

欧米における仮想発電所・ デマンドリスポンス事業の現状

Case Studies of Virtual Power Plant in US. and Europe

坂東 茂*

1. はじめに

再生可能エネルギー（以下、再エネ）電源への固定価格買取制度の導入により太陽光発電の大量連系が進む中、系統運用上は予測困難な変動出力への対応が迫られている。再エネ比率が高くなるにつれて、系統運用上の課題としては、図1はPV導入量自体の情報は古いものの、PV大量導入に伴う系統課題と対策案を示した図である。再エネ電源が増加するにつれて課題は徐々に①から⑤へと推移することを説明している図であり、具体的な対策等の詳細は文献¹⁾を参照されたい。対策技術がある程度確立し

ているものについてもシステム自体が巨大であるため、解決にはリードタイムが必要である。中でも、③の需要と供給のバランスを取る役割（周波数調整／予備力など系統サービスの確保を含む）については、現状は火力発電が主に担っているが、今後脱炭素社会の実現のために火力発電の利用が難しい状況となった場合には、蓄電池や需要側のリソースを用いて対応する必要がある。同じく④の余剰電力の処理についても、カーボンニュートラルの実現を考える上では、余剰電力利用は必須であり、大量のエネルギー貯蔵や、需要側で柔軟に余剰電力を吸収できるような仕組み（デマンドリスポンス、以下

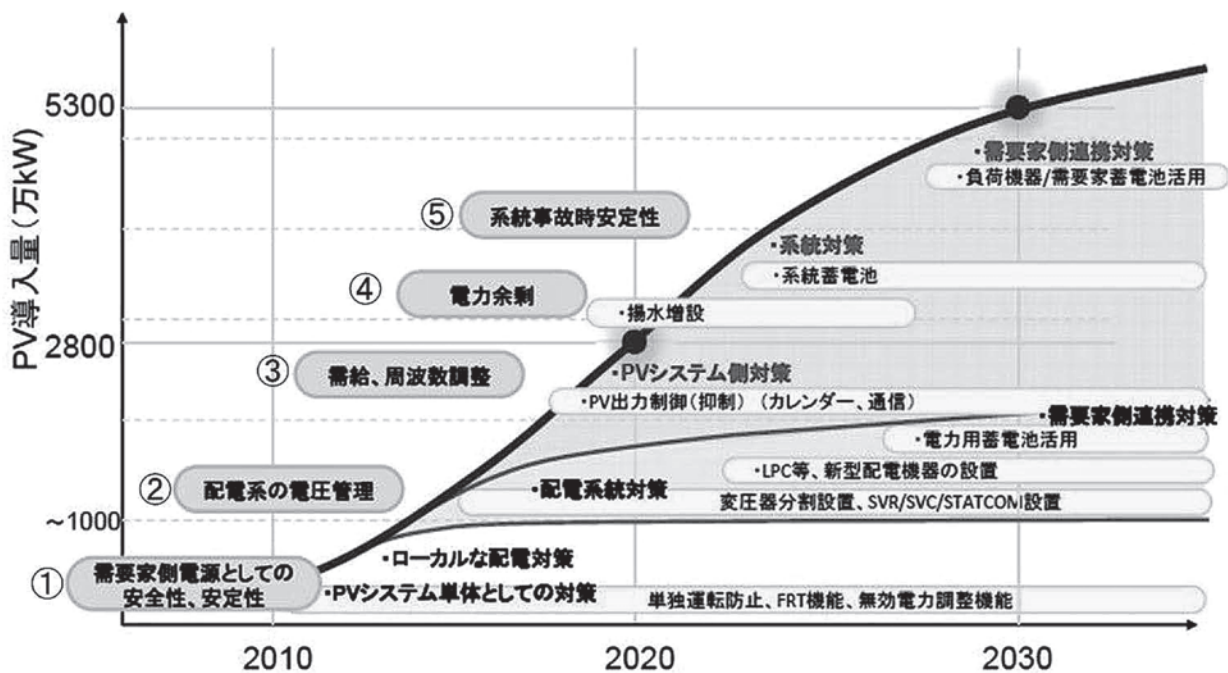


図1 PV大量導入に伴う系統課題と対策案¹⁾

*一般財団法人電力中央研究所エネルギーイノベーション創発センター 上席研究員

DR)が必要となる。これらの対策は、大量に必要となることが考えられるため、再エネ導入と同じく、長い時間をかけて確実に確保していくことが重要である。

③に関する制度面の変更点としては、東日本大震災後以降の電力市場改革の一環として、2017年の調整力公募の運用開始、2021年4月には需給調整市場が設立され、調整力を市場で調達する制度がわが国でも開始されている点が挙げられる。調整力とは、電力システムの周波数を保つために、需要の短周期の変動に合わせて発電機の出力を調整することであるが、2017年に調整力公募の運用開始以降は、需要側リソースから調整力を出すことも制度的に許容されるようになった。低炭素化をさらに進める一方で、従来通りの高信頼度かつ経済的な電力供給を維持していくためには、系統運用者の指令が十分に反映されるようリソース登録の要件を適切に設定した上で、さらに競争的な市場環境を整えることが必須である。平常時の周波数調整・瞬動予備力等の調整力の供給は、これまで火力発電・水力発電等が中心的に担ってきたが、今後は需要側を含めた多様なリソースからも供給される環境となる。このような背景の下、仮想発電所(Virtual Power Plant, VPP)に代表される、需要側の新たなリソース活用が強く期待されている。

筆者はこれまで、我が国への適用上の課題を抽出することを目的として、需要側資源(Demand Side Resources, DSR)を対象として

- ・ 系統サービスを提供するDRが扱われる市場にはどのようなものがあるか(周波数調整、予備力)
- ・ 実際に登録されているDSRにはどのようなものがあり、どのような参加要件が課せられているか
- ・ これらの市場への参加規模はどの程度か
- ・ DSRの保有者は、DRによりどの程度の収入を得ているか

以上の4つの観点から調査を実施し、これまで文献^{2), 3), 4), 5)}にまとめてきた。

本稿では第2章において、国外の需要側リソースによる系統サービスの登録状況などについて文献⁴⁾の調査結果を基に解説する。第3章では、大型のDSRの活用例として、電力消費の大きな産業用需要機器や、大型蓄電池などを用いた大容量のDRについて、文献⁴⁾の調査結果を基に事例紹介する。また、近年VPPとして比較的小規模のリソースを束ねて制御する事業が増えつつある。元来、通信・制御システムのコストがかさみやすいコスト構造と

なっているはずのVPPがなぜ増えてきているのか?第5章では、文献⁵⁾の考察を基に、現在進展しつつあるVPP事業のうち、需給調整市場にて事業を展開しているものが、どのように経済性の問題に対処しているのかについて解説することとする。

2. 国外のDR/VPP事業の市場活用動向⁴⁾

米国PJM、ドイツ、英国の需給調整市場では、DRやVPP事業の調整力市場における取扱量のデータが公開されている。本章ではその内容について説明する。いずれにしても登録容量は電源側が圧倒的である。

2.1. 米国PJMの需給調整市場に登録されている需要側リソース

米国の地域市場の一つであるPJMにおける、DR事業の各市場における収入額の内訳を図2に示す。DR事業の収入源としては容量市場がほとんどであり、その他の収入はまだそれほど多くないことが分かる。一方で、価格の高い需給調整市場において、徐々にDSRが活用される事例が見られるようになってきたこともまた事実である。

PJMは、需給調整市場の一つとして、周波数調整市場を持つ。周波数調整サービスを提供する市場参加者(発電側/需要側リソース)は、2秒毎の信

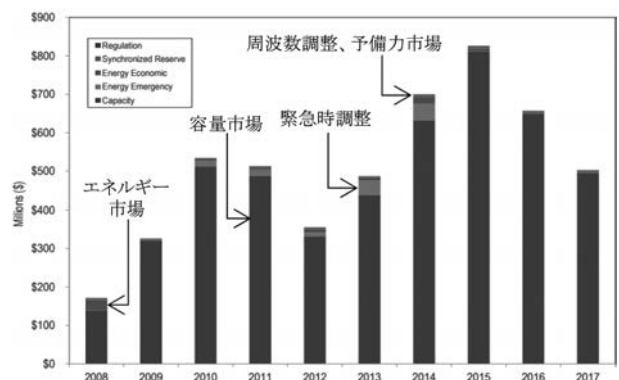


図2 PJM管内における2008～2017年のDR事業の市場別売上⁶⁾

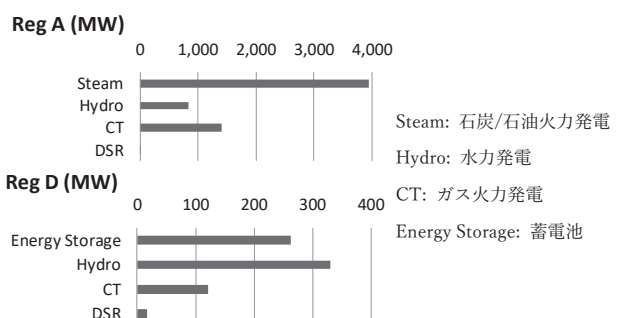


図3 PJMの周波数調整の技術別容量(2018年6月)⁷⁾

号に回答する Reg D カテゴリ、または 10 秒毎の Reg A カテゴリがあり、これらが PJM 管内では最も高速の反応を求められるサービスである。図 3 は利用されたリソース種別の容量を表しているが、ほとんどが発電側のリソースであり、需要側の比率はかなり小さい。一方で、図 4 は、2014 年以降の DSR の種別登録容量であるが、2017 年に急激に電気温水器の登録容量が増えていることが示されている。電気温水器の登録容量の半分ほどは Mosaic Power という事業者であり、調査対象として選んだ。結果の詳細については、4 章に記述する。

2.2. ドイツの需給調整市場の登録リソース

ドイツの需給調整市場は、日本で検討中の需給調整市場と構造がよく似ており、リソース自端で周波数を検知して反応する一次調整力 (Primary Control Reserve, PCR)、LFC 制御の二次調整力 (Secondary Control Reserve, SCR)、予備力としての三次調整力 (Tertiary Control Reserve, TCR) に分けられている。図 5 に、2020 年の調整力カテゴリごとに事前認証されたリソースの内訳と容量を示す⁸⁾。ドイツにおいても、調整力を供給するリソースは水力発電、

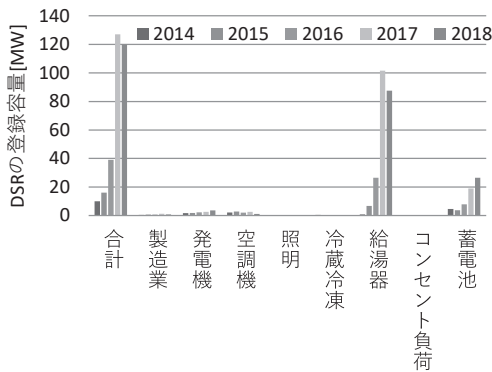


図 4 PJM の周波数調整市場における DSR の登録状況⁷⁾

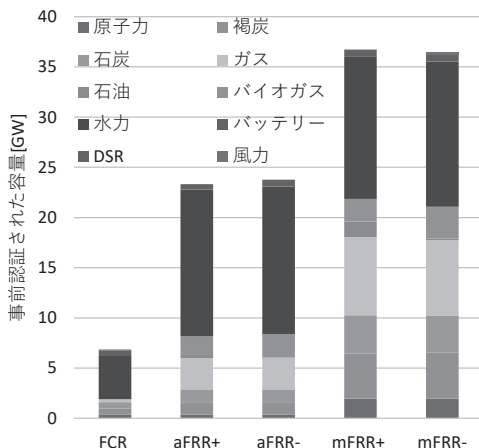


図 5 ドイツの需給調整市場の登録リソースの技術別内訳⁸⁾

火力発電に代表される大型発電機が大部分を占めているが、DSR の登録としては、PCR では蓄電池が 5% 程度、SCR と TCR ではバイオマス発電や需要側資源が計約 10% 程度を占めている。

2.3. 英国の需給調整市場における需要側リソースの取引状況

National Grid の需給調整市場の商品は Balancing Service と呼ばれ、主に周波数応答 (FRS) と表現される一次調整力と、Reserve と表現される三次調整力の二種類に大別される。

需給調整市場において DR が参加できる商品区分は、2016 年時点のデータであるが、表 1 の 8 区分が存在する。市場規模では STOR (応動時間 20 分の三次調整力であり、応動時間の観点では日本の需給調整力市場の三次調整力①に近い) が最大のプログラムである。

National Grid ESO が公表した系統柔軟性における需要側資源参加の年次レポート⁹⁾ (2017 年時点) によると、FFR の調達コストを見ると、発電機が 9 割を占め、負荷側のリソースは約 7% に留まる。また、STOR の容量ベースのリソース種別を見ると、水力や需要家の所有するガスレシプロやディーゼル発電機、ガスタービンが殆どを占める。これらのことから、FFR や STOR といった従来型の調整力には DR は少ないことがわかる。需要側リソースは EFR, FCDM, DTU といった DR 向けの商品カテゴリに参加していると言える。調整力サービス全体で見た場合、需要側資源参加は容量ベースで 28% を占めている。

3. 大型 DR の事例⁴⁾

ここでは、大型の DR の事例として、ドイツとイ

表 1 National Grid の DR 契約の推計 (2016 年)¹⁰⁾

	商品区分	DR 契約量 (MW/年)
三次調整力	Short Term Operating Reserve (STOR)	1,750
	STOR Runway	200
	Demand Turn Up (DTU)	300
	DSBR	515
	Fast Reserve	280
一次調整力	Firm Frequency Response (FFR) and Bridging	200
	Frequency Control by Demand Management	150~200
	Enhanced Frequency Response	200

ギリスの事例を挙げる。

3.1. アグリゲータ Flexitricity 社

英国のアグリゲータのビジネス事例として、Flexitricity 社（以下、F 社）の事例を示す。F 社は 2008 年創業のアグリゲータであり、予備力型 DR プログラム STOR を中心に需要家顧客を集めて事業を展開している。STOR プログラムは、発動後 20 分での反応が求められ、発動期間は最大 2 時間継続される。2018 年現在の情報では、300MW 程度のリソースと契約しており、対象リソースは CHP や瞬時電圧低下対策の蓄電池（UPS）、産業用負荷などで構成されている。産業用負荷としては、冷凍倉庫や、下水処理場のポンプなどがある。

冷凍倉庫の会社との契約の事例では、F 社が直接制御により冷凍機を on-off 制御しており、以下の 3 つの条件がそろったときに、冷凍機の電源を切ることができる。

- ・ TSO から STOR 発動の指令があること
- ・ 遠隔監視する冷凍倉庫の温度が上限に達していないこと
- ・ 冷凍倉庫の管理者により制御回避を表示するボタンが押されていないこと

F 社とリソースの所有者とは、リアルタイム通信でつながれており、F 社は発動可能な容量と、発動可能な状況を確認してから発動する。

3.2. ガラスボトルメーカー Encirc 社

Encirc 社（E 社）は創業 25 年の比較的新しいガラスボトルメーカーである。回収したガラスの再利用のため、色などで分けしたガラスボトルの破片を高温で溶かし、ボトルに成形する工場を所有している。E 社は、高温炉の底部にある 4MW のヒーターを対象に、アグリゲータ Kiwi Power 社を通じて FFR プログラムに参画している。高温炉では、主要な熱源として、炉上部からガスが噴射され、これが燃焼して熱を供給しており、電気加熱はサブ的な役割を持つ。E 社では、高温炉を流れる熔融ガラスの上下方向の温度差が規定値を超えないようにすることが、生産設備を DR に利用する上の絶対条件であり、それを勘案した上で発動継続時間を決めている。この工場では発動シグナルが来ると 2 秒で反応して溶解炉の底にある電熱線負荷（4MW）のうち、2MW を削減し、30 分継続することとしている。

3.3. アルミ精錬 TRIMET 社

ドイツではアルミニウム精錬のような電力多消費型の企業が大きな工場を持っている。精錬工程では、ホール・エルー法によりアルミナからアルミニウム

に変換するが、大電流の直流電力が必要である。近年、調整力が市場化された国では、需給調整力を系統に供給して、電気料金を下げる工夫をしているケースがある。

ドイツでは、近年 SCR の価格の値下がり傾向が顕著であり、アルミニウム精錬事業者の TRIMET 社では、Virtual Battery と銘打ったプロジェクトを展開し、これまで参加していた SCR のカテゴリ（消費電力の下げ方向のみ参加）から PCR のカテゴリへの変更を目指した。カテゴリ変更に伴い、電力消費の上げ下げ両方に対応する必要があるため、特に消費電力を増加させた場合のポッド（図 6 の水色部分）の温度管理が技術的課題である。TRIMET 社では、ポッドの脇に熱交換器を配置し、ポンプで空気を引いて温度制御をしている。温められた空気は、材料の乾燥などに使われる。2020 年 5 月現在では TRIMET 社は PCR 供給者として登録されており¹¹⁾、PCR カテゴリへの移行が完了したものと考えられる。

4. VPP アグリゲータのビジネス戦略⁵⁾

VPP 事業は、3 章で記述した大型 DR と比較して、各リソースで計測・通信・制御システムを持つ必要があり、コストがかさみやすい構造である。本章では、VPP アグリゲータの実例を通して、対象リソース、提供する系統サービスの種別、コスト削減の工夫について、分析した結果を紹介する。

4.1. 米国の電気温水器 VPP 事業

4.1.1. MP 社のビジネスモデル

MP 社は、米国メリーランド州の VPP 事業者であり、米国北東部 7 州の計 14,602 台（2019 年 11 月時点⁵⁾）の住宅用電気温水器の電力使用状況を遠隔制御して VPP リソースとし、制御幅を PJM の周波数調整市場および容量市場に同時提供している。住宅の電気温水器への遠隔制御装置の設置やデータ通

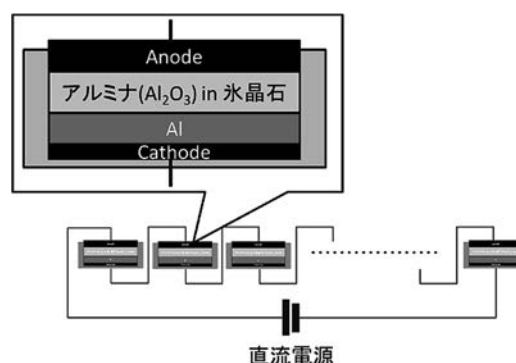


図 6 アルミニウム精錬設備の概要図⁴⁾

信の疎通確認、運用後の故障対応等は、各地域の電装・通信技術を持つ設置業者と提携して事業を推進している。

a) VPP システム構造

PJM の周波数調整市場にリソースを登録し、2 秒ごとに PJM から送信される制御指令信号を受け、10 秒以内に各リソースを反応させる。十分に速く応動しなくてはパフォーマンススコア (PS) と呼ばれる応動評価の成績が落ち、インセンティブ報酬もそれに伴い減ってしまう。よって VPP の場合は、多くの DSR を高頻度、かつ短時間で反応させる通信・制御システムを構築する必要がある。このシステムの特徴は以下の 4 点である。

- ・ MP 社の電気温水器 VPP は、集合住宅の電気温水器を制御対象としており、10 台程度の温水器とゲートウェイを Zigbee 無線でつないでいる。
- ・ 各電気温水器には、遠隔制御装置として小型の負荷コントローラを設置し、温水器本体に手を加えることなく、電気温水器に流れる電気を高速で制御することができる。
- ・ 制御・通信システムの中核部分である Water Heater Efficiency Network (WHEN) は、クラウドサービス上に構築している。

・ MP 社本社の制御センターからは、WHEN を通じて携帯電話回線経由で各温水器の状態を監視・制御できる。

なお、制御の中核部分である WHEN の主な機能は以下の通りである。

- ・ PJM との間で、周波数調整の信号受信と、VPP アグリゲータとしての反応データ送信を 2 秒ごとに行う。
- ・ PJM から受けた信号を各電気温水器に最適に割り振る。
- ・ 2 秒ごとに各電気温水器から受信する電力使用量を計測・蓄積し、プロファイル分析した結果を学習して、各戸の給湯需要を予測する。
- ・ 各電気温水器から PJM に提供可能な調整力を算出・積算し、MP 社全体として入札容量を決定し、自動入札する。

b) コスト削減の工夫

MP 社が多数の電気温水器を制御して周波数調整信号に反応するシステムを構築し、Reg D のカテゴリで競争力を持っている要因について述べる。

1 点目は、無線通信を活用して 1 つの携帯電話回線契約で 10 台程度の電気温水器を制御可能にしたことが挙げられる。MP 社は、同じ建物に多数の温

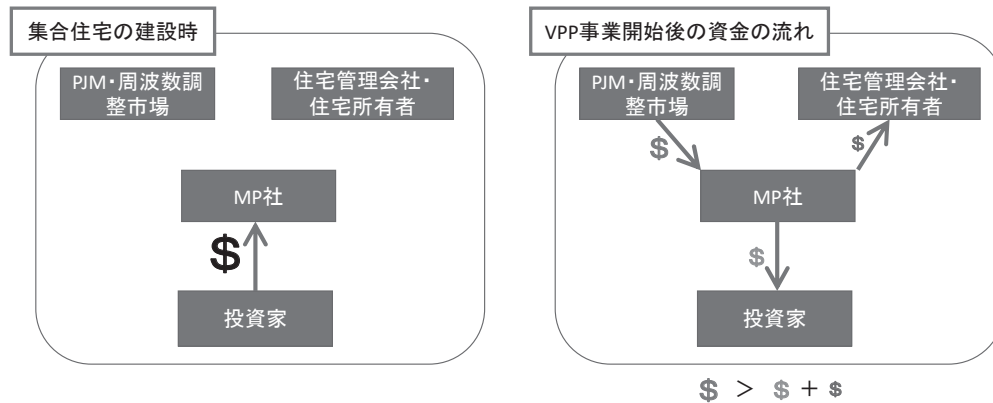


図7 MP社のビジネスモデル⁵⁾

表2 技術別・期間別の PS の平均値¹²⁾

MW	Hydro	CT	Energy Storage	DSR
Regulation D				
Avg. Performance Score (1/2017)	77%	90%	96%	85%
Avg. Performance Score (1/2018)	77%	92%	92%	84%
Avg. Performance Score (1/2019)	80%	85%	93%	85%
Avg. Performance Score (1/2020)	80%	85%	91%	87%
Avg. Performance Score (11/2020)	79%	86%	90%	84%
Regulation D Qualified MW (11/20)	334.0	132.4	254.7	19.3

水器が置かれる集合住宅の利点を活かしたと言える。

2点目は、クラウドサービスと各電気温水器との間を1秒以下の遅れで通信できるシステムを構築した点である。これにより、PJMで最も単価の高い周波数調整市場のReg Dのカテゴリに参加できるようになった。系統側からの指令に対する応動評価の成績であるPSを下げることなく（表2のDSRの欄を参照）、インセンティブ報酬の減額を避けつつ、Reg Dのカテゴリに応札し続けることができています。

c) MP社のビジネスモデル

MP社のビジネスモデル(VPP事業の資金の流れ)を図7に示す。集合住宅の新規建設時、MP社が温水器の遠隔コントローラと無線通信システム、ゲートウェイを設置する際には、装置費用と設置工事費、MP社による制御権込みの初期費用がかかる。MP社はこの初期費用を、このVPPビジネスを支援するベンチャーキャピタルなどの投資家から投資を受けて賄っている。

住宅が完成し、VPP事業を開始した後は、電気温水器を制御対象とすることへの見返りとして使用料を、住宅所有者（賃貸物件であるため、住民ではない）に支払う契約を交わしている。つまり、遠隔制御可能にした電気温水器を、WHENが算出した制御幅だけVPP資源としてPJMの周波数調整市場に提供し、そこで得た収益から所有者に支払うリソース使用料を引いた後に、投資家とシェアするのが、MP社の基本的なビジネスモデルである。

4.1.2. VPP事業の収入

1年間通して1kWの調整力を提供した時のインセンティブは2017年のデータでは、年間平均で150ドル/kWとなった。文献⁴⁾にて実施した価格調査の中では、ドイツや英国と比較して最も高い水準であった。また2019年より、PJMではDSRも容量市場に登録可能となったため、マルチマーケットにおける収益拡大も期待されるようになった。

4.2. Next Kraftwerke社のVPPビジネス戦略

バイオマス発電を中心にVPP事業を展開している事業者としては、世界最大規模のVPP事業者と呼ばれるNext Kraftwerke社（以下、NXK社）が当てはまる。

4.2.1. Next Kraftwerke社のビジネスの概要¹³⁾

NXK社は、売上高627.7百万ユーロ（2018年）のVPP事業者であり、アグリゲート対象設備は欧州全域に広がっており、全部で8,732ユニットある

リソースの総設備容量は7,560MW（2019年10月）である。欧州各地の卸電力取引市場と需給調整市場で市場取引をしており、取引高は合計で12.1TWh（2018年）と、欧州のVPP事業者としてトップクラスの実績を持っている。

NXK社の事業は大きく3つに分けられ、売上高の内訳は、各約1/3ずつである。

① 再生可能エネルギーの出力予測提供サービス

各再生可能エネルギー事業者単体では出力予測が難しいためにインバランスが大きく発生しがちであり、それに伴いインバランス料金の支払いも大きくなる。NXK社は、複数の顧客事業者をアグリゲーションし、保持している高精度の気象予測システムを活用することによりインバランス総量を減らし、回避した支払い分を各事業者とNXK社でシェアする事業である。再生可能エネルギーを多く持つVPP保有者や再生可能エネルギー事業者を対象顧客としたサービスである。

② VPP事業

複数のVPPリソースを束ねて、調整力、エネルギーをまとめて需給調整市場やエネルギー市場に提供するサービスである。

③ VPPプラットフォームの販売

VPP事業者にVPPプラットフォームシステムを提供するサービスである。このプラットフォームの導入により、VPP事業者は、リソースの計測・管理・制御を一括して行えるようになる。NXK社ではVPP as a Service (VaaS)の一環として位置付けている。

サービス利用者の視点では、①と②の事業は、NXK社の開発した取引ポータル“NEXTRA”を利用することで、電力市場参入を簡易にする便益を得ることができる。NXK社では、他のリソースとのアグリゲーションにより規模の経済を働かせ、一つのVPPとしてエネルギー市場、需給調整市場など幅広く市場に投入することにより利益の最大化を狙う。

4.2.2. VPPリソースと損益分岐点の目安

a) リソースの種類と制御

NXK社がVPPアグリゲータとして管理しているリソースは、シュタットヴェルケが所有するバイオガス発電や天然ガスコージェネレーションシステム、太陽光発電、風力発電、非常用発電機などの発電リソースが主体である。NEXT Boxと名付ける計測・制御システムを端末近傍に設置し、対象リソースを制御する。NEXT Boxは、NXK社の制御セン

ターとの通信, リソースの制御, 電力出力の計測の3つが主な機能である。

b) NKK 社 VPP の経済性確保の目安

NKK 社が契約するリソース規模は 100kW 以上の中規模以上の産業用施設・発電所に限定している。これは遠隔操作や情報収集のための通信機器 Next Box の設置・維持・管理コストの損益分岐点が発電機であれば 100kW, DSR の場合は調整力としての契約容量で 100kW である。

4.2.3. 事業収入源の目安

VPP 事業の収入源の1つである需給調整市場の価格の目安としては, PCR で1年間通して 1MW の調整力を提供した時のインセンティブ報酬は 2018 年のデータでは, 年間平均で 112 ユーロ/kW である。また, SRC の場合は 26 ユーロ/kW であり, 高速カテゴリの PCR が 4 倍以上の高い価格となった。NKK 社の場合は, 4.2.1 に示した通り, 複数のエネルギーサービスを提供しており, 顧客から見ると, エネルギーワンストップ型の事業と言えるであろう。

5. まとめ

本稿では, 太陽光発電等の再エネの大量導入により, なぜ DR/VPP 事業が必要になるのかについて解説し, その後, 下記3点について著者がこれまで調査してきた結果を解説した。

- ・ 系統サービスを提供する DR が扱われる市場にはどのようなものがあるか
- ・ これらの市場への参加規模はどの程度か
- ・ DSR の保有者は, DR によりどの程度の収入を得ているか

現状では DR や VPP の事業は, 容量市場を中心に広まっているが, 単価の高い需給調整市場でも現状での登録量は小さいものの, 徐々にその登録容量を増やしつつある。再エネの予測精度向上の影響を受けながらも発展していくものと考えられる。

参考文献

- 1) 坂東茂, 他, 2050 年を見据えた再生可能エネルギー大量導入による余剰電力の用途に関する調査と一考察, 電力中央研究所報告, C16011 (2017).
- 2) 坂東茂ら, “米国におけるアンシラリーサービス供給のための需要側資源の活用動向”, 電力中央研究所報告, Y14011, 2015.
- 3) 山田智之, 坂東茂, “欧米のアンシラリーサービス市場における需要側資源の応動評価の制度調査”, 令和元年電力技術/電力系統技術合同研究会, PE-19-143, 2019.
- 4) 山田智之, 坂東茂, “欧米のアンシラリーサービス供給における需要側資源の活用動向調査 - 関連制度とリソース実例 -”, エネルギー・資源学会論文誌, 41 (5) 219-225, 2020.
- 5) 坂東茂, 山田智之, “調整力市場の高速カテゴリにおけるリソースアグリゲーション活用のケース分析”, エネルギー・経済・環境コンファレンス 2021 講演論文集, 18-5 (2021)
- 6) PJM interconnection, “2017 State of the Market Report for PJM” (2018)
- 7) PJM interconnection, “2014-2018 Demand Response Operations Markets Activity Report”, Mar. 2015-April 2018.
- 8) Regelleistung.net: “Prequalified Capacity in Germany”, 2020 年 9 月
- 9) National Grid “Power Responsive Demand Side Flexibility Annual Report 2017” (2017), (accessed June 18th 2021), <http://powerresponsive.com/wp-content/uploads/2018/02/Power-Responsive-Annual-Report-2017.pdf>
- 10) University of Cambridge, Energy Policy Research Group “Exploring The Market For Demand-Side Response”, MPhil in Technology Policy - Final Group Project EPRG Spring Seminar, 2016 年 5 月 13 日 (accessed June 18th 2021), <https://www.eprg.group.cam.ac.uk/wp-content/uploads/2016/05/O.Khalid.pdf>
- 11) Regelleistung.net: “Prequalified providers”, 2020 年 9 月 (accessed June 18th 2021), <https://www.regelleistung.net/ext/download/anbieterliste>
- 12) PJM, “Regulation Update”, (accessed June 18th 2021), <https://www.pjm.com/-/media/committees-groups/committees/oc/2020/20201106/20201106-item-15-regulation-update.ashx>
- 13) Next Kraftwerke, (accessed June 18th 2021), <https://www.next-kraftwerke.com/company>

著者略歴



坂東 茂 (ばんどう しげる)

2005年3月東京大学大学院新領域創成科学研究科博士課程修了。博士(環境学)取得。

東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻特任講師などを経て、2010年電力中央研究所入所、現在に至る。

主にスマートグリッド、デマンドレスポンス、VPPを中心としてエネルギーシステム分析に従事。