

再生可能エネルギー需給型コミュニティ-エネルギー需給 balancing機構の検討

A Demand-Supply Balancing Scheme on a Solar Photovoltaic-based Community

杉本 一郎 *・牛場 悠颯 **・石田 政義 ***

Ichiro Sugimoto

Yusa Ushiba

Masayoshi Ishida

Since October 2020 when Japan decided to reduce GHG emissions to net-zero by 2050, we have proposed Tsukuba Green Holonism Town, which is a concept of a solar photovoltaic (PV)-based energy community aimed at carbon-neutrality by 2030. The first and second reports so far showed the basic policies and functional categories of the community, and outlooked a preliminary energy supply and demand in 2030.

This study, as the third report, proposes an add-on energy supply method and a demand-side management (DSM) method: the add-on supply method is composed of a basic energy system including electric, hydrogen, and hot water networks, a winter option system using combined heat and power (CHP), and a temporary backup option applying fuel-cell (FC) buses to a power supply source, the DSM method comprises energy saving, demand response (DR) using spinning reserve of distributed energy resources (DERs), and planned demand curtailment by a demand-shutdown of small areas in the community. On the basis of the both methods, a balance sheet between energy supply plan and demand plan is set up and a demand-supply balancing scheme is specified on the PV-based energy community.

Keywords : renewable energy community, demand-supply balancing, energy network, spinning reserve and demand curtailment

1. まえがき

日本政府は2021年10月、「日本のNDC (National Determined Contribution) : 2030年の温室効果ガス (GHG) の排出削減目標 (46%削減; 2013年度比)¹⁾」と「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略²⁾」を閣議決定し、国連に提出した³⁾。これにより、わが国の「2050年GHG排出の実質ゼロ」へのマイルストーンが設定され、2030年に向けて、省エネルギーの野心的な深掘り (22.9%削減; 2013年度比)、再生可能エネルギー (再エネ) の大量導入 (2020年度末累計20%から37%へ)、産業・民生・運輸部門における燃料転換 (電化、天然ガスシフトなど) 等を含む、第6次エネルギー基本計画が策定された⁴⁾。

一方欧州連合 (EU) は、2022年2月のロシアによるウクライナ侵略を機に、Saving energy, Diversifying supplies and supporting our international partners 等を含む、REPowerEU プランを制定し (同年5月)⁵⁾、ロシア産の化石エネルギー依存からの脱却を図っている。これによりEUのエネルギー政策は、地球温暖化を防止する環境 (Environment) と共に、エネルギー安全保障 (Energy Security) を重視する方向性を打ち出している。この方向性は、資源に乏しいわが国のエネルギー政策にも少なからず影響を与えている⁶⁾。

筆者らは2015年から「つくば3Eフォーラム」においてタスクフォース「次世代エネルギーシステム」を組織して、特に2020年からは、地域の再エネを活用して水素製造、貯蔵、およびネットワーク搬送を基盤にした「再生可能エネルギー需給型コミュニティ」 (コンセプト名称: つくばグリーンホロニズムタウン) を提唱し、その形成方策等について研究を行っている (図1参照)。これまで第一報では、当該コミュニティの基本理念と機能分類を示し⁷⁾、第二報では、2030年時点における当該コミュニティの予備的なエネルギー需給見通しを行った⁸⁾。この予備的な需給見通し等から、日本において再エネ (特に、太陽光発電) を主力電源とするエネルギーコミュニティでは、

- ・季節間でのエネルギー供給、需要および熱電比の変動、特に冬期の供給量の不足 (太陽光発電量の減少と熱需要量の増大による)
- ・異常気象 (30年に一度程度) ではないが、平年と異なる気象条件が発生した期間 (NOD: Non-ordinary Days と称す) におけるエネルギー需給の乖離 (一時的な供給量の減少、需要量の増大による)

といった日本固有の課題を整理した。

本稿 (第三報) では、これらの課題に対処するために、供給側の「アドオン・システム構成方策」、需要側の「デマンドサイド・マネジメント方策」を提案し、両方の方策を組み合わせ、再エネ需給型コミュニティの「エネルギー需給balancing機構」を形成する。

* 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

** 筑波大学大学院 理工情報生命学院
システム情報工学研究群 構造エネルギー工学

*** 筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学科

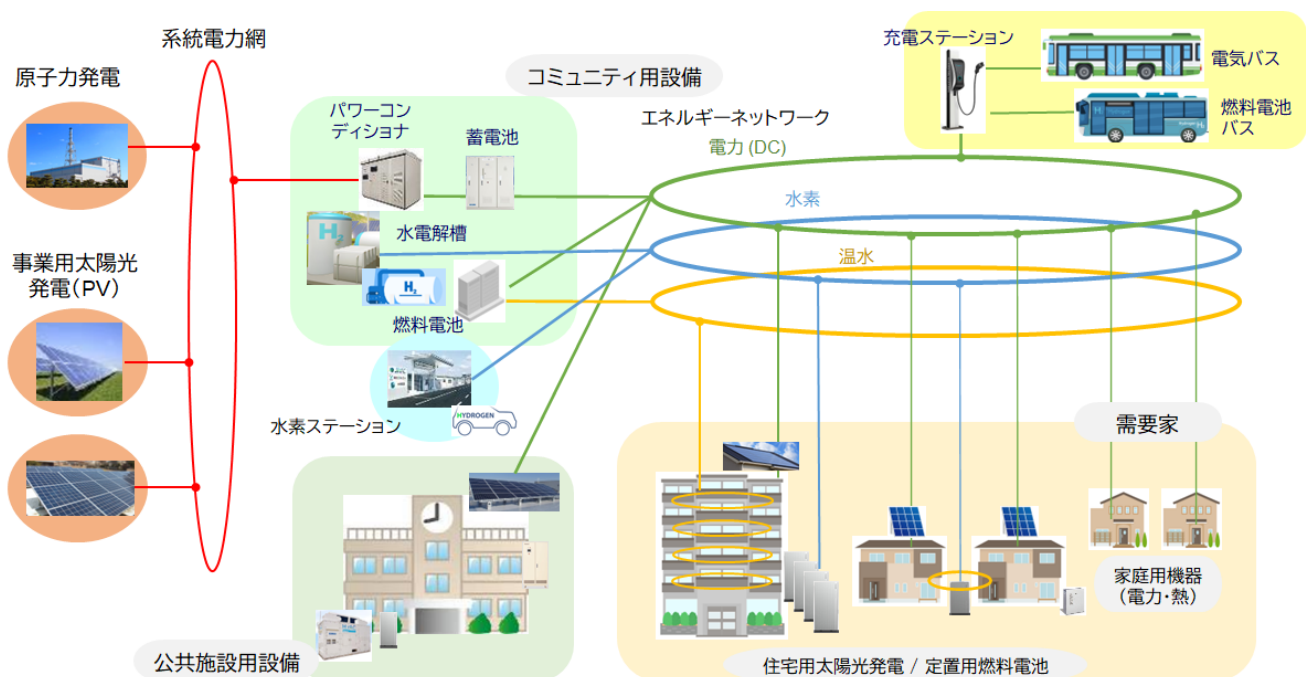


図1 再生可能エネルギー需給型コミュニティのシステム構成（暫定案）

2. アドオン・システム構成方策（供給側）

太陽光発電（PV）を主力電源とするコミュニティにおいて、合理的に電源容量を割り当て、変換・貯蔵・搬送設備を配備しエネルギー供給に柔軟性を持たせるために、

- 平年並みの気象条件の期間（OD: Ordinary Days）に対応するベーシックシステム（通年）
- 冬期（12月～2月）のみに限定して追加される冬期向けオプションシステム（冬期）
- NOD 期間に、短期的にエネルギー供給をバックアップするオプション（随時、短期間）

による、アドオン・システムの構成方策を提案する。図2に、アドオン・システム構成方策の概要を示す。以下に、それぞれのシステム・仕組みについて述べる。

2.1 ベーシックシステム（通年）

ベーシックシステムは、春期・夏期・秋期の OD 期間を対象に、収容する需要家の増減に合わせて容量・供給量を変化できるよう合理的な設計とする。

近隣の事業用 PV、原子力発電から系統電力網で託送を行い、コミュニティ用設備で電力（DC）・水素・熱（温水）に変換して、エネルギーネットワークによりコミュニティの需要家に搬送する。また需要家には、分散型電源（e.g. 定置用燃料電池、住宅用 PV、蓄電池）、エネルギー変換器（e.g. CO2 ヒートポンプ給湯機）等のコミュニティ側から遠隔監視・制御できる機器が、2030 年の普及見通し⁴⁾以上に装備されるものとする（図1 参照）。なお、ベーシックシステムの設備・機器（一覧）は文献 7) に示す。

2.2 冬期向けオプションシステム（冬期）

予備的なエネルギー需給見通し⁸⁾から、冬期は電力供給が春期の 2/3 程度に減少し、需要が中間期（春期・秋期）の 1.5 倍以上に増大することがわかる。また冬期の需要内訳を見ると、熱（温水）需要が 50%以上占めている。

そこで、冬期（12～2 月）向けのオプションシステムとして、水素ステーションに隣接して水素コージェネレーションシステム（H₂-CGS; e.g. SOFC⁹⁾）を期間限定で設置し、エネルギーネットワークを介して電力・温水を供給する。このオプションシステムは設置期間中に契約した容量の範囲で稼働し、ベーシックシステムと一体的に供給する。

ここで、追加的な H₂-CGS の「燃料」は水素ステーションから供給されることになり、この燃料のカーボンニュートラル（CN）は担保されないことに留意する必要がある。

2.3 Non-ordinary Days (NOD) オプション（随時・短期間）

短期的にエネルギー需給が乖離する NOD 期間において、コミュニティの「公共交通機関に使用されている燃料電池バス（FC バス）・電気バス」を、ベーシックシステムや冬期向けオプションシステムをバックアップする電源「VGI（Vehicle-Grid Integration）¹⁰⁻¹¹⁾」として活用する。このような仕組みを「NOD オプション」と呼ぶ。

NOD オプションの規模・期間（使用する FC バスの台数、運休期間）は、運転計画で事前に予測する「エネルギー需給の乖離の量と時間」によって決定され、その結果としてコミュニティ居住者の働き方（e.g. リモート・ワーク）や移動手段（e.g. 自転車移動）等に変更が求められる⁷⁾。

構成方策	冬期（12-2月）	春期（3-5月）	夏期（6-8月）	秋期（9-11月）
NOD (Non-ordinary Days) オプション				
季節間ギャップ オプション	冬期向け オプションシステム			
Ordinary Days ベーシック	パワーコンディショナ 蓄電池 事業用PV 原子力発電 ベーシックシステム 水電解槽 / 水素貯蔵 / 燃料電池 住宅用PV 定置用燃料電池 EV			

図2 アドオン・システム構成方策の概要（供給側）

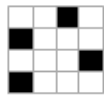
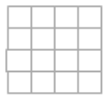
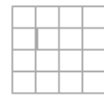
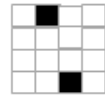
マネジメント方策		冬期（12-2月）	春期（3-5月）	夏期（6-8月）	秋期（9-11月）
需要抑制 (Curtailment)	デマンド・リリース				
デマンドレスポンス (DR)	V2H (EV / FCEV)				
	DERブース ティン	燃料電池 / 蓄電池	燃料電池 / 蓄電池		燃料電池 / 蓄電池
省エネルギー	車両不使用 (EV / FCEV)				
	家庭用機器	空調 / 暖房		空調	風呂・給湯 / 厨房 / 照明

図3 デマンドサイド・マネジメント方策の概要（需要側）

3. デマンドサイド・マネジメント方策（需要側）

需要側の電力負荷曲線（Load Curve）を成形（Shaping）する、デマンドサイド・マネジメント（DSM: Demand Side Management）の手法として、省エネルギー（EE: Energy Efficiency）、時間帯料金（TOU: Time of Use）、デマンドレスポンス（DR: Demand Response）、予備力（SR: Spinning Reserve）等が提案され、これまで実施されている¹²⁻¹⁴⁾。

本稿ではこれらの手法に加えて、新たな DSM 手法として需要家ブロック単位での需要抑制「デマンド・リリース（Demand Release）」を提案する。図3に、デマンドサイド・マネジメント方策の概要を示す。

3.1 省エネルギー

2030 年時点でのコミュニティの省エネルギー（省エネ）手法は、第6次エネルギー基本計画の関連資料「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し」¹⁵⁾で示された取組内容と同様とする。また運輸部門での移動手段の変更（i.e. 車両不使用）は、3.2 項デマンドレスポンスに含める。

よって、2030 年時点のエネルギー需要の省エネ率は、予備的な需給見通し⁸⁾と同様の効果「22.9%（2013 年度比）」（需要全体に係る）とする。

3.2 デマンドレスポンス（DR）

DR 手法は市場ベース DR（Market DR）、系統管理ベース DR（Physical DR）に分類され、様々な手法が提案されている¹²⁻¹⁴⁾。ここでは、コミュニティ側からの事前の依頼・要請（シグナル）に基づき需要家設備を運転操作する、以下の二つの DR 手法に着目する。

● 分散型電源（DER）ブースティン

需要家が所有する分散型電源（DER: Distributed Energy Resource, e.g. 純水素型定置用燃料電池）の余剰能力（＝発電容量－計画発電出力）を利用する DR 手法であり、コミュニティ側からの要請により計画値以上の発電出力を行い、ネットワークに電力を供給（逆潮流）する¹⁶⁾。

DER の余剰能力は稼働率の低い季節（i.e. 夏期）には大きく、稼働率の高い季節（i.e. 冬期）には逆に小さくなることに留意する必要がある。

● Vehicle-to-Home（V2H）

需要家が所有する電動車両（電気自動車（BEV）、燃料電池自動車（FCEV））から自家に給電する DR 手法であり、コミュニティ側からの依頼により給電を行い、自家需要（電力需要）の低減を図る¹⁷⁾。この手法の実施に当たり当該電動車両は不使用となり、利用者に移動手段の変更を伴う。

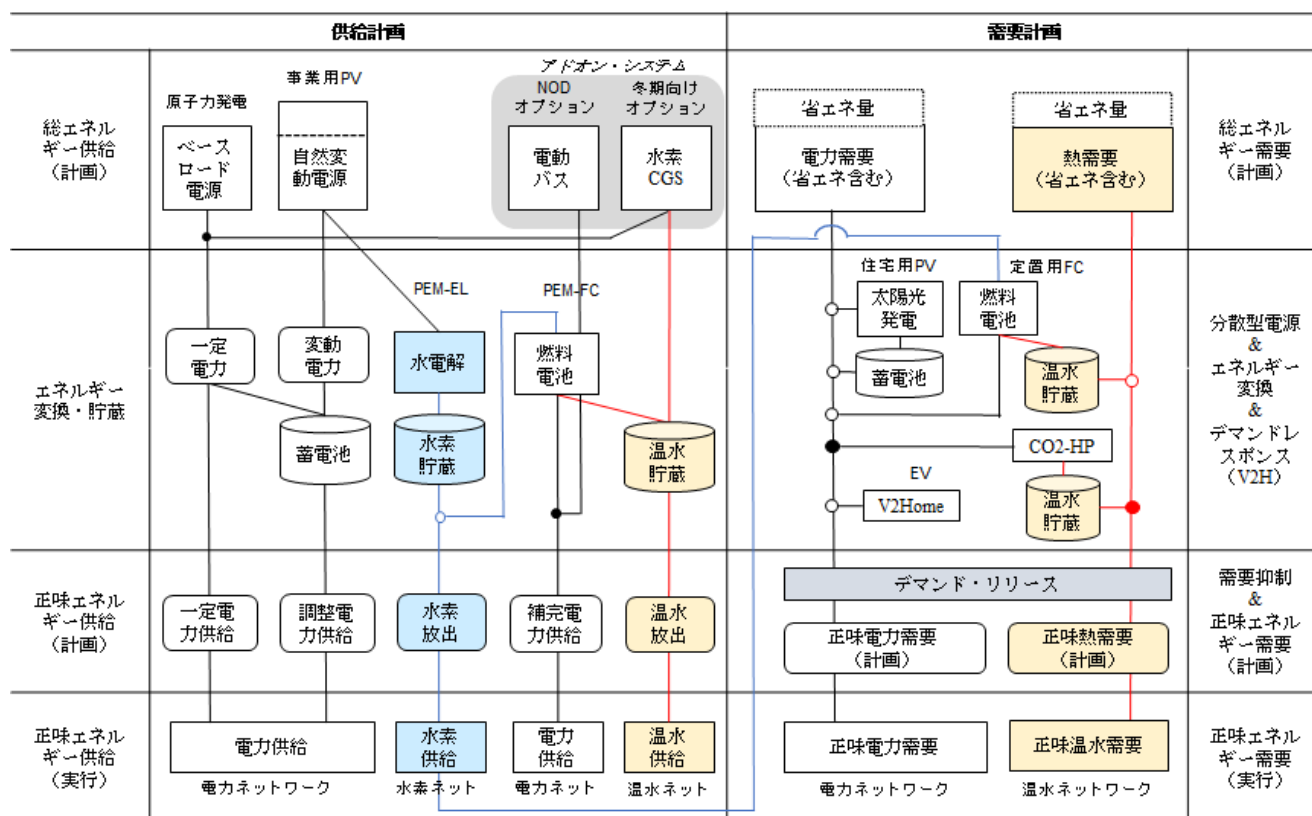


図 4 エネルギー需給バランスシート（需給対照表）

3.3 需要抑制（デマンド・リリース）

コミュニティ内の需要家群をエネルギーネットワークの実装時にブロック分けして、需要家ブロック単位（10 件程度を想定）で「電力ネットワークと需要家をリリース（切断）/コネクト（接続）する機構」（デマンド・リリースと称す）を設ける。運用時には、事前にコミュニティ側から対象の需要家ブロックへ通知・要請して、計画的にコミュニティ全体の電力需要量を低減（抑制）する。

この抑制手法は一般送配電事業者が提示する計画停電¹⁸⁾と異なり、通常の運用時は「需要家側から駆動（リリース）する」ことが特徴となる。以下に、デマンド・リリースの基本的な運用手順を示す。

「リリース（切断）手順」

- コミュニティ側から該当する需要家に対して、事前に「リリース時刻」を通知
- リリース時刻前に、需要家が所有機器を「OFF」（重要機器（冷蔵庫、常夜灯、センサ類）は除く）
- 需要家ブロックの受電量が一定値以下に低下した時点で、ブロックリレーを「リリース」
- 受電量が一定値以下に低下しない場合には、DR 手法（e.g. DER ブースティング）も併用

「コネクト（接続）手順」

- コミュニティ側から該当する需要家に対して、直前に

「コネクト時刻」を通知

- 需要家はコミュニティ側からのコネクト「重要機器 ON」を確認し、その後に所有機器を「ON」

ここで、リリース時刻・時間は「原則として昼間の時間帯（e.g. 10:00-18:00）で 2 時間以内」、リリースするブロック数と順番は「電力需要の抑制量に応じて 1 日のブロック数を決定し輪番制」とする。さらに、災害等の緊急時への対処方法として「コミュニティ側からリリースする」機能も備えるものとする。

4. エネルギー需給バランス機構

図 4 に、コミュニティにおけるエネルギー供給計画と需要計画を階層化（それぞれ 4 階層）併記して、エネルギー需給のバランスシート（需給対照表）を示す。

コミュニティのエネルギー需給は、バランスシートの観点から、正味エネルギー供給と需要（計画ベース；図 4 の第 3 階層と実行ベース；第 4 階層）の各階層で需給を整合させる必要がある。ここで、正味エネルギー供給と需要（計画）の階層において、エネルギー需給の整合を取る一連の方策を「エネルギー需給バランス機構」と称す。

以下に、供給計画と需要計画の各階層の内容とエネルギー需給バランス機構の仕組みについて述べる。

4.1 エネルギー供給計画

「総エネルギー供給（計画）層」において、原子力発電は割当容量に応じて常時一定の電力量を、事業用 PV は気象条件（日射量、気温等）に依存した発電量（変動量）を託送供給する。冬期向けオプションの H₂-CGS は期間限定で、契約範囲内の電力と熱を供給する。また NOD オプションの FC バス（公共交通機関）は、運転計画（需給予測）に準じて短期的に電力供給をバックアップする。

「エネルギー変換・貯蔵層」において、蓄電池は上位層から供給される電力の一部を貯蔵すると共に調整電力を供給（放電）する。水電解（PEM-EL）は事業用 PV の供給電力の一部を水素に変換し貯蔵して供給する、また後段の燃料電池（PEM-FC）は蓄電池のバックアップ（調整電力）として発電し、同時に生成された温水を貯蔵し供給する。冬期に H₂-CGS で発電された電力は、原子力発電の電力と合わせて供給し、同時に生成された熱（温水）は温水タンクに貯蔵し供給する。ここで水電解による水素製造量は、コミュニティ内に設置された定置用 FC（需要家設備）の発電容量・台数（合計）、併給対象需要家の熱需要量（合計）等に基づき計画（予測）される。

「正味エネルギー供給（計画）層」において、上位層の原子力発電の電力（一定電力）は一部が蓄電池に充電されることもあるが、ほぼ一定量が供給される。事業用 PV の発電電力はその過半が水素製造に充てられ、残量は蓄電池に充電されるか、または蓄電池の放電と合わせて供給される。水電解で製造・貯蔵された水素は需要側の定置用 FC へ供給される。PEM-FC の発電電力は FC バスの電力と合わせて補完電力として供給される。また PEM-FC の温水は冬期においては H₂-CGS の温水と合わせて供給される。

つまりこの層では、これまでの供給履歴と予測情報等に基づき、コミュニティ側で製造・貯蔵した電力・水素・温水を需要家側へ供給する、“計画ストック値”（e.g. 1 日の供給計画量）が算定される。

「正味エネルギー供給（実行）層」において、上位層は予測に基づく計画値であるが、この層ではコミュニティ側の計測情報（託送受電量等）と観測情報（気象条件等）から、実際に電力・水素・温水を供給した“実行ストック値”（e.g. 1 日の供給実績量）が導出される。

4.2 エネルギー需要計画

「総エネルギー需要（計画）層」において、電力需要・熱需要はこれまでの使用履歴と予測情報（e.g. 週間天気予報、給水温）等を基に、事前に（e.g. 1 週間前）コミュニティ側で予測する。ここで予測する電力需要・熱需要は、2030 年時点を想定したものであり、省エネ効果（3.1 項参照）を含んでいることに留意する必要がある。

「分散型電源・エネルギー変換・デマンドレスポンス層」において、分散型電源（住宅用 PV、蓄電池、定置用 FC）の発電（放電）電力は需要家の電力需要を低減し、定置用 FC で生成・貯蔵された温水は熱需要を軽減する。CO₂ ヒートポンプ給湯機は電力から熱へのエネルギー変換を行い、生成・貯蔵された温水は熱需要を大幅に削減する。またデマンドレスポンスの DER ブースティングと V2H（3.2 項参照）は、1 日の計画時間帯の電力需要を低減する。

「需要抑制層」のデマンド・リリースについては次項（4.3 項）で述べる。

「正味エネルギー需要（計画）層」において、上位層で事前に予測した電力・熱需要量から分散型電源、CO₂ ヒートポンプ給湯機、デマンドレスポンスの電力量・温水量を差し引いて、正味電力需要と熱需要が導出される。

つまりこの層では、これまでの需要履歴と予測情報等に基づき、コミュニティ側から供給される電力・水素・温水を、需要家側で消費する“計画ストック値”（e.g. 1 日の消費計画量）が算定される。

「正味エネルギー需要（実行）層」において、上位層は予測による計画値であるが、この層では計測情報（使用量・発電量等）と観測情報（気象条件等）に基づき、需要家側で製造・貯蔵し消費した電力・温水量を差し引いた、コミュニティ側から供給され消費した“実行ストック値”（e.g. 1 日の消費実績量）が導出される。

4.3 エネルギー需給バランス機構

4.1 項の供給計画、4.2 項の需要計画共に詳細な設計を行う必要があるが、再エネ需給型コミュニティの運転計画を策定する際には、予備的なエネルギー需給見通し⁸⁾からも明らかなように、以下の関係が成り立つ必要がある。

$$\sum_i Net_Supply_i(X_{day}) \geq \sum_{i,j} Net_Demand_{i,j}(X_{day}) \quad (1)$$

ここで、 $Net_Supply : X_{day}$ の正味エネルギー供給量、 $Net_Demand : X_{day}$ の正味エネルギー需要量、 X_{day} : 運転予定日、 i : 供給・需要エネルギー種別、 j : 需要家種別とする。

供給計画、需要計画共に、過去の履歴・観測結果、予測情報（e.g. 天気予報）からそれぞれ独立に電力・熱の供給量、需要量を算定しているため、上記(1)が成り立つ保証はない。そこで需給ギャップが想定される（(1)が成り立たない）場合に、供給計画および需要計画において、これまでに述べた以下の手法を適用する。

● 供給計画：NOD オプション

バックアップする FC バスの台数と放電時間を増加させて、補完電力の供給量を短期的に増強する。ただしこの増強手法を採用する場合には、公共交通機関の運行に影

響を及ぼすため、3 日程度前に当該交通機関の運行予定（計画運休含む）を通知する必要がある。

● 需要計画：デマンド・リリース

エネルギー需給ギャップ（計画ベース）を埋める最終的な手段として、「最小限の規模と時間を設定」したデマンド・リリースにより計画的に正味エネルギー需要量（電力量）を抑制する。この抑制手法はコミュニティの需要家（居住者）の協調行動が必須となり、居住者のライフスタイル、ワークスタイルに影響を与えるため、3 日以上前に周知が必要と考えられる。

つまり正味エネルギー供給・需要の計画において、上記手法の一つまたは両方を用いて、最も社会的影響の少ない方法・規模でコミュニティ全体のエネルギー需給を整合させることが重要となる。

5. あとがき

本稿では、第二報の予備的なエネルギー需給見通しを踏まえて、PV を主電源とする再生可能エネルギー需給型コミュニティにおける、

- エネルギー供給を合理的に行う、ベーシックシステム、冬期向けオプション、NOD オプションによるアドオン・システム構成方策
- エネルギー需要を分散型電源で短期的に低減するデマンドレスポンス、計画的に抑制するデマンド・リリースを含むデマンドサイド・マネジメント方策

を提案した。またエネルギー供給計画と需要計画を階層化してエネルギー需給バランスシートを示し、

- 運転計画ベースの正味エネルギー供給と需要を整合させるエネルギー需給バランス機構

を提言した。今後の研究課題としては、具体的なシステム設計、天気予報等に基づく電力需要・熱需要の予測、運転計画を含む運用方策のロジック化などが挙げられる。

参考文献

- 1) UNFCCC; Japan's Nationally Determined Contribution (NDC), Japan's Greenhouse Gas Emission Target.
- 2) UNFCCC; The Long-Term Strategy under the Paris Agreement, The Government of Japan, October 2021.
- 3) 環境省プレスリリース; 「地球温暖化対策計画」及び「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」の閣議決定について、2021 年 10 月 22 日
<https://www.env.go.jp/press/110060.html>
(アクセス日 2022. 11. 6)
- 4) 経済産業省; 第 6 次エネルギー基本計画、2021 年 10 月 22 日（閣議決定）
- 5) EC Press Release; REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels, 18 May 2022.
- 6) 経済産業省; エネルギーの安定供給の再構築, 第 50 回総合資源エネルギー調査会基本政策分科会（事務局提出資料）, 2022 年 9 月 28 日
- 7) Morita K, Sugimoto I, et al: Tsukuba Holonism Town (I)—Building A Carbon Neutral Community, WHEC 2022, June 26-30, 2022, Istanbul, Turkey.
- 8) Sugimoto I, Ishida M, et al: Tsukuba Holonism Town (II)—Examining A preliminary energy demand–supply outlook, WHEC 2022, June 26-30, 2022, Istanbul, Turkey.
- 9) 三菱重工業パンフレット; MEGAMIE 高効率分散型電源・コージェネシステム（発行 2021.9.13）
- 10) トヨタ, 本田プレスリリース; 災害時の電力確保を目指し、移動式発電・給電システムを構築して電気を届ける実証実験を開始、2020 年 8 月 31 日
- 11) Nataly A., Seyedmostafa H., et al: Distribution System Services Provided by Electric Vehicles: Recent Status, Challenges, and Future Prospects, IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems Vol. 20, Issue 12, Dec. 2019.
- 12) Palensky P., Dietrich D.: Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads, IEEE Trans. on Industrial Informatics Vol. 7, Issue 3, Aug. 2011.
- 13) Tsaousoglou G., Soumplis P., Kokkinos P., et al: Demand Response as a Service: Clearing Multiple Distribution-Level Markets, IEEE Trans. On Cloud Computing Vol. 10, No.1, Jan.–Mar. 2022.
- 14) FERC; 2021 Assessment of Demand Response and Advanced Metering, Dec. 2021.
- 15) 経済産業省; 第 6 次エネルギー基本計画に係る関連資料「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し」, 2021 年 10 月 22 日（閣議決定）
- 16) Sugimoto I., Aki H.: CHP-based Demand Response for controlling Electricity Load Profile, IRED2014, Nov. 17-21, 2014, Kyoto, Japan.
- 17) Wang Z., Paranjape R.: Optimal scheduling algorithm for charging electric vehicle in a residential sector under demand response, IEEE EPEC 2015, Oct. 26–28, 2015, London, ON, Canada.
- 18) 東京電力パワーグリッド HP; 計画停電に関するお知らせ（2018 年 7 月 10 日）
<https://www.tepco.co.jp/keikakuteiden/index-j.html>
(アクセス日 2022. 11. 12)