

将来の再生可能エネルギー社会を 実現するイノベーションの全体像:

変動性再生可能エネルギー導入のための ソリューション



© IRENA 2019

別途規定がない限り、本刊行物に記載された資料は自由に使用、共有、複写、複製、印刷および／または保存することができる。ただし、情報の出所および著作権者として IRENA を適切に明記する場合に限る。本刊行物に記載された資料のうち第三者に帰属するものには、別段の使用条件および制限が適用される可能性があり、かかる資料を使用する前に、かかる第三者から適切な許可を得る必要がある可能性がある。

ISBN 978-92-9260-419-6

引用の表記: IRENA (2019)、将来の再生可能エネルギー社会を実現するイノベーションの全体像: 変動性再生可能エネルギーの導入に向けたソリューション、国際再生可能エネルギー機関、アブダビ

本レポートは "Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables" ISBN: 978-92-9260-111-9 (2019) の非公式な邦訳版であり、英語オリジナル版 と日本語版で相違がある場合は、英語版の記述が優先される。本翻訳物は、日本政府環境省のご好意によるものである。

謝辞

本報告書のために、以下の専門家の方々からご意見とレビューをいただいた: Konstantin Staschus (Ecofys – A Navigant Company); Deger Saygin (SHURA Energy Transition Centre); Mark Van Stiphout, Ruud Kempener (European Commission); Luiz Augusto Barroso, Gabriel Rocha (PSR); Tomas Baeza (CORFO); Maher Chebbo, Vlad Duboviks (GE Power); Stephen Woodhouse (Poyry); Wolfram Sparber (EURAC); Mackay Miller (National Grid); Jan Vorrink (Tennet); Ioannis Theologitis, Norela Constantinescu (ENTSO-E); Koen Noyens, Helene Lavray (Eurelectric); Guy Vekemans (Vito); Tiago Moura Antunes (EDP); Nilmini Silva-Send (EPIC); David Butler (Hydro Tasmania); Mika Ohbayashi (Renewable Energy Institute); James Watson, Thomas Döring (Solar Power Europe); Lei Xianzhang, Wang Caixia, Wand Feng (SGCC); Jia Hongjie, Wang Chengshan (Tianjin University); Zhou Yue (Cardiff University); Gerard Wynn, Tim Buckley (IEEFA); Marko Vainikka, Saara Kujala (Wärtsilä); Peter Stratmann, Yvonne Finger (Federal Network Agency for Electricity); Varun Sivaram (Council on Foreign Relations); Doug Arent (NREL); Paolo Mastropietro (IIT, Comillas Pontifical University); Josh Roberts (REScoop); François Moisan, Olivier Chazal (ADEME); Anna Darmani (Innoenergy); Ilja Rudyk (EPO); Karoliina Auvinen (Aalto University); Florence Coulet (Clarion Energy); Arthur Petersen, Iman Jamall (UCL); Ahmed Abdel-Latif, Hameed Safiullah, Emanuele Bianco, Paul Komor, Emanuele Taibi, Carlos Fernandez, Raul Miranda, Harold Anuta, Elena Ocenic, Bowen Hong (IRENA).

本報告書は、Arina Anisie、Francisco Boshell、Roland Roesch、Paul Durrant、Sean Ratka、Alessandra Salgado、Javier Sesma (IRENA) によって執筆された。本研究は、Dolf Gielen が監修した。

本報告書はオンラインでダウンロードできる。: www.irena.org/publications

ご意見・お問合せ: publications@irena.org

免責

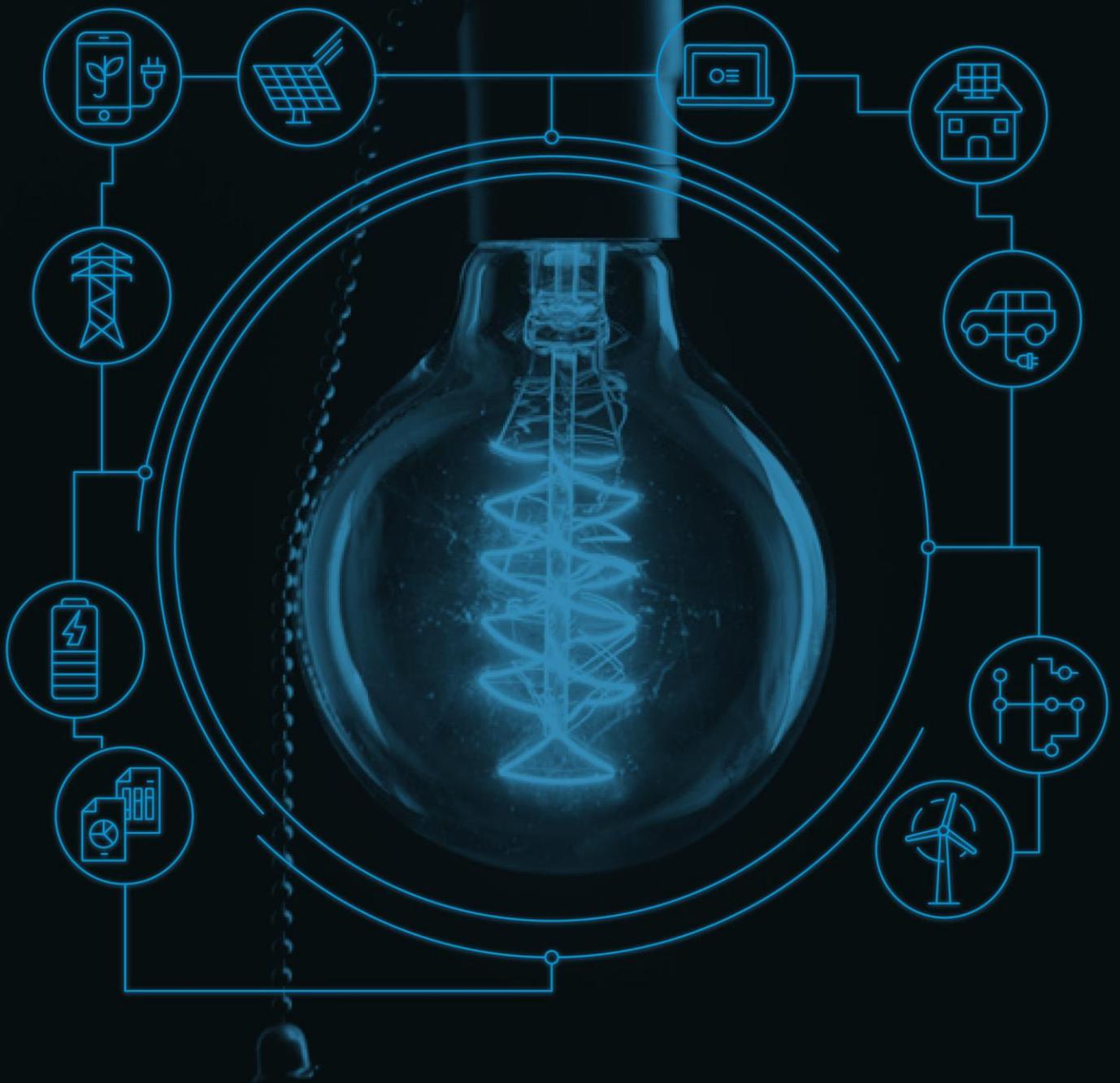
本書およびこれに含まれる内容は、「現状のまま」提供される。本書に含まれる内容の信頼性を確認するため、IRENA はあらゆる合理的注意を払っている。しかし、IRENA も、またそのいかなる職員、代理人、データまたはその他の第三者資料提供者も、かかる内容の正確さ、完全性、特定の目的との適合性、または第三者の権利を侵害しないことについて保証せず、本書またはその内容の使用に関連したいかなる責任も引き受けない。

本書に含まれる情報は必ずしも IRENA 加盟国の見解を代表するものとは限らない。特定の企業やプロジェクト、製品に対する言及は、類似の特徴を持つが言及されていない他のものと比較して IRENA がこれを認証または推奨することを意味するものではない。本書で使用している名称や内容の提示方法は、いかなる地方、国、領土、都市、または地域、もしくはその機関の法的地位、または境界線や国境の画定に関連した IRENA 側の見解を表明するものではない。

別段の定めがない限り、掲載された写真は Shutterstock から入手したものである。

日本語版(2020年3月)
翻訳者: 安田 陽(京都大学大学院
経済学研究科 再生可能エネルギー
経済学講座 特任教授)

本翻訳は環境省「令和元年度パリ協定等を受けた中長期的な温室効果ガス排出削減達成に向けた再生可能エネルギー導入拡大方策検討調査委託業務」の一環で(株)三菱総合研究所の協力の下に行われた。



序文



イノベーションは、世界中で進行しているエネルギーシステムの転換を促進する牽引力である。さまざまな革新的ソリューションが重要な役割を果たすことによって、再生可能エネルギーは今日のような競争力のあるエネルギーの選択肢へと成長を遂げた。

その間、再生可能エネルギーのイノベーションは加速の一途をたどっており、なかでも発電ソリューションはその先頭を走っている。コストが急速に低下した結果、太陽光発電と風力発電はエネルギー転換の中核となっている。電力コストを低く抑えながら再生可能エネルギーの導入率を最大化するには、より柔軟性の高い電力システムが必要である。

そのため、先進市場で実施されているイノベーションプログラムは、電力システムの柔軟性を最大限に高めるソリューションに重点を置いている。また輸送部門、建築部門、産業部門の電化（エレクトリフィケーション）拡大も、スマートに行われれば、太陽光発電や風力発電の導入を促進するものとなりうる。そのような新たな需要は柔軟性が高いと考えられるため、電力システムに組み込むことにより、デマンドサイドマネジメント戦略を通じたさらなる再生可能エネルギーの導入を後押しすることができる。

これらの課題に取り組むソリューションの多くは、既に商業化が可能な段階にある。先進的な企業は変革をもたらす一連のイノベーションを創出、試行、展開しており、デジタル化、分散化、電化の傾向は、誰も予想できなかったほど急速に進展している。とはいえ、イノベーションを支え、台頭しつつあるソリューションを取り入れるために、政府による時宜を得た集中的な措置は不可欠である。

いずれの状況においても、意思決定者はソリューションの最適な組み合わせを特定する必要がある。それぞれの国に合わせた適切なイノベーションミックスを決定するには、技術におけるイノベーションと、市場設計、ビジネスモデル、系統運用におけるイノベーションを組み合わせた、総合的な取り組みが必要である。しかし選択可能なソリューションが非常に多岐にわたるということは、世界の電力システムの多様性と相まって、意思決定に大きな困難をもたらすとも考えられる。

国際再生可能エネルギー機関（IRENA）が作成した「イノベーション展望」に関する本
研究報告書は、かかるソリューションに関する明確かつ包括的な手引きを示すことを
目的としている。本報告書は、十分な情報に基づく意思決定を支え、実効性のある政
策枠組みの策定に役立ち、的を絞ったイノベーションの育成を助け、最終的には再生
可能エネルギーへの移行を加速させることを目指している。

本報告書では、変動性再生可能エネルギーの大規模導入を促進するために世界各
地で開発および実施されているイノベーションの事例をマッピングし、分類している。
この主報告書を補足するものとして、イノベーションのタイプごとに詳細な検討ができ
るイノベーション概要書およびオンライン資料がある。

本研究では、再生可能エネルギーの導入を加速して需要を満たすだけでなく、エネル
ギー転換を世界規模の包括的な動きとするために役立つ幅広いイノベーションを取り
上げる。IRENA は、加盟国の経済・社会・環境目標、また世界の気候目標や持続可
能な開発目標に沿って再生可能エネルギーのイノベーションと導入を促進するため、
引き続き加盟国と協力していく。

アドナン Z. アミン

事務局長*

国際再生可能エネルギー機関

* 2019 年 4 月まで

目次

要約.....	8
変動性再生可能エネルギー導入を促進するイノベーション.....	10
将来の再生可能エネルギー社会を実現するソリューション.....	12
図一覧.....	14
表一覧.....	15
略語一覧.....	16
1 電力部門における転換.....	20
1.1 低炭素化、信頼度維持、低廉化、セキュリティ確保のすべてを備えたエネルギーシステムを目指して.....	21
1.2 VRE の系統連系のための系統柔軟性向上.....	23
1.3 イノベーションの紹介.....	25
1.4 イノベーションの動向と未来の電力システムにおける役割の変化.....	31
• 電力部門のデジタル化.....	34
• 電力システムの分散化.....	37
• 最終消費部門の電化.....	40
2 VRE 導入に向けたイノベーションの展望.....	44
● 2.1 実現技術.....	47
電力貯蔵.....	48
最終消費部門の電化.....	49
デジタル技術.....	52
新たな電力システム.....	54
ディスパッチ可能な電源.....	55
● 2.2 ビジネスモデル.....	56
消費者を能動的な主体に変える.....	57
再生可能エネルギー供給の実現.....	59
● 2.3 市場設計.....	60
革新的な卸市場設計.....	61
革新的な小売市場設計.....	63
● 2.4 系統運用.....	65
分散型エネルギー源の運用.....	66
不確実性への対応.....	67
系統増強の繰り延べ.....	68

3 将来の再生可能エネルギー社会を実現するイノベーション	72
3.1 供給側の柔軟性ソリューション	80
ソリューション I: 先進的な気象予測手法を取り入れることによる VRE 電源の不確実性低減	81
ソリューション II: 柔軟性の高い電源による変動性吸収	86
3.2 系統柔軟性ソリューション	94
ソリューション III: 柔軟性供給源としての地域間連系線・地域市場の活用	95
ソリューション IV: スーパーグリッドによる需要地と遠隔地にある再生可能エネルギー電源の需給調整 ...	100
ソリューション V: 大容量電力貯蔵および新たな系統運用手法による系統増強投資の抑制	103
3.3 需要側の柔軟性ソリューション	109
ソリューション VI: 分散型エネルギー源のアグリゲーションによる電力系統へのサービス提供	110
ソリューション VII: デマンドサイドマネジメント	117
ソリューション VIII: 再生可能エネルギーのミニグリッドによる電力系統へのサービス提供	123
ソリューション IX: 分散型エネルギー源による配電系統の最適運用	128
3.4 電力系統全体にわたる柔軟性ソリューション	133
ソリューション X: 大容量蓄電池ソリューション	135
ソリューション XI: P2X ソリューション	143
4 ソリューションの影響評価	152
4.1 主要ソリューション: 導入課題と柔軟性ポテンシャル	156
4.2 ソリューションの適合性に関する指標	168
5 結論: 8 段階のイノベーションプラン	176
参考文献	182

イノベーションは、世界のエネルギー転換を促進する牽引力である。世界中でより効率的で優れた再生可能エネルギー技術の開発と導入が加速している。再生可能エネルギーは多くの国にとって、セキュリティが保たれ、コスト効率のよい、環境的に持続可能なエネルギー供給に移行するための確かな選択肢となりつつある。再生可能エネルギーは、雇用や地域価値を創出する継続的な社会経済的發展を支えると同時に、気候変動や地域の大気汚染への対策ともなっている。

電力部門は、太陽光発電と風力発電の急速なコスト低下と、それに伴う多くの国での導入拡大を通じて、イノベーションの牽引役となってきた。これまでも有望な進展が続いてきたが、エネルギー転換はさらにペースを大幅に上げる必要がある。市場政策と同様、技術的イノベーションを推進するために実施される政策も、最新の状況や急速な進展に合わせて、継続的な見直しと更新を行うことが望ましい(IRENA, IEA and REN21, 2018)。

変動性再生可能エネルギー(VRE)の導入には、発電比率が高くなるに従い需給バランスの維持がより困難になるという固有の課題が伴う。低コストのVRE、すなわち太陽光発電と風力発電の価値を最大限高めるには、より柔軟性のある統合された電力システムが必要である。

これに対し、世界の政策立案者や系統運用者は、変化する状況の中で低廉かつ確実に需給バランスを維持するための幅広い対策を採用している。イノベーションの重点は、太陽光発電と風力発電の大量導入に必要な電力システムの柔軟性を高めるソリューションを策定、展開することに置かれている。

柔軟性: 太陽光発電や風力発電がもたらす変動性と不確実性に対して、電力システムが超短期から長期までのさまざまなタイムスケールで対応し、これら変動性再生可能エネルギー(VRE)電源の出力抑制を回避するとともに、すべての需要家のエネルギー需要を信頼度高く満たすことができる能力(IRENA, 2018c)。

変動性: 太陽光資源や風力資源の変動的な性質のこと。発電出力の急激な変化を引き起こす可能性がある。

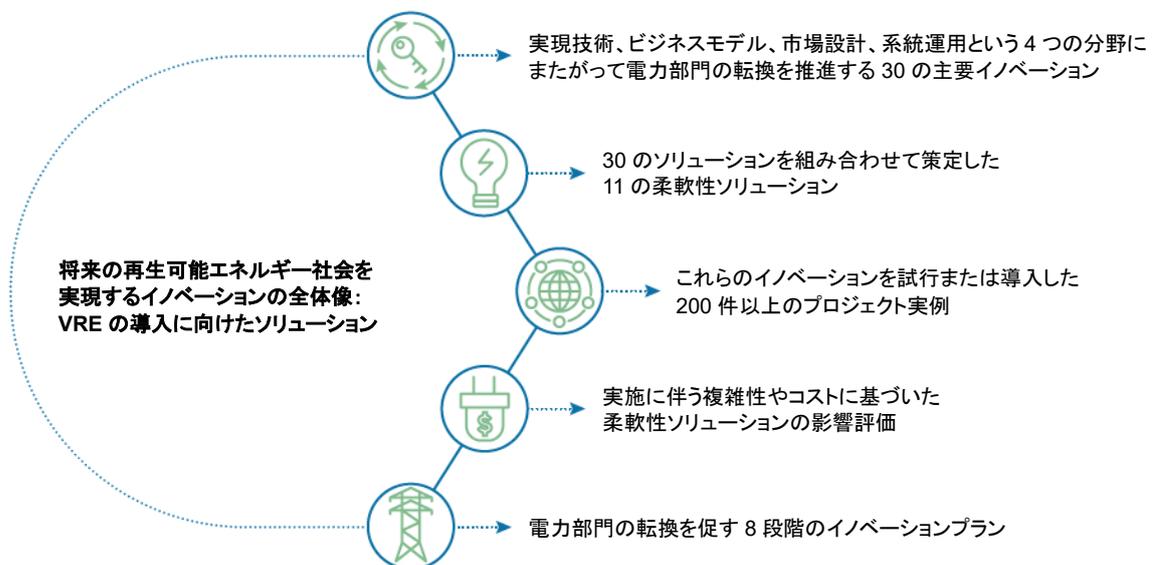
不確実性: 太陽光発電や風力発電の出力を完全に予測することができないこと。



近年、先見性のある行政機関や先進的企業は世界中で、電力システムを根本から変革する可能性を持ったさまざまな革新的ソリューションの創出、試行、展開を実施している。ソリューションはきわめて多様であり、また地域のエネルギーシステムはそれぞれ異なることから、意思決定者を迷わせ、それぞれの国や状況に合わせた最適なソリューションの特定や評価を困難にするおそれがある。

そこで、国際再生可能エネルギー機関（IRENA）は、VRE 導入に関するイノベーション展望の広範囲で詳細な分析を行い、イノベーションや革新的ソリューションの多くの事例をマッピングし、分類した。本報告書と各種オンライン資料は、多様なイノベーションについて明確かつ参照しやすい手引きを意思決定者に提供することを目的としている。これらのイノベーションには、現在開発中のものもあれば、各国の状況に合わせた形で既に使用されているものもある。世界のさまざまな電力システムの中で、これらのイノベーションは組み合わせられている。そこから見てくる枠組みにより、個別のケースにおいてどのようなソリューションが適用できるか、知識に基づいた判断を下すことが可能になると期待される。

図 ES1 イノベーション展望プロジェクトの概要



変動性再生可能エネルギー導入を促進するイノベーション

VRE の大量導入に役立つ多くのイノベーションが世界各地で台頭し、実用化されている。IRENA の「イノベーション展望」研究は、関連性のあるイノベーションをマッピングし相乗効果を特定、これらのイノベーションを取り入れることでもたらされる、電力系統に VRE を大量導入するためのソリューションを提示する。

本「イノベーション展望」は、世界中で実施されている数多くの革新的なプロジェクトやイニシアチブの分析に基づくものである。これらのイノベーションをカテゴリー別に分類してマッピングし、30 のイノベーションに集約した（表 1 を参照）。

またこの分析は、これらのイノベーションが世界の電力系統に見られる 4 つの主要な分野にわたり出現していることも示している。

- **実現技術**: 再生可能エネルギー導入を促進するために重要な役割を果たす技術。
- **ビジネスモデル**: 新たなサービスのビジネスケースを策定し、系統柔軟性を高め、再生可能エネルギー技術のさらなる導入にインセンティブを供与する革新的モデル。
- **市場設計**: 再生可能エネルギーを中心とするエネルギーシステムに必要な柔軟性やサービスを奨励し、新たなビジネスの出現を後押しする、新しい市場構造と規制枠組みの変更。
- **系統運用**: VRE 電源の大量導入を可能にする、電力系統の革新的運用方法。

先駆的な国や企業がこれらのイノベーションを試行および導入した事例に基づいて、30 タイプのイノベーションのそれぞれについて詳細な分析を行った。本報告書に付属する一連のイノベーション概要書は、特定の状況における個々のイノベーションの便益、リスク、適切性を評価するための参考となることを目的としている。

各イノベーション概要書は、以下の項目からなる。

- I **説明**: イノベーションの内容とその役割。
- II **電力部門における転換への貢献**: 電力系統に提供されるサービスや便益を通して、イノベーションが VRE 導入をどのように支援することができるか。
- III **市場展開を可能にする主要因**: イノベーションを実用化するうえでのリスクと課題、またそれらを克服する方法の概説。
- IV **現状とイニシアチブ事例**: イノベーションの最新の進捗状況を追跡する指標と、世界各地で現在進行しているイニシアチブおよびイノベーション導入プロジェクト事例。
- V **実施要件チェックリスト**: イノベーションを導入するために準備する必要がある項目を整理した、政策立案者向け簡易ツール。

表 1 イノベーション概要書の概説

	概説	イノベーション概要書
実現技術 	<ul style="list-style-type: none"> 再生可能エネルギーの変動性をバックアップし、さまざまなシステムサービスを提供することができる蓄電池技術。 	<ol style="list-style-type: none"> 大容量蓄電池 ビハインド・ザ・メーター(需要側)蓄電池
	<ul style="list-style-type: none"> 他部門の電化を実現し、再生可能エネルギー電源の新たな市場を切り開くとともに、余剰電力を貯蔵する新たな方法をもたらす技術。 	<ol style="list-style-type: none"> 電気自動車のスマートチャージ 再生可能エネルギーによるP2H(電力から熱への変換) 再生可能エネルギーによるP2H2(電力から水素への変換)
	<ul style="list-style-type: none"> 電力部門に新たな選択肢をもたらすとともに、業界の境界線とダイナミクスを一変させ、再生可能エネルギーアセットの最適化を促進するデジタル技術。 	<ol style="list-style-type: none"> IoT(モノのインターネット) AI とビッグデータ ブロックチェーン
	<ul style="list-style-type: none"> 相互に補完し合い、VRE 電源の新しい運用方法を可能にする新たなスマートグリッド(大規模、小規模のいずれも)。 	<ol style="list-style-type: none"> 再生可能エネルギーのミニグリッド スーパーグリッド
	<ul style="list-style-type: none"> 新たな状況と電力システムのニーズに適応するための、既存アセットの改修。 	<ol style="list-style-type: none"> 従来型発電所における柔軟性
ビジネスモデル 	<ul style="list-style-type: none"> 需要家に権限を付与し、能動的な参加者へと変容させるビジネスモデル。 	<ol style="list-style-type: none"> アグリゲーター ピア・トゥー・ピア(P2P)電力取引 エネルギー・アズ・ア・サービス(EaaS)
	<ul style="list-style-type: none"> オフグリッド地域と系統接続地域の両方で再生可能エネルギーの供給を可能にする革新的手法。 	<ol style="list-style-type: none"> コミュニティ所有モデル 従量課金モデル
市場設計 	<ul style="list-style-type: none"> 市場参加者による柔軟性の供給を奨励し、より適切なシグナルを送ることで電力供給の価値を安定させ、システムサポートサービスに適切な報酬を与える新たな規制。 	<ol style="list-style-type: none"> 電力市場における時間分解能の向上 電力市場における空間分解能の向上 革新的なアンシラリーサービス 容量市場の再設計 地域市場
	<ul style="list-style-type: none"> 需要家/プロシューマー側の柔軟性を促進する小売市場の設計および規制の変更。 	<ol style="list-style-type: none"> 時間別料金制度 分散型エネルギー源の市場導入 ネットビリング制度
系統運用 	<ul style="list-style-type: none"> 分散型電源の導入に必要な新たな配電システム運用方法と、分散型電源に適した市場促進。 	<ol style="list-style-type: none"> 配電システム運用者(DSO)の将来的役割 送電システム運用者(TSO)とDSOの協力
	<ul style="list-style-type: none"> 系統柔軟性を高める新たな運用手順。 	<ol style="list-style-type: none"> VRE 電源の先進的予測手法 揚水発電の革新的運用手法
	<ul style="list-style-type: none"> 系統混雑に起因する VRE の出力抑制を削減し、系統増強の必要性を低減する新たな系統運用方法。 	<ol style="list-style-type: none"> バーチャル送電線 動的線路定格

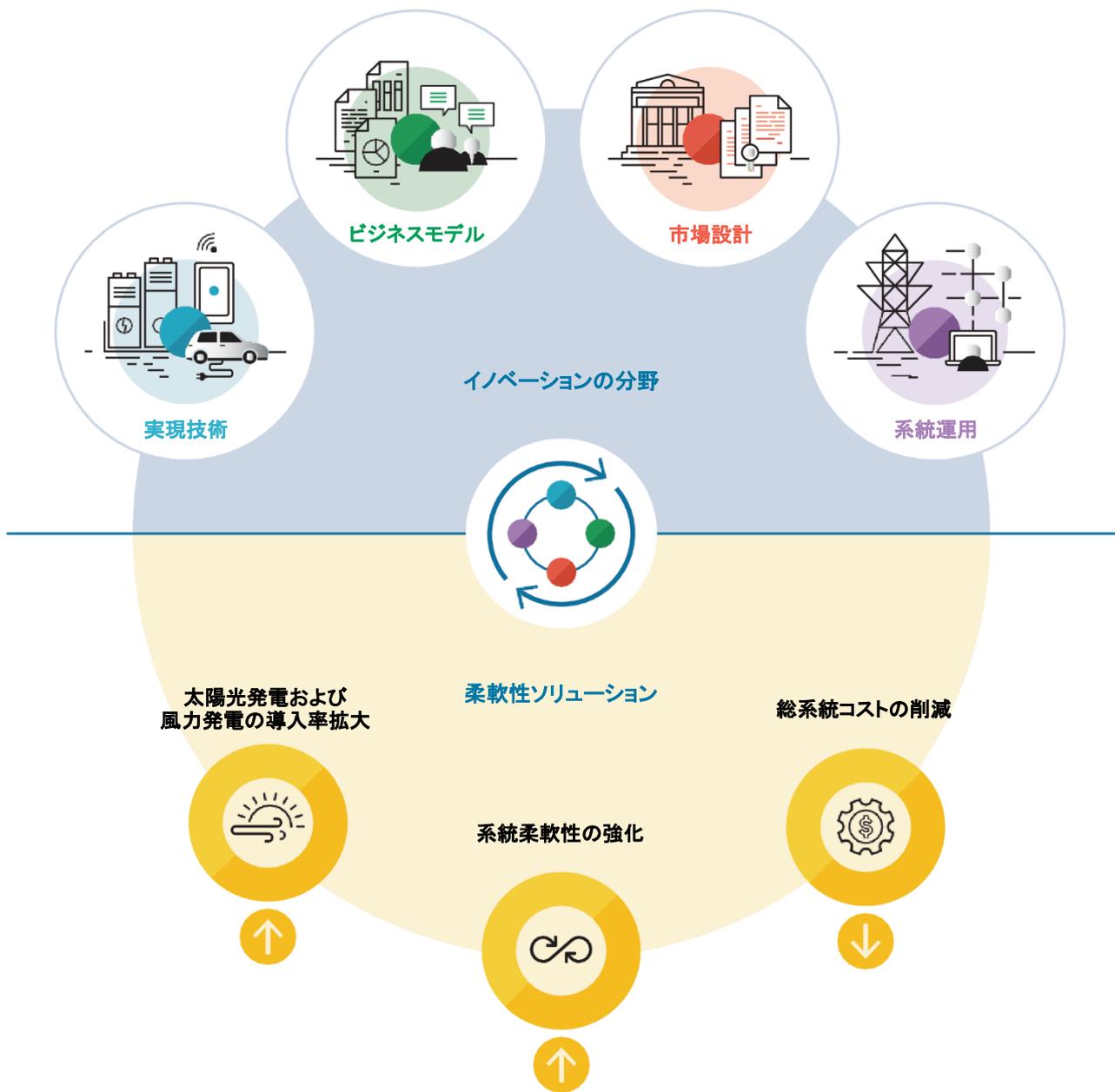
ES

将来の再生可能エネルギー社会を実現するソリューション

この統合報告書は、「イノベーション展望」において特定された主要な知見を集約し、イノベーションが単独で発生するものではないことを説明するものである。VRE 導入のために現場で実施されているソリューションは、技術、市場設計、ビジネスモデル、系統運用といったさまざまな分野にまたがる多様なイノベーションの相乗効果によってもたらされている。これは**体系化されたイノベーション**と呼ばれている。

この主報告書は、付属のイノベーション概要書に記載されている情報を統合し、さまざまなイノベーション間の関連性を明らかにしている。統合報告書で取り上げる個々のイノベーションについては、イノベーション概要書で詳細を論じる。

図 ES2 電力部門全体にまたがるイノベーションの組み合わせによる柔軟性ソリューション



本統合報告書は、4つの章で構成されている。

第1章:「電力部門における転換」では全体像を概説し、再生可能エネルギーが支える未来の電力系統が、低炭素、高信頼度、高セキュリティ、かつ低廉なエネルギーシステムを実現するうえでいかに重要であるかを説明する。また、今後直面することになる主な課題を挙げ、それらを克服するために役立つイノベーションの動向を明らかにする。電力部門のプレイヤーが果たす役割や責任の変化のほか、この分野に参入してくる新たなプレイヤーにも焦点を当てる。

第2章:「変動性再生可能エネルギー電源導入に向けたイノベーション展望」は、マッピングした30タイプのイノベーションを概説する。

第3章:「将来の再生可能エネルギー社会を実現するイノベーション」は、イノベーションのタイプや4つの分野の関係と相乗効果について説明し、イノベーション間の相乗効果がもたらしうるソリューションを立案する。本報告書ではこれを体系化されたイノベーションと呼んでいる。体系化されたイノベーションとは、イノベーションを組み合わせ、その相乗効果を電力系統のあらゆる部分、すべてのプレイヤーに波及させることを意味する。

第4章:「ソリューションの影響評価」は、電力系統の柔軟性を高めるためにどのソリューションが実施しやすいか、さまざまな電力系統状況に対してどのソリューションが適しているかについて、簡単な手引きを提供する。

第5章:結論:「8段階のイノベーションプラン」には、報告書の締めくくりとして、再生可能エネルギーが支える未来に向けて推奨される施策を記す。

図一覽

図 ES1	イノベーション展望プロジェクトの概要	9
図 ES2	電力部門全体にまたがるイノベーションの組み合わせによる柔軟性ソリューション	12
図 1	低炭素化、低廉化、信頼度維持、セキュリティ確保のすべてを備えたエネルギーシステムへの道筋	22
図 2	イノベーションにより広がる電力部門全体の新たな柔軟性の選択肢	24
図 3	電力サプライチェーンにおけるイノベーション	33
図 4	イノベーションの動向	34
図 5	電力システムにおけるデジタル技術の台頭	35
図 6	世界における IoT 接続された機器の台数(単位: 10 億台)、2015~2020 年	37
図 7	分散型エネルギー源	38
図 8	イノベーションの全体像	45
図 9	実現技術におけるイノベーション	47
図 10	ビジネスモデルにおけるイノベーション	56
図 11	市場設計におけるイノベーション	60
図 12	系統運用におけるイノベーション	65
図 13	VRE の系統連系に向けたイノベーションの全体像	70
図 14	電力部門の転換を促す体系的イノベーション	73
図 15	従来型の柔軟性供給源(左)と新たな柔軟性供給源(右)の比較	75
図 16	実現技術、ビジネスモデル、市場設計、系統運用におけるイノベーションを組み合わせたソリューション	76
図 17	VRE 電源の不確実性低減に向けた先進的气象予測手法を含むイノベーションの相乗効果	81
図 18	柔軟性の高い電源を生み出すためのイノベーションの相乗効果	86
図 19	ノード料金制の費用と便益	90
図 20	ドイツにおける原子力、石炭火力、褐炭火力発電所の出力(2016 年 3 月 23 日~30 日)	91
図 21	ドイツにおける柔軟性の必要性。冬季のドイツにおける 2 週間にわたる負荷曲線の例	92
図 22	北欧市場の主な特徴	93
図 23	地域間連系線および地域市場による柔軟性向上を生み出すためのイノベーションの相乗効果	95
図 24	スーパーグリッドによる需要地と再生可能エネルギー電源の需給調整を生み出すためのイノベーションの相乗効果	100
図 25	送電システムの増強投資に関するイノベーションの相乗効果	103
図 26	サーフインターフ・イニシアチブの仕組みの図解	106
図 27	分散型エネルギー源に基づく系統サービスを実現するためのイノベーションの相乗効果	110
図 28	デマンドサイドマネジメントを実現するためのイノベーションの相乗効果	117
図 29	ミニグリッドによる電力システムへのサービス提供を実現するためのイノベーションの相乗効果	123
図 30	分散型エネルギー源による配電システムの最適運用を実現するためのイノベーションの相乗効果	128
図 31	大容量蓄電池を有効活用するためのイノベーションの相乗効果	135
図 32	PJM による周波数調整サービスのシグナルおよび蓄電池応答	141
図 33	P2X ソリューションを実現するためのイノベーションの相乗効果	143
図 34	水素による最終消費部門への VRE 統合	144

図 35	電気分解装置を利用した高速周波数応答	147
図 36	電力システムの便益を最大化するためのイノベーション	153
図 37	高 VRE 導入率におけるトータルシステムコスト削減のためのイノベーション	154
図 38	システム柔軟性を向上させるソリューション	155
図 39	各ソリューションの柔軟性ポテンシャルと必要な技術コスト	159
図 40	各ソリューションの柔軟性ポテンシャルと非技術的課題	160
図 41	都市人口密度に基づくソリューションの指針	169
図 42	季節性に基づくソリューションの指針	170
図 43	地域間連系の可能性に基づくソリューションの指針	171
図 44	VRE 電源と大規模需要地の空間近接性に基づくソリューションの指針	172
図 45	残余需要プロファイルに基づくソリューションの指針	173
図 46	すべての状況に適したソリューション	173
図 47	電力部門における転換のための 8 段階のイノベーションプラン	178

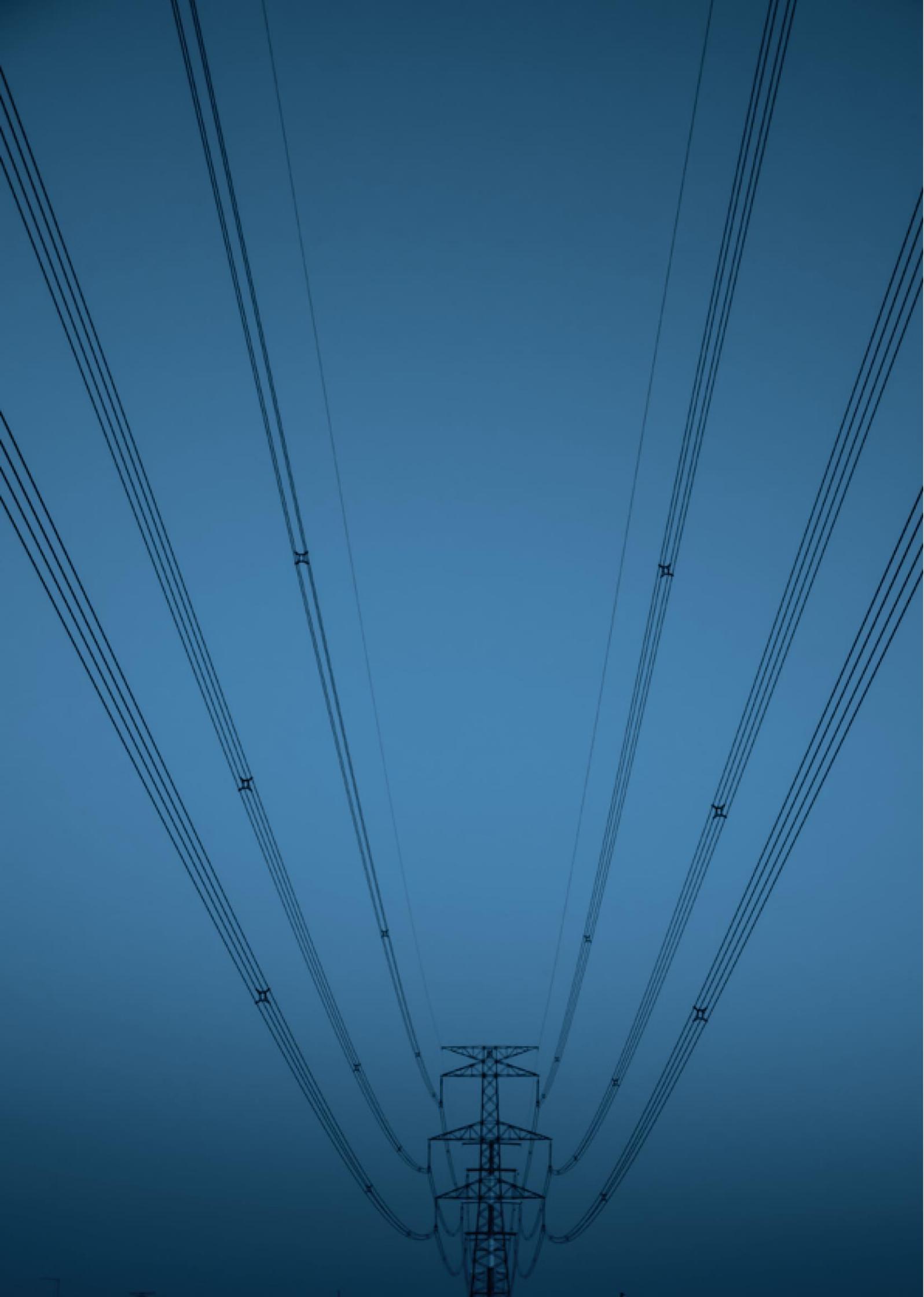
表一覧

表 1	イノベーション概要書の概説	11
表 2	各種蓄電方式について、さまざまなシステム用途に対する適合性	137
表 3	柔軟性ニーズに対応するソリューション	156
表 4	各種イノベーションおよびソリューションの導入課題	158
表 5	概要表	166

略語一覧

AC	交流 (Alternating current)
AI	人工知能 (Artificial intelligence)
APS	アリゾナ州の電気事業者 (Arizona Public Service Company)
AUD	豪ドル (Australian dollar)
BMWi	ドイツ連邦経済エネルギー省 (Germany Federal Ministry for Economic Affairs and Energy)
CAISO	カリフォルニア独立系統運用機関 (California Independent System Operator)
CHP	熱電併給、コージェネレーション (Combined heat and power)
CREZ	競争的再生可能エネルギーゾーン (Competitive renewable energy zone)
DC	直流 (Direct current)
DLR	動的線路定格 (Dynamic line rating)
DUoS	電力系統の分散型利用 (Distributed use of system)
EaaS	エネルギー・アズ・ア・サービス (Energy-as-a-service)
EIM	エネルギーインバランス市場 (Energy Imbalance Market)
ENTSO-E	欧州送電系統運用者ネットワーク (European Network of Transmission System Operators)
ERCOT	テキサス電力信頼度協議会 (Electricity Reliability Council of Texas)
EU	欧州連合 (European Union)
EUR	ユーロ (Euro)
EV	電気自動車 (Electric vehicle)
FCAS	周波数制御アンシラリーサービス (Frequency Control Ancillary Services)
FERC	米国連邦エネルギー規制委員会 (Federal Energy Regulatory Commission)
GBP	英ポンド (British pound)
GW	ギガワット (Gigawatt)
GWh	ギガワット時 (Gigawatt-hour)
HVAC	暖房・換気・空調 (Heating, ventilation and air conditioning)
HVDC	高圧直流 (High-voltage direct current)
Hz	ヘルツ (Hertz)
ICT	情報通信技術 (Information and communications technology)
IoT	モノのインターネット (Internet of things)
ISO-NE	ニューイングランド独立系統運用機関 (Independent System Operator – New England)
IT	情報技術 (Information technology)
IRENA	国際再生可能エネルギー機関 (International Renewable Energy Agency)
kg	キログラム (Kilogram)
kV	キロボルト (Kilovolt)
kW	キロワット (Kilowatt)
kWh	キロワット時 (Kilowatt-hour)

LCOE	均等化発電原価 (Levelised cost of electricity)
MISO	米国中部大陸独立系統運用機関 (Midcontinent Independent System Operator)
MW	メガワット (Megawatt)
MWh	メガワット時 (Megawatt-hour)
NEM	オーストラリア電力市場 (National Electricity Market)
NYISO	ニューヨーク独立系統機関 (New York Independent System Operator)
P2G	電力からガスへの変換 (Power-to-Gas)
P2H	電力から熱への変換 (Power-to-Heat)
P2H2	電力から水素への変換 (Power-to-Hydrogen)
P2P	ピア・トゥー・ピア (Peer-to-peer)
P2X	電力から他のエネルギー媒体への変換 (Power-to-X)
PAYG	従量課金 (Pay-as-you-go)
PEM	プロトン交換膜 (Proton exchange membrane)
PG&E	パシフィック・ガス & エレクトリック (カリフォルニア州の電力・ガス供給業者) (Pacific Gas and Electric)
PJM	ペンシルバニア州、ニュージャージー州、メリーランド州を中心とする地域系統運用機関 (Pennsylvania – New Jersey – Maryland Interconnection)
PV	太陽電池 (Photovoltaic)
SAPP	南アフリカ・パワープール (Southern African Power Pool)
SIDE	スマート統合分散型エネルギー (Smart Integrated Decentralised Energy)
TWh	テラワット時 (Terawatt-hour)
UHV DC	超高压直流 (Ultra-high-voltage direct current)
UK	英国 (United Kingdom)
US	米国 (United States)
USD	米ドル (United States dollar)
VPP	仮想発電所 (Virtual power plant)
VRE	変動性再生可能エネルギー (Variable renewable energy)



1 電力部門における転換



低炭素化、信頼度維持、低廉化、セキュリティ確保のすべてを備えたエネルギーシステムを目指して

1.1 世界のエネルギーセクター（産業部門）は、より包括的で高セキュリティ、高コスト効率、低炭素かつ持続可能な未来に向けて、転換の只中にある。これを構成する極めて重要な要素の一つが、再生可能エネルギーである。エネルギー転換は、2015年のパリ協定に至った気候変動への懸念の高まりだけでなく、国際連合の持続可能な開発目標（SDGs）、大気汚染の悪化や水問題の深刻化を契機に、過去に例がないほどの公的な介入と政策措置により促進されており、その緊急性と重要性は、気候変動に関する政府間パネルの最新の報告書（IPCC, 2018）にも開示されている。エネルギー転換は現在、イノベーションを新たな推進力の鍵として、さらなる進化を遂げている。

電力部門は、現行のエネルギー転換を主導しており、これは再生可能エネルギー電源、特に風力発電と太陽光発電の急速なコスト低減に後押しされている。2010年から2018年までの期間に、太陽電池モジュールのコストは90%低減し、太陽光発電の均等化発電原価（LCOE）は77%低下した。同時期に、風車1基当たりのコストも（市場により異なるが）半減し、陸上風力発電の均等化発電原価は30%近く減少しており、さらなる大幅な削減が今後10年において予想されている（IRENA Renewable Cost Database 2019よりデータ抽出）。

再生可能エネルギーは、2017年の世界の発電電力量のうち4分の1を占めると概算されており、特に風力発電や太陽光発電といった変動性再生可能エネルギー（VRE）は、近年目覚ましく成長している。2017年末までに再生可能エネルギーの設備容量は2,337GWに達しており、総発電設備容量の34%を構成している（IEA, 2018a）。この大部分は水力発電（54%）によるものであり、続いて風力発電（22%）と太陽エネルギーによる発電（大半が太陽光発電で、約17%）の順になる。2005年から2016年までの期間に、世界の太陽光発電の設備容量は7倍以上も拡大し、陸上風力発電の設備容量は、3倍近く増加した。2017年だけでも、新規設備容量は、太陽光発電で98GW、風力発電で48GWである。

それでもなお、現行のエネルギー転換は、この伸びをさらに促進させることが必要である。IRENA（2018b）の分析によると、パリ協定で示されている気候目標に沿った電力部門の脱炭素化には、2050年までに総発電電力量に占める再生可能エネルギーの導入率を85%にすることが必要であると考えられている。その時点までに、太陽光発電と風力発電の設備容量は、現在の900GWから13,000GWまで拡大され、総発電電力量の

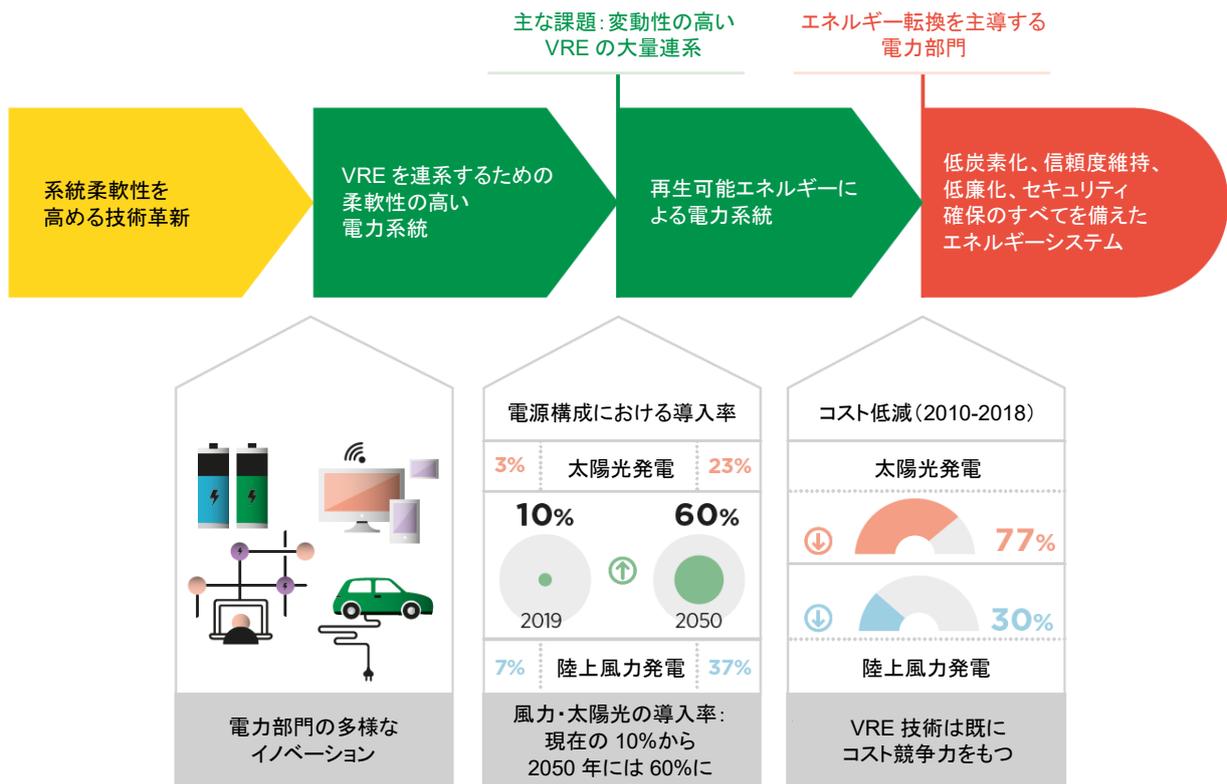
1

60%を占めるものと予測されている。これには、風力発電の年間新規設備容量を2017年の水準から3倍、太陽光発電は2倍にすることが求められる。

さらに、最終消費の主要三部門(産業、建築物と運輸)の総エネルギー需要に占める電力消費の割合を、2015年の約20%から2050年には40%まで倍増させる必要がある。再生可能エネルギー技術の進歩によって、最終消費部門は再生可能エネルギー電気を利用でき、脱炭素化に向かう機会がもたらされる。革新的なビジネスモデルと市場設計を伴ったスマート電化の取り組みは、これらの相乗効果を実現するとともに、新しい形の需要が創出されることで期待される潜在的な柔軟性を実際に獲得する上で、極めて重要である。

再生可能エネルギー技術のさらなるイノベーションは、効率性を高め、特定の気象条件への適応を促進し、住環境との統合(例えば建材一体型太陽電池システム)を強化し、コストを低減させるために必要である。しかし、再生可能エネルギーのイノベーションに加えて、系統連系問題におけるイノベーションにおいても、VRE 導入率向上や、コスト効率の高い方法で系統柔軟性を高めるために、非常に重要になってきている。図1に、よりクリーンで信頼度が高く、セキュリティの保たれたエネルギーシステムへの道筋をまとめる。

図1 低炭素化、低廉化、信頼度維持、セキュリティ確保のすべてを備えたエネルギーシステムへの道筋



VRE の系統連系のための系統柔軟性向上

再生可能エネルギー電源の低コスト化の時代に、エネルギー転換の成功を支えるためには、VRE を可能な限り低コストで大量に系統連系する戦略を実施することになる。現在、G20 諸国の発電電力量に占める VRE 導入率は約 10%である。一部の国々、特に欧州では、VRE 導入率が大幅に上昇している。2017 年の VRE 導入率は、デンマークで 53%、南オーストラリア州で 48%に達しており、リトアニア、アイルランド、スペイン、ドイツでは 20%を上回る。

世界でもっとも大きな電力システムのトップ 3 (中国、インド、米国) では、各国とも VRE 導入率を倍増させ、2022 年までに年間発電電力量のうち 10%以上を占めることが予測される (IRENA, IEA, and REN21, 2018)。インドを例に挙げると、2017 年から 2018 年までの間に、VRE 電源は需要の 7.7%を占めており、2019 年までに VRE 導入率は 9%に達する見通しである。米国では、2017 年の発電電力量のうち風力・太陽光が 7.6%を占めている (EIA, 2018a)。

しかし、世界の発電電力量に占める太陽光・風力発電の導入率は、2050 年までに現在の約 10%から 60%まで拡大させる必要がある (IRENA, 2018b)。風力・太陽光の変動性や不確実性を考慮すると、電力システムに必要な柔軟性とアデカシーを提供する革新的なソリューションが求められる。2015 年から 2050 年までの間に、再生可能エネルギーへの新たな投資が必要であるのと同様に、VRE の系統連系に向けた系統インフラの増強やその他の柔軟性の選択肢に対しても、投資が必要になる可能性がある。この期間における電力システムや柔軟性への投資ニーズは、新規 VRE への投資を除いても約 9 兆～18 兆ドル (約 990～2,000 兆円) まで上昇すると予測される (IRENA, 2018b)。VRE の系統連系は、世界のエネルギー部門における転換の技術的あるいは経済的なボトルネックとなる可能性があるため、投資にあたっては、柔軟性への対応に多大な努力を払うことの重要性を強調する必要がある。

したがって、次の段階では、VRE を大量導入するイノベーションの取り組みに焦点をあて、系統柔軟性を高めるソリューションを通じてこの連系コストを低減することが求められる。柔軟性は、需要と電源の変化に対応する電力システムの能力と定義されるが、通常の電力需要は日毎、季節毎に大きく変化するため、柔軟性は常に系統運用の一部を構成している (IRENA, 2018c)。VRE 導入率が高まるにつれて、運用する系統柔軟性は、電力システムが可能な限り低コストで信頼度の高い需給調整を維持しながら変動性電源を受け入れる能力とも直接関連するようになる。

柔軟性が不十分であると、VRE 電源の出力が少ない時期で電力システムが十分な安定容量を増強できない場合に負荷制限を受けたり、VRE の出力が多い時期で他の電源が急速に出力を低下できない場合に VRE の出力抑制を引き起こす可能性がある。そのため、新規 VRE の増分の運用価値が低下し、予備力やピーク需要に対応するために新たな安定容量が必要となり、運用コストが上昇する可能性がある。したがって、このような状況における柔軟性とは、ごく短期から長期まで、さまざまなタイムスケールにおいて VRE 電源が電力システムにもたらず変動性や不確実性に対処し、VRE の出力抑制を回避して、すべてのエネルギー需要を需要家に確実に供給する電力システムの能力を表す。 (IRENA, 2018c)。

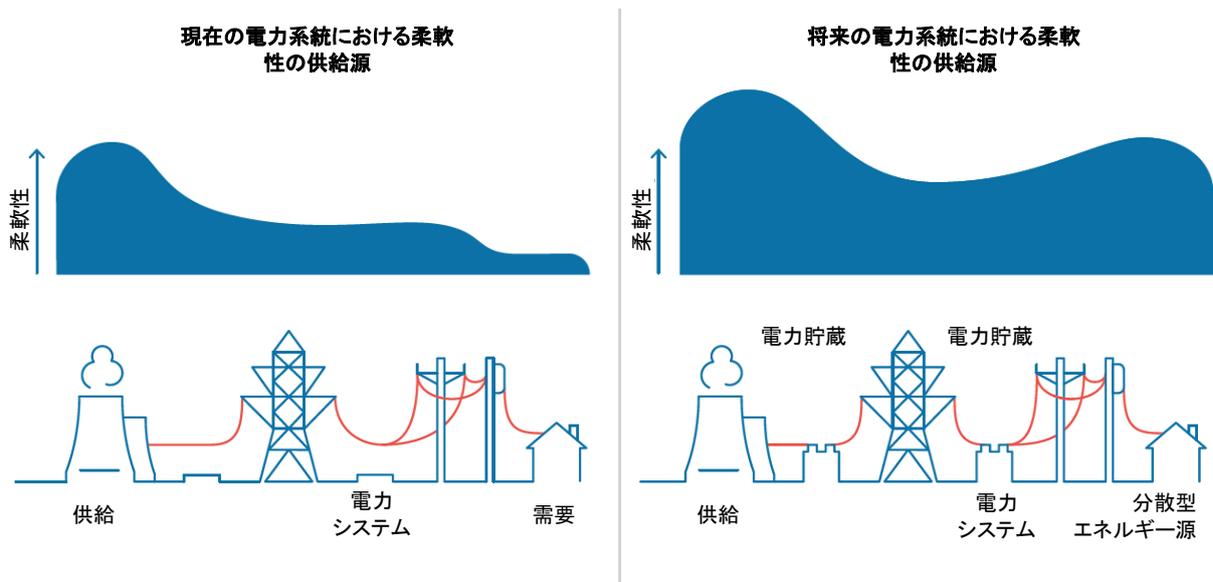
これまで、従来型の電力システムが供給側が需要に応じて電源調整を行うことで柔軟性を提供しており、需要側は

1

ほとんど応答性がないため柔軟性の提供はごく僅かであった。イノベーションによって、供給側の柔軟性がさらに向上するだけでなく、電力システムのすべてのプレーヤーがそのような柔軟性を提供できるようになる。図 2 に、電源が唯一の柔軟な供給源である電力システムからの脱却と、柔軟性の高い電力システムへの転換の様子を示す。

- **供給側の柔軟性:** 既存の従来型発電所と再生可能エネルギー電源の双方からそれぞれの設備能力の範囲で柔軟性の高い運用によって、供給側の柔軟性をさらに向上していく必要がある。
- **系統柔軟性:** 系統柔軟性は、より大きな系統容量と地域市場の確立により提供される。これにより、複数の制御エリアにまたがるより広域の需給調整エリアで、あるいは大陸全域で、電力がより容易に輸送できるようになる。このように、より広い地理的範囲で気象と資源の多様性を活かすことで、需給バランスをとることができる。配電網の系統容量や管理もまた、より多くの再生可能エネルギーを配電網に接続するために重要である。

図 2 イノベーションにより広がる電力部門全体の新たな柔軟性の選択肢



- **需要側の柔軟性:** 需要側(デマンドサイド)では、屋根置き太陽電池、マイクロ風車、蓄電池システム、ミニグリッド、プラグイン型電気自動車などの分散型エネルギー源が登場している。これらが電力システムへ活発に参加することにより、系統柔軟性が大幅に高まる可能性がある。運輸、建築や産業部門といった最終消費部門の電化は、デマンドレスポンス・プログラム、価格弾力性やセクターカップリングといったスマート技術で管理することにより、VREの系統連系に向けた新たな柔軟性の機会が開かれる。分散型エネルギー源をサポートするデジタル技術が登場しており、系統状況にตอบสนองして電力システムに種々のサービスを提供する柔軟性が提供できるようになっている。
- **大容量電力貯蔵の柔軟性:** エネルギー貯蔵技術は、エネルギー部門全体に対する柔軟性供給源であり、VRE 大量導入を実現する大きな可能性を秘めている。供給側では、電力用蓄電池や「power-to-X」と呼ばれる応用技術(例:P2H(電力から熱への変換)、P2H2(電力から水素への変換))によって、VRE 電源に接続して余剰発電を貯蔵し、柔軟性を高めることが可能である。需要側では、負荷が適切に管理されている

場合、貯蔵技術は最終消費部門の電化を直接的・間接的に進め、相当の柔軟性を提供することができる。あるいは、そのような目的で電力系統に接続されることで、貯蔵技術は系統柔軟性を向上させ、系統混雑を緩和することができる。

系統柔軟性を高め、VRE を高い導入率で連系するための最適な戦略は、一定ではない。また、電力需要の伸び率、既存の系統の系統連系の度合いや、国内の天然資源など、各国の状況によって戦略はさまざまである。各種のさまざまな一連のイノベーションが、既にさまざまな電力系統に採用されている。

イノベーションは、さまざまな電力系統の状況に応じて系統柔軟性を高め VRE の連系コストを低減する上で、また、発電事業者から需要家に至る電力バリューチェーンのさまざまなプレーヤーにとっての新たな付加価値を創出する上で、そのソリューションを開発し、導入するために非常に重要である。

イノベーションの紹介

1.3 デンマーク、ドイツ、ポルトガル、スペイン、ウルグアイなどの国々では、系統内の VRE 導入率が年間で 25% を超えても管理できることが実証されている。地域内の一部、さらには国全体においても、短期間で VRE 導入率を 100% に近づけることに成功した事例が増えている (IRENA, 2018a)。以下の表に、系統柔軟性と VRE 導入率を高めるためにさまざまな電力系統が採用しているイノベーションをまとめる。

デンマーク

VRE 導入率

2014 年以來 40% を超え、2017 年には 53% に到達 (IEEFA, 2018)。その大半は風力発電による。

目標

2050 年までに、エネルギー部門における再生可能エネルギー率を 100% にする。そのうちの 50% は風力発電による。

課題

- 需給調整により、無風時も利用可能なベースロード電力を十分確保する。
- 現在、大量の風力発電による電力が低価格またはマイナス価格で販売されているため (Zaman, 2018)、風力発電の出力が多い期間も、風力発電の電力の価値を維持する。

導入または計画されているイノベーション

- デンマークは豊富な地域間連系線によって、風力発電の大量導入を実現した。デンマークは余剰風力エネルギーを北欧諸国に主に輸出しており、北欧諸国は水力発電の代わりにその電力を利用することで、貯水池の水を節約している。デンマークの国内送電網は強固であり、他のスカンジナビア諸国やドイツとの連系容量は、6.5 GW のピーク負荷とほぼ同量である (輸入容量は、ドイツから 2.2 GW、スウェーデンから 2 GW、ノルウェーから 1.6 GW)。
- デンマークの送電系統運用者 (TSO) の最優先事項は、デマンドレスポンスの方策、熱供給部門の電化、スマートグリッド、圧縮空気エネルギー貯蔵の開発である (SEDC, 2017)。
- 従来型電源の柔軟性を高め、電源の変動性によりよく対処するために需給調整を担う商品を再定義するよう、市場設計が変化してきている。石炭火力発電所は、柔軟性を高め、最低負荷を 50% から 20% まで低減するよう設備改良されている。
- 先進的な気象予測が系統運用に導入されており、より正確な予測が 5 分毎に更新されている。



アイルランド共和国および北アイルランド

VRE 導入率

VRE は 2017 年の電力需要の 29.7%を占め、そのほとんど(26.4%)は風力発電によるものである。2015 年 1 月、アイルランドでは風力発電の最大瞬間導入率 66.2%が記録された。

目標

2020 年までに、風力発電を主とした再生可能エネルギー導入率を 40%にする。

課題

- 連系線容量が限られているため、電力系統はほぼ孤立系統となっている。
- 風力発電は、系統安定度を維持するために出力抑制されている。これは、系統の非同期率の上限やその他の系統制約によるものである。出力抑制は、2017 年には風力発電の総発電電力量の 4%に達している。

導入または計画されているイノベーション

- 同期機のように応答できない VRE 電源の導入を増やすために、一連のアンシラリーサービスを定義し、アンシラリーサービス市場を再設計する(Zaman, 2018)。
- 系統インフラの増強: アイルランド共和国は、英国との地域間連系線を強化する送電計画を策定している。北アイルランドとスコットランド間、アイルランドとウェールズ間の連系が、現在実施されている。
- デマンドサイドマネジメントと蓄電池貯蔵プロジェクトにより、信頼度の高い系統運用が確保されると期待されている(EirGrid, 2016)。

テキサス州電力信頼度評議会(ERCOT)

VRE 導入率

テキサスは、米国有数の風力発電容量を誇る州であり、風力発電は 2017 年の電源構成のうち 14.8%を占める(US DOE, 2018)。2016 年の ERCOT の電源構成に占める太陽光発電の割合は 1%である(Seel et al., 2018)。ERCOT は、2018 年から 2019 年に、9 GW の容量拡大を計画しており、2019 年末までに VRE 全体の導入率を 40%拡大し、29 GW に引き上げる見込みである。

課題

- 連系線容量が限られているため、ERCOT エリアはほぼ孤立系統となっている。

- 送電制約があり、また電源の柔軟性も低いことから、信頼度とセキュリティの高いシステムを維持するために、風力発電の出力抑制が必要になる。
- 風力発電と太陽光発電のポテンシャルが最も高い地域は、需要の中心地から離れた地点にあり、利用可能な接続は非常に限られている。

導入または計画されているイノベーション

- 既存の送電線の増強だけでなく、新たな送電線の建設を含む、大規模な送電計画の策定。
- テキサス州公益事業委員会は ERCOT と協議し、競争的再生可能エネルギーゾーン(Competitive Renewable Energy Zone: CREZ)を5カ所設定し、信頼度と経済性を維持しながら CREZ より需要家に再生可能エネルギーによる電力を供給するための送電計画の策定を支援した。CREZ の導入により、テキサス州の系統に 18 GW を超える風力発電設備容量が新たに追加され、出力抑制や送電混雑などの技術的な問題の解決に役立った(ACEG, 2017)。
- 風力発電を含むより多くの電源が、前日市場とリアルタイム市場に参加できるよう市場設計が変更され、すべてのプレーヤーが負荷と電源の変動に対処する責務を負った。
- 予測誤差を最小限に抑えるために、リアルタイム需給調整市場は、15分から5分に短縮された。このソリューションにはアンシラリーサービス調達量の連続的な微調整も含まれており、再生可能エネルギー発電事業者にも一次周波数応答サービスの提供が求められる(Du et al., 2017)。

カリフォルニア州

VRE 導入率

2017年の電源構成のうち約20%は、風力発電と太陽光発電によるものであった(CEC, 2018)。系統には大量の分散型再生可能エネルギー源が導入されており、屋上太陽電池容量は5,900 MWである。

目標

再生可能エネルギー電源の比率を2020年までに33%、2026年までに50%、2030年までに60%にする(Roberts, 2018)。

課題

- 再生可能エネルギーの過剰供給と系統混雑が、出力抑制につながる。
- 分散型太陽光発電の増加により、朝方と夕方に出力変化速度が急激に変化する。

導入または計画されているイノベーション

- 市場設計: 系統運用者は、夕方の急速な出力変化に対処するため、柔軟性のある出力調整商品を開発している。これは、出力変化が少ない時間帯も発電事業者が一定量の容量を待機状態で維持することに対して報酬を支払い、出力変化が急激な時間帯に系統運用者の要求(ディスパッチ)に応じて利用できるようにするものである(Zaman, 2018)。
- エネルギー貯蔵: 柔軟性を高めるソリューションの一環として、カリフォルニア州では、2020年末までに送電網と配電網全体、ならびに需要家側で1,325 GWの貯蔵調達目標を達成するための政策を施行している。パンフィック・ガス&エレクトリック(PG&E)社の4件のエネルギー貯蔵プロジェクトは、2018年11月にカリフォルニア公益事業委員会により承認された。合計567 MW、2,270 MWhの電力貯蔵(Bade, 2018)が可能な、過去に例を見ない世界最大のエネルギー貯蔵契約である。
- 地域のエネルギーインバランス市場: 2014年に、系統運用者は、地域エネルギーインバランス市場の導入を開始した。これにより、隣接する需給調整機関は、より広範な地域にわたり予備力を共有し、再生可能エネルギー電源を連系できる。これは、地域市場が過剰供給を緩和するのに役立ち、カリフォルニア州とそれに隣接する需給調整市場における出力抑制を削減する可能性が期待されている(PacifiCorp, 2018)。



南オーストラリア州*(オーストラリア)

VRE 導入率

2017 年の発電電力量では、風力発電と太陽光発電が 48.4%を占めた。そのうち風力が 39.2%、屋上太陽光発電が 9.2%だった。30%以上の世帯が太陽電池を設置しており、その合計は 781 MW に上る。

目標

電源構成に占める再生可能エネルギーの導入率を 2020 年までに 50%、2025 年までに 75%(Morton, 2018)にする。

課題

電力システムのセキュリティを保つために必要な適切な水準の系統信頼度と慣性は、同期発電機によって提供される。2016 年に南オーストラリア州は異常気象に見舞われた。暴風雨により電力システムの一部が系統崩壊し、連鎖的被害と大規模なブラックアウトが引き起こされた。

導入または計画されているイノベーション

- エネルギー貯蔵:2017 年に、南オーストラリア州は、100 MW / 129 MWh の蓄電池システムを設置した。この蓄電池へは、ホーンズデール(Hornsedale)ウインドファームからの再生可能エネルギーを利用して充電が行われる。この貯蔵システムはピーク時の電力供給を行っており、南オーストラリア州の電力インフラ運用の信頼度維持をサポートし、需要家に対するアンシラリーサービスシステムのコストを大幅に削減している。
- 系統柔軟性の選択肢を広げる最近の取り組みとして、デマンドサイドマネジメントの契約が 1,000MW まで積み上がり、833 MW の柔軟性の高い既存ガス火力の発電所が市場に復帰するとともに、最大 10 時間分の貯蔵容量を備えた柔軟性の高い太陽熱発電所が建設された。
- 地域間連系線の大幅な増強が計画されている(現在の南オーストラリア州とビクトリア州間の連系容量を 2 倍以上にするために、南オーストラリア州とニューサウスウェールズ州間の地域間連系線を新たに追加する計画)。

* 南オーストラリアの系統は、オーストラリアの全国電力市場を構成する 5 つのエリアの 1 つ(他はクイーンズランド、ニューサウスウェールズ、ビクトリア、タスマニア)。

ウルグアイ

VRE 導入率

2017年の発電電力量のうち48.4%が風力発電(28%)と太陽光発電によるものであった。水力発電とバイオマスを含算すると、再生可能エネルギー電源の総発電電力量は98%を占める。

目標

柔軟性の高い水力発電

水力発電と風力発電の補完的な電源プロファイル

課題

- 風力発電が2013年から2014年にかけて8倍に急増したため、ウルグアイの主な課題は、短期的な変動性の増大を前提として系統信頼度を維持することだった。
- バイオマスが年間を通じてベースロードとして稼働し、風力発電の導入量が最低需要を超えるため、VREの出力抑制が大きな課題となっている。余剰電力は、アルゼンチン-ブラジル間の2.57 GWの連系線を通じて輸出可能である。ただし、近隣諸国との間での国境を超えた活発な市場は存在しない。

導入または計画されているイノベーション

- TSOは、短期的な出力の不安定さと需給調整ニーズを管理するために、自動電源制御装置に投資した。
- 電力需要を増やし出力抑制を削減するために、P2X(電力から他のエネルギー媒体への変換)の選択肢、特にP2H(電力から熱への変換)が検討されている。

ドイツ

VRE 導入率

2017年の変動性風力発電と太陽光発電は、25%を占めた。再生可能エネルギー(水力、風力、太陽光、バイオマス)の総発電電力量は、前年比15%増加し210 TWhで、2017年の総発電電力量の38.2%を占めた(Fraunhofer ISE, 2018)。

目標

2030年までに電力に占める再生可能エネルギーの割合を65%にする。

課題

- 主な課題は、系統安定度を維持し、送電網の障壁を解決するための風力発電の出力抑制である。特に風力発電所の大半が位置する北部で大量の出力抑制が行われており、これは主に北部と南部間の系統混雑が原因である。再生可能エネルギー発電事業者には、出力抑制中の損失収入がほぼ補償される。系統運用者は南部の発電所に再給電指令を発し、増加した電力需要を満たすために出力を上昇させるよう求められるが、一方で北部との連系線は混雑したままである。再給電による新たな運用コストは補償の対象となるため、電力系統にとって非常にコストのかかる手続きとなる。
- 2017年に、ドイツでは前日卸電力価格で144時間にわたるネガティブプライスを記録した。

導入または計画されているイノベーション

- 北部と南部の間の新たな送電容量の確保を主とする系統増強。出力抑制と再給電、ループフローを回避するため、南北間で 8 GW の新たな直流送電線が計画されている。一部の近隣諸国との新たな連系容量が計画されている。
- 配電系統運用者 (DSO) と TSO に対して、再生可能エネルギー電源を受け入れるために系統容量を拡大することが、エネルギー法によって求められている。ただし、総発電電力量の最大 3% までの出力抑制は認められている。
- 化石燃料発電所、特にコージェネレーション (コジェネ、熱電併給) を、送電混雑管理の手段として現在以上に活用する必要がある。
- ドイツの 4 つの TSO 間の協力により、再給電のニーズが減少し、柔軟性が高まっている。
- ドイツでは、再生可能エネルギーの影響を具体的に組み込んだ改良された予測モデルと、改良された前日気象予測の活用が既に始まっている。
- 柔軟性の促進に向けた市場設計の変革
 - 卸売市場での自由価格形成 (価格上限なし)
 - 需給スケジュールを維持する義務の強化
 - 取引期間および需給調整期間を 15 分へ短縮
 - ネガティブプライスの導入
 - 新規供給業者に対する需給調整市場の開放
 - アグリゲーターに対するルール
 - スマートメーターの段階的導入
 - コジェネが持つ柔軟性への投資 (EPE and BMWi, 2017)

インド・タミルナードゥ州

VRE 導入率

2016 年から 2017 年の総設備容量の 32% を占め、そのうち風力発電と太陽光発電は 14% にあたる。

目標

風力発電と太陽光発電の導入率を、2021 年から 2022 年までに 17.5%、2027 年までに 21% まで高める (CEA, 2018)

課題

- 南インドの系統容量が風力発電を域外へ輸送するのに不十分であるため、出力抑制をもたらしている。
- 周波数変動が増大している。

導入または計画されているイノベーション

- 市場設計: ここ 10 年、インドは州際連系線の強化と共に、統一された全国的な系統へと徐々に移行している。
- バングラデシュ、ブータン、ネパールとの連系が強化されている。スリランカとの海底ケーブルによる連系も検討されている。
- タミルナードゥ州は、クンダー揚水発電電力貯蔵 (500 MW) プロジェクトの実現可能性を検討している。
- 系統に既に存在する柔軟性の高い電源が、実現に向けての重要な手段となっている。

オーストラリア、タスマニア州キング島

VRE 導入率

風力発電の導入率は 65%。2013 年に VRE の瞬時導入率 100%を達成。輸入ディーゼル燃料のコスト上昇により、1998 年に 250 kW の風車 3 基が設置され、その後 2013 年に 850 kW の風車 2 基と 3 MW、1.6 MWh の蓄電池システムを設置 (Zaman, 2018)。

目標

100%再生可能エネルギーの電力系統

課題

連系のない小規模系統内で、間欠的な再生可能エネルギー電源の信頼度を確保する。

導入または計画されているイノベーション

- 動的抵抗など、即応性、柔軟性、信頼度の高い負荷システムとの連系
- 適正な供給予備力を動的に管理する高度な制御システム
- すべての火力発電が停止した時も安全な系統運用を確保するためにフライホイール
- 蓄電池: 3 MW が設置され、1.6 MWh の使用可能なエネルギーを貯蔵
- 再生可能エネルギー供給の変動に合わせて需要家の電力需要を制御するスマートグリッド技術の統合 (Hydro Tasmania, 2014)

1.4 イノベーションの動向と未来の電力系統における役割の変化

VRE の政策枠組みは、現在のニーズ (VRE の普及) と将来のニーズ (電力系統への VRE 大量連系) を組み合わせる必要がある。短期改善策と長期的戦略の間に、本質的なトレードオフが存在する。再生可能エネルギーの大量導入と系統連系を目標とする場合、政策立案者が短期改善策に集中しすぎることは望ましくない。代わりに、再生可能エネルギーの導入が成功する時期を見据えて、新たな未来とパラダイムを中心に市場やシステムを設計することが望ましい。

自由化された市場の枠組みであるか中央制御型の電力系統であるかに関わらず、たとえば、系統計画、電力需要の増加プロファイル、認可、託送料金、系統アクセス権、さらには柔軟性を引き出す需給調整サービスや系統サービスの取り扱いなどに対して、大局的な視点を取ることが望ましい。このような未来において大切なのは、どれだけの電力量を発電し消費したかではなく、すべてのプレイヤーが提供する柔軟性を組み合わせ、VRE 電源を基幹にした低炭素化、信頼度維持、低廉化、セキュリティ確保のすべてを備えた運用を実現することである。

数々の変化が既に起こりつつある。

- **電源:** 大規模で柔軟性のない火力発電は、小規模の再生可能エネルギー電源に徐々に置き換えられている。小規模の再生可能エネルギー電源の大半は限界費用ゼロであるが商業的には柔軟性がなく、エネルギー価格変動の影響を受けないものの天候に依存する。短期的には、既存の従来型電源は、より出力変

1

化速度の大きな調整力を提供して増大し続ける残余需要の変動性に対応できるよう、柔軟性を高める必要がある。長期的には、需要管理と系統連系の向上も柔軟性をもたらすものになる。

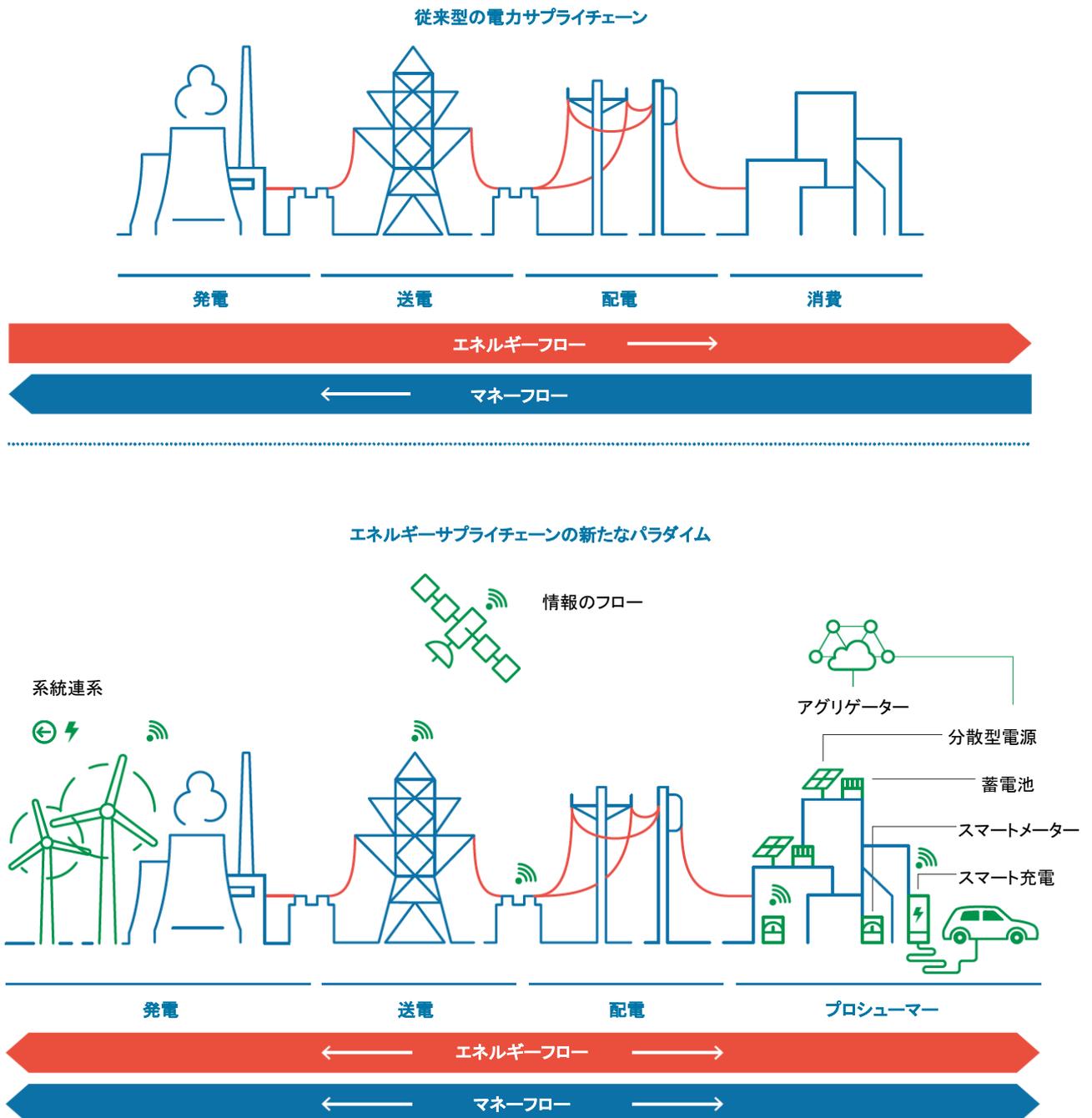
- **セクターカップリングと需要**: 輸送部門(電気自動車)の電化(エレクトリフィケーション)や将来的な熱供給部門の電化など、最終消費部門における電化の傾向はいずれ拡大し、配電網にかかる負荷を大幅に増大させると予想される。これらの新たな負荷が十分管理されない場合、比較的大容量・低電力の負荷になってしまう可能性もあるが、これらは本質的には柔軟性を持っている。電化技術には蓄電池や熱貯蔵が含まれ、それらは電源の稼働率と配電網の容量に合わせて需要パターンを平滑化するのに役立つからである。こうした系統柔軟性に対する最適な貢献は、これらの新たな負荷の統合が適切に管理され、需要家が自身の利用パターンが個人的な選択だけではないということを受容した場合にのみ実現する。
- **エネルギー貯蔵**: 蓄電池技術はますます低廉化している。太陽光発電システムを設置し、自家消費を最大化したいと考えている家庭をはじめとする一般家庭の利用者であっても、経済性というよりは個人的な選好から蓄電池を大量に設置している。DSO は、配電網の増強を避けるために中規模の蓄電池に注目している。また、セクターカップリングの追い風となる電力の変換貯蔵方式(熱変換貯蔵や水素変換貯蔵)が登場してきており、さまざまな形で電量貯蔵をする大きな可能性を秘めている。
- **配電系統**: 負荷を予測し、需給調整に利用可能な容量を提供するという系統容量の「予測・提供」の考え方は、特に電化が進む場合、持続可能ではなくなる。配電系統の電力潮流は、ますます予測しにくくなることが考えられる。また、系統の低圧部分の可視性の向上と改良された制御ツールが、DSO に必要になると予想される。



- **集合化とデマンドレスポンス**: 技術成熟度の向上、アンシラリーサービス商品や市場の活用、新たなビジネスモデルやプラットフォームなど、さまざまな要素がデマンドレスポンスに拡大の余地を与えている。能動的な電力需要家は、電力の消費も発電も行うことからしばしば「プロシューマー(生産消費者)」と呼ばれ、デマンドサイドの柔軟性を開放する大きな可能性を持ち、電力部門の市場動向に変化を引き起こしている。

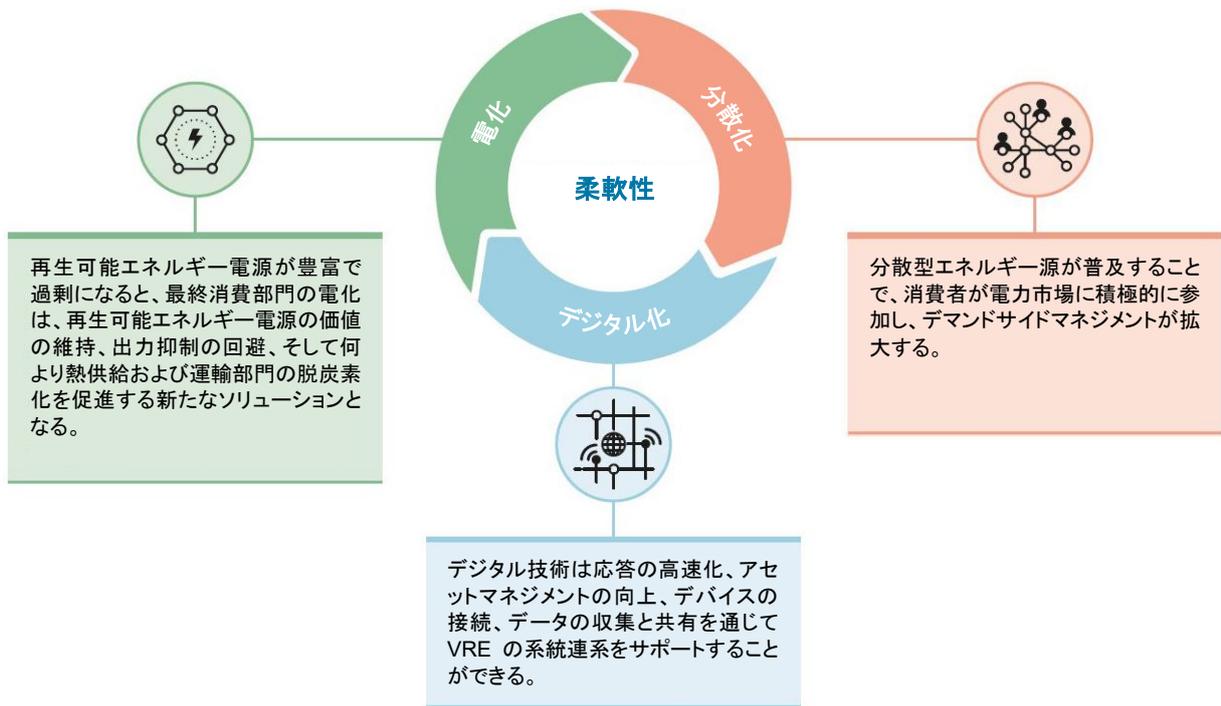
電力系統は既に、数年前とは大きく異なっている(図3を参照)。図4が示すように、1)デジタル化、2)分散化、3)電化という三つの大きなイノベーションの波がエネルギー部門にも到達しており、電力部門における現行の変革は加速している。これらの動向はパラダイムを変革し、大規模なVREの導入に向けて系統柔軟性を拡大している。これらのイノベーションによって各プレイヤーの役割と責任が変化し、この部門への新規参入者に扉が開かれている。

図 3 電力サプライチェーンにおけるイノベーション



1

図 4 イノベーションの動向



電力部門のデジタル化



デジタル化は、データを電力部門の価値に変換すること、と定義できる。発電分野および送電分野で監視や制御にデジタル技術を適用することは、ここ数十年にわたる重要な動向であり、近頃は電力システムのより深部まで導入され始めている(図5を参照)。スマートメーターとセンサーの利用拡大、モノのインターネット(IoT)の適用、人工知能を活用した大量のデータ利用により、電力システムに新たなサービスを提供する機会が生まれている。デジタル技術は、さまざまな形で電力部門の変革を支えている。たとえば、アセットとその性能の監視精度の向上、リアルタイムに近いより高度な運用および制御、新たな市場設計の導入、新たなビジネスモデルの出現である。

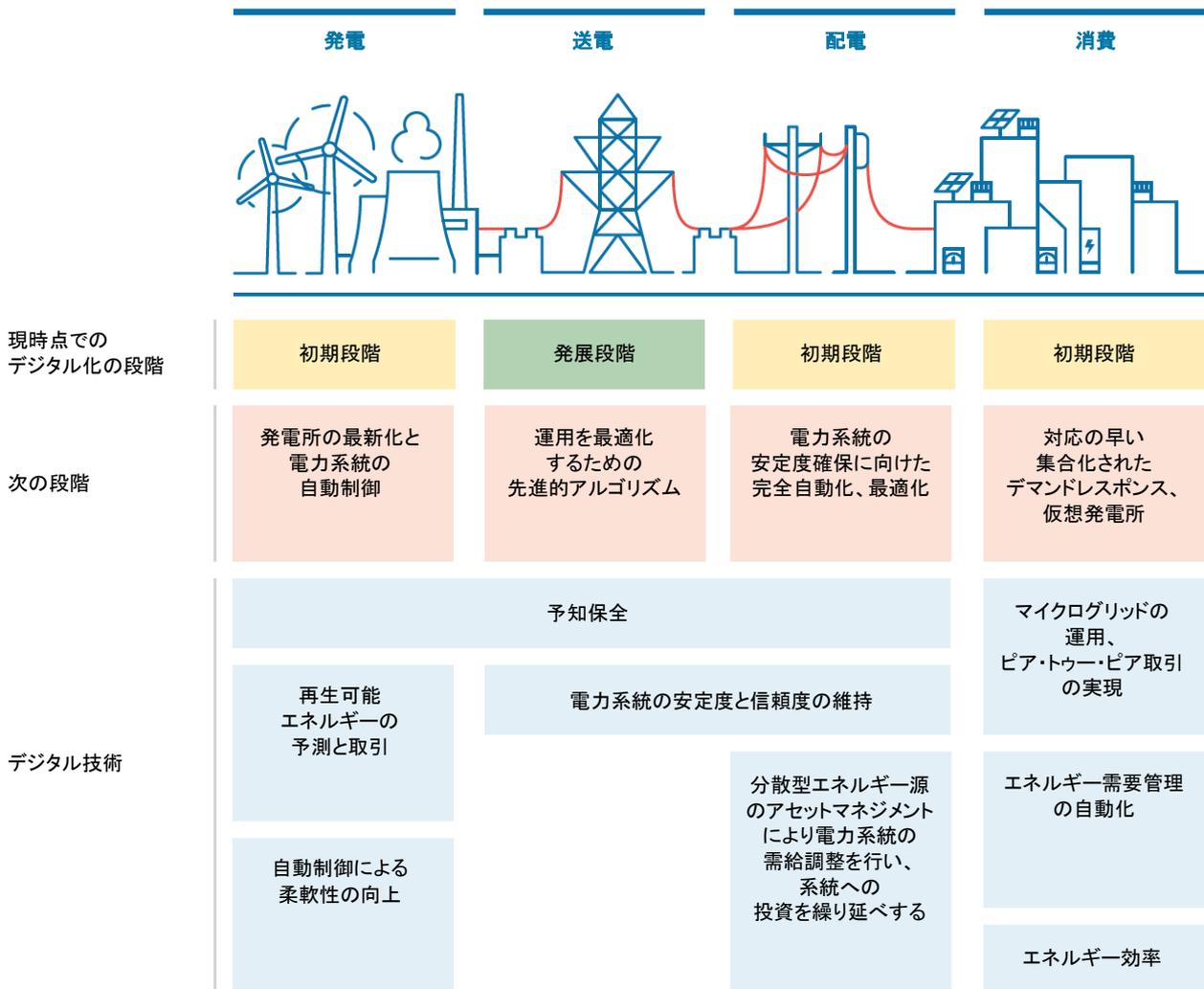
デジタル化の重要性の高まりは、分散化と電化の進展にも起因するものである。分散化により、屋根置き太陽光発電をはじめとする多数の新たな小型発電所が登場することになる。運輸部門と熱供給部門の電化には、電気自動車、ヒートポンプや電気ボイラーなどの大量の新たな負荷が伴う。供給側は分散化により、需要側は電化により登場するこれらすべての新たなアセットは、監視、管理、制御をエネルギー転換の成功のための決定的な要因とするという点で、電力システムに影響を与える。

したがって、デジタル化はエネルギー転換の重要な増幅要素であり、これによって大量のデータ管理と多数の小型発電所を有するシステムの最適化が実現する。通信および制御の進化、そして将来的にはブロックチェーン技術を用いて自動化されたスマート契約により、分散型エネルギー源を「アグリゲーター」がまとめることが可能になる。

分散型電源とそれを可能にする技術は、便利なエネルギーサービスを幅広く提供するだけでなく、有益なデー

タの供給源にもなっている。需要家の利用パターン、負荷のプロファイル、システムの構成要素の性能と障害に関するリアルタイムの詳細情報により、系統運用者による計画と系統運用の改善が可能になる。また、過去の行動パターンに基づいて、分散型電源による発電と消費の予測を強化することも可能になる。これらの機能により、運用コストを上昇させることなく需給の不確実性と関連リスクが低減され、VREの比率を高めた系統運用が可能になる。

図 5 電力系統におけるデジタル技術の台頭





複雑な電力系統は、デジタル化によって多大な恩恵を受ける。なぜなら多くのプレーヤー及びデバイスが電力系統に参加して、電力を供給・消費するためである。デジタル化はデータ管理を可能にし、それにより電力系統の最適化を可能にする。デジタル化は、大規模な電力系統にとっても卸市場の最適化（例えば欧州の Common Grid Model、ENTSO-E の Awareness System、Transparency Platform）にとっても重要なものとなるが、分散型エネルギー源や分散型系統にとっては特に主要な役割を果たす。デジタル化により、分散型エネルギー源の物理的統合が促進され、以前は不可能であった新たな運用形態が実現する。デジタル化によって、需要家の投資や行動（例えば電力不足時の）を中心に、系統内の全プレーヤー間の連携、調整、および相互作用が強化される。

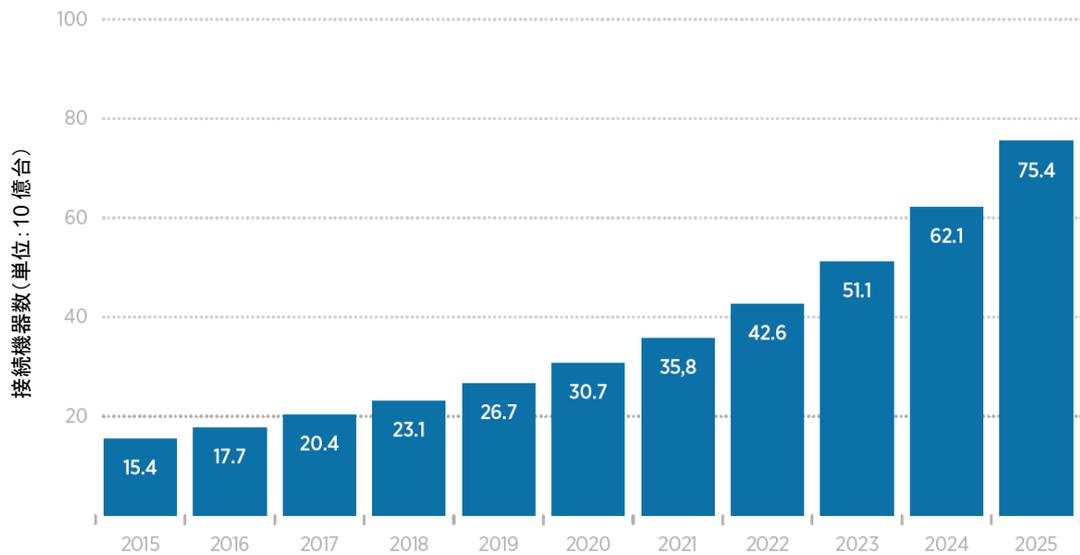
デジタル化は、データを電力部門の価値に変換すること、と定義できる。

■ 電力部門に参入する IT 企業

2025 年までに、世界では 750 億台の電気機器が接続され、世界中でデータを共有し、需要家、製造業者や電気事業者が豊富な情報を提供することが予測されている (Statista、2018)。IoT は人工知能と相まって台頭しており、ビッグデータを活用し、機械学習アルゴリズムに必要となる詳細な情報を提供している。

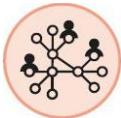
情報通信技術 (ICT) 分野の多数の企業、コンソーシアム、財団や団体が、さまざまな階層 (アプリ、データ、接続、デバイス) で電力部門に参入している。彼らは、需要家への新たなサービス提供、需要管理、エネルギー効率、再生可能エネルギー予測、アセットマネジメント、エネルギー取引、ミニグリッドを運用する IoT 方式 (図 6 を参照) など、電力部門において多様な新たな技術を開発している。

図 6 世界における IoT 接続された機器の台数(単位:10 億台)、2015~2020 年



出所: Statista, 2018.

電力系統の分散化

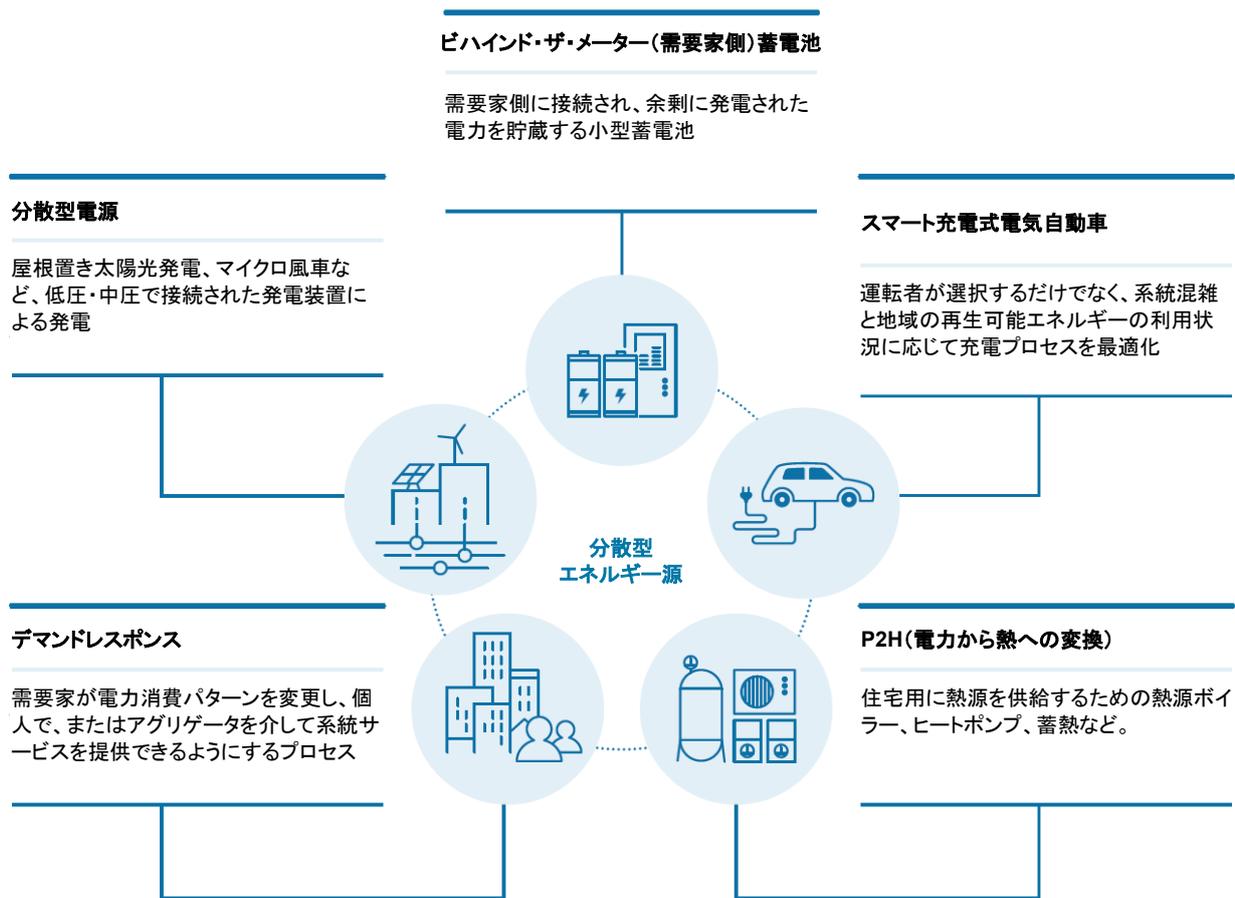


エネルギーの生産や消費に対する個人やコミュニティの決定権が強まっている。屋根置き太陽電池、マイクロ風車、蓄電池システム、プラグイン型電気自動車やデマンドレスポンスなどといった需要家側に接続された分散型エネルギー源が登場し、電力系統を分散化している。現在、ローカルに発電されている電力の消費を最適化することで系統に大きな利点をもたらされ、他のコストのかかる柔軟性対策の必要性が低減できる。

近年、太陽光パネルの設置は劇的に増加している。また、分散型エネルギー貯蔵も活発化している。需要家側の電力貯蔵ビジネスモデルでは、需要家は自宅の屋根置き太陽光パネルで発電された電力を貯蔵し、後から必要に応じて利用したり、系統に販売したりすることができる。図 7 に、電力系統を分散化する分散型エネルギー源を示す。

1

図 7 分散型エネルギー源



■ 新たな需要家と新たなビジネスモデル

分散型電源の増加により、電力の生産や消費に対する個人やコミュニティの決定権が強まっている。需要家は、消費電力量を最適化し、電気料金をより適切に管理する手段を模索している。住宅、商業、産業分野における需要家のエネルギーに関連するニーズは変化している。一般家庭の消費者がスマートホーム機器を利用できるようになり、消費電力量の継続的監視および制御に関連する市場が急拡大している。商業や産業の需要家は、屋根置き太陽光発電などの再生可能エネルギーを利用した電源への切り替え、消費電力量の運用、監視、制御および最適化が可能なスマートデバイスの採用など、電力調達コストを削減する選択肢を検討している。

冷暖房用のサーモスタットやホームセキュリティなどのスマートデバイスは、目新しい分野ではないものの、人気を集めている。単に住宅のエネルギー利用を監視するだけでなく、住宅の消費電力量と、屋根置き太陽光発電などの電源を最適化する高度なデバイスが登場してきてはいるが、それらはまだ比較的高価である。そのような先進的デバイスは、発電された電力を蓄電池に貯蔵したり温水として貯蔵したりするなどして系統への逆流をなくすことにより、住宅用太陽光発電の経済性を高める可能性がある。

エネルギー転換においては、消費者は受動的で身動きの取れない存在から、能動的なプレーヤーへと変化する。今や、消費者は、電力の生産、売買、貯蔵を行うことができ、系統にサービスを提供できるようになり、それによってプロシューマーへと変容を遂げている。デジタル化は、このようなすべての新たな技術を実現するだけで

なく、プロシューマー間の通信を可能にし、系統との取引を最適化する。デジタル化は、分散化と密接に関連しているのである。

しかし、消費者は、抜本的な行動変化や膨大な時間の投資が必要な場合、意思決定において能動的な役割を果たそうとしない可能性がある。消費者は、便益を認識することができ、自動化技術のおかげで容易に価格シグナルに応答することができる場合のみ、意思決定に能動的に関与しようとすると考えられる。そのため、消費者に「既製の」サービスを提供する新たなビジネスモデルが登場しており、消費者が電力部門で活発な役割を果たし、デマンドレスポンスを有効活用することを可能にしている。電力供給者の役割もエネルギーサービス供給者の役割へと進化しており、消費者が必要とする変化に対応している。

スマートデバイスは、エネルギー部門にて新たなビジネスモデルおよびプラットフォームの導入・試験を行う余地を生んでいる。デジタル化とスマートメータリングの拡大により、大量のデータの収集と照合が可能になっている。これにより、電力売買および電力取引システムを開発するための基盤が作られる。デジタル化により、さまざまなステークホルダーとのデータ通信が実現する。デジタル化により、サービスの透明性、メーターの検針、自動化された正確な請求書や見積書の低減または撤廃、人的介入の削減、エネルギー効率、系統運用者による給電指令を改善する即時データなどが生み出される。全プレイヤー間で情報が共有されるこの新たなパラダイムで消費者が直面する主なりスクは、サイバーセキュリティとプライバシーに関連するものである。

■ 配電系統運用者(DSO)の役割の適応

分散型エネルギー源の導入増加と、プロシューマーや能動的消費者などの新たな市場プレイヤーの出現は、新時代の到来を告げると予想される。このような新たな機会を活用し、電力部門の変化と需要家ニーズの変容の両者に対応するために、現在の役割を見直し運用手続きを変革することが DSO にとって必要になると考えられる。DSO に適用される規制枠組みを変更し、分散型エネルギー源という新しいパラダイムに適応した配電システムの運用に向けて、新たなインセンティブを導入することが、転換を成功に導く鍵である。

分散型電源やその他の分散型エネルギー源の台頭により、DSO の役割は今後拡大すると考えられる。DSO は、系統と需要家の双方の利益のために、系統に接続されたアセットを管理しなくなるとなる。DSO は新たな役割において、最終消費部門の電化率を想定し(電気自動車用の充電ステーションの事例に見られるように)、新たな負荷電力を供給しながら、系統の利用を最適化し、アセットへの新規投資を回避するために分散型エネルギー源を運用する(もしくは、少なくとも分散型エネルギー源に高分解能の価格シグナルを提供する)が必要になる。関連する取組みの例として、2016年11月の欧州委員会の提案書では、配電会社が系統利用者から柔軟性サービスを調達することを規制により可能にし、促進することが加盟国に義務付けられている(EC, 2016a)。

■ 送電系統運用者(TSO)の新たな課題と責任

系統運用者にとってイノベーションの重要な要素は、火力発電(再生可能エネルギーの増加に伴い、系統における重要度は今後低下する)に依存するのではなく、系統サービスおよび柔軟性(デマンドサイドマネジメント、その他の分散型エネルギー源など)の新たな供給源を利用できるようにすることである。

1

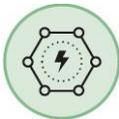
電力系統の分散化に伴い、最適な系統運用と、これらの新たな供給源と電力系統との統合を確保するために、マイクロレベルの監視と制御が必要とされる。

同時に、柔軟性の供給源も分散化しつつある。この柔軟性を系統運用と市場に導入できるかは、新たな小規模なデマンドレスポンスと蓄電池の潜在力を発揮させることができるか否かにかかっている。分散型エネルギー源は柔軟性があるだけでなく、それによって送電系統への新規投資が回避でき、系統運用者には短期に享受できる便益もたらされる。また、分散型エネルギー源によって、系統運用者が再給電指令を通じた電力系統のセキュリティと信頼度を確保するために介入することを回避できるようになる。

これらすべては電力系統にとって新たなコストとなるが、既に系統に接続されているあらゆる装置を活用することで削減が可能である。柔軟性を供給する小型電源の監視、利用、制御には、デジタル化とIoTが不可欠である。DSOとの連携の強化は、配電系統に接続された電源の可視化を強化するために、系統運用者にとって重要である。

ただし、もう一つの前提条件は、需要家が自身のアセットが柔軟に利用される可能性があることを受け入れることである。再生可能エネルギーが大量導入された系統では、柔軟性に報酬を与える発展の枠組みや市場設計が不可欠である。そして、これらのインセンティブを系統に接続されているすべてのプレイヤーが利用できるようにすることが重要である。規制モデルが制定されるまで需要家の受容や関与は想定できないため、自動制御のための正確なデジタルアルゴリズムを構築することはできない。

最終消費部門の電化



最終消費部門の電化は、再生可能エネルギー源から作られた安価な電力が利用しやすくなっていることや、それによる最終消費部門の脱炭素化の可能性のほか、石油およびディーゼル燃料の輸入への過度の依存に対する国家的なエネルギー安全保障の懸念によって牽引されている。スマートに行えば、電化によってこれらの新たな負荷を柔軟性の供給源に変換することができる。

スマートグリッド戦略を伴わない電化は、電力供給コストを増大させ、電力の安定供給を損なう可能性さえある。幸いなことに、電化には再生可能エネルギーの変動性を十分に補完する特徴がある。スマートに計画すれば、電化は、再生可能エネルギーを中心とした系統全体の新たな設計につながり、系統全体の持続可能性を高めるものとなる。電化と再生可能エネルギーの相乗効果を生み出すための戦略が求められる。

最終消費部門の電化における現在の動向は、デジタル化の動向と連動しており、家電製品のさらなるスマート化と接続が進行している。これにより電力需要の特徴が複雑化し、明確に定められたピーク負荷に対処するよう設計された電力系統から、需要を柔軟性の供給源として最大限に活用する電力系統への抜本的な移行が促進される可能性がある。

例として、電気自動車は運輸業界を変革するだけでなく、電力市場の再構築を引き起こそうとしている。電気自動車の台数増加によって、さらなるVREの連系と電力部門の脱炭素化に向けた課題と機会が提供されている。2018年に、乗用車としての世界の電気自動車利用台数は400万台を超え、そのうちの40%は中国で利用さ

れている(BNEF, 2018)。しかし400万台の電気自動車は年間で約1.2TWhの電力を消費する。世界の電力需要と比較すれば大したものではないが、スマートに管理されなければ、配電負荷に影響を与える可能性がある。一方、車両がスマートに充電された場合、配電網と電力システム全体が、系統に接続された電気自動車の小型蓄電池から大きな恩恵を受けることができる。

2017年に、電気自動車の新規登録台数は世界最高記録を達成し、全世界で100万台以上が販売された。これは、自動車販売全体の約1.3%を占める。中国の電気自動車販売は前年比で56%増加し、2018年に電気自動車の利用台数は合計105万台に到達した(NBS, 2018; CAM, 2019)。なお、電力を水素や熱などに変換する産業応用が始まっており、オフピーク時のVREによる電力を吸収することが可能である。

■ 電力部門に参入する石油・ガス企業

さまざまな産業が最終消費部門の電化の取り組みを推進するにつれ、石油とガスの需要は減少している。これに大きな影響を受けて、石油・ガス会社は電力部門に移行しつつある。電力部門では、需要家への新たなサービスの提供や運輸部門の電化といった点で、石油・ガス会社にとって興味深い事業機会が生まれている。例として、ガソリンスタンドには電気自動車用の充電装置が設置されている。

また、電力を利用した電気分解による水素生成の普及は、熱供給部門、運輸部門、産業部門の電化を間接的に進める可能性があり、特にガス会社は既存の天然ガスシステムを用いて水素の貯蔵および輸送ができるため、優位性が高い。天然ガスインフラを水素輸送に適ささせるための投資は、ほとんど不要である。既存のガスパイプラインは、まったく手を加えなくても10%~20%の混合水素に対応することができる(ARENA, 2018)。再生可能エネルギーによる電力を利用して生成される場合、水素はこれらの部門の脱炭素化に重要な役割を果たす。水素は発電にも利用可能である。パイプラインへのアクセスはもちろん、石油・ガス部門で構築されたノウハウにより、ガス会社はこの新たなビジネスにおいて卓越した優位性を得ることができる。

ロイヤル・ダッチ・シェル(Royal Dutch Shell)社は、石油・ガス会社が電力部門に参入した典型的な例である。2018年2月に、シェル社は英国の独立系家庭用エネルギーおよびブロードバンドサプライヤーであるファースト・ユーティリティ(First Utility)社を買収してシェル社の新規エネルギー部門の完全子会社とし、エネルギーサービス供給事業に参入した(Shell, 2018)。さらに、シェル社は2017年に、欧州有数の電気自動車充電システムの所有者であるニューモーション(NewMotion)社を買収した(Shell, 2017)。同社はオランダに拠点を置き、西欧諸国で30,000カ所を超える充電ステーションを運営している。西欧諸国では2030年までに100万から300万カ所の公共充電ステーションが必要になると見積もられており(De Clercq and Steitz, 2017)、シェル社はこの分野への参入を目指している。

2016年8月に、フランスのトタル(Total)社は蓄電池の事業機会に参入する手段として、同国の蓄電池メーカーであるサフト・グループ(Saft Groupe)を11億ドルで買収した(Total, 2016)。それ以前の2011年に、トタル社は世界有数の太陽光パネルメーカーであるサンパワー(SunPower)社を買収している。またトタル社は最近、トタル・スプリング(Total Spring)という新規事業を設立して小売電力市場に参入し、規制価格よりも10%割安の料金を提供している(Felix, 2017)。

1

石油・ガス市場の主要プレーヤーであるスペインのレプソル(Repsol)社は、最近になって企業戦略を見直し、ナトゥルジー(Naturgy)社(旧ガス・ナトゥラル・フェノーサ Gas Natural Fenosa)からの投資引き上げに続き、エネルギー転換に関連する新規事業を開発している。電力部門に新規参入したレプソル社は、264 MW の太陽光発電プロジェクトを買収して電力小売会社を設立、またスペインのホームオートメーション会社と電気自動車の開発に特化した米国のスタートアップ企業の両社に投資を行った。また、再生可能水素の製造を推進するために、エナガス(Enagas)社(スペインのガス輸送システム運用者)と提携し、ハイブリッドカーシェアリング事業の立ち上げに参加している(El Periódico de la Energía, 2018)

ただし、石油・ガス産業は電力部門とは大きく異なる。石油とガスはいずれも世界市場で取引される商品であり、地政学的影響に大きく左右されるが、電力の発電と消費は地域レベルの市場か、せいぜい大陸レベルの市場に限定される。地理的範囲においても収益においても、石油・ガス会社と電力会社の規模は異なる。また、電力事業は、事業機会がはるかに大きい石油・ガス産業と比較して、規制が厳しい部門でもある。



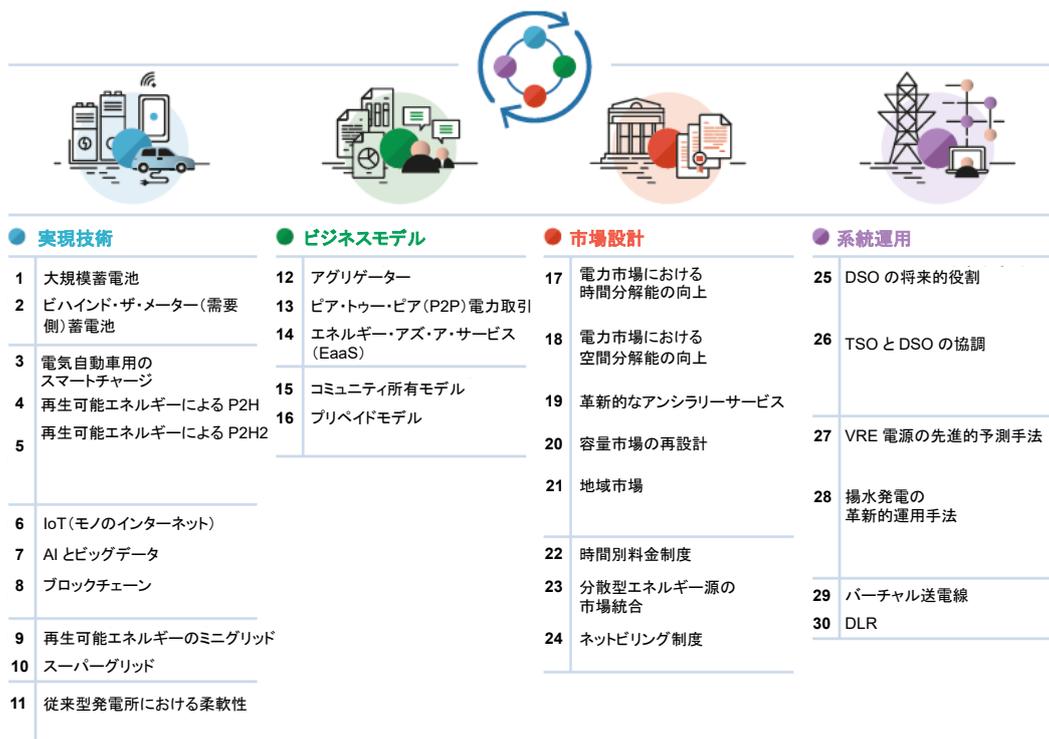
2 VRE 導入に向けた イノベーションの展望



急速なコスト低減により、太陽光発電と風力発電は、電力部門で進行するエネルギー転換の中核を成している。IRENA の分析(2018b)によると、エネルギー部門の脱炭素化を可能にするには、世界の電源における VRE 導入率を 2015 年の 4.5%から 2050 年までに 60%以上に増加させる必要がある。VRE 導入率を拡大する多くの革新的ソリューションが、さまざまな国や地域で試行され、実施されている。しかし、電源構成の中で高い VRE 比率を達成しつつあるのはほんの一握りの国々のみであり、特定の系統運用方法のみがそれを可能にしている。このようなエネルギー転換に伴う課題はきわめて大きい。

IRENA は、VRE の大量導入を促進するイノベーションの展望について調査を行っており、イノベーションは 4 つの観点(実現技術、ビジネスモデル、市場設計、系統運用)から 30 種類に分類されている(図 8 を参照)。

図 8 イノベーションの全体像



2

- **実現技術**: インフラ開発の実現技術は、再生可能エネルギーの導入を促進するために重要な役割を果たす。蓄電池貯蔵は、デジタル技術と共に電力部門のパラダイムを変化させ、系統柔軟性を引き出す多様な新規応用技術の登場を可能にする。最終消費部門のスマートな電化(エレクトリフィケーション)の実現により、再生可能エネルギーの新たな市場だけでなく、将来的に柔軟性のある需要が生まれてくる可能性がある。電力系統が電化に対応するには柔軟性が必要であるが、電化をスマートに管理すればさらに柔軟性を高めることができる。
- **ビジネスモデル**: これらの技術により生み出される新たな価値を収益化し市場投入を実現するには、ビジネスモデルが不可欠である。分散型エネルギー源の導入を踏まえ、いくつかの革新的なビジネスモデルが需要家側で登場している。それとともに、オフグリッド地域や人口密集地域など、選択肢の限られた地域への再生可能エネルギー供給を可能にする革新的な方法も生まれている。
- **市場設計**: 規制や市場設計におけるイノベーションは必要であるが、民間投資を保証する安定かつ予測可能な規制と、イノベーションを可能にする柔軟な規制との間でバランスがとれていることが望ましい。同時に、規制におけるイノベーションの速度は、ビジネスモデルと技術におけるイノベーションの速度と一致している必要がある。エネルギー転換を促進し、価値の創造と適切な収益源を生み出すために、市場設計を新たな前提条件に適合させることが重要になる。系統の持つ柔軟性のポテンシャルをすべて引き出すには、卸市場と小売市場の両者の革新が必要である。
- **系統運用**: 新たな技術や健全な市場設計が導入されれば、系統運用におけるイノベーションも必要となる。電力系統への VRE 導入率の拡大に呼応して、このようなイノベーションは登場しつつある。これらは、不確実性に対応するイノベーションと、分散型エネルギー源を導入する革新的な系統運用という 2 つのカテゴリに分類される。

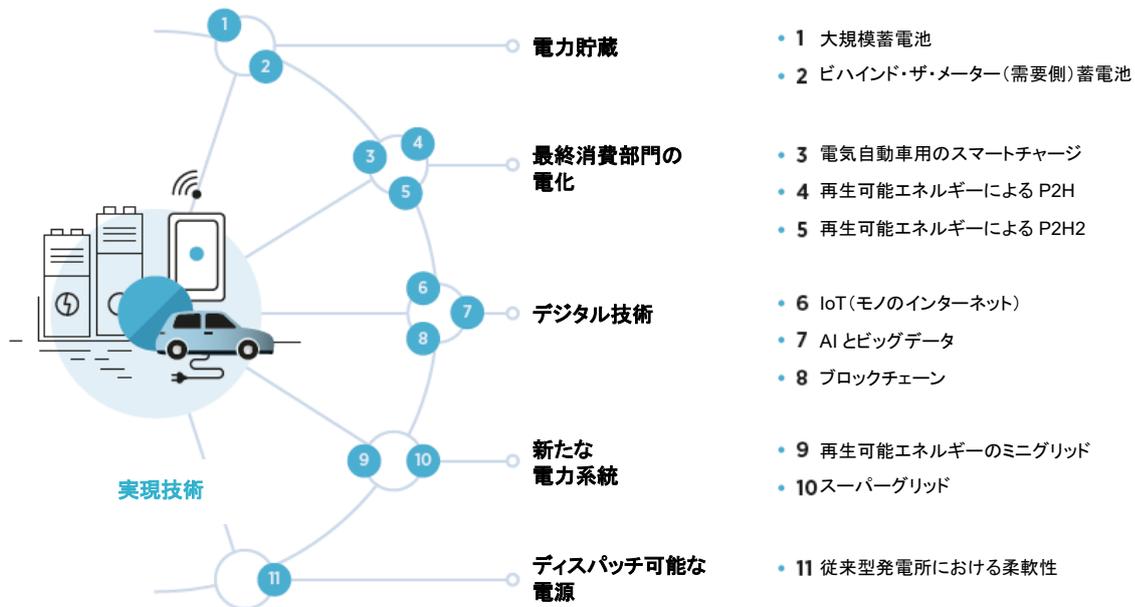
必要とされているイノベーションは、VRE の導入率を拡大するために系統柔軟性を高めることを喫緊の目標とする。しかし、最終目標はエネルギー部門の脱炭素化である。



2.1 実現技術

VRE 発電技術の導入は、実現技術によって促進される。これらの技術には、蓄電池、再生可能エネルギー電力によって他部門の電化を実現する技術、デジタル技術や ICT の開発、スマートグリッド・ソリューションなどが含まれる(図 9 を参照)。これらの開発はいずれも、新たな方法で系統運用し最適化するものであり、再生可能エネルギーの導入拡大に向けた新たな機会をもたらす。

図 9 実現技術におけるイノベーション



2

電力貯蔵

電力貯蔵のコストは引き続き低下しており (IRENA, 2017a)、電力貯蔵の容量 (kWh) という現行用途での導入がいつそう加速するとともに、出力 (kW) 制御による周波数制御サービスという電力システムに対する新たなサービスの供給源ともなりつつある。特に送電制約が大きい系統では、電力貯蔵は系統柔軟性を高める経済的なソリューションを実現する革新的手段となる。電力貯蔵は、特にアンシラリーサービスや残余需要ピークへの対応をサポートするため、電力需要のピーク時だけに運転する発電所への投資を回避し、系統に大きな便益をもたらす可能性がある。このような当初の用途以外にも、各国の電力系統の特性に基づいた革新的な電力貯蔵サービスの展開が進む可能性がある。

イノベーション 1: 大容量蓄電池

内容

大容量蓄電池は主に電力システムを補助するために利用されるが、再生可能エネルギー電源と直接組み合わせることで、より制御可能で安定した電源を提供することもできる。

VRE の系統連系に対する貢献

- 負荷シフト — 余剰発電電力の出力抑制を回避するために蓄電池を充電
- アンシラリーサービスの提供
- 予備力容量の提供
- 孤立系統での信頼度の高い電力供給
- 送配電網の増強に相当する効果

現況

- 世界の大容量蓄電池システムの設備容量: 2017 年中盤に 10 GWh (IRENA, 2017a)
- 大容量蓄電池を利用している主な国々 (2017 年): オーストラリア、中国、ドイツ、イタリア、日本、韓国、英国、米国
- 最も確立された大容量蓄電池方式: リチウムイオン蓄電池が、現在の大容量蓄電池設備容量の 90% 以上を占める (IEA, 2018b)
- 2010 年から 2017 年の間でコスト 80% 減 (IRENA, 2018b)
- 2018 年 11 月に、カリフォルニア州の PG&E 社は、世界で史上最大の蓄電池契約 2 件 (300 MW / 2,270 MWh および 182 MW / 730 MWh) を締結した (Bade, 2018)
- 英国 (National Grid 社) とオランダ (TenneT 社) の送電系統運用者 (TSO) も、需給調整サービスのために大容量蓄電池契約を締結した

イノベーション 2: ビハインド・ザ・メーター (需要家側) 蓄電池

内容

ビハインド・ザ・メーター (需要家側) 蓄電池は、エネルギーが利用される場所、もしくはそれに近接して置かれ、電力会社と需要家の間にある接続点の下流に位置する。需要家側蓄電池は、通常、家庭や職場で利用される。

VRE 導入への寄与

- 局所的な再生可能エネルギー電源の効果的な導入を実現し、分散型電源の便益を実現
- ピーク時負荷特性を平滑化
- 系統柔軟性を生むことで、デマンドレスポンス・サービスを促進するとともに、アンシラリーサービス市場に参入
- 自家消費を最大化することで、分散型再生可能エネルギーのコストを削減

現況

- 小規模蓄電池を利用している主な地域(2017年):ドイツ、イタリア、英国、オーストラリア、日本、オランダ、中国
- ドイツ:蓄電池 100,000 台を設置(2018年8月)、新規設置された屋根置き太陽光発電システムの60%が蓄電池を搭載(IRENA, 2018b)
- 南オーストラリア州政府は、家庭用蓄電池 40,000 台を設置するプログラムを2018年10月に立ち上げた(Skyes, 2018)

最終消費部門の電化

2050年までの世界のエネルギー転換に関するIRENAの分析(IRENA, 2018b)によると、パリ協定に準拠したエネルギーシナリオを達成するためには、最終エネルギー消費総量に占める消費電力量の割合を、2015年の20%から2050年までに40%まで増やす必要がある。別の最近の研究では、50%から60%まで割合を増やすことも可能であることが示唆されている。再生可能エネルギーのコスト低下により、運輸、建築物、産業の最終消費部門では、化石燃料の直接的または間接的な利用から再生可能エネルギー電気への転換に拍車がかかっている。

電化には二通りの道筋がある。ひとつは、再生可能エネルギーによって最終消費部門を脱炭素化することである。もうひとつは、スマートに実現できるのであれば、より多くの再生可能エネルギーを系統連系するための柔軟性の供給源となることである。IRENAのREmapシナリオ*によると、運輸部門における電力の比率は2015年の1%強から2050年には33%まで拡大する。2050年までに、電気自動車の利用台数は10億台を超え、その消費電力量は、現在の世界の電力需要の10%以上に匹敵すると考えられる。建築物部門では、最終エネルギー消費に占める電力の比率は2015年の31%から56%まで増加する可能性があり、産業部門では2015年の27%から43%まで増加すると考えられている。建築物部門においてヒートポンプは重要なソリューションであり、その数は2015年の2,000万台から2050年には2億5,000万台以上に増加させる必要があると考えられる(IRENA, 2018b)。産業部門の電化ソリューションには、機械式蒸気再圧縮(MVR: Mechanical Vapor Recompression)や誘電加熱などがある。再生可能エネルギー電源から生成される水素も、将来的に重要な役割を果たす可能性がある(IRENA, 2018d)。

重要な課題は、電力系統との親和性がある電化を実現することである。つまり、可能であれば、より多くのVREが利用できる時間帯に電力の消費が発生することが望ましく、例えば、理想的にはエアコンは晴天時に稼働することが望ましい。電気自動車は、駐車時には常に充放電のために接続され、系統の種々のサービスのために車載蓄電池が利用されることが望ましく、例えば日中に自宅や職場の駐車場で屋根置き太陽電池から充電するなど、最適な時間帯に充電されることが望ましい。これは充電インフラに大きな影響を及ぼし、また十分なインセンティブを創出するため、充電用電気料金の設定にも大きな影響を及ぼすことになる。

* IRENAの「REmapシナリオ」におけるグローバルREmapロードマップは、産業革命前と比べて、今世紀末までの世界の気温上昇を2°C未満に抑えることを目的とした世界のエネルギーシステムの転換を起こすために、主に再生可能エネルギーとエネルギー効率をベースにした低炭素技術の導入を分析している。

2

イノベーション 3: 電気自動車のスマート充電

内容

電気自動車は、系統側の状況に合わせた充電サイクルをとることで、ユーザーにも親和性のあるかたちで電力系統との統合を図ることができる。

- 電気自動車のスマート充電(再生可能エネルギー電源の特性に従った充電)は、再生可能エネルギーの出力抑制緩和に役立ち、ピーク需要時に余分な負荷を追加したりや新たなインフラコストが発生するのが回避できる。
- V2G (Vehicle to Grid) 技術は、必要に応じて系統に電力を供給することにより、系統柔軟性をさらに高めることが可能である。
- 充電時間を調整するスマート充電の将来性は、車種、充電地点や、充電機器の電力と充電速度に大きく依存する。極端なケースでは、自動運転電動乗合タクシーは 1 回 10 分、150~500 kW で 1 日に数回急速充電すると想定され、日中は実質的に柔軟性がなく、夜間のみ柔軟性が発生する可能性がある。

現況

- 2017 年の電気自動車利用台数は 400 万台で、そのうちの 40%が中国 (BNEF, 2018)
- 直近 6 年間の売上複合年間成長率は 57% (IRENA, forthcoming a)
- 電気自動車の最大市場: 中国、ドイツ、ノルウェー、英国、米国
- すべての乗用車が電気自動車だと仮定すると、2016 年の総電力需要に占める割合は米国で 24%、欧州で 10~15%に達する。スマート充電されなければ、ピーク需要に影響を与える (IRENA, forthcoming a)

イノベーション 4: 再生可能エネルギーによる P2H

内容

再生可能エネルギーによる P2H(電力から熱への変換)とは、再生可能エネルギーによる電力を利用し、ヒートポンプや電気ボイラーなどを介して、建築物や産業工程に有用な熱エネルギーを生成することである。

P2H により、以下のことが可能になる。

- 蓄熱によるエネルギーの大容量貯蔵
- 再生可能エネルギーを熱変換することで出力抑制を低減し、他のエネルギー部門の脱炭素化を促進
- 他の暖房方式よりエネルギー効率が高いヒートポンプを利用し、デマンドサイドマネジメントを実現

現況

- ヒートポンプによる熱生産のコストは、0.06~0.12 ユーロ/kWh。これは、天然ガスのコンデンシングボイラーによる熱生産コストの半分未満である。
- EU21ヶ国に設置されたヒートポンプ(2017年)は、1,050万台。貯蔵容量は368GWで、116TWh分の再生可能エネルギーに貢献している(EHPA, 2018)
- P2H(電力から熱への変換)システムが導入されている主な地域(2017年): 欧州(主にデンマーク、スウェーデン、ドイツ、英国、スイス)、米国、中国、カナダ

イノベーション 5: 再生可能エネルギーによる P2H2

内容

電気分解によって再生可能エネルギーから生成される水素も、エネルギー貯蔵の手段として利用できる。水素は天然ガスシステムを利用してユーザーに供給可能である。燃料電池内で水素を反応させて電気を生成したり、燃焼させて発電機を駆動させたり、運輸または暖房用の燃料として利用したり、ガス供給網へ追加したり、他の産業の供給する原料として利用したりできる。

再生可能エネルギーによる電力によって生成された水素により、以下のことが可能になる。

- エネルギーを大規模かつ長期的に、岩塩坑や貯蔵タンクに貯蔵
- VRE の出力抑制を低減
- 部門統合戦略を通じた、産業部門と運輸部門の脱炭素化
- 一部の産業工程で天然ガスから精製された「グレー」水素を代替

現況

- プロトン交換膜 (PEM: Proton Exchange membrane) を用いた電気分解による水素生成のコストは、2017 年に 6.7 ユーロ/kg であったが、2025 年までに 4.1 ユーロ/kg に低減する可能性がある (Tractebel, 2017)*。 (PEM 方式は柔軟性の提供に適している)
- 2030 年までに、水素生成コストの 70% から 88% をエネルギーのコストが占めるようになる。安価な再生可能エネルギーの導入率の拡大によって、技術の採用が後押しされる (CORFO, 2018)
- 世界で供給されている水素の 4% は電気分解により生成されている (それ以外は化石燃料による) (IRENA, 2018d)
- 水素協議会 (Hydrogen Council) の調査では、水素は 2050 年までに世界の最終エネルギー需要の 18% を占める可能性がある。これは約 78 エクサジュールに相当する (IRENA, 2018d)

*価格は欧州市場のみを対象とする。



2

デジタル技術

デジタル化は、データを電力部門の価値に変換することと定義できる。デジタル化が進めば、より多くの系統情報を収集する機会が生まれる。情報を収集しパターンを認識することで、積極的な系統運用が可能になり、障害の回避や、停電時間の短縮が可能になる。同時に、系統応答の確実性と予測可能性が高まることで、VRE導入率が高くても運用コストを増加させることなく系統運用を行うことができる。

VRE ベースの分散型電源システムは、最適な運用と柔軟性の向上のために、エネルギーと情報の組み合わせを必要とする。エネルギー部門が最新の情報通信技術を集中的に利用しなければ、多数の分散型電源および電力を消費する機器の運用と制御は実現しない。電力システムのデジタル化により、膨大な量の運用データが収集され、管理されることになる。これにより制御の可能性が生まれ、VRE 導入コストを最適化および削減する新たな機会が生じる。

デジタル技術により、エネルギーシステムは次のような変容を遂げている。

- **大量のデータ収集と分析**: 電力系統や家庭など、大量のデータが生じる用途では、ビッグデータ技術を採用することにより、多大な性能上の便益を得ることができる。例としては、既に述べた「ビッグデータ技術」、クラウドストレージ、ホームエネルギーマネジメント (HEM)、スマートグリッドなどがある。現在、配電会社により生成されたデータのうち分析目的に利用されるのは 10%に過ぎない。
- **制御可能性の強化**: アセットを遠隔制御できる場合、コミュニティにエネルギーを提供することを目的としたビハインド・ザ・メーター (需要家側) 電源の集合化など、当初の目的を超えた用途のために利用することができる。例としては、デマンドレスポンス、ビハインド・ザ・メーター (需要家側) 電源、ホームエネルギーマネジメント、電気自動車などがある。
- **柔軟性の向上**: 再生可能エネルギーによる発電技術のほとんどは、その間欠性に対処するために柔軟性のある負荷と電源アセットを必要とする。デジタル技術を活用することで、さまざまな供給源 (蓄電池管理システム、電気自動車、デマンドレスポンスなど) が柔軟性を発揮することができる。つまり、デバイス自身がインテリジェントに、太陽光発電による電力を日中の需要や夜間利用のための電力貯蔵に振り分ければ、系統連系にかかるコストを削減することができる。このようなデバイスは、住宅用に既に利用されている。例えば、屋根置き太陽光発電を利用して蓄電池を充電し、電気ヒートポンプを作動させ、家電製品を操作することにより、太陽光発電による電力を系統に注入する必要がなくなる。しかし、大規模な導入を実現するにはさらなるコスト削減が必須である。
- **スマートメーターの採用により**、インドなどの新興市場では電化が拡大している。料金前払い制の導入による貸し倒れ損失の削減や、電力損失 (盗電) の減少といった効果があげられる。

イノベーション 6: IoT(モノのインターネット)

内容

IoTにより、電力の大規模需要地(家庭、商業施設、産業施設)におけるデバイス同士、またシステム全体で、インターネットを経由したリアルタイム通信が可能になり、情報の収集と交換が促進される。

IoTと最適化アルゴリズムを併用することにより、以下のことが可能になる。

- 分散型電源および需要の遠隔管理や迅速な自動変更を可能にして、システム柔軟性を高める。
- 再生可能エネルギーの予測と取引の精度を向上させ、不確実性を低減する。

現況

- インターネット接続されたデバイスは、2015年に世界で150億台だったが、2025年までに750億台に達すると予想される(Statista, 2018)
- 多数の企業、コンソーシアム、財団や団体が、アプリ層、データ層、接続層、デバイス層など、さまざまな階層でIoT技術に取り組んでいる
- すべての北欧諸国が、電力メータリングデータと市場プロセスを管理するデータハブの導入に向けて動いている。デンマーク、フィンランド、ノルウェー、スウェーデンのTSOは、それぞれの電力小売市場にデータハブを導入する責務を負っている(NordREG, 2018)

イノベーション 7: AIとビッグデータ

内容

ビッグデータとAI(人工知能)の組み合わせは、複数の分野において最も重要な開発の一つとして台頭してきている。多くのAI技術は数十年前から存在していたものの、ようやく最近になって十分な規模のデータセットを活用できるようになり、エネルギー市場での用途に関して有意義な知見と成果を提供している。

この組み合わせは以下のことから、電力システムへのVREの導入に役立てることが可能である。

- 再生可能エネルギー発電の予測精度の向上
- システム運用と分散型電源の管理の改善
- 遠隔監視、分析、メンテナンスの最適化によるアセット管理の改善

現況

- AIがエネルギー分野に採用されている主な地域: 米国、欧州(フランス、ドイツ、スペイン、英国など)

イノベーション 8: ブロックチェーン

内容

ブロックチェーンは、ネットワーク内で行われるすべての取引を安全に記録することができる分散型台帳技術である。

ブロックチェーンにより以下のことが実現する可能性がある。

- 直接取引の増加と検証可能な情報の共有。仲介者を必要とせず、より新しく低コストの小規模運用モデルを実現する
- システム柔軟性。分散型の柔軟性の高いエネルギー資源からシステムへのサービス提供を実現する
- 新規市場と、認定された信頼できるエネルギーフットプリントを持つ商品の取引
- サイバーセキュリティ面で便益を提供する可能性

2

現況

- エネルギー部門におけるブロックチェーン技術の試験的取り組みの件数上位 3 カ国:ドイツ、オランダ、米国(ブロックチェーンを用いたエネルギー関連のスタートアップ企業の大半は欧州に集中)
- 現在、エネルギー部門で最も注目される用途は、ピア・トゥー・ピアのエネルギー取引である。ただし、分散型エネルギー源から系統へのサービスを提供するビジネスモデルのほうが、今のところはるかに優勢である
- 2018 年 10 月現在で、4 億 6,600 万米ドルがブロックチェーン技術に投資されている

新たな電力系統

電力系統への VRE 大量導入には、VRE の変動性と不確実性を管理するためにデータと通信ツールを利用した、新たな系統運用の方法が必要であると考えられる。スマートグリッド技術は、情報通信技術を発電、送電、消費のあらゆる側面に組み込むことにより、VRE の効果的な大量導入を後押しすることができる。これにより系統運用の柔軟性が高まり、運用コストが低減し、効率が高まる(Kempener et al., 2013)。信頼度の高いクリーンなエネルギーを系統に接続されている(オングリッド)コミュニティと接続されていない(オフグリッド)コミュニティの両者に提供するミニグリッド・ソリューションと、再生可能エネルギーを長距離輸送するソリューションとして登場しているスーパーグリッドという 2 種類の電力系統が台頭してきている。複数の地域における系統を結びいわゆる「グリッド・オブ・グリッド」は、再生可能エネルギー電源と需要を最適化するさまざまなレベルの運用や取引と共に、将来的に発展すると考えられる。

イノベーション 9: 再生可能エネルギーのミニグリッド

内容

再生可能エネルギーのミニグリッドは、負荷と再生可能エネルギー源を組み合わせた統合エネルギーインフラであり、自給自足型の運用ができるよう設計されている。再生可能エネルギー電源、インテリジェントな切り替えおよび保護機能、制御装置、エネルギー貯蔵システムが、一般的に再生可能エネルギーミニグリッドの骨子となっている。

系統に接続されると、ミニグリッドは柔軟性の供給源となり、周波数応答、系統混雑の軽減と負荷管理が可能になる。

直流(DC)ミニグリッドが、電力系統の効率を向上させるソリューションとして登場している。ただし、交流(AC)と直流のハイブリッドな電力系統の連系制御は、まだ十分に試験されていない課題である。

現況

- 世界全体のミニグリッドは 12,000 MW
- 系統接続されたミニグリッドが発達している主な地域:オーストラリア、オランダ、米国

イノベーション 10: スーパーグリッド

内容

直流のスーパーグリッドは、交流システムよりも効率的に長距離送電を実現する可能性がある。再生可能エネルギー電源と大規模需要地を長距離で結びながら送電損失を抑制することにより、再生可能エネルギー源から遠隔にある需要家への電力輸送コストを削減する。

現況

- スーパーグリッドが開発されている主な地域: 欧州、インドーバングラデシューネパールーブータン間、北アジア(中国ー日本ーロシア連邦ー韓国ーモンゴル間)
- 直流 500kV の送電線を開発するための平均コスト: 1 km 当たり約 57 万米ドル(EIA, 2018b)

ディスパッチ可能な電源

短期から中期のソリューションとして火力発電の柔軟性を改善することは、多くの国々で一般的になりつつある(IRENA, 2018c)。一部の発電方式は、他の方式と比較して、本質的に柔軟性に優れている。しかし、旧来型の柔軟性の低い方式でも、費用をかけて設備改良することにより、改善が可能である。

イノベーション 11: 従来型発電所における柔軟性

内容

従来型の火力発電機の柔軟性は、最小負荷の低減、起動時間の短縮、出力変化率の向上を実現するために、特定の部品を付け加え、運用に変更を加えることにより高めることが可能である。

この技術的な増強により、以下のことが可能になる。

- 系統柔軟性を高め、VRE の導入増加を実現する
- 従来型発電機の収益性を高める

現況

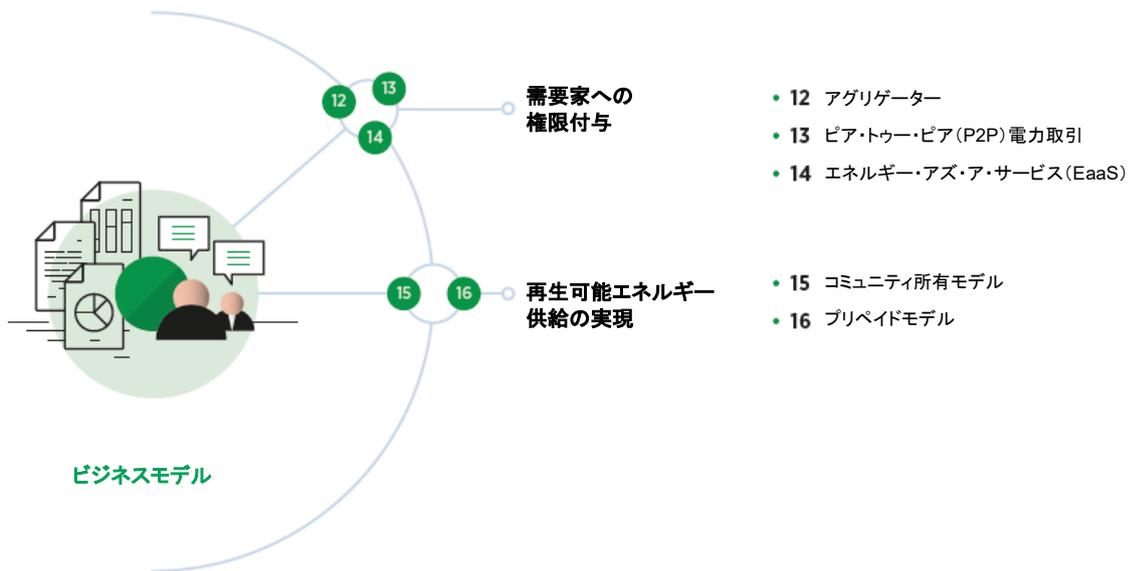
- 世界全体のミニグリッドは 12,000 MW
- 系統接続されたミニグリッドが発達している主な地域: オーストラリア、オランダ、米国

2

2.2 ビジネスモデル

ビジネスモデルは、これらの技術によって生み出された新たな価値を収益化し、市場投入を加速するための重要な役割を果たす。分散型エネルギー源の市場投入に伴い、需要家（消費者）に決定権を与え、能動的なプレーヤーへと変える革新的なビジネスモデルが登場している。アグリゲーターを介し、スマートメーターとデジタル化により可能となるピア・トゥー・ピア取引プラットフォームやエネルギー・アズ・ア・サービス（EaaS）モデルを利用することで、小規模需要家は電力市場に参加できるようになる。またビジネスモデルにより、オフグリッド地域（プリペイド制モデルなど）や、エネルギーアセットの共同所有と管理が個人による所有よりも好まれる場所（コミュニティ所有モデル）でも再生可能エネルギーの供給が実現する。

図 10 ビジネスモデルにおけるイノベーション



消費者を能動的な主体に変える

分散型電源の導入拡大は、消費者のプロシューマーへの変化を促進している。プロシューマーは電力網から電力を得るだけでなく、電力を発電し、貯蔵し、電力網に供給する。分散型エネルギー源と、エネルギー部門に応用されつつある情報通信技術を併用することにより、消費者が中心的な役割を果たすようになる。自身のエネルギー供給および消費に関して情報を得て、能動的な意思決定を行うことができるようになる。電力部門においてプロシューマーが将来果たす役割を決定する可能性のある革新的ビジネスモデルが、いくつか登場しつつある。

イノベーション 12: アグリゲーター

内容

アグリゲーターによって、多くの分散型再生可能エネルギー源が一括して運用され、従来型の発電機と同等の大規模な設備容量を創出することが可能である（「仮想発電所」とも呼ばれる）。そのため、アグリゲーターは卸市場やアンシラリーサービスを調達する系統運用者に対し、電力やアンシラリーサービスを販売できる。

アグリゲーターは、卸市場にエネルギーを供給し、系統運用者にアンシラリーサービスを提供することにより、分散型エネルギー源の系統へのよりスムーズな導入を実現できる。よって、系統柔軟性に貢献する。

現況

- アグリゲーター向けの規制枠組みが確立されている国：オーストラリア、ベルギー、フランス、ドイツ、オランダ、英国、米国
- 英国のアグリゲーター数：19社（National Grid ESO, 2018）
- 英国のアグリゲーターの設備容量：約10GW

イノベーション 13: ピア・トゥー・ピア（P2P）電力取引

内容

プラットフォームビジネスモデルは、エネルギー部門の「Uber」や「Airbnb」と称されることもある。これらのビジネスモデルは、需要家と分散型エネルギー供給事業者がピア・トゥー・ピア取引を行うエネルギーのオンライン市場を生み出している。ピア・トゥー・ピア市場の主な目的は、透明性があり信頼できるメカニズムを提供し、プロシューマーが自分の嗜好と要件を公正に比較できるようにすることである。

ピア・トゥー・ピア取引は、再生可能エネルギーを利用した分散型電源の設置の増加と、エネルギー源の地域利用の増加を促進する。しかし、ピア・トゥー・ピア取引が大規模に実施され、需要家に大きな便益をもたらすようになるためには、系統の利用料などの規制上の措置について依然として力強い進展が求められる。

現況

プロジェクトが実施されている国

- バングラデシュ（SOLShare）
- ドイツ（Lumenaza, sonnenCommunity）
- オランダ（Vandebron, Powerpeers）
- 英国（Piclo - Open Utility）
- 米国（TransActive Grid）



イノベーション 14: エネルギー・アズ・ア・サービス (EaaS)

内容

エネルギー・アズ・ア・サービス (EaaS) とは、「ビハインド・ザ・メーター」サービスの可能性の高まりを踏まえ、需要家にエネルギー (kWh) を販売することからサービスを販売することへのシフトを指す。デマンドサイドマネジメント、分散型電源やエネルギー貯蔵を備えた需要家へのサポート、地域電力網を介した電力の交換、エネルギー節約に関するアドバイス、快適性とセキュリティ強化対策や、その他のさまざまなサービス (例えば E.ON Cloud、EDP や ENECO などのスマートホームソリューション) などが挙げられる。

EaaS は需要側の柔軟性を引き出すことで、分散型電源の導入を実現し、デマンドサイドマネジメントを支援する。例えば、需要家への金銭的補償の支払いを自動制御する。スマートメーターや ICT 技術は、これを実現する重要な要素となりつつある。

現況

- EaaS モデルが実施されている国: オーストラリア、中国、フィンランド、アイルランド、イタリア、日本、スウェーデン、英国、米国
- EaaS モデルへの投資: 約 143 億米ドル (SEI, 2016)
- スマートメーターや先進的メーターの設置
 - 世界: ~7 億台 (2016 年) (SEI, 2016)、2017 年だけで 8,820 万台が設置されている (GlobalData, 2018)
 - 中国: 4 億 800 万台 (2017 年) (SEI, 2017)
 - 米国: 7,890 万台 (2017 年) (EIA, 2017)
 - 英国: 861 万台 (2017 年) (BEIS, 2017)
 - フィンランド: 340 万台 (2016 年) (Finnish Energy, 2017)

再生可能エネルギー供給の実現

環境への懸念の高まりと持続可能性目標に対応して、財政的あるいは物理的な理由で私有の再生可能エネルギー発電所を設置できない場合の革新的なビジネスモデルも登場してきている。

イノベーション 15: コミュニティ所有モデル

内容

コミュニティ所有 (Community Ownership: CO) 制度とは、エネルギー関連アセットの共同所有と管理を指し、コミュニティのメンバー間で再生可能エネルギー発電所の便益を共有できるようにする。

コミュニティ所有により、発電所を自分の所有地に設置できない、または設置したくない需要家にも再生可能エネルギーを供給できる。これらの制度は分散型電源の導入と、地域の持続可能な再生可能エネルギー供給源からのエネルギー利用を促進する。

現況

- コミュニティ所有のプロジェクト数: 世界で 4,000 件以上 (主に米国、欧州、オーストラリア) (REN21, 2016)
- コミュニティ所有モデルのプロジェクト規模: 約 50 kW ~ 10 MW。ただし、これよりはるかに大規模なプロジェクトも可能である (例: ドイツのダーデスハイムでの 66 MW のコミュニティ所有の風車、オランダのクランメル川流域での 102 MW のコミュニティ所有の風力プロジェクト)
- コミュニティ所有モデルプロジェクトを世界に先駆けて実施した国: オーストラリア、デンマーク、ドイツ、オランダ、ノルウェー、英国、米国

イノベーション 16: プリペイドモデル

内容

- プリペイドモデルは、遠隔地でも容易にアクセス可能なモバイル決済技術により、小型発電設備 (例: 家庭用太陽光パネルシステム) を最終消費者にも手の届く価格にする。需要家は定期的な定額払いの代わりに、利用するサービスに対して直接支払いを行う。多くの場合、電気機器と関連する電力供給をパッケージ化した形式で、需要家は料金を前払いしていないサービスは受けられない。結果的に料金は他の利用方法よりも少額の場合が多く、需要家は消費電力量、つまり支出をより細かく管理することができる。プリペイド制により、オフグリッド地域でもオンライン環境であれば、再生可能エネルギーにアクセスすることが可能になる

現況

- 地域別のプリペイド制の太陽光発電システムの販売 (2016 年): 東アフリカ 730 万台、西アフリカ 3 万台、ラテンアメリカ 1 万台、南アジア 2 万台
- 市場ポテンシャル: 全体の約 64% にあたる 7 億 7,200 万人のオフグリッドの需要家がモバイル通信網を利用している (2016 年時点)
- プリペイド制の太陽光発電事業者への投資総額: 7 億 7,000 万米ドル超 (2012 年から 2017 年)

2

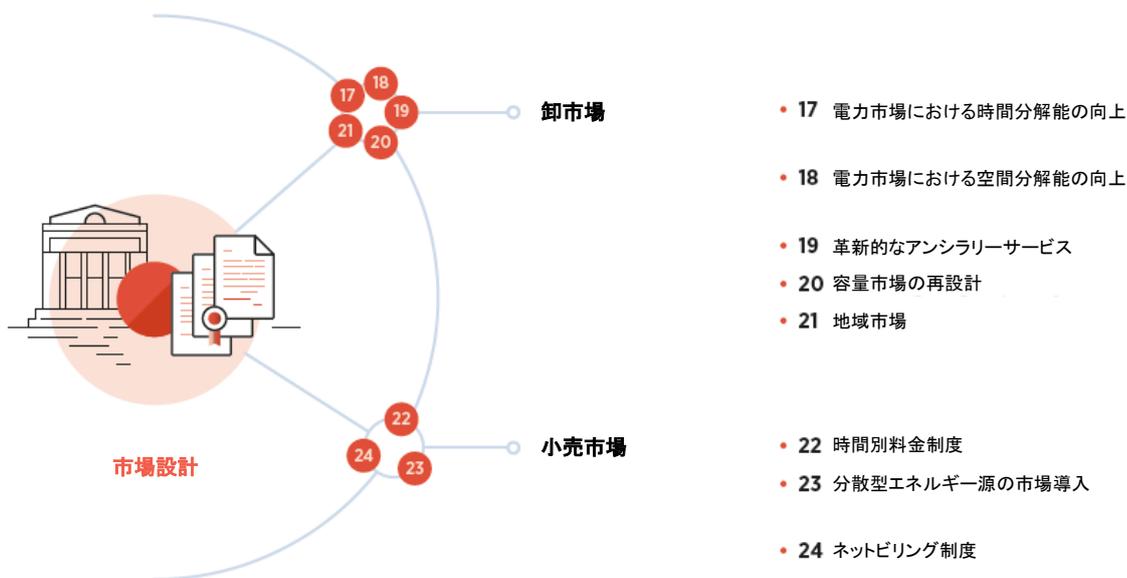
2.3 市場設計

一部のエネルギー市場の規制は、VRE の導入率が高い系統のニーズを反映し、デジタル化、分散化、電化の動向に対応するために、市場をどのように適応させれば良いかを示している。このすべてを結び付ける要となるのが、エネルギーと需給調整サービスの価格を適切に設定し、これらのサービスを提供できるすべてのプレーヤーが報酬を得ることのできる市場である。例えば低すぎる価格上限を設定したり系統混雑コストの負担を均等にしたりするなど市場が適切な状態から遠ざかると、必要な投資コストを支払うために、コストに基づく再給電指令や容量市場など、より多くの応急措置が必要となる。このような応急措置では、十分に機能しているエネルギー・サービス市場のように効率よく価値を配分することはできない。短期的な応急措置を採用するかしないかにかかわらず、エネルギー市場の価格設定を徐々に改善することが重要である。

規制の枠組みには、将来を見据えた意欲的な目標、そしてイノベーションを可能にすることが必要とされる。欧州全土向けのクリーンエネルギーパッケージにおいて欧州委員会が提案したイノベーションには、電力の実質的な値を反映した短期市場と卸価格、新たなディスパッチルール、柔軟性を確保するための需要側の参加の向上、分散型エネルギー源の経済性の向上、自家消費や市場統合が含まれる¹。

卸市場においては、時間と空間の分解能を高め、需給調整サービスを再設計することによって、柔軟性のある行動にインセンティブを与える必要がある。また、新たな電力系統の文脈においては、小売市場のデマンドレスポンスに適切な報酬を与えることが重要である。時間別料金、自家消費のネットビリング制度、または分散型エネルギー源の(アグリゲーターを介した)卸市場への参加を可能にするといった規制は、さまざまなシステムにおいて台頭してきている革新的な施策である。本節は、IRENA の報告書『変動性再生可能エネルギー大量導入時代の電力市場設計』に基づいている(IRENA, 2017b)。より詳細な分析については、同報告書を参照のこと。卸市場と小売市場の両方で、以下のような新たな市場設計が求められる。

図 11 市場設計におけるイノベーション



1. 2019年1月の第9回IRENA総会で行われたInnovation Ministerial Roundtable(イノベーション閣僚円卓会議)での議論に基づく

革新的な卸市場設計

電力システムへの VRE の大量導入を促進するには、電力市場の取引ルールの変更が必須である。これらのルールは、新たな市場条件に合わせて、再生可能エネルギーの短期的な変動性と不確実性に対処するために必要な柔軟性のある行動を重視する必要がある。新たな商品を開発し、新規参加者が柔軟性のあるサービスを提供できるようにすることが望ましい。例としてデマンドレスポンスは、供給側の発電事業者と同様に、すべての卸市場（エネルギー、アンシラリーサービス、確立されている場合は容量市場）に参加可能であることが望ましい。

イノベーション 17: 電力市場における時間分解能の向上

内容

より質の高い価格シグナルを送ることで柔軟性供給源の市場参加を促し、システムが必要とする柔軟性をより適切に捕捉できるようにする新しい規制。VRE 電源の不確実性と変動性に対処するための鍵となる。

例えば 15 分単位の契約など、新たな商品を導入して時間分解能を向上させ、取引間隔をリアルタイムに近づけることは、急速に変化する状況に迅速に対応できる（しかしリードタイムが長くなると対応できない可能性がある）技術や、リードタイムが非常に短い場合にのみ高い確実性で市場に貢献できる再生可能エネルギーの柔軟性を評価するひとつの方法である。

現況

- オーストラリアは、30 分間隔から 5 分間隔の決済に移行し、市場閉場時間を、2 時間から 30 分に移行した
- 2016 年、ノルドプールにおいて、フィンランドの TSO であるフィングリッド (Fingrid) 社とエストニアの TSO であるエレリング (Elering) 社は、市場閉場時間をこれまでの 60 分に替わり 30 分とし、エストニア—フィンランド間の当日市場で試験的に開始した
- オーストリア、ベルギー、ドイツ、およびルクセンブルグ（特定の TSO のエリアにおいてのみ）では、現地の当日市場閉場時間は、物理的な受渡開始の 5 分前である (ACER, 2018)
- カリフォルニア州は、1 時間間隔から 15 分間隔のスケジューリングへの移行を提案している
- フランス、ドイツ、ルクセンブルグ、スイス、および英国は、当日市場に継続取引用の 30 分単位の商品を導入した
ザラ場取引用の 15 分単位の商品は、オーストリア、ベルギー、ドイツ、ハンガリー、ルクセンブルク、オランダ、スロベニア、スイスで取引可能である。ドイツとルクセンブルグでは 15 分単位の商品が（ザラ場取引とは対照的に）入札にかけられている (ACER, 2018 年)

イノベーション 18: 電力市場における空間分解能の向上

内容

送配電のレベルで（再給電コストまたは柔軟性市場を含む）ゾーン料金やノード料金または価格シグナルを使用して位置分解能を向上させることで、新たなシステム制約を捕捉し、効率的な位置シグナルを伝達する。

VRE の大量導入は送電システムのシステム混雑を悪化させる可能性がある。空間分解能の高い水準での価格決定はこの状況を反映し、コストのかかる再給電を回避しデマンドレスポンスを奨励、価格シグナルの表示により送電網の適切な地点への設備容量の投資を奨励すると考えられる。

2

現況

いくつかの米国の独立系統運用機関(ISO)は、地点別の価格設定を導入している。ISO-NE(ニューイングランド独立系統運用機関)、NYISO(ニューヨーク独立系統運用機関)、ERCOT(テキサス州電力信頼性評議会)、MISO(中部大陸独立系統運用機関)、PJM(ペンシルバニア-ニュージャージー-メリーランド州を中心とする独立系統運用機関)および CAISO(カリフォルニア独立系統運用機関)(NPTEL, 2012)

汎欧州市場ではゾーン料金制が採用されており、デンマーク(2つのビiddingゾーン)、イタリア(6つの地理別ビiddingゾーン)、ノルウェー(5つのビiddingゾーン)、スウェーデン(4つのビiddingゾーン)など一部の国では、国全体の送電システムを複数のビiddingゾーンに分割している。(IRENA, 2017b)

イノベーション 19: 革新的なアンシラリーサービス

内容

系統内で増大する VRE の変動性と不確実性に対処するには、系統柔軟性を高め、高速応答と出力変化能力を奨励し、各サービスに応じて報酬を得られるように、アンシラリーサービス商品を適合させる必要がある。アンシラリーサービス市場は、蓄電池、デマンドレスポンス、その他の分散型エネルギー源、VRE 発電事業者などの新規参入者にも開放されていることが望ましい。

現況

- 英国、米国、ドイツでは、柔軟性を高めるための新商品が設計されており、蓄電池の市場参入が許可されている
- 米国の ISO である PJM は、低速の従来型電源と高速の蓄電池用に異なる周波数調整商品を開発した
- 英国では、蓄電池用の新商品が導入され、周波数応答が強化された
- チリでは、太陽光発電所が系統にアンシラリーサービスを提供し、系統安定性を確保する初の試験的プロジェクトが実施された
- 2018 年に英国では、系統運用者は電力の需要と供給を不正確に予測する供給事業者や発電事業者の料金を引き上げ、柔軟性への投資を奨励した
- アイルランドの TSO であるエアグリッド(EirGrid)社は、風力発電の変動に対処するために、複数の系統サービス商品を新たに決定している

イノベーション 20: 容量市場の再設計

内容

容量メカニズムは十分な信頼度の高い安定容量が確実に利用できるように設計されている。そのため、系統のオペレーションが長期的に確保される。

- 容量市場のイノベーションには以下のことが含まれる。
- たとえ発電が間欠的であっても、VRE 電源の系統連系が可能であれば、再生可能エネルギーが容量市場に参加できるようにする。再生可能エネルギーが信頼度を提供する場合もある。特に、系統内の他のエネルギー源と補完性がある場合や、風力/太陽光/蓄電池を統合したハイブリッドプロジェクトによる場合も同様である
- 容量市場に柔軟性の要件を導入することにより、将来の電源の柔軟性と VRE の導入が確保される
- デマンドレスポンス、エネルギー貯蔵、他地域との連系線が容量市場に参加できるようにする

現況

主な開発は米国と欧州で行われており、最新の容量メカニズムは 2018 年にベルギー、フランス、ドイツ、ギリシャ、イタリアとポーランドで承認されている

カリフォルニアは容量市場の構造に柔軟性要件を導入している

米国の PJM とフランスは、需要に応じた負荷と VRE 電源の容量市場への参加を認めている

イノベーション 21: 地域市場

内容

地域市場は、地域全体の卸市場、アンシラリーサービス市場、および容量市場における規則の調和を前提としている。連系を活用して地域市場を創設すると、需給調整エリアが統合され、柔軟性が向上する。大規模な地域で電源を共有することにより、出力抑制要件やコストだけでなく、運転予備力のニーズが削減される。

現況

地域市場: 欧州の前日および当日市場、西アフリカの電力プール、南アフリカの電力プール、中央アメリカの電力市場、米国西部系統のエネルギーインバランス市場など

デンマークは、ドイツ、スウェーデン、ノルウェーとの豊富な系統連系により、2017年にVRE導入率50%を達成することができた

革新的な小売市場設計

電力市場は従来、系統接続された大規模発電所に合わせて調整されてきた。この発電所は比較的予測しやすい、受動的で弾力性のない需要に対して電力を供給していた。需要家側に設置された貯蔵技術やデマンドレスポンスの向上とともに、分散型電源の普及拡大によって、需要家は能動的な市場参加者になりつつある。需要側の柔軟性を引き出すには、市場の規制が重要である。

イノベーション 22: 時間別料金制度

内容

デマンドレスポンスは、需要家を時間とともに変化する電力価格にさらすことで実現する。これにより自動化の有無にかかわらず、特に稀に生じる超ピーク価格期間(間接的デマンドレスポンスとして知られる)に対して、需要家が自発的にこれらの価格に反応することが可能になる。

料金シグナルに基づいて、需要家は消費をピーク時間間隔からオフピーク時間間隔にシフトすることを選択できる。これにより、VREの出力抑制または配電混雑が減少し、ひいてはピーク時の系統容量に対する投資を節約できる。

現況

米国の電気事業者コン・エジソン(Con Edison)社は、1時間単位の価格設定プログラムを提供している。これにより需要家は負荷をシフトし、電気料金を約15%節約できる

フィンランドでは、需要家は卸市場のスポット価格に基づいて、ダイナミックプライシングを選択できる。需要家の10%がこの料金を選択している

エストニア、ルーマニア、スペイン、スウェーデン、英国の欧州5カ国では、電力供給の1時間ごとのリアルタイムプライシングが利用されている。スペインとエストニアでは、家庭需要家はスポット価格で1時間ごとに異なる料金を選択できる。需要家の25%から50%がこの料金設定を選択している(ACER, 2016)

これ以外にもダイナミックプライシングは、デンマーク、ノルウェー、スウェーデンの家庭用電力に適用されており、需要家は月平均卸価格に基づいた市場ベースのスポット価格の適用を受ける(ACER, 2016)

2

イノベーション 23: 分散型エネルギー源の市場導入

内容

デマンドレスポンスは、分散型エネルギー源を卸市場に参入させ、市場価格にさらすことで実現できる(直接的デマンドレスポンスと称される)。

負荷のシフトに加えて、分散型エネルギー源はアンシラリーサービスや電力を系統に提供することもできるため、報酬を得ながら系統柔軟性を向上させることができる。

現況

ニューヨークの系統運用者は、分散型エネルギー源の市場参加と、エネルギー市場およびアンシラリーサービス市場への完全な導入を可能にする市場提案を発表した

需給調整に関する EU のグリッドコードは、需給調整市場により少量の電力 (MW) とより短期の時間枠を提案しており、太陽光発電や風力発電などの小規模な供給源へアクセスできるようになるだけでなく、デマンドレスポンスも可能になる

アグリゲーターを介して分散型エネルギー源の参加が認められている市場: ベルギー、フランス、ドイツなど

イノベーション 24: ネットビリング制度

内容

ネットビリング制度では、屋根置き太陽光発電の所有者から系統に注入された電力は、注入された時点での kWh の価格に基づいて補償される。ネットメータリング制度では注入した電力量と受電した電力量の差に基づいて料金が請求されるのに対して、ネットビリングは、受電した電力の価格から注入した電力の価格を差し引いて請求料金が決定する。したがって、プロシューマーは能動的な参加者であり、価格シグナルに基づいて系統柔軟性を提供できる。

現況

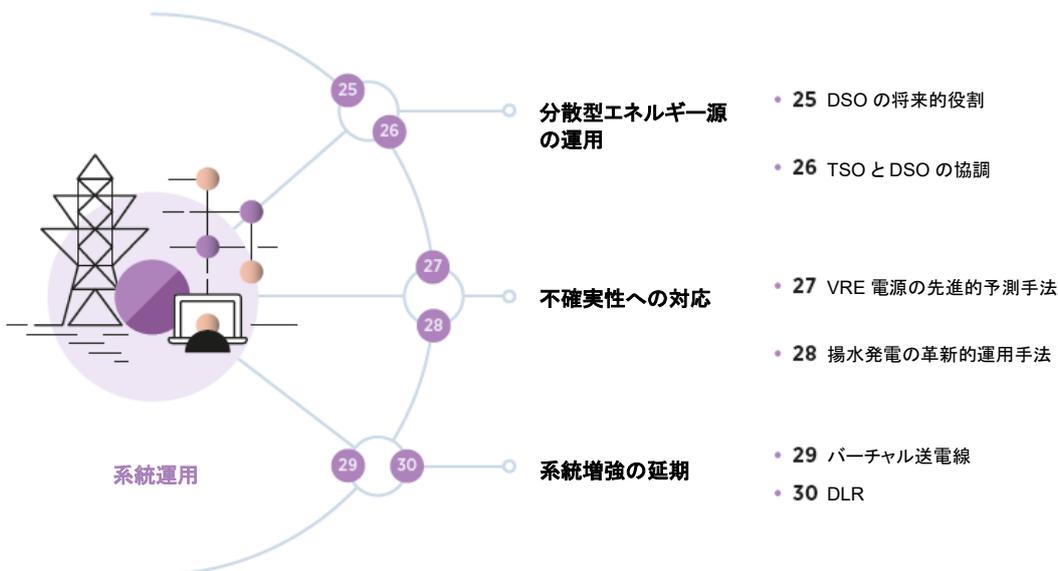
ネットビリングを導入している地域: メキシコ(事前に決定された時間変動料金)、カリフォルニア州(動的料金)、メキシコおよびニューヨーク州(位置別変動料金)、アリゾナ州(回避された電力コストに基づく料金)

2.4 系統運用

系統運用は、新技術と市場の規制によって変化し、新たな課題によって牽引される。第一に、分散型電源の導入率を増加させ、系統の分散化を進行させると、配電網が双方向の電力潮流システムに変わり、新たな運用方法が必要になる。そのような技術の統合を促進するために、配電会社は新たな役割を引き受けることが求められる。また分散型エネルギー源を系統全体にうまく導入するには、TSO-DSO 間の協力が求められる。

第二に、VRE 電源の不確実性を管理するための新たな運用施策が必要である。不確実性を削減するために、先進的な VRE 発電予測手法やツールが開発されている。揚水発電貯蔵の新たな運用など、柔軟性を高める他の運用施策が登場している。VRE 資源が豊富な地域(特に風力発電)が大規模需要地から遠く離れた位置にある場合、一時的に系統混雑が発生する。電力貯蔵装置または動的線路定格(DLR)の利用といった、連系線の増強に必要な多額の投資を代替する革新的な運用施策が登場している。

図 12 系統運用におけるイノベーション



2

分散型エネルギー源の運用

電力系統は世界中で大きな変革期に突入している。電力系統は、ますますエネルギー部門全体の重要な部分になりつつある。従来、産業界の中で「眠っている」部分と考えられていた電力系統は、VRE の系統連系に重要かつ能動的な役割を果たしている。

屋根置き太陽光発電、マイクロ風車、蓄電池システム、プラグイン型電気自動車、スマート家電などの分散型エネルギー源が登場し、消費者は系統の能動的な参加者となっている。これは系統運用者の役割と責任に重大な影響を与えると考えられる。特に DSO の責任は、単なる電力供給事業者から、系統運用に積極的な役割を果たし、電力系統への分散型エネルギー源の参加を促進することにまで拡大する。また TSO との連携を深め、情報が双方向に流れるようにする必要があると考えられる。

イノベーション 25: 配電系統運用者(DSO)の将来的役割

内容

DSO は配電網への分散型エネルギー源の系統連系の効果的な管理についてまで広げて責任を取ることが望ましい。それにより電力系統への分散型エネルギー源の導入を実現し、その便益を最大化する。

この新たな役割には以下のことが含まれると考えられる。

分散型エネルギー源からの系統サービスの調達

既存の電力系統の利用を最適化し、不必要な新規投資を延期するための、直接制御または価格シグナルを用いた分散型エネルギー源の運用

現況

DSO が役割を拡大している主な地域: 米国、英国、その他の欧州諸国

配電会社が行っている主な変革の歩み: スマートメタリングの開発、電気自動車用の充電システム、アグリゲーターとの契約、オンライン市場の確立(例えば柔軟性、系統混雑管理に対する、技術的制約よりも費用便益に基づいた系統計画)

英国の Open Networks プロジェクトは、配電網運用者(DNO)を配電系統運用者(DSO)の役割へと移行するための基盤を築いている

EU のクリーンエネルギーパッケージで系統運用者が調達するサービスの一部として、系統混雑管理は、DSO がビハインド・ザ・メーター(需要側)の柔軟性を利用できる問題になる。これは、系統混雑管理サービスのための市場を創設することにより、報酬が得られるようにする必要があると考えられる

イノベーション 26: TSO と DSO の協調

内容

DSO は、上流のサービス市場に分散型エネルギー源を参加させるための中立的な市場の仲介者として行動することが望ましい。これらの電源が卸市場に参加するには、配電系統と送電系統の運用者間の効率的な連携が不可欠になる。

また DSO は、TSO と分散型エネルギー源の所有者との間のデータ交換プラットフォームに貢献するか、そのようなプラットフォームとしての役割を果たし、TSO がこれらの電源の種類と利用状況を把握できるようにする必要がある。

これにより分散型エネルギー源を系統にスムーズに統合でき、柔軟性が向上し、既に接続されているアセットの便益が最大化される。

現況

TSO と DSO の連携のためのプログラムが実施されている主な地域: ベルギー、オーストリア、イタリア、すべての北欧諸国、エストニア、スペイン、オランダ

ベルギーでは、TSO と DSO が共同で、集中型の共有 IT プラットフォームを開発した。このデータ拠点を介して、柔軟性を高めるための分散型エネルギー源の調達に関連するデータを共有できる。また、送配電網に接続されているすべての利用者や発電事業者は、日々 TSO に柔軟性サービスを提供することができる (Elia, 2018)。上に挙げた他の国々もデータ拠点を開発している

欧州委員会が出資する SmartNet プロジェクトは、TSO と DSO の連携モデルを明らかにすることを目的にしている

不確実性への対応

風力発電と太陽光発電の変動性と不確実性は、系統運用にとって大きな課題である。発電と負荷のバランスをリアルタイムで調整するには、系統柔軟性を高める必要がある。この変動性に対処するには、予備力容量とも呼ばれる、より多くのバックアップ容量の調達が要求される。既存の揚水発電所は、電源の変動性に対するシステムの対応力を高めるために運用可能な柔軟性の高い発電所である。再生可能エネルギー発電の予測を向上させるためのツールとモデルも開発されている。

イノベーション 27: VRE 電源の先進的予測手法

内容

新たなモデルは、クラウドベースの演算、1 時間ごとではなく 15 分ごとに予測結果を生成する改良数理モデル、非常に高解像度の気象予測、機械学習や AI の利用により、再生可能エネルギー発電の予測の精度と緻密さを改善できる。再生可能エネルギー発電の予測を改善すると系統運用者の不確実性が減少し、結果として再生可能エネルギーの導入率が増加する。

日毎および季節毎といった長期予測は、TSO が苦手な気象予測 (北大西洋振動が欧州において負の状態になり、風速低下をもたらす場合など) に備えて計画を立てるためにも重要である。季節予報の改善により系統運用者は、このような極端な事象が発生する期間中の代替容量について計画を立てることができる。

現況

気象予測の精度向上: 10~30%

先進的な気象予測プロジェクトが試験的に実施されている国: 米国、ドイツ、オランダ、スペイン、中国

イノベーション 28: 揚水発電の革新的運用手法

内容

揚水発電所は、短期的には高速の出力変動に対応することで風力・太陽光発電を補完し、長期的には日毎、週毎、または季節毎の発電パターンに対する補完性を持つ柔軟性の高い設備である。

現況

揚水発電の革新的運用を行っている主な地域: オーストラリア、オーストリア、ブラジル、中国、フランス、イタリア、日本、ノルウェー、ポルトガル、韓国、スペイン、スイス、英国、米国



系統増強の繰り延べ

送電システムは、再生可能エネルギー電源の大量導入に伴い、複雑化している。需要パターンの変化と新たな大規模 VRE 電源の登場を受け、系統混雑や再生可能エネルギー電源の出力抑制を防ぐための、送電アセットの効率的な管理が求められる。VRE の導入率が高いと、系統混雑が一時的に発生する可能性がある。蓄電池の設置や、風力発電・太陽光発電・蓄電池を組み込んだ建物、DLR などの代替方法が、コストの高い送電インフラ増強に代わって、電力系統に採用されてきている。

イノベーション 29: バーチャル送電線

内容

電力系統のある地点の混雑部分の両側に配置された蓄電池は、不測の事態が発生した際にはバックアップとしてのエネルギー貯蔵の役割を担い、熱的過負荷を軽減することができる。このようなバーチャル送電線により、物理的な送電線の増強は不要となるか、または繰り延べすることができる。比較的控えめな量の電力貯蔵であっても、送電線の容量を超えるピーク需要の一部に対応することが可能である。これにより、送電混雑による VRE 電源の出力抑制が削減されることが考えられる。

現況

- フランスの TSO である RTE 社は、100 MW のエネルギー貯蔵設備を設置して系統混雑を緩和し、系統への VRE 導入率を増やすことを目的としたプロジェクト(Ringo プロジェクト)を試験的に行っている
- イタリアの TSO であるテルナ(Terna)社は、蓄電池を利用して北部と南部の系統混雑を緩和し、風力発電と太陽光発電の出力抑制を削減することを計画している
- 南オーストラリア州での 100 MW/129 MWh のテスラ社の蓄電池の成功に続いて、オーストラリアは系統混雑地点に大容量蓄電池を設置している(2018 年にビクトリア州の 2 カ所で 80 MW が委託された)
- 大韓民国は、多くの分散型事業用リチウムイオン蓄電池システム(合計 245 MWh)を設置している(Kenning, 2018)

イノベーション 30: DLR

内容

動的線路定格(DLR)とは、気象条件(例えば、風が吹いているときや気温が低いときは冷却されるため、送電線の熱容量が高くなる)に応じて送電線の容量が動的に変化することを意味している。DLR は系統混雑を緩和し、風力発電の導入を促進し、経済的便益をもたらす、系統の信頼度を向上させる。

現況

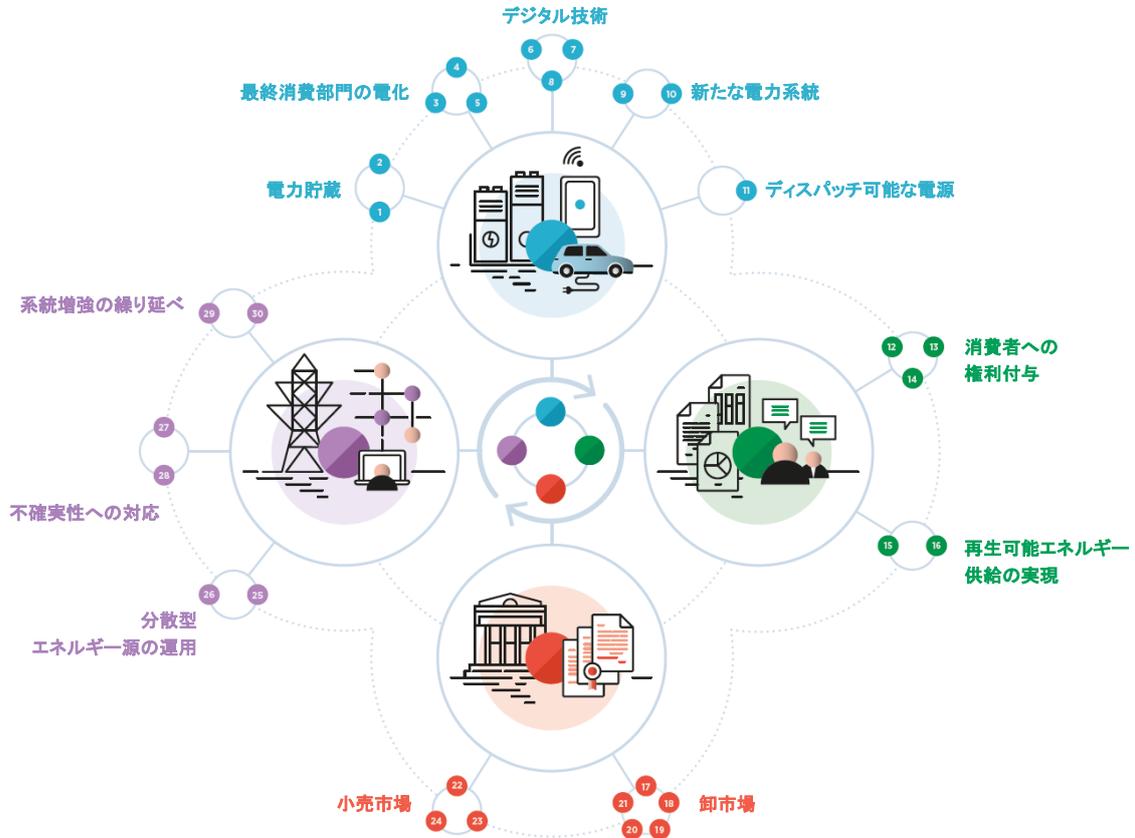
ドイツでは、風力発電の送電系統への導入を向上させ、系統混雑の管理を改善するために、DLR システムの試験と設置が進んでいる

欧州では、11 社の TSO が DLR を運用している

DLR は、英国の UK パワー・ネットワークス(UK Power Networks)社や英国のノーザンパワーグリッド(Northern Power Grid)社などの配電網にも利用されている



図 13 VRE の系統連系に向けたイノベーションの全体像



● 実現技術

1	大規模蓄電池
2	ビハインド・ザ・メーター(需要側)蓄電池
3	電気自動車用のスマートチャージ
4	再生可能エネルギーによるP2H
5	再生可能エネルギーによるP2H2
6	IoT(モノのインターネット)
7	AIとビッグデータ
8	ブロックチェーン
9	再生可能エネルギーのミニグリッド
10	スーパーグリッド
11	従来型発電所における柔軟性

● ビジネスモデル

12	アグリゲーター
13	ピア・トゥー・ピア(P2P)電力取引
14	エネルギー・アズ・ア・サービス(EaaS)
15	コミュニティ所有モデル
16	プリペイドモデル

● 市場設計

17	電力市場における時間分解能の向上
18	電力市場における空間分解能の向上
19	革新的なアンシラリーサービス
20	容量市場の再設計
21	地域市場
22	時間別料金制度
23	分散型エネルギー源の市場導入
24	ネットビリング制度

● 系統運用

25	DSOの将来的役割
26	TSOとDSOの協調
27	変動性再生可能エネルギー電源の先進的予測手法
28	揚水発電の革新的運用手法
29	バーチャル送電線
30	DLR

3 将来の再生可能エネルギー社会を 実現するイノベーション

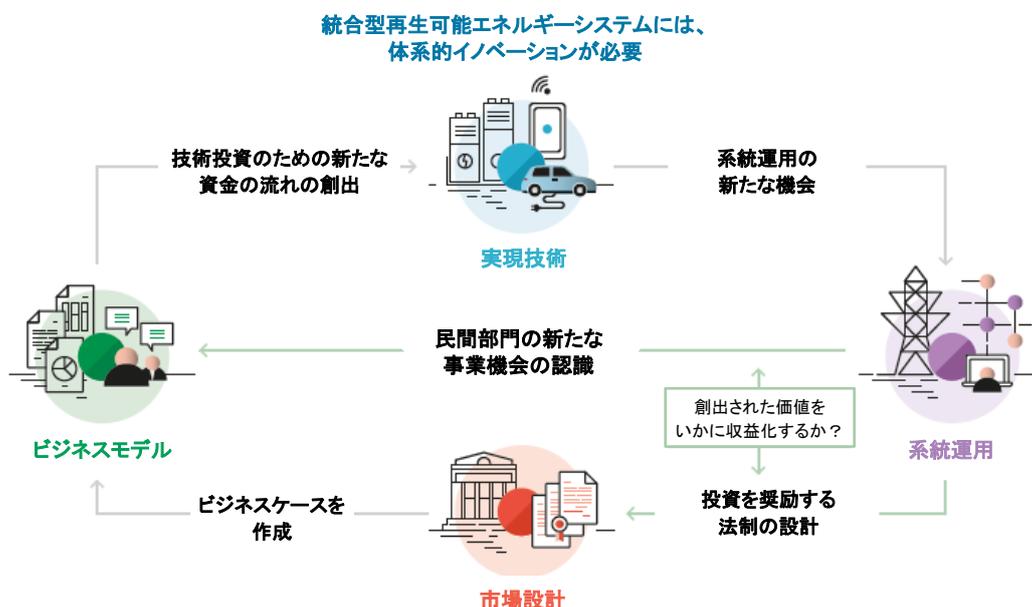


第2章で描いたイノベーションを踏まえ、本章では、複数のイノベーションを補完的に組み合わせることによって系統内の VRE 導入率を促進する 11 の新たなソリューションを紹介する。

イノベーションは、単独で実施されるものではない。VRE 導入を促す革新的ソリューションは、技術、市場、ビジネスモデル、系統運用という4つの分野それぞれに存在するさまざまなイノベーションの相乗効果によって生まれる。

技術イノベーションが実際に影響力を発揮するためには、適切なビジネスモデルが必要である。また、新たなバリューチェーンが適正に評価され、系統運用者が運用面における新技術導入を推進するような枠組みを構築するように、規制を適合することが要求される。再生可能エネルギーを中心とした電力系統の実現のためのソリューションを形作るために、電力系統の複数の構成要素のイノベーションの相乗効果を組み合わせ活用することは、「体系的イノベーション」と呼ばれる。これを図 14 に示す。

図 14 電力部門の転換を促す体系的イノベーション



3

新たな系統運用手法は、電力系統における再生可能エネルギー導入を実現する**新興技術**によって可能となる。新たな技術から、系統柔軟性を高める新たなサービスが生まれ、それにより、再生可能エネルギー電源の変動性と不確実性がもたらす課題への対応が容易になる。例えば、大容量蓄電池を使用することで短期的な柔軟性のニーズに対応することができ、最長で数時間程度（通常はそれより短時間）、バックアップ電力で系統を運用することが可能となる。デジタル化と自動化技術を活用すれば、現状の電力系統においてもデマンドレスポンスを実現し、需要側の膨大な潜在的柔軟性を引き出すことも可能であると考えられる。

系統運用の柔軟性があれば、系統運用者は、日毎、1時間毎、あるいは1時間未満の需給変動に対応することができる。この種の短期的な柔軟性は、従来、明確に評価されてこなかった。しかし現在は、VREの大量導入に必要なサービスを提供しうる多様な技術が利用可能になっている。新たなバリューチェーンは、適切なビジネスモデルによってこれら技術の開発・普及がサポートされるように構築しなければならないが、それをどのように収益化するかが重要な課題である。

価値の創出と十分な収益構造を実現するためのひとつの方法は、柔軟性の向上を支援する法制の整備である。IRENAの報告書『変動性再生可能エネルギー大量導入時代の電力市場設計』（IRENA、2017b）で論じた通り、適切な**市場設計**は、電力市場が機能して政策目標が達成されるために重要な要素である。供給側の柔軟性を促進するインセンティブや、デマンドレスポンスに適切な対価を与えることは、いずれも革新的な法制の下で実現する。さらに、革新的な法制によって革新的な**ビジネスモデル**の実現が可能となる。エネルギー転換を加速するには、電力系統におけるパラダイムシフトに合わせて市場設計を適応させることが重要である。

しかし、たとえ法制が整備されていなくても、民間部門は、技術進歩により可能となる新たなビジネスモデルの機会を見出す可能性がある。例えば、規制機関がデマンドレスポンス・プログラムを実施していなくても、民間企業は、蓄電池や人工知能を用いた負荷シフトや節電などの電力サービスを顧客に提供し、電気料金を引き下げてそれらの利用を促進するようになると考えられる。2017～18年における主要な動向として、米国、欧州、オーストラリアでは、企業がより低コストで価格が変動しないVRE電力を求めたことで、法人向けの電力購入契約（Corporate PPA）市場が生まれたことが挙げられる。

系統全体にわたって柔軟性を高めるソリューション

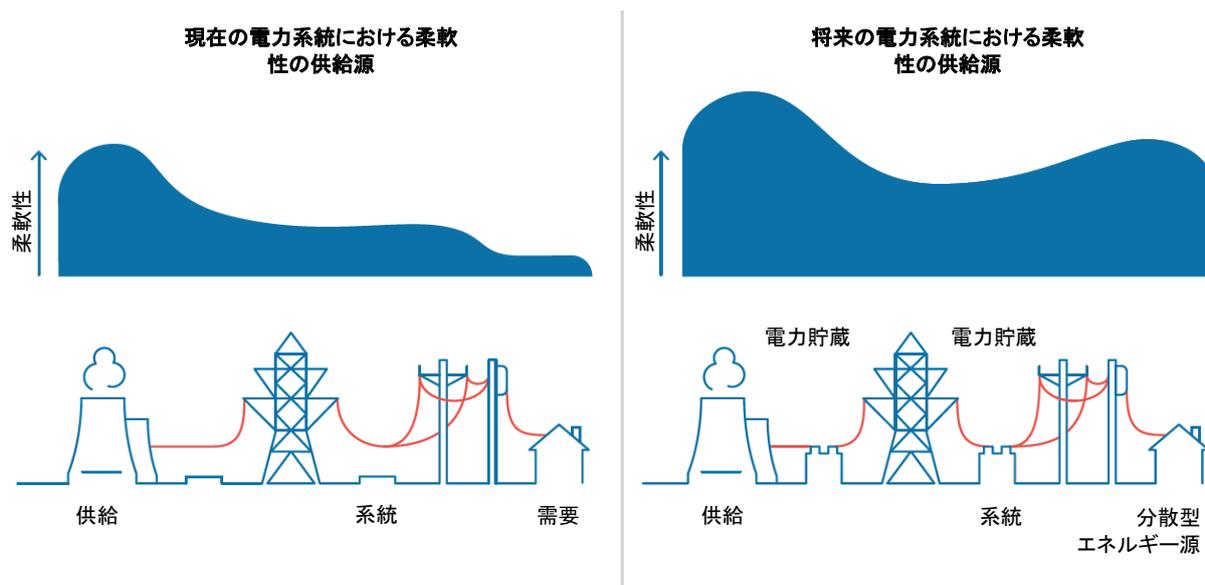
第1章で説明した通り、従来、系統柔軟性は電源側によって供給されており、需要に左右されていた。しかし、VRE電源の導入率が高まり、サプライチェーンのあらゆるレベルで統合されるようになった今、系統柔軟性の向上が求められている。需要側でも、さらなる柔軟性を引き出す効果的な新手法が生まれつつある。電力系統の分散化とデジタル化の進展により、多くの発電方式が需要側に接続されるようになった。また、デジタル技術により、デマンドレスポンスや他のサービスを電力系統に提供することが可能になった。系統柔軟性についても、送電容量の増大と地域市場の確立により、より重要となってきている。図15は、発電側のみに柔軟性の供給源が存在していた従来の電力系統から、サプライチェーン全体に柔軟性の供給源が存在する電力系統への移行を示している。

VRE導入率をさらに高める最適戦略は、国や状況によってさまざまである。電力系統のあらゆる領域にまたがるそれぞれのイノベーションの相乗効果から生まれるソリューションを構築することで、再生可能エネルギーに

主軸を置き、信頼度が高く、安価な電気料金の電力システムを創出することが可能になる。本章では、図 16 に示す通り、世界各地で実施されている、系統柔軟性を高める 11 のソリューションを明らかにする。

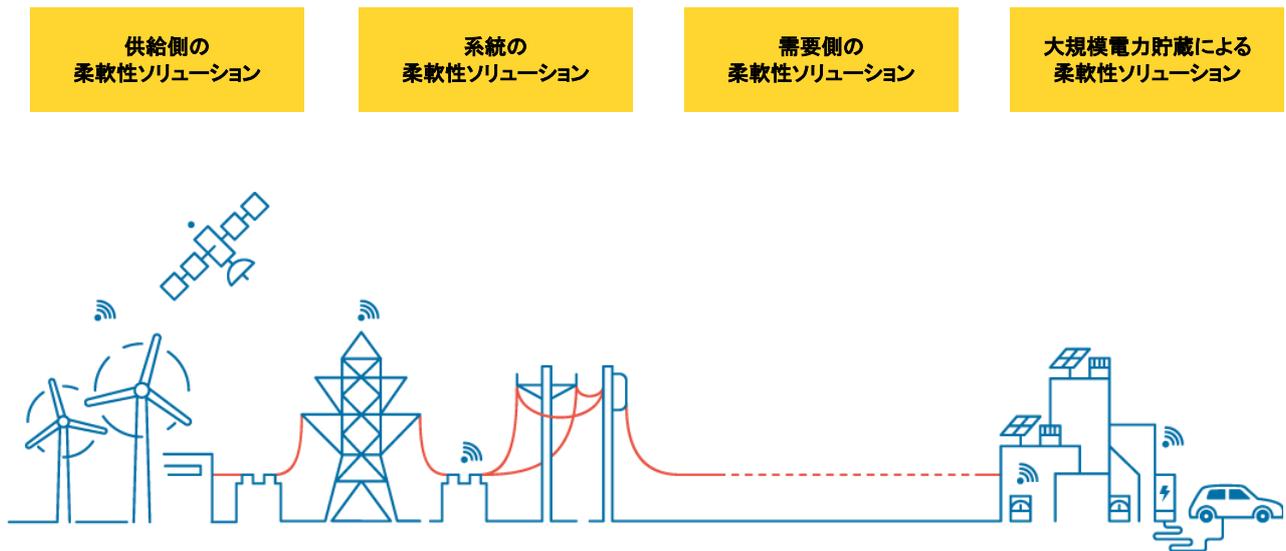
以下の小節では、11 のソリューションのそれぞれを詳しく論じる。効果的なソリューションを構築するために必要となるイノベーションと、ソリューションが電力システムに及ぼす影響について説明する。また、実際にこれらのソリューションが実施された事例についても取り上げる。

図 15 従来型の柔軟性供給源(左)と新たな柔軟性供給源(右)の比較



3

図 16 実現技術、ビジネスモデル、市場設計、系統運用におけるイノベーションを組み合わせたソリューション



供給側の柔軟性ソリューション

● ソリューション I:

先進的な気象予測手法を取り入れることによる VRE 電源の不確実性低減

- IoT(モノのインターネット)
- AI(人工知能)とビッグデータ
- 電力市場における時間分解能の向上
- 電力市場における空間分解能の向上
- VRE 電源の先進的予測手法

● ソリューション II:

柔軟性の高い電源による変動性吸収

- 従来型発電所における柔軟性
- IoT
- AI とビッグデータ
- ブロックチェーン
- 電力市場における時間分解能の向上
- 革新的なアンシラリーサービス
- 容量市場の再設計
- 揚水発電の革新的運用手法

システムの柔軟性ソリューション

● ソリューション III:

柔軟性供給源としての地域間連系線・地域市場の活用

- IoT
- AI とビッグデータ
- ブロックチェーン
- 地域市場
- 電力市場における時間分解能の向上

● ソリューション IV:

スーパーグリッドによる需要地と遠隔地にある再生可能エネルギー電源の需給調整

- スーパーグリッド
- IoT
- AI とビッグデータ
- 地域市場

● ソリューション V:

大容量電力貯蔵および新たな系統運用手法による系統増強投資の抑制

- 大容量蓄電池
- 再生可能エネルギーによる P2H
- 再生可能エネルギーによる P2H2
- IoT
- AI とビッグデータ
- 電力市場における空間分解能の向上
- バーチャル送電線
- DLR

需要側の柔軟性ソリューション

● ソリューション VI:

分散型エネルギー源のアグリゲーションによる電力系統へのサービス提供

- ビハインド・ザ・メーター(需要側)蓄電池
- 電気自動車のスマートチャージ
- 再生可能エネルギーによる P2H
- IoT
- AI とビッグデータ
- ブロックチェーン
- アグリゲーター
- 分散型エネルギー源の市場導入

- 革新的なアンシラリーサービス
- TSO と DSO の協力

● **ソリューション VII:**

デマンドサイドマネジメント

- ビハインド・ザ・メーター(需要側)蓄電池
- 電気自動車のスマートチャージ
- 再生可能エネルギーによる P2H
- IoT
- AI とビッグデータ
- エネルギー・アズ・ア・サービス (EaaS)
- 時間別料金制度
- ネットビリング制度
- VRE 電源の先進的予測手法

● **ソリューション VIII:**

再生可能エネルギーのミニグリッドによる電力系統へのサービス提供

- 再生可能エネルギーのミニグリッド
- ビハインド・ザ・メーター(需要側)蓄電池
- 電気自動車のスマートチャージ
- 再生可能エネルギーによる P2H
- IoT
- AI とビッグデータ
- ブロックチェーン
- ピア・トゥー・ピア (P2P) 電力取引
- コミュニティ所有モデル
- 分散型エネルギー源の市場導入

● **ソリューション IX:**

分散型エネルギー源による配電系統の最適運用

- IoT
- ビハインド・ザ・メーター(需要側)蓄電池
- 電気自動車のスマートチャージ
- AI とビッグデータ
- アグリゲーター
- ネットビリング制度
- DSO の将来的役割
- バーチャル送電線

大容量電力貯蔵による柔軟性ソリューション

● ソリューション X:

大容量蓄電池ソリューション

- 大容量蓄電池
- IoT
- AI とビッグデータ
- アグリゲーター
- 革新的なアンシラリーサービス
- 電力市場における時間分解能の向上
- 電力市場における空間分解能の向上
- 容量市場の再設計
- バーチャル送電線

● ソリューション XI:

P2X ソリューション

- 再生可能エネルギーによる P2H2
- 再生可能エネルギーによる P2H
- AI とビッグデータ
- 革新的なアンシラリーサービス
- バーチャル送電線



- 実現技術
- ビジネスモデル
- 市場設計
- 系統運用

- ソリューション

3

3.1 供給側の柔軟性ソリューション

電力系統の需給調整における変動性と不確実性への対処は、系統運用において目新しい問題ではない。需要は、ある程度の変動性と不確実性を常に伴うものではあるが、比較的容易に予測することができている。しかし、電力系統においてVRE導入率が高まるにつれ、VRE電源の変動性と不確実性が及ぼす影響は頻度的にも程度的にも大きくなり、系統運用にさらなる課題をもたらしている。供給側でこの課題に取り組むためのソリューションには、次のようなものがある。

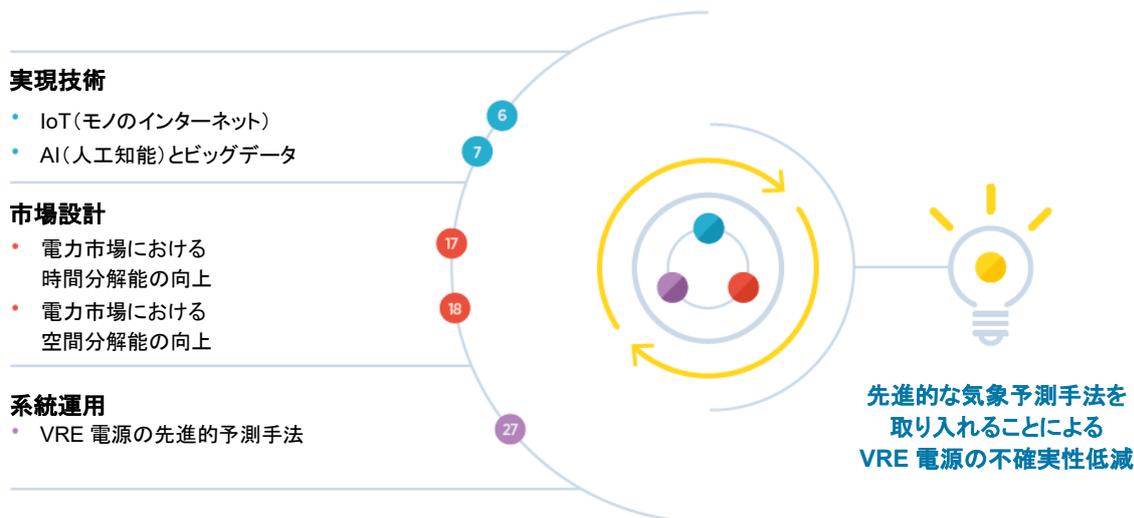
- **先進的气象予測手法を取り入れることによる風力発電や太陽光発電の不確実性の最小化**：このソリューションは、予測手法やそれを利用するための技術に依存する。ビッグデータや人工知能を駆使して改良を図ることにより、予測精度を高め、ひいては系統全体の信頼度を高めることができる。(ソリューション I)
- **既存の電源がより柔軟性を高めるようなインセンティブ**：例えば、高速応答型の揚水式電力貯蔵や出力変化速度の速いガス火力発電などが挙げられ、柔軟性の小さい発電所が技術更新によって柔軟性を高めた場合に報酬を与えることも含まれる。このソリューションは、技術面および市場設計におけるイノベーションに重点を置いており、系統柔軟性に大きな影響を与えられる可能性がある。(ソリューション II)



ソリューション I

先進的な気象予測手法を取り入れることによる VRE 電源の不確実性低減

図 17 VRE 電源の不確実性低減に向けた先進的な気象予測手法を含むイノベーションの相乗効果



- **系統運用レベルでは**、電力系統に風力発電や太陽光発電を導入するにあたっては、特に大量導入の際に VRE 出力の高精度予測がきわめて重要である。系統運用者が利用できる最もコスト効率の高い手段のひとつである先進的な気象予測は、VRE 発電に伴う不確実性の低減に貢献し、変動性に対応した運用計画の策定を支援する。予測精度の向上によって対策の必要性が取り除かれるわけではなく、計画を立てる時間的余裕が増えるにすぎない。とはいえ、高精度の予測によって、電源の起動停止および給電指令の効率を高めることができ、系統信頼度の問題が軽減され、ひいては系統に必要な運転予備力を削減できる。また、運転予備力などの系統サービスを提供するために、VRE 電源を利用することも可能になる。例えば、風力発電の場合、風車ブレードのピッチ制御によって上方および下方予備力を供給することができる。VRE から系統サービスを得られる場合、系統における VRE 導入率をさらに高めることが可能となる (IRENA, IEA and REN21, 2018)。

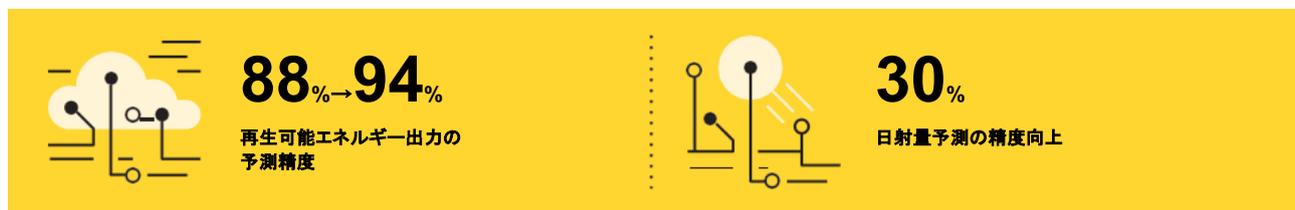
高精度な気象予測を利用すれば、2～6 時間間隔で発電出力を正確に予測することができ、系統信頼度が大幅に向上する。今日では、(発電所単位ではなく)地域レベルの予測誤差は、発電の 1 時間前で定格出力の 3%～6%、1 日前で 6%～8%である。それに対し、負荷予測の誤差は通常、1 日前で 1%～3%である (Lew et al., 2011)。発電予測のわずかな改善でも、大きな運用上の便益と経済的便益をもたらす可能性がある。(主要イノベーション: VRE 電源の先進的な予測手法)

- **実現技術の進歩により**、先進的な気象予測モデルはいまや、サイト固有のパラメーターや先進的な気象観測装置から収集したリアルタイムのデータを考慮に入れるようになっている。クラウドベースのコンピューティング、予測結果を 1 時間ではなく 5 分から 15 分で算出可能な改良数理モデル、人工知能など、最新の情報通信技術 (ICT) がもたらす著しい処理能力を、過去の気象パターンおよび発電出力を収集したビッグデータとともに用いることにより、VRE 出力予測の精度と位置分解能を高めることができる。このほか、先進的な雲画像解析技術、雲の動向を監視する全天球カメラ、風車に設置する風速・風向・気温を観測する各種センサーを用いた気象予測モデルがある。(主要イノベーション: AI とビッグデータ, IoT)

3

その成功事例は、ドイツで使用されている機械学習ベースのソフトウェア EWeLiNE である。このソフトウェアは、人工知能と、太陽光センサー、風車センサー、気象予測のデータを用いて、出力予測を行うものである。これにより、再生可能エネルギーが連系された電力系統における発電余剰や間欠性による損失を最小限に抑えることに貢献する。もうひとつの事例は、ニューヨークとインドを拠点とする企業ユートプス・インサイト(Utopus Insights)社である。同社は、需給調整に大きな課題をもたらす再生可能エネルギーの拡大に対応する手段として、機械学習を用いた電力系統向けの高度な予測手法に特化している。ピーク負荷の予測および管理に加え、ユートプス・インサイト社のソフトウェアによって、送電線の断線、太陽光パネルの系統からの遮断、風車の不快な騒音の原因となる着氷現象も予測することができる(Polhamus, 2017)。

- 予測精度向上の便益を最大限に活用するためには、**市場設計**の適応が必要になる。高度な気象予測を利用して、電源の起動停止および給電指令や送電計画の更新頻度を高めることができる。これにより、電力系統の計画精度を改善し、割高な運転予備力の必要量を減らすことができる。高精度の太陽光発電および風力発電出力予測があれば、十分な時間的余裕をもって従来型電源の出力を上昇または低下させることができ、それによって従来型電源からの排出量削減や電力系統の需給調整をコスト効率よく行うことができる。卸電力市場の時間分解能および空間分解能の向上は、市場やディスパッチ(給電)計画において、VRE 発電のための先進的気象予測がもたらす価値を生かすことに貢献する。米国テキサス州の ERCOT では、ディスパッチの間隔を 15 分おきから 5 分おきに短縮した結果、実際のディスパッチの 10 分前まで発電計画の更新ができるようになった。このような法制の変更は、予測誤差を最小限に抑え、予測精度の向上によって風力発電の出力抑制を低減させることに役立っている(Bridge to India, 2017)。(主要イノベーション: 電力市場における時間分解能の向上、電力市場における空間分解能の向上)



デジタル技術による予測精度向上が及ぼす影響

- **人工知能によって再生可能エネルギー出力の予測精度を 88%から 94%に向上可能。**

機械学習アルゴリズムなどのデジタル技術を気象データおよび発電所の出力データに応用することにより、再生可能エネルギー出力の予測精度を、業界全体で約 88%から 94%に引き上げることができる。これらのシステムのほとんどは、試行段階である。また、既存のデジタルシステムを改良して運用データを系統運用者に直接提供可能にすることで、VRE 導入率を高めることも可能である(BNEF, 2017)。

- **人工知能を利用した場合、日射量予測の精度を 30%向上。**

2015 年、米国エネルギー省の SunShot イニシアチブにおいて策定された IBM とパートナーチームによるプロジェクトは、ディープマシンラーニング技術を用いた高度な日射量予測モデルを構築することにより、予測精度の 30%向上を可能とした。Watt-Sun と命名された自己学習型の気象予測モデルおよび再生可能エネルギー出力予測技術は、各地の気象観測所、センサーネットワーク、衛星、全天球画像カメラから得られた膨大な過去のデータとリアルタイムの測定値を統合するものであった(NREL, 2015a)。



10%

風力発電の
出力抑制を削減6000 万ドル
(約 66 億円)風力発電出力予測精度の
37%向上によるコスト削減

最大

1.46 億ドル
(約 161 億円)短期的な風力発電出力予測精
度の 50%向上によるコスト削減

VRE 出力抑制に及ぼす影響

- 出力 670 MW の太陽光・風力併設発電所において、風力発電の出力抑制を 10%削減することにより、14,000 世帯分の電力を供給。

IBM は、中国国家電網公司(State Grid of China)の子会社である国網冀北電力有限公司(Jibe Electric Power Company Limited)向けに「ハイブリッド再生可能エネルギー予測」(Hybrid Renewable Energy Forecasting: HyRef)ソリューションを構築した。これは、先進的データ解析を行い、出力 670 MW の太陽光・風力発電所における出力予測の向上を図るものである。HyRef は、気象モデリング機能、先進的な雲画像解析技術、雲の動向を監視する全天球カメラのほか、風車センサー、気象予測データ、雲画像を用いて、15 分前から 1 カ月前までの期間における風力発電出力を事前に予測する。この技術により、風力発電の出力抑制を 10%削減し、系統内の再生可能エネルギーの導入率を高めることができる。この再生可能エネルギーの追加供給量によって、14,000 世帯分相当の電力をまかなうことができる(NREL, 2013)。

コスト削減に及ぼす影響

- 米国コロラド州において、2009 年から 2016 年までの間に 3,800 万ドル(約 4 億 2 千万円)の投資によって風力発電出力の予測精度が 37.1%向上し、6,000 万ドル(約 66 億円)のコストを削減。

米国コロラド州の電気事業者 Xcel Energy 社は、風力発電出力の予測精度が 37.1%向上した結果、2009 年から 2016 年までの間に同社顧客の費用負担が 6,000 万ドル軽減されたと算定した。風車中心(ハブ)の平均的な高さは地表から 80~100 m になるが、従来の予測は地表レベルの測定値に基づいて行われていた。また、一部の観測所は風車から約 50 km も離れていた。そこで、最先端の風況予測システムを発電所ごとに個別に設置し、風車中心の高さで風速を測定して、15 分おきにデータを更新することによって予測精度の向上を達成した。この風力発電所では、発電出力予測精度の向上により、年間約 1,170 万トン相当の二酸化炭素排出量が削減された(Baskin, 2016; RAL, 2014)。

- 米国カリフォルニア州において、短期的な風力発電出力予測精度の向上により、年間約 500 万~1.46 億ドル(約 5.5 億~161 億円)のコスト削減(容量予備力、周波数制御予備力、発電コストの削減)を達成。

カリフォルニア独立系統運用機関(CAISO)に関する研究では、CAISO 市場における短期的な風力発電出力予測精度の向上により、さまざまなシナリオを考慮すると年間約 500 万~1.46 億ドルのコスト削減(容量予備力、周波数制御予備力、発電コストの削減)をもたらすことが示された(NREL, 2015b)。利用可能な風力発電総容量は、風力発電導入率が低いシナリオでは 7,299 MW、風力発電導入率が高いシナリオでは 11,109 MW と予想される。風速の時間変動により、瞬間的な導入率、および、予測精度が実際のディスパッチにどの程度影響を及ぼすかが決まる。

風力発電シナリオ	予測精度向上	年間コスト削減額(百万ドル)
低	10%	5.05(約 5.5 億円)
高		25.1(約 28 億円)
低	25%	14.8(約 16 億円)
高		62.9(約 69 億円)
低	50%	34.7(約 38 億円)
高		146(約 161 億円)

出所: NREL, 2015

ソリューション実施例

ドイツでは、再生可能エネルギーの導入目標を達成するために先進的気象予測手法を活用

- 2012 年以降、Deutscher Wetterdienst (ドイツの気象予測サービス)は、連邦経済エネルギー省(BMWi)が出資した 2 つの研究プロジェクトである EWeLiNE および ORKA の一環として、再生可能エネルギーへの応用のための気象予測手法最適化に取り組んできた。2015 年 12 月に公表された ORKA プロジェクトの結果を受け、良好な成果が認められた同プロジェクトは新たなプロジェクトとして続行されることとなり、ORKA2 が 2016 年 1 月に発足した。対象分野は、送電線の電流容量の予測にも拡大された。

EWeLiNE プロジェクトでは、ドイツ気象庁およびフラウンホーファー風力エネルギー・エネルギーシステム技術研究所(Fraunhofer IWS)が、ドイツの TSO であるアンプリオン(Amprion)社、テネット(TenneT) TSO 社、フィフティーヘルツ・トランスミッション(50 Hertz Transmission)社の 3 社と協力を行っている。その目的は、風力発電所や太陽光発電所向けの気象予測および出力予測技術を向上させ、特に系統安定度に重点を置いた新たな予測ツールを開発することである。EWeLiNE では、ドイツ各地の太陽光パネルと風車からリアルタイムデータを収集し、アルゴリズムに投入する。アルゴリズムは、以後 48 時間の再生可能エネルギー出力を、機械学習を用いて計算する。そのうえで、研究者が実際のデータと EWeLiNE の予測を比較し、アルゴリズムに改良を加えて精度の向上を図る。

BMWによるもうひとつの研究プロジェクトである PerduS は、2016 年 3 月に発足した。このプロジェクトは、サハラで発生する砂塵と、砂塵発生中の天候および太陽光発電出力予測に重点を置いており、ドイツの電源構成における再生可能エネルギーの導入率拡大に貢献している(DWD, 2018)。例えば、2014 年 4 月 5 日、ドイツ全土の太陽光発電に関する翌日予測に 10 GW レベルでの重大な誤差が生じた。当日とその前の数日間、サハラの砂塵がドイツに飛来していたためであると考えられる。

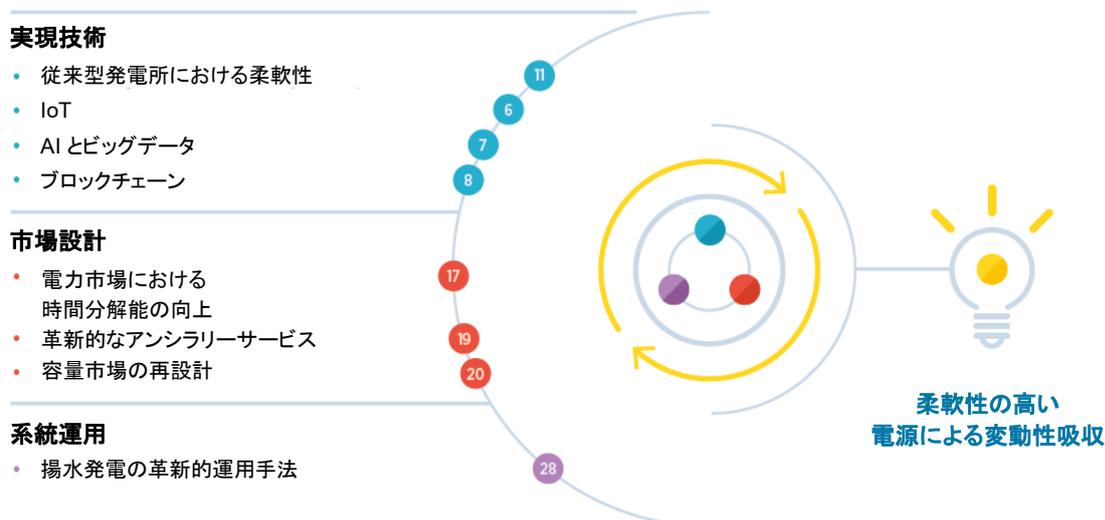
概要表: 先進的な気象予測手法による VRE 電源の不確実性低減に関する便益と費用

先進的な気象予測手法による VRE 電源の不確実性低減	低い	中程度	高い	非常に高い
 便益				
システム柔軟性が向上する可能性				
対象となる柔軟性ニーズ	分単位～週単位			
 費用および複雑性				
技術およびインフラの費用				
規制枠組みに求められる変化				
	このソリューションは、法制度による誘導が可能である。 例えば、VRE の需給調整責任の導入によって、 VRE 出力の予測精度向上を促すことができる。			
プレイヤーの役割に求められる変化				
その他の課題	<ul style="list-style-type: none"> 小規模プレイヤーが過去の気象データをどこまで利用できるか 			

3

ソリューション II
柔軟性の高い電源による変動性吸収

図 18 柔軟性の高い電源を生み出すためのイノベーションの相乗効果



- **運用レベルでは**、供給側電源設備の出力変化速度が速く、起動時間が短く、応答時間が短いほど、系統柔軟性は大幅に高くなる。水力発電所およびガス火力発電所は、一般的にそのような速い出力変化速度と応答時間を提供する。水力発電所は、ゼロコストで即時に応答する能力を備えている。しかし、ガス火力発電所の場合、柔軟性を得るためのコストは出力変化速度と保持時間に応じて増加する。また、特に液化天然ガス(LNG)の輸入に依存する市場においては、ガス燃料コストの影響を大きく受ける。揚水式電力貯蔵設備は、供給面(必要量を確実に供給できる電力)においても需要面(供給過剰時は貯水池に水を汲み上げ)においても大きな柔軟性を発揮することができる。(主要イノベーション:揚水発電の革新的運用)
- **技術面では**、通常であれば柔軟性の小さい発電手法でも、技術向上により系統柔軟性に貢献できるようになる(Jacobs et al., 2016)。発電所レベルでは、運用柔軟性は主に3つの要素によって特徴付けられる。運転可能範囲(燃焼量変更比、最小負荷から最大負荷までの範囲)、正味電力供給量を調整できる速度(出力変化速度)、および停止状態から起動して定常運転に達するまでの所要時間(起動時間)である(Agora Energiewende, 2017)。石炭火力発電所は、比較的柔軟性に乏しいと従来考えられてきたが、実際には、技術面および運用面で必要な改修を行えば、柔軟性を供給することが可能であることが研究により示されている(Cochran et al., 2013)。また、発電設備の所有者が設計上の最適利用率である70%~85%を大きく下回る平均設備利用率でも運転するように促される、または強いられる場合も、同様に改修を行うことで、柔軟性の供給が可能となることが示されている。インドとオーストラリアはいずれも、既存発電設備を改修して、より低い設備利用率でより柔軟性のある出力変化管理に対応できるようにすることを検討している。(主要イノベーション:従来型発電所における柔軟性)
- **市場設計については**、発電所をベースロード電源としてではなく負荷調整電源として運用するよう動機付けるためには、発電所の運用者に対して、このような変更の実施と追加的な発電所運用コストを補償する新たな

な収入源を提供する必要がある。例えば、石炭火力発電所をベースロード電源から負荷調整電源に移行させる場合、運用者は新規設備投資が必要になる可能性が高い一方、年間設備利用率の低下と強制停止の頻度増加に直面する。このような発電所を負荷調整電源として運用し、なおかつ利益も維持できるよう、運用者に十分な報酬とインセンティブを与えるために、画期的な市場規定を設計する必要がある。

これを達成するひとつの方法は、卸電力市場における時間分解能を高めることである。それにより、特定時点での電力市場状況をより反映した形で、既存電源の効率的な応答に対して報酬を与えることができる。商品や契約の取引間隔を短縮すること、および取引を可能な限りリアルタイムに近づけることは、柔軟性に関わる費用を取引価格に内在化させるために役立つ。それにより、出力を容易に上昇または低下させられリアルタイムに近いタイミングで応答できる柔軟性のある電源に、価値をもたらすことができる。価格が短期的な需給状況を反映するほど、迅速に出力調整できる電源に適切な価格シグナルを送ることができる。風力発電や太陽光発電の導入率拡大に伴い、電力の当日取引量が増大し、また、更新された最新予測に合わせて発電スケジュールを調整する必要性が高まる。したがって、再生可能エネルギーの潜在力を十分に活用するために市場の時間枠（決済期間と市場閉場の双方）を適応させ、VRE 電源に対応するために系統内の他の既存電源の柔軟性を高める必要がある。

当日市場がある場合、市場参加者は、受渡日に所定の取引間隔（決済期間とも呼ばれる）で売買入札を出さなければならない。市場参加者は、決済期間の前のある時点（市場閉場と呼ばれる）まで取引を行うことができる。時間分解能が低い市場の例として、ドイツでは 15 分間の決済期間に対して実際の受渡が始まる 5 分～30 分前が市場閉場時間である（EPEX SPOT, 2019）。一方、イングランドでは 30 分間の決済期間の 16 分～19 分前が市場閉場時間となっている（IEEFA, 2018）。市場閉場時間の幅が狭いほど、再生可能エネルギーの出力予測の誤差が少なくなり、予想外の変動性に対応するための高価な予備力電源の必要量を最小限に抑えることができる。（主要イノベーション：電力市場における時間分解能の向上）

リアルタイムでは、系統運用者は、需給予測からのリアルタイムでの逸脱に対応するため、一次予備力、二次予備力、または三次予備力を用いて運用する。このようなアンシラリーサービス商品は、系統柔軟性を高め、高速応答と出力調整能力を奨励し、個々のサービスに応じた報酬を与えられるように設定する必要がある。例えば、米国の系統運用者である PJM は、応答速度の遅い従来型電源と応答速度の速い蓄電池電力貯蔵システム向けにさまざまな周波数調整商品を開発している。また、小規模事業者や分散型エネルギー源を含むすべての新規プレーヤーに市場を開放し、すべてのプレーヤーに電力系統の需給調整に対する責任を持たせることも、系統柔軟性を高めると考えられる。需給調整力を限界価格制にし、上限価格をなくすことで、電力の真の価値を価格に反映させることが可能になる。これはまた、柔軟性への投資に対して、また、需給調整力および予備力サービスを提供することに対して、適切なインセンティブを与えることにもなる。（主要イノベーション：革新的なアンシラリーサービス）

容量市場メカニズムを通じて、1) かかる容量メカニズムが、需要側の応答、連系線、電力貯蔵設備の運用者など、すべての柔軟性サービス提供者の公平な参加を可能にするように設計されており、かつ、2) かかるメカニズムが、実際に懸念されているアデカシー問題への対策として設計されている場合、信頼度の高い容量を常時、十分に確保することができる。しかし、VRE を大量導入した将来の電源システムにおいては、

3

再生可能エネルギー電源がもたらす変動性に対応するため系統柔軟性が必要となる。容量市場商品に柔軟性要件を設定することにより、発電所への投資を奨励することができる。(主要イノベーション: 容量市場の再設計)

- より迅速に、よりリアルタイムに近く、より短い間隔でエネルギーが取引される電力系統は、管理がより難しく、いっそうの自動化を進める必要がある。デジタルシステムのような**実現技術**を用いることにより、遠隔地の発電所を監視して、簡単な指示や修正を運用者に自動送信することができる。系統運用者は、発電所や電力取引所からのデータ報告に基づいて予測を立てることができ、電力およびサービスの調達に関してより良い決定を下すことが可能になる。ICT の発展と先進的コントロールセンターは、それらの変化を実現させる契機となり、系統運用のあり方を変革して系統柔軟性を高めると期待される。

最近までは、十分なセンサーを設置し、高頻度データを伝送し、大量データを保管し、スマートデータ解析を行い、最適化を行うために運用手法を調整するには、多くのコストが必要であった。しかし、デジタル技術の進歩によって運用の「完全デジタル化」が実現し、このような制約は解消されつつある。系統はよりインテリジェントに、より柔軟になり、変動性と不確実性への対応力を蓄えつつある。運用側では、IoT を活用して最低設備利用率を引き下げ、出力変化速度を高めることにより、発電所の柔軟性を高めることができる。(主要イノベーション: AI とビッグデータ、IoT)



卸電力市場における時間分解能の向上が及ぼす影響

- 米国では、ディスパッチの高速化に伴って系統安定化費用が低減。ディスパッチが 5 分間隔の地域では 0 ドル～4.40 ドル/MWh (0～約 4.8 円/kWh) であるのに対し、1 時間間隔の地域では 7 ドル～8 ドル/MWh (約 7.7～8.8 円/kWh)。

5 分間隔のディスパッチは、現在、米国各地の独立系統運用者にとって標準的な様式であり、国内負荷の 3 分の 2 以上をまかなっている。ディスパッチのさらなる迅速化により、負荷と発電とのレベルをより細かく一致させることができ、割高な調整予備力の必要量を削減することができる。5 分間隔のディスパッチが採用されたのは、再生可能エネルギー電源の導入を可能にするという目的のためではなく、系統運用コストを削減するという理由からである。5 分間隔のディスパッチにより、調整力の必要量は 1 日のピーク負荷の 1%未満に抑えられている。ディスパッチが迅速化している地域では、系統安定化費用が低くなることが明らかになっている。例えば、ディスパッチが 5 分間隔の地域では、系統安定化費用は 0 ドル～4.40 ドル/MWh (0～約 4.8 円/kWh) であるが、1 時間間隔の地域では 7 ドル～8 ドル/MWh (約 7.7～8.8 円/kWh) である (WGA, 2012)。

- ドイツの当日電力市場では、15 分間隔の当日入札 (板寄せ方式) を新たに導入することによって効率性が向上、また、明確な価格シグナルの発信を容易化。石炭火力発電所の改修は、柔軟性向上と再生可能エネルギー電源の導入率拡大に役立っている。

2014 年 12 月、EPEX は、前日 (D-1) 午後 3 時に開場する 15 分間隔の当日入札 (板寄せ方式) を新たに導入した。前日市場と当日市場の取引が 1 時間間隔であることによる制約は、これにより大幅に解消された。オークションは、翌

日の 15 分単位 96 コマについて、シングルプライス方式で行う。これにより、ドイツの当日電力市場の効率性が高まり、明確な価格シグナルの発信が容易になった。15 分間隔の当日入札が導入されてから、価格の変動幅も小さくなっている(EPEX SPOT, n.d.)。石炭火力発電所は 15 分間隔で出力調整を行って、当日市場に参加している。ヴァイスヴァイラー(Weisweiler)発電所は、設備更新により 2 基の発電ユニットにおける最低負荷を 170 MW から 110 MW まで引き下げ、出力変化速度を 10 MW/分に速めることができた。ベックバツハ(Bexbach)発電所は、設備改良により最低負荷を 170 MW から 90 MW に引き下げた。このような設備改良と系統運用の柔軟化は、運用保守コストを増大させる。しかし、系統内の再生可能エネルギー電源の導入率拡大に伴う燃料節減に比べると、コスト増加は小さなものである(Agora Energiewende, 2017)。

- 市場閉場を受渡の 75 分前から 15 分前まで短縮することで、電力需給調整の必要量を年間数百 GWh 削減可能。

例えば RWE のグループ会社の TSO であるドイツのアンプリオン(Amprion)社は、エネルギー規制当局に提出した文書で、受渡までの時間を 75 分間から 15 分間まで短縮できれば、電力需給調整の必要量はアンプリオン社の管轄地域だけでも年間数百 GWh 削減できることを明らかにした。



イノベーションがアンシラリーサービス市場に及ぼす影響

- 英国の TSO であるナショナルグリッド(National Grid)社は、新たなアンシラリーサービス商品を導入して 2.62 億ドル(約 290 億円)のコスト削減を実現。

風力発電や太陽光発電の導入率拡大に伴い、系統運用者は増大する出力変動への対応を余儀なくされている。英国の National Grid 社が導入した Enhanced Frequency Response と呼ばれる 1 秒以内で周波数調整を行う高速応答サービスは、周波数変動の制御強化を可能にし、2 億英ポンド(約 290 億円)のコスト削減をもたらすと見込まれている(KPMG, 2016)。

- 再生可能エネルギー電源、蓄電池電力貯蔵システム、産業需要家によるアンシラリーサービス提供を認めることにより、TSO の調達コストを 70%低下し、VRE の設備容量を 200%拡大。

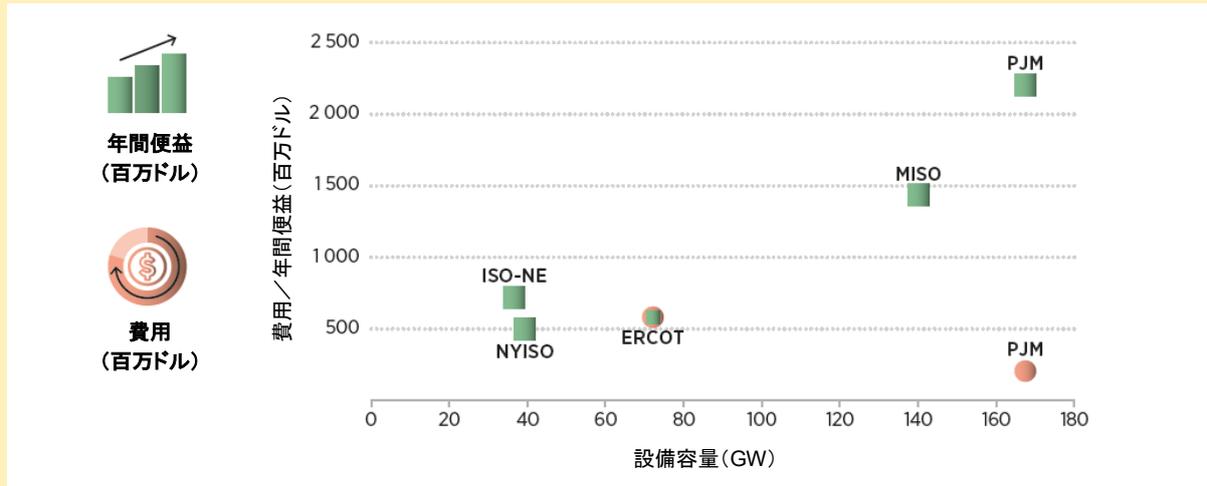
ドイツでは、2009 年より、従来型電源のほか、再生可能エネルギー電源、蓄電池電力貯蔵システム、産業需要家も、需給調整市場への参加を認められている。その結果、2009 年から 2015 年までの期間に需給調整市場の規模(GW 単位)が 20%縮小し、電力系統のアンシラリーサービス調達コストが 70%低下した一方、同時期の系統安定度は向上し、VRE の設備導入容量は 200%増加した。これは、代替エネルギー源にアンシラリーサービス市場への参加を許可することで、系統安定度を高めるとともに、コストを削減できることを示している(Wang, 2017)。

ゾーン料金制およびノード料金制の影響

- 米国のそれぞれの独立系統運用機関において、ノード料金制への移行に要した投資は 1 年に満たない運用期間で回収。

米国では、ノード料金制が導入された結果、送電混雑管理の向上、系統信頼度の強化、小売市場へのアクセスと競争の促進、送電コストの低下、プランニングの改善、規制当局との協調強化がもたらされた(Eto et al., 2005)。図 19 に示す通り、それぞれの独立系統運用機関において、ノード料金制への移行に要した投資は 1 年に満たない運用期間で回収された。

図 19 ノード料金制の費用と便益



ISO-NE=ニューイングランド独立系統運用機関; NYISO=ニューヨーク独立系統運用機関; ERCOT=テキサス電力信頼度協議会; MISO=中部大陸独立系統運用機関; PJM=ペンシルバニア州、ニュージャージー州、メリーランド州を中心とする地域系統運用機関

出所: Neuhoff and Boyd, 2011



8%

デジタル化により、再生可能エネルギーの発電電力量が増加



25%

デジタル化により、出力抑制を削減



10%

デジタル化により、運用保守コストを削減

デジタル化が卸市場に及ぼす影響

- デジタルシステムの導入とデータ解析により、再生可能エネルギーの発電電力量の 8%増加、出力抑制の 25%削減、運用保守コストの 10%削減を実現可能。

ゼネラルエレクトリック (General Electric) 社は、デジタルシステムとデータ解析を導入することにより、再生可能エネルギーの運用保守コストを 10%削減し、発電電力量を 8%増やし、出力抑制を 25%削減することができると見積もっている (Neuhoff and Boyd, 2011)。

ソリューション実施例

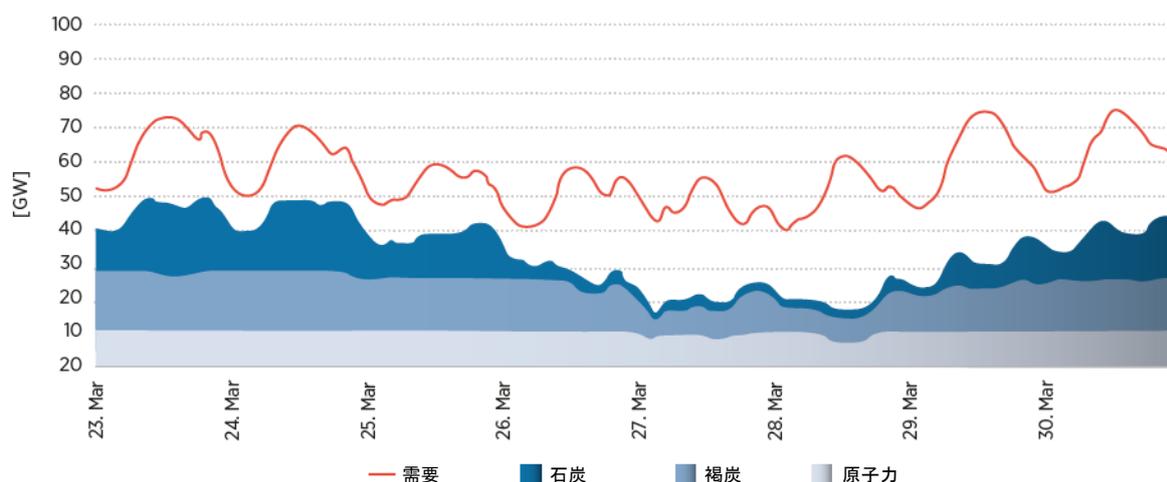
ドイツにおける石炭火力発電所および市場設計を通じた柔軟性向上

- 既存の石炭火力発電所の運用者は、技術的には、通常考えられているよりはるかに大きな柔軟性を発揮することができる。ドイツやデンマークのような国々では、既存発電所を対象とする柔軟性向上を目的とした改修事業が実施され、技術的要素における柔軟性が大幅に向上している。また、柔軟性の提供に報酬を与えるために、当日電力市場などにおいて効果的な市場インセンティブが導入されている。このような対策のおかげで、より容易に、かつ経済効率の高い方法で再生可能エネルギー電源を導入することができ、それにより無駄な出力抑制を削減することができる。

最新式の石炭火力発電所は、定格負荷の 25%~40%の最低負荷で運転することができる。最新式の褐炭火力発電所は、定格負荷の 35%~50%の最低負荷で運転することができる。それに対し、先進国で 10 年

～20年前に建設された発電所の最低負荷率は40%(石炭)から60%(褐炭)であるが、設備改良によって最低負荷率をさらに低減させることができる。例えばドイツでは、12%の最低負荷率が達成されている(Agora Energiewende, 2017)。図20は、ドイツにおいて既に石炭火力発電所が大幅な運用柔軟性を、褐炭火力発電所もある程度の運用柔軟性を実現しており、また、再生可能エネルギーの出力や需要の変動に応じて出力調整をしている状況を示している。

図20 ドイツにおける原子力、石炭火力、褐炭火力発電所の出力(2016年3月23日～30日)



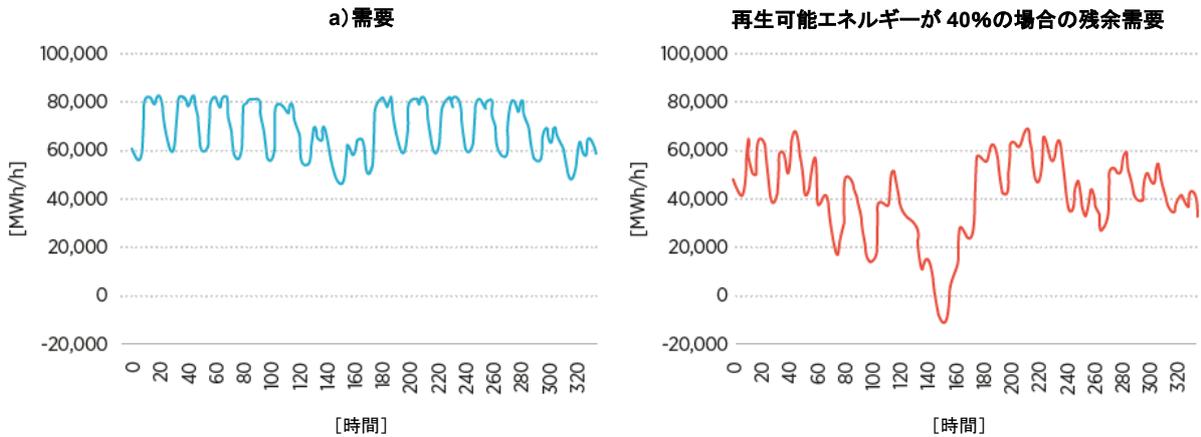
出所: Agora Energiewende, 2017

柔軟性を高める設備改修における採算性の有無とその程度は、発電所の特徴と市場環境との関係(発電所の運転年数、再生可能エネルギーの市場シェア、全般的な市場設計、柔軟性に対する報酬オプションなど)によりケースバイケースで異なる。とはいえ、柔軟性に報酬を与えるよう適切な市場設計がなされているドイツでは、柔軟性を高める設備改修は採算性が見込めることが示されている。短期電力市場の導入と需給調整力に関する仕組みを修正することは、柔軟性に報酬を与えるための重要な手段である。15分間隔の当日市場の導入によって、石炭火力発電所の設備改良が促進された。

ドイツでは、たとえ発電所の寿命を縮めることになっても、敢えて柔軟性を高める取り組みを推進する発電所運用者がいる。これは、一部には、今後何十年かのうちに石炭火力発電から脱却していくというエネルギー政策に関係している。これはまた、他国と比べてドイツの発電所の柔軟性が比較的高価であることを説明するものでもある。

風力発電や太陽光発電の導入率が高い電力系統では、VREによってまかなわれない負荷、すなわち残余負荷曲線に従来型発電所が対応しなければならない。したがって、従来型発電所の柔軟性を大幅に高める必要があり、それに適した市場設計を採用することが望ましい。ドイツにおける柔軟性の必要性と、従来型発電所が直面している課題を、図21に示す。

図 21 ドイツにおける柔軟性の必要性。冬季のドイツにおける 2 週間にわたる負荷曲線の例



出所: Agora Energiewende, 2017

デンマークにおける市場設計と柔軟性の供給源

- デンマークでは、電力市場の発達が見られ、VRE 導入の基礎となっている。火力発電所の柔軟性向上を奨励し、VRE と火力発電が電力市場も巻き込んだ形で連動することで、広域市場において VRE の需給バランス向上を実現している。

デンマークは、2000 年より北欧の電力市場に参加している。デンマークの電源構成は、風力発電と火力発電からなり、火力発電所のほぼすべてがコージェネレーション(コジェネ)システムである。VRE 導入率拡大に伴い、コジェネ発電所の役割は、電力システムの主要なベースロード電源から系統柔軟性の主要な供給源へと変化した。

通常、火力発電所が一定の電力量を供給し続けるために設定されている出力変化速度は、最大出力の 1%/分である。デンマーク火力発電所は、電源側における柔軟性への要求を満たすため、平均出力変化速度が 4%/分になるよう設計されたり改良されたりしている。柔軟性が必要であることは、電力価格の日変動によって示されている。出力変化速度の能力が向上することで、発電所は電力市場への参加をより迅速に増減することができ、電力価格の変動に合わせた対応が可能になる。同様に、最適化されていない火力発電所の標準的な最低負荷は 30%~40%であるが、デンマークの火力発電所の中には 15%という低い最低負荷を達成しているところもある(Energinet, 2018)。

市場設計に関連する多くの問題によって、柔軟性は影響を受ける。北欧の市場設計に見られる最も重要な特徴のいくつかを、図 22 に挙げる。火力発電所の最低負荷が非常に低いことの利点は、前日市場に最低負荷(例えば 20%)で参加して、当日市場や需給調整市場に残りの容量で参加することができるという点である。柔軟性に対する大きな需要が存在する場合、価格は当日市場と需給調整市場で高くなると考えられる。したがって、柔軟性のレベルが高い発電所は、低価格で販売する電力量を最小限に抑え、高価格で販売する電力量を最大限に増やすことで、利益を増大させることができる(Energinet, 2018)。

カリフォルニアの電力市場における柔軟性奨励策

- カリフォルニアの独立系統運用機関である CAISO は、太陽光発電の導入率拡大に伴い、系統柔軟性を奨励するために電力市場におけるいくつかの改革を提案した。改革案のひとつは、前日市場における時間分解能を 1 時間から 15 分に短縮することである²(CAISO, 2018a)。スケジュールリング間隔を短縮することにより、電源側は、CAISO が予測する負荷曲線に合わせてよりきめ細かく対応することが可能になる。CAISO も、特に出力変化の大きい朝と夕方時間帯に、リアルタイム市場からの調達量を削減することができる。

2016 年 11 月、CAISO は、Flexible Ramping Product と呼ばれる調整力商品をアンシラリーサービス市場に導入した。これらは、Flexible Ramp Up および Flexible Ramp Down という不確実性に備えるための報奨金(Uncertainty Awards)商品であり、15 分間隔および 5 分間隔の出力増加および出力減少能力をアンシラリーサービスで調達する。商品は、5 分間で MW 単位の出力調整を行うという条件で調達され、出力調整の要求を満たす能力がある電源であれば参加することができる。出力増加サービス提供の価格は上限額を 247 ドル/MWh(約 270 円/kWh)とし、出力減少サービス提供の価格は上限額を 152 ドル/MWh(約 170 円/kWh)とする(CAISO, 2018b)。

CAISO の導入成功を受けて、ニューヨーク独立系統運用機関(NYISO)も、2018 年マスタープランの一環として同様の調整力商品を提案した(Avallone, 2018)。

図 22 北欧市場の主な特徴

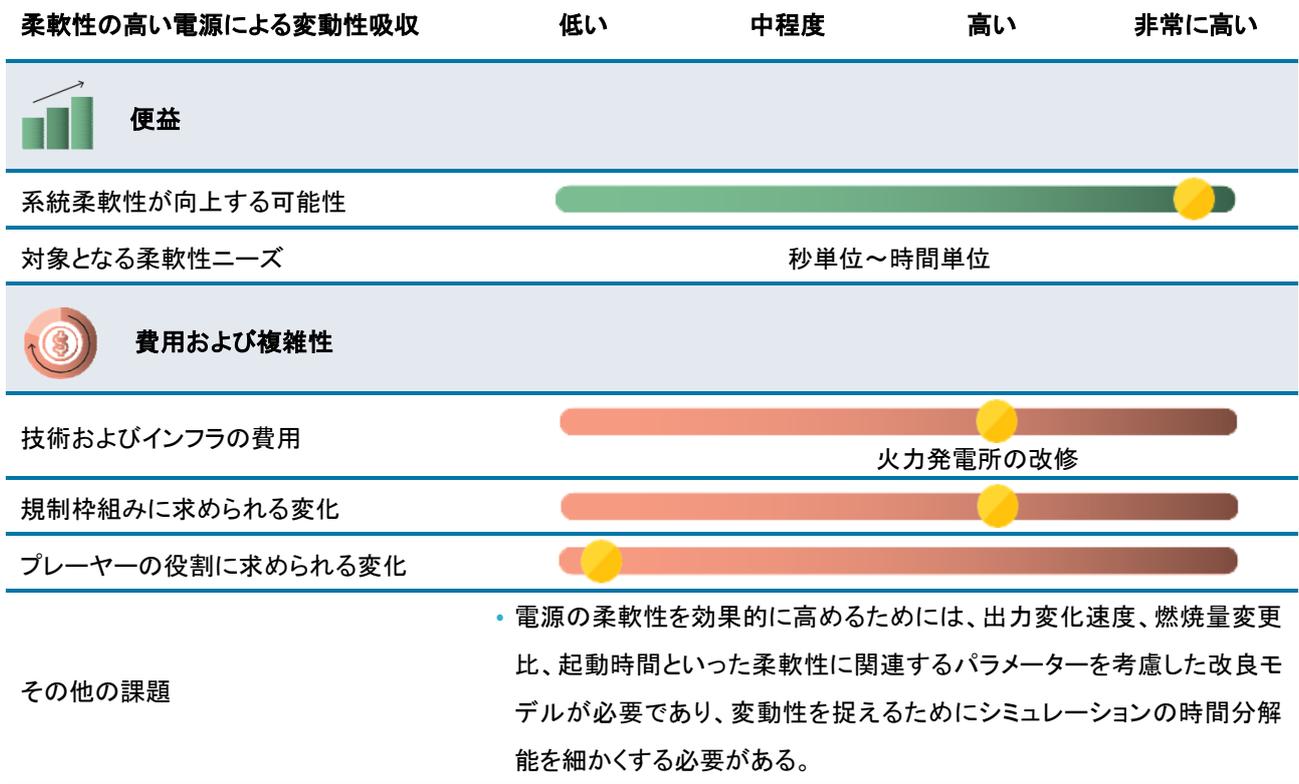
	前日	当日	需給調整
市場の種類	入札／限界価格	連続取引(ザラ場)	約定の優先順位付け／限界価格とペイ・アズ・ビッド方式の併用
最低入札量	1 MW	1 MW	5 MW
市場閉場時間	12～35 時間	60 分	45 分
入札の連結	可	不可	不可
有効期間	60 分	60 分	60 分
インバランス決済	1 時間(二重インバランス料金制)		

出所: Energinet, 2018.

² その他の改革案には、統合先渡市場(IFM)と残余ユニットコミットメント(RUC)の組み合わせ、リアルタイム市場に経済的入札を提出する義務のあるインバランス予備力の調達などがある。

3

概要表: 柔軟性の高い電源による変動性吸収に関する便益と費用



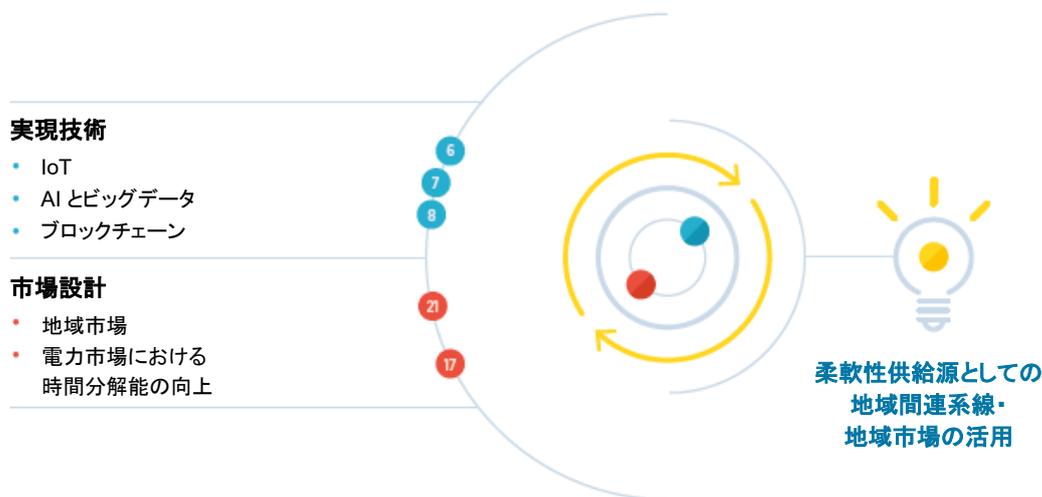
3.2 系統柔軟性ソリューション

十分な容量で強固に系統連系されている電力系統は、それ自身が強力な柔軟性供給源となる。系統柔軟性をさらに高める可能性がある新たな革新的ソリューションには、次のようなものがある。

- 地域内の再生可能エネルギーの組み合わせで生じる相乗効果を活用する地域電力市場の創出。地域市場は、地理的範囲を広げることによって出力の変動管理を容易にし、再生可能エネルギーの不足が同時に発生する可能性を削減する。(ソリューション III)
- 系統内で再生可能エネルギーの大量余剰が発生する可能性のある場所に、高圧送電網すなわちスーパーグリッドを構築して、他の地域に電力を輸送し、再生可能エネルギーの出力抑制を回避。スーパーグリッドを構築するコストは高く、供給元と連系先の系統双方にとっての経済的便益に基づいて検討しなければならない。(ソリューション IV)
- 以下のような革新的ソリューションにより、再生可能エネルギーの導入率拡大を可能にするとともに、系統増強を回避。
 - 蓄電池貯蔵を用いる。
 - P2X ソリューション(P2H2 または P2H など)を用いて、電力を別のエネルギー形態に変換し、貯蔵や輸送を可能にする。これらは、バーチャル送電線とも呼ばれる。
 - 気象条件が満たされる場合には系統における VRE を増やすために、動的線路定格(DLR)を用いる。(ソリューション V)

ソリューションⅢ 柔軟性供給源としての地域間連系線・地域市場の活用

図 23 地域間連系線および地域市場による柔軟性向上を生み出すためのイノベーションの相乗効果



電力系統間の連系を生かして地域市場を創出することは、系統柔軟性を高める非常に効果的な方法である。送電容量の増大と連系により、需給調整エリア内の電力輸送が容易になる。つまり、より多くのエリア内資源を需給バランスに活用することができる。その結果、各地の系統運用者が互いに電力やその他の系統サービスを売買するようになり、地域市場が創出される (Aggarwal and Orvis, 2016)。

- **市場設計の観点からは**、地域電力市場を創出するために、すべての参加市場の法制を調和させ、価格シグナルに応じて自由に電力をやりとりできるようにする必要がある。真に統合された地域市場とは、地域全体の卸電力市場、アンシラリーサービス市場、容量市場における規則の調和を意味する。一般的に、エネルギー源のポートフォリオにばらつきがあっても広い地域内でバランスが取れている場合、出力の変動は局地的なものに留まる傾向があり、系統全体の変動は大幅に抑えられる。また、再生可能エネルギー電源が空間的に補完し合うことも、地域市場の利点である。(主要イノベーション: 地域市場)

異なる系統間の協調を推進するために、以下のような施策がある。

- **予備力の共有**により、複数の需給調整エリア管轄機関が一連の運転予備力を維持、配分、供給する。
- **スケジューリングの協調**により、需給調整エリア管轄機関がより短い時間間隔で電力のやりとりを行う(5分から1時間間隔の短期ディスパッチ)。これにより、ユニットコミットメントに利用可能な電源の範囲が広がり、ディスパッチの効率性が向上する。スケジューリングの協調には、コミュニケーションおよびプランニングの強化と、参加者の発電電力量に対して報酬を与える市場メカニズムの設計が必要である。
- **運用の統合**、すなわち、2つ以上の需給調整エリアを統合して、ひとつの系統運用者とする。これにより、ユニットコミットメント(24時間)、短期ディスパッチ(5分~1時間)、予備力提供といった系統運用のタイムスケールをすべて統合することができる (Zaman, 2018)。(主要イノベーション: 電力市場における時間分解能の向上)

3

- **実現技術**は、地域市場運用者がすべての参加国からの注文を透明性の高い方法で処理するために必要となる。VRE がより多く導入される状況において、電力市場の時間分解能と空間分解能を細かくすることにより、さらなる VRE を系統に接続させることが可能となる。分解能が細くなるほど、電力市場のモデル化は複雑化する。特定の地域において電力市場を連系する場合、いっそう複雑性が高くなる可能性もある。なぜなら、市場運営者および系統運用者は、連系線を通して電力のやりとりをするより前に、参加国のエネルギー安全保障を確保する必要があるからである。また、電力市場が統合すれば、入札者数と約定件数も大幅に増加する。

堅牢な IT システムは、市場運営者が効率的かつ円滑に注文を処理するために不可欠である。IoT や AI、ビッグデータのようなデジタルイノベーションは、そのような複雑性を管理するために重要な役割を果たす。ブロックチェーン技術は、システムのさまざまな部分がより低コストで通信できるようにする相互運用可能な技術であり、多くのプレイヤーが関与する大規模な地域市場で取引と支払いを円滑化できる可能性がある。(主要イノベーション: IoT、AI とビッグデータ、ブロックチェーン)



VRE 導入に及ぼす影響

- **米国カリフォルニア州では、地域市場の導入によって再生可能エネルギー電源の出力抑制を 4 年間で 715,405 GWh 削減。**これはカリフォルニア州における VRE 発電電力量全体の 0.5%に相当する。

西部エネルギーインバランス市場 (Western EIM: Energy Imbalance Market) の導入により、2014 年から 2018 年半ばまでの間に、再生可能エネルギーの出力抑制が 715,405 GWh 削減され、306,112 トン相当の二酸化炭素排出量が削減された (CAISO, 2018)。

- **地域間連系により、デンマークでは系統内の風力発電導入率が 49%に。**

近隣諸国 (ドイツ、スウェーデン、ノルウェー) との大規模な連系により、デンマークの風力発電導入率は約 49%に達し、大きな出力抑制も行われていない。2008 年から 2015 年までの間で風力発電の出力抑制が行われたのは、わずか 2 回であり (2008 年と 2010 年に 200 MW ~ 300 MW の電源において 6 ~ 8 時間)、連系線の 1 本が使用できなくなったためである (DEA, 2015)。風力発電による余剰電力は、周辺国が使用または揚水貯蔵する (IEEFA, 2018)。

- **アイルランドでは、英国との連系により出力抑制を 50%削減。**

アイルランドでは、英国への電力輸出 (2 本の海底ケーブルによる連系線による) により、2013 年に出力抑制が 50%削減されたと推定される。アイルランドは、国際連系線が総発電設備容量のわずか 7%と限られており、全 EU 加盟国が 2020 年までに目指す 10%の目標値を下回っている (IEEFA, 2018)。

- **欧州では、地域市場が再生可能エネルギー電源間の相乗効果を実現。**

既存の連系線を有効活用しつつ、新たな連系線を導入することにより、さまざまな利点が生まれる。例えば、ノルウェーの水力による予備力や、イタリア、スペイン、ギリシャなどの国の予測可能な太陽光発電を利用することが可能となり、欧州全体の系統柔軟性が向上する (Neuhoff and Boyd, 2011)。



地域間連系と地域市場が運用コストに及ぼす影響

- ドイツでは、TSO 間の協調強化により、年間 2.60 億ユーロ(約 340 億円)のコストを削減。

ドイツの規制当局は、TSO 間の協調を強化し、さまざまな種類の需給調整力を発電会社から共同調達するよう指示しており、これにより年間約 2.60 億ユーロ(約 340 億円)のコスト削減が見込まれている(Knight, 2010)。ドイツでは、系統混雑に起因する再給電指令のため、年間 1.382 億ユーロ(約 180 億円)のコストを要している。送電容量の協同的利用によるコストは年間 5,640 万ユーロ(約 73 億円)で、再給電指令によるコストの大幅削減をもたらしている(DIW, 2013)。

- 西部アフリカ・パワープール内の地域取引において、50 億～80 億ドル(約 5,500～8,800 億円)の年間コストを削減。

世界銀行は、西部アフリカ・パワープール内の地域取引による経済便益額を年間約 50 億～80 億ドル(約 5,500～8,800 億円)と推定した。これは、運用コストの削減、発電の持続可能性向上、そして、天然ガス、太陽光、水力などのよりクリーンなエネルギー源が石油火力発電に代わるベースロード電源となることによるものと考えられている(World Bank, 2018)。

- 再生可能エネルギー大量導入のシナリオでは、欧州市場の統合により、2030 年までに年間 400 億ユーロ(約 5.2 兆円)の経済的便益を想定(Neuhoff and Boyd, 2011)。

- 米国における地域間の需給調整サービス取引により年間 7,200 万～2.08 億ドル(約 79 億～230 億円)のコスト削減。

米国では、地域間で系統需給調整サービスを取引する特別な市場が発達しており、現在までのところ相互に独立して運営されている。新たな送電設備を建設せずとも、地域間の取引を認めるだけで、需要家において年間 7,200 万～2.08 億ドル(約 79 億～230 億円)のコスト削減が見込まれている(Aggarwal and Orvis, 2016)。



3

ソリューション実施例

南部アフリカ・パワープール(Southern African Power Pool) (SAPP)

- 南部アフリカ・パワープール(SAPP)は、電力事業の計画および運用における地域の協力と協調を促進するために、1995年8月に設立された(Beta, 2016)。現在 SAPP には、南部アフリカ開発共同体(SADC)に加盟する12カ国が参加している³。プールの総発電設備容量は62 GWで、計画発電容量(2015~19年)は23.6 GW、ピーク需要は55 GWである。基本的に SAPP は、地域内で最も低コストの電源を利用して需要を満たしている。

SAPP について IRENA が実施した評価では、2030年までに再生可能エネルギーの導入率が10%から46%に高まる可能性がある⁴と結論付けられた。これは、2010年から2030年までに新規増設される設備容量の約80%が再生可能エネルギー技術に関連するもの⁵ということの意味する。連系を強化するために必要な財政的投資は、その結果もたらされる国際電力取引の便益と比較するとわずかなものである(必要な投資総額のわずか0.2%)。地域最大のクリーンエネルギー発電プロジェクトのひとつが、コンゴ民主共和国のGrand Ingaプロジェクトである。この40,000 MW級の水力発電プロジェクトは、国際送電容量が拡大された場合にのみ、経済的に存続可能である。

西部エネルギーインバランス市場⁴(EIM)、米国

- 2014年11月、CAISOとPacifiCorp社は、西部エネルギーインバランス市場(EIM)を発足させた(PacifiCorp, 2018)。現在、西部 EIM には実質的に8社⁵が参加しており、2020年までに新たに4社⁶が参加する予定である。西部 EIM は、連系された系統の中で最も低コストの電力によって、5分間隔で電力の需給調整を行うことを目的としている。これは、柔軟性の高いバックアップ資源と連系された系統全体の需要を活用するものである。電力コストを削減する⁷だけでなく、西部 EIM によって、再生可能エネルギーの系統連系も促進されている(EIM, 2018)。市場発足以来(2018年第2四半期までに)、715,405 GWhの出力抑制を削減し、306,112トン相当の二酸化炭素排出量を削減した(CAISO, 2018c)。

欧州における XBID プロジェクト

- 11カ国の TSO が、EPEX SPOT、GME、Nord Pool、OMIE といった電力取引所とともに、単一日市場への取り組み(商標名である XBID プロジェクトとして知られている)の共同イニシアチブを発足させた。これは2015年7月24日に発行された欧州委員会の規則(Regulation)2015/1222の枠組みの一環であり、この規則は「容量割当および混雑管理に関するガイドライン(CACM ガイドライン)」を制定したものである。XBID プロジェクトは、TSO で共有可能な、また統合された国際当日市場を創出することを目的としている。プロジェクトは、2018年6月に14カ国⁸が参加して発足した。ローカル市場で応じられなかった入札・注文

3 アンゴラ、ボツワナ、コンゴ民主共和国、エスワティニ、レソト、マラウイ、モザンビーク、ナミビア、南アフリカ、タンザニア連合共和国、ザンビア、ジンバブエ

4 米国の「インバランス市場」は、他国では「需給調整市場」と呼ばれる。

5 Idaho Power Company、Powerex、Portland General Electric、Puget Sound、Arizona Public Service、NV Energy、PacifiCorp、CAISO

6 北部カリフォルニア需給調整機関(Balancing Authority of Northern California) / SMUD、ロサンゼルス電力水道局、Salt River Project、Seattle City Light

7 西部エネルギーインバランス市場は、導入から2018年第2四半期までの間に4.01億ドル(約440億円)の電力コスト削減に寄与している(CAISO, 2018c)。

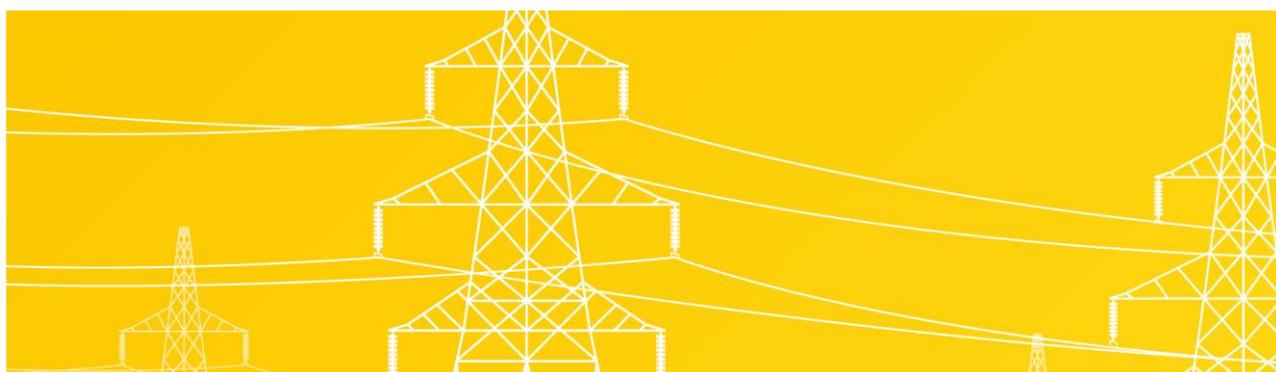
8 オーストリア、ベルギー、デンマーク、エストニア、フィンランド、フランス、ドイツ、ラトビア、リトアニア、ノルウェー、オランダ、ポルトガル、スペイン、スウェーデン

をより広域の統合市場においてマッチさせることが可能になったため、当日市場、特に新規参加市場の流動性が高まると見込まれる。

また、このプロジェクトは、容量割当と需給調整のプロセスが間接的に同時に行われるため、市場の効率性を高めることも予想される。そして、市場の流動性と効率性が高まると、再生可能エネルギーの市場統合と系統連系がいっそう促進されると期待される。また、統合市場では多くの資源が利用可能になるため、予備力の必要性は低下し、ひいては電力コストの低下をもたらすと期待される(Nord Pool, 2018)。EU および欧州南東部の残りの国々も、今後 XBID に参加すると期待されている。

概要表: 柔軟性供給源としての地域間連系線・地域市場の活用に関する便益と費用

柔軟性供給源としての地域間連系線・地域市場の活用	低い	中程度	高い	非常に高い
 便益				
系統柔軟性が向上する可能性				
対象となる柔軟性ニーズ	秒単位～日単位(十分大規模な市場があれば、地域市場は、より長期的な時間枠で柔軟性を提供することができる)			
 費用および複雑性				
技術およびインフラの費用	 地域間連系が実施されていない場合			
規制枠組みに求められる変化	 市場の部分統合の場合		 市場の完全統合の場合	
プレイヤーの役割に求められる変化	 部分統合市場における各市場の TSO および市場参加者間の協調		 完全統合市場における各市場の TSO および市場参加者間の協調	
その他の課題	<ul style="list-style-type: none"> 政治および規制面の課題 地域のマインドセットと信頼構築、堅固な制度設計、ガバナンス方法 			

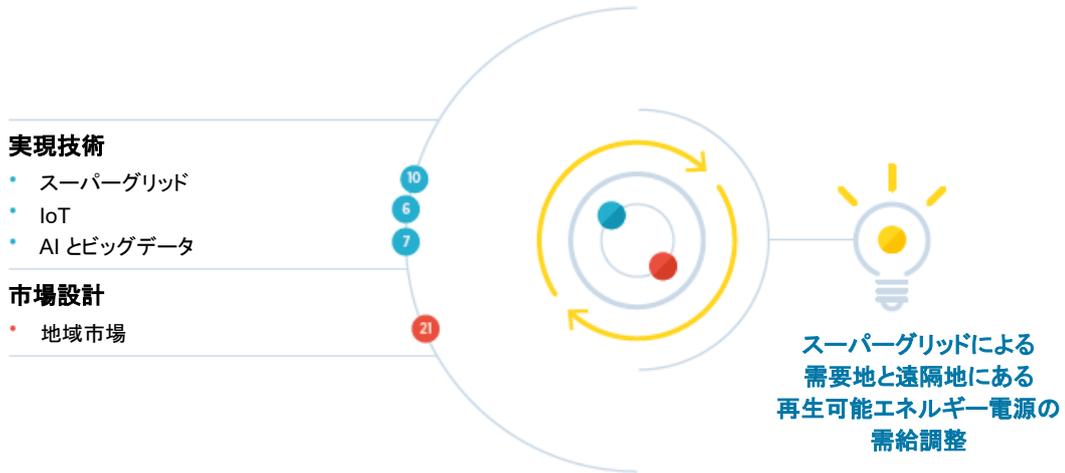


3

ソリューション IV

スーパーグリッドによる需要地と遠隔地にある再生可能エネルギー電源の需給調整

図 24 スーパーグリッドによる需要地と再生可能エネルギー電源の需給調整を生み出すためのイノベーションの相乗効果



- スーパーグリッドは、大量の電力を長距離間を取引することを可能にする大規模送電網である。スーパーグリッドとは、高圧直流(HVDC)送電線(500 kV 以上)または超高圧直流(UHV DC)送電線(800 kV 以上)である。スーパーグリッドの開発では、直流技術が選好される。なぜなら、交流では無効電力の補償が必要であり、線路損失が直流技術と比べて 30%~40%大きいいため、交流技術を用いた長距離送電は困難だからである(Siemens, 2018)。スーパーグリッド網は、通常、従来型の交流系統とは独立して建設されており、既存の交流系統との連系は少数または多数の連系点において行う。

日射量や風速が大きい地理条件などの資源が豊富な地域が、必ずしも都市や産業拠点などの大規模需要地に近接しているわけではない。スーパーグリッドは、資源が豊富な場所から大規模需要地まで、大量の電力を長距離輸送するために検討されているソリューションのひとつである。例えば、潜在的な風力エネルギーは、陸上サイトより洋上サイトのほうがはるかに高い(Cuffari, 2018)。また、アフリカの砂漠など日射量が高い土地は、太陽光発電の導入に最適であるが、現地のエネルギー需要が高いとは限らない。

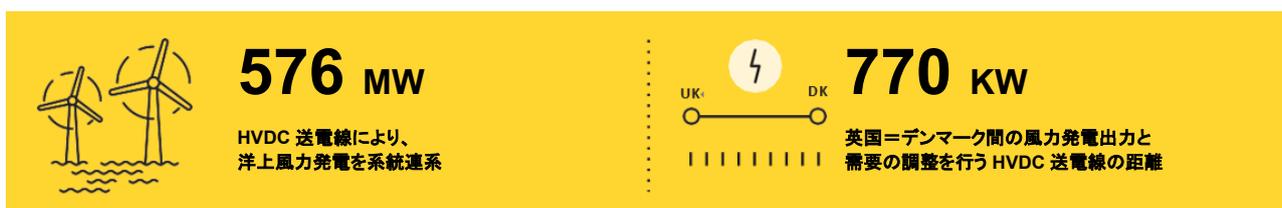
交流系統が主流となっている理由は、現在のところ直流送電線が地点間送電にしか使えず、今日あるような連系された電力系統に容易に組み込めないからである。とはいえこの数年、設備メーカーは直流遮断器に関する研究開発に力を入れており、メッシュ型の直流系統を実現可能にする製品が利用可能になっている。EU のプロジェクトである PROMOTioN は、メッシュ型の高圧直流(HVDC)オフショアグリッドを開発するため、課題の解決を目指している(PROMOTioN, 2018)。

距離が長くなり、送電容量が大きくなるほど、HVDC の経済的便益は大きくなる。再生可能エネルギー電源と遠距離にある需要地域を結び付け、風力発電や太陽光発電の局所の変動を相殺し、日射や風があまりない地域に電力を提供するには、直流系統の方が効率的である可能性がある。

サハラに設置された太陽光発電が曇天のドイツに電力を供給し、欧州全土の風力発電が夜間の照明を維持することも考えられる。そうなれば、再生可能エネルギー電力のきわめて大規模な導入も可能になる。(主要イノベーション: スーパーグリッド)

IoT、人工知能、ビッグデータは、このような電力システムの運用を支援することが可能である。(主要イノベーション: IoT、AI とビッグデータ)

- **市場設計面では、スーパーグリッドは通常、異なる系統間の電力取引を可能にするものであるため、系統間での取引規定の調和と、ある種の地域市場の創出が必要である。**(主要イノベーション: 地域市場)



再生可能エネルギー導入に及ぼす影響

- **ドイツでは、576 MW の洋上クリーンエネルギーを HVDC 送電線によって系統へ導入。**

ドイツのエネルギー転換(Energiewende)の一環として、洋上風力発電とドイツ系統を連系する HVDC 系統 HeWin1 が敷設された。全長 130 km、電圧 250 kV の HVDC 送電線は、テネット(TenneT)社により所有および運用され、ノルトゼー西(Nordsee Ost)およびメールヴィンド南/西(Meerwind Süd/Ost)風力発電所から電力を輸送する。これにより、最大 576 MW のクリーンエネルギーを 700,000 人以上の消費者に届けることができる。(Offshorewind.biz, 2015)。

- **英国とデンマークの連系により、再生可能エネルギーの利用が拡大し、系統信頼度が向上。**

ヴァイキングリンク(Viking Link)は、英国とデンマークの間に計画されている 1,400 MW の洋上および陸上 HVDC 送電線である。海底および地中ケーブルを含む全長 770 キロメートルの送電線は、再生可能エネルギーの有効利用を可能とし、両国にとってエネルギー供給のセキュリティを高めるものと期待される。デンマークは、2020 年までに消費電力量全体の半分を風力発電でまかなうことを目指している(Viking Link, 2018)。

グリーンエネルギーが支える未来への効率的な移行を実現するためには、国境を越えた風力発電の需給調整を可能にすることと、系統間の連系をより緊密にすることが不可欠である。ヴァイキングリンク・プロジェクトは、2022 年までに稼働する予定である(Viking Link, 2018)。



3

ソリューション実施例

北海風力発電ハブ(North Sea Wind Power Hub)コンソーシアム

- 北海風力発電ハブ構想は、欧州の電力系統が持続可能な電力を目指す一環として、北海中央の洋上に建設される予定の複合エネルギー島である。一連の設備は、2040年に70~150GW規模の北海洋上風力発電所として稼働すると見込まれている(NSWPH, 2018)。パワーリンク島(Power Link Island)は、多くの風車や洋上風力発電所との連系を実現することができ、風力発電による電力を直流送電線で北海周辺国(オランダ、ベルギー、英国、ノルウェー、ドイツ、デンマーク)に分配し送電する拠点となる。ウィンドコネクタ(Wind Connectors)と呼ばれる送電線は、風力発電所からハブ(人工島)に電力を送るだけでなく、同時にこれらの国々のエネルギー市場間の連系線としても機能し、国境を越えた電力取引を可能にする(TenneT, 2017a)。

このイニシアチブを担うのは、オランダ・テネット(TenneT)社、ドイツ・テネット(TenneT)社、デンマークのエネルギーネット(Energinet)社からなるTSOのコンソーシアムである。2017年9月、水素化社会への関心を持つオランダのガスパイプライン事業者ガスニー(Gasunie)社がイニシアチブに加わった。風力発電による電力は、陸上への大量輸送、貯蔵、バッファの用途で、持続可能な手段である水素への変換も可能である(TenneT, 2017a)。

インドのライガル・プガール間800kV超高压直流(UHVDC)送電プロジェクト

- インドの送電系統運用者であるPGCIL(Powergrid Corporation of India Limited)社は、インド中央部のライガルからインド南部のプガールまで、800kVの超高压(HHV)直流(DC)送電網を建設するため、ABB社と提携している。完成すれば、この送電線は世界最長クラスの1,830kmに及ぶ。約8,000万人に電力を提供するこのプロジェクトは、風力発電で余剰が出る時期は南インドの風力発電所から北インドの需要の中心地に電力を輸送し、風力発電の出力が低い時は火力発電による電力を北から南へ送ることになる(ABB, 2017)。

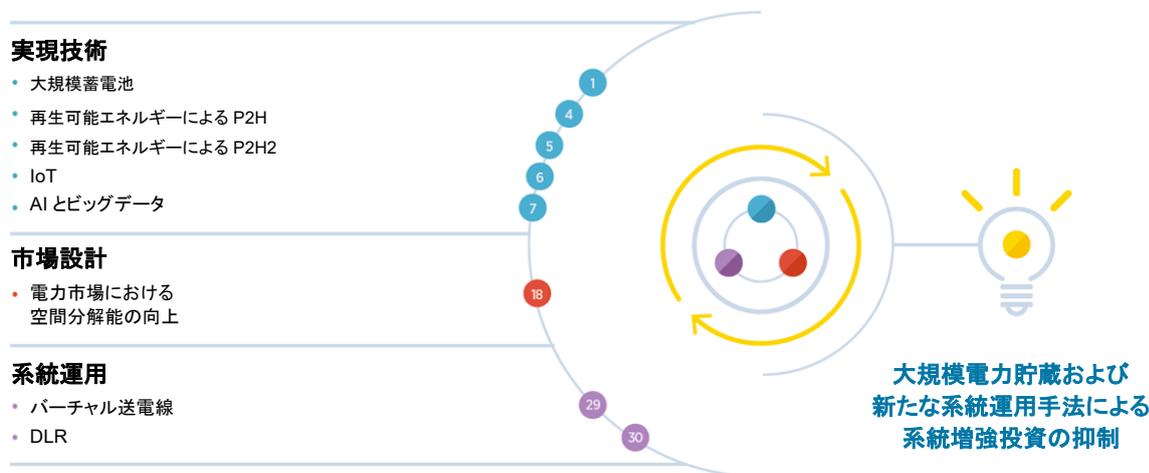
概要表: スーパーグリッドによる需要地と遠隔地にある再生可能エネルギー電源の需給調整に関する便益と費用

スーパーグリッドによる需要地と遠隔地にある再生可能エネルギー電源の需給調整	低い	中程度	高い	非常に高い
便益				
システム柔軟性が向上する可能性	[Progress bar from low to high]			
対象となる柔軟性ニーズ	秒単位~週単位(本ソリューション単一で実現するものでなく、システム全体に大きく寄与できるものとして)			
費用および複雑性				
技術およびインフラの費用	[Progress bar from low to high] スーパーグリッドの費用			
規制枠組みに求められる変化	[Progress bar from low to high] 連系する地域間で合意した規制枠組み			
プレイヤーの役割に求められる変化	[Progress bar from low to high]			
その他の課題	● 所有権、権利、収益分配などに関して国際的、政治的な協力体制の必要性			

ソリューション V

大容量電力貯蔵および新たな系統運用手法による系統増強投資の抑制

図 25 送電系統の増強投資に関するイノベーションの相乗効果



- VRE の導入拡大に伴い、配電レベルと送電レベルの双方に系統混雑をもたらす可能性がある。**市場設計の観点からは**、系統混雑を反映して、より正確な運用シグナルおよび投資シグナルを発信するために、ゾーン料金制またはノード料金制が有用であると考えられる。(主要イノベーション: 電力市場における空間分解能の向上)
- 地域間連系と系統強化は、VRE 電源の大量導入の鍵となる実現要因である。しかし、そのためには多額の投資が必要となり、また、大半の時間において系統容量全体が十分に利用されない可能性もある。そのため、設備投資を繰り延べしつつ VRE 導入率を高める革新的なソリューションが、**系統運用面**から生まれている。
- ひとつのソリューションは、1) 大容量蓄電池、2) P2H2 または P2H ソリューションなどの**実現技術**を利用するものである。これらの技術を適切な方法で運用することで、バーチャル送電線として機能させることができる。

もうひとつのソリューションは、3) DLR に関連するものである。これは、実際の大気条件によって送電線の冷却が十分に進む場合(過熱する危険なくケーブルや電線を利用することができる場合など)、より大きな電流を「動的に」流すことを認め、したがってより多くの VRE からの電力を系統に流すことを認めるというものである。導体の熱的状态に影響を及ぼす気象変数は、風速および風向、外気温、日射量である。

1: 大容量蓄電池貯蔵システム

大容量電力貯蔵システムは、非ピーク時に余剰電力を貯蔵するため、送配電系統のさまざまな地点に配置することができる。ピーク時には貯蔵システムを放電させ、混雑した線路で送電する必要なく、局地的な負荷ニーズを満たすことができる。これにより系統混雑が低減され、バーチャル送電線が形成される。この場合、蓄電池

3

は商用の資産ではなく、系統運用者が所有し、系統管理のためにのみ使用される。例えば、イタリアの TSO であるテルナ (Terna) 社は、系統混雑管理のため、イタリア南部にある 150 kV の送電網に 35 MW の蓄電池貯蔵システムを配置するパイロットプロジェクトを計画している (Terna, n.d.)。フランスの TSO である RTE 社も、Ringo と呼ばれる同様のプロジェクトを実施している。(主要イノベーション: バーチャル送電線、大容量蓄電池)

2: P2H2 または P2H

最も風力資源が豊かな場所は、洋上や地方に位置することも多い。そのような場合、風力エネルギーを水素に変換し、それを液化してエネルギーが不足している地域や需要の中心地に輸送することができる。それにより、送電設備を新設するために多額の投資をする必要なしに、風力発電の開発を促すことができる。ただし、電気分解装置のコストと電力損失はまだ非常に高い。同様に、系統混雑を解消し、系統インフラへの投資を回避するために、再生可能エネルギーからの電力を熱に変換することができる。(主要イノベーション: バーチャル送電線、再生可能エネルギーによる P2H2、再生可能エネルギーによる P2H)

3: 動的線路定格 (DLR)

電力線は、所与の温度で決まった量の電流しか流すことができず、それ以上の電流を流すと電力線が過熱する。送電線または配電線が過熱することなく安全に流すことができる電流の大きさは、静的定格として表現されることが多く、系統運用者はそれを用いて電力線の容量を計算する。しかし、このような静的定格は、気象条件 (風速および風向、外気温、日射量) による電力線冷却効果、特に風力発電所の立地となりうる風の強い地域における効果を考慮に入れていない。送電線が風力発電所と同じ場所にある地域では、気象観測装置を用いて電力線の温度と、結果的に増やすことのできる電流容量を推定することができる。(主要イノベーション: DLR)



30%

DLR による風力発電
の導入量の増加

10-15%

DLRによる送電容量の
増加

67%

送電容量の増強

再生可能エネルギー導入に及ぼす影響

- 英国では、エーオン・セントラルネットワーク(E.ON Central Networks)社が DLR システムを適用しており、系統内の風力発電の導入量が 30% 拡大したと見積もっている (Fernandez et al., 2016)。
- 欧州の TSO、発電会社、電力技術や風力発電設備のメーカーなど、多様なステークホルダーが関与した TWENTIES プロジェクトでは、DLR の予測によって送電容量が平均 10~15% 増加すると結論付けられた (Alen Pavlinić, 2017)。

運用コストに及ぼす影響

- ダラム大学の研究チーム、スコティッシュパワー・エナジーネットワーク (ScottishPower Energy Networks) 社、アイマス (Imass) 社、PB Power 社、アレバ T&D (AREVA T&D) 社は、DLR を採用することにより、62% の維持コストで、送電容量を 67% 増強することができる結論付けている (Roberts et al., 2008)。



ソリューション実施例

RINGO プロジェクト - フランスにおけるバーチャル送電線

- フランスの電気事業者 RTE 社により設計された Ringo プロジェクトと呼ばれるバーチャル送電線は、2020 年にサービスを開始し、3 年間にわたって試行を行う。プロジェクトは、新たな送電線を建設する代わりに、電力貯蔵システムを使用して系統混雑の緩和を図る。この概念を支えるのは、人工知能によってディスパッチのプロセスを支援し、系統の電流管理を最適化するソリューションである。

系統運用者が発電をすると市場を妨げることになるため、複数の蓄電池によって同時に蓄電・放電するシステムを系統の 3 カ所に配置することが計画されている。蓄電池貯蔵システムは、系統混雑が起きている箇所に設置され、大量の VRE 電力を吸収する。各地点の蓄電池の出力および容量は、12 MW, 24 MWh となる。

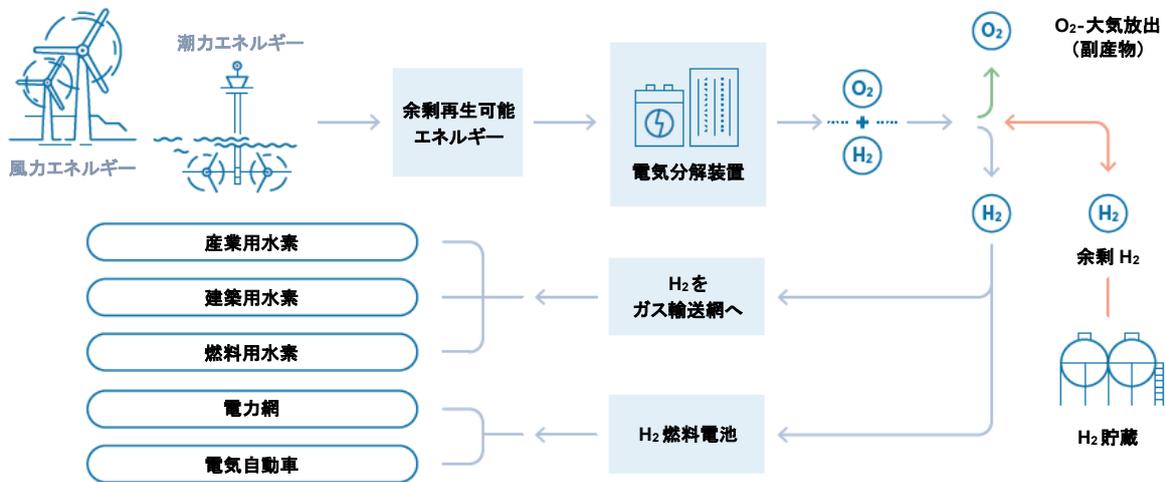
プロジェクトの構想では、2020 年から 2023 年までは、RTE 社がこれらの蓄電池をバーチャル送電線として運用する。2023 年以降は第三者にも蓄電池を開放することになっており、周波数調整、需給調整、混雑解消、エネルギー裁定取引など、多くの用途に利用される可能性がある。

3

サーフターフ・イニシアチブ - 英国オークニー諸島における P2H2 プロジェクト

- サーフターフ(Surf 'n' Turf) イニシアチブは、オークニー諸島のエデイ(Eday)島で潮力および風力で発電した電力を用いている。エデイ島の住民 150 人は、900 kW の風車を共同所有しているが、系統インフラの欠如など、さまざまな理由から出力抑制を余儀なくされていた。しかし、サーフターフ・イニシアチブでエデイ島に設置された 500 kW の電気分解装置により、いまや過剰な風力・潮力エネルギーは水素に変換されている。カークウォール(Kirkwall, オークニーの州都)では、エデイ島で生成され、船で輸送された水素を活用するためのシステムが次々に開発されている(Surf 'n' Turf Initiative, 2018)。水素は、産業および家庭における緊急時、あるいは再生エネルギーによる発電出力が低い時期に利用することができる。図 26 に、イニシアチブの仕組みを示す。
- 後にシェイピンセイ(Shapinsay)島にも 1 MW の電気分解装置が設置され、やはりカークウォールに水素を輸送している。これを基にした、BIG HIT プロジェクトが始動している。このプロジェクトは、水素が柔軟性の高い局地的エネルギー貯蔵手段として利用でき、またスコットランドのオークニー諸島の例は他地域でも再現可能なモデルであると示すことを期待されている。水素は、補助電源、カークウォール港に停泊するフェリーの暖房、燃料電池車の水素補給、カークウォール地域のビル暖房など、さまざまな用途に利用されている(BIG HIT, 2018)。

図 26 サーフターフ・イニシアチブの仕組みの図解



出所: Surf 'n' Turf Initiative, 2018

Terna 社による DLR の試行運用

- イタリアの送電系統運用者 Terna 社は、運用する送電線のうちスペツィア・ヴィニョーレ間(380 kV)、バルジ・カレンツァーノ間(380 kV)、ミステルビアンコ・メリッリ間(220 kV)、ベネヴェント 2・フォイアーノ間(150 kV)の 4 経路において、DLR システムの試行運用を行っている。プロジェクトでは、送電線自体に 2 組の DLR 装置を配置し、末端変電所にも DLR 装置を配置した。また、DLR 値を推定するために、エプソン気象

研究所(Epson Meteo Centre)の気象予測データを利用する。これにより、気象条件が良好な時は送電容量を増やし、近隣の風力発電所の系統連系を増やすことが可能になった(Carlini et al., 2013)。

米国における DLR

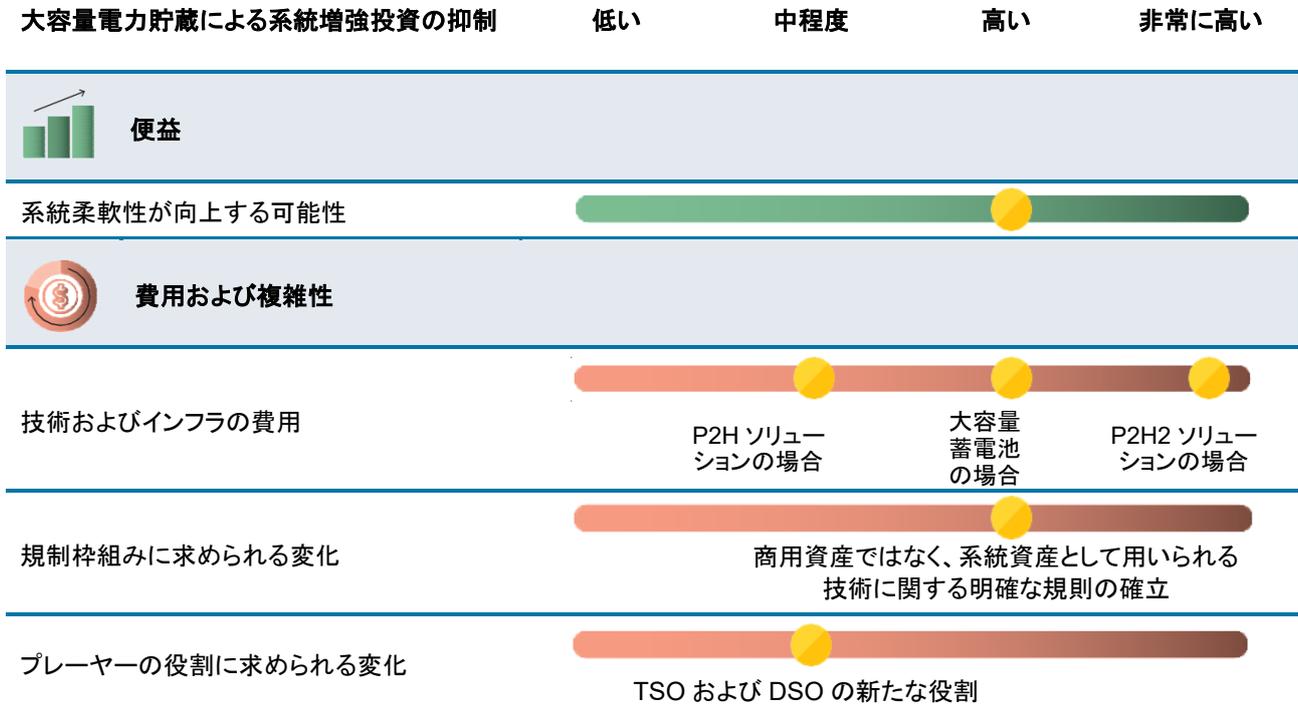
- テキサス州の送配電事業者であるオンコール・エレクトリックデリバリー(Oncor Electric Delivery Company)社は、米国エネルギー省のスマートグリッド実証プログラムの下で資金提供されたプロジェクトにおいてDLRシステムを実証した。DLRシステムは、日々の運用と卸市場の取引に用いられている送電線8経路のリアルタイムの容量を監視した。オンコール社が観測したところ、約84%~91%の時間において、132 kVの送電線ではリアルタイムの送電線容量が周辺環境により調整された後の静的定格を8%~12%上回り、345 kVの送電線では6%~14%上回っていた。オンコール社は現在、テキサス州西部において新たにDLRシステムを導入し、混雑緩和を図ることを計画している(US DOE, 2014)。イーオン・セントラルネットワーク(E.ON Central Networks)社は、現地の気象観測値に基づいてスケッグネス・ボストン間の送電線の定格容量を制御システム内(ENMAC)で算定し、発電許可出力を自動調整する予定である。これは、風の冷却効果を考慮に入れる。DLRがもたらすこのような改善により、冬季・夏季を通じて定格容量が固定された場合の運用と比べて電源の系統接続を約30%増やすことができると考えられる(Yip et al., 2009)。



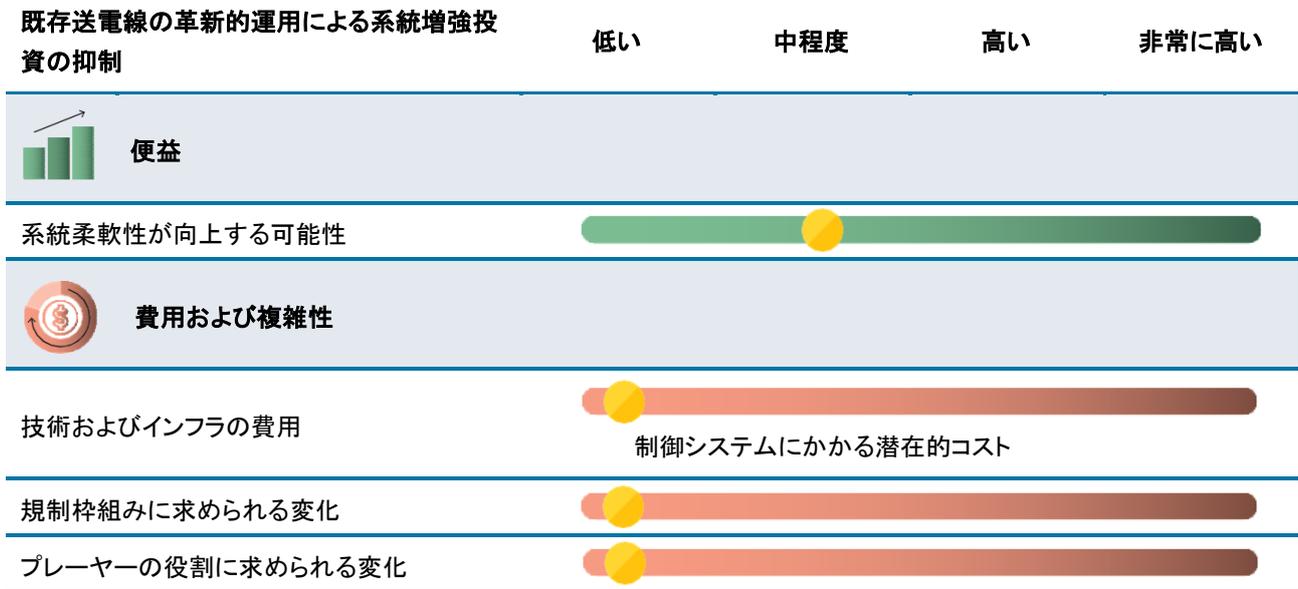
3

概要表:送電・配電網増強への投資の抑制に関する便益と費用

大容量電力貯蔵による系統増強投資の抑制



既存送電線の革新的運用による系統増強投資の抑制



注:この費用便益比較は、電力系統の範囲内に限られており、電力部門のみに目を向けている。この比較表では考慮されていないが、より広範な便益はコストを大幅に上回る可能性がある。

3.3 需要側の柔軟性ソリューション

電力システムの柔軟性を高める効果的な新手法は、需要家負荷と分散型エネルギー源を効率的に管理して需要側の柔軟性を有効活用することである。

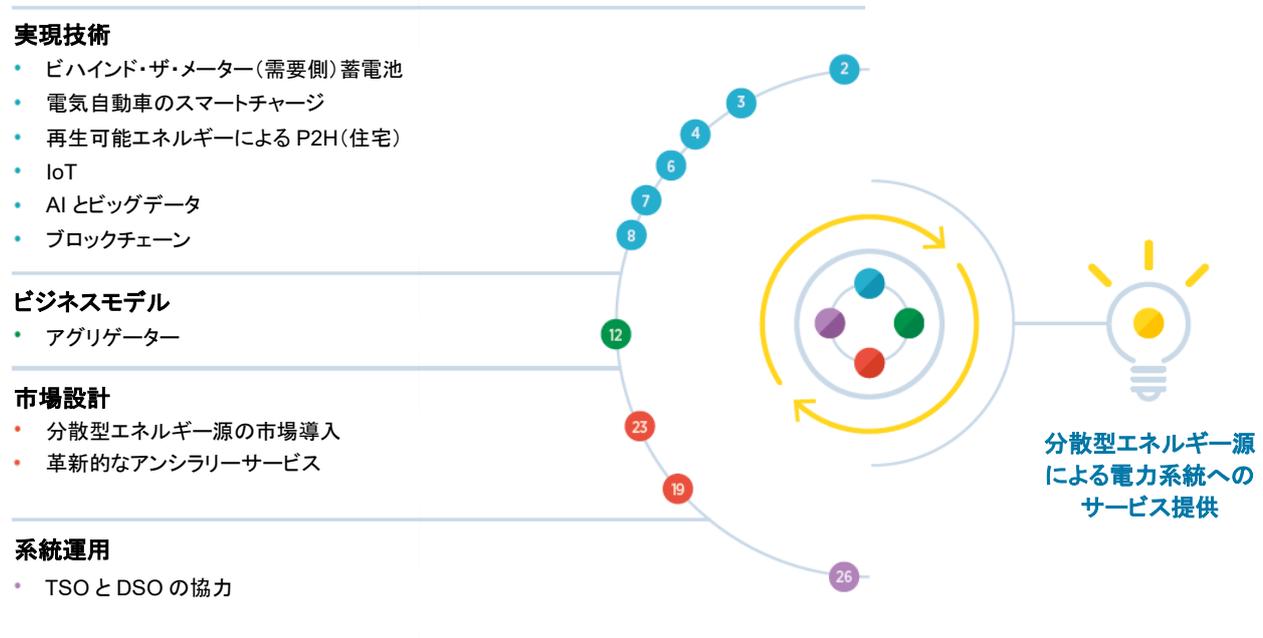
- **分散型エネルギー源の発電状況を DSO や TSO がより明確に把握することで、分散型エネルギー源は電力システムの需給調整とアンシラリーサービス提供（瞬動予備力、安定度とセキュリティ確保のための高速周波数応答、電圧維持のための無効電力）に貢献する。**このソリューションを実現するためには、分散型エネルギー源を導入するだけでなく、これらの電源が上記のようなサービスを提供できるように規制枠組みを変更する必要がある。分散型エネルギー源の導入がすでに始まっていることを考慮すると、電力システムに対する便益を最大化するために、これらの技術を利用することはきわめて重要である。技術を有効利用することで、比較的限られたコスト（アグリゲーター向けの ICT など）で系統柔軟性に大きな影響を及ぼすことが可能となる。（ソリューション VI）
- **計量、通信および制御インフラの進歩により、適切なインセンティブを通じてさまざまなタイプの需要家をターゲットとするデマンドサイドマネジメント・プログラムの策定が可能。**スマート家電を使用する（住宅をスマートホームにする）ことによってデマンドサイドマネジメントの自動化が可能になり、価格シグナルに対する応答性を高めることができる。このような大量のデータを人工知能で管理すれば、デマンドレスポンスの有効性をより向上させ、電力システムの予測可能性や信頼度を向上することができる。（ソリューション VII）
- **ミニグリッドソリューション（僻地におけるエネルギーアクセスの提供だけでなく、電力システムにも接続される）は、自立運用だけでなく系統柔軟性の提供も実現。**ミニグリッド内のピア・トゥー・ピア（P2P）技術も登場しており、需要家やプロシューマーが小売事業者を介さずに電力を取引できる市場が生まれている。ブロックチェーン技術は、このようなピア・トゥー・ピア（P2P）取引におけるゲームチェンジャーとなり、仲介業者に取って代わる可能性を秘めている。（ソリューション VIII）
- **分散型エネルギー源による電力供給を利用して、送配電システムの混雑回避、および系統増強の必要性を最小化。**これは、分散型電源の系統への導入を促す方法の一つである。分散型電源をローカルなシステムでスマートに利用することは、システムの柔軟性を高め、VRE 導入率の拡大に寄与する。（ソリューション IX）



ソリューション VI

分散型エネルギー源のアグリゲーションによる電力系統へのサービス提供

図 27 分散型エネルギー源に基づく系統サービスを実現するためのイノベーションの相乗効果



- 分散型エネルギー源は、低圧および中圧の電力網に接続するさまざまな方式の電源や技術からなり、屋根置き太陽光発電などの分散型発電所のほか、ビハインド・ザ・メーター(需要側)蓄電池、電気自動車、家庭用ヒートポンプ、デマンドレスポンスなどの**実現技術**がある。(主要イノベーション:ビハインド・ザ・メーター(需要側)蓄電池、電気自動車のスマートチャージ、再生可能エネルギーによる P2H)。ほとんどの電力系統において、これらの分散型電源は「つなぐだけ」(Plug-and-forget)方式(訳注:設置後何もしなくても良いほど冗長で高性能という意味)で運用されている。しかし、分散型電源の導入がさらに進めば、この方式が電力系統に悪影響を及ぼす可能性がある。
- **市場設計面**では、系統柔軟性を高める効果的な新手法として、電力系統全体の状況に適切に応答することによる分散型エネルギー源の管理が挙げられる。これを実現するための主要イノベーションは、分散型電源が卸電力市場、アンシラリーサービス市場、容量市場(存在する場合)に参加できるようにし、市場の価格シグナルが分散型電源に影響を及ぼすようにすることである。これは、アグリゲーターによって、あるいはこれらの市場における容量制限を緩和することによって実現可能である。供給側電源が入札するのと同様に、分散型エネルギー源も前日市場および当日市場に参加できるようにすることが望ましい。

米国では、いくつかの卸売市場運用者がこの方式で成功を収めている。例えば米国最大の市場運用者である PJM は、アンシラリーサービス市場においてデマンドレスポンス資源による周波数調整サービスへの入札を許容したことで成功を収めた。ERCOT では、瞬動予備力の半分をデマンドレスポンス資源から得ている。また、2017 年 12 月、NYISO は、分散型エネルギー源が卸電力市場にもアンシラリーサービス市場にも参加することを認める市場設計のコンセプト案を発表した。この案では、分散型エネルギー源は市場に

参加する他の電源と同様に扱われることとなる。分散型エネルギー源は、容量予備力市場や周波数調整市場などに、直接、または小規模分散型エネルギー源(100 kW 以下)のアグリゲーターを介して参加できるようになる(NYISO, 2017)。(主要イノベーション:分散型エネルギー源の市場導入、革新的なアンシラリーサービス)

- 分散型エネルギー源の卸電力市場への参加を認め、電力系統全体の利益と再生可能エネルギー電源の導入を促すインセンティブを設定することで、需要家は能動的な市場参加者となる。このような相互作用を可能にするには、**系統運用**におけるイノベーションが必要である。配電会社は、配電市場に拠出された分散型エネルギー源を技術面から検証し、配電上の制約に触れていないかを確認することにより、市場ファシリテーターとしての役割を果たしうる。

これは、現在の卸電力市場で系統運用者が果たしている役割と似ている。分散型の電力系統によって柔軟性供給方法の幅が広がり、それらを十分に活用するために、電力系統における TSO と DSO の密接な協力と調整が必要となる。電力潮流が大きく変動し、配電網に接続する需給調整予備力がより一層増えていることから、DSO は電力系統全体の需給調整に責任を持つ TSO と協力する必要がある。(主要イノベーション:送電系統運用者(TSO)と配電系統運用者(DSO)の協力)

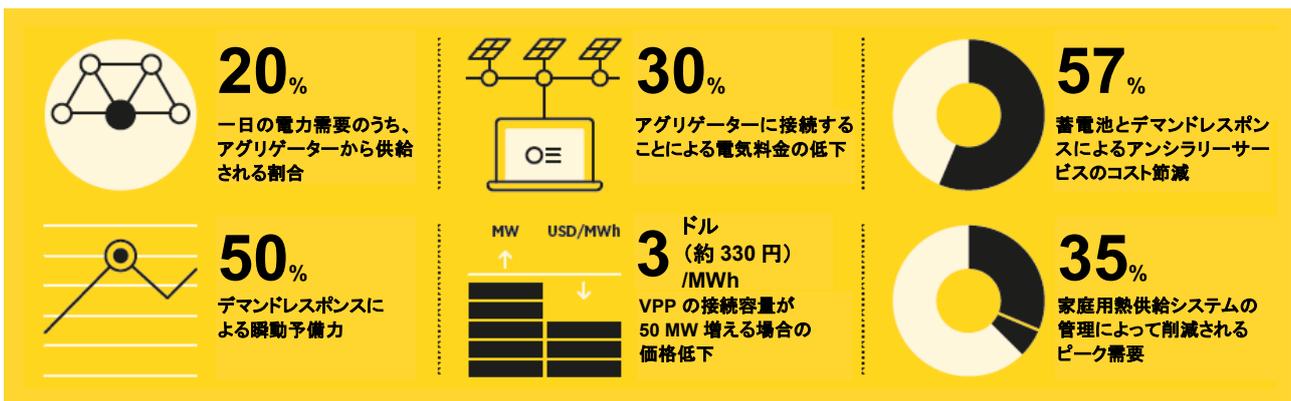
- 個別の電源それぞれが電圧や周波数に対して提供できる支援は、小規模でしかない。しかし、これらの電源をアグリゲートする**ビジネスモデル**は、ICT 機器を用いて多くの分散型電源を協調させることにより、単一で、大規模かつ予測可能な電源として機能させることができる(仮想発電所、すなわち VPP の概念)。VPP とは基本的に、ソフトウェアとスマートグリッドに依存するシステムで、分散型エネルギー源を遠隔操作で自動的にディスパッチし、最適化する。分散型電源、太陽光発電、エネルギー貯蔵システム、デマンドレスポンス資源、その他の分散型エネルギー源を協調させることにより、VPP は、化石燃料ベースの予備力に代わって、出力変化速度の速いアンシラリーサービスを提供することができる。米国の PJM においては、分散型エネルギー源の容量のうち 80%は VPP 経由である。(主要イノベーション:アグリゲーター)
- デジタル化に係る**実現技術**は、逆潮流など、分散型システムの及ぼすあらかじめ想定されていない影響を管理するために必要な配電自動化を可能にする。しかし、それだけでは十分とは言えない。VPP によって分散型エネルギー源を直接制御することで、系統運用者はより効果的に間欠性と電力潮流のバランスを取ることができる。デジタルシステムは、末端装置の監視や電力系統間のデータ統合を行うことで、この調整プロセスを支援する。配電自動化とデジタルシステムはすでに電力系統に導入されつつあり、分散型エネルギー源管理システム(DERMS)と VPP がそれに続いている。

例えば、北欧諸国はいずれも、電力メーターのデータと市場のデータとを集約するデータハブの導入に向けて進んでいる。デンマーク、フィンランド、ノルウェー、スウェーデンの政府や規制機関は、小売電力市場にデータハブを導入する責任を TSO に負わせている。デンマークにおいてデータハブは完全導入され、サプライヤーと DSO の間のすべての通信が処理されている。ノルウェーのデータハブは 2019 年 2 月に稼働した。それぞれの国営 TSO によれば、フィンランドのデータハブは 2021 年春に、スウェーデンのデータハブは 2021 年初頭に稼働予定である(NordREG, 2018)。

3

データハブは、配電網のすべてのスマートメーターに接続し、電力網で起こっている状況に関する情報の収集を可能にする。これにより電力請求のための集計コストが削減され、さらに重要な点は、この情報を活用することで系統運用のいっそうの効率化が可能となることである。アグリゲーターは、この情報を利用して、需要家と電力系統の両者に役立つサービスを創出し、需要家の柔軟性のある行動を引き出すと期待される。これにより需要側は、市場とアグリゲーターを介して管理できるような形でデジタル化される。

電力系統における機械学習を活用した技術は、まだ実験的な段階にある。ブロックチェーン技術は、このプロセスの効率化に貢献すると考えられる。(主要イノベーション:IoT、AI とビッグデータ、ブロックチェーン)



需要に及ぼす影響

- 南オーストラリア州では、アグリゲーターが一日の電力需要の 20%を満たし、電気料金の 30%低下を実現。南オーストラリア州政府と Tesla は、50,000 件の家庭用太陽光発電システムをアグリゲーターに接続するネットワークの構築に取り組んでいる。この VPP は、南オーストラリア州の平均的な一日の電力需要(250 MW)の約 20%を満たすと見込まれる。また、この新たな発電所のおかげで、ネットワーク参加世帯の電気料金が約 30%低下すると見込まれるほか、南オーストラリア州の全住民にも電気料金の引き下げと電気の安定供給という便益がもたらされる (Government of Australia, 2018)。

- オランダの PowerMatcher Suite プロジェクトで行われた実証実験では、熱供給システム(マイクロコジェネおよびヒートポンプ)の管理により、ピーク需要が 30%~35%削減 (TNO, 2016)。

アンシラリーサービスの調達に及ぼす影響

- オーストラリア東部では、蓄電池とデマンドレスポンス資源の市場参加を認めることで、アンシラリーサービス調達量が 57%削減。

オーストラリア東部の電力市場 (National Electricity Market: NEM) では、再生可能エネルギーへの転換を促進するうえで、デマンドレスポンスがますます重要な役割を果たしている。2018 年上半期には、約 180 MW 相当の新たなデマンドレスポンス資源がアンシラリーサービス市場に参入した。2017 年 7 月、分散型エネルギー源の独立系アグリゲーターが NEM の周波数調整アンシラリーサービス (FCAS) 市場に入札することが NEM によって初めて許可された。Hornsedale Power Reserve として知られる大容量蓄電池と分散型エネルギー源の市場参入が主な促進要因となつて、FCAS のコストは、2017 年第 4 四半期から 2018 年第 1 四半期にかけて 57%も低下した (Grover, 2018)。

- 米国の ERCOT 市場では瞬動予備力の 50%をデマンドレスポンスから調達。また、PJM 市場では電源アデカシー必要量の 10%をデマンドレスポンスによって調達。

PJM は、デマンドレスポンス資源によるアンシラリーサービス市場への入札、周波数調整サービスの提供を実現している。また、PJM は、電源アデカシー必要量のうち約 10%をデマンドレスポンスによって調達している。ERCOT は、瞬動予備力の半分をデマンドレスポンスから得ている。

需要家のエネルギーコストに及ぼす影響

- VPP の電力系統への接続容量が 50 MW 増えるごとに、卸電力価格が 3 ドル/MWh(約 0.33 円/kWh)低下。

南オーストラリア州では、VPP の電力系統への接続容量が 50 MW 増えるごとに、卸電力市場の価格が全需要家に対し 3 ドル/MWh(約 3.30 円/kWh)低下すると見積もられている。テスラ(Tesla)社がオーストラリアで計画している VPP が稼働すれば、卸電力価格が約 8 米ドル/MWh(約 0.88 円/kWh)低下すると見込まれる。これは、南オーストラリア州の需要家全体に対する年間約 9,000 万ドル(約 99 億円)の削減に相当し、電気料金全体の 30%を占めるものとなる(Frontier Economics, 2018)。

発電設備への投資を抑制

- 米国エネルギー情報局(EIA)の試算によれば、新たな石炭火力発電所の建設コストは、2,934~6,599 ドル/kW(約 32~73 万円/kW)、ガス火力発電所の建設コストは 676~2,095 ドル/kW(約 7.4~23 万円/kW)。VPP は、80 ドル/kW(約 8,800 円/kW)前後のコストで需給バランスを維持することができるため、分散型エネルギー源の所有者に便益をもたらす(Enbala, n.d.)。

ソリューション実施例

ベルギーで、ネクストクラフトヴェルケ(Next Kraftwerke)社による VPP が TSO に系統サービスを提供

- ベルギーでは、日々の電力市場運用においてデマンドレスポンスを実用的な方法で取り入れている。TSO であるエリア(Elia)社は、産業需要家の電力使用を優先しつつも、分散型エネルギー源を利用して発電とピーク需要のミスマッチを埋めている。TSO と DSO が共同開発した集中型の共有 IT プラットフォームによって、分散型エネルギー源の柔軟性を活用するためのあらゆるデータを共有することができる。送配電網に接続するすべての利用者と電源は、このデータハブを介して、日々、系統運用者に柔軟性サービスを提供することができる(Elia, 2018)。

レストア(Restore)社やネクストプール(Next Pool)社といった分散型エネルギー源のアグリゲーター企業は、必要な容量を Elia 社に提供する。これは、すでに数百 MW もの容量が契約されており、負荷が高くなっているベルギーの系統運用状況において、追加的な柔軟性を提供するために行われる。レストア社は、柔軟性の高い産業用の電力容量をアグリゲートし(総容量 1.7 GW)、系統負荷を常時監視している。ピーク需要時には、レストア社に参加している企業が負荷をシフトさせることによって系統需給調整に貢献する。

ネクストクラフトヴェルケ(Next Kraftwerke)社は、デジタル化技術によって、VPP のネクストプール社に参加している 5,000 件の発電・消費ユニットをアグリゲートしている。この VPP は総容量 4,100 MW を超え(ベルギー国外も含む)、アグリゲートした電力をさまざまな電力スポット市場で取引している。また、この VPP は、ピーク負荷時に個々のユニットの発電電力および消費電力を効率よくバランスさせることによって、系統安定化に大きく貢献している。

3

エリア社のような TSO は、制御予備力を用いて電力系統の需給調整を行っている。二次予備力は、7.5 分以内に完全起動する必要があり、エリア社にとって最も重要な需給調整商品である。アグリゲーターが現行のユニットと同等の品質で二次予備力を提供できるかどうかを実証するため、2017 年に実証プロジェクトが実施され、ネクストクラフトヴェルケ社や他の参加者は、VPP が予備力に求められる技術的要件を満たせることを証明した(Trilations, n.d.)。

エリア社は 2018 年 4 月に、ブロックチェーン技術を利用した複雑かつ短時間での取引向け清算システムのビジネス機会を模索するために、初めてのブロックチェーン・実証プロジェクトを発足させた。これは、分散型エネルギー源が提供したサービスに対する報酬支払いを簡易化するものである。この実証プロジェクトが成功を収めれば、ベルギーの電力網が、持続可能な分散型エネルギー源を広範に提供していくための大きな一歩となる。この例は、デジタル化が今後数年から数十年でエネルギー部門にどれほど大きな変化をもたらすかを示す一例にすぎない。

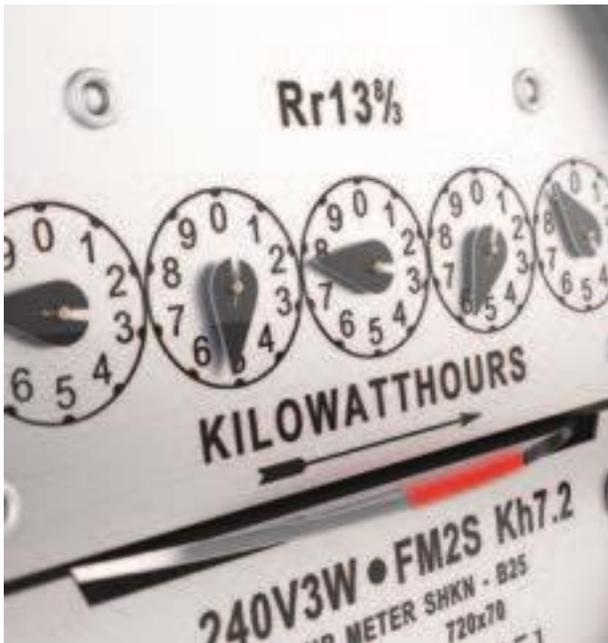
ドイツでは、ゾンネンバッテリー(Sonnen Batterie)が系統サービスを提供

- ゾンネンコミュニティ(sonnenCommunity)社はドイツのアグリゲーターであり、蓄電池システム、太陽光発電システム、またはその両方を持つ約 10,000 件の需要家を擁する。2015 年に発足したゾンネンコミュニティ社は、おおむね VPP 内のピア・トゥー・ピア(P2P)取引に利用されていた。しかし、2017 年夏、VPP は電力系統の周波数調整へも利用することが可能となった。揚水発電貯蔵のような他の技術に比べ、この分散型「バーチャル」電力貯蔵システムは瞬時(1 秒未満)に周波数変動に応答することができるので、一次周波数調整サービスの優れた提供元となっている。

このエネルギー貯蔵システムの一部は、ドイツの電力系統によって利用されている。そのため、電力供給が過剰な時は、電力を蓄電池に充電することで、風力発電の出力抑制を削減することが可能となる。これは、再生可能エネルギー発電による変動性を低減させると共に、コストを要する系統増強の必要性を軽減するものである。このようなサービスに対して周波数調整市場で報酬が得られることから、ゾンネンコミュニティ社は、その対価として蓄電池所有者へ「無料」の電力を提供している。蓄電池が必要とされるのはごくまれで、週に数分程度であるため、蓄電池の可用性、性能、寿命への実質的な影響はほとんどない。

2017 年 5 月、ゾンネン社はドイツの系統運用者であるテネット(TenneT)社と提携して、Sonnen eServices という実証プロジェクトを発足させた。このプロジェクトでは、ブロックチェーン・ソリューション(IBM が開発)を通じて蓄電池を電力系統上で利用可能とした。ドイツでは、系統混雑時に北部で発電された風力エネルギーを南部の産業中心地に送ることができず、その際に生じる再給電指令への対策が必要である。この実証プロジェクトでは、家庭用太陽光発電システム向け蓄電池によるネットワークを形成して、送電容量不足時の風力発電の出力抑制を軽減する。ドイツの系統混雑を管理するためのコストは、2016 年に約 8 億ユーロ(約 1,040 億円)にのぼり、その大部分は風力の出力抑制によるものであった(Grey Cells Energy, 2018)。

ブロックチェーンを利用することで、テネット社のオペレーターは、利用可能な柔軟性リソースを一覧で見ることができ、またボタンひとつですぐにそれらのリソースを活用することができる。リソースを活用した場合は、



ブロックチェーンによって蓄電池の貢献状況が記録される。ブロックチェーン技術は、プロシューマーも需要家も含めた無数の小規模な分散型電源からなる未来の電力系統において、取引を記録し、検証し、セキュリティを確保するために欠かせない要素となる可能性がある。このプラットフォームは、小規模蓄電池による取引の透明性や検証可能性を確保するよう設計されている。これにより、局所的に分散している柔軟なエネルギー源は、将来的に、電力系統運用者にサービスを提供することが容易になる。また、データセキュリティ、アクセス制限、プライバシー保護に関するテネット社の要求事項を満たすことができるかどうか検証されている(TenneT, 2017b)。

南オーストラリア州では、Tesla 社の VPP が再生可能エネルギー導入と系統安定度に貢献

- テスラ(Tesla)社は、南オーストラリア州の電力インフラ安定化に貢献し、また、電力の半分近くが風力発電によって供給される地域における電力系統のセキュリティや信頼度を高めるために、250 MW(それまで建設された中で世界最大)の VPP 開発計画を提案した。このイニシアチブは、公営住宅 1,100 戸の試験操業からスタートする。

この技術は、4 つの構成要素から構成される。

- イニシアチブに参加した全世帯にスマートメーターを設置して、屋根置き太陽光パネルと蓄電池の制御、電力潮流の測定を支援
- 公営住宅に設置する屋根置き太陽光発電システムによるネットワーク(5 kW の太陽光発電システム)
- 公営住宅に設置する蓄電池システム(5 kW/13.5 kWh の Tesla 社製蓄電池 Powerwall 2)
- 再生可能エネルギーと蓄電池電力の貯蔵、使用、および輸送に関して住宅と電力系統間で制御し、また、需要家への価値を最大化するとともに、必要な時に電力系統へのサービス提供が実現可能なコンピューターシステム

ビジネスモデルもイノベーションのひとつである。太陽光パネルと蓄電池の初期費用は、参加世帯が負担するのではなく、売電収入と政府の助成によりまかなわれる。政府から 200 万豪ドル(約 1.5 億円)が提供されるほか、州の再生可能エネルギー技術基金から 3,000 万豪ドル(約 22 億円)が融資される。

再生可能エネルギーの導入という点では、このようなソリューションの影響は大きく、容量約 130 MW の屋根置き太陽光発電システムと、130 MW/330 GWh のディスパッチ可能な分散型蓄電池システムが新たに導入される見込みである。プロジェクトの対象を同程度の数の民間需要家にも拡大すれば、この規模はほぼ倍増する。

3

系統柔軟性の増加という点では、5 万世帯がプログラムに参加すれば、250 MW のピーク容量が電力系統に追加され、あるいは電力系統の需要が 250 MW 削減でき、その分の容量を他の需要家へ提供することができる。

プログラムの導入によるコスト削減という点では、南オーストラリア州の卸電力価格は、VPP の容量が 50 MW 追加されるごとに、すべての需要家に対して約 3 米ドル/MWh(約 3.3 円/kWh)低下することが見込まれる。これは、Tesla 社の計画に公営住宅の需要家に参加するだけでも、南オーストラリア州のすべての需要家に対して、卸電力価格が約 8 豪ドル/MWh(約 6.0 円/kWh)低下、あるいは年間約 9,000 万豪ドル(約 67 億円)の費用が削減できることを示唆している。

このプロジェクトの計画上限である 250 MW の発電容量を実現した場合、削減額はおよそ 2 倍になる。また、政府の試算では、参加世帯の電気料金は 30%低下する可能性があることが示されている。

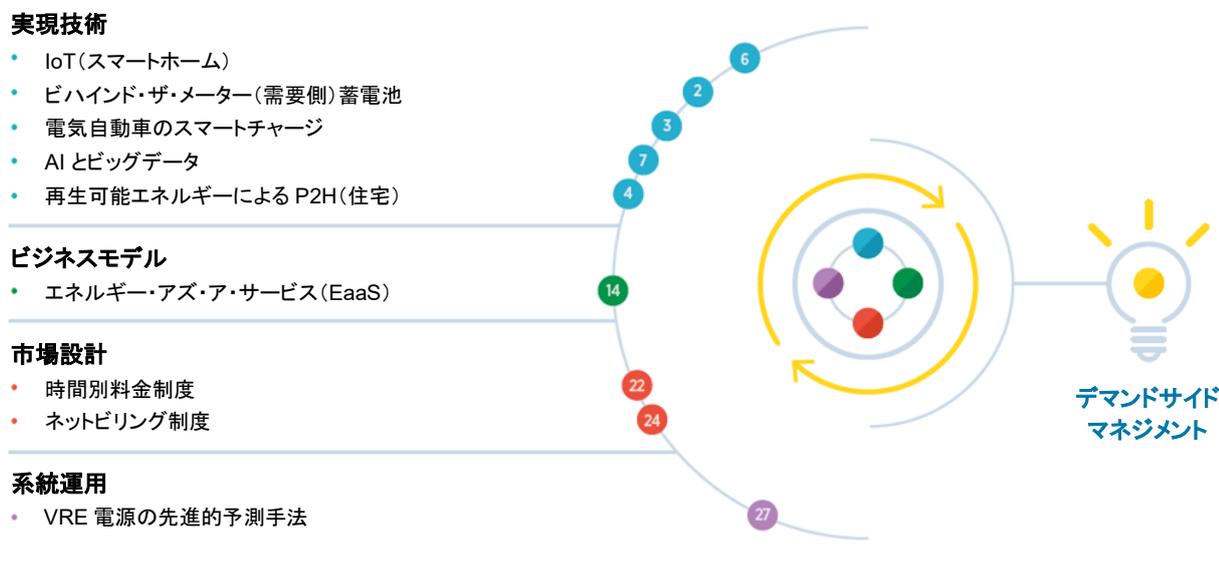
ディスパッチ可能な分散型蓄電池システムが追加され、VPP によってアグリゲーションおよび管理されることで、電力系統のセキュリティと系統安定度が向上する。例えば、Tesla の 100 MW の蓄電池により、最初の満 1 か月間である 2017 年 12 月の取引で、需要家が周波数調整サービスに支払うコストが約 75%削減された。VPP も同様の成果をあげると考えられる(Frontier Economics, 2018)。

概要表:分散型エネルギー源のアグリゲーションによる電力系統へのサービス提供に係る便益と費用

分散型エネルギー源による電力系統へのサービス提供	低い	中程度	高い	非常に高い
便益				
系統柔軟性が向上する可能性	[Progress bar from low to high]			
対象となる柔軟性ニーズ	秒単位～時間単位			
コストと複雑性				
技術およびインフラの費用	ICT プラットフォーム。ただし、分散型エネルギー源とスマートメーターが導入済みであることを前提とする			
規制枠組みに求められる変化	[Progress bar from low to high]			
プレイヤーの役割に求められる変化	能動的な需要家、DSO と TSO、アグリゲーターなどの新たなプレイヤー			
その他の課題	・ プロシューマーを含むさまざまなステークホルダー間の密接な協調			

ソリューション VII デマンドサイドマネジメント

図 28 デマンドサイドマネジメントを実現するためのイノベーションの相乗効果



- **実現技術**のおかげで、自動化は、デマンドレスポンスやデマンドサイドマネジメントの最も重要な要件のひとつとなっている。自動化技術がなければ、需要家は価格シグナルにリアルタイムで応答することはできない。スマートホームにおいてデマンドサイドマネジメントを実現するための要素として、デジタル技術が普及し始めている。IoT は、ローカル蓄電池システム、屋根置き太陽光発電システム、家電製品、スマートメーターなどのデバイスをインターネットで接続し、情報の収集と交換を可能にする。

IoT は基本的に、アセットのデジタル化、データの収集、および、それらのアセットで形成された電力システムをコンピューターアルゴリズムによって制御すること、からなる。クラウドベースの制御システムを用いることで、これらのデバイスの管理が可能になる。システムを制御するために用いられる計算アルゴリズムは、人工知能に取って代わられる可能性がある。人工知能とは、根本的にはインテリジェントに行動する一連のシステムであり、人間と同じように自身の認知的判断によってパターンを検出し、推論を導き、意思決定を行うことができる(主要イノベーション:IoT、AI とビッグデータ)。

- スマートハウスのエネルギー効率を高めること以外に、**市場設計面**において、系統柔軟性の供給源にもなるような価格シグナルを設定する必要もある。時間別料金制度は、需要家が特定の時間帯で負荷をシフトさせるようなインセンティブ設計をすることで、電力システムをサポートし、VRE 導入率の拡大に貢献することができる。これにより、再生可能エネルギー電源が利用できる時は消費電力量を増やし、発電制約がある時は消費電力量を減らすことが可能となる。結果的に、再生可能エネルギーの出力抑制の大幅な削減、および系統信頼度や予測可能性の向上が期待できる。

リアルタイム価格設定を行うことで、再生可能エネルギーによる短時間の出力変動に対しても、デマンドレスポンスによって需給調整が可能となる。また、時間別料金制度の下では、需要家は電気料金を節約する

3

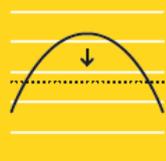
ために消費電力量を調整するという選択肢を得ることができる。自動応答システムがあれば、需要家にはさらに効率的で都合の良い運用が可能となる。屋根置き太陽光発電システムを備え、電力系統への電力供給もできるスマートホームでは、ネットビルディング制度があれば再生可能エネルギーによる電力供給に対して適切な報酬が与えられる。ネットビルディング制度では、合算されたkWhではなく、受電／給電それぞれのkWhあたりの価格に基づいて電気料金が決定される。電気料金の請求は、買電料金から売電料金を差し引いた額に基づいて行われる。

電力系統との相互作用に対する責任をプロシューマーに負わせることによって、電力系統への VRE 電源の導入が促進される。再生可能エネルギー出力を予測する先進的ツールがあれば、不確実性の低減に役立つ(主要イノベーション: 時間別料金制度、ネットビルディング制度、VRE 電源の先進的予測)。

- 需要家側のデジタル化に伴い、**新たなビジネスモデル**が登場している。エネルギー・アズ・ア・サービス (EaaS) は、サービスプロバイダーが電力量(kWh)のみを供給するのではなく、多様なエネルギー関連サービスを提供する革新的なビジネスモデルである。自動制御システムを用いることで、分散型エネルギー源は、電圧制御のために無効電力サポートを提供できる。温度によって制御される需要については、例えば系統の周波数に応じて整定値を調整するなどの方法で、その需要量を変化させることができる。

エネルギーサービスプロバイダーは、リモコン操作可能なインテリジェントデバイスを用いて消費を管理し、顧客の快適性を損なうことなくピーク需要時の負荷を低減させることができる。スマートホーム・ソリューションは、モニタリング、自動化、エネルギー制御、防犯サービス、ホームインテリジェンスを組み合わせることで総合ソリューションとすることができる。最近の調査によれば、「コネクテッドホーム⁹」、すなわちスマートホームの件数は、2015年から2017年までの3年間で1,700万件から2,900万件に増加しており、年平均成長率31%の伸びを示している(McKinsey, 2017)。(主要イノベーション: エネルギー・アズ・ア・サービス (EaaS))

9 「コネクテッドホーム」とは、通信、エンターテインメント、ヘルスケア、セキュリティ、ホームオートメーションといった、さまざまなデバイス、サービス、アプリケーションの相互接続と相互運用を可能とするネットワークである。



17%

ピーク需要を非ピーク
時間帯にシフト

2,000 億 kWh

デマンドレスポンス・プログラ
ムにより節電

10%

ピーク需要を削減

需要削減に及ぼす影響

- スウェーデンでは、時間別料金制度によりピーク需要の 17%が非ピーク時にシフト。

スウェーデンでは、価格シグナルを用いてデマンドレスポンスを促進する実証プロジェクトにおいて、総電力需要に対するピーク時の消費電力量の割合が 23%から 19%に低下した。これは、ピーク需要の 17%が非ピーク時間帯にシフトしたことによる(WEF, 2017)。

- 米国では、2015 年のデマンドレスポンス・プログラムにより、総販売電力量の 5%(約 2,000 億 kWh)を削減。

電気事業者にとって総販売電力量が 1%低減するということは、ピーク需要が平均 0.66%低減することを意味する(Nadel, 2017)。

- デマンドレスポンスにより、電気事業者のピーク需要を 10%削減可能。

米国エネルギー効率経済協議会(ACEEE)の試算によれば、デマンドレスポンス・プログラムを用いることで、ピーク需要を 10%以上削減することが可能である(Nadel, 2017)。

- Google データセンターは、人工知能を利用することで冷房用電力需要を 40%削減。

Google が擁する AI 技術 DeepMind は、同社のデータセンターのひとつにおいて、センサーから収集した経時的データを用い、機械学習アルゴリズムを応用してデータセンターの気温と気圧を予測し、効率を最適化することによって、冷房に使用されるエネルギーを 40%(総消費電力量の 15%に相当)削減した(Evans and Gao, 2016)。



40%

AI を利用した冷房用
電力需要の削減

15%

時間別料金制度による
電気料金の削減

40%

AI を利用したデマンドサイ
ドマネジメントによるコスト
削減

需要家に対する電気料金への影響

- 350 世帯を対象とする時間別料金制度で、電気料金を 15%削減。

コンエジソン(Con Edison)社の Community Power 実証プロジェクトは、ニューヨーク市住宅局の住宅 350 戸に太陽光エネルギーを割引価格で提供した。このプロジェクトで、需要家は、電気料金の 15%にあたる約 80 ドル(約 8,800 円)を節約することができた(Con Edison, 2018)。

- 人工知能を利用したデマンドサイドマネジメントにより、電気料金を最大 40%削減。

フランスとシンガポールに拠点を置く「ソフトウェア・アズ・ア・サービス(SaaS)」企業であるビーブライト(BeeBryte)社は、大規模な商業施設や産業施設の需要をリアルタイムで監視するクラウドベースのインテリジェンスソフトウェアを提供している。このソフトウェアは、気象予測、稼働率、利用状況、エネルギー価格シグナルに人工知能を活用し、時間別料金に応じて自動的に空調システムなどの負荷を蓄電池貯蔵に切り替えることで、電気料金を最大 40%削減している(BeeBryte, n.d.)。

3

ソリューション実施例

米国アリゾナ州のリバース・デマンドレスポンス・プログラムでは、再生可能エネルギーの出力抑制を削減

- 米国の電気事業者であるアリゾナ・パブリックサービス (Arizona Public Service Company: APS) 社では、夏季に需要のピークを迎えるが、残りの 3 シーズンは気候が穏やかで需要が減少する。気温が上昇する夏季は空調が最大の負荷源となるため、太陽光発電との相性は良い。しかし、1 年の残り 9 カ月は気候が穏やかなため、太陽光発電による余剰電力は、多くの場合利用されないままである。日中の特定の時間帯には分散型電源による太陽光発電電力量が増えるため、電気料金はネガティブプライスになる。再生可能エネルギーによる余剰電力を電力系統に吸収させるためには、日単位での負荷シフトを実現する方策が必要である。

APS は近年、ネガティブプライスが発生する時期に太陽光エネルギーの出力抑制の必要性を低減するため、新たなプログラムを提案した。再生可能エネルギー発電を抑制する代わりに負荷を平準化して再生可能エネルギー源の接続を維持するため、APS は、需要家に料金を支払って余剰エネルギーの使用を促す。これは負荷シフトと似ているが、オンピーク/オフピーク価格の裁定取引と比べて予見可能性が低い(再生可能エネルギーの間欠性による)ため、APS のプログラムの対象は、制御可能かつ不要な負荷に限定されることになる。APS の計画には、スマートサーモスタット、電気自動車用の充電インフラ、エネルギー貯蔵システム、温水器タイマーへのインセンティブのほか、再生可能エネルギー電源による余剰電力と電力系統需要を調整することを目的とした新たな「リバース・デマンドレスポンス」商品が含まれている。例えば、スマートチャージ機能を備えた電気自動車は、リバース・デマンドレスポンスが発動されれば無料で電力供給を受けることができる。その際には、スマート家電(食器洗浄機、洗濯機、乾燥機など)も無料の電力供給を受けることができる。

APS のリバース・デマンドレスポンスは、再生可能エネルギーの出力抑制を回避すると同時に、需要家に価値をもたらしている。

フィンランドのダイナミックプライシング設定方式とスマートホーム

- フィンランドでは、需要家は、ダイナミックプライシング方式の電気料金を選択することができる。小売供給者は、自身の選択によって(規制によらずに)ダイナミックプライシング方式を提供する。価格は、ノルドプール (Nord Pool) 市場のフィンランド価格エリアにおけるスポット価格に基づいて決定される。ダイナミックプライシング方式を選んだ需要家は、時間単位の価格、小売供給者ごとのプレミアム、および契約先に選んだ小売事業者への月額固定料金を支払う。

2017 年末までに、需要家の約 9%(約 34 万世帯)がこの料金方式を選択しており (Finish Energy Authority, 2018) (Eurelectric, 2017)、選択した小売供給者のウェブサイトです翌日の各時間の電気料金を確認することができるようになった。料金は、スポット市場の予定表に基づいて発表される。したがって、翌日(24 時間)の価格は深夜 12 時から適用され、午前 2 時頃に最終決定する。特定の時間帯に需要家が支払う価格は、消費のタイミングによって決まる。需要家には、フィンランドにおける他のすべての需要家と同様に、時間ごとのメータリング結果が提供され、データは配電の翌日に地域の DSO のウェブポータルかアプリ上で確認することができる。

現在利用可能な技術によって、例えば、照明、熱供給、換気等を気象条件や市場価格に応じて自動的に最適化することが可能である。一部の小売供給者は、気象条件と実際の熱供給能力に応じて、価格を最適化した熱供給時間帯を設定している。これにより、現行の熱供給システムでも効率的に運用することができ、熱供給費用を最大 15%削減することができる(Eurelectric, 2017)。

Flex PowerPlay - オーストラリアにおける太陽光発電による電力自家消費のためのホームオートメーション

- スマートビルディングとは、要するに適切な時に適切な場所でのエネルギー使用を突き詰めることである。Flex PowerPlay は、オーストラリアで 2017 年に発足したスマートホーム・エネルギープラットフォームであり、太陽光パネル、家庭用蓄電池、監視システムという 3 つの要素からなる。Energy App は、家電製品のオン/オフを容易にし、また、電力負荷の自動制御を行い、エネルギーと費用の管理に役立つものである。このような最適化ソリューションは、利用者が太陽光発電システムを最大限に活用し、電気料金を削減するために将来不可欠のものとなる。

利用者は、スマートフォン、ノートパソコン、タブレットを使って、リアルタイムで自宅の発電状況をモニターし、それを利用することができる。スマート家電と連携する PowerPlay は、外が暗くなると照明を点け、日差しが戻ると消灯するようにプログラムすることができる。また、エアコン、テレビ、音響システムを遠隔操作することもできる。このプラットフォームは、リアルタイムの電力を表示するだけでなく、消費電力量を自動的に最適化することもできる。



その他の事例: デマンドサイドマネジメントのためのエネルギー・アズ・ア・サービス(EaaS)

ニューヨークの電気事業者コンエジソン(Con Ed)社は、デマンドレスポンス・プログラムに登録した需要家に 85ドル(約 9,350 円)の報酬を提供している。需要家は、自宅のサーモスタットを年間に最大 10 回まで電気事業者が制御することを認めなければならない(Con Edison, 2016)。

英国のパッシブシステム(PassivSystems)社は、ホームテクノロジー(蓄熱暖房機、ヒートポンプなど)とパッ

3

シブプラットフォームやバックエンドシステムをインターネット上で接続されたソリューションとして統合することを通じて、家庭用エネルギーモニタリングやエネルギー管理ソリューションを提供している。これは、家庭のエネルギー使用をアグリゲートすることで、多様な電気料金や系統運用者が提供する需要側インセンティブに応じた対応が可能であることを示している(DECC, n.d.)。

同じように、米国のエネルギーサービスプロバイダーである **STEM 社**は、ピーク需要時に商業需要家や産業需要家が蓄電池に貯蔵したエネルギーを使用することにより、電気料金を削減できるよう支援している。同社は、蓄電池システムとクラウドベースの解析システムを組み合わせ、蓄電池に貯蔵したエネルギーを使用する最適のタイミングを特定する(Colthorpe, 2017)。STEM は、人工知能に基づく技術を利用してエネルギー使用を一定レベルに維持し、事業者がデマンド料金をコントロールできるようにしている(pickerel, 2018)。

「バッテリー・アズ・ア・サービス(BaaS)」は EaaS ビジネスモデルのもうひとつの形態で、需要家にエネルギー貯蔵システムを提供して、低需要時に電力を貯蔵し、ピーク需要時に貯蔵電力を使用してもらうものである。例えば、欧州のエネルギーサービスプロバイダーであるエーオン(E.ON)社は、太陽光発電システム所有者を対象に、クラウドソリューションによって余剰電力を貯蔵する **Solar Cloud** を開発した。このような電力を貯蔵する「口座」は、家庭だけでなく他の場所でのエネルギー需要のためにも利用することができる。電力クラウドの主な利点は、需要家が実際に蓄電池の費用を負担する必要がないことである。また、需要家は、ピーク時料金を避けることによって電気料金を削減することもできる(E.ON, 2018)。2018 年には、ドイツ市場だけで太陽光発電システムを所有する需要家は 160 万件にのぼった。エーオン社によれば、またエーオン社と Google の共同プロジェクトである Sunroof のデータに基づけば、ドイツではさらに 1,000 万戸の屋根置き太陽光発電システムの設置ポテンシャルがあるとされる。したがって、このようなサービスは大きな市場ポテンシャルを秘めている。

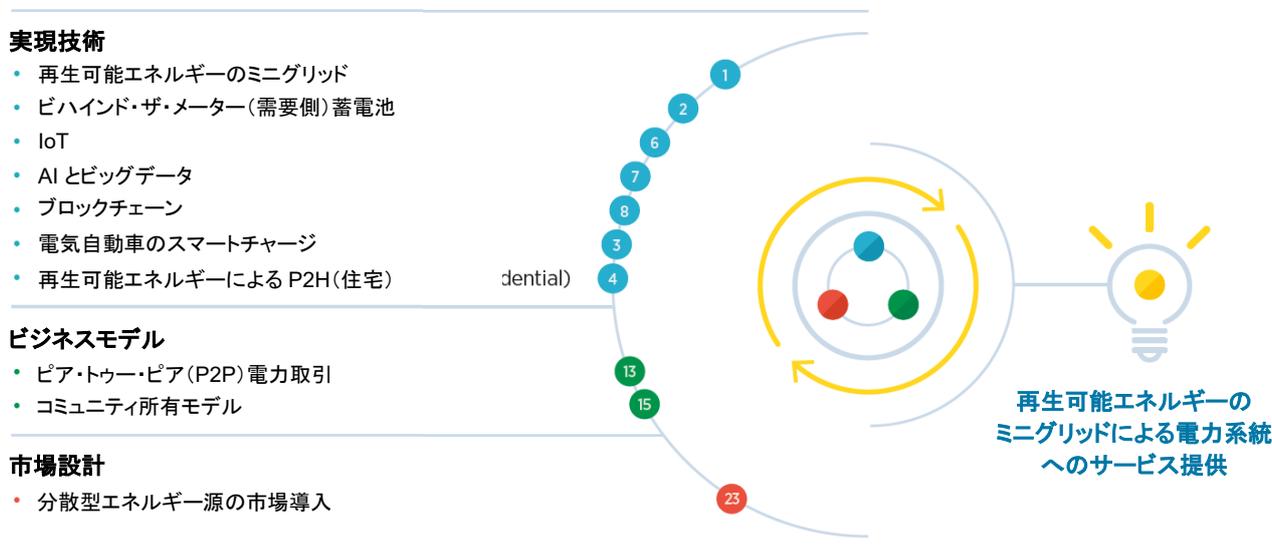
概要表: デマンドサイドマネジメントの便益と費用

デマンドサイドマネジメント	低い	中程度	高い	非常に高い
便益				
システム柔軟性が向上する可能性	[Progress bar from low to high]			
対象となる柔軟性ニーズ	分単位～日単位			
コストと複雑性				
技術およびインフラの費用	[Progress bar from low to high]			
	スマートメーター、ICT			
規制枠組みに求められる変化	[Progress bar from low to high]			
	需要家への価格シグナル			
プレイヤーの役割に求められる変化	[Progress bar from low to high]			
	能動的な需要家 - 促進要因として自動化技術			
その他の課題	• 需要家の参加とプライバシーの保証			

ソリューション VIII

再生可能エネルギーのミニグリッドによる電力系統へのサービス提供

図 29 ミニグリッドによる電力系統へのサービス提供を実現するためのイノベーションの相乗効果



- **実現技術**の一つである再生可能エネルギーのミニグリッドは、電力需要と再生可能エネルギー電源を組み合わせ合わせた統合エネルギーインフラである。ミニグリッドは、電力需要と分散型エネルギー源を組み合わせ制御可能なまとまりを構成して、電力系統から独立して運用されるものである。ミニグリッドによって、電力系統が発達した地域において再生可能エネルギー電源を導入(分散型電源が、状況に応じて電力系統から独立して運用可能)できるだけでなく、電力系統未発達地域など遠隔地のコミュニティにおいても分散型電源を利用できるようになる。(主要イノベーション:再生可能エネルギーのミニグリッド)

ミニグリッドには、あらゆるタイプの分散型エネルギー源を接続することができる。たとえば、屋根置き太陽光発電などの分散型発電システム、蓄電池、温度管理、電気自動車、家庭用ヒートポンプ、デマンドレスポンスなどがある。(主要イノベーション:ビハインド・ザ・メーター(需要側)蓄電池、電気自動車のスマートチャージ、再生可能エネルギーによる P2H)

- ミニグリッドに接続されるこれらのアセットは、需要家が個別に所有する場合も、コミュニティで共有される場合もある。コミュニティ所有モデルは、発電システム、エネルギー貯蔵システム、エネルギー効率化システム、地域冷暖房システムといったエネルギー関連資産の共同所有および管理を可能にする**革新的なビジネスモデル**である。コミュニティ所有モデルでは費用の分担が可能のため、参加者は少ない投資額でアセットを所有することができる。また、住民が結束し、エネルギー問題だけでなく、地域やコミュニティそれぞれの社会経済問題に取り組む契機ともなり、コミュニティ内の連帯と協力も活性化される。(主要イノベーション:コミュニティ所有モデル)

多くの場合、ミニグリッドは参加者間のピア・トゥー・ピア(P2P)電力取引を可能とする。ピア・トゥー・ピア(P2P)の概念には、需要家と分散型エネルギーサプライヤーが希望する価格で電力取引を行うことのでき

3

る、オンライン取引市場のプラットフォーム型ビジネスモデルが含まれる。プラットフォームに直接接続している需要家であれば、このような電力を購入することができる。ピア・トゥー・ピア(P2P)取引を容易にするイノベーションとしてブロックチェーン技術が浮上してきている。(主要イノベーション:ピア・トゥー・ピア(P2P)電力取引、ブロックチェーン)

- 配電網と連系している場合、ミニグリッドは、**市場設計**に基づいて許容される場合には電力系統に柔軟性サービスを提供することができる。今日の飛躍的な技術革新により、再生可能エネルギーのミニグリッドは革新的ソリューションとなりつつある。なぜなら、これらの技術革新により、電力系統にアンシラリーサービスを容易に提供できるようになり、エネルギー効率とコスト効率を高めることが可能になったからである。インテリジェントセンサーを活用して、電力系統の運用状況をモニタリングし、自動的に電力系統とミニグリッドの切り替えを行うことができる。

グリッド間の切り替えでは、直流ミニグリッドのほうが、迅速に電力系統との接続/切断を行えることから利点が多い。交流ミニグリッドと異なり、周波数同期の必要がなく、そのため大規模データセンターのような重要な用途への連続電力供給を保証できる。また、ミニグリッドは、ミニグリッドと電力系統間の連系における混雑の削減に貢献できる可能性がある。低需要時は電力系統への接続、ピーク需要時には電力系統からの切断を選ぶことで、デマンドレスポンスを可能にすることができるためである。このようなサービスに適切な報酬が与えられるためには、ミニグリッドに接続する分散型エネルギー源が卸電力市場に参加可能である必要がある。(主要イノベーション:分散エネルギー源の市場導入)

- しかし、ミニグリッド内のローカルな需要と出力を調整するためには、運用者は複雑なツールを用いる必要がある。ミニグリッドによる自動的な需要予測、電源調整、予備力の最適化、電圧と周波数の制御、電力系統との接続または切断(可能であれば)を実現できるのは、デジタル化に関連した**実現技術**のみである。これらの資源のバランス調整が有効になされるほど、ミニグリッド内での発電コストは低下し、ミニグリッドが電力系統に提供できる追加的サービスによる収益は高くなる。(主要イノベーション:IoT、AIとビッグデータ)

パワーレジャー(Power Ledger)社、LO3 エナジー(LO3 Energy)社などの企業と The Energy Collective などの研究イニシアチブは、ブロックチェーン技術を用いたローカルミニグリッドでのピア・トゥー・ピア(P2P)電力取引を実験している。スマート契約を結ぶことで、価格シグナルやリアルタイムの再生可能エネルギー発電データに基づいて、電力系統全体で自動的に取引を行うことができる。これらの企業は現在、デジタル化やスマート契約を利用してミニグリッドのエネルギーを自動的に監視し、再分配するインテリジェントグリッドの構築に取り組んでいる。



ミニグリッドの影響

- ドイツのミニグリッドでは、発電した余剰電力を電力系統に供給することにより、地域住民の電気料金を30%削減。ドイツのフェルトハイム村は、太陽光、風力、バイオマスを利用した発電設備と蓄電池システムからなるローカル・ミニグリッド・システムを所有し、運用している。太陽光発電所は年間 2,700 MWh を超える電力、バイオマスプラントは年間 4 GWh を発電し、風力発電の設備容量は 74.1 MW を有する。発電した余剰電力は、電力系統に供給される。また、ミニグリッドは、蓄電池システムを用いて電力系統に周波数調整のための柔軟性サービスを提供する。このミニグリッドシステムにより、地域の電気料金は 30%以上低下した(Eid, 2016; Guevara-Stone, 2014)。

- ブルガリアでは、プラグ・アンド・プレイ型のミニグリッドが、0.28 ドル/kWh(約 31 円/kWh)でオフグリッド電力を供給可能に。

ブルガリアのインターナショナルパワーシステムズ(International Power Systems)社は、太陽光パネル、風力発電システム、蓄電池システムといったさまざまな電源を効率的に切り替えることができるプラグ・アンド・プレイ型システム Exeron を開発した。このシステムにより、ミニグリッド運用者はグリッド内全需要の遠隔監視や制御ができるようになり、ミニグリッドシステム全体の効率性も向上する(Exeron, 2018)。このシステムは、運用コストの大幅な削減をもたらし、0.28 ドル/kWh(約 31 円/kWh)でオフグリッド電力を供給することが可能になる。

- インドでは、ミニグリッドシステムが信頼性の高いクリーンなバックアップ電力を電力系統に提供。

IBM 社は、インドのバンガロールにあるデータセンター向けに、太陽光発電による直流ミニグリッドを導入している。このシステムは、年間 330 日にわたり 50 kW の直流電力を提供することができ、交流電力と比べてエネルギー消費を 10%削減している(IBM, 2011)。このミニグリッドシステムは、信頼性が高く、クリーンなバックアップ電力を電力系統に提供している。

ソリューション実施例

オランダの系統接続型ミニグリッド

- オランダでは、持続可能でスマートなエネルギー制御を目的とするミニグリッド・実証プロジェクトが実施されている。これらの実証プロジェクトは「SIDE システム」(スマートかつ統合された分散型エネルギーシステム)とも呼ばれており、電力や熱分野において、VRE に基づくさまざまな技術を統合している。ローカルミニグリッドは、太陽光発電システム、太陽熱システム、電気ボイラー、熱供給用ヒートポンプからなる。SIDE ネットワークは、インテリジェント・マネジメントシステムを用いてさまざまな構成要素を統合して、地域の需給調整を行い、コストを削減している。例えば、日射量が一定程度存在する時は太陽光パネルで収集したエネルギーで、電気自動車を充電する。余剰電力は、蓄電池に貯蔵するか、電力系統を通じてコミュニティ内の他の住宅に供給される。長期的に見れば、SIDE システムは従来型の電力系統より低コストであり、高コストのインフラ増強を必要としないことが、研究データにより示されている(Wood, 2018)。

ローカルミニグリッドは、電力系統にも接続されており、ミニグリッドで発電された余剰電力を電力系統に供給することも可能である。実証プロジェクトの結果から、太陽光発電によって電力コストが大幅に低下することが示された。また、低コストの太陽熱システムにより、熱供給コストもわずかながら低下した(de Graaf, 2018)。



オーストラリアの系統接続型ミニグリッド

- オーストラリア再生可能エネルギー庁（The Australian Renewable Energy Agency: ARENA）は、Wattle Point Wind Farm に隣接した総工費 2,190 万ドル（約 24 億 900 万円）で建設される 30 MW／8 MWh の蓄電池設備に、870 万ドル（約 9 億 5,700 万円）を投資することになった。この蓄電池システムは、地域の風力発電や太陽光発電を活用してミニグリッドシステムを

形成する。ミニグリッドシステムは、電力系統の停電時に高速応答し、南オーストラリア州とヴィクトリア州を結ぶ地域間連系線の混雑を緩和するものとなる。また、このミニグリッドは、総出力 90 MW の風力発電と太陽光発電を利用して系統から切り離して独立運転することもできる（AGL, 2017）。

米国の Brooklyn Microgrid

- ニューヨークに本拠を置くスタートアップ企業 LO3 社が開発した Brooklyn Microgrid は、ブロックチェーン技術を活用する試験的なマイクログリッドである。当初は既存の送配電網を利用する「バーチャル・マイクログリッド」として運用する予定であり、したがって物理的なレジリエンスも兼ね備えている。地域で発電をおこなう住民や企業は、近隣の他の参加者が接続しているネットワークに余剰電力を販売することができる。マイクログリッドは、電力系統を利用するか、あるいは利用可能な場合にはプライベート・コミュニティ・ネットワークを利用して、確実な方法で参加者を相互接続する役割を果たす。

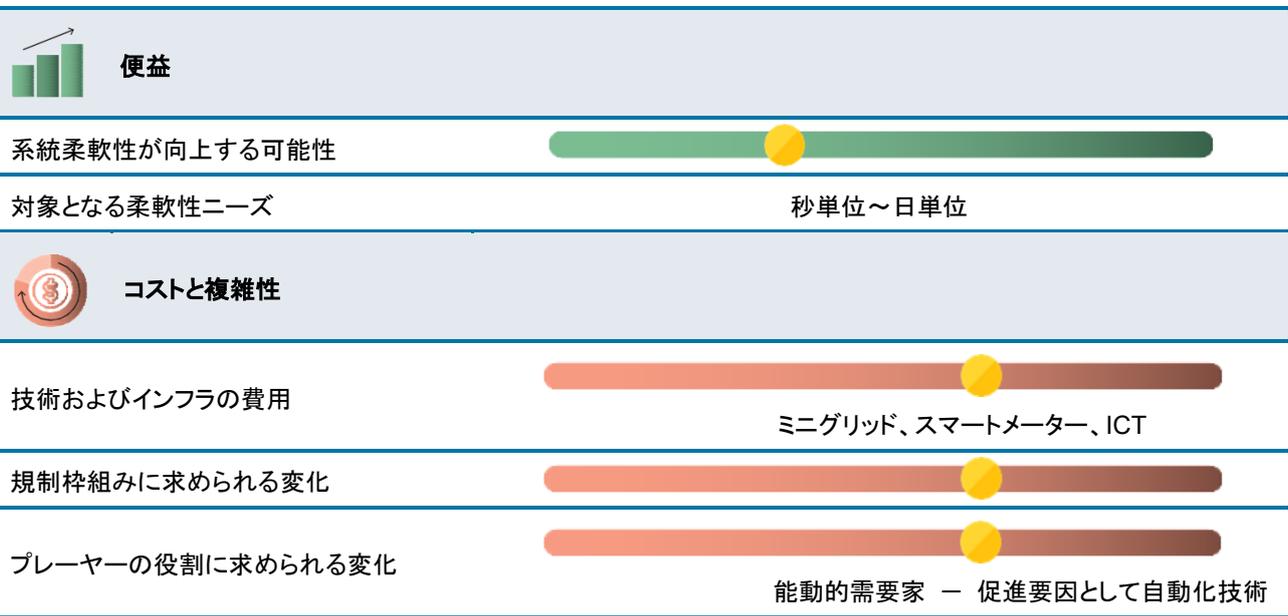
つまり、このプラットフォームは、ブロックチェーンの利点を生かしてピア・トゥー・ピア（P2P）取引を可能にするものである。ソフトウェアは、参加者が所有するエネルギーシステムによって供給された電力量を残らず記録し、かつ把握する。余剰電力は、Smart Contracts アプリケーションによって TransActive Grid の市場に供給され、地域のコミュニティメンバーによって売買される。これらの支払いは、電気料金を通じて精算される。このような契約の価格設定は市場主導型であり、需要供給曲線に基づいて決まる。売り手からの供給が変動する中で、発電者は入札価格を設定し、両者が一致する取引価格を導く。プロシューマー（発電者であり需要家）は、入札価格が足りずにローカル発電されたクリーンなエネルギーを落札できなかった場合は、通常の電力供給者と取引することもできる。現時点では、ブルックリンに所在する 50 件を超える参加者がこのプラットフォームに加わっている。

ブロックチェーンを活用したスマート・マイクログリッドという概念は、主に 2 つの目的をもって生み出された。まず、住民や企業が余剰電力を収益化するための代替選択肢を提供することである。太陽光パネルを所有する住民はそれまでも、余剰電力を電気事業者に販売することができたが、個々のパネルは個々の住民しか使えず販売価格もあらかじめ決められた価格に限られていた。また、地域でブラックアウトが発生した場合、住民の太陽光発電システムは、自家発電する能力があっても停止が求められることもある。2012 年にスーパーハリケーン・サンディが米国各地で一連のブラックアウトを引き起こして以来、電力系統の信頼度が問われている。

概要表:ミニグリッドソリューションの便益と費用

電力系統にサービスを提供する再生可能エネルギーのミニグリッド

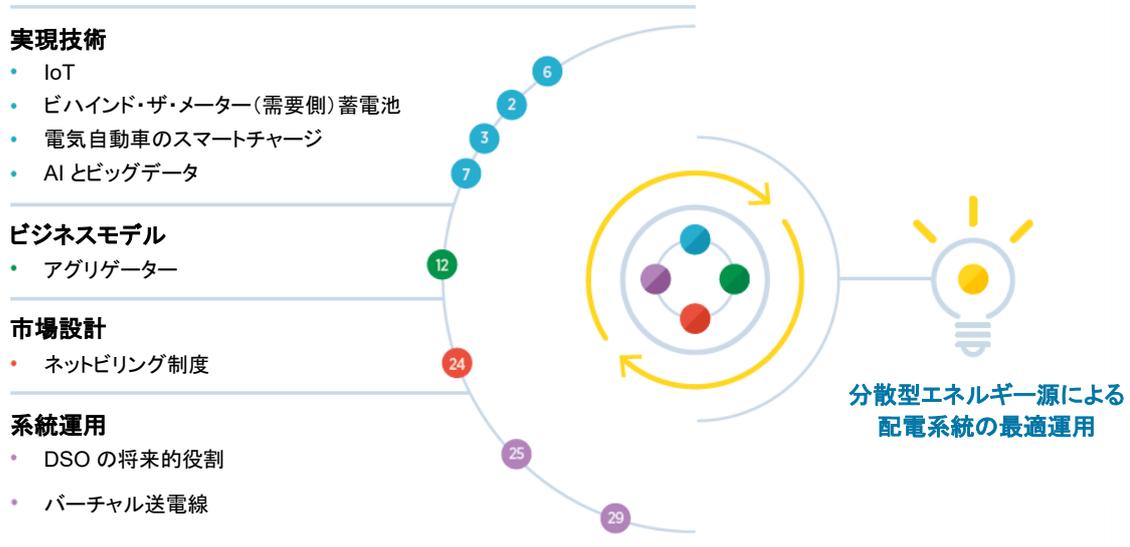
低い 中程度 高い 非常に高い



3

ソリューション IX
分散型エネルギー源による配電系統の最適運用

図 30 分散型エネルギー源による配電系統の最適運用を実現するためのイノベーションの相乗効果



分散型電源の導入拡大に伴い、電力系統への予測不可能な逆潮流が発生するようになった。そのため、従来の手法のままでは送配電網の計画や運用に影響を及ぼす可能性がある。配電網に連系する分散型エネルギー源を効果的に管理するために、配電会社は従来からの配電網管理者としての役割を果たすだけでなく、TSO と同等のレベルで能動的な系統運用者となる必要がある。配電会社は DSO として、配電網利用者からピークシェーピングや電圧維持などの柔軟性サービスを調達できることが望ましい。分散型エネルギーユニットに一定の通信要件や給電シグナルへの順守を義務付けることにより、配電会社は、これらの技術を能動的に運用する、もしくは分散型エネルギーユニットに少なくとも価格シグナルを送ることで、ピーク負荷時の系統混雑を管理することができる。

- また、電気自動車などの**実現技術**の導入やそれらが電力網にもたらす新たな負荷に対応して、DSO は、充電ステーションをスマートに管理することで、電気自動車を電力系統に接続された追加的な蓄電池として有効活用することもできる。さまざまな分散型エネルギー源を最適に組み合わせ、相乗効果を生み出すことにより、系統柔軟性は大幅に高められる。最終需要家が導入した蓄電池システムは、太陽光発電などの再生可能エネルギー源により発電された余剰電力を貯蔵し、あるいは電気料金が安価な時は系統からの電力で充電することもできる。その後、DSO の要請に応じて、電力使用のピーク時間帯に蓄電池を放電して電力需要を満たすことができる。(主要イノベーション: 電気自動車のスマートチャージ、ビハインド・ザ・メーター(需要側)蓄電池)

地域で貯蔵されたエネルギーがピーク需要を満たすことにより、需要家が TSO から受電する必要性は減少する。それにより系統混雑が緩和され、電力系統投資は抑制される。電力系統への投資を回避するために分散型エネルギー源を利用することは、「バーチャル送電線」とも呼ばれている。例えば、英国の配電ネット事業者である UK パワーネットワークス(UK Power Networks)社は最近、ロンドン初の VPP を構築する計

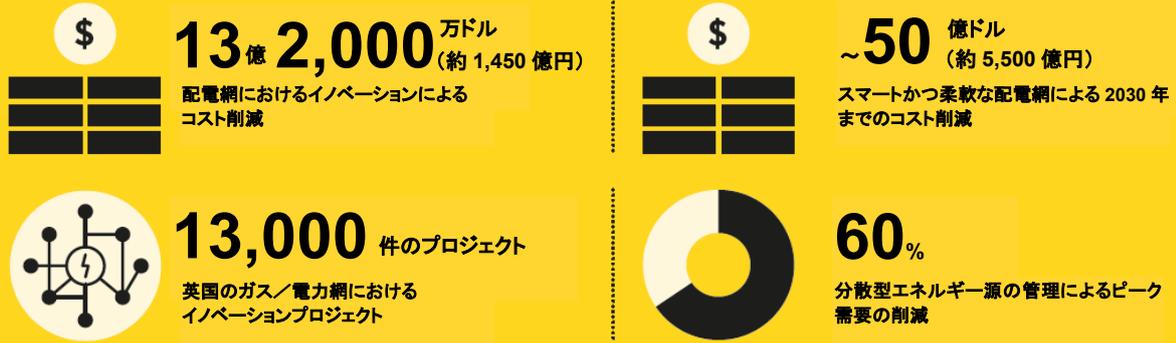
画を発表した。VPP は、市内の住宅 40 戸に設置された太陽光パネルと蓄電池システムからなる。2018 年 2 月に、45 台の蓄電池を用いてピーク需要を満たす試験コンセプトを実施した。このプロジェクトは、系統容量を増やしてピーク需要を満たすという従来型の方法に代わる新たな選択肢を提供すると期待される (Hill, 2018)。(主要イノベーション:バーチャル送電線、アグリゲーター)

分散型電源を効率的に導入するために、従来型の系統増強に代わる選択肢として、能動的系統管理手法が採用されなければならない。配電会社が新たな役割を担い、分散型エネルギー源と配電会社が能動的に相互作用することを目的とした規制メカニズムとして、ノンファーム型接続契約、柔軟性のある相対契約やローカル市場がある。欧州委員会の 2016 年 11 月付け提案は、配電会社が系統利用者から柔軟性サービスを調達することを可能とし、またそれを奨励する法制の施行を、加盟国に対して義務付けることを示している (EC, 2016a)。これは、DSO と系統利用者との間における柔軟性のある相対契約によって、あるいは経済的インセンティブ(地点/時間帯ごとの価格)によって実現することができる。英国では、ノンファーム型接続契約として知られる分散型電源向けの柔軟な系統アクセス方式により、配電会社がセキュリティ上の理由で最終需要家による電力供給や受電を一時的に抑制することが可能になっている。(主要イノベーション:DSO の将来的役割)

ネガティブな影響を最小限に抑え、電力系統全体にとって分散型電源の価値を最大化するよう適切に設計された報酬メカニズムとして、ネットビリング制度がある。この制度では、供給された再生可能エネルギーに対する報酬は、時間帯または地点別料金に基づいて決まる。需要家は、価格シグナルに応答することで系統需給調整を支援する、すなわち系統混雑の緩和に貢献する。(主要イノベーション:ネットビリング制度)

配電会社は、系統運用者となるために、情報通信技術や革新的システムをこれまで以上に活用して系統制約を解決する必要がある。センサー、スマートメーター、人工知能、ロボティクスといった先進デジタル技術の出現により、新しく効率的な系統運用の手法が実現している。これらのソリューションとして、自動電圧制御や電力系統の自動再構築などがあり、分散型電源による電力供給の一部を近隣の電源に転送することで配電線の負荷を抑制する。このような技術を活用した配電網は、しばしば「スマートグリッド」と呼ばれる。(主要イノベーション:IoT、AI とビッグデータ)





配電事業の最適化によるコスト削減の影響

- 英国では、電力網におけるイノベーションにより、10 億ポンド(約 1,400 億円)のコスト削減を実現。
英国では、配電ネットワーク事業者が、よりスマートな配電網の創出、分散型電源の連系に関する送配電プロセスの改善、共有サービスの計画、顧客体験における期待値とのギャップ評価、送配電システムの要件変更の検討といったイノベーションを実施することにより、2018 年から 2023 年までの間に需要家のコストを 10 億ポンド(約 1,400 億円)近く削減できると見込まれている(Engerati, 2018)。英国の DSO であるウェスタンパワーディストリビューション(Western Power Distribution)社は、移行にかかる総コストを、営業許可や新規雇用などの継続的に発生する費用も含めて 1 億 5,000 万ドル(約 165 億円)と見積もっている(Engerati, 2018)。
- 英国では、電力系統に接続された柔軟性供給源に DSO が容易にアクセスできるスマートかつ柔軟な配電網により、2030 年までに最大 40 億ポンド(約 5,700 億円)のコスト削減を実現可能。
オープンユーティリティ(Open Utility)社は、DSO がその立地に応じた柔軟性供給源にアクセスできるようなオンライン市場プラットフォームを開発している。DSO は、このような技術を活用して局地的なスマートグリッドの需給調整を能動的に行うことで、分散型電源、エネルギー貯蔵システム、電気自動車の普及を促進させる重要な役割を果たす。オープンユーティリティ社の資源最適化アルゴリズムは、直感的に使用できるオンラインサービスとして提供され、地域的な柔軟性供給源の参入障壁を緩和し、かつ非常に効率的かつ拡張可能な方法で管理する(BEIS, 2018)。
- 英国では 2004 年より、ガス／電力網を対象とする 1,300 件を超えるイノベーションプロジェクトを実施:これらのプロジェクトによって、電気自動車、分散型再生可能エネルギー電源、脱炭素化したガス供給源などの新たなエネルギー技術をエネルギーシステムに導入する方法について、ガス／電力網の運用者が理解を深めている(Northern Powergrid, 2018)。

ピーク需要削減に及ぼす影響

- 英国の配電網において、分散型エネルギー源の管理によってピーク需要を 60%削減。
英国の配電会社である UK パワーネットワークス(UK Power Networks)社は、ロンドン市内で屋根置き太陽光発電システムをすでに設置している約 40 戸の住宅に、蓄電池システムを設置する。8 kWh の蓄電池モジュールを組み合わせ、合計容量 0.32 MWh が設置される予定である。蓄電池はアグリゲーションされて VPP となり、遠隔操作による放電によりタ方のピーク需要を 60%削減することができる(Willuhn and Brown, 2018)。ピーク時間帯(平日の 2~3 時間)は「配電システム利用料金」の 93%を占めると考えられ、需要家にピーク時間帯のエネルギー使用を減らすよう奨励することが、ピーク需要を削減する上で重要となる。

ソリューション実施例

英国の Open Networks プロジェクト

- 英国の Open Networks は、送配電事業者の全国業界団体である電力ネットワーク連盟が開始したプロジェクトである。このプロジェクトは、配電ネットワーク事業者が配電系統運用者の役割を担うための土台を作るものと期待される。プロジェクトの目的は、DSO と TSO のプロセス改善、共有サービスの計画、需要家の期待値とのギャップ評価である (Engerati, 2018)。

英国の配電ネットワーク事業者であるウェスタンパワーディストリビューション (Western Power Distribution) 社は、配電系統運用者への移行に向けて 4 項目から構成される計画を発表した。この計画は、スマート電力網ソリューションの高圧線への拡大・拡張、アグリゲーターや需要家から各種サービスの供給を受ける契約、DSO と TSO の協力、低圧系統の保全や安全性の確保、からなる (Engerati, 2018)。

英国における Piclo オンライン市場

- オープンユーティリティ (Open Utility) 社は、DSO が立地に応じた柔軟性供給源にアクセスできるようにするため、Piclo というオンライン取引市場を開発している。DSO は、このような技術を活用して局地的なスマートグリッドの需給調整を能動的に行うことで、分散型電源、エネルギー貯蔵システム、電気自動車の普及を促進させる重要な役割を果たす。スマートかつ柔軟な配電網は、英国の発電事業による排出量を削減し、2030 年までに最大 40 億ポンド (約 5,700 億円) のコスト削減を実現する可能性がある。ただし、DSO が電力系統上にある柔軟性供給源に迅速かつ容易にアクセスできることが必要となる。オープンユーティリティ社の資源最適化アルゴリズムは、直感的に使用できるオンラインサービスとして提供され、地域的な柔軟性供給源の参入障壁を緩和し、かつ非常に効率的かつ拡張可能な方法で管理する。この試行プロジェクトでは、需要家や売り手から良好な関与が得られ、ステークホルダーは定期的にサービスにログインして電力取引の詳細を確認していた。Piclo は、需要家の選好と立地に基づいて発電と需要をマッチさせ、需要家に視覚的なデータや分析結果を提供する。透明性のある利用しやすいメカニズムによって、契約者は、再生可能エネルギー電源からの電力調達を望む需要家に、要求通りの電力を提供することができる。日単位、週単位、月単位で視覚化したデータは、エネルギー需要や、配電コストを意味する「配電系統利用料金 (DUoS)」について理解するために非常に有用であった。ピーク時間帯 (平日の 2~3 時間) が DUoS 料金の 93% を占める可能性もあることが認識されたため、需要家はピーク時間帯の電力利用を減らすようになった (Open Utility, 2016)。需要家からのフィードバックによって、発電の方式よりも電源に近いか遠いか、電力購入先を選ぶ際の決定要因となっていることがわかった。需要家は、遠方の供給者より地元の供給者を選好していた。コーンウォールの地域エネルギー市場の場合は、地域内の発電の 54% が、同地域の 4 件の需要家によって消費されていた。

ニューヨーク州のエネルギービジョン改革

- ニューヨーク州は、「エネルギービジョン改革 (Reforming the Energy Vision)」(REV) と銘打ったロードマップを策定し、ニューヨーク州公益事業委員会はそれに基づき、大規模な投資家所有電気事業者 6 社に対して、分散型エネルギー源を導入するためにいくつかの措置を講じることを義務付けている。これらには、電気自動車充電システムの整備、エネルギー商品やサービスに対するオンライン取引市場の創設、VPP の構築、分散型エネルギー源の系統連系の実現、ストレージ・オン・デマンド (storage on demand) の開発な

3

どがある。このような商品やサービスのコストは、料金体系の改定によって回収される。電気事業者はすでに、いくつかの実証プロジェクトを開始している (New York State, 2018)。

概要表:分散型エネルギー源による配電系統の最適運用に関する便益と費用

分散型エネルギー源による配電系統の最適運用	低い	中程度	高い	非常に高い
便益				
系統柔軟性が向上する可能性	[Progress bar from low to high]			
対象となる柔軟性ニーズ	分単位～日単位			
コストと複雑性				
技術およびインフラの費用	[Progress bar from low to high]			
	スマートメーター、ICT			
規制枠組みに求められる変化	[Progress bar from low to high]			
	DSO に対する新たなインセンティブ および規制枠組み			
プレイヤーの役割に求められる変化	[Progress bar from low to high]			
	DSO の新たな役割			
その他の課題	<ul style="list-style-type: none"> 系統不安定性の管理 			



3.4 電力系統全体にわたる柔軟性ソリューション

実現技術のなかには、幅広い用途に対応し、電力系統のさまざまな部分で柔軟性を高めることができるものもある。

大容量蓄電池ソリューションは、再生可能エネルギーの日内変動に対処することができ、次のような柔軟性をもたらす。

- **供給側:**蓄電池は、VRE 発電所と組み合わせることで、出力変動に対してバランスを取ることができる。蓄電池のコストは近年目覚ましく低下しているが、それでもなお、このソリューションは高額である。また、このソリューションは、発電所自体の柔軟性に直接的な影響を与えることができる可能性があるが、系統信頼度にまで影響を及ぼすことができるか否かは、すべての変動性電源に対するソリューション導入状況に依存する。
- **電力系統:**蓄電池システムは、再生可能エネルギー電力の出力を安定させ、連系を促進させるという便益が見込まれることから勢いを得ている。しかし、利点はそれだけに留まらず、蓄電池システムは、負荷シフト、周波数調整、予備力など幅広いサービスを提供することができる。蓄電池が十分なコスト競争力を持った選択肢となるためには、さらなるコスト削減が必要である。しかし、蓄電池がアンシラリーサービスを提供できるよう規制を変更することによっても、蓄電池に新たな収益源をもたらし、導入を促進させることができる。高速応答技術として、蓄電池が系統柔軟性に及ぼす影響は大きい。
- **系統混雑緩和:**一部の TSO にとっては、蓄電池を用いて系統混雑を緩和し、電力網への投資の抑制を実現することも、新たなソリューションのひとつである。そのようなプロジェクトのほとんどはまだ試験段階にあるため、蓄電池の利用が系統柔軟性に及ぼす影響は、十分明確にはなっていない。また、既存の法制下においても、例えば TSO が所有する蓄電池などに制約が課される可能性がある。(ソリューション X)

P2X ソリューション、すなわち P2H₂ や P2H は、再生可能エネルギー発電の短期的な変動性に対処ことができ、また、より長期にわたるエネルギー保存手段ともなることから、季節変動への対応にも役立つ。また、供給側に柔軟性をもたらし、系統サービスを提供し、系統混雑を回避するという電力系統の幅広いソリューションともなる。

- **供給側:**P2X は、再生可能エネルギーによる余剰電力を熱または水素に変換することによって、発電と需要のタイミングを切り離すことができる。どちらも、再生可能エネルギー電源を大量に連系するために必要な柔軟性の供給に大きな影響を及ぼすが、技術の成熟度には差があり、コストにも差がある。
- **電力系統:**柔軟な負荷の役割を担う電気分解装置は、電力需給調整市場に参加するために十分な容量と応答性を備えている場合には、需給調整サービスを提供することができる。水素は、再生可能エネルギー源が利用できない時に、電力に再変換して安定供給を行うことで、系統の安定化に貢献することができる(EC, 2016b)。また、電気分解装置は、処理速度の増減を迅速に行うことができるため、低コストの需給調整サービスを電力系統に提供する柔軟な負荷として用いることができる。

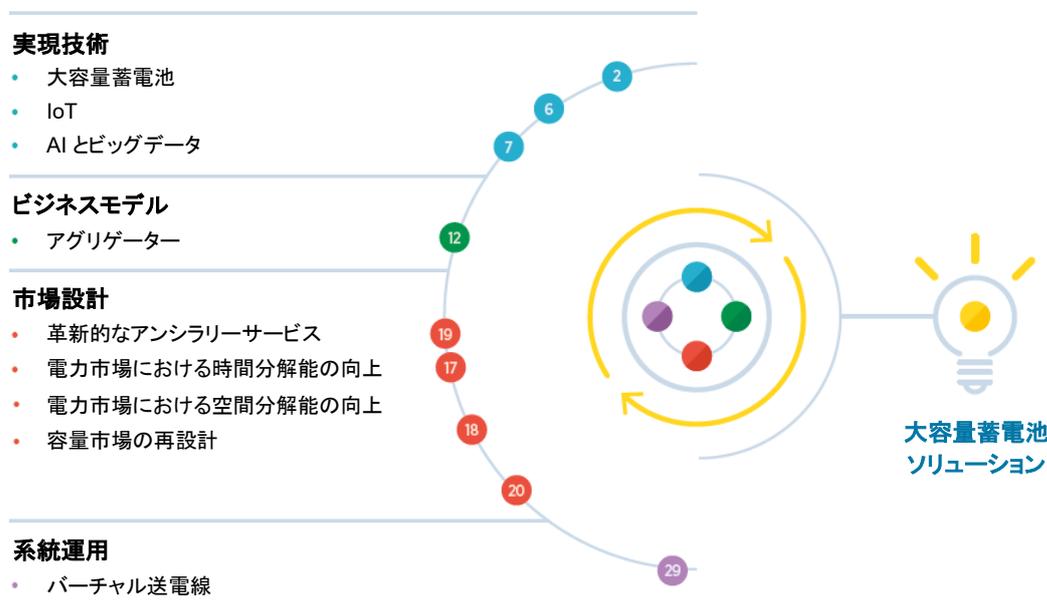
3

- **系統混雑緩和**: P2H2 や P2H は、系統混雑が著しく、発電された再生可能エネルギーを大規模需要地に送電できない場合に、このようなエネルギーを貯蔵するために利用することができる。(ソリューション XI)



ソリューション X 大容量蓄電池ソリューション

図 31 大容量蓄電池を有効活用するためのイノベーションの相乗効果



- **実現技術**として、大容量蓄電池は、さまざまな面から再生可能エネルギーの系統連系を促進する。第一に、発電余剰が発生した場合はエネルギーを貯蔵して出力抑制を回避し、再生可能エネルギー電力が不足した場合には、蓄電池から電力を供給することで、再生可能エネルギーの変動性に対処することができる。第二に、蓄電池は柔軟性があり、かつ高速応答型の技術であるため、突発的な出力変動にも対応でき、電力系統の需給調整の維持に役立つ。蓄電池は、再生可能エネルギーの導入に対してきわめて重要な要素であり、高速の周波数調整や電圧制御などによる安定度や信頼度を提供することができる。(主要イノベーション:大容量蓄電池)
- **ビジネスモデル**については、大容量蓄電池は、その容量に応じて、単独の市場参加者として、あるいはアグリゲーターの一部としてその役割を果たすことができる。(主要イノベーション:アグリゲーター)

VRE 発電所と蓄電池貯蔵システムの組み合わせ

特定の VRE 電源と蓄電池を組み合わせることで、系統連系点での出力変動を抑え、ひいては再生可能エネルギーの系統連系をより円滑に進めることができる。蓄電池システムは、VRE 電源の出力を平滑化し、出力変化速度(MW/分)を制御して、電力系統における急激な電圧変化や周波数変化を低減させることができる。また、発電の平滑化によって、再生可能エネルギー電源の発電計画に対する順守性を高めて、出力変動に対するペナルティの支払いを避けることができる。また、発電を平滑化することで、より確実かつ安定的なエネルギー供給が 24 時間いつでも可能となるため、市場でも電力量や容量の取引における再生可能エネルギー電源のプレゼンスが高まる。電力系統において再生可能エネルギー電源の大量導入が計画されている場合は、それらの再生可能エネルギー電源に蓄電池システムを併設することも検討される場合がある。

また、大型蓄電池は、屋根置き太陽光発電など、アグリゲートされた地域分散型電源と組み合わせることができる。これらの蓄電池システムは、電気事業者の電力網に系統連系し、電気事業者もしくは電気事業者に代わって業務を行うアグリゲーターによって直接制御される。貯蔵された電力は、需要が供給を上回った際に地元で消費することができる。ドイツのウォルドルフでは、100 kW の蓄電池システムに 40 世帯が接続する実証プロジェクトが実施されている(GTAI, 2018)。

電力系統にサービスを提供する蓄電池システム

蓄電池システムは、高速応答能力を備えるため、電力系統へのサービス提供に用いることができる。VRE の導入拡大に伴って、一次(高速)周波数制御サービス、二次周波数制御サービス、電圧サポート、容量予備力といったアンシラリーサービスが大幅に増加すると見込まれるが、これらのサービスは、市場や季節によって性能要件が変動する。高い出力を短時間必要とする用途(高速周波数調整応答など)もあれば、より長時間にわたって電力を必要とする用途(安定供給容量など)もある。このようにサービスが異なれば、充放電サイクルも異なる。したがって、蓄電方式の違いによって、性能やコストの面で競争力を発揮できる市場は異なると考えられる(IRENA, 2018a)。表 2 に、各種の蓄電方式について、さまざまな用途に対する適合性を示し、また、これらのサービスに関する説明も付け加えた。

- **市場設計面**では、エネルギー貯蔵システムの経済性を左右する重要な要因は、単一の蓄電貯蔵システムで複数のサービスを供給して、複数の付加価値を創出できるかどうかである。そのような方法を許容することで、複数の収益源を「積み重ね」て、プロジェクトの収益性を向上させることができる。多くの国では、これを実現するために市場構造と法制を変更する必要がある。あるいは、アンシラリーサービスを扱う新たな市場を創設し、個々のサービス(一次および二次周波数制御予備力、安定供給容量など)に対してより直接的に報酬を与えることができる、分解能の高い市場を導入する必要がある。市場に競争力の高いサービスを提供できる機会が増えれば、蓄電池の導入を促進させる契機になると考えられる。同時に、蓄電池による再生可能エネルギーの出力安定化やタイムシフトサービスも拡大すると見込まれる。(主要イノベーション: 革新的なアンシラリーサービス、電力市場における時間分解能向上、電力市場における空間分解能向上、容量市場の再設計)

表 2 各種蓄電方式について、さまざまな系統用途に対する適合性

用途	蓄電池のタイプ			
	リチウムイオン電池	鉛蓄電池	ナトリウム硫黄電池	フロー電池
負荷シフト - 余剰再生可能エネルギーの出力抑制を削減	適合	適合	適合	適合
周波数回復予備力	適合	不適合	不適合	不適合
容量予備力	適合	適合	適合	適合可能性
送配電系統増強の抑制	適合	適合	適合	適合可能性
電圧維持	適合可能性	不適合	不適合	不適合
運転予備力	適合可能性	適合	適合可能性	適合可能性

注:「適合」とは、蓄電方式が実証レベルまたは商業レベルでそれぞれの用途に使用されていることを意味する。「適合可能性」とは、蓄電方式がそれぞれの用途に使用できる潜在力はあるが、設置例がほとんどまたはまったくないことを意味する。「不適合」とは、蓄電方式がそれぞれの用途に適さない可能性が高いことを意味する。

出所: HDR, 2017.

多くの国において、エネルギー貯蔵システムは電力市場への参加を許可されていない。所有モデルや運用モデルを規定する法制を明確化することで、エネルギー貯蔵システムの提供者は、多様な収入源を確保することができる。これには、卸電力市場への参加、系統運用者への周波数応答サービスの販売、容量市場への参加などがある。例えば、英国の系統運用者が 2016 年に初めての「高速周波数応答サービス」の入札を実施し、エネルギー貯蔵システムと合計 201 MW の契約を結んだ。

米国の連邦エネルギー規制委員会 (FERC) は、地域送電運用機関 (RTO) や独立系統運用機関 (ISO) が運営する容量市場、電力市場、アンシラリーサービス市場において、エネルギー貯蔵システムの参加を妨げる障壁を取り除く決定を下した。この指令により、大容量蓄電池は、基幹電力システムのレジリエンス強化に貢献することが可能になる。2018 年 2 月、FERC は、エネルギー貯蔵プロバイダーが米国の卸電力市場に参加することを認める規則を可決した (FERC, 2018)。近年のもうひとつの FERC 指令は、エネルギー貯蔵システムの容量市場への参加を認めるもので、系統運用者に対して、料金体系の改定、およびエネルギー貯蔵システムの物理特性と運用特性を反映した規則の確立を義務付けている (Walton, 2018)。

世界中の電力系統では、すでにエネルギー貯蔵システムを組み込んだ計画立案が行われている。例えば、カリフォルニア州の電力系統においてカリフォルニア公益事業委員会は、大手電気事業者 3 社に対し、2020 年までに合計 1,325 MW のエネルギー貯蔵システムを稼働させることを義務付けた。同様に、アジア太平洋、北米、西欧は、2026 年までにアンシラリーサービス向けのエネルギー貯蔵容量の主要な取引市場となり、その規模は合わせて 32 GW 以上と見込まれる (Colthorpe, 2018)。

3

系統混雑の緩和を目的とした蓄電池システムの利用

- **系統運用を支援するため、送配電系統のさまざまな地点に大容量エネルギー貯蔵システムを配置して、非ピーク時の余剰電力を貯蔵することができる。ピーク時には貯蔵システムから放電して現地の需要を満たすことで、混雑した系統線を使って電力を送電する必要性がなくなる。このようにして、系統混雑を低減させるとともに、「バーチャル送電線」が創出される。**

この場合、蓄電池は商用の資産ではなく、系統運用者が所有し、系統管理のためにのみ使用される系統資産である。例えば、イタリアの TSO であるテルナ(Terna)社は、系統混雑を管理するため、イタリア南部にある 150 kV の送配電系統において 35 MW の蓄電池システムを用いた実証プロジェクトを実施している(Terna, n.d.)。フランスの TSO である RTE 社も、Ringo プロジェクトと呼ばれる同様の取り組みを行っている(イノベーション概要を参照:バーチャル送電線)。



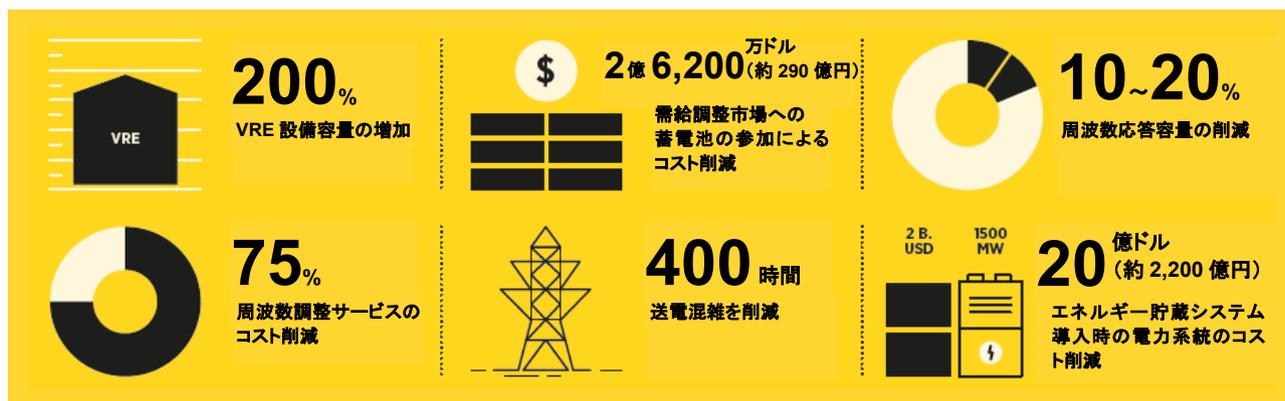
VRE 連系に及ぼす影響

- **アラスカでは、蓄電池により風力発電の発電電力量が 800 万 kWh 増加。**

アラスカでは、地元の電気事業者コディアック・エレクトリックアソシエーション(Kodiak Electric Association)社がベルリンのエネルギー貯蔵システムを開発しているユニコス(Yunicos)社と協力して、3 MW/750 kWh の先進的な鉛蓄電池システムを 4.5 MW の風力発電プロジェクトに併設し、新たに 800 万 kWh 分の風力発電の発電電力量の増加を実現した(IRENA, 2015)。

- **ハワイ島では、太陽光発電と蓄電池の併用により、化石燃料の使用量を 97%削減見込み。**

2014 年、エネルギー貯蔵システムプロバイダーのアクイオンエナジー(Aquion Energy)社は、ハワイ島バックケンハレ(Bakken Hale)地区にあるオフグリッドの太陽光マイクログリッドの一環として、1 MW の蓄電池システムの設置を完了した。この電力系統では、年間 350 MWh を発電するよう設計されている。これにより、化石燃料の使用量が 97%削減され、二酸化炭素排出量は 5,000 トン以上削減される見込みである(ESA, 2014)。



系統運用に及ぼす影響

- ドイツでは、VRE 導入容量が 200%増加、アンシラリーサービスの調達コストが 70%減少、需給調整市場の規模が 20%縮小。

ドイツの需給調整市場では、2009 年より、従来型電源だけでなく、再生可能エネルギー電源、蓄電池システム、産業需要家の参加も認められている。2009~2015 年の間に、需給調整市場の規模(GW 単位)は 20%縮小し、TSO によるアンシラリーサービス調達コストが 70%減少した一方、同時期に系統安定度は向上し、VRE 導入容量は 200%増加した(Wang, 2017)。

- 英国では、ナショナルグリッド(National Grid)社が 1 秒未満で応答する高速周波数応答サービス(Enhanced Frequency Response)を導入し、需給調整市場に蓄電池の参加を許容した結果、需要家に約 2 億 6,200 万ドル(約 290 億円)のコスト削減がもたらされた。2016 年 7 月には、合計 200 MW を超える蓄電池システムの導入契約が結ばれた(National Grid, 2017)

- PJM は、周波数応答容量の調達量が 10%~20%減少すると予測。

米国の系統運用者である PJM が導入したエネルギー貯蔵システムは、コスト効率の高い周波数応答サービスを提供し、化石燃料発電の使用量を削減している。PJM は、周波数応答容量の調達量が 10%~20%減少すれば、2,500 万(約 27 億 5,000 万円)~5,000 万ドル(約 55 億円)のコスト削減が需要家にもたらされると予測している(HDR, 2017)。

- オーストラリアでは、大容量蓄電池によって周波数調整サービスの費用を 75%減少。

テスラ(Tesla)社の 100 MW の蓄電池は、最初の満 1 カ月間である 2017 年 12 月の取引で、需要家が周波数調整サービスに支払う費用を約 75%削減した(Frontier Economics, 2018)。

送電系統に及ぼす影響

- 送電混雑を 400 時間削減し、燃料費を年間最大 203 万ドル(約 2 億 2,300 万円)削減。

4 MW/40 MWh の蓄電池システムを使用して 4 時間の電力貯蔵を行うことで送電混雑を緩和する大掛かりな実証研究において、ニューヨーク独立系統運用機関(NYISO)が燃料費を年間最大 203 万ドル(約 2 億 2,300 万円)削減でき、また、送電混雑をほぼ 400 時間削減できることが示された(IEEE, 2017)。

- 約 1,500 MW 分のエネルギー貯蔵システムが導入された場合、20 億ドル(約 2,200 億円)のコスト削減。

ニューヨーク州から委託された研究の報告書では、州が従来型の系統ソリューションの代わりに約 1,500 MW のエネルギー貯蔵システムを導入すれば、20 億ドル(約 2,200 億円)を超えるコスト削減が実現すると見積もられている(NYSERDA, 2018)。



ソリューション実施例

オーストラリアにおいて大容量蓄電池と風力発電所を組み合わせる電力システムにサービスを提供

- 2017年、米国企業のテスラ(Tesla)社が、南オーストラリア州にある315 MWのHornsedale Wind Farmにおいて、100 MW/129 MWhのリチウムイオン蓄電池システムの稼働を開始した。蓄電池システムは、Hornsedale Wind Farmで発電される電力を安定化し、同時に南オーストラリア州の電力システムにアンシラリーサービスを提供するために設置された。容量70 MWの蓄電池が電力システムに接続されてシステムサービスを提供し、残りの30 MWが風力発電所で発電された再生可能エネルギー電力の安定化に用いられる。30 MWの蓄電池は、エネルギーを最大で3~4時間貯蔵し続けられるよう設計されている(McConnell, 2017)。

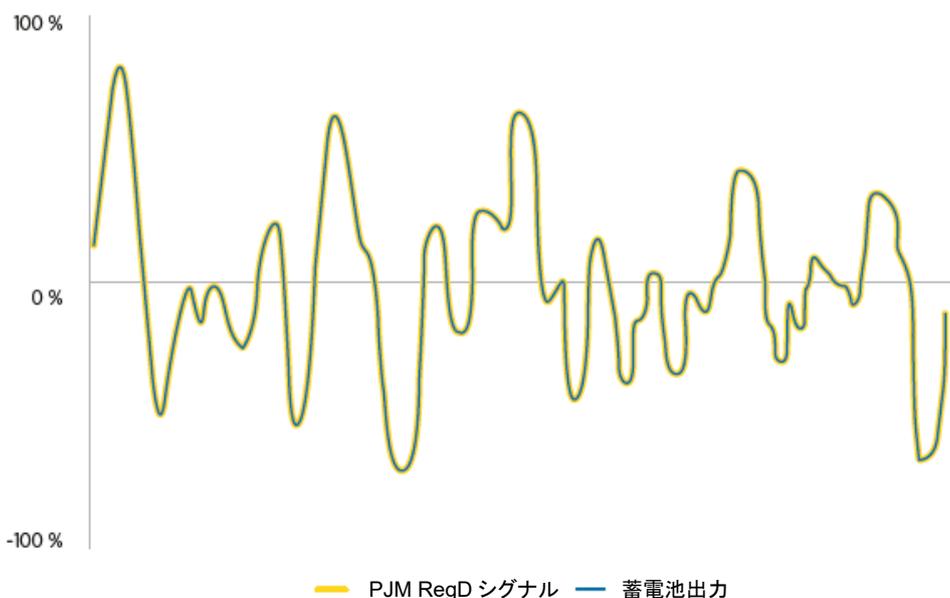
さらに、オーストラリア・エネルギー市場委員会(Australian Energy Market Commission)は、エネルギー貯蔵システムがアンシラリーサービスを提供できるように市場ルールを変更して、オーストラリアにおけるエネルギー貯蔵の導入を促進させる契機となった(Stone, 2016)。

大容量蓄電池が米国のPJMにアンシラリーサービスを提供

- FERCがISOに対し、周波数調整サービスの提供成果に報酬を支払うよう義務付けたことを受けて、英国企業のRenewable Energy Systems(RES)は、米国のRTOであるPJMに周波数調整サービスを提供する4 MW/2.6 MWhの蓄電池システムを構築した(RES, 2016)。

周波数調整とは、システム周波数を規定レベル内で維持するために、電力を秒単位で供給または消費することである。周波数調整に利用される主要な電源は、石炭火力発電所とコンバインドサイクル・ガス発電所で、出力変化速度が比較的遅く、周波数調整のための高速な信号に十分追従できない。これを踏まえ、FERCは、ISOに対して「需給調整の成果に対価を支払う」よう求めるOrder 755を発令した。その結果、エネルギー貯蔵システムは、提供した調整力に対して、従来型電源よりも多くの報酬を得られるようになった(RES, 2016)。

図 32 PJM による周波数調整サービスのシグナルおよび蓄電池応答



出所: RES, 2016

PJM は、周波数調整市場の参加者を、主に PJM からのシグナルに対する応答の迅速さと正確さに基づいて評価している。RES が設置した蓄電池は、周波数調整を提供する際に最大限の応答速度と正確性を発揮するように設計されており、非常に高い成績を維持している。図 32 は、PJM から受信したシグナルと、それに対して RES の貯蔵システムがいかにか正確に応答するかを示している。

蓄電池は、柔軟性が高く、応答速度が速い。多様な電源に対応して、電力システムの需給調整の維持に貢献できる

ポルトガル・グラシオーザ島の太陽光・風力・蓄電池システムのハイブリッドソリューション

- ポルトガルのグラシオーザ (Graciosa) 島では、従来、輸入した化石燃料とディーゼル燃料での発電によってエネルギー需要を満たしてきた。しかし、1 MW の太陽光発電所、4.5 MW の風力発電所、6 MW/3.2 MWh の蓄電池システムからなるグラシオーザ・ハイブリッド再生可能エネルギー発電所が新設されたことで、輸入化石燃料への依存度が軽減されるとともに、温室効果ガス排出量も減少している。

このプロジェクトで発電されたエネルギーは、地元の電気事業者である EDA 社に販売される。また、プロジェクトでは、気象予測や負荷パターンといったさまざまな要因に基づいて発電を最適化するソフトウェアである GEMS (Greensmith Energy Management System) も使用されている。島内の再生可能エネルギー消費が全エネルギー消費に占める割合は 15% から 65% へと増加し、1 カ月あたりのディーゼル燃料の必要量は約 17,000 リットル削減されると見込まれる。このハイブリッド発電所は現在、地域需要の 70% を満たしている (Anteroinen, 2018)。

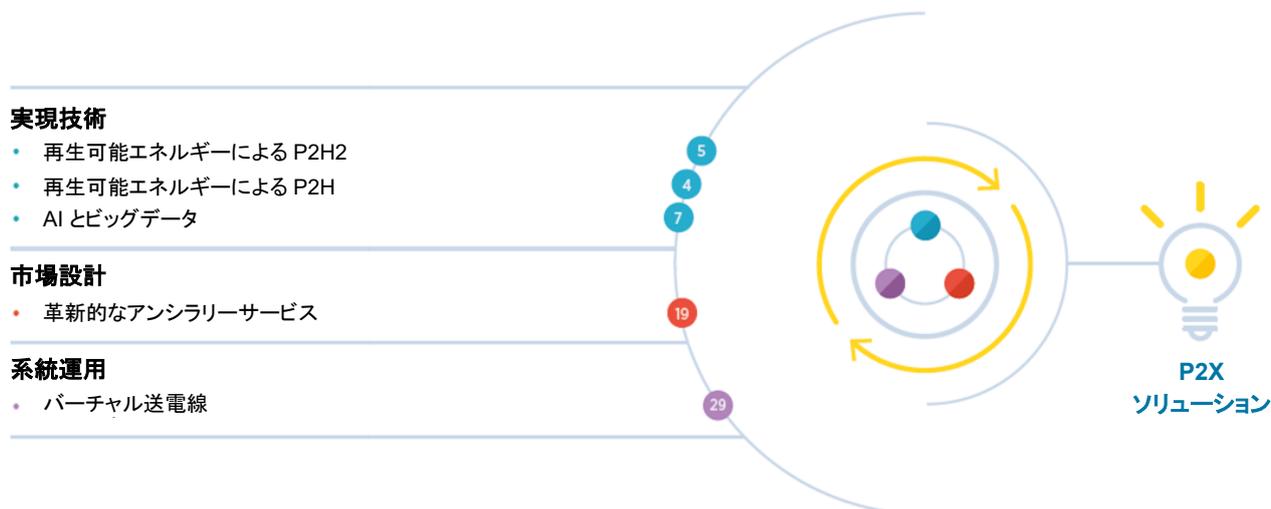
3

概要表: 大容量蓄電池ソリューションの便益と費用

大容量蓄電池ソリューション	低い	中程度	高い	非常に高い
 便益				
システム柔軟性が向上する可能性				
対象となる柔軟性ニーズ	秒単位～時間単位			
 コストと複雑性				
技術およびインフラの費用				
	容量および蓄電池コスト動向による			
規制枠組みに求められる変化				
	電力を発電、貯蔵、消費できる新たなプレーヤーに適切なインセンティブを提供する			
プレーヤーの役割に求められる変化				
その他の課題	<ul style="list-style-type: none"> DSO と蓄電池事業者の間で基準を策定する必要がある 			

ソリューション XI P2X ソリューション

図 33 P2X ソリューションを実現するためのイノベーションの相乗効果



- **実現技術**として蓄電池を利用する以外に、電力は、水素または熱に変換して貯蔵することができる。この電力変換貯蔵は、発電と需要のタイミングを切り離し、それによって VRE の大量連系を促進するとともに、余剰発電の出力抑制を回避できる可能性があるという点でも価値がある。日内変動への対応においては蓄電池の方が優れている。一方、電力以外の部門の電化は、これらの部門の需要を電力部門にシフトさせることができる。これを上手く利用することで、電力系統に大きな柔軟性をもたらせる可能性がある。

太陽光や風力発電による電力を別種類のエネルギー媒体に変換し、多様な部門で利用する、あるいは再変換して電力に戻す手法は、系統柔軟性を大幅に高められる可能性がある。変換貯蔵は、VRE による余剰電力の一時保管先の創出という選択肢を生み出し、他部門において化石燃料を用いたエネルギー源に取って代わることによって炭素排出量を削減できる。

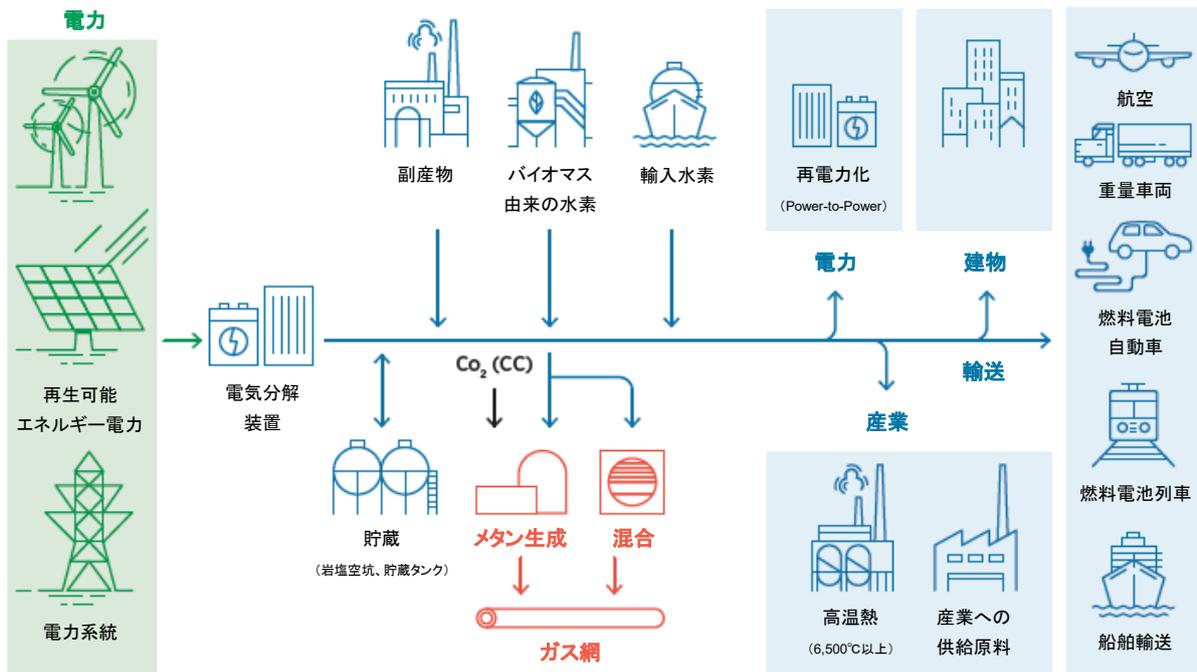
P2H2

P2H2(電力から水素への変換)は、電力を用いて水を電気分解し、水素と酸素に分離させるという手法である。水素は用途が広く、クリーンかつ安全なエネルギー媒体であり、発電用燃料としても、産業部門における供給原料としても使用することができる。液体または気体として貯蔵、あるいは輸送することが可能で、熱や電気を発生させるために燃焼させることや、燃料電池用燃料として使用することも可能である。したがって、水素は再生可能エネルギー電力の季節貯蔵に大きな役割を果たしうる。また、モビリティ用途、産業用途、ガス網への供給など、他の用途で使用して他部門の脱炭素化を促進させることも期待できる(図 34 を参照)。

P2G(電力からガスへの変換)は、再生可能エネルギーを水素やメタンといった気体のエネルギー媒体に変換するという手法である。P2G においても、電気分解によって再生可能エネルギー電力から水素を生成し、生体触媒を用いて水素と二酸化炭素を反応させ、メタンを生成する。合成されたメタンは、化石燃料である天然ガスの直接代替品として、海上輸送や発電などにおいて使用することができる。また、エネルギーの季節貯蔵や既存インフラを用いてエネルギーの大量輸送を可能にする低コストの方法でもある。

3

図 34 水素による最終消費部門への VRE 統合



出所: IRENA, 2018d

同様のコンセプトとして、Power-to-liquid fuels (電力から液体燃料への変換)がある。これは、電気分解で生成した水素を二酸化炭素と反応させて、合成原油、ガソリン、ディーゼル、ジェット燃料などの液体燃料を製造する方法である。このようなエレクトロフュエル(再生可能エネルギー電力から製造された液体燃料)は、燃料を使用している設備を変更する必要がないため、化石燃料に取って代わることができる(IRENA, 2018d)。また、水素は、産業部門で使用されるメタノールやアンモニアなどのバルク化学品を製造する原料として使用することもできる(Power-to-chemicals(電力から化学材料への変換)として知られる概念)。

水素をエネルギー貯蔵に用いることで、これまでにない機会がもたらされる。再生可能エネルギー電力の余剰時に水素を製造し、再生可能エネルギー源が利用できない時に電気に再変換して提供することができるため、系統安定化に貢献する。また、電気分解装置は、短時間で処理速度を増減できるため、電力系統に低コストの需給調整サービスを提供する柔軟な負荷として用いることができる(主要イノベーション:再生可能エネルギーによる P2H2)。

- **系統運用面**におけるイノベーションとしては、P2H2 を利用して、系統への投資を抑制するソリューションが挙げられる。洋上や市街地から離れた地域は、風力資源の最も豊かな地域の一つである。そのような地域の風力エネルギーを水素に変換し、それを液化してエネルギーが不足する地域や需要の中心地に輸送することができる。このような手法を利用することで、送電設備へ多額の投資を行うことなく、風力発電の開発を促すことができる。(主要イノベーション:バーチャル送電線)

このソリューションを推進するためには、多額の投資と政策による支援が必要である。ドイツの P2X 連盟は、グリーン水素と合成メタンの製造を促進するため、最大 11 億ユーロ(約 1,430 億円)の投資を行っている。

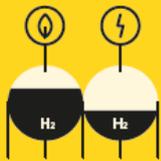
P2H

- もうひとつの**実現技術**である、再生可能エネルギーによる P2H(電力から熱への変換)は、再生可能エネルギー源による電力を利用し、ヒートポンプや大型電気ボイラーによって熱を生成する手法である。ヒートポンプは、電力を利用して熱源(空気・水・地面)から建物に熱を伝達する。ヒートポンプは、負荷シフトやピークカットといったデマンドサイドマネジメント用途に用いることができる。再生可能エネルギーによる P2H は、集中型ソリューションとしても分散型ソリューションとしても導入できる。集中型熱供給システムの場合、ヒートポンプまたは大型電気ボイラーで熱を発生させ、配管網を通して複数の建物に熱を供給する。このようなシステムは、地域熱供給システムとも呼ばれる。分散型システムは、ヒートポンプまたは電気ボイラーからなり、個別のビルまたは住宅に熱を供給する。(主要イノベーション:再生可能エネルギーによる P2H)

P2H は、再生可能エネルギーの余剰電力を利用して熱需要に対応し、再生可能エネルギーの出力抑制を回避することができる。例えば、中国の内モンゴル自治区には、2014 年末の時点で容量約 22.3 GW の風力発電設備があったが、特に送電混雑が原因で大幅な出力抑制を余儀なくされていた(風力発電の出力抑制率は、2014 年に 9%、2015 年に 15%(Zhang, 2016))。出力抑制を回避するため、中国国家能源局(Chinese National Energy Administration)は容量 50 MW の電気ボイラーを設置している。この電気ボイラーを使用すれば、それまでの非効率的な石炭ボイラーに代わり、余剰再生可能エネルギーを利用した熱を、地域熱供給システムにおいて用いることができる。このプロジェクトは、2020 年の完了を目指しており、地域熱供給の年間計画量の約 2.8%を満たすことを目的としている(IRENA, 2017)。

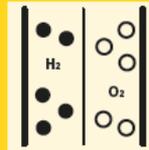
スウェーデンの電気事業者であるバッテンフォール(Vattenfall)社は、2 年間にわたり約 1 億ユーロ(約 130 億円)を投資し、3 基の P2H ユニートを設置する予定である。熱供給能力は、合わせて 120MW となる。これらのユニットは、風力発電による余剰電力を利用して水を加熱し、その温水を利用して住宅や商業ビルに熱を伝達する。これらのユニットは 2019 年までに稼働する見込みであり、その時点で総容量 330 MWh の石炭火力発電所は閉鎖され、熱供給用途における化石燃料の使用量が削減される(Vattenfall, 2017)。

蓄熱システムは、何日間も、さらには何カ月もエネルギーを貯蔵することが可能であり、需給の季節変動への対応に貢献できる。これは、特に温熱/冷熱需要が季節によって大きく変わる地域において大きな便益をもたらす。夏季に再生可能エネルギーによって生成された熱を蓄熱システムに貯蔵し、冬季の熱需要を満たすために使用することができる。それによって、ピーク時における非再生可能エネルギー源の必要性を削減することができる。また、蓄熱システムを利用して冬季の自然冷熱を貯蔵し、夏季に空間冷却のために供給することができる(IRENA, forthcoming b)。季節貯蔵のための主要技術としては、帯水層蓄熱技術や、他の方式の地下蓄熱技術がある。



水素貯蔵

VRE を出力抑制する代わりに、熱と電気を住宅に提供



電気分解装置

電力系統安定化サービスに利用

P2H2 の影響

- カリフォルニアでは、太陽光発電や風力発電による余剰電力を水素に変換して貯蔵することにより、最大 370,000 世帯への熱供給、または最大 187,000 世帯への電力供給が可能。

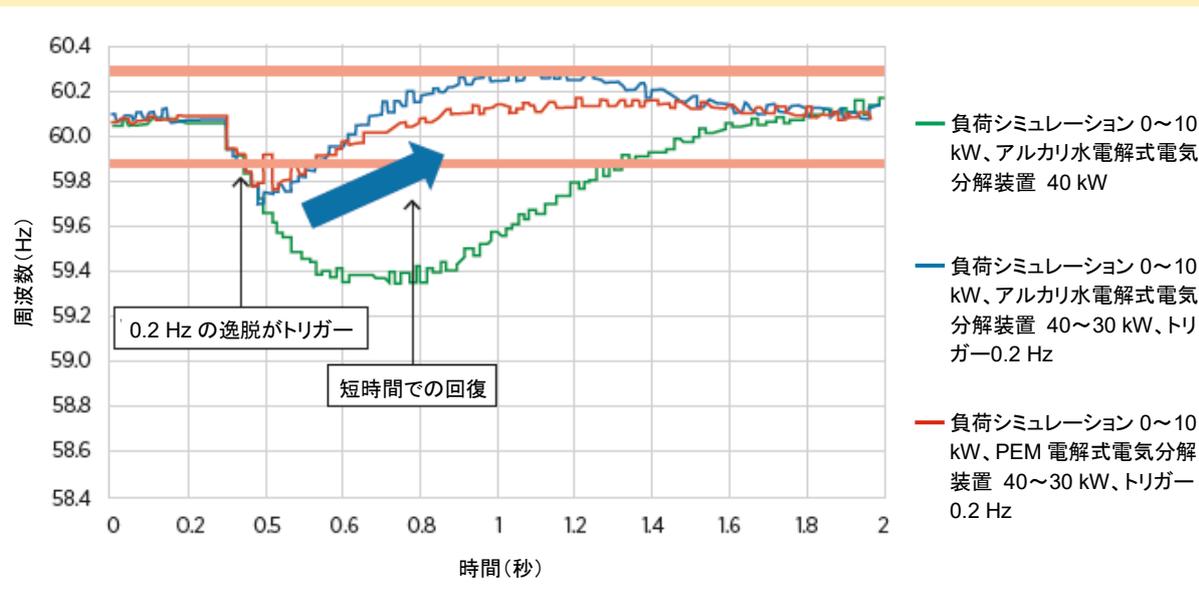
ローレンス・バークレー国立研究所の研究によれば、2017 年～2025 年の間にカリフォルニア州で出力抑制される太陽光発電および風力発電の電力量は 3,300～7,800 GWh にのぼる。余剰電力から生成された水素は、燃料電池車またはトラックの動力として使用するか、天然ガスと混合して他のガス燃焼機器に使用することができる。出力抑制されることが想定される太陽光発電および風力発電の余剰電力すべてがメタンに変換され、いわば「再生可能な天然ガス」として貯蔵された場合、最大 370,000 世帯への熱供給、または最大 187,000 世帯への電力供給が可能となる (Sempra, 2017)。

- 電気分解技術による系統安定化サービス。

2011 年、ハイドロジェニクス社 (Hydrogenics Corporation) は、電気分解技術を利用して系統安定化サービスを提供する際の効果を実証するため、オンタリオ州の独立系統運用機関と共同で試験的取り組みを実施した。米国国立再生可能エネルギー研究所 (NREL) による実験的分析でも、電気分解装置は系統の要求に応じて瞬時に負荷を変更することができ、同時に、周波数変動時も短時間で回復できることが示されている (Gardiner, 2014)。

検証実験の結果を図 35 に示す。負荷シミュレーターを用いて、電力系統において高調波が発生する状況を想定した (図中の緑色の線)。この影響で、周波数は規定値下限の 59.8 Hz を下回っている。周波数が規定値に達すると、制御信号が生成され、その信号が電気分解装置に送られて、消費電力を削減する。図中の赤色と青色の線は、周波数が 0.2 Hz 低下して規定値下限に達した際の電気分解装置の (消費電力を削減することによる) 反応を示している。この反応に要する時間は 1 秒未満であり、電気分解装置はこのような周波数変動に対応するサービスを提供することができる。電力会社による入札では、1 秒未満の高速周波数応答のような高速での応答が要求されている。系統需給調整による報酬は、電気分解装置による水素製造コストの削減に貢献する (ITM Power, 2015; NREL, 2012)。

図 35 電気分解装置を利用した高速周波数応答



出所: NREL, 2017



5%

風力の余剰発電を利用して電気ボイラーから供給される熱需要



47~61%

電気自動車とヒートポンプの利用によるピーク負荷の削減

P2H による影響

- ドイツでは、電気ボイラーと蓄熱ユニットを組み合わせることで、夜間の出力抑制を削減、また、アンシラリーサービスを提供。

ドイツの町レムゴ (Lemgo) では、2012 年に 5 MW の電気ボイラーを導入して、地域熱供給サービスに利用している。電気ボイラーは、夜間に系統余剰電力を受電して、アンシラリーサービスを提供することにより収益を生み出す。電気ボイラーと蓄熱ユニットを併設することで、熱供給と熱需要を一致させることができる。推定によれば、年間 500 時間のピーク負荷時間においては、電気ボイラーのパフォーマンスは既存のコージェネレーション発電所に匹敵する。ボイラーで生成された熱は 27 TJ、すなわち 7.5 GWh にのぼり、レムゴにおける 2012 年の熱供給量全体の 5% を占めた (IRENA, 2017c)。

- デンマークのプロジェクトで、電気自動車とヒートポンプを用いてピーク負荷を 47%~61% 削減可能。

住宅の熱需要に柔軟性を加えることでピーク負荷を削減できることが、デンマークの DONG Energy 社 (現 Ørsted 社) が実施した eFlex プロジェクトの一環として示された (DONG Energy, 2012)。このプロジェクトでは、自動制御可能なスマートデバイスとヒートポンプを接続し、価格に基づくデマンドレスポンス・プログラムに応答することで、ピーク負荷をどれだけ削減できるかを検証した。ヒートポンプがピーク需要時間帯に熱消費を削減または休止し (住宅が十分に温まっている場合)、低需要の時間帯に再び作動するようシステムを設定した。その結果、ヒートポンプのパフォーマンスを最適化することによって、時間帯や主要な気温条件によるものの、ピーク負荷を 47%~61% 削減できることが示された。

3

ソリューション実施例

P2H2 プロジェクト

オランダの HyStock

- HyStock は、オランダのガス輸送事業者ガスニー（Gasunie）社の子会社であるエナジーストック（EnergyStock）社により開発されたプロジェクトで、オランダ初の P2G 施設である。このプロジェクトは、1 MW のプロトン交換膜型（PEM）電気分解装置と、水から水素を生成するために必要な電力の一部を供給する 1 MW の太陽光発電施設からなる。HyStock プロジェクトは岩塩空洞の近くに立地していることから、電気分解装置で生成した水素を圧縮した後に貯蔵する一時保管場所として岩塩空洞を利用することができる。その後、水素は貯蔵シリンダーに注入され、最終消費者に輸送される。また、このプロジェクトでは、アンシラリーサービスの提供などによって、電気分解装置が電力部門にどれくらい便益をもたらすことができるかについても調査している（EnergyStock, 2018）。

デンマークの HyBalance

- HyBalance は、エネルギーシステムにおける水素利用を実証するデンマークのプロジェクトである。このプロジェクトでは、風力発電による余剰電力を水素生成に利用し、電力系統の需給調整の維持に役立っている。生成された水素は、デンマークのホプロにある輸送部門や産業部門で使用される。このプロジェクトは、水素がどのように収益を生み出せるのかを明らかにするとともに、P2H2 の経済的実現可能性を高めるためにどのような規制環境の変更が必要となるかを明らかにすることが期待される。

オーストリアの H2Future

- H2Future は、オーストリアのヴェスタルピーネ・リンツ（Voestalpine Linz）鉄鋼所への設置が予定されている 6 MW の電気分解装置によるプロジェクトであり、鉄鋼所に水素を供給するとともに、電気分解装置による一次、二次、三次予備力などの系統需給調整サービス提供について検証することが期待されている。水素は、時間別料金を活用して、オフピーク時に発生する電力により生成される。

ドイツの REFHYNE

- REFHYNE プロジェクトは、ドイツのラインラントにある大規模製油所に設置された 10 MW の電気分解装置を用いて、製油所の運営に必要な水素を提供するものである。電気分解装置は、既存の水蒸気メタン改質装置 2 基からの供給に代わるものと期待される。同時に、製油所内の電力網の需給調整を維持し、ドイツの TSO に一次制御予備力を提供することも期待される。実証プロジェクトの評価は 2 年後に行い、収集したデータに基づいて、電気分解装置が経済的に実現可能となるための必要条件を検討することとなっている。また、このプロジェクトでは、大規模装置の分析として、ラインラント（Reinland）製油所の 100 MW の電気分解装置についての調査も含まれている（FCH JU, 2018）。

フランスの GRHYD

- フランスでは、エンジー（ENGIE）社が率いるコンソーシアムが、GRHYD 水素エネルギー貯蔵プロジェクトの実証研究を行っている。フランスは、2020 年までに最終エネルギー消費全体の 23%を再生可能エネルギーで賄うことを目指しており、GRHYD プロジェクトは、再生可能エネルギー源により発電された余剰電力

を水素に変換することを目指している。生成された水素は天然ガスと混合され(「ハイタン(1)」と呼ばれる)、既存の天然ガスインフラに導入される。このプロジェクトの目的は、水素と天然ガスを混合して使用することが、持続可能なエネルギーソリューションとして技術的、経済的、環境的、社会的な優位性を備えていると実証することである(ENGIE, 2018)。

P2H プロジェクト

スコットランドの Heat Smart Orkney プロジェクト

- スコットランド政府の地域エネルギーチャレンジ基金から 120 万ポンド(約 1 億 7,000 万円)の資金を得た Heat Smart Orkney プロジェクトの一環として、風力発電を用いた P2H プロジェクトが実施されている。エネルギー効率の高い熱供給装置を参加者の住宅に設置し、コミュニティが所有する風車の余剰電力を、出力抑制する代わりにこれらの装置に供給する。各世帯の熱供給装置はインターネットに接続され、風車が出力抑制信号を受信すると熱供給装置が起動する仕組みである。

デンマークにおける P2H の拡大

- 2015 年、デンマークの都市オーフス(Aarhus)は、コミュニティに地域熱供給サービスを提供するため、既存のコジェネ発電所の設備を拡大して 80 MW の電気ボイラーと 2 MW の電気ヒートポンプを追加した。既存のヒートポンプのパフォーマンスを評価した後、ヒートポンプの容量を最大 14 MW まで拡張する計画である(IRENA, 2017)。電気ボイラーとヒートポンプはデンマーク西部の風力発電の余剰電力を利用する。通常この余剰電力は、冬季に最も多くなり、熱需要が増大する時期とも一致する。



3

概要表:P2X ソリューションの便益と費用

P2H2 ソリューション

P2H2 ソリューション	低い	中程度	高い	非常に高い
 便益				
系統柔軟性が向上する可能性				
対象となる柔軟性ニーズ	分単位～月単位			
 コストと複雑性				
技術およびインフラへの投資				
	複数の収益源へのアクセス、既存のガスインフラとの連携			
規制枠組みに求められる変化				
	市場資産ではなく系統資産として用いられる 技術に関する明確な法制の確立			
プレイヤーの役割に求められる変化				

P2H ソリューション

P2H ソリューション	低い	中程度	高い	非常に高い
 便益				
系統柔軟性が向上する可能性				
対象となる柔軟性ニーズ	秒単位～月単位(例えば、大規模な洞窟、コンテナ、帯水層での蓄熱により季節熱貯蔵が可能となる)			
 コストと複雑性				
技術およびインフラへの投資				
規制枠組みに求められる変化				
	複数の収益源へのアクセス			
プレイヤーの役割に求められる変化				



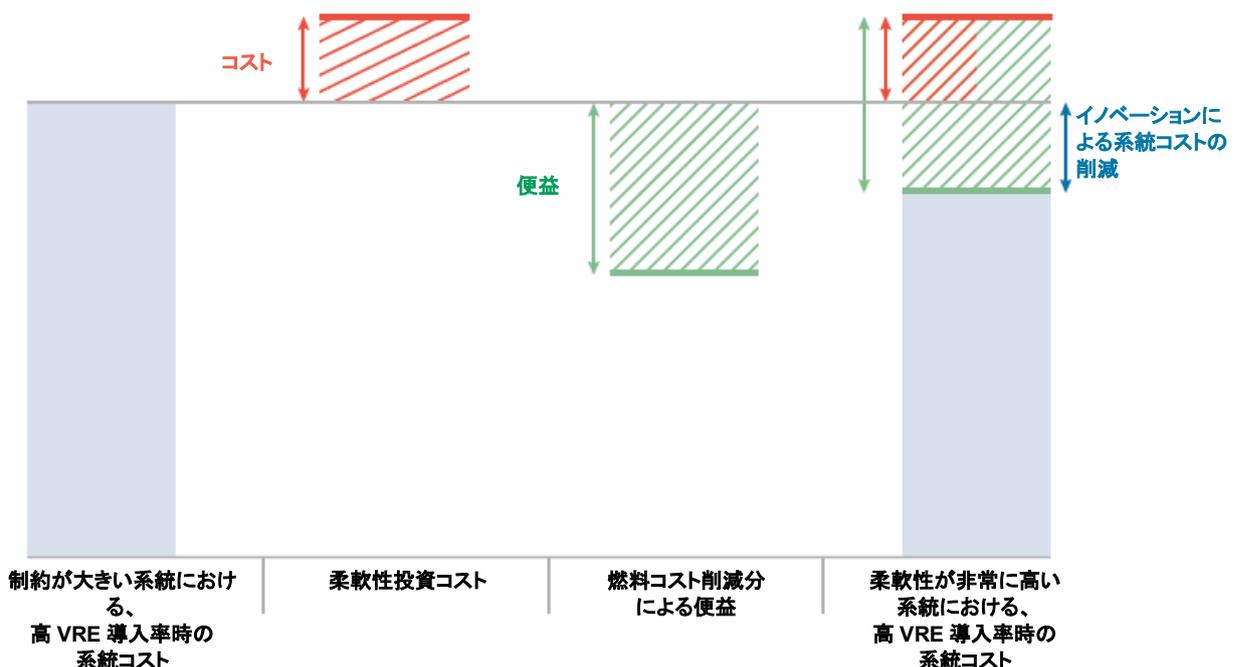
4 ソリューションの影響評価



電カシステムへ VRE を大量連系するためのイノベーションは、系統柔軟性を強化しつつ系統運用コストを削減することに重点を置いている。例えば、EU では電気料金の 50%を系統連系コストが占める。系統柔軟性、すなわち、安定した需給調整を維持するために電力系統が需給パターンに対してどこまで適応できるか (IRENA, IEA and REN21, 2018) は、VRE をどれだけ安く系統に接続できるかに直結する。

世界規模のエネルギー転換を高いコスト効率で達成し、その結果として低炭素かつ持続可能で、信頼度の高い、包含的なエネルギーシステムを構築するためには、VRE の系統連系に伴うコストを最小限に抑えつつ、便益を最大限に高めるための戦略が必要である。VRE の系統連系計画が適切に立案されなければ、電力系統における制約が増え、運用コストも増加する。系統に必要な調整能力や新たな柔軟性ソリューションを想定して堅実な計画を行うことで、低コストの VRE 電源を導入することができ、図 36 に示すように得られる便益を高めることができる (IRENA, 2017b)。

図 36 電力システムの便益を最大化するためのイノベーション



4

IRENA の分析では、再生可能エネルギーの追加導入のために必要な投資額という点においては、系統柔軟性を向上させる場合と、系統インフラを増強する場合とで、両者は同程度であると結論付けられている。パリ協定のシナリオにおいて、系統柔軟性向上への取り組みが限定的である場合は、この投資額は、今後 2050 年までの間に 18 兆ドル(約 1,980 兆円)にまで膨れ上がる可能性がある(IRENA, 2018b)。図 37 に示す通り、電力システムのイノベーションを推し進めることで、系統柔軟性を向上させるソリューションが普及し、VRE 導入のための系統連系コストは低減される。

当然ながら、個々のソリューションごとに、導入するためのコストや課題、便益は異なる。しかし、再生可能エネルギー連系のための最適なソリューションとそのコストは、電力システムそれぞれの特性によって決まるものであり、絶対的なソリューションが存在するわけではない。電力システムの特性により、あるソリューションが他のソリューションより適していることもあれば、そうでない場合もある。第 3 章では、供給側、系統、需要側、そして電力システム全体において柔軟性を向上させる 11 のソリューションを示した。これらのソリューションを図 38 に再掲する。

議論の結びとなる本章では、系統柔軟性を向上させるソリューションのうち容易に実施できるものの指針を政策立案者に示す。本章は、主に 2 つの節で構成される。最初の節ではこれらのソリューションを概説し、その便益、コストのほか、ソリューション実施にあたって政策立案者が認識し、対処すべき課題をまとめる。次の節では、その国の電力システムの特性に最も適した、あるいは適用可能性が限定されるソリューションについての指針を示す。指針を示すために、電力システムとその国の状況を表すいくつかの指標を用いた。1) 都市人口密度、2) 季節性、3) 地域間連系線の有無、4) VRE 電源と需要の地理的分散、および 5) 需要プロフィールと VRE プロファイルの関係、の 5 つの指標である。

図 37 高 VRE 導入率におけるトータルシステムコスト削減のためのイノベーション

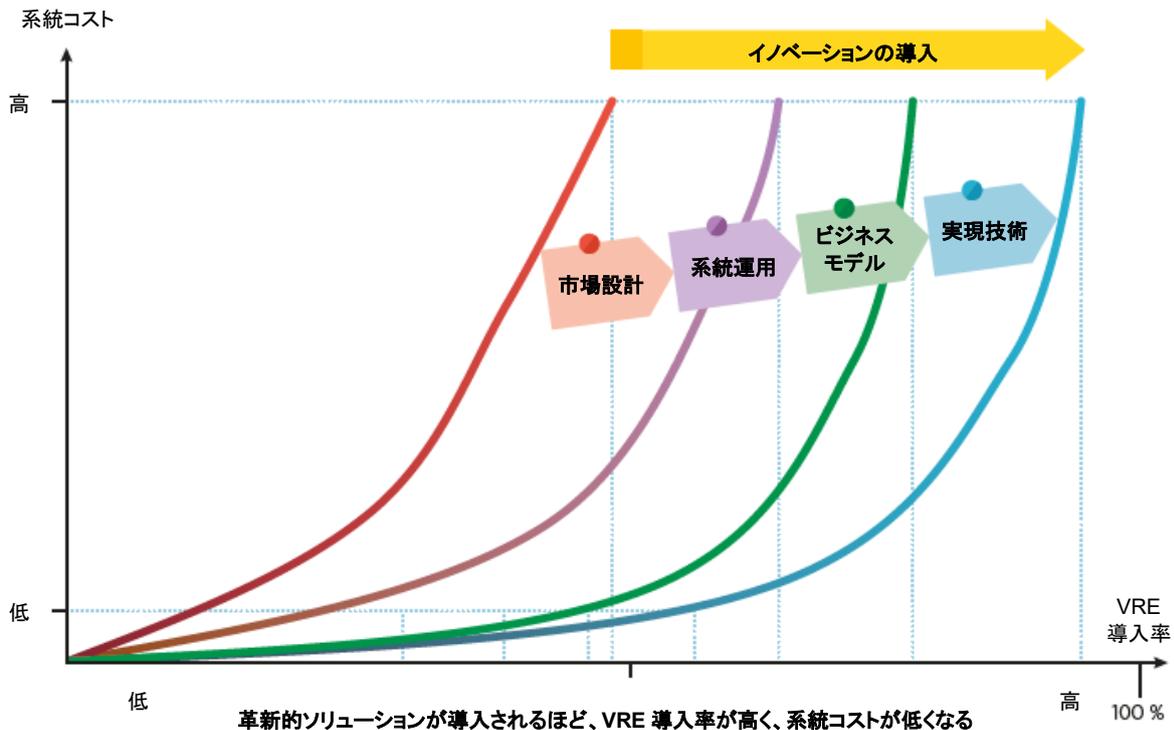
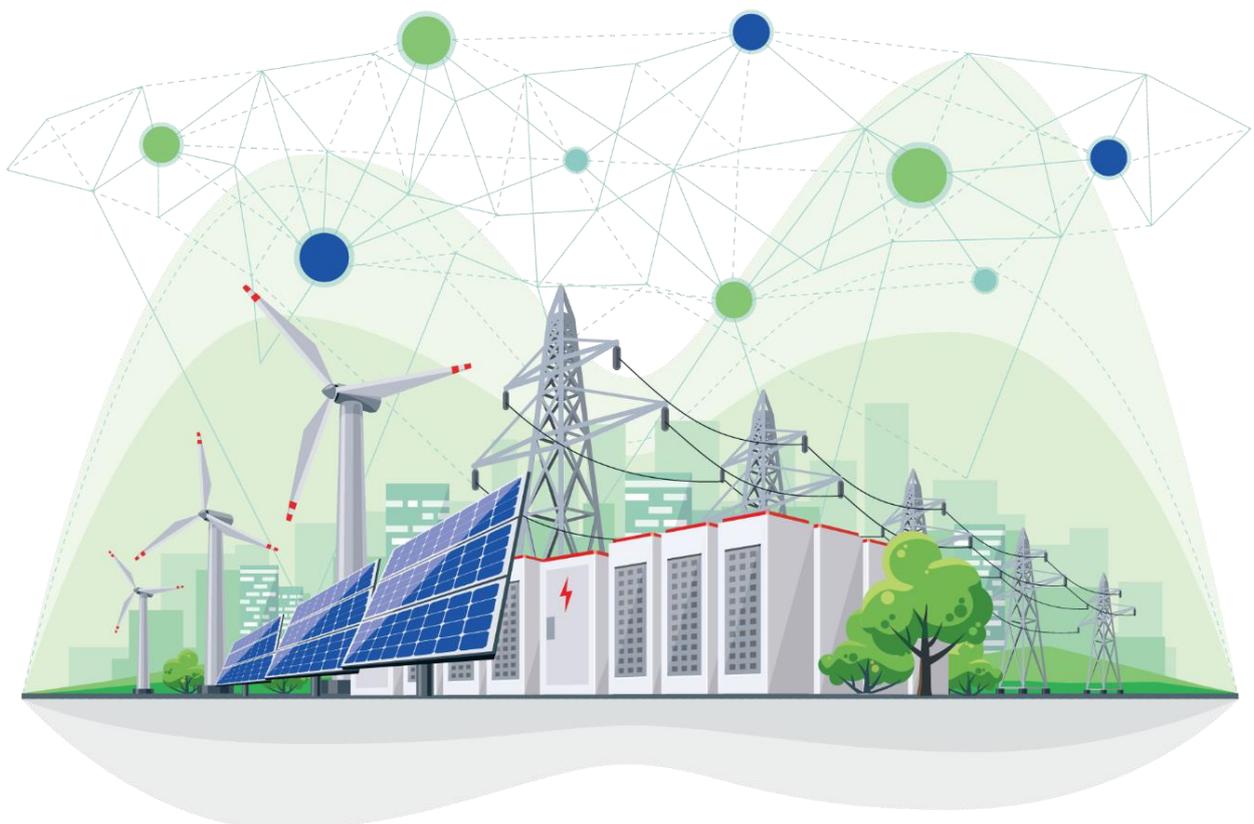
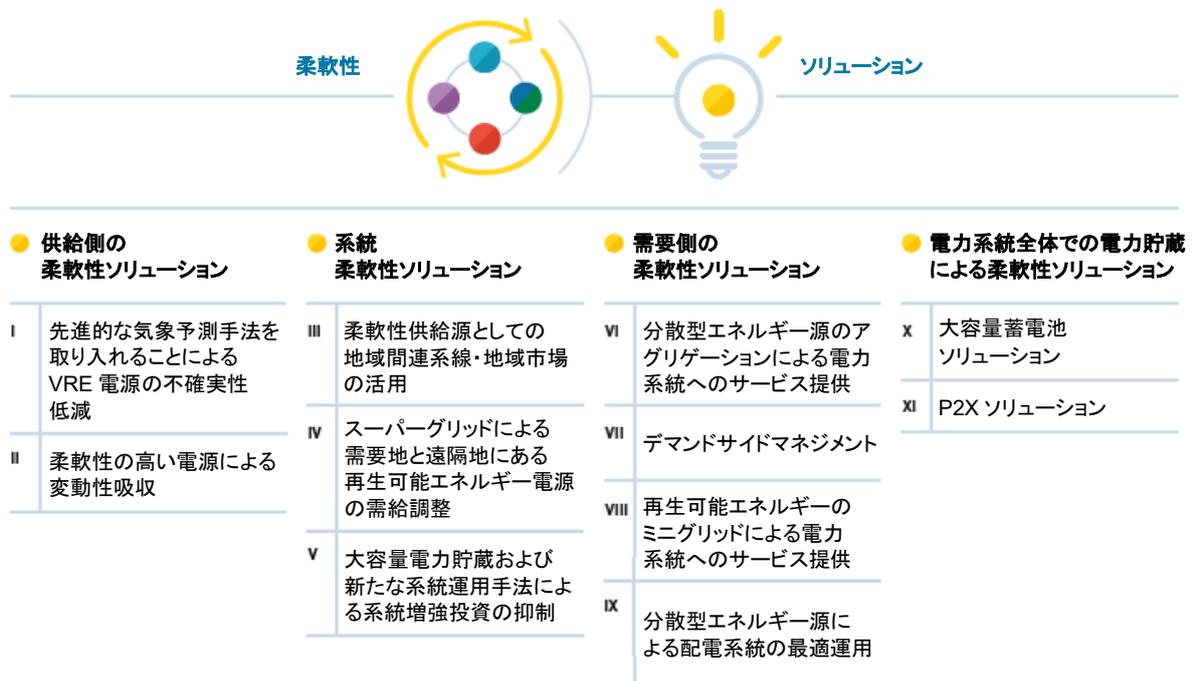


図 38 系統柔軟性を向上させるソリューション



4

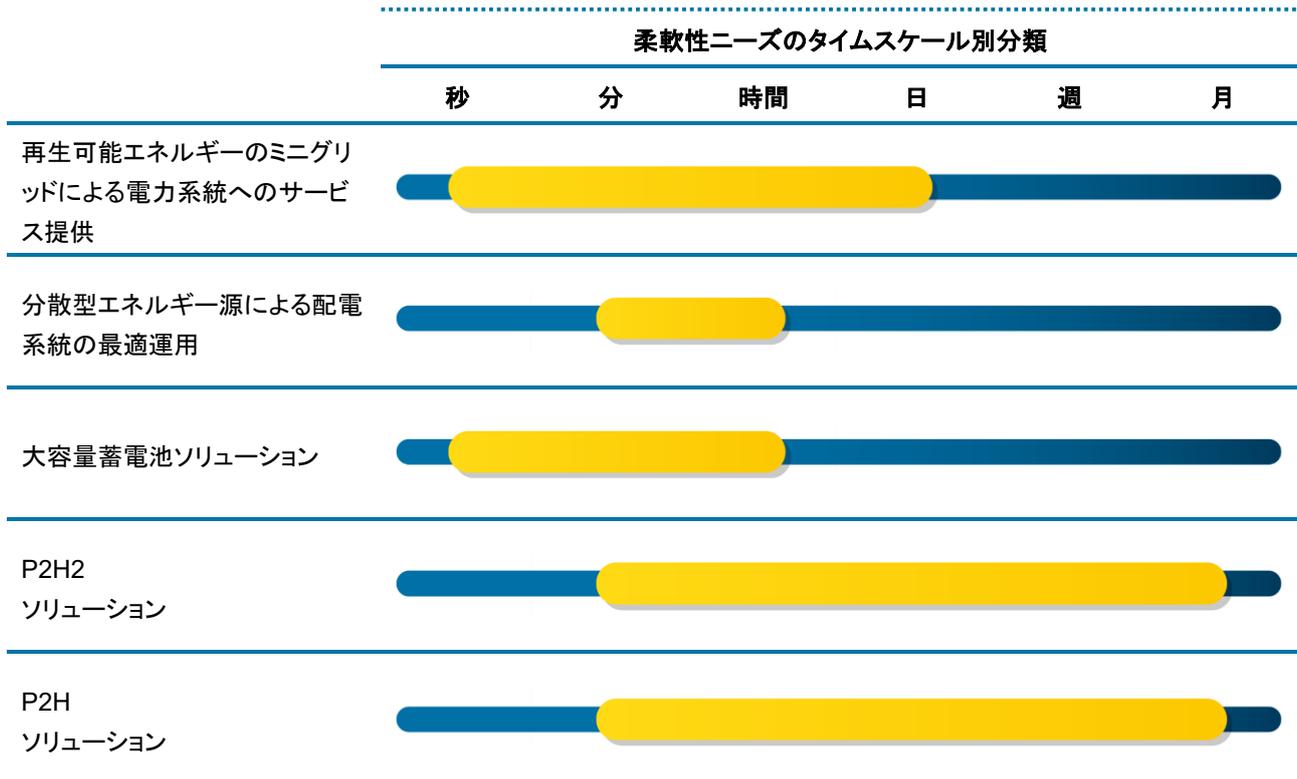
4.1 主要ソリューション:導入課題と柔軟性ポテンシャル

前章で紹介された主要ソリューションは、リアルタイムの需給調整サービスに用いる秒単位から分単位の柔軟性に始まり、VRE 電源の運用最適化に用いる時間単位から日単位の柔軟性まで、さまざまなタイムスケールの柔軟性ニーズを対象としている。週単位、月単位などのさらに長期的な柔軟性ニーズは、季節変動が大きい地域において活用される。

供給側および系統におけるソリューションは、リアルタイム運用に用いられる短時間の柔軟性ニーズに対応するもので、一般的な例としては、柔軟性のある電源、大容量蓄電池や、地域市場から連系線によって提供される集中型サービスである。一方、需要側の柔軟性を高めるソリューションは、ほとんどが分散型エネルギー源であり、電力系統において利用可能な電源を最適運用するための分単位から時間単位の柔軟性を供給する。水素や熱貯蔵も、最大で数カ月にわたってエネルギーを貯蔵することができるため、季節単位での柔軟性を供給することができる。表3に、主要ソリューションとそれらに対応可能な柔軟性ニーズ(タイムスケール)を示す。

表 3 柔軟性ニーズに対応するソリューション

	柔軟性ニーズのタイムスケール別分類					
	秒	分	時間	日	週	月
先進的な気象予測手法を取り入れることによる VRE 電源の不確実性低減	[Progress bar showing coverage from '分' to '日']					
柔軟性の高い電源による変動性吸収	[Progress bar showing coverage from '秒' to '時間']					
柔軟性供給源としての地域間連系線・地域市場の活用	[Progress bar showing coverage from '分' to '日']					
スーパーグリッドによる需要地と遠隔地にある再生可能エネルギー電源の需給調整	[Progress bar showing coverage from '分' to '日']					
大容量電力貯蔵および新たな系統運用手法による系統増強投資の抑制	[Progress bar showing coverage from '分' to '時間']					
既存送電線の革新的運用による系統増強投資の抑制	[Progress bar showing coverage from '時間' to '日']					
分散型エネルギー源のアグリゲーションによる電力系統へのサービス提供	[Progress bar showing coverage from '分' to '時間']					
デマンドサイドマネジメント	[Progress bar showing coverage from '分' to '日']					



ここで、ソリューションごとに対応可能な柔軟性ニーズをタイムスケールごとに示したものの、これらは系統全体の柔軟性に対して示された以外の影響も及ぼす。一般論として、すべてのソリューションが同一系統内において導入されると想定すれば、それぞれのソリューションの影響を比較することができる。

また、ソリューションを導入するためには、さまざまな課題が伴う。技術やインフラ開発に必要となる投資、法制上の課題、複数のステークホルダーの関与や主要プレーヤーの役割が変化することによる取引や運用の複雑化、さらには政治的環境、国際状況などに起因する課題まで多岐にわたる。一般論として、技術やインフラへの投資ニーズが最も少ないソリューションは、主に系統運用と市場設計におけるイノベーションをベースとしたものである。それらのソリューションは、既存の系統資産を用いながら電力系統の新たな状況に追従して効果的な対応をするよう、新旧両者のプレーヤーに対してインセンティブを提供することによって実現できる。さまざまなソリューションおよびイノベーションの導入に際して想定される課題を表4で概説する。

図39は、柔軟性ポテンシャルとコストの面から各ソリューションを比較し、図40は非技術分野の導入難易度の面から各ソリューションを比較したものである。影響力が非常に大きいものの、低コストで導入難易度も高くない「特効薬」と呼べるソリューションは存在しないが、それぞれのソリューションを導入するための投資額は、柔軟性ポテンシャルにおおむね比例することが図39に示されている。一方で、図40が示す通り、非技術分野の導入難易度については同様の比例関係は見受けられない。これは、個々のソリューションにおける課題は多岐にわたり、それぞれを絶対的に比較すること自体が困難なためである。いずれの課題も、地政学的状況や電力系統の特性から生じている。

4

表 4 各種イノベーションおよびソリューションの導入課題

	必要な投資	課題
<p>実現技術</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ハード面の投資が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> 実現技術の運用
<p>ビジネスモデル</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ハード面の投資は少ないが、ソフト面の投資が大きい(人材やソフトウェアへの投資が必要になる可能性) 	<ul style="list-style-type: none"> 法制の変更が必要になる可能性が高い 新たなデジタル技術の導入が必要(センサ、予測モデルなど)
<p>市場設計</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ハード面の投資は少ないが、ソフト面の投資が大きい(電力取引所や市場参加者のソフトウェア投資など) 	<ul style="list-style-type: none"> 規制枠組みの変更 政治的課題 国際協調が必要になる可能性 複数の異なるステークホルダー間の協調 電力部門のプレイヤーが果たす役割の変化 利害関係が生じるため、合意と実施に時間を要する可能性
<p>系統運用</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ハード面の投資は少ないが、ソフト面の投資が大きい(新たなソフトウェア、ツール、制御システムが必要になる可能性) 	<ul style="list-style-type: none"> データの利用可能量 データの取り扱い 法制の変更が必要になる可能性

図 39 各ソリューションの柔軟性ポテンシャルと必要な技術コスト

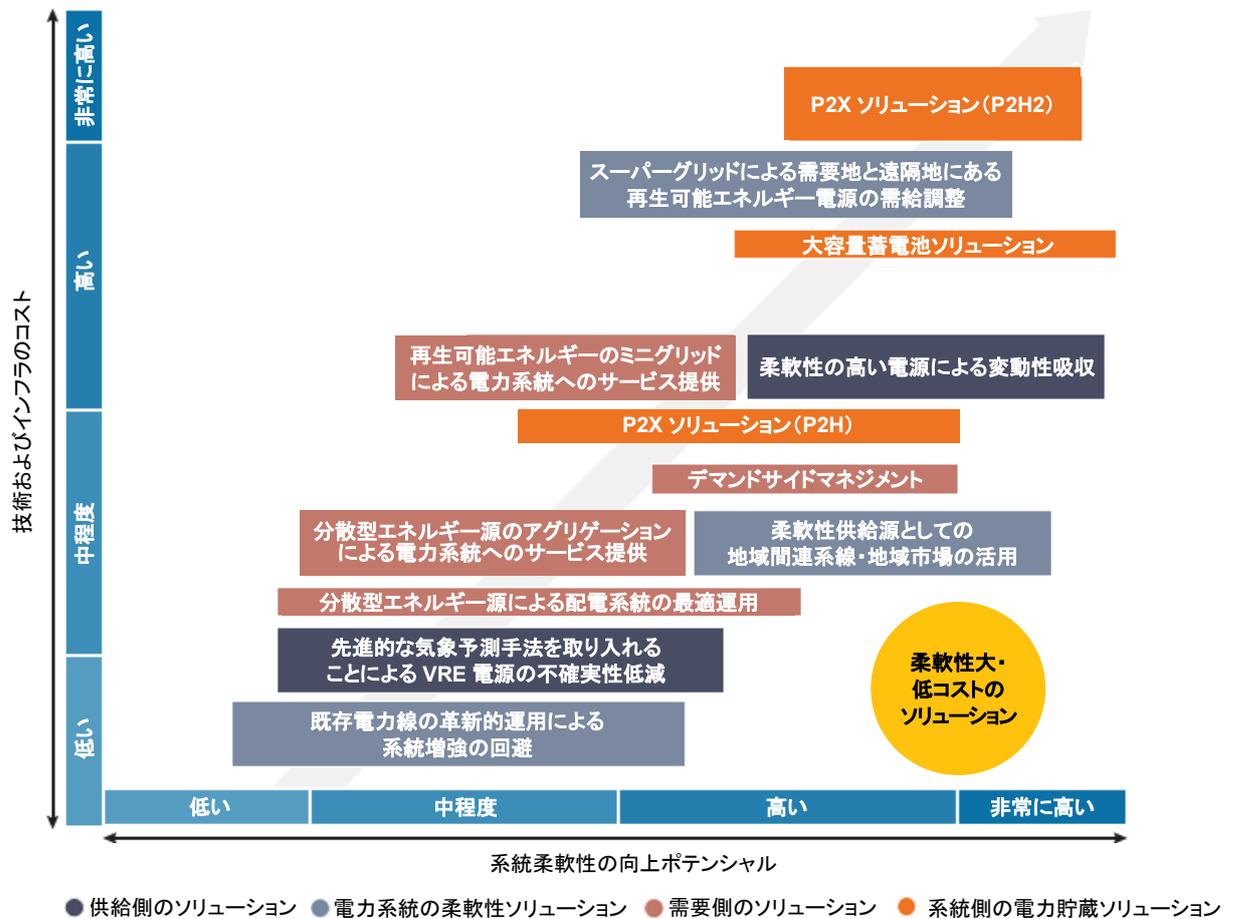


図 39 は、ソリューション導入に必要な技術／インフラコストと系統柔軟性の向上ポテンシャルとの間に高い相関関係があることを示している。大型蓄電池、スーパーグリッド、P2H2 で用いられる電気分解装置は高コストな技術であるが、柔軟性に非常に大きな影響を及ぼすソリューションでもある。とはいえ、他にも低コストで大きな柔軟性をもたらす多くのソリューションが存在する。そのため、それぞれの電力系統に関して、必要とする柔軟性の程度と、それぞれの状況に応じて得られる相乗効果を考慮して、ソリューションを評価する必要がある。

また、重要な点として、ソリューション同士には相乗効果が存在するため、それらを一緒に導入することで投資額を抑制できる可能性がある。例えば、デジタル技術への投資を行うことで分散型エネルギー源による系統サービス提供が可能になれば、それは同時に、デマンドサイドマネジメントにとっても有益となる。また、住宅用ヒートポンプなどの P2H ソリューションに投資することで、需要側ソリューションの影響力が高まり、デマンドサイドマネジメントの効率化、系統サービスの提供、さらには配電系統においてこれらの技術を活用した運用最適化を実現することができる。

また、このアセスメントにおいて重要なポイントは、系統構成や置かれている状況である。例えば、地域間連系が進んでいる系統の場合、法制および地域間連系の運用方法を改善することで、大規模なインフラ投資を行うことなく地域市場運用を実現することができる。しかし、連系線が存在しない場合、そのコストは大幅に増大する可能性がある。風力発電や太陽光発電の変動性を吸収するために従来型電源の柔軟性を向上させるソリューションについても同様のことが言える。大規模な揚水発電や柔軟なガス火力発電所といった、柔軟性のある

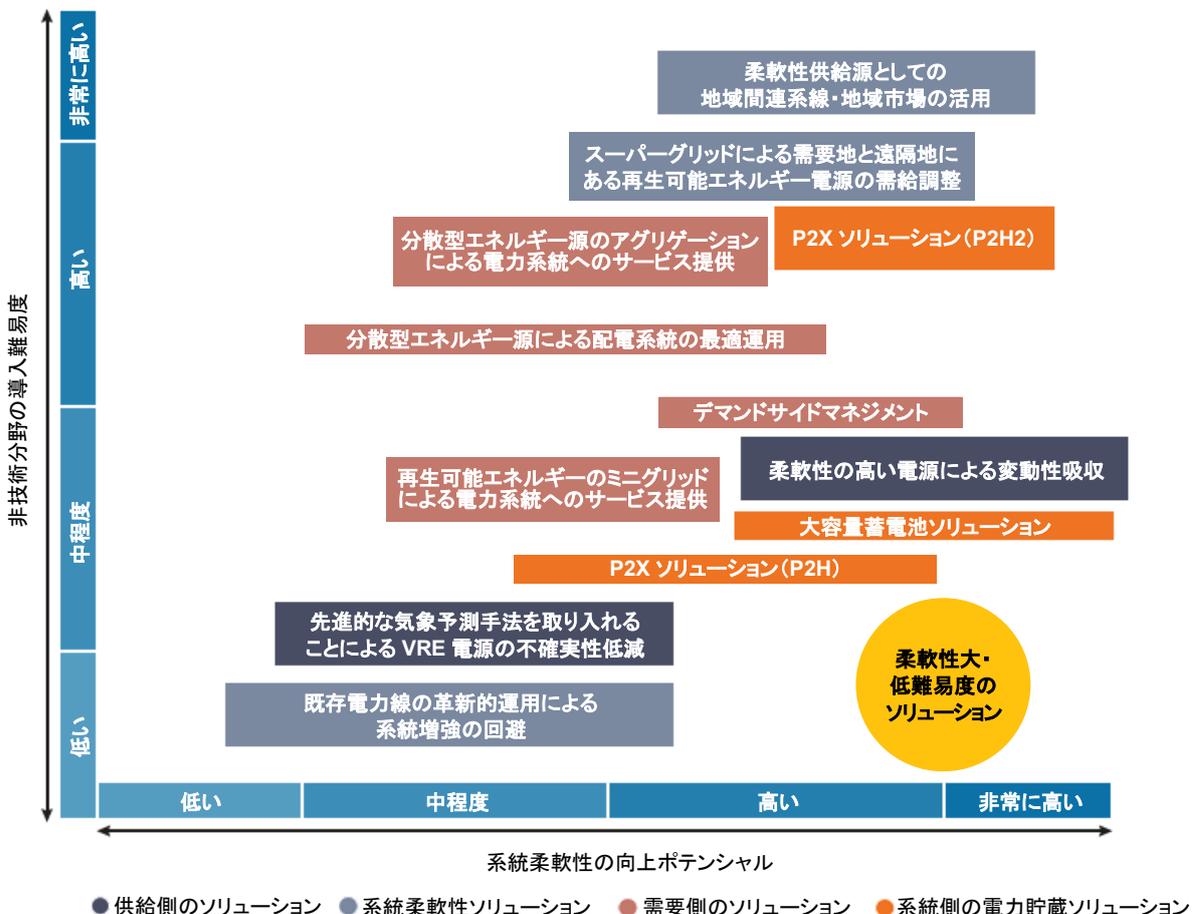
4

発電所がすでに電源構成に含まれている系統の場合、柔軟性ポテンシャルを十分に発揮させるためには単に運用方法を変革するだけでよい。そうではない場合は、より多くのコストをかけて従来型発電設備を改良することが必要となる。

ソリューションを導入する際の非技術分野の導入難易度と柔軟性ポテンシャルの関係を図 40 に示す。大容量蓄電池ソリューションを導入する場合や、変動性を吸収する柔軟性電源へインセンティブを付与する場合などに、必要に応じて法制変更を検討することが重要である。このような場合には、柔軟性を持ったエネルギー源への適切なインセンティブ提供という点で、法制と市場設計が重要な役割を果たす。

法制度の変更以外でソリューションの導入を困難にする重要なポイントは、関連するプレーヤーの役割と責任の変化である。例えば、需要側の柔軟性ソリューションは、需要家の役割変化と消費パターンの変化を伴う。分散型エネルギー源を導入し、それらからの系統サービス提供を実現させるためには、送電系統運用者(TSO)が果たす役割の変化や、より重要な点として、配電系統運用者(DSO)が果たす役割の変化が求められる。プレーヤーの役割変化を促すことは難易度の高い課題である。なぜなら、役割変化を正当化するためには適切なインセンティブとビジネスモデルが必要だからである。

図 40 各ソリューションの柔軟性ポテンシャルと非技術的課題



注：非技術分野の導入課題として、法制度の変更の必要性、プレーヤーの役割における変更の必要性、その他の課題がある。

その一方で、地域外・国外との協力が必要となる場合、系統間の役割や責任を配分しなければならない場合、あるいは、国より地域の便益が優先されているような場合には、政治的状況や国際環境が大きな課題となる。これらの課題は、地域市場を十分有効に機能させるうえで、あるいは連系線を通じた電力融通の取引においてさえ、きわめて大きな負担となる。

各ソリューションの影響を検討し、以下に図 39 および 40 から得られる知見および要点をまとめる。

- **送電線の革新的運用による系統増強投資の回避または抑制**とは、動的線路定格(DLR)を指す。DLRを採用することにより、気温が低い場合や安全性を損なわないような環境条件であれば、より多くの VRE 電力を送電線に供給できる可能性がある。DLR は、追加投資の必要がなく、系統混雑による VRE 出力抑制の大幅低減を期待することもできるソリューションである。また、ソリューション導入に関与するプレーヤーも、TSO のみである。DLR の運用パラメーターは、気象予測を行う頻度、予測に要する時間、および精度に応じて、多くの場合は数時間から数週間前に変更可能となる。

夏季と冬季の気温差が大きい欧州では、11 の TSO が DLR を用いた運用を行っている。例えば、ドイツのテネット(TenneT)社は自らが所有する気象観測ステーションから収集したデータ(気温、風速)を DLR に用いており、イタリアのテルナ(Terna)社は送電線に直接取り付けられた温度センサーを利用している(ENTSO-E, 2015)。

- **先進的気象予測ツール**は、VRE 電源の不確実性の影響を低減できる大きな可能性を秘めている。風力発電や太陽光発電の変動性を減らすことはできないが、出力予測の確実性が増すことで、系統運用のスケジュール作成が容易になり、変動性をより正確に考慮することができる。先進的気象予測ツールはすでに開発されており、新たなデジタル技術を用いて継続的に改善が進んでいる。人工知能は、このようなツールを進化させ、精度を高められる一方で、コストも増加させてしまう。とはいえ、このソリューションの導入は比較的容易である。なぜなら、発電事業者や系統運用者が給電指令のスケジュールを作成するために使用するツールだからである。最大の課題は、これまでに蓄積されたデータがどこまで利用できるかである。これらのデータは通常、電力部門の大手事業者が測定および保持しており、小規模な発電事業者はアクセスすることができない。気象データのオープンプラットフォームが構築されれば、このソリューションはポテンシャルを最大限に発揮することができる。

ドイツでは、アンプリオン(Amprion)社、テネット(TenneT)社、フィフティーヘルツ(50 Hertz)社の 3 つの TSO がドイツ気象庁およびフラウンホーファー(Fraunhofer)研究所と協力して、風力発電所や太陽光発電所向けの気象予測や発電予測精度の向上を図っている。彼らは、特に系統安定度に重点を置いて、新たな予測商品を開発している。ドイツ各地の太陽光パネルと風力発電システムから収集されたリアルタイムデータがアルゴリズムに投入され、48 時間先までの再生可能エネルギー出力を計算している(IRP Wind, 2016)。

4

一般的には、図 39 および 40 によれば、市場設計におけるイノベーションを活用する需要側ソリューションが他と比較して低コストでありながら、VRE 導入率の拡大に対して中位から高位の効果がある。そのため、これらのソリューションは、多くの国々において価値のある施策となっており、電力系統の転換の出発点となっている。電力系統、電力貯蔵、あるいは P2X などのイノベーションに基づく実現技術を積極的に活用するソリューションは、より多くの投資を必要とするが、VRE 導入率拡大に大きな効果を及ぼす可能性がある。そのため、これらのソリューションは、先進的な状況にある国々、すなわち電力系統への VRE 大量導入を実現しつつある国々に適している。ただし、これらのソリューションの導入を成功させるためには、これらを考慮した法制やインフラ計画を、政策枠組みの中にあらかじめ織り込むことが不可欠である。

- **需要側のソリューション**は、系統柔軟性を有効活用できる大きな可能性を秘めている。これらのソリューションには、需要家向けの時間別料金（または卸電力価格）を用いてデマンドレスポンス（デマンドサイドマネジメント）を促す暗示的な方式と、分散型エネルギー源の市場参加を認め、卸電力市場の状況に基づいたディスパッチに対応させる（系統サービスを提供する）明示的な方式がある。技術的な観点から見ると、これらのソリューションを小規模電源に適用するには、スマートメーターやスマート家電を導入して、デマンドレスポンスプログラムへの自動応答や、分散型エネルギー源とスマート家電の接続および両者間の通信強化を行う必要がある。これは特に、小規模な需要家や住宅に当てはまる。一方、産業需要家は、高度なデジタル化技術がなくとも、価格シグナルに反応する可能性がある。

また、太陽光発電、ビハインド・ザ・メーター（需要側）蓄電池といった分散型エネルギー源や電気自動車の普及により、プロシューマーが卸電力市場や地域市場に参加できる機会が増えている。これらの技術はボトムアップ方式で導入されており、技術の進歩と革新的なビジネスモデル導入の結果として広く普及している。政策立案者の立場からすれば、技術やインフラへの大規模な投資は必要ないものの、需要家側において既に導入および接続されているこれらの技術を十分に活用して電力系統に便益やサービスをもたらすためには、法制の変更が必要になる。適切な価格シグナルが送信され、新たな柔軟性サービスが適正な評価の下で報酬を得られ、また、新たなプレーヤーが卸電力市場に参加できるように、法制を変更する必要がある。

法制上の課題に加え、これらのソリューションは多くのプレーヤーの協調を必要とするため、プロシューマー、TSO、DSO が果たす役割の変化も伴う。デマンドサイドマネジメントはどのような状況においても導入を進めることが可能であるが、分散型エネルギー源が卸電力市場やアンシラリーサービス市場に参加して系統サービスを提供するためには、卸電力市場と小売市場の両者の自由化が必要である。また、分散型エネルギー源は、TSO への系統サービスやアンシラリーサービスの提供以外に、DSO へのサービス提供（それにより系統増強を抑制する）に利用することもできる。これら 2 種類のケースでは、TSO や DSO との直接契約によってサービス提供が可能な場合においては、自由化された市場を要件としない。

ベルギーでは、電力市場の日々の運用において、デマンドレスポンス・ソリューションが実用的な方法で取り入れられている。TSO は、発電とピーク電力需要のミスマッチを埋める手法として分散型エネルギー源の活

用を認めており、それゆえに産業需要家はきわめて重要な役割を担っている。フィンランドでは、ダイナミックプライシング設定方式とスマートホームによって、家庭向けのデマンドサイドマネジメントを実現している。

- **また、配電網に最大の便益をもたらすよう、既存の分散型エネルギー源を制御することもできる。** DSO は、配電網に接続されている分散型エネルギー源を、価格シグナルによって直接的または間接的に活用することで、運用の最適化を実現できる。その際、DSO はその役割を拡大し、系統制約に応じて配電網に接続される新たな電源を制御し、これら資源を最適運用することへの責任を負う必要がある。

そのためには、コストではなくパフォーマンスに基づいた、**DSO に対する革新的な法制を導入する必要がある**。また、運用上の手順も複雑になるため新たに整備する必要がある。系統設備への投資（設備投資コスト、CAPEX）に対してではなく、系統サービスの調達（運用コスト、OPEX）に対してのインセンティブ制度などはその一つである。また、**配電網へのアクセスの基本条件や使用料の見直しも必要になる**。英国の配電会社である Western Power Distribution 社は、配電網の運用を最適化する 4 項目の計画を発表した。この計画は、スマート電力網ソリューションの高圧線への拡大・拡張、アグリゲーターや需要家から各種サービス供給を受ける契約、TSO と DSO の協力、低圧系統の保全や安全性の確保、からなる（Engerati, 2018）。地域的な柔軟性市場はすでに発展しつつあり、DSO が柔軟性を調達し、それにより系統増強を抑制することが可能になっている（Agder Energi など）。

- もうひとつのソリューションは、**さまざまな分散型エネルギー源を制御可能なまとまりとして構築するミニグリッド**である。ミニグリッドは、電力系統から独立した運用が可能であり、必要な場合にはリアルタイムの状況に応じて電力系統と連系することができる。このソリューションには、ミニグリッドを構成するすべての機器を相互に接続する堅牢な IT システムとデジタル化が必要である。オランダでは、持続可能でスマートなエネルギー管理に重点を置いた、ミニグリッドの試験的プロジェクトが実施されている。そのようなミニグリッドは、さまざまなコンポーネントを統合し、地域レベルで需給調整を行い、コストを削減するために、インテリジェント・マネジメントシステムを用いている。例えば、日射量が一定程度存在する時には太陽光パネルで収集したエネルギーで電気自動車を充電する。余剰電力があれば、蓄電池に貯蔵するか、電力系統を通じてコミュニティ内の他の住宅に供給される。
- **地域市場と地域間連系**は、不確実性を補うことが可能な**柔軟性の高い従来型電源**とともに、系統全体の柔軟性を高めるうえで重要な役割を果たす。いずれも、市場設計のイノベーションに基づくソリューションであり、柔軟性サービスをより適正に評価し、系統内でこれらのサービスを容易に取引できるようにするために、それぞれの規制枠組みを変更する必要がある。現行の電力系統の状況によっては、投資が必要になる場合もある。例えば、大規模な揚水発電やガス火力発電といった柔軟性の高い従来型電源オプションを備えた電力系統では、発電所の柔軟性に対して適切な報酬を与える法制は十分整備されている可能性がある。しかし、石炭火力発電や原子力発電といった柔軟性に乏しい電源が中心となる系統では、新たな法制に加えて、技術強化や発電所の改修が必要になることがある。

電源構成が風力発電と火力発電からなるデンマークでは、火力発電所の設備改修を行うことで、通常 1%/分程度である出力変化速度を平均 4%/分まで引き上げ、電力価格の日内変動によって指し示される電力

システムの柔軟性ニーズに対応している。出力変化速度の性能が向上することで、発電所は電力市場への参加をより迅速に増やしたり減らしたりすることができ、電力価格の変動に合わせた対応が可能になる。同様に、最適化されていない火力発電所の標準的な最低負荷は 30%~40%であるが、デンマークの火力発電所の中には 15%という低い最低負荷を達成しているところもある(Energinet, 2018)。

地域市場は大きな柔軟性をもたらすことができるが、その前提となるのは地域間連系線である。地域間連系線への投資が必要な場合、このようなソリューションを導入するための課題とコストは増加する。また、地域市場を実現するには、地域全体において(合理的な)調和が取られた市場設計が必要である。この調和を実現するためにはさまざまな課題が伴うと考えられる。すなわち、強力な制度的取り決めや、国益よりも地域全体の供給保証を優先するという姿勢に基づいた、地域のマインドセットと関係当事者間の信頼関係構築、などが求められる。欧州、中米、アフリカ、米国など、世界各地の地域市場が、VRE 導入に伴う同様の便益と課題に直面している。長期的には、国際協力の難しさがあるとしても、再生可能エネルギーの導入を促進し、パリ協定の環境目標を達成するため、地域市場をソリューションに取り入れることが必要になる。国際交渉は時間を要する可能性もあるが、そのような議論はすぐにでも始めることが望ましい。

- **P2H** ソリューションは、ヒートポンプと大型電気ボイラーの運用に大きく依存している。これらの技術は、成熟した商業化段階に達している。現在はデジタル技術を活用して運用方法を最適化し、系統柔軟性の向上を図る段階にある。例えば、スコットランド政府は、風力発電を用いた P2H 事業のために 120 万ポンド(約 1 億 7,000 万円)の資金を確保している。エネルギー効率の高い熱供給装置を参加者の住宅に設置し、コミュニティが所有する風力発電システムからの余剰電力を、出力抑制する代わりにこれらの装置に供給する。各世帯の熱供給装置はインターネットに接続され、風力発電システムが出力抑制シグナルを受信すると熱供給装置が起動する仕組みとなっている。
- **大容量蓄電池**や **P2H2** ソリューションに用いられる電気分解装置など、商業化の初期段階にある技術を用いたソリューションは、柔軟性を供給する技術の中において現時点では最も高コストであり、大容量展開前のコストが低下していない段階において、リスクの高い投資となっている。このようなソリューションは、依然として商業化の初期段階にある。蓄電池は過去 10 年で大幅に普及が進んだため、コストがやや低下しており、P2H2 ソリューションに比較すれば導入および運用が容易である。その一方で、大容量蓄電池が電力消費、発電、貯蔵のできる新たなプレーヤーとなるためには、法制度の変更が必要とされる。プレーヤーと電力システムの両者に最善の便益をもたらすよう、電力系統において蓄電池がもたらす効果にインセンティブを付与することが望ましい。

例えば、南オーストラリア州では 100 MW/129 MWh の蓄電池施設が設置され、Hornsedale Wind Farm で発電された電力を安定化するとともに、アンシラリーサービスを電力系統に提供している。

電気分解装置により再生可能エネルギーを水素変換することは、P2H2 ソリューションにおける一つの要素でしかない。水素を貯蔵し、さらに他の用途に使用し、または電力に再変換するためには、他の技術、適切なインフラと運用手順の整備を必要とする。オーストリアの H2Future プロジェクトでは、ヴェシュタルピーナ・リンツ(Voestalpine Linz)鉄鋼所に 6 MW の電気分解装置を設置することを計画している。このプロジェクト

では、鉄鋼所に水素を供給するとともに、電気分解装置による一次、二次、三次予備力などの系統需給調整サービスの提供について研究を行う予定である。水素は、時間別電気料金を活用して、オフピーク時に発生する電力により生成される。電気分解装置の規模を拡張し、大量生産を行うことで、大幅なコスト低下が期待される。

*既に存在している潜在的な柔軟性を有効活用することが、
イノベーションによって実施すべき最初のアクション*

- スーパーグリッドに基づくソリューションは、いくつかの理由から、導入をする上での複雑度が最も大きい。第一に、これらは発展途上の技術であり、特に直流遮断器を用いたメッシュ型の高圧直流送電網に関しては、その状況が強く当てはまる。これまでに世界で数件の試験的プロジェクトが実施されているのみである。第二に、国家間の電力取引を行う上で必要となる経済的合意と政治的合意によって、スーパーグリッドに基づくソリューションの複雑度が増大する可能性がある。法制、標準化、さらには所有権、権利、収益配分に関する問題が挙がる可能性がある。

ドイツのエネルギー転換政策「エネルギーヴェンデ(Energiewend)」の一環として、洋上風力発電とドイツの電力網を連系する HVDC 送電線が敷設された。2015 年 4 月、ドイツの TSO であるテネット(TenneT)社は、現時点で世界最長の洋上発電所用連系線 SylWin1 の運用を開始した。SylWin1 は、70 km 沖合にある 3 つの風力発電所と連系している。総出力 864 MW のウィンドファームは、SylWin1 の HVDC 連系線を介して風力発電からの大量の電力をドイツに輸送することができる。合計 232 基の風車が生み出すエネルギーを陸上の変電所に輸送するために、160 km の海底ケーブルと 45 km の陸上ケーブルによって総距離 205 km が結ばれている。それにより、100 万戸以上の住宅にクリーンな風力エネルギーが供給されている(TenneT, 2018)。

一方、欧州、中国、北米だけでなく世界の他の地域でも、国際連系や国際電力市場を推進する国は増えている(湾岸協力会議、アフリカ各地のパワープールのほか、南米、インドおよびその周辺国、東アジアなど)。国際取引ルールが策定され、数十年をかけて精緻化され、世界各地の関係者が互いに学び合おうと積極的な努力を行っている。

 ソリューション	システム柔軟性が向上する可能性	技術およびインフラのコスト	規制枠組みに求められる変化	プレイヤーの役割に求められる変化	その他の課題
分散型エネルギー源による電力系統へのサービス提供	●●●●	●●●● ICTプラットフォーム。ただし、分散型エネルギー源とスマートメーターが導入済みであることが前提	●●●●	●●●● 能動的需要家、DSOとTSO、アグリゲーターなどの新たなプレイヤー	プロシューマーを含むさまざまなステークホルダー間の密接な協調
デマンドサイドマネジメント	●●●●	●●●● スマートメーター、ICT	●●●● 需要家への価格シグナル	●●●● 能動的需要家—促進要因としての自動化技術	需要家の参加とプライバシーの保証
再生可能エネルギーのミニグリッドによる電力系統へのサービス提供	●●●●	●●●● ミニグリッド、スマートメーター、ICT	●●●●	●●●●	
配電システムの最適運用	●●●●	●●●● スマートメーター、ICT	●●●● DSOに対する新たなインセンティブおよび規制枠組み	●●●● DSOの新たな役割	系統不安定性の管理
大容量蓄電池ソリューション	●●●●	●●●● 規模および蓄電池コスト動向による	●●●● 発電、貯蔵、電力消費できる新たなプレイヤーに適切なインセンティブを与える	●●●●	DSOと蓄電池プロバイダー間での基準策定
P2H2ソリューション	●●●●	●●●● 電気分解装置、ガスインフラ、パイプラインの改修費用	●●●● 複数の収益源へのアクセス、既存のガスインフラへのアクセス	●●●●	
P2Hソリューション	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	

4

4.2 ソリューションの適合性に関する指標

これまでに示されたソリューションは、前節で述べた通り、導入における複雑さも、対応できる柔軟性ニーズも異なる。しかし、あらゆる状況において適切となるソリューションが存在するわけではない。したがって、政策立案者は、ソリューションが導入される状況を鑑みて、それぞれのソリューションを慎重に評価しなければならない。本節は、5つの指標に基づいて、適切なソリューションおよびイノベーションの指針を政策立案者に示すことを目的とする。

これは「ハウ・トゥ」ガイドではなく、それぞれの状況に応じた適切なソリューションは何かを、イノベーションの展望に基づいて示すことを試みている。その目的は、政策立案者が選択肢を絞り込み、どのソリューションをより詳細に調査すべきかを検討できるようにすることである。それぞれの指標について、適用可能性が限定されるソリューションと、推奨されるソリューションを示す。異なる状況においてどのソリューションが適切であるかを説明するために、下記の5つの指標を検討する。

- 1 都市人口密度: 高人口密度／低人口密度
- 2 季節性: 四季あり／季節性なし
- 3 地域間連系の可能性: 連系系統／孤立系統
- 4 VRE 電源と大規模需要地の空間近接性: 大規模需要地が VRE 電源から近い／遠い
- 5 VRE 発電プロファイルと負荷プロファイルの時間的一致: VRE 発電と需要が一致(フラットな残余需要)／不一致(凹凸のある残余需要)

それぞれの指標がソリューションに及ぼす影響について、以下に示す。

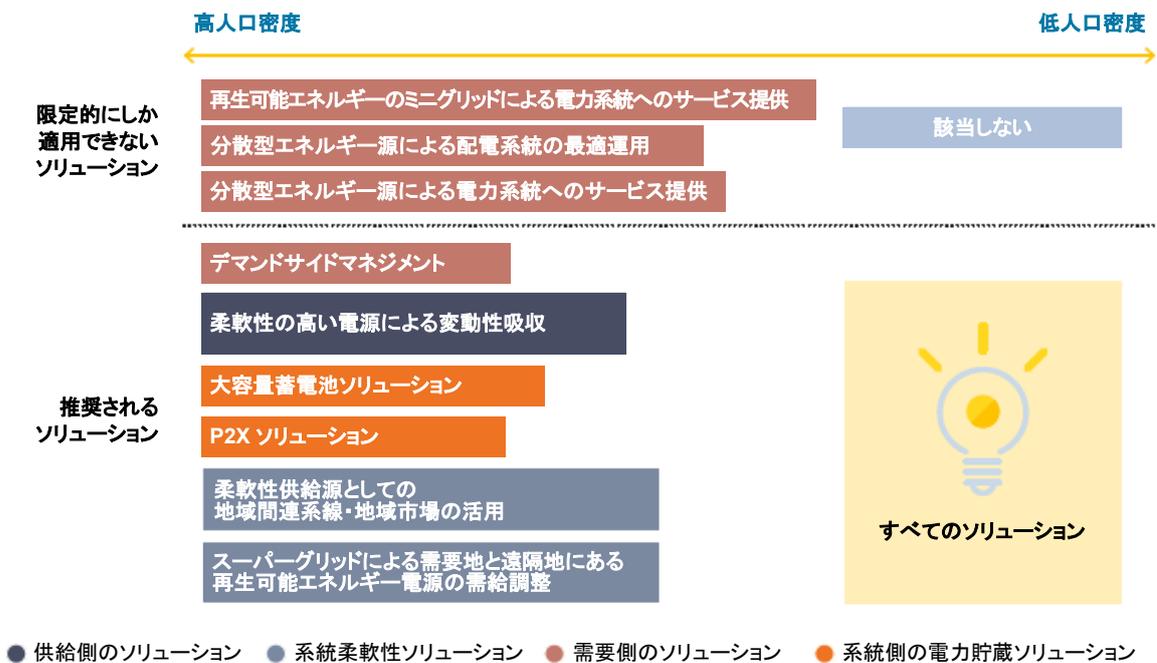
1. 都市人口密度

都市人口密度は、電力システムの分散化が物理的かつ現実的に実現可能かどうかを評価するうえで重要な指標である。分散型ソリューションは、高層ビルや混雑した地域に人々が暮らすような人口密度の高い都市(ニューヨーク、ボゴタ、サンパウロ、パリなど)においては現実的な選択肢とはならない。需要家の家屋に、蓄電池、屋根置き太陽電池や電気自動車用プラグを設置する余地がほとんどないからである。そのような状況において、需要側に柔軟性をもたすことが可能となる選択肢は、デマンドサイドマネジメント、つまり時間別料金や直接的な負荷制御を用いたデマンドレスポンスである。そのような密集地域における需要の規模を考慮すると、このソリューションは大きな柔軟性ポテンシャルを秘めている。

逆に言えば、ほとんどの再生可能エネルギープロジェクトは、都市郊外における大規模プロジェクトであることを意味している。従来型電源から供給できる柔軟性や、貯蔵ソリューション(大容量蓄電池、再生可能エネルギー電力の水素または熱への変換)は、VRE 大量導入を実現するためにきわめて重要である。人口密度が高い地域では、強靱な電力系統や隣接系統との連系線が整備されているため、系統柔軟性ソリューションも重要である。都市における再生可能エネルギーの消費拡大は、主に電力市場の改善と再生可能エネルギーの地域間取引によって達成することができる。スーパーグリッドは、再生可能エネルギーを長距離輸送して大規模需要地まで供給するソリューションとなる可能性がある。

一方、人口密度が低い都市や地域においては、利用可能な空間が広いいため、分散型ソリューションの展開が可能となる。これにより、太陽光パネルのような分散型電源と需要側柔軟性供給源を併せて配置することが可能になる。ビハインド・ザ・メーター（需要側）蓄電池、電気自動車のスマート充電、住宅用ヒートポンプ、ミニグリッドはいずれも、電力系統に価値の高いサービスを提供することができる。

図 41 都市人口密度に基づくソリューションの指針



2. 季節性

季節性は、電力系統の柔軟性ニーズに対する重要な指標である。短期的な柔軟性ニーズはいかなる状況においても存在するが、年間の気温変動が大きな地域の系統においては、多くの場合、長期的な柔軟性ニーズが存在する。

季節変動のある国々では、電力需要やエネルギー需要が、ある季節において他の季節より高くなる（冬季の気温が低い地域では、熱供給ニーズのため冬季のエネルギー需要が夏季より高くなり、夏季の気温が非常に高く冬季の気温がそれほど低くない地域では、エアコン使用のため夏季のエネルギー需要が高くなる）。したがって、長期にわたりエネルギー貯蔵ができれば、需要が低い季節に再生可能エネルギーで発電された余剰電力を貯蔵し、需要が高い季節に利用することが可能となる。

P2X ソリューション、特に P2H2 は、このような課題に対応できるソリューションである。水素は、現時点では非常にコストが高くエネルギー損失が大きいものの、長期にわたる貯蔵が可能のためである。水素は、エネルギーを長期貯蔵する媒体となり、これによって数カ月にもわたるエネルギー保存も可能となる。例えば、ドイツでは冬季のエネルギー需要は夏季より 30%高いものの、冬季の再生可能エネルギー源による電力は夏季より約 50%少ない (Hydrogen Council, 2017)。現時点では、水素を媒体とした電力貯蔵は経済的ではない。しかし、

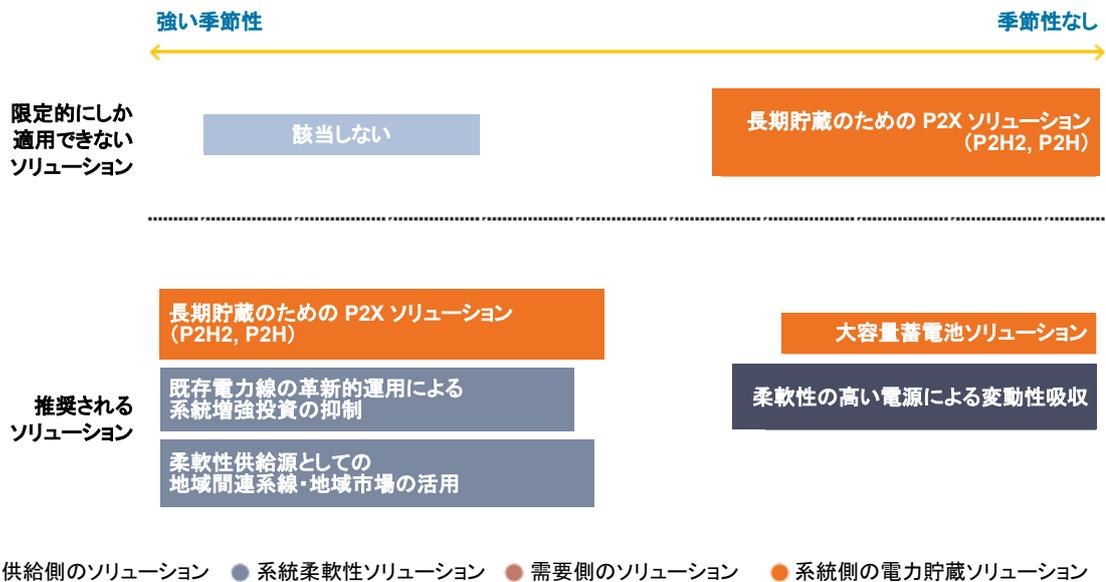
4

2030年までに規模の経済によるコスト低下が起こると予想されている。欧州が2050年までに目指している脱炭素化を実現したエネルギーシステムにおいて、水素がどのように利用されるかは、さらなる関心と研究の対象となっている。帯水層やその他の地下蓄熱技術など、一部のP2H技術では、最長6カ月のエネルギー貯蔵が可能である。

系統ソリューションに関しては、DLRが挙げられる。これは、気温その他の環境条件の変化を利用したイノベーションであり、気温が低い、風速が大きい、日射量が少ないなどの場合に、より多くの電力を送電線へ供給可能とするものである。

これらのソリューションはいずれも、気温やVRE利用率が年間を通して一定となる地域では、限定的にしか適用できない。そのような状況においては、長期的な柔軟性は必要ない可能性もあるため、主に短期的な柔軟性にのみ重点を置くことが望ましい。大容量蓄電池は、電力系統全体の短期的な柔軟性に対応できるソリューションであるが、他の類似ソリューションも同様に短期的な柔軟性に対応可能である。

図 42 季節性に基づくソリューションの指針



3. 地域間連系

地域間連系は、系統における強力な柔軟性供給源である。電力系統が非常に大規模な場合、あるいは地域間連系が進んでいる場合において、政策立案者が考慮するに値するソリューションは、**地域市場の確立**という、近隣の系統との相乗効果を生み出し、需給調整エリアを広域化する方法である。また、地域間連系線が整備されていない場合でも、建設が可能である場合は検討することが望ましい。その場合、広域連系された地区、またはより大規模系統においてVRE電源がどのような影響を与えるかという点と、地域により異なる風況／日射状況を最大限に活用するために連系線をどのように運用すべきかという点が、考慮すべき課題として挙げられる。リアルタイムに近い地域市場の運用は、柔軟性を高めるために有益であると考えられる。

このソリューションは、他の電力系統との連系線が存在せず、また構築することもできない、孤立した小規模な電力系統には適用できない。孤立した電力系統と遠距離にある他の電力系統とを連系して相乗効果を生み出

せるソリューションは、スーパーグリッドである。

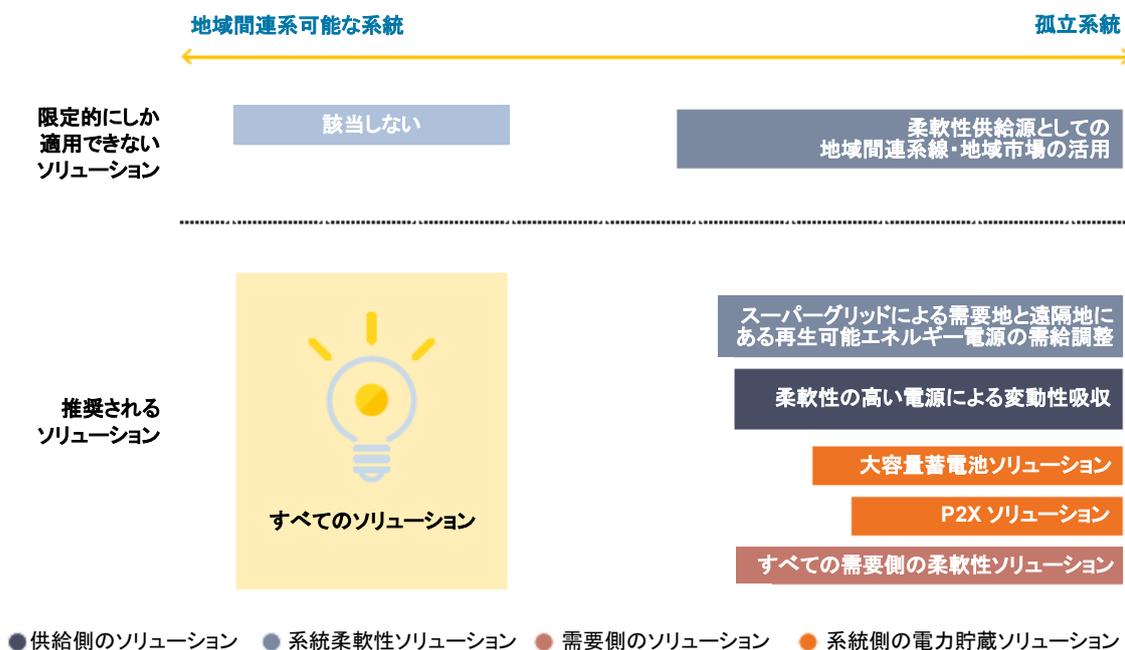
しかし、このような孤立した電力系統の場合、柔軟性は完全にその電力系統自身から供出しなければならない。この場合に検討すべき選択肢は、従来型電源の柔軟性強化を促すインセンティブ設計、貯蔵ソリューション(蓄電池、P2X)、または需要側柔軟性の有効活用である。

4. VRE 電源と大規模需要地の空間近接性

この指標は、どの柔軟性ソリューションが適切かを示すものと言うよりは、発電した電力を VRE 資源の豊富な地域から大規模需要地へ送るソリューションへと政策立案者を導くものである。そのような相乗効果を得られる手法の一つとして、スーパーグリッドは、少ない損失で電力を長距離輸送する新たな選択肢である。地域市場を構築し、さまざまな VRE 発電プロファイルと負荷プロファイルの組み合わせによる相互補完性を有効活用することも、強力な選択肢の一つである。VRE 電源と需要を結ぶ系統が混雑している場合も、VRE の出力抑制を回避しつつ系統増強投資を抑制する革新的なソリューション(貯蔵技術、DLR)がいくつかある。

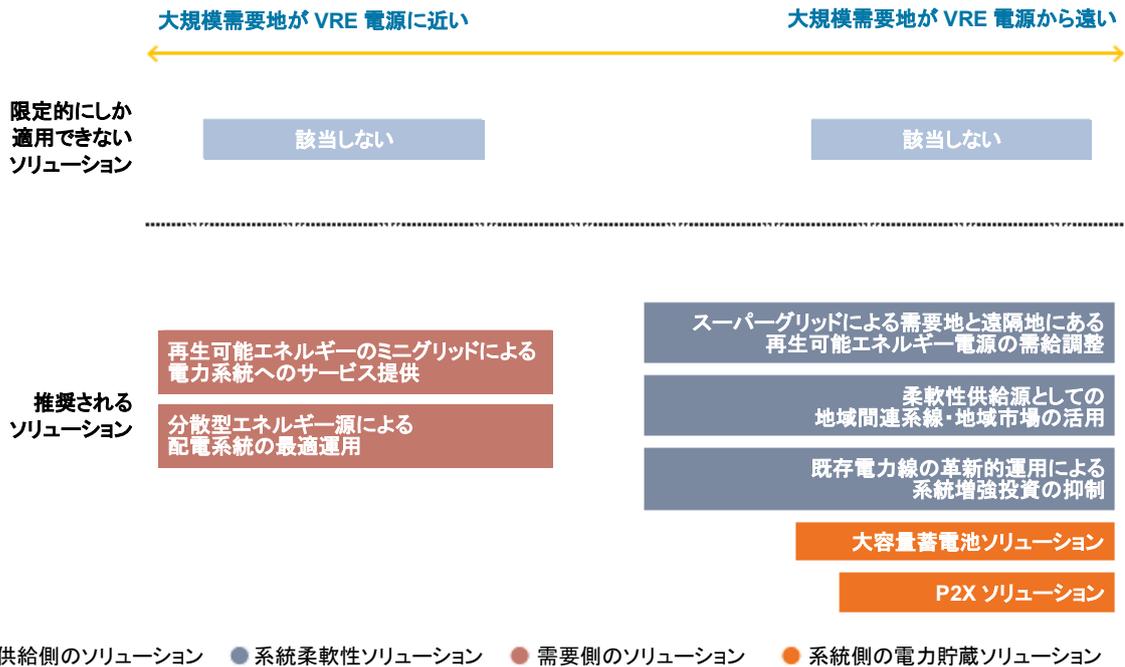
しかし、VRE 資源が豊富な場所が大規模需要地と一致する場合は、地域レベルで VRE 電源や他の分散型エネルギー源を導入することによって、系統における再生可能エネルギーの消費と需要側の柔軟性のいずれをも拡大することができる。

図 43 地域間連系の可能性に基づくソリューションの指針



4

図 44 VRE 電源と大規模需要地の空間近接性に基づくソリューションの指針



5. VRE 発電プロフィールと負荷プロフィールの時間的一致

残余需要プロフィールとは、VRE 発電プロフィールと負荷プロフィールの差である。VRE 電源プロフィールが負荷プロフィールと一致しない場合、ピーク時の残余需要に対応する系統柔軟性が求められる。この場合、系統柔軟性を高めるための選択肢は、電力系統のバリューチェーン全体に存在する。たとえば、従来型発電所の出力上昇／低下性能の強化、地域間連系と地域市場による系統需給調整、デマンドサイドマネジメント、貯蔵ソリューションなどである(図 45 参照)。

どのような状況においても推奨されるソリューション

本章で説明したように、絶対的なソリューションはない。すべてのソリューションが、導入に対して異なるレベルの複雑さを伴い、また電力系統固有の状況に基づいたさまざまな柔軟性ニーズに対応する。とはいえ、示された 11 の主要ソリューションのうち、先進的な気象予測手法を取り入れることによる VRE 発電の不確実性低減、およびデマンドサイドマネジメントの 2 つは、ほとんどの状況において検討可能なソリューションである(図 46 参照)。より精度の高い出力予測がなされれば、VRE 発電所の不確実性は低減し、どのような電力系統においてもより効果的に再生可能エネルギーを導入することができる。同様に、デマンドサイドマネジメントの向上と、価格シグナルに対する効果的な需要レスポンスが実現すれば、状況によらず、需要側の柔軟性を有効活用できるようになる。

図 45 残余需要プロファイルに基づくソリューションの指針

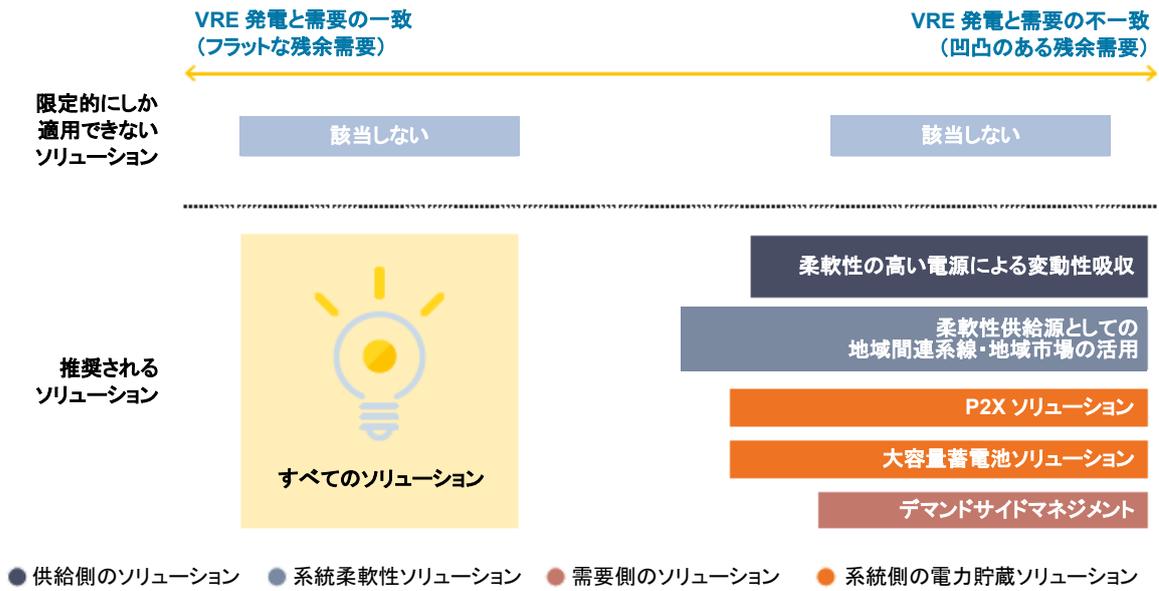
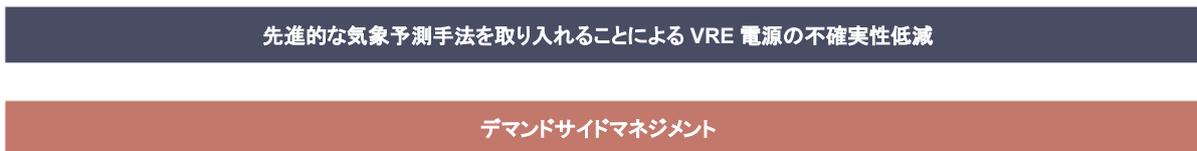


図 46 すべての状況に適したソリューション





5 結論：8段階のイノベーションプラン



イノベーションはエネルギー転換を促進する原動力であり、イノベーションのペースは世界中で加速している。さまざまな国々において多数の革新的ソリューションが、エネルギーシステム全体のさまざまな分野で試験導入され、採用されている。電力部門は、主要な再生可能エネルギー技術である太陽光発電と風力発電の急速なコスト削減を先導しており、多くの電力システムで導入が促進されている。

変動性再生可能エネルギー（VRE）の導入率が高まるにつれ、柔軟性は電力システムにおいてこれまで以上に価値を持つ。VRE 導入率が拡大すると、電力システムの変化に対応した政策が必要である。VRE が安価になり、VRE の大量導入により需要家に低コストの電力を供給するためには、連系戦略を成功に導くことが不可欠である（IRENA, IEA and REN21, 2018）。

未来は我々にかかっている。既に、以下のような数々の変化が起こっている。

- **電源:** 大規模で柔軟性のない火力発電は、より小規模な再生可能エネルギー電源に徐々に置き換えられている。その大半は商業的な柔軟性がなく（限界費用ゼロ）、気候に依存する（エネルギー価格によって変化しない資源）。短期的には、既存の従来型発電設備はより柔軟になる必要がある。より出力変化の速い容量（出力変化速度容量）を提供する能力を強化して、残余需要の変動増大に対応する必要がある。長期的には、デマンドサイドマネジメントと系統連系の向上が柔軟性をもたらす。
- **セクターカップリング／需要:** 輸送部門（電気自動車）や、潜在的には熱供給部門の電化といった最終消費部門は、やがて電化が進み、配電網の負荷を大幅に増加させると予想される。これらの新たな負荷は管理されない場合、比較的大容量／低エネルギーになる可能性があるが、本質的には柔軟性を持っている。電化技術には蓄電池や熱貯蔵を含み、電源の利用可能状況と配電網の容量に合わせて需要パターンを平滑化するのに役立つ。系統柔軟性に対して最適な貢献ができるのは、系統連系が適切に管理され、かつ需要家が自分自身の選択ではないところで利用パターンが決められてしまうことを受け入れる場合に限る。
- **エネルギー貯蔵:** 蓄電池技術はますます低廉化している。一般家庭のユーザーであっても、特に太陽光発電システムを設置し、自家消費を最大化したいと考えている家庭では、経済性よりも個人的な選好から蓄電

5

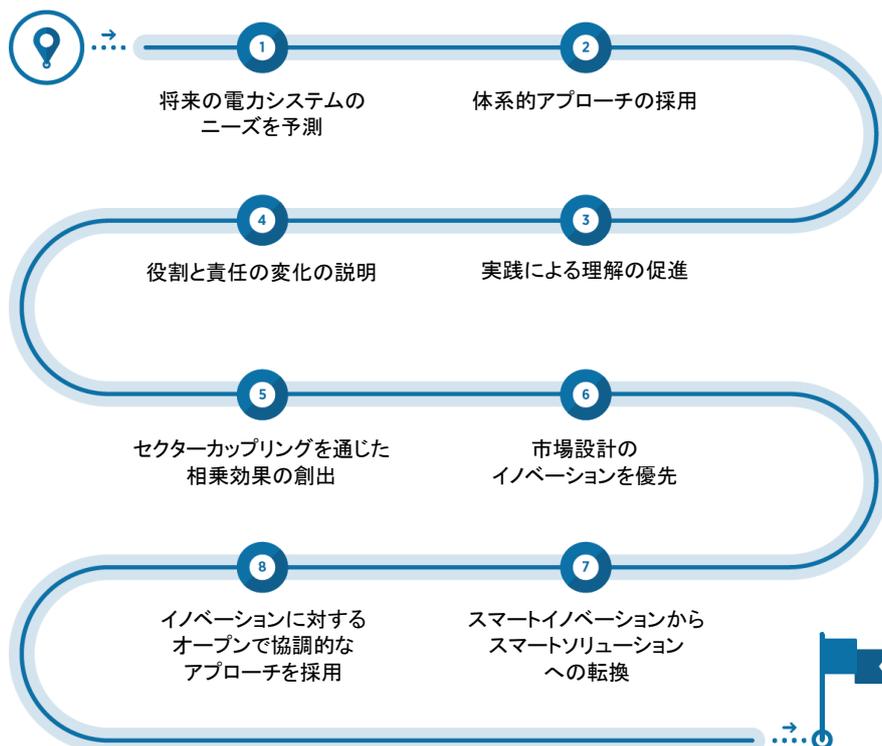
池を大量に設置している。配電系統運用者(DSO)は、配電網の増強を回避するために中規模蓄電池に注目している。また、セクターカップリングを支援する P2H（電力から熱への変換）や P2H2（電力から水素への変換）などの応用技術「P2X」が登場しており、さまざまな技術でエネルギーを貯蔵する大きな可能性を秘めている。

- **配電網**: 系統容量を「予測して提供する」という考え方（負荷を予測し、需給調整に利用可能な容量を提供する）が広がりつつあるが、これは特に電化が進むと持続可能的ではない。配電網の電力潮流が予測しにくくなることが考えられる。また、DSO は電力システムの低電圧部分をより把握し、それらをコントロールするためのより良い手立てを得る必要があると予想される。
- **アグリゲーション/デマンドレスポンス**: デマンドレスポンスが増加する余地は拡大している。技術は成熟してきており、適切な市場、アンシラリーサービス商品、市場やプラットフォームが登場してきている。能動的な電力需要家は、電力の消費も生産も行うことからしばしば「プロシューマー（生産消費者）」と呼ばれ、需要側の柔軟性を解放する大きな可能性を持ち、電力部門に変化を引き起こしている。

8 段階のイノベーションプラン

風力発電や太陽光発電といった有力な事例により、VRE 技術はエネルギー転換の中核に位置付けられている。先駆的な国々で試験導入されているイノベーションは、VRE を大量導入しても電力システムが高い信頼度と経済性をもって運用できることを示している。ただし、先んじて VRE を導入している国々と初期段階にある国々との間には、依然として大きなギャップが存在する。このギャップを埋めるために、各国において、以下の対応策の実施が推奨される。

図 47 電力部門における転換のための 8 段階のイノベーションプラン



- 1 **将来の電力システムのニーズを予測した先見性のある政策枠組みの策定。**コスト効率の高い VRE 大量導入を実現するためには、現在のニーズ(再生可能エネルギー電源の普及に焦点)と将来のニーズ(VRE の大量導入に焦点)を調整することが求められる。短期改善策と長期的戦略の間には難しいトレードオフが存在する。再生可能エネルギーの大量導入と連系を目標とする場合、政策立案者が短期改善策のみに注目することは望ましくない。政策立案者は、再生可能エネルギーが導入された時を見据えて、そのような将来に向けた市場と電力システムの設計をする必要がある。
- 2 **技術、市場設計、ビジネスモデル、運用におけるイノベーションを統括する体系的アプローチの採用。**電力システムのあらゆる部門や一部分で起こるイノベーションの相乗効果を活用し、すべてのプレイヤーが関与することが非常に重要である。本報告書に概説されている革新的なソリューションは、実現技術、市場設計、系統運用やビジネスモデルの組み合わせによって、各国の状況やニーズに合わせたソリューションが構築できることを示している。これらのイノベーションを実施して電力部門全体で柔軟性を発揮することによって、VRE の導入コストを削減し、ひいてはエネルギー転換を後押しする。さまざまなソリューション間に相乗効果が生まれる可能性も存在するため、それらを組み合わせて実施すれば投資額を低減することができる。
- 3 **継続的な試験と実証を通して、実践による理解を促進。**将来の電力システムとして唯一無二のモデルを想定することはできない。イノベーションには失敗がつきものだが、エネルギーシステムには失敗が許されない。電力供給は途切れてはならないものであるため、各国の状況によって、どのソリューションがうまくいき、どのソリューションがうまくいかないかを理解する必要がある。そのため試験と実証を通じた実践による理解が、リスクを緩和するために非常に重要となる。どこまでリスクを取れるかは、プレイヤーによって異なる。スタートアップ企業(新規参入者など)は、より高いリスクを取ることができ、失敗する余地も大きい。したがって、スタートアップ企業が問題を解決し、解決策を導き出すためには、オープンイノベーションが不可欠である。規制に余裕を持たせ、さまざまな段階の実験を可能にする必要がある。例として、各プレイヤーが規制環境による制限を受けずに革新的技術を実験できる、サンドボックス制度の創設が挙げられる。
- 4 **系統運用における変化する役割と責任の説明。**分散型エネルギー源の導入増加と、プロシューマーや能動的な需要家などの新たな市場プレイヤーの出現は、新たな時代の到来を告げる。政府や企業は、需要家やコミュニティのニーズ、要望、イノベーションを採用する意欲について、さらに洞察を深める必要があり、それに合わせてソリューションを適合させることが望ましい。一部の消費者は、エネルギーシステムにおいて能動的な役割を果たそうとするだろうが、その便益は明確にされていなければならず、応答を簡略化するために自動化が必要である。さらに DSO は現行の役割を見直し、ビジネスモデルを変革して、電力システムの計画者から電力システムの運用者へと移行する必要がある。電力システムに接続され、サービスを提供できる新たな分散型エネルギー源の可視性を高めるために、送電系統運用者(TSO)とのより大規模な協力が必要である。
- 5 **市場設計のイノベーションを優先し、比較的低コストで柔軟性を促進。**VRE のための市場設計ソリューションは、非常に影響力があり低コストであることが示されており、真っ先に取り組むべき選択肢となっている。いくつかのエネルギー市場や規制からは、VRE を大量導入した電力システムのニーズを反映し、デジタル化、分散化、電化といった動向に対応するために、市場をどのように適応させていけるかを見て取ることができる。電力市場の価値は、電力量(kWh)の提供から、安価な VRE をより多く取り入れるための柔軟性の提供へと

5

移り変わってきている。これらをつなぐ鍵となるのが、エネルギーと需給調整サービスの価格を適切に設定し、柔軟性を提供するすべてのプレーヤーが報酬を得ることのできる市場である。エネルギー転換を考慮した適切な計画により、包括的でコスト効率の高い市場設計がもたらされると考えられる。一方、パッチを用いたソリューションは即効性があるものの、長期的な系統コストを押し上げる可能性がある。割り当てられる短期的なパッチに関わらず、エネルギー市場の価格設定を徐々に改善することが重要である。

- 6 **再生可能エネルギー電力の供給と運輸・冷暖房の電化による相乗効果の創出。**セクターカップリングにより、再生可能エネルギーと最終消費部門の脱炭素化の間で有益な相乗効果を生み出すことができる。電化戦略は、さまざまな社会的変化を考慮し、再生可能エネルギーの普及を加速するための戦略と密接に連携したうえで、慎重に計画され、インテリジェントに実行されることが望ましい。
- 7 **デジタル技術を利用した、スマートイノベーションからスマートソリューションへの転換。**デジタル・イノベーション(人工知能、IoT、ブロックチェーンなど)は、さまざまな面で電力システムに大きな影響を及ぼしつつある。既存のモデルやプレーヤーへの影響とリスクはまだ完全に把握しきれていない。技術は存在するものの、スマートな応用についてはいまだ限定的である。エネルギーシステムには、デジタル・イノベーションが実現する「スマートネス」をさらに大規模に活用していくことが望まれる。他の産業部門はデジタル技術を(ほぼ)最大限に活用しており、電力部門にも転用できる知識を提供している。より広範な状況において、デジタル化により実現するソリューションのさらなる試験的運用と拡大が必要とされている。
- 8 **イノベーションに対するオープンで協調的なアプローチを採用。**公共部門と民間部門の双方、先進国と発展途上国といったさまざまなプレーヤーがイノベーションに関与する必要がある。知識と経験をより幅広く共有することが望ましい。他の部門やさまざまなプレーヤーから多くを学ぶための機会は豊富に存在する。エネルギー部門の一部と見なされていなかった他の産業部門との連携は、相乗効果を活用する絶好の機会をもたらす可能性がある。イノベーションは、持続可能で包括的なアプローチと組み合わせることが望ましい。

本報告書は、上記の要素を包含する政策枠組みが、電力部門の転換を成功に導くための適切な位置づけにあることを示している。VRE 導入を促進する多数の革新的なソリューションは、10 年前はまるで SF のように思われていたかもしれないが、今や世界中に広まり、試験導入されている。台頭しているソリューションは、ほとんどの電力システムに合わせて調整が可能である。本報告書とこれに付随するオンライン資料が提供する知見によって、エネルギーシステムの計画者と意思決定者が将来の再生可能エネルギー社会に向けた計画を真摯に熟慮することが可能となる。





- ABB** (2017), "India to build longest 800kV UHVDC transmission line", *T&D World*, <https://www.td-world.com/overhead-transmission/india-build-longest-800kv-uhvdc-transmission-line>.
- ACEG** (2017), "Texas as a national model for bringing clean energy to the grid", Americans for a Clean Energy Grid, <https://cleanenergygrid.org/texas-national-model-bringing-clean-energy-grid/>.
- ACER** (2016), *ACER Market Monitoring Report 2015 - Electricity and gas retail markets*, Agency for the Cooperation of Energy Regulators, Ljubljana, Slovenia.
- ACER** (2018), *ACER/CEER - Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity and Natural Gas Markets in 2017 - Electricity Wholesale Markets Volume*, Agency for the Cooperation of Energy Regulators, Ljubljana, Slovenia.
- AGGARWAL, S. AND R. ORVIS** (2016), *Grid flexibility: Methods for modernizing the power grid*, Energy Innovation, San Francisco, California.
- AGL** (2017), "Wattle Point Wind Farm", <https://www.agl.com.au/about-agl/how-we-source-energy/wattle-point-wind-farm>.
- AGORA ENERGIEWENDE** (2017), *Flexibility in thermal power plants*, Agora Energiewende, Berlin.
- ALEN PAVLINIĆ, V. K.** (2017), "Direct monitoring methods of overhead line conductor temperature", *Engineering Review*, Vol. 37(2), pp. 134-146.
- ANTEROINEN, S.** (2018), "Graciosa on the path to 100% renewable energy", Wärtsilä, <https://www.wartsila.com/twentyfour7/energy/graciosa-on-the-path-to-100-renewable-energy>.
- ARENA** (2018), "Hydrogen to be trialled in NSW gas networks", Australian Renewable Energy Agency, <https://arena.gov.au/news/hydrogento-be-trialled-in-nsw-gas-networks/>.
- AVALLONE, E. D.** (2018), *Flexible ramping product: Market design concept proposal*, New York Independent System Operator.
- BADE, G.** (2018), "Storage will replace 3 California gas plants as PG&E nabs approval for world's largest batteries", *Utility Dive*, <https://www.utilitydive.com/news/storage-will-replace-3-california-gas-plants-as-pge-nabs-approval-for-world/541870/>.
- BASKIN, J. S.** (2016), "Xcel tames variability of wind power", *Forbes*, <https://www.forbes.com/sites/jonathansalembaskin/2016/06/30/xcel-tames-variability-of-wind-power/#2d2f70263bdd>.
- BEEBRYTE** (n.d.), BeeBryte website, <https://beebryte.com>.
- BEIS** (2018), UK Department of Business, Energy and Industrial Strategy website, <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-business-energy-and-industrial-strategy>.
- BEIS** (2017), "Smart meters", UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/662089/2017-Q3-smart-meters-quarterly-report.pdf.
- BETA, E. M.** (2016), "SAPP experience on regional power market development & operation", presentation, <https://sari-energy.org/wp-content/uploads/2016/03/Session-3-Mr-Musara-BETA-SAPP.pdf>.

- BIG HIT** (2018), "About the project", <https://www.bighit.eu/about>.
- BNEF** (2018), "Cumulative global EV sales hit 4 million", Bloomberg New Energy Finance blog, <https://about.bnef.com/blog/cumulative-global-ev-sales-hit-4-million/>.
- BNEF** (2017), *Digitalization of energy systems*, Bloomberg New Energy Finance, London, UK.
- BRIDGE TO INDIA** (2017), "Southern region to lead India in grid integration of renewable energy – Bridge to India", *PV Tech*, <https://www.pv-tech.org/guest-blog/southern-region-to-lead-india-in-grid-integration-of-renewable-energy-bridg>
- CAISO** (2018a), "Day-ahead market enhancements", California Independent System Operator, <http://www.caiso.com/informed/Pages/StakeholderProcesses/Day-AheadMarketEnhancements.aspx>.
- CAISO** (2018b), "Flexible ramping product", California Independent System Operator, <http://www.caiso.com/informed/Pages/StakeholderProcesses/CompletedClosedStakeholderInitiatives/FlexibleRampingProduct.aspx>
- CAISO** (2018c), *Western EIM benefits report – Second quarter 2018*, California Independent System Operator, Folsom, California.
- CAM** (2019), *Branchenstudie Elektromobilität 2019*, Center of Automotive Management, Bergisch Gladbach, Germany, <http://www.auto-institut.de/e-mobility-studien.htm>.
- CARLINI, E. M., F. MASSARO AND C. QUACIARI** (2013), "Methodologies to upgrade an overhead line. Italian TSO case study", *Journal of Electrical Systems*, Vol. 9(4), pp. 422-439.
- CEA** (2018), *National Electricity Plan (Volume I) – Generation*, Central Electricity Authority, Ministry of Power, Government of India, New Delhi, India.
- CEC** (2018), "Total system electric generation", California Energy Commission, https://www.energy.ca.gov/almanac/electricity_data/total_system_power.html (accessed 4 December 2018).
- COCHRAN, J., D. LEW AND N. KUMAR** (2013), *Flexible coal: Evolution from baseload to peaking plant*, US National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
- COLTHORPE, A.** (2018), "Navigant: Energy storage PCS becoming a 'crowded market'", *PV Tech*, <https://www.pv-tech.org/news/navigant-ener-gy-storage-pcs-becoming-a-crowded-market>.
- COLTHORPE, A.** (2017), "Stem connects 1MW aggregated virtual power plant in Hawaii", *Energy Storage News*, <https://www.ener-gy-storage.news/news/stem-connects-1mw-aggregated-virtual-power-plant-in-hawaii>.
- CON EDISON** (2018), "Con Edison's 'Community Power' to bring solar energy to 350 NYCHA households", <https://www.coned.com/en/about-con-edison/media/news/20180925/con-edisons-community-power-to-bring-solar-energy-to-350-nycha-households>.
- CON EDISON** (2016), "Register your smart thermostat and get up to \$135", [https://www.coned.com/en/save-money/rebates-incentives-tax-credits/rebates-incentives-tax-credits-for-residential-customers/bring-your-thermostat-and-get-\\$85](https://www.coned.com/en/save-money/rebates-incentives-tax-credits/rebates-incentives-tax-credits-for-residential-customers/bring-your-thermostat-and-get-$85).
- CORFO** (2018), *Opportunities for the development of a solar hydrogen industry in the Atacama and Antofagasta regions: Innovations for 100% renewable energy system*, Chilean Solar Committee (CORFO), Santiago, Chile.
- CUFFARI, B.** (2018), "Offshore vs. onshore wind farms", AZoCleantech, <https://www.azo-cleantech.com/article.aspx?ArticleID=704>.
- DE CLERCQ, G. AND C. STEITZ** (2017), "Energy firms battle startups to wire Europe's highways for electric cars", *Reuters*, <https://www.reuters.com/article/us-electricity-autos-charging/energy-firms-battle-startups-to-wire-europes-highways-for-electric-cars-idUSKCN1BQ0JG>.
- DE GRAAF, F.** (2018), *New strategies for Smart Integrated Decentralized Energy systems*, Metabolic, Amsterdam, the Netherlands.
- DEA** (2015), *System integration of wind power – Experiences from Denmark*, Danish Energy Agency, Copenhagen.

- DECC** (n.d.), *Energy Entrepreneurs Fund projects, Phases 1&2*, Department of Energy & Climate Change, UK.
- DIW** (2013), *The benefit of coordinating congestion management in Germany*, German Institute for Economic Research, Berlin.
- DONG ENERGY** (2012), *The eFlex Project Main Report* DONG Energy.
- DU, P., R. BALDICK AND A. TUOHY** (eds.) (2017), *Integration of Large-Scale Renewable Energy into Bulk Power Systems*. Cham: Springer International Publishing, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-55581-2>.
- DWD** (2018), "Weather forecasts for renewable energy – A challenge", Deutscher Wetterdienst, https://www.dwd.de/EN/research/weather-forecasting/num_modelling/07_weather_forecasts_renewable_energy/weather_forecasts_renewable_energy_node.html (accessed 16 November 2018).
- E.ON** (2018), "E.ON brings innovation to the energy market: Storing solar power without batteries", <https://www.eon.com/en/about-us/media/press-release/2018/eon-brings-innovation-to-the-energy-market-storing-solar-power-without-batteries.html>.
- EC** (2016a), *Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on common rules for the internal market in electricity*, European Commission, Brussels.
- EC** (2016b), "FCH-02-7-2016 – Demonstration of large-scale rapid response electrolysis to provide grid balancing services and to supply hydrogen markets", European Commission CORDIS, https://cordis.europa.eu/programme/rcn/700832_en.html (accessed 3 December 2018).
- EHPA** (2018), "Press release: Ongoing growth: heat pump sector continues its positive contribution to Europe's energy and climate targets", European Heat Pump Association, <https://www.ehpa.org/about/news/article/press-release-ongoing-growth-heat-pump-sect-continues-its-positive-contribution-to-eu-ropes-ene/>.
- EIA** (2018a), "Frequently asked questions: What is U.S. electricity generation by energy source?" US Energy Information Administration, <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3>.
- EIA** (2018b), *Assessing HVDC transmission for impacts of non-dispatchable generation*, US Energy Information Administration, Washington, D.C.
- EIA** (2017), "Frequently asked questions: How many smart meters are installed in the United States, and who has them?" US Energy Information Administration, <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=108>.
- EID, C. et al.** (2016), "Market integration of local energy systems: Is local energy management compatible with European regulation for retail competition?" *Energy*, Vol. 114, pp. 913-922.
- EIM** (2018), "About", Western Energy Imbalance Market, <https://www.westerneim.com/Pages/About/default.aspx> (accessed 29 November 2018).
- EIRGRID** (2016), *DS3 Programme operational capability outlook 2016*, EirGrid Group, Dublin.
- EL PERIÓDICO DE LA ENERGÍA** (2018), "Wible, el servicio de car-sharing de KIA y Repsol comienza a funcionar en Madrid", <https://elperiodicodelaenergia.com/wible-el-servicio-de-car-sharing-de-kia-y-repsol-comienza-a-funcionar-en-madrid/>.
- ELIA** (2018), "Deployment of a datahub shared by all system operators to support electrical flexibility", Elia, Brussels, http://www.elia.be/~media/files/Elia/PressReleases/2018/20180308_SYN_Persbericht_Datahub_EN.pdf.
- ENBALA** (n.d.), *Virtual power plants: Coming soon to a grid near you*, Enbala, Vancouver, British Columbia, <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1537427/Chapter1.pdf?submissionGuid=859d63d0-7af0-4c64-9cb3-1e1e3c0bd3d4>.
- ENERGINET** (2018), *Nordic power market design and thermal power plant flexibility*, Energinet, Fredericia, Denmark.

- ENERGYSTOCK** (2018), “The hydrogen project HyStock”, <https://www.energystock.com/about-energystock/the-hydrogen-project-hystock>.
- ENGERATI** (2018), “UK networks: Making the switch from DNO to DSO”, <https://www.engerati.com/article/uk-networks-switch-dno-dso-western-power-distribution>.
- ENGIE** (2018), “The GRHYD demonstration project”, <https://www.engie.com/en/innovation-energy-transition/digital-control-energy-efficiency/power-to-gas/the-grhyd-demonstration-project>.
- ENTSO-E** (2015), *Dynamic Line Rating for overhead lines – V6*, European Network of Transmission System Operators, Brussels.
- EPE AND BMWI** (2017), *Untapping flexibility in power systems*, EPE and Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Brasilia and Berlin.
- EPEX SPOT** (2019), *Products Intraday Continuous*, EPEX SPOT, Paris, https://www.epexspot.com/en/product-info/intradaycontinuous/intraday_lead_time
- EPEX SPOT** (n.d.), *15-minute intraday call auction*, EPEX SPOT, Paris, <https://www.epexspot.com/document/29113/15-Minute%20Intraday%20Call%20Auction>.
- ESA** (2014), “Providing 100% renewable power to large residence on protected Kona coast”, Energy Storage Association, <http://energystor-age.org/energy-storage/case-studies/provid-ing-100-renewable-power-large-residence-pro-tected-kona-coast>.
- ETO, J. H., B. C. LESIEUTRE AND D. R. HALE** (2005), *A review of recent RTO benefit-cost studies: Toward more comprehensive assessments of FERC electricity restructuring policies*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.
- EURELECTRIC** (2017), *Dynamic pricing in electricity supply – A Eurelectric position paper*, Eurelectric, Brussels.
- EVANS, R. AND J. GAO** (2016), “DeepMind AI reduces Google data centre cooling bill by 40%”, DeepMind, <https://deepmind.com/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cool-ing-bill-40/>.
- EXERON** (2018), “Exeron – Applications”, <https://exeron.com/applications/applications-xgrid> (accessed 17 October 2018).
- FCH JU** (2018), “Launch of REFHYNE, world’s largest electrolysis plant in Rhineland refinery”, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, <https://www.fch.europa.eu/news/launch-ref-hyne-worlds-largest-electrolysis-plant-rhine-land-refinery> (accessed 16 November 2018).
- FELIX, B.** (2017), “Total ready for price war as it enters French retail power market”, *Reuters*, <https://www.reuters.com/article/us-total-gas/total-ready-for-price-war-as-it-enters-french-re-tail-power-market-idUSKBN1CA1JP>.
- FERC** (2018), *Open Commission Meeting Staff Presentation, Item E-1*, US Federal Energy Regulatory Commission, Washington, D.C., <https://www.ferc.gov/industries/electric/in-dus-act/rto/02-15-18-E-1-presentation.pdf>.
- FERNANDEZ, E. et al.** (2016), “Review of dynamic line rating systems for wind power integration”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, pp. 80-92.
- FINNISH ENERGY** (2017), *Finnish Energy’s position on the features of next-generation electricity meters*, Finnish Energy, Helsinki.
- FINNISH ENERGY AUTHORITY** (2018), *National Report 2018 to the Agency for the Cooperation of Energy Regulators and to the European Commission*, Energy Authority, Helsinki.
- FRAUNHOFER ISE** (2018), *Power generation in Germany – Assessment of 2017*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany.
- FRONTIER ECONOMICS** (2018), *South Australia’s Virtual Power Plant*, Frontier Economics, Melbourne, Australia.
- GARDINER, M.** (2014), *Hydrogen energy storage: Experimental analysis and modeling*, US Department of Energy, Washington, D.C.

- GLOBALDATA** (2018), “Global smart meter market expected to see huge rollout”, Global Data, <https://www.power-technology.com/comment/global-smart-meter-market-expected-see-huge-rollout/>.
- GOVERNMENT OF AUSTRALIA** (2018), South Australia’s Virtual Power Plant website, <https://virtualpowerplant.sa.gov.au/> (accessed 29 November 2018).
- GREY CELLS ENERGY** (2018), “Sonnen’s ‘Community’: Aggregating domestic battery storage”, <https://greycellsenergy.com/examples/sonnens-community-aggregating-domestic-battery-storage/>
- GROVER, M.** (2018), “Demand response is disrupting Australia’s ancillary services markets”, RenewEconomy, <https://reneweconomy.com.au/demand-response-disrupting-australias-ancillary-services-markets-43382/>.
- GTAI** (2018), *The energy storage market in Germany*, Germany Trade & Invest, Berlin.
- GUEVARA-STONE, L.** (2014), “Why a small German village bet big on renewables”, GreenBiz, <https://www.greenbiz.com/blog/2014/02/13/rural-german-village-feldheim-power-clean-energy/>.
- HDR** (2017), *Battery energy storage technology assessment*, Platte River Power Authority, Fort Collins, Colorado.
- HILL, J. S.** (2018), “Solar & batteries to power London’s first ‘virtual power station’”, CleanTechnica, <https://cleantechnica.com/2018/06/26/solar-batteries-to-power-londons-first-virtual-power-station/>.
- HYDROGEN COUNCIL** (2017), *How hydrogen empowers the energy transition*, Hydrogen Council.
- HYDRO TASMANIA** (2014), *King Island Renewable Energy Integration Project*, Hydro Tasmania, <http://www.kingislandrenewableenergy.com.au/project-information/overview>
- IBM** (2011), “IBM rolls out first solar array designed for high-voltage data centers and industrial use”, <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/35891.wss>.
- IEA** (2018a), *World energy outlook 2018*, International Energy Agency, Paris.
- IEA** (2018b), *Energy storage: Tracking clean energy progress*, International Energy Agency, Paris.
- IEEE** (2017), “Large scale storage and demand resources – Enabler of transmission delivery? ”, presentation, Institute of Electrical and Electronics Engineers Power & Energy Society, Piscataway, New Jersey, <https://pdfs.semanticscholar.org/presentation/3648/25caf9687eb-3c483a14578bb54e5fedf1b64.pdf>.
- IEEFA** (2018), *Power-industry transition, here and now. Wind and solar won’t break the grid: Nine case studies*, Institute for Energy Economics and Financial Analysis, Cleveland, Ohio.
- IPCC** (2018), *Global Warming of 1.5 °C*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- IRENA** (forthcoming a), *Innovation outlook: Smart charging for EVs*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (forthcoming b), *Innovation outlook: Thermal energy storage*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2018a), *Renewable power generation costs in 2017*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2018b), *Global energy transformation: A roadmap to 2050*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2018c), *Power system flexibility for the energy transition. Part 1: Overview for policy makers*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2018d), *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2017a), *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

- IRENA** (2017b), *Adapting market design to high shares of variable renewable energy*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
【日本語訳】変動性再生可能エネルギー大量導入時代の電力市場設計, 環境省 (2019)
https://www.env.go.jp/earth/report/sankou2%20saiene_2019.pdf
- IRENA** (2017c), *Renewable energy in district heating and cooling: A sector roadmap for REMap*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2015), *Battery storage for renewables: Market status and technology outlook*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA, IEA AND REN21** (2018), *Renewable energy policies in a time of transition*, International Renewable Energy Agency, International Energy Agency and Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Abu Dhabi and Paris.
- IRP WIND** (2016), *Yearly report on IRPWIND and EERA JP Wind Activities*, Integrated Research Programme on Wind Energy.
- ITM POWER** (2015), "Rapid response electrolysis for power-to-gas energy storage", <http://www.itm-power.com/news-item/rapid-response-electrolysis-for-power-to-gas-energy-storage>.
- JACOBS, D. et al.** (2016), *RE Transition — Transitioning to policy frameworks for cost-competitive renewables*, IEA Technology Collaboration Programme for Renewable Energy Technology, Utrecht, the Netherlands.
- KEMPENER, R., P. KOMOR AND A. HOKE** (2013), *Smart grids and renewables: A guide for effective deployment*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- KENNING, T.** (2018), "Macquarie to finance solar hybrid and 'largest' energy storage project in South Korea", *PV Tech*, <https://www.pv-tech.org/news/macquarie-to-finance-solar-hybrid-and-largest-energy-storage-project-in-sou>.
- KNIGHT, S.** (2010), "Merger of German TSOs could solve electricity cost problem", *Windpower Monthly*, <https://www.windpowermonthly.com/article/1000530/merger-ger-man-tsos-solve-electricity-cost-problem>.
- KPMG** (2016), *EFR tender results*, KPMG, <https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/uk/pdf/2016/10/kpmg-efr-tender-market-brief-ing-updated.pdf>.
- LEW, D. et al.** (2011), *The value of wind power forecasting*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
- McCONNELL, D.** (2017), "SA's battery is massive, but it can do much more than store energy", *Australian Broadcasting Company*, <http://www.abc.net.au/news/2017-12-05/yes-sa-battery-is-a-massive-battery-but-it-can-do-more/9227288>.
- McKINSEY** (2017), "There's no place like (a connected) home", McKinsey&Company, <https://www.mckinsey.com/spContent/connected-homes/index.html>.
- MORTON, A.** (2018), "South Australia on track to meet 75% renewables target Liberals promised to scrap", *The Guardian*, <https://www.theguardian.com/environment/2018/jul/25/south-ustralia-to-hit-75-renewables-target-by-2025-lib-eral-energy-minister-says>.
- NADEL, S.** (2017), "Demand response programs can reduce utilities' peak demand an average of 10%, complementing savings from energy efficiency programs", American Council for an Energy-Efficient Economy blog, <https://aceee.org/blog/2017/02/demand-response-programs-can-reduce>.
- NATIONAL GRID** (2017), *Annual Report and Accounts 2016/2017*, National Grid, London.
- NATIONAL GRID ESO** (2018), "Commercial aggregation service providers", https://www.nationalgrideso.com/sites/eso/files/documents/Commercial%20Aggregation%20Service%20Providers_1.xlsx.
- NBS** (2018), "In August 2018, the added value of industrial enterprises above designated size increased by 6.1%", National Bureau of Statistics China, Beijing.
- NEUHOFF, K. AND R. BOYD** (2011), *International experiences of nodal pricing implementation*, Climate Policy Initiative, London.

- NEW YORK STATE** (2018), “REV – Demonstration projects”,
<http://www3.dps.ny.gov/W/PSCWeb.nsf/All/B2D9D834B0D307C685257F3F006FF-1D9?OpenDocument>.
- NORD POOL** (2018), *Cross-border intraday: Questions & answers*, Lysaker, Norway,
https://www.nordpoolspot.com/globalassets/download-center/xbid/xbid-qa_final.pdf.
- NORDREG** (2018), *Implementation of data hubs in the Nordic countries - Status report*, Nordic energy Regulators,
<http://www.nordicenergyregulators.org/wp-content/uploads/2018/08/Nor-dREG-Status-report-on-datahubs-June-2018.pdf>
- NORTHERN POWERGRID** (2018), “Innovation Strategies launch latest chapter in GB’s energy network innovation success story”, EE Online,
<https://electricenergyonline.com/article/energy/category/General/90/693663/Innovation-Strategies-Launch-Latest-Chapter-in-GB-s-Energy-Network-Innovation-Success-Story.html>.
- NPTEL** (2012), *Module 5: Locational Marginal Prices (LMPs)*, <http://nptel.ac.in/courses/108101005/27>.
- NREL** (2017), *Hydrogen energy storage: Experimental analysis and modeling*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
- NREL** (2015a), “NREL and IBM improve solar forecasting with big data”, National Renewable Energy Laboratory, <https://www.nrel.gov/esif/partnerships-ibm.html>.
- NREL** (2015b), *The value of improved short-term wind power forecasting*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
- NREL** (2013), *Market evolution: Wholesale electricity market design for 21st century power systems*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
- NREL** (2012), *Potential for distributed and central electrolysis to provide grid support services*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
- NSWPH** (2018), “Planning the future today”, North Sea Wind Power Hub,
<https://northseawindpowerhub.eu/vision>
 (accessed 29 November 2018).
- NYISO** (2017), *Distributed energy resources roadmap for New York’s wholesale electricity markets*, New York Independent System Operator, Rensselaer, New York.
- NYSERDA** (2018), “New York State Energy Storage”, New York State Energy Research and Development Authority,
<https://www.nysesda.ny.gov/All%20Programs/Programs/Energy%20Storage>.
- OFFSHOREWIND.BIZ** (2015), “Siemens hands over HelWin1 to TenneT”,
<https://www.offshorewind.biz/2015/02/09/siemens-hands-over-helwin1-to-tennet/>.
- PACIFICORP** (2018), “Western grid coordination”,
<https://www.pacificcorp.com/about/eim.html>
 (accessed 29 November 2018).
- PICKEREL, K.** (2018), “Urban Energy Solutions and SunGreen Systems will use Stem’s AI solutions in solar+storage projects”, Solar Power World,
<https://www.solarpower-worldonline.com/2018/09/urban-energy-solutions-and-sungreen-systems-will-use-stems-ai-solutions-in-solar-storage-projects/>.
- POLHAMUS, M.** (2017), “Joint venture has IBM tackling renewable energy’s grid effects”, *VTDigger*,
<https://vtdigger.org/2017/02/28/joint-venture-ibm-tackling-renewable-energy-grid-effects/>
- PROMOTioN** (2018), “EU-Project PROMOTioN: Successful testing of DC circuit breaker module prototype completed”, https://www.promotion-offshore.net/news_events/news/detail/eu-project-promotion-successful-test-ing-of-dc-circuit-breaker-module-proto-type-completed/.
- RAL** (2014), “How advanced forecasting is making it easier to integrate solar onto the grid”, Research Applications Laboratory,
<https://ral.ucar.edu/solutions/how-advanced-forecasting-making-it-easier-integrate-solar-grid>.
- REN21** (2016), *Renewables 2016 global status report*, Renewable Energy Network for the 21st Century, Paris.

- RES** (2016), *PJM Frequency Regulation*, Renewable Energy Systems, http://www.res-group.com/media/2409/frequencyreg_flyer_042517.pdf.
- ROBERTS, D.** (2018), "California just adopted its boldest energy target yet: 100% clean electricity", *Vox*, <https://www.vox.com/energy-and-environment/2018/8/31/17799094/california-100-percent-clean-energy-target-brown-de-leon>.
- ROBERTS, D., P. TAYLOR AND A. MICHIORRI** (2008), *Dynamic thermal rating for increasing network capacity and delaying network reinforcements*, Institution of Engineering and Technology, Frankfurt.
- SEDC** (2017), *Explicit demand response in Europe: Mapping the markets 2017*, Smart Energy Demand Coalition, Brussels.
- SEEL, J., A. D. MILLS AND R. H. WISER** (2018), *Impacts of high variable renewable energy (VRE) futures on wholesale electricity prices, and on electric-sector decision making*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.
- SEI** (2017), "Smart electric meters programme", Smart Energy International, <https://www metering.com/industry-sectors/smart-meters/smart-electric-meters-programme/>.
- SEI** (2016), "Global trends in smart metering", Smart Energy International, <https://www metering.com/magazine-article/global-trends-in-smart-metering/>.
- SEMPRA** (2017), "SoCalGas and U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory install nation's first biomethanation reactor system for power-to-gas testing", Semptra Energy, <https://www.semptra.com/newsroom/press-releases/socal-gas-and-us-department-energys-national-renewable-energy-laboratory>.
- SHELL** (2018), "Shell completes acquisition of First Utility", Shell Petroleum Company Ltd., <https://www.shell.co.uk/media/2018-media-releases/shell-completes-acquisition-of-first-utility.html>.
- SHELL** (2017), "Shell steps up its electric vehicle charging offer", Shell Petroleum Company Ltd., <https://www.shell.co.uk/media/2017-media-releases/electric-vehicle-charging-offer.html>.
- SIEMENS** (2018), "HVDC classic", <https://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/hvdc/hvdc-classic.htm#content=Low%20Loss-es>.
- SKYES, J.** (2018), "South Australian government's home battery scheme", Solar Choice, <https://www.solarchoice.net.au/blog/south-australian-governments-home-battery-scheme/>.
- STATISTA** (2018), "Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025 (in billions)", <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/> (accessed 16 November 2018).
- STONE, M.** (2016), "Unbundled ancillary services are another energy storage opportunity in Australia", Greentech Media, <https://www.greentechmedia.com/articles/read/unbundled-ancillary-services-are-another-energy-storage-opportunity-in-aust>.
- SURF 'N' TURF INITIATIVE** (2018), Surf 'n' Turf Initiative website, <http://www.surfturf.org.uk/>.
- TENNET** (2018), "SylWin1", <https://www.tennet.eu/our-grid/offshore-projects-germany/sylwin1/> (accessed 3 December 2018).
- TENNET** (2017a), "Port of Rotterdam becomes fifth partner in North Sea Wind Power Hub Consortium", <https://www.tennet.eu/news/de-tail/port-of-rotterdam-becomes-fifth-partner-in-north-sea-wind-power-hub-consortium/>.
- TENNET** (2017b), "Europe's first blockchain project to stabilize the power grid launches: TenneT and sonnen expect results in 2018", <https://www.tennet.eu/news/detail/europes-first-blockchain-project-to-stabilize-the-power-grid-launches-tennet-and-sonnen-expect-res/>.
- TERNA** (n.d.), "Pilot storage projects", <https://www.terna.it/en/gb/sistemaelettrico/progettupilota-diaccumulo.aspx>.

- TNO** (2016), *PowerMatcher, matching energy supply and demand to expand smart energy potential*, TNO, Amsterdam, the Netherlands.
- TOTAL** (2016), "Total takes control of Saft Groupe after the successful tender offer which will be re-opened from July 19 to August 2, 2016", <https://www.total.com/en/media/news/press-releases/total-takes-control-saft-groupe-after-successful-tender-offer-which-will-be-re-opened-july-19-august>.
- TRACTEBEL** (2017), *Study on early business cases for H2 in energy storage and more broadly power to H2 applications*, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Brussels.
- TRILATIONS** (n.d.), "Is the Belgian energy market ready for residential VPP's?" <https://www.trilations.com/is-the-belgian-energy-market-ready-for-residential-vpps/>.
- US DOE** (2018), *2017 Wind technologies market report: Summary*, US Department of Energy, Washington, D.C.
- US DOE** (2014), *Oncor's pioneering transmission dynamic line rating (DLR) demonstration lays foundation for follow-on deployments*, US Department of Energy, Washington, D.C.
- VATTENFALL** (2017), "Vattenfall invests in innovative heat storage in Berlin", <https://corporate.vattenfall.com/press-and-media/press-releases/2017/vattenfall-invests-in-innovative-heat-storage-in-berlin/>.
- VIKING LINK** (2018), Viking Link Interconnector website, <http://viking-link.com>.
- WALTON, R.** (2018), "FERC creates path for energy storage into RTO/ISO capacity markets", *Electric Light & Power*, <https://www.elp.com/articles/2018/02/ferc-creates-path-for-energy-storage-into-rto-iso-capacity-markets.html>.
- WANG, W.** (2017), "Ancillary services: An introduction", China National Renewable Energy Centre, <http://boostre.cnrec.org.cn/index.php/2017/09/14/ancillary-services-an-introduction/?lang=en>.
- WEF** (2017), *The future of electricity: New technologies transforming the grid edge*, World Economic Forum, Geneva.
- WGA** (2012), *Meeting renewable energy targets in the West at least cost: The integration challenge*, Western Governors' Association, Denver, Colorado.
- WILLUHN, M. AND F. BROWN** (2018), "UK Power Networks to launch London's first VPP", *pv magazine*, <https://www.pv-magazine.com/2018/06/26/uk-power-networks-to-launch-londons-first-vpp/>.
- WOOD, J.** (2018), "These Dutch microgrid communities can supply 90% of their energy needs", World Economic Forum, <https://www.weforum.org/agenda/2018/09/these-dutch-microgrid-communities-can-supply-90-of-their-energy-needs/>.
- WORLD BANK** (2018), "Regional power trade in West Africa offers promise of affordable, reliable electricity", <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2018/04/20/regional-power-trade-west-africa-offers-promise-affordable-reliable-electricity>.
- YIP, T. et al.** (2009), "Dynamic line rating protection for wind farm connections", *2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System*, 29-30 July.
- ZAMAN, A.** (2018), "100% Variable Renewable Energy Grid: Survey of Possibilities", University of Michigan, https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/143152/Zaman_Ansha_Practicum.pdf
- ZHANG, L.** (2016), "China renewables curtailment: Is there light at the end of the tunnel? ", presentation, The Lantau Group, http://www.lantaugroup.com/files/ppt_pgen16_lz.pdf.



将来の再生可能エネルギー社会を実現 するイノベーションの全体像：

変動性再生可能エネルギー導入のための ソリューション

© IRENA 2019

IRENA 本部
P.O. Box 236, Abu Dhabi
United Arab Emirates

www.irena.org

