

風といった事故を未然に防ぐことが難しい自然災害に対しても、変電所における自動再閉路や配電自動化等を用いて、速やかに故障区間を限定して健全区間を早期復旧するなど、停電区間や停電時間の縮小化が図られてきた。

しかしながら、東日本大震災では、原子力だけでなく大型火力発電所など大規模電源の脱落に伴う供給力不足から関東エリアにおいて計画停電が余儀なくされた。その後、原子力発電所の長期停止に伴い、代替火力発電を主体として需給調整を実施しているが、2011年夏季には東京電力管内において電気事業法に基づく使用制限（15%の節電義務）をはじめとして、全国でも夏や冬の需給ピーク時は未だ需給状況が厳しく、また、老朽化した発電所の故障のリスク、燃料費の高騰、CO₂排出量増加などの課題も顕在化している。

それら環境負荷の削減策及び供給力確保など解決策の一環として、再生可能エネルギー電源の導入や、新たな供給力確保としてコジェネや燃料電池など需要家側での発電設備の導入、さらには、供給力と等価な価値としての需要家側（スマートハウスやスマートビル等）での需給逼迫時のピークカットや需要抑制などの需要応答（デマンドレスポンス）が、今後一層拡大する傾向にある^{4)~8)}。これらは、需給面での貢献が期待される一方、系統内の電気の流れ（潮流）や電圧の分布が複雑になり、電力品質（周波数、電圧）を確保する上で課題となることから、系統側と需要家側の情報通信技術（ICT）を活用した連携やグリッドの監視・制御技術のさらなる高度化が求められている。

3. 各国のスマートグリッドへの取り組み

スマートグリッドの導入の契機、目的、ならびに対象は、エネルギー供給政策、エネルギー戦略、環境政策、経済成長戦略およびその進展に深く関わっていることから、それぞれの国で異なる。日米欧の比較を表一1に示す。

(1) 米国の取り組み

米国では世界に先駆けて一部の州で電力の小売り自由化が行われるなど電力自由化が進展している。一方で電力会社の数が多い米国では、それぞれの会社が独自に送電線整備を進めてきたことから、送電線の混雑がひどく、送配電ロス率の悪化、電力品質が問題となっていた。加えて電力自由化の影響により多大な設備投資が必要となる電力ネットワークの増強に対する投資は停滞しており、設備の老朽化進行も加わり、供給信頼度が低下していた。2003年8月のニューヨークを含む北米大停電では、東京電力の全供給エリアに匹敵する約6000万kW（完全復旧までには2日以上）が停電し、約5000万人に影響を与え、先進国の中でも停電時間の長さが際だっていた。その被害額は約50億ドルにもおよび、電力の安定供給能力の強化が喫緊の課題となっていた。

米国では今後も堅調な人口増加が予想され、需要が伸び続ける一方で、発電設備、送配電設備への投資は遅れていることから、これら需要増へ対応しつつ、供給信頼度を維持する方策の1つとして需要抑制やピークカットや、配電自動化など設備高度化への期待が高

表一1 日米欧でのスマートグリッドに関する比較

	日本	米国	欧州
契機	・ポスト京都議定書 ・太陽光発電の大量導入 ・東日本大震災による大規模電源停止（2011年3月）	・発電・送電設備のインフラ不足 ・送電混雑多発 ・大規模停電（2003年8月）	・風力発電の大量導入 ・大規模停電（2006年11月）
主目的	・太陽光発電の大量導入に伴う環境産業育成 ・電力の安定供給能力維持 ・地球温暖化ガス排出量削減	・ピーク需要削減 ・需要家情報の積極活用による新たな情報産業育成 ・電力の安定供給能力強化 ・地球温暖化ガス排出量削減	・風力発電の大量導入に伴う環境産業育成 ・電力の安定供給能力強化 ・地球温暖化ガス排出量削減
主対象	・発送電系と需要家を含む配電系	・需要家を含む配電系が中心 ・マイクログリッド	・送電系と需要家を含む配電系が別々に対象 ・マイクログリッド
優位技術	・太陽光発電技術 ・省エネ技術 ・蓄電技術 ・監視・制御技術	・情報通信技術（ICT）	・風力発電技術 ・太陽光発電技術 ・標準化技術

まっていた。このような背景から、ICT技術を活用し、需要家の電力消費を直接的、あるいは間接的に制御することにより、送配電線の混雑等を回避し、電力の安定供給の確保を図ろうとしている。総じて言うと、電力供給インフラの整備不足を、高需要時期に電力使用量を抑制することにより補うという意味でスマートグリッド、および、ダイナミックプライシング（価格変動設定）の適用に向けたスマートメーターが注目されている。

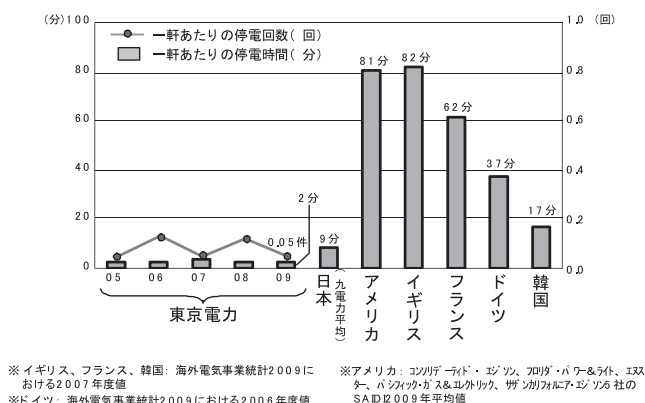
(2) 欧州の取り組み

欧州では図—2に示すように、大陸に面的に広がる複雑なメッシュ状のネットワークを構成しており、電力ネットワークは国際連系しつつ、数十～百程度の送電系統運用者が管理している。欧州では電力自由化のため、広域的な電力取引が活性化されている。さらに、CO₂排出量の抑制やエネルギー安全保障の両立を目的として再生可能エネルギーの導入が促進されており、特にウインドファームを主体とした大規模な風力発電の連系がなされてきた。一方で、風況に伴う不規則な風力発電電力が大量に電力ネットワーク内に流れ込むことにより、電力ネットワーク全体の安定供給運用が難しくなってきた。2006年には、風力発電出力の想定はずれがきっかけで、ドイツ、フランス、イタリアなど欧州の11か国で大停電（約1700万kWの停電が2時間）が発生している。欧州では電力の供給力拡大と環境政策の双方の推進のために、風力発電の大量導入をさらに進めており、この広域的なネットワークの監視・制御の高度化などスマートグリッドの技術開発を中心とした安定供給を維持する取り組みがなされている。

(3) 日本の取り組み

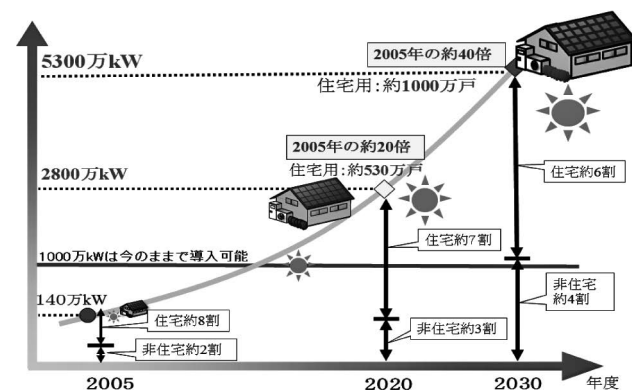
日本の電力系統は図—2に示すようにシンプルな「くし形」に連系しているため、主幹系統の潮流（電気の流れ）の監視・制御は容易である。また、早くから配電自動化や系統安定化保護リレーなどICTが活

用されており、設備建設・保守が適切に行われてきたことなどから、図—3に示すように各国と比較して高い供給信頼度となっている。

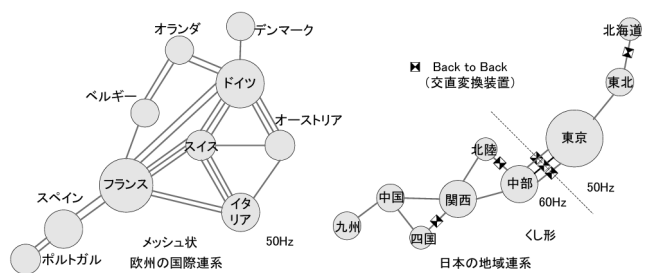


図—3 日米欧での供給信頼度比較

日本でのスマートグリッド議論のきっかけは、2008年に発表された福田ビジョンに掲げられた大胆な再生可能エネルギー拡大の目標であったと考えられる。CO₂の排出削減や新たな産業の創出を目的に、国策として再生可能エネルギー導入量の目標（図—4参照）が出されるなど、環境面を配慮した再生エネルギー導入が着目されており、東日本大震災以降は、再生可能エネルギーの固定価格買取制度の施行でさらに加速している。



図—4 日本の太陽光発電導入拡大の目標値
(出典：新エネルギー部会資料)



図—2 欧州と日本の電力ネットワーク
(出典：電力系統利用協議会)

日本の再生可能エネルギー導入の特徴は、補助金や高い買い取り価格の設定などの理由から、住宅用太陽光が導入量の大半を占めている。これらは主として配電系統に連系されるが、今後の急激な増加により配電系統の電圧や需給バランスを崩す恐れがあることなどが指摘されている。このことから再生可能エネルギーの導入拡大と電圧を含む電力品質の両立が急務となり、スマートグリッド、スマートメーターへの期待が

高まっている。

4. 太陽光発電の多数台連系に伴う課題と対策

前述のように太陽光発電は、補助金や買い取り価格面での優遇などの政策により日本において普及が顕著である。ただし、太陽光発電は出力変動電源であり、導入が進むと「配電系統における電圧上昇」、「周波数調整力の不足」といった電力ネットワークへの連系上の課題が発生する。住宅用太陽光発電の導入期には電圧逸脱問題が発生し、普及期には電圧逸脱問題に加えて周波数逸脱問題が生じる⁴⁾。これらの課題と対策を以下に概説する。

(1) 配電系統における電圧上昇と対策

配電系統では、電気事業法第26条に基づき受電点を適正電圧（ $101 \pm 6 \text{ V}$ 、 $202 \pm 20 \text{ V}$ ）で供給することが規定されている。太陽光発電の連系量が増加して、電気の消費量より発電量が上回ると、図—5に示すように太陽光発電設置箇所から配電系統への電気が逆向きに流れ、配電系統の電圧が上昇する。連系箇所や連系量によっては、配電系統の電圧が適正電圧を逸脱する恐れがあり、太陽光発電自身も結果として出力抑制機能（電圧上昇抑制機能）の動作が頻発し、発電稼働率低下を招くこととなる。

また、電力会社では現状、配電用変電所の引き出し口で計測している電圧・電流および力率を基に配電系統の電圧管理を実施している。太陽光の連系量が増加すると、配電系統の末端部など逆潮流が発生し、結果として電圧上昇するなど配電系統内の電圧、電流分布が複雑になり、電圧管理や配電事故復旧が困難に成

恐れがある。

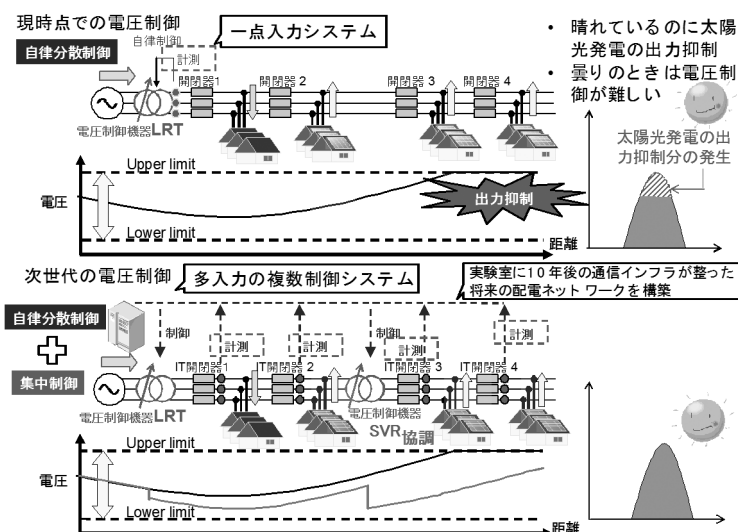
そこで電力会社では現地データ（電圧、電流、力率、事故情報など）の計測可能なセンサ内蔵開閉器（IT開閉器）や、需要家地点の電圧情報を取得可能なスマートメーターの計画的な導入・展開を計画している。これら測定情報から ICT（情報通信技術）を活用して、電圧調整機器（LRT、SVR、SVC）を統合的に制御することで、太陽光発電や特殊負荷が連系し電圧、電流分布が複雑になった場合でも適正電圧維持が可能となるだけでなく、連系可能量の拡大が期待される。

また、センサ内蔵開閉器を用いた事故区間判定の高速化による停電区間、停電時間の極小化や、設備劣化の前駆現象を検出することで、事故の未然防止に繋がるなど信頼度向上も期待される。このようなシステムは、次世代配電自動化システムと呼ばれ、スマートグリッド実現の重要な機能の一つである「配電網の高度化」を実践するものである。

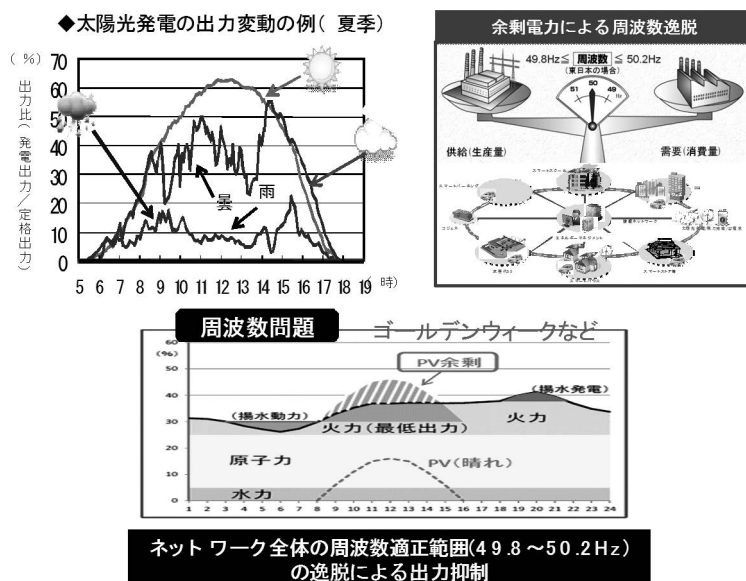
(2) 周波数調整力の不足と対策

太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーの連系量が増加すると、天候や風況などの変動により短期的な発電電力と消費電力の需給バランスが崩れ、周波数が適正値を逸脱するなどの問題が生じる恐れがある。需要の刻みな変動（20分程度以内）は、その予測が困難なため、電力会社ではLFC（Load Frequency Control）と呼ばれる需要変動を検出してから、火力・水力などの発電量を自動的に微調整して、周波数を維持している。

太陽光や風力発電の導入量が拡大すると相対的に調整量（供給量における火力、水力の比率）が減るため、周波数調整力（LFC容量）が不足する。特に、ゴー



図—5 センサ内蔵開閉器による電圧管理法



図一6 太陽光連系増による周波数への影響

ルデンウィークや年末年始や春・秋季（端境期）の休日など電力需要の少ない日は、出力調整の難しいベース供給力（原子力や流れ込み水力など）と太陽光発電の合計が電力需要（消費量）を上回り、余剰電力が発生する恐れがある（図一6の下側参照）。特に軽負荷期の電力消費の少ない深夜から明け方にかけて、ベース供給力が電力需要を上回り、余剰電力が発生する恐れがあり、現状では揚水発電所へ蓄電することなどで対策を図っている。

このような状況で需給バランスを保つためには、太陽光発電の出力を抑制するか、新たに可変速揚水発電や蓄電池などの電力貯蔵設備を建設し、余剰分を吸収する必要がある。また、今後、電気自動車やヒートポンプ給湯機など、新たに需要の創出ができれば、太陽光発電の出力抑制量を軽減もしくは回避することが可能である。

5. スマートグリッド関連実証事業

日本版スマートグリッドは、太陽光や風力など自然エネルギーを豊富に取り入れた地域エネルギー供給形態であり、ICT（情報通信）を使った需要（Demand Response）と供給（Power Supply）の双方向のエネルギー管理（EMS: Energy Management System）の協調を特徴としている。住宅・ビルなどの需要家やそれらの集合体であるコミュニティを対象としたグリッドとは異なる目的でのエネルギー管理がスマートグリッドの運用・制御に深く関わってくる。

ここでは、スマートグリッド関連の実証事業とし

て、次世代グリッド、スマートコミュニティ、需要家側エネルギーマネジメントの三つの切り口から、主な事例を取り上げる。

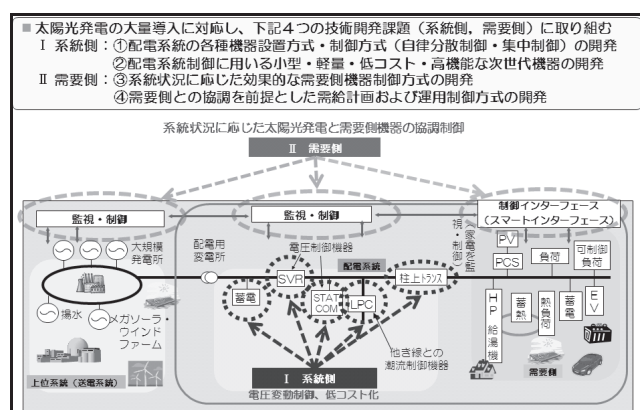
(1) 次世代グリッド実証事業

日本では2002年頃から、新エネルギーの大量導入時代を見越した様々な実証研究が実施されている。最近では、再生可能エネルギーとの調和を目指した実現可能な日本版スマートグリッドの構築に向けて、国内の電力会社を中心に離島マイクログリッド実証事業、分散型新エネルギー大量導入促進系統安定化対策事業、分散型電源大量導入系統影響評価基盤整備事業、次世代送配電系統最適制御技術実証事業などの様々な実証事業がなされている。それぞれの実証事業の概要を表一2に示す。

とりわけ、「次世代送配電系統最適制御技術実証事業」は、電力系統への再生可能エネルギー大量導入と系統安定化を両立するための諸課題の解決を目的に、経済産業省が公募し、2010年度から2012年度の3年間の実証期間で、東京大学をはじめとする28法人が受託した⁴⁾。この事業の概要を図一7に示す。電力系統側では、様々な電圧制御機器を最適に組み合わせることで配電系統の電圧変動を抑制する技術の確立や、高機能な次世代電圧制御機器の開発などが行われ、配電系統シミュレータ、または配電系統を模擬した実験設備を用いて効果が検証される。需要側では、系統状況に応じて太陽光発電の余剰電力を需要家内に設置された蓄電・蓄熱機器（電気自動車、ヒートポンプ式給湯機など）を用いて効率的に活用する需給制御技術の

表—2 次世代グリッドに係る主な国内実証事業

実証事業名称	期間	採択事業者	概要
離島マイクログリッド 実証事業	2009 2013	九州電力 沖縄電力	独立した系統となっている離島において、相当量の太陽光発電等を導入するとともに、蓄電池等を活用した系統システムの制御を実証的に行うことを通じて、今後の太陽光発電の大量導入に対応した次世代送配電ネットワーク構築に向けての課題を整理。
分散型新エネルギー大量 導入促進系統 安定化対策事業	2009 2011	10 電力会社	太陽光発電の大量導入による電力系統への影響を見極めるため、全国 100 か所以上で太陽光発電出力や日射量データ等を収集し、太陽光発電の出力変動幅や広域的視点でみた出力の平滑化効果を分析。あわせて、太陽光発電の総出力量を推定するための基盤データについても取得。
分散型電源大量導入 系統影響評価 基盤整備事業	2009 2010	電力中央研究所	新エネルギー大量導入時における電力系統への影響等を評価するため、模擬太陽光・模擬風力発電設備、模擬電力設備（発電所、変電所、送電線）や模擬負荷設備（インバータ・抵抗、回転機）等から構成される電力系統シミュレータを構築し、電力系統への影響や系統事故時の現象について実験検証。 (1) 周波数の変動：周波数安定性に及ぼす影響の解明、周波数異常防止技術の開発 (2) 電圧の変動：系統全体に与える電圧安定性への影響の解明、対応策の検討 (3) 同期安定度の変動：系統の同期安定度に及ぼす影響の解明、制御技術の開発 (4) 系統潮流量の変動：リアルタイムの潮流把握、評価技術の開発
次世代送配電系統 最適制御技術 実証事業	2010 2012	東京大学 東京工業大学 早稲田大学 東京電力 他 24 社	参加事業者の大学・企業・電力会社が共同で、政府が掲げる 2020 年度までに太陽光発電 2800 万 kW の導入目標の達成に向けて必要不可欠となる、大規模電源から家庭まで発電・送電・配電システム一体となった全体制御・協調による高信頼度・高品質の低炭素電力供給システムの実証。具体的には、配電線電圧上昇・余剰電力発生などを解決するための技術確立や機器開発などを、系統側・需要側両面で行う。

図-7 次世代送配電系統最適制御技術実証事業の概要⁴⁾

確立や、需要家内機器制御機能（スマートインターフェース）の開発などが行われ、中央給電指令所の機能を備えた全系統シミュレータを用いて実現可能性の検証が行われる。

(2) スマートコミュニティ実証事業

経済産業省より、地域を対象としたスマートコミュニティに対する実証として、神奈川県横浜市、愛知県豊田市、京都府けいはんな学研都市、福岡県北九州市の4地域が次世代エネルギー・社会システム実証地域

(2010～2014年度)として公募選定され、2010年8月には、各地域の次世代エネルギー・社会システム実証マスタープランが公開されている⁵⁾。

一例として、豊田市の『豊田市低炭素社会システム実証プロジェクト (Smart Melit (Smart Mobility & Energy Life in Toyota City))』⁹⁾ のイメージを図—8 に示す。太陽光発電が普及した近未来を見据えた HEMS (Home Energy Management System) を活用して、太陽光による発電電力を住宅内で視聴するエネルギーの“地産地消”を推進し、更に HEMS を束ねる EDMS (Energy Data Management System) を用いてコミュニティ全体におけるエネルギーの需給バランスを最適に制御しつつ、各住宅のエネルギー使用状況を把握するなど、需給に応じて料金変動によるデマンドレスポンス (DR: 需要応答) の実証している。更に天候を予測しながら、蓄電池やヒートポンプ給湯機の最適制御を実施している。実証地区では、2011 年 6 月から順次分譲が開始された新築の 67 棟を対象に HEMS の実証実験が始まっている。

(3) 需要側エネルギーマネジメント実証事業

東日本大震災以降の電力需給の逼迫を背景に、需要

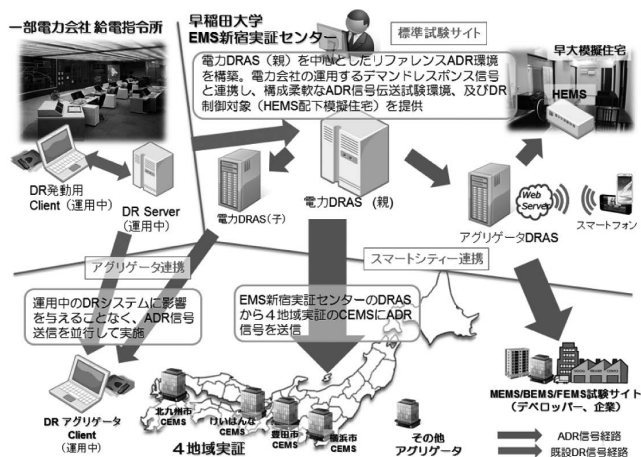


図10 新宿実証 ADR 連携全体イメージ図

6. 今後の展望

日本の電力供給システムでは、早くから ICT を活用した配電自動化や系統安定化保護リレーを導入するなど、欧米に比べて高信頼度・高効率の電力供給が図られており、米国で言われるスマート化がすでに進展していた。しかしながら、東日本大震災以降、供給力確保が喫緊の課題となっており、従来の電気事業者の「大規模集中」電源による供給だけでなく、需要家側に設置されるコジェネ、太陽光発電、燃料電池、蓄電技術といった電源の多様性を目的とした「電源の分散・集約」への期待が高まるとともに、節電、ピークカット、ピークシフトといったデマンドレスポンスによる需要家側の電気利用を活用した「需給調整」が重要視されている。

原子力の代替として火力発電の運転比率の増加により急増した環境負荷の低減および低炭素化社会実現に向けて、再生可能エネルギー（特に家庭用太陽光発電）の大量導入への取り組みや、需要家側の電気の効率的利用・省エネ実現、ならびに需要側と電源側の電力変動に起因する電力ネットワーク全体の電力品質（電圧、周波数）の維持・向上について、課題が顕在化する前に早めの技術検討・対策等を推進していく必要がある。

太陽光発電や風力発電のように出力が不安定な再生可能エネルギーを効率的に利用、さらには夜間電力を有効に利用するには、一時的にエネルギーを貯蔵する技術、特に二次電池による電力貯蔵が期待される。また、我が国の二酸化炭素排出の約二割を占める運輸部門でも、電気エネルギーを利用する電気自動車やハイブリッド自動車への転換が期待されており、高性能な二次電池の開発が待たれている。日本は早くから蓄電池の技術開発に取り組み、現時点では世界シェアも高

く競争力を有していることから、監視制御も含めた蓄電池システム技術は我が国のスマートグリッドを構成する重要な要素技術となりうる。

なお、需要家側の住宅用太陽光発電の出力調整（軽負荷期の出力抑制）や需要家機器の制御については、各種技術の検証・実証に加えて、社会的受容性等も含めトータルに検討を進め、方向性を定めていく必要がある。

7. おわりに

東日本大震災以降、スマートグリッドへの期待が急速に高まる中で、欧米各国と日本のスマートグリッドへの取り組みを比較しながら、今後スマートグリッドを実現する上で課題と展望について概説した。スマートグリッドは、発電所から需要家内に至る巨大なネットワークシステムであり、電氣的につながったものはずべて多かれ少なかれ相互に影響を与え・受けることになる。それら重要なインフラであるスマートグリッドの構築には、①再生可能エネルギー電源の導入拡大、②送配電網の高度化、③電力需要のスマート化（デマンドレスポンス等）の三つの柱を同時並行的に推進していく必要があり、信頼ある技術実証が不可欠である。中立的で信頼性のある技術実証や評価にもとづく今後の展開に期待したい。

J C M A

《参考文献》

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁ホームページ <http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/index.html>
- 2) 林 泰弘, スマートグリッド学, 日本電気協会新聞部 (2010)
- 3) 林 泰弘, スマートグリッド概論, エネルギー・資源, Vol.32, No.1, (2011), 22-26.
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁 審議会・研究会, http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment.html
- 5) 林 泰弘, スマートグリッドと制御分野への期待, 計測と制御, Vol.51, No.1, (2012)
- 6) 林 泰弘, 総論: スマートグリッドとテクノロジー, 電学誌, Vol.132, No.10, (2012), 678-679
- 7) 経済産業省 スマートハウス標準化検討会, <http://www.meti.go.jp/press/2011/02/20120224007/20120224007-3.pdf>
- 8) 経済産業省 スマートハウス・ビル標準・事業促進検討会, <http://www.meti.go.jp/press/2012/11/20121101003/20121101003-1>
- 9) 豊田市低炭素社会システム実証プロジェクト (Smart Melit) <http://jscp.nepc.or.jp/toyota/index.shtml>

〔筆者紹介〕

林 泰弘 (はやし やすひろ)
早稲田大学大学院
先進理工学研究科電気・情報生命専攻教授,
先進グリッド技術研究所所長

