

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 2030 年温室効果ガス削減目標及び電源計画達成を前提とした
2050 年カーボンニュートラルに向けた経済・産業への影響分析
—E3ME マクロ計量経済モデルによる分析—

**Study on Economic and Industrial Impact by 2050 Carbon Neutral in Japan,
Assuming GHG Reduction Target and Power Supply Composition in 2030**
Analysis using E3ME Macro Econometric Model



2022 年 9 月
September 2022

山口大学経済学部観光政策学科 准教授 **加藤真也**

Shinya Kato, Associate Professor, Faculty of Economics, Yamaguchi University
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 准教授 **何彦旻**

Yanmin He, Associate Professor, Faculty of Economics, Otomon Gakuin University
東洋大学経営学部会計ファイナンス学科 助教 **吉岡努**

Tsutomu Yoshioka, Assistant Professor, Faculty of Business Administration, Toyo
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 Chewpreecha, Principle 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 2030 年温室効果ガス削減目標及び電源計画達成を前提とした 2050 年カーボンニュートラルに向けた経済・産業への影響分析

—E3ME マクロ計量経済モデルによる分析—

Study on Economic and Industrial Impact by 2050 Carbon Neutral in Japan, Assuming GHG Reduction Target and Power Supply Composition in 2030

Analysis using E3ME Macro Econometric Model

山口大学大学経済学部観光政策学科 准教授 加藤真也

名城大学経済学部産業社会学科 教授 李秀澈

追手門学院大学経済学部 准教授 何彦旻

東洋大学経営学部会計ファイナンス学科 助教 吉岡努

京都大学大学院地球環境学堂/経済学研究科 教授 諸富徹

Principle Modeler, Cambridge Econometrics, Unnada Chewpreecha

Abstract:

This study analyzes the impact on Japan's economy and industry of the simultaneous achievement of the 2030 GHG reduction target, the realization of the power supply plan, and the power supply plan for carbon neutral in 2050, using the E3ME macro econometric model. As a result, it showed that GDP will increase by about 3% in 2050 compared to the baseline scenario, and that the cost of electricity generation will fall as the share of renewable energy generation increases. In addition, industrial production in 2050 is expected to increase in many sectors, driven by increased decarbonized investment and household consumption. This shows that there are significant positive impacts on the economy, such as increased decarbonized investment, lower renewable energy generation costs, and an improved balance of trade due to reduced fossil energy imports.

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 2030 年温室効果ガス削減目標達成と、それに合わせた電源計画の実現、成長戦略会議の 2050 年カーボンニュートラルに向けた電源計画検討案、これらが同時に実現された場合の日本の経済と産業に与える影響について、E3ME マクロ計量経済モデルを用いて推定した。その結果、2050 年にはベースラインシナリオと比べて GDP が 3%程度上昇すると予測され、再生可能エネルギーの発電シェアが大きくなることで発電コストが下落することを示された。また、2050 年における産業生産は多くの業種で、脱炭素関連投資需要と民間消費の堅調さにより、生産の増加が予想されることとなった。これにより、脱炭素政策の施行によるエネルギーコスト上昇という経済への負の影響よりも、経済各部門からの低・脱炭素投資需要の拡大と再生可能エネルギー発電コストの低下、そして化石エネルギー輸入の急減による貿易バランスの改善など正の影響が大きいことが明らかとなった。

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

今世紀半ばのカーボンニュートラル達成は、逆らうことのできない世界の潮流となっている。そこで日本政府は、2020年10月にカーボンニュートラルを宣言し、2021年4月には、日本の2030年度における温室効果ガス削減目標を2013年度比46%削減へ引き上げると発表し、同年6月には再生可能エネルギーの大量導入を骨子とする電源計画の見直しも行った。そして、成長戦略会議(2021)では、2050年電源計画の検討案として、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス等の再エネ発電を50~60%程度、原子力・CO₂回収前提の火力発電(火力+CCUS)を30~40%程度、そして水素・アンモニア発電を10%程度とする電源シェアを示している。

ただし、日本政府の2030年温室効果ガス削減目標と電源計画、そして2050年電源計画検討案が、2050年カーボンニュートラルに向けて各発電コスト、そして日本経済と産業にどれほど影響を与えるかについては、学術的研究があまり行われていない。そこで本研究では、日本が①2030年温室効果ガス削減目標達成と、それに合わせた電源計画の実現、②成長戦略会議の2050年カーボンニュートラルに向けた電源計画検討案、これらが同時に実現された場合の日本の経済と産業に与える影響についてE3MEマクロ計量経済モデルにより推定する。その際に、この推定結果との比較検討のために、2040年石炭火力と原発のフェーズアウトを前提とした2050年カーボンニュートラルが実現されたときの電源構成、そして経済・産業へ与える影響について同じくE3MEモデルにより推定を行う。

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2030年削減目標と2050年カーボンニュートラル同時達成のための低・脱炭素政策パッケージの設定について論じる。第5章では2030年削減目標と2050年カーボンニュートラル同時達成時の電源構成と発電コスト^{注1}に与える影響について考察し、第6章ではその際の経済及び産業生産に及ぼす影響についてE3MEモデルの推定結果を分析する。第7章ではまとめと今後の課題を提示することとする。

2. 先行研究レビュー

EUでは、European Commission (2018)が、2050年までにカーボンニュートラルが実現された場合の経済予測について、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モデルの両方のシミュレーションによる比較考察を行った。その結果、E3MEモデルでは、ベースラインシナリオ^{注2}と比較して、EUのみカ

注1: ここで発電コストとは、均等化発電原価(LCOE: Levelized Cost of Electricity)を指す。すなわち、発電所の建設に要する設備・工事費、部材費などの初期コストと、運転や維持にかかるコスト、そして設備の廃棄にかかるコストまですべてを合計したコストを総発電電力量で割ったものとなる。

注2: 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。

ーボンニュートラル達成時には GDP が 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 1)。

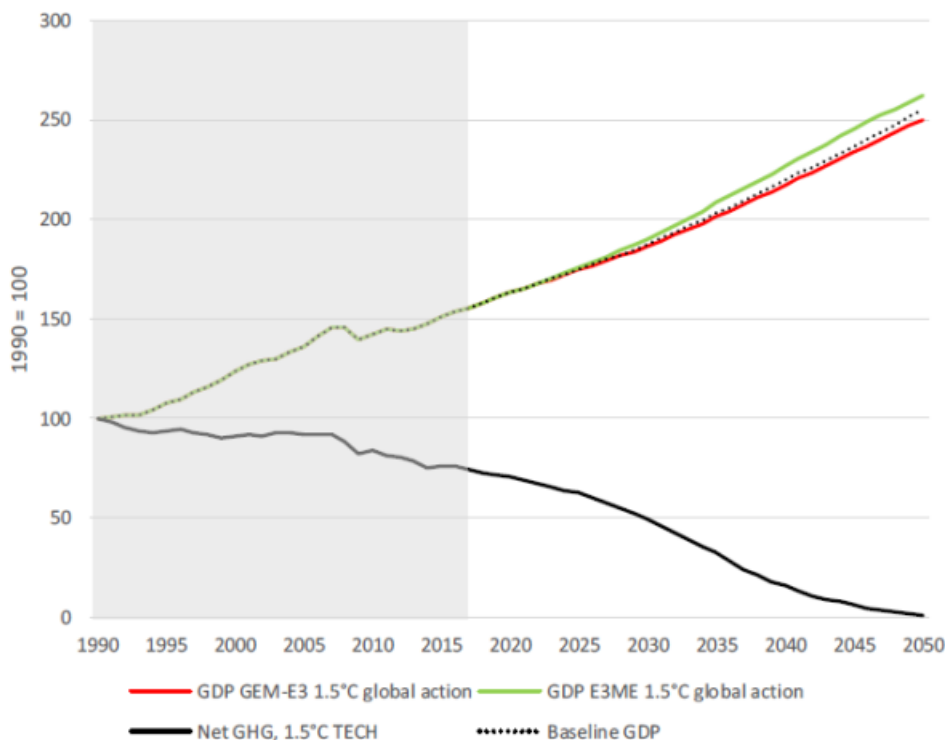


図 1 EU における 2050 年カーボンニュートラル達成時の GDP 予測

出所 : European Commission (2018)

一方、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 1.30% 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背景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。

Pollitt (2020) は、E3ME モデルを用いたシミュレーション分析で、中国のみカーボンニュートラル達成時には累計約 215Gt の二酸化炭素排出の削減が見込まれるとしている。また、今後 10 年間、電力産業における投資拡大、脱石炭に伴う技術革新や燃料転換の促進によって、中国の GDP は約 5% 上昇し、経済には良い影響を与えることが予測されている。

国内で本研究と関連した研究には、Lee et al. (2019) がある。この研究では、東アジア（日中韓台）の国・地域における 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 年までシミュレーション

されているが、カーボンニュートラル達成による影響を分析するまでは至っていない。

また、李ほか(2021)では、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ている。その結果、両電源を2050年より前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^{注3}。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ため、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した。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き、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を政策手段として採用しているという限界がある。

そして、本研究と最も関連の高い研究として、Lee et al. (2022)がある。この研究では、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、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予測している。これにより、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、結果的に燃料費の負担増を大きく緩和する効果があることが明らかとなった。

本研究では、2050年カーボンニュートラル達成のための経路として、2030年温室効果ガス削減目標及び電源計画を外生的に設定しており^{注4}、その際の2050年におけるカーボンニュートラルの電源構成と発電コスト、そしてマクロ経済だけでなく、産業別二酸化炭素排出量及び生産への影響をも分析している。この点が、先行研究にはなかった本研究の新規性と独創性であるといえる。

3. E3ME モデルの概要

E3ME モデルは、エネルギー環境政策の経済・環境影響分析において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・制度設計で重用されている^{注5}。従来、同モデルの主な分析対象国はEU諸国であったが、筆者らが所属している「東アジア環境政策研究会」と Cambridge Econometrics 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

注3：しかし、ロシアのウクライナ侵攻に伴うエネルギー価格の高騰や天候不順などの原因による電力供給不足が日本のマクロ経済に与える影響は無視できないとの試算もある。北辻(2022)では、産業連関表を基に、電力需給のひっ迫により国内生産額は年間9,616億円減少すると試算している。

注4：李ほか(2021)では、2030年削減目標と電源計画は設定せず、モデルで内生的に決まるとしている。その結果、二酸化炭素排出基準で2030年に2013年比約63.7%削減された。

注5：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。



ア諸国や地域に対しても EU 諸国と同様の分析が可能となった^{注6}。

E3ME モデルは、分析対象国に対して経済・産業分類がなされた国民所得勘定と産業連関表から構築されている。また、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、エネルギー需要及び CO₂ などの環境負荷物質排出量を算出することができる。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。

また、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 年までの経済と産業、二酸化炭素排出に与える影響について定量的な分析が可能となる。

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）サブモデルを実装している^{注7}。これら 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。そして、FTT-Power は E3ME 本体で決まった電力量を所与として、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 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。

ところで、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は、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効果は起きにくく、経済へプラスの効果が表れることになる。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ため、需要牽引の経済刺激効果は限定的となる。

したがって、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

注 6: E3ME モデルの詳細については、www.e3me.com、日本語翻訳版（Version 6.0 (April 2014)）は、次の E3ME マニュアルを参照：http://www.reeps.org/top_news/201805/E3ME_Manual%20ver6.0_jpn_%202018.pdf

注 7: 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、詳しくは、Lee et al. (2019)を参照。

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。それに対して、E3ME モデルでは、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）により、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することになる。それにより、資本とエネルギーの投入率が変更され、低炭素エネルギー産業構造への転換が促されることを通じて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 モデルでは見られない特色である^{注8}。

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

本研究において「ベースラインシナリオ」とは、現在で実施されている低・脱炭素政策（すなわち温暖化対策）以外に特別対策や政策が行われない場合のシナリオのことであり、2050 年までの温室効果ガス排出量、エネルギー構造、そして経済及び産業生産の変化の道筋を予測するものとする。

これと比べて、本研究における「政策シナリオ」とは、政府の 2030 年温室効果ガス削減目標（2013 年度比 46%削減）と 2050 年カーボンニュートラル達成のために必要な新たな低・脱炭素政策パッケージを設定し、その政策パッケージが実施された場合、2050 年までのエネルギー・経済及び産業生産・構造の変化の道筋を予測するものとする。したがって、本研究では、新たな低・脱炭素政策パッケージがエネルギー・経済・産業へ与える影響については、ベースラインシナリオからの乖離程度により評価するものとする。

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(2021)の「IEEJ OUTLOOK 2022」（以下、OUTLOOK 2022）のレファレンスシナリオを採用した^{注9}。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。

OUTLOOK 2022 のレファレンスシナリオでは、GDP の場合、2019 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 7.8 兆米ドル（2010 年価格）となり、最終エネルギー消費は 2050 年に 2019 年より 20.4%削減され 222 百万 toe、

注 8：2つのモデルは、いずれも経済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。こうした点で 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、比較を行っている。また、E3ME モデルと、日本でエネルギー・環境・経済分析によく用いられている CGE 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。

注 9：ベースラインシナリオと類似の概念として「レファレンスケース/シナリオ」がある。「レファレンスケース/シナリオ」とは、「対策を取った場合と比較するための参照」（つまり、対策を取らなかった場合）という意味である。日本エネルギー経済研究所の OUTLOOK 2022 では、主要エネルギー・経済・二酸化炭素関連指標について、レファレンスケースとして 2050 年まで公表されているが、本研究ではこのレファレンスケースをベースラインシナリオとして採用している。



発電量は2050年に1,099TWh（2019年より6.0%増加）^{注10}、そしてエネルギー起源の二酸化炭素排出量は2050年に691百万CO₂t（2019年の1,059百万CO₂tより34.7%減少）と予測されている（表1）。

表1 OUTLOOK 2022 レファレンスシナリオにおける主要指標の見通し

注：()内は、各電源の全体発電量に占める構成比(%)である。

出所：日本エネルギー経済研究所(2021)

	2019年	2030年	2040年	2050年
GDP（10億米ドル、2010年価格）	6,211	6,664	7,227	7,761
最終エネルギー消費（百万toe）	279	259	240	222
発電量（TWh）	1,037	1,045	1,079	1,099
原子力	64(6.2)	157(15.0)	141(13.1)	141(12.8)
再生可能エネルギー	205(19.8)	255(24.4)	305(28.3)	365(33.2)
石炭火力	329(31.7)	257(24.6)	247(22.9)	221(20.1)
LNG火力	385(37.1)	338(32.3)	358(33.2)	354(32.2)
エネルギー起源CO ₂ 排出量 （百万CO ₂ t）	1,059	885	792	691

また、表1において電源構成に関して見れば、石炭火力は2019年に31.7%から2050年には20.1%へ縮小し、LNG火力は2019年に37.1%から2050年に32.2%へ縮小する。その一方で、原発は2019年に6.2%から2050年に12.8%へ上昇、そして再エネ発電（大型水力含む）は2019年に19.8%から2050年に33.2%へ拡大することが予想されている。

4.2 脱炭素政策パッケージと政策シナリオ

本研究では、2050年カーボンニュートラルの実現と合わせて、途中の削減経路として2030年削減目標も達成することを目標としている。この目標は前節のベースライン上では、エネルギー起源二酸化炭素排出基準で、2030年は2019年に比べて16.4%削減であり、2013年に比べては32.9%削減にとどまっている。したがって、2030年に2013年比で46%削減及び2050年カーボンニュートラルの目標達成が可能となる脱炭素政策の設計が必要となる。

脱炭素政策の設計においては、カーボンプライシングなど単一政策ではなく、カーボンプライシングを含めた現実的に動員可能な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

注10: OUTLOOK 2022のレファレンスシナリオでは発電量が2050年に至るまで増加傾向にあることを示しているが、エネルギー白書2022によると、実際の発電量は2010年（1,149TWh）以降、2020年（1,001TWh）まで減少傾向にあることを示している。これは、原発の停止や人口減少、工場の海外移転など日本経済の構造変化、さらに省エネやエネルギー効率性の向上が背景にあると考えられ、この傾向は中長期的に続くと考えられる。ただし、本研究ではデータ制約のためOUTLOOK 2022のレファレンスシナリオを用いることとする。

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。

そして、カーボンニュートラル達成に向けた脱炭素政策シナリオの設定において、次の2つのシナリオを想定した。1つ目（政策シナリオI）は、2030年の電源構成を政府の第6次エネルギー基本計画上の電源計画、そして2050年の電源構成は政府の成長戦略会議(2021)による検討案に従わせることである。すなわち、原発シェアの場合、2019年に6.2%から2030年には20%（電源計画上では20～22%）、2050年に10%^{注11}へ縮小、再生可能エネルギーは2019年19.8%から2030年には38%（電源計画上では36～38%）、2050年には60%へ拡大することを想定するケースである。石炭などその他の発電は表2の通りとなる。

表2 政策シナリオI及びIIにおける2030年の電源構成

出典：政府の2030年における電源計画（第6次エネルギー基本計画）及び本研究の設定による。

		政策シナリオI (政府の2030年電源計画)	政策シナリオII (本研究の設定)
2030年温室効果ガス目標		46%削減(2013年比)	内生的に決定される
原子力		20%	2040年にフェーズアウト
石炭		19.0%	2040年にフェーズアウト
LNG		20.0%	内生的に決定される
石油		2.0%	内生的に決定される
再エネ	小計	38.0%	内生的に決定される
	太陽光	15.7%	
	洋上風力	3.7%	
	陸上風力	1.8%	
	地熱	1.2%	
	水力	10.5%	
	バイオマス	5.1%	
水素・アンモニア		1.0%	内生的に決定される
合計		100.0% (総発電量：9,340億kWh)	100.0%

2つ目（政策シナリオII）は、政策シナリオIとの比較考察の観点から、電源構成を政府の計画には従っておらず、本研究独自の設定によるものである（表2及び3）。まず、原発は2040年にフェーズアウトさせている。このケースは2018年以降原発の新規建設は行われず、稼働歴が40年に達する順で廃止することを想定している^{注12}。そ

注11：成長戦略会議(2021)では、原発と火力+CCUSを合わせて30～40%、再エネ50～60%、水素+アンモニア10%であるが、本研究では、再エネを最大限となる60%と設定し、原発10%、火力+CCUS20%と設定した。

注12：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。



して、石炭火力も 2040 年にフェーズアウトさせている。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^{注 13}。その他の電源は、内生的に決定されることとなる。したがって、本研究の設定される脱炭素政策パッケージ（表 4）によるシミュレーションは、発電部門において政府の 2030 年電源計画と 2050 年電源計画検討案に従うケース（政策シナリオI）と、本研究独自のケース（政策シナリオII）の 2 つのケースによって構成される（表 2 及び 3）。

表 3 政策シナリオ I 及び II における 2050 年の電源構成

注：政府の 2050 年電源計画検討案では、火力+CCUS 及び再生可能エネルギーの細部電源については示されていない。細部の電源シェアはモデルの中で内生的に決定される。

出典：政府の 2050 年電源計画検討案（成長戦略会議, 2021）及び本研究の設定による。

	政策シナリオI (政府の 2050 年電源計画検討案)	政策シナリオII (本研究の設定)
2050 年温室効果ガス目標	カーボンニュートラル	カーボンニュートラル
原子力	10%	2040 年にフェーズアウト
火力+CCUS	30%	石炭火力は 2040 年にフェーズアウト
再生可能エネルギー	60%	内生的に決定される
水素・アンモニア	10%	内生的に決定される
合計	100%	100%

以上の 2 つの政策シナリオによる電源構成を前提として、2050 年カーボンニュートラル達成のための政策パッケージを、Lee et al. (2022)に基づいて次のように設定した（表 4）。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/CO₂t の税率を比例的に増加し、2040 年には 410 米ドル/CO₂t になるように設定し、2041 年から 2050 年までには、410 米ドル/CO₂t を維持することとした（図 2）。この炭素税の課税から発生する税収は、税収中立原則に基づき、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。

注 13：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 で設定が可能である。また、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圧（Sub-C）は 2025 年度、超臨界圧（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こととしている。その上で、新規の石炭火力発電所（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を採用している。このシナリオ設定について詳しくは、李ほか(2020)を参照。

表 4 脱炭素政策パッケージの内容

出所：Lee et al. (2022)を基とした本研究の設定による。

設定項目	シナリオの設定内容	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 410 米ドル/CO ₂ t になるように設定。2041 年から 2050 年までには、410 米ドル/CO ₂ t を維持	○炭素税収は、税収中立に基づき、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 ○電源構成：2030 年 20%及び 2050 年 10%ケース ○2040 年フェーズアウトケース	
	石炭火力 ○電源構成：2030 年 19%ケース ○2040 年にフェーズアウトケース	
	再エネ発電 ○電源構成：2030 年政府電源計画及び 2050 年政府電源計画検討案ケース ○モデルによる内生的に決定されるケース	○再エネ発電は現行の固定価格買取制度を設定 ○バイオマス+CCS は、スタートアップ電源として 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	○2050 年まで高炉は 100%水素還元製鉄を設定 ○水素還元製鉄に必要な追加的投資費用は、炭素税の税収から補助されるように設定
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	

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

注 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。

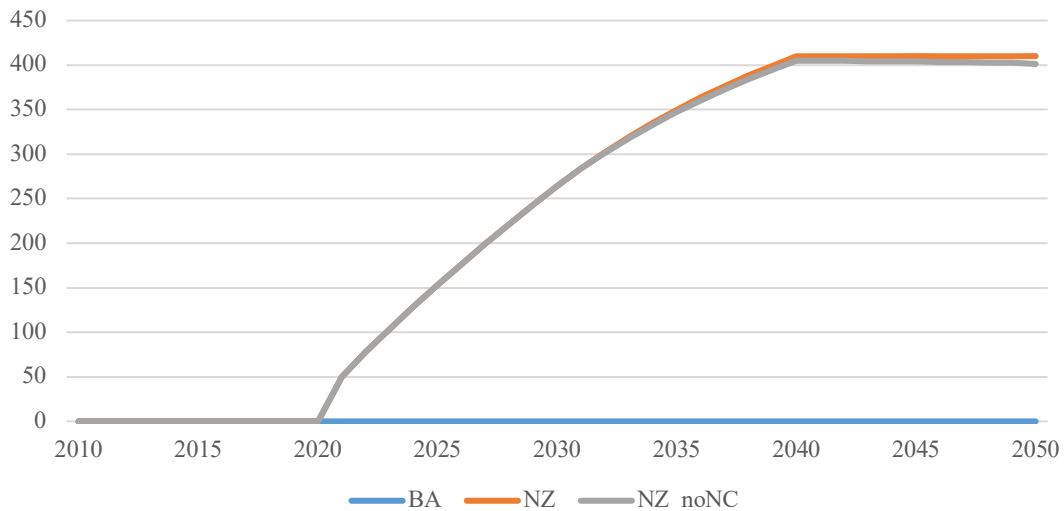


図2 炭素税の税率経路（単位：2010年米ドル）

注：BAはベースラインシナリオ（炭素税率はゼロ）、NZは電源構成が政策シナリオIに従うケース、NZ_noNCは電源構成が政策シナリオIIに従うケースである。図では、2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。

交通部門においては、2021年1月に表明された2035年までに新車販売で電動車100%を実現する方針に従い、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^{注14}。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^{注15}。鉄鋼部門では、高炉部門は2050年までに100%水素還元法を採用し、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^{注16}。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

注14：2035年での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。

注15：環境省(2022)によると、2018年における経済全体のエネルギー起源二酸化炭素排出量は12億4,400万トンであるが、産業部門からは3億9,600万トン、鉄鋼部門からは1億5,800万トンが排出された。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）のみが構築されている。また、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。

注16：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、本研究で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。

一を 2050 年までにフェーズアウトするように設定した。

本研究では、電源構成を 2030 年政府の電源計画と 2050 年政府の検討案に従いながら表 4 のすべての政策を採用してシミュレーションするシナリオを政策シナリオI(以下の図では、GPMP で表記)、そして電源構成を本研究独自に設定したうえで、表 4 のすべての政策を採用してシミュレーションするシナリオを政策シナリオII(以下の図では、NCPO で表記)とする。

5. 2050年カーボンニュートラルのエネルギー構成及び経済への影響

5.1 2050年までのカーボンニュートラルの温室効果ガス排出経路

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、ベースラインシナリオにおける温室効果ガス排出経路については、前述のように 2050 年に 2019 年と比較して 34.7%減少する OUTLOOK 2022 に従っている。本研究での温室効果ガス排出経路は、図 3 のように、政策シナリオIの場合、2030 年には 2013 年比 46%削減となり、2050 年には約 6,500 万トンまで減少することになる。2050 年の温室効果ガスの排出分 6,500 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) 及び発電部門のバイオマス+CCS により相殺されることになる^{注17}。

注 17: 環境省(2022)によれば、2018 年の日本の吸収源による吸収分は 4,450 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 6,500 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。また、経済産業省(2022)「CCS 長期ロードマップ検討会中間とりまとめ(案)」によると、日本の CCS の想定年間貯留量は 2050 年時点で年間約 1.2~2.4 億トンが目安とされているため、本研究の設定である吸収分 6,500 万トンは炭素制約をより厳しく評価しているものと言える。

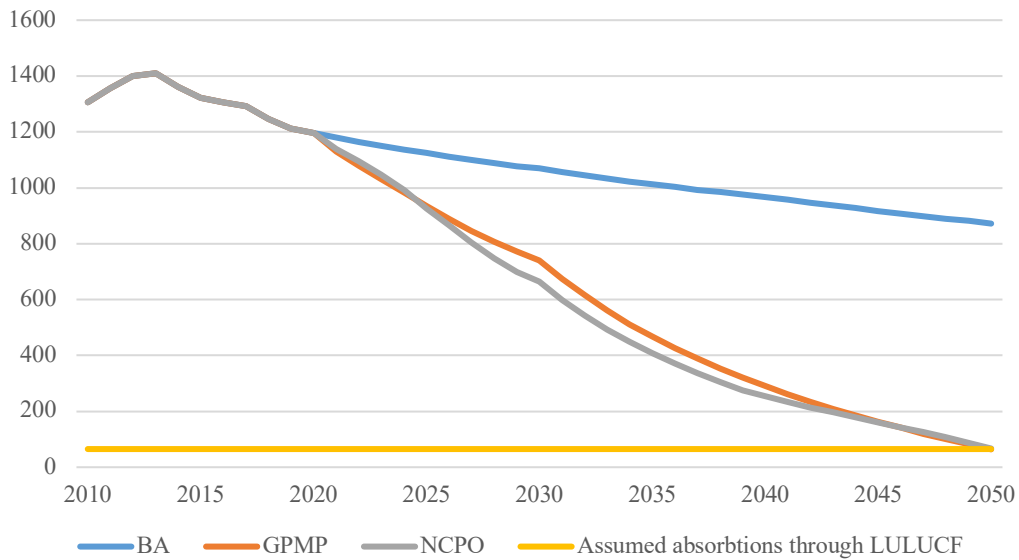


図3 ベースライン及び政策シナリオによる温室効果ガス排出量経路
(単位：百万CO₂換算トン)

注1：BAは、OUTLOOK 2022のレファレンスケースを用いたベースラインシナリオである。以下の図においても同様である。

注2：GPMPは、日本政府の2030年温室効果ガス排出目標を経由するシナリオである（政策シナリオIと同様）。以下の図においても同様である。

注3：NCPOは、原発及び石炭火力の2040年フェーズアウトを想定したシナリオである（政策シナリオIIと同様）。以下の図においても同様である。

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

図4はエネルギー起源二酸化炭素排出量を示しているが、図3と同じような削減経路を辿っている。OUTLOOK 2022では、温室効果ガスのうちエネルギー起源二酸化炭素排出量のみ2050年までのレファレンスケースを公表している。E3MEモデルにおいてもエネルギー起源二酸化炭素排出量のみが内生的にシミュレーションされており、その他の温室効果ガスは二酸化炭素排出量に対して一定比率で排出されているため、本研究ではエネルギー起源二酸化炭素排出を中心に分析を行う。

また、2013年比2030年の温室効果ガス46%削減のためには、政策シナリオIの場合、2013年比2030年のエネルギー起源二酸化炭素基準では55.6%削減となる。政策シナリオIIの場合、2013年比2030年のエネルギー起源二酸化炭素排出削減は61.6%となる。

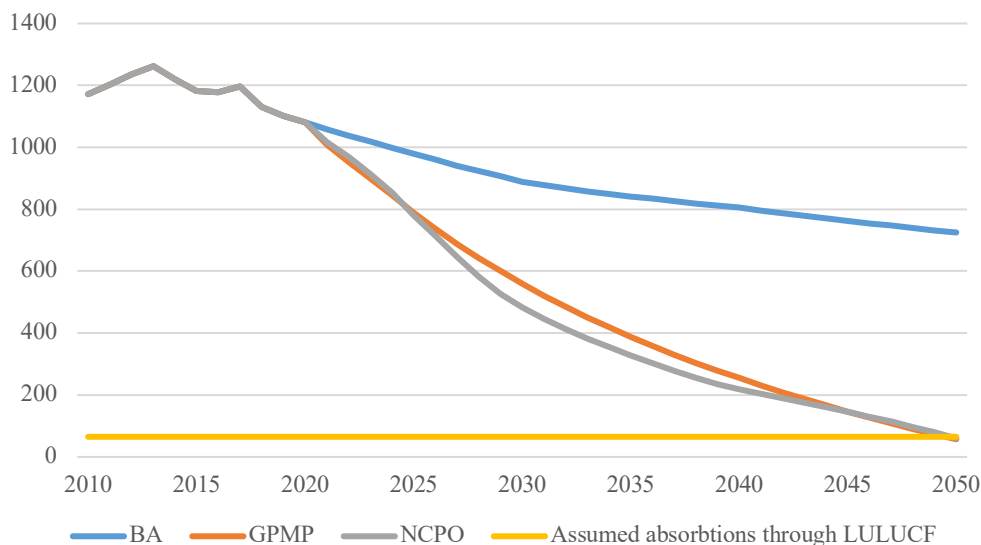


図4 ベースライン及び政策シナリオによるエネルギー起源二酸化炭素排出量経路
(単位：百万CO₂換算トン)

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

そして、2050年における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（2019年比2050年に34.7%削減されるシナリオ）に比べて、電源部門は114%削減^{注18}、道路交通部門は100%削減されるが、産業部門は約72%、住宅部門は約82%削減に留まる（図5）。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の二酸化炭素排出量約6,000万トンは、電源部門のマイナス削減分及び吸収源により相殺されることになり、カーボンニュートラルが達成されるようになる^{注19}。また、2030年と2050年における部門別二酸化炭素の削減量は図6で示されている^{注20}。

注18：電源部門において100%をオーバーする分は、バイオマス+CCS（2050年のバイオマス+CCS発電量は88.4～96.6TWh）による削減分を合わせたものである。

注19：政策シナリオIIによる部門別二酸化炭素排出量の削減率は、政策シナリオIの場合とほぼ同様なので、説明を省略する。

注20：本研究で、ベースラインシナリオ上の2050年エネルギー起源二酸化炭素排出量は、6億9,100万トンであるので（表1）、図6での部門別二酸化炭素削減量を合算すると吸収分6,500万トンを除いた6億2,600万トンとなる。

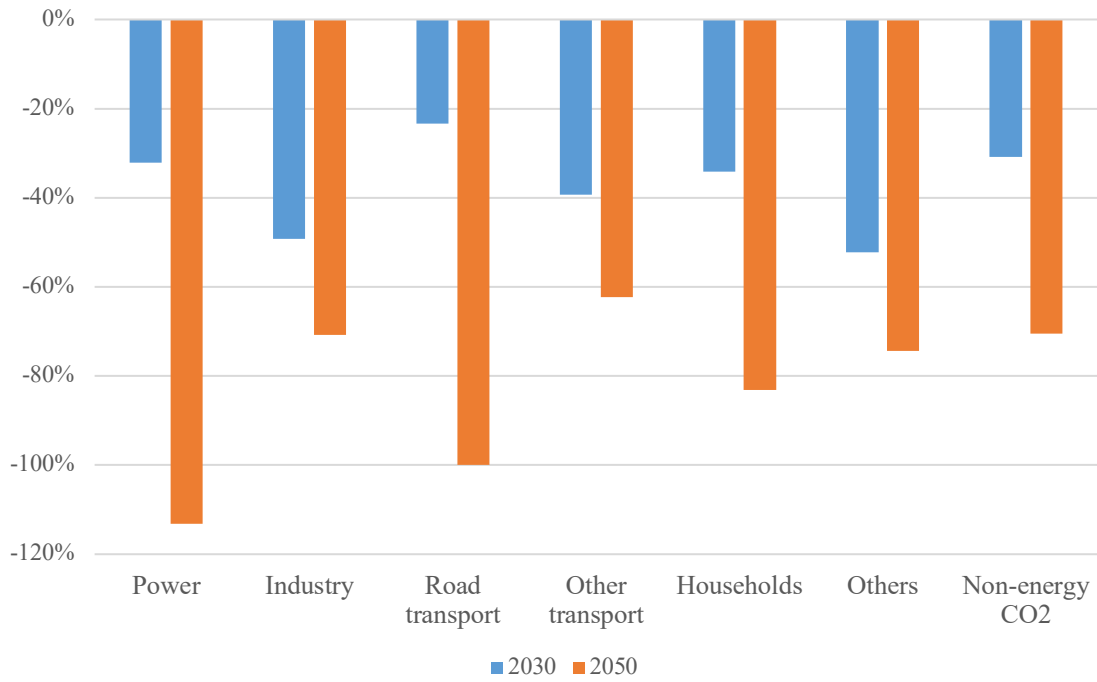


図5 政策シナリオ I による部門別 CO2 削減率（対ベースラインシナリオ）

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

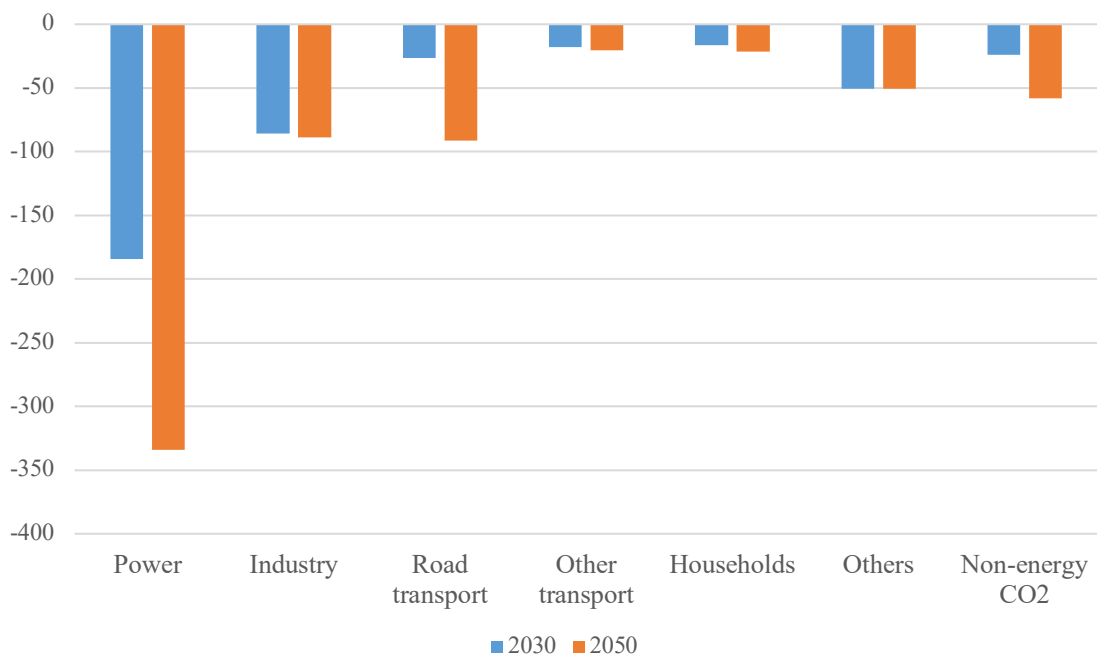


図6 政策シナリオ I による部門別 CO2 削減量（対ベースラインシナリオ）
（単位：百万 CO2 換算トン）

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

5.2 電源構成及び発電コストへの影響

2050年におけるカーボンニュートラル実現までの電力需要量は、2035年までには、炭素税など脱炭素政策パッケージの施行による発電コストの上昇により、ベースライン比最大4%まで減少するが、2035年頃からは、経済の電力化が進み、上昇に転じることとなり、2050年にはいずれのシナリオにおいても、ベースライン比9~11%程度増加することになる^{注21}（図7）。

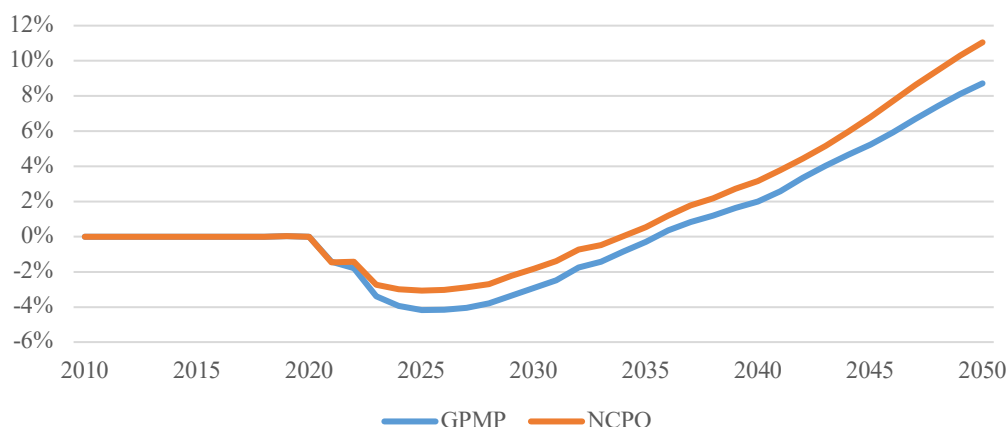


図7 政策シナリオによる電力需要予測（ベースライン比）

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

2030年の電源構成については、政策シナリオIの場合、政府の2030年電源計画に従っており、表5及び図8のように推定されている^{注22}。政策シナリオIの場合、石炭がフェーズアウトされず、2030年の電源構成は再エネが約4割、化石燃料（石炭+ガス+石油）が約4割と、再エネと化石燃料の割合が拮抗することとなる。ところが、石炭と原発をフェーズアウトさせる政策シナリオIIの場合、再エネは64%、化石燃料は17%と、再エネが全体の3分の2近くを占める一方、化石燃料が大きく抑え込まれる形になる。しかし、2030年までの短期間であるので、増加する再エネの約6割は太陽光発電によって賄われなければならないこともわかる。

注21：シミュレーションでは人口減少による電力需要量の減少が加味されているが、2050年には非電力部門の電力化（本シミュレーションでは電力生産は、非電力部門の電化（電気自動車、家庭・ビルなど）によりベースラインより10%近く増加している）、つまり、経済の電化に伴い、ベースライン以上に増えることになる。成長戦略会議(2021)においても、2050年の電力需要は、産業・運輸・家庭部門の電化によって、現状の30~50%増加するとあり、政府の計画でも電力需要量は長期的に増加傾向にあると考えられている。

注22：ただし、政策シナリオIの電源構成は、政府の2030年電源計画通りモデルに外生的に与えられているが、モデルの中でシミュレーションされるうちに、調整力が働き、例えば、原発が政府電源計画案の20%から19.9%、石炭火力が19%から18.9%、そしてLNG火力が20%から19.7%といったように正確には一致していない。



表5 政策シナリオ別 2030 年における電源別発電量（単位：TWh）

注：()内は、電源割合(%)である。

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

	2019 年	2030 年		
		BA	政策シナリオ I	政策シナリオ II
原子力	64	158.6	209.7(19.9)	95.6(8.9)
石油火力	36	30.0	12.7(1.2)	42.4(4.0)
石炭火力	329	269.1	199.2(18.9)	107.1(10.0)
LNG 火力	385	349.8	207.3(19.7)	138.3(12.9)
水力	80	98.4	124.4(11.8)	84.8(7.9)
陸上風力	7.5	15.5	19.3(1.8)	43.6(4.1)
洋上風力	0.2	3.3	38.6(3.7)	59.8(5.6)
太陽光	69	90.0	156.6(14.9)	413.0(38.6)
バイオマス	45	65.3	59.0(5.6)	66.5(6.2)
地熱	0.0	6.3	12.8(1.2)	17.9(1.7)
その他	19	0.0	12.5(1.9)	0.0(0.0)
合計	1,037		1,052.1(100.0)	1,069.0(100.0)

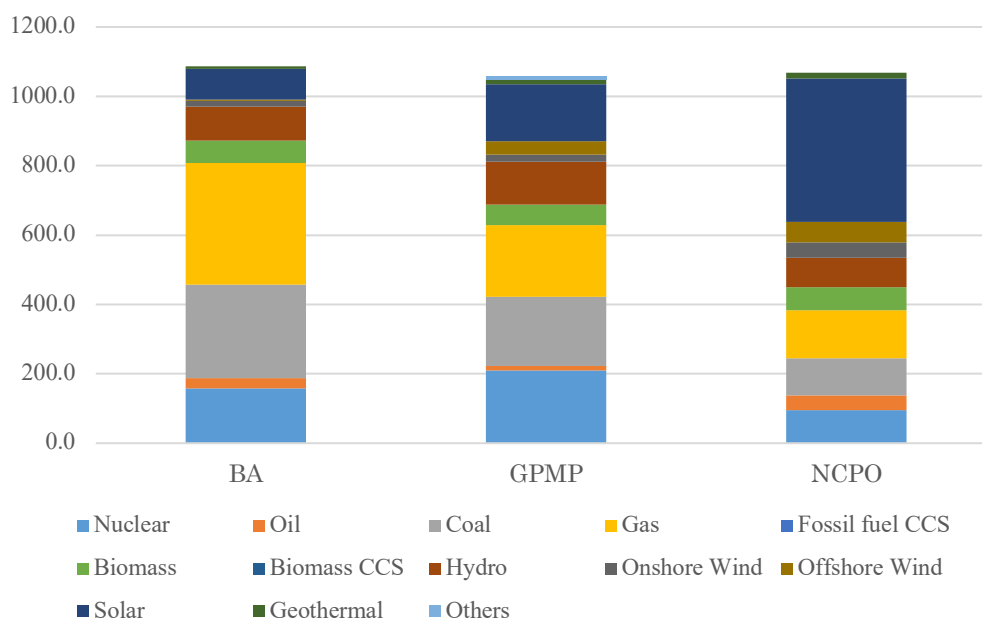


図8 政策シナリオ別 2030 年における電源別発電量（単位：TWh）

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

2050 年の電源構成については、政策シナリオIの場合、政府の検討案（表 3）に従い、原発、化石燃料（主に、LNG）+CCS、バイオマス+CCS の合計シェアが、30% になるように外生的に設定されている。そして、水素+アンモニア発電は、E3ME-FTT

ではデータ不足により、シミュレーション項目に入っておらず、その他の発電として分類されている。政策シナリオⅡは、2030年の電源計画と同じく、原発と石炭火力の2040年フェーズアウト以外は内生的に決定されている。その結果、政策シナリオⅡでは、原発と化石燃料+CCSが2050年にゼロとなり、調整電源としてLNG火力の3%が残っているほかは、すべて再生可能エネルギー電源で構成されている^{注23}。

再生可能エネルギー電源の中では、陸上風力の電源構成が政策シナリオⅠの4.9%から政策シナリオⅡの11.9%へ、洋上風力が9.4%から26.4%へ、太陽光が26.5%から33.5%へ大きく伸びており、特にポテンシャルの大きい洋上風力のシェアが著しく伸びる見通しである。

ただし、地熱と水力発電の電源構成は、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示された。そして、バイオマス+CCS電源は、ベースラインシナリオではゼロであったが、政策シナリオⅠ及びⅡともにスタートアップ補助の影響により、2050年には7%前後までシェアが伸びることが予測された。

表6 政策シナリオ別2050年における電源別発電量への影響（単位：TWh）

注：（ ）内は、電源割合（%）である。

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

	2019年	2050年		
		BA	政策シナリオⅠ	政策シナリオⅡ
原子力	64	151.0	118.9(10.9)	0.0(0.0)
石油火力	36	0.2	0.0(0.0)	0.0(0.0)
石炭火力	329	242.2	0.0(0.0)	0.0(0.0)
LNG火力	385	356.5	0.0(0.0)	38.5(3.0)
化石燃料+CCS	385	356.5	157.2(12.6)	0.0(0.0)
水力	80	105.1	127.8(10.2)	86.3(6.8)
陸上風力	7.5	50.6	61.1(4.9)	151.1(11.9)
洋上風力	0.2	15.8	117.6(9.4)	336.7(26.4)
太陽光	69	131.7	332.0(26.5)	427.3(33.5)
バイオマス	45	94.7	96.0(7.7)	62.8(4.9)
バイオマス+CCS	0.0	0.0	96.6(7.7)	84.4(6.6)
地熱	2.8	13.9	25.0(2.0)	50.8(4.0)
その他	19	0.0	119.0(9.5)	37.2(2.9)
合計	1,037		1,251.2(100.0)	1,275.1(100.0)

注23: 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、火力発電は、競争力を失っても一定容量が調整電源として残存する構造となっている。また、電力広域的運営推進機関（2022）によると、本研究のシナリオとの違いはあるが、2050年において東京エリアでは電力需要量の8.2%を調整力必要量としている。そのため、本研究の設定である3%は調整能力としては不十分である可能性もある。この点に関しては今度の課題としたい。

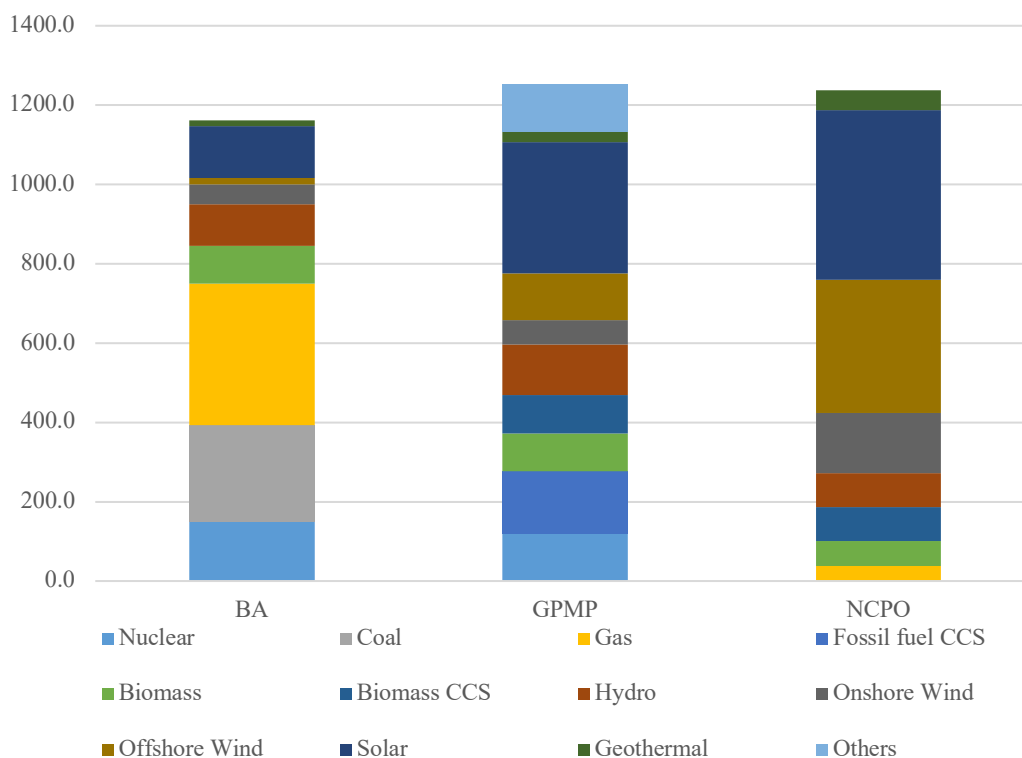


図9 政策シナリオ別 2050 年における電源別発電量（単位：TWh）

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

政策シナリオの発電コストの影響については、図 10 及び表 7 に示されている。政策シナリオI及びIIとも、石炭火力がフェーズアウトされる 2040 年までには、炭素税の影響により発電コストが 15%までに上昇することが予測されている。政策シナリオIの場合、政府の電源計画検討案により 2050 年においても化石燃料+CCS が残るなどの影響で発電コストの上昇が続けられることが予想される。しかし、政策シナリオIIの場合、太陽光発電を中心に再生可能エネルギー発電のコストダウンにより、2040 年からは発電コストの下落傾向に転じている。これは再生可能エネルギー発電の発電コストが十分に下落する長期においては、再生可能エネルギーの発電シェアが大きくなるほど、総発電コストが相対的に安くなることを表している^{注24}。さらに、これは次節で考察する 2050 年カーボンニュートラルの経済活及び産業生産にも影響を与えることになる。ただし、表 10 で示されているように、洋上風力の発電コストは、2030 年以降は下がらないと予測されている。これは洋上風力の場合、普及拡大に伴う適切な立地の減少と系統連系コストの大幅な上昇が、発電コスト下落を妨げる要因となっているからである。

注 24：本研究の E3ME モデル推定では、再エネ発電コストとしてバランシングコストも考慮されている。すなわち、再エネが増えることで、それに相当するバッテリー投資コストが比例的に増えることになり、再エネ発電コストに転嫁される構造となっている。再エネにおける学習効果に伴うコストダウンが、バランシングコストにより一部阻害されることを加味したモデルとなっている。

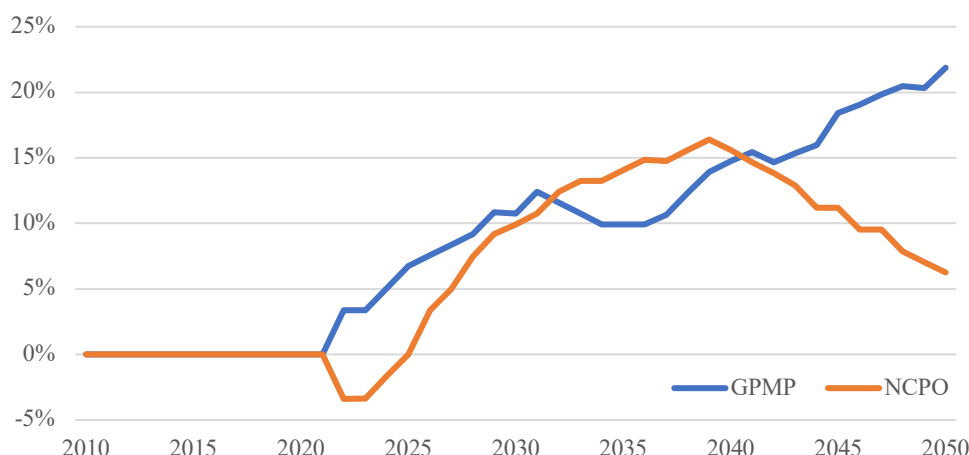


図 10 政策シナリオ別発電コストへの影響

出所：本研究の E3ME モデル推定による。

表 7 政策シナリオにおける発電コストの予想 (単位：円/kWh)

出典：政府の 2030 年電源計画及び本研究の E3ME モデル推定による。

	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
原子力	10.2	10.2	—	—
石油火力	26.5	42.0	50.3	50.8
石炭火力	7.4	31.2	—	—
LNG 火力	10.7	22.7	29.0	29.2
水力	10.8	10.8	10.8	10.8
バイオマス	28.1	28.1	27.6	23.3
陸上風力	14.6	11.8	11.7	11.3
洋上風力	21.1	18.2	18.8	19.3
太陽光	12.0	10.5	9.0	7.5
地熱	10.9	10.9	10.0	9.9

注 1：2020 年及び 2030 年の発電コストは、経済産業省(2021)の「発電コスト検証に関するとりまとめ」に従っており、2040 年及び 2050 年の発電コストは、本研究のシミュレーションによるものである。

注 2：原発及び石炭火力発電の 2040 年及び 2050 年の発電コストの場合、2040 年フェーズアウトシナリオに従い、表示されていない。

注 3：再生可能エネルギー発電は、FIT が適用された価格である。

注 4：電源別発電単価は、政策シナリオIとIIにあまり差がないので、表の発電コストは政策シナリオIIに基づいている。

6. マクロ経済及び主要産業への影響

6.1 マクロ経済への影響

2050年カーボンニュートラル達成に向けた脱炭素政策パッケージの施行は、政策シナリオI及び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つの政策パッケージによる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2%程度押し上げた後、2050年には3%程度上昇させる見通しとなっている（図11及び表8）。そして政策シナリオIとIIのGDP上昇効果の差は、殆どないことが示された^{注25}。両シナリオともに、GDPの上昇効果が表れたのは、カーボンニュートラルの達成する過程で、様々な低・脱炭素投資需要が多様な部門（発電部門、産業部門、交通部門など）に渡って経済を刺激したことが最も大きかったといえる（表8で投資需要がベースライン対比6～7%上昇）。

そして2030年までには、脱炭素政策パッケージの施行により、発電コストを中心にエネルギーコストの上昇により、物価も上昇するが、2050年までを考えると、化石エネルギーの代替電源としての再エネ発電のコストが十分に下がることにより、物価はかえってマイナスへ転じることにより、マクロ経済への影響はあまりないことが予測された。

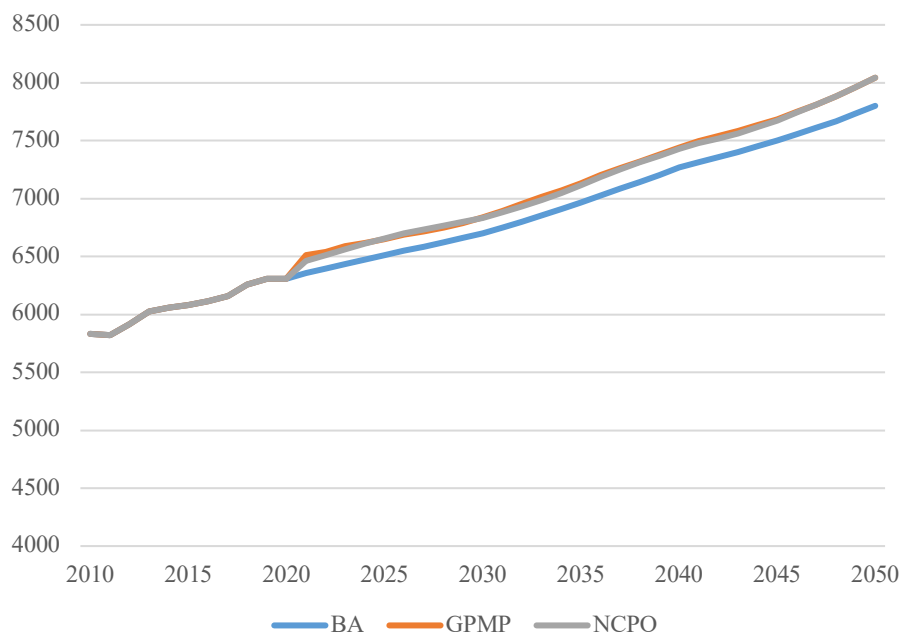


図11 2050年カーボンニュートラル達成におけるGDPの経路
(単位：10億ドル、2010年価格)

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

注25：政策シナリオIと比べてIIの方が2050年時点において再エネの普及が進んでいるため、エネルギーコストの上昇によりGDPの押し上げは小さいように思われるが、政策シナリオIIにおける投資需要の増加と再エネ普及に伴う発電コストの低下により政策シナリオIと同程度のGDPの押し上げがあったと考えられる。

さらに、多様な低・脱炭素投資需要により、新規雇用も刺激されており、両政策シナリオともに2050年までベースライン対比、雇用が1.4~1.5%程度上昇し、これによる所得効果により消費も堅調（ベースラインに比べて2.3~2.5%上昇）であることが予測された。2050年カーボンニュートラルの経済効果のもう一つの大きな要因としては、貿易バランスの改善が取り上げられる。すなわち一部資本財輸出の減少により、輸出は微減（-0.2~-0.3%）するが、化石エネルギー輸入需要の激減による貿易バランスの改善がGDPを押し上げる要因と予想されている^{注26}。

**表 8 2050年カーボンニュートラル達成におけるマクロ経済への影響
(対ベースライン)**

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

	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	2.0%	1.9%	3.1%	3.1%
消費	0.5%	0.5%	2.3%	2.5%
投資	7.7%	7.5%	7.0%	6.0%
輸出	-0.4%	-0.5%	-0.3%	-0.2%
輸入	0.2%	0.1%	-2.1%	-2.7%
雇用	1.1%	1.2%	1.4%	1.5%
消費者物価	3.3%	3.3%	-0.3%	-1.4%

6.2 主要産業の二酸化炭素排出と生産への影響

6.2.1 二酸化炭素排出への影響

2030年及び2050年における、政策シナリオIによる部門別CO₂排出削減への影響は図12に示されている。2050年カーボンニュートラル達成に最も大きく寄与する部門は、発電部門となる。発電部門の2050年の二酸化炭素排出量は、100%非化石エネルギー電源が達成されており、さらにバイオマス+CCSを導入されているため、-3,910万トンとなる。この削減量は、非発電部門の温室効果ガスの残余分を相殺することに大きく貢献することとなる。

製造業の中では、エネルギー集約業種である、鉄鋼、製紙、非鉄金属、化学の各部門で排出削減効果が大きく、製造業以外ではEVなどゼロエミッション自動車の普及が大きく進んだ道路交通などの分野で大幅な削減が見込まれる。特に製造業の中で約40%の二酸化炭素排出量のシェアをもっている鉄鋼業の場合、高炉部門の100%水素還元法が採用されることになり、2050年には約410万トンまで大幅に縮小することにな

注26：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(2020)「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することができる。



る^{注27}。2050年においてもエネルギー起源二酸化炭素は、計5,690万トン排出されるが、これは前述のように吸収源などにより相殺されることになる。

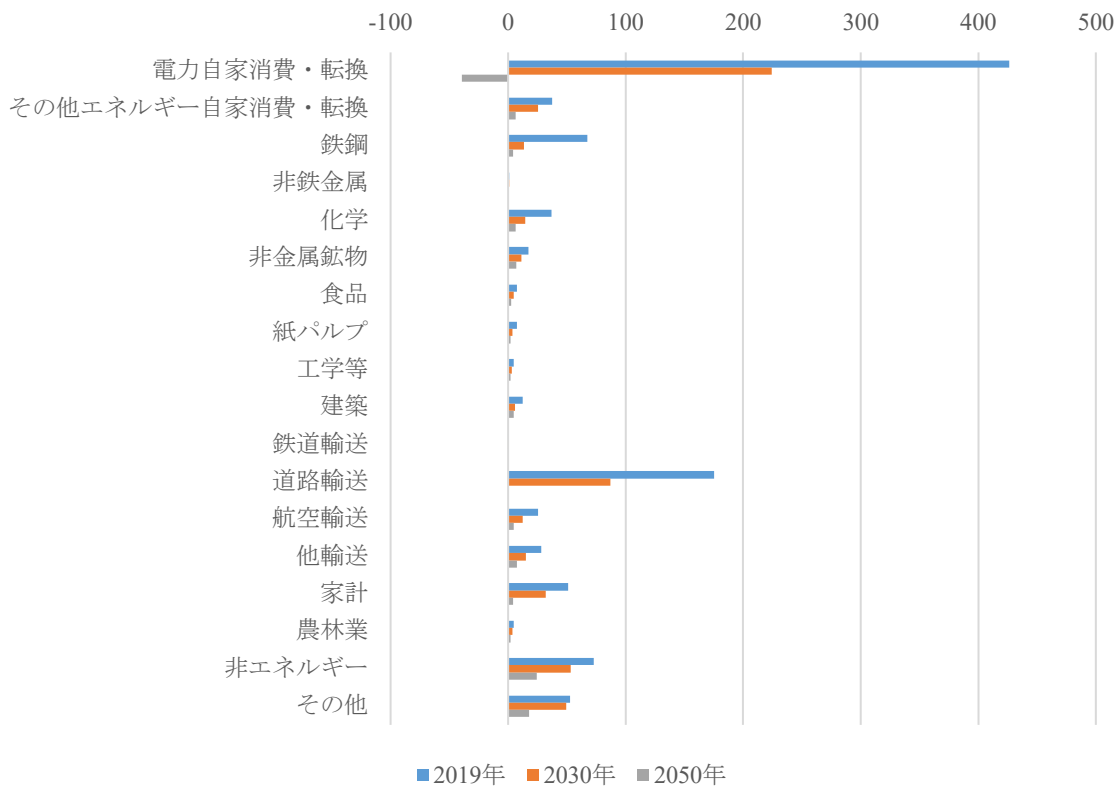


図12 カーボンニュートラル政策シナリオによる部門別二酸化炭素排出量見通し
(単位：エネルギー起源CO2百万トン)

注：「非エネルギー」は、鉄鋼部門のコークス利用など製造工程上の非エネルギー利用による排出量である。

出所：本研究の政策シナリオIのE3MEモデル推定による。

6.2.2 主要業種別生産への影響

カーボンニュートラル政策シナリオによるE3MEモデル推定によれば、2050年までの業種別生産見通しは図13のようになる。図13では、2030年及び2050年の業種別生産見通しが、ベースライン比として示されている。2050年の産業生産は、加工燃料（石油精製など）、化学、非金属鉱物（セメントなど）、ガスなどエネルギー集約産業を中心に、ベースライン比で生産の減少が予想されるが、その他のほとんどの業種では、低・脱炭素関連投資需要と民間消費の堅調さにより、ベースライン比で生産の増加が予想されている。特に、発電部門は経済の電化が進むことによりベースライン比9.1%

注 27： 鉄鋼産業の2019年の二酸化炭素排出量は、1億3,400万トンであったが、表9ではエネルギーの燃焼過程で発生する6,750万トンだけ集計されている。コークスなど原料の非燃焼過程で発生する残り約6,600万トンは、統計上、非エネルギー利用項目で捉えられている。

の大幅な生産増加が見込まれている。

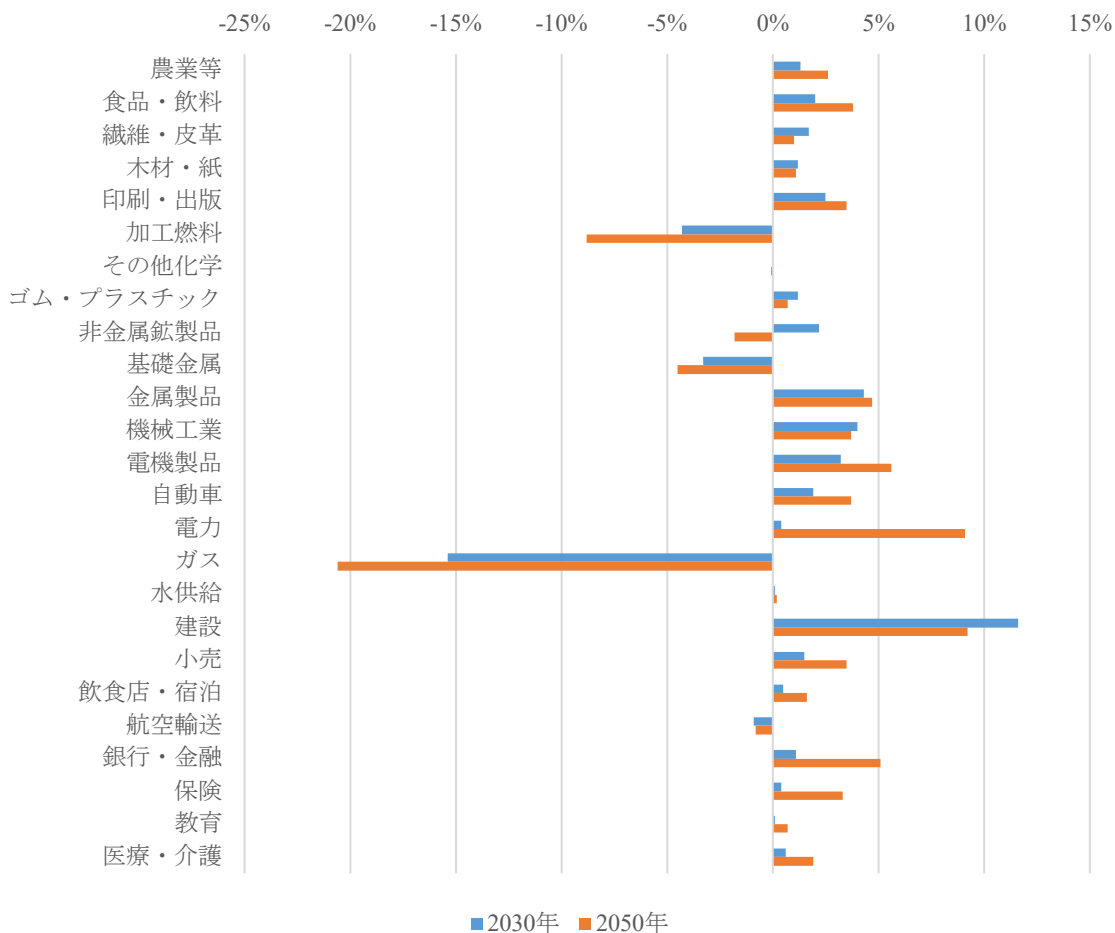


図13 カーボンニュートラル政策シナリオによる2050年までの業種別生産見通し (対ベースライン)

出所：本研究のE3MEモデル推定による。

ただし、2050年までの長期における産業構造の転換をシミュレーションにより正確に予測することは不可能に近い。今後、第4次産業革命と呼ぶべき経済社会システムのIoT化、AI、ビッグデータの発展に伴い、将来の産業構造や就業構造が劇的に変わる可能性が高い。従来の業種・企業の垣根を越えた産業間企業間融合が行われ、新たな産業の創生と価値の創出、すなわち新たなバリューチェーンと産業群の出現が経済と産業を牽引し、その結果、産業構造の大転換が行われると予想される。

2050年カーボンニュートラルに向けた脱炭素政策の施行は、こうした産業構造の大転換を加速化させる役割を担うことになる。例えば、炭素生産性（GDP・付加価値／炭素投入量）の高い産業構造への転換、水素還元法製鉄と電気炉によるリサイクル鉄を中心とした産業内システムの変化、再生可能エネルギーの大量導入による脱炭素電



源への転換、全産業分野でのエネルギー効率化推進、低・脱炭素新産業及び低・脱炭素素材の創出が挙げられる。

ただし、本研究に用いられている E3ME モデルは、他の大規模計量モデルと同様に、このような定量的予想が難しい産業の構造的な大転換を推定する機能は有していない。産業構造の変換は、あくまでもモデル中であらかじめ設定された産業間の変化であり、産業間の融合や新しい産業の創出を表現することは現段階のモデルではデータや情報の制約などにより難しい。裏を返せば、2050年までのカーボンニュートラルの予測は、大規模計量モデルが示すビジョンを大きく超える大胆な脱炭素技術革新、新しい産業の出現とそれに伴う産業構造の大転換が起きる可能性を秘めているといえる。カーボンニュートラルに向けた脱炭素政策の産業部門別影響に関するシミュレーションの解釈には、こうした制約と可能性を考慮に入れる必要がある。

7. 結論

本研究では、日本が 2030 年温室効果ガス削減目標達成・電源計画の実現、2050 年カーボンニュートラルに向けた電源計画検討案、これらの実現が日本の経済と産業に与える影響について、E3ME マクロ計量経済モデルを用いて推定した。その結果、2050 年カーボンニュートラルに向けた脱炭素政策の施行は、経済成長と 2050 年温室効果ガス実質ゼロが同時に実現される低炭素・脱炭素社会への明るいビジョンを示すことになる。これは、脱炭素政策の施行によるエネルギーコスト上昇という経済への負の影響よりも、経済各部門からの低・脱炭素投資需要の拡大と再生可能エネルギー発電コストの低下、そして化石エネルギー輸入の急減による貿易バランスの改善などに起因した正の影響が大きかったことを意味している^{注28}。また、昨今ではウクライナ危機に伴う燃料価格の高騰によって電力の安定供給体制が不安定になる懸念がある。それに対して、本研究では長期的な視点で見た場合に、太陽光発電を中心とする再エネの普及により発電コストが下落することを示しており、これは再エネの普及が電力供給体制の安定化にも貢献することを表している。以上を踏まえ、政府は 2050 年までの脱炭素社会構築を見据え、一貫した方向性を示した上で政策を打ち出していく必要がある。これにより、低・脱炭素技術、製品、サービスの市場競争力の強化、脱炭素イノベーションの加速化に向けた市場環境の整備、そして自然との共生できる豊かな社会の構築が可能であろう。

本研究はいくつかの課題も抱えている。まず、本研究の E3ME モデルでは、日本以外の国は現状の政策を維持することを想定している。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、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変わる可能性もある。日本以外の国、例えば、EU、アメリカ、そして中国と韓国および台湾などがカーボンニュートラルを達成した場合の日本経済へ

注 28: FIP(Feed-in Premium)制度を通じた再エネの市場統合にあたっては、インバランスリスク等に対するヘッジ手段の確保が必要になる。そのため、再エネ導入の効果を評価する際には Flexibility 取引の活性化が重要となってくるが、これらの論点を加味したモデル推定は今後の課題としたい。

与える影響に関する研究は今後の課題である。

次に、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・再生林、土壌炭素貯留、バイオ炭、風化促進、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（DACCS）、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を加味するに留まっている。より多様なネガティブエミッションの技術のモデルへの採用については今後の課題として挙げられる。

最後に、E3MEモデルにおける低炭素技術はあくまでも現在で予測可能な技術に限られている。そもそも技術革新は予測不可能性があり、予期せぬところでブレイクスルーが生じる可能性が高い。現在、マクロ計量モデルの分野において、技術革新の予測不可能性をモデルに内在化しようとする試みは行われているが（例えば、game changing theory など）、まだ科学的根拠に基づいたモデル構築までには至っていない。技術革新の予測不可能性を考慮に入れた脱炭素モデルを用いた分析は今後の課題としたい。

参考文献

環境省(2022)「2020年度（令和2年度）温室効果ガス排出量（確報値）について」,
<https://www.env.go.jp/content/900518858.pdf>

北辻宗幹(2022)「電力不足が今後の生産下振れリスクに一火力発電設備の休廃止増加が背景」, 日本総研, Research Eye No. 2022-032, <https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=103265>

経済産業省(2021)「発電コスト検証に関するとりまとめ（案）」,
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/2021/data/08_05.pdf

経済産業省(2022)「CCS 長期ロードマップ検討会中間とりまとめ（案）」,
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/20220527_1.pdf

成長戦略会議(2021)「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.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosenryakukaigi/dai6/siryou1.pdf>

日本エネルギー経済研究所(IEEJ)(2021)「IEEJ OUTLOOK 2022」,
<https://eneken.ieej.or.jp/data/9868.pdf>

資源エネルギー庁(2020)「エネルギー白書 2020」,
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020pdf/>

資源エネルギー庁(2022)「エネルギー白書 2022」,
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/pdf/>

電力広域的運営推進機関(2022)「将来の再生可能エネルギー導入拡大に伴う調整力の検討について」,
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2022/files/chousei_72_03.pdf

李秀澈, 何彦旻, 昔宣希, 諸富徹, 平田仁子, Unnada Chewpreecha, 石炭火力発電と原発早期フェーズアウトの2050年までの日本経済と電源構成, そして二酸化炭素排出への影響分析, 環境経済・政策研究, 2021, 14巻, 2号, pp.1-12, https://doi.org/10.14927/reeps.14.2_1

European Commission(2018) A Clean Planet for all A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, Brussels, 28 November 2018,



https://climatecooperation.cn/wp-content/uploads/2019/06/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf

H. Pollitt (2020) Analysis: Going carbon neutral by 2060 ‘will make China richer’, Carbon Brief, <https://www.carbonbrief.org/analysis-going-carbon-neutral-by-2060-will-make-china-richer>

S. Lee, H. Pollitt, and K. Fujikawa, (eds) (2019) Energy, Environmental and Economic Sustainability in East Asia: Policies and Institutional Reforms, Routledge, London.

S. Lee, Y. He, S. Suk, T. Morotomi, U. Chewpreecha (2022) Impact on the power mix and economy of Japan under a 2050 carbon-neutral scenario: Analysis using the E3ME macro-econometric model, Climate Policy, Volume 22, <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2061406>