

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6版)

2024年6月17日 日立東大ラボ



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6版)

2024年6月17日 日立東大ラボ

CONTENTS

提言サマリー	4
第 1 章 はじめに	7
第 2 章 変化するグローバル・ランドスケープと統合的なトランジション	8
2.1 はじめに	8
2.2 日立東大ラボのトランジション・シナリオ	9
2.3 気候、エネルギー、環境にかかわるランドスケープ	11
2.4 日本における社会技術トランジションの次の課題	13
2.5 アジア太平洋地域のトランジションと日本	20
2.6 第2章まとめ	23
第 3 章 社会および産業変革を取り入れたエネルギーシステムのあるべき姿と成長戦略	24
3.1 激変する国際情勢を踏まえたエネルギーシナリオの見直し	24
3.2 エネルギーシステムのバックキャストとフォアキャストのギャップと対策	26
3.3 データとシミュレーションで分析・評価を可能とする技術の開発	27
3.4 エネルギー需要とデジタルを活用した成長とエネルギーシステムとの統合的なトランジション	31
3.5 第3章まとめ	32
第 4 章 CN と S+3E のエネルギー需給の両立に向けた地域の貢献	33
4.1 CN 社会実現に向けた地域社会の役割	33
4.2 CN に伴う社会変化の客観的分析	34
4.3 地域社会のトランジションを円滑に進める施策と成長戦略の策定	38
4.4 第4章まとめ	41

第5章 まとめ	42
----------------	-----------

第6版提言検討体制 (2024年3月31日時点)	46
---------------------------------	-----------

【付録】	48
付録1. 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）	48
付録2. エネルギーシステムの課題と解決策の例	50

提言サマリー

2016年より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・シナリオを提言として発信している。

2023年に発刊した第5版では「地政学的変化」、「脱炭素に向かう世界的潮流の堅持」および「国や地域特有のエネルギーに関する個別事情」の3つのポイントについて議論した。特に、2030年のエネルギー長期需給見通しを議論した第6次エネルギー基本計画や世界的なクリーンエネルギー戦略の議論開始といったエネルギー分野の議論、さらにガバナンス

を考慮したESG投資やCOPなど環境分野の動きに着目して、2050年のカーボンニュートラル(CN)および2050年以降の社会の持続性に向けた課題を整理し、それらを解決するための取組みの議論結果をまとめた。

本書、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6版では、第5版からの変化点とそれに伴うさまざまな動向を網羅的に解析し、留意すべき課題とその対策について論じた。

第2章 変化するグローバル・ランドスケープと統合的なトランジション

第6版では、気候、エネルギー、環境における国際的なランドスケープの分析を通じて、気候変動、自然喪失、戦争などの複合的な危機のもとで、エネルギーにかかわるトランジションを他のアジェンダとの緊密な結びつきの中で達成しなければならないことを論じた。そうした「統合的なトランジション」においては、地域における独自の取り組みが重要であり、政府が自治体の意思決定や人材育成を支援していく必要を指摘した。また、産業においては、来るべきグリーン経済における繁栄をめざして、イノベーションへの投資や産業構造の

転換をめざしていくことが重要であることを説明した。そして、アジア太平洋地域におけるエネルギー需要の増大を背景として、日本が同地域のトランジションのための枠組みにおいて役割を果たしていくべきであることを主張した。多様な研究機関や社会団体が日本のエネルギーのあり方に対して提言を行っており、日立東大ラボは、各セクターにおける多様なアクターの視点を包摂しながら、エネルギーを中心とする統合的なトランジションの道筋を多角的に捉えながら、その推進に資する資料を提供していくことを強調した。

第3章 社会および産業変革を取り入れたエネルギーシステムのあるべき姿と成長戦略

データセンタ等のICT需要増に対してエネルギーシナリオを見直し、CNシナリオ実現には、2030年までに①再エネ導入前倒し(太陽光発電88GWと風力発電15GW増設)および既存の全原子力発電運転など脱炭素電源確保、②PVの導入から短期間での廃棄回避や設置環境面の課題解決、③10GWを超える水素・アンモニア発電の稼働、④コジェネ等による化石燃料発電の熱利用、⑤希頻度の無風・曇天継続、燃油不足、災害を想定したエネルギーのレジリエンスとセキュ

リティ確保、を進める必要性を見出した。また、2040年～2050年に向けて、①太陽光・風力・原子力等のCN電源のさらなる増加、②DACによるCO₂回収の実用化と普及、③回収したCO₂からの合成燃料製造と運輸・産業部門での利用、に開発・投資しイノベーションを起こすべきである。また、再エネ導入量の急拡大に対する基幹システムの課題と対策について、第5版提言での検討を踏まえて考察した。

第4章

CNとS+3Eのエネルギー需給の両立に向けた地域の貢献

第5版で2030年に地域社会から創出される需要調整ポテンシャルを全国規模で33.2TWh/年となる定量評価結果を明らかにしたが、これを具体化するためにデジタル技術を活用した再エネ地産地活、地域特性を活用した自然回復と共存するネガティブエミッション、による地域経済の活性化の事

例を示した。経済と環境を両立する社会移行の一手段として、環境クレジットを活用し、エネルギー協調に基づく地域内の再エネの使い切り、および地域内循環がなり得ること、またCO₂貯留量を低減する施策として、藻場育成によるブルーカーボンの事例を示した。

「Society 5.0を支えるエネルギーシステムの実現に向けて」17の提言（第5章）

以上の2023年度におけるエネルギーtransitionにおける変化点を踏まえ、第5版で策定した18の提言を改訂し、新たな17の提言を策定した。

【短期】

第2章 変化するグローバル・ランドスケープと統合的なtransition

1. 急激な地政学的変化の中でも統合的なtransitionを加速させるガバナンス
2. グリーンな経済のためのイノベーションと構造転換の道筋の同定
3. アジア太平洋地域における気候、エネルギー、環境の国際連携の推進
4. 地域における統合的なtransitionのための意思決定の枠組みと人材の育成
5. 科学的エビデンスと包摂的な対話にもとづく合意形成のプラットフォーム

第3章 社会および産業変革を取り入れたエネルギーシステムのあるべき姿と成長戦略

6. 激変する国際情勢を踏まえたエネルギーシナリオの見直し
7. エネルギーシステムのバックキャストとフォアキャストのギャップと対策
8. 短期市場原理だけでない中長期的制度設計と施策の重要性
9. 電力市場の再構築と環境価値市場の融合
10. 地域・需要家参画による社会システムの構築

第4章 CNとS+3Eのエネルギー需給の両立に向けた地域の貢献

11. CNとS+3Eのエネルギー需給の両立に向けた地域の貢献
12. 地域社会のtransitionを円滑に進める施策
13. CNに伴う社会変化の客観的分析と成長戦略の策定
14. transitionの選択肢と尤度を広げる自然と調和したネガティブエミッション技術の開発

【中長期】

2050 年カーボンニュートラル実現から考える社会（第2章）

- 15. 地域独自のトランジションの道筋
- 16. 地域の持続可能な発展のための戦略的な産業政策

エネルギーシステムの技術的対策（第3章、第4章）

- 17. カーボンニュートラルに向けたエネルギーシナリオの対策技術

第1章 はじめに

2022年2月のロシアのウクライナ侵攻に伴う燃油価格の急騰は、エネルギーコストの増大や関連するさまざまな物品の価格高騰を招いた。未だロシアとウクライナの紛争は収束していないが、主に欧州における液化天然ガスをはじめとする燃油のサプライチェーンは大きく変貌を遂げ、欧州における燃油価格および電力価格は2022年春の状況から一定の落ち着きを示している。他方、生成AIをはじめとするICT分野の急速な成長に伴い、将来のエネルギー需要の増大が懸念されている。データセンタをはじめとして情報トラフィックは急増している一方、機器やネットワークの効率化も進捗しており、ICT分野のエネルギー消費の将来像は不透明さを増していると言える。

また、わが国では2025年に第7次エネルギー基本計画を策定予定であり、2030年の温室効果ガス削減目標を踏まえ、2035年から2040年にかけてエネルギー安定供給と、脱炭素および産業成長との両立を図るための課題と施策について議論される見込みである。さらに、国連気候変動枠組条約（UNFCCC）締約国会議（COP）に対して、向こう2035年ま

での具体的な行動指針であるNDC（Nationally Determined Contribution）の提出も2025年に予定されており、温室効果ガスの削減のみならず、わが国の持続可能性について広い視野からの考察が求められている。

日立東大ラボではトランジション・シナリオの検討、エネルギーシステムの課題と対策、エネルギートランジションを実現する日本の地域に着目して検討を重ねてきた結果、提言第5版において、主に2030年までの短期と、2040年から2050年を見据えた中長期に着目して、18の提言を取りまとめた。第6版では、これら18項目の提言を気候、エネルギーにかかわるグローバルなランドスケープの現状を概観した上で、ICT分野のエネルギー消費の将来像や地域社会における環境と経済の両立といった観点から見直しを図り、新たに17の提言を取りまとめた。本書では、電力システムからエネルギーシステム全般について考察対象を拡大してきた日立東大ラボの検討結果に基づき、エネルギーシステムに関する考察を詳細に記載するとともに、多くのみなさまと共に議論を進め、なるべく17の提言に至る過程を述べる。

第2章 変化するグローバル・ランドスケープと統合的なトランジション

2.1 はじめに

2020年10月に当時の菅総理大臣によって行われた2050年を目標とするカーボンニュートラル宣言以降、日本においては、広範かつ急速な脱炭素対策が行われてきた。日立東大ラボによるエキスパート・インタビューにおける専門家の発言においては、「宣言」以後の約3年間の変化に対する考察が示された。

公共セクターにおいては、日本政府のエネルギー基本計画や地球温暖化対策計画に明確な長期的目標が与えられるとともに、排出削減を推進するための重要な法改正が行われてきた。同時に、エネルギー分野においては、有償オークション制度や化石燃料賦課金などの制度上の準備が進展した。各自治体でもカーボンニュートラル(CN)をめざす取り組みが急速に広がってきている。

また、民間セクターにおいては、それまでグローバル企業が先導していた脱炭素の取り組みが主流化した。現在、国内の主要な上場企業のほとんどがカーボンニュートラルへの目標を掲げている。金融市場においては、ESG投資が大きな潮流となり、ISSB (International Sustainability Standards Board, 国際サステナビリティ基準審議会) などの国際基準に基づく情報開示に加え、グリーン・ボンドやトランジション・ファイナンスをはじめとするビジネスのグリーン化やエネルギー転換を推進するしくみが生まれている。

そして、社会セクターにおいては、持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals, SDGs)の認知の広がりのもと、サステナビリティにかかわる市民組織の活動が活発

化し、政府や企業の活動に対して、より大きな影響力をもつようになった。気候変動などの環境やエネルギーの課題にかかわるメディアにおける言及が増加し、市民の認識も向上しつつある。

一方、エキスパート・インタビューでは、過去数年間におけるこれらの進展とともに、新たな課題が浮上していることも指摘された。

例えば、日本におけるエネルギーのグリーン化と安定供給をいかに両立するか。

将来のグリーンな経済を支えるイノベーションにどのように機動的な投資を行うのか。

脱炭素の取り組みと同時に、重要鉱物の確保を含む経済安全保障をどのように達成するか。

生物多様性や化学汚染など、気候変動以外の環境課題にどのように対応するのか。

異なる省庁が管轄する気候・エネルギー政策をどのように一貫したものとしていくか。

そして、グローバル・サウスの国々とともにいかなるエネルギー転換を行っていくか、などである。

こうした新たな課題を視野に入れながら、持続可能な世界への地球規模の取り組みにおいて日本が置かれている状況を理解し、日本における社会技術トランジションの「次の課題」を明らかにしながら、アジア太平洋地域のエネルギー転換のあり方と日本の役割を探求していくことが求められている。

2.2 日立東大ラボのトランジション・シナリオ

日立東大ラボでは、日本におけるCN実現への道筋を描く「トランジション・シナリオ」(図2.1)を作成することを通じて、多面的な社会の転換という挑戦に資することをめざしてきた。トランジション・シナリオは、長期的な変化のCNプロセスを

複数のパスウェイにもと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している¹。

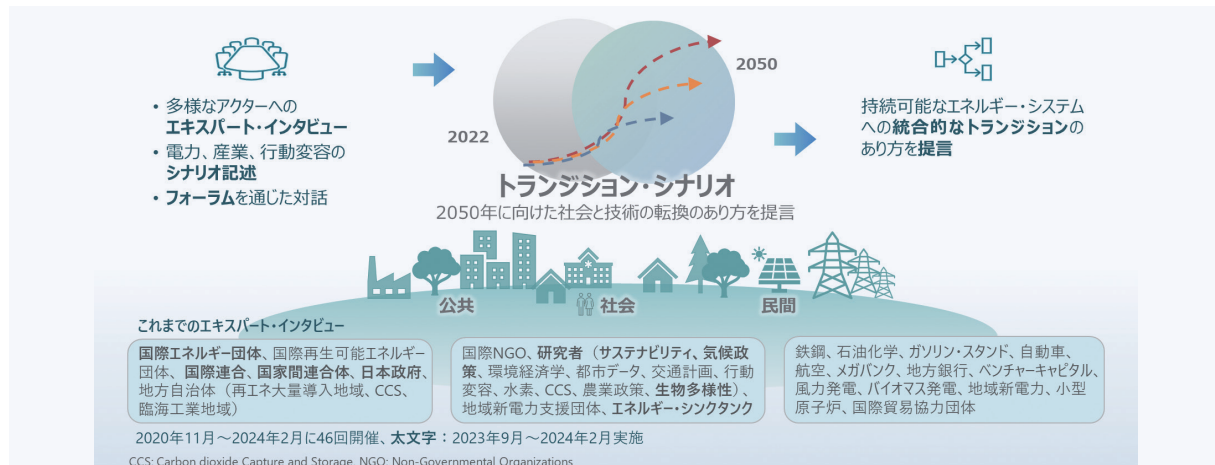


図 2.1 トランジション・モデルに基づく社会技術シナリオ

この研究では、既存の研究や報告書などを参考としつつ、公共、民間、社会セクターの専門家や当事者とのエキスパート・インタビュー(表2.1)などから得られる知見をもとに、多様なアクターの分析を行い、脱炭素のプロセスにとって重要なドメインにおいて、2020年から2050年までの長期的な変化の道筋を質的に記述している。具体的には、電力、産業、行動変容の3つの分野における計12のドメイン(表2.2)に関

して、2020 - 30年、そして2030 - 50年という時間軸に沿って、関連のアクターにかかわる時系列の事実の展開を「ありそうな」(plausible)なものとして描くものである。

日立東大ラボのトランジション・シナリオの研究を担当するチームでは、こうした研究をラボが開催する産学協創フォーラムやクロズドワークショップなどで各分野の専門家と共有しながら、研究を続けている。

表 2.1 インタビューに参加したエキスパートの関係分野 (2020-23 年度)

セクター	公共	社会	民間
所属	国際エネルギー団体、国際再生可能エネルギー団体、国際連合、国家間連合体、日本政府、地方自治体(再エネ大量導入地域、CCS、臨海工業地域)	国際NGO、研究者(サステナビリティ、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、農業政策、生物多様性)、地域新電力支援団体、エネルギー・シンクタンク	鉄鋼、石油化学、ガソリン・スタンド、自動車、航空、メガバンク、地方銀行、ベンチャーキャピタル、風力発電、バイオマス発電、地域新電力、小型原子炉、国際貿易協力団体

注：日立東大ラボでは、2020年度から23年度にかけて、計44回(2020年度13回、21年度12回、22年度13回、23年度8回)のエキスパート・インタビューを行った。

1 日立東大ラボにおけるトランジション・シナリオは、Frank W. Geels による Multi-level Perspective(MLP)の理論における社会技術システムの変化の考え方から影響を受けている。Frank W. Geels. 2002. "Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case study," Research Policy 31, 1257-1274; および Frank W. Geels, et al. 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.

表 2.2 トランジション・シナリオのドメインの構成

カテゴリー	ドメイン	ドメイン数
電力	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	鉄鋼、運輸、石油化学	3
行動変容	行動変容	1

2023年度、日立東大ラボにおいては、これまでの活動に基づき、「フェーズ3」という新たな活動期間が始動した。現在、ロシアによるウクライナ侵攻の長期化、世界の多極対立の深刻化とともに、気候変動対策の不足や生物多様性を含む生態学的危機が重要な問題として認識されている。また、これらの課題は、グローバル・サウスの政治的重要性、デジタル経済の不均質な加速、そして日本の産業転換の遅れなどと結びつき、日本におけるエネルギー転換に重要な影響を与え

る条件となっている。

そこで、フェーズ3においては、トランジション・シナリオにかかわる研究チームは、そのミッションと研究課題を改めて設定し、「プラネタリー・バウンダリーズ」²の範囲内での繁栄のために、日本におけるトランジションの戦略、およびグローバルなトランジションにおける日本の役割を明らかにすることをめざすこととした(表2.3)。

表 2.3 SWG3 のフェーズ 3 におけるミッションと研究課題

ミッション	プラネタリー・バウンダリーズの範囲内での繁栄のために、日本におけるトランジションの戦略、およびグローバルなトランジションにおける日本の役割を明らかにすること。	
研究課題	I. 日本におけるトランジション	・日本の都市や地域のトランジションを加速するガバナンスのビジョン ・日本の産業の構造転換の障壁を取り除くための統合的な枠組み
	II. グローバル・トランジションの中の日本	・サプライ・セキュリティと経済安全保障 ・グローバルなジャスト・トランジションにおける日本の役割

² 人間の活動が地球環境の多様な側面に与える影響について、人間の生存の安全性を確保するために維持すべき限界値を示したもの。2023年の研究では、9つの境界のうち、生物多様性の保全や窒素やリンの循環などの6つの分野で安全な水準を超えていることが示されている。Stockholm Resilience Centre. 2023. "Planetary boundaries," <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>, Accessed on April 15, 2024.

2.3 気候、エネルギー、環境にかかわるランドスケープ

過去数年間に生じた気候、エネルギー、環境にかかわるグローバルな状況を見わたすと、日本におけるエネルギー転換は、持続可能性にかかわるさまざまな深刻な課題と密接な関係にあり、エネルギーのみに着目した捉え方では実現することができないことが明らかになってきている。特に、プラネタリー・バウンダリーズによって示されているような、地球環境にかかわる多元的な危機の回避と持続可能な開発の実現というきわめて優先度の高い条件が、日本におけるエネルギー転換のパスウェイに大きな影響を与えようとしている。

日立東大ラボでは、日本におけるカーボンニュートラル化への取り組みの現在の状況を理解するために、過去数年間の気候、エネルギー、環境にかかわるマクロ・レベルな変化について理解を試みながら、日本におけるトランジションについての示唆を得ることをめざしている。

プラネタリー・バウンダリーズの科学において示された多元的な環境危機の状況において、気候変動は最も危険度の高い課題であるが、唯一の問題ではない。実際、生物多様性の喪失は最も深刻度の高い課題の一つであり、緊急の対策が必要となっている。現在、人間の活動の影響による急速な生物種の喪失が生じており、「第6の大量絶滅」と呼ぶべき状況が生じていることが指摘されている³。自然の喪失は、経済を含む人間の活動に深刻な影響を与えることがますます明らかになっている。

こうした状況を打開するために、2022年12月に開催された生物多様性条約のCOP15では、「昆明・モントリオール生物多様性枠組」(Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework) が採択され、「自然と共生する世界」が2050

年ビジョンとして掲げられるとともに、2030年までには自然喪失を食い止め、自然回復へと反転させる緊急行動をとることなどが定められた⁴。

また、現在、2022年の国連環境計画総会における決議案に基づき、プラスチックによる深刻な汚染を規制するために新たな国際的な法的枠組みの構築のための準備が行われている⁵。

一方、世界における気候変動への対策は、ますますその緊急性が高まっている。世界気象機関(World Meteorological Organization, WMO) の「グローバル気候状況」(State of Global Climate) によると、2023年は観測史上、もっとも平均気温が高い年となり、2023年の地球の平均気温は、産業革命前に比べ、摂氏1.45度上昇した⁶。これは過去に最高気温を記録した2016年や2022年に比べても大幅な逸脱を示す気温上昇であった。また、海洋の熱、酸性化、水位の上昇、南極の海氷の融解、氷河の後退も史上最大の値を示した⁷。

気候変動にかかわるきわめて危機的な状況は、地球全体における温室効果ガスの削減が十分な速度で進んでいないことを改めて示唆している。WMOの報告書によると、地球の大気における3つの主要な温室効果ガス(二酸化炭素、メタン、一酸化窒素)の濃度は、2022年に観測史上もっとも高い水準となり、さらに各地のリアルタイム観測値は2023年に入っても増加を続けているという⁸。大気中における二酸化炭素の寿命は長く、これまでの排出量の増加にしたがって、今後も長期的な気温上昇が見込まれている。平均気温の上昇による重大なリスクはすでに顕在化し、人々の生活に深刻な被害

3 Ceballos, Gerardo, et al. 2015. "Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction," *Science Advances* 1 (5) , <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1400253>, Accessed on April 15, 2024.

4 UN Convention on Biological Diversity. "2050 Vision and 2030 Mission", <https://www.cbd.int/gbf>, accessed Mar 22, 2024.

5 Environment Assembly of the United Nations Environment Programme. 2022. "Resolution adopted by the United Nations Environment Assembly on 2 March 2022," <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/39764/END%20PLASTIC%20POLLUTION%20-%20TOWARDS%20AN%20INTERNATIONAL%20LEGALLY%20BINDING%20INSTRUMENT%20-%20English.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, Accessed on April 14, 2024.

6 World Meteorological Organization (WMO) . 2024. "Climate change indicators reached record levels in 2023: WMO," 19 March, <https://wmo.int/news/media-centre/climate-change-indicators-reached-record-levels-2023-wmo>, Accessed on March 22, 2024.

7 WMO. 2024. "Climate change indicators reached record levels in 2023: WMO."

8 WMO. 2024. "Climate change indicators reached record levels in 2023: WMO."

を与えている。2023年に発行されたIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の『第6次統合報告書』では、「気候レジリエントな開発」(Climate Resilient Development)のための選択肢は時間の経過とともに減じており、機会の窓が急速に閉じつつあると警告している⁹。

こうした気候、エネルギー、環境にかかわる問題はグローバルな影響を持つ一方、その原因や対策は、世界の経済発展や自然破壊の不均質な状況に対する認識に基づかなければならない。2023年にインドのゴアで開催された「G20エネルギー大臣会議」における文書において改めて示されたように、現在、新興国や発展途上国と呼ばれる国々では、深刻な気候災害に直面しながらも、エネルギー・アクセスの確保とクリーンなエネルギーへ転換を同時に達成する必要に迫られている¹⁰。

過去の気候変動対策においては日本を含む北側の先進国の観点とその経済的威力を背景により強い影響力を持っていたが、気候変動は経済発展の加速期を終えた国々のみで調整をすることはできず、「グローバル・サウス」と呼ばれるような、南側の国々の独自の状況や発展の方針と一貫する必要が改めて指摘されている。歴史的な排出や環境の収奪によって経済的な利益を得てきた北側の国々や企業と、気候災害や環境汚染によってその増大する影響を受け続けていく南側の国々の間に生じている不公正は、気候変動対策においては是正されるべき課題である。したがって、日本におけるエネルギー・トランジションも、アジア太平洋地域の国々における取り組みと調和したものでなければならない。

こうした世界的な気候、エネルギー、環境にかかわる状況は、持続可能性とデジタル技術という現在の世界にとってかかわる重大な課題とも深くかかわっている。

特に、過去数年間に生じているグローバルな地政学や安全保障をめぐる深刻なリスクは、地球規模の持

続可能性への努力に大きな影を落としている。2023年に発表された国連の2030年アジェンダ＝持続可能な開発目標にかかわる中間的な報告である「グローバル持続可能な開発報告書」(Global Sustainable Development Report, GSDR)では、過去数年間に生じた、パンデミック、経済混乱、気候災害、戦争などの複合的な影響により、持続可能な開発にかかわるグローバルな取り組みが深刻な影響を受けていることが指摘された¹¹。この報告書では、科学にもとづき変革を推進するための行動と投資を行い、こうした危機を打開することを提言している。日本におけるエネルギー・トランジションも、持続可能性にかかわる他の領域への取り組みへの相互関連性に着目しながら、統合的な取り組みを必要としているといえる。

現在、急速に発展を続けるデジタル技術は、こうした課題の改善にとって重要な役割を果たすことが期待されている。デジタル技術の革新はさまざまな分野でエネルギーの効率化や排出削減に寄与しうると考えられている。しかし、デジタル技術の指数関数的な拡大そのものが、地球環境に対する負荷を大幅に増大しうることにも注意しなければならない。

2023年10月に開催された「インターネット・ガバナンス・フォーラム」(Internet Governance Forum, IGF)では、デジタル技術と持続可能性や地球環境のかかわりについて、多数のセッションが設けられ、幅広い議論や提案が行われた¹²。ここでは、気候変動や生物多様性を含む持続可能性に対してデジタル技術が重要な貢献を行う可能性がある一方、インターネット、およびその関連技術であるAI、IoT、電気自動車、自動運転モビリティの拡大が、コンピューターによる計算を増大させ、エネルギー需要を拡大させることが指摘された。また、電子デバイス、データセンタや通信ネットワークに関連するエネルギー消費、また電子デバイスの製造から廃棄にいたるプロセスはエネルギー消費や炭素排出の増大につ

9 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) . "Headline Statements" in "AR6 Synthesis Report," <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/resources/spm-headline-statements/>, Accessed Mar 22, 2024.

10 G20 Research Group. 2023. "Outcome Document and Chair's Summary," G20 Energy Ministers Meetings, Goa, India, July 22. <http://www.g20.utoronto.ca/2023/230722-energy.html>, Accessed on March 22, 2024.

11 Department of Economic and Social Affairs, UN. 2023. The Global Sustainable Development Report (GSDR) 2023, <https://sdgs.un.org/gsdrgsdr2023>, Accessed on March 22, 2024. World Meteorological Organization (WMO) . 2024.

12 Internet Governance Forum (IGF) . 2023. "IGF 2023 Reports," https://www.intgovforum.org/en/igf-2023-reports?field_theme_copy_target_id%5B%5D=2843&sort_by=changed_1&sort_order=DESC&feed_me=, Accessed on March 22, 2024.

ながるおそれがある。さらに、有害な化学物質や電子廃棄物(e-waste)は特に途上国において適切な管理がなされておらず、懸念の対象となっている。

こうした状況への対策として、IGFでは、エネルギー的に効率的なアルゴリズムや生態系に配慮したハードウェアは不可欠であり、デジタル・サービスの環境影響に対して企業の透明性を高める政策や、デジタル技術によるエネルギー公正性にかかわるリスクの低減、デザイン・プロセスに生態学的持続可能性を統合する必要などが議論された。デジタル技術にかかわるイノベーションやその普及が指数関数的に増大している現在において、その環境フットプリントを的確に理解し、幅広いステークホルダーを通じてこれに対応することは、急務であるといえる。

本提言書の第3章では、こうした問題が日本の電力需給にもたらすインパクトについて、より詳細な分析を行う。

このように、今日の世界においては、気候変動とともに地球環境にかかわる問題が複合的な危機をもたらし、持続可能な世界の構築のための努力を深刻な停滞に陥らせている。AIをはじめとするデジタル技術は、エネルギー分野を含むさまざまな領域で重要な役割を果たすことが期待される一方、その急速な普及がもたらす地球環境への影響はますます懸念の対象となっている。このことは、気候変動への対策が、生物多様性の喪失などの環境課題だけでなく、地域の創生、産業の転換、ジェンダーの平等などを含む持続可能性にかかわるさまざまな目標の達成と同時に進められるべきであることを示している。

したがって、日本におけるエネルギーのトランジションは、その他の領域におけるトランジションとの有機的な関係のもとに、統合的なアプローチを通じて実現すべきものであるといえる。

2.4 | 日本における社会技術トランジションの次の課題

ここまで議論した地球規模のランドスケープのもとで、過去数年間の日本におけるトランジションの状況と、現在の喫緊の課題をどのように捉えることができるだろうか。

ここでは、日立東大ラボで実施している検討作業に基づきながら、政府の環境政策や地域の状況、日本の産業界における変化、および国内の研究機関などによる提言などについて言及しながら、公共、民間、社会セクターにおける重要な課題への手がかりを示したい。

2.4.1 統合的トランジションに向けたガバナンス、意思決定、人材

2020年の菅総理大臣の宣言以降、日本における気候変動対策は各セクターにおいて急速に進展したが、気候、エネルギー、環境における目標をそのほかの政策上の優先事項とともに実現するために、ガバナンスにかかわる新たなアプローチが求められている。

日本における気候変動対策は、きわめて広範な分野にかかわっている。政府の気候「緩和」の取り組みに関連するもののだけをとりあげても、エネルギー、産業、農業や林業、生

態系、土地利用、交通などにかかわる多様な側面における取り組みを要する。さらに気候変動への対策を通じてグリーンな経済に結びつけていく努力は、外交、資源、労働、消費、金融、地方自治、そして教育を含む、きわめて幅広い領域における持続可能な変革と密接な関係をもっている。

現在、日本が2050年までのカーボンニュートラル化という目標を実現し、これらの幅広い領域における大規模かつ長期的な取り組みを包括的に推進するためのガバナンスの機関はないといえる。しかし、既存の政策主体による個別の取り組みは、その計画や実行において必ずしも効果的にならないおそれがある。特に、各主体による独立したカーボンニュートラルやグリーンな経済への転換にとって、科学的な根拠に基づく政策立案やモニタリングを通じた評価を効果的かつ持続的に行うために、統合的なガバナンスのしくみが必要となるかもしれない。

特に、プラネタリー・バウンダリーズの研究において明らかになっているとおり、地球環境における危機は、気候変動のほかにも、生物多様性の喪失、プラスチックを含む新規化学物質や窒素・リンなどによる汚染などさまざまな側面において

生じている。たとえば、生物多様性の喪失は、気候変動に対する人間の適応能力を弱めてしまうことがわかっている¹³。

すでに論じた通り、日本における「GX」（＝「グリーン・トランスフォーメーション」）の関連政策は、自然環境全体に対する施策というよりもエネルギーや産業の脱炭素転換にかかわる関心に限定されており、現在は経済産業省によって主要な対策が行われている。他方、生物多様性にかかわる対策は伝統的に環境省が管轄している。日本においては「昆明・モントリオール生物多様性枠組」に対応する生物多様性の保全と持続可能な利用に関する基本計画である「生物多様性国家戦略2023-2030」では、2030年に「ネイチャーポジティブ」（自然再興）を目標として掲げている¹⁴。これまで、気候変動と自然環境にかかわる課題は、別個のものとして政策が作られてきたが、気候変動と生物多様性を含む、自然環境の各側面には、緊密な結びつきがあり¹⁵、各領域でシナジーとトレードオフを的確に理解しながら、脱炭素の取り組みを自然再興や循環経済への努力と統合するアプローチが重要となる。

また、日本における統合的なトランジションの具体的な取り組みにとって、地域社会はきわめて重要な単位となる。都道府県や基礎自治体という地域の単位は、それぞれが独自の自然や歴史にかかわる条件のもとで、特色ある社会・経済構造を形作り、公共、民間、社会セクターのあらゆるアクターが緊密に結びつきながら相互依存の活動を行う領域である。一方、現在の日本では、多くの地域が、人口や既存の産業の衰退、これに伴う財政や住民の福祉にかかわる課題に直面している。したがって、国家レベルにおけるエネルギー・トランジションの実現は、地域レベルにおける脱炭素化とグリーンな経済を通じた持続的な発展と住民のウェルビーイングの

実現と切り離すことができない。

さまざまな規模で形成されている地域が、独自の条件のもとで長期的かつ、多面的なトランジションを実現するために、地方自治体をはじめ、多様なアクターへの支援が必要となる。日本においては、これまで「環境モデル都市」¹⁶、「環境未来都市」、「SDGs 未来都市」¹⁷、「脱炭素先行地域」、「地方創生SDGs 課題解決モデル都市」¹⁸など、さまざまな制度のもとで、地方自治体に対する政府の支援が行われている。たとえば、脱炭素先行地域は、日本の2030年度の炭素削減目標と整合する取り組みを行う100か所以上の地域を支援し、これを通じて他の地域にその取り組みや影響を波及させる「脱炭素ドミノ」を実現することをめざすものだという¹⁹。これらの政府の取り組みは現時点で強調点が異なるものだが、脱炭素化への取り組みを、自然環境にかかわる多様な課題領域や、関連する持続可能性課題などとともに統合的に捉えた取り組みを支援することによって、より効果的に地域の発展へとつなげることができる可能性がある。

日立東大ラボでは、これまでに再生可能エネルギーの大規模な導入、エネルギーの地産地消、大規模な産業クラスターの転換、森林を共有財産とするまちづくりなどに注力する複数の地域についての検討を行ってきた。

これまでの調査では、エネルギー転換を基軸として地域創生を行うためのガバナンスや意思決定のあり方について、意見が寄せられている。第一に、自治体は、地域の状況に合わせて脱炭素やグリーン経済への道筋を具体的に立案し、長期的なスパンで実現をすることを求められており、独自の自然環境や社会的コンテキストに深くコミットするとともに、外部のアクター、資源、知識などを結びつけて、新たな取り組みを実

13 Stockholm Resilience Centre. 2023. "Planetary boundaries," <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>, Accessed on April 15, 2024.

14 環境省. 2023. 『生物多様性国家戦略 2023 - 2030』の閣議決定について 3月31日, https://www.env.go.jp/press/press_01379.html, 2024年4月15日アクセス.

15 Pörtner, H. O., et al. 2021. Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change. IPBES secretariat, Bonn.

16 内閣府によると、「環境未来都市」は「環境や高齢化対応など人類共通の課題にチャレンジする都市」、また「環境モデル都市」は、「今後我が国が目指すべき低炭素社会の姿を具体的にわかりやすく示すために、低炭素社会の実現に向け高い目標を掲げて先駆的な取組にチャレンジしている都市」であり、それぞれ政府がこれを選定し、助成を行っている。内閣府地方創生推進事務局. 2020. 『環境未来都市』構想とは, <https://future-city.go.jp/about/>, 2024年4月15日アクセス.

17 内閣府によると「SDGs 未来都市」は「自治体によるSDGsの達成に向けた優れた取組」を行う都市で、政府がこれを選定し、助成を行っている。内閣府地方創生推進室. 2020. 『SDGs 未来都市』等の選定について, <https://www.chisou.go.jp/tiiki/kankyo/teian/pdf/result01.pdf>, 2024年4月15日アクセス.

18 内閣府によると、「地方創生SDGs 課題解決モデル都市」は「人材や専門性が限られている小規模な自治体などに、地方創生の経験や知見のある人材活用を支援することにより、小規模な自治体に共通する喫緊かつ深刻な地域課題に対する先進的・試行的な解決策を講じ、その計画から結果まで公表することで、SDGsの理念に沿った地域活性化や持続可能なまちづくりを促進する」ことを目的としたもので、政府がこれを選定し、助成を行っている。内閣府地方創生推進室. 2024. 「地方創生SDGs 課題解決モデル都市募集要領」 https://www.chisou.go.jp/tiiki/kankyo/2024sesaku/11_bosyuuyouryou.pdf, 2024年4月12日アクセス.

19 環境省大臣官房地域政策課. 「脱炭素先行地域」, <https://policies.env.go.jp/policy/roadmap/preceding-region/#about>, 2024年4月12日アクセス.

現できる人材を確保することが重要であることが語られた。第二に、異なる条件やケイパビリティのもとで発展した各地域の取り組みについて、科学的な手法でこれを分析し、その実践的な知見を相互に共有することの有用性も言及された。第三に、自治体や地域のアクターからは、自治体の独自の取り組みと政府の意思決定の間に生じうる齟齬を克服するために、中央政府と自治体の間でともに脱炭素化や経済のグリーン化を達成するためのより緊密な連携を行うことの必要性が示唆された。さらに第四に、中央省庁において、旧来のエネルギーシステムの関係者のみで政策立案を行うのではなく、これまでエネルギーの議論において周縁に置かれていた多様なアクターとともに意思決定を行うことを求める意見も寄せられた。

政府は、地方自治体が、地域のコンテキストに根差しつつも、専門的能力や知見をもってトランジションを推進することのできる人材を招き入れることのできるしくみを支援するとともに、政策基金の分配だけではなく、統合的なトランジションにかかわる新たなプロジェクトの立案や遂行能力を増強する取り組みを行うことが期待されている。また、気候、環境、エネルギーにかかわる領域において、統合的な観点から、幅広い主体の参画を通じた意思決定のあり方をめざすことが求められている。そして地域の状況と政策に対する科学的な分析や評価を通じて、効果的な取り組みを支えることも重要である。

2.4.2 日本の産業界における進捗と課題

すでに述べたように、2020年に菅総理大臣によって発表された2050年のカーボンニュートラル宣言以降、日本の産業界では急速に脱炭素にかかわる対策が推進されている。日本におけるカーボンニュートラル化の実現にとって、エネルギー部門の脱炭素化と、脱削減困難部門の脱炭素化は、気候変動に対する緩和だけでなく、将来のグリーン経済への転換のためにも大きな重要性をもっている。

各業界団体は、それぞれがビジョンやシナリオを策定し、温室効果ガスの排出の削減や革新的な技術の開発を進めてきた。日本経済団体連合会は、2021年に「経団連カーボンニュートラル行動計画」を定め、「国内事業活動からの排出抑制」「主体間連携の強化」「国際貢献の推進」「革新的技術の開発」を推進してきた。

経団連は、行動計画にもとづき各業界団体の進捗の報告を行っている(表2.4)。2023年11月に示された報告では、参加業種全体の約7割にあたる42の業種でカーボンニュートラルのためのビジョンを策定していることが示された²⁰。これは全業種の排出量の97%に当たるといふ。これによれば、2022年度の全部門合計のCO₂排出量は、43億281万トンで、前年度に比べ3.5%減、2013年度に比べ20.1%減であった。

表 2.4 2050年のカーボンニュートラルリティ実現に向けた各業界のビジョン

部門	業界	ビジョン(基本方針等)
エネルギー 転換部門	電力	S+3Eの同時達成を果たすエネルギーミックスを追求するとともに、確立した脱炭素電源(原子力や再生可能エネルギー)の最大限活用やヒートポンプ活用等、「電気の高・脱炭素化」と「電化の促進」を両輪とした取り組みを継続しつつ、電力供給サービスのさらなる高度化に向けた課題解決を果たすための「イノベーション」を通じた革新的技術(小型モジュール炉、次世代太陽光、蓄電池、水素・アンモニア発電、CCUS/カーボンリサイクル等)の実用化に向けて、官民一体となって取り組む。
	石油	サプライチェーンや製品の脱炭素化の取り組みを加速化し、既存インフラが活用できる革新的な脱炭素技術(①CO ₂ フリー水素、②合成燃料、③CCS・CCU(カーボンリサイクル)など)の研究開発と社会実装にも積極的に取り組むことで、事業活動に伴うCO ₂ 排出(Scope 1+2)の実質ゼロ(CN)を目指すとともに、供給する製品に伴うCO ₂ 排出(Scope 3)の実質ゼロ(CN)にもチャレンジすることにより、社会全体のCN実現に貢献する。
	ガス	ガスのCN化を目指すとの方針の下、徹底した天然ガスシフト・天然ガスの高度利用、ガス自体の脱炭素化(e-methaneや水素利用等)、CCS/CCUに関する技術開発等に取り組む。

20 日本経済団体連合会、2024、「経団連カーボンニュートラル行動計画:2050年カーボンニュートラルに向けたビジョンと2023年度フォローアップ結果(2022年度実績)【確定版】」のポイント」、https://www.keidanren.or.jp/policy/2023/072_gaiyo.pdf、2024年4月15日アクセス。

産業部門	鉄鋼	カーボンニュートラルの実現に向けて、「COURSE50やフェロコックス等を利用した高炉のCO ₂ 抜本的削減+CCUS」、超革新的技術である「水素還元製鉄」といった超革新的技術開発への挑戦に加え、スクラップ利用拡大などあらゆる手段を組合せ、複線的に取り組む。
	化学	「化学」の潜在力を顕在化させることで、地球規模の課題を解決し持続可能な社会の成長に貢献するイノベーションの創出を推進・加速するとの方針の下、原料の炭素循環(CO ₂ の原料化、廃棄プラスチック利用等)、エネルギー利用極小化へのプロセス、構造の転換(膜分離プロセス等)などに取り組む。
	セメント	クリンカ製造過程における排出量削減に向けたクリンカ/セメント比の低減、バイオマスを含む代替廃棄物の利用拡大や将来的な水素・アンモニア混焼などによる使用エネルギーの低炭素化、及び効率的にCO ₂ 回収する製造プロセスとそのCO ₂ 利用としての鉱物化等のCCUS技術開発に取り組む。
	製紙	生産活動における省エネ・燃料転換を推進(省エネ設備・技術の積極導入、再生可能エネルギー利用拡大、革新的技術(高効率なパルプ製造方法の開発等)するとともに、独自性のある取組みとして、木質バイオマスから得られる環境対応素材(セルロースナノファイバー等)の開発・利用によるライフサイクルでのCO ₂ 排出量削減、植林によるCO ₂ 吸収源としての貢献拡大を進める。
	電気・電子	「技術開発」「共創/協創」「レジリエンス」の視点から、各社の多様な事業分野を通じて気候変動・エネルギー制約にかかる社会課題の解決に寄与するとの方針の下、次世代の省エネ・脱炭素化技術の革新(スマートグリッド、水電解水素製造、パワー半導体、急速充電・ワイヤレス充電等)、高度情報利活用ソリューション(自動運転支援システム、スマートファクトリー、高精度気象観測等)の社会への実装に取り組む。
運輸部門 関連	自動車	電動車(HV、PHV、EV、FCV等)の普及と水素社会の実現(FCモビリティの拡大等)等に取り組む。
	海運	カーボンリサイクルメタン、アンモニア、水素など新燃料によるゼロエミッション船への転換に取り組む。
	鉄道	エネルギーを「つくる」から「使う」までのすべてのフェーズでCO ₂ 排出量実質ゼロにするべく、再生可能エネルギー電源の開発推進と導入の加速、蓄電池車両の展開、燃料電池車両の開発に取り組む。
	不動産、ビル	2050年CNを実現した社会では「ZEB、ZEHをはじめとした省エネ・再エネに配慮した建物」、「環境負荷が低い建材を使用した建物」や、「再エネ設備、蓄電池、エネルギー融通等を組合せ、地域全体でCO ₂ 削減をできるまち」が広く普及していると想定し、建物単体ではZEB・ZEH化、HEMS・BEMSの活用、まち全体ではZET化、CEMSの活用等の取組みにより貢献する。

出典：日本経済団体連合会、2023.「経団連カーボンニュートラル行動計画：2050年カーボンニュートラルに向けたビジョンと2023年度フォローアップ結果（2022年度実績）」、https://www.keidanren.or.jp/policy/2023/072_gaiyo.pdf, 2024年3月22日アクセス。

産業部門では前年度に比べ6.3%の削減、2013年度に比べ20.6%となったが、ほかの業界では前年度に比べて増加がみられた。これらは経済活動量の変化、エネルギーの低炭素化、および省エネ努力によるものだという。

経団連に所属する主な業界団体は、カーボンニュートラル化にむけた多角的な取り組みについて報告している。炭素集約的な特徴をもつ多くの業種において、再生可能エネルギーの導入を推進し、製造や燃料使用時に発生する排熱や副生ガスを回収・利用することでCO₂排出量の削減を図っている。また、調達、製品・サービスの提供、仕様、廃棄にかかわる事業のバリューチェーンにおける排出量の削減を行うとともに、排出削減に貢献する製品やサービスについてその削減量を定量化しながら積極的に情報発信を行っているという。そして、多くの業種において、技術の海外移転と製品・サービスの普及を通じて世界の排出削減に貢献したほか、国際貢献を通じた海外での排出削減にも取り組んでいる²¹。

さらに、各業界において、大幅な炭素排出量の削減を行うために、イノベーションが重要と捉えられており、民間だけでは実現が難しい中長期的な研究開発においては、「政府と連携しながら継続的に取り組む」としている。

日立東大ラボでレビューを行いたいいくつかの主要な業界団体²²では、カーボンニュートラルの実現のために、政府の支援が必要な項目として、制度や生産拠点などにかかわる環境整備、財政、税制、価格補填などの経済的制度を通じた支援、取り組みにかかわる費用の社会全体での負担、さらに新たな金融手法や、グランド・デザインの設定などが挙げられた。

日本政府は2023年2月の「GX実現に向けた基本方針」の閣議決定、および「GX推進法」や「GX脱炭素電源法」の成立をはじめ、「グリーン・トランスフォーメーション」にかかわる独自の政策を展開している。これは「化石エネルギー中心の

産業構造・社会構造をクリーンエネルギー中心へ転換」をめざすもので、「戦後における産業・エネルギー政策の大転換」とされる²³。ここでは、2022年のロシアのウクライナ侵略によって深刻化したエネルギー危機への対応の必要性を背景として「エネルギー安定供給の確保を大前提としたGXに向けた脱炭素の取組」「『成長志向型カーボンプライシング構想』の実現・実行」「国際展開戦略」「社会全体のGXの推進」「GXを実現する新たな政策イニシアティブの実行状況の進捗評価」などを掲げ、具体的な政策の推進を行っている。「GX実現に向けた基本方針」では、今後10年間で20兆円規模の先行投資を支援し、新たな金融手法の活用を通じて、今後10年間で150兆円以上のGX投資を官民協調で実現するとしている²⁴。

現時点において、政府のGX関連政策は計画段階にあり、それが各業界に与える影響を的確に評価することは難しい。しかし、エキスパート・インタビューにおいては、先行する欧州連合(EU)の「グリーン・ディール」やアメリカ合衆国における「インフラ抑制法」(Inflation Reduction Act)と比較しながら、日本の将来の産業競争力をみすえた選択的なイノベーション支援が必要であることや、その短期的・中長期的タイムラインにもとづく取り組みの加速の必要性などが議論された。

特に、このような各業界における取り組みやGX政策については、おおむね、次のような点において、継続的な分析が必要であるとの意見が寄せられた。すなわち、第一に、幅広い分野において進められているGX関連施策や投資が日本におけるグリーンな経済における繁栄への道筋につながっているかどうか。第二に、そのために必要な産業構造の転換が政府や企業の間で的確に推進されているかどうか。第三に、地域における自然再生、労働の高度化を含む、GX関連政策の効果について科学的な分析に基づいて評価や検証に基づいているか、などである。

21 日本経済団体連合会. 2024.「経団連カーボンニュートラル行動計画」

22 日立東大ラボでは、下記の業界団体の報告について、簡易的な分析を行った。日本経済団体連合会.「2050年カーボンニュートラルに向けたビジョンと2023年度フォローアップ結果」2023年11月;日本鉄鋼連盟「カーボンニュートラル行動計画報告」2023年2月;日本自動車工業会.「2050年カーボンニュートラルシナリオ」2022年9月;セメント協会.「カーボンニュートラルを目指すセメント業界の長期ビジョン」2022年3月改訂;日本化学工業会.「カーボンニュートラルへの化学産業としてのスタンス」2021年5月;日本ガス協会.「ボンニュートラルチャレンジ2050」2021年;石油連盟.「石油業界のカーボンニュートラルに向けたビジョン」2021年;電気事業連合会.「2050年カーボンニュートラルに向けた電気事業者の取り組みについて」2022年2月.

23 経済産業省. 2022.「GX実現に向けた基本方針: 今後10年を見据えたロードマップ」, https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002_1.pdf, 2024年4月11日アクセス.

24 経済産業省製造産業局. 2023.「GX実現に向けた分野別投資戦略について」, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/pdf/015_02_00.pdf, 2024年4月15日アクセス.

実際、国連の責任投資原則(Principles for Responsible Investment, PRI)は、日本政府が発表した「GX基本方針」に対してパリ協定の履行にかかわる整合性という点から懸念を表明している²⁵。PRIはGX基本方針には、「パリ協定の目標を達成し、相互に関連するエネルギーと気候の危機に対処するために必要な経済移行を、GX基本方針と関連政策がどのように可能にするのかを明確にするための十分な情報が含まれていない」とし、「2035年までに電力部門を脱炭素化する方法についての戦略も含まれておらず、提案されるエネルギーミックスに占める化石燃料の割合は依然として大きい」と指摘している。そして、2025年に予定されている時期NDCの提出や、2024年の第7次エネルギー基本計画の発行に向けて「2050年までのネットゼロ目標との整合性を確保するため、GX基本方針を支える現在の前提」について、日本政府がより高い透明性を確保し、関係省庁間で調整するよう提言している。

日本においては、パリ条約と整合する脱炭素化のビジョンとロードマップを普及させながら、次世代の産業構造の構築に資するイノベーションに投資を行っていくことが求められている。

2.4.3 国内シンクタンクが示すシナリオとビジョン

日立東大ラボでは、2020年の菅総理の宣言以降、日本国内の研究機関等が発表した主要な気候、エネルギー、環境のあり方に関するシナリオや提言等についても、調査が続けている。これらの文書についての研究は今後さらに詳細に進める必要があるが、さまざまな主体によって提示されている議論について、そのコンテキストに照らしながら比較的な分析を進めることで、現在の日本において描きうる経路のさまざまな選択肢を批判的に把握することが可能になるかもしれない。

日本国内の研究機関などによって2020年以降に発行された主要なシナリオや提言は、気候変動対策として国全体の産業の脱炭素化の必要性について、おおむね合意している。ただし、各団体が発信するシナリオや提言はそれぞれが異なる歴史的背景、社会的属性、利害関心を反映する傾向にある(表2.5)。たとえば、1960年代に設立された日本エネルギー経済研究所は、石油、ガス、電力にかかわる計量的な分析を

表 2.5 日本におけるエネルギートランジションにかかわる主要な提言と概要

団体	主な文書	主な論点
日本エネルギー経済研究所 (IEEJ)	IEEJ Outlook 2024 (2023年10月)	現状の延長シナリオでは2050年の世界のCN達成は困難。天然ガス活用など経済合理的なエネルギーミックスの追求に言及。
自然エネルギー財団	2035年エネルギーミックスへの提言(第1版) (2023年4月)	2035年に自然エネルギー電力目標を80%以上にすることを提案。風力発電の認可手続きの迅速化、太陽光発電の設置義務化を提言。
地球環境産業技術研究機構 (RITE)	2050年カーボンニュートラルのシナリオ分析 (2022年1月)	2050年CNは大きな技術進展を見込んでも高い排出削減費用が必要。柔軟性を有したCN戦略を持つことが重要。
日本経済新聞社	NIKKEI脱炭素プロジェクトからの宣言(2021年~)	社会のサステナビリティを毀損することなく、また、産業や社会の転換の中で取り残される人や地域が生まれない公正な移行をめざす。
地球環境戦略研究機関 (IGES)	ネット・ゼロという世界 2050年日本(試案) (2020年6月)	社会変革がほとんど起きないロックインシナリオによるCN達成ではなく、社会制度・インフラなどを変革していくトランジションを選択すべき。

25 責任投資原則。2023.「日本におけるネットゼロの実現：政策の必要性和投資家の優先課題」, 2024年4月25日アクセス。

重視しており、化石エネルギーの動向の経済分析にもとづき、カーボンニュートラルの達成のために化石燃料の安定供給やネガティブ・エミッション技術の重要性を示す論考を多く発表している²⁶。一方、2011年の東日本大震災と福島第一原発の事故を機に、通信・デジタル分野の大手企業によって設立された自然エネルギー財団は、2035年に再生可能エネルギーの比率を80%以上にするための方策を提言している²⁷。

これらの提言とは異なり、エネルギーに対する関心に基づきつつも、より広い観点にもとづいてこれを議論する取り組みも行われている。日本経済新聞が主催する「NIKKEI脱炭素プロジェクト」では、委員会に気候政策の専門家、国連の金融関係の顧問などに加えて、ESG金融関係の関係者が多く含まれるほか、電力、火力発電、不動産、海運、飲料、コンサルティングなど幅広い業種の国内外の大手企業が参画しており、社会の持続可能性を重視し、産業や社会な転換において人々や地域が取り残されない「公正な移行」を進めることを宣言している²⁸。さらに、国際的な持続可能性分野の研究者が多く参画する地球環境戦略機関(IGES)による提言では、エネルギーのみならず、労働、生産と消費のあり方なども含む変革に関心を寄せており、多様な分野における多元的な変化によって脱炭素を実現する「トランジション・シナリオ」と、構造転換が伴わず社会経済の停滞に陥る「ロックイン・シナリオ」を対比させながら、持続可能な変化の道筋について記述を試みている²⁹。

このように、日本におけるエネルギーやそれを取り巻く社会全体のトランジションについては、研究機関やシンクタン

クなどによる研究や提言が行われているが、各組織が中立性を重視し、科学的な手法に基づいた研究を行っている場合にも、その活動方針、共有された概念、強調点は、研究やその資金的基盤に対して重要な影響力を用いる社会的集団の見解と結びついている。エネルギーにかかわるシステムの転換においては、共通言語や概念自体の刷新が伴うことが予想できる。

特に、現在、日本における主流のエネルギー・シンクタンクには、政府や大手エネルギー企業との関係性にもとづき日本のエネルギーにかかわる公的議論に強い影響力を持つ一方、デジタル分野、サステナビリティ科学、地域創生の実践者等の参画が乏しく、経済成長期の日本におけるエネルギー研究の枠組みを大きく踏襲している傾向がある。

日立東大ラボでは、このような知識の社会的構築のあり方について認識をしたうえで、公共、民間、社会セクターの幅広いアクターとのインタビューや対話を通じて、エネルギー転換によって影響を受けうる幅広い主体の声を包摂しながら、エネルギーにおける変化を基軸とする統合的なトランジションへの道筋を描くことをめざすものである。こうしたアプローチは、日本における従来のエネルギーの議論において周縁に置かれていた意思決定、産業転換、国際協調などを含む側面に光を当てることも意味する。また、特定の課題について相反する観点などについても比較的な分析を行いながら、幅広い合意形成に資する参考資料を提供することを望むものである³⁰。こうした取り組みを通じて、現在の複合的な危機の現状に根差しながら、エネルギー転換を通じて、将来におけるグリーンな繁栄を実現することに貢献することをめざしている。

26 日本エネルギー経済研究所. 2024.「事業概要」, <https://eneken.ieej.or.jp/about/business.html>, 2024年4月15日アクセス.

27 自然エネルギー財団. 2023.『2035年エネルギーミックスへの提言(第1版):自然エネルギーによる電力脱炭素化を目指して』, https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_2035_Study_JP.pdf, 2024年4月15日アクセス.

28 NIKKEI脱炭素プロジェクト. 2022.「NIKKEI脱炭素プロジェクトからの宣言」, https://events.nikkei.co.jp/sengen_march2022/, 2024年4月15日アクセス.

29 地球環境戦略研究機関. 2020.『ネット・ゼロという世界:2050年日本(試案)』, <https://www.iges.or.jp/pub/net-zero-2050/ja>, 2024年4月15日アクセス.

30 とりわけ、日本においては、伝統的にエネルギーにかかわるトランジションの議論をより広い文脈のもとに位置づける、全体論的な視点にもとづく課題の把握や変化の道筋の分析により一層の努力がはらわれる必要がある。たとえば、プラネタリー・バウンダリーズに示される包括的な地球環境にかかわる危機、SDGsに示されているようなジェンダーにかかわる偏りの是正、持続可能な生産や消費のあり方の普及にかかわる観点などがそれにあたる。

2.5 アジア太平洋地域のトランジションと日本

すでに論じたように、日本における統合的なトランジションをめざすうえで、エネルギーを中心とする脱炭素化は、日本国内における取り組みのみでこれを達成することは困難であり、日本以外の国々や国境を越えた主体との協力が不可欠である。とりわけ、日本もその一部であり、日本と隣接する重要な経済共同体が存在するアジア太平洋地域において、日本は緊密な連携を通じて自国が必要とする資源を確保するとともに、この地域におけるトランジションのためのさまざまな必要性に対して積極的に役割を果たし、貢献を行っていくことが求められる。

日本における統合的なトランジションが日本国内の資源のみによって実現することが難しいことは、広く理解されている通りである。とりわけ、今後、大きな需要の増大が見込まれる電気自動車の生産には、旧来の自動車では必要とされなかった多量のグラファイト、リチウム、ニッケル、コバルトなどの重要鉱物が必要であり³¹、こうした原料を大量かつ安定的に確保しなければならない。また、日本のカーボンニュートラル化のために大量導入の必要性が指摘されるCCSについても、現時点において、日本の国境の内側に地理的な貯留適地を多く確保することは困難であると考えられている。

一方、アジア太平洋地域においては、独自の必要性が生じている。アジア太平洋経済協力(Asia-Pacific Economic

Cooperation, APEC) のエネルギー調査部門であるアジア太平洋エネルギー研究センター (Asia-Pacific Energy Research Centre, APERC) の報告書によると、将来への人口や経済活動の拡大が見込まれるアジア太平洋地域では、GDPが現在から2050年にかけて2倍以上となることが予想されており、これとともに発電量は2018年から2050年にかけて45-60%の増大が見込まれる³²。再生可能エネルギーは2050年時点で太陽光や風力のシェアが27-45%であるが、再生可能エネルギーのみによるエネルギー転換は困難と考えられている。カーボンニュートラル達成シナリオにおいては、石炭火力は大きく減少するものの、ガス火力発電は継続することが予想されており、CCSによるCO₂貯留の導入が必要と予想されている。国際エネルギー機関(International Energy Agency, IEA) の調査によれば、特に、東南アジア地域においては、エネルギー需要の変化が大きく、2018年から2050年にかけて、発電量が4-5倍になることが予測されている³³。IEAの「持続可能な開発シナリオ」では、2020年から2050年にかけて、この地域で大きな再生可能エネルギー発電量の増大がみられることが予測されている。この地域においては、急激に増大するエネルギー需要と、再生可能エネルギーへの転換を同時に達成するということが求められている。

31 International Energy Agency (IEA) . 2021. "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions". <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/executive-summary>

32 Asia Pacific Energy Research Centre (APERC) . 2022. *APEC Energy Demand & Supply Outlook 8th Edition 2022, Volume 1*, https://www.apec.org/docs/default-source/publications/2022/9/apec-energy-demand-and-supply-outlook-8th-edition---volume-i/222_ewg_apec-energy-demand-and-supply-outlook_vol-1.pdf, Accessed on April 15, 2024.

33 International Energy Agency (IEA) , *Decarbonisation Pathways for Southeast Asia*, 41.

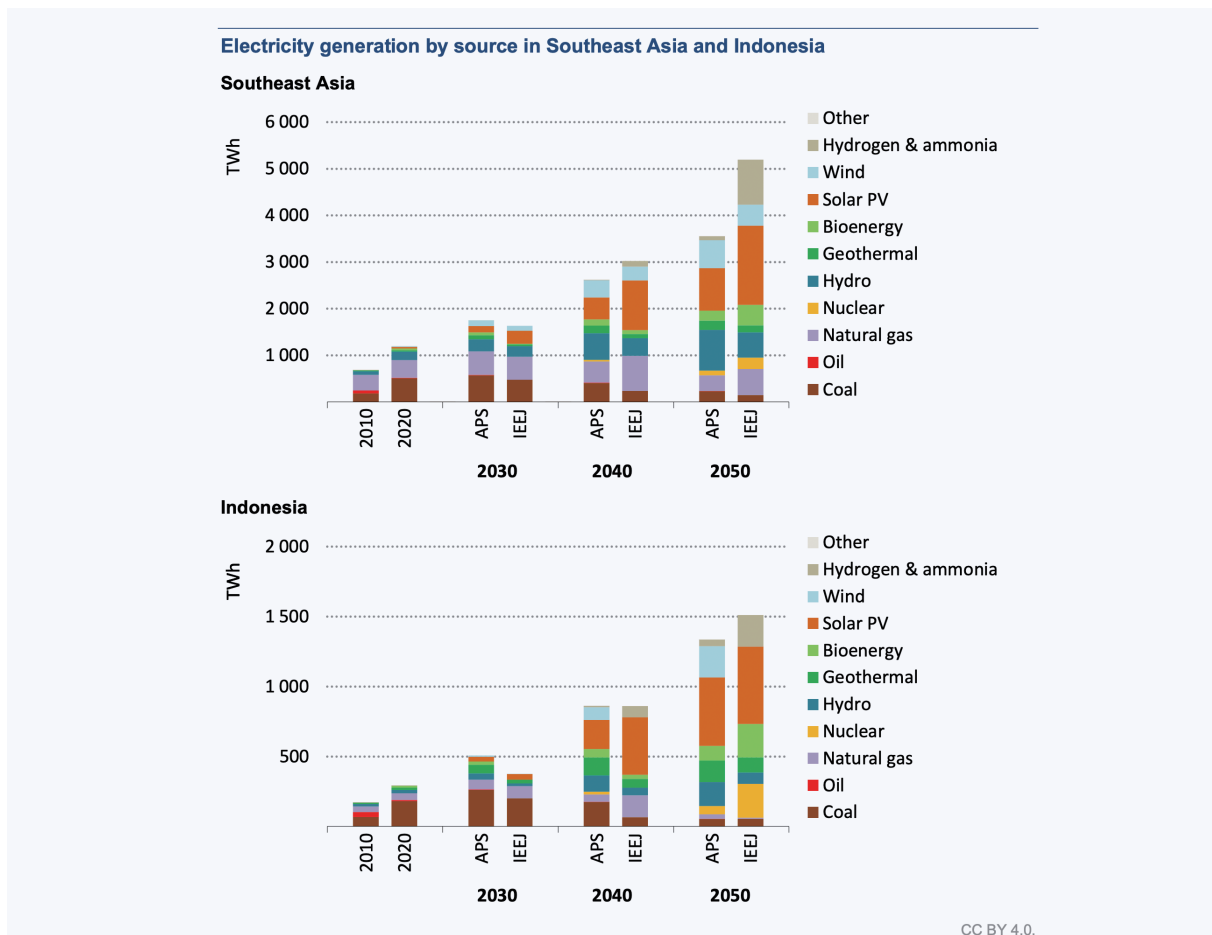


図 2.2 東南アジアとインドネシアにおける電源別発電量の見込み（2010-2050, IEA によるシナリオ（IEEJ））

出典：International Energy Agency (IEA) . 2023. Decarbonisation Pathways for Southeast Asia, 41, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d0d7d7d-0ace-4de4-94cf-7c51a0a1517a/DecarbonisationpathwaysforSoutheastAsia.pdf>, Accessed on April 15, 2024.

日本政府は、このような日本、およびアジア太平洋地域におけるニーズを相互の連携を通じて満たすために、いくつかの取り組みを開始している。その一つが「アジアゼロエミッション共同体」(Asia Zero Emission Community, AZEC) である。2023年3月の共同声明では、日本、インドネシア、オーストラリアを含む11か国が、省エネルギー、再生可能エネルギー、水素、アンモニア、エネルギー貯蔵、バイオエネルギー、炭素回収・利用貯蔵、「脱炭素インフラへの投資」と「クリーンエネルギーサプライチェーン」に対する資金支援、「脱炭素技

術の標準の開発、調和および相互運用性の確保」、そして「人材の強化」などにかかわる情報を共有し、議論し、行動するとしている³⁴。同共同体の英語のウェブサイトによれば、これは「脱炭素化を行う日本と類似した課題を抱えながら、カーボンニュートラルリティにむけて積極的に取り組むアジア諸国とともに各国の状況に応じたエネルギー転換を目的とする」もので、「日本の資源や経験を最大限に活用し、パートナー国への金融、技術、人的資源、および政策調整の支援の供与」を行うとしている³⁵。

34 経済産業省 . 2023. 「アジア・ゼロエミッション共同体 共同声明（仮訳）」, <https://www.meti.go.jp/press/2022/03/20230306005/20230306005-23.pdf>, 2024 年 4 月 15 日アクセス。

35 Asia Zero Emission Community. 2024. "AZEC, Asia Zero Emission Community," <https://asiazeroemission.com/about-azec>, Accessed on April 15.



図 2.3 AZEC 首脳会合（2023 年 12 月 18 日、総理大臣官邸）

出典：首相官邸 . 2023. 「AZEC 首脳会合」, https://www.kantei.go.jp/jp/101_kishida/actions/202312/18azec.html, 2024 年 4 月 15 日アクセス .

2023 年 12 月には、東京で AZEC 首脳会合が行われた共同声明が出された。これによれば、AZEC のパートナー国は、「産業構造、社会的背景、地理的条件、発展の段階と速度」など各国の状況が異なり、「カーボンニュートラル/ネット・ゼロ排出への多様かつ現実的な道筋があること及び、それらの道筋を設計・実施するために多様なエネルギー源と技術の活用が重要であるとの理解を共有」と語っている。AZEC ではパートナー国間で、脱炭素化にかかわる情報やベスト・プラクティスの共有、政策協調や人材の交流や開発を呼びかけるとともに、政策、基準、枠組みの相互的な学習や協調を行うとともに、ビジョンやロードマップ、あるいは政策策定の支援のプラットフォームとして、「アジア・ゼロエミッションセンター」を設立するよう、「東アジア・アセアン経済研究センター」(Economic Research institute for ASESAN and East Asia, ARIA) に招請している。

日立東大ラボが開催したエキスパート・インタビュー（2023 年）やオープン・フォーラム（2024 年 2 月）では、日本政府が主導する AZEC の取り組みの意義や、ASEAN からの好意的な反応に対して肯定的な評価がなされた。一方で、すでに

アジア太平洋地域では、中国、インド、中東を含む活発な議論や脱炭素化にかかわる取り組みが作られつつあり、日本は自国中心の手法ではなく、これらの枠組みに適切に参画しながら、それと調和する形でプロジェクトを推進していくことが求められることが議論された。

特に、アジア太平洋地域におけるエネルギー需要の増大の大きな一角を占めるインドの IEA 加入や、ASEAN 地域における重要国であるインドネシアによる OECD (Organization for Economic Co-operation and Development, 経済協力開発機構) への加盟申請という出来事は、これらの地域のアジェンダが国際的な影響力を増大させることを意味している。また、ウクライナ戦争の長期化、北東アジアや中東地域における安全保障の不安、2024 年の欧州議会選挙やアメリカ大統領選挙の結果がこれらの地域の取り組みや日本の参画に影響を及ぼす可能性がある。

日立東大ラボでは、引き続き、アジア太平洋地域を中心とする国際的な連携において、日本がこれらの地域におけるエネルギーを中心とする統合的なトランジションのために果たすことができる役割を研究していく予定である。

2.6 | 第2章まとめ

ここまで、過去数年間における気候、エネルギー、環境にかかわるグローバルな条件の変化を簡潔に振り返りつつ、2020年以降の日本における公共、民間、社会における変化に着目しながら、日本における統合的なトランジションの次の課題についての示唆を得ることを試みた。

- 気候変動、自然喪失、戦争などの複合危機によって、地球環境や持続可能性はますます緊迫したリスクにさらされている。エネルギー転換は、他のアジェンダとの緊密な結びつきの中で達成しなければならない。
- 日本におけるエネルギー転換は、地域創生を含む統合的なトランジションに位置づけることが求められる。そのためには、中央省庁と地方自治体の間のより緊密な連携によって地域におけるグリーンな経済への転換を長期的・多元的な観点から支援するとともに、旧来の意思決定のあり方を乗り越え、統合的なガバナンスを実現するしくみや人材の育成することが必要となる。
- また、日本では各業界や企業において脱炭素化が進んできたが、既存産業のロックインを回避し、デジタル分野を含めた次世代の産業構造への転換を実現するイノベーションへの戦略的な投資が求められている。
- そうした中で、日本は今後、大幅なエネルギー需要の増大と再生可能エネルギーの大規模な導入が進むアジア太平洋地域の国々と連携しながら、独自の役割を果たしていくことが期待されている。

日立東大ラボでは、各セクターにおける多様なアクターの視点を包摂しながら、エネルギーを中心とする統合的なトランジションとグリーンな繁栄のあり方を多角的に捉えていくことをめざしていく。

第3章 社会および産業変革を取り入れたエネルギーシステムのあるべき姿と成長戦略

本章では、第5版報告後の国際情勢の変化やデジタル技術による産業の成長シナリオをふまえ、カーボンニュートラル(以下、CN)に向けたエネルギーシナリオの見直し、新たな課題抽出と対策について示す。

下、CN)に向けたエネルギーシナリオの見直し、新たな課題抽出と対策について示す。

3.1 激変する国際情勢を踏まえたエネルギーシナリオの見直し

本節では、産業の成長に期待されるAI・データセンタのエネルギー供給ニーズの増加に対し、2050年のCNへの移行との両立は可能か、またエネルギーバランスとともに考えるべき課題と対策はなにか、について示す。

2.3節でも述べたように、近年AI×データの産業分野への活用が急速に拡大しており、業務支援、製品開発支援、作業効率化、創作活動で活用されている。図3.1(a)に示すように、生成AIの世界市場は各適用分野において急速に増大する見通しが示されており、また図3.1(b)に示すように扱われるデータ量もまた増大することが予想される。

このような情報化社会の進展、AI等による情報処理量の拡大にともなって、データセンタ等の電力消費も拡大する。具体的には、現在の計算負荷の増大傾向が将来にわたって継続し、現在入手可能な最新機器を用いたと仮定したときの(将来の技術進歩は織り込まない)消費電力は、2030年に国内で最大90TWhに達する見込みであることが示されている³⁶。さらに技術進展を考慮しても、2050年には260TWh(2020年の約26%)に達する予測がなされている³⁷。なお、データセンタの電力は、50%がサーバ、25~30%が電源と冷却系、10%程度がストレージで消費される。

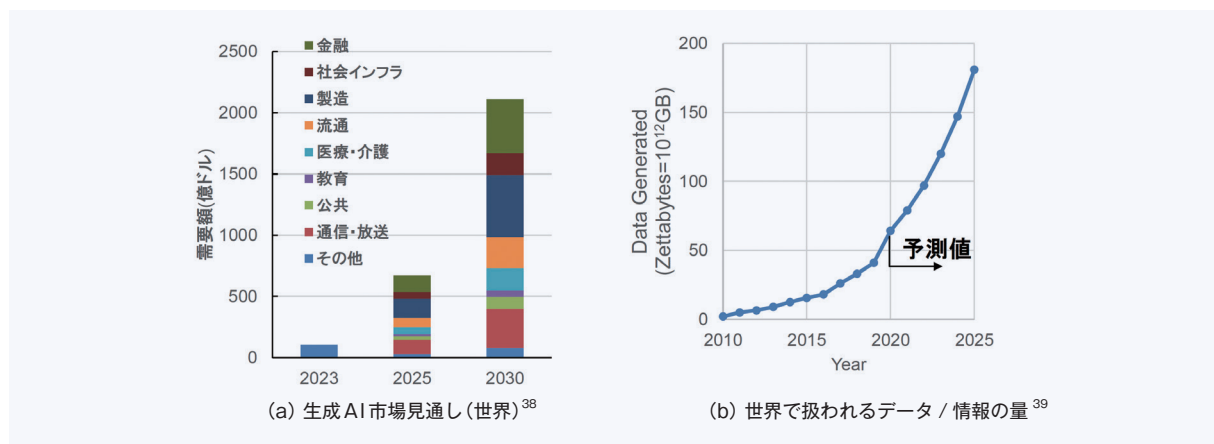


図3.1 AI×データの産業分野への活用見直し例

36 科学技術振興機構：情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.4) -データセンタ消費電力低減のための技術の可能性検討-，令和4年2月

37 ETI-CGC (Energy Transition Initiative - Center for Global Commons). 2023. "Challenges and recommendations for Japan's net zero by 2050 - energy system perspective -", December 2, <https://www.youtube.com/watch?v=5MbK713H7ZI>, Accessed April 23, 2024.

38 JEITA (電子情報技術産業協会)「JEITA、生成AI市場の世界需要額見通しを発表」(2023)

39 International Data Corporation; Seagate Technology; Statista estimates

この条件をふまえ、2050年CN像を、第4版と同様に変動再エネ(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・分類した結果を図3.2に示す。ここで、2050年までの移行シナリオの計算には、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を用いた。本モデルを用いて、各時間断面でエネルギー需給を保ちつつ、エネルギーやシステムの総コストを最小にするような移行計画を各年8760時間を考慮して計算している。そのため、本解析はCN達成シナリオを2050年からのバックキャストで立案するものといえる。図3.3には、左に技術イノベーションの進展や

コスト条件の異なるエネルギーシナリオ(再エネ100%、火力CCS制限、原子力活用、水素調達)の2050年のVREと電力需要の関係と総コストの増加率を、右に各シナリオの自給率と備蓄率の関係を示している。各エネルギーシナリオの詳細条件は付録1―表A.1.1を参照いただきたい。

各シナリオとも、燃油高騰後のシナリオに比較して、ICT需要増によって、再エネを中心とした電力供給が増加し、また総コストも2020年比で30～60%増加することがうかがえる。次に、総コスト増、自給率、備蓄率のバランスから「③原子力 活用」を例にとりCN移行シナリオの細部を分析する。

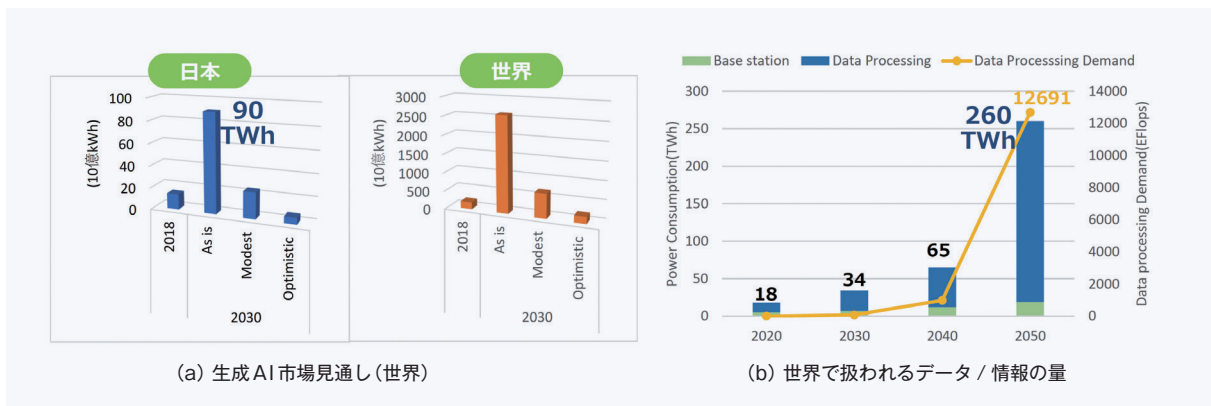


図3.2 AI × データの産業分野への活用見通し例

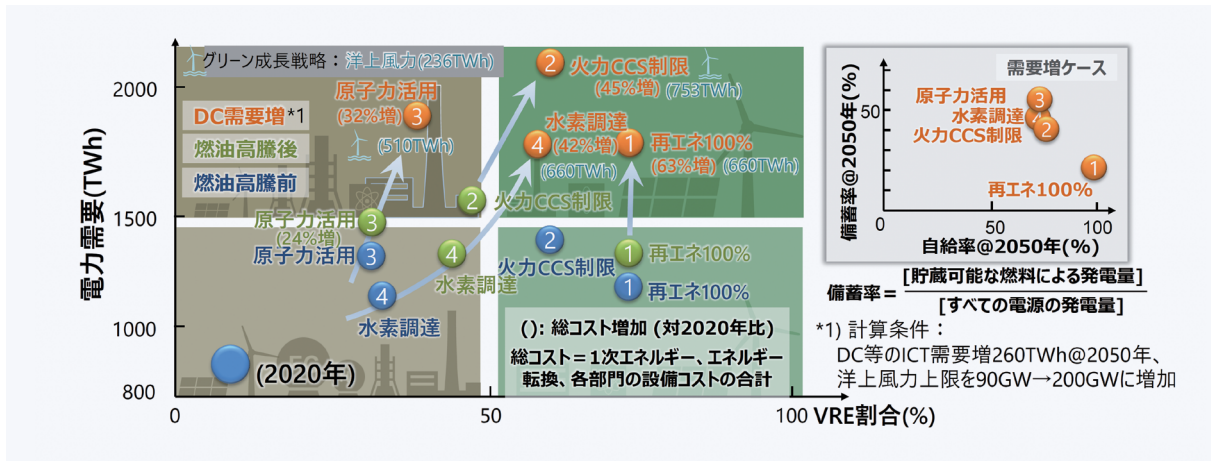


図3.3 再エネ導入と電化促進による4つの社会像の燃油高騰による変化

図3.4に原子力活用シナリオにおける移行過程の各年度の電源設備容量の計算結果を示す。各々の年度で、ICT需要増前(第5版の条件)と需要増(2050年で260TWh増加)の条件を並べて示している。ICT需要増に対し、2040年の発電設備は146GW増加、発電電力量は290TWh増加が、2050年の発電設備は137GW増加、発電電力量は333TWh増加

が必要となることがわかる。また、発電設備の内訳をみると、風力、太陽光等の再エネが増加しており、例えば2040年洋上風力発電設備もグリーン成長戦略での計画値の2倍必要となっている。このように、ICT需要の増加に応じて、再エネ、原子力等の脱炭素電源の増加が必要であり、需要増加幅が大きくなるほど電源確保がより難しくなることが想定される。

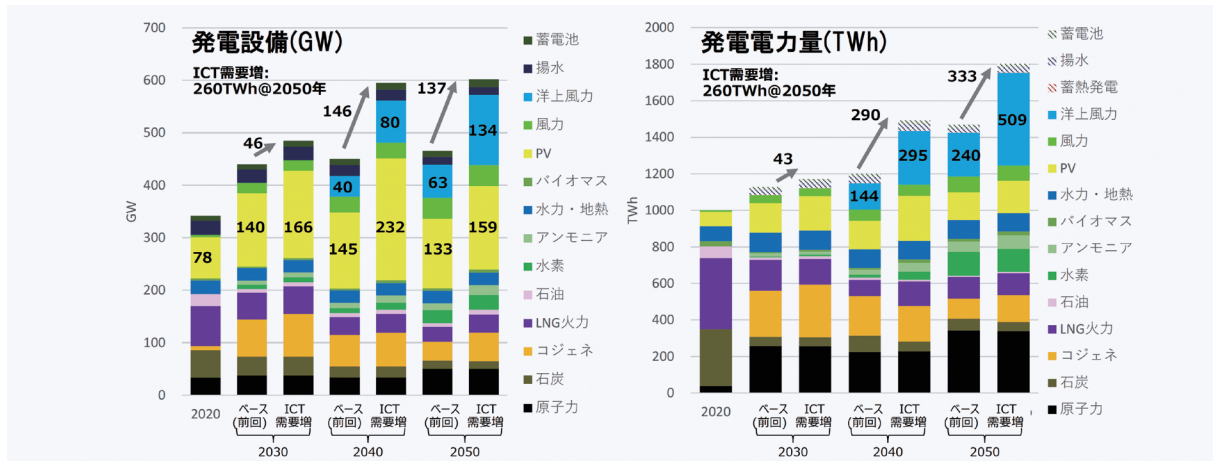


図3.4 各年度の電源設備容量 (原子力活用シナリオ)

3.2 エネルギーシステムのバックキャストとフォアキャストのギャップと対策

図3.4に示された条件で2020年から2030年の電源構成への移行の課題について考察した。

- (1) 太陽光発電: 2020年78GW → 2030年140GW
166GW、62GW 88GW増必要

2021年の太陽光発電協会(JPEA)の目標では2030年の目標が100~125GW(AC出力)と示されている⁴⁰。これからの2030年の140GW 166GWは高い障壁の数値といえる。太陽光発電設備を62GW 88GW新設するためには、平均的な面積(15km²/GW)から考えると930km² 1320km²必要であり、これは東京23区や琵琶湖の1.5 2倍の面積が必要である。容量で考えると国内最大級のメガソーラ設備(約260MW)を340か所新設に相当する。パネル廃棄・リサイ

クルの課題も解消するとともに、環境面を考慮した設置場所の選定・有効活用を進めていく必要がある。

- (2) 風力発電: 2020年5GW → 2030年20GW、
15GW増必要

日本風力発電協会(JWPA)資料⁴¹では、2031年までに陸上風力で13GW、洋上風力で18GWが運転を開始する予定と分析されている。また陸上風力の内約9GWが事業計画認定前であり、認定ペースを1.2GW/年を2GW/年まで上げることに加えて、環境アセスメントや系統制約解消などを進め、リードタイム短縮が重要と示されている。洋上風力については資源エネルギー庁資料⁴²からは、促進区域で事業者選定済1.7GW、公募開始1.8GW、有望区域5区域で2.2GW

40 太陽光発電協会(JPEA) 2021年。「太陽光発電の現状と自立化・主力化に向けた課題」, 2021年10月29日, https://www.meti.go.jp/shingikai/santei/pdf/071_01_00.pdf, 2024年4月23日アクセス。

41 日本風力発電協会(JWPA) 2021年。「2050年カーボンニュートラルの実現に向けた2030年の風力発電導入量のあり方」, 2021年3月15日, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/028_05_00.pdf, 2024年4月23日アクセス。

42 資源エネルギー庁。2022年。「国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案」, 2022年10月, https://www.meti.go.jp/shingikai/santei/pdf/078_01_00.pdf, 2024年4月23日アクセス。

の合計5.5GWの事業化が進められている。案件形成の早期化、運転までのリードタイム短縮、系統整備ともに環境面や地域との協調を進めることが重要である。

(3) コージェネ：2020年8GW → 2030年81GW

本試算では化石燃料に起因する発電については、その1/2を熱利用可能とすることが期待されている。従来のコージェネレーション設備だけでなく熱を有効に活用していくことが必要である。

(4) 水素・アンモニア発電：2020年0GW → 2030年19GW

従来の化石燃料発電設備の転換で実現すると、大型の火力発電設備(例えば1GW/基)を19機転換する必要がある。設備技術開発と燃料調達など環境面・経済面・流通も併せて課題解決を急ぐ必要がある。

(5) 原子力発電：2020年33GW → 2030年36GW

廃炉決定済のものを除く、36基の原子力発電所(建設中を含む)が60年運転かつ運転可能と仮定した数値となっている。安全対策や許認可取得と、地域や国民との合意形成が必要である。

3.3 データとシミュレーションで分析・評価を可能とする技術の開発

前述のように2050年CNからのバックキャストからのシナリオと現状からのフォアキャストのギャップを埋めるために、脱炭素電源への転換や再エネの早期導入に合わせて、系統連系など電力システム側の課題解消が必要である。第5版までに示された項目も含めると、具体的には下記の課題を解決していく必要がある。

- (1) 慣性低下に起因する周波数低下の課題
- (2) 調整力不足に起因する周波数変動の課題
- (3) 系統安定性確保の課題
- (4) インバータ電源増にともなう不安定化の課題
- (5) 系統と分散リソースの協調
- (6) 電力需要の柔軟性向上
- (7) 貯蔵の活用を含むエネルギー供給信頼性確保
- (8) 需要増加に対する系統混雑の解消

本節では、このうち需要増によってより顕著となる(8)の系統混雑解消について、CNへの過程で想定される電力システムの課題と対策について示す。

前述のように、ICT需要増にともなって再エネ等のCN電源の増設が必要であり、系統を流れる電力潮流のピークは拡大し、系統混雑が多く地点・時間に発生することが想定される。例えば、北海道・東北地域を中心とした洋上風力の導入は2040年に最大150GW増必要でこれを需要地へ送る際に送配電網の混雑発生が懸念される。例えば、各エリアの需給バランス確保のため、再エネ出力抑制が顕在化する中、需要の大きい関東エリアでも2024年度に再エネに起因する系統混雑が発生する見通し(国内全エリアで再エネ出力制御の見込み)である(表3.1)。また、ノンファーム型接続などによる再エネ普及を受け、各エリア地内系統でも2027～

表 3.1 地内系統での系統混雑(再エネ出力制御)の見通し(2024年度、関東エリア)⁴³

	年間出力制御量	最大出力制御量	出力制御時間
154kV上越幹線	1,220 kWh	680 kW	3 時間
66kV玉諸線	15,440 kWh	830 kW	26 時間

43 経済産業省：新エネルギー小委員会・系統ワーキンググループ 資料 5 (2023年)、https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/048_05_00.pdf

2028年度に混雑発生の可能性がある(表3.2)。

このように、ノンファーム型接続など(送電線の空き容量の有効活用策)を受け、系統混雑が今後も発生の見込みである。これらの課題に対する対策としては、出力制御(優先給電ルール、地内線混雑)の実施頻度増加の可能性を踏まえ、市場メカニズム(メリットオーダー)の最大活用など系統運用の効率化、日本の系統全体の電力コスト最小化が重要である。また、日本全体での系統運用最適化によるあらゆるリソースの最大活用(混雑処理のための日本全体レベルでの電源差替え、出力抑制、送電線運用等)による電力コ

スト最小化と安定供給実現も必要となる。合わせて、課題や対策の有効性の定量的評価のために、電力需給解析モデル等を用いたシミュレーション評価が重要である。例えば、日本全国大での完全メリットオーダー実現によるコスト最小化と混雑管理実現への貢献評価などを進める必要がある。

具体的事例として、送電線混雑発生や混雑管理の課題について試算を行った結果を示す。ここでは、日本の電力系統全体を対象にした電力需給モデルによるシミュレーションツール^{45,46}を用いてCNを実現する電源構成を想定して計算した⁴⁷。図3.5に電力需給解析モデルを用いて、全国にPV

表 3.2 日本全体の系統混雑想定結果(混雑設備数)⁴⁴

		混雑が想定される設備数		
		断面I	断面II	断面III
2027年度	基幹系統	0	0	19
	ローカル系統	0	0	101
2028年度	基幹系統	1	1	25
	ローカル系統	3	2	95

断面 I: 昼間ピーク需要断面、断面 II: 夜間ピーク需要断面、断面 III: I, II 以外の断面(軽負荷期等)

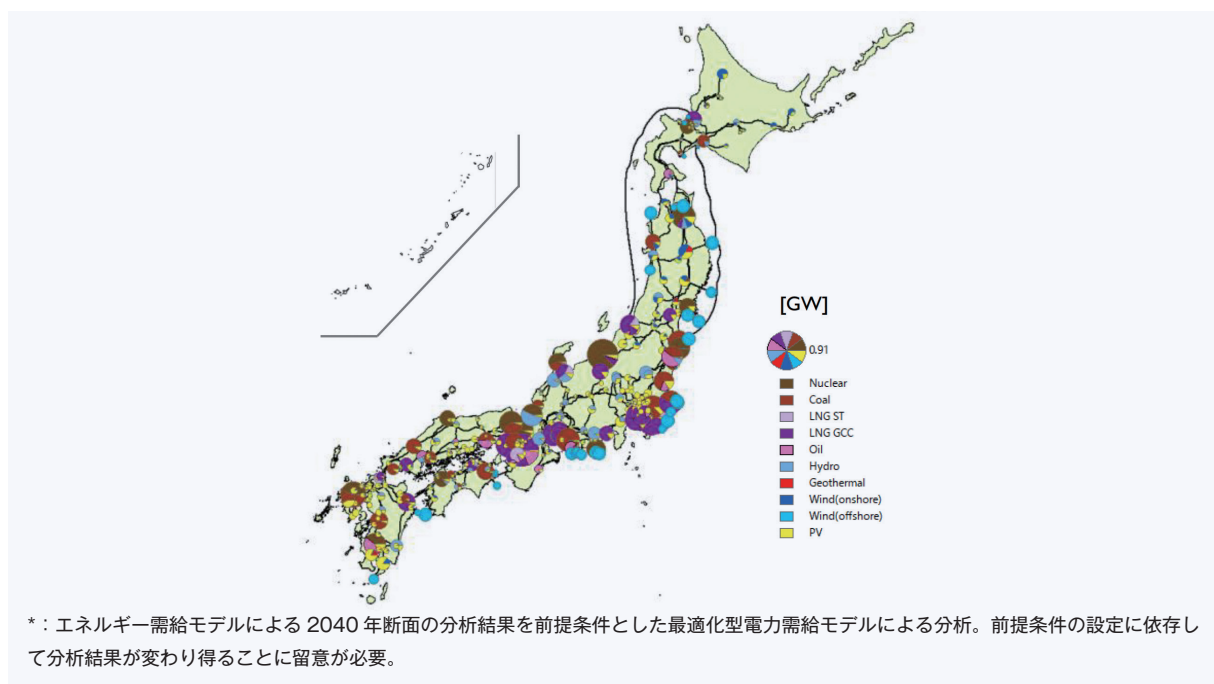


図 3.5 電力需給解析モデルを用いた解析事例(PV 約 200GW 導入による送電線混雑の分析)

44 電力広域的運営推進機関: 第 70 回 広域系統整備委員会 資料 (2023 年), https://www.occto.or.jp/iinkai/kouikikeitouseibi/2023/files/seibi_70_03_01.pdf, 2024 年 4 月 23 日アクセス。

45 Komiya Ryoichi, and Fujii Yasumasa. 2017. "Assessment of post-Fukushima renewable energy policy in Japan's nation-wide power grid." Energy Policy 101, February 2017: 594-611.

46 Komiya Ryoichi, and Fujii Yasumasa. 2019. "Optimal integration assessment of solar PV in Japan's electric power grid." Renewable Energy 139, August 2019: 1012-1028.

47 小宮山涼一, 藤井康正. 2022 年. 「送電網を考慮した電源投資・運用最適化に関する電力需給解析」電気学会全国大会講演論文集 H6-3, 2022 年 3 月 1 日, での分析結果より作成

約200GWが導入された条件での送電線混雑を分析した事例を示す。また図3.6に地域間連系線混雑の分析例を、図3.7に地内線混雑の分析例を示す。図3.7は送電線容量制約のシャドープライスで数値が付いた送電線本数をカウントした結果を示している(前提条件の設定に依存して分析結果が変わり得ることに留意が必要)。再エネ大量導入に向け、効率的な地内送電線混雑管理と電力システムコスト最小化に向けた取組も重要な課題と考えられる。このように、送電設備、発電種別と立地、発電や需要の分布のデータ(の将来像)が共有されることで、より有効な設備増強や地点別電力価格制度などの制度面の整備を進めることも可能となる。

次に、電力消費拠点の立地誘導による対策について示す。前述のように、データセンタや大規模工場の電力消費拠点の適切な立地誘導が電力コスト抑制に向けて重要となる。評価検討を進めるにあたり、ダイナミックプライシング(市場価格連動料金)の浸透や電力需要の立地誘導インセンティブが機能した場合を仮定すると、データセンタ(ベースロード負荷を仮定)は、卸電力価格が低下するエリアでの立地が最適となる。立地誘導インセンティブの確保に向けては、ゾーン制、ノーダル制といった市場主導型での電源出力最適配分と電力系統における電力価格シグナルの形成が有効である。また、電力価格低下は需要創出のインセンティブに貢献す

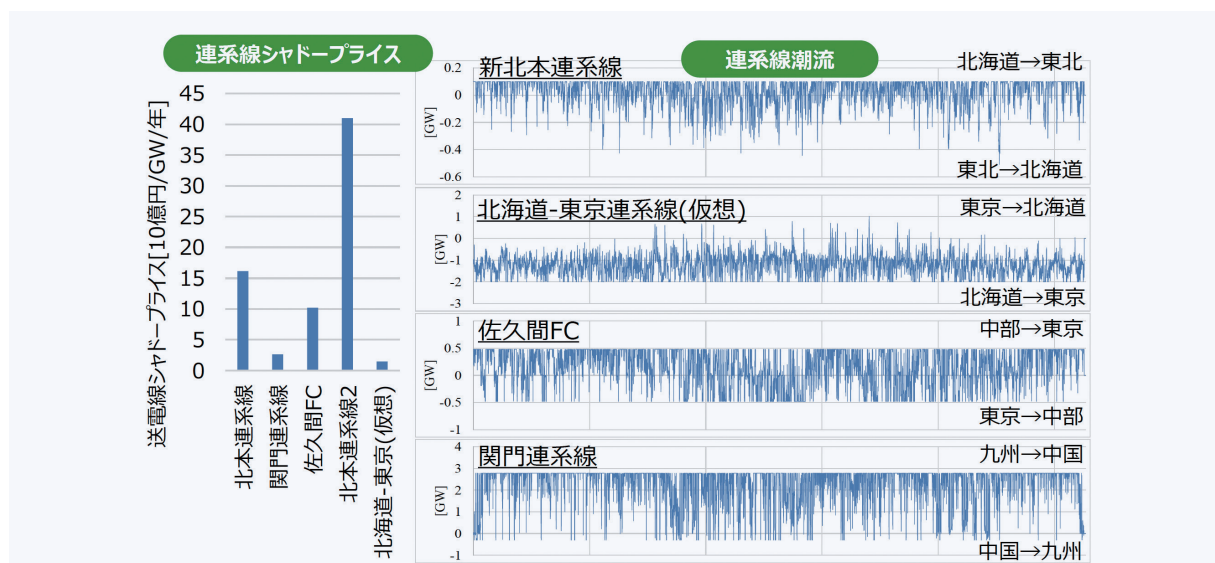


図 3.6 地域間連系線混雑の分析例

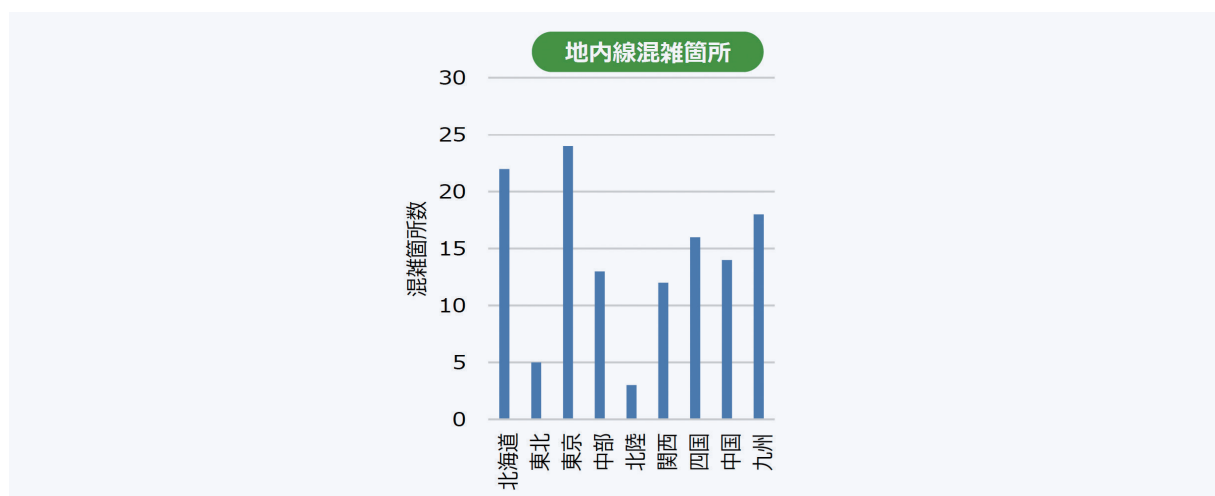


図 3.7 地内線混雑の分析例

ることになる。図3.8にデータセンタ電力消費(90TWh)の仮想的な最適配分の試算結果を、図3.9に電力価格の推移を示す。このように、再エネ普及を反映した価格シグナルと電源や消費の立地誘導インセンティブの形成が重要である

ことがわかる。一方で、大都市圏への需要立地に対応するための送電網強化が必要ともいえる。

次に、データセンタ立地誘導有無による電力需給バランスの試算結果を図3.10に、図3.11に日本全体の出力抑制

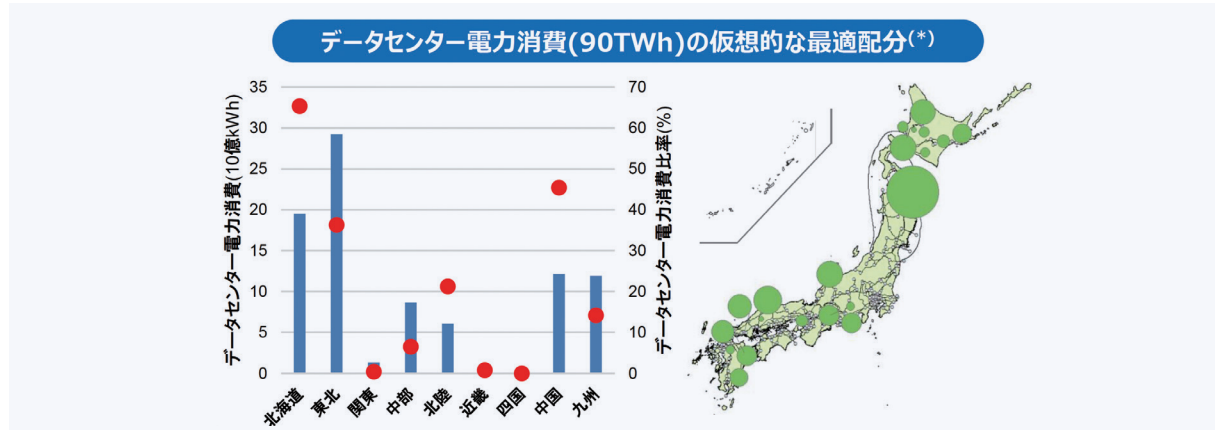


図3.8 データセンタ電力消費(90TWh)の仮想的な最適配分の試算結果

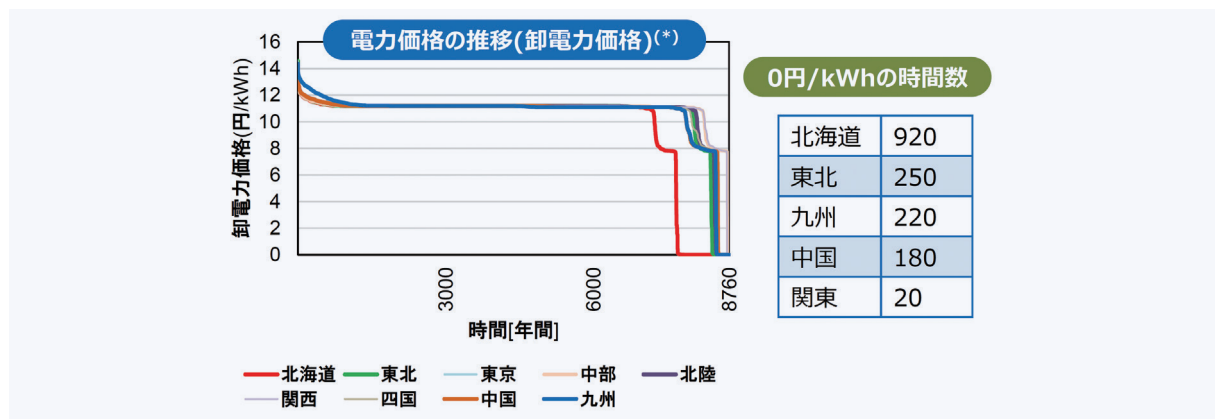


図3.9 電力価格の推移

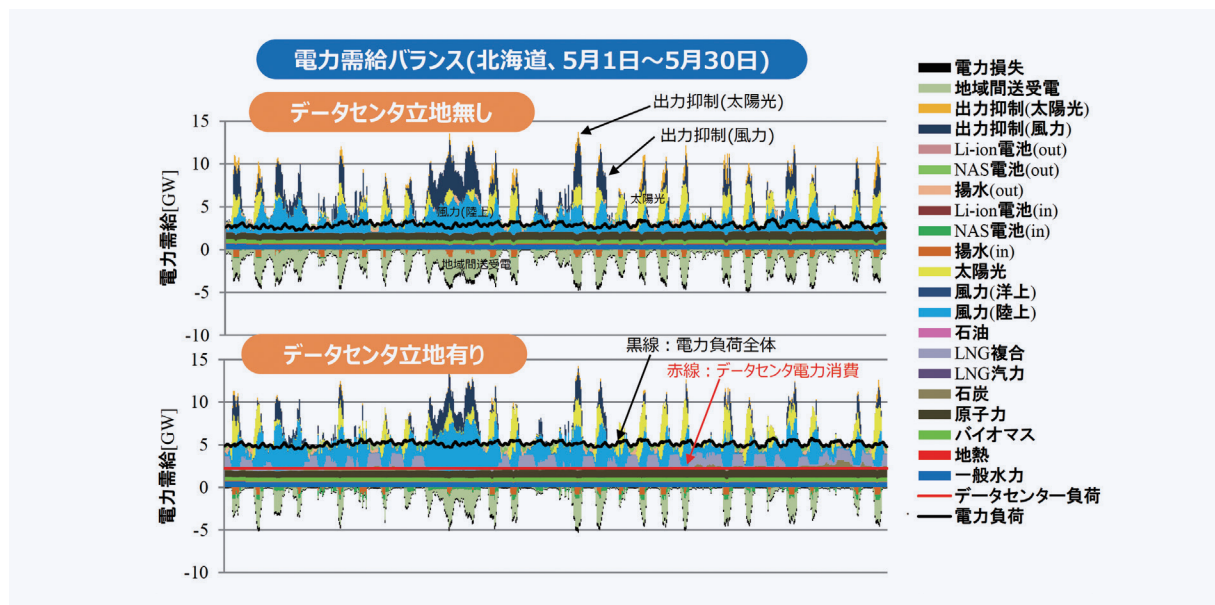


図3.10 データセンタ有無による需給バランスの試算

量の試算結果を示す⁴⁸。データセンタの立地によって増加した電力消費によって、再エネの出力抑制が減少していることが伺える。このように、電力消費誘導による再エネ接続量

の拡大、再エネ出力抑制低減による需給バランス確保に向けた対策強化が必要である。

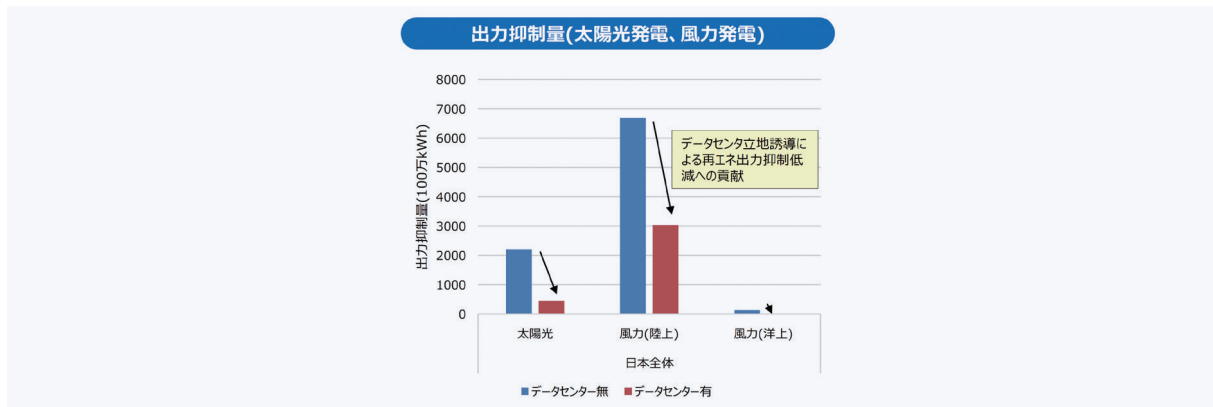


図 3.11 太陽光・風力発電の出力抑制量試算結果

3.4 エネルギー需要とデジタルを活用した成長とエネルギーシステムとの統合的トランジション

日本の電力システム制度は2020年4月の広域的な系統運用拡大、小売の全面自由化、法的分離による送配電部門の中立化の3段階からなる改革でひと区切りを迎えた。2020年以降、ロシアのウクライナ侵攻、夏季や冬季の電力需給ひっ迫といったエネルギー需給に関する課題が顕在化してきている。2050年CNを想定すると火力発電の段階的休廃止、再エネの偏在化が既に課題となっており、当面電源に対する投資予見性の不確実性が続くと思われる。本提言書では、ICT分野の電力需要増加についてエネルギーシナリオを見直したが、今後の再エネ電源の増加や、人口減および産業構造の変化をはじめとする国土そのものの変化を考えると、エネルギー需要とデジタル技術を活用した成長とエネルギーシステムの改革との統合的トランジションが必要となる。

電力システムの需給バランスを考慮すると、気象条件に左右される需給ひっ迫が懸念される。気象データの電力システムとの連携により、エネルギーの時間別および季節間変動予測、さらに調整力の確保見通しといったエネルギー需要や需給調整に関する予測や制御への活用が非常に重要視される。このような

高度な予測や制御はICT技術が不可欠であり、必要なICT技術の確保、災害等においても早期に必要なICT技術は最低限の稼働を確保できるレジリエンスの向上についても考慮すべきである。

2020年以降の発電および送配電部門の分離による電力システム改革は、電力を活用したサービス展開に大きく貢献した。他方、国内ですべての電力を発電しなければならない日本の地政学的状況を考慮すると、電力のS+3Eに対する経費が相応に増大することも予想できる。発電、送電、エネルギーミックス、および電力需要状況のそれぞれの変化は、今後これまでに早いペースで変化することが考えられる。これらの変化に電力システムが対応しているか、さまざまな視点で監視や助言ができる市場の透明性が求められ、この透明性を実現するための必要なデータ、情報を統合的に管理、運営する中立的なシステムが必要である。電力システムの中立性は、今後需要家参画による需給調整をはじめとした多様なステークホルダの参画やエネルギー供給面の事業環境を支えるため、さらにシステムを客観的に検証するためのデータ提供の役割として重要となる。

48 経済産業省「2030年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）」（2021年）での太陽光発電、風力発電等の設備容量や電力需要（8,640億kWh）等を前提条件とした最適化型電力需給モデルによる仮想的な分析。データセンタ負荷はベースロード負荷を想定。通信インフラのコスト等は考慮しておらず、電力のみに関する分析。前提条件の設定に依存して分析結果が変わり得ることに留意が必要。

3.5 | 第3章まとめ

第3章の内容を要約する。

- 激変する国際情勢を踏まえ、燃油価格の高騰に加えてデータセンタ等のICT需要増に対してエネルギーシナリオを見直した結果、CNシナリオ実現には、2030年までに①再エネ導入前倒し(太陽光発電88GWと風力発電15GW増設)および既存の全原子力発電運転など脱炭素電源確保、②PVの導入から短期間での廃棄回避や設置環境面の課題解決、③10GWを超える水素・アンモニア発電の稼働、④コジェネ等による化石燃料発電の熱利用、⑤希頻度の無風・曇天継続、燃油不足、災害を想定したエネルギーのレジリエンスとセキュリティ確保、を進めるべきである。また、2040年~2050年に向けて、①太陽光・風力・原子力等のCN電源のさらなる増加、②DACによるCO₂回収の実用化と普及、③回収したCO₂からの合成燃料製造と運輸・産業部門での利用、に開発・投資イノベーションを起こすべきである。
- 再エネ導入量の急拡大に対する基幹システムの課題と対策には、①慣性低下による周波数低下に対し、火力・原子力の回転機運転台数確保と分散リソースの慣性制御の導入、②調整力不足による周波数変動に対し、地域リソースの活用と系統混雑回避の対策、③系統安定性低下に対し、HVDCの送電増強に加えて地域の蓄電・EV制御高度化、④インバータ電源増にともなう不安定化に対し、インバータ制御の高度化と高速な(秒レベルの)統合制御、⑤系統と分散リソースの協調、⑥電力需要の柔軟性向上、⑦貯蔵の活用を含むエネルギー供給信頼性確保、⑧需要増加に対する系統混雑の解消、を進めるべきである。
- CNに向けた基幹システムの検討を進めるにあたり、発送配電・需要家など多くのステークホルダのデータやシミュレーションモデルの共有とシミュレーション評価技術の開発・活用が必要である。CNに向けて①数値シミュレーションモデルによる多面的・定量的な課題の可視化、②施策の評価、を随時行い、情勢変化に応じた設備やイノベーションへの投資、制度整備を進めべきである。
- 国土計画と連携したエネルギー分野の施策。エネルギー供給だけでなく、需要やエネルギー需給の中長期的施策を議論できる環境を整えるため、長期的な国土計画にエネルギー分野の施策を連携すべきである。
- 短期市場原理だけでない中長期的制度設計と施策の重要性。短期的な市場シグナルでは、長期的な脱炭素投資や安定供給に向けた供給力確保や資源調達が困難。島国でエネルギー源が豊かではないわが国の特有の事情を勘案しつつ、トランジションを見据えた政策議論が求められる。
- 電力市場の再構築と環境価値市場の融合
各市場が非対称、すなわち双方に等価な規制が課されていない現状からの脱却が早期に必要であり、これを実現するための電源稼働の状況可視化、市場監視を徹底すべき。
- 地域・需要家参画による社会システムの構築
需要家の積極的な環境投資を促す持続的システムの構築。地球温暖化にかかる政策(FIT/FIP等)に関して、①需要家の判断に基づく仕組みの導入と、②排出量取引制度への融合の実現。

日立東大ラボでは、引き続きエネルギーシナリオ評価シミュレーション技術の開発と国内外の情勢変化に応じたCNトランジションシナリオの評価、エネルギーシステムの課題解決のためのイノベーション技術の選定と開発、多様なステークホルダ間のデータ・解析モデルの共有プラットフォームの提案に取り組んでいく。