

再生可能エネルギー需給型コミュニティの構成方法 の検討

Preliminary System Design for A Renewable Energy Sources-based Community in the Tsukuba City

杉本 一郎 *・森田 賢治 **・三石 洋之 **・石田 政義 ***
Ichiro Sugimoto Kenji Morita Hiroyuki Mitsuishi Masayoshi Ishida

This paper proposes a draft system design of a renewable energy sources (RES)-based community in the Tsukuba City, which is comprised of the five functional categories specified in the previous report, “Tsukuba Green Holonism Town,” and examines a preliminary energy outlook both supply and demand in the community in 2030, which includes an allocation plan of zero-emission energy sources in the Ibaraki Prefecture and a set of residential electricity and heat demand estimated in winter, summer, and the other seasons. Japan is taking on the considerable challenge of reducing greenhouse gas (GHG) emissions to net-zero by 2050, so we are urged to deploy a large amount of RES. The draft design and preliminary outlook identify the research problems on system configuration and operation for the community, which are classified to six domains: energy supply profile of solar photovoltaic (PV) in a day, a week, and a year, variability and intermittency during PV power generation, transmission capacity restriction in the grid, weather conditions around the RES installation site, demand imbalance between electric power and heat, and demand response corresponding to the energy imbalance between supply and demand.

Keywords : energy community, the energy imbalance between supply and demand, photovoltaic, hydrogen, and demand response

1. まえがき

英国・欧州における再生可能エネルギー（再エネ/RES）の導入は欧州連合（EU）の第 3 次エネルギーパッケージ（2009 年 9 月施行）¹⁾により加速され、電力消費における再エネの割合は EU 全体で 2009 年 19.0 % から 2019 年 34.2 % まで増加している²⁾。EU（英国除く）は、2021 年 7 月に「2030 年の再エネ比率の目標を 40 % に引き上げる」再生可能エネルギーパッケージの改正案を発表した³⁾。また国際エネルギー機関（IEA: International Energy Agency）は、IEA 加盟国等（34 ヶ国; 中国・インド含む）において、太陽光発電（PV）と風力発電（Wind）を合わせた発電容量が 2020 年から 2030 年の 10 年間で 4 倍に増加する（計 1,020 GW）と予測している⁴⁾。

わが国では、再エネの固定価格買取制度（FIT）⁵⁾が 2012 年 7 月から導入され、再エネの発電量比率が 2011 年度 10.4 %（水力発電含む）から 2019 年度 18.1 %（同上）まで増加した⁶⁾。今後の導入政策として第 6 次エネルギー基本計画では、2030 年度の再エネ電源比率の目標が「36 % - 38 %」と明記されている⁷⁾。また再エネ（水力発電を除く）の内

訳として、PV の発電量比率が 2019 年度は再エネ全体の 73 % を占め、2030 年度には PV と Wind を合わせて 55 % 程度が計画されている。特に PV については、発電容量ベースで 2019 年度 55.8 GW（実績）から、2030 年度 103.5 – 117.6 GW と大幅な導入を見込んでいる⁷⁾。

今後わが国においても、PV や Wind といった変動型再生可能エネルギー（VRE: Variable Renewable Energy）が大量に導入されることになり、それによって以下の課題が顕在化すると予想されている⁸⁻¹⁰⁾。

- ・ VRE 発電出力プロファイルと電力需要プロファイルの時間的・期間的な乖離
- ・ VRE 発電出力の不安定性・間欠性による電力需要とのインバランス
- ・ VRE が系統連系する上での系統側の容量等の制約

さらに VRE には、大量導入に伴って設置場所の気象条件に依存した固有の課題「Dunkelflaute¹¹⁾」も内在している。

筆者らは、茨城県の自治体、大学、研究機関、企業等で構成される「つくば 3E フォーラム」においてタスクフォース（TF）「次世代エネルギーシステム」を推進し、水素エネルギーが社会において実装される方策を議論・提案している¹²⁾。特に 2020 年からは、地域の再エネを活用して水素製造・貯蔵・搬送を基盤にしたエネルギー需給型コミュニティの形成方策について研究を行っている¹³⁾。

*株式会社エネルギー・生活科学研究所

〒563-0022 大阪府池田市旭丘 3-6-2

ichiro@energy-and-humanlife.com

** 一般財団法人日本自動車研究所

*** 筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学科

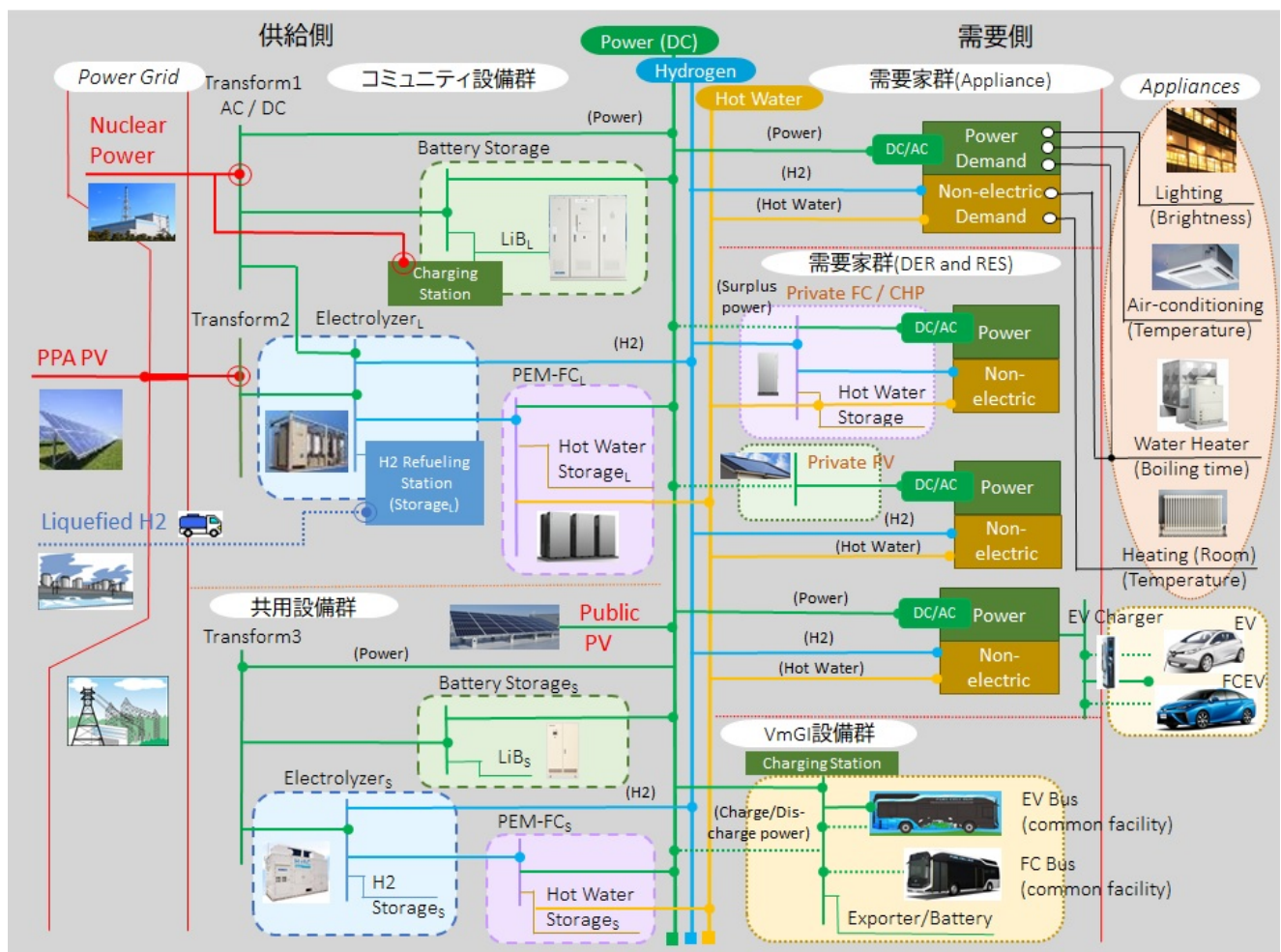


図1 再生可能エネルギー需給型コミュニティのシステム構成（暫定案）

第一報「つくばグリーンホロニズムタウン—カーボンニュートラルコミュニティの実現に向けて」では、提案したコミュニティの基本理念とそれを構成する機能分類を示した。本稿は第二報として、まず再エネを主たるエネルギー源とするコミュニティの設計や運用に関する先行研究事例を示し、「再生可能エネルギー需給型コミュニティ」を位置付ける。次に、コミュニティの暫定的なシステム構成を示すと共に、地域のエネルギー源を合理的に割り当て、供給計画（案）を作成する。また、季節変動を考慮して類型化した電力需要、熱需要を作成し、予備的なエネルギー需給の見通しを立てる。さらに、以上の結果からコミュニティを設計・運用する上での研究課題を再整理する。

2. 先行研究事例

再エネを主体とするエネルギーコミュニティ（マイクログリッドを含む）に関する研究は、再エネの導入が進む英国・欧州で2000年代から始まり¹⁴⁾、その後世界各国の再エネ普及に伴い、2010年代後半から各国で多くの研究が進められている¹⁵⁾。これらの研究をコミュニティのエネルギー需給の観点から類型化すると、以下の手法が挙げられる。

- ✦ エネルギー需要を所与として、コミュニティを構成するエネルギーシステム（再エネ発電、エネルギー変換、貯蔵等の設備）の設計の最適化、運転戦略の最適化、予測情報を導入した運転の最適化を、数理計画法、ニューラルネットワーク等を用いて行う手法¹⁶⁻²⁰⁾。
- ✦ 需要家の分散型エネルギー（DER: Distributed Energy Resources）の発電出力の変更、エネルギー消費機器の制御、電気自動車（EV）の充放電制御等のデマンドレスポンス（DR: Demand Response）により、電力需要プロファイルを時間的または期間的に成形（Shaping）して、コミュニティ全体の運転を最適化する手法²¹⁻²⁴⁾。

エネルギー需要を所与（固定）としてエネルギーコミュニティを構成する設備の容量等を最適化する手法では、目的関数（e.g. コスト最小化）に沿って最適化した設計・運用を行うことは可能だが、実際のコミュニティの形成過程や時間経過を考えると、居住者や労働者の転入/転出によって当初計画したエネルギー需要に達せず、設備が想定した性能を発揮できないケースがあり、それゆえ需要に合わせて設備を柔軟に増強/縮小する仕組みが求められる。

需要家の保有する設備・機器（e.g. DER, EV, 消費機器）を対象として DR 等によりエネルギー需要を変更する手法では、設備・機器の所有者・使用者に対してエネルギーシステムと協働するためのインセンティブ（e.g. 報酬）を付与する仕組み、配電事業者等と需要家の間にアグリゲータが介在する、といったコミュニティの需要プロファイルを制御する市場を介した仕組みが求められる。

再エネ需給型コミュニティでは、エネルギーネットワークを多重構成することで、エネルギー需要の増加/減少に追従して設備容量に柔軟性を持たせる、さらに、コミュニティ設備や需要家の保有設備による DR だけでなく、予測情報を活用してコミュニティに暮らす人や働く人の移動や行動の変容を行い、需給を調整させるという特長を有する。

3. 再生可能エネルギー需給型コミュニティ

本稿では、第一報の基本理念「カーボンニュートラル化」「エネルギー需給のバランス」「生活様式、働き方、移動機会・様式の変容」を 2030 年時点の目標と位置付け、コミュニティの暫定的なシステム構成を示し、予備的なエネルギー源の割当（供給）計画、季節類型別のエネルギー需要と 2030 年時点での需給見通しを概観する。

3.1 コミュニティの暫定的なシステム構成

図 1 に、第一報の「機能分類」に基づく、再エネ需給型コミュニティのシステム構成（暫定案）を示す。ここでコミュニティは、茨城県つくば市の既成の市街地（住宅地; 100–200 世帯）を想定して、以下に設備群、需要家群の構成・機能を述べる。

（コミュニティ設備群）

- コミュニティが外部から調達するエネルギーは県内に設置された再エネ、原子力発電等であり、その容量は公平かつ合理的に配分して供給される。
- コミュニティ設備群は専用設備として、エネルギー供給ステーション（エネルギー変換・貯蔵等）とエネルギーネットワーク（電力・水素・温水の融通）を有する。
- 水素ステーションを併設し、水素貯蔵設備を共用する。（共用設備群）
- 共用設備群はコミュニティ付近の公共施設に設置された再エネ設備等であり、製造されたエネルギーは合理的に配分されエネルギーネットワークを介して供給される。（VmGI 設備群: Vehicle-to-Microgrid Integration）
- 充電・放電スタンドは、電動車両の充電だけでなく放電（エネルギーネットワークへの給電）も行う。（分散型エネルギー等を保有する需要家群）
- 需要家の保有する DER / RES / EV は、当該需要家のエネルギー需要の低減に寄与し、余剰電力・温水がエネルギー

ネットワークを通じて供給される。

（消費機器のみを保有する需要家群）

- 需要家の保有するエネルギー消費機器は、自動操作により制御できる機器（制御可）と人為的にしか操作できない機器（制御不可）に類別される。

3.2 予備的なエネルギー源の割当計画

コミュニティが外部から調達する再エネは、茨城県の「事業用太陽光発電（PPA PV）」を対象に、固定価格買取制度（FIT）の認定量（2021 年 6 月末時点²⁵⁾を 2030 年時点の全体容量と推定し、世帯数（1,195 千世帯）で按分して、コミュニティ向けの割当容量（100 世帯分）を算定する。またコミュニティ内の需要家が保有する再エネは、茨城県の「住宅用太陽光発電（Public PV）」を対象に、2030 年時点で「普及率 10%」（2021 年 6 月末時点で 7.9%²⁵⁾）と推定し、住宅用 PV 容量（平均 4.4kW/世帯）を算定する。

事業用 PV、住宅用 PV の発電量（電力量）は共に、1 年間の「NEDO 日射スペクトルデータ（@つくば）」を基に、シミュレーションにより推定する。

さらに、コミュニティが調達する原子力発電（原発）は、「東海第二原発²⁶⁾」を対象に、事業用 PV と同様の手法でコミュニティ向けの割当容量を算定し、設備利用率（実績値 56.9%²⁶⁾）から割当電力量（年間一定量）を推定する。

以上の受電量・発電量を合算して、予備的な「コミュニティ向けの割当計画」とする。表 1 に、コミュニティ（100 世帯）向けのエネルギー源の割当計画（案）を示す。

なお共用設備群に属する再エネ（PV）は、ロケーションによる得失を排除するため、本稿の割当計画では割愛する。

3.3 予備的なエネルギー需給見通し

コミュニティの季節類型別（冬期、夏期、中間期）の電力需要・熱（温水）需要は、文献 27) の結果の内、

- ・ 世帯人員 2.5 人（茨城県 2.38 人、2021 年 5 月時点）
- ・ 在宅時間（外出行動）は AM 外出型、PM 外出型に分けて結果を平均する
- ・ 給湯使用は IBEC「修正 M1 モード」に準拠し、入浴は浴槽（湯量 180L）を使用する

を採用する（これらの需要を「当初需要」という）。

表 2 に、コミュニティ（100 世帯）の季節類型別の電力需要と熱需要（案）を示す。

当初需要は 2010 年度の「電力需要実績（東京）²⁸⁾」と整合を計っているため、それ以降の省エネルギー（省エネ）効果は含まれていない。そこで、2030 年時点のコミュニティのエネルギー需要は、エネルギー基本計画が提示する最終エネルギー消費⁷⁾を基に、以下の省エネ率を考慮して推定する（基準年 2013 年 最終エネルギー消費 363 百万 kl）。

表 1 コミュニティ向けエネルギー源の割当計画（案）

エネルギー源	茨城県全体容量 (kW)	コミュニティ割当		備考
		容量 (kW)	電力量 (kWh/日)	
事業用太陽光発電	4,769,694	399	1,192(*)	FIT 認定容量 (茨城県)
住宅用太陽光発電		44	133(*)	PV 普及率 10 % (推定)
原子力発電 (東海第二)	1,100,000	46	628	設備利用率 56.9 %
受電量・発電量合計 (年平均)			1,954	

(*) 日射量スペクトルデータ：全天日射量・気温 [10 分値] (@つくば, 2015.1.1 -12.31) を基に算定

表 2 コミュニティの季節類型別の電力需要・熱需要（案）

種別	冬期 (12 月-2 月)	夏期 (6 月-8 月)	中間期 (3-5 月/9-11 月)	年平均	備考
電力需要 (kWh/日)	1,432	1,299	738	1,050	AM・PM 外出平均
熱需要 (kWh/日)	1,528	655	1,091	1,089	浴槽使用
熱電比	1.07	0.50	1.48	1.04	熱/電力
需要合計 (kWh/日)	2,960	1,954	1,829	2,139	

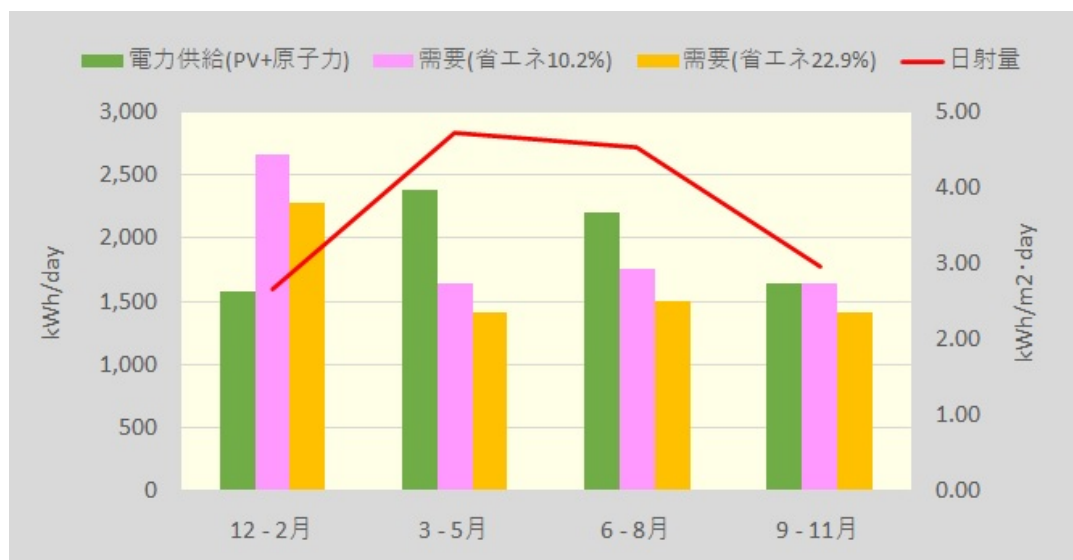


図 2 再生可能エネルギー需給型コミュニティの季節類型別のエネルギー需給見通し（暫定版）

1) 第 5 次エネルギー基本計画（2015 年策定）：省エネ率 10.2 %（2030 年 326 百万 kl）

2) 第 6 次エネルギー基本計画（2021 年策定）：省エネ率 22.9 %（2030 年 280 百万 kl）

以上の省エネ率を考慮したエネルギー需要（案）と前節のエネルギー源の割当計画（案）から、コミュニティの 2030 年時点の予備的なエネルギー需給（省エネ率 10.2 %, 22.9 %）が導かれる。図 2 に、再エネ需給型コミュニティの季節類型別のエネルギー需給見通し（暫定版）と日射量を示す。なおこの需給見通しでは、エネルギー変換（再変換）や貯蔵に係る損失を考慮していないことに注意を要す。

4. 考察 – 課題の再整理 –

コミュニティへの電力供給は、PV 発電量（電力量）が全体の 2/3 以上を占めているため（表 1 参照）、日射量との相関が高くなる。よって電力供給は、年平均値を基準にすると、冬期（12-2 月）0.81 倍、中間期（3-5 月）1.22 倍となり、±20 %程度変動する（図 2 参照）。

コミュニティの需要（省エネ率 22.9 %）は、年平均値を基準にして、中間期（3-5 月 / 9-11 月）0.85 倍、冬期（12-2 月）1.38 倍となり、-15 %から+40 %程度まで変動する。さらに熱電比も夏期（6-8 月）0.50 から中間期（9-11 月）1.48 と、極めて大きく変動する（表 2 参照）。

コミュニティのエネルギー需給率（＝需要/電力供給；省エネ率 22.9%）は、年平均値 0.84（電力供給＞需要）に対して、冬期（12-2 月）1.45，中間期（3-5 月）0.59，夏期（6-8 月）0.69，中間期（9-11 月）0.86 と、冬期のみが突出して高く，需要に対して電力供給が大幅に（50%程度）不足していることがわかる（図 2 参照）。これは主に，冬期（12-2 月）の熱需要が年平均値よりも 40%程度大きいことが要因と考えられる。

以上の議論から，日本において地域の再エネ（PV）を主力エネルギー源として，エネルギー需給型のコミュニティを構成する際に，以下の課題が整理される。

(1) PV の発電プロファイルに係る課題

- 1 日の時間軸（24h）での PV 発電プロファイル－需要プロファイルの乖離（供給側）
- 1 週間の曜日軸（平日・土日）での PV 発電－需要プロファイルの乖離（需要側）
- 1 年の季節類型軸（冬期・夏期・中間期）での PV 発電－需要プロファイルの乖離（供給側・需要側）

(2) PV の発電出力の不安定性・間欠性に係る課題

- コミュニティへの電力供給が気象条件（日射量，気温），外的条件（雲，建物の影）に依存して変動（供給側）

(3) 再エネの系統連系の制約に係る課題

- 外部から調達する再エネ（事業用 PV）が「ノンファーム型接続²⁹⁾」の系統連系の場合，コミュニティへの電力供給が系統の輻輳状態により低下（供給側）

(4) 変動型再エネ（PV・Wind）の大量導入とその設置場所の環境に係る課題

- エネルギー源の「可制御電源」（周波数制御・予備力）の不足（供給側）
- 「日本において発生する Dunkelflaute」による発電量の短期・中期に及ぶ低下（供給側）

(5) 電力需要と熱需要のインバランスに係る課題

- 1 年の季節類型軸（冬期・夏期・中間期）での需要の熱電比の変動（需要側）

(6) コミュニティのエネルギー需給バランスに係る課題

- 1 年の季節類型軸（1-12 月）での突出した需給インバランス期間（i.e. 冬期（12-2 月））への対応（供給側・需要側）
- 自動的/人為的デマンドレスポンス（上げ DR，下げ DR 共に）の信頼性と性能の仕様化（需要側）
- 「DR の組み合わせ」による，コミュニティ全体の予備力としての信頼性と性能の仕様化と，需給乖離の度合い（容量・時間・期間）と「DR の組み合わせ」仕様のマッピング（供給側・需要側）

5. あとがき

本稿では，水素を活用したエネルギー変換とエネルギーネットワーク（電力・水素・温水）を基盤とする，再生可能エネルギー需給型コミュニティのシステム構成を示した。ただし現段階では，各設備の容量等は未定である。次に，茨城県を事例に 2030 年時点の予備的なエネルギー源の割当計画（案）を提示し，住宅地域を想定したコミュニティ（100 世帯）の電力需要・熱需要を作成して，季節類型別（冬期・夏期・中間期）の暫定的なエネルギー需給見通しを概観した。さらにこれらの結果を基に，日本において太陽光発電（PV）を主力エネルギー源として，エネルギー需給型のコミュニティを合理的に設計・構築する上での課題を再整理した。

謝辞

本稿の「再生可能エネルギー需給型コミュニティの暫定的なシステム構成（案）」を策定するに当たり，つくば 3E フォーラム TF（次世代エネルギーシステム）の参画メンバーに議論をいただいた。

参考文献

- 1) EC HP; Third energy package,
https://ec.europa.eu/energy/topics/markets-and-consumers/market-legislation/third-energy-package_en
（アクセス日 2021. 11. 2）
- 2) EC Eurostat; SHARES 2019 summary results (Last updated: 2 April 2021)
- 3) EC COM (2021) 557 final, “Proposal for a Directive of the European Parliament, amending Directive (EU) 2018/2001,” Brussels, 14 July 2021.
- 4) IEA report; Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector, 18 May 2021.
- 5) 経済産業省 資源エネルギー庁 HP; 再生可能エネルギー 固定価格買取制度
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saie/kaitori/surcharge.html （アクセス日 2021. 11. 2）
- 6) 経済産業省 資源エネルギー庁 調達価格等算定委員会; 国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案, 2021 年 10 月 4 日
- 7) 経済産業省 資源エネルギー庁; 2030 年度におけるエネルギー需給の見通し, 2021 年 10 月 22 日
- 8) Hirth L, Ziegenhagen I: Balancing power and variable renewables: Three links, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 50, October 2015, Pages 1035-1051.
- 9) Brussels A: Energy market analysis of integration of the variable renewable energy sources (VRES) into the EU

- energy systems, CEEP Policy Paper, October 2020.
- 10) 松尾雄司: 電源の限界費用と平均費用: 「LCOE を超える」指標, エネルギー・資源 Vol. 42 No. 2 (2021).
 - 11) Li B, Russchenberg H, et al: A Brief Climatology of Dunkelflaute Events over and Surrounding the North and Baltic Sea Areas, *Energies* 2021, 14, 6508.
 - 12) つくば 3E フォーラム HP; タスクフォース 次世代エネルギーシステム
<https://eeeforum.sec.tsukuba.ac.jp/taskforce/nextgeneration.php> (アクセス 2021.11.3)
 - 13) Morita K, Sugimoto I, et al: Tsukuba Holonism Town—Building A Carbon Neutral Community, *SOLARIS* 2021, September 2021, Tokyo, Japan.
 - 14) Hewitt R, Bradley N, et al: Social innovation in community energy in Europe: a review of the evidence, *REVIEW article Frontiers in Energy Research*, 5 April 2019.
 - 15) Vera Y, Bernal-Agustín J, et al: Energy Management in Microgrids with Renewable Energy Sources: A Literature Review, *Applied Sciences* 2019, 9, 3854
 - 16) Yoshida Y, Farzaneh H, et al: Optimal Design of a Stand-Alone Residential Hybrid Microgrid System for Enhancing Renewable Energy Deployment in Japan, *Energies* 2020, 13, 1737
 - 17) Zhang W, Maleki A, et al: Sizing a stand-alone solar-wind-hydrogen energy system using weather forecasting and a hybrid search optimization algorithm, *Energy Conversion and Management*, Vol. 180, 15 January 2019, pp. 609-621.
 - 18) Dawood F, Anda M, et al: Stand-Alone Microgrid with 100% Renewable Energy: A Case Study with Hybrid Solar PV-Battery-Hydrogen, *Sustainability* 2020, 12(5), 2047.
 - 19) Li B, Miraoui A, et al: Sizing of a stand-alone microgrid considering electric power, cooling/heating, hydrogen loads and hydrogen storage degradation, *Applied Energy*, Vol. 205, 1 November 2017, pp. 1244-1259
 - 20) Sachs J, Sawodny O: Multi-objective three stage design optimization for island microgrids, *Applied Energy*, Vol. 165, 1 March 2016, pp. 789-800.
 - 21) Nazari-Heris M, et al: Optimal economic dispatch of FC-CHP based heat and power micro-grids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 114, 5 March 2017, pp. 756-769
 - 22) Qaeini S, Catalao J, et al: Optimal Planning of CHP-based Microgrids Considering DERs and Demand Response Programs, 2020 IEEE 20th MELECON, 15 July 2020.
 - 23) Melicio R, Mendes V, et al: Assessing the Value of Demand Response in Microgrids, *Sustainability* 2021, Vol. 13, Issue 11, 5848.
 - 24) Hashemi S, Romero R, et al: Distribution System Services Provided by Electric Vehicles: Recent Status, Challenges, and Future Prospects, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 20, Issue 12, Dec. 2019.
 - 25) 固定価格買取制度 情報公表用 HP, 都道府県別 A 表 都道府県別認定・導入量 (2021 年 6 月末時点)
<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>
(アクセス日 2021. 11. 14)
 - 26) 日本原子力発電 HP; 発電所情報, 東海第二発電所
<http://www.japc.co.jp/plant/tokai/dai2top.htm>
(アクセス日 2021. 11. 14)
 - 27) 杉本, 安芸, 毛笠; 熱・電気を統合したデマンドレスポンスの検討 (その 3), 第 32 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2016 年 2 月.
 - 28) 電気事業連合会 HP; 電力需要実績 2010 年度
<https://www.fepc.or.jp/library/data/demand/2010.html>
(アクセス日 2021. 11. 15)
 - 29) 経済産業省 資源エネルギー庁; 再エネをもっと増やすため、「系統」へのつなぎ方を変える (2021-03-25)
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/non_firm.html (アクセス日 2021. 11. 17)