

電力経済研究

特集「脱炭素化のために電化にどう向き合うか」

No.69 (2023.2)

R 電力中央研究所
社会経済研究所

「電力経済研究」

「電力経済研究」は電気事業、電力産業に関わる社会経済・制度問題を対象分野とし、課題指向型、問題解決型に関連した研究成果等を掲載し、学術の振興に寄与することを目的とした雑誌です。一時休刊ののち、2015年3月にリニューアル復刊しました。当面の間は、広く一般に投稿論文を募ることは致しません。

原稿の種類と内容

電力経済研究の原稿には次のようなカテゴリーがあります（下記のカテゴリーは当面のものであり、今後、編集委員会での議論を経て追加・変更になる場合があります）。

(1) 総説

特集を全体的に俯瞰して、その目的や意義、内容などについて総合的に展望・解説したものの。

(2) 論文

主題、内容、手法等の新規性を有し、当該分野の発展に貢献すると思われる研究成果を報告したもの。また、特定の主題に関する一連の事象を、実態調査を通して、あるいは特定の主題に関する一連の研究及びその周辺領域の発展を、著者の見解にしたがって総括的かつ系統的に報告したもの。

(3) 研究ノート

総合的な報告までには至らないが、その研究途上で得られた有用な分析手法に関して記録にとどめておく価値があると認められたもの。特に、テクニカルな分析手法を特徴とするもの。また、特集の目的に沿って、他の媒体で報告した内容について、本誌向けに要約したもの。

(4) 研究トピックス紹介

経済、経営、エネルギー・電力、環境等に関連する国内外の新たな研究動向を紹介するもの。

一般財団法人 電力中央研究所

社会経済研究所

「電力経済研究」編集委員会

E-mail : src-henshu-ml@criepi.denken.or.jp

電力経済研究 No. 69 (2023. 2) 目次

特集

「脱炭素化のために電化にどう向き合うか」

総説

- 脱炭素化のために需要サイドの電化にどう向き合うか
—バリアへの対応と便益の追求— 西尾 健一郎、中野 一慶 …1

第1部 部門横断

論文

- 脱炭素に向けた日本のエネルギーシステム転換
—IPCC 第6次評価報告書のシナリオ群における共通性と多様性— 坂本 将吾 …19

第2部 民生部門

論文

- ロックイン問題を考慮に入れた給湯分野の経済合理的なCO₂削減可能性
—家庭CO₂統計の個票データを用いた将来分析— 山田 愛花、西尾 健一郎 …39

論文

- 家庭用給湯分野の省エネルギー・温暖化対策のバリア
—賃貸住宅や機器選定の関係者へのインタビュー調査— 西尾 健一郎、山田 愛花 …61

論文

- 災害時におけるZEHのレジリエンス
—アンケートデータと傾向スコアによる因果効果の分析— 中野 一慶 …78

論文

- 建物脱炭素化に向けた取組の検討
—欧米の最新動向に見られる対策の広がり— 中野 一慶、西尾 健一郎 …95

第3部 運輸部門

研究ノート

- 運輸脱炭素化に向けた取組の検討
—欧米の自治体の事例とゼロカーボンシティへの示唆— 向井 登志広 …108

第4部 産業部門

論文

- 産業部門における電化バリアと課題
—国内製造業を対象としたアンケート調査— 向井 登志広 …118

研究ノート

- 産業用ヒートポンプの社会実装強化に向けた考察
—技術開発から技術展開へ— 甲斐田 武延 …130

特集

「脱炭素化のために電化にどう向き合うか」

2050年カーボンニュートラルの実現のためには、エネルギーの供給サイドだけでなく、需要サイドの各分野においても、脱炭素化に向けた道筋を示していく必要がある。第6次エネルギー基本計画には、「産業・業務・家庭・運輸部門においては、徹底した省エネルギーによるエネルギー消費効率の改善に加え、脱炭素化された電力による電化という選択肢が採用可能な分野においては電化を進めることが求められる」とある。ヒートポンプ技術や電気自動車などによる電化は、需要サイドの直接排出を大幅に減らすための中心的手段である。

一方、電化を進めるための取組が本格化しているとは言い難い。需要サイドの技術・インフラとそのCO₂排出はロックイン（固定化）されることが多いため、将来のカーボンニュートラルに適合する技術については、早い段階から普及を加速させていく必要がある。省エネや再エネ電力調達だけでなく、電化にも向き合い、その位置づけや具体的な取組のあり方について議論を深めるべき時期に来ている。

本特集号では、電力中央研究所 社会経済研究所の研究成果を中心に、電化に関連する9編の論文等を所収した。まず、冒頭の総説により、電化を巡る論点と特集号の全体像を示す。その上で、4部（部門横断、民生部門、運輸部門、産業部門）に分けて、6編の論文と2編の研究ノートにより、長期シナリオにおける電化の位置づけ、家庭用給湯分野の対策の経済性やバリア（阻害要因）、停電に対する不安、欧米の建物・運輸脱炭素化取組、産業電化のバリアや対応策などを論じる。これらの研究は、理想的な将来像やポテンシャルへの期待を示すだけでなく、現実のバリアを把握した上で、バリアの解消策を講じていくことが必要になるという視点に基づいている。

くらしを豊かにし、工場の生産性なども向上させる可能性を秘めた電化は、脱炭素化のためのエネルギー転換の一形態にとどまらず、多面的な便益を追求するアプローチとして捉えていくべきものでもある。一方、電化のバリアやそれへの対応、あるいは、便益をテーマとする研究は、国内ではそれほど活発とは言えない。本特集号が、今後の議論や研究のきっかけになれば幸いである。

2023年2月

編集責任者 電力中央研究所 社会経済研究所 西尾 健一郎
中野 一慶

脱炭素化のために需要サイドの電化にどう向き合うか —バリアへの対応と便益の追求—

How to Face Demand-Side Electrification for Decarbonization?:
Overcoming Barriers and Pursuing Benefits

キーワード：脱炭素、カーボンニュートラル、エネルギー需要、省エネルギー、電化

西尾 健一郎、中野 一慶

要旨

カーボンニュートラルの実現に向けては、エネルギーの供給サイドと需要サイドが一体となった取組が必要である。CO₂排出量の半分以上は需要サイドからの直接排出であり、省エネルギー対策の強化のみならず、直接排出を大幅に減らすための手段も講じていかなければならない。水素・合成燃料・CO₂回収等の手段は未だ研究開発・実証・初期導入の段階にあるが、電気利用技術は多くの分野で既に利用可能である。本総説では、エネルギー需要サイドに着目して、脱炭素化のために電化にどう向き合うかを論じる。まず、国内外で電化が需要サイドの取組としてどのように位置づけられているかを概観し、わが国では実際の取組については必ずしも十分に検討されていないことなどを述べる。また、電化には脱炭素目標への対応、再生可能エネルギー導入との相乗効果、技術の進歩や便益の拡大などへの期待があることを明らかにする。さらに、電化のバリアの実態を把握することの重要性や、ロックイン問題を考慮して早期にバリアへの対応策を講じていく必要があることを示す。それらを踏まえて、本特集号の構成と所収した論文等の概要を述べる。

1. はじめに

2020年10月、政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにし、脱炭素社会の実現を目指すことを宣言した。カーボンニュートラルは、従来の省エネ・温暖化対策の延長線上では達成できず、電気事業者をはじめとするエネルギー供給サイド（以下、供給サイド）と企業や個人などのエネルギー需要サイド（以下、需要サイド）が一体となった取組が必要である。

CO₂の半分以上は需要サイドからの直接排出

わが国の2020年度の温室効果ガス総排出量は11.5億トンで、そのうちCO₂排出量は10.4億トンである（環境省, 2022a）。

CO₂排出量の内訳を見ると、発電に伴う排出などを供給サイドに計上する場合、それらを含むエネルギー転換部門の排出量が40%と最も多く、次いで工場などの産業部門が24%、自動車などの運輸部門が17%、商業・サービス・事業所などの業務その他部門が6%、家庭部門が5%であり、半分以上（52%）は需要サイドからの直接排出となっている。発電に伴う排出などをエネルギーの需要サイドに計上する場合、すなわち、間接排出も含めると、その排出量は85%に達する。

カーボンニュートラルの実現に向けては、需要サイドの取組が重要となることがわかる。

省エネルギーや再生可能エネルギーへの期待

需要サイドの取組としてよく知られているのが、省エネルギー（以下、省エネ）である。本特集号の筆者らも、省エネ行動を促すための情報提供の効果を明らかにするための実証など、省エネ研究に携わって

1) このほかに、工業プロセスの原材料使用や廃棄物焼却に伴う非エネルギー起源 CO₂ が 7%ある。

きた。工場や事業所のエネルギー管理の運用改善や建築物の断熱性能や機器の向上など、省エネが引き続き重要であることは言うまでもない。わが国の省エネ技術のレベルは高く、技術開発・普及を通じて国際的にも大きな貢献をしている。

再生可能エネルギー（以下、再エネ）にも期待が寄せられている。特に再エネ電力については、住宅や事業所への太陽光発電システムの設置、再エネ由来の電力メニューの契約、再エネ電力証書の購入など、様々な調達手段が積極的に活用されている。

これらの取組は、CO₂排出削減に着実に寄与するものとして、今後も推進されるべきである。一方、省エネや再エネ電力調達だけでは、需要サイドの直接排出が残存し、脱炭素化が実現しない可能性があることも認識する必要がある。

脱炭素手段の1つとしての電化

需要サイドの直接排出を大幅に抑える有力な手段の1つとして期待されるのが「電化」(electrification)である。

例えば、家庭・業務部門では石油ストーブ・ガス給湯器などの燃焼技術からエアコン・エコキュート（自然冷媒ヒートポンプ給湯機）などの電気式ヒートポンプ技術へのシフト、ガスコンロからIH調理器へのシフトなどがある。産業部門では、重油ボイラーから電気式ヒートポンプへのシフト、生産プロセスにおける誘導加熱や抵抗加熱の導入などがある。運輸部門では、内燃機関自動車から電気自動車（electric vehicle, EV）へのシフトが注目を集める。

電化への期待は、わが国の政策の方向性を示すエネルギー基本計画でも示されている。研究知見としても、脱炭素社会を実現するためには電化を加速する必要があることは、様々なエネルギーシステム分析に共通する傾向として示されている。このように期待や脱炭素要請があるにもかかわらず、社会全体としては、省エネや再エネに比べ、電化の取組の機運が高まっていないのが現状である。

電化率の上昇ペースは十分か

電化といっても技術や用途は多様であるため、進展状況は部門によって異なる。2020年度のわが国の最終エネルギー消費（EDMC, 2022）の電化率は、家庭部門50%、業務部門62%、産業部門25%、運輸部門2%となっている。最終エネルギー消費全体に占める電化率は、1990年度の20%から2020年度の29%へと上昇しているものの、上昇幅は30年間で9ポイントにとどまっている。

わが国の電化率が2050年にどの程度になると考えられているかといえば、各種のシナリオ分析（経済産業省, 2021）では33～51%と幅がある。社会経済などの前提を揃えながら複数の研究機関の間で長期シナリオを比較した研究（Sakamoto et al., 2021）によれば、CO₂排出制約が厳しくなるほど電化率は上昇する傾向にあり、当時想定されていた最も厳しい制約である2050年80%削減シナリオでも電化率を37～64%まで引き上げる必要があることが示されている²⁾。

部門間の相違

忘れてならないのは、直接的に電化することが困難な分野の存在である³⁾。一連のシナリオ分析で電化率が100%に近くないのは、主に、産業部門の高温プロセスなどで対応が困難とされていることや、素材産業で原材料として用いられる化石燃料への脱炭素化手段は水素・CCUS（二酸化炭素回収・利用・貯留）等とされるためである。運輸部門においても、船舶・航空分野などで水素・バイオマス・合成燃料等に期待が寄せられている。

他方、それら以外の分野、すなわち、産業部門の低温用途や家庭・業務部門、運輸部門の乗用車用途で

2) 同論文（Sakamoto et al., 2021）と本特集号に所収する論文（坂本, 2023）は、いずれも日本の排出削減シナリオを比較分析した研究であるが、前者はEnergy Modeling Forum 35 Japan Model Intercomparison Project（JMIP）の5つのモデルによる分析結果を比較、後者は世界の研究機関が気候変動に関する政府間パネル（IPCC）に提出したモデル分析結果を比較している。

3) 電化には、ヒートポンプやEVへのシフトのように電力をそのまま用いる「直接電化」と、水の電気分解で生成した水素を用いる等の「間接電化」がある。ここでの説明は、直接電化が困難という意味である。

は、電化を相当程度進める必要があるとする分析が多く、これらの分野では、多くの電気利用技術が既に利用可能である。水素・バイオマス・合成燃料・CCUSなどは最終的な脱炭素の実現において一定の役割があり、研究開発や実証、さらには初期導入に取り組みなければならないが、それらの将来技術だけではなく、需要サイドの直接排出を脱炭素化する手段としての電化に正面から向き合う必要がある。

本総説の構成

需要サイドの直接排出を大幅に脱炭素化するためには、電化に向き合う必要があることを踏まえ、本総説は以下の構成とする。まず、2章では、わが国や欧米において電化が需要サイドの取組としてどのように位置づけられているか、また、電化にどのような便益が期待されているかについて概観する。続いて、3章では、電化のバリアの実態を把握することの重要性を述べた上で、特に電化についてはロックイン問題を考慮して早期にバリアへの対応策を講じていく必要があることを示す。その上で、4章で本特集号の構成と所収した8編の論文等の概要を説明し、5章で結語を述べる。

2. 電化の位置づけと期待される便益

わが国では電化の重要性は指摘されているものの、実際の取組については必ずしも十分に検討されていないことなどを述べる。また、電化を巡る議論が増加している背景を読み解き、脱炭素目標への対応、再エネ導入拡大との相乗効果、技術の進歩や便益の追求などへの期待があることを明らかにする。

2.1. 既往検討における電化の位置づけ

既往検討における電化の位置づけを、日本、米国、欧州の順で概観する。

2.1.1. 日本

政府や自治体の計画文書等において、エネルギー需要サイドの取組として電化に言及される機会が徐々に増えてきている。しかし、実際の取組については必ずしも十分に検討されていない。

第6次エネルギー基本計画

2021年10月に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」では、政府として電化への注目を高めつつあることを読み取れる。

例えば、2050年カーボンニュートラル時代のエネルギー需給構造に関して、「徹底した省エネルギーによるエネルギー消費効率の改善に加え、脱炭素電源により電力部門は脱炭素化され、その脱炭素化された電源により、非電力部門において電化可能な分野は電化される」とした。

2030年に向けた政策対応に関しても、2018年策定の第5次では「徹底した省エネルギー社会の実現」としていた部分を、第6次では「需要サイドの徹底した省エネルギーと供給サイドの脱炭素化を踏まえた電化・水素化等による非化石エネルギーの導入拡大」とした。

「電化」という語の登場回数は、改定により8回から29回へと増えた。

クリーンエネルギー戦略の検討

2021年12月、岸田首相は所信表明演説において、気候変動問題への対応を説明する中で、「社会のあらゆる分野を電化させることが必要」と述べた。また、同演説でクリーンエネルギー戦略の策定を指示し、同月、経済産業省はそのための検討会合を立ち上げ、筆者らの一人も委員として参加することとなった。

2022年5月にとりまとめられた「クリーンエネルギー戦略 中間整理」（経済産業省, 2022）では、エネルギー安全保障の確保に万全を期しながら脱炭素の取組を加速することを確認した上で、経済・社会や産業構造変革の方向性が示された。産業のGX（グリーントランスフォーメーション）の課題整理がされるなど、需要サイドでは産業部門に関する検討が多く、熱利用の高効率化・脱炭素化の政策の方向性の中で、低温熱源の脱炭素化に向けた産業用ヒートポンプの導入加速などについて触れられている。

省エネ法の改正など

こうした方向性に沿った取組の検討も進められている。2022年6月に成立した改正省エネ法では、大規模工場のような特定事業者などに提出が義務付けられている中長期計画書や定期報告書において、非化石エネルギーへの転換についても記載を求められることとなった。

省エネ法改正案の国会議論では、中小企業への働きかけも別途必要との指摘がされていた（中村ほか、2022）。令和4年度補正予算により、中小企業向けの省エネ診断が拡充される。中小企業は脱炭素化や電化の対応が遅れており（向井、2023b）、それらへの支援も求められるようになる。

産業部門以外を見ると、電化、エネルギー転換、非化石化といった観点の動きが本格化しているとは言い難い。例えば、国土交通省が中心となってとりまとめた「脱炭素社会に向けた住宅・建築物における省エネ対策等のあり方・進め方」（国土交通省、2021）の中で焦点があてられたのは省エネ対策の強化と太陽光発電の活用であり、環境省の炭素中立型社会変革委員会がとりまとめた「GXを支える地域・くらしの脱炭素」（環境省、2022b）の中で投資促進対象として強調されているのは再エネ・省エネ・蓄エネである。

地域脱炭素

2022年末時点で45の都道府県と市区町村を含む800以上の自治体が、2050年までに二酸化炭素排出実質ゼロに取り組むことを表明している⁴⁾。環境省は、その実現を目指す上でのモデルとなる脱炭素先行地域の募集・選定を進めている。このような機運の中、電化について言及される頻度は以前と比べれば高まっているが、取組があるとしてもEV関連が中心であり、熱分野が本格的に検討されることはまだ多くないのが実態である。

「東京都環境基本計画」（東京都、2022）は、2050年の脱炭素化に向けて「電化可能な分野での電化に加えて、高温域など電化が困難な分野においては、カーボンニュートラルメタンの活用など新たな技術の開発・実用化が必要」としている。一方、2030年までは「特に電気の脱炭素化によりエネルギーの脱炭素化を推進」することとし、熱の脱炭素化については「引き続き、制度・仕組みのあり方を検討」と述べるにとどめている。

「横浜市地球温暖化対策実行計画（改定原案）」（横浜市、2022）は、2050年に向けた方向性として最大限の省エネ・電化の推進について触れるとともに、「再生可能エネルギー等の導入等」を省エネや電化を含むものと定義し、市や市民はそれに努める責務があるとしている。2020年5月公表の「横浜市再生可能エネルギー活用戦略」（横浜市、2020）では、省エネ・電化・再エネを仮定して2050年のエネルギー消費量等を試算していた。今後は、どのように実行計画や取組に展開させていくかが問われる。

「第六次熊本県環境基本計画（2021～2025年度）」（熊本県、2021）は、2050年ゼロカーボンに向けた戦略として、省エネの推進、エネルギーシフト、電気のCO₂ゼロ化、その他のCO₂の実質ゼロ化の4つを掲げている。また、「くまもとゼロカーボン行動ブック」（熊本県、2022）では、このうちエネルギーシフトについて、「化石燃料の使用を減らし、CO₂排出量の少ない電力等にエネルギーをシフトすることが、ゼロカーボンへの近道」とし、「節約にもつながる電気エネルギーなどへ転換」などと説明されている。このように説明されること自体も現状ではそう多くない。

公共施設

このほか、庁舎等の建築物における燃料を使用する設備については、インフラのロックインがないように、「脱炭素化された電力による電化を進める、電化が困難な設備について使用する燃料をカーボンニュートラルな燃料へ転換することを検討するなど、当該設備の脱炭素化に向けた取組について具体的に検討し、計画的に取り組む」とされている（地球温暖化対策推進本部、2022）。一方、これまでの取組は省エネ対策が中心といえる。

4) 環境省。「地方公共団体における2050年二酸化炭素排出実質ゼロ表明の状況」、アクセス日 2023.1.10.
<https://www.env.go.jp/policy/zerocarbon.html>

2.1.2. 米国

米国では5年ほど前から、電化に関連する報告書が多数公開されている。戦略的電化 (strategic electrification)、便益のある電化 (beneficial electrification)、効率的電化 (efficient electrification) といった表現が多用され、従来のように単に「電化」と表現するだけでは捉えきれない役割にも期待を寄せている。代表的なのは、電化は再エネ拡大にも寄与するという視点であり、需要側で蓄電・蓄熱等の電気利用技術を増やすことは電力システムの柔軟性を高め、変動性電源の利用拡大に資するとされる。

また、そうした動きが省エネを重視する機関や環境対策に積極的な機関、研究者の間で広がっている点や、連邦政府や州政府、自治体の中で、熱分野の脱炭素化を含めて取組に着手する動きが出ている点も特徴的である。

連邦政府

連邦レベルでは、バイデン大統領が就任した2021年1月から2022年末までの約2年間に、ホワイトハウスが公表したファクトシートのうち約100件が電化に触れている。

2021年11月に成立したインフラ投資雇用法では、EV充電設備への投資などが盛り込まれた。

2022年8月に成立したインフレ抑制法の中では、建物分野でのエネルギー・環境投資にも多くの予算が割り当てられ (上野, 2022)、同法の下で、低・中所得世帯向けの電化補助プログラム (high-efficiency electric home rebate) の実施に向けた準備⁵⁾なども進められている。

公共施設についても、2030年までに既築建物の3割で省エネと電化を進める連邦建物性能基準を発表するとともに (The White House, 2022a)、電化と排出削減のステップとして、連邦建物の新築・大規模改修時に2003年比で9割の排出削減をする規則の検討に着手した (U.S. DOE, 2022a)。

研究開発の面では、2050年の気候目標達成に向け、クリーンエネルギーのイノベーションを加速するための5つの優先事項を特定し、このうち2つは「効率的な建物冷暖房」と「ネットゼロ電力網と電化」としている (The White House, 2022b)。産業脱炭素化ロードマップ (U.S. DOE, 2022b) では、①省エネ、②電化、③低炭素燃料・原料・エネルギー源、④CCUSの4つの柱を掲げている。

このように、連邦政府は電化の位置づけを明確にしながら、具体的な取組に着手している。

州政府や自治体

連邦政府に先駆けて2019年頃から、野心的な排出削減目標を掲げた州政府や自治体の中に、熱分野の脱炭素化のために、建物の新築時に燃焼機器の設置を禁止する動きや、燃焼機器から電気式暖房・給湯機器へ代替する際の導入補助額を優遇するといった動きが見られるようになった (西尾・中野, 2020)。運輸部門でも独自のEV普及支援策を講じる例がある (向井, 2022)。それぞれ、本特集号の中でも触れる (中野・西尾, 2023 ; 向井, 2023a)。

国立研究所

National Renewable Energy Laboratoryは複数年にわたるプロジェクトElectrification Futures Studyを実施し、2017～2021年にかけて6つの報告書を公表した⁶⁾。具体的には、①需要側の電気利用技術のコストや効率の見直し、②需要サイドの電化シナリオ、③時刻別パターンなど電力需要の詳細分析、④電力システム分析の方法論、⑤発送電など供給サイドのシナリオ、⑥電化シナリオにおける電力システムについて順次検討してきた。

Lawrence Berkeley National Laboratoryは、家庭・業務・産業部門における電化の便益とバリア障壁に関する報告書 (Deason et al., 2018) や、産業用ヒートポンプの適用用途やバリアに焦点を当てた報告書 (Jibran et al., 2022) などを公表している。

5) U.S. Department of Energy. “High-Efficiency Electric Home Rebate Program,” アクセス日 2023.1.10.
<https://energycommunities.gov/funding-opportunity/high-efficiency-electric-home-rebate-program/>

6) National Renewable Energy Laboratory. “Electrification Futures Study,” アクセス日 2023.1.10.
<https://www.nrel.gov/analysis/electrification-futures.html>

環境対策や省エネ対策に積極的な非営利団体

環境対策に積極的な非営利団体として知られるNatural Resources Defense CouncilやRMI、Sierra Clubは共通して、脱炭素のためには供給サイドのみならず需要サイドの電化に直ちに着手すべきとの見地から、連邦政府や州政府、自治体への政策提言を積極的に行っている。

省エネ政策を提言する非営利の研究機関として知られるAmerican Council for an Energy-Efficient Economy（以下、ACEEE）は、2018年に住宅の石油・プロパン機器をヒートポンプ技術に代替することによる効果や費用に関する分析結果を発表して以降、2022年末までの5年間に民生・運輸・産業部門の電化に関連した研究レポートを15件公表している⁷⁾。

ACEEEが主催する夏の省エネ研究会では、米国の研究者や政策担当者、政策評価者などから多くの発表がなされているが、産業が対象の2021年は約3割、建物が対象の2022年は約5割の予稿で「電化」の語が含まれるようになっており⁸⁾、省エネと電化が不可分なものになりつつあることを読み取れる。

2.1.3. 欧州

欧州連合（EU）

欧州委員会は2020年に発表したエネルギーシステム統合戦略（EC, 2020）の中で、クリーンエネルギー移行を加速させるための行動計画を提示した。6つの柱として、①省エネ優先を中核とする、より循環型のエネルギーシステム、②再エネ主力の電力システムを基盤とするエネルギー需要の電化の加速、③脱炭素化が困難な部門のための水素を含む再生可能で低炭素な燃料の促進、④脱炭素化や分散型資源へのエネルギー市場の適合、⑤より統合されたエネルギーインフラ、⑥デジタル化されたエネルギーシステムと支援的なイノベーション枠組みを掲げている。

2022年5月には、ロシア産化石燃料への依存を減らしながら気候変動対策を強化するための計画であるREPowerEU（EC, 2022）を発表し、省エネ対策の強化、エネルギー供給の多様化、再エネ普及の加速を掲げた。同計画は2030年の再エネ目標の引き上げも提案し、そのためにはヒートポンプの普及率を倍にする必要などがあるとしている。

このことからわかるように、欧州ではヒートポンプの熱源として用いる大気熱などを再エネ量として算定し、エネルギー自給率にも反映することで位置づけを明確にするだけでなく、具体的な取組につなげている（甲斐田, 2022）。

各国の動き

英国は2021年、住宅・建築物を脱炭素化するためのアプローチをまとめた熱・建物戦略を公表し、ヒートポンプ補助を強化すること、2035年からガスボイラーの設置をフェーズアウトさせることを目指すこと、水素については2026年に熱源としての役割に関する戦略的決定をすることなどを示した（UK Government, 2021）。2025年に導入予定のFuture Homes Standardの検討では、新築住宅は直接排出源を極力排して「ゼロカーボン対応」させておくことの重要性が強調されている。こうした動きの背景には、政府に対して独立した助言を行う機関である気候変動委員会（CCC）が、住宅の実態が温暖化対策の長期戦略に合致していないと繰り返し指摘してきたことがある。

ドイツは建物エネルギー法により、2026年以降、石油ボイラーの設置を原則禁止する。政策全体としては電化を推奨するというよりも、需要サイドの中でもこれまで取組が不十分であった用途への対策に乗り出したことが特徴的である。具体的には、燃料排出権取引法（BEHG）により、熱・輸送分野の対策を強化するための国内排出量取引制度（nEHS）が創設された。対象はガソリン・ディーゼル・燃料油・天然ガスなど燃料流通業者であり、2021年に開始され、当初5年は固定価格であるため、実質的には炭素税といえる。

7) “by Type”で“Research Report”を選択、“Keywords”に“electrification”を入力してフィルタ検索した結果より。

American Council for an Energy-Efficient Economy. “Publications & Resources,” アクセス日 2023.1.10. <https://www.aceee.org/publications>

8) 予稿集を“electrification”でキーワード検索した結果より（参考文献なども含む）。具体的には Summer Study on Energy Efficiency in Industry 2021 では50件中17件（34%）、Summer Study on Energy Efficiency in Building 2022 では407件中192件（47%）。

オランダは、既築建物の対策として、約350ある自治体の役割を重視している。各自治体に対して、建物の脱炭素化に取り組む具体的な計画である「熱移行計画」を2021年末までに提出することを求めるなど、近隣地域やステークホルダーと協働しながら、熱分野の対策を進めるよう促している（中野, 2022）。各自治体は、地域や地区の特性を考慮しながら複数の手段の経済性を比較検討するなどして、熱移行に向き合っている。

2.2. 電化を巡る議論の増加の背景

欧米などで電化を巡る議論が近年増加しているのは、それが脱炭素目標を達成する上で中心的手段であることに加えて、再エネの導入拡大と親和的であることや、電気利用技術の進歩やそれに伴うエネルギー面以外の便益の拡大があるためである。

2.2.1. 脱炭素目標への対応

脱炭素目標への対応は、電化への期待が高まっている大きな要因である。欧米では、温暖化対策に積極的な政府や自治体ほど、2050年の脱炭素の実現可能性などを精査する段階で、供給サイドの脱炭素化と需要サイドの省エネのみでは目標達成できないリスクがあり、電化の早期着手も不可欠との認識を持つに至っている。代表例として、米国のカリフォルニア州や北東部の州、英国やオランダなどが挙げられる。

電源の脱炭素化を待つべきか

電化を進める前に電源の脱炭素化を待つべきではないかとの指摘がされることはあるが、電化を先送りするとCO₂削減機会を逸しかねない。

第1に、電化は現状においてもCO₂削減に寄与することが多い。ヒートポンプを例にとると、適用用途にもよるが、機器自体は1の電力投入に対して3~7程度の熱エネルギーを得ることができる。そのため、現状で火力発電の依存度が高くなっている日本の電源構成や送配電ロスを考慮してもなお、直接燃焼機器よりもCO₂排出量を削減することができることが多い（例えば産業用については甲斐田（2020））。

第2に、エネルギー設備を電化しておくことで、電源の脱炭素時にゼロカーボンとなる。いわば電化は建物や設備をゼロカーボンレディにする手段であるともいえる。国際エネルギー機関は、「エネルギー効率が高いことに加えて、再エネを直接利用する、もしくは、2050年までに完全に脱炭素化されることになるエネルギー供給（例えば電力または地域熱供給）を利用するゼロカーボンレディ建物」の普及に向けて、規制強化などが必要としている（IEA, 2022a）。

第3に、技術のロックイン（固定化）問題に伴う時間的制約に対する危機感がある。詳しくは3.2節で後述するが、エネルギー設備の寿命は往々にして長いこと、電化できる機会はそう多くなく、その際も適切な技術選択ができなければ脱炭素化に向けて必要な対策は遅延するため、取組への着手を先送りできないとの認識がある。

第4に、電化には電源の脱炭素化を支える側面もある。これについては2.2.2項で後述する。

電化以外の手段もあるのではないか

多くのシナリオ分析において、直接的に電化することが困難な分野では、水素・CCUS・バイオマス等が一定程度の役割を果たすが（坂本, 2023）、これら以外の手段として、合成燃料もある。合成燃料の利用を社会全体でカーボンニュートラルなものにするためには、①使用後のCO₂回収、②大気から回収したCO₂を利用した燃料の合成、③ネガティブエミッション技術を用いた排出量の相殺などを用いて炭素循環を確立することが必要になる（吉岡ほか, 2021）。

CO₂と水素からメタンを合成するメタネーションには、既存インフラ・設備を有効活用できるメリットがある。上述の社会全体としての炭素循環の確立に加えて、安価な水素の確保も重要な前提になるため、どの分野でどの程度利用されるかはエネルギーシステム全体の複雑な相互作用の中で決まると考えられる。Blanco et al. (2018) は、欧州におけるPower-to-Methane（電力を用いたメタン製造）の貢献可能性をエネルギーシステムモデルで評価し、その利用が進むためには、合成効率が高くなるといった技術要因もさることながら、CO₂貯留が利用できない・変動性再エネ電力の普及が進むといった他のシステム要因も大きく

作用することを指摘している⁹⁾。Sheikh et al. (2019) は、米国・カリフォルニア州の脱炭素戦略を比較検討する中で、合成ガスや水素について、家庭部門の熱分野では再エネ電力をヒートポンプで直接利用するのと比べてシステム効率やコストに課題があるとし、脱炭素化がより困難な分野で利用する方がその価値を高められると指摘している。

2.2.2. 再生可能エネルギーの導入拡大

再エネ電力と電化の親和性

電源の脱炭素化の中でも、再エネ拡大に係る背景として、主に3点を指摘できる。

第1に、供給される電力のCO₂排出原単位が小さくなるほど、電化の優位性は向上する。供給サイドと一体的な取組を進めていくためにも、いずれ原単位が大きく低下する可能性を考慮する必要があり、現在の原単位に基づく分析では、電気利用技術の将来価値を過小評価するおそれがある。付言すると、再エネ価格が十分に低くなるという仮定を置くことは、電気利用技術の費用対効果が向上するとみなすことに等しい。

第2に、需要サイドにおける蓄電・蓄熱等の電気利用技術の普及拡大は、電力システムのflexibility（柔軟性）を高め、変動性電源の利用拡大に寄与することが指摘されている。例えば、EPRI (2018) は「乗用車、貨物、ヒートポンプやそれによる給湯、その他の多くの効率的な電化技術は、電力システムの柔軟性を高める可能性があり、PV・風力の発電比率が伸びるほど、その性質の価値は高まる」と指摘する。NEEP (2017) は、省エネと柔軟性向上を同時達成できる領域の熱源転換を戦略的電化と捉えている。カリフォルニア州を対象とするモデル分析によれば、電化を伴わない供給脱炭素化はCO₂削減への貢献が限定的だが、電化を伴うことで再エネの統合が進む (Ebrahimi et al., 2018)。

第3に、再エネ拡大により浮上しているデススパイラル問題を緩和する意味でも、系統需要増へのニーズが高まっている (Weiss et al., 2017)。これはエネルギーの浪費を肯定するものではなく、効率的な電化を通じて一定の電力量を確保し続けることで、電力インフラの固定費を健全に回収できるようになり、再エネ拡大の動きと協調的になるという考えであり、より詳しく述べると次のとおりである。

好循環を実現できるか

電化は電力の供給サイドからみても、これまで以上に重要な意味を持つようになる。

需要サイドの直接排出が多く残存したままでは、供給サイドで対応しようにも排出制約が極めて厳しくなるため、CO₂限界削減費用の高い電源を利用することで電力単価の上昇につながる可能性がある。さらに、電化が進まない中では、人口減少などの影響も相まって電力需要は落ち込んでいくことが予想され、送配電システムを支えるのに必要な固定費の回収のために、電力単価の上昇圧力が一層高まる。これらにより、さらに電化の停滞につながるといった悪循環に陥ることが予想される。

一方、電化が進捗すれば、需要サイドの直接排出が抑制され、電力需要もある程度確保されることにより、供給サイドからすれば電力量あたりの排出係数でみた制約が幾分緩和されるため、電源構成の取りうるオプションが増える。送配電システムの固定費も回収しやすくなり、安定供給と再エネ普及を両立しうる環境となる。このようにして電力単価を抑制できれば電化もしやすくなり、社会全体で脱炭素化の好循環が期待できる。

2.2.3. 技術の進歩や便益の拡大

本総説のここまでの部分や本特集号の所収論文等の多くでは、脱炭素の視点から電化について考えるが、

9) 同論文は、55のシナリオを分析した上で、主要8シナリオを抽出して詳細に分析している。Power-to-Methaneの貢献が大きかったのは“Optimistic”シナリオであり、その条件は、CO₂削減率が95%と高い、CO₂貯留が利用できない、メタン化のイニシャルコストが低い、太陽光・風力のポテンシャルが高いことに加えて、バイオマスのポテンシャルが低い、ガス価格が高い、電力のネットワークコストが高い、Power-to-Methaneの効率が高い、Power-to-Liquid（電力を用いた液体燃料製造）の効率が低い、SOEC（固体酸化物型電解セル）が利用できる、船舶の液化メタンガス効率が高いことなどである。なお、“Optimistic”シナリオにおいても、家庭部門の熱需要は主に電力で賄われたとしている。

電気利用技術や情報通信技術の継続的な進歩や、それらがもたらす便益の拡大は、利用者や社会全体の受容性を高める要因となる。

技術の進歩

ヒートポンプ技術については、米国では寒冷地仕様のダクトレスタイプの普及が始まり、着実な技術進歩により、特に北東部州で費用効果的なオプションになってきたことなどが導入機運を高めてきた。欧州においても、ロシアによるウクライナ侵略を背景に、ロシア産化石燃料からの脱却も求められるなど、普及支援策が強化されているが、冷媒の開発をはじめ、もともと関心が高まっている状況にあった。

近年の顕著な変化は、蓄電池や運転制御システムを含むEV関連の技術水準向上や、情報通信技術を活かしたライドシェアに代表されるサービスモデルのイノベーションにも多く見られる。シェアリングにより車の稼働率が上がることや、V2H (vehicle to home) やV2G (vehicle to grid) による付加価値の向上は、初期コストの高さというEVの欠点を補う可能性を秘める。

省エネ対策のエネルギー面以外の便益 (non-energy benefits, NEBs)

省エネ対策はエネルギーコストの削減をもたらすが、エネルギー面以外の便益 (non-energy benefits, NEBs) をもたらすことも多い。わが国でも、健康維持がもたらすNEBsを考慮することで、高気密・高断熱住宅の投資回収年数が短くなるという研究知見 (伊香賀ほか, 2011) が、省エネ政策を議論する際に引用されることが多い。

これまでも国内外の多くの研究で、省エネ対策の意義をNEBsも含めて多面的に評価していくことで、需要サイドの技術選択に資する知見を提供できると指摘されている (西尾・大藤, 2018a)。

中でもIEA (2015) は、300名以上の専門家の協力を得て、省エネ対策には、①エネルギーシステムの安全保障の向上、②経済の成長、③社会の発展、④環境の持続可能性、⑤繁栄の促進の5領域にまたがる14の便益があると整理した上で、省エネ政策に多重便益 (multiple benefits) アプローチを適用することで、省エネポテンシャルへの理解が深まると結論づけている。

産業電化の生産性便益

省エネ対策と同様に、電化にもNEBsが期待できる。例えば、Laaguidi et al. (2021) は、食品加工における赤外線加熱と鋳造工程における電気誘導炉活用のNEBsを考慮に入れることで、ライフサイクルコストの改善と採用確率の向上が期待できると指摘している。

わが国で電化のNEBsに関する定量的分析はあまり行われていないが、定性的な指摘は多い。例えば、食品製造工場の温水供給設備をヒートポンプ化した事例では、CO₂が69%減ったことに加えて、蒸気漏れなどのメンテナンス対応や蒸気供給申請対応の不要化、送水圧力の安定化、温水供給までの待ち時間の短縮などにより生産性が向上した (川口・藤本, 2019)。向井 (2020) は、電気加熱の導入による省エネ効果や生産改善効果の評価事例を収集し、生産工程・運用保守・作業環境の生産性便益を技術別に整理している。

電化を通じた多面的な便益の追求

もとをたどれば、電化が受け入れられてきた根源的理由は便益の追求である。1879年にエジソンが発明した白熱電球や、戦後日本で電化製品の三種の神器といわれた白黒テレビ・冷蔵庫・洗濯機に象徴されるように、電気利用技術はその高い制御性を活かして、利便性・安全性・快適性・生産性・効率性・環境性などを向上させ、豊かなライフスタイルをもたらしてきた。

ヒートポンプ技術が冷蔵庫や空調、給湯、洗濯乾燥機、工場の加熱・乾燥工程などに、また、蓄電技術が携帯・小型電気機器、EV用、定置用などに使われているように、電気利用技術の応用範囲は広く、暮らしだけでなく製造業にも関わっており、今後も継続的な技術進歩が望まれる。

このように、電化は需要サイドのエネルギー転換の一形態にとどまらない役割を担っている。省エネ、省コスト、CO₂削減といった観点だけでなく、多面的な便益を追求するアプローチとして捉えていくことが重要になる。

3. 電化のバリアとその対応策

電化は需要サイドの脱炭素化の中心的手段であり、多面的な便益も追求できる。一方、これまでの電化率の上昇ペースは十分とはいえ、期待だけでは必要な水準には到達しない。電化を進めるためには、そのバリア（阻害要因）の実態を把握することが重要であり、エネルギー機器は一度導入されるとロックイン（固定化）される傾向があることも念頭に、早めにバリアへの対応策を講じていく必要がある。

3.1. バリアの実態把握の重要性

促進策を考える上で、電化と省エネは共通する部分が多い。どちらも期待どおりには進まないことが多く、検討の出発点としてエネルギー需要家などの意識や行動を分析し、その理由を明らかにすることが必要である。省エネバリアに着目する省エネ政策理論（若林・木村,2009）は、電化について議論する上でも有用な基盤を与える。

省エネギャップと省エネバリア

省エネやCO₂削減の「ポテンシャル」にはいくつかのレベルがある。工学的視点では、コストを考慮せず技術的に最大限導入可能な量（技術ポテンシャル）を取り上げることが多い。これに対して、数年で元が取れるといった条件を加味した量（経済ポテンシャル）も議論されることが多い。しかし、経済ポテンシャルといえども、その実現を保証するものではない。なりゆきにまかせると、実際に市場で実現する量（市場ポテンシャル）は小さなものになってしまう。

この経済ポテンシャルと市場ポテンシャルの乖離は「省エネギャップ」と呼ばれ、そのギャップを生み出す要因は「省エネバリア」と呼ばれている。省エネバリアの概念整理の代表的なものとして、情報不足、限定合理性、隠れた費用、資金調達力、リスク、動機の分断といった要因が指摘されている（Sorrell et al., 2004）。

本来であれば実施されるはずの省エネ対策が、バリアを乗り越えられないがゆえに手つかずになってしまうことは、その対策を行わない個人や企業の損失であるのみならず、エネルギー安全保障や気候変動対策の面でのマイナスでもあるという意味で、社会的な損失である。経済合理的な対策であれば順調に実施されると安易に期待するのではなく、そのポテンシャルの活用に向けて、省エネバリアは何かを把握し、そのバリアを解消するための対策を講じることが不可欠である。

このことは、電化についてもあてはまる。

電化バリアの特徴

理論的基盤は共通であっても、電化バリアには省エネバリアと若干異なる特徴がある。

省エネ対策には、省エネのための設定変更などの運用改善対策と、機器の入れ替えなどの設備投資対策がある。居間にエアコンと灯油ストーブの両方があるようなケースは別として、電化の多くは設備投資対策である。そのため、資金調達力や動機の分断といった投資関連のバリアの影響を特に受けやすい。エネルギーの日頃の使い方であればバリアを解消する機会はそれなりに存在するが、エネルギー設備の投資機会は10年に一度あるかないかである。

加えて、設備投資対策の中でも、使用するエネルギーを変えずにエネルギー効率を高めるシンプルな省エネ更新と比べると、住宅や工場に一度設置されたエネルギー設備を電化することは、それまでのエネルギー利用のスタイルや生産プロセスを変更することも必要になるため、必ずしも容易ではなく、次に述べるようにロックイン（固定化）問題も生じやすい。このように、電化バリアの特徴に注目して実態を把握していくことが重要である。

3.2. 需要サイドにおけるロックイン問題

ある製品やサービスが何らかのきっかけで市場の優位性を獲得すると、その優位性が、代替製品・サービスが利用可能になった後でも、長期にわたって固定化されることがある。こうした現象を「ロックイン」

と呼ぶ。例えば、1882年発売のタイプライターに採用されたQWERTY配列は、より入力効率が高いとされる他の配列に置き換えることなく、今日のPCキーボードに受け継がれている。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第6次報告書（AR6）第3作業部会報告書では、ロックインという言葉が200回以上登場し、その対象範囲はエネルギー供給インフラから民生、運輸、農林業まで多岐にわたる。

エネルギー利用機器のロックイン

家庭用給湯機器もロックインしやすい技術である（西尾・大藤, 2018b）。新築時の採用シェアをみると、電化率は戸建て住宅で高まっている一方で、集合住宅では伸び悩んでいる。また、既築集合住宅における交換シェアを見ると電化があまり進んでおらず、交換前後の機器の比較からは一度導入された設備をエネルギー転換することは容易でないことがわかる。

既築住宅の給湯電化が停滞している背景をひもとくと、第1に技術的側面として、設置スペースや重量、給排水配管、電源容量確保などの課題がある。第2に、組織的側面として、エネルギー事業者や機器販売者による顧客囲い込み戦略が成功した結果として、現状の構造が固定化していることに加えて、政策がそうした市場・業界構造に配慮しながら発展してきたことがある。その結果、漸進的改善はある一方で、CO₂大幅削減に必要とされる非連続な変革が妨げられるおそれがある。第3に行動的側面として、利用者は故障や不具合が出てからその場しのぎの交換をしがちであり、販売者も同じタイプの機器を提案することが多い。

したがって、技術代替を進めていく上で、給湯機器寿命の十余年ごとに訪れる機会に多くを期待するのではなく、建物寿命の数十年のサイクルを保守的に想定する方が現実的な見方であると考えられる。今後建築される住宅の多くは2050年にも利用され続け、新築時の技術選択が将来のCO₂排出に与える影響は大きいという認識に立ち、温暖化政策を立案する必要がある。

新築時点で対策を講じておくことの費用対効果は、後から改修するよりもはるかに優れている。ロックイン問題を考慮に入れると、新築時に電化をする、或いは、将来電化しやすいような準備をしておく必要がある。後者を「電化レディ」と呼び、中でも充電インフラを整備することを「EVレディ」と呼び、新築時の要件とする例が出てきている（中野・西尾, 2023；向井, 2023a）。

工場でも同様に、熱源設備は一度設置されると配管などの既設ユーティリティーとも絡みながらロックインしやすい（戸田, 2019）。

3.3. バリアへの対応

バリアが存在する中で市場だけに委ねていると、合理的な対策が取られないギャップが生じ、そのギャップはロックインするおそれがある。これを解消するには政策介入などによる対応が必要となる。

バリアに応じた政策手法の適用

省エネバリアに着目する省エネ政策理論で示されているように、制限を含む強い動機づけが必要であれば規制的手法、費用面の問題を緩和しようとするなら経済的手法、情報不足などが問題であれば情報的手法といったように、バリアの性質や影響度に応じて取るべき手法は異なる。また、同じ技術でも複数のバリアを取り除く必要がある場合や、セグメントによって支配的なバリアが異なる場合があるため、複数の手法を組み合わせることも多い。

本特集号では、民生部門（中野・西尾, 2023）と運輸部門（向井, 2023a）については欧米の取組を手法別に整理し、産業部門（甲斐田, 2023）については技術開発と関連づけた論考をしているので、詳細は各稿を参照されたい。

個別政策手法の高度化

脱炭素に向けて目指すべきCO₂削減の水準は引き上げられる一方で、予算などのリソースは限られているため、手法の細部においても、従来の省エネ取組よりも難しい判断と高度な設計が求められる。

一例として、米国カリフォルニア州が2021年に開始したTECH（Technology and Equipment for Clean Heating）イニシアチブでは、補助の高度化に向けて次のような要素が取り入れられている。

第1に、支援対象技術の選定にあたっては、省エネ性能だけではなく、CO₂削減などの長期的な目標との整合性も考慮する。TECHは、クリーン熱を謳っているように技術中立的であり、その上で、最良の利用可能技術はヒートポンプであるという判断のもと、既築住宅の電化を重点的に支援している。第2に、インセンティブの受給者は、技術採用プロセスにおいて影響力のある主体とする。従来の取組では商流の下流（downstream）にいるエンドユーザーにインセンティブを直接付与するのが一般的であったが、中流（midstream）にいる販売・設置業者の行動も住設機器の採用を左右しているという現状認識に基づき、それら業者に取り扱い実績に応じたインセンティブを付与することになっている。このようなアプローチは中流プログラムと呼ばれ、連邦政府も市場変革を促す費用対効果の高い手法として期待を寄せている¹⁰⁾。第3に、便益の一定割合は低所得世帯にもたらされるようにすることである。低所得世帯は光熱費の負担感が大きく、対策のために投資する経済的余裕もない実態を踏まえ、格差の拡大を防ぐために政策対応するものである。連邦政府が実施準備を進めている低・中所得世帯への電化補助プログラムも同じ考えに基づいている。第4に、評価のためのプロセスを組み込み、そのための予算もあらかじめ確保されていることである。実際の政策の効果や課題を明らかにし、改善につなげていくことが肝要である。

エネルギーにかかる負担のリバランシング

電化バリアの解消に向けて、個別取組もさることながら、政策全体としての対応を要するものもある。

主要テーマの1つはエネルギーにかかる負担のリバランシングである。再エネ電力を支えるための負担が電気料金に偏り続けると、たとえ電力をクリーンなものにしても需要サイドの電化のバリアになりかねない。再エネ普及を今後も支えていくにあたり、非化石化を進めることは脱炭素、さらにはエネルギー安全保障面で社会全体に裨益するという大局的な見地から、誰がどのように負担するかということは幅広く見直すべき時期に来ている。

欧州委員会はエネルギーシステム統合戦略（EC, 2020）の中で、電力に適用される税や賦課金が相対的に高いことがクリーンエネルギー移行のバリアになっていることを指摘し、国際エネルギー機関もヒートポンプの普及バリアとして指摘している（IEA, 2022b）。

この課題と対応オプションはRosenow et al. (2023) に詳しいが、具体的な動きとして、①英国は熱・建物戦略の中で、エネルギー価格のリバランシングの検討に着手する方針を提示、②ドイツが欧州連合域内排出量取引制度（EU-ETS）や燃料流通業者を対象とする国内排出量取引制度の収入の一部も充当して、2022年7月に再エネ賦課金を廃止、③上述のカリフォルニア州TECHイニシアチブの原資は排出量オークション収入であり、ガス需要家の費用負担のもとで電化支援、といったものがある。

わが国では今後、成長志向型カーボンプライシング構想に基づき、石油石炭税と再エネ賦課金の減少する範囲で炭素賦課金と排出量取引の有償オークションを導入する予定だが、その際に負担のリバランシングを図らなければ、需要サイドでの化石燃料利用のロックインを招くおそれがある。

技術による対応

電気利用技術のNEBsを高めていくことや、電力負荷の柔軟性を高めて需要家のコスト削減や電力系統に貢献することにより、電気利用技術の採用率を高めていくことも重要である。そのためには、技術開発・実証などを通じて、データ活用やデジタル化、エネルギーマネジメントの高度化、サービスモデルの構築などを支援していく必要がある。例えばエネルギーマネジメントは、従来は見える化機能の有効活用に実質的に留まるものが多かったが、センサデータやIoT機器なども増え、予測・学習技術や運用手法の進歩もある中で、それぞれの機器や建物、工場などで電力需給の状況にあわせて制御を高度化していくなど、改善の余地は大きく残されている。そうした技術は自然災害時などにおける自給自足性を高めることにもつながり、電化のバリアの1つであるレジリエンスへの不安を解消していく可能性も秘める。

10) U.S. Department of Energy/Environmental Protection Agency. “Distributor-Focused Midstream Programs.” アクセス日 2023.1.10.
https://www.energystar.gov/products/retailers/midstream_programs

4. 本特集号の構成と所収論文等の概要

本特集号には全8編の論文等を所収する。それぞれは独立しており、用いる研究手法も異なるので、関心にあわせて読んでいただくのでも構わないが、相互の関連性を意識しながら全体を読むことで、より深い理解が得られる。特集号の構成と所収論文等の概要は以下のとおりである。

第1部 部門横断

第1部では、部門横断的な分析に関する1編の論文（坂本, 2023）を所収する。ここでいう部門横断とは、第2～4部で取り上げる3つのエネルギー需要部門にまたがるものであり、付け加えるならば、供給部門を含むエネルギーシステム全体との関連で電化の位置づけを把握することができる。同論文は、世界中の研究機関が行った多数のモデル分析結果を鳥瞰した集合知によって、わが国のエネルギーシステム転換の輪郭を浮かび上がらせようとするものである。特に、2050年のネットゼロ排出実現時のデータセットを読み解くことで、結果に多様性はあるものの、電化への期待が高いという共通した傾向があることなどが明らかとなる。

第2部 民生部門

第2部は民生（家庭・業務）部門を対象とし、4編の論文で構成されている。

1つ目の山田・西尾（2023）は、約8千件の統計個票データを活用したモデル分析により、複数のシナリオ間で2050年にかけての給湯機器のシェア変化やCO₂排出量、費用を比較する。電化を進めることで経済性を重視しながらCO₂削減を相当程度進められることや、CO₂排出量を大幅削減するためには、例えば設備がロックインしがちな集合住宅では、できるだけ早期に新築時からの対策を強化する必要があることなどを明らかにする。

2つ目の西尾・山田（2023）は、給湯機器の利用者ではなく、その選定に関与する立場にある関係者30名へのインタビュー調査を通じて、給湯機器の省エネ・温暖化対策のバリアの実態にアプローチする。わが国がカーボンニュートラルを目指していることは認知しながらも、その対応を自分ごととして受け止めている人は少ないことなどを明らかにする。

以上の2編は、家庭部門に起因するCO₂排出量の2割を占める給湯機器を共通のテーマとしている。前者は将来にかけての機器採用戦略を経済性も考慮に入れて定量的に分析し、後者はその実現に向けて乗り越えなければならないバリアを定性的に分析するものであり、対を成している。

次に、バリアへの対応についてである。これには技術的なものと政策的なものがあり、続く2編はそれぞれの例にあたる。

3つ目の中野（2023）は、新築時の省エネ対策の目玉とされるZEH（net zero energy house）を取り上げ、レジリエンスの観点からアンケートデータの分析を試みている。分析対象はZEHであるが、ZEHは電化住宅比率が高い。電化住宅の選択をためらう理由として停電に対する不安をあげる人は多いが、PVや蓄電池などの技術はそうした不安を取り除く可能性を秘める。

4つ目の中野・西尾（2023）は、欧米における建物脱炭素取組の先進事例とその示唆を述べる。ここでいう建物脱炭素とは、家庭・業務部門のCO₂排出量を大幅削減することであり、バリアを克服するための規制・経済・情報的手法の最新動向を追う。わが国では例のない取組ばかりであり、熱需要や建物・設備の特性、制度環境などに違いはあるが、需要サイドの脱炭素への向き合い方については示唆がある。

第3部 運輸部門

第3部では運輸部門を取り上げ、1編の研究ノート（向井, 2023a）を所収し、欧米の自治体による運輸脱炭素取組の先進事例とその示唆を述べる。既刊の当所研究報告書の概要を紹介した上で、わが国の地域脱炭素の最新動向なども踏まえた考察を加える。

第2部最後の建物脱炭素取組と同様に、規制・経済・情報的手法のそれぞれについて述べるものである。そのため、この2編は連報として読むことができ、建物・運輸という切り口を変えることで脱炭素化のため

の取組を重層的に理解することができるだろう。

第4部 産業部門

第4部は産業部門を対象とし、1編の論文と1編の研究ノートで構成される。

向井 (2023b) は、工場のエネルギー管理者など約900件へのアンケート調査により、電化のバリアを分析する。中小工場で脱炭素や電化の取組の検討が遅れていることや、電気による熱供給設備への認知不足を確認した上で、電気利用設備の導入が難しい理由として、設備費用の高さや追加導入場所がないことなどを示し、今後取り組むべき課題を整理する。同論文では、バリアの1つとしてエンジニア人材の不足も指摘している。

甲斐田 (2023) は、電化技術のうち産業用ヒートポンプに着目し、社会実装の課題と対応策を考察し、克服すべき課題として、技術の適合性、経済性、信頼性、導入検討を担う人材の不足を指摘する。そして、バリアを克服していくために、技術開発にとどまらず、普及に向けた取組を強化するという道筋を提示する。

5. おわりに

本総説では、脱炭素化のために電化にどう向き合うかを論じてきた。

電化は、需要サイドの直接排出を大幅に減らすための中心的手段であるだけでなく、再エネ導入との相乗効果がある、継続的な技術進歩を見込むことができる、社会経済に多面的な便益をもたらすといった特徴を有する。わが国では電化の重要性は指摘されているものの、実際の取組が必ずしも十分に検討されていないことは課題である。

電化の適用可能性は分野ごとに異なり、それぞれ課題を踏まえながら詳細に検討する必要があるが、ここで提起したい共通の視点は次の4つに集約できる。

- 2050年カーボンニュートラルの実現のためには、エネルギーの供給サイドだけでなく、需要サイドの各分野においても、脱炭素化に向けた道筋を示すべき。
- 省エネや再エネ電力調達だけでなく、電化にも向き合い、その位置づけや具体的な取組のあり方について議論を深めていくべき。
- 理想的な将来像やポテンシャルへの期待を示すだけでなく、現実のバリアを把握した上で、バリアの解消策を講じていくべき。
- 電化はエネルギー転換の一形態にとどまらないものであり、多面的な便益を追求するアプローチとして捉えていくべき。

わが国のエネルギー政策の基本方針は、安全性 (Safety) を大前提とし、エネルギー安定供給 (Energy Security)、経済効率性 (Economic Efficiency)、環境適合 (Environment) を同時達成するS+3Eである。本特集号では脱炭素の観点から電化を取り上げるが、電化についても環境性に傾倒してバランスを欠くようなことはあってはならない。

脱炭素化に貢献しながら、非化石化を進めることでエネルギー自給率を高め、化石燃料の輸入に国富を流出させるのではなく設備・インフラ投資に充てること、それにより、個人や企業のエネルギー関連支払額を削減するだけでなく、生産性向上による競争力強化や経済成長への寄与、健康で便利で快適なライフスタイルを実現していくことが、電化のあるべき姿である。

参考文献

- Blanco, H., et al. (2018). "Potential of Power-to-methane in the EU Energy Transition to a Low Carbon System using Cost Optimization," *Applied Energy*, 232, pp.323–340, 2018.12.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.027>
- Deason, J., et al. (2018). "Electrification of Buildings and Industry in the United States: Drivers, Barriers, Prospects, and Policy

Approaches,” LBNL-2001133.
<https://emp.lbl.gov/publications/electrification-buildings-and>

Ebrahimi, S. et al. (2018). “California End-use Electrification Impacts on Carbon Neutrality and Clean Air,” *Applied Energy*, 213, pp.435-449, 2018.3.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.050>

EPRI (2018). “U.S. National Electrification Assessment,” 2018.4.
<https://www.epri.com/research/products/000000003002013582>

EDMC (2022). 「エネルギー・経済統計要覧 2022」, 2022.4.

International Energy Agency(2022a). “Technology and Innovation Pathways for Zero-Carbon-Ready Buildings by 2030,” 2022.9.
<https://www.iea.org/reports/technology-and-innovation-pathways-for-zero-carbon-ready-buildings-by-2030>

International Energy Agency (2022b). “The Future of Heat Pumps,” 2022.11.
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>

International Energy Agency (2015). “Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency,” 2015.11.
<https://www.iea.org/reports/capturing-the-multiple-benefits-of-energy-efficiency>

Jibran, Z., et al. (2018). “Electrification of U.S. Manufacturing with Industrial Heat Pumps,” LBNL- 2001478.
https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/us_industrial_heat_pump-final.pdf

Laaguiddi, I., et al. (2021). “The Non-Energy Benefits for Industrial Electric Technologies,” ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry.
<https://www.aceee.org/sites/default/files/pdfs/ssi21/panel-2/Laaguiddi.pdf>

NEEP (2017) “Northeastern Regional Assessment of Strategic Electrification,” 2017.7.
<https://neep.org/sites/default/files/Strategic%20Electrification%20Regional%20Assessment.pdf>

Rosenow, J., et al. (2023). “Clean Heating: Reforming Taxes and Levies on Heating Fuels in Europe,” *Energy Policy*, 173, 113367, 2023.2.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113367>

Sakamoto, S., et al. (2021). “Demand-Side Decarbonization and Electrification: EMF 35 JMIP Study,” *Sustainability Science*, 16, pp.395-410.
<https://doi.org/10.1007/s11625-021-00935-w>

Sheikh, I., and Callaway, D. (2019). “Decarbonizing Space and Water Heating in Temperate Climates: The Case for Electrification,” *Atmosphere*, 10(8), 435.
<https://doi.org/10.3390/atmos10080435>

Sorrell, S., et al. (2004). “The Economics of Energy Efficiency - Barriers to Cost-effective Investment,” Edward Elgar, Cheltenham, UK.

The European Commission (2022). “REPowerEU Plan,” COM (2022) 230 final, 2022.5.18.
https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

The European Commission (2020). “Powering a Climate-Neutral Economy: An EU Strategy for Energy System Integration,” COM (2020) 299 final, 2020.7.8.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0299&rid=6>

The White House (2022a). “FACT SHEET: Biden-Harris Administration Announces First-Ever Federal Building Performance Standard, Catalyzes American Innovation to Lower Energy Costs, Save Taxpayer Dollars, and Cut Emissions,” 2022.12.7.
<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/12/07/fact-sheet-biden-harris-administration-announces-first-ever-federal-building-performance-standard-catalyzes-american-innovation-to-lower-energy-costs-save-taxpayer-dollars-and-cut-emissions/>

The White House (2022b). “U.S. Innovation to Meet 2050 Climate Goals: Assessing Initial R&D Opportunities,” 2022.11.
<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/11/U.S.-Innovation-to-Meet-2050-Climate-Goals.pdf>

UK Government (2021). “Heat and Buildings Strategy,” 2021.10.
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1026507/heat-buildings-strategy.pdf

U.S. Department of Energy (2022a). “Biden-Harris Administration Announces Steps to Electrify and Cut Emissions from Federal Buildings,” 2022.12.7.
<https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-steps-electrify-and-cut-emissions-federal-buildings>

U.S. Department of Energy (2022b). “Industrial Decarbonization Roadmap,” DOE/EE-2635, 2022.9.
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/Industrial%20Decarbonization%20Roadmap.pdf>

Weiss, J., et al. (2017). “Electrification: Emerging Opportunities for Utility Growth,” The Brattle Group White Paper, 2017.1.
https://www.brattle.com/wp-content/uploads/2017/10/7298_electrification_emerging_opportunities_for_utility_growth.pdf

伊香賀俊治・江口里佳・村上周三・岩前篤・星旦二・水石仁・川久保俊・奥村公美(2011). 「健康維持がもたらす間接的便益 (NEB) を考慮した住宅断熱の投資評価」, 日本建築学会環境系論文集, 76 巻, 666 号, pp.735-740.
<https://doi.org/10.3130/aije.76.735>

上野貴弘(2022). 「米国『インフレ抑制法』における気候変動関連投資」, SERC Discussion Paper 22009, 2022.9.30.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/22009.html>

甲斐田武延(2023). 「産業用ヒートポンプの社会実装強化に向けた考察—技術開発から技術展開へ—」, 電力経済研究, 第 69 号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>

甲斐田武延(2022). 「なぜヒートポンプの熱源を再生可能エネルギーとしてカウントすることが重要なのか?」, 電気新聞ゼミナール (261) , 2022.6.22.

<https://criepi.denken.or.jp/press/journal/denkizemi/2022/220622.html>
甲斐田武延(2020)。「産業用ヒートポンプへの期待」, 電気新聞テクノロジー&トレンド, 持続可能社会における電化の役割 (第3回), 2020.2.3.
<https://wp-criepi.denken.or.jp/topics-20200203/>
川口寿久・藤本憲二(2019)。「冷温同時取り出し可能なヒートポンプの導入で 69%の省エネを達成」, エレクトロヒート, 4(228), pp.21-24.
環境省(2022a)。「2020年度(令和2年度)の温室効果ガス排出量(確報値)について」, 2022.4.15.
<https://www.env.go.jp/content/900518858.pdf>
環境省(2022b)。「GXを支える地域・くらしの脱炭素～今後10年を見据えた取組の方向性について～」, 中央環境審議会炭素中立型経済社会変革小委員会, 2022.12.20.
https://www.env.go.jp/council/content/i_05/000096596.pdf
熊本県(2022)。「くまもとゼロカーボン行動ブック」, 2022.3.
<https://www.kankyo-kumamoto.jp/kiji003713/index.html>
熊本県(2021)。「第六次熊本県環境基本計画(令和3～7年度)」, 2021.7.
<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/49/103587.html>
経済産業省(2022)。「クリーンエネルギー戦略 中間整理」, 2022.5.19.
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/20220519_1.pdf
経済産業省(2021)。「2050年シナリオ分析の結果比較」, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会(第45回会合)資料1, 2021.7.13.
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/045/045_004.pdf
国土交通省(2021)。「脱炭素社会に向けた住宅・建築物における省エネ対策等のあり方・進め方」, 脱炭素社会に向けた住宅・建築物の省エネ対策等のあり方検討会, 2021.8.
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001419636.pdf>
坂本将吾(2023)。「脱炭素に向けた日本のエネルギーシステム転換—IPCC第6次評価報告書のシナリオ群における共通性と多様性—」, 電力経済研究, 第69号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>
地球温暖化対策推進本部(2022)。「政府がその事務及び事業に関し温室効果ガスの排出の削減等のため実行すべき措置について定める計画の実施要領」, 令和3年10月22日 地球温暖化対策推進本部 幹事会申合せ, 令和4年5月27日一部改定.
<https://www.env.go.jp/content/000040075.pdf>
東京都(2022)。「東京都環境基本計画」, 2022.9.
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/basic/plan/master_plan/body.html
戸田直樹(2019)。「電化を阻むロックイン効果。新たな価値の提案が必要に。さらに法制度の変革も」, 電気新聞テクノロジー&トレンド, 2019.10.18.
<https://www.denkishimbun.com/sp/45672>
中村直貴・薄井蘭実・水間紘史(2022)。「省エネ法等改正案をめぐる国会論議—エネルギー需給構造の転換と安定供給の確保に向けて—」, 立法と調査, 449号, pp.64-77, 2022.9.9.
https://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/backnumber/2022pdf/20220909064.pdf
中野一慶・西尾健一郎(2023)。「建物脱炭素化に向けた取組の検討—欧米の最新動向に見られる対策の広がり—」, 電力経済研究, 第69号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>
中野一慶(2023)。「災害時におけるZEHのレジリエンス—アンケートデータと傾向スコアによる因果効果の分析—」, 電力経済研究, 第69号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>
中野一慶(2022)。「地域の脱炭素化を進める上で重要なことは何か?」, 電気新聞ゼミナール(256), 2022.4.20.
<https://criepi.denken.or.jp/press/journal/denkizemi/2022/220420.html>
西尾健一郎・山田愛花(2023)。「家庭用給湯分野の省エネルギー・温暖化対策のバリア—賃貸住宅や機器選定の関係者へのインタビュー調査—」, 電力経済研究, 第69号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>
西尾健一郎・中野一慶(2020)。「建物脱炭素化に向けた取組の検討—米国の州や自治体の先進事例とわが国への示唆—」, 電力中央研究所報告 Y19005.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y19005>
西尾健一郎・大藤建太(2018a)。「省エネルギー対策の副次的便益に関する既往研究レビュー」, 第37回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp.281-286, 2018.6.
西尾健一郎・大藤建太(2018b)。「CO₂の長期大規模削減とロックイン問題」, 電力経済研究, 第65号, pp.136-144.
https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/pdf/periodicals65_10.pdf
向井登志広(2023a)。「運輸脱炭素化に向けた取組の検討—欧米の自治体の事例とゼロカーボンシティへの示唆—」, 電力経済研究, 第69号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>
向井登志広(2023b)。「産業部門における電化バリアと課題—国内製造業を対象としたアンケート調査—」, 電力経済研究,

第 69 号.

<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>

向井登志広(2022).「運輸脱炭素化に向けた取組の検討—欧米の自治体の先進事例とわが国への示唆—」, 電力中央研究所報告 SE21005.

<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=SE21005>

向井登志広(2020).「産業部門における電気加熱の生産性便益—評価方法の現状と課題—」, 電力中央研究所研究資料 Y19505, 2020.3.

<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/source/Y19505.html>

山田愛花・西尾健一郎(2023).「ロックイン問題を考慮に入れた給湯分野の経済合理的な CO₂削減可能性—家庭 CO₂統計の個票データを用いた将来分析—」, 電力経済研究, 第 69 号.

<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>

横浜市(2022).「横浜市地球温暖化対策実行計画(改定原案)」2022.12.15 修正版.

https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/machizukuri-kankyo/ondanka/jikkou/keikaku/plan.files/0055_20221215.pdf

横浜市(2020).「横浜市再生可能エネルギー活用戦略」, 2020.5.

<https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/machizukuri-kankyo/ondanka/jikkou/saiene.html>

吉岡七海・朝野賢司・永井雄宇(2021).「『2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略』で示された水素の役割と課題」, SERC Discussion Paper 20011, 2021.3.23.

<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/download/20011dp.pdf>

若林雅代・木村幸(2009).「省エネルギー政策理論のレビュー—省エネルギーの『ギャップ』と『バリア』—」, 電力中央研究所報告 Y08046, 2009.5.

<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y08046>

西尾 健一郎 (Ken-ichiro Nishio)

電力中央研究所 社会経済研究所 (兼) グリッドイノベーション研究本部

中野 一慶 (Kazuyoshi Nakano)

電力中央研究所 社会経済研究所

第1部
部門横断

脱炭素に向けた日本のエネルギーシステム転換 —IPCC第6次評価報告書のシナリオ群における共通性と多様性—

Japan's Energy System Transformation Toward Decarbonization:
Commonality and Diversity in the IPCC 6th Assessment Report Scenarios

キーワード：エネルギーシステム転換、エネルギー需要サイド、電化、IPCC AR6シナリオデータ

坂本 将吾

要旨

本稿では、脱炭素に向けた日本のエネルギーシステム転換の方向性について示唆を得ることを目的に、IPCC第6次評価報告書のシナリオ群（約600本）を分析した。その結果、温暖化対策の強化にともない、供給サイドのゼロ/ネガティブ排出化の進展、需要サイドの省エネと低炭素エネルギーキャリアへの転換、CO₂貯留量の増加、が共通傾向であると指摘した。一方、共通傾向を示すシナリオ群においても、2050年CO₂ネットゼロ排出達成は、エネルギー需要サイドに限っても多様であった。例えば、電化は総じて進展するが、残余排出量や、他の低炭素エネルギーキャリア（水素、バイオマス）、CO₂貯留量により、電化率の増加量は左右される。エネルギーシステム全体として描くネットゼロ排出達成への道筋によって、電化に限らず、あらゆる排出削減策の必要量は異なる。

1. はじめに

1.1. 脱炭素に向けたエネルギーシステム転換の必要性

気候変動緩和にむけて、パリ協定では、「世界全体の平均気温上昇を、工業化以前と比べて2℃よりも十分低く抑え、また1.5℃未満に制限するために努力すること」を目的とした（UNFCCC, 2015）。その下で、各国はネットゼロ排出達成を含む長期削減目標を掲げている（United Nations Webページ）。日本政府も、2020年10月に「2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする」（首相官邸, 2020）ことを表明し、目標達成に向けた取組の検討が本格化している。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の報告書によると、世界全体のネットゼロ排出達成には、温室効果ガスの大半を占めるエネルギー起源CO₂排出量の削減が不可欠であり、エネルギー需給両面から転換が求められる（IPCC, 2018、IPCC, 2022）。エネルギー需要サイドについては、省エネルギーだけでなく、化石燃料の直接燃焼から低炭素エネルギーキャリア（電力、水素、バイオマス）への転換が示されている。特に、電力への転換は、成熟した技術が利用可能であり、他のエネルギーキャリアと比較して相対的に効率が高く、電力部門の排出量の低下とともに排出削減効果が高まる。世界全体については、大幅なCO₂排出量の削減において、最終エネルギー消費に占める電力の割合（以下、電化率）を高めること（以下、電化）が、多数のシナリオに共通する傾向として示されている¹⁾。

1) 日本の長期目標においては、GHG全体のネットゼロ排出をカーボンニュートラルと定義しているが、以降本稿では、IPCC第6次評価報告書の第1作業部会（IPCC, 2021）の定義を参照の上、CO₂ネットゼロ排出をカーボンニュートラルと同義として用いる。

2) Sugiyama (2012) は、緩和策が厳しくなるほど最終エネルギー消費量に占める電力の割合（電化率）が高くなる（電化）傾向が、さまざまな機関（国際エネルギー機関, Eurelectric, 自然エネルギー財団, 電力中央研究所）のシナリオに共通していることを整理している。IPCCの報告書（IPCC, 2018、IPCC, 2022）では、エネルギー需要部門における電化率が高い傾向が世界全体について示されている。坂本 (2018) では、AR5シナリオデータベースを用いて、温暖化の抑制が進むほど、世界全体の電化率が高くなることを示している。Gambhir et al. (2019) では、多数のシナリオから、1.5℃シナリオでは、それ以上の温度上昇シナリオよりも電化率が高いことを示している。坂本・堀尾 (2020) では、SR15シナリオデータベースを用いて、世界全体のCO₂ネットゼロ排出達成時点において、現状よりも電化率が高くなっていることを示している。DeAngelo J. et al. (2021) では、SR15シナリオデータベースの177のネットゼロ排出達成シナリオを分析し、共通して電化率が高いことを示している。

1.2. 長期にわたる対策の検討におけるシナリオ情報の活用

長期の脱炭素の方向性を検討する際には、IPCCをはじめ、シナリオ情報が活用されることが多い。シナリオは、不確実な将来における社会経済状況や削減策のコストや導入可能量について想定を置いたうえで、温暖化目標の達成のためにどのようなエネルギーシステムの転換がより効率的であるかを定量的に描くものである。分析者によって、分析時点までの知見・知識に基づいたさまざまな想定の下に作成されることで、シナリオは、将来における不確実性を踏まえた意思決定の参考材料となる。

このような異なる想定のもとで作成されたシナリオ間においても、共通する傾向がみられる指標（パラメータ）がある。多様なシナリオ間においてもなお共通する傾向は、不確実な将来に向けて、進めるべき対策実施の方向性として認識されていると解釈することができる。IPCCの報告書（IPCC, 2018, IPCC, 2022）で示される分析の多くは、世界中の研究機関から提出される多数のシナリオ群におけるパラメータの分布を整理し、温暖化が抑制されるにしたがって、分布が示す変化の方向性に共通する傾向を見出すことが行われている。

一方、シナリオは、一つ一つがエネルギーシステム全体のバランスの結果として将来像を描いており、それぞれが独立したものである。さまざまな対策がどの程度ずつ実施されるのかは、個々のシナリオにおけるパラメータの組み合わせとして示されるものであり、個別パラメータの分布の傾向だけでは把握できない。削減策同士に代替関係がある場合には、それらが実施される組み合わせを理解することは重要である。こうしたシナリオが持つ多様性も、すべての削減策が想定通りに導入される保証のない不確実性の高い将来にわたる意思決定においては貴重な情報であり、個別パラメータの共通する傾向と合わせて活用が求められる。

1.3. AR6シナリオデータベースにおける日本関連のシナリオ情報の拡充

シナリオから、対策実施について共通性や多様性を見極めるためには、可能な限り、異なる想定の下で作成された多様なシナリオを参照することが有用と考える。しかしながら、日本に関するシナリオ情報としては、国内の研究機関によるシナリオ比較研究が実施され始めたものの、世界全体に関するシナリオ情報と比較して、利用できるシナリオは限られていた³⁾。

こうした状況は、2022年4月にIPCC第3作業部会（WG3）の第6次評価報告書（AR6）のシナリオデータベース（以下、AR6DB）が公開されたことにより、改善された。IPCCの報告書の作成に用いられたシナリオデータは、従来から公開されていたが、最新のAR6DBでは、主に以下の二点について、利用可能なシナリオ情報が拡充されている。

第一に、パリ協定の目標に対応する2°Cシナリオ、1.5°Cシナリオの数が増加しただけでなく、パリ協定の目標を超えるような温暖化水準についても従来よりも細かく区分され、幅広い温暖化水準のシナリオが参照できるようになった。幅広い温暖化水準の違いは、対策の強度の指標として解釈でき、温暖化水準が低いほど、対策を強化したシナリオとみなせる。細かく区分された温暖化水準に該当するシナリオ間にみられる違いから、段階的に温暖化対策を強化することにもなうエネルギーシステムの転換に共通の傾向を把握することができる。

第二に、日本を含む国単位の結果も報告され、国内外の研究機関による多様なシナリオが利用可能になった。これまで日本に関するシナリオは、国内の研究機関によるシナリオが中心で、一般に利用可能なシナリオ数も限られていた⁴⁾。AR6DBに含まれる多様なシナリオにより、日本においてさまざまな削減策が実施される組み合わせの多様性を把握できるようになった。

1.4. 本稿の目的と構成

本稿では、脱炭素に向けた日本のエネルギーシステム転換の方向性について示唆を得ることを目的に、

3) JMIP (Sugiyama et al.(2021 a), Sugiyama et al.(2021 b)) は、国内の研究機関による 2050 年 80%削減シナリオを比較したプロジェクトであり、シナリオデータも一般に公開されている (Ju, Y. and Silva Herran, D., 2021)。Sakamoto et al. (2021) は、このプロジェクトにおいて、需要サイドに着目し、5つのモデルに共通で電化率が高くなることを示している。

4) Oshiro et al (2019)は、国内外の9つのモデルによる世界全体の温暖化抑制に応じた日本の結果を比較している数少ない例である。

IPCCのAR6DBが公開されたことにより、従来よりも多数利用可能になった日本のシナリオ群における共通性と多様性を分析する。以下、本稿の構成を示す。2章では、AR6DBに収録されているシナリオデータについて概説し、本稿で分析対象とする日本に関するシナリオについて述べる。

3章と4章は、本稿の分析結果をまとめたものであり、それぞれの章で異なる点に着目することで、補完することを意図している。3章では、幅広い温暖化水準にわたる変化の共通性を分析するのに対して、4章では、「2050年CO₂ネットゼロ排出達成」という温暖化水準が同程度のシナリオにおいてもみられる多様性を明らかにすることになる。各章の具体的な内容は以下のとおりである。

3章では、温暖化の抑制のために対策を強化するにしたがって、エネルギー需給の各部門においてどのようなエネルギーの転換が生じると想定されているのか、シナリオ間に共通する傾向を明らかにする。具体的には、各種パラメータの分布を、温暖化水準の異なるシナリオ群間で比較することで、温暖化の抑制に伴う各種パラメータの変化における共通性を見出す。

4章では、2050年CO₂ネットゼロ排出達成時のエネルギー需要サイドに着目する。シナリオは、全体のバランスの中である一つの将来像が各種パラメータの組合せとして描かれるものであり、それぞれにおけるパラメータの組合せに重要な意味がある。そのため、シナリオごとのパラメータの組合せにも着目し、特に最終エネルギー消費の構成をシナリオごとに確認し、複数の低炭素エネルギーキャリア（電力、水素、バイオマス）や二酸化炭素回収・貯留（Carbon Capture and Storage.以下、CCS）など、削減策同士の補完・代替関係を分析する。

5章では、本稿で得られた成果についてまとめを述べる。

2. AR6シナリオデータベースと本稿の分析対象

2022年4月に公表されたAR6 WG3の分析は、世界各国の研究機関から提出されたシナリオに基づいており、これらを収録したものがAR6DBである。AR6DBでは、品質チェックを経た提出シナリオ⁵⁾のうち、1,202本では、今世紀中の世界全体の温暖化水準の評価に十分なパラメータ⁶⁾が報告されており、C1からC8までの8段階の温暖化水準カテゴリーに分類されている（Kikstra, J S. et al., 2022）。このうち、601本は、日本の結果を報告している。

本稿では、これら601本のうち、基本的な前提条件となるGDP、人口が他のカテゴリーと傾向が異なるC8の7本を除いた594本⁷⁾を分析対象とする⁸⁾（表1）。これらは8つの研究機関の11種類のモデル（同じモデルのバージョンを区別すると17タイプ）によるシナリオであり、各機関から複数本、提出されている⁹⁾。温暖化水準カテゴリーについては、C7（Below 4°C）からC1（Below 1.5°C OSなし・低）へかけて、今世紀末時点の温暖化がより抑制されている（対策がより強化されている）。

5) AR6DBには合計で3,131本のシナリオが収録されている。このうち、複数の部門をカバーする少なくとも1種類の排出量、エネルギー指標を報告している世界シナリオ 2,266本に対して品質チェックが実施され、1,686本が通過した。品質チェックでは、足元のCO₂排出量、CH₄排出量、CCS導入量、一次エネルギー、原子力・太陽光・風力の発電量との乖離の度合いに加えて、2030年までのネガティブエミッション、CCS、原子力、CH₄排出量に極端な値がないか確認された。

6) 温暖化水準の評価を行うためには、2100年までのCO₂（全体及びエネルギー・産業プロセス）、CH₄、N₂O排出量を最低限報告する必要がある。AFOLU（土地利用）部門のCO₂排出量が報告されていない場合、2020年の総排出量とエネルギー及び産業プロセスの排出量の差は500MtCO₂以上でなければならない。

7) CO₂排出量を報告しているシナリオ数。他のパラメータを部分的に報告していない場合もある。

8) なお、AR6DBには、日本のみを分析対象にしたシナリオもあるが、世界全体の温暖化水準との対応関係は把握できないため、本稿では使用しない。

9) 温暖化水準が評価されたシナリオ全体では、12の研究機関の20種類のモデルによるものである（同じモデルの異なるバージョンを区別した場合には、44タイプ）。収集されたシナリオデータがデータベースとして構築される際、異なる出力変数や定義で報告されたシナリオが調整され、シナリオの比較可能性を高める処理がなされている。ただし、シナリオデータの提出は、自発的になされるものであり、シナリオ設計やシナリオ数の面で、偏りなく収集されたシナリオ群であるとは保証されているものではない。

表1 AR6シナリオの温暖化水準カテゴリー別のシナリオ数

カテゴリー・略称		説明	シナリオ数	
			日本	世界
C1	Below 1.5°C OSなし・低	温暖化が、2100年に50%を超える確率で1.5°Cに抑制、21世紀中に67%以下の確率で1.5°C以上。	50	97
C2	Below 1.5°C OS高	温暖化が、2100年に50%を超える確率で1.5°C未満、21世紀中に67%を超える確率で1.5°Cを超える。	69	133
C3	Likely Below 2°C	21世紀を通じて、温暖化のピークが67%を超える確率で2°Cに抑制。	177	311
C4	Below 2°C	21世紀を通じて、温暖化のピークが50%を超える確率で2°Cに抑制。	81	159
C5	Below 2.5°C	21世紀を通じて、温暖化のピークが50%を超える確率で2.5°Cに抑制。	105	212
C6	Below 3°C	21世紀を通じて、温暖化のピークが50%を超える確率で3°Cに抑制。	50	97
C7	Below 4°C	21世紀を通じて、温暖化のピークが50%を超える確率で4°Cに抑制。	62	164
C8	Above 4°C	21世紀中に温暖化が50%以上の確率で4°Cを超える。	7	29
合計			601	1202

注1：OSはOvershootの略。所定の温度を一時的に超えることを意味する。

注2：OS低とは、一時的に1.5°Cを最大0.1°C超える温暖化が、OS高とは、一時的に1.5°Cを0.1～0.3°C超える温暖化が、それぞれ数十年継続すること。

人為的な温度上昇は、人為的な累積CO₂排出量と近似的な比例関係にあることから、温度上昇をとめるにはCO₂のネットゼロ排出に達する必要があるIPCC (2021)。そのため、温暖化水準カテゴリーの違いは、主に、世界全体のCO₂排出量、ネットゼロ排出達成割合・年の違いとして確認できる (図1)。温暖化が2°Cを下回るC1～C4など温暖化が抑制されるカテゴリーほど、年単位のCO₂排出量は急速に削減が進み (図1 a)、結果的に累積CO₂排出量が小さくなっている。この違いは、CO₂ネットゼロ排出の達成割合と達成年にも反映され、CO₂排出量の削減ペースが早い、温暖化を抑制するカテゴリーほど、達成割合が高く、達成年が早い傾向がある。達成割合は、温暖化が2°Cを下回る場合 (C1～C4) は約9割である (図1b)。達成年は、一時的な温度超過 (オーバーシュート、以下OS) の度合いが小さく、温暖化を1.5°Cに抑えるC1では2050年代前半に、温暖化を2°Cに抑えるC3では、2070年代前半に、CO₂のネットゼロ排出に達するシナリオが多い (図1 b)。

本稿は、こうした世界全体のCO₂排出量の削減傾向を示すシナリオにおいて、どのような日本のエネルギーシステムの転換が示されているのか、CO₂排出量やエネルギー関連指標から概観するものである。

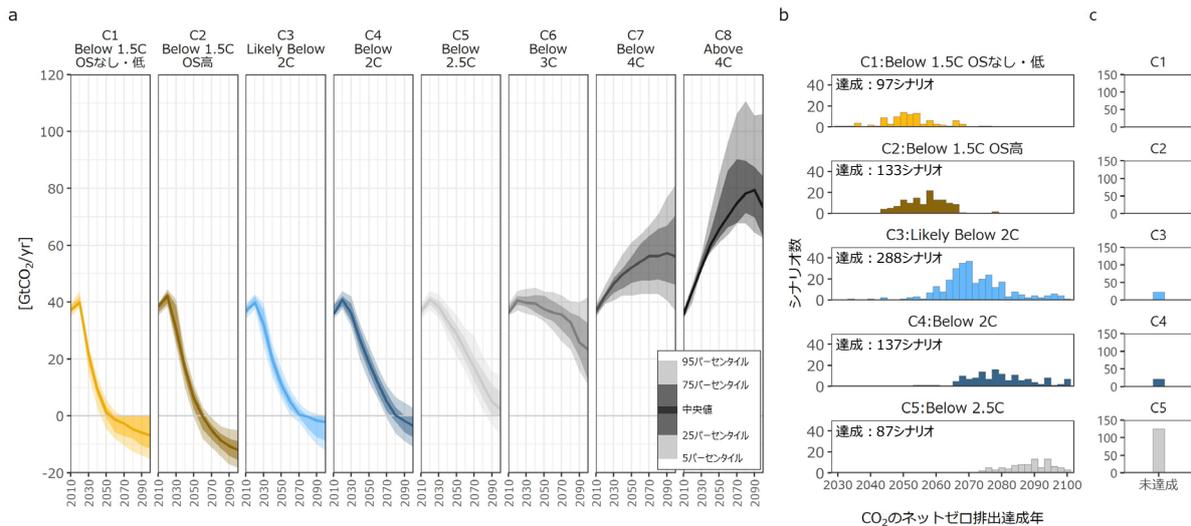


図1 CO₂排出量・CO₂ネットゼロ排出達成年 (世界全体)

3. 温暖化水準に対応した日本のエネルギーシステム転換の共通性

本章では、各種パラメータの分布を温暖化水準カテゴリ間で比較する。比較を通じて、さまざまな仮定の下でのシナリオ群であってもなお、カテゴリ間の違いとして共通する傾向を明らかにする。

ここでの留意点は、以下の2点である。1つ目は、本分析は温暖化水準のみを変化させた感度分析の結果と解釈できないことである。各シナリオは、異なるモデル、シナリオ設計に基づいており、温暖化水準以外の条件は揃えられていない。2つ目は、シナリオは予測ではないため、各種パラメータの分布の幅は、実現可能性の大きさとして解釈できないことである。本章では、記述統計量として、中央値、パーセンタイルなどを示すが、これは、多数のシナリオにみられる傾向の把握を容易にするためである。

3.1. CO₂排出量・CO₂貯留量

はじめに、日本のCO₂排出量、ネットゼロ排出の達成について、世界全体の温暖化抑制の度合いに応じた変化における共通した傾向を確認する（図2）。

CO₂排出量は、温暖化抑制の度合いによらず、今世紀にわたって減少しているが、温暖化を抑制するほど減少幅が大きくなる傾向が、シナリオ間で共通している（図2a）。温暖化水準が2°Cを下回る場合、2050年は約24（C1）～430（C4）MtCO₂、2100年は約-164（C2）～-2（C4）MtCO₂であるのに対して、温暖化が2°Cを上回る場合では、2050年は約500（C5）～732（C7）MtCO₂、2100年は約49（C5）～316（C7）MtCO₂である（数値は各カテゴリの中央値）。

今世紀中のCO₂ネットゼロ排出の達成については、温暖化を抑制するカテゴリほど、達成割合が高く（図2c）、達成年が早い傾向がシナリオ間で共通であり（図2b）、世界全体と類似している（図1参照）。達成割合は、温暖化水準が2°Cを下回る場合（C1～C4）は約7割、2°Cを上回る場合（C5～C7）は約1割である。達成年、温暖化の抑制度合いが強いほど、早い傾向がある（中央値では、C1：2053年、C2：2059年、C3：2069年、C4：2077年、C5：2094年）。

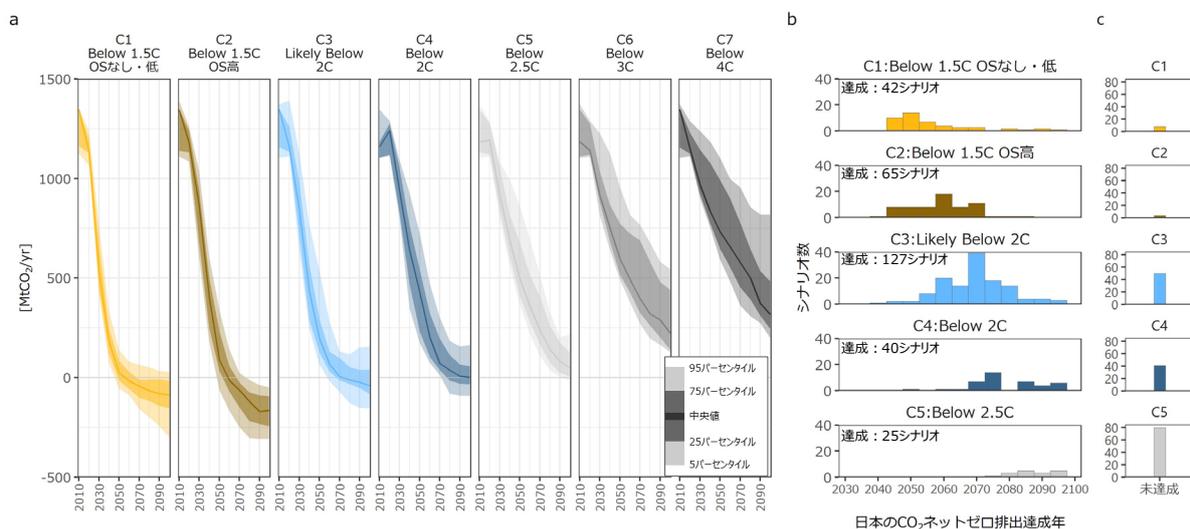
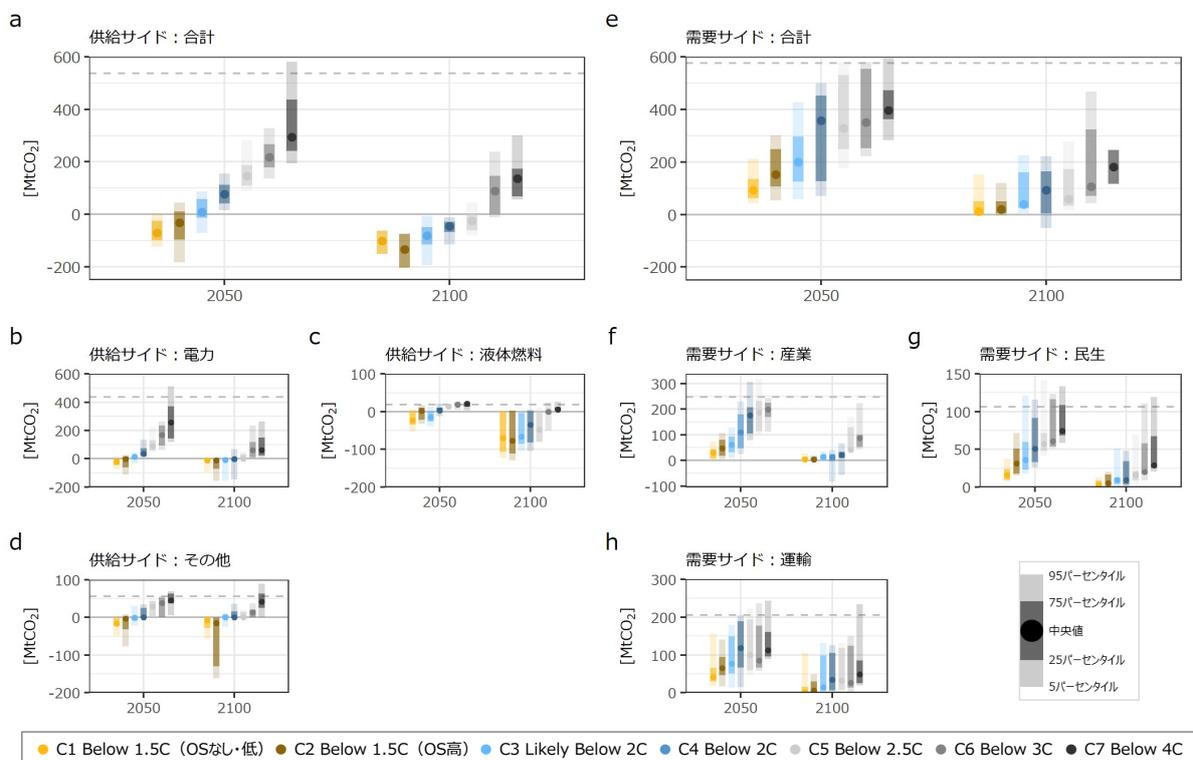


図2 CO₂排出量、CO₂ネットゼロ排出達成年（日本）

次に、上記の合計CO₂排出量のうち約97%を占めるエネルギー起源CO₂排出量（約1,168MtCO₂）を、供給サイド（約537MtCO₂）、需要サイド（約577MtCO₂）に分けて確認する（()内は、2020年値¹⁰）。供給サイドは、電力、液体燃料、その他供給（ガス、熱、石炭、水素）、需要サイドは、産業、民生、運輸に区分する（図3）。

供給サイド、需要サイドいずれにおいても、温暖化が抑制されるほど、CO₂排出量は小さくなる傾向がある（図3 a、e）。温暖化水準が2℃を下回る場合、供給サイドのCO₂排出量は、2050年に約-70（C1）～-76（C4）MtCO₂、2100年には約-134（C2）～-46 MtCO₂となる。一方、需要サイドのCO₂排出量は、2050年に約92～356 MtCO₂であるが、2100年には約11～92 MtCO₂である（いずれも数値は各カテゴリーの中央値）。供給サイドでは、2050年以降C1～C5においてマイナス排出となるシナリオがみられるのに対して、需要サイドでは、2100年においても排出が残余している（C4の一部のシナリオを除く）。

部門別にみると、温暖化水準が2℃を下回る場合、供給サイド（図3 b、c、d）ではすべての部門において、2100年までにマイナス排出となるシナリオが含まれている（C1とC4の中央値は、電力：約-11～-0.1 MtCO₂、液体燃料：約-77～-34 MtCO₂、その他供給：約-7.7～0 MtCO₂）。一方の需要サイド（図3 f、g、h）では、温暖化水準が2℃を下回る場合（C1～C4）、2050年のCO₂排出量は、産業部門では約30～110 MtCO₂、民生部門では約16～51 MtCO₂、運輸部門では約42～118 MtCO₂となる（カテゴリーの中央値）。



注1：点線は2020年のシナリオの中央値

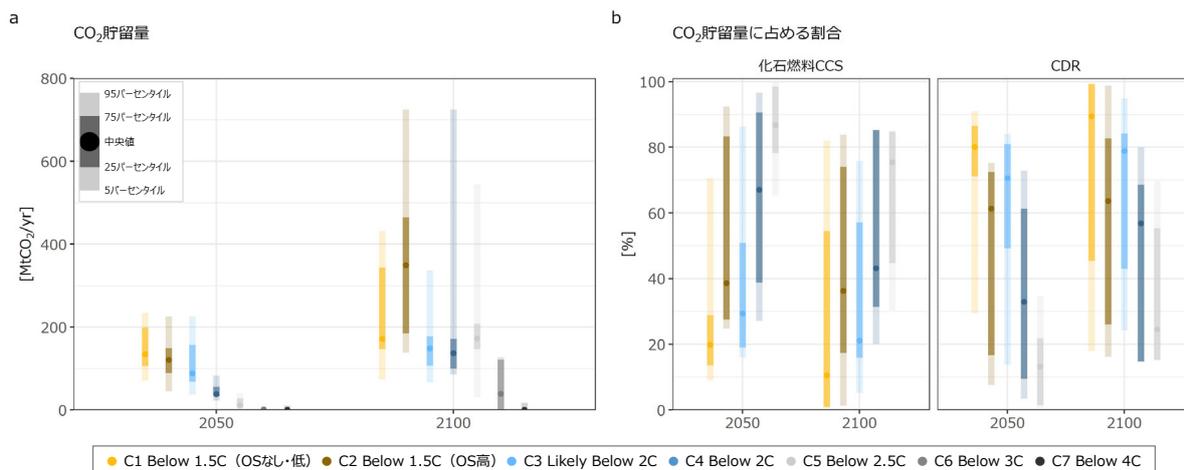
図3 エネルギー起源CO₂排出量（日本、部門別、2050年、2100年）

CO₂排出量がマイナスとなる部門（供給サイド：電力、液体燃料、その他供給（水素製造）、需要サイド：産業部門）においては、大気中の二酸化炭素を除去する（Carbon Dioxide Removal. 以下、CDR）技術のうち、二酸化炭素回収貯留付きのバイオエネルギー（Bioenergy with Carbon Capture and Storage. 以下、BECCS）

10) 2020年のCO₂排出量はすべて分析対象シナリオの中央値。シナリオにおいて、2020年が実績値ではなく計算値であるシナリオも含まれており、ばらつきがあるため、中央値で示す。シナリオ値が実績値とずれている場合があり、シナリオ内での変化の大きさの目安を得るため実績値ではなくシナリオ値を示している。

が導入されている。BECCS以外にも、CO₂貯留をともなうCDR技術として、大気中のCO₂を直接回収し貯留する直接空気回収・貯留（Direct Air Capture and Storage.以下、DACCS）があり、分析対象シナリオの中に含まれているものもある（エネルギー起源CO₂排出量ではなく、その他の部門に計上）。また、CO₂貯留をともなう温暖化対策としては、化石燃料由来CO₂を貯留する二酸化炭素回収・貯留（Carbon Capture and Storage. 以下、CCS）もあるが、同じようにCO₂貯留をともなうCCSとCDRには相違点がある。CCSが、導入部門における化石燃料消費にともなう排出をほぼゼロ排出とする排出削減にとどまるのに対して、CDRは、大気中に累積したCO₂を除去するため、CO₂排出量はマイナスと計上され、CDR導入部門以外の残余排出量を相殺する点が異なっている。また、ゼロ排出となるCCSはCO₂排出量には計上されないが、ネガティブ排出となるCDRは、部門内の残余排出との差し引きによってはCO₂排出量がマイナスとなる形で確認できる。

上記を踏まえ、CCSとCDR（BECCSとDACCSの合計）によるCO₂貯留量を確認する（図4）。温暖化が抑制されるほど、CO₂貯留量の総量が大きくなる傾向がシナリオ間で共通している。温暖化水準が2℃を下回る場合、2050年では38（C4）～135（C1）MtCO₂、2100年では137（C4）～349（C2）MtCO₂である（図4a、数値はカテゴリーの中央値）。また、温暖化が抑制されるほど、貯留量に占める化石燃料CCSの割合が低くなり（2050年の中央値は、C4が67%に対して、C2は35%、C1は18%）、CDRの割合が高くなる傾向（2050年の中央値は、C4が36%に対して、C2は62%、C1は67%）もシナリオ間で共通している（図4b）。これは、限られた年間の貯留可能量に対して、CDRにより多くの貯留を割り当てなければ、温暖化の抑制度合いを強くしていくことが難しくなるためと考えられる。なお、C6、C7では、2050年においてもほぼすべてのシナリオでCO₂貯留がゼロである。



注1：CO₂貯留量は化石燃料CCSとCDRの合計。注2：CDRはBECCSとDACCSの合計。

図4 CO₂貯留量（日本、2050年、2100年）

3.2. エネルギー関連指標

ここからは、前節で確認したエネルギー起源CO₂排出量の由来となるエネルギー関連指標におけるシナリオ間に共通する傾向を分析する。

3.2.1. 化石燃料消費量

はじめに、CO₂排出の直接的な由来となる化石燃料消費について、一次エネルギーベースで確認する。化石燃料消費のすべてがCO₂排出量の由来となるわけではなく、CCSありの場合はほぼゼロ排出となる。図5に、化石燃料消費量、各化石燃料に占める二酸化炭素回収・貯留（Carbon Capture and Storage. 以下、CCS）ありの割合を示す。

化石燃料消費量は、温暖化が抑制されるほど小さくなる傾向が、シナリオ間で共通している（図5 a）。温暖化水準が2℃を下回る場合、2050年は約3.3（C1）～8.7（C4） EJ/yr、2100年は約1.5（C1）～4.6（C4） EJ/yr となり、2020年（シナリオの中央値：17.2 EJ/yr）から削減される（図5 a）。一次エネルギー全体に占める化石燃料の割合でも、2020年では9割（91%）近いが、温暖化が抑制されるシナリオほど小さくなる（2050年は約30（C1）～60（C4）%、2100年は約17（C1）～34（C4）%）。燃料種別にみても、温暖化が抑制されるシナリオほど、消費量が小さくなる傾向は共通している（図5 b、d、f）。

燃料種別にCCSありの割合をみると（図5 c、e、g）、シナリオ間で共通傾向がみられるのは、天然ガスと石油である。天然ガスは温暖化が抑制されるほど、CCSありの割合が高くなる傾向がある。石油は、温暖化の抑制程度に関わらず、CCSなしが大半を占める。一方、石炭については、温暖化水準が2℃を下回る場合（C1～C4）でも、CCSありの割合にシナリオ間でばらつきがみられる。

上記の通り化石燃料消費が温暖化の抑制度合いに応じて減少することが共通しているとともに、化石燃料消費がCCSの有無にかかわらずゼロとにならないことも同時にシナリオ間で共通している。これは、残余しているCCSなしの化石燃料による排出分を温暖化が抑制されるほどCDR技術により除去しているためである（図4参照）。

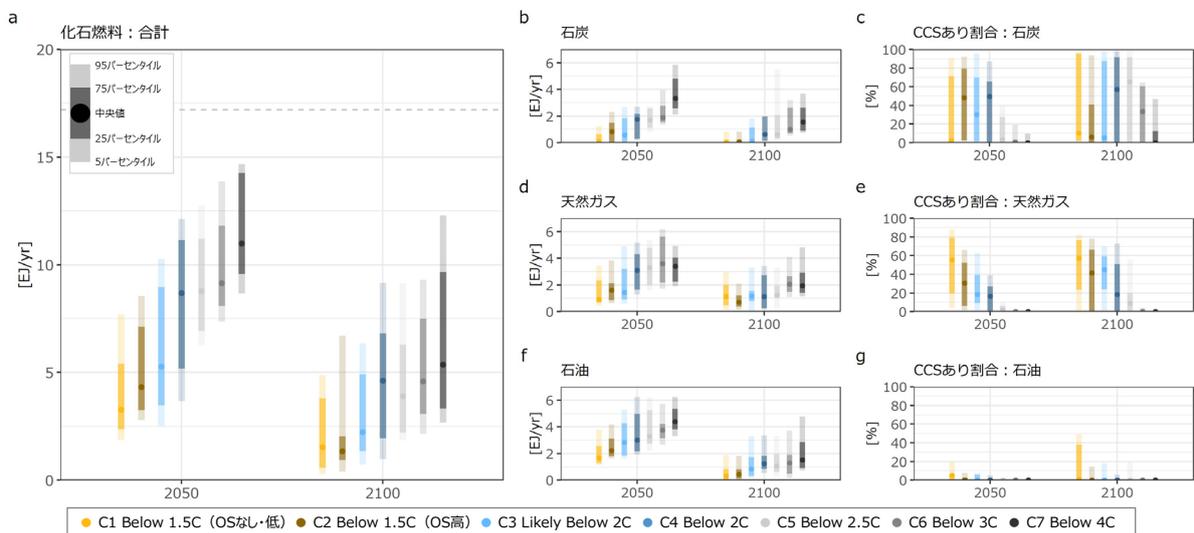


図5 化石燃料消費、CCSあり割合（一次エネルギーベース）

上記で整理した一次エネルギーベースの化石燃料消費は、日本全体での消費量に相当し、これらがエネルギー供給サイドにおいて電力、水素、液体燃料、ガスなどへ転換され、また、エネルギー需要サイドにおいて直接消費され、供給サイド、需要サイドの各部門のCO₂排出量へとつながる。

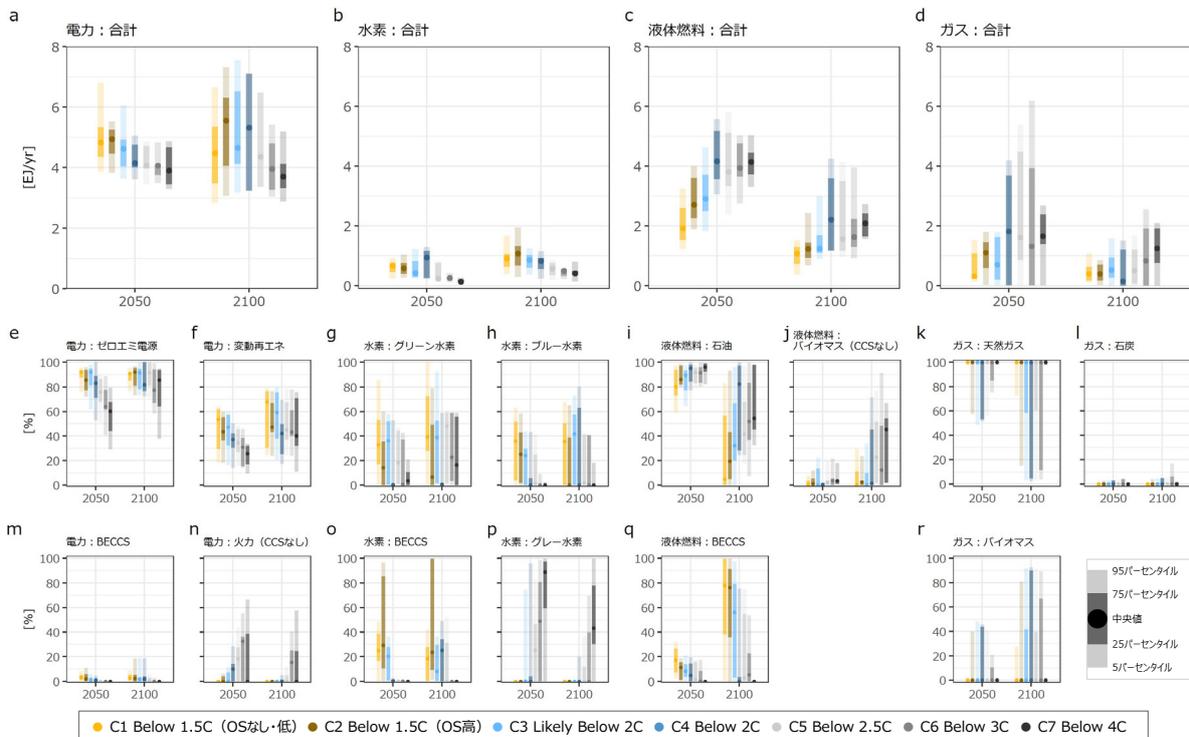
3.2.2 エネルギー供給

ここでは、エネルギー供給サイドを概観する。エネルギー供給のうち、転換をともなう主なエネルギーである電力、水素、液体燃料、ガスを取り上げ、エネルギー供給量と、転換方法別のエネルギー供給割合を図6に示す。全体として、すべてのエネルギー供給において、化石燃料を用いた供給から、ゼロ排出ないしネガティブ排出となる供給方法へと切り替わる傾向が確認できる。以下、各エネルギー供給における温暖化抑制にともなう共通した傾向をまとめる。

- 電力供給では、温暖化水準が2℃を下回る場合（C1～C4）、それよりも温暖化が進む場合（C5～C7）と比べて、2050年、2100年ともに発電量が大きい傾向がある（図6 a）。発電電力量に占める各電源の割合（図6 e、f、m、n）をみると、温暖化が抑制されるほど、ゼロエミ電源（再生可能エネルギー（BECCSを除く）、原子力、CCS付き火力発電）、BECCS（ただし割合は小さい）が高くなり、CCS

なしの火力発電が低くなる傾向が、シナリオ間で共通している。

- 水素供給では、温暖化が抑制されるほど、合計供給量が大きい傾向がある（図6 b）。製造方法の割合（図6 g、h、o、p）をみると、温暖化が2°Cを下回る場合（C1~C4）には、グレー水素の割合がほぼゼロとなり、そのほかの製造方法の割合が高くなる傾向が共通している。電解装置由来（グリーン水素）、化石燃料+CCS（ブルー水素）、BECCS由来は、温暖化が抑制されるほど中央値は大きい傾向がある。ただし、これらの導入量はシナリオ間の幅が大きく、特定の製造方法が大半を占める傾向は見いだせない。
- 液体燃料供給では、温暖化が抑制されるほど総供給量は小さく、2050年から2100年にかけても減少している（図6 c）。現状ではほぼ100%を占める石油は、2050年でも約8~9割近くを占めるが、2100年には、主にバイオ燃料に代替される傾向がみられる（図6 i、j、q）。バイオ燃料の内訳（図6 j、q）をみると、温暖化が抑制されるほどBECCSの割合が高くなる傾向があり、2100年にはBECCSがほぼ100%を占めるシナリオもある。
- ガス供給では、温暖化が抑制されるほど、供給量が小さくなる傾向がある（図6 d）。構成（図6 k、l、r）をみると、温暖化の抑制度合いによらず、中央値でみるとすべて天然ガスが100%であり、一部のシナリオでバイオガスによる供給に切り替わっている。



注1：ゼロエミ電源には、再エネ（変動再エネ含む）、原子力、火力（CCSあり）が含まれる。変動再エネには、太陽光、風力が含まれる。BECCSはネガティブ排出でありゼロエミ電源には含まれない。バイオマス（CCSなし）はゼロエミ電源に含まれる。

注2：グリーン水素は水の電気分解によって製造された水素、ブルー水素は化石燃料から水素を製造する際にCCSを組み合わせたもの、グレー水素は化石燃料から製造された水素。

図6 主な二次エネルギーの供給量・各エネルギーにおける供給方法の割合

3.2.3. エネルギー需要

本項では、エネルギー需要サイドについて概観する。

需要サイドの対策としては、まず、省エネルギーがあり、温暖化の抑制とともに進展することが考えられる。ここでは、省エネルギーの指標の一つとして、エネルギー強度（最終エネルギー消費/GDP）に注目し、温暖化の抑制にともなう省エネルギーの進展について確認する。図7に、最終エネルギー消費、GDP、エネルギー強度を示す。

最終エネルギー消費は、温度上昇が抑制されるほど、小さい傾向にあるが、2100年にかけてカテゴリー間の差は明確ではなくなる（図7 a）。GDPは2100年まで大部分のシナリオで増加が想定されている（図7 b）。最終エネルギー消費とGDPの変化の結果、エネルギー強度は、温暖化が抑制されるほど、現状（2020年は2.16MJ/USD）から、より減少する傾向が共通している。ただし、2100年においては、カテゴリー間の差は明確ではなくなり、省エネルギー可能な分野が限られてくることが理由と考えられる。温暖化が2℃を下回る場合、2050年は約1.11（C1）～1.36（C4）MJ/USD、2100年は約0.67（C1）～0.79（C4）MJ/USDであり、削減率（2020年比）でみると、2050年には約42（C4）～48（C1）%、2100年には約70（C1～C4）%である（図7 c）。

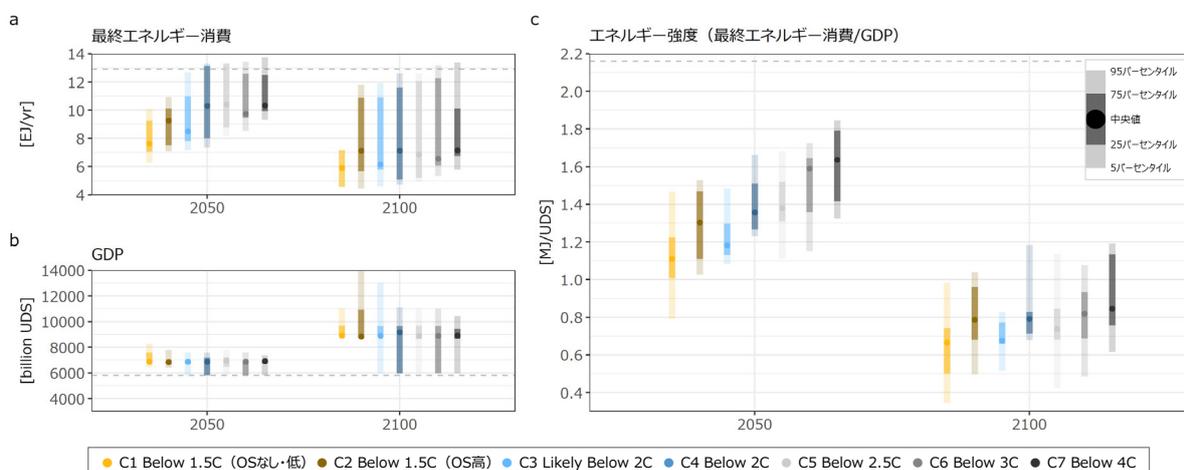


図7 需要サイドのエネルギー強度

需要サイドの対策には、省エネルギーに加えて、化石燃料の直接燃焼から、低炭素エネルギーキャリアである電力、水素、バイオマスへの転換が挙げられる。こうした低炭素エネルギーキャリアへの転換は、最終エネルギー消費における化石燃料の直接燃焼の割合を下げるため、炭素強度（CO₂排出量/最終エネルギー消費）の低下につながる。図8に、需要サイドの部門別に、炭素強度と最終エネルギー消費に占める低炭素エネルギーキャリアの割合を示す。

需要サイドのすべての部門において、温暖化の抑制度合いが強くなるほど、炭素強度が低下する傾向（図8 a、f、k）、また、低炭素エネルギーキャリア（電力、水素、バイオマスの合計）の割合が増加する傾向（図8 b、g、l）、がそれぞれシナリオ間で共通している。

温暖化水準が2℃を下回る場合（C1～C4）における各部門の傾向は以下の通りである。

炭素強度（図8 a、f、k）は、産業部門では約10～32 gCO₂/MJ（2050年）、約2～5 gCO₂/MJ（2100年）、民生部門では約6～15 gCO₂/MJ（2050年）、約1～5 gCO₂/MJ（2100年）、運輸部門では約24～36 gCO₂/MJ（2050年）、約1～18 gCO₂/MJ（2100年）に、それぞれ低下している（2020年は、産業部門が約55 gCO₂/MJ、民生部門が約26 gCO₂/MJ、運輸部門が約65 gCO₂/MJ。いずれもシナリオの中央値）。

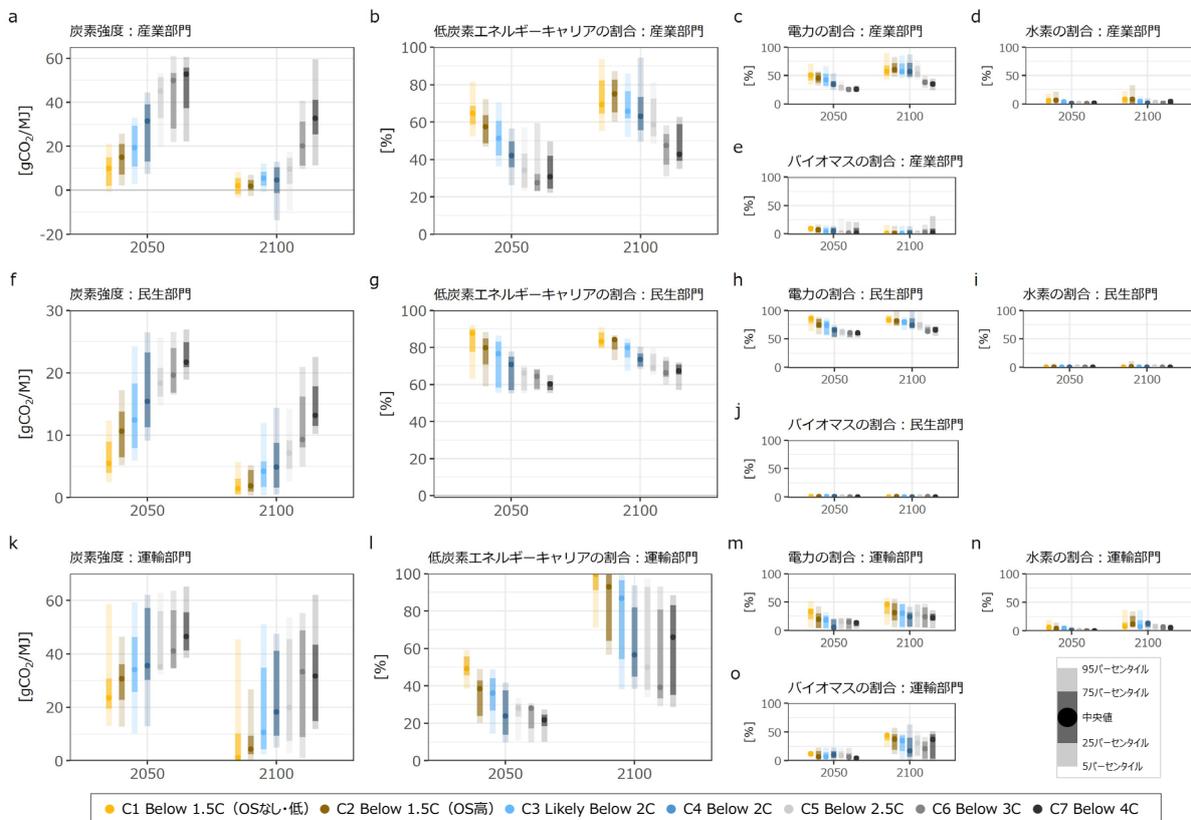
一方、低炭素エネルギーキャリアの割合（図8 b、g、l）は、産業部門では、約42～65%（2050年）、約63～75%（2100年）、民生部門では、約71～88%（2050年）、約74～84%（2100年）、運輸部門では、約24～49%（2050年）、約57～99%（2100年）に、いずれも増加している（2020年は、産業部門が約26%、民生部門が

約57%、運輸部門が約2%。それぞれシナリオの中央値)。

低炭素エネルギーキャリアの割合を電力、水素、バイオマスに分けてみると、温暖化水準が2℃を下回る場合 (C1~C4) では、電力の割合 (図8 c、h、m) は、一部 (運輸部門の2050年のC3) を除き、中央値がすべての部門で最も高くなっている (産業部門：34~51% (2050年)、57~90% (2100年)、民生部門：66~85% (2050年)、74~83% (2100年)、運輸部門：5~33% (2050年)、24~46% (2100年))。

水素は、民生部門 (図8 i) では導入がほぼ想定されておらず、産業部門 (図8 d)、運輸部門 (図8 n) での導入がみられる (産業部門：0~6% (2050年)、1~8% (2100年)、運輸部門：1~6% (2050年)、7~13% (2100年))。

バイオマスも水素と同様、民生部門にはほぼ導入が想定されていない (図8 j)。産業部門 (図8 e) と運輸部門 (図8 o) に導入が想定されているが、2100年にかけて、産業部門では割合が小さくなる傾向があり、運輸部門では割合が高くなる傾向がある (産業部門：4~9% (2050年)、0~1% (2100年)、運輸部門：10~12% (2050年)、17~44% (2100年))。



注1：産業部門と民生部門のバイオマスは固体燃料のみ。運輸部門のバイオマスは液体燃料のみ。

図8 炭素強度と最終エネルギー消費に占める低炭素エネルギーキャリアの割合

4. 2050年CO₂ネットゼロ排出達成時のエネルギー需要サイドの多様性

本章では、パリ協定の温度目標に整合的なシナリオ（C1～C4）のうち、2050年¹¹⁾にCO₂ネットゼロ排出に達している44本のシナリオ¹²⁾の達成時に着目し、エネルギー需要サイドに多様性があることを示す。

以下、本章の分析の考え方を述べる。多数のシナリオを分析する場合、前章の分析に限らず、IPCCの報告書などにおいても、パラメータの情報が分布として集約された形で整理されることが一般的である。これは、さまざまな異なる仮定の下で作成されたシナリオ間にみられる共通した傾向の把握には有益な方法であり、本稿（3章）でも採用している。一方で、パラメータの分布間にみられる代表値の大小関係がすべてのシナリオで共通しているとの誤解を招く場合があることや、分布のみから個々のシナリオにおけるパラメータの組み合わせを推測することは困難であるといった短所もある。本来、シナリオは一つ一つ独立したものであり、全体のバランスで一つの将来像を提示しているものであるため、パラメータの組み合わせにも、各シナリオの意義があるという見方もできる。

以上を踏まえ、本章では、前章の分析を補完することを意図して、個々のシナリオにおけるパラメータの組み合わせを可能な限り提示するアプローチをとる。そのため、一見煩雑な図を多数示すことになるが、こうした煩雑さがまさにシナリオの多様性を示すものであり、分布を中心とした整理のみでは、多くの場合、見過ごされている情報である。ここでは「2050年にCO₂ネットゼロ排出に達している」という同一条件にあるシナリオのみを抽出することで、結果の解釈がなるべく容易になるようにしている。

シナリオには数多くのパラメータが報告されており、それらすべての組み合わせを同時に把握することは困難である。ここでは、エネルギー需要サイドに着目して、CO₂排出量と最終エネルギー消費の構成の関係について個々のシナリオの内訳を整理する。これにより、エネルギー需要サイドにおける温暖化対策、特に複数の低炭素エネルギーキャリア、CCS、BECCSの代替関係を分析する。

4.1. 需要サイドのCO₂排出量と最終エネルギー消費

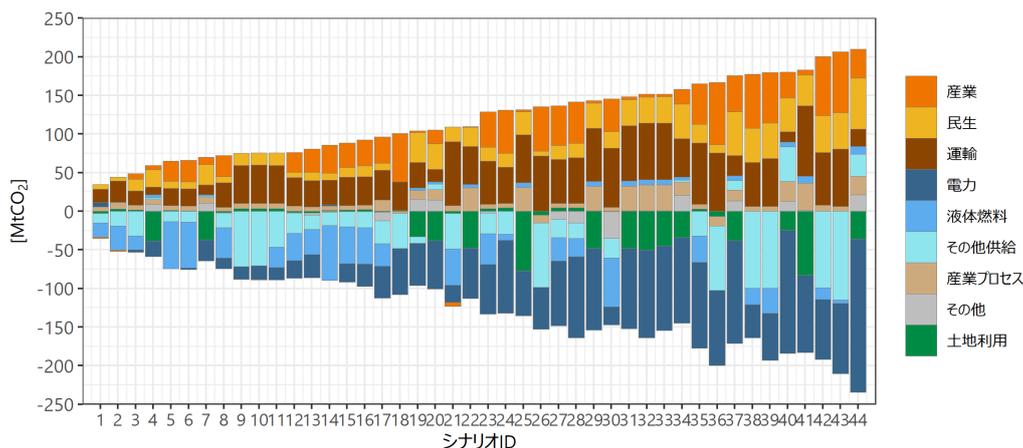
はじめに、日本の2050年CO₂ネットゼロ排出達成時の部門別CO₂排出量を確認する。図9は、44本のシナリオの部門別CO₂排出量を、残余する排出量の大きさに従って並べたものである（図中のシナリオIDは、本稿においてこの順番に従って便宜上割り当てたものであり、IDは以下共通とする）。

残余する排出量は約50～200MtCO₂であり、いずれのシナリオにおいても残余排出と同量のマイナス排出によって、CO₂ネットゼロ排出となっている。共通する点として、土地利用のみで除去を想定しているシナリオはなく、複数のエネルギー供給部門へのCDRの導入が想定されていること、また、残余する排出の大部分がエネルギー需要サイドであること（残余排出量に占めるエネルギー需要サイドの割合は中央値88%（最小値50%、最大値100%））が挙げられる。一方で、排出が残余する部門、マイナス排出となる部門の組合せをみると、同じ2050年CO₂ネットゼロ排出達成時においても、多様性があることがわかる。なお、3章の図3においてもCO₂排出量の分布を部門別に示したが、図9にみられる多様な部門の組み合わせを読み解くことは困難であることがわかる。

残余する需要サイドの合計CO₂排出量は、約21～200 MtCO₂である。部門別にみると、産業部門は約5～81 MtCO₂、民生部門は約0.4～66 MtCO₂、運輸部門は約10～91 MtCO₂である。残余する部門の組合せはさまざまであり、CO₂排出量に占める部門別の割合は中央値でみると、産業部門が35%、民生部門が24%、運輸部門が45%であり、運輸の割合が高いが、範囲（最小値と最大値の差）は、産業部門は0～63%、民生部門は0～58%、運輸部門は15～84%である。

11) 年単位のCO₂排出量は線形補間で推計しており、推計誤差を考慮して2045～2054年の間にCO₂ネットゼロ排出を達成しているシナリオとした。

12) 5つのモデル（4つのモデルタイプ）のみのシナリオに限られてしまう点には留意が必要である。



注1：2045年～2054年の間にCO₂ネットゼロ排出達成しているシナリオ。
 注2：図中のシナリオIDは、本稿においてCO₂排出量の大きさによって便宜上割り当てたもの。
 注3：「その他供給」には、ガス、熱、石炭、水素の供給部門が含まれる。

図9 日本の2050年CO₂ネットゼロ排出達成時の部門別CO₂排出量

次に、図9のうち、エネルギー需要サイド（産業、民生、運輸）のみを取り上げ、需要サイドの部門ごとに、それぞれのCO₂排出量を大きさによって並べ（図9のシナリオの並び順と異なるだけでなく、部門ごとにも並び順が異なることに留意）、最終エネルギー消費の構成との関係を分析する（図10）。産業部門については、CCS、BECCSが導入されるシナリオもあるため、CO₂貯留量との関係も分析に含める。

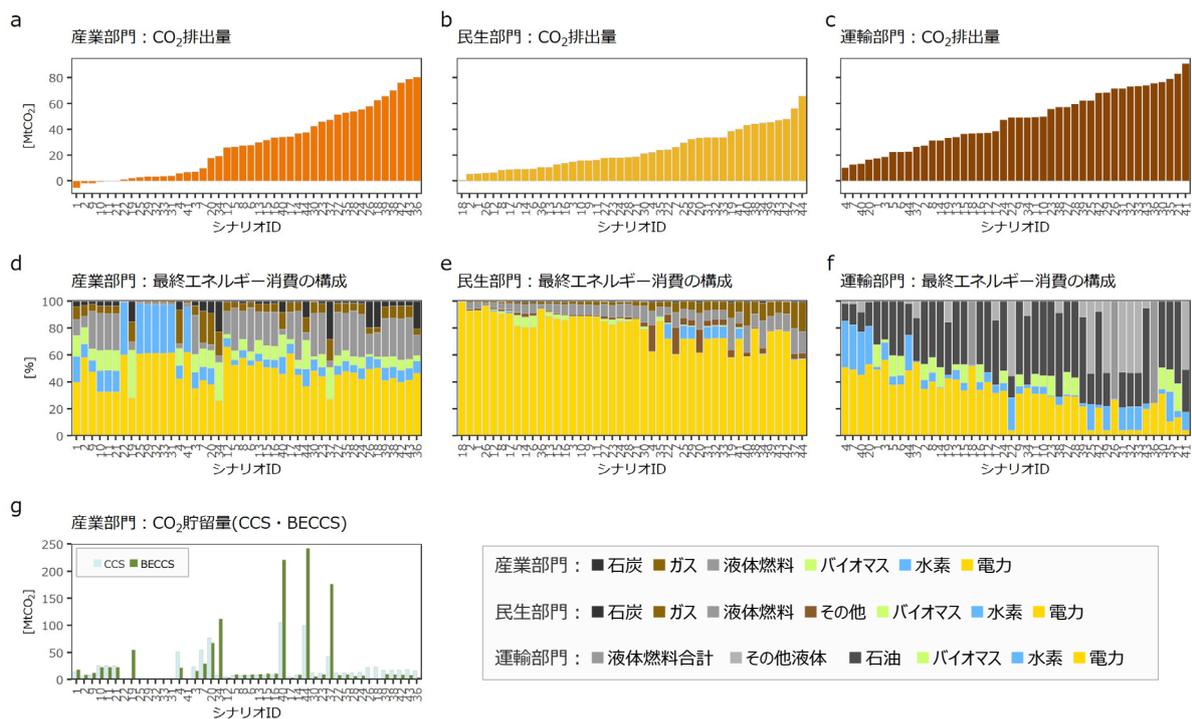
CO₂ネットゼロ達成時で、残余するCO₂排出量と最終エネルギー消費の関係を考えると、CO₂排出量が多く残余しているシナリオほど、最終エネルギー消費にも多くの化石燃料消費が残余しているため、相対的に、低炭素エネルギーキャリアの割合が小さくなる。逆に、残余するCO₂排出量が少ないシナリオでは、最終エネルギー消費に占める低炭素エネルギーキャリアの割合は大きくなる。

この関係が最も明確に表れているのは、民生部門（図10 b、e）である。CO₂排出量が小さいほど、液体燃料とガスの直接燃焼の割合が小さくなるとともに最終エネルギー消費に占める電力の割合が高くなる傾向があり、CO₂排出量が最も小さいシナリオでは、ほぼ100%となっている（図10 e）。すなわち、残余するCO₂排出量が小さいシナリオほど、電化率が高いと言えることができる。これは、民生部門では、電力以外の低炭素エネルギーキャリアの導入を想定しているシナリオが限られているためであると考えられる。

運輸部門（図10 c、f）においても、CO₂排出量が小さいシナリオほど最終エネルギー消費に占める電力の割合が高くなる傾向があるが、民生部門とは異なり、水素（燃料電池車）、バイオマス（バイオ燃料車）の割合もあわせて高くなっている（図10 f）。水素とバイオマスが同時に高くなるシナリオもあれば、いずれかだけが高くなるシナリオもある。いずれの場合も、CO₂排出量が小さいシナリオほど、低炭素エネルギーキャリアの割合が合計として高くなるが、電化率との関連は民生部門ほど明確ではない。

産業部門（図10 a、d、g）では、低炭素エネルギーキャリアに加えて、CCSとBECCSの導入が想定されているシナリオもある。CO₂貯留が想定されるシナリオでは、CCS、BECCSがそれぞれ想定されており（図10 g）、CCS分の化石燃料と、BECCS分のバイオマスの割合が相対的に大きくなるため、最終エネルギー消費に占める電力の割合は小さくなる傾向がある（図10 d）。CCSが導入されている場合、排出量にはカウントされないが、最終エネルギー消費における化石燃料消費（主に石炭）自体は残余している。

また、CCSが導入されているにも関わらず、CO₂排出量が相対的に大きいシナリオもある。この場合、排出量分とCCS分の化石燃料が消費されているため、より多くの化石燃料が残余していることが見て取れる（図10 d、gのシナリオID40、44）。CO₂貯留が想定されずにCO₂排出量を小さくするシナリオでは、電力と水素がほぼ100%となっている（図10 d、gのシナリオID22、25、29、32、33、31）。これは、CCSとBECCSが想定されない中でCO₂排出量をゼロに近づけるためには、化石燃料消費量を減らさなければならないためである。低炭素エネルギーキャリアの割合が小さく、CCSなしで排出量が小さいシナリオでは、排出量



注1：エネルギー需要部門ごとのCO₂排出量のみを抽出し、部門ごとにCO₂排出量の大きさに従い並べ替えたもの（シナリオIDは全部門合計のCO₂排出量の順番（図9）と対応。部門ごとに並び順は異なる）。

注2：バイオマスは固体のみ。ガス、液体燃料には、バイオガス、バイオ燃料も含まれる。産業部門のCO₂排出量が小さい6シナリオの液体燃料については、CO₂排出量が非常に小さいことから、バイオ燃料が含まれると推測される。運輸部門の「その他液体」は、液体燃料のうち、石油以外が含まれるが、内訳が不明なもの。

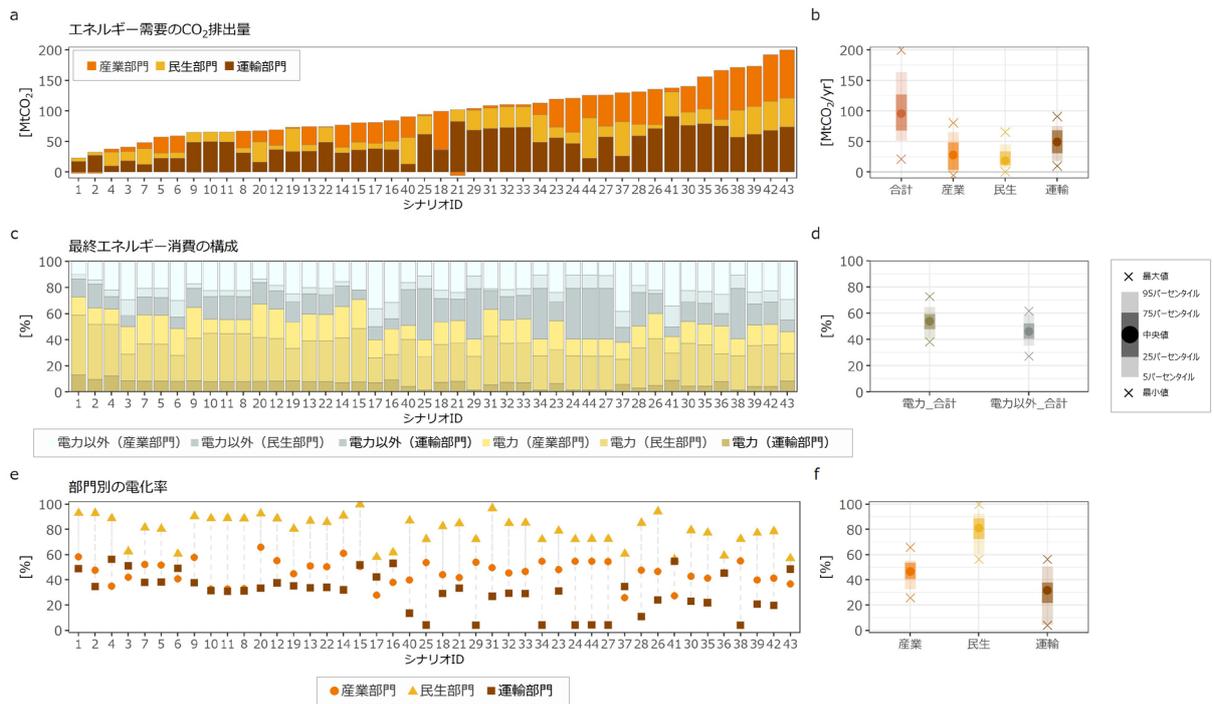
図10 CO₂ネットゼロ排出達成時の需要サイドの部門別CO₂排出量、最終エネルギー消費の構成

を除去するためにBECCSが多く導入される（図10d、gのシナリオID19、34）。この場合、化石燃料の割合とバイオマスの割合が高く、電化率は低くなる。

需要サイドのCO₂排出量の合計の順番に並べなおし、全部門を合わせて示したものが図11である。ここでは、低炭素エネルギーキャリアのうち、すべての部門で高い割合を示していた電力に着目して整理する（図11 c、e）。

2050年CO₂ネットゼロ排出達成シナリオにおける最終エネルギー消費に占める電力の割合は、中央値で見ると全体54%（38～73%）であり、すべてのシナリオで2020年（28%）よりも電化率が高くなっていることが見てとれる（図11 d）。部門別では、産業部門が47%（26～66%）、民生部門が81%（56～100%）、運輸部門が32%（4～56%）である（()内は範囲）。すべてのシナリオで、各部門における最終エネルギー消費に占める電力の割合が、2020年（産業部門：24%、民生部門：56%、運輸部門：2%）よりも高くなっている（図11 f）が、増加量はシナリオごとに異なる（図11 e）。そのため、2050年CO₂ネットゼロ排出達成時における部門ごとの電化率の組合せは、シナリオによりさまざまである（図11 e）。民生部門は、すべてのシナリオにおいて電化率が最も高い部門であるが、56～100%まで幅があり、ほかの部門よりも数十%pt以上高いシナリオもあれば、3部門ともほぼ同水準のシナリオもある。現状（2020年）にみられる部門間の電化率の大小関係が変化するほど、部門ごとの電化率の変化量に差があるシナリオもある。例えば、産業部門と運輸部門の電化率の大小は、2020年では産業部門のほうが22%pt高く、2050年においても35本のシナリオでは、現状と同様、産業部門のほうが高いままであるが、それ以外の9本のシナリオでは運輸部門のほうが高くなっている（図11 e）。

以上の通り、CO₂ネットゼロ排出達成にすべての部門で電化が進むことがシナリオ間で共通しているが、部門ごとの電化の進み方だけを見ても、多様であることを示した。なお、図11では、各パラメータについ



注1：シナリオIDはCO₂排出量の全部門合計の大きさの順番を意味する（図9と対応）

図11 CO₂ネットゼロ排出達成時の需要サイドのCO₂排出量と最終エネルギー消費、電化率

て分布もあわせて示しているが（図11 b、d、f）、個々のシナリオにおけるパラメータの組合せ（図11 a、c、e）を推測することが困難であることがわかる。

4.2. 電力需要・発電電力量

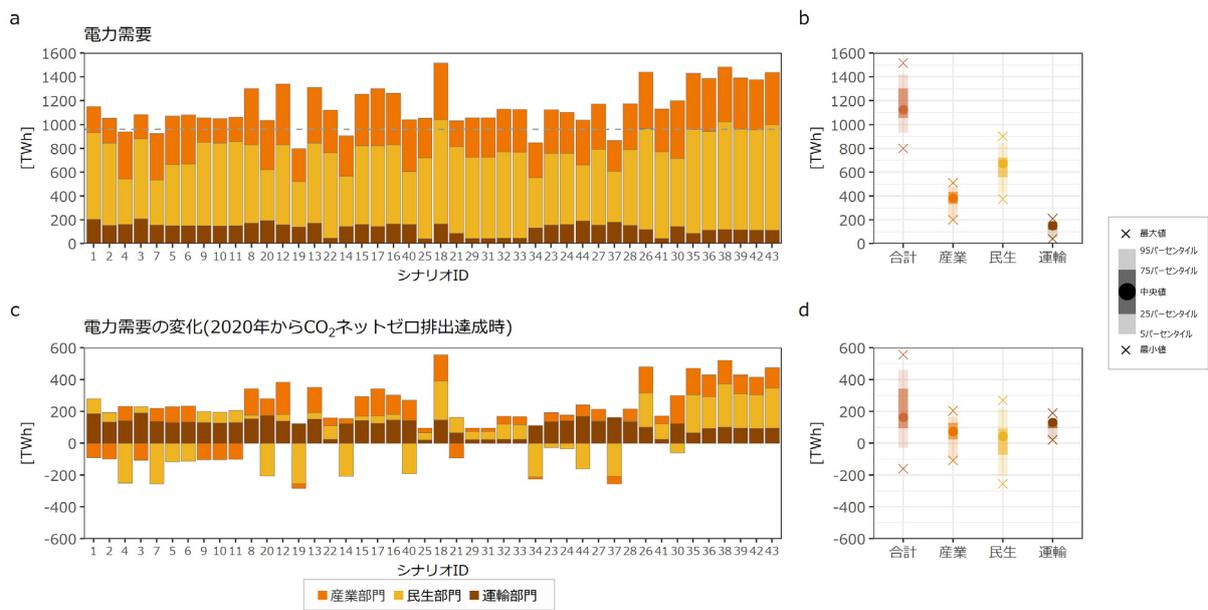
前節では、最終エネルギー消費の構成における低炭素エネルギーキャリアの割合、特に電化率に着目して分析したが、本節では、電化率と関連する需要サイドの電力需要の大きさと、それを賄う供給サイドの発電電力量の大きさについて考察する。

電化率が増加していても、最終エネルギー消費量の大きさ次第で、電力需要は増加も減少もありうる。それに加えて、発電電力量は、グリーン水素製造やDACCSのための電力がどの程度必要になるかにも左右される。これらに消費される電力量は、需要サイドの電力需要としては計上されないため、導入されるほど発電電力量と電力需要の差が大きくなる。さらに、グリーン水素が製造される場合には、発電電力量の増加につながるとともに、需要サイドへの水素が導入される分だけ、電力需要が小さくなることも考えられる。

はじめに、電力需要について、CO₂ネットゼロ排出達成時点と、現状（2020年）からCO₂ネットゼロに至るまでにおける変化量をシナリオ別に示す（図12）。

電力需要の中央値は、約1,100TWhであるが、範囲は約800～1,600TWhと幅があり（図12 a、b）、約9割のシナリオで2020年から増加が見られる（図12 c、増加は38シナリオ、減少は6シナリオ）。部門別にみると、電力需要の中央値は、産業部門は383TWh（範囲は202～514TWh）、民生部門は674TWh（範囲は376～902TWh）、運輸部門は152TWh（範囲は42～211TWh）である（図12 b）。

2020年からの電力需要の変化（図12 d）をみると、大部分のシナリオで合計だけでなく、部門別の電力需要が増加する（部門別では減少するシナリオの割合が全体よりはやや高い）。電力需要の変化量をシナリオ別にみると（図12 c）、シナリオ間で増減の違いが最もみられるのは民生部門であり、30本のシナリオが増加、14本のシナリオが減少している。産業部門は34本のシナリオが増加であるが、10本のシナリオは減少である。運輸部門は現状の電力需要がほぼゼロであるため、電化率の増加にともなってすべてのシナリ



注1：シナリオIDはCO₂排出量の全部門合計の大きさの順番を意味する（図9と対応）。
 注2：シナリオの順番は、エネルギー需要部門のCO₂排出量の大きさに従っている（図11と対応）。
 注3：灰色点線は2020年の電力需要の水準（シナリオの中央値）。

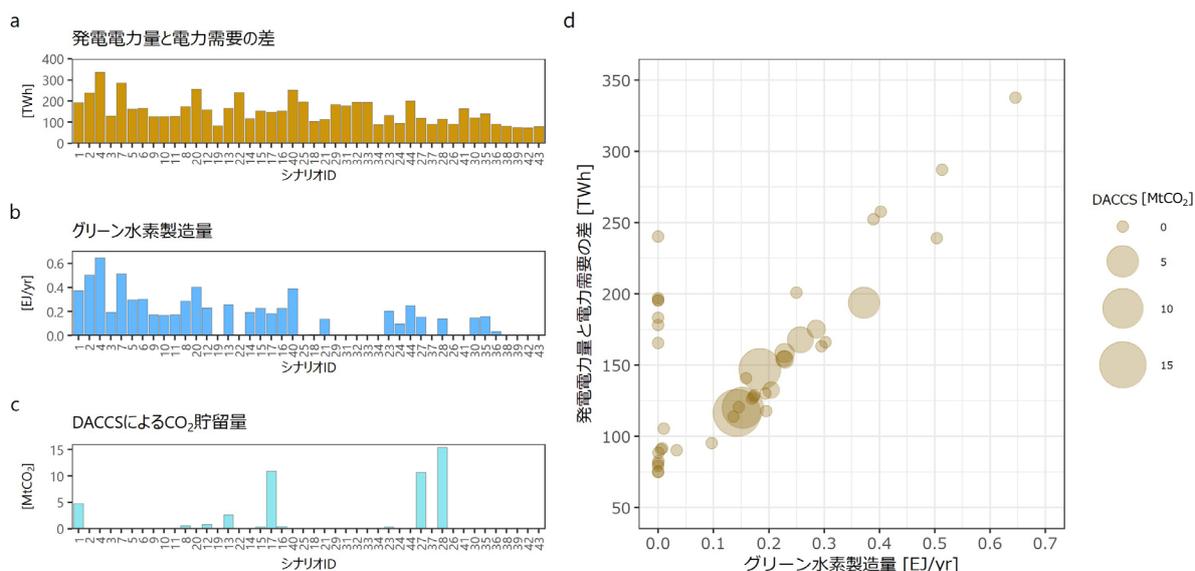
図12 日本の2050年CO₂ネットゼロ排出達成時の電力需要と2020年からの変化

オで増加している。現状で相対的に電力需要が高い民生部門では、電化が進む一方で省エネも進むことが想定され、両者の大小関係によって変化の方向が異なると考えられる。なお、ここでは各パラメータの分布も参考として示しているが（図12 b、d）、これらのみから、個々のシナリオにおけるパラメータの組合せ（図12 a、c）を推測することが困難であることがわかる。

本稿では個々のシナリオのデータは割愛するが、電力について供給サイドからみると、発電電力量の中央値は約1,300TWhであるが、範囲は約880～1,620TWhと幅がある。主なゼロエミ電源の発電電力量におけるばらつきの大きさ（90%範囲）は、太陽光が81 TWh、風力が584 TWh、原子力が362 TWh、化石燃料CCSが159 TWh、BECCSが102 TWhである。こうしたばらつきは、シナリオ分析の際に設定される、電源の導入可能量や電源間のコスト差などの想定によるものだと考えられる。

最後に、電力需要と発電電力量の差について考察する。発電電力量と電力需要の差を確認すると、中央値は約140TWhであるが、範囲は75～338TWhであり、シナリオによっては差が大きい（図13 a）。送配電ロス以外に大きな差が生じる理由として、前述のとおり、グリーン水素の製造（水の電気分解による水素製造）における電解装置の稼働と、DACCSの稼働に消費される電力が考えられる。これらの消費電力は、AR6のシナリオデータの報告上では、発電電力量としては計上されるが、需要サイドの電力需要には計上されないためである。

そこで本稿では、グリーン水素の製造量と、DACCSによるCO₂貯留量から、グリーン水素製造とDACCSによる消費電力量を推測する（AR6DBでは、グリーン水素製造とDACCSの稼働の消費電力量自体や、電解装置とDACCSの電力消費効率の設定は報告されていない）。図13に、発電電力量と電力需要の差、グリーン水素製造量、DACCSによるCO₂貯留量を、需要サイドのCO₂排出量の大きさに従って示した。グリーン水素製造量を報告しているシナリオは33本であり、報告シナリオの中央値は0.19EJ/yr（最小はほぼゼロ、最大は0.65EJ/yr）である（図13 b）。DACCSによるCO₂貯留を報告しているシナリオは11本であり、報告シナリオの中央値は0.8MtCO₂（最小はほぼゼロ、最大は15.4MtCO₂）である（図13 c）。発電電力量と電力需要の差の大きさとグリーン水素製造量の図は似通った傾向を示すことから、対応関係が推測できる（図13 a、b）。



注1：シナリオIDはCO₂排出量の全部門合計の大きさの順番を意味する（図9と対応）。
 注2：エネルギー需要部門のCO₂排出量の大きさに従うシナリオの順番に図示（図11と対応）。

図13 発電電力量と電力需要の差、グリーン水素の製造量、DACCSによるCO₂貯留量

まず、DACCSによる消費電力量を、文献値を参考に推計する。IEA（2022）によると、DACCSの単位電力消費量は約400～660 kWh/tCO₂¹³⁾とされており、これとCO₂貯留量を乗じることで、消費電力量を推計する。単位消費電力量に幅があるが、最もDACCSの影響が大きい場合として、660kWh/tCO₂を用いると、DACCSの消費電力量は、中央値で0.55TWh（範囲は0～10TWh）と推計された。DACCSの消費電力量は限定的であり、図13 dをみても、DACCSの大きさに応じて発電電力量と消費電力の差が変動する傾向は見取れない。

次に、グリーン水素製造による消費電力量を推計する。まず、電力需要と発電電力量の差から、先に推計したDACCSの電力消費を差し引いたのち、グリーン水素製造量と正の相関があることから（図13 d）、回帰分析により平均的な消費電力量を推計した（定数項は送配電ロスと解釈する）¹⁴⁾。その結果、回帰係数¹⁵⁾から推計されたグリーン水素製造の電力消費は、中央値73 TWh（範囲は0.1～242 TWh）と推計された。

以上を整理すると、発電電力量に占める割合は、電力需要（産業、民生、運輸）が80～100%、グリーン水素製造の中央値が約5%（範囲は0～20%）、DACCSが0～1%となった。電力需要が大半であるが、グリーン水素製造の消費電力量が1～2割を占めるシナリオもある。グリーン水素自体のエネルギー量（1EJ/yr以下）は限られているが、製造における消費電力量が発電電力量に与える影響は無視できない。

今回の分析対象においては、DACCSによるCO₂貯留を想定しているシナリオは少なかったため、発電電力量に与える影響は限定的である。これはCDRとしてはBECCSによるCO₂貯留をより多く想定しているシナリオが多かったためである。図9をみると、残余排出の最大値は約200MtCO₂程度であり、仮に、これらをすべてDACCSのみで除去する場合を概算すると、消費電力量としては約132TWhとなる（すべてDACCSで除去すると想定した場合には残余排出量が同量とならない可能性があるため、厳密には単純に置き換えることはできない）。

13) IEA（2022）に示されている Solid DAC のエネルギー消費量の合計とそれに占める電力の消費割合それぞれの最大値・最小値から、筆者が推計。

14) なお、回帰係数の推定に際しては、グリーン水素製造も DACCS による貯留もないシナリオにおいても、発電電力量と電力需要の差が 150TWh 以上確認できるシナリオは除外した。これらのシナリオは、グリーン水素製造の量が未報告であるが、最終エネルギー消費に占める水素の割合が高いシナリオであることから、一定程度のグリーン水素製造をしている可能性があると考えられる。これらのシナリオについては、発電電力量と電力需要の差はすべて送配電ロスとみなすことになるが、過大である可能性がある。

15) 推定された回帰式は、 $374 (20.6) \times \text{グリーン水素製造量} + 73 (16.1)$ であり（()内はt値）。調整済み決定係数は0.93。

5. おわりに

本稿では、2022年のIPCC 第6次評価報告書（AR6）のシナリオデータベースの公開により利用可能になった約600本の日本のシナリオを用いて、温暖化の抑制にともなうエネルギーシステムの転換における共通性と、2050年（2045～2054年）CO₂ネットゼロ排出達成時のエネルギー需要サイドの多様性を分析した。

脱炭素に向けたエネルギーシステムの転換における共通性として、以下を明らかにした。世界全体の温暖化を低く抑えるシナリオほど、日本においても、CO₂排出量の大幅な削減が想定されており、温暖化が2℃を下回る場合には、世界全体と同様、大部分のシナリオがCO₂のネットゼロ排出に達する。日本全体で化石燃料依存度を低減させることでエネルギー供給・需要においても、部門に関わらず大幅な削減が共通して想定される。供給サイドでは、化石燃料を原料とした供給を減少させつつ、ゼロ/ネガティブ排出の方法も組み合わせた供給へと、全部門に共通して転換される。需要サイドでは、省エネルギーに加えて、石炭・ガス・石油の直接燃焼から、低炭素エネルギーキャリア（電力・水素・バイオマス）への転換による炭素強度の低下が進む。特に、電力への転換は、すべての部門で最も進むことが共通している。また、CCS（二酸化炭素回収・貯留）やCDR（二酸化炭素除去）によるCO₂貯留は、供給・需要両サイドで導入が想定され、温暖化の抑制に応じた貯留量の増加とともに、貯留量に占めるCDRの割合も共通して高くなる。

2050年CO₂ネットゼロ排出達成時の需要サイドの多様性として、以下を明らかにした。CO₂ネットゼロ排出達成時における、部門ごとに残余するCO₂排出量とその組み合わせは多様である。また、残余排出量の大きさに応じて低炭素エネルギーキャリアの割合や化石燃料の残余の仕方も多様である。民生部門では、電力以外の低炭素エネルギーキャリア（水素・バイオマス）が限られているため、CO₂排出量の小さいシナリオほど電化率は高く、残余排出がほぼゼロのシナリオでは電化率はほぼ100%に達する。運輸部門においても、CO₂排出量が小さいほど電化率が高くなるが、水素、バイオマスの割合も合わせて高くなる。産業部門は、低炭素エネルギーキャリアの組合せに加えて、CCSとBECCS（二酸化炭素回収・貯留つきバイオエネルギー）の導入との関係から、最終エネルギー消費の構成がより多様である。

低炭素エネルギーキャリアのうち、電力は、すべての部門で共通して現状から増加する傾向が確認されたが、電化率（最終エネルギー消費に占める電力の割合）の範囲は、全体では38～73%（54%）、部門別では、産業部門が26～66%（47%）、民生部門が56～100%（81%）、運輸部門が4～56%（32%）と多様であった（()内は中央値）。電力需要についても、最終エネルギー消費の変化との関係から、電化率が増加している場合でも、増加・減少するシナリオどちらも確認された（運輸部門は一貫して増加を示すが、民生・産業部門では増加・減少もみられた）。こうした電力需要のばらつきには、発電部門のゼロエミ電源の利用可能量の想定や、グリーン水素製造、DACCS（直接空気回収・貯留）の消費電力が関係している。グリーン水素製造の消費電力量は、本稿の試算では発電電力量の約5%（最大20%）など、ゼロエミ電源の利用可能量の配分や、需要サイドでの水素利用により電力需要を変化させる可能性もある。

温暖化の抑制のためには、電化をすべての部門で進めるべきであることは、一定の共通認識があるといえる。同時に、エネルギーシステム全体のさまざまな転換に影響を受けながら、必要な電化の水準が決まることにも留意すべきである。これは電化だけに限らず、あらゆる排出削減策の検討に際しても当てはまる。個別の削減策のみに着目するのではなく、エネルギーシステム全体としてどのようなネットゼロ排出達成への道筋を描いているのかを、議論の前提として共有する必要がある。その上で、各技術の導入目標設定、研究開発支援の優先順位などの意思決定を行うべきである。そのためには、特定のシナリオや、個別の数値に縛られることなく、さまざまなシナリオにおいて共通してみられる傾向や、シナリオ間の多様性について理解を深めていくことが有用であると考えられる。

最後に、分析の課題について述べる。AR6の執筆には英文の査読付き論文のみが引用され、2022年の公開より数年前に掲載された論文も対象となる。そのため、近年の技術・政策動向や日本の特性が十分反映されていない可能性がある。例えば、水素・アンモニア発電やメタネーションなど、日本の脱炭素化に向けて検討が進められている技術は、今回分析対象としたAR6のシナリオにおいては、明確には影響が確認できなかった。日本のみを対象としたシナリオは、国内の機関によるものが大部分であり、日本の状況が詳細に考慮されていると期待でき、併せて分析することで、日本独自の事情を反映できると考えられる。

参考文献

- DeAngelo, J., Azevedo, I., Bistline, J., Clarke, L., Luderer, G., Byers, E. and Davis, S.J. (2021), “Energy systems in scenarios at net-zero CO₂ emissions,” *Nat. Commun.* 12 6096
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-26356-y>
- Edward, B. et al. (2022), “AR6 Scenarios Database (1.0),” Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.5886912>
- Gambhir, A., Rogelj, J., Luderer, G., Few, S. and Napp, T. (2019), “Energy system changes in 1.5 °C, well below 2 °C and 2 °C scenarios,” *Energy Strategy Reviews*, 23, pp.69-80.
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.006>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014), “Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Cambridge University Press.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018), “Global Warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emissions pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.”
<https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2021), “Climate Change 2021: The Physical Science Basis”, IPCC Sixth Assessment Report.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2022), “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change”, IPCC Sixth Assessment Report.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- International Energy Agency (2022), “Direct Air Capture A key technology for net zero.”
https://iea.blob.core.windows.net/assets/78633715-15c0-44e1-81df-41123c556d57/DirectAirCapture_Akeytechnologyfornetzero.pdf
- Ju, Y. and Silva Herran, D. (2021), “UTokyo-mip/JMIP_dataset: JMIP_dataset_2021 (v2.1),” Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4817656>
- Kikstra, J S. et al. (2022), “The IPCC Sixth Assessment Report WGIII climate assessment of mitigation pathways: from emissions to global temperatures”, *Geosci. Model Dev.*, 15, 9075-9109
<https://doi.org/10.5194/gmd-15-9075-2022>
- Oshiro, K., Gi, K., Fujimori, S., van Soest, H. L., Bertram, C., Després, J., Masui, T., Rochedo, P., Roelfsema, M., and Vrontisi, Z. (2019), “Mid-century emission pathways in Japan associated with the global 2 °C goal: National and global models’ assessments based on carbon budgets,” *Climatic Change*, 162, pp.1913-1927.
<https://doi.org/10.1007/s10584-019-02490-x>
- Sakamoto, S., Nagai, Y., Sugiyama, M., Fujimori, S., Kato, E., Komiyama, R., Matsuo, Y., Oshiro, K., and Silva Herran, D. (2021), “Demand-side decarbonization and electrification: EMF 35 JMIP study,” *Sustain. Sci.* 16, pp.395–410.
<https://doi.org/10.1007/s11625-021-00935-w>
- Sugiyama, M. (2012), “Climate change mitigation and electrification,” *Energy Policy*, 44, pp.464–468.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.028>
- Sugiyama, M., Fujimori, S., Wada, K. and Weyant, J. (2021, a), “Introduction to the special feature on energy scenarios for long-term climate change mitigation in Japan,” *Sustain. Sci.* 16, pp.347–353.
<https://doi.org/10.1007/s11625-021-00931-0>
- Sugiyama, M., Fujimori, S., Wada, K., Oshiro, K., Kato, E., Komiyama, R., Silva Herran, D., Y. Matsuo, H. Shiraki, and Ju, Y. (2021, b), “EMF 35 JMIP study for Japan’s long-term climate and energy policy: scenario designs and key findings,” *Sustain. Sci.*
<https://doi.org/10.1007/s11625-021-00913-2>
- UNFCCC. Paris Agreement (2015), “Decision 1/CP.17 - UNFCCC Document FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1.”
<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>
- United Nations: “Long-term strategies portal.”
<https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies>, アクセス日 2022.12.23.
- 坂本将吾 (2018) 「CO₂の長期大規模削減と電化—排出制約下における電化の促進と電力需要の関係性—」 *電力経済研究*, No. 65, pp.121-135.
https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/pdf/periodicals65_09.pdf
- 坂本将吾, 堀尾健太 (2020) 「ネットゼロ排出達成時における CO₂ 排出・除去の態様—IPCC SR15 シナリオデータを中心とした検討—」, *電力中央研究所報告 Y20001*.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y20001>
- 首相官邸 (2020) 「第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説」, 令和 2 年 10 月 26 日.
https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html

坂本 将吾 (Shogo Sakamoto)

電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 (兼) 社会経済研究所

第 2 部
民生部門

ロックイン問題を考慮に入れた 給湯分野の経済合理的なCO₂削減可能性

—家庭CO₂統計の個票データを用いた将来分析—

Economically Rational CO₂ Reduction Potential in the Hot Water Sector
considering Lock-in Issues:
Future Analysis using Micro Data of Survey on Carbon Dioxide Emissions
from Residential Sector

キーワード：電化、CO₂排出、脱炭素、経済合理性、ロックイン

山田 愛花、西尾 健一郎

要旨

給湯は家庭部門のCO₂排出の2割を占めている。今後脱炭素を進めていく上で、経済合理性の視点は欠かせない。そのためには、各種給湯機器の単価やその設置・交換工事に伴う費用、交換時の現実的な制約、世帯人数が同じ場合であっても給湯需要が異なる点なども考慮した、可能な限り実態に即した検討が求められる。そこで、本稿では家庭CO₂統計の個票データなどを用いる形で実態を反映し、費用を抑えた家庭用給湯分野の脱炭素化に必要な機器シェアの変化を分析した。結果より、(1) 給湯関連費用の低減とCO₂大幅削減の両方にロックイン問題の克服が必要であり、建物種類別に細かくみると(2) 戸建て住宅では、経済性の高い機器の着実な採用と、機器寿命を考慮したCO₂削減対策が必要なこと、(3) 集合住宅では、建物寿命を考慮した、新築におけるCO₂削減対策の前倒しが必要であることが明らかとなった。

1. はじめに

1.1. 背景

2050年カーボンニュートラル宣言が出されるなど、脱炭素への動きが加速している。脱炭素のためにはエネルギー供給側の対策に加えて、需要側の省エネや電化も同時に行う必要がある。電化に特化した分析として、例えば、ヒートポンプ・蓄熱センター／日本エレクトロヒートセンター（2022）では、足元における市場動向を踏まえて2050年までの日本のヒートポンプ等電化機器の普及見通しシナリオを複数作成し、普及拡大による一次エネルギー及び温室効果ガスの削減効果、経済波及効果の定量分析を行っている¹⁾。

一方で、脱炭素対策を進めるうえで経済合理性の視点は欠かせない。特に給湯のようにサービスを差別化しづらい機器においては、費用対効果が本来的には重要である。元・西尾（2011）では、家庭給湯分野のCO₂排出削減可能性について費用対効果を考慮し分析している。同分析はイニシャルコストとランニングコストの合計が最小となる機器構成を求め、世帯人数が多いほど電気省エネ型のヒートポンプ給湯機（エコキュートなど）のようなCO₂削減に寄与する機器を採用しやすい傾向や、CO₂削減を進めるほどイニシャルコストの占める割合が増加することを明らかにした。しかしながら、この分析は日本全体の機器が一度にすべて交換されるとした単純な技術比較分析であり、現実的には機器の交換が徐々に進んでいくことや、機器の設置・交換工事費用は考慮されていない。

分析にあたり時間軸を踏まえると、上記の課題を解消できる。加えて、新築時に採用した機器がその後の機器選択の範囲を狭める、交換前後の機器の組み合わせにより機器交換の工事費用が変化するという

1) ヒートポンプ・蓄熱センター／日本エレクトロヒートセンター（2022）の分析では、将来の機器シェアに前提を置き、給湯以外の用途や、家庭以外の部門も分析している。

状況が反映され、一度採用された機器が交換時にも再び採用されて長期にわたり固定化するロックイン問題²⁾も考慮される。本稿では時間軸を考慮した分析により、具体的にどのような対策をいつから行う必要があるかを確認する。

1.2. 目的

本稿では、費用を抑えた家庭用給湯分野の脱炭素化に必要な対策を明らかにする。機器シェアは、以下の3ケースで導出する。その上で、CO₂排出量の推移や給湯分野で必要となる費用を算出する。

- (1) 機器採用の傾向が今後も変わらないとする「現状維持ケース」
- (2) 費用最小となる機器が採用される「経済性重視ケース」
- (3) 費用をできるだけ抑えながら2050年に2020年比でCO₂排出量を80%削減する「80%削減ケース」³⁾

なお、本稿では元・西尾（2011）の分析枠組みをベースに、機器単価だけでなく機器交換時の工事費用や新築時の設置工事費用も考慮した。加えて、環境省が平成29年度より実施している「家庭部門のCO₂排出実態統計調査」（家庭CO₂統計）⁴⁾を活用し、実データに即した分析を行った。具体的には、平成31年度家庭CO₂統計の中から8,075世帯分の調査票情報（個票データ）を抽出して用い、建物種類・建築時期・地域・世帯人数によって機器シェアに違いが見られる現状や、同じ世帯人数でもそれぞれの給湯需要の大きさに応じて適した機器は異なる実態を考慮できるようにした。

1.3. 本稿の構成

本稿の構成は次のとおりである。はじめに、2章では、分析前提としてデータ詳細を示す。具体的には、家庭CO₂統計個票データの利用方法、給湯機器の単価や設置・交換工事費用、効率、エネルギー単価の前提などを述べる。次の3章では、給湯機器シェアを導出する方法や機器シェアに対して設ける制約について説明した後、分析結果を示す。分析結果では、はじめに分析のシナリオと機器シェアの関係を整理したのち、CO₂排出量や最終エネルギー消費量の変化、機器ストックシェアやフローシェアの変化、費用を明らかにする。そして、4章のおわりにでは、給湯分野の費用を抑えたCO₂削減に必要な事柄をまとめて考察を加えるとともに、今後の研究課題を述べる。

2. 分析前提

本分析の全体像を図1に示す。図1の紙マークは家庭CO₂統計の個票データを用いた情報であることを示している。家庭CO₂統計の個票データから、各世帯サンプルにおいて給湯機器の設置や交換が必要となる機会（給湯機器設置・交換イベント、以下「イベント」と称する）を定義し、各世帯サンプルの情報、給湯機器の情報、エネルギーの情報と共に入力値として用いる。これらの入力値の紐づけにより、給湯機器にまつわる費用やCO₂排出量を算出し、CO₂排出上限などの制約を満たすように2020年から2070年までの期間の総費用最小化問題を解き、イベントごとの機器シェアを決定する。

2) ロックイン問題については西尾・大藤（2018）が詳しい。

3) 2050年カーボンニュートラル宣言では2050年の温室効果ガスの排出量と吸収量の均衡が目指されている。一方で、給湯分野の場合、ロックイン問題によりCO₂排出機器が残り続けてしまう可能性がある。本稿の分析でもロックイン問題を考慮に入れるため、2050年のCO₂排出量ゼロは困難であり、基準年度は異なるものの以前の政府目標で採用されていた80%という値を用いた。

4) 政府統計ポータルサイト e-Stat でも、各種属性による有用なクロス集計表が多数公開されている。また、エネルギー・資源学会の「家庭部門のCO₂排出実態統計調査利用研究会」では、温暖化防止に貢献すべく、家庭用CO₂統計の調査票情報（個票データ）を直接利用し、多様な視点で分析をすることとしている。家庭用CO₂統計を用いた筆者らの研究には、西尾・中野（2020）や西尾（2021）がある。

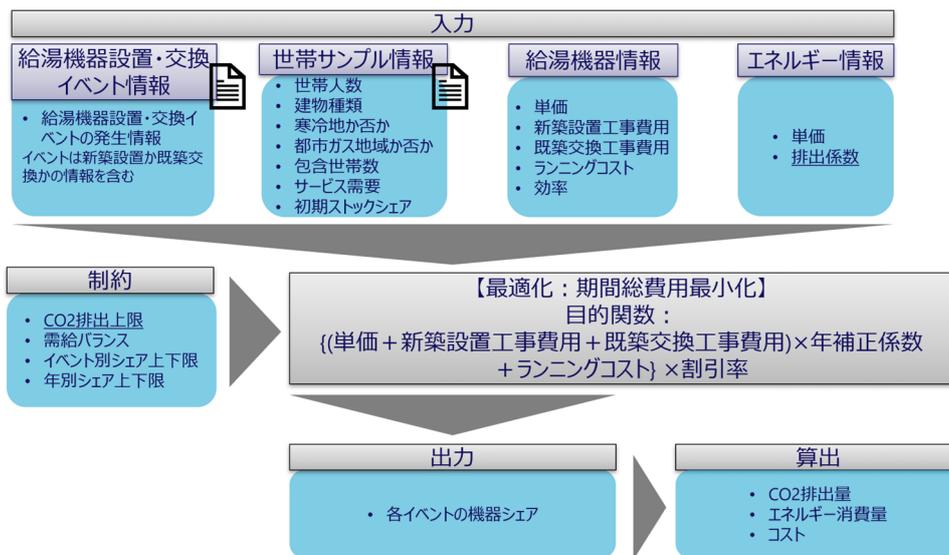


図1 給湯機器将来シェア分析モデルの全体像

2.1. 給湯機器設置・交換イベント情報

図2に示すように、家庭CO₂統計の個票データの建築時期情報をもとに、各世帯サンプルで次に給湯機器が交換される時期や家が建て替えられる時期を与え、給湯機器設置・交換イベント情報として作成した。このとき、給湯機器の交換は12年ごと、家の建て替えは48年⁵⁾ごととした。個票データが約8千世帯分あるなかで、各世帯の建築年の候補が5～50⁶⁾あり、各建築年の前提ごとに2020年から2070年の間で4～5回の設置・交換イベントが発生するため、イベント数は約40万となる。給湯機器設置・交換イベント情報の作成により、新築時に採用した機器がその後の機器選択の範囲を狭める、交換前後の機器の組み合わせにより機器交換の工事費用が変化するという状況の反映が可能となる。



図2 給湯機器設置・交換イベント情報の作成方法

5) 本稿では家の建て替えは48年ごととしたが、総務省の平成30年住宅・土地統計調査によると平成30年に築48年を超えている住宅はストック総数の約8%を占める。建て替えまでの期間が長くなれば、スペースなどの制約なしに機器選択できる機会が減少し、CO₂排出量の削減に影響をもたらす可能性がある。

6) 個票データの建設時期は、1990年以前は10年ごとの区分、1991年以降は5年ごとの区分となっている。また、建設時期が「不明」の個票データに関しては、建設時期が「1971～2020年」、つまり建築時期の候補が50あると仮定して扱った。

2.2. 世帯サンプル情報

家庭CO₂統計の個票データにもとづき世帯サンプル情報を作成した。世帯人数（1人・2人・3人・4人・5人以上）や建物種類（戸建て住宅・集合住宅）は回答データをもとに決定した。また、北海道と東北地方は寒冷地と定義した。都市ガス地域は都市ガス供給エリアの情報⁷⁾をもとに特定した。サンプルの包含世帯数は、サンプルが日本全体の世帯のどれだけを包含するかの重みである。個票データには現状の母集団を拡大推計するための補正係数が収録されている。本稿では、追加して人口減少や単身世帯比率の増加を反映した重みも掛け、将来的な人口動態の変化を考慮⁸⁾し、調査回答時から世帯構成が変化する点に対応した。給湯機器のランニングコストを求める際に用いる各サンプルの給湯サービス需要⁹⁾に関しても、家庭CO₂統計の給湯エネルギー消費量から算出した。初期ストックシェアは、各世帯サンプルの利用エネルギーと設置されている給湯機器の回答から、西尾・中野（2020）の分類方法に基づき決定した。なお、太陽熱温水器は0.93%、コージェネレーションは0.72%と設置率が低いため、本分析対象からは除外した。家庭CO₂統計では都市ガス給湯器、LPG給湯器、石油給湯器が省エネ型（潜熱回収型）か従来型かのデータがないため、日本ガス石油機器工業会のガス石油機器の販売実績と予測データより2009～2020年の合計販売台数から省エネ型比率を推計して按分¹⁰⁾し、初期ストックシェアとした。

2.3. 機器情報

元・西尾（2011）にならい、本分析では4つのエネルギー源（電気・都市ガス・LPG・石油）と2つの効率レベル（従来型・省エネ型）の組み合わせにより、8種類の給湯機器を想定する。

2.3.1. 機器単価

給湯機器の機器単価は「積算資料ポケット版 住宅建築編 2022年度版（以降は積算資料住宅建築編）」（建築工事研究会，2022a）をベースとしたが、一般的なタイプ・容量の単価の記載に限られる。そのため、価格ドットコムから取得したデータを参考に補正係数を推定して容量や省エネ性能による単価の違いも考慮できるようにした。積算資料住宅建築編には、民間の一般的な戸建て住宅等で施主に提示される見積等の記載価格の調査結果が示されている。価格ドットコムとは、参加販売店による価格情報を表示するウェブサイトである。サイトの表示価格は給湯機器の本体価格であり、工事費は含まず、リモコン・脚部カバー等の付属品有無は販売店ごとに異なる。補正係数推定のため、価格ドットコムから「給湯器」タグの価格データを取得した。複数の販売店が同一機器を扱う場合、最安値が表示されるが、本分析では補正係数の推定のみに用いている点に留意されたい。

機器単価は、エネルギー源（電気・都市ガス・LPG・石油）・効率レベル（従来型・省エネ型）・世帯人員数（1人・2人・3人・4人・5人以上）ごとに与える。世帯人数ごとの各機器の容量や、ガスとして都市ガスを用いるタイプとLPGを用いるタイプで機器単価の前提を共通とする点は、元・西尾（2011）と同様とした。なお、単価や以降で紹介する工事費用は税込み価格を用いた。使用した各エネルギー源・効率レベル・容量での機器単価を表1に示す。

(1) 電気給湯機器

電気をエネルギー源とする電気給湯機器は、従来型の電気温水器と、省エネ型としてヒートポンプ給湯機（エコキュートなど）がある。積算資料住宅建築編によると、湯はりから追い焚き、保温、たし湯までを自動で行うフルオートタイプの場合、460Lでの機器単価は従来型で431,200円¹¹⁾、省エネ型で574,200円である。他容量での価格は、積算資料住宅建築編の460Lの単価に容量補正係数を乗じることで決定した。容

7) 日本ガス協会の一般ガス導管事業者一覧より都道府県・市区町村名を抽出。

8) 国立社会保障・人口問題研究所が2018年に推計した「日本の世帯数の将来推計（全国推計）」（国立社会保障・人口問題研究，2018）に記載された総世帯数と単身世帯比率の値を利用。2040年までの値しかないので、2041年から2050年までの値は過去10年の移動平均を与えた。

9) ここでのサービス需要とは、使用するお湯の温度や量といった、最終的に消費者が享受する給湯サービスの大きさである。

10) 計算の結果、省エネ型の比率は都市ガスで0.377、LPGで0.237、石油で0.111となった。

11) 建築工事研究会（2022a）の機器単価は税抜きであり、以降に記載している価格は消費税10%分を加算した値。

量補正係数は、価格ドットコムで取得した電気給湯機器の価格と容量の関係から線形回帰を行い推定した。1人世帯用の貯湯タンク容量は200L、2人は300L、3人は370L、4人は460L、5人以上の世帯は550Lと仮定した。

(2) ガス給湯器

ガスをエネルギー源とする給湯機器は、従来型ガス給湯器と、省エネ型として、排ガスを回収・再利用して熱効率を高めた潜熱回収型の高効率ガス給湯器（エコジョーズ）を想定した。積算資料住宅建築編によると、フルオートタイプの場合、24号の省エネ型の機器単価は229,900円である。省エネ型の他容量での価格は、積算資料住宅建築編の24号の単価に容量補正係数を乗じて決定した。従来型での価格は、省エネ型の価格に従来型補正係数を加算して決定した。これらの補正係数は、価格ドットコムで取得したガス式給湯器の価格と容量や効率の関係から線形回帰を行い推定した。1人世帯用の貯湯タンク容量は10号、2人は16号、3人は20号、4人は24号、5人以上の世帯は32号と仮定した。

(3) 石油給湯器

石油をエネルギー源とする給湯器は、従来型石油給湯器と、省エネ型として、排ガスを回収・再利用して熱効率を高めた潜熱回収型の高効率石油給湯器（エコフィール）を想定した。積算資料住宅建築編によると、フルオートタイプの場合、46.5kWでの機器単価は従来型で265,100円、省エネ型で288,200円である。他容量での価格は、積算資料住宅建築編の省エネ型ガス給湯器との比率から推定した。

表1 各エネルギー源・効率レベル・容量別の機器単価（円/台）

	使用可能人数						給湯能力				
	1人	2人	3人	4人	5人以上		1人	2人	3人	4人	5人以上
電気従来型	369,824	393,430	409,954	431,200	452,446	L	200	300	370	460	550
電気省エネ型	512,824	536,430	552,954	574,200	595,446	L	200	300	370	460	550
都市ガス従来型	81,793	126,413	156,159	185,906	245,399	号	10	16	20	24	32
都市ガス省エネ型	125,787	170,407	200,153	229,900	289,393	号	10	16	20	24	32
LPG従来型	81,793	126,413	156,159	185,906	245,399	号	10	16	20	24	32
LPG省エネ型	125,787	170,407	200,153	229,900	289,393	号	10	16	20	24	32
石油従来型	145,046	196,498	230,799	265,100	333,702	kW				46.5	
石油省エネ型	157,685	213,620	250,910	288,200	362,780	kW				46.5	

積算資料住宅建築編から一般的なタイプ・容量の単価を取得し、価格ドットコムから取得したデータから得た補正係数などから、容量別・省エネ性能別の単価を推定。表の左側が単価、右側は想定した容量。

2.3.2. 新築設置工事費用

給湯機器の新築設置工事費用は、積算資料住宅建築編の値を参考に表2のように与えた。新しく設置する機器の単価は含まず、機器搬入取り付け費のみとした。従来型ガス給湯器の新築設置工事費用は資料に値が存在しないため、石油給湯器の省エネ型と従来型の比率をもとに推計した。また、都市ガス給湯器の場合は、新築戸建て住宅に伴うガス工事の費用149,700円¹²⁾を参考に、一部を設置工事費用に加算した。具体的には、世帯において主にガスが用いられると考えられる厨房と給湯のうち、給湯が占めるエネルギー消費が74.65%¹³⁾なので、111,751円（ガス工事の費用149,700円の74.65%）を給湯の負担分と考えた。集合住宅

12) 建築工事研究会（2022a）p.577に記載。

13) EDMC（2022）の2-02-04 家庭部門世帯当たり用途別エネルギー消費量より計算。

の場合、戸建て住宅の費用から埋設管工事費を除き経費を再計算した85,400円¹⁴⁾をガス工事費用として、そのうち74.65%の63,751円を給湯の負担分とした。

表2 各機器の新築設置工事費用（円/世帯・台）

	戸建て	集合
電気従来型	127,600	127,600
電気省エネ型	134,200	134,200
都市ガス従来型	141,671	93,671
都市ガス省エネ型	155,751	107,751
LPG従来型	29,920	29,920
LPG省エネ型	44,000	44,000
石油従来型	37,400	37,400
石油省エネ型	55,000	55,000

積算資料住宅建築編より取得し税込み金額に換算。一部推計。

2.3.3. 既築交換工事費用

給湯機器の既築交換工事費用は、「積算資料ポケット版 リフォーム編 2022年度版（以降は積算資料リフォーム編）」（建築工事研究会，2022b）の値を参考に表3のように与えた。資料によると、ガス従来型からガス省エネ型への交換工事費用は127,600円、ガス従来型から電気省エネ型への変更は321,200円である。そこで、ガス/石油給湯器の同様給湯機への交換はエネルギー性能に関わらず127,600円、ガス/石油給湯器から電気省エネ型への電化ケースは321,200円とした。電気従来型から電気省エネ型への交換工事費用は、ガス従来型からの交換と異なり基礎工事は終了しているものと想定し、基礎工事費用を除いた280,500円とした。電気従来型から電気従来型、あるいは電気省エネ型から電気省エネ型への交換工事費用は、基礎工事、エコキュート専用配線、電力会社への申請の費用を除いた235,730円とした。

表3 交換工事費用（円/台）

交換前	交換後							
	電気従来型	電気省エネ型	都市ガス従来型	都市ガス省エネ型	LPG従来型	LPG省エネ型	石油従来型	石油省エネ型
電気従来型	235,730	280,500 (戸建てのみ)						
電気省エネ型		235,730 (戸建て・集合)						
都市ガス従来型		321,200 (戸建てのみ)	127,600	127,600				
都市ガス省エネ型		321,200 (戸建てのみ)		127,600				
LPG従来型		321,200 (戸建てのみ)			127,600	127,600		
LPG省エネ型		321,200 (戸建てのみ)				127,600		
石油従来型		321,200 (戸建てのみ)					127,600	127,600
石油省エネ型		321,200 (戸建てのみ)						127,600

積算資料リフォーム編より取得し税込みに換算。一部推計。

14) 建築工事研究会（2022a）p.577に記載の手順を踏襲して求めた値。埋設管工事費を除いた工事費用を合計し、その1割を諸経費とした小計に消費税率分の10%を加え、最後に端数を控除した。

なお、既築時の交換の組み合わせとして、戸建て住宅の場合、同じエネルギー源の従来型から従来型、従来型から省エネ型、省エネ型から省エネ型への交換と、電気以外から電気省エネ型への交換（電化）を想定した。集合住宅の場合、後から基礎工事などを行うのが難しいため、電気従来型から電気省エネ型への交換や、電化は想定しないものとした¹⁵⁾。

2.3.4. 機器効率

各給湯機器の効率は表4に示すように設定した。ガス給湯器や石油給湯器はトップランナー値を採用した¹⁶⁾。電気省エネ型は省エネ性能カタログ（資源エネルギー庁，2020）の値¹⁷⁾を採用し、寒冷地においては効率が低下する¹⁸⁾とした。ヒートポンプ・蓄熱センター／日本エレクトロヒートセンター（2022）にならい、電気省エネ型の効率は2050年まで線形に向上すると仮定した¹⁹⁾。

表4 機器効率

	2020年	2050年
電気従来型	0.95	—
電気省エネ型	3.2	5.0
電気省エネ型（寒冷地）	2.634	4.434
ガス従来型	0.825	—
ガス省エネ型	0.925	—
石油従来型	0.883	—
石油省エネ型	0.962	—

総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会（2020）、資源エネルギー庁（2020）、総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会エアコンディショナー及び電気温水機器判断基準ワーキンググループ（2021）より取得。一部推計。

2.3.5. ランニングコスト

ランニングコストは、各サンプルに与えられたサービス需要をもとに各エネルギーの消費量を式(1)で計算したのち、エネルギー単価を掛けた式(2)で求まる。なお、ランニングコストとしてはメンテナンス費用の考慮も可能だが、燃料費と比較して安く影響が小さい、機器による差が出にくい、回数については世帯によるばらつきもあるといった理由により本稿では含んでいない。

$$\text{各エネルギーの消費量} = \frac{\text{サービス需要}}{\text{機器効率}} \times \text{機器シェア} \times \text{機器エネルギーダミー} \quad (1)$$

$$\text{ランニングコスト} = \sum_{\text{エネルギー種類}} \text{各エネルギーの消費量} \times \text{各エネルギーの単価} \quad (2)$$

15) 西尾・大藤（2018）の2015年のwebアンケート調査によると、既築集合住宅において交換後の給湯器の比率に電気省エネ型が占める割合は、持ち家で1%、賃貸で0%となっており、既築集合住宅での電気省エネ型への交換はほとんど行われていないとわかる。

16) 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会（2020）の「ガス・石油機器判断基準ワーキンググループ取りまとめ」の値を参照。ガス従来型はガス温水機器区分Ⅲ（ガスふろがま）の従来型、ガス省エネ型はガス温水機器区分Ⅲ（ガスふろがま）の潜熱回収型、石油従来型は石油温水機器区分Ⅲ（給湯用のもの・浴用あり・瞬間形）の従来型、石油省エネ型は石油温水機器区分Ⅲ（給湯用のもの・浴用あり・瞬間形）の潜熱回収型のトップランナー値を用いた。

17) フルオートタイプのエコキュート320L以上550L未満の効率の平均値。

18) 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会エアコンディショナー及び電気温水機器判断基準ワーキンググループ（2021）の「電気温水機器の取りまとめ」の値を参照。重回帰分析より、寒冷地仕様のエネルギー消費効率は一般地使用に対して0.566低下するとの結果が得られている。

19) 電気省エネ型の効率が向上しないと、電化によるランニングコスト削減効果が小さくなる。参考のため、効率が2020年のまま変わらなかった場合を試算した。結果として、電気省エネ型を採用した場合のランニングコスト削減効果が小さくなり、総費用が高くなる。一方で、各ケース（現状維持・経済性重視・80%削減）の機器シェアに顕著な違いは見られない。

2.4. エネルギー情報

2.4.1. エネルギー単価

エネルギー単価は、統一省エネラベルの目安光熱費の単価前提²⁰⁾を用い、表5のように設定した。本稿では、2020年から2050年までエネルギー単価が一定であると仮定した。なお、設定した電気単価は、電気給湯機器利用者の加入が想定される料金プラン（深夜電力が安価なプランやオール電化プラン）をもとに決められている。

表5 エネルギー単価

エネルギー	単価
電気（寒冷地仕様以外）	23円/kWh
電気（寒冷地仕様）	20円/kWh
都市ガス	156円/m ³
LPG	706円/m ³
灯油	88円/L

総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会小売事業者表示判断基準ワーキンググループ（2021）より取得。

2.4.2. CO₂排出係数

2020年のCO₂排出係数は、電気は電気事業者別排出係数（特定排出者の温室効果ガス排出量算定用）（環境省、2022a）を、そのほかのエネルギー源は温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度の値（環境省、2022b）を用いた。本稿では、電気のCO₂排出係数の変化に着目し、2050年に排出係数ゼロを達成しないBAUシナリオと、達成するカーボンニュートラル（CN）シナリオの2つの想定をおいた。図3に電気BAUシナリオと電気CNシナリオのCO₂排出係数前提の推移を示す。電気BAUシナリオでは、2030年に0.25kgCO₂/kWh²¹⁾（0.069kgCO₂/MJ）まで削減し、以降は変化なしとした。電気CNシナリオでは、2030年に0.25kgCO₂/kWhまで削減し、その後2050年0kgCO₂/kWhへ向けて線形に減少するものとした。なお、電気が排出係数ゼロを達成する場合においても単価は変化しないものとした。都市ガス、LPG、石油についてはCO₂排出係数が2020年の値のまま一定であるとした。他方で、参考として都市ガスが2050年に排出係数ゼロを達成する都市ガスCNシナリオの結果も算出し、3.3.6項にて考察を行った。

表6 2020年のCO₂排出係数（kgCO₂/MJ）

エネルギー	CO ₂ 排出係数
電気	0.126
都市ガス	0.050
LPG	0.059
灯油	0.068

環境省（2022a）、環境省（2022b）より取得。

20) 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会小売事業者表示判断基準ワーキンググループ（2021）を参照。

21) ELCS（2022）に記載された、政府が示す野心的な「2030年度におけるエネルギー需給の見通し」が実現した場合の排出係数見通し。

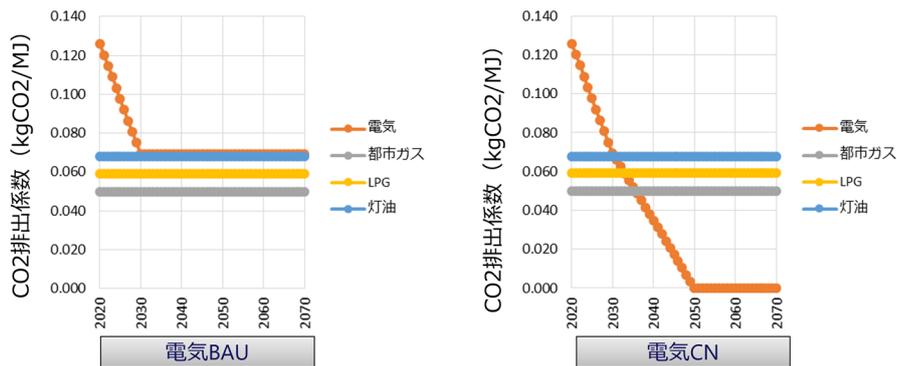


図3 CO₂排出係数前提

3. 給湯分野における経済合理的なCO₂削減可能性

3.1. 給湯機器シェアの導出方法

本分析では、現状維持ケース・経済性重視ケース・80%削減ケースの3つの方法で給湯機器シェアを求めた。

現状維持ケースでは、総費用最小化問題を解かず、現状の機器交換シェアで固定する。機器交換が現状維持ペースで進んだ場合の結果の算出を目的としている。具体的には、既築交換時は交換前と同様の機器を設置し、機器が固定化するロックインを考慮する。一方で、新築設置時には当該サンプルと同様のセグメント（世帯人数×建物種類×地域×都市ガス供給）の近年の機器交換シェアを代入する。これにより、既築交換時のロックインと同時に、建物ストックの入れ替わりに伴って近年の電気省エネ型給湯機器採用の増加傾向は反映され、機器シェアが徐々に変化する。近年の機器交換シェアは、家庭CO₂統計の2016年以降に建設されたサンプルの使用機器割合をセグメントごとに算出して与えた。サンプルの存在しないセグメントは、セグメントを広げて求めた使用機器割合で補完した²²⁾。

経済性重視ケースは、CO₂排出制約を与えずに、割引率6%²³⁾で期間の総費用を最小化した。機器交換が経済性重視で進んだ場合の結果の算出を目的としている。期間の総費用とは、2020年から2070年までにかかった機器単価・新築設置工事費用・既築交換工事費用・ランニングコストの合計である。終端効果の影響を考慮するため、2070年までで計算を行い、結果は2050年までをみている。

80%削減ケースは、2020年のCO₂排出量を基準として、2050年に80%減となるよう、排出量に対して線形的（2030年に26.7%減、2040年に53.3%減）に強める制約を与えたうえで、割引率6%で期間の総費用を最小化した。制約以下のCO₂排出量を条件としながら、できるだけ費用を抑えて機器交換が進んだ場合の結果の算出を目的としている。

現状維持ケースと経済性重視ケースは、機器シェアがCO₂排出係数に影響されずに1通りだけ求まる。よって、CO₂排出係数の想定が異なる場合の結果はCO₂排出量のみ再計算する。一方で、80%削減ケースは、機器シェアがCO₂排出係数の影響を受けて変化する可能性があるため、CO₂排出係数の想定ごとに機器シェアを求める必要がある。

22) まずは、世帯人数×建物種類×寒冷地×都市ガス供給のセグメントで求めた近年の機器交換シェアで補完した。それでもサンプルの存在しないセグメントは、建物種類×寒冷地×都市ガス供給のセグメントで求めた近年の機器交換シェアで補完した。

23) Geller, H. & Attali, S. (2005) で公共政策の視点からは割引率が4~8%の水準での評価が推奨されている。したがって、本稿での割引率も元・西尾 (2011) と同様に 6%とした。消費者の視点からは割引率が高めに設定される場合や、建物種類により割引率を変えるといった考え方もある。研究により割引率は異なるため、比較の際には注意されたい。

3.2. 機器シェアに対する制約

3.2.1. イベント別の機器シェア上下限

イベント別の機器シェア上下限制約は、各世帯サンプルの給湯機器設置・交換イベントの機器シェアに対して与えられる、満たすべき上下限制約である。最適化問題としては、給湯機器設置・交換イベントの機器シェアが0から1の間の連続変数を取れるように定義している。一方で、ほぼすべてのイベントにおいては経済性の高い機器は1つに絞られるため、ある機器のシェアが1となり他が0となる²⁴⁾。通常の分析では極端な結果が得られやすくなるのに対し、世帯人数などの属性が同じでも給湯需要が異なるサンプルを多数用いた本分析では、各イベントのシェアが0や1であっても、イベントを集計して全体で求めると連続的なシェアが導出される。イベントごとの交換前後の機器の組み合わせ（スイッチシェア）に制約を設けることで、改修工事やスペースなどの問題から既築集合住宅において電化が進みにくい現状を反映している。

イベントごとの機器シェアに対する制約

- ・ 機器シェアの合計は1
- ・ 2020年の機器シェアは初期ストックシェアと一致
- ・ 都市ガス地域でない場合は都市ガス給湯器のシェアが0

イベントごとの交換前後の機器の組み合わせ（スイッチシェア）に対する制約

- ・ 2020年のイベントと新築時はスイッチシェア0
- ・ 2020年のイベントと新築時以外のスイッチシェア合計は1
- ・ 交換後機器ごとのスイッチシェアの集計はイベントごとのシェアと一致
- ・ 交換前機器ごとのスイッチシェアの集計は1つ前のイベントごとのシェアと一致
- ・ 都市ガス地域の新築は、初期ストックシェアと同様のエネルギー源か電気を選択²⁵⁾
- ・ 戸建ての既築交換時は同様のエネルギー源の機器か電気省エネ型へ交換
- ・ 既築集合住宅においては交換が容易ではないケースが多いため、本分析では電化や電気従来型から電気省エネ型へのスイッチシェアを0に制約

3.2.2. 年別の機器シェア制約

年別の機器シェア上下限を表7に示す。年別の機器シェア上下限とは、各年の機器シェアに対して与えられる上下限制約である。ストックシェアや、新たにその年から採用される機器のシェア（フローシェア）の前年との比率で与えられる制約には、従来型機器や石油給湯器の採用が今後増加しないことが反映されている。フローシェアにおいては、より細かいセグメントに対しても制約を与え、従来型機器や石油給湯器の比率が各セグメントにおいても前年を上回らないようにした。

24) 一部のイベントでは、CO₂ 排出制約を満たすため、経済性が最も高い機器と経済性では劣るが CO₂ 削減のため必要な機器でシェアを分けあう場合がある。

25) 都市ガス地域だが LPG 給湯器を使用する世帯も一部存在する。そうした世帯はエネルギー源に LPG を使い続けるか、電化する（ただし既築交換時に電化できるのは戸建ての場合のみ）ものと仮定している。

表7 年別の機器シェア制約

	ストックシェア制約				フローシェア制約			
	絶対値		前年との比率		絶対値		前年との比率	
	上限	下限	上限	下限	上限	下限	上限	下限
機器別	1	0	従来型は前年以下	0	1	0	従来型は前年以下	0
エネルギー源別	1	0	石油は前年以下	0	1	0	石油は前年以下	0
機器×世帯人数×建物種別×新築既築別	-	-	-	-	1	0	都市ガス・LPG従来型は前年以下	0
石油給湯器×新築×世帯人数×建物種別	-	-	-	-	1	0	前年以下	0

3.3. 分析結果

3.3.1. 機器シェア構成の種類と結果の関係

本分析では、CO₂排出係数2通りと給湯機器シェアの導出方法3通りの組み合わせで、計6つの結果を求めた。現状維持ケースと経済性重視ケースではCO₂排出係数に関わらず機器シェアは1通りであり、電気BAUシナリオの80%削減ケースでは解が得られなかったため、出てくる機器シェア構成は表8のA、B、Cで示した3通りとなる。

なお、仮に、全世帯が電気省エネ型に移行できる状況であれば、電気BAUシナリオにおいても2050年に2020年比で80%以上の削減となる。ロックイン問題の影響で世帯の一定割合が移行できない状況では80%削減に満たず、エネルギー供給側の脱炭素も必要となる。

表8 結果として出てくる給湯機器シェア構成

	現状維持	経済性重視	80%削減
電気BAU	A	B	解なし
電気CN			C

3.3.2. CO₂排出量

CO₂排出係数のシナリオ別のCO₂排出量の推移を図4に示す。図4において、708.8万tCO₂を示す黒色の横線は、2020年の3,544万tCO₂から80%削減した場合のCO₂排出量を示している。図4左側の電気BAUシナリオでは、現状維持ケース（2050年時点で2,300万tCO₂）が経済性重視ケース（2050年時点で1,661万tCO₂）より排出量が多い。図4右側の電気CNシナリオにおいても、現状維持ケース（2050年時点で1,910万tCO₂）が経済性重視ケース（2050年時点で1,243万tCO₂）より排出量が多い。このように、どちらのCO₂排出係数シナリオにおいても、経済性重視ケースの方が現状維持ケースよりもCO₂排出量を抑えている。つまり、経済性の高い機器の採用を進めることはCO₂削減にも寄与する。

次に、経済性重視ケースの詳細を確認する。電気BAUシナリオにおいても、2020年比で2050年にCO₂排出量を50%以上削減可能だが、80%削減までは届かない。電気CNシナリオにおいても、BAUシナリオよりも削減量は大きくなるが、80%削減には届かない。80%削減には、単に経済性の高い機器を選択するだけでなく、CO₂排出制約のもと初めて経済性が高くなる機器も選択していく必要がある。

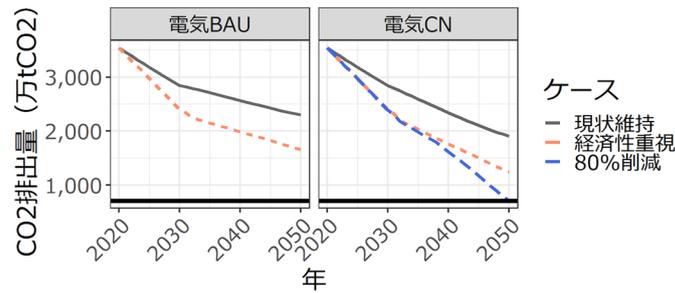


図4 CO₂排出係数シナリオ別のCO₂排出量

3.3.3. 最終エネルギー消費量

以降は機器シェア構成の違いがもたらす影響に着目し、現状維持ケース・経済性重視ケース・80%削減ケース（電気CNシナリオのとき）の3つの結果を比較する。

エネルギー別の最終エネルギー消費量の推移を図5に示す。電気の場合、機器効率の改善や人口減少の影響で、2030年中頃まではどのケースにおいても消費量は減少する。2030年代後半までは各ケースの消費量の差は少ないが、80%削減ケースでは排出係数の減少に伴い電化が進んでいくことで、消費量が減少から増加に転じる。都市ガスの場合、現状維持ケースと比較して経済性重視ケースや80%削減ケースでの消費量が少なくなる。2050年には現状維持ケースと比較して経済性重視ケースで約7割、80%削減ケースで約4割の消費量となる。LPGの場合も、現状維持ケースと比較して経済性重視ケースや80%削減ケースでの消費量が少なくなる。2030年頃には、経済性重視ケースや80%削減ケースは現状維持ケースの半分程度の消費量となる。灯油の場合、どのケースにおいても消費量は年々減少していく。経済性重視ケースや80%削減ケースは現状維持ケースよりも消費量が少なくなる。

以上のように、経済性重視の機器交換やCO₂削減を目指した機器交換は、各エネルギーの最終エネルギー消費量に変化をもたらす。

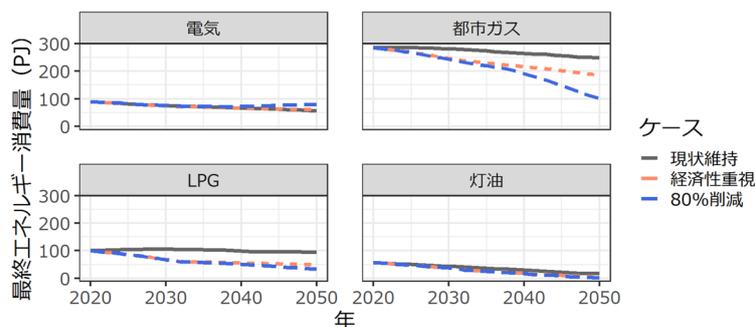


図5 エネルギー別の最終エネルギー消費量

3.3.4. 機器シェア構成

2030年と2050年のストックシェア構成を図6に示す。2030年の機器ストックシェア構成は、経済性重視ケースと80%削減ケースではほぼ同様となっており、現状維持ケースと比較して省エネ型への置き換えと電化が進んでいる。一方、2050年のストックシェア構成は、経済性重視ケースと80%削減ケースで違いがあり、80%削減ケースの電気省エネ型ストックシェアが大きくなる。80%削減のためには、2030年までの段階では経済性重視ケースと同様に経済性の高い機器の採用を進めれば良いが、それ以降は経済性の高さだけで

なくCO₂削減効果も考慮して電気省エネ型の採用世帯を増やす必要がある。全世帯に占める割合の少ない非都市ガス地域（約12%）や寒冷地（約11%）も、ストックシェア構成のバランスは全体とは異なる²⁶⁾が、上述の傾向は同様である。

なお、80%削減ケースのLPG省エネ型に着目すると、2030年と2050年のストックシェアはほぼ同じである。これは、LPG省エネ型採用に経済合理性のあるセグメントが一部存在するためである。非都市ガス地域で石油給湯器のフローシェアが前年より増加しない状況下では、新築設置時に採用可能性のある機器が電気給湯機器かLPG給湯器に絞られる。給湯需要が少ない場合、より効率の高い電気省エネ型のランニングコスト削減効果も限られるため、高い新築設置工事費用を支払い電化するよりも、LPG省エネ型を使うことが選択される。既築交換時も同様で、給湯サービス需要の少ない少数世帯では電化の経済合理性が低く、元々LPG給湯器を使っていれば同じ機器への交換が選択されやすい。一方で、LPG従来型から省エネ型への交換は進み、また、世帯人数が多ければ電化もされる。よって、図6のストックシェア構成とは異なり、図5のLPGの最終エネルギー消費は経済性重視ケースや80%削減ケースで大幅に少なくなっている。

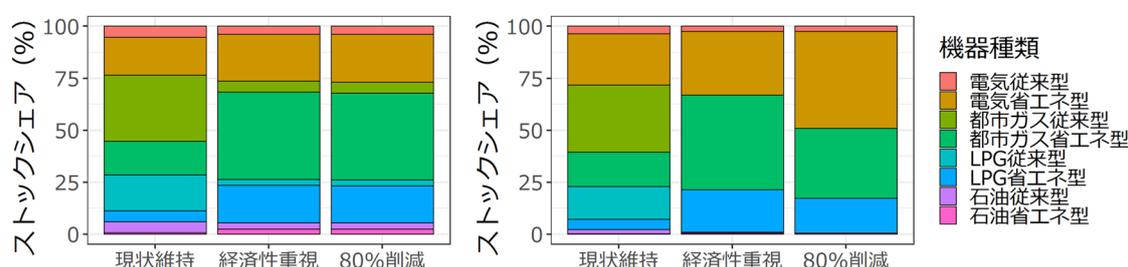


図6 2030年（左）と2050年（右）の機器ストックシェア構成

3.3.4.1. 経済性を高めるために必要な変化

2030年の機器ストックシェア構成は経済性重視ケースと80%削減ケースではほぼ同様であったことから、2030年までは経済性の高い機器の採用促進がCO₂削減においても重要であると考えられる。そこで、現状維持ケースと経済性重視ケースの比較により、機器交換の経済性を高めるために何が必要かを明らかにする。

(1) 新築・既築の両方における従来型機器の採用減少

図7は新築住宅と既築住宅の従来型機器のフローシェア推移を示す。現状維持ケースでは、新築と既築の両方で従来型機器のフローシェアが残り続ける。一方で、経済性重視ケースの場合、新築住宅においては2021年以降、電気従来型を除く従来型機器のフローシェアがゼロになる。既築住宅に関しても、都市ガス・LPGの従来型フローシェアはすぐにゼロとなり、石油従来型も徐々に減少する。

26) 非都市ガス地域では都市ガス機器を利用できないため、都市ガス機器のストックシェアがゼロとなり、代わりにその他の機器のストックシェアが大きくなる。寒冷地では、全体と比較して都市ガス機器のストックシェアが小さく、そのほかの機器のストックシェアが大きい。2050年において、現状維持ケースと比較して経済性重視ケースで増加している電気省エネ型ストックシェアは、全体よりも非都市ガス地域や寒冷地で大きい。非都市ガス地域は都市ガスが使えない分、電気省エネ型の経済性が高くなる世帯数が増えたと考えられる。また寒冷地は、効率は低いものの、電気の単価が安い、給湯需要が多いといったことから電気省エネ型の経済性が高くなる世帯数が増えたと考えられる。

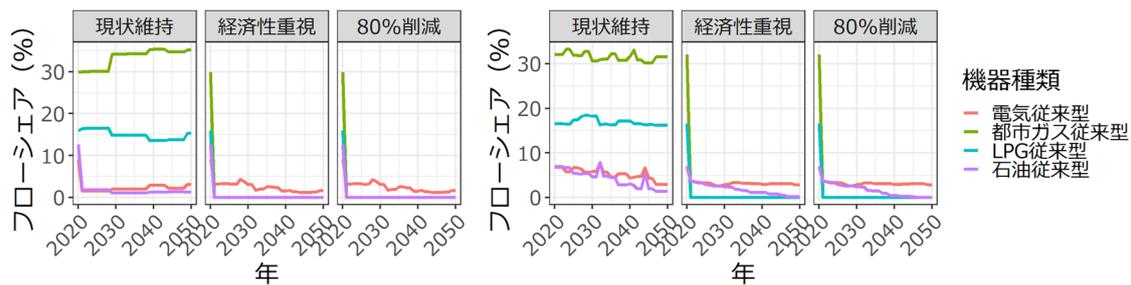


図7 新築住宅（左）と既存住宅（右）の従来型機器フローシェア推移

(2) 特に世帯人数の多い戸建て住宅における電気省エネ型給湯機器の採用増加

図8（左）は2030年における戸建て住宅の電気省エネ型フローシェアを既築・新築別でみている。経済性重視ケースでは、新築・既築ともに現状維持ケースよりもフローシェアが大きい。新築に関しては、現状維持ケースでも近年の電気省エネ型の採用増加傾向が反映されているが、経済性重視ケースはそれを上回るペースで電気省エネ型が採用されている。また、既築は新築よりも電気省エネ型の工事費用が他機器と比較して高くなるが、それでも新築と同様の比率で電気省エネ型が採用されている。本分析では考慮していないスペースの問題などで経済性が高くとも採用に至らない状況もありうるが、現状維持ケースでは、新築住宅の給湯機器設置時や既存住宅の給湯機器交換時に電気省エネ型の経済性の高さが見過ごされている可能性がある。

また、図8（右）に2030年における世帯人数別の電気省エネ型ストックシェアを示す。世帯人数が多いほど電気省エネ型のストックシェアは大きくなっており、現状維持ケースと経済性重視ケースの差も大きくなっている。これは、世帯人数が多いほど給湯サービス需要が多く、高効率な電気省エネ型の経済性が高まるためである。したがって、特に人数が多い世帯への普及に力を入れる必要がある。

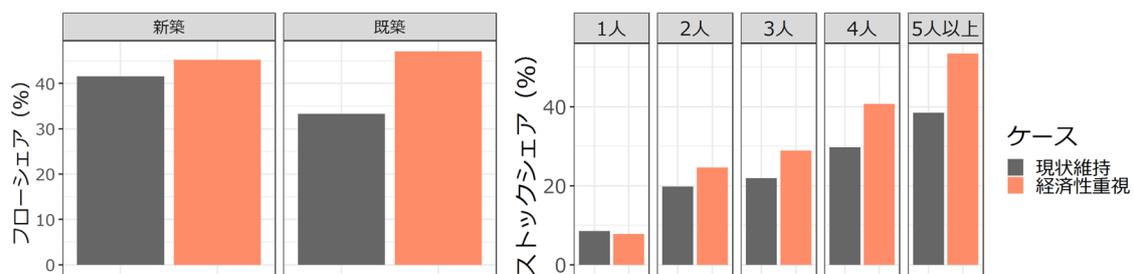


図8 2030年における電気省エネ型の戸建て住宅でのフローシェア（左）と世帯人数別のストックシェア（右）

3.3.4.2. 80%削減のために必要な変化

2050年のストックシェア構成は、経済性重視ケースと80%削減ケースで異なり、80%削減ケースの電気省エネ型ストックシェアが大きくなっている。そこで、経済性重視ケースと80%削減ケースの比較により、80%削減のためには経済性の高い機器の採用に加えて何が必要かを明らかにしていく。

(1) 戸建て住宅における機器寿命を考慮した加速的な電気省エネ型ストックシェアの普及拡大

図9（左）は戸建て住宅の電気省エネ型ストックシェア推移を示す。80%削減ケースでは、2030年代後半

から加速的に、経済性重視ケースよりも電気省エネ型のストックシェアが増加している。これは、本分析は機器寿命を12年と想定しているため、2050年から逆算すると2038年以降に生じる機器交換は最後の機会となり、CO₂排出を大幅に削減するならば、電気省エネ型を積極採用する必要に迫られるためである。

(2) 早期からの集合住宅における電気省エネ型ストックシェアの増加

図9（右）は集合住宅の電気省エネ型ストックシェア推移を示す。80%削減ケースでは、経済性重視ケースよりも電気省エネ型のストックシェアが足元から増加している。集合住宅の場合は既築の電化が困難なため、早期から徐々に新築の電化を進めていく必要がある。

また両ケースにおいて、電気省エネ型のストックシェアは戸建て住宅よりも小さい。集合住宅ではランニングコストメリットの出にくい少人数世帯が多いことと、既築交換での電化が困難なためストックを増やすタイミング自体が限られていることが影響している。

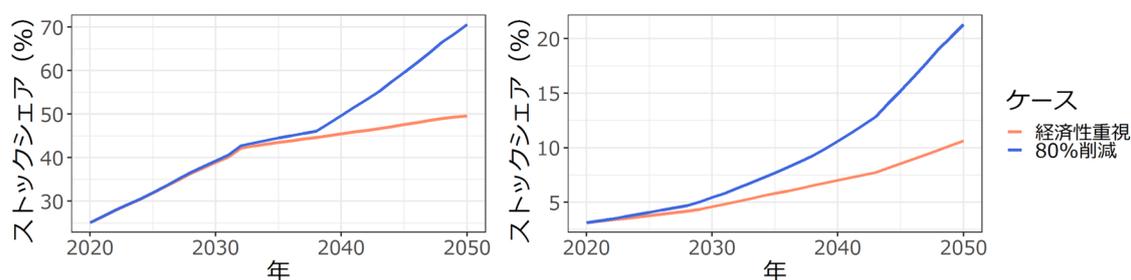


図9 戸建て住宅（左）と集合住宅（右）の電気省エネ型ストックシェア推移

3.3.5. 費用

3.3.5.1. 総費用

図10（左）に機器単価・新築設置工事費用・既築交換工事費用・ランニングコストの合計費用である総費用（名目。以降も費用はすべて名目で算出）を各年で算出して示す。80%削減ケースでは、CO₂制約がなければ他機器の経済性が高い世帯においても電気省エネ型を採用する必要が出てくる。そのため、総費用は経済性重視ケースよりも高く、2050年付近に関しては現在維持ケースよりも高くなる。一方で、期間全体の費用²⁷⁾は、経済性重視ケースが最も抑えられ、次いで80%削減ケース、現状維持ケースとなり、80%削減ケースでも現状維持ケースよりも抑えられる。

図10（右）に2050年の総費用の内訳を示す。電気式をはじめとする省エネ型の採用増加により、経済性重視ケースや80%削減ケースでは機器単価や新築設置工事費用、既築交換工事費用といった初期費用が高くなる。一方で、ランニングコストは大幅に安くなる。

27) 後述するように費用は精緻化の余地があるため参考としての値となるが、現状維持ケースと比較した2020年から2050年までの期間の総費用は、経済性重視ケースでは約4.3兆円抑制、80%削減ケースでは約2兆円抑制となる。

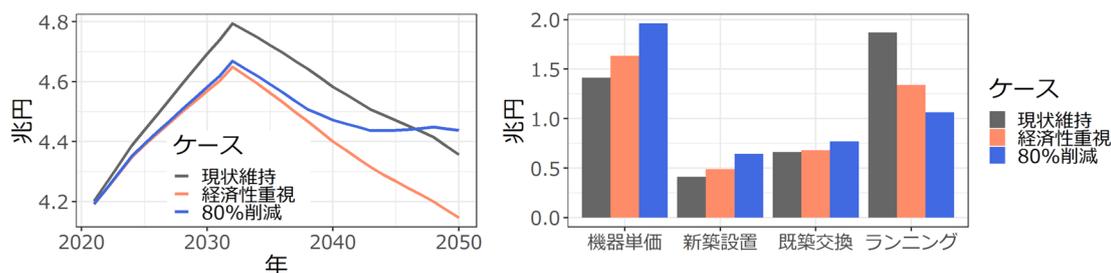


図10 各年における総費用（左）と2050年の総費用の内訳（右）

3.3.5.2. 世帯人数別費用

図11（左）に、2050年における世帯人数別の総費用の平均を示す²⁸⁾。世帯人数が少ない場合は、現状維持ケースと経済性重視ケースの価格差が小さく、現状維持ケースより80%削減ケースで費用が高くなる。一方で、世帯人数が多い場合は、現状維持ケースと経済性重視ケースの価格差が大きく、現状維持ケースより80%削減ケースで費用が安くなる。

図11（右）において、2050年の4人世帯の費用内訳を確認すると、経済性重視ケースや80%削減ケースは現状維持ケースと比較してランニングコストが大幅に安い。世帯人数が多いと給湯需要も多いため、ランニングコストの削減余地が大きく、電気式をはじめとする省エネ型の初期費用の高さを補える。

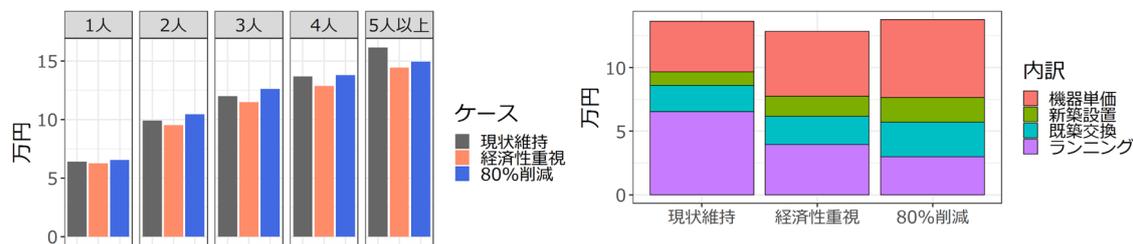


図11 2050年における世帯人数別の費用（左）と4人世帯の費用内訳（右）

3.3.5.3. 4人世帯の建物種類別費用

図12に2050年・4人世帯における建物種類別の総費用の平均を示す。現状維持ケースと経済性重視ケースの比較を行うと、戸建て住宅の方が集合住宅よりも価格差が大きく、経済性を高める余地が残されている。また、現状維持ケースと80%削減ケースの比較を行うと、戸建て住宅では80%削減ケースの費用が安く、集合住宅では高い。同様の世帯人数であっても、住んでいる建物種類により費用への影響は変化する。

なお、ほかの世帯人数での傾向も同様である。戸建て住宅の方が経済性を高める余地が残されている傾向や、集合住宅の方が現状維持ケースと比較して80%削減ケースでの費用がより高くなり、5人世帯においては安くなるものの戸建て住宅ほどではないといった傾向がある。

28) 費用には世帯人数だけでなく、地域や建物種別など様々な要因が絡んでいるが、ここでは世帯人数に着目して結果を述べる。なお、各世帯人数での戸建て住宅と集合住宅の割合は次の通りであり、1人世帯は集合住宅の割合が多く、それ以外は戸建て住宅の割合が多い。1人：戸建て28.6%、集合71.4%、2人：戸建て63.3%、集合36.7%、3人：戸建て64.8%、集合35.2%、4人：戸建て71.5%、集合28.5%、5人以上：戸建て81.6%、集合18.4%。

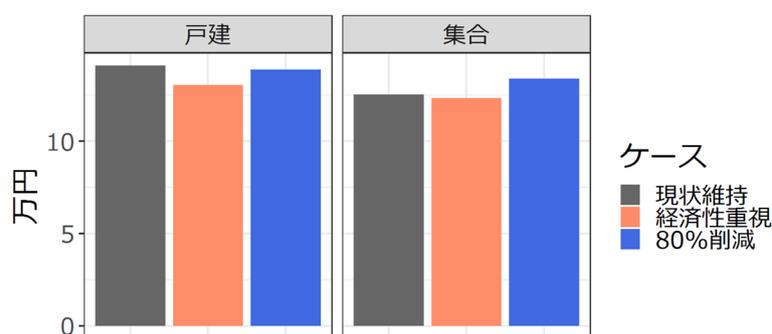


図12 2050年・4人世帯における建物種類別の費用

3.3.6. 参考：都市ガスカーボンニュートラルの考察

80%削減ケースの機器シェアを求めるにあたり、上述までの分析では電気CNシナリオを用いていた。しかしながら、電気以外のエネルギー源も脱炭素を目指す動きがある。そこで、都市ガスのCN化が与える影響について参考として考察を加える。具体的には、日本ガス協会（2021）に従い、都市ガスの排出係数を2030年に2020年比で5%低減させ、その後2050年にゼロとなるように線形に減少すると想定した都市ガスCNシナリオでの試算を行った。試算の際には、単価は変化しないものと仮定した²⁹⁾。

都市ガスCNシナリオの試算結果のうち、電気がBAUシナリオの場合、経済性重視ケースの機器シェアでは80%削減にわずかに届かないため、その分の追加対策を行う必要が生じる。具体的には、前掲図6における2050年の経済性重視ケースのストックシェア結果と比べて、80%削減時の都市ガス省エネ型のストックシェアはわずかに大きくなる。このとき電気省エネ型のストックシェアは小さくなっておらず、LPG省エネ型と電気や石油の従来型（都市ガス、LPGの従来型のストックシェアは経済性重視ケースでも80%削減ケースでもゼロ）のストックシェアがわずかに小さくなる。電気もCNシナリオの場合は都市ガスと電気の排出係数がゼロとなるため、2020年比の2050年のCO₂削減率は現状維持ケースの機器シェアでは80%以上、経済性重視ケースでは90%以上となる。

すなわち、CO₂大幅削減時に都市ガスがCN化する場合においても、電気のシナリオがBAUかCNかに関わらず、経済性重視ケースと同程度まで電気省エネ型のストックシェアを増やす必要がある。また、経済性重視の機器採用で十分なCO₂削減効果を得られるため、都市ガスがCN化するシナリオにおいても、経済性重視ケースと比較して80%削減ケースで大幅に都市ガス省エネ型のストックシェアが増加するという結果にはならなかった。

4. おわりに

4.1. 分析結果のまとめと考察

本稿では、(1) 機器採用の傾向が今後も変わらないとする「現状維持ケース」、(2) 費用最小となる機器が採用される「経済性重視ケース」、(3) 費用をできるだけ抑えながら2050年に2020年比でCO₂排出量を80%削減する「80%削減ケース」の3通りの方法で給湯機器シェアを導出した。そのうえで、CO₂排出量の推移、将来の機器シェア、給湯にまつわる費用などを求め、各ケースの比較を行った。本稿の時間軸を踏まえ、

29) 日本ガス協会（2021）は、CNメタンは2050年にLNGと同水準の価格を目指すという目標を掲げている。一方で、排出係数の低減には水素製造装置の低価格化、CO₂回収やメタネーションのコスト低減、技術開発といった課題がある。また、経済性の高い機器の採用やCO₂削減効果の高い機器の採用が進み、図5で示したように都市ガスの最終エネルギー消費量が減少すると、単価が上昇する可能性もある。海外では、今後脱炭素のために電化が進み都市ガス利用者が減少すると、都市ガス事業の固定費を残りの少ない顧客で負担する必要が生じ、料金が上昇するという分析もある（Davis, L. & Hausman, C., 2021）。

経済合理性を考慮した分析から大きく3点が明らかとなった。

(1) 給湯関連費用の低減とCO₂大幅削減の両方にロックイン問題の克服が必要

現状に見られるような、採用する機器が固定化するロックイン問題が解消されない場合、経済性の高い機器の採用が見逃される場合も多く、わが国の給湯分野の費用・CO₂削減につながらない。経済性を重視した機器採用が実現できれば、電気省エネ型（ヒートポンプ給湯機）などの導入が進み、CO₂排出量を2050年に2020年比で5割以上³⁰削減できる。このことから、ロックイン問題の克服に向けて、給湯機器の市場を変革していくことの重要性は明らかである。

その上で、CO₂大幅削減を目指すためには、CO₂制約下ではじめて経済性が高くなるような世帯に対して、省エネ型の採用を進める必要が生じる。それでもなお、現状の機器採用を続けるより2050年までの給湯関連の総費用を抑えられることは、注目に値する。

このときの費用の内訳を見ると、電気式をはじめとした省エネ型の採用が増えるため、機器・関連工事費用は高くなりランニングコストは安くなる。給湯需要の多い世帯ほど、ランニングコストが安くなる恩恵を受けやすい。特に4人以上の世帯では、電気省エネ型の経済性が優れている場合が多く、分析結果でも現状の機器採用の場合と比較してストックシェアが大きくなることを確認できる。ランニングコストの削減を進めることは、日頃の家計負担を抑制するとともに、エネルギー価格高騰による影響リスクの軽減にもつながると考えられる。一方で、初期費用は高くなる。現実には総費用を考慮に入れた経済合理的な機器採用が行われていない実態を踏まえると、初期投資を支援するための補助、ランニングコストをわかりやすく伝えるための情報提供の徹底、機器採用に関連する規制措置の強化など、何らかの対策の検討が求められる。

(2) 戸建て住宅では、経済性の高い機器の着実な採用と、機器寿命を考慮したCO₂削減対策が必要

戸建て住宅では、第一に、経済性の高い機器の採用を徹底していく必要がある。すなわち、従来型から省エネ型への置き換えを着実に進める必要がある。電気省エネ型に着目すると、新築と既築の両方で採用が増加する。より詳しく見ると、新築では、現状でも近年の採用は増加しているが、それを上回る必要がある。既築の場合においては、新築で設置する場合と比較して相対的に高くなる工事費用を考慮してもなお、新築での採用比率と同程度に高めていくことが経済合理的であった。戸建て住宅においては、給湯需要が大きく、電気省エネ型の採用が給湯関連費用の削減につながる世帯が多く残されている。

第二に、2050年にCO₂大幅削減を実現するためには、機器寿命を考慮して2030年代後半から加速度的に電気省エネ型の採用を上積みしていく必要がある。目標年と機器寿命から逆算して最後となる機器交換時には、CO₂削減効果を踏まえたうえで経済合理的な機器が採用されていく。このとき、できるだけ費用を抑えたとしても、人数の少ない世帯では、2050年の給湯関連費用が現状の機器採用を続けた場合と比較して高くなる。機器単価や設置・交換工事費用の低減対策を進めていくことは、この課題を克服するための1つの方法だと考えられる。

(3) 集合住宅では、建物寿命を考慮した、新築におけるCO₂削減対策の前倒しが必要

集合住宅においては、既築での電化が難しいという特有のロックイン問題もある。建物寿命を考慮すると、2020年代に採用した給湯機器のエネルギー源は、2050年にも使われ続ける可能性が高い。そのため、CO₂大幅削減のためには早期から新築での電気省エネ型採用を増やしていく必要があるという結果であった。元々ランニングコストメリットの出にくい少数世帯が多いうえに、多人数世帯であっても既築では電化できない状況があるため、経済性重視ケースの機器交換によるCO₂削減効果は限りがある。そのため、集合住宅では戸建て住宅よりも現状と比較してCO₂大幅削減にあたり必要な追加費用が大きくなる。そうした中で、追加費用がない、あるいは小さいと考えられるファミリー層向け集合住宅などの新築タイミングでは、積極的に電化する必要があるだろう。対策を早期から進める必要性や、戸建て住宅よりも大きく

30) 電気のCO₂排出係数が2030年に0.25kgCO₂/kWhとなり、それ以降は低減しない場合の値。2050年に0kgCO₂/kWhまで低減した場合は6割以上削減できる。

なる追加費用を考慮すると、補助などによる後押しも検討に値する。

今回の分析前提のように既築集合住宅の使用エネルギー源の変更が不可能な場合、LPG式や石油式の機器が残ることで一定量のCO₂排出量も残るため、CO₂の100%削減は困難である。もし給湯由来のCO₂排出量を100%削減するのであれば、既築集合住宅はエネルギー源の変更を可能にする対策を考えていく必要がある。集合住宅に関連して、賃貸住宅は、西尾・山田（2023）に詳しく述べられているように、オーナーが初期投資をし、居住者が光熱費を支払うことが、経済合理的な機器採用を難しくしてしまう一面がある。そのため、前述の対策に加えて、省エネ型機器採用のメリットを両者が享受できるような仕組みを検討していく必要がある。

4.2. 今後の研究課題

最後に、今後の研究課題を3点述べる。

設置関連費用の精緻化

本分析の給湯関連費用には精緻化の余地がある。

機器単価は、高値傾向のあるメーカーカタログより実際の取引価格と近いと考えられる積算資料住宅建築編の見積等の調査結果をベースとして、エネルギー源・効率レベル・世帯人員数ごとに設定した。しかしながら、給湯機器には多様性があり、反映できていない部分もある。例えば、寒冷地仕様や集合住宅仕様で価格は異なるであろう。また、将来的に機器単価が低下する可能性は想定していない。仮に機器単価が低下していく場合、初期費用の占める割合の大きい電気式をはじめとする省エネ型の経済性が高まると考えられる。一方で、効率が向上していく中では機器単価は上昇する。この場合、効率向上によるランニングコスト減少と機器単価増加のバランスで経済性が決まるだろう。

加えて、本分析では機器単価だけでなく工事費用も分析に含め、交換前後の機器の組み合わせにより交換工事費用が変化するという状況の反映が可能となったが、工事費用には精緻化の余地がある。例えば、海外では電気省エネ型の導入増加により工事費用が低下している事例もある³¹⁾。導入増加による工事費用低下が日本でも起こる場合、電気省エネ型の初期費用は今より低下し、経済性も高まる可能性がある。また、米国の一部自治体では、諸事情により新築時には全電化できない場合においても、将来的な電化へのハードルを下げるため、十分な電気容量・配線・導線を備える「電化レディ」を求めている（西尾・中野，2020）。電化レディの場合、交換工事費用を抑えられ、電気省エネ型の経済性が高まるだろう。

なお、本分析では考慮していない費用もある。例えば、電気省エネ型の設置スペース分の費用や、分電盤などの増強が必要になった場合の費用は工事費用に上乗せしていない。仮に上乗せした場合、電気省エネ型の初期費用は高くなる。スペースの費用は、持ち家では物件価値損失、賃貸住宅では家賃収入の機会損失というように、費用の考え方が異なる可能性もある。特に、スペース損失の影響がより大きい賃貸住宅や、土地の価格が高い地域においては、電気省エネ型の採用が減少する可能性がある。

このような設置関連費用の精緻化は、建物種類や地域、建物の所有体系ごとの特徴のより詳細な把握や、機器・関連工事費用変化の影響評価を行う場合に必要となるだろう。

エネルギー単価の変化

本稿ではエネルギー価格を固定して分析を実施したが、実際には世界情勢の不安定化によるエネルギー価格高騰リスクや³²⁾、エネルギー供給側の脱炭素技術導入による価格上昇、PVを設置し自家消費することによる電気料金の低下などが考えられる。経済性の高い機器への交換やCO₂排出削減を目指した機器交換では最終エネルギー消費量が少なくなることから、将来的にエネルギー価格が上昇していく場合は、現状

31) カルフォルニア州のサクラメント市では、地域の電力会社により電化補助が拡充された。「当初は、施工経験の不足、初期コストの高さ、冬季のヒートポンプ効率低下などへの懸念から、電化に消極的な工務店もあり、経験不足は工事費が低下しない要因にもなっていた。しかし、導入補助プログラムの開始以降、工務店はより積極的に電化に関わるようになり、ヒートポンプ給湯機の工事費は500～1,000ドル低下したとされる」（西尾・中野，2020）。

32) 資源エネルギー庁（2022）によると、日本の2019年1月の数値を基準とした2022年3月の消費者物価指数は、電気で1.10、ガスは1.11、ガソリンは1.29である。

の機器交換と比較した総費用の削減効果がより大きくなる。

また、PV自家消費³³⁾による電気料金の低下を考慮した場合、電気省エネ型の経済性が高まる。このとき、湯沸かしを気温の高い日中に行うことによる効率向上と、貯湯時間が短くなることによる放熱ロス削減の効果も得られるため、単に電気料金が低下するだけでなく、最終エネルギー消費量の減少によるランニングコスト削減効果も上乘せされる。今後脱炭素化の流れが進み、PV設置³⁴⁾やPVを搭載したZEH³⁵⁾やZEH-M³⁶⁾の普及が広まると、電気省エネ型の経済性が高いセグメントは増加していく可能性がある。

今後の給湯機器の技術発展や政策の影響

今後の給湯機器の技術発展や脱炭素対策を後押しする政策も、本稿の分析結果へ影響を与える。例えば、本分析では電気省エネ型の効率が2050年に5.0まで向上すると仮定したが、効率の向上余地に関しては不確実性がある³⁷⁾。また、電気給湯機器が外部からの制御を受け入れられるようになる³⁸⁾と、湯沸かしタイミングをずらし需給バランスの維持に貢献できる。海外では、仮想発電所（VPP）のリソースとして、外部から制御可能な電気給湯機器を組み込む計画も存在する³⁹⁾。調整力の提供による系統安定への貢献を考慮すると、電気給湯機器の経済性は高まる可能性がある。

政策の影響としては、カーボンプライシング（炭素価格付け）の導入や、中野・西尾（2023）でも紹介されているように、電気式をはじめとする省エネ型の機器・関連工事費用に対して補助が行われる⁴⁰⁾ことが考えられる。いずれもCO₂排出削減効果を有する機器の採用は増加するであろう。

本稿のような時間軸を踏まえた分析により、政策タイミングや強度がCO₂排出量や給湯関連費用にもたらす影響を確認していくことは有益である。

謝辞

本研究は、エネルギー・資源学会の「家庭部門のCO₂排出実態統計調査利用研究会」のメンバーとして実施した。関係者の皆様に御礼申し上げます。なお、本分析の結果に係る責任は著者が負う。

33) PV自家消費を前提とした電気省エネ型給湯機として、太陽光自家消費促進型自然冷媒CO₂ヒートポンプ給湯機（おひさまエコキュート）がある。2022年2月にダイキンから販売され、その後パナソニック、コロナ、三菱電機も販売を開始している（東京電力エナジーパートナー、2022、東京電力エナジーパートナーウェブサイト参照）。

34) 東京都は、新築住宅を供給する大手住宅メーカー等に対し、太陽光発電設置等を義務付ける新たな制度を検討している（東京都、2022）。また、エネルギー基本計画では、「2030年において新築戸建て住宅の6割に太陽光発電設備が設置されることを目指す」とする政策目標を設定している（資源エネルギー庁、2021）。

35) ZEHは、「外皮の断熱性能などを大幅に向上させるとともに、効率的な設備システムの導入により、室内空間の質を維持しつつ大幅な省エネルギーを実現した上で、再生可能エネルギーを導入することにより、年間の一次エネルギー消費量の収支がゼロとなることを目指した住宅」（経済産業省ほか、2022）。

36) ZEH-Mは、「先進的な建築設計によるエネルギー負荷の抑制やパッシブ技術の採用による自然エネルギーの積極的な活用、高効率な設備システムの導入などにより、室内環境の質を維持しつつ大幅な省エネルギー化を実現した上で、再生可能エネルギーを導入することにより、エネルギー自立度を極力高め、年間の一次エネルギー消費量の収支がゼロとなることを目指した集合住宅」（経済産業省ほか、2022）。

37) 2020年のまま電気省エネ型の効率が変化しないと想定した場合については脚注19参照。

38) 三菱電機は高圧一括受電マンションのヒートポンプ式給湯器を群制御する管理システムを作成し、ピーク電力の抑制を実現している（ヒートポンプ・蓄熱センター、2021）。四国総研は、放送型通信を用いて電気温水器やエコキュートなどの電気給湯機器を遠隔制御するシステムを実現・販売している（エネルギーフォーラム、2022）。

39) 電気給湯機器によるデマンドレスポンスに取り組むShifted Energyは、2019年10月にオアフ島とマウイ島に2,400台の系統連系電気温水器を設置し、2.5MWのVPPを形成する計画を発表した（Shifted Energy, 2019）。また、2022年3月には、ハワイの一部地区でヒートポンプ給湯器を用いたVPPプロジェクトを実施する計画も発表した（Shifted Energy, 2022）。2021年2月、オーストラリア再生可能エネルギー庁は、南オーストラリア州の住宅用温水器2,400台を対象としたVPPの計画を発表した（ARENA, 2021）。

40) 米国の一部自治体では、建物脱炭素化のため燃焼機器から電気式暖房・給湯機器へと電化する際に補助金を提供している。また、電化レディの建物であれば、交換工事費用を抑えられ、電気省エネ型の経済性が高まる。

参考文献

- ARENA. “Rheem Active Hot Water Control”.
<https://arena.gov.au/projects/rheem-active-hot-water-control/> (アクセス日 2022.12.22)
- Davis, L. and Hausman, C. (2022). “Who Will Pay for Legacy Utility Costs?”, *NBER WORKING PAPER SERIES Working Paper 28955*.
<https://www.nber.org/papers/w28955>
- EDMC (2022). 「2022年版 EDMC/ エネルギー・経済統計要覧」.
- ELCS (2022). 「電気事業者低炭素社会協議会 カーボンニュートラル行動計画」.
<https://e-lcs.jp/news/9f9fb3ddb831696017088732f868f5f3da50d66b.pdf>
- Geller, H. and Attali, S. (2005). “The Experience with Energy Efficiency Policies and Programmes in IEA Countries: Learning from the Critics”, *IEA Information Paper*.
- Shifted Energy (2019). “Shifted Energy to Equip 2,400 Water Heaters in Hawaii with Grid-Interactive Technology to Create Virtual Power Plant”.
<https://www.shiftedenergy.com/heco-gspa-press-release/> (アクセス日 2022.12.22)
- Shifted Energy(2022). “Energy Efficiency + Grid Services: Hawai'i Energy Partners with Shifted Energy to Launch a Virtual Power Plant of Heat Pump Water Heaters”.
<https://www.shiftedenergy.com/shifted-energy-leads-demand-response-energy-efficiency-program-with-heat-pump-water-heaters/> (アクセス日 2022.12.22)
- エネルギーフォーラム (2022). 「再エネ普及の一翼を担う 給湯器の遠隔制御システムを開発」.
<https://energy-forum.co.jp/online-content/7451/> (アクセス日 2022.12.22)
- 環境省. 「家庭部門のCO₂排出実態統計調査 (家庭CO₂統計)」.
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/kateico2tokei/index.html> (アクセス日 2022.12.23)
- 環境省 (2022a). 「電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)－R2 年度実績－」, 2022.7.
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r04_coefficient_rev4.pdf
- 環境省 (2022b). 「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧」.
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf (アクセス日 2022.12.22)
- 経済産業省・国土交通省・環境省 (2022). 「住宅の省エネ・省CO₂化に向けた経済産業省 国土交通省 環境省による3省連携の取り組み」, 2022.3.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/housing/data/pamp.pdf
- 建築工事研究会 (2022a). 「積算資料ポケット版 住宅建築編 2022年度版」, 一般財団法人経済調査会.
- 建築工事研究会 (2022b). 「積算資料ポケット版 リフォーム編 2022年度版」, 一般財団法人経済調査会.
- 国立社会保障・人口問題研究所(2018). 「結果表 1. 世帯の家族類型別一般世帯数, 一般世帯人員, 平均世帯人員」.
https://www.ipss.go.jp/pp-ajsetai/j/HPRJ2018/hprj2018_gaiyo_kekka1.xls
- 資源エネルギー庁 (2020). 「省エネ性能カタログ 2020年版」.
<https://seihinjyoho.go.jp/frontguide/pdf/catalog/2020/catalog2020.pdf>
- 資源エネルギー庁 (2022). 「令和3年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2022)」.
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/>
- 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会 (2020). 「ガス・石油機器判断基準ワーキンググループ取りまとめ」.
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/gas_sekiyu/pdf/20200728_01.pdf
- 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会エアコンディショナー及び電気温水機器判断基準ワーキンググループ (2021). 「電気温水機器の取りまとめ」.
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/air_denki/pdf/20210303_1.pdf
- 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会小売事業者表示判断基準ワーキンググループ (2021). 「小売事業者表示判断基準ワーキンググループ取りまとめ」.
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/kori_jigyosha/pdf/20210326_1.pdf
- 東京電力エナジーパートナー (2022). 「カーボンニュートラル社会の実現に向けた新しい暮らし方のご提案について」.
<https://www.tepco.co.jp/ep/notice/pressrelease/2022/pdf/220125j0101.pdf>
- 東京電力エナジーパートナー. 「太陽光自家消費促進型給湯機とは」.
https://www.tepco.co.jp/ep/private/plan/smartlife/day_calorifier.html (アクセス日 2022.12.23)
- 東京都 (2022). 「太陽光発電設置義務化等の基本方針を策定」.
<https://www.koho.metro.tokyo.lg.jp/2022/10/05.html> (アクセス日 2022.12.22)
- 内閣府 (2022). 「「物価高克服・経済再生実現のための総合経済対策」について」.
https://www5.cao.go.jp/keizai1/keizaitaisaku/2022-2/20221028_taisaku.pdf
- 中野一慶・西尾健一郎 (2023). 「建物脱炭素化に向けた取組の検討－欧米の最新動向に見られる対策の広がり－」, 電力経済研究, 第69号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>
- 西尾健一郎・大藤建太 (2018). 「CO₂の長期大規模削減とロックイン問題－家庭用給湯器の事例にもとづく考察－」, 電

力経済研究 No.65, 136-144.
https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/pdf/periodicals65_10.pdf
西尾健一郎・中野一慶 (2020). 「家庭 CO₂ 統計の個票データを用いた給湯機器の保有実態などに関する基礎検討」, 第 39 回エネルギー・資源学会研究発表会 講演論文集, 136-144.
西尾健一郎・中野一慶 (2020). 「建物脱炭素化に向けた取組の検討—米国の州や自治体の先進事例とわが国への示唆—」, 電力中央研究所報告 Y19005.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y19005>
西尾健一郎 (2021). 「家庭 CO₂ 統計の個票データと機械学習を用いた建築時期別光熱費の実態把握」, エネルギー・資源学会論文誌, Vol. 42, No. 3, 175-184.
https://doi.org/10.24778/jjser.42.3_175
西尾健一郎・山田愛花 (2023). 「家庭用給湯分野の省エネルギー・温暖化対策のバリアー賃貸住宅や機器選定の関係者へのインタビュー調査」, 電力経済研究, 第 69 号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>
日本ガス協会 (2021). 「カーボンニュートラルチャレンジ 2050 アクションプラン」, 2021.6.
<https://www.gas.or.jp/newsrelease/0610.pdf>
日本ガス協会「一般ガス導管事業者一覧」.
<https://www.gas.or.jp/jigyosya/ichiran/> (アクセス日 2022.12.22)
日本ガス石油機器工業会「ガス石油機器の出荷実績見込と予測」.
<https://www.jgka.or.jp/industry/toukei/kougyo-toukei/shukkajisseki/index.html> (アクセス日 2022.11.2)
ヒートポンプ・蓄熱センター／日本エレクトロヒートセンター (2022). 「令和 4 年度 電化普及見通し調査報告書」.
https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/press_topics/%E4%BB%A4%E5%92%8C%EF%BC%94%E5%B9%B4%E5%B9%B4%E5%BA%A6/R4Houkokusyo.pdf
ヒートポンプ・蓄熱センター (2021). 「令和 3 年度デマンドサイドマネジメント表彰 機器部門 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター振興賞」.
https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/documents/2021DSM/K8_mitsubishi.pdf
元アンナ・西尾健一郎 (2011). 「家庭用給湯分野における温室効果ガス削減の可能性」, 電力中央研究所報告 Y10011.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y10011>

山田 愛花 (Manaka Yamada)

電力中央研究所 社会経済研究所

西尾 健一郎 (Ken-ichiro Nishio)

電力中央研究所 社会経済研究所 (兼) グリッドイノベーション研究本部

社会経済研究所「電力経済研究」No.69

特集「脱炭素化のために電化にどう向き合うか」の記載内容の訂正について

論文「ロックイン問題を考慮に入れた給湯分野の経済合理的なCO₂削減可能性—家庭CO₂統計の個票データを用いた将来分析—」につきまして、本来掲載すべきものとは異なる図とその解説文章を掲載していることがわかりました。すでにダウンロードされた皆様にはご迷惑をおかけしますことを深くお詫びいたします。なお、論文の主な結論には変更はございません。

訂正内容

①-1 p.49 「3.3.2. CO₂排出量」の第一段落

図4の訂正（①-2）に関連して、その解説文章を下記の通り訂正いたします。

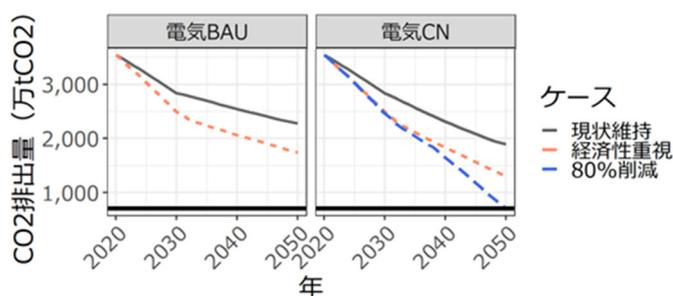
（正）図4左側の電気BAUシナリオでは、現状維持ケース（2050年時点で2,281万tCO₂）が経済性重視ケース（2050年時点で1,740万tCO₂）より排出量が多い。図4右側の電気CNシナリオにおいても、現状維持ケース（2050年時点で1,890万tCO₂）が経済性重視ケース（2050年時点で1,306万tCO₂）より排出量が多い。

（誤）図4左側の電気BAUシナリオでは、現状維持ケース（2050年時点で2,300万tCO₂）が経済性重視ケース（2050年時点で1,661万tCO₂）より排出量が多い。図4右側の電気CNシナリオにおいても、現状維持ケース（2050年時点で1,910万tCO₂）が経済性重視ケース（2050年時点で1,243万tCO₂）より排出量が多い。

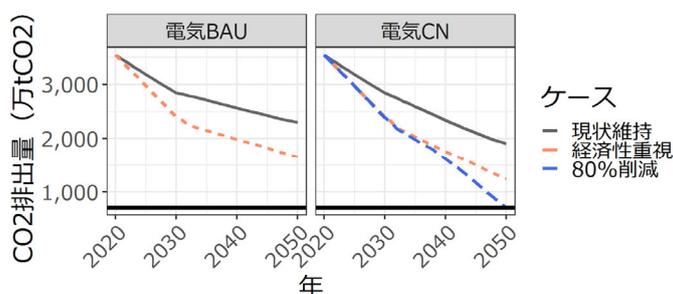
①-2 p.50 「図4 CO₂排出係数シナリオ別のCO₂排出量」

CO₂排出量の図を下記の通り訂正いたします。

（正）



（誤）



②-1 p.50 「3.3.3. 最終エネルギー消費量」の第2段

図5の訂正(②-2)に関連して、その解説文章を下記の通り訂正いたします。

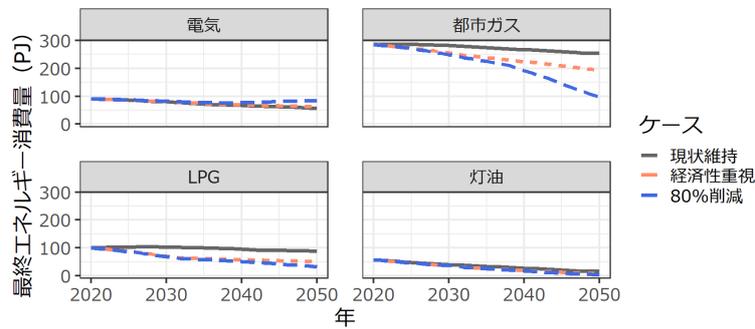
(正) 都市ガスの場合、現状維持ケースと比較して経済性重視ケースや80%削減ケースでの消費量が少ない。2050年には現状維持ケースと比較して経済性重視ケースで約8割、80%削減ケースで約4割の消費量となる。

(誤) 都市ガスの場合、現状維持ケースと比較して経済性重視ケースや80%削減ケースでの消費量が少ない。2050年には現状維持ケースと比較して経済性重視ケースで約7割、80%削減ケースで約4割の消費量となる。

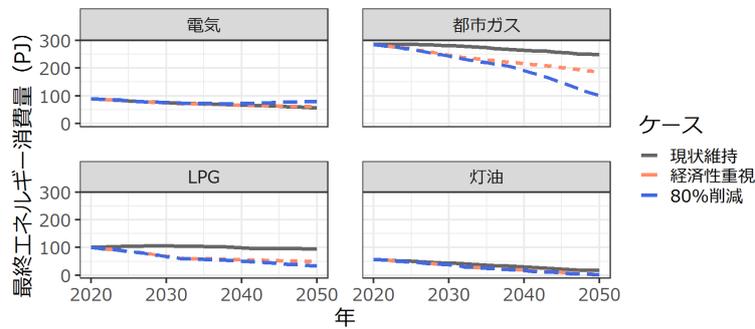
②-2 p.50 「図5 エネルギー別の最終エネルギー消費量」

最終エネルギー消費量の図を下記の通り訂正いたします。

(正)



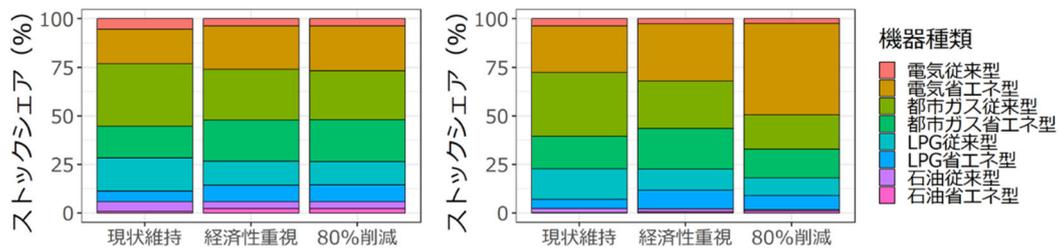
(誤)



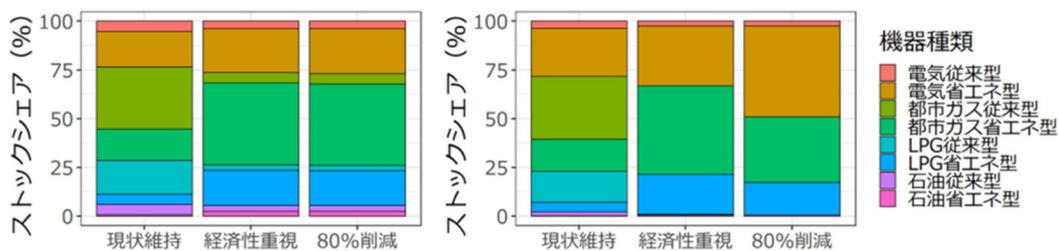
③ p.51 「図6 2030年（左）と2050年（右）の機器ストックシェア構成」

機器ストックシェアの図を下記の通り訂正いたします。

(正)



(誤)



④-1 p51 「3.3.4.1. 経済性を高めるために必要な変化 (1) 新築・既築の両方における従来型機器の採用減少」

図7の訂正 (④-2) に関連して、その解説文章を下記の通り訂正いたします。

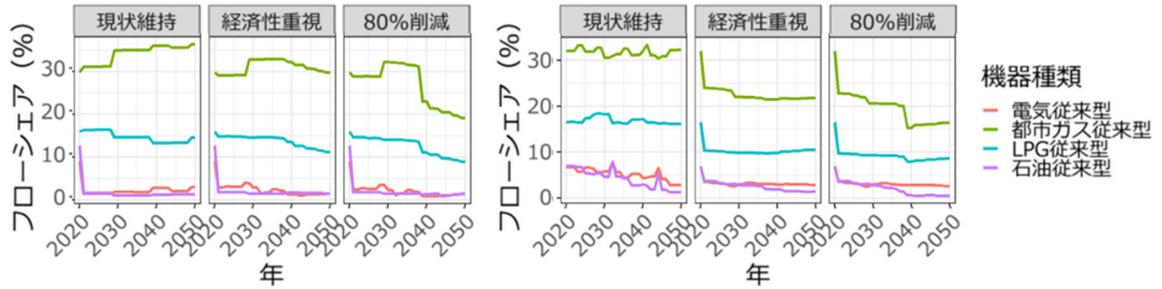
(正) 現状維持ケースでは、新築と既築の両方で従来型機器のフローシェアが残り続ける。一方で、経済性重視ケースの場合、新築住宅においては2021年以降、従来型のフローシェアが減少傾向にある。既築住宅に関しても、都市ガス・LPGの従来型フローシェアははすぐに大きく減少し、石油従来型も徐々に減少する。

(誤) 現状維持ケースでは、新築と既築の両方で従来型機器のフローシェアが残り続ける。一方で、経済性重視ケースの場合、新築住宅においては2021年以降、電気従来型を除く従来型機器のフローシェアがゼロになる。既築住宅に関しても、都市ガス・LPGの従来型フローシェアははすぐにゼロとなり、石油従来型も徐々に減少する。

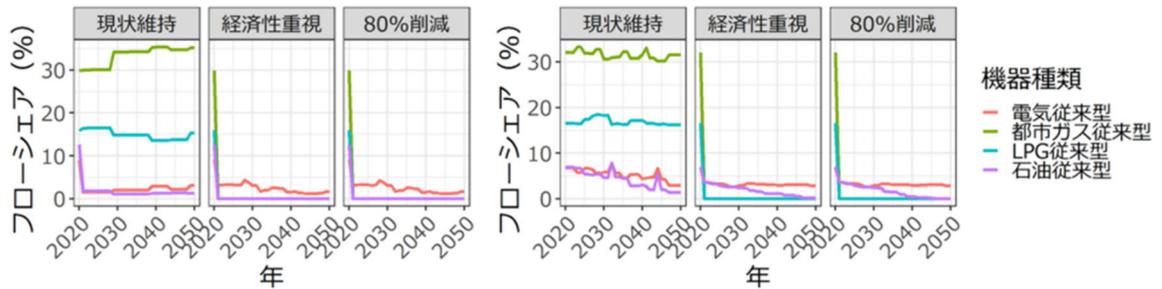
④-2 p.52 「図7 新築住宅（左）と既築住宅（右）の従来型機器フローシェア推移」

図7を下記の通り訂正いたします。

(正)



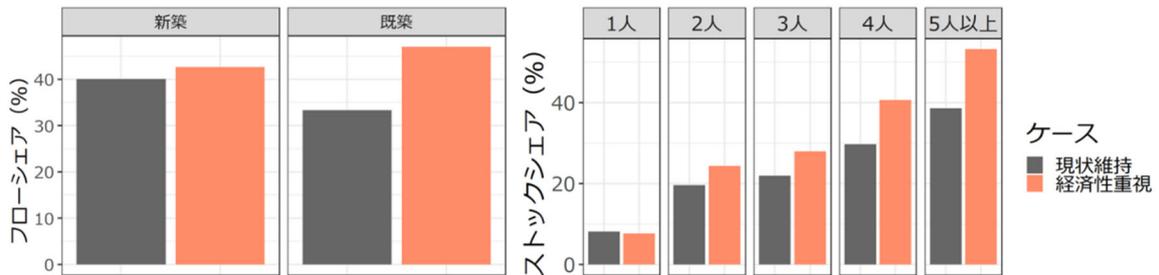
(誤)



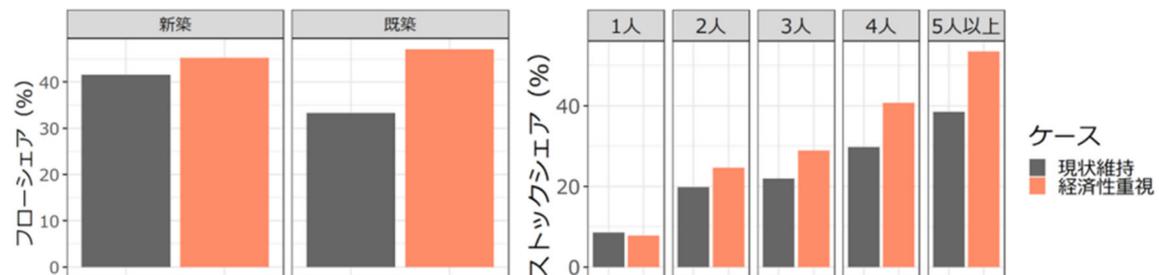
⑤ p.52 「図8 2030年における電気省エネ型の戸建て住宅でのフローシェア（左）と世帯人数別のストックシェア（右）」

図8を下記の通り訂正いたします。

(正)



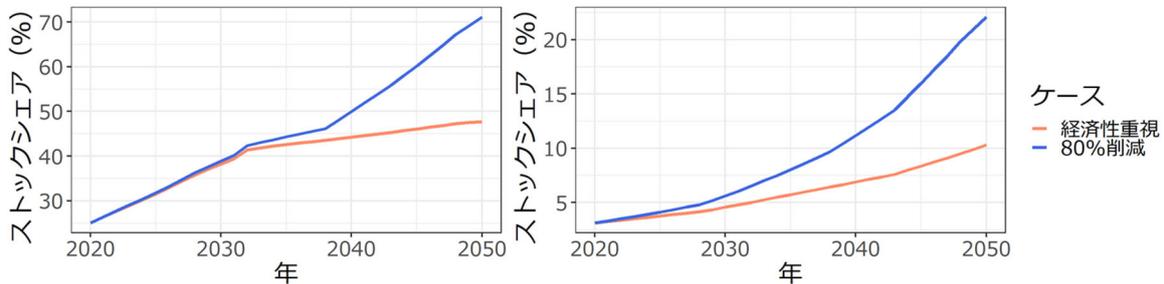
(誤)



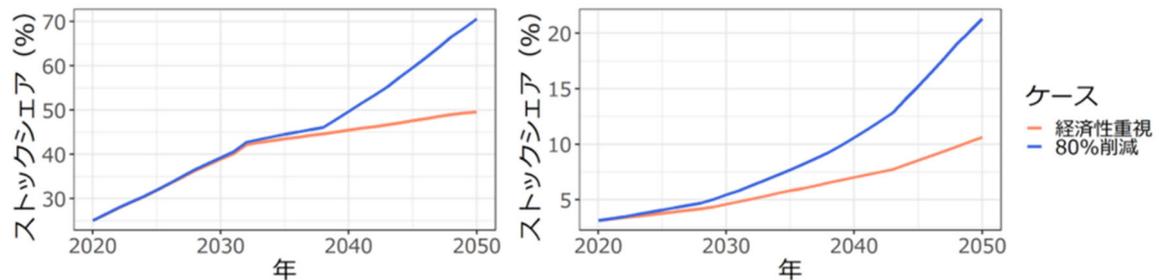
⑥ p.53 「図9 戸建て住宅（左）と集合住宅（右）の電気省エネ型ストックシェア推移」

図9を下記の通り訂正いたします。

(正)



(誤)



⑦-1 p.53 「3.3.5.1. 総費用」の第一段落

図10の訂正 (⑦-3) に関連して、その解説文章を下記の通り訂正いたします。

(正) そのため、総費用は経済性重視ケースよりも高くなる。

(誤) そのため、総費用は経済性重視ケースよりも高く、2050年付近に関しては現在維持ケースよりも高くなる。

⑦-2 p.53 脚注27)

図10の訂正 (⑦-3) に関連して、その解説文章を下記の通り訂正いたします。

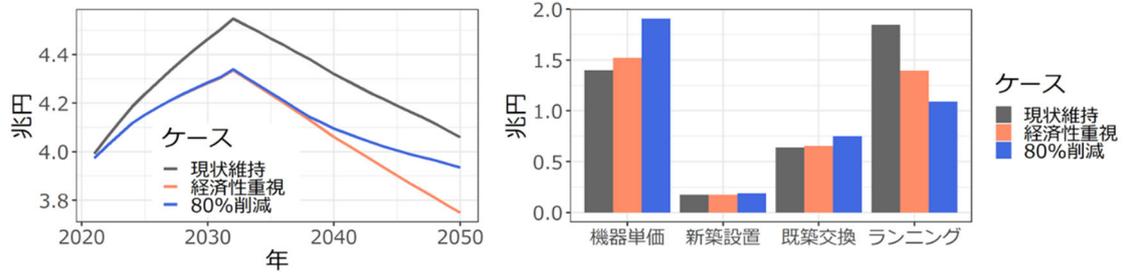
(正) 後述するように費用は精緻化の余地があるため参考としての値となるが、現状維持ケースと比較した2020年から2050年までの期間の総費用は、経済性重視ケースでは約6.2兆円抑制、80%削減ケースでは約5.0兆円抑制となる。

(誤) 後述するように費用は精緻化の余地があるため参考としての値となるが、現状維持ケースと比較した2020年から2050年までの期間の総費用は、経済性重視ケースでは約4.3兆円抑制、80%削減ケースでは約2兆円抑制となる。

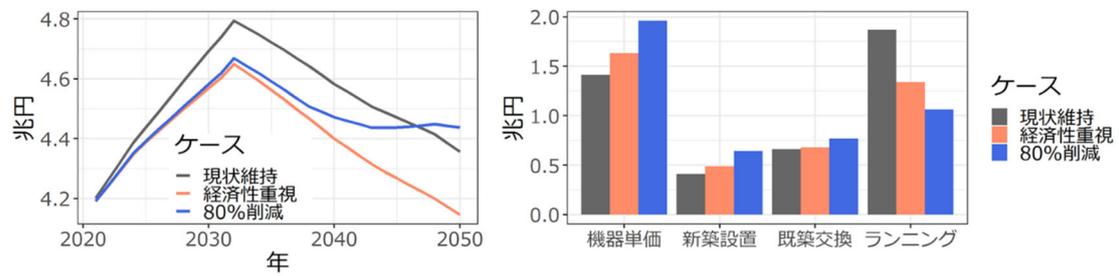
⑦-3 p.54 「図10 各年における総費用（左）と2050年の総費用の内訳（右）」

図10を下記の通り訂正いたします。

(正)



(誤)



⑧-1 p.54 「3.3.5.2. 世帯人数別費用」第一段落

図11の訂正 (⑧-2) に関連して、その解説文章を下記の通り訂正いたします。

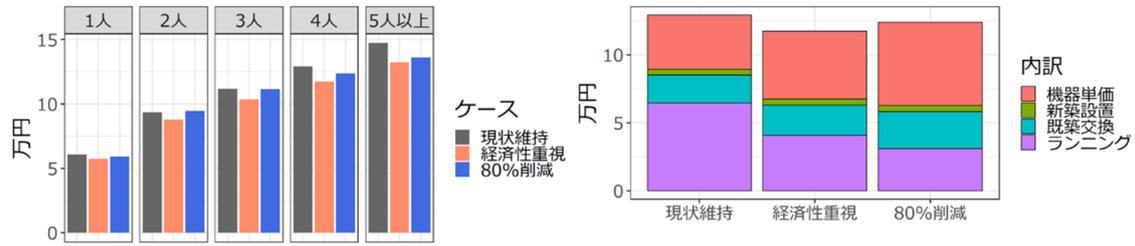
(正) 世帯人数が少ない場合は、現状維持ケースと経済性重視ケースの価格差が小さく、現状維持ケースより80%削減ケースで費用が高くなる場合もある。

(誤) 世帯人数が少ない場合は、現状維持ケースと経済性重視ケースの価格差が小さく、現状維持ケースより80%削減ケースで費用が高くなる。

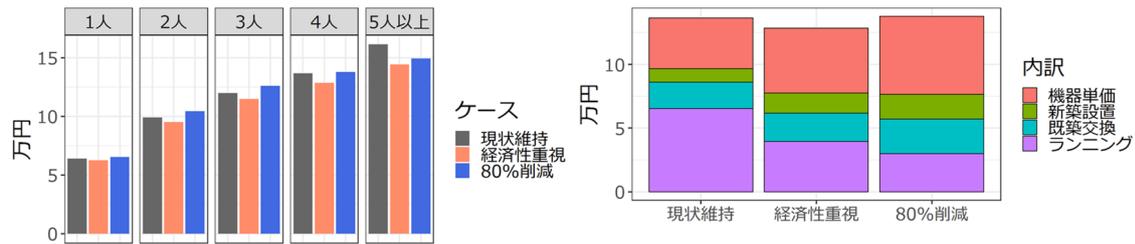
⑧-2 p.54 「図11 2050年における世帯人数別の費用（左）と4人世帯の費用内訳（右）」

図11を下記の通り訂正いたします。

(正)



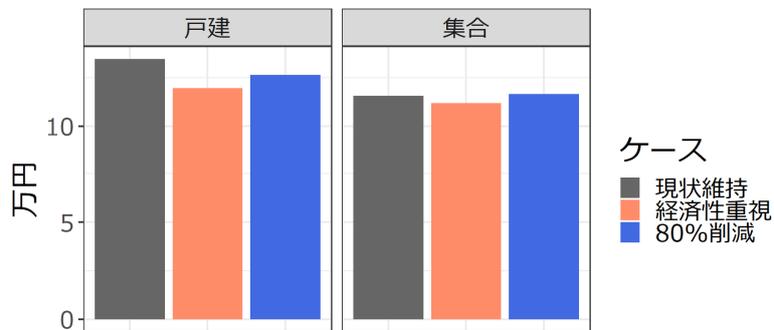
(誤)



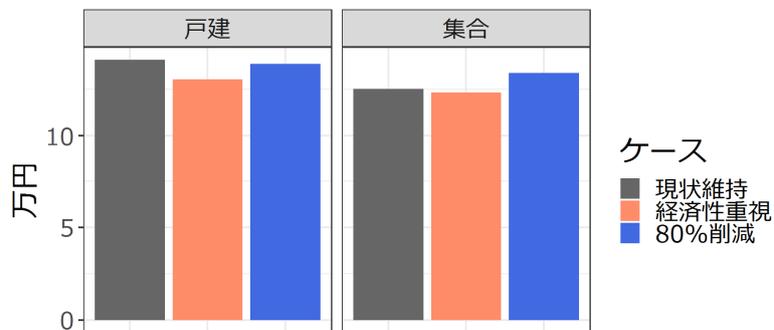
⑨ p.55 「図12 2050年・4人世帯における建物種類別の費用」

図12を下記の通り訂正いたします。

(正)



(誤)



⑩ p.55 「3.3.6. 参考：都市ガスカーボンニュートラルの考察」の第二段落

図6の訂正（③）の訂正に関連して、解説文章を下記の通り訂正いたします。

- （正）このとき電気省エネ型のストックシェアは小さくなっておらず、LPG省エネ型と電気やLPG、石油の従来型がわずかに小さくなる。
- （誤）このとき電気省エネ型のストックシェアは小さくなっておらず、LPG省エネ型と電気や石油の従来型（都市ガス、LPGの従来型のストックシェアは経済性重視ケースでも80%削減ケースでもゼロ）のストックシェアがわずかに小さくなる。

⑪ p.56 「(2) 戸建て住宅では、経済性の高い機器の着実な採用と、機器寿命を考慮したCO₂削減対策が必要」の第二段落

図10の訂正（⑦-3）に関連して、解説文章を下記の通り訂正いたします。

- （正）このとき、できるだけ費用を抑えたとしても、2050年の給湯関連費用が経済合理的な機器採用を続けた場合と比較して高くなる。
- （誤）このとき、できるだけ費用を抑えたとしても、人数の少ない世帯では、2050年の給湯関連費用が現状の機器採用を続けた場合と比較して高くなる。

⑫ p.56 「(3) 集合住宅では、建物寿命を考慮した、新築におけるCO₂削減対策の前倒しが必要」の第一段落

図12の訂正（⑨）に関連して、解説文章を下記の通り訂正いたします。

- （正）そのため、集合住宅では戸建て住宅よりも現状と比較してCO₂大幅削減にあたり削減できる費用が小さくなる。（中略）対策を早期から進める必要性や、戸建て住宅よりも費用削減が小さくなることを考慮すると、補助などによる後押しも検討に値する。
- （誤）そのため、集合住宅では戸建て住宅よりも現状と比較してCO₂大幅削減にあたり必要な追加費用が大きくなる。（中略）対策を早期から進める必要性や、戸建て住宅よりも大きくなる追加費用を考慮すると、補助などによる後押しも検討に値する。

以上

家庭用給湯分野の省エネルギー・温暖化対策のバリア —賃貸住宅や機器選定の関係者へのインタビュー調査—

Barriers to Energy Efficiency and Global Warming Measures for Residential Water Heaters:
Interview Surveys with Actors involved in Rental Housing and Equipment Selection

キーワード：省エネルギー、カーボンニュートラル、電化、ヒートポンプ、給湯

西尾 健一郎、山田 愛花

要旨

脱炭素化社会の実現に向けては、家庭用給湯分野の対策も強化していく必要がある。そこで本稿では、給湯機器の利用者以外で、その選定に関与する立場にある人を対象とする2つのインタビュー調査により、給湯分野で省エネ・CO₂削減を進めていく上での阻害要因（バリア）を把握する。賃貸住宅のオーナー・関係業者20名を対象とするインタビューからは、オーナーは光熱費削減メリットを享受しづらく省エネ型の採用動機に欠ける、賃貸住宅市場自体がコスト削減ニーズの強い環境下に置かれている、電気式採用時は貯湯タンクのスペース・重量対応が隠れた費用になる、正確なコスト比較機会が欠如しているといったバリアが明らかになった。給湯機器の販売・設置関係業者10名を対象とするインタビューからは、わが国がカーボンニュートラルを目指すこと自体は認知されているが、現場でのCO₂削減ニーズ不足や行動主体としての納得感不足、省エネ対策と脱炭素化の関係性を理解することの難しさにより、カーボンニュートラル対応を自分ごと化して受け止めている人は少ないことなどが明らかになった。これら実態も踏まえながら、規制的手法・経済的手法・情報的手法のそれぞれについて政策への期待や課題を考察した。

1. はじめに

1.1. 背景

脱炭素社会の実現に向けては家庭部門における対策の強化も不可欠であり、中でも給湯は、家庭のエネルギー消費量の33%、CO₂排出量の24%を占める重要対策分野である¹⁾。これまでも省エネルギー型給湯機器として、電気式のヒートポンプ給湯機（自然冷媒を用いたエコキュートなど）、燃焼式の潜熱回収型給湯器（ガスを燃料とするエコジョーズ、灯油を燃料とするはエコフィール）や家庭用燃料電池コージェネレーションシステム（エネファーム）の普及が進められてきた。今後の対策のあり方を検討するにあたり、普及シナリオ分析や技術評価、経済性分析などに加えて、機器選択の実態把握をしておくことは有益である。

元他（2011）は、約4,200世帯へのアンケート調査により給湯機器の保有・導入実態を分析し、住宅選びにおける検討項目として給湯機器選択の優先順位は高くなく、十分な検討時間をかけずに設置・交換されてしまう場合が多いことを明らかにした。西尾他（2013）は、約2,700世帯へのアンケート調査により既築住宅における給湯機器の交換実態を分析し、戸建持家住宅向け市場の詳細分析からは、不具合や故障をきっかけとするその場しのぎの交換が多いことや業者の影響も受けやすいことなどを明らかにした。これら先行研究からは、給湯機器の省エネ・温暖化対策のあり方を検討するにあたっては、機器の利用者（エンドユーザー）のみならず、例えば住宅供給や機器設置・交換に関与する業者といった、機器選択に影響を及ぼす立場にある主体（アクター）にも着目して、対策の阻害要因（バリア）を把握していく必要があることがわかる。それにも関わらず、省エネ型給湯機器の採用に関する調査研究は、利用者を対象とするも

1) 環境省の「令和2年度家庭部門のCO₂排出実態統計調査」（家庭CO₂統計）より、「自動車用燃料」を除いて算出。エネルギー消費量は最終エネルギー消費量。

のばかりであった²⁾。

1.2. 目的と研究手法

本稿では、(1) 利用者以外の行動が影響しやすい住宅セグメントの代表例として、賃貸住宅のオーナー(大家)・関係業者20名を対象とするインタビュー調査(2021年2~3月実施)、及び、(2) 住宅セグメントを広げるとともに様々なアクターに注目すべく、給湯機器の販売・設置関係業者10名を対象とするインタビュー調査(2022年2月実施)を実施する。2つのインタビュー調査の実施要領は次章以降で詳述するが、ここでは研究の全体像をつかむために、それぞれの調査対象の選定理由や両者の関係性を述べる。

前半のインタビュー調査で賃貸住宅に注目する理由は、わが国の住宅ストックの4割弱を占めることに加えて、給湯分野の対策余地が多く残されており、さらには、利用者以外のアクターが重要な役割を担うセグメントだからである。平成30年住宅・土地統計調査(総務省統計局)の分類にならえば、住宅戸数の36%は借家であり、建て方別には共同住宅の71%や一戸建の5%は借家である。大まかに理解すれば、賃貸住宅の約9割は集合住宅であり、集合住宅の約7割は賃貸住宅である(以降では文意に即して「集合」「賃貸」「集合賃貸」といった用語を適宜使い分ける)。集合賃貸住宅では、新築時における省エネ型給湯機器の採用比率が他のセグメントよりも低く、また、スペースや重量などの事情により、給湯機器は一度設置されると同じタイプのものに交換され続けることが多い(西尾・大藤, 2018)。このようなロックイン(固定化)問題を考慮に入れた分析によれば、2050年のCO₂大幅削減を目指すためには、新築集合住宅の対策強化は喫緊の検討課題である(山田・西尾, 2023)。賃貸住宅の新築時に給湯機器がどのようにして選ばれるかについては、オーナーやオーナーを支える立場にある業者(非オーナー)が詳しいはずである。このように調査対象の住宅セグメントやアクターを絞ることで、省エネ型給湯機器の採用バリアを深掘り分析できるようになる。

これに対して、後半のインタビュー調査は分析スコープを広げた。すなわち、住宅セグメントは賃貸に限定せず、調査対象者は給湯機器の設置・販売に関わるアクターとし、新築時の設置ばかりではなく既築住宅における交換も扱うこととし、省エネだけではなくCO₂削減という社会要請の受け止め方も考慮することにした。前半の知見を調査設計に活かしつつ、その最大の課題は賃貸住宅向け市場に特化し過ぎていることも鑑み、後半は市場を限定せずに知見の拡充を目指すことにした。その一方で焦点がぼけるおそれもあるため、分析の補助線として、脱炭素社会への貢献意欲の高低と給湯機器の商流の上下関係という2軸を新たに設定した上で、ポジションができるだけ分散するように調査対象者を選定している。

分析結果を解釈するにあたっては、次の2点に留意されたい。1つには、本稿は合計30名の限られたサンプルを対象とする定性調査として位置づけられるものであり、市場全体(母集団)の平均的な姿や分布を捉えようとする定量調査ではない。実際に、調査対象者の選定にあたっては、立場や考え方の異なるアクターを含むことを意識した。発言データは読みやすさを向上させるために一部修正することもあるが、定性調査の長所である具体性やニュアンスを大切にすべく引用部分を多くするとともに、対立するような発言も積極的に取り上げるようにした。もう1つには、調査対象者は経営者や従業員であるものの、本稿の調査手法上、所属企業の公式見解や平均的な意識・行動を述べている保証はなく、その発言データはあくまで個人的なものとして受け止めるべきである。正確性を優先するのであればフォーマルな企業ヒアリングが調査手法の候補になるが、本稿は多様性も重視するため、Web調査会社モニターの中から、予備調査で職業や業務経験などの詳細をたずねた上で、インタビュー調査対象者を抽出する手法を採用した。現実社会がそうであるように、担当者それぞれにスペシャリティや業務分担があり、すべての技術や政策を正確に把握しているとは限らないことや、時にはその必要がないことも考慮しながら解釈していく姿勢が求められる。

2) 給湯機器に限らなければエンドユーザー以外も調査対象とする既往研究として、管理会社・管理組合・建材会社・施工会社などの関係者6名へのインタビュー調査と管理組合理事60名へのアンケート調査により分譲集合住宅における各種省エネ改修の課題を明らかにする研究(小島他, 2012)、建築主8名と建築士8名へのインタビュー調査と建築主100名のアンケート調査により注文住宅取得プロセスの現状と課題を明らかにする研究(伊丹他, 2019)、大阪府の賃貸住宅オーナー5名へのヒアリング調査により賃貸経営の現状を述べる研究(岡市, 2017)などがある。一方、エンドユーザー以外への調査により省エネ型給湯機器の採用の課題を明らかにしようとする研究は、筆者らの知る範囲ではわが国ではない。

1.3. 本稿の構成

本稿は2つのインタビュー調査で構成される。まず、2章では、居住者以外の行動が影響しやすい住宅セグメントの代表例として、賃貸住宅のオーナー・関係業者20名を対象とするインタビュー調査結果を分析する。具体的には、発言データを参照しながら、主な省エネバリアを順に述べた上で、規制的・経済的・情報的手法の3つにわけて政策への期待や課題を明らかにする。次に、3章では、住宅セグメントを広げるとともに様々な立場から見た実態を理解すべく、給湯機器の販売・設置業者10名へのインタビュー調査結果を分析する。2章では省エネ対策に注目するのに対して、3章ではCO₂削減対策へと視野を広げた上で、2章と同様に政策への期待や課題を明らかにする。最後に、4章でまとめと考察をする。

2. 賃貸住宅のオーナー・関係業者へのインタビュー調査

2.1. 調査実施要領

賃貸住宅でどのような給湯機器が採用されるかは、入居者のニーズだけではなく、オーナーやオーナーを支える立場にある設計・施工・管理者（非オーナー）の意識や行動にも左右される。そこで、機器選定の実態や、規制・補助などの各種政策への期待や課題について記述的エビデンスを得ることを目的として、入居者ではなくオーナー・非オーナーを対象とするインタビュー調査を実施した。

まず、2021年2月12～15日に、インタビュー調査対象者を抽出するための予備調査を実施した。具体的には、調査会社（楽天インサイト株式会社）のモニターに対して、Web回答方式のアンケートを配信し、業種や業務、賃貸住宅への関与経験などをたずねることで、オーナーと非オーナーを各10名、計20名を抽出した。オーナーはマンション・アパートを棟単位で所有することを条件としており、非オーナーよりも関与物件は少なめ、年齢層は高めといった特徴を有する。一方、非オーナーは建設会社などの勤務者とし、設計と施工のいずれかには関与している。2006年以降に建てられた物件への関与経験がある人を抽出し、住宅設備選定に全く関与したことがない人は除外した。賃貸住宅の多い関東・近畿地方に在住する人が多い。

次に、2021年2月28日～3月7日にかけて、オンライン・デプス方式（60分/名）のインタビュー調査を実施した。インタビュー対象者20名のプロフィールは図1のとおりである。左右にオーナー（Ownerの通し番号としてO1～O10を付与）と非オーナー（Non-ownerの通し番号としてN1～N10を付与）をわけて示す。インタビューでは、賃貸住宅との関わり方や住宅性能、省エネ・温暖化対策などについてたずねた。本章では特に、オーナーが所有物件で省エネ型給湯機器を採用する上でのバリアについて分析していく。言うまでもなく、給湯機器は居住者のニーズも踏まえながら選ばれていくものであるし、居住者も含む社会全体での視点からのバリア分析も重要であるが、ここでは、賃貸住宅の給湯機器の最終決定者はオーナーであることを踏まえて、オーナーに注目することにした。実際には非オーナーの提案なども影響するので、調査対象者はオーナーだけではなく非オーナーを含むようにしている。

ところで、脱炭素社会の実現に向けては、省エネ型給湯機器の中でもヒートポンプ給湯機に多くの期待が寄せられている。そのため、予備調査の中では、賃貸住宅に関わる上で「オール電化に積極的である」かを「とてもそう思う」から「まったくそう思わない」の5件法の選択肢でたずねており、電化積極層・消極層がほぼ同数となるように抽出している。同図の縦軸はその回答データに基づく。同じ理由により、省エネバリアを分析するにあたっては、電化の課題についても多めに扱うことにした。関与経験が複数ある場合、築浅物件について優先的に聴取した。

なお、図中や以降の本文中では、オーナーのIDの横に賃貸住宅の管理形態を付記している。日本住宅総合センター（2019）の民間賃貸住宅オーナー300名への調査によれば、管理形態としては管理委託が55%、すべて自主管理が25%、一括借上げにより管理（サブリース等）が20%となっている。同調査によれば、賃貸住宅を購入した理由として、自主管理は不動産物件を相続・譲り受けた、管理委託では今後の安定収入を得る・事業収益をあげる、サブリースは今後の安定した収入を得る・将来の相続税対策のため、といった理由の割合が多い特徴がある。

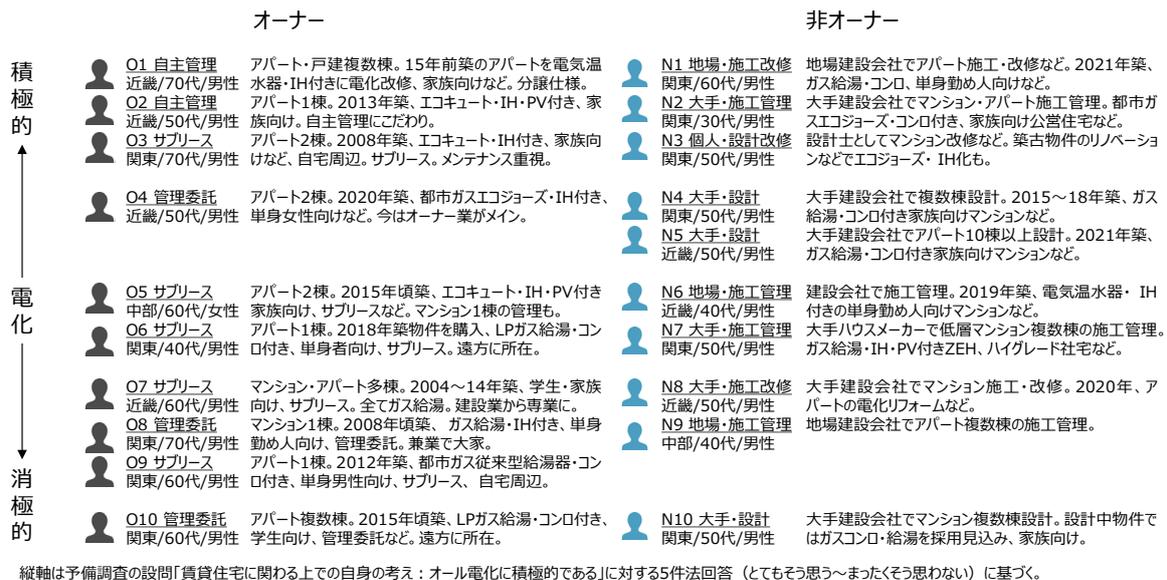


図1 調査対象者（賃貸住宅のオーナー・関係業者）のプロフィール

インタビューフローは4つのパートで構成され、具体的には(1) 調査対象者のプロフィール（仕事の概要など）、(2) 賃貸住宅との関わり（保有もしくは関与している賃貸マンション・アパート、重視している点と気になることなど）、(3) 住宅性能について（住宅設備全体で重視している点や仕様の決めり方、台所用コンロ・給湯機器で重視している点や仕様の決めり方、その際における省エネに関する意識、その際における電化に関する意識など）、(4) エネルギー問題や温暖化問題について（現行政策の認知、脱炭素社会を目指すことの認知、賃貸住宅市場での対策アイデアなど）の順でたずねた。すなわち、賃貸住宅への関与経験という身近な話題から始めて、省エネ型給湯機器の採用バリアや関連する政策手法に関する話題へと徐々に掘り下げることとした。接触した情報が発言にバイアスを与えることを避けるために、インタビュー序盤において、こちらからは省エネ・温暖化対策に触れないこととした。住宅設備に対する考え方を様々な角度から引き出していくために、途中過程で台所用コンロについても簡単にたずねているが、本稿で注目するのは給湯機器である。

インタビューはフローに基づき実施したが、2.2節で扱う省エネ型の採用バリアについては、バリアを1問ずつ聴取するといったように完全に構造化された方法で聴取したものではなく、インタビュー全体を通じて採用・不採用理由を掘り下げていく過程で浮かび上がる実態を、分析にあたり構造化したものである。2.3節では政策への期待や課題について考察するが、インタビュー過程で出てきた発言に加えて、インタビュー調査の最終盤においても、予備調査の自由回答欄の記入内容を参考に、脱炭素社会に向けて賃貸住宅分野で個人や企業が自主的に取り組むべきことや政策的に取り組むべきことのアプローチも例示するなどして、追加の発言を引き出している。

2.2. 賃貸住宅における省エネ型給湯機器の採用バリア

以降では、主な発言データを引用しながら、インタビュー調査結果を分析していく。省エネバリアの体系的整理方法は様々あるが、本稿は西尾・岩船（2009）と同様に、省エネバリア研究の代表例である Sorrell et al.（2004）による6つの類型、すなわち、動機の分断、資金調達力、隠れた費用、リスク、情報不足、限定合理性に準拠することにした。特に賃貸住宅というセグメントの特性に着目しながら、オーナーが所有物件で省エネ型給湯機器を採用する上でのバリアを明らかにしていく。

2.3. 動機の分断：オーナー・テナント問題

「動機の分断」(split incentive) とは、複数のアクターが関わる際に省エネ対策の適切な動機付けがされ

ない現象であり、「principal-agent問題」(IEA, 2007)として言及されることもある。特に賃貸契約が介在するときは「オーナー・テナント問題」と称され、光熱費をテナントが払う時に、その削減メリットを直接享受する立場にはないオーナーによって低効率機器が選ばれてしまうおそれがあることが指摘されてきた。

インタビュー回答の中には、給湯機器は「ほぼガスで、全てエコジョーズ。会社のほうで仕様を決める。ランニングコストのこともあるだろうし、環境に配慮した形。入居者や株主に対して、そういう企業であるというところをアピールする目的もある」(N5 大手・設計)といったように、企業の方針上、初期コストをかけてでも省エネ型を選ぶという指摘もあった。一方で全体傾向としては、良い機器を選ぶことによって「家賃が上がればいいが、多分そんなに変わらない」(N8 大手・施工改修)、そうした状況下で「省エネ型にしない理由は単純にイニシャルコスト」(N9 地場・施工管理)といった判断に陥りがちであることがうかがえる。

賃貸住宅で動機の分断が生じる様子を、LPガスを例に確認しよう。1990年半ばに建てたアパートで当初はLPガスを採用するも、約10年ごとに飛び込み営業をきっかけに都市ガス、LPガスと2度の切り替えをしたオーナーは、「ガス屋のサービスがすごく良くなってきている。プロパンに換わった時は給湯器もガスコンロも置いていってくれて、玄関の鍵も換えてくれた」(O5 サブリース)と経緯を振り返る。別のオーナーも、2010年代半ばに建てたアパートでは「都市ガスエリアだけどプロパンにして、その代わりにエアコンを無料でつけてもらった」(O10 管理委託)と指摘する。これら機器費用はLPガス料金の一部として回収される可能性があり、動機の分断が生じやすい構造にあることを認識しておくとともに、国も指摘している集合賃貸住宅のLPガス料金の透明化(資源エネルギー庁, 2017; 資源エネルギー庁, 2021)を進めていく必要がある。

2.3.1. 資金調達力：コスト削減に対する強いニーズ

本来であれば実施するのが望ましい省エネ対策であっても、資金調達力に限りがあるために実施されないことがある。ガス給湯器であれば潜熱回収型のエコジョーズは従来型と比べて省エネ性が高く、光熱費を抑えられるメリットを有するが、初期投資が増えることに対する許容度はオーナーの立場にも依存する。

中には「今はほとんどエコジョーズ。メーカーは大体省エネ型が主流なので。今は省エネ型が高いというわけでもない」(N9 地場・施工管理)といったように、デメリットであるはずの初期費用も許容範囲であり、大企業では標準的な仕様になっているとの指摘がある。

一方、賃貸住宅市場自体がコスト削減ニーズの強い環境下に置かれているため、初期投資を少しでも抑えようと省エネ型が検討候補から除外されてしまうことがある。例えば、「エコジョーズの方がちょっと高い。利回りをよくしようとすると普通のガス給湯器になる。家賃はガス給湯器の種類ごとで変わらない。デフォルトは普通の給湯器にして、オーナーの様子を見ながらエコジョーズを提案していく。デベロッパ相手にはエコジョーズを採用するのが当たり前」(N10 大手・設計)と述べるように、個人オーナーが関与する物件ではバリアになりやすい可能性が示唆される。小規模物件以外でも、「県営住宅は税金で建てるので浴室乾燥機もトイレの暖房便座もカラーインターホンもない。キッチンや給湯器はイニシャルコストが安いので基本的にガス」(N2 大手・施工管理)とあるように、公営住宅で初期投資削減ニーズが強い実態を指摘する。

2.3.2. 隠れた費用：スペースや重量への対応

省エネ型給湯機器の中でもヒートポンプ給湯機については、「隠れた費用」(hidden cost)も課題になる。

賃貸住宅における電気式給湯機器の不採用理由として、貯湯タンクのスペースや重量に関する言及が複数あった。具体的には、「水を貯めるから重たく、構造上大変で建設費が割高。1部屋半量くらいスペースを取り、それだけ貸室面積が減る」(O7 サブリース)、「電化リフォームはIHだけなら良いが、給湯は床荷重の話になって置き場所が限られてくる」(O10 管理委託)といった指摘である。「ファミリーマンションならわからないがワンルームマンションだと」(Q8 管理委託)無視できないとの指摘もあり、貯湯タンクの隠れた費用は狭小賃貸住宅ほど相対的に大きな影響を持ち、面積あたりの単価が高い物件でもバリアになるだろう。仮の話としてエコキュート採用時に容積率が緩和されるとしたら影響があるかをたずねたところ、「建坪は増えるが、仕様が変わる可能性は上がる」(N5 大手・設計)といったように、状況次第で採

用率が上がる可能性があることは示唆された。

給湯機器は本体費用だけではなく、インフラ整備費用を追加的に要することがあるが、本インタビュー調査では、既築リフォームの経験談について掘り下げた分析ができておらず、新築時についても明らかな影響を把握することまではできなかった。例えば、都市ガスを利用するための費用を巡っては、「オール電化にするとガスを引き込まない時点で実はそんなには変わらない」（N10 大手・設計）、「低層で戸数が少なければ電気が良い。建築費はあまり変わらない。貸主にとっても電気とガスを別に引くとメンテナンス費用がかさむ」（N8 大手・施工改修）との捉え方がある一方、「県営住宅があるような所は栄えていて、元々都市ガスも通っている」（N2 大手・施工管理）といった指摘もあり、物件の立地条件や規模の経済性によって左右される部分がある。

隠れた費用に関連して、バリアになるとは一概に言えないが、維持管理（メンテナンス）のしやすさも機器選定に影響を及ぼすことについて触れておく。オーナーは賃貸経営をするにあたり考慮すべき事柄を多く抱え、物件の維持管理にかけられる手間や労力には限りがあるため、住設機器に対しても維持管理のしやすさを期待する。あるオーナーは賃貸住宅との関わり方について、「基本的にはメンテナンスがなるべく少なく。色んな問題がでたら勤め人だから面倒。節税・相続対策というのがあるから、あまりとらわれたくない」（O8 管理委託）と述べる。その点では、電化住宅を採用した1番の理由を「管理、メンテナンス。電気の方が長持ちもする」（O3 サブリース）と評価するオーナーもいれば、「IHはメンテナンスとしては非常にいい。壊れないし、掃除も楽。エコキュートはでかいから交換も大変だし、壊れやすいというイメージもある」（O8 管理委託）といったように、機器によって異なる印象を抱くオーナーも存在する。初期費用のかかる機器ほど維持管理費用もかかるという考えもあれば、維持管理費の抑制も意識しながら仕様を決める場合もある。本インタビュー調査から明確な影響を見出すことはできないが、オーナーからは維持管理費について複数の言及があった点は指摘しておきたい。

2.3.3. リスク：不確実な入居率向上効果

工場やオフィスなどで省エネ対策が実施されない理由として、生産プロセスやビル利用者に影響が及ぶ可能性があることや、事業環境の不確実性下では3～5年といった短い投資回収年数が求められることなどが指摘されることがある。賃貸住宅の給湯機器に関していえば、この類のリスクに関する直接的な言及はなかった。

一方、賃貸住宅市場自体について日頃から気がかりなことをたずねると、「空室が長くなると不安が出て来る」（O2 自主管理）、「一所懸命やって入居率ほぼ100%を維持している。世間は三分の一空いているという話が出る」（O1 自主管理）といった反応が多く見られ、入居率の低迷は賃貸経営における主たるリスク要因の1つであることがわかる。このような観点から、「オーナーの1番大事なポイントは収支がどれだけ合うか、その中で1つの切り口として、スペックが高くて省エネになって借主の光熱費が下がるので、満足度が高まって空室率が低くなる」といった話（N7 大手・施工管理）を期待する声もあり、省エネ対策を実施することが入居率の向上手段になるという構造を作りあげることができるかも今後の検討課題の1つと考えられる。

2.3.4. 情報不足：正確なコスト比較機会の欠如

オーナーは居住者ニーズも考慮に入れて省エネ型給湯機器を選ぶことができるし、省エネ型を採用したときに光熱費削減メリットがあることを居住者に訴求できる立場にある。一方、給湯機器の光熱費をどのように捉えるかは人によって異なる部分も多く、わかりやすく正確な情報の提供については課題が残されている。

省エネ型給湯機器の中でも、ガス・石油式の潜熱回収型給湯器については従来型と比べてメリットがわかりやすいので、調査対象者には電気式について焦点を当ててたずねたところ、夜間電気料金の上昇や再エネ賦課金の増加なども相まって、電気省エネ型のランニングコスト削減メリットはかつてほど魅力的ではないという指摘が複数あった。例えば、「エコキュートで電化上手という契約にしているとすごく安かった。契約している人は引き続き安い値段でいけるが、新規で入ると値段が高い。オール電化だから安いイメージでやると、以前住んでいた家よりなぜこんなに高いんだということがある」（N3 個人・設計改修）、

「東日本大震災まではエコキュートの方が安いというトークが成り立った。今そういったメリットもないので、コストパフォーマンスの点と場所の件も踏まえて、ほぼほぼ給湯器に関してはガス」(N7 大手・施工管理) という反応である。

それでもなお、省エネ性能の高さや夜間電力を活用できること、エネルギー源が集約されることにより、どちらかといえば電化するほうが光熱費は抑えられるとの指摘はある。「居住者にオール電化っていいですねと言われる。一人住まいで都市ガスを使ってた方が結婚して2人になって、うちのアパートに来て、オール電化になったら、光熱費がこちらの方が安いと」(O2 自主管理) などであり、特にLPガスと比べて安価であるとの共通認識は形成されていた。

コスト情報は利用可能であったとしても、実際に利用されるかという点の課題は残る。「初めて1人住まいする人だから、比較するものがない。立地と家賃で決めると思うので、ある程度仕様を落としてでも、家賃を下げる方が喜ぶような気がする」(O7 サブリース) との指摘が象徴するように、物件選びの際に光熱費が話題になりにくい側面は否めない。物件の光熱費よりも詳しい給湯機器単体の光熱費について、情報提供がされにくいことは想像に難くない。

2.3.5. 限定合理性：検討時間・労力に限りがある中での機器選定

「限定合理性」(bounded rationality) とは、時間・注力・情報処理能力には限界があるため、省エネ機会が見逃されてしまう省エネバリアである。

例えば一括借上げにより管理(サブリース)を利用しているオーナーは、サブリース会社の提案を受け入れがちであり、仕様へのこだわりが少なかった。具体的には、「本業をやりながら自分で管理できなかったからサブリースにした」(O7 サブリース) というオーナーは、サブリース会社が「ガスの方がいいと言ったからガスにした。それだけ」(同上) と振り返り、省エネ性能への関心も低かった。このような状況を、積極的に賃貸管理に関わるタイプのオーナーは、「みんなサブリースで放り投げているので、実際に設備がどうか使い勝手は一切オーナーには」(O1 自主管理) わかれないと批判的に捉える。オーナーの検討時間・労力には限りがあり、外部リソースを活用することは合理的であるが、そのような過程で省エネ型給湯機器が十分に採用されているのかは明らかでなく、今後の検討課題といえる。

2.4. 政策への期待や課題

以上のような省エネバリアがあることを念頭に、政策への期待や課題について掘り下げていく。

2.4.1. 規制的手法

現状のままであれば初期投資抑制が優先されがちであり、オーナーや設計側の行動を変えていくためには規制強化も一つの手段であるとの指摘は少なくない。無論、対応コスト増への懸念はあるし、採用者側ではなく機器メーカー側の問題であるとの捉え方も一部ではあるが、後述するように支援と組み合わせた規制強化であればそれほど強い抵抗感は示されなかった。また、光熱費を負担する立場にはないオーナーに省エネ性能を説明することを求める規制だけでは効果が限定的であることも示唆された。具体的な発言は以下のとおりである。

規制的手法の中でも厳しい、仕様を制限するタイプのものに対して、「コストが上がる可能性が高いので、その辺の懸念はある」(N6 地場・施工管理) という反応はごく自然のものである。特に賃貸住宅では動機の分断や資金調達力のバリアにより、この懸念は大きくなる。一方、「規制が住宅にも及んできて、デベロッパが省エネ住宅を考えていかなければならないのだろうという認識がある。規制をかければできると思う。作る側にしても規制がかからないと、今のままずっと続くことになる」(N4 大手・設計) といったように企業の社会的責任として前向きに捉える向きや、「義務化は大変だが、間違いなく効果があるので政府が先導していかないと」(N10 大手・設計)、「結局は規制化しないとだめ。本当はそこをしたくないけど。借り手が安いところを探す傾向になれば流れ的には安いものを作らないといけなくて、そういうところから離れていってしまう」(N9 地場・施工管理) といったように、消極的ながらも受容する態度を示す調査対象者も少なからずいた。業者自らが規制強化を求める声は日常的にはそう多くないと想像されるし、インタビュー過程で出てくる個人的発言として受け止めるのが妥当であるが、変化のきっかけが不足して

いる実態を映し出すものとしては十分であろう。

規制的手法に分類されるものであっても、機器選定の自由は確保される説明義務についてはどうだろうか。建築物省エネ法のもとで2021年4月、300m²未満の原則全ての住宅・非住宅を対象として、建築主から建築主への省エネ性能の説明義務制度が開始されており、説明自体には情報的手法としての側面もある。本インタビュー調査は制度開始の約1か月前に実施されたため、その運用実態を把握することはできないが、次のような反応があった。「採用可能な省エネ対策は積極的に建築主に提案をしていくべき。かかる費用と費用対効果をきちんと説明して、やりたいというお客さんもいる」(N10 大手・設計)といったように、省エネ不適合状況や取りうる省エネ対策を説明することでオーナーに検討を促すものとして前向きに受け止める人はいる。一方、「丸投げする人と神経質に言ってくる人と二通りいる。金額はボンと上がるので、結局オーナー次第」(N3 個人・設計改修)、「(説明義務で仕様を良くすることは)省エネではそうはならない。最低限のところクリアしようとする。当然コストの話。建物のデザインや見た目グレードアップすることはあるが、省エネ関連で義務でないところまで踏み込むことはまずない」(N5 大手・設計)といったように、説明しても結局はコスト重視で判断されてしまうとの見方も少なからずある。オーナー側からも、「わざわざお金をかけて省エネ化しなくても良いと言うような気がする」(O6 サブリース)、「満たすためにどれくらいコストがかかるか考える。それをするのか他を削るのかという判断」(O9 サブリース)といったように、影響が限定的であることを示唆する声がある。

2.4.2. 経済的手法

規制と補助・税制優遇が一体的に運用されることを望む声は多かった。賃貸住宅市場ではコスト削減ニーズが強いことも作用しているだろう。賃貸住宅の関与物件数が少ない調査対象者や、機器選定時に利用可能な制度がなかった調査対象者もいると考えられ、経済的手法の実態把握調査としては十分なものはいえない点に留意すべきだが、これまでに補助・税制優遇を活用して省エネ性を向上させたという経験が語られることは少なかった。

主だった指摘として、「デベロッパもお金が第一なので、違反したら罰則規定というのも大事だけど、規制や義務だけでは補いきれないところもある。そうなりとやっぱりお金でしょという気がする」(N2 大手・施工管理)、「ある程度の規制がかかると思うから対応するが、(CO₂排出を)ゼロにするようなものを作るとなったら、それこそエコポイントどころではない補助をしてくれないと。国がオール電化工事費の100%を出すならばする」(N1 地場・施工改修)といった反応が多い。各種の給湯機器は十分に成熟していて、技術的には採用したくてもできないような類のものではなく、機能的にもお湯を供すること以上の差別化要素は少ないため、業者が省エネ機器を選ぶかは政策次第といった様相である。

2.4.3. 情報的手法

2021年3月の国土交通省「住宅の省エネ性能の光熱費表示検討委員会」とりまとめにに基づき、新築賃貸住宅についても住宅情報サイトなどで年間目安光熱費を表示する任意制度が導入される(とりまとめでは2022年10月以降とされていたが、2022年6月の建築物省エネ法の改正等も踏まえて、本稿執筆時点では導入時期を後ろ倒し³⁾)。本調査時点ではその詳細は明らかにされていないことも手伝ってか、自ら言及する調査対象者はいなかったが、インタビュー過程でそのような検討がされていることにも触れると次のような反応が見られた。

光熱費表示にどちらかといえば肯定的であったのは、電化住宅を扱う個人オーナーであり、例えば「オール電化のメリットが費用にあるのかなのか、データとしてあるなら今後入居募集する時に有利になるのかもしれないが、賃貸の募集時には見たことがない。データとして提案できるなら今後の賃貸物件のオール電化も有りだと思ふ」(O9 サブリース)と述べる。一方、期待もありながら本音では不安という反応が全般に多い。例えば、「借り主は反応すると思う。その物件が省エネ的に優れていて、明らかに省エネ効果を発揮して年間の光熱費をかなり抑えられるという物件なら積極的に表示していきたい。トラブルは

3) 詳細は国土交通省「住宅の省エネ性能の光熱費表示検討委員会」Web ページの補足(令和4年7月20日追記)。
(https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_tk4_000176.html (アクセス日 2022.12.21))

懸念される。何を基準にやっているのかという話になるので、額面通りに結果が出るのかは疑問。省エネ物件なら表示はしたいけど、そういう心配はある」(N9 地場・施工管理)と述べるように、考えを巡らせていくうちに、情報の正確性、クレームの心配、関心の欠如といった不安要素を思い浮かべるようになる。中には、「仮に比較サイトで光熱費表示を見て来たとしても、入居して自分の使い方を棚上げておかしいじゃないかと言いかねない。理想的な数字しか出てこないから、我々としてはあまり良くない。トラブルの種を蒔いているようなもの。借り主に説明しても分からないと思う」(O10 管理委託)という指摘もある。

以上の発言は、物件の光熱費と給湯機器単体の光熱費を明確に区別していない場合が多いと考えられることや、光熱費について具体的な情報に基づいてコミュニケーションするためのツールがこれまでなかったために想像に基づくことを踏まえれば、参考結果としての理解にとどめるのが妥当である。

そこで、関連する現行取組からの考察を次に試みる。

光熱費ではなく省エネ性能については、建築物省エネ法により2016年4月から販売・賃貸業者に対する建築物の省エネ性能の表示の努力義務があり、具体的にはBELS (Building-Housing Energy-efficiency Labeling System) を建物本体や広告に付与できる(国土交通省,2016)。他方、調査対象者に限ればBELSを認識している例は1名のみであった。そのオーナーも、「管理している物件でBELSを表示している物件はない。新築住宅でBELSをとったことはあるが、賃貸ではあまり聞いたことがない。借り主側もそこに何のメリットがあるんだという感じだと思う。認知されていないから、BELSって何?と。説明すれば分かるかもしれないが」(O6 サブリース)との反応である。このことから、情報提供制度については、今後も実効性を高めるための工夫が求められると推察できる。

3. 給湯機器の販売・設置関係業者へのインタビュー調査

3.1. 調査実施要領

前章の賃貸住宅が象徴するように、給湯機器が選ばれる過程においては、利用者だけでなく業者も重要な役割を果たす。業者といっても、住宅供給者の立場から設備の1つとして給湯機器を扱う人、エネルギー事業者の立場から需要側技術として給湯機器を扱う人、メーカーに近い立場から商材として給湯機器を扱う人、施工業者として給湯機器の設置に関わる人など、商流の中には様々なアクターがいる。そこで機器選定の実態や、各種政策への期待や課題について記述的エビデンスを得ることを目的として、給湯機器の販売・設置業者へのインタビュー調査を実施した。

まず、2022年1月17～24日に、インタビュー対象者を抽出するための予備調査を実施した。具体的には、調査会社(株式会社マクロミル)のモニターに対して、Web回答方式のアンケートを配信し、業種や業務、直近1年間の給湯機器の販売・設置台数などたずねることで、設置・販売に関与する10名を抽出した。

次に、2022年2月5～8日にかけて、オンライン・デプス方式(60分/名)のインタビュー調査を実施した。インタビュー対象者10名のプロフィールは図2のとおりである(前章との区別もできるようにWater heaterの通し番号として右上からW1～W10を付与)。なお、予備調査の中では、給湯機器の設置・販売に関わる上で「脱炭素社会の実現に向けて積極的に貢献していきたい」かを「とてもあてはまる」から「まったくあてはまらない」の5段階の選択肢でたずねており、同図の横軸はその回答データに基づく。縦軸は商流に基づくおよその分布である。

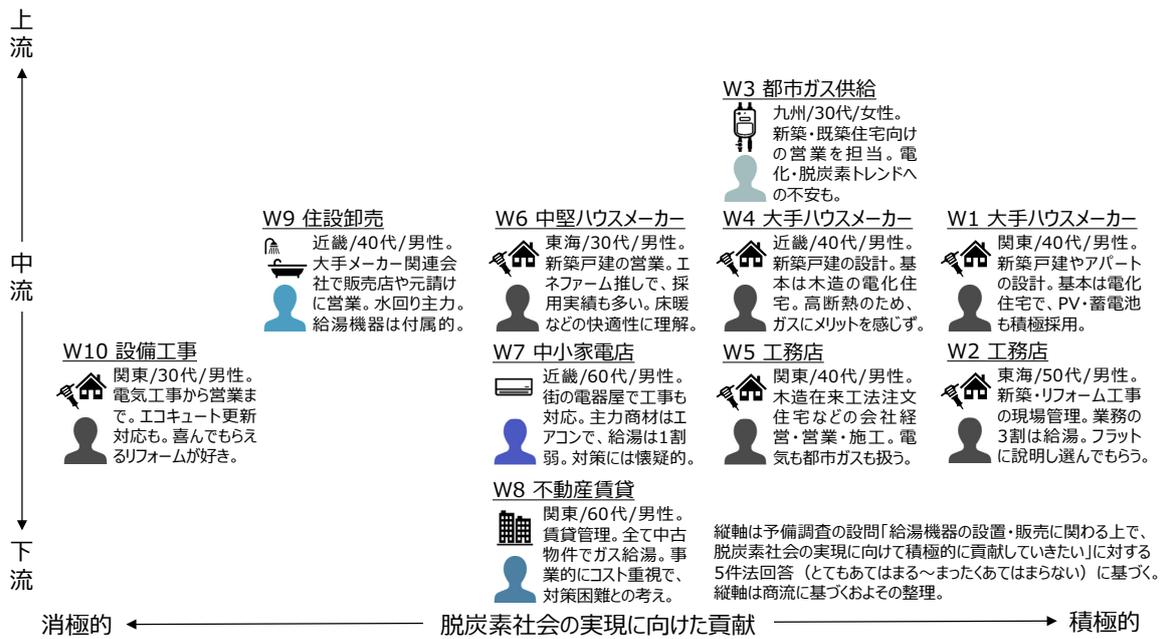


図2 調査対象者（給湯機器の販売・設置関係業者）のプロフィール

インタビューフローは4つのパートで構成され、具体的には (1) 調査対象者のプロフィール（仕事の概要など）、(2) 住宅設備機器の販売・設置との関わり（取り扱っている住宅設備機器、事業の中での位置づけ、給湯機器などの販売・設置実績、典型的な関与事例、業者としての選好やその理由など）、(3) カーボンニュートラルなどの認知・理解状況（エコキュートや電化に対する印象、エネルギー問題・温暖化問題による事業影響、現行政策の認知、「カーボンニュートラル」「脱炭素社会」の認知など）、(4) 政策の印象（温暖化対策の強化が求められていることや今度の取組のアイデアへの印象など）の順でたずねた。前章の調査と同様に、住宅設備機器の販売・設置への関与経験という身近な話題から始めて、給湯機器との関わり方、選好や理由、政策手法に関する話題へと徐々に掘り下げる、インタビュー序盤においてこちらからは省エネ・温暖化対策に触れない、インタビュー全体を通じてバリアを同定していくといった点を意識した。

3.2. 給湯機器の販売・設置関係業者にかかる省エネ・温暖化対策のバリア

以降では、主な発言データを引用しながら、インタビュー調査結果を分析していく。2.2節の実態把握では省エネバリアに着目したのに対して、本節の実態把握では、商流と脱炭素に着目しながらインタビュー結果を述べる。

3.2.1. エンドユーザーとの関わり方：ニーズや制約にあわせた状況依存的対応

エンドユーザーは経済性や交換に伴う不便さの回避などを重視し、業者はそうしたニーズや制約にあわせて対応することが多く、基本的には状況依存的といえる。

本章の調査対象者の中には、前章のテーマであった賃貸住宅のオーナーも1名だけ含まれており、動機の分断が生じてしまうおそれを、「ガス代は入居者が持つので省エネしてもインセンティブがない。導入費は僕が持つがランニングコストは入居者が払うので、社会全体の効率がいいということと私の効率がいいというのはイコールではない」（W8 不動産賃貸）と端的に述べる。とはいえ、調査対象者全体を見渡すと、エンドユーザーにとっての経済性も考慮事項の1つになっている。例えば、「エンドユーザーのニーズは昔から変わらない。快適になればと電気代を安く」（W10 設備工事）、「光熱費は一生掛かってくるので、できるだけ抑えたい。お客様の話を聞いてイニシャル重視かランニング重視か合ったものを売っていく」（W3

都市ガス供給)といったように、ニーズにあわせる様子がわかる。

新築住宅における給湯機器の選定は、エンドユーザーが電化住宅を志向するかにも左右されやすい。例えば、「エコキュートはオール電化にマッチする。物自体も50~80万円で買えるため手が出しやすくなっている。非常時の貯湯機能があり水が使えることも推しているため、エンドユーザーが良さを理解しやすい」(W1 大手ハウスメーカー)といったような採用経緯がある。

既築住宅では、光熱費削減が交換の理由になることもある一方、故障・不具合をきっかけとする急ぎの交換も多い。「壊れたから替える、ガス代が高いから安くしたいというのが大きい」(W9 住設卸売)というのは、業務範囲が広い業者の声である。賃貸住宅に限れば、「既存物件での交換のきっかけは、90%以上は入居者が管理会社にお湯が出ない、壊れたと言ってくる。ほとんど修理はせず、すぐに交換する」(W8 不動産賃貸)といったように、急ぎの交換が典型的という指摘もある。

スペース制約をどの程度受けるかは新築と既築とで異なる。「新築する時に基礎工事から関わられるなら、場所さえあればエコキュートにしようということになるが、交換では今まで通りガス給湯器になる。周辺の住宅地は家と家の間の路地がかなり細く狭いので、外に大きな貯湯設備を置くエコキュートは難しい」(W7 中小家電店)と指摘されているように、業者が関わるタイミングや立地条件にも依存する。

3.2.2. 事業戦略：業者の意向にも左右されがちな機器選定

業者が機器選定にどのように影響を及ぼすかについては、自由選択型、業者推奨型、業者判断型というおよそ3つのパターンに分類できると考えられる。このうち業者推奨型と業者判断型においては、業者の意向次第で機器選定結果が左右される。

自由選択型では、業者は特定の機器にこだわることなく選択肢を幅広く提示し、求められるものを販売・設置する。その対応は分け隔てないものであり、「ガスを推す、エコキュートを推すというのはない。あくまでもニーズに合わせて提案。お客様は得になる、元請けも提案して喜ばれる、自分たちも売上があがる、と全員にとってメリットがある形で単価を上げられるのが理想」(W9 住設卸売)、「まずお客様の希望を聞く。エコキュート、ガス、石油の3つから選んでもらう。最近では石油はなく、エコキュートが7割、ガスが3割くらい。選択肢を出してそれぞれのメリット・デメリットがあるという話をした上で、お客様に選んでもらう」(W5 工務店)といった具合である。

業者推奨型では、業者が特定の商材を薦めることで、エンドユーザーの機器選定に影響を及ぼす。電化を好む例としては、「オール電化を提案するので8割くらいはエコキュート、残り2割はアパートを含めてガス給湯器。エネファームはあまり出ない、うちがあまり推していないのもあるが」(W1 大手ハウスメーカー)、「ガス工事の資格はあるが率先してガス設備を売ってはいない。自分の好きな商品でないと売らないので。ガスにあまり魅力を感じていない。キャンプでも電気系で火をおこす」(W10 設備工事)といったものである。その反対に、「うちで取り扱っているものならガス給湯器」(W3 都市ガス供給)というようにガス機器に専念する業者もいる。ハウスメーカー勤務でエネファームを推奨することが多い別の担当者は、「最初から給湯器まで何にしようと思って来る人は多分いない。話を聞いて初めてどうしようかなとなる。こちらの提案で選んでもらうことが多いかな」(W6 中堅ハウスメーカー)とエンドユーザーの機器選定への影響力があると述べた上で、業者としての選好が形成された経緯を「電力会社と都市ガス会社と付き合いがある。ガス屋の方が営業を掛けてくる率は断トツ高い。ガスが50回来るのに対して、電力は1回とかのレベル。我々も営業なので、来て使ってくださいと言われると、使いたくなってしまうというか情が湧くというか。それも多少は影響してくるかな」(同上)と振り返る。

業者判断型では、賃貸住宅や建売住宅において給湯機器の選択肢が早い段階で絞り込まれる。例えば、「賃貸住宅ではオール電化への切り替えは進んでいない。そもそも収益目的で建てているから、オーナーは土地に対して目いっぱい建てたい。給湯設備に場所をとることは、部屋が小さくなって家賃収入が減ることに直結する」(W8 不動産賃貸)といった様子は、前章でも分析したとおりである。また、「建売業者があまりエコキュートは入れていない。駐車場の場所が減るので」(W7 中小家電店)といったように、賃貸住宅だけではなく建売住宅でも隠れた費用や動機の分断が生じるおそれがある。

3.2.3. 技術：「省エネ型」で得られる着実な効果と安心

電気式であればエコキュート、ガス式であればエコジョーズやエネファームといったように、いずれのエネルギー源もラインナップの中に「省エネ型」機器を持つ。効果の違いこそあれ、光熱費削減のニーズに一定程度応えられる状況にあるのは望ましいことである。例えば、「エコキュートが向いているのはガス代が高い家、プロパンの地区は特に。ガスに払っている金額に対して、どれくらいでペイできるかを計算した上で提案する。お湯なので感動が少ない。電気代とガス代を比べると格段に安い」(W10 設備工事)、「エコジョーズはメーカーの話だとガス代がお得になる。メリットを提案しやすい。リフォーム屋にも分かってもらえるし、よほどの人でなければエンドユーザーにも伝えられる」(W9 住設卸売)、「エネファームは光熱費とかで返ってくるものが大きいから勧めやすい」(W6 中堅ハウスメーカー)といった具合である。

このように節約・省エネニーズに応えられることで得られる肯定感により、CO₂削減にも一定程度寄与しているという認識が形成されていくものと推察される。これは省エネの観点では着実な前進であるが、CO₂を大幅削減するためには効率改善のみならず電化も検討する必要があるという問題意識を持ちにくくさせてしまう側面も否めない。この点については3.2.4項でも関連発言に触れながら分析する。

3.2.4. カーボンニュートラルの認知：自分ごと化されていない現状

カーボンニュートラル(CN)社会の実現を目指すこととされていること自体は認知されているが、自分ごと化して受け止めている調査対象者は少なかった。次に述べるように、その背景として(1)現場におけるCO₂削減ニーズの不足、(2)行動主体としての納得感の不足、(3)省エネ対策と脱炭素化の関係性を理解することの難しさが浮かび上がった。

第1に、少なくともこれまでのところ、現場でCO₂の話をされることはないに等しく、自ら話を持ち出すほどのニーズは感じられない状況にある。「施主に直接聞かれるのは、いくら安くなるのか。／例えば、この商品に替えたなら何本の木の削減ができるのかという質問は、今までに一度もされたことがない」(W9 住設卸売)、「お客さんは脱炭素は気にしない。日頃のお金だと言う奥さんが多い。／脱炭素への関心がないのがベース。それよりもお客さんの生活で安心できるならいい。その結果、脱炭素につながったと。無理に脱炭素だからこれを買ってくださいと勧める気はない」(W10 設備工事)と指摘する。

第2に、CO₂削減は他の主体・手段の課題として捉えるなど、行動主体としての納得感が不足する。例えば、「住宅でカーボンニュートラルを目指すのは結構難しい。給湯器をこれ以上効率よくできるかというと限度がある。地球環境を考えると一番いいのは、太陽光を付けるとかになってくる」(W6 中堅ハウスメーカー)といったように他の優先的課題を思い浮かべる、「脱炭素になる給湯器の原料は電気。今どうしているかという、石炭もしくは液化天然ガスで作っている」(W9 住設卸売)といったようにエネルギー供給業者の問題として捉える、「私の仕事レベルではない。おそらくもっと大きな事業レベル、大規模な工場でCO₂削減ならあると思う」(W10 設備工事)といったように大企業の問題として捉える、「給湯器のCO₂なんて知れていると思う。牛のゲップの方がひどいと聞いた」(W7 中小家電店)といったようにエネルギー以外の検討課題として受け止めるといったものである。

第3に、給湯分野の省エネ対策をできる範囲でやればよいという考え方が、CN対応も見据えた対策にアップデートすることを難しくさせる。「ガスが脱炭素に向けて逆方向に進んでいるわけでもなく、それはそれでいい。ガス・石油関係でも二酸化炭素ゼロにはならないだろうが抑えることはできるだろうと思うので、そちらの技術が進めばいい」(W4 大手ハウスメーカー)、「もっと少ないガスで燃焼するとかシャワーでもいいヘッドが出てきている。使っている時間が短かったら省エネ。そちらを一所懸命やった方がいいと思う」(W7 中小家電店)などである。

3.2.5. カーボンニュートラルに対する態度：対応意向と不安

さらにインタビューを進めていくと、CN対応に前向きな声から不安や懸念を指摘する声まで様々な反応があった。

CN対応は自社の戦略に合致するという認識のもと、期待を寄せる業者も中にはいる。「ZEH (net zero energy house) の情報をお客様もつかんでいる。いい設備を入れ、環境にも貢献し、補助金ももらおうという

ので人気。補助金という国の政策が絡んできて、追い風が吹いている状況」(W1 大手ハウスメーカー)、「元からオール電化、太陽光発電や床暖房を勧めてきた会社。今、社会に合致した。先見の明があったのかなと」(W4 大手ハウスメーカー) などである。

いざとなれば商材構成を変更可能という業者も存在する。「影響は多少あると思うが、そんなに。売るのがAからBに替わるくらいで、そこまでは変わらないと思う」(W9 住設卸売)、「うちはお客さんに頼まれて付けるだけなので、使う製品が駄目なら他を使うだけ。全体としては変わらないのではないかな」(W2 工務店) といったように、商材に対する選好が元々そこまでない場合、心理的なハードルは低い。

一方、関連産業への影響を懸念する声も多く聞かれた。「ガスの方がいいと言うお客様も一定数はいるのでなくなることはないと思うが、以前に比べて件数が減ってきているとは感じる。電気の方がCO₂の削減率が高いと思う人も多く、そちらに流れていく傾向になるのかなと思う。電気などもやるようになって、どんなお客様に対しても、どの機器でも提案できるような、そんな会社になっていく必要があるのかな」

(W3 都市ガス供給) というように、複雑な思いを持つ人は多いだろう。「ガス業者やガスリンスタンドにとってはデメリットでしかない。地方は特に、昔からの近所の付き合いもあると思うので、いろいろ難しい」(W10 設備工事)、「ガスリンで動く車をずっと勉強して覚えてきた人は、急に電気自動車に変わっても対応できない。それが給湯器にも当てはまる。うちとしては取引先を替えるだけだが、そういう人たちのことも考えないといけない」(W2 工務店)、「急いでやられて景気が悪くなるのが一番嫌。中小企業は言われた通りの設備投資はできない。その人たちが困って、いろんなものを作れないようになると、連鎖のように私たちの所にも来る」(W7 中小家電店) といった反応があった。このほかにも、住宅単価が上昇して売れなくなる、人手が必要になるといった心配の声はある。「売る側の営業からすると、お客様の予算は変わらず、補助金も出ない中、(基準だけがどんどん高まって高価な機器などを) 付けていきましょうと言われるのはしんどい」(W6 中堅ハウスメーカー)、「ガス給湯器なら運搬も取り付けも一人で簡単ができるが、エコキュートは空でも70、80kgなので運搬は二人いないと無理」(W10 設備工事) といった声である。

3.3. 政策への期待や課題

3.3.1. 規制的手法

関連規制として建築物省エネ法が広く知られているため、給湯機器単体というよりも住宅レベルのエネルギー消費性能向上をイメージしながら規制について話す対象者は多い。このときに、「大手にはそれだけの体力があるし、推進して業界を引っ張っていかねばいけないという自負もあるし、どんどんやるべき」(W1 大手ハウスメーカー) との肯定的な反応がある一方、「各省庁が毎年のように告示したり法律を変えている。それに付いていくのが面倒」(W5 工務店)、「これを付けなければいけないというのがあると、予算に合わなくてやめると言われることの方が多くなってきている。規制されると営業妨害レベル」(W6 中堅ハウスメーカー) といったように、抵抗感も根強く残る。

一方、給湯機器に焦点をあてる規制を想像しながら、「最後は国が半強制的に決めるのではないかな。CO₂排出量の多い機器は販売できないように規制するみたいにな」(W2 工務店)、「規制は正直どちらでもいい。メーカーは売れなくなったら、そのうち廃盤にするだろう」(W9 住設卸売)、「(CO₂排出量の多い) 機器はもう売らないというなら、僕らも何も言えない。メーカーが頑張っって作り、一気に変わる」(W5 工務店)、「規制でメーカーが作らなくなるということであれば、理解せざるを得ない」(W8 不動産賃貸) といったように、消極的ながら受容するという態度は少なからず観察された。

3.3.2. 経済的手法

よく知られた経済的手法である補助について、「住宅エコポイントを使ったこともあるし、補助はあるならありがたい」(W2 工務店)、「うちとしては物が売れる状況になるのでメリットはある」(W9 住設卸売) といったように、期待する声は多い。将来のことを想像し、「CO₂排出量の少ない機器への交換を促す補助制度を充実させるのが一番いい。同じ金額なら、みんなそちらに替える」(W5 工務店) との指摘もある。他方で、「補助金はよいが一時的なもの。あるうちに販売の方向性を変えて、なくても全ての家で普及を済ませてしまえるような体制に会社も変えていかないと」(W4 大手ハウスメーカー) という指摘もあり、市

場変革につながるかが本来重要であることを問いかける調査対象者もいた。

ところで、以上のやり取りは、わが国における典型的な補助制度、すなわち、エンドユーザー（下流）向けの支援策についての発言である。本章の調査は商流にも着目するものであるため、補助が販売・設置業者（中流）向けであればどのように感じるかもたずねたところ、「ヒートポンプ給湯機を付ける割合を昨年度から今年度で何%増やすと、プラスアルファで国から補助がもらえるとなれば、会社としてもどんどん付けろという話にはなると思う」（W6 中堅ハウスメーカー）、「業者向けの補助もメリットはある。その分売れるようになるので」（W9 住設卸売）、「今までエコキュートを扱っていない業者に対する補助がでたら、電気も扱うことになれば積極的に売っていこうという話になると思う」（W3 都市ガス供給）という肯定的な捉え方もあった。一方、「卸売業への補助は社員の懐には入らない。エンドユーザーと直接関わるリフォーム店やハウスメーカーにするか、エンドユーザーにするかのどちらか」（W9 住設卸売）、「全部利益にしてしまえという会社もあるだろうし、お客様に還元しようという会社もある」（W6 中堅ハウスメーカー）、「1台につきいくらか加算とかが早いのかな。そうすると不正受給が出てくるので、なんともいえない」（W10 設備工事）、「補助金だけもらって機器は横流しするような人が出てくる。性悪説でものを考えた方がいい」（W7 中小家電店）との懸念事項を指摘する声もあった。従来のようなエンドユーザー向けの補助とは異なり、業者向けの補助については想像で回答している点に留意する必要があるが、業者のメリットになるか、適正な運用が図れるか、エンドユーザーにメリットが還元されるか、エンドユーザーに訴求できるか、結果として市場変革につながるかといった点が解決すべき課題になることが示唆された。

3.3.3. 情報的手法

本調査は2022年2月に実施したが、2021年10月には給湯機器の省エネラベルを変更する告示が施行された。この変更は、エネルギー種別を問わず星の数で省エネ性能を比較できるようにするとともに、年間目安エネルギー料金を表示するようにするものであり、2023年3月末までは従前の省エネラベルも使用できる状況にあった。インタビューを進める中で変更後のラベル例も提示し、その印象を聴取したところ、「省エネラベルは説明するのに役立つと思う。星印で評価が出るから」（W2 工務店）、「ランニングコストは電気の方が安いのかなと思うので、光熱費の比較を出すとエコキュートを選ぶ人が増えるのかなという気がする」（W3 都市ガス供給）との指摘があった。一方で、「省エネラベルは別に興味ない。ない時代から販売している。家族構成、子どもの年齢、女の子なのか男の子なのか、地域柄、電力会社の契約内容などによっても違う」（W10 設備工事）との否定的な反応もあった。これらは前章で確認した賃貸住宅関係者の反応に似ている。

商流にも注目する観点から、業者向けの情報提供についても印象をたずねた。「タンクのコンクリートの基礎を補強しなければいけないという知識が、地場工務店だと薄いかも。そういう補助情報があるといいかも。エコキュートに対して抵抗のある高齢な職人さんにメリットや施工の簡単さを教育すべきかな」（W1 大手ハウスメーカー）、「エコキュートの施工講習を充実させるべきと思うのは、これから普及するから。施工方法はその時によって変わるので、知っていた方がいい」（W2 工務店）、「新しい商品だと施工トラブルが増えるので、そこは必要かなと。現場で作業している人も高齢化が進んでいる」（W9 住設卸売）という期待の声があった。また、行政が信頼できる業者に関する情報提供をすることへの期待や課題についてたずねたところ、「自治体Webページなどで認定工務店の一覧を紹介することも効果があると思う」（W5 工務店）との期待もある一方で、「認定工務店の一覧は多分見ないと思う。Webに掲載したところで載っているのかくらい」（W2 工務店）、「認定をしたところで施主はそこまで見るのかと」（W9 住設卸売）との否定的な反応もあった。

4. おわりに

脱炭素化社会の実現に向けては、家庭用給湯分野のCO₂排出削減対策も強化していく必要がある。対策のあり方を検討するにあたり、普及シナリオ分析や技術評価、経済性分析などに加えて、機器選択の実態把握をしておくことは有益である。利用者を調査対象とする既往研究により、給湯機器は業者による選択

や提案の影響も受けやすいことまでは指摘されてきたが、その実態は十分には明らかにされてこなかった。給湯機器は一度設置されると同じタイプのものに交換され続けることや、例えばスペースや重量などの事情も関係するといったバリアの推察まではされてきたが、機器選定の関係者への調査は十分にはされてこなかった。

そこで本稿では、給湯機器の利用者以外で、その選定に関与する立場にある人へのインタビュー調査により、家庭用給湯分野で省エネ・CO₂削減を進めていく上での阻害要因（バリア）を把握するとともに、政策への期待や課題を明らかにすることにした。

4.1. 主な結果

給湯機器の利用者以外の行動が影響しやすい住宅セグメントの代表例として、賃貸住宅のオーナー・関係業者20名を対象とするインタビュー調査を実施（2021年2～3月）した上で、住宅セグメントを広げるとともに様々なアクターに注目すべく、給湯機器の販売・設置関係業者10名を対象とするインタビュー調査を実施（2022年2月）した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 賃貸住宅における省エネ型給湯機器の採用バリア

賃貸住宅の仕様の最終決定者であるオーナーは、省エネ型給湯機器を採用するにあたり、次のような課題を抱えている。オーナーを支える関係業者もそうした事情を勘案しながら行動するため、他のセグメントと比べて対策が進みにくい構造にある。

- オーナーは光熱費削減メリットを直接享受する立場にはないため、省エネ型を採用する動機に欠けるという「オーナー・テナント問題」がある（動機の分断）。
- 賃貸住宅市場自体がコスト削減ニーズの強い環境下に置かれているため、初期投資を少しでも抑えようと省エネ型が検討候補から除外されてしまうことがある（資金調達力）。
- 利用するエネルギーによってはインフラ整備費用が上乗せされたり、電気式は貯湯タンクのスペース・重量対応が貸室面積減・建築コスト増という追加負担になることがある（隠れた費用）。
- 省エネ型を採用することが、賃貸住宅経営で重視される入居率の向上手段になるという確証がない（リスク）。
- 給湯機器にかかる光熱費についての認識がまちまちである、光熱費情報が利用可能だとしてもクレームをおそれて提示することをためらうなど、正確なコスト比較機会が欠如している（情報不足）
- 賃貸住宅経営にあたってサブリース方式を使うこともあるように、オーナーは省力化を図る必要があり、検討時間・労力に限りがある中で機器選定が行われることがある（限定合理性）。

(2) 給湯機器の販売・設置関係業者にかかる省エネ・温暖化対策のバリア

今後、省エネ対策をアップデートし、CO₂削減という目的も併せ持つものにしていくためには、次のような点を踏まえた検討が求められる。

- エンドユーザーは経済性や交換に伴う不便さの回避などを重視し、業者はそうしたニーズや制約にあわせて対応することが多く、基本的には状況依存的といえる。
- 業者にはそれぞれの事業戦略があり、エンドユーザーに幅広い選択肢を提示する業者もいる一方、推奨する選択肢が限られている業者や、賃貸住宅や建売住宅で選択肢を早期に絞り込む業者もいる。
- 省エネ型を採用することは着実な効果をもたらす一方、CO₂を大幅削減するために何をすべきかという問題設定をさせにくくしてしまう側面がある。
- 現場でのCO₂削減ニーズ不足や行動主体としての納得感不足、省エネ対策と脱炭素化の関係性を理解することの難しさにより、カーボンニュートラル対応を自分ごと化している人は少ない。
- いざとなればカーボンニュートラル対応できるという認識の人もいるが、解決すべき課題としてコスト負担や関連産業影響への対応などがある。

(3) 政策への期待と課題

本稿の調査対象者は立場上、個別政策の詳細に精通している必要はない点にも留意すべきだが、今後の

政策への期待や課題として次の点が示唆された。

- 規制的手法：規制強化を望むわけではなく、影響を懸念する声もある。一方、CO₂削減のために利用可能な給湯機器が限定されるならば対応するだけである、そのようなきっかけがなければ市場は変わらないだろうと想像するなど、消極的ながらも受容する態度は少なからず観察された。
- 経済的手法：補助制度の認知度は高く、規制と一体的な支援に期待する声は多い。販売・設置事業者への補助の可能性をたずねたところ、期待する声もある一方で、商流・社内構造により価格反映されなかったり、エンドユーザーへの訴求力に欠けるおそれがあることも課題として指摘された。
- 情報的手法：省エネラベルの認知・活用度は高くなく、給湯機器の目安エネルギー料金や住宅情報サイトにおける目安光熱費の表示は期待感にばらつきがある。業者向けの情報提供としては、施工技术などのノウハウ共有などのニーズがある可能性は示唆された。

4.2. 今後の課題

最後に、家庭用給湯分野における今後の課題について、3つの考察を加える。

給湯機器の省エネルギー対策と温暖化対策の融合

省エネ型給湯機器を選ぶことでランニングコストが削減できるというメリットは広く理解され、給湯機器の利用者や関連業者はそれぞれの形で省エネ対策に取り組んでいる。わが国が2050年カーボンニュートラル宣言をしていることや、発電のための化石燃料利用を減らす必要性などは認識されている。一方、業者としての立場から関わりを持つ給湯機器に関して、従来の省エネ対策を上回る行動がすぐにでも求められると受け止めている人は少なかった。太陽光発電とヒートポンプ給湯機を備えた住宅に触れることで脱炭素化を想像しやすくなる例はあったが、全体としてみれば、省エネ対策のみでは建物脱炭素化が難しいという認識は共有されていない。このようなギャップを埋めていく上では、カーボンニュートラルを実現する上で必要となる給湯機器構成や対策の経済性（山田・西尾，2023）などについて議論を深めていく必要があるだろう。

給湯機器の選択に影響を与えるキーアクターへの注目

賃貸住宅のオーナー・テナント問題が典型的であるように、アクターは立場によって異なる判断基準を持つため、社会全体でみれば経済合理的な対策も個別レベルで実施されるとは限らない。扱うテーマにより効果的な政策介入ポイントは変わるが、給湯機器の選択でいえば居住者だけでなく業者の意識や行動が大きな影響を持っていることに注目する必要がある。例えば、米国・カリフォルニア州ではヒートポンプ補助プログラムの実施にあたり、商流の中流にいる設置・建設業者にインセンティブを付与することとした（中野・西尾，2023）。キーアクターを特定することで、そのような検討も可能になると考えられる。

政策の実効性評価や改善提案に向けて

本稿からは、給湯機器関連の政策の中には課題も残る可能性が示唆された。一方、限られた対象・件数のインタビュー調査であることには留意すべきであるし、個別の政策の効果について深掘り分析をしていないのは本稿の限界である。実態把握によりキーアクターの意思決定構造を理解した上で、政策の実効性を評価し、改善策を検討していくことは有益である。

謝辞

3章のインタビュー調査は、環境省「令和3年度民生部門における脱炭素化対策・施策検討委託業務」（委託先：みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社）の一環で実施したものである。関係諸氏に対して謝意を表す。なお、本稿の全体目的にあわせて、分析内容を一部アップデートしている。

参考文献

- International Energy Agency (2007). “Mind the Gap : Quantifying Principal-Agent Problems in Energy Efficiency”
<https://doi.org/10.1787/9789264038950-en>
- Sorrell, S., O’Malley, E., Schleich, J., and Scott, S. (2004). “The Economics of Energy Efficiency - Barriers to Cost-effective Investment,” Edward Elgar, Cheltenham, UK.
- 伊丹弘美・末森雅大・若林直子・小島隆矢(2019). 「注文住宅取得プロセスの現状と課題に関する調査研究」, 日本建築学会技術報告集, 第 25 巻, 第 59 号, pp.205-209.
<https://doi.org/10.3130/aijt.25.205>
- 元アンナ・西尾健一郎・岩船由美子(2011). 「家庭部門における省エネルギー型給湯器の導入実態の分析」, 日本建築学会環境系論文集, 第 76 巻, 第 663 号, pp.529-538.
<https://doi.org/10.3130/aije.76.529>
- 岡市由加理・大谷由紀子(2017). 「賃貸住宅の供給動向とオーナーに関する研究—大阪府の賃貸住宅オーナーを対象として—」, 日本建築学会近畿支部研究報告集計画系, (57), pp.481-484.
- 国土交通省(2016). 「住宅・ビル等の省エネ性能表示のガイドラインを策定・公表しました」.
http://www.hyogo.zennichi.or.jp/data/topics/tenpu_1085_1.pdf
- 小島泰志・丹治三則・小林光(2012). 「既存分譲集合住宅における省エネ改修の普及に向けた改修阻害要因の解明」, 土木学会論文集 G (環境), 第 68 巻, 第 6 号, p.II_485-II_494.
https://doi.org/10.2208/jscejer.68.II_485
- 資源エネルギー庁(2017). 「液化石油ガスの小売営業における取引適正化指針」.
<https://www.khk.or.jp/Portals/0/resources/information/law/dl/guideline.pdf>
- 資源エネルギー庁(2021). 「賃貸集合住宅における LP ガス料金の情報提供のお願い」.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/distribution/lpgass_chintai/youeibun.pdf
- 中野一慶・西尾健一郎(2023). 「建物脱炭素化に向けた取組の検討—欧米の最新動向に見られる対策の広がり—」, 電力経済研究, 第 69 号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>
- 西尾健一郎・大藤建太(2018). 「CO₂の長期大規模削減とロックイン問題」, 電力経済研究, 第 65 号, pp.136-144.
https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/pdf/periodicals65_10.pdf
- 西尾健一郎・大藤建太・元アンナ(2013). 「既築住宅における給湯器交換の傾向分析—2010 年に交換を経験した居住者へのアンケート調査から—」, 日本建築学会環境系論文集, 第 78 巻, 第 691 号, pp.711-718.
<https://doi.org/10.3130/aije.78.711>
- 西尾健一郎・岩船由美子(2009). 「エアコンによる CO₂削減に向けた方策—アンケート調査による実態把握と省エネルギーバリアの分析—」, 電力中央研究所報告 Y08026.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y08026>
- 日本住宅総合センター(2019). 「民間賃貸住宅の供給実態調査報告書—供給主体やサブリース事業者の関与などを中心に—」.
https://www.hrf.or.jp/webreport/pdf-report/pdf/chintai_houkoku.pdf
- 山田愛花・西尾健一郎(2023). 「ロックイン問題を考慮に入れた給湯分野の CO₂削減対策の経済性—家庭 CO₂統計の個票データを用いた将来分析—」, 電力経済研究, 第 69 号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>

西尾 健一郎 (Ken-ichiro Nishio)

電力中央研究所 社会経済研究所 (兼) グリッドイノベーション研究本部

山田 愛花 (Manaka Yamada)

電力中央研究所 社会経済研究所

災害時におけるZEHのレジリエンス —アンケートデータと傾向スコアによる因果効果の分析—

Disaster Resilience of ZEH:
Causal Effect Analyses by Questionnaire Survey Data and Propensity Score

キーワード：レジリエンス、ZEH、停電、蓄電池、因果効果、傾向スコア

中野 一慶

要旨

近年、住宅の省エネ促進のためにNet Zero Energy House (ZEH) の導入が進められている。本稿ではZEHやその要素であるPV・蓄電池が停電時のレジリエンスを高めるのかどうかを明らかにするために、過去に停電を経験した世帯に対するインタビュー調査やアンケート調査を行い、その因果効果を、他の要因のバイアスを補正する手法である傾向スコア調整法を用いて分析した。その結果、停電時の困りごととして、室温を調整したい、食事をしたい、情報が欲しいといったニーズがあることや、ZEH居住者やPV・蓄電池等の保有者は在宅避難への不安が軽減され、停電時に家電を使用でき、不便さが緩和されていることが示された。アンケートの単純比較だけでは停電時の不便さにZEHが及ぼす影響を明らかにできなかったが、傾向スコアを用いることによりはじめて統計的に確認できた。

1. はじめに

1.1. 背景

近年、自然災害による大規模な停電などが相次いで発生してきており、レジリエンス¹⁾に対する関心が高まってきている。災害などによるエネルギー供給途絶時・停電時に、住宅でできるだけ安全・安心・快適に過ごすためには、非常食の確保などの日頃の備えだけでなく、太陽光発電 (PV) や蓄電池の設置なども対策として挙げられる。さらに、我が国で導入が進められているNet Zero Energy House (ZEH) については、その便益として、光熱費を安く抑えることができる経済性、高断熱による快適・健康性に加え、レジリエンスが高いことが挙げられている (資源エネルギー庁Webサイト)。

PV・蓄電池・ZEHなどの機器や住宅の普及には、その便益を評価し、訴求していくことが必要である。環境性や経済性はエネルギー使用量等をもとに評価しやすいのに対し、レジリエンスの評価には課題もあり、適切な手法を用いて便益に関する知見を蓄積していくことが、政策的な視点からも、普及を行う事業者の視点からも不可欠である。

1.2. 先行研究

PVや蓄電池、ZEHなどがレジリエンスを実際に高めるのかどうかを把握するため、機器の出力や家電の電気使用量などから、災害時にどのくらい家電が使用可能かといったシミュレーションを行う研究がある (稲葉他2021a,b; 金他2021など)。しかし、災害時のエネルギー利用のニーズは平常時と異なる可能性や、様々なバリアによって思うように機器が利用できない可能性がある。そのため、実際の被災世帯の行動から、機器や住宅のレジリエンスを明らかにすることも必要である。災害時のエネルギー利用のニーズを調査したものとして、佐藤・村尾 (2018)、稲垣・佐土原 (2014) などがあり、ニーズの高いものとして医療

1) レジリエンスとは、ある主体が外的なショック (外力) を受けた時に、その影響を最小限にし、迅速にもとの状態にもどる能力のことを指して用いられる。エネルギー分野では、電力供給システムの外力への耐性や回復力 (いわば供給側のレジリエンス) が評価対象となることが多い。本稿では、災害などによるエネルギー供給途絶時・停電時に、住宅でできるだけ安全・安心・快適に過ごせる能力 (いわば需要側のレジリエンス) を対象とする。

器具やスマートフォン、暖房器具などが挙げられている。向井他（2021）は、長期停電経験者が困窮度が高いと感じたものは、冷蔵庫、スマホ・携帯電話、照明、テレビ、エアコン等であることを明らかにしている。安岡他（2022）も長期停電経験者へのインタビュー・アンケート調査から同様の傾向を得ており、停電時の困りごとを「不快」「不安」「不便」に整理した上で、「不快」や「不安」に関するものが多いことを示した。また、朝野他（2012）は東日本大震災の被災世帯を調査し、震災による停電時のPV利用実態や利用までのバリアを明らかにした。中野・小谷（2022）は2018年北海道胆振東部地震、2019年台風15号の被災世帯を対象に調査し、PV・蓄電池等の電力が困窮度の高いものに使われている様子を明らかにしている。

しかし、実際の災害時の行動から、PV・蓄電池等の設備・機器や住宅性能がレジリエンスにもたらす因果効果を明らかにしようとする場合、他の要因のバイアスをもたらす影響を考慮する必要がある。先行調査例（朝野他2012、中野・小谷2022）には、因果効果を明らかにするような定量分析が含まれていない。

すなわち、(1)災害時の行動に関する調査の中から、(2)因果効果を明らかにする定量分析を行う、という2点を具備することに意義を見出すことができ、筆者の知る限りそうした研究は見当たらない。

1.3. 因果効果の定量的な把握と傾向スコア調整法

一般に、因果効果の定量的な把握のためには、ランダム化比較試験（RCT）が望ましいとされる。RCTでは、分析対象を処置群と対照群にランダムに割当てることにより、等質とみなされるサンプル群を作成し、その群間比較を行うことにより因果効果を推定する。エネルギー分野でも、省エネアドバイスによる効果検証（Mukai et al. 2021など）や情報提供による製品購入への効果検証（Allcott and Sweeney 2016など）に用いられてきた。一方で、こうした介入実験が不可能な対象もあり、その場合には観察型研究も重要なオプションになる。災害は実験的なアプローチが困難な対象の一つであり、観察型研究を適用するのが有効と考えられる。

観察型研究では、原因となる要因以外の条件がバランスしていないことがしばしばあり、原因となる要因が結果に影響しているのか、その他の要因のバイアスが影響しているのかを判別できない。その場合には、バイアスを補正して結果を比較することにより因果関係を推定することが可能になる。傾向スコア調整法はバイアス補正のための代表的な手法であり、エネルギー分野では西尾・向井（2016）など、災害分野では松川他（2019）などが用いている。本稿で扱うZEHは住宅性能が高く、居住者の所得も高いといった特徴があるために、ZEH以外と単純に比較するとバイアスの影響を受けやすい。そのため、本稿の分析のための手法として傾向スコアを用いることは適切である。

1.4. 本研究のねらい

そこで本稿では、ZEHやその要素であるPV・蓄電池等の設備・機器が停電時のレジリエンスを高めるかを明らかにするために、過去の停電を経験した世帯に対するインタビュー調査やアンケート調査を行い、その因果効果を傾向スコア調整法を用いて評価する。インタビュー調査を事前に行い、分析対象者の意識を定性的に捉えておくことで、アンケートで検証すべき仮説が明確になる。また、アンケートで得られた結果を考察する際にもインタビューの結果が参考になるため、2つの調査を合わせて実施することで効果的な分析が可能となる。なお、いずれの調査でも、近年建てられた新築戸建ての持ち家を対象としている。

本稿は以下のように構成される。住宅のレジリエンスに関して実施したインタビュー調査結果を2章で、アンケート調査結果を3章で述べる。3章ではさらに、アンケートのデータを用いて傾向スコア調整法による因果効果の推定を行う。4章では得られた結果について考察する。

2. 住宅のレジリエンスに関するインタビュー調査

2.1. 実施要領

インタビュー調査は表1の要領で2021年12月に実施した。対象者はスクリーニング調査により、築5年以内の新築戸建て・持ち家・注文住宅（ZEHを優先）の居住者で、停電経験者を5名抽出した。全員がPVを保

有しており、そのうち3名はZEH居住者、1名は家庭用蓄電池を保有していた。インタビュー対象者のプロフィールは表2のとおりである。5名の対象者に対し、1対1のオンラインデプスインタビュー（1人あたり1時間）を実施した。

表1 インタビュー調査の実施要領

時期・方法	2021年12月4-7日、デプス方式（オンライン）、1時間
対象者	築5年以内の 新築戸建て・持ち家・注文住宅（ZEHを優先）の居住者（5名） ・ 停電を経験した世帯を抽出
調査項目	停電時の行動と、技術採用によるレジリエンス向上： ・ 停電時の詳細経験（困りごと・不安）、機器利用実態（電気を使えることの便益、使う上でのバリア） ・ 停電時の在宅避難意向、EVの活用意向

表2 インタビュー対象者プロフィール

	1	2	3	4	5
性別	男性	男性	女性	女性	女性
年齢	30代	40代	40代	30代	30代
同居家族	妻・子供と5人暮らし	妻・子供他と6人暮らし	夫・子供と5人暮らし	夫・子供と4人暮らし	夫・子供と4人暮らし
居住地	埼玉県	静岡県	茨城県	山梨県	長崎県
現住宅の建築時期	2018年	2017年	2020年	2019年	2020年
現住宅について 当てはまるものや保有している設備	高断熱住宅である 太陽光発電を保有している	太陽光発電を保有している	ZEH 高断熱住宅である 太陽光発電を保有している	ZEH 高断熱住宅である 太陽光発電を保有している 家庭用蓄電池を保有している	ZEH 高断熱住宅である 太陽光発電を保有している
住宅メーカー	その他	セキスイハイム	タマホーム	セキスイハイム	その他
現住宅での停電経験	発電所火災で夏に6時間	台風で9月に1日弱	人的要因で冬に約半日	鉄塔落雷で6月に30分	台風で9月に約半日
被災時の困り事	暑さで子供寝れず/夕食準備に電子レンジ使えず	状況わからず	子供の翌夕食準備。冷蔵庫心配	自動切替で困りごとなし。夏場ならエアコン困っていた	復旧情報知りなかった
被災時の不安	復旧わからず/冷蔵庫	冷蔵庫の不安大きい	原因がわからない不安	特になし	冷蔵庫は開けない
PV自立運転の利用	×夜間で使えず	×(19年は偶然利用)	×切迫しておらず	自動切替(冷蔵庫/テレビ)	×小型機器用と思っていた
自立運転の認知	○試用あり	×	○	○	○試したことなし
コンセント位置の認知	○	○認知ありだが当時は用途不明	○2階なので、1階家電利用は無理	○リビングの壁の高い位置	△2階のPVパネル内、高くて踏み台や延長コード必要
停電時在宅避難意向	1日なら想定	電気があれば可能	2～3日なら	在宅避難念頭に新築	断水しなければ2～3日
在宅避難に必要な機器	蓄電池。機器より食品備蓄が重要	蓄電池	食料/懐中電灯。今後は蓄電池も検討	PVと蓄電池	断水していないこと。蓄電池への関心は高まった
EVへの関心	-	蓄電池として購入検討したが、予算合わず断念	現時点では停電対策にならない。蓄電池兼用に関心はあり	今の蓄電池で満足	EV = 蓄電池代わりはなし

2.2. 結果

インタビューからは、停電時に電気を使えることが不便・不安を軽減しており、PVや蓄電池の活用の有効性が示唆された。具体的には、「停電時の困りごと・不安」「停電時に電気を使えることの便益」「停電時に電気を使う上でのバリア」「停電時の在宅避難意向、EVの活用」について聴取し、以下の知見を得た（表3）。

まず、停電時の困りごと・不安として、室温を調整したい、食事をしたい、情報が欲しいといったニーズがある。また、停電時に電気を使えることの便益として、PVの自立運転機能で冷蔵庫が使えた[2]（[]内は対象者番号）、停電への備えを一つの動機としてPVを導入し、安心感につながった[3,4]、PVと蓄電池を導入し、停電時に自動的に電気を使えるように設定をしていたため、テレビと冷蔵庫が使えた[4]、等の声があった。

停電時に電気を使う上でのバリアとしては、夜だったのでPVが発電していなかった[1]、PVは保有しているが、認識不足で自立運転機能を十分に活用できなかった時があった[2]、自立運転用コンセントが2階なので使いにくかった[3]、蓄電池への関心はあるものの、高価格で性能も発展途上という認識で購入には至らない[3]、普段の節電にも寄与すれば蓄電池の購入意向が高まる[2]、といった声が聞かれた。このこと

から、蓄電池は防災対策の強化につながると示唆される。

停電などの災害時に自宅の安全が確保され、電気なども十分に使えるのであれば、避難所へ移動するよりも自宅で過ごす方（在宅避難）がよいと考えることもできる。停電時の在宅避難意向を聴取すると、倒壊/水害/断水等がなければ1～3日の在宅避難をする意向があり、蓄電池の保有有無は在宅避難意向に影響する[1,2]、PVと蓄電池を保有しており、在宅避難を前提に新築した[4]、などの声が聞かれた。また、停電時に自宅でエネルギーを利用できる手段としてのEVにも着目し、その関心について聴取すると、EVを災害対策用に検討したが、予算が見合わず断念した[2]、EVが蓄電池も兼ねられるのなら今後関心がある[3]、EVを蓄電池として活用できることの認識がない[5]、といった声が聞かれた。このことから、蓄電池さらにはEVが活用できれば、在宅避難の可能性が高まることが示唆される。

以上、インタビューでは、PVや蓄電池などの機器を保有することで停電時の不安や不便さが軽減されるとの声がある一方、実際の使用には一定のバリアがあることがわかった。そのため、実際にレジリエンスに寄与しているのかは、アンケート調査により統計的に明らかにする必要がある。

表3 インタビュー調査から得られた主な内容

【停電時の困りごと・不安】 ・室温を調整したい、食事をしたい、情報が欲しいといったニーズがある
【停電時に電気を使えることの便益】 ・PVの自立運転機能で冷蔵庫が使えた[2] ・停電への備えを一つの動機としてPVを導入し、安心感につながった[3,4] ・PVと蓄電池を導入し、停電時に自動的に電気を使えるように設定をしていたため、テレビと冷蔵庫が使えた[4]
【停電時に電気を使う上でのバリア】 ・夜だったのでPVが発電していなかった[1] ・PVは保有しているが、認識不足で自立運転機能を十分に活用できなかった[2] ・自立運転用コンセントが2階なので使いにくかった[3] ・蓄電池への関心はあるものの高価格、性能も発展途上という認識で、購入には至らない[3]。普段の節電にも寄与すれば、蓄電池の購入意向高まる[2] →蓄電池は防災対策の強化につながる
【停電時の在宅避難意向、EVの活用】 ・倒壊/水害/断水などがなければ、1～3日の在宅避難意向あり ・蓄電池の保有有無は在宅避難意向に影響[1,2] ・PVと蓄電池を保有しており、在宅避難を前提に新築[4] ・EVを災害対策用に検討も、予算が見合わず断念[2]。EVが蓄電池も兼ねられるのなら、今後関心あり[3]。EVを蓄電池として活用できることの認識なし[5] →蓄電池さらにはEVが活用できれば、在宅避難の可能性が高まる ※[]内は対象者番号

3. 住宅のレジリエンスに関するアンケート調査：傾向スコアによるバイアス補正

3.1. アンケート調査実施要領

表4に示す要領で2021年12月に、築4年以内の新築戸建て・持ち家・注文住宅の居住者に対するアンケート調査を実施した。アンケート調査対象者5,152名のうち、現在の住まいにおいて停電経験のある居住者は4,663名²⁾、PV保有者は2,340名、蓄電池保有者は847名³⁾、停電経験のある居住者のうち910名はZEH居住者であった。

2) スクリーニング調査で停電経験のある居住者に限定して可能な限り回収した後、条件を緩和し、経験のない居住者も含めた。

3) 令和2年度家庭部門のCO₂排出実態統計調査（環境省 2022）では、2016年以降に建築された戸建住宅で3割がPVを保有し、1割が蓄電池（家庭用蓄電システム）を保有していると報告されている。本調査では持ち家・注文住宅を対象を絞っていることから、その比率が若干高くなっていると推測される。

表4 アンケート調査の実施要領

時期・方法	2021年12月、Web回答方式、45問程度
対象者	築4年以内の新築戸建て・持ち家・注文住宅の居住者（5,152名）
調査項目	<ul style="list-style-type: none"> ・ PV・蓄電池・ZEH等の採用状況 ・ 停電時行動：機器利用実態、不便さ、不安感など

3.2. アンケートデータの単純比較

3.2.1. 在宅避難への不安の引越前後の変化

はじめに、アンケートデータの単純比較から、保有する設備や住宅種類とレジリエンスへの影響を概観する。まず、在宅避難への不安の引越前後の変化の集計結果を確認する。「災害時に長時間の停電が生じた際にご自宅で生活（在宅避難）することを想像した際の不安感は、いまのお住まいに引越す（住み替える）前と後で変化はありましたか？」との問いに対し、「いまの家のほうが非常に安心して在宅避難できる」「いまの家のほうがやや安心して在宅避難できる」の比率の合計は、PV、家庭用蓄電池、家庭用燃料電池、EV・PHEV（Plug-in Hybrid Electric Vehicle）、VtoH（Vehicle-to-Home）機器の保有者や、ZEH、オール電化住宅の該当者が、それぞれの非保有者／非該当者に比べて高い（図1）。このことから、これらの機器や性能を備えた住宅に住むことで、在宅避難への不安の軽減につながる傾向が見られる。

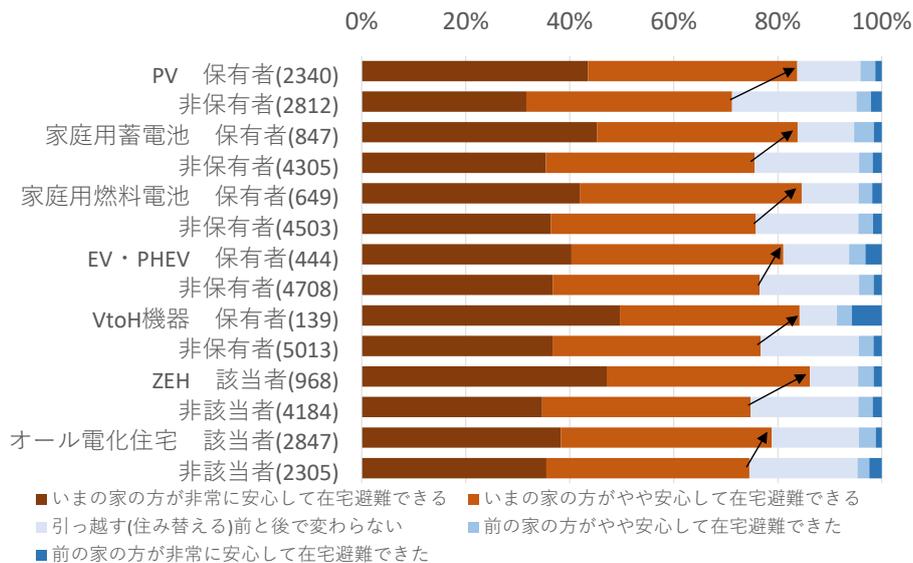
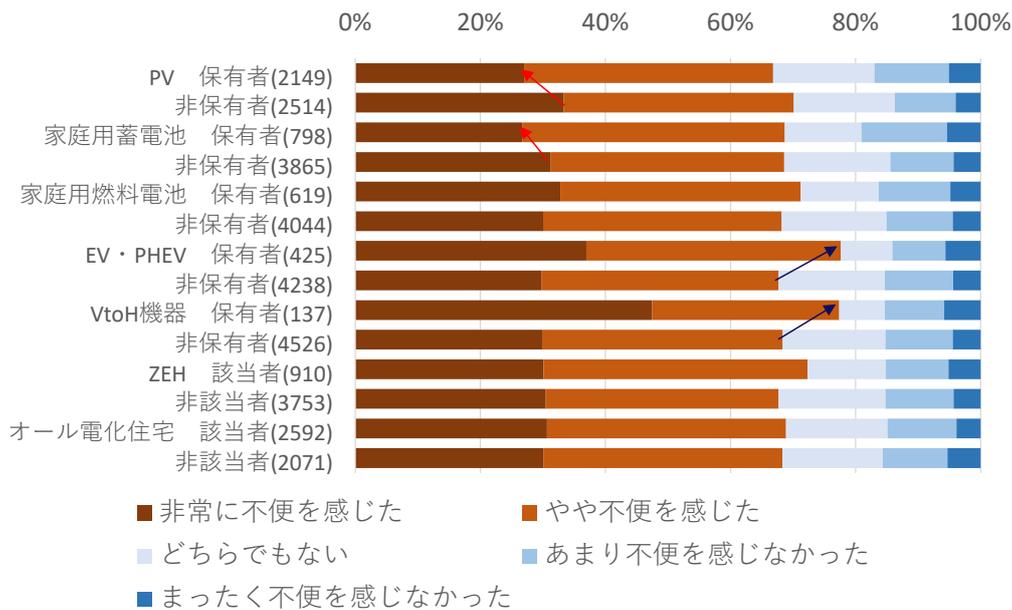


図1 アンケートデータの単純比較：在宅避難への不安の引越前後の変化

3.2.2. 停電時の不便さ

実際に経験した停電時の不便さについての集計結果は次の通りである。「いまのお住まいで停電を経験された際の不便さについて、もっとも当てはまるものを一つお選びください」との問いに対し、「非常に不便を感じた」の比率は、PV、家庭用蓄電池保有者の方が非保有者に比べて低いといった傾向が見られる（図2）。一方、ここでの集計結果からは、ZEH該当者やオール電化住宅該当者については明確な差は見られず、EVやVtoHについては逆の傾向も観察される。ただし、機器保有の影響は複合的であり、不便さの感じ方は経験した停電事象の長さなどにもよるため、正確な理解のためには詳細分析が必要である。



注：停電経験のある居住者のみが対象

図2 アンケートデータの単純比較：停電時の不便さ

3.2.3. 停電時の家電使用

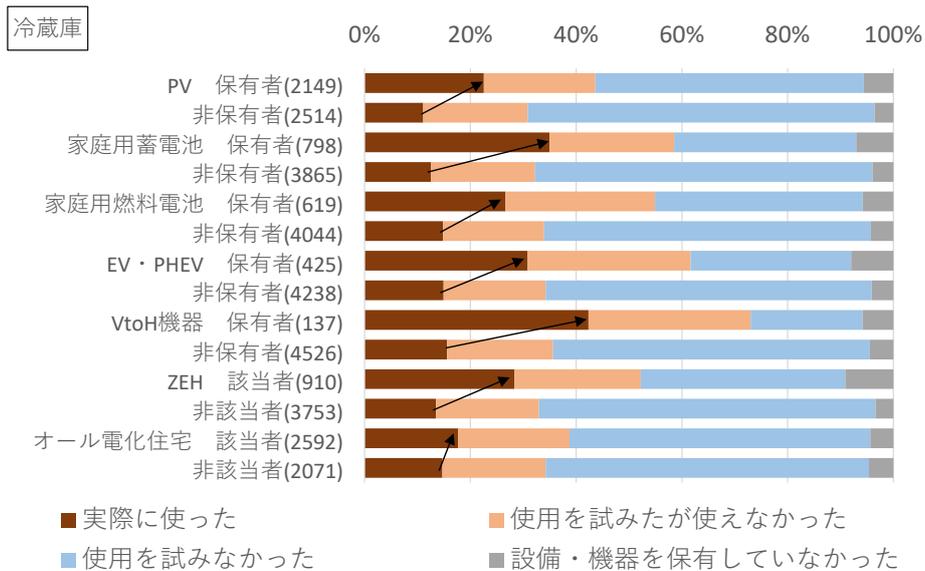
停電時の不便さを詳細に見るため、家電機器の例として、停電時に使用ニーズの高い冷蔵庫を取り上げ、その使用率を把握する。「停電発生から復電するまでの間、次の設備・機器等の使用を試みましたか？」との問いに対し、PV、家庭用蓄電池、家庭用燃料電池、EV・PHEV、VtoH機器、のそれぞれの保有者は非保有者と比べて、また、ZEH該当者は非該当者と比べて、「実際に使った⁴⁾」の比率が高い(図3)。このことから、取り上げた機器の保有者やZEH居住者は、家電機器を使用できるようになることで、不便さ軽減につながる可能性がうかがえた。ただし、冷蔵庫の使用については、回答者によって捉え方が異なる可能性もあり、結果の解釈には注意が必要である。

なお、「実際に使った」の比率はPV保有者でも23%、家庭用蓄電池保有者でも35%にとどまっている。この理由の一つは、「使用を試みなかった」を選択した比率が高いことが挙げられる。PVの場合は、夜間や天候が悪い場合などは発電しないため、使用を試みなかった可能性が考えられる。さらに、「使用を試みたが使えなかった」の比率もPV保有者で21%、家庭用蓄電池保有者で24%いる。調査では、何らかの家電について「使用を試みたが使えなかった」と回答した人に、その理由を尋ねているが、PVや蓄電池の発電・給電量が不足していた、PVや蓄電池に不具合が生じた、家電が壊れていた、などを挙げた人がいた。

また、「実際に使った」比率がPV非保有者でも11%、家庭用蓄電池非保有者でも13%に上ることは注意して解釈する必要がある。一つの可能性として、その他の代替的な手段で電力を確保した可能性が考えられる⁵⁾。一方、調査の意図とは反し、電気は通っていなくても冷蔵庫の中のものを取り出したという人も一部交じる可能性は否定できない。

4) 「冷蔵庫は、電気が通って冷やせる状態になることを、「使用」と考えてください。」という注意書きを付けたため、例えば、通電はしていないが中身を取り出した、という場合は「不使用」と調査上では想定した。

5) PV非保有者(2,514名)のうち、6%(160名)は家庭用蓄電池、9%(214名)は家庭用燃料電池(エネファーム)を保有していた。また、家庭用蓄電池非保有者(3,865名)のうち、39%(1,511名)はPV、9%(358名)は家庭用燃料電池(エネファーム)を保有していた。



注：停電経験のある居住者のみが対象

図3 アンケートデータの単純比較：停電時の家電機器使用（冷蔵庫を例として）

3.3. 傾向スコア調整法の手法

アンケートの単純比較からは、PVや蓄電池の保有者の方が、非保有者に比べて停電時の不安・不便さが軽減されている可能性がうかがえた。しかし、これらの技術の採用者は所得が高いなど、比較対象の属性にバイアスがある場合、技術の採用が不安や不便さに因果効果をもたらしているかどうか、単純比較から判断することはできない。傾向スコア調整法はそのバイアスを補正し、対象となる各群を仮想的に比較可能にするための手法である。

図4は傾向スコア調整法の概念図を示している。原因となる介入を受けた群を処置群、介入を受けなかった群を対照群と呼ぶ。また、処置群と対照群を分ける変数を処理変数(z_i)と呼ぶ。 z_i は処置群に割当てられた時に1、対照群に割当てられた時に0を取る。本稿において処理変数にはPV・蓄電池等の様々な機器や、ZEHの採用有無が当てはまる。結果を表す変数を結果変数(y_i)と呼び、本稿においては停電時の不便さ等が当てはまる。住宅・世帯属性など、処理変数と結果変数の両方に影響を及ぼす変数を共変量(x_i)と呼ぶ。

ルービンによる因果効果の推定の考え方にもとづくと、潜在的な結果変数 (potential outcomes) の定義が必要である (Rubin 1974)。潜在的な結果変数は、各群に仮に割当てられたとした場合の仮想的な結果変数である。ここで、仮に処置群に割当てられた時の結果変数を y_1 (サンプル*i*については y_{i1})、仮に対照群に割当てられた時の結果変数を y_0 (サンプル*i*については y_{i0})と表記する。また、実際に観測される結果変数 y_i は式(1)のように書ける。

$$y_i = z_i y_{i1} + (1 - z_i) y_{i0} \quad (1)$$

このとき、サンプル*i*における因果効果は $y_{i1} - y_{i0}$ と定義できるものの、実際にはどちらかの群にのみ割当てられるため、 y_{i1} と y_{i0} のいずれかは観測できない。ランダム化比較試験のように、もし割当が無作為に行われるのであれば、 z_i と結果変数(y_1, y_0)は独立となるため、因果効果の期待値は以下のように求めることができる。

$$E(y_1) - E(y_0) = E(y_1|z = 1) - E(y_0|z = 0) \quad (2)$$

割当が無作為に行われない観察型研究では、 z_i と結果変数(y_1, y_0)は独立とならない。例えば、PV・蓄電池・ZEH等を採用する世帯は所得水準が高く、他の停電時の対策もとることができているために停電時の不便

さが軽減される、などの傾向がある可能性がある。この場合、技術を採用している群としていない群の間で共変量の分布にバイアスがあることで、技術の採用有無による結果変数への因果効果を正しく推定できなくなる。傾向スコア調整法はそのバイアスを補正する。

具体的には、まずサンプル*i*が処置群に割当てられる確率($p(z_i=1|x_i)$)を表す傾向スコア(e_i)を推定する。傾向スコア e_i は式(3)のようなロジスティック回帰モデルで表されることが多い。次に、推定された傾向スコアの近いサンプル同士で比較したり（マッチング）、傾向スコアで結果変数を重み付けしたりすることで、仮想的に処置群と対照群の処理変数以外の条件を同じとみなすことができ、処理変数による結果変数への因果効果を推定できるようになる。本稿ではこのうち、各群に割当てられる確率の逆数により重み付け平均する手法（Inverse Probability Weighting, IPW）を用いる⁶⁾。

IPWでは、式(4)のように処置群、対照群の重み付け平均を求める。因果効果の推定にあたっては、重み付けした結果変数を被説明変数とし、処理変数を説明変数として回帰分析し、処理変数が有意な結果を及ぼしているかを確認する。

$$e_i = p(z_i = 1|x_i) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha^T x_i)} \quad (3)$$

$$\hat{E}(y_1) = \frac{\sum_i \frac{z_i y_i}{e_i}}{\sum_i \frac{z_i}{e_i}}, \hat{E}(y_0) = \frac{\sum_i \frac{1-z_i y_i}{1-e_i}}{\sum_i \frac{1-z_i}{1-e_i}} \quad (4)$$

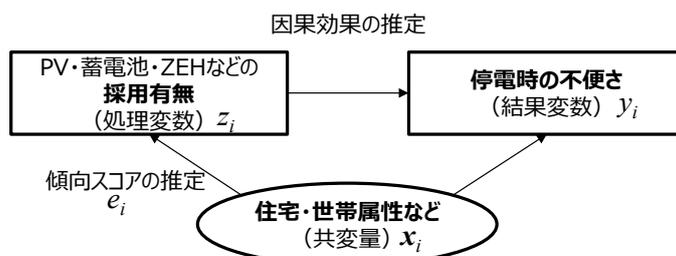


図4 傾向スコア調整法による因果効果の推定の考え方

3.4. 傾向スコアの推定

3.4.1. 変数の選択

3.2節のアンケートの単純比較でとりあげた変数のうち、ここでは停電時の不便さについて明確な差が見られなかったZEHの該当・非該当を処理変数として取り上げる。ZEHはほとんどの場合でPVを保有しており、蓄電池を導入すれば停電時にも自給自足が可能な住宅として期待が高いことから、詳細に分析しておく価値はある。

結果変数としては、アンケートの単純比較でも扱った、在宅避難への不安の引越前後の変化、停電時の不便さ、家電機器（冷蔵庫）の使用率の3項目を取り上げる。「災害時に長時間の停電が生じた際にご自宅で生活（在宅避難）することを想像した際の不安感、いまのお住まいに引っ越す（住み替える）前と後で変化はありましたか？」との問いに対する5件法の選択肢から、1：「前の家のほうが非常に安心して在宅避難できる」～5：「今の家のほうが非常に安心して在宅避難できる」とし、指数化したものを「在宅避難への不安の引越前後の変化」とする。また、「いまのお住まいで停電を経験された際の不便さについて、もっとも当てはまるものを一つお選びください。」との問いに対する5件法の選択肢から、1：「まったく不便を感じなかった」～5：「非常に不便を感じた」とし、指数化したものを「停電時の不便さ」とする。さら

6) IPW 推定は他の調整法（マッチングや層別解析）と比べて恣意性が低い等の利点が指摘されており、近年の適用事例が増えている（星野 2009）。

に、「停電発生から復電するまでの間、次の設備・機器等の使用を試みましたか?」との問いに対し、冷蔵庫を「実際に使った」と回答した人の比率を「使用率」とする。

共変量としては、処理変数と結果変数の双方に影響するものを取り上げるべきであるとされている。また、必ずしも処理変数に影響しなくても、結果変数と関係の深い変数は共変量に加えることが推奨されている(星野 2009)。そこで、日頃の防災・停電対策への関心を5件法(1:まったく関心がない~5:非常に関心がある)で尋ねた結果を指数化したもの、日頃の防災・停電対策として実施している具体的な対策を示すダミー変数(「防災グッズを常備」「飲料水や生活用水を備蓄」、家や設備の点検・メンテナンスをしているかどうかを5件法(1:まったくしていない~5:非常にしている)で尋ねた結果を指数化したもの)をとりあげる。防災・停電対策に関心が高い世帯や実際に対策をとっている世帯では、ZEHの採用率も高い可能性があるのと同時に、ZEH以外の様々な対策が停電時の不安や不便さに影響している可能性が考えられるためである。さらに、経験した停電の期間が長いほど感じた不便さが大きかった可能性があるため、経験した停電の期間を表すダミー変数(基準:最大で2日以上)をとりあげる。その他、属性として、同居人数、世帯年収のダミー変数(基準:200万円未満)、世帯主年齢、世帯主の最終学歴を表すダミー変数(基準:中学校卒)、回答者本人の年齢、性別(男性)を表すダミー変数などを設定する。サンプルは過去に停電を経験した世帯のみを対象(4,663サンプル)とする。

3.4.2. 傾向スコア推定のためのロジスティック回帰モデル

表5は傾向スコアを求めるロジスティック回帰モデルの推定結果を示している。「防災・停電対策への関心」を表す変数(係数は0.21)や、日頃の防災・停電対策として「飲料水や生活用水を備蓄」するダミー変数(同0.18)、「家や設備の点検・メンテナンス」の変数(同0.43)が有意で、係数が正值である。防災・停電対策に関心があり、実際に日頃の対策や点検等を実施している人において、ZEHを採用することが多い傾向にあることがうかがえる。

加えて、世帯主の最終学歴として「高等専門学校卒」(係数は0.84)や「大学卒(文系)」(同1.00)、「大学卒(理系)」(同1.01)を表すダミー変数が有意に正となっており、基準である中学校卒の人と比べてZEHの採用率が高くなる傾向がうかがえる。さらに、世帯主年齢(同-0.03)、回答者年齢(同-0.03)の変数は有意に負である。年齢が若いほど、将来にわたり住宅を使い続ける期間が長いなどのことから、ZEHを選択することも多いと推測される。なお、停電期間を表すダミー変数は結果変数に影響するものとして入れている。

また、傾向スコアを推定した際の当てはまりの良さを表すC値⁷⁾は0.78、McFaddenの疑似決定係数は0.18となる等、概ね良好な傾向を示している。傾向スコアを計算するモデルのフィットがよいことは、共変量調整によって因果効果の推定が可能になるための条件(「強く無視できる割当」)が成立しているかどうかを判別する一つの方法とされている(星野2009)。

7) 近年の傾向スコアを用いた研究からは、C値が0.8以上であることが一つの基準となっている(星野2009)。

表5 傾向スコアを求めるロジスティック回帰モデルの推定結果

変数	係数	標準誤差
防災・停電対策への関心 (1:まったく関心がない~5:非常に関心がある)	0.21 ***	(0.06)
日頃の防災・停電対策ダミー		
防災グッズを常備	0.07	(0.09)
飲料水や生活用水を備蓄	0.18 **	(0.09)
家や設備の点検・メンテナンス (1:まったくしていない~5:非常にしている)	0.43 ***	(0.05)
停電期間ダミー(基準:最大で2日以上)		
最大で丸1日	-0.34 **	(0.14)
最大で半日~1日未満	-0.41 ***	(0.14)
最大で1時間~半日未満	-0.75 ***	(0.13)
1時間未満	-1.02 ***	(0.12)
世帯主の最終学歴ダミー(基準:中学校卒)		
高校卒	0.28	(0.43)
専門学校・各種学校卒	0.44	(0.43)
短大卒	0.72	(0.45)
高等専門学校卒	0.84 *	(0.45)
大学卒(文系)	1.00 **	(0.42)
大学卒(理系)	1.01 **	(0.42)
大学院卒(文系)	0.80	(0.49)
大学院卒(理系)	0.67	(0.44)
その他	-9.51	(234.09)
同居人数(人)	0.01	(0.03)
世帯年収ダミー(基準:200万円未満)		
200~400万円未満	-0.80 **	(0.36)
400~600万円未満	-0.59 *	(0.33)
600~800万円未満	-0.26	(0.32)
800~1000万円未満	-0.17	(0.33)
1000~1200万円未満	0.49	(0.34)
1200~1500万円未満	-0.02	(0.36)
1500~2000万円未満	0.26	(0.40)
2000万円以上	0.29	(0.38)
答えたくない	-0.66 *	(0.34)
世帯主年齢(歳)	-0.03 ***	(0.01)
回答者年齢(歳)	-0.03 ***	(0.01)
回答者性別・男性ダミー	0.45 ***	(0.09)
定数項	-2.03 ***	(0.58)
サンプル数		4663
対数尤度		-1897.2

注: ***は1%、**は5%、*は10%水準で統計的有意

3.4.3. 傾向スコアによる各群の共変量の調整結果

「強く無視できる割当」条件が成立しているかどうかを判別する方法の一つとして、推定した傾向スコアによって調整した共変量の分布を比較することで、対照群と処置群が比較可能になっていることを確認することが推奨されている（星野 2009）。

共変量の調整結果を示した表6では、各共変量について、調整前後における対照群・処置群の平均値と差の有意性を示してある。調整前には処置群の防災・停電対策への関心の指数は平均4.2と、対照群の3.8より有意に大きい。一方、調整後には対照群・処置群の指数はともに平均3.9であり、有意な差は見られない。その他の変数についても、調整後には各共変量に群間で有意な差は認められない。この結果、傾向スコアによる調整後に各共変量のバイアスは取り除かれており、対照群と処置群が比較可能となっていることが確認できる。

3.5. アンケートデータの詳細分析結果

3.5.1. 在宅避難への不安の引越前後の変化

推定された傾向スコアによりバイアスを調整した上で、処置群（ZEH該当者）と対照群（ZEH非該当者）の間で結果変数を比較する。在宅避難への不安の引越前後の変化を結果変数とした図5における調整後の数値を見ると、対照群の4.1に対し、処置群の方が4.2と有意に大きい。すなわち、長期停電時の在宅避難に対する安心感の引越後の高まりは、ZEH該当者の方が大きいことがうかがえる。調整前にも同様の傾向は見られていたが、他の要因の影響を除いた後でも、ZEHの効果が見られることが統計的に明らかになった。

3.5.2. 停電時の不便さ

同様に、処置群（ZEH該当者）と対照群（ZEH非該当者）の間で停電時の不便さを比較する（図6）。調整後の数値を見ると、対照群の3.8に対し、処置群の方が3.6と有意に小さい。すなわち、ZEHに住むことで実際に停電時の不便さが軽減されている。調整前には対照群と処置群の間に有意な差は見られなかったのが、他の要因の影響を除いた結果、有意に軽減されていることが統計的に明らかになった。

3.5.3. 停電時の家電使用

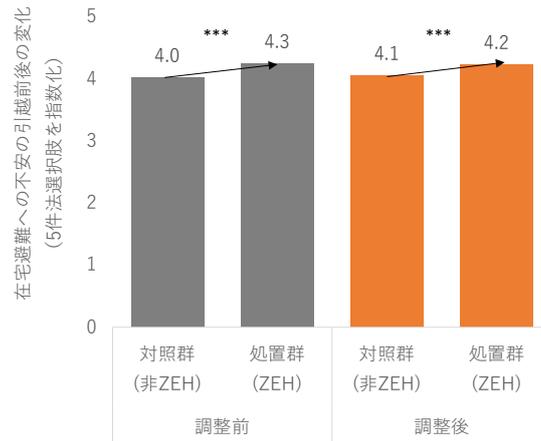
停電時の不便さの詳細を把握するために、処置群（ZEH該当者）と対照群（ZEH非該当者）の間で停電時の家電機器使用状況を比較する。冷蔵庫の使用率を示した図7を見ると、対照群の14%に対し、処置群の方が24%と有意に高い。調整前にも同様の傾向は見られていたが、他の要因の影響を除いた後でもZEHの効果が見られることが統計的に明らかになった。

図8は調査したすべての家電機器について、停電時の使用率を対照群と処置群で比較している。いずれの機器についても対照群に比べて処置群の使用率の方が有意に高いことがわかる。例えば、照明の使用率は対照群の13%に対し、処置群の方が24%と有意に高い。

表6 傾向スコアで調整した各群の共変量の平均

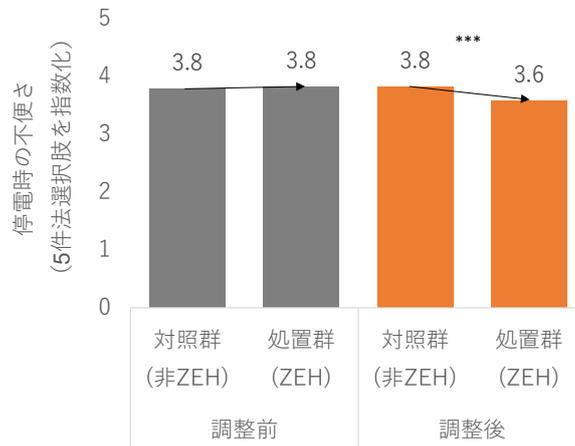
共変量	調整前		調整後	
	対照群	処置群	対照群	処置群
防災・停電対策への関心 (1:まったく関心がない~5:非常に関心がある)	3.8	4.2 ***	3.9	3.9
日頃の防災・停電対策ダミー				
防災グッズを常備	44%	61% ***	48%	49%
飲料水や生活用水を備蓄	51%	66% ***	54%	56%
家や設備の点検・メンテナンス (1:まったくしていない~5:非常にしている)	3.3	3.9 ***	3.4	3.4
停電期間ダミー(基準:最大で2日以上)				
最大で丸1日	9%	15% ***	10%	10%
最大で半日~1日未満	12%	14% **	12%	12%
最大で1時間~半日未満	22%	16% ***	21%	21%
1時間未満	46%	25% ***	42%	44%
世帯主の最終学歴ダミー(基準:中学校卒)				
高校卒	25%	12% ***	22%	22%
専門学校・各種学校卒	14%	8% ***	13%	14%
短大卒	7%	5% **	7%	6%
高等専門学校卒	4%	4%	4%	4%
大学卒(文系)	28%	40% ***	30%	30%
大学卒(理系)	14%	21% ***	15%	15%
大学院卒(文系)	2%	2%	2%	2%
大学院卒(理系)	5%	7% ***	5%	5%
その他	0%	0%	0%	0%
同居人数(人)	3.5	3.6 **	3.5	3.5
世帯年収ダミー(基準:200万円未満)				
200~400万円未満	10%	5% ***	9%	9%
400~600万円未満	24%	17% ***	23%	23%
600~800万円未満	22%	23%	23%	25%
800~1000万円未満	13%	17% ***	14%	14%
1000~1200万円未満	5%	14% ***	7%	7%
1200~1500万円未満	3%	6% ***	4%	4%
1500~2000万円未満	2%	4% ***	2%	2%
2000万円以上	2%	6% ***	2%	2%
答えたくない	16%	7% ***	15%	13%
世帯主年齢(歳)	42.0	37.6 ***	41.2	41.2
回答者年齢(歳)	39.9	36.4 ***	39.3	39.4
回答者性別・男性ダミー	43%	56% ***	46%	46%

注:ダミー変数は、該当者の比率(%)を記載する。***1%、**5%、*10%有意。



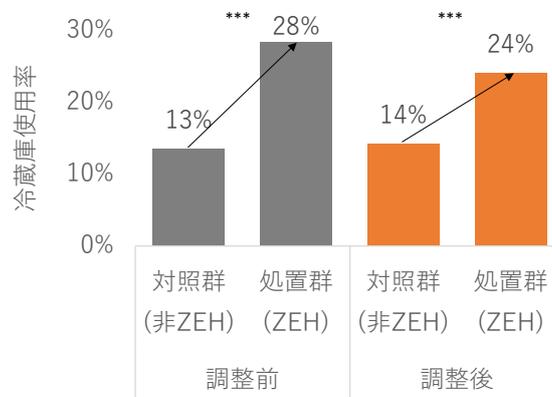
注：在宅避難への不安が引越前後で変化しかを尋ねた5件法の選択肢から、1：「前の家のほうが非常に安心して在宅避難できる」～5：「今の家のほうが非常に安心して在宅避難できる」とし、指数化。

図5 在宅避難への不安の引越前後の変化：傾向スコアによる調整後



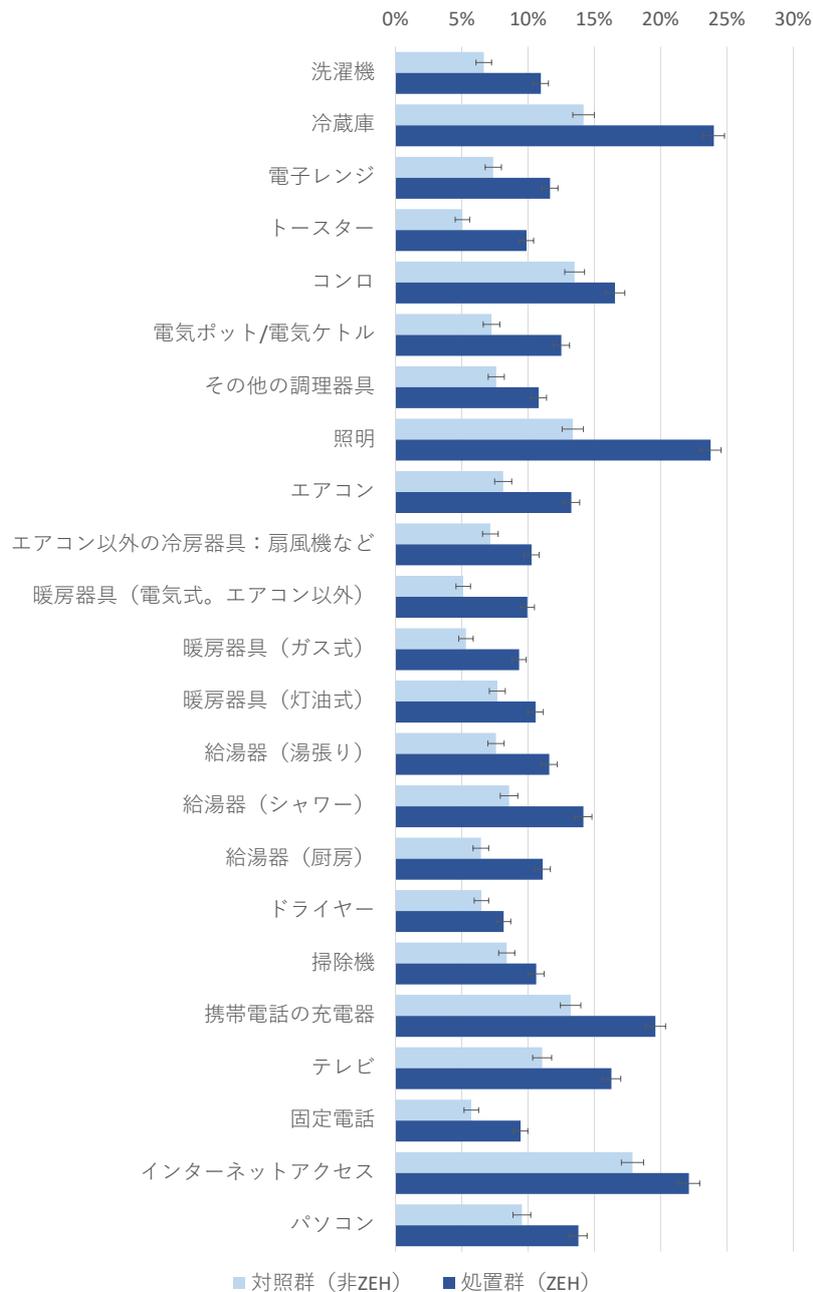
注：今の自宅で停電を経験した際の不便さを尋ねた5件法の選択肢から、1：「まったく不便を感じなかった」～5：「非常に不便を感じた」とし、指数化。

図6 停電時の不便さ：傾向スコアによる調整後



注：今の自宅で停電を経験した際に冷蔵庫を使用できた人の比率。

図7 停電時の家電機器使用（冷蔵庫を例として）：傾向スコアによる調整後



注：差はすべて5%以下の有意水準

図8 停電時における家電機器の使用率：傾向スコアによる調整後

4. 考察

本稿では、ZEHやその要素であるPV・蓄電池等の機器が停電時のレジリエンスを高めるかどうかを明らかにするために、過去の停電を経験した世帯に対するインタビュー調査やアンケート調査を行い、その因果効果を傾向スコア調整法を用いて評価した。災害は因果効果を推定するために実験的アプローチができない対象であり、観察型研究が適している。また、ZEHの居住者の所得が高い傾向にあるなど、比較対象

の群間にバイアスがある点で傾向スコアを用いることが適している。

以下ではインタビュー調査やアンケートデータの分析から明らかになった点を整理し、考察を加える。

4.1. 停電時の困りごと

インタビューからは、停電時の困りごと・不安として、室温を調整したい、食事をしたい、情報が欲しいといったニーズがあった。これらは先行研究の結果とも概ね整合しており、災害時のニーズとして一般的なものといえることができる。

4.2. ZEHやその要素であるPV・蓄電池等のレジリエンス便益

インタビューからは、停電時に電気を使えることの便益として、「PVの自立運転機能で冷蔵庫が使えた」「停電への備えを一つの動機としてPVを導入し、安心感につながった」「PVと蓄電池を導入し、停電時に自動的に電気を使えるように設定をしていたため、テレビと冷蔵庫が使えた」等の声があった。

アンケートからは、在宅避難への不安を引越前後で比較した場合、いまの家のほうが安心して在宅避難できるという評価がPV、家庭用蓄電池、家庭用燃料電池、EV・PHEV、VtoH機器の所有者や、ZEH、オール電化住宅の該当者で高かった。このうち、ZEH該当者においては傾向スコアによる調整後も有意に評価が高いことが確認されており、在宅避難への安心につながっていることが統計的にも明らかになった。

また、停電時に不便を感じている人の比率は、PV、家庭用蓄電池保有者の方が非保有者に比べて抑えられる傾向が見られた。さらに、傾向スコアによる調整を行うと、ZEH該当者が感じる不便さが非該当者に比べて有意に改善されることが統計的に明らかとなった。これは、アンケートを単純に比較しただけでは明確な傾向が見られなかった点である。

停電時の不便さを詳細に見るため停電時の冷蔵庫の使用率を集計すると、PV、家庭用蓄電池、家庭用燃料電池、EV・PHEV、VtoH機器の所有者の使用率は高かった。また、傾向スコアによる調整後もZEH該当者の使用率は非該当者より高かった。このことから、エネルギー供給のための機器保有や住宅性能により不便さ軽減につながる可能性がうかがえた。

一方で、停電時にはPV保有者や家庭用蓄電池保有者でも冷蔵庫を十分に使えなかった場合もあることには留意が必要である。その背景には、機器を保有していても実際に効果が発揮されるためにバリアがあることもうかがえる。例えば本稿のインタビューでは、「夜だったのでPVが発電していなかった」「PVは保有しているが、認識不足で自立運転機能を十分に活用できなかった時があった」「自立運転用コンセントが2階なので使いにくかった」などの声があった。中野・小谷（2022）はPVなどのエネルギー設備を停電時に利用するには、保有しているエネルギー設備を実際に利用する段階（保有→利用）、エネルギー設備を利用した場合に、それが十分に家電使用につながるという段階（利用→効果）の2段階でバリアがあることを指摘している。朝野他（2012）も東日本大震災でPVの電気を使えなかった人が多かった理由として、天候が悪かったこと以外に自立運転を知らなかった人が多かったことなどを明らかにしている。例えば蓄電池についても、製品によっては自立運転モードに手動で切り替える必要があり、その方法を知らなければ停電時に電気が利用できないこともある。近年では自立運転モードへの自動切り替えが行えるものもあり（例えば本稿のインタビュー対象者[4]）、こうした機能向上がバリアを解消していくことが期待される。

4.3. 今後の住宅のレジリエンス強化

アンケート調査からはZEHの採用、あるいはその要素であるPVや蓄電池の導入により停電時のレジリエンスを高めることが示された。自然災害による大規模な停電などが発生してきている中、他の防災対策と合わせ、これら設備や住宅の普及もレジリエンス強化の一助となる。ZEHは正味のエネルギー使用量がゼロであることなどから脱炭素化にも寄与し、蓄電池も組み合わせればPVの電気を日頃から有効に活用できる。レジリエンスの高い住宅が、脱炭素や日頃のランニングコスト節約にも貢献する形で普及することは望ましい。

一方、インタビューでは、「蓄電池への関心はあるものの、高価格で性能も発展途上という認識で購入には至らない」「普段の節電にも寄与すれば蓄電池の購入意向が高まる」などの声が聞かれた。現在のように設備の初期費用が高い状況では、災害時のための備えという目的だけでは十分な購入動機にならないこと

がうかがえる。そのため、本稿で検討したレジリエンス便益だけでなく、ランニングコスト節約を含めた多面的な便益を伝えることが普及に必要である。多面的便益の水準の向上⁸⁾やその評価に加え、便益を効果的に訴求するための情報提供手法について、今後検討する必要がある。

本稿の分析対象に限らず、技術の採用などとその効果の関係を知らうとする場合には、バイアスのあるデータを扱うことも多い。そのため、関連する知見を蓄積していくことは正しい効果の把握に寄与していくと期待され、今後も継続的に研究に取り組む必要がある。

謝辞

本稿は、環境省「令和3年度CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の採択課題「エネルギー自給自足ユニットの技術開発・実証」（技術開発代表者：積水化学工業株式会社、共同技術開発者：ニチコン株式会社、一般財団法人電力中央研究所、東京大学生産技術研究所）の成果の一部である。関係諸氏に対して謝意を表す。

参考文献

- Allcott, H., and Sweeney, R. (2016). "The Role of Sales Agents in Information Disclosure: Evidence from a Field Experiment," *Management Science*, 63(1), pp.21-39.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.2015.2327>
- Mukai, T., et al. (2021). "What effect does feedback have on energy conservation? Comparing previous household usage, neighborhood usage, and social norms in Japan," *Energy Research & Social Science*, 86, 102430.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102430>
- Rubin, D. B. (1974). "Estimating causal effects of treatments in randomized and nonrandomized studies," *Journal of Educational Psychology*, 66(5), pp.688-701.
<https://doi.org/10.1037/h0037350>
- 朝野賢司他 (2012) 「東日本大震災・被災地におけるエネルギー利用実態調査—震災後1ヶ月間の在宅被災者の対応行動—」, 電力中央研究所報告 Y11027.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y11027>
- 稲垣景子・佐土原聡 (2014) 「東日本大震災における停電時の生活行動に関する調査研究」, *電気学会論文誌 C*, 134(3), pp.398-403.
<https://doi.org/10.1541/icejeiss.134.398>
- 稲葉愛永他 (2021a) 「停電時の在宅避難を考慮したゼロ・エネルギー住宅における設備構成と居住者行動に関する研究」, *日本建築学会環境系論文集*, 86(779), pp.111-120.
<https://doi.org/10.3130/aije.86.111>
- 稲葉愛永他 (2021b) 「在宅避難を考慮したゼロ・エネルギーハウスにおける夏季の停電模擬実験」, *BECC JAPAN 2021 環境省(2022) 令和2年度家庭部門のCO₂排出実態統計調査(確報値)*
https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00650408&kikan=00650&result_page=1
- 金ジョンミン他 (2021) 「48時間停電自立実験におけるエネルギー・温熱環境に関する研究」, *BECC JAPAN 2021*
https://seeb.jp/paper/2021/doc/BECCJAPAN2021_P-9.pdf
- 佐藤真吾・村尾修 (2018) 「東日本大震災の経験に基づく生活支障の定量評価」, *地域安全学会論文集*, 33, pp.43-51.
資源エネルギー庁 Web サイト「ZEH(ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス)」.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/housing/index03.html (アクセス日 2022.12.22)
- 中野一慶・小谷仁務 (2022) 「自然災害に起因する停電時の家庭のエネルギー利用実態とレジリエンス—2018年北海道胆振東部地震と2019年台風15号を対象としたアンケートから—」, *第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集*, pp.313-318.
- 西尾健一郎・向井登志広 (2016) 「時間帯別料金による家電利用行動の変化—傾向スコアでバイアス補正をしたアンケートデータ分析—」, *日本建築学会環境系論文集*, 81(729), pp.1025-1034.
<https://doi.org/10.3130/aije.81.1025>
- 星野崇宏 (2009) 「調査観察データの統計科学—因果推論・選択バイアス・データ融合」, 岩波書店.

8) 蓄電池の運用方法改善によりランニングコスト節約効果が高まる可能性を示したものとして、山田他 (2022) の研究がある。このように、便益の水準を向上させるための関連研究も重要となる。

- 松川杏寧他 (2019) 「インクルーシブな防災訓練の傾向スコア分析によるインパクト評価」, 地域安全学会論文集, 35, pp.279-286.
<https://doi.org/10.11314/jisss.35.279>
- 向井登志広他 (2021) 「自然災害による停電経験者に対するインタビュー調査」, 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 講演論文集, pp.53-58.
- 安岡絢子他 (2022) 「住宅のエネルギーに関するレジリエンス性向上のための調査—自然災害による長期停電時の困りごとの把握—」, 電力中央研究所報告 GD21016.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=GD21016>
- 山田愛花他 (2022) 「自給自足住宅の多面的評価—PV・蓄電池の大容量化や運用高度化ポテンシャルの分析—」, 令和4年電気学会 電力・エネルギー部門大会, 2022.9.9.

中野 一慶 (Kazuyoshi Nakano)
電力中央研究所 社会経済研究所

建物脱炭素化に向けた取組の検討 —欧米の最新動向に見られる対策の広がり—

Study on Initiatives for Building Decarbonization:
Expansion of Measures Observed from the Latest Trend in Europe and the US

キーワード：民生部門、建物脱炭素、規制的手法、経済的手法、情報的手法、地域脱炭素

中野 一慶、西尾 健一郎

要旨

近年、野心的な脱炭素化目標の実現のために、民生部門の取組を促進する動きが各国で見られている。特に、再エネの調達や省エネだけでなく、エネルギー転換を伴う熱分野の取組が積極的に進められている点に特徴がある。また、中央政府だけでなく、州や自治体が主体となり、規制的手法、経済的手法、情報的手法等を含めた多様なアプローチが展開され始めている。本稿では我が国の政府や自治体での取組の検討に資するため、民生部門における欧米の脱炭素化取組の先進事例を手法別に整理し、報告する。本稿の事例から、(1)既存の省エネ制度をCO₂削減も重視する制度へとアップグレードするなど熱分野の脱炭素化に取り組むものが多いこと、(2)経済性を考慮して受容性を高めた形で進めていること、(3)地域脱炭素化のためにリソース支援をしていくことの重要性などが示唆された。

1. はじめに

1.1. 背景・目的

我が国は2020年10月に当時の菅内閣によって2050年までにカーボンニュートラルに至ることが宣言され、2021年4月には、2030年度に温室効果ガスを2013年度比で46%削減する目標が示された。我が国のCO₂排出量（2020年度）における民生部門（家庭・業務の合計）のエネルギー使用による排出量は33%を占めており（環境省 2022）、野心的な脱炭素化目標の実現に向けて民生部門の対策が不可欠である。民生部門については、これまで省エネ意識の向上や家電・機器の高効率化、断熱性能の向上等が重視されてきたが、例えば家庭のCO₂排出量の5割を熱分野（給湯・暖房・台所コンロ）が占めることから、熱分野の対策に早期に取り組む必要がある。2021年10月に閣議決定された第6次エネルギー基本計画においても、「非電力部門は、脱炭素化された電力による電化を進める」とされており、熱分野に取り組むことの重要性が認識され始めている。また、2021年6月に策定された「地域脱炭素ロードマップ」では、脱炭素を進める先行地域を支援することを表明しており、その選定要件の1つに「運輸部門や熱利用等も含めてそのほかの温室効果ガス排出削減」が挙げられている。しかし、その具体的な対策案が十分に検討されているとは言い難い。

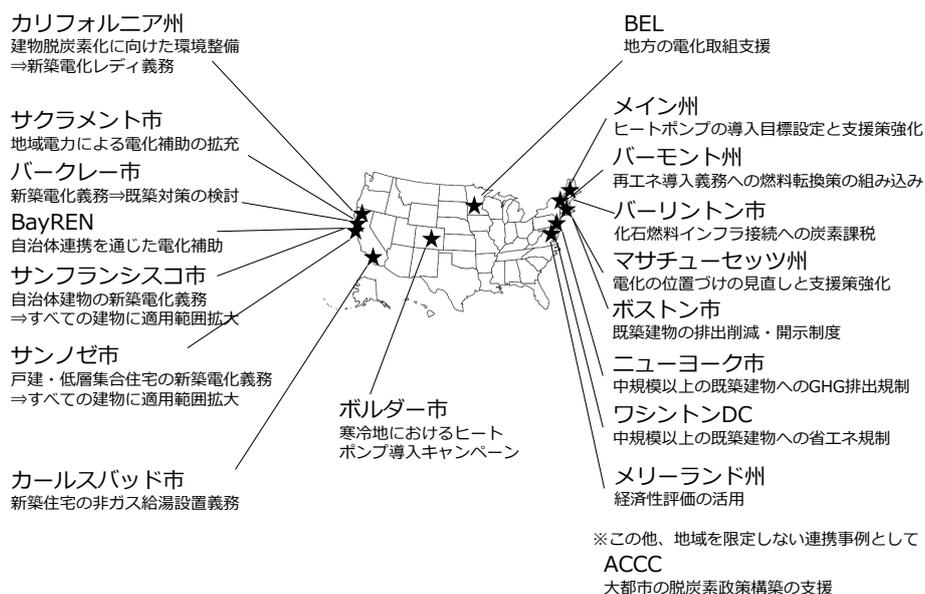
一方、野心的な脱炭素化目標を掲げる諸外国では、民生部門の脱炭素化を促進する積極的な動きが見られている。そこでは「建物脱炭素化（building decarbonization）」という問題設定がなされており、再エネの調達や省エネだけでなく、熱分野のエネルギー転換の取組が進められている点に特徴がある。また、中央政府だけでなく、州や自治体が主体となり多様なアプローチが展開されている点も特筆すべきである。特に米国では州の権限が強いことや、自治体で新築建物を管理する意識が元々高いことなどから、規制等も含めた革新的な取組が展開されている。

野心的な目標を掲げているという面では我が国の政府や自治体も同じであり、諸外国の多様な取組から得られる知見は参考になる¹⁾。著者らは2020年2月時点の先行調査（西尾・中野 2020）において、米国の州・

1) 例えばカリフォルニア州では、2050年までに州のGHG排出を1990年比で80%削減するという目標を掲げ、2045年までのできるだけ早期にカーボンニュートラルを目指すとする州知事命令を出している。民生部門のGHG排出量が占める比率は我が国と同様の水準である（電力に起因するものを除いて1割ほど（California Air Resource Board））。

自治体の脱炭素化政策の先進的な15事例をとりあげ、その背景や取組内容、ステークホルダーの反応、課題などを報告してきた。その後、米国や欧州では脱炭素化の動きが継続しており、地域的な広がりや取組対象の拡大、新たな政策手法などが見られるようになってきている。本稿はこうした諸外国での動きを手法別に整理し、報告する。その結果から我が国の脱炭素化に向けた示唆を得る。特に、我が国での課題となっている熱分野の取組や地域脱炭素の推進といった観点を意識して、これらの新たな動向を整理することは有用である。

図1と図2は調査対象の事例と地域を示している。その多くが脱炭素化に向けて野心的な目標を掲げている国や州、自治体である。その背景には、電力の脱炭素化も進んでいることや、環境対策に積極的な風土などが挙げられる。また、熱需要の多寡やヒートポンプの効率などの条件を幅広く捕捉するため、寒冷地の事例も含むようにした²⁾。



注：西尾・中野（2020）をもとに2022年12月時点の情報にアップデート

図1 米国の建物脱炭素化政策の先進事例



図2 欧州の建物脱炭素化政策の先進事例

2) なお、本稿では代表的な事例を取り上げており、図1や図2で示されていない国・地域でも取組がある。

1.2. 本稿の構成

本稿は以下のように構成される。2章では建物脱炭素化の主要な取組を紹介する。2.1～2.3節では西尾・中野（2020）や向井（2022）にならい、環境政策の分野で用いられることの多い分類である規制的手法、経済的手法、情報的手法という区分で整理する（表1）。規制的手法は法律や制度などを変更し、要件に従う建物や設備等のみを許可する手法であり、建築基準等が対象となる。経済的手法は補助金や課税により消費者や企業の行動を変化させる。情報的手法は情報を提供することにより消費者や企業の行動を変化させる手法である。2.4～2.5節では、この3手法には分類しきれない、取組の環境を整備するような事例や、地域脱炭素化に向けた戦略策定や連携の事例を取り上げる。最後に3章では、欧米諸国の事例から得られる我が国への示唆について述べる。

表1 手法の種類に着目した先進事例の類型と主な事例

	先進事例にみられた主な促進手法	主な事例
規制的手法	新築電化義務：空調・給湯・調理用などの燃焼機器の設置を禁止する（応用例：建物・用途を限定して義務化、公共施設から義務化）	バークレー市、サンフランシスコ市、サンノゼ市
	新築電化推奨：電化・非電化建物間で省エネ性能や実施事項の要求水準に差をつけることで、電化へと誘導する	サンフランシスコ市
	新築電化レディ義務：燃焼機器を設置する場合、将来的に容易に電化できる環境を整えるため、新築時に十分な電気容量の確保や事前配線を求める	カリフォルニア州、サンノゼ市
	新築建物の排出規制：新築建物のエネルギー性能を規制する際に、GHG 排出量に関する要件を加える	フランス
	既築建物の省エネ・排出規制：事業所などに対して従来よりも厳しい省エネ基準・排出上限を設定することで、燃料転換などの大規模改修を実質的に求める	ニューヨーク市、ワシントンDC、ボストン市
	燃焼機器の設置規制：ガス給湯器や石油ボイラー等、燃焼機器の設置を規制する	カールスバッド市、ドイツ
	再エネ政策との連携：エネルギー事業者向けの再エネ・代替エネ導入義務制度に、需要サイドの対策による排出削減効果を活用する	バーモント州
経済的手法	導入補助：低排出空調・給湯機器の導入を補助する（応用例：燃料転換を伴う場合の補助額優遇、低所得者向けの補助額優遇、中流向けの補助）	サクラメント市、カリフォルニア州他
	化石燃料インフラ接続への炭素課税：化石燃料の使用に対して課税をすることで、低排出なエネルギーへの転換を促す	バーリントン市
	熱・輸送分野の国内排出量取引：燃料流通業者が排出権を取引する	ドイツ
情報的手法	需要家教育：快適性・制御性などの便益にも訴求しながら、ヒートポンプ普及啓発キャンペーンを展開する（応用例：潜在的採用者へのターゲティング、専門家による無償の導入検討支援）	ボルダー市
	人材育成：燃焼機器・関連サービスの従事者がヒートポンプ普及などに関われるよう、労働力開発支援を行う	カリフォルニア州、シアトル市

注：西尾・中野（2020）をもとに2022年12月時点の情報にアップデート

2. 建物脱炭素取組の類型と主要な取組

2.1. 規制的手法

2.1.1. 新築電化義務

規制的手法のうちもっとも厳しいものとして、新築建物の電化を義務化するというものがある。新築電化義務は、米国カリフォルニア州バークレー市が2019年7月、米国初の条例を可決させたことが象徴的に取り上げられる（西尾・中野 2020）。同州サンフランシスコ市でも、2020年1月から公共建物を先行して新築

電化義務にしていたことに加え、同じ年の11月に条例を改正し、2021年6月以降に新築されるすべての建物で電化義務が課された（City and County of San Francisco 2020）。同州サンノゼ市では2020年1月から新築の戸建や低層集合住宅を電化義務化しており、さらにその後の条例改正で、2021年8月からはほぼすべての建物に新築電化義務を課した（City of San Jose ウェブサイト）³⁾。

電化に限るものではないが、欧州における新築建物の規制強化策として、オランダでは2018年に法改正があり、新築住宅や小規模事業所の建物はガス供給網に接続できないことを定めた（Climate Agreement Web 2019）。英国では新築住宅への規制強化案であるFuture Homes Standardが検討されている。そこでは2025年以降の新築住宅のCO₂排出を現在の要件より75～80%低い水準に抑えることが求められ、「低炭素熟」でゼロカーボン対応させることが重視されている（UK Government ウェブサイト）。

2.1.2. 新築電化推奨

規制的手法のうち、電化義務ほど強くないものとして、電化・非電化建物の中で省エネ性能や実施事項の要求水準に差をつけることにより、エネルギー転換を促進するというものがある。例えばカリフォルニア州サンフランシスコ市では、2020年1月時点では公共建物以外に電化推奨を課しており、中高層住宅や非住宅建物を新築する際には州の建築基準で定められた床面積あたりエネルギー消費量を10%下回る必要があった（西尾・中野 2020）（前述の通り、2021年6月以降はすべての建物で電化義務が課された）。

2.1.3. 新築電化レディ義務

新築電化レディ義務は将来的に容易に電化できる環境を整えておくことを新築時に求める規制である。具体的には、空調・給湯・調理機器の設置箇所や分電盤に専用回路を配線させ、将来の電気機器用である旨を表示させることなどがある。改修時に実施すると費用がかさんでしまうため、新築時に実施するほうが合理的との考え方である。例えば、米国サンノゼ市では2019年9月に制定した建築基準により、集合住宅に対して将来的に電気自動車を容易に導入できるようにする対策を求めている（EVレディ義務）（西尾・中野 2020）。また、カリフォルニア州においては、エネルギー委員会が2021年8月に州のエネルギー基準の改正提案（Energy Code 2022）を採択し、同12月に建物基準委員会で承認されたことで、自治体が主導してきた電化レディが州基準でも取り込まれた。住宅における暖房機器、調理機器、衣類乾燥機などを電気式機器に更新しやすくなるような措置である。エネルギー基準は3年サイクルで改正されており、今回の基準は2023年1月以降に建築される建物に適用される（California Energy Commission 2021）。

2.1.4. 新築建物の排出規制

政府が新築建物のエネルギー性能を規制する際に、GHG排出量に関する要件を加える手法である。フランスでは1974年から熱規制（Réglementation Thermique, RT）により、一次エネルギーの使用量をもとに新築建物の性能を規制してきた。しかし、2020年11月、GHG排出量による規制にアップグレードする方針を発表した。これは環境規制（Réglementation Environnementale, RE）と呼ばれる。2021年7月には政令が制定され、2022年1月から適用されている。新たな規制（RE2020）により、戸建住宅では2022年から排出原単位の上限が160kgCO₂/m²/50年（以下同様）に設定されたため、ボイラー設置は困難となる。集合住宅では、ガス暖房が75%という現状も考慮し、2022年の上限値は560kgCO₂という控えめな水準に設定され、段階的に引き下げられる（Ministère de la Transition écologique 2021）。

2.1.5. 既築建物の省エネ・排出規制

中規模以上（面積2.5万平方フィート以上⁴⁾）の既築建物（大半は既築の業務用ビルや集合住宅）については、米国ニューヨーク市でGHG排出規制が行われている。ワシントンDCでは大規模な建物（面積5万平方フィート以上の民間の商業ビル・集合住宅と、1万平方フィート以上の公共施設）におけるエネルギー消費量の報告・公表制度があったが、2024年から民間建物も1万平方フィート以上を対象を拡大する（西尾・

3) 2020年1月時点では、非住宅と高層集合住宅で新築電化推奨かつ電化レディ義務であった。

4) 1平方フィートは約0.093平方メートル。

中野 2020)。ボストン市では建物エネルギー報告・開示 (Building Energy Reporting and Disclosure Ordinance, BERDO) 制度から、建物排出削減・開示 (Building Emissions Reduction and Disclosure Ordinance, BERDO 2.0) 制度へアップグレードされ、中規模以上 (面積2万平方フィート以上の業務用ビルまたは住宅戸数15戸以上の集合住宅) の既築建物について、2050年までの年間排出量の基準値を定めた。2025年から適用された後、5年毎に厳しくなり、2050年にはネットゼロ排出を求めるものであり、建物オーナーはエネルギー転換の検討を迫られる (City of Boston 2021)。

また、既築のオフィスビルへの規制という点で、オランダでは2023年からエネルギーラベルC⁵⁾以上を取得していないオフィスビル (全体の5割ほど) の利用を禁止することになる (Rijksdienst voor Ondernemend Nederlandウェブサイト)。

2.1.6. 燃焼機器の設置規制

米国カリフォルニア州カールスバッド市では、2019年に新築住宅のガス給湯器設置を制限する条例を定めた。条例により、新築される3階以下の低層住宅ではヒートポンプ給湯機と太陽熱温水器のみが設置を認められた (西尾・中野 2020)。ドイツでは2020年11月発効の建物エネルギー法により、2026年以降、石油・固体化石燃料ボイラーの設置を原則禁止する。ただし、ガスインフラがない場合や一定割合以上の再生可能エネルギーからの熱を利用できる場合に免除されることがある。設置後30年を超える石油・ガスボイラーの更新義務も継続する (BMWST, GEG-info などのウェブサイト)。

2.1.7. 再エネ政策との連携

エネルギー事業者向けの規制的手法である再エネ・代替エネ導入義務制度に、需要サイドの対策による排出削減効果を活用できるようにする手法がある。米国バーモント州では、2032年までに販売電力量の75%を再エネ (大規模風力は除外) で調達することを義務付けるRES (Renewable Energy Standard) を導入しており、その一部に需要サイドの化石燃料消費削減効果を組み込んである (西尾・中野 2020)。2020年の実績を見ると、対策としてヒートポンプ導入が最も多く、その他としてEV・PHEVとその充電設備の導入、蓄電池導入、建物断熱対策などがある (Vermont Department of Public Service 2022)。

2.2. 経済的手法

2.2.1. 導入補助

導入補助は機器を設置・交換する際の金銭的負担を軽減するものであり、我が国でも一般的に用いられる。米国で特徴的なのは、燃料転換を伴う場合や低所得者向けに補助額を優遇する場合などである。米国カリフォルニア州サクラメント市の事例では、ヒートポンプの低所得世帯への補助、燃焼機器から置き換える場合の補助、全電化リフォームへの補助、IH調理器への補助、電化改修の集合住宅オーナーへの補助、などがある。

カリフォルニア州は既築住宅におけるヒートポンプ給湯・空調の普及を促すTECH (Technology and Equipment for Clean Heating) や、低所得世帯向けの新築住宅の全電化を促すBUILD (Building Initiative for Low-Emissions Development) というプログラムを開始している。TECH/BUILDプログラムでは、商流において設備業者や建設業者などの中流に位置づけられる業者向けに補助を行っている (TECH Clean California Web, California Energy Commission Webなどより)。これは中流 (midstream) インセンティブと呼ばれる手法である。例えば機器の交換に際しては、設備業者等の推奨が消費者の選択に大きく影響することから、業者のトレーニングなども含め、中流への働きかけが重要であるとされている。

また、米国メイン州は寒冷地でもヒートポンプ導入を進めている事例であり、2020年からは低所得者向けに2,000ドルの導入補助も始められた (西尾・中野 2020)。

5) 面積当たりの一次エネルギー消費量で評価されている。

2.2.2. 化石燃料インフラ接続への炭素課税

炭素税は、化石燃料の使用に対して課税をすることで低排出なエネルギーへの転換を促すものである。米国バーモント州バーリントン市では、新築建築物が化石燃料インフラに接続する際に炭素料金の支払いを義務付ける条例が提案された。州によるバーリントン市への権限付与の承認後、具体的な制度検討が進められている (Lyons 2022) ⁶⁾。

2.2.3. 熱・輸送分野の国内排出量取引

ドイツは燃料排出権取引法 (BEHG) により、熱・輸送分野の対策を強化するための国内排出量取引制度 (nEHS) を2021年に創設した。熱・輸送分野は家庭や自動車保有者などCO₂を排出する需要家が多いため、それらが直接排出量取引に参画するのではなく、ガソリン・ディーゼル・燃料油・天然ガスなど燃料流通業者が排出権を購入する制度となっている。2025年までの5年間は排出権の価格は政府により予め設定されるが、その理由は「排出量取引のすべての参加者にとって計画の安全性を確保するため」とされる (DEHSt ウェブサイト)。

2.3. 情報的手法

2.3.1. 需要家教育

需要家教育は、必要な情報を提供することによってエネルギーの需要家が自ら合理的な選択行動をとれるようにする手法である。米国ボルダー市では、これまでヒートポンプになじみのなかった寒冷地で快適性などの便益を強調した普及啓発キャンペーンである“Comfort365”を行っている (西尾・中野 2020)。

2.3.2. 人材育成

人材育成は、GHG削減技術を販売・施工できる人材を増やすことで導入機会の拡大や施工単価の低減を図るものである。カリフォルニア州のTECHプログラムやシアトル市の暖房用燃料課税の検討事例などに、持続可能な暖房・給湯機器の販売・設置業への移行を支援する取組が見られる。

2.4. 脱炭素化取組のための環境整備

規制的、経済的、情報的手法以外にも、脱炭素化取組を推進するための環境整備も重要となる。

2.4.1. 電化の位置づけの明確化

米国では省エネに積極的な州ほど、電気は電気の省エネ、ガスはガスの省エネといったように、それぞれの対策を徹底してきたという歴史がある。一方、個別の対策を追求する従来の省エネプログラムのあり方では、エネルギー全体でみて望ましい省エネ対策を講じにくいという矛盾も指摘されるようになってきた。そこで、エネルギー転換を促していくために、省エネプログラムの中に電化を明確に位置づける動きがある。マサチューセッツ州では2017年に省エネプログラムの根拠法を改正し、「戦略的電化」を実施対象に追加した。これにもとづいて、2019年には石油・ガス暖房からヒートポンプへ置き換える既築住宅への補助を新たに開始した。2022～2024年の省エネプログラム計画では電化が最優先事項の1つになった (Mass Save 2021)。

2.4.2. 評価手法の見直し

一次エネルギー消費量によって省エネを評価する場合に、電源構成の変化を反映して電気の評価を見直すことで、エネルギー転換を含めた省エネ対策がとりやすくなる。例えば、カリフォルニア州は省エネプ

6) 炭素課税に関連するものとして、米国シアトル市では、2023年1月から暖房用燃料の販売量に応じて石油販売業者に課税 (\$0.236/ガロン; 140円/\$換算すると8.7円/L) し、その税収を低所得世帯のヒートポンプ普及支援や、石油サービス業からの移行支援に活用することが検討されていた (西尾・中野 2020)。この暖房用燃料課税は新型コロナウイルス拡大の影響も考慮して施行が延期された後、2022年11月の市議会で廃止が可決された (Seattle City Web)。

プログラム上で電気を一次エネルギー使用量に換算して評価する方法を見直した。従来は火力電源の平均を用いて一次エネルギーやCO₂排出量を算出していたのを、全電源平均で与えるようにし、さらに、将来の再エネ拡大による変化を見越して評価するようになった。建物の設備は長く使われるため、現在のみではなくライフタイムで評価することが必要であり、そこに将来の再エネ拡大の影響を見込んでおくことは、全体として効率的な技術選択につながる（西尾・中野 2020）。フランスのRE2020においても、建物は長期にわたり運用されるため、電力の一次エネルギー換算係数は今後50年間の平均的な値で算定することとされた（Government of France 2020）。

2.4.3. 経済性評価の活用

米国では脱炭素化対策の社会的費用や家計への影響等を検証した報告書（Mahone et al. 2018; Hopkins et al. 2018など）が多く公表されており、経済性に関する知見が蓄積されてきている。また、米国メリーランド州では州の脱炭素化目標を達成するために電化やガスの脱炭素化などを活用した複数のシナリオを策定し、経済性の高い案の検討を行った。その結果は州の建物エネルギー移行計画の作成に反映されており、政策決定に直接結果が活用された点や、ガスの脱炭素化を含めた選択肢の中から比較検討を行っている点で特徴的である（Maryland Commission on Climate Change 2021）。

2.5. 地域脱炭素に向けた戦略策定・連携

2.5.1. 既築対策の包括的戦略の策定

米国バークレー市では新築電化義務が象徴的に取り上げられてきたが、住宅のストックの大部分を占める既築建物の対策が急務となっていた。そのため、2021年11月には既築建物の電化戦略をとりまとめている。すぐに制度の改正等につながるものではないが、政策のアイデアを整理している資料として参考になる（City of Berkeley 2021）。表2にその概要を示す。

電化戦略は、①買い替え・改修時、②売却時、③建物性能基準、④地区電化・ガス切断、という4つの基本戦略からなり、以下の2つの特徴がみられる。第一に、規制的手法、経済的手法、情報的手法が組み合わせられている。例えば、①では交換時のヒートポンプ採用の義務化などの規制的手法、ヒートポンプ空調・給湯機への補助金などの経済的手法、電化の便益やガスフェーズアウトについての教育などの情報的手法などが挙げられている。第二に、4つの基本戦略のうち①②は、買い替え・改修時、売却時といった、機器の交換等の対策がとりやすいタイミングをターゲットとしており、消費者に比較的受容されやすいことを目指している。また、2045年までにすべての建物を電化することを目標に、2021～25年のフェーズ1、2022～30年のフェーズ2、2027～45年のフェーズ3と、3つのフェーズにわけて段階的に対策を進めることを提案している。同市では2030年までに化石燃料フリーを実現するという目標を掲げているが、費用分析やコミュニティとの議論を踏まえて、既築については長期のタイムラインを提示している。つまり、新築に比べて対策のハードルが高い既築建物では、適切なタイミングを捉えて対策を打つことに加え、比較的長期のスパンで計画しておくことの重要性が示唆される。

2.5.2. 地域脱炭素に向けた熱移行計画策定要請

オランダでは国として脱炭素化対策の方向性を明確に示す一方で、既築建物の対策においては自治体の役割を重視しており、およそ300あるすべての自治体に天然ガスからのフェーズアウトを行う計画（熱移行計画）の策定を求めた（Climate Agreement Web 2019）。自治体は建物のストックの特性などを考慮し、ヒートポンプや熱供給ネットワーク、バイオガスなどの選択肢の中から、経済性の高い対策を地区ごとに特定して計画を策定することが求められており、国もガイドラインを設けて支援する。熱分野の対策に明確に取り組む点や経済性を重視する点はいずれも特筆すべきである。また、そのための知見を地域の実証事業の中から蓄積し、横展開していくことが目指されており、脱炭素化のための先行的な事業を支援するプログラムが実施されている（ガスフリー地区プログラム、表2）。

表2 自治体の既築対策の事例

事例	概要
米国 バークレー市	<p>既築電化戦略の策定</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ①買い替え・改修時、②売却時、③建物性能基準、④地区電化・ガス切断、という4つの基本戦略からなる。特徴として、規制的手法、経済的手法、情報的手法が組み合わされている点や、買い替え・改修時、売却時といった、機器の交換等の対策がとりやすいタイミングをターゲットとしている点が挙げられる。また、費用分析やコミュニティとの議論を踏まえて、既築については長期のタイムラインを提示していることなども、受容性を高めることにつながる
オランダ 熱移行計画・ガスフリー地区プログラム	<p>地域の脱炭素化における自治体の役割と支援</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 既築建物の対策において自治体の役割を重視。およそ300あるすべての自治体に、天然ガスからのフェーズアウトを行う計画（熱移行計画）の策定を求めた ● 地域を天然ガスフリーにする計画を立てた自治体に補助金を授与。先駆的な取り組みの実証事業から、地域の脱炭素化に向けた知見を蓄積し、展開を図る

2.5.3. 地域・事業者間の連携

地域の脱炭素化においては自治体が必ずしも十分なリソースを有していない場合があり、地域や事業者などの連携が鍵になる。表3では3つの事例を示している。

米国都市気候チャレンジ（ACCC）は、ブルームバーグ慈善団体が都市による気候変動対策を支援するために2018年に開始された取組である。総額約7千万ドル（約80億円）の活動資金を2年にわたって提供していた。25都市を選定し、建物・運輸部門などの専門知識を有するパートナーの協力のもと、参加都市に対して気候変動対策にかかる技術支援やサポートパッケージを提供した。支援の結果、建物脱炭素化に向けた自治体の条例制定などに貢献した（Bloomberg Philanthropies ウェブサイト）。

BayREN（Bay Area Regional Energy Network）はサンフランシスコベイエリアの9つの群において省エネを推進するため、2012年に設立された地域エネルギーネットワークである。ベイエリアの自治体協議会が主導する組織であるBeyRENは、2020年には従来の省エネ対策を補完するものとして、戸建・集合住宅の電化を促進する補助プログラムを新たに開始した（BayREN ウェブサイト）。

Beneficial Electrification League（BEL）は地方の電化推進を支援する非営利団体である。主に地方の電気共同組合の業界団体が中心となって2018年に設立された。「消費者の費用を長期にわたり削減する」「環境に便益をもたらす、温室効果ガスの排出を削減する」「製品の品質や消費者の生活の質を向上させる」「電力システムをより強固でレジリエントなものにする」という4つの項目を設定し、少なくとも1つにプラス影響を与え、かつ残りの項目にマイナス影響を与えないものを「有益な電化（beneficial electrification）」と定義し、ステークホルダーとの対話や該当する実証プロジェクトへの補助などに取り組んでいる。建物の電化に関するプロジェクトも多い（BEL ウェブサイト）。

表3 地域・事業者間の連携事例

事例	概要
米国都市気候 チャレンジ (ACCC)	<p>大都市の脱炭素政策構築の支援</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ブルームバーグ慈善団体（Bloomberg Philanthropies）が2018年、都市による取組を支援するために開始 ● 総額約7千万ドル（約80億円）の活動資金を提供 ● 人口の多い100都市を対象に、25都市を選定し、2年にわたり支援 ● 建物・運輸部門などの専門知識を有するパートナーの協力のもと、参加都市に対して気候変動対策にかかる技術支援やサポートパッケージを提供
米国 BayREN	<p>地域エネルギーネットワークを通じた電化補助</p> <ul style="list-style-type: none"> ● カリフォルニア州は2006年以降、GHG排出削減目標を設定・更新。ベイエリアの自治体の間でも、独自目標を定める動きが拡大し、省エネ対策への期待は高まっている ● BayRENは2020年、省エネ対策を補完するものとして、戸建・集合住宅の電化を促進するための補助プログラムを開始した
米国 Beneficial Electrification League	<p>地方の電化取組を支援するためのネットワーク</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 約900の地方電気協同組合を代表する業界団体であるNRECAが中心となり、2018年に、地方の電化取組を支援する非営利団体であるBELが設立された ● 多様なステークホルダーの支持を得られるように、ある製品やサービスが「有益な電化」であるかどうかを判断するための基準を定めている ● 電力会社、コンサルタント、非営利団体、民間企業などの様々な関係者が講演する電化会議を各州で開催し、有益な電化に関する議論を促進 ● 2021年5月、5つの州の電化実証プロジェクトに対して、総額10万ドル以上を助成することを発表

3. 我が国への示唆

既往報告（西尾・中野 2020）では、脱炭素化に関する米国の先進事例から「建物脱炭素化という政策目標の設定」「再エネ主力電源時代の建物の姿」「省エネ政策のチューニング」「建物脱炭素化の促進策」「社会的受容性」という、5つの点について示唆を得た。本稿ではこのうち、建物脱炭素化という政策目標の設定、促進策、社会的受容性に関連し、以下の3点を指摘したい。

3.1. 熱分野の脱炭素化に取り組む必要

欧米諸国では国や州・自治体が掲げる高い脱炭素化目標の実現のために、建物脱炭素化という政策目標を設定しており、再エネ調達や省エネだけでなく、熱分野（給湯・暖房・台所コンロ）への取組を進めている。我が国においても建物脱炭素化という目標設定により、熱分野への取組を進めていくことが肝要である。導入補助といった経済的手法は我が国でもすでに多く実施されている一方、諸外国では野心的な脱炭素化目標を達成するための実効性のある手段として、規制的手法も導入されてきている点には注目すべきである。本稿で取り上げた事例からは、フランスの環境規制、ボストン市の既築建物排出規制などのように、既存の省エネ制度をCO₂削減も重視する制度へとアップグレードするなど、規制的措置を時代の要請にあわせて見直すアプローチが見られた。また、BayRENやマサチューセッツ州のようにこれまでの省エネ対策の知見を活かし、電化促進を補助対象にできるように取組をアップグレードしようとする動きもある。サンフランシスコ市では、公共建物など比較的取り組みやすい対象を規制することからはじめ、その後すべての建物に規制範囲を広げるなどの工夫も見られた。

我が国でも、2022年に建築物省エネ法が改正され、2025年までに施行されるとすべての新築住宅・非住宅に省エネ基準適合が義務付けられるようになった。しかし、住宅断熱性の向上が主眼であり、建物脱炭素化を実現するには不十分である。「脱炭素社会に向けた住宅・建築物における省エネ対策等のあり方検討会」により作成されたロードマップも、住宅断熱性を始めとする省エネ性能の向上や再エネ普及の検討を深めるものとしては評価できるが、脱炭素化のために諸外国が熱分野に取り組んでいるのとは比べると、十分な内容ではない。東京都のように新築建物へのPV設置義務化を検討する例が出てきているが、カリフォ

ルニア州はPV設置のみならず、電化レディも義務化するなど、熱分野への対策も重視している。相乗効果という点で、再エネ普及と電化を同時に行うことで、炭素排出を抑えた高効率な熱サービスを実現させていくことが有効である。さらに、住宅断熱性向上と電化を同時に行うことで、電力系統への負荷を抑えた高効率な熱サービスを実現させていくことも、長期的に求められる。

3.2. 経済性の考慮が重要

必要な対策を選ぶにあたり、経済性を考慮することが重要である。米国で規制的手法が採用された時期には、エネルギー転換を進めることにより社会的費用が小さくなる点や、消費者の経済的負担が大きくなる点を検証するレポートが様々な機関から提示されている。また、先に十分な投資をしておくほうが、あとから改修するよりも経済的かつ実施容易なことが、電化レディを建築基準に取り入れる根拠となっている。パークレー市の既築対策の事例で買い替えや改修時、売却時のタイミングをとらえた対策が強調されているのも、費用対効果を高めることを目指しているためである。メリーランド州の事例では、ガスの脱炭素化や電化などの取組の経済性を比較し、政策検討へ活用する取組がみられた。また、BELの「有益な電化」の要件には「消費者の費用を長期にわたり削減すること」が付されている。

我が国においても、建物脱炭素化の費用対効果を踏まえ、社会的受容性の高い手法の検討が必要である。エネルギー転換には初期投資がかかるが、ランニングコストが軽減される便益などを考慮すれば、結果として総費用を抑えられる場合もある。経済性についての知見が少ないことで、こうした本来安価であるはずの対策が十分に進まない場合もあると考えられる。山田・西尾（2023）の経済性分析では、脱炭素化を実現する場合にできるだけ費用を抑えた形で給湯機器交換等を進めることで、現状維持の場合より総費用が削減されることが示唆されている。それでもなお、長期的には経済合理的でも初期投資の大きい機器は採用されないといった課題がある。導入補助は、このような省エネバリアを克服するための政策手法である。米国カリフォルニア州の事例では補助対象者を下流（エンドユーザー）から中流（卸売業者・施工業者）へシフトさせるなど、政策としての費用対効果を上げるための試みが進められている。エンドユーザーだけではなく業者の行動も機器選定に影響を与えている実態（西尾・山田 2023）を踏まえながら、我が国でも効果的な補助制度の活用のあるあり方について検討の余地があるだろう。

3.3. 地域脱炭素化のためにはリソース支援が必要

自治体が脱炭素化対策を行う上で十分なリソースを有していないことは、国内外を問わず指摘されてきた。この課題に対応するため、米国ACCCの事例では自治体への技術支援やサポートパッケージを提供しており、費用分析、ストック分析で技術協力をしている。オランダは国として脱炭素化の方向性を明確に示した上で、既築の建物については自治体の役割を重視している。その場合にも、自治体が必要とする情報やガイドラインを国が整備するとともに、国が先行的な取組を支援し、知見を横展開することを目指している。

我が国でも環境省の地域脱炭素ロードマップが、2025年までに100箇所以上の脱炭素先行地域を選定し、先駆的な取組を支援するという方向性を示している。しかし、熱分野は「運輸部門や熱利用等も含めてそのほかの温室効果ガス削減」に含まれる形で要件になっており、実際に採択された先行地域の事例をみてもエネルギー転換を含む熱分野への取組は不十分である。そのためにも、国として熱分野の脱炭素化について明確な方向性を示すとともに、それに合致するような地域脱炭素化取組を先行地域としてリソース支援し、知見を広く共有して横展開につなげていく必要がある。

参考文献

- BayREN Web “About”.
<https://www.bayren.org/about-bayren> （アクセス日 2022.12.23）
Beneficial Electrification League Web
<https://be-league.com/> （アクセス日 2022.12.23）
Bloomberg Philanthropies Web “American Cities Climate Challenge”.

- <https://www.bloomberg.org/environment/supporting-sustainable-cities/american-cities-climate-challenge/> (アクセス日 2022.12.23)
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). “Das Gebäudeenergiegesetz”.
<https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/bauen/energieeffizientes-bauen-sanieren/gebäudeenergiegesetz/gebäudeenergiegesetz-node.html> (アクセス日 2022.12.23)
- California Air Resource Board “Current California GHG Emission”.
<https://ww2.arb.ca.gov/ghg-inventory-data> (アクセス日 2022.12.23)
- California Energy Commission (2021). “Energy Commission Adopts Updated Building Standards to Improve Efficiency, Reduce Emissions From Homes and Businesses”, 2021.8.11.
<https://www.energy.ca.gov/news/2021-08/energy-commission-adopts-updated-building-standards-improve-efficiency-reduce-0> (アクセス日 2022.12.23)
- California Energy Commission Web “Building Initiative for Low-Emissions Development Program”.
<https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/building-initiative-low-emissions-development-program> (アクセス日 2022.12.23)
- City and County of San Francisco (2020). “Ordinance 237-20 to Building Code, Environment Code. (11/10/2020). (Ordinance 237-20)”.
<https://sfbos.org/sites/default/files/o0237-20.pdf> (アクセス日 2022.12.23)
- City of Berkeley (2021). “Existing Buildings Electrification Strategy”, 2021.11.
<https://berkeleyca.gov/sites/default/files/2022-01/Berkeley-Existing-Buildings-Electrification-Strategy.pdf> (アクセス日 2022.12.23)
- City of Boston (2021). “Ordinance Amending City Of Boston Code, Ordinances, Chapter VII, Sections 7-2.1 And 7-2.2, Building Energy Reporting And Disclosure (BERDO)”, 2021.9.
<https://www.lawandenvironment.com/wp-content/uploads/sites/5/2021/09/BERDO-Ordinance-Final.pdf> (アクセス日 2022.12.23)
- City of San Jose “San Jose Reach Code”.
<https://www.sanjoseca.gov/your-government/departments-offices/environmental-services/climate-smart-san-jos/san-jos-reach-code> (アクセス日 2022.12.23)
- Climate Agreement Web (2019). “National Climate Agreement - The Netherlands”, 2019.6.28.
<https://www.klimaataakkoord.nl/documenten/publicaties/2019/06/28/national-climate-agreement-the-netherlands> (アクセス日 2022.12.23)
- Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) Web “National Emissions Trading”.
https://www.dehst.de/EN/national-emissions-trading/national-emissions-trading_node.html (アクセス日 2022.12.23)
- Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) Web “Understanding National Emissions Trading”.
https://www.dehst.de/EN/national-emissions-trading/understanding-national-emissions-trading/understanding-nehs_node.html#doc434392 (アクセス日 2022.12.23)
- GEG-info Web “Gebäude Energie Gesetz (GEG 2020) Volltext in Html-Format”.
https://geg-info.de/geg/072_%a7_betriebsverbot_heizkessel_oelheizungen.htm (アクセス日 2022.12.23)
- Government of France (2020). “Integrated national energy and climate plan for FRANCE”, 2020.3.
https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-08/fr_final_necp_main_en.pdf (アクセス日 2022.12.23)
- Hopkins, A.S. et al. (2018). “Decarbonization of Heating Energy Use in California Buildings, Technology, Markets, Impacts, and Policy Solutions”, Synapse Energy Economics, 2018.10.
<https://www.synapse-energy.com/sites/default/files/Decarbonization-Heating-CA-Buildings-17-092-1.pdf> (アクセス日 2022.12.23)
- Lyons, J. (2022). “Armed with new regulatory power, Burlington City Council commissions plan to reduce carbon output”, 2022.5.10.
<https://vtdigger.org/2022/05/10/armed-with-new-regulatory-power-burlington-city-council-commissions-plan-to-reduce-carbon-output/> (アクセス日 2022.12.23)
- Mahone, A. et al. (2018). “Residential Building Electrification in California – Consumer economics, greenhouse gases and grid impacts”, Energy+Environmental Economics, 2018.4.
https://www.ethree.com/wp-content/uploads/2019/04/E3_Residential_Building_Electrification_in_California_April_2019.pdf (アクセス日 2022.12.23)
- Maryland Commission on Climate Change (2021). “Building Energy Transition Plan, A roadmap for decarbonizing the residential and commercial building sectors in Maryland”, 2021.10.13.
https://mde.maryland.gov/programs/Air/ClimateChange/MCCC/Documents/MWG_Buildings%20Ad%20Hoc%20Group/Building%20Energy%20Transition%20Plan%20-%20Approved.pdf (アクセス日 2022.12.23)
- Mass Save (2021). “Massachusetts Joint State Wide Electric and Gas Three-Year Energy Efficiency Plan (2022-2024)”, 2021.11.1.
<https://fileservice.eea.comacloud.net/FileService.Api/file/FileRoom/14149885> (アクセス日 2022.12.23)
- Ministère de la Transition écologique (2021). “Construction durable : Barbara Pompili et Emmanuelle Wargon détaillent les conditions d’entrée en vigueur de la RE2020”, 2021.2.18.
<https://www.ecologie.gouv.fr/construction-durable-barbara-pompili-et-emmanuelle-wargon-detaillent-conditions-dentree-en-vigueur> (アクセス日 2022.12.23)
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland “Energie label C Kantoren”.

<https://www.rvo.nl/onderwerpen/wetten-en-regels-gebouwen/energielabel-c-kantoren> (アクセス日 2022.12.23)
Seattle City Web “Heating Oil Tax – Repealed”.
<https://www.seattle.gov/city-finance/business-taxes-and-licenses/seattle-taxes/heating-oil-tax> (アクセス日 2022.12.23)
TECH Clean California Web
<https://techcleanca.com/about/> (アクセス日 2022.12.23)
UK Government (2021). “The Future Homes Standard: changes to Part L and Part F of the Building Regulations for new dwellings”, 2021.1.27.
<https://www.gov.uk/government/consultations/the-future-homes-standard-changes-to-part-l-and-part-f-of-the-building-regulations-for-new-dwellings> (アクセス日 2022.12.23)
Vermont Department of Public Service (2022). “2022 Annual Report on the Renewable Energy Standard”, 2022.1.14.
<https://publicservice.vermont.gov/sites/dps/files/documents/2022%20CEP%20AppendixC%20Renewable%20Energy%20Standard%20Report.pdf> (アクセス日 2022.12.23)
環境省 (2022) 「2020 年度 (令和 2 年度) の温室効果ガス排出量 (確報値) について」, 2022.4.15.
<https://www.env.go.jp/content/900518858.pdf> (アクセス日 2022.12.23)
西尾健一郎・中野一慶 (2020) 「建物脱炭素化に向けた取組の検討—米国の州や自治体の先進事例とわが国への示唆—」, 電力中央研究所報告 Y19005.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y19005>
西尾健一郎・山田愛花 (2023) 「家庭用給湯分野の省エネルギー・温暖化対策のバリア—賃貸住宅や機器選定の関係者へのインタビュー調査—」, 電力経済研究, 第 69 号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>
向井登志広 (2022) 「運輸脱炭素化に向けた取組の検討—欧米の自治体の先進事例とわが国への示唆—」, 電力中央研究所報告 SE21005.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=SE21005>
山田愛花・西尾健一郎 (2023) 「ロックイン問題を考慮に入れた給湯分野の経済合理的な CO₂ 削減可能性—家庭 CO₂ 統計の個票データを用いた将来分析—」, 電力経済研究, 第 69 号.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>

中野 一慶 (Kazuyoshi Nakano)

電力中央研究所 社会経済研究所

西尾 健一郎 (Ken-ichiro Nishio)

電力中央研究所 社会経済研究所 (兼) グリッドイノベーション研究本部

第3部
運輸部門

運輸脱炭素化に向けた取組の検討

—欧米の自治体の事例とゼロカーボンシティへの示唆—

Policy Recommendations on Achieving Transport Decarbonization by Local Governments:
A review of Local Efforts in the US and EU and Implications for Zero Carbon Cities in Japan

キーワード：ゼロ・エミッション車、規制的手法、経済的手法、情報的手法

向井 登志広

要旨

我が国の運輸部門の脱炭素化に向けて、運輸部門のCO₂排出量の8割以上を占める自動車部門における対策の実施は不可欠である。筆者は、国内自治体による地域の運輸脱炭素化に向けた検討に貢献することを目指し、欧米の10の自治体による39種類の運輸脱炭素化に向けた取組について内容や導入経緯を明らかにし、当所研究報告（SE21005）にまとめている。本稿では、同報告にて取りまとめた規制的手法・経済的手法・情報的手法などの先進事例について概要紹介する。今後、2050年ゼロカーボンシティを表明する国内自治体においては、中期目標を含む包括的な運輸脱炭素ロードマップの策定や、運輸脱炭素化に向けた条例の検討などが求められる。

1. はじめに

わが国の運輸部門の脱炭素化に向けて、運輸部門のCO₂排出量の8割以上を占める自動車部門における対策の実施は不可欠である。2021年1月、政府は2035年までに乗用車の新車販売で電動車100%を実現することを発表しており（首相官邸, 2021）、2021年10月には日本自動車工業会も2050年カーボンニュートラルへの挑戦を表明している（日本自動車工業会, 2021）。電動車には、バッテリー電気自動車（Battery Electric Vehicle: BEV）や燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle: FCV）に加えて、プラグイン・ハイブリッド電気自動車（Plug-in Hybrid Electric Vehicle: PHV）、ハイブリッド車（Hybrid Electric Vehicle: HV）が含まれる¹⁾。

BEVやFCVといったゼロ・エミッション車（Zero Emission Vehicle: ZEV）の普及に向けて、欧米の国や州は様々な施策を講じている。例えば、地域内で一定台数以上を販売する自動車メーカーに対して販売する新車の一定割合をゼロ・エミッション走行が可能なBEVやFCVなどとすることを要求するZEV規制²⁾、輸送用燃料供給業者に対して燃料のライフサイクルでの温室効果ガス排出係数を段階的に低減するよう求める低炭素燃料基準（Low Carbon Fuel Standards）³⁾、自動車メーカーに対して温室効果ガス排出量や燃費の段階的改善を求める排出量規制などがある。

加えて、これらのZEV普及策を講じる欧米の国や州を観察すると、ノルウェーにおけるオスロ市や、米国カリフォルニア州におけるサンノゼ市・ロサンゼルス市等、ZEVの普及を先導する自治体が地域の取組を活性化させていることがわかる。筆者は、国内自治体による地域の運輸脱炭素化に向けた検討に貢献することを目指し、図1に示す欧米の10の自治体による39種類の運輸脱炭素化に向けた取組について内容や導入経緯を明らかにし、当所研究報告にまとめている（向井, 2022）。本稿では、その概要紹介として、2章において規制的手法、経済的手法、情報的手法・交通インフラ整備・地域連携など、自治体による取組の

1) 本稿では、電気自動車（Electric Vehicle: EV）とはBEVとPHVを、ゼロ・エミッション車（Zero Emission Vehicle: ZEV）とはBEVおよびFCVを指すものとする。

2) 1990年に初めて米国カリフォルニア州で導入され、現在米国内の14の州、カナダの複数の州、中国、韓国などで導入されている。

3) 米国カリフォルニア州で2011年から開始している。同州では、2030年までに輸送用燃料のCI（Carbon Intensity: 燃料毎のライフサイクルのCO₂指標）を2010年比で20%低減することを目的としている。カリフォルニア州以外では米国オレゴン州、カナダのブリティッシュ・コロンビア州、欧州が導入している。また、米国ワシントン州が2023年1月に運用開始を予定している。

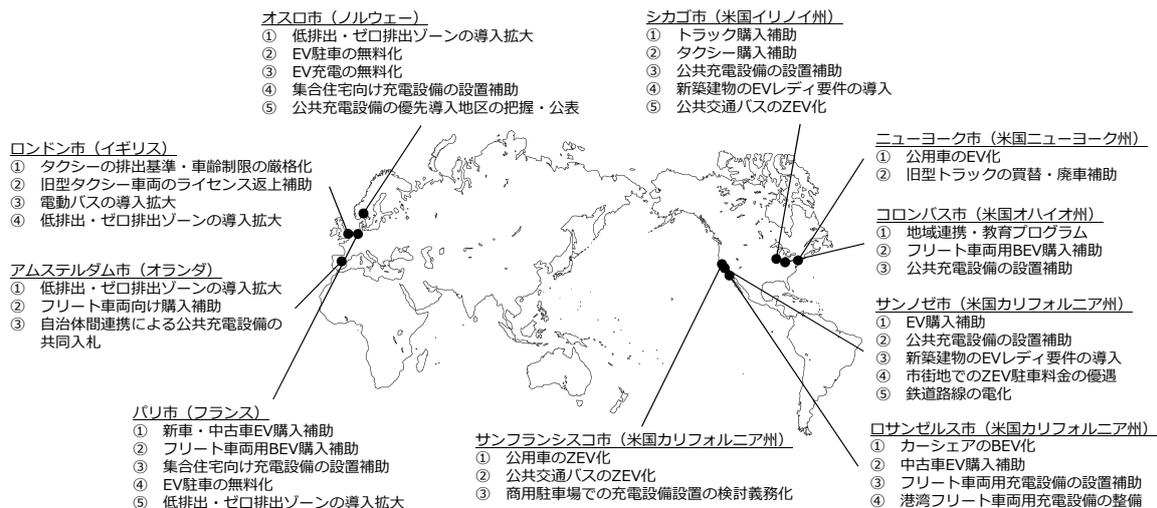


図1 欧米の自治体による取組事例

類型について述べる。さらに3章では、国内の最新動向を踏まえた考察を行う。

2. 運輸脱炭素化に向けた取組の先進事例

2.1. 規制的手法

本節では、規制的手法の先進事例について述べる。

2.1.1. 新築建物向けEVレディ要件

これは、集合住宅・商業施設・商用駐車場などの建物新築時に一定程度の充電設備の設置や、充電設備の設置に必要な配線・配管等を要求するものである。米国のサンノゼ市・シカゴ市・ロサンゼルス市・サンフランシスコ市・ニューヨーク市、欧州のオスロ市・パリ市・ロンドン市・アムステルダム市など、多くの自治体で導入されている (Bernard et al., 2021)。

多くの自治体で導入が進む背景には、充電設備の設置に必要な分電盤・駐車スペース間の配線等が、建物の新築時よりも既築建物の改修時のほうが高額になる点が挙げられる。例えばサンノゼ市は、新築時と比べて、既築建物の改修時には充電設備の設置に必要な分電盤・駐車スペース間の配線等が50~80%程度も高額になるとの試算をしている (San Jose Department of Transportation, 2019)。

2.1.2. 既築建物向け充電設備設置の検討義務化

米国サンフランシスコ市では、2019年10月、100台以上の駐車スペースを有する商用駐車場・ガレージに対し、2023年はじめまでに、駐車スペースの10%以上に充電設備の設置を検討することを義務付ける条例が決定された (San Francisco Board of Supervisors, 2019)。サンフランシスコ市内にある約300の商用駐車場・ガレージが対象となる予定であり、許可なく上記方針に違反した場合、商用駐車場・ガレージの事業者は営業許可取消しなどの行政処分を受ける可能性がある。

当条例では、免除規定が設けられており、技術的な問題や受電インフラの不足といった導入が困難な理由がある場合、当該義務を免除することができる。免除申請には充電設備会社2社以上の見積の提出が求められている。当免除規定は、過度の費用負担の回避や、商用駐車場・ガレージの事業者と充電設備会社との間でのコミュニケーションを促す狙いがあると考えられる。

2.1.3. ゼロ排出ゾーン拡大と購入補助の統合

パリ市は、2030年までに内燃機関車の販売を終了するという計画を掲げており、同年に、パリ市を含むパリ大都市圏内でBEV・FCV以外の走行が禁止される予定である (Bernard et al., 2020)。また、パリ市は2022年・2024年の段階的な規制内容の厳格化に関するスケジュールを公表している。この点は、自動車の新規購入や乗換を検討している消費者に対して、ZEVの選択を促すうえで効果的であると思われる。

ゼロ排出ゾーンによる規制厳格化スケジュールの公表に加えて、パリ市は、欧米の自治体の中でも比較的手厚いZEV購入補助を提供している。例えば、パリ都市圏の居住者は、EV購入補助として最大6,000ユーロが支給される (Beevウェブサイト参照)。EVの他にも、電動自転車やカーゴバイク、集合住宅での自転車用シェアの設置に対しても補助金を提供している。

2.2. 経済的手法

続いて本節では、経済的手法の先進事例について述べる。

2.2.1. 自家用車向けEV購入補助の提供

自家用車向けのEV購入補助は、運輸部門において最も認知度の高い経済インセンティブの一つであり、国内外の多くの自治体が導入している。

EV購入補助は、新車だけではなく、中古車も補助対象に含める取組が見られる。例えばロサンゼルス市は、自治体独自に中古車向け購入補助を提供している (Los Angeles Department of Water & Powerウェブサイト参照)。新車のBEVは初期費用が高額なため、比較的、高収入の世帯のみしか補助制度の恩恵を受けることができない点を考慮し、公平性の観点から中古車を補助対象にしている。また、BEV・PHVのみではなくHVの中古車も補助対象に含めており、幅広い車種・製造年の低燃費車両の利用促進を通してCO₂削減効果を高めようという意図が感じられる。中古車は新車と比べて初期費用が安くなるため、補助費用も抑制され、費用対効果の面でも合理的である可能性がある。

これまでの研究から、購入補助については補助額が高い地域ほどEVなどの販売比率も高いということがわかっている。例えば、米国各州の2010～2015年の補助制度を分析したところ、補助額が1,000ドル多いとEVなどの新車登録台数が5～11%程度増加したとの結果が報告されている (Wee et al., 2018)。また、欧州32か国の2010～2017年の補助制度を分析した例では、補助額が1,000ユーロ多いとEVなどの販売シェアが5～7%程度増加したとの結果が示されている (Münzel et al., 2019)。2010年代の欧州や米国の分析結果が2020年代のわが国のEV市場にそのまま当てはめられるか否かについて不確実性が残るものの、わが国の自治体が、国の補助金の他に追加的な購入補助を提供することで、地域のEV導入を加速することができるものと思われる。

また、欧州の分析事例では、効果が出現するには補助制度の導入から一定年数を要するとの結果も報告されている。わが国の自治体が補助策を実施する場合は、単年の補助制度で終わらせることなく、EV販売比率の増加傾向が出現し定着するまでの複数年にわたり、補助制度の維持のために必要な財源の確保が求められる。

2.2.2. 充電設備の導入地区の優先順位付け

米国カリフォルニア州のバイエリア大気質管理区域は、2021年12月、Charge!と呼ばれる充電インフラ補助プログラムの募集を公開した (Bay Area Air Quality Management District, 2021)。民間企業・地方自治体・非営利団体などによる充電設備の設置・運用プログラムを対象とした、総額700万ドルの補助プログラムである。

当補助プログラムは、申請要件として設置後3年間の最低充電量が定められている。具体的には、レベル2充電では9,000～18,000kWh、急速充電では90,000kWhの充電量が見込まれることが要件として含まれている。また、採択事業は充電設備の設置後すぐに補助額の85%が支給されるが、残りの15%は、充電量実績に関する年次報告を設置後3～4年間提出し、最低充電量が達成された事業にのみ支給される仕組みとなっている。高い稼働率が期待される地区への充電設備の導入事業を優先させる狙いがあるものと思われる。

公共充電設備の導入地区の偏りは批判対象にもなりうる。例えば、シカゴ市では、2018年時点で充電設

備の設置地区が富裕層の居住地域に集中していることや、シカゴ市の77のコミュニティエリアのうちわずか3エリアに公共充電設備の7割が集中している点について批判されている（Henderson, 2020）。

2.2.3. フリート車両⁴⁾向け補助対象の拡大

ニューヨーク市やシカゴ市といった自治体の補助制度の特徴の一つは、低炭素型ディーゼルトラックに加えて、電気トラック、プラグインハイブリッド・トラック、ディーゼル電気ハイブリッド・トラックなどが補助対象に含まれている点である。シカゴ市では、2015～2017年の間に、トラックやバスなど中型・大型車の買替に対する補助制度を提供してきたが、電気式のターミナル・トラクター、電気バス、電気式の配達用バンなどの補助支給実績が報告されている（Chicago Department of Transportation, 2020）。このような、短距離輸送や地域配送を想定するバン・トラックなどについては、すでにEV車両が製品化されており、充電設備が整備されている場合は運用上のリスクも少ないため、買替・廃車補助対象に含めることで運輸部門の脱炭素化に寄与することが期待される。

2.2.4. フリート車両向け補助制度の評価

また、ニューヨーク市のフリート車両向け補助の場合、当該取組による排ガス削減量も推計したうえで公開している（NYC Clean Trucks Program ウェブサイト参照）。老朽化した大型トラックの買替は、CO₂排出量の削減に加えて、排ガス量の削減による大気環境の改善といったメリットも期待される。しかしその一方で、1台あたりの補助金額は自家用車と比べても高額になる。自治体による取組として実施する際には、補助金支給によるCO₂排出量や排ガス量の削減効果を適切に評価し地域のメリットをアピールしていくような取組も、地域の理解を得ていく上で重要であろう。

2.3. 情報的手法など

本節では、情報的手法・交通インフラ整備・地域等との連携について述べる。

2.3.1. 地域連携

米国オハイオ州のコロンバス市は、2016年、米国運輸省とポール・G・アレン・ファミリー財団による「スマート・シティ・チャレンジ」を通して、交通網のスマート化に向けた取組のための資金5,000万ドルを獲得し、スマート・コロンバス・イニシアチブを立ち上げた。当資金を原資としたコロンバス市の取組は、民間企業・公共機関・学術機関などによる総額5億ドル以上の関連投資を誘発したといわれる（Maddox, 2017; Smart Columbus, 2019; American Electric Power, 2021）。

スマート・コロンバス・イニシアチブでは、「アクセラレーション・パートナー」プログラムと呼ばれる地域連携の取組が行われた。これは、コロンバス市が地域の民間企業・大学・非営利団体などと連携しつつ、運輸部門のスマート化やCO₂排出量・排ガス量の削減に資する取組や関連投資の活発化を狙ったものである（Slaymaker and Marbury, 2020）。当プログラムには、合計70の民間企業・大学・非営利団体などが参加した。彼らは「パートナー」と呼ばれ、以下5つの目標に取り組むことで協力した。

1点目は、組織内の実働部隊の編制・支援やプログラムの全体会合への出席などの役割を担う「シニア・スポンサー」の選出であり、パートナー企業の社長・副社長クラスから選出された。2点目はパートナー企業でのBEV導入検討であり、18のパートナー団体が社用車としてBEVを導入するとともに、パートナー団体の経営層50名が自家用車としてBEVを購入した。3点目は充電設備の設置検討であり、パートナー団体全体で合計219の充電ポートが設置され、うち72%が「プログラム参加や補助がなければ設置しなかった」と回答した。4点目はパートナー団体内での教育プログラムの実施であり、全パートナー団体が社員等を対象としたBEV試乗会を開催した。5点目は行動変容プログラムの実施であり、30のパートナー団体が行動変容プログラムを設計・開始するとともに、21のパートナー団体がプログラム実行のための助成金をコロンバス市から獲得している。

4) フリート車両とは、民間企業や自治体などが事業に用いる社用車や公用車。スクールバス、シャトルバス、タクシー、貨物車などが含まれる。

スマート・コロンバス・イニシアチブは2020年に終了したが、コロンバス市は引き続き運輸部門の排出削減に向けた取組を発展させる必要があると考えている。2020年2月、ギンサー市長は、2050年までにコロンバス市のカーボンニュートラル実現を目指すという目標を発表している。また、2050年のカーボンニュートラル実現に向けた32の行動計画を取りまとめた気候行動計画のドラフトを2020年に、最終版を2021年に公表している（City of Columbus, 2021; CAP Working Group, 2021）。例えば家庭利用向けの乗用車部門では、2025年にEVレディ建物条例を施行、2030年に市の登録自動車の15%をゼロ・エミッション化、2050年に市の登録自動車の100%をゼロ・エミッション化など、運輸部門の各分野における段階的な目標を表明しており、資金提供が終了した後も継続的な取組を続けている。

2.3.2. 充電設備の効率的な導入に向けた取組

充電設備の整備に向けた取組として充電設備の補助制度を前述したが、それ以外にも、充電設備の効率的な導入に向けて多様な取組が見られる。

例えばオスロ市では、市がすでに設置している充電設備の充電実績データに加え、1960年以前に建てられ駐車場がない住宅の多寡や、地区別の電気自動車所有台数などを踏まえて、今後充電需要が増加する可能性の高い地区の特定を行っている（Oslo kommune, 2019）。また、前節で取り上げたサンノゼ市による充電設備に対する設置補助では、充電設備の設置により期待されるCO₂・排ガス削減効果などを審査項目に含めており、より地域のメリットが高い地区から優先して充電設備の整備を進めている。設備整備計画と経済インセンティブの統合が図られた事例としても参考になる。

ロサンゼルス市では、エレクトリファイ・アメリカ社による「グリーン・シティ」と呼ばれる投資計画としてロングビーチ地区・ウィルミントン地区が選定されている（Electrify America, 2021）。当該地区は、国内でも大気汚染が残る地域としてカリフォルニア大気資源委員会（CARB）によって「不利な立場にあるコミュニティ」（disadvantaged community）に分類されている。自治体がCO₂や排ガス削減を急ぐ地区への充電設備導入に、自治体の外部からの資金を誘導した事例である。

アムステルダム市は、国内の他の80の自治体と共同で、2012年、電気自動車の普及を目的とした自治体間連携Metropolitan Region of Amsterdam Electric（MRA-Electric）を設立し、充電設備の設置と充電サービスを開始している（MRA elektrischウェブサイト参照）。設立当初は自治体資金を用いて充電設備の設置を行っていたが、充電設備からの売電収入の拡大や、充電設備設置数の増加に伴う設置費用の低減などにより、自己資金のみで設備投資費用を賄えるようになってきており、アムステルダム市は欧州の他の自治体よりも充電設備設置数が多い。

2.3.3. アクティブ移動による健康便益の考慮

ZEVの導入に向けた取組の他に、内燃機関車の走行距離抑制に向けて徒歩・自転車の利用促進を目標に掲げる欧米の自治体は多い。サンフランシスコ市は公共交通機関・自転車・徒歩の利用を住民に推奨するトランジット・ファースト（transit first）と呼ばれる取組を1973年に開始している（von Krogh, 2018）。オスロ市は、徒歩・自転車・公共交通機関の充実化を通じて、自動車走行量を2015年比で2030年までに3分の1まで削減するとの目標掲げる（City of Oslo, 2020）。サンフランシスコ市は2030年までに、ロンドン市は2041年までに、市内の移動の80%を徒歩・自転車・公共交通による「持続可能な移動方法」へと転換するという目標を表明している（Electric Mobility Subcommittee, 2019; Mayer of London, 2018）。

このような背景には、徒歩・自転車による移動は「アクティブ移動（Active transportation）」と呼ばれ、健康促進などのメリットが報告されている点が挙げられる。運動による健康増進メリットは広く認知されているが、徒歩移動や自転車移動に着目してそのような健康メリットを検証する研究が増加傾向にある（Buchler et al., 2016）。アクティブ移動の促進には、本稿で取り上げた経済インセンティブの他にも、歩行者や自転車移動の安全性を高めるような道路整備などの取組が重要になる。

2.3.4. ゼロ・エミッション交通への転換

徒歩や自転車移動の他にも、バス・鉄道・カーシェアのZEVシフトを通じて、自動車からのモーダルシフト効果を高めていくような取組が見られる。

シカゴ市では、2040年までにバス車両をすべて電気バスに転換することを決定している (Patil, 2019)。2014年以降、公共交通バスとして電気バスの導入を開始しているが、すべてをすぐに電気バスへと移行することはせず、急速充電した場合のバッテリー劣化率や、シカゴ市のような寒冷地の屋外に夜間駐車した場合の信頼性などの評価を実施するとしている (Chicago Transit Authorityウェブサイト参照)。一方で、排ガス量の削減に向けて、2006年に調達した1,000台以上のディーゼル・バスが耐用年数 (12~14年) を迎えるタイミングで最新のディーゼル・バスに交換する等も行っており、これら最新のディーゼル・バスは次の買替タイミングで電気バスへと転換することで、2040年目標を達成する計画を立てている。

ロサンゼルス市で見られるようなBEVを活用したカーシェア (Shared-Use Mobility Center, 2019) では、内燃機関車の走行量削減によるCO₂・排ガス削減に加え、地域の交通手段の充実化といったメリットが期待される。BEVの初期費用は高い一方で燃料費の低減メリットは消費者に還元されるため、カーシェア事業者への補助など経済的支援が必要になるものと思われる。また、普段BEVやPHVに乗車する機会のない消費者に対して身近に感じてもらうような教育的効果も期待される。

なお、自動車走行をアクティブ移動やゼロ・エミッション交通の利用へと転換する取組は、すべての自動車移動を転換することはできない点に留意する必要がある。そのため、運輸脱炭素化に向けては他の取組との組み合わせを前提とした補完的な役割に留まるものと思われる。

2.4. 小括

欧米の自治体による取組事例の整理を通じて、以下の点を明らかにした。

第1に、規制的手法として、集合住宅・商業施設などを新築する際に、充電設備の設置に必要な分電盤・駐車場間の配線などを求めるEVレディ要件や、既築駐車場に対して、充電設備の設置検討を義務付ける条例が見られた。前者は将来的に改修で対応するよりも費用が抑えられる点を踏まえた措置であり、後者は設置費用が高くなる場合の免除規定も定められるといった配慮がなされている。

第2に、経済的手法として、充電設備の設置補助、自家用EVの購入補助、フリート車両の買替・廃車補助などが見られた。例えば、充電設備の設置補助については、期待される導入効果が高い地区の申請を優先的に採択するなど、限られた予算で効率的に運用することが求められる。

第3に、地域住民などとの対話型イベントやEV試乗会といった情報的手法、電気バスなど公共交通のゼロ・エミッション化に向けた交通インフラ整備、地域関係者間や自治体間での連携を目指す取組も見られた。自治体という立場を活かして地域の取組を活性化すべく、包括的な支援策を講じていくことが肝要である。

3. 考察

前章では、欧米の自治体による運輸脱炭素化に向けた取組の先進事例について内容や導入経緯をまとめた当所研究報告の概要を紹介した。翻って、わが国の自治体による取組として近年注目を集めるのが、2021年6月、国・地方脱炭素実現会議 (2021) が公表した「地域脱炭素ロードマップ」に端を発する地域脱炭素化に向けた動きであろう。ここでは、少なくとも100か所の脱炭素先行地域で、2025年度までに、脱炭素に向かう地域特性等に応じた先行的な取組実施の道筋をつけ、2030年度までに実行することとしている。加えて、2022年10月31日時点で797自治体が2050年ゼロカーボンシティを表明している (環境省, 2022)。

本章では、前章にて概要紹介した当所研究報告の発刊以降の国内動向もふまえて、今後わが国の自治体にとって有効と考えられる取組を2点述べる。

3.1. 中期目標を含む、包括的な運輸脱炭素ロードマップの策定

第1に有効と考えられるのが、2025年・2030年・2040年などの中期目標を含む、包括的な運輸脱炭素ロードマップの策定である。

2050年ゼロカーボンシティを表明する自治体の取組等を見ると、再エネ導入など部分的な取組のみに言及する一方で、地域の運輸部門に関する包括的な脱炭素取組に言及する自治体は少ない。

前章で紹介した米国コロンバス市のスマート・コロンバス・イニシアチブでは、米国運輸省等から資金を獲得し、2017年から地域連携プログラムや経済インセンティブ支給等を実施したのち、2050年カーボンニュートラル実現に向けた32の行動計画を取りまとめた気候行動計画の最終版を2021年に公表した（City of Columbus, 2021）。ここでの運輸部門の取組計画は包括的であり、①家庭利用向け乗用車のZEVシフト、②公用車・社用車のZEVシフト、③トラック等中型・大型車のZEVシフト、④高速鉄道の整備、⑤運転手のみが乗車する一人乗り車両（Single-occupancy vehicle）の走行距離の削減、⑥公共交通バスの旅客距離（Passenger miles travelled）への転換、⑦アクティブ移動の支援に向けた交通インフラ整備、の7分野に言及している。

加えて、これら各分野の中期目標や具体的取組内容も明示されている①の「家庭利用向け乗用車のZEVシフト」を例に挙げると、2025年にEVレディ建物条例を施行、2030年に市登録自動車の15%をゼロ・エミッション化、2050年に市登録自動車の100%をゼロ・エミッション化、との中期目標や取組が記されている。

わが国においても、2025年・2030年・2040年などの中期目標を含む包括的な運輸脱炭素ロードマップを各自治体が策定することで、2050年ゼロカーボンシティの実現に実効性を持たせることができるものと思われる。その際には、本稿で紹介したような欧米の自治体による先進事例も検討材料となるだろう。

3.2. 運輸脱炭素化に向けた条例の検討

第2に、前述のようなロードマップを策定する際に、自治体が実行可能で、早期対応が求められる運輸脱炭素化に向けた取組については積極的に採用を検討していくべきである。

2050年ゼロカーボンシティを表明する自治体の取組等を見ると、目標・計画を実行に移す手段として関連条例の策定・改正を採用する自治体が複数見られ、その際に欧米の先進事例で見られた取組を積極的に採用検討することが考えられる。

例えば、欧米の自治体で採用事例が増えている新築建物向けEVレディ基準は、建物新築時に一定程度の充電設備の設置や、充電設備の設置に必要な配線・配管等の整備を要求するものであり、将来的に既築建物の改修で対応するよりも費用が抑えられる点を踏まえた措置である。国内では、2022年9月に東京都（2022）が「カーボンハーフ実現に向けた条例制度改正の基本方針」を公開しており、延床面積2,000m²以上の大規模新築建物や、それ未満の中小規模新築建物を対象に、充電設備の設置要件等を導入することが示されている⁵⁾。このような動きが他の国内自治体にも波及していくことが望まれる。

参考文献

American Electric Power. (2021) Plugged in to EVs. September 24, 2021.

<https://www.aep.com/news/stories/read/7261/Plugged-in-to-EVs>

Bay Area Air Quality Management District, (2021) “Charge!” December 21, 2021.

https://www.baaqmd.gov/-/media/files/strategic-incentives/tfca/charge/fye-2022-charge-program-guidance_12032021-pdf.pdf?la=en

Beev. Les voitures électriques à Paris. アクセス日：2022年12月22日。

<https://www.beev.co/voitures-electriques/voiture-electrique-paris/>

Bernard, M. R., Hall, D., and Lutsey, N. (2021) Update on Electric Vehicle Uptake in European Cities. The International Council on Clean Transportation.

<https://theicct.org/publication/update-on-electric-vehicle-uptake-in-european-cities/>

Bernard, Y., Miller, J., Wappelhorst, S., and Braun, C. (2020) Impacts of the Paris low-emission zone and implications for other cities. The International Council on Clean Transportation.

<https://theicct.org/publication/impacts-of-the-paris-low-emission-zone-and-implications-for-other-cities/>

5) 具体的には、延床面積 2,000m² 以上の大規模新築建物では、①5 台以上の駐車場区画を有する専用駐車場では区画の 20%以上（上限 10 台）に充電設備を実装するとともに駐車場区画の 50%以上（上限 25 台）に配管等を整備する、②10 台以上の駐車場区画を有する共用駐車場では 1 台以上（上限なし）の充電設備を実装するとともに区画の 20%以上（上限 10 台）に配管等を整備するとしている。また、延床面積 2,000m² 未満の中小規模新築建物では、①駐車場付き戸建住宅 1 棟ごとに充電設備用の配管等を整備する、② 10 台以上の駐車場区画を有する集合住宅・非住宅では 1 台以上の充電設備の実装とともに区画の 20%以上に充電設備用の配管等を整備すること等が述べられている。

- Buehler, R., Gotschi, T. and Winters, M. (2016) Moving Toward Active Transportation: How Policies Can Encourage Walking and Bicycling. Active Living Research.
https://activelivingresearch.org/sites/activelivingresearch.org/files/ALR_Review_ActiveTransport_January2016.pdf
- CAP Working Group. (2021) Columbus Climate Action Plan Working Group Sessions Slides – Sept. 2021.
<https://www.columbus.gov/sustainable/cap/>
- Chicago Department of Transportation. (2020) Drive Clean Truck. Presentation on April 30, 2020.
https://www.cmap.illinois.gov/documents/10180/1109463/CDOT+Drive+Clean+Truck_2020_02_24.pdf/e07c1759-d859-a16e-ff79-2b26a08f578e
- Chicago Transit Authority. Electric Buses. アクセス日：2022年12月22日。
<https://www.transitchicago.com/electricbus/>
- City of Columbus. (2021) Columbus Climate Action Plan. December 2021.
<https://www.columbus.gov/sustainable/cap/>
- City of Oslo. (2020) Climate Strategy for Oslo towards 2030. August 2020.
https://www.klimaoslo.no/wp-content/uploads/sites/88/2020/09/Klimastrategi2030-Kortversjon-ENG_2608_enkeltside.pdf
- Electric Mobility Subcommittee (2019) Electric Vehicle Roadmap for San Francisco. June 2019.
https://sfenvironment.org/sites/default/files/fliers/files/sfe_tr_ev-roadmap.pdf
- Electrify America. (2021) Electrify America Announces \$200 Million Additional Investment for Zero Emission Vehicle Infrastructure and Education in California; Reveals Long Beach-Wilmington Community as Second “Green City” Investment. May 4, 2021.
<https://media.electrifyamerica.com/en-us/releases/140>
- Henderson, A. (2020) In Chicago, ‘charging deserts’ part of racial divide on electric vehicles. Energy News Network. December 14, 2020.
<https://energynews.us/2020/12/14/115idwest/in-chicago-another-roadblock-for-would-be-ev-drivers-charging-deserts/>
- Los Angeles Department of Water & Power. Used Electric Vehicle Rebate Program. アクセス日：2022年12月22日。
https://www.ladwp.com/ladwp/faces/ladwp/residential/r-savemoney/r-sm-rebatesandprograms/r-sm-rp-usedev?_afWindowId=1b02r32q12_1&_afLoop=589634878379456&_afWindowMode=0&_adf.ctrl-state=1b02r32q12_4
- Maddox, T. (2017) How Columbus, Ohio Parlayed \$50 Million into \$500 Million for a Smart City Transportation Network. Tech Republic, May 10, 2017.
<https://www.techrepublic.com/article/how-columbus-ohio-parlayed-50-million-into-500-million-for-a-smart-city-transportation-network/>
- Mayer of London. (2018) Mayor’s Transport Strategy. March 2018.
<https://www.london.gov.uk/sites/default/files/mayors-transport-strategy-2018.pdf>
- MRA elektrisch. アクセス日：2022年12月22日。
<https://www.mra-e.nl/>
- Münzel, C., Plötz, P., Sprei, F., and Gnann, T. (2019) How large is the effect of financial incentives on electric vehicle sales? – A global review and European analysis, Energy Economics, Volume 84, 104493.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104493>
- NYC Clean Trucks Program. Program Success. アクセス日：2022年12月22日。
<https://www.nycctp.com/program-success/>
- Oslo kommune. (2019) Kartlegging av ladebehov i Oslo kommune. Bymiljøtaten. November 28.
<https://www.oslo.kommune.no/getfile.php/13354701-1576848117/Tjenester%20og%20tilbud/Gate%2C%20transport%20og%20parkering/Parkering/Kartlegging%20av%20ladebehov%20i%20Oslo%20kommune.pdf>
- Patil, M. (2019) Chicago Commits to 100 Percent Clean Energy. Sierra Club. April 10, 2019.
<https://www.sierraclub.org/sierra/chicago-commits-100-renewable-clean-energy>
- San Francisco Board of Supervisors. (2019) Ordinance 0244-19. October 22, 2019.
<https://sfbos.org/sites/default/files/o0244-19.pdf>
- San Jose Department of Transportation. (2019) San Jose Electric Mobility Roadmap. December 2019.
<https://sanjose.legistar.com/View.ashx?M=F&ID=7965077&GUID=6055F811-99D3-4052-BF9E-6B999ABFF7D0>
- Shared-Use Mobility Center. (2019) Electric and Equitable: Learning from the BlueLA Carsharing Pilot. April 2019.
https://learn.sharedusemobilitycenter.org/wp-content/uploads/NewFile_SUMC_04.15.19.pdf
- Slaymaker, A and Marbury, D. (2020) Acceleration Partner Program Final Report. Smart Columbus. March 2020.
https://d2rfd3nxvhnf29.cloudfront.net/2020-05/Acceleration%20Partner%20Program%20Final%20Report%20_compressed.pdf
- Smart Columbus. (2019) Impact Report: AEP Ohio’s Role in Quadrupling EV Charging Infrastructure in Columbus. August 2019.
https://d2rfd3nxvhnf29.cloudfront.net/2019-08/FINALAEP_ImpactReport81219.pdf
- von Krogh, B. J. (2018) City’s Transit-First Policy Turns 45. San Francisco Municipal Transportation Agency. March 23, 2018.
<https://www.sfmta.com/blog/citys-transit-first-policy-turns-45>
- Wee, S., Coffman, M., and La Croix, M. (2018) Do electric vehicle incentives matter? Evidence from the 50 U.S. states, Research Policy, Volume 47, Issue 9, pp. 1601-1610.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.05.003>
- 環境省「地方公共団体における2050年二酸化炭素排出実質ゼロ表明の状況」, 2022年10月31日時点。
<https://www.env.go.jp/policy/zerocarbon.html>
- 国・地方脱炭素実現会議 (2021)「地域脱炭素ロードマップ」, 2021年6月9日。
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/pdf/20210609_chiiki_roadmap.pdf
- 国土交通省「運輸部門における二酸化炭素排出量」, 2022年7月5日更新。

https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
首相官邸(2021)「第二百四回国会における菅内閣総理大臣施政方針演説」, 2021年1月18日.
https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2021/0118shoshinhyomei.html
東京都(2022)「カーボンハープ実現に向けた条例制度改正の基本方針」, 2022年9月9日.
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/climate/solar_portal/program.files/220909taiyoko.pdf
日本自動車工業会(2021)「カーボンニュートラルを目指す自工会」, 2021年10月29日.
<https://blog.jama.or.jp/?p=655>
向井登志広(2022)「運輸脱炭素化に向けた取組の検討—欧米の自治体の先進事例とわが国への示唆—」, 電力中央研究所報告 SE21005.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=SE21005>

向井 登志広 (Toshihiro Mukai)
電力中央研究所 社会経済研究所

第4部
産業部門

産業部門における電化バリアと課題

—国内製造業を対象としたアンケート調査—

Barriers and Opportunities for Industrial Electrification: Survey to Manufacturing Industry in Japan

キーワード：産業電化、産業用ヒートポンプ、電気加熱

向井 登志広

要旨

産業部門の脱炭素化を進めるうえで、熱の利用に伴うCO₂排出量をどのように削減していくべきかについて検討する必要がある。具体的な対策として、200℃以下の低温域におけるヒートポンプへの転換や、100～1500℃付近までの中高温域における電化などが選択肢として議論されているが、これら産業部門の電化に向けては様々なバリアへの対応が求められる。産業部門の電化バリアは、定性的に言及される場合が多いが、これら諸課題への対応策を検討するうえで、優先度の高い課題を特定することは有用である。そこで本稿では、工場内での熱供給設備や電化バリアの実態を定量的に把握することを目的に、国内製造業企業を対象にアンケート調査を実施した。その結果、特に中小企業の工場での脱炭素化や電化に向けた取組の検討・実施の遅れや、電気を利用する熱供給設備への認知不足が確認された。加えて、電気を利用する熱供給設備を認知している工場において導入が難しい理由を尋ねたところ、「設備費用が高い」との回答が最も多く、続いて「追加導入場所がない」との回答も多かった。さらに、未導入工場におけるエンジニアリング知見の不足、長い投資回収年数や電気料金増への懸念、誘導加熱など電力消費の大きい熱供給設備の追加導入による受変電設備の増強コストなどが電化バリアとなっている様子が観察された。これらの実態を踏まえて、今後取り組むべき課題について整理する。

1. はじめに

産業部門の脱炭素化に向けて、熱の利用に伴うCO₂排出量をどのように削減していくべきかについて検討する必要がある。例えば、経済産業省（2022）による「クリーンエネルギー戦略：中間整理」では、産業部門における温度帯別熱需要を踏まえた今後の対応の方向性として以下が述べられ、200℃以下の低温域におけるヒートポンプへの転換や100～1,500℃付近までの中高温域における電化などが選択肢として示されている。

- 脱炭素化を進めるうえで、熱利用効率化・未利用熱活用等、熱の有効活用は引き続き重要。
- 低温域の蒸気需要については、ヒートポンプへの転換が有力な選択肢だが、適用温度帯が限定的である点や、事例の横展開が進んでいない点、設備費用が高額である点などが課題となっているため、これらの課題を整理したうえで、高効率ヒートポンプ開発・実証（温度域の拡大）や、導入拡大に向けた設備投資支援を行う。
- 一方で、ヒートポンプの導入が困難である中高温域については、中長期的な電源構成やコスト等を考慮の上、電化や非化石燃料への転換などのうち適切な選択肢に対して、必要な支援策を講じる。

また、環境省（2021）による「中小規模事業者のための脱炭素経営ハンドブック」では、中小規模事業者の視点から、削減計画策定のフローを以下の通り整理している。

- 最初の STEP1 では、都市ガスや重油等を利用している主要設備に着目した上で、これらの電化や、バイオマス・水素等への燃料転換など、長期的なエネルギー転換の方針を検討します。
- 短中期的な省エネ対策の洗い出しは、次の STEP2 で行います。STEP1 で検討したエネルギー転換の方針を前提に、これを補完する形で省エネ対策を検討することになります。

- ここまでで、自社の温室効果ガス削減余地を概ね把握できることとなります。そこで STEP3では、温室効果ガス削減目標の達成に向けた再エネ電気調達に必要な量を明確にするとともに、自社に適した再エネ電気の調達手段を検討します。
- 最後の STEP4では、対策の実施に必要な投資額が財務（キャッシュフロー）に及ぼす影響を分析しながら、最終的に実施する削減対策を精査し、削減計画としてとりまとめます。

1.1. 産業部門の電化バリア

このように、産業部門の熱需要の脱炭素化に向けては、低温域におけるヒートポンプへの転換や中高温域における電化など、電気を利用する熱供給設備への転換が選択肢となる。しかしながら、産業部門の電化には様々なバリアが指摘されている。例えば、Wei et al. (2019) は産業部門の電化バリアに言及した既往文献をレビューし、以下9点のバリアに言及している。ここでは、エンドユーザである工場のほか電力会社や政府などのステークホルダーが直面する技術的・経済的・組織的なバリアが含まれている。

- ① 燃料費や運転コスト（自家用燃料や天然ガスコストが低く、電化はしばしば運転コスト上昇に）
- ② 燃料転換に係る資本コスト
- ③ 特定の燃料を優遇する規制・政策
- ④ 電力供給インフラの制約や増強コスト
- ⑤ 産業界のリスク回避傾向
- ⑥ 電気利用設備の利用可能性、また、生産プロセスの再デザインやプロセス統合に必要なエンジニアリング知見や能力の不足
- ⑦ 産業界の多様性
- ⑧ 高温域業種における高いエネルギーコストと低い利益率
- ⑨ 再生可能エネルギー電力の間欠性への対応

1.2. 目的

これら産業部門の電化バリアは、定性的に言及される場合が多いが、これら課題への対応策を検討していくうえで、優先度の高い課題を特定することは有用である。そこで本稿では、国内製造業企業を対象に実施したアンケートを分析し、工場内での熱供給設備や電化バリアの実態を定量的に把握することを目的とする。2章ではアンケート調査概要を、3～5章では、アンケート回答の分析結果として、回答工場の脱炭素化に向けた取組状況、熱供給設備の導入状況、電化バリアの集計結果を示す。さらに6章では、アンケート分析結果を踏まえ、わが国の電化バリアの実態や今後の課題について考察する。

2. 調査概要

本アンケートでは、エネルギー使用量が多い事業所について実態把握するため、「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」（省エネ法）において、特定事業者・特定連鎖化事業者に区分されている事業者の主な事業所、および、第一種・第二種エネルギー管理指定工場等に指定されている事業所を対象とした¹⁾。

アンケートは、2021年10月15日から11月5日の間に実施した。郵送先は、特定事業者・特定連鎖化事業者、および、第一種・第二種エネルギー管理指定工場等に指定されている事業所名から、郵送先情報が特定可能な事業所6,016件へ郵送した。回答依頼票には、工場のエネルギー管理者から回答を得ることを目的に「工場のエネルギー利用を管理する方（エネルギー管理統括者・エネルギー管理企画推進者・エネルギー管理

1) 「特定事業所」は事業者全体のエネルギー使用量（原油換算値）が合計1,500kL/年度以上、「特定連鎖化事業者」はフランチャイズチェーン事業等の本部とその加盟店を含む事業全体のエネルギー使用量（原油換算値）が合計して1,500kL/年度以上の場合に指定される。また、「第一種エネルギー管理指定工場等」は個別の工場や事業場等の単位でエネルギー使用量が3,000kL/年度以上である場合に、「第二種エネルギー管理指定工場等」は個別の工場や事業場等の単位でエネルギー使用量が1,500～3,000kL/年度である場合に指定される。

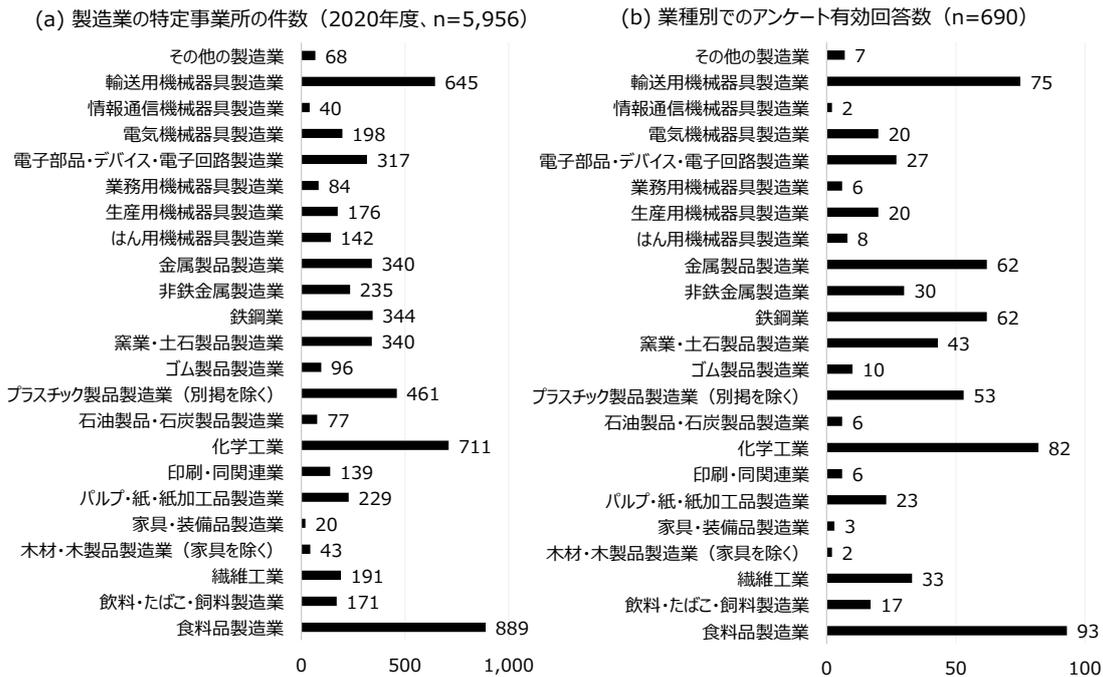


図1 業種別の製造業の特定事業所数とアンケート有効回答数の比較

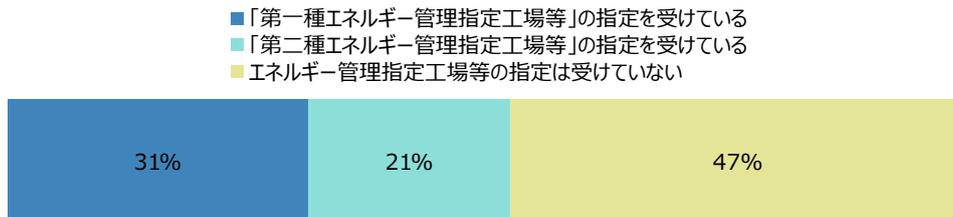


図2 回答工場におけるエネルギー管理指定工場等の指定状況²⁾

者・エネルギー管理員など)」による回答を依頼する文章を掲載した。

アンケートでは、事業者内のうち、エネルギー消費量の多い主な工場について回答するよう依頼し、897件(回答率14.9%)の回答を得た。本稿では、そのうち、2020年度において特定事業所・特定連鎖化事業者、および、第一種・第二種エネルギー管理指定工場等に指定されていると回答した事業所690件を有効回答として分析対象にした。アンケート回答者の役割(複数回答可)は、エネルギー管理担当が92%、生産管理が14%、その他が9%であり、おおむね依頼通りにエネルギー管理担当から回答を得られていることを確認した。

なお、本稿で分析対象とする事業所は、本アンケートへの協力をしていることから、事業所全体と比べて脱炭素化に向けた取組意向が高い可能性がある点に留意されたい。

2.1. 回答工場の属性

図1に、資源エネルギー庁がウェブサイトで公開する「省エネ法定期報告の分析・集計データ」の2020年度における製造業の業種別の特定事業所の件数を、アンケート有効回数(件)の業種別分布と比較した結果を示す。特定事業所数の多い食品製造業、化学工業、輸送用機械器具製造業などの業種において、アンケー

2) 小数点第一位の四捨五入により、合計が必ずしも100%とはならない点に留意。以降の図も同様。

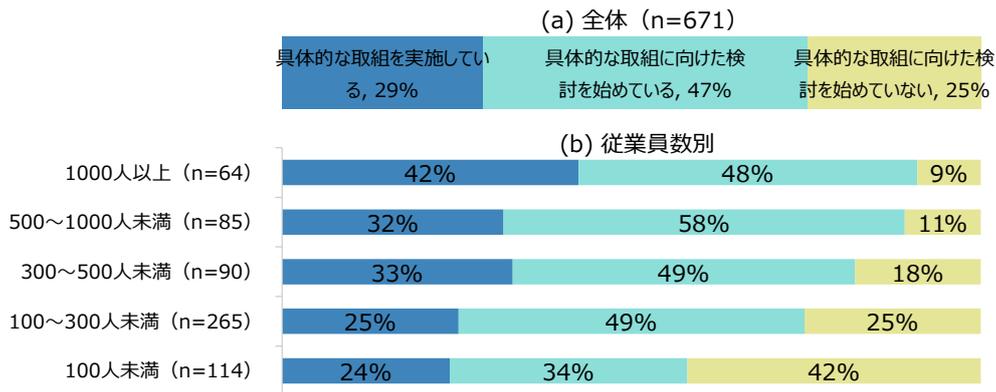


図3 脱炭素化に向けた取組状況

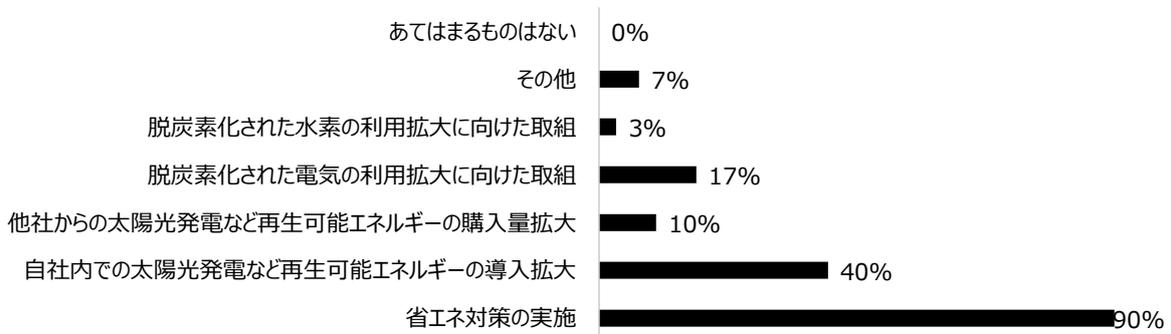


図4 脱炭素化に向けた取組内容

ト有効回答も多い傾向が観察される。

図2に、省エネ法に基づく事業者・事業所の指定区分状況を示す。アンケート回答工場のうち、31%が第一種エネルギー管理指定工場等、21%が第二種エネルギー管理指定工場等によるものである。

3. 脱炭素化に向けた取組状況

本章以降では、アンケートデータの分析結果について述べる。本章ではまず、アンケート回答工場による脱炭素化に向けた取組状況に関する傾向を把握する。

図3(a)に、回答工場による脱炭素化に向けた取組状況を示す。76%の回答工場が、工場の脱炭素化に向けた「具体的な取組を実施している」、または、「検討を開始している」と回答している。さらに、図3(b)に、工場の従業員数別での脱炭素化に向けた取組状況を示す。従業員数の少ない工場ほど、脱炭素化に向けた具体的な取組の検討や実施が遅れている様子が観察された。人材などのリソースの不足等が原因で脱炭素化に向けた取組が進んでいないものと考えられる。

図4に、脱炭素化に向けた「具体的な取組を実施している」または「検討を開始している」と回答した工場における、具体的な取組の内容を示す。回答工場の90%が「省エネ対策の実施」と回答しており、次いで「自社内での太陽光発電など再生可能エネルギーの導入拡大」が40%と多い。一方で、「脱炭素化された電気の利用拡大に向けた取組」については、17%に留まった。

さらに、本稿の主眼である産業電化に関連する「脱炭素化された電気の利用拡大に向けた取組」について属性別での傾向を観察すると、図5に示すように、従業員数の少ない工場ほど、取組の検討・実施が遅れ

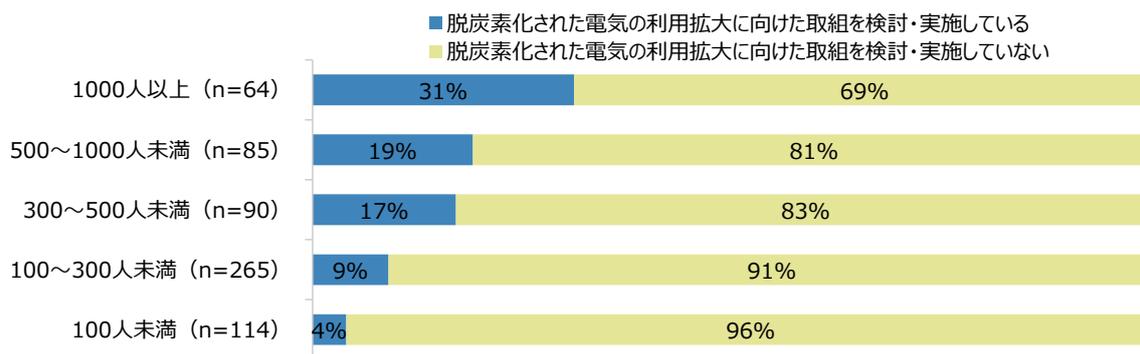


図5 脱炭素化された電気の利用拡大に向けた取組（従業員数別）

ている様子が観察された。脱炭素化に向けた取組の検討・実施が遅れている工場では、電化に向けた取組の検討・実施も遅れているものと考えられる。

4. 熱供給設備の導入実態

本章では、熱供給設備の導入・認知状況や、導入工場における満足度について集計した結果について述べる。

4.1. 導入・認知状況

図6に、熱供給設備全般の認知・導入状況についての回答結果を示す。回答工場のうち、都市ガスや重油等を利用する熱供給設備として導入事例が多いのは蒸気ボイラ（73%）、燃焼加熱設備（47%）、温水ボイラ（21%）であった。また、電気を利用する熱供給設備として導入事例が多いのは、抵抗加熱方式³⁾の電気加熱（40%）、圧縮式ヒートポンプ・冷凍機⁴⁾（38%）、誘導加熱方式⁵⁾の電気加熱（21%）であった。

加えて、「その機器を知らない」との回答は、蒸気ボイラの場合は2%程度と極めて低いものに対して、圧縮式ヒートポンプ・冷凍機で13%、電気加熱設備では20~33%と高めであり、相対的に、電気を利用する熱供給設備への認知度が低い点を確認された。

なお、「導入している」との回答が一定程度確認された設備については、次節にて、設備に対する満足度の比較分析を行う。加えて、「知っているが導入していない」との回答については、①導入していないが今後の導入計画・導入希望がある、②導入が難しい理由がある、③該当する熱需要がなく設備が必要ない、といった事例が含まれるものと考えられる。この点に関する分析結果は、電気を利用する熱供給設備に着目して5章にて詳述する。

4.2. 満足度

図7に、「導入している」との回答が多かった6種類の熱供給設備（蒸気ボイラ、温水ボイラ、燃焼加熱設備、圧縮式ヒートポンプ・冷凍機、誘導加熱、抵抗加熱）について、導入設備の満足度について得られた回答を示す。なお、圧縮式ヒートポンプについては、参考情報として、供給温度帯が51~100℃のみの導入事例についても別途集計した結果を示す。

満足度は、設備導入時に想定した省エネ効果・生産性向上効果や投資回収年数が期待通り実現したか、

3) 抵抗加熱方式とは、物質に電流を流した際に発生するジュール熱を用いて被加熱物を加熱する方式。

4) 圧縮式ヒートポンプ・冷凍機とは、圧縮機を用いて冷媒を昇温して熱を供給する方式を採用するヒートポンプ・冷凍機。

5) 誘導加熱方式とは、コイルに交流電流を流すことで発生する電磁場の近くに導電物体を置くことで渦電流を発生させ、導電物体の抵抗により発生する熱を用いて被加熱物を加熱する方式。

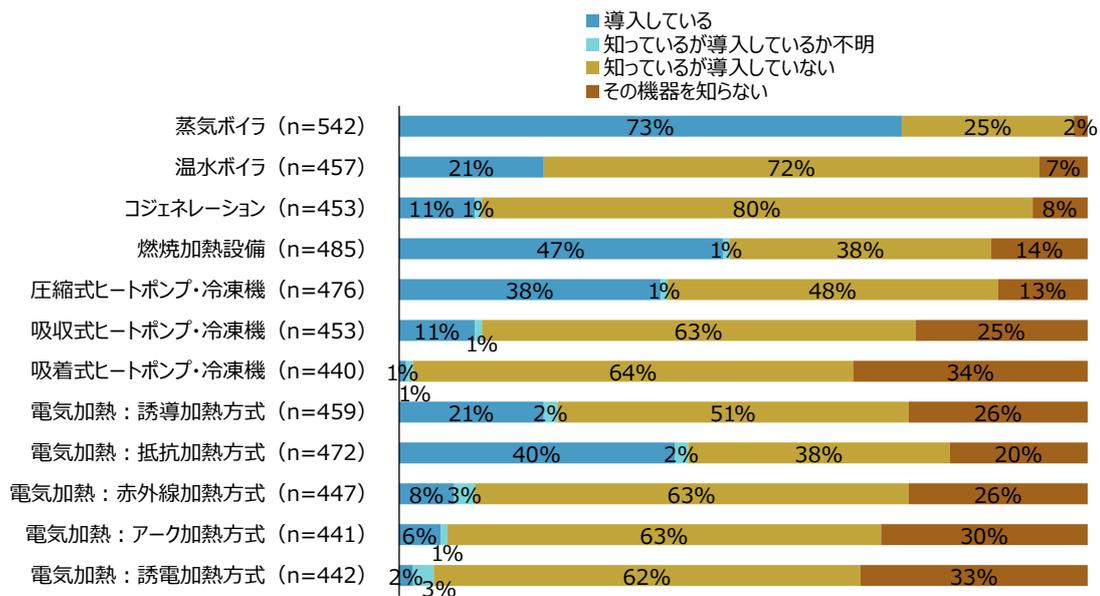


図6 熱供給設備の導入・認知状況

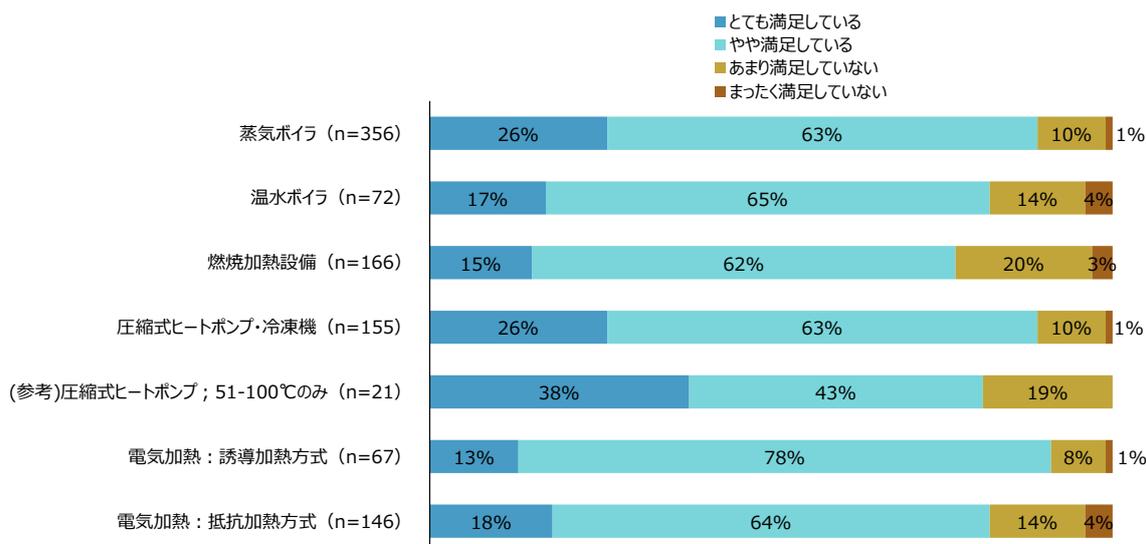


図7 熱供給設備に対する満足度

不具合発生頻度やメンテナンス費用が許容範囲内か、といった複合的な要因が影響しているものと考えられる⁶⁾。図7に示す熱供給設備別での「とても満足している」「やや満足している」の割合を見ると、圧縮式ヒートポンプ・冷凍機、誘導加熱、抵抗加熱といった産業電化に分類される設備は8-9割であった。これは、蒸気ボイラ、温水ボイラ、燃焼加熱と比べて同程度の満足度であると言える。

6) 本アンケートの事前検討のため、筆者は、2021年2~3月に電気加熱設備を導入済みの工場20件を対象にオンライン・インタビュー調査を実施した。その際、電化に伴う初期費用は従来設備よりも割高である一方で、生産時間・炉昇温時間・メンテナンス頻度等の削減による人件費・機械稼働費減により、製造原価減や投資回収年数短縮を実現する電化事例も見られ、これら生産性メリットが熱供給設備への満足度に影響している様子が観察された。

5. 導入阻害要因

前章では、熱供給設備の導入・認知状況や満足度について集計した結果について述べた。その中で、図6において、各設備について「知っているが導入していない」との回答が一定割合で観察された。ここには、電気を利用する熱供給設備の導入を阻む諸要因が部分的に影響しているものと考えられる。本章では、電気を利用する熱供給設備に着目して、今後の導入計画、および、導入が難しい理由の深掘分析を行う。

5.1. 今後の導入計画

図8に、圧縮式ヒートポンプ・冷凍機、誘導加熱、抵抗加熱について、今後の導入計画に関する回答を集計した結果を示す。ここでは、導入事例の有無による電化バリアの違いを観察するため、図6において各設備を「導入している」あるいは「知っているが導入していない」と回答した工場のみを集計対象とした。集計の結果、設備の種類によらず共通の傾向が観察された。すなわち、すでに設備を「導入している」工場のほうが、「知っているが導入していない」工場と比べて、「導入計画がある」「導入検討したい」との回答が多めであった。詳細には、圧縮式ヒートポンプ・冷凍機では未導入工場の場合21%であるのに対して62%が、誘導加熱では未導入工場の場合5%であるのに対して53%が、抵抗加熱では未導入工場の場合6%であるのに対して54%が、「導入計画がある」「導入検討したい」と回答した。

なお、「導入に関心がない」と回答する工場は、追加的な導入余地がない、あるいは、そもそも工場内の熱需要が少ない場合が考えられる。

5.2. 導入が難しい理由

次に、電気を利用する熱供給設備の「導入が難しい」と回答した工場について、その理由を尋ねた結果を図9に示す⁷⁾。ここでは、各設備の導入経験の有無による傾向差の観察のため、①各設備を知っているが導入しておらず今後の導入も難しい工場の回答と、②各設備を導入しているが今後の導入が難しい工場の回答を個別に集計した。その結果、次の6点が観察された。

第1に、熱供給設備の種類や導入経験の有無を問わず、「設備費用が高い」との回答が最も多かった。また、設備に関する情報をより多く有していると考えられる導入済み工場のほうがその傾向が高めに出現していた。熱供給設備の電化に向けて、多くの工場が高い設備費用をバリアとして認識している様子が確認された。

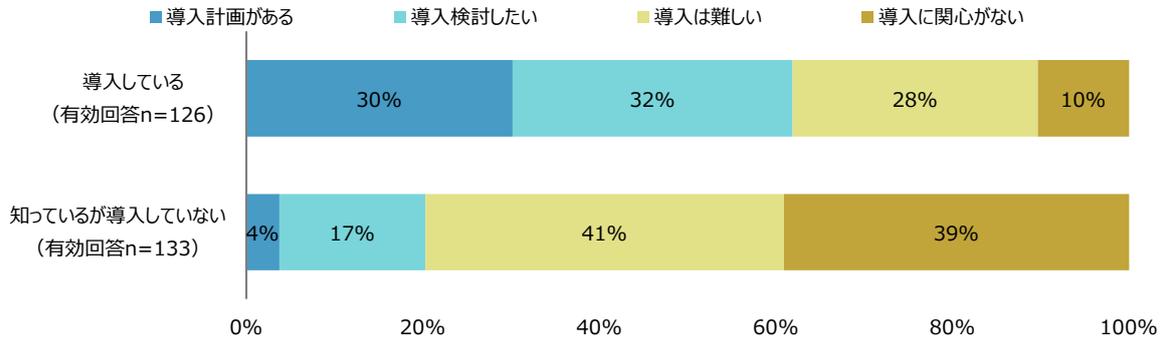
第2に、熱供給設備の種類や導入経験の有無を問わず、「追加導入場所がない」との回答も多かった。なお、導入済み工場のほうが「追加導入場所がない」との回答が多めであるが、これは、導入済み工場では追加的な電化ポテンシャルが限定的であるためと考えられる。

第3に、「導入に向けた社内エンジニアリング人材の不足」や「既存生産設備の変更に対する不安」など、エンジニアリングに関するバリアが導入を阻害している様子も観察された。なお、設備別や導入経験の有無による明確な傾向差は見られなかった。設備別に求められるエンジニアリングの知見は異なるため、エンジニアリング関連のバリアの詳細把握のためには、特定の設備・用途を対象とした詳細調査を別途行う必要がある。

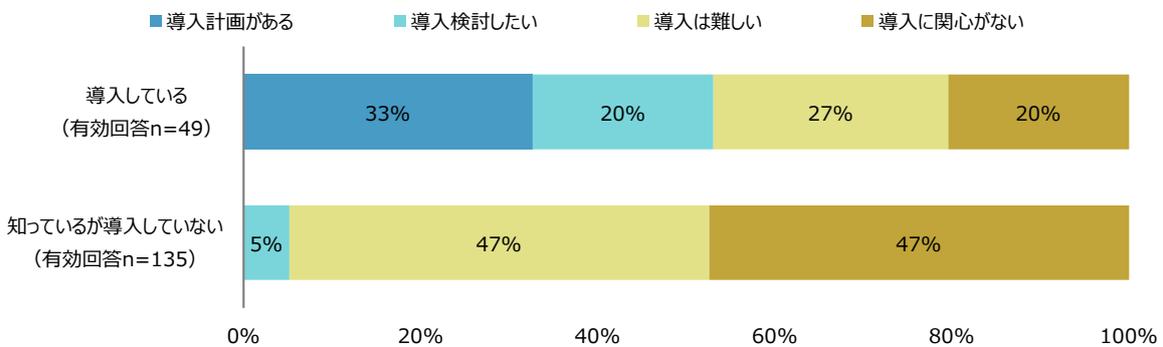
第4に、設備運用時のコストに関する理由を回答する工場も少なからず見られた。圧縮式ヒートポンプ・冷凍機では「投資回収年数が長い」との回答が、誘導加熱や抵抗加熱では「電気料金が高い」「デマンド上昇による電気料金増を避けたい」との回答が多めであった。誘導加熱や抵抗加熱では、特に電力消費量増への懸念が見られた。

7) 本アンケートの事前検討のために実施したオンライン・インタビュー調査では、電気加熱設備を初めて導入した際の懸念として、①運用保守（例：新たな生産ラインの生産品質や部品故障対応に関する現場の従業員の不安・不満があった）、②情報不足（例：競合他社が導入したという話を聞かないため不安であった）、③費用面（例：電気を利用する熱供給設備の導入により生産性が大幅に向上したが他の燃焼設備すべてを電化すると高額な設備投資が必要なため実施できていない）、などが電化バリアとして観察された。これらの知見を踏まえ、導入が難しい理由の選択肢を設計した。

(a) 圧縮式ヒートポンプ・冷凍機



(b) 電気加熱：誘導加熱方式



(c) 電気加熱：抵抗加熱方式

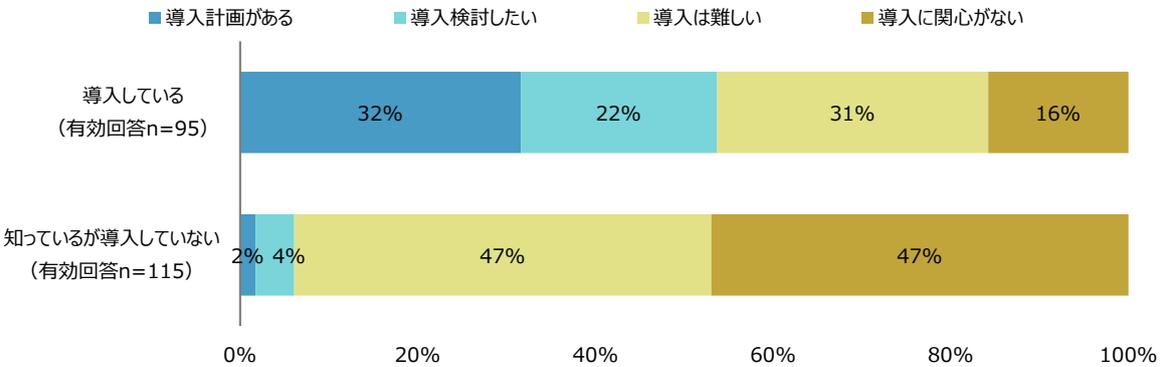


図8 今後の導入計画

第5に、特に誘導加熱の導入工場において「受変電設備の増強に伴う設備費用が高い」が相対的に多めの傾向が観察された。電気を利用する熱供給設備のなかでも誘導加熱炉などの電力消費の大きい設備では、受変電設備の増強コストが設備追加導入のバリアとなっている可能性がある。

最後に、熱供給設備の種類に依らず「熱供給技術として未成熟である」、「省エネ効果が低い」、「省CO₂効果が低い」といった回答は少なく、これらは産業部門の電化に向けた阻害要因とはなっていない点が確認された。

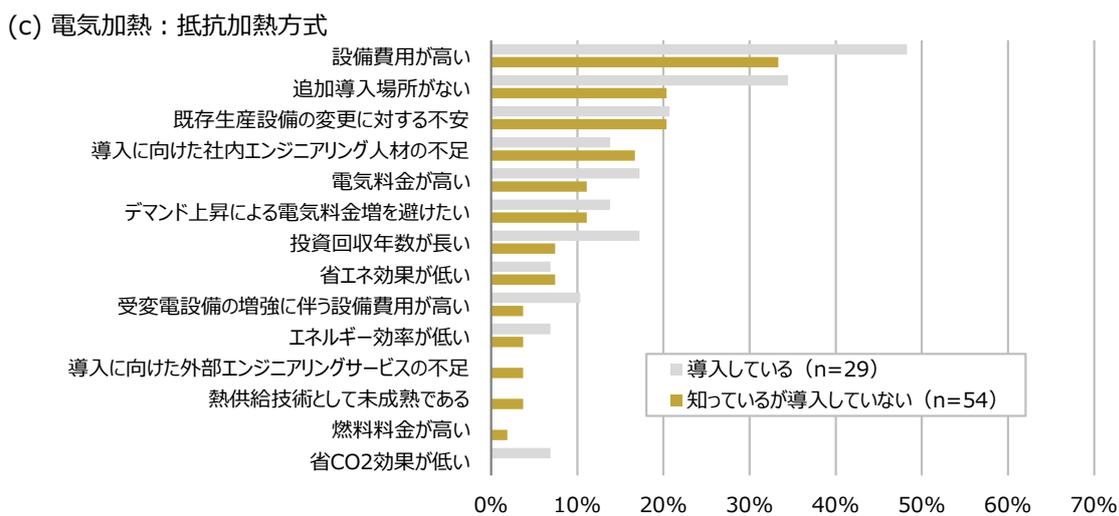
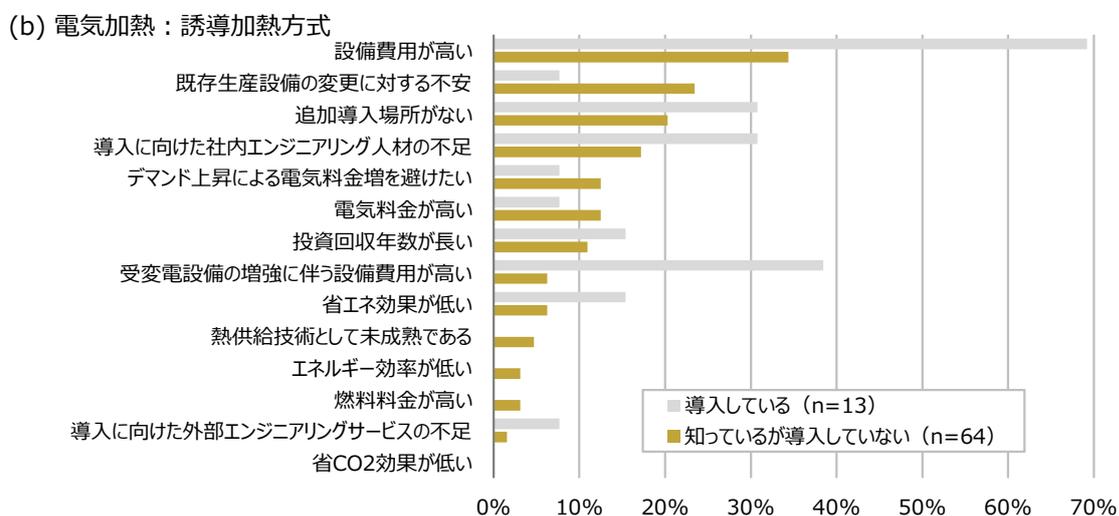
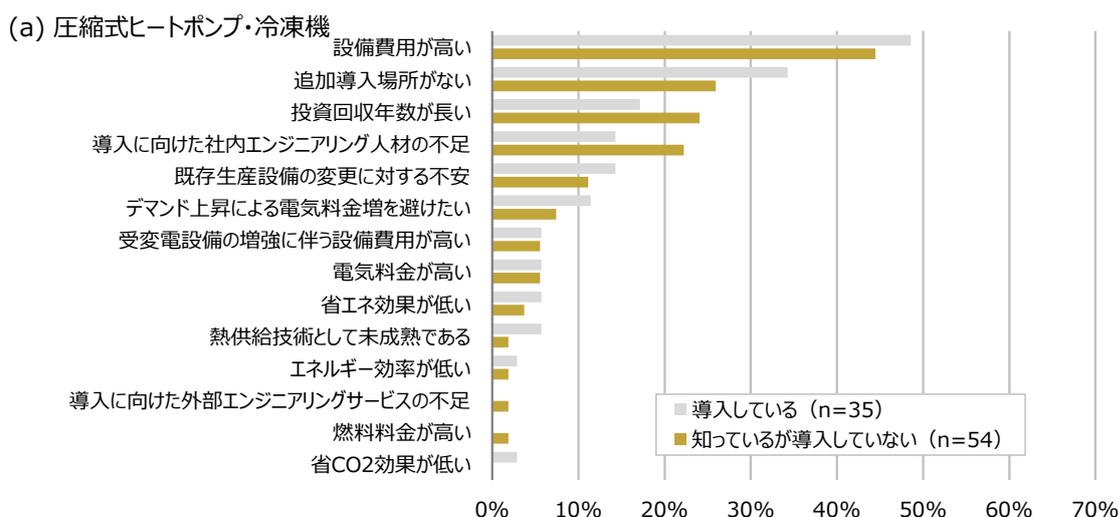


図9 導入が難しい理由

6. 考察

6.1. 電化バリアの実態

アンケートの結果から、産業部門の電化バリアとして以下のような実態が観察された。

第1に、脱炭素化に向けた取組を検討・実施している工場は76%であったが、具体的な取組内容として省エネ対策に留まる工場が多く、電化に向けた取組を検討・実施する工場は17%に留まった。また、従業員数の少ない工場ほど脱炭素化・電化に向けた取組の検討が遅れている実態が観察された。

第2に、熱供給設備に対する認知度を尋ねたところ、「その機器を知らない」との回答は蒸気ボイラの場合2%程度と極めて低いものに対して、圧縮式ヒートポンプ・冷凍機では13%、電気加熱設備では20～33%と高かった。都市ガスや重油等を利用する熱供給設備と比べて、電気を利用する設備の認知度が相対的に低いという課題が確認された。

第3に、圧縮式ヒートポンプ・冷凍機、誘導加熱方式の電気加熱、抵抗加熱方式の電気加熱を認知している（「導入している」または「知っているが導入していない」と回答している）工場について、今後の導入が難しい理由について尋ねたところ、以下の傾向が観察された。

- 設備種類や導入有無に依らず、最も多かったのは「設備費用が高い」との回答であった。
- 設備種類や導入有無に依らず、2番目に多かったのは「追加導入場所がない」との回答であった。
- 「導入に向けた社内エンジニアリング人材の不足」や「既存生産設備の変更に対する不安」など、エンジニアリングに関するバリアが導入を阻害している様子も観察された。
- 運用コストに関する要因を理由として回答する工場も少なからず見られた。圧縮式ヒートポンプ・冷凍機では「投資回収年数が長い」、誘導加熱や抵抗加熱では「電気料金が高い」「デマンド上昇による電気料金増を避けたい」などである。
- 誘導加熱炉などの電力消費の大きい熱供給設備の導入工場では、受変電設備の増強コストが設備追加導入のバリアとなっている可能性が示唆された。
- 電気を利用する熱供給設備に対する満足度は、都市ガスや重油等を利用する設備と同程度に高く、また、「熱供給技術として未成熟である」、「省エネ効果が低い」、「省CO₂効果が低い」といった要因を導入阻害要因として回答する工場は少ない点を確認された。

6.2. 電化バリアの解消に向けた今後の課題

これらの実態を踏まえて今後取り組むべき課題について述べる。

第1に、「設備費用が高い」との課題への対応策を検討する必要がある。例えば、産業用ヒートポンプを対象とした「先進的省エネルギー投資促進支援事業費補助金」では、設備費のみではなく工事費・付帯設備費などの初期費用全体を補助対象とすることが考えられる。また制度運用面では、施工業者等が補助申請手続きを行うことでエンドユーザが被る負担（申請要件の確認、書類作成、省エネ量の事後評価や報告、補助金の支給待ち、等）を軽減するといった方法も考えられる。

第2に、「追加設置場所がない」との課題への対応策を検討する必要がある。一つには、工場新設時に適切なインセンティブを提供しつつ、新設工場の脱炭素化設計を促すことで、設置スペースの問題を回避するような取組が考えられる。一方で、既設工場では電化が難しい場合も考えられ、既存の燃焼設備の部分的改修による再エネ電力由来のグリーン水素の利用なども選択肢となるだろう。また、「受変電設備の増強に伴う設備費用が高い」との課題に対しても、これらの対応策が有効と考えられる。

第3に、「導入に向けた社内エンジニアリング人材の不足」や「既存生産設備の変更に対する不安」など、エンジニアリングに係る課題へ対応する必要がある。エンドユーザの情報不足・惰性等による従来燃焼設備へのロックイン解消に向けて、多様な業種・プロセスにおけるモデル工場での生産プロセスへの統合を促す実証事業や、得られたエンジニアリング事例をガイドブック等で広く公知化していくような取組が考

えられる⁸⁾。

第4に、「投資回収年数が長い」「電気料金が低い」「デマンド上昇による電気料金増を避けたい」など、運用時のコストに係る課題への対応策を検討する必要がある。一つには、再エネ賦課金の増加がガス・石油等に対する電気の相対価格を上昇させてしまっている課題に対しては、賦課金や税のあり方の見直し、すなわち、負担のリバランシングの検討が考えられる。ドイツ・英国・オランダ等では、電気料金への再エネ賦課金等を化石燃料料金や一般会計へシフトさせるような制度改正に向けて進み出している (Rosenow, et al., 2022)。また、電化による生産性メリット⁹⁾を認知していない一部の中小企業等では、産業競争力向上に寄与するような電化投資が遅延している可能性がある。生産性向上を目的とした国・自治体の設備導入補助等において、生産性メリットに係る費用便益の評価方法や結果の提出・公開を促していくような取組が考えられる。

第5に、特に中小企業など従業員数の少ない工場において、脱炭素化に向けた取組内容として電化を選択する工場が17%に留まった。また、従来の燃焼設備と比べて、電気を利用する熱供給設備の認知度が低めの傾向も観察された。近年、自動車産業を中心に、サプライヤーへの脱炭素要請の動きが活発化しており、このような動きが他業種にも波及することで、中小企業等による熱分野の脱炭素取組の誘発が期待される。この際、中小企業は人材・資金などのリソース不足により対応が難しい場合も考えられ、脱炭素化計画の策定支援、設備投資に対するファイナンス・補助制度などの支援策が必要になる。

6.3. 今後の研究課題

本稿では製造業全体の電化バリアの把握を目的としていたため、多様な熱供給設備や業種を対象としてアンケート調査を設計・実施した。それにより製造業全体の傾向把握が可能となったものの、しかしながら一方では、熱供給設備別や工場属性別での電化バリアの詳細把握は限定的なものに留まった。例えば、5.2節における熱供給設備別でのエンジニアリングに係るバリアの傾向把握では、熱供給設備別や導入経験の有無による明確な傾向差は見られなかった。今後、特定の熱供給設備に対するバリア解消策や支援策の検討に向けては、当該設備の導入ポテンシャルが高いと思われる業種・用途に着目した調査分析が効果的であると思われる。

参考文献

- Electric Power Research Institute (2019) The Total Value Test: A Framework for Evaluating the Cost-Effectiveness of Efficient Electrification.
<https://www.epri.com/research/products/000000003002017017>
- Rightor, E., Whitlock, A., and Elliott, R.N. (2020) Beneficial Electrification in Industry. ACEEE Research Report.
<https://www.aceee.org/research-report/ie2002>
- Rosenow, J., Thomas, S., Gibb, D., Baetens, R., De Brouwer, A., and Cornillie, J. (2022) Levelling the playing field: Aligning heating energy taxes and levies in Europe with climate goals. Regulatory Assistance Project.
<https://www.raponline.org/wp-content/uploads/2022/07/Taxes-and-levies-final-2022-july-18.pdf>
- Wei, M., McMillan, C.A. and de la Rue du Can, S. (2019) Electrification of Industry: Potential, Challenges and Outlook. Current Sustainable/Renewable Energy Reports 6, 140–148.
<https://doi.org/10.1007/s40518-019-00136-1>
- 甲斐田武延(2021)「欧州における産業用ヒートポンプの市場概観と開発動向」、電力中央研究所報告 C20005.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=C20005>

8) 甲斐田 (2021; 2023) によると、日本ではヒートポンプ機器メーカーが工場でのエネルギー分析を行いヒートポンプの仕様やプロセス統合方法を選定・提案していることが多いが、欧州では、工場のプロセスとヒートポンプに関する両方の知見を有するコンサルティング会社が工場とヒートポンプ機器メーカーの間で活動しており、産業用ヒートポンプの普及拡大に貢献している。

9) 例えば米国では「効率的な電化」(Efficient electrification)、あるいは、「有益な電化」(Beneficial electrification)と呼ばれ、初期費用や光熱費削減の他にも、生産性向上効果などの便益を定量的に評価して投資判断や社会的費用便益分析を行うことの必要性が主張されている (EPRI, 2019; Rightor et al., 2020)。筆者が産業電化の国内既往事例 70 件をレビューした調査では、産業用ヒートポンプでは工程安定化、制御性向上、除湿能力向上といった生産性向上効果が訴求されるケースが見られた。また、誘導加熱や抵抗加熱などの電気加熱では、加熱時間短縮・塗布回数減・品質向上・加熱温度ムラ減・自動化・設備コンパクト化・メンテナンス頻度減・放熱ロス減少による作業環境の改善など、多岐にわたる生産性メリットの訴求事例が確認された (向井・安岡, 2020)。

甲斐田武延(2023)「産業用ヒートポンプの社会実装強化に向けた考察—技術開発から技術展開へ—」, 電力経済研究, 第69号.

<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>

環境省(2021)「中小規模事業者のための脱炭素経営ハンドブック：温室効果ガス削減目標を達成するために」.

https://www.env.go.jp/earth/SMEs_handbook.pdf

経済産業省(2022)「クリーンエネルギー戦略 中間整理」.

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/008_01_00.pdf

資源エネルギー庁「省エネ法定期報告の分析・集計データ」, アクセス日 2022年12月22日.

https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/enterprise/factory/analysis/index.html

向井登志広・安岡絢子(2020)「産業部門における電気加熱の生産性便益—評価方法の現状と課題—」, 電力中央研究所研究資料 Y19505.

<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/source/Y19505.html>

向井 登志広 (Toshihiro Mukai)

電力中央研究所 社会経済研究所

産業用ヒートポンプの社会実装強化に向けた考察 —技術開発から技術展開へ—

Consideration for Strengthening Social Implementation of Industrial Heat Pumps:
From Technology Developments to Deployments

キーワード：産業用ヒートポンプ、支援策、プロセス統合

甲斐田 武延

要旨

産業部門の脱炭素化に向けて、高効率な電化技術でありかつ技術成熟度の高い、産業用ヒートポンプへの期待は大きい。一方、その導入が期待されているほど進展していないのが現状であり、適切な対策を施すことが求められている。本稿では、産業用ヒートポンプの導入状況や技術動向を概観するとともに、導入が進展しない課題として、①技術の適合性、②経済性、③信頼性、④導入検討を担う人材の不足を指摘した。その上で、近年産業用ヒートポンプの技術開発・実証が活発化している欧州の取り組みと比較しながら、今後の普及拡大に向けた方策について考察した。これまで実施されてきた技術開発支援や設備導入支援だけでは不十分であり、今後は技術実証事業や技術展開事業を強化し、ヒートポンプを生産プロセスに統合する手法を構築するとともに、その担い手を育成していくことが重要であることを示した。

1. はじめに

産業部門の熱需要を温度帯別に見ると、200°C未満の熱需要が産業部門全体の熱需要の27%を占めるとの報告がある（三菱総合研究所，2018）。この温度帯ではガスや重油等を燃料に用いたボイラから供給する蒸気によって加熱していることが多く、その脱炭素化が求められている。

2022年5月に発表されたクリーンエネルギー戦略の中間整理（経済産業省，2022）において、この200°C以下の温度域については、ヒートポンプへの転換が有力な選択肢として、また足元から取り組むべき事項として挙げられており、産業用ヒートポンプへの期待は大きい。一方、同資料の中で、①適用温度域が限定的であること、②事例の横展開が進んでいないこと、③設備費用が高額であることなどが課題として挙げられており、これらの課題を整理した上で、適用温度域拡大に向けた高温ヒートポンプの開発実証や導入拡大に向けた設備投資支援を行うことが示されている。

本稿では、産業用ヒートポンプの現状を概観し課題を明らかにするとともに、近年産業用ヒートポンプの技術開発・実証が活発化している欧州の取り組みと比較しながら、今後の普及拡大に向けた方策について考察する。

2. 産業用ヒートポンプの現状

産業用ヒートポンプの普及拡大に向けて、まずはその現状を認識することが重要である。ここでは、産業用ヒートポンプの導入状況と技術動向の概要を述べ、普及拡大に向けた課題を明らかにする。

2.1. 導入状況

産業用ヒートポンプの導入状況については、日本冷凍空調工業会（JRAIA）と日本エレクトロヒートセンター（JEHC）がそれぞれ調査している情報が公開されている。JEHC調べ（日本エレクトロヒートセンター，2021）の方が調査対象とするメーカー数が多く、より実態に即した数値であると考えられるが、こ

では地球温暖化対策計画の対策評価指標に使用されているJRAIA調べ（環境省，2022）を参照する。

図1に示すように、産業用ヒートポンプの導入状況は、一定の進捗は認められる一方で、現在の導入速度では2030年度における普及見込みを下回る。この普及見込みは、パリ協定への対応として2030年度における日本の温室効果ガス排出量を2013年度比で26%削減することを目指し、その削減量の根拠として、2016年5月に閣議決定された値である。その後、2021年4月に日本政府は、2030年度における日本の温室効果ガス排出量を2013年度比で46%削減することを目指すこと、さらに50%の高みに向けて挑戦を続けることを表明し、2021年10月に地球温暖化対策計画が改訂された。しかし、産業用ヒートポンプの普及見込みについては修正されていない。2030年度までのこの普及見込みに達するためには、2020年代の10年間で毎年の導入設備容量を現在の5倍程度に上昇させる必要があり、普及拡大に向けた取組強化が喫緊の課題となっている。

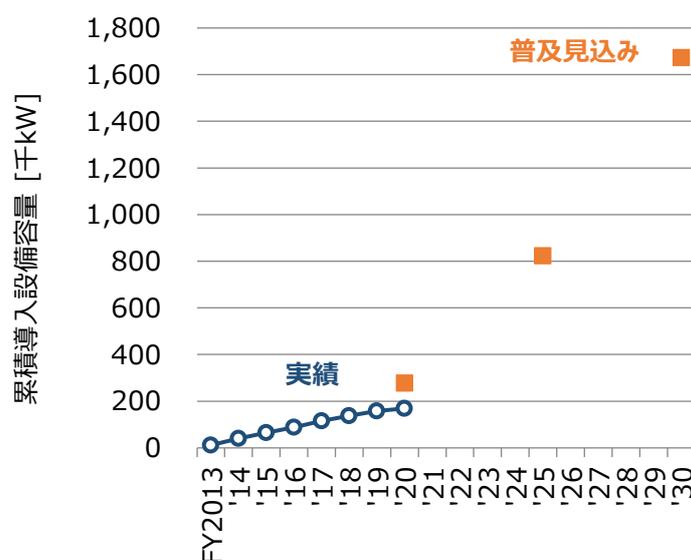


図1 産業用ヒートポンプの導入状況（地球温暖化対策計画の進捗状況より）

2.2. 経済的制約

ヒートポンプは熱回収技術としての側面があり、熱をくみ上げる温度差（温度リフト＝熱供給温度－熱源温度）が小さいほど高い効率（COP＝供給熱量／消費電力量）で運用できるが、逆に温度リフトが大きいくほど適用先は広がる。COPは省エネ効果やCO₂排出削減効果、エネルギーコスト削減効果に影響する。導入検討の際には、特に経済性の観点から要求COPが決定されるのが現状である。

経済性が成立するかは、それぞれの工場でのエネルギー利用状況やエネルギー契約形態、要求する投資回収期間などにも依るが、現在の日本のエネルギー価格の状況では、概して少なくとも3以上のCOPが要求される。一方、電気料金が安価な国では日本よりも要求COPが低く、例えばノルウェーのようにCOPが2～2.5程度でも経済的に成立する国もある。

2.3. 技術動向

産業用ヒートポンプの開発・製品化に際して、その技術仕様（特に温度リフト）は、上述の経済的制約を受けながら設定される。例えば、外気を熱源として、120℃の蒸気を供給するヒートポンプを造ることは可能だが、大きな温度リフトとなり、現状では燃焼機器と比べて市場競争力に劣るため、開発・製品化されていない。

国内で製品化されている産業用ヒートポンプのリストは、JEHCが取りまとめている（日本エレクトロヒ

ートセンター, 2022)。供給温度に着目すると、100°C未満の製品ラインアップは充実してきている。また、100°C以上の熱供給が可能な高温ヒートポンプも複数製品化されている。これらは、欧州でも同様の状況である（甲斐田, 2021）。

供給温度が100°C以上の高温ヒートポンプについては、近年新たに高温供給に適した冷媒が開発され、技術的ポテンシャルが拡大しつつある（甲斐田, 2020）。国際エネルギー機関（IEA）ヒートポンプ技術協力プログラム（HPT）Annex 58で調査したところ、現在国内外で約30の高温ヒートポンプ技術が開発・実証中であり、150～200°C供給のものが多い（IEA, 2022）。このうち、日本においても、150°C蒸気供給が可能で蒸気ボイラの代替として適用が期待されるものや、200°Cまでの顕熱加熱が可能で乾燥工程等での適用が期待されるものなど、新たに5つの高温ヒートポンプ技術が開発中である。これらの技術は2020年代半ばから後半にかけて製品化される計画である。

このように、産業用ヒートポンプの技術面では、適用温度域が拡大中の状況にある。

2.4. 課題整理

2.3節で述べたように、産業用ヒートポンプの技術成熟度（TRL）は向上してきており、IEAのエネルギー技術展望では産業用ヒートポンプ全般としてTRL9（商用化初期段階）に位置づけられている（IEA, 2020）。開発が進行中である、供給温度が100°C以上の高温ヒートポンプについては現時点でTRL 5～8の段階のものが多いが（IEA, 2022）、2020年代半ば頃からTRL9に達する見込みである。

産業用ヒートポンプに関する取り組みとしては、今後はTRL9から11（安定的なシェア拡大）へ進めていくことが肝要である。その場合、導入を阻害している要因を明確にし、適切に対応することが求められる。

向井による事業所へのアンケート調査によると、導入に至らない理由として、「設備費用が高い」、「投資回収期間が長い」といった経済性の面での課題や、「追加導入場所がない」、「エンジニアリング人材の不足」、「既存生産設備の変更に対する不安」といった生産プロセスへの統合（プロセス統合）に関する課題が大きいことが示されている（向井, 2023）。一方、ヒートポンプ技術の省エネ性やCO₂排出削減効果については満足している事業所が多い様子である。

この結果を参考としながら、想定される課題とその解決策について整理したものを表1に示す。導入にあたっては、技術の適合性、経済性、信頼性（生産プロセスへの影響など）が事前に精査される。表1の(a)～(c)に、この順にそれぞれの検討段階で有効だと考えられる方策を列記している。また、これら3点は適切に事前検討を進めることができた場合の課題であるが、そもそもこのような事前検討を担う人材が不足していることも課題として挙げられる。表1の(d)にこの点を整理している。

表1 産業用ヒートポンプの普及拡大に向けた課題整理

課題	導入に至らない理由	考えられる方策
(a) 技術の適合性	製品化されている技術の中では適した仕様のものがない。	工場のニーズにマッチした技術を開発する必要があり、工場のニーズがヒートポンプ機器メーカーに伝わるようにすること（ 情報共有 ）。ニーズを満足するために技術的向上（高温化など）を必要とする場合には、 技術開発支援 が有効。
(b) 経済性	技術的には適しているが、経済性の面で満足できない。	ヒートポンプの省エネ性によって運用費用の削減が見込まれるものの、設備費用の高さが主な導入障壁である場合には、 設備投資支援 が有効。
(c) 信頼性	技術的にも経済的にも満足しているが、生産プロセスへの影響を懸念して導入に至らない。	技術実証事業 などを通じて、ヒートポンプ機器及びエンジニアリング技術の信頼性を向上させること。
(d) 人材の不足	技術的・経済的に成立するかの事前検討も含め、導入に向けた社内の知見が不足している。	技術展開事業 などを通じて、ヒートポンプの選定や生産プロセスへの統合手法を確立するとともに、その担い手を育成すること。

これまでの日本政府による産業用ヒートポンプへの助成事業は、表1の(a)や(b)に対応した、技術開発支援と設備導入支援が主であった。冒頭で述べたように、クリーンエネルギー戦略の中間整理においても、この2つが今後の支援策として示されている。

しかし、このような取り組みの延長では、2.1節で述べたように一定の進捗はあっても大幅な導入速度の向上は期待できない。今後は、(c)や(d)に対応した、技術実証事業や技術展開事業の強化が必要になると考えられる。

3. 今後の普及に向けた方策

産業用ヒートポンプの実証事業や展開事業の強化に向けて、近年の欧州の取り組みを紹介しながら、今後の日本における方策を考察する。

3.1. プロジェクトのあり方

表2に国内外における産業用ヒートポンプに関する代表的なプロジェクトを示す。ここで、技術段階に応じた取り組みとして、研究 (Research) ・開発 (Development) ・実証 (Demonstration) ・展開 (Deployment) ・発信 (Dissemination) の5つを設定し、それぞれのプロジェクトが対象とする技術段階を識別している。

表2 産業用ヒートポンプに関する代表的なプロジェクト

技術段階に応じた 取り組み	参画団体	代表的なプロジェクト				
		TherMAT 日本	BAMBOO EU	DryF EU	SuPrHeat デンマーク	LEAP オーストリア
研究 Research	大学 研究機関	○	○	○	○	
開発 Development	メーカ	○	○	○	○	
実証 Demonstration	エンドユーザ エンジニアリング会社		○	○	○	○
展開 Deployment	コンサルティング会社 小売電気事業者など				○	○
発信 Dissemination	ヒートポンプ協会など			○		

3.1.1. 技術実証事業の必要性

日本では、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発 (2015～2022年度) の枠組みの中で高温ヒートポンプの研究開発が進められてきた (TherMAT, 2022)。メーカと大学・研究機関が参画し、技術の「開発」に焦点が当てられている。このように、これまでの日本のプロジェクトはR&D (Research and Development) に留まるものが多かった。

一方、欧州ではこのようなR&Dプロジェクトもあるが、開発の段階から参画機関にエンドユーザ候補 (以降、単にエンドユーザと記述) やエンジニアリング会社等も加わり、技術の「実証」までを含んだRD&D (Research, Development and Demonstration) プロジェクトが多く見られる (甲斐田, 2021)。代表的なものとして、欧州連合 (EU) Horizon 2020のBAMBOOプロジェクトの中で2018～2023年に実施の蒸気供給ヒートポンプの開発・実証が挙げられる (BAMBOO, 2022)。エンドユーザとして鉄鋼大手のArcelorMittal社が参画している。オーストリア技術研究所 (AIT) が蒸気生成を含めたヒートポンプシステムを概念設計し、エンジニアリング会社であるAMT社がヒートポンプシステムを構築する。フランス電力 (EDF) の研究所

にてラボ評価後、ArcelorMittal社の製鉄所にて実証試験を実施する。

また、同じHorizon 2020の枠組みで2016～2021年に、DryFという乾燥工程用ヒートポンプの開発・実証プロジェクトが実施され、13団体が参画した。ここでも、研究機関とメーカーに加え、エンジニアリング会社やエンドユーザが当初から参画していた。実証先として、Wienerberger社（レンガ）、Agrana社（デンブ）、Scanship社（排水処理）が参画し、それぞれの乾燥工程で実証試験が実施された。さらに、欧州ヒートポンプ協会（EHPA）も参画し、得られた成果や産業用ヒートポンプの活用に関する情報「発信」も積極的に行われた。

このような研究開発・実証事業はEUレベルだけでなく、オーストリアやデンマーク、フランス、オランダ、ノルウェーなど、国レベルのプロジェクトでも見られる。実工場での実証を当初から組み込むことで、ヒートポンプ技術の信頼性向上だけでなく、ニーズの把握やエンジニアリングの担い手の育成にも貢献する。

3.1.2. 技術展開事業の必要性

近年、産業用ヒートポンプの生産プロセスへの統合（プロセス統合）手法の構築やその担い手の育成、さらに新しいビジネスモデルの創出を目的とした、「展開」事業も見られるようになった。ここでは、デンマークのSuPrHeatプロジェクト（SuPrHeat, 2022）とオーストリアのLEAPプロジェクト（LEAP, 2022）を紹介する。

SuPrHeatプロジェクトは、2020～2024年の期間で16団体が参画し、自然冷媒を用いた高温ヒートポンプの研究開発から実証・展開までを含んだRDD&D（Research, Development, Demonstration and Deployment）プロジェクトである。デンマーク技術研究所（DTI）がリーダーを務め、ヒートポンプ機器メーカーに加え、エンドユーザとして食品・飲料を製造・販売する企業が4社（Arla Foods社、Danish Crown社、Chr. Hansen社、Royal Unibrew社）、食品分野に強いエンジニアリング会社（GEA Process Engineering）、工場のエネルギー分析やプロセス統合手法の構築を担うコンサルティング会社（Viegand Maagoe社）が参画している。食品産業を対象を絞り、複数の工場のプロセスとユーティリティのデータを分析し、産業用ヒートポンプのプロセス統合手法を構築していく。

LEAPプロジェクトは、2021～2024年の期間で4団体が参画し、低圧蒸気供給ヒートポンプの実証・展開プロジェクトである。このプロジェクトの中でヒートポンプを新たに開発せず、開発済みの技術を用いる。AITがリーダーを務め、Austrotherm社（断熱材）とLenzing社（繊維）の2社がデモンストレータとして参画している。このプロジェクトは、ユーティリティ（低圧蒸気）ラインへの蒸気供給ヒートポンプの統合手法を構築することを目的とし、排熱を最大限に有効活用するために必要な情報をデモンストレータが提供するように設計されている。低圧蒸気は様々な産業で使用されているため、この2つのデモンストレータをロールモデルとし、蒸気供給ヒートポンプを展開していく狙いである。

3.1.3. 今後のプロジェクトへの示唆

産業用ヒートポンプは、機器を開発するだけでは不十分であり、生産プロセスに統合されるような技術にしなければ、社会への実装は進みにくい。そのため、今後新たにプロジェクトを立ち上げる際には、従来の研究開発をメインとしたR&Dプロジェクト（主にTRL 6までが目標）から、実証も含んだRD&Dプロジェクト（TRL 8までが目標）、さらには展開と発信も含めたRDDD&Dプロジェクト（TRL 11までが目標）に移行していくことが重要である。あるいは、日本ではすでに多くの産業用ヒートポンプ技術が開発されているため、LEAPプロジェクトのように実証と展開に重点を置いたプロジェクト（TRLを9から11に向上させることが目標）も有効であると考えられる。プロジェクトの参画団体については、大学や研究機関、メーカーだけでなく、エンドユーザ、エンジニアリング会社、コンサルティング会社、エネルギーサービス会社（小売電気事業者など）、情報発信団体（日本エレクトロヒートセンターやヒートポンプ・蓄熱センター）なども当初から加え、これらの幅広い団体が協力して取り組んでいくことが求められる。

3.2. プロセス統合の担い手の必要性

産業用ヒートポンプは、熱源（主に外気）と熱供給先（暖房や給湯）が定まっている民生用ヒートポン

プと異なり、導入にあたって生産工程の熱需要や排熱を精査し、適切なヒートポンプを選定する必要がある。そのためには、生産プロセスとヒートポンプの両方の知識を兼ね備える必要がある。生産プロセスの情報を把握しているエンドユーザが自らヒートポンプを選定することが望ましいが、エンドユーザの多くはヒートポンプに関する知識や経験が不足している。一方、生産プロセスの情報は一般的に非公開であるため、メーカーにとってはヒートポンプに要求される技術仕様を把握することが困難である。

そこで、図2に示すような、エンドユーザとメーカーの間で活動し、工場データの分析から適正なヒートポンプの選定までを担える、プロセスインテグレータの存在が重要になる。プロセスインテグレータの役割が確立されれば、エンドユーザにとっては、情報をやり取りする窓口が一本化され、自社工場の情報管理が容易くなる。一方、メーカーにとっては、ヒートポンプに要求される仕様の調査までを担う必要がなくなるため、ヒートポンプ機器の開発に専念することができる。

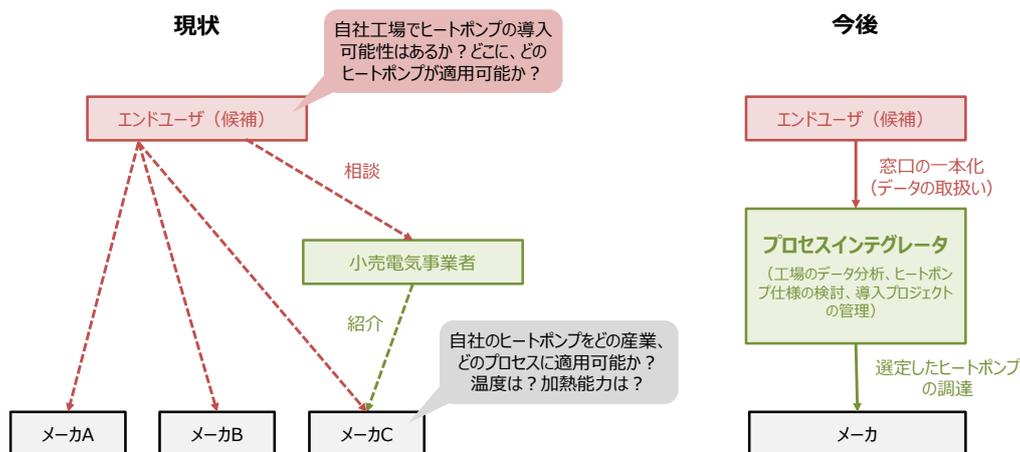


図2 プロセスインテグレータの役割

図3に示すように、近年デンマークではこのようなプロセスインテグレータの役割を担うコンサルティング会社が登場してきた。例えば、上述したSuPrHeatプロジェクトにも参画しているViegand Maagøe社やInnoterm社、Rambøll社などが挙げられる。フランスでは、EDFグループ（小売電事業部門とその子会社であるDalkia社との連携）が、コンサルティングからエンジニアリングまでを手掛けようとしている。

日本では従来小売電気事業者が工場の省エネ診断等を通して産業用ヒートポンプの導入に貢献してきた。しかし、ユーティリティレベルの分析（例えば、蒸気配管システムの放熱損失の分析など）に留まっていたことが多い。ヒートポンプをより効果的に活用するためにも、今後はプロセスレベルの分析もできるようにエンジニアリング力を強化していくことが求められる。

今後は小売電気事業者に限らず、エネルギー管理システムを提供している計測器メーカーやエンジニアリング会社などもプロセスインテグレータとしての役割が期待される。また、蒸留塔や蒸発・濃縮設備、一部の乾燥機など、運転時間が比較的長く、熱需要と排熱が安定している単一プロセスについては、プロセス自体に初めからヒートポンプを一体型として組み込むことも有効である。この場合は、プロセス機器メーカー（兼プロセスエンジニアリング会社）がプロセスの情報を熟知しているため、ヒートポンプに要求される仕様を検討しやすい。

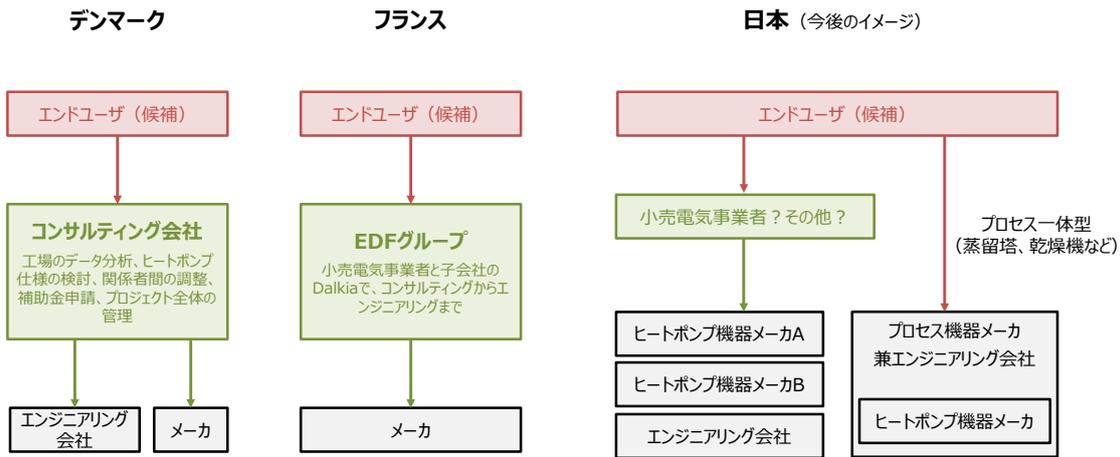


図3 プロセスインテグレータの動向

3.3. プロセス統合手法の構築

今後、例えば小売電気事業者がプロセスレベルの分析を実施していくためには、その分析手法を構築していくことが必要である。産業用ヒートポンプに関する研究は、これまでヒートポンプ機器を対象とした「開発」がほとんどであったが、今後はプロセス統合手法の構築など「展開」のための研究を推進していくことが求められる。

具体例として、プロセスを起点とした熱回収の分析手法であるピンチ解析を産業用ヒートポンプに応用し、その方法論を構築していくことが挙げられる（甲斐田，2022）。ピンチ解析は、熱交換器による熱回収の最大化を目的として発達してきたが、実際に活用されている事例は石油化学プラント等に限られている。熱交換器だけでなく、別の熱回収技術である産業用ヒートポンプの製品化が進み、カーボンニュートラル実現に向けて様々な産業における熱回収や電化が重要になった現在、その有用性を再考し、さらに発展させる意義は大きいと考えられる。

あるいは、「開発」であってもヒートポンプ機器単体ではなく、プロセス一体型ヒートポンプ（ヒートポンプ式蒸留塔、ヒートポンプ式蒸発・濃縮設備、ヒートポンプ式乾燥機など）の開発を推進することが期待される。

4. おわりに

本稿では、産業用ヒートポンプの現状を概観し、その技術成熟度は向上してきているものの、期待されているほどには導入が進展していないことを確認した。また、導入が進展しない課題として、①技術の適合性、②経済性、③信頼性、④導入検討を担う人材の不足を挙げ、これらを解決するためには、これまでに日本で実施されてきたヒートポンプ機器の技術開発支援や設備導入支援だけでは不十分であることを示した。

普及拡大に向けた今後の方策として、すでに市場で入手可能な技術を用いて実工場（あるいはパイロット設備）での導入実績を積みながらエンジニアリングの担い手を育成する技術実証事業や、プロセス統合手法を構築するとともにその担い手を育成する技術展開事業を強化していくことが期待される。さらには、それらで培った知見を技術ガイド等に取りまとめ、適切な情報を発信していくことも重要である。

参考文献

- BAMBOO (2022) Boosting new approaches for flexibility management by optimizing process off-gas and waste use.
<http://bambooproject.eu/> (アクセス日: 2022年12月22日)
- DryF (2022) Waste heat recovery in industrial drying processes.
<https://dryficiency.eu/> (アクセス日: 2022年12月22日)
- IEA (2020) Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Clean Energy Innovation.
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- IEA (2022) HPT Annex 58 (High-Temperature Heat Pumps) Task 1 (Technologies), Preliminary results.
<https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/> (アクセス日: 2022年12月22日)
- LEAP (2022) Low pressure steam heat pump.
<https://projekte.ffg.at/projekt/3849152> (アクセス日: 2022年12月22日)
- SuPrHeat (2022) Sustainable process heating with high-temperature heat pumps with natural refrigerants.
<http://www.suprheat.dk/> (アクセス日: 2022年12月22日)
- TherMAT (2022) 未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発.
<http://www.thermat.jp/> (アクセス日: 2022年12月22日)
- 甲斐田武延 (2020) 「熱力学的分析に基づく高温ヒートポンプサイクルの設計指針—冷媒および高効率化技術の選択に向けた一提案—」 電力中央研究所報告 C20002.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=C20002>
- 甲斐田武延 (2021) 「欧州における産業用ヒートポンプの市場概観と開発動向」 電力中央研究所報告 C20005.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=C20005>
- 甲斐田武延 (2022) 「産業用ヒートポンプのプロセス統合: ピンチ解析を用いたヒートポンプの選定法の概案」 2022年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集.
- 環境省 (2022) 「2020年度における地球温暖化対策計画の進捗状況」 2022年6月17日.
<https://www.env.go.jp/press/111120.html>
- 経済産業省 (2022) 「クリーンエネルギー戦略: 中間整理」 2022年5月19日.
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/20220519_report.html
- 日本エレクトロヒートセンター (2021) 「2021年度版 産業用ヒートポンプ導入量把握調査結果 報告書」 2021年10月.
https://sangyo-hp.jeh-center.org/asset/00032/library/IHP_hokoku_2021.10.pdf
- 日本エレクトロヒートセンター (2022) 「産業用ヒートポンプ活用ガイド 第2版」 2022年3月.
<https://www.jeh-center.org/untitled47.html> (アクセス日: 2022年12月22日)
- 三菱総合研究所 (2018) 「平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査(熱の需給及び熱供給機器の特性等に関する調査) 調査報告書」 2018年2月.
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000018.pdf
- 向井登志広 (2023) 「産業部門における電化バリアと課題—国内製造業を対象としたアンケート調査—」 電力経済研究 No. 69.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>

甲斐田 武延 (Takenobu Kaida)

電力中央研究所 グリッドイノベーション研究本部

電力経済研究 No.69 2023年2月

[不許複製]

発行 一般財団法人 電力中央研究所
社会経済研究所
東京都千代田区大手町1-6-1
e-mail : src-henshu-ml@criepi.denken.or.jp

著作 一般財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町1-6-1

ISSN 2758-5980

