



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **19**

超分散エネルギーシステム (Integration Study)分野の技術戦略策定に向けて

2017年7月

1 章	超分散エネルギーシステム(Integration Study)分野の概要 …	2
1-1	エネルギー／電力システムをとりまく環境の変化 ……………	2
1-2	太陽光発電、風力発電等の導入拡大に伴う電力系統上の諸問題と対策 ………	5
1-3	超分散エネルギーシステムにおけるIntegration Studyの概要……………	7
2 章	超分散エネルギーシステムにおけるIntegration Studyの置かれた状況	8
2-1	Integration Studyにより期待できる市場規模 ……………	8
2-2	Integration Studyに係る論文発表・特許出願の状況 ……………	9
2-3	Integration Studyに係る国内外の取組状況……………	10
2-4	長期のIntegration Studyにおける電力需給解析・シミュレーションモデル …	12
3 章	超分散エネルギーシステムにおけるIntegration Studyの課題	16
4 章	おわりに ……………	17

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

1章 超分散エネルギーシステム (Integration Study)分野の概要

1-1 エネルギー／電力システムをとりまく環境の変化

「スマートグリッド」という言葉が使われるようになって久しい。スマートグリッドは、当初、情報通信技術等を駆使して、既存の電力システムと需要家（電力を含めたエネルギーの使用者）側が協調し、高効率、高品質、高信頼な電力システムの実現を目指すものとして提唱された。

2008年、当時の米国オバマ政権が環境問題とリーマンショック後の景気低迷への対応策として、スマートグリッド分野への政策的な大規模投資を発表し、日本を含めた各国がそれにほぼ追随する形で広く知れ渡ることになった。当時、海外では、最大電力需要の増加に対する電力供給能力の不足、再生可能エネルギーの導入のために必要な電力システムの対応等、国・地域によって様々な理由で、スマートメータをはじめとするスマートグリッド分野の技術に大きな

期待が寄せられた。他方、我が国の電力システムは、電力会社をはじめ社会全体で最大限のコスト削減と電気料金低減を図りながら、電力の安定供給を目的とした設備形成や系統運用を行っており、電力需給に特段大きな課題がなかった。すなわち、日本の電力システムは既にスマートさを具備していたといえる。

しかし、現在、我が国は、そのエネルギー／電力システムに関する歴史的な転換点にある。東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所の事故を受けて、エネルギー政策の見直しが行われ、今後の我が国のエネルギー供給を支えるエネルギー源として、再生可能エネルギーの導入機運が高まった。特に2012年7月の固定価格買取制度（FIT：Feed-in Tariff）の開始以降、太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入拡大が急速に進んでいる（図1）。また、パリ協定の採択を受け、2016年4月に内閣府は、エネルギー・環境イノベーション戦略を策定し、二酸化炭素（CO₂）の排出量削減に向けて、研究開発をより重点的・集中的に進めていくべき技術課題を明らかにして、再生可能エネルギーを含む革新技術の開発推進を打ち出

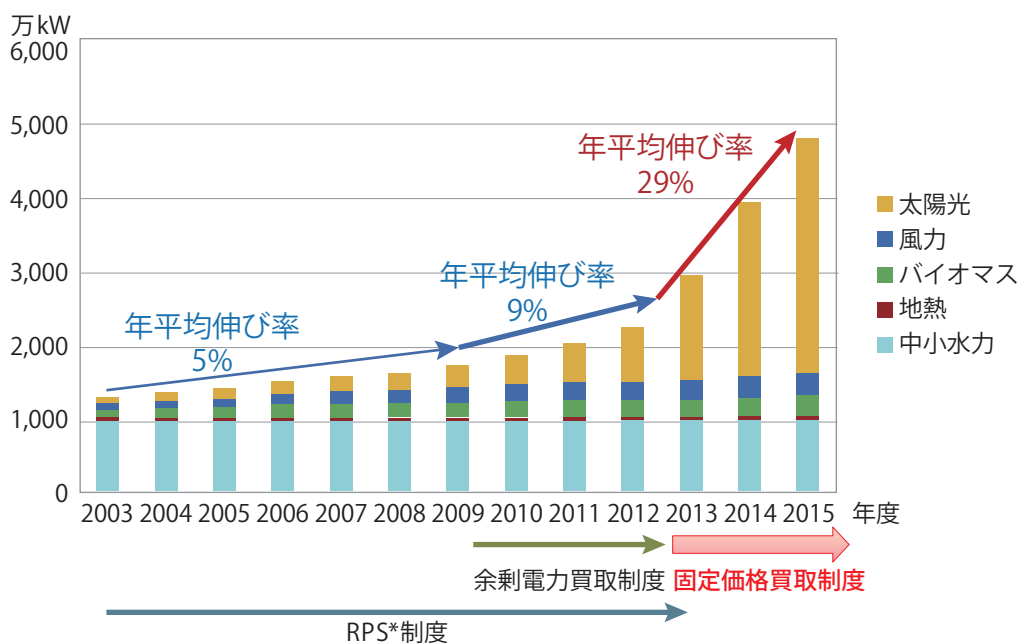


図1 再生可能エネルギー発電の導入推移

*RPS制度：「Renewables Portfolio Standard」の略称。

「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（平成14年法律第62号）」の通称。

出所：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会再生可能エネルギー導入促進関連制度
改革小委員会（第10回）資料（経済産業省、平成29年1月25日）

超分散エネルギーシステム(Integration Study)分野の技術戦略策定に向けて

している。

加えて、1995年から電力自由化と電力システム改革が開始され、2013年4月「電力システム改革に関する改革方針」の閣議決定により、広域系統運用の拡大、小売及び発電の全面自由化、法的分離方式による送配電部門の一層の中立性確保という3段階からなる改革の全体像が示された。2015年4月には、電力広域的運営推進機関が発足し、これまで、原則として地域(旧一般電気事業者の管轄エリア)ごとに行われていた電力需給の管理を、地域を越えて、より効率的かつ安定的に行う電力需給体制が強化された。そして、2016年4月には電力小売全面自由化が開

始され、2020年には送配電部門の法的分離が予定されている。

同様に1995年から都市ガスについてもシステム改革が始められ、2017年4月に小売の全面自由化、2022年にガス導管部門の法的分離が予定されている。また熱供給事業については、2016年4月に自由化された。

これらの改革は、需要家側の選択肢を広げるとともに、他地域・他事業から電力事業やガス事業、熱供給事業への新たなプレイヤーの参画を増加させることになる(図2)。また、蓄電池等の技術が需要家側に普及することに伴い、それら技術を活用した新たなビジネスの創造につながっている。

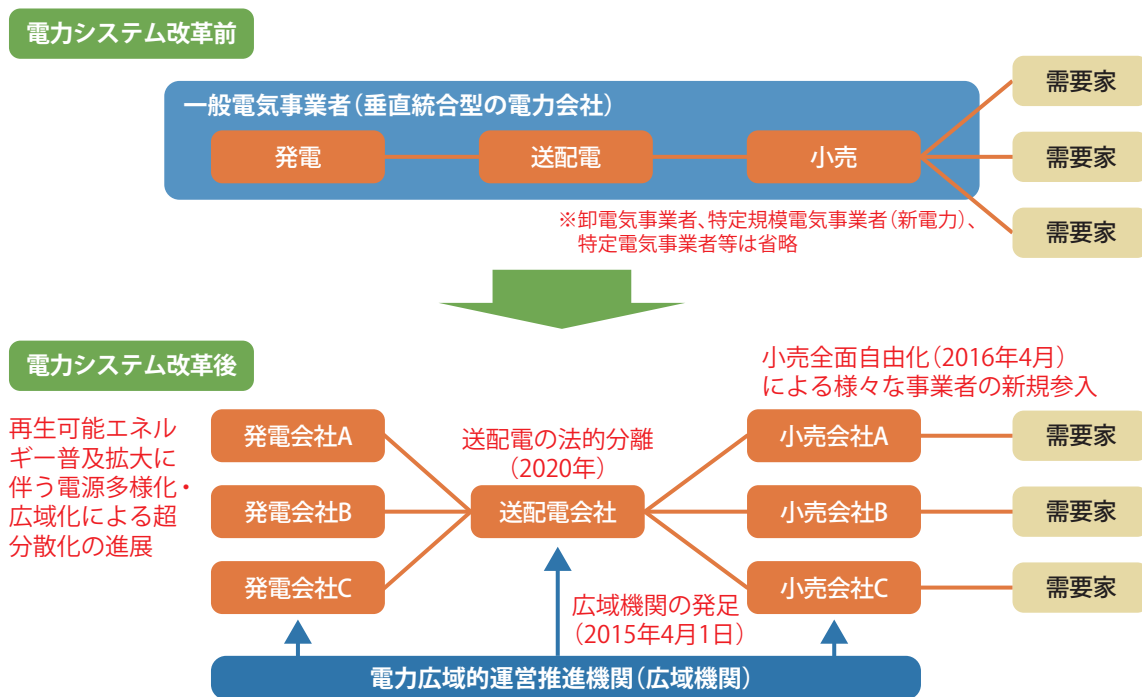


図2 電力システム改革によるプレイヤーの変化

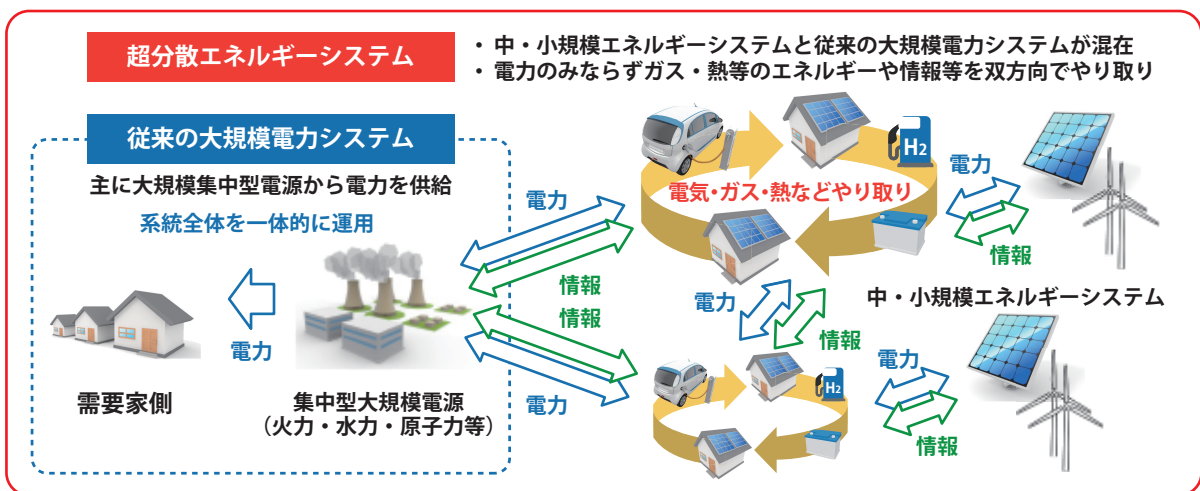
出所：NEDO技術戦略研究センター作成(2015)

超分散エネルギーシステム(Integration Study)分野の技術戦略策定に向けて

このようなエネルギーシステムをとりまく大きな変化の中で、我が国では、電力、ガス、熱等のエネルギーについて、エネルギー政策の基本的視点である安全性 (Safety) を前提に、エネルギーの安定供給性 (Energy Security) を第一とし、経済効率性の向上 (Economic Efficiency) による低コストでのエネルギー供給、環境への適合 (Environment) (以下、「3E+S」) を実現することが求められている。電力システムにおいては、省エネルギー、創エネルギーの両分野で3E+Sの実現に向けた大きな貢献が期待されている。今後は、既存のエネルギー需要の電化や新たな電力需要の創出等による需要拡大とともに、電力

システム改革による発電事業者、小売事業者の増加と、再生可能エネルギー普及拡大による電源の多様化、分散化がますます進むと考えられる。

このような、多種多様なエネルギー技術が広域かつ大量に分散設置される中・小規模エネルギーシステムと従来の大規模電力システムが混在し、電力のみならずガスや熱等のエネルギーや通信等の双方向のやり取りがなされる新しいエネルギーシステムを、本レポートでは「超分散エネルギーシステム」と呼ぶことにする。この超分散エネルギーシステムにおいて、様々な技術を統合・協調させて3E+Sを実現することが重要となる (図3)。



超分散エネルギーシステムを構成する個別技術の例

発電側を構成する技術

- 従来電源
 - ▷ 火力発電
 - ▷ 水力発電
 - ▷ 原子力発電 等
- 次世代火力発電
 - ▷ 複合発電 (石炭ガス化、ガスタービン)
 - ▷ 燃料電池複合発電 (石炭ガス化、ガスタービン)
 - ▷ 水素発電 等
- 分散型電源
 - ▷ 再生可能エネルギー (太陽光発電、風力発電等)
 - ▷ 燃料電池等の自家発電 等

送配電側を構成する技術

- 中央給電指令所システム
- 再生可能エネルギー発電出力予測システム
- 広域需給運用システム
- 流通設備・機器 (送配電線、変圧器、遮断器、開閉器、配電自動化システム、信号制御システム、自動電圧調整器、SVC・SVR等)
- 電力貯蔵システム
- ⋮

需要家側を構成する技術

- エネルギーマネジメントシステム (電力・熱)
- ヒートポンプ
- 電気自動車
- 電力貯蔵システム
- エレクトロヒート機器 (電気炉等)
- 燃料電池
- スマートメータ
- スマートインバータ
- 充電インフラ管理システム
- ⋮

図3 超分散エネルギーシステムのイメージ

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

1 太陽光発電、風力発電等の導入拡大 -2 に伴う電力系統上の諸問題と対策

(1) 電力系統上の諸問題

超分散エネルギーシステムでは、気象条件等によって時々刻々と発電出力が変動する太陽光発電、風力発電（以下、「変動性の再生可能エネルギー」）等の分散型電源の導入が拡大する。それに伴い、以下の①から④までに示す電力需給上の問題が懸念されており、地域によっては既に問題が発生しつつある。

①周波数調整容量の不足

変動性の再生可能エネルギーは、気象条件による出力の変動が電力系統の周波数を乱す要因となりうる。周波数の大きな変動は、大規模停電を引き起こす要因になるため、適正な周波数を維持しなければならない（図4）。我が国では、基準周波数（50Hz / 60Hz）を維持することが規定されており、主に火力発電や水力発電で変動する周波数を調整してきた。

優先給電ルールの下では、変動性の再生可能エネルギーによる発電量が増加した際、主として、一般送配電事業者の指令により、その増分に相当する火力発電等の出力を絞るか、火力発電等の運転台数を抑制することとなり、周波数調整力の不足等の問題が起こりうる。そのため、周波数調整容量の確保は大きな課題である。

なお、おおむね20分以内の短い周期の変動は、広く大量に分布した再生可能エネルギーの出力変動が互いに打ち消し合う「ならし効果」が電力系統全体で働くことが、過去の実証等で解明されている。したがって、このならし効果を考慮して周波数調整容量を確保することが重要である。

②余剰電力の発生

電力需要の小さい季節・時間帯に、変動性の再生可能エネルギーの発電電力が大きくなる気象条件がそろると、調整可能な他の電源の発電出力を抑制しても供給が需要を上回る状態、すなわち余剰電力が発生する（図5）。太陽光発電では特に4～5月の昼間帯、風力発電では冬期の夜間に発生頻度が高いと予想されている。

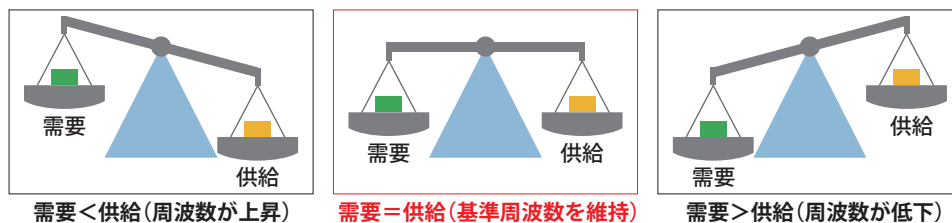


図4 周波数維持・変動のイメージ

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2017）

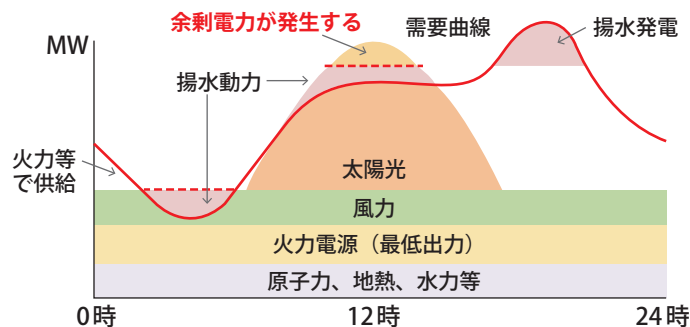


図5 余剰電力発生イメージ

出所：新エネルギー小委員会 系統ワーキンググループ第3回資料9（資源エネルギー庁，2014）
にNEDO 技術戦略研究センター追記（2015）

③みかけの需要の変動対応力不足(ダックカーブ問題)

変動性の再生可能エネルギーは、朝夕等の「みかけの需要^{※1}」の変動速度が大きく、従来発電機の出力上げ/下げ変化速度の限界を超過する問題が生じる。その際、電力の需要と供給のバランスを描いたカーブが「アヒル」の形に似ていることから、この問題は一般に「ダックカーブ問題」と呼ばれる。ダックカーブ問題は、太陽光発電導入量の増加に伴って顕著になる。既に米国カリフォルニアやイタリア等では顕著化しており、日本でも九州等で同様の問題が起り始めている(図6)。

④その他

①から③までに加え、送配電線の熱容量不足や、太陽光発電等の分散型電源から系統側への逆流流電力量が増大することによる連系点の電圧の適正值(101±6V)逸脱、インバータ電源の拡大による交流系統の慣性モーメントや同期化力の低下等の課題も挙げられ、既に問題が顕在化している地域もある。

(2) 電力系統上の諸問題への対応策

前節で述べた諸問題に対して、発電側から送配電側、

需要家側に至るまで様々な対応策が考えられる。

発電側、送配電側の対応策としては、既存の技術に加え、火力発電や水力発電等の集中型電源調整能力向上や再生可能エネルギーの発電出力予測精度の向上、電力貯蔵システムによる需給調整、再生可能エネルギーの発電出力制御(利用可能量超過分の抑制)、広域連系線を用いた広域需給運用等が挙げられる。

需要家側では、既存の技術に加え、蓄電池や電気自動車(EV: Electric Vehicle、ここではプラグインハイブリッドを含む)、時間的に変化する電力価格や報酬等に応じて需要家が自らの電力使用量を増減させるデマンドレスポンス(DR: Demand Response)等の技術が電力システム全体の需給調整力(柔軟性: flexibilityともいう)の向上に重要な役割を果たす^{※2 ※3}。

これらの対応策は、一律に構わずれば良いというものではなく、3E+Sを達成する観点から、どの対応策を、どこへどのように導入すれば良いか、様々な制約や条件、将来の不確定性を考慮した上で計画することが求められる。そして、その対応策の最適な導入計画等を策定する検討方法の1つが「Integration Study」である。

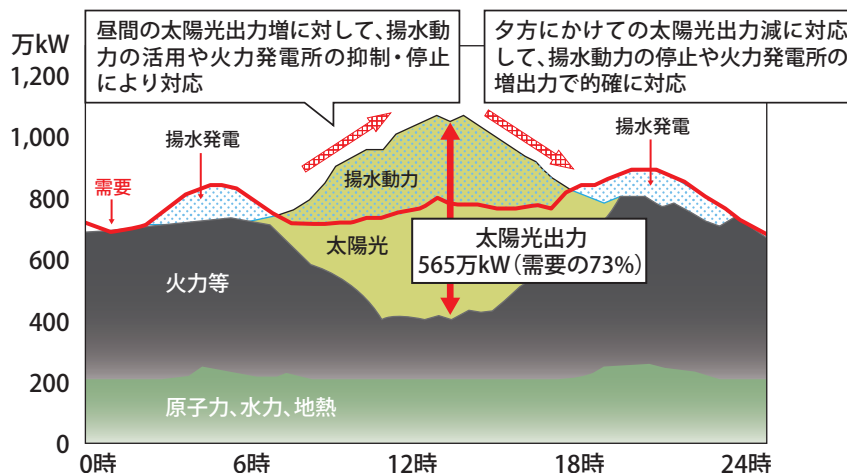


図6 九州本土の需給運用の状況(2017年4月30日)

出所:九州電力「2017年度 経営計画の概要〔詳細版〕」[※]

※ <http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0076/5472/iyr09lk3.pdf>

※1 需要家がつもつ太陽光発電や燃料電池等の自家発電量や蓄電池やヒートポンプによる蓄電等を足し合わせ、それをトータルの電力需要から差し引いた需要。系統運用者はこの需要量を、常に発電量とバランスさせるよう電力システム全体の需給調整を行っている。

※2 荻本和彦:低炭素社会における電力システム, IEE, 雑誌 Vol.129, No.1 特集解説, pp.16-19 (2009)

※3 池上貴志, 岩船由美子, 荻本和彦:電力需給調整力確保に向けた家庭内機器最適運転計画モデルの開発, IEEJ 論文誌, Vol.130-B, No.10 (2010)

1 -3 超分散エネルギーシステムにおける Integration Studyの概要

電力需給解析(電力システムの需給解析)・シミュレーションという言葉は広範な意味を含む。電力システムにおける同期安定度や電圧安定性といった送電の安定度合いの解析(過渡現象解析)から、特定期間における電力システムの発電コストや発電所の振る舞いの解析(プロダクションコスト最適化シミュレーション)、需要家に電力(kW)や電力量(kWh)を供給する系統の信頼度評価(アデカシー評価)

等、その目的と手法は多様である。すなわち、電力需給解析・シミュレーションには、マイクロ秒オーダーの電力システムの電氣的な物理現象の再現から、数年、さらには数10年オーダーで、発電等コストを算出する価値解析まで、様々な取組が存在する^{※4}^{※5}。

電力需給解析・シミュレーションは、経済性、安定供給性、環境性を実現するための設備/運用計画問題として、「オフライン^{※6}の設備計画」、「オフラインの運用計画」、「オンライン^{※6}の運用計画・需給制御」として整理できる(表1)。

表1 電力需給解析・シミュレーションの主な目的と特徴

オフライン	
種別	目的・特徴
設備計画 (短期:数年度)	設備構成に対し、経済性、信頼度、安定性等の目的関数と制約条件のもとで、電源、需要、送配電網等の将来の最適な設備構成を評価する。1~3年程度の範囲で計算を行い、発電計画を詳細に模擬し、平均発電コストや限界費用(マージナルコスト)の期待値を計算する。発電機の故障率等も通常は反映する。
設備計画 (長期:数十年単位)	発電所の建設における建設費の支出から、耐用年数間に亘る運転費、燃料費等までを含めて最適化する。
運用計画 (1日~1週間単位)	所与の設備構成において、入力情報を基に、経済性、信頼度、安定性等の目的関数と制約条件の下で、数日前、前日、当日、市場ゲートクローズ(当日の計画提出期限)後、リアルタイムでの電源の起動停止、出力の最適な運用を選択、評価する。分析期間は、1日から1週間単位の計算が基本となる。
オンライン	
種別	目的・特徴
運用計画/需給制御 (前日~当日~市場ゲートクローズ後~リアルタイム)	電力市場と連動した実際の運用スケジュールの中で、安定的な系統運用を行うため、厳しい時間制限の中で行われる。1日単位の運用計画が策定され、特に、翌日運用計画の策定に重きが置かれてきたが、最近では、当日、市場ゲートクローズ後、リアルタイムへと運用最適化と評価の対象が短期間化してきている。

出所：NEDO技術戦略研究センター作成(2017)

※4 第23回 CEEシンポジウム with NEDO(2016年8月9日)『これからの電力需給の解析・評価を考える』; https://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/html_seminar/s20160809.html

※5 第25回 CEEシンポジウム with NEDO(2016年10月19日)『電力需給解析とIntegration Study』; https://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/html_seminar/s20161019.html

※6 オンライン/オフラインは、電力需給運用システムへの接続有無を指す。

このうちIntegration Studyは、火力発電や再生可能エネルギー等の電源の他、蓄電池やEV、DR等の需要家側の技術をエネルギーシステムに統合した際の経済性や環境性、周波数安定性、過渡安定度等を電力需給解析・シミュレーションを用いて分析・評価する「オフラインの設備計画」、「オフラインの運用計画」のことを指す。

本レポートでは、変動性の再生可能エネルギーが大量導入される電力需給運用への影響をシミュレーションし、年間あるいは数年から数十年に亘るオフラインでの設備計画のためのIntegration Studyに関して、国内外の主要研究機関や系統運用機関で実施された事例を対象としている(表1赤字太線枠)。そして、Integration Studyは、電力のみならずガスや熱等も対象として実施されるものであるが、ここでは、3E+Sの実現に向けて、省エネルギー、創エネルギーの両分野で大きな貢献が期待されている電力システムを対象とする。

2章 超分散エネルギーシステムにおける Integration Studyの置かれた状況

2-1 Integration Studyにより期待できる市場規模

Integration Studyに用いられる電力需給解析・シミュレーション技術は、電力システム構築のための「基盤技術」であり、その技術自体が大きな市場規模を有するものではない。

ただし、世界のスマートコミュニティ関連市場^{※7}が2020年時点で約29兆円という予測があり(図7)、これらの技術開発、制度整備に使われる電力需給解析・シミュレーションの波及効果としては同規模の市場ポテンシャルが見込まれる。

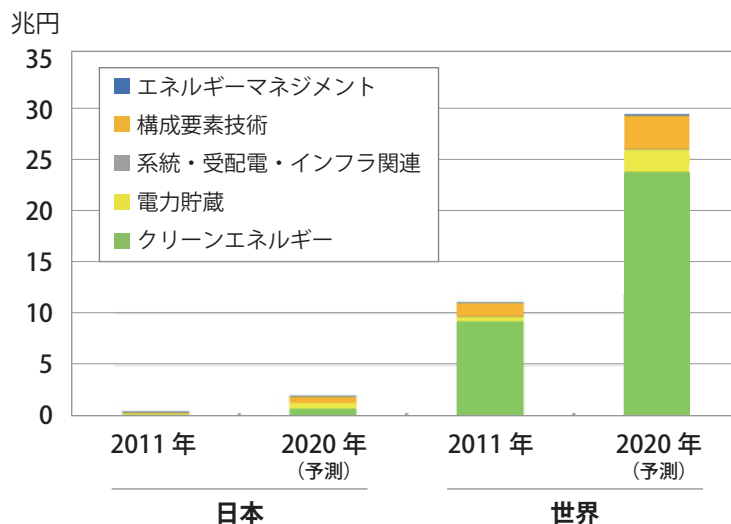


図7 スマートコミュニティ関連市場

出所：富士経済「スマートコミュニティ関連技術・市場の現状と将来展望2012 No.1：エネルギー編」(2012)

※7 HEMS (Home Energy Management System) やBEMS (Building Energy Management System) 等の「エネルギーマネジメント」、電力スマートメーター、ガススマートメーター、住宅用パワーコンディショナ等の「構成要素技術」、超電導電力ケーブル、柱上変圧器等の「系統・受配電・インフラ関連」、リチウムイオン電池等の「電力貯蔵」、太陽光発電、風力発電、燃料電池コージェネ等の「クリーンエネルギー」で構成される市場。

2 Integration Studyに係る論文発表・特許出願の状況

(1) 論文

Integration Studyに係る論文については、風力発電に関する発表論文件数が最も多く、最近では、太陽光発電やDR等の技術に関する発表論文件数が増えており、再生可能エネルギーや需要家側の技術の開発と普及に伴い、解析対象が多様化しつつあると考えられる(図8)。

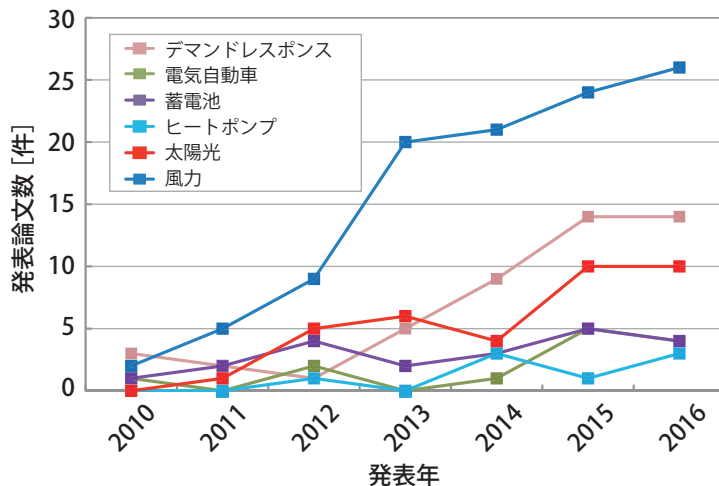


図8 Integration Studyに係る発表論文件数の推移

出所：Web of Science™ Core Collectionでの検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

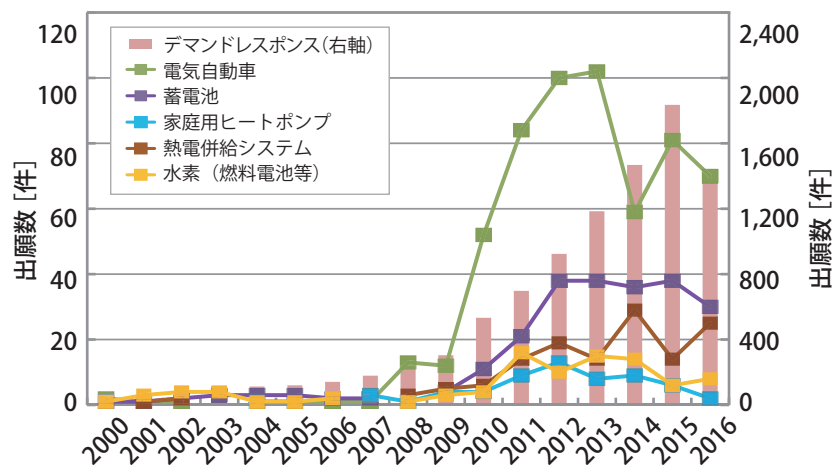


図9 需要家側の技術に関連する電力需給解析・シミュレーション技術の特許出願件数の推移

出所：Thomson Innovation™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

(2) 特許

需要家側技術に関連する電力需給解析・シミュレーションに係る特許出願は、2009年以降、EVやDR関連の出願件数が増加傾向にある(図9)。

なお、ここではオフライン/オンラインの設備/運用計画のための電力需給解析・シミュレーション技術全てを対象としており、DRに関しては、運用に用いられるインターフェイスや制御プログラムに関する特許出願も含まれる。そのため、図9の対象は、本レポートで主に対象としているIntegration Studyのための電力需給解析・シミュレーション技術に限ったものではない。

2 -3 Integration Study に係る国内外の取組状況

(1) 変動性の再生可能エネルギーの

大量導入に関する主なIntegration Study

①米国

再生可能エネルギー導入のためのIntegration Studyとしては、2010年、2013年、2014年に実施された米国エネルギー省(DOE: Department of Energy)傘下の国立再生可能エネルギー研究所(NREL: The National Renewable Energy Laboratory)とGE Energyによる米国西部における風力発電及び太陽エネルギー発電(太陽光発電、集光型太陽熱発電)の導入検討^{※8}が挙げられる。2013年、2014年の検討では、後述するPLEXOSを用いて、再生可能エネルギーが一定程度系統に接続された場合の経済性及びアデカシー等を含めた運用上の影響等を評価している。

この他、風力発電及び太陽光発電の導入検討として、2030年のミネソタ州を対象に、PLEXOSを用いて行われたGE Energy Consultingやミッドコンチネント独立系統運用機関(MISO: Midcontinent Independent System Operator)によるアデカシー評価結果^{※9}や、2015年から2029年までのテキサス州を対象としたテキサス電力信頼

度協議会(ERCOT: Electric Reliability Council of Texas)によるアデカシー、エネルギーコスト、CO₂等排出量の分析結果^{※10}、2026年の米国北東部地域を対象とした独立系統運用機関PJM(Pennsylvania-New Jersey-Maryland)による必要調整力、アデカシー、発電コスト、CO₂等排出量の分析結果^{※11}が、それぞれ2014年に公表されている。

②欧州

2015年、Fraunhofer IWES(独国)が2030年の欧州を対象としたアデカシー評価^{※12}を実施している。また、同年、フランス電力会社(EDF: Électricité de France)(仏国)は、再生可能エネルギーが大量に導入された2030年における、ドイツ、ベルギー、スペイン、フランス、イギリス、イタリア、ノルウェー、ポーランドの国別の必要調整力、系統の安定度等への影響、広域ネットワーク等に要求される役割、再生可能エネルギーや電力貯蔵等の市場価値等を後述するCONTINENTALモデルを用いて評価している^{※13}。

③日本

経済産業省による再生可能エネルギーの接続可能量の算定^{※14}や環境省による再生可能エネルギーの導入に応じた電力系統の見直し検討^{※15}が行われている。

※8 Western Wind and Solar Integration Study (2010); <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47434.pdf>

※9 Minnesota Renewable Energy Integration and Transmission Study (2014); <http://www.minnelectrans.com/documents/mrits-report.pdf>

※10 ERCOT Analysis of the Impacts of the Clean Power Plan (2014); <https://docs.wind-watch.org/ERCOT-Analysis-EPA-Clean-Power-Plan.pdf>

※11 PJM Renewable Integration Study (2014); <http://www.pjm.com/committees-and-groups/subcommittees/irs/pris.aspx>

※12 The European Power System in 2030: Flexibility Challenges and Integration Benefits (2015); https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/Ein-flexibler-Strommarkt-2030/Agora_European_Flexibility_Challenges_Integration_Benefits_WEB_Rev1.pdf

※13 TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE EUROPEAN ELECTRICITY SYSTEM WITH 60% RES (2015); <http://www.energypost.eu/wp-content/uploads/2015/06/EDF-study-for-download-on-EP.pdf>

※14 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 系統ワーキンググループ「再生可能エネルギー接続可能量の算定結果について」(2014); http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/shin_ene/keitou_wg/pdf/003_02_00.pdf

※15 2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会「エネルギー供給WG 現時点でのとりまとめ」(2012); <https://www.env.go.jp/council/06earth/y0613-11/mat01.pdf>

(2) 需要家側の技術を考慮した主な

Integration Study

需要家側の技術として、蓄電池やEV、DR等の技術についての系統導入時評価に関するIntegration Studyは現状では少ないが、表2に、それら需要家側の技術を考慮している主なIntegration Studyを示す。2016年に発表

されたDOEによるIntegration Studyでは、総発電コスト削減量と短期限界費用^{※16}によるDR事業者が市場から受け取る収益の2つの観点で、2020年の米国西部系統内における蓄電池やDRの系統統合による潜在的価値を定量的に評価している^{※17}。

表2 需要家側の技術を考慮した主なIntegration Studyの事例

No.	文献名	実施者(発表年)	蓄電池	EV	DR
1	Western Wind and Solar Integration Study (米国西部系統を対象とした風力発電や太陽光発電のIntegration Study)	DOE NREL, GE Energy (米) (2010)		✓	
2	Midwest Independent Transmission System Operator Energy Storage Study (米国MISOの管轄地域を対象とした電力貯蔵技術のIntegration Study)	EPRI* (米) (2012)	✓		
3	Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart (太陽光発電の大量導入により米国カリフォルニア州で顕在化するダックカーブの問題に対する対応策の検討)	DOE NREL (米) (2015)	✓	✓	✓
4	Low Carbon Grid Study: Analysis of a 50% Emission Reduction in California (カリフォルニア州を対象とした50%CO ₂ 排出削減する低炭素化技術が系統に与える影響の評価)	DOE NREL (米) (2016)	✓	✓	✓
5	Georgia Power Company's 2016 Integrated Resource Plan and Application for Decertification of Plant Mitchell Units (米国 Georgia Power Companyの再生可能エネルギー電源の調達、デマンドサイドマネジメントプログラム等の計画に関する認証を得るための定量評価)	Georgia Power Company (米) (2016)			✓
6	Demand Response and Energy Storage Integration Study (米国西部系統を対象としたDRやエネルギー貯蔵のIntegration Study)	DOE (米) (2016)	✓		✓

* EPRI : 「Electric Power Research Institute, Inc.」の略称。

出所：市場・需要家等を考慮した電力システムの需給解析に係る国内外動向調査及び技術開発の方向性・要件の検討（構造計画研究所／NEDO，2016）を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2017）

※16 短期断面での生産量の増加分一単位あたりの総費用の増加分。ここでは、燃料費や人件費、メンテナンス費等のランニングコスト。

※17 Demand Response and Energy Storage Integration Study (2016); <http://energyinstitute.ucd.ie/wp/wp-content/uploads/2016/02/DOE-EE-1282.pdf>

2-4 長期のIntegration Studyにおける電力需給解析・シミュレーションモデル

数年から数十年に渡る長期の計画を主な目的としたIntegration Study (以下、「長期のIntegration Study」)における電力需給解析・シミュレーションは、様々な条件の下で、経済性や環境性、供給信頼度等の指標とその最適解を求めるものである。このとき、「電力需給解析・シミュレーションモデル」は、将来の需要想定値を与える「需要家側モデル」、容量、燃料費、O&M費、建設費、工期、計画外停止率等をパラメータとした「統合検討対象のモデル」(需要家側モデルに含まれる場合がある)、そのほか目的に応じて作成される故障確率を考慮した送電設備モデル等の「その他のモデル」と統合して扱われる(図10)。

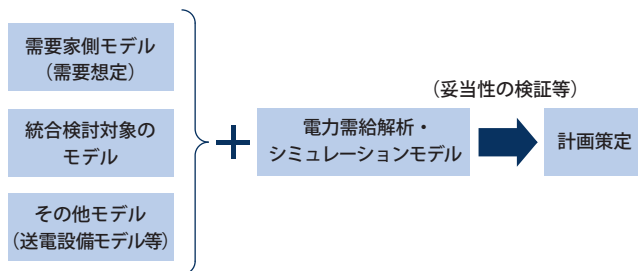


図10 長期のIntegration Studyイメージ

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

本節では、米国や欧州における長期のIntegration Studyに活用される電力需給解析・シミュレーションモデルの事例と、表2に示されたIntegration Studyにおいて分析対象となる個々の需要家側の技術のモデル化方法を紹介する。

(1) 長期のIntegration Studyに用いられる

電力需給解析・シミュレーションモデル事例

Integration Studyに用いられる電力需給解析・シミュレーションモデルでは、運用・発電コスト最適化のための「プロダクションコスト最適化モデル (Unit Commitmentモデル+Economic Dispatchモデル)」や設備投資最適化のための「発電機拡張計画モデル (Capacity Expansionモデル)」を用いることが多い。

長期のIntegration Studyを実施するためには、運用・発電コスト最適化機能と設備投資最適化機能から構成されるシミュレーションを実施することとなる。それら機能を兼ね備えた主な電力需給解析・シミュレーションモデルの事例として、CONTINENTAL^{※18}、PLEXOS^{※19}、Strategist^{※20}の3つがある。各モデルの計算手法概要を表3に示す。

表3 CONTINENTAL、PLEXOS、Strategistの計算手法概要

モデル名/ 商用・非商用	運用・発電コスト最適化機能	設備投資最適化機能	需要家側モデル
CONTINENTAL / 非商用	分枝限定法 (混合整数計画問題)	ヒューリスティクス	発電機モデル (時系列)
PLEXOS / 商用	分枝限定法 (混合整数計画問題)	詳細不明	発電機モデル (時系列)
Strategist / 商用	動的計画法	動的計画法	発電機モデル (時系列)

出所：市場・需要家等を考慮した電力システムの需給解析に係る国内外動向調査及び技術開発の方向性・要件の検討 (構造計画研究所/NEDO, 2016) を基にNEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

※18 Infrastructure planning in power systems at EDF R&D, from theoretical considerations to operational tools and current practices: an investor's perspective (2015); <http://www.ieee-pes.org/presentations/gm2015/PESGM2015P-003069.pdf>

※19 Capacity Expansion Planning (2015); energyexemplar.com/wp-content/uploads/2015/03/PLEXOS-ADGO-2015.ppsx

※20 Strategist: Strategic Planning Solution (2016); https://www.pnm.com/documents/396023/3306887/Strategist+Presentation+Nov+10+2016_Post.pdf/9e0c91f9-a78b-4d5e-8fd1-bd13be018241

① CONTINENTAL

CONTINENTALは、もともとは最適な火力発電機構成を得るために、EDFグループの研究開発部門(EDF R&D)により開発された電力需給解析・シミュレーションモデルである。最近では、再生可能エネルギー大量導入時の欧州の電力システムの技術的・経済的分析等に活用されている。

フランス国内だけでなく欧州の長期(10年)に渡る将来想定シミュレーションのためには、再生可能エネルギーの出力等の不確定性の高い変数を取り扱う必要があり、将来の電力需要、再生可能エネルギー発電量、水力発電所への水の流入量、燃料費、発電機停止状態等の不確定要素を考慮することができるようにモデル化されている。

② PLEXOS

PLEXOSは、Energy Exemplar(豪州)により開発された電力需給解析・シミュレーションモデルである。10年以上の長期を対象として、設備投資コストと運用コストの和が最小となるような設備投資計画や最適なメンテナンス計画が算出可能であり、発電機起動停止の運用、設備投資計画、リスク評価、メンテナンス計画、市場分析、送電ネットワークに関する分析等多様な用途で利用可能である。地域間送電線の拡張、新規電源の追加、廃止電源候補の選定、再生可能エネルギーの出力等不確定要素等を考慮することができるようにモデル化されている。PLEXOSは、研究機関、政府機関、エネルギー関連企業、コンサルティングファーム等幅広く利用されている。

③ Strategist

Strategistは、ABBグループのVentyx(米国)により開発された、主に電力会社での20～30年先の設備投資計画向けの電力需給解析・シミュレーションモデルである。1980年にPROSCREEN IIとして開発された後、2000年からStrategistと改名して販売されている。現在、米国の規制下の電力会社が策定を求められる統合資源計画(IRP: Integrated Resource Planning)分析や提案依頼書(RFP: Request For Proposal)評価を行うために

用いられている。

発電機の故障確率等の不確定要素は考慮できるようにモデル化されているが、1時間単位での負荷配分モデルではなく、起動費や出力変化速度等も考慮するようにモデル化されていないため、詳細なプロダクションコスト最適化シミュレーションはできず、運用費の分析には向かない。

(2) 長期のIntegration Studyに用いられる

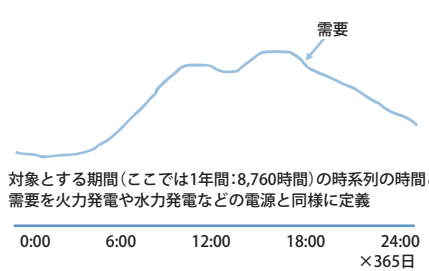
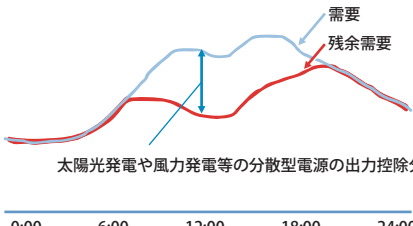
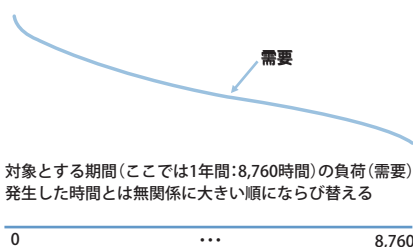
需要家側の技術に関する個別モデル事例

① モデル化方法の分類と事例

需要家側の技術については、需要家数の多さや、アグリゲータ^{*21}による制御、電力の需給状況に応じた電気料金設定により電力消費を促進又は抑制しようとするダイナミックプライシングによる多様な電力消費パターン等を考慮したモデルを構築することが求められる。需要家側の技術に関するモデルとしては、「工学的アプローチ」による「発電機モデル」と「残余需要モデル」の2つが、「統計的アプローチ」による「統計的モデル」がある(表4)。工学的アプローチは、モデル化対象技術の工学的メカニズムやプロセスに注目してモデルを構築する方法であり、得られるモデルは時系列モデルである。一方、統計的アプローチとは過去の実績等のデータを統計的に処理してモデルを構築する方法であり、得られるモデルは非時系列モデルである。

*21 多数の需要家側の太陽光発電等の分散型電源や蓄電池、EV等の技術、需要を統合して制御し、電力の需給調整力やサービスを提供する事業者。小売事業者を含む。

表4 需要家側技術のモデル化方法

アプローチ	モデル名	概要																		
工学的 アプローチ	発電機モデル	<ul style="list-style-type: none"> 対象とする期間(1年間、10年間、等)の単位時間ごとの需要家側の技術の出力やその変化速度等の特性を火力発電や水力発電等の電源と同様に定義する時系列のモデル(図11)。 DRやエネルギー貯蔵等の需要削減やピークシフトを行うことができる需要家側の各種技術を、仮想的な発電機と見なし、潜在的なボリュームを見積もった上で、他電源同様に、反応時間、出力変化速度、反応継続時間等の特性を定義し、電力需給解析モデルに組み込む。 メリット:需要家側の技術の経済性を他電源と直接比較できる点 デメリット:時々刻々と変動する需要やその応答特性等を詳細にモデル化できないこと 等 <div style="display: flex; align-items: center;"> <table border="1" style="margin-right: 20px;"> <caption>【入力データ例】</caption> <thead> <tr> <th></th> <th>蓄電池</th> <th>EV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>定格出力</td> <td>XXX [MW]</td> <td>YYY [MW]</td> </tr> <tr> <td>最適出力</td> <td>XXX [MW]</td> <td>YYY [MW]</td> </tr> <tr> <td>出力変化速度</td> <td>XXX [MW/min]</td> <td>YYY [MW/min]</td> </tr> <tr> <td>コスト</td> <td>XXX [JPY/MWh]</td> <td>YYY [MW/MWh]</td> </tr> <tr> <td>⋮</td> <td>⋮</td> <td>⋮</td> </tr> </tbody> </table>  </div> <p style="text-align: center;">図11 発電機モデルのイメージ</p>		蓄電池	EV	定格出力	XXX [MW]	YYY [MW]	最適出力	XXX [MW]	YYY [MW]	出力変化速度	XXX [MW/min]	YYY [MW/min]	コスト	XXX [JPY/MWh]	YYY [MW/MWh]	⋮	⋮	⋮
		蓄電池	EV																	
定格出力	XXX [MW]	YYY [MW]																		
最適出力	XXX [MW]	YYY [MW]																		
出力変化速度	XXX [MW/min]	YYY [MW/min]																		
コスト	XXX [JPY/MWh]	YYY [MW/MWh]																		
⋮	⋮	⋮																		
残余需要モデル	<ul style="list-style-type: none"> 蓄電池、DR等の需要家側の技術によるピークシフト、需要創出や削減の変動量を加味して対象とする期間(1年間、10年間、等)の需要曲線(残余需要)を作成し、電力需給解析モデルに組み込むモデル(図12)。 メリット:比較的簡便に実行できること、単位時間あたりの需要の不確実性の高さを見積もることが可能であること 等 デメリット:工学的なモデル化とアップスケーリングのためのデータが必要な点。一般にはプロダクションコスト最適化の対象にならないため、他電源との経済性が比較できない点 等 <div style="display: flex; align-items: center;">  </div> <p style="text-align: center;">図12 残余需要のイメージ</p>																			
統計的 アプローチ	統計的モデル	<ul style="list-style-type: none"> 過去の実績等のデータを統計的に処理して、対象とする期間(1年間、10年間、等)の負荷持続曲線を構築するモデル。例えば、過去のDRプログラムによる価格データや曜日・天候等の各種データを用いて、実績としての負荷プロフィール(非時系列モデル)を作成する(図13)。 メリット:実データに基づいて作成するモデルであるため、信頼性が高い。重回帰式等を作成した場合に係数を比較することで各変数の感度を把握可能。 デメリット:実証試験や調査によるデータ取得が必要となり時間と手間がかかる点 等 <div style="display: flex; align-items: center;">  </div> <p style="text-align: center;">図13 負荷プロフィールのイメージ</p>																		

出所: NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

通常、需要家側の技術を評価するIntegration Studyにおいて、これらモデルは前述の(1)で示した電力需給解析・シミュレーションモデルと統合して使用されるが、表2に示したIntegration Studyは、全て発電機モデルを適用している。残余需要モデルと統計的モデルを統合して実施したIntegration Studyの例は確認できていないが、それぞれのモデル化手法としては、電力需給に活用されるPEV関連の潜在的な費用便益の分析の事例^{※22}や、テキサス州におけるDR容量の分析の事例^{※23}がある。

なお、工学的アプローチの中にも部分的に統計的な処理を含んでいる場合があるため、明確にどちらか一方に分類することは困難である。

②入力データソース

表4に示したIntegration Studyで用いられる発電機モデルへの入力データとしては、WECC (Western Electricity Coordinating Council)のTEPPC (Transmission Expansion Planning Policy Committee)のデータ^{※24}やCEC (California Energy Commission)のデータ^{※25}等が活用されている。WECCやCECは各ステークホルダーからデータを収集するスキームを構築しており、ステークホルダーが提供するデータを集約して公開することにより、共通の前提条件に基づいて米国における電力需給解析・シミュレーションを行うことができるようになっている。

我が国では、太陽光発電や風力発電の出力データは、気象庁アメダスのデータ等から疑似的に作成される事例が多いが、実績データの収集等の例はまだ少ない。

※22 Multi-Lab EV Smart Grid Integration Requirements Study (2015); <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63963.pdf>

※23 2013-2014 Retail Demand Response and Dynamic Pricing Project (2013); http://www.ercot.com/content/services/programs/load/2013-2014_DR_and_PriceResponse_Survey_Analysis_FinalReport_P.pdf

※24 Transmission Expansion Planning Policy Committee, WECC; <https://www.wecc.biz/SystemAdequacyPlanning/Pages/Datasets.aspx>

※25 CALIFORNIA COMMERCIAL END-USE SURVEY(2006); <http://www.energy.ca.gov/2006publications/CEC-400-2006-005/CEC-400-2006-005.PDF>

3章 超分散エネルギーシステムにおける Integration Study の課題

本章では、前章までの電力需給解析・シミュレーション及び Integration Study の動向と比較を踏まえて、長期の 3E+S の実現に向けた Integration Study の課題について述べる。

(1) 超分散エネルギーシステムにおける長期の

Integration Study の実施

米国や欧州では、風力発電や太陽光発電等再生可能エネルギーの電力系統への統合のみならず、蓄電池、EV、DR 等の需要家側の技術を電力系統に統合する検討を始めている。ただし、変動性の再生可能エネルギーが大量に導入された場合の電力システムについて、蓄電池、EV、DR 等の需要家側の技術の詳細なモデリングを含んだ長期の Integration Study は、まだ実現していない。

長期の 3E+S の実現に向けて、再生可能エネルギーの導入拡大、需要家側の技術の拡大、新たな電力取引市場の創設等を見据えつつ、超分散エネルギーシステムにおける蓄電池、EV、DR 等の需要家側の技術の詳細なモデリング、長期を対象とした電力需給解析・シミュレーションモデルが必要である。そして、それらを統合して、系統へ導入される技術の価値や市場創設の価値等を定量的に明らかにする Integration Study を実施する必要がある。

(2) 需要変動や DR の応答特性等を含む需要家側の

詳細モデルと長期を対象とした

電力需給解析・シミュレーションモデルとの統合

長期の Integration Study における、電力需給解析・シミュレーションモデルでは、プロダクションコスト最適化機能及び発電機拡張計画機能を兼ね備えたモデルにより、再生可能エネルギーの出力等の不確定要素を考慮し、運用・発電コストと設備投資を同時最適化しなければならない。

さらに、需要家側技術の系統における価値を適切かつ正確に評価するためには、需要変動、DR の応答特性等を含む詳細な需要家側技術のモデリング、プロダクションコスト最適化機能及び発電機拡張計画機能を兼ね備えた長期の電力需給解析・シミュレーションモデルへの統合が課題である。

(3) 蓄電池、EV、DR 等需要家側の技術の

応答特性等のモデリングに必要となるデータの蓄積、データベースの確立・維持管理

長期の電力需給解析・シミュレーションを詳細に実施するためには、モデルの作成だけでなく、モデルへの入力データも必要である。しかし、我が国においては、モデルへの入力すべきデータの収集・蓄積ができていない。

したがって、再生可能エネルギーの発電出力予測データに加え、蓄電池、EV、DR 等需要家側の技術の応答特性等のモデリングに必要なデータを蓄積し、データベースを確立・維持管理することが課題である。

4章 おわりに

東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所の事故や温暖化対策の機運に端を発して、太陽光発電、風力発電等の再生可能エネルギーの更なる導入が加速され、それに加え、相次いで原子力発電所が稼働停止した。さらに、1995年から開始された電力自由化と電力システム改革が深化し、需要家側の選択肢の増加と、需要家側への蓄電池、EV等の技術の普及が起り始めている。また、高度成長期に建設し、我が国の電力の安定供給に貢献してきた発電設備や送電設備、変電設備の老朽化が進んでいる。

このような、世界でも稀にみる電力システム全体の需給環境の変化と、それに起因する系統上の諸問題に対して、我が国は発電側から送配電側、需要家側に至る全ての領域で、3E+Sを実現するために様々な技術対応が求められている。すなわち、既存のエネルギー／電力システムに関する資産や技術の最大限の活用と、社会インフラとして3E+Sを実現する持続的な超分散エネルギーシステムの進化を、技術の開発や導入に加え、適切な制度の整備や改善と併せて、計画的に進めることが重要である。

そのためには、蓄電池、EV、DR等の需要家側の技術の応答特性等を含めた詳細モデルを確立し、長期的に3E+Sを実現する超分散エネルギーシステムについて定量的な議論を深めることが必要となる。その際、長期を対象とした電力需給解析・シミュレーションモデルを確立させるためのデータの蓄積等の検討も併せて行う必要がある。

EVや蓄熱槽を伴う業務用・産業用のヒートポンプ、工場の電気炉などの需要家側の機器が"flexibility"として電力システムの中で適切に活用されることで、優先給電ルールの下で出力を絞らざるを得なかった火力発電を効率よく運転することができ、これにより、再生可能エネルギー発電の導入拡大と相まって、日本全体の輸入燃料費

を削減するだけでなく、国民負担を低減できる蓋然性が高まる。また、従前単価の安い夜間電力を積極的に使用してきたエレクトロヒート関連産業では、現在、夜間電力と昼間電力の価格差が減少しつつあり、より安価な電力が求められている。

この要望を満たす可能性のあるものが変動性の再生可能エネルギー発電の余剰電力の活用や自家発電として高い発電効率と高耐久を実現する燃料電池等の技術であり、自動DRやセンサなどの技術によってこれらが工場内で最適に制御されることにより、工場の運用が改善されて省エネルギー・低コスト化が実現できるのみならず、再生可能エネルギーがエンジンとなって、我が国の産業をますます活性化する可能性が考えられる。これらの可能性や価値を、詳細モデルを用いて定量的に示し、必要な技術開発等の取組や制度を検討して計画するのがIntegration Studyである。

社会実装するための制度等を組み合わせて、長い時間の流れの中で、様々な技術を確立して普及させることの価値を評価し、導入選択・計画を行うIntegration Studyが、我が国において一層活発になることが望まれる。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol. 19

超分散エネルギーシステム(Integration Study)分野の技術戦略策定に向けて

2017年7月14日発行

TSC Foresight Vol.19 超分散エネルギーシステム分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター(TSC)

■ センター長 川合 知二

■ センター次長 矢島 秀浩

■ エネルギーシステム・水素ユニット

・ユニット長 矢部 彰

・統括研究員 渡邊 重信 (2016年3月まで)

板倉 賢司

・主任研究員 梅田 信雄 (2015年6月まで)

西 順也

・研究員 小笠原有香 (2017年6月まで)

川上 博司

増田 美幸

山下 尚人

・フェロー 荻本 和彦 国立大学法人東京大学 生産技術研究所 人間・社会系部門
(2017年3月まで) エネルギー工学連携研究センター 特任教授

・フェロー 黒沢 厚志 一般財団法人エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長

● 本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

● 本書は以下URLよりダウンロードできます。
<http://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。