

提 言

Society 5.0 を支える エネルギーシステムの実現に向けて

(第 4 版)

2022 年 3 月 24 日

日立東大ラボ

目次

第1章 提言サマリー	1
第2章 はじめに	4
第3章 トランジションシナリオ：2050年カーボンニュートラル実現から考える社会と技術の道筋	6
3.1 CN 実現の挑戦とトランジションシナリオの必要性	6
3.2 トランジションシナリオの方法	6
3.3 日本の CN 実現をめぐる二つの道筋	9
3.4 第3章まとめ	16
第4章 エネルギーシステムとマクロな社会像	18
4.1 再エネ導入・電化による4つの社会像	18
4.2 エネルギー需給構造の定量評価から導かれるトランジション上の課題	18
4.3 2050年 CN 実現に向けた電力システムの課題と対策	21
4.4 データを活用した社会インフラの計画・運用	24
4.5 第4章まとめ	24
第5章 地域で起こす変革	26
5.1 CN に向けた地域での意思決定	26
5.2 エネルギー視点での都市改革	28
5.3 データを用いた賢いエネルギー消費による基幹システムとの協調	31
5.4 第5章まとめ	36
第6章 カーボンニュートラル実現とその先を見据えた制度・政策	37
6.1 CN の実現に向けた国土の長期展望	37

6.2 エネルギー-S+3E の制度・政策の現状および制度・政策.....	3 8
6.3 CN を実現する産業イノベーション.....	4 0
6.4 CN を実現する地域イノベーション.....	4 2
6.5 第 6 章まとめ.....	4 3
第 7 章 新たに見出された持続可能な社会の構築における課題と挑戦	4 4
7.1 持続可能な社会の実現に向けて考慮すべきキーワード	4 4
7.2 協調と競争	4 4
7.3 日本の制約条件と求められるソリューション	4 6
7.4 物質循環と日本固有の課題を踏まえたイノベーション.....	4 8
7.5 持続可能な社会の構築に向けたビジョンとコンセプト.....	5 0
7.6 第 7 章まとめ	5 1
第 8 章 まとめ	5 2
第 4 版提言検討体制（2022 年 3 月 24 日時点）	5 8
【付録 1】 東京都町田市における戸建世帯数、および分散リソースの保有台数の導出	I
【付録 2】 2030 年におけるアグリゲータの事業規模評価	IV
【付録 3】 エネルギー技術選択モデル(動学的コスト最小化型モデル).....	V
【付録 4】 各ドメインのシナリオ概要.....	VII

第1章 提言サマリー

2016 年以降、日立東大ラボエネルギープロジェクトではエネルギーシステムのビジョン・シナリオを発信してきている。2019 年の第 2 版ではパリ協定の 80%削減、2021 年の第 3 版ではカーボンニュートラル(以下、CN)宣言を受けた技術、制度・政策に関する提言を示し、これに加えて第 3 版においては社会技術シナリオの策定開始を宣言した。

ESG 投資の活性化、第 6 次エネルギー基本計画、グリーンエネルギー戦略の議論開始、COP26 などの社会の動きを鑑み、2050 年の CN および 2050 年以降の社会の持続性に向けた課題や、それらを解決するための取組みを議論し、その結果を第 4 版としてまとめた。

① 日立東大ラボでは、社会、民間、公共の各セクターにおける多様なアクターの分析をもとに 2050 年の CN の実現のためのトランジションシナリオを作成した。ここでは、専門家へのインタビュー、および既存の統計や報告書の知見に基づき、それぞれのセクターにおいて役割を果たす多様なアクターの分析を行った。この分析では、社会セクターでは NGO や大学、民間セクターで電力、ガス、運輸、鉄鋼、石油化学、金融などの事業者、そして公共セクターでは日本政府や国際機関などが、それぞれの利害関心を持ちながら相互の関係や役割を変化していくすがたを捉えることを試みた。そして、将来の日本の電源構成にかかわる 2 つのケース（「再エネ 100%」、および「多様なエネルギー」）を軸に、CN の実現のために想定されるエネルギー、産業、市民の行動などの変化の道筋をドメインシナリオとして記述した。これによって、CN 実現へ向けた国境を越えた連携、CCS 等の対策にかかわる合意形成、市民・企業・政府の参画による公正な意思決定、さらには脱炭素イノベーションへの長期的な投資、産業構造の転換、グリーン雇用創出などを通じて、地域における人々が持続的な繁栄を実現するための方途を提示した。

(3章)

② エネルギーシステムのトランジションシナリオの策定を進めるにあたり、気候変動をプラネタリー・バウンダリー内に戻し、その範囲内にあり続けるためのエネルギーシステム構成と必要な対策を定量的に解析・評価し、将来の電力・産業の姿を描いた。技術イノベーションの進展やコスト条件の違いにより、2050 年の CN 像は再エネ導入と運輸・産業セクターの電化進展の二軸で整理・分類した結果、4 つの全く異なる社会像を示すこととなった。各社会像に対応するエネルギーシステムのコスト最小化試算の結果、再エネや新燃料、原子力・CCS 付き火力といった多様なエネルギーを活用することが、他の条件に比べて経済的であることが示唆された。また、需要側が非電化部門での電化コストなどの経済合理性を追求した場合は、設備設置の実現性について分析が必要だが、電力供給を再エネ発電 100%とするケースでさえ、化石燃料消費と CCUS/DAC 等を活用した年間 4 億トン規模の CO₂ 回収の組み合わせが選択される、との結果も示された。CO₂ 回収の手段・貯蔵・利活用は大きな課題である。日立東大ラボでは、エネルギー供給側・需要側・CO₂回収事業者、政府・金融等が協調し、社会コストを抑制しつつエネルギーシステムを再構築するため、さらなる情報収集を行い、データを重視して将来の社会像の予測精度を高める。また、エネルギー供給(電力・燃料)や、CO₂回収にかかるサービス提供者間の競争により、多様な技術の活用／脱炭素イノベーションを進展させるため、技術開発の動向や社会情勢を踏まえてシミュレーションを重ね、課題を明確化するのと

ともに、イノベーションを起こすべき領域を示していく。

(4章)

- ③ 地域のトランジション実現には、規制や補助制度、エネルギー価格の変動など日々変わるエネルギー情勢への対応が求められ、そのためには国や自治体・企業・市民が協調した意思決定が重要となる。具体的には、レジリエンスを含めた地域のあるべき姿および移行タイミングを地域の目標として共有し、アクターに生じるメリット・デメリットを予測・検証しながら施策を段階的に進めることが重要となる。本提言書ではデータ活用による意思決定や都市設計・レジリエンス強化の実例を示すとともに、需要家のエネルギー消費時間シフトで地域エネルギー調達コストを削減する協調型サービスを提案した。本サービスにより、需要家のエネルギーコスト削減と基幹システムへの調整力創出を両立できる。日立東大ラボでは、豊かで活気ある 2050 年の CN 地域の実現に向け、各所での提言を通じて上記のような地域エネルギーサービスの新規市場創設や市場構築に求められるプラットフォームの社会実装をけん引し、同時にサービス提供者間の競争の中で創出されるべきイノベーションやルール形成の在り方、地域と地域、もしくは地域と基幹エネルギーシステムとの協調を加速する必要条件を示していく。

(5章)

- ④ エネルギートランジションの実現には、これまで進めてきた電力システム改革を CN 社会実現シナリオに合わせて見直すとともに、電力システム以外の産業や地域のトランジションを支える制度・枠組み整備が必要である。電力ドメインでは、CN 移行過程における燃料市況によらない電源の確保が課題であり、安定供給電源の導入・維持を含めた電力の安定供給の責任所在を明確化する制度形成を提言した。産業ドメインでは、現行制度による特定産業ドメインへの CO₂ 排出量削減負担の偏在、またこれによる日本産業の国際競争力や国力の低下が課題となる。製造業全体が協調して製造サプライチェーンとライフサイクルまで含めた CO₂ 排出量を最小化するため、個別のアクターの CO₂ 削減努力を見える化し、特定アクターへの CO₂ 削減負担集中を回避する費用助成や負担平準化を推進すること、競争に基づく国内市場形成によりイノベーション創出を促し、新興国での CO₂ 削減事業の展開により世界全体での CO₂ 削減に貢献することを提言した。地域においては、第 2 版で述べた地方分散の指針をさらに具体化すべく、日立東大ラボは分散エネルギーリソースと 国土・社会・都市の計画および運営システムとの協調を促すデータシステム的具体化を提言していく。

(6章)

- ⑤ CN に有効とされる施策は、その一方でプラネタリー・バウンダリーの観点では負の効果を生む可能性がある。例えば、再生エネルギーを代表する風力発電や PV は、機器が寿命を迎える時には難分解性の廃棄物を大量に排出する。これは、再生エネルギー導入に併用される電池についても同様で、これら廃棄物が化学物質汚染や生物多様性の損失を進行するおそれがある。そのため、CN を持続可能な形で実現するには、各商品やサービス提供者が独自に進める施策に加え、ドメインやアクターを超えた社会全体でのライフサイクルでの CO₂ 排出(LC-CO₂)と廃棄物削減を効率的に推進する社会の実現をめざすべきであり、これらを盛り込んだ新たな尺度で S+3E を再構築しなければ

ならない。本章では、既存技術の延長線にある技術改良がなされたとの仮定のもと、再エネおよび蓄電池の廃棄物
 想定発生量、評価軸を LC-CO₂ にした場合の第4章で示した社会像の見え方の変化、そして製造・利用・廃棄
 それぞれのフェーズにおいてエネルギーを消費して CO₂ を排出するリニアエコノミーの限界、を示した。また社会を形成
 する各アクターがプラネタリー・バウンダリーを踏まえて協調・競争することを前提に、エネルギーと物質循環をデータの
 活用により効率的に連動させる社会を実現すべきである、との気づきを得て、ビジョンおよびコンセプト図を見直した。
 日立東大ラボでは、複数のセクターを巻き込んだサーキュラーエコノミーの構築やリサイクル制度の実装、エネルギー
 消費を抑える商品やサービスの選択、行動変容誘導など、持続可能な社会形成に求められる協調と競争のあり方、
 およびトランジションの道筋を提言していく。

(7章)

持続可能な社会へ移行するための協調と競争 物質循環と連動するエネルギーシステム

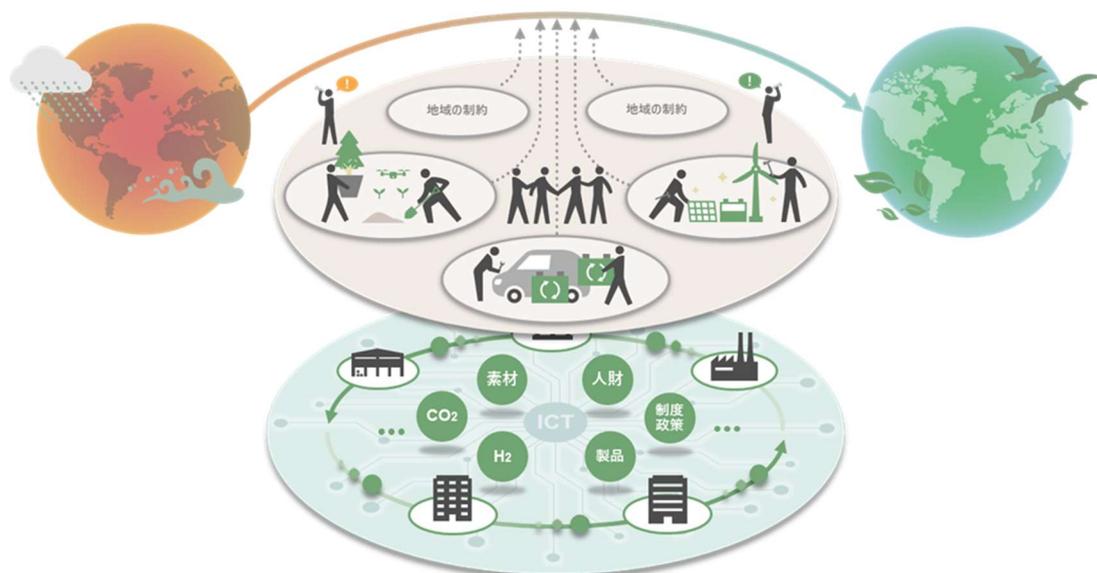


図 1-1 持続可能な社会に向けたビジョンとコンセプト

第2章 はじめに

2021年11月に開催されたCOP26(第26回気候変動枠組条約締約国会議)で取り交わされたグラスゴー気候合意では、地球温暖化を2050年において1.5℃の上昇に留める目標の世界的な合意がなされた。これは、地球の環境バランスであるプラネタリー・バウンダリーで規定された環境容量が飽和しつつあるという認識が国、業種などの垣根を越えた共通認識であり、地球温暖化は世界規模で取り扱うべき課題であることが改めて合意されたと考えられる。

日立東大ラボでは、2016年以来、Society5.0を支えるエネルギーシステムのビジョン・シナリオを発信してきた。2019年4月に発行した提言書第2版(以下、第2版)では、パリ協定のCO₂排出削減目標である2013年比80%減を具体的なターゲットとして、エネルギー価値の多様化とともに、個々に特色のあるエネルギーシステムをめざす地域社会と、複数の地域社会をつなぎ、システム全体を調整する役割を有する基幹システムとが共存を前提に再構築していく将来像を示した。また、将来のエネルギーシステムにおける様々の施策に対して、広くステイクホルダーと共通認識を持ち、合意形成することが求められ、そのための評価プラットフォームが必要となること、およびその概念設計と具体化に向けた制度・政策、および人材育成などに言及した。

2021年3月に発行した提言書第3版(以下、第3版)では、日本を含む120以上の国や地域でのカーボンニュートラル(以下、CN)化への宣言、2020年12月に日本政府により示されたグリーン成長戦略を受け、CNに向けた移行戦略の策定、地域での変革と価値創造の両立、基幹システムにおけるS+3Eの最適バランスの構築、それらの解決策をけん引する制度・政策および人材育成という課題意識のもと、全員参加を前提とした多様なエネルギー流通システムの構築とエネルギーデータ活用体系の構築、再エネ主電源化に向けた電力需要の配置まで考慮する社会レベルの施策推進、これら施策の推進を支援するエビデンス重視の政策立案、そして平行した国益を維持するための国境調整など国際的枠組みの構築、の必要性を言及してきた。また、第3版ではCN社会の着実な実現に向け、各分野で達成すべき構造変革の道筋を示す「移行シナリオ」の構築と共有の必要性を述べ、社会の移行シナリオの策定開始を宣言した。このようにCNの達成には科学技術イノベーション、社会システム、および経済メカニズムを一体で捉えることが必要で、業界・学問・世代を超えたステイクホルダーの議論をけん引できる横断的人材の育成が必要となる。

CN社会の実現においては、とかく石油・ガス等の一次エネルギーを再生可能エネルギーに置換するエネルギーバランスに議論が集中しがちである。しかし、CNが実現した社会は、単に温室効果ガスの排出源を別の手段によって排出抑制する社会ではなく、産業や公共事業・サービス、そして我々の身の回りの生活に至るまで多様なトランジション(移行)が図られているべきである。

各国によるCN宣言以降、炭素原単位の低い発電燃料(天然ガス)へのシフトやEV化の加速施策、VREの大量導入など、同じ施策が世界の各国で同時に採用されることで、エネルギー資源に限らず、非エネルギー資源においても、特定の資源の価格が高騰し、経済安全保障上の懸念が大きくなっている。さらに、ロシアによるウクライナ侵攻に垣間見られるように、エネルギー需給における急速な変化が人々の安心・安全に大きな影を落とし始めている。CN社会がどのような構造をなすことが望ましく、トランジションの過程にあたりどのような障壁や駆動原動力となる要素があるか、それらに対してどのような戦略を持つべきか、といった統合性、不確実性の認識、規範性などを考慮したトランジションシナリオの作成が重要となる。日立東大ラボでは2050年を超えたトランジションシナリオの作成、それと並行した電力システムの定量的評価とトランジションの方向性、これまでの電力システム制度の変遷を踏まえたCNに向けた制度・政策の課題と方向性、さらにこれらの議論を基にした新たな論点の抽出と課題解決、について、次の提言をまとめた。

電力システムの定量的評価は、CNが単に脱炭素電源へシフトしたエネルギーミックスとエネルギー高効率利用を実現する電化の推進によって達成されるのではなく、エネルギー利用機会自体の削減や空間的・時間的なミスマッチの克服、そして脱炭素燃料の積極利用をはじめとするさまざまなエネルギー需要の変革により、めざすべきシステム構成の多様性

が生まれるという仮説に立って検討し、再生可能エネルギーの大量導入の実現性検証の必要性と CN の実現に向けた電力システム構築のロードマップ共有の重要性を指摘した。

地域社会においては国内における都市形成、住民との協調といった新たな国土形成を踏まえ、地域の特色を活かした CN の推進がなされるべきである。地域の実情に応じたエネルギー需要の協調がエネルギー安定供給に貢献し、かつ地域における経済的メリットも発揮できることをシミュレーションから示した。

電力システム改革を経て、電力の需給ひっ迫や化石燃料の価格高騰といった社会課題が顕在化している。CN への移行過程において、燃料市況に左右されない安定電源の確保は極めて重要となってくる。また、産業部門の CN 移行は原料とエネルギーのサプライチェーン、製品のバリューチェーンをデータに基づき解析し、CN の価値を適切に評価する仕組みが必要である。経済安保を視野に入れた抜本的な製造サプライチェーンの変革を目指す企業をトップリーグとして後押しし、持続可能でクリーンな経済成長を牽引すべきである。

上記提言に共通することは、CN の実現を複雑な社会課題を解決しながら推進する点にある。これら課題の解決策は時々世論に左右されるべきではなく、データに基づいて定量的に検証されるべきである。エネルギーに関するデータが原料調達や製造工程といった産業行動や住民生活、ライフスタイルといった都市環境などのデータとどのように関連しているか、を検証できるプラットフォームを設けることにより、エネルギーの問題と経済成長、持続可能な地域形成との両立が可能となる。

本提言では、トランジションシナリオの作成によって得られた俯瞰的、網羅的なインサイトについてまとめたうえで、電力システムの定量的な評価に展開したエビデンスについて述べ、得られたエビデンスに基づいた CN へのトランジションにおいて留意すべき点を提言した。また、日本における将来の社会動向、産業動向を踏まえたエネルギー以外のセクターにおける CN 実現に求められる留意点、データ利活用に関する方向性、さらには 2050 年以降を見据えた持続可能な社会に求められる循環型社会の実現の必要性について提言した。

第3章 トランジションシナリオ：2050年カーボンニュートラル実現から考える社会と技術の道筋

3.1 CN 実現の挑戦とトランジションシナリオの必要性

日本における「カーボンニュートラル」¹(以下、CN)実現のための挑戦は、行政、産業、そして市民生活に関わるきわめて広範かつ長期的な変革を必要とする。旧来の化石燃料中心のエネルギーシステムから、再生可能エネルギー中心のシステムへの転換が急務であるだけでなく、さまざまな産業におけるサプライチェーンや製造法の転換、そして居住、モビリティ、消費、食、労働のあり方を含む市民生活の変化を必要とするものである。

しかし、CN を実現するために今後、生ずるべき変化や想定される課題については、その全体像や複雑な相互関係性を理解することが難しい。各分野では、多様なアクターが個別の状況で複雑に関係を持ちながら存在しており、それぞれがさまざまな制約や不確定性のもとで行動しているためである。

新たなシステムへの転換は、多様な「筋書き」を考慮して検討することが必要となる。

日立東大ラボでは、日本における CN への転換をさまざまな「トランジション」(移行、転換)が織りなす多面的なプロセスと捉え、その道筋を描く「トランジションシナリオ」を作成することを通じて、こうした挑戦に資することをめざしている。トランジションシナリオは、さまざまなアクターが関わる長期的な変化のプロセスを複数のパスウェイに基づいて検討することで、隠れた課題や、重要な分岐点などを明らかにし、CN への公正で持続可能な変化のあり方を示すことを指向する。

本章では、このたび作成した「トランジションシナリオ」の最初のバージョンをもとに、その概要を解説する。

3.2 トランジションシナリオの方法

日本における CN 実現という目標は、単に電力やグリッドにかかわる技術の向上や産業分野における努力だけで達成することはできない。エネルギーシステムの根本的な変化は、人々の生活、社会、経済活動における大きな転換を伴うからである。したがって、トランジションに関わるシナリオもまた、関連するさまざまな分野において、技術的な変化だけでなく、社会的な変化をも記述していくことが重要となる。その目標をより具体的に示すために、現在から将来に至る定量的(quantitative)な分析とともに、将来の社会像やそこに至る戦略的プロセスを定性的(qualitative)に示すシナリオが必要となる。

この分野において詳細な研究論文を執筆したサーチエ・ソндаイカー(Saartje Sondeijker)によれば、トランジションシナリオは、持続可能性へ向けた構造的な社会変革を指向しており、統合性、不確実性の認識、規範性、参加性に重きを置きつつ、望むべき将来へのシステム変化の過程を明らかにすることをめざす。そこでは、

- ・望むべき将来のシステムがどのような姿をしているか
- ・それを達成するためにどのような構造的変化が必要なのか
- ・その変化においてどのような障害やドライバーがあるのか、
- ・社会アクターがとるべき戦略はどのようなものか

といった問いを繰り返しながら、徐々にシステム全体の移行のあり方を描いていく方法がとられる²。

また、2000年代初頭から、社会技術移行(socio-technical transition)の研究者たちが、社会技術シ

¹ 国際的には広く「カーボン・ニュートラリティ」という用語が一般的であり、「カーボンニュートラル」を名詞として使用する用法は英語文法の規則から逸脱した和製用法であるが、日立東大ラボでは日本政府資料などにしたがって後者を用いる。

² Saartje Sondeijker. 2009. *Imagining Sustainability: Methodological building blocks for transition scenarios*. Erasmus University Rotterdam. <http://hdl.handle.net/1765/17462>.

ナリオ(socio-technical scenario)にかかわる議論を展開してきた。定性的なストーリー・ラインの策定から始まった研究であったが、近年では、定量的モデル分析と接合(bridge)する試みも行われ、定量的モデルベースのシナリオのための説得力のある(plausible)移行経路を設計する社会技術シナリオの策定手法が開発された³。

そこで、日立東大ラボでは、持続可能な社会の実現のための構造的な転換のあり方を示す「トランジションシナリオ」の基本的な考え方を共有しながら、社会技術シナリオの概念と作成手法を参考にし、日本における CN の達成のためのエネルギーシステムの転換を中心とする社会的な移行のあり方を描き出すことをめざすこととした。本提言書では、これを「トランジションシナリオ」と呼ぶ。

特に、日立東大ラボが取り組むトランジションシナリオ策定のプロセスにおいては、現在の社会技術システムから、将来の望むべきシステムへの変革を指向しつつ、それらのシステムの「構造」、そこにかかわるさまざまな「アクター」、求められる「意思決定」のあり方に着目しながら、検討を進めている。

具体的には、下記のプロセスを通じて、シナリオの策定を行った。

(1) エキスパートインタビュー

日本における CN 実現のために、関連する諸領域において、現実に根差したシナリオを策定するための基礎的理解を得るために、それぞれの分野で経験や知識をもつ関係者にインタビューを実施した⁴。また、シナリオの作成においては、日立東大ラボが開催する「オープンフォーラム」や「クローズドワークショップ」において各分野の専門家と行った議論なども参考とした。インタビュー対象となったドメインは表 3-1 の通りである。

表 3-1 エキスパートインタビューの対象ドメイン

セクター	ドメイン
社会	国際 NGO、研究者（気候政策、環境経済学、都市データ、交通計画、行動変容、水素、CCS）
民間	自動車、鉄鋼、石油化学、ガソリン・スタンド、銀行、投資家、風力発電、バイオマス発電、地域新電力、小型原子炉
公共	日本政府、国際機関

(2) アクター分析

エキスパートインタビュー(以下、インタビュー)における議論をもとに、各分野において主なアクターやその利害関係について分析を行った。こうした作業は、各分野において、重要な役割を果たす主要な主体を見出し、微細な視点からシナリオを記述するために重要な知見を与えるものであった。インタビューにおける発言では、のべ数

³ Geels, F. W., McMeekin, A., and Pfluger, B. 2020. "Socio-technical scenarios as a methodological tool to explore social and political feasibility in low-carbon transitions: Bridging computer models and the multi-level perspective in UK electricity generation (2010–2050)," *Technological Forecasting and Social Change*, 151, 119258. また、エネルギー・トランジションに関わる社会技術シナリオについてのより詳細な議論は、日立東大ラボメンバーによる次の報告に示した。陳奕均ほか, 2021 年。「エネルギー移行をめぐる社会技術シナリオ研究の動向と日本への示唆」第 40 回エネルギー・資源学会研究発表会, 8 月。

⁴ インタビューは社会、民間、公共セクターに関連する下記のステイクホルダーの協力を得て、2020 年後半から 2021 年末までに 25 回実施し、将来のエネルギーシステムに影響を与える要因、カーボンニュートラルの実現を妨げる障害、長期的な変革のために必要な政策、注目すべきステイクホルダーなどについて具体的な知見を得た。

百項目にのぼるアクターが同定されたが、そのうち主なものは、図 3-1 の通りであった。表 3-2 に示すように、それぞれのドメインにおいては、多様なアクターが関与しており、それぞれにとって、気候変動は複雑な現実を生じさせていることがわかった⁵。



図 3-1 CN 社会へのトランジションに関わる主要アクター

表 3-2 インタビューとアクター分析の例

ドメイン	アクター	アクターから見た現実
金融	大手金融機関 情報開示団体 気候行動 NGO 投資家 グローバル企業 中小企業	<ul style="list-style-type: none"> 環境情報開示団体は、グローバルな専門家ネットワークを構築しながら、多様な手法を通じて、コミットメントを掲げる企業を拡大。 大手金融機関に対しては、気候行動 NGO がパリ条約と合致した経営計画を求める株主提案を行い、影響力を強化。金融機関は、これらの投資家や、高い基準に難色を示す借り手との対話の中で、具体的な投資を続ける。 基準を満たさなければグローバルなサプライチェーンに外されてしまう恐れがある一方、「ティア2」以降の企業は、対応に遅れ。 <p>金融機関は、環境や脱炭素に関する制度・技術の知識を持つ人材の不足を懸念。</p>
都市	市民 都市計画家 都市交通研究者 地方自治体 自動車製造業者	<ul style="list-style-type: none"> 欧米を中心に、歩行者中心の街づくりへの動きが高まっており、道路の公共空間化、自動車の乗り入れの禁止区域の設定、自転車レーンの拡張などが行われている。 地方自治体の予算編成にデジタルプラットフォームを通じて市民が参画している都市も増加。 公共交通の質の向上でエネルギー消費も削減する可能性がある。都市や住民にかかわる空間、経済、エネルギーデータの分析が、これらの動きを加速しうる。
石油	ガソリンスタンド事業者団体 石油化学事業者	<ul style="list-style-type: none"> ガソリンスタンドは、災害時に暖房や発電のためのエネルギーを地域に供給するなど、地方のエネルギー安定性に貢献している側面がある。 ガソリン以外にも、人口減少地域に生活サービスなどを提供している業態もあるが、将来に大きく

⁵ 本研究においては、「アクター」(actor) という概念を、社会事象の分析やシナリオの記述の基礎的な単位として用いている。ステイクホルダー (stakeholder) が、しばしば、特定の組織や状況に対して受動的、または反動的に行為する主体として用いられる一方、アクターは、それぞれのセクターやドメインを形成する主体の能動的な側面に光を当て、マクロ・ミクロな状況の下で、自らの行動を変化させながら、そのコンテキスト自体に影響を及ぼす動態を理解するために有用である。C.f. 大芝亮. 1998. 「国際関係における行為主体の再検討」. 国際政治 (119), 1-10; Bryson, John. M. 2004. What to do when stakeholders matter: stakeholder identification and analysis techniques. *Public Management Review*, 6 (1), 21-53. <https://doi.org/10.1080/14719030410001675722>, Accessed on March 14, 2022.

		発展していけるかは課題。 ・ガソリンスタンドを EV のための充電ステーションへ転換するという道筋は、設備投資の大きさや利益の観点から困難とみている事業者もある。
LPG	地域ガス事業者	・地域の発展に焦点を置き、実質 CO ₂ フリー電気と環境価値のセット提供のような販売戦略を打ち出している企業もある。

(3) ドメインシナリオの記述

インタビューやアクター分析における知見、さらに一般に公開された既存の報告書や統計などを手掛かりとして、関連するドメインごとに、質的なシナリオの記述を行った。

あとに詳述するように、ここでは、2050 年において既存の電源を含めた多様なエネルギー源を用いるケースと、再生可能エネルギーを中心に用いるケースという二つの異なる状況を想定し、電力、産業、行動変容に関わる 12 の分野 = ドメインについて、主なアクターを同定しながら、「ドメインシナリオ」の記述を行った。2015 - 20 年、2020 - 30 年、2030 - 50 年という時間軸に沿って、社会、民間、公共セクターにおける主なアクターの行動や社会的事実の連なりを通じて「ありそうな」将来として記述を試みた（図 3-2）。

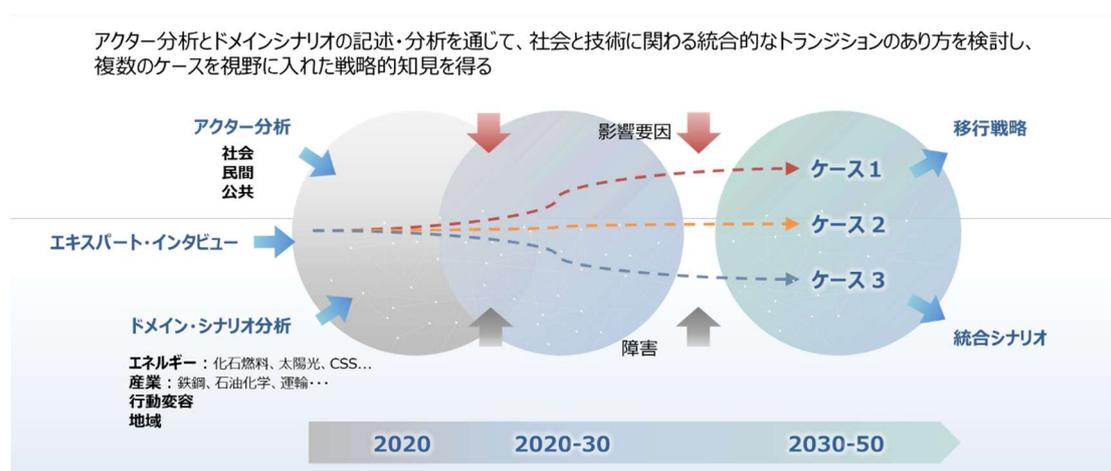


図 3-2 トランジション・モデルに基づく社会技術シナリオ

3.3 日本の CN 実現をめぐる二つの道筋

日立東大ラボでは、日本における CN 実現の将来像を検討するにあたって、2050 年時点における電源構成から多様なエネルギーを用いるケースと、再生可能エネルギーを中心とするケースの二つについて検討を行うこととした。そこで、地球環境産業技術研究機構（RITE）が 2021 年に発表した報告⁶に示された、2050 年の日本の発電源構成に関する複数のケースのうち、「参考値」ケース、および「再エネ 100%」ケース（図 3-4）を選択し、これを基礎として電力、産業、行動変容にかかわる 12 のドメインについて、シナリオを記述した（ドメインシナリオ）。それぞれのケースは本提言書では、「多様なエネルギー」ケース、および「再エネ 100%」

⁶ 地球環境産業技術研究機構（RITE）．2021.「2050 年カーボンニュートラルのシナリオ分析（中間報告）」, 2022 年 1 月 5 日アクセス,
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/043_005.pdf.

ケースと呼び、それぞれに3つの時期を設定し、合計72のマトリクスにわけて記述を行った。また、これらのさまざまなドメインにかかわるシナリオを統合し、将来にかかわる二つの異なるケースの全体像を表したものを「**統合シナリオ**」として記述した。

日立東大ラボのトランジションシナリオにおいて対象とした12のドメインの構成は表3-3の通りである。

表 3-3 ドメインの構成

カテゴリー	ドメイン	ドメイン数
電力別	石炭火力、ガス火力、太陽光、風力、水力・地熱、バイオマス、原子力、水素・アンモニア	8
産業別	鉄鋼、石油化学、運輸	3
行動変容	行動変容	1

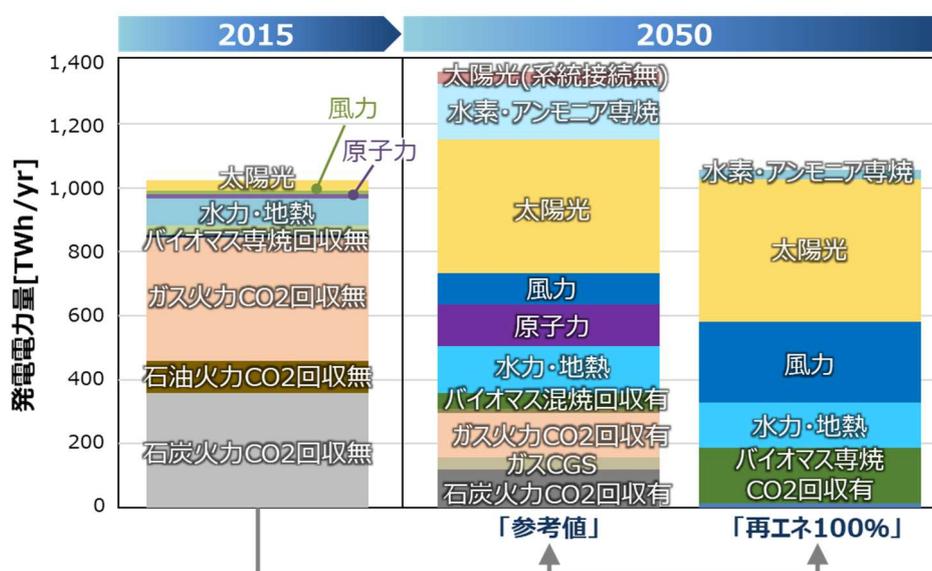


図 3-4 RITE の報告書を参考とした日本における電源構成：2015 年と 2050 年

出典：地球環境産業技術研究機構（RITE）．2021.「2050 年カーボンニュートラルのシナリオ分析（中間報告）」, 2022 年 1 月 5 日アクセス, https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/043_005.pdf.

各ドメインについては、2015 年、2020 年、2030 年という時間軸に沿って、社会、民間、公共の分野で、どのようなアクターが存在し、それぞれがどのような行動をとるのか、ということの詳細に記述した。

各ドメインのシナリオの概要については、付録 4 に示す。またドメインシナリオ、統合シナリオの詳細については、別冊として公開する。

ドメインシナリオは、さまざまなアクターがかかわる長期的な変化について、時間軸に沿った記述を行っているため、本章では、その詳細をすべて明らかにすることはできない。しかし、その概要をみることで、その主な成果の一端を示すことができる。

たとえば、ガス火力においては、2 つのケースにかかわる社会像は大きく異なることが明らかになった。表 3-4 のとおり、ガス火力が炭素回収を通じて維持される「多様なエネルギー」ケースでは、2020 年から 30 年には、CO₂ 回収システムの開発を推進し、2030-50 年には国際的な CO₂ 回収・輸送ネットワークの構築を行いながら事業が継続する。その一方、「再エネ 100%」ケースでは、ガス火力事業者はバイオマス発電などへの転換

を迫られるほか、労働組合、市民との合意形成などを課題として抱えることになる。政府は、これに代わるグリーンな雇用（自然環境を維持し、回復する、働きがいのある人間らしい仕事⁷）の創出を推進することが必要となる。ただし、「多様なエネルギー」ケースのようなガス火力の継続には、炭素回収にかかわる社会的受容性の確立や、他国との炭素貯留枠組みの形成などが大きな課題となる。

⁷ International Labor Organization (ILO). 2016. "What is a green job?" Accessed on January 25, 2022. https://www.ilo.org/global/topics/green-jobs/news/WCMS_220248/lang--en/index.htm.

表 3-4 ガス火力に関わる二つのケースの概要

	2015-20年	2020-30年	2030-50年	主な論点
多様なエネルギー	「省エネ法」改正で非効率火力のフェードアウトと新型ガス火力へのリプレイス推進。	政府はガス火力発電事業維持の方針。ガス火力事業者は政府基金を活用してCO ₂ 回収システムの開発と商業化を推進。	LNG インフラを活用したCO ₂ 回収・輸送ネットワーク構築と、政府主導によるASEAN連携のCO ₂ 貯留実現により、ガス火力事業継続。	1. 政府主導によるCCSの国内の社会的受容獲得とアジア太平洋を含む国際連携の確立 2. 発電所の撤退等による地域経済の衰退を懸念する自治体や市民との合意形成
再エネ100%	「省エネ法」改正で非効率火力のフェードアウトと新型ガス火力へのリプレイス推進。	政府のガス火力完全廃止決定により、投資は停滞。事業者はバイオマス発電などへの事業転換を迫られる。	ガス火力事業者は主力事業撤退・転換に迫られ、労組、地域行政・市民との合意形成に苦慮。政府はグリーン・ジョブ創生を推進。	1. ガス火力事業者は、バイオマス発電への転換など、大きな変化を迫られる 2. 政府は、地域の発展やグリーン雇用創出のための施策を推進することも必要

また、運輸ドメインにおいては、特に内燃機関車から電気自動車（EV）への転換が、そのサプライチェーンや都市におけるモビリティのあり方の変化につながっていく。表 3-5 に示す通り、再エネ 100%ケースでは、2020年から30年には、系統安定化に車載用蓄電池の活用が重要になる一方、2030年から50年にかけて、個人の移動手段において徒歩や自転車等が重要になっていくことが示されている。蓄電池の製造能力や自動車のライフサイクル全体での炭素排出削減が、自動車産業の競争力の維持にとって重要である一方、蓄電池を系統安定に用いる技術開発や環境整備が重要となる。

表 3-5 運輸に関わる二つのケースの概要

	2015-20年	2020-30年	2030-50年	主な論点
多様なエネルギー	自動車産業は、出荷額、雇用、幅広いエコシステムにより日本経済を支える重要分野である。	EV普及のため、国内の蓄電池製造能力が増強。ライフサイクルアセスメントに対応し競争力を維持。部品やサービスを含む関連産業の電動化シフトを官民で推進。	電動化が困難な領域にはグリーン新燃料が用いられる。また、系統安定化の調整力として車載蓄電池を活用するための環境整備が進展。	・蓄電池の国内製造能力強化、製造・使用・廃棄まで含めたライフサイクル全体での排出削減が競争力の維持に重要である
再エネ100%	自動車産業は、出荷額、雇用、幅広いエコシステムにより日本経済を支える重要分野である。	太陽光や風力など再生可能エネルギーの導入が急速に進展。系統安定のための車載用蓄電池の活用がより重要に。分散型電源のアグリゲータや充電サービス・プロバイダなどが重要な役割を果たす。	系統安定化のためのコストが増加し、電気料金が上昇。コンパクトシティが進むことで、個人の移動手段として徒歩や自転車が重視される。長距離輸送にもモーダルシフトが生じる。	・中古電池を含む、EVの蓄電池を系統安定に活用するための技術開発や環境整備が重要になる

このように、それぞれのドメインでは、多様なアクターの利害関心や個別のコンテキストがあり、エネルギーをめぐる二つのケースにおいて、それぞれが独自の条件のもとで展開することが明確になった⁸。

⁸ たとえば、炭素回収型の火力発電が維持される「多様なエネルギー」ケースでは、石炭火力やガス火力に関して CCS にかかわる社会的受容や、国際協調などが重要となる一方、「再エネ 100%」ケースでは、火力発電事業者が他の事業への転換を迫ら

それでは、このようにドメインごとに示された多様なトランジションのあり方を、それぞれのケースごとに結びつけると、どのような像が示されるだろうか。表 3-6 では、「多様なエネルギー」と「再エネ 100%」の二つのケースについて、2020—30 年、および 2030—50 年という二つの時期に関して、その概要を示した。

表 3-6 統合シナリオの概要（2020—30 年、2030—50 年）

	「多様なエネルギー」ケース	「再エネ 100%」ケース
2020—30 年	<p>2020 年に政府の CN 目標が発表されると、日本においても政府、企業、市民レベルでの変化が大きく加速した。</p> <p>既存の火力発電の資産を用いた、アンモニア混焼ガス火力発電、CO₂ 回収型のガス火力発電の開発が進められた。また、炭素の回収や貯留にかかわる技術開発、政府間交渉が行われた（火力発電）。</p> <p>再エネへの完全移行を掲げる「RE100」などへの加入が増大する中、太陽光の大規模導入、洋上風力発電設備の建設が急速に拡大した（再エネ）。</p> <p>一方、政府は原子力をクリーンで安定的な脱炭素電源として位置づけ、安全基準を満たした発電所の再稼働を徐々に推進した（原子力）。</p> <p>鉄鋼や石油化学産業においては、既存の製造方法からの転換が必要となり、新たな製造技術や炭素回収への投資が行われた（産業）。</p> <p>こうした中、各国で内燃機関自動車の販売禁止のロードマップが掲げられ、北米、ヨーロッパ、中国が主導する EV 市場が急激に拡大すると、日本においても急速に EV への移行が進行した（EV）。</p> <p>環境やエネルギーにかかわる基準の厳格化や、トランスナショナルな市民団体の影響力は高まり、化石燃料による発電の継続が重要な国民的な議論となったが、旧来の政府の方針に大きな変化を与えるには至らなかった。エネルギーや産業分野におけるイノベーション、再エネの設備建設、そして EV への移行への投資を、急速に拡大した ESG 金融が支えた（行動変容）。</p>	<p>国際的な気候変動対策の高まりは、これまでの政府や産業界の立場に大きな変化を生じさせ、化石燃料の段階的廃止に関わる動きが急速に進んだ。</p> <p>石炭火力発電は、漸次的に完全廃止することが決定。石炭火力事業者は、バイオマスやアンモニア専焼発電へ転換。また、ガス火力発電に関しても廃止への動きが高まり、バイオマス発電などへの転換が生じた（火力発電）。</p> <p>再エネへの完全移行を掲げる「RE100」などへの加入が増大する中、太陽光が大規模導入。洋上風力発電設備の建設が急速に拡大した。特に、自動車、IT などの新アクターの再生エネルギー分野への参画が拡大。各地域において環境や住民の合意形成をめぐる課題を生み出した（再エネ）。</p> <p>一方、政府は原子力をクリーンで安定的な脱炭素電源として位置づけ、安全基準を満たした発電所の再稼働を徐々に推進した。しかし、原子力行政や事業者に対する不信任は依然として強かった（原子力）。</p> <p>鉄鋼では、炭素排出量が少ない電炉方式への投資が高まり、シェアも増大。一方、高炉を活用した水素還元などの技術には、政府による技術開発援助が行われたが、コストの回収が懸念事項に。石油化学では、炭素回収インフラの構築とともに、ポートフォリオの転換が進められた（産業）。</p> <p>こうした中、EV 車の急速な普及が生じ、これまでの内燃機関車のサプライチェーンや雇用は、インバーターや蓄電池を核とするものへと変化した（EV）。</p> <p>気候や環境にかかわる一般市民の関心は高まり、リベラル諸政党の勢力を後押しし、政権与党における世代交代に結び付くと、再生可能エネルギーや新電力を重視する政策の推進が加速した。人々は ESG 金融に支えられた産業と結びついた、新たなライフスタイルを変化させた（行動変容）。</p>
2030—50 年	<p>国際的な気候変動対策や脱炭素の枠組みはさらに厳格化した。</p> <p>日本では、旧来の火力発電インフラを活用しつつも炭素回収をおこなう発電システムが、一部維持された。低効率な石炭火力発電は退役し、炭素回収を行う高効率型の石炭火力発電が継続。また、ASEAN との連携を含めた炭素回収・輸送ネットワーク、アンモニアの国際的な流通基盤が確立された（火力発電）。</p> <p>気候対策にかかわる世論の強まりとともに、政府は大規模な再エネ・インフラ整備、スマート送配電網の整備、自然災害対策を通じて、太陽光発電を推進。また、政府は、風力</p>	<p>国際的な気候変動対策や脱炭素の枠組みはさらに厳格化した。さらに環境と調和した社会や経済のあり方に対する関心は、大きく高まった。</p> <p>日本における主要な石炭・ガス火力発電事業者は、アンモニア専焼、バイオマス、風力などへの事業転換。しかし、アジアにおけるアンモニアの供給網の確立や、十分な炭素貯留への見通しが立たず、廃炉となるものもあった。また、火力発電に関わる地域の雇用について労働組合や地域との合意形成が課題となった。政府は、再生エネルギーや環境に関わるグリーン雇用を生み出すことを重視した政策を実行した（火力発電）。</p>

れたり、雇用や地域生活にかかわる課題に直面することを示している。一方、運輸については、「再エネ 100%」ケースでは、地域の系統安定のために EV が果たす役割が重視される状況が示される。

<p>発電に関わる産業競争力強化、地域の合意形成の推進や、地方創生、雇用創出に力を入れた（再エネ）。</p> <p>原子力発電については、再エネのコストの低下、およびCCS 付き石炭・ガス火力発電が安定電源としての役割を果たしたため、SMR の開発が進むも、そのシェアは漸次的に縮小した（原子力）。</p> <p>鉄鋼では、電炉による生産はシェアを伸ばす一方、高炉による事業は海外への移転が見られた。石油化学では、日本においては高機能材への集中化が見られたが、基礎製品は国外に生産拠点を移す動きがあった（産業）。</p> <p>国内における EV 普及率が上昇するとともに、ガソリンスタンドなどの関連産業が業態の転換を迫られた。また、シェアリング・サービスなどが普及し、地域ではエネルギーやレジリエンスに関するインフラとしての性質をもつようになった。バッテリーは重要な市場となっていた（EV）。</p> <p>人々の生活において、環境との調和は重要な要素となったが、旧来の政治的意思決定や経済の構造の変化のスピードは緩く、旧システムから引きついで経済や社会のモデルにもとづくライフスタイルはさまざまな形で維持された（行動変容）。</p>	<p>政府は各地においてスマート送配電網の整備などを進めた。また、ITとエネルギーの連動型ビジネスが大きく普及した。さらに、地域の農業振興やグリーン雇用の創出などと結びついた風力発電も大きく発電量を伸ばした（再エネ）。</p> <p>核セキュリティ、巨大地震、使用済み核燃料の処理にかかわる懸念のもと、再エネのコストが低下、安定性も改善したことから、発電量は漸次的に縮小し、再びゼロになった（原子力）。</p> <p>鉄鋼では、電炉による生産はシェアを伸ばした一方、旧来の高炉系メーカは国内においては電炉への転換を図ったほか、高炉による製鋼は海外において行う方針をとった。また、石油化学では、高機能材などへの転換が生じ、基礎製品を海外で生産。石油によらない製造法の技術開発が行われた（産業）。</p> <p>国内における EV 普及がさらに進行した。コンパクトシティ化が高まる中、自動車は個人所有からシェアへの動きが高まった。充電設備の整備とともに、EV は電力取引市場に接続された（EV）。</p> <p>人々の生活において、環境との調和は重要な要素となり、脱炭素化、再エネの導入、EV の普及に対して強い影響をもたらした。新たな価値観に基づく歩行者中心の街づくり、グリーン雇用の創出、デジタル技術による柔軟な就労を含むライフスタイルの変革が、再生可能エネルギーへの完全転換という考え方と結びつき、これを強く後押しした（行動変容）。</p>
---	--

このように、統合シナリオでは、2つのケースの時期ごとの展開がより明確に示される。

トランジションの第1段階：まず、2020-30年においては、CNへの基礎的な動きが重なるトランジションの第1の段階が形成し、2つの異なる将来像に向かって、電力、産業、行動変容のそれぞれの側面で準備的な状況が形成される。特に、「多様なエネルギー」ケースでは、アンモニア混焼、CO₂回収の技術開発・政府間交渉が進むが、「再エネ100%」ケースでは、旧来のエネルギーシステムの周辺にいた新たなアクターの再エネ分野への参画が急速に拡大するとともに、気候や環境にかかわる一般市民の関心の高まりが、国政における政策転換に結びつく。

トランジションの第2段階：また、2030-50年においては、CN実現につながる第2の段階が形成し、各分野におけるトランジションの加速的な進展により、さらに対照的な状況が生じる。「多様なエネルギー」ケースでは、CCS付き化石燃料火力が維持されるとともに、炭素やアンモニアの国際的な流通基盤が形成する。一方、「再エネ100%」ケースにおいては、都市生活のあり方そのものの変化のもとで、気候や環境に関わるグリーン雇用の創出へと大きな転換が生じる。

これらの2つのケースは、CNの実現のための電力構成に関する前提から検討されたものであり、いずれかのケースもあらゆる社会課題が解決された状況としては設定されていない。したがって、いずれのケースにおいても、第1の段階、第2の段階で、分野ごとに新たな課題や不安定性が生じる可能性が示唆される。しかし、このように、電力、産業、行動変容にかかわる社会的・技術的事実の連なりから、将来へのトランジションの道筋を示すことで、よりよい決断を行うための手がかりとすることができるだろう。

また、これらのシナリオの策定を通じて、各ドメインにおけるインサイトを得ることができた。シナリオでは、社会、民間、公共セクターのさまざまなアクターが、CN実現に向かってとりうる行動に着目して記述をしており、これに基づき、見落とされがちな課題や、注力すべき事項を「**インサイト**」として導出した。

ここにその例として、石炭・ガス火力、風力、水素・アンモニアドメインのインサイトについて、それぞれ表 3-7、3-8、3-9 に示した。

表 3-7 石炭・ガス火カドメインのシナリオ記述とインサイト

	シナリオ記述（抜粋）	インサイト
多様なエネルギー	政府は、2030 年までに回収 CO ₂ の貯留場所の確保と事業化支援、さらに貯留に関するパブリックコンセンサス形成プログラムを推進した。国内の貯留場所の調査と選定と合わせて情報公開を進めたが、貯留対象地域（陸上と海洋）の 市民や漁協との安全性や漁業への影響などの懸念払拭が できず合意形成が進まなかった。	CCS はトランジション過渡期に必要であるが、 広い社会的な受容が形成されていない側面がある 。日本において CCS を実現するためには、政府や事業者はその必要性、技術的可能性、気候や環境への影響など、メリットとデメリットを公正かつ適切に開示、説明を行い、 国民や国際社会との合意形成と連携構築の必要 がある。
再生エネルギー 100%	2025 年に 日本政府 は、すべての化石燃料火力発電のフェードアウト、再生エネルギーとバイオマス発電のエネルギーミックスを表明した。これに対し、CO ₂ 回収有効率ガス火力を進めてきた 発電事業者は経団連と連携して日本政府に激しく反発した 。協議の結果、 日本政府 はゆるやかなフェードアウトに変更し、新設化石燃料火力発電の運転上限年設定で妥協した。	再生エネルギーが 100%の電力を支える社会をめざす場合は、火力発電は段階的な削減や廃止が進む。 政府は、事業者、自治体、労働者などの関連のステイクホルダーとともに 、火力発電のフェードアウトへの道筋を描くとともに、 グリーンな雇用の創出や新たな産業の新興 などを通じ、エネルギー転換を地域の繁栄につなげていくことが求められる。

表 3-8 風カドメインのシナリオ記述とインサイト

	シナリオ記述（抜粋）	インサイト
多様なエネルギー	再生エネルギー推進により、 地域エネルギー事業者と大手発電事業者と海外企業 による競争激化に対し、 政府 は国内産業の競争力強化政策（洋上風力関連事業への補助金、人材育成など）を実行した。	日本においては、急速に洋上風力発電に対する需要が高まり、大規模な建設プロジェクトが開始された一方、 風力発電分野に豊かな経験を持つ人材が大きく不足している 。このことは風力発電事業の専門知識を海外企業に依存したり、日本での推進を阻害する原因になりうる。政府が、省庁の垣根を超えた統合的な取り組みを推進するとともに、事業者、自治体、教育機関などとともに風力発電の急速な拡大を支えるための 分野横断的な意思決定と専門人材の育成や獲得を支援することは 、こうした障害を減らすことにつながる。
再生エネルギー 100%	事業者にとっては、再生エネルギーの大幅な推進により、 地域エネルギー事業者、大手発電事業者と海外企業 による競争や、優秀な人材獲得競争は一層激しくなった。そこで、 政府 は国内産業の競争力強化政策（洋上風力関連事業への補助金、人材育成など）の推進が急務となった。	

表 3-9 水素・アンモニアドメインのシナリオ記述とインサイト

	シナリオ記述（抜粋）	インサイト
多様なエネルギー	日本は世界に先駆けて、アンモニア（NH ₃ ）の国際的なインフラ整備に乗り出した。 日本政府はアジア諸国と戦略的協定を結び、炭素貯留の拠点整備と NH₃ の現地生産化を進めた 。NH ₃ 専焼による CO₂ 削減効果の世界的認知、CO₂ 貯留の技術確立と整備と、石炭火力発電所の転換の投資タイミングが全てうまく重なったことが大きな要因 であった。	水素・アンモニアとも混焼や専焼に供するためには、燃料として大量供給できる体制（サプライチェーン）の構築が必須である。ヨーロッパ、アメリカ、中国を中心に競争が加速する中で、日本は、 パートナー国の脱炭素化にも寄与し、Win-Win が成立する ようにしなければならない。パートナー国には、火力発電がまだ必要となるアジア圏が有望。
再生エネルギー 100%	日本は国際的なインフラ整備に乗り出したが、需要を満たすには不十分な状態が続いた。このため国内の火力発電所は NH₃ 専焼への転換の計画が立たないまま廃炉 をせざるを得なくなった。このため NH ₃ の需要は見込みより小さくなり、このことが更にインドネシアでの炭素貯留拠点整備のスピードを遅らせた。	

このようなインサイトは、それぞれの個別のドメインにおけるトランジションに関するものである。シナリオ検討の作業からは、さらに、ドメインの境界を越えた、統合的なトランジションにかかわる示唆も得ることができた。これらは、CN の実現のために必要な重層的な国際連携、雇用の創出の設計、人々の価値観の変化や意思決定の仕組みの変革に関わるものである。その一部を表 3-10 に示す。

表 3-10 統合的なトランジションに関わる論点

<p>1. エネルギー資源、イノベーション、送電網などにかかわる重層的な国際連携</p> <p>日本における CN 実現のためには、水素やアンモニアにかかわる新たな資源の調達、再生可能エネルギーの専門人材の確保、国際送電網の接続の可能性の模索などが重要となる。これらの国際的な連携の基盤を重層的に構築することが重要である。</p>
<p>2. 将来の脱炭素化のための過渡期的対策に関わる合意形成</p> <p>CO₂の回収や貯留の実現については、国内の社会的受容はもちろん、貯留先の国や地域との合意が必要である。</p>
<p>3. 公正なトランジションとグリーンな雇用の創出の設計</p> <p>石炭・ガス火力発電、内燃機関車のサプライチェーン、地域のガソリンスタンドなど、エネルギーシステムのトランジションにおいて、急速かつ根本的な変化が迫られる分野がある。これらに着目しながら、共同体や市民生活への影響を明らかにしつつ、グリーンな雇用の創出を通じた地域の繁栄のシナリオを描くことが重要である。</p>
<p>4. 製造業における脱炭素化イノベーションへの投資</p> <p>鉄鋼を含む産業分野では、製造プロセスやサプライチェーンの変革が必要となる。技術や制度にかかわる幅広い選択肢を視野に入れながら、脱炭素型製造法にかかわるイノベーションへの長期的な投資を行う必要がある。</p>
<p>5. 都市、仕事、日常生活のあり方に関わる人々の価値観の変化</p> <p>エネルギーシステムの変化はその「コンテキスト」である社会の変化、とりわけ人々の価値観や日常生活のスタイルのトランジションともに生じていく。とりわけ、都市における移動、消費、エネルギーに関する選択は市民の強い関心の対象となる可能性があり、これらを正確に捉えながら、長期的なシステム変革をめざしていく必要がある。</p>
<p>6. 環境・エネルギーにかかわる新たな意思決定のあり方</p> <p>日本における環境とエネルギーの政策は、従来、立て分けられていたが、気候変動にかかわるエネルギー・トランジションの長期的な実現のため、これらを統合的に捉えた仕組みを形成することが有効である。その際、地方自治体、市民、NGO、金融機関など、新たなアクターが意思決定に参加できるしくみをめざすことが重要である。</p>

このように、CN の実現のために、各ドメインにおいて個別の課題を乗り越えていくとともに、それらを統合的なプロセスとして捉えながら、トランジションに対する障害をなくしながら、公正な変化を促していく必要がある。

トランジションシナリオは、起こすべき社会の長期的な変革に対して、各分野のアクターが乗り越えるべき課題や注目すべき解決策を示しながら、その道筋を明らかにすることに役立つものである。

3.4 第3章まとめ

ここまで、日立東大ラボが取り組むトランジションシナリオについて、その必要性、方法論、2つのケースにもとづくシナリオの概要、そしてシナリオから導かれるインサイトについて示した。

これらのシナリオやインサイトは、日本における CN 実現へのトランジションのあり方を、ドメインと時期区分に基づき明示するものである。また、エネルギー、産業、市民のあり方について、二つの可能な将来像との関係で質的に記述し、主要なアクターや各時期における重要な分岐点を明らかにしつつ、インサイトと戦略的示唆を与えるものである。

ここでは特に下記の点について訴えたい。

- CN 実現のために、水素やアンモニアにかかわる新たな資源の調達、再生可能エネルギーの専門人材の

確保、国際送電網の接続などの可能性の模索のために、国際的な連携の基盤を重層的に構築すること。

- CO₂ の回収や貯留の実現のために、国内の社会的受容はもちろん、貯留先の国や地域との合意を図ること。
- 石炭・ガス火力発電、内燃機関車のサプライチェーン、地域のカソリンスタンドなど、急速かつ根本的な変化が迫られる分野については、共同体や市民生活への影響を明らかにしつつ、グリーンな雇用の創出を通じた地域の繁栄のシナリオを描くこと。
- 鉄鋼を含む産業分野では、製造プロセスやサプライチェーンの変革のために、技術や制度にかかわる幅広い選択肢を視野に入れながら、脱炭素型製造法にかかわるイノベーションへの長期的な投資を行うこと。
- 都市における移動、消費、エネルギーに関する選択を含む人々の価値枠組みや日常生活のスタイルの変化を捉えながら、長期的なエネルギーシステム変革をめざしていくこと。
- 従来立て分けられていた環境とエネルギーの政策を統合的に捉えた仕組みを形成すること。その際、地方自治体、市民、NGO、金融機関など、新たなアクターが意思決定に参加できるしくみをめざすこと。

このように、トランジションシナリオは、幅広いステイクホルダーとともに脱炭素までの道筋を描くための共通の将来理解を生み出す参考資料となりうるだろう。

なお、本提言に示したシナリオは、今後、上記以外のケースやドメインを追加し、ドメインごとの記述をよりの確なものとするを想定しつつ、日立東大ラボのメンバによるレビューを経て、最初の「バージョン」としてまとめたものである。したがって、ここに記述した内容は、今後もデータの追加や検討を重ねながら、よりの確で有用なシナリオへと修正を行っていくべきものである。

日立東大ラボでは、日本のさまざまな地域に着目したトランジションの分析、国際的な先進事例やベストプラクティスの研究、定量的な研究とのより一層の連動、そして新たなケースの検討などを視野に入れながら、内容を深化させていく予定である。

次章以降では、本章で示したトランジションシナリオを前提としながら、定量的な見地から見出される将来課題やその克服法について検討する。

第4章 エネルギーシステムとマクロな社会像

第3章では「多様なエネルギー」「再エネ 100%」を定性的に分析したが、本章では 2050 年のカーボンニュートラル（以下、CN）へのトランジションに向けたエネルギーシステムの需給構造と必要な対策を定量的に示す。エネルギー供給・需要のほか、技術イノベーションのインパクトを試算条件に、複数のシミュレーションを行い、それらの解析結果から将来の電力・産業の姿を描いた。

4.1 再エネ導入・電化による4つの社会像

第3章の結果や、昨今注目されている水素・アンモニア発電、CCS、原子力(SMR)活用も対象に、考えられる将来のエネルギーシナリオをシミュレータ等で定量評価した 2050 年 CN 像について、変動再エネ(VRE)の導入割合と運輸・産業セクターの電化進展の二軸で整理・分類した結果、4つの全く異なる社会像を示すこととなった(図 4-1)。

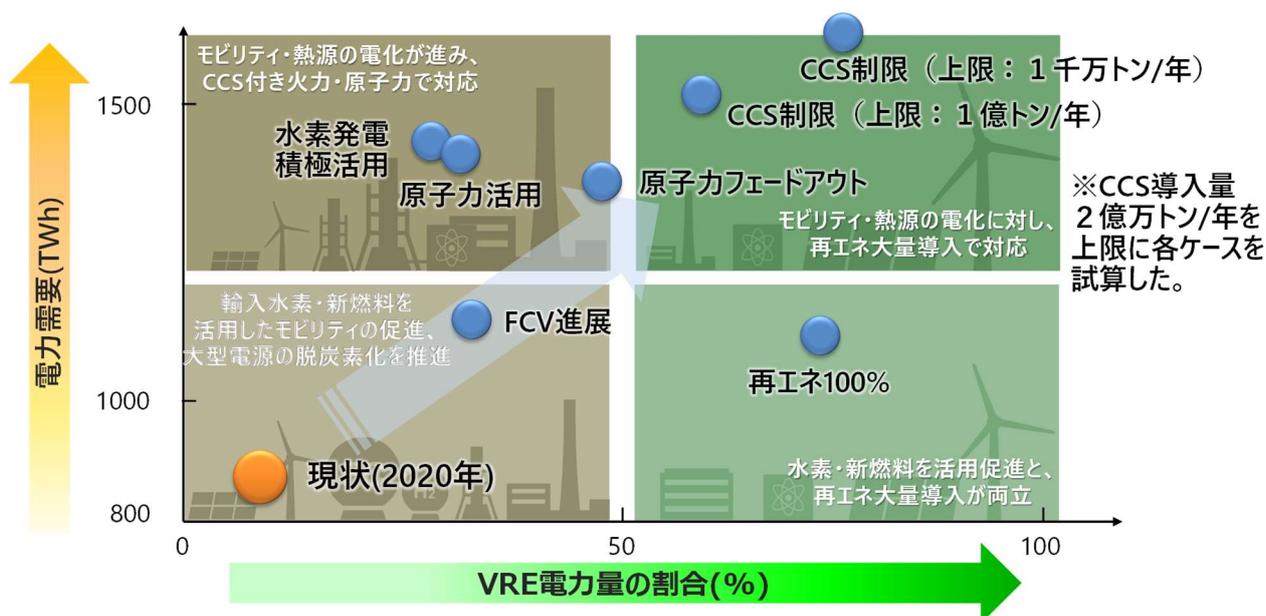


図 4-1 再エネ導入と電化促進による4つの社会像

4.2 エネルギー需給構造の定量評価から導かれるトランジション上の課題

今回は東京大学 藤井・小宮山研究室で研究開発した「技術選択モデル」に基づくエネルギー・経済シミュレーションモデル⁹を用いて試算した。本モデルは、エネルギー需給構造のフローを想定し、総エネルギー消費量・電力供給量・CO₂排出量などについて、線形計画法に基づく総コストを最小化する目的関数で構成されており、エネルギー需給の時間分解能に優れている。本モデルは各種発電設備の効率や追従速度、需要家機器、エリア間送電上限、時間的に変化する発電設備やエネルギー転換・貯蔵、エネルギー消費機器のコストモデル、総エネルギー消費、総輸送需要などを諸元として入力とし、CO₂排出量を制約条件として高時間解像度(発電部門の時間分解能は 10 分)での総コストの最小化計算を行うことで、制約条件に応じた電源構成や需要分布を算出する。コストモデルは文献 9 およびその引用文献を参考として設定し、複数の時点(年)での電源構成およびエネルギー消費形態の変化を数値で示すことでエネルギーシステムにおける社会課題の抽出を試みた。なお、本モデルでは、ある時点の年間 8760 時間断面におけるエネ

⁹ Kawakami Y, Komiyama R, Fujii Y, IFAC-Papers OnLine 51(28)598-603 (2018), 川上,小宮山,藤井,電気学会論文誌 B,138(5), 382-391 (2018) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318334906>

ルギー需給バランスのみを対象とし、システムの安定性の評価はできない。安定性維持に必要な設備容量および投資については4.3節で述べる。

4.2.1 多様なエネルギー活用によるCN実現／トランジション

図4-2に、多様なエネルギーを活用して2050年CNトランジションにおけるエネルギー需給をコスト最小化計算した一例を示す(計算条件は付録3に記載)。図4-2は、「CN実現には電化推進が経済的」であるほか、「再エネ/水素・アンモニア発電だけでなく、CCS付き火力・原子力の活用も交えるのが経済的」と示唆しており、エネルギーの安定供給の観点からも火力・原子力の活用を積極的に議論すべきである(安定供給については、第6章で詳しく述べる)。

図4-3に、多様なエネルギーを活用した場合の電源別のエネルギー供給量と容量の2050年CNトランジションを示す。2030年▲46%達成には、2030年以降の洋上風力発電の拡大に加え、2030年/2035年に太陽光設備160GW/253GWが必要であり、「この数字は物理的に達成可能か?」「太陽光設備の設置を推進するため、どのような政策が考えられるか?」「代替手段による排出削減を導入できないか?」などの議論が必要である。

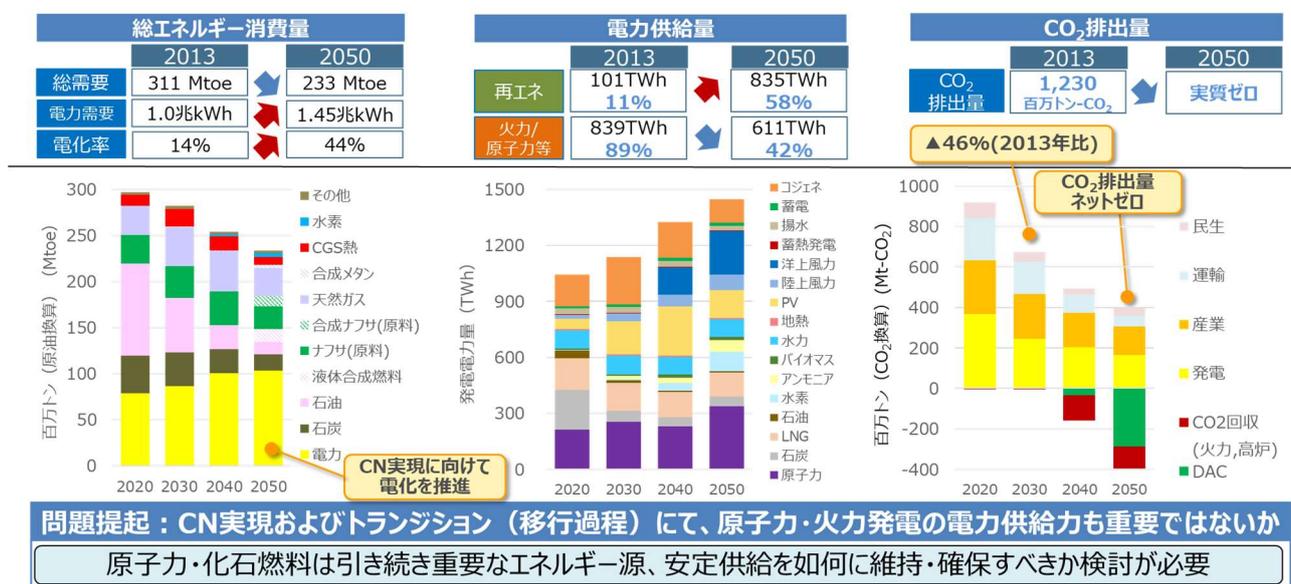


図4-2 多様なエネルギーを活用するCN実現／トランジションのコスト最適化計算

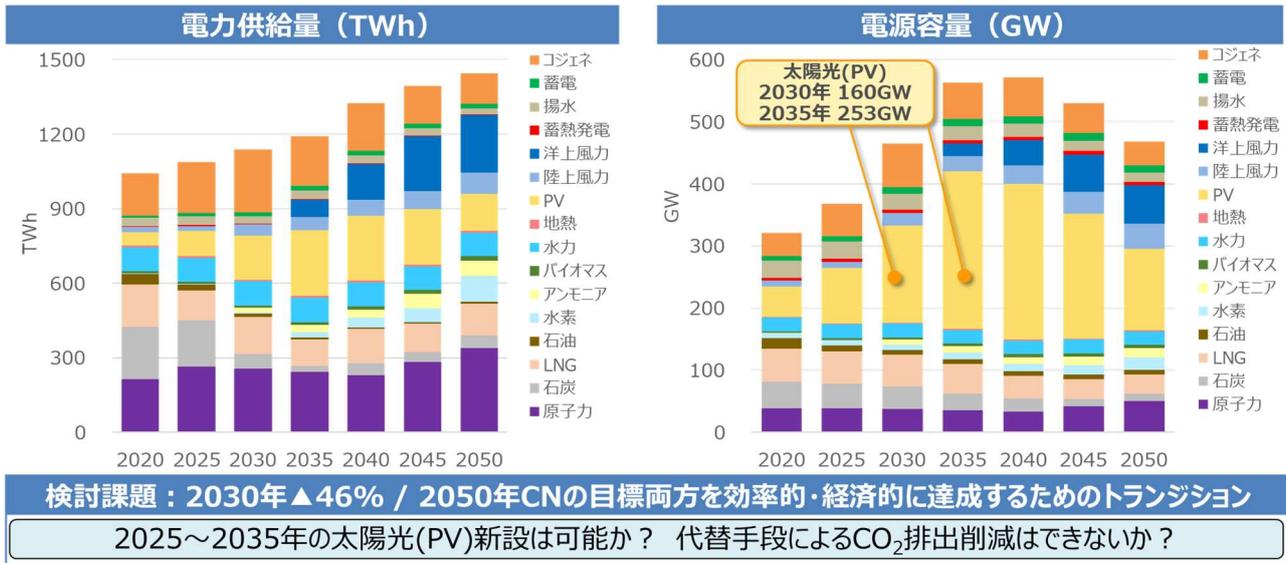


図 4-3 多様なエネルギーを活用する CN 実現／トランジションの試算結果（5年単位）

4.2.2 エネルギー利用の制約条件を変化させた場合の CN 実現／トランジション

「再エネ 100%」「CCS 制限(1 億トン/年)」「原子力活用」の3ケースのCN実現／トランジションの試算結果を、図 4-4 に示す。「再エネ 100%」で 2050 年 CN を実現するには、2040 年/2050 年までに太陽光設備 355GW/638GW の導入と、2050 年までに 84GW の蓄電システムが必要と示唆された。再エネ 100%を志向する場合、設備を設置する場所/土地や、投資コスト(費用対効果)の検証が必要となる。

図 4-5 に、各ケースでの投資キャッシュフロー(単年)と CO₂ 排出量・回収量の推移を示す。いずれのケースでも、2040 年以降に DAC への投資が必要となるほか、再エネ 100%ケースでは「電力部門の排出量がゼロ」「産業・運輸・民生の排出量が増加」となることが分かる。これは、再エネ 100%ケースでは、再エネや電力系統など電力部門への投資金額が大きく、電気料金が燃料活用よりも割高となり、その結果として電化が進まないためである。再エネの導入量は、エネルギー需要側で電気が選択される価格水準となるよう、経済性も考慮すべきと言える。

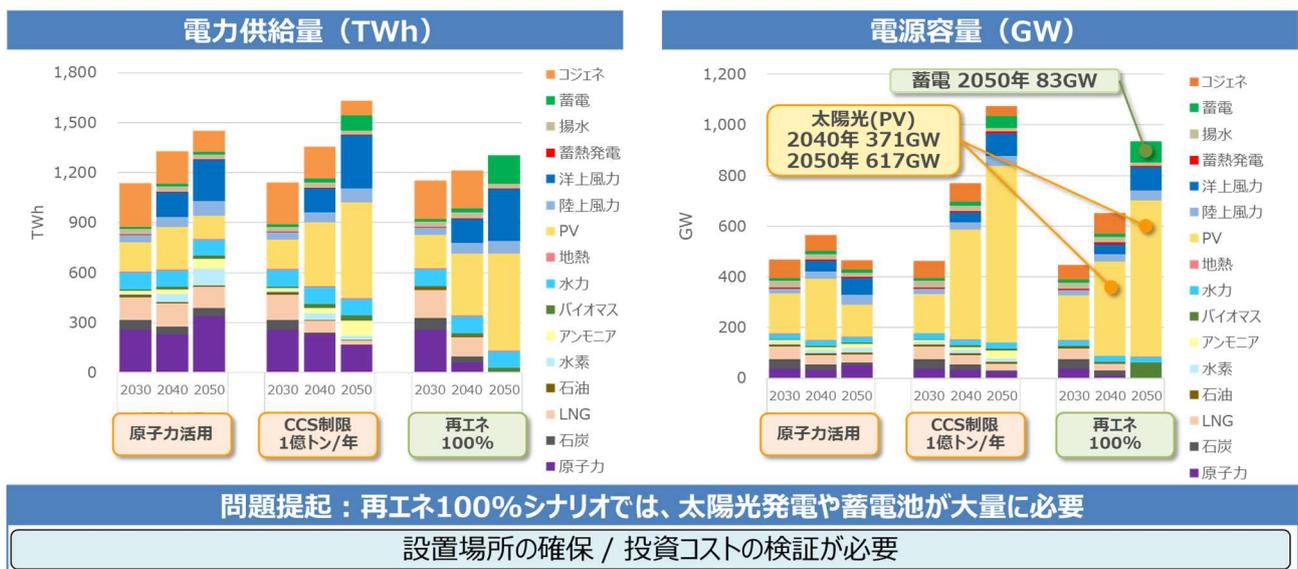
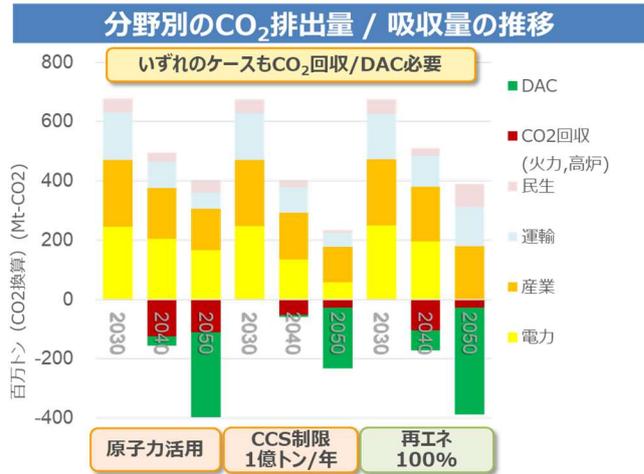
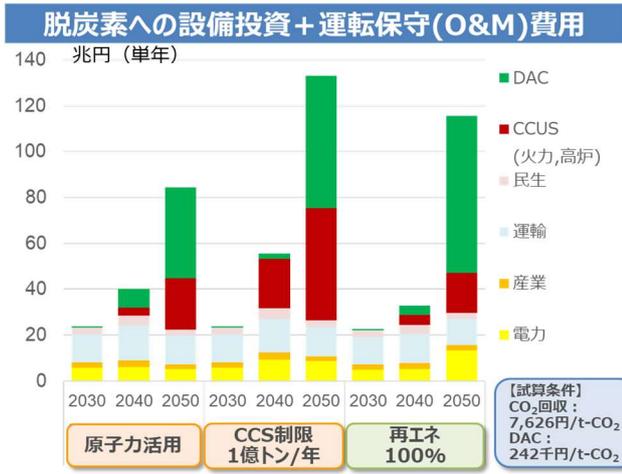


図 4-4 CN 実現／トランジションのケース比較



CCS制限ケースでは投資額が増加。回収したCO₂を燃料転換し、資源活用する事業が必要なため。CO₂貯留量の上限や、CO₂を資源循環で活用する市場の創出・ポテンシャル精査が必要ではないか。

図 4-5 CN 実現／トランジションに向けた投資キャッシュフロー（単年）と CO₂ 排出量・吸収量

4.3 2050 年 CN 実現に向けた電力系統の課題と対策

4.2 で示した 2050 年 CN 実現に向け、電力供給設備や需要設備の投資だけでなく、供給と需要とをつなぐ電力系統の課題抽出と対策の実行が必要となる。

図 4-6 に再エネ導入時の電力系統の課題／対策を整理した。高速応答や蓄電システム・揚水発電の運用高度化など、再エネ比率が拡大した際に有効と考えられる技術の開発・普及が課題である。本節では、国内で想定される電力系統の課題と、必要な対策を定量的に検討する。

課題	Phase	再エネ 電力量比	Phaseの概要	対策候補
系統運用微修正	Phase1	~5%	再エネによる 系統への顕著な影響なし	・リアルタイム監視制御 ・送電容量の拡大
潮流変化 大	Phase2	~10%	再エネによる わずかな系統運用影響	・需給運用の広域連携 ・柔軟な発電出力制御 ・系統安定化システム
柔軟な供給調整	Phase3	~20%	再エネ出力が 系統運用を決定	・非同期電源の連系制限 ・揚水発電の運用高度化 ・高速周波数応答 ・蓄電システム
長期エネルギー過不足	Phase4	~45%	再エネ100% タイミング発生	・水素・大規模蓄電(数日)
季節単位の電力貯蔵	Phase5	~70%	日単位での再エネ余剰 (蓄電)	・水素・新燃料長期貯蔵
	Phase6	~100%	季節単位の再エネ余剰 (水素貯蔵)	

開発・普及必要

※ [1] IEA, "Integrating variable renewables: Implications for energy resilience", Asian Clean Energy Forum 2017. [2] IEA, "Status of Power System Transformation 2019" を元に日立東大ラボで追記作成

図 4-6 再エネ導入時の電力系統の課題／対策

4.3.1 国内で想定される電力系統課題とその対策

国内では、洋上風力等の再エネ有望地（北海道・東北等）と、電力需要地（関東等）が一致していない（空間的ミスマッチ）。余剰電力発生を避けるための再エネ有望地での対策として、新たな産業（水素製造 等）の誘導や、電力需要地とつなぐ送電網の整備が必要となる。図 4-7 に、空間的ミスマッチの電力需給例・対策例を示す。

上記のほか、図 4-8 に天候・季節・時間帯での電力需給の変動（時間的ミスマッチ）とその対策を、図 4-9 に再エネの出力変動とその対応として、同時同量・周波数の安定化の必要性を示す。

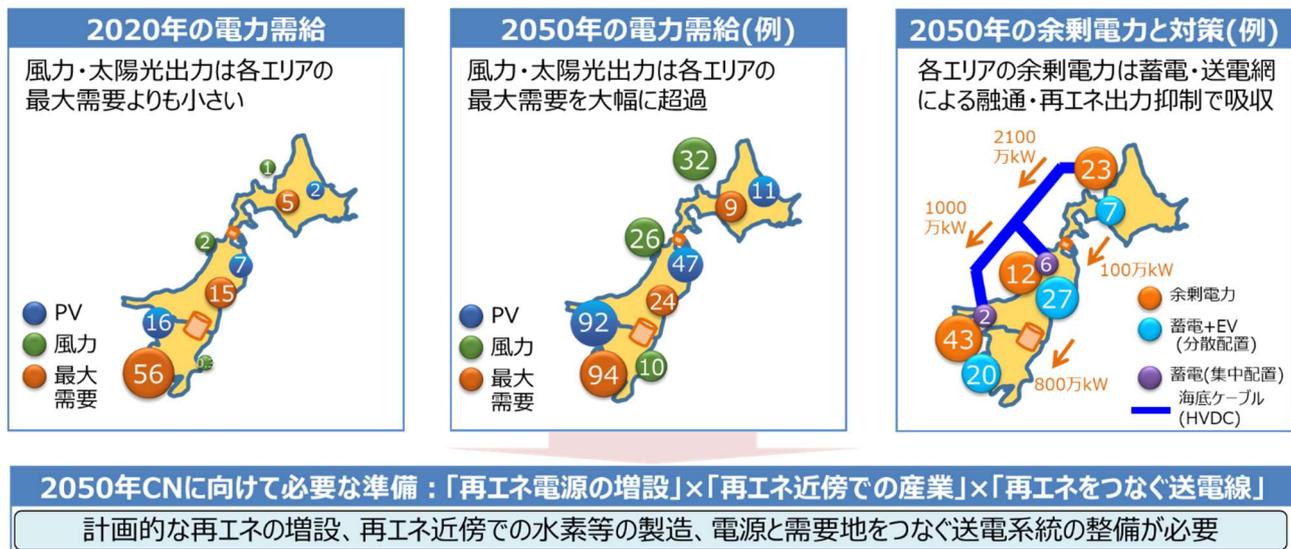
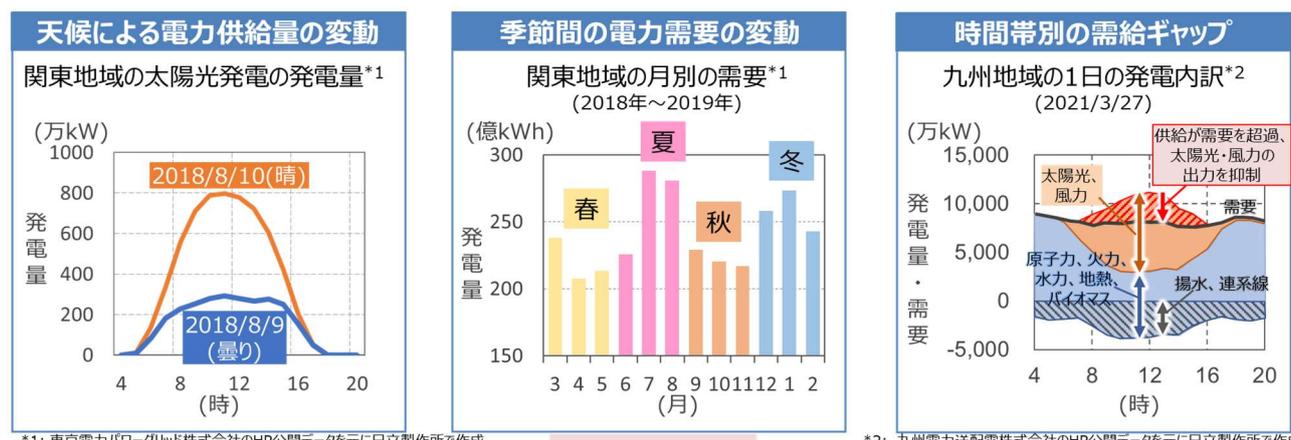


図 4-7 対策その 1：再エネ電源近傍での需要創出、送電線の整備



2050年CNに向けて必要な準備：季節・時間帯別の需給ギャップを埋めるための対策
 需給ギャップ発生時に稼働させる発電所、余剰電力を蓄電する設備、電力の使い方の見直しなどが必要

図 4-8 対策その 2：天候・季節・時間帯での電力需給の変動対策

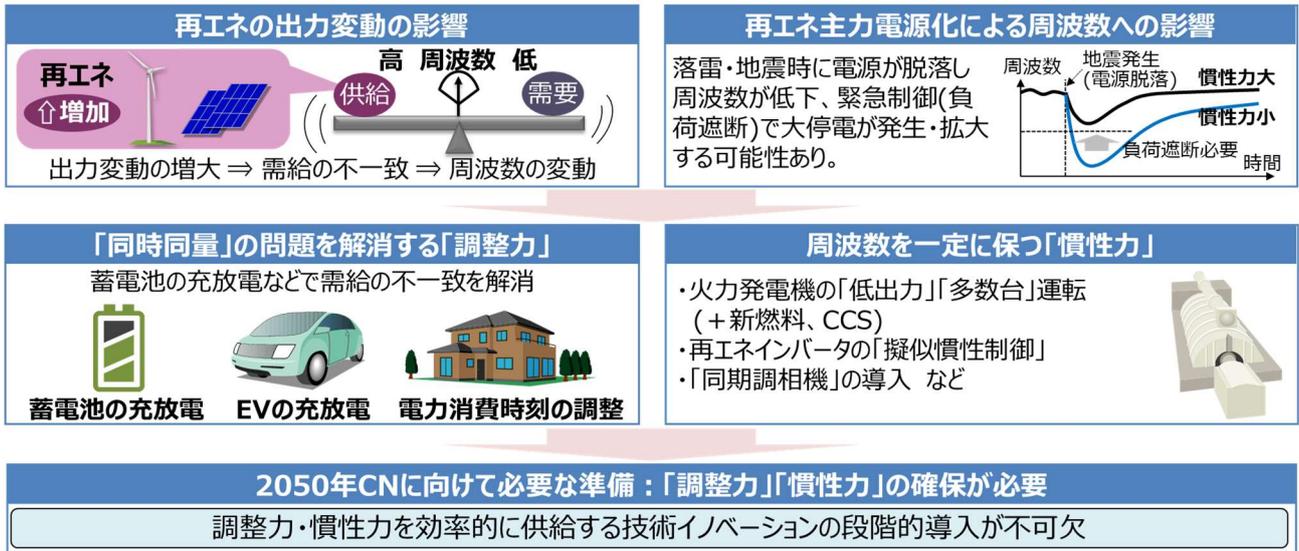


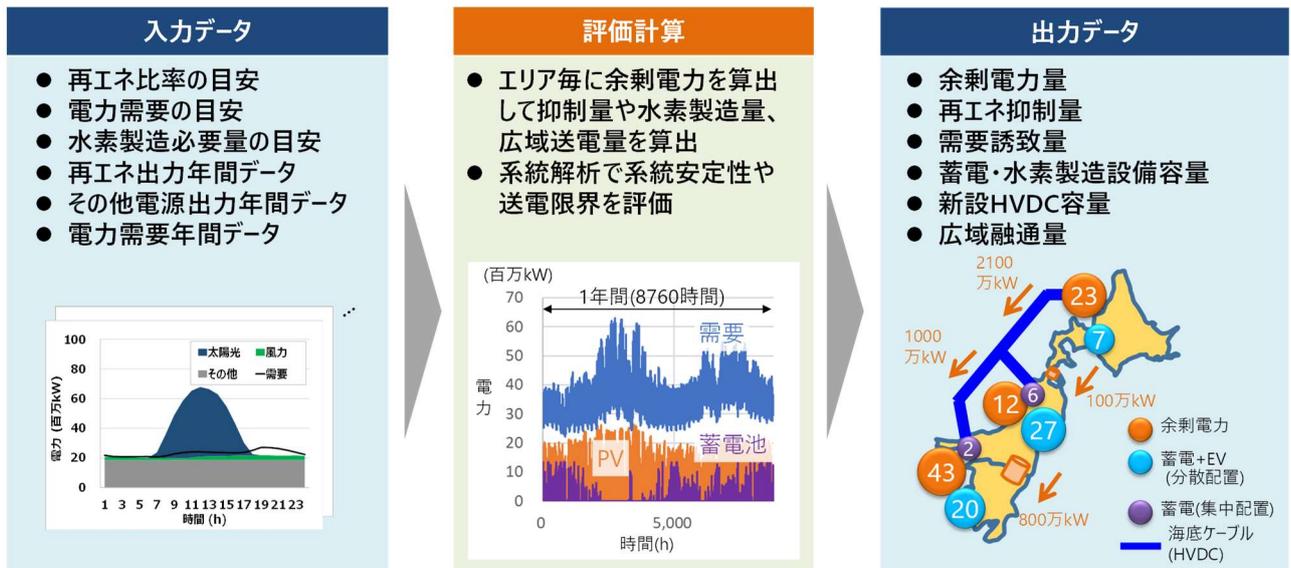
図 4-9 対策その 3：再エネの出力変動への対応（同時同量・周波数の安定化）

4.3.2 系統対策の試算

日立東大ラボでは、再エネを含む電力系統の現象を検討するため、系統構成などの解析モデルを公開情報から構築した。解析の対象を、洋上風力が期待される北海道・東北と、エネルギー需要の大きい関東とし、「東日本シミュレータ」として系統対策を検討している。図 4-10 に解析システムの概要を示す。

図 4-11 に、解析システムに用いたシミュレーション検討条件とその結果を示す。シミュレーションでは、「再エネ 100%」「CCS 制限」「原子力活用」の 3 ケースについて、北海道・東北～関東をつなぐ送電容量、蓄電システム容量を試算・比較した。その結果より、各ケースで共通して一定規模の送電容量・蓄電システム容量が必要との示唆を得られた。社会インフラ整備には時間・費用が必要なため、各ケース共通に必要な設備導入に早めに着手すべきといえる。

図 4-11 では、蓄電容量を全て新設する条件としたが、実際は地域社会に普及する分散リソース（ヒートポンプ給湯機、EV 等）からの調整力を活用することで社会コスト低減が期待できる。この可能性については第 5 章に記載する。



EV: Electric Vehicle, HVDC: High Voltage Direct Current

図 4-10 系統課題の解析システム（東日本シミュレータ）概要

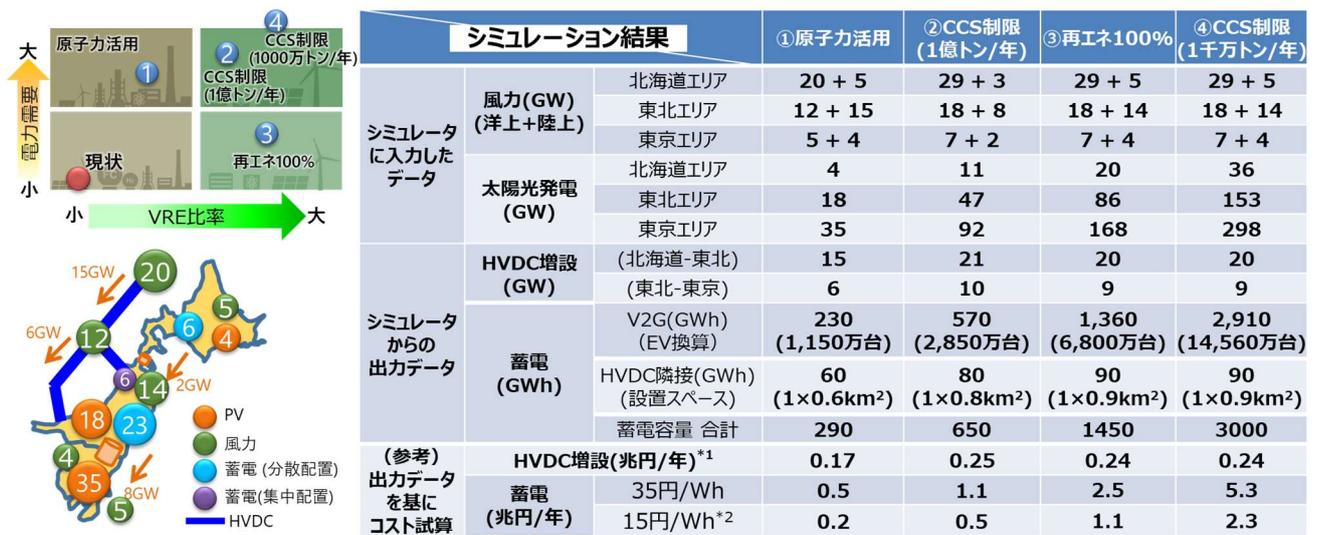


図 4-11 シミュレーション検討条件と結果^{10,11}

4.4 データを活用した社会インフラの計画・運用

提言書第2版において電力システムのデータ共有について提言し、のちに電力系統概要などのデータ公開が進んだ。このような電力システムデータの公開は再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、参入する発電事業者、送配電事業者双方が共通のデータに基づき確認できるため、大きなメリットとなる。他方、2050年CN実現・トランジション戦略策定に向けては、将来の需要予測をはじめとする不確実性に対するシミュレーション技術が有効である。日立東大ラボでは、エネルギー供給側・需要側・CO2回収事業者、政府・金融等が協調し、社会コストを抑制しつつエネルギーシステムを構築するため、不確実性に対する多様なシミュレーションを駆使し、データを重視し将来の社会像の予測精度を高める。また、多様な技術の活用／脱炭素イノベーションを進展させるため、技術開発の動向や社会情勢を踏まえてシミュレーションを重ね、課題を明確化するとともに、イノベーションを起こすべき領域を示していく。このようなシミュレーション技術は、モデル自体の研究投資はもとより、シミュレータ運用やデータ更新など持続可能な運用と、適切にデータ公開する枠組みが必要である。

社会インフラの効率的な運用を考えるにあたって、電力供給力・需給変動・調整力等を協調させ、各技術・設備が電力需給バランスを実現するシステム的な仕組みが必要となってくる。地域社会における社会インフラ(エネルギーアセット)と電力システムとの協調(協調メカニズム)については、第5章にて詳しく述べる。

4.5 第4章まとめ

第4章の内容を要約する。

- エネルギーの供給・需要のほか、昨今注目されている技術イノベーションの可能性を踏まえ、考えられる将来のエネ

¹⁰ *1) 資源エネルギー庁「海底直流送電の導入に向けて FS 調査について」をもとに算出

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chokuyori_kaitai/pdf/004_03_00.pdf)

¹¹ 2) W. Cole and A. W. Frazier, "Cost projections for utility-scale battery storage: 2020 update," NREL/TP-6A20-75385.

ルギーシナリオをシミュレータ等で定量評価した 2050 年 CN 像について、再エネ導入割合と運輸・産業セクターの電化進展の二軸で整理・分類した結果、4 つの全く異なる社会像を示すこととなった。エネルギー需給構造について、総エネルギー消費量・電力供給量・CO₂ 排出量・脱炭素投資額をコスト最適化して試算した。「CN 実現には電化推進が経済的」に加え、「再エネ/水素・アンモニア発電だけでなく、火力・原子力も活用するのが経済的」との示唆が得られたため、火力・原子力の活用を政府委員会等においても積極的に議論すべきである。

- 様々な制約条件を付してコスト最適化計算を行ったが、いずれのケースでも物理的に 2030 年▲46%を達成するには、2030 年前後に大量の太陽光設備の導入が必須との結果であった。「物理的に設置可能か?」「設置を推進する政策として何が考えられるか?」「代替手段による排出削減はできないか?」などの議論が必要といえる。
- 「再エネ 100%」で 2050 年 CN を実現するには、太陽光 600GW 超/蓄電システム 80GW 超の設置が必要と示唆された。再エネ 100%の場合、設備を設置する場所/土地や費用対効果の検証が必要なほか、電力系統など電力部門の投資金額が大きく、電気料金が燃料活用よりも割高となるため電化が進まないことにも留意すべきである。
- 「原子力活用」「CCS 制限」「再エネ 100%」の 3 ケースについて、北海道・東北～関東をつなぐ送電容量、蓄電システム容量を試算・比較した。その結果から、いずれにおいても、共通して一定規模の送電容量・蓄電システム容量が必要との示唆を得られたため、各ケース共通に必要な設備導入に早めに着手を検討すべきである。
- 社会インフラ整備には相当の時間と費用を要するため、2050 年 CN 実現・トランジション戦略の策定に向けて、現実的かつ効率的な計画を立てるべきである。計画の策定にはシミュレータを用いた定量評価が不可欠で、今回の提言では「総エネルギー消費量」「電力供給量」「CO₂ 排出量」「脱炭素投資のキャッシュフロー」のほか、将来必要な送電容量・蓄電システム容量と総コストを試算した。蓄電システムコストの低減の可能性については、第 5 章で述べる。
- 社会インフラの効率的な運用には各種シミュレータの活用が不可欠。シミュレーションモデル自体の研究投資はもとより、将来予測のためのシミュレータを公的に運用し、適切にデータ公開する枠組みが必要である。また、電力供給力・需給変動・調整力等の技術・設備を系統的に協調させる仕組みが必要であり、デジタル技術による連携が有益である。日立東大ラボでは、多様なシミュレーションの活用とデータを重視して予測精度を高め、将来の社会像と課題を明確化し、イノベーションを起こすべき領域を示していく。

第5章 地域で起こす変革

カーボンニュートラル(以下、CN)を達成するには、地域においても全方位的な施策が求められる。また、4章で述べた地域から基幹系統に提供する調整力の創出も含めた新たなエネルギーシステムを構築するには、社会・民間・公共セクターにおける地域での各アクター、すなわち市民・企業・国/自治体の協調に向けた意思決定にも変革が求められる。本章では、3章で述べた地域における意思決定、エネルギー視点での街づくりの在り方、そしてデジタル技術の活用の観点から、地域における価値創生とエネルギー基幹システムとの協調について述べる。

5.1 CNに向けた地域での意思決定

CN 実現に向けた省エネや調整力の創出など、エネルギー利用施策の重要度の上昇、EV 普及に向けた世界的な舵切り、再エネ大量導入時の社会インパクト評価、水素・新燃料の社会実装に向けた開発加速など、エネルギー関連の社会動向は急速に変化している。CN 社会において豊かで活気ある地域を実現するには、地域社会における過剰投資を抑制しつつも、社会情勢に合わせて大小さまざまな変革を進める必要がある。そのような変革には、大きな投資を伴うインフラ整備や、アセットの所有者を超えた共用など、国や自治体・企業・市民が協調して意思決定する変革も含まれ、地域社会の全員参加によるトランジションが求められる。図 5-1 に、地域におけるエネルギー消費の内訳を示す。製造業では多くの熱エネルギー、電力エネルギーを消費しているため、省エネルギー、電化、プロセス転換などの推進が求められる。また、製造業やサービス業においては、投資や商品の選択において排出 CO₂ が評価されるため、半ば強制的に CO₂ 削減の努力がなされる。一方で、家庭におけるエネルギー消費は、熱エネルギー、電力エネルギーともに無視できるほど小さくなく、また、家庭には CO₂ 削減の外圧が働きにくいことから、個々人の CN への認識の深化や意識の高揚、CN に向けた自発的行動が重要である。

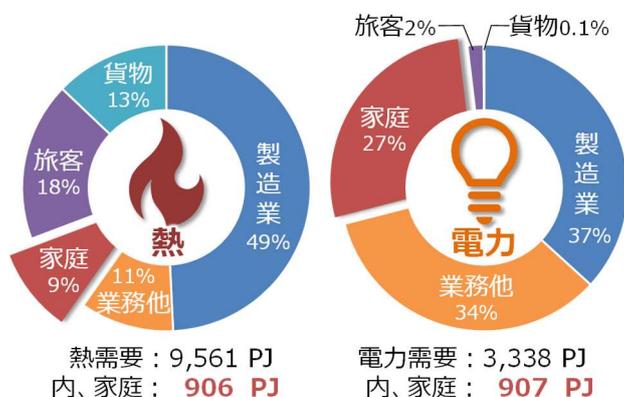


図 5-1 エネルギー消費内訳¹²

CN に向けた個人の自発的な行動や選択は、企業や公共を動かす社会全体のトランジションの起点ともなる(図 5-2)。同様に、個人の行動・選択に至るまでの企業・公共への支援も必要で、個人・企業・公共の足並みをそろえた意思決定が必要となる。さらに、大きなトランジションの場合は、行動や選択がさらなるモチベーションを生み、障壁の除去に進む段階的な好循環を進めることが必要となる。例えばスマートシティの構築で世界を先導するバルセロナのスーパーブロック

¹² 資源エネルギー庁、2019年、「総合エネルギー統計(エネルギーバランス表)」(2020年1月アクセス。)をもとに算出
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2

では、自動車の使用時間の制限からはじめ、次に遊具やベンチを敷設し、最終的に大規模工事を伴う街の構造変化が進められた(図 5-3)^{13,14}。

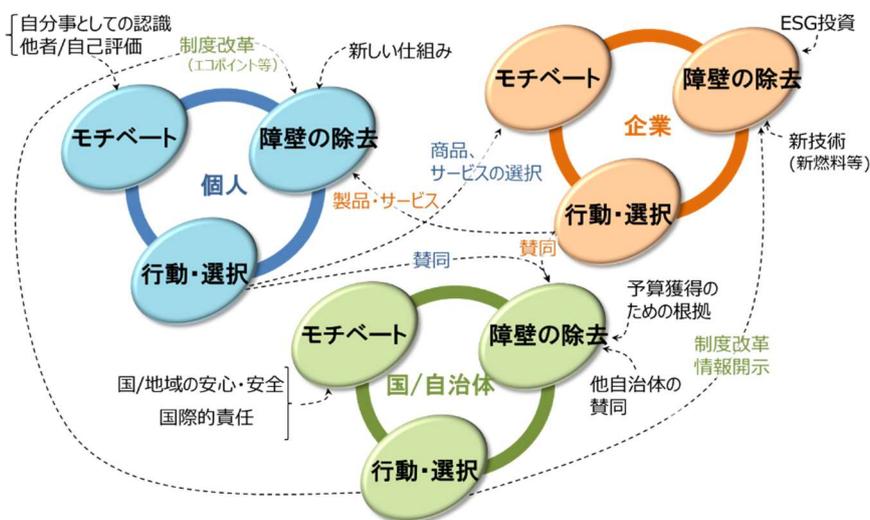


図 5-2 個人の行動・選択を起点とした社会のトランジション

足並みをそろえた地域のトランジションには、地場産業や地形的特徴、人口構成などを含めた地域の特色を前提とし、めざす地域の姿を定めること、そしてそれに向けた行動・ルール策定が必要となる。そのような意思決定には、各アクターが自ら参画して地域の目標として納得することが必須である。この段階においては、政府による地域改革のロードマップが議論の後ろ盾となり、自治体が策定する計画に企業や市民が足並みをそろえることが強力なサポートとなる。策定する計画は、地域の企業や市民が自分ごととして認識できるよう、地域をいくつかに分割し、その単位での現状や目標値、利用可能なリソースを提示することも有効である。例えば、Google 社が提供する Web サイト“Environmental Insights Explorer”では、建築物、輸送・移動による CO₂ 排出量、およびルーフトップ PV のポテンシャルが提示されている¹⁵。このようなデータをもとに現状を認識し、各アクターが自分事として計画に参加することが望ましい。

また、行動による中期的期待効果と負の面を同時に各アクターに示すこと、アクターの声を広く拾い、より多くの納得と合意を獲得することが重要となる。アクターの声を広く拾う施策として、オンライン市民参加による参加者の開放性・多様性の向上、意思決定プロセスの透明化が考えられる。千葉県など、国内でも部分的に進んできているが、英国・米国で進むオープンガバメントの仕組みなど、諸外国の例を参考に、公共セクタにおける意思決定の IT 化を加速すべきである。(図 5-4)

¹³ WORKSIGHT. 2020 年。「バルセロナ市民にストリートを取り戻す」2022 年 1 月 14 日アクセス。
<https://www.worksight.jp/issues/1644.html>

¹⁴ AMP. 2020 年。「バルセロナでも自動車禁止の動き、世界の都市で広がる「car-free ムーブメント」」2022 年 1 月 14 日アクセス。
<https://ampmedia.jp/2020/01/27/car-free-movement/>

¹⁵ Google. “Environmental Insights Explorer” February 2, 2022 accessed.
<https://insights.sustainability.google/>



図 5-3 バルセロナ市 Super Block¹³

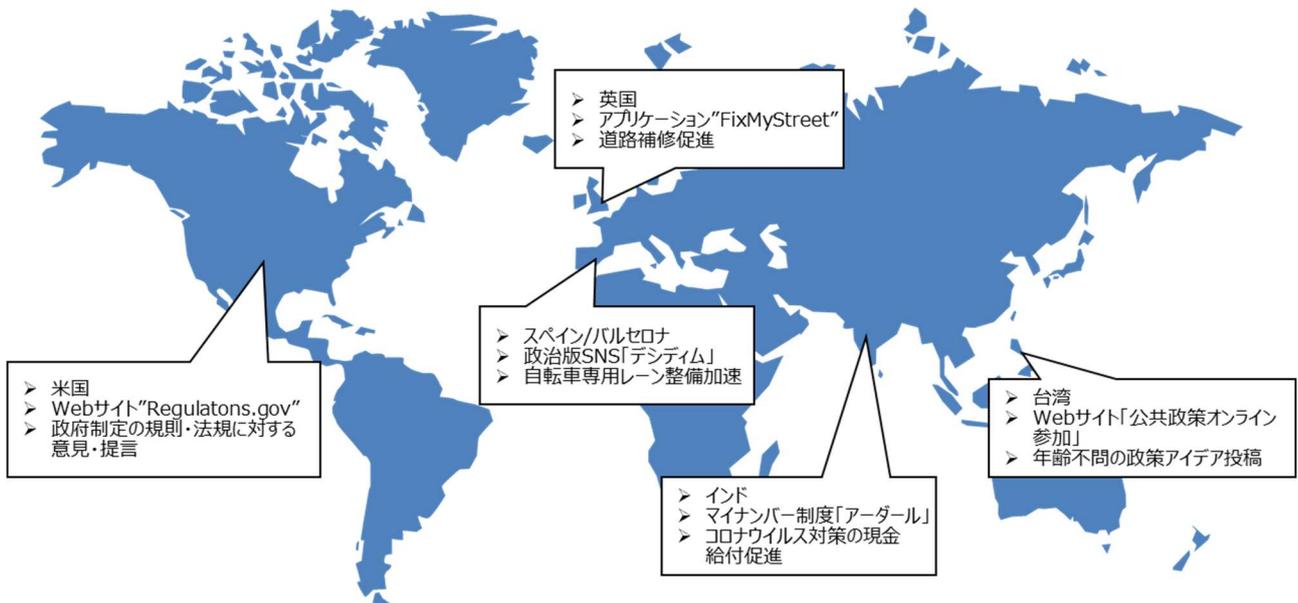


図 5-4 市民対話における「オンライン活用」の先行事例^{16,17,18}

5.2 エネルギー視点での都市改革

日本における CN を合理的に実現するには、再エネの主電源化や電化の推進、新燃料の活用が必要である¹⁹。しかし、再エネの導入は国土による制約を受けるため、4章で示したように多くの調整力を必要とする。そのため、街づくりの

¹⁶ SocietyWorks. “FixMyStreet – Report, view, or discuss local problems” February 14, 2022 accessed. <https://www.fixmystreet.com/#>

¹⁷ The United States Government. “Regulations.gov – Your Voice in Federal Decision Making” February 14, 2022 accessed. <https://www.regulations.gov/>

¹⁸ 日本経済新聞. 2022. 「民主主義の危機、「機敏統治」に活路 IT 駆使で迅速改善」 2022 年 2 月 11 日アクセス. <https://www.nikkei.com/article/DGXZQQUA169LU0W1A211C2000000/>

¹⁹ 経済産業省. 2021 年. 「クリーンエネルギー戦略の策定に向けた検討」2022 年 1 月 19 日アクセス.

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/001_02_00.pdf

改革など多様な施策を進めることで人々の行動変容を促し、電化推進と新燃料活用を社会全体での省エネルギー化のもとで推進することが望ましい。

一方で、国内外で進む近年の天災の激甚化により、地域のエネルギーレジリエンスの重要性が急激に高まっている。そのため、地域レジリエンスの向上を踏まえた柔軟性のある都市構造の変革が求められる。

5.2.1 都市改革による省エネルギー

地域においては、図 5-1 で示したように、製造業、運輸、家庭・業務で多くの熱需要、および電力需要が生じている。その用途は多岐にわたるため、多方面からの省エネが求められる。表 5-1 に都市改革に関する各種省エネ施策をまとめる。これらの施策の中には、アクター単独で遂行できるもの、同業種の協業で推進できるもの、多数のアクターの同意および協力が必要なものが含まれる。このうち、職住一体やウォーカブルシティ・コンパクトシティへの移行など、都市の構造や特性を変化させる施策は、省エネ以外の目的も含んで推進されるため、多くのアクターに影響を与える。

いくつか具体例を挙げて説明する。ウォーカブルシティについては、2021 年 11 月時点で国内 319 都市が“WEDO” (Walkable(歩きたくなる)、 Eyelevel(まちに開かれた 1 階)、 Diversity(多様な人の多様な用途、使い方)、 Open(開かれた空間が心地よい))の考えに共鳴し、政策実施のパートナーとして具体的取組を推進しており、53 都市が滞在快適性など向上区域を設定している²⁰。また、自転車のネットワーク計画を策定する自治体数も 203 を超え、自転車の利用環境の整備も広がっている²¹。両施策は、カーボンフリーの移動手段へと導く行動変容の誘導施策という側面を持ちつつ、地域活性化と自転車事故削減を狙った国土交通省による支援が後ろ盾となった好事例である。その一方で、自動車道の渋滞や、期待値に届かない人流の活性化、景観の変化などが地域におけるトランジションの障壁となる。また、国土の約 7 割を丘陵地が占め、高齢者人口比率の高い日本においては、ウォーカブルシティが市民を広く見たときに最良の選択肢にならない場合もある。このため、コンパクトシティや移動・輸送アセットを共有化する MaaS (Mobility as a Service)の導入など、複数の選択肢を用意したうえで、意思決定されることが望ましい。

このように、変革の結果としてアクターに生じるメリットとデメリットを、地域の地形・人口・年齢分布を反映した人流検出技術、人流シミュレータ、景観変化シミュレータなどのデジタル技術を活用して、施策を定量評価または可視化することによって、トランジションのための選択を進めていくことが重要である。愛媛県松山市では、人流計測などのデジタル技術を活用した「データ駆動型都市プランニング」の実証を進めており、人々の行動変容を促すウォーカブルシティ化や、地域の活性化に向けたまちづくりの合意形成を進めている²²(図 5-5)。

²⁰ 国土交通省、2021 年、「ウォーカブル推進都市一覧（令和 3 年 1 月 3 日時点）」2022 年 1 月 14 日アクセス。
<https://www1.mlit.go.jp/toshi/content/001420516.pdf>

²¹ 国土交通省、「道路—自転車利用環境の整備」2022 年 1 月 14 日アクセス。<https://www.mlit.go.jp/road/road/bicycle/index.html>

²² 日立製作所、2019 年、「日立評論—デジタル基盤で支える「People Centric City」」2022 年 1 月 14 日アクセス。
https://www.hitachihyoron.com/jp/archive/2010s/2019/03/pdf/66-71w_HY05A05.pdf

表 5-1 地域における省エネ^{23,24,25,26}

省エネ種別	区分	施策
熱需要の抑制	通勤移動の抑制	職住一体の街づくり
	街中における自動車交通量の抑制	LRT の導入、ウォークアブルシティ・コンパクトシティへの移行
	都市間の貨物消費エネルギーの削減	モーダルシフト、共同配達、輸送車両の大型化
熱・電力需要の抑制	建屋内の熱需要抑制	住宅・ビルの高断熱化、太陽熱給湯の導入
	廃熱の抑制・有効活用	給湯の電化、コジェネ、廃熱回収給湯
電力需要の抑制	空調・照明エネルギーの最適化	BEMS の導入
	流体駆動の効率化	インバータドライブシステムの導入
省エネ関連施策	再エネ自家消費による省エネ	住宅への PV 設置要求
	電化推進	住宅への電化レディ要求、HP 導入支援

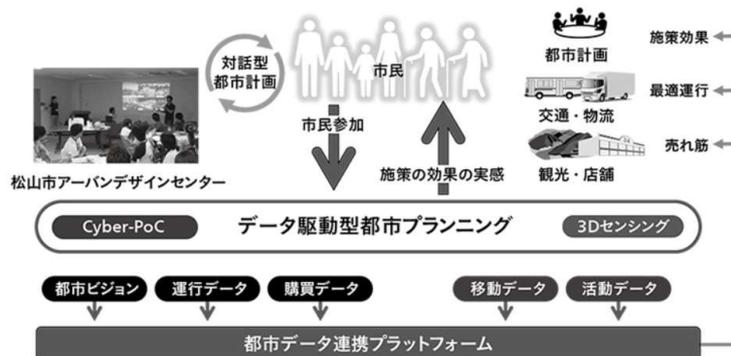


図 5-5 データ駆動型都市プランニング²²

5.2.2 地域のエネルギーレジリエンス

CN を達成するために電化を進めていく一方で、近年、天災による停電の長期化の事例が続いていることから、地域におけるエネルギーレジリエンスの重要度が高まっている。しかし、ガソリンスタンドの減少によって地域内のエネルギー拠点が脆弱化していること、また、生産人口の減少により地域の財政難が継続していることから、地域の変化に合わせたエネルギーレジリエンスを確保することが必要である。

日本では、陸上風力やメガソーラの建設適所が枯渇しつつあり、今後、配電系統に連系する 2 MW 以下の小規模な太陽光発電の導入が進むことが想定される。そのため、従来の避難場所の配置や避難計画の事前立案に加え、地域

²³ 国土交通省。「物流—モーダルシフトとは」2022 年 1 月 14 日アクセス。

<https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/modalshift.html>

²⁴ 国立環境研究所。2021 年。「つながる ひろがる」環境情報メディア 環境展望台 — 環境技術解説 グリーン物流」2022 年 1 月 14 日アクセス。 <https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=24>

²⁵ 国土交通省。2020 年。「新型コロナがもたらす「ニュー・ノーマル」に対応したまちづくりに向けて」2022 年 1 月 14 日アクセス。

https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi05_hh_000301.html

²⁶ 国土交通省。2021 年。「LRT の導入支援」2022 年 1 月 14 日アクセス。

https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/lrt/lrt_index.html

に設置される太陽光発電を活用するレジリエンス確保の仕組みを社会実装することが重要である。

一例として、宮崎県国富町では、太陽光発電と蓄電池システム、EV を連携制御し、レジリエンスを高めるエネルギーマネジメントシステムの実証が進んでいる(図 5-6)。本プロジェクトは、EV を公用車として活用することを実証するものだが、緊急時には地域住民や地域内企業の所有する EV や太陽光などのアセットとも連携した臨時の地域内エネルギーシステムを構築できるようにしており、地域のエネルギー投資を抑制しつつエネルギーレジリエンスを高めている。このように、アセットの所有者を超えた協調のあり方を議論しておくことが大切である。また、EV の地域内滞在率予測など、デジタル技術が施策の効果向上に大きく寄与することから、データのセキュアな共有・管理の仕方についても併せて議論することが重要である。



図 5-6 国富町で実証が進む太陽光、蓄電池、EV 活用のエネルギーマネジメント実証²⁷

5.3 データを用いた賢いエネルギー消費による基幹システムとの協調

4 章で述べたように、CN の実現に向けて大量の VRE が導入されると、天候により電力の需給バランスが変化するため、多くの調整力が必要となる。しかし、調整力を調達するため、電力系統用の蓄電池等を設置すると巨額のコストが必要となる。そこで、地域内の需要家の分散リソースから調整力を集約し、VRE 導入の社会コストを抑制する仕組みが望まれる。本版では、この需要家の持つ分散リソースを集約し協調する手段として、協調・制御プラットフォーム(以下、PF)の導入を提言する。

協調・制御 PF とは、地域社会に分散する各種のリソースを、エネルギーデータをもとに統合して管理・制御し、需要側の平常時・災害時のエネルギー利用、基幹システムの安定運用などに価値を創出する PF である(図 5-7)。本プラットフォームは段階的な社会実装が望まれる。第一段階では、VRE の発電電力やその予測値に応じてダイナミックに変動する電力小売料金と需要を協調させ、基幹システムへの調整力の供給と需要側の電力調達コストの抑制を両立する。第二段階では、需要側のリソース協調を高度化し、調整力市場への参画を可能とする。最終の第三段階では、災害時に地域内リソースをアクティブに制御し、地域のレジリエンスを向上することを目指す²⁸。

²⁷ 日経 BP 総合研究所。2021 年、「新・公民連携最前線―「太陽光 + EV + 蓄電池」でレジリエンス工場、国富町で実証」2022 年 1 月 14 日アクセス。 <https://project.nikkeibp.co.jp/atclppp/PPP/news/101202170/>

²⁸ 日立東大ラボ。2021 年、「Society5.0 を支えるエネルギーシステムの実現に向けて (第 3 版)」 <http://www.ht-lab.ducr.u-tokyo.ac.jp/wp-content/uploads/2021/03/c5ddff233c8d1e825bb53999344dcc62.pdf>

2030年代には自動車を中心とした電化が本格的に進行し、2030年代半ばのEVの台数は全国で1600万台規模に達すると見込まれる^{29,30}。1台あたりの蓄電池容量を40kWhとすると、その調整力ポテンシャルは640GWhに相当する。このような分散リソースの急増と並行して、協調・制御PFを段階的に社会実装していく必要がある。

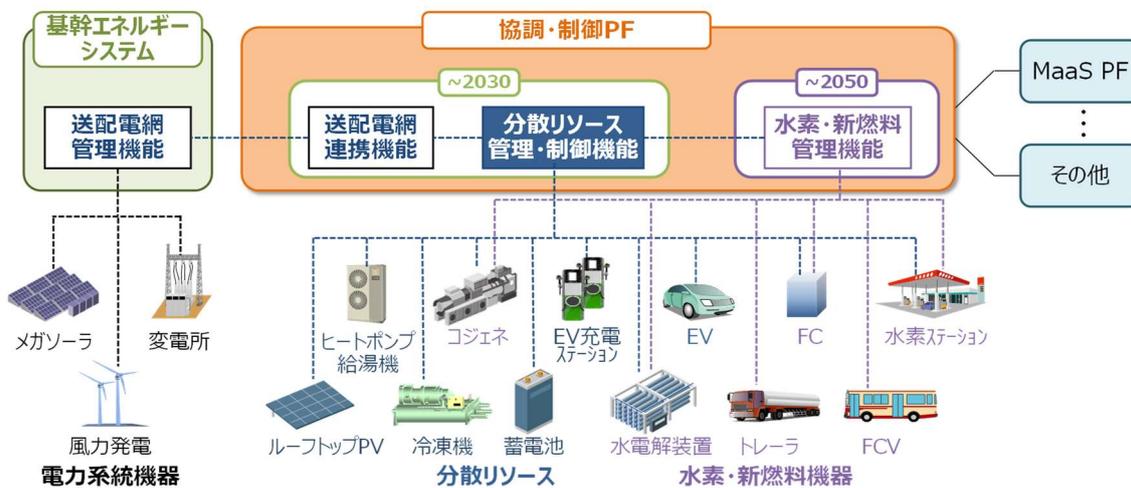


図 5-7 分散リソースを束ねる協調・制御 PF

協調・制御 PF の主体を民間と仮定し、EV 普及進展と並行して本 PF を社会実装していくには、本 PF を活用した分散リソースのアグリゲーション事業の規模を評価する必要がある。2030 年での本 PF 社会実装を想定し、系統需給シミュレーションで卸電力市場のスポット市場価格を解析するとともに、そのスポット市場価格に基づいた需要側アグリゲーションを解析した。また、同様の方法で 2050 年に期待できる分散リソースによる調整力の規模を試算した。

図 5-8 に示すように、系統需給シミュレーションにより、電力需要、電源構成、燃料費、PV・風力の発電量、連系線の容量・損失を入力条件として、スポット市場価格を解析した^{31,32}。2030 年の電源構成は、第 6 次エネルギー基本計画を参照した³³。解析の結果、2030 年では大量の太陽光発電があるために供給が需要を上回り、スポット市場価格が 0 円/kWh になる時間帯が多く発生することが確認された。

²⁹ 現代文化研究所。2020 年。「全市区町村のうち半分弱で、2030 年に乗用車保有台数が 20%以上減少」 研究レポート 2022 年 1 月 31 日アクセス。 <https://www.gendai.co.jp/report/post-1623/>

³⁰ AIM プロジェクトチーム。2020 年。「2050 年脱炭素社会実現の姿に関する一試算」2022 年 1 月 14 日アクセス。 https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/034/034_004.pdf

³¹ 東仁、磯永彰、福留潔、蓑津真一郎、野中俊介、荻本和彦、片岡和人。2017 年。「連系線によるエネルギーと需給調整力融通を含む電力需給解析手法」 電気学会論文誌 B, Vol.137, No.2, pp.83-92

³² 荻本和彦、岩船由美子、占部千由、東 仁、磯永彰。2021 年。「電力需給モデルの限界費用によるスポット市場価格分析」 Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol.42, No.4, pp.185-193

³³ 経済産業省。2021 年。「第 6 次エネルギー基本計画 (2021 年 10 月)」 2022 年 1 月 14 日アクセス。 <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>

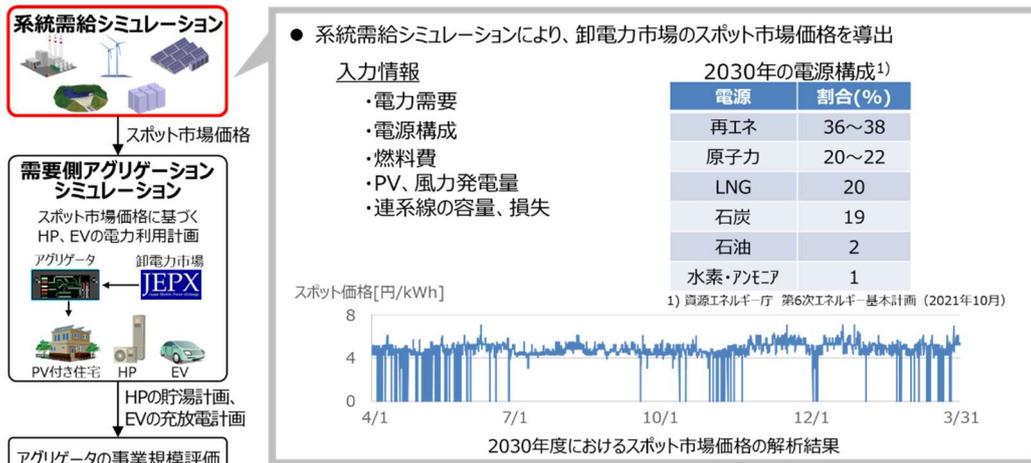


図 5-8 需給シミュレーションによる 2030 年のスポット市場価格解析

図 5-9 に示す需要側アグリゲーションシミュレーションでは、得られたスポット市場価格を基に、分散リソースのアグリゲーション効果を解析した³⁴。アグリゲーション対象は、東京都町田市の戸建住宅約 10 万世帯のうち、分散リソースを保有する世帯とした。分散リソースとしては、太陽光発電(PV)、ヒートポンプ給湯機(HP)、電気自動車(EV)、を想定した。戸建住宅の世帯数、および分散リソースの保有台数の導出については、付録 1 を参照されたい。

解析条件は 2 条件とした。Case1 は 0~7 時を中心に HP の貯湯と EV の充電を実施する夜間運転のケース、Case2 は、給湯需要と走行需要を基に HP 貯湯量と EV 充放電を最適な時間帯にシフトしたケースである。また、HP 給湯需要および EV 走行需要のばらつきを考慮し、最適化は HP 貯湯量と EV 蓄電量に下限制約を設定して、アグリゲーションによって需要家の利便性が低下しない条件で解析した。

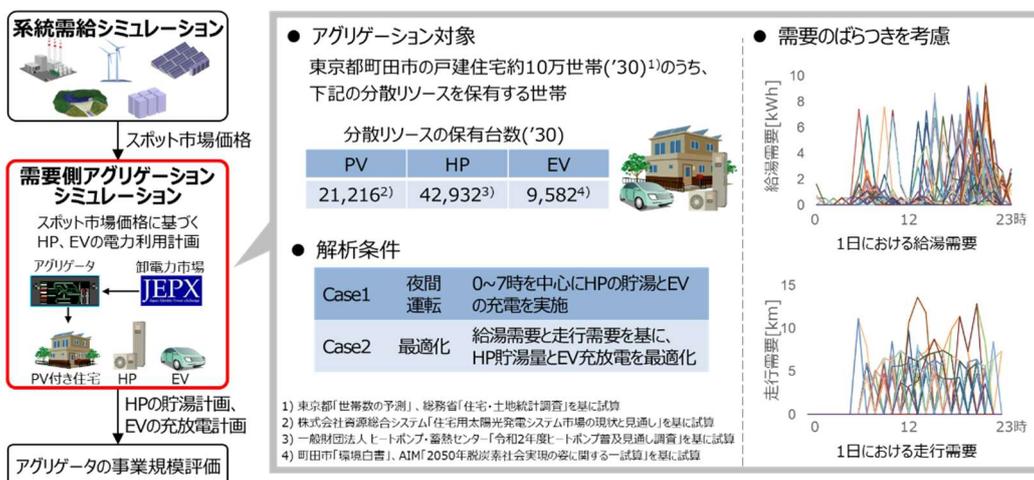


図 5-9 需要側アグリゲーションシミュレーション

図 5-10 に、2030 年におけるアグリゲータ事業規模の評価結果を示す。左側のグラフは、3 月 6 日におけるスポット市場価格および町田市全体の電力需要である。Case1 の夜間運転では、夜間に EV の充電と HP の沸き上げを行うのに対し、Case2 の最適化ケースでは、EV 充電、HP の沸き上げに要する 227MWh 分の需要がスポット市場価格の

³⁴ 岩船由美子、荻本和彦、2021 年、「住宅用太陽光発電および需要家機器のアグリゲーション評価モデル」、電気学会 B 部門大会

安い昼間の時間帯にシフトしている。この効果を全国規模に換算すると 79.5GWh に相当する。この電力需要のシフトを蓄電池で代替すれば、50 円/Wh 換算で約 4 兆円のコストがかかる。これより、本アグリゲーションが大きな社会コスト削減に寄与することがわかる。また、2030 年断面では、需要側からの調整力として期待の集まる EV ではなく、すでに普及の進んでいるヒートポンプが主となり需要の時間シフトに貢献することがわかる。

図 5-10 の右側に、アグリゲータのスポット市場からの電力調達費用の削減効果を示す。Case1 の夜間運転の場合、調達費用が 12 億 7100 万円であるのに対し、Case2 では、11 億 5400 万円となり、約 1 億 2000 万円の削減効果がある。この結果を戸建て住宅数比で換算すると、関東全域で約 140 億円、全国では 340 億円の削減効果となり、同量のアグリゲーション事業規模が期待できることがわかる。本解析では、インバランス調整や、勤務地など自宅外での EV 充放電を考慮していないが、これらを考慮することでさらなる事業規模の拡大も期待できる。

図 5-11 に 2050 年に創出可能な調整力の試算結果を示す。2050 年におけるスポット市場価格は文献³⁵の解析結果を用いた。2050 年に想定される町田市の戸建住宅の分散リソースは、PV が 31,080 台、ヒートポンプ給湯機が 78,108 台、EV が 38,744 台である。Case1 の夜間運転に対し、Case2 の最適化したケースでは、EV 充電と HP 沸き上げの時間帯をシフトすることで、614MWh の調整力を創出できる。そして、これを全国規模に拡張換算すると、約 215GWh の調整力に相当する。したがって、2050 年では、戸建住宅の分散リソースをアグリゲーションすることで、第 4 章「原子力活用ケース」で必要とされる蓄電調整力(580GWh)³⁶の約 37%を代替できると考えられる。

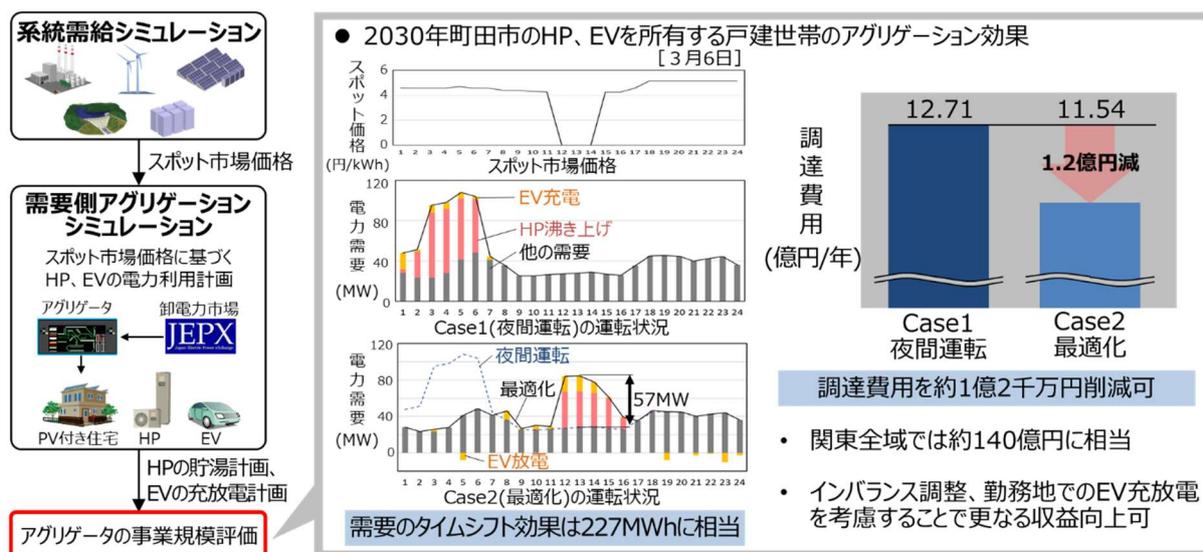


図 5-10 2030 年におけるアグリゲータの事業規模評価

³⁵ 荻本和彦、他 11 名、2022 年、「ソフトリンクによる 2050 年のエネルギー需給分析 その 2 (3)電力システムモデル」、第 38 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス 25-3

³⁶ 蓄電池容量 580GWh は、第 4 章 図 4-11 記載の東日本における①原子力活用ケースでの必要蓄電池容量 290GWh を全国換算した値

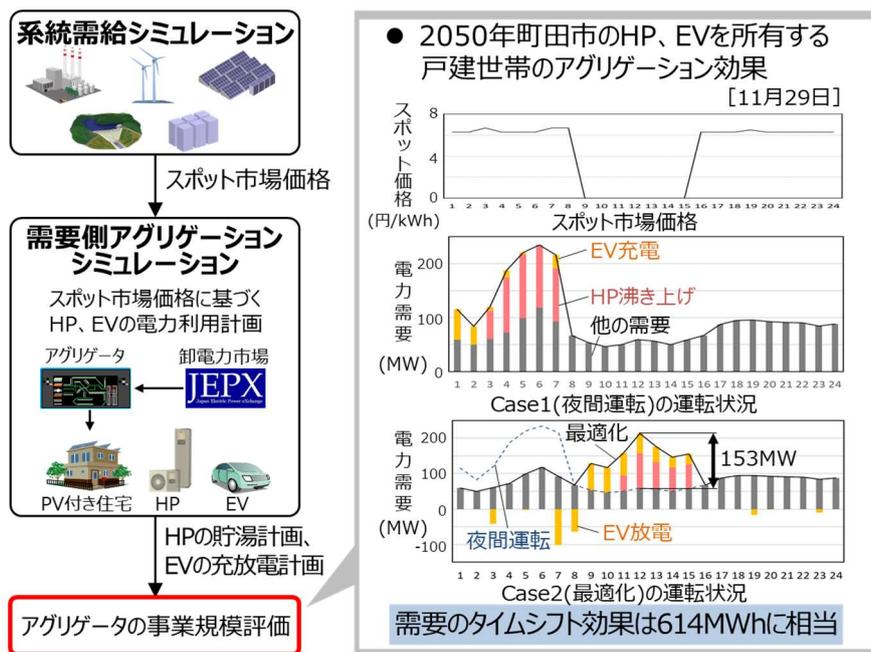


図 5-11 2050 年における調整力の試算

本アグリゲーションは、需要家の経済合理性による選択を促すものであり、需給調整を実施するためのインフラなどの追加費用は発生しない。そのため、電力供給と需要家の win-win で調整力を創生することができる。電化が急伸する 2030 年代に間に合わせて導入効果が発揮されるよう、協調・制御 PF の社会実装とそれに必要な機器側のインターフェース(IF)の実装を急ぐべきである。

上記試算は、戸建住宅の分散リソースをすべて協調・制御 PF でアグリゲートできる理想的な状況を仮定し、試算したものである。このアグリゲートの実現には、多くの分散リソースへの PF 連携 IF の装備、リソース所有者とのアグリゲーションにかかる合意形成が必要となる。ヒートポンプの導入を後押しする施策や、ダイナミックプライシングを含めた需要の最適化に資する情報、料金体系の実現が盛んに議論されているが^{37,38}、これらに加え、上記 IF の国際規格準拠による機器メーカーの二重開発の回避、IF の無線化による家庭内環境の維持など、メーカーやリソース所有者の障壁を打破するとともに、IF を装備した機器に関する適切な情報管理・共有について、メーカー・ユーザーを含めて広く議論する場を設ける必要がある。

日立東大ラボは、2050 年の CN 社会において、豊かで活気ある地域社会を実現するため、各所での提言を通じて上記のような地域エネルギーサービスの新規市場の創設や、市場構築に求められるプラットフォームの社会実装をけん引するとともに、サービス提供者間の競争の中で創出されるべきイノベーションや、準備されるべき規格、データ管理基盤など、地域間の協調や地域と基幹エネルギーシステムとの協調を加速する必要条件を示していく。

³⁷ 経済産業省、2021 年、「今後の省エネ法について（2021 年 12 月 24 日）」2022 年 1 月 14 日アクセス。

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/pdf/036_01_00.pdf

³⁸ 経済産業省、2021 年、「2050 年カーボンニュートラルの実現と省エネ政策について」2022 年 1 月 14 日アクセス。

<https://www.nedo.go.jp/content/100940154.pdf>

5.4 第5章まとめ

第5章の内容を要約する。

- 地域のトランジションの実現には、日々変わるエネルギー情勢への対応が求められる。その対応には国や自治体・企業・市民が協調した意思決定が重要となる。具体的には変動、レジリエンスを含めた地域のあるべき姿と移行タイミングを地域の目標として共有し、アクターに生じるメリット・デメリットを予測・検証しながら施策を段階的に進めることが重要となる。
- CN 社会において豊かで活気ある地域を実現するには、地域社会の過剰な投資を抑制しつつも社会情勢に合わせた変革を進める必要があり、そこでは国や自治体・企業・市民で協調した意思決定を要する変革も含まれる。政府はロードマップの策定により地域におけるトランジションの方向性を示し、地域はそれぞれの実態に即した計画を策定することが必要である。また、地域内の各アクターが上記計画を自分ごととして認識して意思決定に参画すること、施策のメリットとデメリットを事前に理解することが重要であり、ここではデジタル技術の活用が期待できる。
- 日本における合理的 CN の実現には、再エネ主電源化・電化の推進・新燃料の活用に加え、新しい枠組みでの省エネ施策の推進が重要となる。地域では、移動手段と空間の整備、新たな仕様を備えた住宅の普及、アセットの共同活用が選択肢となる。街づくりなど多くのアクターが関与する意思決定には、デジタル技術を活用した意思決定がトランジションを加速する。
- 地域ではガソリンスタンドの減少などエネルギー拠点が脆弱化し、生産人口の減少により地域の財源は厳しくなる中、電化の進展のもとで天災による停電時でもエネルギー供給を確保するためには、地域の住民や企業が持つ太陽光や EV などのアセットを活用する議論を進めるべきである。
- 今後の EV 導入の進展と並行して、ヒートポンプや EV 充電器のアグリゲーションを実現する協調・制御 PF を段階的に社会実装する必要がある。本版では、協調・制御 PF による需要家のエネルギー消費の時間シフトで地域エネルギーの調達コストを削減する協調型サービスを提案し、東京地区の住宅地を例にその事業規模の評価を試みた。その結果、2030 年では EV ではなく、すでに普及が進んでいるヒートポンプが主役となって需要シフトに貢献すること、および上記サービスを全国展開した場合には 340 億円の事業規模と、蓄電池コスト換算(50 円/Wh)で 4 兆円に相当する 80GWh の調整力創出が期待できることが明らかとなった。協調・制御 PF の社会実装を加速するためには、PF に連携可能な機器の情報を適正に管理・共有していくための議論が必要である。
- 日立東大ラボは、各所での提言を通じて、上記のような地域エネルギーサービスの新規市場の創設や市場構築に求められるプラットフォームの社会実装をけん引するとともに、サービス提供者間の競争の中で創出されるべきイノベーションや、地域と地域、地域と基幹エネルギーシステムとの協調を加速する必要条件を示していく。

第6章 カーボンニュートラル実現とその先を見据えた制度・政策

カーボンニュートラル(以下、CN)の達成に向けたエネルギーシステムのあり方として、電化の促進、S+3Eの堅持に向けた幅広いエネルギーリソースの確保の必要性について述べた。また、地域社会においては、CN 実現の適切なロードマップに基づいたトランジションの方向性を見極め、地域内の多様なアクター参画のもと意思決定がなされるべきであり、地域におけるエネルギーの電化と省エネ、エネルギーと連動する地域がめざすべき都市設計を選択する仕組みが重要であると。本章では最近 10 年程度のわが国における社会構造変化に対する制度・政策を概説し、CN に必要と考えられる制度のあり方について述べる。

6.1 CN 実現に向けた国土の長期展望

2021 年 6 月に国土交通省は国土の長期展望最終とりまとめ³⁹を発表した。それによると、CN 前提のもと、災害増加や人口減少、少子高齢化の課題を抱えた我が国では、人口 10 万人程度の地域生活圏をローカルに構成しながら、地域生活圏同士のネットワークを想定し、グローバルな競争に勝ち抜くことのできる産業転換を基本とし、レジリエンスが確保された安心・安全の下で真の豊かさが実感できる社会をめざしている。この国土の長期展望に CN の実現に立ったエネルギー分野を取り込んだ概念図を図 6-1 に示す。地域生活圏を構成するローカル、ネットワークを支えるためにエネルギーの安定供給 S+3E は欠かせない前提となる。資源に乏しい我が国では、国土構築には国際連携も重要となる。災害に強い国土の下で産業・運輸・業務の各業種が成長・発展を遂げ、この成長・発展にはエネルギー-S+3E の維持のためにエネルギーの供給と利用(需要)の協調が前提となり、さらに経済安保を視野に入れたグローバルな関係が構築される。これらの基盤が構築された上で、地域生活圏の真に豊かさが形成される。以下、図 6-1 の概念図にしたがって、エネルギー領域、産業領域および地域社会(地域生活圏)のそれぞれにおける現状の制度・政策と CN に伴うトランジションに必要となる制度・政策について述べる。

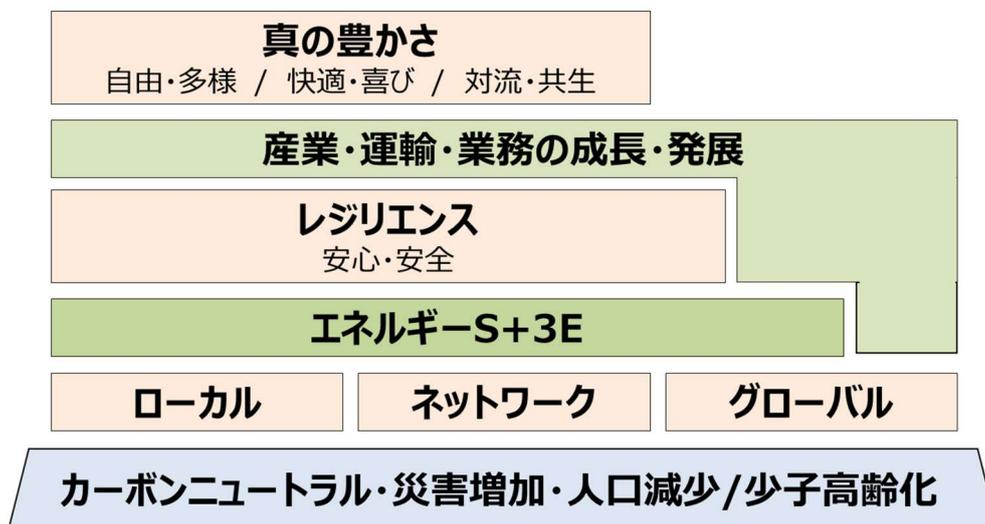


図 6-1 エネルギー分野を取り込んだ国土の将来展望

³⁹ 国土交通省「国土の長期展望」最終とりまとめ 2022 年 3 月 14 日アクセス。
https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/kokudo03_sg_000243.html

6.2 エネルギー-S+3E の制度・政策の現状および制度・政策

6.2.1 エネルギー-S+3E の制度・政策の現状

エネルギー供給は東日本大震災を経て原子力発電が休止し、その代替として LNG 火力発電が急増した結果、エネルギー源の構成が大きく変わった。他方、FIT をはじめとする再生可能エネルギーの導入施策により、2020 年には約 20%の電力を風力および太陽光発電が担うようになった。電力事業の変革は、発送電分離をはじめとする市場原理に基づく電力自由化を志向した制度設計を中心に、非化石発電比率の向上を進める施策や技術革新を狙ったグリーンイノベーション戦略が示された⁴⁰。

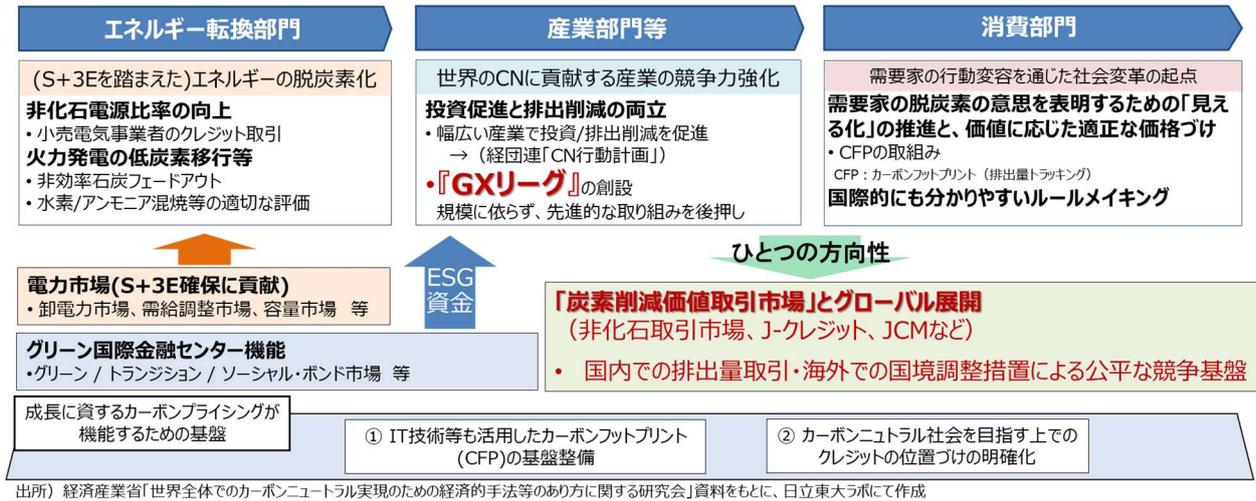


図 6-2 エネルギー関連動向

エネルギー需給安定化は供給側の各種施策に留まらず、変動する再生可能エネルギーに対応したエネルギー需要の協調が不可欠である。産業部門においては、2000 年代初頭のエネルギー価格高騰、2008 年の金融危機、東日本大震災を経て、エネルギー利用効率化が図られた結果と人口減少に伴う産業集約の影響もあり、エネルギー消費は減少傾向にある。また、省エネルギー法(以下、省エネ法) の高効率産業機器・部品導入の促進をはじめとする部分改善もなされた⁴¹。このようなエネルギー利用効率化、省エネルギーに関する投資や実行計画を「GX リーグ」として後押しする動きもある⁴²。民生・業務部門においては、需要比率の高い冷暖房に関して、機器のトップランナー認定制度⁴³、高い断熱性能や建物設置の太陽光発電を省エネ換算する建築物省エネルギー法⁴⁴が本格施行し、省エネ建築の標準化への見通しがついた。

⁴⁰ 「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」 2022 年 1 月 22 日アクセス。

<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html>

⁴¹ 「省エネポータルサイト」 2022 年 1 月 22 日アクセス。

https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/index.html

⁴² 「世界全体でのカーボンニュートラル実現のための経済的手法等のあり方に関する研究会」2022 年 1 月 22 日アクセス。

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_neutral_jitsugen/index.html

⁴³ 資源エネルギー庁「エネルギー消費機器製造事業者等の省エネ法規制」2022 年 1 月 22 日アクセス。

https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/enterprise/equipment/

⁴⁴ 国土交通省「建築物省エネ法のページ」2022 年 1 月 22 日アクセス。

https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/jutakukentiku_house_tk4_000103.html

6.2.2 エネルギー安定供給の課題と対策

「第6次エネルギー基本計画」が2021年10月22日に閣議決定され、図6-3中に示した「S+3E」を大前提に、「2050年カーボンニュートラル」や「2030年温室効果ガス▲46%」の実現に向けた政策の道筋が示された⁴⁵。また、第6次エネルギー基本計画では、「供給力確保のための枠組」について検討を行うこととしている。



図6-3 第6次エネルギー基本計画の概要

2020年4月までに「電力システム改革」が完了し、図6-3の内容が実施された。電力システム改革の目的の一つは「安定供給の確保」だが、現行の電気事業法にて、安定供給の責任の所在が明記されていないことが課題であった。電力広域的運営推進機関(広域機関)は、供給能力の確保を促進する業務を担うが、第6次エネルギー基本計画により、国全体の「供給能力の確保の促進」の役割の重要性が大きくなっている。そのため、電気事業法における広域機関の目的に「供給能力の確保の促進」等が明記される方針が、2021年12月の政府委員会で示された。

CNの実現にあたっては風力、太陽光といった再生可能エネルギーの導入促進を進める一方、新たな需給調整力として水素・アンモニア発電等の実現までの間も安定供給を可能とする電源が必要となる。さらにCNの移行期にはLNG等の価格が高騰する可能性など燃料市況も大きく影響する。このような背景から燃料市況に左右されない安定供給な電源および電力供給能力の確保が必要である。

電力システム改革によって多くの電力小売事業者が参画できるようになったが、昨今の電力逼迫時における電力卸価格の高騰を背景として、安定供給に影響が及ぶことも現実となった。5章で述べた電力需要アグリゲーションなどの電力需給協調を背景とした新たなイノベーション創出による事業展開を促すため、腰を据えて電力事業を営む事業者を増やす必要がある。他方、電力供給におけるS+3Eの原則に基づいた事業リスクの可能性を予見するシステム形成や安定供給に必要なルールづくりを並行して進めるとともに、電力供給におけるS+3Eを堅持するための責任所在を整理する時期に来ている。現行制度の追加措置として対策するだけでなく、電力供給の計画性、安定供給のコスト負担、再生可能エネルギーに対する調整力創出などについて、今後起こりうる課題の把握に努め、抜本的制度改革も含めた議論がなされるべきである。

⁴⁵ 資源エネルギー庁「エネルギー基本計画について」2022年1月22日アクセス。

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/

電力システムの新たな展開には、グローバルな視点が不可欠であることが再認識された。2022年2月のロシアのウクライナ侵攻や2021年の欧州風力発電の発電量不足など地政学や気候の影響で燃料市況が大きく高騰する状況下にある。エネルギー源、エネルギー需給安定化および省エネルギーについて、多くのイノベーション創出とできるだけ多様な技術的選択肢を確保するために、避けられない現実を国として受け止める時期にある。客観的なエビデンスに基づいて、わかりやすい国民への現状の発信、柔軟に対応できる選択肢の確保が一層重視される。

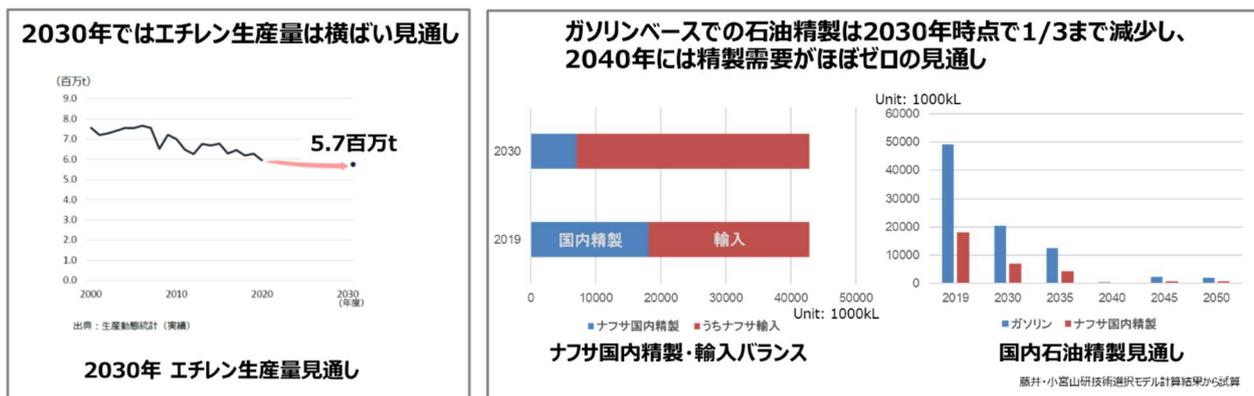


図 6-4 電力システム改革の実績と改革後の課題

6.3 CNを実現する産業イノベーション

CN はエネルギー供給のみならず、エネルギー消費、原料供給に対しても多くのトランジションを必要とする。例えば、図 6-5 に示すように、我々の生活を支える4大樹脂（ポリエチレン・ポリプロピレン・ポリスチレン・ポリ塩化ビニル）の原料となるナフサは現状、ガソリン精製の副産物である国内供給と輸入がほぼ 50% ずつとなっているが、2030 年温室効果ガス▲46%を想定すると国内供給は約 15%まで落ち込み、サプライチェーンの再考に迫られる。このように化石燃料は同時に炭素供給源であるため、そのサプライチェーンと CCUS をはじめとする炭素回収・循環技術や代替物質といった、バリューチェーンの長期見通しや生産・調達に関する高度な分析技術が不可欠である。

3章で述べたように、化学や鉄鋼産業においては CO₂ 回収および CO₂ リサイクルが CN 社会の実現において重要となってくる。例えば石油化学コンビナートでは、ナフサ等の原料共有のほか、熱源と電力の供給もサイト内で最適化されており、安定した生産を実現してきた。CO₂ リサイクルは言わば生産技術の静脈系の最適化を意味しており、設備周りの最適化のみならず、原料物質サプライチェーンを最適化するためのサイトの集約や効率運用に対する投資の促進策がなされるべきである。



エネルギーサプライチェーンに連動する産業界のバリューチェーン検証の必要性
エネルギー計画と連動した原料・資源サプライチェーンと産業バリューチェーンの計画・高度な分析技術

図 6-5 ナフサ供給を事例としたトランジションに伴う変化

CN は、産業セクターが新たなイノベーションを生み出す契機ともなり得る。現状は、需要に応じて食糧の安定供給を維持しており、担い手が不足していることから耕作放棄地が増加している。農業分野のイノベーション創出に向けて、食糧需要のほかに、バイオ燃料需要のようなエネルギー供給の国産基盤を新たに構築することができれば、国内の農業市場とバイオ燃料の供給量・価格安定化が図れる可能性がある。日本は農業・燃料分野での連携を政策レベルで進め、農業由来の国産非化石燃料ロードマップを作成し、農業・バイオ燃料産業が連携した市場の醸成、バイオ燃料の規格化などの課題を統合的に考える必要がある。

CN に伴う産業部門のトランジションにおいて、データ利活用は不可欠である。単に温室効果ガスの排出減少だけでなく、原料調達やサプライチェーンの再考に迫られることも予想される。このような課題の因果は一義的には定義されず、複合的な要因や要因自体の不確実性も伴うとともに、最終的な便益が必ずしも CN という尺度ではなく、経済や福祉、サービスといったほかの価値によって還元されている可能性もある。複雑な社会課題の解決には、関係しうる要因をデータに基づき解析し、CN を実現しつつ、危機を最小化する客観的解析技術が求められる。図 6-6 に示すような社会課題の分析やバリューチェーンの解析をデータに基づいて実現することが重要となる。このようなデータをオープンで管理し、誰もがアクセスできる PF の構築と、特定のアクター同士が高いセキュリティに基づいてデータ享受できる枠組みの双方が求められる。

産業部門の CN 移行は、消費者によって各産業の CO₂ 排出削減の努力が適切に評価され、産業界の競争によるイノベーション創出が促進される。この評価のひとつとして、消費者が最終製品において CO₂ 排出が把握できる「CO₂ 見える化」を提言書第 3 版にて提言した。消費者が市場形成するための枠組みとして重要であるとともに、最終製品のみならず、原料や部材製造の CN に対する貢献が適切に評価されることが必要であり、CN への投資へ循環される市場形成が求められる。また、鉄鋼や化学など原材料製造の CN 移行プロセスにおいても、先に述べたようなデータ連携に基づくサプライチェーン、バリューチェーン解析を活用して、単に CN の技術イノベーションという固定投資に留まらず、イノベーション創生が評価されて適切な市場価値を生み出す投資循環の構築が必要となる。

- カーボンニュートラルに伴う影響は複雑・多岐にわたり、社会モデルや要因分析による統合的評価が有効になる
- カーボンニュートラルに伴うサプライチェーン、バリューチェーンを分析し、セクター間協調を進める施策を支援

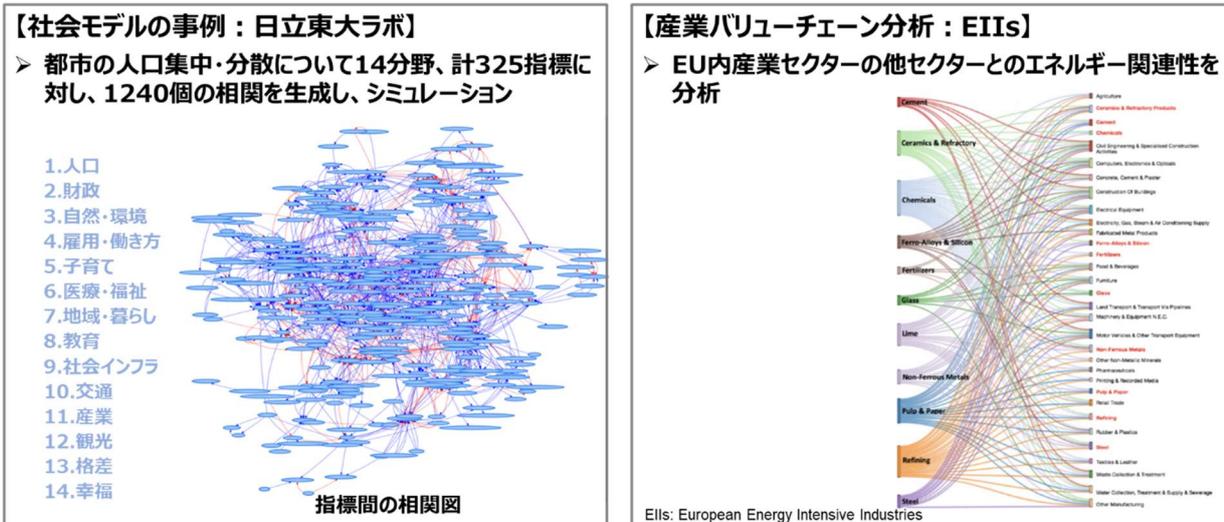


図 6-6 社会課題・産業サプライチェーンをデータサイエンスで解析した事例

産業における CN のイノベーションは、国内の CO₂ 削減に留まらず、新興国をはじめとする世界規模での CO₂ 削減につなげるため、イノベーションの輸出を戦略的に考えるべきである。単に CO₂ 削減のみならず、新興国における経済成長や課題の解決を絡め、CN のイノベーションを輸出ソリューションとして強い武器に育成することによって、グローバルなイノベーション創出競争に打ち勝つ持続可能な産業が形成される。

6.4 CN を実現する地域イノベーション

我が国は 2015 年より人口減少に転じている一方、人口分布は都市部に集中する傾向が続いている。他方、地方では人口密度の低い地域を抱える構造となっており、人口密度の低い地域においても一定の行政サービスを維持する必要があることから、特に民生部門のエネルギー利用効率は過疎地域ほど低くなる傾向にある⁴⁶。我が国は 2015 年より人口減少に転じている一方、人口分布は都市部に集中する傾向が続いている⁴⁷。

「国土の長期展望」最終とりまとめには、人口 10 万人程度でおおむね 1 時間以内の移動で完結できる地域生活圏に着目し、その維持・強化を図っていくことが示されており、従来の人口 30～50 万人程度の中核市をハブにした機能形成と比較して、より分散化、広域化を進める方針となっている。人口 10 万人程度の都市では、百貨店や拠点病院など一部の都市サービスの事業成立性の確率は低下するものの、多くのサービスのデジタル化、コロナ禍を経たテレワークや教育の ICT 化進展などによってカバーできる見通しが得られつつある。このような地方のデジタル化の契機をエネルギーシステムも含めて統合的に実施し、地域生活圏のエネルギーレジリエンス、セキュリティの強化につなげるとともに、地方の工業産業のエネルギー需給協調など地域生活圏内および地域生活圏間、広域のエネルギー協調を高め、地域生活圏のエネルギー-S+3E の価値を固める施策を進める必要がある。他方、立地適正化計画など都市のスプロール（無秩

⁴⁶ 浅野寛人ほか「中山間地域におけるエネルギー自立型集落の計画に関する研究」日本建築学会関東支部研究報告集 85 (85) 249 - 252 2015 年 03 月

⁴⁷ 国立社会保障・人口問題研究所「将来推計人口・世帯数」2022 年 1 月 22 日アクセス。
<https://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Mainmenu.asp>

序な拡張)を集約する施策など、国土のハード部分を適正化する試みが開始された。この国土を集約する施策に全国規模でのエネルギー需給バランスを考慮した大規模需要家の再エネ供給地への移設など、エネルギー需要家の移転と事業継続・拡大を念頭に置いた施策を考える時期に来ている。

提言書第2版において、電力システムにおけるデータの公開・秘匿性とその活用事例について提言した。その後、各機関、電力会社の取組が進み、系統概要等のデータが公開され、再生可能エネルギーの拡大に対する備えや、新規の風力発電、太陽光発電の設置計画検討などに活用できるようになった。他方、地域社会の主要エネルギーデータのひとつであるスマートメーターのデータ利活用はグリッドデータバンクラボの活動などの進捗があるものの、本格的なサービスへの利活用は道半ばの状態である。電力需要データのサービス利活用においてはデータガバナンスに対する制度整備の加速が必要である。データ利用者の多くは今後のスマートシティで運用される他の都市データと併用しながらサービス展開することが想定され、スマートシティのデータ基盤整備と連携したデータの整備と活用展開がなされるためのルールとデータ利用のプラットフォーム整備が必要となる。電力関連データを単にエネルギーマネジメントのみの利用価値に留めることなく、都市データと容易に連携可能にすることにより、エネルギー事業者、サービス提供者双方の価値向上につながる。

6.5 第6章まとめ

第6章の内容を要約する。

- CN 時代に向けたエネルギー安定供給においては燃料市況によらない安定供給を実現できる電源が必要であり、水素・アンモニア発電をはじめとする非化石燃料による発電技術の確立までのつなぎとして重要な役割を担う。
- CN に伴う急激な原料価格高騰や地政学的な調達困難な状況といった不確実性に備え、経済安保を見据えて単に最終製品を廃棄するだけでなく、原料や部品として循環させる物質循環のイノベーションも選択肢として掲げ、社会として育成していく枠組みが求められる。
- 農業分野においてもイノベーションを生み出す契機となり得る。食糧需要のほかに、バイオ燃料需要のようなエネルギー供給の国産基盤を新たに構築し、国内の農業市場とバイオ燃料の供給量・価格安定化を図るため、農業・燃料分野での連携を政策レベルで進め、国内生産量拡大に向けてのロードマップを作成し、農業・バイオ燃料産業が連携した市場の醸成、バイオ燃料の規格化などの課題を統合的に考える必要がある。
- 複雑な社会課題の解決には、関係する要因をデータに基づき解析し、CN という価値を最大化し、危機を最小化するデータに基づいた客観的解析技術が求められる。このようなデータをオープンで管理し、誰しもがアクセスできるPFの構築と、特定のアクター同士が高いセキュリティに基づいてデータ享受できる枠組みの双方が求められる。
- 持続可能な地域形成の実現には地域の特色を反映した運営を柔軟かつ地域の意思に基づいて実行できる枠組みが求められる。現行の都市計画にかかる柔軟な運用や地域の実情を反映できる投資などの制度を活用し、CN に拡張できる枠組みを具体化すべきである。

第7章 新たに見出された持続可能な社会の構築における課題と挑戦

第6章まで、2050年のカーボンニュートラル（以下、CN）達成に向けたトランジションをシナリオ記述やエネルギー基幹システムの解析による評価から得られたインサイト、地域で起こすべき改革、それらを支える制度・政策について述べた。しかし、2050年のCNは一通過点であり、そのCN実現形態は持続可能な社会につながるものでなければならない。本章では前章まで述べてきた事柄から導かれる持続可能な社会の実現に向けて考慮すべきキーワードを確認し、それを軸にCN達成に有効とされる手段に内在する課題を整理する。これを受け、イノベーションを起こすべき領域を見直すとともにめざすべき持続可能な社会像を示す。

7.1 持続可能な社会の実現に向けて考慮すべきキーワード

前章まで、シナリオ描画・マクロなエネルギーシステムの解析・地域での価値流通サービスの評価を通じてCNに向けた課題の抽出や起こすイノベーションを示し、それを支援するための制度・政策を示してきた。全章までの主要メッセージを図7-1に整理する。この整理から、CNへの移行には「協調と競争」、国や地域の「制約」がキーワードとして導かれる。またCO₂回収やライフサイクルでの評価の必要性から、環境の評価指標はエネルギーの利用フェーズに限定してはいけなく、製品・設備の製造から廃棄まで含めた「汚染」を含む指標に見直す必要があることが導かれる。この「汚染」を抑える有力な手段に「物質循環」がある。CO₂を含めたモノの廃棄を減らすエネルギー利用システムの構築が2050年以降の持続可能な社会の実現に必要となる。

次節からは、導かれたキーワードをもとに持続可能な社会に求められる社会像を説明していく。



図 7-1 第6章までの主要メッセージから導かれる持続可能な社会に向けてのキーワード

7.2 協調と競争

7.2.1 持続可能な社会の科学的フレームワーク

持続可能な社会の実現をめざすにあたり、プラネタリー・バウンダリーとSDGsは極めて重要な科学的フレームワークである。プラネタリー・バウンダリーとは、人類が生存できる安全な活動領域とその限界点を定義する概念である。3つの領域で地球の状況を示しており、CNに対応する気候変動は、不安定な領域に達している。一度バランスを崩し境界を超えると、逆戻り困難と言われており、速やかに安全領域に戻ることが重要である。プラネタリー・バウンダリーを科学的根拠とし、「誰一人取り残されない持続可能な社会実現の開発目標」がSDGsである。日立東大ラボでは、環境の観点からプラネタリー・バウンダリーを再認識することで持続可能な社会の実現をめざす。

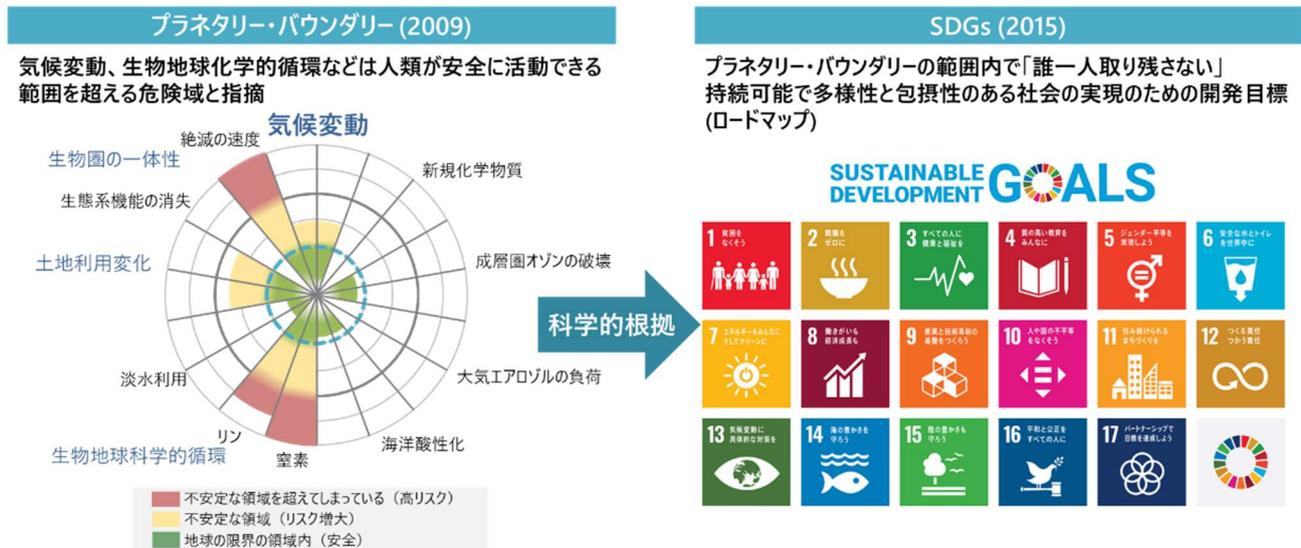


図 7-2 プラネタリー・バウンダリーと SDGs⁴⁸

7.2.2 サステナビリティにおける協調と競争

持続可能な社会のキーワードは「協調と競争」である。「協調」とは、互いに力を合わせて助け合うことで、利害の相反する双方が協力し問題を解決する状態であり、「競争」とは、製品もしくはサービスを提供するアクター同士が、市場原理のもと競い合いイノベーションを起こす状態を意味する。サステナビリティの3項目である、環境・経済・社会における協調と競争を図 7-3 に整理する。

最初に競争に着目する。環境における競争は、前提条件の異なる国や地域がそれぞれの制約や利害関係をもとに、独自のゴールやトランジションシナリオを策定する状況である。経済では、競争原理の下で強者が支配する、市場競争に相当する。また、社会においては、一部の意識の高い市民を中心とした環境維持に向けた活動がなされる姿を意味する。

一方、協調に目を移すと、環境においてはプラネタリー・バウンダリーを踏まえ、全てのステイクホルダーが協調して地球を維持する姿を示し、脱炭素化・循環型社会・自然との共存がそれに相当する。経済では、双方が経済的メリットを享受する仕組みや仕掛けが構築される姿で、契約や競艇、共通のルールで運用される市場の創生などがそれに該当する。社会においては、業界の枠を超え、エネルギー最適化に向けた枠組みが構築される姿であり、セクターカップリングやデマンドレスポンスなどが相当する。

協調だけでは社会が成立せず、競争の結果生まれるイノベーションが期待できない。また、競争のみでは活動が個別で最適化の範囲が局所的になり、CN や持続可能な社会の実現など大きな社会の変革を伴うトランジションは実現し得ない。そのため、いかに「協調」と「競争」を共存させるか、が持続可能な社会の実現を左右する。

協調の中にアンダーラインを引いた部分については、本提言書の第3版までに提言してきた「エネルギーシステムの協調メカニズム」で包含される箇所であり、今後日立東大ラボは循環型社会にスコープを拡張していく。

⁴⁸ プラネタリー・バウンダリーの図は、環境省作成の図(<http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h29/html/hj17010101.html>)をもとに作成

協調：互いに力を合わせて助け合うことで、利害の相反する双方が協力して問題を解決する
 競争：製品もしくはサービスを提供するアクター同士が、市場原理のもと競い合いイノベーションを起こす

サステナビリティの3項目		協調	競争
1	環境	プラネタリー・バウンダリを踏まえ、全てのステークホルダーが協調して、地球という共有財産を維持 <脱炭素、循環型、自然との共存>	国や地域ごとに置かれている状況が異なり、それに適応したゴール・トランジションシナリオを策定 <ロードマップの策定と共有>
2	経済	Give & Takeの関係を構築し、双方が経済メリットを享受する仕組み・仕掛けを構築 <契約・協定、市場の創生>	経済的合理性・効率は重要なKPIであり、競争原理の下で、強者が支配する <市場競争での勝利>
3	社会	業界の枠を超えて、エネルギー最適化に向けた枠組みを構築 <セクターカップリング、デマンドレスポンス>	意識の高い市民を中心に、地球環境の維持に向けた活動を推進 <イノベティブな市民>

※アンダーラインは、これまで検討した「エネルギーシステムの協調メカニズム」でカバーされる箇所

図 7-3 サステナビリティの3項目における協調と競争

7.3 日本の制約条件と求められるソリューション

持続可能な社会の実現における2番目のキーワード「制約」について述べる。日本にとっては、狭い国土、隣接国がなく海に囲まれる島国、少ない鉱物・再エネ資源、そして東日本大震災の経験、という特殊事情を持っており、これらが大きな制約条件となる。

・狭い国土における再エネ立地の困難性

第4章で述べた再エネ100%ケースでは、600GWを超える太陽光を導入することとなる。この量は発電サイト7400km²の確保を意味し、東京都、大阪府、神奈川県をパネルで敷き詰めても足りない面積となる。国土の7割を丘陵地で占める日本においては、この占有面積は社会的に大きなインパクトを与える⁴⁹。

また、山間部は一般に風向の変化頻度が高く、平均風速が高くても風力発電に適しない場合が多い。さらに、日本には遠浅の海岸が少なく、建設コストが高い浮体式の風車を導入せざるを得ない。このような理由から、再エネ立地の困難性が第一の制約になる。

・国際連系線の不在による国内で閉じた電源システム

欧州やアメリカ、中国は隣接国との連系線を持ち、電力需給バランスにそれらを活用することができる。日本と同様に島国である英国は、隣国までの距離が短く、総容量18GWの連系線が設置もしくは計画されている。この連系線により、巨大な調整力による調整力を得ることができ、電力コストの抑制につながる。日本は、隣国との距離だけでなく、地政学的にも敷設は困難である。

・少資源であるが故の輸入依存の継続

⁴⁹ 国土技術研究センター。「国土を知る/意外と知らない日本の国土」, 2021年11月20日アクセス。
<https://www.jice.or.jp/knowledge/japan/commentary06>

CN は、本質的にエネルギーの自給率を高めるものである。しかし、日本はもともとの自給率が低いこと、先にも述べた再エネ立地の困難性に起因するエネルギー源の輸入必要性、そしてCO₂ 国外輸送を視野に入れた国際協調の必要性から、他国からのエネルギー資源の輸入と有償でのCO₂ 輸送という他国への依存が継続することとなる。

・原子力活用に対する社会的受容性

東日本大震災の経験から、原子力活用に対する社会的受容性の獲得が極めて重要となっている。図 7-4 の表には、インタビューによる世論調査の一つの結果である⁵⁰。この結果は、安全・信頼性の高いシステム構築、SMR などの新型炉の開発、そして核廃棄物の処理技術の革新が重要であることを裏付ける。

上記の制約による課題が CN に向かう際のエネルギーコスト増加を引き起こし、ひいては国内産業の競争力低下につながる。そのため、これら課題を打破もしくは緩和するイノベーションを創出していかなければならない。4 つの制約による課題およびそれらに向けたソリューション候補を表 7-1 に整理する。この整理からも、競争の結果によるコスト抑制や機能の高度化、協調による課題の解決・緩和を共存させなければならないことがわかる。

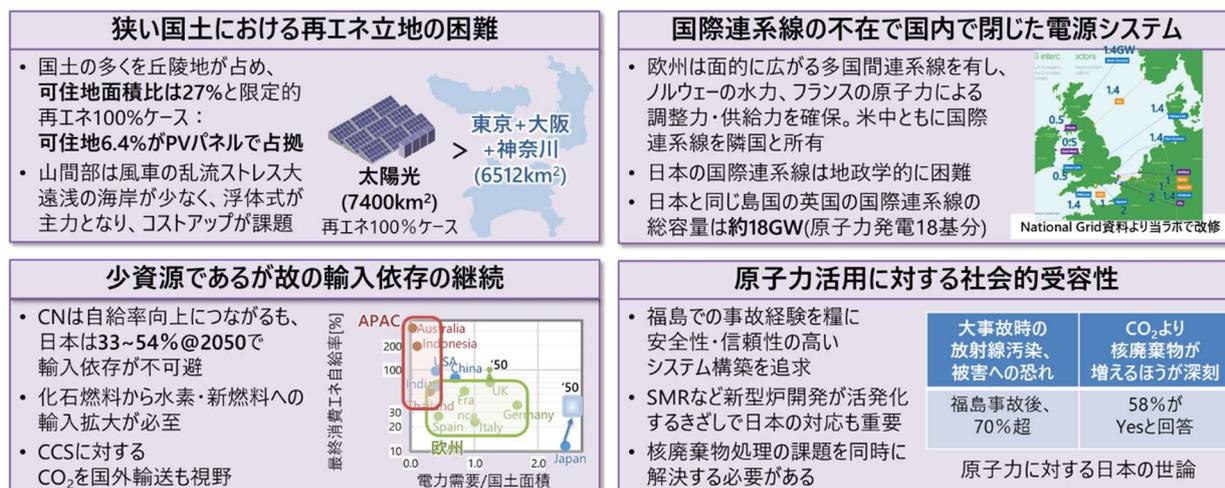


図 7-4 日本の制約

表 7-1 制約によるエネルギーコストへの影響とソリューション

制約	エネルギーコストへの影響	ソリューション
狭い国土	建設コストの安い再エネ設置の困難性	洋上風力発電技術の確立
国際連系線の不在	需給バランスを国内で保つための大量の調整力の必要性	原子力発電設備の出力調整、デマンドレスポンス活用
省資源国	化石燃料や水素・新燃料の輸入、CO ₂ 国外輸送	調整力用の燃料を削減するEV 活用の調整力創生
原子力活用に対する社会的受容性	東日本大震災以降の放射線汚染被害や核廃棄物への高い関心	安全性・信頼性の高いシステム構築、燃料燃やし切り技術の革新

⁵⁰ 北田淳子. 2019 年.『原子力発電世論の力学-リスク・価値観・効率性のせめぎ合い』大阪大学出版会

7.4 物質循環と日本固有の課題を踏まえたイノベーション

第3章、第4章で述べてきたように、CNは再エネを大量に導入するだけでは実現できない。その理由は、すでに記載してきた再エネの立地確保、地域産業との協調、再エネ導入による調整力確保コストに加え、再エネ設備の製造時CO₂や廃棄物の処理にも目を向ける必要があるからである。

図7-5に、第4章の「再エネ100%」ケースにおける発電部門の排出CO₂を示す。「再エネ100%」ケースは、化石燃料による火力発電および原子力発電を次第に閉鎖し、電力供給を再エネや新燃料活用の電源で代替する社会像である。2050年以降の電力需要を太陽光(581TWh/年)、風力(386TWh)を主電源として供給することを考えると、現存の再エネ機器の製造法では年間56Mt/年のCO₂を製造・廃棄に起因する間接的CO₂として排出することになり、大規模な再エネ導入をもってしても真の電源ゼロカーボン化は達成できず、狙いと異なる社会が構築されることになる。

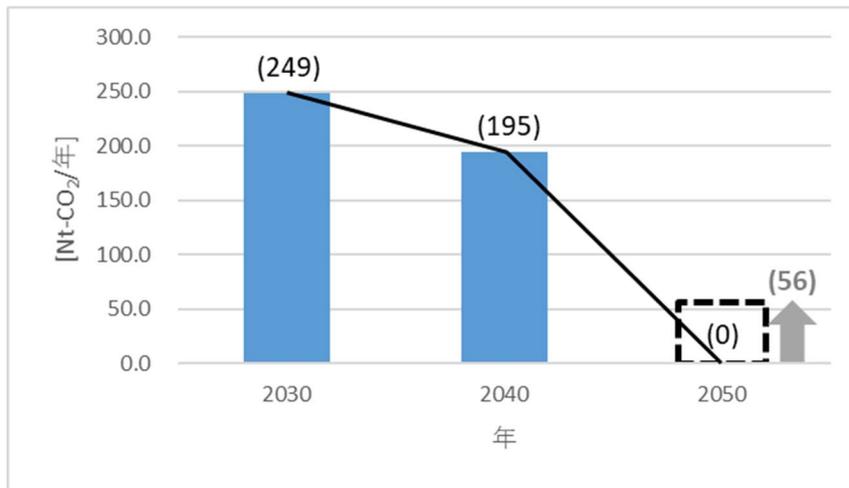


図7-5 再エネ100%ケース時の発電部門CO₂排出量⁵¹

また、機器寿命を迎えた際の廃棄物も大きな課題となる。表7-2にCNに有効とされている太陽光・風力発電、およびEV搭載の電池の廃棄によるインパクトを整理する。

再エネ100%ケースでの太陽光・風力発電導入量を想定し、機器寿命をそれぞれ太陽光で25年、風力発電で20年と想定すると、太陽光パネル200万t/年、風力ブレード5.6万t/年、本体・基礎49万t/年の廃棄物が生じることとなる。また、全国のEV普及台数を仮に4000万台とし、車載電池寿命を10年とすると、120万t/年の廃棄物が生じる。太陽光パネルは保護ガラス、セル、接着剤、バックシートと多層にわたる複雑な構成となっており、風車ブレードは繊維とプラスチックが格子状に組み込まれる強化繊維プラスチックでできている。これら複雑な構成がリサイクルを困難としている。

EV用電池に至っては、リサイクルコストが高価であること、電池の主要物質であるリチウムやコバルトが限られた国でしか生産できないことによる取引額不安も存在する。電池はCNに向かう再エネ主電源化には必須で、社会に大量導入される。欧州では電池のリユース・リサイクルに対するルール作りが先行しており、日本からも本議論に参加している。工業的ルール作りと同時に、複数セクター合同での日本における経済的なサーキュラー体系の構築議論を進めるべきである。

⁵¹ 電力中央研究所『電力中央研究所報告－日本における発電技術のライフサイクルCO₂排出量総合評価 総合報告：Y06』記載の太陽光および風力発電システムの間接CO₂排出量をもとに日立東大ラボにて試算

日本のエネルギーシステムは S+3E をコンセプトとして掲げてきた。しかし、持続可能な社会の実現には、上述のように環境(Environment)の評価尺度にライフサイクル CO₂・廃棄物・付帯工事など、スコープ 1、2、3 を網羅する環境負荷を組み込んだものに見直し、CN に有効とされている手段や目指す社会像を再評価する必要がある。また、それと同時に太陽光パネルのセル、ブレード内繊維とプラスチックの分離技術、低コスト・低 CO₂ 排出電池リサイクルプロセスや電池リユースを進める循環構造など、リユース・リサイクルを支える循環型イノベーション、物質やエネルギーの必要量自体を低減する工業的プロセスや人々の行動変容を促す省物質・省エネイノベーション、エネルギーリソースの空間的・時間的分散へのエネルギー消費主体の協調を促す協調型イノベーションを起こす必要がある。これらイノベーション群の創出で、無計画に大量の物資を生産し、材料の発掘、製品加工、使用後の廃棄、という各過程でエネルギー消費と CO₂ 排出を繰り返すリアエコノミーから脱却し、図 7-6 に示すバタフライダイアグラムが各所で社会実装されていくべきである。

上記施策を特定のアクターもしくはドメインの中で実現する場合、社会全体としてのエネルギー効率や経済性の低下や特定アクターへの経済的しわ寄せが生じるおそれがある。これを回避する社会全体でのリユース・リサイクル体系の構築、およびそれを支援するルールづくりが必要となる。また、リユース・リサイクルの循環構造は国内に閉じる必要はなく、リサイクルと地場産業の育成の両立に代表されるような win-win の関係で構築される国際協調を実現し社会コストの抑制と物質循環を両立することが望ましい。

電力・産業・家庭から生じてしまう CO₂ については、透明性高く管理され、排出者責任を明確にすることが極めて重要となる。CO₂ の回収は、貯留や CO₂ 固着やメタネーションなどにより資源化・燃料化という工業的対策を複数準備するとともに、地域特性に見合った植樹など生物的サイクルを活用した回収を再度見直すべきである。それら対策の推進と、必要となるインフラの開発・社会実装は、セクターを超えた協調と競争によりのみ実現可能となる。

表 7-2 再エネ・EV 用電池・排出 CO₂ の状況と課題^{52,53,54}

	PV・風車	蓄電池	排出CO ₂
状況	<ul style="list-style-type: none"> 寿命を迎える廃棄パネル、風車構造物 PVパネル：200万t/年 (面積：東京ドーム600個相当) 風車ブレード：5.6万t/年 本体・基礎：49万t/年 <p>注)太陽光パネルは25年寿命、80kg/kWとして試算 風車廃棄量は、洋上風車90GWを対象とし、寿命想定20年、文献^[3]10MW重量値をもとに試算 想定ケース：再エネ100%</p> <p>廃棄PVパネル重量見通し^[2]</p>	<ul style="list-style-type: none"> EV普及、系統用の使用済蓄電池の処理 EV乗用車の廃棄電池：120万t/年 (乗用車4000万台、電池寿命10年想定) 生産国に限られた物質の取引額不安 <p>リチウムおよびコバルトの生産国^[1]</p>	<ul style="list-style-type: none"> 火力発電、産業、家庭からのCO₂回収 回収CO₂の管理、処理、活用法 <p>家庭、中小規模製造業からの分散少量排出 大規模設備からの集中大量排出</p>
課題	<ul style="list-style-type: none"> PVパネルのガラスとセルを破壊せずに分離 風車ブレードにおける強化繊維ブラの分離 <p>繊維 プラスチック 風車</p> <p>保護ガラス セル 接着剤 バックシート</p> <p>分離が難しい</p>	<ul style="list-style-type: none"> 低コスト・低CO₂排出電池リサイクルプロセス 国内リユース/リサイクル循環構造の構築 <p>リサイクル 原料 製造 利用 長寿命化 リユース</p>	<ul style="list-style-type: none"> CO₂循環・貯留システムの構築 <p>大規模施設 資源・燃料 CO₂ 資源・燃料化 CO₂貯留 CO₂回収設備・インフラ 中小規模プラント</p>

⁵² 資源エネルギー庁。2018年。「EV普及のカギをにぎるレアメタル」2021年11月20日アクセス。

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ev_metal.html

⁵³ 環境省。「太陽光発電設備のリユース・リサイクル・適正処分の推進に向けた検討結果について」2021年11月20日アクセス。

<https://www.env.go.jp/recycle/recycling/renewable/h2810/h28-01.pdf>

⁵⁴ 国土交通省。「風車大型化・発電所大規模化に対応した基地港湾の最適な規模について」2021年11月30日アクセス。

<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001418320.pdf>

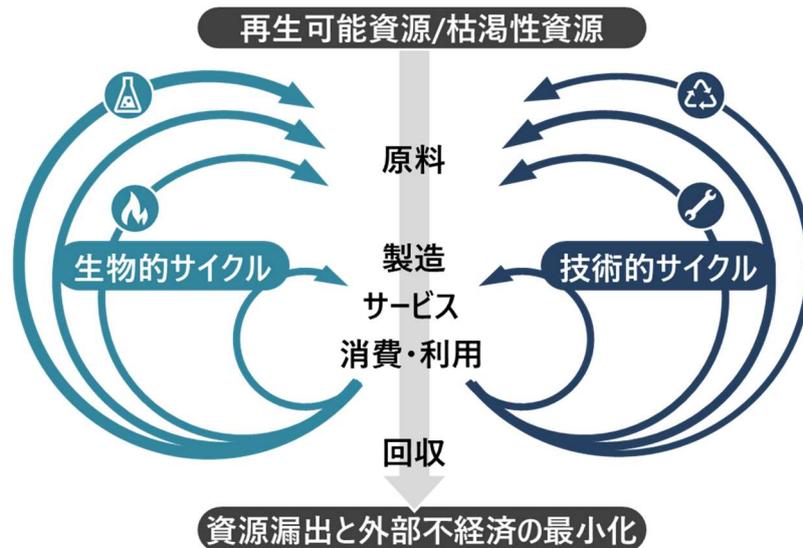


図 7-6 廃棄物があらかじめ出ないようにするバタフライダイアグラム⁵⁵

7.5 持続可能な社会の構築に向けたビジョンとコンセプト

極めて大きな社会変化を伴う CN に向けた動きは、世界同時に発生し、そのスピードも急速である。そのため、資源の価格急変など意思決定における前提条件を大きく変える事象が起きており、今後もそのような社会的変化が継続して起きるであろう。それら変化に柔軟に対応し、プラネタリー・バウンダリーを踏まえて協調・競争することを前提に、国や地域に特有な制約を打破するイノベーションを起こしていく必要がある。そこで求められるのは、エネルギーと物質循環をデータ活用により効率的に連動させるエネルギーシステムであり、それを支える協調メカニズムの構築である。

日立東大ラボでは複数セクターを巻き込んだサーキュラーエコノミーの構築やリサイクル制度の実装、エネルギー消費を抑える商品やサービスの選択、行動変容誘導など、持続可能な社会を形づくるために求められる協調と競争のあり方、およびトランジションの道筋を提言していく。

平行して、データに基づきエネルギー消費における改善や廃棄物の削減に求められるイノベーション、極めて多岐にわたる技術分野の議論を統括し、世の中に進むべき方向性を示すことのできる人材の育成、さらにはそこに至る道筋を提言していく。

その決意を示すものとし、コンセプト図を以下に見直す。

⁵⁵ エレンマッカーサー財団提唱モデルを日立東大ラボにて改編

持続可能な社会へ移行するための協調と競争 物質循環と連動するエネルギーシステム

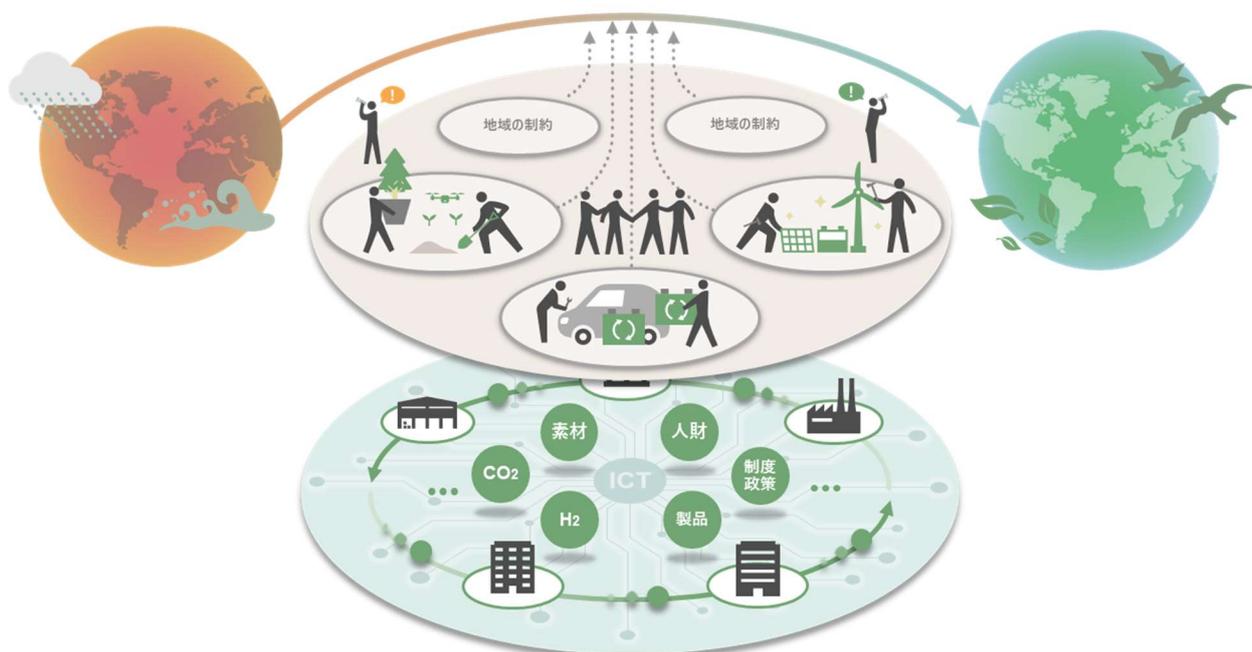


図 7-7 日立東大ラボ エネルギープロジェクト新規コンセプト図

7.6 第7章まとめ

第7章を要約する。

- CN に有効とされる施策は、その一方でプラネタリー・バウンダリーの観点では負の効果を生む可能性がある。例えば、再生エネルギーを代表する風力発電や PV は、機器が寿命を迎える時には難分解性の廃棄物を大量に排出する。これは、再生エネルギー導入に伴って併用される電池についても同様で、これら廃棄物が化学物質汚染や生物多様性の損失を進行するおそれがある。
- CN を持続可能な形で実現するためには、ドメインやアクターを超え、社会全体でライフサイクルでの CO₂ 排出(LC-CO₂)と廃棄物の削減をめざすべきであり、これらを盛り込んだ新たな尺度で S+3E を再構築しなければならない。
- 再エネおよび蓄電池の廃棄物の想定発生量、評価軸を LC-CO₂ にした場合の第4章で示した社会像の見え方の変化を示した。製造・利用・廃棄それぞれのフェーズでエネルギーを使い、CO₂ を排出する現状のリニアエコノミーでは持続可能な社会の実現は難しい。特定ドメインやアクターに閉じた排出削減施策により社会全体のエネルギー利用効率や経済性を下げることを避けるべきであり、社会を形成する全てのアクターがプラネタリー・バウンダリーを踏まえて適切な協調・競争することを前提に、エネルギーと物質循環をデータでつないだ社会を実現すべきである。
- 上記気づきを得て、本提言書のビジョンおよびコンセプト図を見直した。日立東大ラボでは社会を俯瞰した LC-CO₂ の抑制や廃棄物の削減に導く社会像を多様なアクターとの会話の中から見出し、複数のセクターを巻き込んだサーキュラーエコノミーの構築やリサイクル制度の実装、エネルギー消費を抑える商品やサービスの選択、行動変容誘導など、持続可能な社会を形づくるために求められる協調と競争のあり方およびトランジションの道筋を提言し、それを実現する際に求められるイノベーションを起こす領域、様々な領域での議論をまとめて社会のトランジションをけん引する人材育成の在り方を平行して示していく。

第8章 まとめ

プラネタリー・バウンダリーの範囲内で持続可能な社会を実現するため、エネルギー分野のみならず、多様な分野のアクターが社会・民間・公共の全ての領域横断的に大きく変わっていくことの必要性が世界中で論じられている。その一方で、国・地域で異なる自然環境、エネルギーシステム、社会システムや市民の価値観などに対応して、変革を推進する方策を構築する必要もある。日立東大ラボでは、エネルギー分野のみならず、多様な分野において日本の社会・民間・公共領域で現在起きている、もしくは将来起こり得る課題やインサイトを明確にするトランジションシナリオの描出を通して、日本が考えるべき論点を提示した(第3章)。また、これらの論点を踏まえ、エネルギーシステムやマクロな社会像および地域での変革を解析・評価することでカーボンニュートラル(以下、CN)実現に必要な挑戦を具体化し(第4章、第5章)、その克服に必要な制度・政策を示した(第6章)。これに加え、2050年のCNを一通過点ととらえた持続可能な社会実現におけるエネルギーの課題を示し、再生可能エネルギー(以降、再エネ)や水素など新エネルギーの導入だけでは持続可能な社会の構築には不十分であり、新たに構築する「持続可能な社会へ移行するための協調と競争」により幅広く社会の抜本的改革を進める必要があることを示した(第7章)。ここで、「協調」は利害の相反するアクター同士が互いに力を合わせて助け合うことで問題を解決する状態を示し、「競争」は製品もしくはサービスを提供するアクター同士が、市場原理のもと競い合いイノベーションを起こす状態を意味する。

以下、提言をまとめる。

- **日立東大ラボでは、社会、民間、公共の各セクターにおける多様なアクターの分析をもとに2050年のCNの実現のためのトランジションシナリオを作成した。ここでは、専門家へのインタビュー、および既存の統計や報告書の知見に基づき、それぞれのセクターにおいて役割を果たす多様なアクターの分析を行った。この分析では、社会セクターではNGOや大学、民間セクターで電力、ガス、運輸、鉄鋼、石油化学、金融などの事業者、そして公共セクターでは日本政府や国際機関などが、それぞれの利害関心を持ちながら相互の関係や役割を変化していくすがたを捉えることを試みた。そして、将来の日本の電源構成にかかわる2つのケース(「再エネ100%」、および「多様なエネルギー」)を軸に、CNの実現のために想定されるエネルギー、産業、市民の行動などの変化の道筋をドメインシナリオとして記述した。これによって、CN実現へ向けた国境を越えた連携、CCS等の対策にかかわる合意形成、市民・企業・政府の参画による公正な意思決定、さらには脱炭素イノベーションへの長期的な投資、産業構造の転換、グリーン雇用創出などを通じて、地域における人々が持続的な繁栄を実現するための方途を提示した。(第3章)**

日立東大ラボでは、ミクロな知見を手掛かりとしながら、エネルギー、産業、市民の行動変容についてシナリオを記述し、社会を構成する多様なアクターがCNを達成するための道筋を示している。例えば、石炭火力発電ドメインでは、CCSは、日本を含む多くの国で広い社会的な合意が確立していないため、これを実現するためには、政府

や事業者はその必要性、技術的可能性、気候や環境への影響など、メリットとデメリットを公正かつ適切に開示し、国民と国際社会との間に広い合意を形成する必要があることが示された。また、石油化学ドメインにおいては、EV化や人口減少によって国内に数万か所あるガソリンスタンドが CN への動きの中で事業転換を迫られ、災害時のエネルギー供給拠点、あるいは自治体や市民と連携した移動式商店や医療ケア拠点などの機能を高めながら、地域住民の生活基盤としての新たな役割を果たす可能性が提示された。

上記のシナリオ策定を通して導き出された CN 実現のための論点は、多岐にわたるものである。とりわけ、①日本単独では実現不可能な CN に向けた国際連携、②脱炭素化のための過渡的対策にかかわる合意形成、③公正なトランジションとグリーンな雇用の創出、④産業分野への長期的な脱炭素化イノベーション投資、⑤都市における市民の価値枠組み把握、⑥公共・民間・社会などの枠組みを超えた意思決定への参加、などが CN の実現のために重要と考えられる。このように、日本の CN 実現のためには、旧来、異なる領域と捉えられていた分野にまたがって、持続可能な社会へのトランジションを起こしていくことが重要となる。

- エネルギーシステムのトランジションシナリオの策定を進めるにあたり、気候変動をプラネタリー・バウンダリー内に戻し、その範囲内にあり続けるためのエネルギーシステムの構成と必要な対策を定量的に解析・評価し、将来の電力・産業の姿を描いた。技術イノベーションの進展やコスト条件の違いにより、2050年のCN像は再エネの導入と運輸・産業セクターの電化進展の二軸で整理・分類した結果、4つの全く異なる社会像を示すこととなった。各社会像に対応するエネルギーシステムのコスト最小化試算の結果、再エネや新燃料、原子力・CCS 付き火力といった多様なエネルギーを活用することが、他の条件に比べて経済的であることが示唆された。また、需要側が非電化部門の電化コストなどの経済合理性を追求した場合は、設備設置の実現性について分析が必要だが、電力供給を再エネ発電 100%とするケースでさえ、化石燃料消費と CCUS/DAC 等を活用した年間4億トン規模のCO₂回収の組み合わせが選択される、との結果も示された。CO₂回収の手段・貯蔵・利活用は大きな課題である。日立東大ラボでは、エネルギー供給側・需要側・CO₂回収事業者、政府・金融等が協調し、社会コストを抑制しつつエネルギーシステムを再構築するため、さらなる情報収集を行い、データを重視して将来の社会像の予測精度を高める。また、エネルギー供給(電力・燃料)や、CO₂回収にかかるサービス提供者間の競争により、多様な技術の活用／脱炭素イノベーションを進展させるため、技術開発の動向や社会情勢を踏まえてシミュレーションを重ね、課題を明確化するとともに、イノベーションを起こすべき領域を示していく。

(第4章)

今回の定量評価の結果では、洋上風力は各ケースで脱炭素エネルギー源として有力な選択肢であり、電力流通設備の対策として2050年までに15-21GWの「北海道～東京／東北ルート」高圧直流送電の新設が必要

となることが示された。さらに、再エネ余剰電力や出力変動を吸収するため、総計 300~3,000GWh 級の大規模な電力調整能力(蓄電、V2G、水素製造など)を再エネ分布に合わせて分散配置しなければならないことも明らかとなった。

一方で、3章で述べた検討を踏まえると、提示した4つの社会像には依然として技術革新や社会受容性などの不確実性が残る。日立東大ラボでは複数の仮定をおいた定量評価を行い、複数ある可能性に対して、ステイクホルダーがトランジションへ向けた適切な意思決定を行うための情報発信を継続する。具体的には、CCUS/DACなどを活用した年間2億トン規模のCO₂回収事業における技術革新や市場創出の議論の結果、データセンタを含む新たな産業のエネルギー需要モデルなどをシミュレーションに反映し、将来起こる可能性の高いエネルギーシステムの将来像と実現プロセスを深く検討していく。

- **地域のトランジションの実現には、規制や補助制度、エネルギー価格の変動など日々変わるエネルギー情勢への対応が求められ、そのためには国や自治体・企業・市民が協調した意思決定が重要となる。具体的にはレジリエンスを含めた地域のあるべき姿および移行タイミングを地域の目標として共有し、アクターに生じるメリット・デメリットを予測・検証しながら施策を段階的に進めることが重要となる。本提言書ではデータ活用による意思決定や都市設計・レジリエンス強化の実例を示すとともに、需要家のエネルギー消費時間シフトで地域エネルギー調達コストを削減する協調型サービスを提案した。本サービスにより、需要家のエネルギーコスト削減と基幹システムへの調整力創出を両立できる。日立東大ラボでは、豊かで活気ある2050年のCN地域の実現に向け、各所での提言を通じて上記のような地域エネルギーサービスの新規市場創設や市場構築に求められるプラットフォームの社会実装をけん引し、同時にサービス提供者間の競争の中で創出されるべきイノベーションやルール形成の在り方、地域と地域、もしくは地域と基幹エネルギーシステムとの協調を加速する必要条件を示していく。**
(第5章)

CN 実現に向けた省エネや調整力創出などのエネルギー利用側施策の重要度上昇、EV 普及に向けた世界的なシフトなど、エネルギー関連の社会動向は急速に変化している。CN 社会において豊かで活気ある地域を実現するには、地域での過剰な投資を抑制しつつ社会情勢に合わせた大小さまざまな変革を進める必要があり、そこでは大きな投資を伴うインフラ整備やアセットの所有者を超えた共用など、国や自治体・企業・市民で協調した意思決定を要する変革も含まれる。日立東大ラボでは、データ・デジタル技術活用による市民参加、エネルギー利用の姿を変える街づくりに基づく協調による価値づくりの一例として、需要家エネルギー消費時間シフトによる地域エネルギー調達コストを削減するサービスを提案している。本版では東京地区の住宅地を例にその事業規模の評価を試みた結果、2030年ではEVではなく、すでに普及が進んでいるヒートポンプが主役となって需要シフトに貢献すること、上記事業を全国展開すると340億円の事業規模および蓄電池コスト換算(50円/Wh)で4兆円に相当

する 80GWh の調整力創出が期待できること、が明らかとなった。

今後は、このようなエネルギーサービスの実現を加速するため、データに基づく技術的提案を進化させるとともに、活気あるサービス提供者間の競争と、地域と地域もしくは基幹システムとの協調を加速するための施策を提言していく。

- **エネルギー・トランジションの実現には、これまで進めてきた電力システム改革を CN 社会の実現シナリオに合わせ見直すとともに、電力システム以外の産業や地域のトランジションを支える制度・枠組みの整備が必要である。電力ドメインでは、CN 移行過程における燃料市況によらない電源の確保が課題であり、安定供給電源の導入・維持を含めた電力の安定供給の責任の所在を明確化する制度形成を提言した。産業ドメインでは、現行制度による特定産業ドメインへの CO₂ 排出量削減負担の偏在、またこれによる日本産業の国際競争力や国力の低下が課題となる。製造業全体が協調して製造サプライチェーンとライフサイクルまで含めて CO₂ 排出量を最小化するため、個別アクターの CO₂ 削減努力を見える化して、特定アクターへの CO₂ 削減負担集中を回避する費用助成や負担平準化を推進することと、競争に基づく国内市場形成によりイノベーション創出を促し、新興国での CO₂ 削減事業の展開により世界全体での CO₂ 削減に貢献することを提言した。地域においては、第 2 版で述べた地方分散の指針をさらに具体化すべく、日立東大ラボは分散エネルギーリソースと国土・社会・都市の計画および運営システムとの協調を促すデータシステムの具体化を提言していく。**

(第 6 章)

CN 社会の実現と 2050 年以降の持続可能な社会の構築には、CO₂ 排出やエネルギーコストに経済安全保障の観点も加えたトランジションが必要となる。その実現のために、電力ドメインにおいては CN の移行過程におけるエネルギー安定供給とイノベーション導入を両立させる電源の確保とエネルギーシステムロードマップの策定・遂行が不可欠である。産業ドメインにおいては、鉄鋼や石油化学をはじめとする製造原料の変革が伴うため、サプライチェーンや LCA を考慮したデータ利活用に基づく戦略策定と施策が求められる。産業製造の CN トランジションは、サプライヤ間の競争によって進むべきであり、それは調達や最終製品まで CO₂ 削減の過程を適切に公開する制度によって促進され、消費者と製造事業者との間で CO₂ 排出削減の経済的負担の協調につながる。他方、CO₂ 回収およびその後の処理体制の構築は、新燃料の確保と電化困難産業での熱源代替促進、および VRE 導入時の調整力確保といった観点で重要である。CO₂ 回収の課題は、その課題解決がドメイン内、ドメイン間、特定地域の特徴活用など、ふさわしい対応策を促す制度および政策の整備が必要となる。

日立東大ラボでは、提言書第 2 版で述べた地方分散のあり方をさらに進化させ、Society 5.0 社会のサイバーシステムと実社会の融合に基づくエネルギーデータと多様な地域データの包括的活用で CN と豊かな生活を両立するシステム提案をめざすとともに、地域産業など産業や再エネの地域ポテンシャルなどエネルギーの地方分散の

具体化要件の抽出を進める。

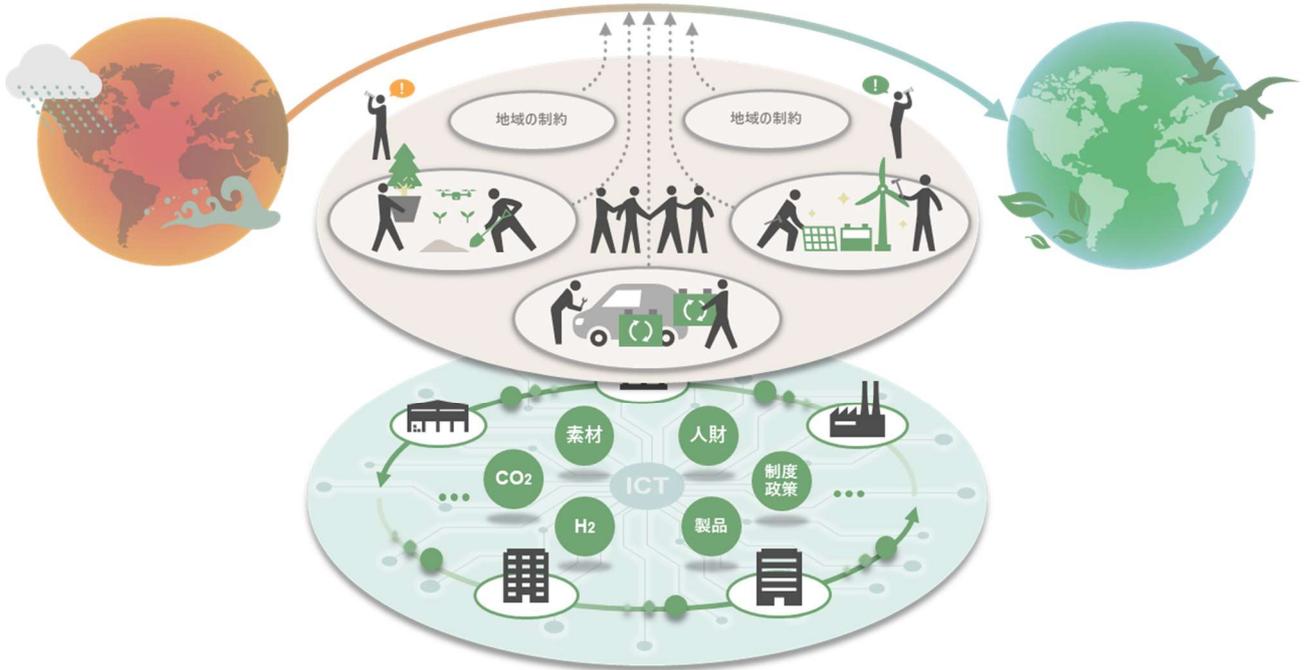
- CN に有効とされる施策は、その一方でプラネタリー・バウンダリーの観点では負の効果を生む可能性がある。例えば、再生エネルギーを代表する風力発電や PV は、機器が寿命を迎える時には難分解性の廃棄物を大量に排出する。これは、再生エネルギー導入に併用される電池についても同様で、これら廃棄物が化学物質汚染や生物多様性の損失を進行するおそれがある。そのため、CN を持続可能な形で実現するためには、各商品やサービス提供者が独自に進める施策に加え、ドメインやアクターを超えた社会全体でのライフサイクルでの CO₂ 排出(LC-CO₂)と廃棄物の削減を効率的に推進する社会の実現をめざすべきであり、これらを盛り込んだ新たな尺度で S+3E を再構築しなければならない。本章では、既存技術の延長線にある技術改良がなされたとの仮定のもと、再エネおよび蓄電池の廃棄物の想定発生量、評価軸を LC-CO₂ にした場合の第 4 章で示した社会像の見え方の変化、そして製造・利用・廃棄それぞれのフェーズにおいてエネルギーを消費して CO₂ を排出するリニアエコノミーの限界、を示した。また、社会を形成する各アクターがプラネタリー・バウンダリーを踏まえて協調・競争することを前提に、エネルギーと物質循環をデータ活用により効率的に連動させる社会を実現すべきである、との気づきを得て、ビジョンおよびコンセプト図を見直した。日立東大ラボでは、複数種のセクターを巻き込んだサーキュラーエコノミーの構築やリサイクル制度の実装、エネルギー消費を抑える商品やサービスの選択、行動変容誘導など、持続可能な社会を形づくるために求められる協調と競争のあり方、およびトランジションの道筋を提言していく。

(第 7 章)

CO₂ の排出は、製造・利用・廃棄それぞれのステージで生じる。ライフサイクルでの CO₂ 排出量や廃棄物にかかる社会的負荷を評価基準に盛り込み、その評価結果を広く共有することで、社会的選択がなされるべきである。また、過度な競争による特定のアクターの排出削減施策により社会全体のエネルギー利用効率や経済性を下げることは避けるべきであり、社会全体の CO₂ 排出および廃棄物を抑制する施策を議論していく必要がある。

日立東大ラボでは、社会を俯瞰した LC-CO₂ 抑制に導くアクター間の競争と協調の在り方を多様なアクターとの会話から見出し、並行してデータに基づきエネルギー消費における改善や廃棄物の削減に求められるイノベーション、人材育成、さらにはそこに至る道筋を提言していく。

持続可能な社会へ移行するための協調と競争 物質循環と連動するエネルギーシステム



以上

第4版提言検討体制（2022年3月24日時点）

1. 東京大学

相原博昭	全体統括	理事・副学長
吉村忍	コーディネータ	副学長・大学院工学系研究科教授
	WG0	
坂田一郎	WG0	総長特別参与・大学院工学系研究科教授
江崎浩	WG0	大学院情報理工学系研究科教授
<u>横山明彦</u>	WG1	大学院工学系研究科教授
<u>大橋弘</u>	WG1	公共政策大学院院長・大学院経済学研究科教授
藤井康正	WG1	大学院工学系研究科教授
小宮山涼一	WG1	大学院工学系研究科准教授
<u>荻本和彦</u>	WG2	生産技術研究所特任教授
岩船由美子	WG2	生産技術研究所特任教授
馬場旬平	WG2	大学院新領域創成科学研究科教授
田中謙司	WG2	大学院工学系研究科准教授
<u>城山英明</u>	WG3	大学院法学政治学研究科教授・公共政策大学院教授・ 未来ビジョン研究センター センター長
芳川恒志	WG3	大学院公共政策学連携研究部特任教授
杉山昌広	WG3	未来ビジョン研究センター准教授
山口健介	WG3	大学院公共政策学連携研究部特任講師
陳 奕均	WG3	未来ビジョン研究センター特任研究員
杉本 南	WG3	未来ビジョン研究センター特任研究員
稲垣博明	事務局	副理事・産学協創部 部長
大久保哲也	事務局	産学協創部 協創課 課長
福井美乃	事務局	産学協創部 協創課 協創事業チーム
菅 哲郎	事務局	産学協創部 協創課 協創事業チーム

2.日立製作所

松岡秀行	コーディネータ	研究開発グループ 基礎研究センタ 主管研究長
森田歩	WG0	研究開発グループ テクノロジーイノベーション統括本部 統括本部長
馬場淳史	WG0	研究開発グループ 脱炭素エネルギーイノベーションセンタ センタ長
山田竜也	WG0	エネルギー業務統括本部 経営戦略本部 担当本部長
<u>小野田学</u>	WG1	エネルギー業務統括本部 経営戦略本部 主任
渡辺雅浩	WG1	研究開発グループ システムイノベーションセンタ 主管研究員
中沢健二	WG0・1	エネルギー業務統括本部 経営戦略本部 部長
渡部亜由美	WG1	研究開発グループ 脱炭素エネルギーイノベーションセンタ 研究員
吉本尚起	WG1・2	研究開発グループ脱炭素エネルギーイノベーションセンタ 主任研究員
<u>伊藤智道</u>	WG2	研究開発グループ脱炭素エネルギーイノベーションセンタ 研究主幹
佐藤康生	WG0・2	制御プラットフォーム統括本部 エネルギーソリューション本部 主管技師
河村勉	WG2	研究開発グループ システムイノベーションセンタ 主任研究員
畠山智行	WG2	研究開発グループ エネルギーイノベーションセンタ 研究員
<u>鈴木朋子</u>	WG3	研究開発グループ 技師長
飯塚秀宏	WG3	研究開発グループ 東京社会イノベーション協創センタ 環境プロジェクト サブリーダー
福本恭	WG3	研究開発グループ 東京社会イノベーション協創センタ 環境プロジェクト サブリーダー
稲垣幸秀	WG3	研究開発グループ 東京社会イノベーション協創センタ 環境プロジェクト 主任研究員
佐々木剛二	WG3	研究開発グループ 東京社会イノベーション協創センタ 環境プロジェクト 主任研究員

WG0: 全体ビジョン、WG1:基幹システムおよび制度・政策、WG2 : 地域社会、WG3 : シナリオ策定の分科会を表し、下線が各 WG リーダを示す

付録 1. 東京都町田市における戸建世帯数、および分散リソースの保有台数の導出

表 A1-1 に、東京都町田市における戸建世帯数、および分散リソース（HP、PV、EV）の保有台数の導出結果を示す。以下では、同表の 2030 年、2050 年における各項目の導出過程について、それぞれ説明する。

表 A1-1 東京都町田市における戸建世帯数と分散リソースの保有台数

	2030 年	2050 年
1. 戸建世帯数	96,596	86,330
2. ヒートポンプ給湯機 (HP)	42,932	78,108
3. 太陽光発電 (PV)	21,216	31,080
4. 電気自動車 (EV)	9,582	38,744

1. 戸建住宅世帯数

表 A1-2 に、東京都町田市における戸建世帯数の導出過程をまとめる。はじめに、町田市の世帯数を求める。東京都は、2030 年の町田市における世帯数を約 20 万世帯と予測している¹。同文献では、2040 年までの予測を対象としており、2050 年における町田市の世帯数は明示されていない。そこで、同文献の 2015 年から 2040 年にかけての世帯数の推移から、2050 年における世帯数を 17.8 万世帯と推算した。

次いで、町田市の全世帯のうち、戸建に住む世帯数を求める。関東地区における戸建住宅の割合は 48.5%である²。2030 年、2050 年の町田市におけるの割合も同様であると仮定すると、町田市における戸建世帯数は 2030 年で約 9.7 万世帯、2050 年で約 8.6 万世帯と求められる。

表 A1-2 東京都町田市における戸建住宅世帯数の導出

	2030 年	2050 年
町田市世帯数 (A)	199,168	178,000
うち、戸建住宅 (=A×48.5%)	96,596	86,330

2. ヒートポンプ給湯機 (HP)

表 A1-3 に、ヒートポンプ給湯機の台数の導出過程をまとめる。ヒートポンプ給湯機の普及見通しは、寒冷地、温暖地別で試算されており、町田市は温暖地に分類される³。同文献から、温暖地戸建世帯数は 2030 年で約 2,250 万世帯、2050 年で 2,100 万世帯である。また、温暖地戸建世帯数におけるヒートポンプ給湯機の台数は、2030 年までは中位ケースで推移し、その後、急速に普及して、2050 年には高位ケースに移行することを仮定すると、2030 年で 1,000 万台、2050 年で 1,900 万台となる。全国と町田市におけるヒートポンプ給湯機の普及率が等しいと仮定する

¹ 東京都. 2019 年. 「推計人口資料第 71 号 東京都世帯数の予測」1 月 14 日アクセス.

<https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/syosoku/sy19rf0000.pdf>

² 日本ポストン協同組合関東ブロック. 2015 年. 「町田市世帯数」1 月 14 日アクセス. <http://www.pos-kanto.jp/>

³ 一般財団法人 ヒートポンプ・蓄熱センター. 2020 年. 「令和 2 年度ヒートポンプ普及見通し調査」1 月 6 日アクセス.

https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/press_topics/2020NewsRelease/news_release_siryoo.pdf

と、町田市の戸建世帯におけるヒートポンプ給湯機の台数は、2030年で42,932台、2050年で78,108台と求められる。

表 A1-3 ヒートポンプ給湯機台数の導出

	2030年	2050年
温暖地戸建世帯数(全国) (A)	22,500,000	21,000,000
ヒートポンプ給湯機台数(全国) (B)	10,000,000	19,000,000
戸建世帯数(町田市) (C)	96,596	86,330
ヒートポンプ給湯機台数(町田市) (=B/A×C)	42,932	78,108

3. 太陽光発電 (PV)

表 A1-4 に、太陽光発電の台数の導出過程をまとめる。戸建住宅用の太陽光発電導入量は、文献4の現状成長ケースでは2030年で30.2GW、文献5の受容性重視シナリオでは2050年で45GWと予測されている^{4,5}。これらの試算は全国における戸建世帯を対象としている。全国の戸建世帯数は、文献3における温暖地戸建世帯数と寒冷地戸建世帯数を合算し、2030年で2750万世帯、2050年で2500万世帯とした。

ヒートポンプ給湯機の台数の導出と同様に、全国と町田市で戸建住宅用太陽光発電の普及率が等しいと仮定すると、町田市における戸建住宅用太陽光発電の導入量は2030年で106.1MW、2050年で155.4MWとなる。さらに、平均的なパネルの出力を5kWと仮定すると、町田市における戸建住宅用太陽光発電の台数は、2030年で21,216台、2050年で31,080台と求められる。

表 A1-4 太陽光発電台数の導出

	2030年	2050年
戸建世帯数(全国) (A)	27,500,000	25,000,000
戸建住宅用太陽光発電導入量(全国) (B)	30.2 GW	45 GW
戸建世帯数(町田市) (C)	96,596	86,330
戸建住宅用太陽光発電導入量(町田市) (D=B/A×C)	106.1 MW	155.4 MW
戸建住宅用太陽光発電台数(町田市) (=D/5 kW)	21,216	31,080

⁴ 株式会社 資源総合システム. 2020年. 「住宅用太陽光発電システム市場の現状と見通し(2020年版)～今後のビジネス展開に向けて～」の発刊のお知らせ」1月14日アクセス. https://www.rts-pv.com/news/202003_7166/

⁵ 電力中央研究所. 2020年. 「ネットゼロ実現に向けた風力発電・太陽光発電を対象とした大量導入シナリオの検討」1月14日アクセス. https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/034/034_007.pdf

4. 電気自動車 (EV)

表 A1-5 に、電気自動車の台数の導出過程をまとめる。自動車に占める電気自動車の割合は、新車ベースが 2050 年に 100%電気自動車になるシナリオでは、2030 年で 16%、2050 年で 79%である⁶。一方、町田市における世帯当たりの自動車の保有台数は年々減少しており、2030 年では 0.62 台、2050 年では 0.57 台になると見積もられる⁷。以上のことから、町田市における電気自動車の台数は、2030 年では 9,582 台、2050 年では 38,744 台と求められる。

表 A1-5 電気自動車台数の導出

	2030 年	2050 年
電気自動車割合(全国) (A)	16%	79%
世帯当たり自動車保有台数(町田市) (B)	0.62	0.57
戸建世帯数(町田市) (C)	96,596	86,330
電気自動車台数(町田市) (=A×B×C)	9,582	38,744

⁶ AIM プロジェクトチーム. 2020 年. 「2050 年脱炭素社会実現の姿に関する一試算」2022 年 1 月 14 日アクセス.
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/034/034_004.pdf

⁷ 町田市. 2019 年. 「町田市環境白書 2019 (データ集) 1 章 町田市の環境測定結果および統計データ」2022 年 1 月 14 日アクセス.
https://www.city.machida.tokyo.jp/kurashi/kankyo/kankyo/keikaku/keikau/dainijikankyomaster/kankyohaku_sho/kankyohakusyo2019.html

付録2. 2030年におけるアグリゲータの事業規模評価

5章では2030年におけるアグリゲータの事業規模を評価するとともに、アグリゲーションの最適化ケース（Case2）としてEV充放電の解析結果を示した。ここではEV充電とEV充放電の効果を比較した結果を示す。表A2-1に示すとおり、Case2-1ではEVの充電、Case2-2ではEVの充放電を最適化した。

図A2-1の左側の図は、3月6日におけるスポット市場価格および町田市全体の電力需要である。Case1の夜間運転では、夜間にEVの充電とHPの沸き上げを行っているのに対し、Case2-1（最適化:EV充電）およびCase2-2（最適化:EV充放電）のケースでは、EV充電、HPの沸き上げがスポット市場価格の安い昼間の時間帯にシフトしており、需要のタイムシフト効果は、それぞれ192MWh、227MWhとなった。これを全国規模に換算すると、67.2GWh、79.5GWhに相当する。

図A2-1の右側の図は、アグリゲータの調達費用の削減効果である。Case1の場合、調達費用が12億7100万円であるのに対し、Case2-1（最適化:EV充電）のケースでは、11億6200万円となり、約1億1000万円の削減効果があり、Case2-2（最適化:EV充放電）のケースでは、調達費用は11億5400万円となり、約1億2000万円の削減効果があった。これを東電管内に拡張すると、それぞれ、約128億円、約140億円に相当する。

最適化したケースでは、スポット市場価格に応じて調達コストを最小にするようにHPの沸き上げとEV充(放)電を行うため、スポット市場価格が安い昼間にHP沸き上げとEV充電を実施している。一方、EV放電は、スポット市場価格が高い時間帯に実施することで調達コストを低減することができるが、2030年における系統需給シミュレーションではスポット市場価格の高い時間帯が発生しなかったため、EV充電の効果が小さくなり、Case2-1（最適化:EV充電）とCase2-2（最適化:EV充放電）の調達コスト削減効果に大きな差が出なかったと考えられる。今後、PV導入量がさらに増大した場合、PV発電量が減少し、電力需要が急激に増大する夕方の時間帯ではスポット市場価格が高くなると予想されるため、EV放電の効果が増大すると考えられる。

表 A2-1 解析条件

Case1	夜間運転	0～7時を中心にHPの貯湯とEVの充電を実施
Case2-1	最適化(EV充電)	給湯需要と走行需要を基に、HP貯湯量とEV充電を最適化
Case2-2	最適化(EV充放電)	給湯需要と走行需要を基に、HP貯湯量とEV充放電を最適化

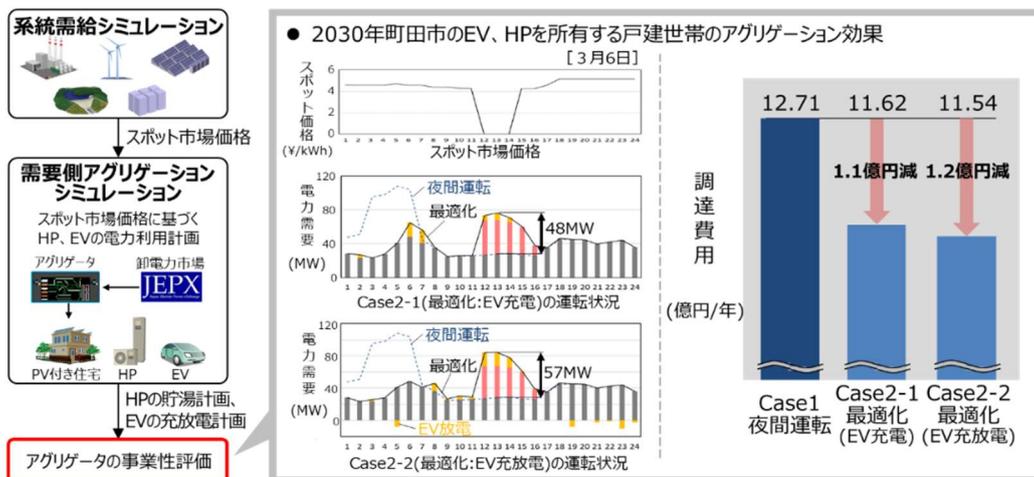


図 A2-1 需要側アグリゲーションシミュレーション

付録3. エネルギー技術選択モデル(動的コスト最小化型モデル)

第4章では2030年、2050年のCNへのトランジションに向けたエネルギーシステムの需給構造と必要な対策を定量的に示すために、東京大学 藤井・小宮山研究室で研究開発した技術選択モデルに基づくエネルギー・経済シミュレーションモデルを用いて試算した。本モデルの特徴を以下に示す。

・日本のエネルギー全体を分析対象に、CO₂排出制約のもとでエネルギー需給構造のコスト最適化計算が可能。

図A3-1に示すようなエネルギーシステムを想定しシステム全体の評価を行う。

(一次エネルギー、転換部門、最終消費部門[産業、家庭、業務、旅客、貨物])

電力部門についても詳細分析。

(時間解像度→1時間値、年間8,760時間で分析→再エネ出力変動を詳細に考慮)

・エネルギー供給サイド(一次/二次エネルギー)と需要サイド(鉄鋼、セメント、化学、民生、運輸など)について個別技術の積み上げによる分析を行い、CN実現ならびにそのトランジション(移行過程)のエネルギー需給構造を統合的に分析可能。

・革新的技術をはじめ多様な技術要素を考慮：次世代自動車(EV、FCV)、エネルギー貯蔵(Li-ion電池、NAS電池、蓄熱装置)、CCUS(大気中CO₂直接回収、メタネーション、FT合成)、エネルギーキャリア(水素、アンモニア、メタノール、合成ガス、合成石油)、発電技術(水素発電、アンモニア発電、洋上風力発電、燃料電池、蓄熱発電)、省エネ技術(ヒートポンプ)など。

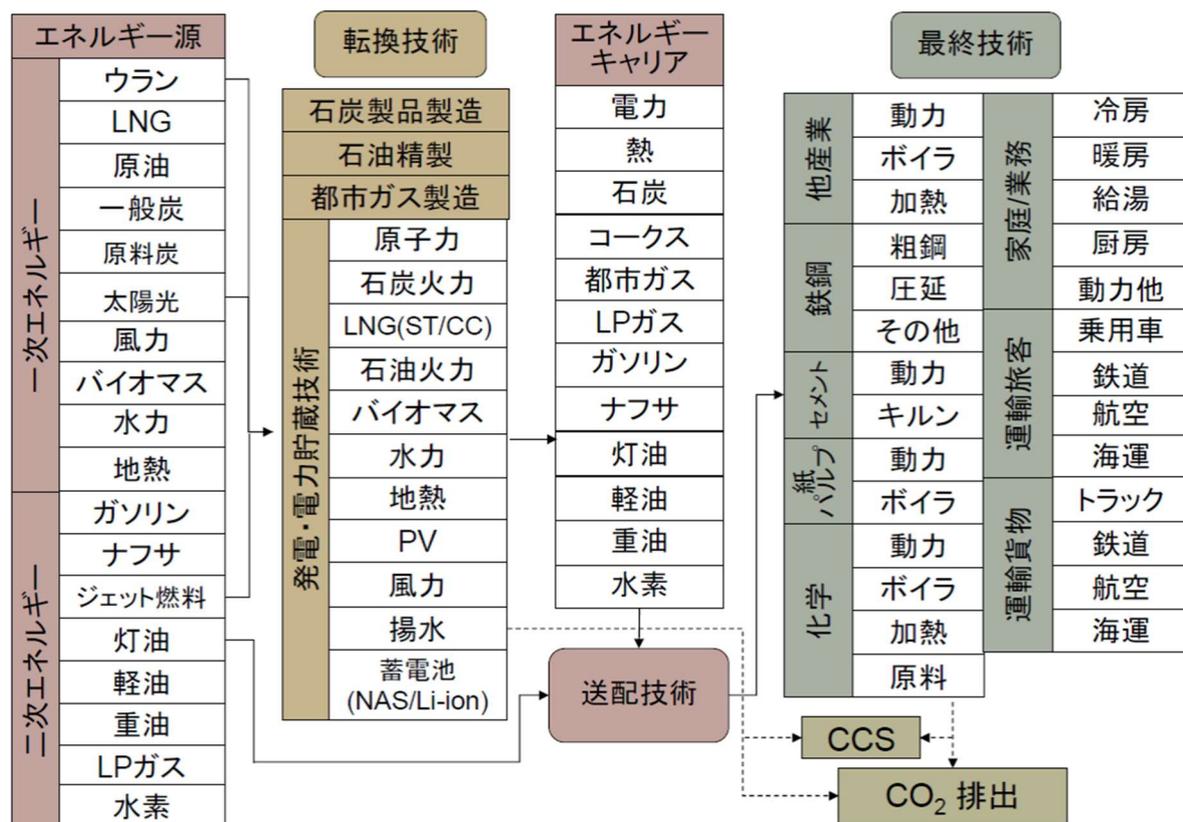


図 A3-1 基準エネルギーシステム

第4.2節で行ったシミュレーションの主な条件（ベース条件）を図A3-2に示す。また、各エネルギーシナリオの条件を表A3-1に示す。

- 主要な脱炭素技術の導入（再エネ・原子力・水素・CO₂回収）が全て実現すると仮定
- 2050年CNおよびトランジション（移行過程）について、コストを最適化してシミュレーション

CO₂排出量 (削減目標値)	2030年：2013年比 ▲46 % 2050年：ネットゼロ (▲100 %)
発電設備・技術の導入条件(2050年)	
太陽光発電(PV) ：発電容量の上限を設定せず、新增設 太陽光発電協会(JPEA)の目標値は、2050年に300GW(*1)	風力発電 ：陸上40 GW・洋上90 GWを目標に新增設 日本風力発電協会(JWEA)が政府に提言した目標値(*2)
原子力発電 ：50 GWを上限に新增設 ・既設発電所の再稼働 / 運転期間の延長(40年→60年) (廃炉が決定されたものを除く) ・建設が中断している新設3基が完工・運転開始 ・小型モジュール炉(SMR)などを新增設	水素発電 ：輸入量 2000万t / 輸入価格 20円/Nm ³ 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(*3)における目標値
CO₂回収技術の導入条件 排出削減目標を達成するためCO ₂ 回収技術を導入 CO ₂ の貯留・活用(CCS: Carbon Capture, Utilization & Storage) CO ₂ の直接空気回収(DAC: Direct Air Capture)	

- *1) (一社)太陽光発電協会 (2021年3月8日資料)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/026_05_00.pdf
- *2) (一社)日本風力発電協会 (2021年3月24日資料)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/039/039_008.pdf
- *3) 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf

図A3-2 主なシミュレーション条件（ベース条件）

表A3-1 各エネルギーシナリオの条件

	①再エネ 100%	②原子力 フェードアウト	③火力CCS 制限(1億t)	④原子力 活用	⑤水素発電 積極活用	⑥FCV 進展	⑦火力CCS 制限(1000万t)
原子力稼働年	停止	40	60	←	←	←	←
原子力設備容量上限(GW)	0	4	24	50(SMR)	24	←	←
火力CCS上限(ton)	2億	←	1億	2億	←	←	1000万
水素輸入上限(ton)	2,000万	←	←	←	4,000万	上限なし	←
水素単価(¥/Nm ³)	20	←	←	←	10	20	←
FCV価格(現状比)	0.68	←	←	←	←	0.20	←
EV価格(現状比)	0.68	←	←	←	←	←	←
太陽光上限(GW)	なし	←	←	←	←	←	←
陸上風力上限(GW)	40	←	←	←	←	←	←
洋上風力上限(GW)	90	←	←	←	←	←	←
太陽光建設コスト(万円/kW)	15	←	←	←	←	←	←
陸上風力建設コスト(万円/kW)	21	←	←	←	←	←	←
洋上風力建設コスト(万円/kW)	51	←	←	←	←	←	←
CCSコスト(¥/tonCO ₂)	745	←	←	←	←	←	←
DACコスト(¥/tonCO ₂)	10,340	←	←	←	←	←	←
LiB蓄電コスト(¥/Wh)	10	←	←	←	←	←	←

- *1) 年間コスト：2050年の年間の1次エネルギーから最終エネルギー消費に至るエネルギーコスト(=燃料費)と設備投資コストの合計
- *2) 水素の輸入元の設備コストは考慮外

付録 4. 各ドメインのシナリオ概要

表 A4-1 に、「多様なエネルギーケース」、表 A4-2 に「再生エネ 100%ケース」について、各ドメインのシナリオ概要をまとめる。

表 A4-1 「多様なエネルギーケース」における各ドメインシナリオの概要

	ドメイン	2015-20	2020-30	2030-50	主な論点
電力別	石炭火力 CO2 回収有	「第 5 次エネルギー基本計画」に基づき、非効率石炭火力のフェードアウトと石炭火力の高効率化を推進	石炭火力のフェードアウトと高効率化を着実に推進、政府は CO2 貯留へ向けた国内貯留コンセンサスと海外貯留のための国際連携を平行して推進	石炭火力のフェードアウトと CO2 回収有 高効率火力への転換を完了、政府は海外貯留のための国際連携を実現	1. 日本の 3E+S 対応として、災害時のエネルギー安定供給源としての石炭火力発電維持シナリオを考えることが必要 2. CO2 貯留のためには、国内のパブリックコンセンサスのプロセス作りの他に、代案シナリオとなる国際連携の検討が必要
	ガス火力 CO2 回収有	「省エネ法」改正で非効率火力のフェードアウトと新型ガス火力へのリプレース推進	ガス火力事業者は政府基金を活用して CO2 回収システムの開発と商業化を推進	LNG インフラを活用した CO2 回収・輸送ネットワーク構築と、政府主導による ASEAN 連携の CO2 貯留実現により、ガス火力事業継続	1. 政府主導で CCS に関する国内パブリックアクセプタンス獲得と国際連携/APAC 連携の確立 2. ガス火力発電のフェードアウトにより、地域衰退(過疎化・財政力低下・失業による雇用維持)を懸念する行政と市民との合意形成
	太陽光	パリ協定以降、FIT 制度のもと大規模プロジェクトが開始。環境影響の対策を推進	再生エネへの完全移行を行う組織や団体が増加。再生エネ型新電力事業に、自動車、IT、石油化学等の資本を背景とする事業者が参入。政府は促進地域制度を指定するとともに、環境影響を管理。	大規模な再生エネインフラ整備、スマート送配電の整備、自然災害強靱化を通じて、太陽光発電の設置が推進。2050 年までに発電量全体のシェア 30%に到達	2020-30 年：多様な資本を背景としてさまざまな新たなアクターの参画により、発電や制御にかかわる機能の改善やコストの低減のためのインフラ、制度の基盤整備が重要 2030-50 年：太陽光発電の特質が、自然災害への対策上有用であり、防災上の観点から公有地などでの設置を進めるなど、総合的な土地利用の中で設置が広がる必要がある
	風力	再生エネ海域利用法制定で野心的な風力事業策定、地域市民と合意形成開始	風力発電事業への国内外関連企業の参入加速、風車設置による地域産業・市民とのコンセンサス形成に苦慮	市場競争激化により産業競争力強化政策を推進、風力発電事業が地域の QoL・QoW 向上に貢献する事例も出現	1. 洋上・陸上風力発電事業者は地域経済活性化への貢献、地場産業や住民などの合意形成が必要 2. 風力導入加速は、実力のある海外企業参入の加速を促し、国内洋上風力関連産業の競争力増大へ向けた政策が必要
	水力・地熱	水力・地熱の総発電量は大きくないが、地域な自立的な再生エネ電源として注目を集める。	日本政府は中小水力導入のための促進政策を推進。	中小水力は CO2 排出量削減以外に地域の住民意識改善や経済向上に価値を發揮。関連産業も出現。	2020-30 年：中小水力発電導入課題の解決（水利権、採算性、維持管理の手間低減）と、民間の環境負荷低減意識の向上。 2030-50 年：中小水力発電の事業リスク低減。
	バイオマス専焼 CO2 回収有	「第 5 次エネルギー基本計画」でバイオマス発電の普及拡大に弾み	2050 年のバイオマス発電は 2015 年比で 1.7 倍程度の発電量増加に留まる政府方針により、地域密着型の CO2 回収無発電による事業拡大を推進	森林バイオマス発電にも CO2 回収が必要との国際的認識により、政府は CO2 回収有バイオマス発電へと施策転換	1. 参考値ケースではバイオマス発電の普及拡大は抑制される 2. 将来、バイオマス発電はカーボンニュートラルではないと認定されると CO2 回収有が必須となり、CAPEX・OPEX で事業が成り立たない可能性がある
原子力	福島第一原発事故以降、避難継続や風評被害の固定化が課題に。2015 年以降、徐々に再稼働。	原子力は安定的なクリーン電源として位置づけ。2030 年には安全基準を満たした発電所の再稼働により発電量が增大。ただし、原子力行政や事業者への不信感が高く、新設や建て替えは行われず。	再生エネのコスト低下とシェア拡大、さらに CCS 付きの石炭・ガス火力発電が継続。小型モジュール炉など開発は進むが、国内での運用には至らず、原子力の発電量は漸次的に縮小。発電所は老朽化し、開発・運用技術の維持が課題に。	2020-30 年：原子力が脱炭素化のためのクリーン・エネルギーとして有効であるとしても、その推進は、復興地域や使用済み核燃料処理に関わる地域の住民を含めた国民的議論のもとに、慎重な判断が必要。 2030-50 年：政府が推進する小型モジュール炉の整備は、脱炭素だけでなく、周辺核セキュリティ、使用済み核燃料処理、避難計画など規制の整備など含めた観点から住民との合意形成を必要とする。	
	水素アンモニア専焼	「アンモニアの貿易量は少なく、現地生産が主流。日本が燃料として利用するには極めて少ない	①アンモニア混焼発電に反対運動勃発、政府は安全対策を強化。 ②日本は政府主導でアンモニアの国際（アジア）サプライチェーンの整備に乗り出す。アンモニア生産工場の海外移転も加速。	アンモニアの国際流通の基盤が確立。石炭火力のアンモニア専焼への転換が進む。	2020-30 年：NH3 と H2 の国際的供給インフラと CCS インフラの整備着手。 2030-50 年：NH3/H2 の大量生産体制
	産業別	鉄鋼	高機能鋼材が日本の強みで、欧米に比べ高炉比率が圧倒的に高い	脱炭素の動きと政策の後押しにより電炉へのシフトが進む。高炉メーカーでは水素還元への動きも始まるが、研究開発費の負担が増える	電炉メーカーは国内シェアを伸ばす。鉄鉱石からの鉄鋼製造は水素還元・補助金等による H2 価格の下支えにより、高機能鋼材に特化して国内生産が維持される。
産業別	石油化学	国内産業（石油化学）の経営課題は利益率の向上。	環境対応が各社の最重要経営課題になる。政府主導で炭素回収インフラ整備始まる。M 社も炭素回収の技術・ノウハウを開発・蓄積。	炭素回収のサプライチェーン構築も中国リスクが顕在化。石油化学業界は脱炭素を契機に利幅の薄い事業の海外展開を済ませ、国内事業の構造転換を実現。	2020-30 年：炭素貯留に関する国内外体制の整備と技術開発。炭素回収コスト。 2030-50 年：産業構造変化に伴う雇用維持 or 減少。炭素回収の国際サプライチェーン構築と日本の安全保障。
	運輸	自動車産業は、出荷額、雇用等の面で日本経済を支える大黒柱である。	電動車普及のため、国内の蓄電池製造能力が増強。ライフサイクルアセスメントに対応し競争力を維持。部品、サービスを含めた関連産業の電動化シフトを官民挙げて支援。	電動化困難な領域にはグリーン新燃料の適用が進展。また、系統安定化の調整力として車載蓄電池を活用するための環境整備が進展。	1. 蓄電池の国内製造能力強化、製造・使用・廃棄まで含めたライフサイクル全体での排出削減が競争力の維持に重要である 2. 内燃機関を中心とした産業構造からの転換に影響を受けるアクターへの物的・人的支援が重要となる
行動変容	行動変容	2015 年パリ協定と政府のカーボンニュートラル目標が青年層に強い訴求力を持ち始める。	一般市民の気候変動や再生エネへの関心はさらに高まり、電気自動車の普及は加速。ガス・石炭火力発電は炭素回収技術をもとに継続。原子力発電も安定的な電力源として継続。	気温上昇が継続し、炭素排出への基準が厳格化。送電網拡張と用地整備で再生エネが推進。	2020-30 年：政府が進める原子力発電所の再稼働や、ガス・石炭火力発電の継続に対して、気候や環境の取り組みに対して関心を高める市民との間に対立を生む可能性がある。 2030-50 年：国際的な気候対策のさらなる厳格化によって、政府が再生可能エネルギー政策をさらに強く推し進める可能性がある。

表 A4-2 「再エネ 100%ケース」における各ドメインシナリオの概要

	ドメイン	2015-20	2020-30	2030-50	主な論点
電力別	石炭火力 CO2回収有	「第5次エネルギー基本計画」に基づき、非効率石炭火力のフェードアウトと石炭火力の効率化を推進	政府は災害時のエネルギー安定供給源と位置付けた石炭火力を国際的圧力で全廃決定、石炭火力事業者は非石炭火力や再エネ事業転換	大手の石炭からバイオマス発電への参入増加で地域発電事業者との競争激化と業界再編加速。政府は社会構造変遷に対しQoL/QoW 施策を実行。	1. 石炭火力発電のフェードアウトに伴う、地域のQoW・QoLに対する対策が必要 2. 大手火力事業者と地域再エネ事業者が再エネ発電事業に収束することで、日本全体で電事業の棲み分け・吸収合併が進む
	ガス火力 CO2回収有	「省エネ法」改正で非効率火力のフェードアウトと新型ガス火力へのリプレイス推進	政府のガス火力完全廃止決定で投資家の投資引き上げが起こり、バイオマス発電などの事業転換を迫られる	ガス火力事業者は事業撤退により、労組、地域行政・市民との合意形成に苦慮。政府はグリーン・ジョブ創生政策で対応	1. ガス火力発電事業者は、国策により国内での操業停止がバイオマス発電への転換など、大きな移行を迫られる 2. 政府は、グリーン・ジョブ創生と雇用創出の施策を推進することも必要
	太陽光	パリ協定以降、FIT 制度のもと大規模プロジェクトが開始。環境影響の対策を推進。	再エネへの完全移行を行う組織や団体が増加。再エネ型新電力事業に、自動車、IT、石油化学等の資本を背景とする事業者が参入。政府は促進地域制度を指定するとともに、環境影響を管理。	大規模な再エネインフラ整備、スマート送配電の整備、自然災害強靱化を通じて、太陽光発電の設置が推進。IT とエネルギーの連動型ビジネスが広く普及。2050 年までに発電量全体のシェア 30% に到達。	2020-30 年：EV や IT など背景とする国際的なアクターの参入により、発電や制御にかかわる機能の改善やコストの低減が加速する可能性がある。 2030-50 年：太陽光発電の特質が、自然災害への対策上有効であり、防災上の観点から公有地などでの設置が広がる可能性がある。
	風力	再エネ海域利用法制定で野心的な風力事業策定、地域市民と合意形成開始	石炭火力全廃により風力発電市場は沸騰状態、地域産業・市民との合意形成は一段と厳しくなり、政府は対策に苦慮	風力事業の海外展開拡大と地域復興の好事例が増加、一方、政府は自然災害による大規模停電回避施策に苦慮	1. 政府は、将来のエネルギーシナリオにより起こる日々の働き方や生活(QoW/QoL) の施策を検討し実行することが必要 2. 風力導入加速は、実力のある海外企業参入の加速を促し、国内洋上風力関連産業の競争力増大へ向けた政策が必要
	水力・地熱	水力・地熱の総発電量は大きくないが、地域な自立的な再エネ電源として注目を集める。	日本政府は中小水力導入のための促進政策を推進。	中小水力は CO2 排出量削減以外に地域の住民意識改善や経済向上に価値を發揮。ただし、高額な炭素税を乗り越える事業環境の整備が急務。	2020-30 年：中小水力発電導入課題の解決（水利権、採算性、維持管理の手間低減）と、民間の環境負荷低減意識の向上。 2030-50 年：高額な炭素税導入による脱炭素化促進の是非。中小水力発電の事業リスク低減。
バイオマス専焼 CO2回収有	「第5次エネルギー基本計画」でバイオマス発電の普及拡大に弾み	石炭火力全廃で 2050 年の発電量目標は 2015 年比で 3 倍以上となりバイオマス発電市場活性化、金融機関は投資推進、政府も新規雇用創出支援	バイオマス発電燃料の安定大量調達に向け、国内生産者や国際調達者などの新アクターの SC 構築が課題、関連省庁の壁を超えた連携が重要	1. 化石燃料発電事業者は、国策により国内での操業停止がバイオマス発電への転換など、大きな移行を迫られる 2. 再エネやバイオマス発電に偏った移行は、環境破壊とエネルギー調達の安定性欠如などの課題が生じる可能性あり	
	原子力	福島第一原発事故以降、避難継続や風評被害の固定化が課題に。2015 年以降、徐々に再稼働。	原子力は安定的なクリーン電源として位置づけ。2030 年には安全基準を満たした発電所の再稼働により発電量が增大。ただし、原子力行政や事業者への不信任は高く、新設や建て替えは行われず。	送配電インフラ整備が進み、再エネの安定性にかかわる課題が克服。一方、核セキュリティ、巨大地震、使用済み核燃料処理の課題、および海外の原子力政策転換により、原子力発電量は再びゼロに。	2020-30 年：原子力が脱炭素化のためのクリーン・エネルギーとして有効であるとしても、その推進は、復興地域や使用済み核燃料処理に関わる地域の住民を含めた国民的議論のもとに、慎重な判断が必要。 2030-50 年：この時期に日本の既存の原子力発電所が老朽化するが、国内だけでなく、国外の原子力発電にかかわる事故や危機が、日本国内の世論に大きな影響を与える可能性がある。
	水素アンモニア専焼	アンモニアの貿易量は少なく、現地生産が主流。日本が燃料として利用するには極めて少ない	①アンモニア混焼発電に反対運動勃発、政府は安全対策を強化。 ②日本は政府主導でアンモニアの国際（アジア）サプライチェーンの整備に乗り出す。アンモニア生産場の海外移転も加速。	日本主導のアンモニアのアジアサプライチェーンが喧嘩。石炭火力の閉鎖が相次ぐ。	2020-30 年：NH3 と H2 の国際的供給インフラと CCS インフラの整備着手。 2030-50 年：NH3/H2 の大量生産体制
産業別	鉄鋼	高機鋼材が日本の強みで、欧米に比べ高炉比率が圧倒的に高い	先脱炭素の動き、政策の後押し、需給バランス対応等により電炉へのシフトが進む。高炉メーカーでは水素還元への動きも始まるが、研究開発費の負担が増える	電炉メーカーは、余剰電力の先行にもなり国内シェアを伸ばす。鉄鉱石からの鉄鋼製造は海外に移転する	1. 高炉メーカーと電炉メーカーの立場・戦略がほぼ対立 2. 国内に限った CO2 削減か、世界的にトータルな CO2 削減を議論できるかの葛藤
	石油化学	国内産業（石油化学）の経営課題は利益率の向上。	環境対応が各社の最重要経営課題になる。政府主導で炭素回収インフラ整備始まる。M 社も炭素回収の技術・ノウハウを開発・蓄積。	炭素回収が暗礁に乗り上げる。石油価格も高騰し、石油化学業界は体力がある M 社に一本化。雇用対策、教育体系見直しが必要。	2020-30 年：炭素貯留に関する国内外体制の整備と技術開発。炭素回収コスト。 2030-50 年：産業構造変化に伴う雇用維持 or 減少。炭素回収の国際サプライチェーン構築と日本の安全保障。
	運輸	自動車産業は、出荷額、雇用等の面で日本経済を支える大黒柱である。	太陽光や風力など変動性再生エネルギーの導入が急ピッチに進展。系統安定のための車載用蓄電池の活用がより重要になり分散型電源のグリゲータや充電サービスのプロバイダなどが重要な役割を果たすようになる。	系統安定化のためのコストが増加し電気料金が上昇した結果、個人の移動手段が徒歩や自転車等に移行。長距離輸送のモーダルシフトなどと相まって、コンパクトシティへの変容が見られる。	1. 中古電池を含む、電動車の蓄電池を系統安定に活用するための技術開発や環境整備が重要になる 2. 変動性再生エネ導入拡大による電気料金の上昇を背景として、個人の移動や物流システムの変容が起こる
行動変容	行動変容	2015 年パリ協定と政府のカーボンニュートラル目標が青年層に強い訴求力を持ち始める。	一般市民の気候変動や再エネへの関心はさらに高まる。EV 化と IT 企業の参画により、市民の再エネエネルギー選択が加速。原子力政策に対する不信任は高く、政策転換が再エネインフラ整備を後押しし。	大規模地震災害による事故により、原子力発電はすべて停止。被災地復興事業を通じて、デジタル送配電網が整備される。	2020-30 年：気候・環境への市民の関心を背景に、EV との接続や通信会社の参画が、エネルギーにかかわるまったく新しい状況を生む可能性がある。 2030-50 年：気候対策の状況や、日本における大規模地震災害が、再生可能エネルギーの推進をさらに強める可能性がある。