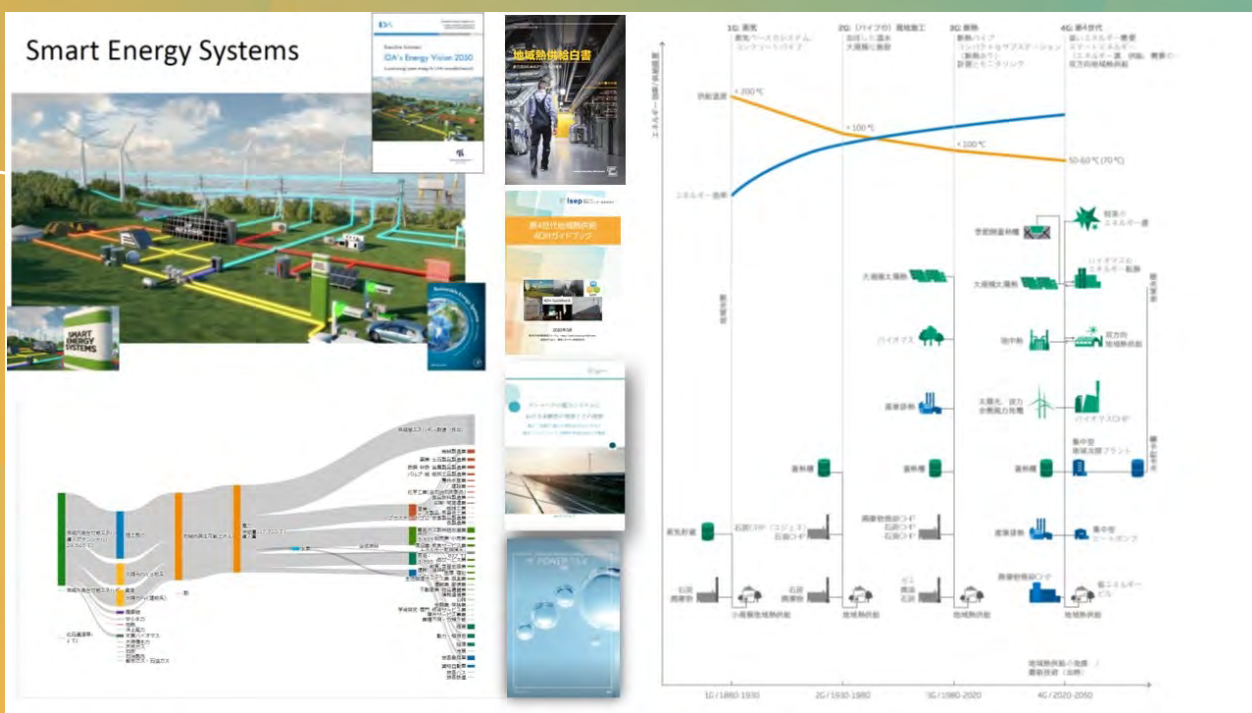


4DHガイドブック スマートエネルギーシステム編



2024年3月

第4世代地域熱供給4DHフォーラム <http://4dh.isep.or.jp/>

特定非営利活動法人 環境エネルギー政策研究所

内容

- I. **脱炭素社会に向けたスマートエネルギーシステムと4GDH**
オールボー大学 Henrik Lund
- II. **脱炭素化に向けた地域エネルギーシステムのデザイン手法**
東北大学 中田俊彦
- III. **地域エネルギーシステムデザインのガイドライン**
東北大学 中田俊彦
- IV. **Positive Energy Districts (PED) 展開の可能性について**
東京都市大学 加用現空

4DHフォーラム <http://4dh.isep.or.jp/>

自然エネルギーの熱政策の実現や熱利用の普及のための調査・研究・意見交換・交流の場として、デンマーク関係機関との協力のもとで、関連する研究者・行政・NGOなどで構成される「第4世代地域熱供給フォーラム」(4DHフォーラム)を2018年10月に創設した(事務局：特定非営利活動法人環境エネルギー政策研究所)。パリ協定に基づく欧州の熱戦略や熱ロードマップに基づく第4世代地域熱供給の知見・経験の共有を図るとともに、国内外での会議での情報交換や研究会・シンポジウムでの議論、国内での自然エネルギー熱利用普及のためのネットワーク形成を目指している。

特定非営利活動法人 環境エネルギー政策研究所 (ISEP) <https://www.isep.or.jp/>

環境エネルギー政策研究所 (ISEP: Institute for Sustainable Energy Policies) は、持続可能なエネルギー政策の実現を目的とする、政府や産業界から独立した第三者機関です。2000年9月、地球温暖化対策やエネルギー問題に取り組む環境活動家や専門家によって設立されました。私たちは、次のような持続可能なエネルギー社会を目指します。(1) 自然エネルギーを軸とした効率的なエネルギーシステム、(2) エネルギー利用にともなう便益とリスクの分配が公平な社会、(3) エネルギー政策や社会政策の意思決定が透明で参加的な社会、(4) 個人と地域が自立した地域分権型のエネルギー社会を柱とした持続可能なエネルギー社会を目指し、エネルギー政策の研究と提言、自然エネルギーの普及啓発に取り組んでいます。

免責事項：

本白書における見解は、特定非営利活動法人 環境エネルギー政策研究所 (ISEP) のポジションを必ずしも反映したものではない。本白書内の情報は、作成時に各執筆者が有する最前のものであるが、情報の精度と正確性の責任を負うものではなく、今後修正される可能性がある。



脱炭素社会に向けたスマートエネルギーシステムと4GDH

Professor Henrik Lund
Aalborg Universitet



Henrik Lund, オールボー大学, デンマーク



ユトランド/デンマーク(2022):

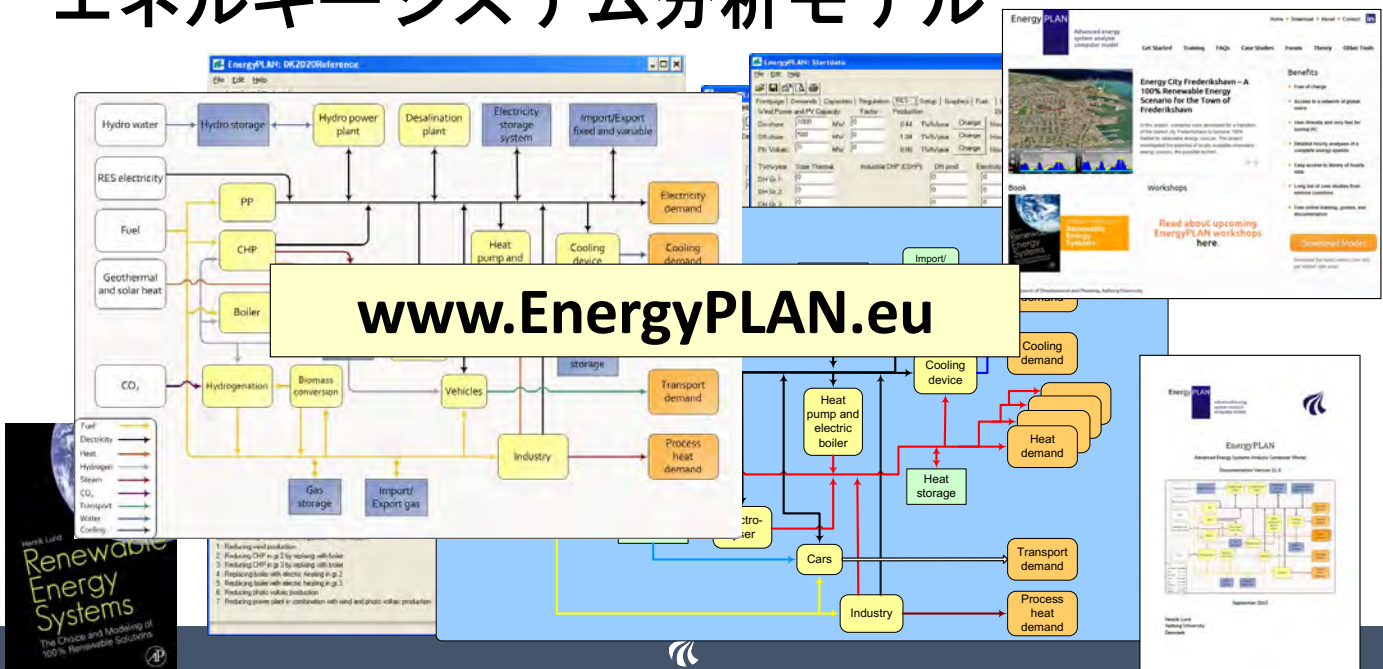
- 約50%の風力発電
- 世界における洋上発電の高いシェア
- 電力の30~50%をCHPで供給
- >地域熱供給は50%以上
- >天然ガス供給におけるバイオガスは30%



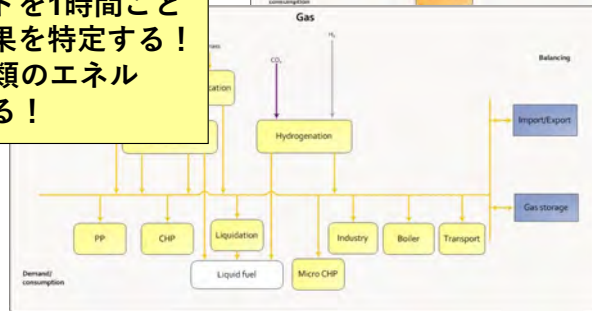
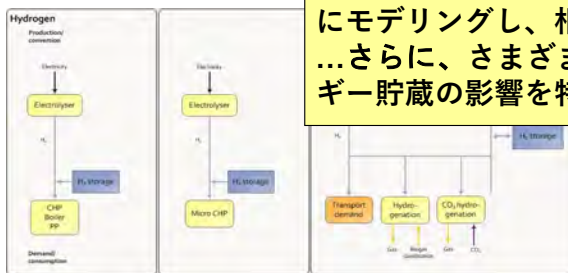
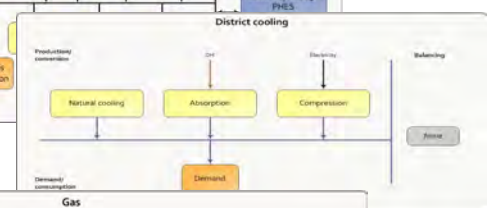
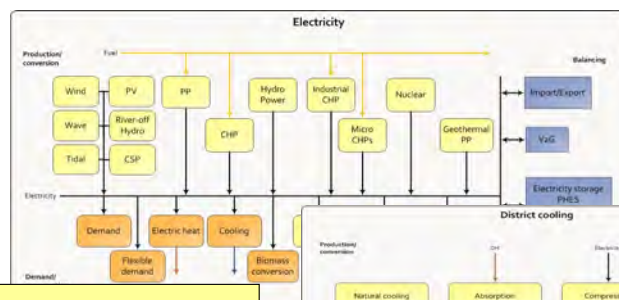
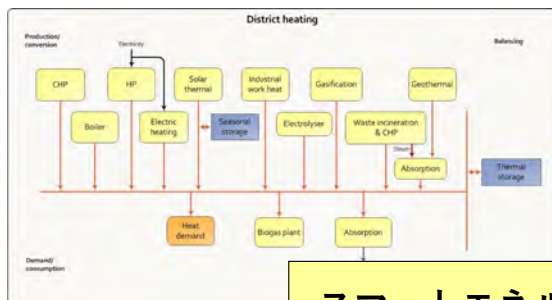
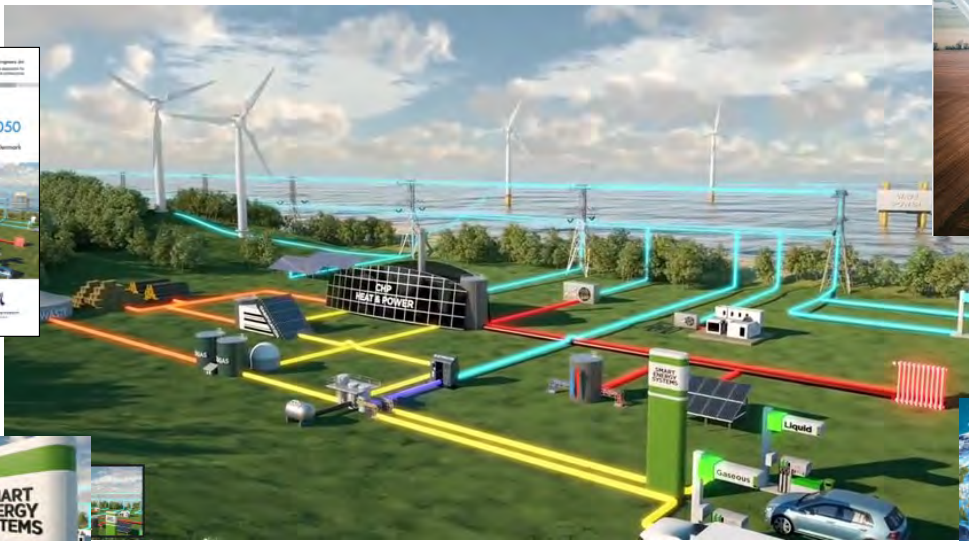
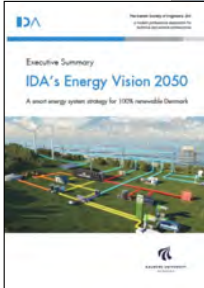
2050年までに100%再生可能エネルギーまたは気候ニュートラル経済を目指す.....しかし、どうやって.....？



エネルギーシステム分析モデル



包括的なスマートエネルギーシステムアプローチ

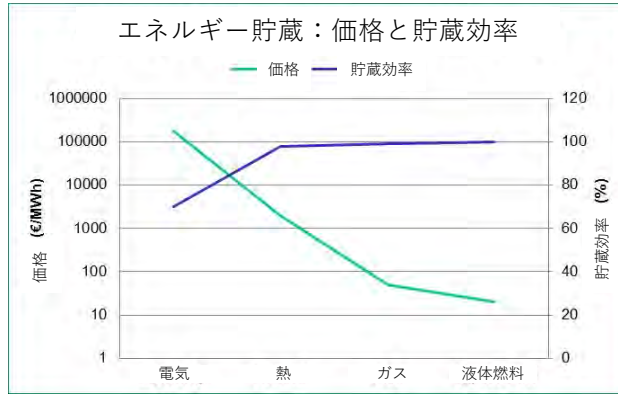


スマートエネルギーシステム：
 すべてのスマートグリッドを1時間ごとにモデリングし、相乗効果を特定する！
 ...さらに、さまざまな種類のエネルギー貯蔵の影響を特定する！

エネルギー貯蔵



揚水発電
175 €/kWh
(出典: Electricity Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits. Electric Power Research Institute, 2010)



熱貯蔵
1-4 €/kWh
(出典: Danish Technology Catalogue, 2012)



天然ガスの地下貯蔵
0.05 €/kWh
(出典 Current State Of and Issues Concerning Underground Natural Gas Storage. Federal Energy Regulatory Commission, 2004)



石油タンク
0.02 €/kWh
(出典: Dahl KH, Oil tanking Copenhagen A/S, 2013; Oil Storage Tank, 2013)



AALBORG UNIVERSITY

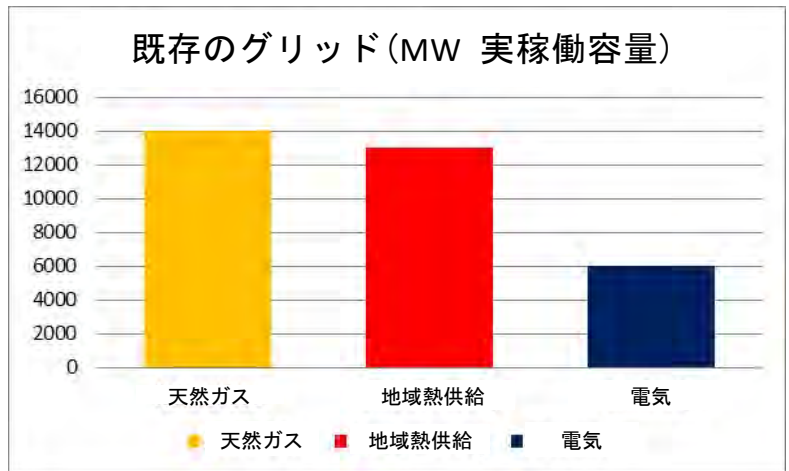
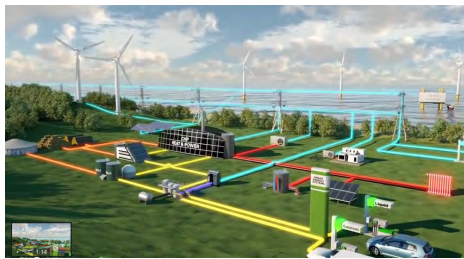
デンマークのエネルギー貯蔵容量(現状)



2050年再エネ100%でのデンマークのエネルギー貯蔵容量



既存のグリッド(供給網)



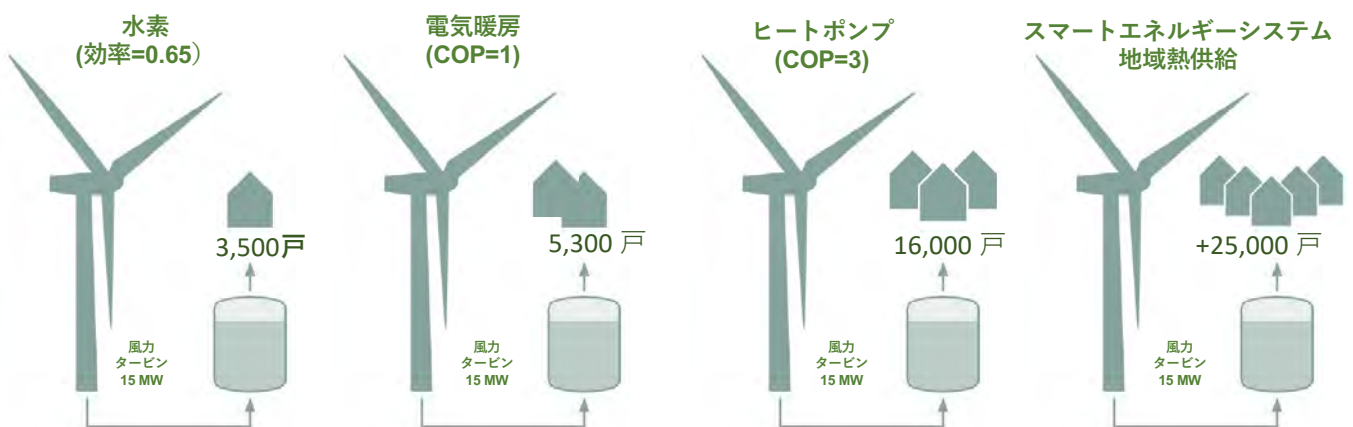
www.4DH.dk

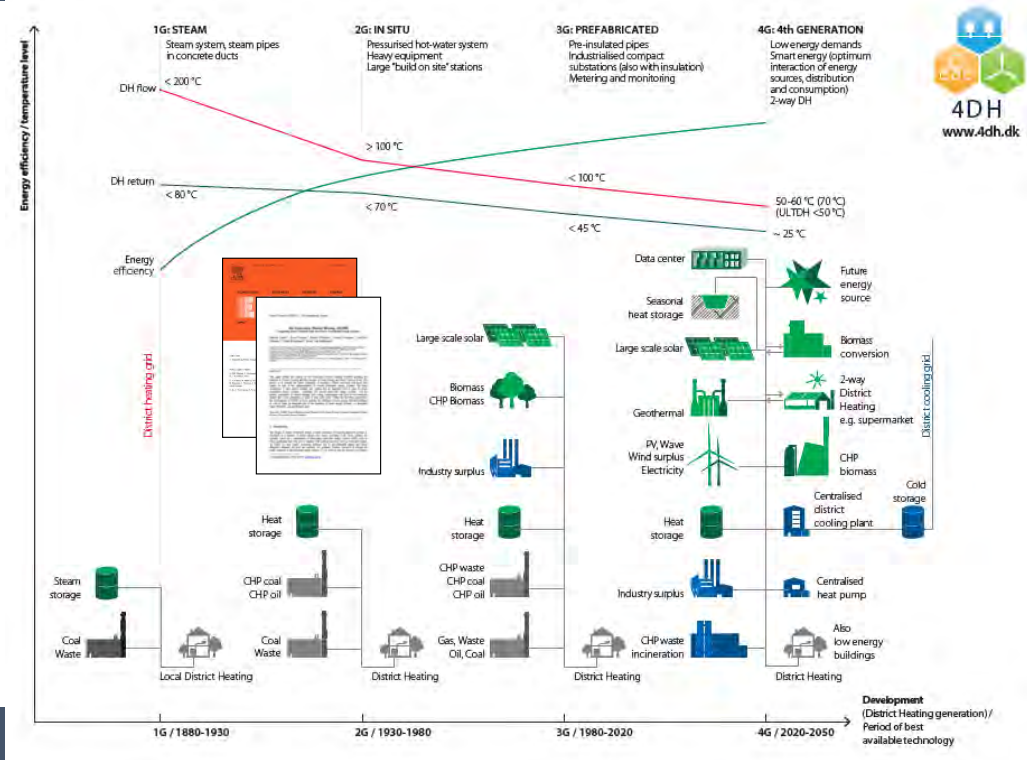
4DH

4th Generation District Heating
Technologies and Systems



住宅への熱供給用の水素..???





スマート ヒーティング ヨーロッパ



熱ロードマップ・ヨーロッパ



Heat Roadmap Europe 2050

GIS Mapping: Many Heat Sources

- Urban areas (Heating Demands)
- Power and Heat Generation
- Waste Management
- Industrial waste heat potential
- Geothermal heat
- Solar Thermal

the study indicates that the **market shares for district heating for buildings can be increased to 30% in 2030 and 50% in 2050.**

Logos: EUROHEAT & POWER, AALBORG UNIVERSITY DENMARK, ECOFYS, PlanEnergi

4DH
4th Generation District Heating Technologies and Systems

ECO F Y S
sustainable energy for everyone

PlanEnergi

HEAT ROADMAP EUROPE 2050

For Heatmaps see the EU27

HEAT ROADMAP EUROPE 2050

For Heatmaps see the EU27

Logos: Aalborg University, Halmstad University, Ecofys Germany GmbH, PlanEnergi



IDAの提言：気候変動に関する欧州での状況

デンマークは再生可能エネルギーと二酸化炭素削減という目標を何らかの形で達成すべきであり、欧州の他の地域が同様に組み込んでいくという状況にも合致している。

したがって：

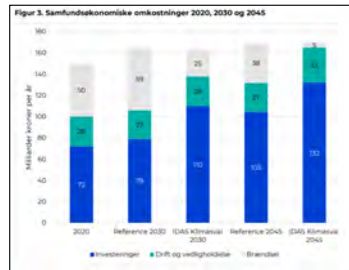
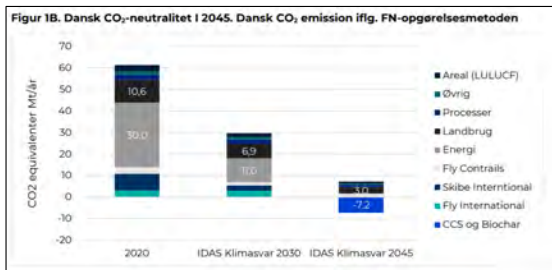
- 国連による国ごとのCO2排出量の計算方法にはまだ含まれていないが、デンマークは国際航空と国際海運のシェアを含めるべきである。
- デンマークは、世界におけるバイオマスの持続可能な利用のシェアを超えないようにすべきである。
- デンマークは、欧州の電力供給に風力と太陽光を組み込むために、柔軟性と予備能力の面で貢献すべきである。



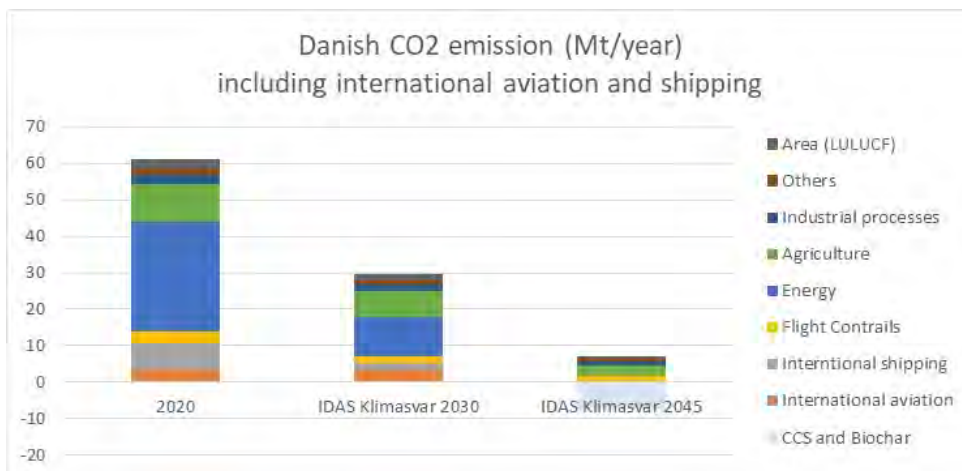
IDAの気候変動への提言 2024

デンマークが気候中立になる方法

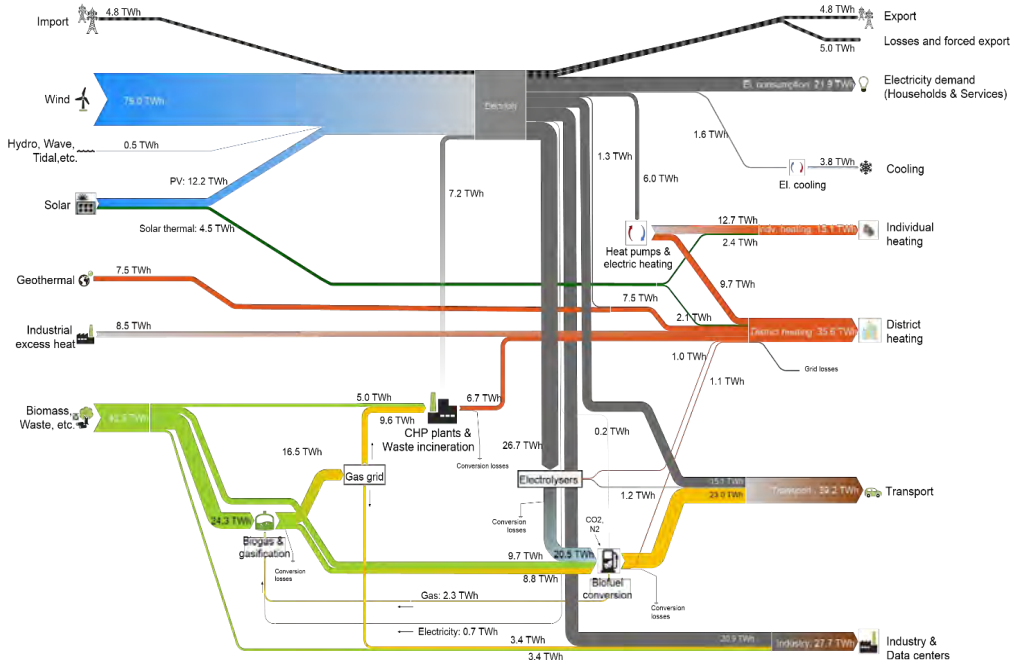
- 国際航空・海運におけるデンマークのシェアを含める
- 世界の持続可能なバイオマス資源に占めるデンマークの割合の範囲内
- 2050年の気候中立目標を2045年には達成する
- 農業、LULUCF、プロセスにおける活動と協調する



完全に脱炭素化したデンマーク(シナリオ) 2045



2045

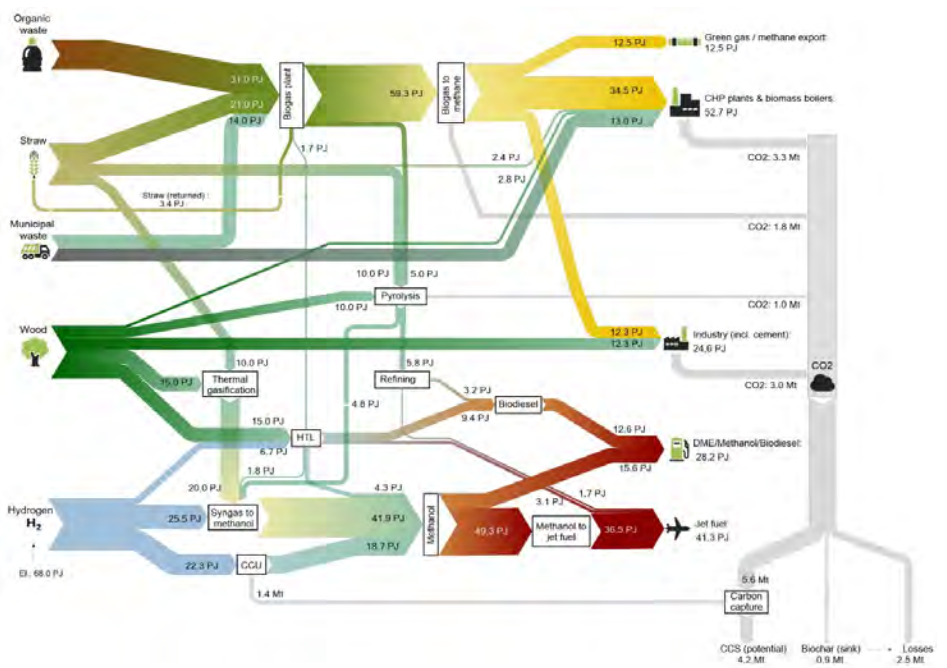


バイオマス シナリオ

2045

概要:

**(153 PJ minus
eksport 13 PJ =
140 PJ svarende
til 23 GJ/capita)**





ヒートプラン・デンマーク2021



Varmeplan Danmark 2021

Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, Steffen Nielsen, Peter Sorknæs, Diana Carolina Moreno Saltos og Jakob Z. Thellufsen

Aalborg Universitet



なぜ熱プラン・デンマーク2021なのか？

熱セクターはどのように政策目標に貢献することができるのか？

- 2030年までに温室効果ガスを70%削減
- 2050年にデンマークを気候ニュートラルにする

主な問い：

- 熱の省エネと熱供給のバランスは？
- 地域熱供給を導入すべき地域はどこで、個別熱供給を導入すべき地域はどこか。
- 個別熱供給とする判断は何に基づくべきか。
- どの熱源から地域熱供給がされるべきか。
- 革新的な挑戦とは？
例) 第4世代地域熱供給、スマートメーター、デジタル化、Power2X、データセンター、地熱など
- エネルギー供給全体の柔軟性という点で、熱セクターはどのように貢献するのがベストか？



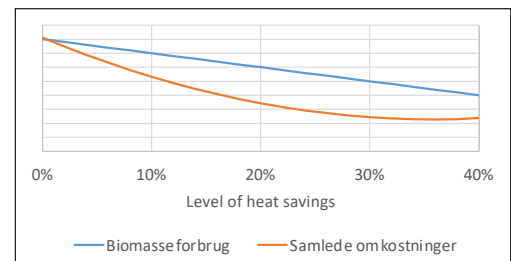
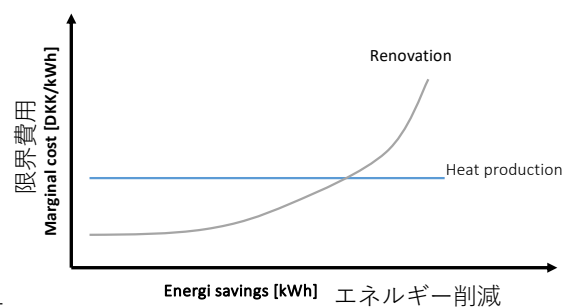
4つの主要なポイント

- **建築物ストックの省エネは重要である。**低コストと低燃費を実現するためには、省エネルギーと再生可能エネルギーのバランスがとれていなければならない。つまり、**32~36%の省エネ**を実現するためには、建物のエネルギー改修に引き続き注力することが重要である。
- 既存の都市部で天然ガスや石油を燃料とする個別ボイラーが段階的に廃止され、新たな都市部ができるとともに、**地域熱供給は熱市場の63~70%までに拡大されるべきである。**地域熱供給エリア外では、太陽熱を利用した個々のヒートポンプで熱を供給する。この組み合わせが、最もエネルギー効率が高く、柔軟な解決策となる。
- 地域熱供給では、より低温の**第4世代地域熱供給への移行に焦点を絞るべきである。**これにより、地中熱、排熱、大型ヒートポンプを最も低コストで効率的に利用することができる。
- 今後の低炭素エネルギーシステムでは、**地熱や産業、データセンター、Power-to-Xからの廃熱を大いに活用できる可能性がある。**こうした潜在的な可能性を活用すべきである。



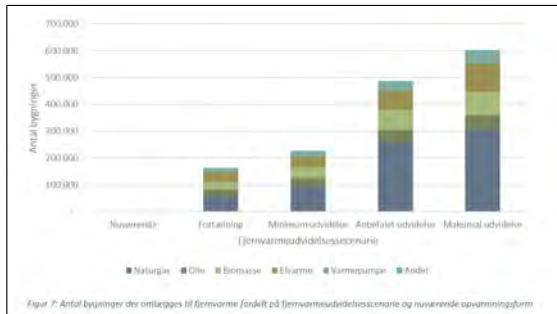
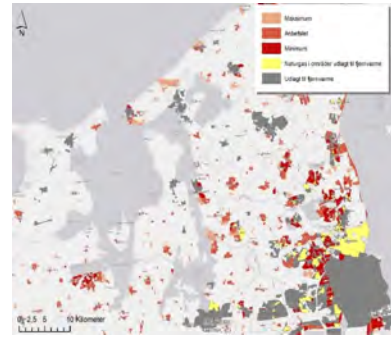
建築物ストックの36~40%の省エネ

- **建築物ストックの省エネは重要**
- **省エネとエネルギー効率、再生可能エネルギーの適切なバランスとは。**
 - 金融的には、36%でバランス（年間11億~13億デンマーク・クローネの節約）。
 - 熱の省エネを40%にすることで、限界追加費用面でもバイオマスへの負荷を減らすことができる。



地域熱供給を63%~70%に拡大させるべきである

- 現在：地域熱供給に接続されている現在の建物（～50%）
- 高密度化：地域熱供給指定地域の全建物（～59%）
- 最小限の拡張：熱密度15kWh/m²以上の都市部への拡張（～63%）
- 望ましい拡張：熱密度10kWh/m²以上の都市部への拡張（～70%）
- 最大限の拡張：熱密度5kWh/m²以上の都市部への拡張（～74%）



Figur 7: Antal bygninger der omstilles til fjernvarme fordelt på fjernvarmeudviklingsscenarie og nuværende opvarmingsform

天然ガスの転換:

- 260,000戸を地域熱供給へ
- 115,000戸をヒートポンプへ

石油ボイラーへの転換:

- 44,000戸を地域熱供給へ
- 70,000戸をヒートポンプへ

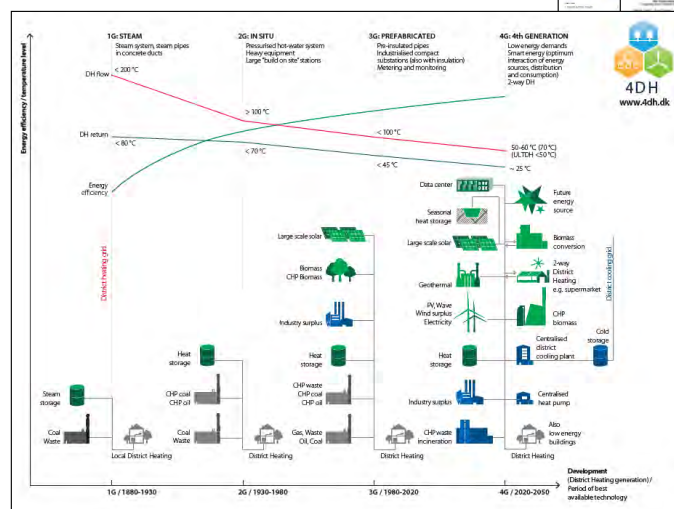
バイオマスボイラーへの転換:

- 74,000戸を地域熱供給へ
- 183,000戸をヒートポンプへ

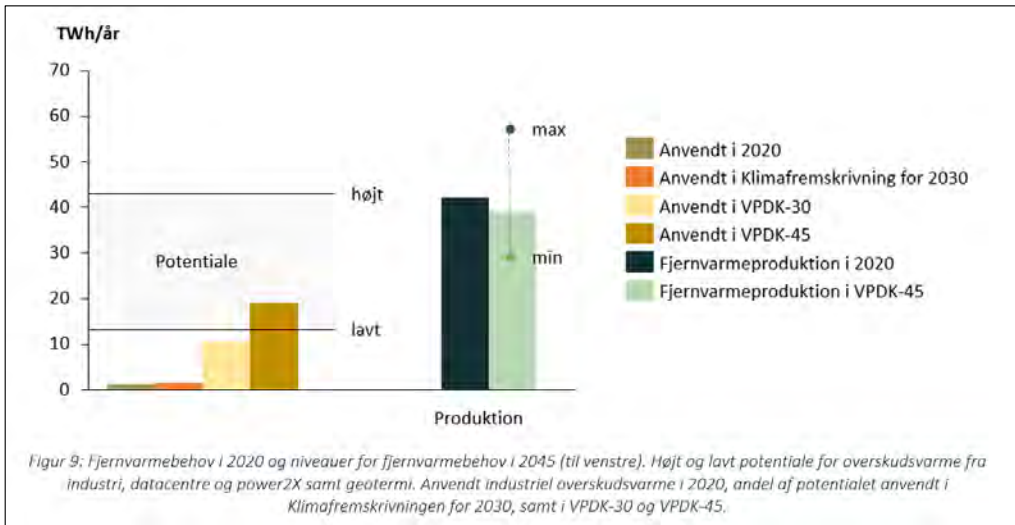
第4世代(低温)地域熱供給

地域熱供給では、低温の第4世代地域熱供給への移行に焦点を絞るべきである。

地熱、廃熱、大型ヒートポンプや既存または新規の蓄熱設備による効率的な電化が、最も低コストかつ効率的に供給できる。



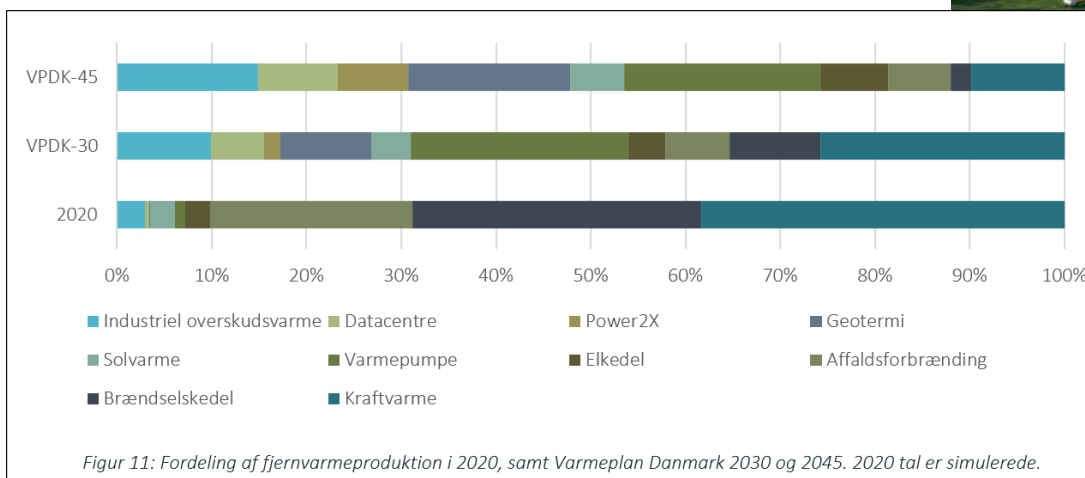
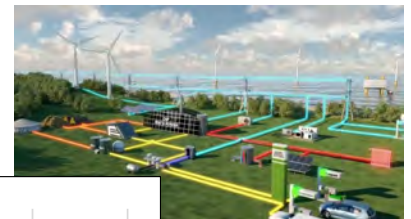
地熱と余剰熱の大きな可能性



今後のエネルギーシステムにおいては、地熱や産業、データセンター、PtXからの排熱が大きな可能性を秘めている。これらを活用していくべきである。



全体的なソリューションの一部 熱セクターの変化



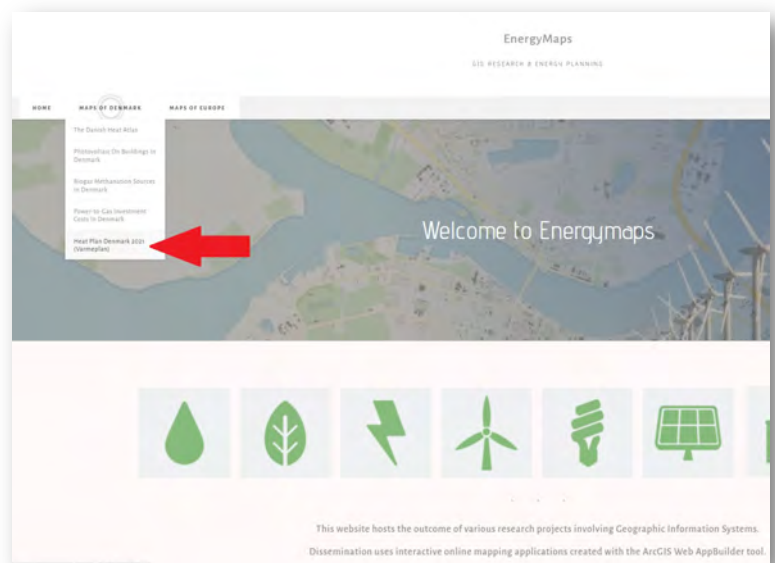
熱プラン・デンマーク2021のマップがオンラインで入手可能

Findes på hjemmesiden:

<https://energymaps.plan.aau.dk/>

4種類の地図:

1. 都市部における熱消費
2. 地域熱供給拡大シナリオ
3. 産業廃熱
4. 地域熱供給の「無料」ベースロードマップ



AALBØRG UNIVERSITY
1789-2017

<https://www.aau.dk/en/research/energyplan/denmark-2021-heat-map/denmark-2021-heat-map/>

詳しくはこちら:

www.henriklund.eu

www.4DH.dk

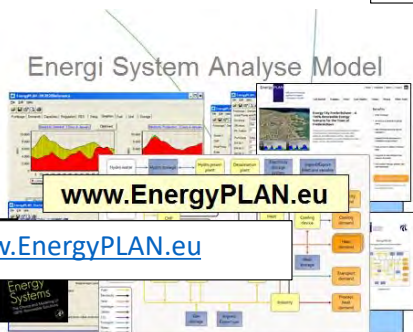
<https://www.energyplan.eu/book2/>

www.energyplan.eu/SmartEnergyEurope

www.heatroadmap.eu

www.EnergyPLAN.eu

www.energyplan.eu/smartenergysystems/



AALBØRG UNIVERSITY
1789-2017

II. 脱炭素化に向けた地域エネルギーシステムの デザイン手法

東北大学 中田俊彦

はじめに

カーボンニュートラルは、国際社会の新たな命題として、価値規範やビジネスモデルに波及して、さまざまな取り組みが始まっている。国内では、脱炭素地域の推進など、CO₂排出の起源となる化石燃料の削減と再生可能エネルギーへの移行が着々と進み始めている。本研究では、地域社会とその担い手である地方公共団体に目を向けて、従来エネルギー政策とは無縁であった地域の脱炭素化に向けたエネルギーと異種のエネルギーが混在するそのシステムについて、具体的なデザイン手法を取りまとめたものである。

1. 地域エネルギーシステムとは

従来のエネルギー政策は、輸入資源を主体とした国単位のエネルギー供給量の確保を主眼としてきたのに比べて、再生可能エネルギーは、その資源量に地域間の偏差が大きく、そもそも地域のエネルギー需要量と合致しない。この需給バランスを、エネルギーキャリアを含めて統合デザインした社会システムを、地域エネルギーシステムという。物理面では、仕事をする能力のことをエネルギーといい、その担い手となるエネルギーキャリアは「電力」、「熱」、「輸送用燃料」の三種からなる。

地域エネルギーシステムの構成図を図1に示す。このシステムは、複数のレイヤー層から構成され、下面が需要サイド（消費）、上面が供給サイド（資源）を表す。これら二つの層の間に、各エネルギーキャリアが位置し、たとえば電力キャリアは地域の再生可能エネルギー資源からグリーン電力を生産し、それを地域の需要地に供給する機能を果たす。本システムでは、熱キャリアと輸送用燃料に加えて、グリーン電力由来のエネルギーキャリアである水素やアンモニアを含む合成燃料を新設している。江戸時代までの「地産地消」と異なるのは、再生可能エネルギーの地域間の偏差を解消する手法として、広域連携圏のレイヤーを最上部に設けている。これは、地域内でエネルギー需給が均衡しないときに、隣接地域を広域圏とみなして、その広域圏内および他の広域圏間にてエネルギーを相互融通することを想定している。

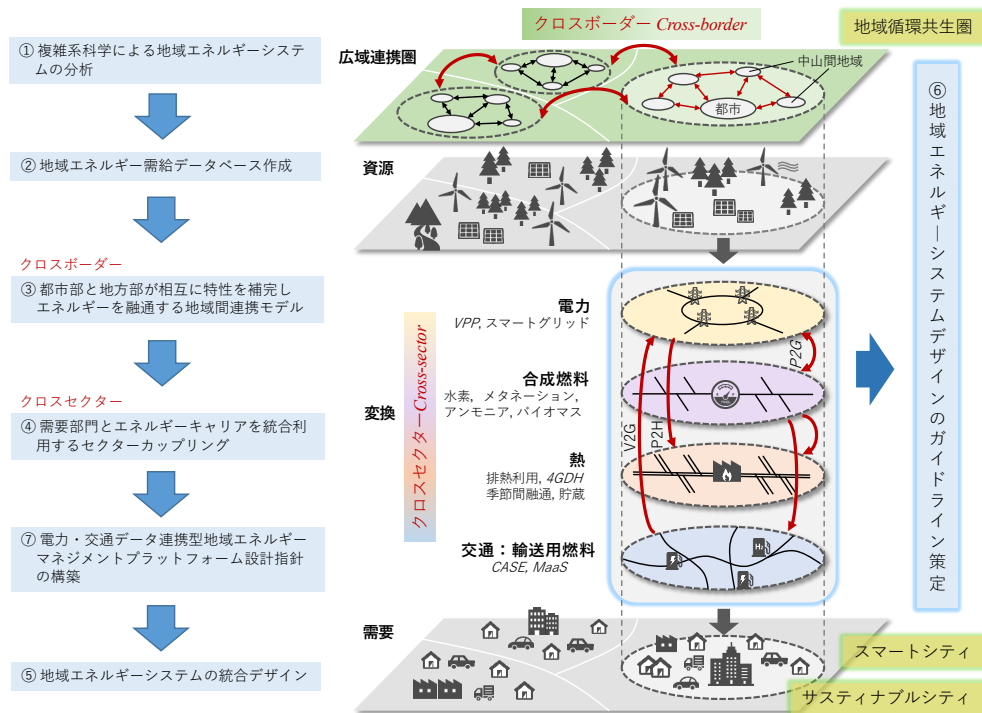


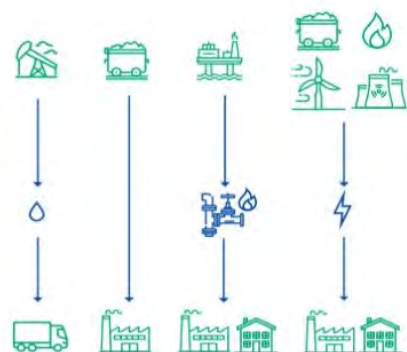
図1 地域エネルギーシステムの構成

2. エネルギーシステムの定義

システムとは、個々の要素が相互に影響し合いながら、全体として機能するまとまりや仕組みを表す。システム・オブ・システムズとは、各システムが独立運用されつつそれら全体をマネジメントする主体が存在するシステムのことである⁽¹⁾。EUでは、2020年にエネルギーシステムのインテグレーション戦略(Integrated energy system)を公表して、石油、ガス、電力などの個別で一方向の従来型エネルギー供給システムからの脱却を宣言した。このなかで、各部門をリンクさせることによって、部門個別に脱炭素化や効率化を進めるのではなく、エネルギーシステム全体を最適化することが可能になること、EUの新戦略には、ICTやデジタル化、スマートグリッドやメーター、フレキシビリティ市場など、さまざまな既存および新技術、プロセス、ビジネスモデルを含む(図2)。

重要なのは、各システムで最適と思われる解(局所最適解)が、必ずしも全体の最適解ではないということだ。オーケストラに例えれば、弦楽器や管楽器から構成される演奏者集団を指揮者が束ねてひとつのシステムを形成してきたが、どんなに大勢のオーケストラも、上位のミュージック業界からみれば一つの要素にすぎない。楽曲ひとつ見ても、異種のジャンルを超えた協奏が始まり、その結果として世界規模の大きな共創の価値が生まれてきている。プレイヤーだけでなく、リスナーとの境界が混在したコミュニティが、新たなミュージック業界のエコシステムを牽引している。

The energy system today :
linear and wasteful flows of energy,
in one direction only



Future EU integrated energy system :
energy flows between users and producers,
reducing wasted resources and money



図2 エネルギーシステムのインテグレーション⁽²⁾

日本のエネルギーシステムを、このシステム・オブ・システムズから眺めると、今後の大きな変化を俯瞰できる。図2左は、現状のエネルギーシステムを表していて、石油業界、ガス業界、電力業界などに代表される確立された垂直統合システムである。これが、図2右の円環（サーキュラー）状に統合し移行するなかで、排熱の相互融通、エネルギー効率の向上など波及効果を生じ、結果としてエネルギーシステム全体のエネルギー効率、総コスト、CO₂排出量のいずれもがよくなることめざしている。円環状のシステム・オブ・システムズの構成要素は、それは従来のエネルギー業界要素に加えて、各地域のエネルギーシステムである。

そもそも現在の電気事業の原型が、明治から大正にかけて各地域で生まれた無数の電気会社であったことをふまえれば、日本発送電株式会社を主体とする国家統合を経て、現在の10地方区分に分割して運営されてきた経緯がある。「同時同量」、「供給保証」、「安定価格」の理念を具現化するために、地域格差を平準化して、全国でのユニバーサルアクセスを保障する事業体制を築いてきた。再生可能エネルギーを起源とするグリーン電力は、実はこの地域格差を助長することになる。「同時非同量」、「供給保証外」、「不安定価格」の特性を、全国規模のインテグレーションによっていかに克服するかの知恵と技術が問われている。

意外にも、国際社会のインテグレーションの新たな潮流は、歴史ある電気事業者よりも、情報、センサー、データ分析、コンサルティングなど新興業界からのアプローチが盛んである。送配電設備などの巨大なストックを有しない「身軽」な人たちが、アナログ主体のエネルギーを、デジタル化してマネジメントする可能性に大きな魅力を感じている。柔軟なエネルギー市場の創出に伴う新たな覇権の取得をめざして、国際的な競争が激しさを増している。このような変革は、重厚長大な技術ストックの延長上に価値を生み出すインクレメンタル（増分型）イノベーションとはまったく別の、ラジカルイノベーション（変革型）といっぴよいだろう。

著者が出席する地方の会合では、地域のエネルギー需給現況が不明なままで、ビジョンを語り合うことが多い。データ駆動型イノベーション⁽³⁾は、生産性、資源効率、経済競争力、

社会福祉を大幅に強化する可能性を秘め、21 世紀の成長の重要な柱となっている。足元の地域社会のファクトの把握、分析とその精度が、今後の社会の利益と効用を最大化する原点であるといっても過言ではない。

3. 地域エネルギーデータの問題点

地域のエネルギー需給の現況を理解するには、データ分析は欠かせない。需要側と供給側のアイテムと精度がデータベースの品質を左右し、これらの科学的エビデンスに基づくエネルギーシステムのデザインが要となる。現在、公的なエネルギー統計としては、総合エネルギー統計、都道府県別エネルギー消費統計⁽⁴⁾、電力調査統計などがある。

「総合エネルギー統計(資源エネルギー庁長官官房総務課戦略企画室)」は、日本の代表的なエネルギー統計であり、国規模のエネルギー需給の構成を数値化している。貿易統計(財務省関税局関税課)の化石燃料輸入量をもとにした加工統計である。空間解像度は国つまり「一カ国」、時間解像度は「一年間」と、各一種類である。

これに空間解像度を高めたものが「都道府県別エネルギー消費統計(資源エネルギー庁長官官房総務課戦略企画室)」である。総合エネルギー統計に、製造品出荷額など活動指標を用いて都道府県別に按分している。それよりも解像度の高いエネルギー統計は、作られていない。

いっぽう、地方公共団体の温暖化対策実行計画の区域施作編の策定するために国が提供したのが、自治体排出量カルテ(環境省大臣官房地域脱炭素政策調整担当参事官室)である。都道府県別エネルギー消費統計に化石燃料別の CO₂ 排出係数を乗じて CO₂ 排出量の合計値を算出して、製造品出荷額など活動指標によって市区町村別に按分している。

一般に、統計データは、人口や所得など、個々の活動をボトムアップで足し合わせて国単位の数値が算出されるが、エネルギー統計では化石燃料のタンカーによる輸送量をもとに国単位の合計値を先に推定して、これを地域に按分する。したがって、地域を主体に考えると、地域エネルギーデータの統計値とファクトになんらかの差異があって当然である。

エネルギー統計が苦手とするのが、バイオマスや再生可能エネルギーなど、小規模で地域に散在するエネルギーである。例えば、ペレットストーブ、チップボイラーなどのバイオマス熱利用、太陽熱給湯器、電気自動車の充電量などは、なかなか把握が難しく、統計側では捕捉困難なアイテムである。

統計の精度は、的確な投資や政策判断の礎となるので、国の知的水準を表すソフトパワーとしても重要である。エネルギー統計の精度向上に向けた考え方を、以下に紹介する。

3-1. データ空間解像度の向上

空間解像度とは、統計データの一単位要素が把握する空間の大きさを指す。エネルギーデータの地域区分を、現在の国や都道府県区分から、市区町村やメッシュ単位にまで粒度(解像度)を上げることが役立つ(図3)。たとえば、「地球温暖化対策の推進に関する法律(環境省)」に基づき市区町村が作成する温暖化対策実行計画(区域施作編)では、CO₂ 排出量の推定値はわかるものの、その排出源となる化石燃料の種類と消費量はわからない。したが

って、実行計画の中身を見ると、再エネの大量導入、エコドライブの推進、クールビズの実践など、環境に良い行動を促す‘呼びかけ’が多い。これでは、環境行動が進んだ効能を定量化することが難しく PDCA も回らずに、啓蒙や啓発を延々と繰り返すことになってしまう。

市区町村単位のエネルギー需給がわかれば、再エネの導入ともない減少する化石燃料消費量を特定できて、その燃料の CO₂ 排出係数を乗じて CO₂ 減少量をかんたんに計算できる。同様に、エコドライブ、電気自動車への移行など日常の具体的な変化を、エネルギー消費構成の変化として把握することができて、温暖化対策効果を自ら実感して、さらに次の行動に移る意欲が増すことになる。

電力スマートメーターは、各需要家の消費量を自ら把握して理解できるので、ユーザーに気づきを促す点で大きな意義がある。



課題 1 データ空間解像度の向上

GIS地理情報システムと連動したデータ可視化とオープンアクセス環境の整備。

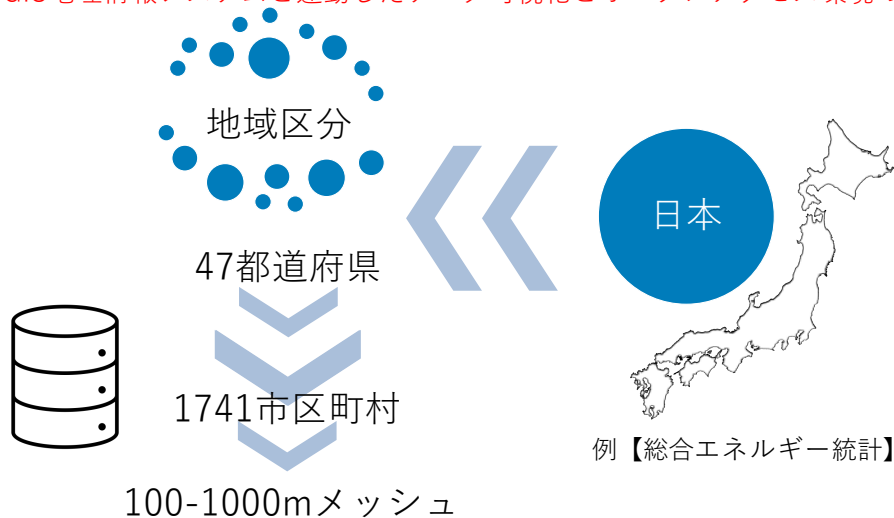


図3 データ空間解像度の向上

3-2. データ時間解像度の向上

エネルギーデータの時間区分を、年単位から、時間、分、秒単位にまで粒度（解像度）を上げることである（図4）。再生可能エネルギーは、もともと‘天然’なので、その出力は太陽や風などの「気象予報」と表裏一体である。日本では、「再生可能エネルギー情報提供システム REPOS（環境省）」が、2013年から整備されて毎年更新されている。時間解像度は年間平均値にとどまり、時間変動や間欠性をまだ表現できていない。

海外に目を向ければ、風力エネルギーの出力評価と風力発電所計画を支援するソフトウェアとして WAsP, Wind Atlas Analysis and application Program⁽⁵⁾があり、世界中のあらゆる地形を対象として、風況データの分析からサイト評価、風力発電所の発電出力量が計算できる。

たとえば、風力タービンおよび風力発電所のエネルギーバランスの計算、風力発電所の後流損失と風力発電所の効率の計算、環境アセスメントのための風況計算の機能が備わっている。さらに、ドイツを拠点とする研究者グループでは、欧州を対象として風力、太陽光、太陽熱、水力の供給エネルギーと、熱重要なデータベースを公開し⁽⁶⁾、いずれも時間と空間の解像度は非常に高い。

このようなデータベースは、事業者にとってもたいへん重宝であり、風況観測を行う事前に、高い精度で電力や熱の出力特性を知ることができる。今後の統合型エネルギーシステムでは、再生可能エネルギーの出力が入口（供給サイド）として電力、熱、輸送用燃料に変換し分配されて、出口（需要家サイド）に至るネットワークが作られていく。この基盤となる入力情報が精緻に予測できれば、入力の変動を表す変動波長と、出口の変動波長が同期する、まったく新しいエネルギーシステムの詳細なデザインが可能となる。バッテリーや水素製造の能力、設備容量、設備稼働率も、これらのデータに基づいて最適に設計することが可能となる。さらに、統合型エネルギーシステムに参入するプレイヤーと、マーケットの創出、価格メカニズムなど、経済原則に基づく新しいプラットフォームの形成が促される。

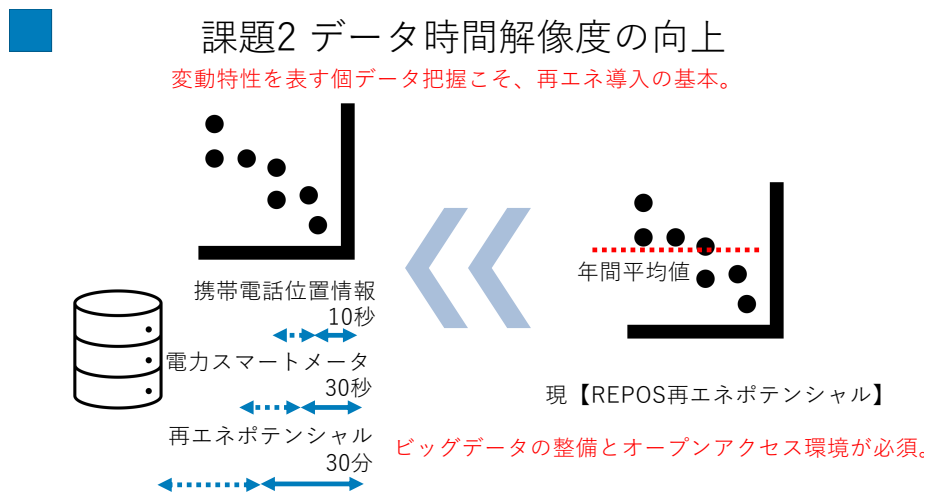


図4 データ時間解像度の向上

3-3. データ推定手法の向上

すべてのデータを収集して整備するのは理想ではなく、重要なデータを分析して統計の精度を向上させることが腕の見せ所である。入手可能なエネルギーデータを入手して、重要な要因を分析するには、大きく二つの方法がある。「積み上げ法」と「按分法」である（図5）。

積み上げ法は、スマートメータなど個々のデータを集めて、積算することによって各地域のデータを特定する、ボトムアップ手法である。これに対し、按分法は国規模のデータを、何らかの按分指標で各地域に割り出して各地域のデータを推定する、トップダウン手法である。

按分法は、各地域に割り出す按分指標の設定が結果に影響を及ぼす。たとえば、「自治体排出量カルテ（環境省）」⁽⁷⁾では、そもそも、個別のエネルギー消費量を測らないで、産業部門全体の消費量を「製造品出荷額」で按分するので、ファクトを正しく捕捉できているか不安になるかもしれない。運輸部門の自動車の燃料消費量を、「自動車保有台数」で按分すれば、各自動車の出力、燃費、走行距離などは関係なく、すべての自動車の燃料消費量が同一になってしまう。家庭部門も同様に「世帯数」で按分するので、すべての住宅のエネルギー消費量は同一になるし、業務部門は「従業者数」で按分するので、オフィスの空調環境などは考慮できない。

理想に向けて、少しずつファクトに近づく長い道のりを思えば、今できることは進むべき方向をしっかりと定めることである。



図5 データ推定手法の向上

4. 地域エネルギー需給データベースの開発

熱工学を基盤とするエネルギーシステムの解析技術と火力技術開発の知見を組み合わせ、日本初の地域エネルギー需給データベース(Japan Energy Database)を東北大学にて開発した。エネルギー統計解析に社会経済指標を加えて、全国 1,741 市区町村の地域エネルギー需給特性を情報提供する日本初のプラットフォームである。2022 年 3 月の学生と共同開発して公開以降、多くの地方自治体で活用されている(図6)。エネルギーフロー図で好評で、年間のエネルギー供給構成と需要区分が、エネルギー源別に一目でわかる。続いて多いのは、市区町村別のエネルギー消費統計表である。これらが、地方公共団体が作成する地域エネルギービジョンなどの基礎資料として役立っている。

地域エネルギーデータの活用事例

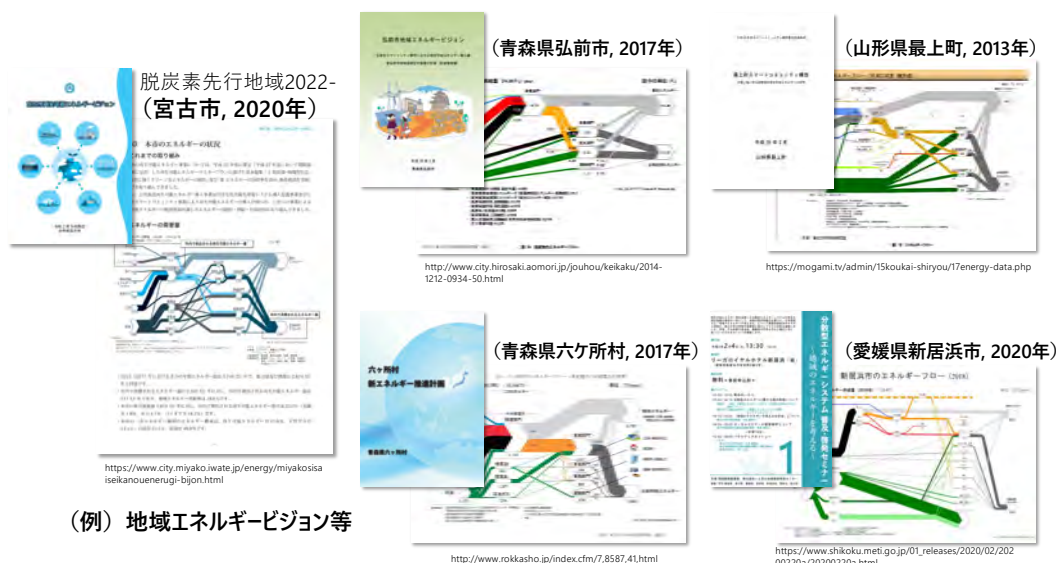


図6 地域エネルギーデータの活用事例

本技術の要は、6,200万個のビッグデータの統合解析、利用者の視点に立ったインタラクティブなデータ・ビジュアライゼーション機能とシミュレーション機能である。182変数の依存関係を緻密に定式化した動的シミュレーションモデルを内生し、サンキーチャート、時系列グラフ、ウェブマッピングなどデータ・ビジュアライゼーションを駆使して視覚化することに成功した。特徴として、データサイエンスとアートを融合して、地域エネルギー需給バランス表からドリルダウン操作でエネルギーフロー図を表示して、エネルギー資源量、需要量、エネルギー変換技術、エネルギー効率、CO₂排出量、コストなど解析結果を提供している。

公開後約二年間で14万件を超える表示回数と2.2万人のユーザー数の実績から、技術専門家、コンサルタント、政策立案者、環境団体まで幅広いユーザーに本データベース技術の優位性が認知されたといえる。カーボンニュートラル社会への異なるシナリオを仮想実験して、脱炭素技術の導入と市場展開に不可欠なCO₂削減効果を事前に理解し評価することが可能となった。環境省をはじめ約40の地方公共団体がカーボンニュートラル社会の実行計画立案に参照するなど、本技術の社会実装が始まっている。

5. 地域エネルギー需給データベースの使い方

はじめに、地域エネルギー需給データベースのウェブサイト画面左上の「地域を選ぶ」から、全国の1741市区町村のうち一つを選択する。図左側の燃料資源の内訳から、図右側の消費側の内訳に至るまでの一連のエネルギーの動きがわかり、線の太さは、エネルギー量に

比例し、単位は TJ (テラ・ジュール、10 の 12 乗ジュール) で表示される。次に、画面左列の四種のメニューから、「エネルギーシステム可視化・分析」、「エネルギーマップ」、「再生可能エネルギー発電特性」、「市区町村別エネルギー消費統計」のなかから機能を選択する。メニュー画面の「エネルギーマップ」には、日本地図上で各地域の特性が色別に表示される。メニュー画面の「市区町村別エネルギー消費統計」では、各地域のエネルギーバランス表をデータ形式でダウンロードできる。さらに、メニュー画面右側の「シミュレーションパラメータ」の各項目を左右に動かすと、太陽光発電など再エネ量を増減させたり、電気自動車 (EV) に代表される運輸部門電化率を増加させると、その項目の影響がエネルギーフロー図に反映されて変化する。画面下部の「エネルギー起源 CO₂ 排出量」には選んだ地域の CO₂ 排出量が表示されて、「シミュレーションパラメータ」に連動して数値が動く。ウェブサイト画面の概要 (図 7)、エネルギーフロー図の説明 (図 8)、エネルギーフロー図の読み方 (図 9)、エネルギー消費統計表 (図 10) をそれぞれに示す。詳細は、画面左下のマニュアルを参照されたい。

本データベースは、従来のデータベースに比して下記の特長をもつ。

- 日本のエネルギー統計では初めて英語を併記。
- 年単位のエネルギー需給データに加えて、気象データに基づく再エネ発電機器の出力特性を全国 1 時間単位で解析し視覚化し、動的シミュレーション技術に応用可能。
- 国際エネルギー機関 (IEA) や米国エネルギー省 (DOE) が常用するエネルギー単位や作図法に準拠し国際互換性を保有。

— 地域エネルギー需給データベース Japan Energy Database

● 日本全国のエネルギー需要と再生可能エネルギー資源量のデータ(地域エネルギー需給データ)を掲載。
 ● 日本全域、10 地方、47 都道府県、1,741 市区町村を網羅。
 ● 各地域のエネルギー需給構造をエネルギーフロー図として可視化し、多面的指標を用いて定量評価。
 ● 再生可能エネルギーの導入やEVの普及をはじめとする脱炭素施策を想定した地域エネルギーシステムのシミュレーションが可能。

公開URL : <https://energy-sustainability.jp>
 ライセンス : クリエイティブ・コモンズ 表示-非営利 4.0 国際 パブリック・ライセンス

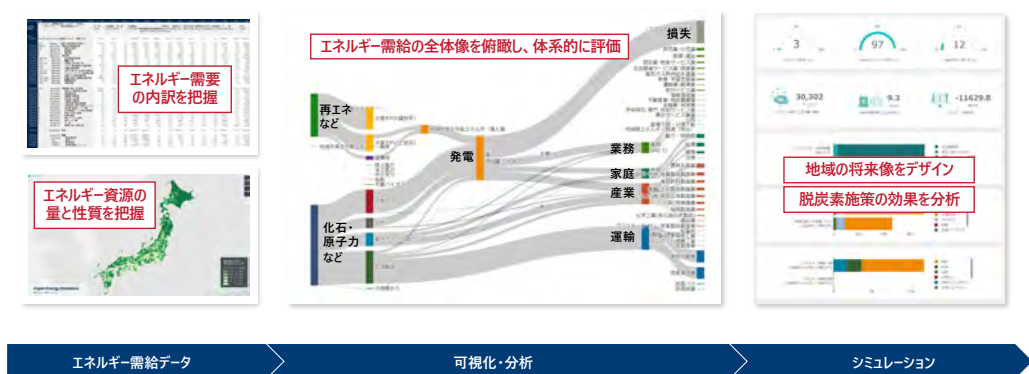
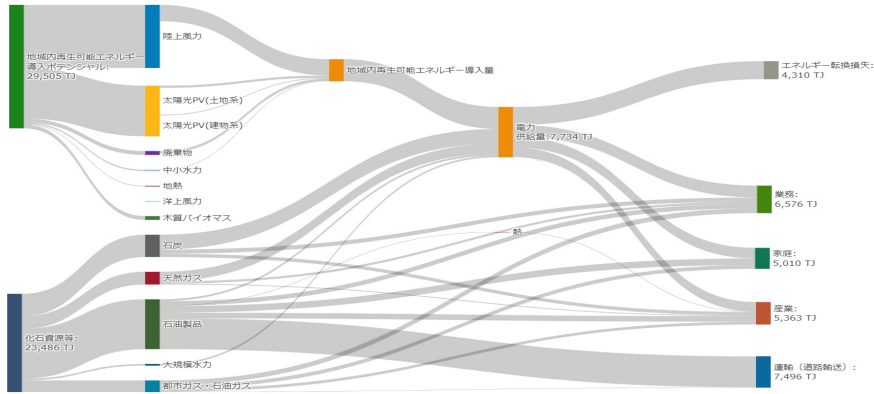


図 7 地域エネルギー需給データベース

エネルギーフロー図とは

- 地域内のエネルギー需給構造（エネルギーシステム）の全体像を可視化した図。
- 部門間のエネルギーの流量および各部門のエネルギーの収支の相対関係を表現。
- エネルギーシステムは、大きく分けてエネルギー資源（図左側）、エネルギー転換（図中央部）、エネルギー需要（図右側）の3部門によって構成される。



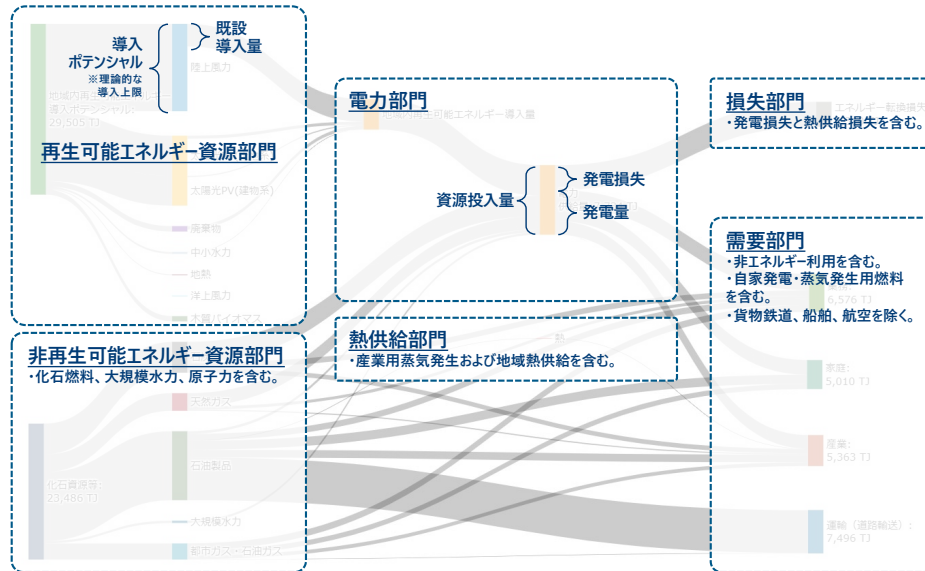
エネルギー資源

エネルギー転換

エネルギー需要

図8 エネルギーフロー図とは

エネルギーフロー図の読み方



エネルギー資源

エネルギー転換

エネルギー需要

図9 エネルギーフロー図の読み方

エネルギー消費統計表

- エネルギー消費統計表は、エネルギー種別、需要部門別の年間エネルギー消費量ととりまとめた表。
- 1年間に、どのエネルギー種が、どの需要部門で、どれだけ消費されたかが把握できる。

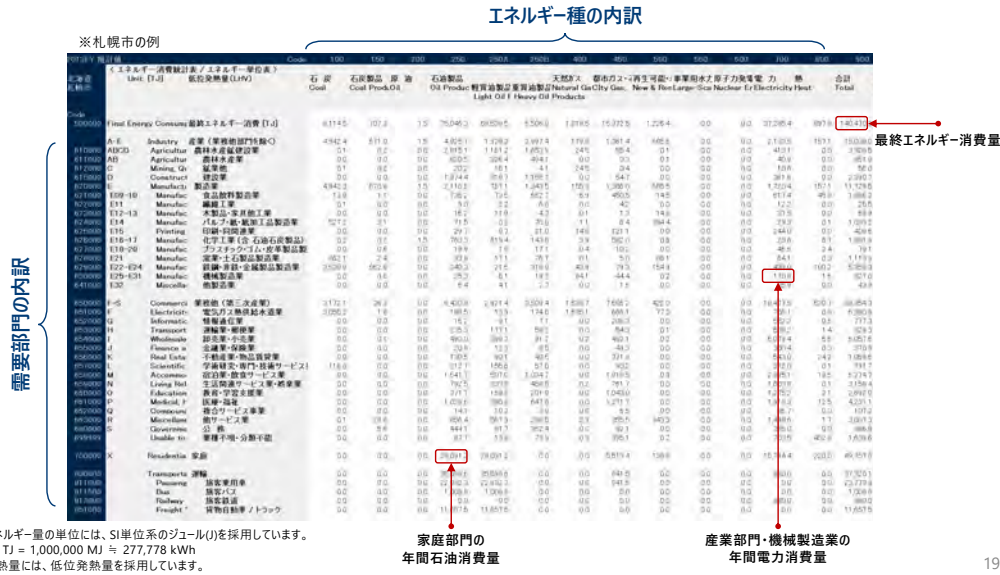


図10 エネルギー消費統計表

6. おわりに

グリーン電力を主体とする地域エネルギーシステムのデザインを進める上で重要なのは、地域データの把握と、データ精度である空間解像度と時間解像度の向上である。前者の空間解像度は、地理情報システム GIS と連動した視覚化の機能を重視し、再生可能エネルギーの供給ポテンシャルとエネルギー消費特性が同スケールのメッシュ座標で把握することが要となる。電気自動車の双方向の充放電や、ピアツーピア P2P の地域エネルギーシステムのデザインに必須となる。

後者の時間解像度は、現状の年間合計値や年間平均値のデータに加えて、分単位のエネルギー需給データの解析機能の新設である。変動を伴う再生可能エネルギーの出力と需要家を合理的かつ最適に組み合わせるシステムデザインと運用が、次世代のエネルギー事業の覇者となり、あわせてカーボンニュートラルを実現するキープレイヤーとなる。

さらに、今後の再生可能エネルギーの導入促進には、地域社会の理解が欠かせない。地域エネルギー需給データベースは、地域住民が化石燃料に依存した現状のエネルギー需給の課題を実感し、その望ましい解決策を自ら探る手助けとなる。環境アセスメント (EIA)、パブリック・アクセプタンス (PA) と、高度経済成長の副産物として地域社会の合意形成機能をその都度追加してきたものの、一貫した法整備には至っておらず不十分である。エネルギー事業が地域社会にとって持続可能であるためには、ソーシャルライセンス (社会的操業権) の取得と維持を図る必要がある。グローバルな社会の視点に立って気候変動への対応を進めるなかで、再生可能エネルギーの価値をローカルな地域社会で共有し、その恩恵をグローバルに享受することをめざしたい。

文献

- (1) IoT 時代の開発方法論としてのシステムズエンジニアリング, 白坂成功, SEC journal, Vol, 111, No. 3, pp. 34-36 (2015).
- (2) EU energy system integration strategy, European Commission, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1295, (2020).
- (3) Data-driven innovation: Big data for growth and well-being, OECD (2015).
- (4) 都道府県別エネルギー消費統計, 資源エネルギー庁, https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/summary.html#headline3
- (5) WAsP, DTU Wind and Energy Systems, <https://www.wasp.dk>
- (6) Hofmann et al., (2021). atlite: A Lightweight Python Package for Calculating Renewable Power Potentials and Time Series. Journal of Open 1 Source Software, 6(62), 3294. <https://doi.org/10.21105/joss.03294>.
- (7) 自治体排出量カルテ (2. 各部門の算出方法), 環境省, https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/tools/siryou/suikai-2.pdf

III. 地域エネルギーシステムデザインのガイドライン

東北大学 中田俊彦

このガイドラインの構成は以下の通りです。必要に応じて参照ください。

第1章では、地域エネルギーシステムを皆様がデザインすることを目的として、各種データの定義や算出根拠などを解説します。

第2章では、KPI ツリーに基づく地域エネルギーシステムデザインの手順をまとめます。

第3章では、地域エネルギー需給データの構成を、出典や推定を含めて紹介します。

第4章では、未来エネルギーシミュレータの機能を解説します。

第5章では、地方公共団体における地域エネルギー需給データベースの活用事例として、岩手県宮古市の事例を紹介します。

第6章では、地域間連携の可能性について、その定義と期待される効果について説明します。

第7章では、セクターカップリングの機能と課題について解説します。

1. 地域エネルギーシステムとは

エネルギーシステムとは、エネルギー資源、エネルギー変換、エネルギー需要の三要素から構成される一連の集合体である。

1-1. エネルギー資源

エネルギー資源は、従来は化石燃料と非化石燃料に分類されてきた。化石燃料は、炭素と水素が化合した有機物であり、その形態によって石炭（固体）、石油（液体）、ガス（気体）の三種に大別できる。非化石燃料は、原子力燃料と再生可能エネルギーのひとつである水力に代表される。近年は、これらに太陽光、太陽熱、陸上・洋上風力、海洋、地熱、バイオマスが加わった。

バイオマスは、エネルギー作物など植物由来のバイオエタノールとバイオディーゼルが、内燃機関用の液体燃料として石油の代替として用いられる。もうひとつは、廃棄物由来のもので、家畜排せつ物（牛糞、豚糞、鶏糞）、食品廃棄物、下水汚泥、農業系廃棄物（稲わら、もみガラ、麦わら）、建築廃材などである。木質バイオマスは、国内の間伐材、林地残材、製材残材、街路樹の剪定枝に加えて、海外からは木質チップやペレットの形態で火力発電の混焼燃料として輸入されている。

エネルギー統計では、これらのエネルギー資源の年間供給量を、一次エネルギー総供給量という。

1-2. エネルギー変換

エネルギー変換とは、エネルギー資源を各用途に利用できる形態に加工することである。エネルギーの利用形態は、電力、熱、輸送用燃料の三種であり、これらを「エネルギーキャリア」と総称する。輸送用燃料は、ガソリンや軽油などの内燃機関自動車の燃料のことである。それらの需要家側からみた割合は、現状で電力が約 30 パーセント、熱が約 45 パーセント、輸送用燃料が約 25 パーセントである。

各エネルギーキャリアの特徴をみると、電力は多様なエネルギー資源を原料として、火力発電、原子力発電、水力発電、風力発電、太陽光発電等のエネルギー変換技術によって発電される。輸送用燃料は、石油を製油所にて精製して、ガソリンや軽油などの石油製品に変換される。熱は、化石燃料を燃焼して蒸気や温水等の熱エネルギーに変換される。太陽熱や地中熱も熱エネルギーの一種である。

エネルギー資源を一次エネルギーというのに対し、エネルギーキャリアを二次エネルギーという。二次エネルギーは、需要家にて各用途に消費される。

1-3. エネルギー需要

エネルギーキャリアを消費する需要家は、産業部門、業務部門、家庭部門、運輸部門の四部門から成る。産業部門は、鉄鋼、窯業・土石製品、化学工業、パルプ・紙・紙加工品、食品飲料、繊維、非鉄金属、機械、農林水産、建設等からなる。業務部門は、オフィス、商業施設、学校等からなる。家庭部門は、家庭で使用するエネルギーである。運輸部門は、旅客輸送と貨物輸送からなる。これらの需要家で消費されるエネルギー量を、最終エネルギー消費量とよぶ。

1-4. 地域エネルギーシステムとエネルギーフロー図

地域エネルギーシステムの構成を図 1-1 に示す。一般に、地域のエネルギーシステムの構成要素は、エ

エネルギー資源部門、エネルギー変換部門、エネルギー需要部門の三要素である。地域内外から調達するエネルギー資源は、電力、熱、燃料などの各エネルギーキャリアに変換された後に、地域内のエネルギー需要を満たすように供給される。このエネルギー資源から最終消費に至る一連のエネルギー需給の流れをエネルギーフロー図とよぶ。エネルギーフロー図を作成することによって、「エネルギー資源」が「エネルギー変換」を経て「エネルギー需要」を満たす一連の動きを、実在の流れを見るように表現できる（図1-2）。

エネルギーフローは、国、都道府県、市区町村、地区・建物単位など、対象とするエネルギーシステムの範囲を任意に設定できる。フロー図は、別名でサンキーダイアグラムとよび、プロセスの全貌を俯瞰する作図法としてマテリアルフローなど化学工学の分野で広く用いられている。エネルギーや物質について、プロセス毎の出入りや派生する損失量を容易に理解することが可能である。金融のキャッシュフローの作図も可能である。エネルギーフローを分析することによって、(1)エネルギー供給構成や部門別エネルギー消費量の現状把握、(2)エネルギーシステム導入計画や省エネルギー対策の立案、(3)計画導入後の地域効果の評価、にそれぞれ活用できる。

エネルギーフロー図の構成を図1-3に示す。本「データベース」では、米国エネルギー省ローレンス・リバモア国立研究所の作図法¹に基づいている。ここでは、エネルギーフロー図に加えて、カーボンフロー図も作成している。また、従来は米国一国を対象としていたが、最近では米国各州のエネルギー需給を分析して州別エネルギーフロー図の作成を始めた。

国際エネルギー機関IEAでは、世界各国のエネルギーフロー図を作図して、公開している²。

¹ Energy Flow Charts, Lawrence Livermore National Laboratory, <https://flowcharts.llnl.gov>

² IEA Sankey Diagram, International Energy Agency, <https://www.iea.org/sankey/>

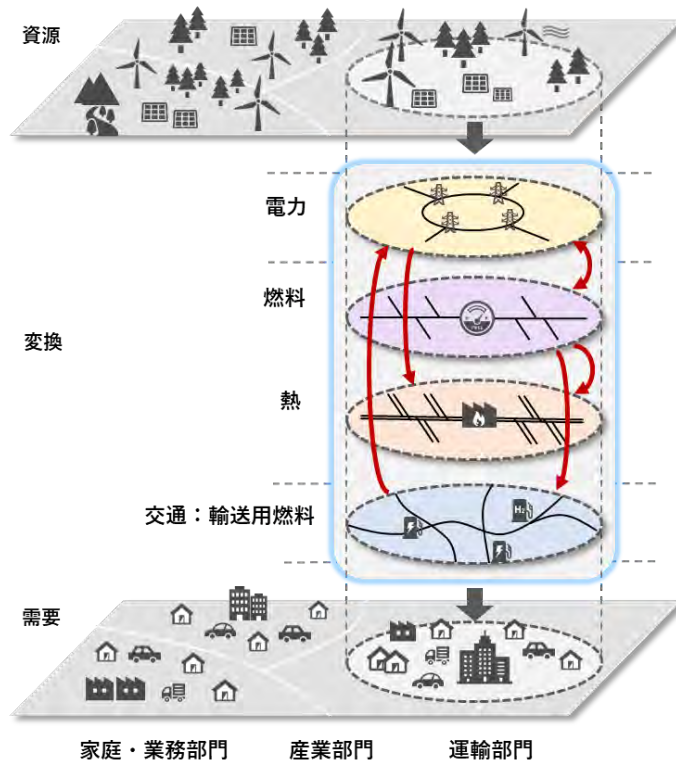


図 1-1 地域エネルギーシステムの構成

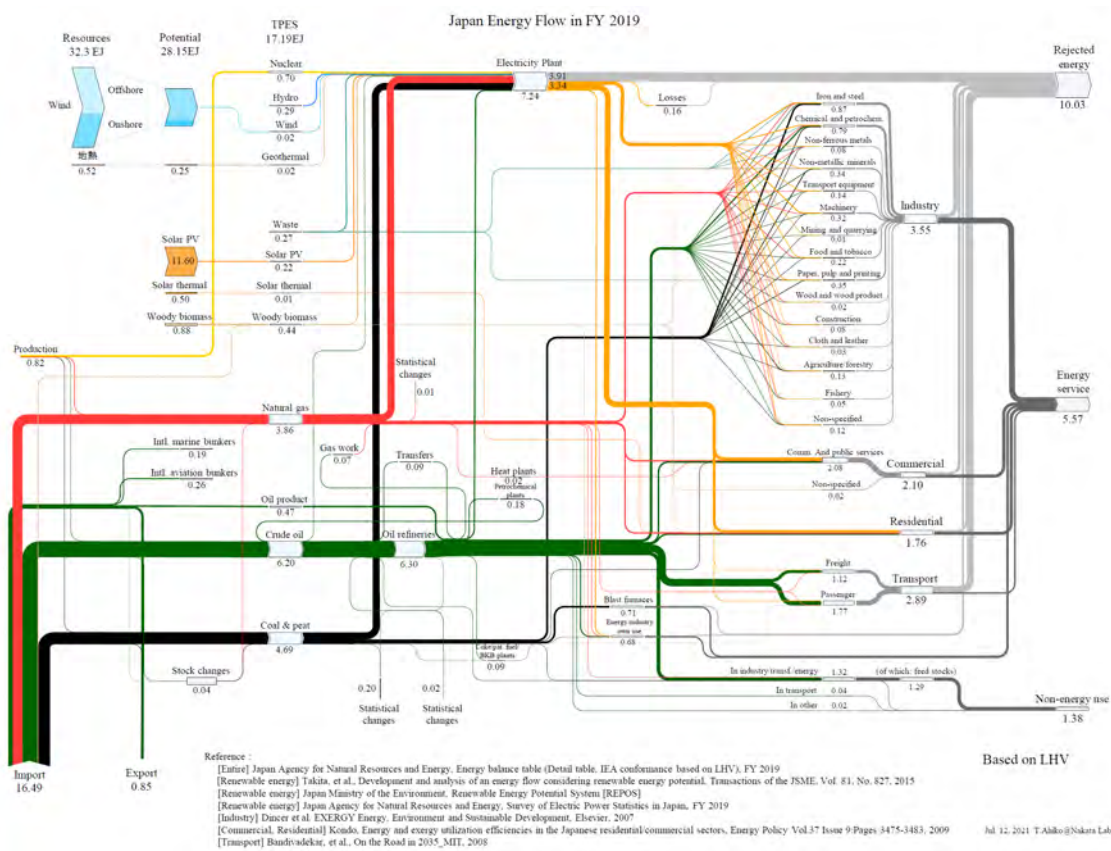


図 1-2 日本のエネルギーフロー図 (2019 年度)

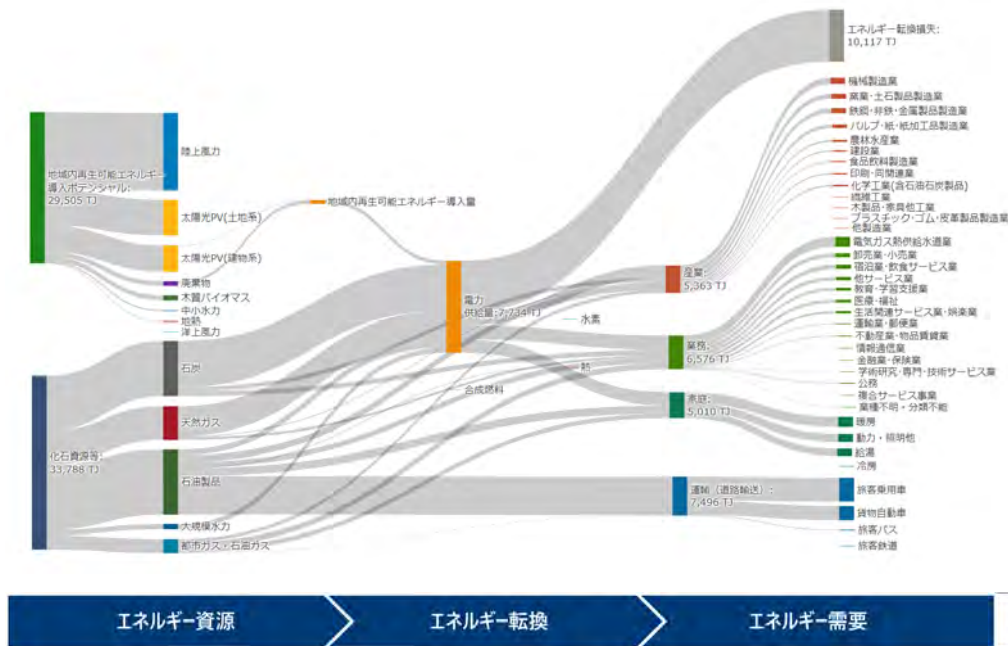


図 1-3 エネルギーフロー図の構成

まとめると、エネルギーフロー図は、左から(1)エネルギー資源、(2)エネルギー転換、(3)エネルギー需要の三要素から構成される。地域内の部門別のエネルギー需要を満たすために、どのようなエネルギーが需要部門に供給されているのかなど、資源からエネルギーキャリアを通じて需要家に至る仕組みの全体を俯瞰することができる。さらに、数値データを読み取ることによって、エネルギー資源別のエネルギー供給量とエネルギー収支などが定量的に理解できる (図 1-4)。

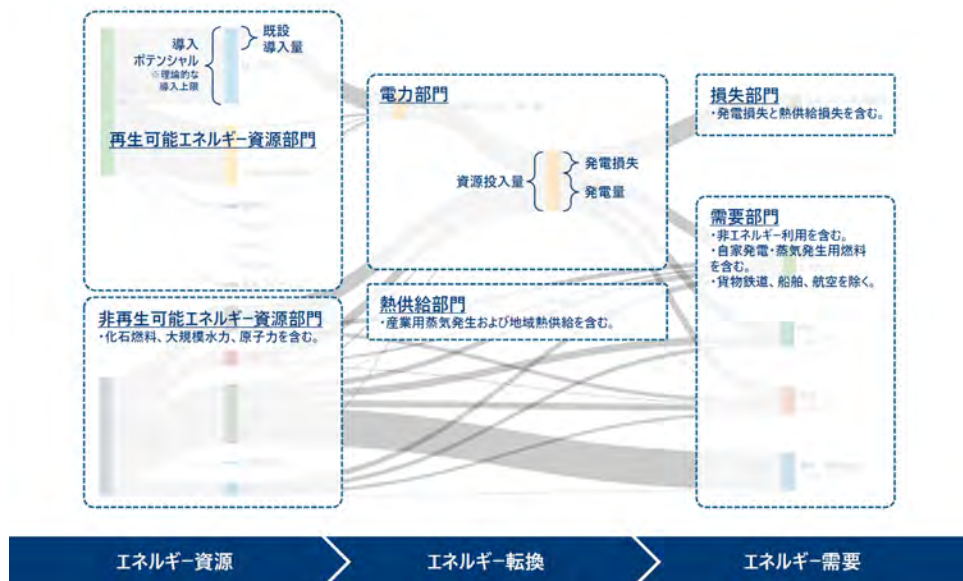


図 1-4 エネルギーフロー図の情報

1-5. 地域エネルギーシステムのデザインとは

システムとは、「複数の要素が有機的に関係しあい、全体としてまとまった機能を発揮している要素の集合体」である。したがって、地域エネルギーシステムとは、地域のエネルギー資源と需要家が連携して、地域社会のエネルギー需給を満たす仕組みである。その機能の優劣は、システムの性能指標を設定して評価することになる。たとえば、利便性、経済性、供給安定性、環境保全、カーボンニュートラルなどの複数の設計指標のなかから、優先順位や重みづけを定めてシステム性能を評価することになる。客観的な評価手法としては、各指標のスコアを評点して統合する方法から、数理モデルを構築して最適化手法によって最適解を得る数値解法まで幅広い。

1-6. 地域エネルギーシステムの評価指標の定義

地域エネルギーシステムの評価指標を、下記に順に紹介する。

(1) 一次エネルギー総供給量

一次エネルギー総供給量 (TPES: Total Primary Energy Supply) とは、地域内に供給された一次エネルギーの合計で、次式で定義できる。

$$\text{一次エネルギー総供給量 [TJ]} = \text{地域内エネルギー生産量 [TJ]} + \text{エネルギー移入量[TJ]} - \text{エネルギー移出量[TJ]}$$

ここで、一次エネルギーは、電力や熱などの二次エネルギーに転換される前のエネルギーであり、石炭、石油、天然ガス、風力、太陽光などが含まれる。また、風力、太陽光、地熱、中小水力などの再生可能エネルギーは、資源量を二次エネルギー量（発電電力量または熱供給量）に換算し、再生可能エネルギーの変換効率を 100 パーセントと設定することが多い。移入量とは、他地域から購入し地域内で消費されたエネルギー量である。移出量とは、他地域へ販売し供給したエネルギー量である。いずれも、国家間の取引を表す輸出入に対応して、地域間の取引として独自に定義した。

(2) 最終エネルギー消費量

最終エネルギー消費量 (FEC: Final Energy Consumption) とは、産業や家庭などの最終需要家によって消費されたエネルギー量であり、次式で定義される。

$$\text{最終エネルギー消費量 [TJ]} = \text{燃料消費量 [TJ]} + \text{電力消費量 [TJ]} + \text{熱消費量 [TJ]}$$

(3) エネルギー転換損失

エネルギー損失とは、一次エネルギーを電力や熱などの二次エネルギーに転換する際に生じるエネルギー損失である。たとえば、発電、石油精製、ガス改質によるエネルギー転換損失などであり、次式で定義される。

$$\text{エネルギー転換損失 [TJ]} = \text{一次エネルギー総供給量 [TJ]} - \text{最終エネルギー消費量 [TJ]}$$

(4) 再生可能エネルギー移出ポテンシャル

再生可能エネルギー移出ポテンシャルとは、地域内の再生可能エネルギー資源で地域内エネルギー需要を賄いつつ、他地域に供給可能なポテンシャルを表す独自の指標であり、次式で定義される。この値が正の場合は、地域内資源によって地域内エネルギー需要を賄うことができ、逆に負の場合には、地域内資源によって地域内エネルギー需要を賄うことが難しいことを示す。図 1-5 に、市区町村別の全国再生可能エネルギー移出ポテンシャルマップを示す。2013 年時点のエネルギー消費量をもとに作成している。

$$\text{再生可能エネルギー移出ポテンシャル[TJ]} = \text{再生可能エネルギー導入ポテンシャル[TJ]} - \text{エネルギー需要[TJ]}$$

(5) 電化率

需要部門にて、エネルギー消費と伴う仕事のうち、電力によって賄われている割合を表す。

ここで、エネルギー消費を伴う仕事とは、たとえばガソリン自動車の場合には燃料消費によって車体を前進させることで、最終エネルギー消費量からエネルギー損失を差し引いた値、または、最終エネルギー消費量にエネルギー消費効率を乗じた値である。最終エネルギー消費量における電力消費量の割合でないことに注意されたい。

$$\text{仕事量} = \text{最終エネルギー消費量} \times \text{エネルギー消費効率}$$

$$\text{電化率}[\%] = \frac{\text{電力消費量} \cdot \text{電力消費効率}[\text{TJ}]}{\text{仕事量}[\text{TJ}]} \times 100$$

(6) エネルギー自給率

エネルギー自給率とは、地域内に供給されたエネルギー量に対する地域内エネルギー生産量の比率である。国際エネルギー機関（IEA）の定義³に準じている。

$$\text{エネルギー自給率}[\%] = \frac{\text{地域内エネルギー生産量}[\text{TJ}]}{\text{エネルギー供給量}[\text{TJ}]} \times 100$$

この定義では、エネルギー自給率が 100 パーセントでも、地域外からのエネルギー移入に依存するケースが起こり得る。たとえば、地域内の再エネを地域内で使わずにすべて移出しても、定義上はエネルギー自給率 100 パーセントとなる。エネルギーが地域内で賄われたかどうかの地域エネルギーシステムの自立性とは異なる。

³ IEA, World Energy Balances – Database documentation 2022 edition (2022).

(7) 電力自給率

電力自給率とは、地域内で消費された電力量に対する地域内発電量の比率である。電力自給率は、再生可能エネルギーなどの地域内発電量（分子）の増加によって上昇するが、電化率の低下や人口減少によって電力消費量（分母）が減少することで上昇し、EVの普及に伴う電力消費量の増加によっても減少することがある。

$$\text{電力自給率}[\%] = \frac{\text{地域内発電量}[\text{TJ}]}{\text{電力消費量}[\text{TJ}]} \times 100$$

(8) エネルギー移入依存率

エネルギー移入依存率とは、地域内に供給されるエネルギー量のうち、地域外から移入されたエネルギー量の割合である。エネルギー移入依存率がゼロのときは、エネルギーが地域内にて賄われている。

$$\text{エネルギー移入依存率}[\%] = \frac{\text{エネルギー移輸入量}[\text{TJ}]}{\text{地域内エネルギー供給量}[\text{TJ}]} \times 100$$

(9) エネルギー起源 CO₂ 排出量

エネルギー起源の CO₂ 排出量、つまりエネルギーの転換および消費に伴って生じる CO₂ 排出量である。エネルギー種ごとに算出する。化学製品原料用の原油と天然ガスは、廃棄時に廃棄物部門 CO₂ 排出量として計上されるために除外する。

$$\text{エネルギー起源 CO}_2\text{ 排出量} [\text{t-CO}_2] = \text{一次エネルギー供給量} [\text{TJ}] \times \text{CO}_2\text{ 排出係数} [\text{t-CO}_2/\text{TJ}]$$

CO₂ 排出量の算出における注意点を記す。地球温暖化対策計画等に記載する CO₂ 排出量は、経済産業省と環境省の算定省令⁴に則って算出する必要がある。算定省令では、エネルギー種区分を表 1-1 のとおり考慮するよう定められている。

表 1-1 算定省令および市区町村別エネルギー消費統計のエネルギー種区分

算定省令におけるエネルギー種区分	市区町村別エネルギー消費統計におけるエネルギー種区分
原料炭	石炭
一般炭	
無煙炭	
コークス	石炭製品
コールタール	

⁴ 特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令（平成十八年三月二十九日 経済産業省・環境省令第三号）別表第 1（第 2 条関係）

コークス炉ガス	
高炉ガス	
転炉ガス	
コンデンセート（NGL）	原油
原油（コンデンセートを除く）	
ガソリン	軽質油製品
ナフサ	
ジェット燃料油	
灯油	
軽油	
石油コークス	重質油製品
石油アスファルト	
A重油	
B・C重油	
石油系炭化水素ガス	都市ガス・石油ガス
液化石油ガス（LPG）	
都市ガス	
液化天然ガス（LNG）	天然ガス
天然ガス（LNGを除く）	

「データベース」の市区町村別エネルギー消費統計のエネルギー種区分は、この省令の区分より粗いため、地球温暖化対策計画のためのCO₂排出量の推計に用いることはできない。ただし、エネルギー量ベースの分析評価や、地域独自のエネルギー計画等におけるCO₂排出量の概算値として用いることは可能である。

（10）地域エネルギー経済収支

地域エネルギー経済収支とは、エネルギー移出入に伴うエネルギー代金の流出入収支である。この値が負の場合は、地域外へのエネルギー代金の支払いによる経済流出を表し、正の場合には外貨の獲得（経済流入）を表す。エネルギー移出入額は、エネルギー移出入量に卸売価格などのエネルギー単価を乗じて算出できる。

$$\text{エネルギー経済収支 [億円/年]} = \text{エネルギー移出額 [億円/年]} - \text{エネルギー移入額 [億円/年]}$$

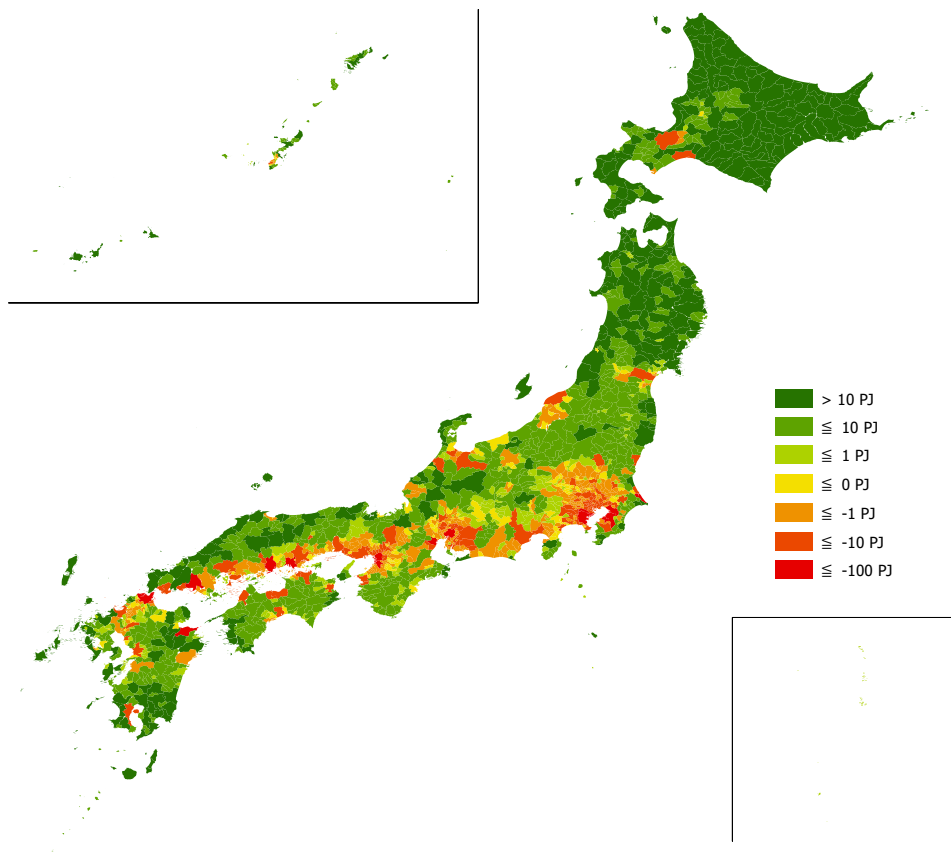


図 1-5 市区町村別再生可能エネルギー移出ポテンシャル
 (再生可能エネルギー資源として、太陽光、陸上風力、洋上風力、地熱、中小水力、木質バイオマス、
 廃棄物を含む。エネルギー消費量は 2013 年の推計値。)

2. KPI ツリーに基づく地域エネルギーシステムデザインの手順

2-1. KGI と KPI の定義

地域エネルギーシステムデザインとは、地域エネルギーシステムの全体像を的確に捉えて、将来に向けて具体的かつ定量的なビジョンまたは実行計画を策定する手続きといえる。いいかえれば、「整合性のある数値目標群」を策定する手続きである。エネルギーシステムの評価指標のように、相互に依存関係がある複数の性能指標を数値目標として採用する場合には、論理的矛盾が生じないように注意が必要である。そこで、「KPI ツリー」を用いて目標間の関係を整理することが有用である。

KPI は、重要業績評価指標（Key Performance Indicator）の略であり、目標を達成するための各プロセスが適切に実施されているかを定量的に評価する指標である。KPI ツリーとは、目標群を階層的に並べ、それらの依存関係を線でつないだロジックツリー（図 2-1）である。KPI ツリーを作成する際には、以下が重要である。

数値目標には、最終的に達成したい KGI（Key goal indicator, 重要目標達成指標）と KGI を達成するために必要な KPI（Key performance indicator, 重要業績評価指標）がある。たとえば、気候変動対策を目的とする場合の KGI には CO₂ 排出量を、KPI には化石燃料消費量や再エネ導入量などが設定する。KGI を達成するための手段が多いほど、目標を KPI によって細分化することによって、KGI 達成に向けた具体的な方策を考えることが容易になる。

地域エネルギーシステムデザインでは複数の KGI が必要となり得る。KGI は目的に合わせて設定され、一つに絞ることが多い。しかしながら、地域エネルギーシステムデザインの目的は、脱炭素化、地域経済的価値の創出、レジリエンスやエネルギーセキュリティの向上など地域社会によって多様であり、複数の KGI が必要となってくる。その際に、一つの KPI が複数の KGI に影響する場合があるため、KGI ごとに KPI ツリーを作成するのではなく、すべての KGI と KPI を網羅した KPI ツリーを作成するほうが望ましい。

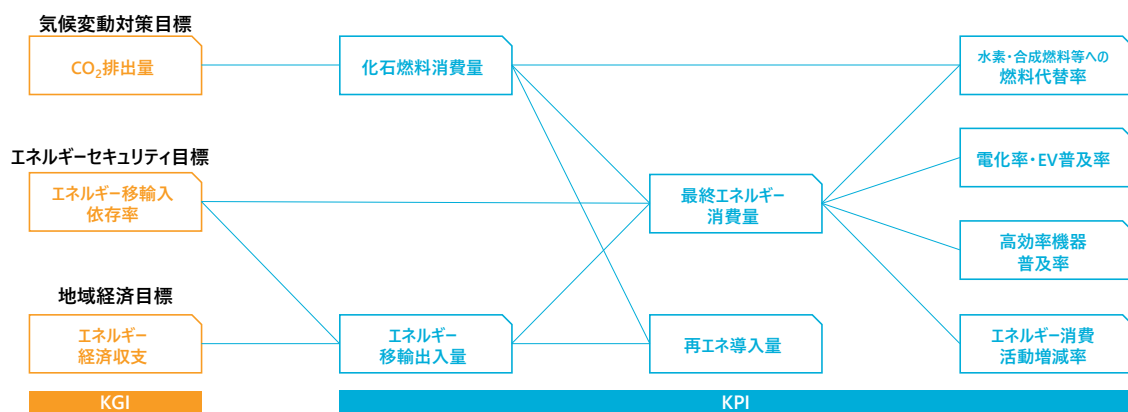


図 2-1 地域エネルギーシステムの KPI ツリーの例

2-2. 地域エネルギーシステムデザインの手順

「データベース」を用いる具体的な手順を、図 2-2⁵⁾に示す。

⁵⁾ 地方独立行政法人北海道総合研究機構齊藤茂樹, 地域エネルギー需給データベースの活用事例, 地域エネルギーシステムデザイン研究会 (2023) .

(1) ビジョン・構想づくり

- ・ 地域ごとの特徴を把握する。都道府県のデータでは把握できない、市区町村単位のエネルギー需給を「データベース」を活用して把握する。
- ・ 「再生可能エネルギー導入ポテンシャル」、「エネルギー需要」、「再生可能エネルギー移輸出入ポテンシャル」を、「データベース」から俯瞰する。
- ・ 1741 市区町村のエネルギー消費統計表をダウンロードして、たとえば産業分類別のエネルギー消費割合を分析する。
- ・ 需要部門別エネルギー消費構成の関係を、対象地域は特定部門に特化してプロットする。各市町村では、エネルギー消費の面からどのような特徴があるか、類似性がわかる。

(2) 計画の検討

「ビジョン・構想」作りから「計画」検討へと進める。

- ・ エネルギー地産地消、広域連携等の検討のため、地域エネルギー需給の時刻変化を把握する。
- ・ 地域の時刻別エネルギー需要推定の骨子を検討し、現状で把握できる情報を可視化する。詳細データが得られ次第、精度を高めていく。
- ・ 地域内のエネルギー消費量の分布を推計する。「データベース」を活用して、現状でエネ需要の積上げが困難な部門でも相対的なボリュームを把握することができる。積上げで試算した結果の妥当性を判断する指標となる。

(3) 実施と検証

地域エネルギーシステム導入の効果を検証すると共に、得られた知見を今後の計画策定にフィードバックする。

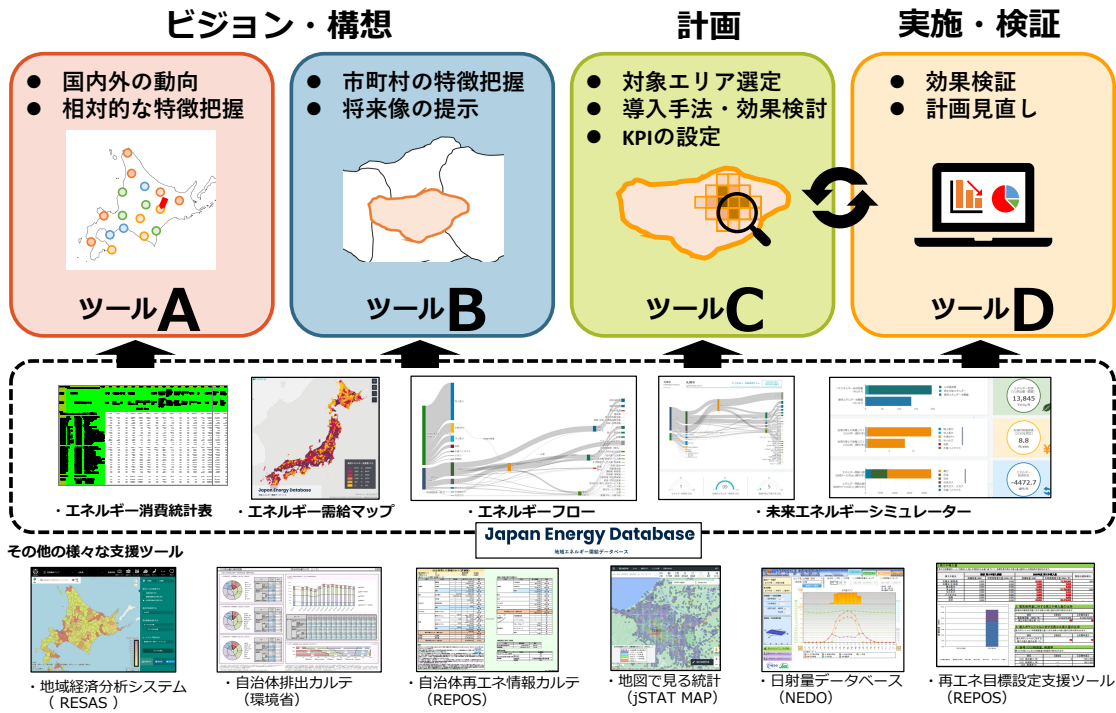


図 2-2 地域エネルギーシステムデザインの手順例

3. 地域エネルギー需給データ

3-1. 再生可能エネルギー資源データ

(1) 再生可能エネルギーポテンシャルの考え方

地域資源である再生可能エネルギーの活用を進めるために、その資源量を把握することが重要である。再生可能エネルギーの資源量を測る指標として、賦存量と導入ポテンシャルがある。賦存量は、技術的に利用可能なすべての再生可能エネルギー資源量を表す。導入ポテンシャルは、賦存量のうち実際には導入が困難な資源量を除いた量である。

環境省は、資源量の区分と定義を表 3-1 に、賦存量と導入ポテンシャルを図 3-1 にそれぞれ定義している。

表 3-1 再生可能エネルギー資源量の区分と定義⁶

区 分	定 義
賦存量	技術的に利用可能なエネルギーの大きさ(kW)または量(kWh 等)。設置可能面積、平均風速、河川流量等から理論的に算出することができるエネルギーの大きさ(kW)または量(kWh 等)のうち、推計時点において、利用に際し最低限と考えられる大きさのあるエネルギーの大きさ(kW)または量(kWh 等)。
導入ポテンシャル	各種自然条件・社会条件を考慮したエネルギーの大きさ(kW)または量(kWh 等)。賦存量のうち、エネルギーの採取・利用に関する種々の制約要因(土地の傾斜、法規制、土地利用、居住地からの距離等)により利用できないものを除いた推計時点のエネルギーの大きさ(kW)または量(kWh 等)。
事業性を考慮した導入ポテンシャル	事業性を考慮したエネルギーの大きさ(kW)または量(kWh 等)。推計時点のコスト・売価・条件(導入形態、各種係数等)を設定した場合に、IRR(法人税等の税引前)が一定値以上となるエネルギーの大きさ(kW)または量(kWh 等)。

導入ポテンシャルは、すべて利用可能であるとは限らない。たとえば、太陽光では、すべての官公庁・病院・学校・住宅・工場などの建物の屋根・屋上と、すべての耕地・荒廃農地・ため池などを対象として導入ポテンシャルを推計している。対象ごとに設置可能面積を考慮しているが、建物の用途や耐久性、屋根の形状によっては設置が困難な場合がある。また、耕地・荒廃農地は将来、農業利用や多用途での利用がなされる可能性があり、必ずしも太陽光発電に利用可能とは限らない。洋上風力発電については、対象海域に満遍なく風車を設置する想定であるが、こうした状況は漁業や海上交通への影響や、景観が損なわれるなどの社会受容性の観点から、実際に最大限導入できるとは考えにくい。

したがって、再生可能エネルギーの導入計画や導入目標の策定にあたっては、導入ポテンシャルのうち

⁶ 環境省、令和 3 年度再エネ導入ポテンシャルに係る情報活用及び提供方策検討等調査委託業務報告書、https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/dat/report/r03/r03_whole.pdf

対象地域では実際にどれだけの導入が見込まれるかを、実地調査もふまえて検討する必要がある。

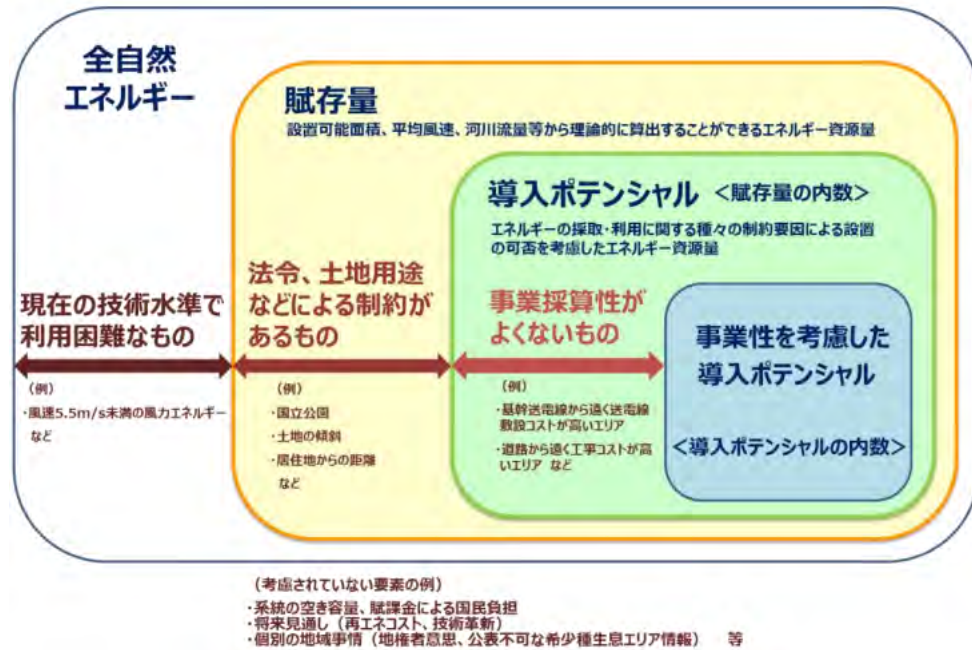


図 3-1 再生可能エネルギーの賦存量と導入ポテンシャルの定義⁶

(2) 変動性再生可能エネルギー

風力や太陽光は、その賦存量の多さや発電技術の進歩から、エネルギーシステムの脱炭素化に向けて中心的な役割が期待される。分単位から季節単位で変動する間欠性から、変動性再生可能エネルギー (Variable renewable energy) とよばれる。また、その間欠性や賦存量(賦存密度)といった物理的な性質は気候や地形によって異なるので、風力や太陽光を適切にエネルギーシステムに導入するためには、その時間変動と地理特性を正確に把握することが重要である。

太陽放射コンソーシアム⁷が提供する 30 分間隔および 1km メッシュの高時空間解像度気象データ(以下、AMATERASS データセット)を用いて、風力・太陽光資源の賦存量を推定した事例を紹介する。

(3) 風力資源の賦存量の推定例

はじめに、AMATERASS データセットに収録されている高度 10m 地点の風速データを用いて、タービンのナセル高さ(地上 100m)の風速を推定する⁸。地形の粗さを考慮するために、たとえば海上のような起伏の少ない地形では、高度による風速の変化は少ないと考える。次に、陸上・洋上用風力タービンの出力曲線(各風速に対する理論的発電量)に基づいて、風速を風力発電量に変換する⁹。1 基あたりの

⁷ 太陽放射コンソーシアム <http://www.amaterass.org/>

⁸ R. Delage, T. Matsuoka, and T. Nakata, Spatial-Temporal Estimation and Analysis of Japan Onshore and Offshore Wind Energy Potential, *Energies* 14 (2021) 2168

⁹ 環境省, REPOS 令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書 (2020)

設置面積は、後流の乱れ（ウェイクロス）による損失の影響を緩和するために、ローター径を D として $8D \times 8D \text{ km}^2$ とする¹⁰。

2019 年を対象に推計した風力資源賦存量マップ（年間発電量ベース）を、図 3-2 に示す。この図では、洋上については、自然保護公園と水深 200m 以上のエリアを除く離岸距離 30km 以内のエリアを対象として可視化している。

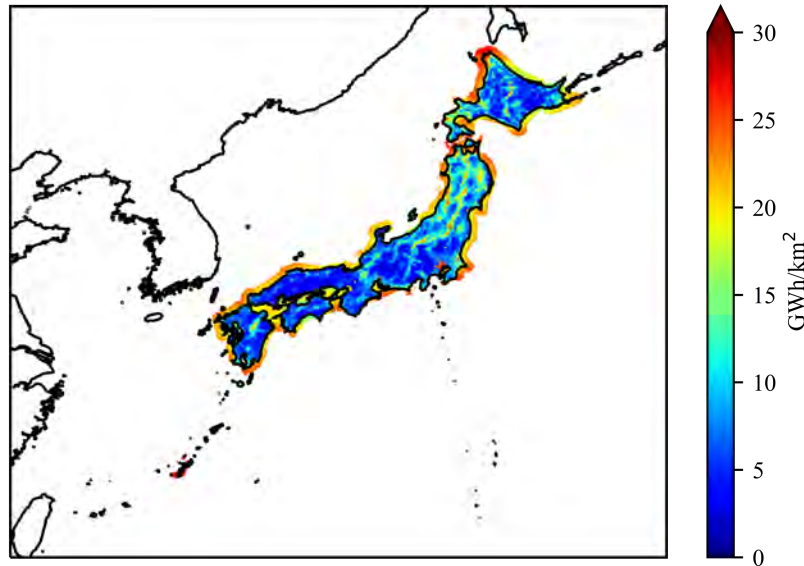


図 3-2 風力資源賦存量（年間発電量ベース）
（2019 年気象衛星観測データに基づく 1km メッシュ値）

(4) 太陽光資源の賦存量の推定例

太陽電池パネルの傾斜角と太陽の位置を考慮し、直達日射、拡散日射、反射日射の強度に基づいてパネル表面の日射量を推定する^{11,12}。パネルの傾斜角は、南向き 10 度と仮定する。次に、標準効率（約 20%）、インバーター等の機器効率（約 90%）、およびモジュールの温度に対する効率（7%）を用いて、日射量を発電量に変換する¹³。パネル温度の推定では、周囲気温、放射強度、風速を考慮し、熱拡散による遅延を考慮するとともに¹⁴、各メッシュの土地利用状況に基づく設置係数を考慮する⁶。

2019 年を対象に推計した太陽光資源賦存量マップ（年間発電量ベース）を、図 3-3 に示す。

¹⁰ T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, Ed. John Wiley & Sons Ltda (2005)

¹¹ I. Reda and A. Andreas, Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, NREL/TP-560-34302, Revised (2008)

¹² R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart, Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, Energy 44, (1990) 271

¹³ T. Huld, M. Sári, and E. D. Dunlop, Geographical variation of the conversion efficiency of crystalline silicon photovoltaic modules in Europe, Prog. Photovolt. Res. Appl. 16 (2008) 595

¹⁴ M. K. Fuentes, A Simplified Thermal Model for Flat-Plate Photovoltaic Arrays, Sandia National Labs (1988)

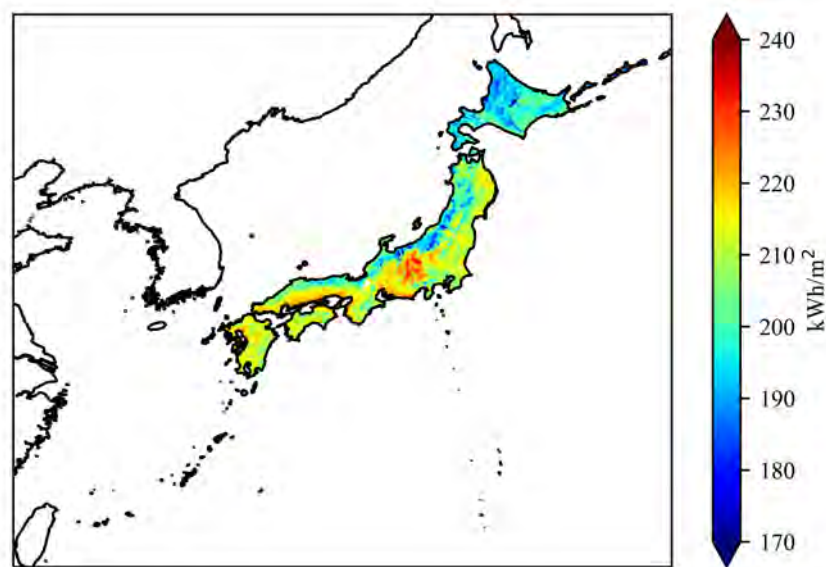


図 3-3 太陽光資源賦存量（年間発電量ベース）
（2019 年気象衛星観測データに基づく 1km メッシュ値）

以上の手法で、風力・太陽光資源の賦存量を推定した分析結果は、時空間ポテンシャルデータとして環境省が提供されている再生可能エネルギー情報提供システム（REPOS）¹⁵を通じて公開されている。

（5）木質バイオマス資源賦存量

木質バイオマス資源は、発電用燃料としてだけでなく、熱供給用燃料や熱電併給用燃料として活用可能であることに加え、地域の林業振興や地域経済循環にも寄与する。地域別の木質バイオマス資源賦存量の推計手法の一例を紹介する。前提条件として、天然林と保安林は自然保護や災害対策等の観点から除外し、民有林・国有林の人工林を推計対象とする。また、森林資源の持続的な利用および建築用材・合板・製紙等のマテリアル利用との競合に配慮し、①森林蓄積の年間増加量、②年間伐採実績量における未利用資源量、③枝条発生量、を対象とする。①から③までの各推計手法を以下に紹介する。体積ベース（ m^3 ）の賦存量は、容積密度[dry-t/ m^3]と単位発熱量 [GJ/dry-t]を乗じればエネルギー量に変換できる。

① 森林蓄積の増加量（用材利用部分を除く）

都道府県ごとの蓄積増加量を森林面積により按分し推計する。はじめに、林野庁「森林資源現況調査」の「樹種別齢級別都道府県別の森林蓄積量」の直近 2 回分（5 年間隔）の差から 5 年間の都道府県別蓄積増加量を推計し、さらにそれを 5 年で除すことで年間平均値を算出する。この森林蓄積増加量に未利用資源発生割合を乗じて、エネルギー利用可能な資源量を得る。未利用資源発生割合は、森林・林業統計要覧（農林水産省）に収録されている「年間伐採量（伐採立木材積）」から「素材生産量」を除いた割合として、簡易的に算出できる。

¹⁵ 環境省，再生可能エネルギー情報提供システム（REPOS）時空間ポテンシャルデータ，<https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/41.html>

② 年間伐採実績量における未利用資源量

都道府県別未利用資源の年間発生量は、森林・林業統計要覧（農林水産省）の「伐採立木材積」の全国値を木材需給報告書（農林水産省）「都道府県別素材生産量」を用いて都道府県に按分し、その按分値から都道府県別素材生産量を差し引いて算出できる。

③ 枝条発生量

枝条発生量は、蓄積増加量および伐採実績量にバイオマス拡大係数を乗じて推計できる。バイオマス拡大係数とは、幹の体積に対する枝条発生量の割合を表した係数であり、日本国温室効果ガスインベントリ報告書などに記載されている。バイオマス拡大係数は樹種によって値が異なるため、各県ごとに樹種別の素材生産割合を用いて加重平均の値を用いている。

3-2. 市区町村別エネルギー消費量の推計手法

国内で公的機関が作成するエネルギー統計には、全国を対象とした総合エネルギー統計¹⁶（資源エネルギー庁）と都道府県を対象とした都道府県別エネルギー消費統計¹⁷（資源エネルギー庁）がある。市区町村を対象とするエネルギー統計は整備されていない。環境省が作成する自治体カルテ¹⁸では、市区町村別・部門別のCO₂排出量データの推計値が入手できる。CO₂排出量の情報には、そもそも排出源となる化石燃料の種別が含まれていないので、脱炭素実行計画に有用な電化、燃料代替、エネルギー消費の効率化といったエネルギー利用側からみた行動計画目標を定量的に定めることが難しく、結果として環境行動の啓発や啓蒙に重点を置かざるを得ない。つまり、全地方公共団体に対して、地球温暖化対策実行計画の策定が努力義務あるいは義務づけられていても、肝心の市区町村のエネルギーデータが欠けていた。

市区町村別エネルギー消費量を推計するための手法を大別すると、表 3-2 に示す二手法が代表的である。本「データベース」は、按分法に基づく。

表 3-2 市区町村別エネルギー消費量の推計手法

手法の名称	手法の概要	利点	欠点
按分法 （トップダウン型 推計手法）	国や都道府県のデータを、エネルギー消費量と関連のある活動指標により比例配分する。	・データの入手可能性が高い。 ・推計が容易。	・データの信頼性の評価が難しい。 ・他地域の特性の影響を受ける。 ・施策のPDCAに活用できない。
積上法 （ボトムアップ型）	アンケート調査やセンシング等の個票データ	・地域特性が反映されやすい。	・個票データの収集コストが高い。

¹⁶ 経済産業省資源エネルギー庁，総合エネルギー統計，https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/

¹⁷ 経済産業省資源エネルギー庁，都道府県別エネルギー消費統計，https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/

¹⁸ 環境省，自治体排出量カルテ，https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/tools/karte.html

推計手法)	ータに基づいて統計的に <u>拡大推計</u> する。	・統計的信頼性の評価が可能。	・選択バイアスが生じる可能性がある。
-------	-----------------------------	----------------	--------------------

将来的には、電力スマートメーター¹⁹や IoT 機器、携帯電話²⁰など GPS から収集されるビッグデータの活用や人工知能による推計精度の向上に伴って、より高精度な推計やビッグデータである実績データの自動収集が期待できる。

米国エネルギー情報局 (US-DOE, EIA) では、従来からのエネルギーデータ分析に加えて、API 連携によるオープンデータによる情報提供基盤²¹を開発中である。

3-3. エネルギー需給特性による市区町村の分類

全国 1741 の市区町村のなかで、すべてが独自の特徴を持つことは考えにくい。むしろ、エネルギー需要や再生可能エネルギー資源量などのエネルギー需給特性が類似する地域は、脱炭素ビジョンなどの地域エネルギー計画が類似してくるほうがふつうであろう。そこで、地域エネルギー需給データを用いて市区町村を類型化してみた。

(1) 再生可能エネルギー資源類型

類型化指標：再生可能エネルギー導入ポテンシャル（陸上風力、洋上風力、太陽光(建物系)、太陽光(土地系)、地熱中小水力、木質バイオマス、廃棄物）※常用対数により正規分布に近似する。

類型化手法：階層型クラスター分析(Ward 法)

類型化結果：地理特性を反映した以下の 6 クラスターに分類できる（図 3-4、図 3-7）。

クラスター	資源に関する特徴
沿岸山地クラスター	陸上/洋上風力ポテンシャルが高い。
沿岸平地クラスター	洋上風力ポテンシャルが高い。
都市クラスター	建物系太陽光・廃棄物以外のポテンシャルが低い。
中山間地域クラスター	建物系太陽光・廃棄物・木質バイオマス・陸上風力ポテンシャルが高い。
火山地域クラスター	地熱・中小水力ポテンシャルが高い。
山林地域クラスター	中小水力・陸上風力・木質バイオマスポテンシャルが高い。

(2) エネルギー需要構成類型

類型化指標：最終エネルギー消費量の部門別構成比(業務部門，家庭部門，運輸部門，産業 14 部門の計 17 部門)

¹⁹ 一般社団法人電力データ管理協会，<https://denkankyo.jp/#about>

²⁰ 総務省、位置情報の取り扱いに検討について，
https://www.soumu.go.jp/main_content/000738897.pdf

²¹ U. S. Energy Information Administration, <https://www.eia.gov>

類型化手法：階層型クラスター分析(Ward 法)

類型化結果：産業構造等を反映した以下の 8 クラスターに分類できる（図 3-5、図 3-8）。

クラスター	エネルギー需要の特徴
製紙業系クラスター	紙・パルプ・紙加工品製造業の割合が高い。
窯業系クラスター	窯業・土石製品製造業の割合が高い。
平均的クラスター	他クラスターに含まれない地域によって構成される。
商業・観光業クラスター	産業部門の割合が低く、業務部門の割合が高い。
農林水産業クラスター	農林水産業の割合が高い。
交通クラスター	運輸部門の割合が高い。
鉄鋼業系クラスター	鉄鋼・非鉄・金属製品製造業の割合が高い。
化学工業クラスター	化学工業の割合が高い。

(3) エネルギー需要規模類型

類型化指標：合計最終エネルギー消費量 ※常用対数により正規分布に近似する。

類型化手法：標準偏差による分類

類型化結果：エネルギー需要規模によって以下の 8 階級に分類できる（図 3-6、図 3-9）。

階級	エネルギー需要の特徴
需要 低位- $[-\infty, \mu - 2\sigma)$	平均 μ から負に標準偏差 2σ 以上離れた範囲に含まれる。
需要 低位+ $[\mu - 2\sigma, \mu - \sigma)$	平均 μ から負に標準偏差 2σ 離れた範囲に含まれる。
需要 中位- $[\mu - \sigma, \mu)$	平均 μ から負に標準偏差 σ 離れた範囲に含まれる。
需要 中位+ $[\mu, \mu + \sigma)$	平均 μ から正に標準偏差 σ 離れた範囲に含まれる。
需要 高位- $[\mu + \sigma, \mu + 2\sigma)$	平均 μ から正に標準偏差 2σ 離れた範囲に含まれる。
需要 高位+ $[\mu + 2\sigma, \infty]$	平均 μ から正に標準偏差 2σ 以上離れた範囲に含まれる。

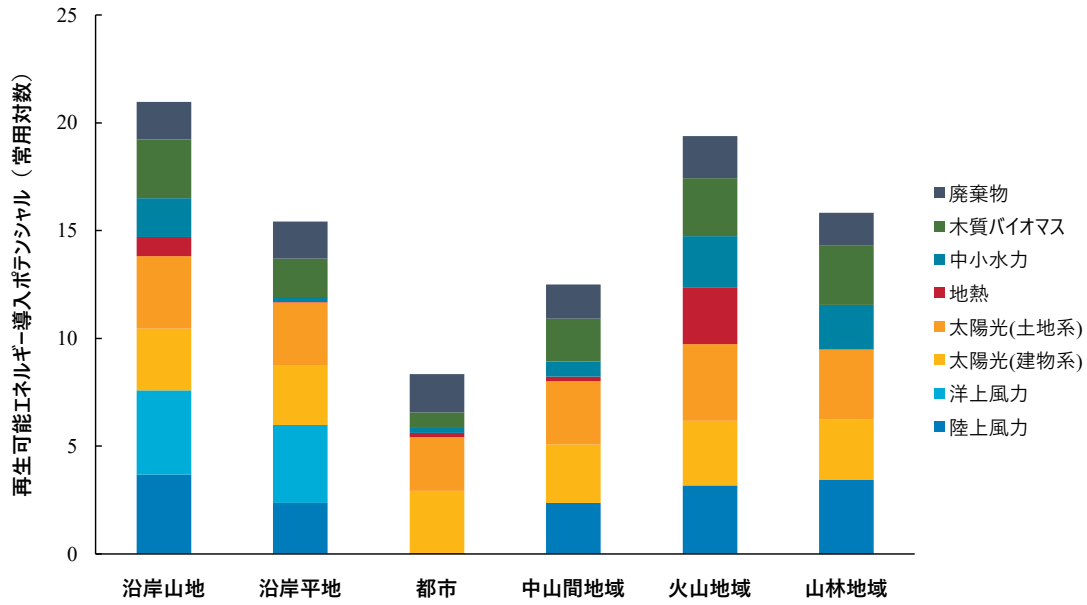


図 3-4 再生可能エネルギー資源の類型比較結果

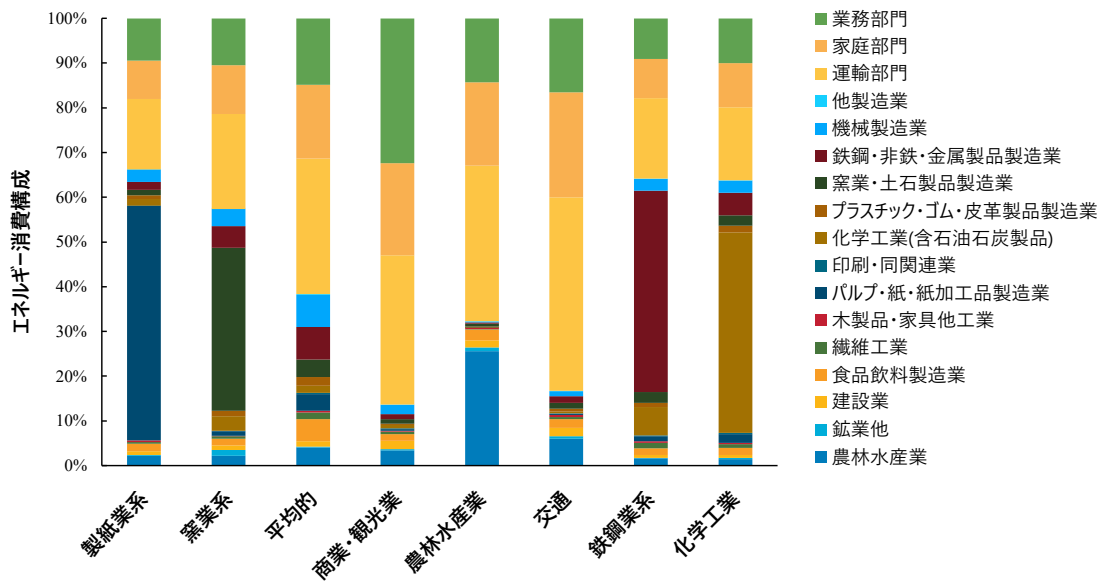
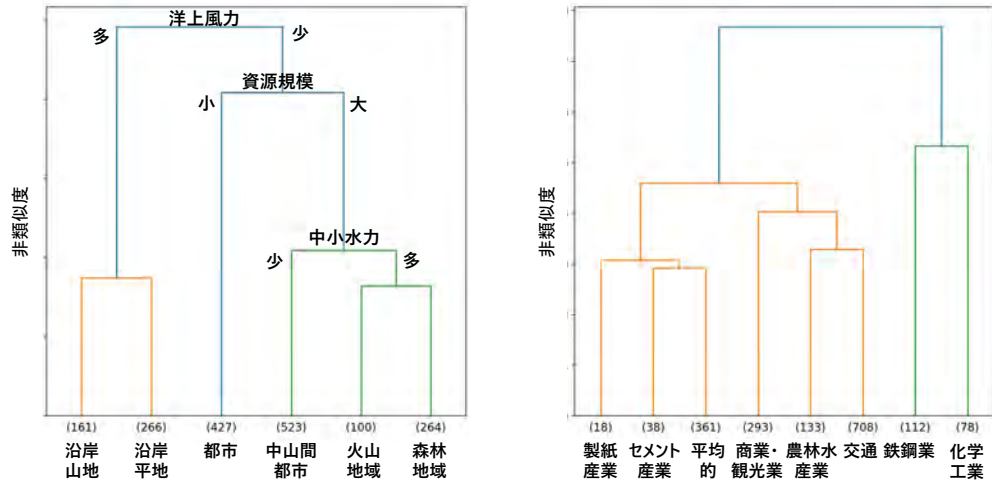


図 3-5 エネルギー需要構成の類型比較結果



(a) 再生可能エネルギー資源類型 (b) エネルギー需要構成類型

図 3-6 各クラスターの類似度 (デンドログラム)

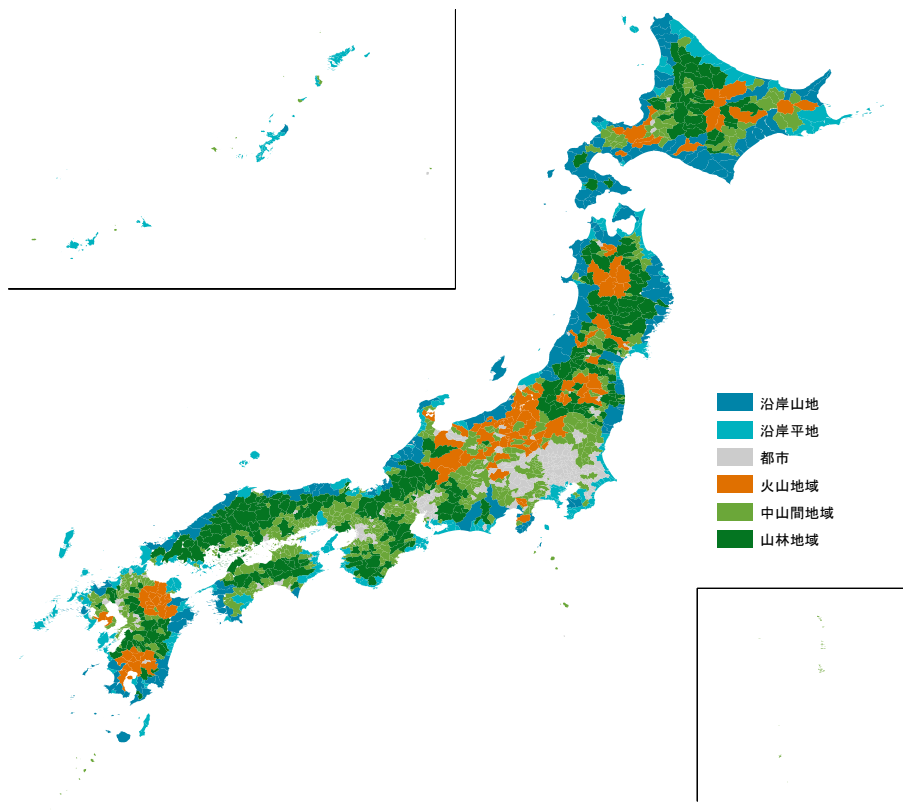


図 3-7 再生可能エネルギー資源類型の全国マップ

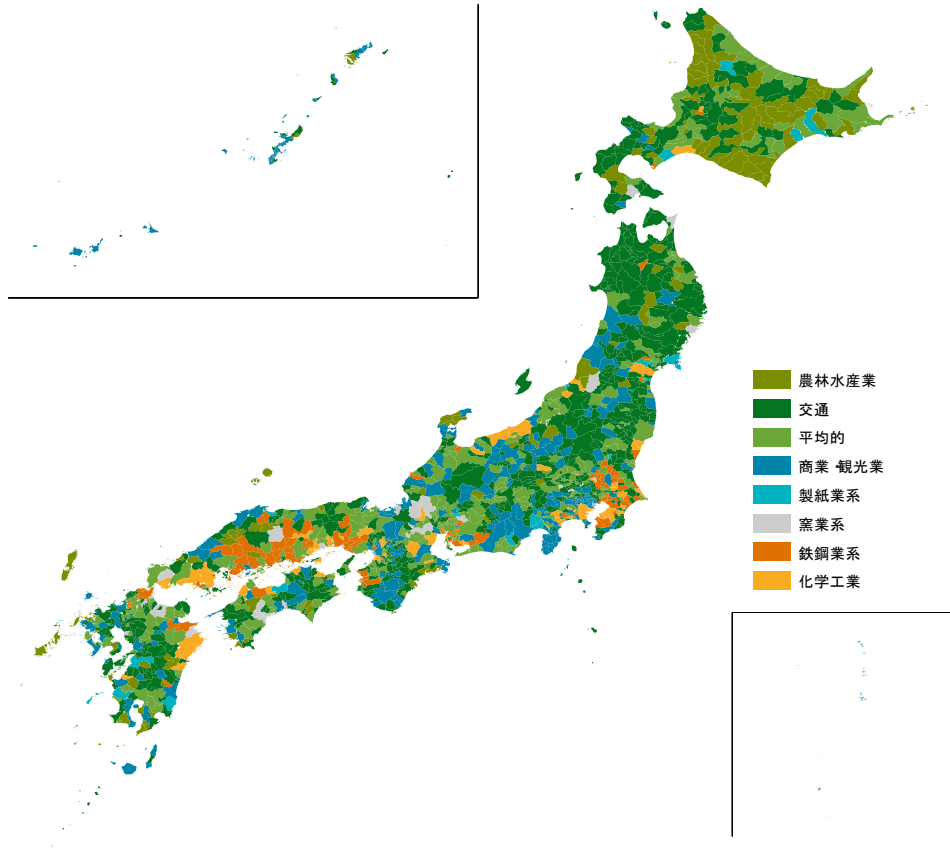


図 3-8 エネルギー需要構成類型の全国マップ

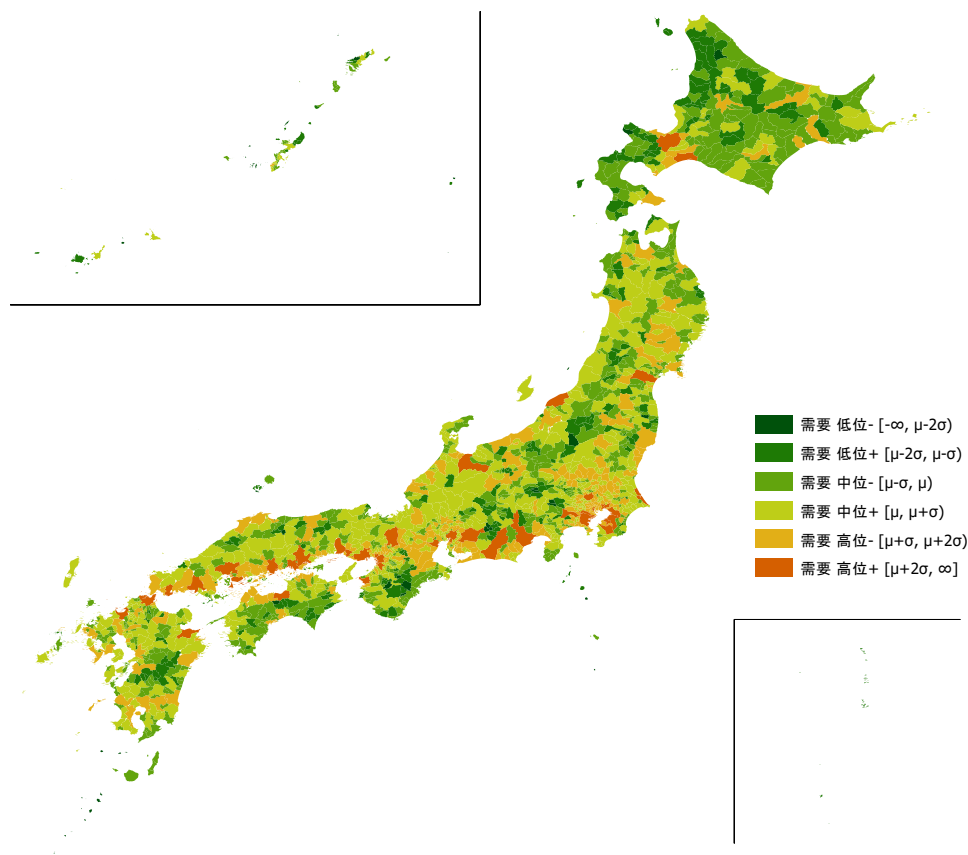


図 3-9 エネルギー需要規模類型の全国マップ

3-4. 市区町村のクラスター分析

再生可能エネルギー資源、エネルギー需要構成、エネルギー需要規模の3類型をそれぞれ掛け合わせて、各クラスターの複合的特性を分析した。

(1) 再生可能エネルギー資源類型×エネルギー需要構成類型

最も多くの地域が含まれるクラスターは、交通×中山間地域クラスターであり、231市区町村が所属する。中山間地域では、公共交通網が都市部ほど整備されておらず、商業施設等の目的地も疎らで遠いことから交通需要が高いと推測でき、そうした地域特性が類型に反映されたと考える。このクラスターに所属する地域では、電気自動車の導入によるCO₂排出削減効果のインパクトが大きい。また、再生可能エネルギー資源も比較的豊富であることから、気候変動対策において地域内再生可能エネルギー資源と電気自動車の導入による運輸部門の脱炭素化が効果的と考えられる（表 3-3）。

(2) エネルギー需要規模類型×エネルギー需要構成類型

この複合類型では、エネルギー需要構成類型の各クラスターに所属する地域の需要規模を推測できる。例えば、エネルギー集約型産業の鉄鋼業系や化学工業、製紙業系クラスターでは多くの地域が需要中位+階級に所属しており、エネルギー需要が高いことが確認できる。また、交通クラスターに所属する約7割の地域は需要低位-階級から需要中位-階級であり、地域規模が小さいと考えられる（表3-4）。

(3) エネルギー需要規模類型×再生可能エネルギー資源類型

この複合類型では、再生可能エネルギー資源類型の各クラスターに所属する地域の需要規模を推測できる。都市クラスターは需要中位+階級、中山間地域クラスターや山林地域クラスターは需要中位-階級が最大となることから、資源類型から推定された地域形態とエネルギー需要規模から推定された地域形態が一致していると確認できる（表3-5）。

表3-3 再生可能エネルギー資源類型とエネルギー需要構成類型の複合類型における市区町村数分布

	再生可能エネルギー資源類型						市区町村数計
	沿岸山地	沿岸平地	都市	中山間都市	火山地域	森林地域	
製紙業系	4	3	3	3	0	5	18
窯業系	2	5	8	16	1	6	38
平均的	22	49	110	116	23	41	361
商業	32	61	77	71	28	24	293
農林水産業	27	28	4	25	11	38	133
交通	61	88	164	231	36	128	708
鉄鋼業系	4	16	40	35	1	16	112
化学工業	9	16	21	26	0	6	78
市区町村数計	161	266	427	523	100	264	1,741

表3-4 エネルギー需要構成類型とエネルギー需要規模類型の複合類型における市区町村数分布

	エネルギー需要規模類型						市区町村数計
	需要 低位- [-∞, μ-2σ)	需要 低位+ [μ-2σ, μ-σ)	需要 中位- [μ-σ, μ)	需要 中位+ [μ, μ+σ)	需要 高位- [μ+σ, μ+2σ)	需要 高位+ [μ+2σ, ∞]	
製紙業系	0	0	0	6	11	1	18
窯業系	0	0	8	20	10	0	38
平均的	0	6	112	185	50	8	361
商業・観光業	10	31	82	96	66	8	293
農林水産業	5	46	69	13	0	0	133
交通	17	167	307	192	24	1	708
鉄鋼業系	0	0	12	47	38	15	112
化学工業	0	0	5	30	32	11	78
市区町村数計	32	250	595	589	231	44	1,741

表 3-5 再生可能エネルギー資源類型とエネルギー需要規模類型の複合類型における市区町村数分布

	エネルギー需要規模類型						市区町村数計
	需要 低位- [-∞, μ-2σ)	需要 低位+ [μ-2σ, μ-σ)	需要 中位- [μ-σ, μ)	需要 中位+ [μ, μ+σ)	需要 高位- [μ+σ, μ+2σ)	需要 高位+ [μ+2σ, ∞)	
再生可能 エネルギー 資源類型							
沿岸山地	1	21	57	54	22	6	161
沿岸平地	8	35	104	77	31	11	266
都市	5	37	120	174	81	10	427
中山間地域	16	96	193	156	56	6	523
火山地域	0	10	24	48	16	2	100
山林地域	2	51	97	80	25	9	264
市区町村数計	32	250	595	589	231	44	1,741

4. 未来エネルギーシミュレーター

「データベース」では、現状の地域エネルギー需給データに基づいて、地域の現状を理解することに主眼を置いている。ここでは、付加機能として、将来のエネルギー需給の変化を、各自が任意に操作して体感できる「未来エネルギーシミュレーター」を紹介する。メニュー画面右側の「シミュレーションパラメータ」には、計 27 種の条件を任意する機能があり、大きく 7 グループに分類できる。これらは、「再生可能エネルギー導入量」9 種、「エネルギー消費想定として「部門別電化率」5 種、「燃料代替率」3 種、「マクロフレームの想定として「社会経済指標増減率」4 種、「系統電力の想定」1 種、「地域間エネルギー融通の想定として「エネルギー移輸入量」2 種と「移輸出量」3 種である。複数同時に組み合わせ条件設定が可能であり、エネルギーフロー図の形状とエネルギー起源 CO₂ 排出量など各性能指標が変化する。たとえば、再生可能エネルギー導入に伴う CO₂ 削減効果を試算しつつ、エネルギー需給システムの構造変化を同時に理解できる（図 4-1）。



図 4-1 未来エネルギーシミュレーターの概要

再生可能エネルギー導入量は、既設導入量を初期値、導入ポテンシャルを上限として可変できる。再生可能エネルギー導入ポテンシャルは、自然環境の特性に地域の地勢・社会的条件を考慮して算出されたものであり、必ずしも全量を直ちに導入できる訳ではない。

需要部門には、部門別の電化率と燃料代替率のパラメータがある。たとえば、運輸部門の電化率を操作すると電気自動車等の導入割合を増やして、その影響を上流側に発電部門に遡ってみることができる。燃料代替率は、既存の化石燃料需要のうち電化が困難な部分（Hard-to-abate 部門）を電力由来の水素や合成燃料²²によって代替する割合を表す指標である。運輸部門の水素代替率は、燃料電池車等の導入を想定している。

需要部門のエネルギー消費量の増減を可変できる。これは、人口、生産量、交通量などのエネルギー消費を伴う経済活動量の増減を反映している。

独自の考えとして、市区町村が他地域と連携してエネルギーを融通する場合を想定して、電力、木質バイオマス、水素・合成燃料の移出入量を任意に設定できる。

なお、英国政府では、ケンブリッジ大学工学部の David Mackay 教授（1967-2016）が開発したモデルを基盤として、ビジネス・エネルギー・産業戦略省が機能を増やして国内エネルギー需給を模擬できるカーボンシミュレーター²³をウェブサイトにて公開している。

5. 地方公共団体における地域エネルギー需給分析の活用事例

岩手県宮古市では、2011年3月11日に発生した東日本大震災を契機にして、同年10月に宮古市東日本大震災復興計画を策定した。宮古市には、再生可能エネルギーに関する専門的な知識や知見がなく、何をどのように進めていけばよいか手探りの状況にあり、東北大学教員の中田俊彦や大手民間企業が、市の復興に協力することとなった。さっそく、再生可能エネルギープロジェクトの具体化として、2012年度から経済産業省所管の「スマートコミュニティ導入促進事業²⁴」に取り組んだ（図5-1）。当時は、「データベース」はなく、宮古市も市内のエネルギー需給状況がわかるデータを持ち合わせなかった。そこで、宮古市のエネルギー需給の現況を東北大学チームが独自に分析して2012年にエネルギーフロー図を作成した。2018年には、その改良版（図5-2）を作成して宮古市に提供し、その後の社会実装に向けた脱炭素計画立案の礎となった。

²² 合成炭化水素は、フィッシャー・トロプシュ（FT）法によって人工的に生成される炭化水素で、ガソリンや軽油、ジェット燃料、メタンなどの燃料やエチレンなどの化学製品原料と同じ組成の物質である。FT法は、水素と一酸化炭素を高温高圧で反応させる手法で、すでに高純度のワックス製品などで商用化されている。現在は、大気から回収したCO₂を使ったFT法の研究開発が進められており、そのTRL（国際エネルギー機関が定める技術習熟レベル）は2022年末時点で6（フルスケールプラントでの実証段階）である。未来エネルギーシミュレーターでは、このCO₂FT法による合成燃料の供給のシミュレーション機能を搭載している。

²³ MacKay Carbon Calculator, Department for Business, UK Energy and Industrial Strategy, BEIS, <https://my2050.beis.gov.uk/?levers=1111111111111111>

²⁴ 岩手県宮古市、宮古市スマートコミュニティ, https://www.city.miyako.iwate.jp/energy/smartcommunity_2.html

- マスタープラン策定：平成24年9月
- 事業構築期間：平成25年度～平成29年度

再生可能エネルギーを地産地消型で
有効利用する仕組みを構築

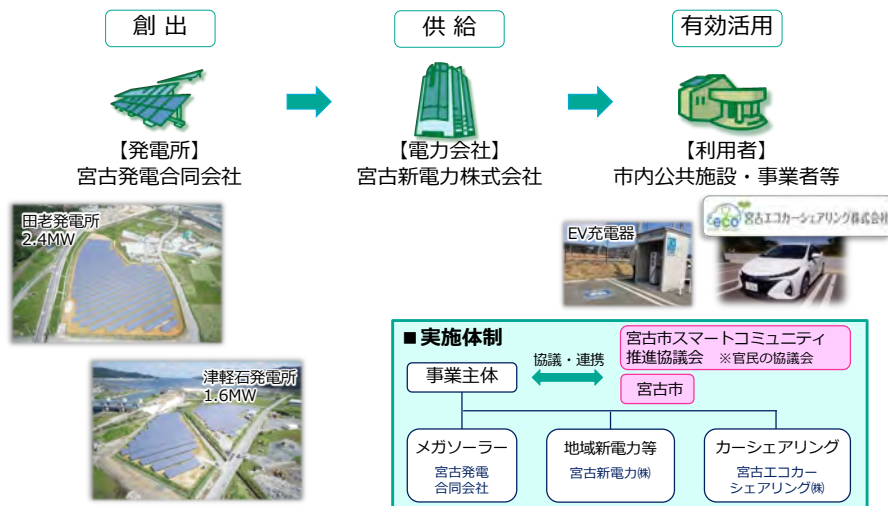


図 5-1 創設期：宮古市スマートコミュニティ（2012年）

地域エネルギーの供給源として、「宮古発電合同会社」によって4メガワットの太陽光発電所を整備した。エネルギーの供給としては、「宮古新電力株式会社」を設立し、市内の公共施設や民間施設などへの電力供給の体制が整った。宮古新電力は、2022年7月末現在で、194施設へ供給している。並行して、カーシェアリング、電気自動車の充電器設置も進めてきた。スマートコミュニティ構築当時、各事業は、企業がSPCを作って取り組む民間主体から始めて、その後、官民一体の協議の場として、「宮古市スマートコミュニティ推進協議会」を設立した。さらに、新たな再生可能エネルギーの推進として、「再生可能エネルギービジョン²⁵」、「再生可能エネルギー推進計画²⁶」、「再生可能エネルギー事業の導入に関するガイドライン²⁷」を続々と策定して、新たな展開に入った（図5-3）。

²⁵ 岩手県宮古市，宮古市再生可能エネルギービジョンについて，
<https://www.city.miyako.iwate.jp/energy/miyakosisaiseikanouenerugi-bijon.html>

²⁶ 岩手県宮古市，宮古市再生可能エネルギー推進計画について，
https://www.city.miyako.iwate.jp/energy/r4miyakoshi_renewableenergy_promotionplan.html

²⁷ 岩手県宮古市，宮古市再生可能エネルギー事業の導入に関するガイドラインについて，
<https://www.city.miyako.iwate.jp/energy/guideline.html>

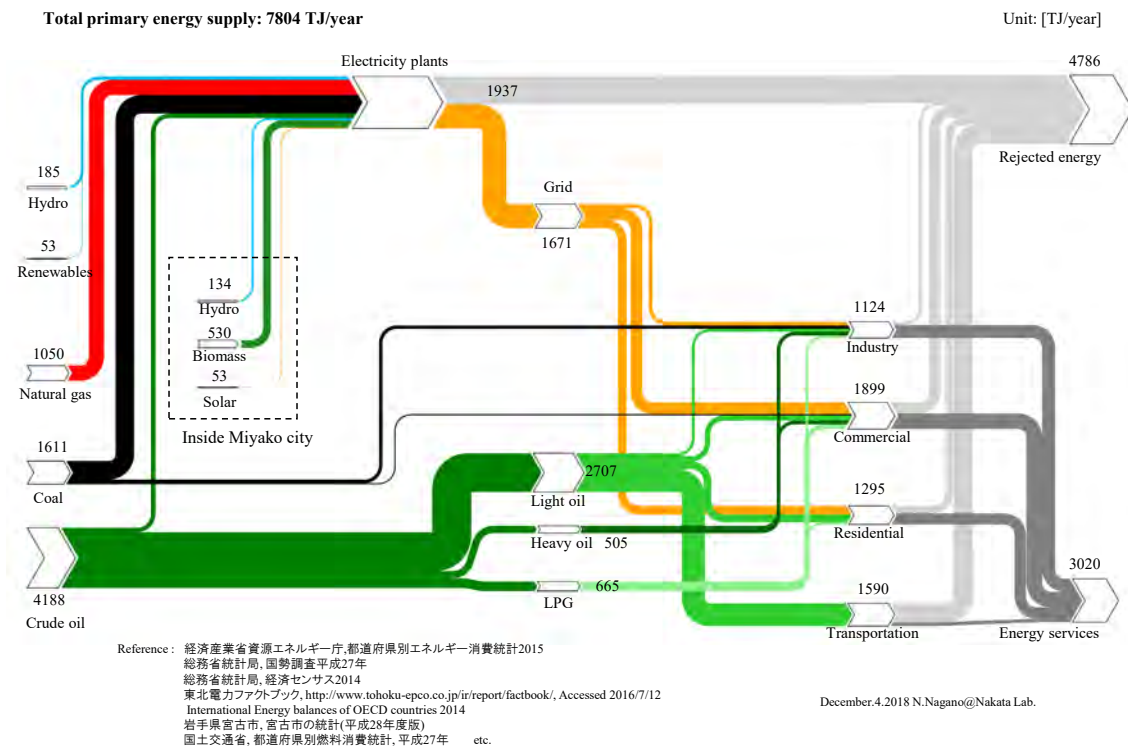


図 5-2 宮古市のエネルギーフロー分析

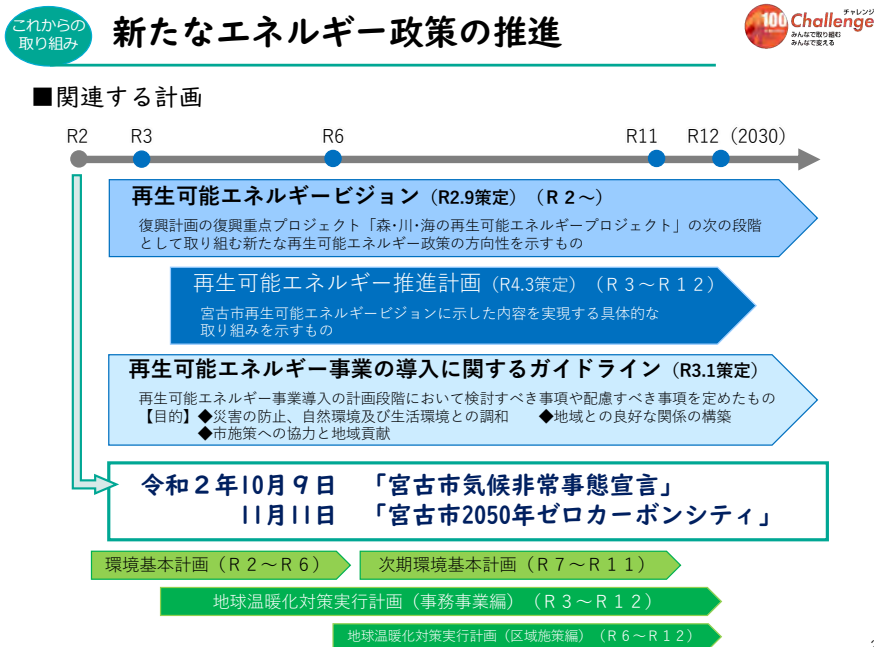


図 5-3 展開期：スマートコミュニティーからゼロカーボンシティへ

このような準備段階を経て、2022 年には環境省の脱炭素先行地域に選定²⁸されて、地域脱炭素の社会

²⁸ 岩手県宮古市、脱炭素地域に選定されました、

実装を全国に実践するモデル地域となった（図 5-4）。

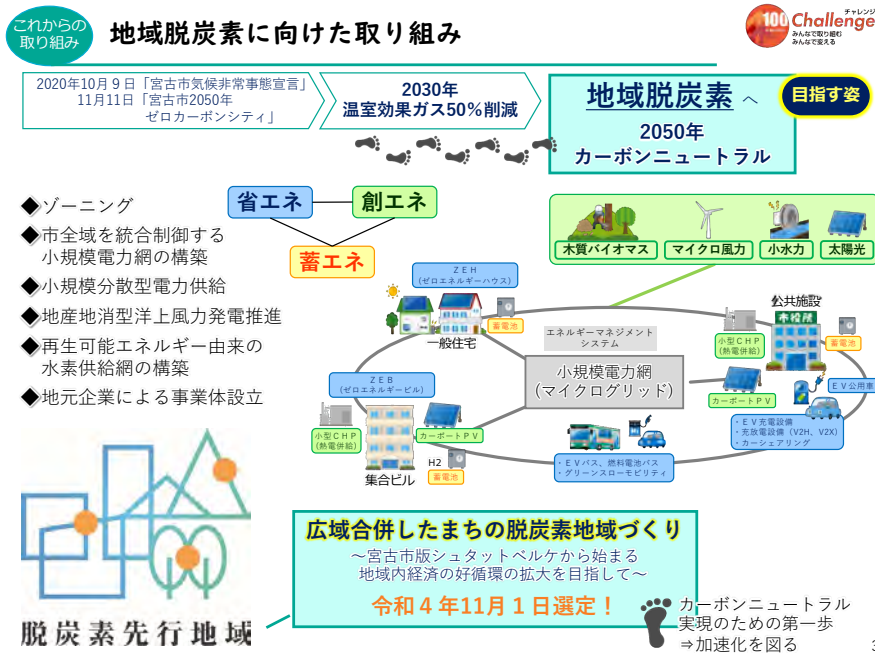


図 5-4 実践期：脱炭素先行地域による地域エネルギーシステムの構築と実践

6. 地域間連携の可能性

6-1. 地域間連携の考え方

再生可能エネルギー資源のポテンシャルやエネルギー需要には、地域特性がある。異なる特性を持った地域同士が連携して相互に補完し合う、あるいは類似する地域同士が連携して相乗効果を生み出すことによって、より持続可能な地域エネルギーシステムを実現することが地域間連携の目的である。再生可能エネルギーを主体とする地域エネルギーシステムを実現するためには、再生可能エネルギー資源とエネルギー需要の時間間欠性（時間変動・季節変動）と、空間偏在性に適応した需給調整の仕組みが必要となり、そのひとつとして、地域間のエネルギー融通がある。

地域間エネルギー融通とは、ある地域の余剰エネルギーをエネルギーが不足する地域に融通することである。市区町村スケールでこれを実現するには、地域に跨るエネルギーインフラの整備や需給バランスをマネジメントするシステム共有といった地域間連携の仕組みが必要になる。地域間連携は、複数の地域に価値を提供する公共投資を地方公共団体同士が連携して実施する枠組みが基本となり、すでに廃棄物処理や交通インフラ整備においてこの地域間連携が重要な役割を果たしてきた。近年では、地球温暖化対策や地域エネルギー計画にもその枠組みを導入する動きが見られる。

地域間連携の目的は、より実効的、より効率的な行政計画の策定と実施にある。ただし、連携に参画するどの地域においても利益が得られ、持続可能であることが前提となる。したがって、地域間連携の計画あるいは参画する地域の選定にあたっては、各地域の特強みや弱みの特徴を把握して、その特徴が地域間連携の目的達成に向けて補完的または相乗的であるかの理解が重要となる。

https://www.city.miyako.iwate.jp/energy/cn_miyako.html

6-2. 地域間連携による補完と効果

地域同士の補完関係について考える。たとえば、エネルギー資源が豊富に賦存する地域 A とエネルギー需要過多の地域 B、いいかえれば、エネルギー移出ポテンシャルが正の地域 A と負の地域 B の関係を考える。地域 A は地域 B のエネルギー不足を解消できるため、「地域 A は地域 B にとって補完的である」といえる。一方で、地域 A は自地域のみでエネルギー需要を満たせるため、地域 B は地域 A にとって必ずしも必要ではなく、「地域 B は地域 A にとって補完的とはいえない」。したがって、地域 A にとってはインセンティブがないので、連携が成立しない可能性がある。しかし、仮に地域 A が財政的余裕の不足によりエネルギー資源の活用を推進できず、地域 B は財政的に十分余裕があるという場合には、地域 B が地域 A に財政的協力を実施して地域 A にとって地域 B と連携するインセンティブが発生し、相互の利益が期待されるため連携が進むことになる。したがって、地域間連携に参画する地域同士は相互に補完的であることが望ましく、再生可能エネルギーの融通を軸とする場合には、エネルギー資源賦存量またはエネルギー移出ポテンシャルに加えて、財政力など別の指標が必要となってくる。

エネルギー資源以外の指標として、財政力に代表される行政資源、地域産業や人材といった地域資源が想定される。実際に、地域エネルギー政策の策定に向けた課題に関する地方公共団体へのアンケート調査では、財源や人材などが挙げられている^{29,30}。また、地球温暖化対策の推進に関する法律(温対法)に基づいて、全地方公共団体にて策定が努力義務である「地方公共団体実行計画(区域施策編)」をみると、GHG 排出削減目標策定率は、財政力指数³¹が高いほど上昇し(図 6-1)、行政資源が地域脱炭素化の推進に重要な要因であることがわかる。

そこで、2 指標を軸にとって地域を 4 象限に分類(図 6-2)すると、地域同士の補完関係が明確になる。第 1 象限に分布する地域は、エネルギー資源も行政資源も豊富であり、単独で脱炭素化を進めることのできる持続可能な地域といえる。しかし、第 2,3,4 象限に分布する地域は、エネルギー資源と行政資源のどちらかまたは両方が不十分であり、単独で脱炭素化が困難であると考えられる。

この分類に基づいて地域間連携を再定義すると、第 2 象限と第 4 象限に分布する地域のように相互に補完的な特徴を持つ地域同士が連携することで持続可能性を高め合う枠組みといえる。

²⁹ 環境省, 地方自治体の地域エネルギー政策推進に向けた取組み状況について(報告), (2015)

³⁰ 関川千恵美, 地方自治体における再生可能エネルギー政策の現状と課題-地方自治体における再生可能エネルギー政策調査結果からの考察, 公共研究(2015)

³¹ 総務省, 地方公共団体の主要財政指標一覧, https://www.soumu.go.jp/iken/shihyo_ichiran.html



図 6-1 財政力指数と温室効果ガス(GHG)排出削減目標策定率の関係
(財政力指数は 2013 年、GHG 排出削減目標策定率は 2022 年 10 月末時点の値)

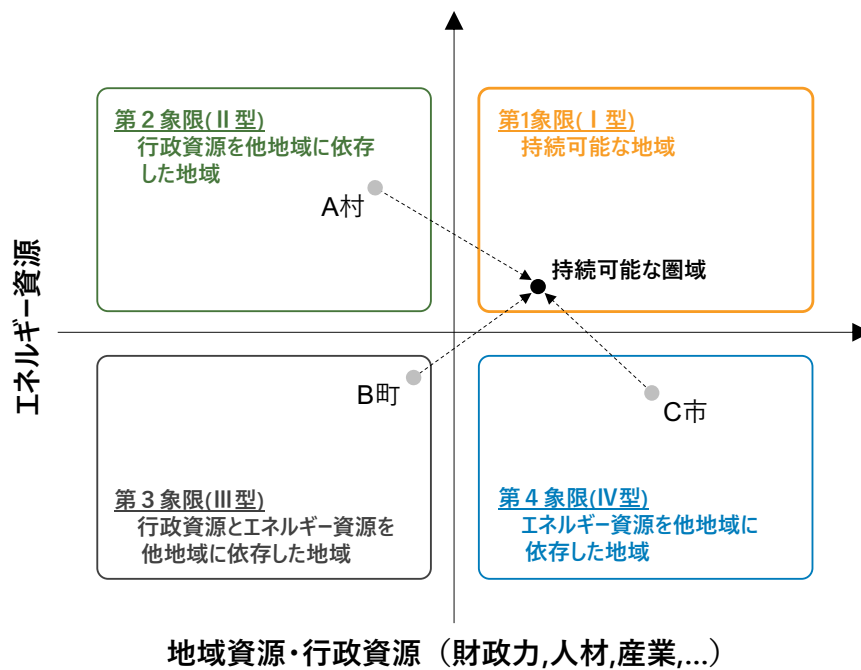


図 6-2 再生可能エネルギーを軸とする相互補完的な地域間連携の分類

この地域間連携の考え方では、国内の約 9 割の市区町村では個別に地域脱炭素化を実現することが困難である³²。これは、国内の全 1,741 市区町村のエネルギー資源量(エネルギー移出ポテンシャル)と財政力(財政力指数)の関係を調査した結果に基づいて述べている。図 6-3 には、地域エネルギー需給データを用いて、この理論を検証した。文献¹の分類手法に倣うと、第一象限に分布する持続可能な地域は、全体の 223 市区町村であり全体の約 13%に留まる。すなわち、残りの 87%の市区町村では、地域脱炭素化に向けてエネルギー資源と行政資源(財政力)のどちらかまたは両方が不十分であることになる。

³² 小野寺弘晃, 根本和宜, 中田俊彦, 市区町村のエネルギー需給特性を考慮した広域圏エネルギーシステムの設計, エネルギー・資源学会論文誌 (2021)

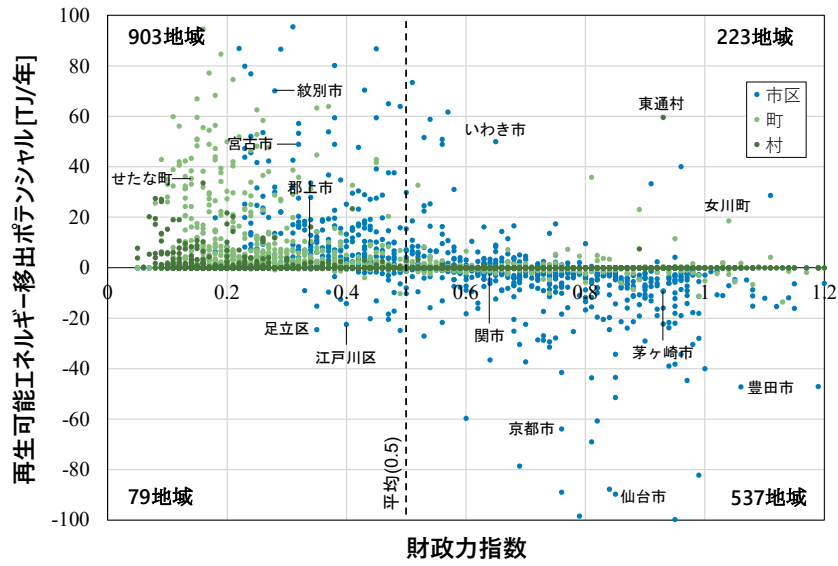


図 6-3 財政力指数と再生可能エネルギー移出ポテンシャルの関係

(財政力指数と再生可能エネルギー移出ポテンシャルの算出に用いるエネルギー消費量は、2013 年値。再生可能エネルギー資源として、太陽光、陸上風力、洋上風力、地熱、中小水力、木質バイオマス、廃棄物を考慮。)

7. セクターカップリング

7-1. セクターカップリングとは

セクターカップリング³³とは、エネルギーシステムを構成する電力部門や熱部門、燃料部門、需要部門といった各部門（セクター）が協調することで、電力、熱、燃料といったエネルギーキャリアを相互に変換し、エネルギーの生産、貯蔵、輸送、消費の柔軟性を高める概念である。

代表的な技術として、表 7-1 に示す 6 種類がある。V2G、V2H、V2B は総称して V2X とよばれ、P2H、P2G、P2L は、総称して P2X という。

7-2. エネルギーシステムにおけるセクターカップリングの役割

セクターカップリングに共通する役割は、エネルギーの生産、貯蔵、輸送、消費の柔軟性を高めることによるエネルギーシステムの需給調整にある。主要な需給調整の仕組みとして、発電出力調整、エネルギー貯蔵、地域間エネルギー融通、デマンドレスポンスがあり、各セクターカップリング技術は図 4-1 のように対応する。

需給調整の手段として、大規模な蓄電池の導入や電力系統の大幅な増強がある。しかし、エネルギーシステムのコストが増大して、再エネ電力の価格高騰につながると懸念されている。さらに、かえって脱炭素化に向けた動きが鈍化し、1.5 度目標の達成が困難になる懸念もある。そこで、セクターカップリングを導入した需給調整を実施することによって、システムコストや再エネ電力の価格を抑制できることが最近の研究から示されている。

表 7-1 需給調整におけるセクターカップリングの位置づけ

需給調整力		セクターカップリング			
		P2G Power-to-Gas	P2L Power-to-Liquid	P2H Power-to-Heat	V2G Vehicle-to-Grid
発電出力調整	負荷追従電源	✓	✓		
	解列(出力抑制)				
地域間エネルギー融通	地域間送電				
	燃料輸送	✓	✓		
エネルギー貯蔵	定置型蓄電池				
	移動型蓄電池				✓
	揚水発電				
	燃料貯蔵	✓	✓		
デマンドレスポンス	熱貯蔵			✓	
	ピークシフト	✓	✓	✓	
	ピークカット				

³³ European Parliament, Sector coupling: how can it be enhanced in the EU to foster grid stability and decarbonise?, 2018, ISBN 978-92-846-4294-6, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626091/IPOL_STU\(2018\)626091_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626091/IPOL_STU(2018)626091_EN.pdf)

7-3. セクターカップリングの課題と展望

表 7-2 に、地域エネルギーシステムにおける V2X と P2X の課題と展望を整理する。P2X に期待されるおもな役割は、次の三点である。

- ・ カーボンニュートラルエネルギーキャリアの供給：カーボンニュートラルな熱・燃料を供給する。とくに P2G と P2L は、航空部門や化学製品といった電化や燃料代替が難しい部門（Hard-to-abate セクター）の化石燃料消費量を削減する。
- ・ 再エネの付加価値創出：再生可能エネルギーに可搬性や貯蔵の容易さといった付加価値を付与する。また、再生可能エネルギー導入地域における付加価値創出により地域内経済循環につなげる。
- ・ 電力需給調整：電力需給の過不足に合わせた柔軟な運用（負荷追従運転）により、電力の需給調整に貢献する。

これらの役割を実現するためには、次の(1)から(5)の課題解決を進める必要がある。

(1) カーボンニュートラルエネルギーキャリア間の競合

カーボンニュートラルなエネルギーキャリアとして、再エネ電力やバイオマス燃料（木質系、廃棄物系、藻類系など）と競合する。それぞれのエネルギーキャリアに特徴があり、適する用途は異なるが、性質が類似する場合にはコストや供給ポテンシャルによって導入可否が決定する。なお、家庭における給湯・暖房といった低温熱需要は、基本的に電気ボイラーやヒートポンプにより電化した方が効率がよい。最も効率がよい技術はヒートポンプであるが、ヒートポンプは給湯速度が遅いため、蓄熱層の併設が必要となる。

(2) コスト低減へのトレードオフ

P2X のコスト（水素・合成燃料の製造コスト）は、電力調達価格と設備利用率に強く依存する。化石燃料と競合する水準までコストを低減させるためには、安価な電力と一定の設備利用率が必要である。電力のダイナミックプライシングを導入することで安価な電力を調達できる可能性がある一方で、負荷追従運転によって設備利用率が低下するというトレードオフがある。また、過度なダイナミックプライシングは再生可能エネルギー発電の事業性を低下させる可能性がある。

(3) カーボンニュートラルエネルギーキャリアの需要創出

付加価値創出を目的として P2X を実施する場合、熱・燃料需要が十分にあることが前提となる。たとえば P2H は、地域冷熱供給システムの熱源としての利用が想定されるが、地域冷熱供給システムの導入には一定の熱需要密度が必要となる。

(4) 需給調整力の統合とアグリゲーション

電力の需給調整力として、系統用蓄電池や V2G、家庭等によるデマンドレスポンスと競合する。それぞれ需給調整における柔軟性（応答速度や調整容量、貯蔵可能期間など）が異なるため、市場原理等によって相互補完的に最適運用されるような仕組みが必要である。

(5) エネルギーシステムのインテグレーション

セクターカップリングは、電力、熱、輸送用燃料など各エネルギーキャリアが、新たな需要家と結ばれることである。つまり、従来のエネルギー事業が個別に脱炭素化や効率化を図るのではなくて、最終需要家と新たに連携や結合することによって、エネルギーシステム全体としての最適化が可能になる³⁴。このためには、従来のエネルギー供給に関わるさまざまな障壁を取り除き、全体最適に向けた仕組みの構築が重要となる。解像度の高いエネルギー消費データなど、現状のアナログベースの事業マネジメントから、API 連携によるオープンデータを活用する事業モデルへの転換と、その具体的な変換の戦略も大きな役割を果たす。セクターカップリングは、個別技術の市場導入ではなくて、エネルギーシステム全体のインテグレーションに成功したときに初めて、その価値と恩恵が社会に還元されると考えられる。

³⁴ European Commission, EU strategy on energy system integration, https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/eu-strategy-energy-system-integration_en

表 7-2 代表的なセクターカップリング技術

		概要	展望	課題
Vehicle to X (V2X)	Vehicle to Grid (V2G)	電気自動車の蓄電池を電力系統（送配電網）のバッファおよび予備電源として活用する。	<ul style="list-style-type: none"> ・系統用蓄電池の削減 ・需給調整による EV ユーザーの収益獲得 →EV 利用インセンティブの創出による EV 普及促進 	<ul style="list-style-type: none"> ・配電網への逆潮流 ・分散する EV 蓄電池のアグリゲーションメカニズムの構築 ・V2G に対応した HEMS・BEMS の導入 ・充放電設備の導入
	Vehicle to Home (V2H)	電気自動車の蓄電池を住宅内電力システムのバッファおよび予備電源として活用する。	<ul style="list-style-type: none"> ・家庭用蓄電池の削減 ・建物用太陽光発電電力の最大限活用（ZEH・ZEB の実現） 	<ul style="list-style-type: none"> ・V2H・V2B に対応した HEMS・BEMS の導入 ・充放電設備の導入
	Vehicle to Building (V2B)	電気自動車の蓄電池を商業ビルや集合住宅内の電力システムのバッファおよび予備電源として活用する。	→電気代の抑制	
Power to X (P2X)	Power to Heat (P2H)	電力を温水などの熱に変換し、貯蔵・供給する。主に地域熱供給システムの熱源として想定される。	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー消費効率の改善再エネの熱貯蔵 →蓄電池の削減，季節間貯蔵 	<ul style="list-style-type: none"> ・地域熱供給インフラの整備
	Power to Gas (P2G)	電力を水素やメタンなどの気体燃料に変換し、貯蔵・供給する。気体燃料は、発電用燃料やガスエンジン用燃料として利用可能。	<ul style="list-style-type: none"> ・カーボンニュートラル燃料の供給 →航空や化学製品といった Hard-to-abate セクターの脱炭素化 ・燃料製造による付加価値創出 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料製造コスト ・脱炭素燃料需要
	Power to Liquid (P2L)	電力を炭化水素やアンモニア、メタノールなどの液体燃料に変換し、貯蔵・供給する。液体燃料は、発電用燃料や燃料として利用可能。炭化水素は、化学製品原料としても利用可能。		

IV. Positive Energy Districts(PED)展開の可能性について

東京都市大学環境学部 加用現空

1. はじめに

EBC Strategic Plan 2019-2024 ビジョンステートメントでは、新築建物と街区は、2030年までに一次エネルギー使用と二酸化炭素排出の Nearly Zero を実現する持続可能性のある解決策を含んでいること、また、既存の建物ストックに対しては、幅広い多様な技術的解決策が適用されることが挙げ得られている。このような IEA が都市に対して提言する役割のもとに PED (Positive Energy District) のコンセプトが打ち出された。上述の背景から、IEA EBC は第 83 専門家分科会 (Annex 83) を発足した。Annex83 では、IEA の国際協力枠組みをいかし、PED の考え方を発展させ、都市部が実践可能な方法論を確立することを目的に、以下のサブタスクごとにチームを組み、研究活動を行なっている。ヨーロッパ圏を中心に展開する PED だが、日本においては、地域脱炭素ロードマップなどを背景に PED コンセプトの展開が考えられ、その際にはカーボンニュートラルの他、地域のレジリエンスも考慮することが求められる。本研究は、欧州を中心に推進される Positive Energy Districts (以下、PED) の事例調査と、日本における地域単位のエネルギー事業である脱炭素先行地域の事例調査を行ない、日本における PED コンセプト導入の可能性について検討したものである。

2. Positive Energy Districts

2.1. 背景

世界の都市部から排出される CO₂ 総量は 70% を占め、都市間の国際的連携が喫緊の課題です。国連の持続可能な開発目標 (SDGs) の「持続可能な都市とコミュニティ (Goal 11)」は、街区単位で実践可能な具体方策を求めている。パリ協定 (2015) は、CO₂ 排出量削減を目的とした国際的な取組みを重視している。IEA Energy Technology Perspective 2017 では、都市計画によりクリーンで分散型のエネルギーソリューションを牽引する方向性が述べられている。また、EBC Strategic Plan 2019-2024 ビジョンステートメントでは、新築建物と街区は、2030年までに一次エネルギー使用と二酸化炭素排出の Nearly Zero を実現する持続可能性のある解決策を含んでいること、また、既存の建物ストックに対しては、幅広い多様な技術的解決策が適用されることが挙げ得られている。このような IEA が都市に対して提言する役割のもとに PED のコンセプトが打ち出された。

PED を進める動向として、2つのネットワーク事例を示す。国際エネルギー機関 (IEA) では、PED に関する研究会合 EBC Annex83 [1] を立ち上げ、街区スケールでの脱炭素化に資する研究活動を進めている。また、COST Action Positive Energy Districts European Network (PED-EU-NET) では、さまざまな領域やセクターの研究者やその他の関係者を参画し、知識のオープンな共有、アイデアの交換、リソースのプール、新しい手法の実験、斬新なソリューションの共同創造を通じて、欧州における Positive Energy Districts (PEDs) の展開を推進することを目的に活動している [2]。

2.2. 定義

PED コンセプトが欧州を中心に発展した背景に、欧州戦略的エネルギー技術 (SET 計画) [3] でのプログラムで発足された「持続可能な都市開発のためのポジティブエネルギー街区 (Positive Energy District, PED)」がある。SET 計画では、パリ協定に基づいて 2025 年までに 100 の PED 地区を計画、展開することを目指している。ここで、PED は、以下のように定義される。

- 1) エネルギー使用量以上に生産可能な能力を有する都市型街区である。
- 2) エネルギーインフラ、近隣街区の需要変動に応答可能な柔軟性を有する。
- 3) 独立したシステムではなく、インフラと連携した相互補完可能なシステムである。

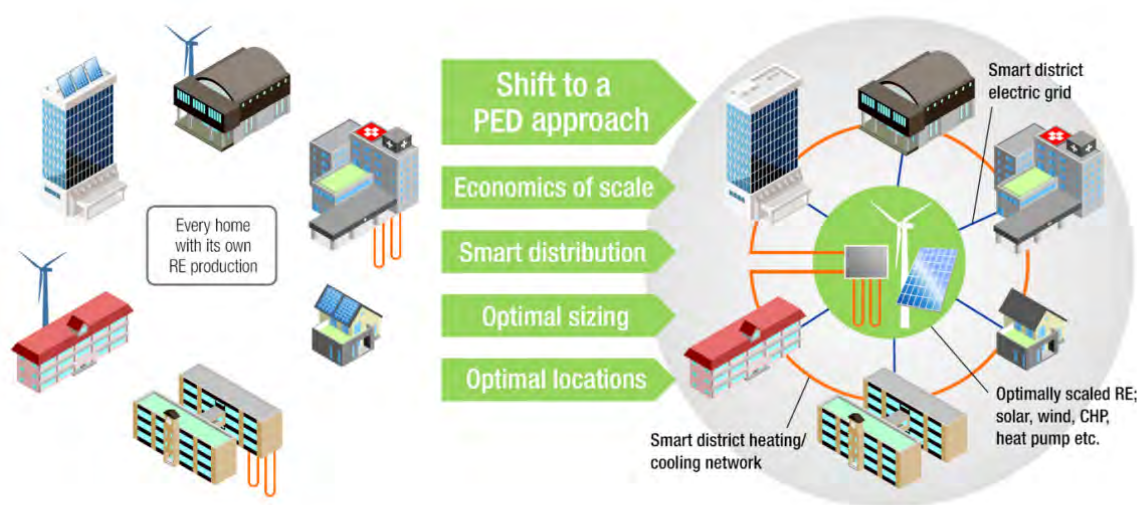


図 1. PED イメージ図 (VTT Technical Research Centre of Finland 作成)

定義 1 について、Zero Energy Building (ZEB)の主旨と近しく、年間を通じたエネルギー生産と使用のバランスをゼロにする ZEB 基準をさらに進め、年間のエネルギー生産量が使用量を上回ることを目指すものである。定義 2・3 について、エネルギー市場との応答性は、Demand Response (DR) によるエネルギーネットワーク全体のバランス調整に貢献することを示す。エネルギー市場が十分に発達し、エネルギー街区側に Dynamic Pricing 等による応答・調整の必要性がなくては実現が難しい。Annex83 研究会合における議論では、既存の PED 定義を再解釈し、以下の 3 点に整理している (報告書作成中の動向)。

- a. 再生可能エネルギーに基づくシステムである
- b. 地域の脱炭素化 (Carbon Neutral) に貢献する
- c. 電力ネットワークとの応答能力を有する

論点 a・b について、日本におけるプロジェクトでも該当するものが多い。論点 c について、複数の需要家が連携したオープンなエネルギー市場はまだ十分に整備されていない現状では、日本の事例はほとんど存在しない。

2.3. PED 事例

Annex83 では、PED 事例を収集し、類型化、特徴抽出、情報公開を行なっている。PED-EU-NET [2] は、様々な PED プロジェクトの概要をまとめ情報提供する PED データベースを公開している。各 PED プロジェクトに関する詳細情報のリンクや、プロジェクトの特徴を比較するツールも提供されている。データベースを作成・構築した研究者・実務家のほとんどはヨーロッパ圏出身のため、収集されたプロジェクト事例はヨーロッパ地域に集中している。本調査では 2 つの EU プロジェクト (syn.ikia, SPARCS) で進めれる 6 事例を示す。

Fondo, Santa Coloma de Gramenet (Barcelona, Spain) [4]

都市型新築プロジェクトの事例。公営住宅供給会社 INCÀSOL によって開発・管理される 38 戸の集合住宅である。地域の住宅機関 (Agència de l'Habitatge de Catalunya) は、住民に新しい住環境を提供し、継続的な関わりを通じて、住まい方を監修する。医療センターなど近隣街区と設備を共有する。エネルギー管理者は、両建物のエネルギー需要と生産のモニタリングし最適化を図る。中央式ヒートポンプと PV パネルを組合せたアクティブシステムにより給湯と暖房を行なう。



図. Fondo, Santa Coloma de Gramenet [4]

Gneis District (Salzburg, Austria) [5]

既存地区に 250 戸の公営住宅と幼稚園の改築を含む事例。公営住宅は Heimat Österreich によって建設される。40 戸のアパートは特別なニーズを持つ住民に配布される。Caritas は、55 年の歴史を持つコミュニティ・グループ "Wohngruppe Silberstreif" とともに、Gneis 地区に関わる。公営住宅の供給事業者は、エネルギー利用や住宅改修に関するアドバイスやコンサルティング・サービスを提供し、住民と協力して自給自足のエネルギー・コミュニティを立ち上げる。敷地内には、幼稚園、医師、カフェ、コワーキング・スペース、談話室、特別支援室などの施設も設置されている。地中熱ヒートポンプと地下水熱源ヒートポンプによる給湯と暖房を行なう。



図. Gneis District, Salzburg [5]

Loopkanstraat, Uden (Netherlands) [6]

新築開発の事例。Area Wonen が管理する 24 戸と、Labyrinth zorg & werk が管理する 16 戸の合計 39 戸の公営住宅事例。街区内での太陽光発電と EV 充電ステーションを含めた検討が行なわれた。このプロジェクトが提示する“Social Beautiful”コンセプトは、Area Wonen 社、Uden 市により示され、社会福祉サービスは Labyrinth 社と街区開発者であるデベロッパーである Hendriks Coppelmans 社により提供された。設計段階において、入居者のグループ代表が選定され、コミュニティ形成活動を主導し、継続的な住環境が構築された。住戸別の地中熱ヒートポンプによる暖房と給湯を行ない、屋根面には 190 枚の PV パネルが設置されている、室内は床放射暖房と CO2 センサーによる機械換気が行なわれる。



図. Loopkanstraat, Uden [6]

Verksbyen, Fredrikstad (Norway) [7]

Verket Atrium and Panorama は 56 戸の集合住宅から構成され、Verksbyen 都市開発プロジェクトの一部である。このプロジェクトと関連する土地は、不動産開発者 Arca Nova Bolig AS 社が全て所有する。建物はパッシブハウス基準を満たし、熱橋発生の回避、高性能な開口部、高断熱材、熱回収を伴う機械換気、気密性の高い建物外壁などを含む。地中熱ヒートポンプ、壁面と屋根面の PV パネル、熱回収型機械換気が導入されている。



図. Verksbyen, Fredrikstad [7]

SPARCS Lighthouse City Espoo (Finland) [8]

それぞれ独自の特徴を持つ3つの地区（計画段階、再開発段階、既存街区）でデモンストレーションを進めるプロジェクト事例。Kera（計画段階の街区）は Leppävaara にある未開発の工業地区である。今後数十年間で、14,000 人の市民と 10,000 人の雇用を創出する新しい住宅地区として開発予定である。Espoolahdi（再開発段階の街区）は、延伸された地下鉄ネットワークに接続する新しい商業施設 Lippulaiva を核とする街区開発である。Sello（既存街区）は Espoo 市内で最も大きい複合商業施設のひとつで、65,000 人以上の居住者を有する。



図. Sello shopping center

<https://www.sello.fi/en/info/parking-and-public-transport>



図. Lippulaiva https://www.citycon.com/sites/default/files/images/cision/91f6b71c2bd0ac7f_org.jpg

Leipzig SPARCS Demo site (Germany) [9]

Leipzig のプロジェクトは、3つのデモ地区で構成される。Baumwollspinnerei は、1884 年創業の旧綿織物工場の敷地（約 30,000 m²）の部分改修による事例である。かつての産業用地を文化活動に利用する実施例として知られる。2つめの Leipzig-West のデモ地区は、Neulindenau の Duncker 地区にあるスマート公営住宅で構成されており、Leipzig Lausen に建設予定の太陽熱利用事業と連携している。熱とエネルギー使用を可視化する様々なアプリケーションにより、入居者は PED 運用に積極的に関わる。3つめの Virtual Positive Energy Community は、複数の拠点をバーチャルにつなぐエネルギー連携の様々な取り組みで構成される。これらの取

り組みは、オープン技術によって強化され、接続されたエネルギー拠点の実生活への影響把握を目的としている。ICTモデルにより、生産者、消費者、プロシューマーを結びつけてデータ化する。



図.

Baumwollspinnerei

<https://sparcs-leipzig.info/energiemanagement-in-der-baumwollspinnerei-leipzig-in-betrieb/>

2.4. 日本とヨーロッパの状況比較

欧州の PED コンセプトを他地域に展開する際、前提となる背景における大きな際は、電力ネットワークにあると考えられる。欧州では European Super Grid をもとに国と地域を横断して電力融通が行なわれる。ヨーロッパ全域に分布する発電所からの出力に加え、PED 街区がグリッド全体の出力調整に貢献することで、ネットワーク内の再生可能エネルギー導入可能性を高めるねらいがある。

一方、日本をはじめとするアジア地域の電力ネットワークは、ヨーロッパのネットワークに比べて範囲が狭く、規模も相対的に小さい。そのため、PED 街区のようなオンサイト発電から電力ネットワークへの出力は、ネットワーク全体の不安定を生じ得る。

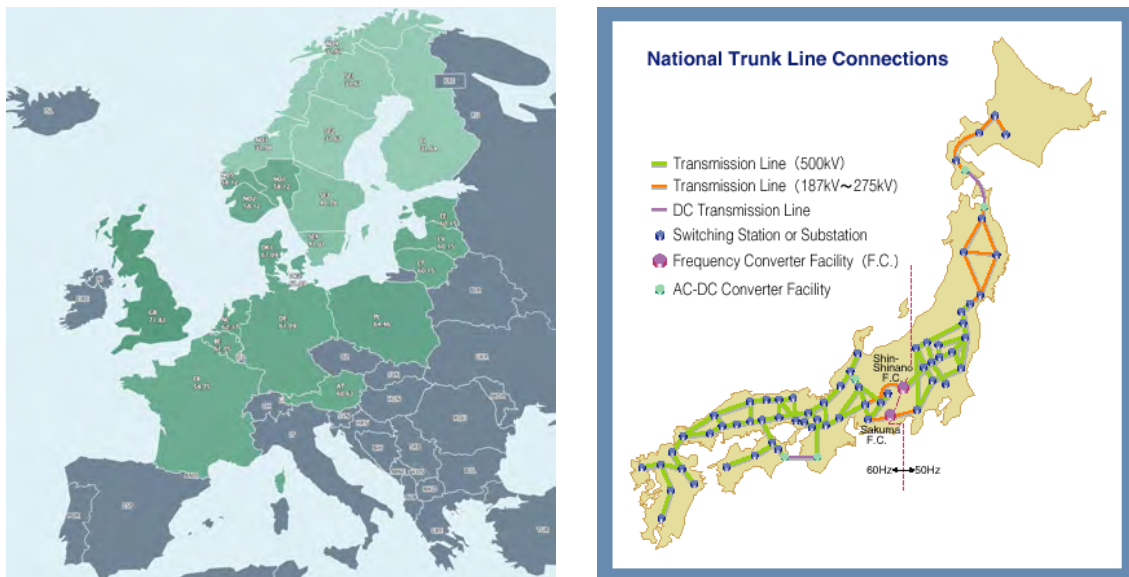


図2. エネルギーネットワーク (左：ヨーロッパ、右：日本) [10]

2.5. PED 事例における熱供給

今回取り上げた事例では、地中熱ヒートポンプなど、ヒートポンプ技術による熱供給を採用する事例が多く見られた。地域熱供給が普及しているフィンランドの事例 Lippulaiva でも、地域熱供給と接続しているが、総長約 50km による地中熱杭による地中熱ヒートポンプ (4MW) と店舗からの排熱による熱供給を基本とし、地域熱供給はバックアップの位置づけとなっている。熱供給もヒートポンプを採用することで電化し、電力を主とするエネルギーマネジメントを行なう傾向が確認された。

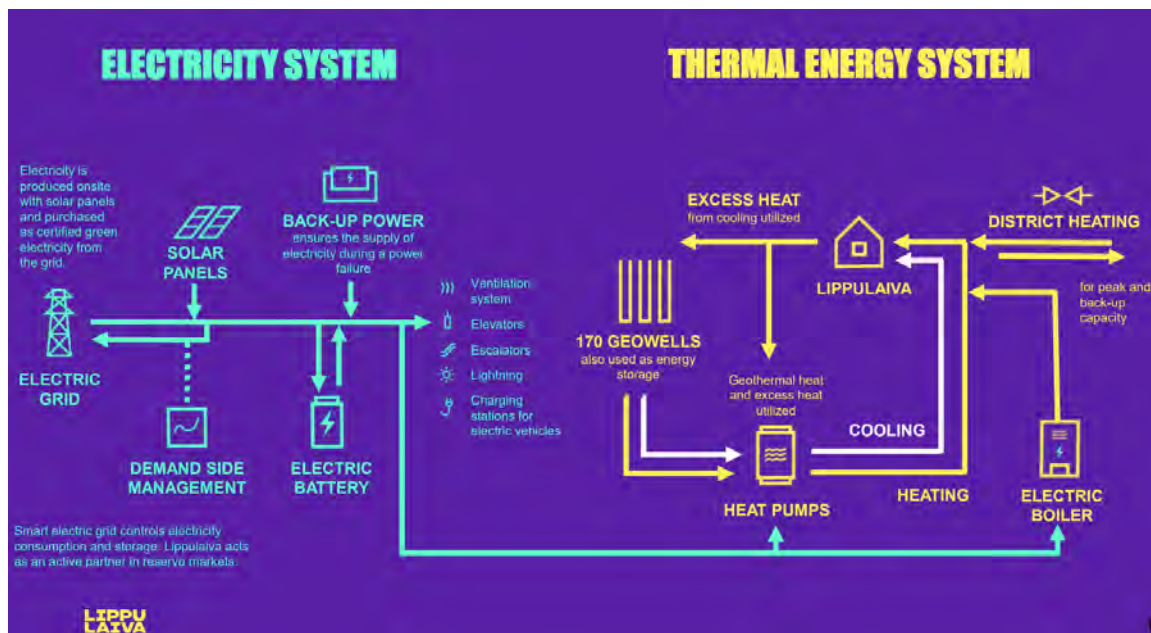


図. Lippulaiva エネルギーシステム [13]

3. 脱炭素先行地域

3.1. 概要

環境省が中心となり 2050 年カーボンニュートラルに向けて、家庭部門及び業務その他部門の電力消費に伴う温室効果ガス排出の実質ゼロの実現と、運輸部門や熱利用等も含めたその他の温室効果ガス排出削減を具体的に推し進めるため、地域脱炭素ロードマップを策定した [11]。農山漁村、離島、都市部の街区など、多様な地域の特性に応じた脱炭素計画を立案した地域（脱炭素先行地域）を 100 地域選定し、地域の主体的活動を国が支援する事業である [12]。第 4 回 脱炭素先行地域までに、全国 36 道府県 95 市町村の 74 提案が選定された。

脱炭素先行地域(74提案)

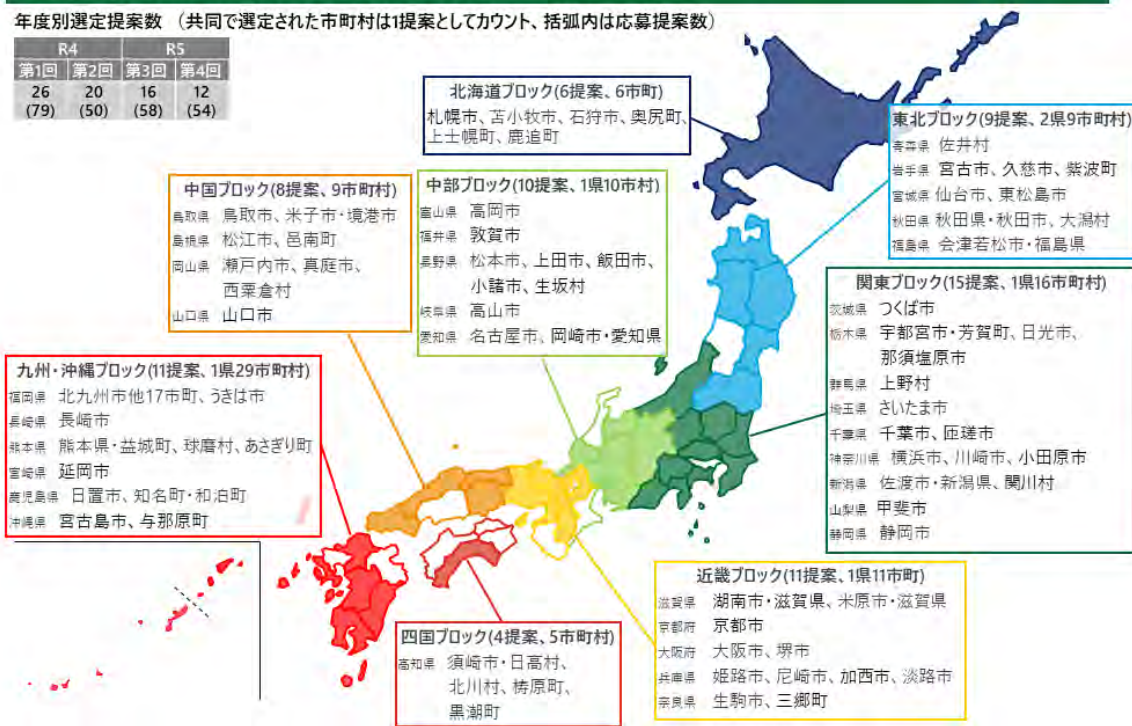


図 3. 脱炭素先行地域（74 地域、2023 年時点） [12]

3.2. 自治体事例分析

1) 選定した 4 事例

各自治体の脱炭素先行地域計画書 [12] に基づき、4 つの自治体事例を取り上げた。再生可能エネルギーを中心とする石狩市、震災復興と地域活性化を目指す東松島市、離島におけるエネルギーマネジメントを目指す佐渡市、産業復興と雇用拡大を目指す北九州市である。

2) 目標設定に関する考察

石狩市は、地域の活性化を背景に、石狩湾新港地域内に電力使用の多いデータセンターを誘致し、その電力供給を再生可能エネルギー（RE）で賄う RE ゾーンでの産業集積を計画している。市民に対しては、公用車の脱炭素化による柔軟な行政機能の実現や、地域と公共交通のセクターカップリングによる地域活性化を目標としている。

東松島市では、2011 年の東日本大震災からの復興や人口減少を背景に、復旧復興が未完である自然環境の緑化推進や、東松島市、商工会、社会福祉協議会の 3 社により設立された「一般社団法人東松島みらいとし機構

(HOPE)」を中心とした新規エネルギー産業による企業誘致による、東松島市での雇用の増加を図ることや次世代車両を活用した交通機関整備をすることによって市民の移住や定住につながることを目標としている。

佐渡市では、エネルギーの災害脆弱性や地域活性を背景に、再生可能エネルギーと蓄電池導入により、災害時の電源喪失などのリスクを最小限に抑えつつ、再生可能エネルギーによる産業復興と雇用拡大を通じた地域経済活性化を目標としている。そして、2003年に絶滅したトキを中国から提供された親鳥を繁殖と放鳥を繰り返して今では480羽のトキが佐渡島で生活をしている。そのトキと共に暮らすために再生可能エネルギーの導入を拡大している。

北九州市では、市内の町村や民間企業との連携を通じて、社会経済の維持を目標とし、ものづくり産業や中小企業の競争力の強化、都心部分のオフィスビルの再開発などの街の再生、再生可能エネルギーなどの新産業の創出を計画している。

3) 要素技術に関する考察

目的達成に向けて各自治体が計画に取り入れる主な要素技術を表1に示す。全ての地域で採用される技術は太陽光発電と電気自動車（EV）だった。日本事例では、災害対策から大型蓄電池を導入し、被災時のエネルギー計画が盛り込まれている。一方、Groningenでは天然ガスを地熱やバイオガスに置き換えるなど、熱エネルギーに関する技術導入を含んでいる。暖房需要の高い寒冷地の熱供給に重点が置かれていることがわかる。

表1. 要素技術

	石狩市	東松島市	佐渡市	北九州市
太陽光発電	○	○	○	○
バイオマス発電	○（木質）		○（木質）	○
風力発電		○		○
電気自動車	○	○	○	○
蓄電池	○	○	○	○
水素	○			○
地熱利用				
バイオガス				
マイクログリッド	○	○		

4. まとめ

本研究は、欧州を中心に推進される Positive Energy Districts（以下、PED）の事例調査と、日本における地域単位のエネルギー事業である脱炭素先行地域の事例調査を行ない、日本における PED コンセプト導入の可能性について検討したものである。欧州の PED コンセプトを他地域に展開する際、前提となる背景における大きな際は、電力ネットワークにあると考えられる。欧州では European Super Grid をもとに国と地域を横断して電力融通が行なわれる。ヨーロッパ全域に分布する発電所からの出力に加え、PED 街区がグリッド全体の出力調整に貢献することで、ネットワーク内の再生可能エネルギー導入可能性を高めるねらいがある。一方、日本をはじめとするアジア地域の電力ネットワークは、ヨーロッパのネットワークに比べて範囲が狭く、規模も相対的に小さい。そのため、PED 街区のようなオンサイト発電から電力ネットワークへの出力は、ネットワーク全体の不安定を生じ得る。

日本のエネルギーコミュニティにヨーロッパで定義された PED コンセプトを適用するためにはその役割と昨日を再定義する必要がある。環境省が進める脱炭素先行地域の実践を機に、地域単位のエネルギー応答性を高める方法論を確立、普及させることが求められる。

備考

本調査報告書の一部は、卒業研究論文「日本と欧州における地域脱炭素化計画の事例比較」(東京都市大学環境学部・阿部新)としてまとられた成果を参照している。また、IEA EBC Annex83 の研究活動を通じて得られた情報に基づいており、Annex83 成果物として報告されるものと関連付けられている。

引用文献

- [1] Annex 83-Positive Energy Districts, IEA EBC, 2021.
- [2] <https://pedeu.net/map/>
- [3] Strategic Energy Technology Plan, EC, 2019.
- [4] <https://www.synikia.eu/neighbourhoods/fondo-santa-coloma-de-gramenet/>
- [5] https://www.synikia.eu/neighbourhoods/gneis-district-salzburg_2/
- [6] https://www.synikia.eu/neighbourhoods/gneis-district-salzburg_2/
- [7] <https://www.synikia.eu/neighbourhoods/demo-neighbourhood-norway/>
- [8] <https://sparcs.info/en/cities/espool/>
- [9] <https://sparcs.info/en/cities/leipzig/>
- [10] <https://www.nordpoolgroup.com/en/maps/#/nordic>
- [11] 国・地方脱炭素実現会議、地域脱炭素ロードマップ、2021.
- [12] 脱炭素地域づくり支援サイト, 環境省, 2022.
- [13] https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/2166329/mod_folder/content/0/Lippulaiva_Sustainability_concept%20Jaakko%20Jokinen%2011%202023.pdf?forcedownload=1

本書は独立行政法人環境再生保全機構地球環境基金の活動助成により作成されています。



(発行 2024年3月)

作成・発行：特定非営利活動法人 環境エネルギー政策研究所 (ISEP)

〒160-0008 東京都新宿区四谷三栄町16番16号

TEL 03-3355-2200

FAX 03-3355-2205

<https://www.isep.or.jp/>

Institute for
Sustainable
energy
policy
isep 特定非営利活動法人
環境エネルギー政策研究所