



Technical Report

IGES 1.5°Cロードマップ

日本の排出削減目標の野心度引き上げと
豊かな社会を両立するためのアクションプラン

Technical Report

IGES 1.5°Cロードマップ

日本の排出削減目標の野心度引き上げと 豊かな社会を両立するためのアクションプラン

執筆者：

IGES気候変動とエネルギー領域 栗山昭久

IGES関西研究センター 田中勇伍

IGESビジネスタスクフォース 岩田生

IGES気候変動とエネルギー領域 田村堅太郎

謝辞：本レポートを作成するにあたり、数多くの専門家の皆様から貴重なご助言を賜りました。以下の方々からは、シナリオやパラメータに係る事項や分析方法、さらに分析結果から得られる示唆に関わる貴重なご意見を頂きました。京都大学 諸富徹氏、日本エネルギー経済研究所 二宮康司氏、日本経済研究センター 落合勝昭氏、New Climate Institute 倉持壮氏、国立環境研究所 増井利彦氏、国立環境研究所 日比野剛氏。また、IGESの同僚である、高橋康夫氏（IGES所長）、川上毅氏、内藤克彦氏、西岡秀三氏、甲斐沼美紀子氏、中尾豊氏、森尚樹氏、Mark Elder氏、松尾直樹氏、小嶋公史氏、松尾雄介氏、高橋慶衣氏、畑泰彦氏、山守正明氏、大高裕生氏。また、IGES 庄かなえ氏、青木正人氏には、本レポートのデザイン編集を頂きました。その他、ヒアリングやインタビューを通じてIGES内外の様々な方々からも数多くの有益な情報を頂きました。とりわけ、日本気候リーダーズ・パートナーシップ(JCLP)の会員企業の皆様には、本レポートの検討初期から公開に至る間、複数回のワークショップや個別テーマでの意見交換等を通じて、多数のインプットをいただきました。ステークホルダーと共創し受容性のあるアクションプランの提示を目指すにあたり、JCLP会員企業をはじめとする皆様のご協力は不可欠の要素でした。本レポートに対して、示唆に富むご知見、ご支援を頂いた皆様に深く感謝を申し上げます。

公益財団法人 地球環境戦略研究機関（IGES）

本レポートは、作成時点において本レポートの執筆者が信頼できると判断した情報に基づいて作成されておりますが、その情報の正確性・完全性等を保障するものではありません。IGESは、本レポートを用いて行う一切の行為について何ら責任を負うものではありません。

© 2023 Institute for Global Environmental Strategies. All rights reserved.

2024年3月更新

ISBN978-4-88788-267-6

DOI: 10.57405/iges-13273

キーメッセージ

本レポートは、世界平均気温の上昇を産業革命前と比べて1.5℃以内に抑えるという目標の達成に向けて、2050年までにカーボンニュートラルを実現するだけでなく、累積排出量をできる限り小さくする観点から、日本国内で早期に大幅な温室効果ガス（GHG）排出量削減を果たす可能性を検討し、その実現のためのアクションプランをまとめたものである。

エネルギーの需要と供給において脱炭素化に資する技術の導入を進めるだけでなく、デジタル化を起点とする社会経済の変革に直ちに取り組むことが重要である。無形資産投資の増加による高付加価値化や、製造業のサービス産業化、ビッグデータや自動運転技術を活用した人流・物流の合理化、効率的で循環的なエネルギー・素材利用といった社会経済の変化を考慮したシナリオでは、最終エネルギー消費量が早い段階から減少していき、2035年までに2019年比で60%以上のGHG排出量削減が可能になる。

エネルギーの省エネと電化を早期に進めると同時に、再生可能エネルギー（以下、再エネ）を中心とする電力システムへの転換を進めることで、大幅な排出削減を実現しつつ、エネルギー自給率を約90%まで高める可能性を見出すことができる。省エネ、電化の促進、再エネの拡大のいずれも、現在直面している様々な課題を克服するための戦略的な取組が求められる。省エネ、電化については、エネルギーコストの削減につながることも多く、企業のデジタル化や生産性向上との相性も良い。専門的知識を持つ人材による知見・情報の提供や、機器の設置スペース・配管等の建物の物理的制約が障壁とならないよう、長期的視点を持った設備投資を可能とするなどの対応が求められる。

再エネ中心の電力システムへの転換については、需給バランスを確保し、効率的なシステム運用を行うため、様々な取組が必要である。特に、自然条件によって発電出力が変動する再エネが中心の電力システムにおいて、秒単位・時間単位といった短期の変動と、季節間・年間といった長期の変動の双方に対応するため、柔軟性を高める必要がある。このため、電力システムの運用ルールを見直すとともに、EV蓄電池を用いたV2Gや、国内での水素製造のための水電解装置などによるデマンドレスポンスといった、需要側の柔軟性の活用を可能とする環境整備を進めるべきである。

自然環境や地域社会への悪影響を抑制しつつ、再エネの大幅な導入量拡大を見込むことは可能であり、経済循環や雇用の創出などの便益を地域にもたらす可能性がある。太陽光発電については、景観や生態系へのインパクトが少ない建物屋根上を中心に大幅な導入拡大を見込むことができる。その実現には、新築建物への太陽光導入を原則化する政策措置、屋根置き太陽光を促進するファイナンス支援、余剰電力を他の需要家と融通できる仕組み、適切な機器の選定と施工ができる事業者の確保、地域で太陽光発電を利用する便益とリスクに関わるコミュニケーションの促進等を早急に進める必要がある。また、将来的には、ペロブスカイト太陽電池とシリコン太陽電池を組み合わせたタンデム型は、限られた面積でより多くの発電量を得ることに貢献する。風力発電については、ポテンシャルが大きく、高い設備利用率

が期待できる洋上風力発電を中心に導入拡大を見込むことができる。その実現には、海域の先行利用者との調整を含め、導入目標や利用海域について社会的合意を早期に進めることや、浮体製造、風車組立、風車やメンテナンス部品の製造に関わる国内工場や港湾の整備を進め、洋上風力を国内産業として拡大することが重要となる。

将来の再エネの初期投資コストの低下や化石燃料価格、蓄電や水素製造にかかるコストによっては、現状よりも低いコスト水準でエネルギー供給が行われる可能性がある。モビリティや水素製造など電力以外のセクターと共有しているコストをどのように配分するかにもよるが、早期かつ大幅に電力システムからの排出削減を行う際に想定される将来の電力コストの上昇幅は、現状の燃料価格の高騰による電力コストの上昇幅よりも小さくなる可能性が高い。電力供給及び水素供給設備に対する投資規模は、2021～2050年の平均で、3.9兆円/年～4.6兆円/年となり、現在の年間の化石燃料輸入額（20兆円/年～30兆円/年）を大幅に下回る。

社会経済の大きな変革を促すために、また、再エネなどへのエネルギー転換を早期に進めるために、十分なインセンティブを与える制度を構築する必要がある。投資の流れの変化や需要家の行動変容を促すため、十分に高い水準でのカーボンプライシングを導入することが不可欠である。また、積極的労働市場政策や職業能力開発・教育訓練などの人的資本への投資の拡充によって、労働生産性や炭素生産性の高い活動への労働者の公正な移行を促進することは、脱炭素化推進政策の社会的受容性を高める鍵となる。

変化が実現するためには、エネルギーに限らない統合的な視点での政策形成や、企業による変化を成長の機会と捉えた積極的な戦略構築が重要である。本レポートが想定する社会経済の変化は、都市・建物・道路空間・土地利用の変化や、地域・企業・消費者の活動の変化なども包含したものであり、エネルギーの関係者のみならず幅広い関係者を巻き込んだ政策形成が必須である。一方、本レポートで検討した社会経済変化は、生産性を高め、より安全・便利・快適な社会に向かう大きな潮流に根差している。1.5℃目標の追求に向けた取組を、各業界や社会・インフラが抱える課題の解決やウェルビーイングの向上にも資する統合的な戦略として構築する必要がある。また、本レポートは、企業が脱炭素の世界的潮流を踏まえた自社戦略を構築する際に参照でき、今後一層加速する変化を成長の機会とするために、いつ、どのような変化が起こるかを判断する目安として活用できるものと考えている。

エグゼクティブ・サマリー

2021年に英国で開催されたG7（主要7か国）気候・エネルギー大臣会合では、各国は1.5℃目標を追求する決意を確認した。また、同年開催されたCOP26（国連気候変動枠組条約第26回締約国会議）において1.5℃目標を追求する決議が採択された（グラスゴー気候合意）。それ以降、国際社会におけるパリ協定の軸足は2℃目標から1.5℃目標へと移っており、2023年に日本で開催されたG7気候・エネルギー大臣会合の合意文書および広島G7サミット共同声明においても、日本を含むG7各国がこの目標にコミットすることが再確認されている。しかしながら、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の最新の報告によると、現在提出されているNDC（国が決定する貢献）が全て実現されたとしてもこの目標を達成するために必要な温室効果ガス排出削減水準には達しない。2035年までに世界全体で温室効果ガスの排出量を2019年比で60%削減することを目指し、各国が目標を引き上げる必要があることが指摘されている。パリ協定には、年月とともに各国が目標の野心度を引き上げる「ラチェット・メカニズム」が組み込まれており、進捗を評価し、より野心的な排出削減を継続的に目指していくことが、パリ協定の長期的目標の達成のために極めて重要である。

そこで、本レポートでは、エネルギーの需要と供給における脱炭素化に資する技術の導入に加えて、デジタル化を起点とする社会経済の変化を多面的に検討することにより、日本の温室効果ガス排出量をより早期に、より大幅に削減する可能性を検討した。

具体的には、まず、対策技術の導入量と社会経済の変化幅に差をつけた複数のシナリオに対して、2021年から2050年までの累積GHG排出量の推計を行い、シナリオ比較分析を行った（第2章～第5章）。構築したシナリオは、最大限の技術（再エネや輸入水素など）導入が行われる「①技術変容シナリオ」、脱炭素化に寄与する形で社会経済が大幅に変化し技術導入はより緩やかになる「②社会変容シナリオ」、社会経済の変化も技術導入も両者の中庸となる「③バランスシナリオ」である。さらに、政府が策定するトランジション・ファイナンス推進のためのセクター別ロードマップ等で公開されている情報をもとに、政府が目標としていると考えられるカーボンニュートラルに向けた道筋を示した「④政府目標シナリオ」を設定した。各シナリオにおける社会経済に関する想定と対策技術の導入量に関する想定を基にエネルギー及び電力の需要を推計し（第3章）、電源構成と電力システム・水素輸入を検討し、電力需給及び国内水素製造のシミュレーションを行った（第4章）。その結果をもとに温室効果ガス排出量やエネルギー自給率、電力コスト・水素コストといった主要な指標を推計した（第5章）。なお、社会経済の変化については、無形資産投資の増加による高付加価値化や、製造業のサービス産業化、ビッグデータや自動運転技術を活用した人流・物流の合理化、効率的で循環的なエネルギー・素材利用といった多面的な変化を想定している。これらの想定を産業関連表などに投影することで、可能な限り整合的に、かつ定量的に、将来の社会経済の姿を描いている。また、対策技術の導入量については、技術成熟度やポテンシャルなどに基づいて導入の規模や速度を想定している。電力需給のシミュレーションについては、送電線等の制約を考慮して全国450地点における1時間ごとの需給バランスが成立する

ことを条件に、安定供給確保に向けた対策等についても検討している。

次に、バランスシナリオに対して、どのような想定内容がいつ現実化すればシナリオを実現しうるのかを意味するマイルストーン、およびそれぞれのマイルストーンを達成するために必要な政策や行動変容につなげるアクションプランを整理した（第6章）。また、これらの分析結果を、実際に行動を起こすことが期待されるビジネス界のステークホルダーに提示し、そのフィードバックを踏まえてシナリオの修正を行うプロセスを反復的に行った。これにより、多様な視点からの意見や実務的知見も踏まえたシナリオ及びアクションプランを構築するとともに、それらに対するステークホルダーの理解や受容性が向上するよう配慮した。

シナリオ分析の結果、まず、デジタル化など社会経済の変化は、2050年までの最終エネルギー消費量の減少に対して、無視することができない程度の影響を及ぼしうることが明らかとなった。図ES-1はバランスシナリオにおける現状（2015-2019年の平均）と2050年の最終エネルギー消費量の差を要因別に分解した結果を示している。社会経済の変化を社会変容シナリオと技術変容シナリオの中庸程度に設定したバランスシナリオでも、最終エネルギー消費量が47%減少するうち16%程度は、デジタル化・素材利用変化等の取組が貢献している。

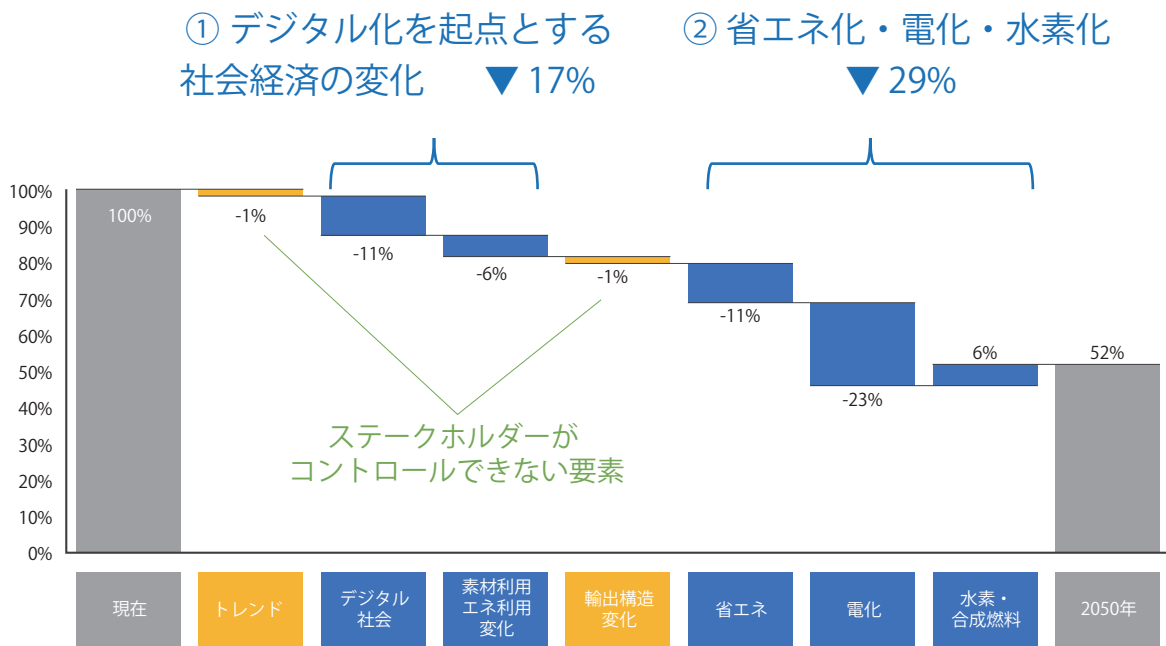
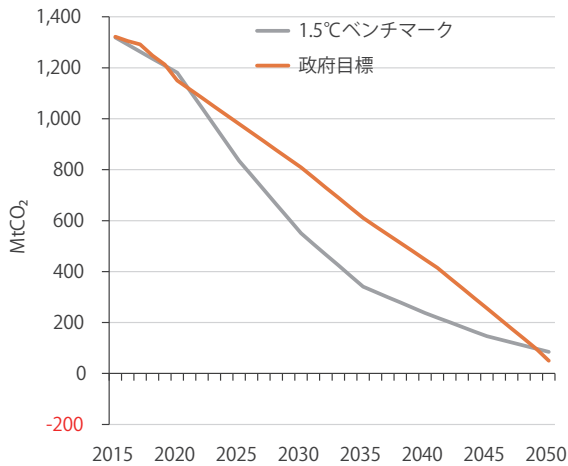


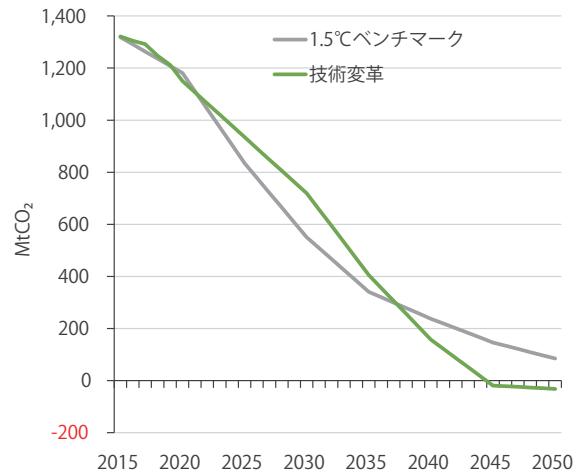
図 ES-1. バランスシナリオにおける最終エネルギー消費量減少の内訳

また、社会経済の変化を想定するシナリオでは、より早期のGHG排出量削減が達成できることも明らかになった。気温上昇を1.5°C以内に抑える場合の世界全体での排出経路から、日本における2020年から2050年までのGHG及びCO₂の累積排出量のベンチマークを設定し、各シナリオの推計結果と比較した（図ES-2）。その結果、社会変容シナリオとバランスシナリオのみが、ネガティブエミッション技術やCCSへの依存リスクを抑えつつ、ベンチマークとして設定した累積排出量以下に収まった。両シナリオともに、程度は異なるが社会経済の変化を想定している。デジタル技術を起点とした生産構造や暮らしの変化によって、最終エネルギー消費量が早い段階から減少し、その結果、2030年代の化石燃料利用も縮小できることから、早期のGHG排出量削減が達成できると考えられる。

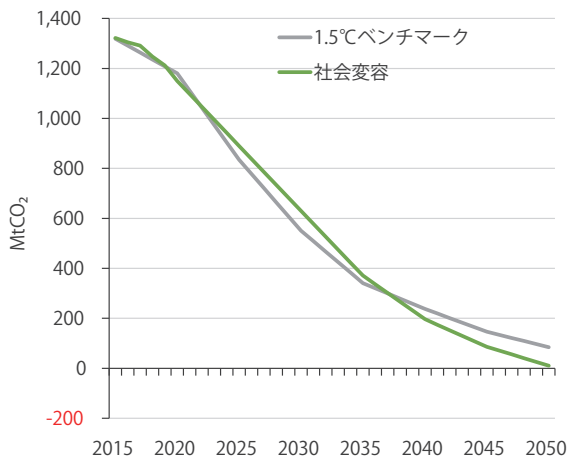
政府目標 累積 GHG 排出量 19.3GtCO₂ (2020-2050)



技術変容 累積 GHG 排出量 14.3GtCO₂ (2020-2050)



社会変容 累積 GHG 排出量 14.3GtCO₂ (2020-2050)



バランス 累積 GHG 排出量 14.3GtCO₂ (2020-2050)

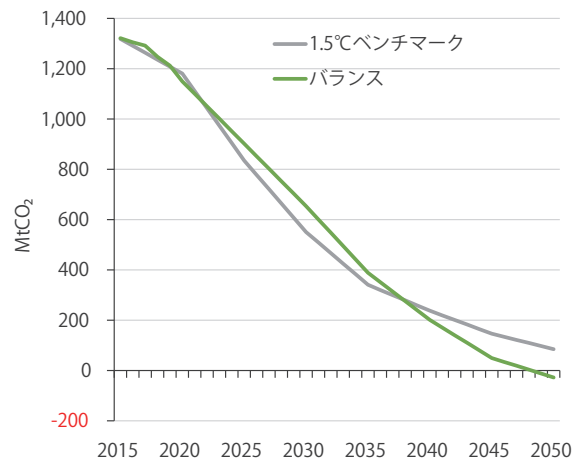


図 ES-2. 各シナリオのGHG時系列排出量変化とベンチマークとの比較

さらに、屋根置き太陽光発電、洋上風力発電を中心とした再エネ拡大に早期に着手すると同時に、再エネからの電力を効果的に利用できるような電力制度や需要側設備の整備、再エネの変動性への対応を進めることで、2040年には40%、2050年頃には90%近いエネルギー自給率の達成を望めることが分かった。

再エネの変動性への対応として、ガス火力発電を改修した水素専焼火力、再エネ電力を用いた水素製造設備の導入、V2Gで運用される蓄電池など様々な柔軟性を活用したシステムの構築を検討した。その結果、電力需給シミュレーションにより地点ごと、時間ごとに需給バランスが成立することを確認した。加えて、電力コストについても検討し、再エネを主力電源化し、柔軟性を高める設備を導入した場合でも、現在よりも低い水準のエネルギー価格が形成される可能性があることを見出した(図 ES-3)。この場合の投資額は、2021~2050年の平均で、3.9兆円/年~4.6兆円/年となり、現在の年間の化石燃料輸入額(20兆円/年~30兆円/年)を大幅に下回る。バランスシナリオが想定するエネルギーシステムの実現には、現状において日本が化石燃料の輸入に費やしている資金や国際的な投資を、国内の再生可能エネルギー開発のための投資にいかに向かせせるか、また、そのためにいかに市場環境を整備できるか、が鍵となる。

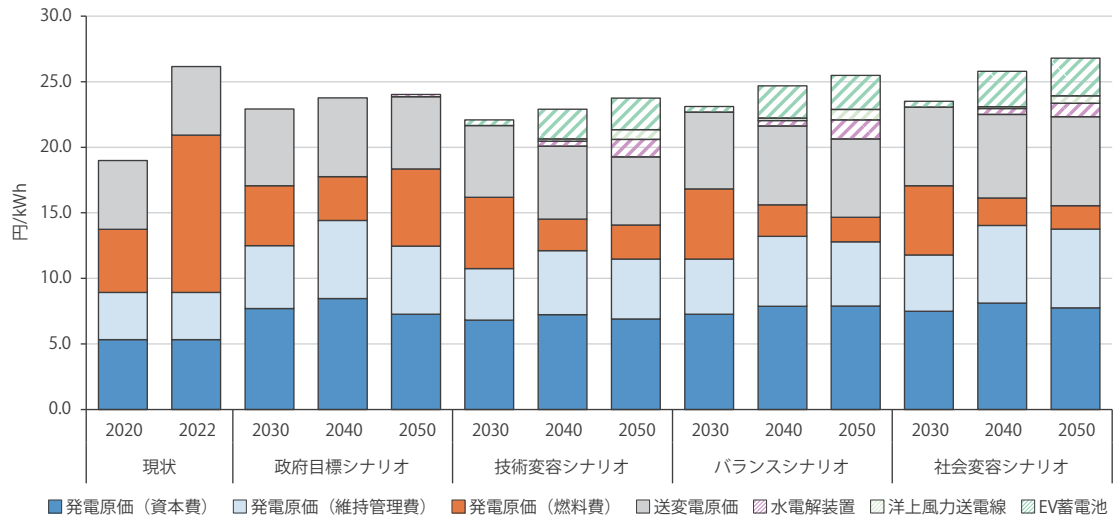


図 ES-3. 各シナリオにおける2030、40、50年の電力コスト推計結果と現状との比較

注：斜線部は電力以外のセクターと共有しているコストであり、全てが電力コストに上乗せされるとは限らない

バランスシナリオで描いた道筋を実現するためのマイルストーンとアクションプランを整理した（第6章、図ES-4）。概要は以下の通り。

- 社会経済全体の変化：**デジタル化や素材利用の変化など、脱炭素化を進めつつ生産性と付加価値の向上を推し進める戦略の立案と実行が求められる。社会全体の行動変容と産業構造転換を促す上で、十分なインセンティブを与えるカーボンプライシングを速やかに（2025年頃）導入することが有効と考えられる。同時に、社会経済の変化にあたり不平等・格差が拡大しないよう、人的資本への投資増などの積極的労働市場政策や失業手当等の充実を図るべきである。誰もが積極的にリスクを取れる環境を整備し、労働生産性や炭素生産性の高い産業への転換を社会的に受容できる形で進めることが望ましい。
- 建物・インフラ・設備の整備：**ZEB・ZEH化やEV充電インフラ整備は、建物更新のタイミングで順次行うのが合理的である。本格的設備導入がすぐに難しい場合、ZEB・ZEHレディ、電化レディ、IoTレディ化を進めておくことが重要である。産業部門も同様に、設備更新の投資のタイミングで円滑に脱炭素技術を取り入れられるよう、中長期的な計画が必要になる。交通分野については、少子高齢化に伴う人手不足や高齢者の移動問題の解決が課題となるが、自動運転技術の進展やオンライン・仮想空間技術の発展による移動需要の変化も見込まれる。これらの変化を踏まえた人流・物流の中長期的見通しを持って、効率的な施策を検討すべきである。
- 電力：**再エネの拡大のためには、電力システムの基盤である系統運用ルールの整備を2030年頃までに達成することが喫緊の課題である。これにより再エネ事業の安定性・予見可能性を高めることは、民間の再エネ投資促進に大きく貢献する。また、系統運用ルール整備は、V2Gやデマンドレスポンスなど柔軟性を様々なリソースを活用して確保することにつながり、系統安定化にも寄与する。加えて、投資対象となる再エネについても明確なシグナルを出すことが必要である。本レポートでの検討に基づく、ペロブスカイト太陽電池など新技术を活用した屋根置き太陽光発電や浮体式洋上風力発電がその中心となる。浮体式洋上風力発電については、造船所や火力発電所等の休廃止設備跡地も活用した港湾の整備など、設備導入のためのインフラ整備を2030年代を通じて進めることも重要となるため、国全体での長期の戦略を速やかに構築し明示することが、民間企業がこの分野でビジネスを展開するための必要条件となる。
- 水素：**カーボンニュートラル達成のためには、電化が困難な領域における水素利用が必要となる。2040年頃までに、鉄鋼・化学等の素材産業を中心とした水素利用による産業の脱炭素化を進展させるには、これらの工場周辺を中心とした水素サプライチェーンが構築されていることも望まれる。

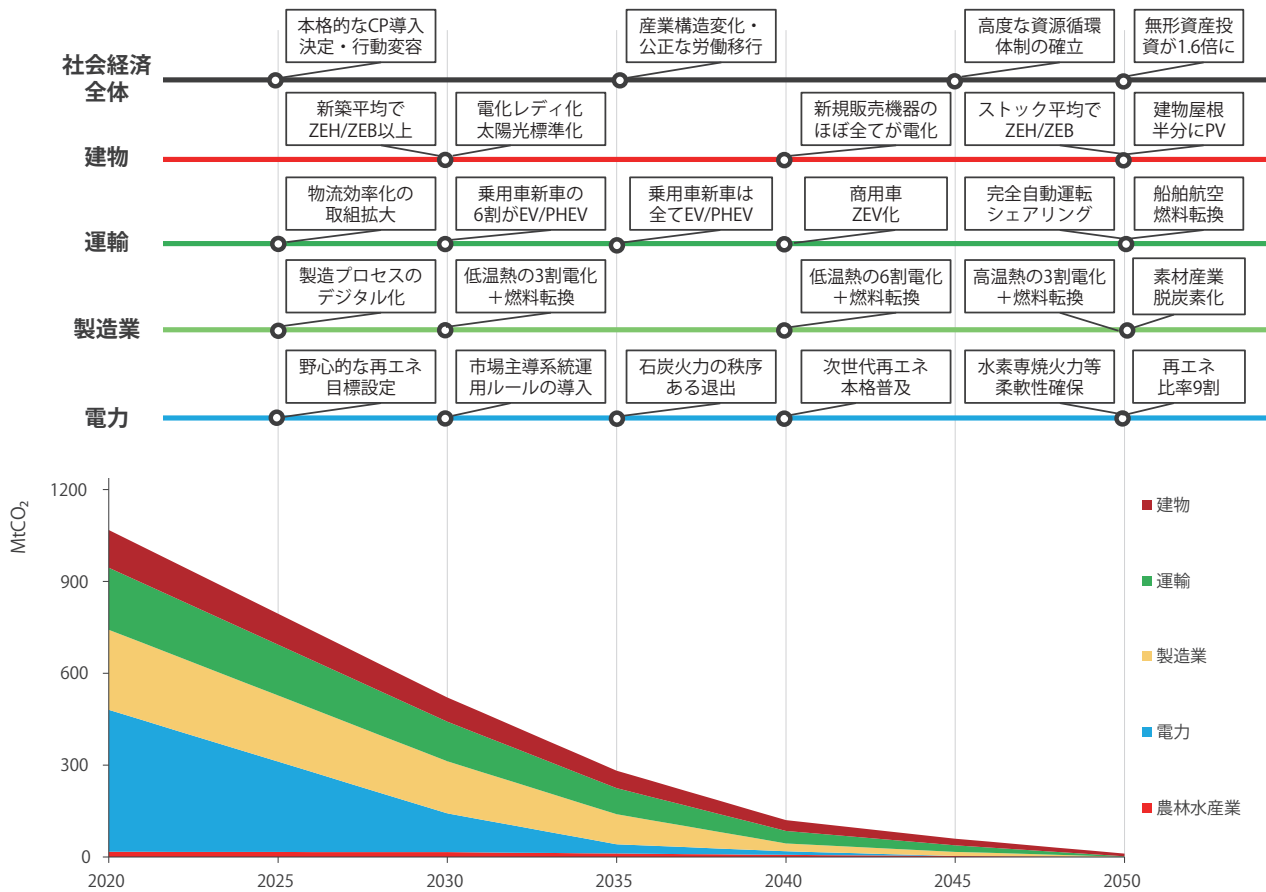


図 ES-4. 1.5°Cロードマップ（バランスシナリオ）における、部門ごとのエネルギー起源CO₂排出量時間変化と主要なマイルストーン

これらの取組は一企業で始められることもあるが、そのスケールアップや、様々な分野、企業、取組とのシナジーをもった発展のためには、様々な主体による、互いの強みを生かした連携的事業が数多く形成されることが必要である。これまでの部門最適のアプローチに留まらず、分野横断的な統合的な観点から、各主体が中長期的な戦略づくりに取り組むことが望まれる。



目次

第1章

本レポートの目的	20
1. 問題の所在	20
(1) 1.5°C目標に向けた継続的な野心度引き上げの必要性	21
(2) ステークホルダーとの「共創」の必要性	22
(3) 企業にとっての本レポートの価値	23
2. レポートの射程	23
3. ベンチマークの設定	25
(1) 1.5°C目標と整合する世界の排出経路	25
(2) 日本の2050年までの累積排出可能量のベンチマーク	25

第2章

1.5°Cロードマップの策定方法	28
1. 1.5°C目標を実現する道筋の探求	28
2. 道筋を同定するプロセスの概要	29
(1) シナリオ設定	29
(2) エネルギーサービス需要	30
(3) エネルギー需給	32
(4) 電力系統	33
(5) 指標	34
(6) ロードマップのとりまとめ	34

第3章

エネルギー需要はどこまで変わるか	35
1. 本章の概要	35
2. エネルギーサービス需要のシナリオ設定	35
(1) 生産活動量の推計	35
(2) 旅客輸送量の推計	39
(3) 貨物輸送量の推計	43
(4) 住宅床面積・性能の推計	44
(5) 業務用建物床面積・性能の推計	45
3. 電化・水素利用・省エネに関するシナリオ設定	47
(1) 導入される技術に関する考え方	47
(2) 各部門における想定内容	53
4. エネルギー需要の推計結果	72
5. まとめ	75

第4章

エネルギー供給はどこまで変わるか	76
1. 本章の概要	76
2. 電力・水素製造に関する想定	76
(1) シナリオ別の各電源の想定	76
(2) 電力系統の柔軟性の想定	87
(3) 電源と柔軟性リソースの設備容量まとめ	90
(4) 送電線	90
3. 電力系統シミュレーション結果	91
4. 一次エネルギー供給量の推計結果	99
5. まとめ	100

第5章

GHG 排出量を早期に大幅削減し、低廉で自立したエネルギーシステムは実現するか	101
1. 本章の概要	101
2. エネルギー起源 CO ₂ 排出量及び GHG 排出量とベンチマークとの比較	101
3. エネルギー自給率	106
4. コスト	107
5. 国内投資額	110
6. まとめ	112

第6章

1.5°C ロードマップ	113
1. 本章の概要	113
2. 主なマイルストーン	113
3. 分野ごとのアクションプラン	114
(1) 社会経済全体	114
(2) 民生	116
(3) 電力	120
(4) 産業	127
(5) 運輸	129
(6) 農林水産鉱業建設業	134

結び

結び	136
----	-----

参考資料 1

1.5°Cロードマップにおける各項目の分析方法	137
(1) エネルギーサービス需要の推計	137

(2) 部門別最終エネルギー需要の推計	141
(3) 1次エネルギー供給の推計	144
(4) 電力系統シミュレーション	145
(5) GHG 排出量の推計	147
(6) エネルギー自給率の推計	149
(7) コストの推計	149
(8) 投資額の推計	153

参考資料 2

推計結果の詳細	154
---------	-----

(1) 各部門の国内生産額	154
(2) 部門別 CO ₂ 排出量原単位	155
(3) 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因	156

参考資料 3

シナリオの不確実性と感度分析	158
----------------	-----

(1) 再生可能エネルギーの導入量が小さくなるケースの想定内容	158
(2) バランスサブシナリオのケースにおける各指標の推計結果	159
(3) サブシナリオ分析を踏まえた考察	160

参考資料 4

グローバルな累積排出量の分配 (effort-sharing) に関する議論	162
--	-----

参考文献

参考文献	165
------	-----



図表目次

図 ES-1. バランスシナリオにおける最終エネルギー消費量減少の内訳	7
図 ES-2. 各シナリオのGHG時系列排出量変化とベンチマークとの比較	8
図 ES-3. 各シナリオにおける2030、40、50年の電力コスト推計結果と現状との比較	9
図 ES-4. 1.5°Cロードマップ（バランスシナリオ）における、部門ごとのエネルギー起源CO ₂ 排出量時間変化と主要なマイルストーン	10
図 1-1. CATIによる日本のGHG排出量推移（左）と、IPCC AR6のグローバルと同じ速度で排出量が減少する場合の日本のCO ₂ 排出量推移（右）	26
図 2-1. 1.5°Cロードマップ策定方法の概要	28
図 2-2. 各シナリオのGDP想定	31
図 3-1. 鉄鋼・化学・窯業土石・紙パルブの生産活動量の基準年からの変化率	39
図 3-2. 旅客輸送に関わる人々の移動量の基準年比	41
図 3-3. 政府目標シナリオ、技術変容シナリオにおける年別の移動手段	41
図 3-4. 社会変容シナリオにおける年別の移動手段	42
図 3-5. バランスシナリオにおける年別の移動手段	42
図 3-6. 新築住宅に占める各省エネ基準の割合（全シナリオ共通）	45
図 3-7. 業務部門の新築建物のエネルギー性能別シェア（全シナリオ共通）	47
図 3-8. 基準年の産業部門別、用途別のエネルギー需要	48
図 3-9. 産業部門の熱エネルギーの温度帯別、業種別の分布	49
図 3-10. 産業部門の熱エネルギーの温度帯別、形態別の分布	49
図 3-11. 水素はしごの概念図	50
図 3-12. 排出削減費用曲線の例	51
図 3-13. 電炉、水素還元法、高炉による粗鋼生産量	57
図 3-14. シナリオ別のバージンナフサ利用率	59
図 3-15. シナリオ別のクリンカ代替率及び再利用クリンカの利用率	61
図 3-16. シナリオ別乗用車及びバス新車販売シェア	64
図 3-17. シナリオ別乗用車ストック推計結果	65
図 3-18. シナリオ別バスストック推計結果	65
図 3-19. シナリオ別小型トラック新車販売シェア	66
図 3-20. シナリオ別小型トラックストック推計結果	67
図 3-21. シナリオ別普通トラックストック推計結果	67
図 3-22. シナリオ別の船舶及び航空機で使用されるエネルギー割合想定	68
図 3-23. 政府目標シナリオ及びバランスシナリオの給湯機器ストック推計結果	69
図 3-24. 政府目標シナリオ及びバランスシナリオの給湯機器ストックシェアの推移	70
図 3-25. 農林水産業における各種機器等の燃料別シェアの想定	71
図 3-26. 各シナリオのエネルギー種別最終エネルギー消費量	72
図 3-27. 各シナリオの部門別最終エネルギー消費量	73
図 3-28. 2050年最終エネルギー消費量の他機関との比較	74
図 3-29. 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因（バランスシナリオ）	74
図 4-1. JPEAビジョンにおける年間太陽光発電導入量の推移	81
図 4-2. 海洋技術フォーラムの意欲的目標を達成するための年間導入容量及び累積導入容量	84

図 4-3. 一般水力発電の月別地域別最大発電電力量想定	86
図 4-4. 技術変容、バランス、社会変容シナリオにおける火力発電の設備容量（年別）	87
図 4-5. 政府目標シナリオの火力発電系における火力発電の設備容量（年別）	87
図 4-6. 各シナリオの各電源の設備容量	90
図 4-7. 各シナリオの電源別発電電力量	92
図 4-8. 各シナリオの電力供給に占める変動性再生エネの割合の推移	93
図 4-9. グリッドフォーミングインバータの社会実装の概念図	94
図 4-10. MGセット導入前後での系統運用の変化	94
図 4-11. 2040年、2050年における火力発電のシナリオ別持続曲線	95
図 4-12. 風力太陽光発電の出力抑制率	96
図 4-13. バランスシナリオの陸上風力発電と太陽光発電の時間別出力抑制率年間平均値	96
図 4-14. 風力太陽光発電の出力抑制された発電電力量	97
図 4-15. 2050年断面の送電線設備利用率	98
図 4-16. バランスシナリオにおける年間の設備利用率別の送電線持続曲線の一例	98
図 4-17. 各シナリオのエネルギー種別一次エネルギー供給量	99
図 5-1. シナリオ別部門別のエネルギー起源CO ₂ 排出量（CCSによるCO ₂ 回収後）推計結果	102
図 5-2. シナリオ別部門別のエネルギー起源CO ₂ 排出量（CCSによるCO ₂ 回収前）推計結果	102
図 5-3. シナリオ別のGHG排出量推計結果	104
図 5-4. シナリオ別の累積GHG排出量推計結果	105
図 5-5. 各シナリオで必要なタイプ別CO ₂ 地下貯留量	106
図 5-6. 各シナリオのエネルギー自給率の推移	106
図 5-7. 燃料費低位・再生エネ単価低位ケースにおける電力コスト推計結果	107
図 5-8. 燃料費低位・再生エネ単価高位ケースにおける電力コスト推計結果	108
図 5-9. バランスシナリオと政府目標シナリオで想定されるコストの変動幅	109
図 5-10. バランスシナリオの2050年における水素供給コスト	109
図 5-11. 各シナリオにおける5ヵ年ごとの投資額	111
図 5-12. 日本における化石燃料の輸入額の推移	112
図 6-1. 1.5°Cロードマップの主要なマイルストーン	113
図 6-2. とっとり健康省エネ住宅「NE-ST」	117
図 6-3. 再生可能エネルギーの1GWhの電力を発電した場合の雇用人数（雇用係数）	124
図 6-4. 石炭火力発電の1GWhの電力を発電した場合の雇用人数（雇用係数）	125
図 6-5. 石炭火力発電の建設年代別の設備容量（出典）	125
図 6-6. 「電力ネットワークの次世代化に向けた中間とりまとめ」での将来の送電線運用ルール整理	126
図 6-7. 配電事業者の参入イメージ	127
図 6-8. フィジカルインターネットによる積載効率向上のイメージ	132
図 S1-1. 電力系統分析で対象とする送電線、ノードの概要	146
図 S1-2. 電力需給シミュレーション分析の手順	147
図 S2-1. 政府目標シナリオとバランスシナリオにおける部門別CO ₂ 排出原単位の推移（2015-2019年=1）	155
図 S2-2. 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因（政府目標シナリオ）	156
図 S2-3. 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因（技術変容シナリオ）	156
図 S2-4. 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因（社会変容シナリオ）	157

図 S2-5. 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因（バランスシナリオ）	157
図 S3-1. バランスサブシナリオにおける電力システムの設備構成	158
図 S3-2. バランスサブシナリオの電源別発電電力量	159
図 S3-3. バランスサブシナリオの一次エネルギー供給量	159
図 S3-4. バランスサブシナリオのエネルギー起源CO ₂ 排出量（左：CCSによる回収後、右：CCSによる回収前）	160
図 S3-5. バランスサブシナリオのGHG排出量（左）と累積GHG排出量（右）	160
表 1-1. IPCC AR6統合報告書による、気温上昇を1.5°C以内とする排出経路における世界排出量の削減割合（2019年比）	25
表 2-1. 検討するシナリオの概要	29
表 3-1. 社会変容シナリオにおける社会経済諸元の想定内容（2050年）	36
表 3-2. 外出率の基準年比変化想定	40
表 3-3. 1回当たりの移動距離の基準年比変化想定	40
表 3-4. 物流の効率化による陸上貨物輸送量の変化	43
表 3-5. フィジカルインターネットによる陸上貨物輸送量の変化	43
表 3-6. 資源効率性向上による陸上貨物輸送量の変化（社会変容シナリオの場合）	44
表 3-7. 世帯数の想定（全シナリオ共通）	44
表 3-8. 省エネ基準ごとの断熱性能（UA値）の想定（全シナリオ共通）	45
表 3-9. 業務部門の生産額100万円あたりの床面積（単位：㎡）	46
表 3-10. 業務部門の生産性向上に関する想定	46
表 3-11. 技術成熟度評価（Technological Readiness Level）の定義	47
表 3-12. 産業部門（エネルギー集約的な素材産業以外）の想定内容	54
表 3-13. 粗鋼生産の想定内容（政府目標シナリオ、技術変容シナリオ）	56
表 3-14. 粗鋼生産の想定内容（社会変容シナリオ、バランスシナリオ）	57
表 3-15. 粗鋼生産に係るその他の想定内容	57
表 3-16. パージンナフサの原料及びその他の生産プロセスに関する想定	59
表 3-17. シナリオ別省エネ率、水素利用率、電化率	61
表 3-18. 各シナリオの家庭部門の想定内容	69
表 3-19. 各シナリオの業務部門の想定内容	70
表 4-1. 新築戸建て住宅の屋根への太陽光発電設置割合	77
表 4-2. 新築戸建て住宅の屋根に設置される各年の太陽光発電設備容量最大値（AC、単位GW）	77
表 4-3. 技術変容、社会変容、バランスシナリオの太陽光発電設備容量（AC、単位：GW）	78
表 4-4. 政府目標シナリオにおける太陽光発電設備容量（AC、単位：GW）	78
表 4-5. 各シナリオの太陽光発電の単年導入量（AC、単位GW）	79
表 4-6. 太陽光発電の設備利用率想定	79
表 4-7. ペロブスカイト／シリコン・タンデム型モジュールの採用率	79
表 4-8. 各年における出力抑制計算前の太陽光発電電力量（最大値、単位:TWh）	80
表 4-9. 各年の陸上風力発電の設備容量（単位:GW）	80
表 4-10. 各年における出力抑制計算前の陸上風力発電電力量（最大値、単位:TWh）	80
表 4-11. 各年の洋上風力発電の設備容量の想定（単位:GW）	83
表 4-12. 各年における出力抑制計算前の洋上風力発電電力量（最大値、単位:TWh）	83

表 4-13. 稼働する原子力発電の設備容量想定 (単位:GW)	86
表 4-14. 蓄電池の設備容量 (単位:GW、括弧内はGWh)	88
表 4-15. 揚水式水力発電の設備容量	88
表 4-16. 家庭用ヒートポンプ式給湯器柔軟性能力	89
表 4-17. 水素製造設備の設備容量	89
表 4-18. 各シナリオにおける地域間連系の運用容量の想定 (単位MW)	91
表 4-19. 地内基幹送電線の増強まとめ (全シナリオ共通)	91
表 4-20. 火力発電の供給予備率	95
表 5-1. 2020年から2050年の累積エネルギー起源CO ₂ 排出量 (単位GtCO ₂)	103
表 5-2. シナリオ別の主要年のGHG削減率	104
表6-1. 社会経済全体の変革に向けたアクションプラン	116
表6-2. 民生部門の脱炭素化に向けたアクションプラン	120
表6-3. 系統運用ルールと送電線増強に関するアクションプラン	121
表6-4. 太陽光発電に関するアクションプラン	121
表6-5. 陸上風力発電に関するアクションプラン	123
表6-6. 洋上風力発電に関するアクションプラン	124
表6-7. 火力発電に関するアクションプラン	126
表6-8. 産業部門に関するアクションプラン	128
表6-9. 運輸陸上旅客に関するアクションプラン	130
表6-10. 運輸陸上貨物に関するアクションプラン	131
表6-11. 農林水産業に関するアクションプラン	134
表 S1-1. 輸送品目と産業部門の対応表	139
表 S1-2. 検討対象とした機器種別	142
表 S1-3. 地域区分	142
表 S1-4. 水電解と合成燃料変換の想定効率	145
表 S1-5. Power-to-liquidにかかる想定効率	145
表 S1-6. 技術変容、バランス、社会変容シナリオで想定した部門別ガス別の2050年におけるGHG削減率 (基準年比)	148
表 S1-7. 政府目標シナリオで想定した部門別ガス別の2050年におけるGHG削減率 (基準年比)	148
表 S1-8. 各設備の初期投資単価	150
表 S1-9. 燃料価格の想定	151
表 S1-10. グリーン水素の諸元想定	152
表 S1-11. 海外ブルー水素の諸元想定	152
表 S1-11. 水素輸送費用の諸元想定	153
表 S2-1. 各部門の国内生産額に関する推計結果	154
表 S3-1. 各年の風力発電の設備容量 (単位:GW)	158
表 S3-2. 各年における出力抑制計算前の陸上風力発電電力量 (最大値、単位:TWh)	158
表 S4-1. 1.5°C目標に整合したグローバル累積GHG排出量上限に対し、配分方法による日本の排出量 (2020-2050年) の違い	163

第1章 本レポートの目的

1. 問題の所在

本レポートの目的は、世界全体の1.5°C目標に向けて、自国の温室効果ガス排出量削減の観点において、日本がより大きな貢献を果たすためのアクションプランを検討し、様々な対策の実行を期待されるビジネス界をはじめとする様々なステークホルダーが参照しうるものとして提示することである。また、それにより、日本のエネルギー政策及び気候変動対策に関する議論を深化させることである。

2015年に合意されたパリ協定では、「世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも2°C高い水準を十分に下回るものに抑えること並びに世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも1.5°C高い水準までのものに制限するための努力を、この努力が気候変動のリスク及び影響を著しく減少させることとなるものであることを認識しつつ、継続すること¹」という温度目標が定められている。1.5°C目標とは、パリ協定において国際社会が正式に合意し、その実現に向けて協調した努力を各国が行うことを約束しているものである。

気候変動問題はもはや地球環境だけの問題ではない。基本的な人権と国際社会の安定を脅かす社会問題であり、経済活動や金融システムに重大な影響をもたらす経済問題である。こうした認識の高まりを背景として、国際的に、金融、規制や制度、ビジネスにおける取引ルール等に急速に変化が生じており、企業にとっても喫緊の経営課題になりつつあると言える。

そこで、本レポートでは、主に以下の3点について探求する。

- ・ ① 世界全体での1.5°C目標に貢献するため、世界各国がその目標の野心度を更に高めていく必要がある中で、日本として今後野心的な水準での排出削減を実現することは、どのようにすれば可能か？
- ・ ② 大幅な排出削減を実現している状況で想定されうる社会経済の姿は？より野心的な排出削減に取り組むことと、豊かな社会を実現することは両立するか？
- ・ ③ より豊かで持続可能な社会を追求するために、社会経済活動やエネルギー利用においてどのような行動が必要か？

そして、本レポートの結論を先取りすれば、次の通りである。世界全体の1.5°C目標に日本がより大きな貢献を果たすために、現行の目標よりも野心的な水準での排出削減を実現することは、今すぐに社会経済とエネルギーの両面で変革に取り組み、可能である。また、こうした大きな変化は新たなビジネスやその他の機会に満ちており、うまく活用することで、企業の生産性と競争力を高め、より豊かで快適な社会の実現につながる。ただし、こうしたシナリオは従来のトレンドの延長線上では実現し得ず、企業や消費者などの行動変容と、それを強力に促進するための政府の政策措置が不可欠である。

では、なぜ2°Cではなく1.5°C目標を追求すること、また、政府が掲げている現行目標よりも野心的な水準での排出削減を検討することが重要なのだろうか？また、なぜそれをステークホルダーが参照できるものとするのが有効なのだろうか？本章の以下では、本レポートの背景にある問題意識について深掘りする。

(1) 1.5°C目標に向けた継続的な野心度引き上げの必要性

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の評価によると、世界全体の気温が2°C上昇した場合と比較して、1.5°C上昇に留めることができた場合は、熱波や豪雨など極端現象が少なくなるのみならず、特に東南アジア・中央アジア・南アジアにおける農作物の生産量減少の幅が小さくなること、厳しい水不足にさらされる世界人口が約半分になること、気候に関連したリスクや貧困の影響を受けやすい人々の数が数億人少なくなること、など特に途上国への影響が大きく異なる。また、気候システムに限らず、生物多様性の喪失や化学物質による汚染などにより、地球上の自然環境に係る様々なシステムがプラネタリー・バウンダリー²を超えており、これらは気候システムとも深い相互関係がある。気温上昇を1.5°Cに抑制することは、2015年9月の国連サミットにおいて全ての加盟国が合意した持続可能な開発目標（SDGs）を統合的に達成するうえで極めて重要であるとされている³。さらに、気温上昇が1.5°Cを超えることで、氷床の不安定化や熱帯雨林の生態系喪失、さらにはそれらの不可逆的な変化が他のシステムに波及してドミノ倒しのように連鎖的に起こり、地球システム全体の劇的な変化につながるリスクが高まる、と指摘されている³。

日本を含む先進国も、気温上昇を1.5°Cに抑制するために責任を果たすことを国際的に約束している。2021年に英国で開催されたG7（主要7か国）気候・エネルギー大臣会合では、各国は1.5°C目標を追求する決意を確認し⁴、同年に開催された国連気候変動枠組み条約締約国会議（COP26）では1.5°C目標を追求する決意を含む「グラスゴー気候合意」が採択された。それ以降、国際社会におけるパリ協定の軸足は2°C目標から1.5°C目標へと移っており、2023年に日本で開催されたG7気候・エネルギー大臣会合の合意文書および広島G7サミット共同声明においても、日本を含むG7各国がこの目標にコミットすることが再確認されている⁵⁶。

しかしながら、IPCCの第6次統合評価報告書によれば、現状において世界各国が約束している2030年までの排出削減目標が全て実現したとしても、気温上昇を1.5°C以内で安定化させる排出経路とは依然として大きな乖離がある⁷。IPCC報告書は、1.5°C目標の実現には、現状からの大転換（major transition）が不可欠であり、今すぐに行動を起こし遅くとも2025年までに世界全体の排出量をピークアウトする必要があることを指摘している⁷。

ここで、パリ協定には、年月とともに段階的に向上する各国の危機感と野心、技術の発展を加味し、目標の野心度を引き上げていく「ラチェット・メカニズム（Ratchet-up Mechanism）」が組み込まれている。パリ協定の長期目標達成はこの仕組みが効果的に運用されるかどうかにかかっていると言っても過言ではない。2023年に実施されている第1回グローバル・ストックテイクは、長期目標に対する世界全体での現時点での進捗状況を評価するものであり、各国が2025年に提出する新たな目標を設定するにあたっては、その結果を踏まえて従来の目標から野心度を更に引き上げることが期待されている。各国が設定する目標はそれぞれの国の事情を考慮してあくまで自主的に定めるものであり、各国の排出削減目標が世界全体での長期目標と整合した水準になっているか、といったトップダウンの発想による評価とは馴染まない。そのため、世界全体の長期目標に対する進捗状況を踏まえて、より野心的な排出削減を実現する可能性を継続的に模索していくことを全ての国に対して求めることで、実効性を担保しようとしているのである。

世界全体での残り少ないカーボンバジェットを有効に活用するため、早期に排出削減を加速させることで、累積排出量をできる限り減らしていくことが求められている（本章第3節及び本章末コラム参照）。一方、現状の日本において議論されている脱炭素化に向けたアクションプランの多くは、石炭火力発電所や内燃機関自動車など、既存のエネルギーインフラや関連する産業を維持しつつ、2030年以降に実用化が期待される革新的技術を適用することで温室効果ガスの削減を図ることが重視されており⁸、2050年にカーボンニュートラルを実現できたとしても、そこに至るまでの累積排出量が大きくなってしまふ。したがって、特に2050年に至るまでの過程において、より大きな排出削減を行う余地が存在すると考えられる。

そのため、本レポートの第一の目的として、1.5°C目標に日本がより大きな貢献を果たすために、日本において現行目標よりも野心的な水準で温室効果ガス排出削減を実現しうる1つの道筋を具体的に描き出し、その実現のために必要な変化やアクションプランを明らかにすることを目指す。

【まとめ】問題の所在 その1

パリ協定では、世界全体での1.5°C目標の達成のため、各国の排出削減目標の野心度を継続的に引き上げていくことが求められている。日本におけるより野心的な排出削減の可能性を検討するため、より累積排出量が小さくなる排出経路と、その実現に向けたアクションプランを明らかにする必要がある。

(2) ステークホルダーとの「共創」の必要性

1.5°C目標を達成するためにいつ何をするのか、あるいは、何をどのように変えるのか、を具体的に示した時系列付のアクションプランは、科学的な知見に基づいて策定することが重要であるものの、科学のみで最適な姿を特定できるようなものではなく、社会において合意形成が行われ実行に移されていくことで初めて意味を持ちうる。そのため、幅広いステークホルダーが連携し、政府等が描くアクションプランを検証しながら、必要に応じて代替案を模索し、様々な視点からの議論を深めて実行に結び付けていくことが重要であると言える。

アクションプランが実行に移されていくためには、社会の多くの構成員にとってそれが魅力的であり、実現可能なものでなければならない。これは必ずしも全ての構成員の合意がなければならないということの意味しないが、少なくともこのアクションプランに基づいて行動し、他の構成員に協調した行動を働きかけようとするステークホルダーが一定数存在しなければならない。

そのためには、企業にとって事業活動を制限する足枷となるのではなく、大きく社会が変化していく不確実性に満ちた状況において、新たな成長のチャンスをつかむためのヒントとなり得るような、前向きな行動を応援する道標となりうるということが重要である。これまでも優れた企業は、不都合な真実に目を背けることなく、新しい時代に向き合う勇氣を持って事業変革に取り組み、成功を収めてきた。この大きな社会の変化や要請は、気候変動問題に限るものではないが、本書が提示するアクションプランは、こうした企業にとって、炭素制約下社会に大きく社会が向かっている中での経営の未来地図の1つとなることを意識している。

IPCCが2018年に取りまとめた1.5°C特別報告書では、地球温暖化を1.5°C上昇に抑えるためには「エネルギー、土地、都市、インフラ（交通と建物を含む）、及び産業システムにおける、急速かつ広範囲に及ぶ移行が必要となる⁹」と指摘している。このことは、1.5°C目標を如何に達成するか、という議論のスコープが、エネルギーの供給における排出削減対策を如何に施すか、という範囲にとどまらず、化石燃料や資源を自然環境が許容する水準以上に消費する社会経済システムをいかに変革していくか、という点にまで及ぶことを示唆している。

一方、社会経済システムの本質的な変化は、気候変動対策だけを目的として起こるものではない。特に現在、国際的に第四次産業革命とも呼ばれる大きな変革が起こりつつある。デジタルと物理的な世界が融合し、広範な経済活動が自動化されていくことは不可避であり、従来の生産・消費の形が大幅に変化し、否応なく日本の産業構造も変化していくと、複数の論者が指摘している¹⁰⁻¹⁴。ウクライナ危機において顕在化したような世界の分断や地政学的リスク、貧困や格差、少子高齢化と財政危機、地方衰退といった諸々の問題を克服するための行動も重要である^{15,16}。そのため、エネルギー分野内だけでの最適解を模索するのではなく、分野横断的な視点に立ち、気候変動とその他の様々な社会課題の統合的な解決につながるアクションプランを構築することが重要である。

そのため、本レポートでは、気候変動に対する問題意識を共有しつつも多様な関心を有するステークホルダーとの対話にもとづき、各々が当事者意識を持ちうるアクションプランへと練り上げていくことを目指している。

【まとめ】問題の所在 その2

1.5℃目標の追求を、事業活動を制限する足枷ではなく、事業変革と社会の繁栄を実現する好機と捉えられるように、ステークホルダーと共に、当事者意識を持ちうるアクションプランを構築することが望ましい。

(3) 企業にとっての本レポートの価値

企業は、最終的なネットゼロ達成の目標年だけでなく、そこに至るまでの具体的な移行戦略・中間目標を設定し、進捗やリスクについても開示することが、事実上の社会的要請として求められるようになってきている。例えば、国連事務総長のイニシアティブで組織された「非国家主体のネットゼロ宣言に関するハイレベル専門家グループ」は、2022年11月に企業等の非国家主体の排出削減に関する行動指針についての提言を公表した¹⁷が、その中で、ネットゼロに向けた目標については、バリューチェーン全体について、5年ごとの短期目標を設定し、具体策を示すことを求めている。

自社とサプライチェーンの事業計画の立案や投資判断にあたっては、社会を構成するそれぞれのセクターにおいて、脱炭素化がどのようなタイムラインで進んでいくのか、その見通しを持つことが、適切な意思決定を行う上で欠かせない。ネットゼロへの移行を目指す金融機関イニシアティブの国際的連合体であるGFANZは、セクターごとの移行経路に関するガイダンス¹⁸を提供しており、その中で、「セクターごとの移行経路は、科学的知見と具体的な排出削減のステップを結びつけるものであり、必要とされる温室効果ガス（GHG）排出量削減のペース・タイミングのベンチマークを与え、変化のために必要なアクション（技術開発、資産の撤退、市場変化、政策、エネルギーミックス等）をまとめるものである」、としている。本レポートは、1.5℃目標実現を目指す世界的な潮流を踏まえた日本の脱炭素の道筋を提示することで、企業が自社の事業計画を検討する上での脱炭素に関する道標の役割を果たすことを目指している。

本レポートでは、デジタル化をはじめとする社会経済システムの大きな変化の潮流を踏まえたうえで、鉄鋼・化学などの素材産業、製造業、サービス産業、運輸などの分野ごとに2050年までの道筋と、電力をはじめとするエネルギー供給の在り方とを検討する。1.5℃目標に整合した排出削減要請に伴う社会経済とエネルギーシステムの大きな変化は、企業活動にとって大きなリスクであり、同時に新たな事業が大きく伸びる機会でもある（社会は常にダイナミックに変化しているため特別なことではない）。第6章で整理する分野別のアクションプランは、いつ、どのような変化が起こるか、企業が自社事業分野における今後の変化を見通す際の目安の一つとして、あるいは、従来の事業分野以外において直面している課題に対して自社が新たなソリューションを提供しビジネスに結び付けるための参考として活用いただきたい。また、本レポートで検討した様々な導入技術群については、国際エネルギー機関（IEA）による技術成熟度評価や、業界団体や専門家へのヒアリング等に基づき、導入タイミングや拡大の規模を設定してシナリオを構築している。一定の経済合理性を持ちつつ排出量を速やかに下げていくために重要な技術とその拡大タイミングについても参考としていただけるものと考えている。

2. レポートの射程

本レポートでは、日本から2050年までに排出される温室効果ガス及び森林等による吸収を検討対象とし、その中でも特に、エネルギー起源及び非エネルギー起源の二酸化炭素排出量の削減方法について重点的に検討を行う。そのうえで、ステークホルダーとの共創により、1.5℃目標と整合しうる排出削減の道筋を描くのみならず、その道筋を実現するためにどのような行動が必要か、そのアクションプランを例示するところまでを射程としている。

① 対象とする地域

日本国内を対象としている。したがって、国外での活動、例えば日本企業が海外の生産拠点等で排出している温室効果ガス

や、最終的に国内で消費される輸入品の生産のために国外で排出された温室効果ガスなどは検討の対象としていない。また、国際海運及び国際航空については、現行の国別排出量には含まれていないため、将来の推計値においても考慮しない。海外産のカーボンクレジットも対象外としている。

一方、電力システムにおける送電系統の制約を考慮するため、可能な限り基礎自治体レベルでデータ収集を行い、高い地理的解像度でエネルギー需給の分析を行っている。

② 対象とする期間

現在から2050年までの期間を対象としている。アクションプラン作成の基礎情報となるエネルギー需給やGHG排出量を計算する際には、2015年～2019年の平均値を基準年（ベース）として、2030年、2040年、2050年の各時点におけるエネルギー需給及び温室効果ガス排出・吸収量を推計したうえで、各時点間は線形補間によって推計を行っている。

一方、電力システムにおけるkWベースの需給バランスは再エネ利用の程度などに大きく影響を与えるため、各年における1時間ごとの電力需要量及び供給量（ロードカーブの大きさと形状）を推計し、高い時間解像度で検討を行っている。

③ 温室効果ガスの種類

エネルギー起源及び森林吸収源を含む非エネルギー起源の二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、一酸化二窒素（N₂O）、代替フロン等4ガス（HFCs, PFCs, SF₆, NF₃）を検討対象としている。

ただし、エネルギー起源及び非エネルギー起源の二酸化炭素排出については、詳細に積み上げ計算を行っているが、それ以外の温室効果ガスの排出及び吸収については簡易的に推計を行っている。例えば、営農方法の見直しによる農業由来のメタン排出量の削減や、海洋生態系への炭素の隔離・貯留など、様々な取り組みが検討・実施されているが、これらについて個別の対策のポテンシャルや効果を推計しているわけではない。

④ 1.5°C目標の達成に資する行動

前節で述べた通り、本レポートでは、エネルギー分野における省エネルギー、再生可能エネルギーによる発電、といった対策だけでなく、例えばデジタル・トランスフォーメーションによる省資源・脱物質化といった、ビジネスモデルや社会経済の在り方そのものの変化をも1.5°C目標の達成に資する行動として検討対象としている。

⑤ ステークホルダーとの共創

本レポートでは、気候変動問題に対する高い問題意識を有し、ビジネスを通じてその解決に貢献したいという意思を持った企業群とのアクションプランの共創を試みた。

より具体的には、約1年にわたって複数回のワークショップを開催して修正を重ね、意見交換やアンケート等を通じた参加者からのフィードバックを踏まえて、執筆者がアクションプランに対して一定の理解が得られたと判断したものが本稿で提示するバージョンである。このことは参加者が所属する企業等による本アクションプランへの組織的な支持・賛意を意味するものではない。もちろん、参加者やその状況によって共感しうる内容は異なり、状況の変化によって取るべき行動も変化していく。従って、今後、より広いステークホルダーに共有することができ、より高い効果を生み出すものへと洗練させていくために、本レポートで提示するアクションプランは常に見直しを図られていくべきものである。

⑥ その他

本レポートでは様々な分析を行っているが、これらの分析上の射程はその分析手法と共に本レポートの各章及び参考資料に記述されているため確認されたい。例えば、コストについては、想定するシナリオにおける平均費用を積み上げ計算によって求めているのであって、市場において定まる均衡価格を予測しているわけではない。また、電力需給については、1時間ごとの需給一致並びに一定の予備力の確保を条件に電力システムの運用方法を分析しているのであって、系統要素の稀頻度多重事故を想定した供給信頼度の評価などは行っていない。水素需給については、日本全国での年間の需給一致の確保を条件としているが、より短い期間や地域単位での需給バランスについては考慮していない。これらは別の検討が必要であり、分析の射程を超えるものである。

3. ベンチマークの設定

本レポートのゴールである、世界全体での1.5°C目標により大きな貢献を果たす日本の排出削減経路を検討するにあたって、比較対象の指標（ベンチマーク）となる累積排出量を以下の通り設定した。前述のように各国の目標はそれぞれの国の事情に応じて自主的に定められるものであり、このベンチマークは各国の目標の水準を評価するものではないが、野心度の引き上げを検討するうえでの客観的な参照点を提供するものである。

(1) 1.5°C目標と整合する世界の排出経路

世界の平均気温上昇は、化石燃料起源の累積CO₂排出量と比例関係にあることが知られている。産業革命以降の累積CO₂排出量について、気温上昇を一定の上限に抑えるために許容できるCO₂排出蓄積量をカーボンバジェットと呼ぶ。これまでに排出されたCO₂の累積量やCO₂以外の温室効果ガス（GHG）の効果を考慮することで、IPCC第6次評価報告書（AR6）統合報告書では、50%の可能性で気温上昇を1.5°C以内に抑えるために、2020年以降に排出できる総CO₂排出量（残余カーボンバジェット）は500 Gt（67%の可能性では400Gt）としている。残余カーボンバジェットの推定には大きな不定性があるが、1.5°C以内に抑えるための1850年以降の累積CO₂排出量2,900 Gt（中央値）のうち、大半を既に排出してしまっており、残された排出可能性がわずかであることは明確である⁷。さらに、現在世界全体では40Gt/年以上のCO₂が排出されており（すでに2023年を終えようとしている）、増加を続けていることから、1.5°C目標を達成するためには、速やかな排出量削減を直ちに行わなければならない。

また、IPCCでは、今後必要とされるGHGの削減レベルを検討するため、世界の様々な研究機関が行った統合評価モデル（Integrated Assessment Models）を用いたシナリオ分析結果を評価し、気温上昇を抑制するために必要なGHGの削減レベルが取りまとめられた。AR6統合報告書によると、50%以上の可能性で、オーバーシュートがない、または限定的（0.1°C以内）で気温上昇を1.5°Cに抑制するには、グローバルの排出量について表 1-1のような時系列で削減する必要がある。

表 1-1. IPCC AR6統合報告書による、気温上昇を1.5°C以内とする排出経路における世界排出量の削減割合（2019年比）

温室効果ガス	2030	2035	2040	2050
すべてのGHG	43%	60%	69%	84%
CO ₂	48%	65%	80%	99%

(2) 日本の2050年までの累積排出可能量のベンチマーク

グローバルの累積排出可能量を国ごとに配分する方法に国際的な合意はないが、本レポートでは、1.5°C目標のために必要な、早期のGHG排出量の大幅な削減を果たす日本における可能性の検討のために、以下の二つを、日本の累積排出可能量のベンチマークとして設定する。

Climate Action Tracker（CAT）による各国ごとの「1.5°C整合のGHG排出量経路」に基づく2020-2050年の累積GHG排出可能量（14.3Gt CO₂eq）

IPCC AR6におけるグローバルのCO₂排出量経路（オーバーシュートがないか限定的で気温上昇を1.5°C以内に抑える）をスケールした累積CO₂排出可能量（12.7 Gt CO₂）

CATは、IPCC 1.5°C特別報告書で用いられた世界の様々な研究機関による統合評価モデルを集積したシナリオ・データベースから、気温上昇が1.5°C以内でオーバーシュートがない、または限定的なシナリオ群を抽出し、そのGHG排出量の時系列推移

の中央値を算出した。それによると、2020年から2050年間のグローバルでの累積GHG排出可能量は、727 Gt CO₂eqとなっている（土地利用や森林吸収分を除く。25パーセンタイルは631Gt、75パーセンタイルは794 Gt）¹⁹。

GHG排出量の推移をどの程度地域ごと、国ごとに分解して計算・公表しているかは、シナリオごとに異なる。そのため、日本の経路のデータを示していないシナリオについては、より広い範囲のデータから日本の排出量推移を算出する必要がある。CATでは、OECD諸国全体の削減経路を、人口・GDP・排出強度（GDPあたりの排出量）を考慮して各国に配分し、日本に期待される排出量推移を算出している^{20,21}。このようにして算出した2020年から2050年間の日本の累積GHG排出量は、14.3 Gt CO₂eqとなる（中央値）。このレポートでは、この累積GHG排出量を指標の一つとして参照する。

また、CO₂排出量については、IPCC AR6でまとめられた、可能性50%で気温上昇を1.5°Cに抑えるシナリオ群の排出量推移の中央値を参照し、2019年比でグローバルと同じように日本のCO₂排出量が下がっていく場合を考えることができる。その場合の2020-2050年のエネルギー起源CO₂の累積排出可能量は12.7Gt CO₂となる¹。これは、表1-1で示したCO₂の削減割合を日本も達成した場合の数値となる。

図1-1に、これらの日本の排出量推移を図示した。いずれの場合も、直線的に排出量が減る場合に比べて下側を通る（すなわち、早期の排出量削減を必要とする）経路となっている。直線的に減少し2050年に排出量ゼロとなる場合の2020-2050年の累積CO₂排出量はGHG（土地利用・森林吸収分を除く）で17.8Gt CO₂eq、エネルギー起源CO₂で15.0 Gt CO₂となり、上記ベンチマークよりも大きくなる。

なお、日本政府は「国が決定する貢献の明確性、透明性及び理解のための情報」において、2030年46%削減目標（2013年比）はパリ協定の気温目標に整合的であり、また、2050年ネットゼロ目標もパリ協定の気温目標達成に貢献するものであると説明している²²。しかし、具体的な根拠（すなわち自国の責任分についての考え方）は示されていない。参考資料4には、グローバルな累積排出量の分配方法（effort-sharing）に関するこれまでの議論について記している。過去の排出に対する責任や、一人あたりの排出量についての平等性を考慮した配分では、上記ベンチマークとして設定した数字よりも、日本の累積排出可能量は小さくなる。

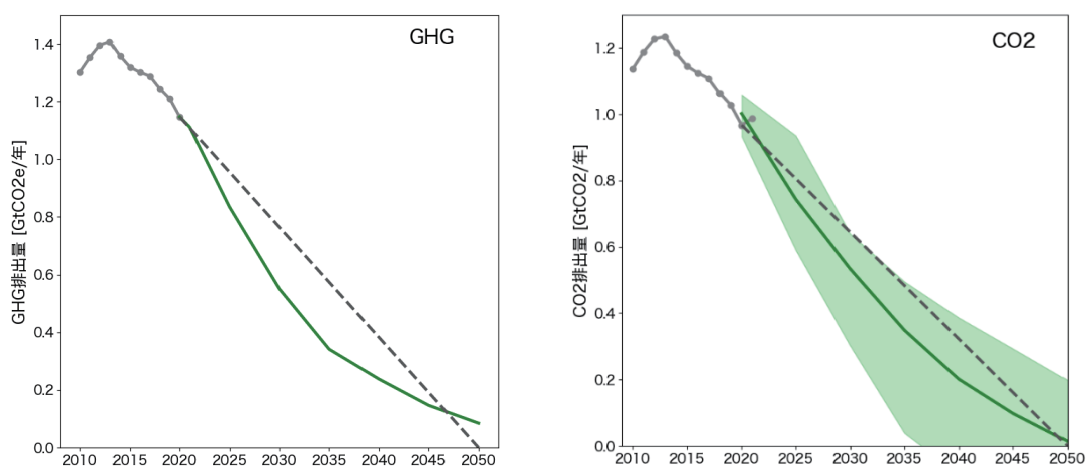


図1-1. CATによる日本のGHG排出量推移（左）と、IPCC AR6のグローバルと同じ速度で排出量が減少する場合の日本のCO₂排出量推移（右）

破線は2019年から直線的に排出量が減少し2050年にゼロになる場合。シェード部分は、グローバルでの5%-95%範囲を単純にスケールしたもの。

¹ GHG排出量についても同様の計算を行うことが可能だが、AR6統合報告書 政策決定者向け要約でまとめられているGHG排出量は、土地利用と森林吸収分を含んでおり、国ごとの変動が非常に大きいため、そのまま日本の排出量推移にスケールするのは不適切と考えられる。

コラム 1.5°C目標をめぐる国際潮流

2015年の国連気候変動枠組条約（UNFCCC）第21回締約国会議（COP21）で採択されたパリ協定は、長期気温目標として、地球の気温上昇を工業化前に比べ「2°Cよりも十分低く」抑え、さらには「1.5°C未満に抑えるための努力を追求する」ことを掲げた。1.5°C目標は、当初、パリ協定において「努力目標」としての位置づけであったと言える。しかし、1.5°Cに抑えるための排出経路や温暖化を2°Cと1.5°Cに抑えた場合の影響の差などについての科学的知見は当時、不十分であったため、パリ協定と同時に採択されたCOP決定において、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）に対して報告書を作成することを要請した。その結果、作成されたものが、IPCC 1.5°C特別報告書⁹である。同報告書のポイントは以下のとおり。

- ・ 工業化以降の気温上昇は既に約1°Cとなっており、その悪影響は既に顕在化している。
- ・ 今後1.5°Cに上昇したときの悪影響のリスクは現在より高くなり、2°C上昇だとさらに高くなる。
- ・ 1.5°C上昇と2°C上昇がもたらす悪影響には明確な違いがある
- ・ 気温上昇を1.5°C未満に抑えるためには、世界のCO₂排出量を2030年には2010年比45%削減し、2050年頃までにネットゼロにする必要がある。

1.5°C特別報告書を受けてグテーレス国連事務総長は、2019年9月の国連気候行動サミットに先駆けて、各国に対して1.5°C目標に沿った排出削減目標の引き上げと2050年までのネットゼロ達成を呼びかけた。その後、EU、日本、韓国、米国など多くの国が2050年までに温室効果ガス（GHG）の排出をネットゼロにする目標を掲げ始めた。さらに、2020年6月には、UNFCCC事務局が1.5°C目標達成には、国家以外にも企業、金融機関、地方自治体、NGO等の「非国家アクター」の行動が重要であるとして、非国家アクターを対象としたキャンペーン「Race to Zero（ゼロへの競争）」を開始した。現在、11,000以上の非国家アクターが参加している（2022年末時点）。

このように1.5°C目標に向けた機運が高まる中、2021年11月にCOP26で採択されたグラスゴー気候合意では「1.5°Cの気候変動の影響は、2°Cの場合よりもはるかに低いことを認識し、1.5°C以内に抑える努力を追求することを決意する」と明記された⁵。これは、パリ協定の軸足が、事実上、これまで努力目標と位置づけてきた1.5°C目標の達成に向けて移ったことを意味した。加えて、日本政府は、日米首脳会談（2021年4月）およびコンウォールG7サミット共同声明（2021年6月）の中で、気温上昇を1.5°Cまでに制限する努力を行うことを明確にし、2023年5月の広島G7サミット共同声明においても1.5°C目標へのG7としてのコミットメントを再確認している⁶。

第2章

1.5°Cロードマップの策定方法

1. 1.5°C目標を実現する道筋の探求

前章では、本レポートの目的を示し、本レポートを通して、日本が世界全体の1.5°C目標により大きな貢献を果たすために2020年以降の温室効果ガスの道筋を探ることを示した。では、我々が「1.5°Cロードマップ」と呼ぶ、その道筋をどのように明らかにすることができるだろうか。

図2-1に示す通り、本レポートでは、シナリオ分析と呼ばれる手法を、実社会のステークホルダーとの共創プロセスの中に組み込むことで、ベンチマークとする累積排出量の制約を満たしつつ、ステークホルダーからの一定の受容性が見込まれるシナリオを同定している。より具体的には、対策技術の導入量と社会経済の変化幅に差をつけた複数のシナリオを用意し、そのシナリオのもとでのエネルギー需給及び電力需給を推計し、それをもとに温室効果ガス排出量やエネルギー自給率、コストといった主要な指標の推計を行っている。そのうえで、シナリオ及び想定されるアクションと併せて、推計結果をステークホルダーに提示し、意見を踏まえてシナリオを修正する作業を反復的に繰り返すことで、ステークホルダーにとって納得感を高めつつ、科学的知見を踏まえて合理的に選択しうる道筋を同定している。

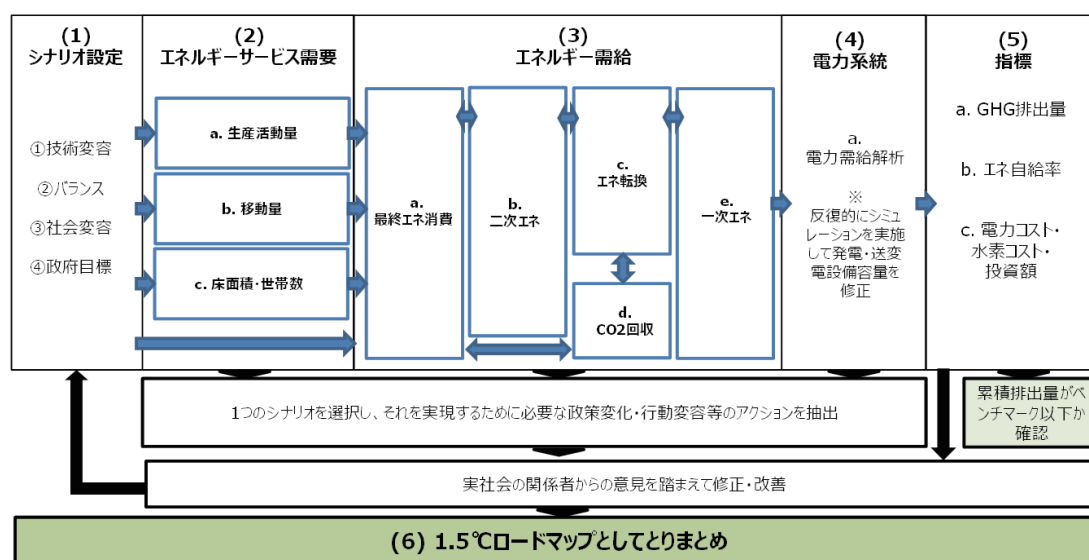


図2-1. 1.5°Cロードマップ策定方法の概要

具体的なシナリオの設定内容については、第3章～第5章のそれぞれで記述することとし、本章の第2節では、シナリオの考え方を含め、図2-1に示すステップごとに「1.5°Cロードマップ」の策定方法を概観する。なお、各項目の分析方法の詳細については、参考資料1に記載しており、必要に応じて参照していただきたい。

2. 道筋を同定するプロセスの概要

(1) シナリオ設定

本レポートでは、累積排出量をベンチマーク（14.3Gt）以下に抑制しつつ、ビジネスセクターからの一定の受容性が見込まれるロードマップやアクションプランを作成するためのシナリオを同定する過程で、複数のシナリオの比較を行った。具体的には、社会経済の内容に人口減少や少子高齢化等のトレンド以上の変化がみられなかった場合に累積排出量の制約を満たすべく最大限のエネルギー技術（浮体式洋上風力など再生可能エネルギーや輸入水素など）導入が行われる「① 技術変容シナリオ」、デジタル化などを起点として脱炭素化に寄与する形で社会経済の内容が大幅に変化しエネルギー技術導入はより緩やかになる「③ 社会変容シナリオ」、社会経済の変化もエネルギー技術導入も両者の中庸程度となる「② バランスシナリオ」を設定した。さらに、2023年7月末時点で資源エネルギー庁及び関連機関から公表されている計画や見通し、各種検討の参照値に基づき、現在政府が想定していると思われるカーボンニュートラルに向けた道筋を「④ 政府目標シナリオ」として設定し、それぞれを対比させるように定量化を行った（表 2-1）。各シナリオにおけるパラメータ設定の対象年を2030年、2040年、2050年とした。電力部門は、2035年、2045年の電源構成を別途計算してGHG排出量を求めた。推計によって得られた結果を線形補完して、各時点間の値を計算した。

表 2-1. 検討するシナリオの概要

		想定内容			
		社会経済変化	省エネ・電化	再エネ・水素	CO ₂ 吸収
シナリオ名	①技術変容	成り行き	最大限導入 (共通)	再エネ最大 輸入水素最大	森林吸収源は 現状維持 2035年以降、 排出量に応じて DACs及びCCSが活用される
	②バランス	①と③の中庸		再エネ最大 輸入水素進展	
	③社会変容	DX等による 大きな変化		再エネ進展	
	④政府目標	現状通り	省エネ進展 電化率は漸増	輸入水素最大 再エネは漸増	

社会経済の変化については、2050年までに想定しうる変化のポテンシャルを検討し、シナリオごとに変化の大きさを設定した。①技術変容シナリオについては、外部専門機関による予測を参照して、トレンドを反映した産業構造を想定した。また、②バランスシナリオについては、トレンドに加えて社会経済変化のポテンシャルの50%が実現することを想定した。さらに、③社会変容シナリオについては、トレンドに加えて社会経済変化がポテンシャル上限まで実現することを想定した。一方、④政府目標シナリオでは、現状の産業構造を維持したまま政府のGDP目標を達成している状況を想定した。

省エネ・電化については、①～③のシナリオで同一の想定とした。カーボンバジェットの制約を遵守するためには、化石燃料の消費を早急に抑制する必要がある。また、多くの場合、省エネや電化といった対策は長期的に経済性を見込むことができる。さらに、温室効果ガス以外の環境汚染物質の排出削減や、操作性の向上、安全性の向上など、電化によって多くの副次的な便益を見込むことができる。これらのことから、部門ごと技術ごとにポテンシャルを精査したうえで、一部の高温熱需要など電化が困難なものを除き、省エネ・電化といった対策が、設備更新のタイミングにおいて最大限導入されていくことなどを想定した。一方、④政府目標シナリオでは、既存の化石燃料インフラを維持・活用し、長期的に燃料を脱炭素化していくことを想定しているため、電化の進展は緩やかになる想定としている。

再エネ・水素については、太陽光発電、陸上風力発電、着床式洋上風力発電、浮体式洋上風力発電、輸入水素については、各業界団体・政府が公表している導入目標を上限値として設定した。また、次世代太陽光発電（ペロブスカイトとシリコンのタンデム型）の導入によるポテンシャルの増加を2035年以降にリプレース・新設される太陽光発電容量から独自に算定した。そのうえで、①技術変容シナリオでは、再エネ・輸入水素とも最大限に導入される想定、②バランスシナリオでは、再エネが最大限導入され輸入水素の導入は緩やかになる想定、③社会変容シナリオでは、上限値以下で必要な量だけ再エネが導入される想定としている。また、④政府目標シナリオでは、二酸化炭素分離・回収・貯留（CCS）や炭素を含まない燃料の部分的な混焼などにより化石燃料の使用が継続される想定のもとで、上限値以下で必要な量の再エネの導入が行われる想定としている。

吸収源（ネガティブエミッション）については、森林等による吸収量は現状が維持されると想定したうえで、2035年以降に二酸化炭素分離・回収・貯留（CCS）及び直接大気回収・貯留（DACs）が行われることによって人工的に二酸化炭素の隔離・固定が行われることを想定している。①～③のシナリオについては、2050年時点での累積GHG排出量（森林吸収源を除く）がベンチマーク値以下となるように、発電所等の大規模排出源において想定するCCSに加えて、残余排出量に応じてDACsが導入されることを想定している。④のシナリオについては、政府のカーボンニュートラル目標に合わせて、2050年単年でのGHG排出量（森林吸収源を含む）が正味ゼロとなるようにDACsの導入量を想定した。

（2）エネルギーサービス需要

エネルギー需要は、エネルギー消費以外の別の目的を有する行動の結果として（多くの場合意図せずに）派生的に発生するものであり、派生需要と呼ばれる。したがって、エネルギー消費を伴って得ようとするサービスに対する需要（エネルギーサービス需要）をいかに想定するかが重要になる。以下では、産業部門のエネルギー需要を左右する生産活動量、運輸部門の輸送・移動量、民生部門（家庭・業務部門）の世帯数・床面積について、その推計方法の概要を述べる。

a. 生産活動量

2015年の産業連関表をベースに、投入係数や最終需要などをシナリオの設定に合わせて変化させた将来の産業連関表を作成し、各産業部門の活動量の変化を推計した。

産業連関表では産業の相互依存関係を定量的に表現することができるため、同表をベースに見通しを描くことで、各産業の変化を整合的に描くことができる。また、国内総生産（GDP）を組み込んでおり、マクロ経済との整合性もとることができる。投入係数には、各産業が1単位の生産を行う際に、他産業から何をどれぐらい必要とするか、という生産技術に関する情報が投影されている。したがって、例えば、ペーパーレス化により各産業への紙の投入量が減少するといった変化を、この投入係数を調整することで表現することができる。また、シェアリングエコノミーの進展で自動車の購入台数が減少するのであれば、最終需要（国内需要・輸出）に占める自動車関連の支出の減少として表現することができる²³。このように、各シナリオで想定する社会経済の変化によって各産業の生産活動量がどのように変化するか、産業間の相互関係を考慮した上で推計を行っている。

なお、実質GDP（2015年暦年連鎖価格）については、外部専門機関による予測²⁴を参考に、①～③のいずれのシナリオも2030年602兆円、2050年660兆円となるように設定した。④については政府²⁵及び関連機関²⁶が掲げるGDP成長率を参照し、2030年に660兆円、2050年に715兆円と想定している。なお、政府が掲げるGDP成長率は、民間エコノミスト（40機関）による予測と比較すると、その高位値よりも高く平均値の2～3倍となっている、など野心的な目標としての水準であることに留意が必要である²⁵。

コラム：経済成長をどのように想定するか

将来の温室効果ガス排出量を推計する上で、将来の経済活動の規模をどのように見積もるかは重要な論点である。第6次エネルギー基本計画が検討された際に前提とされたのは、政府が経済政策の目標として設定するGDP成長率（2020年度～2030年度の平均で1.7%/年）であった。これは見通しというよりは、GDPが成長し続けることを前提としたシステム設計になっている現行の金融システム、年金制度あるいは雇用制度などを維持するために必要と考えられる水準のGDP成長率、という性格が強い。

一方、人口減少や少子高齢化を考えると、こうした現行の金融システムや年金制度・雇用制度自体に変革が必要だと指摘もある。例えば、岩田ら（2019）は、10年程度の有期雇用を解禁し、定年を迎えた人が健康寿命の増加に従って75歳頃まで専門性を活かして責任ある仕事ができるようにしたうえで、年金給付開始を遅らせることや、デジタル医療の普及とあわせた診療報酬の合理化や医療費の自己負担割合見直し、社会保障の社会保険方式から税方式への見直し、などの変革により、緩やかな経済成長と財政・社会保障制度を持続しつつ、実質等価消費（いわば家計の豊かさ）を向上し世代間格差も縮小させられる、と主張している¹²。本レポートは、こうした変革も見据えつつ、日本経済に関する専門機関による現実的な見通しに立脚して、①～③のシナリオを構築している。なお、①～③のいずれのシナリオにおいても、過去のトレンドの延長線上に想定される経済成長ではなく、1.5°C目標に向けた社会変革や技術導入の取り組みによって成長率が向上する想定となっている（図2-2）。

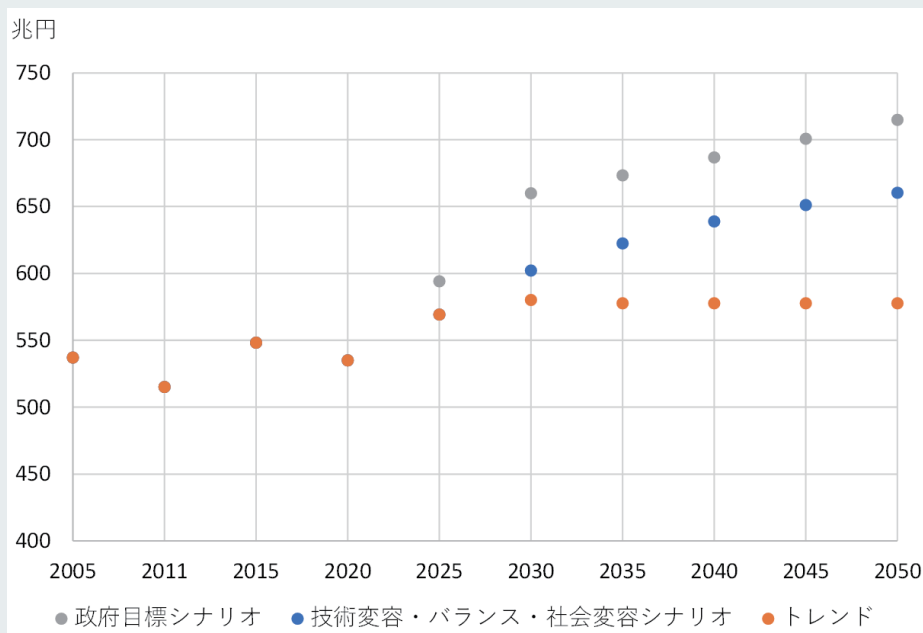


図2-2. 各シナリオのGDP想定

b. 移動・輸送量

旅客輸送については、都市類型ごとに現状の人々の外出率・移動回数・距離・移動手段等を調査した全国都市交通特性調査（全国パーソントリップ調査）をベースに、シナリオの設定に合わせてそれらを変化させることで、将来のパーソントリップデータを作成した。市区町村ごとに都市類型を設定し、これを適用することで、移動手段ごとの移動量の変化を推計した。

貨物輸送については、品目ごとに現状の輸送トンキロを調査した統計データをもとに、産業構造の変化やECの拡大、循環経済の進展、フィジカルインターネットを始めとする物流インフラのシェアリングによる積載率の向上などの要素を勘案して品目ごとに輸送トンキロの変化率を想定し、輸送量の変化を推計した。

なお、(1)で想定した社会経済の変化（テレワークによる通勤減など）及び上記a.で推計した生産活動の変化（生産減による輸送量減など）を反映して推計を行っている。

c. 床面積・世帯数

住宅については、先行研究²⁷を参照して市区町村ごとの将来人口を想定し、国立社会保障・人口問題研究所が推計する将来の世帯あたり人員数²⁸で除することで市区町村ごとの世帯数を求めた。次に、市区町村ごとに将来の戸建住宅及び集合住宅の床面積必要量と、既存の住宅ストックの残存量を推計し、その差を新築面積とした。その上で、新築住宅に占める外皮断熱性能水準ごとのシェアを建築年ごとに想定し、将来のストックの外皮断熱性能の改善率を推計した。

業務用建物（事務所、店舗、飲食店、ホテル、病院、学校、その他）の床面積については、a.で推計した国内生産額の変化を考慮して、将来の床面積必要量を求めた。また、将来のストック残存量を推計し、必要量との差を新築床面積とした。その上で、新築床面積に占める1次エネルギー消費量基準（BEI：Building Energy Index）ごとのシェアを建築年ごとに想定し、将来における各種建物ストックの性能（設計1次エネルギー消費量）の改善率を推計した。

(3) エネルギー需給

a. 最終エネルギー消費

産業部門のうち鉄鋼・石油化学・窯業土石については個別に製造プロセスにおけるエネルギー消費をモデル化し、産業部門のその他の業種については、用途別（直接加熱、動力、蒸気発生）及び温度帯別（200℃以上、200℃以下）に現状のエネルギー需要を整理したうえで、省エネや燃料転換、電化・水素化による現状からの変化率を検討して最終エネルギー消費量を推計した。

運輸部門については、輸送に用いられる輸送機器のストックの残存率と新規販売に占める各車種のシェアを想定して、将来のストックに占める各車種の台数とエネルギー効率を推計することで、最終エネルギー消費量を推計した。

家庭部門における給湯・暖房・調理用の需要については、それぞれの機器ストックを整理し、残存率と新規導入に占めるシェアを想定して、将来のストックに占める燃料種別の台数とエネルギー効率を推計することで、最終エネルギー需要を推計した。照明・その他の家電については、機器のエネルギー効率の改善率を想定して最終エネルギー消費量を推計した。

業務部門については、エネルギー用途別（給湯、空調、その他）、エネルギー源別に現状のエネルギー消費量を整理し、1次エネルギー消費量がBEIに応じて変化すると想定した。そのうえで、新築時と既存建築では30年毎に新規設備導入が行われると想定し、各時点における各機器のシェアとエネルギー効率を想定して、将来のストックにおける最終エネルギー消費量を推計した。

b. 二次エネルギー

電力、水素、合成燃料、アンモニア、都市ガス、灯油・ガソリンなどの石油製品などの需要量を推計した。上記a.によって求

めた各部門における二次エネルギーの需要と、c.及びd.で求めた水素製造（水電解）、CO₂回収、合成燃料の製造等のための電力消費量を集計した。

c. エネルギー転換

電力については、シナリオごとに需要端での電力需要量を、送変電ロスを考慮して送電端の発電電力量に変換したうえで、それを満たす電源構成を検討した。発電設備のビンテージと新規導入容量を考慮して各年度の設備容量を想定したうえでシミュレーションを行い、各年度において1時間ごとの電力需要に対して最小の費用で電力供給を行う電源構成を推計した。

水素については、輸送によるロス（圧縮等にかかるエネルギーを含む、13%）を考慮して、輸入液化水素の荷揚時点あるいは国内水素製造時点での需要量を求めたうえで、再生可能エネルギーの余剰電力による国内での水素製造量を差し引いた量を輸入するものとした。

アンモニアについて、政府目標シナリオでは、石炭火力の脱炭素化燃料と大型船舶の燃料としての利用があり、アンモニアはすべて輸入されると想定した。技術変容シナリオ、バランスシナリオ、社会変容シナリオでは、アンモニア利用は、大型船舶の燃料に限定され、取扱量も産業用の水素需要と比較して少ない。そのため、インフラの観点から水素の状態での流通を想定し、船舶への燃料供給拠点でアンモニアに転換することを想定した。水素からアンモニアへのエネルギー転換効率は77%と想定した²⁹。

合成燃料については、シナリオごとに国内での製造量と輸入量を想定し、国内での製造量についてはその製造に必要な水素及び電力の需要量及びCO₂の需要量をc. 二次エネルギー及びd. CO₂回収に計上し、輸入分についてはe.一次エネルギー供給に計上した。

その他（石油石炭製品、都市ガス）については、現状通りの転換ロスを想定した。

d. CO₂ 回収

2035年以降に火力発電所及びセメント工場・石油化学工場へCCSが導入されることを想定し、導入率を外生的に設定した。また、本レポートでは、ネガティブエミッションとして、DACsが2040年以降に導入されることを想定した。導入量について、技術変容、バランス、社会変容シナリオでは、2050年までの累積排出量が累積GHG排出量のベンチマーク値以下になるように導入量を設定した。政府目標シナリオについて、2050年単年でのGHG排出量（森林吸収源を含む）が正味ゼロとなるように、2050年のDACsの導入量を想定した。

e. 一次エネルギー

発電部門については、上記c.で求めた電源構成に応じて、発電所の送電端熱効率を想定して一次エネルギー供給量を推計した。なお、原子力発電所の変換効率は33%、再生可能エネルギー（バイオマスを除く）は100%とした。

また、輸入水素、輸入合成燃料についてはその熱量を一次エネルギー供給量として計上した。

(4) 電力系統

(3) で求めた電力需要及び発電設備を全国450地点の変電所区域に割り振り、1時間ごとの電力需要量、1時間ごとの再生可能エネルギー発電量を求めた。そのうえで、地域間連携線及び上位2系統の地内期間送電線をモデル化し、発電設備や送変電設備の制約を考慮して電力システム全体の費用を最小化する運用方法について、ソフトウェア（PROMOD）を用いてシミュレーションを行った。シナリオ及び対象年ごとにこれを行い、需給バランスが確保されていることや発電設備の稼働率・稼働パターン等を確認した。また、繰り返しシミュレーションを行い、必要に応じて蓄電池や水素専焼火力等などの調整力の想定を検証することで、発電設備容量等のシナリオへフィードバックしている。

(5) 指標

上記のシナリオ及びエネルギー需給のもとでのGHG排出量、エネルギー自給率、コスト及び投資額、電力供給安定性について分析を行った。

a. GHG 排出量

CO₂とそれ以外に分けて推計を行った。前者については、一次エネルギーごとに排出係数を想定し、一次エネルギーの消費量に乘じたうえで、DACs及びCCSによる回収量を差し引くことでCO₂排出量を求めた。後者については、2013年度の各ガスの排出量に外生的に想定した変化率を乗ずることで求めた。さらに、これらの累積排出量を求めた。

b. エネルギー自給率

一次エネルギー供給量から輸入エネルギーを差し引いたものを、一次エネルギー供給量で除することで、エネルギー自給率を求めた。

c. コスト

電力及び水素について、各時点において1単位を供給するためにかかる平均的な費用を推計した。また、電力及び水素供給に関わる累積投資額についても推計した。

電力コストについては、まず、上述の(3) c.で想定する電源構成及び(4)で求めた稼働率をもとに、各時点における各電源の均等化発電原価(LCOE: Levelized Cost of Electricity)の資本費相当分を求め、発電量に応じて加重平均し、各年度の燃料費・維持管理費を加えることで発電コストを求めた(資本費の推計において設備ビンテージを考慮)。さらに、(4)で想定した送電線や蓄電設備等の増強費用を年平均化したものを需要端電力量で除して送変電コストの増加額を求め、現状の送変電コストに上乘せすることで各時点での送変電コストを推計した。発電コストと送変電コストを合計することで、電力コストを求めた(ここにはカーボンプライシングなど社会的費用・政策経費は含めない)。

水素コストについては、(4)における電力需給解析の結果として浮体式洋上風力発電からの余剰電力が主として水素製造に用いられているため、浮体式洋上風力発電の発電原価で水電解が行われる際の1単位あたりの生産コストを求めた(なお、水素製造のために消費された電力分は上記の電力コスト推計には含めない)。輸入水素については、海外でのグリーン水素製造(再生可能エネルギー電気による水素製造)とブルー水素製造(化石燃料を改質して水素を製造しCO₂はCCSで回収)を想定し、液化・海上輸送・荷揚費用を加えて推計した。

投資額については、上記のコスト推計と同じ諸元を用いて、再生可能エネルギー発電、水素火力、蓄電池、送電線、水電解装置など、電力及び水素供給のために必要な設備に関わる年ごとの投資額を推計した。なお、自動車や電気機器など需要側の設備及び港湾・水素ステーション・充電設備等のインフラ整備に係る費用については推計の対象外とした。

(6) ロードマップのとりまとめ

以上を踏まえて、累積排出量が想定するカーボンバジェットの範囲内に収まり、かつ、社会の構成員から一定の支持が得られるシナリオを同定したうえで、そのシナリオを実現させるために必要なアクションを、各技術・対策が現状において直面している障壁に関する分析、及び、文献調査や専門家へのヒアリングをもとに検討し、時系列に沿って分野ごとにまとめた。

また、日本気候リーダーズパートナーシップ(JCLP)の協力を得て、1.5°C目標の追求に賛同する企業の参加を募り、4回のワークショップ(対面3回、オンライン1回)を開催した(2022年11月のワークショップには、複数の地方自治体の担当者等にも参加いただいた)。2022年11月から2023年8月にかけて反復的に関係者の意見を聞きながらシナリオを修正する作業を繰り返し、ワークショップ参加者へのアンケート調査の結果から、一定の支持が得られたことを確認した。

第3章

エネルギー需要はどこまで変わるか

1. 本章の概要

私たちは2050年までの間に、どのぐらいエネルギーを消費するだろうか？過去のエネルギー消費量が人口増加や経済成長と強い相関をもって増加してきたことは事実だが、今後経済がさらに成長するにつれて将来のエネルギー需要も増加するとは限らない。私たちはより小さなエネルギー・資源の消費でより多くの効用を生み出す「デカップリング」を実現していかなければならないし、現実には世界各国で起こり始めている²。デジタル化に特徴づけられる第四次産業革命の大きな国際的潮流は、私たちの経済社会の姿を大きく変えるポテンシャルを持っており、今すぐに取り組むことができるものも多い。また、従来のように内燃機関や燃焼機器によって化石燃料を動力や熱に転換する手法と、モーターやヒートポンプによって電力で動力や熱を生み出す手法とでは、その効率は何倍も異なる。電化は多くの場合、制御性や安全性の向上など副次的な便益をもたらすし、デジタル化とも相乗効果を発揮する。本章では、こうした各部門における様々な変化のポテンシャルを考慮して複数のシナリオを構築し、各シナリオにおける将来の最終エネルギー消費量の合計値を推計する。

第2節では、社会経済活動に関する想定、すなわちエネルギー消費を伴って得ようとするサービスに対する需要（エネルギーサービス需要）のシナリオ（想定のコレクション）の内容を記す。また、第3節では、エネルギー技術のシナリオの内容を示す。そのうえで、第4節では、こうした想定の下で推計されるエネルギー需要についての分析結果を示す。なお、本章が対象とする「エネルギー需要」は、第2章で説明した策定プロセスにおける（2）エネルギーサービス需要、（3）エネルギー需給のa.及びb.に対応している。

2. エネルギーサービス需要のシナリオ設定

本節では、エネルギーサービス需要を推計するうえで、各シナリオにおいて設定した前提諸元を示す。（1）生産活動量では、産業連関表の投入係数や最終需要を調整して各産業の活動量（粗鋼生産量など）を推計するために設定したシナリオについて説明する。（2）旅客輸送量では、都市類型ごとに移動手段の変化などを考慮して移動量を推計するために設定したシナリオについて説明する。（3）貨物輸送量では、輸送品目の生産量や物流効率化などを考慮して輸送量を推計するために設定したシナリオについて説明する。（4）住宅床面積・断熱性能及び（5）業務用建物床面積・性能では、住宅及び業務用建物ストックの変化を推計するために設定したシナリオについて説明する。

（1）生産活動量の推計

社会経済の変化について、政府や各省庁が掲げる長期的なビジョンに基づいて変化の方向性を見定め、それらの変化の具体的な大きさについては、様々な文献及び専門家へのヒアリングをもとにポテンシャルを精査したうえで、複数のシナリオを設定した。

²例えば、ドイツは1990年から2010年の間に実質GDPは30%以上成長する一方で、一次エネルギー消費量は10%、温室効果ガス排出量は20%以上減少している。

- ・ **社会変容シナリオ**：全ての変化のポテンシャルが最大まで具現化することを想定した。
- ・ **バランスシナリオ**：トレンドに加えて、その他の変化のポテンシャルの50%が具現化することを想定した。
- ・ **技術変容シナリオ**：トレンドを反映したうえで、その他の変化は想定せず、現在の主力分野（自動車、機械、建設）の需要拡大の努力が行われることを想定した。
- ・ **政府目標シナリオ**：トレンドによる変化は考慮せず、鉄鋼業・化学工業・窯業土石業・製紙業については政府及び関連機関の想定値を参照し、その他は現在の産業構造がそのまま維持されることを想定した。

社会変容シナリオにおける想定内容について、表 3-1に示す。ただし、これらの具体的な数値には大きな不確実性が存在するため、留意が必要である。

表 3-1. 社会変容シナリオにおける社会経済諸元の想定内容（2050年）

要素		社会変容シナリオにおける想定内容（2050年時点）
トレンド	人口減少、少子高齢化、国際動向等	最終需要及び輸出入が日本経済研究センター中期経済予測 ²⁴ のベースライン（標準シナリオ、2050年は2035年を横置き）水準まで変化。
デジタル化	DXの推進	無形資産投資が100兆円程度まで拡大し、粗付加価値が現状より3割増。業務用建物建設が2割減。公務・情報通信・教育研究・対事業所サービスへの紙の投入が9割減。
	テレプレゼンス（オンライン会議、テレワーク、遠隔医療・教育）の推進	鉄道・航空移動需要が5割減。
	フィジカルインターネット・モーダルシフトによる物流効率化	貨物輸送の5割でシェアリング化が進展。
	CASE（Connected/Autonomous:自動運転、Shared:シェアリング、Electric:電動化）の推進	高齢化等による運転者数減・移動困難者数増に対応して完全自動運転自動車が普及。 自家用車の6割がシェアリングに移行し、年間新規販売台数が5割減。 自動運転により安全性が改善し車体用の鋼板が樹脂化。
素材利用	古紙利用の増加	紙・紙製品へのバージンパルプの投入が8割減となり、古紙投入が増加。
	建築へのCLT材活用	非木造建築の5割が木造化し、建設部門における国産木材利用が増加。
	機械部品の樹脂化	はん用・業務用・生産用機械に投入される鉄鋼の4割が樹脂製品に。
	脱プラの推進	飲食料品へのプラスチック製品投入が5割減少し、その半分が紙加工品に。
エネルギー利用変化	電化・省エネ化の推進	想定する電化・省エネ導入量に応じて化石燃料投入減と電力投入・電気機械の最終需要の増。
	浮体式洋上風力の成長産業化	想定する電源構成に合わせて建設部門の需要増と鉄鋼・機械等の投入増。
輸出構造の変化	サービスで外貨を稼ぐ経済への転換	製造業の輸出の50%を新たな基幹産業（情報通信サービス、研究開発、金融保険、インバウンド観光、小売）の輸出に付け替え

DXの推進については以下のように想定した。まず、複数の有識者^{11-14,23}が指摘するように、無形資産（ソフトウェアやデータベースなど情報化資産、科学的な研究開発、製品開発・デザイン・調査に関する支出、ブランド資産、教育訓練投資を含む人的資本に関する支出、組織構造構築のための支出）への投資の増加と抜本的なビジネスモデル・組織構造の変革、高付加価値化があらゆる産業で起こることを想定した。これを産業連関表上では、無形資産への支出（研究開発・教育、対事業所サービス、情報通信の中間投入と最終需要）の増及び各部門の付加価値率の増、有形資産投資（建築物、紙への中間投入と最終需要）の減として表現した。無形資産投資の増加については、対GDP比で米国以上の水準とするためGDPの5%分を上乗せすべきとの提言もある¹²。産業連関表上で無形資産投資の動きを直接捕捉することは困難だが、これを参考に、情報通信、研究開発・教育、対事業所サービス（コンサルティング・デザイン・広告など）の各部門における現状の無形資産投資額を先行研究³⁰から求めたうえで、現状では対GDP比10%程度である投資規模が最大15%程度まで拡大することを想定して、対応する中間投入と最終需要を調整した。付加価値率については、第4次産業革命によってもたらされる生産性の向上に関する予測³¹や、日本経済研究センターによる中期経済予測²⁴で想定されている付加価値率を参考に設定し調整した（2035年に57%、2050年に58-61%を目安とした）。また、有形資産投資の減少については、公務・情報通信・研究教育・対事業所サービス部門への紙の投入が最大9割減少し情報通信サービスへの投入に置き換わるほか、建設部門のうち非住宅建築の最終需要が最大2割減少すると想定した。さらに、無形資産への中間投入及び付加価値率の増加分を相殺するようにその他の中間投入を全体的に減少させた。さらに、経済安全保障の観点から半導体等の国内での安定供給確保の取組が進められていることを鑑み、情報通信機器及び電子部品の輸入係数が最大10-15%ポイント改善することを想定した。

テレプレゼンスの推進については、以下のように想定した。国土交通省「鉄道輸送統計調査」によると、新型コロナウイルス感染症の流行によって不要不急の外出自粛が強く求められていた2020年4月の鉄道旅客輸送量は、前年と比較して数量ベースで凡そ半減、人キロベースで4割以上減少している。将来の社会においては移動自粛といった形ではなく能動的にテレワーク・オンライン会議やオンラインでの教育・交流などを選択するようになる、といった違いはあるものの、ポテンシャルとしては参考になると考え、鉄道・航空需要5割減を上限とした。

フィジカルインターネット・モーダルシフトによる物流効率化については、主に次項で述べる貨物輸送のサービスエネルギー需要において考慮しており、ここでは生産活動への影響に焦点を絞って分析に反映することとした。日用品や食料品などについて、2030年以降にEVシェアリングを利用した物流への移行が進み、トンキロベースの輸送量で最大5割がシェアリングモビリティを利用できるようになることを想定した。

CASE（Connected, Autonomous, Shared and Electric）の推進については、以下のように想定した。家計部門では、次項で述べる都市類型別の移動手段の変化を考慮し、乗用車のストックが最大6割の減少となることと、稼働率上昇による車両寿命の短縮を考慮し、年間販売台数が最大で5割減になると想定した。また、自動運転化の進展で安全性が高まることや軽量化が追求される³²ことによって車体への代替素材適用が進展することを想定し、最も変化が大きいケースで、2050年には自動車部門への普通鋼板の投入の全てと特殊鋼板の1割、アルミ圧延製品の投入の全てが、化学繊維に置き換わることを想定した。

古紙利用については、2050年に洋紙製造時のバージンパルプ投入の8割が古紙に置き換わることを上限として想定した。**建築の木造化**については、強度等に優れた建築用木材であるCLT（直交集成板）やLVL（単板積層材）、木質耐火部材に関する開発・普及やコストダウン、規制緩和が進み³³、2050年に新築の非木造建築物（住宅・非住宅）のうち低層の全てと10階までの中高層の半数に相当する、最大5割が木造化されると想定した。また、先行研究によるポテンシャル評価³⁴を参考に、木材供給部門において使用される木材が全て国産化されることを想定した。

機械部品の樹脂化については、足元では製品の軽量・小型化などのニーズを受けて金属部品の樹脂化が加速している一方、強度や耐久性などについて一定の技術革新が必要であることを考慮し、2050年までに機械製造部門への鉄鋼製品投入の最大4割が樹脂製品で代替されることを想定した。

脱プラについては、過剰包装・使い捨てなどのプラスチックの削減と代替素材への転換、マテリアルリサイクル・ケミカルリサイクルの拡大を想定した。プラスチック廃棄物の約半分を占める飲食料品の包装について³⁵、飲食料品製造業へのプラスチック製品の投入が2050年に最大5割減少し、その半分が紙製品で代替されると想定した。また、プラスチック製品の4割がリサイクル材から製造されることを想定した。なお、水素由来の化学製品製造については、産業連関表で扱うことが困難であるため、次項のエネルギー需要の推計において考慮している。

電化・省エネ化については、次項で述べる設定内容にしたがって推計した化石燃料・電力の増減率に応じて各業種の間接投入、家計部門の最終需要を調整した。一般的に、電化・省エネ機器はその他の機器と比較して初期投資が増加する一方、運用費用が安くなることが多い。そのため、産業部門については、エネルギーの中間投入の減少分を付加価値率（固定資本減耗）の増加で相殺し、家計部門については、電気機械への投資増で相殺することで、これを表現した。

浮体式洋上風力の成長産業化については、第4章で述べる設定内容に準じて推計した電源別のシェアをもとに電力部門の投入係数を推計した。また、第5章で述べる方法で推計した電源別の投資額をもとに電力施設建設部門の投入係数及び最終需要額を推計した。これにより、浮体式洋上風力への投資が進み、電源構成の一定割合を担うようになった際に想定される各産業への波及効果や、その際の経済全体の姿を簡易的に表現した。

サービスで外貨を稼ぐ経済への転換については、国際的にデジタル化、脱物質化が進むことや、製造業を中心としてモノを売ることで外貨を稼ぐ経済から、モノの生産と密接に結びついた形でより付加価値の高いサービスを提供することで外貨を稼ぐ経済への変化が起こることを想定して輸出額を調整した。これに伴って輸出額に占める製造業の割合は減少し、サービス業の比重が大きくなる。ここには、製造業のサービス化に伴う情報通信サービスや金融保険サービスの増加、オープンイノベーションやその他の環境整備を促進して日本がグローバルな研究開発拠点となることや、インバウンド観光を起点として越境ECの活用により継続的な消費につなげること²⁴などが含まれている。

なお、2030年時点での社会経済諸元については、以下のように設定した。DXの推進及びテレプレゼンスの推進については、いずれのパラメータも2050年に想定する変化の50%が2030年までに実現することを想定した。一方、シェアリングを利用した物流効率化及びCASEの推進については、2030年時点では普及しておらず、それ以降に導入されることを想定した。建築物の木造化や脱プラについては2050年までの50%の変化が2030年までに実現し、機械の樹脂化や古紙利用はそれぞれ2050年までの1/4、1/3の変化が2030年までに実現することを想定した。

これらのシナリオを反映させた投入係数表及び輸入係数からレオンチェフ逆行列を求め、最終需要に掛け合わせることで、各産業部門の生産額を求め、それによって生産活動量の現状からの変化率を推計した。エネルギー多消費産業とされる主要4部門の生産活動量の推計結果を図 3-1に示す。なお、その他の部門の生産活動量の推計結果については参考資料2に記載している。

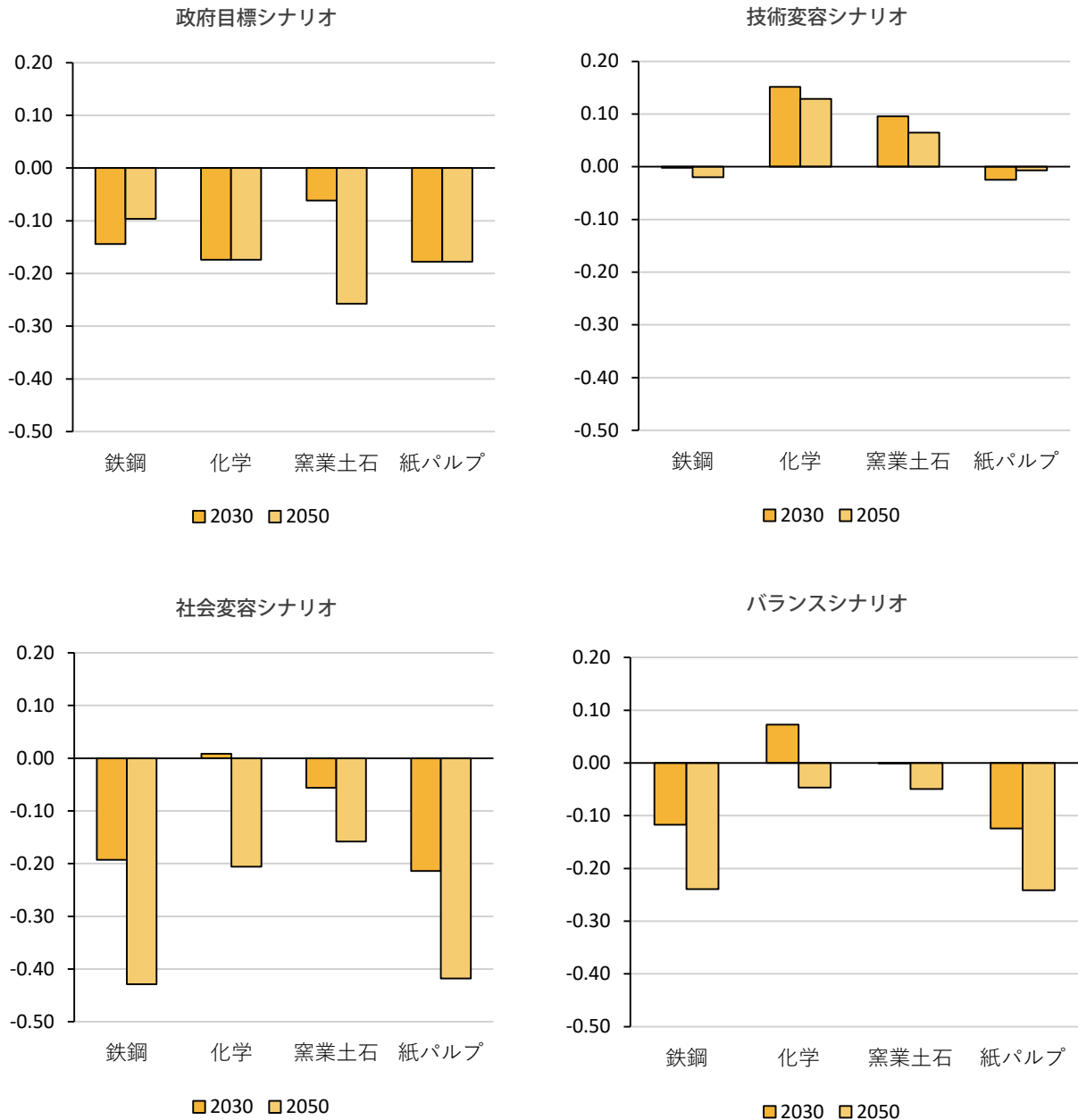


図3-1. 鉄鋼・化学・窯業土石・紙パルプの生産活動量の基準年からの変化率

(2) 旅客輸送量の推計

旅客輸送量の主な決定要因は、人々の移動量であり、政府による長期的なビジョンの方向性を考慮した。このレポートでは、移動量は「年間の移動距離（人キロ）＝人口×（平日の日数×平日の外出率×平日の1日当たりの移動距離＋休日の日数×休日の外出率×休日1日当たりの移動距離）」と定義する。外出率は、DXの推進によって大幅に減少すると予想される。総務省の「未来をつかむTECH戦略³⁶」では、人々は複数の仕事に就き、時間を効果的に活用する将来像を描いており、これを実現するためには、家やカフェなど、スイッチ1つでバーチャル個室に切り替えられる環境での作業が描かれている。Society 5.0³⁷では、従来の就業時間に縛られず、自宅やカフェなどの場所で自分の好きな時間に働くことが可能になり、ICTの活用により、遠隔地の同僚と効果的にコミュニケーションを取ることができると述べられている。国土交通省の「2040年、道路の景色が変わる～人々の幸せにつながる道路～³⁸」では、通信の高速化と大容量化が進展し、テレワークやホログラム（投影）技術により、バーチャルコミュニケーションが普及すると描かれている。人々の直接の対面が特別なシチュエーションに制限され、

これにより満員電車での通勤などの義務的な移動が大幅に減少する。居住地から職場までの距離の制約がなくなり、自然や観光資源の豊富な郊外や地方への移住・定住が増加する可能性が示唆されている。また、完全自動運転の実現により、飲食店、医院、クリーニング、スーパー、教育施設などの小型店舗型サービスが移動しながら営業することが可能となり、人々が自家用車を使って買い物をする機会が大幅に減少する。同様に、日本経済研究センター²³では、在宅ワークや人口減少により、鉄道輸送は80%減少し、小売店舗は無人化し、オンラインショッピングが主流になると同様の予想がされている。また、IBM Smart Business³⁹では、AIが装置の監視とメンテナンスを行うことにより、製造ラインには人・オペレーターが必要なくなる可能性が示唆されている。以上から、各シナリオにおける外出率の基準年比変化の想定を、表 3-2にまとめた。

表 3-2. 外出率の基準年比変化想定

	平日			休日		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
技術変容シナリオ	1	1	1	1	1	1
バランスシナリオ	0.95	0.83	0.7	0.88	0.8	0.72
社会変容シナリオ	0.9	0.65	0.4	0.76	0.6	0.44
政府目標シナリオ	1	1	1	1	1	1

1回当たりの移動距離については、デジタル化に伴い増加すると想定した。その理由は、第一に、平日においては、人と人が直接会うことは、より高い価値が創出されるシチュエーションに絞られることで、距離に関係なく必要であれば外出することが考えられる。第二に、ホログラムなどを利用して、移動中も生産的な活動を行うことができることから、1回の移動距離・移動時間が長くなっても、外出しなければならない複数の予定を同日に済ませるインセンティブが働くと考えられる。第三に、休日においては、遠隔地での休暇と仕事を組み合わせたワーケーションが不自由なく選択できる。そのため、現在よりも休日を遠距離にある場所で過ごすことができる（休日日数が限られるという理由から、都市部近郊にある場所を目的地にする必要性はなくなる）と考えられる。

表 3-3. 1回当たりの移動距離の基準年比変化想定

	平日			休日		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
技術変容シナリオ	1	1	1	1	1	1
バランスシナリオ	1.03	1.14	1.25	1.03	1.14	1.25
社会変容シナリオ	1.05	1.28	1.5	1.05	1.28	1.5
政府目標シナリオ	1	1	1	1	1	1

注釈：表 3-2の外出率と表 3-3の日当たりの移動距離を用いて、各シナリオにおける移動量の基準年比（現状からの変化の度合い）を図 3-2の通り推計した。

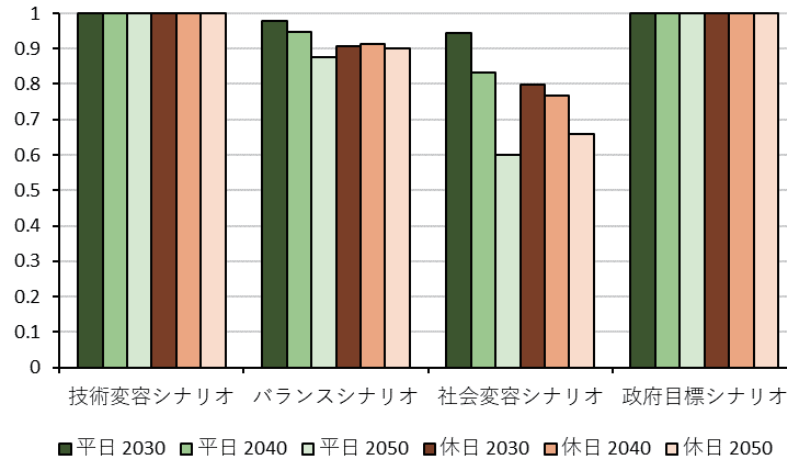


図 3-2. 旅客輸送に関わる人々の移動量の基準年比

さらに、推計した陸上輸送移動量と、図 3-3、図 3-4、図 3-5で示される移動分担率（人々の移動手段）によって、各移動手段による人々の移動距離（人キロ）を市区町村別に推計した。基準年の移動手段は国土交通省による「全国都市交通特性調査」を用いた。また、すべての市町村を「全国都市交通特性調査」で定義される都市の形態に分類した。

2030年、2040年、2050年の社会変容シナリオの移動手段について、国土交通省「2040年、道路の景色が変わる～人々の幸せにつながる道路～³⁸」では、「旅行、散策、健康のためのウォーキングやランニング等、「楽しむ移動」が増加する。通勤においても、あえて徒歩や自転車で移動する人が増加する。」社会を描いている。この方向性を数値化する際には、ITF Transport Outlook 2021⁴⁰で示される移動距離別の人々の移動手段を参照して設定した。

各移動手段の人キロの基準年比の変化率を基に、各年の旅客輸送量（人々の移動量）を推計した。

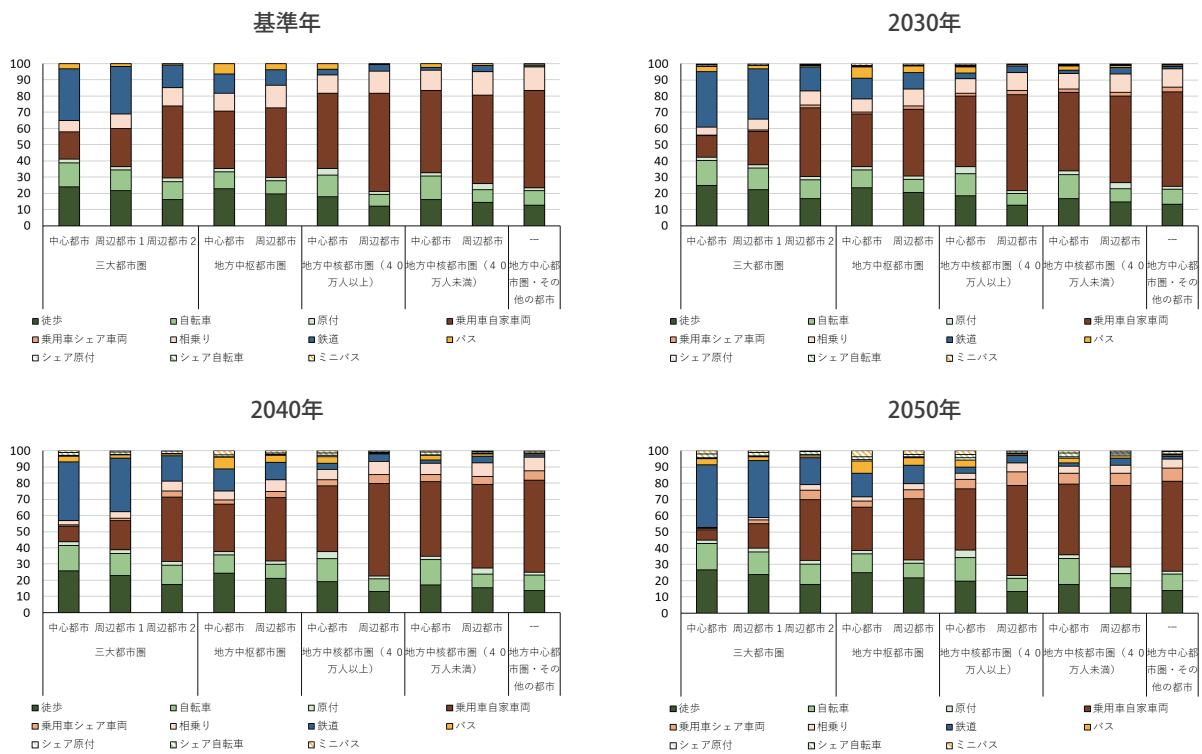


図 3-3. 政府目標シナリオ、技術変容シナリオにおける年別の移動手段

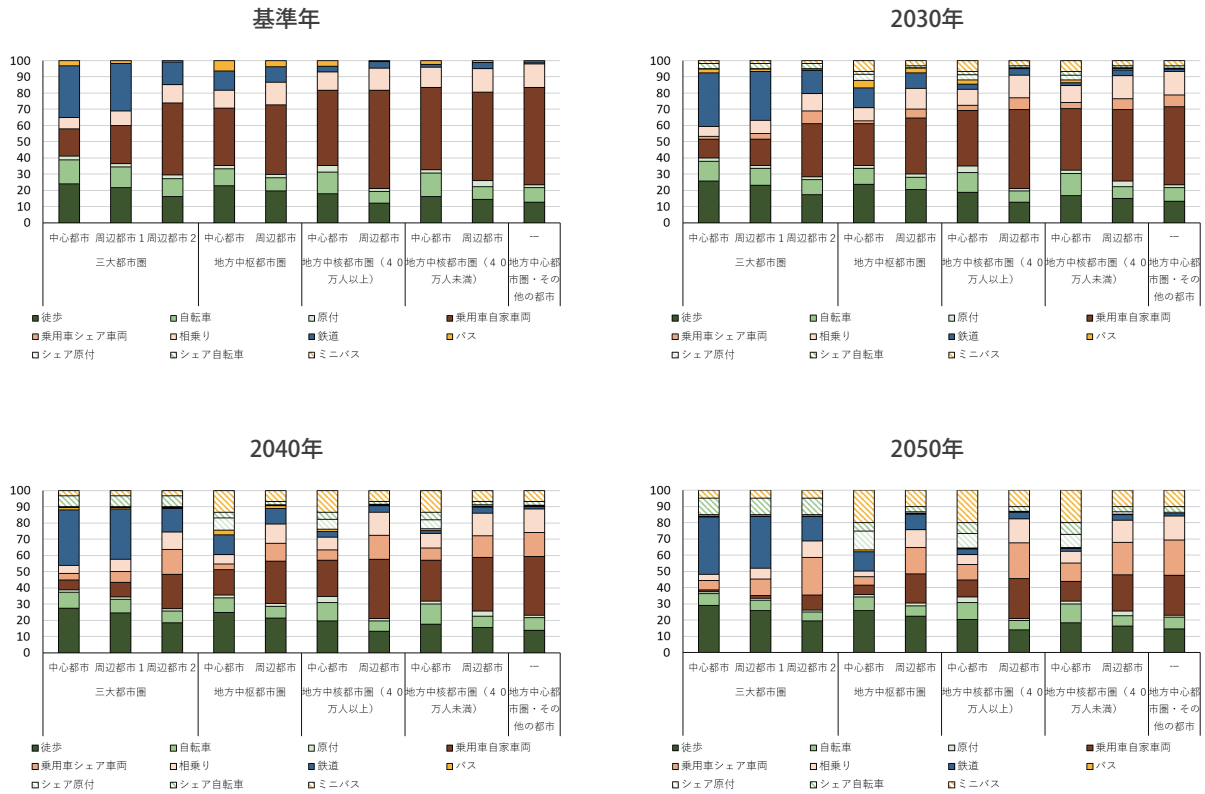


図 3-4. 社会変容シナリオにおける年別の移動手段

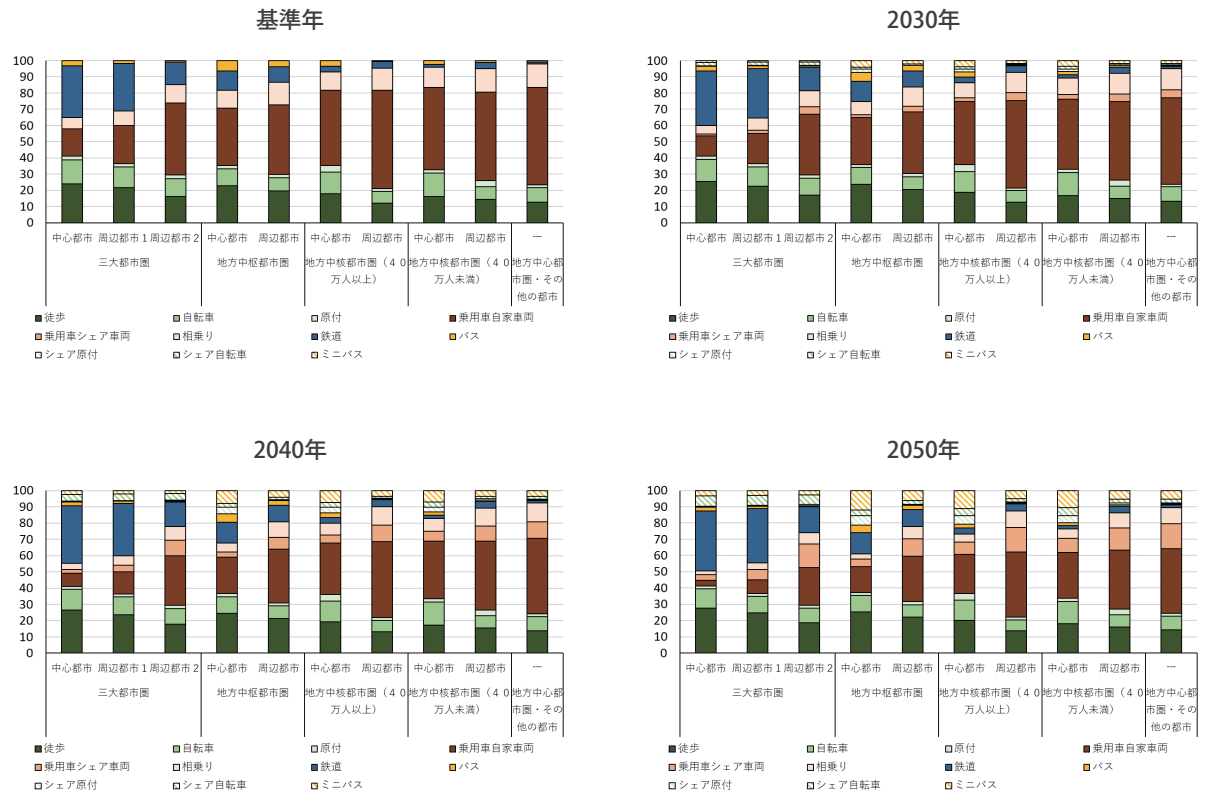


図 3-5. バランスシナリオにおける年別の移動手段

(3) 貨物輸送量の推計

陸上貨物輸送について、物流業界のあらたな輸送技術や取組についてシナリオごとに差異化した。物流の効率化については、モーダルシフト、道路交通流対策や部分的な自動運転走行や車両の大型化、トレーラー化の推進、ダブル連結トラックの推進によるエネルギー効率の改善、車両の軽量化の効果を想定した（表3-4）。

フィジカルインターネットについては、貨物需要に応じた貨物車両運用の最適化や他社との共同配送などがあげられる。ただし、フィジカルインターネットが適用できる輸送品目は、食料品や日用品など共同配送が行いやすいものに限定されると想定した（表3-5）。

表3-4. 物流の効率化による陸上貨物輸送量の変化

	2030	2040	2050
技術変容シナリオ	0.86	0.81	0.76
バランスシナリオ	0.86	0.81	0.76
社会変容シナリオ	0.86	0.81	0.76
政府目標シナリオ	0.95	0.93	0.9

表3-5. フィジカルインターネットによる陸上貨物輸送量の変化

	2030	2040	2050
技術変容シナリオ	0.9	0.88	0.85
バランスシナリオ	0.9	0.79	0.68
社会変容シナリオ	0.9	0.7	0.5
政府目標シナリオ	0.9	0.88	0.85

循環経済によって、資源効率性が高まり、食品や日用品の輸送量が変化することが想定される。そのため、社会変容シナリオとバランスシナリオでは輸送品目のうち、資源循環の影響を受ける品目を想定し、変化率を推計した。表3-6は、社会変容シナリオにおける品目別、年代別の変化率を示す。「穀物」「野菜・果物」「その他の農産品」「畜産品」「水産品」については、令和元年度食料需給表から「粗食料」と「加工用」の合計値を求め、食品廃棄率33%⁴¹を乗じて食品廃棄物の量を計算した。これらの数値を基に、可食部に占める食品ロスの割合を計算したところ、9%と推計された。農林水産省の「みどりの食料システム戦略」⁴²では、2050年までに肥料の使用を30%減、農薬の使用を50%減としている。これを参考に、「化学肥料」と「動植物性製造飼・肥料」の2050年の輸送量を40%減とした。「繊維工業品」について、ファストファッションの見直しやリユース品を着用するファッションの高まりなどを受け、工場から市場に輸送される衣類の減少によって、50%減とした。製造品食品については、「令和2年版 消費者白書」⁴³において、食品製造業の食品ロスの割合は、全部門平均の食品ロスの割合の半分程度であることから、可食部に占める食品ロスの割合を5%と想定した。「日用品」「ゴム製品・木製品その他の製造工業品」について、使い捨て習慣の変化やリユース市場の進展、消費地に近いところでのリサイクルと再加工程の発展などによって、輸送量が50%減と想定した。これらの各部門の移動量削減率を合計すると、貨物輸送量全体として、7%減の変化となった。

表 3-6. 資源効率性向上による陸上貨物輸送量の変化 (社会変容シナリオの場合)

	2030	2040	2050
穀物	0.98	0.95	0.92
野菜・果物	0.98	0.95	0.92
その他の農産品	0.98	0.95	0.92
畜産品	0.98	0.95	0.92
水産品	0.98	0.95	0.92
化学肥料	0.90	0.75	0.60
繊維工業品	0.90	0.70	0.50
製造食品	0.98	0.97	0.95
食料工業品	0.98	0.97	0.95
日用品	0.90	0.70	0.50
ゴム製品・木製品その他の製造工業品	0.90	0.70	0.50
動植物性製造飼・肥料	0.90	0.75	0.60
廃棄物	0.90	0.80	0.69

(4) 住宅床面積・性能の推計

まず、地域区分ごとの戸建住宅及び集合住宅に住む世帯数は表 3-7のように推計され、これを全シナリオ共通の前提とした(表 3-7)。

表 3-7. 世帯数の想定 (全シナリオ共通)

(単位：千世帯)	2020	2030	2040	2050
寒冷地・戸建	5,394	5,189	4,937	4,868
寒冷地・集合	2,608	2,610	2,573	2,631
温暖地・戸建	25,412	24,848	23,907	23,786
温暖地・集合	20,915	20,760	20,203	20,334

新築住宅の断熱性能については、建物の外皮断熱性能を表すUA値(単位： $W/m^2 \cdot K$)を建築物省エネ法上の地域区分ごとに想定する。一般社団法人日本サステナブル建築協会の文献⁴⁴およびエネルギー消費性能シミュレーション⁴⁵結果を元に設定し、表 3-8の通り全シナリオ共通の前提とした。

表 3-8. 省エネ基準ごとの断熱性能 (UA値) の想定 (全シナリオ共通)

(単位: W/m ² ・K)	1.2 地域	3 地域	4 地域	5 地域	6 地域	7 地域
無断熱	0.94	1.58	1.92	2.18	2.18	3.06
S55	0.72	1.21	1.47	1.67	1.67	2.35
H4	0.54	1.04	1.25	1.54	1.54	1.81
H11/H25	0.46	0.56	0.75	0.87	0.87	0.87
ZEH	0.40	0.40	0.50	0.60	0.60	0.60
HEAT20 G2	0.28	0.28	0.28	0.34	0.34	0.46

新築住宅に占める各省エネ基準の割合 (床面積ベース) は、国土交通省ほかの資料^{46,47}を参照し、全シナリオ共通の前提とした。2025年までに全ての住宅が省エネ基準への適合義務化となること、2030年に新築平均がZEH性能を有すること、2030年までに適合基準をZEH水準とし誘導基準を更に引き上げることが目指されている⁴⁸ことから、それらを反映してパラメータを設定した (図 3-6)。

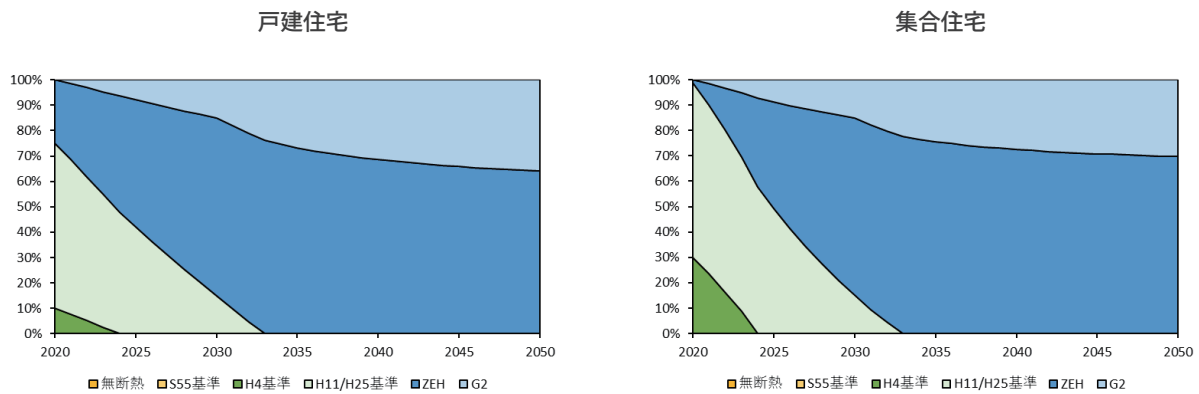


図 3-6. 新築住宅に占める各省エネ基準の割合 (全シナリオ共通)

(5) 業務用建物床面積・性能の推計

まず、現状の業務用建物の用途別・業種別の床面積及びエネルギー消費量のデータ^{49,50}と生産額をもとに、業種別に生産額百万円を得るために使用している床面積の原単位を表 3-9の通り想定した。ただし、各種データのカテゴリ分類方法が厳密には一致していないため、一定の不確実性を伴う想定値であることに留意が必要である。

表 3-9. 業務部門の生産額100万円あたりの床面積（単位：㎡）

業種	事務所	店舗	飲食店	学校	ホテル	病院	その他
情報通信	1.4						0.7
運輸郵便	0.7						
卸売小売	1.0	5.1					
金融保険	1.1						
不動産	0.2						
研究他	1.3						
宿泊飲食			2.1		2.7		
生活関連サービス							3.5
教育				13.4			1.3
医療福祉						1.7	0.9
公務	1.5						1.6
その他	12.6						

次に、過去のGDP及び国内生産額と業務用建物床面積の相関から、現在の政府がエネルギー基本計画において2030年に想定している業務用建物床面積⁵¹と、トレンドを延長した場合に推計される床面積の差を求め、これを政府目標シナリオにおける生産性の向上幅とした。そのうえで、シナリオごとに生産性（単位生産額を得るために投入される建物）の向上幅を表 3-10の通り想定した。ここでは、オフィスのあり方が変化することを想定し、テレワーク等テレプレゼンスの推進により、2050年には最大で5割まで出社率が下がる一方で一人あたりの床面積が4割増加し、現状よりも3割程度小さいオフィスの床面積で同じ生産額を生み出すようになると想定した。また、医療福祉及び教育研究部門の生産活動量の増加は主にデジタル分野から生み出されると想定しているため、これらの部門については生産活動量の増加と床面積の計算とを紐づけず、病院・学校は現状の床面積が維持されると想定した。これらと（1）で推計した業種別生産額をあわせて考慮し、各建物種別の業務用床面積を推計した。

表 3-10. 業務部門の生産性向上に関する想定

	技術変容シナリオ	バランスシナリオ	社会変容シナリオ	政府目標シナリオ
床面積あたり生産額	2030年に生産性が16%向上、2050年は2030年を据置	オフィスは2050年に生産性が23%向上、その他はトレンド通り	オフィスは2050年に生産性が30%向上、その他はトレンド通り	2030年に生産性が16%向上、2050年は2030年を据置

また、新築建築物におけるエネルギー消費性能別のシェアは国土交通省ほか^{46,52}の資料を参照し、図 3-7の通り想定した。

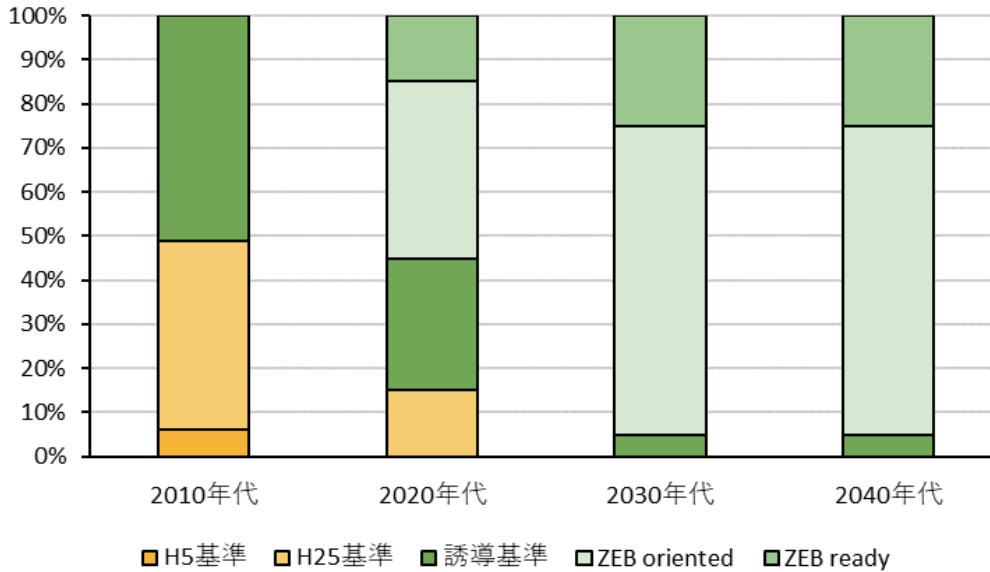


図 3-7. 業務部門の新築建物のエネルギー性能別シェア (全シナリオ共通)

3. 電化・水素利用・省エネに関するシナリオ設定

本節では、電化・水素利用・省エネなど、エネルギー需要技術の変化に関するシナリオの設定内容を示す。まず、全体に共通する、採用される技術の選択や導入時期に関する考え方の概要を示し、次に、各部門における想定内容を記す。

(1) 導入される技術に関する考え方

導入される技術の選択、技術の導入時期の想定については、IEAが公表する技術成熟度評価 (Technological Readiness Level) を参照した⁵³ (表 3-11)。具体的には、技術成熟度が高い技術 (TRL9以上の技術。つまり、商用化されているもの) は、設備が更新されるタイミングに高い採用率で順次導入されると想定し、プロトタイプはできているが技術成熟度は低い技術 (TRL4以上8以下の技術) については、2035年以降に導入がはじまり、2040年にある程度技術が社会実装され、2050年までに完全に採用されると想定した。本レポートにおいて、業務、家庭部門で普及が想定されている導入技術及び運輸部門のうち電気自動車は、TRL9以上であり、ストックが入れ替わるタイミングでこれらの技術に置き換えられていくと想定できる。一方、産業部門、船舶、航空、農林水産業、建設分野において普及が想定されている導入技術及び燃料電池自動車については、一部の電化技術を除きTRL8以下のものも多く、普及速度は緩やかになる。

表 3-11. 技術成熟度評価 (Technological Readiness Level) の定義

TRL	成熟度評価	TRL	成熟度評価
レベル 1～3	コンセプト	レベル 7～8:	デモンストレーション
レベル 4	小規模プロトタイプ	レベル 9～10:	導入初期
レベル 5～6:	大規模プロトタイプ	レベル 11:	成熟

図 3-8に、基準年の産業部門の最終エネルギー消費量を、熱、電力、非エネに分けて示す。熱には、化石燃料及びバイオマスの燃料消費と蒸気消費が含まれる。非エネは、ナフサなど原料として使用される化石燃料の消費が分類されている。産業部門全体では、電力の割合は21%、熱の割合は53%、化石燃料の非エネ利用の割合は26%であることから、現状では、産業部門で消費されるエネルギーの半数以上が燃料である。

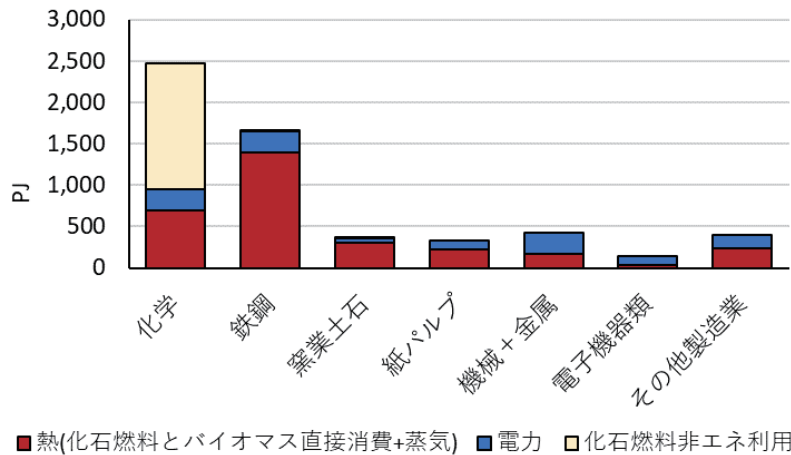


図 3-8. 基準年の産業部門別、用途別のエネルギー需要

次に、図 3-9に2017年の産業部門の熱エネルギーの温度帯別、業種別の分布を示す⁵⁴。熱エネルギーの多くは鉄鋼金属、窯業土石、化学の3つの部門が占めている（具体的には、3部門合計で78%）ことが分かる。これらは素材産業と言われる部門であり、鉄鉱石、石灰石、原油といった鉱物資源を熱エネルギーによって化学的に変化させるために大量のエネルギーが必要である。さらにこれらの部門は200℃以上の高温熱を主に利用する。一方で、非素材産業である機械製造、食品飲料や、素材産業であるが、比較的低温熱を利用するプラゴム製造、繊維、製紙業の熱需要は大きくなく、利用する熱も200℃以下が大半を占める。

また、熱の形態別の分布を図 3-10に示す。0℃未満～150℃未満までは、温水、蒸気、直接加熱、冷熱が混在し、150℃～200℃の温度帯では蒸気が大半を占める。200℃～600℃までは、蒸気と直接加熱が同じような割合で使用され、600℃以上になると直接加熱が大半を占め、一部電気加熱がある。

素材産業を除くと、50℃までは冷熱需要が大半を占める。50℃～150℃では、温水と蒸気が混在し、150℃～200℃は蒸気が大半を占める。こうした100℃までの温度帯の熱需要を脱炭素化する手段として、電力中央研究所の報告⁵⁵や関係者へのヒアリングによると、電化が最も有効と考えられる。100℃～200℃の温度帯の熱需要を脱炭素化する主要手段として、産業用ヒートポンプまたは水素などの燃料燃焼による熱利用があり、競合するセグメントである。どちらが採用されるかについては、エネルギー価格、オペレーションコントロールに要求される精度、周辺のインフラ環境や技術の進展の度合い、エネルギー関連企業が展開するサービス発展度合いによって左右されるセグメントといえる。

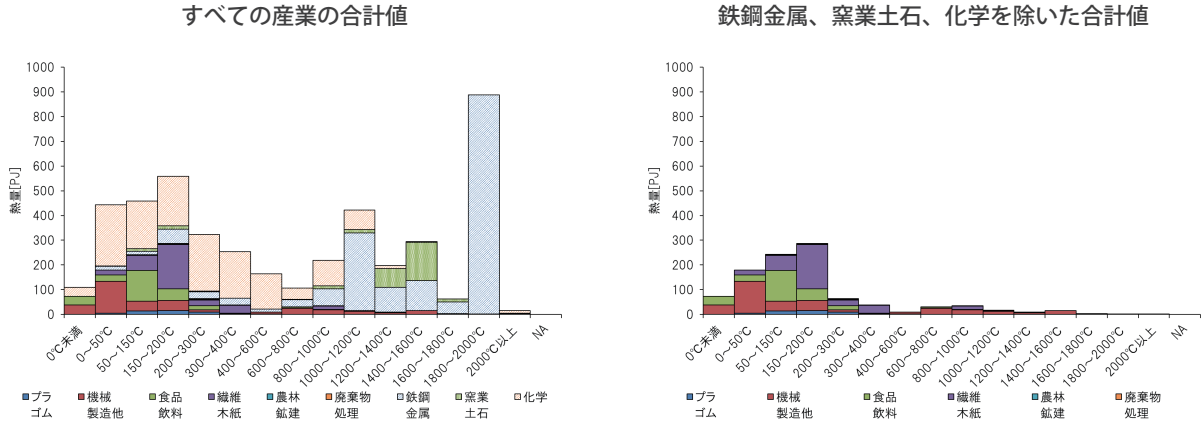


図 3-9. 産業部門の熱エネルギーの温度帯別、業種別の分布

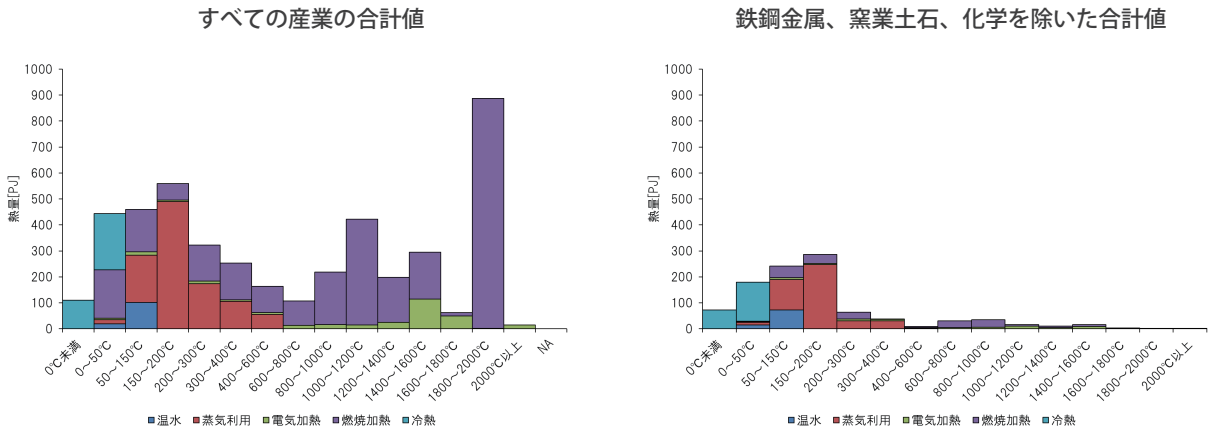


図 3-10. 産業部門の熱エネルギーの温度帯別、形態別の分布

コラム：水素のはしご（The Hydrogen Ladder）の概念

Bloomberg New Energy Finance（ブルームバーグNEF）創設者で、各国政府、国連、著名なエネルギー企業のアドバイザーなども務める世界的エネルギーアナリスト、マイケル・リーブライク氏は、水素の経済合理性、エネルギー効率、物理特性を総合的に判断して、どのような分野や用途の水素利用の市場が拡大しうるかについての指針となる「水素のはしご（The Hydrogen Ladder）」の概念を提唱した⁵⁶。様々な水素の用途を、水素が占める市場シェアの大きさに応じて、以下に示すAからGの7段階で評価している。例えば、肥料（Fertiliser）、メタノール（Methanol）などは、水素利用以外に代替手段がないものとして、Aランクに位置づけられている。一方で、産業部門における中温～低温熱供給（Mid/Low-Temperature Industrial Heat）や乗用車（Cars、すなわち燃料電池を使った乗用車）は、市場が形成されることが期待できないものとして、Gランクに位置づけられている（図3-11）。

A:代替手段がない、B:相応の市場シェアとなる可能性が高い、C:ある程度の市場シェアが見込める、D:小規模な市場シェアとなる可能性がある、E:ニッチな市場シェアとなる可能性がある、F:一部の地域においてニッチな市場シェアとなる可能性ある、G:市場が形成されることが期待できない

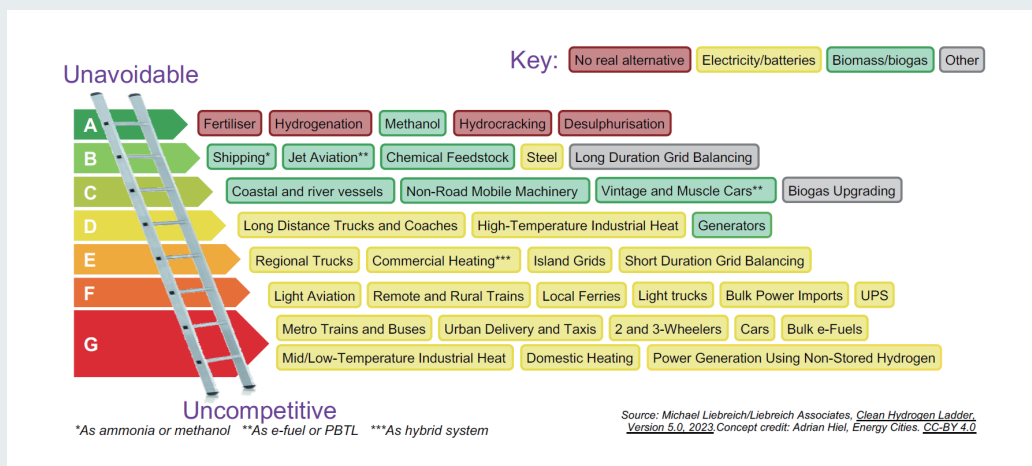


図3-11. 水素のはしごの概念図⁵⁶

IGES1.5°Cロードマップのバランスシナリオでは、2050年におよそ2,500PJ（570万トン）の水素を消費すると推計された。水素の主要用途は、化学原料（Chemical Feedstock）、鉄鉱石の還元剤（Steel）、再エネの長期変動に対応するために稼働する水素専焼火力発電の燃料（Long Duration Grid Balancing）であるが、これらはすべてBランク（相応の市場シェアが見込まれる）に位置づけられている。その他の水素利用用途として、大型船舶用燃料（Shipping）、航空用燃料（Jet Aviation）、貨物輸送（Long Distance Truck and Coaches）、産業用の高温熱供給用の燃料（High-Temperature Industrial Heat）であり、これらはBランクまたはDランクに位置づけられている。このように、本レポートでは、リーブライク氏の水素のはしごの概念の中で、市場が形成されやすい用途を中心に水素利用を想定している。

コラム：対策別のCO₂排出削減費用

1単位のCO₂排出量を削減するのにかかる対策費用を、該当する技術の削減ポテンシャルを横軸にして、削減費用が安価な順に並べたものを排出削減費用曲線と呼ばれる。この曲線を見ると、どのような技術がどの位の費用でどの程度CO₂を削減するかといった情報や、各技術の普及速度のポテンシャルを理解することができる。

図 3-12は、東京電力の2022年統合報告書に記載されている排出削減費用曲線である⁵⁷。断熱、電化、再生可能エネルギーの多くは、削減費用がマイナスになっている。すなわち、対策を講じれば、利益が出る対策となっている。これらの技術が普及していない理由は、費用以外の障壁（制度、規制、初期費用ファイナンス、情報、立地など）が存在することが考えられるため、これらの障壁を取り除くか乗り越えられるような支援が必要となる。なお、マッキンゼー・アンド・カンパニーも2050年の日本の脱炭素化を扱うレポートの中で、類似の排出削減費用曲線を描いている⁵⁸。

こうした対策費用は、費用計算に使用される投資回収期間や割引率、初期投資費用、エネルギー価格など、様々な仮定に影響されることに留意が必要であるが、一般的には、普及障壁に対して適切なアプローチがとられれば、省エネや電化は経済的にも得になる対策であり、技術の普及も速いと考えられている。カーボンプライシングは、ゼロコストの水平線をより上部に持ち上げ、従来ならプラスコストの対策を、マイナスコストすなわち行った方が利益の出る対策に変える効果を持つ。

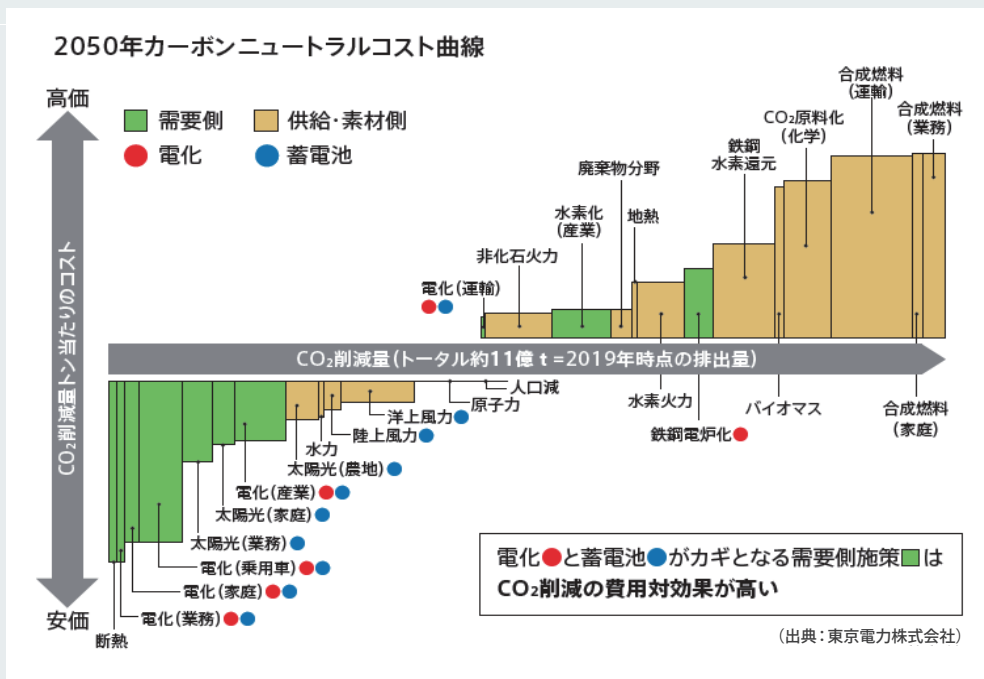


図 3-12. 排出削減費用曲線の例⁵⁷

コラム：電化によるエネルギー効率向上と複数の便益（デジタル化など）

エネルギーの電化は、様々な側面からエネルギー効率を改善する。エネルギー効率改善の理由を、以下の通り簡潔に記す。

- 自動車のエンジンなど内燃機関によって化石燃料を燃焼して動力を生み出す代わりに、電気モーターを使用することで、エネルギー効率が3~4倍に高まる。さらに、回生ブレーキによって制動時のエネルギーを回収することで、エネルギー効率を高められる。自動車エンジンレベルの小さな内燃機関は、化石燃料の持つエネルギーを動力に転換する際に、大半を熱エネルギーとして損失してしまう。
- 化石燃料を燃焼して熱を得る暖房機器をヒートポンプ式エアコンに置き換えることで、エネルギー効率が3~7倍に高まる（家庭用と業務用などの規模や使用する条件によってエネルギー効率は変わる）。ヒートポンプ式エアコンは、大気中の熱を利用することから、このような高いエネルギー効率を発揮する。
- 化石燃料を燃焼して熱を得る調理機器をIHに置き換えることで、エネルギー効率が2倍程度に高まる。これは、ガスコンロなどは、室内の空気など加熱の対象である鍋以外の温度も上げてしまうので、投入されるエネルギーの50%前後がヒートロスとなるためである。電子レンジも、電気が持っているエネルギーのほとんどを水分子の振動という形で調理品の内部からの直接加熱に使うことができ、ヒートロスが殆ど生じないきわめて効率の高い調理方法である。
- エネルギー効率改善以外にも電化によるメリットは様々ある。以下にその具体例をまとめる。
- 化石燃料を動力や電気エネルギー変換する際に、燃焼プロセスが必要であるため、必ず排気ガス及び廃熱が発生する。これが自動車であれば、大気汚染や歩行空間の温度上昇につながる。空調や調理に関しては、室内における温度やNOx濃度、PM2.5濃度に影響を与える。特に、換気が悪い条件下だと、ガスコンロによるNOxの排出が、呼吸器疾患を起こす可能性が指摘されている⁵⁹。実際に、米国における現在の小児喘息の12.7%がガスコンロの使用に起因していることが判明した⁶⁰。さらに、室内でのガス空調や調理器具の利用によって、発がん性物質であるベンゼンが発生することも報告されている⁶¹。このような研究的知見から、米国では2023年1月に、消費者向け製品の安全基準を定める政府機関「米国消費者製品安全委員会」が全米でガスコンロの使用禁止を検討することが報道されるなど注目が高まっている。
- 電気エネルギーのほうが細かな出力制御が可能になることから、きめ細やかな温度調整が可能であり、より快適な環境や性能の良い製品やサービスの提供が可能となる。
- 今後高齢化が進む中で、暖房の消し忘れ、調理用コンロの消し忘れなどが、火災などの重大な事故につながる可能性が考えられる。電化であれば、これらの機器を消し忘れても、重大事故になる可能性は極めて低いことに加えて、センサーなどで制御することで、自動的に稼働を止める機能も付けやすいことから安全性が高まる。
- 自動車の分野においては、デジタル技術を用いた自動運転の実用化に向けて様々な研究開発が進められている。自動運転は、電子制御や車両の設計自由度などの観点から電動車両と相性が良いとされる⁶²。また

トルク性能が一様で高いなど、エンジン車では難しかった快適な運転を可能とする。ガソリンスタンドに行く必要もなくなる。今後、これらの技術が発展し社会実装されていく過程で、自動車の電化も進むことが考えられる。

- 産業部門での電化のメリットに関して、電中研が実施した70件の事例研究^{55,63}によると、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副次的な便益があることが報告されている。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・塗布回数の減少・品質向上・加熱温度のムラの減少・製造プロセスの自動化進展・設備コンパクト化・メンテナンス頻度の減少・放熱ロス減少による作業環境改善といった生産性向上に資する便益も報告されている。結果、生産時間、炉昇温時間、メンテナンス頻度の削減による人件費・機械稼働比削減が満足度に影響を与えていることを報告している⁶⁴。東京電力は、ヒートポンプによる熱供給装置は、ボイラによる熱供給装置よりも小規模分散型であり、設備更新に係る投資を分散化できること、デジタル管理を行いやすい生産ラインを構築できることを報告している⁶⁵。

(2) 各部門における想定内容

① 産業部門

エネルギー集約的な素材産業（鉄鋼業、化学工業、窯業・土石製品製造業）以外の業種に対して、電化率及び既存の電気機器の省エネ率を共通して想定した（表 3-12）。2030年度におけるエネルギー需給見通しの関連資料⁵¹を参照し、既にエネルギー源として電気が使われている用途需要については、産業用モーター・インバータの導入、高効率な電気工業炉や、高効率空調、高性能ボイラ（配管の修繕や適正配置などの対策も含む⁶⁶）が進むことを想定し、政府目標シナリオでは2030年までにエネルギー効率が基準年比で2割改善することを想定した。技術変容、バランス、社会変容シナリオについては、デジタル化との相乗効果を図ることでより高い省エネ効果を見込むことができると想定し、2030年までのエネルギー効率の改善に加えて、2050年までに基準比で26%の省エネが達成されることを想定した。

電化が行いやすい工場空調、動力、低温熱（200℃以下）需要については、技術変容、バランス、社会変容シナリオにおいて、2050年までに、以下の理由から、70%まで進むと想定した。第一に、上述の通り、100℃～200℃の温度帯の熱需要を脱炭素化する主要手段として、産業用ヒートポンプまたは水素などの利用がある。水素が選択されるのは、工場が水素流通のインフラ整備が進む立地にある場合や、生産工程の制約から水素を使用しなければならない製品を利用する場合などに限られると考えられる。従って、低温熱の需要の脱炭素化を進める際には、多くの工場で産業用ヒートポンプの利用が選択されることが考えられる。第二に、産業用ヒートポンプの導入障壁として、ヒートポンプの設置場所確保や、生産プロセスに合わせた適切なヒートポンプの配置が課題としてあげられるが、欧州の事例で見られるように、ヒートポンプの利用について高度な知識をもつ専門家が知見を提供することで、これらの課題の多くが解決されることが考えられる（詳細は第6章参照）。第三に、低温熱需要に対しては、グリーン水素を利用することは、再エネ電力を用いたヒートポンプを利用するよりも、エネルギー転換効率の観点から採算性が落ちると考えられる。なお、後述する通り、非電化分の30%のうち、水素化などに切り替わるのは、70%と想定し、非水素化分は30%と想定した。低温熱需要のうち残りの9%（30%の2乗）は、従来型天然ガスによって供給されると想定した。

高温熱（200℃以上）の電化に関しては、技術的に大半のプロセスに適用することが可能であるとされているが⁶⁷、生産規模や立地制約などのさまざまな要因から経済的に課題があるため、技術変容、バランス、社会変容シナリオにおいても、2050年時点での電化率は30%とした。

燃焼加熱用エネルギーなどの電化が難しい生産用エネルギーについては、水素および合成燃料の利用が主となると想定した。従って、技術変容、バランス、社会変容シナリオでは、これらのエネルギー源が非電化エネルギーの70%に相当する割合で採用されると想定した。残りの30%は、ガスによってエネルギー供給が行われると想定した。これらの想定背景として、第一に、事業者へのヒアリングでは、鑄造プロセスや焼成プロセスなど生産工程で必要となる熱需要の特性（単位時間あたりに必要な熱量や水素の燃焼速度など）から、電化や、燃料の水素転換は難しいという意見が寄せられた。第二に、電化が難しい生産プロセスで水素を導入しようとしても、水素の供給インフラが整わない場合は、どちらも難しくなる。第三に、中小企業などの経営規模が小さな事業者の中には、2050年までに、電化または燃料の水素転換への投資が間に合わない状況も想定する必要があるという意見も寄せられた。

表 3-12. 産業部門（エネルギー集約的な素材産業以外）の想定内容

	政府目標シナリオ			技術変容、バランス、社会変容シナリオ		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
既存の電気機器（既存動力・照明・空調等）の省エネ率	20%	20%	20%	21%	24%	26%
工場空調（化石燃料利用分）の電化率	20%	30%	60%	30%	60%	90%
動力（化石燃料利用分）の電化率						
低温熱（200℃以下）需要の電化率						
高温熱（200℃以上）需要の電化率	0%	10%	20%	10%	20%	30%
非電化エネルギー需要の水素への利用転換率	0%	5%	30%	0%	20%	45%
非電化エネルギー需要の合成燃料への利用率	0%	5%	30%	0%	20%	45%
電化、水素化、合成燃料化されていない石炭利用のガス化率	15%	30%	100%	45%	100%	100%

素材産業のうち、化学工業、窯業・土石製品製造業、鉄鋼業においては、高温熱の需要が他の業種に比べて多く、さらに特殊なエネルギー利用（例：鉄鉱石の還元や素材としてのエネルギー利用）が存在するため、これらの産業部門においては、生産プロセスのサブモデルを別途構築し、それぞれに対策を想定した。なお、紙パルプ製造業については、サブモデルを構築して部門別の技術導入率は想定していない。その理由として、製紙業で使用される熱の温度帯が200℃以下のものが大半であること、製紙業ではバイオマスエネルギーである黒液や建設廃材の利用が進んでいること⁶⁸、海外では製紙業においても産業用ヒートポンプの利用が進んでいる（コラム 製紙業におけるヒートポンプの利用を参照）ことであり、上述の非素材産業に対する計算アプローチで対応できるためである。

コラム：製紙業におけるヒートポンプの利用

欧州のヒートポンプ協会（EHPA）と紙製造業界協会（CEPI）の共同論文では、産業用ヒートポンプを使用することで、熱処理用エネルギー需要を50%削減することが可能であると述べており、EUは、EU Green Deal Industry Planの中で市場へのサポートも約束している⁶⁹。

イタリア Turbodenは、北欧のパルプ・紙製造工場向けに大型ヒートポンプ（LHP）を受注⁶⁹。このシステムは、Turboden LHPと三菱重工の蒸気圧縮技術の統合に基づいており、低品位熱（10° Cから20° Cの範囲）を利用して、紙製造プロセスに必要な170° Cの過熱蒸気を12 MWthで生成する⁷⁰。

なお、産業用ヒートポンプは技術的には成熟している分野ではあるが、高温熱域でのさらなる効率改善を得るための研究開発や実証実験が今後も必要とされる。例としては、乾燥フード内の空気含有量を低くすることで、ヒートポンプの効率を向上させる（空気中の水分が蒸発する際に必要な熱量（潜熱）を増加させ、ヒートポンプがより多くの熱を回収できるようにする）。加えて、蒸気の開始圧力を低くすることも重要である⁷¹。これは、ヒートポンプが作動するためには一定の圧力差が必要であり、開始圧力を低くすることでその圧力差を確保できる。特に、後続の乾燥段階では相対的に高い蒸気圧が必要となるため、このような工夫が求められる。

このように製紙業において、化石燃料を利用しない生産プロセスの技術開発や実践への投入が進んでいる。

鉄鋼産業における脱炭素化の手段として、様々なものがある⁷²が、代表的な例として以下の方策が挙げられる。以下の方法以外にも、CCSの代わりに、DACsを使って脱炭素化を達成する手段も考えられる。

- ・ 鉄鉱石を使わずに、スクラップ鉄を活用し還元自体を行わないルート（scrap-EAF）
- ・ 鉄鉱石を水素だけで直接還元したうえで電炉で粗鋼を製造するルート（H2DRI-EAF）
- ・ 鉄鉱石を従来のコークスにより還元したうえで、排出されるCO₂を回収するルート（BF-BOF+CCS）
- ・ 鉄鉱石を還元する高炉で使用するコークスの一部を水素で置き換え、排出されるCO₂を回収するルート（BF-BOF+H₂+CCS）
- ・ 高炉で使用する鉄鉱石の一部を還元鉄で置き換え、排出されるCO₂を回収するルート（BF-BOF+DRI+CCS）
- ・ 鉄鉱石をガスで直接還元したうえで、電炉で粗鋼を製造し、排出されるCO₂を回収するルート（GasDRI-EAF+CCS）
- ・ 鉄鉱石を直接電気分解して、鉄鉱石中の酸素を除去する方法（MOE）

スクラップ鉄の利用は、スクラップ鉄の利用可能量が上限制約となることと、不純物による強度低下等の問題から将来的に①の技術のみで鉄鋼部門の脱炭素化を達成することは難しい。②の水素直接還元製鉄法は、海外企業を中心に早期実用化が進められている（コラム参照）。③の高炉（BF-BOF: Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace）から排出されるCO₂の回収について

は、脱炭素化を達成するためには、90%–95%のCO₂回収率が必要とされているが、実際に運用中のアブダビのAl Reyadah プラントでの回収率は50%に満たない⁷³。④の既存の高炉を一部改造した上で、還元材の原料炭（コークス）の一部を水素で代替する方法及び⑤の鉄鉱石の一部を直接還元鉄に代替する方法は、実証実験が進められているところであるが、2023年8月時点では、CO₂削減量効果は22%である⁷⁴。実用化や普及については、2050年頃までに目指すとされているので、2040年時点での利用可能性には大きな不確実性がある。また、政府資料⁷⁵においても、④のBF-BOF+H₂+CCSの実用化は2045年以降とされているのに対し、②のH2DRI-EAFは部分的な水素直接還元の実用化は2030年代、100%水素直接還元の実用化は2040年代としており、H2DRI-EAFのほうが普及スピードが早い。⑥については、③と同様にCO₂の回収の不確実性が大きい。⑦については、研究開発の段階の技術であり、商業化の時期に関する見通しが無い。そのため、本レポートでは、①scrap-EAFと②H2DRI-EAFの技術を基に、鉄鋼部門の脱炭素化を想定した。

鉄鋼部門のエネルギー消費量の算定方法として、第一に、スクラップ鉄を用いた粗鋼生産量を推計した。具体的には、シナリオごとにスクラップ発生率（現状では、約2%⁷⁶）を仮定し、それを鉄鋼蓄積量に乗じてスクラップ発生量の最大値を推計した。既存の鉄鋼蓄積量は、一般社団法人日本鉄源協会の資料⁷⁷を参照した。次に、各シナリオにおいて電炉による粗鋼生産量の最大値を想定した。なお、日本における電炉の設備利用率は60%³と計算されることから、スクラップ鉄を手入れできれば増産の余地がある。そのため、短期的な電炉の粗鋼生産量の最大値は、電炉の生産能力の上限値ではなく、スクラップ鉄の利用可能量に影響を受ける。

第二に、各シナリオの粗鋼必要量と電炉による粗鋼生産量との差を、鉄鉱石を還元して製造する粗鋼生産量として推計した。このうち、水素直接還元製鉄（H2DRI-EAF）法による生産量割合を、表 3-13及び表 3-14に示す。scrap-EAFとH2DRI-EAF以外の粗鋼生産量は高炉による生産量と想定する。高炉に対しては、2040年以降は、CO₂回収装置が装着されると想定し、その回収率を表 3-13及び表 3-14に示す。

なお、scrap-EAFとH2DRI-EAFともに、電炉を用いて粗鋼を生産するが、電炉生産能力は必要に応じて増強されると想定する。電炉、水素還元法、高炉による粗鋼生産量を図 3-13に示す。scrap-EAFとH2DRI-EAFによる生産量合計値は、バランスシナリオにおいて、2030年は3400万トン、2040年は6100万トン、2050年は8000万トンと推計された。

その他、圧延、熱処理などの化石燃料需要の電化および水素化、熱需要の電化に関連するパラメータについては、表 3-15にまとめられた。

表 3-13. 粗鋼生産の想定内容（政府目標シナリオ、技術変容シナリオ）

	政府目標シナリオ				技術変容シナリオ			
	基準年	2030	2040	2050	基準年	2030	2040	2050
鉄鋼蓄積量に対するスクラップ発生率	0.03	0.031	0.032	0.035	0.03	0.031	0.032	0.035
スクラップ鉄を用いた粗鋼の最大生産量（基準年比）	1	1.05	1.1	1.15	1	1.05	1.1	1.15
鉄鉱石を還元する粗鋼生産のうち、水素直接還元製鉄（DRI-EAF）法による生産量割合	0	0	0.02	0.1	0	0	0.4	1
高炉からの排出されるCO ₂ 回収率	0	0	0.2	0.95	0	0	0.7	0.95

3 日本の電炉の粗鋼生産能力は4000万トン程度と想定し、2021年の電炉による粗鋼生産量が2400万トン程度と想定した場合の推計値^{274,275}。

表 3-14. 粗鋼生産の想定内容（社会変容シナリオ、バランスシナリオ）

	社会変容シナリオ				バランスシナリオ			
	基準年	2030	2040	2050	基準年	2030	2040	2050
鉄鋼蓄積量に対するスクラップ発生率	0.03	0.031	0.032	0.035	0.03	0.031	0.032	0.035
スクラップ鉄を用いた粗鋼の最大生産量（基準年比）	1	1.25	1.63	2	1	1.2	1.5	1.8
鉄鉱石を還元する粗鋼生産のうち、水素直接還元製鉄（DRI-EAF）法による生産量割合	0	0	0.4	1	0	0	0.4	1
高炉からの排出されるCO ₂ 回収率	0	0	0.7	0.95	0	0	0.7	0.95

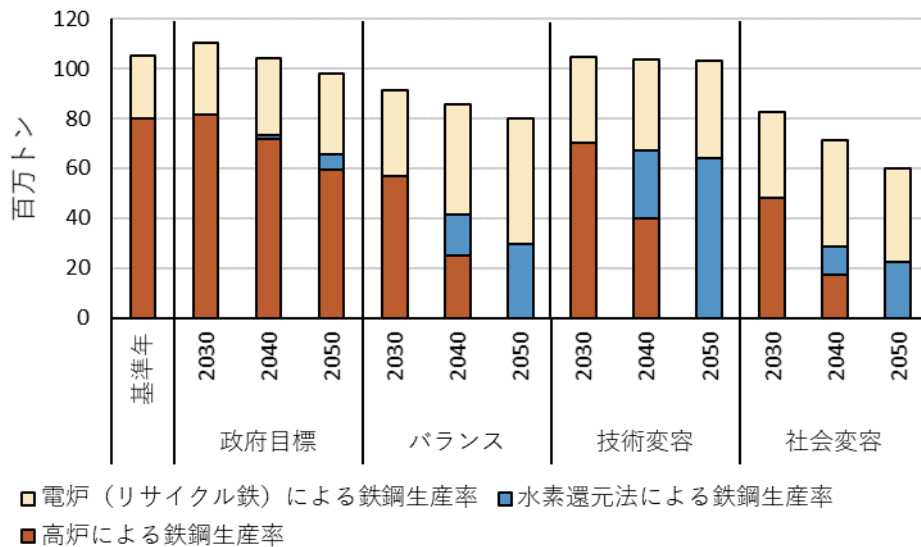


図 3-13. 電炉、水素還元法、高炉による粗鋼生産量

表 3-15. 粗鋼生産に係るその他の想定内容

	政府目標シナリオ			技術変容、バランス、社会変容シナリオ		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
圧延・熱処理等化石燃料需要の電化	0%	5%	10%	0%	20%	40%
圧延・熱処理等化石燃料需要の水素化	0%	5%	10%	0%	16%	60%
200℃未満蒸気の電化	10%	15%	60%	30%	60%	90%
200℃以上蒸気の電化	0%	10%	20%	0%	20%	30%

コラム：水素還元製鉄の国際的な動向

スウェーデンでは、グリーン水素を直接還元製鉄プロセスに利用するプロジェクトが早くから進められてきた。HYBRIT⁷⁸、H2 Green Steel⁷⁹は、業界初の商業的なH2-DRIによるグリーンスチール工場の（数年内= 2025、2026年）の運用開始を予定している。すでにオフテイク契約を発表しており⁸⁰、その需要の高さを表している。なお、水素産業は北部地域の産業化に貢献している。

ドイツ政府は鉄鋼産業におけるカーボンニュートラルでのリーダー的な役割を目指している。政府はグリーン水素ベースのDRI生産の実現可能性とスケーラビリティを評価するため、関連した研究とパイロットプロジェクトに積極的に投資している⁸¹。年間190万トンの粗鋼生産能力を持つ第1段階は、早ければ2025年末に稼働する予定である⁸²。

オマーンに拠点を持つ、インド資本のジンダル・シャディード・グループは、オマーン最大の民間総合鉄鋼製造会社である。同国のドゥクム港のコンセッション区域内に年間500万トンのグリーンスチール製造工場を建設すると発表した⁸³。投資額は30億ドル（日本円約4400億円）。敷地面積は約2平方キロで、2026年に完成予定となっている。

日本では、株式会社神戸製鋼所が直接還元製鉄プラントを製造しており、海外企業から受注している。2022年にスウェーデンの製鉄会社H2グリーンスチール社に、世界初の100%水素直接還元鉄プラントを納入する契約を受注し、年産能力は210万トンで2025年の稼働開始を予定している⁸⁴。さらに、2023年3月には、ドイツthyssenkrupp社から、生産能力が年産250万トンの直接還元製鉄プラントを受注した⁸⁵。本プラントは、初期の段階では還元剤として天然ガスを利用するが、水素が十分に供給できる体制が整い次第、水素還元製鉄に移行する（2027年以降）としている。

このように、2020年代に水素直接還元製鉄プラントの商用運転が開始される計画が次々と発表されている。また、ドイツthyssenkrupp社のように、水素の供給量に応じて、化石燃料の中でもCO₂排出量が小さい天然ガスを一時的に利用するなど柔軟な戦略を講じることができる。従って、脱炭素社会に向けて早期にCO₂排出量を削減することが求められる中では、水素直接還元製鉄法が、鉄鉱石を還元して粗鋼を生産する製造する有効な手段である。

化学工業においては、脱炭素社会の構築のみならず、海洋プラスチックごみ問題への対応や資源制約といった様々な環境問題に対応するため、プラスチック製品をリサイクルする取組が広がっている。海洋プラスチックごみの問題解決に対応するために、CLOMA（クリーン・オーシャン・マテリアル・アライアンス）では、2050年までにプラスチック製品100%リサイクルを目標に、官民及び民間の企業同士の連携強化を進めている⁸⁶。また、2021年に環境省は、経済産業省及び経団連とともに、官民連携の強化を目的に、J4CE（循環経済パートナーシップ）を立ち上げプラスチック製品や樹脂製品のリサイクルを含む様々な取組を進めている⁸⁷。三菱ケミカルグループは東京大学と共同で、循環経済、エネルギー、食料、都市などの主要経済システムの転換に対して化学産業がいかに貢献できるかについて研究を行った。成果報告書の中で、プラスチックのバージン材であるオレフィンの需要を循環経済によって40%以上削減できる見通しを示している⁸⁸。

本レポートにおいても、プラスチックのリサイクル（プラスチック製品のリユース、マテリアルリサイクル、CCUを含まないケミカルリサイクル）によって、バージン材の需要が大幅に減少することを想定している。各シナリオにおけるバージン材（ナフサや原料として新たに投入されるグリーン水素）の利用率は、図 3-14に示す。また、バージン材の製造に使用する原料

について、原料として新たに投入されるグリーン水素由来の原料の割合は、表 3-16に示す。これは、グリーン水素とDAC（直接空気回収）技術によって回収されたCO₂を利用してFT合成プロセスやeメタノールからプラスチック製品などの化学品を製造するプロセスに必要な水素である。政府資料⁸⁹では、2030年代にはケミカルリサイクル及び原料転換（合成ガスやメタノールからオレフィン生成など）の商用化が目標とされている。

これらの合成プロセスに必要なエネルギーの電化率および水素利用率も表 3-16にまとめた。化学製品製造に必要なエネルギー投入量は、次の理由で、生産量当たり一定とした。プラスチック製品のリサイクルによって、原油からナフサ製造に関わる投入エネルギーは減少する。しかし、プラスチック製品のリサイクルには、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクルの二つが考えられる。リサイクルされたプラスチック製品の品質が悪い場合、あるいは、均一ではない場合は、プラスチックを熱分解して合成ガスに戻してからプラスチック製品を製造する必要があるため、高温のエネルギー投入が必要である⁹⁰。次に、技術変容、バランス、社会変容では、燃焼加熱燃料の水素転換率を2050年では90%になると想定した。これらのシナリオは、バージンナフサを製造する際に、原油から基礎化学品を製造するプロセスから、水素を大量に利用する合成ガスやeメタノールから基礎化学品を製造プロセスに転換することを想定している。そのため、エネルギー供給インフラの合理化の観点から高温熱も水素によって供給されると想定するためである。政府目標シナリオでは、プラスチック製品から基礎化学品を製造する際には、ナフサを熱分解して基礎化学品を製造することを想定する。そのため、従来の製造プロセスの一部に電化や水素利用を取り入れる想定とした。

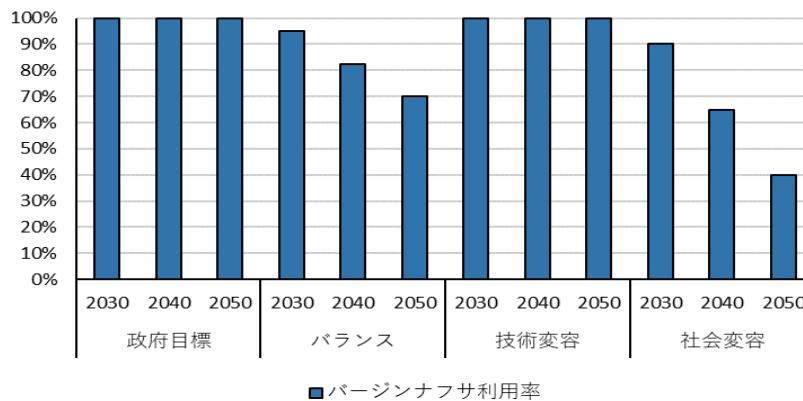


図 3-14. シナリオ別のバージンナフサ利用率

表 3-16. バージンナフサの原料及びその他の生産プロセスに関する想定

	政府目標シナリオ			技術変容、バランス、社会変容シナリオ		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
グリーン水素由来の原料比率	0%	10%	20%	0%	30%	90%
燃焼加熱燃料の電化率	10%	15%	20%	10%	10%	10%
燃焼加熱燃料の水素転換	5%	18%	30%	5%	53%	100%
200℃未満蒸気の電化	20%	40%	60%	30%	60%	90%
200℃以上蒸気の電化	0%	10%	20%	0%	15%	30%

コラム：eメタノール製造の諸外国の状況

化石燃料を利用しないでプラスチック製品を製造する基幹技術の一つであるe-メタノールの製造についても、世界各国で様々な取組が進められている。

European Energy⁹¹のデンマークKassøにある太陽光発電施設と併設されるこのe-メタノール施設では、再生エネルギー由来の電力を活用して製造されるグリーン水素と、バイオマス由来のグリーン二酸化炭素（CO₂）を合成してe-メタノールを製造する。出力304MWの太陽光発電と水電気分解・メタノールの各設備を建設し、e-メタノールを年産能力最大4.2万トンの商業規模で製造する。玩具LEGO社、医薬品Novo Nordisk社への販売契約を締結済み。両社、e-メタノールを使用したプラスチック製品（LEGO社はレゴブロック、Novo社はインスリンペン等）の生産を2024年から開始する⁹²。なお、このプロジェクトは、三井物産が買収した⁹³。

ABEL Energyは、オーストラリアタスマニア州のBell Bay先進産業地区において、大規模なグリーン水素およびメタノール施設の開発を進めている⁹⁴。このプロジェクトでは、造林の残渣をバイオマスガス化し水電解と連携させて、年間30万トンのe-メタノールを生産する計画。将来的に大気中からのCO₂を回収するDAC計画も進行中。

米国テキサス州クリアレイクにあるCelaneseの合併会社の工場では、周辺の工場から回収したCO₂からメタノールを製造するコストが、天然ガスから製造するコストと同等であると報告した⁹⁵。工場から回収されたCO₂の純正度が高く、効率よくメタノールの生産ができると発表。

シーメンス、リンデ、フラウンホーファーを含むコンソーシアムが主導するGreenHydroChemプロジェクトは、ドイツのLeunaにある化学工場でデモ実験プロジェクトを実施⁹⁶。再生エネルギー由来の50 MW電解装置で水素を生成し、現地の製油所でメタノールやその他の化学物質を製造している。

化石燃料を使用しないで、プラスチックなどの化学製品を製造することは、遠い将来のことのようにも感じるが、世界全体で脱炭素社会への早期の移行が求められる中で、様々な企業がこの変化をビジネスチャンスと捉えて、新たな技術の実装に動いている。

窯業・土石製品製造業の中でも、セメント業では、石灰石（CaCO₃）からクリンカ（CaO）を製造する際に、石灰石に含まれるCO₂が発生する。そのため、セメント業では、クリンカの利用率を減らすことがCO₂削減に大きく貢献する。この手法として、セメントに混合するクリンカの割合を下げる方法がある。2013年のクリンカの割合を下げた混合セメントの利用率は全セメントに対して22.1%⁹⁷であるが、2030年までに25.7%まで引き上げる目標となっている⁹⁸。2050年にかけて、社会変容シナリオでは40%、バランスシナリオでは33%と想定した。なお、電力部門において石炭火力発電がフェーズアウトし、鉄鋼部門において、高炉が水素還元製鉄に転換すると、混合セメントに用いられていたフライアッシュや高炉スラグが利用できなくなることから、焼成粘土を利用したセメント⁹⁹のような新たな技術開発が必要となる。焼成粘土を利用したセメントは、強度や強度発現スピードに関する研究¹⁰⁰や3Dプリンターへの応用¹⁰¹など、社会実装に関わる様々な研究が進められている。

次に、資源循環の高まりによって、社会変容シナリオ、バランスシナリオではクリンカの再利用が進むと想定した。Sousa et al.¹⁰⁰は、リサイクルセメント（再利用したクリンカを利用するセメント）を40%まで使用したコンクリートの機械的強度は、わずかな影響しか受けなかったと報告している。さらに、リサイクルセメントを100%使用したコンクリートでも、同じ組成

のポルトランドセメントを利用したコンクリートと比較して、強度の低下は17%で通常の設計尤度の範囲内に収まったと報告している。従って、社会変容シナリオでは、再利用したクリンカの利用率を40%と想定し、バランスシナリオでは、20%と想定した。

セメント協会は、低炭素社会実行計画において、セメント製造用エネルギー原単位の2020年目標値である3,420MJ/t-cemを2030年までに3,334MJ/t-cemに改善（約3%）することを目標としている⁹⁷。従って、窯業・土石製品製造業の政府目標シナリオの2030年省エネ率は、2020年比で3%とし、2040年、2050年は1%ポイントずつ改善すると想定した。技術変容、バランス、社会変容シナリオの省エネ率は政府目標シナリオと比べて、1%ポイント高い水準と想定した。窯業・土石製品製造業に必要なエネルギーの電化率、水素利用率を表3-17にまとめた。政府目標シナリオでは、セメント焼成プロセスからのCO₂削減に対する主要対策としてCCSが想定されることから、焼成加熱燃料の水素転換及び電化が進まない想定した。技術変容、バランス、社会変容シナリオでは、省エネ・電化及び再エネ・水素を最大限導入することをシナリオの基軸としていることから、これらの比率が上がることを想定した。なお、IEAのTRL評価では、セメント焼成炉へのCO₂回収技術導入はTRL7、変動性再エネによる直接加熱の技術はTRL6、セメント焼成炉での水素利用は、TRL4となっている。政府資料¹⁰²では、2020年代に排ガス等からのCO₂分離回収の実装、2030年代に水素・アンモニア等の利用が目標となっている。

表3-17. シナリオ別省エネ率、水素利用率、電化率

	政府目標シナリオ			技術変容、バランス、社会変容シナリオ		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
省エネ率	3%	4%	5%	4%	5%	6%
焼成加熱燃料の水素転換	0%	0%	0%	0%	30%	60%
焼成加熱燃料の電化	0%	0%	0%	0%	14%	32%
200℃未満蒸気の電化	10%	20%	60%	30%	60%	9%
200℃以上蒸気の電化	0%	10%	20%	0%	15%	30%

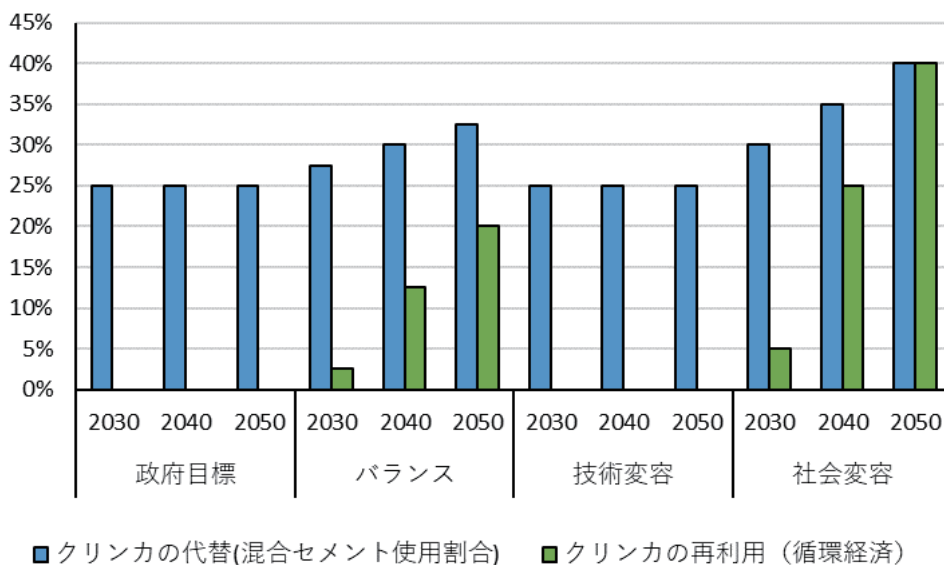


図3-15. シナリオ別のクリンカ代替率及び再利用クリンカの利用率

コラム：脱炭素社会における混合セメント

従来、環境に配慮したコンクリート製造のために、クリンカの量を減らす目的としてフライアッシュ（石炭灰）や高炉スラグなどの産業廃棄物が混和材（SCM）として使用されてきた。しかし、電力部門の脱炭素化によって、フライアッシュの量は減少すると予想される（一部の国では、すでに減少している）。他のSCMがない場合、セメントに対するクリンカ比は増加し排出量も増加してしまうことから、代替SCMの利用が検討されている。主な代替SCMの種類は以下の通り。

- ・ **シリカフューム**（Silica Fume）：微細なシリカ粒子。高い反応性と強度。耐久性を向上。
- ・ **バイオマスフライアッシュ**（Biomass Fly Ash）：バイオマス燃焼の副産物
- ・ **焼成粘土**（Calcined Clay）：カオリンクレイや粘土鉱物を高温焼成して得られる。強度と耐久性を向上。
- ・ **天然ポゾラン**（Natural Pozzolans）：天然の鉱物や火山灰などの自然由来の材料。
- ・ その他、スラグ、コンクリートリサイクル微粉、リサイクルガラスも挙げられる。これらのSCMの実用性は地域毎の特性（供給環境等）に依存する。

北米を拠点とするTerra CO₂は、ケイ酸塩系の火成岩（花崗岩など）や非固結性堆積物（砂や砂利など）を補助的なセメント材料として使用するプロセスを開発している¹⁰³。同社のOPUS SCM（コンクリート混和材）は、長年クリンカの量を減らすために使用されてきたフライアッシュ（石炭灰）の代替材料として使用される。同社は2022年に4,200万ドルの資金を調達。2023年に最初の商業プラントの建設に着手した。年間250 ktの製品の生産を予定している。さらに、ミネソタ州の道路研究施設プロジェクトでは、混合率35%の補助セメント材料を使用し基準の曲げ強度を満たすことができた。

オーストラリアのCalix社は焼成粘土（Calcined Clay）を活性化させてセメントおよび/またはコンクリート生産のSCMとして使用できるようにする技術を開発している¹⁰⁴。Calix社が開発しているCALIPSO™は、焼成粘土（Calcined Clay）を製造する技術である。特定の温度で焼成された焼成粘土は、セメントに混ぜることでコンクリートの強度を向上させることができ、さらにCO₂排出を削減できると注目されている。

スイスのLC3-プロジェクトは、スイス開発協力機関（SDC）支援のプロジェクトで、新型セメントLC3の開発と普及を目指すプロジェクトである⁹⁹。同プロジェクトは、石灰石（Limestone）と焼成粘土（Calcined Clay）を材料とするSCMに着目している。CO₂排出量を最大40%削減できると提言している。この新型セメントは、豊富に存在する石灰石と低品質の粘土を使用し、既存のセメント工場施設で大規模な改修を必要とせず生産できるため、コスト効率が良いとされている。LC3プロジェクトの目標は、この新型セメントをセメント世界市場で一般的に使用されるよう標準化することである。

このように、フライアッシュや高炉スラグに代わるSCMの開発がセメント分野の脱炭素化に重要となるが、日本において、どのようなSCMが適するかについて検討していくことが望ましい。

コラム：クリンカの再利用の実践とさらなる研究開発

Holcim社は、自社の特許技術であるECOCycle®を使用して、現在世界初の100%リサイクルコンクリートによる住宅を建築中。ECOCycle®技術により、建設解体廃棄物（CDW）を新しい建築材料としてリサイクルしている。この“Recygénie”プロジェクトでは、フランスのパリ郊外に220戸の集合住宅を建設しており、全体で6000トン以上の自然資源を節約できるとする。同社は、2021年に100%リサイクルのクリンカも開発し、実用化している。¹⁰⁵

ケンブリッジ大学の研究チームはセメント業界と製鉄業界の両方のCO₂削減に貢献できるセメントのリサイクル方法を開発した。建設廃材CDWを構成要素に仕分けするプロセスを経て、セメント粉末が生成され、製鉄における高炉スラグの代わりに使用することができる。このプロセスの残留物質はポルトランドセメントの基礎となるクリンカとほぼ同一であるため、セメント製造に再利用可能¹⁰⁶。

EFPプロジェクトは、Horizon 2020 イニシアティブの一環として、2018–2021年に実施されたEU資金研究プロジェクトである。その一つのプロジェクトとして、オランダのDelft大学の研究チームは「HAS」と呼ばれる新技術の実証実験を行った。この技術は、微細な骨材から水分と不純物を取り除き、従来はダウンサイクルされていたコンクリート廃棄物を新たなセメントとして再利用できるよう品質を向上させることを目指している¹⁰⁷。

コラム：セメントにCO₂を注入する新しい技術

カナダを拠点とするCarbonCure社は、回収したCO₂を触接乾燥前の（湿った）コンクリートに抽入するCarbonCureテクノロジーを開発した¹⁰⁸。コンクリートの製造を開始すると、同社が開発した装置によってCO₂を適切に計量した後に、ミキサー内に直接噴射・注入する。液化CO₂は空気に触れた瞬間に「CO₂スノー」と呼ばれる粒子に変わり、練り混ぜ水に炭酸イオンとして溶け込む。さらに、セメントから溶出されたカルシウムイオンと結合し、瞬間的に400ナノメートルレベルの微細な炭酸カルシウムの鉱物を生成し、セメント表面に付着する。セメント量を削減しながら同じコンクリート強度を引き出すテクノロジーである。

同社が特許取得したこの技術は、北米全土のコンクリート工場にいち早く導入された。北米の大手生コン会社を中心に、すでに500を超える工場がこのカーボンキュア技術を採用しており、日本では、會澤高圧コンクリート（本社苫小牧市）が導入している¹⁰⁹。會澤高圧コンクリートでは、現時点では製鉄所等から排出されるCO₂を利用している。

② 運輸部門

運輸部門について、各種自動車の年ごとの販売シェアをシナリオ別に想定した。

政府目標シナリオにおいて、乗用車の車種別販売シェアは、日本自動車工業会の「2050年カーボンニュートラルに向けたシナリオ分析¹¹⁰」CNFシナリオ（新車販売は、乗用で約半分がPHEVとなることを含め、全車種でそれぞれ電動化シェアがほぼ100%となるシナリオ）における乗用車の新車販売構成を参照した。バス車両の車種別販売シェアは、経済産業省資料¹¹¹を参考に、2030年以降、徐々に主にFCVがガソリン車を置き換えていくことを想定した。

技術変容、バランス、社会変容シナリオにおいて、乗用車の車種別販売シェアは、IEAの「Net Zero by 2050¹¹²」のLight-duty vehiclesの新車販売構成のグラフ及び「Net Zero Emissions Guide¹¹³」のcars and vansの車両ストックの想定値を参照した。バスの販売シェアは、IEAの「Net Zero Emissions Guide¹¹³」のBuses車両ストックの想定値を参照した。

各シナリオで想定する新車販売構成を基に推計した車両ストックの推移を図3-16、図3-17、図3-18に示す。乗用車のストック台数について、政府目標シナリオ及び技術変容シナリオでは、人口減が要因となって減少していく結果となった。社会変容シナリオ、バランスシナリオでは、人々が外出する頻度の減少や、移動手段が自家用車からシェアリングモビリティへと変わっていく中で、乗用車のストック台数がさらに減少していく結果となった。バス車両のストックについて、技術変容シナリオでは、内燃機関（ICE）車が自然減によってストックが入れ替わるスピード以上に、EV車両が必要となる想定であることから、2040年以降にバスのストック車両総数が増加する結果となった。社会変容シナリオ、バランスシナリオでは、移動手段の変化によって、自動車利用からバス利用へのシフトが進むことから、必要となるバス車両のストックがより多く必要となる結果となった。

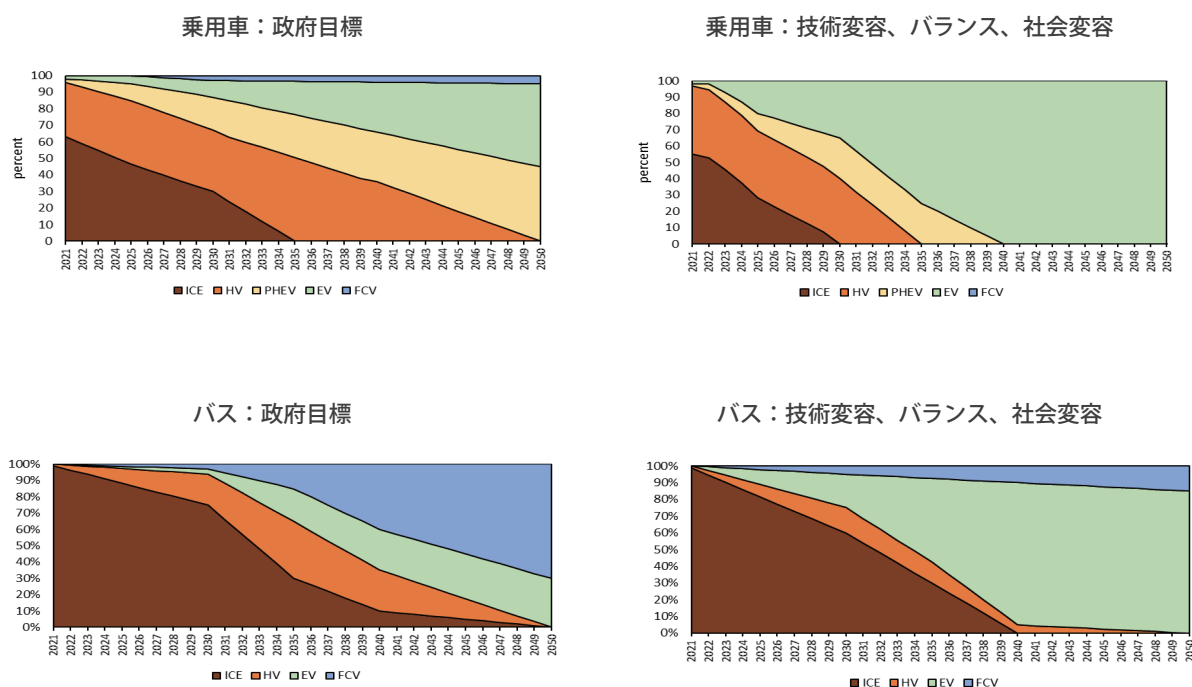


図3-16. シナリオ別乗用車及びバス新車販売シェア

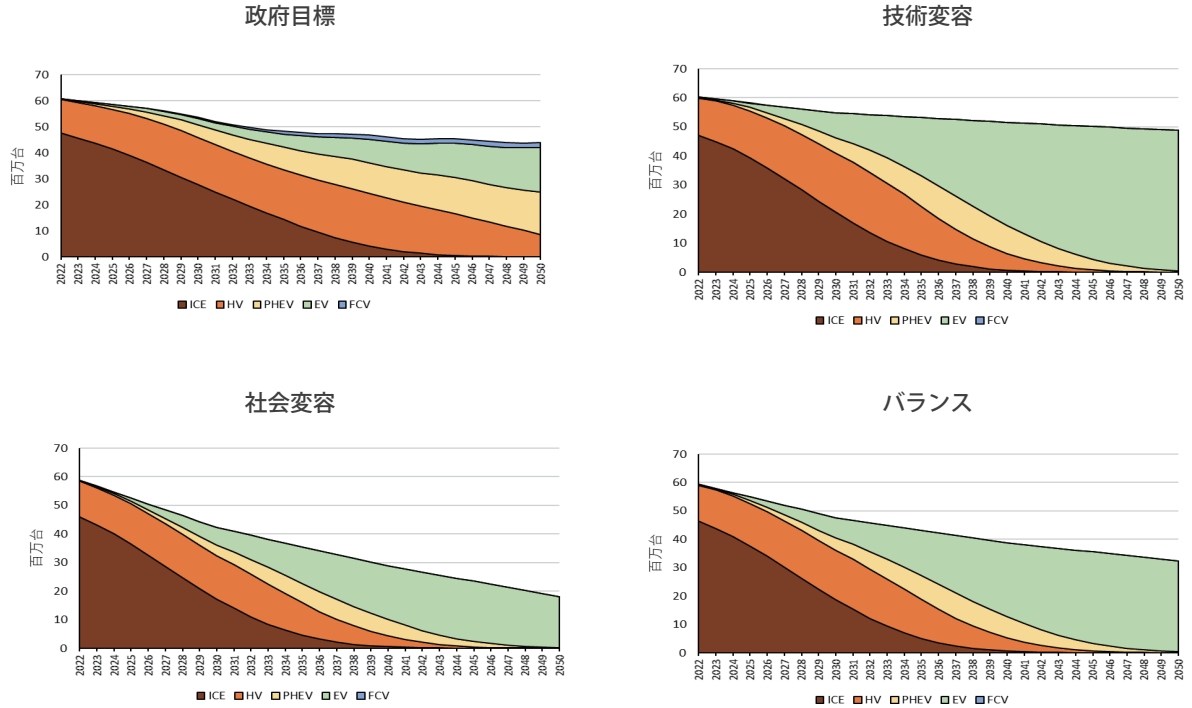


図 3-17. シナリオ別乗用車ストック推計結果

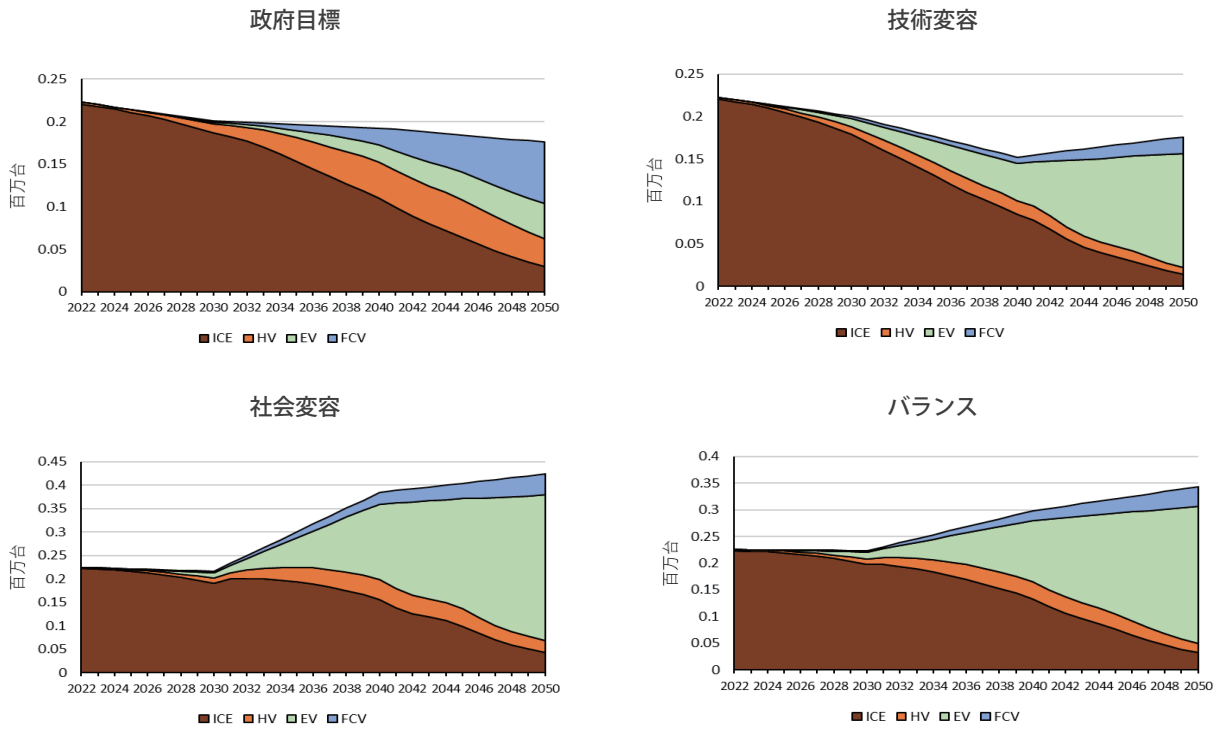


図 3-18. シナリオ別バスストック推計結果

政府目標シナリオにおいて、小型トラックの車種別販売シェアは、日本自動車工業会の「2050年カーボンニュートラルに向けたシナリオ分析¹¹⁰」のCNFシナリオにおける商用車の新車販売構成の想定値を参照した。普通トラック車両の車種別販売シェアは、経済産業省資料¹¹¹を参考に、2030年以降、徐々に主にFCVがガソリン車を置き換えていくことを想定した。

技術変容、バランス、社会変容シナリオにおいて、小型トラックの車種別販売シェアは、IEAの「Net Zero by 2050¹¹²」のLight-duty vehiclesの新車販売構成のグラフ及び「Net Zero Emissions Guide¹¹³」のcars and vansの車両ストックの想定値を参照した。普通トラックの車種別販売シェアは、IEAの「Net Zero by 2050¹¹²」のHeavy trucksの新車販売構成のグラフ及び「Net Zero Emissions Guide¹¹³」のHeavy trucksの車両ストックの想定値を参照した。各シナリオで想定する新車販売構成を基に推計した車両ストックの推移を図3-19、図3-20、図3-21に示す。

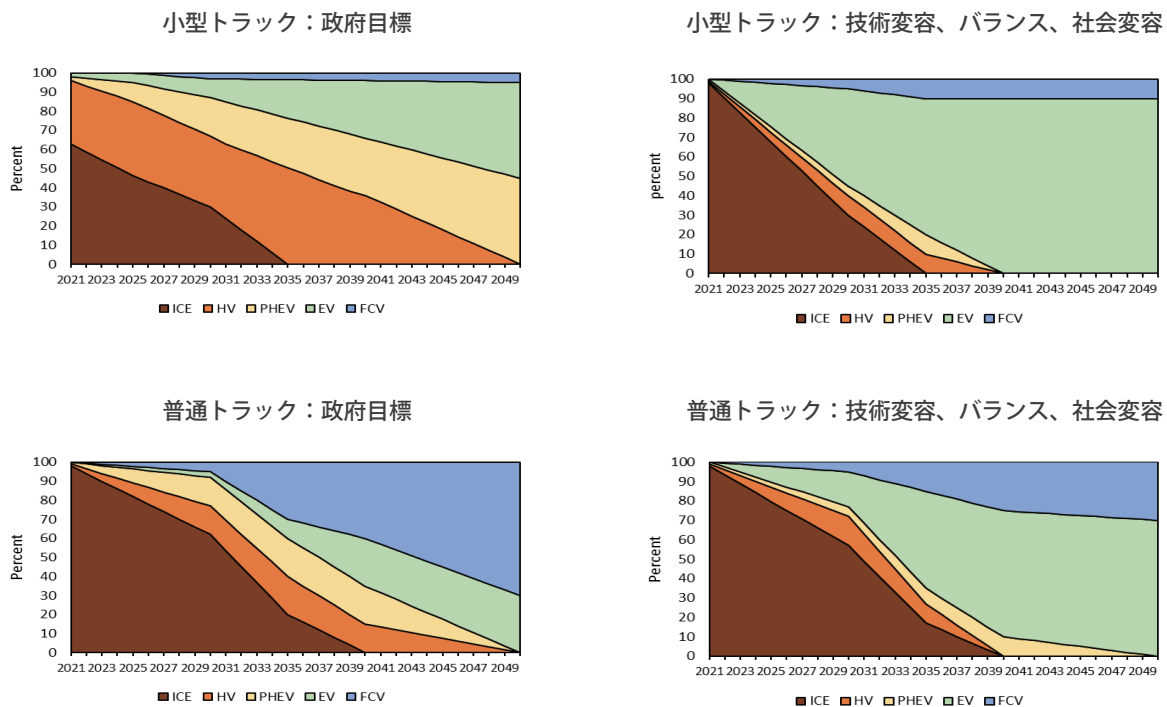


図3-19. シナリオ別小型トラック新車販売シェア

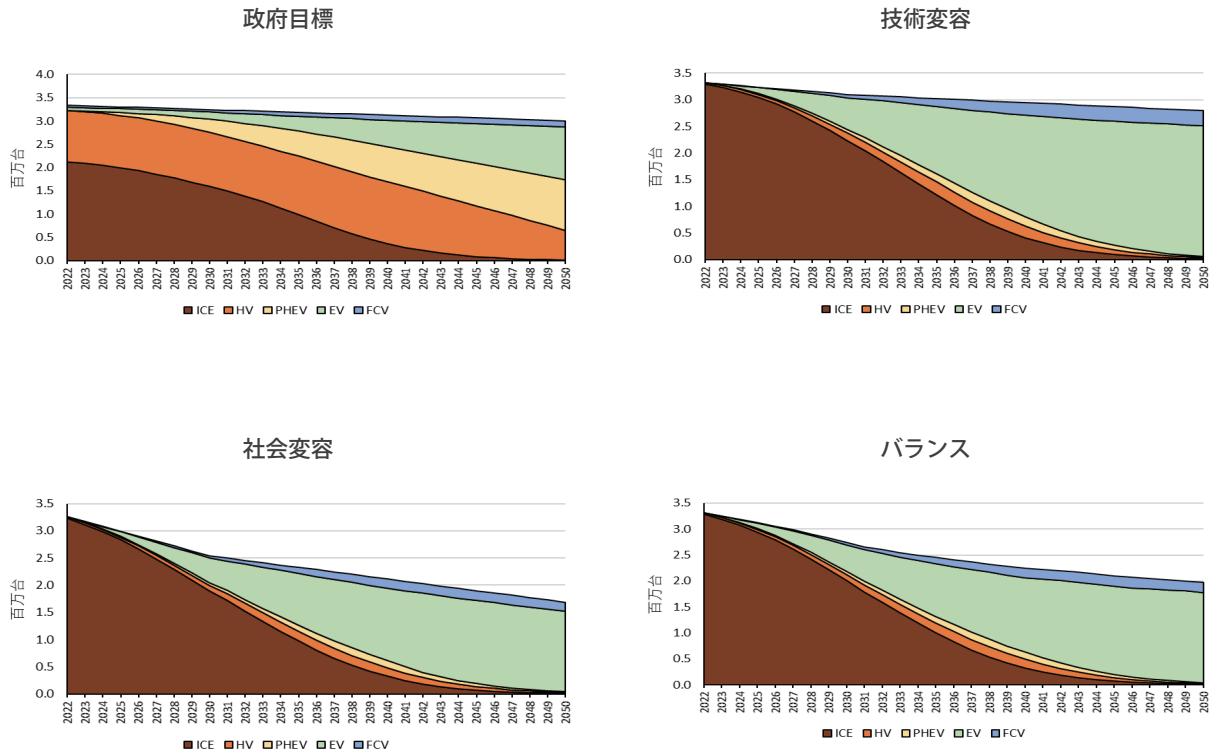


図 3-20. シナリオ別小型トラックストック推計結果

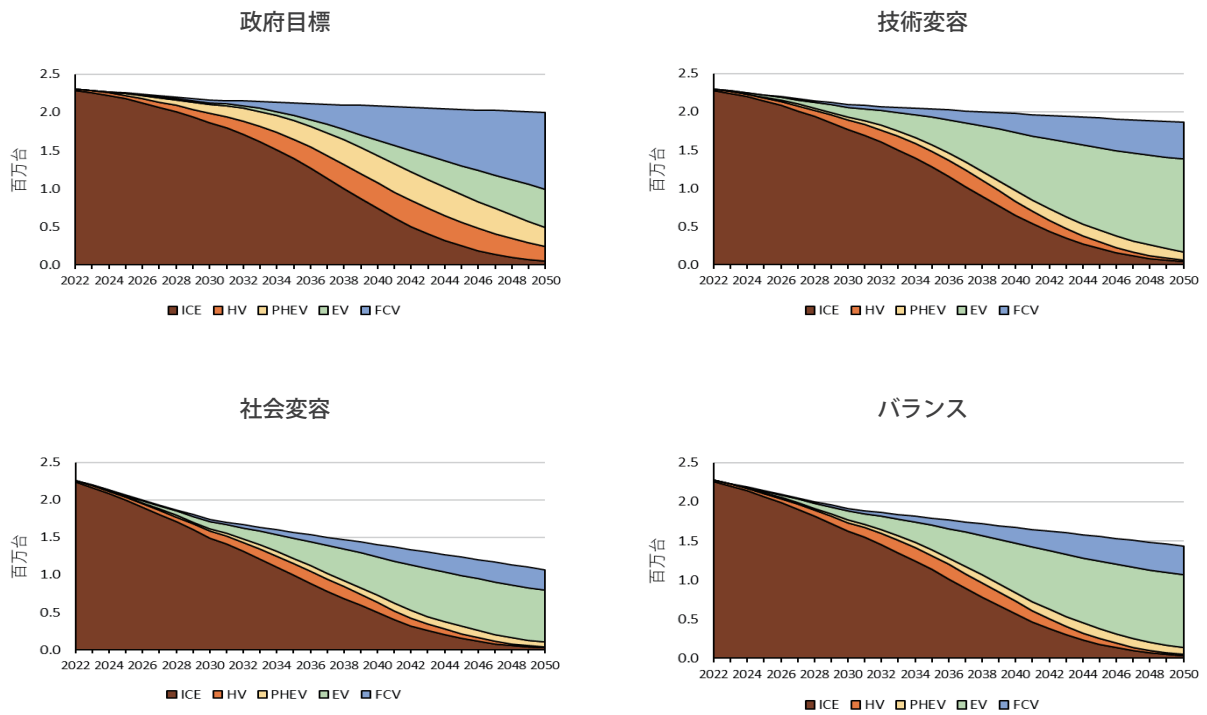


図 3-21. シナリオ別普通トラックストック推計結果

船舶について、ガソリンやディーゼルを使用する船舶は電化や燃料電池、内燃機関による合成燃料の燃焼を想定した。一方で、重油を使用する船舶は内燃機関によるアンモニア燃焼を中心的に想定した。航空機においては、使用する燃料のエネルギー密度が高い必要があることから、合成燃料を中心的に想定した。（図 3-22）

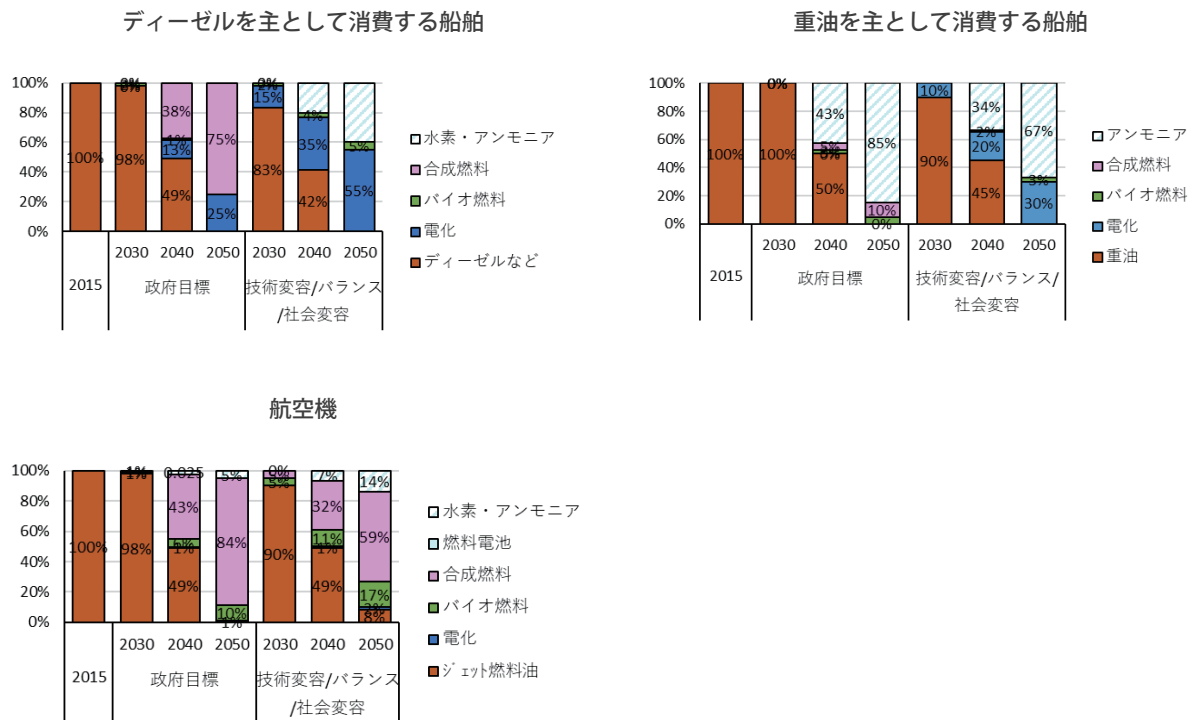


図 3-22. シナリオ別の船舶及び航空機で使用されるエネルギー割合想定

③ 家庭部門

まず、技術変容・バランス・社会変容シナリオについては、以下を根拠に、2050年時点でほぼすべての機器が電化されることを念頭に、2040年以降の新規販売機器は全て電化されると想定した。まず、給湯機器については、IEAは、民生部門の排出削減の大半がヒートポンプの導入によって実現され、中でも日本の市場は成熟しており新築戸建住宅へのヒートポンプ式給湯器の導入は既にガス給湯器よりも経済的になっていると指摘している¹¹³。また、既設戸建住宅への導入については、設備費・施工費のコストダウンや補助金等により経済性の向上が図られることで導入が進むと考えられる。一方、特に既設集合住宅においては設置スペースや配管等の課題があり給湯器のシェアの全てをヒートポンプにすることは容易ではないが¹¹⁴、コンパクトな機器の開発が進められていることや、電気温水器といった既に成熟したオプションも存在することから、2040年までには全て電化することは技術的には可能である。また、空調機器については、2030年以降の新築住宅は断熱性能の比較的高いZEHが平均的になることから、電気機器（エアコンを想定）による暖房で十分に賄うことができる。

それに対して、政府目標シナリオでは、燃焼機器が一定のシェアを維持することを想定した。現状の政府の計画には、給湯器や空調の効率化に関する目標は掲げられているが、電化の促進については明確な目標が存在しない¹¹⁵。そのため、給湯器については、2030年時点での高効率給湯器の普及台数に関する目標を参考に、新規導入に関するシェアについてパラメータを設定した。空調機器については、現状から各機器の空調負荷分担率が変化しないものと想定した。

給湯・暖房機器の効率に関しては、一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター¹¹⁶の見通しを参照し、その他家電ストックの効率改善率については、Shimoda et al.の推計¹¹⁷を参照して、全てのシナリオに共通の前提として設定した。

シナリオごとの想定内容を表 3-18に、また、それをもとに政府目標シナリオ及びバランスシナリオの給湯機器ストックの推移について推計した結果を図 3-23に示す。

表 3-18. 各シナリオの家庭部門の想定内容

変数	技術変容シナリオ	バランスシナリオ	社会変容シナリオ	政府目標シナリオ
新規給湯機器シェア	2040年以降 100% が電気（主にヒートポンプ）			ヒートポンプ：2030年に30%、2040年に40%、2050年に50% ガス：30%を維持
新規給湯機器効率	2050年までにヒートポンプのCOP4.2（寒冷地）又は5.0（温暖地） 燃焼式は2030年までにCOP0.9			
新規暖房機器シェア	2040年以降 100% が電気（主にエアコン）			現状維持
新規暖房機器効率	2050年までにエアコンのCOP8.0 燃焼式は2030年までにCOP0.9			
調理機器ストックシェア	2050年までに100%電化			現状維持
その他家電ストック効率改善	2030年までに37%、2050年までに53% 効率改善			

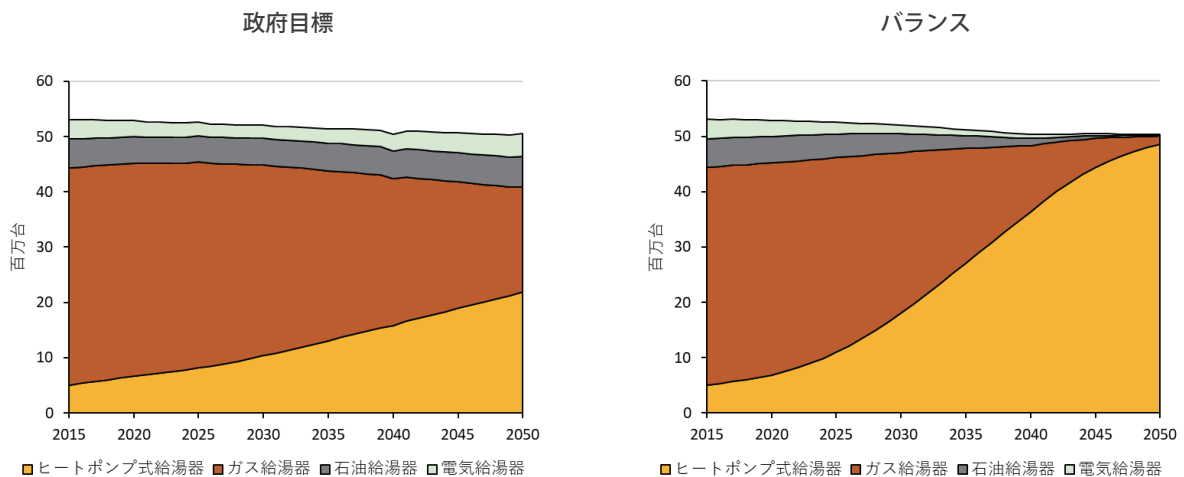


図 3-23. 政府目標シナリオ及びバランスシナリオの給湯機器ストック推計結果

④ 業務部門

まず、技術変容・バランス・社会変容シナリオでは、2040年以降の新規販売機器はほぼ全てが電化されることを想定した。暖房機器については、まず、一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センターによる推計方法¹¹⁶を参考に、セントラル空調と個別空調の比率は現状から変わらないと想定した上で、セントラル式のうち電気ヒートポンプ式が占めるシェアについて、過去のトレンドを延長して2050年までのシェアの推移を推計した。そのうえで、カーボンプライシング等の政策介入によって10%ポイント程度シェアが高まることを想定し、2040年以降は病院・ホテル以外のセントラル式は全て電気式ヒートポンプになると想定した。また、個別式は全て電気（パッケージエアコン）と想定した。レジリエンスの観点からコジェネレーション等の導入実績が多い病院やホテルについては、電化率は95%に留まると想定した。給湯機器については、一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センターによる推計方法¹¹⁶を参考に、建物種別及び規模ごとに電気式ヒートポンプの導入適正を考慮し、導入適正が高いセグメントでは2050年までに8割、適性が低いセグメントについては2050年までに15%のシェアを占めるようになることを想定した。また、ヒートポンプの導入が難しい場合は電気温水器が導入され電化が進むことを想定した。ただし、レジリエンスの観点や調理用途でのガス利用が想定される飲食店・病院・ホテル・その他については、電化率は95%に留まると想定した。

それに対して、政府目標シナリオでは、Yamaguchi et al. による推計¹¹⁸を参考に、新規販売に占める各機器のシェアについて、建物種別ごとに過去のトレンドを延長して2050年までのパラメータを設定した。なお、業務部門については、過去の建物種別ごとの暖房・給湯機器の導入シェアについて多くのデータが公開されておらず、不確実性が高いことには留意が必要である。

給湯・暖房機器の効率に関しては、一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センターの見通し¹¹⁶を参照し、全てのシナリオに共通の前提として設定した。

シナリオごとの想定内容を表 3-19に、また、それをもとに政府目標シナリオ及びバランスシナリオの給湯機器ストックの推移について推計した結果を図 3-24に示す。

表 3-19. 各シナリオの業務部門の想定内容

変数	技術変容シナリオ	バランスシナリオ	社会変容シナリオ	政府目標シナリオ
新規暖房機器シェア	2040年以降オフィス・店舗・学校・飲食店・その他は100%電化、病院・ホテルは95%電化			過去トレンドを延長（2040年以降8～9割電化）
新規暖房機器効率	2050年までに圧縮式・PACのCOPが6.2 吸収式のCOPは1.4			
新規給湯・厨房機器シェア	2040年以降オフィス・店舗・学校は100%電化、飲食店・病院・ホテル・その他は95%電化			過去トレンドを延長（2040年以降もヒートポンプのシェアは1割程度）
新規給湯機器効率	2050年までにHPのCOPが5.4 燃焼式/電気温水器のCOPが0.9			
その他機器ストックの電化率	2030年までに100%（その他セグメントは2050年までに100%）			現状維持

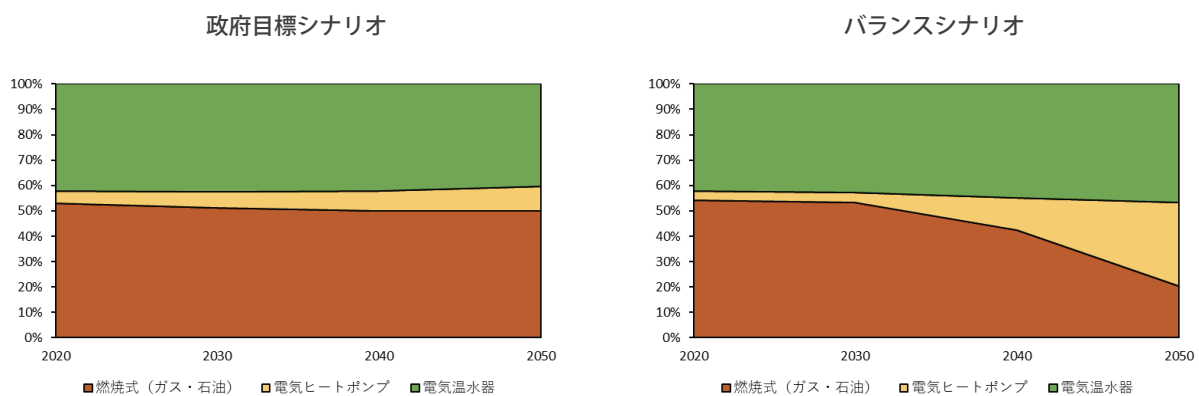


図 3-24. 政府目標シナリオ及びバランスシナリオの給湯機器ストックシェアの推移

⑤ 農林水産業

農業作業機械については、現在でも電動の農耕機が開発されていることから、電化が主要な割合を占めると想定し、一部の機械では合成燃料や燃料電池が使用されることを想定した。また、欧州においては、電動の農機やオンサイト製造した水素を用いて、水素エンジンを搭載した農機を組み合わせた研究報告もなされている。

温室の空調などで使用される農業暖房機械は電化とバイオマス利用を想定した。漁船については、小型の漁船の一部では、合成燃料が使われるものの、大型の漁船を中心に水素やアンモニアを燃焼させるエンジンを使用する機械が主要となることを想定した。鉱業作業機械、建設業作業機械では、高出力の重機が必要であることから燃料電池や合成燃料の機械が主要と想定した。

なお、関係者ヒアリングでは、建設機械を脱炭素するには、建設機械のパワーを確保するために燃焼系のエンジンの必要性が指摘された。一方で、Epirocなどの海外建設機械メーカーでは、安全性確保やオペレーション費用削減の観点から建設機械や鉱業機械の電化も研究開発が進められている。そのため、合成燃料のみならず、燃料電池及び電化された建設機械の利用も想定した。(図3-25)

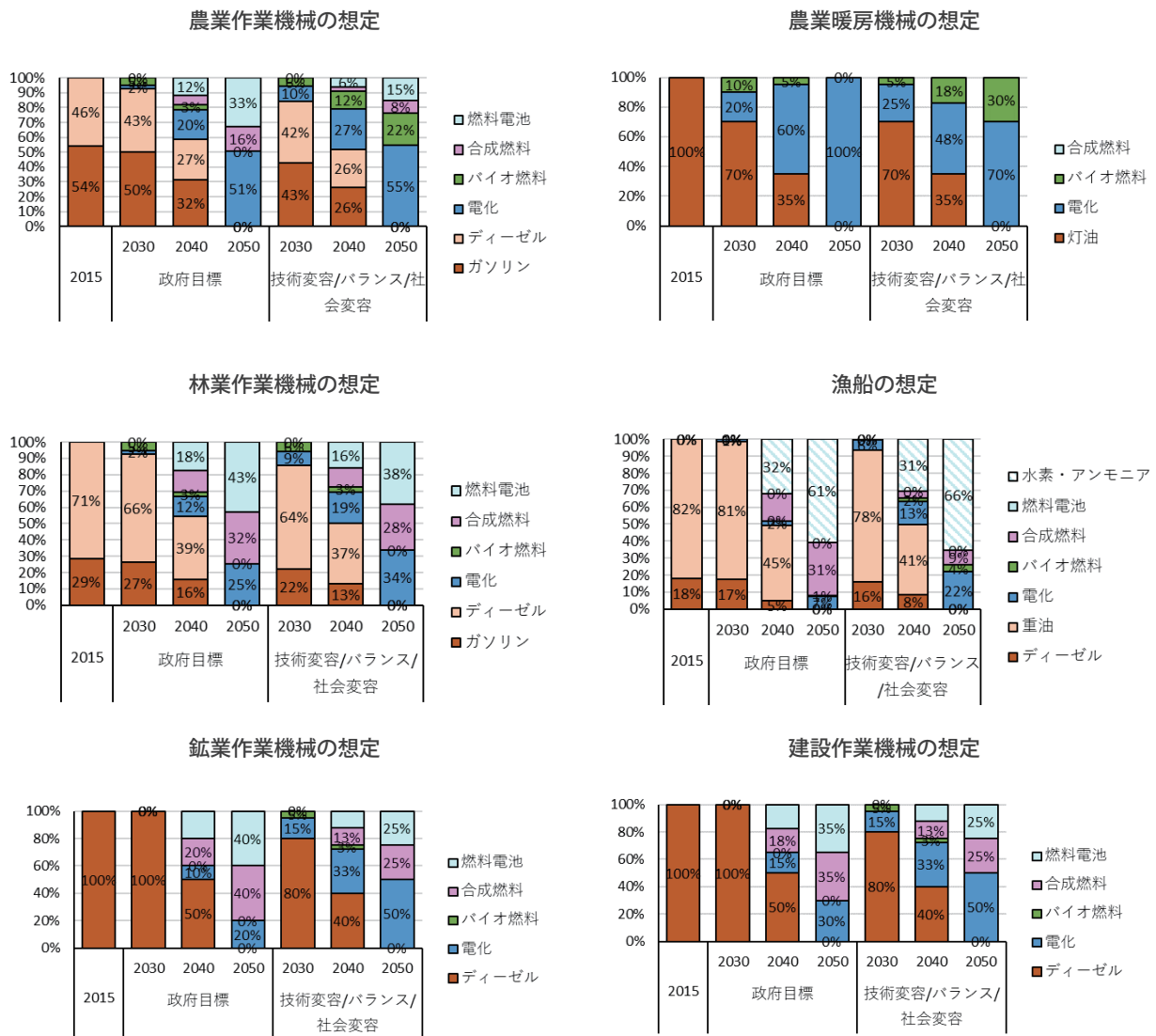


図3-25. 農林水産業における各種機器等の燃料別シェアの想定

4. エネルギー需要の推計結果

各シナリオのエネルギー種別最終エネルギー消費量の結果を図 3-26に示す。政府目標シナリオでは、2050年にかけて徐々に最終エネルギー消費量が減少し、2050年では基準年比で最終エネルギー消費量が30%減となる。また、最終エネルギー消費量のうち、38%が化石燃料となった。これは、各部門における電化率想定が低いこと理由である。技術変容シナリオでは、2040年までに最終エネルギー消費量が基準年比27%減少するが、2050年では基準年比30%減となり、最終エネルギー消費量において化石燃料比率は5%となった。社会変容シナリオは、2040年では基準年比46%減、2050年では基準年比60%減となった。これは社会経済がデジタル化等によって大きく変わることで、エネルギー消費量が大きく減少することが理由である。また、化石燃料比率は6%であった。バランスシナリオは、技術変容シナリオと社会変容シナリオの中立的なシナリオであり、2040年では基準年比39%減、2050年では基準年比48%減、化石燃料比率は4%となった。技術変容・バランス・社会変容シナリオのいずれでも、最終エネルギー需要の9割以上が電力又は水素であり、化石燃料を需要家が直接消費することは殆どなくなる。

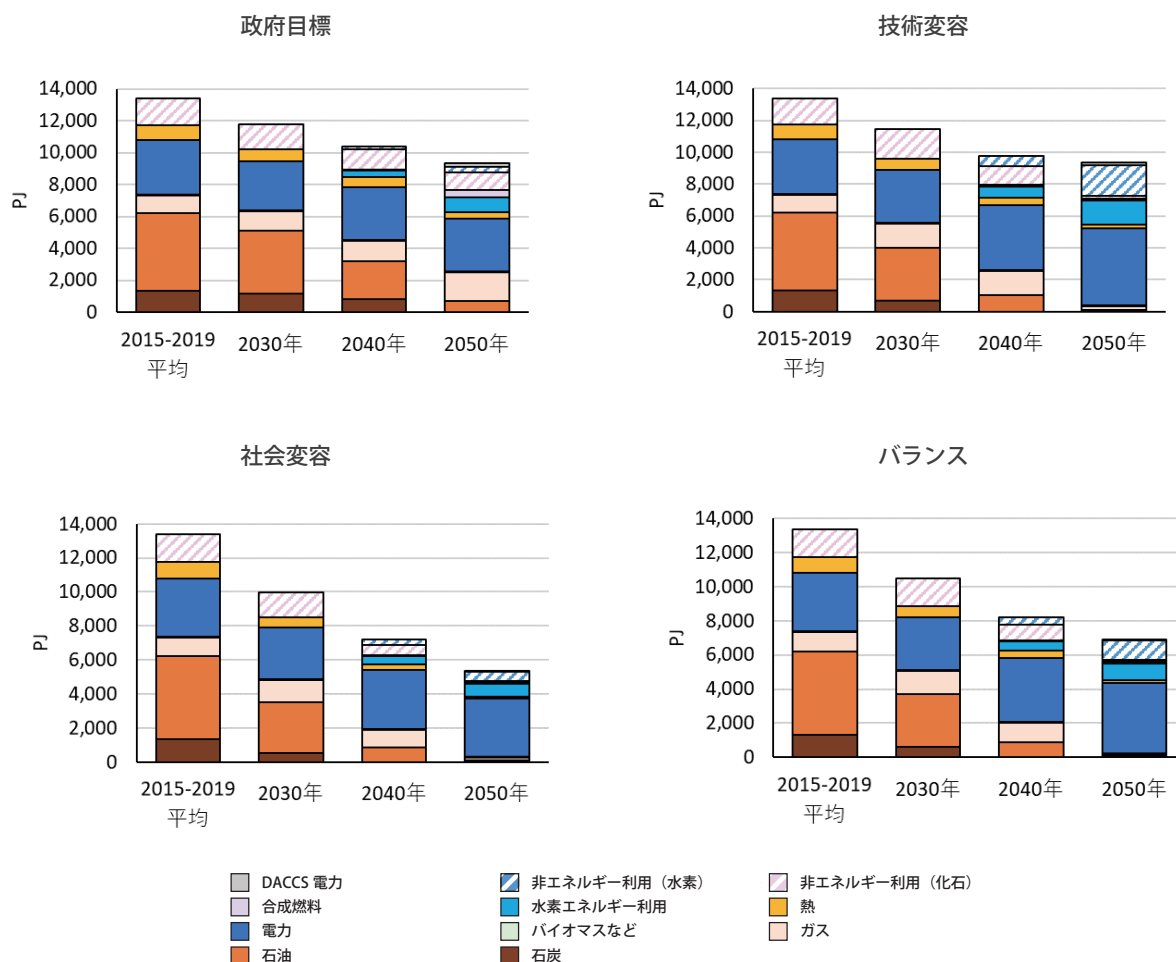


図 3-26. 各シナリオのエネルギー種別最終エネルギー消費量

各シナリオの部門別最終エネルギー消費量の結果を図 3-27に示す。政府目標シナリオでは、製造業が2050年にかけて基準年比18%減となるどころ、業務は33%減、家庭は43%減、運輸旅客は57%減、運輸貨物は48%減となった。技術変容シナリオでは、2050年において製造業が基準年比6%減、業務は45%減、家庭は65%減、運輸旅客は67%減、運輸貨物は65%減となった。2050年において、製造業で最終エネルギー消費量が殆ど減少しないのは、化学部門において合成ガスから化学品の原料を製造する際に、空気中からのCO₂を回収するための電力消費量が増加するためである。民生部門業務、家庭、運輸は、エネル

ギー効率改善にも寄与する電化が進展することから、高い削減率となった。社会変容シナリオでは、2050年の製造業の最終エネルギー消費量が基準年比47%減、業務は53%減、家庭は66%減、運輸旅客は81%減、運輸貨物は76%減となった。エネルギー効率の高い電化に加えて、デジタル化等によって人とモノの移動が大きく変わる効果が表れた。バランスシナリオは、技術変容シナリオと社会変容シナリオの中庸的なシナリオであり、2050年の製造業の最終エネルギー消費量は基準年比31%減、業務は51%減、家庭は69%減、運輸旅客は71%減、運輸貨物は72%減となった。

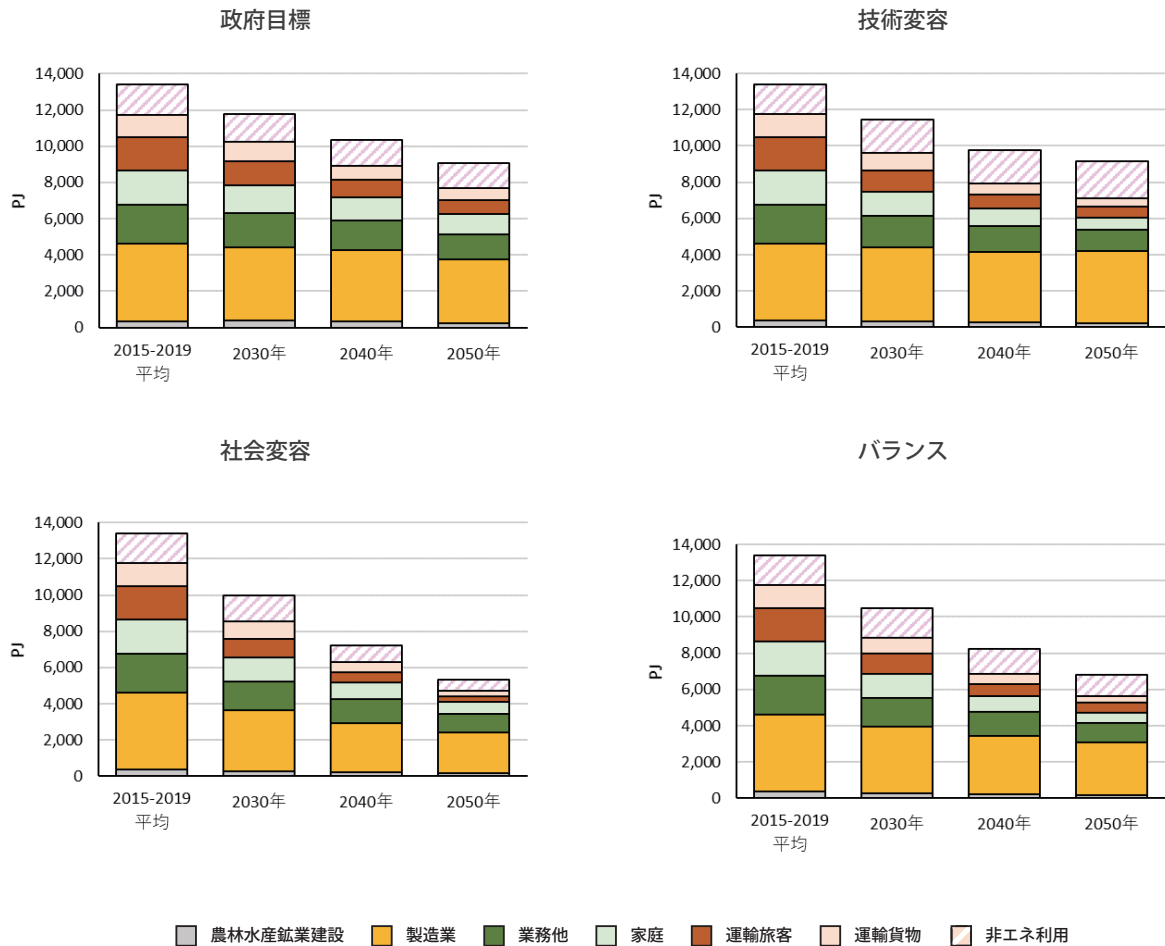


図 3-27. 各シナリオの部門別最終エネルギー消費量

本分析で得られた結果と他機関が推計した2050年脱炭素社会における最終エネルギー消費量の推計結果の比較を図 3-28にまとめた。各機関の推計方法や想定するシナリオ、非エネルギー利用の表記方法が異なることから、単純な比較はできないが、最終エネルギーの絶対値やおよそのエネルギー種別の割合が参考になる。

IGESの政府目標シナリオは、第6次エネルギー基本計画策定時にRITEが公表した推計値²⁶に近い値であることが確認できた。IGES技術変容シナリオの最終エネルギー消費量の絶対値は、MRI現状延長シナリオ¹¹⁹やMckinseyシナリオ⁵⁸、RITE Ordinary1.5シナリオ¹²⁰のシナリオに近い。IGESバランスシナリオは、NIES社会変容シナリオ¹²¹、MRI技術革新¹¹⁹に近い。IGES社会変容シナリオは、他のシナリオと異なり化石燃料の比率が小さいことから比較は難しいが、最終エネルギー消費量の絶対値は、MRI両輪達成シナリオ¹¹⁹に近い。

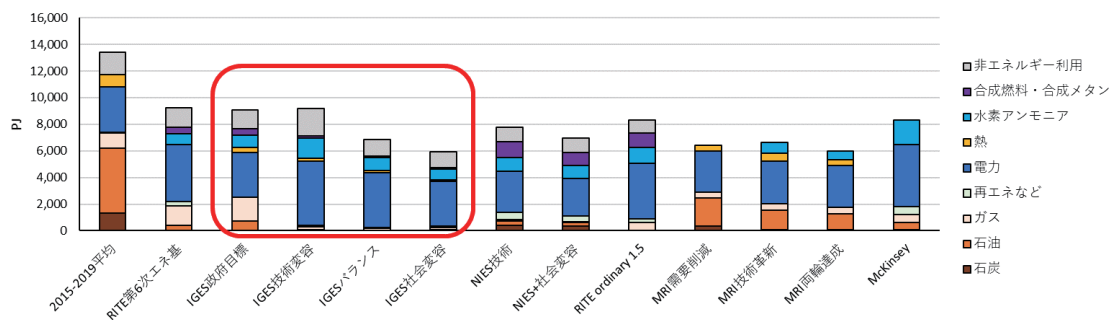


図 3-28. 2050年最終エネルギー消費量の他機関との比較

また、検討したシナリオのうちバランスシナリオの最終エネルギー消費量について、現状と2050年の差異を要因別に分析した結果を図 3-29に示す（すべてのシナリオの結果は、参考資料2(3)に示す）。バランスシナリオでは2050年には現状と比較して最終エネルギー消費量が48%減少するが、そのうち社会経済の変化によるものが17%、省エネ・電化・水素化といった需要側技術の変化によるものが29%、トレンド等による変化が2%であった。この分析結果から、社会経済の変化が最終エネルギー消費量の減少に大きな寄与を果たしていることが理解できる。また、社会変革シナリオではその寄与率はより大きくなる。なお、水素・合成燃料の要素で最終エネルギー消費量が増える理由は、化学業界において、ナフサから化学製品を製造するプロセスから、水素と一酸化炭素からなる合成ガスをフィッシャー・トロプシュ合成法やeメタノールを通じて化学製品を製造するプロセスに切り替わるためである。また、本ウォーターフォールチャートは水素の最終エネルギー消費量をカウントしており、水素を製造するために必要な電力需要量はここには含めていない。

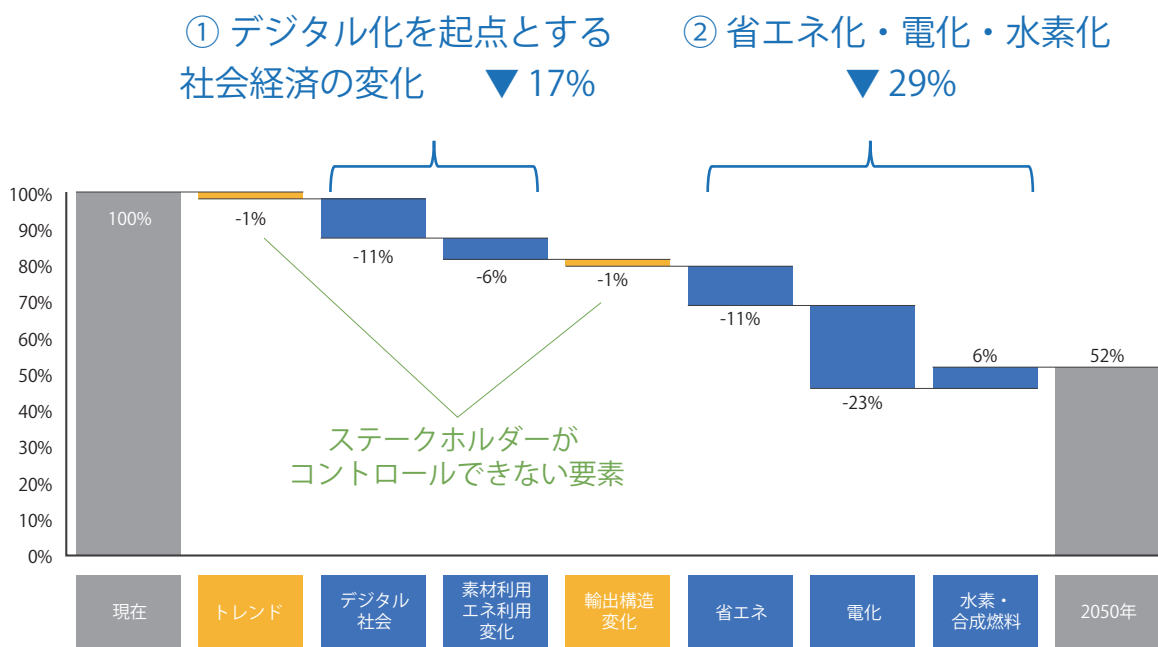


図 3-29. 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因（バランスシナリオ）

注：本ウォーターフォールチャートは最終エネルギー消費量のみを扱っており、水素を製造するための電力需要量は計算に含まれていない。

5. まとめ

2050年の最終エネルギー消費量は、政府目標シナリオや技術変容シナリオなど社会経済の大きな変化を想定しないシナリオでも基準年と比較して3割減少し、バランスシナリオでは約5割減、社会変容シナリオでは約6割減と、更に減少幅が大きくなる。より豊かな将来社会を目指しつつ、最終エネルギー消費量を大幅に減少させる姿を描くことは可能であり、その際には、社会経済自体の変革と需要者のエネルギー技術の選択の変化の両面からアプローチすることが重要である。

なお、本分析は、他の多くの研究と同様に、エネルギー消費効率の高い技術やサービスの出現により、逆にこうした技術・サービスへの需要が増え過ぎてしまい（隠れた需要の発現）、エネルギー消費削減効果を相殺してしまう可能性（ジェボンズのパラドックス、リバウンド効果）を十分に考慮できていない。これらは今後も研究の深化が必要な課題であることは間違いないが、現時点では、エネルギー消費効果を相殺してしまわないために、価格インセンティブの付与などの適切な政府の介入が必要になる可能性がある、ということ付記するに留めたい。

第4章 エネルギー供給はどこまで変わるか

1. 本章の概要

私たちが必要とするエネルギーを、主に再生可能エネルギーを中心とするクリーンなエネルギーで賄えるようにする、という目標は実現可能だろうか？前章で検討したエネルギー需要を満たしつつ、1.5°C目標を達成するために、エネルギー供給の在り方が大きく変化しなければならないことは自明である。再生可能エネルギーを主力電源化し、最大限導入を促進することについては、社会的な合意が存在する。では、再生可能エネルギーの導入スピードや自然条件に応じた出力変動、送電システムの制約などを考慮したうえで、どこまで再生可能エネルギーで賄うことができるだろうか。また、その際に火力発電などの従来からの発電設備や、海外から輸入されるエネルギーは、どのような役割を果たしているだろうか。

前章では、「水素（及びアンモニア）」「電力」「石炭製品・石油製品・都市ガス」「合成燃料」などの二次エネルギーごとに最終エネルギー消費量を推計した。本章では、一次エネルギーから二次エネルギーへの転換過程を分析対象とする。特に、電力と水素については、電力システムの制約等を考慮したうえで変動性の再生可能エネルギーがどこまで利用可能か、といった観点から更なる分析が必要である。そこで本章では、まず第2節で説明するように、各電源、特に再生可能エネルギーの導入量と国内グリーン水素製造量に差をつけた複数のシナリオを設定する。次に第3節では、電力需給や水素製造についてシミュレーション分析を行った結果を説明する。そのうえで、第4節では、電力以外のエネルギーを含めた日本全体での1次エネルギー供給量の推計結果を示す。

2. 電力・水素製造に関する想定

(1) シナリオ別の各電源の想定

本レポートでは、再生可能エネルギーの設備容量については業界団体の公表値を基に各年の最大導入容量を想定した。次に、想定した電力需要と設備容量を入力条件として電力需給シミュレーションを行い、各電源の稼働率や出力抑制量を見ながら反復的に調整を行うことによって、シナリオ別の再生可能エネルギーや各火力発電の設備容量を設定した（方法論の詳細は参考資料1を参照）。以下では、各項目についての想定内容とその考え方について述べる。

太陽光発電

太陽光発電は、太陽光発電協会が掲げる2050年のビジョン¹²²を基に、現在一般的に普及しているシリコン系の太陽光発電の2050年の導入量を想定した。現状、電力システムの制約等により、太陽光発電パネルの発電設備容量（以下、DCベースの容量）よりも小さな容量のパワーコンディショナー（以下、ACベースの容量）で交流の電気に変換し、発電された電力の一部を放棄したうえで電力システムに接続することが、メガソーラーなどの土地系太陽光発電所を中心に行われている（過積載、ピークカット）。太陽光発電協会のビジョンでは、ACベースで300GW、DCベースで420GWの太陽光導入量が想定されており、パネルの設置可能面積という観点ではDCベースでの導入量が参考になる。

2030年、2035年、2040年、2045年の設置場所別の太陽光発電の設備容量最大値は以下の手順で求めた。なお、エネルギー長期需給見通しや固定価格制度における認定容量はACベースで議論されていることから、表 4-1から表 4-2の数値はACベースで示している。

- ① 表 4-1で示される割合で、新築戸建て住宅の屋根に5kW/棟の太陽光発電が導入される。なお、FIT認定を受けた10kW未満の太陽光発電設備（住宅用）の平均が5kW/件であったことから、2050年までの住宅の屋根置き太陽光発電の設置についてもこれに倣った。また、過去の実績では戸建て住宅太陽光発電を過積載することはほとんどなかったこと¹²³から、過積載率を100%と想定した。その結果、各年の新築戸建て住宅の屋根置き太陽光発電の累積導入量の推計結果は表 4-2となった。

表 4-1. 新築戸建て住宅の屋根への太陽光発電設置割合

	2021-2025	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2045	2046-2050
技術変容、バランス、社会変容シナリオ	25%	60%	70%	80%	80%	80%
政府目標シナリオ	25%	25%	40%	60%	60%	60%

表 4-2. 新築戸建て住宅の屋根に設置される各年の太陽光発電設備容量最大値（AC、単位GW）

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
技術変容、バランス、社会変容シナリオ	19	22	33	43	55	68	79
政府目標シナリオ	19	22	27	34	42	47	53

- ② 残りの太陽光発電の2050年時点の導入箇所を、環境省の再生可能エネルギーポテンシャルデータ¹²⁴を基に想定した。公共施設については、2030年までに設置可能な建築物屋根等の約50%に太陽光発電を設置することが求められており¹²⁵、2030年までの公共施設への新規導入量は6GWと推計されていることから、環境省の再生可能エネルギーポテンシャルデータに記載される設置可能なポテンシャルの50%に相当する8GWが導入されると想定した。その他の建物系の太陽光発電については、ポテンシャルの50%の設備容量、過積載率を150%¹²²と想定し、ACベースの設備容量を算定した。農地への太陽光発電の導入については、ポテンシャルの5%~8%の設備容量、過積載率を150%¹²²と想定し、ACベースの設備容量を算定した。技術変容、社会変容、バランスシナリオの太陽光発電設備容量を表 4-3、政府目標シナリオの太陽光発電設備容量を表 4-4に示す。

表 4-3. 技術変容、社会変容、バランスシナリオの太陽光発電設備容量（AC、単位：GW）

		2030	2035	2040	2045	2050
建物系	官公庁	2	2	3	3	3
	病院	1	1	1	1	1
	学校	4	4	5	5	5
	戸建住宅等	32	42	52	65	76
	集合住宅	1	2	2	3	3
	工場・倉庫	3	4	6	7	8
	その他建物	14	31	42	56	70
	鉄道駅	0	0	0	0	0
	小計	56	86	112	140	168
土地系	最終処分場	0	1	1	2	2
	耕地（田）	0	6	11	14	18
	耕地（畑）	0	9	17	23	28
	荒廃農地 （再生利用可能）	0	1	2	2	3
	荒廃農地 （再生利用困難）	0	4	8	10	13
	ため池	0	0	0	0	0
	小計	1	20	39	52	64
FIT 認定済（10kW 以上）		68	68	68	68	68
合計		125	174	219	260	300

表 4-4. 政府目標シナリオにおける太陽光発電設備容量（AC、単位:GW）

		2030	2035	2040	2045	2050
建物系	官公庁	2	2	2	3	3
	病院	1	1	1	1	1
	学校	3	4	5	5	5
	戸建住宅等	26	33	40	45	50
	集合住宅	1	1	2	2	3
	工場・倉庫	3	4	6	7	8
	その他建物	14	31	48	59	70
	鉄道駅	0	0	0	0	0
	小計	49	77	104	122	140
土地系	最終処分場	0	1	1	2	2
	耕地（田）	0	4	8	11	13
	耕地（畑）	0	8	15	19	24
	荒廃農地 （再生利用可能）	0	1	1	2	2
	荒廃農地 （再生利用困難）	0	3	6	8	10
	ため池	0	0	0	0	0
	小計	1	16	31	42	52
FIT 認定済（10kW 以上）		68	68	68	68	68
合計		118	161	203	232	260

- ③ 太陽光発電の設備導入ペースの想定を表 4-5に示す。2030年までの単年導入量は6GW（ACベース）/年である。これは、2014年度から2019年度における新規太陽光発電新規導入量年平均は7GW程度¹²⁶であったことから、コラムに示すような取り組みを一体的に進めることで、不可能ではない太陽光発電の導入ペースと考えられる。

表 4-5. 各シナリオの太陽光発電の単年導入量（AC、単位GW）

	2021- 2025	2026- 2030	2031- 2035	2036- 2040	2041- 2045	2046- 2050
技術変容、バランス、社会 変容シナリオ	6	6	10	9	8	8
政府目標シナリオ	6	7	9	9	6	6

- ④ 太陽光発電の設備利用率は、DCベースで13%と想定した¹²⁷。ただし、現状では電力システムの制約により一般的にパネルの出力よりもパワコンの出力を小さくしているため、2035年までは過積載率150%でACベースの設備利用率を17%と想定した。2035年以降は、系統運用ルールの変更（追加の1kWhを発電するためにかかる費用が安価な電源から送電線を利用できるように、時間単位で送電線を管理する）により、電力システムの制約が大幅に緩和され、パネル出力と同じ容量のパワコンに更新されることで、放棄されていたピーク時の発電電力量が有効に活用されるようになることを想定した。太陽光発電の設備利用率の想定を表 4-6に示す。

表 4-6. 太陽光発電の設備利用率想定

	2035 年まで	2035 年以降
太陽光建物系	14%（AC 端設備利用率）	13%（DC 端設備利用率）
太陽光土地系	17%（AC 端設備利用率）	13%（DC 端設備利用率）

- ⑤ 技術変容、バランスシナリオでは、既設リプレース太陽光発電及び新設太陽光発電において、ペロブスカイト／シリコン・タンデム型モジュールの利用を想定している。リプレース・新設時のタンデム型モジュールの採用率を表 4-7に示す。なお、反復的シミュレーションを通じて、社会変容シナリオは、ペロブスカイト／シリコン・タンデム型モジュールの採用を想定せずとも、電力需要量に対して、再エネによる発電電力量が十分にあることが判明したため、ペロブスカイト／シリコン・タンデム型モジュールの採用率を一律に0%とした。また、ペロブスカイト／シリコン・タンデム型モジュールは、一般的なシリコン単独のモジュールと比較して、発電効率が1.76倍と想定した。

表 4-7. ペロブスカイト／シリコン・タンデム型モジュールの採用率

	2030 年～ 2035 年以前	2036 年～ 2040 年	2040 年以降
政府目標、 社会変容シナリオ	0%	0%	0%
技術変容、 バランスシナリオ	50%	67%	100%

- ⑥ 上記の想定をもとに、算定した太陽光発電の発電電力量の最大値を表 4-8に示す。なお、送電線制約や電力需給バランスなどの制約から出力抑制を考慮した太陽光発電の発電電力量は、次節で記述する電力システムシミュレーションによって定める。

表 4-8. 各年における出力抑制計算前の太陽光発電電力量（最大値、単位:TWh）

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
技術変容、バランス	86	129	172	303	411	547	691
社会変容	86	129	172	273	342	405	465
政府目標	86	124	163	253	318	361	404

陸上風力発電

長期エネルギー需給見通し⁵¹では、2030年の野心的水準として、風力発電の設備容量を17.9GWとしている。OCCTOのマスタープラン¹²⁸では、2050年の陸上風力の設備容量を41GWとしている。風力発電協会が2023年5月に公表した「JWPA Wind Vision 2023」¹²⁹では、陸上風力発電の導入目標が、2030年26GW、2050年40GWと示されている。この数値を基に、政府目標シナリオでは、2030年の設備容量を18GWと想定し、2050年まで毎年、1GW程度の新規導入量を想定した。技術変容、バランス、社会変容シナリオでは、2030年の設備容量を26GWと想定し、2030年から2040年までに毎年1GW程度の風力発電を導入して早期に再エネ電源を増やすことを想定し、2040年～2050年まで毎年0.5GWの新規導入量を想定して、各年の陸上風力発電の設備容量は表 4-9の通り設定した。

また、陸上風力発電の設備利用率を27%と想定し、シナリオ別の発電電力の最大値を表 4-10に示す。なお、送電線制約や電力需給バランスなどの制約から出力抑制を考慮した陸上風力発電の発電電力量は、次節で記述する電力システムシミュレーションによって定める。

表 4-9. 各年の陸上風力発電の設備容量（単位:GW）

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
技術変容、バランス、社会変容シナリオ	4	15	26	31	35	38	40
政府目標シナリオ	4	11	18	24	30	35	40

表 4-10. 各年における出力抑制計算前の陸上風力発電電力量（最大値、単位:TWh）

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
技術変容、バランス、社会変容シナリオ	10	36	61	72	83	89	95
政府目標シナリオ	10	26	42	57	21	83	95

なお、陸上風力発電は、2022年末時点の累積導入量は4.8GWであった¹³⁰。2030年に26GWの導入を達成するためには、2023年以降に3GW/年のペースで導入が必要となるが、これまでの導入実績では、0.3GW/年に満たない。そのため、第6章で述べるような対策を講じた上で大幅な導入加速が必要となるが、この不確実性を考慮し、2030年までの導入量を固定価格買い取り制度の2023年3月末時点の認定容量である15GW¹³¹と想定したシナリオについても分析を行った（参考資料3）。

洋上風力発電

洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会は2020年に「洋上風力産業ビジョン（第1次）」¹³⁴を公表し、2040年の洋上風力発電の案件形成を30GW-45GWと示した。これを参照し、政府目標シナリオにおける洋上風力発電の設備容量を2040年に30GW、2050年に45GWと想定した。

コラム：2050年に太陽光発電による600TWh以上の電力供給は実現可能か？

技術変容およびバランスシナリオでは、①太陽光発電の導入ペース、②系統運用ルールの変更に伴う電力系統の制約緩和、③ペロブスカイトとシリコンのタンデム型モジュールの導入、の3つの要素を基に、2050年に太陽光発電の最大発電電力量を691TWhと想定した（シミュレーションによる出力抑制量計算前の数値）。

太陽光発電の導入ペースについて、太陽光発電協会は2020年に公表した「JPEAビジョン」¹²²において、2050年までにACベースで300GWの太陽光発電の導入を達成する目標を掲げている。この目標を実現するために、2020年代前半の年間太陽光発電導入ペースを年間4～6GWとし、2030年後半以降はリプレースと増設を含めて年間10～20GWの導入ペースを想定している。図 4-1に示されている通り、過去には9GW/年のペースで太陽光発電が導入されたことがあるが、2030年以降の導入ペースを実現するためには、導入場所の確保と施工体制等のサプライチェーンの強化、設備導入を促すファイナンススキームの整備が必要条件になる。

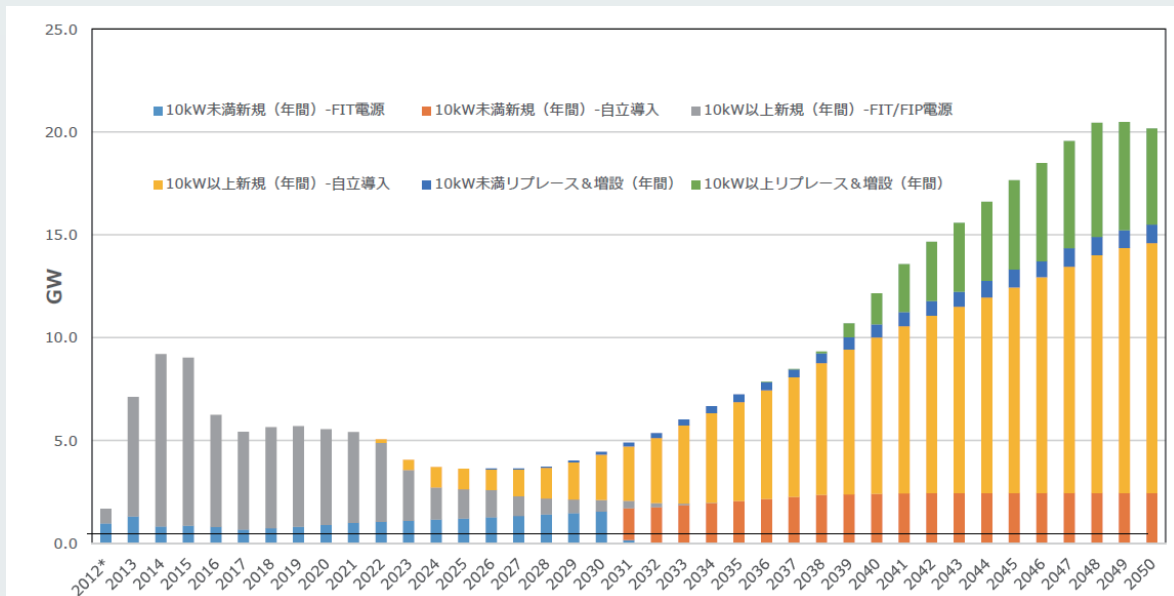


図 4-1. JPEAビジョンにおける年間太陽光発電導入量の推移

系統運用ルールの変更に伴う電力系統の制約緩和について、太陽光発電協会が掲げる目標値300GW（ACベース）は過積載を前提としており、太陽光発電パネルの出力自体は420GW（DCベース）を想定している。これは基本的には前述の通り電力系統の制約や電力需給バランス制約の中で収益性を高めるための工夫によるものであり、電力系統の制約や需給バランスの制約がなければ、パネルで発電された電力を放棄する量をできるだけ小さくすることが合理的である。本レポートにおいては、系統運用ルールの変更により、電力系統の制約が大幅に緩和される（追加の1kWhを発電するためにかかる費用が安価な電源から送電線を利用できるように、時間単位で送電線を管理する）ことを想定している。さらに、2040年頃には、EV（V-to-G）や定置型蓄電池の利用が進み、太陽光発電で発電した電力を系統に接続する時間帯をずらす工夫がしやすくなる。そのため、予めパワーコンディショナーでピークをカットし出力を絞ることなく、発電した電力の全量を売電できる機会を得ることができる。したがって、系統運用ルールの改善や蓄電システムを組み合わせることで、これまで過積載をおこなっていた太陽光発電がピークカットを行っていた発電分を有効に利用することが可能になる。

ペロブスカイトとシリコンのタンデム型モジュールの導入について、2030年以降に導入される結晶シリコン太陽電池やCIGS太陽電池の一部を、その表面にペロブスカイトを塗布したタンデム型の太陽電池とすることで、同じパネル設置面積でもより高い発電出力を得ることができるようになる。ペロブスカイト太陽電池は、ペロブスカイトと呼ばれる結晶構造を持つ化合物を用いる技術であり、日本が世界に先行している技術で、塗布や印刷技術で量産でき、ゆがみに強く軽い太陽電池の実現が期待されており、この10年で急速に開発が進んでいる¹³²。サウジアラビアのアブドラ王立科学技術大学（KAUST）の研究チームが、シリコンとペロブスカイトを組み合わせたタンデム型太陽電池を開発し、発電効率33.2%の太陽光発電を実現している¹³³。このように、面積当たりの発電能力を向上させることで、太陽光発電の発電電力量の増加を見込むことができる。

以上のように、太陽光発電設備の導入ペース（2030年まで6GW/年、2031年以降に、8GW/年～10GW/年）を維持するための太陽光発電の用地確保（建物屋根、駐車場、農地など）やファイナンススキームの構築、サプライチェーンや施工体制の確保を進め、系統運用ルールの変更により発電した電力を無駄なく使用し、新たな技術を取り入れて面積当たりの出力を向上する、という取り組みを一体的にすすめることで、2050年に600TWh以上の太陽光発電を導入することは可能であると考えられる。

なお、現行の海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）は領海内の一般海域の利用を前提としていることから、洋上風力産業ビジョンの目標値は領海内での目標値と解釈できる。一方、風力発電協会が2023年5月に公表した「JWPA Wind Vision 2023」¹²⁹では、2050年の電力供給のための風力発電の導入目標として、着床式洋上風力発電を40GW、浮体式洋上風力発電を60GW、足し合わせて、2050年に100GWを掲げている。また、国産グリーン水素供給拡大に向けてさらなる高みを目指すとして、2050年時点で30GW以上の浮体式洋上風力を追加導入することへの言及や水素火力に供給されるグリーン水素製造用電力のために90GWの浮体式洋上風力が導入されることについても言及している。このため、2050年の洋上風力の設備容量として、130GW～190GWの可能性が検討されていると言える。

また、日本の海洋活動を強化するために設立された産学官コミュニティである「海洋技術フォーラム」は、2022年に「我が国の浮体式洋上風力発電導入の数値目標に関する提言」を発表した¹³⁵。この提言には、意欲的目標、高位目標、中位目標、低位目標の4つの目標が示されている。高位目標、中位目標、低位目標は、2030年の導入予想値を出発点とし、それぞれ2050年までの導入目標値を積み上げベースで設定したものであり、2050年の浮体式洋上風力発電の設備容量目標値はそれぞれ、50GW、100GW、150GWとしている。一方、意欲的目標は、気候変動1.5°Cシナリオに従って求められるアジア全体での2050年の洋上風力導入目標に対して、日本が洋上風力ポテンシャルにふさわしい貢献を果たすために必要な導入量を求め、国際的なサプライチェーンの構築や組立拠点の整備など様々な取り組みによって可能になる水準として、2050年に360GWを目標としている（コラム「浮体式洋上風力360GWは実現可能か？」を参照）。そこで、技術変容、バランスシナリオについては、領海内の45GWに加えて、最大360GWの浮体式洋上風力発電の導入を想定した。また、反復的シミュレーションを通じて、社会変容シナリオにおける浮体式洋上風力発電の2050年の設備容量を292GWと定めた。これは、292GWの浮体式洋上風力が導入されれば、社会変容シナリオにおける水素需要をすべて国内グリーン水素で賄える水準である。（表4-11）

なお、バランスシナリオと技術変容シナリオで想定する2050年405GWの浮体式洋上風力発電は、最大で1419TWhの発電電力量をもたらす、すべての電源の中で突出した値である。そこで、浮体式洋上風力発電の普及拡大に関する不確実性を踏まえて、浮体式洋上風力発電については、海洋技術フォーラムが積み上げベースで設定した高位目標の150GWを想定し、2050年の洋上風力発電の設備容量を195GWとするシナリオについてもシミュレーションを行った（参考資料3）。

洋上風力発電の設備利用率を40%と想定し、シナリオ別の発電電力の最大値を表 4-10に示す。なお、送電線制約や電力需給バランスなどの制約から出力抑制を考慮した洋上風力発電の発電電力量は、次節で記述する電力系統シミュレーションによって定める。

表 4-11. 各年の洋上風力発電の設備容量の想定（単位:GW）

	2020	2030	2040	2050
技術変容、バランスシナリオ	0	8 (8)	135 (45)	405 (45)
社会変容シナリオ	0	8 (8)	135 (45)	276 (45)
政府目標シナリオ	0 (0)	6 (6)	30 (30)	45 (45)

表 4-12. 各年における出力抑制計算前の洋上風力発電電力量（最大値、単位:TWh）

	2020	2030	2040	2050
技術変容、バランスシナリオ	0	29	473	1,419
社会変容シナリオ	0	29	473	979
政府目標シナリオ	0	20	105	158

一般水力発電、地熱発電、バイオマス発電

一般水力発電は、将来的に大規模な河川の開発を行うことは難しく、新規の発電所の建設を見通すことは難しい。しかし、既存のダムの実用方法の工夫により、発電量を増加することが可能との報告¹⁴⁰があるため、これを設備利用率の増として反映する。

コラム：浮体式洋上風力360GWは実現可能か？

日本はアジア最大の洋上風力発電のポテンシャルを有しており、その殆どが水深60m以上の浮体式洋上風力に適した海域である¹³⁶。現在の日本の洋上風力発電促進のための再エネ海域利用法は領海内の一般海域の利用を前提としているが、領海面積の10倍以上の面積を有する排他的経済水域の利用を想定すれば、官民協議会において現状共有されている目標よりも高い導入容量を目指すことは可能である。実際に、諸外国の事例を見れば、英国の年間電力消費量は日本の1/3程度に過ぎないが、既に排他的経済水域（EEZ）をも洋上風力発電用に海域設定しており、2050年には浮体式を含む洋上風力を100-150GW導入するシナリオを描いている¹³⁷。

日本における浮体式洋上風力発電の導入目標に関しては、産官学の専門家で構成される海洋技術フォーラムが詳細に検討を行っており、2050年までに360GWを導入するためのロードマップを示している¹³⁵。（図4-2）

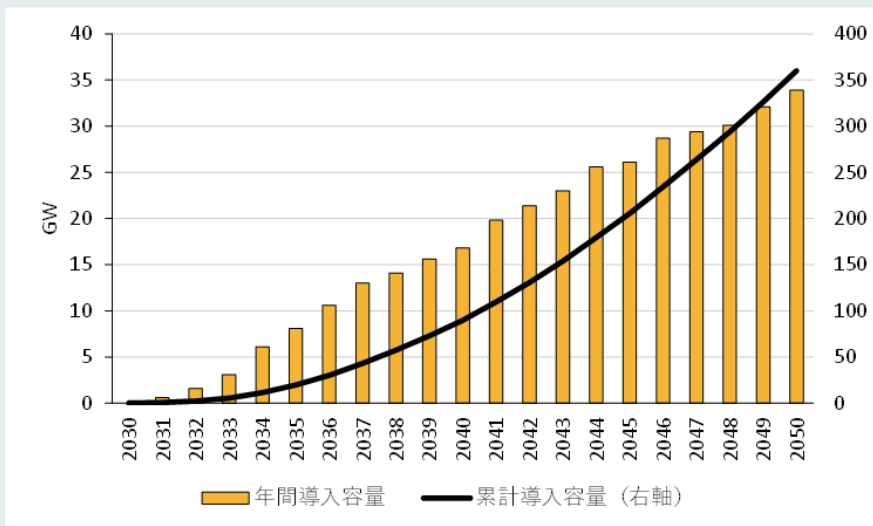


図4-2. 海洋技術フォーラムの意欲的目標を達成するための年間導入容量及び累積導入容量

このロードマップを実現するうえでは、「海域の確保」「浮体の製造」「風車の組立」のそれぞれについて克服すべき課題が想定される。

まず、海域の確保について、360GWを導入するためには、EEZの面積の1.5%程度の海域を洋上風力発電のために充てることになる。EEZで展開されている沖合漁業の中には長さ150キロにも及ぶはえ縄を流すものもあり、風車の立地海域だけでなく、その周辺での操業も難しくなる可能性があり、こうした漁業者との利害調整が大きな課題となる¹³⁸。目標設定・計画初期の段階から漁業関係者の参加の下で官民が連携して合意形成を進めることが重要であるほか、立地地域の多くにおいて漁業振興のための基金を設立する、といった対応が検討されている¹³⁹。

また、浮体の年間製造数については、2034年頃に1年あたり400基を超える想定となっており、日本の新造船竣工量を上回る。既存の造船所のドックでは不足するため、浮体生産用ドックの新増設を行うか、中国・韓国・台湾・ベトナムなどで製造を行い輸入する必要が生じる。あるいは、造船、ゼネコン、製鉄・鉄鋼事業者等が浮体製造に参入し、コンクリート等の様々な素材と浮体形式で需要に対応する場合は、国内での浮体製造量を増加させることができる。

最後に、大型風車のパーツを保管する大きなヤードや大型クレーンを備えた風車の組立拠点や、浮体を一時的に係留しておく場所の確保が必要になる（風車の組立拠点について、下記写真参照）。1拠点あたり月間4基の組立を行うと仮定すると、2035年までに10か所程度、2040年までに20か所程度の組立拠点が必要になる。また、2050年時点では、風車の1基あたりの出力が30MWまで大型化すれば25か所程度、20MWにとどまれば35か所程度まで拡大する必要があると考えられる。したがって、行政側でも計画的に港湾等の整備を進めることが求められるほか、2021年時点で出力1GWを超える石炭火力発電所は全国に32か所あり、広大なヤードと埠頭を有していることから、本ロードマップが想定するように石炭火力発電所のフェーズアウトが進めば、そのインフラを有効活用することも考えられる。

このように、浮体式洋上風力発電の導入量を360GWまで拡大することは決して容易ではないが、既存の海域利用やビジネス、インフラの変革を積極的に進め、円滑な移行のプロセスをマネジメントすることができれば、不可能な目標ではないと言える。



画像出典； “Can the North Sea become Europe’s new economic powerhouse?” Jan 1st 2023, The Economist

また、中小水力発電及び地熱発電については、環境省¹²⁴によるとそれぞれ最大9GW、8GW程度のポテンシャルが存在するとされており、比較的安定的に発電する再生可能エネルギー電源の確保の観点からも重要であるが、太陽光・風力と比較するとポテンシャルの規模が限定的であるため、大幅な導入拡大は想定していない。ただし、それはこれらの電源の開発に取り組むことの意義を損なうものではない。

バイオマス発電を含むバイオマス利用については、森林の適切な新陳代謝の促進による環境保全や、廃棄物を利用することによる資源循環・地域活性化といった観点から重要であるものの、大規模かつ効率的に導入を進めようとするれば、国内では森林環境や生態系への負が高まることが懸念され、海外からの輸入バイオマスの利用についてもライフサイクル全体では排出量・環境負荷の増加につながりかねないため、具体的なケースごとに慎重に検討を行う必要があると考えられる。

そのため、本分析における2050年の一般水力発電、地熱発電、バイオマス発電の設備容量想定は、2030年度におけるエネルギー需給の見通し⁵¹で定められた2030年までに導入される設備容量と同値と想定した。

一般水力発電は、発電出力が調整可能な電源と想定し、2018年度の電力地域別の一般水力発電の発電実績に比例して、月別の発電電力量の上限を設定する（図 4-3参照）。

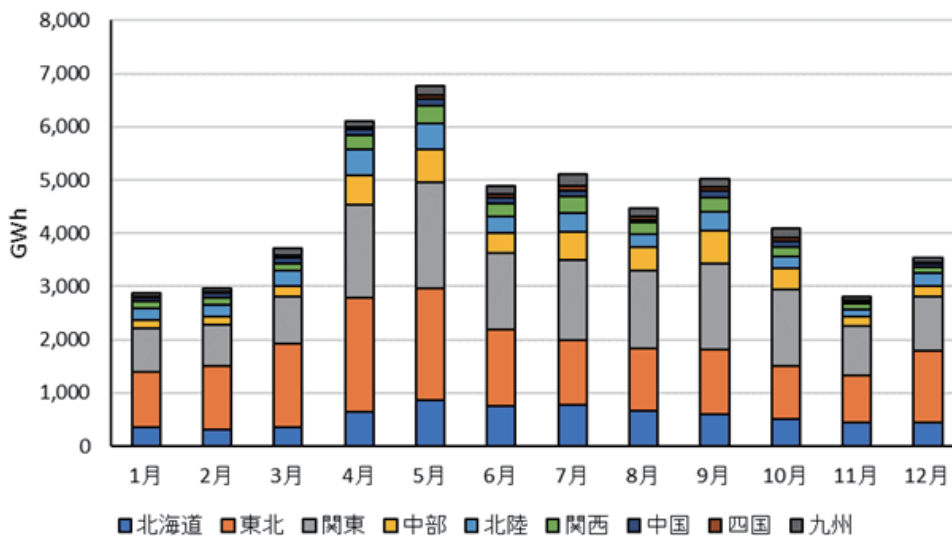


図 4-3. 一般水力発電の月別地域別最大発電電力量想定

原子力発電

政府目標シナリオでは、2030年の稼働する原子力発電の設備容量は、エネルギー需給見通しの関連資料⁵¹を参考に37GWと想定した。2040年、2050年の設備容量は、稼働してからの年数が60年以下の原子力発電が稼働すると想定した。技術変容、バランス、社会変容シナリオにおいては、現時点で適合性審査に申請しており、かつ、2030年、2040年、2050年の時点で稼働してからの年数が60年以下の原子力発電が稼働すると想定した。年間の設備利用率は、定期点検を考慮して、75%と想定した。なお、原子力発電の発電ユニットの半分が、4月から6月に定期点検を行い、残りの半分が9月から11月に定期点検を行うと想定した。（表 4-13）

表 4-13. 稼働する原子力発電の設備容量想定（単位：GW）

	2020	2030	2040	2050
技術変容、社会変容、バランスシナリオ	9	25	21	15
政府目標シナリオ	9	37	34	25

火力発電

各火力発電のシナリオ別年別の設備容量を図 4-4、図 4-5に示す。技術変容、バランス、社会変容シナリオでは、石炭火力が2030年までに太宗が、2040年までに完全にフェーズアウトし、既存のLNG火力のうち60GWが2040年までに水素火力（専焼又は混焼）として改修されると想定した。政府目標シナリオでは、ガス火力発電、石炭火力発電の大部分が残るが、2040年頃からCO₂分離回収装置の導入や水素混焼/専焼火力、アンモニア混焼/専焼火力発電の利用が増加し、2050年にはすべてこれらの火力発電となると想定した。

政府目標シナリオは、反復的シミュレーションの結果、想定した再エネからの電力供給量では足りない電力を補うために、115GWの火力発電（CO₂分離回収型石炭火力、アンモニア混焼火力、CO₂分離回収型LNG火力、水素専焼火力）を想定した。

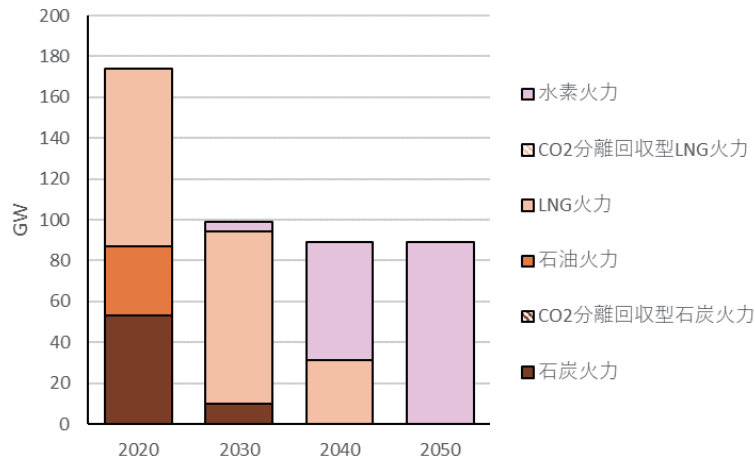


図 4-4. 技術変容、バランス、社会変容シナリオにおける火力発電の設備容量 (年別)

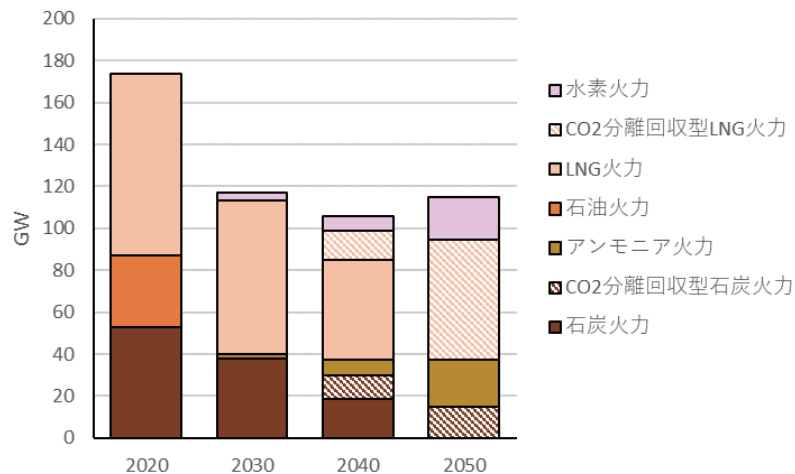


図 4-5. 政府目標シナリオの火力発電系における火力発電の設備容量 (年別)

(2) 電力システムの柔軟性の想定

上記で想定した電源のうち電力システムの柔軟性（調整力）を有するものは、火力発電（ガス火力と水素混焼/専焼火力）、一般水力発電のうち調整池付水力発電、バイオマス専焼火力発電である。石炭火力発電およびアンモニア混焼/専焼火力発電は、出力調整をする機能を有しているが、ガス火力発電、水素専焼/混焼火力発電と比較して応答速度が遅いことから主要な調整力としては想定しない。なお、変動性再エネについても電力供給量が過剰となる際に、出力抑制を行うという形で、下げ方向の柔軟性を有している。

これらの電源の柔軟性に加えて、蓄電池、揚水式水力発電、家庭給湯用ヒートポンプ、水素製造装置を想定した。蓄電池は、V2Gとして系統に接続されるEV、定置蓄電池の2種類を想定した。

蓄電池

技術変容、バランス、社会変容シナリオにおいては、乗用車のうち自家用車として所有されるEVを対象に、そのうち2030年は4%、2040年は25%、2050年は50%が系統に接続され、V2Gにより電力系統の需給調整用に利用することができることを想定した。1台当たりの電池容量は60kWhとし、充放電の出力を6kW（普通充放電器の水準。急速充放電器を用いればこの10倍も可能）とした。

また、定置型蓄電池については、主に太陽光発電・風力発電の余剰が生まれやすいノードにおいて、効率的に電力需給を行うために導入が進むと想定した。より具体的には、各ノードにおいて、1世帯当たり電池容量5kWh・出力2kWの蓄電池が、2030年には各ノードの世帯数の5%、2040年には20%、2050年には50%相当分導入されることを目安として蓄電池の導入容量と配分を想定したうえで、ノードごとに送電線の容量と電力需給の状況を考慮して調整を行った。蓄電池の容量の推計結果を表4-14に示す。

政府目標シナリオについては、V2Gを想定していない⁴。定置型蓄電池については、その他のシナリオと同様に、主に太陽光発電・風力発電の余剰が生まれやすいノードにおいて、効率的に電力需給を行うために導入が進むと想定した。

表 4-14. 蓄電池の設備容量 （単位:GW、括弧内はGWh）

		2030	2040	2050
技術変容、バランス、社会変容シナリオ	EV(V2G)	15(83)	57(571)	63(635)
	定置型蓄電池	1 (3)	25(67)	62(160)
政府目標シナリオ	定置型蓄電池	0(0)	5.3(20)	9.2(35)

揚水式水力

揚水式水力発電は、2050年まで現在の設備容量と同値と想定した。揚水式水力発電の出力は日本全国で27GW、蓄電容量は日本全国で235GWhと想定した。各地域の発電/蓄電能力と蓄電容量は表4-15を参照。

表 4-15. 揚水式水力発電の設備容量

地域	発電 / 蓄電能力 (GW)	蓄電容量 (GWh)
北海道	0.8	8
東北	0.5	4
関東	12.3	115
中部	3.4	27
北陸	0.2	2
関西	4.9	39
中国	2.1	17
四国	0.7	5
九州	2.3	18
合計	27.1	235

⁴ 電力広域的運営推進機関（OCCTO）のマスタープランでは、「系統運用のための蓄電池を想定しており、導入量の推計においてはEV・PHEVのバッテリー容量を積み上げた数値をもとに試算」としており、V2Gを明示的に想定していない。

家庭給湯用ヒートポンプ

家庭用ヒートポンプ式給湯器について、技術変容、バランス、社会変容シナリオにおいて、家庭部門で2030年以降に導入されるヒートポンプ式給湯機器が消費する電力については、電力需要が少ない時間帯にお湯を沸かし貯湯することで、調整力として扱うことができることを想定した。給湯器の出力は、3時間で1日分の給湯需要を満たせる大きさを想定し、シフトできる電力量に影響する貯湯タンクの容量は、2日分の貯湯が可能なものを想定した。各シナリオの年別の柔軟性能力を表 4-16に示す。

表 4-16. 家庭用ヒートポンプ式給湯器柔軟性能力

	2030	2040	2050
技術変容、バランス、社会変容シナリオ	—	13GW, 2.6GWh	21GW, 4.6GWh
政府目標シナリオ	—	—	—

水素製造装置

各シナリオの水素製造設備の容量を表 4-17に示す。洋上風力発電の導入容量とアクセスポイントとなる変電所に接続される送電線の容量を考慮して、洋上風力発電で発電された電力が送電線を通じて全国に送電できない分を水素製造用電力として利用できる設備容量を想定した。なお、電力系統シミュレーションでは、太陽光発電など洋上風力以外の再エネ余剰電力で水素製造も想定している。

表 4-17. 水素製造設備の設備容量

	2030	2040	2050
技術変容、バランスシナリオ	—	81GW	350GW
社会変容シナリオ	—	81GW	222GW
政府目標シナリオ	—	—	38GW

(3) 電源と柔軟性リソースの設備容量まとめ

(1) で記述したシナリオ別の各電源の想定及び (2) で記述した柔軟性のある電源や蓄電池の想定で、記述した内容のまとめを図 4-6に示す。

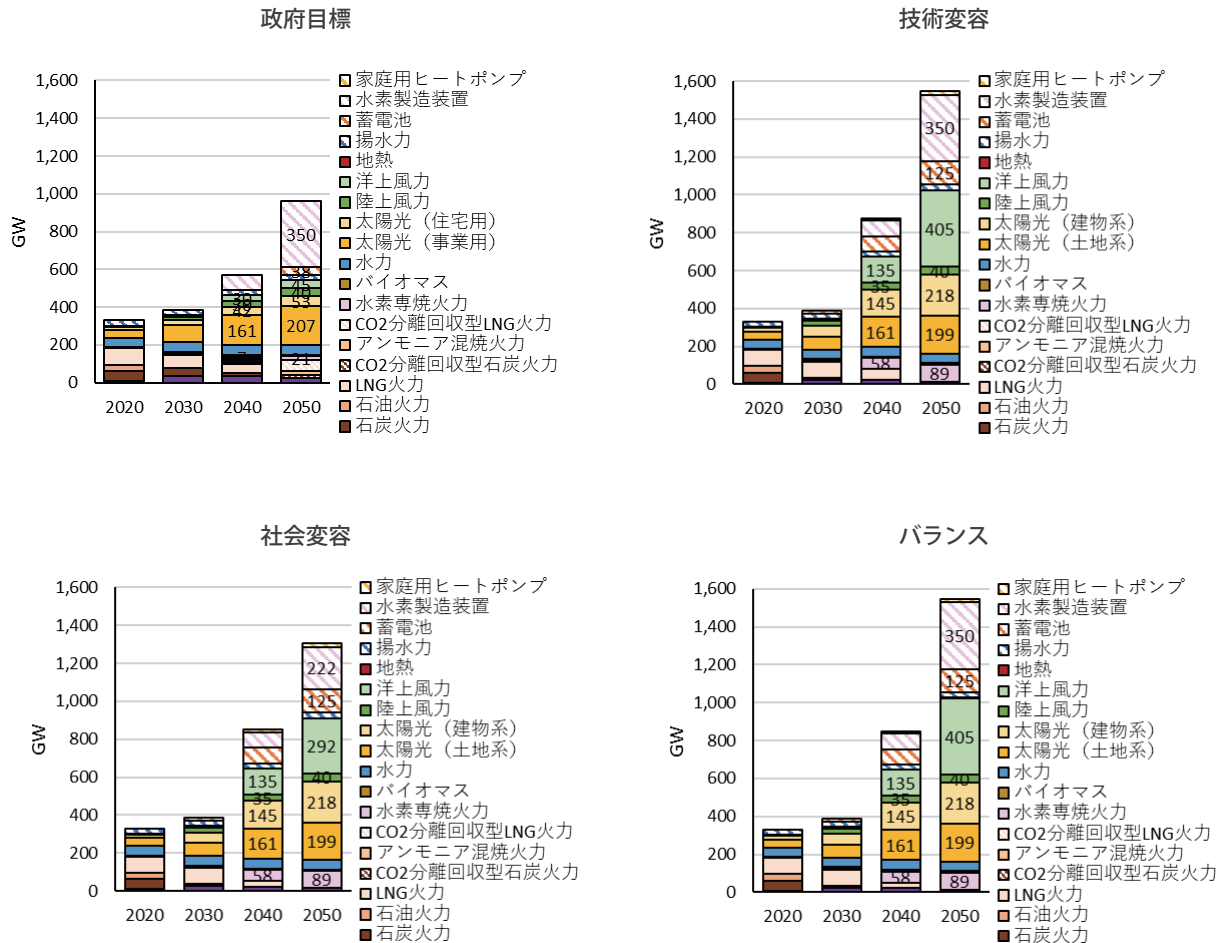


図 4-6. 各シナリオの各電源の設備容量

(4) 送電線

① 地域間連系線

地域間連系線については、2030年時点では、各送配電会社の整備計画を基に北海道—東北間、東北—関東間、関東—中部間の連系線の運用容量が増強されていることを想定した。また、2040年以降については、政府目標シナリオでは、電力広域的運営推進機関 (OCCTO) が作成したマスタープラン¹²⁸を参照した。OCCTOのマスタープランには地域間連系線の増強完了時期が明記されていないが、通常10年ほどかかる工期を短縮し2030年度までの運用開始を目指す、との報道¹⁴¹も参考に、2040年までには十分に間に合うと想定した。

また、その他のシナリオにおける地域間連系線は、2040年以降、地域間連系線が結ぶ両地域の地内系統の運用容量よりも小さくならない水準まで増強されると想定した。これは、従来の地域間連系線は、各送配電地域内での電力供給力が足りない場合に緊急時の措置として、地域間連系線を通じて電力を融通するという考え方を基に設備が整備されてきた。このため、地域間連系線の運用容量は、地内基幹系統の運用容量よりも小さいことが一般的である。しかし、2040年以降は、偏在する再エネを日本全体に効率的に送電するために、電力の広域融通が求められていることから、地域間連系線の運用容量が広域融通のボトルネックとならないようにすることを想定したものである。(表 4-18)

表 4-18. 各シナリオにおける地域間連系の運用容量の想定（単位MW）

地域間送電線	現状	2030年 全シナリオ共通	2040年以降 政府目標シナリオ	2040年以降 その他のシナリオ
北海道—東北	600	1,200	1,200	2,000
東北—関東	5,830	10,880	12,000	12,000
北海道—関東	-	-	8,000	8,000
関東—中部	1,200	1,800	5,400	9,986
中部—北陸	300	300	360	2,000
中部—関西	2,500	2,500	5,000	6,000
北陸—関西	1,900	1,900	1,900	3,500
関西—中国	4,140	4,140	5,468	8,000
関西—四国	1,400	1,400	1,400	2,800
中国—四国	1,200	1,200	1,200	3,000
中国—九州	2,470	2,470	5,270	6,000

② 地内基幹送電線

地内基幹送電線について、2030年は現在の送電線と同じ容量とした。2040年以降の地内送電線の増強の想定は、全シナリオに共通して2種類ある。一つ目は、現在公表されている流通設備計画（送電線の増強計画）や増強検討資料¹⁴²に基づいて増強する予定の送電線である。これは、主に東北地域北部の日本海側や北海道地域の基幹系統、関西地域の播磨港や加古川周辺の地域間連系統の増強に伴う地内系統の再整備などが該当する。二つ目は、参考資料1（4）に示すプロセスにおいて電力需給シミュレーションを反復的に行う中で特定された、送電線増強が必要なボトルネックとなる部分である。これらは電力需要が大きくなる都市部を中心に送電線の増強を想定した。本分析で想定した送電線の地域別の増強本数を表 4-19にまとめた。

表 4-19. 地内基幹送電線の増強まとめ（全シナリオ共通）

地域	現在公表されている計画など流通設備計画	電力需要の増加により、本分析において増強が必要となる送電線		
		本数	平均増強量（MW）	平均増強率
北海道	2	23	386	220%
東北	10	3	876	196%
関東	1	13	575	194%
中部	2	4	518	166%
北陸		1	1,769	270%
関西	5	5	884	246%
中国		1	388	163%
四国		5	205	130%
九州	3	15	625	218%
合計	23	70	543	206%

3. 電力系統シミュレーション結果

電力需給シミュレーションの結果得られた電源別の発電電力量を図 4-7に示す。2050年において、政府目標シナリオは、再エネ電力の利用について、系統電力需要に対する供給が大半を占め、水素製造のための電力供給量は134TWhとなった。系統電力需要に対して供給している発電電力量に占める再エネの割合は、45%となった。技術変容シナリオ及びバランスシナリオでは、系統電力需要への供給分と水素製造への電力供給分がおおよそ同程度になった。また、水素専焼火力の発電電力量は、技術変容シナリオ、バランスシナリオにおいてそれぞれ125TWh、71TWhであった（図 4-7の水素火力に該当）。この結果、系統電力需要に対して供給している発電電力量に占める再エネの割合は、77%、78%となった。社会変容シナリオでは、水素製造のための電力供給量は、714TWhとなった。系統電力需要に対して供給している発電電力量に占める再エネの割合は、76%となった。

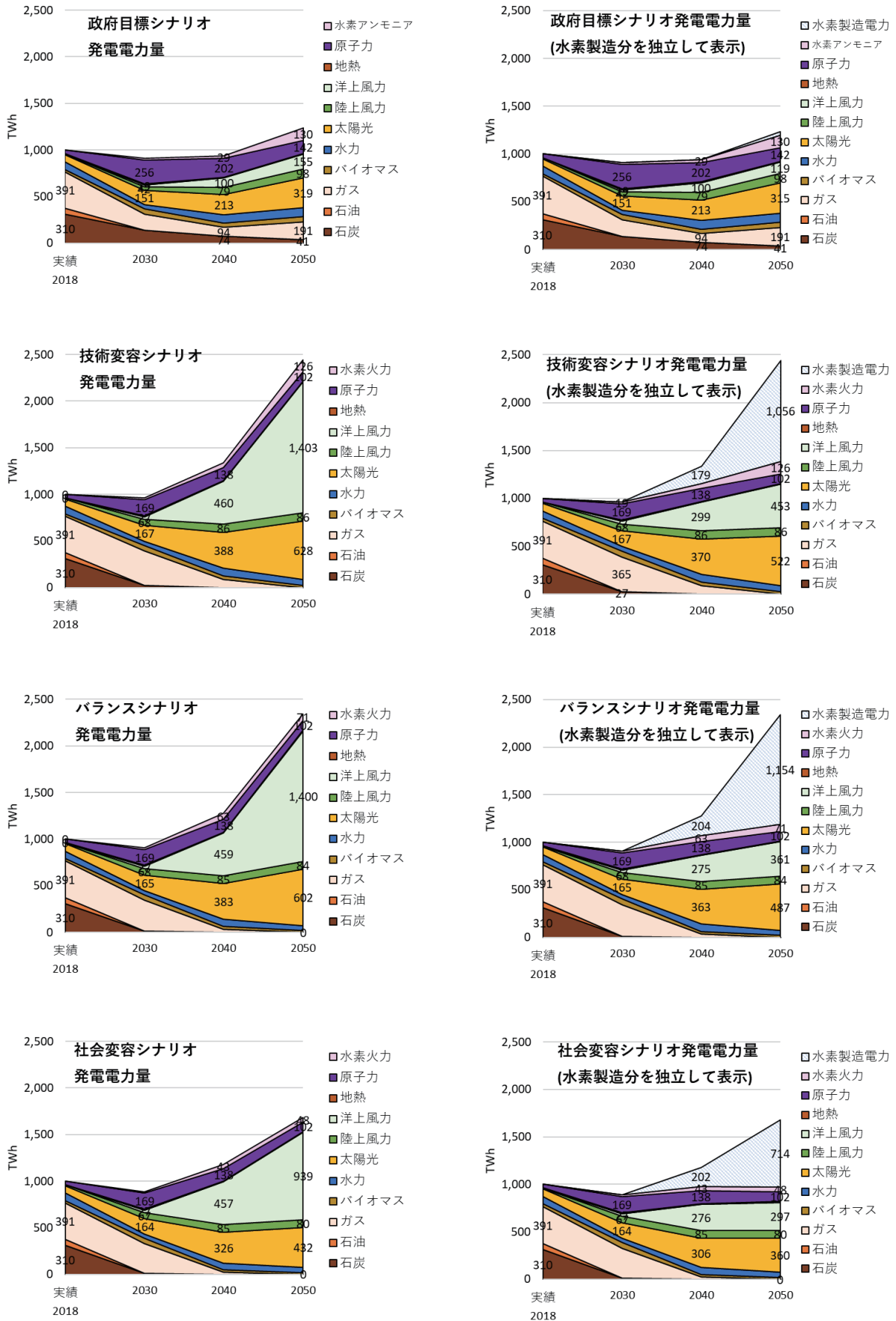


図4-7. 各シナリオの電源別発電電力量

電源構成において、太陽光や風力発電などの変動性再エネの比率が40~50%以上になると、周波数変動が大きくなり、系統に接続されている発電機が故障を防ぐために、自らを系統から切り離すことで、電力供給量が不足し、停電が起きるといった電力システムの安定性に対する懸念が生じると言われている¹⁴³。そのため、電力部門の脱炭素化を議論する際に、再エネ比率は電力システムの安定性を議論する際の基礎情報となる。なお、本レポートにおける電力需給シミュレーションの時間解像度は1時間であることから、詳細な安定性評価は分析の対象外であり、今後の課題とする。

図 4-8に電力系統需要に対する電力供給分における再エネ比率及び水素製造用の電力供給分も含めた再エネ比率をシナリオ別に示した。なお、非同期電源比率（SNSP; System Non-Synchronous Penetration）¹⁴⁴は、分母を「系統電力需要+広域連係線を通じた輸出（Demand + Net Interconnector Exports）」、分子を「変動性再エネなど非同期電源による発電量+広域連係線を通じた輸入（Non-Synchronous Generation + Net Interconnector Imports）」とするのが一般的である。しかし、本レポートで想定している電力システムにおいては、水素製造用の電力には、電力系統を通じて消費されるもの（例えば、太陽光発電からの電力は系統で消費しきれない電力が広域融通され水素製造に用いられる）と、電力系統に入る前に消費される分（例えば、洋上風力発電からの電力は主に海底送電線を通じて本土に供給され、陸側のアクセスポイントとなる変電所に併設された水素製造拠点において消費される）の両者が存在することから、水素製造用電力を含めた場合と含めない場合の二つの非同期電源比率を示している。

政府目標シナリオは、2040年までに変動性再エネ比率が、40%程度まで上がり、そこからほぼ横ばいに推移する。技術変容シナリオ、バランスシナリオ、社会変容シナリオでは、2030年以降に変動性再エネ比率が高まり、2035年に50%程度、2040年に70%程度、2050年に80%程度となった。そのため、2035年頃から、グリッドフォーミングインバータ技術や再エネで発電した電気でモーター（Motor）を回し、そのモーターで発電機（Generator）を回すM-Gセットなど、高い変動性再エネ比率に対応する措置を検討する必要がある可能性がある（コラム：グリッドフォーミング（スマートインバーター）やM-Gセットの実践的応用 参照）。

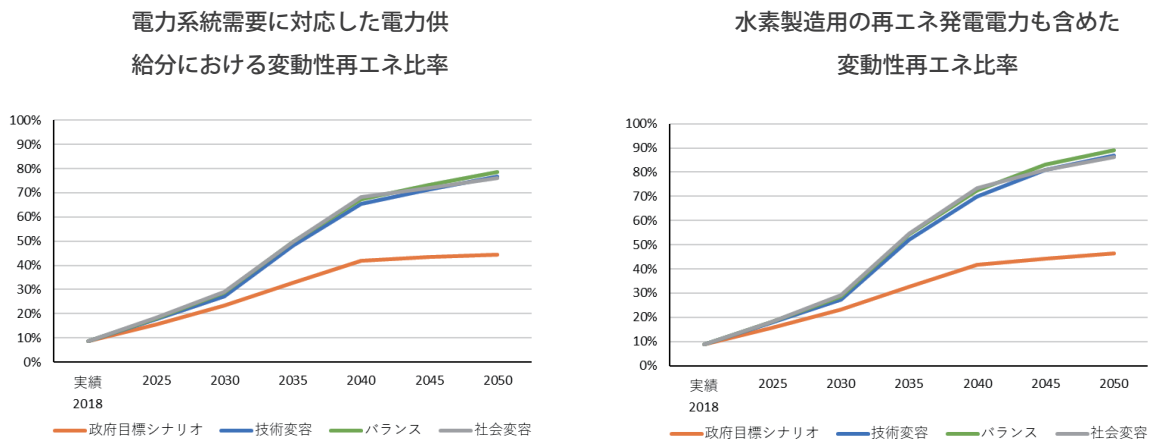


図 4-8. 各シナリオの電力供給に占める変動性再エネの割合の推移

コラム：グリッドフォーミング（スマートインバーター）やM-Gセットの実践的応用

IEAによるとグリッドフォーミング（GFM）技術を含むスマートインバーターのTRLは8（First of a kind commercial）であり、技術実証の最終段階と位置づけられる。東芝は2022年3月、系統周波数が急変動した際にインバータから出力される電力で擬似的に慣性力を与え、配電系統の系統周波数を維持できるGFMインバータを開発した。さらに、太陽光発電装置にGFMインバータを搭載することで、系統周波数の低下を約30%抑制できることを実証している¹⁴⁵。図4-9は、米国国立再生可能エネルギー研究所（NREL）によるGFMインバータの社会実装の概念図である¹⁴⁶。送配電網の各所に、GFMインバータを導入することで、変動性再エネ比率が高い電力システムにおいて、系統を安定化する研究や技術が進められている。

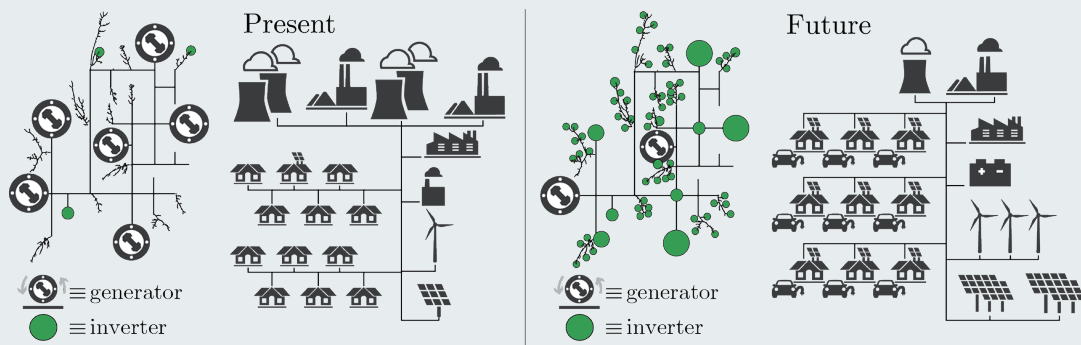


図4-9. グリッドフォーミングインバータの社会実装の概念図¹⁴⁶

沖縄にある波照間島では、再エネで発電した電気でもーター（Motor）を回し、そのモーターで発電機（Generator）を回すM-Gセットの実証が行われた¹⁴⁷。2020年11月27日18時21分から試験を開始し、12月7日7時48分までの約10日間、継続して変動性再エネのみでの電力供給を実現した。これは、「ディーゼル発電機は内燃力機関の特性上、定格出力の50%未満に抑えて発電することができず、常に運用下限である定格出力の50%以上の出力で運用し、下げ代を確保する」という従来の運用の制約を克服した画期的な成果といえる。（図4-10）

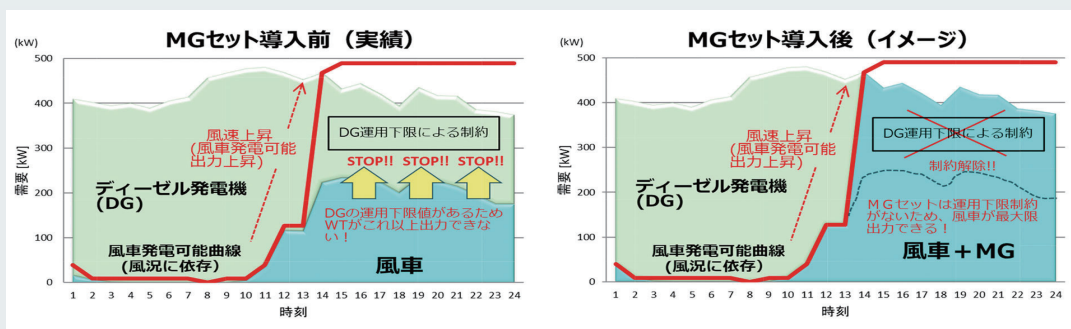


図4-10. MGセット導入前後での系統運用の変化¹⁴⁷

次に、各シナリオにおける火力発電の負荷持続曲線を図 4-11に示す。2040年の政府目標シナリオ、技術変容シナリオ、バランスシナリオ、社会変容シナリオにおける火力発電の最大供給量はそれぞれ、48GW、77GW、70GW、61GWであった。2050年においては、それぞれのシナリオで、77GW、85GW、74GW、64GWであった。政府目標シナリオについて、2040年断面では火力発電が恒常的に稼働し、2050年断面では、発電電力量最大値と最小値の差が大きいものの火力発電から電力が常に供給される結果となった。

それ以外のシナリオ（技術変容、バランス、社会変容シナリオ）では、2040年、2050年ともに、限られた時間しか稼働していないことが特徴的である。そのため、このように稼働率が低くなる火力発電を需給調整用のバックアップ電源として維持するための制度・施策が重要となる。

各シナリオが想定している火力発電の設備容量（GW）に対する最大供給量の比率を表 4-20に示す。バランス、社会変容シナリオにおいては、80%程度の比率が確保されていることから、異常気象による電力需要パターンの変動など、想定外の事態が起きた場合にも対応することができる余力があることが示されている。一方で、技術変容シナリオでは、90%以上の比率となっている。これは、図 4-11に示されるとおり瞬間的な状況ではあるが、需給がひっ迫する時間帯が発生する可能性がある。

なお、需要側で電力のピークをシフトさせるようなデマンドレスポンスを有効に取り入れることができれば、限定的な時間しか稼働しない火力発電の容量を少なくとも、瞬間的な需給ひっ迫を回避し、火力発電を維持するための費用を下げる可能性があるが、これらの検討は今後の課題である。

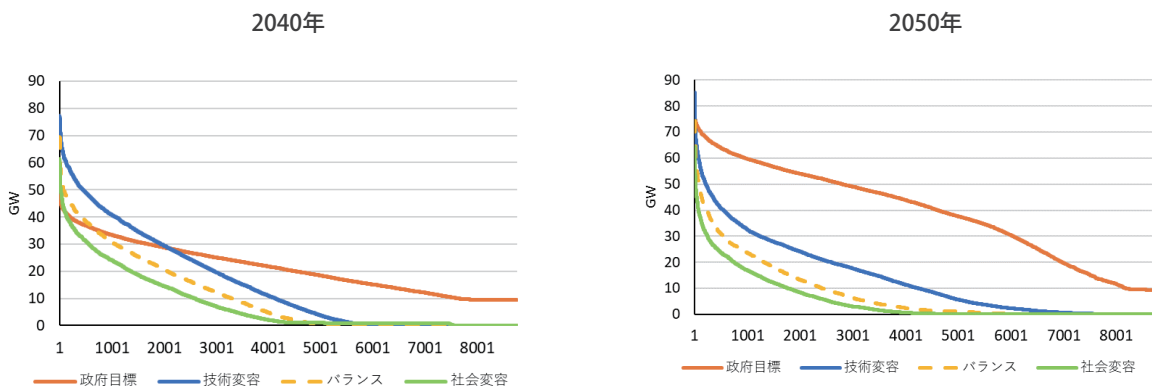


図 4-11. 2040年、2050年における火力発電のシナリオ別持続曲線

表 4-20. 火力発電の供給予備率

シナリオ名	2040年	2050年
政府目標	55%	33%
技術変容	13%	4%
バランス	22%	17%
社会変容	31%	28%

各シナリオ別の太陽光発電、陸上風力発電、洋上風力発電の年別の出力抑制率を図 4-12に示した。政府目標シナリオでは、2040年の太陽光発電と陸上風力発電の出力抑制率が高くなった。これは、電力需要量に対して、再エネの設備容量が比較的大きいなかで、蓄電池と余剰再エネを利用した水素製造装置の設備容量が小さい（すなわち、柔軟性が少ない）ことが理由である。2050年になると、各再エネの出力抑制率は6%以下となる。各部門の電化が進み、システムの電力需要が大きくなること、余剰再エネによる水素製造を想定していることが理由である。

技術変容シナリオ、バランスシナリオ、社会変容シナリオでは、2050年の太陽光発電と陸上風力発電の出力抑制率が10%近くに達した。また、図4-13に一例としてバランスシナリオにおける年間を通じた出力抑制率の平均値を示す。この図より、太陽光発電、陸上風力発電ともに、昼間の時間帯に出力抑制が多く発生した。このことから、太陽光発電の発電電力が余剰となる時間帯に、太陽光発電や陸上風力発電の電力を有効に使えていないことが、太陽光発電と陸上風力発電の出力抑制率が高い理由として考えられる。

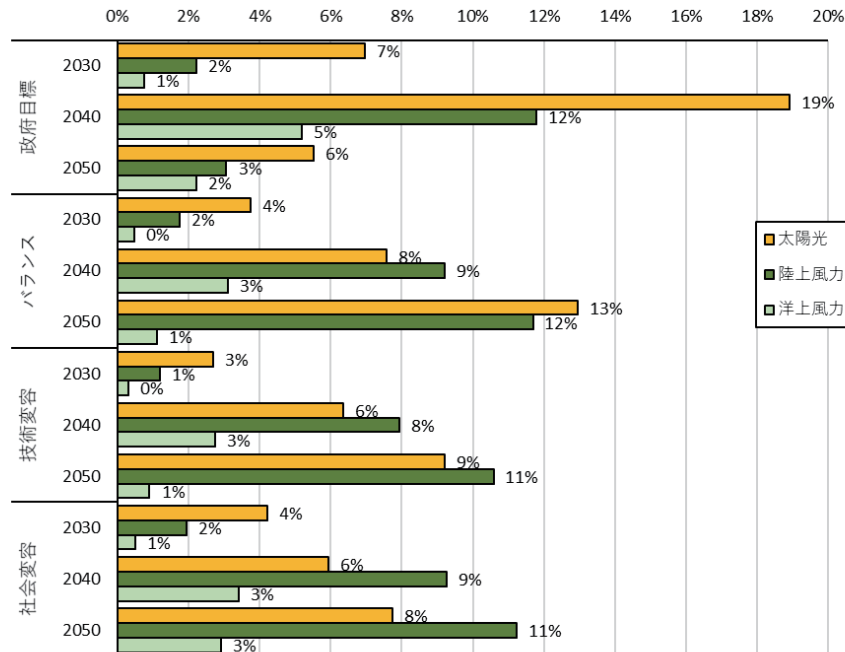


図4-12. 風力太陽光発電の出力抑制率

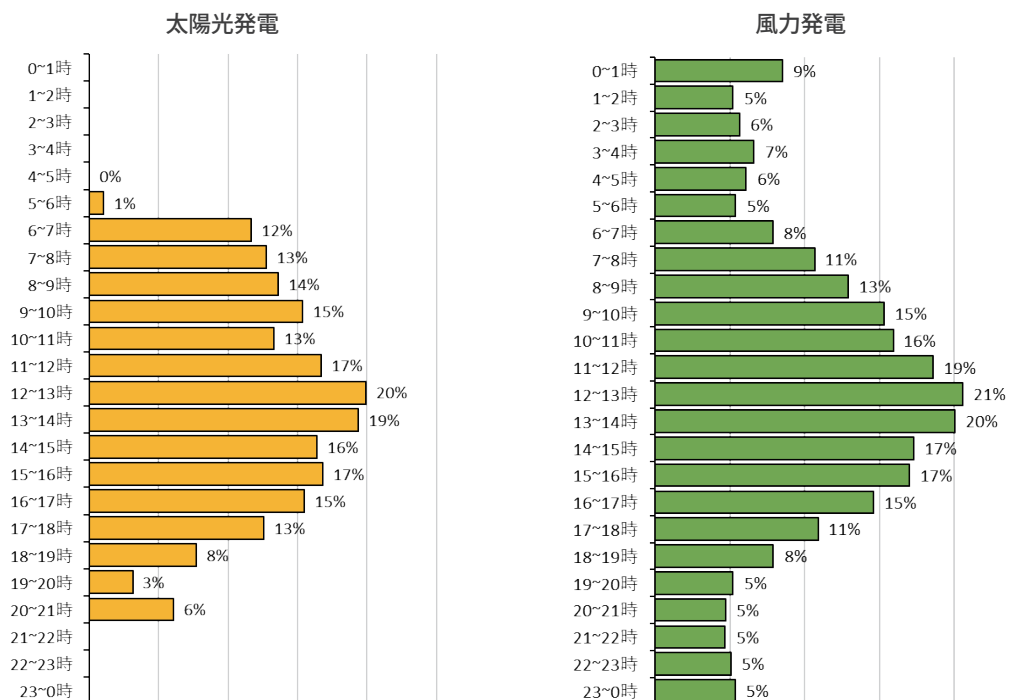


図4-13. バランスシナリオの陸上風力発電と太陽光発電の時間別出力抑制率年間平均値

出力抑制された発電電力量を図 4-14に示す。どのシナリオにおいても太陽光発電の出力抑制量が大きい。産業部門におけるデマンドレスポンス、小規模分散型の水素製造装置と水素利用などについては、本レポートでは想定していない。このように太陽光発電の余剰電力を有効に活用できる取組を取り入れることで、太陽光発電の出力抑制量を改善できる可能性があり、今後の研究課題である。

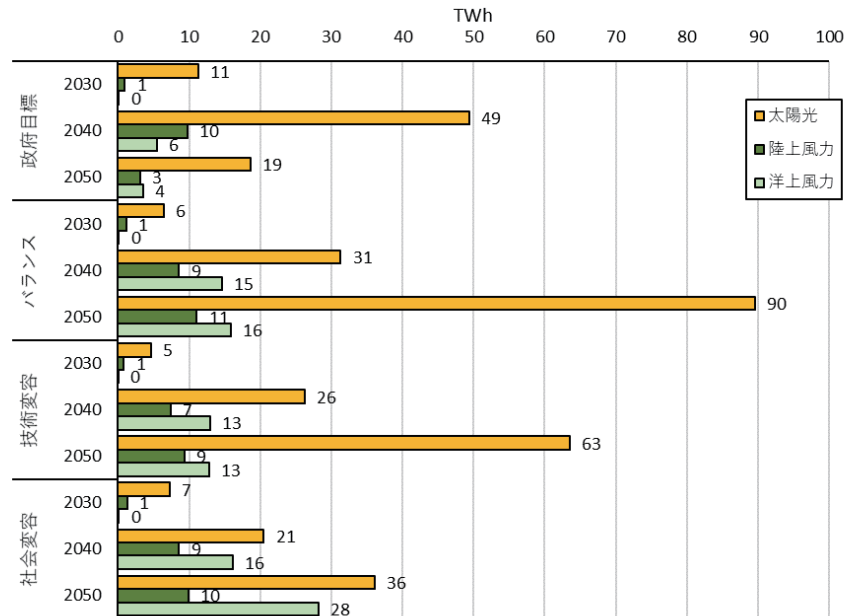


図 4-14. 風力太陽光発電の出力抑制された発電電力量

2050年における各シナリオの送電線の年間の設備利用率（運用容量ベース）の平均値を図 4-15に示す。全シナリオにおいて、年間の設備利用率が10%~20%または20%~30%の送電線の数が多いことから、運用容量に余裕のある送電線がほとんどであるといえる。図 4-16にバランスシナリオの年間の設備利用率が20%~30%の送電線と70%~80%の送電線の持続曲線（duration curve）の一例を示す。年間の設備利用率が20%~30%の送電線の持続曲線は、送電線に流れる電力量が最大の時でも運用容量に達していない。70%~80%の送電線の持続曲線は、送電線に流れる電力量が最大の時には、運用容量の上限に達しているが、運用容量を超えていない。

また、政府目標シナリオとその他のシナリオを比較すると、政府目標シナリオは、年間の設備利用率が10%~30%の送電線の年間の設備利用率が最も多い。一方で、技術変容シナリオ、社会変容シナリオ、バランスシナリオは、年間の設備利用率が30%~70%の送電線の数も相対的に多い。これは地域分散型の再エネが増えて、より多くの送電線を用いた電力需給が行われているためである。

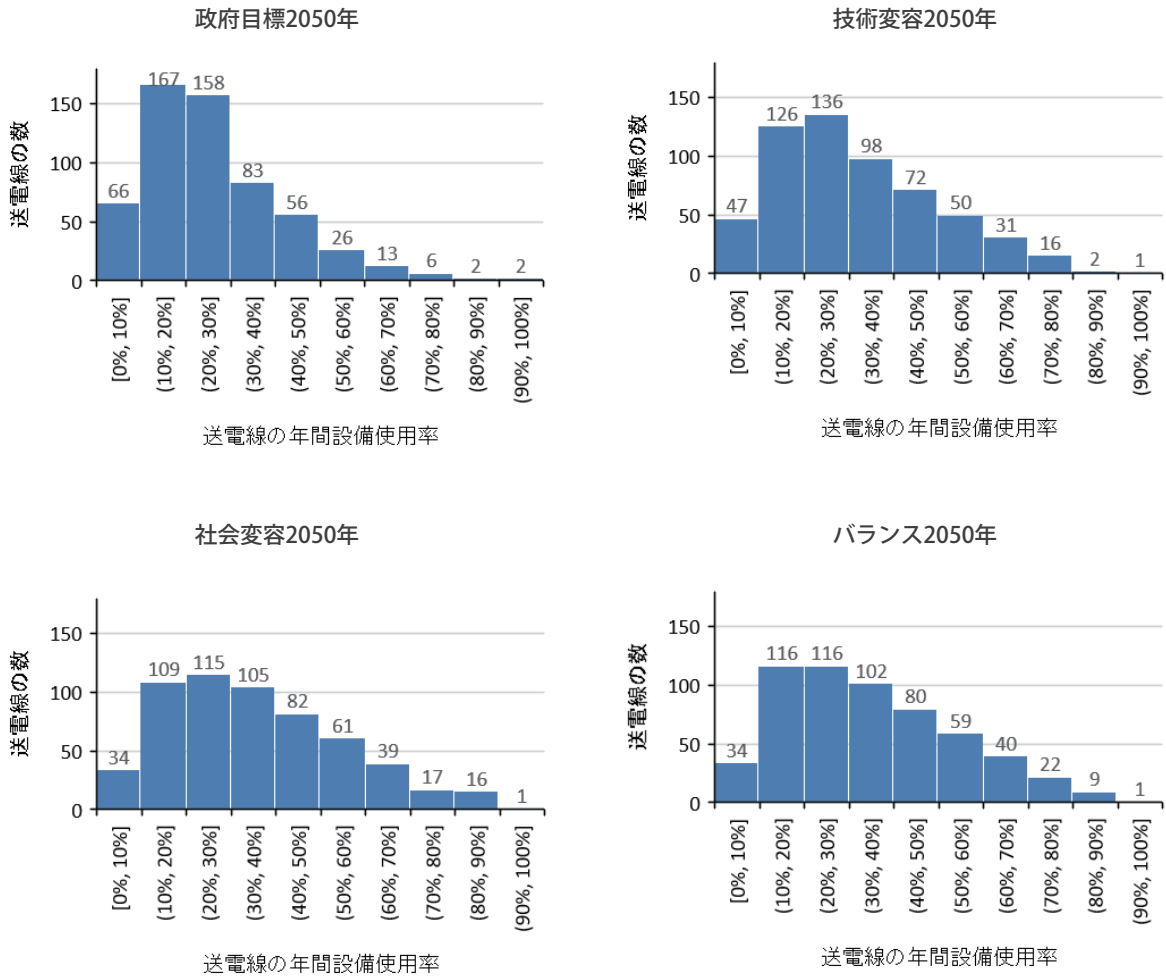


図 4-15. 2050年断面の送電線設備利用率

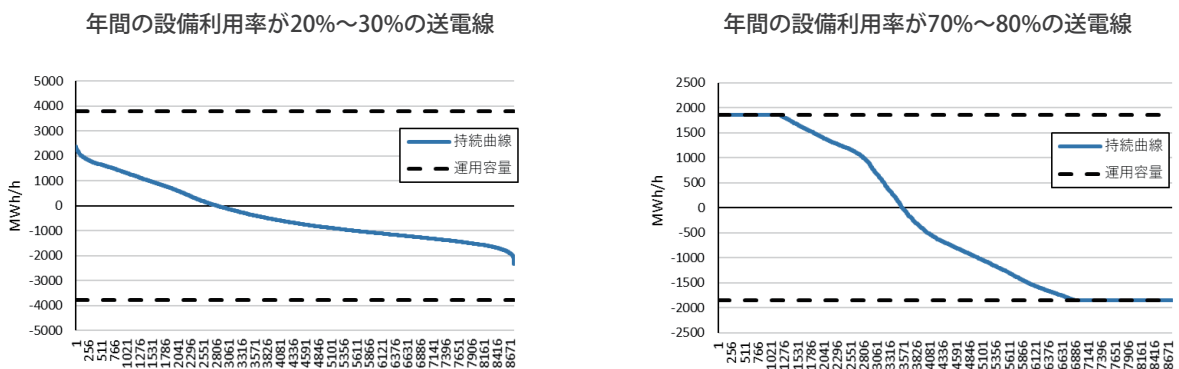


図 4-16. バランスシナリオにおける年間の設備利用率別の送電線持続曲線の一例

4. 一次エネルギー供給量の推計結果

図 4-17に、各シナリオについて一次エネルギー供給量の推計結果を示す。

政府目標シナリオの一次エネルギー供給量は2050年にかけて減少し、2050年には基準年比28%減となる。また、基準年に89%であった化石燃料比率は39%になり、基準年に9%であった再エネ比率は25%となる。ガスと水素が主要な輸入エネルギーと推計された。

技術変容シナリオの一次エネルギー供給量は、2050年に基準年比33%減となった。2050年の化石燃料比率と再エネ比率はそれぞれ、4%、68%となった。図 4-17に示される通り、現行政策シナリオと技術変容シナリオにおける最終エネルギー消費量の絶対値の差よりも、1次エネルギー供給量の絶対値の差のほうが大きい。これは、政府目標シナリオでは、電力部門において火力発電の発電電力量が大きいことが強く影響している。

社会変容シナリオの一次エネルギー供給量は、2050年に基準年比61%減となった。2050年の化石燃料比率と再エネ比率はそれぞれ、4%、79%となった。バランスシナリオの一次エネルギー供給量は、2050年に基準年比48%減となった。2050年の化石燃料比率と再エネ比率はそれぞれ、3%、85%となった。

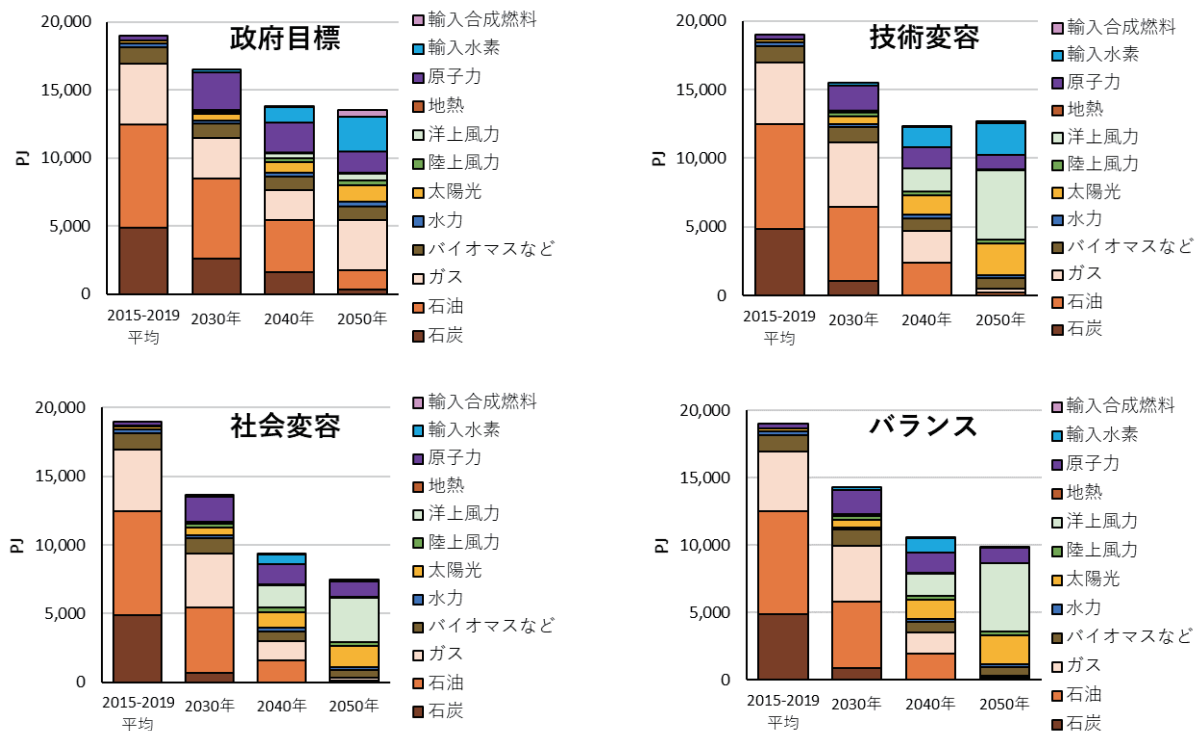


図 4-17. 各シナリオのエネルギー種別一次エネルギー供給量

5. まとめ

2050年における一次エネルギー供給のうち、政府目標シナリオでは25%、技術変容シナリオ・バランスシナリオ・社会変容シナリオでは、それぞれ68%、79%、85%を再生可能エネルギーが占める結果となった。これはいずれのケースにおいても現状の一次エネルギー供給に占める再生可能エネルギー比率9%よりも増加し、国内のエネルギー自給率が高まっていくことを意味している。しかし、技術変容シナリオ・バランスシナリオ・社会変容シナリオでは、業界団体が掲げる目標値を最大限においた水準で再生可能エネルギーの導入が進むことを想定したことにより、政府目標シナリオとはその増加幅が大きく異なっている。なお、本レポートでは、バランスシナリオを構成する要素のうち、特に不確実性が高いと思われる要素として、再生可能エネルギー、特に風力発電の導入拡大に注目し、それが想定通りに進展しないケースについても考察するための、サブシナリオも分析しており、その内容を参考資料3にまとめている。

輸入エネルギーについては、政府目標シナリオでは2050年には一次エネルギー供給の3/4を占め、非常に大きな役割を果たす。一方、技術変容シナリオ・バランスシナリオ・社会変容シナリオでは、その割合は相対的に低くなるものの、一定の役割を果たしている。

飛躍的な再生可能エネルギー比率の拡大は、前章で述べたエネルギー消費量の違いだけでなく、特に電力部門において、蓄電池や水素製造装置などの導入や、送電線の最大限の活用、水素専焼火力がバックアップの役割を担うことなど、電力供給システムの柔軟性を高めることで、実現が可能になる。全国450の変電区域における1時間ごとの需給バランスと579本の基幹送電線（上位2系統）の制約を考慮した電力需給シミュレーションの結果からは、柔軟性の高いシステムを構築することで、再生可能エネルギーの出力抑制を必要最低限に留めつつ、電力の安定供給を行うことは可能である、と結論づけられる。

ただし、電力の安定供給を担保するためには、より短い時間スケールでの瞬間的な需給変動への対応方法も含めたより詳細な検討を併せて行うことが必要であり、これは本分析では対象としておらず、今後の研究課題である。

第5章

GHG 排出量を早期に大幅削減し、低廉で自立したエネルギーシステムは実現するか

1. 本章の概要

本章では、各シナリオについてGHG排出量を含む主要指標を定量化し、それぞれの特徴について理解を深める。政府が施策立案にあたって遵守すべきエネルギー政策の骨格を示したエネルギー政策基本法では、「エネルギーの供給源の多様化、エネルギー自給率の向上及びエネルギーの分野における安全保障を図る」、「地球温暖化の防止及び地域環境の保全が図られたエネルギーの需給を実現し、併せて循環型社会の形成に資する」、「エネルギー需要者の利益が十分に確保される」ことを重視して施策を講じることが定められている。本章の以下では、GHG排出量に加えて、従来の議論において用いられてきた主要指標であるエネルギー自給率、電力及び水素コスト、投資額を定量化し、各シナリオの特徴を分析する。各指標の計算方法については第2章 2. (5) 及び参考資料1に記載している。

なお、例えば「エネルギー需要者の利益」は短期的な光熱費のみを指すのではなく、本来は需要家が直面する中長期的な经营风险といった便益まで含むものと捉えるべきであり、エネルギー政策基本法が定める政策目的全てを定量化することが必ずしも可能でも適切でもないことに留意が必要である。

2. エネルギー起源 CO₂ 排出量及び GHG 排出量とベンチマークとの比較

各シナリオの部門別のエネルギー起源CO₂排出量推移について、CCS技術によるCO₂回収後の結果を図 5-1に示し、CO₂回収前の結果を図 5-2に示す。エネルギー起源CO₂排出量は、本レポートで詳細に検討したエネルギー需要と供給の変化が推計結果に影響する。政府目標シナリオでは、業務部門や家庭部門の排出が含まれる建物からのCO₂排出量が2050年まで残る結果となった。これは、建物部門ではCCS技術のような大型の設備を導入することはできないことから、化石燃料の利用が残ると、その分だけCO₂が排出されるためである。製造業においても化石燃料の利用が残るが、大規模排出源などでは、CO₂回収設備によって、エネルギー起源CO₂排出量が削減される。しかし、小規模排出源では、CCS技術によって回収できない化石燃料からのエネルギー起源CO₂排出量が残る。

技術変容・社会変容・バランスシナリオでは、2040年までに電化や水素化が進むことから、CCS回収によるエネルギー起源CO₂排出量削減分は小さい（詳細は、図 5-5参照）。そのため、図 5-1と図 5-2の見え方に差異はほとんどない。社会変容とバランスシナリオでは、需要側の変化で各部門の最終エネルギー消費量が減少するとともに、再エネなどの脱炭素電源が増加することで、2035年頃までに電力部門の脱炭素化がほぼ達成されている。一方で、技術変容シナリオでは、電力部門の脱炭素化が2040年以降となった。これは、技術変容シナリオでは、需要側の変化が小さい分、電力需要量の減少が限られるため、2040年までの再エネ導入量だけでは火力発電を完全に置き換えることができないためである。

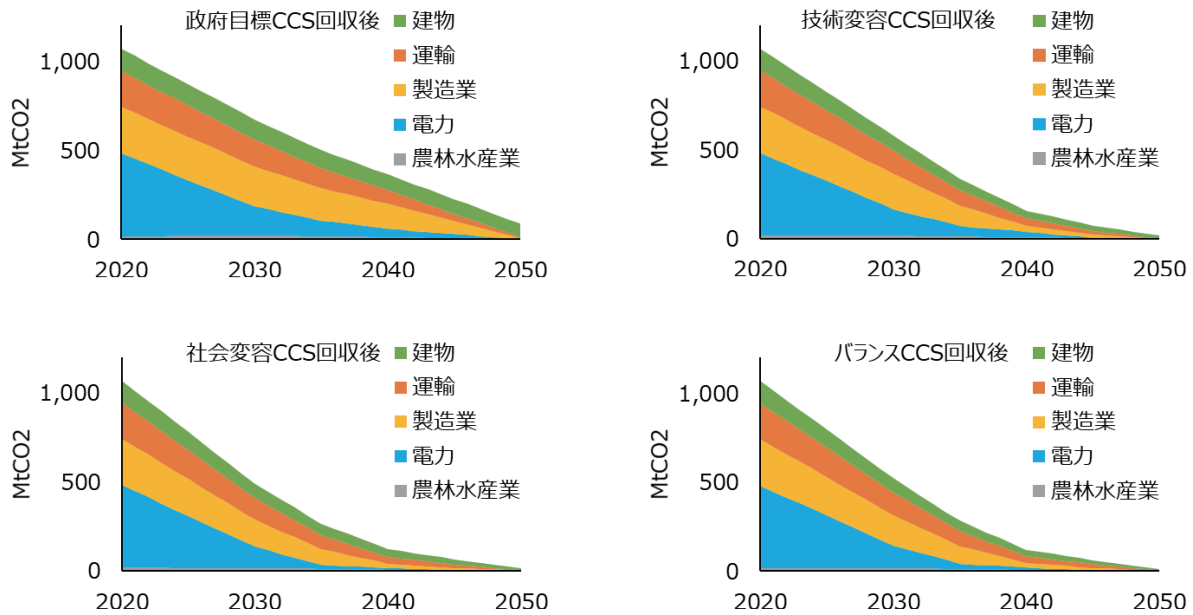


図 5-1. シナリオ別部門別のエネルギー起源CO₂排出量 (CCSによるCO₂回収後) 推計結果

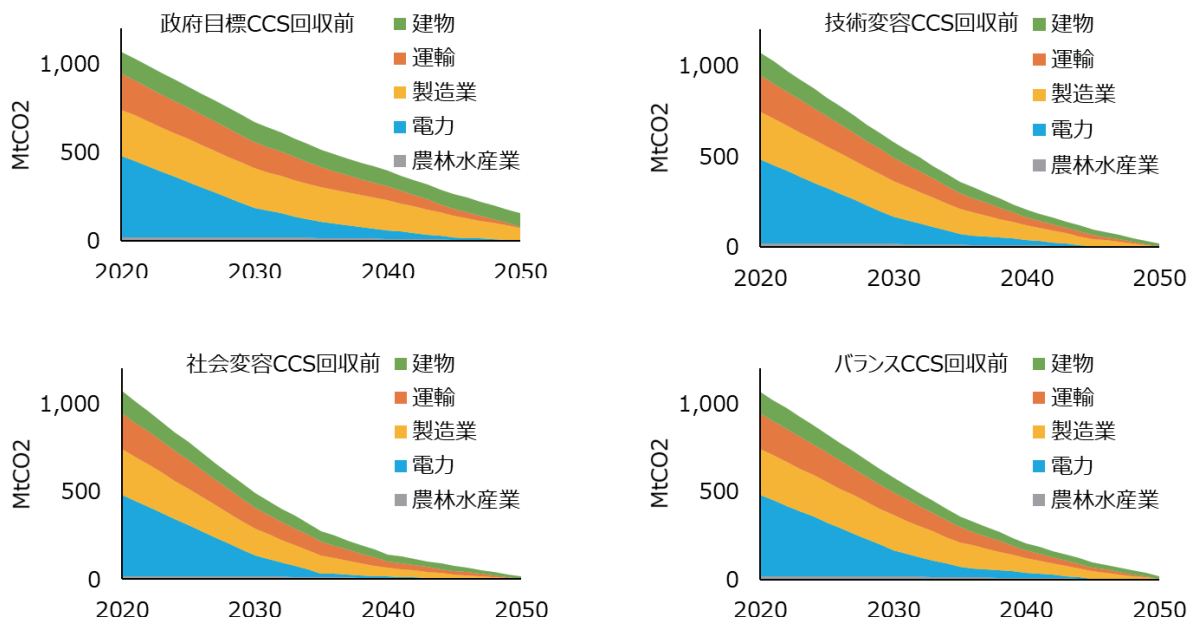


図 5-2. シナリオ別部門別のエネルギー起源CO₂排出量 (CCSによるCO₂回収前) 推計結果

各シナリオの2020年から2050年の累積エネルギー起源CO₂排出量を表 5-1に示す。第1章3節で定義したベンチマークとしての累積エネルギー起源CO₂排出量は、12.7GtCO₂排出量である。政府目標シナリオでは、CCS回収前及びCCS回収後の累積エネルギー起源CO₂排出量ともにベンチマークの値を超えた。技術変革シナリオでは、CCS回収前の累積エネルギー起源CO₂排出量がベンチマークの値を超え、CCS回収後の累積エネルギー起源CO₂排出量はベンチマークと同程度となった。社会変容シナリオとバランスシナリオでは、CCS回収前及びCCS回収後の累積エネルギー起源CO₂排出量はともに、ベンチマークの値以下となった。

表 5-1. 2020年から2050年の累積エネルギー起源CO₂排出量（単位GtCO₂）

CCS の条件	政府目標	技術変革	社会変容	バランス
CCS 回収前	16.9	13.1	11.7	12.2
CCS 回収後	16.3	12.7	11.4	11.7

次に、シナリオ別のGHG排出量（森林吸収は含まない）の推計結果と第1章3節で定義した1.5°C目標の達成に向けた野心度引き上げの累積GHG排出量のベンチマーク（2020年から2050年までの累積GHG排出可能量が14.3GtCO₂）を図 5-3に示す。GHG排出量は、エネルギー起源CO₂排出量に加えて、非エネルギー起源CO₂と参考資料1に記す方法で推計されたCO₂以外のGHGの排出量（Fガス、N₂O、CH₄）及びネガティブエミッション技術によるCO₂回収量に基づいて推計した。CO₂以外のGHG排出量の削減率について、政府目標シナリオとそれ以外のシナリオで差異がある想定としている。一方、技術変容・社会変容・バランス・バランスサブシナリオの間では、CO₂以外のGHG排出量の削減率に差異はなく、累積GHG排出量をベンチマーク値に抑えるためのCO₂回収量に差異がある。

政府目標シナリオのGHG排出量は、2020年から2050年までおよそ直線的に下がり、2050年にGHG排出量がゼロとなる排出経路をとる。その結果、政府目標シナリオのGHG排出量の経路は、本レポートで1.5°C目標野心度引き上げのベンチマークと設定した排出経路よりも上側に位置する。また、2020年から2050年まで累積GHG排出量が18.8GtCO₂と推計され、累積GHG排出量のそれぞれのベンチマークである14.3GtCO₂を超過した。そのため、図 5-4で示される累積GHG排出量の経路も、2030年頃からベンチマークの排出経路よりも上方を推移する。これらの結果より、政府目標シナリオは、累積GHG排出量が、ベンチマークとして設定した水準を超過するリスクが非常に高い。

技術変容シナリオの累積GHG排出経路は、2030年から前後5年間の値がベンチマークと設定した排出経路よりも上側に位置し、2038年頃からベンチマークと設定した排出経路よりも下側に位置する。また、図 5-4で示される累積GHG排出量の経路も2040年頃には14.3GtCO₂に達し、2045年頃にはベンチマークを超過する14.4GtCO₂まで達し、2050年に14.3GtCO₂になる。これは、2020年から2050年までの累積GHG排出量を14.3GtCO₂以内にするために、2045年以降に平均で142MtCO₂/年の回収を可能とするネガティブエミッション技術が導入されるためである。142MtCO₂/年の回収量は、「CCS 長期ロードマップ検討会最終とりまとめ¹⁴⁸」において、日本のCO₂貯留量想定を年間約120MtCO₂から240MtCO₂としている中で、その下限値を超える水準である。CO₂の地下貯留は、技術や貯留場所、貯留後のCO₂漏洩に関わるモニタリング体制などはまだ確立しておらず、普及に不確実性がある。そのため技術変容シナリオの累積GHG排出量は、ベンチマークである14.3GtCO₂に収まらないリスクがある。また、表 5-1で示した通り、CCS回収前の累積エネルギー起源CO₂排出量もベンチマークの値を超えた。これらの結果より、技術変容シナリオは、ネガティブエミッション技術やCCSに依存する（図 5-5に示すとおり、年間100MtCO₂以上）ことで、野心度を引き上げられることが示唆されるが、相対的にリスクの高いシナリオであるといえる。

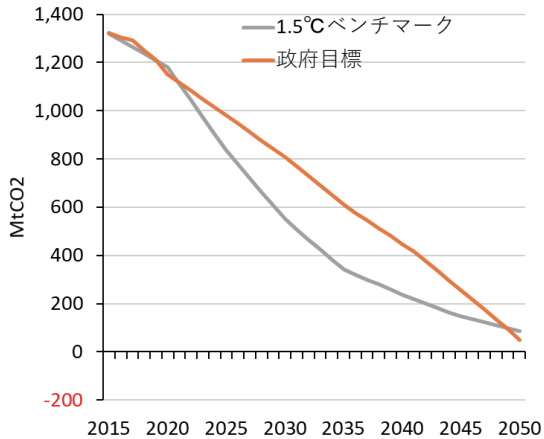
社会変容シナリオは、2020年から2050年までのGHG排出経路について、2030年から前後5年間のGHG排出量がベンチマークと設定した排出経路より少し上側に位置するが、2038年頃からベンチマークと設定した排出経路よりも下側をたどることで、2020年から2050年までの累積GHG排出量削減が強14.3GtCO₂に収まった。図 5-4で示される累積GHG排出量についてもベンチマークに近い経路をたどり、2050年に14.3GtCO₂となる。また、表 5-1で示した通り、CCS回収前の累積エネルギー起源CO₂排出量もベンチマーク以下となった。従って、社会変容シナリオは、日本のCO₂貯留量想定量の下限値である120MtCO₂を超えることなく（図 5-5に示すとおり、34MtCO₂程度）、野心度を引き上げるシナリオである。2030年のGHG削減率が2013年比59%削減、2035年は2019年比72%削減となった。

バランスシナリオの2020年から2050年までのGHG排出量排出経路とベンチマークと設定した排出経路との関係性は、社会変容シナリオとおよそ同じとなった。図 5-4で示される累積GHG排出量については、2045年に14.3GtCO₂に達する。2045年以降は、平均で62MtCO₂/年のCO₂をネガティブエミッション技術で回収して、累積GHG排出量を14.3GtCO₂にほぼ保ちながら2050年に達する。また、表 5-1で示した通り、CCS回収前の累積エネルギー起源CO₂排出量もベンチマーク以下となった。

従って、バランスシナリオも、日本のCO₂貯留量想定量の下限値である120MtCO₂を超えることなく（図 5-5に示すとおり、70MtCO₂程度）、野心度を引き上げるシナリオである。2030年のGHG削減率が2013年比57%削減、2035年は2019年比71%削減となった。

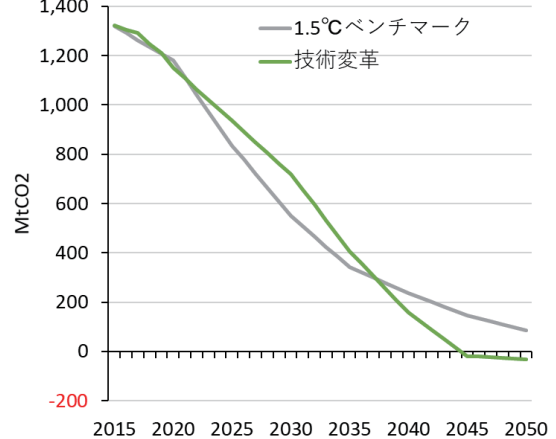
政府目標：

累積 GHG 排出量 19.3GtCO₂ (2020-2050)



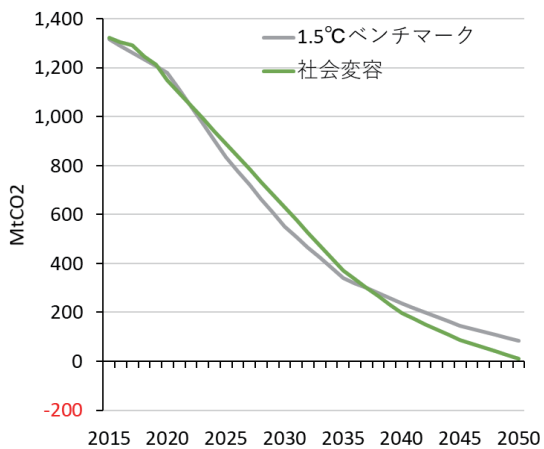
技術変容：

累積 GHG 排出量 14.3GtCO₂ (2020-2050)



社会変容：

累積 GHG 排出量 14.3GtCO₂ (2020-2050)



バランス：

累積 GHG 排出量 14.3GtCO₂ (2020-2050)

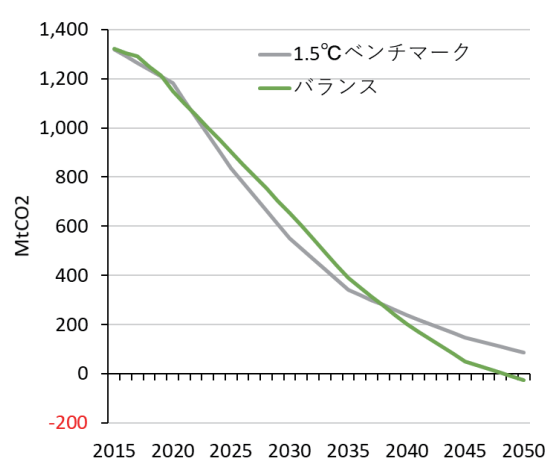


図 5-3. シナリオ別のGHG排出量推計結果

表 5-2. シナリオ別の主要年のGHG削減率

	2030年 (2013年比)	2035年 (2013年比)	2035年 (2019年比)
政府目標シナリオ	46% 削減	60% 削減	52% 削減
技術変容シナリオ	52% 削減	73% 削減	67% 削減
バランスシナリオ	57% 削減	76% 削減	71% 削減
社会変容シナリオ	59% 削減	77% 削減	72% 削減

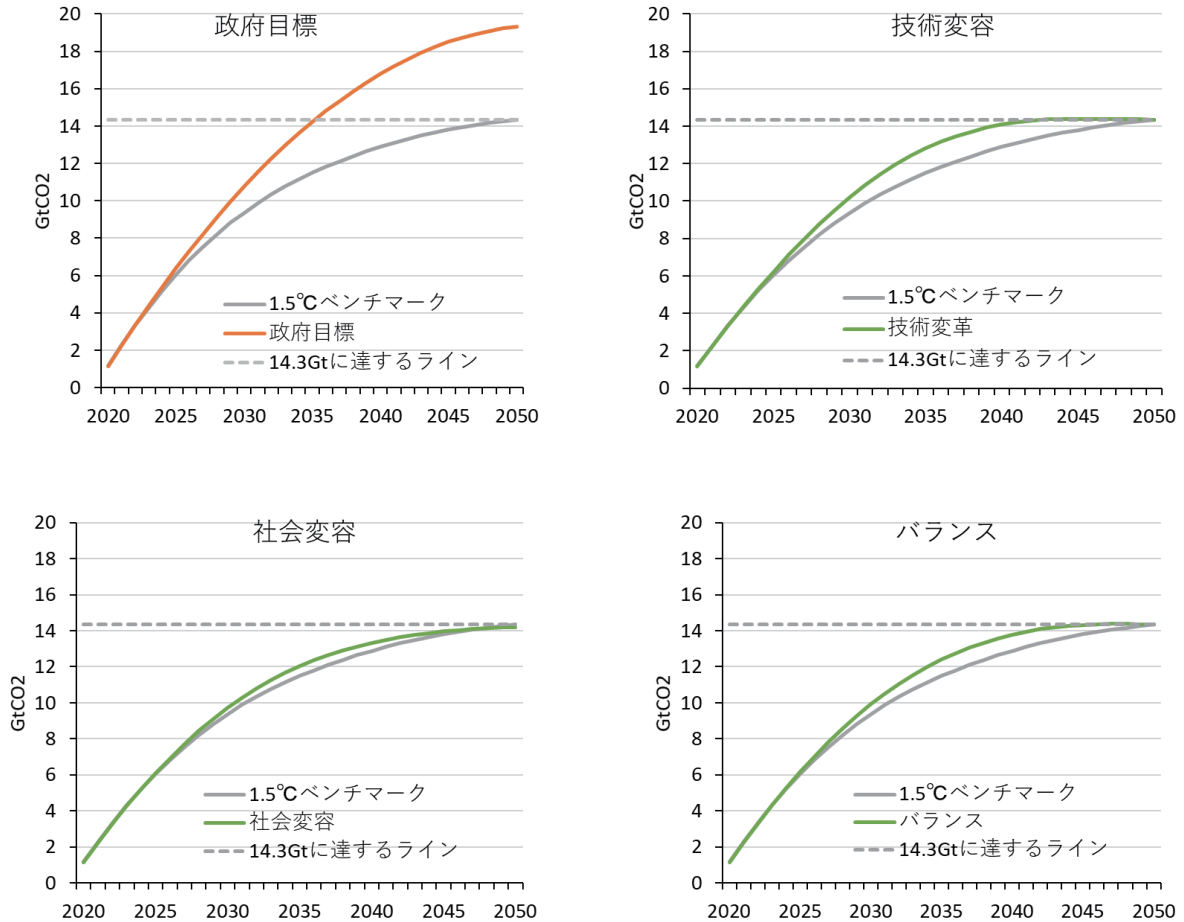
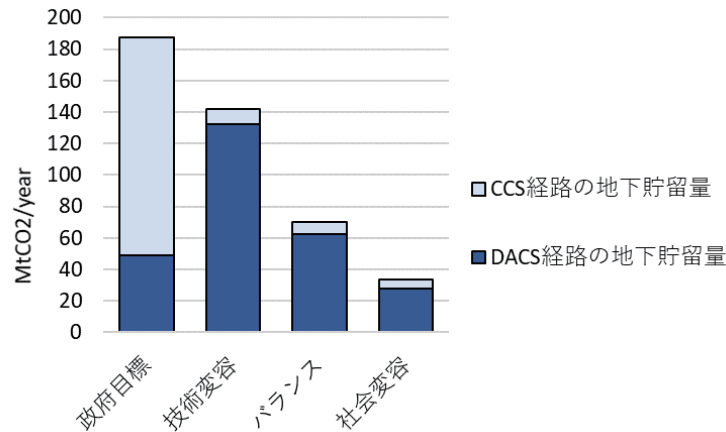


図 5-4. シナリオ別の累積GHG排出量推計結果

図 5-5 に、2050 年時点において各シナリオで必要となる 1 年あたりの CO₂ 地下貯留量を示した。技術変容シナリオ、バランスシナリオ、社会変容シナリオにおいて、CCS よりも DACS の貯留量が多い理由は、これらのシナリオでは電化・水素化を促進する想定をおくために化石燃料利用のフェーズアウトが早いためである。また、DACs であれば必ずしも日本国内の貯留地を使わなくても、海外でプロジェクトを実施し、オフセットなどのスキームを通じて日本の CO₂ 吸収量として計上できる可能性も考えられる。

これまでの日本国内の CO₂ 貯留実績は、約 0.1 MtCO₂/年⁵ であり、いずれの場合でも、実績を大幅に上回る CO₂ 回収・貯留が必要となっている。CCS や DACs の技術的・コスト的不定性の大きさを考えると、できるだけ CO₂ 回収・貯留技術に依存しないシナリオを選択することが望ましい。

5 苫小牧 CCS 実証試験での 2016 年-2019 年の実績²⁷⁶

図 5-5. 各シナリオに必要なタイプ別CO₂地下貯留量

3. エネルギー自給率

各シナリオのエネルギー自給率について、図 5-6に推計結果を示す。2050年の政府目標シナリオ、技術変容シナリオ、バランスシナリオ、社会変容シナリオのエネルギー自給率は、現状の9%（原子力を含めて11%）に対して、それぞれ26%（37%）、68%（77%）、85%（97%）、79%（94%）となった。いずれのシナリオにおいても自給率は改善するが、シナリオ間でその幅には大きな隔りがある。特にバランスシナリオと社会変容シナリオでは、原子力を含めるとほぼ全てのエネルギーを国内で自給できる見通しが描かれている。自給率の向上に最も大きく寄与しているのは再生可能エネルギーの大幅な拡大である。

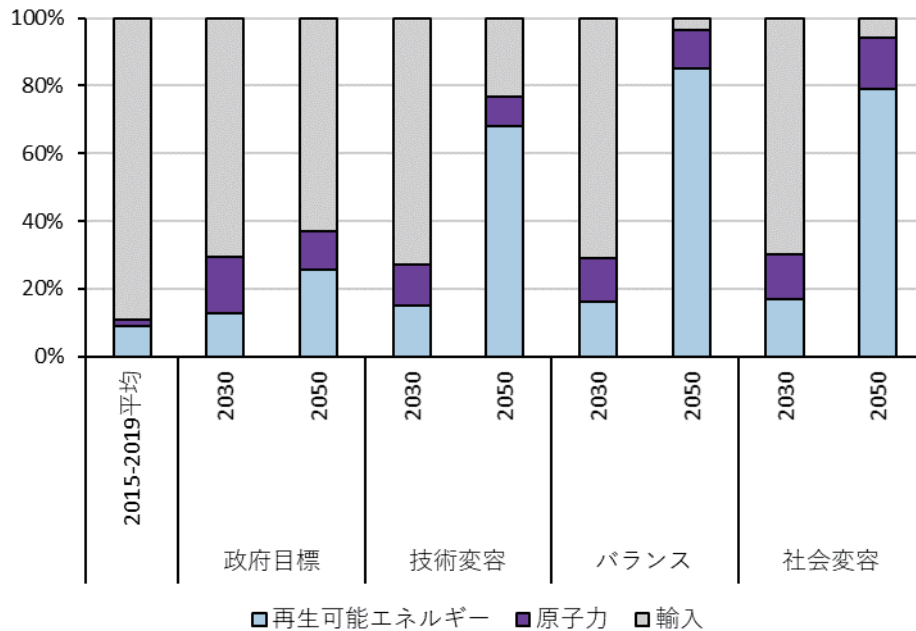


図 5-6. 各シナリオのエネルギー自給率の推移

4. コスト

a. 電力コスト

本レポートで検討した5つのシナリオについて、再生可能エネルギーの初期投資費用が2030年以降横ばいとなり高止まりする「再エネ単価高位ケース」と累積導入量に応じて低減していく「再エネ単価低位ケース」、燃料価格が2022年度の水準で高止まりする「燃料費高位ケース」とIEAによる価格見通し（WEO2021 STEPSシナリオ¹⁴⁹）程度で推移する「燃料費低位ケース」を設定し、それぞれについて電力平均費用の分析を行った。（推計方法、想定内容の詳細は参考資料①を参照）

図 5-7に燃料費低位・再エネ単価低位のケースにおける各シナリオの電力コストの推計結果を示す。セクターカップリングが進んだ電力システムでは、電力と水素製造・モビリティなど別のシステムとで共有しているコストが存在し、何を電力コストに含めるべきであるかは自明とは言えない。下図では、水電解装置・洋上風力送電線（洋上風力発電の大半は水素製造に使われているため）・EV蓄電池のコストが全て電力コストに上乗せされると仮定したうえで、これらを破線で示している。水電解装置のコストは水素製造費用にも含まれており、EV蓄電池のコストをモビリティ利用者ではなく電力利用者が全額負担するということは考えにくいいため、現実的にはこれらの破線部のコストの一部のみが電力コストに算入されると考えられる。

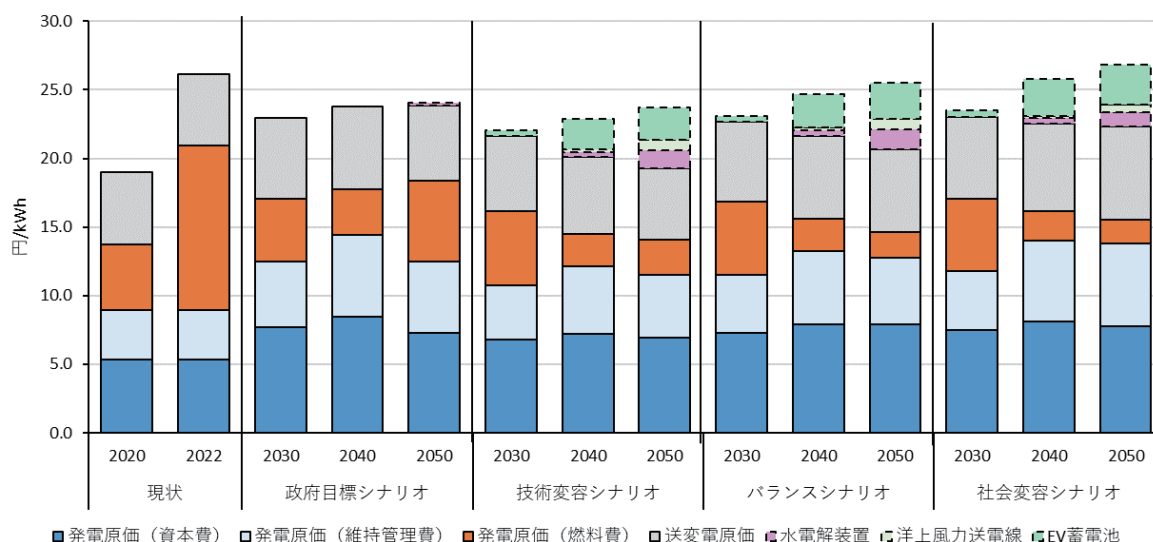


図 5-7. 燃料費低位・再エネ単価低位ケースにおける電力コスト推計結果

2040年及び2050年の技術変容・バランス・社会変容シナリオは、政府目標シナリオに比べて再生可能エネルギーの割合が大きいため、資本費や送変電費用が大幅に増加する一方で燃料費が減少していく点に特徴がある。2030年の技術変容・バランス・社会変容シナリオにおいて、政府目標シナリオよりも燃料費が大きくなっているのは、電源構成において石炭から比較的燃料費の高いガス火力へのシフトが進むことが想定されているためである。なお、本結果にはカーボンプライシングなど社会的費用・政策経費は含まれていない。

2050年におけるバランスシナリオの電力コストは20.6～25.5円/kWhとなり、水素・モビリティと共有しているコストをすべて電力コストに含めても、燃料費高騰の影響で電力コストが上昇している2022年の26.2円/kWhよりも低い、という結果となった。また、2050年における政府目標シナリオの電力コスト23.8～24.0円/kWhであり、2022年の電力コストよりは下がるものの、2020年よりは2-3割ほど高くなる結果となっている。バランスシナリオの電力コストは、2022年の電力コストよりも低く、また、水素・モビリティと共有しているコストの配分次第で、2050年における政府目標シナリオの電力コストよりも安く抑えられる可能性はある。ただし、これらは今後の市場設計やビジネスモデルに拠る部分が大いと考えられる。

2050年における社会変容シナリオの電力コストは他のシナリオと比較して高い水準にある。これは、電力需要が大幅に減る一方、現状の送変電設備及びその維持費用に加えて系統増強分の費用の増加を見込んでおり、1kWhあたりの送変電原価が高くなっていることが要因である。ただし、今回の分析では、現状の送変電設備やその維持費用のうち不要になる部分を精査しておらず、その費用減を織り込んでいないため、やや過大な推計になっている可能性がある点に留意が必要である。その場合でも、2022年の電力コストとほぼ同じ水準となっている。

以上を踏まえると、再生可能エネルギーが大量に導入され、再生可能エネルギーの発電コストが大幅に下がることや、再生可能エネルギーの出力変動に対して、電力システムの運用方法の変革を行い、水電解装置・水素専焼火力・定置蓄電池・電気自動車のバッテリーなどを総動員して効率的に電力システムの運用を行うことができれば、電力コストを現状よりも低い水準に抑えつつ、排出量削減の野心を引き上げられる可能性は十分にあると考えられる。

一方、仮に、経済性の高い地点が開発され尽くし、再生可能エネルギーのコスト低下が思うように進まなかった場合でも、手頃な価格で電力供給が行えなければならない。そこで、図 5-8 に再エネ単価が高位のケースの分析結果を示す。

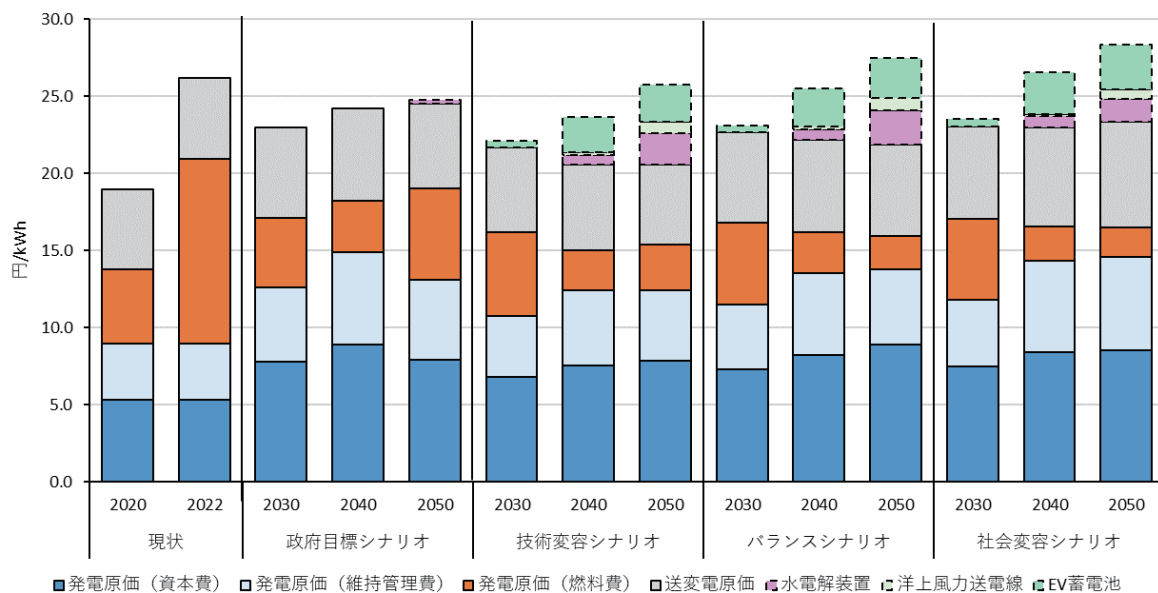


図 5-8. 燃料費低位・再エネ単価高位ケースにおける電力コスト推計結果

再エネ単価高位ケースでは、2050年におけるバランスシナリオの電力コストが21.9～27.5円/kWhとなり、低位ケースよりも6～8%上昇した。一方、2050年における政府目標シナリオは24.5～24.8円/kWhとなり、低位ケースから3%の上昇となった。バランスシナリオでは再生可能エネルギーの割合が大きいため再エネ単価の増加による感度が高いことが理解できる。しかし、この場合でも、政府目標シナリオのコスト水準は、バランスシナリオのコストの幅の中に収まっていることから、将来の電力コストそのものは、再エネ単価による感度よりも、市場設計やビジネスモデルによって大きく左右される可能性のほうが高いと考えられる。

さらに、全てのシナリオについて、燃料費が高位・低位のケース、再エネ単価が高位・低位のケースの組み合わせ（5シナリオ×4パターン）で電力コストを推計したうえで、それらの平均値と最大・最小値をシナリオごとに比較した。政府目標シナリオ以外の4シナリオは殆ど同じ傾向を示しているため、バランスシナリオと政府シナリオの推計結果についてのみ、図 5-9 に示す。なお、ここではEV蓄電池の半分と洋上風力送電線を電力コストとして折り込み、水電解装置のコストは電力コストには含めていない。

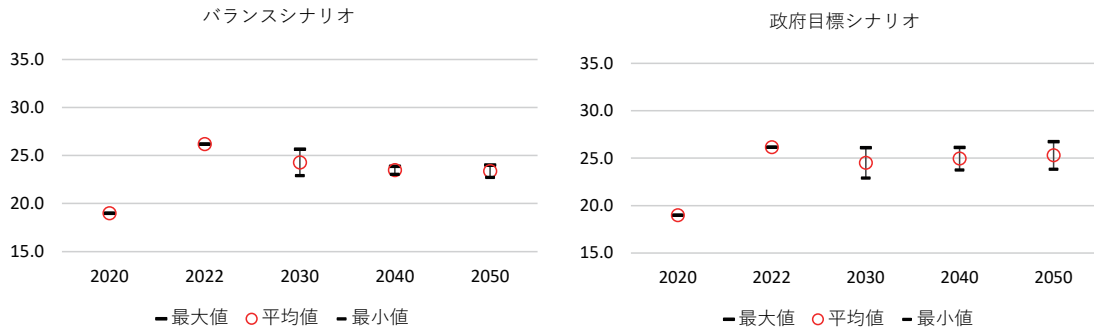


図 5-9. バランスシナリオと政府目標シナリオで想定されるコストの変動幅

政府目標シナリオは化石燃料の消費量が多いため、輸入燃料の価格によって電力コストが左右され、ボラティリティが高く、最大値と最小値で3円/kWh程度の開きがある。一方で、バランスシナリオにおいては2030年時点では一定のボラティリティが存在するものの、長期的にはその変動幅は相対的に小さい。もちろん、この結果は、シナリオ想定において高位ケースと低位ケースで燃料価格や再エネ単価にどの程度差をつけるかに依存している点に留意が必要であるが、国際情勢に価格が左右される化石燃料に依存し続けることで、より大きなリスクを背負い続けることになることは確認できる。

なお、本検討では系統慣性の確保のための対策費用などは分析対象外としており、変動性再エネの比率が高いシナリオではコスト増加要因となる。電力広域的運用推進機関によると、同期調相機の設置等の慣性力対策の費用は、再エネ比率が5～6割のケースで50億～130億円/年（0.01円/kWh）程度と推計されている¹⁵⁰。更に再エネ比率が高いケースについては推計が行われておらず、今後精査が必要である。しかし仮に大幅に対策費用が増加した場合でも、結果を大きく左右するほどの影響は持たないと考えられる。

b. 水素コスト

次に、本レポートで検討した4つのシナリオについて、水電解の効率や海外での再エネ電力コスト、輸送コストが2030年目標から横ばいとなる「コスト高位ケース」と、水電解の効率が向上し、海外での再エネ電力が2円/kWh程度まで低下し、輸送コストが2030年の2/3となる「コスト低位ケース」を設定し、水素供給コスト（発電所など需要地点までの供給を行う費用）を推計した。なお、いずれのケースにおいても、前章で述べた電力需給シミュレーションの結果、国内グリーン水素の水電解は主に洋上風力の余剰電力で行われるため、水電解に使用する電力の単価は洋上風力発電の発電原価（再エネ単価低位ケース）とした。（推計方法、想定内容の詳細は参考資料①を参照）

バランスシナリオの2050年における水素供給コストを図 5-10に示す。なお、グリーン水素の供給コストには、水電解装置のコストや電源のコストが含まれている。

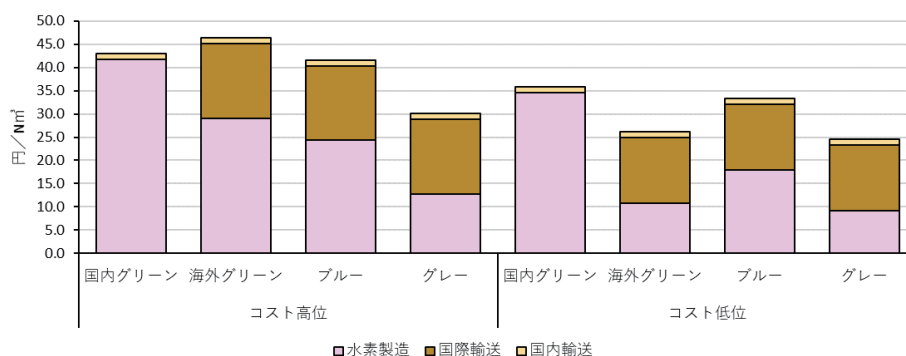


図 5-10. バランスシナリオの2050年における水素供給コスト

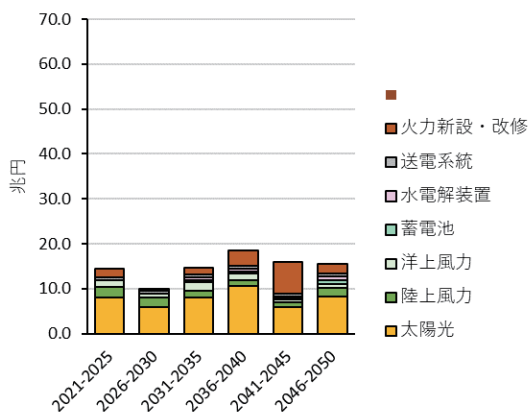
コスト高位ケースにおいては、国内グリーン水素は海外ブルー水素よりも3%高く、低位ケースにおいては7%高い、という結果となった。国産であることとグリーンであることを踏まえると、十分に競争力を持ちうる水準であると考えられる。

国内グリーン水素は洋上風力の発電原価で水電解が行われることを想定しており、現状の効率のままでは43円/Nm³程度、高効率化が進めば36円/Nm³程度まで製造コストが低下すると考えられる。海外グリーン水素は、5円/kWhの再生電力が調達できる前提では29円/Nm³程度の製造コストとなるが、液化水素として国際輸送を行う費用を加味すれば需要家への供給コストは国内グリーン水素と変わらない水準となる。一方、高効率化に加えて2円/kWh程度の再生電力が調達できると想定し、さらに国際輸送についても技術革新が進むと仮定すれば、海外ブルー水素よりも安い水準となることも想定はしうる。ブルー水素については、2030年以降技術革新が進まなければ42円/Nm³程度の供給コストと考えられ、技術革新が進めば33円/Nm³程度まで低下しうると考えられる。現在政府が目標として掲げるブルー水素の供給コスト20円/Nm³（CIF価格であり揚地・国内輸送費を含まない）は、本分析ではグレー水素の低位ケースにおけるコスト水準よりも低く、目標を達成するためには、CO₂回収費用をEoR（石油増進回収法）・CO₂販売などの別事業で相殺するか、本分析が想定した低位ケース以上の設備の高効率化やコストダウンが必要であると考えられる。

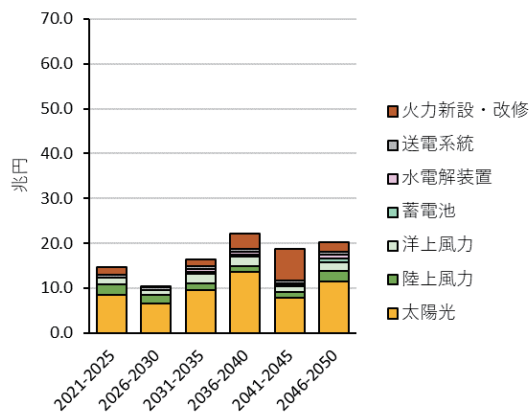
5. 国内投資額

図 5-11に、各シナリオの2050年までの5ヵ年ごとの投資額について、再生コスト高位ケース及び再生コスト低位ケースの推計を行った結果を示す。技術変容・バランス・社会変容シナリオは、想定する新規設備導入容量の違いにより差はあるものの、投資額の大半を太陽光・風力が占める結果となっている。そのため、2030年以降再生の初期投資単価が下がらない高位ケースと、累積導入量にしたがって低下する低位ケースでは、投資額に25%ほどの開きが生じている。一方、政府目標シナリオにおける投資額は、これらのシナリオとは大きく異なり、総投資額はその半分以下の水準になっており、その内訳も火力新設・改修が大きい。これは、両者のシナリオでは想定する電源構成が異なることに加えて、前者のシナリオでは、水素を再生の余剰電力を使って国内で製造することを想定している一方、後者のシナリオでは海外からの水素輸入を想定しているためである。前節で示した分析結果では、電力コスト及び水素コストの水準に両者で大きな差異がないことから、このことは、需要家が電力及び水素の調達のために支払った資金の多くが、国内への設備投資ではなく燃料費として海外に流出していることを示唆していると考えられる。

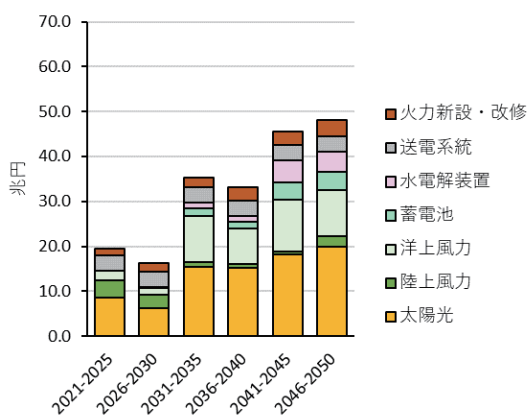
政府目標シナリオ・低位ケース



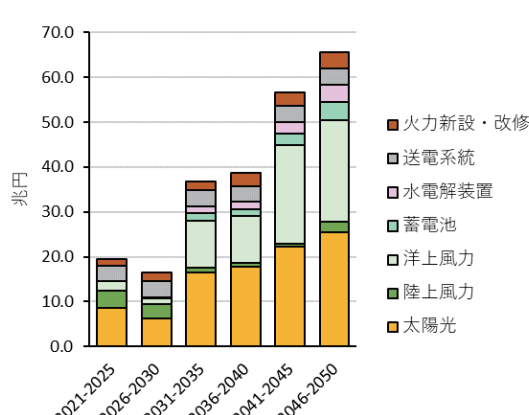
政府目標シナリオ・高位ケース



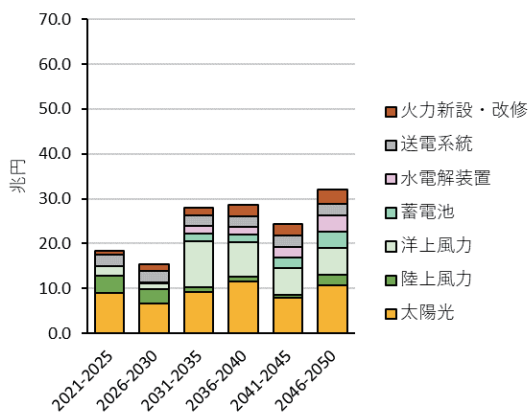
技術変容シナリオ／バランスシナリオ・低位ケース



技術変容シナリオ／バランスシナリオ・高位ケース



社会変容シナリオ・低位ケース



社会変容シナリオ・高位ケース

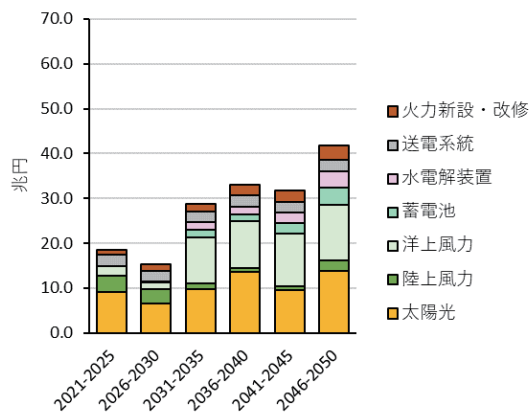


図 5-11. 各シナリオにおける5ヵ年ごとの投資額

上記で示した投資額を割引率3%で現在価値に換算し、2021年～2050年までの累積投資額を求めると、政府目標シナリオでは56-63兆円、技術変容シナリオ・バランスシナリオでは116-139兆円、社会変容シナリオでは89-103兆円となった。

これと比較するため、図 5-12に日本における2011年以降の化石燃料輸入額の推移を示す。

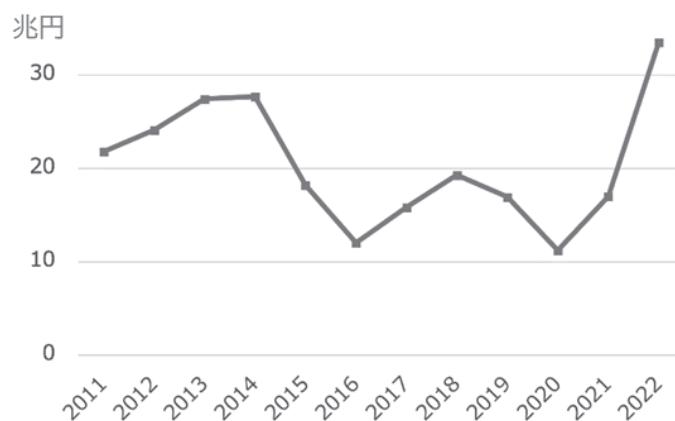


図 5-12. 日本における化石燃料の輸入額の推移

日本は2011年以降の平均で年間約20兆円の化石燃料を輸入しており、2022年度は33.5兆円に達している。本レポートで想定している電力・水素供給に関わるシナリオを実現するために必要な国内投資額は、技術変容・バランスシナリオでも約6-7年分の化石燃料輸入額で賄える水準である。バランスシナリオの投資規模は、2021~2050年の平均で、低位ケースでは3.9兆円/年、高位ケースでは、4.6兆円/年であり、年間の化石燃料輸入額を大幅に下回ることがわかる。

なお、IEAが発表した「World Energy Investment 2023」¹⁵¹では、再エネへの投資額は、2023年には6,500億ドル（約90兆円）であり、前年比11%増、過去5年間では75%増となっている。また、EVも2018年以降800%以上増加し、今年は約1,300億ドル（約18兆円）に達している。つまり、世界全体では、2023年の単年で、100兆円以上の投資が再エネと蓄電池になされており、これらの投資額は増加傾向にある。一方、IEAによる1.5°C達成に向けたロードマップ¹¹³では「新たな石炭・石油・天然ガスへの投資は不要」と強調されており、今後も資金の流れが再エネや蓄電池へと向かっていく可能性が高い。

バランスシナリオが想定するエネルギー供給の姿が実現するためには、現状において日本が化石燃料の輸入に対して支払っている資金や国際的な投資を、国内の再生可能エネルギー開発のための投資にいかに向けさせるか、また、そのために如何に市場環境を整備できるか、が鍵となると考えられる。

6. まとめ

本レポートで検討した4つのシナリオのうち、2020年以降の累積エネルギー起源CO₂排出量と累積GHG排出量をベンチマーク（14.3Gt）以下に抑制しつつ、ネガティブエミッション技術やCCSへの依存リスクを抑えられる（日本のCO₂貯留量想定量の下限值である120MtCO₂を超えることがない）シナリオは、バランスシナリオと社会変容シナリオであった。

本章での分析結果からは、バランスシナリオと社会変容シナリオのいずれも、エネルギー自給率が現状よりも飛躍的に高くなる。一方、コストの観点からは、バランスシナリオが社会変容シナリオよりも優位である可能性が高い。現状から社会が大きく変容することの不確実性や政策介入の難しさを鑑みても、バランスシナリオのほうが社会変容シナリオよりも社会からの受容可能性が高い可能性がある。

また、バランスシナリオは、コストの観点からも政府目標シナリオと遜色ない水準となり得るが、政府目標シナリオの2倍以上の国内への投資が行われる必要がある。それは日本経済にとってのチャンスでもあるものの、一方でシナリオ実現のボトルネックともなり得る。このため、政府が早期に変革の方向性を示し、投資家からの予見性を高めることが不可欠であると考えられる。

次章では、このバランスシナリオについて、現状の課題及び過去のトレンドをもとに、その想定内容が実現するとすればどのようなアクション（政策介入、行動変容）が必要と考えられるか検討し、そのアクションプランを整理することをしたい。

第6章

1.5°Cロードマップ

1. 本章の概要

これまで、早期に大幅なGHG排出削減を実現しうるシナリオについて分析を行ってきた。本レポートにおいて設定したシナリオの中では「バランスシナリオ」が累積排出量のベンチマークを満たした上で、社会的・経済的な便益ももたらしうるシナリオであることを示した。本章では、はじめに、どのような想定内容がいつ実現すればこの「バランスシナリオ」を達成するのか、主要なマイルストーンを示す。次に、それぞれのマイルストーンを実現するために必要な政策や行動変容につなげるアクションプランを整理する。

なお、それぞれのアクションプランは各論として詰めるべき論点が多数存在し、本レポートでその全てを扱うことはできない。ここで示すアクションプランは、主要論点の整理をしたものであり、今後社会における建設的な議論の土台となることを意図するものである。

2. 主なマイルストーン

図 6-1にバランスシナリオにおいて想定されている主要なマイルストーンを5年ごとの時系列で示す。社会経済全体でのマイルストーンとあわせて、建物・運輸・製造業・電力の各分野における主なマイルストーンが、それぞれのエネルギー起源CO₂排出量の推移とあわせて示されている。

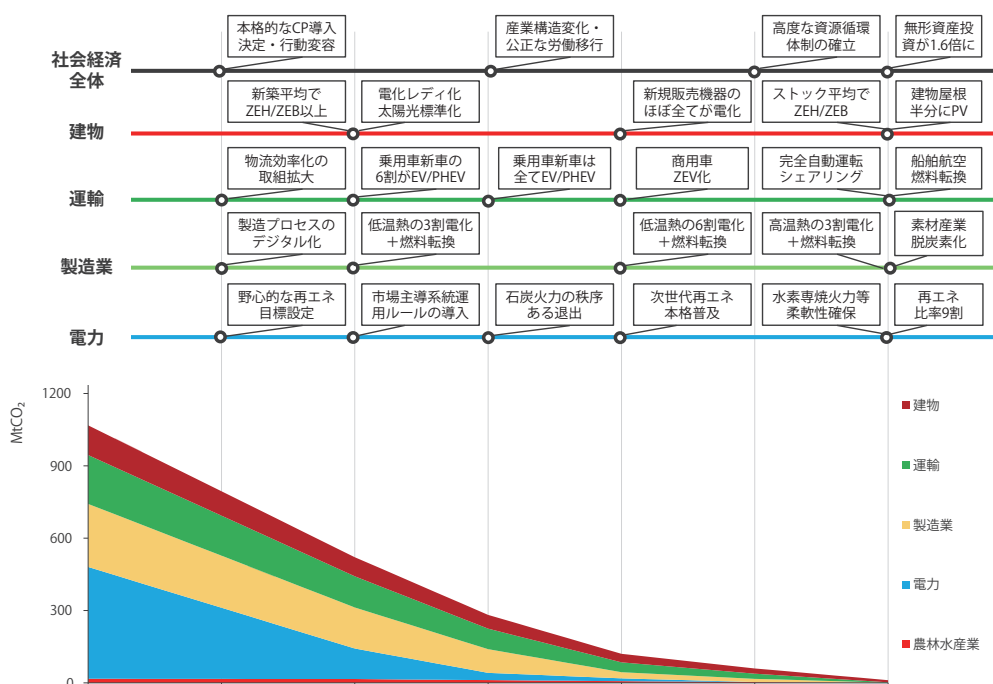


図 6-1. 1.5°Cロードマップの主要なマイルストーン

これらのマイルストーンの達成に必要と考えられるアクションを、次節では分野ごとに整理する。

3. 分野ごとのアクションプラン

(1) 社会経済全体

第5章でも論じたように、早期の排出削減のためには、一定の社会経済の変革が不可欠である。より具体的には、脱炭素に寄与する革新的なエネルギー技術の将来的な普及を待たずに、デジタル化や素材利用の変化などを含め、すでに商用化された技術をベースに脱炭素化を進めつつ生産性と付加価値の向上を推し進める戦略を立て、実行に移していかなければならない。しかもそれは、社会全体の便益を高めるものでなければならない。

この点については既に多くの研究蓄積が存在しており、多くの専門家が、積極的な気候変動対策と産業構造の転換とが、日本経済の課題克服にとって不可欠であり、社会に大きな便益をもたらすと主張している。中でも諸富¹⁴は、自身が「資本主義の非物質主義的転回」と呼ぶ、デジタル化を筆頭とした資本主義の大きな構造転換の中で、不平等や格差を縮小させながら、付加価値を伸ばして労働生産性・炭素生産性を引き上げて経済発展と脱炭素化を実現するための戦略の骨格を端的に提示している。すなわち、まず、積極的労働市場政策の拡充により職業能力開発・教育訓練などの人的資本への投資を大幅に増加させること、さらに、最低賃金・平均賃金の引き上げやカーボンプライシングの導入により、常に労働生産性や炭素生産性の低い企業が淘汰され、生産性の高い企業に労働力が移動していくような仕組みを市場に内包させること、また、その前提として失業・家族・住宅手当の充実により、労働者を保護し誰もが積極的にリスクを取れる環境を整備すること、である。

上記の戦略パッケージのうちカーボンプライシングについては、2023年5月に成立した「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律（GX推進法）」により、2028年度から化石燃料の輸入事業者等に対して炭素量に比例する賦課金を課すこと、2033年度から発電事業者に対してCO₂の排出枠を一部有償で割り当てたうえで排出権取引制度を導入することが決定されている。しかしながら、これらの制度開始までの期間は企業による自主的な取り組みに委ねることとされているほか、将来的に炭素に対して課せられる賦課金の水準も明らかにはされていないものの、エネルギーに関する公的負担の総額を超えない範囲で導入するとの規定がある。民間機関による複数の試算^{152,153}によると、その水準は2,000円/tCO₂程度となる見通しであり、国際エネルギー機関（IEA）が2050年までにカーボンニュートラルを達成するシナリオ¹⁵⁴において想定している水準（全ての先進国で2030年に130ドル/tCO₂、2050年に250ドル/tCO₂）とは大きな隔りがある。本制度は現在政府が想定するロードマップの実現に必要な支出額を賄うための財源を確保することに主眼があると考えられ、価格効果によって社会全体に行動変容を生み出し、産業構造の転換や炭素生産性の低い企業の新陳代謝を促すことを意図するものではないと考えられる。

一方、本レポートで繰り返し述べてきたように、1.5°C目標に整合するためには、社会全体に行動変容を生み出し、産業構造の転換を促す必要がある。とりわけ、本レポートにおいて社会経済構造の変化の重要な要素として想定したデジタル化の促進や無形資産への投資増に対しても、カーボンプライシングが有効な手立てとなりうる。また、ヒアリングを行った複数の企業からは、脱炭素化や循環資源利用といった取り組みが正しく評価される市場環境の重要性が繰り返し指摘され、その筆頭として十分な水準でのカーボンプライシングの導入が挙げられていた。したがって、カーボンプライシングは、これらの目的のために効果的な水準で、かつ、市場参加者が共通して遵守すべきルールとして導入されなければならない。GX推進法によって定められた枠組みを活用するとすれば、2028年度から化石燃料に対して課せられる賦課金水準を国際エネルギー機関が想定する水準と同程度とすることを政府が早急に決定・周知し、自主的な取り組みに委ねられている2027年度までの期間を、全ての社会構成員が実質的な行動変容に向けた試行的な取組や検証を行う期間として有効に活用すべきと考える。また、賦課金によって電力価格が上昇し電化への取り組みが抑制されることがないように、発電セクター全体での排出可能量を設定するなど、発電事業者に対して再生可能エネルギーへの転換を早期に進めるインセンティブとなるような制度とすることが重要と考える。

また、上記の指摘とも通じるが、脱炭素化の促進による失業の増加などの新たな社会課題を防ぐ「公正な移行（Just Transition）」を具現化するためにも、人的資本への投資や労働者の企業間移動促進と保護を車の両輪のように推し進めていかなければならない¹⁵⁵。欧州連合（EU）が2019年に発表した「欧州グリーンディール」にはこうした考え方に基づく具体的

な施策が多数盛り込まれており、日本でも同様の計画策定に向けた議論を早期に開始しなければならないと考える。

さらに、社会経済全体の変革を促すアクションに加えて、個別の分野におけるアクションも重要である。各分野に関するロードマップについて既に詳細に議論が行われているものも多いため適宜参照していただきたいが、以下では要点のみに絞ってアクションの例を紹介する。なお、本レポートにおける検討の趣旨は、こうした各分野における課題解決に向けた変革の取り組みと、脱炭素化の取り組みとを相乗効果を生み出すように推進すべく、脱炭素化に向けたロードマップの中にこれらを位置づけることであって、各分野におけるアクションプランの妥当性をつぶさに検証するものではない点に留意していただきたい。

まず、デジタル化に関して、企業は無形資産への投資を拡大させ、デジタル時代に即したビジネスモデルへと変革を進めることが必要である。ただし、宮川¹⁵⁶が指摘するように、ソフトウェアや研究開発などの無形資産への投資の増加だけでなく、それを生産性の向上につなげるために必要な、高度な人材の育成や獲得、新たな技術に対応した組織の構築等を行うことが必要であり、一時的な収益悪化も覚悟したうえで長期的視野を持って取り組むことができる環境づくりや、官民通じた人材育成や情報通信インフラの整備も重要であろう。さらに、経済産業省のビジョン¹⁵⁷が描くように、製造業が優れた製品を販売・輸出することでモノから収益を得るだけでなく、強みを持つハードを接点として巨大なデータを集積し、その利活用により革新的製品・サービスの実現につなげていくことが重要であり、そのための試行的な社会実験を支援するような環境づくりも必要と考えられる。

また、ヒトやモノの移動の在り方も大きく変わっていく必要がある。国土交通省のビジョン³⁸に描かれているように、テレプレゼンスの活用により、遠隔医療・遠隔教育、テレワークやオンライン会議といった選択肢が拡がり、人と人が直接会うことは、より高い価値が創出されるシチュエーションに絞られていくと考えられる。このことは移動や対面でのコミュニケーションを不要にするわけではなく、より適切な優先順位づけが行われ、その質を向上させていく。さらに、モビリティ分野は、MaaS（Mobility as a Service）やCASE（Connected, Autonomous, Shared and Electric）と呼ばれる国際的な大きな変革の潮流の中にある。特にドライバーを不要とする完全自動運転技術は移動の在り方を大きく変えるポテンシャルを有しており、政府のロードマップ¹⁵⁸⁻¹⁶⁰では、2025年度には全国50か所で地域限定型の無人自動運転移動サービスの提供が行われ、高速道路向けの自動運転トラックや家用車が市場化されることが目標となっている。当面はこうした官民での取り組みを推進していくと共に、これらの新たなモビリティサービスが、再生可能エネルギーの発電状況や配電システムの効率的な整備を考慮して充電が行われるように、あるいは、EVの車載蓄電池を電力需給安定化に活用することで蓄電池のオーナーが新たな収益源を確保することができるように、分野や組織を跨いでビジネスモデルが成立するための検討を進めていく必要があると考えられる。

物流分野においても、トラックドライバーの不足等を背景とする「2024年問題」の克服に向けて積載率向上やモーダルシフトなど効率化の取り組みが進められており、長期的には、政府は2040年までにフィジカルインターネット（物流インフラを企業間で共有化・相互利用し、貨物の規格を統一することで、インターネットのように効率的にモノのやり取りを行うこと）の実現を目指している。このような取り組みを推進していくためにも、企業が物流を含むサプライチェーンマネジメントを経営戦略として認識し、サプライチェーン上の各部門や各企業のデータや機能の連携・統合を進めることが重要であり、そのためにもデジタル化とデータの標準化を進めることが必要である¹⁶⁰。

さらに、マテリアル分野に関しては、ナノテクノロジーやデジタル技術などの飛躍的な発展も、素材利用の在り方を自ら変化させていくと考えられる。それに加えて、天然資源の採取・生産における環境負荷低減や、海洋プラスチックごみ等廃棄物による環境汚染を抑制するといった環境的側面、循環経済関連ビジネスの市場規模拡大や主流化、資源の国内循環により国際情勢等による資源制約に左右されない経済安全保障を強化すること、地域の循環産業による地域活性化、といった経済・社会的側面からも、現在の物質フローからの抜本的変革が必要とされている¹⁶¹。これは、廃棄物処理や消費者の選択の変化などに留まらず、製品設計やビジネスモデル、社会システム自体の変革をも含む。

古紙利用の拡大については、既に新聞紙や印刷紙への再生紙利用は一般的に普及しており、バランスシナリオで想定する水準に到達するためには、再生品の利用拡大や未利用古紙の利用技術確立などが必要と考えられる。特に今後消費量が増加してい

くことが予想されている紙おむつについては、既に複数の自治体で再利用が行われており、取組の発展・拡大が期待される¹⁶²。建築の木造化については、CLT等の新たな建築資材の活用が想定されるが、政府ロードマップでも示されている通り、公共建築物等への積極的な活用によりまとまった需要を確保するとともに、量産体制を構築し、コスト面での優位性を高める必要がある。また、新たな建築資材を使った建築物の設計・施工・維持管理を行える体制を整備することも必要と考えられる¹⁶³。機械部品の樹脂化については、エネルギー消費の削減のための軽量化等をドライバーとして、樹脂化が適切な部品では一定程度進展していくと考えられるが、耐久性の向上等に向けた技術開発などが求められる。脱プラについては、環境省の戦略¹⁶⁴にあるように、ワンウェイの容器包装・製品をはじめ、回避可能なプラスチックの使用を合理化し、無駄に使われる資源を徹底的に削減するとともに、紙など代替素材への転換を進め、使用済みプラスチック資源については徹底的な分別回収とリサイクルの仕組みを構築する必要がある。

最後に、電化・省エネ化、浮体式洋上風力の成長産業化については、本章の次項以降で順次整理することとしたい。

表6-1. 社会経済全体の変革に向けたアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
<ul style="list-style-type: none"> デジタル、脱炭素を成長分野と位置づけて政府支援を伴う大規模投資を実施 世界水準でのカーボンプライシングの導入決定により成長分野への資金流入の促進 積極的労働市場政策・労働者保護施策の拡充により成長分野への労働力流入の推進 生産性向上、物価上昇と賃金上昇の好循環の定着 デジタルライフライン、デジタル人材基盤の整備 樹脂素材、プラ代替素材、CLT材等、古紙リサイクル等に関する技術開発・市場化促進 	<ul style="list-style-type: none"> 世界水準でのカーボンプライシングの本格導入（130ドル/tCO₂以上を目安とする化石燃料賦課金、電化・再エネ転換へのインセンティブとなりうる電力分野での排出枠の設定） 政府によるデジタル化・脱炭素化に向けた事業変革・組織変革の継続的支援 完全自動運転（レベル5）の市場化、本格普及 物流分野におけるフィジカルインターネットの実現 使用済みプラスチックの100%リサイクル 	<ul style="list-style-type: none"> 日本企業の無形資産への投資が対GDP比で米国並みに

(2) 民生

まず、家庭においては、住宅の外皮断熱性能の向上と設備の電化、屋根上への太陽光発電の導入が主なアクションの内容となる。

日本の住宅ストックの断熱性能は先進国で最低水準とされており、大きな改善余地がある。日本の住宅の平均寿命は30～40年程度であり、今後建設される建築物の大部分が2050年にも残存することから、早期にアクションを起こすことが不可欠である。国土交通省⁴⁷は、すべての新築住宅に対して2025年までに省エネ基準への適合を義務付け、法定基準及び誘導基準を引き上げることで、2030年時点では新築住宅の平均でZEH以上の水準に適合することを目指す方針を掲げており、これを着実に実装するとともに、施主の意識改革や地域の工務店のサポートなども行っていく必要がある。また、ZEH水準に留まらず、適切な場合はZEH+、HEAT20といったそれ以上の性能に誘導するようなインセンティブを確保する必要があると考える。

既設の住宅については、断熱改修を加速させるため、所有者に対する理解促進や動機付け、補助金の申請手続きの簡素化を行う必要がある。また、公営住宅が率先して性能改善することによる高断熱住宅への平等なアクセスの確保や、高断熱住宅の住

居としての価値（居住快適性や健康の維持・促進）の見える化と訴求、といった対策も重要である。

家庭の暖房・給湯については、現状では、政府は「省エネ」に資する機器を公平に推奨するという観点から、電化に関する目

コラム 室温が健康に与える影響と建物断熱性を高める地方自治体の取組

住宅の断熱性の向上は光熱費の削減に大きく貢献するほか、ヒートショックの予防といった健康面でのメリットが期待できる。例えば、英国公衆衛生庁の調査¹⁶⁵では、一般成人集団において、約18℃またはそれ以下の室内温度にさらされることで血圧が上昇することが示されている。この結果から、英国公衆衛生庁は室温を18℃以上に保つことを推奨している。また、日本においては、気温が28℃を超えると熱中症の件数が急激に増加する¹⁶⁶。そのため、熱中症環境保健マニュアルでは、室温を28℃以下に保つことが推奨されている。建物の断熱性能の向上により、外部の温度変化の影響を受けにくくなり、また、住宅内での気温差も小さくなる効果が期待できる。

建物の断熱性能について、日本では国が定める基準は全ての人々が遵守すべき最低水準であり、地方自治体は、必要に応じて自主的にそれを上回る基準を定めることができるとされている。例えば、鳥取県では、県民の健康の維持・増進、省エネ化の推進及びCO₂の削減を図ることを目的として、戸建住宅を新築する際の県独自の省エネ住宅基準を策定している¹⁶⁷。政府が推進するZEH基準を上回る断熱性能・気密性能を備えた「とっとり健康省エネ住宅性能基準（T-G1～T-G3）」を満たす住宅「NE-ST」に認定された住宅には助成が行われる。また、設計・施工及び性能評価に関する研修を県が提供しており、研修を受講し合格した技術者が所属していることを「NE-ST」の認定要件とする、といった仕組みを整備している。

区分	国の省エネ基準	ZEH（ゼッチ）	とっとり健康省エネ住宅性能基準		
			T-G1	T-G2	T-G3
基準の説明	次世代基準（H11年）	2020年標準政府推進	冷暖房費を抑えるために必要な最低限レベル	経済的で快適に生活できる推奨レベル	優れた快適性を有する最高レベル
断熱性能 U _A 値	0.87	0.60	0.48	0.34	0.23
気密性能 C値	—	—	1.0	1.0	1.0
冷暖房費削減率	0%	約10%削減	約30%削減	約50%削減	約70%削減
住まいる上乗せ額	—	—	定額10万円	定額30万円	定額50万円
住まいる最大助成額			最大110万円	最大130万円	最大150万円
世界の省エネ基準との比較					

※断熱性能(UA値): 建物内の熱が外部に逃げる割合を示す指標。値が小さいほど熱が逃げにくく、省エネ性能が高い。
 ※気密性能(C値): 建物の床面積当りの隙間面積を示す指標。値が小さいほど気密性が高い。
 ※「住まいる」とは「とっとり住まいる支援事業」の略称。県内工務店により一定以上の県産材を活用する木造戸建て住宅が対象となる補助金。
 ※ZEHは、ネット・ゼロ・エネルギー・ハウスの略。断熱化による省エネと太陽光発電などの創エネにより、年間の一次消費エネルギー量(空調・給湯・照明・換気)の収支をプラスマイナス「ゼロ」にする住宅をいう。

図 6-2. とっとり健康省エネ住宅「NE-ST」¹⁶⁷

標を明確には掲げておらず、あくまで機器の高効率化を促進している。しかし、特に給湯機器については、配管・配線や設置スペースなどの制約から、新築時に化石燃料を燃焼する機器が導入された場合は事後的に電化することが困難になることが多い（ロックイン）¹⁶⁸。そのため、省エネや排出量の漸進的な削減という観点ではなく、長期的に脱炭素が確実にできるかという観点から、2030年までのできるだけ早期に、新築住宅に対して少なくとも事後的に電化が可能となるように配管・配線や設置スペース等の確保しておくことを義務付ける（電化レディ¹⁶⁹）ことが必要と考える。また、設備導入に関する補助金についても、電化を促進することを前提に対象を絞り込む必要があると考える。電中研の報告¹¹⁴によると、このような規制的手法に対する反対する声は根強くある一方で、規制を入れないとヒートポンプ式給湯器が進まないの、政府が主導して規制を入れるしかない、と消極的ながらも受容する態度を示す事業者も一定程度存在する。

なお、バランスシナリオでは、2040年までに新規導入・更新される暖房・給湯設備の全てが電化されることを想定している。特にヒートポンプ式の給湯機器は従来の燃焼型機器と比較して大幅にエネルギー効率が良く、ランニングコストが安くなる⁶が、初期投資が大きくなる傾向があり、サービス型のモデルやランニングコストを含めた経済合理的な判断を促進するための情報提供なども必要と考えられる。

戸建住宅の屋根上への太陽光導入については、2030年時点で新築戸建住宅の6割に太陽光が搭載されていることを目指す現在の政府目標⁴⁸を更に強化し、2025年までに新築戸建住宅への導入を原則化し、2025～2030年に新築される戸建住宅の6割、2030年～50年は8割に平均5kW/戸程度の太陽光パネルが搭載されることで、2050年時点でストック全体の約半数の住宅に導入されると推計される。東京都や川崎市は、2025年4月から、区域内に新築される戸建住宅等への太陽光発電設備の導入を大手住宅メーカーなどに義務付けている。そのほか、京都府・京都市では、建築主に対して再エネ導入の努力義務を課したうえで、建築士に対して、再エネ導入による環境負荷低減効果等を建築主に説明することを義務付けている。太陽光発電設備に関する部分については住宅ローンの与信枠とは別に公的な融資が利用できるようにするなど政府の支援を拡充し、戸建住宅の屋根という小規模な案件に対しても信頼性のあるサービスが提供されるような体制を構築しつつ、地域の実情に応じて同様の取り組みが早期に全国に拡大する必要があると考える。

賃貸住宅については、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、経済合理的な断熱性能の選択・機器の選択を難しくしてしまう一面がある。そのため、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する必要があると考える¹¹⁴。

業務用建築物（オフィス、店舗、飲食店、病院、学校、ホテル、その他）について、国土交通省⁴⁸は2030年までに建築物省エネ法の適合基準／誘導基準を引き上げ、2030年時点で新築される建築物を平均でZEB水準とする方針を示しており、これを着実に実装することが求められる。それに加えて、特に大規模建物については、住宅と同様に、少なくとも事後的に電化が可能となるように配管・配線や設置スペース等の確保しておくことを義務付ける（電化レディ¹⁶⁹）ことが必要と考える。

また、既設の建築物についても、建物の断熱改修に比べると熱源対策は取り組みやすく、セントラル方式で給湯・空調を行っている大規模建物では設備設置スペース制約や配管インフラ制約なども比較的少ないと考えられることから、大規模改修時に確実に電化が進められるように、対象機器を絞って初期投資費用の補助を拡充する必要があると考える。

建築物の屋根上への太陽光発電の導入についても、政府は、政府および自治体が所有する建築物等の50%に太陽光発電設備を導入し、2040年までに100%導入する目標を掲げている¹⁷⁰が、これを着実に進めるとともに、民間施設にも取組が拡大していき、2050年までに建築物ストック全体で設置可能な屋根の50%に導入される必要がある。太陽光発電設備を導入した建物の所有者側での初期投資費用負担や維持管理が不要になる第三者所有モデル（PPAモデル）の活用や、自家消費しきれない余剰電力の売電による収益性の向上、デマンドレスポンスやEV蓄電池などいろいろな手段を扱うアグリゲーションビジネスの発達

6 さらには、将来的にデマンドレスポンスの仕組みが発展すれば安価な電力を利用することができる。将来的に、より多くの機器がデマンドレスポンスを行えるように、家庭内の様々な機器を今からでもIoTレディにすることが有効である。

によるインバランスへの対応など、様々な工夫によって、電気料金低減メリットを享受しつつ排出削減を行うことが可能である。

コラム 屋根置き太陽光発電拡大を促す様々な取組

屋根上太陽光発電の導入コストは大きく低減しており、固定価格買取制度における調達価格等の算定・検証を所掌する調達価格等算定委員会¹⁷¹によると、事業用太陽光発電（50kW以上250kW未満）の2021年度に設置された案件の発電コストは11-13円/kWhとなっている。これは2021年度の電力卸売市場の年平均価格14.3円/kWhよりも安く、2022年度の22.4円/kWhの約半額の水準である。同委員会は2028年度までに事業用太陽光については5-7円/kWhまで発電コストが低減する見通しを示している。設置可能な屋根には太陽光発電を導入し、自家消費を進めることが、二酸化炭素排出量の削減だけでなく光熱費の削減にも貢献することはほぼ間違いない。

近年、初期費用の負担や維持管理の手間を懸念する需要家向けに、エネルギーサービス会社が設備を所有したままに需要家の屋根に太陽光発電設備を導入し、一定期間の電力供給契約を締結し発電量に応じて需要家がエネルギーサービス会社に利用料を支払うことで、需要家の初期費用負担や維持管理を不要とするモデルの普及が進んでいる。

しかしながら、こうしたモデルは長期的な契約を前提とするため、需要家の信用力や施設の適性などが慎重に評価され、収益性の高い大口の需要家のみが契約対象とされることが多い。また、自家消費のみを前提として、余剰分を電力系統に逆潮流させられない場合も多く、需要家の電力消費量が小さいケースや休日に電力を消費しないようなケースでは、電力供給単価が高くなることも多い。こうした課題を克服するための取り組みが進んでいく必要があると考えられる。

例えば、一般社団法人日本再生可能エネルギー地域資源開発機構（RDo）、あいおいニッセイ同和損害保険株式会社、株式会社スマートエナジーは、全国各地域の中小企業を対象に、リース会社の信用審査方法の高度化等により、小規模でもイニシャルコストなく太陽光発電設備を導入でき、税額控除や電気代低減により経済的なメリットを生み出すとともに、CO₂排出削減量を認証しサプライチェーンの脱炭素化対策にも活用できるビジネススキームを提供し、地域脱炭素の担い手の裾野を広げようとしている^{172,173}。

また、株式会社アイ・グリッド・ソリューションズは、導入施設の電力需要量と太陽光発電量をAIによるディープラーニング技術を用いて正確に予測することで、インバランスの発生を防ぎ、余剰電力を他施設に供給することを可能にしている¹⁷⁴。従来は、余剰電力は不確実性が高く、市場での取引にはインバランスが発生するリスクが伴うため、太陽光発電設備の導入適正が高い建物で屋根に空きスペースがある場合であっても、そのごく一部分のみに設備を導入して電力系統への逆潮流はしないケースが多かった。このような取り組みの拡大により、建物屋根への再生可能エネルギー導入ポテンシャルが十分に活用されることが期待できる。

このような取組を単独ではなく、複数個所で実施しつつ、統合的に管理するアグリゲーションビジネスも進められている。SBエナジー株式会社（現・テラスエナジー株式会社）¹⁷⁵は、東名阪の各エリアで太陽光発電所のバランシンググループを模擬組成し、30~35%のインバランス低減を確認した。その結果、このような仕組みの下では、FITよりFIPの方が、経済性が良いと結論づけている。また、予測精度についても、単独の発電予測精度は88%のところ、均し効果により92%以上を達成したとする。また、アグリゲーションビジネスに蓄電池の運用も加えることで、収益性が1.7-2倍向上するとしている。

表6-2. 民生部門の脱炭素化に向けたアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
<ul style="list-style-type: none"> ・建築物省エネ法における住宅・非住宅建築物の義務基準及び誘導基準をZEH/ZEB水準に引き上げ ・建築物屋根上への太陽光発電導入を原則化 ・建築物の電化レディを義務化 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期投資費用の支援拡充等により住宅に新規導入・改修される給湯・暖房設備が全て電化、非住宅建築物も原則電化 ・公共施設の設置可能な屋根面積の50%に太陽光発電設備を導入 	<ul style="list-style-type: none"> ・全ての建築物の設置可能な屋根の半分に太陽光発電設備が導入

(3) 電力

早期に大幅な排出削減を果たすうえで、電力部門の早期脱炭素化は不可欠であり、今後10年間で再エネを増加する様々な取組を早急かつ大胆に進める必要がある。そのためには、太陽光発電や風力発電などの再エネ設備の導入を進めるだけでなく、再エネから供給される電力を効率的に利用するための基盤インフラである送電線の整備も重要となる。送電線の新規建設というハード面の整備は、地元住民との合意形成や立地調査などに時間を要する。そのため、送電線の運用ルール改革というソフト面での送電線整備に着手し、既存の送電線の運用を効率的にすることを早期に行うことで、再エネの新規導入を促すことができる。

太陽光発電については、2030年までに年間6GWのペースで導入が必要となる中で、導入する場所の選定が重要となる。これまでの太陽光発電は、メガソーラーなど広大な土地に太陽光パネルを設置するような規模の経済を活かすようなビジネスモデルが主流であったが、自然災害の誘発するリスクや景観を損ねるリスク、野生動物に深刻な影響を与えるリスクなどから地元住民の理解を得ることが難しい状況があり、かつ送電線に接続できず売電できないリスクも高まっている。従って、今後は建物の屋上など、送電線制約が少ない電力需要地に近く、外部環境への影響が小さい箇所への設置が中心になると考えられる。そのためには、中小企業の工場やオフィスや住宅などにも太陽光発電を設置する必要があることから、新たな取組（例えば、小規模のプロジェクトをまとめて管理するアグリゲーションビジネスなど）が必要となる。同時に、営農型太陽光発電など地域共生電源への優遇措置¹⁷⁶や屋上太陽光発電に特化したファイナンススキームや規制なども早期に導入し、小規模分散型の太陽光発電の導入を促進する必要がある。このような制度が整備されると、今後は中小企業や住民などのステークホルダーが太陽光発電設備の設置に関わるようになることから、これらのステークホルダーに近い存在である自治体の役割も今後一層重要となる。太陽光発電の立地制約が厳しくなる中で、2030年以降には、タンDEM型ペロブスカイト太陽電池など太陽光発電の高効率化を達成する新たな技術が利用できる可能性があり、これらの技術も積極的に取り入れていく必要がある。また、2030年以降は、2011年ころから導入された太陽光発電のリプレースの需要も増えることが想定される。リプレースのタイミングで高効率な太陽光発電を導入することで、容量の増加を見込むことができる。

また、2030年以降、日本の総電力供給量のうち、太陽光発電を含む変動性再エネの発電割合が高まってくる。この場合、電力システムの安定性の課題への対応に太陽光発電設備も求められる可能性がある。これに対して、グリッドフォーミング技術など新たなインバータ技術を用いた対応も必要となる。

表6-3. 系統運用ルールと送電線増強に関するアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
<ul style="list-style-type: none"> ・ 先着優先の見直し ・ 実潮流ベース、市場主導型の送電線の運用管理に向けたルールの整備（前日市場、リアルタイム市場の整備含む） ・ 下位系統・配電網を含めたコネクタ&マネージに向けたルールの整備¹⁷⁷ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電力広域融通を可能とする地域間連系線の増強 ・ エネルギーの地産地消を可能とする配電網管理 ・ V2G を含むアグリゲートビジネスを可能とする系統管理 ・ 洋上風力発電のポテンシャルが高い地域でのアクセスポイント周辺の送電線の整備 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 洋上風力の急速な発電容量追加に対応した洋上風力発電ファームから陸上のアクセスポイントまでの送電線整備 ・ 急速な水素製造装置導入体制の整備

表6-4. 太陽光発電に関するアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
<ul style="list-style-type: none"> ・ 屋上太陽光設置実質義務化（新築の6割） ・ 太陽光発電の余剰電力を既存配電網を通じて近隣の建物に共有する制度整備 ・ 中小企業や戸建て住宅に太陽光発電を設置するための体制やファイナンス制度の整備 <p>（例：地域再エネ会社¹⁷⁸）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 屋根置き太陽光発電を設置する事業者の体制整備 ・ ペロブスカイト／シリコン・タンデム型モジュールの実用化 ・ 太陽光発電設備の遠隔操作装置設置義務化 ・ 災害などによる損害への公的保証制度 ・ カーポート太陽光を促進するための建築基準法の整備（建蔽率や建設確認審査¹⁷⁹の合理化） ・ 耕作放棄地活用のため、土地の権利関係の整理 ・ 営農型太陽光推進のため、継続性のある営農者の確保や農業の形成、営農者との協力や合意形成、太陽光発電設備導入のためのファイナンス制度の整備、農業委員会を含む地域全体での合意形成 ・ オンサイト PPA やアグリゲートビジネスを行う事業環境の整備 ・ 中小企業や住民に近い存在である自治体の支援策の拡充 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 屋上太陽光設置実質義務化（新築の7割-8割） ・ ペロブスカイト／シリコン・タンデム型モジュールの本格的実装（設備更新時のリパワリング含む） ・ リプレースされる太陽光発電の廃棄処理方法や制度の整備 ・ 安価かつ精度の高い PV パネルの性能診断 ・ 高度な発電予測技術を組み併せて、細かな柔軟性を持った太陽光発電の運用 ・ グリッドフォーミング技術導入による PV への柔軟性付与 ・ 駐車場や歩行空間における太陽光発電設置の推奨 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 屋上太陽光設置実質義務化（新築の8割）

コラム 地域に貢献する太陽光発電のあり方

2010年代に急速に設置されたメガソーラーの一部は、景観や土砂災害を誘発するリスクなどから地元住民から迷惑設備として認識されるケースがあることが問題となっている。今後太陽光発電を設置する際には、その設置を通じて様々な価値を地域に提供していくことも必要である。その一つが、エネルギーの地産地消である。これまでのヒアリングでは、大規模太陽光発電に対しては、電気代として支払ったお金が、すべて都市部にあり大企業に吸い上げられるという感覚を持たざるを得ない（「再エネ植民地」という表現もある）という意見が数多く寄せられている。一方で、自分たちが電気代として払っているお金が地域内の関係者（自治体や地元企業）に流れて、地域内の経済の循環に寄与していることが認められる場合は、多少高い価格を支払っても良いという声も聞く。従って、今後は導入される再エネが地域に貢献しているようなスキームを組むとともに、それらを可能な限り可視化していくことが求められる。

もう一つは、太陽光発電の発電以外の価値を地域に貢献することである。2023年は世界中で猛暑となり、「地球沸騰化」とも呼ばれるような状況であった。今後は、世界全体の気温上昇にともない、猛暑が頻繁に発生する可能性も考えられる。そういった状況下では、街中に日影が多くあることが人々の生活にとってより一層重要となる。筆者が2019年にアリゾナ州立大学 (ASU)に出張した際には、太陽光パネルがキャンパス内の通路の上部に設置されており（日本の商店街のアーケードのようなイメージ）、直射日光を避けられるようになっていた。また、大学付近の駐車場には、駐車場の上部空間にも太陽光パネルが設置されて、駐車している車に直射日光が当たらないような環境を作り出していた。日本よりも暑く日射量も多いアリゾナ州ならではの取組であるが、今後は日本でもこのような取組を随所に取り入れていくことで、太陽光発電が人々の暮らしに役立つものとして一層受容されていく可能性を秘めている。また、このようなアイデアは緩和と適応の両立の実践的な取組といえる。

ASUキャンパス内の通路上部に設置されていた太陽光パネル
(2019年筆者撮影)

ASUの駐車場の上部に設置されていた太陽光パネル
(2019年筆者撮影)



陸上風力発電は、リードタイムが現状では約8年程度あり、これを5年までに短縮する必要があるとされる¹⁸⁰。そのためには、環境省が進める再エネの促進区域の設定（ポジティブゾーニング）¹⁸¹を通じて、地元住民との合意形成を進めることを2020年代に早期に進める必要がある。また、風力発電のポテンシャルが高い地域は、北海道や東北の中でも人口密度が小さい地域であり、そのような地域は送電線の運用容量が小さく送電線に接続できないケースがある。さらに、送電線に接続できたとしても、都市部といった電力需要地までは遠いことから、基幹系統を通じて送電する必要がある。そのような状況から、系統運用ルールを早期に改革するとともに、陸上風力発電のポテンシャルが高い地域へは送電線増強を行うことが重要である。送電線の増強については、費用負担について様々な観点（事業性、環境価値、エネルギーセキュリティ）から整理して風力発電が適切に促進される制度設計が望まれる。

風力発電業界の構造は、全国的な風力発電の設備容量の増加に対してメンテナンス体制の構築が常に後追いつく形となっている¹⁸²。そのため、2030年以降は、導入された風力発電を風力発電設備の利用率を上げる（故障を防ぐ）ためのメンテナンスの整備が必要となる。また、2040年にかけて、全ての発電電力量に対して、変動性再エネによる発電電力量が高まる。そのため、時々刻々の電力需給バランスを保つために、柔軟性のある電源（揚水式水力発電など）の効果的な運用が求められる。そのため、高度な気象予測を活用しながら風力発電の発電電力量の予測向上を上げることが効果的である。2040年以降は、風力発電のリプレース需要に対応した部材や人員の確保とリプレースの際に設備容量を拡張するリパワリングの推進がある。

洋上風力発電の規模拡大について、2030年に8GW、2040年に135GWを達成するためには、サプライチェーンの抜本的な強化が急務である。これには、洋上風力発電の部品の調達や洋上風力発電を建設するための港湾整備や人材育成、ノウハウの共有などが含まれるべきである。そのためにも、EEZを含めた海域への拡大を見据えた野心的な目標を設定し、官民が連携して効率的に事業開発を進められる制度を構築することが欠かせない。洋上風力発電の導入は、他の再エネと同様に地元住民（特に漁業関係者）との合意形成も重要であるため、洋上風力発電導入の意義に関する基本的な理解を得るとともに、地元地域にとっても便益のあるスキームや取り組みの検討が円滑なプロジェクトの推進に寄与するであろう。¹³⁹

表6-5. 陸上風力発電に関するアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
<ul style="list-style-type: none"> ・ 立地制約の解消・リードタイムの短縮 ・ 地域住民との合意形成、ポジティブゾーニングを設けるインセンティブの設計 ・ メンテナンスやリプレースに関わる人材育成 ・ 発電事業者の送電線整備コスト負担軽減 	<ul style="list-style-type: none"> ・ メンテナンスやリプレースに係る新規事業の育成 ・ 高度な発電予測技術を組み併せて、細かな柔軟性を持った風力発電の運用（グリッドフォーミング技術など） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 風力発電リプレースへの対応と設備容量拡張（リパワリング）

表6-6. 洋上風力発電に関するアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
<ul style="list-style-type: none"> 野心的な導入目標設定 将来の大量生産を見込んだ製造拠点整備（港湾整備含む）やサプライチェーンの構築 官民が連携して効率的に事業開発を進められる制度の構築 EEZ 利用に関わるルールの整備 洋上風力発電の開発・建設に係る人材育成 	<ul style="list-style-type: none"> EEZ 浮体式洋上風力発電の導入本格化するための事業環境整備 高度な発電予測技術を組み併せて、細かな柔軟性を持った風力発電の運用 	<ul style="list-style-type: none"> リブレースやメンテナンスが円滑に行われるための技術や事業環境の整備

コラム 国内再エネの価値

電源構成を考える際、電力システムのコストに関する論点は、経済的な観点、あるいは事業者の観点から重要であるが、電力料金として支払ったお金がどのように社会の中で循環するのかという論点も、社会的な観点からは重要である。

例えば、再生可能エネルギーは、燃料費がかからない分、人件費が多くかかるのが特徴的である¹⁸³。特に、50kW以上の発電設備の場合、電気事業法に基づいて、電気主任技術者を選任しなければならない。このような背景から、風力発電では、1GWhを発電するのに、年間2人程度の雇用が発生し、そのうち半分程度は維持管理に必要な人材である。また、太陽光発電については、自然エネルギー財団の報告¹⁸³によると、除草や定期点検に関わる人件費も大きい割合であることから、再エネ立地地域に雇用をもたらす効果がある。

一方で、火力発電のコストの内訳の多くは燃料費であり¹⁸⁴、燃料として支払った金額の多くは海外に流れる。その結果、例えば、石炭火力発電は、1GWhを発電するのに、年間0.42人程度の雇用創出であり、その多くが、エネルギー関連企業の雇用である。そのため、火力発電からの電力を使用する限り、電力部門から派生して地域の雇用が増える効果は限定的であるといえる。

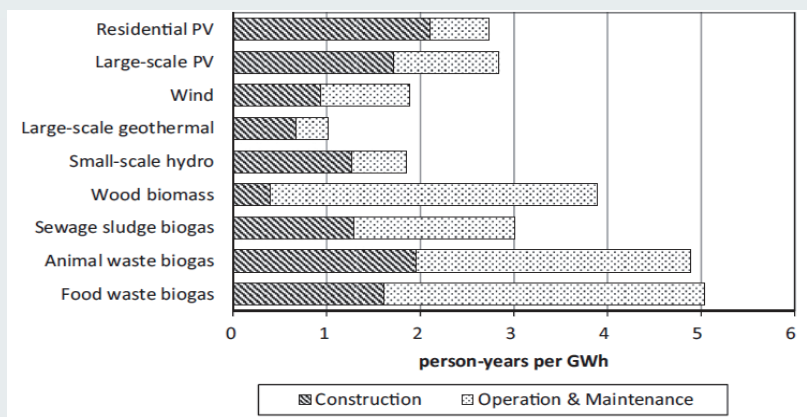


図 6-3. 再生可能エネルギーの1GWhの電力を発電した場合の雇用人数（雇用係数）¹⁸⁵

表6-7. 火力発電に関するアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
<ul style="list-style-type: none"> ・石炭火力の早期フェーズアウト ・変動性再エネに対応した火力の最低出力値の見直し 	<ul style="list-style-type: none"> ・石炭火力の完全フェーズアウト ・ガス火力発電の水素専焼火力化 ・一部火力の M-G セットの装着 	<ul style="list-style-type: none"> ・水素専焼火力化していないガス火力を非常時電源として残すための制度構築

コラム 系統運用ルールに関わるOCCTOの議論

資源エネルギー庁の電力ネットワークの次世代化に向けた中間とりまとめ¹⁸⁹では、送電線運用ルールの改革が議論されている。ここでは、基幹送電線に対して、現在の後着者抑制型の送電線運用ルールから再エネなどの限界費用が安価な電源から順番に送電線を利用する市場主導型のルールへの更新が議論されている。

市場主導型の送電運用ルールに切り替わることで、例えば、2030年の再エネ導入水準であれば、再生可能エネルギーの出力抑制が5%以内に抑えられることが、シミュレーションの結果として得られており¹⁹⁰、本レポートのシミュレーションもこれを採用している。

代表的な送電線利用の仕組み

	再給電方式	市場分断 (ゾーン制)	市場分断 (ノード制)
抑制方法	TSOが抑制 (調整電源を活用)	市場落札されなかった 電源が抑制	市場落札されなかった 電源が抑制
適用可能系統	基幹系統～ローカル系統	基幹系統 (ある程度のゾーンが限界か)	基幹系統～ローカル系統
類型	ドイツ・イギリスなど	ノルウェーなど	PJMなど

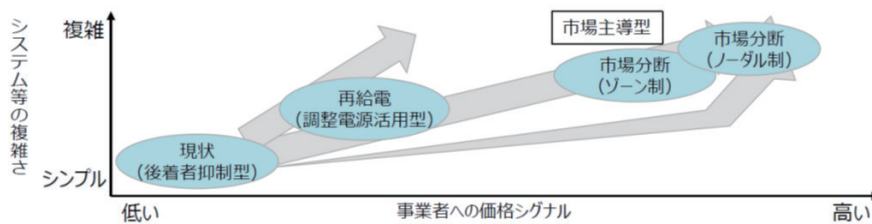


図6-6. 「電力ネットワークの次世代化に向けた中間とりまとめ」での将来の送電線運用ルール整理²⁷⁸

コラム 地域に根差した事業主体がローカル系統（配電網など）を管理する意義

広域系統整備委員会事務局資料¹⁹¹では、ローカル系統での混雑管理手法として、ノンファーム電源の一律制御方式を採用している。これは、送電線の混雑が発生した際に、基幹系統の方法とは異なり、メリットオーダーによる系統利用を取らず、ノンファーム電源を一律に出力抑制するものである。背景として、再給電に伴う精算が不要なため精算するためのシステム対応を省略できることが挙げられている。一方で、火力発電などの限界費用の高い電源が混雑系統に連系している場合、限界費用の安い電源価値が活かせないというデメリットがある。つまり、ローカル系統では、混雑発生時に火力発電などのファーム電源が優先的に給電する仕組みが残っていることになる。これは、一般送配電事業者は大規模かつ広域なエリアを扱うため、一般送配電事業者にとって末端部であるローカル系統の運用を簡素化するのは事業運営上、合理的な措置なのかもしれない。

このような中、総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会持続可能な電力システム構築小委員会第二次中間取りまとめ¹⁹²では、自治体等が出資する「地域電力会社」などが配電事業を行い、再エネの地産地消を促す取り組みが展開できる制度の可能性が議論されている。上記の通り、一般送配電事業者では、末端の系統に対してきめ細やかな系統管理が実質的に難しく、混雑発生時に再エネの出力抑制が増えてしまうのに対し、地域に根差した地域電力会社が自らローカル系統の運用管理を行うことで、限界費用の安価な再エネ電源から給電するようにする系統運用が可能になる。その結果、地域外エネルギーへの依存度を下げる、地域の再エネ事業者の売電収益が増えるといった地域にとって様々な便益をもたらすことが、地域に根差した事業主体がローカル系統を管理する意義であると考えられる。

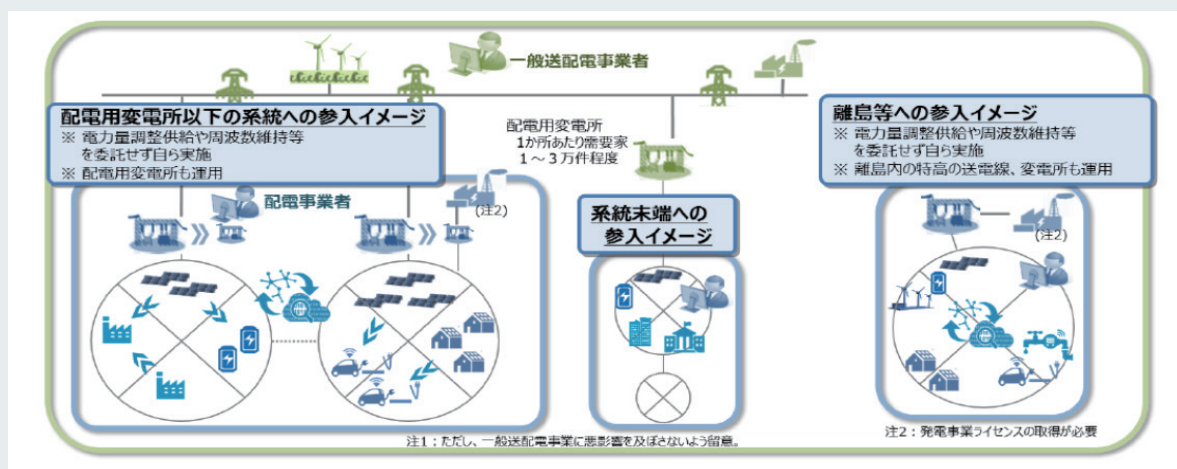


図 6-7. 配電事業者の参入イメージ²⁷⁹

(4) 産業

第3章3節のコラム「対策別のCO₂排出削減費用」で示した通り、省エネや低温熱の電化など非素材産業における脱炭素化対策のカーボンニュートラルコストはマイナスであることから、脱炭素化対策を進めるには費用的な課題よりも、生産プロセスの中で対策技術をどのように取り入れていくかという技術マネジメントに関わる課題や設備投資を行うための資金調達（ファイナンス）が大きい。例えば、甲斐田⁵⁵によると、欧州では工場のプロセスとヒートポンプの両方に関する知見を持ち合わせた高度人材が各工場に適したヒートポンプ導入に関わる知見を提供しており、これが産業用ヒートポンプの拡大に貢献している。そのため、2030年にかけて、費用対効果の高い省エネ、電化対策の周知や専門的人材によるアドバイスの提供（必要となる器材を置く場所のスペースをどのように確保するのかといった実務的なレベル）を進める。また、大企業と比較して資金

力が小さい中小企業に対して、今後成長が見込まれる事業にファイナンスをしていくような支援策が必要である。中小企業もこのような支援策を受けられるように、脱炭素社会に移行する中で、ニーズが高まる製品の生産を基軸とした事業戦略を進める。なお、コラム「電化によるエネルギー効率向上と複数の便益」で示した通り、産業部門での電化は様々な副次的な便益があることから、これらの便益を経営者に十分な理解を促した上で、事業計画や投資判断を促すことが有効である。また、脱炭素化技術の中心である電化との相性が良いデジタル化を進め、生産性向上を高める基盤を構築する。素材産業については、2030年代後半を目途に高温熱供給の脱炭素化等の本格的実装ができるように、技術開発などの準備を進める。

2030年以降は、生産プロセスのデジタル化によって、蓄積したデータをもとに革新的な生産プロセスを開発・導入していく段階になる。具体的には、工場の自動化の促進や消費者のニーズを捉えた多品種少量の生産プロセスを進める。また、数分ごとの電力需要の特性情報を基に、電力が安価な時間帯（すなわち、再エネ電力が余剰となる時間帯）に生産を自動化した工場を中心に展開していくことで、エネルギー費用を抑えた生産を達成する。これらの電化技術を用いた生産性向上を達成していくことで、低温熱利用域では、化石燃料を使用している生産工程がほとんど電化されるように投資拡大を促す。高温熱を利用する素材産業については、水素を用いた生産プロセスの導入を本格化させる。また、バージン材の利用を抑えるために、リサイクル材の利用も段階的に進める。この過程で、グリーン水素や大量の再エネにアクセスしやすいような立地に周辺地域では、水素インフラを共有し、一部の非素材産業の工場でも水素を使えるような取り組みを進める。

2040年以降は、製造プロセスの自動化とデマンドレスポンス技術がより高度に統合化し、生産性が飛躍的に向上する。さらに、使用する素材に占めるリサイクル材比率を高めることで、製品のライフサイクル全体で使用するエネルギー消費量が少ない状態を達成する。またこれらの行程が製品のユーザーにも理解され、優先的に購買されるといった競争力を高めるために、エネルギー生産性、資源生産性、炭素生産性の高い製品やサービスであることを保証することを、デジタルツインのようなデジタル技術を用いて展開する。このような需要側のニーズを製品のライフサイクルの上流である素材産業にも共有できるような仕組みを構築していくことで、素材産業における完全な脱炭素化を達成する。

表6-8. 産業部門に関するアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
<ul style="list-style-type: none"> ・費用対効果の高い省エネ、電化対策の周知や専門的人材によるアドバイスの提供。 ・中小企業に対するファイナンス支援 ・エネルギー価格や取引相手のニーズ変化を考慮した中長期的な事業戦略策定 ・2030年後半の事業拡大を見据えた素材産業における化石燃料を使わない製造技術への集中的な投資（FT合成燃料を用いた化学製品の製造、水素還元製鉄方法、各業界におけるリサイクル技術） ・製造プロセスのデジタル化（遠隔制御、高度なモニタリングと得られた情報処理技術による品質管理など） 	<ul style="list-style-type: none"> ・低温熱電化技術への投資拡大 ・デジタル技術を駆使したデマンドレスポンス技術の導入 ・工場の自動化技術の導入 ・多品種少量のニーズに対応した製造プロセスの構築 ・電化できないエネルギー用途に対して、水素・合成燃料の利用 ・素材産業における水素利用の本格化 ・リサイクル材を用いた製造プロセスの導入促進 ・工場の移転や合理化の促進 	<ul style="list-style-type: none"> ・製造プロセスの自動化×デマンドレスポンス技術の統合による生産性の高い技術 ・リサイクル材を用いた製造プロセスの本格化 ・デジタルツインのような仕組みを利用して、製品の製造プロセスや流通をデータ化し、エネルギー投入量や資源投入量が低い製品であることを付加価値として製品のユーザーにアピールしていく。

(5) 運輸

運輸部門は、デジタル技術及び電化技術によって、大きく変わりうる分野である。また、家庭、業務、産業といった分野間の活動をつなぐ役割も大きい。従って、社会が脱炭素を達成していく中で、人々がその変化を感じやすい分野であることが特徴であるといえる。従って、人々の暮らしに関わるモビリティの変化に関するアクションと車両の電動化に関するアクションのふたつに分類した。なお、モビリティの変化については、デジタル庁が、「モビリティ・ロードマップ」のありかたに関する研究会¹⁹³をとりまとめるなど、新たなモビリティに向けた議論が随時更新されている。

モビリティの変化について、デジタル化を起点として、日々技術やサービスが目まぐるしく進歩している。例えば、米国では、カリフォルニア州公益事業委員会（CPUC）は2023年8月10日、自動運転車を開発する米Cruiseと米Waymoの2社に対し、人間のドライバーが乗務しない「無人タクシー」について、サンフランシスコ市内での24時間営業の開始を許可した。数年前までコンセプト段階にあった技術が、将来のモビリティにどのように影響を与えるかを予測するのは容易ではない。つまり、モビリティに関して我々の予測を超える進化が起こる可能性がある。このような状況下で、モビリティの変革については、人々の実際のニーズを把握し、最新の技術を活用しながら、実験的なアプローチで計画を進める必要がある。特に、自動運転技術がモビリティの中心に位置しているため、2030年頃からはデータ収集とインフラ整備を進め、自動運転の導入に備える必要があるだろう。さらに、2040年以降はモビリティの変化に伴い、都市の土地利用方法も変わる可能性がある。たとえば、自動運転を活用したタクシーやバスサービスの普及により、個人の車を所有する必要が減少し、住宅周辺の駐車施設が利用されなくなる可能性がある。このような土地の再利用には、宅配ボックスの設置、自動販売サービスの拠点化、自動運転車の充電基地の設置など、多くの新たな活用方法が考えられる。このような賢い土地利用の促進が必要となるであろう。

電動車両の普及において、電気自動車（EV）自体も日々進化している。例えば、中国のCATLは2023年8月16日に、わずか10分の充電で400km走行可能な電池を発表した¹⁹⁴。これまでEVの普及を妨げていた充電速度の課題について、改善が進んでいる一つの事例と言える。そのため、2030年までにEVを大規模に普及させるためには、充電インフラの整備が重要となる。新築住宅においては、いつでもEV充電器を取り付けられるようにするために「EV Ready」の仕様を推進し、公共施設や滞在時間の長い商業施設では、普通のEV充電器を設置することにより、日常的なEV利用を促進する。長距離移動に対応するためには、高速道路や道の駅など長距離移動者が休憩する施設に急速充電器を設置することで、長距離移動中の充電切れの心配を軽減し、EVの購入を後押しする。さらに、充電に関連する利用者のルール整備とその周知を行うことで、整備された充電器の効率的な運用を実現できる。

2030年以降は、再生可能エネルギーの大量導入が想定され、屋根置き太陽光発電などの変動性再エネの余剰電力へのアクセス機会拡大や、変動性再エネが発電しない時間帯における電力供給力の価値が高まる状況が予想される。このような機会に対して、EVの蓄電池を系統に接続し、電力需給の一部を担うV2Gが効果的になる。そのため、V2Gが行われるための、利用者への適切なインセンティブやアグリゲータービジネスモデルの構築が求められる¹⁹⁵。さらに、廃車となるEVの数も多くなる時期であることから、EVの蓄電池の中古市場が発展するような仕組みが求められる^{196,197}。これには、中古バッテリーの性能を評価する技術や、評価の信頼性を高める取組が有効である。また、現在様々な研究が進められているペロブスカイト太陽電池が実用化すると、その薄くて軽いという特性から、車載用太陽光発電への搭載も研究開発が進められている¹⁹⁸。これが実現すると、外部給電での必要電力量が減り充電時間が短縮できることや、航続距離が伸びる効果が期待できる。

2040年から2050年頃には、モビリティの状況が大きく変化すると予想される。例えば完全自動運転EVが、電力需給と交通需給の双方の状況を睨みながら最適に配置され、自動運転とV2Gを通して社会のインフラが効率的に活用されるようになる¹⁹⁹。

表6-9. 運輸陸上旅客に関するアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
モビリティの変化		
<ul style="list-style-type: none"> ・ 自家用車を持たない前提の生活を取り入れる。また、そういった選択肢を持てるように、自家用車を利用しない移動の便益（短期的のみならず長期的）や実際の方法について周知する。 ・ 駅前などの市街地の中心部において、徒歩、自転車、マイクロモビリティ、公共交通を優先するような土地利用計画策定を促進する。 ・ 自動運転車両を先行的に利用する場所の選定と自動運転走行に必要なデータ収集 ・ 自動運転車両に対する法的な整備 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 一部の道路空間を、移動以外の目的利用への転換 ・ 自動運転車両の試行的運用 <p>と自動運転に関わる費用負担の整理。広い道路や高速道路、バス運行路線の一部など、自動運転が行いやすい地域での重点的展開</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 自動運転車両に対する法的な整備更新 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 使われていない駐車場を有効活用した新たなビジネスモデルの展開 ・ 市街地など運行が複雑な環境での自動運転の発展
車両の電動化		
<ul style="list-style-type: none"> ・ 充電設備の整備。住宅においては、普通充電器がいつでも設置できるようにしておく。公共施設や滞在時間の長い商業施設に充電設備を整備する。 ・ 高速道路 SA、PA、道の駅など長距離移動者が利用する場所に急速充電器の設置 ・ 充電設備を V2G Ready にしておく。 ・ 一部の施設における EV/PHEV の優遇措置（EV 専用の駐車スペースなど） ・ EV 販売に関わるマーケティング強化（EV に乗ることのステータス性） ・ 充電に関わる利用者のルール整備とその周知 	<ul style="list-style-type: none"> ・ V2G が行われるための、利用者への適切なインセンティブの構築。 ・ EV の中古車市場および EV バッテリーのリユース市場環境整備。 ・ バッテリー診断技術やリサイクル技術の確立 ・ 車載用のペロブスカイト太陽電池を実用化に伴う EV 電費の向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自宅のみならず、外出先の充電中も V2G が行われる市場やインセンティブの構築

ロジスティクスの分野では、輸送業界の人手不足を背景に、様々な改革や変化が進行している。長距離輸送においては、トラックによる輸送から内航海運と鉄道を用いた輸送へのモーダルシフト、トラックの大型化やトレーラーの利用、ダブル連結トラックなどを導入して、一人当たりの輸送効率だけでなく、車両当たりの輸送効率も向上させる取り組みが行われている。デジタル化に起因する変化に関しては、トラックと倉庫の輸送スペースと保管・仕分スペースをシェアすることで、これらの物流リソースの稼働率を高め、より少ないトラック台数で荷物を運ぶ「フィジカルインターネット」という概念がある。経済産業省でも、この動向を取りまとめた「フィジカルインターネット・ロードマップ¹⁶⁰」が策定されている。本ロードマップでは、輸送機械、物流拠点、垂直統合、水平連携、物流・商流データプラットフォーム、ガバナンスなどの観点から、実現に必要な事項がまとめられている。詳細は省略するが、自動化、ITシステムの更新（レガシー・システムの更新）、需要予測技術を用いたオペレーション、ハードウェアおよびソフトウェアの標準化、データの共有による水平連携の促進が早期に進めるべきとされている。また、本ロードマップでは、フィジカルインターネットが実現した社会イメージの例を5つ示しており、こ

これは2040年から2050年頃の人々のロジスティクスの関係性を理解するのに役立つ。国土交通省の資料²⁰⁰によれば、2020年には、再配達のために年間約6万人分のドライバー労働力が投入され、再配達のトラックから排出されるCO₂の量は年間で約25.4万トンとされる。したがって、再配達を抑制する取り組みは、輸送業界の人手不足解消に向けて重要な対策となる。2030年から2040年にかけて、自動運転技術やフィジカルインターネット、ラストワンマイルでの配送の効率化に関連する活動を順次実施する。2040年以降は、これらのロジスティクスの変化に合わせて、多くの新しいサービスが発展し、導入していく。

車両の電動化について、既に商用化されている小型トラックから電動化を進める。小型トラックが利用されるのは、ラストワンマイルのような短距離が主な用途とされるため、配送拠点を中心に充電設備が整備されることが考えられる（充電設備に関する新たな技術については、コラム「貨物車の充電技術の進展」を参照）。大型トラックについては、蓄電池の技術進展に応じて利用される用途範囲が変わるが、2030年以降に大型EVトラックの本格的な運用を検討・進めるための戦略や検討を進める。2040年以降は、小型EVトラックおよび大型EVトラックの自動運転も一般的となると見通され、自動運転に対応した充電設備やサービスの展開が進行している段階に移行する。

FCVトラックについては、水素供給インフラの制約からEVトラックと比較して、使用される用途に制約がある。したがって、長距離の輸送トラックの流通拠点や建設現場などでFCVトラックの需要が見込まれる場所、かつ他業種の活動で整備される水素供給インフラが最初の候補地となり、そのような複数の限定的な場所がFCVトラックの流通網を効果的に支える場所となる（例えば、京浜工業地帯から阪神工業地帯など）。そのようなFCV水素拠点を燃料供給のネットワークとしてどのように活用するか戦略を2030年までに策定し、2030年から実施に移す。

表6-10. 運輸陸上貨物に関するアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
ロジスティクスの変化		
<ul style="list-style-type: none"> 自動運転技術を用いた追従技術の実装化 トレーラー化や大型化、ダブル連結トラック利用による輸送効率の改善²⁰¹ フィジカルインターネットの試行的実施 再配達を抑制する様々な取組の試行的実施 	<ul style="list-style-type: none"> 高速道路など限定的な走行箇所での自動運転 フィジカルインターネットの実装による輸送効率の上昇 再配達抑制に効果的な取組の実装（例：駐車場の一部を宅配ボックスへ転用） 	<ul style="list-style-type: none"> 様々な配送技術の組み合わせによる、エネルギー効率、時間効率の高いロジスティクス技術の利用
車両の電動化		
<ul style="list-style-type: none"> 小型トラック（積載量3トン以下）の配送車などの電動化 配送拠点における急速充電設備の整備 大型EVトラックの利用の試行的運用 FCVトラックの利用が想定される流通拠点に水素ステーションの試行的整備（水素の流通方法の検討含む） FCVトラックの戦略的なネットワーク整備計画の作成 	<ul style="list-style-type: none"> 配送拠点以外の場所でも充電できる場所の整備 大型EVトラックの導入 FCVトラックの戦略的なネットワーク整備計画に対応した水素ステーションの段階的整備 	<ul style="list-style-type: none"> すべての貨物車のEV化、FCV化 自動運転するEVトラック用充電設備の整備やそれらを用いた新たなサービスの展開

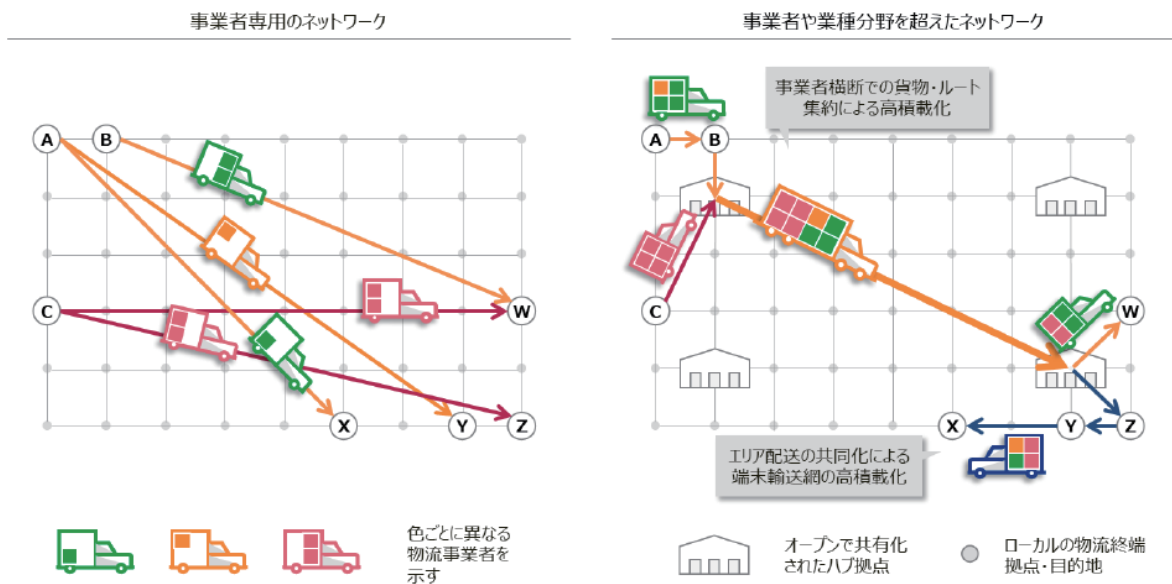


図6-8. フィジカルインターネットによる積載効率向上のイメージ¹⁶⁰

コラム 貨物車の充電技術の進展

車の稼働率が高い貨物部門では、営業時間外の夜間だけの充電で1日分の走行電力が足りない可能性があり、この場合、営業時間中の昼間に充電をする必要が出てくるが、従業員の限られた労働時間の中で、車両の充電を待機する時間は大きなロスとなる。この問題を解決するために、カートリッジ式バッテリーの利用も検討されている²⁰²。しかし、貨物車両に搭載される電池の重量は数100kgを超えると考えられるので、交換時の労力が課題となりそうだ。もう一つの考え方は、急速充電器の整備であるが、従来の急速充電機は高圧受電設備を通じて急速充電器を導入する必要があり、導入に係る工事が大掛かりになるという課題がある。これに対して、再エネなどからの電力を一度定置型蓄電池に充電しておき、貨物車両が必要な時に充電できる仕組みが商用化された²⁰³。このシステムのメリットは商用車の充電は電池から電池となるため、充電速度が早いことが特徴である。また、系統から定置型蓄電池は高圧受電設備を必ずしも必要としない。

このように、これまでは充電に時間がかかるとされてきたEVも、様々な技術や考え方の組み合わせで解決に向かっている。特に電池技術の発展は目覚ましく、政府の蓄電池産業戦略²⁰⁴では、「遅くとも2030年までに、蓄電池・材料の国内製造基盤150GWh/年の確立」とし、「2030年に我が国企業全体でグローバル市場において600GWh/年の製造能力確保」としている。また、電池の種類が多様化も考えられ、今後は全固体リチウムイオン電池やナトリウムイオン電池など、現在の液系リチウムイオン電池が抱える課題を補完するような電池の開発が進めば、電池を利用した貨物車両を中心とするロジスティクスの構築の実現可能性が高まる。

コラム 働き方とロジスティクスが高度にデジタル化すると車の所有率が下がる？

人々が車を保有する理由として、日本自動車工業会のアンケート調査²⁰⁵では「買物・用足し・他」が4割強を占めており、次に、「通勤・通学」が3割強を占めている。また、この割合には地域差があると考えられ、長野県自動車販売店協会の調査²⁰⁶では、車の主な利用目的として、「通勤」が8割弱で、「買い物」が6割弱となっている。

従って、本レポートのバランスシナリオが想定するような様々な業種においてテレワーク率が上昇し、人が移動する際にもMaaSのようなマイクロモビリティからシェアリング車両、公共交通を使い、ものの移動についても高度にデジタル化すると、「通勤・通学」及び「買物・用足し・他」を目的とする車所有ニーズが大幅に下がる可能性がある。特に、人々がモノを自ら運ばずに、人々が注文してから短時間（ロジスティクスの様々な流通経路が自動化されて、遅くとも1日以内。）で荷物が運ばれるような状況が達成されると、車所有ニーズに大きく影響する可能性が考えられる。

船舶・航空について、2018年度の内航海運のCO₂排出量は日本全体の0.91%であり²⁰⁷、2018年度の国内航空のCO₂排出量は日本全体の0.92%であった²⁰⁸。さらにこれらの部門は、CO₂排出量の大幅な削減が既存の技術だけでは難しいhard-to-abate sector²⁰⁹に位置づけられている。そのため、ここでは、他部門と比較して、簡易的なアクションプランを記す。

船舶のうち、現在ディーゼルを用いている小型船舶については、2030年までに駆動力の電化を取り入れる準備を進める。2030年-2040年には、電化に加えて、水素（FCV化）やアンモニアの利用を進める。どちらを選択するかについては、小型船舶を用いる周辺のインフラ環境や使用用途によって変わる。2040年-2050年は、すべての小型船舶が、電気、水素、アンモニア、バイオ燃料、合成燃料のいずれかを利用しているが、港湾インフラの整備や燃料サプライチェーンの整備容易性、陸上交通においてEVの利用が主として普及している社会状況では、電気駆動する船舶の利用が有力と考えられる。

現在、重油を用いている大型船舶については、2030年までに一つの船体の中にある一部のエネルギーを電気に変えていく。例えば、現在の大型船の多くで利用されているディーゼル電気推進システムの一部をバッテリーシステムに転換することが考えられる²¹⁰。また、将来の脱炭素燃料への転換（アンモニア利用など）を見越しつつ、すぐにできるCO₂削減策として、ディーゼルから天然ガスの利用への転換も有効である²¹¹。2030年-2040年にかけて、アンモニアと電気の利用を増やしていき、2050年までにすべての大型船舶が、アンモニア、電気、水素、合成燃料、バイオ燃料のいずれかを利用している。大型船舶の重量と航続距離の理由から、アンモニア利用が主力エネルギーとなりうる。例えば、東京大学グローバル・コモンズ・センターと独立系システム・チェンジ企業である Systemiq社が共同で行った1年以上に及ぶ調査・研究の結果⁸⁸では、船舶によるアンモニア需要を大きく見込んでいる。

航空においては、機体の重量に関わる制約が大きいことから、講じうる脱炭素対策は限られてくる。2030年までに、エンジンの電化（燃料電池含む）技術開発、食糧生産と競合しないバイオ燃料の開発、安価な合成燃料の開発が必要であると考えられる。2030年-2040年にこれらの技術を目的や利用状況に合わせて部分的に採用し、2050年までに本格的な実装を進めることが求められる。

(6) 農林水産鉱業建設業

農業、林業、水産業、鉱業、建設業は労働集約産業であり、少子高齢化が進む日本社会では、人手不足が顕著となっている。また、重機を使う作業も多く作業環境内の潜在的危険性や気象条件によっては厳しい作業環境になることがあり、遠隔操作や自動化によって、労働環境の改善にもつながり易い。従って、デジタル化によって、労働生産性を高めることが一層重要な部門ともいえる。さらに、デジタル化を進めるために、相性の良い電化を進めることも併せて重要となる。

農業、林業は自然資源が利用しやすい立地で営まれる。そのため、農林業の作業の過程で必要となる熱需要に対してバイオマス資源を使うことで、エネルギーの脱炭素のみならず、資源の地域循環を形成することができる。

表6-11. 農林水産業に関するアクションプラン

2020-2030	2030-2040	2040-2050
作業のデジタル化		
<ul style="list-style-type: none"> デジタル技術とその実践 <p>農業：気象状況のモニタリングや予測技術を用いて、最適な農作業の計画管理。また、作物の生育状況のモニタリングを進めることで、施肥の最適化により、肥料コスト減を進める。</p> <p>林業：森林管理のデジタル化、遠隔操作技術の導入</p> <p>漁業：気象状況や衛星情報を用いた海洋漁業の生産効率化。デジタル化による施肥効率改善。</p> <p>建設：3D 設計地図に基づく作業の高度化及び一部重機の遠隔操作及び自動運転²¹²</p>	<ul style="list-style-type: none"> 収集した情報と部分的な自動化による作業の高度化^{213,214} 需要予測に基づく生産管理²¹⁵ 複数の作業機械が協調も可能とする自動運転技術の実装²¹⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> 多くの作業プロセスが、作業機械による自動運転（自律運転）化の達成
熱の電化及びバイオ資源の利用		
<ul style="list-style-type: none"> 農林業：ボイラからヒートポンプへの転換による電化。 	<ul style="list-style-type: none"> 農林業：ハウス農場の暖房用途としてのバイオマス利用。ヒートポンプ及び太陽光発電を利用した電化 	<ul style="list-style-type: none"> 作業のデジタル化と連動した熱供給管理による生産性、収益性の向上
車両の電動化		
<ul style="list-style-type: none"> 作業機械の電動化や水素利用に関わる技術開発の試験的運用 	<ul style="list-style-type: none"> 電動化や水素を利用した作業機械の普及 作業機械へのエネルギー供給インフラの整備（有線給電インフラや制度構築、充電拠点、水素ステーションなど） 	<ul style="list-style-type: none"> 作業のデジタル化の下での、電動化した作業機械の運用

コラム 地域内の資源の使い方：久慈バイオマスエネルギー株式会社の事例

岩手県久慈市にある久慈バイオマスエネルギー株式会社²¹⁷では、林業の廃材として発生するバーク（樹皮）に着目して、シイタケ工場などに対してバイオマス熱供給事業を構築した。事業考案時には、シイタケ工場における殺菌用蒸気と暖房用温水需要を基に、必要となるバイオマス供給量を算定し、事業計画を作成した。これは、「森にバイオマス資源があるから」という供給側の理由でバイオマス利用計画を作るのではなく、「バイオマスで採算が採れる熱需要がどこにあるのか」という需要側からバイオマス利用計画を作成したことが、頑健な事業計画作成に至った理由の一つであると考えられる。

さらに、久慈バイオマスエネルギー株式会社では、バイオマスエネルギーによる暖房装置をもちいてシイタケを栽培することから、シイタケの育成スピードをコントロールすることができ、シイタケの市場価格が高い時期に出荷することで、収益性を上げている。この生産工程に、IoT技術を用いている。近年では、夏季でも冷涼とされてきた久慈地域でも、しいたけ栽培に適した気温以上に外気温度が上昇することも多くなり、品質低下の要因となっていたことから、空冷ヒートポンプチャラーによる温度管理も行っている。

また、久慈バイオマスエネルギー株式会社は地域経済や資源循環に貢献している。熱エネルギーの原料を地場産業である林業から調達しているだけでなく、シイタケ栽培に必要な熱供給プロセスの中で、余剰となった乾燥チップを地域内の福祉施設、学校、工場に販売することで、地域全体のエネルギー自給率工場にも貢献している。また、将来的には、乾燥木質チップ（切削）を原料としたコジェネレーション施設を整備し、地域マイクログリッドを構築するといった展望も描いている。

久慈バイオマスエネルギー株式会社、バイオマス、電化、IoTを用いて、生産効率上がり、その事業が地域全体に貢献している事例といえる。

結び

本レポートでは、グローバルな1.5°C目標に貢献できる、GHG排出の速やかかつ大幅な削減を可能とする日本の脱炭素のロードマップを検討し、エネルギー供給と社会経済の両面で、現状の延長ではない大きな変化が必要であることを定量的に示した。そのような大きな変化を秩序ある移行とするためには、社会のあらゆるステークホルダーが参加することが欠かせない。最初に述べたように、本レポートでは、企業をはじめとするステークホルダーとの協創を指向し、ワークショップやヒアリングを重ねてきた。今後このレポートで検討したプランを現実のものとしていくために、企業・金融機関・自治体・政策決定者等、幅広い人々に認知・支持していただき、その行動に反映していただきたいと考えている。そのためのアウトリーチ活動を積極的に実施していく計画である。また、本レポートの随所で触れたように、脱炭素に向けた技術・投資・政策は日々目まぐるしく変化しており、“1.5°C ロードマップ”は適時にアップデートしていくべきものと考えている。多くのステークホルダーとの対話を通じたフィードバックを受けて、このプランをさらに魅力的で受容性の高いものとしていきたい。

参考資料 1

1.5°Cロードマップにおける各項目の分析方法

(1) エネルギーサービス需要の推計

① 生産活動量の推計方法

産業部門のエネルギー消費量は生産活動量によって大きく左右される。また、産業間には相互関係があり、ある産業の生産活動の増減が、他の産業の生産活動に波及する。そのため、将来の日本の産業の姿を統合的に描くためには、産業連関表を活用することが有効である。本レポートでは、政府目標シナリオ以外の全てのシナリオについて、落合²¹⁸、岩田ほか¹²、小林ほか²³の方法に倣い、総務省が公表する日本全体の産業連関表（2015年）をシナリオに応じて加工することで将来（2030年、2050年）の産業連関表を作成して分析を行っている。

産業連関表の作成にあたっては、まず、経済のマクロフレームを設定し、次にシナリオに応じて投入係数表の修正を行うとともに、最終需要・輸出入を調整してマクロフレームと整合する産業構造の姿を描くことで、想定する条件下における産業各部門の国内生産額を求めた。

まず、経済のマクロフレームについては、日本経済研究センターによる中期経済予測（予測対象：2035年まで）²⁴における実質GDP成長率を外挿補完し、2050年までの実質GDPを設定した（2030年602兆円、2050年660兆円）。同予測では、2035年までの業種別の国内最終需要・輸出入について、現状維持の場合（標準シナリオ）とDX・オープンイノベーションなどに積極的に取り組んだ場合（改革シナリオ）の2つのケースで推計を行っている。本レポートでは、この両方を2050年まで延長した上で、現状維持の場合の推計値を、トレンドを反映したベースラインとして設定した。そのうえで、DXやオープンイノベーションなどに積極的に取り組んだ場合の推計値と現状維持の場合の推計値との差を、シナリオに応じた調整を行う際の最大値として設定し、シナリオを全て反映した場合に改革シナリオの推計値に近くなるように調整した。

次に、取引基本表をシナリオ設定項目に対応するように60部門×60部門に集約した。そのうえで既存の産業連関表には存在しない電気自動車部門を、電力中央研究所²¹⁹及びOsawa, et al.²²⁰を参照して新設した。また、鷺津ほか²²¹を参照し、発電部門及び電力施設建設部門の内に再生可能エネルギー（太陽光、陸上風力、着床式洋上風力、その他再エネ）部門を新設した。将来の産業連関表には、自動運転EVによるモビリティサービスを提供する部門をBosch, et al.²²²を参照して新設した。また、国内での水電解による水素製造と輸入水素を用いて水素供給を行う部門を新設した。さらに、発電部門及び電力施設建設部門の内に、ヨーロッパにおける実プロジェクトのコストデータ²²³をもとに投入係数を想定し、浮体式洋上風力部門を新設した。

そのうえで、想定するシナリオに応じて投入係数及び最終需要の調整を行った。モビリティの自動運転化・サービス化や産業全体でデジタル・トランスフォーメーションが進展する「デジタル化」、消費財や建築物などに利用する素材が変化する「マテリアル利用の変化」、電化が進み再生可能エネルギー中心の電力システムに移行する「エネルギー利用の変化」についてシナリオを設定し、それぞれの想定を反映した場合における生産額の変化を推計した。

デジタル化のうち、モビリティの自動運転化やサービス化が進むシナリオは、家計における自動車購入、ガソリンの消費と自動車整備にかかる支出が減少する一方、モビリティサービスの利用にかかる家計支出が増加し、モビリティサービス部門がEV

購入・整備、電力消費を行うようになる、という変化として表現した。また、自動車の車体の樹脂化が進む効果として、自動車用部品への鋼板投入の一部がプラスチック製品に置き換わることを想定して投入係数を修正した。

また、デジタル化により無形資産への投資が進み高付加価値化していくシナリオは、情報通信、公務、教育研究、郵便、対事業所サービス部門において紙製品への投入が減り情報サービスへの投入が増える変化と、全部門において情報サービス及び教育研究への投入と付加価値率が増加し、その分だけ他の投入が全体的に減少する、という変化によって表現している。それに加えて、日本経済研究センターが提供する中期経済予測の改革シナリオを参照し、デジタル化による成長分野の国内最終需要及び輸出量を増加させる形で反映している。

マテリアル利用については、再生紙利用が進むシナリオについて、紙・板紙・加工紙の生産においてバージンパルプの投入が古紙の投入で置き換わる変化を、投入係数を調整することで表現する。また、建築物への国産木材利用が進むシナリオについては、建設部門のうち住宅・非住宅の建築に関わる部分について、木造建築物と非木造建築物の割合を変化させて投入係数を集計することと、木材の輸入係数を変化させることによって反映している。飲食料品の脱プラが進むシナリオについては、プラスチック製品の投入減と紙製品の投入増として反映している。なお、鉄鋼及び化学製品のリサイクル及び製造プロセスの変化もシナリオでは想定しているが、材の価格が大きく変化することが想定され、産業連関表による分析では扱えないため、別途エネルギー需要の計算において考慮している。

エネルギー利用については、電化が進むシナリオについては、各部門の化石燃料投入額と電力投入額の変化（差額を付加価値で調整することで固定資本への投資増を表現）と、家計の化石燃料への支出減と電気機械への支出増によって反映している。また、再生可能エネルギー中心の電力システムへの移行が進むシナリオについては、発電部門の投入係数の変化、電力施設建設部門の投入係数の変化と電力システムへの投資額の変化による最終需要の変化、によって表現している。

なお、本アプローチは経済のマクロフレームを予め与えたうえで、それと整合しうる1つの生産活動の在り姿を描き出すものであり、本来であればマクロフレームとの相互関係についても定式化したうえで考慮を行うことが望ましい。本分析ではこれは検討できておらず、今後の研究課題である。

② 陸上旅客輸送量の推計方法

旅客輸送量は、市町村別の将来人口、平日と休日の外出率、平日と休日の外出当たりのトリップ長、平日と休日の日数、各移動手段（徒歩、自動車、原付、乗用車、鉄道、バス、二輪車、自転車）輸送分担率を基に、各移動手段の移動需要量を推計した。推計年は、基準年、2030年、2040年、2050年とした。これらのデータをもとに、各移動手段の移動需要量の基準年比の増減率を推計した。

市区町村ごとの人口想定は、Hori, et al.²²⁴の分散化シナリオを参照した。外出率、トリップ長、移動手段は「全国都市交通特性調査²²⁵」を引用した。「全国都市交通特性調査」は、全国すべての自治体に対して調査がなされておらず、都市類型ごとに対象となる都市（地域）に限定して調査がなされている。従って、本報告書ではこれらの地域の類似性を鑑みて全国の自治体ごとに、「全国都市交通特性調査」におけるもっとも近い都市類型を特定した。具体的なパラメータについては、3章2節「シナリオ設定①：エネルギーサービス需要」、3章3節「シナリオ設定②：需要側エネルギー技術の変化（電化・水素利用・省エネ）」を参照。

③ 陸上貨物輸送量の推計方法

貨物輸送量は、エネルギーサービス需要の推計①で得られた産業部門の経済活動量の変化率を基に、自動車輸送統計調査²²⁶の輸送品目の輸送量（トンキロ）を推計した。輸送品目と産業部門の対応表を表 S1-1に示す。

次に、物流業界のあらたな輸送技術や取り組みによる輸送量の変化も取り入れた。第一に、トラックによる輸送から内航海運や鉄道による輸送へのモーダルシフト、道路交通対策や部分的な自動運転走行や車両の大型化、トレーラー化の推進、ダブル連結トラックの推進等の物流の効率化による輸送量の変化を考慮した。第二に、貨物需要に応じた貨物車両運用の最適化や他社との共同配送などを可能とするフィジカルインターネットの導入による輸送量の効果を考慮した。ただし、フィジカルインターネットが適用できる輸送品目は、食料品や日用品など共同配送が行いやすいものに限定した。第三に、資源効率化や食品ロスについては、使用済み製品の再利用化に伴いバージン材の使用量が減る効果や食品ロスの改善に伴う肥料や農作物、廃棄物運搬に関わる貨物需要が減少すると考えられる。従って、これらの効果を循環経済による活動量の変化として、輸送量を算定する際のパラメータとして考慮した。

表 S1-1. 輸送品目と産業部門の対応表

カテゴリ	部門	カテゴリ	部門
機械_輸送用機械	輸送機械	石油製品_その他の石油製品	石油石炭製品
機械_輸送用機械部品	輸送機械	石油製品_LPG及びその他のガス	石油石炭製品
工業用非金属鉱物	非鉄金属	化学薬品	石油化学
金属_非鉄金属	非鉄金属	化学肥料	石油化学
穀物	農林水産建設	染料・塗料・その他の化学工業品	石油化学
野菜・果物	農林水産建設	製造食品	食料品
その他の農産品	農林水産建設	食料工業品	食料品
畜産品	農林水産建設	紙・パルプ	紙パルプ
水産品	農林水産建設	繊維工業品	紙パルプ
木材	農林水産建設	金属製品	一般機械
薪炭	農林水産建設	窯業品_その他の窯業品	その他窯業
動植物性製造飼・肥料	農林水産建設	機械_その他の機械	その他
くずもの_金属くず	鉄鋼及び非鉄金属	窯業品_セメント	セメント
くずもの_その他のくずもの	鉄鋼及び非鉄金属	日用品	人口
金属鉱	鉄鋼	ゴム製品・木製品その他の製造工業品	人口
金属_鉄鋼	鉄鋼	廃棄物	人口
コークス・その他の石炭製品	鉄鋼	輸送用容器	人口
石炭	石油石炭製品	取合せ品	人口
石油製品_揮発油	石油石炭製品	砂利・砂・石材	建設
石油製品_重油	石油石炭製品	廃土砂	建設
石油製品_その他の石油	石油石炭製品		

④ 船舶、航空輸送量の推計方法

船舶、航空の輸送量を推計する際に、資源エネルギー庁「総合エネルギー統計²²⁷」に倣い、旅客船舶、貨物船舶、旅客航空、貨物航空に分割した。旅客船舶と、旅客航空の活動量は、日本全国の人口と比例して変化すると想定した。貨物船舶と貨物航空の活動量は、上記の③陸上貨物輸送量の推計した貨物輸送量の変化率の全部門平均を用いた。

⑤ 住宅床面積・性能の推計方法

日本の住宅ストックは先進国の中で最も断熱性能が低いとされており、断熱性能の向上によるエネルギー消費量への影響は非常に大きいと考えられる。また、日本の住宅は寿命が比較的短いとはいえ、数十年間残存することから、ストックの入れ替えがどのように起こりうるか、慎重に検討する必要がある。そのため、本レポートでは新築住宅における断熱性能ごとのシェアが、ストック全体の性能向上にどのように影響するか分析を行った。

市区町村ごとの人口想定は、Hori, et al.²²⁴の分散化シナリオを参照した。これは過去のトレンドとは異なり、デジタル化や働き方の変化を背景に地方移住が進んだ場合の人口分布を推計したものであり、1.5°C目標と様々な社会課題の解決との相乗効果を追求するうえで分散型社会の構築が重要であるとの考えに基づくものである。ただし、人口分布は政策介入等でコントロールすることは難しく、不確実性が高い。そのため、同文献によるBAUシナリオ及び集中化（大都市圏への人口流入トレンドが強化される）シナリオの人口分布を用いて感度分析を行っており、日本全体のエネルギー消費量・温室効果ガス排出量への影響は殆ど無視できることを確認している。

世帯数については、国立社会保障・人口問題研究所²⁸による将来の世帯あたり人員数（都道府県ごと）で除することで求めた。また、各市町村の戸建／集合住宅に住む世帯の比率は現状から変化しないと想定する。そのうえで、戸建／集合住宅それぞれの1世帯あたりの床面積（都道府県ごと）を住宅着工統計²²⁸から求め、それらが変化しないとの仮定のもと、市区町村ごとに将来の戸建住宅及び集合住宅の床面積を推計した。

次に、建築物ストック統計をもとに都道府県ごとの住宅ストック床面積（戸建／集合、建築年、木造／非木造別）を整理し、各市区町村の世帯数に応じてそれを按分し、経過年数に応じて残存率を乗ずることで将来の市区町村ごとの住宅ストックを推計した。さらに、将来の床面積から各時点におけるストックの残存量を引くことにより新築住宅面積を求めた。

その上で、新築住宅に占める外皮断熱性能水準ごと（1～7地域、無断熱～HEAT20 G2まで6段階を想定）のシェアを建築年ごとに想定し、各断熱性能水準の下での暖房エネルギー消費量の変化率を想定することにより、将来の住宅ストックの外皮断熱性能の改善率を推計した。

なお、本分析においては家庭における給湯・空調・調理に関するエネルギーサービス需要（お湯の使用量や温度、冷暖房の温度や使用時間など）は現状から変化しないと仮定して分析を行った。

⑥ 業務用建物床面積・性能の推計方法

業務用の建物は多種多様な業種および用途から構成されており、同じ業種や用途内でも業態や規模の違いによって大きくエネルギー消費の在り方が異なり、詳細な積み上げによってモデル化することが難しい。また、従来のトレンドでは業務用床面積はGDPの増加と共に拡大してきたが、今後はデジタル化が進むことにより、これまでオフィスや店舗などにおいてリアルに行われていた活動がバーチャルで行われるようになる、といった可能性も考慮する必要がある。また、業務用建築物は、住宅と同様に長期間残存することや、エネルギー消費が建物の性能と相互に関係していること、などを考慮し、ストックの入れ替えがどのように起こり得るかを検討する必要がある。そのため、本レポートでは、生産活動の変化とデジタル化による床面積の変化を考慮したうえで、新築・改修におけるエネルギー消費性能の向上が業務用建物ストック全体の性能向上にもたらす影響に注目して分析を行った。

まず、日本エネルギー経済研究所⁴⁹及び平野ほか⁵⁰を参照し、業種別に国内生産額1単位を得るために使用している建物種別（事務所、店舗、飲食店、ホテル、病院、学校、その他）の業務用建物床面積を分析した。さらに、その使用床面積について、デジタル化が進むことによる将来の変化率を想定した。それに前項a.で推計した業種ごとの国内生産額を乗じることで、業務部門における将来の建物種別の必要床面積を業種ごとに推計した。

次に、奥村ほか²²⁹を参照し、都道府県ごとに建築物ストック（建物種別、建築年代別）を整理し、経過年数に応じて残存率を乗ずることで将来のストック残存量を推計した。新築面積については、将来の建物種別の必要床面積を人口に応じて都道府県ごとに按分したうえで、それから将来のストック残存量を差し引くことで求めた。既存の建築物の改修については、ストックの床面積に対する割合を想定して求めた。その上で、国土交通省⁵²及び建築着工統計²³⁰を参照し、新築及び改修に占める1次エネルギー消費量基準（BEI：Building Energy Index）ごとのシェアを新築・改修年代ごとに想定することで、将来における業務用建物ストックの1次エネルギー消費量の改善率を推計した。

(2) 部門別最終エネルギー需要の推計

① 産業部門

産業部門の最終エネルギー需要は、資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」に記載される2015年から2019年の部門別の最終エネルギー消費量を基に基準年エネルギー消費量を算定する。次に、各部門の活動量変化率と電化・水素利用・省エネ対策によるエネルギー消費量の変化率を乗じて、各部門の対象年（2030年、2040年、2050年）の部門別最終エネルギー消費量を算定した。

なお、産業部門では他の部門（運輸部門、家庭部門、業務部門）とは異なり、製造設備のストック推計に基づく、設備の入れ替えのタイミングを計算していない。しかし、ものづくり白書 2020年版²³¹によると、2018年の時点で金属工作機械、第二次金属加工機械、鑄造装置では50～80%近くの設備が導入されてから15年以上経過していること、設備投資が見送られる傾向が続いていることが指摘されている。また、第2章のコラム「対策別のCO₂削減費用（限界削減費用曲線）」に示される通り、産業部門における電化技術は、コストがマイナス（対策を導入すれば経済的な便益が得られる）となるという考えが支持されている。加えて、「DXレポート～ITシステム「2025年の崖」克服とDXの本格的な展開～」²³²では、約8割の企業が、老朽化・複雑化・ブラックボックス化した既存システムを抱えており、企業のDXの推進の足かせになっていることが指摘されている。なお、製造設備をデジタル管理するために、電化を通じて生産設備も大型集中から個別分散にすることが有効な手段のひとつである²³³。

従って、今後製造業が生産性の高い製造プロセスで製品を製造していくために、脱炭素のみならず設備のDX化の観点から、積極的な設備投資が行われ易い状況であるといえる。すなわち、脱炭素化、デジタル化に資する技術の投資インセンティブが十分に与えられれば、既存のストックが早期に入れ替わると想定した。

② 運輸部門

陸上旅客輸送量のうち、乗用車とバス車両について、日本自動車工業会が公表する四輪車の販売台数統計データ（1985年-2020年）²³⁴及び乗用車の残存率（ある年式の自動車がある程度残っているかを表す数値）を基に、年式別の2020年のストック量を推計した。この際に、推計値が自動車の保有台数の統計値と整合するように残存率を調整した。残存率の設定については、豊田中央研究所の研究レポート²³⁵の方法論及び自動車検査登録情報協会の実績値²³⁶を参照した。自動車の保有台数の統計は、自動車検査登録情報協会「市区町村別自動車保有車両数（令和2年度3月末現在）」²³⁷、全国軽車両自動車協会連合会「市区町村別軽自動車車両数（令和2年度3月末現在）」²³⁸を用いた。

次に、旅客輸送量（人キロ）及び人々の移動手段の移動割合を基に、各シナリオのt年の乗用車とバスによる移動需要量を求めた。移動需要量に対して必要となる乗用車とバス車両台数の係数（台/人キロ）を基準年から一定として、各シナリオの自動車及びバス車両必要量を推計した。

自動車及びバス車両のそれぞれの必要量からt-1年までに販売され、t年までに残存している車両ストック（2040年であれば、2039年までに販売され、残存している自動車台数）を差し引いた値をt年の新車販売台数として算出した。

t年の新車販売台数に対して、各年のEV、PHEV、FCV、ICEの販売シェア想定を乗じて各年に販売された自動車種別の販売台数を算出した。これに、t-1年までの既存のストックを足し合わせて、t年の車種別の自動車保有台数あるいは、保有割合を算出した。

ここまでの過程で推計した乗用車による移動量と車種別の自動車保有割合の数値を用いて、基準年からの変化率をもとめ、最終エネルギー消費量を計算した。具体的なパラメータについては、3章2節「シナリオ設定①：エネルギーサービス需要」、3章3節「シナリオ設定②：需要側エネルギー技術の変化（電化・水素利用・省エネ）」を参照。

陸上旅客輸送量のうち、鉄道と二輪車について、旅客輸送量（人キロ）及び人々の移動手段の移動割合を基に、各シナリオのt年の鉄道と二輪車の移動需要量をそれぞれ求めた。これにt年の車両電化率及び水素化率を乗じて、最終エネルギー消費量を計算した。

陸上貨物輸送量について、陸上旅客と同様の方法で最終エネルギー消費量を推計した。用いたデータも同様に、日本自動車工業会が公表する四輪車の販売台数統計データ（1985年-2020年）²³⁴、自動車検査登録情報協会の残存率実績値²³⁶、自動車検査登録情報協会²³⁷及び全国軽車両自動車協会連合会²³⁸が示す市町村別の車両保有台数である。

船舶、航空輸送について、求めた輸送量から基準年比の値を用いて、各年の最終エネルギー消費量を推計した。次に、最終エネルギー消費量のエネルギー種別内訳については、船舶、航空に使うエネルギー種別割合（3章3節「シナリオ設定②：需要側エネルギー技術の変化（電化・水素利用・省エネ）」を参照）を乗じて算出した。

③ 家庭部門

まず、給湯・暖房・調理について、環境省「家庭部門のCO₂排出実態調査²³⁹」、一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター「令和2年度ヒートポンプ普及見通し調査¹¹⁶」、総務省「全国消費実態調査²⁴⁰」を参照し、家庭における給湯・暖房・調理のそれぞれの機器のストック（機器種別、地域区分、戸建／集合、設置年代別）を整理し、経過年数に応じて残存率を乗ずることとで将来のストックを推計した。

表 S1-2. 検討対象とした機器種別

エネルギー源	給湯	暖房	調理
灯油	石油給湯器	石油ストーブ	—
ガス	ガス給湯器	ガスストーブ	ガスコンロ
電気	ヒートポンプ式給湯器、電気温水器	エアコン	IH クッキングヒーター

表 S1-3. 地域区分

寒冷地	温暖地
北海道、青森県、岩手県、秋田県、宮城県、山形県、福島県、新潟県、富山県、福井県、石川県	その他都府県

次に、将来の世帯数の変化率にあわせてストックの総容量を求め、それから残存量を差し引くことで各年の新規導入容量を求めた。その上で、新規設置に占める機種別シェア及び各機器のエネルギー効率を設置年ごとに想定し、将来のストックのエネルギー効率の改善率及び燃料シェアを推計した。

そして、環境省「家庭部門のCO₂排出実態調査²³⁹」、日本エネルギー経済研究所によるEDMCエネルギー・経済統計要覧「家庭部門用途別エネルギー消費量²⁴¹」を参照して、用途別・地域区分別・戸建／集合別の現状の最終エネルギー消費量を推計した。その結果と現状の機器ストックのエネルギー効率・容量に関する推計結果を用いて、現状のエネルギーサービス需要を求めた。そのうえで、暖房需要については、断熱性能の改善率に応じて暖房負荷が減少するとの想定、その他の需要については現状のエネルギーサービス需要が変化しないとの想定に基づき、将来の機器ストックの機種別シェア・エネルギー効率・容量に関する推計結果を用いて将来の最終エネルギー消費量を求めた。

また、冷房・照明・その他家電に関しては、環境省「家庭部門のCO₂排出実態調査²³⁹」をもとに現状の電力消費量を推計し、Shimoda, et al.²⁴¹を参照して、現状のトップランナー機器が普及していくことによるストック全体でのエネルギー効率の改善率を設定することで、将来の電力消費量を推計した。以上を合計し、家庭部門の最終エネルギー消費量とした。

④ 業務部門

まず、資源エネルギー庁「総合エネルギー統計²²⁶」、日本エネルギー経済研究所によるEDMCエネルギー・経済統計要覧「業務部門業種別エネルギー消費量²⁴⁰」を参照し、現状の建物種別・エネルギー源別の最終エネルギー消費量を推計した。また、EDMCエネルギー・経済統計要覧「業務部門床面積当たり用途別エネルギー源別エネルギー消費量²⁴⁰」、大阪府環境審議会新たなエネルギー社会づくり検討部会資料²⁴²、平野ほか⁵⁰を参照し、建物種別に用途別エネルギー消費量（1次エネルギー換算値）の内訳を推計した。そして、用途ごと（給湯・空調・照明・コンセント・動力・その他）、エネルギー源別（化石燃料・電力）に現状の最終エネルギー消費量を、照明・コンセント・動力には電力、給湯・空調・その他には化石燃料又は電力が用いられると想定して上記のエネルギー消費量を按分することによって、建物種別に推計した。

次に、建物ストックのエネルギー消費性能（BEI）の平均値及び床面積と、建物種別のエネルギー消費の1次エネルギー換算値とが相関すると考えられるため、将来のストックの性能及び床面積の変化をもとに、建物種別・用途別・エネルギー源別に将来のエネルギー消費の1次エネルギー換算値を推計した。なお、電力の換算係数は9760kJ/kWhで固定した。

さらに、空調・給湯について、エネルギー消費のうち電力が占める割合を推計した。まず、Yamaguchi, et al.¹¹⁸を参考に、新築時と30年毎に新規設備導入が行われると想定し、建物用途ごとに各年代（10年ごと）における燃料種別のシェアを想定することで、各時点においてストックの床面積全体のうち電力をエネルギー源とする機器によって空調・給湯が行われている割合を求めた。さらに、各年代における機種別のエネルギー効率を想定することで、ストック全体でのエネルギー効率の変化を推計した。これらをもとにエネルギー消費の1次エネルギー換算値のうち電力が占める割合を求め、将来の電力及び化石燃料の最終エネルギー消費を推計した。また、その他の需要については、2050年にかけて電化されていくことを想定して最終エネルギー消費量を推計した。そのうえで、化石燃料の最終エネルギー消費量については、現状のエネルギー源別の内訳に対して、重油・灯油・軽油から都市ガス・プロパンガスへの転換率を設定して調整を行ったうえで、これを用いて各エネルギー源の最終エネルギー消費量とした。

なお、デジタル化の進展に伴って処理される情報量（IPトラフィック）が増大するため、データセンターの電力消費量の増加が見込まれる。一方、上記の分析方法ではデータセンターの電力消費は情報通信業の内数として推計しており、データセンターのみを取り出して詳細に検討しているわけではない。科学技術振興機構²⁴³によると、国内のデータセンターの年間消費電力は、現状10TWh程度であるのに対して、現行技術の改善率とトラフィックの増加率が継続した場合では2050年に500TWhに達するが、非ノイマン型 CMOS コンピューティング、量子アニーリングといった現時点で実用化が見込まれる新計算原理が寄与することで、110TWhまで抑えられる。これに加えて、量子コンピューティングや光コンピューティングなど更に電力消費の削減に寄与する革新的技術の実用化も期待される。トラフィック量の増加や技術進展には大きな不確実性が存在することに留意が必要である。

(3) 1次エネルギー供給の推計

エネルギー種別及び部門別の最終エネルギー消費量を満たすための1次エネルギー供給量を計算する。本レポートでは、エネルギー利用分の2次エネルギーとして、電力、熱、水素（及び派生燃料としてのアンモニア）、合成燃料・合成メタンを扱う。非エネルギー利用分の2次エネルギーとして、鉄鋼部門におけるコークスや還元剤としての水素、化学部門におけるナフサ及び合成ガスを製造するための水素を扱う。2次エネルギーから1次エネルギーへの推計方法のうち、①燃料の直接消費、②電力、③熱、④水素・合成燃料、⑤合成ガスから製造される化学品の原料についての詳細を以下に示す。それ以外の2次エネルギー（石炭製品、石油製品、都市ガスなど）について、総合エネルギー統計から計算される変換率を基に1次エネルギー供給量を推計した。なお、本レポートでは、2次エネルギーから1次エネルギーの転換に係る推計は簡素化している。そのため、化石燃料のエネルギー転換に伴うエネルギーロス（例えば、石炭から石油製品への転換や原油から石油製品への転換）が必ずしも総合エネルギー統計の値と一致しない。

これに対し、5章で示す通り、本レポートで推計されるエネルギー起源CO₂排出量と温室効果ガス（GHG）インベントリのエネルギー起源CO₂排出量が一致するように、1次エネルギー供給量に乗じる排出係数を調整することで、日本全体のGHG排出量の整合性を担保している。

① 燃料の直接消費

燃料として直接消費されるエネルギーのうち、石炭、石油、ガス、バイオマスについては、推計した燃料種別の最終エネルギー消費量に、総合エネルギー統計から求めた1次エネルギー換算係数を乗じて1次エネルギー供給量を算定した。

② 電力

電力については、以下の手順で発電電力量及び電力の1次エネルギー供給量を推計した。第一に、各年での再エネ可能エネルギーの設備容量及び稼働する原子力発電の設備容量を想定し（4章2節を参照）、年間の発電電力量見込み値を算定する。第二に、年間の電力需要量（最終エネルギー消費量として計上される電力及び水素と合成燃料の一部を製造するための電力の合計値）と再生可能エネルギーと原子力発電の年間発電電力量との差分を供給する電源や柔軟性として機能する火力発電の設備容量、主要送電線の増強を概算する。これらの諸元を基に上位2系統の送電線の運用容量の制約を考慮した電力需給シミュレーションによって、1時間ごとの需給バランスを推計した上で、各電源の年間の発電電力量を推計する（4章3節）。得られた発電電力量から、電源別のエネルギー転換効率（熱効率）を基に1次エネルギー供給量を推計する。

③ 熱（蒸気）

以下の手順で、熱供給に係る1次エネルギー供給量を推計した。基準年の総合エネルギー統計に記載される蒸気発生量と蒸気需要量から蒸気生成に係る部門別のエネルギー効率を推計した。これによって、推計したエネルギー効率値を用いて、各年の部門別の蒸気必要量から1次エネルギー供給量を推計した。また、熱供給に係る1次エネルギー供給量のエネルギー種について、基準年で使用されている再生可能エネルギー及び未活用エネルギーと同量を各年の最大値利用量と想定し、残りの1次エネルギー供給量は、3章3節で想定したガス転換率を用いて、天然ガスと石炭による1次エネルギー供給量を推計した。

④ 輸入水素・輸入合成燃料

水素と合成燃料は、国内電力（主に、再生可能エネルギー）によって製造・供給される分と、海外から輸入する分の双方があるため、以下の手順で推計した。第一に、電力系統シミュレーションにおいて、水素製造として利用できる余剰電力量（主に再生可能エネルギー、一部原子力発電）を推計する。次に、最終エネルギー消費量で消費される水素（化学品の原料など非エネルギー用途含む）及び水素専焼火力で消費される水素を製造するために必要なエネルギー量（電力量）を表 S1-4の変換効率を用いて推計する。水素を製造するために必要なエネルギー量（電力量）が水素製造として利用できる余剰電力量よりも大きい場合、不足となる水素を輸入で調達する。水素を製造するために必要なエネルギー量（電力量）が水素製造として利用できる余剰電力量よりも小さい場合、この残分をさらに合成燃料を製造するために必要なエネルギー量として利用を想定する。残

分が合成燃料を製造するために必要なエネルギー量よりも小さい場合、不足となる合成燃料を輸入で調達する。なお、余剰となる電力量が水素製造及び合成燃料製造に必要となる電力量よりも大きい場合、再生可能エネルギーの設備容量を調整し、再度電力需給シミュレーションを行う。そのため、輸出となる水素と合成燃料はない。

表 S1-4. 水電解と合成燃料変換の想定効率

エネルギーの変換	変換効率	参考資料や根拠となる数値
水電解効率	74.1%	アルカリ型水電解、PEM 型水電解、Hysata 型の水電解効率の平均値を用いる
合成燃料への変換効率	54.8%	Becker ²⁴⁴ を基に設定

⑤ 化学品の原料（非エネルギー利用）

現在の化学製品は石油ナフサから製造されているが、脱炭素社会では化石燃料の利用に大きな制約があることから、水素と一酸化炭素からなる合成ガスをフィッシャー・トロプシュ合成法やeメタノールを通じて、化学品を製造することを想定する。合成ガスから製造される化学品の原料は、国内グリーン水素を利用した国内製造と海外からの輸入のふたつのオプションがある。合成ガスから製造される化学品の原料の国内製造プロセスとして、グリーン水素と一酸化炭素との反応によって、基礎化学製品の製造を想定する。一酸化炭素は大気中から回収（Direct Air Capture）した二酸化炭素の利用を想定する。本レポートでは、基礎化学品として、エチレン、プロピレン、ブタン、ブチレン、ベンゼン、トルエン、キシレンの基準年の需要割合及び各基礎化学品の分子組成式を基に、原料となる水素及び炭素分子量を推計した。次に、必要となる水素及び一酸化炭素を得るために必要となるエネルギー量（非エネルギー利用分のエネルギー量）を表 S1-5の値を基に推計した。この結果、電気から合成燃料を製造（Power to liquid）するための総合エネルギー変換効率は、55%と推計された。なお、合成ガスから製造される化学品の原料の国内製造は、国内再生可能エネルギー導入量が大きく、余剰再生可能エネルギーで製造される水素が十分に利用可能な場合に選択されるオプションである。国内の再エネが十分に利用可能でない場合、あるいは、不足が発生する場合は、石油/合成ガスから製造に必要なグリーン水素を海外から輸入する。

表 S1-5. Power-to-liquidにかかる想定効率

エネルギーの変換	変換効率	参考資料や根拠となる数値
水電解効率	74.1%	アルカリ型水電解、PEM 型水電解、Hysata 型の水電解効率の平均値を用いる
CO ₂ → CO 必要電力量	3.1MWh/ トン	内閣府 ²⁴⁵ をもとに設定
CO ₂ を空気中から回収するためのエネルギー量	2MWh/ トン	Fasihi et al. ²⁴⁶

(4) 電力系統シミュレーション

本分析の対象は、北海道電力ネットワーク株式会社電力供給区域（以下、北海道地域）、東北電力ネットワーク株式会社電力供給区域（以下、東北地域）、東京電力パワーグリッド株式会社電力供給区域（以下、関東地域）、中部電力パワーグリッド株式会社電力供給区域（以下、中部地域）、北陸電力送配電株式会社電力供給区域（以下、北陸地域）、関西電力送配電株式会社電力供給区域（以下、関西地域）、中国電力ネットワーク株式会社電力供給区域（以下、中国地域）、四国電力送配電株式会社電力供給区域（以下、四国地域）、九州電力送配電株式会社電力供給区域（以下、九州地域）における上位2系統とする。本分析が対象とする送電線の概要を図S1-1に示す。送電線の本数は579本、地内基幹送電線が接続する変電所及び開閉所であるノードの本数は450地点である。

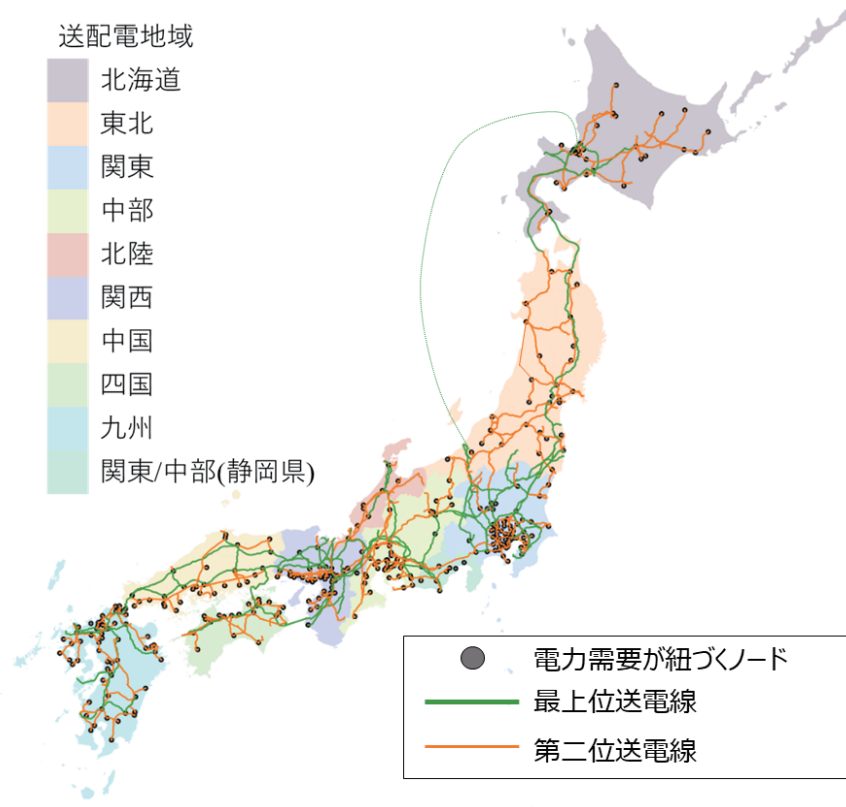


図 S1-1. 電力系統分析で対象とする送電線、ノードの概要

電力需給シミュレーションの分析手順を図S1-2に示す。はじめに、各シナリオの日本の家庭部門、業務部門、産業部門、運輸部門の新規電化分も考慮した電力需要を算定し、ノード別の1時間単位の電力需要及び日本全体で必要となる水素需要量を算定する。次に、既に公表済みの送電線増強計画や電力需要の増加に伴う地内線の送電線の増強分を算定する。次に、各年の乗用車保有台数の想定やEVの蓄電池や充電器の性能に基づいてEVによる柔軟性供給力を設定する。各年の人口・世帯分布や家庭用蓄電池の性能や蓄電池の世帯普及率に基づいて、家庭用蓄電池による柔軟性を想定する。2050年の人口分布と家庭用ヒートポンプ式給湯器の性能に基づいて、家庭用ヒートポンプ式給湯器による柔軟性供給力を設定する。本分析では、再エネの中でも設備の導入量が2030年と同程度と想定した一般水力発電、地熱発電、バイオマス発電について導入量を設定する。次に、分析シナリオの要件に応じて、各ノードの電力需要及び送電線の設備容量の情報をもとに、水素製造拠点にない洋上風力発電、陸上風力発電、太陽光発電の設備容量を各電源のポテンシャルの範囲内で算定する。さらに、ノード別の電力需要量や再エネ導入量と電力需要量、ノードに接続する送電線の運用容量を基に、系統用蓄電池の設備容量を想定する。これは、既存送電線によって、新規再エネの電力を効率良く利用するための適正配置を行うことを意味する。

最後に、水素製造拠点にある洋上風力発電および水素製造能力の設備容量を設定した。これらの導入容量は、本シミュレーションの結果として得られる各再エネ電源の出力抑制量を小さくしつつ、水素需要と水素製造量の需給バランスが整合するような設備容量となるように、繰り返し計算を行い、最終的な設備容量を定めた。

分析のシミュレーションツールは、日立エナジー社が所有するPROMODを使用した。PROMODは、動的な電力系統運用をシミュレートできることが特徴であり、系統の運用容量やトポロジー制約、発電ユニットの各種制約、燃料費などの経済性パラメータ、ノード毎・時間毎の需要を入力とし、直流近似による潮流計算を行い、送電制約を満たしつつ、出力として時間毎の電源の発電指令とこれに伴う系統の潮流をシミュレートできるソフトウェアである。2017年時点では、北米で272件、欧州で27件、豪州太平洋地域で11件等の利用があり、欧米の電力ビジネスの現場で広く実用に供されているものである。また、電力広域的運営推進機関も永続ライセンスを取得している²⁴⁷。

電力需給シミュレーション分析の詳細については、栗山ら¹⁸⁹、Kuriyama, et al.²⁴⁸を参照。

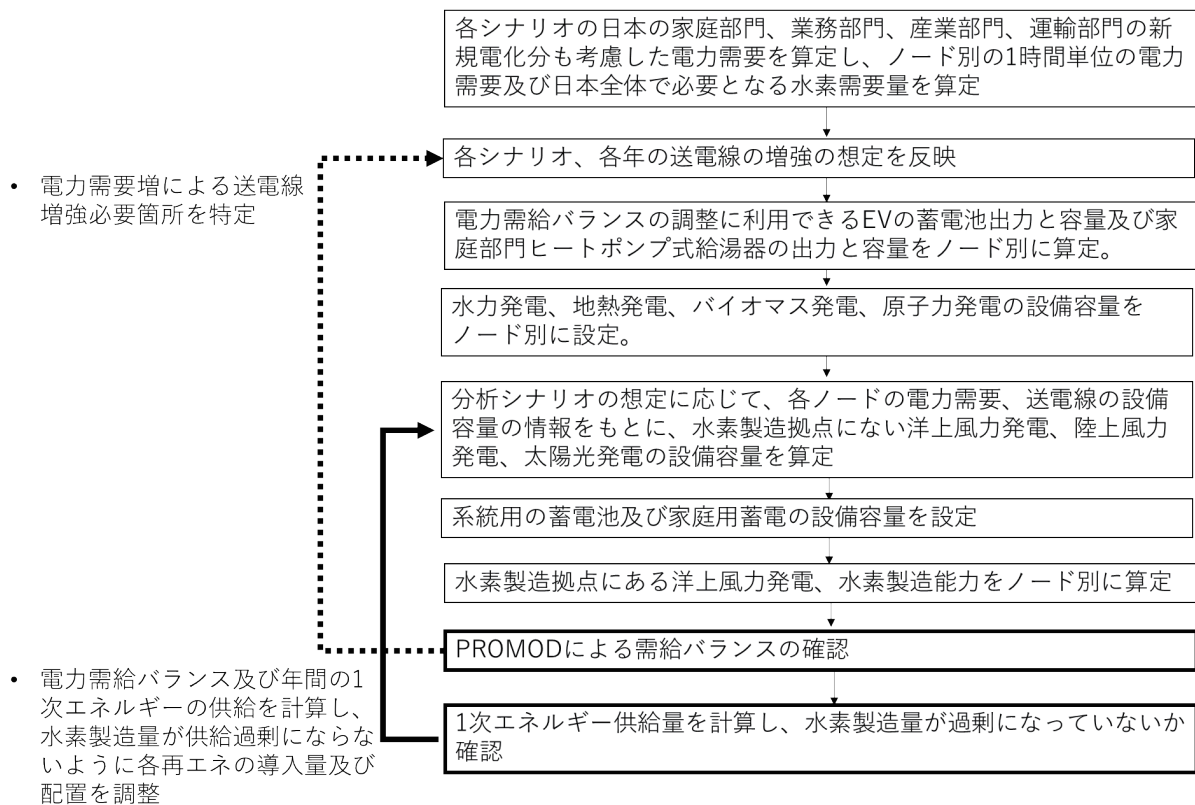


図 S1-2 電力需給シミュレーション分析の手順

(5) GHG 排出量の推計

① エネルギー起源CO₂

エネルギー起源CO₂排出量の計算方法として、電力と熱以外のエネルギー（石炭、石炭製品、石油製品、LPG、天然ガス、都市ガス）、電力、熱エネルギーに対してそれぞれ個別の推計方法を採用した。2035年、2045年のGHG排出量は、2030年、2040年、2050年の推計結果を線形補間して求めた。

電力と熱以外のエネルギーについては、4章で推計した1次エネルギー供給量に対して、エネルギー種ごとのCO₂排出係数を乗じてCO₂排出量を推計した。電力については、電力需給分析によって得られた石炭火力、石油火力、ガス火力発電の発電電力量に対して、発電種ごとの電力排出係数を乗じてCO₂排出量を推計した。2035年、2045年の電力部門のGHG排出量については、電力需要量と各主電源の設備容量及び電力系統分析によって得られた設備利用率を、2030年、2040年、2050年の推計結果を線形補間して求め、2035年、2045年の電源構成を推計した。得られた電源構成を基に、発電種ごとの電力排出係数を乗じてCO₂排出量を推計した。

蒸気については、4章において蒸気を生成するために必要な1次エネルギー供給量を業種別に推計した。この業種別の蒸気生成用の1次エネルギー供給量にエネルギー供給量種ごとのCO₂排出量を乗じてCO₂排出量を推計した。2035年、2045年のGHG排出量は、2030年、2040年、2050年の推計結果を線形補間して求めた。

② 非エネルギー起源CO₂排出量

非エネルギー起源CO₂排出量は、以下の式によって推計した。基準年排出量は2015年から2019年の非エネルギーCO₂排出量の実績値である。活動量は第3章で推計した基準年に対する部門ごとの活動量の変化率である。脱化石燃料化の影響は、脱炭素社会への以降によって生産プロセスが大きく変化し、CO₂を排出しない製品製造プロセスへの移行の効果である。例えば、石油精製由来で発生するCO₂排出量について、技術変容シナリオ、バランスシナリオ、社会変容シナリオでは、FT合成によって製品を製造することから、製油所からのCO₂排出量は発生しないと想定する。

$$CO_2\text{排出量} = \text{基準年排出量} \times \text{基準年比活動量} \times \text{脱化石燃料化の影響} \times \text{CCS利用率}$$

⑥ CH₄、N₂O、フッ素系GHG

メタン（CH₄）、一酸化二窒素（N₂O）並びにフッ素系GHG（HFCs, PFCs, SF₆, NF₃）のGHG排出削減量の推計に対して、2020年にIGESが公表した「ネット・ゼロという世界：2050年日本（試案）²⁴⁹」と同様の方法をとった。すなわち、部門別に排出削減技術を積み上げ、限界削減費用に応じた非CO₂ GHG削減量を推計したEPA²⁵⁰による日本の推計値（～2050年）及び上記のIGES報告書の分析結果を基に部門・ガス別のGHG削減対策を講じた場合の削減率を推計した。

従って、本レポートでは、各年におけるCH₄、N₂O、FガスのGHG排出量を以下の式で推計した。

$$GHG\text{排出量} = \text{基準年排出量} \times \text{基準年比活動量} \times \text{脱化石燃料化の影響} \times \text{対策の効果}$$

表 S1-6及び表 S1-7では、推計した各GHGの2050年時点での部門別ガス別のGHG削減率である。2040年時点の各GHG排出量は、2050年の推計値と2030年のNDCに記載される政府目標値を線形補間して求めた。

表 S1-6. 技術変容、バランス、社会変容シナリオで想定した部門別ガス別の2050年におけるGHG削減率（基準年比）

	CH ₄	N ₂ O	HFCs	PFCs	SF ₆	NF ₃
農業	39%	18%	—	—	—	—
エネルギー	82%	100%	—	—	—	—
産業	100%	83%	99%	53%	28%	53%
廃棄物	60%	30%	—	—	—	—

表 S1-7. 政府目標シナリオで想定した部門別ガス別の2050年におけるGHG削減率（基準年比）

	CH ₄	N ₂ O	HFCs	PFCs	SF ₆	NF ₃
農業	33%	11%	—	—	—	—
エネルギー	59%	100%	—	—	—	—
産業	100%	83%	47%	51%	27%	51%
廃棄物	60%	30%	—	—	—	—

⑦ 森林吸収

GHGインベントリ²⁵¹によると、森林活動によるCO₂吸収量は、2013年は54MtCO₂、2020年は50MtCO₂であった。日本のNDC（国が決定する貢献）²⁵²では、2030年の吸収量は48MtCO₂という目標が掲げられている。日本では、今後森林活動によるCO₂吸収量の大幅な増加は難しいと考えられることから、本レポートでは、すべてのシナリオにおいて2040年のCO₂吸収量を

49MtCO₂、2050年のCO₂吸収量を50MtCO₂と想定した。なお、Climate Action Trackerに示される1.5°C整合となる累積GHG排出量の目標値には、森林吸収源のGHG吸収量は含まれていないことから、5章2節で示すGHG排出量の推計結果にも、森林吸収源のGHG吸収量を含めていない。

⑧ DACS導入量

技術変容、バランス、社会変容シナリオについては、CCSによるCO₂回収量も考慮した2050年時点までの累積GHG排出量が1.5°C目標ベンチマーク累積GHG排出量を超える分を相殺する程度にDACCSの導入量を想定した。DACCSの導入時期について、2041年から徐々に導入量が増えて、2045年から2050年の導入量が一定となるような想定を置いた。

政府目標シナリオについては、2050年のGHG排出量（森林吸収源を含む）が正味ゼロとなるように、2050年のDACCSの導入量を想定した。2041年から2049年のDACCSの導入量は、2050年の導入量まで比例的に増加すると想定した。

(6) エネルギー自給率の推計

1次エネルギー供給量に占める国産エネルギーの割合とし、国内の再生可能エネルギーのみを国産エネルギーと定義した。一方、一般的には、原子力を準国産エネルギーと位置づけて自給率に算入することが多いため、原子力及び再生可能エネルギーの割合を参考値として併記した。

なお、輸入水素や輸入合成燃料は、本来は2次エネルギーでありその生成には別途1次エネルギーが必要であるが、輸入エネルギーとして他の資源と同列に扱うため、便宜上2次エネルギーの熱量をそのまま1次エネルギー供給量としてカウントしている。

(7) コストの推計

a. 電力コスト

まず、時点tにおける電力コストを時点tにおける発電原価と送変電原価の和と定義する。

発電原価は、時点tにおける発電設備の1年あたりの資本費と年間の燃料費・維持管理費の和を、系統電力需要（発電電力量から所内電力・送変電ロス・蓄電ロスを除いたもの）で割ったもの、とする。発電設備の1年あたりの資本費については、発電または予備力として待機している設備に対して、ビンテージを考慮した設備別の初期投資単価を計算した。それらの合計値を全設備容量で割ることで、全設備の平均的な初期投資単価を推計した。この値と電力需給シミュレーションの結果として得られる各年度の設備利用率を前提に、均等化発電原価（LCOE）を推計した。推計結果のうち、資本費相当分を発電電力量に乗じて合計した。均等化発電原価の計算は、資源エネルギー庁の発電コスト等検証委員会の手法に倣って行った（ただし社会的費用・政策的経費は含めない）。年間の燃料費・維持管理費については、各時点における燃料費単価及び容量あたりの維持管理費をもとに求めた。

送変電原価は、各送配電事業者による2023-2027年のレベニューキャップ見積額を現状の送変電コストと仮定したうえで、時点tにおける送変電原価は、時点tにおける現状からの送変電・蓄電等の設備増強分について、1年あたりの資本費と年間の維持管理費の和を求め、これを現状の送変電コストに加えた合計を系統電力需要で除することで推計した。送変電設備については、電力需給シミュレーションにおいて想定する上位2系統の送電線及び変電所の増強費用を織り込んだ。また、水素専焼発電所用の水素貯蔵タンク、水電解装置、蓄電池、洋上風力発電所への海底ケーブルについても、それぞれの初期投資単価及び

運転維持費用を想定して推計を行った。

初期投資単価について、発電設備のうち太陽光発電（事業用・住宅用）と風力発電（陸上・洋上）、電力システムを構成するその他の設備のうち蓄電池と水電解装置に関しては、ユニット・モジュールの量産によるコスト低減が見込まれるため、累積設備導入量に応じて一定の習熟率で低下することを想定して将来の初期投資単価の推計を行った。ただし、コストの低下には不確実性があり、累積導入量が増えるにしたがって事業性の低い案件が増える可能性もある。そのため、本レポートでは再生可能エネルギーのコストが低下するケースに加えて2030年水準で高止まりするケースについても想定して分析を行った。

具体的には、高位ケースと低位ケースを表 S1-8のように想定した。低位ケースでは、太陽光については、設備費用は世界全体の累積導入量（IEA World Energy Outlook2021¹⁴⁹を参照）に応じて習熟率20%で低下、工事費用については日本の累積導入量に応じて習熟率10%で低下することを想定した。また、陸上風力については、設備費用は世界全体の累積導入量に応じて習熟率10%で低下、工事費用については日本の累積導入量に応じて習熟率10%で低下することを想定した。洋上風力については、設備費用・工事費用共に日本の累積導入量に応じて習熟率15%で低下することを想定した。各技術の習熟率はIEA World Energy Outlook2022¹⁵⁴を参照して設定した。高位ケースでは、2030年以降コスト低下が進まない想定とした。

表 S1-8. 各設備の初期投資単価

		2020	高位ケース		低位ケース	
			2030	2050	2030	2050
石炭火力	万円 /kW	24	24	24	24	24
LNG 火力	万円 /kW	16	16	16	16	16
原子力	万円 /kW	40	40	40	40	40
太陽光 (住宅)	万円 /kW	30	21	21	19	14
太陽光 (事業用)	万円 /kW	21	12	12	11	9
風力 (陸上)	万円 /kW	35	21	21	19	17
風力 (洋上)	万円 /kW	52	18	18	16	7
水力	万円 /kW	26	26	26	26	26
バイオマス	万円 /kW	26	25	24	25	24
地熱	万円 /kW	31	30	27	30	27
蓄電池	万円 /kWh	6	5	5	5	5
水電解装置	万円 /kW	17	6	4	4	3
参照文献	火力・原子力については資源エネルギー庁発電コスト検証ワーキンググループ資料を参照、その他は IEA World Energy Outlook2022 の STEPS シナリオ ¹⁵⁴ （太陽光・風力は同シナリオの習熟率をもとに独自推計）		火力・原子力については資源エネルギー庁発電コスト検証ワーキンググループ資料を参照、その他は NZE by2050 シナリオ ¹⁵⁴ （太陽光・風力は左記と同様に独自推計）			

注意：太陽光及び風力の初期投資単価は累積導入量によって推計しているため、シナリオ間で異なる。上記はバランスシナリオの導入容量を元に推計したものを示している。

ペロブスカイト/シリコンのタンデム型の太陽光発電については、文献²⁵³を参考に、kWあたりの単価がシリコン型の2倍と想定し、発電効率の向上を想定した。

また、燃料費単価についても不確実性が高いため、緩やかに燃料費単価が低下していくケースに加えて、燃料価格が高騰した2022年水準に高止まりするケースについても想定して分析を行っている。（表 S1-9）

表 S1-9. 燃料価格の想定

		2019	高位ケース		低位ケース	
			2030	2050	2030	2050
石炭	USD/t	109	385	385	91	72
天然ガス	USD/t	513	1071	1071	559	544
原油	USD/bbl	67	123	123	83	96
参照文献		財務省貿易統計	財務省貿易統計より 2022 年の平均燃料価格を横置		IEA World Energy Outlook2022 における STEPS シナリオ ¹⁵⁴	

なお、長期的に電力システムは、セクターカップリングと呼ばれるようにモビリティや水素と相互関係を強めていくことが想定される。このような異なるシステム間の融合が進んだ状況において、電力システムに関する平均的なコストを推計する際は、どのコストをいずれのシステムに含めるか、という境界線（バウンダリー）の設定が結果を大きく左右することに留意が必要である。この点について、本レポートでは電力系統上に存在する水電解装置を用いた水素製造用に使用される電力は、浮体式洋上風力発電による電力が大半であると考えられるため、浮体式洋上風力発電については、相当分を水素製造用の設備と見做し、電力コストの推計には含めず、水素コストに計上することとした。また、EV蓄電池、洋上風力発電所への海底ケーブル、水電解装置については、水素製造及びモビリティと電力システムが共有しているコストとして提示することとした。

また、送変電設備の増強については、電力広域的運営推進機関の資料^{254,255,256}をもとに交直交換機及びHVDCケーブル、架空線・引出設備・変圧器の単価を設定し、第4章で述べた電力需給シミュレーションで想定した上位2系統の系統増強内容をもとに容量・距離・回線数・台数を求め、これらを乗ずることで合計費用を求めた。浮体式洋上風力への海底ケーブルについては、10GWまでは沖合60km、それ以上は沖合120kmの地点に導入されることを想定して推計を行った。

b. 水素コスト

本分析では、国内グリーン水素、海外グリーン水素、海外ブルー水素、海外グレー水素の4種類を推計対象とした。

まず、国内水素は、製造コストと国内輸送（パイプライン）の合計を水素コストとした。また、海外水素は、製造コストと液化・積地・国際輸送（液化水素タンカー）・揚地・国内輸送（パイプライン）の合計を水素コストとした。

グリーン水素の製造コストについては、国内では洋上風力の発電原価で、海外では豪州の再エネ電力を用いて、水電解によって水素を製造することを前提に、1年あたりの水電解装置の資本費、年間の維持管理費・電力コスト・用水コストを織り込んで1Nm³あたりのコストを推計した。

ブルー水素の製造コストについては、褐炭ガス化による水素製造を前提に、水素製造設備の1年あたりの資本費、年間の運転維持費及び原料（褐炭）コスト、CO₂回収費及び輸送・地中貯留費を織り込んで1Nm³あたりのコストを推計した。

グレー水素の製造コストについては、ブルー水素の製造コストからCO₂回収費及び輸送・地中貯留費を差し引くことで推計した。

水素の輸送コストについては、液化・積地・国際輸送・揚地のそれぞれについて、先行研究等の文献をもとに1Nm³あたりのコストを推計し、製造コストに加算した。

水素製造設備や液化・輸送工程については、高効率化・大規模化を目指して技術開発が進められており、コストが低下する可能性がある。そのため、ベースケースに加えて、野心的なコスト削減目標が実現するケースについても想定して分析を行った。

国内でのグリーン水素の製造については、電力価格は洋上風力発電の発電単価（いずれのシナリオも前項a.の低位ケースの発電原価）とし、水電解装置の稼働率は第4章で述べた電力需給シミュレーションの結果を用いた。高位ケースについては現状の転換効率が横置き、低位ケースについては、NEDO²⁵⁷が掲げる2030年の高効率化目標が達成され、さらに2050年には廃熱利用などにより更なる高効率化が図られることを想定した²⁵⁸。海外での製造については、高位ケースにおいては5円/kWhで水電解装置稼働率50%、低位ケースでは、IRENA²⁵⁹を参考に、2050年にかけて2円/kWhまで低下することを想定した。（表 S1-10.）

表 S1-10. グリーン水素の諸元想定

		高位ケース		低位ケース	
		2030	2050	2030	2050
水電解装置	万円 /kW	6	4	4	3
転換効率	Nm ³ -H2/kWh	0.22	0.22	0.23	0.28
耐用年数	年	10	10	10	10
水単価（国内）	円 /Nm ³ -H2	0.1	0.1	0.1	0.1
水単価（海外）	円 /Nm ³ -H2	1.5	1.5	1.5	1.5

褐炭由来のブルー水素の製造コストについては、泰中ほか²⁶⁰、西ほか²⁶¹を参考に、表 S1-11の通り設定した。低位ケースの2050年については、政府が水素供給価格（CIF価格）の目標を2030年に30円/Nm³、2050年に20円/Nm³としていることを鑑み、水素製造コストが2030年の2/3となるように設定した。

表 S1-11. 海外ブルー水素の諸元想定

		高位ケース		低位ケース	
		2030	2050	2030	2050
褐炭価格	円 /t	1240	1240	1240	1240
水素製造設備建設費	万円 /kW	21.4	21.4	21.4	15.0
運転維持費	建設費の%	5	5	5	5
効率	%	58	58	58	75
CO ₂ 回収率	%	95	95	95	95
CO ₂ 回収費	円 /t-CO ₂	2670	2670	2670	2670
CO ₂ 輸送・地中貯留費	円 /t-CO ₂	2140	2140	2140	2140
稼働年数	年	25	25	25	25
設備利用率	%	91.3	91.3	91.3	91.3

水素輸送費用については、水野ほか²⁶²、資源エネルギー庁²⁶³を参照し、表 S1-12の通り設定した。低位ケースの2050年については、液化・積地・海上輸送の費用が2030年の2/3となるように設定した。

表 S1-11. 水素輸送費用の諸元想定

		高位ケース		低位ケース	
		2030	2050	2030	2050
液化	円 /Nm ³ -H ₂	10.3	7.0	9.4	6.3
積地	円 /Nm ³ -H ₂	5.5	3.0	3.7	2.5
海上輸送	円 /Nm ³ -H ₂	4.2	2.3	2.5	1.7
揚地	円 /Nm ³ -H ₂	7.5	3.7	7.5	3.7
国内輸送	円 /Nm ³ -H ₂	1.3	1.3	1.3	1.3

(8) 投資額の推計

上記のコスト推計の諸元を用いて、技術変容・バランス・社会変容・政府目標シナリオのそれぞれにおいて、電力供給及び水素供給を行うために必要となる国内での投資額を推計した。ここでは、水素製造のための海外での設備投資や輸送に関わる設備、電力や水素を消費するための需要側の機器に関する投資、設備を製造するための工場等に関する投資は含まない。

まず、既存の火力発電設備について、石炭火力発電・LNG火力発電のそれぞれの設備容量を導入年ごとに整理し、シナリオごとの電源構成に関する想定をもとに、運転開始から50年経過したものは廃炉又はリプレース、石炭又はLNG火力として稼働しないものについては、必要に応じて、40年に満たないものにはCCSの設置又は水素・アンモニア専焼化の改修、それ以上のものはリプレースされるものとして2021～2050年の5年ごとに投資額の推計を行った。

再生可能エネルギー、蓄電池、水電解装置、送電系統設備については、シナリオごとの電源構成に関する想定をもとに、導入時点での初期投資単価を想定して5年ごとに投資額の推計を行った。

原子力については、既設炉の再稼働を見込んでいるが、追加的な安全対策等にかかる投資規模を見積もることが困難であるため、推計対象外とした。

累積投資額については、5ヵ年ごとの投資額から年ごとの投資額を求めたうえで、割引率3%で現在価値に換算したものを集計した。

参考資料 2

推計結果の詳細

(1) 各部門の国内生産額

第3章2節で記載した各部門の生産活動量について、産業連関分析によって推計された各部門の国内生産額を表 S2-1に示す。

表 S2-1. 各部門の国内生産額に関する推計結果

国内生産額(単位:兆円)	2015	2050			増減率(2015-2050)		
		技術変容	バランス	社会変容	技術変容	バランス	社会変容
農林水産業	13	14	11	11	10%	-12%	-16%
石炭・原油・天然ガス	0	0	0	0	-86%	-89%	-92%
鉱業	1	0	0	0	-50%	-57%	-63%
飲食料品	38	45	33	32	18%	-13%	-15%
繊維	4	3	2	2	-25%	-32%	-38%
パルプ・紙・木製品	12	18	16	14	54%	35%	20%
化学	28	32	27	22	13%	-5%	-21%
石油・石炭製品	17	3	2	2	-83%	-87%	-91%
プラスチック製品	14	15	14	13	6%	3%	-4%
窯業・土石	6	7	6	5	7%	-5%	-16%
鉄鋼	27	27	21	16	-2%	-24%	-43%
非鉄金属	9	11	9	8	20%	3%	-13%
金属製品	12	12	10	10	-1%	-10%	-18%
はん用機械	11	16	15	15	48%	45%	39%
生産用機械	17	23	20	17	36%	18%	-1%
業務用機械	7	8	7	6	10%	-1%	-13%
電子部品	14	25	30	34	88%	123%	155%
電気機器	16	30	36	39	88%	123%	142%
情報通信機器	6	9	12	15	69%	125%	181%
自動車	48	32	29	21	-33%	-40%	-56%
その他の輸送機械	7	10	8	6	38%	14%	-10%
その他製造業	4	6	6	6	54%	55%	42%
建設	61	60	55	48	-1%	-9%	-21%
電力	20	20	20	19	-1%	-4%	-8%
ガス・熱供給	4	1	1	0	-87%	-88%	-89%
水道・廃棄物処理	9	10	9	9	8%	1%	-3%
卸売	51	59	47	36	15%	-8%	-29%
小売	45	54	50	47	21%	12%	4%
金融・保険	35	40	44	48	12%	24%	36%
不動産	81	87	79	72	8%	-2%	-11%
運輸・郵便	45	39	41	42	-14%	-11%	-7%
通信・情報サービス	62	60	82	92	-3%	31%	48%
公務	40	41	41	41	3%	3%	2%
教育・研究など	44	58	68	77	32%	54%	77%
医療・福祉	68	100	102	105	48%	52%	55%
対事業所サービス	69	87	92	96	26%	35%	40%
対個人サービス	58	60	53	55	4%	-9%	-5%
その他	6	7	6	6	10%	-1%	-8%
合計	1,008	1,129	1,106	1,088	12%	10%	8%

(2) 部門別 CO₂ 排出量原単位

第5章2節で記載したエネルギー起源CO₂排出量について、部門別に活動量あたりのCO₂排出量（CCSによるCO₂回収分含む。DACsによるCO₂排出量相殺分含まない。）を求め、基準年からの変化を分析した。政府目標シナリオとバランスシナリオの結果を図S2-1に示す。

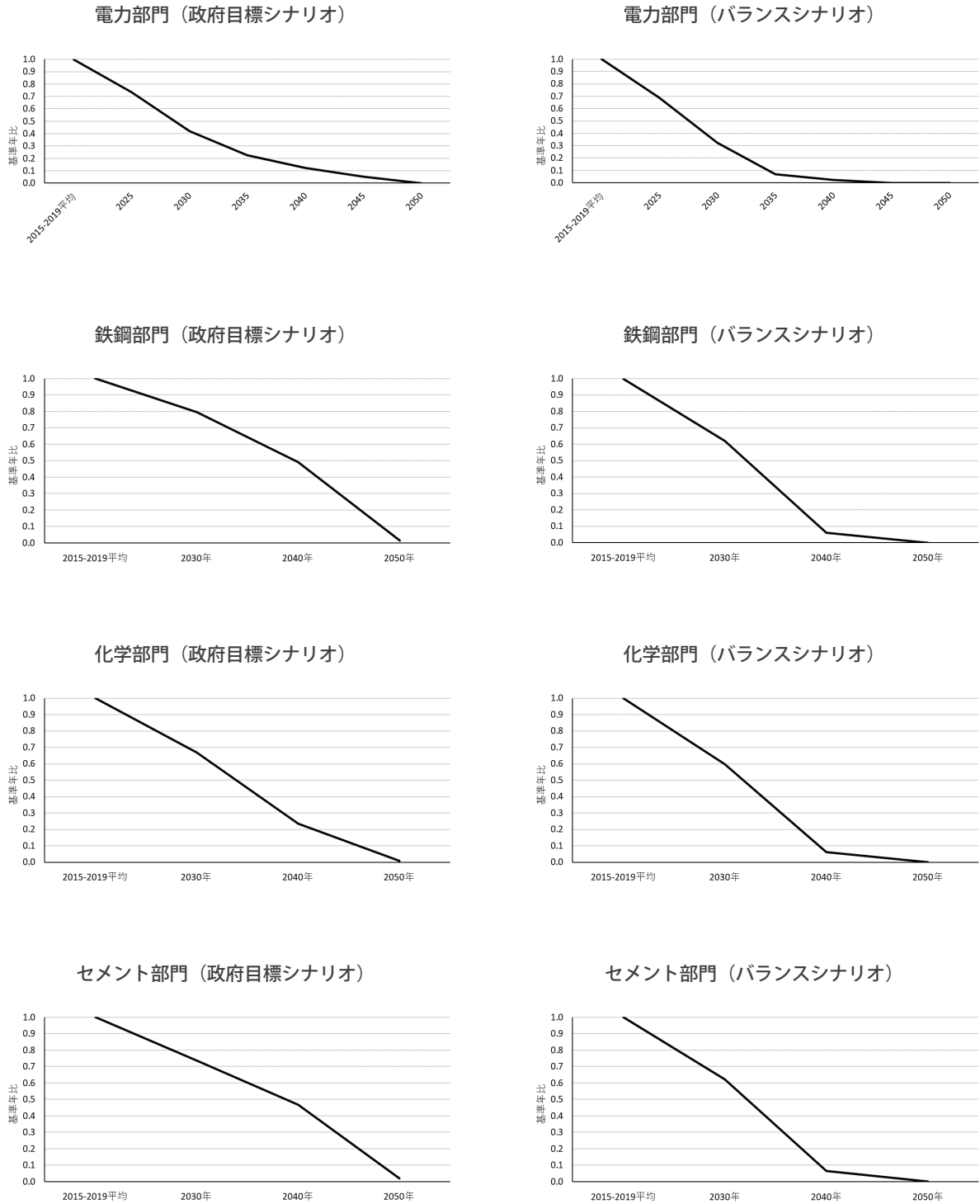


図 S2-1. 政府目標シナリオとバランスシナリオにおける部門別CO₂排出原単位の推移（2015-2019年=1）

(3) 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因

各シナリオの2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因を図S2-2から図S2-5に示した。政府目標シナリオ及び技術変容シナリオにおける社会経済構造の変化はトレンドにまとめている。これらの二つのシナリオにおいて、「省エネ」と「電化」によるエネルギー技術的要因による最終エネルギー消費量削減分が、それぞれ26%、30%となった。これらの変化によって、2050年の最終エネルギー消費量は、どちらのシナリオも現状比30%減となった。

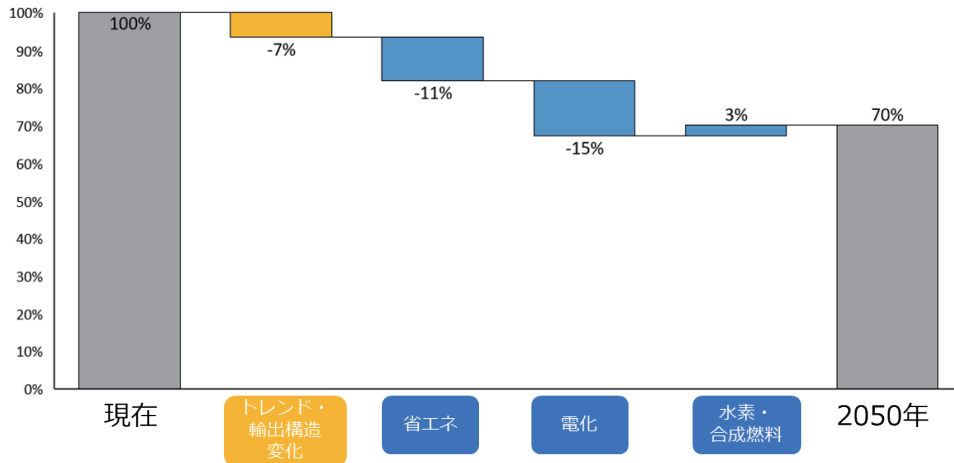


図 S2-2. 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因（政府目標シナリオ）

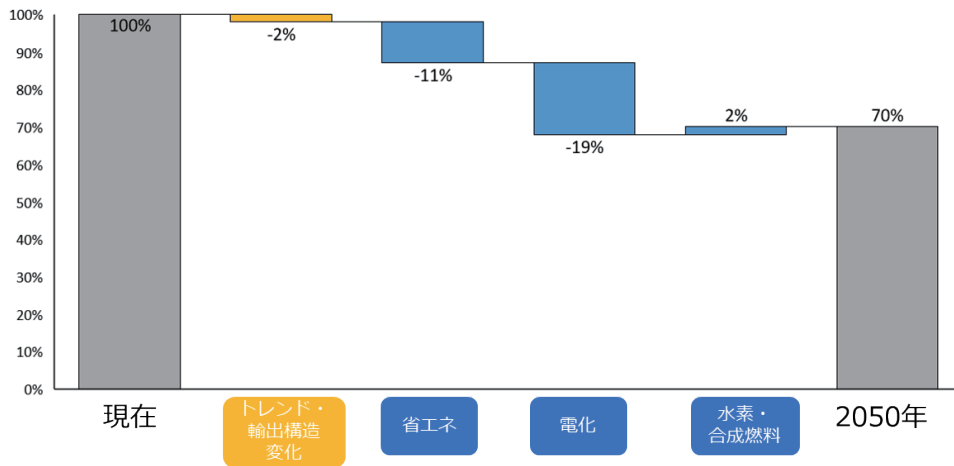


図 S2-3. 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因（技術変容シナリオ）

社会変容シナリオ及びバランスシナリオでは、「デジタル社会」と「素材利用とエネルギー利用変化」といった社会経済的要因による最終エネルギー消費量削減分が、それぞれ23%、32%となり、「省エネ」と「電化」による最終エネルギー消費量削減分が、それぞれ、32%、34%となった。どちらのシナリオも、社会経済的要因も大きな最終エネルギー消費量削減をもたらしている。

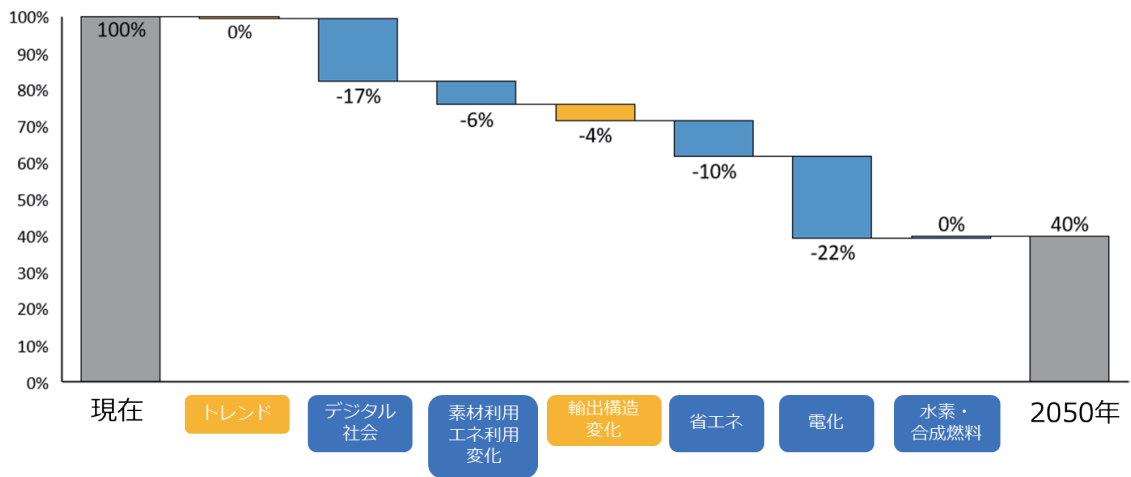


図 S2-4. 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因（社会変容シナリオ）

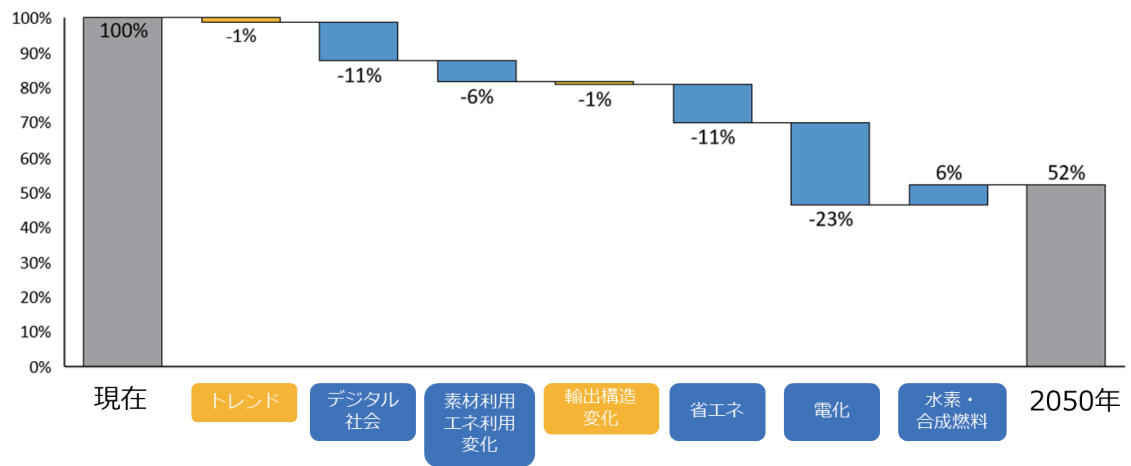


図 S2-5. 2050年と現状の最終エネルギー消費量の差異要因（バランスシナリオ）

参考資料 3

シナリオの不確実性と感度分析

シナリオ分析は未来を予測するものではなく、将来が大きな不確実性に直面している場合に、起こり得る複数の未来を考察し、それぞれの相対的な強みや課題を特定するためのものである。それにより、不確実な未来に対して計画を立てるだけでなく、積極的に未来を創造し、形成することに役立てることができる。本プロジェクトで構築したシナリオのいずれも、起こり得る未来の一部を描き出したものではあるが、必然的に不確実性の高い想定内容も含まれている。そこで、バランスシナリオを構成する要素のうち、特に不確実性が高いと思われる要素として、再生可能エネルギー、特に風力発電の導入拡大に注目し、それが想定通りに進展しないケースについても考察を行った。

(1) 再生可能エネルギーの導入量が小さくなるケースの想定内容

陸上風力発電については、特に2030年において導入拡大が現状のFIT認定容量程度に留まる可能性が想定される。また、浮体式洋上風力発電については、バランスシナリオでは海洋技術フォーラムによる意欲的目標（2050年に360GW）を前提としたが、高位目標（2050年に150GW）程度に留まる可能性が想定される。そこで、バランスシナリオが想定する風力発電の導入量よりも小さくなるケースについて、サブシナリオを構築して同様の分析を行った（バランスサブシナリオ）。

バランスサブシナリオにおいて想定する風力発電の設備容量及び発電電力量、電力システムの設備構成は、それぞれ表 S3-1、表 S3-2、図S3-1の通りである。バランスサブシナリオのエネルギー需要や、風力発電以外の供給設備については、バランスシナリオと同様の想定内容としている

表 S3-1. 各年の風力発電の設備容量（単位:GW）

	2020	2030	2040	2050
陸上風力	4	15	28	40
洋上風力	0	8 (8)	85 (45)	195 (45)

表 S3-2. 各年における出力抑制計算前の陸上風力発電電力量（最大値、単位:TWh）

	2020	2030	2040	2050
陸上風力	10	35	66	95
洋上風力	0	29	298	683

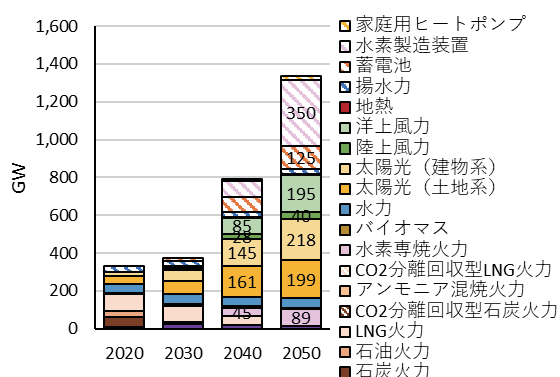


図 S3-1. バランスサブシナリオにおける電力システムの設備構成

なお、このケースでは風力発電が想定通りに拡大しないことを想定しているが、ペロブスカイト太陽電池の普及や農地等への太陽光発電の導入がバランスシナリオの想定通りに進まないケースでも、本サブシナリオと同様の分析結果が得られると考えられる。

(2) バランスサブシナリオのケースにおける各指標の推計結果

バランスサブシナリオのもとでの電源構成は、図S3-2のようになった。

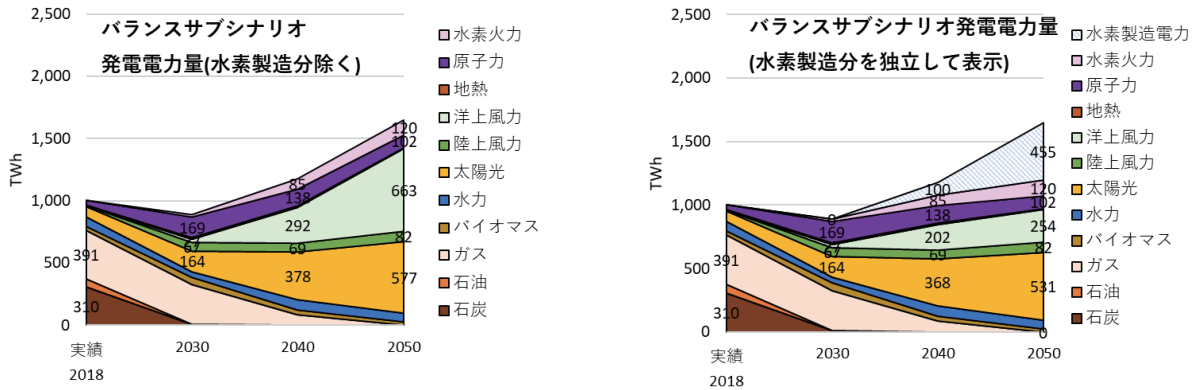


図 S3-2. バランスサブシナリオの電源別発電電力量

バランスシナリオと比較して、風力発電の発電電力量が小さくなり、それに伴って水電解による水素製造量も減少した。また、水素火力発電の発電電力量が増加した。

バランスサブシナリオの一次エネルギー供給量を図S3-3に示す。一次エネルギー供給量は、2050年に基準年比50%減となった。また、2050年の化石燃料比率と再エネ比率はそれぞれ、3%、61%となった。輸入水素の割合が拡大し、1次エネルギー供給の23%を占めている。これは、国内での水素製造量が減少したことや、水素火力発電の燃料として水素需要が増加したこと起因している。このケースにおける2050年のエネルギー自給率は61%（原子力を含めると72%）であり、バランスシナリオと比較して20ポイント以上低下した。

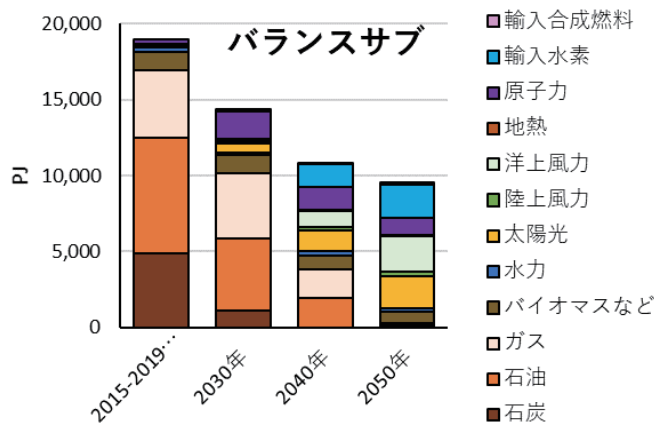


図 S3-3. バランスサブシナリオの一次エネルギー供給量

バランスサブシナリオのもとでの部門別エネルギー起源CO₂排出量は図S3-4のようになった。バランスサブシナリオは、2020年から2050年までの累積エネルギー起源CO₂排出量が12.1GtCO₂と推計され、累積エネルギー起源CO₂排出量のベンチマークの値以下となった。

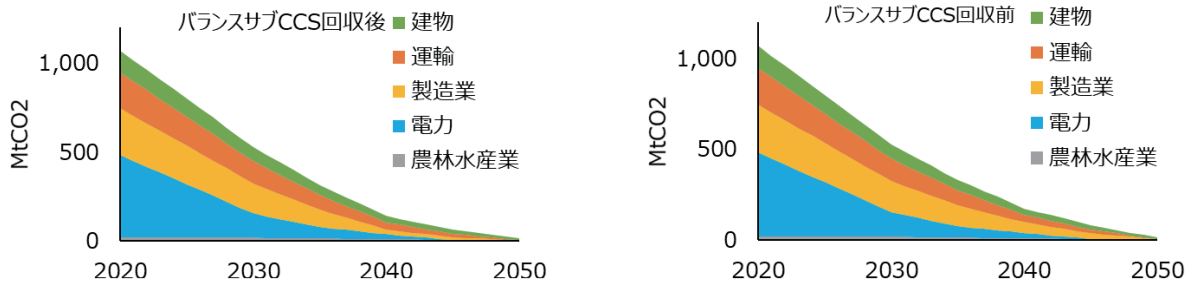


図 S3-4. バランスサブシナリオのエネルギー起源CO₂排出量 (左: CCSによる回収後、右: CCSによる回収前)

一方、GHG排出量については、図S3-5に示すように、2050年に至る途中で一時的にベンチマークと設定した排出経路を超過し、ネガティブエミッション技術に頼る形で14.3GtCO₂に収まる結果となった。この際の2050年におけるCO₂地下貯留量は、CCS経路が8MtCO₂/年、DACs経路が102MtCO₂/年、合計110MtCO₂/年となり、バランスシナリオよりも56%高い水準となった。主要年のGHG排出量削減率は、2030年には2013年比で56%削減、2035年には2013年比で74%削減、2019年比で68%削減となった。

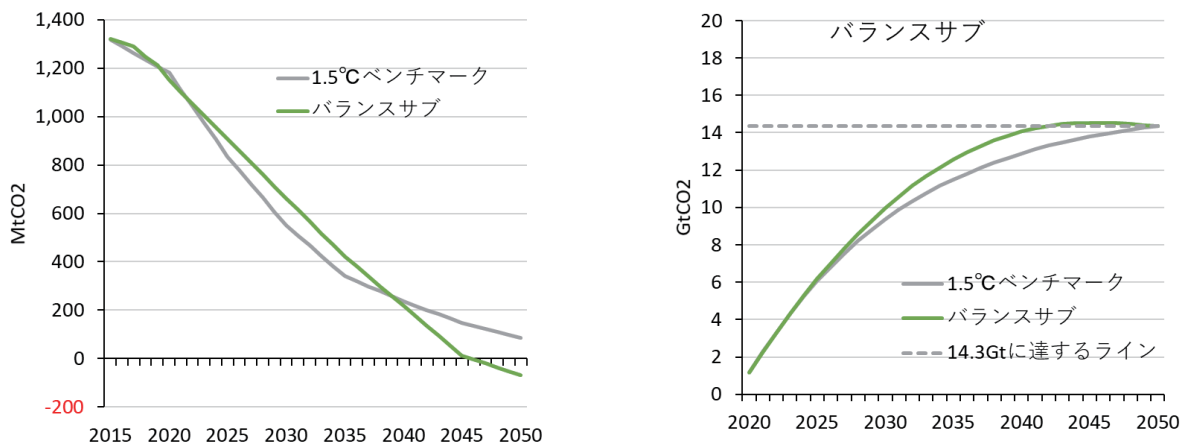


図 S3-5. バランスサブシナリオのGHG排出量 (左) と累積GHG排出量 (右)

(3) サブシナリオ分析を踏まえた考察

サブシナリオ分析の結果、次の示唆が得られた。まず、浮体式洋上風力をはじめとする再生可能エネルギーの大幅な導入拡大の重要性に相違はないが、仮にそれが何らかの理由によりバランスシナリオで想定する水準に達しない場合であっても、水素の輸入量を拡大することができれば、電力システムにおける安定供給は成立する。また、この場合、ベンチマークとして設定した水準での排出量削減を実現するためには、ネガティブエミッション技術への依存度をバランスシナリオよりも高めることになる。さらに、海外からの輸入資源への依存度が高まるため、エネルギー自給率がバランスシナリオよりも低くなり、国際動向等の影響を受けやすくなる。このような課題は残るものの、再生可能エネルギーの導入拡大の不確実性を想定し、エネルギー安定供給確保のため、水素輸入に向けたサプライチェーンを構築することは重要であると言える。

ただし、バランスサブシナリオにおける2050年の水素の輸入量は2,231PJであり、政府目標シナリオにおける輸入量2,576PJと近い水準になっているが、その利用用途は大きく異なる点には留意が必要である。バランスサブシナリオにおいては水素の50%は化学工業部門におけるナフサを代替する原料として使用されるのに対し、政府目標シナリオでは第3章3節で紹介した「水素のはしご」において、水素の競争力が比較的低い用途分野として位置づけられている、発電・熱利用・運輸が大半である。すなわち、再生可能エネルギーの導入量が相対的に小さくなり、水素の輸入が拡大したとしても、本レポートにおける議論やロードマップの趣旨が損なわれることはなく、需要と供給の両面から変革を推し進めていくことで、より野心的な排出削減が実現可能となるのである。

参考資料 4

グローバルな累積排出量の分配（effort-sharing）に関する議論

多くの場合、統合評価モデルでは、世界全体でのコスト最小化が理想的に行われた場合を想定してシナリオが作られている。その場合、グローバルに一定の排出量削減を達成するために、限界削減費用の小さいところから順に対策が導入されることがモデル化される。このようなコスト最小化に基づく計算では、限界削減費用が相対的に大きい先進国では対策が入りにくい傾向にあるが、その場合であっても、今後人口が増加し経済規模の拡大が予想されるアジア諸国などの途上国に比べ、先進国は速やかに排出量のピークを越えるシナリオになっている²⁶⁴。第1章3節のCATによる算定のベースとなった1.5°C整合シナリオ群もコスト最小化に基づくものであり、日本の排出経路が示されていないシナリオは、日本の排出パスを推計する際にOECD内での人口・GDP・排出強度も考慮したものである。

一方、世界が協調してGHG排出量を削減する努力を進めるにあたり、削減努力を公平に配分すべきという議論がある。国連気候変動枠組条約（UNFCCC）や京都議定書では、「公平だが差異ある責任及び各国の能力（CBDR-RC）」原則のもと、先進国と途上国との間の二分論に基づく責任分担、削減努力分担が行なわれた。それに対しパリ協定の下では、CBDR-RCに「各国の異なる事情に照らした」という文言が加わった。この文言は、パリ協定が附属書I国、非附属書I国といった区分を行なわない一方で、先進国や途上国という一般的な用語を定義規定なしに用いていることから、パリ協定では状況の変化に応じて差異化を行なうものと解釈される²⁶⁵。ただし、緩和や資金については、先進国の「率先の継続」が規定されている。また、パリ協定は野心的な長期的でグローバルな気温上昇に目標を定める一方で、国別の排出削減目標は各国が自ら決定することとなっているため、事前に予想されたことだが、国別削減目標を積み上げても、長期気温目標の達成に必要な削減量には到達しない状況となっている。そのため、各国の排出削減目標を共通の基準で評価することの重要性や必要性が指摘され²⁶⁶、さまざまな評価基準が提起されている^{267,268}。公平性を担保する原則やその指標としては以下が代表的なものである。

- 責任（Responsibility）：過去のGHG排出量に応じて必要な削減量を配分する。
- 能力（Capacity）：気候変動対策のためにかかるコストに対する負担能力を考慮する。一人あたりGDPが使用されることが一般的である。
- 平等（Equality）：今後の排出量について、人口一人あたりの排出量を均等にするように配分する。

これらに加え、途上国の「発展する権利」も考慮し、様々な排出量の配分方法が提案されている^{20,269,270}。また、日本では、効率性の観点から各国間の削減努力を差異化するものとして、GDPあたり排出量に基づく方法も議論されており、日本の「約束草案」の前文では、GDPあたり排出量や一次エネルギー供給量が日本の目標の公平性・野心を示す一つの指標として語られている²⁷¹。

これらの公平性や効率性を考慮した配分方法を採用した場合、日本の累積排出可能量がどう変化するかを、いくつかの単純な計算方法で検討した（表 S4-1）。⁷

⁷ ここでは、GHGで評価するために、IPCCで評価されている累積CO₂排出量で表される残余カーボンバジェット（400GtCO₂）ではなく、CATが算出した統合評価モデルにおける1.5°C排出経路の2020年から2050年の累積GHG排出量の中央値（727Gt CO₂eq）を用いている。

一人あたりの2020-2050年の排出量を均等にする場合: 国連の人口予測を参照すると、日本の2020-2050年の人口は、世界全体の約1.3% (2021年時点では、1.6%)。世界の2020-2050年の累積GHG排出可能量の1.3%は、9.5Gt CO₂eq (以下Gtと略す)。

一人あたりの1990-2050年の排出量を均等にする場合: 過去の排出を考慮するため、1990年以降2050年までの累積排出実績+可能量が一人あたり均等になるようにする場合、1990-2050年の人口に占める日本の割合は1.6%。一方、1990-2050年のグローバルな累積GHG排出実績+可能量の1.6%は33.6Gtとなるが、日本は2020年までに累積で38.2Gt排出しており、この考え方で許容される累積排出量を既に超えている。

一人あたりのGDPに応じて配分する場合: 2020年のGHG排出量に対する削減割合の国別の配分が、一人あたりGDPに比例するようにする。2050年までのGDPと一人あたりGDPの予測値として、Goldman Sachsによる推計値²⁷²を使用した。一人あたりGDPが世界平均を上回る国では、2050年よりも前に排出量がゼロになる。日本の場合2040年に排出量ゼロとなる。2020-2040年の累積GHG排出量は9.0Gt。

GDPあたりの排出量の絶対値を各国で均一に下げる場合: GDPあたりの排出量 (排出強度) は、現在日本は世界平均の約2.5分の1と小さい。世界全体の排出強度が現在の日本のレベルに下がるまで (CATの排出量推移とGDP予測値を用いると、2030年まで) は、日本の排出強度は現在のままで、その後世界全体と同じ割合で排出強度が下がるという想定。この場合、2020-2050年の日本の累積排出量は20.7Gtとなり、世界全体の2.9%となる。日本の過去の削減努力を評価した計算方法と言えるが、産業構造の違いによる排出強度の差異を無視している上、今後の削減努力について、日本に対して甘い想定となっており、国際的に受け入れられるのは難しいと考えられる。

GDPあたりの排出量の削減率を世界均一とする場合: 排出強度が世界平均と同じ割合で低下する場合、2020-2050年の日本の累積排出量は10.8Gtとなり、世界全体の約1.5%となる。日本を含む現在の排出強度が相対的に小さい国にはより厳しい目標となる。

表 S4-1. 1.5°C目標に整合したグローバル累積GHG排出量上限に対し、配分方法による日本の排出量 (2020-2050年) の違い

配分方法	ベースとなる考え方	日本の GHG 排出量 (Gt, 2020-2050)	グローバルに対する割合	備考
CAT による日本への配分	世界コスト最小化	14.3	1.9%	OECD 諸国の中で、人口・GDP・排出強度に応じて配分
一人あたり排出量均等 (2020-2050)	平等	9.5	1.3%	国連の人口予測を参照
一人あたり排出量均等 (1990-2050)	責任・平等	-4.6	1.6%	1990 年以降の一人あたり排出量をグローバルに均等にする場合、許容される排出量 33.6Gt に対し、日本は 2020 年までに既に 38.2Gt 排出。
一人あたり GDP に応じた排出量削減	能力	9.0	1.2%	日本は 2040 年に排出量ゼロになる
GDP あたり排出量の絶対値が世界均一	効率性	20.7	2.9%	世界全体の排出強度が現在の日本のレベルに下がるまでは日本は現状のまま、その後は世界と同じレベルで下がるとした場合
GDP あたり排出量の低下率が世界均一	効率性	10.8	1.5%	日本の排出強度が、世界平均と同じ比率で低下を続ける場合
現行政府目標	—	19.1	2.5%	経産省の 6 次エネ基策定時の資料や「トランジション・ファイナンス」等の行程表を参照し、IGES が推計

GDPあたりの排出量を世界平均と同じレベルで下げる場合を除き、これらの配分方法ではCATによる日本の累積GHG排出量よりも小さくなる。特に平等や責任といった公平性を考慮した配分方法では、日本や先進国への排出量の配分が相対的に小さくなることは、過去の研究でも指摘されている^{270,273}。

パリ協定は、自国の排出削減目標を自らが決定するという中核原則の上に成り立っており、残余カーボンバジェットを上記のような一定の方式で配分するアプローチをとっていない。そもそも、配分方法もさまざまな原則、考え方を反映しており、特定の配分方法に合意・収れんすることも困難である。その一方で、各国は「国が決定する貢献 (NDC)」を提出する際、それが「どのように公正かつ野心的であるのか」や「長期気温目標にどのように貢献するのか」についての説明が求められている²²。その説明方法は各国に委ねられているが、本来であれば、公平性、効率性、コスト最小化という考え方を反映した場合の各国が努力すべき量と比較した相対的な評価を提示することが必要であろう。上記のように、日本の現行政府目標のもとに推計される日本の2020年から2050年にかけての累積GHG排出量19.1Gtは、さまざまな配分方法の中でも大きな数字となっている。また、本レポートでベンチマークとしたCATの14.3Gtという累積排出可能量は、公平性の観点からは不十分とされうることには留意しておくべきである。

参照文献

1. 外務省. パリ協定 (和文) . <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000197312.pdf> (2016) .
2. J.ロックストローム, M.クルム & 武内和彦・石井菜穂子 (監訳) . 小さな地球の大きな世界 プラネタリー・バウンダリーと持続可能な開発. (丸善出版, 2018) .
3. Grubler, A. et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5° C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nat Energy* 3, 515–527 (2018) .
4. The United Kingdom. G7 Climate and Environment: Ministers' Communiqué, London, 21 May 2021. <https://www.gov.uk/government/publications/g7-climate-and-environment-ministers-meeting-may-2021-communication/g7-climate-and-environment-ministers-communication-london-21-may-2021#joint-commitments> (2021) .
5. Ministry of Economy, T. and I. J. G7 Climate, Energy and Environment Ministers' Communiqué. (2023) .
6. Ministry of Foreign Affairs, J. G7 Hiroshima Leaders' Communiqué. <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/100506875.pdf> (2023) .
7. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_Full_Volume.pdf (2023) doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
8. 資源エネルギー庁. GX実現に向けた基本方針 参考資料. https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002_3.pdf (2022) .
9. IPCC. Global Warming of 1.5° C. Global Warming of 1.5° C (2018) doi:10.1017/9781009157940.
10. クラウス・シュワブ & 世界経済フォーラム (訳) . 第四次産業革命 ダボス会議が予測する未来. (日本経済新聞出版, 2016) .
11. 西山圭太. DXの思考法 日本経済復活への最強戦略. (文芸春秋, 2021) .
12. 岩田一政 & 日本経済研究センター. 2060デジタル資本主義. (日本経済新聞出版社, 2019) .
13. 安宅和人. シン・ニホン AI×データ時代における日本の再生と人材育成. (NewsPicksパブリッシング, 2020) .
14. 諸富徹. 資本主義の新しい形. (岩波書店, 2020) .
15. S.ディクソン=デクレーブ et al. Earth for All 万人のための地球. (丸善出版, 2022) .
16. 広井良典. 人口減少社会のデザイン. (東洋経済新報社, 2019) .
17. The United Nation's High-Level Expert Group on the Net-Zero Emissions Commitments of Non-State Entities. INTEGRITY MATTERS: NET ZERO COMMITMENTS BY BUSINESSES, FINANCIAL INSTITUTIONS, CITIES AND REGIONS. <https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/high-level-expert-group-update7.pdf> (2022) .
18. Glasgow Financial Alliance for Net Zero. Guidance on Use of Sectoral Pathways for Financial Institutions. https://assets.bbhub.io/company/sites/63/2022/06/GFANZ_Guidance-on-Use-of-Sectoral-Pathways-for-Financial-Institutions_June2022.pdf (2022) .
19. Climate Action Tracker. 1.5° C-consistent benchmarks for enhancing Japan's 2030 climate target. (2021) .
20. van Vuuren, D. P., Lucas, P. L. & Hilderink, H. Downscaling drivers of global environmental change: Enabling use of global SRES scenarios at the national and grid levels. *Global Environmental Change* 17, 114–130 (2007) .
21. Gidden, M. J. et al. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geosci Model Dev* 12, 1443–1475 (2019) .
22. 地球温暖化対策推進本部. 日本のNDC (国が決定する貢献) . <https://www.env.go.jp/content/900442544.pdf> (2021) .
23. 小林光, 岩田一政 & 日本経済研究センター. カーボンニュートラルの経済学 2050年への戦略と予測. (日本経済新聞出版, 2021) .
24. 日本経済研究センター. 第49回中期経済予測 自由貿易推進と自前主義脱却でイノベーション拡大を DXと人的資本投資が切り拓く成長軌道. <https://www.jcer.or.jp/economic-forecast/2023038-2.html> (2023) .

25. 内閣府. 中長期の経済財政に関する試算（令和5年7月25日経済財政諮問会議提出）. <https://www5.cao.go.jp/keizai3/econome/r5chuuchouki7.pdf>（2023）.
26. 秋元 圭吾 & 佐野 史典. 2050年カーボンニュートラルのシナリオ分析（中間報告）.（2021）.
27. Hori, K. et al. Projecting population distribution under depopulation conditions in Japan: scenario analysis for future socio-ecological systems. *Sustain Sci* 16, 295–311（2021）.
28. 国立社会保障・人口問題研究所. 日本の世帯数の将来推計（都道府県別推計）. <https://www.ipss.go.jp/pp-pjsetai/j/hjpp2019/gaiyo/data.asp>（2019）.
29. 小池 誠, 宮川 浩, 鈴置 哲典 & 小笠原 和人. 水素エネルギーキャリアとしてのアンモニアとレシプロエンジン燃焼への適用. *日本燃焼学会誌* 58, 99–106（2016）.
30. 宮川努. 無形資産投資とESG投資—実証研究の現場から—. https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sansei/jizokuteki_esg/pdf/004_06_00.pdf（2016）.
31. McKinsey&Company. Capturing the true value of industry 4.0. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/capturing-the-true-value-of-industry-four-point-zero>（2022）.
32. Bagloee, S. A., Tavana, M., Asadi, M. & Oliver, T. Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. *Journal of Modern Transportation* 24, 284–303（2016）.
33. 株式会社日本政策投資銀行 & 株式会社価値総合研究所. 建築物の木造・木質化に関する現状と今後の可能性調査. <https://www.dbj.jp/upload/investigate/docs/94734d9981d3a0cb20d3173b31e526e4.pdf>（2022）.
34. 鈴木祐大, 島田亮太, 岩川慎悟, 杉山郁夫 & 加藤博和. 建築材料転換シナリオにおける二酸化炭素削減ポテンシャルの推計～式年遷宮に学ぶカーボンオフセット都市～. in 第5回日本LCA学会研究発表会講演要旨集（2010）.
35. 一般社団法人プラスチック循環利用協会. マテリアルフロー図. <https://www.pwmi.or.jp/business/material-flow/>（2022）.
36. 情報通信審議会 IoT新時代の未来づくり検討委員会. 未来をつかむTECH戦略 ～「静かなる有事」をチャンスと捉え、アグレッシブなICT導入により「変革の実行」へ～. https://www.soumu.go.jp/main_content/000548068.pdf（2018）.
37. 内閣府. Society 5.0. https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/.
38. 国土交通省. 2040年、道路の景色が変わる ～人々の幸せにつながる道路～. <https://www.mlit.go.jp/road/vision/pdf/01.pdf>（2020）.
39. 大矢幸雄. 工場の“無人化体制”で挑むニューノーマル。「人・設備・モノの流れ」3つの切り口で捉える消費財製造業の変革.（2020）.
40. International Transport Forum. ITF Transport Outlook 2023.（OECD, 2023）. doi:10.1787/b6cc9ad5-en.
41. 一般社団法人産業環境管理協会資源・リサイクル促進センター. 食料の生産から廃棄・リサイクルまでの流れ 2014年度. <https://www.cjc.or.jp/school/d/d-2-5.html>（2020）.
42. 藤田由美子. みどりの食料システム戦略におけるスマート農業の果たす役割. <https://www.maff.go.jp/hokuriku/seisan/smart/attach/pdf/forum-4.pdf>（2021）.
43. 消費者庁. 消費者白書. https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_research/white_paper/（2020）.
44. 一般社団法人日本サステナブル建築協会. 住宅の省エネルギー基準（早わかりガイド）. <https://www.jsbc.or.jp/document/files/guide.pdf>（2011）.
45. 一般社団法人日本サステナブル建築協会. エネルギー消費性能計算プログラム. <https://house.app.lowenergy.jp/#/select>.
46. 経済産業省. 省エネ法の施行状況について. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/kenchikubutsu_energy/pdf/006_03_00.pdf（2015）.
47. 国土交通省近畿地方整備局住宅整備課. 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・進め方について.（2021）.
48. 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. 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.（2021）.
49. 日本エネルギー経済研究所. 業務用床面積の推移.（2018）.
50. 平野勇二郎, 稲葉陸太, 酒井広平, 早瀬百合子 & 大迫政浩. 民生業務部門における業種別エネルギー消費量の詳細推計. *環境科学会誌* 26, 430–439（2013）.
51. 資源エネルギー庁. 2030年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）. <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-3.pdf>（2021）.

52. 住宅・建築物のエネルギー消費性能の実態等に関する研究会. 住宅・建築物のエネルギー消費性能の実態等に関する研究会とりまとめ (参考資料). (2018).
53. International Energy Agency. ETP Clean Energy Technology Guide. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide> (2023).
54. 株式会社三菱総合研究所. 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). (2018).
55. 甲斐田 武延. 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 69, (2023).
56. Michael Liebreich / Liebreich Associates. Clean Hydrogen Ladder, Version 5.0. Concept credit: Adrian Hiel, Energy Cities. CC-BY 4.0 <https://www.linkedin.com/pulse/hydrogen-ladder-version-50-michael-liebreich/> (2023).
57. 東京電力ホールディングス. TEPCO統合報告書2022. https://www.tepco.co.jp/about/ir/library/annual_report/pdf/202210tougou-j.pdf (2022).
58. 桑原祐, Detlev Mohr, Benjamin Sauer & 山田唯人. 日本の脱炭素化-2050年に向けた展望. (2021).
59. Eric D. Lebel, Colin J. Finnegan, Zutao Ouyang & Robert B. Jackson. Methane and NOx Emissions from Natural Gas Stoves, Cooktops, and Ovens in Residential Homes. *Environ Sci Technol* 56, 2529–2539 (2022).
60. Gruenwald, T., Brady A. Seals, Luke D. Knibbs & H. Dean Hosgood, I. Population Attributable Fraction of Gas Stoves and Childhood Asthma in the United States. *Int J Environ Res Public Health* 20, (2023).
61. Yannai S. Kashtan et al. Gas and Propane Combustion from Stoves Emits Benzene and Increases Indoor Air Pollution. *Environ Sci Technol* 57, 9653–9663 (2023).
62. 自動運転ラボ編集部. 自動運転とEV (2023年最新版) 完全電子制御・コンピューター化がカギを握る. (2023).
63. 甲斐田 武延. 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. <https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=C20005> (2021).
64. 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—. 電力経済研究 69, (2023).
65. 矢田部隆志. 熱需要のカーボンニュートラル対策～再エネ熱利用とヒートポンプ～. (2023).
66. エイモリー B. ロビンス. 変動型電源と需要管理、電力貯蔵の調和を設計する. https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/01_AmoryLovins_230831.pdf (2023).
67. 内山洋司. '産業電化'による省エネ・脱炭素イノベーションの実現. <https://www.nedo.go.jp/content/100926812.pdf> (2021).
68. 日本製紙グループ. 日本製紙グループの環境への取り組み. <https://www.nipponpapergroup.com/common/pdf/nipponpapergroup/200180354.pdf> (2011).
69. The Confederation of the European Paper Industries. Press release: A collaboration between the paper industry & heat pump producers could halve its energy needs & help decarbonise the sector. <https://www.cepi.org/press-release-a-collaboration-between-the-paper-industry-heat-pump-producers-could-halve-its-energy-needs-help-decarbonise-the-sector/> (2023).
70. Turboden S.p.A. Pulp&Paper Industry chooses Turboden to generate steam with zero CO₂ emissions. <https://www.turboden.com/company/media/press/press-releases/4436/what-could-not-be-done-before-is-now-possible-turboden-large-heat-pump-decarbonizes-industrial-steam-demand> (2023).
71. The European Heat Pump Association & The Confederation of the European Paper Industries. Through Pumps to Pulp: Greening the Paper Industry's Heat. <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2023/02/Cepi-x-EHPA.pdf> (2023).
72. 公益財団法人自然エネルギー財団. 日本におけるグリーンスチールへの道 脱炭素製鉄への転換をめざして. https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_greensteel2022.pdf (2022).
73. The Energy Transitions Commission. Unlocking the First Wave of Breakthrough Steel Investments: International Opportunities. <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/Unlocking-the-First-Wave-of-Breakthrough-Steel-Investments-International-Opportunities-April-2023.pdf> (2023).
74. 日本製鉄株式会社. 高炉水素還元技術Super COURSE50の試験炉において 加熱水素吹込みにより世界最高水準となるCO₂排出量削減効果22%を確認. https://www.nipponsteel.com/news/20230804_200.html (2023).
75. 経済産業省. 「トランジションファイナンス」に関する鉄鋼分野における技術ロードマップ. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition/transition_finance_technology_roadmap_iron_and_steel_jpn.pdf (2021).

76. 一般社団法人日本鉄鋼連盟. 鉄のライフサイクルとリサイクル. https://www.jisf.or.jp/business/lca/material_flow/index.html.
77. 一般社団法人日本鉄源協会. 日本の鉄鋼備蓄量推計. <http://tetsugen.or.jp/kiso/5chikujapan.htm>.
78. Hybrit. HYBRIT: SSAB, LKAB and Vattenfall to begin industrialization of future fossil-free steelmaking by establishing the world's first production plant for fossil-free sponge iron in Gällivare. Hybrit <https://www.hybritdevelopment.se/en/hybrit-demonstration/> (2021) .
79. steel, H. On course for large-scale production from 2025. H2green steel, <https://www.h2greensteel.com/articles/on-course-for-large-scale-production-from-2025> (2022) .
80. H2 Green Steel. H2 Green Steel raises €1.5 billion in equity to build the world's first green steel plant . <https://www.h2greensteel.com/latestnews/h2-green-steel-raises-15-billion-in-equity-to-build-the-worlds-first-green-steel-plantnbsp> (2023) .
81. Salzgitter AG. Salzgitter AG receives official notice of government funding for the SALCOS® low-CO₂ steel production program. <https://www.salzgitter-ag.com/en/newsroom/press-releases/details/salzgitter-ag-receives-official-notice-of-government-funding-for-the-salcosr-low-co2-steel-production-program-20702.html> (2023) .
82. Green Steel World. EU Commission approves €1 billion funding for Salzgitter AG's low CO₂ steel production. <https://greensteelworld.com/eu-commission-approves-e1-billion-funding-for-salzgitter-ags-low-co2-steel-production> (2022) .
83. Mining Technology. Jindal Shadeed to build \$3bn green steel plant in Oman. (2022) .
84. 株式会社神戸製鋼所. スウェーデン・H2グリーンスチール社向けMIDREX H₂TM直接還元鉄プラントの新規受注ならびに同社への出資について ～世界初の100%水素直接還元鉄プラント商業機を受注～. https://www.kobelco.co.jp/releases/1210984_15541.html (2022) .
85. 株式会社神戸製鋼所. ドイツthyssenkrupp社向け水素直接還元鉄プラントにおけるMIDREX FlexTMの採用について. https://www.kobelco.co.jp/releases/1211657_15541.html (2023) .
86. 柳田康一. 海洋プラスチックごみ問題に向けた企業アライアンスCLOMAの取り組み. Journal of Life Cycle Assessment, Japan 19, (2023) .
87. Japan Partnership for Circular Economy (J4CE) . J4CE 循環経済パートナーシップ. <https://j4ce.env.go.jp/>.
88. Naoko Ishii & Daisuke Kanazawa. Planet Positive Chemicals: Pathways for the chemical industry to enable a sustainable global economy. <https://cgc.ifi.u-tokyo.ac.jp/research/chemistry-industry/planet-positive-chemicals.pdf> (2022) .
89. 経済産業省. 「トランジションファイナンス」に関する化学分野における技術ロードマップ. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition/transition_finance_technology_roadmap_chemistry_jpn.pdf (2021) .
90. 府川伊三郎. プラスチックのケミカルリサイクルとその技術開発 (上) . https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1046.pdf (2020) .
91. Renewable Carbon NEWS. European Energy partners with Novo Nordisk and the LEGO Group to replace fossil-based materials in plastic production. (2023) .
92. OFFSHORE ENERGY. World's largest e-methanol facility gets €53 million boost. (2022) .
93. Hydrogen Carbon Processing. Mitsui buys 49% of Danish e-methanol plant from European Energy A/S.
94. BELL BAY POWERFUELS. About Bell Bay Powerfuels. <https://bellbaypowerfuels.com.au/about>.
95. Independent Commodity Intelligence Services. CO₂-based methanol from US Celanese JV resemble natgas-based costs. (2021) .
96. F+L Asia. Pilot project to produce green methanol launched in Germany. (2021) .
97. 一般社団法人セメント協会. セメント業界におけるこれまでの省エネの取組み並びに長期的展望について. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/pdf/031_04_00.pdf (2021) .
98. 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課. セメント産業における省エネ製造プロセスの普及拡大方策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－. https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11062478/www.meti.go.jp/meti_lib/report/2016fy/000046.pdf (2016) .
99. LC3-Project. Limestone Calcinated Clay Cement. <https://lc3.ch/> (2023) .
100. Sousa, V., Bogas, J. A., Real, S., Meireles, I. & Carriço, A. Recycled cement production energy consumption optimization. Sustain Chem Pharm 32, 101010 (2023) .

101. Qian, X. et al. Sustainable cementitious material with ultra-high content partially calcined limestone-calcined clay. *Constr Build Mater* 373, 130891 (2023) .
102. 経済産業省. 「トランジションファイナンス」に関するセメント分野における技術ロードマップ. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition/transition_finance_technology_roadmap_cement_jpn.pdf (2022) .
103. TERRA CO₂. Terra CO₂ emerging as the industry leader in engineered supplementary cementitious materials. <https://ter-raco2.com/construction-solutions/>.
104. Calix. CALIPSO™ - Calcined Clay for the Cement Industry. <https://calix.global/sustainable-processing/calipso-calcined-clay-for-the-cement-industry/> (2022) .
105. HOLCIM. ECOCYCLE® ENABLES THE WORLD'S FIRST FULLY RECYCLED CONCRETE BUILDING. <https://www.holcim.com/who-we-are/our-stories/fully-recycled-concrete-building> (2023) .
106. Cambridge Electric Cement. Welcome to Cambridge Electric Cement. <https://cambridgeelectriccement.com/>.
107. C2CA technology. Heating Air and classification System (HAS) . <https://www.c2ca.tech/has>.
108. CARBON CURE. Fly Ash and Innovation in Concrete. <https://www.carboncure.com/concrete-corner/fly-ash-and-innovation-in-concrete/> (2022) .
109. 會澤高圧コンクリート株式会社. 加カーボンキュアのCO₂鉱物化(固定化)技術を国内初実装 低炭素コンクリートの生産開始. <https://www.aizawa-group.co.jp/news2021111201/> (2021) .
110. 一般社団法人日本自動車工業会. 2050年カーボンニュートラルに向けたシナリオ分析. https://www.jama.or.jp/operation/ecology/carbon_neutral_scenario/PDF/Transitioning_to_CN_by_2050A_Scenario_Based_Analysis_JP.pdf (2022) .
111. 経済産業省自動車課. 日本の自動車産業とカーボンニュートラル化の方向性. https://jcpage.jp/jcevent/file/event/upload/file/301/02_automobile_02_meti_ooima_PPT_J.pdf (2023) .
112. International Energy Agency. Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector. www.iea.org/t&c/ (2021) .
113. International Energy Agency. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 ° C Goal in Reach - 2023 Update. www.iea.org/t&c/ (2023) .
114. 山田愛花 & 西尾健一郎. 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削減可能性一家庭CO₂統計の個票データをを用いた将来分析一. *電力経済研究* 69, (2023) .
115. 環境省. 地球温暖化対策計画. <https://www.env.go.jp/content/900440195.pdf> (2021) .
116. 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター. 令和2年度ヒートポンプ普及見通し調査. (2020) .
117. Shimoda, Y., Sugiyama, M., Nishimoto, R. & Momonoki, T. Evaluating decarbonization scenarios and energy management requirement for the residential sector in Japan through bottom-up simulations of energy end-use demand in 2050. *Appl Energy* 303, (2021) .
118. Yamaguchi, Y. et al. Building stock energy modeling considering building system composition and long-term change for climate change mitigation of commercial building stocks. *Appl Energy* 306, (2022) .
119. 株式会社三菱総合研究所. 2050年カーボンニュートラルの社会・経済への影響. <https://www.mri.co.jp/knowledge/insight/dia6ou000004dvjf-att/er20220704pec.pdf> (2022) .
120. 公益財団法人地球環境産業技術研究機構. 地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業成果報告書. https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2022FY/000219.pdf (2023) .
121. 国立環境研究所AIMプロジェクトチーム. 2050年脱炭素社会実現に向けたシナリオに関する一分析. https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/044/044_005.pdf (2021) .
122. 一般社団法人太陽光発電協会. JPEAビジョン・PV OUTLOOK2050 感染症の危機を乗り越え、あたらしい社会へ「太陽光発電の主力電源化への道筋」. https://www.jpea.gr.jp/wp-content/themes/jpea/pdf/pvoutlook2050_2020.pdf (2020) .
123. 発電コスト検証ワーキンググループ. 基本政策分科会に対する発電コスト検証に関する報告. https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_20210908_01.pdf (2021) .
124. 環境省. 再生可能エネルギー情報提供システム (REPOS) . <https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/>.
125. 環境省地球温暖化対策課・環境計画課. 公共施設への太陽光発電の導入等について. <https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/conference/energy/20220331/220331energy03.pdf> (2022) .
126. 白石賢司 et al. 2035年日本レポート 電力脱炭素化に向けた戦略. https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbni_2035_japan_report_japanese_publish.pdf (2023) .

127. 公益財団法人自然エネルギー財団. 2030年におけるエネルギー目標量のあり方 太陽光発電. (2021) .
128. 電力広域的運営推進機関. 広域系統長期方針 (広域連係系統のマスタープラン) <別冊 (資料編)>. (2023) .
129. 一般社団法人日本風力発電協会. JWPA Wind Vision 2023 -安心・安定・持続可能な社会の実現に向けた風力発電の貢献-. (2023) .
130. 一般社団法人日本風力発電協会. 2022年末日本の風力発電の累積導入量：480.2万kW、2,622基. <https://jwpa.jp/information/6788/> (2023) .
131. 資源エネルギー庁. 再生可能エネルギー電気の利用の促進に関する特別措置法 情報公表用ウェブサイト. <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary> (2023) .
132. 産総研マガジン. ペロブスカイト太陽電池とは？. https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20221124.html (2022) .
133. King Abdullah University of Science and Technology. KAUST team sets world record for tandem solar cell efficiency. (2023) .
134. 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会. 洋上風力産業ビジョン (第1次) 概要. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/pdf/002_02_01_01.pdf (2020) .
135. 海洋技術フォーラム. 我が国の浮体式洋上風力発電導入の数値目標に関する提言 (詳細版) . (2022) .
136. International Energy Agency. Offshore Wind Outlook 2019. <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019> (2019) .
137. renewable UK. Floating Offshore Wind Taskforce: Industry Roadmap 2040. https://cdn.ymaws.com/www.renewableuk.com/resource/resmgr/docs/flow_tf_-_inegrated_report_f.pdf (2023) .
138. 長谷成人. No.377 洋上風力発電のEEZへの展開における漁業をめぐる問題ー洋上風力のEEZ展開②ー. https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/column0377.html (2023) .
139. 公益財団法人自然エネルギー財団. 地域・漁業と洋上風力の共生に向けた提言. https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_OSW_local_acceptance.pdf (2022) .
140. 一般社団法人日本プロジェクト産業協議会/JAPIC. 提言 純国産の自然エネルギー・水力による持続可能な未来社会 ～既存のダム・水力施設の最大活用による水力発電の増強～. (2013) .
141. 日本経済新聞社. 北海道の再エネを東京に 海底送電、200万キロワット. (2022) .
142. 北海道電力株式会社. 北海道の基幹系統増強案について. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/023_01_00.pdf (2019) .
143. 送配電網協議会. 大規模停電回避に向けて～系統周波数維持の取組み～. https://www.tdgc.jp/information/2022/04/15_1300.html (2022) .
144. EirGrid Group. System Non-Synchronous Penetration: Definition and Formulation. <https://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/SNSP-Formula-External-Publication.pdf> (2018) .
145. Toshiba Corporation. Toshiba Demonstrates the Effectiveness of Grid-forming Inverters in Preventing Power Outages due to Fluctuations in Renewable Energy Output and Sudden Changes in Demand to Ensure Stable Microgrid Operation. <https://www.global.toshiba/ww/technology/corporate/rdc/rd/topics/22/2208-02.html> (2022) .
146. National Renewable Energy Laboratory, U. Grid-Forming Inverter Controls. <https://www.nrel.gov/grid/grid-forming-inverter-controls.html>.
147. 沖縄電力株式会社. OKIDEN PROJECT: 再生可能エネルギーによる100%電力供給への挑戦. https://www.okiden.co.jp/company/recruit/adoption_detail/project06.html.
148. 資源エネルギー庁. CCS長期ロードマップ検討会最終とりまとめ. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/20230310_1.pdf (2023) .
149. International Energy Agency. World Energy Outlook 2021. www.iea.org/weo (2021) .
150. 電力広域的運営推進機関. 「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討状況について. (2021) .
151. International Energy Agency. World Energy Investment 2023. www.iea.org (2023) .
152. 清水透 & 坂本敏幸. 20兆円の歳入を生むカーボンプライス. (2023) .
153. 株式会社三菱総合研究所. カーボンニュートラルへの円滑な移行に向けて. <https://www.mri.co.jp/knowledge/mreview/202306.html> (2023) .
154. International Energy Agency. World Energy Outlook 2022. www.iea.org/t&c/ (2022) .

155. International Renewable Energy Agency. Finding common ground for a just energy transition: Labour and employer perspectives. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Finding-common-ground-for-a-just-energy-transition-Labour-and-employer-perspectives> (2023) .
156. 宮川努. 投資意欲引き出すには 脱・停滞へ無形資産投資カギ. <https://www.rieti.go.jp/jp/papers/contribution/miyagawa/15.html> (2022) .
157. 経済産業省. 経済産業政策新機軸部会 第2次中間整理. https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shin_kijiku/20230627_report.html (2023) .
158. デジタル社会推進会議. デジタルを活用した交通社会の未来2022. https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/information/field_ref_resources/22791050-006d-48fd-914d-e374c240a0bd/1ae00570/20220802_news_mobility_outline_01.pdf (2022) .
159. 内閣官房デジタル田園都市国家構想実現会議. デジタル田園都市国家構想総合戦略. https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/digital_denen/pdf/20221223_gaiyou.pdf (2022) .
160. フィジカルインターネット実現会議. フィジカルインターネット・ロードマップ. https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/physical_internet/pdf/20220308_1.pdf (2022) .
161. 環境省. 第四次循環型社会形成推進基本計画の進捗状況の第2回点検結果(循環経済工程表). https://www.env.go.jp/page_00186.html (2022) .
162. 環境省環境再生・資源循環局総務課リサイクル推進室. 使用済紙おむつの再生利用等に関するガイドライン. <https://www.env.go.jp/content/900534449.pdf> (2020) .
163. 内閣官房. C L T の普及に向けた新ロードマップ～更なる利用拡大に向けて～. <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/cltmadoguchi/roadmap.html> (2021) .
164. 消費者庁・外務省・財務省・文部科学省・厚生労働省・農林水産省・経済産業省・国土交通省・環境省. プラスチック資源循環戦略. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/111747.pdf> (2019) .
165. Public Health England. Minimum home temperature thresholds for health in winter – A systematic literature review. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5c5986f8ed915d045f3778a9/Min_temp_threshold_for_homes_in_winter.pdf (2014) .
166. 環境省. 熱中症環境保健マニュアル2022. https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/manual/heatillness_manual_full.pdf (2022) .
167. 鳥取県生活環境部. とっとり健康省エネ住宅. <https://www.pref.tottori.lg.jp/ne-st/>.
168. 西尾健一郎 & 山田愛花. 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一. 電力経済研究 69, 61-77 (2023) .
169. 西尾健一郎 & 中野一慶. 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—. <https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=Y19005&tenpuTypeCode=30&seqNo=1&reportId=8970> (2020) .
170. 環境省. 再エネの更なる導入に向けた 環境省の取組方針. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/034_04_00.pdf (2021) .
171. 調達価格等算定委員会. 令和5年度以降の調達価格等に関する意見. https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/20230208_1.pdf (2023) .
172. あいおいニッセイ同和損害保険株式会社、一般社団法人日本再生可能エネルギー地域資源開発機構、株式会社スマートエナジー. 中小企業向けの自家消費型太陽光発電設備の導入スキーム「Roof Plus」を共同開発. https://aioinissaydowa.co.jp/corporate/about/news/pdf/2023/news_2023102701234.pdf (2023) .
173. PVeye. RDo、中小企業向けの太陽光無償設置開発 あいおいニッセイらと合同で. (2023) .
174. 株式会社アイ・グリッド・ソリューションズ. アイ・グリッドの「R.E.A.L New Energy Platform」とは？ 後編. <https://gurilabo.igrid.co.jp/article/2190/> (2022) .
175. SBエナジー株式会社. 令和4年度再生可能エネルギーアグリゲーション実証事業 成果報告. <https://sii.or.jp/saieneaggregation04/uploads/sbenergy.pdf> (2023) .
176. 太陽光発電協会. 2050年カーボンニュートラル実現に向けて～太陽光発電の最大限導入をめざして～. <https://www.jpea.gr.jp/wp-content/uploads/t210329.pdf> (2021) .
177. 境内行仁. コラム①地域の力を活用して脱炭素社会を実現する!その主役は「地域再エネ会社」である. 一般社団法人日本再生可能エネルギー地域資源開発機構 <https://rdo2050.org/2023/06/11/地域の力を活用して脱炭素社会を実現する- その/> (2023) .

178. 全国ご当地エネルギー協会. ご当地インタビュー #3-1 しずおか未来エネルギー. 全国ご当地エネルギー協会 (2021) .
179. 日本風力発電協会. 2050年カーボンニュートラルの実現に向けた2030年の風力発電導入量のあり方. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/028_05_00.pdf (2021) .
180. 環境省. 地域脱炭素のための促進区域設定等に向けたハンドブック (第1版) . https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/data/sokushin_handbook.pdf (2022) .
181. 高橋健一. 北拓 風力メンテ国内トップ企業の経営戦略【動き出す第1ラウンド事業②】. WInd Journal (2023) .
182. 木村啓二. 日本の太陽光発電の発電コスト現状と将来推計. https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/Report_SolarCost_201907.pdf (2019) .
183. 発電コスト検証ワーキンググループ. 発電コスト検証に関する取りまとめ (案) . https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/2021/data/08_05.pdf (2021) .
184. Hondo, H. & Moriizumi, Y. Employment creation potential of renewable power generation technologies: A life cycle approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, 128–136 (2017) .
185. 稗貫峻一. 産業連関表を用いた再生可能エネルギー技術導入に伴う環境・社会経済分析. (2015) .
186. Kuriyama, A. & Abe, N. Decarbonisation of the power sector to engender a 'Just transition' in Japan: Quantifying local employment impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137, 110610 (2021) .
187. 資源エネルギー庁. 火力発電の高効率化に向けた発電効率の基準等について. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/karyoku_hatsuden/pdf/003_01_00.pdf (2015) .
188. 資源エネルギー庁. 電力ネットワークの次世代化に向けた中間とりまとめ. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/20210903_1.pdf (2021) .
189. 栗山昭久, 劉憲兵, 内藤克彦 & 津久井あきび. 実潮流に基づく電力系統運用を行った場合の2030年度の電源構成に関わる分析. <https://www.iges.or.jp/jp/pub/psa-japan2030/ja> (2022) .
190. 電力広域的推進運営委員会. ローカルシステムのノンファーム型接続適用に伴う対応の方向性について. https://www.occto.or.jp/iinkai/kouikikeitouseibi/2022/files/seibi_62_02_01.pdf (2022) .
191. 資源エネルギー庁. 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 持続可能な電力システム構築小委員会 第二次中間取りまとめ. https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/system_kouchiku/pdf/t62022100902.pdf (2021) .
192. デジタル庁. 「モビリティ・ロードマップ」のありかたに関する研究会 とりまとめ (案) . <https://www.digital.go.jp/councils/mobility-roadmap/1c9b9df9-0b7c-4d89-8f75-7e4092a042f6/> (2023) .
193. 榎谷さえ子. CATLが4C急速充電可能なLFP電池、10分で400km走行. 日経クロステック (2023) .
194. 読売新聞. EV電池の再利用へ、東芝・デンソー・三菱UFJ銀など20社連携…適正な中古市場作り検討. 読売新聞 (2023) .
195. 清水雅史. Vol.3 日産リーフのデビュー前にスタートしていた、リチウムイオンバッテリー再利用への取り組み. . <https://ev2.nissan.co.jp/BLOG/648/> (2021) .
196. 木暮早希. 東芝系と関電、使用済みEV電池の劣化診断サービスを提供へ. 日経クロステック (2023) .
197. 日本経済新聞. 次世代太陽電池、30年EV搭載へトヨタ・京大発新興組む. 日本経済新聞 (2023) .
198. Iacobucci, R., McLellan, B. & Tezuka, T. Optimization of shared autonomous electric vehicles operations with charge scheduling and vehicle-to-grid. *Transp Res Part C Emerg Technol* 100, 34–52 (2019) .
199. 国土交通省. 宅配便の再配達削減に向けて. (2023) .
200. 全日本トラック協会. トレーラの大型化による輸送効率化促進ハンドブック. https://jta.or.jp/wp-content/themes/jta_theme/pdf/publication/trailer_handbook201908.pdf (2019) .
201. ヤマト運輸. ヤマト運輸とCJPT、カートリッジ式バッテリー規格化・実用化に向けた検討開始. ヤマト運輸 https://www.yamato-hd.co.jp/news/2022/newsrelease_20220727_1.html (2022) .
202. PowerX. 商用 EV 向け充電システム「Hypercharger for Fleet」を発表. PowerX <https://power-x.jp/ja/news/press/5179/> (2023) .
203. 蓄電池産業戦略検討官民協議会. 蓄電池産業戦略. https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/battery_strategy/battery_saisyu_torimatome.pdf (2022) .
204. 日本自動車工業会. 乗用車市場動向調査. https://www.jama.or.jp/release/news_release/2022/1298/ (2022) .

205. 長野県自動車販売店協会. クルマ社会あなたはどうお考えですか. [https://www.nada.or.jp/b522iRjR/wp-content/uploads/2022/02/1000人アンケート\(最終\).pdf](https://www.nada.or.jp/b522iRjR/wp-content/uploads/2022/02/1000人アンケート(最終).pdf) (2022) .
206. 国土交通省. 内航海運のCO₂排出量の現状及び取り巻く環境等について. <https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001402855.pdf> (2021) .
207. 国土交通省. 航空分野におけるCO₂削減の取組状況. <https://www.mlit.go.jp/common/001403136.pdf> (2021) .
208. Commission, E. T. Mission Possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors. <https://www.energy-transitions.org/publications/mission-possible/#download-form> (2018) .
209. G, I. T. A. なぜ将来の船舶は電動化されるのでしょうか. Infineon Technologies AG <https://www.infineon.com/cms/jp/discoveries/electrified-ships/> (2021) .
210. 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社. 低炭素・脱炭素エンジン製品の紹介. 三菱重工技報 58, (2021) .
211. I-Construction委員会. i-Construction ～建設現場の生産性革命～. <https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (2016) .
212. 林業イノベーションハブセンター. 林業機械の自動化・遠隔操作化に向けて. https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/morihub/attach/pdf/houkokusyo_230315-3.pdf (2023) .
213. 農林水産省. スマート農業の推進による成長産業化. <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/package-35.pdf> (2022) .
214. 林野庁. スマート林業実践マニュアル. https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/smartforest/attach/pdf/smart_forestry-1.pdf (2023) .
215. 四家千佳史. コマツのデジタルトランスフォーメーション戦略. https://www.komatsu.jp/jp/ir/library/results/03_KomatsuDX.pdf (2019) .
216. 日當和孝. 岩手県久慈市における木質バイオマス熱の面的利用 事業の課題と展望. <https://www.npobin.net/research/data/186thHinata.pdf> (2020) .
217. 落合勝昭. 2050年のデジタル化した日本経済の産業連関表. https://www.jcer.or.jp/jcer_download_log.php?f=eyJwb3N0X2lkIjo0NjI5MCwiZmlsZV9wb3N0X2lkIjo0Njc4OX0=&post_id=46290&file_post_id=46789 (2019) .
218. 間瀬貴之. 産業連関表における電動車部門の推計と電動車の生産台数シェア上昇のシミュレーション分析. <https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/download/18001dp.pdf> (2019) .
219. OSAWA, J. & NAKANO, M. A model of the economic ripple effect caused by the spread of clean energy vehicles. Transactions of the JSME (in Japanese) 81, 14-00071-14-00071 (2015) .
220. 鷺津明由 & 中野諭. 2015年次世代エネルギーシステム分析用産業連関表(組込表)の作成. Preprint at https://www.waseda.jp/fsss/iass/assets/uploads/2021/05/washizu-nakano_2021-J002.pdf (2021) .
221. Bösch, P. M., Becker, F., Becker, H. & Axhausen, K. W. Cost-based analysis of autonomous mobility services. Transp Policy (Oxf) 64, 76–91 (2018) .
222. BVG Associates. Guide to a Floating Offshore Wind Farm: Wind farm costs. <https://guidetofloatingoffshorewind.com/wind-farm-costs/> (2023) .
223. Hori, K. et al. Projecting population distribution under depopulation conditions in Japan: scenario analysis for future socio-ecological systems. Sustain Sci 16, 295–311 (2021) .
224. 国土交通省. 全国都市交通特性調査. (2021) .
225. 国土交通省. 自動車輸送統計調査. https://www.mlit.go.jp/k-toukei/jidousya_hinmoku.html (2021) .
226. 資源エネルギー庁経済産業省. 総合エネルギー統計. Preprint at https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/.
227. 国土交通省. 住宅着工統計. Preprint at <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00600120&tstat=000001016966>.
228. 奥村公美, 伊香賀俊治 & 川久保俊. 非住宅建築物の用途別、都道府県別のストック・フロー床面積データベースの構築. 日本建築学会技術報告集 18, 275–280 (2012) .
229. 国土交通省. 建築着工統計調査. Preprint at <https://www.e-stat.go.jp/statistics/00600120>.
230. 経済産業省, 厚生労働省 & 文部科学省. ものづくり白書 2020年版. https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2020/honbun_pdf/pdf/all.pdf (2020) .

231. デジタルトランスフォーメーションに向けた研究会経済産業省. DXレポート ～ITシステム「2025年の崖」克服とDXの本格的な展開～. https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/digital_transformation/20180907_report.html (2018) .
232. 矢田部隆志. 熱需要のカーボンニュートラル対策 ～再エネ熱利用とヒートポンプ～. in 第19回ゼロエミッション活動紹介セミナー (ハイブリッド開催) 【ヒートポンプ活用シリーズ-第2回-】 (東京湾岸ゼロエミッションイノベーション協議会, 2023) .
233. 日本自動車工業会. 日本自動車工業会 四輪車生産台数. Preprint at <https://jamaserv.jama.or.jp/newdb/>.
234. HARA, T. A Simple Method to Estimate Time-Varying Statistics for the Lifespan Distribution of Products Using Stock and Flow Data. *Journal of Life Cycle Assessment, Japan* 15, 70–85 (2019) .
235. 自動車検査登録情報協会. わが国の自動車保有動向. Preprint at <https://www.airia.or.jp/publish/statistics/trend.html>.
236. 自動車検査登録情報協会. 自動車保有車両数統計書. <https://www.airia.or.jp/publish/book/edata.html> (2020) .
237. 全国軽車両自動車協会連合会. 市区町村別軽自動車車両数. Preprint at <https://www.zenkeijikyo.or.jp/statistics/book> (2020) .
238. 環境省. 家庭部門のCO₂排出実態統計調査. Preprint at <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html> (2020) .
239. 総務省. 全国家計構造調査 (旧全国消費実態調査) . Preprint at <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/data-base?page=1&toukei=00200564&tstat=000001139024> (2019) .
240. 計量分析ユニット日本エネルギー経済研究所. EDMC エネルギー・経済統計要覧.
241. Shimoda, Y., Sugiyama, M., Nishimoto, R. & Momonoki, T. Evaluating decarbonization scenarios and energy management requirement for the residential sector in Japan through bottom-up simulations of energy end-use demand in 2050. *Appl Energy* 303, 117510 (2021) .
242. 大阪府環境審議会新たなエネルギー社会づくり検討部会. 新たなエネルギー社会の論点整理について (たたき台その5) . (2012) .
243. 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター. デジタル化とエネルギー～ICTセクターの持続可能な成長のために～. (2021) .
244. Becker, W. L., Braun, R. J., Penev, M. & Melaina, M. Production of Fischer–Tropsch liquid fuels from high temperature solid oxide co-electrolysis units. *Energy* 47, 99–115 (2012) .
245. 内閣府. CO₂ 利用に当たってのボトルネック課題及び研究開発の方向性. <https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/houkousei.pdf> (2018) .
246. Fasihi, M., Efimova, O. & Breyer, C. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *J Clean Prod* 224, 957–980 (2019) .
247. B, A. B. ABB (現 日立エナジー) プレスリリース. Preprint at <https://new.abb.com/news/ja/detail/57015/japans-grid-operator-occto-signs-perpetual-license-agreements-for-abbs-cross-regional-power-supply-and-demand-simulation-software-promod> (2020) .
248. Kuriyama, A., Liu, X., Naito, K., Tsukui, A. & Tanaka, Y. Importance of long-term flexibility in a 100% renewable energy scenario for Japan. *Sustain Sci* (2023) doi:10.1007/s11625-023-01392-3.
249. 川上毅, 栗山昭久 & 有野洋輔. ネット・ゼロという世界：2050年日本 (試案) . <https://www.iges.or.jp/jp/pub/net-zero-2050/ja> (2020) doi:10.57405/iges-10854.
250. Agency), E. P. A. (United S. E. P. Non-CO₂ Greenhouse Gas Data Tool. Preprint at <https://cfpub.epa.gov/ghgdata/nonco2/>.
251. 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス & 環境省. 温室効果ガスインベントリ. Preprint at <https://www.nies.go.jp/gio/aboutghg/index.html>.
252. 地球温暖化対策推進本部. 日本のNDC (国が決定する貢献) . Preprint at <https://www.env.go.jp/earth/earth/ondanka/ndc.html> (2021) .
253. 日経クロステック. ペロブスカイト利用タンデムセルで世界記録続々、ドイツHZBは変換効率32.5%。 (2022) .
254. 広域連係システムのマスタープラン及び系統利用ルールの在り方等に関する検討委員会事務局. マスタープラン1次案とりまとめの方向性について. https://www.occto.or.jp/iinkai/masutapuran/2020/files/masuta_8_01_01.pdf#https://www.occto.or.jp/iinkai/masutapuran/2020/files/masuta_8_01_01.pdf (2021) .

255. 広域連係システムのマスタープラン及び系統利用ルールの在り方等に関する検討委員会事務局. マスタープランに関する議論の中間整理について～連係線を中心とした増強の可能性～. (2021) .
256. 電力広域的運営推進機関. 送変電設備の標準的な単価の公表について. https://www.occto.or.jp/access/oshirase/2015/files/20160329_tanka_kouhyou.pdf#https://www.occto.or.jp/access/oshirase/2015/files/20160329_tanka_kouhyou.pdf (2016) .
257. 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構. NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ. <https://www.nedo.go.jp/content/100956711.pdf> (2023) .
258. 日経XTECH. 東芝系の次世代水電解、3割高効率に 多積層で「50MW級」へ. Preprint at <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/05482/> (2021) .
259. International Renewable Energy Agency. MAKING THE BREAKTHROUGH: Green hydrogen policies and technology costs. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf?la=en&hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6 (2021) .
260. 泰中一樹 & 電力中央研究所. 2030年を想定した火力発電の脱炭素化技術に対する経済性および環境性の評価 - 二酸化炭素回収・貯留および化石燃料由来水素・アンモニア利用 -. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/carbon_management/pdf/001_08_00.pdf (2023) .
261. 西美奈, 山本博巳 & 竹井勝仁. 2030年におけるブルー水素製造の経済性分析. (2022) .
262. 水野有智, 石本祐樹, 酒井奨 & 坂田興. 国際水素エネルギーキャリアチェーンの経済性分析. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjser/38/3/38_11/_pdf/-char/en (2017) .
263. 資源エネルギー庁. 今後の水素政策の課題と対応の報告制 中間整理 (案) . https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/025_01_00.pdf (2021) .
264. Clarke, L. et al. Assessing Transformation Pathways. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014) .
265. Voigt, C. & Ferreira, F. Differentiation in the Paris Agreement. SSRN Electronic Journal (2016) doi:10.2139/ssrn.2827633.
266. Tamura, K., Kuramochi, T. & Asuka, J. A Process for Making Nationally-determined Mitigation Contributions More Ambitious. Carbon & Climate Law Review 7, 231–241 (2014) .
267. Marc Fleurbaey et al. Sustainable Development and Equity: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. in (2014) .
268. Höhne, N., den Elzen, M. & Escalante, D. Regional GHG reduction targets based on effort sharing: a comparison of studies. Climate Policy 14, 122–147 (2014) .
269. Niklas Höhne & Sara Moltmann. Sharing the effort under a global carbon budget. (2009) .
270. van den Berg, N. J. et al. Implications of various effort-sharing approaches for national carbon budgets and emission pathways. Clim Change 162, 1805–1822 (2020) .
271. 地球温暖化対策推進本部. 日本の約束草案. <https://www.env.go.jp/content/900523883.pdf> (2015) .
272. Kevin Daly & Tadas Gedminas. The Path to 2075 - Slower Global Growth, But Convergence Remains Intact. (2022) .
273. Kuramochi, T., Asuka, J., Fekete, H., Tamura, K. & Höhne, N. Comparative assessment of Japan’s long-term carbon budget under different effort-sharing principles. Climate Policy 16, 1029–1047 (2016) .
274. 一般社団法人普通鋼電炉工業会. 電炉鋼のシェア. http://www.fudenkou.jp/about_03.html.
275. みずほ情報総研株式会社. 諸外国の電炉業の経営動向や原材料・電力コストの動向を踏まえた我が国電炉業の競争力強化による省エネルギー対策調査事業調査報告書. https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/iron_and_steel/downloadfiles/denro.pdf (2014) .
276. 日本CCS調査株式会社. CCS (二酸化炭素回収・貯留) について. (2021) .
277. 資源エネルギー庁. 炭火力検討ワーキンググループ 中間取りまとめ概要. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/sekitan_karyoku_wg/pdf/20210423_1.pdf (2021).
278. 資源エネルギー庁. 石炭火力検討ワーキンググループ 中間取りまとめ概要. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/20210903_report.html (2021).
279. 資源エネルギー庁. 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 持続可能な電力システム構築小委員会 第二次中間取りまとめ. https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/system_kouchiku/pdf/t62022100902.pdf (2021)

IGES 公益財団法人
地球環境戦略研究機関

〒240-0115 神奈川県三浦郡葉山町上山口2108-11

Tel: 046-855-3700

<https://www.iges.or.jp/>

2024年3月更新