

地域における再生可能エネルギーの主力化に向けた 技術システム案の生成

Alternative generation on technological and systematic options
for regional transition enhancing renewable energy

菊池 康紀^{1,2*}・五十嵐 悠²・兼松 祐一郎²

Yasunori KIKUCHI^{1,2*}, Yu IGARASHI² and Yuichiro KANEMATSU²

¹ 東京大学 未来ビジョン研究センター

² 東京大学 「プラチナ社会」統括寄付講座

¹ Institute for Future Initiatives, The University of Tokyo

² Presidential Endowed Chair for “Platinum Society”, The University of Tokyo

摘 要

持続可能な開発目標や地域循環共生圏、Society 5.0 など、様々な将来ビジョンが提示される中、実際に変革を起こすためにはマクロな分析に基づくミクロな設計が不可欠となる。本稿では、地域において再エネが主力エネルギー源となるために乗り越えねばならない課題について議論する。特に、再エネ関連の技術システム開発状況を踏まえ、地域で選択できるオプションの生成と、その中から実際に導入を検討するために必要なシステム設計・評価を実施するにあたり必要な要素について、著者らのこれまでの成果と地域における活動から考察する。

キーワード：産学公の協創、システム設計と評価、シナリオ分析、分散型エネルギーシステム

Key words：collaboration of industry, academia, and public organization; system design and assessment; scenario analysis; decentralized energy system

1. はじめに

パリ協定 (UNFCCC, 2015) や持続可能な開発目標 (SDGs: Sustainable Development Goals) (United Nations, 2015)、バイオエコノミー (European Commission, 2018)、第5期科学技術基本計画における Society 5.0 (内閣府, 2016)、第5次環境基本計画における地域循環共生圏 (環境省, 2018)、プラチナ社会 (プラチナ構想ネットワーク, 2012) など、将来社会のビジョンに関する多様な提案が国内外で出されている。いずれもより良い社会システムが満たす要件や姿、含まれている機能について示しているものであり、気候変動緩和のための低炭素化と適応のための技術開発、デジタル革命、誰ひとり取り残さない社会、地域資源を活かした自立・分散型の支え合う社会、自由な選択が許される資源の心配がない全員参加型の社会など、細部に違いはあるものの、共通点も多い。いずれも特定の学術分野だけで到達できる将来社会ビジョンではないことは、それぞれの定義からも明らかであり、要素技術、技術を

組合せた技術システム、それを活用する社会・経済システムなどといった異なる層を跨いだ熟議が必要といえる。国内外におけるエネルギーに関する現状については既存の記事 (古山, 2019a; 2019b) に解説をゆずるが、特に、2013年比の温室効果ガス (GHG) 排出削減の目標として、2030年に26%削減をパリ協定において約束し、2050年に80%削減することを閣議決定したことは、国内のエネルギーシステム設計において強い目標となっている。ただし、2030年までの蓋然性を有した26%削減シナリオの延長線では2050年の80%削減に到達できないと言われており、従来型のエネルギーシステムにおける技術革新では不十分といえる。

環境・エネルギー分野においてなされてきた研究開発はこうした将来社会ビジョンへ向かうための手段となる。特にエネルギーについては、蓄電や蓄熱といったエネルギーとして貯蔵する蓄エネルギー技術や、電力を水素やメタンなどのキャリアに変換して利用する Power-to-gas など、基礎研究の成果が蓄積されてきており、エネルギーシステムにおける太

受付：2019年10月15日、受理：2019年12月26日

* 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp

陽光(PV)や風力といった変動・分散型再生可能エネルギー(変動性再エネ)のさらなる導入拡大に向けて、エネルギー製造・貯蔵／運搬・利用に関する検討が活発化している(JST-CRDS, 2019)。技術の研究開発が進む一方、導入拡大によるエネルギーネットワークへの影響は既に顕在化してきている。2019年現在の優先給電ルールにのっとり、変動性再エネの出力抑制が既に実施されており(九州電力, 2019)、出力抑制事例が無かったとしても多くの地域で変動性再エネの系統連系に関する回答保留が起きている。送配電網インフラの今後の管理方針など政策的な戦略も必要になる中、周波数変動に対する調整力の設置や新しい市場メカニズムに合わせた電源制御、需要・供給予測に基づくデマンドレスポンスなど、新たな可能性が提示されてきている。研究開発成果の適材適所な配置と応用、社会実装へ向けた具体的なアクションが必要であり、ライフサイクルで要素をシステムとしてつなぎ合わせる設計と、適切な時間的・空間的範囲の設定に基づいた評価が不可欠といえる。しかし、変動性再エネの調整や新たな市場メカニズムの導入、地域でのアグリゲータの必要性など、潜在化・顕在化している課題はいずれも複雑化してきており、対策となる技術システム案も多様に存在し、複雑化してきている。また、エネルギーシステムにおける技術システム案の中には、数年から10年以上の稼働を前提として導入を検討すべきものもあり、変化し続ける社会の中で技術システムを選択することが困難な状況となっている。

SDGs Goal 7でアクセシビリティを確保すべきとされているエネルギーは、「affordable, reliable, sustainable, and modern energy」とされており、これは途上国・先進国問わず、energyを持続的に供給・利用するために必要な観点の一部と言える。これが示すエネルギーの具体的な特徴は多様に挙げることができるが、例えば、affordableとは手頃なエネルギーと解釈でき、安価であるということだけでなく、任意の地域において入手しやすく、変換技術や資源に対する社会の導入障壁が低いようなエネルギーといえる。地域循環共生圏において活用すべきとされている地域資源は、affordableな資源ともいえる。さらにreliableであるためには、供給断絶リスクが低く、防災・減災につながるエネルギーであるべきであり、それが枯渇性の資源の不使用もしくは循環によってsustainableに利用できることが要求されている。地域循環共生圏が目指す基本方針である経済社会システム、ライフスタイル、技術などあらゆる観点からのイノベーション創出や、経済・社会的課題の同時解決に資するようなエネルギーの選択肢は、modernで多様な形が地域ごとに設計されるべきといえる。地域特性を考慮した最適システムの設計が必須である。

本稿では、地域において再エネが主力エネルギーとなるために乗り越えねばならない課題について議論する。特に、再エネ関連の技術システム開発状況を踏まえ、地域で選択できるオプションの生成と、その中から実際に導入を検討するために必要なシステム設計・評価を実施するにあたり必要な要素について考察する。

2. 将来社会のシナリオ分析と環境・エネルギー分野の課題

社会課題は時間的・空間的に広範囲なスケールからの論理構造の解明と目標に向けたビジョニング・シナリオ分析が必要といえる。図1に将来社会のシナリオ分析を概念的に示す。SDGsやパリ協定といった枠組みには2030年のような目標となる年が設定されている。社会のビジョンはこれらの枠組みよりも遠くの将来に存在するものといえる。このとき、時間的に連続なビジョンへ到達するシナリオを描くことが求められる。シナリオ分析には大きく課題解決型の思考が可能となるフォアキャストと、目標追求型の思考が可能となるバックキャストといった種類がある。SDGsやパリ協定における目標、Society 5.0、地域循環共生圏といったいわゆるBig pictureは、空間的にマクロで時間的に長期的なスケールから分析されるものであり、バックキャストによる目標追求によって到達可能なシナリオを探索することが必要といえる。一方、変動性再エネの出力抑制や回答保留、バイオマス資源の調達経路の確保、低炭素化技術の開発と導入など、現況がこのまま進むとどうなるのかをBusiness-as-usualシナリオとして対策を検討するフォアキャストによる課題解決は、空間的にミクロで時間的に短期的なスケールでの設計を必要とするものである。課題の解決は必要ではあるが、目標への到達には十分ではない。マクロな分析に基づくミクロな設計を可能にする方法論が必要といえる。

環境・エネルギー分野においては、多様な研究開発とともに、課題も確認されている(JST-CRDS, 2019)。例えば、環境分野においては、食料生産に関しては水—エネルギー—食料の依存性(nexus)が課題となっており(FAO, 2014)、農業由来の環境負荷が制御しづらいこと(Schnoor, 2014)と合わせ、モデル化(例えば、Bazilian *et al.*, 2011)や特定技術の寄与の分析(Kikuchi *et al.*, 2018)が成されてきている。再エネに関しては低炭素化・化石資源消費削減などが主な環境影響とされることが多いが、環境の問題は地球温暖化だけではなく、多様な課題があることが分かっており、再エネ主力化においても、例えば、レアメタル等必要資源のリサイクルなどは関連する課題といえる。一方、エネルギー分野の課題は、大きくエネルギー供給、利用、ネットワークに

分割することができ、特に、再エネ関連技術については低コスト化と変動調整に関する研究課題が多い(JST-CRDS, 2019)。ここで、例えば低コスト化について研究課題が示されてはいるものの、本来、エネルギーシステムを更新していくにあたり、技術システムの耐用年数が長かったり、インフラを伴うものであったりするため、図1に示すような長期的な分析と視座が必要といえる。図2は、例として均等化発電原価として長期的な分析ができていない事例(Koyama, 2019)を示した。従来型の大規模化石由来火力発電や原子力発電については、燃料価格の上昇や安全対策の徹底により、燃料関連・発電所関連の均等化発電原価が上昇傾向にある。一方、変動性再エネ由来の電源の例として記載されている太陽光発電については、現在、低コスト化が進んでいる状況であり、既にいずれの発電方式よりも安価になる見込みとなっている。図2には調整力によるコストが含まれていないが、これらの電源が Affordable なエネルギー源として利用できるようになったと

き、調整力が他の発電方式を超えるほどにコストを必要とするとは考えにくい。现阶段において導入量が化石由来の発電技術と比較して少ないものの、再エネ関連技術は現在技術開発が行われている中で低コスト化し得る技術システムオプションであり、既に技術開発による低コスト化が多く成されてきた化石資源由来の電源と比較して将来更に低コスト化し得る可能性があるといえる。Sustainable energy を実現する将来ビジョンに向けて、中長期で検討すべき技術システム案として再エネに関する技術はコストの観点でも有力になり得るものといえる。

3. 再エネ関連の技術システムオプションと地域における挑戦

3.1 次世代のエネルギーネットワーク

発電量 [Wh] ベースで賦存量があり、低コスト化が実現したとしても、出力抑制や回答保留といった問題が顕在化しているとおり、電力 [W] ベースでの課題が解決されない限り、実際に社会に再エネ技術を導入できるかどうかは明らかにはならない。再エネを主力化するには、従来の大規模で集中型の電源からエネルギーが供給されるネットワークに加え、中小規模で分散型の電源や蓄エネ・変動調整施設が連系された分散型ネットワークが必要とされており(Kato *et al.*, 2016)、研究課題となっている(JST-CRDS, 2019)。図3に再エネを主力化する分散型エネルギーシステムの概要を、特定の技術システム案を用いた例として示す。現在の国内電力システムは10電力会社の電力供給域によって事実上区切られており、周波数の違いなどもあることから、電力融通がなされている(Koyama *et al.*, 2014)。総発電量の多くは大規模集中型の発電所から数十万Vの電圧で送電され、順次電圧を低下させながら各地へ送電される。その後、21~22kV程度まで変電されて配電変電所に到達し、6,600Vとなって配電される。分散型のエネルギーシステムとは、主にこの6,600Vの配電網内などで電力を利用することなどを意図しており、既に太陽光発電は6,600V内で利用できる電源となっている。従来型の大規模集中

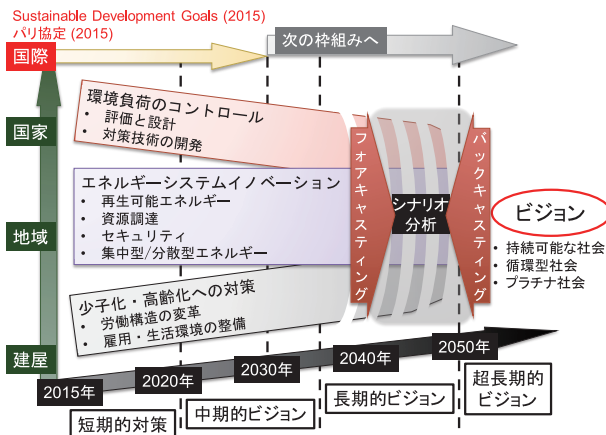


図1 将来社会のシナリオ分析の概念。

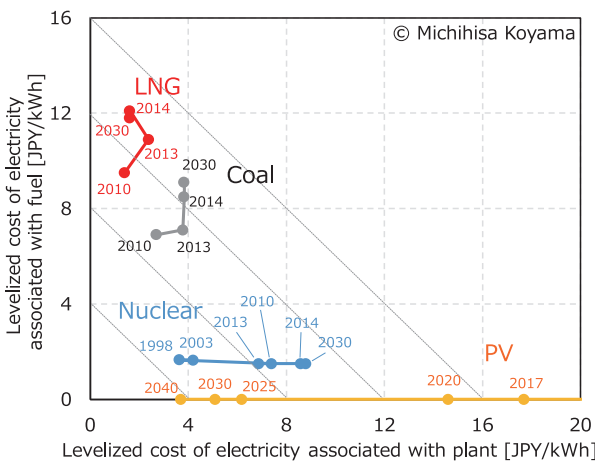


図2 主な電源の均等化発電原価の分析。(既報(Koyama, 2019)からの抜粋)
縦軸：均等化発電原価(燃料関連分)
横軸：均等化発電原価(建屋、プラント関連分)

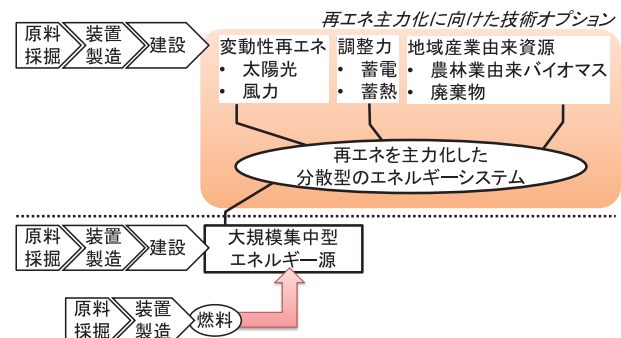


図3 再エネを主力化する分散型エネルギーシステム。

型発電は、輸入されるバイオマスや再エネ由来エネルギーキャリアなどによる稼働があり得るため、全てが分散型エネルギーシステムになるとは言えず、大規模集中型のバイオマス火力や輸入カーボンフリー水素ガスタービンなどによる化石資源代替がありえる。分散している太陽光や小規模な国内再エネ由来発電技術を、最大限利用するためには、集中型の既存のシステムと、分散型システムが適切に連携できる仕組みが必要といえる。このとき、分散型エネルギーシステム内では、変動性再エネと調整力による電力ネットワークに加え、地域産業由来資源などによる熱電併給施設なども接続すべきである。太陽光発電のような変動性再エネは、設置後には保守以外に特に発電のための作業を必要としない。ただし、変動を調整する能力がエネルギーシステムに必要となるため、蓄エネ等の技術が必要になり得る。このとき、農林業由来バイオマスや廃棄物など、地域産業由来の資源由来のエネルギー源を連系させることで、太陽光・風力とバイオマスの中で再エネ利用率を高めるための発電量・電力の最適組み合わせを検討することができる。

農林業の副産物であるバイオマスは、電力だけでなく熱源としても活用されてきたものであり、分散型エネルギーシステムにおいて太陽光・風力などの変動性再エネの変動調整だけでなく、熱としてのエネルギー需要に対する低炭素化・再エネ主力化オプションとなり得る。一般に単価が低く大量に入手できるバイオマス資源や、処理費の掛かる廃棄物を活用して付加価値化することは農林業の基盤強化につながり得るものであり、地域の社会経済的循環の強化にもつながり得る。すでに活用されている堆肥化等の用途と合わせて、適切なバランスでバイオマスをエネルギーに利用することが期待されているが、現在、固定価格買取制度などによって増加しているバイオマス発電等の中には、地域に資源があるにも関わらず、輸入バイオマスを用いて発電を行うものもあり、コストや社会受容性といった課題の解決が不可欠である。

3.2 地域において必要な挑戦

3.2.1 現状の計測と把握

次世代エネルギーネットワークを築くためには、現状の緻密な把握とモニタリングが必須といえる。図4に例として都道府県別の乗用車密度と1台あたり年間平均走行距離を示す。電気自動車や燃料電池車といった次世代型の自動車1台がライフサイクル全体で環境負荷を削減できるかどうかは、製造に掛かる環境負荷と走行に掛かる環境負荷の合計において従来の内燃機関式自動車と比較して優位である必要がある。平均走行距離が大きい地域では、製造に掛かる環境負荷が大きくても、走行に掛かる環境負荷の低減により、次世代型の自動車優位になる可能性がある。乗用車密度が大きければそれだけエ

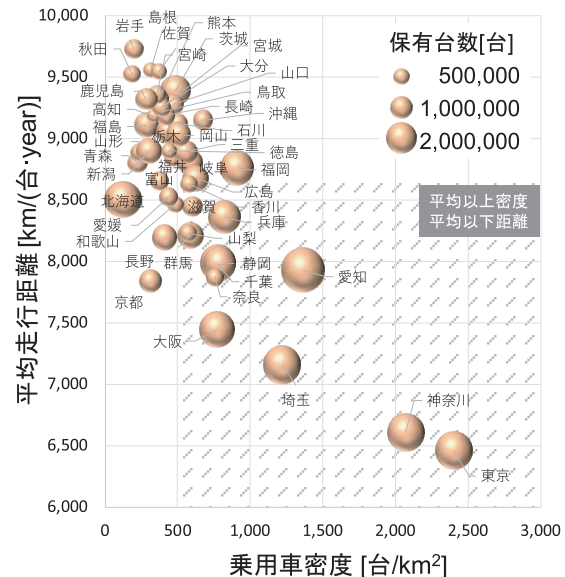


図4 都道府県別の乗用車密度と1台あたり年間平均走行距離。(国土交通省(2019), 自動車検査登録情報協会(2019)統計データより著者作成。縦軸は6,000 km/(台・year)はじまりとなっている。)

ネルギー補給施設が必要となる一方、バッテリーを搭載する自動車であり日中の稼働率が低ければ、地域の蓄エネとして機能する Vehicle-to-grid のインフラともなり得る。このように任意の地域でどのような自動車保有・利用形態を有しているのかによって、エネルギーネットワークの選択肢が変わり得る。しかし、統計上入手できる情報には限界があり、基礎自治体レベルでの保有・利用形態、昼夜・平日/休日の差、時間帯別の稼働状況など、実際にエネルギーネットワークを設計・評価するために必要となるようなデータは計測されていない。

地域に立地する産業は地域資源の1つであり、産業を活用したエネルギーネットワークを検討できるが、任意の地域にどのようなエネルギー需要の産業が立地しているかについても、得られる情報としては不足している。図5に例として産業別の間接 GHG 排出総量と事業電力由来 GHG 比率、さらに事業所当たり GHG 排出規模を示す。鉄鋼や石油・化学工業、窯業土石、紙・パルプについては、熱・電配分後の間接 GHG 総排出量も比較的大きく、1事業所あたりの排出も大きい。また、事業用電力由来の GHG 排出比率が小さいことから、自家発電等からの排出が大きいことがわかる。一方、機械・金属加工などは事業電力由来の GHG 排出が大きいことから、グリッドからの電力需要が大きいことがわかる。

図6に民生部門における間接 GHG 排出総量と事業電力由来 GHG 比率を示す。民生部門におけるエネルギー需要は、主に、空調、照明、厨房、給湯、動力である。事業電力由来の比率は比較的高く、いずれも電化がしやすい需要であることから、事業電力の低炭素化が進むことで、結果的に民生部門の低炭素化も進み得るといふ分析結果も得られている

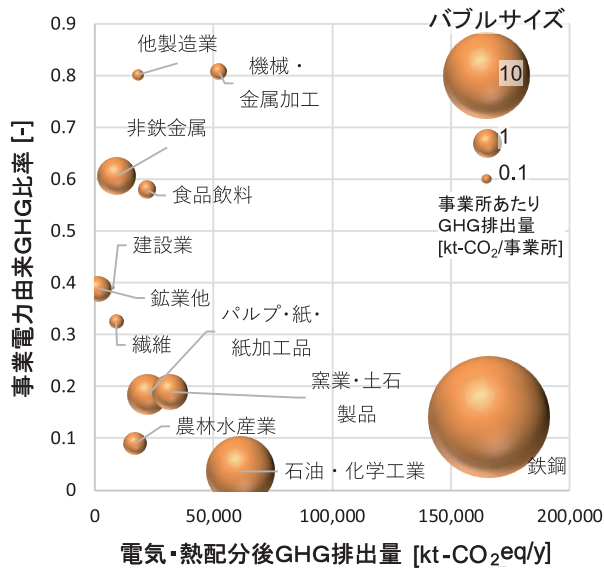


図5 産業別の間接 GHG 排出総量と事業電力由来 GHG 比率, 事業所あたり GHG 排出規模. (温室効果ガスインベントリオフィス(2019)及び経済センサス(経済産業省, 2019)より著者作成)

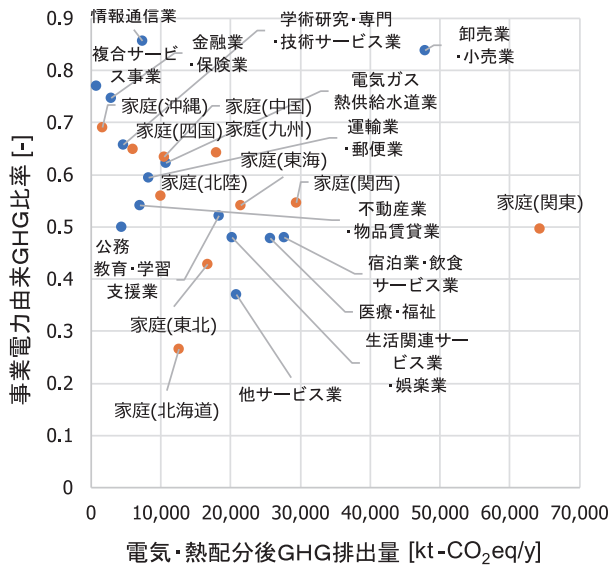


図6 民生(家庭・業務)における間接 GHG 排出総量と事業電力由来 GHG 比率. (温室効果ガスインベントリオフィス(2019)及び総合エネルギー統計(経済産業省資源エネルギー庁, 2019)より著者作成)

(Kikuchi *et al.*, 2014). 得られているデータから, 家庭においては, 寒冷地域における暖房需要の大きさから, GHG 排出における事業用電力由来の比率が低くなっているなどの地域差が確認できる.

3.2.2 多様化する技術システムオプションの把握

地域の現状を把握するとともに, 選択可能な技術システムオプションを把握する必要がある。地域資源を活用した技術システムオプションは数多く提案されてきており, 多様化している。例えば, 変動性再エネのうち, 特に太陽光を活用するシステムとし

て蓄電池援用型の水素製造システムは調整力を必要とせず, オフグリッドで太陽光を資源として利用できるが, この経済性(Kikuchi *et al.*, 2019)や環境性(Sako *et al.*, 2019)の評価が実施されており, 技術開発が現存する技術ロードマップに沿って進むことで実用可能となり得ることが分かってきている。風力については, 蓄熱を活用した風力熱発電を製紙工場に導入した場合の効果について検討がなされ(Yamaki *et al.*, 2019), 風力の変動を吸収し, 一定の電力出力が可能になり得ることが示されてきている。このように変動性再エネについても, 系統に連系しない形で利用する技術システム案がすでに提案されつつある。バイオマスを活用する際にも, 国内の木質バイオマスにおける課題が整理されており(Goh *et al.*, 2019), 地域の森林計画に合わせた木質バイオマスエネルギープラントの導入に関する設計事例(Kanematsu *et al.*, 2017)が存在している。特に地域の産業由来バイオマスを活用することにより, 産業を中心とした産業共生が, 民生部門も含めた地域のエネルギー自給/他地域への供給を促進し得ることが示されてきており(Kikuchi *et al.*, 2016), その地域経済への波及も明らかとなってきた(尾下ら, 2019)。産業排熱の蓄熱利用による産業・民生における化石資源消費を削減し得ること(Fujii *et al.*, 2019)や生活上発生する廃棄物である下水汚泥からも付加価値物質やエネルギーが回収できることが分かっており(Shimizu *et al.*, 2018), 未利用な資源の活用による効果が示されてきている。水素等エネキャリアを用い, 燃料電池車などの需要と合わせたとき, 地域によって差ができること(Shimizu *et al.*, 2019)だけでなく, 資源消費等の環境影響も明らかとなってきた(Shimizu *et al.*, in press)。

こうした技術システムオプションは, 地域別に向き不向きがあり, これを分析等によって明らかにすることが必須となる。このとき, 通常地域における意思決定において, 地域の選択肢を明確に示すとともに, 技術システムオプションごとの導入効果を評価する仕組みが必要である。例として, 図7に示すような地方公共団体における検討委員会の仕組みが存在している。現状調査や代替案生成, シミュレーション, 評価においては, 最先端の技術システムオプションが適切に検討対象として列挙されることが望ましく, これを支援する情報基盤の開発(兼松ら, 2017)などが有効といえる。

情報基盤が持つべき機能としては, 地域特性に合わせた技術システムオプション候補案の生成とシミュレーション, 評価である。ここで, 地域とは, 単純な行政区分で表現されるものだけでなく, 再エネが有効に利用できる領域として定義する必要がある。ただし, 統計データの限界や, 意思決定ができる範囲の制限などがあり, 複数の基礎自治体が広域的に結合して得られる範囲を探索することが必要で

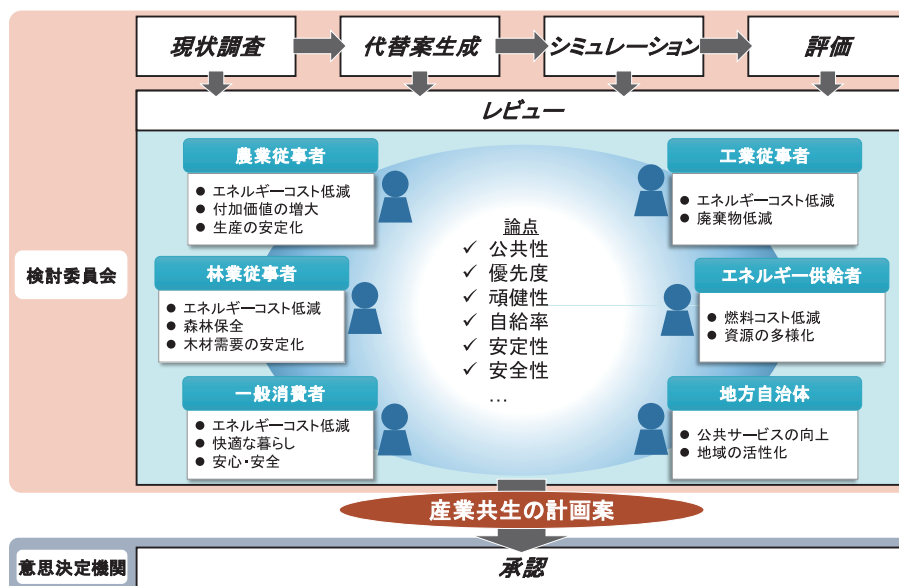


図7 地域における検討の例：地方公共団体における検討委員会の概要。(兼松ら(2017)より抜粋)

ある。例えば、種子島は一市二町の島であるが、地域資源は島で共有されており、島の単位で広域的に技術システムオプションを検討すべきである(菊池ら, 2016)。森林資源など、基礎自治体単位ではなく、その地域の地形などに合わせて収集しやすい範囲を検討し、大規模化することで熱機関等のスケールメリットを得ることなどが有効となった事例もある(例えば、会津「The 13」事業協議会, 2017)。このように、地域の区分を可変させたときに再エネの利用効率が最適となり得る範囲を特定できる仕組みを有することが、地域特性を考慮しながら、再エネを主力エネルギー源として活用するシステムの設計へとつながる。生成される技術システムオプションは最先端のものも当然ながら含み、実用化に至っていない技術であっても、地域特性に適合するのであれば、実証試験の実施などにつなげられるよう、技術システムオプション案が提示されることが、地域の変革を促す情報基盤として有用といえる。

4. おわりに：協創を前提としたプラットフォームの構築へ

再エネを利活用するエネルギーネットワークの地理的範囲は必ずしも基礎自治体の範囲とは限らず、広域的な連携が必要となる場合が多い。このため、特定の自治体や地方公共団体における検討委員会だけでは検討が不十分になる可能性もある。また、エネルギー技術システムオプションは日進月歩であるとともに、多様化しており、既存の俯瞰報告書(JST-CRDS, 2019)でもすべてを記載することは難しい。そのため、特定の主体が単独で技術システムオプションの全体を把握することは困難である。大学等研究機関や産業といった産学公が協創できるプラットフォームにより、こうしたエネルギーシステム

の改革が実行できるようになるといえる。人口の減少は一人当たりには活用できる土地面積の増大を意味する。人手が減る中でもデジタルトランスフォーメーションや産学公の協創により、地域資源を活用した強靱なシステムを設計していくことは不可能ではない。再エネ主力化に向けた最も大きな障壁の1つといえるのは、局所的な最適化に偏った技術やシステムの検討と評価結果の独り歩きがあり得る。オープンプラットフォームにより、産学公や基礎自治体といった既定の枠を超えた資源の利活用を検討することで、適切な技術を組合せたシステムの提案が可能となり得る。

謝 辞

本稿では科学研究費補助金(16H06126)と環境研究総合推進費(2-1910)における成果を含んでいる。

引用文献

会津「The 13」事業協議会(2017)環境・エネルギーで地域経済循環. <http://www.platinum-network.jp/pt-taishou2017/doc/shinrin.pdf>(2019年12月31日確認)

Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., Steduto, P., Mueller, A., Komor, P., Tol, R.S.J. and Yumkella, K.K.(2011)Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, 39(12), 7896–7906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039>

European Commission(2018)Bioeconomy. <https://ec.europa.eu/research/bioeconomy/index.cfm>(2019年4月11日確認)

FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)(2014)The Water-Energy-Food Nexus A new

- approach in support of food security and sustainable agriculture. <http://www.fao.org/3/a-bl496e.pdf> (2019年4月11日確認)
- Fujii, S., Horie, N., Nakaibayashi, K., Kanematsu, Y., Kikuchi, Y. and Nakagaki, T. (2019) Design of zeolite boiler in thermochemical energy storage and transport system utilizing unused heat from sugar mill. *Applied Energy*, 238, 561–571. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.104>
- Goh, C.S., Aikawa, T., Ahl, A., Ito, K., Kayo, C., Kikuchi, Y., Takahashi, Y., Furubayashi, T., Nakata, T., Kanematsu, Y., Saito, O. and Yamagata, Y. (2019) Rethinking sustainable bioenergy development in Japan: Decentralised system supported by local forestry biomass. *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00734-4>
- 自動車検査登録情報協会 (2019) 自動車保有台数. <https://www.airia.or.jp/publish/statistics/number.html> (2019年4月11日確認)
- JST-CRDS (Japan Science and Technology Agency-Center for Research and Development Strategy 科学技術振興機構 研究開発戦略センター) (2019) 研究開発の俯瞰報告書：環境・エネルギー分野 2019年 / CRDS-FY2018-FR-01. <https://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2018-FR-01.html> (2019年4月11日確認)
- 兼松祐一郎・大久保達也・菊池康紀 (2017) 農林業地域における産業共生の計画プロセスのアクティビティモデルとデータモデル. *化学工学論文集*, 43(5), 347–357. <https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.43.347>
- 環境省 (2018) 地域循環共生圏. <https://www.env.go.jp/seisaku/list/kyoseiken/index.html> (2019年4月11日確認)
- Kanematsu, Y., Oosawa, K., Okubo, T., Kikuchi, Y. (2017) Designing the scale of a woody biomass CHP considering local forestry reformation: a case study of Tanegashima, Japan. *Applied Energy*, 198, 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.021>
- Kato, Y., Koyama, M., Fukushima, Y. and Nakagaki, T. (eds.) (2016) *Energy Technology Roadmaps of Japan*, Springer, Tokyo.
- 経済産業省 (2019) 経済センサス. <https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/census/hyo.html> (2019年4月11日確認)
- 経済産業省 資源エネルギー庁 (2019) 総合エネルギー統計. https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/ (2019年12月31日確認)
- 菊池康紀・尾下優子・福島康裕 (2016) 帰結的ライフサイクル思考に基づく離島地域のエネルギーシステム設計. *PETROTECH*, 39(6), 461–467.
- Kikuchi, Y., Kimura, S., Okamoto, Y. and Koyama, M. (2014) A scenario analysis of future energy systems based on an energy flow model represented as functionals of technology options. *Applied Energy*, 132, 586–601
- Kikuchi, Y., Kanematsu, Y., Ugo, M., Hamada, Y. and Okubo, T. (2016) Industrial symbiosis centered on a regional cogeneration power plant utilizing available local resources: A case study of Tanegashima. *Journal of Industrial Ecology*, 20(2), 276–288. <https://doi.org/10.1111/jiec.12347>
- Kikuchi, Y., Kanematsu, Y., Yoshikawa, N., Okubo, T. and Takagaki, M. (2018) Environmental and resource use analysis of plant factories with energy technology options: A case study in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 186, 703–717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.110>
- Kikuchi, Y., Ichikawa, T., Sugiyama, M. and Koyama, M. (2019) Battery-assisted low-cost hydrogen production from solar energy: Rational target setting for future technology systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 1451–1465. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.119>
- 国土交通省 (2019) 自動車関連統計. http://www.mlit.go.jp/statistics/details/jidosha_list.html (2019年4月11日確認)
- 古山通久 (2019a) 次世代エネルギー技術の最前線. *パリテイ*, 34(1), 76–82.
- 古山通久 (2019b) 蓄電池を援用した低コスト再エネ水素製造システムの経済的合理性：フェルミ推定の試行的適用. *えねるみくす*, 98, 255–261.
- Koyama M. (2019) Toward economically rational hydrogen production from solar energy: from battery versus hydrogen to battery × hydrogen. In: Atesin T., Bashir S. and Liu J. (eds), *Nanostructured Materials for Next-Generation Energy Storage and Conversion*, Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-662-59594-7_16
- Koyama, M., Kimura, S., Kikuchi, Y., Nakagaki, T. and Itaokam, K. (2014) Present status and points of discussion for future energy systems in Japan from the aspects of technology options. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 47(7), 499–513.
- 九州電力 (2019) 過去の出力制御 実績. http://www.kyuden.co.jp/power_usages/out_ctrl_history.html (2019年4月11日確認)
- 内閣府 (2016) 科学技術基本計画. <https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html> (2019年4月11日確認)
- 温室効果ガスインベントリオフィス (2019) 温室効果ガスインベントリ. <http://www-gio.nies.go.jp/index-j.html> (2019年4月11日確認)
- 尾下優子・兵法 彩・大内田弘太郎・兼松祐一郎・福島康裕・菊池康紀 (2019) 技術導入による社会経済的影響

響の評価：種子島地域エネルギーシステムにおける産業連関分析の例. 日本 LCA 学会誌, 15(4), 360–376, <https://doi.org/10.3370/lca.15.360>

プラチナ構想ネットワーク(2012)プラチナ構想ハンドブック. <https://www.platinum-handbook.jp/> (2019年4月11日確認)

Sako, N., Koyama, M., Okubo, T. and Kikuchi, Y.(2019) Environmental and technoeconomic analyses of battery-assisted hydrogen production systems from photovoltaic power. International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems (IMPRES 2019), Kanazawa, October 21–23, 2019.

Shimizu, A., Okubo, T. and Kikuchi, Y.(2018) Simulation-based analysis of sewage sludge treatment considering regional, social, and technological characteristics. *Computer Aided Chemical Engineering*, 43, 1353–1358. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50237-0>

Shimizu, T., Tsukushi, Y., Hasegawa, K., Ihara, M., Okubo, T. and Kikuchi, Y.(2019) A region-specific analysis of technology implementation of hydrogen energy in Japan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(35), 19434–19451. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.128>

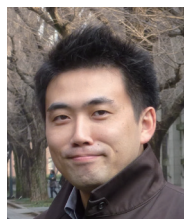
Shimizu, T., Hasegawa, K., Ihara, M. and Kikuchi, Y. (in press) A region-specific environmental analysis of technology implementation of hydrogen energy in Japan based on life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*.

Schnoor, J.L.(2014) Agriculture: The last unregulated source. *Environmental Science and Technology*, 48(9), 4635–4636. <https://doi.org/10.1021/es5015168>

United Nations(2015) Sustainable Development Goals. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (2019年4月11日確認)

UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)(2015)The Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>(2019年4月11日確認)

Yamaki, A., Kanematsu, Y. and Kikuchi, Y.(2019) A simulation of energy balances on paper mills with thermal energy storage. International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems (IMPRES 2019), Kanazawa, October 21–23, 2019.



菊池 康紀 / Yasunori KIKUCHI

東京大学未来ビジョン研究センター准教授。2009年 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻 博士課程修了博士(工学), 2019年4月より, 現職。「プラチナ社会」総括寄付講座の代表を兼務, 工学系研究科にて研究室を運営。専門はプロセスシステム工学, 化学システム工学。日本 LCA 学会及び化学工学会研究奨励賞, 生物工学技術賞, World Cultural Council: Special Recognitions などを受賞。地域における新規な技術システムの導入を産学公の協創にて推進している。



五十嵐 悠 / Yu IGARASHI

東京大学総括プロジェクト機構「プラチナ社会」総括寄付講座学術支援専門職員。1987年神奈川県横浜市生まれ。2011年慶應義塾大学環境情報学部を卒業後, 出版取次会社, 種子島西之表市地域おこし協力隊を経て現職。地域おこし協力隊時は, 地域の大学連携を推進する「スマートエコアイランド種子島」事業に携わった。現在は, 産学官連携, 特に大学と地方自治体の共同事業に関する研究を行っている。



兼松 祐一郎 / Yuichiro KANEMATSU

2005年東京工業大学工学部卒業, 2007年東京大学大学院工学系研究科修了後, 株式会社菱化システム入社。2014年より東京大学総括プロジェクト機構「プラチナ社会」総括寄付講座学術支援専門職員。2018年より同講座特任助教。