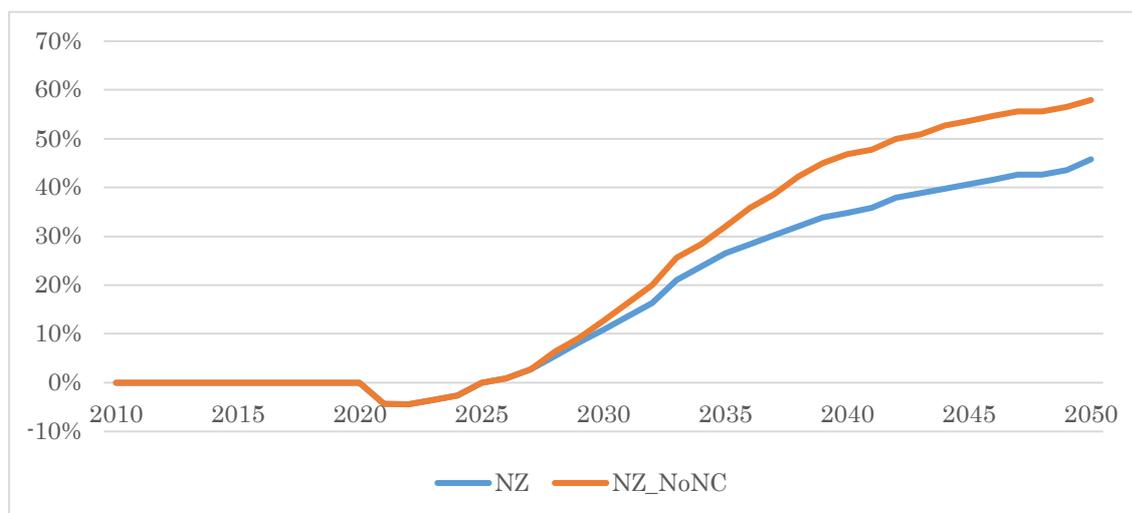


図 15 2050 年カーボンニュートラル達成における電力コストへの影響

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

(ベースラインシナリオ対比、%)

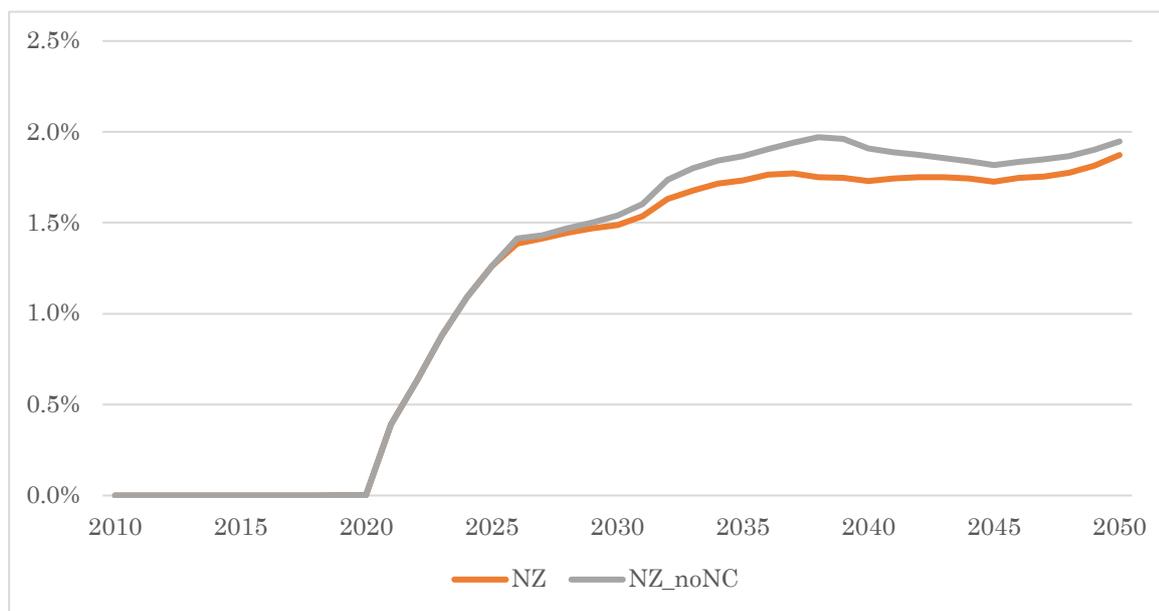


図 16 2050 年カーボンニュートラル達成における雇用の経路

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

6. まとめと今後の課題

本研究では、日本が 2050 年にカーボンニュートラルを達成させるための炭素税をはじめ多様な低・脱炭素政策の組み合わせの政策シナリオが、現実の政策として



実施されることを想定した E3ME モデルシミュレーションにより、2050 年までのエネルギー構成の変化と日本のマクロ経済に与える影響について予測した。その際に、原発の特殊性を考慮し、原発あり（政策シナリオI）と原発 2040 年フェーズアウト（政策シナリオII）の 2 つケースについて政策シナリオの設定を行った。その結果、いずれの政策シナリオにおいても 2050 年にカーボンニュートラルの達成と経済良好の両立が可能であることが示された。

その主な要因として、発電部門の再生可能エネルギー投資拡大とともに経済各部門で多様な低・脱炭素投資需要の拡大、雇用増大による民間消費需要の増加、化石エネルギー輸入の大幅な縮小による貿易バランスの向上が挙げられる。また低・脱炭素政策によるエネルギーコストの上昇は、2050 年になってもベースラインシナリオに比べて 45%~55%上昇に留まり、化石エネルギー費用負担の大幅な縮小分を考慮すれば、経済にはあまり負担にならないことが明らかになった。

ただし、本研究は幾つか課題も抱えている。まずカーボンニュートラル達成のための政策シナリオの設定問題であるが、まだ日本政府から具体的な政策スケジュールが公表されていない段階で、本研究では筆者らにより想定可能な政策を設定した側面がある。日本政府のカーボンニュートラル政策が、実質的にカーボンニュートラルの達成に十分であるか、またその際の経済への影響はどれほどなのかに関して、E3ME モデルによる政策評価も今後の課題としたい。

2 つ目は、多様な低・脱炭素技術に関する FTT サブモデルの設定問題である。2050 年カーボンニュートラルのエネルギー構成および経済への影響に関するシミュレーションにおいては、多様な低・脱炭素技術の技術革新のスピードを適切にモデルに反映することは非常に重要である。本研究における低・脱炭素技術革新のスピードをボトムアップで決める FTT サブモデルでの、技術革新スピードの設定は標準ケースの学習曲線に従っている。例えば FTT-Power（発電部門）においては、石油やガス火力発電は、競争力を失ってもバックアップ電源として一定の割合は残るように設定されている。これは、将来的にはスマートグリッドや水素発電などが進められれば解決可能な問題であり、FTT-Power の設定変更を考慮する必要がある。そして FTT-Steel において水素還元技術、FTT-Transport において燃料電池自動車や e-fuel など、今後技術革新のスピードが速まることが予想される脱炭素技術についても、FTT サブモデルでは、従来の学習曲線に従っているが、これらの技術の学習曲線の調整による低・脱炭素技術革新効果の適正な反映などが今後の課題として挙げられる¹⁸。

3 つ目は、政策シナリオI（原発あり）より政策シナリオII（原発無し）の方の 2050 年電力コストが、ベースラインに比べて約 10%ポイントほど高く表れた。これは、FTT: Power サブモデルで原発の電源コストが他の電源より低くシミュレーションされたためである。その主な要因として、既存の FTT: Power サブモデルでは、原発の初期建設費用が福島第一発電所事故以降の安全規制強化によるコスト

¹⁸ 例えば現在の過去の実績に基づいた学習曲線から、企業ヒアリング調査による最新データの獲得による新たな学習曲線の FTT サブモデルへの適用などが挙げられる。

上昇を反映しておらず、また追加の安全規制費用上昇をも反映できない構造となっていることが挙げられる。FTT-Power サブモデルにおける原発の発電コストデータの改訂および安全規制費用の反映については、今後の課題としたい。

4つ目は、2050年カーボンニュートラル達成のためには、大気中の二酸化炭素を人為的に回収または吸収させる植林・再植林、土壌炭素貯留、湿地・沿岸再生（ブルーカーボン）、バイオマス+CCS（BECCS）、直接炭素貯留（DAC）、海洋アルカリ化などネガティブエミッションの役割も重要であるが、本研究では発電部門のバイオマス+CCSに留まった。より多様なネガティブエミッションの技術の採用と進化方策については今後の課題としたい。

5つ目は、雇用市場と低・脱炭素投資ファイナンスに関する細分化である。本研究では、経済及び雇用効果はマクロ側面だけ考慮したが、低・脱炭素関連雇用とその他の雇用を分離することにより、カーボンニュートラルの新規雇用創出力を図ることができる。また本研究では、低・脱炭素投資に対するファイナンスは主に政府（例えば炭素税の税収）から行うことを想定したが、今後は民間部門からのファイナンスも考慮する必要がある。民間部門からのファイナンスの拡大は、低・脱炭素政策の関連技術革新スピードをより早める可能性がある。

最後に、本研究のE3MEモデルの設定では、日本が2050年カーボンニュートラルを達成することを前提としたが、日本以外の国は現状の政策を維持することを想定した。日本以外の国もカーボンニュートラルの達成を前提とした場合、特に国際市場での日本の競争力構造に変化が起きる可能性があり、経済へ与える影響も多少変わる可能性もある。日本以外の国（特にEU、アメリカ、そして中国と韓国および台湾）がカーボンニュートラル政策を実施した場合の日本経済へ与える影響に関する研究も今後の課題としたい。



参考文献

- 李秀澈, 何彦旻, 昔宣希, 諸富徹, Unnada Chewpreecha, Hector Pollitt (2020) 「石炭火力発電と原発のフェーズアウトの日本経済と環境影響分析」『京都大学大学院経済学研究科再エネ講座ディスカッションペーパー No.16』
- 環境省 (2020) 2018 年度 (平成 30 年度) の温室効果ガス排出量 (確報値) について (<https://www.env.go.jp/press/files/jp/113762.pdf>、閲覧日: 2021 年 5 月 25 日)
- 韓国企画財政部(2020) 「2050 カーボンニュートラル推進戦略」 (<https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156425327><https://m.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156425327#pressRelease>、閲覧日: 2021 年 4 月 25 日)
- 経済産業省(2019) 「令和元年度(2019 年度)における エネルギー需給実績(確報)」『総合エネルギー統計』 (https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/honbun2019fy2.pdf、閲覧日: 2021 年 5 月 25 日)
- 田村堅太郎, 劉憲兵, 金振, 有野洋輔 (2020) 「中国 2060 年炭素中立宣言についての解説」 IGES 気候変動とエネルギー領域、戦略的定量分析センター (<https://www.iges.or.jp/jp/pub/china2060netzero/ja>、閲覧日: 2021 年 4 月 27 日)
- 内閣官房/成長戦略会議 (2020) 「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」 (<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-1.pdf>、閲覧日: 2021 年 5 月 25 日)
- BP (2020) Statistical Review of World Energy. Retrieved April 3, 2021, from <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- Climate Ambition Alliance: Net Zero 2050. Retrieved April 27, 2021, from <https://climateaction.unfccc.int/views/cooperative-initiative-details.html?id=94>
- European Commission (2018) “A Clean Planet for all A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy”, Brussels. Retrieved April 3, 2021, from https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf
- IPCC (2018) An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C. Retrieved May 25, 2021, from <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>
- Lee, S., Pollitt, H. and Park, S. (eds) (2015) “Low-carbon, Sustainable Future in East Asia : Improving energy systems, taxation and policy cooperation”, Routledge Published, London.
- Lee, S., Pollitt, H. and Fujikawa, K. (eds) (2019) “Energy, Environmental and Economic Sustainability in East Asia: Policies and Institutional Reforms”, Routledge Published, London.