

提 言

Society5.0 を支える電力システムの実現に向けて

(第2版)

2019年4月17日

日立東大ラボ

まえがき

近年、再生可能エネルギー電源の大量導入、ICT の発展、グローバル化の進展、人々の価値観の変化などにより、知識や価値の創造プロセスが大きく変化し、経済や社会のあり方、産業の構造が急速に変化する大変革時代が到来している。現在日本政府は、そのような経済や社会の変革に対応した新たな価値を創出し、豊かな暮らしがもたらされる超スマート社会として「Society 5.0」を未来の姿として共有し、世界に先駆けて社会課題の解決を実現していく方針を掲げている。

国立大学法人東京大学（以下、東京大学）では、これまで、社会が直面する複雑な地球的課題を解決するためには、単一分野の学理だけでなく、世界的な視野で多様な知を結び付け、知の協創を行うことが欠かせないと考え、課題解決に必要な多分野の部局における研究成果を結び付けるとともに、政策形成などにも貢献してきた。また、創立以来、東西文化融合の学術の拠点を発展させてきた。このような伝統を引き継ぎ、さらなる未来に向けて、世界の様々な人々を惹きつけ、知の探求を知の活用へとつなげる、「知の協創の世界拠点」を構想している。この拠点において、産学が組織対組織で方向性を共有して相乗効果を積極的に引き出すことによって、スケールの大きな課題に取り組み、新たな社会的価値を創造する機能を強化する「産学協創」を推進しようとしているところである。

一方、株式会社日立製作所（以下、日立）は、長年培ってきたインフラ技術と高度な IT を組み合わせた社会イノベーション事業を推進している。今後は、顧客やパートナーとの協創やオープンイノベーションの推進を加速し、社会の課題に対して最適なソリューションを提供するため、デジタル技術を活用した新たな価値の創造を図っているところである。

東京大学と日立は、こうした両者の取組みを融合し、人類に豊かさをもたらす「Society 5.0」の実現に向けたビジョンを創生し、イノベーションを創造するため、「産学協創」の新たなスキームのもと、2016 年 6 月 20 日、東京大学内に「日立東大ラボ」を設置した。

活動分野の一つとして、Society 5.0 におけるデータ駆動型社会を支えるエネルギーシステム、特に電力システムを対象に検討を進めている。大規模電源を核とした従来の電力システムから、再生可能エネルギーの導入拡大、分散化、デジタル化、電化・電動化などを取り込んだ新しいシステムへの移行が不可避的に進んでいく状況において、国内外の情勢を踏まえつつ、Society 5.0 を支える電力システムの将来に関する技術的課題や政策・制度的課題を抽出し、関係者と問題意識の共有を図っている。その成果を提言として公開する。

議論の方向性

Society 5.0 を支える電力システムを考えていく上で、以下の3つの大きな方向性のもとで議論を進めた。

A) Society 5.0 へのビジョン立案

エネルギーシステムは、従来のようにエネルギー供給の視点に加えて、未来に向けて社会のあり方や個人の生活スタイルを変革する重要インフラとなることを前提として再構築すべきである。これまで培ってきた日本の高い信頼性・技術力・人財を活かしながら、新しい産業や雇用を創出する Society 5.0 の世界をめざすとともに、確立されたビジョンと技術で国際社会に貢献する。

産業の構造転換に向けて何をすべきかを議論する際に、大きく分けて短期・中期・長期の3つの時間スケールを意識する必要がある。エネルギーの場合には、社会的な影響や現有するインフラ設備の規模が非常に大きいので、構造転換に時間がかかると考える。それを踏まえると、短期は5年から10年、中期は10年から20年、長期は20年から100年単位で考える必要がある。

不確実性が増す世界情勢の中で、各種施策を戦略的に進めるためには、2030年、さらには2050年以降も見据えた中長期ビジョンを策定し、その実現に向けて制度・政策（社会システム）を複数のシナリオで議論すべきである。また、技術的にも多様な選択肢を準備する必要がある。中長期シナリオにおいて重要となる技術開発については不確実性が高く、市場原理のみでは対応できないため、国家的かつグローバルな視点での戦略的な投資が必要である。

B) オープンな社会的意思決定の枠組み

社会全体でエネルギーシステムのあるべき姿を議論して共有するには、オープンで、かつ定量的・客観的な情報発信・共有を行うプラットフォームの育成と、それを踏まえた意思決定の枠組みが必要である。産学官の協力のもと、ステークホルダ間の情報共有を促し、エネルギーシステムに関わるデータやツールを可能な限り共有する。このようなオープンな議論のもとで、エネルギーシステム間の健全な競争を促すこともできる。

エネルギーシステムに関する社会的合意形成のため、今起こっている課題に対処するだけでなく、様々な方向性について幅広い思考で討論する仕掛けを整備すべきである。

C) 横断的人財の育成

Society 5.0 を支えるエネルギーシステムを構築していくとともに、グローバルな社会貢献に資するインフラ産業を創生するためには、科学技術イノベーション、社会システム、経済メカニズムを一体で捉えることが重要である。

産学官が連携して業界・学問・世代の枠を超える取組みを推進し、多面的な価値を論じられる人財の育成が必要である。

Society5.0への ビジョンの立案	<ul style="list-style-type: none"> ・2030年/2050年を見据えた中長期ビジョンの実現に向けた、複数のシナリオによる議論推進と多様な技術的選択肢の準備 ・日本の高い信頼性・技術力・人財を活かす ・中長期シナリオの技術開発に対する国家的視点の継続的な投資 ・確立した技術で国際社会に貢献
オープンな社会的 意思決定の枠組み	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギーシステムのあるべき姿を共有するために、オープンで、定量的・客観的な情報発信・共有を行うプラットフォームの育成とそれを踏まえた意思決定の枠組みを構築 ・オープンな議論のもとで、エネルギーシステム間の健全な競争を促進 ・社会的合意形成のためのデータや解析ツールを可能な限り共有
横断的人財の 育成	<ul style="list-style-type: none"> ・新しいインフラ産業の創生には、科学イノベーション、社会システム、経済メカニズムを一体で捉えることが重要であり、多面的な価値を論じられる人財を育成 ・産学官が連携した業界・部門・世代の枠を超える取り組み

図 i 議論の方向性

提言書（第 1 版）の要点

Society 5.0 では、個人の生活が主役となって、地域社会ごとに特色あるエネルギーシステムが構築される。そこではデータが重要な役割を果たし、電力だけでなく、新たな価値やサービスが供給される。地域社会をつなぐ基幹システムは社会全体の「3E+S」¹を最適化する役割を担う。地域社会と基幹システムの役割は画一的ではなくなり、共存を前提として再構築される。電源の分散化、基幹システムと多数の地域社会の連携、さらに人の行動など、協調・調整すべき要素が指数関数的に増加し、これらの分散リソースを統合する新しい協調メカニズム技術の確立が必要である。

地域社会で挑戦すべき新たな方向性として、エネルギーの価値が多様化していく中、独自の価値を創造・流通・取引できる技術革新と制度整備を進めるべきである。例えば再生可能エネルギーの好適地では、系統安定化のための施策とともに、余剰電力の活用で地場産業を育成する社会をめざす。電力・ガス・水道に加えて ICT・交通・物流などを含む各種インフラの情報を公共的なものとして共有する仕組みを設けることで、新しいサービス事業を創生する。

¹ Economy（経済）、Environment（環境）、Energy Security（安定供給）、Safety（安全）の頭文字をとったもの

基幹システムのあるべき姿を議論するために、電力を中心に社会全体のエネルギーシステムを評価するプラットフォームを構築する。産学官が協力して解析ツールや標準データを開発・共有する。評価結果を基に様々のステークホルダが議論をして、基幹システムの役割とその変革に向けた投資に対する社会的合意形成を実現する。また、基幹システムと地域社会をデジタルでつなぐ新しい制御技術を組み込み・実践し、その技術と経験をグローバルに展開する。

上記のようなエネルギーシステムの挑戦と変革には、それに向けた制度・政策の整備も必要である。政治・経済・技術革新など多くの不確実性を抱える時代に対して、社会に大きな影響を与える変化要因を評価軸として設定し、複数のシナリオで制度・政策を議論する。イノベーションと投資は経済性、環境性、安定供給などの多角的な観点でアウトカムを評価し、PDCA を実行する。日本で確立した先進的エネルギーシステムをグローバルに展開し、国際社会に貢献する。これらの政策・制度の議論にあわせて、インフラ輸出のための投資やサプライチェーン全体のセキュリティ・ガバナンスなど、実行面の検討も必須である。

また、エネルギーシステムの発展には、短期・中期・長期といったマルチタイムスケールの戦略立案が必要であり、特に人財や技術を育成するための継続的投資が不可欠である。科学技術、社会システム、経済メカニズムを一体に捉えた広い視点でエネルギーシステムの未来をデザインできる人財を育成するためには、電力、交通、情報などの工学分野に加えて、経済学・経営学・金融工学、さらには社会学などがクロスオーバーする研究と教育の仕組みが必要である。また、貴重な財産であるシニア人財を積極的に活用して、地域社会・基幹システムの発展を加速する。

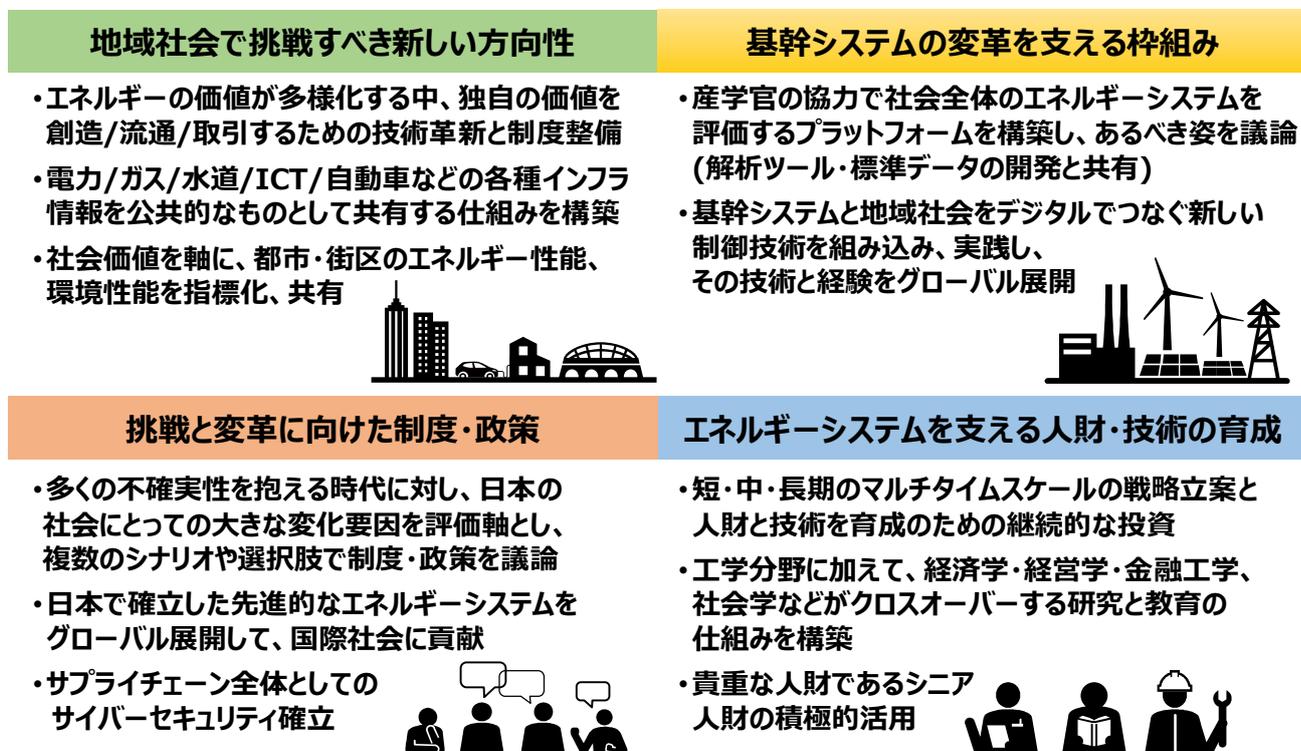


図 ii Society5.0 を支えるエネルギーシステムの実現に向けた論点

提言書第 2 版の改訂趣旨と要点

2018 年 4 月に提言書第 1 版を公開して以降、次世代エネルギーシステムに関する議論が各所で行われている。7 月に発表されたエネルギー基本計画の見直しでは、2030 年長期エネルギー需給見通し（2015 年 7 月に経産省が決定したエネルギーミックス）と 2050 年を見据えたシナリオの設計が記載されている。不確実性と不透明性を抱える状況において、野心的な目標を掲げながら、最新情報に基づいて重点を決める複線的シナリオによるアプローチが適切としており、選択・判断には科学的レビューメカニズムの導入が必要と記載されている。また、9 月に発生した北海道胆振東部地震に伴う道内ブラックアウト契機にレジリエンスの重要性が再認識された。こうした状況を背景に、経産省では、10 月に「次世代技術を活用した新たな電力プラットフォームの在り方研究会」、2019 年 2 月には「脱炭素化社会に向けた電力レジリエンス小委員会」が発足され、様々の有識者との議論を基に、次世代のエネルギーシステムに向けた制度・政策の議論を推進している。なお、これらの活動では日立東大ラボの検討結果も参照されている。

このようなエネルギーシステムの議論を核として、社会全体の視点では、2018 年 8 月に内閣府が設置した「パリ協定長期成長戦略懇談会」では、温室効果ガスの低排出型の経済・社会を発展させる長期戦略として、2019 年 4 月に提言を発行した。さらには 2019 年 6 月予定の「G20 持続可能な成長のためのエネルギー転換と地球環境に関する関係閣僚会合」では、グローバルに広範な議論が期待されている。

このように次世代エネルギーシステムに関する議論が活性化する中、日立東大ラボでは継続して検討を進めている。提言書第 1 版の深堀を目的とし、具体的には以下の 2 つのテーマを進めている。この提言書第 2 版は、これらの検討結果を第 1 版に追加した形で纏めている。

(1) 社会全体のエネルギーシステムを評価するプラットフォームおよびデータの概念設計（主に第 5 章）

上述のように、複数のシナリオや数多くの技術選択肢を踏まえて将来のエネルギーシステムの姿を議論するためには、産学官が協力して、社会全体のエネルギーシステムを分析・評価するツールやデータを準備すべきである。ここでは評価プラットフォームの概念設計を行う。様々のステークホルダが評価プラットフォームを活用するユースケースを想定・抽出し、解析ツールと標準データの要求仕様を具体化する。特に、系統、発電、需要、およびそれぞれの今後の見通しを含んだ情報・データでは、ユースケースごとに必要な項目を定義し、公開・開示の範囲を検討する。また、対象は基幹システムだけでなく、分散型電源の設置や EV の大量導入に伴う充電インフラの拡充によって、地域社会の電力システム（配電系統）にも変革が必要となって、これらに対応した評価環境も準備すべきである。また、将来のエネルギーシステムは、基幹システムと地域社会の共存を前提としており、両者の連携・協調を評価できるプラットフォームへと進化させていく。

情報・データ共有では、個人のプライバシー保護や国のセキュリティ確保、また、事業者の競争環境保護の観点から、匿名加工やモデル化とともに、公開・開示範囲の明確化が重要である。また、このプラットフォームを継続的に発展させる仕掛けや枠組みも必要で、例えば中立的な機関を定めて運用するなど、具体的な施策も議論すべきである。

(2)次世代エネルギーシステムのシナリオ検討（主に第2章と第6章）

2050年以降を見据えたエネルギーシステムの長期的シナリオを検討する。脱炭素化社会実現というゴールをめざす大方針の下、パリ協定のCO₂排出量削減目標をターゲットに据えた。日立東大ラボ独自の評価軸として、脱炭素化（国内のみでCO₂排出量80%減を実現するケース、CO₂クレジットなどを活用してワールドワイドに削減するケース）と人口分散化（東京・大阪などの大都市近郊に集中するケース、地域創生・地域活性化により多くの中規模の都市が分散するケース）の2つの項目を取り上げて、これらで構成する4つシナリオで電力システムを中心に技術的、政策・制度的課題を議論する。

目 次

第1章 将来のエネルギーシステムのあるべき姿	1
1.1 Society 5.0 の実現に向けたエネルギーシステムの全体像	1
1.2 日本における電力システムの変遷と現在の課題	3
1.3 中長期を見据えた段階的な取組み	4
第2章 長期エネルギーシナリオの検討	6
2.1 制度・政策における複数の選択肢：シナリオ分析とは	6
2.2 日立東大ラボによる日本の長期エネルギーシナリオ試案	6
第3章 地域社会で挑戦すべき新しい方向性	12
3.1 地域社会の改革	12
3.2 多様なエネルギー価値流通に向けた技術的な取組み	14
3.3 各種インフラ間でのデータ共有	16
3.4 都市・街区全体のエネルギー性能・環境性能評価	17
3.5 基幹システムとの連携	17
第4章 基幹システムの変革を支える枠組み	19
4.1 基幹システムの新たな役割	19
4.2 基幹システムの評価環境	20
4.3 地域社会との連携	22
4.4 サイバーとフィジカルが融合する評価プラットフォームへの進化	23
第5章 評価プラットフォームとデータ共有の概念設計	25
5.1 評価プラットフォーム	25
5.2 情報・データの開示・公開に関する枠組み	28
5.3 再エネ導入拡大に伴う系統対策の評価	29
5.4 シミュレータ活用による定量的評価例（試行紹介）	30
第6章 挑戦と変革に向けた制度・政策	34
6.1 エネルギーシステムの将来像の具体化	34
6.2 基幹システムと地域社会の再構築を促進する施策	35
6.3 イノベーションの推進のための制度・政策	39
第7章 エネルギーシステムを支える人財育成	42

7.1 新しい人財の育成	42
7.2 シニア人財の活用	43
第8章 まとめ	44
第2版提言検討体制	47
付録	48
付録1 技術選択モデルによる長期エネルギーシナリオの定量的検証	48
付録2 ステークホルダが評価に活用するユースケースおよび必要な情報・データ	53
付録3 シミュレータ評価における解析方法・解析モデル	56

Society5.0 を支える電力システムの実現に向けて

第1章 将来のエネルギーシステムのあるべき姿

1.1 Society 5.0 の実現に向けたエネルギーシステムの全体像

Society 5.0 では、Society 4.0 までに築かれた情報社会を基盤とし、サイバー（仮想）空間とフィジカル（現実）空間を高度に融合させたシステムによって経済発展と社会課題の解決を両立し、ヒューマンセントリックな豊かな社会の実現をめざしている。Society 4.0（情報社会）では、人口の増加に対応して規模拡大による効率向上が重視され、製品・サービス・プロセスなども均一化を進めたことにより、社会の価値観が画一的になるという課題があった。また、富や情報の集中、災害に対する脆弱性、環境負荷の増大という問題も顕在化されてきた。Society 5.0 では、技術革新によってそれらの課題や問題を克服し、多様な人々が多様な価値を發揮して、強靱性や持続可能性を追求する。多くのステークホルダーが協力して、個々に分断していた情報の共有が進んで新しい価値を創出し（バリュークリエーション）、地域創生も可能となる。

Society 5.0 では個人の生活が主役となって、地域社会ごとに特色のあるエネルギーシステムが構築される。経済や社会のあり方、産業の構造が急速に変化する中、地域社会を支えるインフラとして、電力・ガス・水道のみでなく ICT・交通・物流などが互いに連携・協調し、地域社会に適したエネルギーシステムを再構築していく。個人のエネルギー利用価値は、従来のような使用に対する課金だけでなく、CO₂ 排出量削減や地域資源保護などの環境性、さらには生活の利便性や快適性に係わる価値などに多様化していく。このような動向に加えて、エネルギー消費の電化・電動化が進み、電力利用を支えるパワーエレクトロニクス技術が普及して、大量かつ長期に貯蔵できる新たな二次エネルギーの利用も始まる。これまでに比べて、デジタル化の進展とともにエネルギーの消費行為は時間的にも量的にも柔軟になり、自由度が上がる。これらの可制御性が向上したエネルギーの需要では、データが重要な役割を果たし、新たな価値やサービスが融合して供給される世界へと変容する（図1）。

第2章では、ケーススタディと位置づけて、日立東大ラボの独自の視点で日本のエネルギーシステムの長期シナリオを検討した結果を述べる。パリ協定の2050年CO₂排出量削減目標を踏まえ、評価軸に設定した2つの不確定要素、「脱炭素化」と「人口の分散化」で構成する4つのシナリオに基づき、電力システムの技術的、制度・政策的課題を議論する。なお、これらのシナリオは、中長期的社会や技術動向の不確実性に左右されるものであり、特定のシナリオを選択して政策目標とするものではない。

地域社会が変容していく中で、電力システムには大きな改革が求められる。従来は、大規模電源を主力としながら、全国的なユニバーサルサービスとして地理的・時間的にほぼ一様で固定的な料金体系で提供されることが主流であった。今後、再生可能エネルギー（以下、再エネ）、特に太陽光発電や風力発電などの気象状況に応じて出力変動する変動性再生可能エネルギー（以下、VRE [Variable Renewable Energy]）など分散型電源の導入が高まる中、電力の供給と利用において一様な価値観を求めることは難しくなる。電力の価値はいわゆる kWh 価値というエネルギーの「量」の価値に加え、電力システム全体で必要とする容量（供給力）への貢献を意味する kW や、短期変動への

- ✓ 地域社会と基幹システムは、共存を前提として再構築
- ✓ 急増する分散リソースを統合する協調メカニズムの確立

社会全体の3E+Sを最適化



図1 Society5.0を支えるエネルギーシステム全体像

需給調整能力を表す ΔkW など、電力システム全体で見た電力の「質」を支える調整力の価値も必要となる。このような地域社会におけるエネルギーシステムの新たな挑戦に関し、第3章では技術的な観点、第6章では制度・政策面から詳細を述べる。

地域社会におけるエネルギーシステム、特に電力システムが変容する中、基幹システムは社会全体の「3E+S」を全体最適化する重要な役割を担う。再エネの地域偏在や時間変動に耐えるためにも、一つの地域社会でエネルギー需給や価値のやりとりが閉じることは難しく、基幹システムが複数の地域社会をつなぎ、システム全体を調整する役割を果たす。社会全体の便益を向上させるためには、需要、供給、流通網の地理的分布と時間的変動に基づいて、基幹システムも戦略的に変革していく必要がある。

こうした状況の中、地域社会のエネルギーシステムと基幹システムとの役割は画一的でなくなり、共存を前提に再構築する必要がある。現在、基幹システムが電力システム全体を制御する役割を担っているが、将来は再エネや分散型電源によって特色のあるエネルギーシステムを持つ地域社会が増加して、基幹システムも地域社会からの調整力の供給を利用

することで「3E+S」が成立した世界が実現する。地域社会ごとに特色あるエネルギーシステムを構築していく中で、基幹システムとの役割分担については、それらを実現する手段として制度・政策（社会システム）も含め議論することが重要である。基幹システムの変革に向けた取組みに関し、第4章では技術的観点、第6章では制度・政策の観点について述べる。

また、このような将来のエネルギーシステムでは、分散リソースを統合する新たな協調メカニズムを実現する技術の確立が必要である。電源の分散化、基幹システムと多数の地域社会との連携、さらに人の行動との連動といった協調・調整すべき要素が増える。現在、VPP²やリソースアグリゲーション³など、分散リソースを活用する取組みが複数始まっているが、今後、相互に協調すべき対象が指数関数的に増加していくことは明らかである。大規模電源を対象とした従来の基幹システムとは異なり、極めて多数の不確実性をもった多様な分散リソースを統合的に制御することは大きな挑戦であり、自律分散制御と集中制御を組み合わせるなど、高度な技術開発を伴う。制度の観点では、エネルギーシステム全体のデータ共有を実現し、フィジカル空間とサイバー空間が融合する世界を構築して、様々のステークホルダと議論を重ねる必要がある。ステークホルダが同じ土俵の上で議論することが重要であり、その環境づくりとして国の主導で解析ツールやデータの共有を進めるべきである。例えば、再エネの多くは基本的に燃料費がゼロであるが、それが大量導入された電力システムの品質や安定性を維持する施策が必要となる。社会全体のコスト最小化が重要であると同時に、社会的合意形成を得るには、ビジュアル化して共通認識できる評価プラットフォームの整備が必要で、この場合、データの共有が前提となる。このような地域社会と基幹システムをつなぐための取組みに関して、第3章と第4章では技術的な観点について、第5章では評価プラットフォームの概念設計と具体化、第6章では制度・政策面から詳細を述べる。

また、日本の電力システムは、これまで高い信頼性を維持しており、それを支える優れた技術と人財を保有している。これらの強みを活用しながら、エネルギーシステムのあるべき姿をめざす。人財活用については第7章で詳細を述べる。

1.2 日本における電力システムの変遷と現在の課題

電力システム改革の歴史を振り返ると、1990年代以降、電力の安定供給を維持しつつ、電力の供給価格上昇を最大限抑制し、需要家の選択肢や事業者の事業機会を拡大することをめざして段階的な改革が行われてきた。

これにより異分野の事業会社など新たな電力供給の担い手が参入し、1995年以降、東日本大震災まで電気料金は徐々に低下してきた（震災以降は、電源構成の変化に伴って電気料金は上昇）。また、2016年4月に電力小売全面自由化が始まり、一般家庭における新電力へのスイッチング率が2018年12月に20%を超えるなど、需要家の選択の幅は拡大している。一方で、震災以降、原子力発電所の停止、再エネの固定買取価格(FIT)導入、不透明な電力需要、さらには電力システム改革による一層の事業のスリム化を背景として、電力システムへの投資が抑制され、

² VPP : Virtual Power Plant 分散型の発電・蓄電・需要制御などのリソースをICTでつなぎ、一つの大規模発電所のように統合制御する概念

³ リソースアグリゲーション : VPPと同様に、分散型のエネルギーリソースをICTでつなぐ統合制御の仕掛け

2020 年に予定される発送電分離によってその傾向がさらに強まる可能性もある。この結果、高経年化していく設備の適切な更新や、今後、増加する分散エネルギーリソースとの協調、さらにはデジタル化を契機としたエネルギー消費形態の転換への対応が遅れる恐れがあり、エネルギー分野における Society 5.0 への変革が難しくなる。不確実性を前提に将来のエネルギーシステムの長期シナリオを描き、必要な技術や投資対象を明確にして、投資を確保するための政策・制度を議論・構築することが重要となる。

1.3 中長期を見据えた段階的な取組み

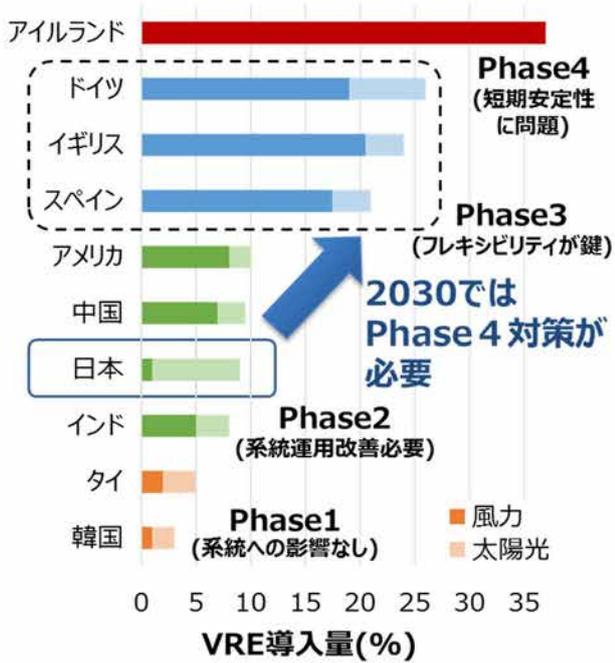
これまでに述べてきたビジョンを実現するためには、幅広い視点の議論が欠かせない。不確実性が増す世界情勢の中、各種施策を戦略的に進めるためには 2030 年さらには 2050 年を見据えた中長期ビジョンを策定し、その実現に向けて制度・政策を複数のシナリオで議論すべきである。また、技術的にも多様な選択肢を準備しておく必要がある。

技術の選択肢を考える上で、主力電源の一つに位置づけられる再エネの導入は重要な変化ドライバーの一つである。特に、VRE が電力システムに与える影響は大きく、VRE 導入率の増加に伴って段階的な対策を準備しなければならない。例えば、国際エネルギー機関（IEA）では、VRE の発電量総量に占める割合に応じた対策の導入ステップを提示するとともに、電力システムの安定運用や経済性の様々の課題が段階的に発生することを述べている。さらにその対策として、需給バランスをとるための調整力を発電・送配電・需要の全ての領域に求めることが必要と指摘している（図 2）。また、VRE 発電量が増加して総量の 50%を越えるようになると、VRE の余剰電力が必然的に発生し、その対策として熱や輸送の電化を進めるとともに、VRE 発電と電力需要の不均衡に対して P2G や貯蔵などが必要となる。また、これまでの大規模電源だけでなく分散型電源・エネルギー貯蔵・需要家からも調整力を得るためには、これら分散リソースに関するグリッドコード⁴を戦略的に決めていく取組みや、分散リソースの協調メカニズムの構築など、新たな施策も不可欠である。

エネルギー貯蔵や備蓄に関する技術進展についても、複数のシナリオをもって準備する必要がある。再エネを含む各種電力供給が、低炭素排出の制約の中で需要と整合するには、大量かつ長期のエネルギー貯蔵が段階的に必要となる。蓄電だけでなく、従来、石油が担ってきた貯蔵・備蓄と同規模の新たな二次エネルギーも必要となる。これらについては、製造や貯蔵に加えて適時の利用を想定して、実際に必要となる時点に間に合うように製造・貯蔵設備、配送インフラ、利用技術を計画・導入することが必要である。

これら中長期シナリオにおいて重要となる技術開発は市場原理だけで対応できるものではなく、国家的視点の継続的投資が必要である。このための実行の枠組みに関しては、制度・政策的な観点から第 6 章で詳細に述べる。

⁴ グリッドコード（Grid Code）：電力システムの運用規定（この場合は特に、分散リソースと電力システムの連系要件を指す）



対策	Ph.1	Ph.2	Ph.3	Ph.4
リアルタイム監視制御				
送電容量の拡大				
柔軟な発電出力制御				
系統安定化システム				
Advanced VRE				
非同期電源の連系制限				
スマートインバータ				
揚水発電の運用高度化				
高速周波数応答				
エネルギーストレージ				
予備力の適切な確保				
発電予測活用系統運用				
高速需給計画・運用				
VRE協調 需給運用				
需給運用の広域連携				

図2 VRE 導入量と系統運用施策
(国際エネルギー機関 IEA 報告書⁵より作成)

⁵ IEA “Integrating variable renewables: Implications for energy resilience”, Asia Clean Energy Forum 2017

第2章 長期エネルギーシナリオの検討

グローバルな経済・社会の変化や技術革新などによって中長期的な不確実性が高まる中、Society 5.0 の実現に向けて複数の長期エネルギーシナリオを想定しておくことが重要である。エネルギーインフラにおける技術開発や設備導入は、短期では5年から10年、中期では10年から20年、長期では20年から100年の単位で考える必要があり、エネルギーシステムの将来像を示すことによって開発項目や投資領域を明確にすべきである。

2.1 制度・政策における複数の選択肢：シナリオ分析とは

エネルギー資源を巡る世界情勢の変化や、グローバルレベルでのマーケットプレーヤーの多様化、EV、蓄電池、水素応用などの様々な技術革新を通じて、政治・経済・技術のあらゆる側面で不確実性が高まっている。こうした時代では、その時々状況や将来の見通しに応じた柔軟な意思決定が要求されるため、あらかじめ複数の将来像を想定しておくシナリオ分析が重要となる。シナリオ分析では、単一の未来予測ではなく、複数の可能性を探り、各々のシナリオにおけるエネルギーシステムのあり方とそこへ向かう方策をデザインする。

2.2 日立東大ラボによる日本の長期エネルギーシナリオ試案

ここでは、日本の社会に大きな影響を与え、かつ不確実性の高い変化要因をシナリオの評価軸に設定し、パリ協定における2050年CO₂排出量削減目標△80%を達成するための複数のシナリオを議論してみる。

(1) 4つの長期エネルギーシナリオ

不確実性の高い項目として、「脱炭素化」（国内で排出量80%減を実現するケースと、CO₂クレジットの活用などでワールドワイドに排出量を削減するケース）と「人口の分散化」（東京・大阪など大都市近郊に人口や産業が集中するケースと、例えば国交省が描く60～70か所の中規模都市（高次地方都市連合）に分散するケース）の2項目を軸として、4つのシナリオを想定した（図3）。評価軸の選定理由と、それが示す具体的な内容は以下の通りである。

少資源国かつ技術立国である日本では、脱炭素化に向かう世界情勢の中、脱炭素化に対応する技術開発と導入拡大、さらにそのグローバル展開によって、環境性と経済成長を両立させていかなければならない。しかしながら、ハードルの高い技術革新、特に経済性との両立にはそれ相当の時間を要し、国内のみでCO₂排出量削減目標△80%を達成することに固執することなく、当面はCO₂クレジットなどを活用し、ワールドワイドの視野で環境対応していくのも現実的な解とも言える。また、技術的観点だけでなく、脱炭素化に向けた国際協調の維持や地政学上の不確実性も想定される。それゆえ、ここでは「脱炭素化」を軸（横軸）に選択した。図3における右側の2つは、国内でCO₂排出量削減目標を達成するシナリオで、電化促進とともに、水素応用・蓄電池のコスト低減・EV・CCUS⁶の普及などの脱炭素に向けた

⁶ CCUS : Carbon Capture, Utilization and Storage

技術の選択肢も拡大する。一方、左側の2つは、上述の脱炭素化技術の開発・普及が限定的で、CO₂の限界削減費用平準化の観点から海外貢献を含めてトータルでCO₂排出量削減目標を達成するケースを示す。

地域創生・地域活性化などを通じた人口や産業の分散化はエネルギー需要の分散化に等しく、エネルギーシステムのあり方に大きく影響する。図4に示すように、国土全体で対策を施さなければ、2045年には日本の半数以上の都市で人口が半減することになる。そこで国交省は人口減少と巨大災害に対応した社会インフラ整備のための国土整備計画として、国土のグランドデザイン 2050⁷を2014年に発表した。地方都市の自立を維持すると同時に、巨大災害などに対応できる安全な生活環境の維持にも主眼が置かれている。人口減少に対応するためのキーワードとして「コンパクト＋ネットワーク」を掲げ、インターネットなどの情報通信技術を活用して、各種機能を相互に結びつけて「対流促進型国土」を形成する。都道府県を越えて周辺都市が連携する「高次地方都市連合」を構築し、人口30万人以上の中核市の形成および都市圏を全国に60～70か所ほど維持することをめざす計画である（図4）。一方で、このコンセプトがどの程度進展するかは、国土利用に係わる政策だけでなく、企業の経済活動や個人のライフスタイルの影響も受けるため、現状のように東京・大阪など大都市近郊に集中する傾向が継続する可能性もある。中国においても、人口が集中すると都市と縮小する都市の2極化が進んでいるという。そこで、「人口の分散化」をもう一つの軸とした。図3の上側の2つのシナリオは、地域創生・地域活性化が進展するシナリオで、無秩序な人口のスパース化が回避されつつ人口と産業の分散化が進む。エネルギーシステムに関しては、地域社会に多様な分散型電源が導入されて地域活性化が進み、特に再エネ電源が重要な役割を担う。

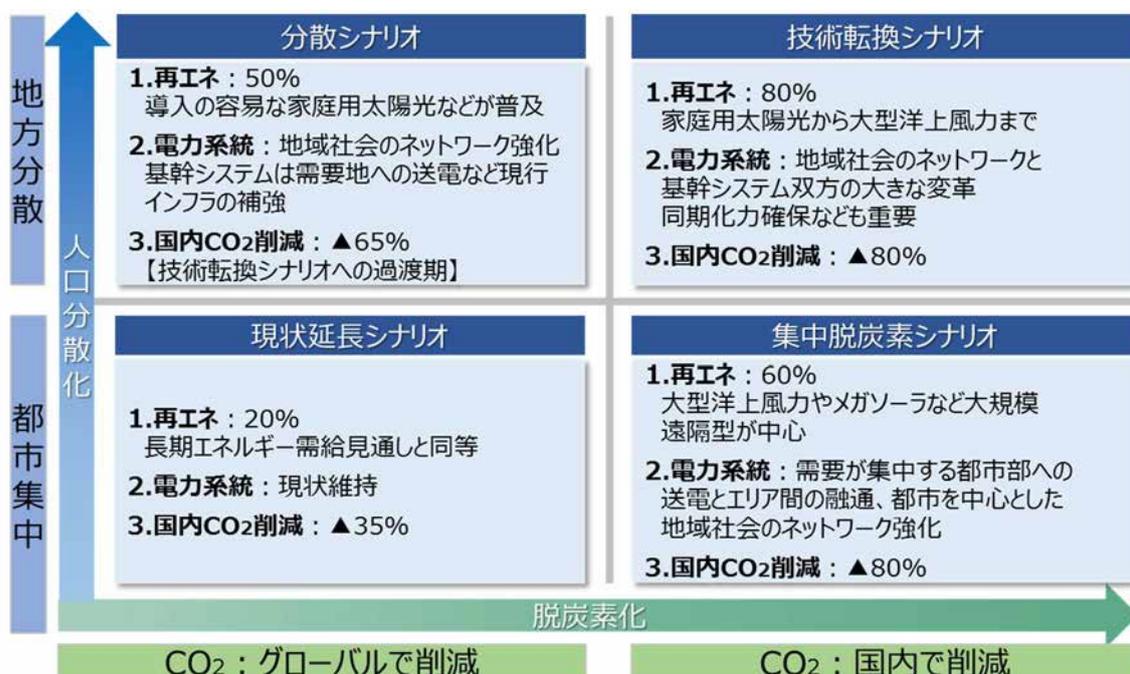
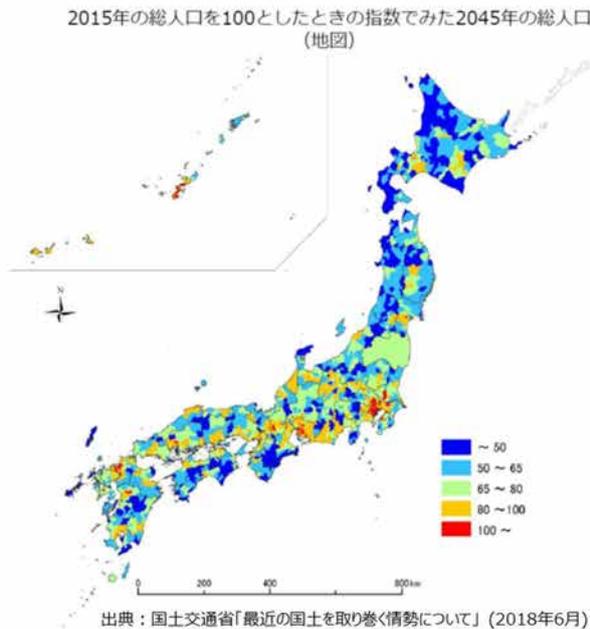


図3 日本における長期エネルギーシナリオの検討

⁷ http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk3_000043.html

(a) 未対策の場合の国土の総人口分布



(b) 地域創生の事例：中核市の取組

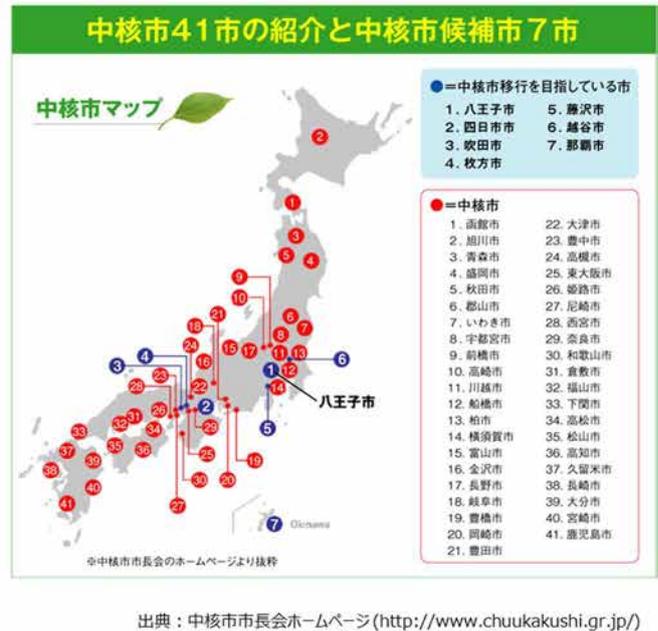


図 4 2045 年の国土の人口分布および中核市の形成

「現状延長シナリオ」は、脱炭素電源（再エネ・原子力）の導入・稼動が進まず⁸、さらに CCUS などの脱炭素化の技術開発が進展せず、CO₂ 排出量削減は国際貢献が主となるケースである。また、地域創生・地域活性化が停滞し、人口や産業は大都市近郊に集中する。エネルギー供給については、エネルギー基本計画の長期需給見通しのとおり、大規模集中型の電源が主であり、地域社会・基幹システムとも電力系統に大きな変更は伴わない。

「分散シナリオ」では、地域創生・地域活性化が進展し、エネルギー供給源も需要地近接に配置する分散型にシフトする。マイクログリッドや VPP などが導入拡大され、地域社会が主役となったエネルギーシステムへと変化していく。ただし、経済性や系統への接続制限などから VRE の導入は 30%程度に抑制され、さらに脱炭素化の技術開発・普及が未だ限定的であり、CO₂ 排出量削減は国際貢献が主となる。なお、「分散シナリオ」は、後述する「技術転換シナリオ」への過渡期とも言える。

「集中脱炭素シナリオ」では、脱炭素化の技術開発・普及が進展して、自国内で CO₂ 排出量削減を達成する。このシナリオでは人口や産業は大都市近郊に集中しているため、エネルギー供給は大規模集中型が経済的に適しており、再エネもメガソーラーや洋上ウインドファームなどが好適である。電力系統では、エリア間の融通や広域運用の最適化を目的に基幹システムが強化される。なお、地方都市については、人口とともに電力需要が減少するため、既設の設備を合理的な形で維持していくことになるが、再エネ適地においてはエネルギーの最適利用のために配電網が強化される。

⁸ 再エネは経済産業省の長期エネルギー需給見通し（2030年）と同等レベルを想定

「技術転換シナリオ」では、人口や産業の地方分散化が進み、エネルギー供給は需要地近接の分散型電源が中心となって、「高次地方都市連合」をはじめとする都市ネットワークの運営概念を活用しながら促進していく。再エネを主に国内で CO₂ 排出量削減目標を達成するシナリオであり、導入量は 80%程度(VRE~60%)に及ぶ。需給バランスを確保するためには、蓄電や蓄熱、水素などを含む蓄エネルギーの技術革新が不可欠である。なお、電力系統の方向性としては、東京・大阪など大都向けを中心とした基幹システムの整備と、自立する地域社会における配電系統の拡充が課題となる。送電容量の観点では基幹システムと地域社会のバランスがとれる方向に進むが、VRE 導入量が過半数になって、同期化力不足などの系統安定性の問題を解決しなければならないことを忘れてはならない。

これら 4 つのシナリオ検討によって、脱炭素化技術の進展や地域創生・地域活性化の状況に応じて電力システムのあり方が変化することがわかる。なお、これらのシナリオは中長期的な社会動向・技術動向の影響を受けて、柔軟に対応すべきものであり、特定のシナリオを政策目標とするものではないことに留意しなければならない。

(2)「技術転換シナリオ」の定量的分析例

以下では「技術転換シナリオ」に焦点を当て、同シナリオにおけるエネルギーシステムを定量的に評価してみた。概要を図 5 に示す。

この評価では、東京大学 藤井・小宮山研究室で開発した技術選択モデルを適用した。技術選択モデルとは、一定期間において CO₂ 削減量や発電設備の導入上限といった前提条件の下で、その期間内においてエネルギーシステムのコストを最小化するように発電技術などを選択するエネルギー・経済モデルの一手法である。ここでは「技術転換シナリオ」について、2050 年における CO₂ 排出量を対 2013 年比 80%削減することを前提条件に、エネルギーシステムを構成する技術について検討した。

技術選択モデルによれば、CO₂ 排出量削減目標を達成するためには、電源の脱炭素化、電化の促進、エネルギー利用の効率化を同時に進めなければならない。計算結果詳細は付録 1 に示す。電源では、地域社会を中心に風力・太陽光などの VRE が導入拡大し、発電量の 60%を占める。また、水力やバイオマス他を合わせて再エネ導入量は 77%にまで達する。エネルギー利用では EV やヒートポンプなど輸送や熱源の電化を進展させる必要があり、これに伴いエネルギーネットワークには変革が必要となる。電力需要は上述の電化に伴って、2013 年 1.0 兆 kWh から 1.46 兆 kWh（電化率 45%）に拡大する⁹。このシナリオにおいては、次世代エネルギーシステムに向けた投資は需要拡大を原資とし、成長と投資の正のスパイラルをピークルに経済成長と脱炭素化が両立する。

⁹ 熱源を中心とした産業部門（電気炉使用の拡大で、150 倍@2050 年(対 2030 年比)）や民生部門の電化（業務部門の高効率ヒートポンプ導入が 1.8 倍に増加@2050 年）、xEV 化の進展などによる

なお、一般に結果が公開されている「Utility3.0」の最大電化ケース¹⁰は 2050 年 CO₂▲72%を達成するために、再エネ電源比率を 55%¹¹、電化率を 70%（民生部門は 100%）としている。それに対し、この技術選択モデルでは、再エネ比率をより高める（77%）一方で、電化率が緩やかになる（45%）という結果となっている。

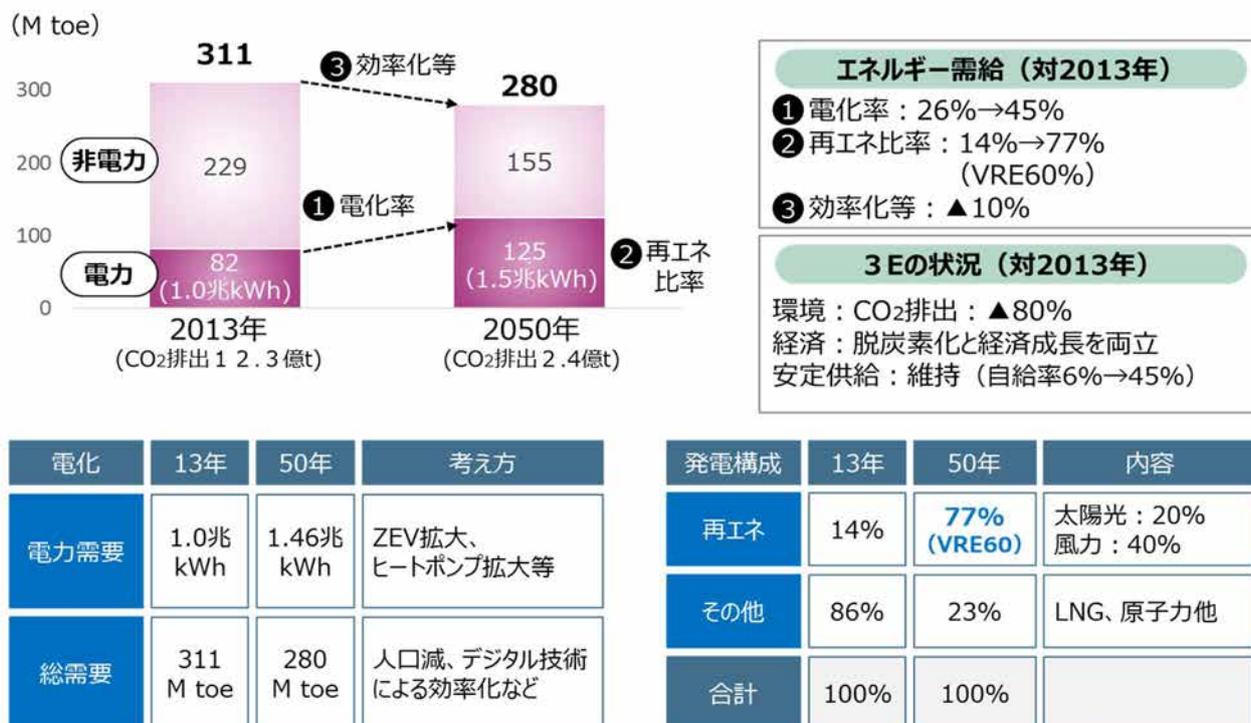


図 5 2050 年エネルギー需給の解析結果（技術転換シナリオ）

また、CO₂ 削減量と電力消費量の関係を図 6 に示す。CO₂ 削減量に対し、電力消費は緩やかな上昇カーブとなり 60%付近から大幅に上昇する。したがって、経済効率的に大幅な CO₂ 削減を達成するためには下記のイノベーションが重要と考えられる（図 6 の CO₂ 削減量と電力エネルギー消費量の関係において、点線のような特性を実現する）。

- 供給サイドでは、脱炭素電源（再エネや原子力など）の低価格化とともに、再エネ調整のための蓄エネルギー技術の低価格化や新技術開発などが期待される。
- 需要サイドでは、電力利用する熱源機器（各種産業用電気炉やヒートポンプなど）の効率化や低価格化によって、それらの導入促進が期待される。

このように、シミュレーションによって社会的な意思決定を客観的な根拠を持って行うことが可能となる。今後は 6.1 節に示す通り、シナリオ分析の手法を高度化して、各シナリオにおけるエネルギーシステムの具体像を示していく必要がある。

¹⁰ 「エネルギー産業 2050 年 Utility3.0 へのゲームチェンジ」（日本経済新聞出版社）の検討ケース

¹¹ 再エネ+原子力で 65%、うち原子力は 10%程度を想定

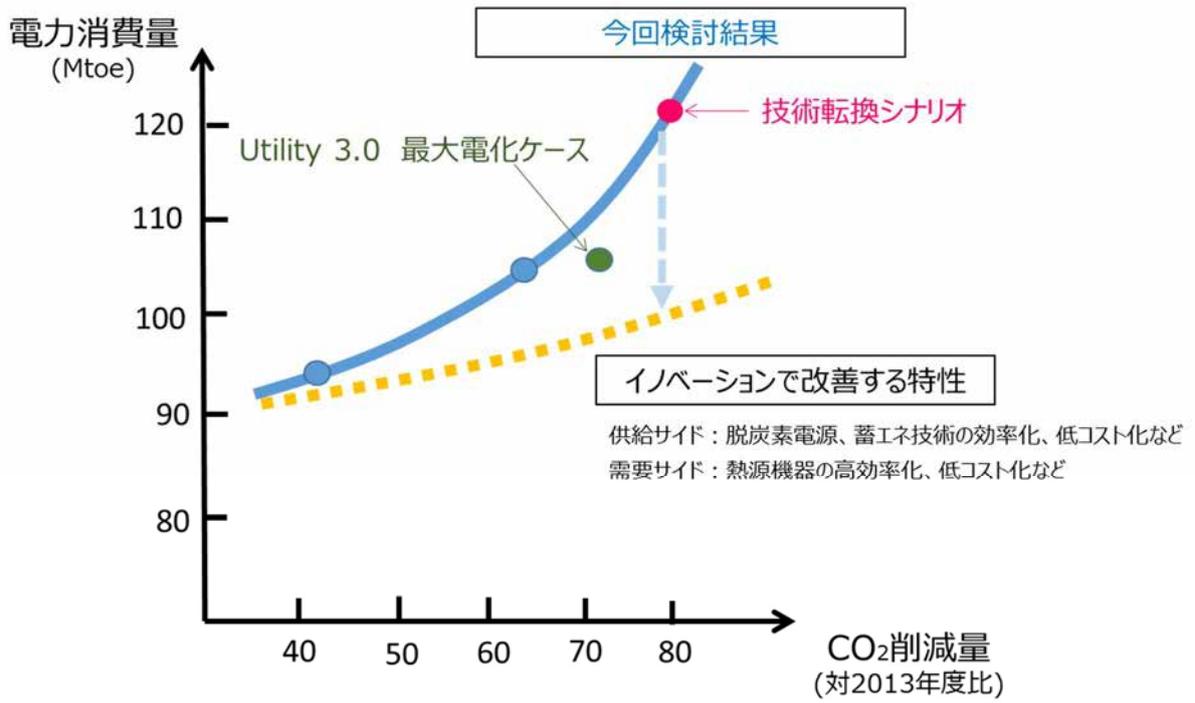


図6 CO₂削減量と電力消費量の関係

第3章 地域社会で挑戦すべき新しい方向性

3.1 地域社会の改革

1.1 節で述べた通り、Society5.0 では、個人の生活が主役となって、地域社会ごとに特色あるエネルギーシステムが構築される。自治体や街区、コミュニティといった多様な視点で地域社会を捉え、電力・ガス・水道に加えて ICT・交通・物流などの社会インフラが互いに連携・協調して個人の生活を支える。エネルギーの価値は CO₂ 削減や地域資源保護などの環境性、さらには生活の利便性や快適性に係る価値へと多様化していく。このようにエネルギー消費からサービス利用に変化する流れの中で、それぞれの地域が求めるサービス品質に合わせたエネルギー流通を実現していく。

VRE などの分散型電源の比率が高まるにつれて、電力の価値は、「量」の価値 kWh に加えて、電力システム全体で必要とする容量（供給力）への貢献を意味する kW や短期変動への需給調整能力を表す Δ kW など、電力システム全体で見たエネルギーの「質」を支える調整力の価値も必要となる。これらの新しい価値を流通および取引するインフラ、および制度を組み入れなくてはならない。

地域ごとに異なるエネルギー価値を構築する例として、再エネの立地に適した地域では、系統安定化のための施策に加えて、再エネを含めた地域資源を活用して地場産業を育成することが考えられる。再エネの発電コストが低廉して、グリッドパリティ¹²を迎えていく中で、積極的に kWh の限界費用ゼロに近い余剰電力を活用し、地場の新しいエネルギー利用方法によって産業を創生する社会をめざす。基幹システムから消費地への一方向の電力供給を前提とした電気事業法を含む諸々の法制度やルールを見直し、地域のエネルギー需給を能動化した双方向の流通を実現することなどがこれまでも模索されている¹³。

中核都市では、戦略的にエネルギーのレジリエンスを強化すべきである。都市間の国際競争力の向上をめざして、事業継続計画 BCP（Business Continuity Planning）を求めるグローバル企業にとって魅力ある環境を整備する。これまで電力品質の観点では、汎用的で、画一的なサービスの提供を前提として、送配電事業者の安定供給責任や小売事業者の供給力確保義務など、諸々の法制度やルールが設けられてきた。レジリエンスなど新しい価値を具現化するためには、これらの法制度やルールを見直し、地域社会のエネルギー事業者が必要な施策を進められるよう適切に規制緩和していくことが望ましい。

このような改革を実現するためには、地域社会において、独自の価値を創造・流通・取引するための技術革新と制度整備を進めなくてはならない（図 7）。地域社会におけるエネルギー供給事業を活性化するためには、レジリエンスを実現するための運転継続（FRT 要件）など分散エネルギーリソースに新しい役割を与えながら、託送あるいは接続の料金に関する法制度やルールに対する規制緩和が必要である。その一方で、社会便益を維持するための必要な規制を

¹² グリッドパリティ：太陽光発電などの再エネの発電コストが、既存商用電力システムの電力コストと同等か安価になること

¹³ 経済産業省エネルギー調査会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 第4回 資料4（2018年3月22日）

再整備するべきである。また、家庭・業務・産業および運輸部門の省エネルギー化や低炭素化を前提とする必要がある。ヒートポンプによる温熱・冷熱供給、電気自動車(EV)、水素活用の燃料電池車、産業分野における熱利用の高度化といったさまざまな電化・電動化が加速して、EVの急速充電設備などを備えた新たな電力システムが整備される。パワーエレクトロニクスや大量かつ長期に貯蔵できる二次エネルギーの利用が進む中で、電力システムに分散リソースを統合的につないでいくためには、中高温領域のヒートポンプ、非接触充電や蓄電などの新技術、スマートインバータ¹⁴などの技術革新が求められる。この取組みについては3.2節で述べる。また、それらを社会実装していくための制度整備として、各種インフラ間でデータ共有を促進して、地域社会のエネルギー性能や環境性能評価の指標化、共有化を進めなくてはならない。これらの取組みは3.4節で説明する。

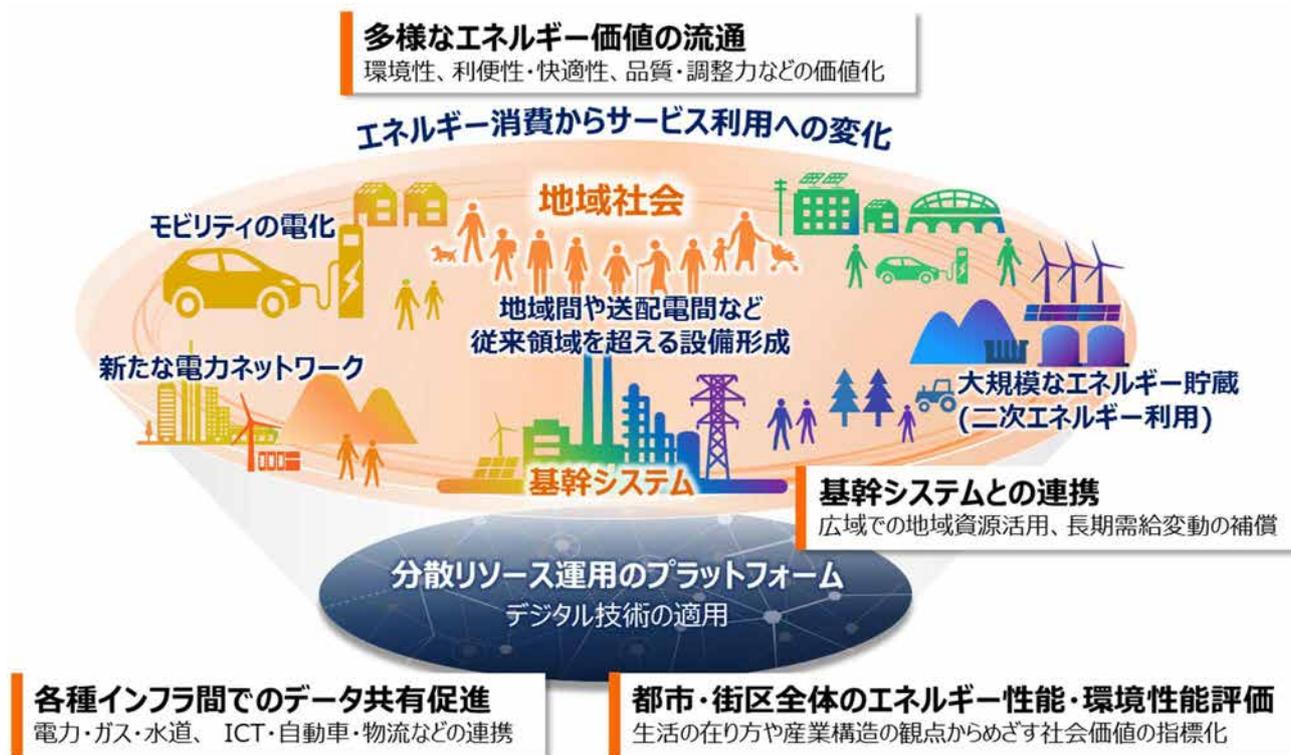


図7 地域社会におけるエネルギーシステムの変容

¹⁴ スマートインバータ：電力系統の状況に応じて自律的あるいは遠隔制御により多様なシステムサービスを提供する。PV、蓄電、ヒートポンプなどに共通に使われる電力変換システム。Smart PCS(Power Conditioning System) など同義。

3.2 多様なエネルギー価値流通に向けた技術的な取組み

VRE の出力変動に対して、様々な時間領域における調整力の供給が必要となる。従来型の火力、水力、揚水などの大規模電源に加え、今後、需要家側で増加する VRE などの分散電源、EV 充電やヒートポンプ給湯などの需要、蓄電池などの分散貯蔵の貢献が期待される。これらの分散リソースによる調整力は、従来よりも対象数が格段に多く、VRE の出力変動と連動するダイナミックな小売料金とそれに基づく自律的な需要管理などで実現される。小売料金の情報や需要管理の制御信号は、市場取引結果に基づく電力システム全体の運用計画の中で算定・配信され、リアルタイムに反映される（図 8）。システム運用は、集中型に加えて、多数の需要を管理するアグリゲータが分担する場合もある。この新たな需給管理を実現するためには、設備利用に関する技術の開発だけでなく、分散リソースを管理するデジタル技術によるインフラ、また、それを活用した電力システム運用や市場運営を含めた制度整備が必要である。

地域社会における分散リソースの管理は、様々な時間領域での需給調整や電圧調整などを通して電力システムの安定的かつ経済的な運用に貢献するが、同時に温熱環境や移動サービスなどの快適性を損なうものであってはならない。したがって、家庭や業務部門が求めるサービス需要を把握・分析し、多様なエネルギー消費形態を評価することが必要となる。制約条件（電力の場合のグリッドコードなど）に基づいて各種技術が普及し、設備形成を見直す。新しい運用技術を確立するためには、多数の需要特性分析や、それらに基づく小売料金や遠隔制御への応答解析、アグリゲータ運用計画の解析・評価などを共通の評価プラットフォームとして整備していく必要がある（第 5 章参照）。

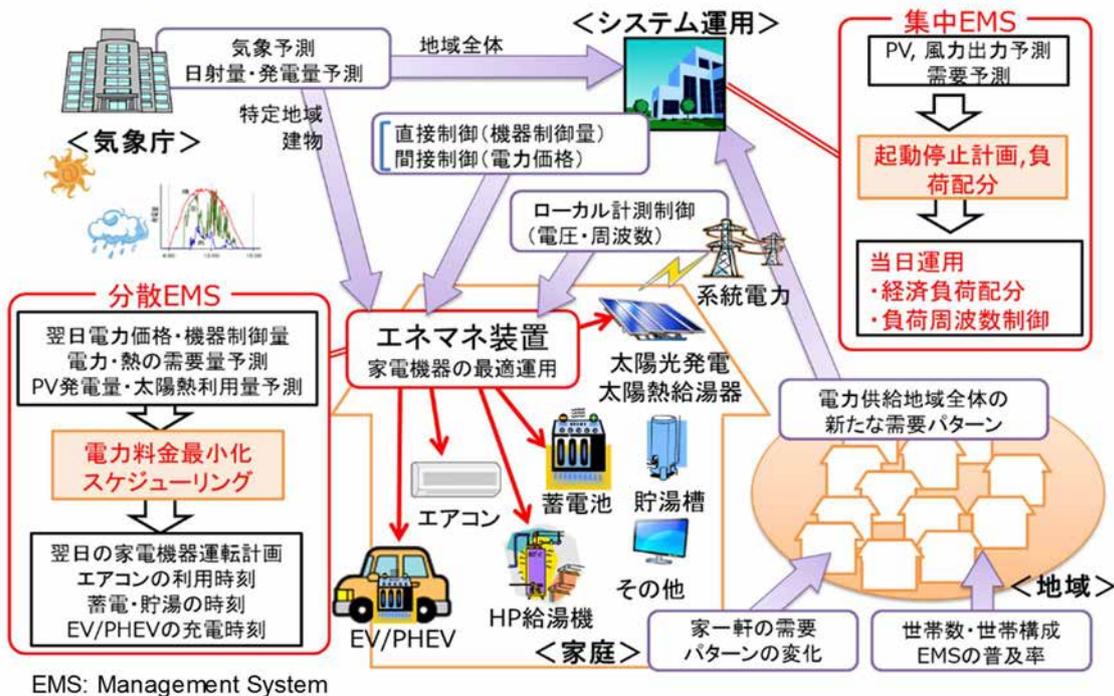


図 8 地域社会内の分散リソースに関する自律管理および遠隔制御のサービス提供への活用
 （出典：東京大学 荻本研究室 電気学会論文¹⁵⁾

¹⁵⁾ 荻本、岩船、片岡、池上、八木田、電力需給調整力向上に向けた集中・分散エネルギーマネジメントの協調モデル、IEEJ B 部門大会, I-16 (2011)

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）による「ハワイにおける日米共同の世界最先端の離島型スマートグリッド実証」では、太陽光発電が引き起こすダックカーブ¹⁶や風力発電における強風時の予期しない離脱などに起因する急峻な需給バランスの乱れに対して、様々な分散リソースを活用して対処する技術が実証されている（図 9）。地域社会に埋もれていた調整力という価値創造を確認した一方で、このような社会実験が限定的であり、実証の域を超えないことも事実である。

今後、さらに制御対象となりうる分散リソースが指数関数的に増えていく中で、これら分散リソースを統合する新しい協調メカニズムの技術を確立する必要がある。ブロックチェーンを活用した P2P 取引¹⁷などの可能性も議論する。多様な分散リソースを活用する仕掛けに対して、産学官の協力で制度を定めた上で、実証規模とその件数を大幅に増やして社会実装を促進し、新しい協調メカニズムの実現を急ぐことも重要である。

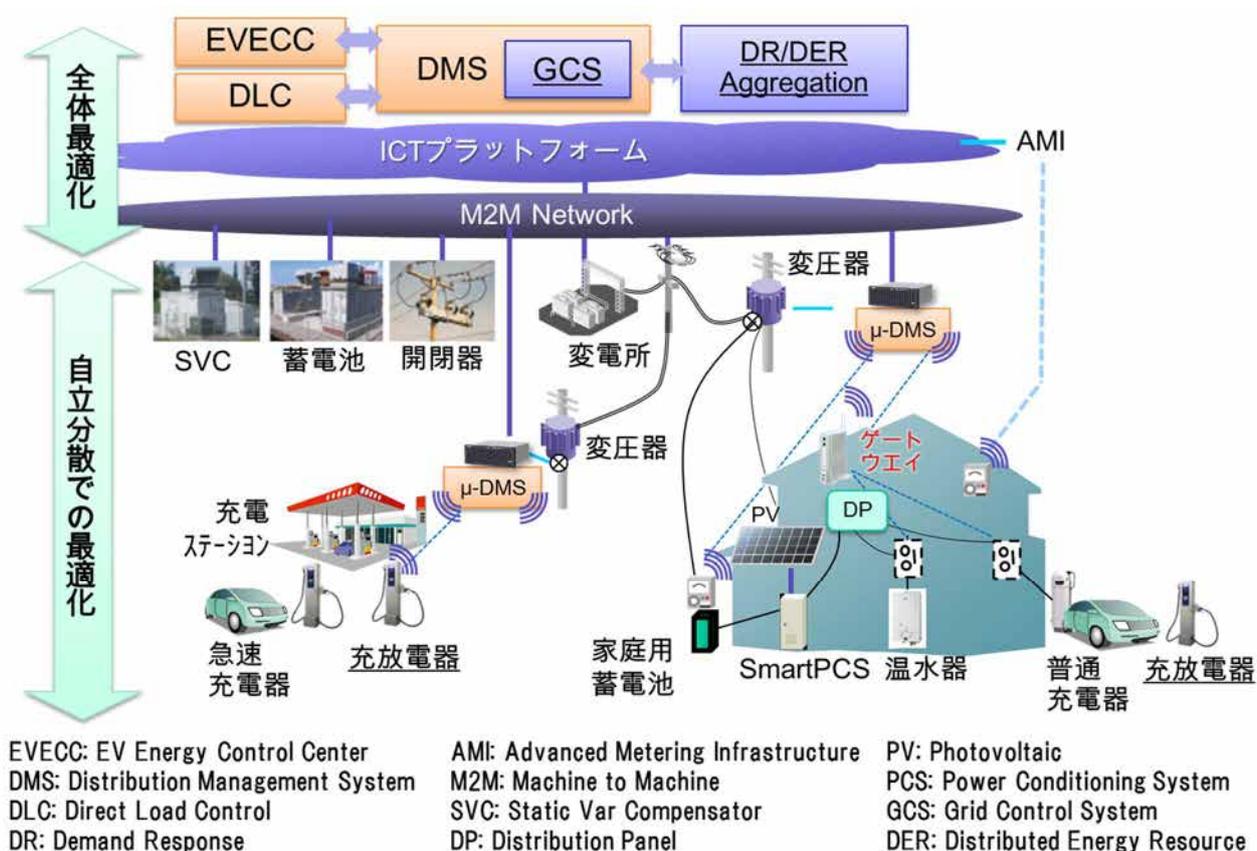


図 9 マウイ島実証における分散リソースの活用例
(NEDO「ハワイにおける日米共同世界最先端の離島型スマートグリッド実証」)

¹⁶ ダックカーブ：昼間の太陽光発電が見た目の需要を押し下げ、夕方に太陽光発電が止まり需要の立ち上がり
急になる現象

¹⁷ peer-to-peer 取引：この場合は複数の発電事業者と消費者（プロシューマ含む）の間の直接取引を指す

3.3 各種インフラ間でのデータ共有

電力・ガス・水道、さらには ICT・交通・物流などを含む各種インフラの情報を、公共的なものとして共有する仕組みを設けることは、新しいサービス事業の創生に有効である。インフラ種別ごとにそれぞれを異なった事業者が運用保守する従来の仕組みは、右肩上がりの成長期においては機能してきたが、今後、分散化、デジタル化、電化・電動化の流れに伴ってインフラ間の代替や融合が進む中で、従来の分野別の管理体系を効率化・高付加価値化するためには、情報技術を活用する取組みが必要である。情報収集と利活用を進めるためには、情報共有に関する規制緩和だけでなく、国のイニシアチブで公共的な情報共有の仕組みを設ければ、情報の過度な独占を防止して産学分野に適正な競争が生まれ、Society 5.0 の実現に貢献するイノベティブな産業や雇用が創出される。

データ流通への取組み事例としては、コペンハーゲン市で進めている CDE (City Data Exchange) プロジェクトがある (図 10)。同市では、2025 年に世界初のカーボンニュートラル都市になることを目標として掲げている。現在、年間約 200 万トンの CO₂ を排出しており、2025 年までに 120 万トンに削減する計画である。この目標達成に向けて、2014 年にデンマークの環境・エネルギーに関する革新技術の導入を推進する Copenhagen Cleantech Cluster (現 CLEAN) は、官民に関連したさまざまなデータを集め、ビッグデータ解析を使った環境にやさしいデジタルインフラの構想を示している。一方で、データは所有者にとって貴重な財産であり、オープンプラットフォームを構築するのは容易ではなく、ユースケースとデータが両輪で成長する、いわゆる正のスパイラルを起こす施策の重要性が指摘されている¹⁸。

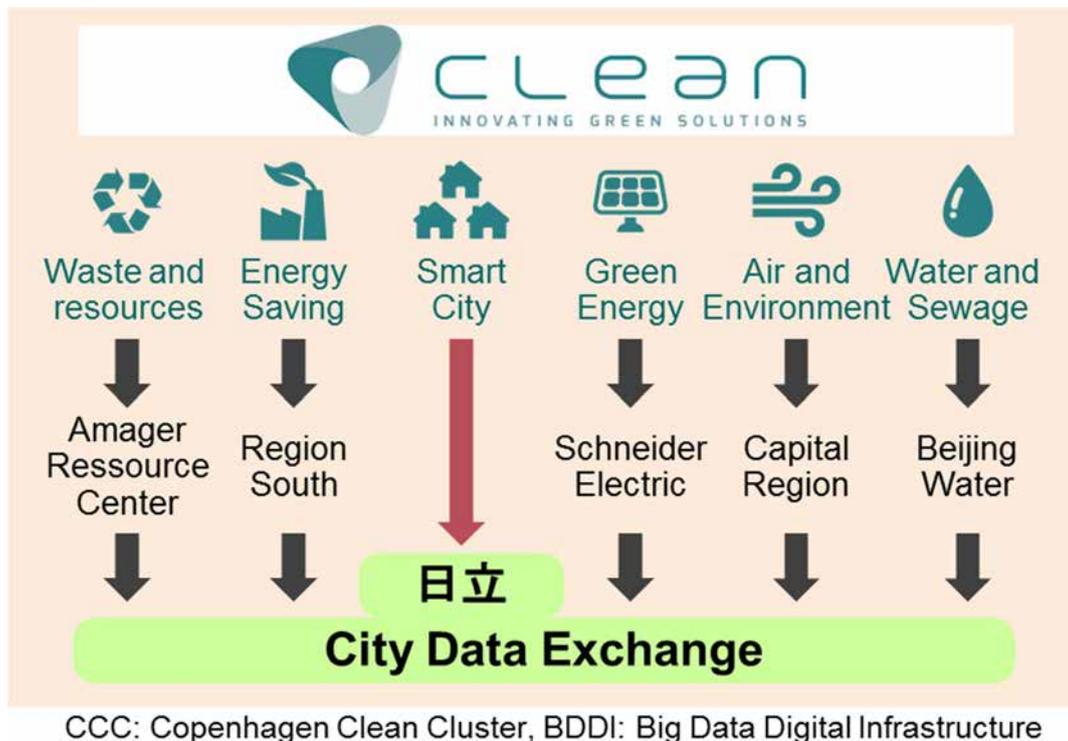


図 10 CDE (City Data Exchange) プロジェクト

¹⁸ LESSONS LEARNED FROM A PUBLIC/PRIVATE DATA COLLABORATION
<https://cphsolutionslab.dk/en/news/city-data-exchange>

3.4 都市・街区全体のエネルギー・環境性能評価

都市や街区の再開発では、個別の機器や建物といったスコープではなく、人々の生活スタイルや産業構造の観点から、その地域社会がめざす社会価値を軸に都市・街区のエネルギー・環境性能を指標化して共有し、適切なインセンティブ制度のもとで、戦略的にインフラを再構築する。インフラ再構築の指標となる建築物の環境指標としては、現在、日本がリードする CASBEE¹⁹、米国の LEED²⁰、欧州の BREEAM²¹などが挙げられるが、その多くは建築物単体の認証制度であり、地域としての環境指標を狙った制度は CASBEE のみである。また、CASBEE も、地域を対象にした場合には、その環境指標が不動産価値といった地域に還元される価値向上指標には至っておらず、また、普及も日本国内中心であることから、制度のより一層の充実とグローバル展開が求められている。

また、都市・街区のエネルギー性能・環境性能に関わるデータ共有を推進することで、エネルギー相互融通などの事業機会の創出を促すことができる。現状のデータ管理の仕掛けとしては、BIM（Building Information Modeling）や CIM²²（Construction Information Modeling）が欧米を中心に拡大しており、建築物や水道、ガスなどの地域インフラの竣工時から保守メンテナンスまで活用されている。BIM や CIM では、3D CAD データを竣工時から整備して、補修記録を全てデジタル管理することから、計画的な都市政策への適用が期待できる。一方で、主に静的な建築物やインフラ設備のメンテナンスを目的としているため、地域社会の動的な変遷を反映しにくい。能動的な情報活用としては、民間保有の BIM と行政保有の CIM を統括的に解析する必要があり、国主導の制度整備が求められる。

これら都市・街区のエネルギー・環境性能について定期的な性能開示を進めていくことで、適切な地域間競争の場が生まれる。3.1 節に述べた通り、上記の指標を活用して各地域社会で独自の価値を創造・流通・取引することで、地域ごとに社会のあり方や個人の生活スタイルが変革されていく。

3.5 基幹システムとの連携

以上のような取組みによって、地域ごとに特色をもった独自のエネルギー価値が創造・流通・取引される世界をめざす一方で、複数の地域社会でエネルギーの需給や価値の授受が行われるようになる。この場合、基幹システムが、複数の地域社会をつなぐ役割を果たす。なお、地域ごとの特色を強めていくトレンドの中で、価値のギャップが拡大していくことを

¹⁹ CASBEE : Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency（建築環境総合性能評価システム）、(財)建築環境・省エネルギー機構の委員会で開発された建築物の環境性能評価システム

²⁰ LEED : Leadership in Energy & Environmental Design、米国グリーンビルディング協会が開発、および運用を行っている建物と敷地利用についての環境性能評価システム

²¹ BREEAM : Building Research Establishment Environmental Assessment Method、イギリス建築研究所建築物性能評価制度

²² CIM : Construction Information Modeling、土木分野において計画・調査・設計・施工・維持管理の各段階を通して 3 次元モデルを用いて情報を共有するもの（別の用語である Common Information Model との混同に注意願う）

想定しなくてはならない。

基幹システムを維持するためには、地域社会が多様な分散リソースから需給調整に資する柔軟性などの新しい価値を提供する必要がある。これまで電力システムでは、送電部門と配電部門が電力供給の信頼性と品質を維持する役割を果たしていて、その役割は固定的であった。今後、地域社会ごとに特色あるエネルギーシステムを構築していく中、地域社会から基幹システムに提供する価値を再考するとともに、社会全体の「3E+S」を担う基幹システムとの役割分担を再設計する必要がある。地域社会と基幹システムとの連携については第4章で詳細を述べる。

第4章 基幹システムの変革を支える枠組み

4.1 基幹システムの新たな役割

エネルギーシステムが変革する中、基幹システムは社会全体の「3E+S」を全体最適化する重要な役割を担う。また、複数の地域社会でエネルギーの需給や価値の授受が行われて、基幹システムがこれらをつなぐ。現在、各地域の垂直統合型の電力会社が担保している kWh 以外の価値、例えば、安定供給や環境性などの価値について、発送電分離後は、定量化および指標化してエネルギーシステム全体として担保する必要がある。そのためには、技術的観点とともに、第6章で述べる制度・政策を踏まえて、エネルギーシステム全体での分析・評価に基づき制度に反映する必要がある。例えば、助成金も含まれる再エネによるエネルギー供給がその時点での小売料金より安価になった状況では、設備投資できる需要家は自立システムを構築して商用システムから離脱し、残された需要家が、増大するシステムの維持コストを負担するような不均衡な状況が生まれることも想定される。地域社会のエネルギーシステムでは、投資の費用対効果を現時点のコストで評価するだけでなく、公平性や福祉も鑑みた長期的な事業の持続可能性、さらには環境価値・エネルギー安全保障の観点など、多面的な評価指標を用いてその導入技術と制度・政策を評価しなければならない。

日本の基幹システムは大きな島が南北に連なって構成される国土構成から、大規模な需要を持つエリア系統が交流および直流連系によって串型に構成される特徴を持つ。この特徴も一つの要因として、再エネ大量導入に対する周波数、電圧、安定性の問題が懸念される国・エリアの一つである（図11）。これらの課題を国内で迅速に解決し、グローバルに技術やノウハウを展開することによって国際社会に貢献していく。

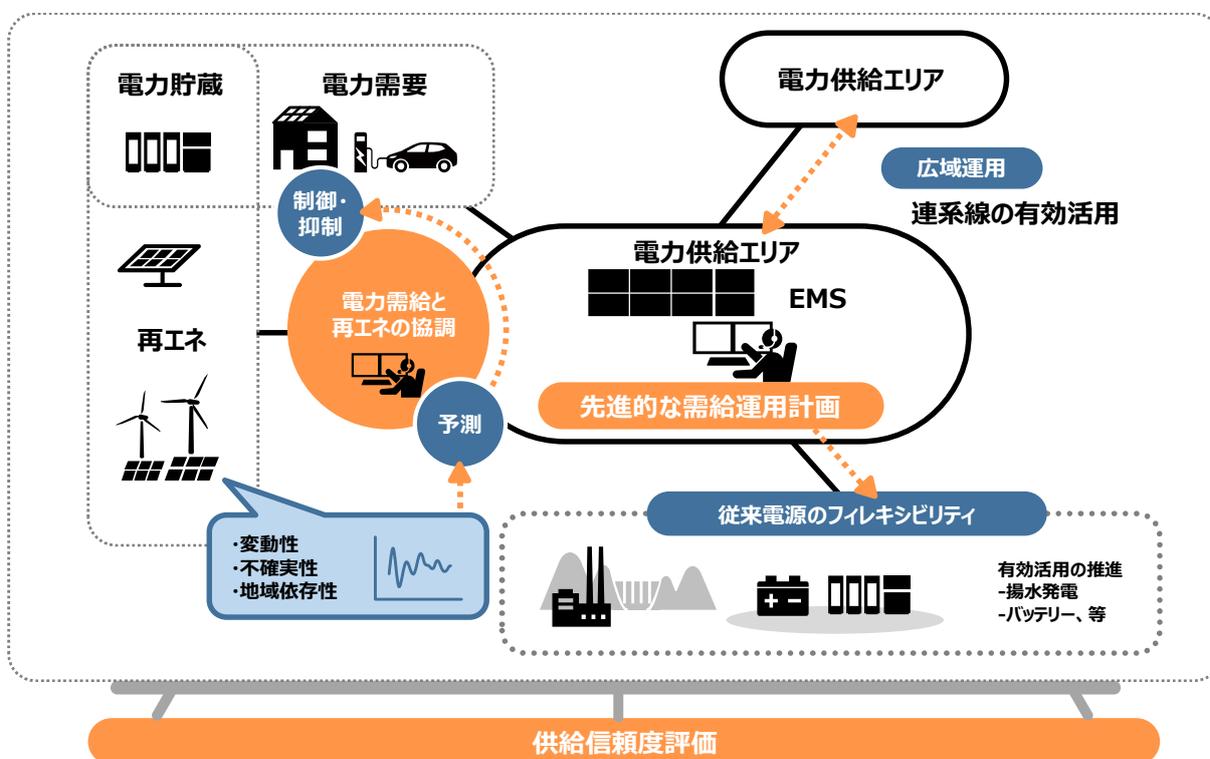


図11 再エネ大量導入時の電力需給のイメージ

4.2 基幹システムの評価環境

基幹システムに期待する役割を具現化するために、電力を中心に社会全体のエネルギーシステムを分析・評価できる環境を整える必要がある。将来の様々な課題や設備投資の費用対効果などを定量的に把握し、様々な立場で課題解決のための対策を評価、共有することが、あるべき基幹システムの実現につながる。

そのためには、産学官が協力して、解析ツールや標準データを開発・共有したプラットフォームを構築するべきである。長期エネルギー需給見通しにおける 2030 年の電源構成や、2050 年の CO₂ 排出量 80%削減などの政府目標の達成に向けて、基幹システム・地域社会に対して、例えば EV 連系や水素変換・貯蔵なども含む多様な将来シナリオについて、事業者や制度設計者などの様々な立場から、分析・評価できるオープンな環境を構築しなければならない。

電力システムの解析ツールの参考事例として、「電力需給解析シミュレータ」や「広域安定度シミュレータ」などがある。NEDO の委託業務として、電力中央研究所、東京電力パワーグリッド、東京大学などが共同で研究開発を進めている電力需給解析シミュレータは、再エネの変動性・不確実性・地域依存性に起因する秒オーダーから年間・将来といった様々な時間的尺度において、電力需給に関わる課題を評価するためのツールである。火力発電の調整力、揚水発電・蓄電池などの電力貯蔵、さらには地域間連系などを組み合わせて、電力需給運用計画の高度化や調整力の信頼度基準について検討できる（図 12）。事例として、2030 年頃の東日本地域システムを想定した再エネ大量導入に基づき、電力需給の考え方や技術開発の方向性を検討している。

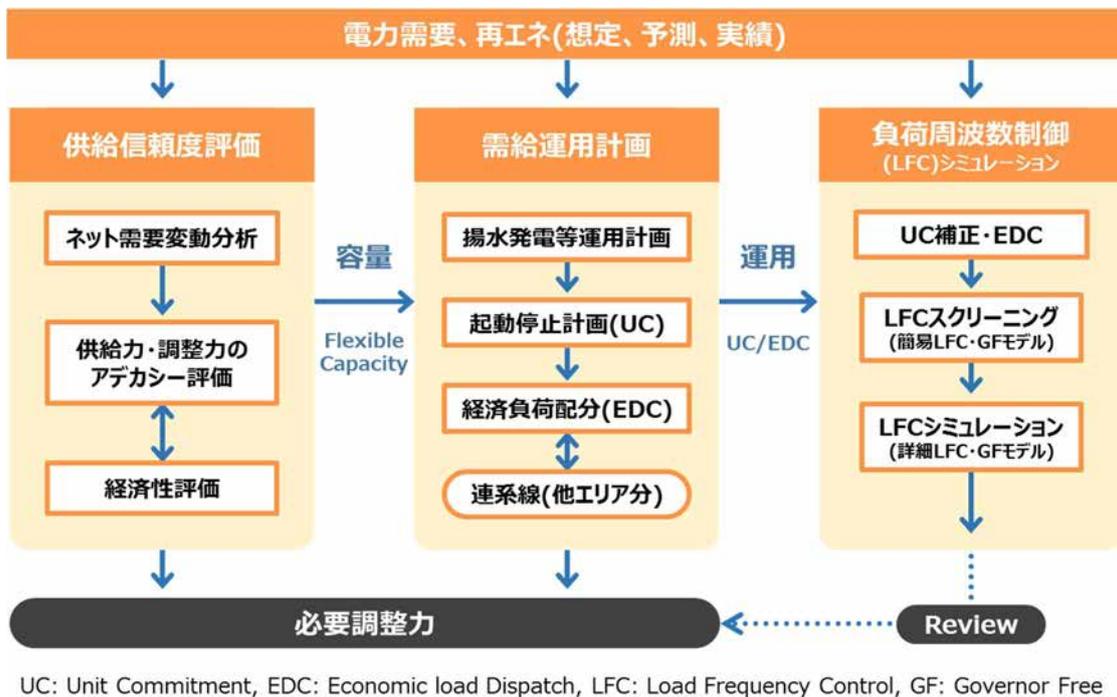


図 12 電力需給解析シミュレータの概要

一方、日立が開発を進めている広域安定度シミュレータは、再エネ導入大に向けた各種施策を技術・便益の観点で評価することを目的とした解析ツールである。再エネ大量導入に対し、需給バランスの確保に加えて、系統各地の故障を想定した過渡安定性を考慮して再エネ導入限界や出力抑制必要量の検討を可能とする。評価指標として、例えば年間の発電コストや CO₂ 排出量の増減量を算出している。事例として、東日本系統を対象とした安定性評価モデルを用いた検討を始めている（図 13）。

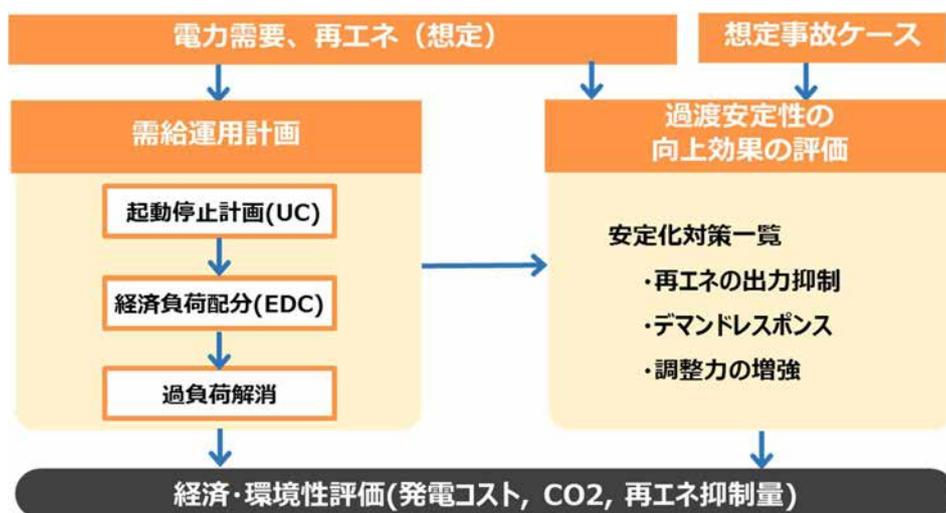


図 13 広域安定度シミュレータ

海外諸国でも取組みが進んでいる。例えば、米国国立再生可能エネルギー研究所（NREL）の High Performance Computing Center²³を中心とする取組みが挙げられる。設備拡張計画、年間の送電網を含めた需給解析、定常/動的システム解析をデータ連携のもとで実施でき、Eastern RE Integration Study²⁴を終了し、現在、米国東西連系検討のための Interconnection Seam Study²⁵などを進めている。

これらの取組みを参考にし、またデータや解析エンジンの相互互換性を考慮しながら、グローバルな視野で Society5.0 を支えるエネルギーシステムを議論できる評価プラットフォームを産学官連携で構築していくべきである。

4.3 地域社会との連携

将来のエネルギーシステムにおいては、需要側のリソースが持つ価値をエネルギーシステム全体で活用するため、基幹システムと地域社会とをデジタルでつなぐ新しい制御技術を組み込み・実践し、さらに市場取引システムや制度設計などもあわせて整備していく必要がある。例えば、VPP やデマンドレスポンス、再エネに付帯するスマートインバータなど、新しい制御技術を開発する。現在は、火力発電や揚水発電が担当している需給調整機能を地域社会の電力制御で分担することによって、既設設備のポテンシャルを有効活用しながら、社会システムの費用対効果を最大化する。そのためには、地域社会内の膨大な設備を連携する IT インフラの整備や効果を最大化する制御スキーム、もしくはインセンティブなどのルール構築が重要である。第 3 章でも述べたように kW 価値や Δ kW 価値など、電力系統全体で見た電力の「質」の価値を地域社会に対して直接的（制御指令）または間接的（インセンティブなど）に要求し、地域社会の調整力を活用する相互協調が考えられる。参考事例として、NEDO「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」における離島（東京都新島村）の実証試験を説明する。このプロジェクトでは 2030 年を想定した国内の再エネ導入比率を新島村の系統で模擬し、様々の課題や解決策を検討している。例えば、再エネの出力予測と出力制御、既存電源や蓄電池との協調運用制御によって、系統システムを構築・評価している。余剰電力対策、変動緩和、計画発電などの制御技術を最適に組み合わせて運用している。また、電力システム改革によって将来想定されるリソースアグリゲーションやバランシンググループなども想定し、複数の分散型制御システムの協調運用についても実証している（図 14）。

²³ <https://www.nrel.gov/news/program/2018/nrel-acquires-powerful-new-high-performance-computing-system.html>

²⁴ <https://www.nrel.gov/grid/ergis.html>

²⁵ <https://www.nrel.gov/analysis/seams.html>

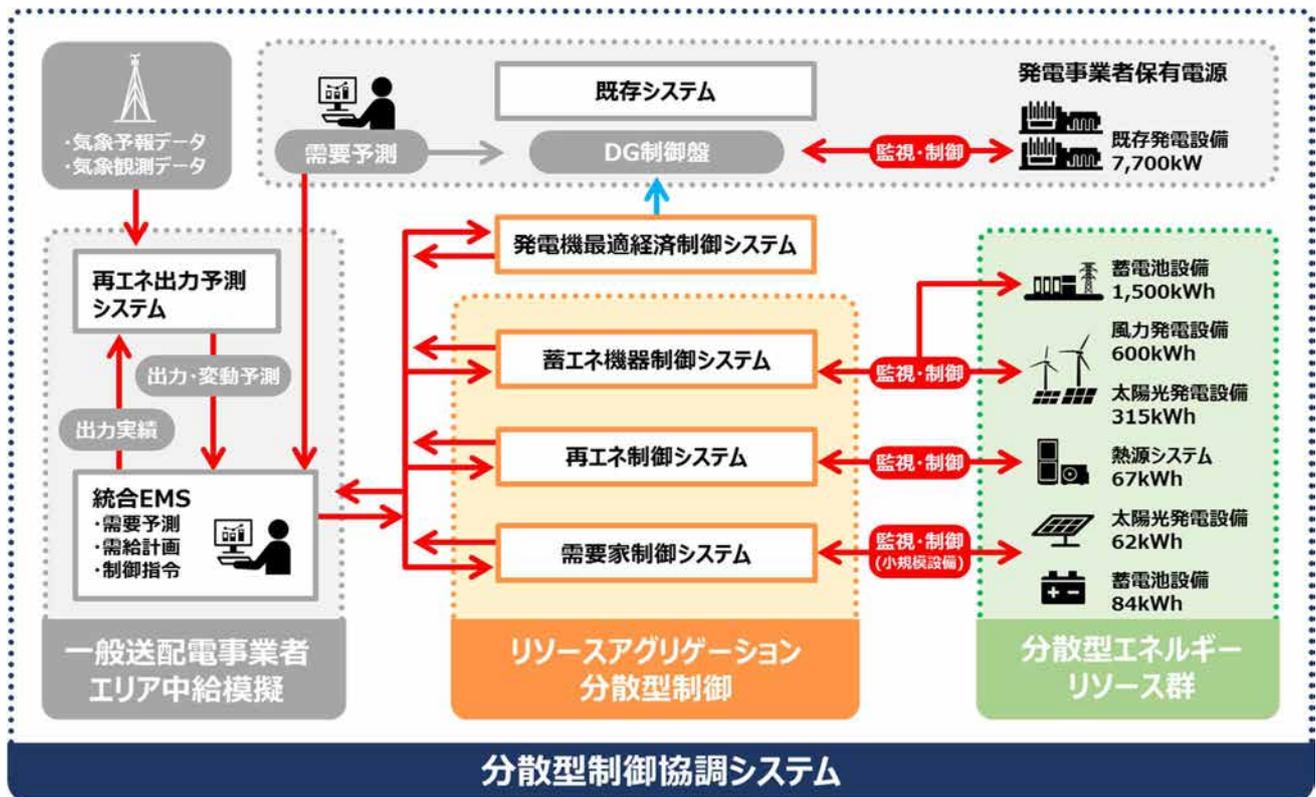


図 14 2030 年のエネルギーミックスを模擬した電力系統の実証
 (東京電力 HP²⁶(2017/4/13)をもとに作成)

4.4 サイバーとフィジカルが融合する評価プラットフォームへの進化

4.2 節や 4.3 節にて述べた基幹システムを対象とする評価プラットフォームを、今後さらに進化させていく必要がある。これまで基幹システムは、広域運用によって隣接する基幹システムと連携することによって全体最適化を実現し、社会にもたらす価値を向上させてきた。今後、地域社会の配電系統や需要家との連携が深まり、例えばモビリティシステムとの連携など、エネルギー産業以外との共生（クロスインダストリ）へと進化する（図 15）。評価プラットフォームは、個別の解析ツールからそれらが連結し、さらにリアルデータを取り込んでサイバー空間上で運用まで可能とする CPS（Cyber-Physical System）へと成長する。

²⁶ http://www.tepco.co.jp/pg/company/press-information/press/2017/1406851_8686.html

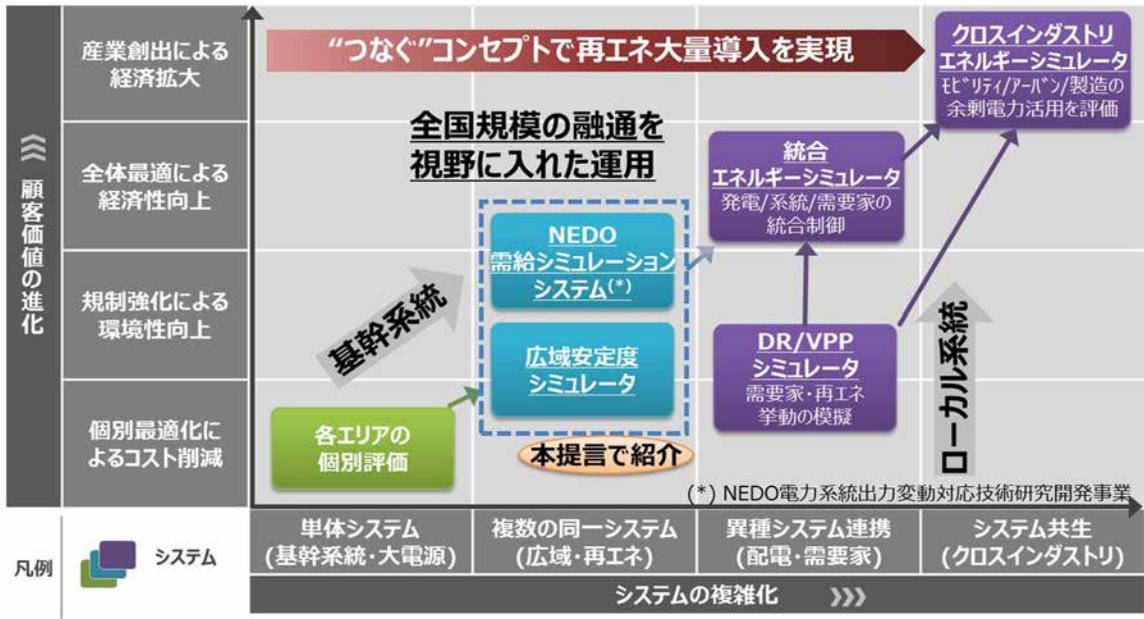


図 15 エネルギーシステム評価プラットフォームの進化

第5章 評価プラットフォームとデータ共有に関する概念設計

5.1 評価プラットフォーム

基幹システムと地域社会の将来ビジョンに関して社会的合意形成を得るためには、社会全体のエネルギーシステムを客観的に分析・評価できる環境を整備する必要がある。それは、ステークホルダとの議論を通じて抽出した課題に対して、その解決に向けた投資の費用対効果なども含めて評価できるプラットフォームであり、共有技術・共有財産として産学官の協力で開発すべきと考える。また、このプラットフォームは制度・政策立案のための公共的役割だけでなく、再エネ発電事業者、VPP などのアグリゲータ、さらには EV の蓄電池活用や水素変換・貯蔵などの新たな事業者も活用できるようになれば、エネルギー市場の活性化にも役立つと考える。

上記の評価プラットフォームを設計する上で考慮すべき項目は以下の3点である。

- (1) 評価プラットフォームを活用するユーザを定義し、要求仕様・必要機能を明確化する。
- (2) 評価プラットフォームは系統、発電、需要の情報・データ共有を前提としているが、それぞれ、重要インフラとしてのセキュリティの問題、発電事業者の競争力に関わる情報の保護、個人のプライバシー保護など多くの制約条件が存在し、適切な範囲で公開・開示する必要がある。(1)の要求仕様・必要機能を踏まえて、公開・開示範囲を検討する。
- (3) 評価プラットフォームは継続的な改善・更新が必要であり、適切な運用者を定める必要がある。

表 1 に評価プラットフォームを活用するユースケース案を示す。また、表 2 は、ユースケース 1, 4, 7, 8 において必要となる機能（＝解析ツール）と情報・データを整理したものである（詳細は付録 2 参照）。ビジョン・政策提言から将来見通しまで含めた事業性評価など、数多くの活用案が容易に想定でき、新事業創生や新規プレイヤーの参入を促して地域創生・地域活性化にもつなげる。また、表 2 記載の必要となる情報・データでは、例えば 154kV 以上の系統構成と言っても、どのレベルまで詳細なものが必要かはユースケースによって異なり、一般を対象とした「公開」と、情報・データの所有者が適切な関係者に限定してオープンにする「開示」を区別して考える必要がある。

以下では、基幹システムと地域社会を対象とし、評価プラットフォームのあり方について議論する。基幹システムによる「3E+S」の全体最適化と、地域社会のエネルギーシステムに関する議論では関係するステークホルダが異なり、各々に適した解析ツールと情報・データを整備する必要がある。1.1 節で述べたように、次世代のエネルギーシステムでは、基幹システムと地域社会が共存を前提として再構築され、急増する分散リソースを統合する協調メカニズムを確立する必要がある。基幹システムと地域社会の間には、VRE の大量導入に伴って必要となる調整力だけでなく、蓄電・エネルギー備蓄・CO₂ 排出量などの新たな価値も含めた取引関係が構築されるようになり、こうした取引を評価する機能も必要となる(図 16)。

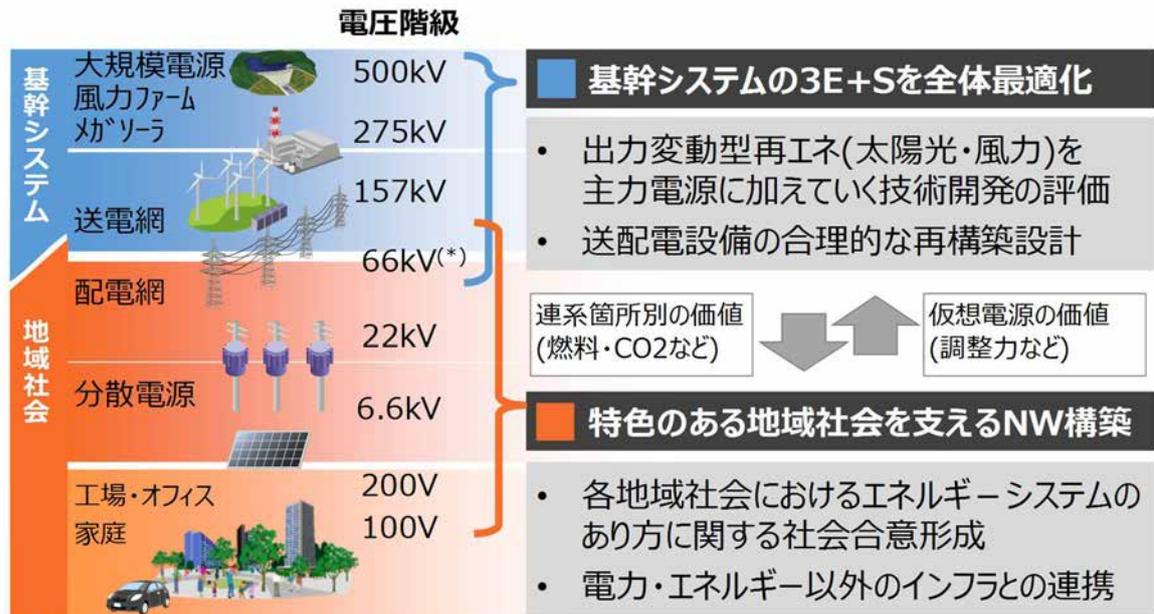
表 1 シミュレータ活用のユースケース案

#	内容	ステークホルダ	使用例
1	ビジョン・政策提言	国民/大学/シンクタンク/メディア/ 立法府/規制機関	<ul style="list-style-type: none"> • 将来の環境・エネルギー戦略の検討と提言 • 再エネ導入促進やそれに向けたインセンティブ制度の検討
2	系統制御・運用 ・ルールの提案	大学/研究機関/規制機関	<ul style="list-style-type: none"> • 新しい系統制御手法の提案(電圧、周波数、安定性の維持など) • 運用基準/ルールの提言
3	託送評価	大学/規制機関/送配電事業者	<ul style="list-style-type: none"> • 将来の電力システムにおける託送料金のあり方を検討 • 託送による送配電線路の混雑推定 • 送電線の設備計画
4	再エネ発電の 事業性評価	風力事業者/太陽光事業者/ 送配電事業者	<ul style="list-style-type: none"> • 年間発電量/出力制御量の推定 • 連系対策費用の算出
5	分散電源連系の 影響評価	大学/送配電事業者	<ul style="list-style-type: none"> • 系統連系時の安定性・信頼性評価
6	調整力・アンシラリー 事業性評価	地域エネルギー事業者/発電事業者/ 送配電事業者	<ul style="list-style-type: none"> • 時間毎の調整力(kW、ΔkW)の予測 • 調整力提供による安定性・信頼性貢献度の定量評価
7	P2Pエネルギー取引 事業性評価	一般需要家/アグリゲータ/ 送配電事業者	<ul style="list-style-type: none"> • 将来の事業シナリオ分析 • P2P取引による送配電網利用費用の妥当性検証
8	EV充電インフラ アセスメント	EV事業者/都市・街区/ 配電事業者/地方自治体	<ul style="list-style-type: none"> • 充電インフラ設置申請時のアセス(電力品質、経済効果) • 連系点の過負荷や電圧変動の推定 • 充放電シフトや無効電力制御の効果試算

表 2 各ユースケースにおける必要な解析ツールと情報・データ (詳細は付録 2)

ユースケース#(前ページの番号に相当)		1	4	7	8	
内容		ビジョン・政策提言 将来の環境・エネルギー 戦略策定	再エネ発電の事業性評価 年間発電量/出力制御量 の推定	P2Pエネルギー取引事業 性評価 将来の事業シナリオ分析	EV充電インフラアセス 申請時のアセス (電力品質、経済効果)	
ステークホルダ		国民/大学/シンクタンク/ メディア/立法府 /規制機関	風力事業者 /太陽光事業者 /送配電事業者	一般需要家/アグリゲータ /送配電事業者	EV事業者/都市・街区/ 配電事業者/地方自治体	
解析ツール (*)		A・B・C	A・C	A	A	
必要 データ (抜粋)	系統 構成	154kV以上	○	○	-	-
		66kV	-	○	-	-
		22kV以下	-	-	-	○
	電源	大規模発電所の 出力実績・特性	○	○	-	-
		再エネ出力実績・特性	○	○	○	-
	需要 実績	154kV以上	○	○	-	-
		66kV	-	○	-	-
		22kV以下	-	-	○	○
		スマートメータデータ	○	-	○	-
	将来 ・ みなし	系統構成	○	○	-	-
		電源構成・配置	○	○	-	-
		需要予測	○	○	○	○
気象条件		○	○	○	-	

○: 必要 -: 不要、(*) A: 供給信頼度評価、B: 需給運用計画、C: 系統安定度評価



(*) 66kV階級の設備データ・計測データは、適宜に縮約を図り、基幹システム評価と地域社会評価で相互に参照する

図 16 基幹システムと地域社会間で取引される新しい価値

(1) 基幹システムの変革に必要な評価プラットフォーム

VRE の主力電源化に伴って送配電設備の合理的な再構築が必要となり、それを社会コストミナムで実現するためには、基幹システムを評価する解析ツールと前提となる情報・データを整備する必要がある。解析ツールについては 4 章記載の電力需給解析シミュレータや広域安定度シミュレータが該当する。情報・データでは、電圧階級 275kV 以上（一部 157kV/66kV を含む）の系統情報（設備構成や設備状況）と同時に、発電量の開示が望まれる。上述のように、重要インフラとしてのセキュリティの問題や発電事業者の競争力に関わる情報の保護が課題であって、このような環境を実現するためには、例えば、評価プラットフォームを運用する中立機関を新設し、その中立機関から事前認可を受けた法人に対してのみ情報・データが開示されるといった枠組みも必要となる。さらに、法人の事業競争を阻害しないようにデータを秘匿化する仕掛けや、それを第三者が検証する制度も必要である。基幹システムでは、地域偏在する VRE の大量導入や人口動態に応じて送配電事業者の運用コストが著しく変化する可能性があり、ノードルプライス（地点別電力供給コスト）や LMP（Local Marginal Price：地点別限界価格）など、地点ごとの電力供給コストを踏まえて全体最適を図る必要がある。このような制度・システムの有効性を評価し、かつ社会的受容性を得るうえでも評価プラットフォームが役立つ。

(2) 地域社会の挑戦に必要な評価プラットフォーム

Society 5.0 では、個人の生活が主役となって、地域社会ごとに特色のあるエネルギーシステムが構築される。電力・ガス・水道・ICT・交通・物流などの各種インフラが連携・協調して新たな価値を創出する。エネルギーシステムについては、例えば、EV の急速充電に伴う急峻な電力需要増加や潮流変化への対応が必要となる。熱やエネルギー備蓄も含めた

地域社会内の全体最適化を進めていくことが重要で、さらに VPP・DR など、調整力の供給によって基幹システムの安定運用に貢献する役割も担うようになる。これらの対策・施策を進める上で評価プラットフォームの整備が重要であり、この場合、配電系統の情報・データが必要となる。

5.2 情報・データの開示・公開に関する枠組み

評価プラットフォームは系統、発電、需要の情報・データ共有を前提としているものの、それぞれ、重要インフラとしてのセキュリティの問題、発電事業者の競争力に関わる情報の保護、個人のプライバシー保護など多くの制約条件が存在し、適切な範囲で公開・開示する必要がある。情報・データの公開・開示における対策と課題を表 3 に纏めた。

データの利活用を拡大するためには、データ共有の重要性を産学官の関係者で理解・共有した上で、公開と開示、および共有に関するルール作りを急ぐ必要がある。現状だけでなく、計画や将来シナリオを反映した系統・発電・需要のデータが、可能な限り実際に近い内容で共有されるのが望ましい。また、発電機固有の制御パラメータなど、知財面から公開が困難な情報については、カプセル化によって詳細情報を秘匿した上で利用するような施策も必要である。例えば、電気学会からは、系統安定度解析への利用を想定した標準系統モデル（EAST30、WEST30²⁷など）が公開されているが、今後の地域偏在する VRE の大量導入や需要側の EV 導入促進を想定すると、さらなる詳細なデータが必要となる。海外では、英国 National Grid や欧州 ENTSO-E が系統構成や潮流状態などを公開しており、データ共有の一つの形態として参考となる。これら海外事例も参考にしながら、たとえば中立的機関による運営や第三者監視機構の準備など、管理体制上の枠組みも構築していかななくてはならない。

表 3 情報・データの開示・公開における課題と対策

#	カテゴリ	課題	対応策（案）
1	データのあり方	エネルギーシステムのセキュリティ （例：サイバーテロ）	<ul style="list-style-type: none"> 開示先ステークホルダの限定 情報を抽象化して公開・開示
2		事業競争環境下の機密保護 （例：ノウハウ流出）	<ul style="list-style-type: none"> ブラックボックス処理 統計情報
3		消費者のプライバシー保護 （例：個人情報悪用）	<ul style="list-style-type: none"> 匿名加工情報 統計情報
4		将来の不確実性の想定 （例：EV台数の想定）	<ul style="list-style-type: none"> 不確実性を考慮し、ステークホルダ間で複数のシナリオを策定して公開・開示
5		他の事業者・インフラ間での情報の開示・公開促進	<ul style="list-style-type: none"> 情報活用によるビジネスモデル(ユースケース)の蓄積とスケールアップ
6	管理体制	オープンな解析ツール開発・保守 データベースの運用	<ul style="list-style-type: none"> 新組織の発足、もしくは責任組織の明確化 システム面・運用面でのプラットフォーム化

²⁷ EAST30, WEST30：電気学会が策定した標準モデル系統の名称。数字は発電機台数を指す。

5.3 再エネ導入拡大に伴う系統対策の評価

地域偏在する VRE の大量導入に伴って、基幹システムと地域社会における対策が必要となる。国内でも先進的な需給運用計画などのソフトウェア対策がさまざま実用・実証・提案されているとともに、同期位相計測器（PMU）などを用いた新たな保護制御技術や、同期化力不足を解消するスマートインバータなど、ハードウェアによる対策も考案されている（図 17）。まずは、少ない投資で実現できるソフトウェア対策から始め、電力広域的運営推進機関 OCCTO が提案する Non-Firm 型接続や N-1 電制を導入しながら、オンライン系統安定化システムなどの高度な保護制御技術も踏まえて、可能な限りに VRE 発電を有効活用、すなわち出力制御を回避していくことが望ましい。また、大量の分散リソースや VRE 導入により、非常時対応がこれまで以上に難しくなることが予見され、カスケード事故まで想定した保護制御技術の開発も課題である（図 18）。

課題 施策		需給調整		系統安定性			供給品質		事例		
		長周期	短周期	脱調現象	周波数現象	電圧現象	設備過負荷	電圧レベル		高調波	
少 再エネ導入量 多	ソフト	基本対策	広域需給調整	○	○					OCCTO機能	
		電圧上昇抑制						○	○	PCSのJIS規格化	
		出力制御（VRE）	○					○		VRE連系における優先給電ルール	
	検討開始	Non-Firm型接続	○					○		OCCTO提案機能	
		N-1電制	○					○		〃	
		DR/VPP	○	○						NEDOマウイ島スマートグリッド実証	
	さらなる対策	ハード	系統安定化システム			●	●	●	○		オンライン事前演算型システム
		動的潮流最適化	○	○				●	○		オンライン最適潮流計算(OPF)
		広域系統保護制御			○	○	○				PMU活用
		スマートインバータ	○	○	○	○	○	○	○	○	擬似ガバナ・擬似同期化力など
	系統設備の増強	○	○	○	○	○	○	○	○	HVDCなど	

PCS: Power Conditioning System, VRE: Variable Renewable Energy, HVDC: High Voltage Direct Current, OPT: Optimal Power Flow Calculation, PMU: Phasor Measurement Unit, FC: Frequency Converter, DR: Demand Response, VPP: Virtual Power Plant

図 17 再エネ導入拡大に伴う各種系統対策²⁸

²⁸ N-1 電制：故障時の電源抑制によって送電可能容量を増加する対策（出典：「広域機関における「日本版コネクト&マネージ」の検討について」、電力広域的運営推進機関、2018/1/24）

オンライン系統安定化：系統故障を想定した対策を事前演算で立案することで大規模停電を回避し、平常時の送電限界を向上する対策（出典：「最先端技術を導入した基幹系統合型系統安定化システムの開発」、中部電力(株)技術開発ニュース、No.158、2018-2）

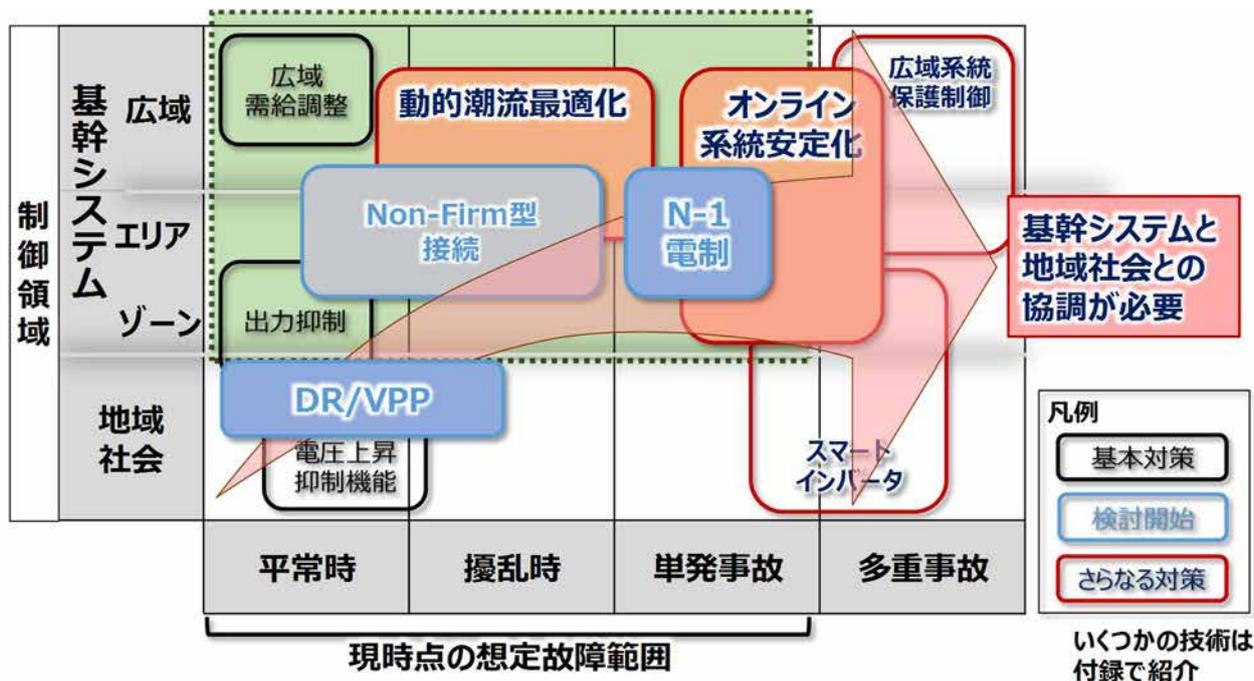


図 18 次世代エネルギーシステムにおける系統対策技術の進展

5.4 シミュレータ活用による定量的評価例（試行紹介）

評価プラットフォーム活用の一例として、東日本を対象とし、東北地方に再エネが大量導入された場合の出力制御の状態に関し、広域安定度シミュレータを用いて定量的に評価する。図 17 および図 18 に示した各種系統体躯を考慮して、東北地方の再エネ電力をいかに関東地方に送電できるかがポイントである。

(1) 2030/2040/2050 の VRE 導入量（想定）

総発電量に対する再エネの割合を 2030 年 22～24% (VRE14%)、2040 年 40% (VRE25%)、2050 年 60% (VRE40%)に設定した（表 4）。2030 年の数値はエネルギー基本計画を参照し、2050 年は、パリ協定の CO₂ 排出量削減目標を踏まえたもので、2 章の「脱炭素集中シナリオ」に該当する。なお、表 4 における VRE 容量は JPEA（太陽光発電協会）の検討結果を参考にした日本全国の総容量であり、2016 年時点の導入量に比例して各地域に分散させた。また、電力需要は、経済発展や電化によって不確実性が高いため、2016 年の 0.8～1.2 倍と変動させて検討する。

(2) 系統対策

評価指標には VRE の出力制御量（=VRE 抑制量）を用いた。出力制御を回避するための対策として、表 5 に示す 4 つの対策を考慮した。OCCTO が提案する東北-東京間の送電線増強計画をスタートポイントとし、N-1 電制、DR・EV 活用、さらにオンラインシステム安定化を想定する。なお、DR では需要の 5%、EV 活用ではバッテリーの 20%が東北エリアにおいて協力が得られると仮定している。

表 4 2030/40/50 の VRE 導入量 (想定)

時期	2030年		2040年		2050年			
VRE構成割合(%)	14 (RE 22-24)		25 (RE 40)		40 (RE 60)			
VRE容量 (GW)	PV	64	104*1)	104*1)	104*1)	104*1)		
	風力	10	16	16	86*2)	86*2)		
想定される東京・東北エリアのVRE・需要	VRE・需要分布 ※東京・東北の需要: 夏(重) 63GW 冬 50GW 春秋 45GW 38GW GW 33GW ● PV 容量GW ● 風力 ():地域の ● 需要 ならし発電量							
	VRE出力(GW)	18.5 (12時)		38.4 (12時)		53.7 (12時)		
	需要(GW)	2016年と同等		2016年の0.8~1.2倍で検討 (上記は、2040年1.1倍、2050年1.2倍の例)				
	EV容量(GW)	1.6 (130万台)		5.1 (410万台)		10.2 (825万台)		

想定：*1)JPEA(太陽光発電協会)試算、*2)*1)に基づく日立独自試算、揚水 13.2GW を再エネ対応に使用
 EV: Electric Vehicle, VRE: Variable Renewable Energy, RE: Renewable Energy

表 5 本評価における系統対策

対策	説明	適用時期	
		2030年	2050年
(1)対策なし	・OCCTO計画に基づく系統増強	○	○
(2)N-1電制	・故障時の電源抑制で送電可能容量を増加 ・2回線以上の送電線が100%送電可能と仮定	○	○
(3)DR追加	・再エネ発電抑制時に、需要家に需要増加を要請して抑制量を削減 ・需要家の5%が協力と仮定	○ 東北 0.5GW	○ 東北 0.6GW
(4)EV追加	・再エネ発電抑制時にEV充電を要請し、抑制量を削減 ・EVの20%が協力と仮定	○ 東北 0.4GW	○ 東北 2.3GW
(5)オンライン 系統安定化	・オンライン系統安定化システムにより、不安定な発電機を事故後に電制	○	○

DR: Demand Response, EV: Electric Vehicle, RAS: Remedial Action Scheme (オンライン系統安定化)

(3) 解析結果例（解析方法・解析モデルの詳細は付録 3 を参照）

2050 年を対象に、需要の少ない秋の断面に対して評価した結果を図 19 に示す。ここでは、ルートトップ型以外の PV 出力を抑制し、その上で風力を出力制御するという考え方とした。スタートの条件(1)では、熱容量の制限で、東北地方から関東地方へ送電可能量は 10GW となっている。30GW の風力発電を有する東北地方のならし容量（全域で平均化した値）21GW に対し、この断面では 5GW しか発電できないことを示す。N-1 電制によって東北-東京間の送電容量が 16GW に拡大し、風力の発電量は 11GW まで改善する（図 19(2)）。N-1 電制によって理想的には送電容量が 2 倍になるが、この場合、系統安定度が制約条件となって、1.6 倍に制限されている。DR や EV 活用（図 19(3)）、オンライン系統安定化（図 19(4)）で、出力制御は徐々に回避されるようになり、この例では、ならし容量 21GW に対して 15GW まで発電してもよいことになる。

電力需要に対する感度分析結果を図 20 に示す。需要を 2016 年の 0.8、1.0、1.2 倍と変化させる。再エネ発電の割合は需要に関わらず表 4 の値とし、すなわち需要に比例して VRE の導入量を増加させる。需要が 20%減少するケースでは 2050 年でも出力制御は不要だが、現状維持の場合、年間 1,000 億円以上の損失が発生する。東北-東京間の送電容量がクリティカルとなって VRE の発電量が制限されている。将来の系統計画では、需要の想定が重要であるが、単にそれに応じて連系線容量を決めるだけでなく、地理的な VRE 設置設計も含めて検討するのが望ましい。

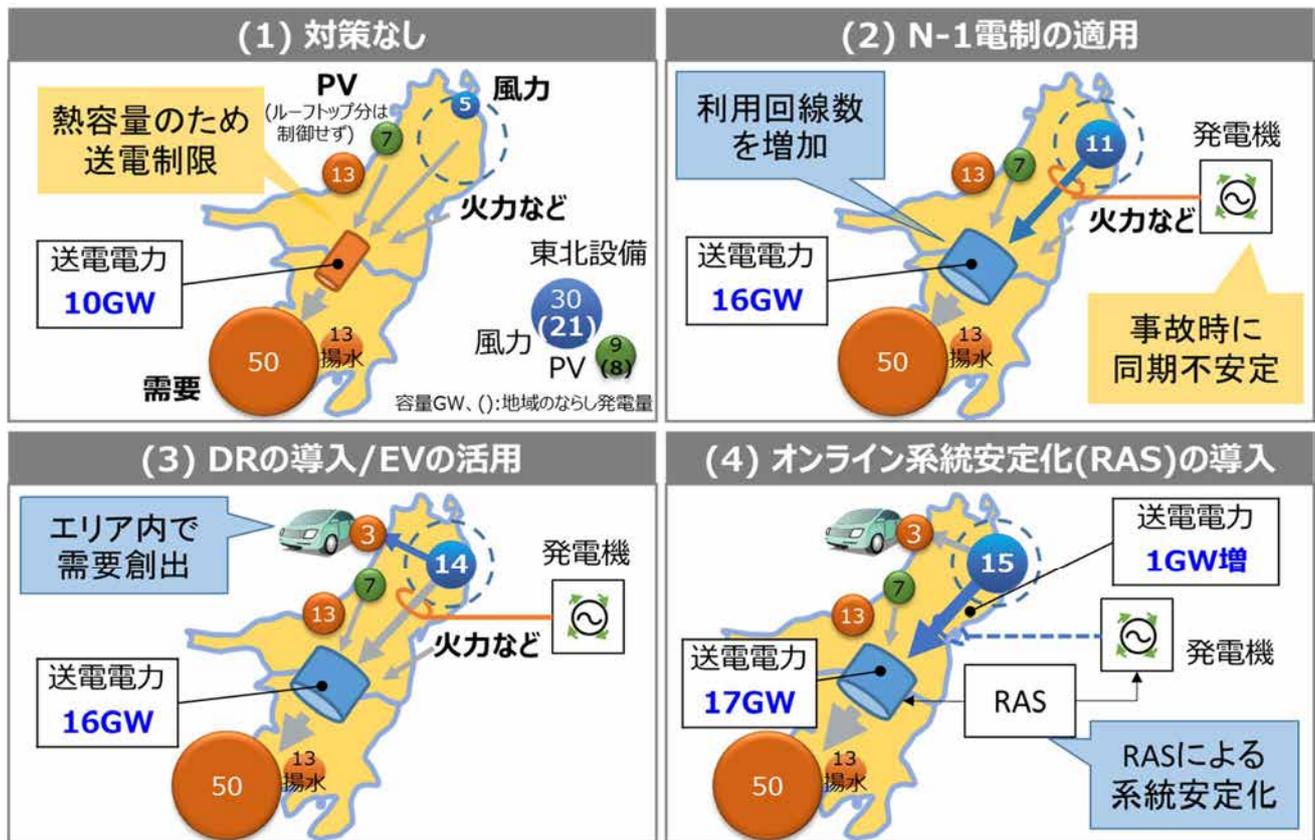
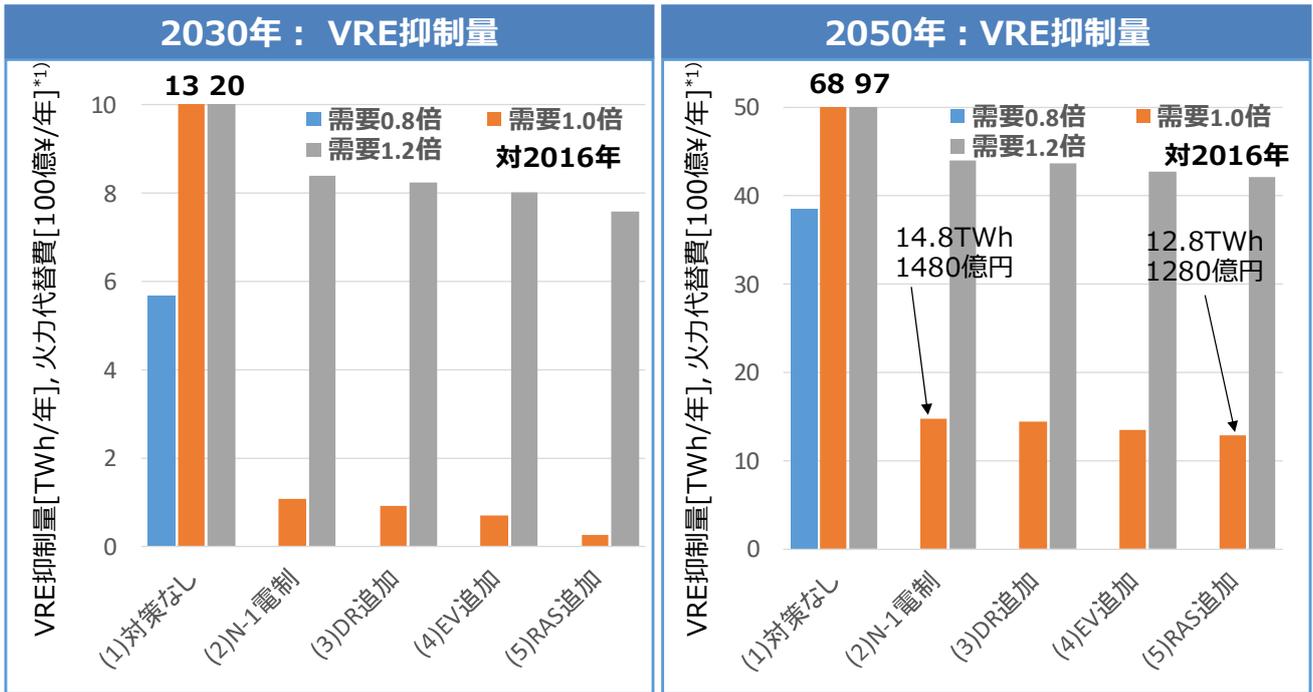


図 19 解析結果例(2050年 8/9 12:00、需要 2016年と同等のケース)



*1) LNG 火力で VRE を代替することを想定：1kWh=10¥として換算 (1)は机上解析、(2)～(5)はシミュレーション解析

図 20 各種施策と再エネ導入可能量の関係

第6章 挑戦と変革に向けた制度・政策

エネルギーシステムの挑戦と変革に向けた制度・政策の整備は重要な課題である。将来、必要な開発や投資領域を明確にして、長期的計画として実行するためにはエネルギーシステムの将来像を具体化していくべきである（6.1 節）。6.2 節では基幹システムと地域社会の再構築を促す制度・政策について検討し、前者ではパフォーマンス駆動型政策によって投資促進と効率化の両立を提案する。後者では、地域社会の特徴に合わせた戦略を実行するとともに、複数の地域社会の相互連携に基づく社会全体の「3E + S」の最適化に向けた制度を構築する。また、エネルギーシステムの転換に向けたイノベーションの促進や資金循環の仕組み等を構築すべきである（6.3 節）。これらを5章で述べた各種評価プラットフォームも活用しながら、科学的根拠に基づいてエネルギーの長期戦略を構築し、また地域経済の活性化と投資の好循環を創出する。

6.1 エネルギーシステムの将来像の具体化

2章では技術選択モデルにより将来のエネルギーシステムを定量的に評価したが、さらに具体的に検討を進めるためには、供給コストを踏まえた価格モデルやシステムシミュレータによる技術評価、さらにエネルギーシステムの姿がマクロ経済に与える影響を評価する経済モデル²⁹などもあわせて検討する必要がある。また、科学的レビューメカニズムの実装によって複数のステークホルダからの知見を取り入れて、シナリオの妥当性や客観性を高め、オープンな意思決定のプロセスとして活用する（図 21）。また、エネルギーシステムの将来像を具体化し、今後、必要となる技術開発や投資領域を明らかにし、長期的な投資につなげる。

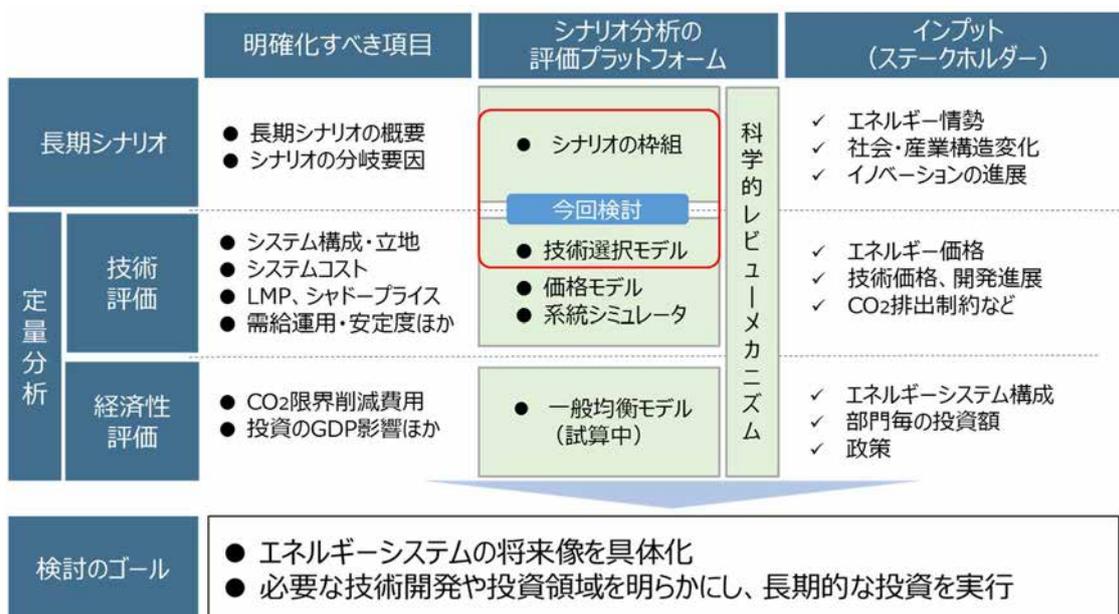


図 21 長期エネルギーシナリオ検討の枠組み（将来）

²⁹ 日立東大ラボでは、国立環境研究所のご協力のもと、応用一般均衡モデル（AIM/CGE）を用いて、エネルギーシステム変革のマクロ経済への評価を施行中である。計算結果は別途公表予定。AIM/CGE の参考資料：
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tikyuu/kaisai/dai06tyuuki/siryou2/5_2.pdf

また、将来のエネルギーシステムの具体化を進めるにあたり、ステークホルダからの知見を取り入れつつ、下記の項目を実施していく必要がある。

- 上述の長期エネルギーシナリオ検討の枠組み（図 21）により、各シナリオにおけるエネルギーシステムの将来像を客観的な根拠に基づき明確化する
- 電源構成、需要家の設備構成、さらには CO₂ 排出量削減や効率など、エネルギーシステムが実現すべき KPI を定量化する
- 中長期的な国土計画とエネルギーシステムを整合させる仕組みを構築する
- 上記 3 項目を実現するために、エネルギーシステムの枠を超えて、分野横断的に産・学・官・民が議論するオープンな枠組みの創出と EBPM³⁰を実践する

6.2 基幹システムと地域社会の再構築を促進する施策

(1) 基幹システムの変革を支えるパフォーマンス駆動型政策

4 章で述べたように、基幹システムは、社会全体の「3E+S」を全体最適化する役割を担う。基幹システムへの投資は、創生されたイノベーションによって実現した経済的便益のみならず、安定供給や持続可能な開発目標（SDGs³¹）などの多様な価値も踏まえて、その成果（アウトカム）を評価すべきである。投資する際の目標設定では、「3E+S」の観点から、エネルギー産業が実現すべき価値を複数のステークホルダがオープンに議論して決定するのが望ましい。また、目標達成度は、シミュレータや標準指標などによって定量的に評価し、ステークホルダの関与のもとで PDCA を実行することで、継続的な改善を図る。このようなアウトカムベースの評価であるべき価値を実現していく政策を、「パフォーマンス駆動型政策」と呼ぶ。パフォーマンス駆動型政策を導入するにあたって、具体的には以下の項目を実施する必要がある。

- 次世代システムへの投資や、老朽化対策、コスト削減、不確実性や大規模災害への対応などを実現していく上で、必要な費用を送配電部門の料金収入に織り込む
- CO₂ 排出量削減や供給安定性を考慮した投資の費用便益を分析し、費用負担ルール³²の確立する
- 需要家の理解を得るために、事業者がアウトカムとして付加価値を判りやすく提示し、アカウントビリティを確保する
- シナリオ分析や将来ビジョンからのバックキャストでインフラシステムを計画し、それを実現するための費用を事業収入に反映する
- 産学官の連携でエネルギーシステムの将来像を具体化し（2 章）、評価プラットフォームで議論する（5 章）

³⁰ Evidence Based Policy Making：ここでは統計やシミュレーションなどの客観的なデータ（証拠）に基づいて、政策オプションの仮説立案や検証を行い、ステークホルダ間でオープンに議論しながら政策を策定することを指す

³¹ SDGs：Sustainable Development Goals、持続可能な開発目標

³² 地域偏在する再エネ導入に関する系統増強などについて、公平性・透明性のある費用負担のルールが必要

海外の先行的な取組みとして、英国は RIIO³³と呼ばれる料金政策を導入している。RIIO では図 22 に示すように、送配電事業の収入は総費用に基づく基本収入に加えて、環境性や安定性などの目標の達成度に応じた報酬が加算される。また、技術開発のための資金を料金収入に反映し、イノベーションを促進している。それに加えて、インフレなどの経済変動の不確実性を料金に反映する仕組みを持って、事業者による中長期の予見性を確保している。一方、コスト削減についてもインセンティブ³⁴を設定することで、料金上昇の抑制につなげている。RIIO における目標の設定や内容の見直しは幅広いステークホルダの関与のもとに実施されており、コミュニケーションのプラットフォームとしての機能も併せ持つ。これらにより、社会的合意形成のもとで料金の上昇を抑制しつつ、投資とイノベーションを促進し、エネルギーシステムの変革を実施している。なお、ドイツや米国においてもそれぞれ独自のスキームで、投資インセンティブの実現を図っている³⁵。

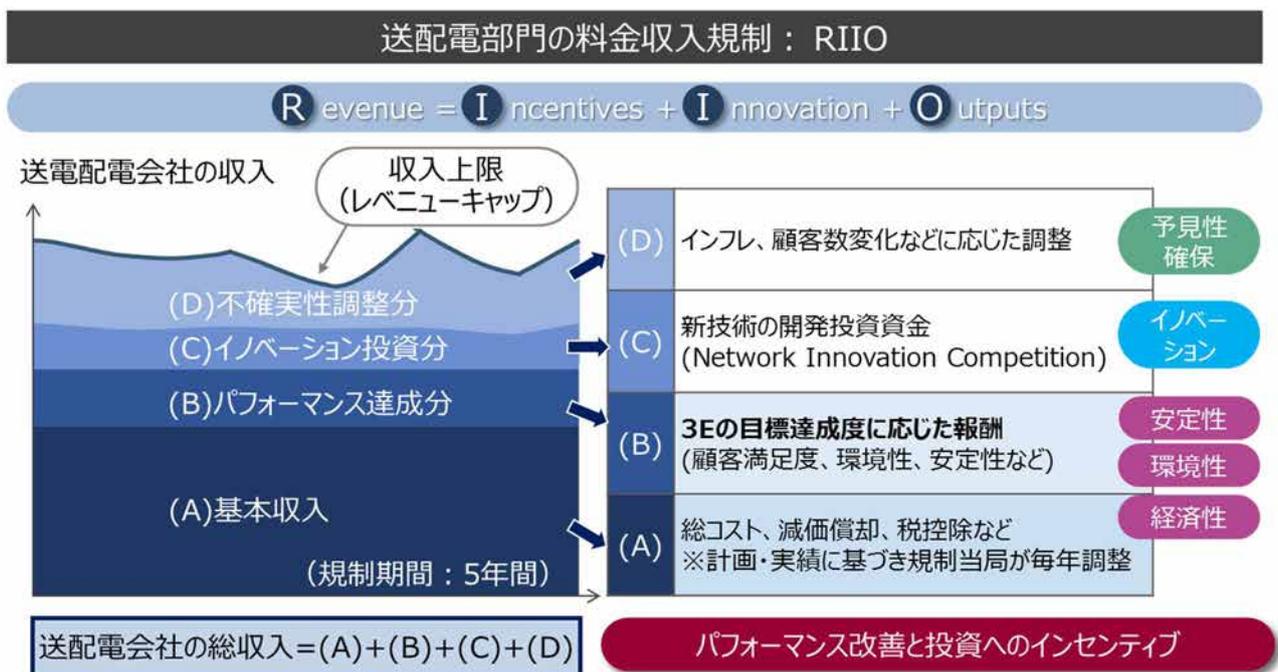


図 22 英国 RIIO の仕組み

また、英国では、将来の需給シナリオと対策オプションの検討、およびその実現する上でのベースとなる送配電部門の収入を一貫して検討するプロセスを設定している（図 23）。複数シナリオからのバックキャストにより、各シナリオにおけるネットワークの直近 10 年間の課題を評価して投資計画を策定する。各シナリオにおける対策オプションから、どの対策を

³³ Revenue=Incentive + Innovation + Output：英国の送配電事業におけるパフォーマンス駆動型政策の一種

³⁴ TOTEX メカニズム：CAPEX（資本支出）+ OPEX（運営費）= TOTEX。TOTEX に目標を定め、目標過達分の一部が事業者インセンティブとして還元される仕組み

³⁵ 資源エネルギー庁資料参照：

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/denryoku_platform/pdf/005_03_00.pdf

投資計画に織り込むかは Least Worst Regret 法³⁶で選択している。これによって、将来の不確実性に対して柔軟な対策を検討でき、需要家へのアカウンタビリティを確保しつつ、投資の予見性を確保している。

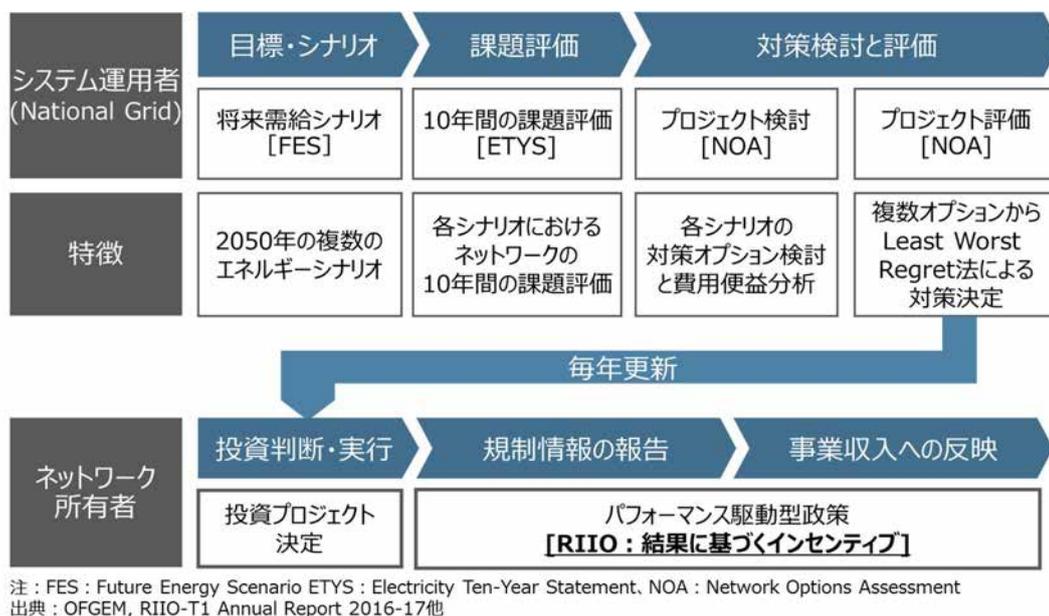


図 23 英国 シナリオ分析と RIIO の関係

(2) 地域社会ごとの多様なシステムの構築とそれらの相互補完を可能とする制度・政策

エネルギーシステム全体における「3E+S」の全体最適化を図るためには、各々の地域社会において需要家リソースを含めたエネルギー利用を最適化するだけでなく、地域社会の相互補完によって社会全体の目標を実現する仕組みが必要である。例えば、地域ごとに脱炭素化率、エネルギー効率、安定供給などの目標を設定し、地域社会がその達成方法を検討して実行する。また、地域社会毎の目標が総体として、社会全体の 3E+S を最適化するよう設定される。

政府は目標の達成度に応じて、例えば、税制や支援策などのインセンティブを付与することによって、地域ごとの計画と実行を促進する。トップダウンによる意思決定とボトムアップによる計画・実行の最適なバランスを図る。これらの仕組みの具体化については、今後さらなる議論が必要だが、このような施策によって様々のステークホルダーがエネルギーシステムに投資し、この投資によって地域社会内の経済循環が進み、地域創生を支える（図 24）。

³⁶ シナリオごとに最適な対策オプションを想定し、その中からシナリオが変更された場合でも機会損失が最小となる対策オプションの組み合わせを選定する法式

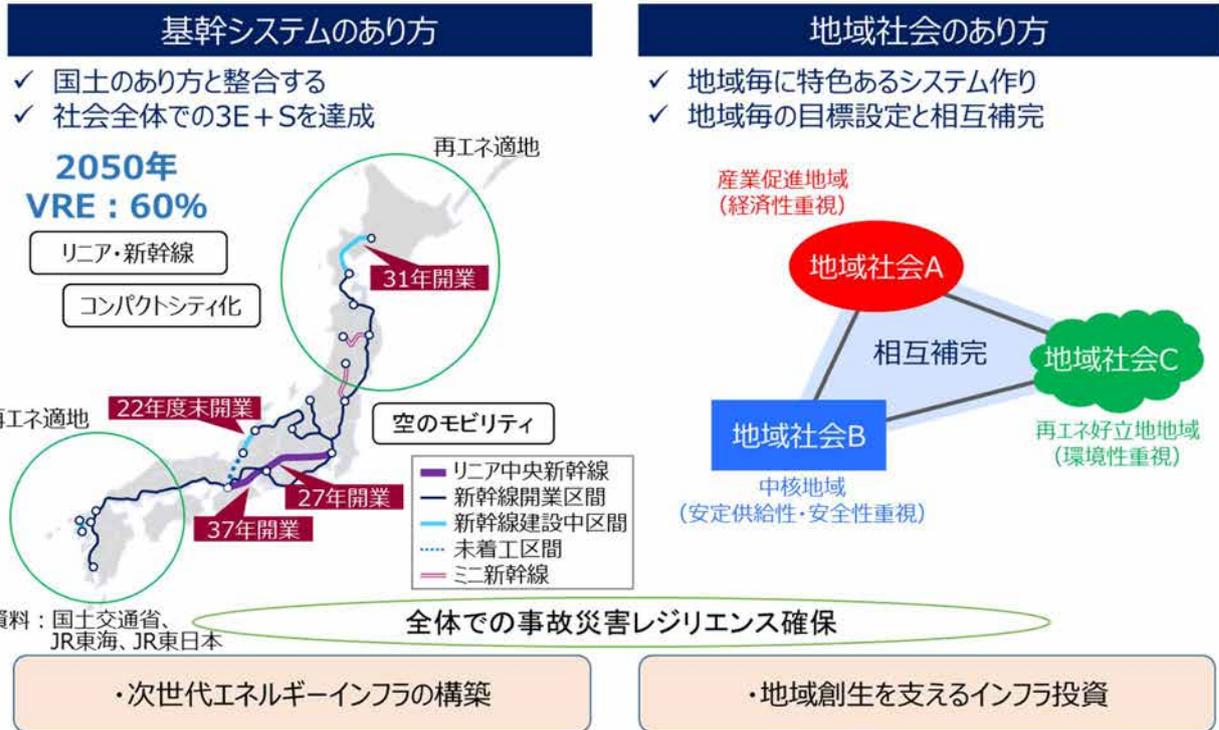


図 24 基幹システムと地域社会

一方で、地域社会では、地域ごとの特徴に即したエネルギー戦略を実行する。その際、以下の項目について具体的な検討を進める必要がある。

- 電圧変動や停電時間・頻度などの電力品質、エリアごとの料金に関して、地域社会や個人のニーズに合わせた選択³⁷を可能とする制度的枠組み
- 地域社会における分散リソース（EV や蓄電値、太陽光など）を効率的に活用するためのグリッドコードや託送ルールの整備
- 地域社会の配電事業に自治体や地元企業など、多様なプレイヤーが参加できるルールの整備
- 新たな取組みに対する大規模実証や税制措置など、地域の戦略的投資をサポートする仕組み

地域社会におけるエネルギー戦略の検討は、人口や産業などの地域社会の特徴に基づいて行われる取り組みであり、繰り返す試行錯誤に対応してアジャイルに制度設計を行うプロセスに変更する必要がある。具体的には、以下の項目を実施する。

- 産・学・官・民で将来の具体的な方向性や評価指標のあり方を検討する
- 地域社会におけるエネルギーシステムの評価環境を構築し、ステークホルダ間の議論に活用する
- 省庁の横断的検討プロセスや政策の評価メカニズムを様々な地域への水平展開する

³⁷ 送電網・配電網の特性や限界を踏まえた上での対応が必要

6.3 イノベーション推進のための制度・政策

(1) イノベーションの推進とグローバル展開

2050 年を見据えた長期ビジョンの実現に向けて、産学官が連携して、地域社会、基幹システムのいずれにおいても多様なイノベーションを推進していくことが必要であり、またそれらの技術をグローバルに展開していくことも重要である。

地域社会では、3 章で述べた分散リソースの協調・調整技術の進展とともに長期的な発電コストの低減が進み、限界費用ゼロの再エネをエネルギー源として活用した新しい産業の創出が考えられる。例えば、昼間の余剰電力を活用した農業や産業誘致や、水の電気分解や再エネ由来の水素の大規模生成などが考えられる。また、水素と二酸化炭素の合成によるメタンの生成（メタネーション）、さらには電気から熱への変換と分散貯蓄、Direct Air Capture（DAC）³⁸などは将来の脱炭素化に向けて重要な開発事項となる。一方、基幹システムにおいては、複数の地域社会との連携に加えて、原子力など脱炭素電源の高効率・安定運用の強化や、将来的には CCUS など脱炭素技術の社会実装を進める。

不確実性の高いエネルギー分野の将来技術の開発と実装に向け、産学官が協力して、幅広い可能性を追求するとともに、技術競争を促進することで、将来のグローバル市場で真に必要な技術の選別と育成を図る。そのためには、産学官の様々なステークホルダによる議論、分野横断的なロードマップ策定、社会的意思決定のためのプラットフォームの整備などが必要である。

政府は、海外の先進プロセスを参考に調達基準や手順を見直して、グローバル仕様を見据えた標準化・デファクト化戦略を検討し、日本の産業成長とともに海外展開の活性化を図る役割を担う。また、国際金融活用や CO₂ クレジットなども産業成長と海外展開に有効な施策である。企業は国内で構築したエネルギーシステム³⁹をグローバルに展開して、国際社会への貢献につなげていく。また、海外市場で得た知見を国内のシステム向上のために還元して、継続的改善を図る。大学は、国際競争力のある技術開発を進めるとともに、アカデミックな知見から制度・政策の品質を向上させる。人材育成も重要なミッションである（図 25）。

³⁸ 大気中の二酸化炭素を直接吸収する技術。現時点では運用に必要な莫大なエネルギーコストの問題から商業利用には至っていないが、限界費用がほぼゼロとなる再エネの活用により、実現への道筋を描くことができる。

³⁹ エネルギーネットワークの技術のみでなく、再エネやクリーンコールなどの電源、ヒートポンプなどの需要家側のリソースを含むエネルギーシステムの全体を指す。

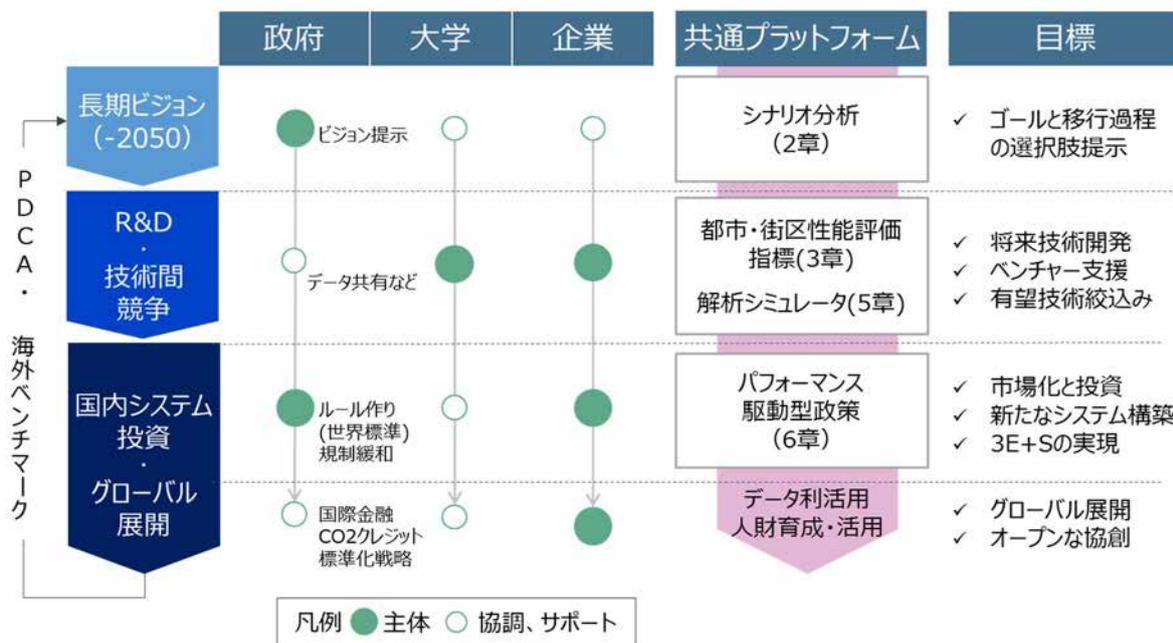


図 25 産学官の連携と共通プラットフォーム

(2) イノベーション創生のための資金循環

政府は、エネルギーシステムの転換や産業創出に向け、イノベーションへの投資を促進する資金循環メカニズムを確立する必要がある。現在、環境価値・社会価値を重視する ESG 投資が世界で急速な広がりを見せており、それら投資が長期的な研究開発や設備投資に向かうように、制度面の後押しを進めていくことが肝要である。例えば、近年世界的に発行額が急増しているグリーンボンド⁴⁰やサステナビリティボンド⁴¹の活用は有効である。市場の透明性や信頼性を高めるためには、統一的な発行基準や、資金用途先プロジェクトが生み出す環境・社会価値を定量化する手法に関する国際ルールを策定する必要があり、日本もルール整備で貢献していくことが求められる⁴²。

また、エネルギーの価値は、現状の kWh、kW、ΔkW から環境・社会的意義を含むものに多様化し、また、それらのリアルタイム取引も可能となる。このような市場システムによって資金フローを増加させ、エネルギーの需要者や供給者が付加価値に再投資する好循環を生み出すことが必要である。また、日本では、再エネの導入促進によって、石油・石炭など海外資源の輸入減少が進んで国富流出も削減され、余剰資金をエネルギー転換や産業育成に生かしていくことも長期的には重要と考える。

⁴⁰ グリーンボンド：環境面の持続可能性向上に貢献するプロジェクトに要する資金を調達するために発行する債券

⁴¹ サステナビリティボンド：環境面の持続可能性向上に貢献するプロジェクト、特定の社会的課題への対処や軽減を促進するプロジェクト双方への融資（または再融資）に利用される債券

⁴² 国際標準化機構（ISO）がプロジェクトの環境価値に関する評価手法や情報開示項目などの標準化を推進している

(3) イノベーションのためのデータ流通システムの確立とサイバーセキュリティ

Society 5.0 における価値の源泉はデータで、データ流通システムの確立を制度面からも促進しなければならない。政府は、スマートメーターのデータなど、個人のプライバシー保護や事業者の営業秘密保護に配慮しながらルール整備し、信頼性に裏付けられたデータ流通の環境を整備する必要がある。データ流通システムを確立するためには、業種の壁を越えた情報の共有や機器の相互接続などが想定される一方で、安全保障の観点からはインフラの制御に対する高度なセキュリティ水準が要求される。企業主導の対策だけでなく、国として以下の項目を考慮した政策を立案・実践することが重要である。

- 高度化して拡大を続ける脅威に対し、エネルギーシステム全体にわたるセキュリティ対策を強化する。
- システムの相互接続のためにシステム仕様をオープン化する一方で、設計段階から外部接続を含むシステム全体のセキュリティを考慮するセキュリティ・バイデザインの考え方を適用する。
- 任務保証⁴³を実践するとともに、調達におけるセキュリティ方針の明確化やエビデンスの確認、運用でのセキュリティ対応組織の整備など、組織ガバナンスを確立する。

⁴³ 任務保証：業務責任者がシステム責任者と重要インフラの機能やサービスを全うする観点からリスクを分析し、経営者層に対し情報を提供し総合的な判断を受ける

第7章 エネルギーシステムを支える人財育成

7.1 新しい人財の育成

Society 5.0 を支えるエネルギーシステムを構築し、同時にグローバルな社会貢献に資するインフラ産業を創生するためには、科学技術イノベーションと社会システム、経済メカニズムを一体として捉えた上で、短期・中期・長期といったマルチタイムスケールの戦略を立案して実行していくことが必要である。エネルギーの場合、社会的な影響や現有インフラ設備の規模が非常に大きく、構造転換に時間がかかると考えられ、それを踏まえると、短期は 5 年から 10 年、中期は 10 年から 20 年、長期は 20 年から 100 年単位となる。そうした活動を持続的に実施し、さらにエネルギーシステムの多面的な価値を論じられる人財を、産学官が連携し、業界・学問・世代の枠を超えて育成するための継続的な投資が必要不可欠である。

これに関連する学術分野は、電力、交通、情報などの工学分野に加えて、経済学・経営学・金融工学、さらには社会学などがクロスオーバーする分野となる。大学では、具体的には、大学院において専攻や研究科を超えたエネルギーシステムに関する共同プログラム等を設置して、教育・研究活動に取り組む。ここでは、複合化していく社会の諸課題を客観的な視点から俯瞰的に捉えることができる能力や、その中で解決すべき課題を発見して、見極め、問題を設定し、解決する力、また異分野にまたがる横串だけでなく、短期・中期・長期での時間的な縦串を刺すことによってマルチタイムスケールの本当に大事な課題を見つけ出す力を養成する。これらの取組みには、例えば、具体的なエネルギーシステムの課題に対して、異分野の知を統合し解決をめざすプロジェクトを推進して、その中で研究と同時に人財育成を行うことが有効であって、同時にその成果をイノベーションや新たな産業の興隆につなげることができるだろう。また、システム構築のプロジェクトを通して、新たな分野横断知・方法論・ツールの創造・開発を推進することにもつながる。これらの取組みにおいては、実効性を最大限に高めるために、大学に対して産業界も強く連携し協力することが必須となる。また、産業界は、そうした教育プロセスを経て産業界に入ってくるクロスオーバー人財を適切に受け入れて、活躍させる仕組みを構築することが必要である。

なお、このような人財養成は、これまで大学が育成をめざしている国際的な学術環境において競争力を有する人財養成との間に大きなギャップが存在するため、そうした人財を適切に評価する評価基準を同時に定めていく必要がある。評価基準としては、例えば、その人財が生み出した成果の社会的・経済的価値による評価や研究成果を価値の創出につなげるプロセスを重視し、利用知に関する積極的評価、さらに組織マネジメント能力に対する評価軸が考えられる。

上述した人財育成は産業界と大学が連携して主に進めることになり、さらに短期的課題については、市場メカニズムに基づき進められるものの、一方で、中長期的課題に対応する人財育成については、国家的な視点や政策の役割が非常に大きく、特に長い時間軸を持つ大学の果たす役割も大きく、大学に対する国の支援の役割は大変重要である。

7.2 シニア人財の活用

少子高齢化が急速に進行するわが国において、マルチタイムスケールでエネルギーシステムに関する戦略を立案して、実行するためには、貴重な財産であり即戦力でもあるシニア人財も積極的に活用し、地域社会システムと基幹システムの発展を加速すべきである。現在、日本では、高い信頼性のエネルギー供給を支えてきた大量のベテラン層が定年退職の時期を迎えている。日本企業においては技術継承が問題となっており、今後の技術力低下の不安材料にもなっている。一方で、一部の海外企業は、日本のシニア人財を積極的に雇用して技術力を高めているという現状も見受けられる。今後、エネルギーシステムの変革に対して、適切な人財を様々な場に幅広く供給するためには、個別企業の枠を超えた横断的なシニア人財プールを整備していくことが望ましい。あわせて、各社ごとに異なる技術基準を標準化する取組みも、今後の少子高齢化を見据えた担い手確保の観点から重要である。特に新しい方向性に挑戦する地域社会においては、産学官をつなぐイノベータとしてシニア人財を活用していくことが大切である。

第8章 まとめ

Society 5.0 を支える電力システムの実現に向けて、以下に提言を纏める。

- ・ **地域社会と基幹システムの共存**を前提にエネルギーシステムの再構築を図る（第1章）

Society 5.0 では個人の生活が主役となり、地域社会ごとに特色あるエネルギーシステムが構築される。そこではデータが重要な役割を果たし、電力だけでなく、新たな価値やサービスが供給される。基幹システムは社会全体の「3E+S」を全体最適化する役割を担う。地域社会と基幹システムの役割は画一的ではなくなり、共存を前提に再構築される。電源の分散化、基幹システムと多数の地域社会の連携、さらに人の行動など協調・調整すべき要素が指数関数的に増加し、これらの分散リソースを統合する新しい協調メカニズム技術の確立が必要である。

- ・ 社会全体の構造の変革に向けて、**中長期的な視点で柔軟に意思決定**する（第2章）

グローバルな経済・社会の変化や技術革新などによって中長期的な不確実性が高まる中、Society 5.0 の実現に向けて複数の長期エネルギーシナリオを想定・準備しておくことが重要である。エネルギーインフラにおける技術開発や設備導入は、短期では5年から10年、中期では10年から20年、長期では20年から100年の単位で考える必要があり、エネルギーシステムの将来像を示すことによって開発項目や投資対象を明確にすべきである。

- ・ 地域社会を支えるエネルギーシステムに対し、**様々のステークホルダが参画して新しい価値を創造**する（第3章）

地域社会で挑戦すべき新たな方向性として、エネルギーの価値が多様化していく中、独自の価値を創造・流通・取引できる技術革新と制度整備を進めるべきである。例えば、再生可能エネルギーの好適地では、系統安定化のための施策とともに、余剰電力を活用して地場産業を育成する社会をめざす。電力・ガス・水道・ICT・交通・物流などを含む各種インフラの情報を公共的なものとして共有する仕組みを設けることで、新しいサービス事業を創生する。

- ・ 基幹システムは **3E+S を最適化する重要な役割**のもと、**地域社会をつなぐ**機能を持つ（第4章）

エネルギーシステムが変革する中、基幹システムは社会全体の「3E+S」を全体最適化する重要な役割を担う。また、複数の地域社会でエネルギーの需給や価値の授受が行われ、基幹システムがこれらをつなぐ。基幹システムのあるべき姿を議論するために、電力を中心に社会全体のエネルギーシステムを評価するプラットフォームを構築する。産学官が協力して解析ツールや標準データを開発・共有する。評価結果を基に様々のステークホルダが議論をして、基幹システムのあり方とその変革に向けた投資に対する社会的合意形成を実現する。また、基幹システムと地域社会をデジタルでつなぐ新しい制御技術を組み込み・実践し、技術と経験をグローバルに展開していく。

- ・ 評価プラットフォームとデータ共有に関する**概念設計**（第5章）

評価プラットフォームを活用するユーザを定義して、ユースケースを想定・抽出し、要求仕様・必要機能を明確化する。エネルギーシステムの評価プラットフォームでは、系統、発電、需要の情報・データ共有を前提としているものの、

それぞれ、重要インフラとしてのセキュリティの問題、発電事業者の競争力に関わる情報の保護、個人のプライバシー保護など、多くの制約条件が存在し、適切な範囲の下で公開・開示する必要がある。それゆえ、上記の要求仕様・必要機能を踏まえて、公開・開示の範囲を検討する。また、評価プラットフォームは、継続的な改善・更新が必要であり、中立機関など、適切な運用者を定める必要がある。

- ・ 地域社会と基幹システムの変革を促すために多様性を前提とした制度・政策を整備する（第6章）

エネルギーシステムの挑戦と変革に向けて、制度・政策の整備は重要な課題である。必要な開発や投資領域を明確にして、長期的計画として実行するためエネルギーシステム将来像を具体化していくべきである。基幹システムと地域社会の再構築を促す制度・政策について検討して、前者ではパフォーマンス駆動型政策によって投資促進と効率化の両立を提案する。後者では、地域社会の特徴に合わせた戦略を実行するとともに、複数の地域社会の相互連携に基づく社会全体としての「3E+S」最適化に向けた制度を構築する。また、エネルギーシステムの転換に向けたイノベーションの促進や資金循環の仕組み等を構築すべきである。5章で述べた各種評価プラットフォームも活用しながら、科学的根拠に基づいてエネルギーの長期戦略を構築し、また地域経済の活性化と投資の好循環を創出する。

- ・ 産学官が連携して横断的人財を育成する（第7章）

Society5.0を支えるエネルギーシステムを構築していくと同時に、グローバル社会に貢献に資するインフラ産業を創生するためには、科学技術イノベーション、社会システム、および経済メカニズムを一体で捉えることが重要である。産学官が連携して業界・学問・世代の枠を超える取組みを推進し、多面的な価値を論ずることができる財の育成が必要である。また、日本の貴重な財産あるシニア人財の活用も重要である。

- ✓ 地域社会と基幹システムは、共存を前提として再構築
- ✓ 急増する分散リソースを統合する協調メカニズムの確立

社会全体の3E+Sを最適化



図 26 Society5.0 を支えるエネルギーシステム全体像

以上

第2版提言検討体制（2019年3月31日時点）

1. 東京大学

小関俊彦	全体統括	理事・副学長
吉村忍	コーディネータ	副学長、大学院工学系研究科教授
	WG0	
坂田一郎	WG0	総長特任補佐、大学院工学系研究科教授
<u>横山明彦</u>	WG1	大学院新領域創成科学研究科教授
松橋隆治	WG1	大学院工学系研究科教授
荻本和彦	WG1	生産技術研究所特任教授
馬場旬平	WG1	大学院新領域創成科学研究科准教授
小宮山涼一	WG1	大学院工学系研究科准教授
<u>大橋弘</u>	WG2	公共政策大学院副院長・大学院経済学研究科教授
江崎浩	WG2	大学院情報理工学系研究科教授
田中謙司	WG2	大学院工学系研究科准教授
藤井康正	WG2	大学院工学系研究科教授
芳川恒志	WG2	公共政策大学院特任教授
羽賀敬	事務局	産学協創研究推進 PT
大久保哲也	事務局	産学協創研究推進 PT
小野彰子	事務局	産学協創研究推進 PT
中川尚治	事務局	産学協創研究推進 PT

2. 日立製作所

松岡秀行	コーディネータ	研究開発グループ 基礎研究センタ 主管研究長
森田歩	WG0	研究開発グループ テクノロジーイノベーション統括本部 副統括本部長
楠見尚弘	WG0	研究開発グループ エネルギーイノベーションセンタ センタ長
<u>佐藤康生</u>	WG0・1	研究開発グループ エネルギーイノベーションセンタ 部長
渡辺雅浩	WG1	研究開発グループ エネルギーイノベーションセンタ 主管研究員
加藤大地	WG1	研究開発グループ エネルギーイノベーションセンタ 研究員
<u>中沢健二</u>	WG2	電力ビジネスユニット 経営企画部 部長代理
山田竜也	WG2	電力エネルギー業務統括本部 次世代エネルギー協創推進本部 担当本部長
熊谷正俊	WG2	研究開発グループ エネルギーイノベーションセンタ リーダ主任研究員
吉本尚起	WG2	研究開発グループ 基礎研究センタ 主任研究員
藍木信実	WG2	日立総合計画研究所 副主任研究員
御手洗茂樹	WG2	日立総合計画研究所 研究員
上村理	事務局	研究開発グループ 技術戦略室 主任技師
齋藤直	事務局	研究開発グループ 技術戦略室 主任技師

WG0: 全体ビジョン、WG1: 評価プラットフォーム、WG2: 制度・政策の分科会を表し、下線が各 WG リーダを示す

【付録 1】 技術選択モデルによる長期エネルギーシナリオの定量的検証

1. 技術選択モデルの概要

技術選択モデルは、エネルギー・経済モデルの一手法で、エネルギー政策に関する多様な論点について定量的に分析できるツールである。エネルギー・経済モデルはこれまで数多くの手法が提案されており、それぞれに特徴がある。ここでは、2050年という長期にわたるシナリオの定量化を試みるため、各シナリオをバックキャストで検証できる技術選択モデルに着目した。技術選択モデルは、ある前提条件を満たす道筋をバックキャスト的に明示できると同時に、技術分野を個別に解釈しやすい特徴を有する。一方で、エネルギー分野以外の経済部門との関連性を表現できないこと、大量のデータが必要で計算に時間を要するなどの短所もある。

東京大学藤井康正教授、小宮山涼一准教授の研究室にて川上恭章氏が開発したモデルを活用し、提言で述べた4つのシナリオについて、具体的に前提条件を設けて検証した結果を示す。上記の通り、技術選択モデルはエネルギー分野以外の経済部門との関連性を示せないため、エネルギーコストの議論は取り上げず、脱炭素化に向けた技術的な取り組みと電力システムに対する課題抽出を中心に概説する。

2. 技術選択モデルの前提条件設定

技術選択モデルの前提条件は、基本的に川上の報告に基づく⁴⁴。図 A1-1 に示す基準エネルギーシステムを想定し、システム内のエネルギーキャリアと、それを転換、送配、消費する技術を設定する。主な前提条件は以下のとおりである。

- (1) 図 A1-1 に示すエネルギーサービスの需要区分にしたがって、エネルギーが最終消費される。
- (2) 電力は 10 分間隔で需給バランスを取り、需要はエネルギーサービスの稼働状況によって内生的に決定される。
- (3) 火力発電の新規設備上限は 10GW、原子力は運転開始から 40 年で検証し、20 年間の稼働延長を認めたと増設しない。水力発電の 2030 年の設備量上限は一般水力 22GW、揚水 27.5GW とする。
- (4) VRE の稼働利用率は 10 分間隔の気象データを基に実績値から推定し、それを将来にわたって利用する。

2章の複数シナリオの検証では、以下の前提条件を検討した。期間は 2030 年から 2050 年の 20 年間である。

- (A) 2050 年の CO₂ 排出量: 238 Mt- CO₂ (2013 年度比 80%減)
- (B) 2050 年の CO₂ 排出量: 417 Mt- CO₂ (2013 年度比 65%減)
- (C) 2050 年の CO₂ 排出量: 691 Mt- CO₂ (2013 年度比 40%減)
- (D) 2050 年の CO₂ 排出量: 238 Mt- CO₂ (2013 年度比 80%減)かつ VRE 50%以下

⁴⁴ 川上恭章、博士論文（東京大学）2018。

川上恭章、小宮山涼一、藤井康正；電気学会論文集 B（電力・エネルギー部門誌）Vol.138, No.5, pp.382-391 (2018)

川上恭章、小宮山涼一、藤井康正；エネルギー・資源学会論文誌, Vol.39, No.4, pp.10-19 (2018)

なお、脱炭素化が技術は、条件(C)(B)(A)の順に進展し、条件(D)は条件(A)と同等に脱炭素化技術は進展するが、VRE 導入は停滞したケースに相当する。

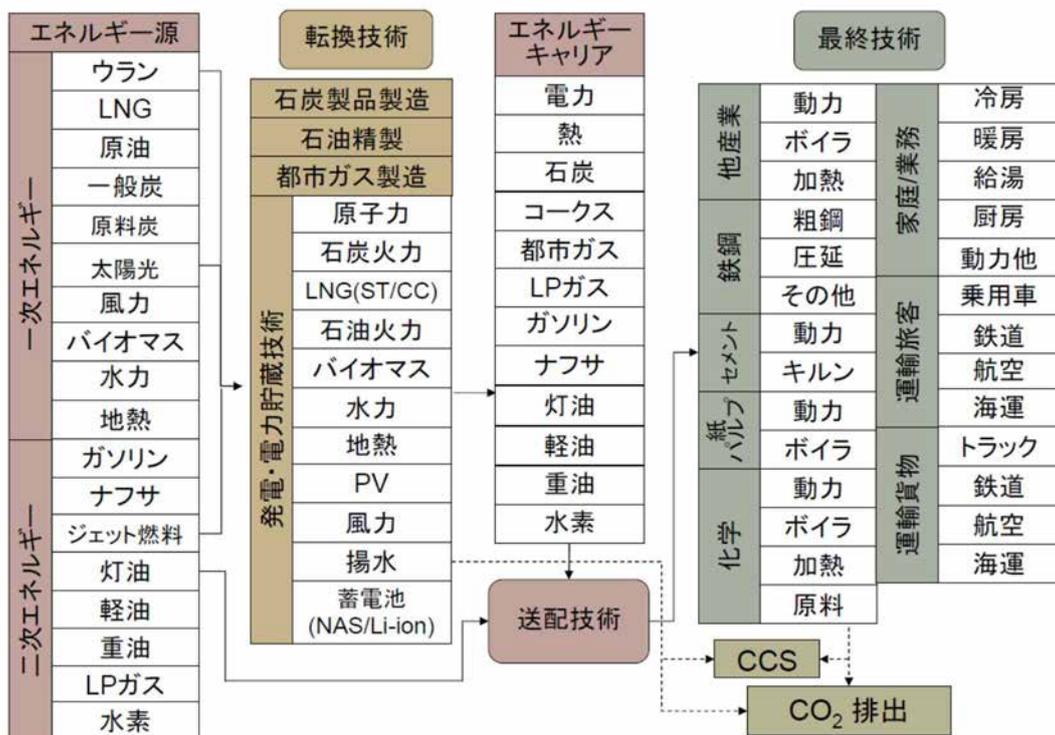


図 A1-1 基準エネルギーシステム

3. CO₂ 排出量の削減比率に伴う検証

図 A1-2 に、条件(A)-(D)における5月の関東地方における発電プロファイルを示す。(C)691Mt-CO₂@2050年では、おおむね需要曲線に沿って電力が供給されており、昼間のVREの余剰分は主にEVの充電に充当されている。夜間のVRE不足分はLNG火力で賄われている。(B)417Mt-CO₂@2050年のケースでは、晴天時におけるPVの余剰が顕著だが、夜間のVRE不足時にはLNG火力の導入が許されている。(A)238Mt-CO₂@2050年となると、天候が荒天でない限り電力は余剰状態にあり、昼間の余剰分はEV充電、貯蔵用蓄電池、熱利用(FIRES)に振り分けられている。荒天時の電力供給は蓄電池、水素、アンモニア等非化石系にほぼ限定される。(D)238Mt-CO₂@2050年かつVRE50%以下の条件では、晴天時はVREが余剰状態になって、蓄エネルギーとして蓄電池が選択される。一方、荒天時でも化石燃料系の発電が活用できず、主にバイオマスで補填されることになる。これら一連のシミュレーション結果によって、VREの導入を促進するための蓄エネルギーや脱炭素化技術のイノベーションが脱炭素化に向けて不可欠であることがわかる。

図 A1-3 に CO₂ 排出量の内訳を示す。CO₂ の排出量削減が進むにしたがって、発電の占める排出量は減少し、(A)238Mt-CO₂@2050年ではわずか0.6%となる。すなわち、需要側の電化促進が脱炭素化に対して有効であることがわかる。

図 A1-4 に各ケースの発電量の推移を示す。全体の発電量に占める VRE の割合は(A)59%、(B)35%、(C)20%となった。また、VRE によって CO₂ 排出量が少ないケースほど、発電総量は増える傾向となっている。

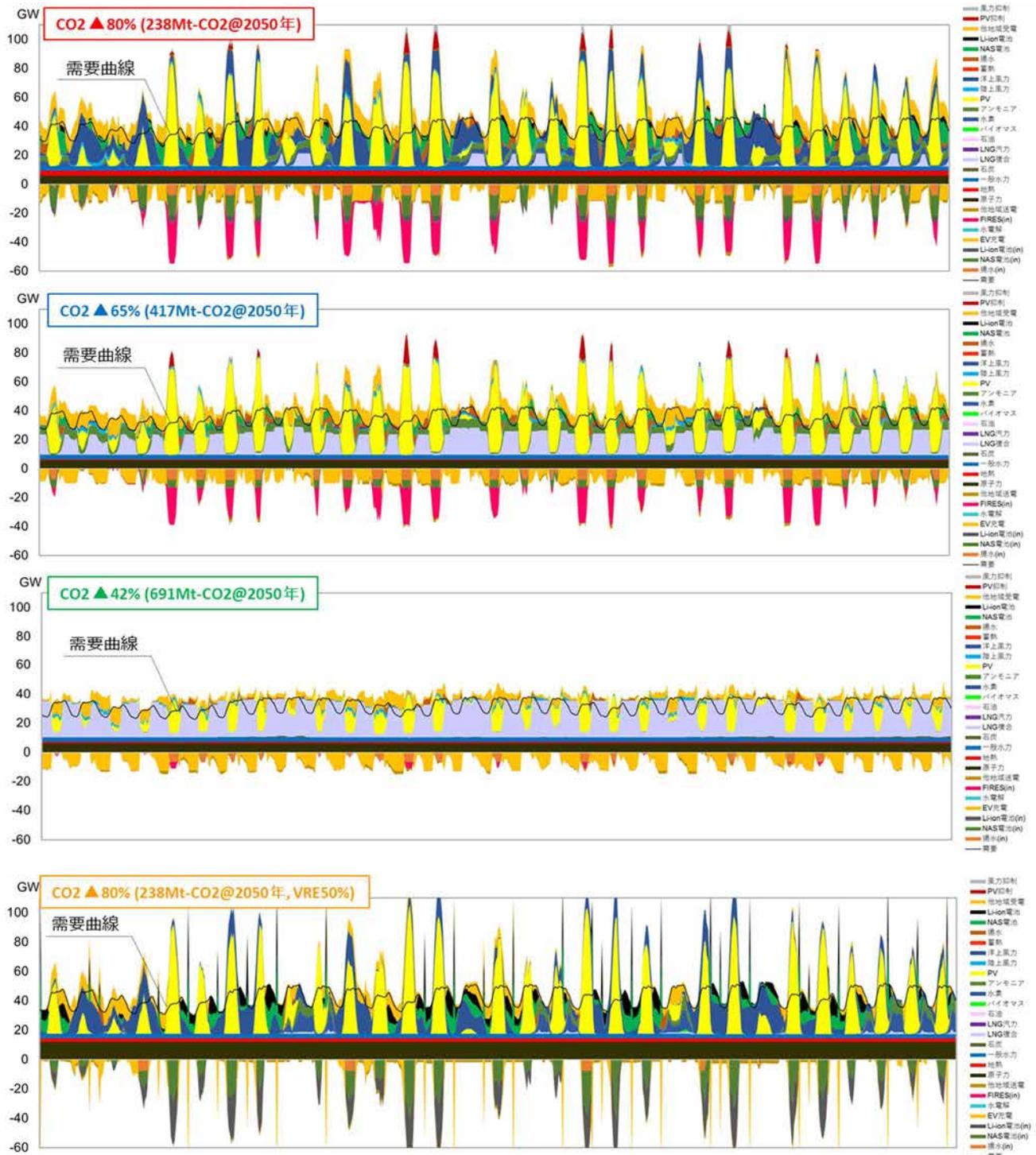


図 A1-2 CO₂ 削減量に対応する電力需給運用（5月・関東地方）

また、(A)では VRE が単調増加し、この変動を熱や蓄電を活用して吸収しながら、CO₂ 80%削減を達成している。一方、VER 導入が停滞する(D)では、水素やバイオマスなどの建設時間を伴う非化石燃料発電を選択することになり、これら出力安定型の再エネを早期導入することが肝要である。

図 A1-5 に全エネルギー消費量に占める電力発電分の内訳を示す。省エネなどの運用効率化でエネルギー消費量が減少するとともに、(A)および(D)では 2050 年時点の電化率が 37%まで進展する。

4. 技術選択モデルによるシナリオ定量化のまとめ

(ア) 電力需給運用

CO₂ 削減量が 50%程度までは需給バランスがとれており、VRE 余剰分は EV 充電に充当される。さらに脱炭素化が進展すると、VRE の余剰が晴天時に定常的に発生し、FIRES をはじめとする各種蓄エネルギーを必要とする。VRE 導入が停滞した場合は、CO₂ 削減のために非化石燃料の電源としてバイオマスや水素が選択される。また、荒天時の電力供給は主にバイオマスが担う。

(イ) CO₂ 排出量▲80%における発電部門の姿

CO₂ 排出量▲80%のエネルギーシステムでは、発電部門からの CO₂ 排出量は 1%以下となる。再エネの割合は 77%に達し、VRE は 60%となる。省エネによって消費エネルギーは削減され、電化率は 2050 年で 45%に達する。

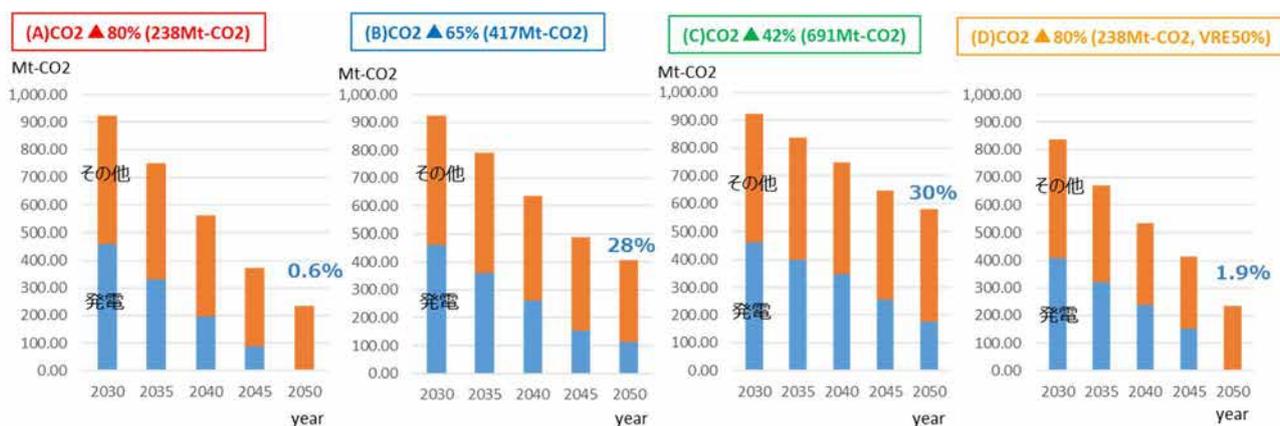


図 A1-3 全部門に占める発電部門の CO₂ 排出量の割合

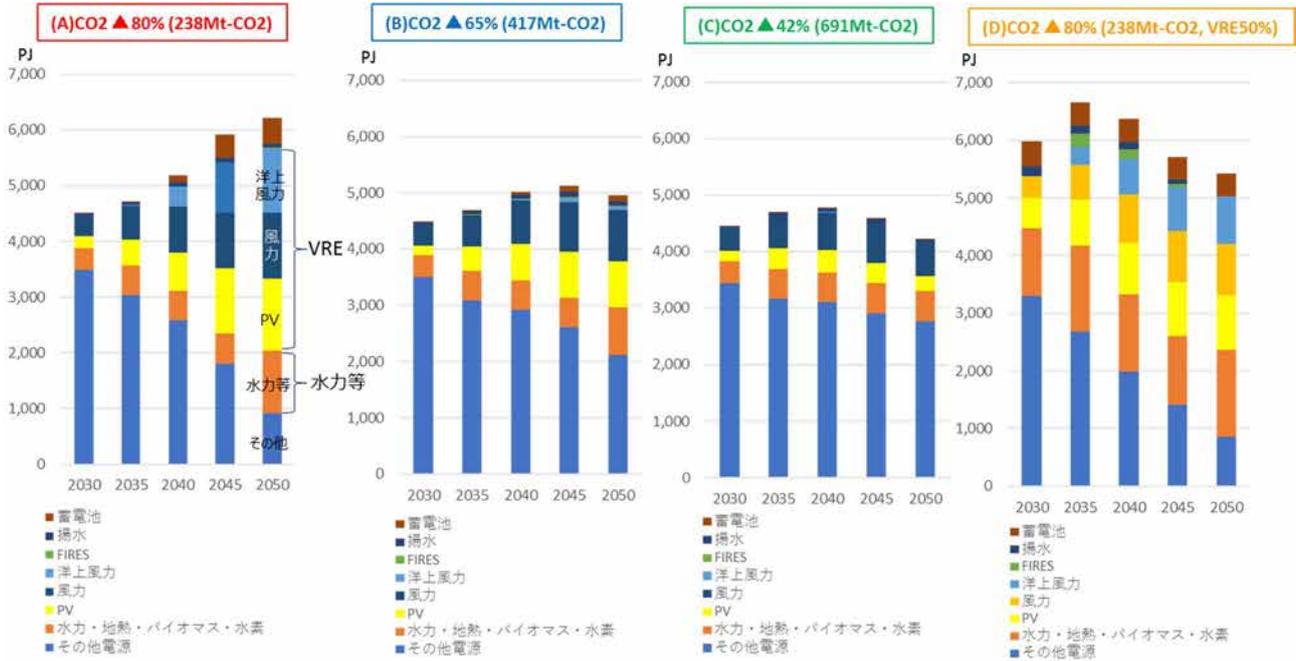


図 A1-4 各ケースに対応する発電部門における発電量

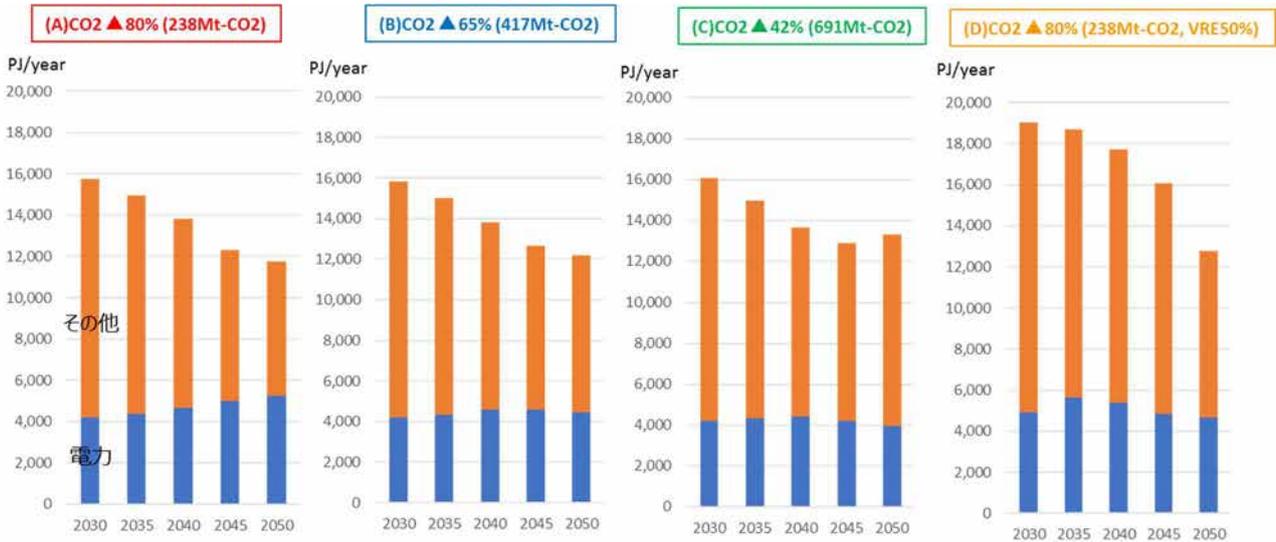


図 A1-5 CO₂ 削減量に対応するエネルギー消費量に占める電力部門の比率

【付録 2】 ステークホルダが評価に活用するユースケースおよび必要な情報・データ

評価プラットフォームのあり方を具体化するために、多様なステークホルダが評価に活用するユースケースを抽出し、またユースケースごとに評価に必要なデータを表 A2-1, A2-2 のように整理した。表では、各ユースケースで使う解析ツールと評価指標、および解析に用いる入力データを示している。入力データにおける「共通データ」は、設備構成から決まる「実績値・性能値」と、これまでに蓄積された計測データ「計測値」で構成される。また、「個別準備データ例」はシナリオなどに基づいて想定する値であり、系統構成の変更や再エネ導入量などの「将来想定」と、需要や気象などを仮定した「みなし値」で構成される。

表 A2-1 情報・データ利用マップ(1/2)

ユースケース			#	1	2	3	4		
目的	内容			ビジョン・政策提言	系統制御・運用 ・ルールの提案	託送評価	再エネ発電の 事業性評価		
	ステークホルダ			国民/大学/シンクタンク/メディア/ 立法府/規制機関	大学/研究機関/規制機関	大学/規制機関/送配電事業者	風力事業者/太陽光事業者/ 送配電事業者		
	使用例			・将来の環境・エネルギー戦略の検討と提言 ・再エネ導入促進やそれに向けたインセンティブ制度の検討	・新しい系統制御手法の提案(電圧、周波数、安定性の維持など) ・運用基準/ルールの提言	・将来の電力システムにおける託送料金のあり方を検討 ・託送による送配電線路の混雑推定 ・送電線の設備計画	・年間発電量/出力制御量の推定 ・連系対策費用の算出		
	解析ツール	供給信頼度評価			✓	✓	—	✓	
		需給運用計画(UC,ELD)			✓	✓	✓	—	
		電圧安定性			✓	✓	✓	✓	
		周波数安定性			✓	✓	—	—	
同期安定性			✓	✓	✓	✓			
過渡現象			—	✓	—	✓			
出力	評価指標(KPI)								
	燃料費(年間改善量)			✓	—	✓	—		
	CO2排出量(環境性)			✓	—	—	—		
	再エネ発電・出力抑制量			✓	✓	—	✓		
	再エネ対策コスト			✓	✓	—	✓		
入力	共通データ	実績値・性能値	インピーダンスマップ	275kV以上の詳細系統	1	○	—	○	○
				66/72kV以上詳細系統	2	—	—	○	◎
				特定地域配電系統	3	—	○	○	○
			発電機	発電容量・場所	4	◎	◎	○	—
				制御・プラント系動特性	5	○	—	—	—
				燃料消費特性	6	○	○	—	—
		再エネ	発電実績	7	○	○	○	—	
			制御・マシン系動特性	8	○	—	—	○	
			需要	需要(157kV以上)	9	○	○	—	—
		需要(66kV)		10	—	—	—	○	
		電圧・周波数特性		11	○	○	○	○	
		エリア	動特性		12	○	—	—	○
	LFC制御系			13	○	○	—	○	
	周波数・連系線制御			14	○	○	—	○	
			系統	線路潮流(基幹系)	15	○	○	○	○
				線路潮流(地域系)	16	—	—	○	○
			発電・需要	スマートメータ	17	—	—	—	—
	分散電源発電量	18		○	—	—	○		
	個別準備データ例	将来想定	系統構成変更	19	○	—	—	○	
			再エネ容量	20	◎	○	○	○	
		みなし値	66kV需要	21	—	—	○	○	
			将来気象	22	○	—	—	○	

表 A2-2 情報・データ利用マップ(2/2)

ユースケース			#	5	6	7	8		
目的	内容			分散電源連系の影響評価	調整力・アンシラリー事業性評価	P2Pエネルギー取引事業性評価	EV充電インフラアセスメント		
	ステークホルダ			大学/送配電事業者	地域エネルギー事業者/発電事業者/送配電事業者	一般需要家/アグリゲータ/送配電事業者	EV事業者/都市・街区/配電事業者/地方自治体		
	使用例			・系統連系時の安定性・信頼性評価	・時間毎の調整力(kW、ΔkW)の予測 ・調整力提供による安定性・信頼性貢献度の定量評価	・将来の事業シナリオ分析 ・P2P取引による送配電網利用費用の妥当性検証	・充電インフラ設置申請時のアセス(電力品質、経済効果) ・連系点の過負荷や電圧変動の推定 ・充放電シフトや無効電力制御の効果試算		
	解析ツール	供給信頼度評価			✓	—	✓	—	
		需給運用計画(UC,ELD)			—	—	✓	—	
		電圧安定性			✓	✓	—	✓	
		周波数安定性			✓	✓	—	—	
同期安定性			✓	✓	—	✓			
過渡現象			✓	—	—	—			
出力	評価指標(KPI)								
	燃料費(年間改善量)			—	—	—	✓		
	CO2排出量(環境性)			—	—	✓	—		
	再エネ発電・出力抑制量			✓	✓	✓	—		
	再エネ対策コスト			✓	✓	✓	✓		
アンシラリーサービス価値			—	✓	✓	✓			
入力	共通データ	実績値・性能値	インピーダンスマップ	275kV以上の詳細系統	1	○	—	—	—
				66/72kV以上詳細系統	2	◎	○	○	○
			発電機	特定地域配電系統	3	◎	○	○	◎
				発電容量・場所	4	○	○	—	—
				制御・プラント系動特性	5	—	—	—	—
				燃料消費特性	6	—	—	—	—
		再エネ	発電実績	7	○	○	○	—	
			制御・マシン系動特性	8	○	○	—	—	
		需要	需要(157kV以上)	9	○	—	—	—	
			需要(66kV)	10	○	—	○	—	
			電圧・周波数特性	11	○	○	○	—	
			動特性	12	—	—	—	○	
		エリア	LFC制御系	13	○	○	—	—	
			周波数・連系線制御	14	○	○	—	—	
	系統								
	計測値	系統	線路潮流(基幹系)	15	—	—	—	—	
			線路潮流(地域系)	16	○	○	○	—	
		発電・需要	スマートメータ	17	—	—	○	○	
			分散電源発電量	18	○	○	○	○	
個別準備データ例			将来想定						
系統構成変更			19	○	—	—	—		
再エネ容量	20	○	—	○	—				
みなし値	66kV需要	21	○	—	○	○			
	将来気象	22	○	—	○	—			

【付録3】シミュレータ評価における解析方法・解析モデル

5.4 節で実施したシミュレーションの解析方法・解析モデルについて説明する。VRE 導入拡大に対応した系統構成の検討を目的とするため、できるだけ実際の構成に忠実なモデル化を進めた。ここでは、Google map を活用して送電線をトレースし、系統マップを作成した。また、発電機モデルに電気学会標準モデルを用いるなど、多くの仮定も含んでおり、詳細検討の際にはデータ共有が前提となる。需給バランスや標準的な予備力 8%を考慮して発電計画 UC を実施し、余剰電力の解消、線路・変圧器の過負荷解消、および安定性の確保によって、VRE の出力制御量を求めた。

図 A3-1 に、解析方法・解析モデル、前提・制約条件などを示す。



*1)北米 WECC 系統解析モデルを参照

UC: Unit Commitment, AVR: Automatic Voltage Management, PSS: Power System Stabilizer, IM: Induction Motor, WECC: Western Electricity Coordinating Council, FRT: Fault Ride Through

図 A3-1 解析方法・解析モデル