



IGES Research Report

# ネット・ゼロ という世界

2050年 日本（試案）

ネット・ゼロという世界  
2050年 日本  
(試案)

IGES気候変動統合チーム

ネット・ゼロという世界

2050年 日本（試案）

プロジェクトリーダー：

IGES 統括研究ディレクター/プリンシパルフェロー 川上毅

執筆者：

IGES戦略的定量分析センター研究員 栗山昭久

IGES戦略的定量分析センター研究員 有野洋輔

謝辞：

今回のプロジェクトでは、数多くの専門家から貴重なご助言を賜った。地球温暖化問題の専門家としては、西岡秀三氏、浜中裕徳氏、甲斐沼美紀子氏に、また、国連環境計画金融イニシアティブ特別顧問末吉竹二郎氏、東京大学生産技術研究所荻本和彦特任教授、東京大学未来ビジョン研究センター杉山昌広准教授、上智大学大学院地球環境学研究科井上直己准教授、エネルギーから経済を考える経営者ネットワーク会議世話役代表・鈴廣かまぼこ代表取締役副社長・小田原箱根商工会議所会頭鈴木悌介氏、東北大東北アジア研究センター明日香壽川教授他からは、大所高所のご意見を頂戴した。産業活動については、石油化学企業関係者、ゼネコン系技術研究所、住宅建築業関係者、自動車技術研究所、再生可能エネルギー研究機関、TCFDに取り組む企業等の方に、ヒアリングをさせていただいた。また、IGESからは森(秀行)所長、小嶋、田村、大塚、梅宮、山ノ下から一部寄稿を、高橋(康夫)特別政策アドバイザー、三好専務理事、田中プリンシパルフェロー、松尾(直樹)、藤野、マーク・エルダー、森(尚樹)、周、高橋(健太郎)、西山、小出、鮫島の各研究員から貴重な情報やコメントを頂戴したほか、庄、青木、北村、矢野から出版にあたり支援を受けた。深く感謝を申し上げたい。

本研究は、Strategic Research Fund (SRF)に基づく研究の成果である。

この出版物の内容は執筆者の見解であり、IGESの見解を述べたものではありません。

©2020 Institute for Global Environmental Strategies. All rights reserved.

イラスト制作：ad-manga.com

ISBN: 978-4-88788-245-4



## 公表に寄せて

IGES所長 森 秀行

ここに、「ネット・ゼロという世界 2050年 日本（試案）」を公表いたします。現下の新型コロナウイルスによる危機的な状況が暗示するように、今後、ますます世界には不確定な要素が増えていくものと想定されます。この試案も、現段階における一つの将来のビジョンなのであり、IGESとしては、今後とも、技術イノベーションや国際展開、それらの政策へのインプリケーションなどを勘案し、これを補完する一連の発信をしていく予定です。

この試案は、ネット・ゼロの世界がどのようなものであるかについて理解の一助となることを目的としています。気候変動という観点から30年後の社会について、エネルギー需要及び温室効果ガス(GHG)排出量を定量的に試算するとともに、私たちの暮らしのイメージなどを描いた試みです。このプロジェクトは、30代の若手研究者が中心となり、所内外の様々な専門家からインプットやアドバイスを受けて作成しました。時には、相互に矛盾する考え方や見通しの理解に悩み、また、ある時は定量分析の合理的根拠に苦しみながら、未来の社会を予想しました。

もとより、未来の予想は容易なことではありません。この試案も、最新の情報分析など必ずしも十分でない面もあり、まだまだ改善の余地はあります。しかし、「どういう社会を作り上げていくのか」ということを自分事としてわれわれ一人一人が想いを巡らせていく、そういう作業が今後ますます必要性を帯びてくると考え公表したものです。

この試案をこのような形で公表させていただくのは、これを契機に多くのステークホルダーの方と忌憚のない意見交換をさせていただき、さらに考察を深め、日本としてどういう道筋でネット・ゼロに向かって進んでいくべきか、建設的な議論につなげて行きたいと考えるためです。

欧州では、昨年末に「The European Green Deal」という2050年に向けた欧州社会の具体的な指針が示されました。その広範かつ具体的な内容に、気候危機(Climate Crisis)を一つの契機として、循環経済などの推進と相まって、社会変革を大胆かつ着実に進めていく欧州の並々ならぬ決意を感じた方も少なくないと思います。そこには、欧州は、今後中国とともに気候変動を巡る国際的な議論をリードしていく予定であることも記されています。

アジアにおける石炭火力発電等への強い依存は、国際的には「Coal Addiction」という強い言葉で非難される状況になってきています。そのような状況下、日本でも、ややもするとゼロカーボンに向けた変革に伴う負の影響の緩和に重きが置かれすぎ、必ずしも理想的な形で脱炭素社会への議論や取り組みが進んでいる状況はありません。

こうした中、日本政府は、国はCO<sub>2</sub>の大幅な削減のための技術革新を実現するため「Beyondゼロ」イニシアティブを立ち上げました。また、経団連においては「チャレンジ・ゼロ」を掲げ、個々の企業によるイノベーションに向けた努力、その成果の活用、資金面での支援などに取り組み始めました。さらに、すでに93の自治体が、「2050年までに、二酸化炭素の排出を実質ゼロにする」ことを表明しました(2020年5月27日現在)。我が国においても、主要なステークホルダーを先頭に、ネット・ゼロに向けた機運が着実に高まっています。

このような中、ここで示された一つの社会像と試算がきっかけとなって、活力があり、だれ一人取り残さない「脱炭素社会」のビジョンについて、広範な議論がなされれば幸いです。

## 概要

近年、人間活動に起因する地球温暖化によって風水害、農業・食料安全保障、水資源・沿岸域・海洋の保全、健康など人々の暮らしに深く関わる様々な面で深刻な影響が生じる可能性が高まることが明らかになってきた。このため2015年に採択されたパリ協定が掲げる「世界平均気温の上昇を産業革命前比で2°C未満(理想的には1.5°C未満)に抑える」という目標を達成するには、2050年頃のネット・ゼロ社会(GHG排出量と吸収量の収支が正味でゼロ)の構築が求められており、大量の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出の原因となっている化石燃料の使用を大幅に減らす必要がある。このような中、欧州を中心とする中央政府や、様々な国・地方自治体、金融機関等がネット・ゼロ排出に向けたイニシアティブを進めている。

世界では気候変動だけでなく、社会や技術の面でも様々な変化が同時に起きている。再生可能エネルギーの急速な普及、内燃機関に代わる電気や水素エネルギーによる新たな移動手段、AIやICT技術の向上などデジタル化の進展、資源制約や廃棄物処理問題などの解決に資する循環型社会の形成、2°Cまたは1.5°Cの気温上昇に対応するためのレジリエンスの向上等の変化である。さらに、国内では自立・分散型の社会を形成しつつ、近隣地域と地域資源を補完し支え合うことで地域を活性化させる「地域循環共生圏」の形成を促す施策が進められている。

経済成長の程度は、暮らしや社会の持続可能性を考える上で根本的な要素であるとともに、経済の活動量を規定する要素である。日本では、2005年から2015年の10年間の一人当たりGDP成長率が年平均0.5%であった。また、資本主義の根幹となる「限りない拡大・成長」というベクトルが、地球資源の有限性といった物質的・外面的な観点及び「幸福」といった精神的な充足の観点から、ある種の飽和状態ないし限界値に達しつつあることが認識され、脱成長や創造的定常経済といった理念の重要性が近年、再認識されている。

このような状況を踏まえ、第1章では、様々な社会変化によって、エネルギー利用量、マテリアル利用量、並びにGHG排出量がどのように変化するのかを、積み上げ(ボトムアップ)方式によって推計した。経済成長率に関して、一人当たりGDPが毎年0.6%成長し、2050年に日本全体のGDPは2015年水準を保つという安定経済の条件を与えた。推計の際には、国際的動向や国内の社会問題、技術の進展に応じて、既存の社会制度、経済構造、インフラなど重要な社会的要素を変革していくトランジションシナリオと、様々な事情により社会変革がほとんど起きないロックインシナリオの二つのシナリオを想定した。

エネルギーシステムに関して、トランジションシナリオでは、家庭、業務、運輸、産業のすべての分野で電化が進むとともにサービス当たりのエネルギー利用の効率化が進み、産業部門においては、一部の高熱需要に対する水素利用や化学製品製造時の水素利用が進んでいる。また、再生可能エネルギーを中心とする非化石エネルギーに暮らしや経済活動が支えられながらネット・ゼロ社会が達成されている。その一方で、ロックインシナリオでは、家庭、業務、運輸、産業のすべての分野において、相応の省エネが進むが、多くは現状のエネルギー技術を延長したエネルギーシステムが想定される。そのため、化石燃料に暮らしや経済活動が支えられながら、CCS技術やネガティブ・エミッション技術の導入によって、(やや強引に)ネット・ゼロ社会が達成されている。

さらに、各シナリオのエネルギー利用量、CCS導入量を推計し、各シナリオの実現可能性に関わる論点として、再生可能エネルギーの必要量と利用可能ポテンシャルの比較、CO<sub>2</sub>貯留の必要量と国内の利用可能ポテンシャルの比較、並びに化石燃料の必要量(輸入量)の算定を行った。その結果、トランジションシナリオでは、ネ

ット・ゼロの達成時には、CO<sub>2</sub>貯留に関するリスクの低減、及び化石燃料依存脱却によるエネルギー・セキュリティー向上に大きく貢献することが示された。さらに、2015年時点で19兆円にのぼる化石燃料の支払い代金を国内に還流させることで、自立・分散型の再生可能エネルギーインフラへの投資(送配電網の増強、EV充電ステーション設置等)が促進され、より成熟した社会の形成に必要な投資を行いややすい状況になる。また、トランジションシナリオにおけるネット・ゼロ社会はほぼすべてのエネルギーが再生可能エネルギーによって賄われるが、エネルギー利用の徹底した効率化によって、必要となるエネルギーは国内の再生可能エネルギーポテンシャルの範囲内に収まる。他方で、ロックインシナリオでは、導入する技術の実証実験は始まっており、具体的な技術導入の将来像を示しやすいと思われるが、CO<sub>2</sub>貯留コストと貯留量が著しく大きくなるリスク(不確実性が高い)、産油国・産炭国への化石燃料依存が継続するエネルギー・セキュリティー上のリスク、並びに貿易収支を悪化させるリスクを常に抱えた社会となることが示された。こうしたことから、ネット・ゼロ社会を目指す上で、トランジションシナリオの方が上述のリスクが少なく、持続性の高いシナリオであることが示唆される。

第2章では、トランジションシナリオにおける社会の変化を都市と地域、暮らし、産業、適応という観点から展望した。現代の日本は、少子高齢化など人口動態に関する問題、年金等を含む社会福祉問題、長時間労働や非正規雇用などの労働問題、格差社会、さらには自然災害への対応も含め、様々な課題に直面しているなかで、トランジションシナリオは、社会の広範多岐にわたり様々な変化が起きたシナリオである。それ故に、我々の暮らしはどのように変化するのか、的確に認識することは容易ではない。そのため、第2章の記述は、トランジションシナリオにおけるネット・ゼロ社会において、我々の暮らしや経済活動がどのようなものであるのかについて、理解の一助となることを目的としている。

第3章では、ネット・ゼロに向けた公正な移行に対して、現時点で想定される論点に対する考え方を示すとともに、ネット・ゼロ社会を実現するために、今後慎重に検証することが求められている課題をまとめた。特に、ネット・ゼロ社会の必要性やその実現可能性やもたらされる負の影響に対して慎重に議論を進めていく必要があることを認識しつつ、それらの論点に対する幅広い議論やネット・ゼロ社会達成によってもたらされる機会も含めて議論を進めていく必要性を示した。

ネット・ゼロ社会の構築には、あらゆる部門で、制度や慣行など必要な変革を進めていくことが求められる。これは一つの組織が単独でできるものではなく、国家的な戦略として位置づけられ、日本のすべての関係者が足並みを揃えて推進していく必要がある。特に、再生可能エネルギーの主力電源化や十二分な活用を実現するインフラ整備を進めるとともに、建築物、大規模発電設備、産業設備など、使用年数が長期におよぶものについては、予め長期的な更改新の方向性を定め、それぞれの設備が更新される機会を逃すことなく、今後大きく変わりうる社会の変化に対応できるようなものに準備しておく必要がある。

## 目次

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 公表に寄せて                             | 3  |
| 概要                                 | 4  |
| はじめに                               | 11 |
| 序章 ネット・ゼロ社会を考える                    | 12 |
| 新たな社会の夜明け                          | 12 |
| ネット・ゼロ社会構築の必要性、緊急性                 | 14 |
| ネット・ゼロ社会に関連する社会変化とそのドライビングフォース     | 21 |
| 第1章 ネット・ゼロ社会を推計する                  | 23 |
| ネット・ゼロの2つのシナリオ作成                   | 23 |
| 各シナリオのGHG排出量推計手法                   | 27 |
| GHG排出量推計の考え方及び用いたデータ               | 29 |
| 推計結果                               | 30 |
| 考察                                 | 34 |
| 第2章 ネット・ゼロ社会を展望する                  | 38 |
| 総論                                 | 38 |
| 都市、地域において                          | 40 |
| 暮らしにおいて                            | 42 |
| 産業活動において                           | 46 |
| 農林水産業において                          | 50 |
| 適応において                             | 51 |
| 第3章 ネット・ゼロ社会の実現に向けて                | 54 |
| 公正な移行に向けた論点と課題                     | 54 |
| 結論                                 | 62 |
| 補論1. GHG/CO <sub>2</sub> 排出量の推計手法  | 65 |
| 1.1 部門別のエネルギー起源CO <sub>2</sub> 排出量 | 65 |
| 1.2 ストック量の推計                       | 77 |
| 1.3 非CO <sub>2</sub> GHG排出量の変化     | 80 |
| 1.4 GHG吸収量の変化および海外での削減分            | 86 |
| 補論2 ネット・ゼロへ向けた緩和策と両立する適応策オプション     | 88 |
| 参考資料(概説)                           | 89 |
| 参考文献                               | 99 |

## 図の目次

|  |    |
|--|----|
| 図 1 本報告書の構成 .....  | 11 |
| 図 2 2050年までのCO <sub>2</sub> 排出実質ゼロを表明した自治体 .....               | 19 |
| 図 3 「Zero Carbon Yokohama」の実現に向けた各地域との連携 .....                 | 20 |
| 図 4 本報告書で想定した社会変化のドライビングフォースとエネルギー需要の関係 .....                  | 21 |
| 図 5 GHG排出量推計アプローチ .....  | 29 |
| 図 6 ネット・ゼロの社会におけるGHG排出量及び吸収量の構造 .....                          | 30 |
| 図 7 シナリオ別の最終エネルギー消費量 .....                                     | 31 |
| 図 8 部門別の最終エネルギー消費量(2015年) .....                                | 32 |
| 図 9 部門別の最終エネルギー消費量(ロックインシナリオ(2050年)) .....                     | 32 |
| 図 10 部門別の最終エネルギー消費量(トランジションシナリオ(2050年)) .....                  | 33 |
| 図 11 シナリオ別の社会変化によるCO <sub>2</sub> 削減量 .....                    | 33 |
| 図 12 各シナリオにおける発電電力量と再エネポテンシャルとの比較 .....                        | 36 |
| 図 13 各シナリオの化石燃料輸入量 .....                                       | 37 |
| 図 14 報知新聞「二十世紀の預言」(1901年1月2日、3日)(国立国会図書館所蔵) .....              | 45 |
| 図 15 重化学工業を除く製造業における業種別・温度帯別熱需要 .....                          | 48 |
| 図 16 ネット・ゼロへ向けた緩和を促進する適応レベルの進展(水災害分野の例) .....                  | 52 |
| 図 17 世界の再生可能エネルギー発電コスト(均等化発電原価)の変化(2010-2018年) .....           | 58 |
| 図 18 電気自動車のリチウムイオン電池パックのコスト:実測値(~2014年)と予測値(~2030年) .....      | 59 |
| 図 19 IRENAエネルギートランジションシナリオにおける2050年の再生可能エネルギー関連雇用者数(地域別) ..... | 60 |

## 表の目次

|  |    |
|--|----|
| 表 1 気候変動による影響.....   | 15 |
| 表 2 2050年ネット・ゼロを宣言している国、地域、都市 .....                                    | 18 |
| 表 3 ロックインシナリオとトランジションシナリオにおける社会の想定 .....                               | 24 |
| 表 4 各国際機関の分析・報告書において重視された社会変化の構成要素 .....                               | 25 |
| 表 5 CO <sub>2</sub> の国内貯留ポテンシャルとシナリオ別CO <sub>2</sub> 国内貯留地利用可能年数 ..... | 36 |
| 表 6 溶解パルプの用途.....  | 47 |
| 表 7 エネルギー集約型産業に適応できる低炭素技術の全体像.....                                     | 49 |

## Boxの目次

|  |    |
|--|----|
| Box 1 欧州グリーン・ディール(European Green Deal)について ..... | 18 |
| Box 2 自治体によるネット・ゼロ宣言 .....                       | 19 |
| Box 3 もうすぐ迎える化石燃料産業文明の終焉？ .....                  | 22 |
| Box 4 成長のジレンマ、持続可能な開発への難問.....                   | 26 |
| Box 5 分散型電源の利用.....                              | 39 |
| Box 6 再生可能エネルギーの導入を促すブロックチェーン技術.....             | 41 |
| Box 7 電気自動車によるエネルギー効率改善.....                     | 42 |
| Box 8 高層建築の木造化.....                              | 44 |
| Box 9 将来を予測するということ.....                          | 45 |
| Box 10 SDGsで評価される日本企業.....                       | 48 |
| Box 11 デジタル化と適応 .....                            | 52 |
| Box 12 気候変動対策で評価される日本企業 .....                    | 55 |

## 略語

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>3R</b>             | Reduce, Reuse, Recycle (リデュース、リユース、リサイクル)                           |
| <b>AI</b>             | Artificial Intelligence (人工知能)                                      |
| <b>APF</b>            | Annual Performance Factor (通常エネルギー消費効率)                             |
| <b>BDI</b>            | Bundesverband der Deutschen Industrie(ドイツ産業連盟)                      |
| <b>BECCS</b>          | Bio-energy with Carbon Capture and Storage(CCS 付きバイオエネルギー)          |
| <b>BNEF</b>           | Bloomberg New Energy Finance(ブルームバーグ・ニュー・エナジー・ファイナンス)               |
| <b>CCS</b>            | Carbon dioxide Capture and Storage(CO <sub>2</sub> 回収・貯留)           |
| <b>CCU</b>            | Carbon dioxide Capture and Usage(CO <sub>2</sub> 回収・利用)             |
| <b>CDP</b>            | Carbon Disclosure Project(カーボン・ディスクロージャー・プロジェクト)                    |
| <b>CFRP</b>           | Carbon Fiber Reinforced Plastic(炭素繊維強化プラスチック)                       |
| <b>CH<sub>4</sub></b> | Methane (メタン)   |
| <b>CLT</b>            | Cross Laminated Timber(クロス・ラミネーティッド・ティンバー)                          |
| <b>CNFRP</b>          | Cellulose Nanofiber Reinforced Plastic(セルロースナノファイバー強化プラスチック)        |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Carbon Dioxide(二酸化炭素)   |
| <b>COP</b>            | Conference of the Parties(気候変動枠組条約締約国会議)                            |
| <b>DAC</b>            | Direct Air Capture(直接空気回収)  |
| <b>DACS</b>           | Direct Air Capture and Storage(直接空気回収・貯留)                           |
| <b>EC</b>             | Electronic Commerce (電子商取引)   |
| <b>EPA</b>            | Environmental Protection Agency (環境保護庁)                             |
| <b>ESG</b>            | Environmental, Social, and Governance(環境・社会・ガバナンス)                  |
| <b>ETC</b>            | Energy Transitions Commission(エネルギー移行委員会)                           |
| <b>EU</b>             | European Union (欧州連合)   |
| <b>EV</b>             | Electric Vehicle(電気自動車)   |
| <b>FCV</b>            | Fuel Cell Vehicle(燃料電池車)  |
| <b>GDP</b>            | Gross Domestic Product (国内総生産)                                      |
| <b>GHG</b>            | Greenhouse Gas (温室効果ガス)   |
| <b>GSDR</b>           | Global Sustainable Development Report(持続可能な開発に関するグローバル・レポート)        |
| <b>GWP</b>            | Global Warming Potential (地球温暖化係数)                                  |
| <b>HCFC-</b>          | Hydrochlorofluorocarbons(クロロジフルオロメタン)                               |
| <b>22</b>             |   |
| <b>HFCs</b>           | Hydrofluorocarbons(ハイドロフルオロカーボン)                                    |
| <b>HFO</b>            | Hydrofluoroolefin(ハイドロフルオロオレフイン)                                    |
| <b>ICT</b>            | Information and Communication Technology(情報通信技術)                    |
| <b>IGES</b>           | Institute for Global Environmental Strategies (地球環境戦略研究機関)          |
| <b>IH</b>             | Induction Heating (誘導加熱)  |
| <b>IIASA</b>          | International Institute for Applied Systems Analysis(国際応用システム分析研究所) |
| <b>IRENA</b>          | International Renewable Energy Agency(国際再生可能エネルギー機関)                |
| <b>IoT</b>            | Internet of Things (モノのインターネット)                                     |
| <b>ITF</b>            | International Transport Forum(国際交通フォーラム)                            |
| <b>IPCC</b>           | Intergovernmental Panel on Climate Change(気候変動に関する政府間パネル)           |
| <b>JCM</b>            | Joint Crediting Mechanism (二国間クレジット制度)                              |
| <b>JST</b>            | Japan Science and Technology Agency(科学技術振興機構)                       |
| <b>LED</b>            | Low Energy Demand (低エネルギー需要)  |
| <b>MaaS</b>           | Mobility as a Service (サービスとしての移動)                                  |
| <b>MIROC</b>          | Model for Interdisciplinary Research on Climate(気候に関する学際的研究のためのモデル) |
| <b>N<sub>2</sub>O</b> | Nitrous oxide (一酸化二窒素)  |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>NDC</b>            | Nationally Determined Contribution(国別目標)   |
| <b>NET</b>            | Negative Emission Technology(負排出技術)  |
| <b>NF<sub>3</sub></b> | Nitrogen trifluoride(三フッ化窒素)   |
| <b>NPO</b>            | Non Profit Organization(非営利組織)   |
| <b>PC</b>             | Personal Computer(パソコン)  |
| <b>PFCs</b>           | Perfluorinated Compound(有機フッ素化合物)  |
| <b>PFN</b>            | Perfluoronitrile(ペルフルオロニトリル)   |
| <b>PHV</b>            | Plug-in-Hybrid(プラグインハイブリッド車)   |
| <b>PRB</b>            | Principles for Responsible Banking(国連責任銀行原則)   |
| <b>PRI</b>            | Principles for Responsible Investment(責任投資原則)  |
| <b>PSI</b>            | Principles for Sustainable Insurance(持続可能な保険原則)  |
| <b>RCP</b>            | Representative Concentration Pathways(代表濃度経路シナリオ)  |
| <b>SCC</b>            | Social Cost of Carbon(炭素の社会的コスト)   |
| <b>SDGs</b>           | Sustainable Development Goals(持続可能な開発目標)   |
| <b>SDSN</b>           | Sustainable Development Solutions Network(持続可能な開発ソリューション・ネットワーク)                               |
| <b>SF<sub>6</sub></b> | Sulfur hexafluoride(六フッ化硫黄)  |
| <b>SRES</b>           | Special Report on Emissions Scenarios(排出シナリオに関する特別報告)  |
| <b>SROCC</b>          | Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate(変化する気候下での海洋・雪氷圏に関するIPCC特別報告書) |
| <b>SSPs</b>           | Shared Socioeconomic Pathways(共有社会経済パス)  |
| <b>TCFD</b>           | Task Force on Climate-related Financial Disclosures(気候関連財務情報開示タスクフォース)                         |
| <b>TEN-E</b>          | Trans-European Networks-Energy(汎欧洲エネルギーネットワーク)   |
| <b>UNEP</b>           | United Nations Environment Programme(国連環境計画)   |
| <b>VPP</b>            | Virtual Power Plant(バーチャルパワープラント:仮想発電所)  |
| <b>VR</b>             | Virtual Reality(仮想現実)  |
| <b>V2G</b>            | Vehicle-to-grid(車両から電力系統への電力供給)  |
| <b>WBA</b>            | World Benchmarking Alliance  |
| <b>WBCSD</b>          | World Business Council for Sustainable Development(持続可能な開発のための世界経済人会議)                         |
| <b>ZEB</b>            | net Zero Energy Building(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)  |
| <b>ZEH</b>            | net Zero Energy House(ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス)  |

## はじめに

本報告書は、日本において、どのようにネット・ゼロ社会の実現を図るのかということについて、問題提起を行うことをねらいとしている。

その構成は、目標年として2050年を掲げ、ネット・ゼロ社会におけるエネルギー需要の動向を中心に定量的な分析を試みた第1章、日々の暮らししぶりなどネット・ゼロ社会を身近なところに引き付けて定性的に叙述した第2章、そしてネット・ゼロ社会に向けた主要な課題や論点を概観した第3章からなる。

第1章では、広範な社会変化を伴いながらネット・ゼロ社会を実現していくケース(トランジションシナリオ)と、大きな社会変化は伴わないケース(ロックインシナリオ)について、ネット・ゼロを達成した場合に、GHG排出量及び吸収量やエネルギー利用量、再生可能エネルギー利用量、必要となるCO<sub>2</sub>貯留量がどのように変化しうるのか、また供給面も含めどのようなエネルギーシステムが実現しうるのかを定量的に示した。

続く第2章では、社会、経済、エネルギー構造等において大きな変革を成し遂げた後の社会像を叙述的に記述する。そのため、研究機関や研究者から示されている2030年や2050年、2100年頃を対象とした未来予測に関する様々なドキュメント(詳細は巻末参考資料に示す)から技術・社会・個人の動向などに関する要素を抽出し、専門家等に意見照会を行い、実現可能性が高いと思われるものを中心に記述した。もとより、2050年という30年後の世界は、現在その片鱗も見られないような技術や価値観などによって大きく様変わりしている可能性もあるが、若干の積極的な期待も込めて記述を試みた。

第3章では、ネット・ゼロ社会の実現に向けて、課題や論点の概観を試みた。総じて、公正な移行の議論を踏まえて適切に社会変化を進めるべきと結論し、最終的なメッセージとして、いわば、人類の生存をかけて社会を進化させる決断と行動が求められているとした。

今後は、ネット・ゼロ社会の実現に向けて、さらに掘り下げたテーマで続編を公表していくとともに、様々な関係者に参加を募り、意見・情報交換の場を設定していきたいと考えている。

### 序章：ネット・ゼロ社会を考える

将来技術要素・社会問題・国際問題の特定

### 第1章：ネット・ゼロ社会を推計する(シナリオ策定)

既存の社会システムや制度が維持された社会での技術進展: ロックインシナリオ  
様々な社会的要素の変革を伴う技術展開: トランジションシナリオ

### 第1章：ネット・ゼロ社会を推計する(GHG排出量など推計)

各技術の発展や問題解決がなされる場合の社会への影響について個別文献の精査  
社会変化のうちエネルギー利用に影響を与えるものを量化  
結果の比較: 再エネ必要量、社会変化による削減量、CCS必要量、化石燃料輸入量

### 第2章：ネット・ゼロ社会を展望する

### 第3章：ネットゼロ社会の実現にむけて

図 1 本報告書の構成

## 序章 ネット・ゼロ社会を考える

### 新たな社会の夜明け

人類は、長い狩猟・採取の時代を経て農耕社会、工業社会、情報社会と、高度な文明社会を築き上げてきた。参考資料(通史的俯瞰)に概観するように、拡大する活動を中心的に支えてきたのがエネルギーであり、人類は、(おそらく)自然現象としての発火の活用から始まり、様々な発見や創造・改善の努力を経て、化石燃料や原子力を活用した電力など近代的なエネルギーを大規模に利用するようになった。

ところが、近年、人間活動に起因する地球温暖化によって風水害、農業・食料安全保障、水資源・沿岸域・海洋の保全、健康など人々の暮らしに深く関わる様々な面で深刻な影響が生じる可能性が高まることが明らかになってきた。社会経済活動の主要部分を支える化石燃料の使用に伴い排出される二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が地球温暖化の主原因であることから、このエネルギー源からの脱却が国際社会において焦眉の急となっている。地球の気候の安定のために、ひいては人類を含む地球上の生物の生存のためにエネルギー利用などに伴う温室効果ガスの排出量と吸収量の正味がゼロとなる世界、すなわちネット・ゼロ社会を実現することが必須であると多くの人々に認識されるようになっている。こうした中、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは、コスト面でも実用・普及の段階に達し、蓄電技術等の向上と相まって社会経済活動を支える主たるエネルギー源としての役割と重要性が一層増している。また化石燃料使用の大きな部分を占める移動・輸送分野でも、従来の内燃機関系自動車から電気自動車や水素自動車などへの移行が始まり、これらの市場での存在感が高まっている。建築の分野でも従来型の住居・ビルをZEH(ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス)やZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)へと移行していく動きが進んでいる。

これまでの企業や産業界による自発的な活動<sup>1</sup>だけでは取り組みが十分ではないとの危機感から、排出削減の活動を側面から促す取り組みも顕著になってきた。例えば、欧米の金融機関を中心としたダイベストメントやグリーンボンドなどESG投資が増加し、気候変動対応に向かう資金の流れが増加している。またサステナブル・ファイナンスの3原則<sup>2</sup>が確立されてきた。こうした投融資の原則などを踏まえて個々の投資先を選定する際に必要となる気候関連情報の開示を通じて気候変動対策を進める取り組みとして、TCFDの活動が進展<sup>3</sup>している。このように多数の機関投資家、保険会社、銀行などの関係機関が参画し、経済社会の転轍手<sup>4</sup>として、その道行きを根底で支えるようになっている。

<sup>1</sup> 日本の例では、1997年から継続的に実施してきた経団連「環境自主行動計画」があり、2013年以降は、それを発展させた「低炭素社会実行計画」に基づき自主的な取り組みが進められている。同計画は、従前から取り組んできた国内の事業活動における排出削減に加えて、製品による排出削減等を含む主体間連携の強化、国際貢献の推進、革新的技術の開発の4つの柱で構成される(低炭素社会実行計画第三者評価委員会2019「2018年度低炭素社会実行計画第三者評価委員会評価報告書」[188])。

<sup>2</sup> 具体的には、2006年のPRI(Principles for Responsible Investment)、2012年のPSI(Principles for Sustainable Insurance)、2019年のPRB(Principles for Responsible Banking)を指す。

<sup>3</sup> 気候関連財務情報開示タスクフォース(Task Force on Climate-related Financial Disclosures);この提言の趣旨に対する賛同数は、世界中で1,027機関に増え、そのうち日本における賛同数は251機関と世界第1位となっている(令和2年3月1日時点)。

<sup>4</sup> てんてつしゅ。最近見かけることは少ないが、鉄道軌道のポイント切り替えを行う者。

2019年9月の国連気候変動サミットでは、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)<sup>5</sup>の特別報告書を踏まえ、1.5°C目標を念頭にした2050年ネット・ゼロ(GHG排出量と吸収量の収支が正味でゼロ)排出が野心度を測る一つのベンチマークとなり、59カ国が2020年末までにNDC引き上げを行うと表明し、11カ国が既に国内プロセスを開始しているとされる。また、66カ国・地域、10の州、102の都市、87の企業、そして12の投資機関が2050年までにネット・ゼロ排出を達成、あるいはそれに向けた動きを加速すると表明している。総じて、世界の排出量の15%以上を占める国、地域、都市が2050年ネット・ゼロ排出を表明している。2020年1月14日、パリ協定に基づいて各国が自国の温室効果ガス排出削減目標や温暖化対策を盛り込んだ国別目標(NDC)を2020年のうちに更新・強化して国連に再提出する意向をもつ国が108にのぼったことが、COP25議長国であったチリより発表された[1]。企業・投資家の動きと合わせて、今後、脱炭素化に向けてより力強い機運が生み出される可能性が高い。COP25では石炭火力発電所新設の中止への日本からのコミットメントは見られなかったが、国際社会の議論が1.5°C目標に軸足を移すことで、石炭火力への風当たりはより強くなるものと見込まれる。

また、古くて新しい問題であるが、経済発展の目標や評価基準となってきたGDPについても、これを見直す動きが生じている。例えば、自然資本や社会資本の有する価値に着目し、持続可能性の観点から新たな国富を測ろうとする指標も提唱されている。気候変動対策の分野では、税制等を通じて経済活動に炭素価格を盛り込み、価格シグナルを介して、あらゆる経済主体の排出を削減しようとする試み(カーボンブライシング)が世界各地で進展している。さらに、炭素の排出が気候変動影響被害をどれだけ引き起こしているかという炭素の社会的コスト(Social Cost of Carbon: SCC)という金銭的指標[2,3]について、すでに米国政府が具体的な数字を示しており[4]、米国の政策評価において活用された事例がある<sup>6</sup>。

このように、エネルギー(技術、制度)、移動・輸送、建築や製造などでの脱炭素技術、資金、価値・行動基準など様々な面でネット・ゼロという新たな世界の構築に向けた諸条件が整ってきた。これらは新たな社会の形成を基盤となって支える広義のネット・ゼロ・インフラといえることから、その整備を国家全体で推し進め、新たな産業・雇用を生み出しながら、誰一人取り残さず、公正な移行<sup>7</sup>により、ネット・ゼロ社会を構築していくという大きなうねりが国際社会のあちこちで生じ始めている。

---

<sup>5</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change:国連環境計画(UNEP)と世界気象機関(WMO)が共催し、1988年に初会合を行った。気候変動について、メカニズム、環境や社会経済への影響、対策のあり方について、世界の科学的な知見をもとに国際的に影響力のある報告書を発表している。

<sup>6</sup> SCCは企業や個人が気候変動影響(例えば、豪雨や洪水被害)を認識し独自に排出削減行動をとっていく際に、どこまでリターン(回避された気候変動の影響被害)を得られるかの指標となるため、排出削減を進める原動力にもなり得る。

<sup>7</sup> ネット・ゼロ社会への移行を含む社会変革の過程で産業の新陳代謝が進み、産業に従事する労働者や地域における暮らしや仕事が大きく変わりうる。このような変化の過程で、労働者の職業訓練や再就職支援、企業の業態転換や多角化支援を行うことで、影響を受ける労働者が働きがいのある人間らしい雇用機会を得られるような対策を伴った移行(トランジション)。

## ネット・ゼロ社会構築の必要性、緊急性

人為的温室効果ガスの累積排出量(これまで人類が毎年排出してきた量の合計)と地球の温度上昇がおよその比例関係にあることが、IPCCの『第5次評価報告書(2013/2014)』で示された。これは人類が温室効果ガスを排出し、増加させている限り温度は上がり、これに伴って風水害を始め様々な面で被害も拡大し続け、人類の生存自体すら危険にさらされることを意味する<sup>8</sup>。このため、できるだけ早い段階で温室効果ガスを増加させない世界にしていく、すなわちゼロ・エミッション社会に転換するべき必要性と緊急性を示している。これは交渉が通用する世界の話ではなく、自然の理(ことわり)からくるもので人類全体として総力を結集して解決に当たるべき事象である。つまり、ネット・ゼロにできるか否かといった論議はあまり意味がなく、いつまでに、どのようにネット・ゼロを達成するのかを関係者が真剣に議論し、速やかに行動に移していくべき時を迎えている。

2015年12月に採択されたパリ協定は、地球の気温上昇を産業革命前に比べ「2°Cよりも十分低く」抑え、さらには「1.5°Cに抑えるための努力を追求する」という長期気温目標を掲げた。しかし、1.5°C上昇と2°C上昇がもたらす悪影響の違いや、1.5°Cに抑えるための排出経路については、IPCCの『第5次評価報告書(2013/2014)』でも十分に検討されておらず、その科学的知見は不十分であった。そのため、パリ協定と同時に採択された決定文書の中で、気候変動枠組条約締約国会議(COP)はIPCCに対して、1.5°C目標に関する科学的知見をとりまとめるよう要請した。こうして生まれたのが2018年に公表された『1.5°C特別報告書』である<sup>9</sup>。本報告書によつて、1.5°Cの気温上昇に抑えることの重要性に対する国際社会における認識が高まった。同報告書の内容は多岐に及ぶが、基本的なメッセージは以下の通りである。

1. 産業革命以降、人間の活動により、気温が既に約 1°C 上昇した。その悪影響は既に顕在化。
2. 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(表 1)。
3. 1.5°C に抑えるためには、世界の排出量を 2030 年には 2010 年比 45% 削減し、2050 年頃までに正味(ネット)ゼロにする必要がある(2°Cに抑える場合は 2075 年頃)。
4. 現行の 2030 年目標の達成にとどまった場合、2030 年以降に大幅な排出削減を行ったとしても 1.5°C に抑えることは困難になる。

IPCCは、この他にも、気候変動と土地、海洋と雪氷圈など重要な特別報告書<sup>10</sup>を公表し、国際社会に警鐘を鳴らしている。

IPCCの特別報告書で示唆されている気候変動の影響は、日本でも豪雨や台風の被害として現れ始めたとみられる。気象庁が2018年の西日本豪雨に人為的なGHG排出による気候変動の影響が現れたとの公式見

<sup>8</sup> ある転換点を超えるとついには温暖化の暴走で灼熱地球(Hothouse Earth)に至るとする研究もある[65]。

<sup>9</sup> 正式名は、『1.5°Cの地球温暖化：気候変動の脅威への世界的な対応の強化、持続可能な開発及び貧困撲滅への努力の文脈における、工業化以前の水準から 1.5°Cの地球温暖化による影響及び関連する地球全体での温室効果ガス(GHG)排出経路に関するIPCC 特別報告書』。この報告書の日本語による解説版は、IGESのウェブページからダウンロード可能(<https://www.iges.or.jp/jp/projects/ipcc48>)。

<sup>10</sup> この二つの報告書の詳細は、IGESのウェブページからダウンロード可能(<https://www.iges.or.jp/pub/ipcc-srocc-handbook/ja> 及び <https://www.iges.or.jp/pub/ipcc-srccl-handbook/ja>)。

解を示したことは、特筆に値する。2018年の自然災害の保険金支払額は過去最高の1.6兆円に達した[5]。2019年の甚大な台風被害はもとより、気候変動の影響被害は、今後拡大していく性質のものである点を看過してはならない。気候変動による影響を最小のものとし、安全・安心な社会を構築するためには、一刻も早いネット・ゼロの達成、すなわち脱炭素社会の完成を日本全体の目標に据え、今すぐに、できる対策から着手していくことが重要である。

表 1 気候変動による影響

| 対象        | 地域              | 1.5°C                                   | 2°C                             | 適応            | 適応ポтенシャル                      |
|-----------|-----------------|---|---------------------------------|---------------|--------------------------------|
| 農業・食料安全保障 | 全域、アフリカ、アジア     | 3,200万人～3,600万人が減産により影響を受ける             | 3億3,000万人～3億9,600万人が減産により影響を受ける | 気候の変化に強い品種、灌漑 | 中、低緯度より高緯度の方が高い                |
| 水資源       | 全域、アフリカ、地中海     | 4億9,600万人が水ストレス                         | 5億9,000万人が水ストレス                 | 配給井戸、雨水タンク    | 低                              |
| サンゴ礁      | 熱帯              | 70～90%が消滅の危機                            | 99%が消滅の危機                       | —             | 非常に限られている                      |
| 沿岸域       | 全域、アジア、小島嶼開発途上国 | 3,100万人～6,900万人にリスクあり                   | 3,200万人～7,900万人にリスクあり           | マングローブ、移住     | 低～中、いくつかの環礁では、1.5°C/2°Cで住めなくなる |
| 健康        | 全域、局所、熱帯        | 2050年までに、巨大都市で、3億5,000万以上の人人が致命的な熱波を受ける | —                               | 水分補給、冷却帯、屋上緑化 | 中、熱帯では低                        |

出典:IPCC1.5°C特別報告書(第3, 4, 5章)、COP24 IPCCサイドイベントのR. Mechlerのスライド[6]よりIGES甲斐沼作成

なお、新型コロナウィルス(COVID-19)の問題は、気候変動や無秩序な開発による生態系の破壊などにより、ヒトと野生生物の関係が複雑化・緊密化した結果生じたものと考えられ、それが、ヒト・モノ・カネ・情報などが国境を越えて瞬時に移動するグローバリゼーションにより世界中に拡散したものである。COVID-19による教訓の一部を後述するが、自然に大きな影響を及ぼす人間の非持続的な開発が、その原因の根底にあることを忘れてはならない。

IPCCの特別レポートや、最近体感されるようになった数々の異常気象を受け、多くの国々が気温上昇を1.5°Cに抑えることを目指し、そのための対策として、排出量から吸収量などを差し引いたネットでのGHG排出量をゼロにしていくこと、いわゆるネット・ゼロ、を中長期の国家目標とし始める動きが活発化している。

2019年9月、Climate Ambition Allianceが立ち上げられた。このイニシアティブは、加盟国に、2020年までのNDCs引き上げ、または、2050年までのネット排出ゼロへのコミットメントを求めるものであるが、今後、これに賛同する国が増えていくことが予想される。

EUでは2018年11月に、「A Clean Planet for all- A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy by EU(万人のためのクリーンな地球)」を発表し、2050年までに1990年比100%削減のシナリオも示した。これを受けて、2019年12月12日に欧州理事会は、2050年までにカーボンニュートラルを達成するという目標を承認した<sup>11</sup>。また、欧州議会では目標引き上げの議決を検

<sup>11</sup> ただし、ポーランド一国のみ、留保した[189]。

討している。2019年12月には、「The European Green Deal(欧洲グリーン・ディール)」((COM2019)640)を策定・公表し、広範かつ積極的に、欧洲一丸となって焦眉の課題にあたり、大胆に社会変革を進めていくことが記された(Box 1参照)。

英国では、2019年3月に、2050年までに二酸化炭素ネット排出量をゼロにする戦略を示す「Net Zero The UK's contribution to stopping global warming(ネット・ゼロ-地球温暖化を止めるための英国の貢献)」[7]を発表した。同年6月27日にはネット・ゼロにする政策目標を法定とする、2008年気候変動法改正法案を可決している。これを受け、英国内の各産業部門は脱炭素化の戦略作りに着手した[8]。フランスでも、2019年11月8日に、2050年までにカーボンニュートラル(ネット・ゼロ)を達成することを規定した法案が可決された[9]。

ネット・ゼロの達成には、産業部門における脱炭素化が必須であり、欧洲の産業界においても議論が活発化している。ドイツ産業連盟(BDI)は、2018年1月に脱炭素化に関するレポートを発表した[10]。BDIのレポートでは、既存の施策で2050年までに1990年比61%のGHG削減が可能であるとし、95%削減の道筋も示している。英蘭石油大手ロイヤル・ダッチ・シェルの石油化学施設が多く位置するロッテルダム港では、脱炭素化の流れを受けて、交通部門における化石燃料の利用が最大限に抑えられることを予想し、Rotterdam Port Authorityのイニシアティブのもと、産業の脱炭素化シナリオを作成している[11]。この他、産業部門における研究機関や国際機関が産業部門の脱炭素化に向けた具体的な施策を検討する数々のレポートを公開している[12-19]。

日本は、2019年6月に策定した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」において、「最終到達点として脱炭素社会<sup>12</sup>」を掲げ、「今世紀後半のできるだけ早期に実現していくことを目指す。」としている。2020年1月、同長期戦略及び「統合イノベーション戦略2019」に基づき、日本政府の統合イノベーション戦略推進会議が「革新的環境イノベーション戦略」を決定した。2019年9月、日本は、脱炭素社会を目指す有志連合「炭素中立性連合」に加入した[20]。

さらに、こうした動きは国レベルのみならず地方レベルでもネット排出ゼロの動きが活発化している。UNEP Gapレポート[21]の集計では、地方レベルでは、8つの州、32の都市がネット・ゼロの目標を宣言している(2019年9月時点。表2参照)。日本におけるネット・ゼロ宣言自治体については、東京都・神奈川県・横浜市を始めとする93の自治体(18都府県、42市、1特別区、24町、8村)が「2050年までに二酸化炭素排出実質ゼロ」を表明。表明した自治体の人口の合計は約6,372万人、GDPは約310兆円となり、日本の総人口の過半数を超えており(2020年5月27日現在。図2参照)。このようにネット・ゼロ社会を構築する動きは国内でも高まっており、その具体的な姿を描くことは、ネット・ゼロ社会に関わる政策、取り組み、研究など様々な活動において議論の進展に貢献すると考えられる。

2020年初頭に顕在化したCOVID-19の世界的大流行(パンデミック)は、期せずしてネット・ゼロ社会構築の必要性と緊急性を改めて強調することとなった。COVID-19のパンデミックが示したポイントの1点目は、我々がこのままのペースで気候と生態系に影響を与え続けることで、COVID-19と同様あるいはそれ以上の危機に直面する可能性を強く認識するようになったことである。COVID-19の爆発的流行(アウトブレイク)の原因は目下

---

<sup>12</sup> 今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡(世界全体でのカーボンニュートラル)を達成すること、としている。

究明中であるが、野生生物からヒトへのウイルス感染(人獣共通感染症)によるとする説が有力である。「人新世(Anthropocene)」といわれる現代において、人類は野生生物の生息域に踏み込み生態系を攢乱し続けている<sup>13</sup>。人間が作り出す自然界における不安定さは、時に人間をも巻き込んで熾烈な生存競争へと発展することに改めて気づかされる結果となった。

ポイントの2点目は、眞の必要性に迫られたとき人間は日頃、無意識にとっている行動や社会の仕組みを変えることができるという事実である。世界各国において実施された(あるいは現在も続いている)ロックダウンや外出自粛の取り組みは、テレワークあるいはリモート授業といった取り組みを大きく前進させた。これまでテレワークの導入があまり進んでいなかった日本においても、ワークスタイルやライフスタイルに変化が生じ、さらにはワーク・ライフバランスの面でも大きな変化が進みつつある。これまで、ネット・ゼロ社会への性急な移行を問題視してきた人々の間にも、変化の必要性と実現可能性を見出す契機が生じている。

ポイントの3点目は、COVID-19とネット・ゼロ社会への移行の関係として、より持続可能でレジリエント(強靭で)かつインクルーシブ(包摂的)な社会への希求が挙げられる。短期的な感染拡大の封じ込めの次に必要となる中期的な経済の復興フェーズにおいて、同様の危機に対してよりよく対応できる社会を構築すること、すなわち、「より良い復興(build back better)」につなげる施策が求められている。今後、各国で実施される大規模な経済対策が、前述の欧州グリーン・ディールなどに近いものになり、世界規模でのグリーン・ニューディールの実施に繋がることが求められている。2020年4月27-28日にオンラインで開催された第11回ペータースベルク気候対話<sup>14</sup>において、小泉進次郎環境大臣を含む世界27カ国の関係閣僚がCOVID-19による経済危機からの復興と気候変動政策を融合させる「グリーンリカバリー」について意見交換し、この流れに先鞭をつけたことは大きな一歩だと言えよう。

COVID-19は、持続性と密接に関連した問題であり、その観点から「短期」、「中期」、「長期」にこの問題に統合的に取り組んでいく必要がある<sup>15</sup>。

---

<sup>13</sup> 国立環境研究所の五箇公一は、これを「人間による宿主—寄生生物間の共進化関係の練乱」と表現している[190]。

<sup>14</sup> 詳細は、ドイツ連邦環境省ホームページ参照(<https://www.bmu.de/en/petersberg-climate-dialogue-xi/>)。

<sup>15</sup> 詳細は、IGESポジションペーパー「新型コロナウイルス感染症が環境と持続可能性に及ぼす影響について」参照(<https://www.iges.or.jp/jp/pub/covid19-j/ja>)。

### Box 1 欧州グリーン・ディール(European Green Deal)について

2019年12月に公表されたこの24頁ほどのドキュメントの対象範囲は広範多岐にわたり、以下に示す社会を根底から変革する政策(deeply transformative policies)を進めるとしている。

- ▶ 気候変動に関する2030年、2050年目標の引き上げ：2050年の気候中立目標の法的根拠となる欧州気候法を2020年3月までに提案する、これに伴い2030年目標の40%削減は50—55%削減目標へと強化される、等。
- ▶ クリーンなエネルギーの供給など：2030年及び2050年目標の引き上げに向けて、電力部門は、その大部分を再生可能エネルギーに立脚したものへと発展する必要があり、速やかな石炭からの脱却とガスの脱炭素化も併せて実施されるべきと認識。2019年中に加盟国に提出が求められているエネルギー及び気候計画の野心度を欧州委員会(EC)が評価し、必要があれば、2021年6月までにEUのエネルギー法制の改正につなげる。2023年に加盟国がこれらの計画の改訂を検討し始める際には、新たな目標が取り入れられるべきこと。
- ▶ クリーンな循環経済に向けた産業の再構築：鉄鋼、化学、セメント産業は欧州経済に必要不可欠とし、この分野での脱炭素化と近代化の必要性を認識、2030年までに水素還元製鉄技術を確立、等。
- ▶ 建築物におけるエネルギー効率、資源効率の向上：改築率を現在の年1%から、2ないし3倍に引き上げる。このため、2020年に加盟国の長期改築戦略の実施状況を審査し、建築物のエネルギーパフォーマンスに関する関連法制を厳格に実施する、等。
- ▶ スマートな交通・移動へのシフトの加速：特に市街地における汚染の徹底的な改善のため、2021年6月までに乗用車に関するCO<sub>2</sub>の排出規制を強化し、交通のゼロ・エミッション化を図る、同時に道路交通における排出量取引制度の検討を始める、等。

表 2 2050年ネット・ゼロを宣言している国、地域、都市

| 国  | 地域  | 都市   |
|--|---|--|
| 欧州:ノルウェー、スウェーデン、イギリス、フランス、スイス、デンマーク、ドイツ、EU28、アイルランド、オランダ、フィンランド、アイスランド、ポルトガル<br>オセアニア:ニュージーランド、フィジー、マーシャル諸島<br>アジア:ブータン<br>南米:チリ、ウルグアイ<br>中米:コスタリカ | 米国:ハワイ、カリフォルニア、ニューヨーク<br>カナダ: ビクトリア<br>欧州:スコットランド、カタルーニャ<br>オーストラリア:オーストラリア首都特別地域、クイーンズランド、南オーストラリア、ニューサウスウェールズ、タスマニア | 欧州:バルセロナ、パリ、レイキャビク、ロンドン、ハーベ、コペンハーゲン、オスロ、ストックホルム、ヘルシンキ<br>北米:ボストン、インディアナポリス、サンフランシスコ、シアトル、ワシントンD.C.、ニューヨーク<br>オーストラリア:キャンベラ、メルボルン、シドニー<br>アフリカ:ケープタウン<br>日本:図 2 |

出典:UNEP GAP Report[22]をもとにIGES作成

## Box 2 自治体によるネット・ゼロ宣言<sup>16</sup>

全国に先駆けて、2019年前半までに京都市、横浜市が21世紀後半でのGHGのネット・ゼロ(Zero Carbon Yokohama)を、東京都は2050年のCO<sub>2</sub>のネット・ゼロ(2050年実質排出ゼロ)を宣言した。全国の多くの自治体が、2050年までのネット・ゼロ目標の達成へ向けた行動を取り始めている(図 2)。



図 2 2050年までのCO<sub>2</sub>排出実質ゼロを表明した自治体

出典:環境省[23]

生産プロセスで排出されるCO<sub>2</sub>やフロンガス類、農業部門からのメタン等の排出分を相殺するには、植林及び森林再生やBECCS、CO<sub>2</sub>の直接空気回収貯留(DACS)などの負排出技術(NET: negative emission technology)が必要となる。そこで、人口減少に伴い遊休化する土地を有する地方自治体と連携して、主要都市がネット・ゼロ宣言していく。このように、ネット・ゼロの達成には、エネルギー需要の低減や再生可能エネルギーの大規模導入などに加えて、経済合理的な最大限のNET導入が必要である。主要都市によるネット・ゼロ宣

<sup>16</sup> ネット・ゼロ宣言の他に、気候危機を受けた「気候非常事態宣言」をする自治体も国内外で広がりを見せている。2020年1月20日現在、日本国内では7自治体が気候非常事態宣言を行っている。全国の自治体の気候危機の認識の広がりは、自治体によるネット・ゼロ宣言の推進力にもなっていると考えられる[191]。

言の達成は、地方都市におけるネット・ネガティブ排出の実現にかかっている。例えば、横浜市はネット・プラスだが、東北地方の市町村は横浜市と連携して再生可能エネルギーを供給しつつ、ネット・ネガティブを達成し、連携自治体全体でネット・ゼロを達成することになる。こうした連携は、各地域がその特性に応じた地域資源を生かし、自立・分散型の社会を形成しつつ、近隣地域と地域資源を補完し支え合うことで地域を活性化させる「地域循環共生圏」の理念のもと行われる[24]。

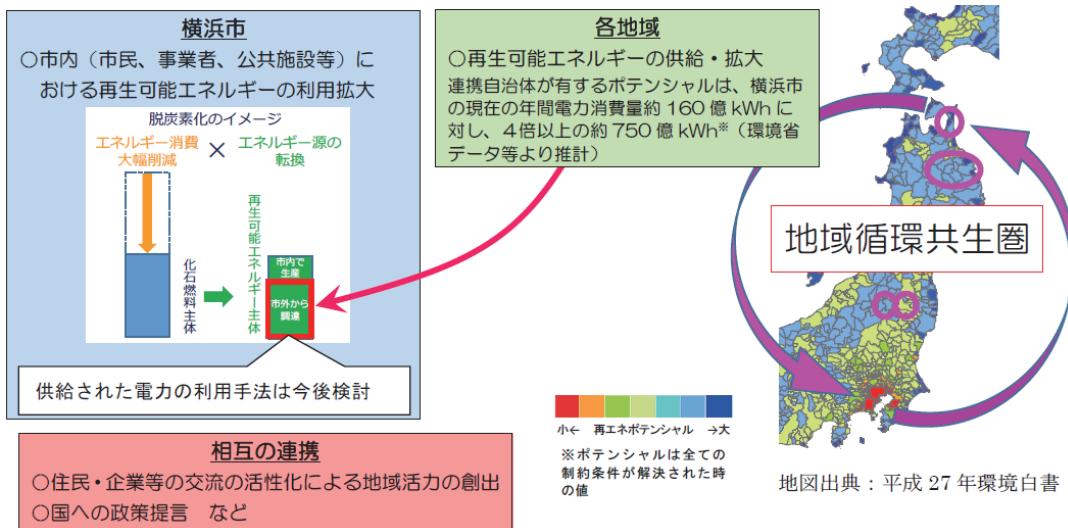


図 3 「Zero Carbon Yokohama」の実現に向けた各地域との連携

出典：横浜市温暖化対策統括本部調整課[24]

## ネット・ゼロ社会に関する社会変化とそのドライビングフォース

今や世界的な目標となりつつあるネット・ゼロの社会は、国民の生活・ワークスタイルや産業・都市構造、エネルギー利用・供給のあり方、科学技術など、現在の社会からは大きく様変わりした社会になっていると推測される。気候危機(Climate Crisis)の認識が、ネット・ゼロに向けて社会を変革させる最も重要な要因(ドライビングフォース)の一つであると考えられるが、近年の社会変化は極めて複雑であり、気候変動対策以外の領域における変化がもたらす影響も考慮する必要がある。本報告書で想定した、2050年頃までに起きると考えられる社会変化やエネルギー需要変化と、ドライビングフォースとの関係を図4に示す。日本の急激な人口減少局面から出発し、気候危機の実態認識の深化と対応の拡大、廃棄物・資源問題を受けた循環型社会構築の必要性、科学技術を含めたイノベーション、国際的な商慣行や規範の形成を、21世紀中葉までの重要な要因と想定した。これらの要因は、過疎化、少子・高齢化という変化をはじめ、脱炭素化やレジリエンス向上、循環型社会の形成、AI、IoTによるデジタル化などの中核的な社会変化を引き起こし、地域分散化、都市機能の集約化、3R(リデュース、リユース、リサイクル)の推進、シェアリング、カスタマイズやデマンドフロー生産など、経済社会システム内の生産・消費体系を抜本的に変革する原動力となると考えられる。こうした複雑な作用を経て結果的にエネルギー需要が増減し、ネット・ゼロの社会への到達の難易度が変化していくと考えられる。

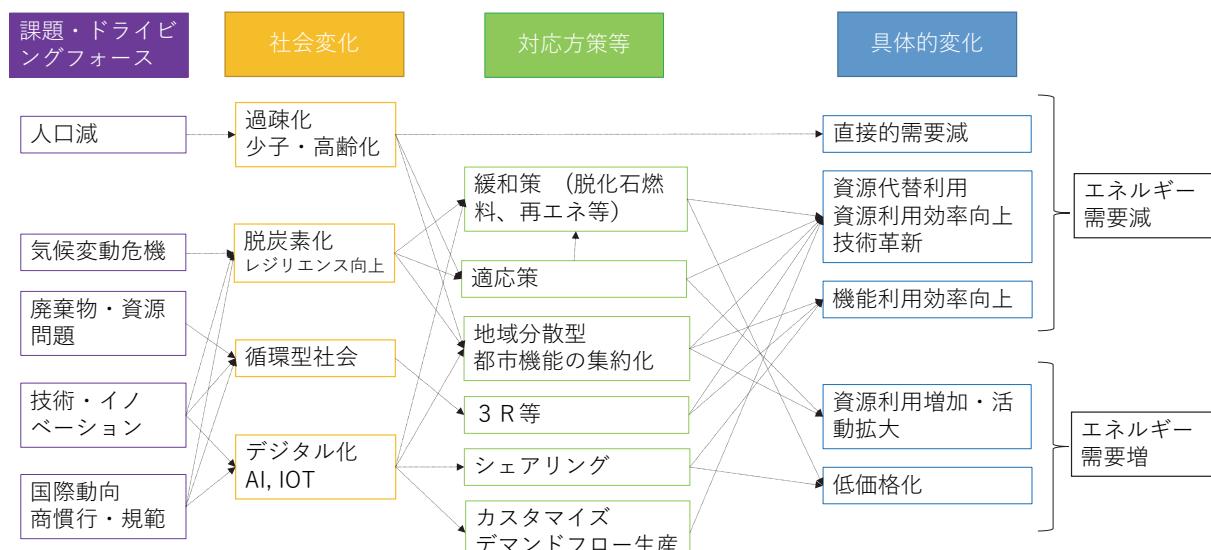


図4 本報告書で想定した社会変化のドライビングフォースとエネルギー需要の関係

本報告書では、こうした複雑なプロセスを踏まえつつ、後述するアプローチ(シナリオ分析)に従って、2つのネット・ゼロの社会像を提示する。もとより将来のことについてすべての事象を取り上げることはできず、2019年時点で論じられている主要な課題を中心に論を進める。なお、地球温暖化問題は、改めて言うまでもなく国際的な取り組みが必要であり、自国第一主義の結果としての地域分断や貿易摩擦などの地政的な状況変化も考慮

すべき重要事項ではあるが、今回は日本に焦点を当てた分析であり、それらは対象としていない<sup>17</sup>。ネット・ゼロに至る道は様々であり、本報告書で示すネット・ゼロの姿は、2050年頃のある時点でのスナップショットとして一例をあげたものであることに留意されたい。そのような世界への具体的な移行プロセスについては、稿を改めて分析していく。

### Box 3 もうすぐ迎える化石燃料産業文明の終焉？

「限界費用ゼロ社会」などで著名なジェレミー・リフキン氏の近著「グローバル・グリーン・ニューディール」では、主要産業に関する様々な調査機関が、最近(この1-2年)、化石燃料産業文明は2023年から2030年の間に崩壊すると予想していることが紹介されている。ここで重要なことは、こうした動きが市場主導で進んでいることとされ、「どの国の政府も市場の動きに従わない限り、報いを受ける」としている。特に世界トップの産油国としての米国は、情報通信、エネルギー・電力、移動・ロジスティックス、建設といった主要部門が化石燃料業界から手を引き、より安価なグリーンエネルギーに乗り換えつつある中、太陽光・風力発電のコスト急落、供給より先に需要のピークが訪れるという「ピークオイル・デマンド」の影響、さらに膨大な金額に及ぶ座礁資産(市場環境や社会環境の激変により、価値が大きく毀損する資産。現在、化石燃料は重要なエネルギー源として価値ある資産であるが、気候変動対応によりCO<sub>2</sub>排出量削減をしなければならなくなると、エネルギー源として活用できなくなり、資産価値が大きく下がることが指摘されている[25])、これらの狭間で身動きが取れなくなるという。翻って日本では、このような市場主導の世界規模の大きな波に十分な備えが出来ているだろうか。

<sup>17</sup> 例えば、国際的な文脈での気候変動シナリオ研究であるSSPシナリオ(SSP1～5までの5つのシナリオで構成される)のSSP3では地域分断の状況を想定している[32]。

# 第1章 ネット・ゼロ社会を推計する

## ネット・ゼロの2つのシナリオ作成

世界的な気候危機の警鐘、国際的商慣行・規範における気候変動問題への配慮等を背景として、欧州を筆頭にネット・ゼロに向けた長期戦略に軸足を移し始めている国々が現れている。同時に、実体経済や金融経済に大きく影響する情報通信技術の大幅な進化による影響は世界のあらゆる主体に及び暮らしや働き方など生活の根本が変化する。すなわち、既存の社会制度、経済構造、エネルギー・システムなどの様々な社会的要素の変革（社会変革＝トランジション）[26]が迫られる時代に突入しており、ネット・ゼロ社会は、これらの変化と併せて考えていく必要がある。他方で、このようなネット・ゼロ社会の構築は容易なことではない。特に、ネット・ゼロという目標を掲げることに対する慎重論（第3章）として、第一に、抜本的な社会変革そのものに対する懸念があり、第二に、ネット・ゼロに向けた取り組みにより経済成長を犠牲にするのではないかとの懸念が示されることがある。したがって、慎重論は、既存の社会制度、経済構造、インフラが大きく変化しない範囲内で技術イノベーションによる変化を享受することが望ましい等と主張する面がある。

このように、将来の経済社会像には多様な意見があることを踏まえ、将来の可能性を可能な限り含めるために範囲の広い複数のシナリオを提示する観点から、本報告書では、政府など様々な機関が作成した戦略・ロードマップや日本の主要な社会問題及び国際問題から、社会変化を生みだす課題を特定した<sup>18</sup>。それらの課題がどのような社会変化をもたらし、資源やエネルギー需要の変化にどのような影響を与えるのか整理した。これを踏まえて、既存のシステムや制度が大きく変わらず現状が維持された社会での技術進展を想定するロックインシナリオと様々な社会的要素の変革を伴う技術発展を想定するトランジションシナリオの2つを設定した。すなわち、国際的動向や国内の社会問題、技術の進展に応じて、既存の社会制度、経済構造、インフラなど重要な社会的要素を変革していくトランジションシナリオと、社会変革がほとんど起きないロックインシナリオの二つのシナリオをベースにネット・ゼロの世界に関してそれぞれ定量分析を行う。

---

<sup>18</sup> 代表的な政府戦略として、ソサエティ5.0[99]、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略[101]、エネルギー・環境イノベーション戦略に関するロードマップ[192]、自動車新時代戦略会議[193]、水素・燃料電池戦略ロードマップ[194]、成長戦略実行計画[195]、未来投資戦略2018[196]、統合イノベーション戦略2019[197]、長期低炭素ビジョン[198]、プラスチック資源循環戦略[199]、国土のグランドデザイン2050[200]、「革新的環境イノベーション戦略」[187]などがある。将来の社会問題や技術、倫理に関しても様々な書籍を参照した[71,130,136,201–206]。

表 3 ロックインシナリオとトランジションシナリオにおける社会の想定

| 分析の視点         |                      | ロックインシナリオ                                  | トランジションシナリオ   |
|---------------|----------------------|--|---|
| 人々の考え方と行動     | 価値観                  | 所有価値                                       | 機能価値  |
|               | 経済                   | 経済合理性                                      | 経済合理性、環境合理性、生活の質への欲求の高まり  |
| 都市と地域         | レジリエンス               | 安全・防災意識の高まり                                | 安全・防災意識の高まり、炭素の社会的コスト(SCC)の可視化・内部化  |
|               | 都市と地域・土地利用           | スプロール化、都市・土地利用の変化なし                        | 都市機能の集約化、インフラの選択と集中(脱炭素化とレジリエンス向上の同時進行)、遊休地の有効活用(再エネ、植林)                            |
|               | 交通・移動形態(モビリティ)       | 自動化、一部電動化                                  | 電動化、自動化、公共交通の利用促進   |
|               | 自治体                  | ネット・ゼロ都市の拡大停止                              | ネット・ゼロ都市の拡大、都市と地方の連携  |
|               | エネルギー利用              | 一部の住宅、オフィスビルにおけるZEHやZEBの普及                 | 半数以上の国民がZEHに居住、オフィスビルにおける建て替えなどの機会を利用したZEBの促進、冷暖房に必要なエネルギーの電化、寒冷地における廃熱などを利用した地域暖房化 |
|               | 暮らし(ライフスタイル・ワークスタイル) | 休日・自由時間                                    | 休日・自由時間が増加、自己実現に投資  |
|               | 消費                   | 製品の所有                                      | 機能・サービスの消費、シェアリング(車、耐久材)  |
|               | 購買                   | デジタル化(AI, IoT等)による効率的な購買                   | デジタル化(AI, IoT等)による効率的な購買、健康意識、SCCの可視化・内部化   |
|               | 労働                   | 若干のオンライン会議                                 | 在宅勤務・オンライン会議の進展   |
|               | 生産と廃棄(廃棄物・資源問題)      | 大量生産・大量廃棄、現状の資源循環                          | 循環型社会の形成、カスタマイズ・デマンドプロ一生産(3Dプリンタの導入等)   |
|               | エネルギー利用              | エネルギー利用に係る問題が供給側で対応され、エネルギーのコンシューマーとしての暮らし | デマンドレスポンス関連技術を応用し、再生可能エネルギーの変動と調和があるエネルギーのプロシューマーとしての暮らし                            |
|               | 産業                   | 生産方法・生産工程の効率化、低炭素技術の導入、電化                  | 生産方法・生産工程の効率化、脱炭素技術の導入(既存技術の代替)、電化の促進   |
| 適応(レジリエンスの向上) | エネルギー利用              | 化石燃料依存、技術の発展による省エネルギーが進展                   | 再エネ中心、技術の発展及び電化による省エネルギーが進展   |
|               | 農林水産業                | デジタル化(AI, IoT等)による効率的な管理                   | デジタル化(AI, IoT等)による効率的な管理、農林業機械や漁船の電化・燃料電池化等、体験型農林業としてのサービス提供、新素材や発電・暖房設備への原料提供      |
|               | 適応策                  | 防御中心                                       | 被害最小化、転換的な適応  |
|               | 緩和と適応の統合             | 一部で緩和とシナジー                                 | 緩和とシナジー、インフラの脱炭素化とレジリエンス向上の同時進行   |
|               | 国際動向、商慣行・規範          | TCFDの対応の頭打ち                                | TCFDの法制化(欧州)などによる企業行動の大きな変化、SCCを内部化した行動   |
| 電力            | 電源構成                 | CCSを用いた化石燃料の利用の継続                          | 多様な再生可能エネルギー中心  |
|               | 電力システム・送電網           | 集中型電源・既存の電力システム                            | 分散型電源・送電網の拡充、デマンドレスポンス、P2P取引、VPPの実用化  |

IGESの日本におけるトランジションシナリオの下での社会変化の特徴として、図 4(社会変化のドライビングフォースとエネルギー需要の関係)に示した通り、過疎化・少子高齢化、脱炭素化、レジリエンス向上、循環型社会、デジタル化等の社会変化を想定した。世界に目を向けると、持続可能な開発目標(SDGs)達成に向けた社会システムのトランスフォーメーション(transformation)の必要性が広く指摘され、様々な国際機関により多様な定義付けが行われている。将来の時間スケールは必ずしも明確に規定されているわけではないが、比較のため、表 4に他の研究機関による世界全体の社会変化とIGESによる日本における社会変化の構成要素を示す。

世界の国際機関(IIASA、SDSN、WBA、GSDR2019)とIGESの分析において重視した項目として共通するのは、脱炭素化やデジタル化である。IGESシナリオにはなく他の国際機関にある構成要素としては、ジェンダー、教育、不平等、健康などの人間の福利・厚生に関する要素、食糧・水などの地球規模の資源利用に関する要素、公正な経済など経済の質に関する要素があげられる。他方、他の国際機関シナリオにはなくIGESシナリオにある構成要素は、レジリエンス向上や都市機能の集約化、シェアリング、カスタマイズ・デマンドフロー生産等(表4)である。シェアリングやカスタマイズ・デマンドフロー生産がデジタル化に含まれると考えると、過疎化・少子高齢化等をドライバーとする都市機能の集約化、気象災害の激甚化を受けたレジリエンス向上等がIGESシナリオの主な特徴と考えられる。

表4 各国際機関の分析・報告書において重視された社会変化の構成要素

| IIASA   | SDSN  | WBA  | GSDR2019  | IGES(日本)   |
|---|---|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>人間のキャパシティ(capacity)と人口動態</li> <li>消費と生産</li> <li>脱炭素化とエネルギー</li> <li>食糧・バイオスフィア(biosphere)・水</li> <li>スマートシティ</li> <li>デジタル革命</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>教育・ジェンダー・不平等</li> <li>健康・福利・人口動態</li> <li>エネルギーの脱炭素化・持続可能な産業</li> <li>持続可能な都市とコミュニティ</li> <li>持続可能な開発のためのデジタル革命</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>農業と食糧</li> <li>脱炭素化とエネルギー</li> <li>循環型(トランスフォーメーション)</li> <li>デジタル(トランスフォーメーション)</li> <li>都市(トランスフォーメーション)</li> <li>社会(トランスフォーメーション)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>人間の厚生とケイパビリティ(capability)</li> <li>持続性と公正な経済</li> <li>食糧システムと栄養パターン</li> <li>エネルギーの脱炭素化・ユニバーサルアクセス</li> <li>都市と郊外の発展</li> <li>グローバルコモンズ(地球環境)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>過疎化・少子高齢化</li> <li>都市機能の集約化</li> <li>脱炭素化</li> <li>レジリエンス向上</li> <li>循環型社会</li> <li>デジタル化(AI, IoT)</li> </ul> |

出典:WBCSD資料“VISION 2050 Refresh Workstream : Exploring Systems Transformation”を参考にIGES作成

注:GSDR2019は報告書を指す点、及びIGESの想定する社会変化は、本報告書の対象とする日本社会に限定される点に留意されたい。

経済成長の程度は、Box 4に示されるように、暮らしや社会の持続可能性を考える上で根本的な要素であるとともに、経済の活動量を規定する要素であることから、シナリオ分析において重要な事項である。日本では、2005年から2015年の10年間のGDP成長率は0.5%、一人当たりGDP成長率も0.5%であった[27]。また、資本主義の根幹となる「限らない拡大・成長」というベクトルが、地球資源の有限性といった物質的・外的観点及び「幸福」といった精神的な充足の観点から、ある種の飽和状態ないし限界値に達しつつあることが認識され、脱成長や創造的定常経済といった理念<sup>19</sup>の重要性が近年、再認識されている[28,29]。これらの状況を踏まえて、本報告書ではロックインシナリオにおけるネット・ゼロの世界とトランジションシナリオにおけるネット・ゼロの世界を対比させることを主目的とするため、経済の全体においては、安定経済(一人当たりGDPが毎年0.6%成長し、日本全体のGDPは2015年水準を保つ)という条件で分析を行う<sup>20</sup>(第1章参照)。

<sup>19</sup> 定常経済という概念は、デイリーが1970年以降から主唱し続けている[207]。

<sup>20</sup> 本研究では、通常シナリオ分析で用いられるBAU(Business as usual: 成り行き)シナリオというものを明示していない。第一に、BAUとは、現状維持、成り行き、あるいは、新たな対策(追加的な対策)を講じないシナリオとされるが、現実には2050年までに緩和策だけでなく様々な社会変化が起きると考えられるため、BAUシナリオがどのような状況であるのか厳密な定義が困難である。第二に、本研究は緩和策のコスト比較分析を行わないので、敢えてBAUを設定する必要性が無いと判断した。

#### Box 4 成長のジレンマ、持続可能な開発への難問

「成長のジレンマ」とはティム・ジャクソンが2009年に出版した大きな話題を呼んだ報告書「成長なき繁栄」で取り上げた問題である。これは、これまで先進国が実現してきたような経済成長はプラネタリー・バウンダリーのような環境制約を考えると持続不可能であろうが、一方で経済成長をやめる「脱成長」は社会経済システムを不安定化させてしまう、というジレンマである。

先進国が直面する成長のジレンマに対する政治的に魅力的な解は、技術革新により資源効率性や環境効率性を大幅に高める成長と資源利用・環境負荷の切り離し(デカップリング)である。しかし現在の経済社会システムにおけるGDP成長の役割を考えるならば、効率性改善のみに頼った持続可能な生産と消費の実現は困難であろう。持続不可能なレベルまで消費が高度化している先進諸国において、広告などを通じて無理に消費意欲を喚起してまでGDP成長を追求せざるを得ないのは、金融システム、年金制度あるいは雇用制度などがGDP成長に依存したシステム設計になっているからである。不況などのシステム破綻を避けるためには、「十分に力強い」GDP成長が必要なのである。このような制度設計のもとでは、より急速なGDP成長は社会的に必要、すなわち「善いこと」であり、可能な限りGDP成長率を高めることへの強烈なインセンティブが働いている。このようなGDP成長依存システムのもとでは、効率性改善の果実が資源利用・環境負荷の絶対量削減ではなく、より急速なGDP成長に使用されることもある。リバウンド効果は、GDP成長依存社会の必然の帰結なのかもしれない。

ティム・ジャクソンは、その著書「成長なき繁栄」で以下のように述べている。「先進国の経済にとって、成長なき繁栄はもはやユートピア的空想ではない。それは財政的かつ生態学的に不可欠なのである」。

成長に依存しない制度設計に作り替えたうえで、プラネタリー・バウンダリー内に豊かな生活を実現できるか、という形で持続可能な開発の問い合わせたる場合に、技術革新によるデカップリングがより積極的な意味を持ちうる。技術革新を環境制約の緩和に用いるのではなく、制約下でのフロンティアの拡張に活用するのである。このアプローチは正しい結果をもたらすだけではなく、技術革新へのインセンティブにもつながる。技術革新が十分でなければプラネタリー・バウンダリーに衝突する可能性がある、と脅かされるよりは、技術革新を実現することに生活の質が向上するという状況の方が、自由な発想で創意工夫が行われるであろう。

出典: Commentary on "Bankrupting Nature: Denying Our Planetary Boundaries" by Anders Wijkman and Johan Rockström [30]

## 各シナリオのGHG排出量推計手法

不確実な未来を前提として複数の社会像を想定するシナリオ分析には、国内外に多数の先行研究がある。国際的な温暖化シナリオ分析には、IPCCの共同作業のフレームとなった、SRES[31](IPCC排出シナリオ)やSSP(共有社会経済パス)[32,33]をベースにした日本低炭素シナリオが国立環境研究所で開発されている。SRESは経済志向か環境志向か、また、地球主義志向か地域主義志向かにより、将来の社会経済発展の可能性を大きく4つに分類している。SSPは緩和、適応の困難さをそれぞれ縦軸、横軸にとり、中庸のシナリオを含めて5つの社会像(SSP1-SSP5)に分類している。他方、IPCCの1.5°C特別報告書に引用されたLEDシナリオ[34]は5つの社会変化の動因(生活の質、都市化、革新的エネルギーサービス、エンドユーザーの役割、情報イノベーション)によって世界の最終エネルギー需要が著しく低減する1つのシナリオを提示した。

国内の事例では、国立環境研究所による活力社会とゆとり社会[35,36]、中央環境審議会地球環境部会による2013年以降の対策・施策に関する報告書における経済成長、自立性、余裕の3つの志向から派生する5つの社会のシナリオ分析[37]などがある。日本経済研究センターはデジタル経済へ移行した先の2050年の日本のGHG排出削減ケースを分析した[38]。以上のように、シナリオ分析は、将来の可能性を可能な限り含めるために範囲の広い複数のシナリオを提示することが基本である。このため、第1章では、ネット・ゼロを達成している2つの社会シナリオに対して分析を行う。

各シナリオに対して、家庭部門、業務部門、運輸部門(陸上旅客、陸上貨物、船舶、航空)、産業部門(鉄鋼、ガラスその他窯業、石油化学製品、アンモニア製造、ソーダ製品製造、その他石油石炭製品、紙パルプ、その他製造業の8部門)において、活動量の変化、エネルギー利用の変化、燃料の脱炭素化の進展レベルをさまざまな文献や専門家へのヒアリングを通じて設定した。また、CO<sub>2</sub>以外のGHG排出量も両シナリオに対して想定をおいた。需要サイドにおける検討項目は、人口動態、都市機能の集約化、ライフスタイルやワークスタイルの変化、AI、IoTの普及、循環型社会の進展や国際的な経済や規範を巡る動向などであり、こうした事態の進行によって、エネルギー及びマテリアル需要がどの程度減少するのかを定量的に分析し、需要の変化の度合いを定量的なパラメータに集約した。民生、産業、運輸の各部門における脱炭素化技術を国際機関や欧州のレポートを含む様々な文献を基に特定した。産業部門における大規模固定排出源などのようにCCSが利用可能な部門については、各部門において最大限利用できるという前提をおいた。小規模排出源や交通部門、民生部門から排出されるCO<sub>2</sub>について、排出相当分をネガティブ・エミッション技術であるDAC(Direct Air Capture)技術で大気中からCO<sub>2</sub>を吸収し、CCSで注入するDACS(Direct Air Capture and Storage)技術[39]を用いることを想定する。

将来の電源構成は、再生可能エネルギーや蓄電池のコスト、洋上風力の実用化、送配電網の整備に関するコスト、デマンドレスポンス、VPP技術の進展といった様々な技術要素変化によって大きく変わりうるものである。詳細な分析は、別途電力システムモデルを用いて分析することとしているため、本報告書の対象としない。本報告書では、ロックインシナリオの電源構成として、2015年から日本の国別目標(約束草案)[40]に記載される2030年目標の電源構成の変化を単純に延長して、非化石電源の割合を5割、CCS付高効率ガス火力の割合を2.5割、CCS付高効率石炭火力の割合を2.5割と設定した。トランジションシナリオでは、再生可能エネルギーの技術発展の予測[41]を見込んで、すべて非化石電源とした。得られた結果と、エネルギーに関する諸条件と

を比較し、再生可能エネルギー利用量、CCS利用量、輸入エネルギー量に着目して各シナリオの実現可能性及び持続可能性を評価した。CCS利用量は日本国内の貯留ポテンシャルと比較して、CCSを用いた脱炭素社会が何年間維持できるか定量化した。再生可能エネルギーは本報告書で描くネット・ゼロ社会の姿の達成に必要なエネルギー量と日本国内の再生可能エネルギーの利用可能量(賦存量とは異なる)と比較した。輸入エネルギー量は、輸入1次エネルギーの割合及び2015年の輸入量との比率を推計した<sup>21</sup>。

---

<sup>21</sup> 本報告書では、ネット・ゼロを可能とする社会変化と代表的な対策オプションの組み合わせを示すことに力点を置き、以下の理由からコスト推計を行っていない。第一に、社会変化を考慮するため、社会変化に伴うGHG排出量の変化と気候変動対策によるGHG排出量を切り分けることが適當ではない。第二に、コスト推計は、詳細な技術選択モデルの枠組みの中で行うことが望ましいが、様々な要因に影響をうける社会変化をどこまで見込むかによって、技術の進展が異なり、気候変動対策コストの変化にも留意が必要となる。第三に、各エネルギー技術のコストのパラメータを長期的に見込む際には、ある特定技術のコストのみを大きく低減させることは恣意的となるため、一般的には全技術のコストを同等の変化率で低減させる。それにより、国際社会や日本社会の抜本的な変化による急激な技術の普及などの大きなエネルギーシステム変化を捉えにくくなる傾向がある。第四に、将来のコストのパラメータを想定する際に過去のトレンドを参考にする方法もあるが、社会変化が起きる局面においては、過去のトレンドが参考にならないという限界もある。

## GHG排出量推計の考え方及び用いたデータ

本報告書では、ネット・ゼロ社会におけるGHG排出量を式(1)で検討した。ここで、GHGはGHG排出量を表し、popは人口、GDPは2015年の実質GDP、activity<sub>i</sub>は部門iにおける活動量(産業部門の生産量、交通部門の移動量、業務部門のエネルギー需要など)を示す。部門iの内訳として、家庭部門、業務部門、運輸部門(陸上旅客、陸上貨物、船舶、航空)、産業部門(鉄鋼、ガラスその他窯業、石油化学製品、アンモニア製造、ソーダ製品製造、その他石油石炭製品、紙パルプ、その他製造業の8部門)とする。TFC<sub>i</sub>は各部門における最終エネルギー消費量、GHG<sub>i</sub>は各部門におけるGHG排出量を示す。

$$GHG = pop \cdot \frac{GDP}{pop} \cdot \frac{1}{GDP} \cdot \sum (activity_i \cdot \frac{TFC_i}{activity_i} \cdot \frac{GHG_i}{TFC_i}) \quad 式 (1)$$

実際のactivityレベルの検討のフローを図5に示す。第一ステップとして、家庭、業務、運輸の各部門の活動量をGDP想定、社会変化の進展に応じて設定する。これにより、エネルギー利用量とマテリアル利用量の変化を推定する(エネルギー利用量とマテリアル利用量の2015年実績値を参考資料に示す)。家庭、業務、運輸で推定したマテリアル利用量に応じて、農業・産業の生産量を推定した。それらの生産量を満たすために必要なエネルギー利用量及びマテリアル利用量を推定して、GHG排出量及びエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量を試算した。詳細な推計方法については、補論1に示す。

分析に用いたデータは、エネルギーバランスデータとして、資源エネルギー庁が公表する総合エネルギー統計[42]に基づき、各部門のマテリアル利用の変化、脱炭素技術利用の変化を想定して、ネット・ゼロ社会におけるエネルギー利用の状況を推計した。補論1において、部門別に活動量の変化、エネルギー利用量の変化、エネルギーの脱炭素化技術を捉えて部門別にエネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量、経済の活動量に応じた非CO<sub>2</sub>GHG排出量、森林面積の変化に応じた森林吸収量、海外での削減分としての二国間クレジット制度によるオフセット量、GHG排出量と吸収量をバランスさせるためのDACS必要量の算定手法を示している。

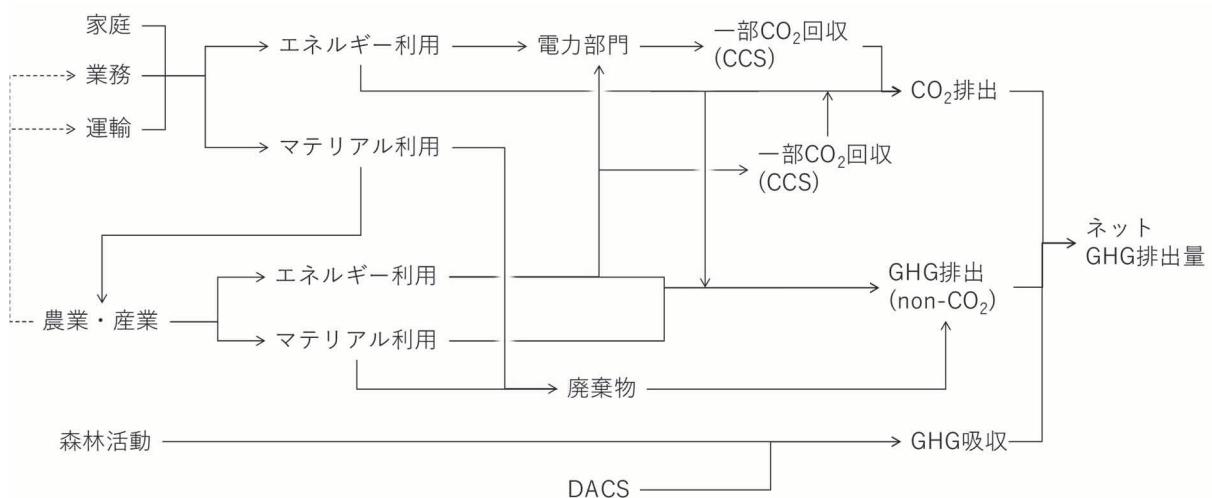


図 5 GHG排出量推計アプローチ

注:産業部門におけるマテリアル利用では、大気中のCO<sub>2</sub>を回収し利用するDAC技術が含まれている。

## 推計結果

本研究において推計されたネット・ゼロ社会におけるシナリオ別GHG排出量を図6に示す。2017年のGHG排出量は、CO<sub>2</sub>排出量が1,190MtCO<sub>2</sub>、メタン、N<sub>2</sub>O、代替フロンなどの非CO<sub>2</sub>排出量が102MtCO<sub>2</sub>であり、森林吸収源が56MtCO<sub>2</sub>であることから、ネットのGHG排出量は1,236MtCO<sub>2</sub>と計算される。

ロックインシナリオでは、グロスのGHG排出量が970MtCO<sub>2</sub>であり、そのうち555MtCO<sub>2</sub>がCCS技術によって、回収され地中に貯留される。非CO<sub>2</sub>排出量が56MtCO<sub>2</sub>であり、森林吸収源が39MtCO<sub>2</sub>、JCMによる海外での削減分が5MtCO<sub>2</sub>である。これによりネットのGHG排出量が372MtCO<sub>2</sub>となるが、同量をDACS技術により空気中からCO<sub>2</sub>を回収し、地中に貯留することで、ネット・ゼロが達成される。このように、ロックインシナリオでは、グロスのGHG排出量は2017年よりは減少しているものの、依然として高い水準にある。そのため、CCSやDACSを多く利用することで、ネット・ゼロ社会が達成されることが示唆されている。

トランジションシナリオでは、循環型社会の形成によるマテリアル利用の変化、エネルギー利用の変化、脱化石燃料化等の変化によってグロスのGHG排出量や非CO<sub>2</sub>排出量が、ロックインシナリオよりも少ない。そのため、トランジションシナリオにおけるグロスのGHG排出量が147MtCO<sub>2</sub>であり、そのうち68MtCO<sub>2</sub>がCCS技術によって、回収され地中に貯留される。非CO<sub>2</sub>排出量が30MtCO<sub>2</sub>であり、森林吸収源が41MtCO<sub>2</sub>、JCMによる海外での削減分が5MtCO<sub>2</sub>である。これによりネットのGHG排出量が33MtCO<sub>2</sub>となるが、同量をDACS技術により空気中からCO<sub>2</sub>を回収し、地中に貯留することで、ネット・ゼロが達成される。このように、トランジションシナリオでは、CCS及びDACSの利用を大幅に少なくすることができる事が示唆される。

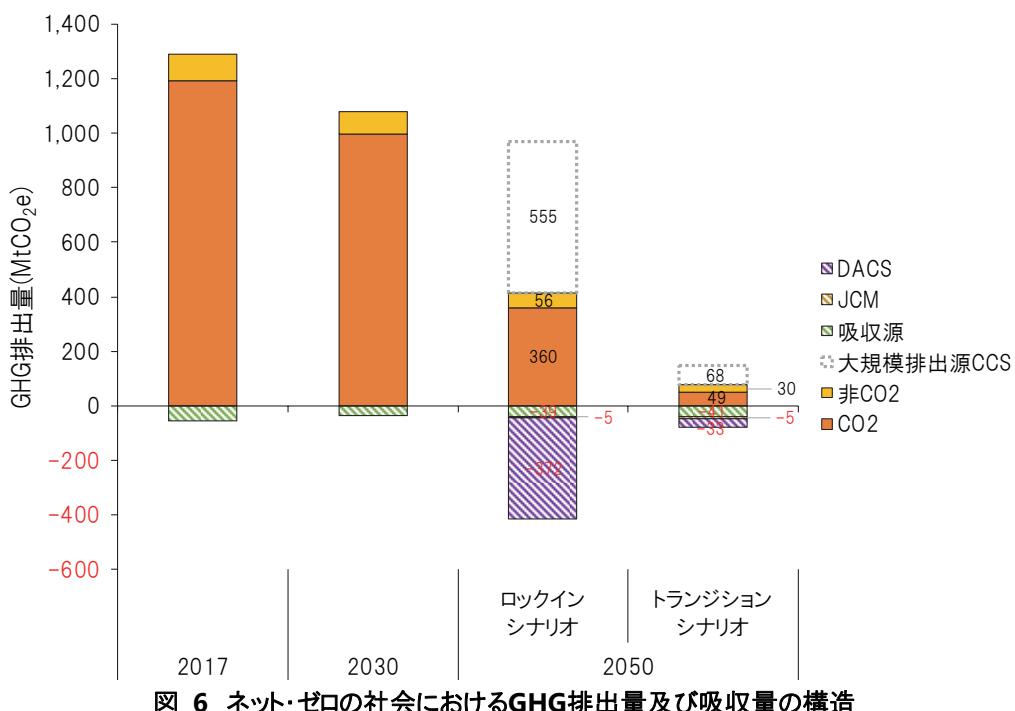


図6 ネット・ゼロの社会におけるGHG排出量及び吸収量の構造

エネルギー利用の変化として、図7にシナリオ別の最終エネルギー消費量を示す。ロックインシナリオは最終エネルギー消費量が10EJ<sup>22</sup>を超えており、エネルギー多消費構造が続き、特に化石燃料の使用量が続いている。トランジションシナリオは、最終エネルギー消費量が大きく減少し、2015年の62%になる。これはマテリアル利用の変化によってエネルギー需要が変化しているとともに、全ての部門においてエネルギー利用の最適化や電化の促進によってエネルギーが効率的に利用されているためである。

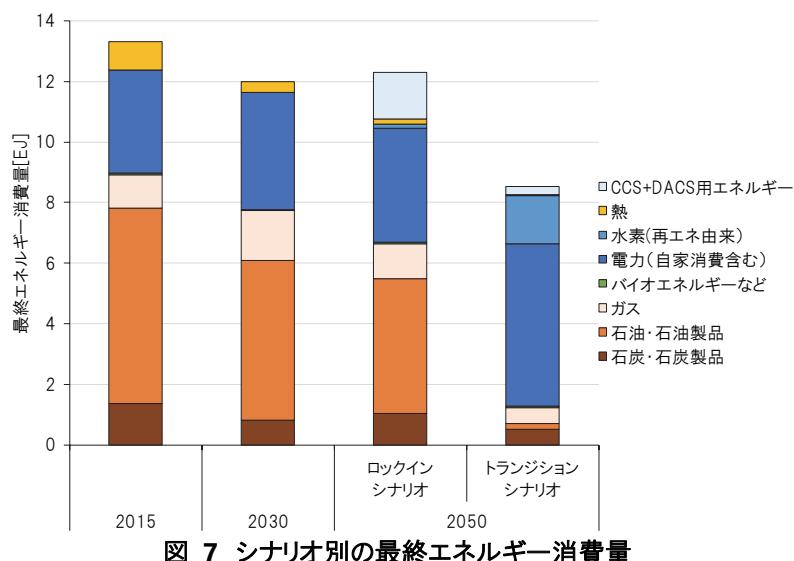


図7 シナリオ別の最終エネルギー消費量

注:化学産業で用いられる大気中のCO<sub>2</sub>を回収し利用するDACに必要なエネルギーは電力に計上されている。

さらに、シナリオ別の部門別の最終エネルギー消費量を図8から図10に示す。2015年では、家庭及び業務(企業・事業所)部門においては、電力が最終エネルギー消費量の5割を占めている。運輸部門はガソリンやディーゼルの消費が主流である。製造業においては、化学工業と鉄鋼が大きなエネルギー消費部門となっている。石油化学を含む化学工業において、1.5EJ以上の石油・石油製品を利用している。これは、石油・石油製品がプラスチック、合成繊維、合成ゴム、塗料などの素材として使われているためである。鉄鋼部門では、鉄を製造する際に、鉄鉱石を銑鉄に還元することから、大量の石炭が用いられる。機械製造業は、製造業の中で3番目に多くのエネルギーを消費しているが、2015年時点で7割のエネルギーが電力である。窯業土石(セメント、ガラス製品など)も、化石燃料多消費産業であり、エネルギー消費量に占める割合のうち石炭・石炭製品が4割、石油・石油製品が2割強、ガスが1割弱である<sup>23</sup>。

ロックインシナリオ(2050年)においては、石油化学工業を含む化学、運輸部門において石油資源への依存が続き、業務・家庭部門でも石油利用は存続することから、エネルギーの脱炭素化はほとんど進まない。ロックインシナリオでは、エネルギー利用が化石燃料に依存しており、化石燃料から排出されるCO<sub>2</sub>は産業部門では

<sup>22</sup> 1Jの10の18乗倍

<sup>23</sup> 窯業土石部門のエネルギー利用による2016年のCO<sub>2</sub>排出量は2,500万トンであるが、セメント製造、石灰製造、ガラス製造時において、素材から発生するCO<sub>2</sub>排出量が3,100万トン[208]となり、エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量よりも、工業プロセスからのCO<sub>2</sub>排出量が多い。

主にCCSで回収される。石油化学製品利用に伴うCO<sub>2</sub>排出、非エネルギー多消費産業、業務、家庭、運輸部門等のCCSで回収できないCO<sub>2</sub>排出を削減するためには、DACSなどの大気中からCO<sub>2</sub>を回収する技術に頼ることになる。一方で、トランジションシナリオ(2050年)においては、再生可能エネルギーを中心とした非化石電源が主要エネルギー源になる。従って、鉄鋼部門、化学部門といったエネルギー集約型産業においても、電気や再エネ由来の水素利用が進み、産業、運輸、家庭部門では電化が進むことで、エネルギーが脱炭素化される。

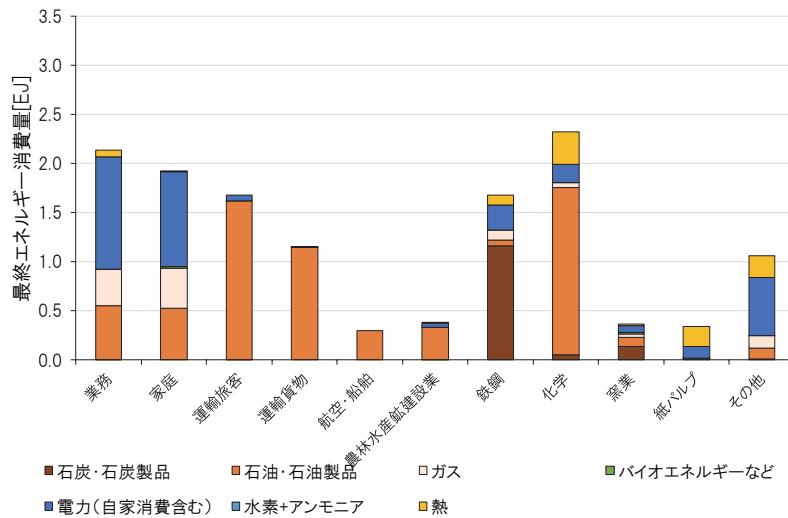


図 8 部門別の最終エネルギー消費量(2015年)

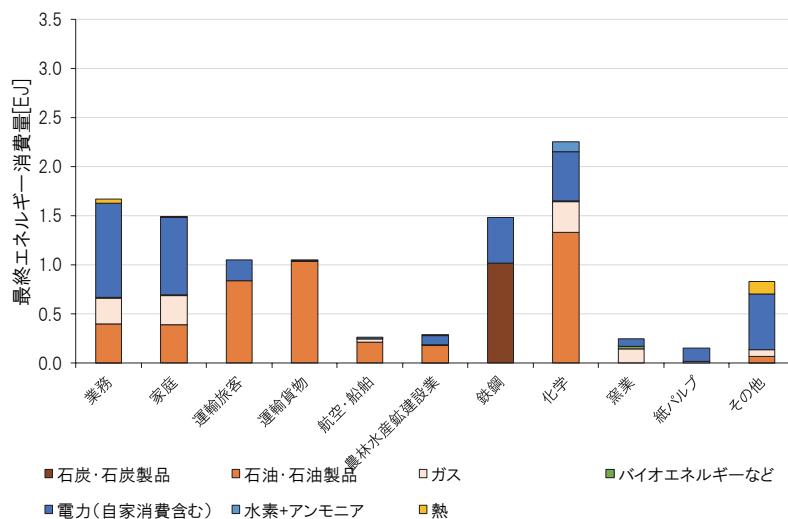


図 9 部門別の最終エネルギー消費量(ロックインシナリオ(2050年))

注:CCS+DACS 用エネルギーは部門別に推計していない

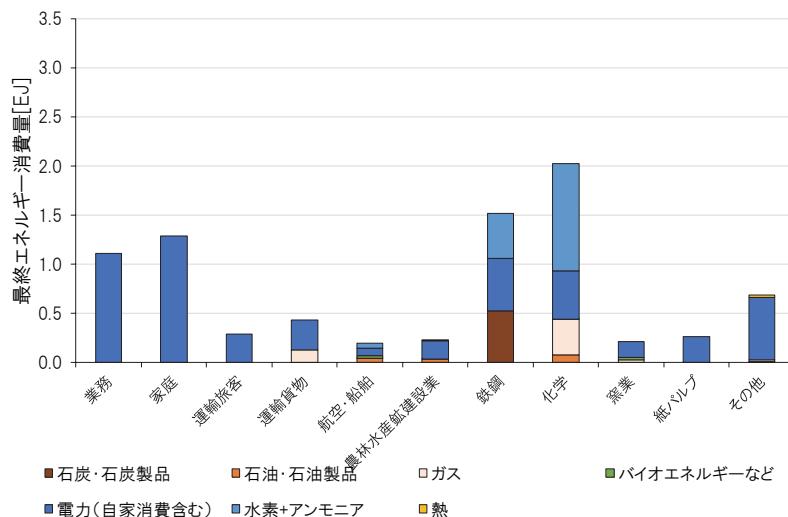
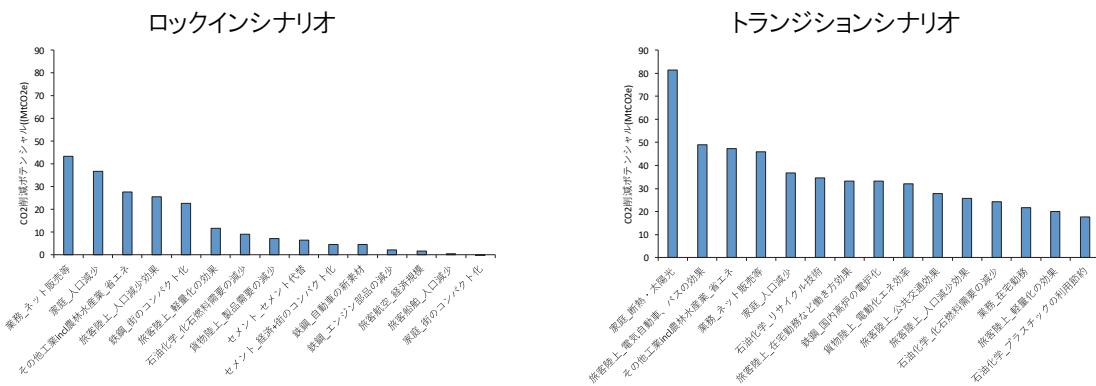


図 10 部門別の最終エネルギー消費量(トランジションシナリオ(2050年))

注:CCS+DACS 用エネルギーは部門別に推計していない

暮らしの変化や循環型社会にもなうマテリアル利用の変化に伴うCO<sub>2</sub>削減の効果として、図 11にシナリオ別の社会変化によるCO<sub>2</sub>削減量を示す。ロックインシナリオでは、省エネ(その他工業)等の気候変動対策以外に、ネット販売等、都市機能の集約化、自動車(陸上旅客)の軽量化等の社会変化に起因する排出削減策も多い。他方、トランジションシナリオでは、家庭部門での断熱・太陽光、省エネ(その他工業)の他に、EV(乗用車及びバス)の普及拡大、ネット販売、リサイクル技術(循環型社会の形成)、高炉の電炉化、在宅勤務等の社会変化による排出削減策が多く、全般的にロックインシナリオよりも縦軸に示す「CO<sub>2</sub>削減ポテンシャル」が大きく推計された。

図 11 シナリオ別の社会変化によるCO<sub>2</sub>削減量注:各取り組みのCO<sub>2</sub>削減量を足し合わせた場合、オーバーラップが起きることから、全部門での削減量の合計にはならない

## 考察

本節では、ロックインシナリオとトランジションシナリオの実現可能性に関する論点として、再生可能エネルギーの必要量とポテンシャル比較、CO<sub>2</sub>の貯留必要量と国内ポテンシャル、化石燃料の必要量(輸入量)を示す。

各シナリオにおける2050年の発電電力量と再エネ利用可能量との比較を図 12に示す。再エネ利用可能量は、再エネ利用可能量a、b、cの3つを示す。再エネ利用可能量aでは、日本国内の再生可能エネルギーポテンシャルを、環境省が公表する再生可能エネルギー導入ポテンシャルマップ・ゾーニング基礎情報[43]で示される発電ポテンシャル(kWベース)を基に、コスト等検証委員会[44]や資源エネルギー庁[45]が示す設備利用率を乗じて推計した。再エネ利用可能量bは、環境省による「再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書」[43]や「地熱発電に係る導入ポテンシャル精密調査・分析委託業務報告書」[46]を基に、JSTが推定した「主要再生可能エネルギーの都道府県別ポテンシャル分布と発電所建設コスト低減」[47]を用いた。太陽光発電については、「変換効率が50%を超える太陽電池」が2040年までに社会実装されるという予測もある[48]。従って、再エネ利用可能量bのうち、太陽光発電の発電量を2倍と想定したものを再エネ利用可能量b'とした。再エネ利用可能量cはJSTによる最新の推定値[49]を参考にした。再エネ利用可能量cは再エネ利用可能量a及びbと比較して、太陽光発電の導入が多い。すべてのシナリオにおいて、洋上風力は、環境省による再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書[50]のデータを用いた。

ロックインシナリオでは、推計された電力需要が再エネ利用可能量aを上回る。しかし、ロックインシナリオでは、CCS付火力発電の利用や原子力発電所の利用が想定されるため、ロックインシナリオにおける再エネ利用量は、再エネ利用可能量aと考えられる。

トランジションシナリオでは、推計された電力需要が再エネ利用可能量a及びbを上回る<sup>24</sup>。そのため、仮に再生可能エネルギー100%を目指す場合は、太陽光発電の発電効率の改善<sup>25</sup>や、駐車場や道路の路面への太陽光発電システムの設置<sup>26</sup>、洋上風力に関する技術革新、小型風力発電、潮力・波力エネルギーといったこれまで採算性が低いとされてきた、あるいは、地元住民の協力が必要な技術も、技術革新や新しいアイディアを実現させるような取り組みを促す必要性が示唆される。例えば、自然エネルギー財団や自然エネルギーの活用のための世界的な送電ネットワークの実現をめざす国際的非営利団体、Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization (GEIDCO)が提唱する、北東アジア(ロシア、モンゴル、中国、韓国、日本)の送電網を国際的送電網で結ぶ構想[51]が実現すればその利用も選択肢と考えられる。特に、モンゴルの南ゴビ砂漠には太陽光及び風力発電ポテンシャルが多い[52]。また、国際的送電網は供給予備力の観点からエネルギー安全保障の向上に貢献するとともに、再生可能エネルギー出力変動対策につながること

<sup>24</sup> トランジションシナリオで推計された電力需要が大きくなるのは、すべての部門において、ほぼ100%の電化(水素キャリアへの変換を含む)を想定しているからである。再エネは概ね自然の力を電力に変換するものであり、最大限の利用を想定する際には、可能な限りのオール電化が必要となる。また、オール電化はエネルギー効率を高めるという副次的效果もある。

<sup>25</sup> 今後太陽電池の効率も大幅に上がることが予想され、2030年代には、変換効率が50%を超える太陽光電池の出現も予測されている[48]。

<sup>26</sup> 駐車場における太陽光パネルの導入が試験的に進められている[209]。

とが挙げられる[53]。これらの再生可能エネルギーに関する技術や再生可能エネルギーの利用増加を促すインフラの構築が進展すれば、再生可能エネルギー利用可能量が従来の推計よりも大きくなる可能性がある。

表 5に、CCSの地質特性別国内貯留ポテンシャル及び両シナリオにおける国内貯留地毎の利用可能年数を示す<sup>27</sup>。このポテンシャル量は、地球環境産業技術研究機構(RITE)が取りまとめた地質学的な様々な構造パラメータに基づく推計値[54]やその推計値と地質学的特性を踏まえた評価[55]である。そのため、石油の探査・開発と同様に、必ずしも実現可能性を保証するものではないとされている[56]<sup>28</sup>。

ロックインシナリオにおいて必要な国内CO<sub>2</sub>貯留量を毎年一定と仮定した場合、地球環境産業技術研究機構(RITE)評価[57]のうち、不確実性が最も低い既存油ガス田は4年で貯留ポテンシャル量に達する。なお、現在日本でCCS実証の経験がある長岡プロジェクト、苫小牧プロジェクトは、いずれも油ガス田がある地域である[58,59]。不確実性が中程度の基礎試錐及び基礎物探によって特定されている背斜構造への地層地を含めても、33年(実際に杭を打つ調査である基礎試錐によって確認された国内貯留ポテンシャルでは10年)しか使用することができない。また、みずほ情報総研株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所、千代田化工建設株式会社が「平成 25 年度シャトルシップによるCCS を活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務」において実施した評価[55](以下、シンクタンク評価)のうち、「海溝型地震震源断層の分布なし」の国内貯留ポテンシャルは、23年で貯留ポテンシャル量に達し、「海溝型地震震源断層の分布が小規模」の国内貯留ポテンシャルを含めても、57年程度で貯留ポテンシャル量に達する。従って、CCSの大量利用を想定したネット・ゼロ社会の構築は一時的にはネット・ゼロを達成できる可能性があるものの、CO<sub>2</sub>貯留ポテンシャルと実際の貯留可能量のギャップや地震発生地域におけるCO<sub>2</sub>貯留安定性といった不確実性を抱えることとなり、持続可能なネット・ゼロ社会にはならない可能性が高い。

各シナリオの化石燃料輸入量を図 13に示す。エネルギーベースで2015年に17EJであった日本の化石燃料輸入量は、2050年に、ロックインシナリオでは12EJ、トランジションシナリオでは1EJと推計された。金額ベースでは、2015年に、化石燃料を19兆円(原油を8.9兆円、天然ガスを5.4兆円、石炭を2.8兆円、石油製品を2.1兆円)以上輸入している[60]。ロックインシナリオでは、必要となる化石燃料は2015年の70%程度になるが、現在価格による単純計算で13兆円の輸入に相当すると推計され、貿易収支、エネルギー安全保障の観点から大きなリスクを抱え続けることになると考えられる。一方で、トランジションシナリオにおいては、化石燃料の使用が、2015年比7%にまで減少することから、化石燃料の輸入費用は1.4兆円程度と試算され、計算上、約17兆円に及ぶ化石燃料の輸入代金分を節約することが可能になると示唆される。

<sup>27</sup> 国外における貯留ポテンシャルは、国内と同程度あるとする調査がある[210]。しかし、調査方法や評価手法が異なることから、貯留ポтенシャル量を直接比較することができないため、本報告書では取り扱わない。

<sup>28</sup> このような背景から、日本エネルギー経済研究所では、国内のCO<sub>2</sub>の貯留可能量を約3,000MtCO<sub>2</sub>と想定をおいている[56]。

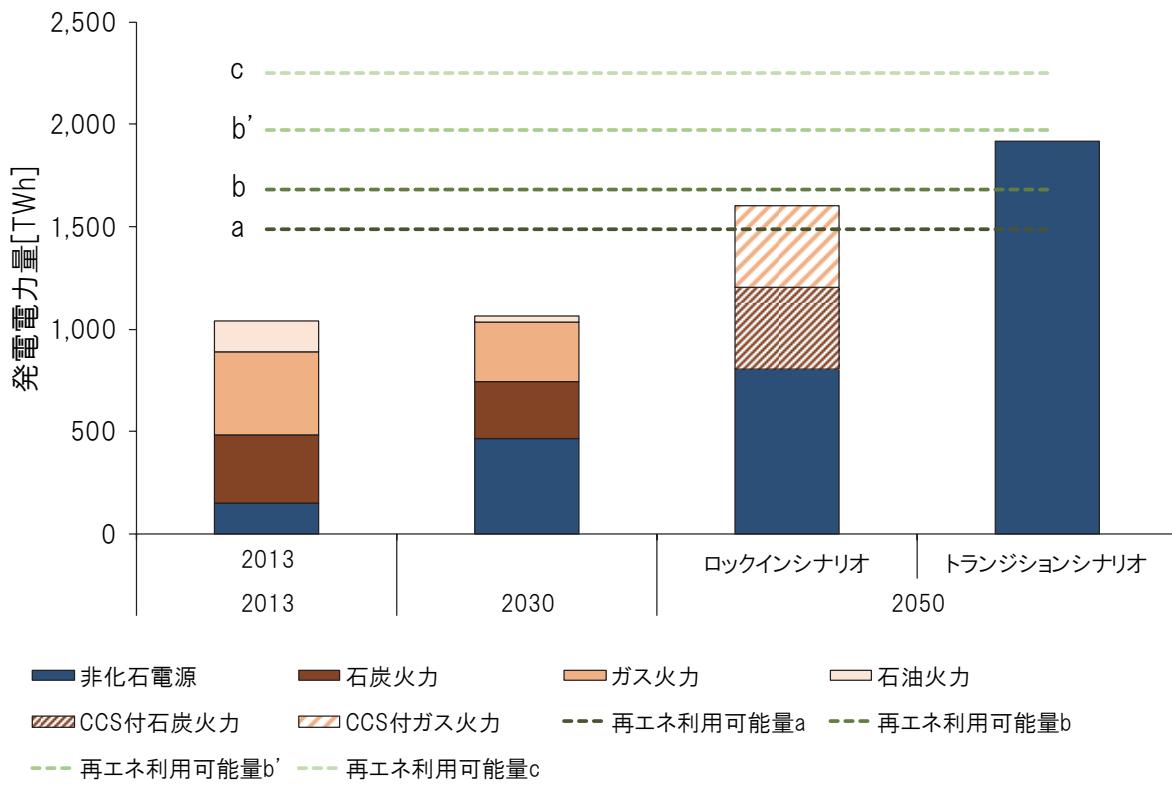
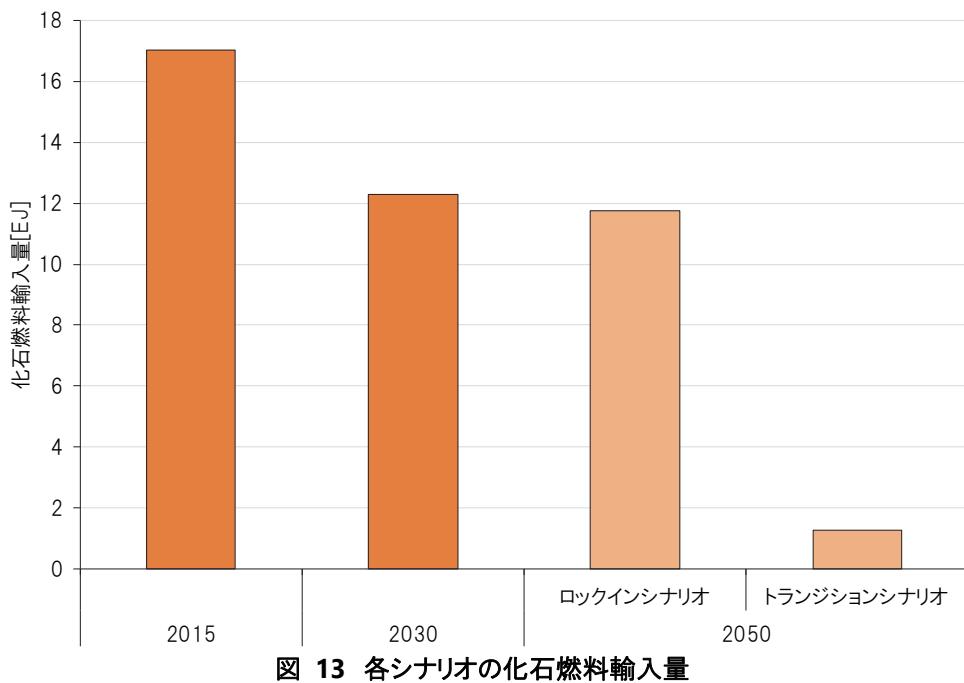


図 12 各シナリオにおける発電電力量と再エネポテンシャルとの比較

表 5 CO<sub>2</sub>の国内貯留ポテンシャルとシナリオ別CO<sub>2</sub>国内貯留地利用可能年数<sup>29</sup>

| 評価資料         | 地質データ、貯留地の特性別<br>国内CO <sub>2</sub> 貯留ポтенシャル | 国内貯留ポテンシャル(MtCO <sub>2</sub> ) | ロックインシナリオ | トランジションシナリオ |
|--------------|--|--------------------------------|-----------|-------------|
| RITE評価[57]   | 背斜構造のうち既存油ガス田に貯留                             | 3,492                          | 4年        | 34年         |
|              | 背斜構造のうち既存油基礎試錐調査<br>ポテンシャルに貯留                | 5,202                          | 6年        | 51年         |
|              | 背斜構造のうち既存油基礎物探調査<br>ポテンシャルに貯留                | 21,393                         | 23年       | 211年        |
| シンクタンク評価[55] | 全ての構造のうち海溝型地震震源断層の分布なしに貯留                    | 21,301                         | 23年       | 210年        |
|              | 全ての構造のうち海溝型地震震源断層の分布が小規模に貯留                  | 31,515                         | 34年       | 311年        |
|              | 全ての構造のうち海溝型地震震源断層の分布が大規模に貯留                  | 27,813                         | 30年       | 274年        |

<sup>29</sup> 基礎物探しかされていない層位トラップなどを有する地質構造への貯留量を含めると、ロックインシナリオ、トランジションシナリオでそれぞれ、260年、1,463年の利用可能年数が計算上は得られるが、利用可能性や不確実性について十分な知見がないことに留意が必要である。



## 第2章 ネット・ゼロ社会を展望する

第1章では、トランジションシナリオが暮らしや産業活動に必要なエネルギーの大半を国内の再生可能エネルギーで賄うことができるから、エネルギー・セキュリティーの確保、国富流出の回避が可能となることが示された。加えて、CO<sub>2</sub>の貯留、化石燃料への依存度が低いから、将来、大きな問題となる可能性のある課題を回避できる利点があることが示された。一方で、トランジションシナリオは、社会の広範多岐にわたり様々な変化が起きたシナリオであり、我々の暮らしはどうにか變化するのか、的確に認識することは容易ではない。従って、第2章では、こうした理解の一助となることを目的に、トランジションシナリオにおける2050年がどのようなものであるか、都市と地域、暮らし、産業、適応という観点から社会を展望する。現代の日本は、少子高齢化など人口動態に関する問題、年金等を含む社会福祉問題、長時間労働や非正規雇用などの労働問題、格差社会、さらには自然災害への対応も含め、様々な課題に直面している。このような現代社会とネット・ゼロを達成した社会とでは、人々の考え方や行動が大きく異なっているものがあるとの前提をおいている。そのいくつかを以下に述べる。

### 総論

- 再生可能エネルギー、非内燃機関駆動による移動・輸送、製造や建築におけるCO<sub>2</sub>のゼロ排出、AIなどが社会の隅々に実装され広義のネット・ゼロ・インフラ(再生可能エネルギー(ソフト、ハード)、移動・輸送(ロジスティクス含む)、建物、これらを統合する電子コミュニケーション・ネットワーク及びAIなど)の整備が総合的に進んでいる。
- 気候変動影響の増大に伴って炭素の社会的コスト(social cost of carbon:SCC)[2,3]が一般のレベルで認識され、相応の炭素価格(カーボンプライシング)が導入されている。
- 再生可能エネルギーは、世界市場の拡大による価格低下(図 17)により、化石燃料エネルギーに対する競争力が圧倒的に高まり、経済原理によって極限まで活用されている。
- 電気自動車は、官民による積極的な必要なインフラ整備、世界規模での市場拡大を受けたバッテリーパックの価格低下(図 18)などにより最大限に導入されている。
- すべての部門において、エネルギー効率改善に大きく貢献する電化が進んでいる。代表的な技術として、家庭、業務、低温熱を利用する産業におけるヒートポンプや運輸部門における電動モータがある[61,62]。電化が進むことにより、再生可能エネルギーの利用が拡大している。
- 全体に製造業の生産性が高まる。循環型社会化でサプライチェーン全般にわたる効率化が進む。精度の高いマーケティングときめ細かな販売方策(ダイナミック・プライシングなど)により大量の売れ残りはほとんど生じなくなり、在庫管理の面でも時間的・空間的に最適化が進んでいる。
- 経済社会活動を支える資金については、ダイベストメントやグリーンボンド発行などが一層進み、気候変動対応に向かう資金の流れが主流化している。また地球規模で悪影響を与えるような活動があれば、資金面でこれを変更していくべく国際協調が比較的迅速に取られるようになっている。
- 需要面では、価格の安さ(経済的合理性)だけでなく、環境面での価値が重視され(環境面での合理性)、こうした需要が促進され、マーケティングに活用されることを通じて、供給されるモノやサービスが大きく変化している。

- ▶ 「所有価値」から「機能価値」へと人々が重視する価値の転換が進み、同じ効用を得るために必要となる資源やエネルギーが社会全体で大きく減少している。
- ▶ 働き方が変わることにより、休日や自由時間が増加し、自己実現に費やすことのできる時間が増加している。
- ▶ 時間の価値が重視され、AI、IoTによる効率化やロボットによる代替などで、従来、家事や買い物などに費やしていた時間が大幅に短縮されている。また、テレワークなどが定着し、通勤に費やす時間が大きく減少している。移動に際しては、乗り換えの効率化が進み、待ち時間が減り、最適な手段や経路の提示により移動に必要となる時間が現在より相当程度短縮している。
- ▶ 上質な空間への要求が高まる。建物の断熱性能が高まり、より静かで、快適な室内環境が実現される。移動時も、占有空間の広さ、快適さ(静音の保持、振動の少なさ)、通信の安定性といった質が重視され、移動時間が仕事や趣味などにも活用される。多くの公共交通機関は座って乗れることが重視され、それが実現している。
- ▶ 気象の予測やリアルタイムでの情報が詳細なメッセージで正確に発信され、防災インフラが整備され、交通機関の対応も含め人々の急な天候変化などへの備えが進んでいる。
- ▶ 量子コンピューターによって、電子計算に関わるエネルギー消費量が大幅に減少している[38]。

#### Box 5 分散型電源の利用

再生可能エネルギーの主力電源化を実現するには、太陽光パネルなどの小規模な電源を多量に導入する必要がある。これにより、住居の周囲にも太陽光パネルが置かれ、近くの河川に中小規模の水力発電所が設置されるなど、再生可能エネルギーがより身近になっている。そのため、我々が消費する電力の一部は、これらの太陽光パネルまたは中小規模の水力発電所から供給されている。一方で、都市域すべての電力需要を満たすほど地域内の再生可能エネルギーは存在しないため、既存の送電網も上手に利用し、他地域にある再生可能エネルギーを利用していている。分散型電源のうち再生可能エネルギーは日照状況や風況など天候によってそれぞれ発電するタイミングが異なる。そのため、再生可能エネルギーを多く利用するには、多数の小規模な発電所や、電力の需要抑制システムを一つの発電所のようにまとめて制御を行うバーチャルパワープラント(VPP)や蓄電池などの技術を使って、秒単位での潮流管理が自律的かつ柔軟に行われ、電力システム全体で発電と消費のバランスを保つ必要がある。このように、空間的、時間的にも偏在しているエネルギーの供給と需要が新しい技術によって統合されている。

また、災害時においては、このような分散型電源すべてが機能不全に陥ることはなく、十分な電力供給ができる場合でも、優先度の高い需要に対して、蓄電されている限られたリソースを配分するような仕組みになつており、レジリエンスの向上にも役立つ。

## 都市、地域において

- (地域循環共生圏の展開): 都市と地域が、それぞれの特性に応じた資源を活かし、自立・分散型の社会を形成しつつ、近隣地域と地域資源を補完し支え合うことで地域を活性化させる「地域循環共生圏」が広く展開する。
- (創造的な発想と認識): 人口増加に伴う都市のスプロール的拡大という発想から転換し、これまで経験のない短期間での人口減少という局面を社会変革の好機ととらえて、ネット・ゼロ・インフラがデジタル・コミュニケーション・ネットワークにより包摂的かつ効率的に連携した都市と地域(スマートシティ)の創造へ、と発想や認識が大きく変化し、生活空間の全領域におよぶ再創造が行われている。
- (進展するネット・ゼロ・インフラの実装): 分散化した都市と地域のあらゆる場所において、ネット・ゼロ・インフラの実装が進み、新たなデジタルネットワーク網の構築や個別機器等の設置、メンテナンスなどの新たな雇用が生み出されている。太陽光パネルは道路や駐車場にも設置され、蓄電と無線給電も行われている。街中を走る自動車は減少し、内燃機関によるものはほとんどない。物品の収集・運搬・配送に係るロジスティックスが高度に発達し、最少の時間とエネルギーでこれが可能となっている。建築物では、ZEH,ZEBが標準仕様となっている。IoT等を通じて収集された膨大なデータをAIが分析し、合理的な状況認識と予測、対応の選択肢が示される。
- (ネット・ゼロ・インフラ整備の制度的促進): 都道府県や市区町村では、ネット・ゼロ・インフラ構築の拡大を加速させるため、合理的な基準設定、規制制度や補助金・税制優遇など助成制度の活用などを通じて、レジリエントかつネット・ゼロ・インフラを構築する新しいビジネスへの移行が促進されている[64]。
- (連携による高レジリエンス地域の構築): 災害リスクに対する対応力も指摘される気候変動[65] や、感染症・パンデミックリスク、サイバーテロ、安全保障などの様々なグローバルリスクに備えて、国、都道府県、市区町村、コミュニティがコミュニケーション・ネットワークを介して連携することにより、都市と地域におけるレジリエンスが高められている。誰一人例外なく安全・安心な生活を享受でき、平和、健康、福祉を含めた生活の質が保証されるよう都市と地域の構築が進んでいる。
- (地域における意思決定レベルでのエコ・リテラシー向上): ネット・ゼロ・インフラが連動することにより、ネット・ゼロ社会実現に必要な情報や経験に誰もがアクセスすることができるようになる。その結果、地域社会やコミュニティのエコ・リテラシーが向上し、エネルギー効率向上や燃料転換に向けた街やインフラが選択される社会となっている。
- (便利で快適な生活空間): 都市機能の集約化によって、生活に必要なあらゆるサービスが徒歩圏内で賄える。通勤や娯楽の移動には、AIにより自動運転化され、最適な場所で柔軟に停車するバスや電車が利用でき、乗客数に合わせて客室部が分割されるなど、エネルギーの無駄が極めて少ない公共交通サービスが一般化している。到達可能時間や健康増進など、その日の目的に合わせて、最適化された交通手段(徒歩や自転車を含めて)や交通ルートを自由に選択でき、生活の満足度が高まっている。
- (新たな事業展開): 農地周辺ではソーラーシェアリングや野菜工場の導入が進んでいる。再生可能エネルギー発電事業と高品質の野菜の販売事業やレストランなどが複合したサービスが広がり、都市郊外や地方都市(農地、山間)における地産地消が進み、雇用の下支えに貢献し、地域経済が活性化している。
- (防災・減災の高度化): 防災・減災や気候変動適応の観点から、都市と地域の脆弱性を踏まえた住宅や

産業インフラの再構築が進み、山間部、河川流域、沿岸部に至るあらゆる場所のレジリエンスが向上し、安心・安全な生活空間が創出されている。

- （未利用地の活用）：一部の未利用地は、植林やCCS付きバイオエネルギー（BECCS：Bio-energy with Carbon Capture and Storage）[66]さらにはCO<sub>2</sub>直接空気回収貯留（DACS：Direct Air Capture and Storage）などのネガティブ・エミッション技術の拡大のために利用されている。DACSは、安全性が確認された貯留適地周辺（沿岸部や内陸の非居住地）で設置が進み、熱源は太陽熱やガス燃焼（CCS付き）で補われている。また、土地の特性に応じて、ソーラーパネルが設置され、また、適地には風力発電が定着している。さらに、バイオマス発電用の燃料の生産や、生物資源から作られる土壤改良材「バイオ炭」の利用地として活用されている。

#### **Box 6 再生可能エネルギーの導入を促すブロックチェーン技術**

再生可能エネルギーは分散型電源であり、その供給側（販売者）に小規模な発電事業者が多く存在する。また、需要側にも中小企業や家庭といった小規模な需要者（購入者）が存在する。一般に、小規模な販売者と購入者が金銭をともなう取引を行う場合は、その取引コストが大きな障壁になる。少額の取引であっても、取引に信用を与えるために仲介者を通す必要があり、これまでの金融業務ではその取引コストが大きな負担になるためである。

しかし、ブロックチェーンを用いた取引は従来の取引の形に変化を与える。第一に、ブロックチェーンを用いた取引はすべての取引履歴が記録されるために、不正が起きにくい。そのため、取引の都度、第三者が確認する必要が無く、取引手数料が大幅に低下する。第二に、ブロックチェーンに関わる手続きはすべてオンラインで行うことが可能であり、その契約情報もブロックチェーンに書き込まれるため、契約内容の保管にかかるコストが不要となるなど、業務の効率化ができる。第三に、すべての取引が記録されることから、発電側が電源別の発電量を管理することができ、再生可能エネルギーはその環境価値を商品にすることが可能となる。消費者も信頼性の高い情報を基に電力という商品を選ぶことができる。さらに、すべての取引が記録されることから、蓄電池や電気自動車を用いた電力供給サービスも展開が可能となる。

日本においては、みんな電力株式会社がブロックチェーン技術を用いた電力小売のサービスを提供している[63]。

## 暮らしにおいて

### (時間の使い方)

- ▶ AIやICTの進展により、働く時間が減り、可処分時間が増えている。一方で、エネルギー源は風力や太陽光発電など自然由来の再生可能エネルギーが大宗を占め、日々変動する自然現象を普段の暮らしで活用できる程度に、社会全体として、時間の使い方の柔軟性が高くなっている。総じて生産の効率性は上がり、人の生活時間はゆっくりと進んでいく時代となっている。
- ▶ 休日と在宅勤務の制度を活用して、週の半分は郊外の保養地等において、仕事と休暇に充てるような生活スタイルも普及している。
- ▶ 待ち時間が有効に活用される。VRや仮想空間、ホログラムに関する技術の発達によって、高い解像度の3次元情報へのアクセスが容易になり、また、センサー技術の発達により、例えば指の動き一つで入力できるなど、短時間で高度な作業を行うことが出来る。

### (価値、慣行)

- ▶ 高度な循環型社会が実現する。リユースやリサイクルが定着し、「捨てる」ことのコストが個人レベルで適切に認識されている。また外部性(処理費用等)が価格・手数料などに組み込まれるなど制度面での対応などと相まって、個人においては、使い捨ての習慣から、社会レベルでは、大量廃棄するシステムからの脱却が図られている。
- ▶ 「所有価値」から「機能価値」へ人々が重視する価値の転換が進み、シェアリングエコノミーが定着し、同じ効用を得るために必要となる物質やエネルギーが社会全体で大きく減少している。

### (移動など)

- ▶ 長距離の移動は、自動運転化されたバスやタクシーの活用を通じて、公共交通機関の利用が促されている。自動運転によって、配送コストや配送時間が大幅に低減し[67]、宿泊施設や主要駅まで荷物を手軽に送ることが出来るようになっている。
- ▶ 都市中心部に住む人々は利便性が向上した公共交通機関をよく使うようになり、現在のような自家用車を使ってスーパーで買い物をするスタイルが大きく変化している。
- ▶ 高性能の車いす、自走式の機材や靴、動く歩道・パネル、高齢者の移動が確保できる製品などの開発が進み、マルチコプターなどの技術を応用した空中移動も含め移動の形態が多様化している。

### Box 7 電気自動車によるエネルギー効率改善

現在のガソリン車のガソリンのエネルギー利用効率は30-40%とされる[68]。これに対し、電気モータのエネルギー利用効率は、80-90%とされる[69]。そのため、送電ロスを5%、電池の充電ロスを15%、石油の精製ロスを8%、輸送ロスを2%[70]とすると、再生可能エネルギーによって供給された電気によって自動車が走行する場合、ガソリンを用いて走行する場合と比較して、同じ距離を走るために必要となる1次エネルギー量で1/2以下になる。また、最新のガス火力発電(発電効率は送電端で52%)によって、発電した電力を用いて電気自動車が走行する場合も、ガソリンを用いて走行する場合と比較して、必要となる1次エネルギー量は同等かそれ以下となる。

## (AI、ICT、その他の技術の進展)

- ▶ 食糧・日用品など日頃使用する商品の購入方法は様変わりし、購買パターンを学習したAIによる購入提案に消費者が可否を与えることで足りるようになっている。
- ▶ ウェアラブルや超小型チップ、高精度センサーなどにより個人の識別が正確化、迅速化し、VRなど新たな機器により、認証、購買、健康状態の確認など様々な面で日常生活における変革、効率化が進んでいる。
- ▶ 少額の取引も安価で高い信頼性を得て行うことが可能なブロックチェーン技術により、多くの製品の再使用(シェア)が可能となり、資源効率性が高まっている[71]。地域に根差して人と企業を結び付けるようなサービスが発達し、例えば、ブロックチェーンの特性を活かした地域内通貨を用いるサービスに関するアイディアがより実現しやすくなっている[72]。
- ▶ 多くの汎用品については、様々な種類の3Dプリンタによってオンラインでの製造が可能[73]になっており、製品の長距離輸送も大幅に減少している<sup>30</sup>。

## (住居など)

- ▶ 住宅やオフィスにおいては、建て替えやリフォームが進み、高断熱、屋上・壁面太陽光、高性能エアコンを含むヒートポンプといったエネルギー利用効率の向上を促す技術・製品利用と親和性の高いオール電化(IHクッキングヒーター等)が普及し、すべての住宅・オフィスからのCO<sub>2</sub>の排出はゼロとなっている<sup>31</sup>。壁面太陽光については、薄くて軽い有機薄膜太陽電池[74]が用いられ、窓部分には透過型の有機薄膜太陽電池が活用されている。
- ▶ 多くの地域では、電化によるエネルギー利用に切り替えられている<sup>32</sup>。古い家は建て替え、改築により断熱性能が向上し、冬場でも、暖房用に灯油やガスヒーターを使わず、エアコンや地中熱の活用だけで足りている。なお、北海道や東北・北陸地域など冬場の暖房需要が大きい地域の一部では、ごみ焼却施設からの廃熱を、熱導管を通して近隣の建物や道路に供給している。
- ▶ 集合住宅や業務ビルは、鉄筋コンクリートや鉄骨の利用が主流であったが、CLT(集成材)を利用した木材+鉄の構造により、建材の9割を木材とする高層建築物も一部実現化されている(Box 8)。

<sup>30</sup> もののシェアリングによって、新規製品製造量も減少している。

<sup>31</sup> 2017年の1世帯が消費するエネルギーのうち冷暖房、給湯に使用されるエネルギーはそれぞれ、28.1%、29%である[211]。冷暖房については、APF(通年エネルギー消費効率)が7を超える製品、給湯については、エネルギー消費効率が3を超える製品が市販されている[212]。

<sup>32</sup> 家庭での水素利用も脱炭素化の手段であるが、1)都市ガスのパイプラインで、水素100%の気体を輸送できる技術が確立する必要があること(例えば、パイプラインがすべてポリエチレン管に代替された場合でも、既存のインフラでは水素を体積比20%の割合でしか入れることが出来ない[213])、2)燃料電池によるエネルギー効率を高めるには、熱需要が十分に存在する必要があり、非寒冷地域や給湯需要が少ない家庭では、燃料電池の非効率な運用になる、といった課題が挙げられるため、本報告書では想定していない。

**Box 8 高層建築の木造化**

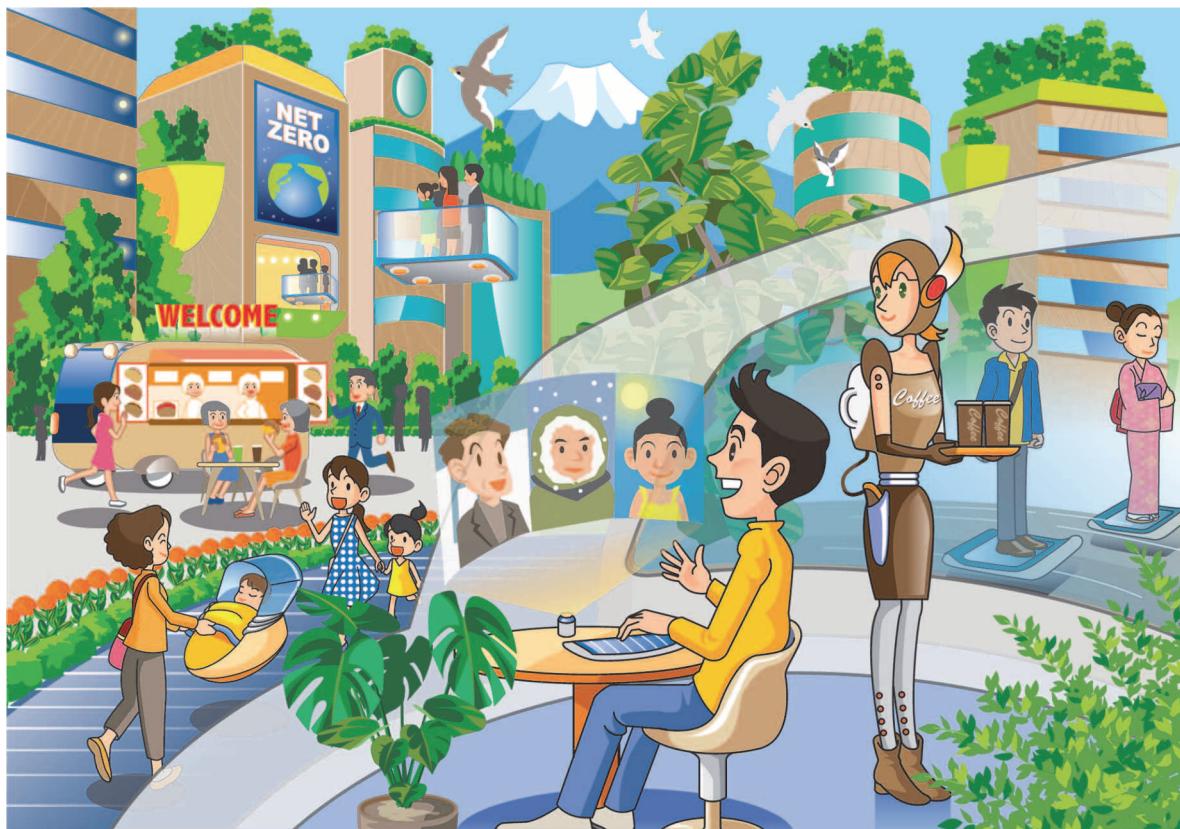
大林組は2019年7月23日に日本初の高層純木造耐火建築物（地下1階、地上11階）の建設に着手した。さらに、建物の外皮性能の向上、自然エネルギーを積極的に利用することで、ZEB Ready（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル・レディ）を達成している[75]。こちらの建築物はグリーンボンドの発行によって資金が賄われており、今後、金融機関による投資制度が変わることで、建材も大きく変わる可能性を秘めている。住友林業は、2041年までに東京都心部に高さ350mに及ぶ地上70階建ての木造高層建築物を建築する構想を発表している。耐震性については、マグニチュード8クラスまで安全確認ができたといわれる。今後、材料の入手や耐火性などの課題を克服していくとしている。

## （健康）

- ▶ 健康寿命の伸長が個人レベルでも求められ、健康志向が高まっている。ウェアラブル機器が体調を把握し、ディープラーニングによる情報の分析結果と合わせ、各個人にフィードバックされることで病気の予防が進んでいる。特に、生活習慣病の予防はごく普通になり、過食が避けられ、市場に出回る食材も健康に良いものが増えている。

## （安全・防災）

- ▶ 現在よりも台風や豪雨の強度が高まり、かけ崩れ、道路の通行止め、停電・断水など生活インフラの寸断が頻発するようになっている。このため、災害に対する自治意識が否応なしに高まっている。生活の安全確保の観点から家庭でエネルギーを自立的に確保できること、また仕事についても災害発生時にはその影響を最小限にとどめられる柔軟な勤務形態などがとられるようになっている。



イラスト制作：ad-manga.com

### Box 9 将来を予測するということ

このところ社会変化の速度が著しく、しかもその速度がますます加速していくと指摘する声が少なくなっている。通史的にみると、農業革命の影響が完全に社会に及ぶのに千年、産業革命は数百年かかっていたものが、情報革命では数十年[76]で社会が一変してしまった。社会の変化などとても予測しきれるものではないが、人々にこうしたいという夢や希望があるのとのとでは、その後の社会発展に違いが生じるかもしれない。

今から100年以上前、1901年に報知新聞が20世紀中に実現するとした科学や技術の予測を行っている。「二十世紀の預言」(1901年1月2日、3日)である。その一部を現代語訳して紹介する。

- 欧州の戦場に行かずに東京にいながら天然色の写真を添え最新の戦争記事が書けるようになる
- 十里離れたところにいる恋人と愛をささやくことができる
- 手元の商品図録を見ながら、その場で買い物ができる、商品は地中管で配達される
- 世界一周は、7日間でできるようになる(当時は八十日を要した)
- 天災の予測が1ヵ月前に可能となる。台風は大砲で雨となる
- 薪炭や石炭が枯渇し、電気が燃料となる
- 電気を以て野菜を育てる
- 蚊や蚤が絶滅する
- 犬猫猿と自由に対話できるようになり、犬が人の使いで歩き回る 等

「預言」は全部で23項目あり、その内容から編集部の明るく前向きな雰囲気が伝わってくるかのようであるが、驚くほど多くの預言が実現(または、ある程度実現)している。

翻って現代社会から将来の展望を試みると、気候変動対策はもとより様々な経済・社会課題に直面し、明るく楽しいだけの未来を予想するのは難しい状況にあるが、それでもビッグデータとAIにより、経験・知識とアイディアの大融合時代を迎えており、様々な面でより大きな可能性が広がる時代となっていることを期待したい。

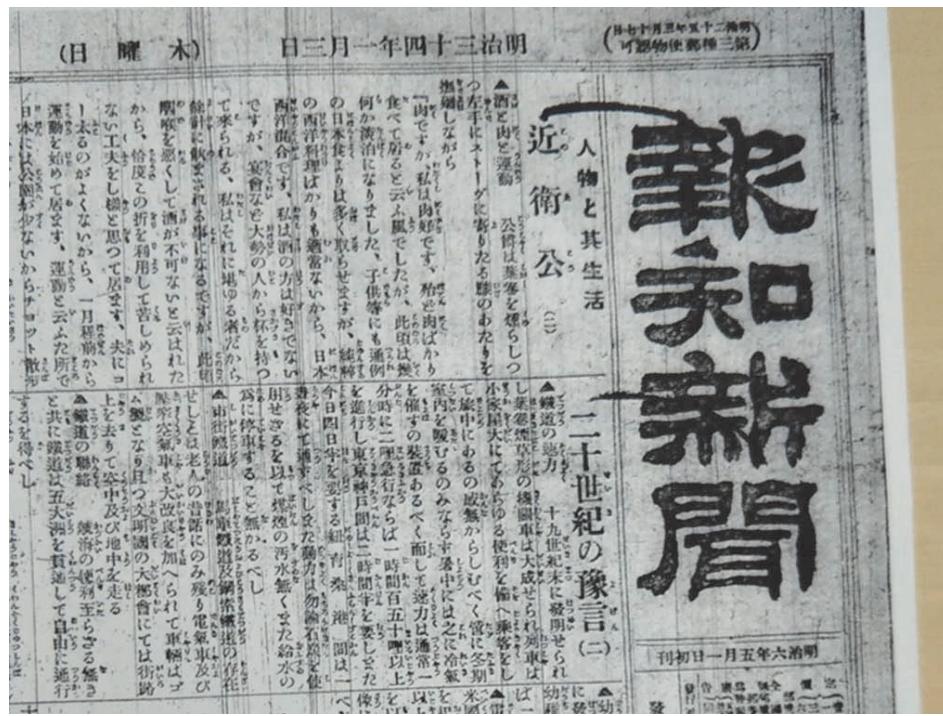


図 14 報知新聞「二十世紀の預言」(1901年1月2日、3日)(国立国会図書館所蔵)

## 産業活動において

- ▶ ネット・ゼロという新たな社会の構築のためにネット・ゼロ・インフラ整備が進み、新たな産業や雇用が生まれ出されている。
- ▶ トポロジー最適化<sup>33</sup>などにより資源生産性があがり、全体に製造の生産性が高まる。精度の高いマーケティングと柔軟な価格設定(Dynamic pricing)により売れ残りは少なくなり、売れ残りについてもリユース・リサイクルが図られている。商品見本は、3D/VR化が進み、宣伝時の誤解や購入直後のトラブルなども減り、需要者のリクエストにきめ細かく対応することができるようになっている。
- ▶ 経営の優先事項が株主第一主義から顧客・取引先・地域社会などの利害関係者全般への貢献を優先するステークホルダー資本主義[77]へとシフトし、金融機関や取引先の要望により、企業の事業は、脱炭素およびSDGsと整合することが前提となっている。
- ▶ ソーシャルネットワークの発達により、企業の自社活動に対する説明責任が増し、一般化している。
- ▶ 金融機関における投融資の際の審査基準としてESGに関する視点が必須のものとなり、気候変動対策を推し進める経済社会の変革ドライバーとしての意義が増している。
- ▶ 鉄鋼、化学、セメントなどのエネルギー集約産業において電化、水素利用、CCU/CCS技術の利用、バイオマス利用など脱炭素型の製造技術が標準装備され、適切な生産が行われている(表 7)。
- ▶ 鉄鋼業については、水素還元法および電気分解法を中心に、鉄鉱石から銑鉄が生産される[13,14,78–80]。これらの技術では脱炭素化できないプロセスについては、CCSによってCO<sub>2</sub>が回収される。さらに循環型社会の発展(国内の鉄鋼に対する新規需要減や鉄ストックの再生利用の進展)及び再生可能エネルギー100%の電気を用いたアーク式電気炉の普及を受けて、必要な品質が維持された鉄を再生する循環サイクルも構築されている[14,19]。
- ▶ 化学産業では、再エネ由来の水素とバイオマスまたはDAC技術による大気中などから回収されたCO<sub>2</sub>から生成されるCO(一酸化炭素)を用いた合成ガスを基に、オレフィン<sup>34</sup>が製造されている。合成ガスが大量に利用可能となるまでの間、プリッジ技術(つなぎの技術)として、天然ガスの改質によるオレフィン精製が行われる。藻類などの非可食バイオ燃料から化学製品、いわゆるグリーン化学製品の製造が行われている[81,82]。循環型社会の形成によってプラスチック製品の需要が低下する面もあるが、新たな素材として期待が高い炭素繊維やセルロースナノファイバーの担体といった新製品による需要増も想定される。
- ▶ セメント産業では、石灰石を焼成し、クリンカを製造する工程で燃料由来とプロセス由来のCO<sub>2</sub>が発生する。燃料由来のCO<sub>2</sub>排出量は、電化、水素利用、バイオマス利用といった手段で抑えられている。プロセス由来のCO<sub>2</sub>排出量はCCS技術によって回収されている、あるいは、クリンカ以外の原料の利用によってクリンカ必要量が抑えられている。産業廃棄物の混焼など循環型社会形成における役割が増加し

<sup>33</sup> 造ろうとするものの中で力があまりかかっていない場所の材料は不要であるとみなし、除去していくことで形状を最適化していく技術[214]。

<sup>34</sup> 二重結合一つをもつ脂肪族鎖式不飽和炭化水素の一般名であり、一般式C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>で表される一群の化合物。化学産業では広く使われており、代表的にはエチレンやプロピレンを指す。オレフィンのポリマー(重合体)がポリオレフィンであり、ポリエチレン(PE)・ポリプロピレン(PP)など様々なプラスチック(合成樹脂)製品の原料となる。

ている。

- ▶ 紙パルプ産業において主にエネルギーを必要とする蒸解行程では、電化(ヒートポンプの利用など[83])、水素利用、バイオマス利用によって脱炭素化が達成されている<sup>35</sup>。紙パルプ産業における製品需要は、新聞、書籍、書類の電子化など減少要因もあるが、廃プラスチック問題への対応として、プラスチック代替品としての紙製品の活用(食品容器など)や、溶解パルプの利用(容器包装や織物繊維など)への応用[84,85]など増加要因もある。
- ▶ その他の製造業では、高温熱需要が限定されている(図 15)ことから、電化が進んでいる。熱需要については、抵抗加熱、誘導加熱、誘電加熱、赤外加熱、アーク・プラズマ加熱、レーザー加熱等のいずれかの電気技術が応用されている<sup>36</sup>。
- ▶ 工業部門から排出されるフッ素系GHG(HFC、PFC、NF<sub>3</sub>、SF<sub>6</sub>)は、地球温暖化係数(GWP:CO<sub>2</sub>を1とした場合の温暖化影響の強さを表す値)がCO<sub>2</sub>よりも非常に大きく、主として冷蔵庫・エアコン用の冷媒として使用されている代替フロンのHFC<sup>37</sup>の冷媒転換(GWPが1台のCO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、HFO系の冷媒[110]の開発・普及拡大)が進んでいる。市中の冷媒回収・再生・破壊といった下流対策も補完的に実施されることで、ゼロ・エミッションが概ね達成されている。
- ▶ 消化剤、発泡剤、液晶パネル製造、HCFC製造時の副生HFC、半導体製造、溶剤で使用されるHFCも、HFOやCO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>等の低GWP物質に転換されている。PFC、NF<sub>3</sub>、SF<sub>6</sub>等に関しては、アルミニウム製造、電気設備、液晶製造、マグネシウム等鋳造、PVパネル製造、半導体製造の工程に、除害装置(90%以上の除害効率)により、ゼロ・エミッション化が概ね達成されている。なお、代替フロンの低GWP化に際して、エネルギー効率や安全性も確保されている[111]。

表 6 溶解パルプの用途

| 加工方法 | 製品            | 主な用途                 |
|------|---------------|----------------------|
| 溶解   | 再生セルロース       | レーヨン、セロファン           |
| 加水分解 | 微結晶セルロース      | 賦形剤(医療)、食品添加剤        |
| 誘導体化 | カルボキシメチルセルロース | 食品添加剤、土木材料           |
|      | 酢酸セルロース       | 人工繊維、タバコフィルター、液晶フィルム |

出典:王子ホールディングス[85]

<sup>35</sup> 例えば、2017年8月15日に稼働したMetsä Groupによる、CO<sub>2</sub>排出量をゼロとしたパルプを含むバイオ製品工場[85]。

<sup>36</sup> 2017年に実施された三菱総研による資源エネルギー庁委託調査[86]では、「業界団体へのヒアリングによると、技術的に電気で供給できない熱需要は存在せず、例えば浸炭熱処理のように炭素を原料として使う用途においても、別途原料となる炭素を供給すれば熱としての部分は電気でも供給可能とのことである。蒸気については、現状ではヒートポンプによる蒸気製造には技術的課題が残っているものの、電気ボイラー等も含めて考えれば電化の技術的制約は小さい。」としている。

<sup>37</sup> いわゆる代替フロンであり、GWPはCO<sub>2</sub>の数千倍以上に及ぶ。

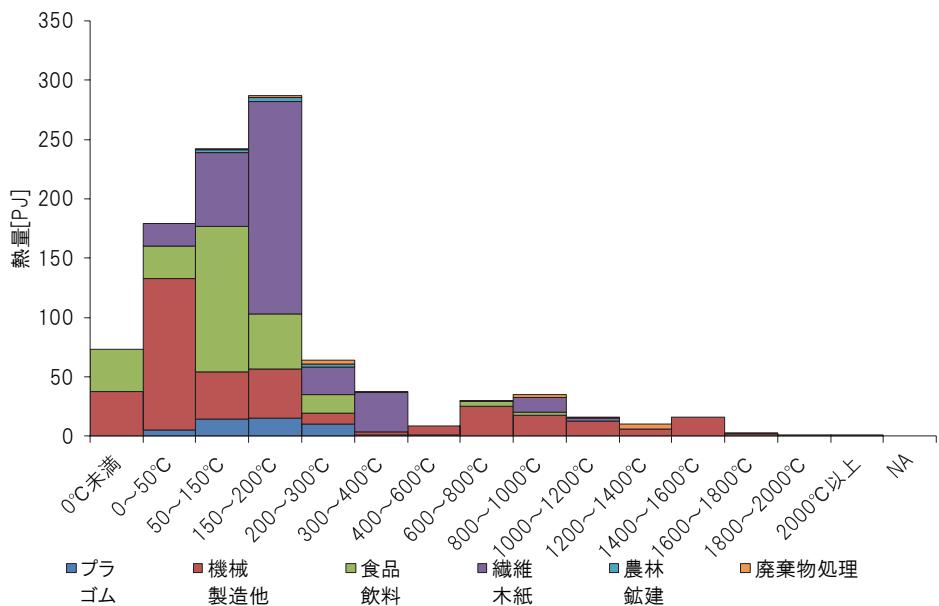


図 15 重化学工業を除く製造業における業種別・温度帯別熱需要

出典：三菱総合研究所[86]を基にIGES作成

#### Box 10 SDGsで評価される日本企業

積水化学工業株式会社は、カナダの出版社、Corporate Knights社が公表したGlobal 100において、世界第12位にランクされた(2020年版)。これは、同社が、年間売上高10億ドル以上の企業7,395社を対象に、製品の環境面、社会面での影響、二酸化炭素や廃棄物の観点、女性社員の幹部登用などSDGsに関する独自の21指標から順位付けをしたもの。アジアでは第1位となる。積水化学工業株式会社は、収入の約28%がSDGsの達成に資する形で生み出されている等として評価された。

表 7 エネルギー集約型産業に適応できる低炭素技術の全体像

|         | 電化(熱や動力の供給) | 電化(電気分解／電気化学などのプロセスでの活用(水素を除く)) | 水素(熱供給ないしプロセスでの活用) | CCU | バイオマス(熱および原材料の提供)・バイオ燃料 | CCS | その他(プロセスの統合を含む)   |
|---------|-------------|---------------------------------|--------------------|-----|-------------------------|-----|---|
| 鉄鋼      | xxx         | xx                              | xxx                | xxx | x                       | xxx | 中間プロセスの廃止・プロセスガスのリサイクル: xxx<br>高品质の鉄鋼のリサイクル: xxx                            |
| 化学・肥料   | xxx         | xxx                             | xxx                | xxx | xxx                     | xxx | 一連の廃棄物の活用(化学リサイクル): xxx   |
| セメント・石灰 | xx          | o                               | x                  | xxx | xxx                     | xxx | クリンカなどのバインダー物質の代替: xxx<br>コンクリートにおけるセメント使用の効率化: xxx<br>廃棄物の燃料利用: <b>xxx</b> |
| 紙・パレプ   | xx          | o                               | o                  | o   | <b>xxx</b>              | o   | 効率改善: <b>xxx</b>  |
| セラミック   | xxx         | o                               | xx                 | x   | x                       | o   | 効率改善: <b>xxx</b>  |
| ガラス     | xxx         | o                               | x                  | o   | xxx                     | o   | ガラスのリサイクルの高度化: xx   |
| 非鉄金属/合金 | <b>xxx</b>  | <b>xxx</b>                      | x                  | x   | xxx                     | x   | 効率改善: <b>xxx</b><br>高品质非鉄金属のリサイクル: xxx<br>不活性電極: xxx                        |
| 石油精製    | xx          | o                               | xxx                | xxx | xxx                     | xxx | 効率改善: <b>xxx</b>  |

o: 限定期あるいは有意義な適応が見込まれない

x: 活用は可能、しかし主要で広範な活用は見込めない

xx: 相当程度に適応可能

xxx: すでに大規模にこの技術を適応済み(場合によっては、さらに活用を拡大できる可能性あり)

**xxx:** 極めて有望

(\*) 特に、アンモニアやエチレンオキサイドの製造に当てはまる

出典:「EUのエネルギー集約産業の競争的変革のためのマスタープラン: 2050年までにカーボンニュートラルな循環経済を実現する」[87]を基にGES作成

## 農林水産業において

- ▶ 農山漁村においては、再生可能エネルギーが十二分に活用され、農林業機械や漁船の電化、燃料電池化等により、生産・流通プロセスにおいて、CO<sub>2</sub>排出量のゼロ・エミッションが達成されている[88]。
- ▶ センサー技術の発達とセンサーによって得られたデータを処理するAI技術の発達によって生育状況の確認、作業時間や施肥の効率最大化や作物の品質の向上がなされる。また、作業用ロボットの性能が向上している。これらの変化によって、畜産農家、林業家の一人一人の作業負荷が大きく改善されている[89]。
- ▶ 食や日用品、建設資材のトレーサビリティの向上によって、国内で生産される付加価値の高い農作物や林産物への需要が高まり、農林業の営みが活発化している。
- ▶ 都市機能の集約化によって、都市部に住む人口割合が増加、テレワークなどによる労働生産性が向上する中で、人々の食や自然への意識の高まりから、都市農業や体験型の農林業の活動によって、農林業の役割が新たな付加価値を提供している。特に、里地里山での地域農業や家庭・屋上菜園の活性化が進み、パーマカルチャー<sup>38</sup>の理念の下、生態系、農業、文化を支える土壤の保全も進んでいる。
- ▶ 建物の素材として、木材の活用が進んでいる。2017年時点の日本的人工林の44%はスギであり[90]、スギ材は、ケボニー化<sup>39</sup>やAFRW(Advanced Fiber Reinforced Woods)などの技術進展により、高級化や高強度化が進み、市場ベースで新たな需要が増加している。国産材の活用が進み、林業の活性化が地方地域の経済振興に貢献することに加え、人工林の林齢の若返りにより、CO<sub>2</sub>吸収量が増加する効果を生み出している[91,92]。
- ▶ 一部の農地には、ソーラーパネルが設置され、また、適地には風力発電が定着している。さらに、林業地域では、バイオマス発電も行われ、これらによる収入が、農林業につぐ柱として成長している。
- ▶ 植林や再植林以外に、生物資源から作られる土壤改良材「バイオ炭」の活用によって、CO<sub>2</sub>吸収源になるとともに、農作物の収穫量を増やしている[93,94]。また、安全性が確認された一部の地区では、バイオマス発電とCCSを組み合わせたBECCSが行われ、これらのネガティブ・エミッション技術がネット・ゼロに貢献している。

<sup>38</sup> パーマネント(永続性)と農業(アグリカルチャー)、そして文化(カルチャー)を組み合わせた言葉で、永続可能な農業をもとに永続可能な文化、即ち、人と自然が共に豊かになるような関係を築いていくための概念[215]。

<sup>39</sup> フルフリルアルコールを針葉樹に含侵させ、熱を加えて重合させることで、木材の硬さや腐朽に対する抵抗性をあげ、高品質木材に改質する技術[214]

## 適応において

- 気候変動の危機的現実と危機意識を念頭に、誰一人取り残されず、「一人一人が大事にされる」という視点・価値観が広く共有された社会になっている。医療技術の進展や健康志向の高まりによる長寿命化、趣味を兼ねた生涯学習、地域貢献としての草の根のボランティア活動、さらには里地里山の保全にも資する農林業の「6次産業化」が進むことにより、地域・コミュニティ・家庭の絆が深まり、公助中心の防災から、共助や自助を主体とする適応へと人々の意識が移っている。
- 適応と緩和のシナジー(相乗効果)が発揮され、適応と緩和が統合された社会が構築されている。例えば、適応策・防災の一環で進められる森林整備は、生態系保全のみならず気候変動の緩和にも貢献している。河川の中下流域における住居・産業の移転などの土地利用転換を伴う適応策は、街のインフラに再投資するきっかけとなり、ZEBやZEHのような建物のゼロ・エミッション化、柔軟なデマンドレスポンスを可能とする分散電源化、VPPの実用化等が進み、ネット・ゼロに向けた緩和を促進している(図 16)。
- 気温上昇の不確実性を考慮して、ハード対策以外のソフト対策も組み合わせた総合的な対策に加えて、都市開発・土地利用計画の変更や居住地・産業の移転を伴う「転換的な適応」が行われるようになっている。周辺地のハザードマップの想定の見直しが行われ、不動産取引や住民による避難マップ作成に役立てられることにより、気候変動リスクを織り込んだ都市と地域が形成されている。
- 不確実な状況に柔軟に対処するための新たな適応の仕組みがシステム化され、広く普及するようになっている。地域の気候予測を踏まえた対応とすでに行われている施策の検証を組み合わせてスムーズな適応策の導入を目指す取り組み[95]や、予測と観測を併用して、複数の代替案を用意し、段階的意思決定を可能とする「順応型管理(adaptive management)」[96,97]が市区町村やコミュニティでも行われるようになっている。
- 過去の経験・知識を超える気候変動影響の増大に対処するために、科学に基づいて新しいアイディア・発想を生み出し続ける、適応におけるイノベーションを担う人材が活躍するようになっている。例えば、気温上昇による栽培地域の拡大という気候変動がもたらす機会を活用し、新たなビジネスモデルを提案するなど、地域活性化の担い手となっている。
- デジタル化は、あらゆる主体の適応行動を改善する機会を生み出している。AIを駆使した予測技術や情報通信技術の進展によって、時間・空間の両面で正確かつ高精細な情報がリアルタイムで提供され、より良い適応行動の判断をすることができるようになっている。例えば、行政から届けられるAIを活用した河川流量予測や避難勧告を、住民が、監視カメラの映像と突き合わせることで、待機・避難などの正確な判断につなげることができるようになっている。

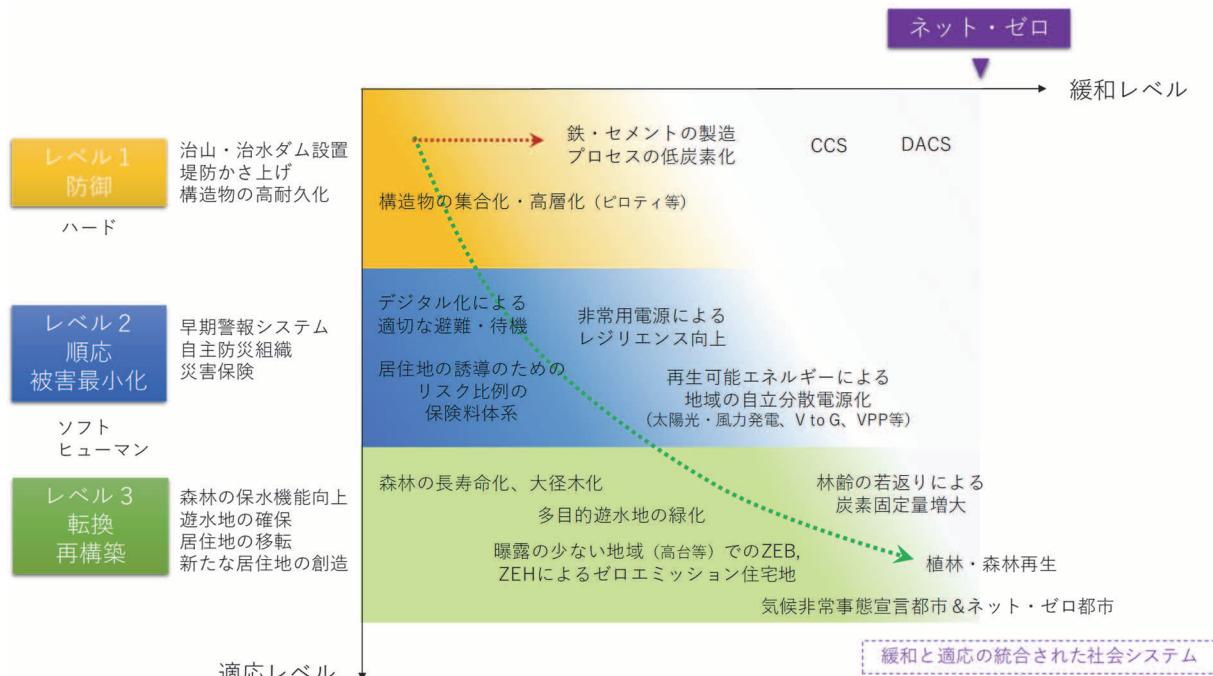


図 16 ネット・ゼロへ向けた緩和を促進する適応レベルの進展(水災害分野の例)

出典:白井他[96]を参考にIGES作成

### Box 11 デジタル化と適応

適応は、基本的に気候変動影響被害に関する情報の理解に基づいて行われる。そのため、情報通信技術の進展によって、時間・空間の両面で正確かつ高精細な情報をもたらすデジタル化は、全ての影響分野の全てのアクターによる適応行動を改善する機会を生み出す。究極的には、完全に信頼できる情報が入手できるのであれば、あらゆる経済主体が適切な適応行動を取ることができ、安心・安全に生活を営むことが可能となる。例えば、雲の生成過程や降雨のレーダー観測による短時間強雨のリアルタイム予測に関して、IoTを介して得られたビッグデータがAIにより解析されることで予測や警報の精度が向上し、防災や適応行動の効果を飛躍的に増大させる可能性がある。また、計算機性能の飛躍的進歩とともに、気候変動の長期予測を行う気候モデルの空間的高精細化や予測精度向上が進展していくと考えられる。農業、暑熱など影響分野によって講じる対策は異なっても、デジタル化は、概して、講じる適応策の的確さを向上させる効果を有すると考えられる。

気候変動影響に関する情報だけでなく、影響を受ける構造物や人の位置、地理的環境に関する情報も、気候変動による総合的なリスクを減らすために重要な情報となる。例えば、インフラ構造物に設置されるセンサーや地球観測衛星などの観測技術の進展により、守るべき資産や人家、生態系が的確に把握され、適応行動が取りやすくなる。ハードなインフラ構造物については、ドローンによる遠隔監視や電磁波によるレーダー検査等[98]により、低成本の無人メンテナンスが可能となる。ソフトやヒューマンの観点の適応についても、AIによる正確な情報に基づく安全な避難、アシストツールや救助ロボットによる迅速な救助、ドローンや空飛ぶ車による物資の最適配送など、Society 5.0で期待されている防災上のメリットが存分に発揮される[99]。

2050年頃には再生可能エネルギーを中心とする社会が構築されていると考えられるため、暴風雨や短時間強雨などの極端現象に対するエネルギーシステムのレジリエンス確保の重要性が強く認識されている。デジタル化の進展により、暴風雨の経路や到達時間、並びに強度(降水量や風況)に関する情報を基に、事前に適切な措置を講じることが可能となる。発災時や事後には、電気自動車と連動した自律分散型の非常用電源ネットワークにより、地域の電力供給が継続可能となる。



## 第3章 ネット・ゼロ社会の実現に向けて

### 公正な移行に向けた論点と課題

ネット・ゼロ社会の実現に向けた変革は、企業活動から個人行動、政治、経済、社会の隅々におよぶすべてのアクターの変化が組み合わさる必要があり、それは「脱炭素革命」と呼ぶに相応しい変化であると考えられる。このため、変化によって生じる負の側面には十分に配慮し、誰一人取り残すことなく、活力のある社会の実現を旨として移行を進めていく必要がある。ここでは、ネット・ゼロに向けた公正な移行に対して、現時点で想定される主な論点に対する考え方を示すとともに、ネット・ゼロ社会を実現するために、今後慎重に検証することが求められている課題をまとめる。

## ■ 論点・課題 その1

世界全体が協調して行動を取らない中、日本だけがネット・ゼロを目指すのは得策ではない。

**考え方:**現在、気候変動への対応を経済成長の機会として捉え、ネット・ゼロを長期目標として掲げる国々が実際にあり、特に欧州では、欧州グリーン・ディール(European Green Deal)など総合的で骨太な国家戦略に基づいて、具体的な行動を起こすようになっている。また、途上国においても、例えばインドでは、政府が鉄鋼部門における大幅なCO<sub>2</sub>削減達成に向けた具体的な対策の検討を進めている[100]。国内に目を転じれば、日本の長期戦略(正式名称:「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」)も、EUと同様に成長戦略としての位置付けがあり、「今後の気候変動分野における枠組み・スタンダード作りを含めた国際的議論をリードしていく」としている[101]<sup>40</sup>。また、CDPの最新の報告書によれば、日本企業が、国別で一番多く最高レベル(Aランク)に位置付けられるなど、日本企業の取り組みの一部は、国際的にもリーダー的な位置にあると言っても過言ではないと思われる。

残念ながら日本はCOPに際し、国際NGOからしばしば化石賞を受賞し、Coal addict(石炭中毒)な国の一として認識されている。日本に対しては、石炭火力の問題や国としての目標の野心度など国際社会が取り組みの強化を期待している課題もある。このため、できるだけ早期の達成年限とともにネット・ゼロを国の目標として掲げ、着実に実行していくことが重要である。その上で、

1)国際社会においては、他国に協調した取り組みを取るよう一層積極的に働きかけリーダーシップを発揮するとともに、

2)産業活動に対しては、今日、経営判断上極めて重要な事項となっている気候変動への対応に、国として積極的なシグナルを発信することで投資を後押ししていく、ことが重要であると考える。

いずれにせよネット・ゼロの達成により得られる恩恵・便益などについて、将来世代とともにバランス良く議論を深めていくことが重要である。

### Box 12 気候変動対策で評価される日本企業

CDP(Carbon Disclosure Project: 英国の国際環境NGO。世界各地の企業を対象に気候変動対策の観点からアンケート調査を実施し9段階で評価している)が発表した報告書によると、2019年度の評価では、日本企業の38社がA評価(最高段階)であり、国別にみると日本が世界第一位となった。A~(第二段階)の日本企業も42社あり、総じて気候変動を経営リスクとして、積極的に取り組んでいる点などが高く評価されたとされる。

<sup>40</sup> 第1章:基本的考え方の2. 我が国の長期的なビジョンにて、「本戦略では、各分野についても、「あるべき姿」としての長期的なビジョンを示す。これらにより、全てのステークホルダーがその実現に向けた可能性を追求するための方向性とともに、政策の方向性も併せて示すことにより、投資の予見可能性を高め、我が国における投資を拡大していく大きな基盤とする。あわせて、どこに非連続なイノベーションが必要かを示し、企業の研究開発・投資を促す。さらに、このビジョンを掲げることにより、今後の気候変動分野における枠組み・スタンダード作りを含めた国際的議論をリードしていく。」としている。

## ■ 論点・課題 その2

### ネット・ゼロを達成しようとする際の製造業の国際競争力上の懸念

**考え方:**より厳しい排出削減をするほど対策コストが生じ、電気料金も上昇するため、ネット・ゼロを達成するとなると、重い経済負担が生じ国内の製造業が立ち行かなくなるという危惧が示されることがある。

この危惧は日本経済の基幹産業である製造業を保護する視点に立ったものであり、ネット・ゼロへの道筋を模索する上で真摯に向き合うべき課題である。かつて厳しい環境(大気)規制が、日本の自動車製造業の技術水準と国際競争力を高め、その後の日本経済を支えたと指摘する事例もあり、脱炭素にむけた国際的な動きを技術革新や社会/ライフスタイルを含むイノベーションの好機、成長との機会ととらえていくことが重要である。

欧州グリーン・ディール(Box 1)では、鉄鋼、化学、セメント産業を欧州経済に必要不可欠とし、この分野での脱炭素化と近代化を進めるとした。わが国においても、同様の認識の下、表7「エネルギー集約型産業に適応できる低炭素技術の全体像」で示された技術がこれらの産業に積極的に導入されるよう支援措置が講じられることが望ましい。

2050年以降のネット・ゼロへの変革が進展している未来においては、再生可能エネルギー、移動・輸送(ロジスティックスを含む)、建築、これらを統合するデジタル・コミュニケーション・ネットワークなどのネット・ゼロ・インフラが社会の隅々にまで整備されていると考えられる。こうしたネット・ゼロ・インフラの普及に支えられ、EVはもとより、蓄電池や無線給電、ZEHとZEBの関係技術など、脱炭素に資する機械・器具に関連する製造業やサービス業が大幅に業績を伸ばしている可能性がある。鉄鋼業、セメント製造業等、エネルギー集約型産業における気候変動対応(製造技術・コスト)は重要な論点であるが、脱炭素化に向けた世界的な潮流が反転するとは考えにくく、2050年以降の長期的な脱炭素化に向けて技術革新や経営改革を速やかに実施し、企業収益を上げていく体制づくりを進める必要がある。企業自身の変革を後回しにすることで、製造業の気候変動対策リスクや国際競争力上のリスクはむしろ高まる可能性がある。なお、鉄鋼など炭素集約型の産業を、その立地国に関わらず、公平に脱炭素化していく上で、EUが提唱し、また、米国議会や大統領選においても議論が行われている国境調整措置は注目される。脱炭素化に向けて努力している国が自国並みの対策をとっていない国からの輸入品に対して、炭素コスト分を課税あるは排出枠設定を行うことで、自国の産業や雇用を守ると同時に、そうした国に対策強化を促すことを目指す制度である。気候変動対策としての国境調整措置と国際貿易レジームとの整合性は、一般論ではなく、個別の具体的な制度設計や策定プロセスに依存するため<sup>41</sup>、今後の動向が注目される。

<sup>41</sup> 例えば、経済産業省通商政策局「補論 貿易と環境—気候変動対策に係る国境措置の概要とWTO ルール整合性—」『2016年版公正貿易報告書』。

## ■ 論点・課題 その3

### 全国のエネルギー需要と比較した際の再生可能エネルギーの供給可能性

**考え方:**日本の2015年の最終エネルギー消費量はおよそ13.5EJ(3,750TWhに相当)<sup>42</sup>である。一方で、住宅太陽光、非住宅太陽光、陸上風力、洋上風力、地熱、バイオマス、中小水力からなる再生可能エネルギーの導入ポテンシャル(自然要因(標高、傾斜等)、法規制(自然公園、保安林等) 等の開発不可地を除いて算出したエネルギー量)は、4,800TWhである<sup>43</sup>。従って、マクロレベルでのエネルギー収支としてみれば、2015年と同レベルの最終エネルギー消費量をすべて、再生可能エネルギーで満たすことが出来る。

しかし、現実には、コストや現場の立地条件といった制約から導入ポтенシャルとして特定された再生可能エネルギーをすべて導入することは不可能であるし、また、導入できたとしても送配電網の制約や、再生可能エネルギーと間欠性という様々な条件を考慮しなければならず、実際に利用できる量は限られる。JSTの分析[102]によると再生可能エネルギーの発電コストや送配電網の系統安定化制約を考慮しても、新たな揚水力発電や高温岩体地熱発電など技術を組み合わせることで、2,200TWh程度の再生可能エネルギー100%の電力を供給できるとしている。従って、電化促進策を大胆に進め、同時に省エネ技術の導入や省エネ慣行の徹底を通じてエネルギー需要を抑制することで、日本で必要とされるすべてのエネルギーを再生可能エネルギーで賄うことは可能であると考えられる。

さらに、JSTの分析で考慮されていない、太陽光発電の超高効率化(発電高効率40%以上)や、歩道や駐車場の路面といったこれまで考慮されてこなかった新たな技術による発電ポテンシャルも実現可能となった場合、再生可能エネルギーによってすべてのエネルギーを供給していく可能性は高まる。

また、太陽光発電と風力発電が全電源構成の50%を占めた場合、必要となる送電線の増強のために必要なコストは、年間1,400億円程度との試算もある[103]。再生可能エネルギー100%のためには、さらなる投資が必要となるが、国家全体で考えれば十分可能な数字であると考えられる。なお、各再生可能エネルギーの発電コストは、次の課題・論点(図 17 世界の再生可能エネルギー発電コスト(均等化発電原価)の変化(2010-2018年))で示されるように大幅に低下しており、今後もその傾向が続くと予想されている。

<sup>42</sup> 1PJ≈0.28TWh(換算係数)

<sup>43</sup> 「各省のポテンシャル調査の相違点の電源別整理」[44]を基にIGES計算。

## ■ 論点・課題 その4

## 再生可能エネルギーの価格

**考え方:**国際的な再生可能エネルギー発電価格(特に、太陽光、集中型太陽熱、風力)は近年急速に下落しており、すでに化石燃料発電コストと競合するレベルに達している(図 17)。しかし、例外的に日本においては、諸外国よりも再生可能エネルギー発電価格が高いことが問題となっている。太陽光を例に挙げると、太陽電池(モジュール)コストは世界共通して下落余地があるが、日本ではインバーターコストや設置の人工費が高いという特徴がある[104]。この点、例えば壁面や窓にも簡単かつ着実に設置できるようモジュールの軽薄化・透明化等が進めば人工費削減につながる可能性がある。技術革新や量産化により、わが国においても太陽光発電単価を下げる余地はある。

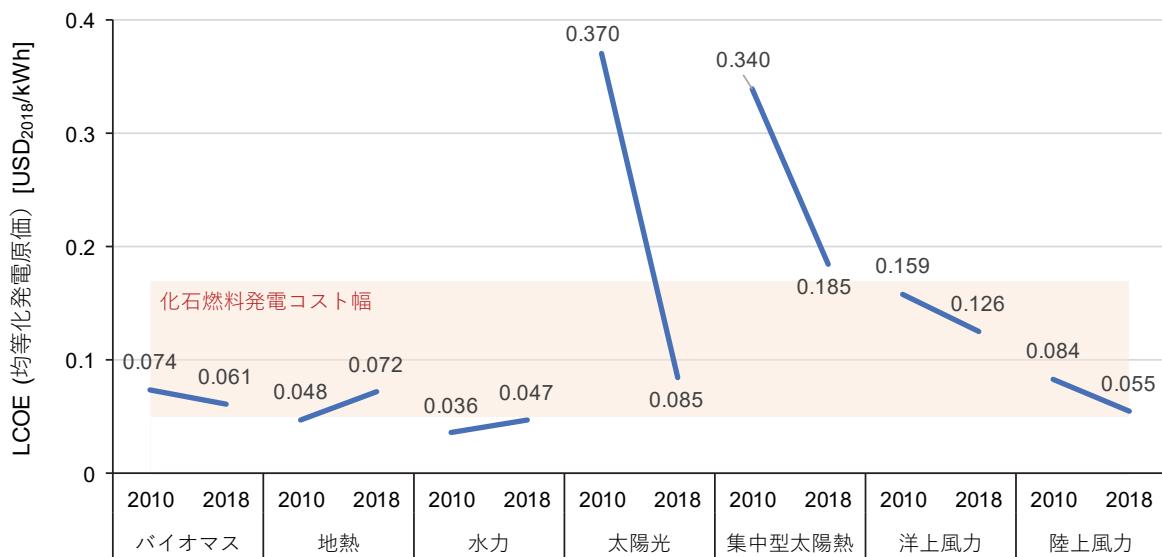


図 17 世界の再生可能エネルギー発電コスト(均等化発電原価)の変化(2010-2018年)

出典:IRENA [104] Figure S.1

注:値はすべて、世界地域別の加重平均値

## ■ 論点・課題 その5

### 再生可能エネルギー利用拡大に向けた技術的制約(系統接続等)

**考え方:** 統には再生可能エネルギーの電力を流すだけの空き容量が無いことが問題として指摘されている。しかし、諸外国で実施されているように系統の運用に際して、短時間刻みで潮流管理を実施することで、現状の系統のままであっても、再生可能エネルギーを系統に流す余地を拡大できる(倍相当まで)可能性が指摘されている[105,106]。実際に、ドイツでは、瞬間に再エネ発電の電力消費に占める割合が100%となる時間帯を何度か記録している[107,108]。蓄電技術の進展も含め、制度面、技術面で、再生可能エネルギーの推進を図る余地は十分にあると考えられる。また近年、電気自動車の蓄電池価格の低下は著しく、2025年以降、蓄電池の大規模普及のための目安となる150ドル/kWhに迫る予測値もある(図 18)。これにより、発電電力量が時間により変動するという再生可能エネルギーの課題への対応が可能となる。

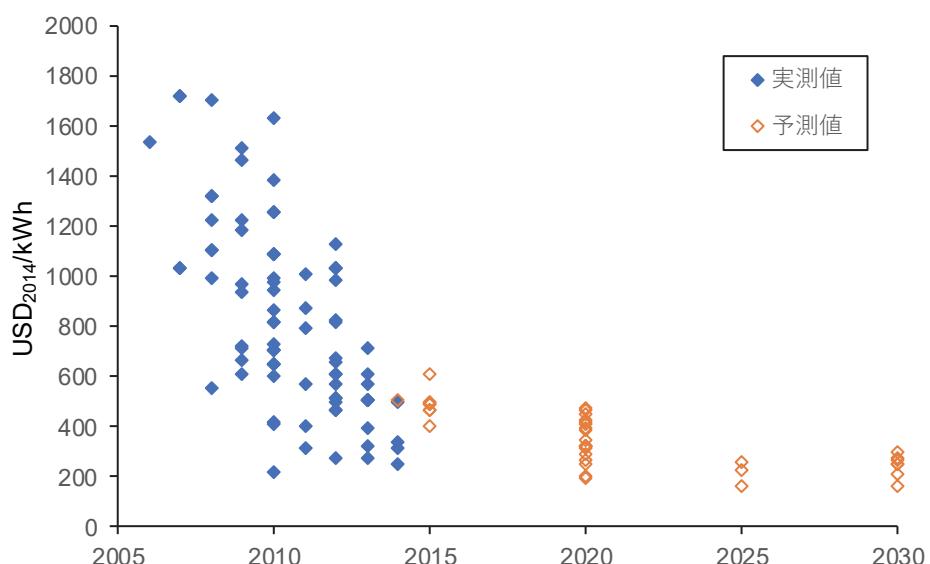


図 18 電気自動車のリチウムイオン電池パックのコスト:実測値(~2014年)と予測値(~2030年)

出典:Nykqvist and Nilsson[109], Figure 1

## ■ 論点・課題 その6

化石燃料関連産業(エネルギー産業、素材産業、石油化学産業など)における雇用問題(公正な移行:Just Transition)

**考え方:**国際的にも極めて重要な論点である。化石燃料関連産業は、日本の戦後の発展を支えてきた基幹産業であり、特に高度経済成長期以降に果たしてきた役割は非常に大きい。他方で、気候変動の主たる原因として脱化石燃料化へと進む国々がみられるようになり、ネット・ゼロへの移行までを見据えた大きなシステム転換が世界的な潮流となりつつある。こうした中、化石燃料関連産業の雇用などに混乱をきたすことなく公正な移行を進めることができることが求められており、2050年に向けた30年間余りの間に、現在の同産業の従事者の新たな雇用確保などを見据えた公正な移行マネジメントを進めることが重要な論点である。例えば、ドイツにおいては、遅くとも2038年までに石炭火力を全廃することを決め、今後20年間で400億ユーロの炭鉱閉鎖、発電所廃止に係る損失補償をすることとしている[110]。またロイヤル・ダッチ・シェル社は、経営方針を大きく変化させ、石油会社から天然ガスと再生可能エネルギーによるエネルギー会社への転換を進めている。

化石燃料関連産業のすべてがネット・ゼロの社会において不要となることは考えにくく、いかにGHG排出低減の機会を拡大していくかが重要となる。鉄鋼セクターでの水素製鉄の採用や化学セクターにおける生物由来の材料への転換、さらには、再生可能エネルギーをはじめネット・ゼロ・インフラ関連の新たなビジネス展開などにより、従事者の雇用を確保できる可能性もある。ネット・ゼロと両立する未来像を前向きに議論することが建設的な方向性である。

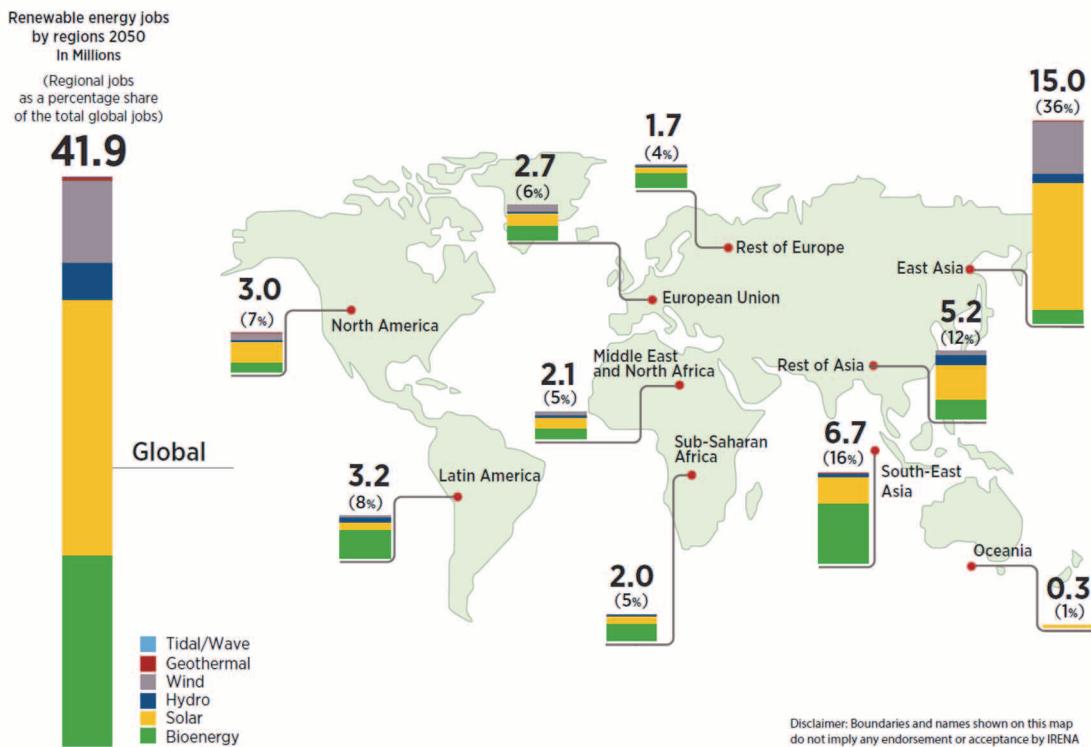


図 19 IRENAエネルギー・トランジションシナリオにおける2050年の再生可能エネルギー関連雇用者数(地域別)

出典:IRENA[111] Figure 12

## ■ 論点・課題 その7

### ネット・ゼロ目標は極端で非現実的であるとする主張

例: ①ネット・ゼロは非常に高くつく。GHGの80%、90%減であっても国民に大きな負担を強いる。そもそもパリ協定の2°Cや1.5°C目標を達成する必要があるか疑問であり、経済合理性に照らして、ネット・ゼロは極端な目標である。②気候変動影響被害だけでなく緩和費用にも大きな不確実性があるため、緩和、適応、気候工学(ジオエンジニアリング)による総合的なリスクマネジメントが大事であり、緩和策に偏重したネット・ゼロ目標は極端である。

### 考え方:

①について: この指摘は、多くの場合、GHG排出削減のコストに比べて気候変動の影響を抑制することによるリターン(便益)が少ない、という1990年代-2015年前後までの統合評価モデルの計算結果等[112,113]を踏まえたものである。しかし、近年、過去の気温上昇が経済成長に及ぼした影響を含めて計算するとリターンは非常に大きくなり、パリ協定の長期目標が決して極端な目標ではないという知見も蓄積されている[114]。排出削減が厳しくなるほど対策コストが高くなると捉えるのではなく、対策が奏功するまでの間の影響被害も考慮することや、コストを投資として捉える必要がある。一般的に、対策に必要な費用に比べて被害額の方が著しく小さいと断じることはできない(例えば、日本における2018年の風水害保険による支払額は1.6兆円に上る[5] )。もとより、人命や生態系に与える影響被害を適切に金銭換算することには限界がある点に留意が必要である。

②について: 既に地球温暖化は進行しており、これを放置すると地球のシステム自身にコントロールできないような影響が生じ、経済・社会に壊滅的なものとなる可能性が高い。したがって、緩和策は必要不可欠であり、温度上昇を2°C以下に抑制しようとするのが現在の国際社会の方向である。しかし、2°Cに抑制するまでにも影響は生じるため、一定程度の適応は不可欠であり、既に対策も講じられつつある。IPCCの1.5°C特別報告書では、2°Cに抑制した場合でも1.5°Cに比べて影響が著しく大きいことが判明した。このため、特に脆弱性の高い自然生態系や人間に対する気候変動リスクを統合的に考慮し、1.5°Cのレベルで緩和/適応策を講じるのが合理的である。ジオエンジニアリング(とりわけ、太陽放射を反射して全球平均気温を低下させる太陽放射管理)は、成層圏に硫酸エアロゾルを注入するなど、その影響が不確定で、取り返しのつかない事態に陥る可能性があるため、現段階では、オプションとして考える段階にはないものと思量する。

## 結論

近年、地球温暖化によって農業・食料安全保障、水資源、サンゴ礁、沿岸域、健康など人々の暮らしに関わる様々な問題に深刻な影響を与えるリスクが高まることが明らかになってきている。そのため、2050年ネット・ゼロ(GHG排出量と吸収量の収支が正味でゼロ)社会の構築が求められている。特に、大量のCO<sub>2</sub>排出源となっている部門での化石燃料の使用を大幅に減らす必要がある。このような部門は、我々の社会経済活動の多くを支えているため、CO<sub>2</sub>削減は容易ではないが、欧州を中心とする中央政府や、様々な国・地方自治体、金融機関等がネット・ゼロ排出に向けたイニシアティブを進めている。

世界では気候変動だけでなく、社会や技術の面でも様々な変化が同時に起きている。AIやICT技術及び電子計算機の処理速度向上などのデジタル化の発展、資源制約や廃棄物処理問題などの解決に資する循環型社会の定着、2°Cまたは1.5°Cの気温上昇に対応するためのレジリエンスの向上、自立・分散型の社会を形成しつつ、近隣地域と地域資源を補完し支え合うことで地域を活性化させる「地域循環共生圏」の形成等の変化である。

第1章では、様々な社会変化によって、エネルギー利用量とマテリアル利用量がどのように変化するのか積み上げ(ボトムアップ)方式によってGHG排出量やエネルギー利用量及びCCS導入量を、安定経済(一人当たりGDPが毎年0.6%成長し、日本全体のGDPは2015年水準を保つ)という条件で推計した。推計の際には、国際的動向や国内の社会問題、技術の進展に応じて、既存の社会制度、経済構造、インフラなど重要な社会的要素を変革していくトランジションシナリオと、社会変革がほとんど起きないロックインシナリオの二つのシナリオを想定した。

トランジションシナリオでは、家庭、業務、運輸、産業のすべて分野で電化が進みサービス当たりのエネルギー利用の効率化が進む。また産業部門においては、一部の高熱需要に対する水素利用や素材としての水素利用が進む。そのため、化石燃料をほとんど使用せず再生可能エネルギーによって支えられる社会が構築される。また、ほぼすべてのエネルギーが再生可能エネルギーによって賄われるが、エネルギー利用の徹底した効率化によって、必要となるエネルギーは国内の再生可能エネルギー・ポテンシャルの範囲内に収まる。その結果、CCSの利用を最低限に抑えることができるため、利用可能性が高い国内CO<sub>2</sub>の貯留層を長い間使うことができる。また、化石燃料の使用がなくなることにより、化石燃料の輸入量を2015年比で17兆円程度[60]減らすことができる。

一方で、ロックインシナリオでは、家庭、業務、運輸、産業のすべて分野において、最低限の省エネが進むが、多くは現状のエネルギー技術の延長が想定される。そのため、化石燃料に暮らしや経済活動が支えられながら、(やや強引に)ネット・ゼロ社会を構築するには、様々な産業部門でCCS技術を導入して化石燃料からのCO<sub>2</sub>を回収・貯留する必要がある。加えて、運輸部門や小規模な工場から排出されるCO<sub>2</sub>を相殺するために、DACS技術で大気中からのCO<sub>2</sub>を回収し、大量のCO<sub>2</sub>を地中に埋める必要がある。特に、ロックインシナリオで安定経済を目指す場合、現時点で分かっている国内CO<sub>2</sub>貯留ポテンシャルのうち、その信頼性が高いポテンシャル量を10年以内で使い尽くしてしまい、およそ60年以内で地震リスクが中程度の国内CO<sub>2</sub>貯留地を使わなければならぬことになる。さらに、化石燃料の輸入量も毎年13兆円を支払い続けることになる。

様々な社会変化を捉えたトランジションシナリオと現状のエネルギー技術の延長を想定したロックインシナリオ

を比較すると、前者は様々な導入技術の不確実性が高いものの、ひとたび達成してしまえば、CO<sub>2</sub>貯留に関するリスク及び化石燃料依存からの脱却という観点からのエネルギー・セキュリティー向上に大きく貢献し、さらに膨大な額の化石燃料の支払い代金を国内に還流させることで成熟した社会が形成されやすい状況になる。反対に、ロックインシナリオでは、導入する技術の確実性、安定性は高いが、国内CO<sub>2</sub>貯留可能量という不確実性の高いリスクと、化石燃料に依存し、貿易収支を悪化させるリスクを常に抱えた社会となることが示唆された。

したがって、ネット・ゼロ社会を目指すうえでは、トランジションシナリオが日本の目指すべき方向であると我々は結論する。そのためには、すべての部門において、様々な対策を導入することが必要である。これは、一つの組織が単独でできるものではなく、日本のすべての関係者が足並みを揃えて進めていくべき、国家的な戦略として位置づけられる必要がある。特に、建物、大規模発電設備、産業部門の設備など、使用年数が長いものについては、現時点で長期的な方向性を定め、それぞれの設備が更新される機会を活用して、今後大きく変わらう社会の変化に対応できるようなものにあらかじめ準備しておく必要がある。

第2章では、様々な変化が大いに進捗しながら到達した脱炭素社会(トランジションシナリオ)において、我々の生活がどのように変化しているのかを描いた。自立・分散型の社会を形成しつつ、近隣地域と地域資源を補完し支え合うことで地域を活性化させる「地域循環共生圏」の形成が進んでいるとの認識の下、都市と地域の構造と暮らし及びこれらを支える産業活動の変化を可能な限り捉えその具体的な姿を記述している。その目的は、今後、脱炭素化した社会をどのように構築していくのかを考えるにあたって、多くの関係者との意見交換や建設的な議論が必要であり、まずは、暮らしのありようなどがどのように変化しうるのかを示すことで、自分事としてとらえ、問題意識を深めていただくことにある。

ここで、トランジションシナリオが行きつく先の世界について頭を巡らしてみよう。

ネット・ゼロの達成は、人々の精神面にも少なからぬ影響を与えるようになった。すなわち21世紀半ばには、気候変動の影響が極端事象の頻発などの形でより強く体感されるようになり、見識ある人々は二酸化炭素の排出やエネルギーの使用に多少とも肩身の狭い思いをしていたのである。このようないわばエネルギー使用の呪縛から一定程度解き放たれたことも相まって、このネット・ゼロの達成は、人々に確かな自信と希望を与えることとなつた。様々な主体が技術的な発明や社会的な改善を含めたイノベーションを進め、いろいろな価値観やニーズに応える製品やサービスのフロンティアが広がつた。このことにより、時間的・空間的な効用も含めて、各人の望むような生き方ができる可能性が飛躍的に高まつた。

これをマクロレベルで見ると、資源に恵まれないとされる日本という極東の島国が、身近で尽きることのない有用な資源に着目し、国を挙げて新たな社会の構築に向かった結果、発展の階段を一段上つたことを意味する。21世紀の半ば、日本は坂の上の雲を見上げつつ、意を決して、大きな段を一つ登り上げたのである。

一般市民の生活レベルでは、環境に対して合理的であることを行動規準としていく考え方が大きく広がつた。利潤の追求が求められる企業レベルの行動においても、ややもすれば短期的局所的な利益でこれに応えることを余儀なくされる株主第一主義から脱却し、地域を大事にし、ひいてはよりよい環境下での人類の持続性の確保までを経営判断に組み込むなど、大局的な環境合理性が部分的な経済合理性を超えるようになった。

ここに、人はもとより、地球のもたらすエネルギーや資源の有限性などに十分配慮する成熟した社会が成立した。

21世紀の初頭、国際社会は、足並みを揃えて速やかに効果的な気候変動対策を講じる、という点で合意に達していない。しかし、ネット・ゼロを達成した世代の人類から見れば、あまり意味のない目先の利益に汲汲とするのではなく、大きな夢の広がるフロンティアになぜもっと早く到達しなかったのか、と歯がゆいような思いをしていることだろう。

巷間議論される2030年目標は、通過点の一つに過ぎない。マラソンは42.195Kmを走るもので、30kmまでの走り方を考えておけばよいというものではない。具体的な政策を考える際には、最終ゴールをよく意識して、より適切で効果的な政策目標を設定していくべきと考える。

生存をかけて社会全体を進化させる、そのための人類社会の決意と行動が求められている。

## 補論1. GHG/CO<sub>2</sub>排出量の推計手法

### 1.1 部門別のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量

本節では、部門別に活動量の変化、エネルギー消費量の変化、エネルギーの脱炭素化技術によるCO<sub>2</sub>排出量の変化の考え方を示す。各要素のパラメータ及び根拠となる参考文献は各項の表内に示す。本文中に示したパラメータの幅はシナリオ(ロックインシナリオとトランジションシナリオ)毎の想定の幅に対応している。

#### 家庭部門

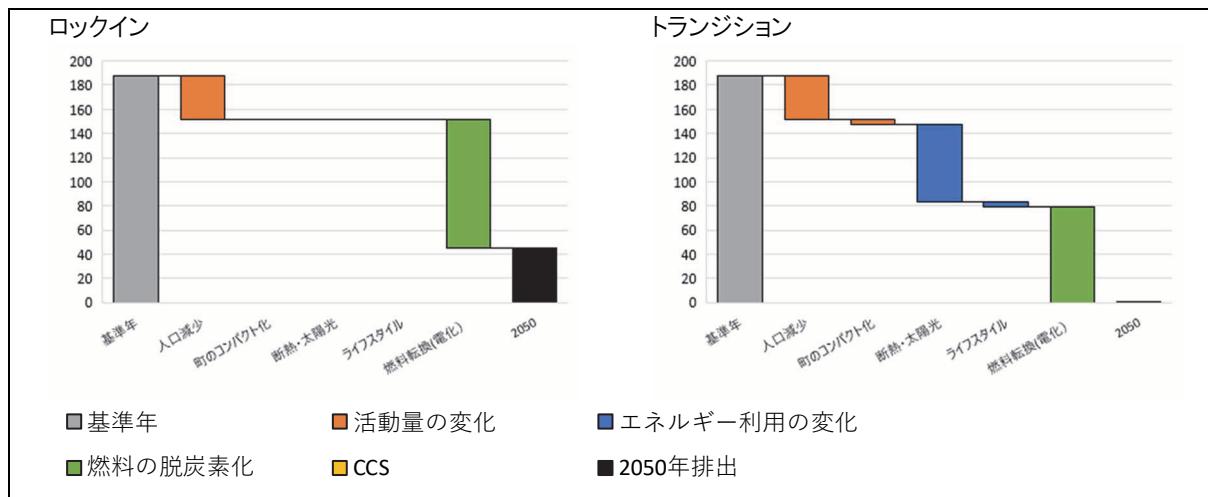
家庭部門におけるCO<sub>2</sub>排出量は式(S.1)によって算定した。

$$\text{CO}_2 = \sum_{i=1}^{1896} \left\{ Pop_i \times \frac{1}{r_{family,i}} \times (r_{i,s} \times \frac{E_{base}}{Family_i} \times r_{s,ZEH} + r_{i,cl} \times \frac{E_{base}}{Family_i} \times r_{cl,ZEH} + r_{i,ch} \times \frac{E_{base}}{Family_i} \times r_{ch,ZEH}) \times r_{life} \times CI \right\} \quad \text{式 (S.1)}$$

ここで、 $Pop_i$ は市区町村*i*における人口、 $r_{family,i}$ は市区町村*i*における世帯数あたりの人数、 $r_{i,s}$ は市区町村*i*(政令指定都市については区ごと)における戸建て住宅の割合、 $r_{i,cl}$ は市区町村*i*における低層集合住宅の割合、 $r_{i,ch}$ は市区町村*i*における高層集合住宅の割合を示す。 $E_{base}$ は基準年最終エネルギー消費量、 $r_{s,ZEH}$ は戸建て住宅の一次エネルギー消費量の変化率、 $r_{cl,ZEH}$ は低層集合住宅の一次エネルギー消費量の変化率、 $r_{ch,ZEH}$ は高層集合住宅の一次エネルギー消費量の変化率を示す。 $r_{life}$ はライフスタイルの変化による省エネルギーの取り組みを示し、CIはエネルギー消費量当たりのCO<sub>2</sub>排出量を示す。

表S. 1 家庭部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター観

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)                                 | ロックイン | トランジション | 主な文献  |
|--|-------|---------|---|
| 人口規模   | 0.80  | 0.80    | 社会人口問題研究所[115]  |
| 1世帯当たり人員の基準年変化率                                      | 1     | 0.9     | 独自想定  |
| 地方部における長屋一戸建て割合<br>(2015年比)                          | 1     | 0.5     | 住宅建物ストックの計算とリンク。<br>文献は、建築着工統計調査[116,117]、名古屋大学[118]、田中ら[119]など |
| 都市部における長屋一戸建て割合<br>の変化率(2015年比)                      | 1     | 0.7     |   |
| 住宅の一次エネルギー消費量の<br>2015年比(省エネ、断熱、太陽光)<br>(共同住宅1.2階)   | 0.9   | 0.4     | 専門家のヒアリング、エネ府等[120]、鳴海[121]、積水ハウス[122]、大京グループ[123]              |
| 住宅の一次エネルギー消費量の<br>2015年比(省エネ、断熱、太陽光)<br>(共同住宅3,4,5階) | 0.9   | 0.6     |   |
| 住宅の一次エネルギー消費量の<br>2015年比(省エネ、断熱、太陽光)<br>(共同住宅6階以上)   | 1     | 0.9     |   |
| ライフスタイル(居住面積、給湯、<br>調理方法、分量)                         | 1     | 0.95    | IGES[124]、環境省[125]など  |
| 電化促進レベル  | 0     | 1       | 独自想定  |



### 業務部門

業務部門の建物の需要量推定は、大西他(2010)の方法論に従う。すなわち、業務建物は人口、GDP、産業比率、一人当たり延床面積によって決められる。ただし、業務建物内の種類の変化は生じると想定を置く。

業務部門におけるCO<sub>2</sub>排出量は式(S.2)によって算定した。

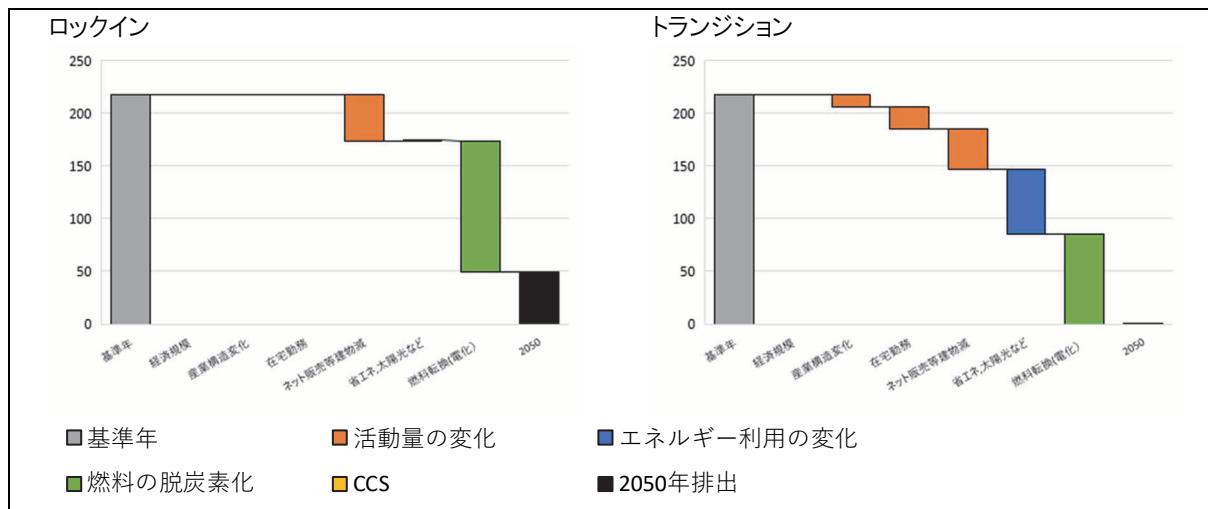
$$CO_2 = GDP \times \sum_{j=1}^{16} \left( \frac{GDP_j}{GDP} \times \frac{E_{j,base}}{GDP_{j,base}} \times r_{j,work} \times r_{j,EC} \right) \times r_{ZEB} \times CI \quad \text{式 (S.2)}$$

ここで、GDPは国レベルのGDP、GDP<sub>j</sub>は経済部門jにおける付加価値額、E<sub>j,base</sub>は基準年最終エネルギー消費量、r<sub>j,work</sub>は、経済部門jにおける在宅勤務による採取エネルギー消費量の変化率、r<sub>j,EC</sub>は経済部門jにおけるインターネット販売の進化による最終エネルギー消費量の変化率、r<sub>ZEB</sub>は、ZEBなどの効果による一次エネルギー消費の変化率、CIはエネルギー消費量当たりのCO<sub>2</sub>排出量を示す。

表S.2 業務部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)   | ロックイン | トランジション   | 主な文献  |
|------------------------|-------|-----------|---|
| 産業活動の規模                | 1     | 1         | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)                                       |
| 産業構造変化                 | 1     | 0.72-1.05 | 産業構造の変化とリンク。<br>田中他[119]の分類、大西[126]の方法論、建築着工統計調査[116,117] |
| 在宅勤務                   | 1     | 0.8-0.9   | 独自想定  |
| ネット販売等                 | 1     | 0.5-1.0   | 独自想定。部門別に係数の差異化を行っている。                                    |
| 業務建物の一次エネルギー消費量の2015年比 | 0.9   | 0.6       | 専門家のヒアリング、エネ府など[127]、大和ハウスグループ[128]                       |
| 電化促進レベル                | 0     | 1         | 独自想定  |

注:表内の数値の幅は、部門別の係数の幅を示す。



## 運輸部門

### ■ 陸上旅客

陸上旅客の輸送量は、市区町村別に旅客の需要量を以下の情報を基に算定した。外出率、トリップ長、交通モードは「全国都市交通特性調査」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。

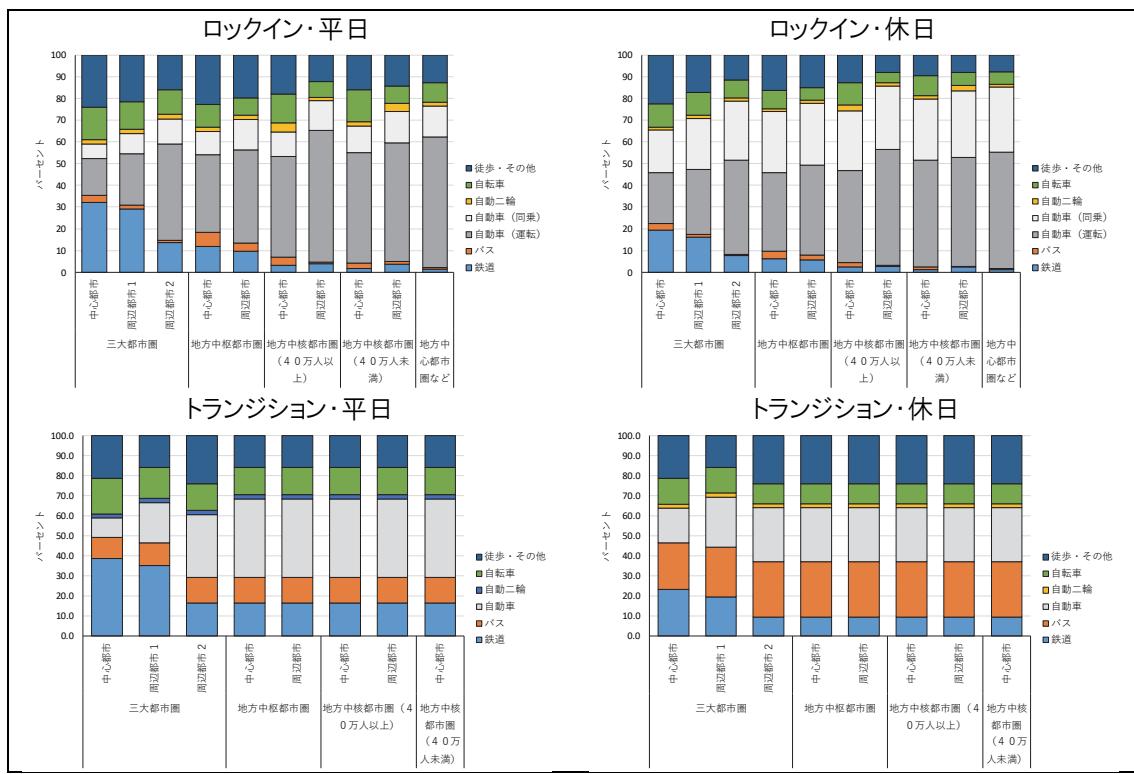
陸上旅客輸送部門におけるCO<sub>2</sub>排出量は式(S.3)によって算定した。

$$CO_2 = \sum_{i=1}^{1896} \left\{ Pop_i \times \frac{E_{base}}{Pop_{base,i}} \times \left( \frac{D_w}{365} \times \sum_{k=1}^7 (r_{k,w,mode} \times r_{k,ele} \times r_{k,body}) + \frac{D_h}{365} \times \sum_{k=1}^7 (r_{k,h,mode} \times r_{k,ele} \times r_{k,body}) \right) \times CI \right\} \text{ 式 (S.3)}$$

ここで、 $Pop_i$ は市区町村*i*における人口、 $Pop_{base,i}$ は基準年の市区町村*i*における人口、 $E_{base}$ は基準年最終エネルギー消費量、 $D_w$ は平日(勤務日)の日数、 $D_h$ は休日の日数を示す。 $r_{k,w,mode}$ は平日における移動モード*k*の割合、 $r_{k,h,mode}$ は休日における移動モード*k*の割合、 $r_{k,ele}$ は移動モード*k*の電動化によるエネルギー消費量の変化率、 $r_{k,body}$ は移動モード*k*の車体の軽量化によるエネルギー消費量の変化率、 $CI$ はエネルギー消費量当たりのCO<sub>2</sub>排出量を示す。

表S.3 陸上旅客部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)             | ロックイン | トランジション | 主な文献   |
|----------------------------------|-------|---------|--|
| 人口規模                             | 0.80  | 0.80    | 社会人口問題研究所[115]                                   |
| 平日_外出率(2015年比)                   | 1.00  | 0.80    | 全国都市交通特性調査[129]を基に想定                             |
| 平日_トリップ長_(km/トリップ)(2015年比)       | 1.00  | 0.90    |  |
| 平日_トリップ数_グロス(2015年比)             | 1.00  | 1.05    |  |
| 休日_外出率(2015年比)                   | 1.00  | 0.80    |  |
| 休日_トリップ長_(km/トリップ)(2015年比)       | 1.00  | 1.10    |  |
| 休日_トリップ数_グロス(2015年比)             | 1.00  | 0.80    |  |
| 移動モードパターン                        |       |         | 図S.3   |
| 休日数(2015年比ではない)                  | 120   | 141     | 小宮山、山田[130]                                      |
| 車両の電動化に伴うエネルギー消費量(単位走行距離当たり)の変化率 | 1.00  | 0.44    | 自動車燃費一覧[131]を基に、ハイブリッドからEVに代替した場合のエネルギー効率を試算。    |
| 車両の電動化率                          | 0.20  | 1.00    |  |
| 車両軽量化効果                          | 0.90  | 0.80    | 日本自動車工業会資料[132], 日経ビジネス[133], 三井物産戦略研究所[134]基に想定 |



図S.3 移動モードパターン

## ■ 陸上貨物

陸上貨物輸送部門におけるCO<sub>2</sub>排出量は式(S.4)によって算定した。

$$CO2 = GDP \times \frac{Sev_{base}}{GDP_{base}} \times \sum_{k=1}^{14} \left( \frac{Sev_{base,k}}{Sev_{base}} \times r_{d,k} \times r_{EC,k} \times r_{3D,k} \right) \times \frac{E_{base}}{Sev_{base}} \times \sum_{k=1}^{14} \left( \frac{E_{base,k}}{E_{base}} \times r_{ele,k} \right) \times CI \quad \text{式(S.4)}$$

ここで、GDPは国レベルのGDP、GDP<sub>base</sub>は基準年のGDP、sev<sub>base</sub>は基準年の貨物輸送需要量、sev<sub>base,k</sub>は基準年の貨物輸送部門kにおける基準年の貨物輸送需要量、r<sub>d,k</sub>は部門kの製品需要の変化率、r<sub>EC,k</sub>は部門kのインターネット販売の進化による製品需要の変化率、r<sub>3D,k</sub>は部門kの3Dプリンタの導入による貨物輸送需要量の変化率を示す。E<sub>base</sub>は、基準年のエネルギー消費量、E<sub>base,k</sub>は基準年の部門kのエネルギー消費量、r<sub>ele,k</sub>は部門kの車両の電動化によるエネルギー消費量の変化率を示す。CIはエネルギー消費量当たりのCO<sub>2</sub>排出量を示す。

**表S.4 陸上貨物部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧**

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)  | ロックイン | トランジション | 主な文献                              |
|-----------------------|-------|---------|-----------------------------------|
| 経済活動の規模               | 1     | 1       | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)               |
| 製品需要の変化               | -     | -       | 産業部門の活動量とリンク<br>自動車輸送統計調査[135]を参照 |
| 電子商取引で取り扱われる日用品の割合の増加 | 1     | 1.05    | ITF[12]を基に設定                      |
| 3Dプリンタによる流通の変化        | 1     | 0.90    | ITF[12]、シュワブ[136]基に設定             |
| 車両の電動化によるエネルギー消費量の減少  | 1     | 0.50    | ITF[12], EC[137] 基に設定             |
| 車両のFCV化によるエネルギー消費量の減少 | 1     | 0.70    | ITF[12], EC[137] 基に設定             |
| 車両の電動化率               | 0     | 0.80    | ITF[12], EC[137], ETC[18]を基に設定    |

## ■ 船舶(旅客・貨物)及び航空(旅客・貨物)

船舶旅客及び航空旅客輸送部門におけるCO<sub>2</sub>排出量は式(S.5)によって算定した。

$$CO2 = Pop \times \frac{Sev_{base}}{Pop_{base}} \times r_d \times \frac{E_{base}}{Sev_{base}} \times r_{ef} \times r_{el} \times CI \quad \text{式(S.5)}$$

ここで、Popは人口、Pop<sub>base</sub>は基準年の人口、Sev<sub>base</sub>は、船舶旅客または航空旅客輸送部門における基準年の移動需要、r<sub>d</sub>は移動需要の変化率を表す。E<sub>base</sub>は船舶旅客または航空旅客輸送部門における基準のエネルギー消費量、r<sub>ef</sub>は省エネ技術によるエネルギー効率改善率、r<sub>el</sub>は電動化によるエネルギー消費量削減率、CIはCO<sub>2</sub>排出原単位を表す。

表S. 5 船舶旅客・航空旅客部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター観

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)             | ロックイン | トランジション | 主な文献                            |
|----------------------------------|-------|---------|---------------------------------|
| <b>船舶旅客</b>                      |       |         |                                 |
| 人口規模                             | 0.8   | 0.8     | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)             |
| 移動需要の減少                          | 1     | 1       | 全国都市交通特性調査[129]を基に想定            |
| 船体の軽量化などによるエネルギー効率改善             | 1     | 0.9     | ETC[15]を基に想定                    |
| 電気・水素・アンモニアエネルギーの採用率(2015年比ではない) | 0.1   | 0.7     | 独自想定。電動化では、40%の燃費改善(ETC[15])    |
| 残存する重油のガス転換率                     | 0     | 1       | 独自想定                            |
| <b>航空旅客</b>                      |       |         |                                 |
| 人口規模                             | 0.80  | 0.8     | 社会保障・人口問題研究所[115]               |
| 移動需要の減少                          | 1     | 0.7     | ETC [17]                        |
| 軽量化,エネ効率                         | 1     | 0.8     | ETC [17]                        |
| 電気・バイオエネルギーの採用率                  | 0     | 0.4     | ETC [17] 電動化では、40%程度の[138]の燃費改善 |

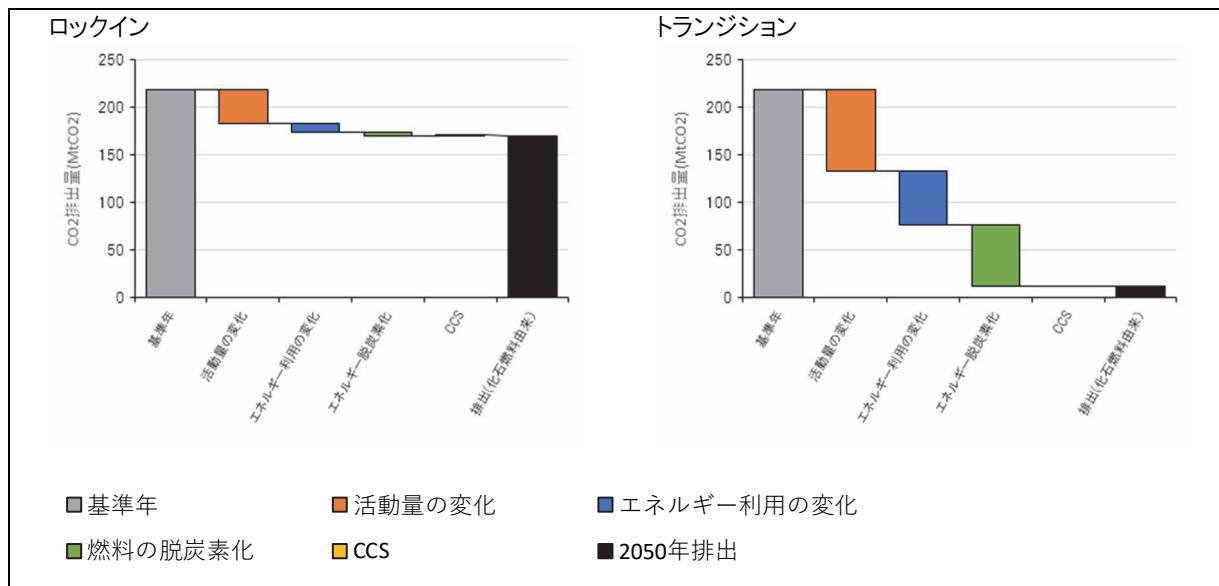
船舶貨物及び航空貨物輸送部門におけるCO<sub>2</sub>排出量は式(S.6)によって算定した。

$$CO_2 = GDP \times \frac{Sev_{base}}{GDP_{base}} \times r_d \times \frac{E_{base}}{Sev_{base}} \times r_{ef} \times r_{ma} \times r_{el} \times CI \quad \text{式(S.6)}$$

ここで、GDPは人口、GDP<sub>base</sub>は基準年のGDP、Sev<sub>base</sub>は、船舶貨物または航空貨物輸送部門における基準年の移動需要、r<sub>d</sub>は移動需要の変化率を表す。E<sub>base</sub>は船舶貨物または航空貨物輸送部門における基準のエネルギー消費量、r<sub>ef</sub>は省エネ技術によるエネルギー効率改善率、r<sub>ma</sub>は船舶の運航のオペレーションの改善によるエネルギー消費量削減率、r<sub>el</sub>は電動化によるエネルギー消費量削減率、CIはCO<sub>2</sub>排出原単位を表す。

表S. 6 船舶貨物・航空貨物部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター観

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)             | ロックイン | トランジション | 主な文献                            |
|----------------------------------|-------|---------|---------------------------------|
| <b>船舶貨物</b>                      |       |         |                                 |
| 経済規模                             | 1     | 1       | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)             |
| 移動需要の減少(3Dプリンタなど)                | 1     | 0.9     | 内航船舶輸送統計調査[139]及びITF [12]を基に想定  |
| 船体の軽量化によるエネルギー効率改善               | 1     | 0.9     | ETC[15]                         |
| 船舶ルートの効率化                        | 1     | 0.9     | ETC[15]                         |
| 電気・水素・アンモニアエネルギーの採用率(2015年比ではない) | 0.1   | 0.7     | 独自想定。電動化では、40%の燃費改善(ETC[15])    |
| 残存する重油のガス転換率                     | 0     | 1       | 独自想定                            |
| <b>航空貨物</b>                      |       |         |                                 |
| 経済活動の規模                          | 1     | 1       | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)             |
| 移動需要の減少                          | 0.8   | 0.72    | 航空輸送統計調査[140]及びETC [17]を基に想定    |
| 軽量化,エネ効率                         | 1     | 0.9     | ETC [17]                        |
| 電気・バイオエネルギーの採用率                  | 0     | 0.4     | ETC [17]<br>電動化では、40%の燃費改善[138] |



### 産業部門

各産業部門におけるCO<sub>2</sub>排出量は式(S.7)によって算定した。

$$CO2_p = GDP \times \frac{Prd_{p,base}}{GDP_{base}} \times \sum_{l=1}^L \left( \frac{Prd_{p,base,l}}{Prd_{p,base}} \times \prod_m^M r_{p,l,m} \right) \times \frac{E_{p,base}}{Prd_{p,base}} \times \sum_{l=1}^L \left( \frac{E_{p,base,l}}{E_{p,base}} \times \prod_n^N r_{p,l,n} \right) \times \sum_{o=1}^O (CI_{p,o} \times r_{p,o}) \quad \text{式(S.7)}$$

なお、 $r_1+r_2+\dots+r_O=1$ である。ここで、GDPは国レベルのGDP、GDP<sub>base</sub>は基準年のGDP、Prd<sub>p,base</sub>は基準年の産業部門 $p$ における生産量、Prd<sub>p,base,l</sub>は基準年の産業部門 $p$ における製品カテゴリ $l$ における基準年の生産量、 $r_{p,l,m}$ は産業部門 $p$ における製品カテゴリ $l$ における生産量の変化率を示す。 $E_{p,base}$ は産業部門 $p$ における基準年エネルギー消費量、 $E_{p,base,l}$ は産業部門 $p$ 、製品カテゴリ $l$ における基準年エネルギー消費量、 $r_{p,l,n}$ は、産業部門 $p$ 、製品カテゴリ $l$ におけるエネルギー消費量の変化率を示す。 $CI_{p,o}$ は、産業部門 $p$ 、燃料種 $o$ のCO<sub>2</sub>排出原単位、 $r_{p,o}$ は産業部門 $p$ 、燃料種 $o$ の割合を示す。以下に、各産業部門の想定の記述の実際の推計に用いたパラメータを示す。

## ■ 鉄鋼

表S. 7 鉄鋼部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)           | ロックイン | トランジション | 主な文献   |
|--------------------------------|-------|---------|--|
| 経済活動の規模                        | 1     | 1       | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)  |
| 乗用車販売の減少                       | 1     | 0.5     | ETC [19], 日経センター[38]、日本鉄鋼連盟資料[141]   |
| EV化によるエンジン部品の減少する車の割合          | 0.1   | 0.9     | 運輸部門のEV比率と連動<br>日本自動車工業会資料[132]、日本鉄鋼連盟資料[141]                                |
| 都市機能の集約化による建物(住宅)への需要量(2015年比) | 0.43  | 1.3     | 住宅部門のストック量と連動  |
| 都市機能の集約化による建物(非住宅)の需要量(2015年比) | 0.1   | 0       | 業務部門のストック量と連動  |
| 車体に新素材を採用した車の割合                | 0.1   | 0.9     | ETC [19], 日経ビジネス[133], 京都大学[142]   |
| 電炉による国内用鋼材の製造割合                | 0     | 0.9     | Fraunhofer[13], ETC [19], EC[143]  |
| 直接還元製鉄プラント(電気、水素)による輸出用鋼材の製造割合 | 0     | 0.9     | Material economics[14]、小宮山&山田 [130], Allanore, et.al [79], OECD[80]          |
| CCS回収率<br>(高炉のCCS設置率はともに1)     | 0.95  | 0.95    | JST[144], RITE[145], International CCS Knowledge Centre[146], Fraunhofer[13] |

## ■ 窯業土石(セメント)

表S. 8 セメント部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)     | ロックイン | トランジション | 主な文献   |
|--------------------------|-------|---------|--|
| 経済活動の規模                  | 1     | 1       | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)  |
| 都市機能の集約化(住宅建物)           | 0.43  | 1.04    | 家庭部門の想定からストック量の計算及び平成27年産業連関表(物量表)[147]                                      |
| 都市機能の集約化(住宅建物<br>木造)     | 0.49  | 1.19    |  |
| 都市機能の集約化(住宅建物<br>非木造)    | 0.34  | 0.84    |  |
| 都市機能の集約化(業務建物)           | 0.09  | 0.00    | 業務部門の想定からストック量の推計を介して推計  |
| 道路セメント増加                 | 0.80  | 1.46    | 都市機能の集約化の想定からストック量を介して推計   |
| 代替素材によるクリンカ使用量           | 1.00  | 0.70    | 土木学会[148]を基に想定   |
| 高層建築を含む建物の木造化によるクリンカ使用量  | 1.00  | 0.40    | Hurmekoski[149], 住友林業[150], 大林組[151]   |
| エネルギーの脱炭素化(バイオ<br>マス、電気) | 0.10  | 0.80    | Fraunhofer[13]など   |
| CCS回収率<br>(CCS設置率はともに1)  | 0.95  | 0.95    | JST[144], RITE[145], International CCS Knowledge Centre[146], Fraunhofer[13] |

■ 窯業土石(ガラス製品など)

表S. 9 ガラス部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)    | ロックイン | トランジション | 主な文献   |
|-------------------------|-------|---------|--|
| 経済活動の規模                 | 1     | 1       | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)  |
| リサイクル率の向上_板ガラス          | 1.00  | 0.95    |  |
| リサイクル率の向上_ガラス製品         | 1.00  | 0.60    | 経済産業省生産動態統計年報 資源・窯業・建材統計編[152]及びFraunhofer[13], P63                          |
| リサイクル率の向上_その他           | 1.00  | 0.90    |  |
| 設備省エネ                   | 0.90  | 0.70    | Fraunhofer[13]P63, EC[143]   |
| 燃料の電化                   | 0.10  | 0.80    | Fraunhofer[13]   |
| CCS回収率<br>(CCS設置率はともに1) | 0.95  | 0.95    | JST[144], RITE[145], International CCS Knowledge Centre[146], Fraunhofer[13] |

■ 石油化学製品

プラスチックに含まれるCO<sub>2</sub>は、焼却などを経て最終的に大気中に放出されると想定を置いているため、プラスチックに含まれるCO<sub>2</sub>は排出量として本部門で計上している。

表S. 10 石油化学製品部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)     | ロックイン | トランジション | 主な文献  |
|--------------------------|-------|---------|---|
| 経済活動の規模                  | 1     | 1       | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)   |
| 運輸、家庭、業務部門における化<br>石燃料需要 | 0.8   | 0.50    | 運輸、家庭、業務部門の状況とリンク   |
| プラスチックの利用の節約             | 1.00  | 0.85    | プラスチック循環利用協会[153],<br>EC[143], Material economics[14], ETC [154]  |
| 車体に新素材を採用した車の割<br>合      | 0.10  | 0.90    | CFRPやCNFRPなどの新素材の需要量は<br>鉄鋼部門とリンク、エネルギー消費量の増<br>加量 Nagaki, et al[155], 船崎 & 種田<br>[156]を基に、鉄鋼製品1単位代替するの<br>に、2.97倍のエネルギー消費量が増えると<br>想定。 |
| リサイクル技術によるバージンナフ<br>サの減少 | 1.00  | 0.60    | Fraunhofer[13], EC[143], Material<br>economics[14], ETC [154]、内閣府<br>[157]  |
| 水素からの基礎化学品製造割合           | 0.00  | 0.80    |   |
| 原料の天然ガス代替                | 0.10  | 0.80    |   |
| 燃料の電化                    | 0.10  | 0.80    |   |
| CCS回収率<br>(CCS設置率はともに1)  | 0.95  | 0.95    | JST[144], RITE[145], International CCS<br>Knowledge Centre[146]   |

■ アンモニア

表S. 11 アンモニア製造部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)            | ロックイン | トランジション | 主な文献  |
|---------------------------------|-------|---------|---|
| 経済活動の規模                         | 1.00  | 1.00    | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)   |
| 食品ロスの削減                         | 1.00  | 0.90    | Fraunhofer[13]<br>Material economics[14]<br>窪田[89]              |
| AIの発達による人工肥料使用量や<br>家畜糞尿の肥料使用量等 | 1.00  | 0.85    | Fraunhofer[13]<br>Material economics[14]<br>窪田[89]              |
| 移動用燃料としての利用による変<br>化率           | 1.00  | 2.5     | 運輸部門とリンク  |
| 原料の再エネ由来の水素利用割<br>合             | 0.00  | 0.90    | Fraunhofer[13], Material<br>economics[14]、内閣府[157]              |
| 燃料の電化割合                         | 0.10  | 0.80    | Fraunhofer[13]<br>Material economics[14]                        |
| CCS回収率<br>(CCS設置率はともに1)         | 0.95  | 0.95    | JST[144], RITE[145], International<br>CCS Knowledge Centre[146] |

■ ソーダ製品及びその他

表S. 12 ソーダ製品その他の製品製造部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)    | ロックイン | トランジション | 主な文献                   |
|-------------------------|-------|---------|------------------------|
| 経済活動の規模                 | 1.00  | 1.00    | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)    |
| 製品利用の効率化によ<br>る需要減少     | 1.00  | 0.85    | 独自想定                   |
| 製造時の燃料の電化割<br>合         | 0.10  | 0.80    | 独自想定                   |
| CCS回収率<br>(CCS設置率はともに1) | 0.95  | 0.95    | 独自想定(ネット・ゼロ達成のための必須条件) |

■ 石油石炭製品

表S. 13 石油石炭製品製造部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)     | ロックイン | トランジション | 主な文献  |
|--------------------------|-------|---------|---|
| 経済活動の規模                  | 1.00  | 1.00    | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)   |
| 運輸、家庭、業務部門<br>における化石燃料需要 | 0.80  | 0.50    | 運輸のうち旅客、家庭、業務部門の状況とリンク  |
| 製造時の燃料の電化割<br>合          | 0.10  | 0.80    | 独自想定  |
| CCS回収率<br>(CCS設置率はともに1)  | 0.95  | 0.95    | JST[144], RITE[145], International CCS<br>Knowledge Centre[146] |

■ 紙パルプ

表S. 14 紙パルプ部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

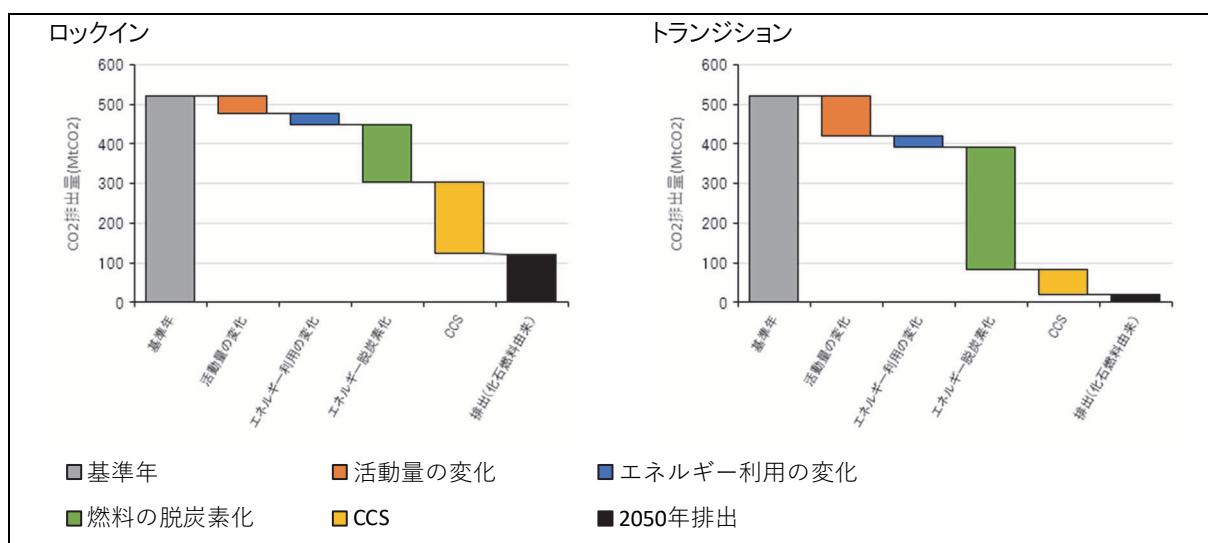
| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)    | ロックイン | トランジション | 主な文献   |
|-------------------------|-------|---------|--|
| 経済活動の規模                 | 1.00  | 1.00    | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)  |
| デジタル化:新聞雑誌の変化           | 1.00  | 0.50    | 日本製紙連合会[158]、日経センター[38]                                    |
| デジタル化:段ボールの変化           | 1.00  | 1.10    |  |
| プラスチック問題によるプラスチックの代替    | 1.00  | 3.00    | CNF研究会[159]、日本製紙グループ[160]                                  |
| 製造時の燃料の電化割合             | 0.10  | 0.80    | Metsä Group資料[161]など                                       |
| CCS回収率<br>(CCS設置率はともに1) | 0.95  | 0.95    | JST[144]、RITE[145]、International CCS Knowledge Centre[146] |

■ その他製造業

表S. 15 その他製造業部門のシナリオ別CO<sub>2</sub>排出量算定パラメーター一覧

| 要素変化の大きさ<br>(2015年比)  | ロックイン | トランジション | 主な文献                    |
|-----------------------|-------|---------|-------------------------|
| 経済活動の規模               | 1.00  | 1.00    | 一人当たりGDP成長率想定(序章参照)     |
| 省エネルギーの促進(電化による効果も含む) | 0.80  | 0.70    | エイモリー[162]、西岡[163]を基に想定 |
| 製造時の燃料の電化割合           | 0.30  | 0.85    | 独自想定                    |

産業部門のシナリオ別のGHG排出量の変化を図S. 5に示す。なお、プラスチックの燃焼によるCO<sub>2</sub>排出量は推計手法の都合上、石油化学部門に計上している。



図S. 5 産業部門におけるCO<sub>2</sub>削減量(単位: MtCO<sub>2</sub>)

## 電源構成

ロックインシナリオの電源構成として、2015年から日本の国別目標(約束草案)[40]に記載される2030年目標の電源構成の変化を単純に延長して、非化石電源の割合を7割、CCS付高効率ガス火力の割合を1.5割、CCS付高効率石炭火力の割合を1.5割と設定した。トランジションシナリオでは、再生可能エネルギーの技術発展の予測[41]を見込んで、すべて非化石電源とした。

なお、2050年の電源構成については、様々な予測がある。原子力発電、CCS付ガス火力といった大規模集中電源の大幅な利用を想定する研究[164]のみならず、再生可能エネルギーの発電コストの低下に伴い、強力な環境政策が無くとも電源構成のうち8割は再生可能エネルギーが占めるという推計[41]もある。電源構成は再生可能エネルギーポテンシャル、電力システムの制約、各電源の発電コスト及び外部コストといった制約条件の中で最適化が図られるものと考えられる。エネルギーモデルを用いたコスト最適化を行わない本報告書では、詳細な分析を行わない。また、エネルギーの備蓄についても、化石燃料依存から脱却した社会では、エネルギー輸入依存度は大幅に低下しており、従来とは異なる視点で検討する必要があり、本報告書では扱わない。

## CCS及びDACSの想定について

本報告書では、すべてのシナリオにおいて、ネット・ゼロ社会を達成することを想定している。そのため、それぞれのシナリオにおいて想定されるエネルギー需要の削減及びエネルギーの脱炭素化技術によってCO<sub>2</sub>排出量が削減されても、なお排出されるCO<sub>2</sub>排出量に対しては、CCSの利用が可能な部門では最大限の導入を想定した。CCSのCO<sub>2</sub>回収率<sup>44</sup>は95%とした。CCSにおけるCO<sub>2</sub>分離エネルギーについては、JSTによる報告書[144]を参照し、DACSに必要なエネルギーについては、Fasihi, et. al[165]を参照した。

<sup>44</sup> 排出されるCO<sub>2</sub>のすべてを回収することはできず、一部は大気中放出される。回収率は、回収手法、排出ガスに含まれるCO<sub>2</sub>濃度や排出ガスの圧力といった要因に影響される。

## 1.2 ストック量の推計

### 建物のストック量

2050年の住宅部門及び業務部門の建物のストックの推計は、建築着工統計調査[116,117]のデータに対して、「平成29年度 環境経済の政策研究(我が国に蓄積されている資源のストックに関する調査・検討)研究報告書」[118]で示される成長率曲線(ロジスティック曲線)によって回帰し、「我が国の住生活をめぐる状況」[166]で現状との調整を行った。業務部門の建物の推計にあたり、産業分類は、田中ら[119]に基づいた。従って、住宅部門と業務部門の2050年の床面積のストック量は式(S.8)で推計した。

$$F_{s,i,2050} = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1998}^{2018} f_{i,j,t} \times \frac{1}{1+a_i \times \exp(-b_i \times (2050-t))} \quad \text{式 (S.8)}$$

ここで、 $F_{s,i,2050}$ は、建物種別*i*(住宅建物は戸建木造、戸建鉄筋コンクリート造、戸建鉄骨造、集合木造、集合鉄筋コンクリート造、集合鉄骨造。業務建物は、木造、鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、その他)の2050年のストック量(床面積)を示す。 $f_{i,j,t}$ は建物種別*i*、区分*j*(住宅建物は都道府県の47グループ、業務建物は、サービス、居住産業、公益事業、公務文教、鉱工業、商業、農林水産、その他の8グループ)、年*t*の建築された床面積の合計を示す。 $a_i$ 及び $b_i$ は、建物種別*i*の残存率の特性であり、1988年から2018年までのデータを基に、非線形最小二乗法によって推計した。

2050年の住宅床面積の必要量は、「各部門のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の推計」で設定したパラメータを基に推計した。住宅部門については、式(S.9)を用いて推計した。

$$F_{n,i,2050} = \sum_{j=1}^{1896} Family_{j,2050} \times r_{i,j,2050} \times R_{floor,j} \quad \text{式 (S.9)}$$

ここで、 $F_{n,i,2050}$ は、2050年の建物種別*i*のストック必要量を示す。 $Family_{j,2050}$ は市区町村*j*の2050年の世帯数、 $r_{i,j,2050}$ は市区町村*i*における建物種別*i*に住む世帯数の割合、 $R_{floor,j}$ は市区町村*i*の一人当たりの居住面積を示す。

業務部門については、式(S.10)を用いて推計した。

$$F_{n,i,2050} = \sum_{j=1}^7 F_{i,j,2015} \times \frac{Activity_{j,2050}}{Activity_{j,2015}} \times r_{j,work} \times r_{j,EC} \quad \text{式 (S.10)}$$

ここで、 $F_{n,i,2050}$ は、2050年の建物種別*i*のストック必要量を示す。 $F_{i,j,2015}$ は、2015年時点の建物種別*i*、産業部門*j*の必要ストック量を示す。 $Activity_{j,2015}$ 及び $Activity_{j,2050}$ は、2015年、2050年の産業部門*j*における活動量を示す。 $Activity_{j,2050}$ は、「各部門のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の推計」で設定したGDP想定及び各産業部門

の製品需要の変化から得られる活動量から得られる。 $r_{j,work}$ は、産業部門 $j$ における在宅勤務によるオフィス、販売店需要量の変化率、 $r_{j,EC}$ は、産業部門 $j$ におけるインターネット販売の進化によるオフィス、販売店需要量の変化率を示す。

以上より、2050年における建物の最低限の建築需要( $D_{min,2050}$ )は、式(S.9)算定する。すなわち、2050年のストック必要量から2050年のストック残存量を差し引いたものが、最低限必要な新規需要であり、それを2020年から30年かけて整備することから、30年平均の建築需要を推計している。なお、本報告書のトランジションシナリオでは、ZEBやZEHの導入率が高まる想定していることから、トランジションシナリオでは、建物の建築需要は、築需要の最低限のレベルよりも多い。

$$D_{min,2050} = \frac{\sum_i^I F_{n,i,2050} - \sum_i^I F_{s,i,2050}}{30} \quad \text{式 (S.11)}$$

#### 道路のストック量

本報告書のトランジションシナリオでは、2050年の道路のストック量は、高速道路、一般国道、一般都道府県道、主要地方道、市町村道のうち、地方の人口減少によって市町村道の一部が、道路財源の制約及び都市機能の集約化の影響によって整備されなくなると想定した。市町村道の2050年の舗装道路の実延長数(km)は以下の式(S.10)で算定した。

$$R_{l,2050} = \sum_{j=1}^{1742} Pop_{j,2050} \times Road_{j,l} \times r_{j,c} \quad \text{式 (S.12)}$$

ここで、 $R_{l,2050}$ は、2050年の市町村道の2050年の舗装道路の道路面積( $km^2$ )を示す。道路面積( $km^2$ )は、市町村別の道路実延長データ[167]に対して、都道府県別の市町村道路の幅のデータ[168]を乗じて算定した。 $Pop$ は市町村の2050年の人口、 $Road_{j,l}$ は2015年の一人当たりの市町村道の面積( $km^2/人$ )を示す。 $r_{j,c}$ は、一人当たりの市町村道の面積の減少率を示し、市町村の人口規模に応じて表S. 16の通り想定した。特にカテゴリ1の小規模人口市町村は、日本全国の一人当たり市町村道実延長数をプロットし、ベストプラクティスと考えられる値をベンチマークとした。

**表S. 16 市区町村の一人当たり道路面積**

| カテゴリ | 一人当たり道路面積[ m <sup>2</sup> /人] | $r_{j,c}$                            |
|------|-------------------------------|--------------------------------------|
| 1    | 100以上                         | 一人当たり道路面積を100[ m <sup>2</sup> /人]を上限 |
| 2    | 50から100                       | 0.80                                 |
| 3    | 20から50                        | 0.9                                  |
| 4    | 20以下                          | 1                                    |

これまで道路の舗装の大半にアスファルトが用いられていたが、トランジションシナリオにおいて原油輸入量が大きく減ることから道路舗装をコンクリートで代替すると想定した。道路の舗装材のアスファルトからコンクリートへの代替は、高速道路、一般国道、一般都道府県道、主要地方道、市町村道の道路面積、道路の実延長数(km)および道路幅(m)のデータ[167,168]に対して、舗装道路を30cmの厚さ、簡易舗装道路を4cmの厚さ[169]と想定し、道路舗装に必要な舗装材の体積を求めた。必要な舗装材量(m<sup>3</sup>)に対して、1立方メートルの舗装材に使用されるセメント量(300kg/m<sup>3</sup>)[170]を乗じて、道路舗装にセメントの必要量を換算した。得られたセメント必要量と2015年の道路に使用されたセメント量の割合から、2050年におけるセメント部門における道路用製品の需要量に変化を与えた。

### 1.3 非CO<sub>2</sub> GHG排出量の変化

CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガス(以下、非CO<sub>2</sub> GHG)には、メタン(CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)、並びにフッ素系GHG(HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>)がある。大気中の残存年数はCO<sub>2</sub>に比べて短いが、GWP(CO<sub>2</sub>を1とした場合の温暖化影響の強さを表す値)がCO<sub>2</sub>よりも非常に大きいため、GHG排出のネット・ゼロに向けた非CO<sub>2</sub> GHG排出総量の削減は重要な課題である。以下では、工業、農業、エネルギー、廃棄物の4部門別に2050年の非CO<sub>2</sub> GHG排出量変化に関する推計結果を示す。

#### 部門別の排出削減の想定

基本的な方法論として、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CO<sub>2</sub> GHG削減量を推計したEPA(2019)[171]による日本の推計値(～2050年)を参照する。EPA(2019)は、独自のモデルを使用して国・部門別に2050年までのベースライン排出量を算定しており、ベースライン比の排出削減量を限界削減費用別に推定している。

本報告書では、EPA(2019)の排出削減量(ベースライン比)を2015年比削減量に換算すると共に、文献・ヒアリング調査に基づいた独自の想定を加えることにより、2050年の部門・ガス別のGHG排出量を推計する<sup>45</sup>。特に、エネルギー部門については、分析結果として得られた石炭、石油、天然ガスの燃料使用量の変化率を算定することにより、CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>Oの排出量変化を推計した。部門別の排出削減パラメータ想定については、表S.17を参照されたい。

#### ■ 工業部門(主にフッ素系GHG)

##### 主な排出ガスと発生源

- 冷媒(冷蔵庫・エアコン)・溶剤・発泡剤・消火剤使用・半導体・HCFC-22(クロロジフルオロメタン)製造からのHFCs、アルミニウム・マグネシウム・半導体・太陽電池・液晶パネル製造からのPFCs・SF<sub>6</sub>、アジピン酸製造からのN<sub>2</sub>O等である。

##### 活動量の変化要素

- 工業部門の生産量を活動量とすることから、経済活動の規模(GDP)が変化の基本となる。1990-2015年のGDPとフッ素系GHGの変化量から線形関数を作成し、2050年の排出量(2015年比)を+0%と想定した。

<sup>45</sup> EPA(2019)[171]の想定する削減技術は非常に多岐にわたるため個別技術の寄与度は示せないが、目安となる限界削減費用を想定することにより、費用の安い順に削減技術が選択され、どの程度まで削減が進むかを把握することができる。

## 排出削減要素

- 排出削減技術：排出の大半を占める冷媒（冷蔵庫・エアコン）については、冷媒回収、分散システム、HFCの2次ループシステム、アンモニアの2次ループシステム、漏洩補修、自動車エアコン冷媒の転換（CO<sub>2</sub>冷媒、HFO1234yf）・排出効率向上、CO<sub>2</sub>遷移臨界システム、R-404Aの改造、R-32（パッケージエアコン用）、サービス利用時の回収等の技術オプションを想定した。その他の排出源についても、EPA（2019）に基づいて、多種類の排出削減技術オプションを想定した。
- ロックインシナリオでは、30ドル/tCO<sub>2</sub>e以下のレベルの技術導入にとどまると想定した。トランジションシナリオでは、最大限（100ドル/tCO<sub>2</sub>e以上）まで技術導入が進むと想定した。
- さらに、トランジションシナリオでは、EPA（2019）想定に加えて、HFCに代わる革新的なフロンガスであるHFO（ハイドロフルオロオレフィン）がエアゾール、消化剤、発泡剤、液晶製造、HCFC製造時の副生HFC、冷蔵庫・エアコン、半導体製造、溶剤の各部門で完全に普及すると想定した<sup>46</sup>。PFCs、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>等のフッ素系GHGについては、99%以上の分解率を有する除害装置が完全に普及すると想定した。

## ■ 農業、エネルギー、廃棄物部門（主に、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O）

### 主な排出ガスと発生源

- 農業部門については、稻作、畜産（消化管内発酵、家畜排せつ物管理）から排出されるCH<sub>4</sub>、畜産と農用地の土壌からのCH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>Oである。エネルギー部門は、石炭、石油、天然ガスの燃焼・漏出によるCH<sub>4</sub>である。廃棄物部門は、廃棄物の埋立処分からのCH<sub>4</sub>、排水処理からのCH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>Oである。

### 活動量の変化要素

- 1990年-2015年の期間において、主に農業、エネルギー、廃棄物部門からの非CO<sub>2</sub> GHG排出量（主に、CH<sub>4</sub>やN<sub>2</sub>O）は通時的に減少傾向にあることに加えて、産業部門のように必ずしも強くGDPと連動しないと考えられる。そのため、EPA（2019）の2050年ベースライン排出量（農業、エネルギー、廃棄物部門合計で2015年比▲16.5%）を参照した。

### 排出削減要素

- 排出削減技術：農業部門の土壌分野には、施肥の方法変更（分割施肥、肥料削減、硝化抑制）や不耕起栽培等の技術オプションがある。農業部門の稻作分野には、水管理（常時湛水、中干し、間断灌漑、陸稻栽培）、施肥の方法変更、不耕起栽培等のオプションがある。エネルギー部門の石炭採掘分野には、エネルギー利用（パイプラインによるCH<sub>4</sub>圧入、現場での自家発電、熱利用）、超過

<sup>46</sup> 地球温暖化係数が1桁台と、従来の数百分の一にとどまる。例えば、硬質ウレタンフォームの発泡剤であるHFC-245faのGWPは1,030であるのに対して、代替発泡剤であるHFO1336mzzbのGWPは8.9、HCFO1233zdは5未満とされる[172]。冷媒に関して、HFC404AのGWPは3,922である一方、HFO1234zeのGWPは1未満、CO<sub>2</sub>のそれは1である。（経済産業省[216]）。

ガスの閉鎖フレアリングシステム導入、低濃度の通気CH<sub>4</sub>ガスの無炎酸化装置導入等がある。エネルギー部門の石油・ガス採掘分野には、漏出の検査・モニタリングや装置改造に関する多岐にわたる技術オプションがある。廃棄物部門には、埋立分野ではエネルギー利用(CH<sub>4</sub>ガス回収・フレアシステム、現場での自家発電、ガスの直接利用)、無炎酸化装置導入、廃棄物の転換(コンポスト化、嫌気性処理)等のオプションがある。排水分野は、排水処理施設での嫌気性処理が中心的技術となる。

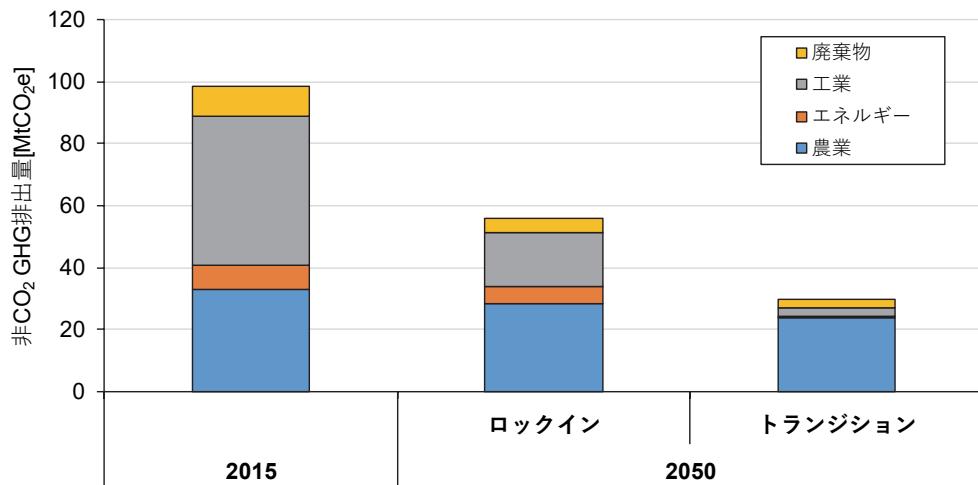
- ロックインシナリオでは、30ドル/tCO<sub>2</sub>e以下のレベルの技術導入にとどまると想定した。トランジションシナリオでは、最大限(100ドル/tCO<sub>2</sub>e以上)まで技術導入が進むと想定した。
- さらに、トランジションシナリオでは、EPA(2019)想定に加えて、人工肉や昆蟲食の普及拡大により、牛肉の精肉需要が5割減少すると想定し、畜産由来のCH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>Oが約1MtCO<sub>2</sub>e削減されると想定した(1人当たり精肉需要は一定、かつ2050年の2015年比人口減少率19.4%を考慮した上で、追加的に精肉需要が5割減少と想定し、成牛が437,530頭減少すると想定した。別途推定した乳用牛と肉用牛の1頭当たりGHG排出量を乗じることにより、0.96MtCO<sub>2</sub>eの排出削減量を算定した)。

#### GHG排出量の推計結果

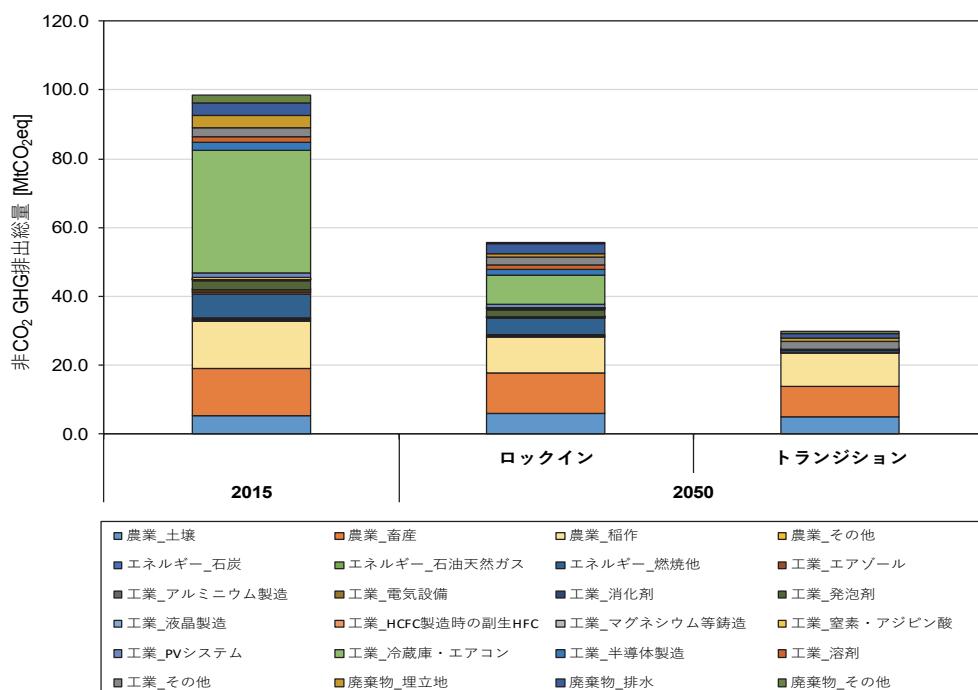
図S. 6は、部門別GHG排出量の変化を示す。2050年に、シナリオ毎(ロックインとトランジション)に2015年比▲44%、▲70%の排出削減が達成される。どちらのシナリオでも廃棄物、工業、エネルギー部門で大幅な削減が達成されるが、農業部門での排出削減は少量にとどまる。技術の導入・普及の想定の違いにより、両シナリオ間で2倍程度のGHG排出量の相違が生じる(ロックインシナリオは55.6MtCO<sub>2</sub>e、トランジションシナリオは29.7MtCO<sub>2</sub>e)。

工業部門に関して、ロックインシナリオでも、EPA(2019)の想定する対策(30ドル/tCO<sub>2</sub>e以下の対策)の削減効果が大きく、2015年比▲63%となる。トランジションシナリオでは、HFCsを使用する各部門で温暖化係数が1桁台のHFO(ハイドロフルオロオレフイン)系のフロンガスが、PFCs、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>を使用する各部門では除害装置が普及していると想定したため、2015年比▲94%に達する。

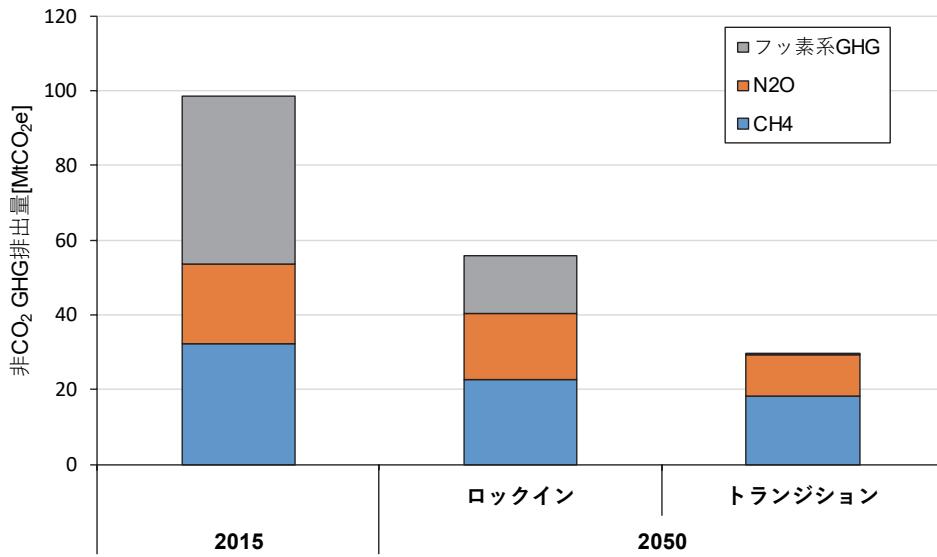
農業部門の畜産分野では、トランジションシナリオにおいて、EPA(2019)の想定する対策(100ドル/tCO<sub>2</sub>e以上の対策)に加えて牛肉需要▲50%によるGHG削減(約1MtCO<sub>2</sub>e)を見込んでいるが、その削減効果は全体のごく一部にとどまる。

図S. 6 部門別の非CO<sub>2</sub> GHG(CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, フッ素系GHGの合計)排出量

図S.7は、図S.6を詳細な部門毎に分割して表示している。工業部門におけるHFO等の革新的な物質の採用やPFCs, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>等の除害装置の普及による効果により、工業部門で大幅な排出削減が進む。

図S. 7 詳細な部門別の非CO<sub>2</sub> GHG排出量

図S. 8は、図S. 6、図S. 7で示した推計結果をガス別に表示している。トランジション型シナリオでは、フッ素系GHG(主に工業部門)が大幅に削減される可能性が示されている一方、EPA(2019)で想定している削減技術オプションを最大限(100ドル/tCO<sub>2</sub>e以上の対策)まで考慮しても、CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O(農業部門、廃棄物部門)の合計排出量は約30MtCO<sub>2</sub>e程度残る。

図S. 8 ガス別の非CO<sub>2</sub> GHG排出量

注) フッ素系GHGはHFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>である。

表S. 17 シナリオ別の非CO<sub>2</sub> GHG排出量算定パラメーター一覧

| 部門別の排出変化率<br>(2015年比) | GHG の 種<br>類  | ロックイン<br>シナリオ | トランジション<br>シナリオ | 主な文献・想定  |
|-----------------------|---|---------------|-----------------|--|
| 工業                    |   |               |                 |  |
| エアゾール                 | HFCs  | 0.5           | 0.01            | EPA[171]、トランジションではHFO(ハイドロフルオロオレフィン)等の脱フロン物質の普及(服部[172])を想定                        |
| アルミニウム製造              | PFCs  | 0.7           | 0.01            | EPA[171]、トランジションでは除害装置(分解率99%)の普及を想定(イプロスものづくり[173])                               |
| 電気設備                  | SF <sub>6</sub>                                     | 0.5           | 0.01            | EPA[171]、トランジションでは除害装置普及を想定(イプロスものづくり[173])  |
| 消化剤                   | HFCs  | 0.7           | 0.01            | EPA[171]、トランジションではHFO等の脱フロン物質普及(服部[172])を想定  |
| 発泡剤                   | HFCs  | 0.7           | 0.01            |  |
| 液晶製造                  | HFCs,<br>PFCs, SF <sub>6</sub> ,<br>NF <sub>3</sub> | 0.7           | 0.01            | EPA[171]、トランジションではHFO等の脱フロン物質普及(服部[172])、除害装置普及(PFCs, SF6, NF3)を想定(イプロスものづくり[173]) |
| HCFC製造時の副生HFC         | HFCs  | 0.2           | 0.01            | EPA[171]、トランジションではHFO等の脱フロン物質普及(服部[172])を想定  |
| マグネシウム等鋳造             | SF <sub>6</sub>                                     | 0.1           | 0.01            | EPA[171]、トランジションでは除害装置普及を想定(イプロスものづくり[PFC·PFN除害装置])                                |
| 窒素・アジピン酸              | N <sub>2</sub> O                                    | 0.3           | 0.2             | EPA[171]   |
| PVシステム                | PFCs, NF <sub>3</sub>                               | 0.7           | 0.01            | EPA[171]、トランジションでは除害装  |

|                  |   |     |      |  |
|------------------|---|-----|------|--|
|                  |   |     |      | 置普及を想定(イプロスものづくり[173])   |
| 冷蔵庫・エアコン         | HFCs  | 0.2 | 0.01 | EPA[171]、トランジションではHFO等の脱フロン物質普及(服部[172])を想定  |
| 半導体製造            | HFCs, PFCs, SF <sub>6</sub> , NF <sub>3</sub> | 0.7 | 0.01 | EPA[171]、トランジションではHFO等の脱フロン物質普及(服部[172])、除害装置普及(PFCs, SF6, NF3)を想定(イプロスものづくり[173])、電子情報技術産業協会[174] |
| 溶剤               | HFCs  | 0.7 | 0.01 | EPA[171]、トランジションではHFO等の脱フロン物質普及(服部[172])を想定  |
| その他(化学産業、金属生産等)  | CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O            | 0.7 | 0.7  | EPA[171]   |
| <b>農業</b>        |   |     |      |  |
| 土壤               | N <sub>2</sub> O                              | 1.1 | 0.9  | ロックインはEPA[171]、トランジションでは肥料抑制効果を独自想定  |
| 畜産               | CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O            | 0.9 | 0.7  | EPA[171]想定に追加して、トランジションでは牛肉需要減少由来のGHG削減を想定   |
| 稻作               | CH <sub>4</sub>                               | 0.7 | 0.7  | EPA[171]   |
| その他(農作物残渣の野焼き等)  | CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O            | 0.6 | 0.6  |  |
| <b>エネルギー</b>     |   |     |      |  |
| 石炭               | CH4   | 0.7 | 0.1  | 第1部の推計結果(エネルギー消費量変化率)を参照   |
| 石油天然ガス           | CH4   | 0.7 | 0.05 |  |
| 燃焼他              | CH4, N <sub>2</sub> O                         | 0.7 | 0.07 |  |
| <b>廃棄物</b>       |   |     |      |  |
| 埋立地              | CH4   | 0.3 | 0.2  | EPA[171]   |
| 排水               | CH4, N <sub>2</sub> O                         | 0.8 | 0.4  |  |
| その他(廃棄物の焼却と野焼き等) | CH4, N <sub>2</sub> O                         | 0.2 | 0.2  |  |

## 1.4 GHG吸収量の変化および海外での削減分

### ➤ 森林吸収

日本の国土面積37.8万km<sup>2</sup>のうち森林は約25万km<sup>2</sup>であり2030年までその面積はほぼ一定と考えられる。日本の国別目標では、2030年の森林吸収源のCO<sub>2</sub>吸収量の目標値は27.8MtCO<sub>2</sub>である。また、図S.9に示されるように、非居住地化が見込まれる面積は居住面積18万km<sup>2</sup>のうち19%の3.42万km<sup>2</sup>とされる。このうち約半数が森林利用になると仮定するとその面積は1.7万km<sup>2</sup>である。従って、2030年の森林面積は25万km<sup>2</sup>に1.7万km<sup>2</sup>を加えて26.7万km<sup>2</sup>と仮定し、森林面積あたりの吸収量を一定とすると、2050年の森林吸収源対策のCO<sub>2</sub>吸収量は29.6MtCO<sub>2</sub>とする。従って、森林吸収量を、ロックインシナリオでは27.8MtCO<sub>2</sub>、トランジションシナリオでは、29.6MtCO<sub>2</sub>とした。

2030年の農地土壤炭素吸収源対策及び都市緑化等の推進により約9.1MtCO<sub>2</sub>のCO<sub>2</sub>吸収量を見込んでいる。2050年には、都市緑化などの対策が進み10MtCO<sub>2</sub>のCO<sub>2</sub>吸収量と想定する。

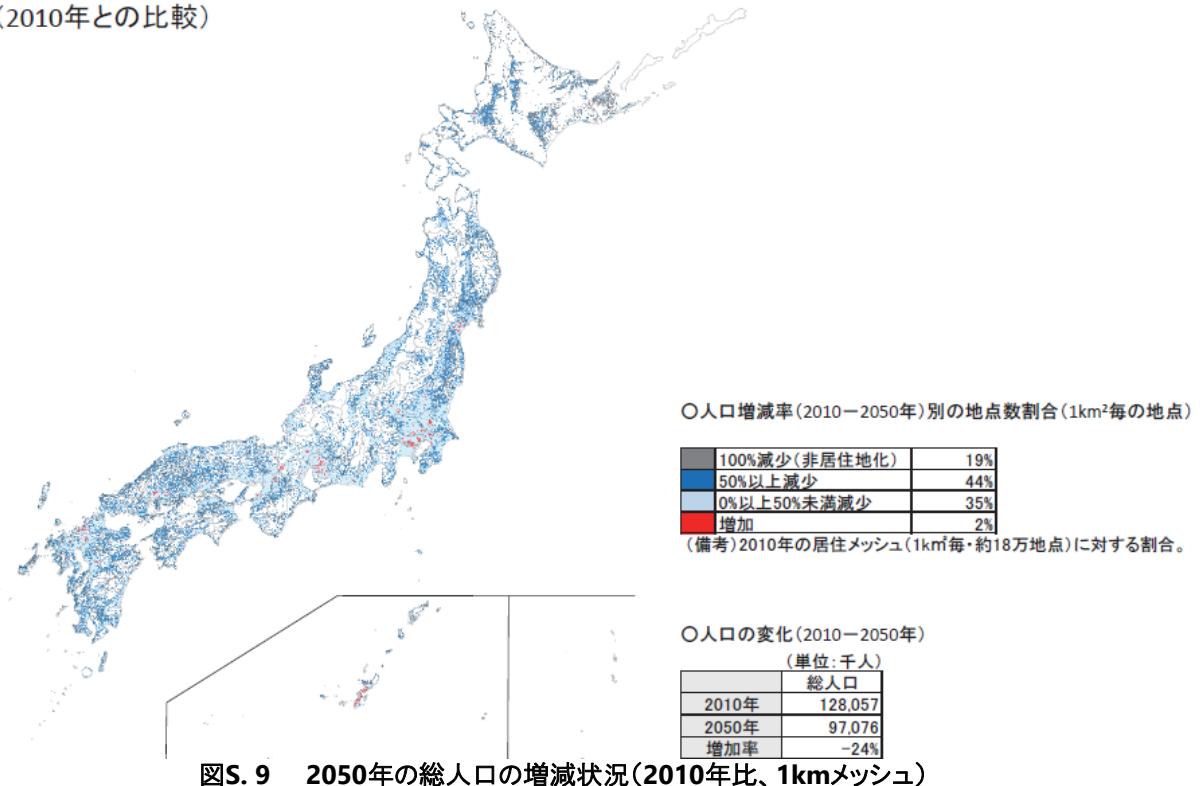
### ➤ 二国間クレジット制度

日本政府は、途上国への優れた低炭素技術・製品・システム・サービス・インフラ等の普及や対策実施を通じ、実現した温室効果ガス排出削減・吸収への我が国の貢献を定量的に評価し、我が国の削減目標の達成に活用するため、二国間クレジット制度(Joint Crediting Mechanism : JCM)を構築・実施している。日本政府は、「毎年度の予算の範囲内で行う日本政府の事業により2030年度までの累積で5,000万から1億t-CO<sub>2</sub>の国際的な排出削減・吸収量が見込まれる。」[40]としていることから、本報告書においても、JCMにおいて年間で500万トンの海外削減・吸収分を計上した。

### ➤ DACS

CCSで回収しきれていないエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量及び非エネルギー起源GHG排出量のうち森林吸収量、JCMによる海外削減分を差し引いた残りのCO<sub>2</sub>排出量及び非エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量に対して、森林吸収源によるCO<sub>2</sub>吸収量を考慮してもネット排出量がプラスになる分だけDACSによる大気中からのCO<sub>2</sub>の回収を想定した。CCS及びDACSの想定について、補論1.1の章末も参照されたい。

2050年の総人口の増減状況  
(2010年との比較)



図S.9 2050年の総人口の増減状況(2010年比、1kmメッシュ)

出典:国土交通省[175]

## 補論2 ネット・ゼロへ向けた緩和策と両立する適応策オプション

**表S. 18 ネット・ゼロへ向けた緩和策と両立する適応策オプション  
(自然生態系、農業、熱中症、エネルギーシステム)**

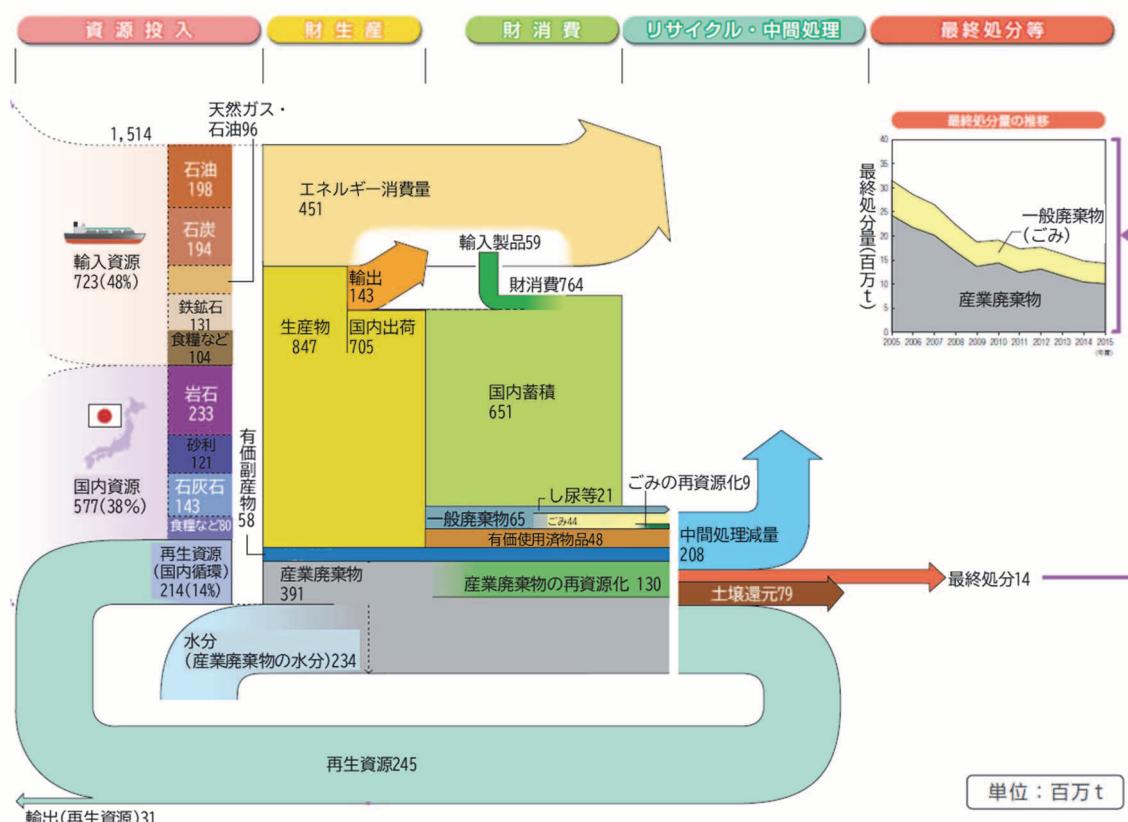
| 影響分野           | 適応策のレベル          | 適応策（計画的適応、事前適応）<br>の具体的オプション | 適応の形態 |     |       | 資源消費（生産）               |             |       | GHG排出量<br>代替(排出増) : +1,<br>独立(排出一定) : 0<br>補完(排出減) : -1 | 緩和策の<br>オプション   | ネット・ゼロ排出(緩和)とレジ<br>リエンス向上を達成する適応策<br>のオプション  |
|----------------|------------------|------------------------------|-------|-----|-------|------------------------|-------------|-------|---|-----------------|--|
|                |                  |                              | ハード   | ソフト | ヒューマン | 原料<br>[マテリアル]          | 土地<br>[遊休地] | エネルギー |   |                 |  |
| 自然生態系          | レベル1<br>防衛       | 対象種の保護、保護区の追加                |       | ✓   |       |                        | 保護区         |       | 0   |                 |  |
|                | レベル2<br>順応・被害最小化 | 対象種の避難地の確保、脆弱な種の阻害要因排除       |       | ✓   |       |                        | 避難地         |       | 0   |                 |  |
|                | レベル3<br>転換・再構築   | 対象種の移植                       |       | ✓   |       |                        |             |       | 0   |                 |  |
|                |                  | 管理                           |       | ✓   |       |                        |             |       | 0   |                 |  |
|                |                  | 生態系ネットワーク整備                  | ✓     | ✓   |       | 機の回廊、<br>里地里山、<br>田園地帯 |             |       | -1  | 森林整備、植林         | 林野の若返りによる炭素固定量増大                             |
| 農業             | レベル1<br>防衛       | 作期移動                         |       | ✓   |       |                        |             |       | 0   |                 | 農業機械の電動化（農業分野のあらゆる適応策に共通）                    |
|                |                  | 作付場所の選定                      |       | ✓   |       |                        |             |       | 0   |                 |  |
|                |                  | 水管理、灌漑管理*                    | ✓     | ✓   |       | 鉄、セメント                 |             | 電力    | 1   | 省資源・省エネ、電力の低炭素化 |  |
|                |                  | 施肥の工夫、地力の増強                  |       | ✓   |       | 窒素肥料                   |             |       | 1   | 窒素肥料の省資源化       |  |
|                |                  | 深耕・耐性品種の導入                   |       | ✓   |       |                        |             |       | 1   | 不耕起栽培           |  |
|                | レベル2<br>順応・被害最小化 | 被害農家への被害支援                   |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | 0   |                 |  |
|                |                  | 共済システム                       |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | 0   |                 |  |
|                | レベル3<br>転換・再構築   | 作付品目の変更                      |       | ✓   |       |                        |             |       | 0   |                 | ソーラーシェアリング、再エネ電源の野菜工場                        |
|                |                  | 栽培地域の移転                      | ✓     | ✓   |       | 鉄、セメント                 | 農業用地        | 電力、燃料 | 1   | 省資源・省エネ、電力の低炭素化 |  |
|                |                  | 移動                           | ✓     | ✓   |       | 鉄、セメント                 | 農業用地        | 電力、燃料 | 1   | 省資源・省エネ、電力の低炭素化 |  |
|                |                  | 多角化等農業経営転換                   |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | 0   |                 |  |
|                |                  | 零細農家の経営支援                    |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | 0   |                 |  |
| 熱中症<br>(暑熱)    | レベル1<br>防衛       | エアコン等の対処行動の普及                | ✓     | ✓   | ✓     | 非鉄金属（アルミ）、プラスチック       |             | 電力    | 1   | 省資源・省エネ、電力の低炭素化 | エアコンの熱交換効率向上、代替プロンの温暖化係数の低減                  |
|                |                  | 弱者の見守り                       |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | 0   |                 | 安全で低炭素な集合住宅の紹介                               |
|                |                  | 安否確認の徹底                      |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | 0   |                 | 安全で低炭素な集合住宅の紹介                               |
|                | レベル2<br>順応・被害最小化 | 患者輸送                         |       | ✓   | ✓     |                        |             | 電力、燃料 | 1   | 省エネ、電力の低炭素化     | 救急車両のEV化                                     |
|                |                  | 医療体制の整備                      |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | 0   |                 |  |
|                | レベル3<br>転換・再構築   | シェルターの整備                     | ✓     |     |       | 鉄、セメント                 |             |       | 1   | 省資源             | シェルターのZEH、ZEB化                               |
|                |                  | 熱波警報システム                     |       | ✓   |       |                        |             | 電力    | 1   | 省電力、電力の低炭素化     |  |
|                |                  | クールシティ化（街路樹、ミスト、打ち水等）*       |       | ✓   | ✓     | （木）                    | 街路樹用地       |       | -1  | 植林（街路樹）         | 都市緑化、都市の風の通り道、グリーンビルディング                     |
|                |                  | 夏山冬里等のライフスタイル変更              |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | -1  |                 | 余暇、労働の時間・場所の変更によるエアコン使用量減少                   |
| エネルギー<br>システム* | レベル1<br>防衛       | 設備、施設の防衛、耐久化                 | ✓     |     |       | 鉄、セメント                 |             | 電力、燃料 | 1   | 省資源・省エネ、電力の低炭素化 | 鉄・セメントの製造プロセスでの脱炭素化                          |
|                |                  | 気候情報を加味したダムの柔軟な運用            |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | 0   |                 | ダム湖の蒸発を防ぐ浮体式太陽光発電                            |
|                | レベル2<br>順応・被害最小化 | 災害時のインフラ破壊時の応急措置             |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | 0   |                 | 建設廃棄物の再資源化と脱炭素素材の利用                          |
|                |                  | インフラ復旧                       | ✓     |     |       | 鉄、セメント                 |             | 電力、燃料 | 1   | 省資源・省エネ、電力の低炭素化 | 復旧後の脱炭素電源の再構築                                |
|                | レベル3<br>転換・再構築   | 曝露の少ない立地選択                   |       | ✓   |       |                        |             |       | 0   |                 | 再エネの立地選択、火力発電所・原子力発電所の気候リスク曝露レベルに応じた移行マネジメント |
|                |                  | 非常用電源を配備した分散かつ独立電源化          | ✓     | ✓   |       | 鉄、非鉄金属、セメント            |             |       | 0   |                 | 高性能バッテリーを搭載した再エネ施設（ZEB、ZEH等も）                |
|                |                  | BCPの体制づくり                    |       | ✓   | ✓     |                        |             |       | 0   |                 | IoTを交えた遠隔管理の体制づくり                            |

出典：白井他[96]を参考にIGES作成

## 参考資料(概説)

### マテリアル利用の現状

日本の2015年のマテリアルバランスを図S.10に示す。輸入資源の723百万トンのうち、化石燃料が488百万トンと重量ベースで67%を占める。次いで鉄鉱石が131百万トンと18%を占めている。国内資源では、岩石、砂利、石灰石など主にコンクリートに使用される素材が国内資源の86%を占めている。このようにマテリアルベースでは、化石燃料、鉄鋼石、岩石、砂利、石灰石など電力部門や重化学工業で用いられる素材が多くを占めている。これらの部門に投入されたマテリアルは、各部門で加工され、最終的には我々の生活を支える製品として供給されている。従って、これらの部門で製造される製品の需要を我々の生活レベルで考え、効率的な資源利用やリサイクルによるマテリアル需要の減少を考えることが重要である。



図S. 10 日本のマテリアルバランス(2015年) 単位:百万トン  
出典:一般社団法人産業環境管理協会[176]

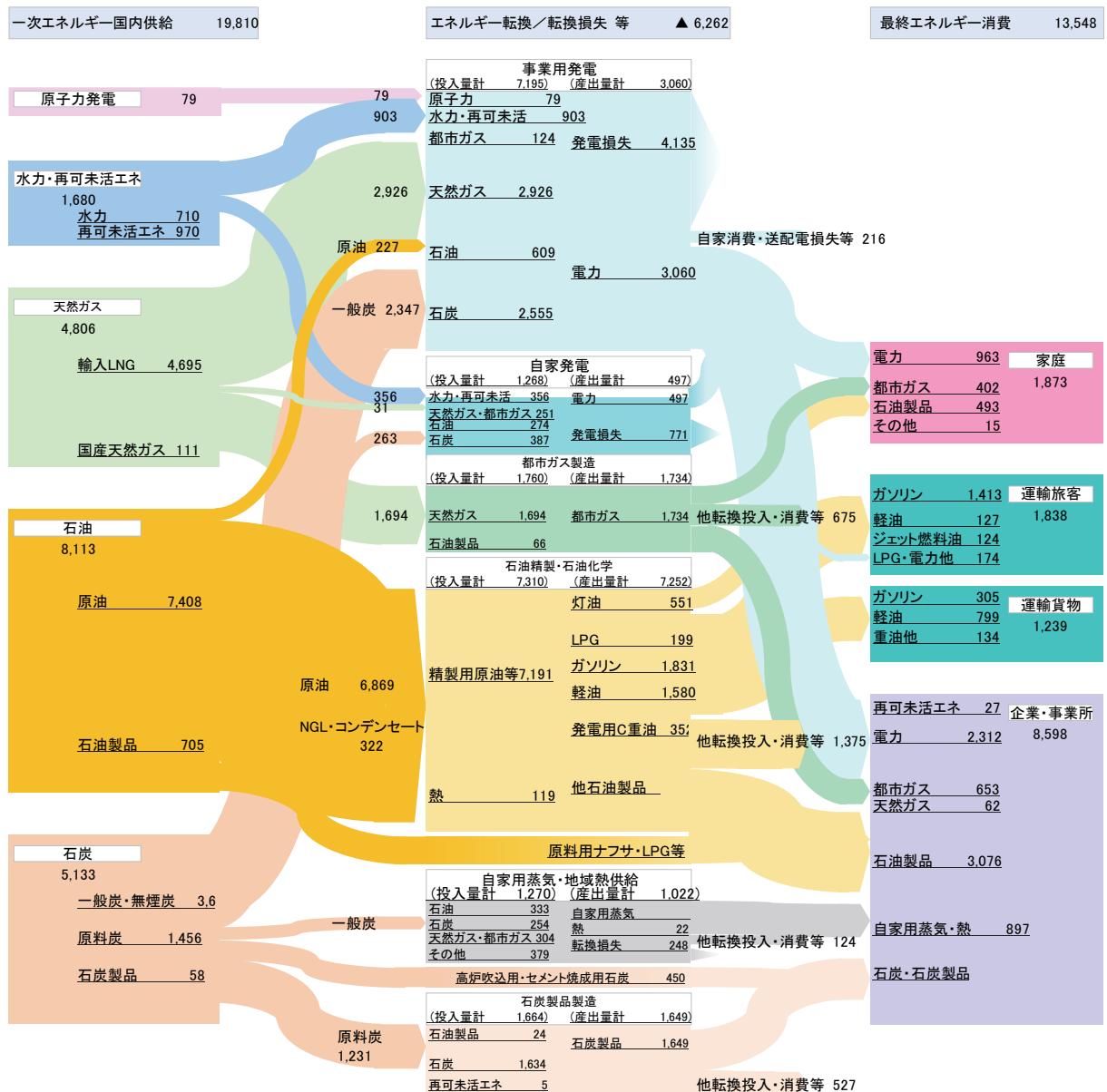
## エネルギー利用の現状

エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量、すなわち、化石燃料からのCO<sub>2</sub>排出量は日本のGHG排出量の9割を占めるところから、ネット・ゼロに向けては、我々の社会活動におけるエネルギーの脱炭素化が必要である。日本の2015年のエネルギーバランスを図S.11に示す。1次エネルギーの供給先として、電力部門(事業用発電及び自家発電)が最も大きく(8,463PJ)、全体の約4割を占める。しかし、発電損失や送配電損失などのエネルギーロスがあるため、電力部門に供給された1次エネルギー供給量のうち42%(8,463PJ中3,557PJ)しか最終エネルギー消費量として使うことができない。

1次エネルギーを種類別に見ると、原油によるエネルギー供給量が8,113PJと最も多く、石油精製・化学産業において原油から石油化学製品に転換され、各最終エネルギー需要元へと供給される。石油化学製品の最終エネルギー需要は運輸部門(旅客と貨物の合計値)が約4割と最大の需要先となり、次いで産業部門(企業・事業所)における石油化学製品製造時の消費が2.5割を有し、家庭及び業務部門が約2割を有する。エネルギー単位当たりのCO<sub>2</sub>排出量が最も大きい石炭は、発電に6割、産業用(蒸気発生用途、高炉吹込用・セメント焼成用途、石炭製品の消費)に4割程度供給されている。天然ガスは発電用に約6割、家庭や業務、工場といった民生部門に4割程度供給されている。

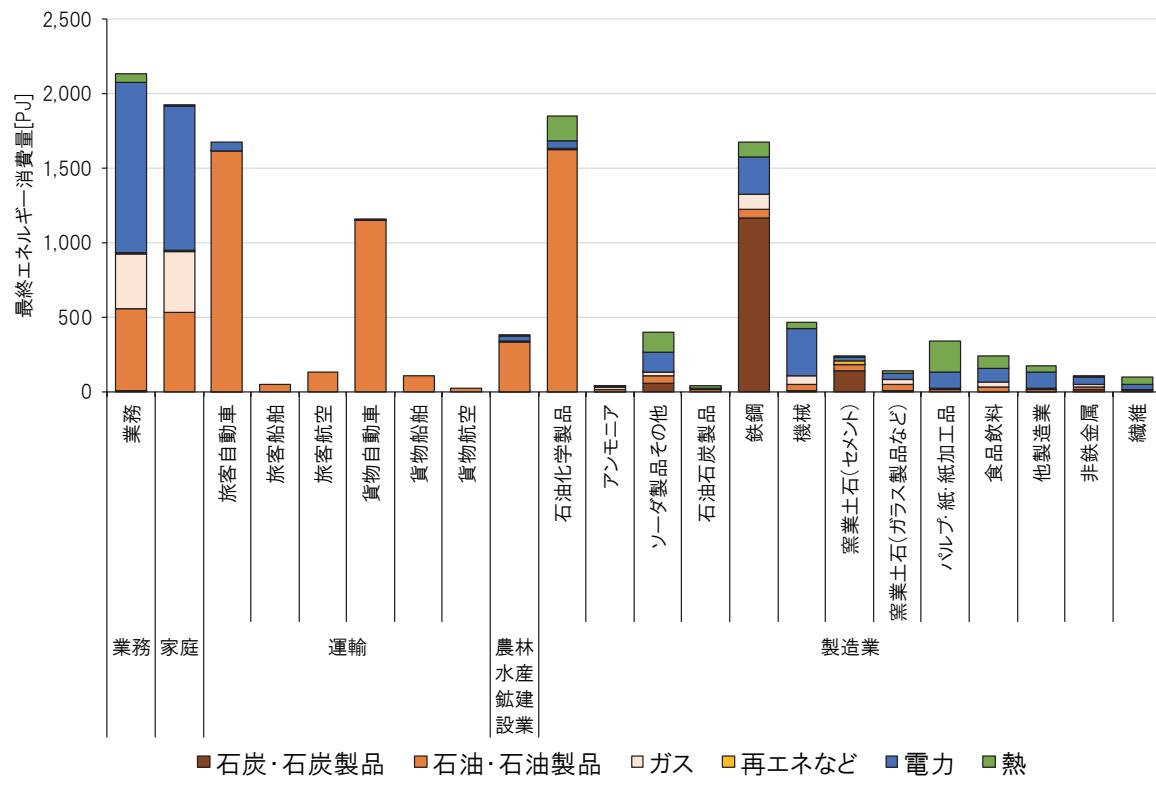
最終エネルギー消費量を部門別に示したグラフを図S.12に示す。家庭及び業務(企業・事業所)部門においては、電力が最終エネルギー消費量の5割を占めている。具体的には石油、石炭及びガスが、給湯、冷暖房、調理等の用途で使用されている。運輸部門はガソリンやディーゼルの消費が主流である。製造業においては、化学工業と鉄鋼が大きなエネルギー消費部門となっている。石油化学を含む化学工業において、1,500PJ以上の石油・石油製品を利用している。これは、石油・石油製品がプラスチック、合成繊維、合成ゴム、塗料などの素材として使われているためである。鉄鋼部門では、鉄を製造する際に、鉄鉱石を銑鉄に還元することから、大量の石炭が用いられる。機械製造業は、製造業の中で3番目に多くのエネルギーを消費しているが、2015年時点で7割のエネルギーが電力である。窯業土石(セメント、ガラス製品など)も、化石燃料多消費産業であり、エネルギー消費量に占める割合のうち石炭・石炭製品が4割、石油・石油製品が2割強、ガスが1割弱である<sup>47</sup>。このように、エネルギー利用は、産業部門のみならず、業務、家庭、旅客輸送、貨物輸送という我々の暮らし方にも密接に関わっている。

<sup>47</sup> 窯業土石部門のエネルギー利用による2016年のCO<sub>2</sub>排出量は2,500万トンであるが、セメント製造、石灰製造、ガラス製造時において、素材から発生するCO<sub>2</sub>排出量が3,100万トン[208]となり、エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量よりも、工業プロセスからのCO<sub>2</sub>排出量が多い。

単位:10<sup>15</sup>J

図S. 11 日本のエネルギー・バランス・フロー概要(2015年) 単位:PJ

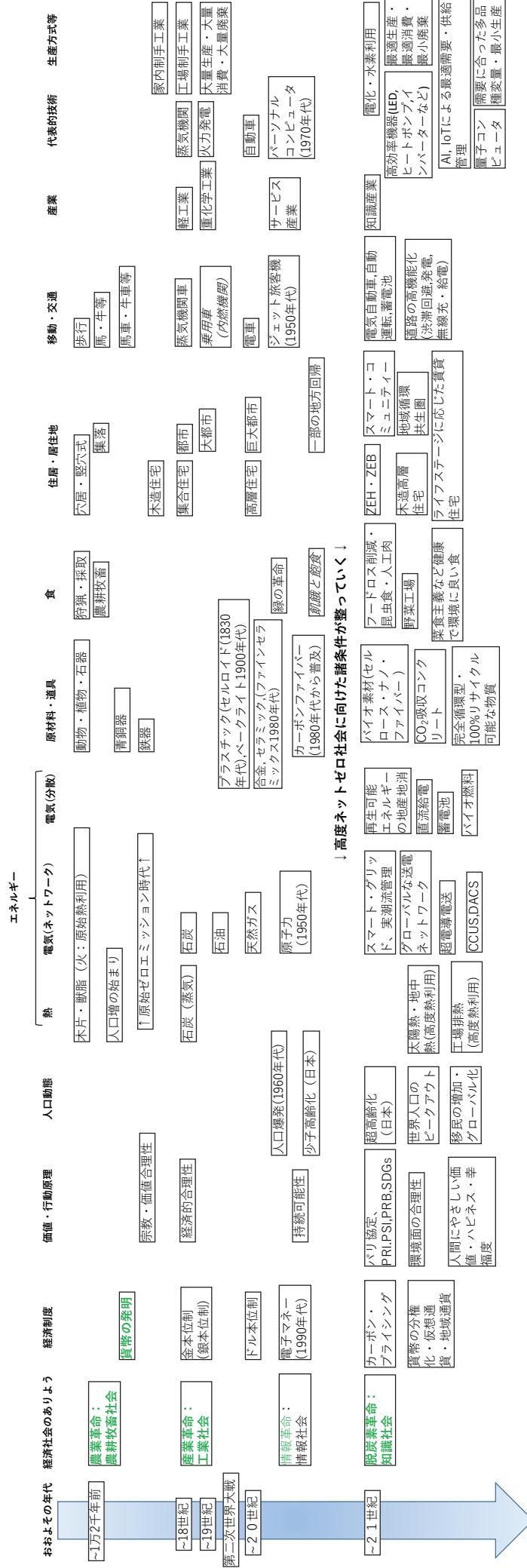
出典:エネルギー白書2017[177]



図S. 12 2015年の最終エネルギー消費量

出典:総合エネルギー統計[42]より筆者作成

## 通史的俯瞰



図S.13 通史的俯瞰

## 経団連のチャレンジ・ゼロ

経団連は、1997年より一貫してGHG排出削減に関する自主的取り組みを実施してきたが、2019年6月に閣議決定された「パリ協定に基づく長期成長戦略」の目指すイノベーション創出に向けて、より野心的かつ具体的な行動が必要と判断し、政府と連携して、脱炭素社会の実現に資する企業のイノベーションを後押しするイニシアティブである「チャレンジ・ゼロ」構想を打ち出した(2019年12月9日発表)[178]。正式名称は、「チャレンジ ネット・ゼロカーボン イノベーション」である。参加する企業や団体は、①ネット・ゼロカーボン技術のイノベーション、②同技術の社会実装・普及、③技術開発や普及に取り組む企業への投融資のいずれかにチャレンジすることを宣言し、具体的なアクションを報告する。結果として、脱炭素社会に向けた取り組みの総合的な絵姿を示すことで、産官学の協働・連携を強化し、イノベーションを後押ししていくことが期待されている。

## IPCC気候変動と土地特別報告書

2019年8月に公表されたIPCC特別報告書「気候変動と土地(Climate Change and Land)」は、その前年に公表されたIPCC特別報告書「1.5°Cの地球温暖化(Global Warming of 1.5 °C)」が、すべての分野において大規模な排出削減を行ったとしても、大気中のCO<sub>2</sub>を除去する手法(CDR)である植林やBECCSといった土地利用に関連する方策の活用が不可欠と示したことを受け、このような緩和策を実施した場合の将来の土地利用の変化予測を示した。

- ▶ 森林とバイオマスエネルギー原料生産のための土地を現在よりもそれぞれ400万-700万km<sup>2</sup>以上(オーストラリアの面積に匹敵)増加させる必要があり、その土地を確保するために農地と牧草地の面積を現在よりも減少させなければならず、増加を続ける世界人口を扶養するための食料生産と気候変動緩和策の間で土地利用をめぐる競合を引き起こす可能性がある。
- ▶ 食料安全保障への悪影響を回避するためには、極めて効率的に土地を利用するよう農業生産性を高めることが求められるが、さらなる排出や土地劣化を引き起こさない持続可能な技術を採用する必要がある。
- ▶ 食料を消費する側における、食品ロスの削減や気候変動に寄与しない食品の選択、食生活の変化など、この問題には、消費側も含めて食料システム全体で対応していく必要がある。

## IPCC海洋と雪氷圏特別報告書

海洋は、温暖化によって増加した熱の90%以上を蓄えるとともに、産業革命以降に排出された二酸化炭素の3分の1を吸収しているとされ、また雪氷圏は、その喪失が気候変動を加速させるといわれるなど、これらの地域は地球温暖化との深い関りが指摘されていたものの、これまで科学的な知見がまとまった形で示されることはなかった。今般、IPCCによって海洋、雪氷圏と温暖化との関係や影響・状況などをまとめた特別報告書(SROCC:Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate)[179]が公表された。示されたいくつかの科学的知見を以下に紹介する。

### 海洋について

- ▶ 海面上昇: 今後、対策をしない場合に最大<sup>48</sup>で、2100年に0.61mから1.10mの海面上昇の可能性を示した。またその最大値が2m以上となる可能性も排除できない、あるいは2300年には3m以上上昇する可能性もある、などとした。
- ▶ 酸性化: 海洋に吸収された二酸化炭素が水分子と反応することで海洋の酸性度が高くなると炭酸塩鉱物で作られるサンゴ・甲殻類・プランクトンなどの海洋生物の骨格や殻の形成が阻害され、海洋生態系に影響が生じる。乱獲やプラスチック汚染などと合わせ、世界経済の損失は、2100年までに1兆9,790億ドル／年に上ると推計された。
- ▶ 貧酸素化: 海水温上昇によって表面に暖かい層ができると、これが安定層となって下層と混じらず、表層の酸素が下に降りていかないことで、貧酸素化が進む。この貧酸素化により赤道から極地に至るまで、構成種、量的豊富さ、生産量の変化が生じている。

### 雪氷圏について

- ▶ 積雪被覆の減少: この数十年で積雪の厚さ、範囲、期間が減少しており、例えば低山域では、この10年で積雪期間が平均して5日、減少している。また、山岳地域<sup>49</sup>の氷河の質量変化は2006年から2015年にかけて、年間-123±24Gtであった可能性が非常に高い。
- ▶ 永久凍土の劣化: 最悪のケース<sup>50</sup>では、2100年までに数百から数千億トンの永久凍土炭素が放出され気候変動を悪化させる可能性がある。北極及び寒帯の永久凍土層には、1,460-1,600Gtの有機炭素があり、これは大気中炭素のほぼ2倍に相当する。
- ▶ 雪氷圏における変化の不可逆性: 雪氷圏の融解と劣化の回復は人為を超える。失われた氷塊の回復には、数百から数千年かかる可能性がある。

<sup>48</sup> IPCCのRCP8.5のケース。

<sup>49</sup> グリーンランド、南極など一部を除く。

<sup>50</sup> IPCCのRCP8.5のケース。

## 台風の脅威 2019年は台風の当たり年？それともこれが普通に？

---

2019年、台風15号、19号、21号が、東日本に大きな災害をもたらした。9月から11月の2カ月の間でこれほどまでに、特定の地域に集中的に大雨の被害があったことは特記すべき事項である。

台風15号は、中心気圧960hpa、最大風速40m/sの強い勢力が衰えることなく、9月9日千葉市付近に上陸し、千葉県を中心に関東地方に甚大な被害をもたらした。被害総額は267億円(17日午前10時時点)。そのうち、ビニールハウスの倒壊や損壊の被害総額は147億円にも上ると推計された[180]。千葉県や神奈川県などで一時、約93万軒の停電が発生した(東京電力9月9日)。千葉県は約64万軒(9日午前8時のピーク時)、その後東京電力が千葉県の停電情報の掲載を終了するまで約16日間かかった[181]。千葉県でこれほどの大規模停電が発生し、復旧までに長期間を要したのは、強風による高圧鉄塔2本の倒壊と、倒木による多く電柱の損壊が主たる原因であると考えられている<sup>51</sup>。こうした大規模停電の最中、太陽光発電システムがある家庭では「停電の影響を免れた」という声が上がった[182]。また、電気自動車(EV)やプラグインハイブリッド車(PHV)、燃料電池車(FCV)に搭載している大容量蓄電池が非常用電源として活躍<sup>52</sup>した。電動自動車の普及が進めば、こうした災害に対処できる住民が増えることが期待できる。台風15号によって、既存の電力システムが有する課題と再生可能エネルギーを中心とした分散型システムによる克服の可能性が明らかになった。一方、太陽光パネルの設置における課題なども表れた事例<sup>53</sup>となった。

台風19号<sup>54</sup>は10月12日19時頃、静岡県伊豆半島に上陸し、関東地方を通過した後、東北地方を13日未明に抜けた[183]。局所的な被害をもたらした台風15号に比べて非常に広範囲に甚大な被害を与えた。台風19号の上陸に伴い、一時的に13都県に大雨特別警報が発表された<sup>55</sup>。神奈川県箱根町では、観測史上1位の24時間降水量を記録した<sup>56</sup>[184]。箱根登山電車は甚大な被害を受け、箱根湯本～強羅区間の年内復旧は困難とされた。国土交通省によると全国20水系71河川140箇所で堤防の決壊が確認された<sup>57</sup>(2019年12月3日時点)[185]。一方で、埼玉県では、全長6.3kmもの巨大な地下放水路(首都圏外郭放水路)が河川の氾濫を最小限に留め、完成に18年を要した治水対策が役立った[185]。台風19号は、広範囲にわたってこれまでの想定を超える雨量をもたらし、各地で堤防が決壊し、甚大な被害が発生した。今後異常気象の頻度が増えると考えられる中で、治水の在り方、居住地の在り方といった、日本のまちづくりについて、真剣に取り組むべきことを考えさせられる災害となった。

<sup>51</sup> 高圧鉄塔(君津市)2本の倒壊により、約11万軒の停電が発生した。また、千葉県を中心に電柱2,000本が倒壊・損傷したとの推計(経済産業省)[180]もあり、これにより停電の被害はさらに拡大したと見られている。

<sup>52</sup> また、自動車各社は、千葉県に85台以上の電動自動車を派遣し、支援活動を行った[217]。

<sup>53</sup> 山倉ダムでは、湖面に設置した太陽光パネルが強風で水面からめくれ上がり、出火する事故が起きた[218]。

<sup>54</sup> 発生当初915hpaという中心気圧を維持し、12日18時時点での中心気圧は955hpa、最大風速40m/s、11日18時時点では暴風域の直径が650kmであった。

<sup>55</sup> 昨年の西日本豪雨の11府県を上回り、東京23区では初の大暴雨特別警報となった。

<sup>56</sup> 平均総雨量の約3割にあたる総雨量1,000mmを越え、24時間雨量では922.5mmに達した。

<sup>57</sup> 長野県では、千曲川が氾濫し、長野市を始め、複数の市で浸水被害にあった。長野新幹線車両センターに停めてあった北陸新幹線120両が浸水した。[219]。また、福島県の阿武隈川が氾濫するなど、被害は東日本の広範囲に及んだ。

台風21号は、日本列島に上陸せず太平洋側を抜けたが、千葉県を中心に被害を及ぼした。例えば、市原市を流れる養老川、新堀川、村田川が氾濫し、海士有木駅は周辺が冠水、線路が水没し、茂原市では土砂崩れで道路が封鎖されたと報じられた。住宅の浸水被害は1,496棟にのぼり(10月28日午後4時現在)、市内が広範囲に冠水した茂原市が全体の5割近くを占めた。浸水による野菜や果物の被害も31市町村で発生した[186]。このように台風本体が上陸せずとも、台風が周辺の前線を刺激することで各地に大きな被害をもたらす場合もあることが明らかになった。

### 「革新的環境イノベーション戦略」

「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」及び「統合イノベーション戦略2019」に基づき、日本が強みを有するエネルギー・環境分野において革新的なイノベーションを創出し、社会実装可能なコストを実現し、世界に広めていくことを目的として策定された[187]。具体的には、

- ① 16の技術課題についてコスト目標等を示した「イノベーション・アクションプラン」
- ② その実現のための研究体制や投資促進策を示した「アクセラレーションプラン」
- ③ 社会実装に向けて、グローバルリーダーとともに発信し共創していく「ゼロエミッション・イニシアティブズ」

から構成され、世界のカーボンニュートラル、さらには、過去のストックベースでのCO<sub>2</sub>削減(ビヨンド・ゼロ)を可能とする革新的技術を2050年までに確立することを目指し、長期戦略に掲げた目標に向けて社会実装を目指すとしている。

同戦略は2050年までの様々な技術の確立を想定し、必要に応じて見直しながら活用する、としている。

技術の社会実装、対策効果の発現までに要するリードタイムを考えると、まず2050年にネット・ゼロ社会を構築するという目標を設定し、そこからそれぞれの技術開発の目標年次や優先性などを明確にすることが望まれる。

### 「イノベーションのジレンマ」

なぜ、巨大で優良な企業が、技術革新の中で滅んでしまうことが起きるのか。見事な成功をおさめてきた企業の有能な経営陣が、ひたすら利益と成長を求めるうちに、最高の経営手法を使いながら、企業を失敗に導いてしまう例があるのはなぜか。この問い合わせに対して、クリエイティン・クリステンセンは、世界的なベストセラーとなった著書『The Innovator's Dilemma』(邦題『イノベーションのジレンマ』翔泳社)において、ハードディスク業界や掘削機業界についての詳細な分析を踏まえ、「持続的」技術と「破壊的」技術の間に戦略的に重要な違いがあること、技術進歩のペースが市場の需要が変化するペースを上回る可能性があること、成功している企業の顧客構造と財務状況が、新規参入企業と比較して、どのような投資を魅力的と考えるかに重大な影響を与えることなどを主な要因として示した。自社製品の持つ技術的優位性を根底から揺るがすような「破壊的」な技術開発に、自社の限られた資源を投入するという経営判断が容易ではないことは想像に難くない。

さらにクリステンセンは、こうしたイノベーションのジレンマを回避するためのいわば処方箋として、まずマネージャーが「持続的」技術と「破壊的」技術の衝突がどのようなものであるかを理解する必要があるとする。次に各組

織の市場での地位、経済構造、開発能力、価値が、顧客の力と調和し、持続的イノベーションと破壊的イノベーションというまったく異なる仕事を邪魔せず、支援する環境を作り出す必要があるとした。

日本企業は、1970年代前半、1980年前後のオイルショックの時には「破壊的」な省エネ技術のイノベーターとして、世界市場における成功を収めた。しかし来るべきネット・ゼロ社会への移行の中で、日本企業は「イノベーションのジレンマ」ゆえに「持続的」技術に固執して「破壊的」技術への投資を起こしにくく、日本全体のエネルギー経済システムの移行(トランジション)が遅れ、最終的には国内産業がグローバルサプライチェーンから置き去りにされ、経済成長率が下落するリスクを考える必要がある。このため個々の企業の戦略ないし社会制度設計の中で、ネット・ゼロ社会構築のための「破壊的」技術をどのように育てていくかについて十分な検討が必要であろう。

## 参考文献

- [1] F. Parra, COP25 president Carolina Schmidt blames big emitters for low-ambition climate talks, Clim. Home News. (2020). <https://www.climatechangenews.com/2020/01/15/cop25-president-carolina-schmidt-blames-big-emitters-low-ambition-climate-talks/>.
- [2] B.G.J. Rose, S.K., Diaz, D.B., Understanding the social cost of carbon: a model diagnostic and inter-comparison study, Clim. Chang. Econ. 8 (2017). doi:10.1142/S2010007817500099.
- [3] W.D. Nordhaus, Revisiting the social cost of carbon, 2016 (2016). doi:10.1073/pnas.1609244114.
- [4] U.S. Government, Technical Support Document: Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866, (2010).
- [5] 朝日新聞, 自然災害保険金、過去最高の1.6兆円支払い 値上げへ, 朝日新聞デジタル. (2019).
- [6] R. Mechler, Asaptaion: incremental or transformational? IPCC Special Report on 1.5°C-Chapter 4, in: IPCC Pavilion COP24 Katowive, 6.12.2018, 2018. <https://www.slideshare.net/ipcc-media/chapter-4-adaptation-incremental-or-transformational>.
- [7] CCC, Net ZeroThe UK's contribution to stopping global warming, Committee on Climate Change, London, 2019.
- [8] UK Gov., The Grand Challenge missions, (2019). <https://www.gov.uk/government/publications/industrial-strategy-the-grand-challenges/missions> (accessed December 20, 2019).
- [9] Fremch Ministry for an Ecological and InclusiveTransition, The revised French Low Carbon Strategy An ecological and inclusive transition towards carbon neutrality, 2019.
- [10] BDI, Climate Paths for Germany, (2018). [http://image-src.bcg.com/Images/Climate-paths-for-Germany-english\\_tcm9-183770.pdf](http://image-src.bcg.com/Images/Climate-paths-for-Germany-english_tcm9-183770.pdf) (accessed October 20, 2019).
- [11] Port of Rotterdam, Decarbonising the port and industrial complex Rotterdam, Rotterdam, 2019. [https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/por\\_priorities\\_energy\\_transition\\_european\\_elections\\_2019.pdf](https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/por_priorities_energy_transition_european_elections_2019.pdf).
- [12] ITF, ITF Transport Outlook 2019, OECD, OECD Publishing, Paris, 2019. doi:10.1787/transp\_outlook-en-2019-en.
- [13] Fraunhofer ISI, Industrial Innovation Part 1: Technology Analysis, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI), Karlsruhe, Germany, 2019.
- [14] M. Economics, Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry, 2019.
- [15] ETC, Reaching zero carbon emissions from Shipping, Energy Transitions Comission, 2019.
- [16] ETC, Reaching zero carbon emissions from Cement, Energy Transitions Comission, 2019.
- [17] ETC, Reaching zero carbon emissions from Aviation, Energy Transitions Comission, 2019.
- [18] ETC, Reaching zero carbon emissions from Heavy Road Transport, Energy Transitions Comission, 2019.
- [19] ETC, Reaching zero carbon emissions from Steel, Energy Transitions Comission, 2019.
- [20] C.N. Coalition, Carbon Neutrality Coalition welcomes new members, pledges renewed ambition at UN Climate Action Summit, Carbon Neutrality Coalit. (2019).
- [21] UNEP, Annex B – UNEP Emissions Gap Report 2019, (2019).
- [22] United Nations Environment Programme, Emissions Gap Report 2019, UNEP, Nairobi, 2019.
- [23] 環境省, 2050年二酸化炭素排出実質ゼロ表明 自治体, (2020). <https://www.env.go.jp/policy/zerocarbon.html> (accessed May 28, 2020).
- [24] 温暖化対策統括本部調整課, 「Zero Carbon Yokohama」の実現に向けて, 横浜市, 横浜, 2019.
- [25] 一般財団法人環境イノベーション情報機構, 座礁資産, 環境用語. (2017). <http://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&serial=4483> (accessed April 30, 2020).
- [26] F.W. Geels, Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study, Res. Policy. 31 (2002) 1257–1274. doi:10.1016/S0048-7333(02)00062-8.
- [27] 内閣府, 2018年度国民経済計算(2011年基準・2008SNA), 東京, 2019. [https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data\\_list/kakuhou/files/h30/h30\\_kaku\\_top.html](https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data_list/kakuhou/files/h30/h30_kaku_top.html).
- [28] 広井良典, 人口減少社会のデザイン, 東洋経済新報社, 東京, 2019.

- [29] 水野和夫, 資本主義の終焉と歴史の危機, 集英社, 東京, 2014.
- [30] S. Kojima, Challenging“The Dilemma of Growth”: the Key to Prosperity without Bankrupting Nature Commentary on “Bankrupting Nature: Denying Our Planetary Boundaries” by Anders Wijkman and Johan Rockström, JAPAN SPOTLIGHT. (2013).  
[https://www.jef.or.jp/journal/pdf/188th\\_Club\\_of\\_Rome.pdf](https://www.jef.or.jp/journal/pdf/188th_Club_of_Rome.pdf).
- [31] N. Nakicenovic, J. Alcamo, A. Gräbner, K. Riahi, A. Roehr, H.-H. Rogner, N. Victor, Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.  
<http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/6101/>.
- [32] B.C. O'Neill, E. Kriegler, K.L. Ebi, E. Kemp-Benedict, K. Riahi, D.S. Rothman, B.J. van Ruijven, D.P. van Vuuren, J. Birkmann, K. Kok, M. Levy, W. Solecki, The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century, *Glob. Environ. Chang.* 42 (2017) 169–180. doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004.
- [33] K. Riahi, D.P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B.C. O'Neill, S. Fujimori, N. Bauer, K. Calvin, R. Dellink, O. Fricko, W. Lutz, A. Popp, J.C. Cuaresma, S. KC, M. Leimbach, L. Jiang, T. Kram, S. Rao, J. Emmerling, K. Ebi, T. Hasegawa, P. Havlik, F. Humpenöder, L.A. Da Silva, S. Smith, E. Stehfest, V. Bosetti, J. Eom, D. Gernaat, T. Masui, J. Rogelj, J. Strefler, L. Drouet, V. Krey, G. Luderer, M. Harmsen, K. Takahashi, L. Baumstark, J.C. Doelman, M. Kainuma, Z. Klimont, G. Marangoni, H. Lotze-Campen, M. Obersteiner, A. Tabeau, M. Tavoni, The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Glob. Environ. Chang.* 42 (2017) 153–168. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- [34] A. Grubler, C. Wilson, N. Bento, B. Boza-Kiss, V. Krey, D.L. McCollum, N.D. Rao, K. Riahi, J. Rogelj, S. De Stercke, J. Cullen, S. Frank, O. Fricko, F. Guo, M. Gidden, P. Havlik, D. Huppmann, G. Kiesewetter, P. Rafaj, W. Schoepp, H. Valin, A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies, *Nat. Energy.* 3 (2018) 515–527. doi:10.1038/s41560-018-0172-6.
- [35] 西岡秀三, 日本低炭素社会のシナリオ—二酸化炭素70%削減の道筋, 日刊工業新聞社, 2008.
- [36] 西岡秀三, 低炭素社会のデザイン——ゼロ排出は可能か, 岩波新書, 2011.
- [37] 中央環境審議会 地球環境部会, 2013 年以降の対策・施策に関する報告書, 2012.
- [38] JCER, デジタル経済への移行、温暖化ガスは6割減に: 2050年8割削減には1万円の環境税、排出量ゼロ、大量のCCSが必要に, 日本経済研究センター, 東京, 2019.
- [39] D. Sandalow, J. Friedmann, C. McCormic, S. McCoy, Direct Air Capture of Carbon Dioxide, 2019.
- [40] 首相官邸, 日本の約束草案, 東京, 2015. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/27581.pdf>.
- [41] BNEF, 脱炭素社会に向けたエネルギー転換-再生可能エネルギーの革新的推進-, 2019.
- [42] 資源エネルギー庁, 総合エネルギー統計(エネルギーバランス表)2015年度, 東京, 2019.  
[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html#headline2](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2).
- [43] 環境省, 再生可能エネルギー導入ポテンシャルマップ・ゾーニング基礎情報, 東京, 2017.
- [44] コスト等検証委員会, 各省のポテンシャル調査の相違点の電源別整理, 東京, 2011.  
[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive02\\_08.html#haifu](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive02_08.html#haifu).
- [45] 資源エネルギー庁, 電源種別(太陽光・風力)のコスト動向等について, 東京, 2016.  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/santei/pdf/025\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/santei/pdf/025_01_00.pdf).
- [46] 環境省, 平成25年度地熱発電に係る導入ポテンシャル精密調査・分析委託業務報告書, 東京, 2014. <https://www.env.go.jp/earth/report/h26-04/index.html>.
- [47] JST, 主要再生可能エネルギーの都道府県別ポテンシャル分布と発電所建設コスト低減, 2018.
- [48] 科学技術予測センター, S&T Foresight 2019総合報告書, 東京, 2019.  
<https://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-NR183-FullJ.pdf>.
- [49] JST, 低炭素電源システムの安定化技術・経済性評価(4)-ゼロカーボン電源システムと技術開発課題-, in: 低炭素社会戦略センターシンポジウム, 2019.
- [50] 環境省, 平成22年度再生可能エネルギー導入ポтенシャル調査報告書, 東京, 2011.  
<https://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/>.
- [51] S. Mano, B. Ovgor, Z. Samadov, M. Pudlik, V. Jülich, D. Sokolov, J.Y. Yoon, Gobitec and Asian Super Grid for Renewable Energies in Northeast Asia, 2014. [https://www.renewable-ei.org/images/pdf/20140124/Gobitec\\_and\\_ASG\\_report\\_ENG\\_BOOK\\_final.pdf](https://www.renewable-ei.org/images/pdf/20140124/Gobitec_and_ASG_report_ENG_BOOK_final.pdf).
- [52] NEDO, 砂漠からのエネルギーtask8 大規模太陽光発電システムに関する調査研究, 2015.  
<https://www.nedo.go.jp/content/100778294.pdf>.
- [53] 自然エネルギー財団, アジア国際送電網研究会 第3次報告書, 2019. <https://www.renewable-energy.org/reports/3rd-report-on-the-international-grid-project-for-asia/>

- ei.org/pdfdownload/activities/ASG\_ThirdReport\_JP.pdf.
- [54] RITE, 二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書, 2006.
- [55] みずほ情報総研株式会社, 独立行政法人産業技術総合研究所, 千代田化工建設株式会社, 平成 25 年度シャトルシップによるCCS を活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務, 2014. [https://www.env.go.jp/earth/ccs/h25\\_report.html](https://www.env.go.jp/earth/ccs/h25_report.html).
- [56] IEEJ, 日本におけるアンモニアのエネルギー利用について-水素社会における、もう1つのエネルギー キャリアー, 東京, 2017. <https://eneken.ieej.or.jp/data/7440.pdf>.
- [57] RITE, 全国貯留層賦存量調査, 2005. <https://www.rite.or.jp/Japanese/project/tityu/fuzon.html>.
- [58] 薮自求, 松岡俊文, 長岡プロジェクトからみた二酸化炭素地中貯留技術の現状と課題, 地学雑誌. 117 (2008) 734–752.
- [59] JAPEX, 北海道・勇払油ガス田浅層における原油開発の開始について, 石油資源開発株式会社, 2017. [https://www.japex.co.jp/newsrelease/pdfdocs/JAPEX20170622\\_YufutsuShallowFormationDevelopment\\_j.pdf](https://www.japex.co.jp/newsrelease/pdfdocs/JAPEX20170622_YufutsuShallowFormationDevelopment_j.pdf).
- [60] 財務省, 財務省貿易統計, 東京, 2019. <https://www.customs.go.jp/toukei/search/futsu1.htm>.
- [61] GSEP, New electricity frontiers: Harnessing the role of low-carbon electricity uses in a digital era, Montreal, Canada, 2018. <https://www.globalelectricity.org/content/uploads/New-electricity-frontiers-report.pdf>.
- [62] D. Steinberg, D. Bielen, J. Eichman, K. Eurek, J. Logan, T. Mai, C. McMillan, A. Parker, L. Vimmerstedt, E. Wilson, Electrification & Decarbonization: Exploring U.S. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in Scenarios with Widespread Electrification and Power Sector Decarbonization, Denver, 2017.
- [63] 三宅成也, 再エネの価値を最大化させるトレーサブルな電力の供給, みんな電力, 東京, 2019. [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/seido\\_kento/pdf/033\\_06\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/033_06_01.pdf).
- [64] リキンジェレミー, グローバル・グリーン・ニューディール:2028年までに化石燃料文明は崩壊、大胆な経済プランが地球上の生命を救う, 1st ed., NHK出版, 東京, 2020.
- [65] W. Steffen, J. Rockström, K. Richardson, T.M. Lenton, C. Folke, D. Liverman, C.P. Summerhayes, A.D. Barnosky, S.E. Cornell, M. Crucifix, J.F. Donges, I. Fetzer, S.J. Lade, M. Scheffer, R. Winkelmann, H.J. Schellnhuber, Trajectories of the Earth System in the Anthropocene, Proc. Natl. Acad. Sci. 115 (2018) 8252–8259. doi:10.1073/pnas.1810141115.
- [66] F. Kraxner, S. Leduc, S. Fuss, K. Aoki, Energy resilient solutions for Japan – a BECCS case study, Energy Procedia. 61 (2014) 2791–2796. doi:10.1016/j.egypro.2014.12.316.
- [67] 下山哲平, 送料が10分の1に...大本命!「自動運転×小売」の衝撃 世界の取り組み状況まとめ(特集:自動運転が巻き起こす小売革命 第1回), 自動運転LAB. (2019).
- [68] 藤村俊夫, 自動車の将来動向:EVが今後の主流になりうるのか 第5章, 東京, 2019. <https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/thoughtleadership/automotive-insight/vol7.html>.
- [69] 内山英和, EVモータの基本を知ろう, MOTORエレクトロニクス. (2015) 20–27. <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/47/47111/47111.pdf>.
- [70] E.T. Japan, 基幹技術が出そろった電気自動車、その近未来像, NIIDays 2011 開催リポート. (2012). <https://eetimes.jp/ee/articles/1201/23/news003.html>.
- [71] リキンジェレミー, 限界費用ゼロ社会 <モノのインターネット>と共有型経済の台頭, NHK出版, 東京, 2015.
- [72] 柳沢大輔, 鎌倉資本主義, プレジデント社, 東京, 2018.
- [73] 日経BP社, 世界をつなぐ100の技術, 1st ed., 東京, 2019.
- [74] 番陽一郎, 壁面や窓がエネルギーを生み出す、日独の方向性の違いは?, BUILT. (2014).
- [75] 大林組, 日本初の高層純木造耐火建築物の建設に着手, 株式会社大林組. (2019).
- [76] 英エコノミスト編集部, 2050年の技術, 1st ed., 株式会社文藝春秋, 東京, 2017.
- [77] 足立英一郎, 「未来世代」は視野にあるか ステークホルダー資本主義隆盛, 日本経済新聞. (2020).
- [78] EC, In-depth analysis in support on the COM(2018) 773: A Clean Planet for all – A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, European Comission, Brussel, 2018.
- [79] A. Allanore, L. Yin, D.R. Sadoway, A new anode material for oxygen evolution in molten oxide electrolysis, Nature. 497 (2013) 353–356. doi:10.1038/nature12134.

- [80] C. Bataille, Low and zero emissions in the steel and cement industries, 2020.  
<https://www.oecd-ilibrary.org/content/paper/5ccf8e33-en>.
- [81] RIEF, 化学メーカーのカネカ、生分解性プラスチック生産能力増強のため、グリーンボンド発行へ。9月に50億円。生産能力を5倍増。将来は100倍増の計画も(RIEF), 一般社団法人環境金融研究機構。(2019).
- [82] 菊川篤, 藻類バイオ燃料, 日立総合計画研究所. (2018). <https://www.hitachi-hri.com/keyword/k070.html> (accessed December 6, 2019).
- [83] 一般社団法人日本エレクトロヒートセンター, エレクトロヒートハンドブック, オーム社, 2019.
- [84] 萩原幹児, 連続蒸解装置の発展の歴史とアンドリツの最新技術, 紙パ技協誌. 70 (2016) 772–784. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtappij/70/8/70\\_772/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtappij/70/8/70_772/_article/-char/ja/).
- [85] 王子ホールディングス, バイオケミカル素材の開発, 王子ホールディングス株式会社. (2019). [https://www.ojiholdings.co.jp/r\\_d/theme/dp.html](https://www.ojiholdings.co.jp/r_d/theme/dp.html) (accessed December 6, 2019).
- [86] 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, 東京, 2018.
- [87] High-Level Group on Energy-Intensive Industries, Masterplan for a Competitive Transformation of EU Energy-intensive Industries: Enabling a Climate-neutral, Circular Economy by 2050, Belgium, 2019. doi:10.2873/723505.
- [88] 末松広行, 農林水産政策における環境問題への取り組み, 2020.
- [89] 塙田新之助, 日本発「ロボットAI農業」の凄い未来 2020年に激変する国土・GDP・生活, 講談社+α新書, 2017.
- [90] 林野庁, 樹種別齡級別蓄積(平成29年3月31日現在), 東京, 2017.  
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/5.html>.
- [91] P. Kotecki, 日本にも来るか、木造高層ビルが北米でブームに, TECH Inside. (2018).
- [92] 加納由希絵, 木造超高層ビルは建つか 住友林業が打ち出す構想とは, ITmedia. (2018).
- [93] R. Cernansky, バイオ炭は地球と人類を救えるか, Nat. Dig. 12 (2015) 24–27.  
doi:10.1038/ndigest.2015.150424.
- [94] A. Tisserant, F. Cherubini, Potentials, Limitations, Co-Benefits, and Trade-Offs of Biochar Applications to Soils for Climate Change Mitigation, Land. 8 (2019) 179. doi:10.3390/land8120179.
- [95] 市橋新, 馬場健司, 自治体における気候変動適応策の施策化過程に関する課題と解決策－インタラクティブ・アプローチの検証とワークショップの実践－, 環境科学会誌. 28 (2015) 27–36.
- [96] 白井信雄, 田中充, 田村誠, 安原一哉, 原澤英夫, 小松利光, 気候変動適応の理論的枠組みの設定と具体化の試行－気候変動適応策の戦略として－, 環境科学会誌. 27 (2014) 313–323.
- [97] 白井信雄, サードウェイ(第三の道)～白井信雄のサスティナブル・スタイル, (2015).
- [98] 国土交通省, i-Construction大賞受賞取組概要, 東京, 2019.  
<http://www.mlit.go.jp/common/001321768.pdf>.
- [99] 内閣府, Society 5.0「科学技術イノベーションが拓く新たな社会」説明資料, 東京, 2018.
- [100] W. Hall, T. Spencer, S. Kumar, Towards a Low Carbon Steel Sector: Overview of the Changing Market, Technology and Policy Context for Indian Steel, New Delhi, 2020.
- [101] 首相官邸, パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略, 首相官邸, 東京, 2019.
- [102] JST, 低炭素電源システムの安定化と技術・経済性評価－ゼロカーボン電源システムと技術開発課題, 3 (2019).
- [103] 安田、濱崎, TIMES-JMT Gridを用いた再生可能エネルギー大量導入長期シナリオによる送電線投資分析, 電気学会合同研究会. (2018).
- [104] IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2018, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [105] 内藤克彦, 電力グリッドの運用で立ち遅れる我が国, 京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座. (2017). [http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable\\_energy/occasionalpapers/occasionalpapersno28](http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/occasionalpapers/occasionalpapersno28).
- [106] 内藤克彦, フローベース(実潮流)の送電管理:東電の試み, 京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座. (2019). [http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable\\_energy/stage2/contents/column0136.html](http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/column0136.html).
- [107] B. Wehrmann, Renewables briefly cover 100% of Germany's power demand for 2nd time, Journal. Energy Transit. (2018). <https://www.cleanenergywire.org/news/renewables-briefly-cover-100-germanys-power-demand-2nd-time>.
- [108] 小笠原潤一, 欧州における再生可能エネルギー発電導入拡大に伴う動き, 東京, 2017.  
[https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy\\_environment/saisei\\_dounyu/pdf/002\\_02\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/saisei_dounyu/pdf/002_02_00.pdf)

- [109] B. Nykvist, M. Nilsson, Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles, *Nat. Clim. Chang.* 5 (2015) 329–332. doi:10.1038/nclimate2564.
- [110] ClimateChangeNews, Germany to quit coal by 2038, under commission proposal, *Clim. Chang. News.* (2019). <https://www.climatechangenews.com/2019/01/26/german-quit-coal-2038-commission-proposal/>.
- [111] IRENA, Measuring the socio-economics of transition: Focus on jobs, Abu Dhabi, 2020.
- [112] W. Nordhaus, 地球温暖化の経済学, 東洋経済新報社, 2002.
- [113] IPCC, Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2014. [www.cambridge.org/9781107641655](http://www.cambridge.org/9781107641655) (accessed January 20, 2020).
- [114] F.C. Moore, D.B. Diaz, Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy, *Nat. Clim. Chang.* 5 (2015) 127–131. doi:10.1038/nclimate2481.
- [115] 国立社会保障・人口問題研究所, 日本の将来推計人口(平成29年推計), 東京, 2017. [http://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp\\_zenkoku2017.asp](http://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp_zenkoku2017.asp).
- [116] 国土交通省, 建築着工統計調査(【住宅】利用関係別 構造別 建て方別 都道府県別 戸数), 東京, 2019. [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/jouhouka/sosei\\_jouhouka\\_tk4\\_000002.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/jouhouka/sosei_jouhouka_tk4_000002.html).
- [117] 国土交通省, 建築着工統計調査(【建築物】構造別・用途別), 東京, 2019. [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/jouhouka/sosei\\_jouhouka\\_tk4\\_000002.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/jouhouka/sosei_jouhouka_tk4_000002.html).
- [118] 名古屋大学, 東京大学, 国立環境研究所, 平成29年度 環境経済の政策研究(我が国に蓄積されている資源のストックに関する調査・検討)研究報告書, 2018. [http://www.env.go.jp/policy/keizai\\_portal/F\\_research/report29\\_4.pdf](http://www.env.go.jp/policy/keizai_portal/F_research/report29_4.pdf).
- [119] 田中健介, 早川容平, 奥岡桂次郎, 杉本賢二, 谷川寛樹, 都道府県における建築物・社会基盤施設の経年マテリアルストック推計に関する研究, in: 土木学会論文集G(環境), Vol69, No6(環境システム研究論文集第41巻), 2013: p. II\_25-II\_34.
- [120] 資源エネルギー庁, 環境共創イニシアチブ, ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス支援事業調査発表会 2016, 東京, 2016. [https://sii.or.jp/zeh28/file/doc\\_1122.pdf](https://sii.or.jp/zeh28/file/doc_1122.pdf).
- [121] 鳴海大典, 植本孝広, 下田吉之, 村上周三, 住宅における省エネルギー対策評価とネットゼロエネルギー達成可能性の検討, 日本建築学会環境系論文集, 76 (2011) 665–672.
- [122] 積水ハウス, 集合住宅におけるZEH推進, 東京, 2019. [https://www.sekisuihouse.co.jp/sustainable/environment/decarbonization\\_8/index.html](https://www.sekisuihouse.co.jp/sustainable/environment/decarbonization_8/index.html).
- [123] 大京グループ, 「ライオンズ芦屋グランフォート」にて日本初「Nearly ZEH-M(ニアリー ゼッチマンション)」を取得, 東京, 2018. <https://www.daikyo.co.jp/dev/files/20180710.pdf>.
- [124] IGES, Aalto University, D-mat, 1.5-Degree Lifestyles: Targets and Options for Reducing Lifestyle Carbon Footprints, Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan, 2019.
- [125] 環境省, 家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態統計調査(家庭CO<sub>2</sub>統計), 東京, 2019. <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html>.
- [126] 大西暁生, 河村直幸, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹, 都道府県別建物ストック需要の将来シナリオ分析, in: 日本都市計画学会 都市計画報告集NO.9 2010年8月, 2010: pp. 58–63.
- [127] 資源エネルギー庁, 環境共創イニシアチブ, ネット・ゼロ・エネルギー・ビル実証事業調査発表会 2019, 東京, 2019. [https://sii.or.jp/zeb31/uploads/ZEB\\_conference\\_2019\\_02.pdf](https://sii.or.jp/zeb31/uploads/ZEB_conference_2019_02.pdf).
- [128] 大和ハウスグループ, ZEBを新たな技術で実現。電力自給オフィスで人にも環境にも優しく, 東京, 2019. [https://www.daiwahouse.com/sustainable/sustainable\\_journey/topics/sagabuilding/](https://www.daiwahouse.com/sustainable/sustainable_journey/topics/sagabuilding/).
- [129] 国土交通省, 全国都市交通特性調査 集計データ(都市別指標), 東京, 2018. [http://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi\\_tosiko\\_fr\\_000024.html](http://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi_tosiko_fr_000024.html).
- [130] 小宮山宏, 山田興一, 新ビジョン2050:地球温暖化、少子高齢化は克服できる, 日経BP社, 東京, 2016.
- [131] 国土交通省, 自動車燃費一覧(平成31年3月), 2019. [https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_fr10\\_000039.html](https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000039.html).
- [132] 高行男, 自動車を構成する3大材料とボディ, JAMAGAZINE(一般社団法人日本自動車工業会). (2013). <http://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/201303/01.html>.
- [133] 山田久美, 炭素繊維でクレマは30%も軽くなるEVの弱点「電池の持ち」を大きく改善する可能性, 東京, 2010.
- [134] 大楠恵美, 自動車構造材の軽量化と多様化, 東京, 2014. [https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/\\_icsFiles/afIELDfile/2016/10/21/140728m\\_ohkusu.pdf](https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afIELDfile/2016/10/21/140728m_ohkusu.pdf).

- [135] 国土交通省, 自動車輸送統計調査(2015年度), 東京, 2016. <https://www.mlit.go.jp/k-toukei/saishintoukeihyou.html>.
- [136] クラウスシュワブ, 「第四次産業革命」を生き抜く, 1st ed., 日本経済新聞社, 東京, 2019.
- [137] European Commission, In-depth analysis in support on the COM(2018) 773: A Clean Planet for all – A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, European Commission, Brussels, Belgium, 2018.
- [138] Y. Liu, J. Deng, C. Liu, S. Li, Energy optimization analysis of the more electric aircraft, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 113 (2018) 012152. doi:10.1088/1755-1315/113/1/012152.
- [139] 国土交通省, 内航船舶輸送統計調査, 交通経済統計調査室, 東京, 2019.
- [140] 国土交通省, 航空輸送統計調査, 交通経済統計調査室, 東京, 2019.
- [141] 日本鉄鋼連盟, 普通鋼地域別用途別受注統計表 IV参考統計表2015年度分, 東京, 2015.
- [142] 京都大学, プロジェクト概要, NCVプロジェクト. (2020). <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ncv/outline/> (accessed January 20, 2020).
- [143] European Commission, Supplementary information for the In-depth Analysis in Support of the Commission Communication COM ( 2018 ) 773 A Clean Planet for all – A European long-term strategic vision for a prosperous , modern , competitive and climate neutral economy., (2018) 114.
- [144] 岩崎博, 三森輝夫, CCS(二酸化炭素回収貯留)の概要と展望— CO<sub>2</sub> 分離回収技術の評価と課題一, 2016. <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2015-pp-08.pdf>.
- [145] RITE, CO<sub>2</sub>分離・回収技術の高度化・実用化への取り組み, 2017.
- [146] International CCS Knowledge Centre, The Shand CCS Feasibility Study Public Report, 2018. [https://ccsknowledge.com/pub/documents/publications/Shand CCS Feasibility Study Public\\_Full\\_Report\\_NOV2018.pdf](https://ccsknowledge.com/pub/documents/publications/Shand CCS Feasibility Study Public_Full_Report_NOV2018.pdf).
- [147] 総務省, 平成27年(2015年)産業連関表(物量表), 東京, 2019. [https://www.soumu.go.jp/toukei\\_toukatsu/data/io/ichiran.htm](https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/ichiran.htm).
- [148] 土木学会コンクリート委員会, 混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案), 東京, 2018.
- [149] E. Hurmekoski, How can wood construction reduce environmental degradation?, European Forest Institute, 2017.
- [150] 住友林業, 街を森にかえる環境木化都市の実現へ木造超高層建築の開発構想W350計画始動, 東京, 2018. <https://sfc.jp/information/news/2018/2018-02-08.html>.
- [151] 大林組, 日本初の高層純木造耐火建築物の建設に着手, 東京, 2019. [https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20190723\\_1.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20190723_1.html).
- [152] 経済産業省, 経済産業省生産動態統計年報 資源・窯業・建材統計編, 東京, 2016. [https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/gaiyo/resourceData/09\\_shigenyogyo/nenpo/h2dee2015k.pdf](https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/gaiyo/resourceData/09_shigenyogyo/nenpo/h2dee2015k.pdf).
- [153] プラスチック循環利用協会, プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況, 東京, 2017.
- [154] ETC, Reaching zero carbon emissions from Plastics, Energy Transitions Comission, 2019.
- [155] H. Nagaki, J. Takahashi, K. Kemmochi, J. Matsui, Inventory analysis in production and recycling process of advanced composite materials, J. Adv. Sci. 13 (2011) 125–128.
- [156] 船崎敦, 種田克典, 自動車LCAのためのインベントリ作成の考え方(3)-鉄鋼製品の製造-, 自動車研究. 23 (2001) 548–555.
- [157] 内閣府, CO<sub>2</sub> 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, 東京, 2018. <https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/houkousei.pdf>.
- [158] 日本製紙連合会, 製紙産業の現状(紙・板紙), 2019. <https://www.jpa.gr.jp/states/paper/index.html#topic01>.
- [159] CNF研究会, セルロースナノファイバー関連サンプル提供企業一覧(第8版2019年9月24日現在), 京都, 2019. [http://tc-kyoto.or.jp/2019/09/CNF\\_Sample\\_8th.pdf](http://tc-kyoto.or.jp/2019/09/CNF_Sample_8th.pdf).
- [160] 日本製紙グループ, セルロースナノファイバー(CNF):cellenpia, n.d. <https://www.nipponpapergroup.com/products/cnf/>.
- [161] M. Toivonen, The next-generation bioproduct mill in Äänekoski, 2018. [https://www.valmet.com/globalassets/media/events/2018/customer-days-2018/pulp/matti-toivonen\\_aanekoski-visit.pdf](https://www.valmet.com/globalassets/media/events/2018/customer-days-2018/pulp/matti-toivonen_aanekoski-visit.pdf).
- [162] エイモリーロビンス, 新しい火の創造, ダイヤモンド社, 東京, 2012.
- [163] 西岡秀三, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素70%削減の道筋-, 日刊工業新聞社, 東京, 2008.

- [164] M. Kainuma, T. Masui, K. Oshiro, G. Hibino, Pathways to deep decarbonization in Japan, SDSN-IDDR, 2015.
- [165] M. Fasihi, O. Efimova, C. Breyer, Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants, J. Clean. Prod. 224 (2019) 957–980. doi:10.1016/j.jclepro.2019.03.086.
- [166] 國土交通省, 我が国の住生活をめぐる状況, 東京, 2015.  
<https://www.mlit.go.jp/common/001087737.pdf>.
- [167] 総務省, 統計でみる市区町村のすがた2016, 東京, 2016. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200502&tstat=000001084735&cycle=0>.
- [168] 國土交通省, 道路統計年報2019 道路の現況, 東京, 2019. <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2019/nenpo02.html>.
- [169] 日本道路協会, 舗装設計便覧, 東京, 2006. <http://www.road.or.jp/event/pdf/hosou03.pdf>.
- [170] 日本建築学会, 建物のLCA指針:温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール, 2006.  
[http://news-sv.aij.or.jp/tkankyo/s0/tkankyo/arc08\\_files/AIJ-LCAandLCW\\_Manual\\_Ver.4.02.pdf](http://news-sv.aij.or.jp/tkankyo/s0/tkankyo/arc08_files/AIJ-LCAandLCW_Manual_Ver.4.02.pdf).
- [171] EPA, Global Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emission Projections & Marginal Abatement Cost Analysis: Methodology Documentation, 2019.
- [172] 服部泰紀, 硬質ウレタンフォームの発泡剤をめぐる 環境問題対策の動向について, ニチアス技術時報. 1 (2014) 1–8. <https://www.nichias.co.jp/research/technique/pdf/364/03.pdf>.
- [173] イプロスものづくり, PFC・PFN除害装置「クリーンエスPF・PFN」ホクエツ, (2020).  
<https://www.ipros.jp/product/detail/2000111459?hub=146+1+除害装置>.
- [174] 電子情報技術産業協会, 半導体業界におけるPFC等ガスの 排出削減活動の推進, (2016) 7–9.  
<https://www.jeita.or.jp/japanese/assets/pdf/letter/vol15/07.pdf>.
- [175] 國土交通省, 国土のグランドデザイン: 人口関係参考資料, 東京, 2014.  
<https://www.mlit.go.jp/common/001046872.pdf>.
- [176] 一般社団法人産業環境管理協会, リサイクルデータブック2018, 東京, 2018.  
<http://www.cjc.or.jp/data/databook.html>.
- [177] 資源エネルギー庁, 「平成28年度エネルギーに関する年次報告」(エネルギー白書2017)PDF版, 東京, 2017.
- [178] 「チャレンジ・ゼロ」構想を発表, 日本経済団体連合会, 東京, 2019.  
[https://www.keidanren.or.jp/journal/times/2019/1212\\_02.html](https://www.keidanren.or.jp/journal/times/2019/1212_02.html).
- [179] IPCC, Summary for Policymakers, in: N.M.W. (eds.) H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama (Ed.), IPCC Spec. Rep. Ocean Cryosph. a Chang. Clim., 2019.  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/03\\_SROCC\\_SPM\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/03_SROCC_SPM_FINAL.pdf).
- [180] 日本農業新聞, 新米荷受け再開 ほつ 続く停電 電源車で復旧 千葉・JA多古町ライスセンター, 日本農業新聞. (2019).
- [181] 大脇桂, 「千葉大規模停電」復旧状況の推移(9/9~9/24)【最終報】レスキューナウ. (2019).
- [182] スマートジャパン, 台風15号による千葉県の大規模停電、8割の太陽光ユーザーが自立運転機能を活用, スマートジャパン. (2019).  
<https://www.itmedia.co.jp/smartzapan/articles/1910/30/news042.html>.
- [183] 内閣府, 令和元年台風第19号に係る被害状況等について, 2019.  
<http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon19/index.html> (accessed December 27, 2019).
- [184] 日本気象協会, 台風19号による大雨・暴風・高潮の記録, Tenki.Jp. (2019).  
<https://tenki.jp/forecaster/deskpart/2019/10/13/6288.html>.
- [185] 産経新聞, 【台風19号】「地下神殿」首都圏外郭放水路、氾濫防ぐ, 産経新聞. (2019).
- [186] 日本経済新聞, 千葉県内の住宅浸水被害1496棟に, 日本経済新聞. (2019).  
<https://www.nikkei.com/article/DGXMXZ051493810Y9A021C1L71000/%0D>.
- [187] 首相官邸, 革新的環境イノベーション戦略, 東京, 2020.  
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/kankyouenryaku2020.pdf>.
- [188] 低炭素社会実行計画第三者評価委員会, 2018年度低炭素社会実行計画第三者評価委員会評価報告書, 2019. <https://www.keidanren.or.jp/policy/2019/029.pdf>.
- [189] BBC, EU carbon neutrality: Leaders agree 2050 target without Poland, BBC.
- [190] 五箇公一, バンデミックの背景にある根本的問題 人獣共通感染症との闘いに終わりはない, in: 特集 コロナ直撃 世界激変, 中央公論新社, 東京, 2020.  
<http://www.chuko.co.jp/ebook/2020/04/517026.html>.
- [191] イーズ未来共創フォーラム, 気候非常事態を宣言した日本の自治体, (2019).
- [192] 内閣府, エネルギー・環境イノベーション戦略に関するロードマップ, 東京, 2017.

- [193] 経済産業省, 自動車新時代戦略会議中間整理, 経済産業省自動車新時代戦略会議, 東京, 2018.
- [194] 経済産業省, 水素・燃料電池戦略ロードマップ, 東京, 2019.  
<https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001-1.pdf>.
- [195] 内閣府, 成長戦略実行計画, 2019.  
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/ap2019.pdf>.
- [196] 内閣府, 未来投資戦略 2018, 東京, 2018.  
[https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2018\\_zentai.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2018_zentai.pdf).
- [197] 内閣府, 統合イノベーション戦略 2019, 2019.  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019\\_honbun.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019_honbun.pdf).
- [198] 環境省, 長期低炭素ビジョン, 東京, 2017. <https://www.env.go.jp/council/06earth/y0618-14/mat03-1.pdf>.
- [199] 環境省, プラスチック資源循環戦略, 東京, n.d.  
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/111747.pdf>.
- [200] 國土交通省, 國土のグランドデザイン2050 ~対流促進型國土の形成~, 國土交通省. (2014).  
[http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku\\_tk3\\_000043.html](http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk3_000043.html) (accessed January 17, 2020).
- [201] 河合雅司, 未来の年表-人口減少日本でこれから起きること-, 講談社, 2017.
- [202] カクミチオ, 2100年の科学ライフ, NHK出版, 2012.
- [203] NHKスペシャル取材班, 縮小ニッポンの衝撃, 講談社, 2017.
- [204] 日高洋祐, 牧村和彦, 井上岳一, 井上佳三, MaaS モビリティ革命の先にある全産業のゲームチェンジ, 日経BP, 2018.
- [205] 梅津光弘, ビジネスの倫理学, 丸善, 東京, 2002.
- [206] メイソンポール, ポストキャピタルズム:資本主義以後の世界, 東洋経済新報社, 2017.
- [207] D. Herman, 持続可能な発展の経済学, 3rd ed., みすず書房, 2005.
- [208] 温室効果ガスインベントリオフィス, GIO, つくば, 2019. <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>.
- [209] 高橋末菜, セブンが省エネ店 駐車場に太陽光パネル、看板に風力も, 朝日新聞デジタル. (2018).  
<https://www.asahi.com/articles/ASL5Q4JDCL5QLFA01L.html>.
- [210] 海江田秀志, 末永弘, 下田明郎, 田中姿郎, 塙田健二, 津旨大輔, 伊藤久敏, 鈴木浩一, 下島公紀, 塙田ひろみ, 坪野考樹, 仲敷憲和, 横山隆壽, 大隅多加志, 我が國の地質的特徴を踏まえたCO2地中貯留技術の開発, 2012. <https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/N16.html>.
- [211] エネ庁, 第1節 エネルギー需給の概要, in: 平成30年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2019), 資源エネルギー庁, 東京, 2019.  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019html/2-1-1.html>.
- [212] エネ庁, 省エネ性能力タログ2019年版, 資源エネルギー庁, 東京, 2019.  
<https://seihinjyoho.go.jp/frontguide/pdf/catalog/2019/catalog2019.pdf>.
- [213] DENTONS, The future of gas: Transition to hydrogen in the gas grid, 2019.  
<https://www.dentons.com/en/insights/articles/2019/january/15/the-future-of-gas-transition-to-hydrogen-in-the-gas-grid>.
- [214] 日経BP社, 世界を変える100の技術, 1st ed., 日経BP社, 2018.
- [215] パーマカルチャーセンター, パーマカルチャーとは, (n.d.). <http://pccj.jp/permaculture/whats/> (accessed January 18, 2020).
- [216] 経済産業省, 代替フロン等4ガスの削減対策, (2014).  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo\\_gijutsu/chikyu\\_kankyo/yakusoku\\_soan/pdf/002\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/yakusoku_soan/pdf/002_04_00.pdf).
- [217] 産経新聞, 「走る蓄電池」が被災地で活躍 自動車各社がEV貸与, ITmediaNEWS. (2019).
- [218] 朝日新聞, ダム水面の太陽光パネルが数十枚燃える 千葉・市原, 朝日新聞デジタル. (2019).  
[https://www.asahi.com/articles/ASM994V27M99UDCB01M.html?iref=sptop\\_8\\_03](https://www.asahi.com/articles/ASM994V27M99UDCB01M.html?iref=sptop_8_03).
- [219] 福井新聞, 浸水の北陸新幹線120両「廃車」, 福井新聞オンライン. (2019).

## 編集後記

2050年の社会の絵姿を一定の根拠をもって展望していくのは、予想を超えて困難な作業であった。ほんの数年間で、想像もしなかった技術や製品等によって社会全体が様変わりすることを我々は経験的に知っている。現在、芽が出始めた技術は、おそらく2030年代には実用化・普及しており、2050年にはその次の世代の技術が普及していると考えられる。もとより「非連續なイノベーション」が起きている可能性も否定できない。ある個人の単なる思い付きでなく、ある程度の客観性を持たせるために、我々は、専門家にアイディアを投げかけ、チーム内で議論を重ねる作業を繰り返した。

誰も正解は知らない。しかし将来への不安が増し、不確実性の高い現代だからこそ、敢えてこのような作業を進め、少しでも現役世代、将来世代にとってよりよい社会へと議論をしていくことに意味があるものと考える。ここで描いた絵姿は、完成形ではない。今後少しづつ展開する新たな技術や社会的な動きを踏まえながら、常にバージョンアップさせていきたいと考えている。

その意味では、2050年の絵姿に関して、締め切りなしの意見募集を開始させていただいたものと捉えていただければと思う。

公益財団法人 地球環境戦略研究機関（IGES）

戦略的定量分析センター

〒240-0115 神奈川県三浦郡葉山町上山口 2108-1

Fax: 046-855-3809 E-mail: [qac-info@iges.or.jp](mailto:qac-info@iges.or.jp) [www.iges.or.jp](http://www.iges.or.jp)

この出版物の内容は執筆者の見解であり、IGES の見解を述べたものではありません。

©2020 Institute for Global Environmental Strategies. All rights reserved.

イラスト制作 : ad-manga.com

