

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5版)

2023年3月24日 日立東大ラボ

CONTENTS

	提言サマリー	4
第 1 章	はじめに	9
第 2 章	地政学的危機とトランジションのパスウェイ： 変動するランドスケープと地域からの視座	10
	2.1 日立東大ラボによる「トランジション・シナリオ」	10
	2.2 今年度のシナリオの検討事項	12
	2.3 エネルギー地政学の国際的なランドスケープ	13
	2.4 日本における地域と脱炭素	17
	2.5 第 2 章まとめ	20
第 3 章	バックキャストとフォアキャストのギャップを踏まえた エネルギーシステムの対策	22
	3.1 国際情勢を踏まえたエネルギーシナリオの見直し	22
	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	24
	3.3 シミュレーション分析・評価に基づく電力システムの課題と対策	25
	3.4 データとシミュレーションで可能とする分析・評価技術	29
	3.5 第 3 章まとめ	32
第 4 章	再エネ主電源時代に向けた地域社会の役割	33
	4.1 地域社会をとりまく情勢変化	33
	4.2 電力需給の安定化に貢献する地域社会の協調ポテンシャル	34
	4.3 地域社会のトランジションを円滑に進める施策	37
	4.4 第 4 章まとめ	40
第 5 章	カーボンニュートラル実現に向けた 電力システム改革の方向性	41
	5.1 日本の電力自由化を経た状況の振り返り	41
	5.2 第 2 次電力システム改革を進める新たな論点	42
	5.3 第 5 章まとめ	43

第 6 章	エネルギー・トランジションと生活の質(QoL)の維持を 両立させる道筋への挑戦	44
6.1	エネルギー・トランジションに伴う社会変化とエネルギー需給の連成シミュレーション	44
6.2	カーボンニュートラルを実現する取り組むべき道筋の分析	45
6.3	第 6 章まとめ	47

第 7 章	まとめ	48
--------------	------------	-----------

	第5版提言検討体制 (2023年3月24日時点)	51
--	---------------------------------	-----------

	【付録】	53
付録 1.	日立東大ラボ トランジション・シナリオのドメインごとの概要	54
付録 2.	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)	56
付録 3.	東京都町田市、福島県いわき市における世帯数、および分散リソースの保有台数の導出	58
付録 4.	福島県いわき市の業務部門の総延床面積と建物数の導出	60
付録 5.	地域社会から創出可能な日本全体での調整力の導出	62

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。

2022年に発刊した第4版では環境、社会、ガバナンスを考慮したESG投資、第6次エネルギー基本計画、ク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や、それらを解決するための取り組みを議論した結果をまとめた。

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5版では、第4版からの変化点である「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結果をまとめる。第5版の構成は、①社会動向全体を踏まえたエネルギー・トランジション・シナリ

オ、②CNに向けた2050年からのバックキャストと同時に、2030年に向けたフォアキャストですべき施策を定量評価を交えて検討したエネルギーシステム、③2022年からの社会変化によって見えてきた電力システムの課題と電力システム改革の方向性、および④CNと生活の質(QoL)の維持の両立を実現する道筋を示すための新たなシミュレーション技術の挑戦、の4つの観点から成っている。①エネルギー・トランジション・シナリオで社会全体の動向変化とインサイトをとらえた上で、②エネルギーシステム、③電力システムの課題と改革方向性を示し、①～③の検討の中で、特に個人や地域の影響を考慮して、④CNと生活の質(QoL)の維持の両立を実現する道筋への挑戦を述べている。

本書では、2030年までの短期と、2030年～2050年の中長期について、合計18の提言として第7章にまとめている。本節では提言に至る検討結果をサマリーとして示す。

地政学的危機とトランジションのパスウェイ：変動するランドスケープと地域からの視座（第2章）

これまで電力、産業、および行動変容にかかわる12のドメインと、2020年から30年、そして2030年から50年という二つの段階について、RITE（地球環境産業技術研究機構）が2021年に発表した2050年のカーボンニュートラル実現を可能にする2つの電力構成「多様なエネルギー」、および「再エネ100%」を想定したトランジション・シナリオを描いてきた。第5版では、エネルギーと気候変動に関する新たな地政学的条件に関して、その理解を試み、シナリオに反映した。また、再エネ大量導入や産業転換の重要エリアなど、強い関連性を持つ日本の地域に着目し、そのケース・スタディを通じて、シナリオをより現実的なものへと改訂することを試みた。さらに農業、化学産業、持続可能な航空燃料（Sustainable Aviation Fuel, SAF）など、昨年度のシナリオにおいて検討が十分でなかった分野についても、より詳細な分析を加えた。これらの検討プロセスを経た結果から、以下の論点を導き出した。

1. 現在の地政学的危機への対応において、システム的な変化を加速させる統治メカニズムをつくれるか。すでに論じたように、EU、アメリカはロシア脱却の方針のもとに、中長期的には気候変動対策を加速している。一方、日本の国民意識・構造転換には遅れも指摘されている。急激な地政学的変化において、あらゆるセクターと統合的なトランジションを加速させるガバナンスの重要性が増している。

2. 気候変動、燃料高騰の中で、日本がアジア太平洋の気候・エネルギーのトランジションへの国際連携をリードできるか。アジア太平洋では、エネルギー・食糧価格の高騰によって脱炭素化に対する逆行リスクも生じている。日本にとって、地政学的変化の中でも、水素・アンモニア、レアメタルなどの資源や炭素貯留のサプライチェーン確保が不可欠となる。政府は、気候対策を強化するオーストラリアや化石燃料依存が高いアジア諸国と、気候やエネルギーに関する重層的な国際

連携をリードする取り組みを強化させていくことが重要になる。

3. 多様な自然環境のもとでローカル・アクターの主体性をエンパワーし、地域ごとに異なるトランジションの道程を示せるか。自然環境が豊かな日本では、地域ごとに社会課題、生活様式、エネルギーのポテンシャルが異なり、トランジションの道筋は多元的である。そのため、市民や地元企業などの地域のアクター（行動主体）の能力構築を支え、エネルギーや食料のグリーン転換を中核とした繁栄をめざす必要がある。特に、需要側の調整力は、地域のエネルギーの効率化や安定にとって重要であり、デジタル・イノベーションの果たす役割は大きい。

4. 政府は戦略的な産業政策のもとで、自治体の連携能力

を支えながら、市民や企業とともに合意形成を行えるか。日本の諸地域では、前例のない挑戦のために、自治体の調整機能の重要性が増している一方、人的資本やノウハウ、横断的なしくみづくりが不足している。政府は、戦略的な産業政策のもとで、縦割り行政を克服し、地域の力を最大化する支援を行っていく必要がある。そして、政府・自治体が市民や企業とともに、科学的データと開かれた対話にもとづく合意形成のプラットフォームの構築を行うことが、長期的かつ広範な分野におけるトランジションを成し遂げる重要な基礎となるだろう。

急激な地政学的変動のもとでも、アジア太平洋地域との新たな連携を模索しながら、地域の主体性に支えられた気候とエネルギーにおけるトランジションを加速するガバナンスを構築していくことが求められている。

バックキャストとフォアキャストのギャップを踏まえたエネルギーシステムの対策（第3章）

燃油価格の高騰を考慮してエネルギーシナリオを見直し、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(Carbon Capture and Strage) 制限、原子力活用、水素調達）をシミュレートし、総コストの増加、自給率、備蓄率のバランスから原子力活用について詳細検討した。CNシナリオ実現には、①再エネ導入前倒しや原子力活用など脱炭素電源の早期確保、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、③発電に加えて合成燃料への活用など水素・アンモニア利用と多様化、④コジェネ等による熱利用促進、⑤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、①DAC(Direct Air Capture)によるCO₂回収の実用化と普及、②回収したCO₂からの燃料製造と運輸・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必要がある。

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、送電増強に加えて地域の蓄電・電気自動車(EV)制御の高度化、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統合制御、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ー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、制度整備を進めるべきである。

再エネ主電源時代に向けた地域社会の役割（第4章）

第4版で検討したヒートポンプ(HP)給湯器やEVといったストレージ機能を有する機器の協調運転で創出される需要調整ポテンシャルについて、家庭部門(戸建住宅・集合住宅)におけるHP給湯器とEV、さらに業務部門のHP給湯器を対象機器として試算した。その結果、2030年に地域社会から創出される需要調整ポテンシャルは全国規模で33.2TWh/年となり、その実現に向け、必要機能を有した機器の普及と早期の社会実装が必要である。

CN化は電化推進が基本である一方、電化が難しい地域・産業が存在することも事実。そのような地域や産業を非難・排除するのではなく、排出権取引やネガティブエミッションと合わせた国全体でのCN化を進める手段を模索すべきである。地域社会の脱炭素に向けたトランジションを円滑に進めるためには、段階的移行の支援、全員参加、役割の明確化が重要である。とりわけ自治体の果たす役割は大きく、地元密着型の価値循環システムを早期に構想・形成していくべきである。

カーボンニュートラル実現に向けた電力システム改革の方向性（第5章）

広域的な系統運用拡大、小売の全面自由化、そして法的分離による送配電部門の中立化という3段階からなる電力システム改革が、2020年4月をもって一区切りを迎えた。電力広域的運営推進機関(OCCTO)、日本卸電力取引所(JEPX)のもとで、全国的なメリットオーダーがめざされるとともに、再生可能エネルギーの固定価格買取制度(FIT)をはじめとする再エネ普及の制度が形成されたことで、再エネ比率が大きく上昇した。その一方で、短期限界コストでの取引の誘導により、発電事業者の費用(特に固定費)回収性は下がり、また特に火力発電は、再エネ比率拡大に伴うkWhの減少に伴う収益性の低下が進んだこともあり、設備の休廃止の増加に至った。

2021年秋ごろから顕著になった輸入資源価格の高騰は電力調達に深刻な影響を与えるとともに、以下の論点が浮かび上がってくる。①kWの確保：短期的なマーケットのボラティリティの中で、市場価格が低位であるかに関わらず、安定供給のための電源容量を確保していくこと、②送配電網の整備：再エネ大量導入が可能となるような送配電設備の整備、③kWhの確保：燃油調達リスクへの対応

以上の検討より、現状制度から見えてきた新たな課題として、次の3つを挙げた。

1. 短期市場価格への過度の依存：卸電力取引市場でのスポット価格を中心に制度設計をしてきた結果、中長期的な安

定供給や脱炭素に向けての対応が不十分。

2. 市場間連携の欠如：スポット価格のシグナルを軸として、経済効率性の観点から容量市場や需給調整市場などの市場を形成してきたが、安定供給や脱炭素といった中長期的な政策目的との齟齬が顕在化。

3. 変動再生可能エネルギーの大量導入：地域に遍在する再エネの更なる導入をどのように目指すのか、送配電網の整備や運用の高度化、調整力の確保などといった更なる対策が必要。

これを踏まえた電力システムの第2次改革の方向性として、以下3点を提言する。

1. 中長期的な政策機軸の打ち出し：①短期的なメリットオーダーを目指す経済効率性と、安定供給や脱炭素化という中長期的な政策目的との切り分けの明確化、②効率性を追求してきた市場デザインの更なる検討。

2. 市場の役割の再構築：①市場の歪みの是正、②電源の稼働状態の透明化・公開、③包括的市場監視

3. 需要家主権のシステム再構築：①需要家の判断に基づく仕組み、②排出量取引制度への融合

エネルギー・トランジションと生活の質 (QoL) の維持を両立させる道筋への挑戦 (第6章)

エネルギー・トランジションが内包する多くの社会変化と、社会の行動変容の道筋への施策反映を目的として、エネルギー・トランジションに関わる社会の変化を社会モデルによりシミュレートし、「ありえそうな社会像」を把握し、その社会像が示す「エネルギー需給の傾向」をエネルギー需給シミュレーションに反映する、2つのシミュレーションモデルの連成について検討した。連成シミュレーションで導かれたエネルギー分野の施策として、①EV導入の2030年代前半からの導入拡大、②PV・風力発電の2030年中ごろからの

導入加速、③2020年代からの大企業の環境分野への投資、2030年代前半からの中小企業の施策加速と環境貢献による収益確保、の3分野が重要となる。また、国土形成・まちづくりをはじめとする行政施策としては、2034年、2035年に①人口閑散地域を改善する抜本施策、②雇用を確保する各種施策、③テレワーク等の情報分野を活用した暮らし・企業活動の効率化、④ヒートポンプや工場等の分散リソースを形成する機器導入の施策、適正運用および立地を誘導する施策、が重要となる。

「Society 5.0 を支えるエネルギーシステムの実現に向けて」18の提言 (第7章)

【短期】

地政学的危機とトランジションのパスウェイ：変動するランドスケープと地域からの視座 (第2章)

1. 急激な地政学的変化の中でも統合的なトランジションを加速させるガバナンスの構築
2. クリーン・トランジションのためのグローバル・サプライチェーンの確保
3. アジア太平洋における気候・エネルギーの国際連携の推進
4. 科学と対話にもとづく合意形成のプラットフォームの構築

バックキャストとフォアキャストのギャップを踏まえたエネルギーシステムの対策 (第3章)

5. 国際情勢を踏まえたエネルギーシナリオの見直し
6. 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
7. データとシミュレーションで可能とする分析・評価技術の開発

再エネ主電源時代に向けた地域社会の役割 (第4章)

8. CNとS+3Eのエネルギー需給に向けた地域の貢献
9. 地域社会のトランジションを円滑に進める施策の立案

電力システム改革の方向性 (第5章)

10. 短期市場原理だけでない中長期的機軸の打ち出し
11. 市場の役割の再構築
12. 需要家がリードするシステムの再構築

エネルギー・トランジションと生活の質(QoL)の維持を両立させる道筋への挑戦(第6章)

13. CNに伴う社会変化の客観的分析の必要性
14. 国土形成・まちづくりと連成したエネルギー分野の施策
15. エネルギー・トランジションに伴う国土形成・まちづくりをはじめとする行政施策

【中長期】

地政学的危機とトランジションのパスウェイ：変動するランドスケープと地域からの視座(第2章)

16. 地域ごとのトランジションの道筋
17. 戦略的な産業政策と地域の力の最大化

エネルギーシステムの技術的対策(第3章、第4章)

18. 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

2021年秋ごろからの欧州異常気象に伴う風力発電の発電不足と2022年2月のロシアのウクライナ侵攻に影響され、輸入原油価格が急騰した。その結果、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ている。この変化は日本のみならず、世界的な変化となっており、各国固有の課題も伴って、事態は複雑化している。しかし、カーボンニュートラルに対する牽引力は、これらのエネルギーに関する変化にもかかわらず欧州を中心に堅持されている。このような「地政学的な影響」、「カーボンニュートラルの世界的潮流の堅持」および「カーボンニュートラルに関わる国ごと、地域の個別事情」が浮き彫りになったのが2022年の大きな変化と言える。

この変化を踏まえ、日立東大ラボではエネルギー・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の検討、これらの検討を踏まえた電力システムの制度・政策の検討を実施してきた。第5版ではエネルギー・トランジション・シナリオは特に、エネルギーと気候変動に関する新たな地政学的条件と、エネルギーと強い関連性をもつ日本の地域に着目して議論を重ねた。また、第4版まで継続的に検討を重ねてきた技術選択モデルに基づくシミュレーションによる2050

年カーボンニュートラル到達時のエネルギー・バックキャストから導かれた2030年のエネルギーの姿と、現状から予想されるフォアキャスト型のエネルギーの姿には大きなギャップが伴っている。このギャップを埋めるための新たな課題と施策について、第5版は広範にわたり検討している。エネルギー・シナリオのギャップを解決する短期的な克服策としては、HP給湯器やEVといったストレージ機能を有する機器の協調運転で創出される需給調整ポテンシャルについて取り上げてきた。この需給調整ポテンシャルの詳細な定量化を試み、需要家が自らのエネルギーリソースを活用して、再生可能エネルギーの導入拡大に伴う課題克服が実現できるかを検討した。原油価格の急騰を受け、電力システムの課題も浮き彫りとなり、電力システム改革の方向性についても取り上げた。

本提言では、上記のようにトランジション・シナリオの策定に基づき、エネルギーシステムの技術的課題および対策、電力システム改革の方向性について検討し、さらにカーボンニュートラルと生活の質(QoL)の両立を実現する道筋を提言するシミュレーションも試みた。これらの検討結果から18項目の提言として取りまとめた内容を以下7章にわたって記載した。

第2章 地政学的危機とトランジションのパスウェイ：変動するランドスケープと地域からの視座

2.1 日立東大ラボによる「トランジション・シナリオ」

2.1.1 カーボンニュートラルへの道筋を描くトランジション・シナリオ

人間の社会経済活動による炭素排出を実質ゼロにする「カーボン・ニュートラル」の実現は、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なしには、到達することが難しい¹。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。

日立東大ラボでは、日本におけるカーボンニュートラル実現への道筋を描く「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、カーボンニュートラル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²。

日立東大ラボによるトランジション・シナリオは、広範な領域にかかわる転換を描くために、独自の手法に基づいて分析を行っている³。このシナリオでは、主要な分野のエキスパートとのインタビュー⁴や日立東大ラボが主催する研究集会等を通じて、当該分野における重要なアクター（行為主体）や課題を分析したのち、2050年に日本がカーボンニュートラルを達成するまでの道筋を記述している（表2.1）。

特にここでは、電力、産業、および行動変容にかかわる12のドメイン（表2.2）と、2020年から30年、そして2030年から50年という二つの段階について質的な記述を行っている。そして、RITE（地球環境産業技術研究機構）が2021年に発表した2050年のカーボンニュートラル実現を可能にする電力構成に関する検討資料⁵を参考としながら、「多様なエネルギー」、および「再エネ100%」という二つのケースについて、それぞれが異なる道筋を経て、カーボンニュートラルを実現するすがたを描いている。

1 現在、地球環境の科学者たちは、人間の社会経済活動の拡大が、これまで1万年以上にわたって人類の発展を支えてきた条件を大きく変化させ、その生存自体を脅かそうとしていることを指摘している。「プラネタリー・バウンダリーズ」と呼ばれる、人間の生存条件の維持のための地球の環境限界について研究を行う専門家たちは、気候変動、生物多様性、化学汚染などについて、すでに人間が安全かつ公正に暮らすことができる限界点を越えようとしていることを指摘している。とりわけ、気候変動においては、すでに人間の生存にかかわる条件が大きく変化する状況が近づいていることが指摘され、日本においても、政府、経済界、市民レベルで気候危機の回避のための脱炭素化への取り組みが加速している。Johan Rockstrom, et al. 2015. *Big World, Small Planet: Abundance within Planetary Boundaries*. New Haven: Yale University Press.

2 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 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.

3 サールチェ・ソンダイカーは、トランジション・シナリオの独自の方法的性質を整理している。Saartje Sondejker. 2009. *Imagining Sustainability: Methodological building blocks for transition scenarios*. Erasmus University Rotterdam. <http://hdl.handle.net/1765/17462>. ただし、日立東大ラボのトランジション・シナリオでは、ソンダイカーによるシナリオ構築のステップを参考としつつも、複数のドメインにまたがるアクターの分析などを経ながら、戦略的な示唆を得られるよう、独自のプロセスによって作成している。

4 エキスパート・インタビューは2020年11月～2022年12月に38回開催された。

5 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.

表 2.1 インタビューに参加したエクスパートの関係分野

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、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(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)、地域新電力支援団体	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

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

2.1.2 これまでの活動を通じて明らかになったこと

日立東大ラボでは、2022年はじめにシナリオを発表し、そこで明らかになった示唆について、同ラボのオープン・フォーラムや提言書において報告した。

このシナリオでは、2050年のカーボンニュートラル実現

に向かう二つの段階の特徴が明らかになった。また各段階において、「多様なエネルギー」と「再エネ100%」の二つのケースが分岐する様態が示された(表2.3)。

また、2021年度に検討したシナリオをもとに、表2.4のような論点を提示した。

表 2.3 2021年度発表のシナリオにおいて示されたトランジションの二つの段階

段階	2020-30年 第1段階	2030-50年 第2段階
特徴	電力、産業、行動変容のそれぞれの側面でトランジションの準備的な状況が形成	トランジションの加速的な進展により、さらにシナリオ間の状況の差異が広がる
分岐	「多様なエネルギー」ケース： 脱炭素化への国際的な動きの中でアンモニア混焼、CO₂回収の技術開発・政府間交渉が進む。 「再エネ100%」ケース： 再エネ分野への新たなアクターの参画が急速に拡大。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。	「多様なエネルギー」ケース： CCSつき化石燃料火力が維持。炭素やアンモニアの国際的な流通基盤が形成。 「再エネ100%」ケース： 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。

表 2.4 2021 年度発表のトランジションシナリオにおける主な論点

#	論点	詳細
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	日本におけるカーボンニュートラル実現のために、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、国際送電網など、国際的な連携の基盤を重層的に構築することが重要。
2	将来の脱炭素化のための過渡期的対策にかかわる合意形成	CO ₂ の回収や貯留の実現については、国内のパブリックアクセプタンスはもちろん、貯留先の国や地域との合意が必要。
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	石炭火力、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、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。
4	製造業における脱炭素化イノベーションへの投資	鉄鋼を含む産業分野では、幅広い選択肢を視野にもとづき、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が必要。
5	都市、仕事、日常生活のあり方にかかわる人々の価値観の変化	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る。
6	環境・エネルギーにかかわる新たな意思決定のあり方	環境とエネルギーの政策の統合と広い文脈への位置づけ：地方自治体、市民、NGO、金融機関など、新たなアクターの意思決定への参与。

2.2 | 今年度のシナリオの検討事項

こうした分析にもとづき、2022年度においては、昨年度に行われた検討に新たな観点を加えながら、分析を行った。

具体的には、エネルギーと気候変動に関する新たな地政学的条件に関して、その理解を試み、シナリオに反映させることをめざした。また、再エネ大量導入や産業転換の重要エリアなど、強い関連性を持つ日本の地域に着目し、そのケース・スタディを通じて、シナリオをより現実的なものへと改訂することを試みた。さらに、農業、化学産業、持続可能な航空燃料(Sustainable Aviation Fuel, SAF) など、昨年度のシナ

リオにおいて検討が十分でなかった分野について、より詳細な分析を加えることとした。

これらの分析の一部は、日立東大ラボが主催するクローズド・ワークショップ(2022年9月)やオープン・フォーラム(2023年1月)において発表された。

本章では、2022年2月以降に生じた、地政学的な条件の変化と、日本の地域における独自の取組に着目しながら、2050年のカーボンニュートラルのためのトランジション・シナリオへの示唆について論じる。

2.3 エネルギー地政学の国際的なランドスケープ

日本におけるカーボンニュートラルへのトランジションは、国内の主体による取り組みのみによって実現できるものではない。政府、産業、市民のそれぞれのアクターは、国境を越えた政治経済のランドスケープのもとに位置づけられており、その意思決定や行動の条件はその複雑な変動に大きく制約される。

2021年末までに、徐々にその勢いを増していたように見えていたグローバルな気候変動対策は、2022年2月のロシアによるウクライナ侵攻以降、それまでには予期されていなかった急激かつ複雑な変化にさらされている。

ここでは、日本のカーボンニュートラルへのトランジションに対する影響を理解するために、その一部について議論する。

2.3.1 化石燃料価格の増大と世界の対応

2022年2月にはじまったロシアによるウクライナ侵攻は、エネルギーと気候変動にかかわる国際的なランドスケープを大きく変化させた。前年までに加速していた国際的な気候変動対策は、エネルギーと物価の大きな変動の中で重大なリスクを抱えることになったが、ヨーロッパやアメリカにおいては、エネルギー転換を加速させるための大規模な政策が公表された。

ウクライナ侵攻以後、両国が輸出していた原油、ガス、石炭などのエネルギーや、小麦や肥料を含む食料の価格が高騰し、世界的なエネルギー・食料危機をもたらした。

そうした中、ヨーロッパにおいては、エネルギー分野に

おいてロシア脱却の動きが急速に進められた。侵攻直後の2022年3月に行われた欧州首脳会合では、「ヴェルサイユ宣言」が示され、EU（ヨーロッパ連合）加盟国の化石燃料への依存度の低減、供給源や供給ルートの多角化、水素市場のさらなる開発などが発表された⁶。

一方、アメリカ合衆国では、2022年8月には「インフレ抑制法」（Inflation Reduction Act, IRA）と呼ばれる法案が可決した⁷。これは、最低法人税率などの改革を通じて、7,370億ドルの税収増を確保するとともに、うち3,690億ドルをエネルギー安全保障と気候変動対策に割り当てるもので、アメリカ史上における過去最大規模の気候変動・クリーンエネルギー転換のための政策パッケージであった。法案は、多様な経済的インセンティブを通じてアメリカにおいてクリーンエネルギー経済を確立することで、幅広い分野で質の高い雇用を創出し、かつて石油、石炭、ガスにかかわる産業で発展してきた地域においても転換を支援するものであった。アメリカは、これを通じて2030年までに炭素排出量を2005年比で40%削減することをめざすとしており、従来の気候変動対策を大幅に前進させる⁸。

日本においては、ウクライナ侵攻以降のエネルギー危機が、カーボンニュートラルへの転換の阻害要因として議論されることもあったが、ヨーロッパやアメリカでは、ロシア脱却を契機にエネルギーにかかわる経済構造の転換を加速させる方針がとられた。

6 European Council. 2022. "The Versailles declaration, 10 and 11 March 2022." Accessed on February 22, 2023. <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/03/11/the-versailles-declaration-10-11-03-2022/>.

7 The White House. 2022. *Building a Clean Energy Economy: A Guidebook to the Inflation Reduction Act's Investments in Clean Energy and Climate Action*. Accessed on February 22, 2022. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/12/Inflation-Reduction-Act-Guidebook.pdf>.

8 アメリカ合衆国内のシンクタンク（Wilson Center, Roosevelt Institute, および Hoover Institution）による評価は、下記の通り。Wilson Center. 2022. "Wilson Center Expert Analysis of the Inflation Reduction Act." Accessed on February 22, 2023. <https://www.wilsoncenter.org/article/wilson-center-expert-analysis-inflation-reduction-act>; Roosevelt Institute. 2022. "Understanding the Inflation Reduction Act: A Series." Accessed on February 22, 2023. <https://rooseveltinstitute.org/2022/08/05/understanding-the-inflation-reduction-act-a-series/>; David R. Henderson. "The 'Shrink The Economy' Act." Accessed on February 22, 2023. <https://www.hoover.org/research/shrink-economy-act>.

2.3.2 ヨーロッパで生じる脱炭素化の加速と新たな動き

ロシアのウクライナ侵攻は、ヨーロッパにおいてはエネルギーにかかわるとりわけ大きな危機をもたらした。EUの主要な国々は、従来、ロシアからのパイプラインを通じて天然ガス供給を受けていたため、これらの供給網が急激に停止することは、加盟国の社会経済にとって重大なリスクを生じさせるからである。しかし、EUにおいては、一時的には化石燃料への回帰につながる動きを見せつつも、長期的にはエネルギーにおけるロシア脱却を契機として、気候変動対策としてのエネルギー・トランジションを加速させる動きを強めた。

2022年5月に欧州委員会(European Commission)が発表した「RePowerEU」は2030年までにロシアの化石燃料から脱却し、再生可能エネルギーへの転換を加速させる大規模な政策プログラムであった⁹。この法案では、(1)省エネルギー、(2)クリーンエネルギーの加速、(3)エネルギーの多元化、(4)投資と改革を行いながら、従前の「Fit 55」に掲げられた目標を前倒して実現する追加政策や追加投資を示したものであった。

特に、この法案では、短期的には、「ガス、LNG、水素の「共同購入」、「能力比80%のガス備蓄」「信頼できる供給元との新たなエネルギー・パートナーシップ」「太陽光、風力、水素エネルギープロジェクトの早期操業開始」「バイオメタンの生産加速」などをめざすとともに、中期的には、「国別に3000億ユーロ相当の投資・改革」「30億ユーロの基金による産業の脱炭素化の前倒し」「再エネプロジェクトの認可加速」

「ガス・電気統合ネットワーク・インフラへの投資」「2030年EUの省エネ目標の9%から13%への引き上げ」「2030年の再エネ率の40%から45%への引き上げ」「クリティカル資源へのアクセス確保」などを実現することを示したものであった(表2.5)。

エネルギー分野にかかわるロシア脱却や、これに伴うエネルギー危機下での気候変動対策を加速させるというEUの方針は、加盟国の国政から独立した委員によって構成される欧州委員会を重要な一角とするEUの意思決定の構造が、経済的な便益のみではなく、EUが重視する諸価値にもとづくガバナンスを可能にしているものと捉えることができる。一方、こうした事例が、同時期の日本においてくだされたエネルギーにかかわる意思決定や、日本の気候変動とエネルギーにかかわるガバナンスの構造にとって、いかなる示唆を持ちうるのかを検討しておくことは重要であろう。

2.3.3 日本とアジア太平洋のエネルギー貿易／協力の変容

ロシアによるウクライナ侵攻は、アジア諸国においても大きな影響をもたらした。特に、エネルギーや食料にかかわる混乱は、気候変動や新型コロナウイルスによって傷つく地域に政治・経済的な危機をもたらした。

ウクライナ侵攻以後、アジアにおける大国は、ウクライナ侵攻を支持しないものの、欧州に見られたようなロシア脱却への強い意思を示すこともしなかった。中国は、アメリカや

表 2.5 RePowerEU における対策の概要

期間	短期	中期(2027年まで)
対策	・ガス、LNG、水素の「共同購入」、ガス備蓄は能力比80% ・信頼できる供給元との新たなエネルギー・パートナーシップ ・太陽光、風力、水素エネルギープロジェクトの早期操業開始 ・バイオメタンの生産加速 ・市民や企業への省エネ推奨のコミュニケーション	・国別に3000億ユーロ相当の投資・改革 ・産業の脱炭素化の前倒し(30億ユーロの基金) ・再エネプロジェクトの認可加速 ・ガス・電気統合ネットワーク・インフラへの投資 ・2030年EUの省エネ目標：9%から13%へ引き上げ ・再エネ率：40%から45%へ引き上げ ・クリティカル資源へのアクセス確保 ・産業用エネルギー確保のため水電解装置、水素の規制枠組みの整備

出典：European Commission. 2022. "REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition." Accessed on February 28, 2023. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131.

9 European Commission. 2022. "REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe." Accessed on February 22, 2023. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en.

中東から独立した供給ルートを確保するために、ロシアから割引価格で石油を輸入し、インドも政治不安に結びつくインフレ対策のために、ロシアからの原油の輸入を増大させた¹⁰。

一方、ウクライナ侵攻は、アジア太平洋地域のその他の国々に対しても、深刻な影響を与えた。たとえば、パキスタンでは、歴史的豪雨や熱波の中、エネルギーと食料の同時高騰が貧しい地域に影響をおよぼした。また、スリランカやバングラディッシュなど、コロナからのダメージにより十分な対策ができない国では、政治経済の重大な危機が生じた¹¹。

これに対して、オーストラリアが、ウクライナ侵攻以後のアジア太平洋地域において独自の役割を担いうる主体として新たな存在感を示し始めている。現在のエネルギー危機のもとで生じているエネルギー供給網の再構築において、オーストラリアはアジアにおける重要な資源国として新たに存在感を増しつつある¹²。日本は、すでに液化天然ガスの40.2%¹³、石炭の68.3%¹⁴をオーストラリアに依存しているが、アメリカ、

インド、そして日本とともにQUADを形成するオーストラリアは、政治的な価値の共有や良好な二国間関係にもとづく連携先となりうる条件をもっている。

オーストラリアでは、2022年5月の選挙で労働党政権が生まれ、緑の党、気候推進派の躍進で、気候対策に関して政策転換が生じたほか、9月にこれまで停滞していた気候変動対策を加速させ、2050年の炭素排出ネットゼロ化を定める法案が可決した¹⁵。同国では、現在のガス輸出の利益を享受しつつも、世界的なグリーン・トランジションにとっての重要な資源国として自国を位置づけようとする動きもあり¹⁶、今後、需要拡大が見込まれる水素・アンモニア、レアメタル（リチウム、ニッケル、レアアースなど）などの資源の供給元として地位を高めることをめざしているといわれる（図2.1）。

日本は、ウクライナ侵攻後の地政学的な再編のもとで、水素・アンモニア、レアメタル、炭素貯留などの新たな国際的供給網の構築を行っていくことが必要であるが、特に、エネ

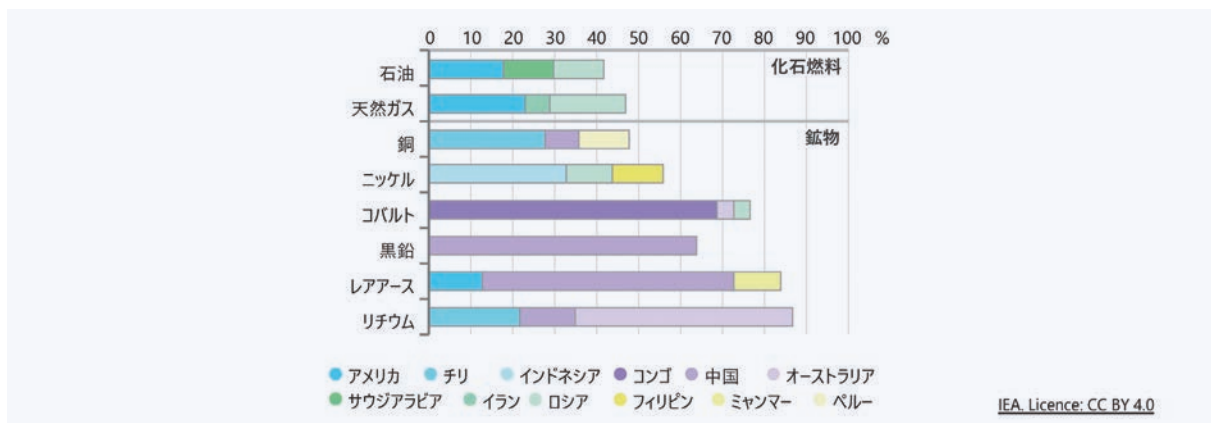


図 2.1 主要産出国の鉱物と化石燃料の採掘量シェア（2019 年）

出典：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>.

10 New York Times. 2022. "In Russia's War, China and India Emerge as Financiers" June 24.

11 United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP). 2022. "Policy Brief: The War on Ukraine: Impacts, Exposure, and Policy Issues in Asia and the Pacific." May. <https://www.unescap.org/sites/default/d8files/knowledge-products/ESCAP-2022-PB-War-in-Ukraine.pdf>

12 Aljazeera. 2022. "Australia looks to fill Asia's energy gap amid Ukraine crisis" May 9. <https://www.aljazeera.com/economy/2022/5/9/australia-looks-to-fill-asias-energy-gap-amid-ukraine-crisis>

13 2020 年における液化天然ガスの輸入量統計にもとづく。財務省. 2023. 「財務省貿易統計」2月28日アクセス. https://www.customs.go.jp/toukei/sui/html/data/y8_3.pdf.

14 2020 年度における一般炭輸入量の統計にもとづく。経済産業省. 2022. 「エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2022）」2023 年 2 月 28 日アクセス. https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/pdf/2_1.pdf.

15 Prime Minister of Australia. 2022. "Australia legislates Emissions Reduction Targets." September 22. Accessed on February 22, 2023. <https://www.pm.gov.au/media/australia-legislates-emissions-reduction-targets>.

16 Nicky Ison. 2022. "Australia can swiftly end the climate wars and become a renewable superpower. Here's how," *The Guardian*, May 24. Accessed on February 22, 2023. <https://www.theguardian.com/australia-news/commentisfree/2022/may/25/australia-can-swiftly-end-the-climate-wars-and-become-a-renewable-superpower-heres-how>; *The Japan Times*. 2022. "Australia digging deep to reshape itself as green energy superpower." August 22. Accessed on February 22, 2023. <https://www.japantimes.co.jp/news/2022/08/25/asia-pacific/australia-green-ambitions/>.

ルギー危機のもとで生じる化石燃料への逆行リスクを乗り越えつつ、オーストラリアなど政治的理念を共有する国々とともに、アジア太平洋地域の気候変動とエネルギー安全保障に関する戦略的・互恵的な連携を確立していくことを求められている。

2.3.4 シナリオへの示唆

上記に論じた内容を含む、2021年から22年ごろにおき

たグローバルな地政学的変化は、日立東大ラボで進めるトランジション・シナリオにおける記述にも重要な示唆を持っている。ここでは、そのすべてを論じることはできないが、特に関連性の高いいくつかのドメインについて、簡潔に触れたい。

なお、シナリオ全体の概要については、巻末の資料を参照されたい。また、各ドメインの詳細なシナリオについては、別冊において公開する予定である。

1. 石炭・ガス火力：過渡期の合意形成とグリーン雇用の創生

シナリオ 「多様なエネルギー」ケースでは、ウクライナ侵攻以後、一時的な化石燃料への回帰があるが、2020 - 30年には、非効率石炭火力のフェーズアウトとCCUSに関する技術開発や国際連携の推進が行われる。

論点 非効率火力のフェーズアウト、持続可能な燃料への転換、CO₂回収型の火力などの着実な推進が必要。また、火力発電のフェーズアウトに伴い、グリーン雇用の創生が重要に。そして、CCUSの普及には、技術開発、パブリック・アクセプタンスの獲得、そしてAPACにおけるグローバルなサプライチェーンの構築が必要となる。

2. 水素・アンモニア：社会的受容性とサプライチェーンの構築

シナリオ 「多様なエネルギー」ケースでは、2030-50年には、火力発電は延命し、混焼・専焼への転換が徐々に進む。アジアの需要も生まれ、国際的なサプライチェーンが構築される。一方、「再エネ100%」ケースでは、火力発電所は閉鎖され、水素・アンモニアの国際的なサプライチェーンの構築がとん挫する。

論点 水素・アンモニア混焼や専焼による火力発電には膨大な供給が必要であり、水素・アンモニアの大量生産体制と国際的なサプライチェーンのインフラ整備が必要となる。また、国際世論において過渡的な化石燃料利用が容認されるかどうか重要な影響を持つ。

3. 原子力：政策転換と制約

シナリオ 「多様なエネルギー」ケースでは、2030-50年には、発電所の跡地で「次世代革新炉」の建替え建設・準備が行われるが、「小型炉」は2050年時点では商業運用には至らない。2030年に20%程度となった電源シェアは、低価格化・安定化する再エネとの競争の中で漸次的に縮小し、2050年には10%程度に。「再エネ100%」ケースでは、新型炉の建設の長期化や、投資回収の問題が世論の関心となり、徐々に発電量がゼロに。

論点 中長期的に低価格化・安定化する再生可能エネルギーとの関係において、いかに原子力人材、技術開発、施設建設に合理的な投資を行うか。また、さまざまな利点やリスクに関する国民全体の理解、および建設用地や放射性廃棄物の処理に関する地域住民との合意形成をどのように行うか。

2.4 日本における地域と脱炭素

日本のカーボンニュートラルへのトランジションは、一方でこのような国際的な地政学の変化によって影響を受けるが、他方で国内の各地域にねざした脱炭素のための取り組みなしには実現できない。

日立東大ラボのトランジション・シナリオはそのすべてについて調査を行うことができない。ここでは、日本におけるカーボンニュートラルへの転換のために地域にかかわる取り組みが持つ課題の特殊性を理解するために、そのいくつかの断面について取り上げる。

2.4.1 地域新電力の可能性と足元の課題

日本の諸地域における脱炭素化のための主要なアクターの一つが「地域新電力」と呼ばれる電力会社である。

地域新電力は、再生可能エネルギーなどを通じて、電力の地産地消に取り組む小売電気事業者と捉えられている。全国の電力シェアにおける割合は小さいものの、その発電シェアは近年まで増加傾向にあった。

特徴的なことは、多くの地域新電力が、エネルギーにかかわる事業を通じて地域の固有の課題に関与し、地域経済の振興やまちづくりにかかわる取り組みを行っている点である。たとえば、鳥取県米子市を中心に事業を展開する「ローカル・エナジー株式会社」は、「エネルギーの地産地消による新たな地域経済基盤の創出」をビジョンとして掲げている。彼らは、地域内にエネルギー供給事業者を置くことによって、地域外へ資金が流出することを抑え、地域内で資金を循環させることで、地域経済の基盤を強化することをめざしている¹⁷。

これらの企業は、少子高齢化、産業衰退、脱炭素への要請のもと、地域の再生可能エネルギーの導入を促進し、営業利益によって地域サービスの拡大をめざしている。また、地域の課題を明らかに、その解決策を提案するシンクタンクとしての役割を担う企業もあるという。

地域新電力の運営を円滑なものとするため、これを支援する組織も存在する¹⁸。彼らは、電力事業のための通信システム、

専門的な知識を持つ人材、電源機材、そして事業ノウハウを複数の地域新電力事業者と共有することで、各事業者のコスト負担やノウハウ不足をカバーすることでその支援を行っている。

しかし、地域新電力の中には、大都市に本部を置き、実際には地域に雇用やノウハウを生まないものも多く存在していることが指摘されている。また、近年の燃料価格の高騰によって、多数の新電力事業者が倒産や撤退に追い込まれていることも明らかになっている。地域創出という社会的な目的と、事業の合理的経営という経済的必要性が相反する場面では、地域新電力は苦しい運営を迫られることになる。

2.4.2 再エネ大規模導入地域における新たな変化

日本においては、再生可能エネルギーの導入が大規模に進んでいる地域がある。こうした地域では地域の自然の特色を生かしながら、固有の社会課題を乗り越えようとする動きがみられる。

東北・秋田県においては、これまで少子高齢化、若者の県外転出、付加価値の低い産業構造など、社会課題に悩まされてきた。しかし、近年、日本有数の風力発電適地としての性格を活かして、多数の風力発電プロジェクトが推進され、すでに300基以上の風力発電機が設置されている。秋田県の風力発電導入量は350kWを超え、全国の都道府県で2位となっている¹⁹。

現在も、国内最大規模の洋上風力発電プロジェクトが進められているが、これには、多様なアクターが関与している。地域の風力発電会社は、発電適地の選定、パートナーの提携、発電所の立ち上げ、メンテナンスなどを含む幅広い事業に取り組む一方、企業コンソーシアムを形成し、地域産業の活性化を図っている。地方銀行は、大規模な資金調達を必要とする風力事業をプロジェクト・ファイナンスで支えている。ただし、洋上風力発電の場合は、地域の漁業者から環境影響への懸念が訴えられることもある。

17 また、鹿児島県日置市を拠点とする「ひおき地域エネルギー株式会社」は、2014年に日置市に所在する14の企業、自治体、そして地元金融機関が設立したもののだが、地域の生活の質の維持向上をめざし、再生可能エネルギーの活用や電力の地産地消に取り組むとしている。

18 日本国内では、地域新電力の支援を行う主体が複数あり、社団法人の形態をとるもののほかに、株式会社として活動するものもある。

秋田県においては、自治体が多様なアクターの調整を行うことで、風力発電を核とする新たな産業の創出に力を入れている。県は市、町、国、漁業関係者と研究会・協議会を設立し、知見が不足する分野において、多様な関係者の意見を調整する場を設けている。また、風力発電にかかわる部品製造やメンテナンス産業の創出をめざす施策を行うほか、地域の大学や技術学校と連携しながらグリーン人材の育成のためのプログラムを展開している。

しかし、風力発電は、日本においてはノウハウが確立された分野ではないため、地域が主導する動きと、政府が進める考え方の間にギャップが生じることもあることが、地域の関係者から指摘された。日立東大ラボのエキスパート・インタビューにおいては、政府に対して、地域資源の活用をめざし、分野横断型の制度設計のビジョンのもとに、透明性の高い事業推進プロセスを求める声が聞かれた。

2.4.3 産業クラスター／化学コンビナートの転換

日本におけるカーボンニュートラルの実現のために、日本に点在する産業クラスター、とりわけ石油化学コンビナートの転換は、もっとも重要な課題のひとつである。

神奈川県川崎市臨海部には、高度経済成長を支えた石油精製・化学、鉄鋼、エネルギー、セメント、物流等の工場／施設が集積している(図2.2)。市の炭素排出量は国内の政令指定都市のなかで最も大きく、うち臨海部に立地する主な企業がその73%を排出している²⁰。

市は、現在のコンビナートのあり方がコンビナート全体の

産業競争力の低下につながるとし、2022年に「川崎カーボンニュートラルコンビナート構想」を発表し、同臨海部を「カーボンニュートラル社会に相応しいエネルギー供給拠点及び素材・原料の製造拠点到転換する」ことをめざすとした。

川崎市は同臨海部が「エネルギー供給拠点」「化学産業の集積」「プラスチックリサイクル施設の集積」「水素関連企業の集積」など、多様な機能を備えていることを取り上げ、これらのポテンシャルを基礎に、首都圏全体のカーボンニュートラル化に貢献する役割を果たすことができると説明する。

一方、石油化学コンビナートの脱炭素化には多くの課題も生じている。たとえば、リサイクル・プラント、炭素分離、そして水素基地関連施設などの新たな投資の負担の配分、副生物を有効利用する化学プロセスにもとづく企業間連携の構築、そして行政のみで長期的設計ができない共有インフラの整備の主体など、従来の事業構造においては解決できない課題もある。

関係者からは、業種による縦割りでなく、産業集積地を統合的に捉えたビジョンと支援、持続可能なインフラの整備の支援、企業や市民の連携メカニズムの設計などを求める声が聞かれた。

2.4.4 シナリオへの示唆

2021年から22年ごろにおきたグローバルな地政学的変化や国内の地域における取り組みについて明らかになった事項は、トランジション・シナリオにおける記述にも重要な示唆を持つ。ここでは、特に関連性の高いいくつかのドメインについて、簡潔に論じる。

19 日本風力発電協会. 2023.「速報版 日本の風力発電導入量(2022年12月末時点)」. 2023年2月21日アクセス. http://jwpa.jp/pdf/dounyuuujisseki2022graph_hp.pdf.

20 神奈川県川崎市. 2022.「川崎カーボンニュートラルコンビナート構想」. <https://www.city.kawasaki.jp/templates/pubcom/cmsfiles/contents/0000137/137116/CNK2.pdf>.



図 2.2 川崎臨海部における産業集積

出典：以下の資料をもとに日立東大ラボ作成：神奈川県川崎市．2022.「川崎カーボンニュートラルコンビナート構想案」．
<https://www.city.kawasaki.jp/templates/pubcom/cmsfiles/contents/0000137/137116/CNK2.pdf>, p. 13.

1. 太陽光：コスト競争力の高まりと事業の持続可能性

シナリオ 「多様なエネルギー」「再エネ100%」ケースのいずれにおいても、2020-30年には、ウクライナ戦争後、電力価格が大きく高騰したことで、太陽光発電のコスト競争力が高まる。住宅設置型の義務化や、地方自治体による太陽光発電の推進が発電量拡大を後押しする。

論点 新たなアクターの参画があるが、環境影響や事業規律にかかわる課題の解決が重要となる。また、2030-40年代に大規模な機材の廃棄、入れ替えへの必要が予想される。EVの急速な普及、地域の脱炭素を支えるために、スマートな送配電網の普及が重要となる。

2. 石油化学：サプライチェーン変革から循環型ビジネスモデルの転換へ

シナリオ いずれのケースにおいても、2020-30年には、非化石資源由来原料、ケミカルリサイクルへの社会的関心が高まり、生産プロセス、国際的なサプライチェーンの変更の取り組みが本格化。2030-50年には、産業の再配置が進展。循環経済に対応するために、ビジネスモデルが変化し、エコシステムが刷新する。

論点 炭素回収や貯留の国内外のサプライチェーン構築と技術開発、産業集積地内外のビジネスモデルの革新、そして新たなエコシステムの構築のための政策や企業間連携が重要な論点に。

3. 農業：食糧システムの転換と独自の課題

- インサイト**
- ・世界の温室効果ガスの4分の1が食糧システムから排出されており、森林破壊、生物多様性の喪失、農業の流出などの観点から、現在の食糧システムは持続不可能と考えられている。
 - ・EUはFarm to Fork戦略を推進。日本でもみどりの食料システム戦略を制定し、2050年までの農林水産業の炭素排出ゼロ、化学農薬の50%低減などを目標に掲げている。
 - ・日本では、農地の4割が水田で、温室効果ガスの半分以上がメタンガスである。農地土壌による炭素吸収に可能性があるが、現時点では農地の土地利用は所有が細分化されている。
 - ・現在の食にかかわる習慣のあり方の転換や、持続可能な航空燃料(SAF)への農業セクターの参画が、日本における農業に大きな影響を与える可能性がある。

なお、すでに述べたように、シナリオ全体の概要については、別冊において公開する予定である。は、巻末の資料を参照されたい。また、各ドメインの詳細な

2.5 | 第2章まとめ

これまでの検討は、ロシアのウクライナ侵攻によって大きく変化する地政学のランドスケープにおいても、日本が気候変動とエネルギー転換を推進するガバナンスを構築するとともに、多様な条件のもとで取り組みを広げる地域アクターを支援しながらカーボンニュートラルを達成していくことの重要性を改めて明らかにするものである。本章では、日本におけるカーボンニュートラルの達成のために、下記のような論点を示したい。

1. 現在の地政学的危機への対応において、システムの変化を加速させる統治メカニズムをつくれるか。すでに論じたように、EU、アメリカはロシア脱却の方針のもとに、中長期的には気候変動対策を加速している。一方、日本の国民意識・構造転換には遅れも指摘されている。急激な地政学的変化において、あらゆるセクターと統合的なトランジションを加速させるガバナンスが重要性を増している。

2. 気候変動、燃料高騰の中で、日本がアジア太平洋の気候・エネルギーのトランジションへの国際連携をリードできるか。アジア太平洋では、エネルギー・食糧価格の高騰によって脱炭素化に対する逆行リスクも生じている。日本にとって、地政学的変化の中でも、水素・アンモニア、レアメタルなどの資源や炭素貯留のサプライチェーン確保が不可欠となる。政

府は、気候対策を強化するオーストラリアや化石燃料依存が高いアジア諸国と、気候やエネルギーに関する重層的な国際連携をリードする取り組みを強化させていくことが重要になる。

3. 多様な自然環境のもとでローカル・アクターの主体性をエンパワーし、地域ごとに異なるトランジションの道程を示せるか。自然環境が豊かな日本では、地域ごとに社会課題、生活様式、エネルギーのポテンシャルが異なり、トランジションの道筋は多元的である。そのため、市民や地元企業などの地域のアクター（行動主体）の能力構築を支え、エネルギーや食料のグリーン転換を中核とした繁栄をめざす必要がある。特に、需要側の調整力は、地域のエネルギーの効率化や安定にとって重要であり、デジタル・イノベーションの果たす役割は大きい。

4. 政府は戦略的な産業政策のもとで、自治体の連携能力を支えながら、市民や企業とともに合意形成を行えるか。日本の諸地域では、前例のない挑戦のために、自治体の調整機能の重要性が増している一方、人的資本やノウハウ、横断的なしくみづくりが不足している。政府は、戦略的な産業政策のもとで、縦割り行政を克服し、地域の力を最大化する支援を行っていく必要がある。そして、政府・自治体が市民や

企業とともに、科学的データと開かれた対話にもとづく合意形成のプラットフォームの構築を行うことが、長期的かつ広範な分野におけるトランジションを成し遂げる重要な基礎となるだろう。

急激な地政学的変動のもとでも、アジア太平洋地域との新たな連携を模索しながら、地域の主体性に支えられた気候とエネルギーにおけるトランジションを加速するガバナンスを構築していくことが求められている。

第3章 バックキャストとフォアキャストのギャップを踏まえたエネルギーシステムの対策

本章では、第4報報告後の国際情勢の変化により、燃油価格や電力価格の高騰、電力需給ひっ迫の顕在化を受け、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。

3.1 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、燃油価格が高騰しているが2030年の温室効果ガス排出量46%削減(2013年比)および2050年のCNが可能となるシナリオはあるか、またこれまでの検討とどのように違ってきたのか、をシミュレーションにより定量的に示す。特に、2050年からのバックキャストによるシナリオに加えて、現在からのフォアキャストとの整合性についても検討した。これによりバックキャストシナリオを実現するために現在から近い将来に取り組むべき課題、イノベーションを示す。

まず燃油高騰の想定条件を図3.1のように想定した。Case 0はウクライナ侵攻前の長期見通しであり米国EIA²¹試算²²を基にした条件(提言書第4版の条件)を示している。2022年

の燃油価格高騰を反映した見通しをCase1に示す。こちらは現在の燃油市況価格は2030年までに沈静化し、長期トレンドに戻る²³ことを想定した条件とした。

この2つの条件での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^{24 25}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

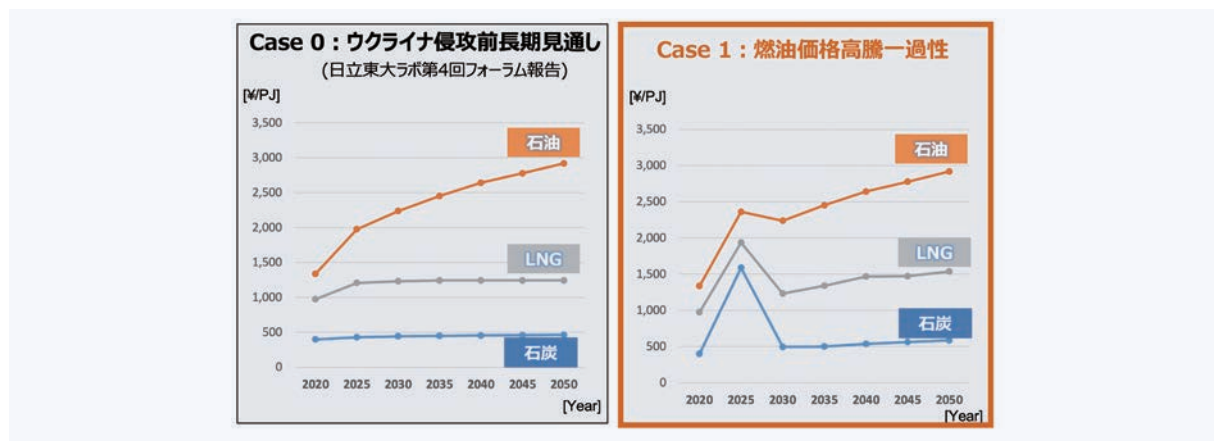


図 3.1 燃油価格高騰を考慮した条件

21 EIA: Energy Information Administration (米国エネルギー省) エネルギー情報局

22 EIA. 2022. "ANNUAL ENERGY OUTLOOK 2022," March 3, 2022. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>.

23 2025 年は現在の燃油市況価格を、2030 年以降は米国 EIA 予測を元に作成

24 Kawakami, Yasuyuki, Ryoichi Komiyama, and Yasumasa Fujii. 2018. "Penetration of Electric Vehicles toward 2050: Analysis Utilizing an Energy System Model Incorporating High-Temporal-Resolution Power Generation Sector." IFAC-Papers OnLine 51, no. 28: 598–603. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318334906>.

25 川上恭章, 小宮山涼一, 藤井康正. 2018 年. 「高時間解像度の発電部門を持つエネルギーシステム技術選択モデルによる CO₂ 削減シナリオの分析」電気学会論文誌 B 138, no.5: 382–391. https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejpes/138/5/138_382/_article/-char/ja.

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3.2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。各シナリオとも電力需要は増加し、水素の原料利用が進み、エネルギー総コストは2020年比で20～50%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3.3に原子力活用シナリオにおけるCase0、Case1、Case1'のCN移行過程の各年度の電源設備容量の計算結果を示す。燃油価格高騰によって、Case0に比較してCase1では2030年の断面の太陽光発電設備が増加し、またLNG発電の利用が低下していることがわかる(①)。また各ケースともコージェネが増加し熱の利用で効率化が図られている(②)。このように、燃油価格高騰により化石燃料から脱炭素電源への移行や熱の効率的利用を早期に実施することがエネルギー総コスト面から必要とされることがわかる。一方でCase1で

は太陽光発電設備の急激な増加と2040年以降の設備廃止が想定され、設置場所の乱開発や廃棄設備増などが懸念される。そこで、発電設備の廃棄量を制限する重みを付けて再計算したものをCase1'として示す。このように現状からのフォアキャストを考慮してバックキャストとのギャップを軽減するシナリオの検討が必要である。

次に図3.4に水素利用、CO₂回収と利用の内訳を示す。水素は火力発電やFCV利用から2045年以降にCCU利用に60%が利用される。CO₂は2045年以降DACによる回収量が増加し、また2050年では回収されたCO₂は燃料製造も活用されることがうかがえる。

図3.5には、シナリオ計算結果から再エネの発電日変化を示している。無風や雨天など、風力や太陽光発電量が小さくなる時期も想定されており、VREの出力不足を他の電源や蓄電によって発電量を補えることが必要となる。実際には希頻度で再エネ発電量が期待できない時期や、他の発電の燃料調達が滞る場合、発電設備のメンテナンスや故障による停止、自然災害による送電設備の障害など、エネルギーセキュリティとレジリエンスについても想定し、準備しておくことが必要である。

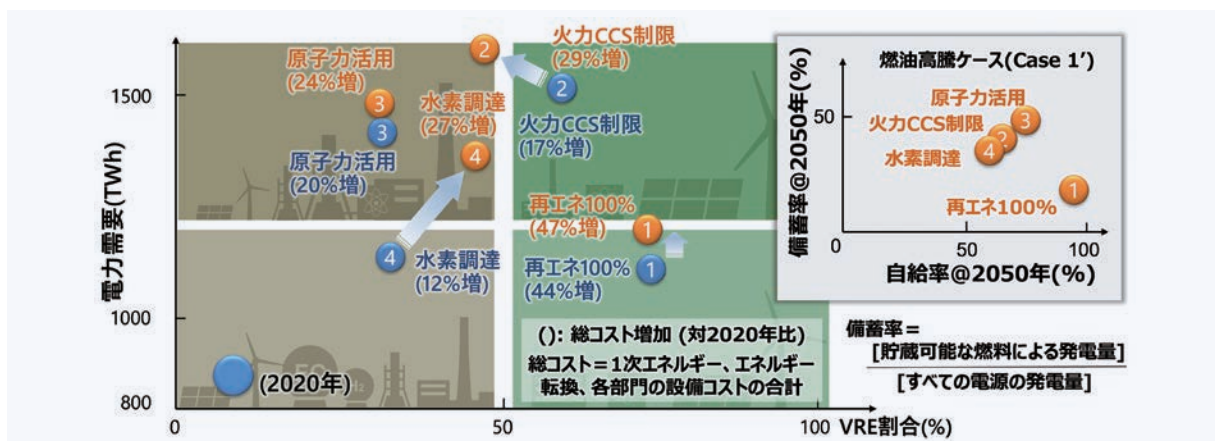


図3.2 再エネ導入と電化促進による4つの社会像の燃油高騰による変化

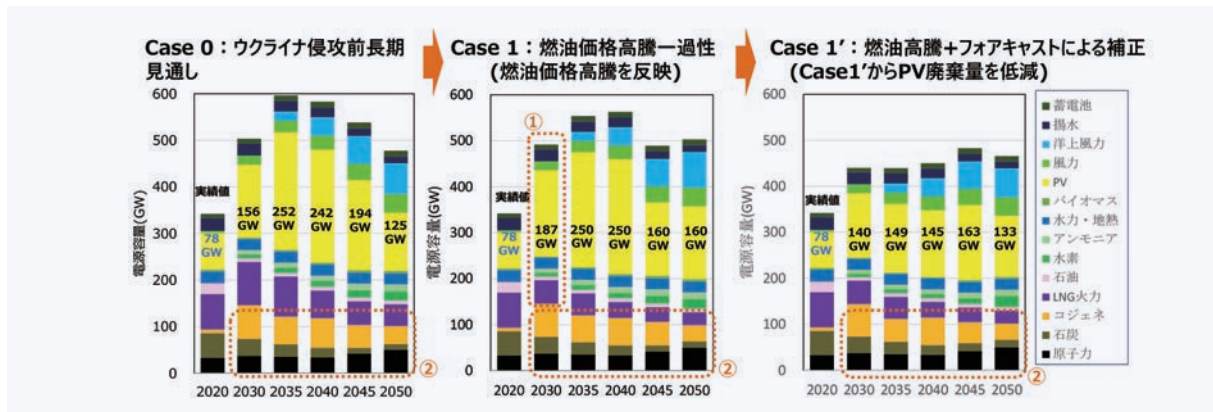


図 3.3 各年度の電源設備容量（原子力活用シナリオ）

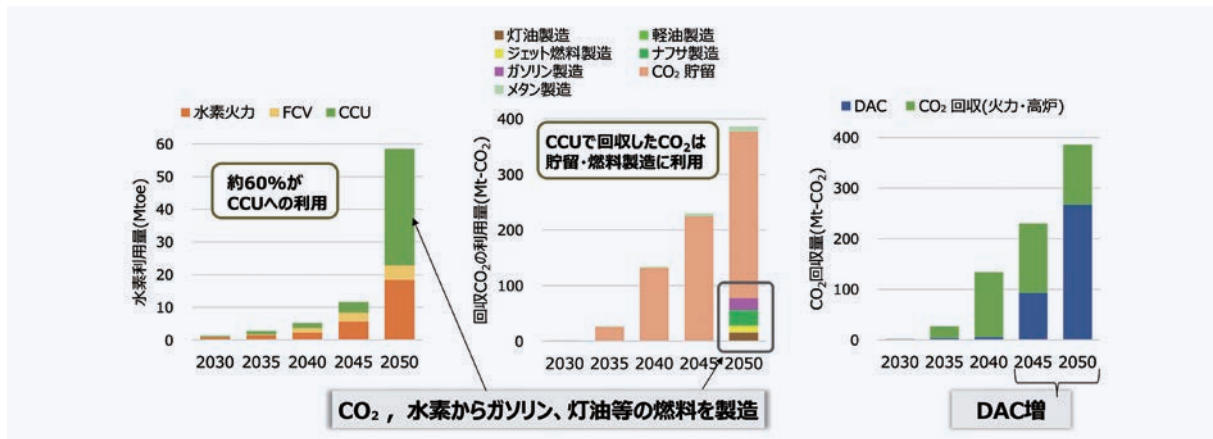
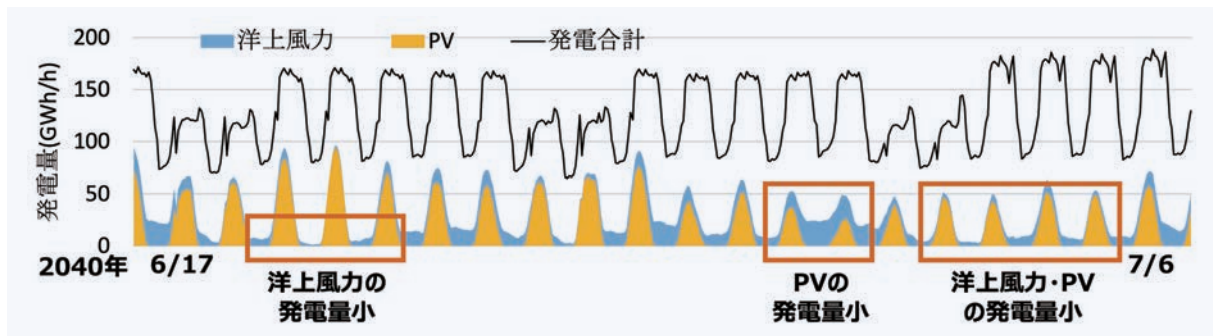

図 3.4 各年度の水素利用、CO₂ 回収と利用量（原子力活用シナリオ Case1'）


図 3.5 太陽光、風力発電量が少ない時期の例（原子力活用シナリオ Case1'、2040 年 6/17-7/6）

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 3.3 に示された現状の電源設備構成から考えると、前述のように、例えば太陽光発電設備の急激な増加（78GW→187GW）と2040年以降の設備容量減少（設備廃止）は、設置場所の乱開発や廃棄設備増などが懸念される。

そこで、発電設備の廃棄量を制限する重みを付けて計算した Case1' では、2030 年の太陽光導入やその後の設備廃棄が軽減されたシナリオが得られている。この条件で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 (Case1')、62GW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²⁶。これから2030年の140GWは高い障壁の数値といえる。太陽光発電設備を62GW新設するためには、平均的な面積(15km²/GW)から考えると930km²必要であり、これは東京23区や琵琶湖の1.5倍の面積に相当する。容量で考えると国内最大級のメガソーラ設備(約260MW)を240か所の新設に相当する。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 (Case1')、15GW増必要

日本風力発電協会 (JWPA) 資料²⁷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²⁸から、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70GW (Case1')

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16GW (Case1')

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16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 (Case1')

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 シミュレーション分析・評価に基づく電力システムの課題と対策

前節までに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ことが示された。本節では脱炭素電源への転換や再エネ導入量の急拡大など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。

図3.6に再エネ急拡大にともなう基幹電力システムの課題と対策を、図3.7に再エネ電源や蓄電システムなどインバータ電源の大量導入にともなう課題と対策を示す。以下、留意すべき課題と必要となる解決策をシミュレーション事例をふまえて示す。

26 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/santeii/pdf/071_01_00.pdf

27 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

28 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/santeii/pdf/078_01_00.pdf



図 3.6 再エネ急拡大にともなう基幹システムの課題と対策

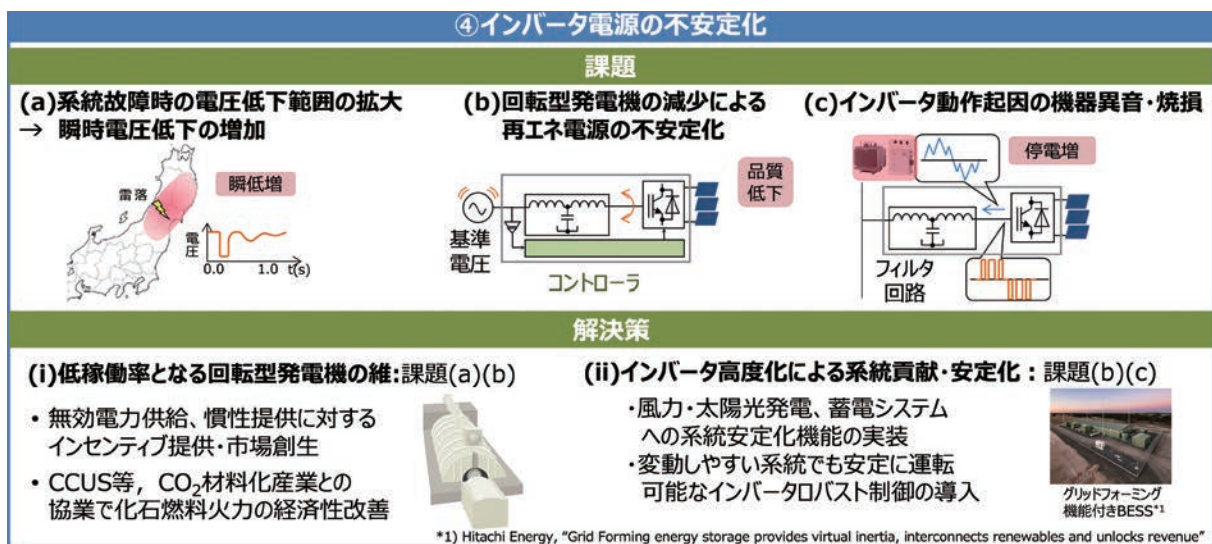


図 3.7 インバータ電源の大量導入にともなう課題と対策

(1) 慣性低下に起因する周波数低下の課題

再エネ発電が大きい時間帯に回転型発電機停止により系統の慣性が低下し、地震発生時などの電源脱落時に周波数低下が大きくなり、更なる電源脱落や停電範囲拡大につながる課題がある。この課題に対し、(a) 慣性増加のための回転型発電機(火力・原子力等)の運転台数確保、(b) 電源脱落直後の周波数低下改善のための再エネ・分散リソースのインバータ慣性制御の導入、が対策候補となる。

以下、シミュレーション例で具体的に示す。図 3.8 に将来の東日本系統を模擬した系統²⁹を対象として系統慣性を低下させた解析条件を構築し、その条件において火力発電機が

多数台解列した場合の系統周波数の様子を示す。インバータ電源等の非同期電源比率を示す SNSP が 75% に達する場合は、火力機脱落直後の周波数変化率(RoCoF) が -2.3Hz/s となる。この値は、一般的に周波数安定度確保の管理値として採用される周波数変化率 2.0Hz/s を逸脱している。一方で、火力発電機の出力を低下させて系統に連系する台数を増やして系統の慣性を 15% 増加させた場合は、RoCoF は -1.96Hz/s と管理値内とすることが可能となる。

次に図 3.9 に分散リソースのインバータ慣性制御による対策例を示す。ここでは蓄電池や出力増加可能な再エネの出力を、周波数低下時に出力を上昇させる制御を行った。火力機 7.1GW

29 電力広域的運営推進機関, 2021 年, 「マスタープラン 中間整理」2021 年 5 月 31 日
https://www.occto.or.jp/iinkai/masutapuran/2021/210524_masutapuran_chukanseiri.html

が一斉脱落した直後に、分散リソース出力を10% (約3GW) 増加させることで、RoCoFを-2.3Hz/sから-1.95Hz/sに改善可能とわかる。インバータの慣性制御方式には様々な手法が検討されており、これらの実用化と分散リソース(蓄電や再エネ)やHVDCなどのインバータ機器への実装・普及策も進める必要がある。

(2) 調整力不足に起因する周波数変動の課題

再エネ出力変動により需給不均衡となり周波数が変動し、

また再エネ発電ピーク時には出力抑制や系統混雑発生する課題に対しては、蓄電システムの充放電や需要調整など分散リソース活用と、需要の発電エリア近隣への配置誘導によって、系統混雑を解消しつつ調整力を確保することが必要である。図3.10に示すように、前述のシナリオ計算結果では必要となる蓄電設備と需要調整量は2030年で合計17GWと算出された。また調整力の配置は、送電線過負荷派生を抑制できるように、出力変動を発生させる再エネ近傍に分散して配置することが望ましい。

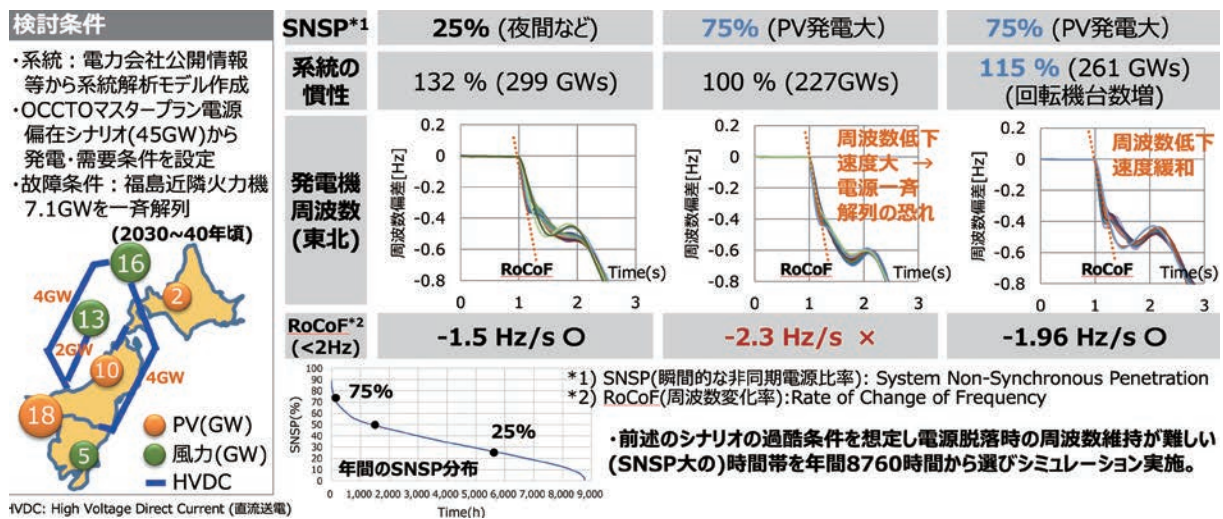


図 3.8 慣性低下に起因する周波数低下と回転型発電機の連系台数増による対策

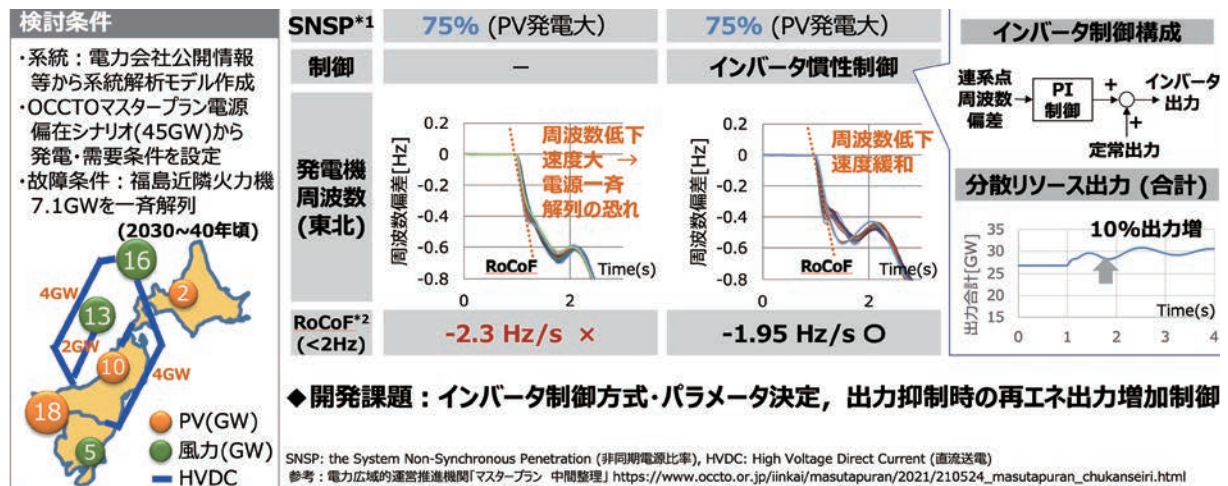


図 3.9 慣性低下に起因する周波数低下と分散リソースのインバータ慣性制御による対策

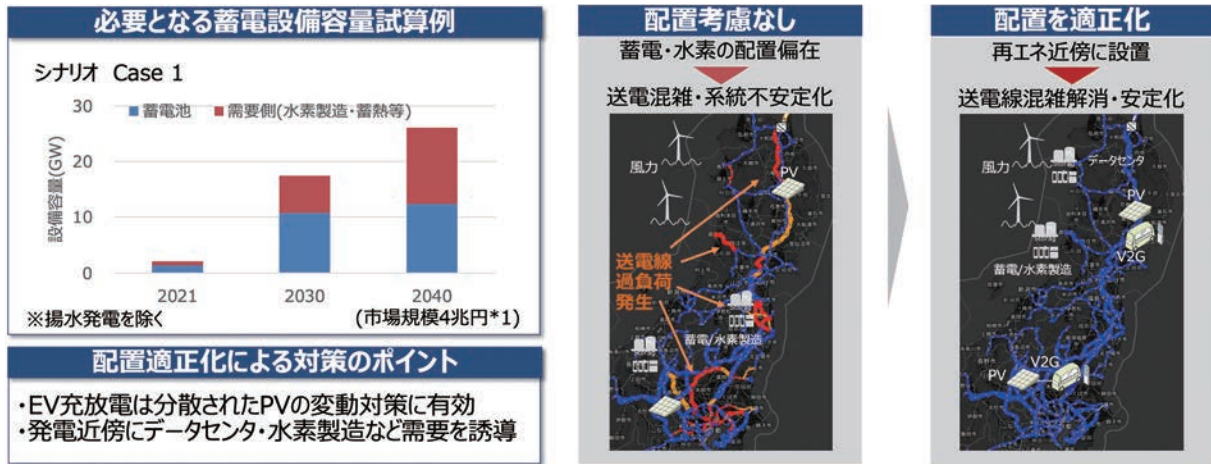


図 3.10 調整力の必要量と配置適正化による対策イメージ

(3) 系統安定性確保の課題

偏在する再エネ電力を需要地へ送る送電能力が上限に達する課題に対し、送電増強・系統安定化による広域送電能力の拡大が必要である。図 3.11 に東日本系統の東北と東京間の連系線の送電限界のシミュレーション例を示す。ここでは OCCTO マスタープランなどを参考に公開情報をもとに系統の安定性をシミュレーション可能な系統モデルを作成した。図の (a) に示すように東北北部での地絡故障に対し、東北から東京への交流連系線の潮流が 9.3GW が系統地絡故障時にも安定に送電可能となる交流系統の上限値と算出された。この条件に、東北東京間に 2GW の HVDC を増設すると、交流系統と HVDC の合計の送電可能量は 11.3GW に増加する。さらに、東北地域の再エネおよび蓄電設備(合計 1.1GW) を地絡故障直後に安定化制御を行うことで、交流系統と HVDC の合計の送電可能量を 12.1GW まで増加できる。

このように送電増強・系統安定化対策により、電力消費地への送電能力を強化でき、これによって東北地域の再エネ発電量増加・出力抑制回避に貢献できる。

(4) インバータ電源増にともなう不安定化の課題

インバータ電源増にともなう回転型発電機の減少により、インバータで系統に連系される再エネ電源の制御不安定化や、落雷等による系統故障時の電圧低下範囲の拡大が懸念される。これに対しては、インバータ制御の高度化や回転型発電機による電圧サポートが有効となる。図 3.12 に回転型発電機有無による系統故障時の電圧低下の様子を示す。故障条件は宮城県の実送電線に落雷が発生したのち故障区間の切り離しがなされたものとした。東北北部の回転型発電機が停止している場合は、系統故障中の電圧が故障近傍の B 地点から北部の A 地点に至るまで 20% 程度まで低下しており、負荷の動

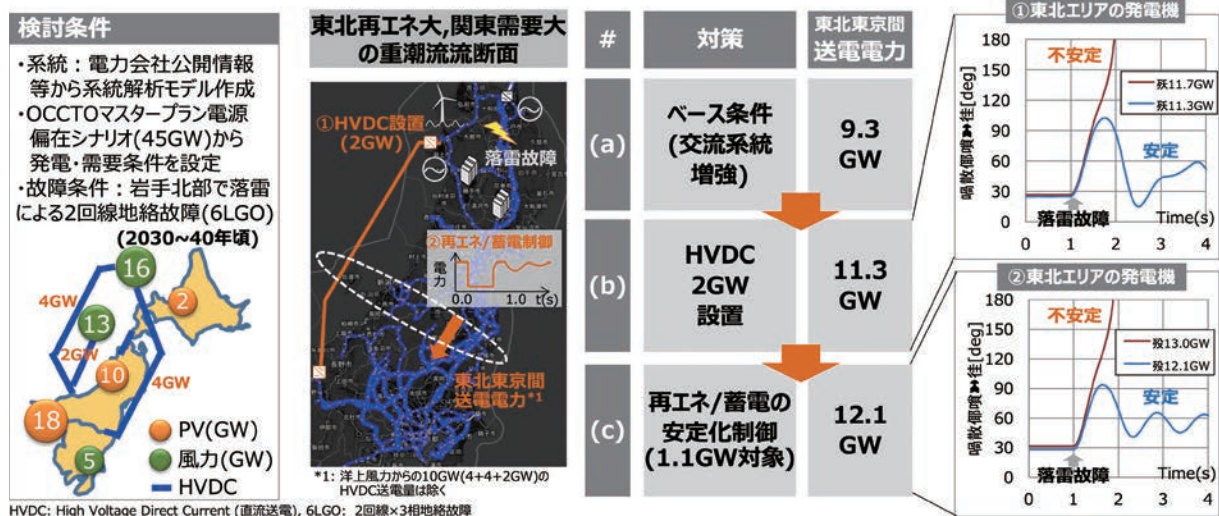


図 3.11 調整力の必要量と配置適正化による対策イメージ

作停止につながる影響が懸念される。一方、回転型発電機が運転されている場合は電圧低下幅が緩和されることがわかる。このように、インバータ電源増加が進む際には、近隣の回転

型発電機の稼働検討、電力品質の維持や代替技術のイノベーション支援もふまえて検討することが必要となる。

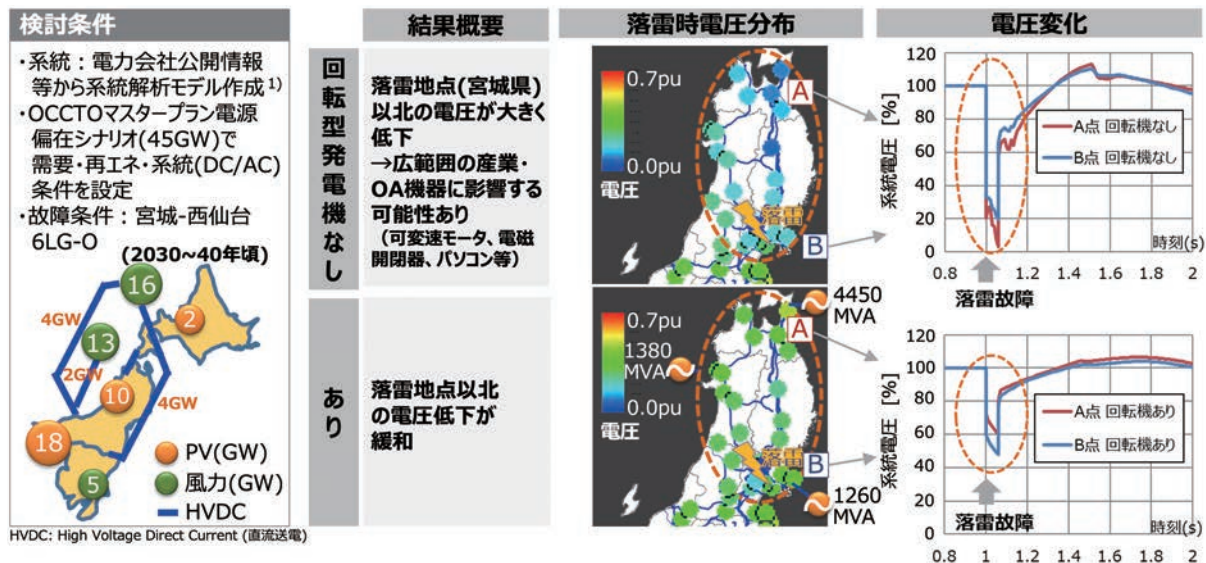


図 3.12 回転型発電機有無による系統故障時の電圧低下^{30,31}

3.4 データとシミュレーションで可能とする分析・評価技術

CNに向けたシナリオや課題と対策を検討するためには、多くのステークホルダーがデータを持ち寄り、予見される多様な条件に対し、定量的な評価を随時繰り返して方策を検討していくことが有効であり、そのためにはデジタルを活用したシミュレーション評価技術の開発・活用が重要となる。基幹エネルギーシステムにおいては、電力系統の大規模数値シミュレーションツールを活用した検討によって、①地点別電力価格と分散リソース協調の必要性分析、②電力需要の柔軟性向上施策の立案、③貯蔵とエネルギー確保を両立する技術の確立、を行うことが必要である。このように、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、関連するステークホルダーによるデータやシミュレーションモデルの共有と情勢変化に伴う多様な評価シミュレーション結果を考慮した設備やイノベーションへの投資、制度整備を進める必要がある。

(1) 地点別電力価格と分散リソース協調の必要性分析

CNに向けた再エネや分散リソースの増加、電化電動化進展による需要の増加に対し、送電網の有効活用や増強を効率的に進めていく必要がある。そのためには以下に留意点を示すように、設備増強の費用対効果や電源の立地誘導なども活用していくことが有効である。

- ・送電線増強：送電線混雑緩和措置（デマンドレスポンス（DR）、蓄電池など）のコストも踏まえ、送電線増強コストの費用対効果の評価が重要となる。
- ・地点別電力限界価格（ノードルプライス [LMP³²]）：各地点の需給状況を反映し（高価格地点→電源増強の費用対効果が相対的に高い）、送電線投資検討の重要な指標。ノードルプライス可視化による再エネ電源の立地誘導も送電線混雑緩和に向けた重要な課題となる。

30 電気協同研究会・1990年、「瞬時電圧低下対策」第46巻第3号。

31 北陸電力・“お客さまにおける瞬時電圧低下の対策,” 2023年3月1日アクセス。https://www.rikuden.co.jp/tairai/taisaku.html.

32 LMP: Locational Marginal Price (地点別電力限界価格)

図3.13にノードルプライス試算例を示す。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^{33,34}を用いてCNを実現する電源構成を想定して計算している³⁵。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が可能となる。

(2) 電力需要の柔軟性向上施策の立案

CNに向けて再エネ電源増加に対応する場合に、経済的に再エネ出力変動に対応するためにはDRなど電力需要の柔軟性向上が有効である。図3.14に電力負荷におけるDRの

活用割合に対する他の調整力代替量を試算した結果を示す。こちらも前述の電力需給モデルによるシミュレーションを活用して試算している。具体的には、各ノードの各時点での電力負荷水準にDR上限・下限制約を与え、各ノードの年間電力需要総量はDR前後で不変と仮定の上でシステムコスト最小化を行い、各ノード各、時点での最適DR導入量を決定している。計算結果から、電力負荷のDRとして活用できる割合が増加するにしたがって、蓄電池等の電力貯蔵設備を代替し低減できることがわかる。実運用に向けては、エンドユース技術(電気自動車、ヒートポンプ、ビル・家庭向けエネルギーマネジメントシステム等)や行動変容による電力需要の柔軟性をいかに高めてゆくか、需要側技術を需給調整にいか

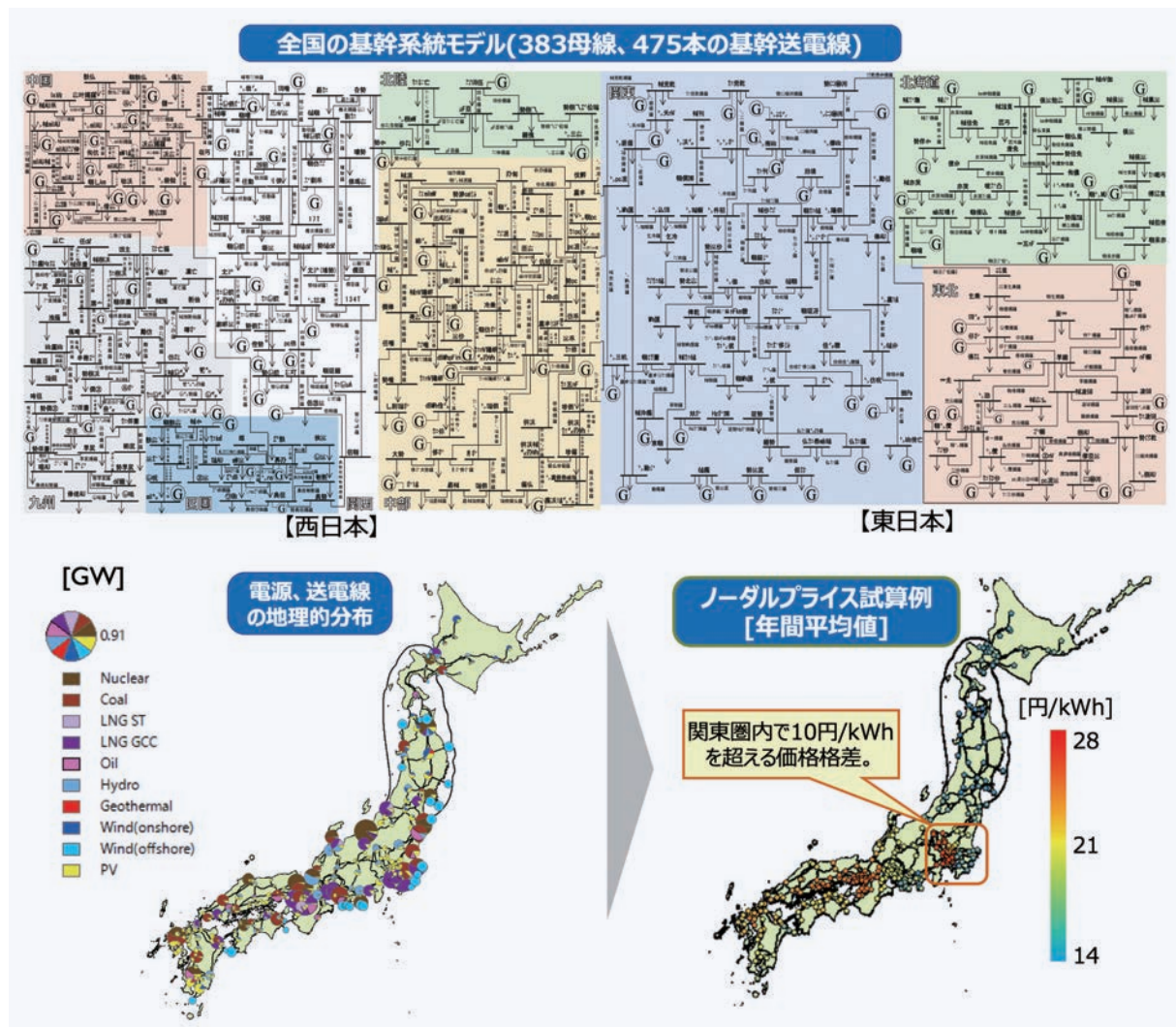


図3.13 電力系統大規模シミュレーションを用いたノードルプライス試算

33 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.

34 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.

35 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

ミットさせてゆくか、に取組んでいく必要がある。

(3) 貯蔵とエネルギー確保を両立する技術の確立

再エネの出力低下が長期間にわたるような希頻度の気象条件を考慮すると、エネルギー貯蔵期間と量を適切に把握しそれに合わせた最適貯蔵技術の運用と要素技術開発が必要である。図3.15に風力発電と必要となるエネルギー貯蔵量の年間推移計算例を示す。エネルギーの長期間貯蔵に、水素貯蔵が選択されている。水素貯蔵は貯蔵様式をガスタンクや液体媒体への貯蔵など多様性があり貯蔵損失の低減が期待できる。本シミュレータではこれら水素の貯蔵技術が実現

しているとの前提で、長期間(週間、月間、季節間)の貯蔵に適する技術オプションとなり得る評価をしている。ただし、長期の水素貯蔵はOPEXが高いため、メタネーションやアンモニア、液体媒体であるトルエンを水素付加反応によってメチルシクロヘキサン(MCH)へ変換する等での貯蔵がより経済的となる可能性がある。また長期のバッテリー電力貯蔵はロスが大きいため、日単位での頻繁な充放電は、バッテリーがより適している。再エネ季節間貯蔵が実用化するためには、充放電の機会が少なく収益機会が限定的であることから、初期投資の大幅な抑制が必要となる。

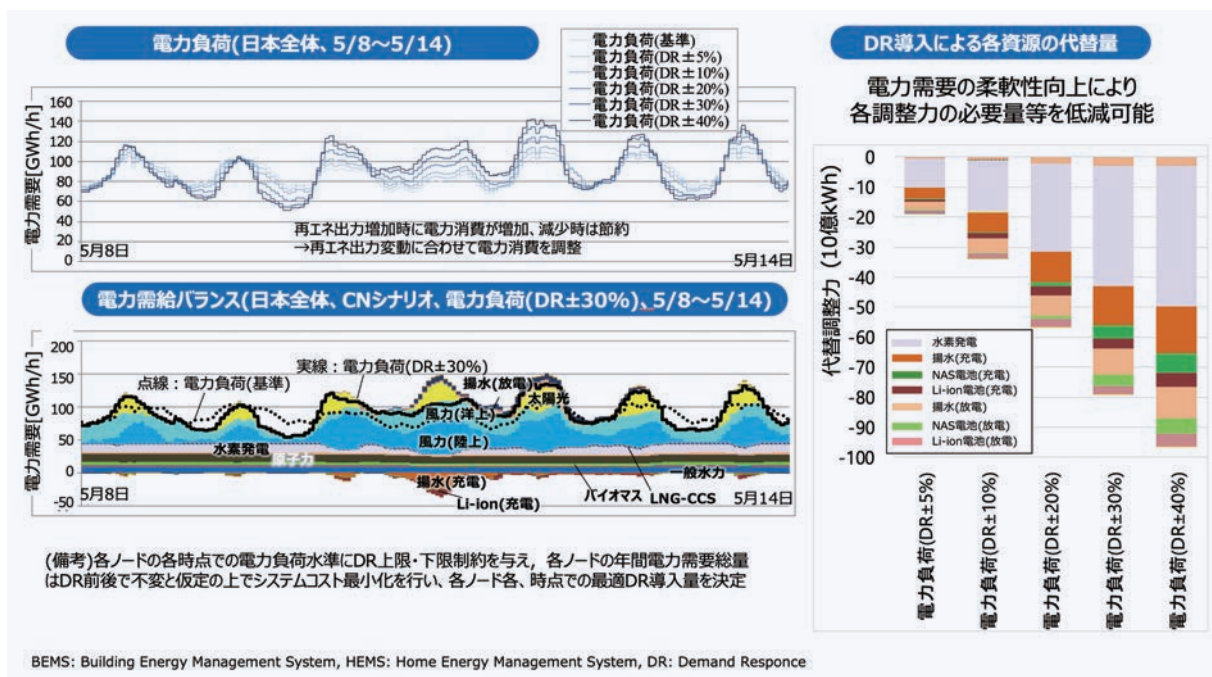


図 3.14 DR の活用割合に対する他の調整力代替量

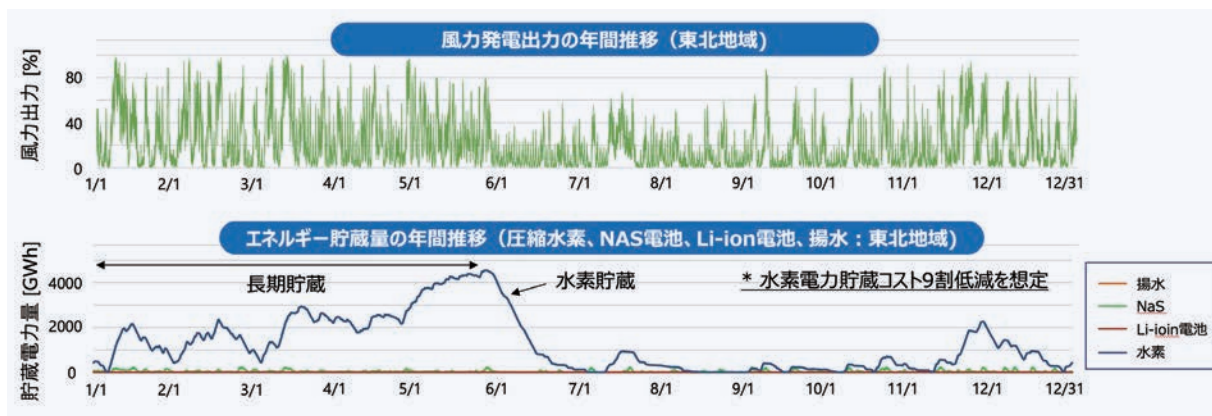


図 3.15 風力発電と必要となるエネルギー貯蔵量の年間推移の例³⁶

36 Komiya Ryoichi, Otsuki Takashi, and Fujii Yasumasa. 2015. "Energy modeling and analysis for optimal grid integration of large-scale variable renewables using hydrogen storage in Japan." Energy 81, 537-555.

3.5 第3章まとめ

1. 国際情勢を踏まえた燃油価格の高騰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62GW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、①DACによるCO₂回収の実用化と普及、②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。

2. 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ま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、を進めるべきである。

3. 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ー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、制度整備を進めるべきである。

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ー間のデータ・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。

第4章 再エネ主電源時代に向けた地域社会の役割

「地域社会」は、家庭、業務、産業といった「人々・社会の生活を支える」社会基盤であり、エネルギーシステムにおいては需要の側面を持つ。図4.1に示すように、再エネが主電源化する時代に向けて地域社会は、基幹システムから安定なエネルギー供給を受けるとともに、データを用いた「賢いエネルギー利用」で電力の需給調整に貢献する「調整力」を創出し、基幹システムと共に「S+3E³⁷のエネルギー需給」を実現する主体となることが期待される。ここで「調整力」とは、利便性や機能を損なうことなく、時間シフト可能な電力需要のことを指す。

昨年発刊した提言書第4版では、賢いエネルギー利用により地域での価値づくりを実現し、基幹システムに調整力を供給する協調・制御プラットフォームを提案するとともに、戸建住宅に着目して調整力とその創出価値を評価した³⁸。本版では、評価対象を、共同住宅を含む家庭部門全体および業務部門に拡張し、地域から創出可能な調整力とその価値を評価する。そして、エネルギー情勢が変化する中、エネルギー供給側と需要側のWin-Winで進める地域の脱炭素の推進施策と、誰がどのような行動をとることが期待されるか、地域や個別の特性を加味し、優先して進めるべき施策について提言する。

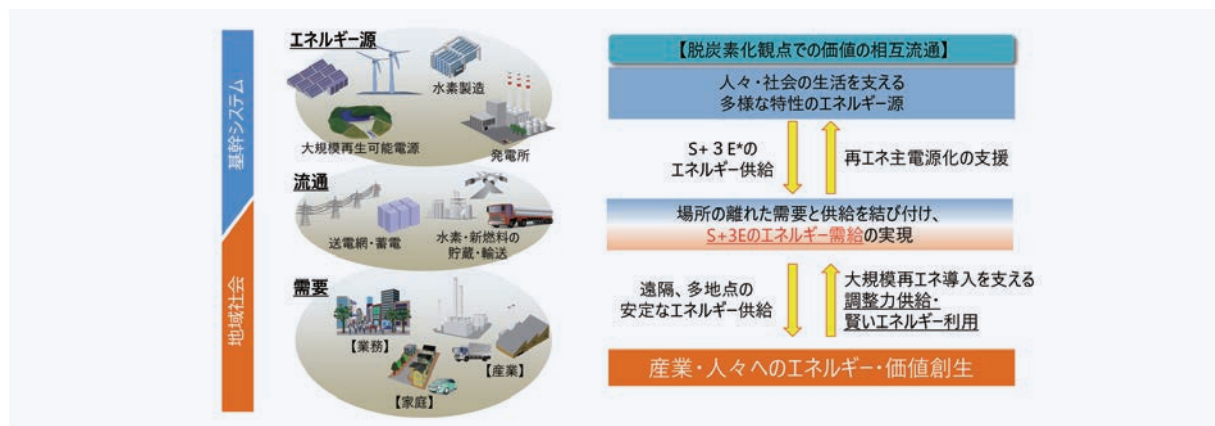


図4.1 基幹システムと地域社会の位置づけ

4.1 地域社会をとりまく情勢変化

ウクライナ侵攻以降顕在化した電気料金の高騰は、地域社会において家計や企業収益を圧迫している。需給ひっ迫も顕在化し、2022年6月には「電力需給ひっ迫注意報」が発令された。その後のアンケート調査では、事前に節電行動を検討していた需要家のうち約9割が節電行動を実施した

が、日を追うごとに節電行動が漸減しており³⁹、需要家の善意を基にした節電への取り組みには限界がある。自治体では、東京都で新築戸建住宅等に太陽光パネルの設置を義務づける条例改正案が可決される⁴⁰など再エネ主電源化に向けた取り組みが進んでいるが、費用負担や太陽光パネルの大量

37 安全性 (Safety)、自給率 (Energy Security)、経済効率性 (Economic Efficiency)、環境適合 (Environment) の同時達成

38 日立東大ラボ。2022. 提言書「Society5.0を支えるエネルギーシステムの実現に向けて」(第4版)

39 資源エネルギー庁。2022. 「2022年度の電力需給対策について」2023年3月1日アクセス。https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/052_04_03.pdf

40 東京都環境局。2023. 「制度改正に関する情報」2023年3月1日アクセス。https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/climate/solar_portal/program.html

廃棄の問題もあり、反対する意見もある。

このような情勢の中、「GX実現に向けた基本方針」⁴¹や「次世代の分散型電力システムに関する検討会」⁴²で分散電力システムや電力市場の再整備等が議論され、中小需要家による需給調整が注目されている。この分野では、米国連

邦エネルギー規制委員会 (FERC) の Order 2222⁴³ が2020年に発行し、各地域の実施に向けた準備が行われるなど海外では制度整備が進んでおり、日本でも中小需要家の需給協調参画を促す仕組みの構築を加速すべき状況にある。

4.2 電力需給の安定化に貢献する地域社会の協調ポテンシャル

日立東大ラボでは、「分散リソースと基幹システムをデータ連携」し、地域社会を構成する無数の中小需要家を含めた「全員参加の需給協調メカニズム」を実現する「協調・制御プラットフォーム(PF)」を提案してきた。図4.2に協調・制御PFの概要を示す。本PFは、例えばヒートポンプ(HP) 給湯器、電気自動車(EV)、蓄電池といった需要家がもつストレージ機器と連携し、常時は、協調を支援する自動化で利便性を損なわない範囲で市場価格と連動してこれらを運用し、システム全体では、天候や時間による需給変動を吸収し、再エネの出力制御の低減と、電源全体の燃料消費量の低減に貢献する。また、非常時、例えば再エネの出力が大きく低下した場合や大規模発電所の停止で供給が不足した場合には、当日の迅速な需要調整によって基幹システムへ調整力を提供し、

需給ひっ迫の緩和や停電の回避に貢献する。このような電力の供給側と需要側のWin-Winを構築するPFは、技術的には既に実現可能なレベルであり、多くのプレーヤが参加・協力することにより実現できる。EVの本格導入に象徴される今後の電力システムの変化に備え、本PFの社会実装を急ぐべきである。

本PFの社会実装に向けた意思決定、および賢いエネルギー利用への参画者を募るため、日立東大ラボは2030年断面における社会便益と事業性について分析・評価している。同図に示すように、昨年発刊した提言書第4版では家庭部門の中でも戸建住宅に注目して評価した。今版では、さらに集合住宅を含めた家庭部門全体、および業務部門としてオフィス、ホテル、福祉施設を評価対象とした。以下ではその評価方法と結果について説明する。

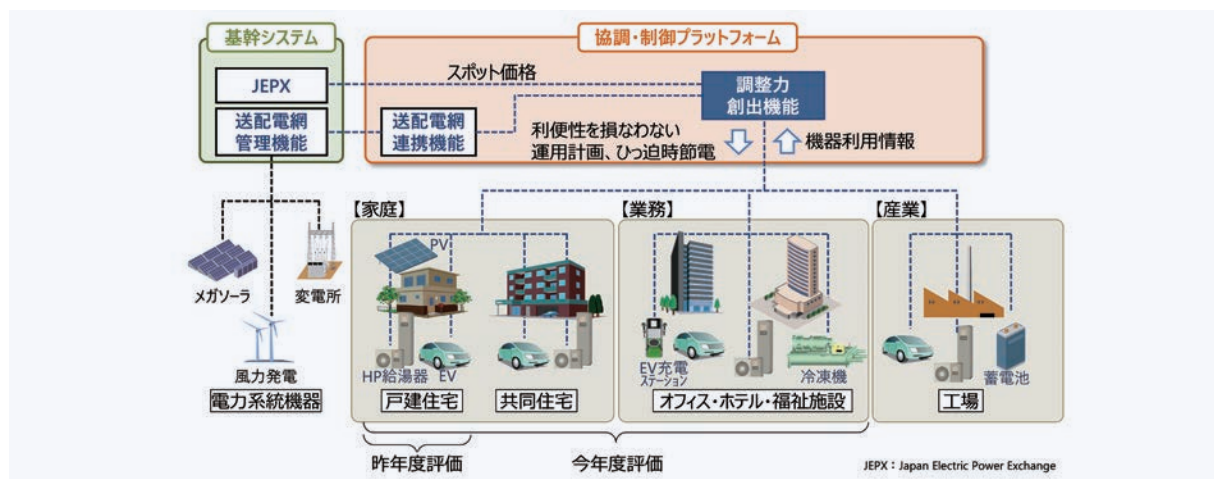


図 4.2 協調・制御プラットフォーム

41 経済産業省. 2023. 「GX実現に向けた基本方針」が閣議決定されました」2023年3月1日アクセス. <https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html>

42 資源エネルギー庁. 2022. 「次世代の分散型電力システムに関する検討会の設置について」2023年3月1日アクセス. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_bunsan/pdf/001_04_00.pdf

43 Federal Energy Regulatory Commission. 2020. "FERC Order No. 2222: A New Day for Distributed Energy Resources" 2023年3月1日アクセス. https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-09/E-1-facts_0.pdf

はじめに、図4.3を用いて協調・制御PFで創出可能な調整力の評価方法を説明する。本評価では次に示す3つのステップで解析を実施した。①まず、系統需給シミュレーションを実施し、電力の卸売市場価格であるスポット市場価格を算出した。②次いで、算出した日々のスポット市場価格に基づいてHP給湯器の運転計画とEVの充放電計画を立て、自治体規模の調整力を算出した。解析対象は東京都町田市と福島県いわき市とし、町田市では家庭部門(戸建住宅・集合住宅)におけるHP給湯器とEV、いわき市では家庭部門におけるHP給湯器とEVに加え、業務部門のHP給湯器をアグリゲーションの対象に含めた。解析条件として、HP給湯器による貯湯とEVの充電を夜間に行う夜間運転ケース(Case1)と、給湯需要と走行需要、およびスポット価格を基にHP給湯器の運転とEVの充放電を最適化したケース(Case2)を想定した。③最後に、自治体規模で算出した評価値を全国規模に換算し、日本全体で創出される

調整力と便益を評価した。なお、本評価における2030年での世帯数、業務部門の延床面積、および太陽光発電、HP給湯器、EVの普及率等の想定は付録で説明する。

図4.4に町田市の家部門を対象とした評価結果を示す。同図(a)は戸建住宅、(b)はさらに集合住宅を含めた場合の結果である。グラフは上から順に、1日におけるスポット価格、夜間運転ケースの電力需要、最適化ケースの電力需要である。代表日として選定した3月6日は、日中に太陽光発電の発電量が過多となり、スポット価格が0円/kWhに低下している。夜間運転ケースでは、深夜から早朝にかけての時間帯でHP給湯器の運転とEVの充電を行っているが、最適化ケースでは、HP給湯器とEVの電力需要をスポット価格の安い昼間にシフトしていることがわかる。このとき、同図(a)、(b)からわかるように、戸建住宅のみの場合の時間シフト可能な調整力は192 MWhであるが、集合住宅を対象に含めることで調整力は312 MWh

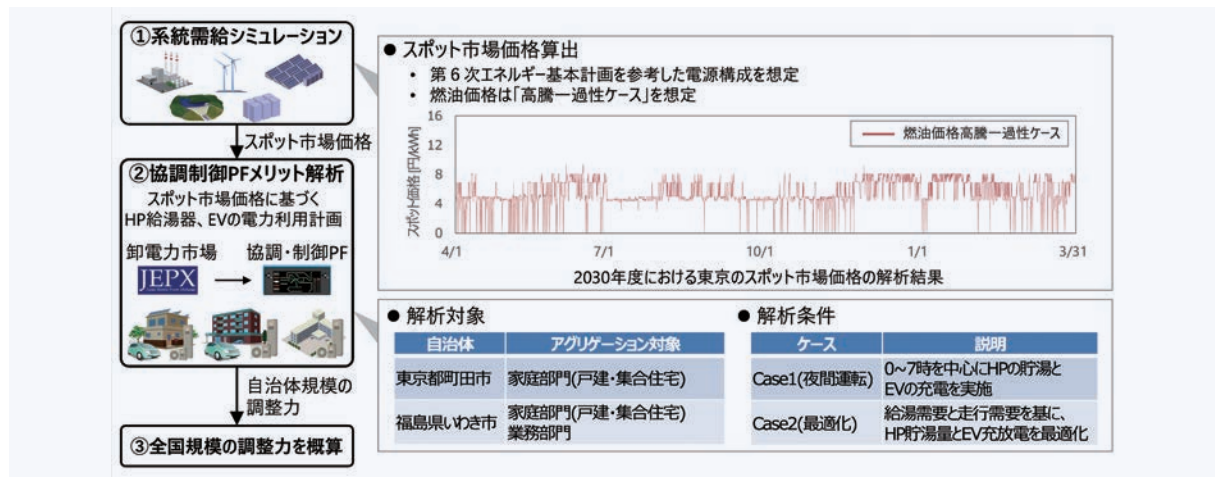


図4.3 調整力の評価方法

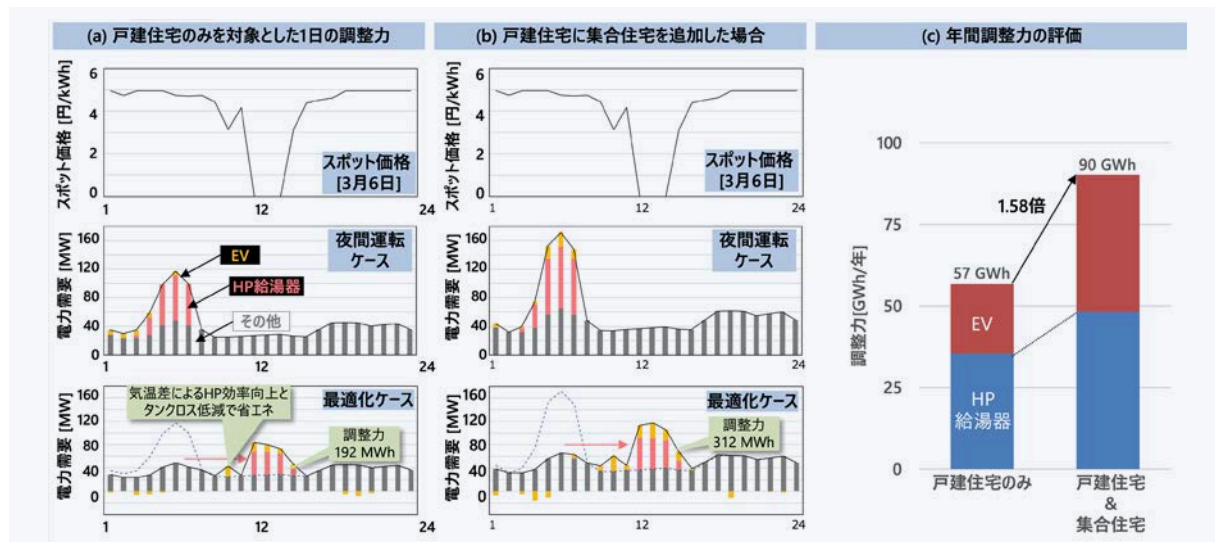


図4.4 家庭部門を対象としたアグリゲーション例 (2030年、町田市)

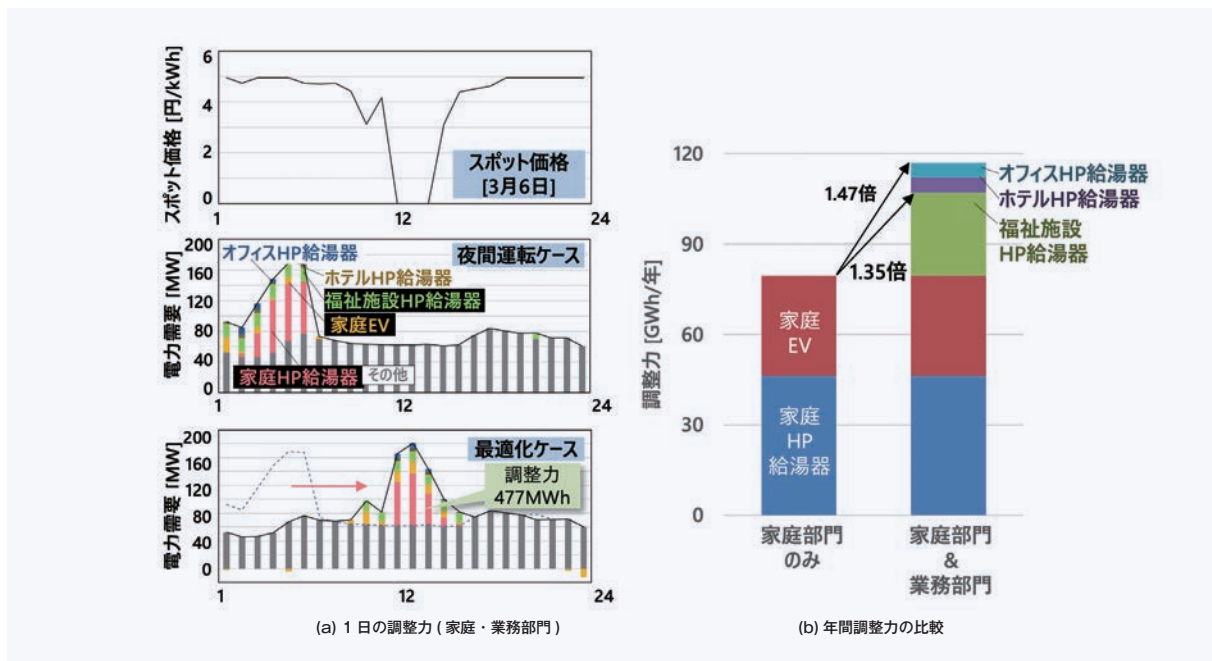


図 4.5 家庭・業務部門を対象としたアグリゲーション例 (2030 年、いわき市)

に拡大する。このような調整力は季節や天候にも依存するため、年間の調整力評価が必要である。同図(c)に年間での調整力の比較を示す。戸建住宅に加えて集合住宅を対象に含めることで、年間を通した調整力は1.58倍に拡大する。また、HP給湯器は外気温が高いほど効率が向上することに加え、貯湯時間を夜間から日中にシフトすることで貯湯タンクでのロスも低減することから、貯湯に必要な電力需要を低減する省エネの効果もある。このようにスポット価格に応じて電力需要を時間シフトすることで、アグリゲータの調達費用、家庭における電気代の低減、ひいては社会全体の安定かつ経済的な電力需給に貢献できる。

次いで、図4.5にいわき市の家庭部門・業務部門を対象とした評価結果を示す。業務部門として、オフィス、ホテル、福祉施設の給湯需要に着目し、これらを全てHP給湯器で貯湯できることを想定した。同図(a)に3月6日における電力需要、同図(b)には年間調整力の比較結果を示す。オフィス、ホテル、福祉施設から創出される調整力は、HP給湯器の普及率を100%と想定しても、家庭部門の5割弱にとどまる結果となった。しかしながら、福祉施設はオフィスに比べて給湯需要が多く、数も少ない。さらに、貯湯タンクの設置が比較的小易と考えられることから、脱炭素化と調整力創出の双方に寄与

する助成が効率的に進められると考えられる。以上から、業務部門では特に福祉施設向けにHP給湯器の普及を後押しすべきである。

以上に示した結果から、地域社会から創出可能な日本全体での調整力を算出した。算出方法の詳細は付録で説明する。図4.6に示すように、2030年における戸建・集合住宅のHP給湯器とEV、および福祉施設におけるHP給湯器を活用することで創出可能な調整力は全国で33.2 TWh/年と算出された。これは、第3章の「原子力活用シナリオ」における「需給バランス用蓄電池」の放電電力量の2倍以上であり、また、揚水発電を超える調整力に相当する。また、日中にHP給湯器を運転することによる3.4 TWh/年の省エネ効果と安価なスポット価格での調達により、アグリゲータの電力調達コストを493億円削減できることから、消費者の電気代の低減にもつながる。社会全体では、揚水発電・蓄電池の必要設備容量と充放電損失を削減できることから、再エネ統合コストを大きく抑制できる。そして、2050年に向けてHP給湯器、EVの普及率がさらに高まり、仮に100%になるとすれば、調整力は全国で230 TWh/年に上り、再エネ導入のさらなる拡大への貢献が期待される。

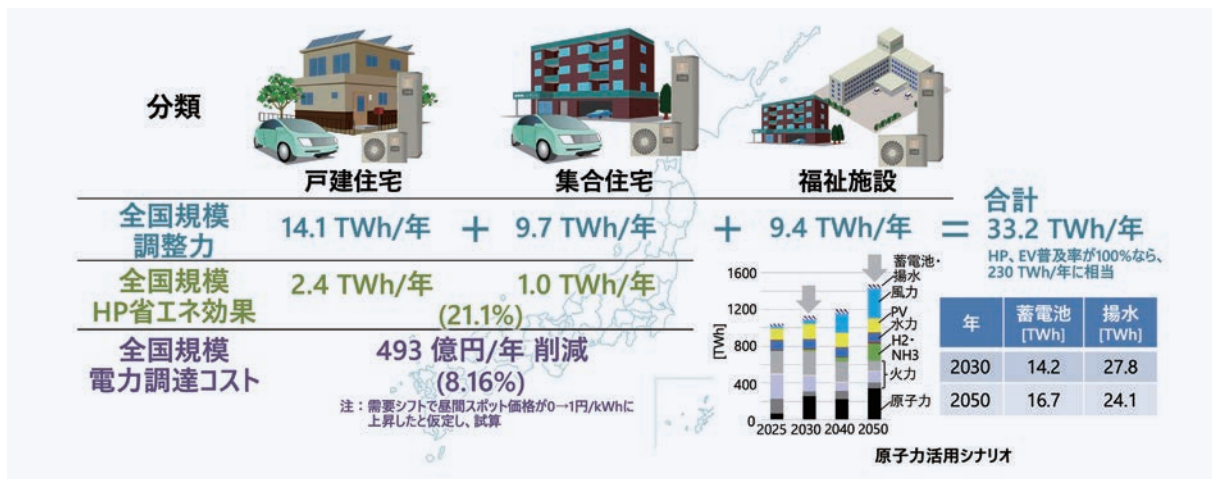


図4.6 地域社会から創出可能な日本全体での調整力

4.3 地域社会のトランジションを円滑に進める施策

地域社会が生み出す調整力を拡大するためには、時間シフトに対応したEV充電器やHP給湯器の導入加速が不可欠である。しかし、図4.7(a)に示すように、日本ではEVの普及が海外の先進地域に比べ遅れている。また、同図(b)に示すように、わが国では約4割の世帯が集合住宅に住んでおり、とりわけEV充電器を既築の集合住宅に設置することは容易ではない。同図(c)に示すアンケート調査によれば、集合住宅に住むEVユーザーの8割以上が週末などに近くの充電スタンドで充電せざるを得ず、EV導入の大きな阻害要因になっている。一方で、既築の集合住宅において、住民理解を獲得し、共同のEV充電設備を導入した例もある⁴⁴。EV充電器の導入を加速するためには、金銭的助成に加え、そのような成功事例の紹介・展開が必要である。

HP給湯器については、同図(d)に示すように共同住宅では依然ガス給湯器の利用が一般的である。普及が進んできた戸建住宅に加え、共同住宅や業務部門におけるHP給湯器の導入促進が必要で、そのためには国や自治体による費用補助やインセンティブが不可欠である。

また、社会全体の脱炭素化を推進するには、今回は調整力創出の解析・評価の対象外とした、産業における熱源の電

化促進も重要である。しかし、産業部門における熱源の電化は、経済的支援だけでは解決できない課題があり、同図(e)に示すように、産業用HPの導入が停滞している。日立東大ラボがヒヤリングを行ったインタビュー調査から、地域の企業では自社のエネルギー利用の状況把握や、電化促進を進めるための計画・設計のスキルが不足していることが見えてきた。例えば蒸気利用の熱工程においては、同図(f)に示すように配管で多くのエネルギー損失が生じている。これに対し、配管末端の熱需要から電化を進めるなど段階的な改造・投資が可能であり、このようなソリューション提案によるエンジニアリング支援が重要である⁴⁵。さらに、成功事例を展開・共有する仕組みづくりが、産業のトランジションを加速すると考える。

CN化は電化推進が基本である一方、電化の適用が難しい地域・産業が存在することも事実である。そのような地域や産業を非難・排除するのではなく、排出権取引やネガティブエミッションと合わせた国全体でのCN化を進める手段を模索すべきである。また、産業においては、生産側ではなく消費側のCO₂排出量の見える化を進めるとともに、サプライチェーンの上流から下流へと至る過程で最終消費者を含む全ての関係者が環境価値を正しく認識・理解することも重要である。

44 日本放送協会。2022。「電気自動車 マンションで充電したい! ～EV充電の課題は?～」2023年3月1日アクセス。https://www3.nhk.or.jp/news/html/20220331/k10013559631000.html

45 産業技術環境局・資源エネルギー庁。2022。「グリーンエネルギー戦略の策定に向けた検討①(エネルギー安全保障の確保と脱炭素化に向けた取組)」2023年3月1日アクセス。https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/006_01_00.pdf

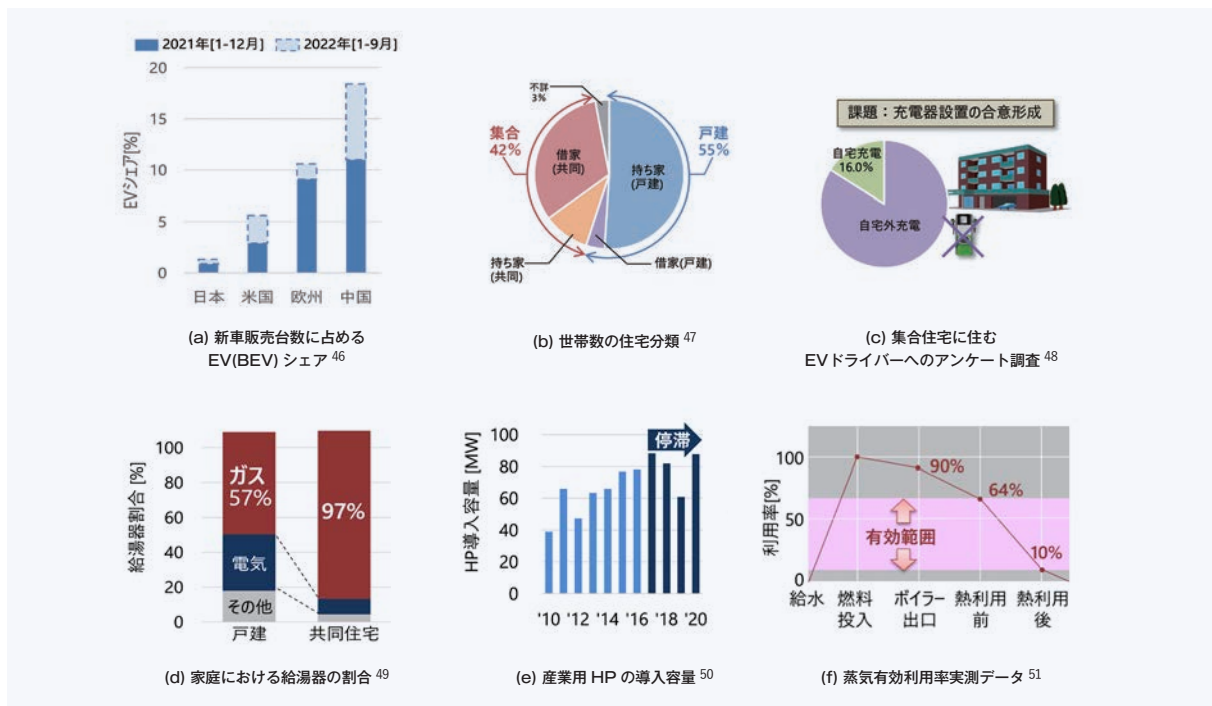


図 4.7 地域社会が生み出す調整力の拡大を阻むエネルギー利用の現状と課題

以上、エネルギー利用の現状と課題から、地域のトランジションを円滑に進める施策について述べる。一度に大きな社会変革を行うことは困難である。しかし、図 4.8(a)に示すように、家庭、業務、産業それぞれについて、地域や個別の特徴を踏まえつつ、段階的にトランジションを起こすことができると思う。例えば家庭では、家電の遠隔操作化やすでに導入済の家電に機能を後付けするアドオン制御といった方法が有効である。また、地域によっては住宅の断熱性能の改善が省エネに有効である。

そして、同図(b)に示すように、段階的に社会実装を進め

ていくべきである。まず、需要の調整力化に有効なEVやHP給湯器といったストレージ機能を有する機器を、複数の選択肢を用意してその普及を加速すべきである。それに合わせて、協調・制御PF及びエッジ技術の社会実装を段階的に進めることで、個人や地域が得られる価値を増やしながら社会移行を円滑に進めることができる。さらに、出力が変動する再エネ、特に太陽光に多くを依存する状況はアジア諸国にも見られ、日本の課題解決はこれらの国々にも適用可能である。このようなトランジションの事例を海外に共有することで、国際社会に対する新たな貢献につながると考える。

46 東京電力エナジーパートナー . 2022.「【最新版】電気自動車 (EV) の普及率はどのくらい? 「日本で普及しない」は本当?」をもとに日立東大ラが作成 . 2023 年 3 月 1 日アクセス . <https://evdays.tepco.co.jp/entry/2021/09/28/000020>

47 国土交通省 . 「資料 4 世帯類型別の住宅の状況」をもとに日立東大ラが作成 . 2023 年 3 月 1 日アクセス . <https://www.mlit.go.jp/common/000145916.pdf>

48 日産自動車 . 2022.「【EV と住環境についての調査リリース】集合住宅住まいの方の EV 購入検討は、ここ 3 年で増加。一方で、集合住宅に充電設備がないことで購入が難しいと考える方が 88.6% と判明。」をもとに日立東大ラが作成 2023 年 3 月 1 日アクセス . <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/0000000049.000065945.html>

49 環境省 . 「2019 年度の家庭のエネルギー事情を知る」をもとに日立東大ラが作成 . 2023 年 3 月 1 日アクセス . <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/kateico2tokei/2019/result3/index.html>

50 日本エレクトロヒートセンター . 2020.「2020 年度版 産業用ヒートポンプ導入量把握調査結果 報告書」をもとに日立東大ラが作成 . 2023 年 3 月 1 日アクセス . https://www.jeh-center.org/asset/00032/20200127ihp/r2020.10%20_IHP_DATA.pdf

51 日本エレクトロヒートセンター . 2022.「産業用ヒートポンプ活用ガイド」をもとに日立東大ラが作成

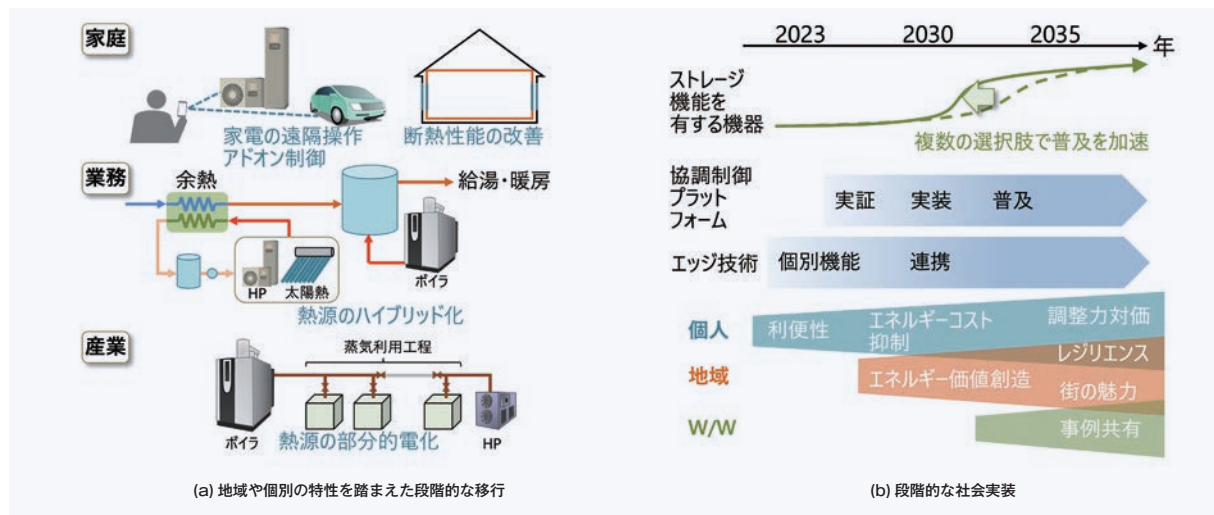


図4.8 段階的な推進によるトランジションの円滑化

以上に述べた脱炭素化に向けたトランジションでは、地域のステークホルダーがそれぞれの役割で取り組みを進めることが重要であり、とりわけ住民の理解と協力が不可欠である。脱炭素化に向け、地域社会を担う全員がトランジションに参加することが望ましいが、デジタル技術に苦手意識を持つ住民が一定数いることも事実である。一方で、例えば、デジタルチケットを導入することで、チケットの購入や入場のための行列が少なくなり、デジタルチケットを利用しない方々にもメリットが期待されるなど、参加者は一部でも全員がメリットを享受できる例もある⁵²。そのような考え方のもと、脱炭素化に向けた社会実装を進めていくことが重要である。

また、新しく取り組みを開始する際にはリーダーが必要である。表4.1に示す関係者がリーダーとなり、参画者とともにエネルギー利用の現状を知り、地域のみざす姿を定め、エ

ネルギー供給側と需要側のWin-Winの関係を構築しつつ、地域社会のトランジションを進めていくべきと考える。

このような社会実装の取り組みは、国家プロジェクトによる実証後、地域に定着せず風化してしまう場合が少なくない。この点において自治体の果たす役割は大きく、組織の垣根を超え、実証段階から自治体为主导して地域のステークホルダーの参画を促し、ドイツのシュタットベルケのような地元密着型の価値循環システムを形成していくことが重要である。

中長期的な視点では、リーダーの育成や住民理解の向上に向けた教育の推進、固定価格買取制度(FIT)導入後に大量に設置された小規模太陽光発電の維持・管理が地域の課題である。産学官連携での学びの場の創生や、再エネリソースのメンテナンス制度の開発を進めていくべきである。

表4.1 円滑なトランジションに向けたアクション

アクション		リーダー	参画者	
エネルギー利用の現状を知る		学習機会の創生	地域住民、学生、地場産業・商業のオーナー、従業員、地元業界組合	
		分析の支援		
地域の目指す姿を定める		脱炭素による地域未来の議論		地方銀行、自治体
		複数ステークホルダーによる意思決定		自治体、商工会議所
Win-Winのもとで進める社会移行		データ連携による異業種協業		エネルギー事業者、自治体
		双方向のメリット供与		

52 アンビュー株式会社・2023.「日本三名国 偕楽園、アンビューが提供する電子チケットを導入～利便性向上と利用促進を目指し2月17日(金)より入園券を販売開始～」2023年3月1日アクセス. <https://www.asoview.co.jp/news/5546/>

4.4 | 第4章まとめ

1. 再エネ主電源化に向け、地域社会は**全員参加の需給協調メカニズム**で**S+3Eのエネルギー需給**を実現する主体となることが期待される。

2. HP給湯器やEVといったストレージ機能を有する機器の協調運転で、2030年に地域社会から創出される**需給調整ポテンシャル**は全国規模で**33.2TWh/年**。その実現に向け、**必要機能を有した機器の普及と早期の社会実装**が必要である。

3. CN化は電化推進が基本である一方、電化が難しい地域・産業が存在することも事実。そのような地域や産業を非難・排除するのではなく、排出権取引やネガティブエミッションと合わせた**国全体でのCN化を進める手段**を模索すべきである。

4. 地域社会の脱炭素に向けたトランジションを円滑に進めるためには、**段階的移行の支援、全員参加、役割の明確化**が重要である。とりわけ自治体の果たす役割は大きく、**地元密着型の価値循環システム**を早期に構想・形成していくべきである。

第5章 カーボンニュートラル実現に向けた電力システム改革の方向性

本章では、提言書第4章発刊以降の国際情勢の変化に伴い見えてきた課題と、その課題の克服に向けた電力システムの制度改革の方向性を提言する。

5.1 日本電力自由化を経た状況の振り返り

2011年3月11日の東日本大震災をきっかけとして制度改革の議論が加速し、広域的な系統運用拡大、小売の全面自由化、そして法的分離による送配電部門の中立化という3段階からなる電力システム改革が、2020年4月をもって一区切りを迎えた。

電力広域的運営推進機関、日本卸電力取引所のもとで、全国的なメリットオーダー（前日取引市場の活性化により、発電コスト（可変費）の安い電源から順に発電することで全国的な観点から発電コストの低廉化すること）がめざされると

もに、再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT）をはじめとする再エネ普及の制度形成もあり、再エネ比率が大きく上昇した。小売市場に700社以上の事業者が参入した結果、需要家の選択肢が拡大した。

その一方で、短期限界コストでの取引の誘導により、発電事業者の費用（特に固定費）回収性は下がり、また特に火力発電は、再エネ比率拡大に伴うkWhの減少に伴う収益性の低下が進んだこともあり、設備の休廃止の増加に至った。（図5.1）。

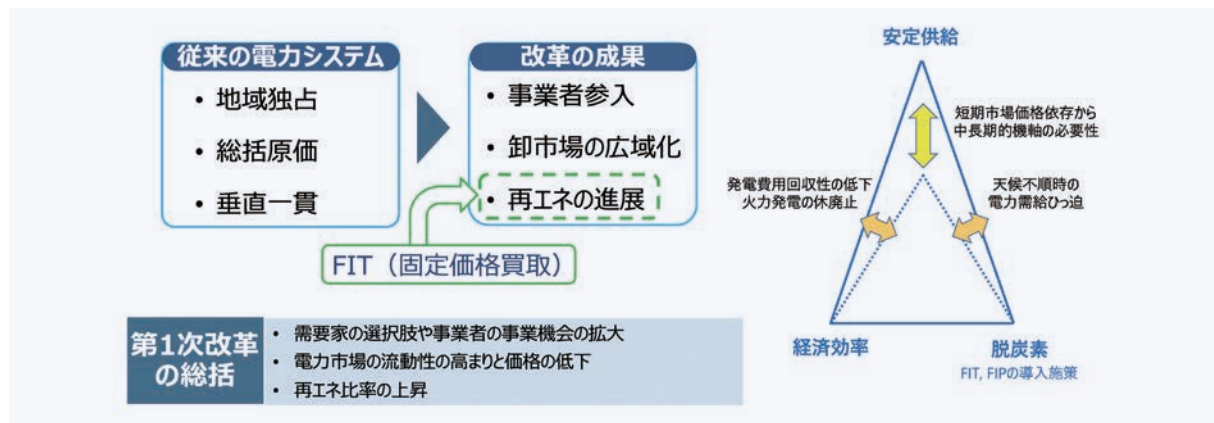


図5.1 第1次電力システム改革の総括

図5.2に需要家を取り巻く昨今の事象をまとめる。2021年秋頃から始まり、ロシアのウクライナ侵攻によって深刻化した、輸入資源価格の高騰がある。電力調達に深刻な影響を与え、小売電気事業者の廃業や倒産が増加している。さらに、脱炭素化の加速に伴って、2050年に向けてカーボンニュートラルに至るまでのトランジションについて検討する必要性

が生じている。このような事象から、以下の論点が浮かび上がってくる。①kWの確保：短期的なマーケットのボラティリティの中で、市場価格が低位であるかに関わらず、安定供給のための電源容量を確保していくこと、②送配電網の整備：再エネ大量導入が可能となるような送配電設備の整備、③kWhの確保：燃油調達リスクへの対応

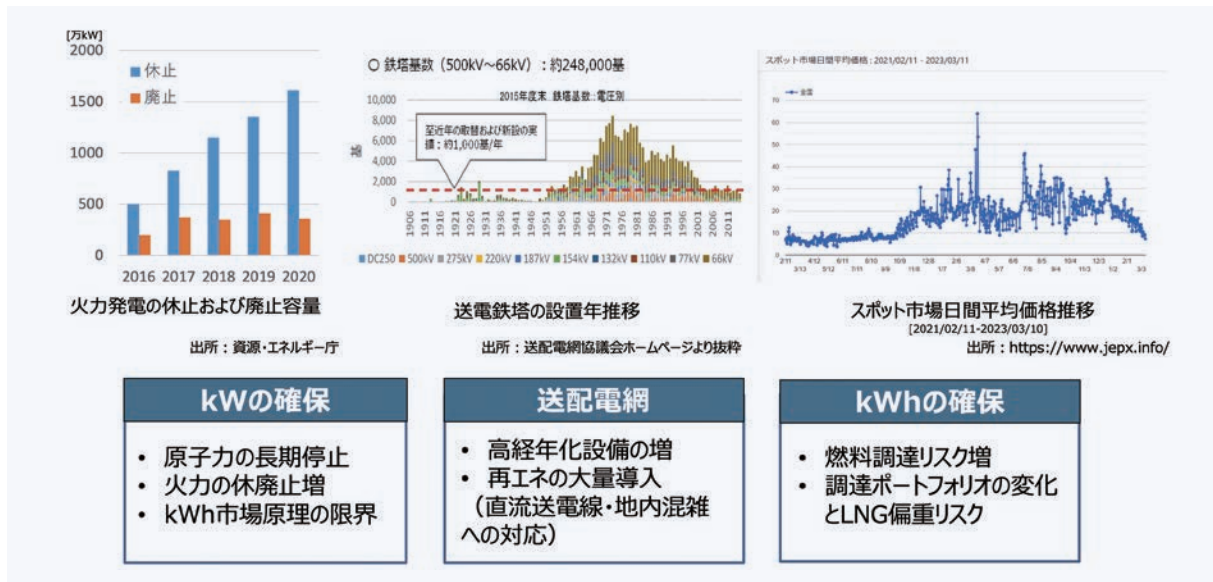


図 5.2 需要家を取り巻く昨今の事象⁵³

5.2 第2次電力システム改革を進める新たな論点

図 5.3 に昨今の事象を踏まえた新たな課題と第2次電力システムの方向性を示す。現状制度から見てきた新たな課題として、以下の3つが挙げられる。

- i. 短期市場価格への過度の依存：卸電力取引市場でのスポット価格を中心に制度設計をしてきた結果、中長期的な安定供給や脱炭素に向けての対応が不十分。
- ii. 市場間連携の欠如：スポット価格のシグナルを軸として、経済効率性の観点から容量市場や需給調整市場などの市場を形成してきたが、安定供給や脱炭素といった中長期的な政策目的との齟齬が顕在化。
- iii. 変動再生可能エネルギーの大量導入：地域に遍在する再生エネの更なる導入をどのように目指すのか、送配電網の整備や

運用の高度化、調整力の確保などといった更なる対策が必要。

これを踏まえた電力システムの第2次改革の方向性として、以下3点を提言する。

1. 中長期的な政策機軸の打ち出し：①短期的なメリットオーダーを目指す経済効率性と、安定供給や脱炭素化という中長期的な政策目的との切り分けの明確化、②効率性を追求してきた市場デザインの更なる検討。
2. 市場の役割の再構築：①市場の歪みの是正、②電源の稼働状態の透明化・公開、③包括的市場監視。
3. 需要家主権のシステム再構築：①需要家の判断に基づく仕組み、②排出量取引制度への融合。

⁵³ 資源エネルギー庁、2022年3月25日、「今後の火力政策について」、2023年3月9日アクセス；送配電網協議会、2022年1月24日、「送配電設備の高経年化に伴う設備更新の考え方」、2023年3月9日アクセス；JEPX information, <https://www.jepx.info/>, 2023年3月9日アクセス

5.3 第5章まとめ

1. 短期市場価格だけに依らない中長期的機軸の重要性。
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。

2. 市場の役割の再構築
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。

3. 需要家がリードするシステムの再構築
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、データに基づくCO₂見える化やカーボンニュートラルに対する需要家視点の情報提供を可能にするデジタル技術を通じて、需要家がリードするシステム構築に貢献する。

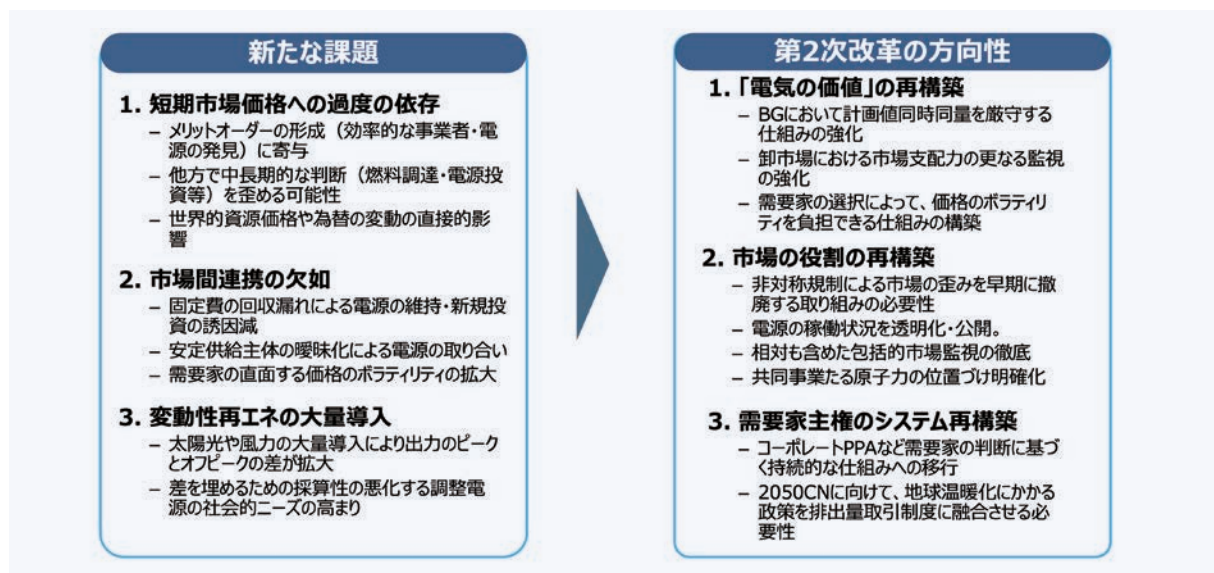


図 5.3 第2次電力システム改革の方向性

第6章 エネルギー・トランジションと生活の質 (QoL) の維持を両立させる道筋への挑戦

本章では、エネルギー・トランジションに関連する暮らしや行政などエネルギー以外の要因変化を解析し、その結果をエネルギー需給に反映した連成シミュレーションについて示す。

6.1 エネルギー・トランジションに伴う社会変化とエネルギー需給の連成シミュレーション

エネルギー・トランジションには多くの社会変化と、社会の行動変容が伴うと考えられるが、不確実な要素が多く、漠然とした不安として受け止められることが現状である。エネルギー・トランジションに関わる社会の変化を社会モデルによりシミュレートし、「ありえそうな社会像」を把握し、その社会像が示す「エネルギー需給の傾向」をエネルギー需給シミュレーションに反映する、2つのシミュレーションモデルの連成について以下に示す。図 6.1 に連成シミュレーションを行う2つのモデルについて示す。エネルギー・トランジション

に関わる社会モデルのシミュレーションは日立京大ラボで開発している政策提言 AI⁵⁴を用いた。政策提言 AI は社会のさまざまな要因のつながりを有識者とともに書き下し、それらの要因が現在からの相関近似で推移すると想定したフォアキャスト型の社会像を示すことができる。得られる社会像は、シミュレーション開始時からの各要因の変化量として表され、変化量が望ましい方向に対してどのように寄与するかを評価点で示す。他方、エネルギー需給シミュレーションは第3章で示したエネルギー・経済シミュレーションモデルを用いた。

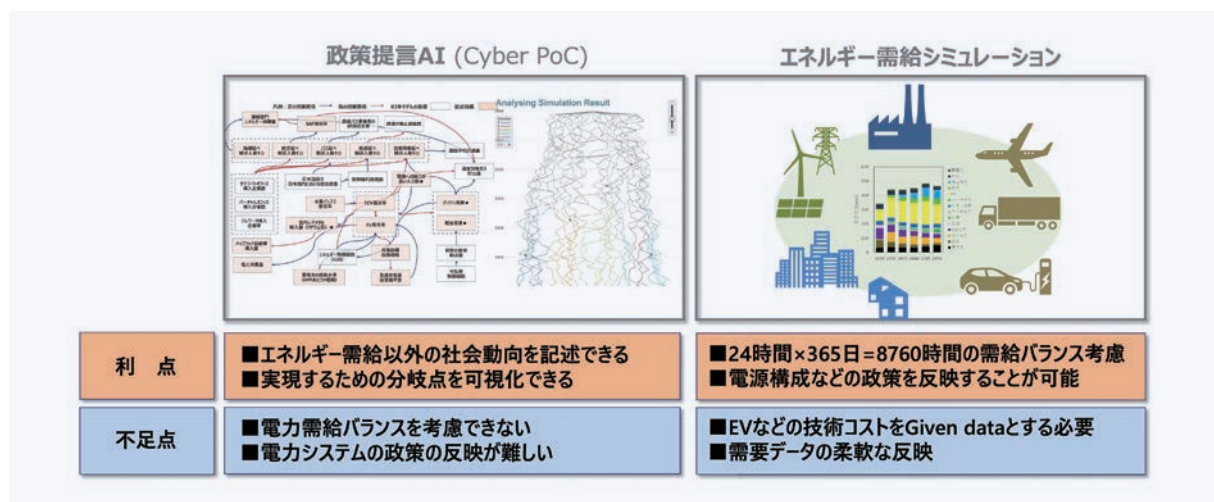


図 6.1 政策提言 AI とエネルギー需給シミュレーションの概要

連成シミュレーションを行うにあたり、図 6.2 に示すように政策提言 AI およびエネルギー需給シミュレーションにそれぞれ改良を加えた。

(改良点1) 政策提言 AI のベースとなる社会モデル⁵⁵にエネルギーに関する要因を追加。

(改良点2) エネルギーに関する要因の変化率を分析し、いつ、

54 福田、馬奈木、岸村、松中、田中、2020、学術の動向、25(2) 66-96

55 古屋、日立東大ラボ 第3回ハビタット・イノベーションフォーラム「人中心のスマートシティの構築へ～持続可能なスマートシティに向けた5つのキーファクター～」(<http://www.ht-lab.ducur-u-tokyo.ac.jp/wp-content/uploads/2021/10/1cf26b0e65157f6d26f8716a97a8d7da.pdf>)

どのようにエネルギー要因が変化するか、傾向を把握。
(改良点3) 改良点2で抽出したエネルギー要因の変化傾向

を参照し、イノベーションの拡大時期、規模をエネルギー需
給シミュレーションの条件に反映。

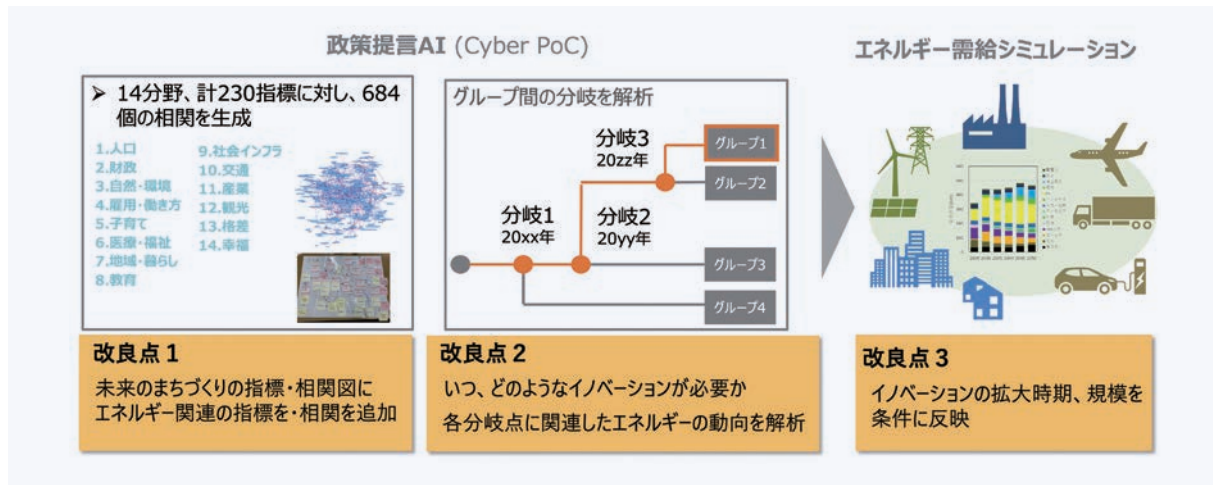


図6.2 連成シミュレーション実施のための改良点

6.2 | カーボンニュートラルを実現する取り組むべき道筋の分析

6.2.1 政策提言 AI が導く道筋の解析

エネルギーに関する要因を追加した政策提言AIで得た都市像の解析結果を図6.3に示す。温室効果ガス排出量がマイナスとなる、すなわち脱炭素が進展するシナリオが存在し、

過疎化や市街化調整区域等の改善が適切に行われ、世帯人口等が改善する。脱炭素を中心とした自然・環境の改善が進み、脱炭素を含めた地域特徴を活かした観光業が成長する。また、脱炭素進展シナリオに至るには2034年の分岐点1と2035年の分岐点2の2つの分岐点を経る。

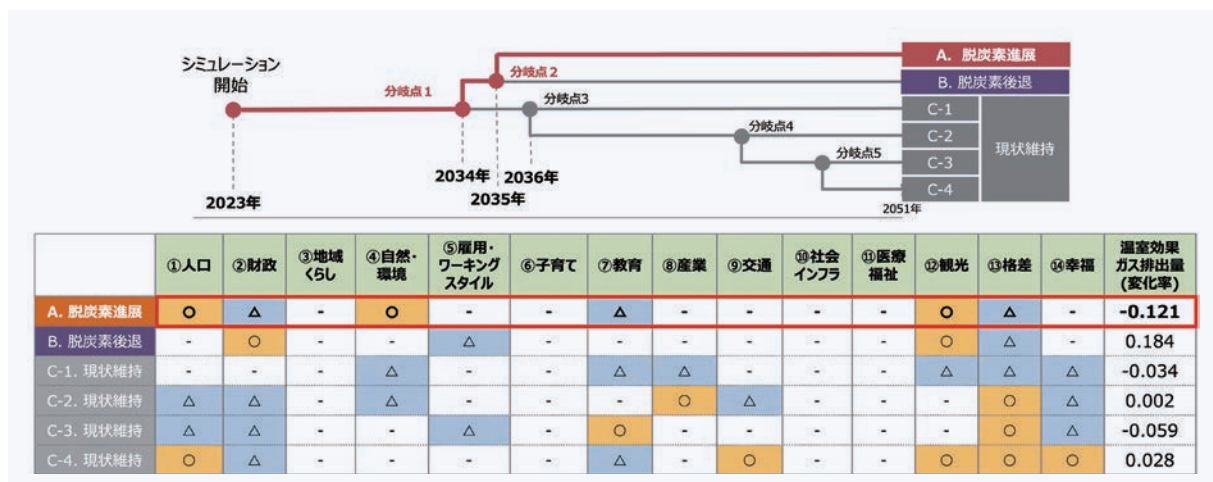


図6.3 政策提言 AI が導くシナリオ

図 6.4 に脱炭素進展シナリオのエネルギー関連要因の変化率を示す。脱炭素進展に伴い、EV (電気自動車) の導入拡大が 2032 年以降に進展するとともに、洋上風力などの再生可能エネルギーの継続的導入拡大が 2035 年以降に進

展する。これに伴う大企業の脱炭素投資と 2035 年以降の高収益構造への転換、中小企業の脱炭素に伴う高収益構造への転換が続く。

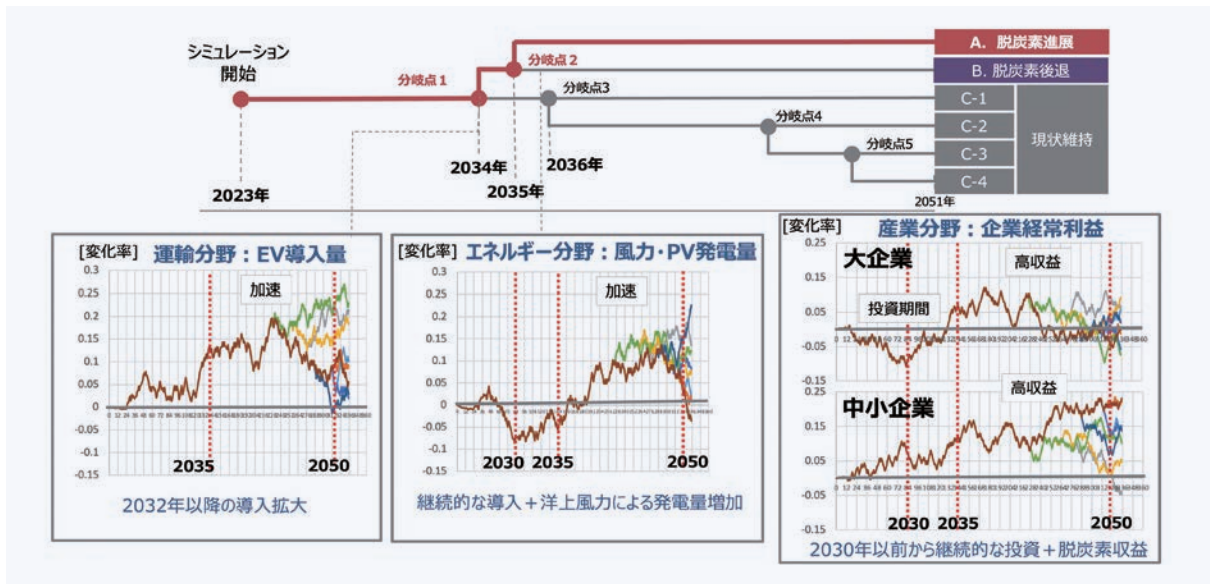


図 6.4 脱炭素進展シナリオのエネルギー関連要因の変化率

図 6.5 には、脱炭素進展シナリオに導くにあたり、エネルギー以外の分野の留意事項を示している。2034 年の分岐点では人口減少等の国土構造の変化に対して非効率なエネルギー供給等を避けるため、人口閑散地域の整理や都市計

画区画外の乱開発抑制といった都市計画の見直しが必要とされる。2035 年の分岐点 2 ではテレワークやインターネットなどの情報分野を活用した暮らしや企業活動の効率化が必要とされる。

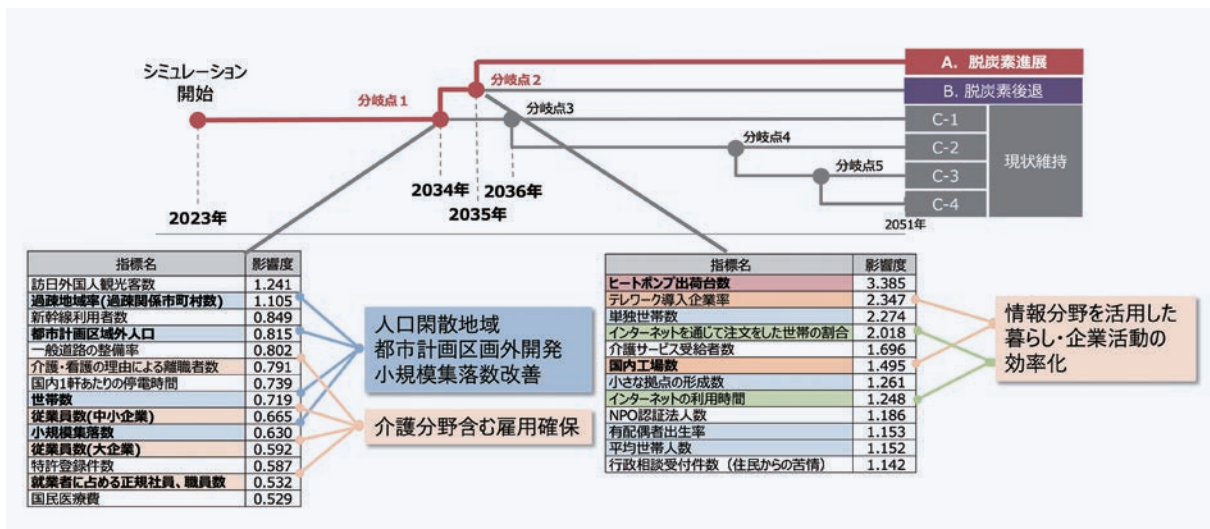


図 6.5 脱炭素進展シナリオの分岐点に対応するエネルギー分野以外の施策

6.2.2 政策提言 AI が導くエネルギー需給

6.2.1 にてシミュレーションした政策提言 AI が導いた道筋に沿ってエネルギー需給シミュレーションを実施する。主な制約条件は以下のように設定した。①2032 年以降、EV 普及のイノベーションに対応した車体価格の削減、②2035 年以降の風力・PV のイノベーションに対応した設置費用の削減、

③燃油価格は第3章の設定と同様、④総コスト負担を最小化するため、第3章の原子力活用シナリオを選択。

図 6.6 に政策提言 AI で導いた脱炭素進展シナリオのエネルギー需給シミュレーションの結果を示す。第3章で示した結果(達成前)に近い傾向を示した。政策提言 AI の導いた結果に基づき、EV 中心の自動車構成となり、CO₂ 排出量が約 1 割削減される。

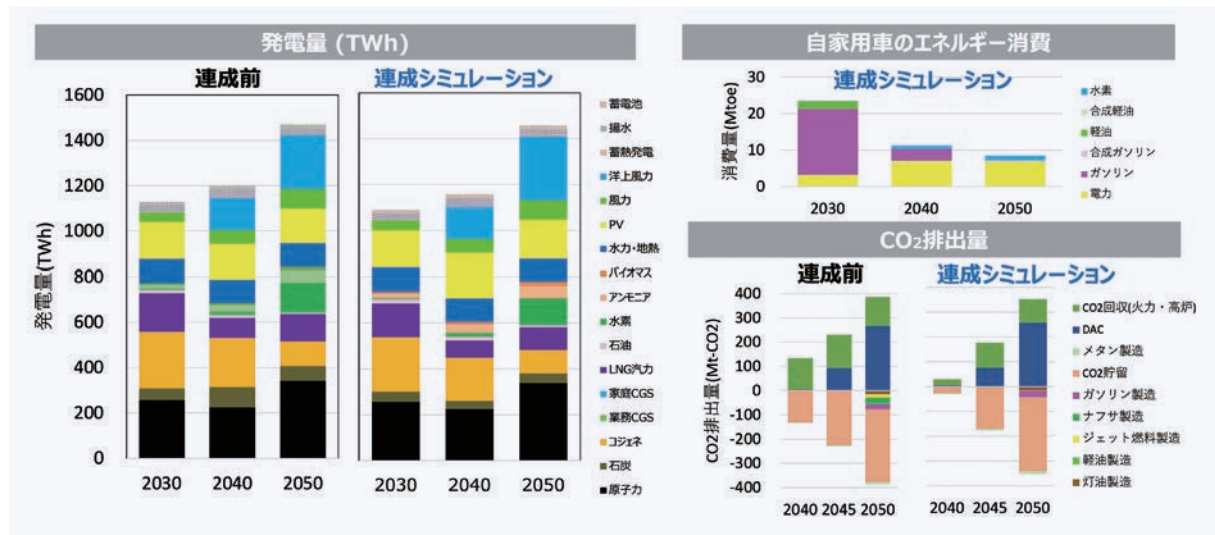


図 6.6 政策提言 AI で導いた脱炭素進展シナリオのエネルギー需給シミュレーションの結果

6.3 第6章まとめ

1. CN に伴う社会変化の客観的分析の必要性

エネルギー・トランジションに伴う国土や暮らしの変化を客観的に分析すべきである。

2. 国土形成・まちづくりと連成したエネルギー分野の施策

エネルギー分野の施策は、①EV 導入の 2030 年代前半からの導入拡大、②PV・風力発電の 2030 年中ごろからの導入加速、③2020 年代からの大企業の環境分野への投資、2030 年代前半からの中小企業の施策加速と環境貢献による収益確保、の3分野が重要となる。

3. エネルギー・トランジションに伴う国土形成・まちづくり

をはじめとする行政施策エネルギー分野の施策

CN を選択するシナリオの達成には、2034 年、2035 年に①人口閑散地域を改善する抜本施策、②雇用を確保する各種施策、③テレワーク等の情報分野を活用した暮らし・企業活動の効率化、④ヒートポンプや工場等の分散リソースを形成する機器導入の施策、適正運用および立地を誘導する施策、が重要となる。

日立東大ラボでは、エネルギー・トランジションに伴う国土や暮らしの変化を客観的に分析するモデルやシミュレーションを提案し、エネルギーと社会の変化の可視化に取り組む。

第7章 まとめ

本提言のまとめとして、提言の実現時期(短期：現在から2030年まで、中長期：2030年から2050年まで)と提言内容を以下に述べる。

短期

地政学的危機とトランジションのパスウェイ：変動するランドスケープと地域からの視座 (第2章)

1. 急激な地政学的変化の中でも統合的なトランジションを加速させるガバナンス

EU、アメリカはロシア脱却の方針のもとに、中長期的には気候変動対策を加速。一方、日本の国民意識・構造転換には遅れも。政府は、急激な地政学的変化において、あらゆるセクターと統合的なトランジションを加速させるガバナンスを構築すべき。

2. クリーン・トランジションのためのグローバル・サプライチェーンの確保

政府や産業は、地政学的変化の中でも、水素・アンモニア、レアメタルなどの資源や炭素貯留のサプライチェーンの確保を急ぐべき。

3. アジア太平洋における気候・エネルギーの国際連携の推進

各セクターは、気候対策を強化するオーストラリアや化石燃料依存が高いアジア諸国と、気候やエネルギーに関する重層的な国際連携をリードする役割を果たすべき。

4. 科学と対話にもとづく合意形成のプラットフォームの構築

政府・自治体は、市民や企業とともに、科学的データと開かれた対話にもとづく合意形成のプラットフォームを構築すべき。

日立東大ラボのアクション

国際事例の分析等を通じたトランジション・ガバナンスのあり方の研究、および多様なステイクホルダーを包摂する合意形成プラットフォームの基礎を提供していく。

バックキャストとフォアキャストのギャップを踏まえたエネルギーシステムの対策 (第3章)

5. 国際情勢を踏まえたエネルギーシナリオの見直し

国際情勢を踏まえた原油価格の高騰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、下記事項の推進が必要である。①再エネ導入前倒しや原子力活用など脱炭素電源の早期確保、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、③発電に加えて合成燃料への活用など水素・アンモニア利用と多様化、④コージェネ等による熱利用促進、⑤エネルギーのレジリエンスとセキュリティ確保。また、2040年～2050年に向けて、①DACによるCO₂回収の実用化と普及、②回収したCO₂からの燃料製造と運輸・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。

6. 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

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、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まなう不安定化に対し、インバータ制御の高度化と統合制御、を進めるべきである。

7. データとシミュレーションで可能とする分析・評価技術の開発

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ー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、制度整備を進めるべきである。

日立東大ラボのアクション

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ー間のデータ・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。

再エネ主電源時代に向けた地域社会の役割（第4章）

8. CNとS+3Eのエネルギー需給に向けた地域の貢献

脱炭素電源の導入加速、家庭・業務・産業の各部門の熱源電化を含めた排出削減が重要な解決手段。さらに、地域の電力需要からの調整力創出がCNへの移行コスト削減とその加速に貢献する。

電力供給者と需要家のWin-Winの関係のもと、再エネと協調した需要の時間シフト創出可能量は2030年断面で33TWh/年。その実現と活用を進めるべきである。

上記需要協調の実現には、必要機能を有した機器普及と協調制御プラットフォーム(PF)の早期社会実装が必要である。

9. 地域社会のトランジションを円滑に進める施策の立案

産業の脱炭素機器の導入には、経済的な導入支援に加え、計画・設計に関するエンジニアリングサービス体制の構築と、成功事例を地域内外に展開する仕組みの事前協議が重要である。

地域社会のCN化には、段階的移行を支援する手段の提供、全員参加と役割の明確化、データ連携による異業種協業が地域の移行を加速する。各アクターが自分事と捉え行動変容を起こす気づきの場を国・自治体が創生すべきである。

日立東大ラボのアクション

日立東大ラボでは、協力自治体や企業を募り、当該協調制御プラットフォームによる地域の価値創生を実証を通じて社会に示す。

電力システム改革の方向性（第5章）

10. 短期市場原理だけでない中長期的機軸の重要性

①短期的なメリットオーダーを目指す経済効率性と、安定供給や脱炭素化という中長期的な政策目的との切り分けの明確化、②効率性を追求してきた市場デザインについて、更なる検討を進めるべき。

11. 市場の役割の再構築

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。

12. 需要家がリードするシステムの再構築

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。コーポレートPPAなど需要家判断によるCN促進電源の確保、地球温暖化の抑制にかかる政策を需要家主権の排出権取引制度と融合させる施策を実現すべき。

日立東大ラボのアクション

日立東大ラボでは、データに基づくCO₂見える化やカーボンニュートラルに対する需要家視点の情報提供を可能にするデジタル技術を通じて、需要家がリードするシステム構築に貢献する。

エネルギー・トランジションと生活の質 (QoL) の維持を両立させる道筋への挑戦 (第6章)

13. CNに伴う社会変化の客観的分析の必要性

エネルギー・トランジションに伴う国土や暮らしの変化を客観的に分析する手法やツールを研究開発すべき。

14. 国土形成・まちづくりと連成したエネルギー分野の施策

エネルギー分野の施策は、①EV導入の2030年代前半からの導入拡大、②PV・風力発電の2030年中ごろからの導入加速、③2020年代からの大企業の環境分野への投資、2030年代前半からの中小企業の施策加速と環境貢献による収益確保、の3分野が重要となり、施策を行うべき。

15. エネルギー・トランジションに伴う国土形成・まちづくりをはじめとする行政施策

CNを選択するシナリオの達成には、2034年、2035年に①人口閑散地域を改善する抜本施策、②雇用を確保する各種施策、③テレワーク等の情報分野を活用した暮らし・企業活動の効率化、④ヒートポンプや工場等の分散リソースを形成する機器導入の施策、適正運用および立地を誘導する施策を行うべき。

日立東大ラボのアクション

日立東大ラボでは、エネルギー・トランジションに伴う国土や暮らしの変化を客観的に分析するモデルやシミュレーションを提案し、エネルギーと社会の変化の可視化に取り組む。

中長期

地政学的危機とトランジションのパスウェイ：変動するランドスケープと地域からの視座 (第2章)

16. 地域ごとのトランジションの道筋

日本でも地域ごとに社会課題、生活様式、エネルギーのポテンシャルが異なり、トランジションの道筋は多元的。政府・自治体は、多様な自然環境のもとでローカル・アクターの主体性をエンパワーし、地域ごとに異なるトランジションの道程を示すべき。

17. 戦略的な産業政策と地域の力の最大化

自治体は、経験の少ない分野で幅広いステイクホルダーを

調整するが、ノウハウの不足もある。地域企業は独自の戦略でグリーン・プロジェクトをけん引。政府は、戦略的な産業政策のもとで、縦割り行政を克服し、地域の力を最大化する支援を。

日立東大ラボのアクション

地域ごとのトランジションのための固有の条件や障害の分析、国際事例の研究などを通じた政策オプションを提示する。

エネルギーシステムの技術的対策 (第3章、第4章)

18. 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の開発

2040年～2050年に向けて、①DACによるCO₂回収の実用化と普及、②回収したCO₂からの燃料製造と運輸・産業部門での利用、のイノベーションが必要である。

地域社会では、大量に設置された小規模太陽光発電の維持・管理が課題。再エネリソースのメンテナンス制度の開発を進

めるとともに、リサイクル技術の開発を加速すべきである。

日立東大ラボのアクション

技術開発に加え、継続的社会移行を進めるためのリーダー人材育成、市民のCNに対する教育推進が必要。日立東大ラボでは、エビデンスに基づく提言を続け、産学官連携での気づきの場を提供していく。

第5版提言検討体制 (2023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	コーディネーター WG0	副学長・大学院工学系研究科教授
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
横山明彦	WG1	名誉教授
大橋弘	WG1	副学長・大学院経済学研究科・公共政策大学院教授
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教授
荻本和彦	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
城山英明	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
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
手塚涼太	事務局	産学協創部 協創課 協創事業チーム
加藤千鶴	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 技術顧問
楠見尚弘	WG0	研究開発グループ サステナビリティ研究統括本部 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
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
大畠康宏	WG0・1	エネルギー業務統括本部 経営戦略本部 部長代理
檜原章	WG1	エネルギー業務統括本部 経営戦略本部 部長代理
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
伊藤智道	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
恒富邦彦	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 主任研究員
鈴木朋子	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 サステナビリティ研究統括本部 プラネタリーバウンダリープロジェクト サブリーダー
福本恭	WG3	研究開発グループ サステナビリティ研究統括本部 プラネタリーバウンダリープロジェクト サブリーダー
稲垣幸秀	WG3	研究開発グループ サステナビリティ研究統括本部 プラネタリーバウンダリープロジェクト 主任研究員
佐々木剛二	WG3	研究開発グループ サステナビリティ研究統括本部 プラネタリーバウンダリープロジェクト 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

付録1 | 日立東大ラボ トランジション・シナリオドメインごとの概要

	ドメイン	多様なエネルギーケース			主な論点
		2015-20 年	2020-30 年	2030-50 年	
電力別	石炭火力 CO ₂ 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ズアウトと石炭火力の効率化を推進。	ウクライナ侵攻で一時的な石炭回帰が起きたが、非効率石炭火力のフェーズアウトとクリーン燃料転換や、CCUS 技術開発と炭素貯留のための国際連携が進展。	石炭火力のフェーズアウトと CO ₂ 回収有高効率火力への転換が完了。政府は民間企業とともにアジア諸国との炭素貯留・利用サプライチェーンを確立。	2020-30 年：非効率石炭火力のフェーズアウトと高効率化の着実な推進が必要。 2030-50 年：官民一体の CCUS 技術開発とアジア地域における炭素貯留・利用サプライチェーン構築が重要。
	ガス火力 CO ₂ 回収有	「省エネ法」改正で非効率火力のフェーズアウトと新型ガス火力へのリプレイス推進。	ガス火力事業者は政府基金を活用して CO ₂ 回収付き火力の開発を推進。政府は国際連携による炭素貯留や利用のサプライチェーン構築を推進。	官民一体となってガス・インフラを活用した CO ₂ 回収・輸送の国内ネットワークと、アジア連携による炭素貯留・利用サプライチェーンを実現。	2020-30 年：ガス火力事業者は政府による補助金や金融機関による融資を活用して CO ₂ 回収有ガス火力発電を実現する必要。 2030-50 年：官民一体となって CCUS 技術開発とアジア連携の炭素貯留・利用サプライチェーン構築が重要。
	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。	化石燃料高騰が再エネ需要を後押し。新たな事業者が参入し、個人や企業の自家発電も増大。政府・自治体は住宅や公用地設置を推進。一方、環境規制も進む。	北海道本州連携線、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 年までに発電量シェア 30% に到達。	2020-30 年：化石燃料高騰による競争力が高まる一方、新電力は苦境に立つ。環境影響や事業規律に配慮しつつ発電量の増加率をいかに高めるか。 2030-50 年：太陽光パネル大量廃棄を乗り越えつつ、太陽光や風力を中心として地域創出、防災や EV の普及を可能にする再エネ安定化インフラをいかに整備するか。
	風力	再エネ海域利用法制定で大規模な風力事業策定、地域市民と合意形成開始。	風力発電事業の円滑な拡大へ向けた制度見直しが続く。地域再エネ事業者により地域アクターを巻き込んだ再エネバリューチェーンの創出が進展。	国際競争激化により産業競争力強化政策が推進。再エネ事業の地域との関係は合意形成から協調による共存共栄へ移行。	2020-30 年：政府は、再エネ適地の発電事業者が、地銀、地場産業や住民などを巻き込んだグリーンな経済圏を形成できるよう支援する必要。 2030-50 年：洋上風力は、漁業者との合意形成から、漁業協調による共存共栄への移行が必要。
	水力・地熱	水力・地熱の総発電量は大きくないが、地域の自立的な再エネ電源として注目を集める。	政府は中小水力導入を促進、地域振興政策とも連携。途上国への脱炭素ソリューションとしてニーズが高まる。	CO ₂ 排出量削減以上に住民意識改善や地域経済活性化に価値発揮。	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 CO ₂ 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。	バイオマス発電を積極推進する政府方針により、地域密着型のバイオマス事業が拡大。	森林バイオマス発電にも CO ₂ 回収が必要との国際的認識により、政府は CO ₂ 回収有バイオマス発電へと施策転換。	2020-30 年：第6次エネルギー基本計画がバイオマス発電の普及拡大を後押しする。 2030-50 年：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 CO ₂ 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。	政府は気候変動、ウクライナ侵攻や電力逼迫を背景として原子力政策を大きく転換。再稼働、運転延長、次世代革新炉の開発を推進。新設に着手。	革新炉は建設工事が推進。小型モジュール炉は国内での運用には至らず。老朽化した発電所を一部運転延長するも、原子力の発電量は漸次的に縮小。	2020-30 年：さまざまな利点やリスクに関する国民全体の理解、および建設用地や放射性廃棄物の処理に関する地域住民との合意形成。 2030-50 年：中長期的に低価格化・安定化する再生可能エネルギーとの関係において、いかに原子力人材、技術開発、施設建設に合理的な投資を行うか。
	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。	国際サプライチェーンが整備され、関連工場（アンモニア等）の海外展開が進む。アジアでは、混焼・専焼への期待が高まる。	火力発電は延命され、混焼・専焼への転換が進む。また、アジアでの需要も生まれ、国際的なサプライチェーンが構築される。	2020-30 年：アンモニアと水素の国際的供給インフラと CCS インフラの整備着手。 2030-50 年：アンモニアと水素の大量生産体制、国際的なサプライチェーンのインフラ整備が不可欠。国際世論においてアンモニア混焼という過渡的な化石燃料利用が容認されるか。
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・補助金等による水素価格の下支えにより、高機能鋼材に特化し、国内生産が維持される。	2020-30 年：電炉へのシフトは進むが、高炉メーカーと電炉メーカーとで、政府に期待する課税・優遇措置などは対立。 2030-50 年：水素還元による鉄鋼製造の技術・インフラが整い、国策として製鉄業に対するさまざまな保護・優遇策が取られる。
	石油化学	国内の石油化学産業の経営課題は利益率の向上。	炭素回収インフラ整備が始まる。循環経済への関心が高まり、生産プロセス、サプライチェーンの変更の取り組みが本格化。	国内生産が不利なプロダクトは海外へ展開し、産業の再配置が進展。ビジネスモデルは変化し、エコシステムが刷新。	2020-30 年：炭素貯留に関する国内外体制の整備と技術開発。グリーン雇用の創出。 2030-50 年：ビジネスモデル、エコシステムの革新（サプライチェーン、産業間連携、国際連携）。官のリーダーシップ（地域の先導や戦略的産業政策）と民のリーダーシップ。
	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重要分野である。	電動車普及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。航空業界では燃料の SAF 転換が緩やかに始まる。	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。	2020-30 年：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のために重要である。 2030-50 年：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産業界に強い訴求力を持ち始める。	一般市民の気候変動を含む持続可能性への関心は徐々に高まったが、地政学的な不安定化のもと、旧来の社会や産業構造の大きな転換には至らず。	気温上昇が継続し、各国の気候対策が厳格化。国内でも地球環境への関心は高まり、生活は変化するが、脱炭素が他国への炭素輸出に依存することに批判も生じる。	2020-30 年：エネルギーにかかわる意思決定において、新たな産業や市民アクター等の参画が乏しく、社会構造の転換が停滞する可能性がある。 2030-50 年：国際的な気候対策のさらなる厳格化が生じる可能性があり、炭素輸出への批判が生じる可能性がある。

再生エネ 100%ケース			主な論点
2015-20 年	2020-30 年	2030-50 年	
「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ズアウトと石炭火力の高効率化を推進。	政府はエネルギー安全保障のため非化石燃料へのシフトを加速。石炭火力事業者は非石炭火力や再生エネへ事業転換を迫られる。	化石燃料発電事業者は事業撤退、バイオマス発電などへ転換。政府は地域経済振興策としてグリーン雇用創生を推進。	2020-30 年：石炭火力発電のフェードアウトに伴う、グリーン雇用創生と生活や労働の質に関する対策が必要。 2030-50 年：大手火力事業者と地域再生エネ事業者が再生エネ電事業に収束することで、日本全体で電力事業の棲み分け・吸収合併が進む可能性がある。
「省エネ法」改正で、非効率火力のフェーズ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、投資引き上げが起こり、バイオマス発電や水素・アンモニア発電などへの事業転換を迫られる。	発電事業者は化石燃料事業を撤退、バイオマス発電、水素・アンモニア発電などへ転換。政府は地域経済振興策としてグリーン雇用創生を推進。	2020-30 年：ガス火力発電事業者は、国内での操業の停止や、バイオマスや水素・アンモニア発電への転換など、大きな移行を迫られる。 2030-50 年：政府は、グリーン雇用創生と生活や労働の質に関する対策が必要。
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。	化石燃料高騰が再生エネ需要を後押し。新たな事業者が参入し、個人や企業の自家発電も増大。政府・自治体は住宅や公用地設置を推進。一方、環境規制も進む。	北海道本州連携線、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 年までに発電量シェア 30%に到達。	2020-30 年：化石燃料高騰による競争力が高まる一方、新電力は苦境に立つ。環境影響や事業規律に配慮しつつ発電量の増加率をいかに高めるか。 2030-50 年：太陽光の大量廃棄時期を乗り越えつつ、再生エネ 100%を実現するための、電力安定化のための制度、および送配電インフラをいかに整備するか。
再生エネ海域利用法制定で大規模な風力事業策定、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。	再生エネ適地では地域復興が進む一方で、不適地は地域振興に苦慮、政府は自然災害による大規模停電回避施策を検討。	2020-30 年：政府は、将来起こりうる生活や労働の質にかかわる施策を検討し実行することが必要。 2030-50 年：再生エネ適地と不適地の間で経済的・社会的格差が拡大する可能性がある。
水力・地熱の総発電量は大きくないが、地域の自立的な再生エネ電源として注目を集める。	政府は中小水力導入を促進、地域振興政策とも連携。途上国への脱炭素ソリューションとしてニーズが高まる。	CO ₂ 排出量削減以上に住民意識改善や地域経済活性化に価値発揮。事業環境改善を追い風に導入事例が顕著に増加。	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。国際世論の要求。 2030-50 年：規制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。
「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は活性化。金融機関は投資推進、政府も新規雇用創出を支援。	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とのサプライチェーン構築が課題。関連省庁の壁を超えた連携が重要。	2020-30 年：化石燃料発電事業者は、国策により国内での操業停止かバイオマス発電への転換など、大きな移行を迫られる。 2030-50 年：再生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。
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。	政府は気候変動、ウクライナ侵襲や電力ひっ迫を背景として原子力政策を大きく転換。再稼働、運転延長、次世代革新炉の開発を推進。	再生エネコストと安定性が向上。一方、安全保障、巨大地震、使用済み核燃料処理の課題などの問題が原因となり、原子力発電量は減少し、再びゼロに。	2020-30 年：さまざまな利点やリスクに関する国民全体の理解、および建設用地や放射性廃棄物の処理に関する地域住民との合意形成。 2030-50 年：安全保障、自然災害、投資回収に関するリスクが人々の意思決定に大きな影響を及ぼす可能性がある。
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きわめて少ない。	国際サプライチェーンが整備され、関連工場（アンモニアなど）の海外展開が進む。アジアでは、混焼・専焼への期待が高まる。	火力発電の閉鎖が相次ぎ、水素・アンモニアの混焼・専焼への転換ならず。国際的なサプライチェーンの構築は頓挫。	2020-30 年：アンモニアと水素の国際的供給インフラと CCS インフラの整備着手。 2030-50 年：国際世論においてアンモニア混焼という過渡的な化石燃料利用が容認されるか。
高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、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。国内再生エネ利用の動きと連携して、原料のみでなく水素や粗鋼生産でもオーストラリア等の重要性が増す。	2020-30 年：電炉へのシフトは進むが、高炉メーカーと電炉メーカーとで、政府に期待する課税・優遇措置などは対立。 2030-50 年：海外の粗鋼生産への依存が増すことに伴う、現地の CO ₂ 削減を監視・支援する体制。
国内の石油化学産業の経営課題は利益率の向上。	炭素回収インフラ整備始まる。循環経済への関心が高まり、生産プロセス、サプライチェーンの変更の取り組みが本格化。	CO ₂ 排出源が減り、国内の炭素回収は需要が減少。炭素回収インフラは暗礁に乗り上げる。	2020-30 年：炭素回収に関する国内外の体制整備と技術開発。炭素回収・貯留に対する社会的受容。 2030-50 年：ビジネスモデル、エコシステムの革新（サプライチェーン上流・下流、産業間連携、国際連携）。官のリーダーシップ（地域の先導や戦略的産業政策）と民のリーダーシップ。
自動車産業は、出荷額、雇用等の面で日本経済を支える重要分野である。	EV は再生エネルギーの安定化においても重要な役割を果たすようになる。航空業界では燃料の SAF 利用が緩やかに始まる。	自動車中心から、公共交通、徒歩、自転車等を重視する街づくりへと転換が強まる。航空輸送は、SAF の輸出も含めた生産体制により最低限の便数を維持。	2020 - 30 年：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。 2030 - 50 年：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。
2015 年パリ協定と政府のカーボンニュートラル目標が産業界に強い訴求力を持ち始める。	市民の持続可能性への関心は徐々に高まる。ソーシャル・メディアや地域創出の活動は既存の意思決定の枠組みに影響を与え、社会システムの大きな転換が生じ始める。	各国の気候対策が厳格化。国内でも地球環境への関心は高まり、日常生活に多様な影響を与える。炭素排出に対する強い制裁のもと、再生エネへの転換が加速。	2020-30 年：気候・環境への市民の関心を背景に、ソーシャル・メディア、人工知能、地域創出の活動などが、意思決定に影響を与え、新しい状況を生む可能性がある。 2030-50 年：国際的な気候対策の状況や、日本における大規模地震災害の脅威が、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。

付録2 | 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)

第3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A2.1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整合的に分析可能。

- ・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。

第3.1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A2.2に示す。また、各エネルギーシナリオの条件を表A2.1に示す。

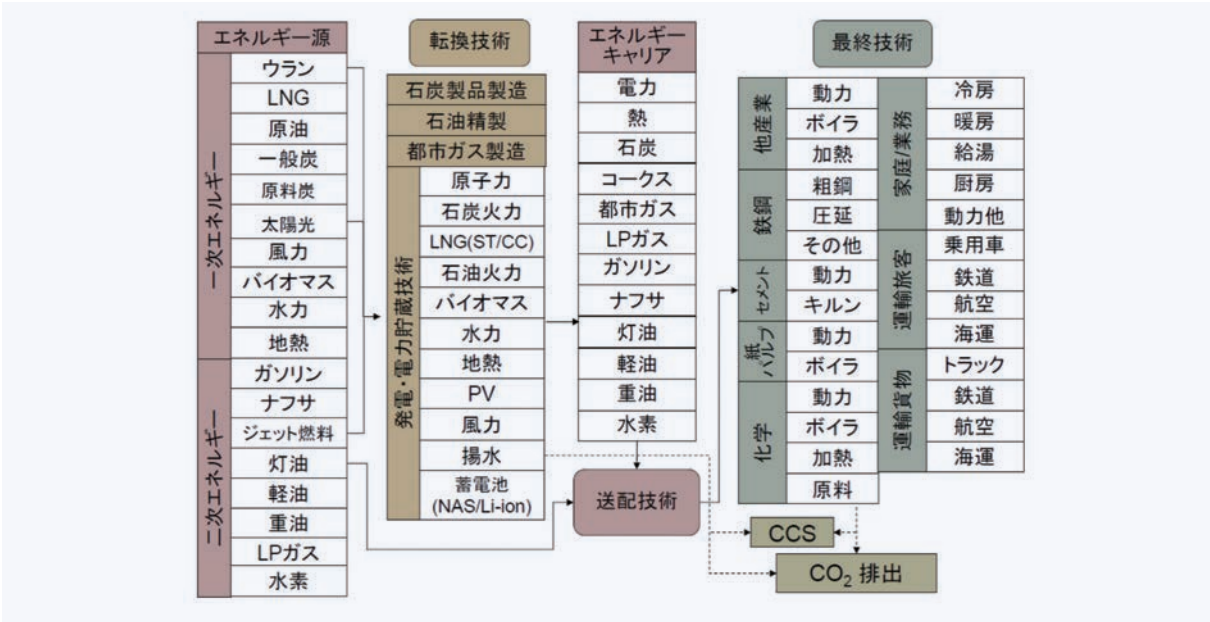


図 A2.1 基準エネルギーシステム

- 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/Nm3 「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: <u>C</u> arbon <u>C</u> apture, <u>U</u> tilization & <u>S</u> torage) CO ₂ の直接空気回収(DAC: <u>D</u> irect <u>A</u> ir <u>C</u> apture)		
*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 A2.2 主なシミュレーション条件（ベース条件）

表 A2.1 各エネルギーシナリオの条件

	①再エネ100%	②火力CCS制限	③原子力活用	④水素調達
原子力稼働年	停止	60	←	←
原子力設備容量上限(GW)	0	24	50(SMR)	←
火力CCS上限(ton)	2億	1億	2億	←
水素輸入上限(ton)	2,000万	←	←	上限なし
水素単価(¥/Nm ³)	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)	7450	←	←	←
DACコスト(¥/tonCO ₂)	10,340	←	←	←
LiB蓄電コスト(¥/Wh)	10	←	←	←
	PV、風力など再エネのみ	火力発電のCCS貯留量に制限あり	2040年以降にSMRを増設する	水素を海外から輸入

*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3 東京都町田市、福島県いわき市における世帯数、および分散リソースの保有台数の導出

表 A3.1 に、2030 年における東京都町田市、福島県いわき市の世帯数、および分散リソース(HP 給湯器、PV、EV)の保有台数の導出結果を示す。以下では、同表の各項目の導出過程について、それぞれ説明する。

1. 世帯数

表 A3.2 に、世帯数の導出過程をまとめる。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⁵⁶。また、いわき市は、同市の世帯数を 14.5 万世帯と予測している⁵⁷。戸建住宅、集合住宅の内訳は次のようにして求めた。関東地区における戸建住宅の割合は 48.5% であり⁵⁸、2030 年における町田市も同様と仮定して、戸建住宅と集合住宅の世帯数をそれぞれ約 9.7 万世帯、10.3 万世帯とした。同様に、2030 年のいわき市の戸建住宅と集合住宅の世帯数はそれぞれ約 9.7 万世帯、4.8 万世帯と求められる⁵⁹。

2. ヒートポンプ(HP)給湯器

表 A3.3 に、HP 給湯器の台数の導出過程をまとめる。HP 給湯器の普及見通しは、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⁶⁰。同文献では福島県は寒冷地の扱いだが、いわき市の省エネ基準地域は同文献において温暖地とされる都道府県に多く含まれる「5」であることから、本検討ではいわき市を温暖地とみなした。同文献から、2030 年の温暖地戸建住宅と集合住宅はそれぞれ約 2,250 万世帯、2,300 万世帯である。2030 年にかけて同文献の「中位ケース」で HP 給湯器が普及することを仮定すると、2030 年の HP 給湯器の台数は戸建住宅では 1,000 万台、集合住宅では 350 万台である。世帯数で按分して、町田市、いわき市における HP 給湯器の台数および普及率を表 3 に示すように求めた。

表 A3.1 2030 年の世帯数と分散リソースの保有台数

市区町村 住宅種別	町田市		いわき市	
	戸建住宅	集合住宅	戸建住宅	集合住宅
1. 世帯数	96,596	102,572	97,497	47,503
2. ヒートポンプ(HP)給湯器 [台]	42,932	15,609	43,332	7,229
3. 太陽光発電 (PV) [MW]	83.48	0	124.35	0
4. 電気自動車 (EV) [台]	7,047	7,483	8,172	3,982

表 A3.2 2030 年の戸建住宅・集合住宅の世帯数

	市区町村	町田市	いわき市
世帯数 (A)		199,168	145,000
うち、戸建住宅 (=A × 戸建住宅の割合)		96,596	97,497
うち、集合住宅 (=A × 集合住宅の割合)		102,572	47,503

56 東京都. 2019. 「推計人口資料第 71 号 東京都世帯数の予測」2023 年 3 月 2 日アクセス. <https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/syosoku/sy19rf0000.pdf>

57 いわき市. 2022. 「いわき市住生活基本計画」2023 年 3 月 2 日アクセス. https://www.city.iwaki.lg.jp/www/contents/1615439248492/simple/02_keikaku-honpen.pdf

58 日立東大ラボ. 2022. 「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)」

59 福島ポスティング.com. 「福島県一戸建数・集合住宅数・事務所数一覧」2023 年 3 月 2 日アクセス. <https://www.posting-nippon.com/fukushima/number2/fukushima.html>

60 一般財団法人 ヒートポンプ・蓄熱センター. 2020. 「令和 2 年度ヒートポンプ普及見通し調査」2023 年 3 月 2 日アクセス. https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/press_topics/2020NewsRelease/news_release_siryō.pdf

3. 太陽光発電 (PV)

表 A3.4 に、太陽光発電の台数の導出過程をまとめる。2018 年における町田市の太陽光導入戸建世帯数は 5,460 世帯である⁶¹。一方、2018 年における関東エリアの太陽光導入戸建世帯数は約 54 万世帯であり、2030 年には 150 万世帯になると試算されている⁶²。町田市と関東エリアの戸建住宅用太陽光発電の普及率が等しいと仮定し、2030 年における町田市の太陽光導入戸建世帯数を 15,206 世帯とした。また、関東エリアの戸建住宅用太陽光発電の平均出力は 5.49 kW である⁶³。2030 年まで平均出力が横ばいで推移することを仮定すると、町田市における戸建住宅の太陽光発電出力は 2030 年で 83.48 MW となる。同様にして、2030 年におけるいわき市の戸建住宅の太陽光発電出力は

124.35 MW となった。なお、集合住宅の太陽光発電については、文献 56 からその普及率が戸建住宅に比べて極めて小さいため無視した。

4. 電気自動車 (EV)

表 A3.5 に、EV の台数の導出過程をまとめる。2022 年の町田市と東京都における自家用乗用車数はそれぞれ約 15 万台、3 百万台であり、東京都の自家用乗用車のうち町田市が占有する割合は 4.83% である⁶⁴。また、2030 年における東京都の EV 台数は約 30 万台と予測されている⁶⁵。このことから、町田市の占有率が 2030 年も変わらないと仮定すると、2030 年の町田市の EV 台数は 14,531 台と求められる。同様に、2030 年のいわき市の EV 台数は 12,153 台となる。

表 A3.3 2030 年の HP 給湯器台数の導出

市区町村 住宅種別	町田市		いわき市	
	戸建住宅	集合住宅	戸建住宅	集合住宅
世帯数 (A)	96,596	102,572	97,497	47,503
HP 給湯器台数 (B)	42,932	15,609	43,332	7,229
HP 給湯器普及率 (B/A)	44.9%	15.2%	44.9%	15.2%

表 A3.4 2030 年の戸建住宅の太陽光発電台数の導出

市区町村	町田市	いわき市
2018 年の太陽光導入戸建世帯数 (市区町村) (A)	5,460	7,080
2018 年の太陽光導入戸建世帯数 (エリア) (B)	538,700	145,600
2030 年の太陽光導入戸建世帯数 (エリア) (C)	1,500,300	430,500
太陽光発電平均出力 (D)	5.49 kW	5.94 kW
2030 年の戸建住宅の太陽光発電出力 (市区町村) (=A/B × C × D)	83.48 MW	124.35 MW

表 A3.5 2030 年の電気自動車台数の導出

市区町村	町田市	いわき市
2022 年の自家用乗用車数 (市区町村) (A)	149,686	221,862
2022 年の自家用乗用車数 (都道府県) (B)	3,096,528	1,218,685
2030 年の電気自動車台数 (都道府県) (C)	300,596	66,758
2030 年の電気自動車台数 (市区町村) (=A/B × C)	14,531	12,153

61 総務省統計局 . 2023. 「平成 30 年住宅・土地統計調査」2023 年 3 月 2 日アクセス . <https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/>

62 富士経済 . 2020. 「2020 年版住宅マーケット別建築・機器・サービス市場調査」

63 環境省 . 2022. 「令和 2 年度 家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査 表 2-6」2023 年 3 月 2 日アクセス . <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateico2tokei/r2co2.html>

64 (一財)自動車検査登録情報協会 . 2023 年 3 月 2 日アクセス . <https://www.airia.or.jp/>

65 富士経済 . 2021. 「EV/PHEV 充電・日本市場の全貌と将来性」

付録4 福島県いわき市の業務部門の総延床面積と建物数の導出

表 A4.1 に、2030 年における福島県いわき市の業務部門（オフィス、ホテル、福祉施設）の総延床面積と建物数の導出結果を示す。以下では、同表の各項目の導出過程について、それぞれ説明する。

1. 総延床面積

業務部門の給湯需要は、主に業務ごとの建物の総延床面積に依存するため、はじめに業務部門の総延床面積を推算した。表 A4.2 にその結果を示す。ここで、福祉施設は病院と老人ホームを含むものとした。図 A4.1 に示す業務別の延床面積の推計フロー⁶⁶、および公知情報^{67,68,69,70} から、2020 年に

おけるいわき市のオフィス(図 A4.1 の事務所ビル)、ホテル(同、ホテル・旅館)、病院(同、病院・医療系施設)の総延床面積を推定した。全国のオフィス、ホテル、病院の総延床面積は、2015 年から 2020 年にかけて横ばいで推移していることから⁷¹、2030 年の総延床面積は 2020 年のそれと等しいものとした。

2020 年における老人ホームの総延床面積は、養護老人ホーム、軽費老人ホーム、有料老人ホーム、サービス付き高齢者向け住宅の延床面積の和とした⁷²。2030 年については、老人ホームの定員数は単調増加していることから⁷³、定員数比と一人当たりの延床面積を乗じて算出した。

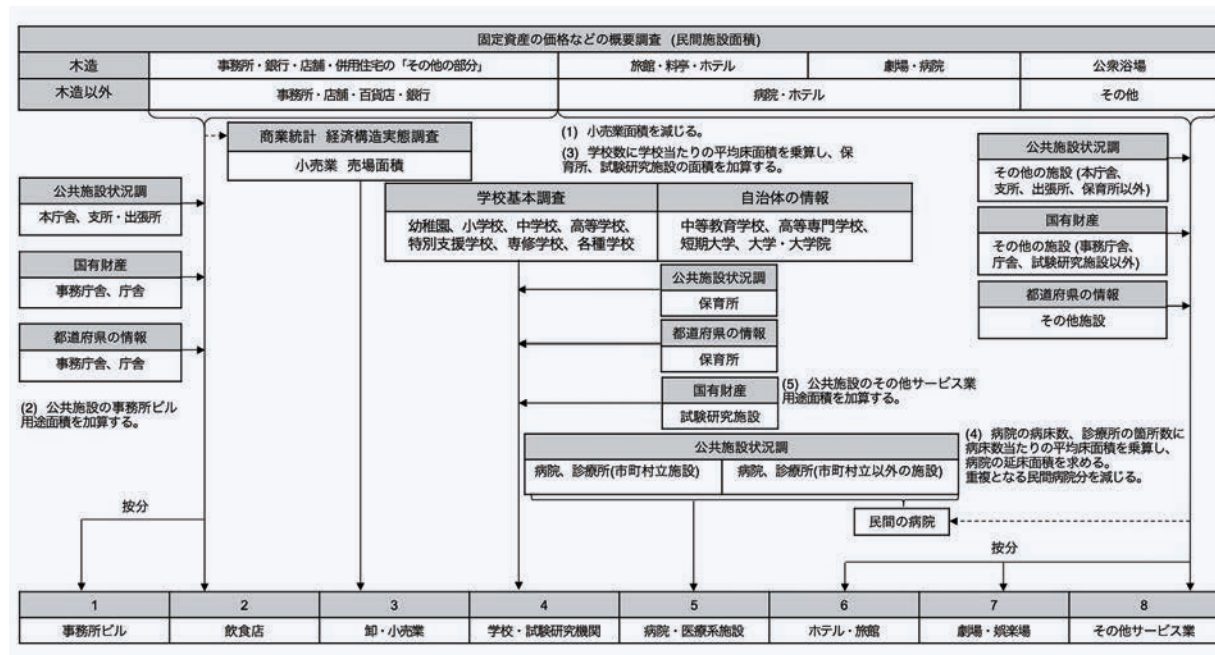


図 A4.1 業務別の延床面積の推計フロー

66 環境省。2021.「地方公共団体実行計画（区域施策編）策定・実施マニュアル（算定手法編）（Ver1.1）」2023 年 3 月 2 日アクセス。 https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/data/manual_santei_202204.pdf

67 総務省。2021.「令和 3 年度 固定資産の価格等の概要調査 5. 木造以外の家屋に関する調査（市町村別内訳）」2023 年 3 月 2 日アクセス。 https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/jichi_zeisei/czaisei/czaisei_seido/ichiran08_r03_05.html

68 総務省統計局。2015.「平成 28 年経済センサス・活動調査」2023 年 3 月 2 日アクセス。 <https://www.stat.go.jp/data/e-census/2016/index.html>

69 いわき市。2021.「いわき市の統計書 令和 2 年度版」2023 年 3 月 2 日アクセス。 <https://www.city.iwaki.lg.jp/www/contents/1629700076841/index.html>

70 （一社）全国公私病院連盟。2021.「令和 3 年 病院運営実態分析調査委の概要」2023 年 3 月 2 日アクセス。 <https://www.byo-ren.com/pdf/r3gaiyou.pdf>

71 日本エネルギー経済研究所。2022.「EDMC エネルギー・経済統計要覧」

72 厚生労働省。「介護事業所・生活関連情報検索 介護サービス情報公表システム」2023 年 3 月 2 日アクセス。 <https://www.kaigokensaku.mhlw.go.jp/>

73 内閣府。「令和 4 年版高齢社会白書（全体版）第 1 章 高齢化の状況（第 2 節 2）」2023 年 3 月 2 日アクセス。 https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2022/html/zenbun/s1_2_2.html

2. 建物数

表 A4.3 に、いわき市の業務部門の建物数の導出過程をまとめる。まず、ホテル、病院については、2020 年における建物数から横ばいで推移すると仮定した。老人ホームについては、養護老人ホーム、軽費老人ホーム、有料老人ホーム、サービス付き高齢者向け住宅を合計し、2020 年における老人ホームの建物数を 72 軒とした。そして、2014 年から 2020 年にかけての老人ホームの建物数の推移から、2030 年では 90 軒になると推定した。

次いで、オフィスビルの建物数の算出について説明する。

表 A4.4 は、国土交通省の法人土地・建物基本調査の区分ごとの平均延床面積⁷⁴、東北エリアのオフィスの総延床面積、および、累積占有率である。まず、表 A4.4 から東北エリアのオフィスの代表建物の延床面積を求めた。累積占有率が過半数を超える CL4 を代表建物とし、その延床面積を CL4 の平均面積 1,447 m² とした。そして、いわき市のオフィスの総延床面積と代表建物の延床面積の比から、オフィスの建物数を 865 とした。

最後に、業務部門エネルギー最終需要モデル⁷⁵に、代表建物や東北エリアの気温等の情報を入力し、業務ごとの延床面積当たりの年間給湯需要曲線を求めた。

表 A4.1 2030 年のいわき市の業務部門の建物数、および建物数

業務種別	オフィス	ホテル	福祉施設
1. 総延床面積 [m ²]	1,251,521	301,358	495,026
2. 建物数 [軒]	865	217	552

表 A4.2 いわき市の業務部門の総延床面積

業務種別	オフィス	ホテル	福祉施設		
			病院	老人ホーム	合計
2020年の総延床面積 [m ²]	1,251,521	301,358	390,756	86,023	476,779
2030年の総延床面積 [m ²]	1,251,521	301,358	390,756	104,270	495,026

表 A4.3 いわき市の業務部門の建物数

業務種別	オフィス	ホテル	福祉施設		
			病院	老人ホーム	合計
2020年の建物数 [軒]	865	217	436	72	508
2030年の建物数 [軒]	865	217	436	90	526

表 A4.4 東北エリアのオフィスビルの延床面積

区分	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6	CL7	CL8	CL9
最大面積 [m ²]	200	500	1,000	2,000	50,000	10,000	20,000	50,000	50,000+
平均面積 [m ²]	132	349	726	1,447	3,258	7,089	15,083	31,238	190,202
総延床面積 [百万 m ²]	0.20	5.29	4.75	4.52	4.40	2.86	2.03	0.72	0.10
累積占有率 [%]	0.8	22.1	41.2	59.3	77.0	88.5	96.7	99.6	100.0

74 山口洋平ほか、2019、「業務用ヒートポンプ給湯器における電力需要調整力の推計」第 38 回エネルギー・資源学会研究発表会 講演論文集 pp325-330

75 Yohei Yamaguchi et.al, 2022, Building stock energy modeling considering building system composition and long-term change for climate change mitigation of commercial building stocks. Appl Energy 2022;306:117907. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921012204>

付録5 | 地域社会から創出可能な日本全体での調整力の導出

表 A5.1 に、地域社会から創出可能な日本全体での調整力の導出結果を示す。以下では、同表の各項目の導出過程について、それぞれ説明する。

1. 全国規模調整力

表 A5.2 に、戸建住宅と集合住宅から創出可能な全国規模調整力の導出過程をまとめる。2030 年の全国の戸建住宅、集合住宅の世帯数はそれぞれ約 2,397 万戸、2,955 万戸と推定されている⁷⁶。また、2030 年度の町田市の戸建住宅、集合住宅の世帯数は表 A5.2 のように算出している。町田市の年間調整力は、第4章の図 4.4(c) から戸建住宅で

56.77GWh/年、集合住宅で 33.48GWh/年である。全国規模の年間調整力は、全国と町田市の世帯数比を乗じて求めた。

次いで、表 A5.3 に福祉施設から創出可能な全国での調整力の導出過程をまとめる。2020 年度の全国の病院の総延床面積は 1.21 億 m² であり、2030 年まで横ばいで推移すると仮定した。全国の老人ホームの総延床面積は、定員と老人ホームの面積が比例関係にあると仮定し、老人ホームの定員の推定値から求めた。老人ホームの定員は単調増加していることから、2030 年の全国の定員は 116 万人と推定した。いわき市の老人ホームの1名あたりの延床面積が全国と等しいと仮定して、これを全国の老人ホームの定員に乘じ、全国の老人ホームの

表 A5.1 地域社会から創出可能な日本全体での調整力

住宅種別	戸建住宅	集合住宅	福祉施設	合計
1. 全国規模調整力 [TWh/年]	14.1	9.7	9.4	33.2
2. 全国規模 HP 給湯器の省エネ効果 [TWh/年]	2.4	1.0	—	3.4
3. 全国規模電力調達コスト削減 [億円/年]	493		—	493

表 A5.2 戸建住宅と集合住宅から創出可能な全国での年間調整力

住宅種別	戸建住宅	集合住宅
全国の世帯数 (A)	23,971,000	29,553,000
町田市の世帯数 (B)	96,596	102,572
町田市の年間調整力 (C) [GWh/年]	56.77	33.48
全国の年間調整力 (D=A/B × C) [TWh/年]	14.10	9.65

表 A5.3 福祉施設から創出可能な全国での年間調整力

項目	値
全国の病院の総延床面積 [m ²] (A)	120,800,000
全国の老人ホームの定員 (B)	1,162,161
いわき市の老人ホームの1名あたりの延床面積 [m ²] (C)	41.1
全国の老人ホームの総延床面積 [m ²] (D=B × C)	47,787,970
いわき市の福祉施設の総延床面積 [m ²] (E)	495,026
いわき市の福祉施設の年間調整力 [GWh/年] (F)	27.67
全国の福祉施設の年間調整力 [TWh/年] (G=(A+D)/E × F)	9.42

76 (国研) 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター. 2023. 「人口変化、住宅種類選択、住宅省エネルギー技術と電力化を考慮した家庭部門市町村別 CO₂ 排出の地域別将来推計」2023 年 3 月 2 日アクセス. <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2021-pp-15.pdf>

総延床面積を推定した。そして、いわき市の福祉施設の年間調整力(第4章の図4.5)に全国といわき市の福祉施設の総床面積の比を乗じて全国規模の年間調整力を求めた。その結果、福祉施設の全国の年間調整力は9.42 TWh/年となった。

2. 全国規模HP給湯器の省エネ効果

表A5.4に、戸建住宅と集合住宅から創出可能な全国でのHP給湯器の省エネ効果の導出過程をまとめる。2030年の全国、および、町田市の世帯数は表A5.2と同様である。第4章の検討結果から、町田市の戸建住宅と集合住宅の夜間運転ケースの消費電力は、それぞれ44.80、16.29 GWh/年である。同様に、最適化ケースの消費電力は、それぞれ35.34、12.84 GWh/年である。これらの差分から、町田市のHP給湯器の省エネ効果は、9.46、3.45 GWh/年となる。これに全国と町田市の世帯数比を乗じることで、全国規模の省エネ効果を求めた。その結果、戸建住宅、集合住宅の全国のHP給湯器の省エネ効果は、それぞれ2.35、1.00 TWh/年となった。

3. 全国規模電力調達コスト削減

表A5.5に、戸建住宅と集合住宅の全国規模の電力調達コスト削減の導出過程をまとめる。まず、第4章の検討結果から、町田市の戸建住宅と集合住宅の夜間運転ケース、最適化ケースの電力調達コストは、それぞれ22.49、20.44億円/年であり、それらに全国と町田市の世帯数比を乗じて全国規模の電力調達コストとした。

最適化ケースでは、スポット価格が0円となる時間帯にHP給湯器の貯湯やEV充電が行われるため、需要が増えてスポット価格が変動することが考えられる。そこでスポット価格が0円から1円に増加することを仮定して最適化ケースの電力調達コストを計算した。スポット価格が0円の時間帯における需要は、21.75 GWh/年であり、このときのスポット価格を1円に変更すると、町田市の調達コストは2175万円増加する。これを世帯数比で全国規模に換算すると58.44億円となる。これにより、最適化ケースの電力調達コストは5550億円、電力調達コストの削減額は493億円とそれぞれ更新され、その削減効果は8.16%となる。

表 A5.4 戸建住宅と集合住宅の全国規模ヒートポンプ給湯器の省エネ効果

住宅種別	戸建住宅	集合住宅
全国の世帯数(A)	23,971,000	29,553,000
町田市の世帯数(B)	96,596	102,572
町田市の夜間運転ケースの消費電力 [GWh/年] (C)	44.80	16.29
町田市の最適化ケースの消費電力 [GWh/年] (D)	35.34	12.84
町田市のHP給湯器省エネ効果 [GWh/年] (E=C-D)	9.46	3.45
全国のHP給湯器省エネ効果 [TWh/年] (F=A/B×E)	2.35	1.00

表 A5.5 戸建住宅と集合住宅の電力調達コスト

住宅種別	町田市	全国
世帯数(戸建住宅・集合住宅)(A)	199,168	53,524,000
夜間運転ケースの電力調達コスト [億円/年](B)	22.49	6,043
最適化ケースの電力調達コスト [億円/年](C)	20.44	5,492
電力調達コストの削減額 [億円/年](D=B-C)	2.05	493
スポット価格の変動加味 [億円/年] (E)	0.22	58.44
更新された最適化ケースの電力調達コスト [億円/年](F=C+E)	20.66	5550
更新された電力調達コストの削減額 [億円/年](G=B-F)	1.83	493



H-UTokyo Lab.

Hitachi and UTokyo Joint Research