

特集 2 / 脱炭素政策検討支援ツールの開発と地域将来ビジョンの共創に関する研究

地域のカーボンニュートラルに向けた技術オプションの導入を支援する情報基盤の開発

東京大学

兼松祐一郎¹、藤井祥万²、尾下優子³、五十嵐悠⁴、菊池康紀⁵

はじめに

SDGs や脱炭素といった世界的な潮流の中で、日本においては 2050 年カーボンニュートラル達成を表明した地方公共団体は 2019 年 9 月には 4 自治体であったものが、翌年には 166、2021 年末時点では 514 と急増しており、表明自治体総人口では 1.1 億人を超えた（環境省、2021）。再生可能エネルギー（再エネ）の導入は脱炭素に向けた重要技術のひとつであり、2012 年の固定価格買取制度の開始を機に導入が加速し、拡大が進んできた。しかし、その大部分を占める太陽光発電と風力発電は天候の影響を受ける変動性再エネであり、導入量が多い地域では接続回答保留となっていたり、一部地域では出力抑制の頻度が増したりと、導入拡大の障壁が顕在化しつつある。更なる導入拡大のためには需給の時空間ギャップを埋めるエネルギー貯蔵やエネルギーキャリアを組み合わせた統合的な地域システムとしての設計に基づいた導入が重要度を増している。また、地域に賦存する産業やそこから得られる資源の価値の再定義が有効とされている。例えば農林業にから得られるバイオマス資源は、化成品やエ

¹ 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 特任助教

² 東京大学総括未来ビジョン研究センター 特任助教

³ 東京大学未来ビジョン研究センター特任講師

⁴ 東京大学総括プロジェクト機構「プラチナ社会」総括寄付講座学術専門職員

⁵ 東京大学未来ビジョン研究センター准教授、総括プロジェクト機構「プラチナ社会」総括寄付講座（代表・兼務）

エネルギーの原料としての活用が期待でき、かつ、地域における社会経済への好循環を引き起こしうる (Kikuchi et al, 2020)。炭素吸収源としても改めて着目されつつある森林資源は、国内では高樹齢化が進んでおり、適度な伐採と植林や、単層林から複層林や天然林へ林相を誘導するなどを組み合わせた森林の再構成をしながら、木製品やエネルギーとして活用していくことが望まれる (Oosawa et al, 2016)。

上記のような取り組みの実現には、地域スケールでの技術システムの設計や評価が必要であるが、その手順は複雑であり、取り扱うデータも多種多様である。まずは設計、評価の手法構築が必要であるが、早期に技術導入を多くの地域で展開して行くためには、それらの実行を支援する情報基盤による加速化と省力化が有効であると考えられる。本稿では、地域資源の情報を可視化し、適用可能な技術のマッチングとその導入を支援する情報基盤の開発について、そのコンセプト、概念設計および開発状況を報告する。

情報基盤の要件と概念設計

自治体とのコミュニケーションの中で、多くの自治体は脱炭素化に向けて必要となる再エネや資源循環に関する技術導入について、具体的な技術選択や導入シナリオの策定はほぼできておらず、専門家等による支援が求められていることが分かっている。しかし、潤沢な資金を有する地域でない限り、長期にわたりコンサルティングを企業へ委託することは現実的ではない。コンサルティングやエンジニアリングによる実務が可能な企業からも、必ずしも十分な予算や期間が無い中、不十分な検討に基づく地域オプションの提示や導入となってしまうことが懸念として指摘されている (兼松ら、2017)。

著者らは、再エネ、資源循環の双方に密接に関連した「産業共生」の計画やその中での技術オプション導入検討のために必要となるタスクと具体的なデータの種類や連携、利用方法をモデル化した (兼松ら、2017)。ここで「産業共生」とは、近隣に位置する異業種の産業間で副産物や廃棄物を資源として相互に活用し、地域レベルでの環境面、経済面でのパフォーマンス向上を目指す取

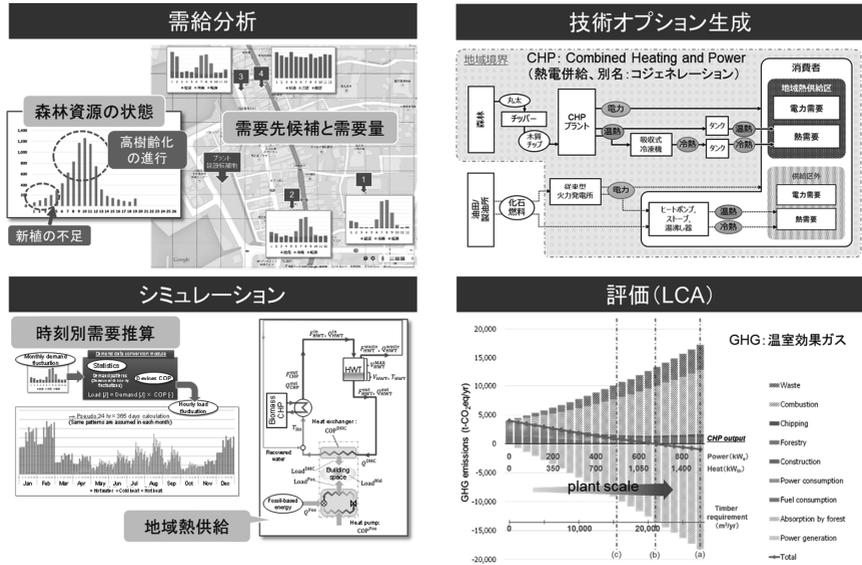
り組みである (Chertow, 2000)。地域の産業、資源、エネルギーなどを総合的に検討し、技術を組合せる必要があることから、地域における脱炭素技術オプション導入検討に適用可能なアプローチであるといえる。このアプローチを拡大し、地域脱炭素における技術オプションのマッチングと導入検討を支援するための情報基盤の開発を進めている。

地域の自治体や産業との対話、技術開発者らとの議論を通して、前述の産業共生の計画におけるタスクとデータのモデリング (兼松ら、2017) を基礎として、脱炭素技術オプションの導入計画には「需給分析」、「技術オプション生成」、「シミュレーション」、「評価」の4つのタスクの実行を通して、それぞれの段階で提示可能な情報を共有しながら意思決定を進めて行くことが必要であることを特定した。

事例に基づく課題整理：木質バイオマスによる地域熱電併給

ここで、地域資源を活用した脱炭素に貢献しうる技術システムの事例として、木質バイオマスを用いた地域熱電併給を対象とした設計と評価 (Kanematsu et al, 2017) を取り上げ、上記の4つのタスクに沿って内容と課題を整理する。この事例で実施された作業の概要を図1に示す。「需給分析」では、供給側の検討として、燃料に用いる森林資源の状態や資源量の調査や、持続的に利用可能な伐採量の推算を行っている。また、需要側の検討として、地域内で熱や電力の需要が比較的大きな施設を調査し、それらの施設別に月ごとのエネルギー需要を調査している。調査で得られないデータに関しては、既存統計などを活用した推算も必要となっている。「技術オプション生成」では、森林資源から燃料を生産し、それを熱電に変換して消費者へ供給するために必要な一連の技術セットを特定し、組合せを検討している。ここでは、チップパー、CHP (Combined Heating & Power：熱電併給) プラント、吸収式冷凍機、温冷熱タンク、などが主要な構成要素技術となる。これらの組合せを導出するための情報や知識がここでは必要となる。「シミュレーション」においては、地域への熱電併給を検討しており、地域の需要とプラントからの供給のバランスを考慮した時刻別の

図1：木質バイオマスによる地域熱電供給システムの設計と評価



(Kanematsu et al (2017) に基づき編集)

計算を行っている。そのために、需給分析で得られた月別需要を時刻別需要に変換する機構が必要である。また、プラントからの生成熱、地域配管を通じた各施設への供給、施設におけるエネルギー消費や、バイオマス熱を用いることによる既存化石燃料の削減量を時刻別に計算するための機構も必要となっている。「評価」においては、原料の供給からエネルギーの消費や廃棄物処理も含めたサプライチェーン全体での脱炭素効果を評価するため、ライフサイクル評価(LCA)が必要である。LCAに関する知識に加え、LCA専用データベースも必要となる。また、この事例では、持続可能な森林資源伐採量とバランスするようなエネルギープラントの規模を明らかにすることを目的のひとつとしており、プラント規模を変えたときの温室効果ガス排出量を定量化できるような計算機構も備えておく必要がある。

以上のように、地域資源を活用した複合的な技術システムの設計や評価には、

対象技術や LCA に関する専門的知識や、地域、資源、技術などに関するデータを必要とする。一方で、定型的な作業や、一度収集すれば他の技術や地域でも共通して活用できるようなデータも多い。定型作業の自動化や各種データおよびシミュレーションモデルの再利用性の向上により、設計や評価の高速化と省力化が実現可能である。

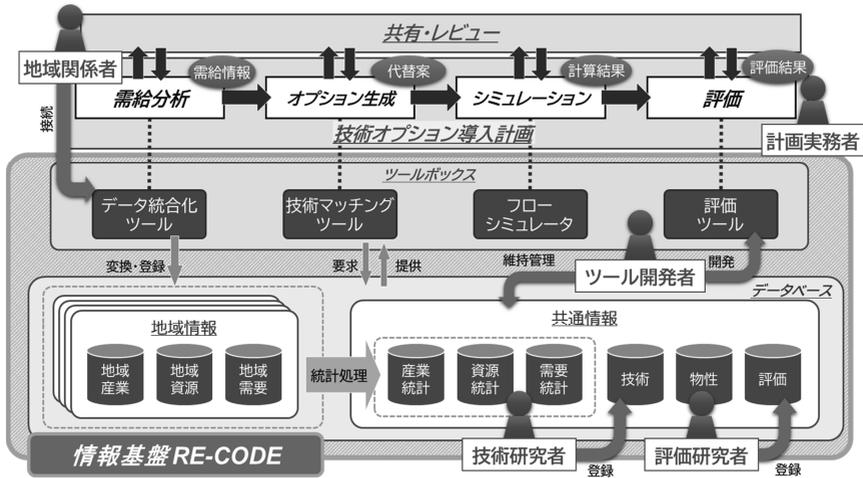
情報基盤の全体像と構成要素

開発を目指す情報基盤は、技術導入計画に必要となる「需給分析」、「技術オプション生成」、「シミュレーション」、「評価」の4つのタスクをそれぞれ支援するツール群と、各ツールがタスク実行のために必要とするデータの収集、蓄積、再利用を可能とするデータベースから構成され、これを RE-CODE と名付けている。「RE」は Resource（資源）、Region（地域）、Renewables（再生可能資源）などの意味を、「CODE」は Co-design（共にデザインする）とプログラムとしての Code の意味を複合的に持たせたものである。RE-CODE の全体像を図 2 に示す。

「需給分析」支援ツールは、複数の省庁や自治体、地域に分散したオープンデータを主軸としつつ、個別に取得する守秘性のある情報（クローズドデータ）も組み合わせながら、初期検討に必要となる地域資源、現在の関連設備導入状況、需要などの情報を集約、可視化できるツールとする。これまで再エネ関連の自治体施策検討における初期調査として、半年～1年程度の期間と調査外注費用を要していたが、公開が進みつつあるオープンデータを活用、統合することでその大部分を自動化できる可能性がある。さらに将来人口推計などと組合せることで、将来シナリオの条件変更に応じた推算も可能となりうる。

「技術オプション生成」の支援ツールは、需給分析で得られた地域資源と需要の情報をキーとして、利用可能な技術の検索やそれらの組合せを検討できるデータベース連携型のアプリケーションとして開発する。この技術データベースには、技術開発者からのアップロードも可能とし、検索機能と組み合わせることで地域と技術の相互アクセスとマッチングの場として機能させることを目指す。

図2：情報基盤 RE-CODE の全体像と構成要素



「シミュレーション」および「評価」の支援ツールは、上記で生成した技術オプションに関して、要素技術による資源から製品への変換を数理モデル化した技術モデルを組合せたシミュレータによって、技術導入による物質やエネルギーのフローを計算する。この物質・エネルギーフローはLCA実行のためのインベントリデータとして用いることができ、LCAデータベースと組み合わせることでLCAが可能となる。効率や規模といった技術パラメータを変数化し、条件変更や技術革新による影響や不確実性も考慮可能とすることで、技術成熟度 (Technology Readiness Level: TRL) の低い将来技術の評価が可能となる。産業連関分析にも連携が可能であり、地域経済への波及効果も評価できるようにすることを目指している。

支援ツールの開発状況

「需給分析」支援ツールの2022年2月時点のバージョンでは、基礎自治体別の地域資源ポテンシャル（環境省、2022）や固定価格買取制度に申請された再エネ設備の導入実績（経済産業省 資源エネルギー庁、2022）など、各省庁に

図3：RE-CODE のインターフェイス



(左上：導入ポテンシャル内訳、左下：導入量年次推移、右：市町村別導入)

分散して公開されていたオープンデータを統合し、標準的なウェブブラウザさえあれば即座に可視化できる機能を実装済みである。インターフェイスの一部を図3に示す。https://re-code.app/ よりアクセスが可能である。指定した都道府県または市区町村の再エネ導入ポテンシャルとその内訳、導入実績の推移を一覧することや、複数市区町村でそれらの情報を並べて比較することなどができる。加えて、エネルギー需要の推算機構と可視化インターフェイスを開発中であり、これを実装することで地域のエネルギー需給の分析が可能となる。この需給分析の結果を利用し、供給可能な地域資源を需要のある製品に変換可能な技術を検索できる仕組みを「技術オプション生成」支援ツールに実装していく。現状では検索対象とする技術情報の収集を進めるための技術開発者との連携体制を構築中である。

「シミュレーション」および「評価」の支援ツールとしては、前述の木質バイオマス CHP に加え、農林業由来のバイオマスを活用する技術群（菊池ら、2020、菊池、2022）、太陽光発電を用いた電解水素製造装置に蓄電池を組み合わせることで設備稼働率の向上を狙ったシステム（Kikuchi et al, 2019, Sako et al, 2021）

や、風力を熱に変換して貯蔵し、需要に合わせて熱や電力として出力するシステム (Yamaki et al, 2020) など、変動性再エネの更なる導入拡大に向けて重要性を増している技術について、数理モデルによるシミュレータを開発し、システム設計を可能としていく。技術モデルは個々に開発されるため、独立したシミュレータとなりがちではあるが、RE-CODE上に統合することで、複数技術の組合せ解析も可能とするよう、共通形式のプログラムに変換するための仕組みが検討可能となる。さらに、LCAをはじめとしてマテリアルフロー分析や産業連関分析といった各種技術評価を行い、地域での意思決定が可能となるよう、結果の提示方法などを工夫していく。

おわりに

このような情報基盤により、地域資源の状態や将来的な技術導入効果を迅速に可視化できれば、地域における産学公での Co-learning を深化させることができ、技術の社会実装とともに、人材育成にも貢献しうる。情報基盤をトレーニングツールとして活用した地域システムの計画や設計を担う人材の育成も視野に入れ、情報基盤そのものだけでなく開発・運用の体制や展開の仕組みを構築していくことが求められる。情報基盤を共創することで地域の共創を加速することをコンセプトとし、持続的にデータやシミュレータの拡充を図っていく。

謝辞

本研究の一部は、環境再生保全機構 環境研究総合推進費 (JPMEERF 20192010, JPMEERF20213R01)、JST COI-NEXT 共創の場形成支援プログラム (JPMJPF2003)、JSPS 科研費 (20K23360, 21K12336, 21K17919) の成果を一部含んでいる。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、(株)地球快適化インスティテュート、三井不動産(株)、信越化学工業(株)、オリックス(株)、積水ハウス(株)、東日本旅客鉄道(株)、豊田通商(株)からの寄付で活動している。

引用文献

- Chertow, M. R. (2000) INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature and Taxonomy. *Annual review of energy environment*, 25 (1), 313–337
- 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
- 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
- 環境省 (2021) 地方公共団体における 2050 年二酸化炭素排出実質ゼロ表明の状況 (<https://www.env.go.jp/policy/zerocarbon.html>, 2022 年 1 月 30 日アクセス)
- 環境省 (2022) 再生可能エネルギー情報提供システム [REPOS (リーボス)] (<https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/>, 2022 年 1 月 31 日アクセス)
- 経済産業省 資源エネルギー庁 (2022) 固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト (<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>, 2022 年 1 月 31 日アクセス)
- Kikuchi, Y., Ichikawa, T., Sugiyama, M., 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
- Kikuchi, Y., Nakai, M., Kanematsu, Y., Oosawa, K., Okubo, T., Oshita, Y., Fukushima, Y., (2020), Application of technology assessments into co-learning for regional transformation: A case study of biomass energy systems in Tanegashima, *Sustainability Science*, 15, 1473-1494
- 菊池康紀, 大澤一岳, 兼松祐一郎 (2020) 木質系資源のバイオマス利用におけるライフサイクル思考, *日本 LCA 学会誌*, 16 (2) 94-105
- 菊池康紀 (2022) ライフサイクル思考に基づくバイオマスプラスチックの役割と挑戦, *日本 LCA 学会誌*, 18 (1), 11-20
- 九州電力 (2022) 過去の出力抑制実績 (https://www.kyuden.co.jp/td_power_usages/out_ctrl_history.html, 2022 年 2 月 28 日アクセス)
- Oosawa, K., Kanematsu, Y., & Kikuchi, Y. (2016). *Forestry and Wood Industry*. In *Energy Technology Roadmaps of Japan*, 391–403. Tokyo: Springer Japan.
- Sako, N., Koyama, M., Okubo, T., Kikuchi, Y., (2021), *Techno-Economic and Life*

Cycle Analyses of Battery-Assisted Hydrogen Production Systems from Photovoltaic Power, *Journal of Cleaner Production*, 298, 126809

Yamaki, A., Kanematsu, Y., Kikuchi, Y., (2020), Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Thermal Energy Storage Implemented in a Paper Mill for Wind Energy Utilization. *Energy*, 205, 118056

(かねまつ ゆういちろう) (ふじい しょうま) (おした ゆうこ)
(いがらし ゆう) (きくち やすのり)