

戦略プロポーザル

未来エネルギーネットワークの基盤技術 とエネルギー需要科学

～ 2050年超の一般家庭でのエネルギー需給構造変化に向けて～

STRATEGIC PROPOSAL

Fundamental Technology of Energy Network in the Future, and Science of Energy Demand

- Toward a change in energy supply and demand structure
in general households beyond 2050-

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立って行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDS は、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

<http://www.jst.go.jp/crds/index.html>

エグゼクティブサマリー

本戦略プロポーザルは、2050 年超に向けたエネルギーネットワークの内、低圧配電系ネットワークの基盤技術、およびそのネットワークとつながる一般家庭のエネルギー需要に関する研究開発戦略の提案である。

2050 年時点では、一般家庭の多くに太陽光発電（PV : Photovoltaics）等の家庭用エネルギー機器の導入が想定されており、全体としての電力供給力が無視できない量になると考えられている。これはエネルギー消費のみであった家庭が、エネルギー供給者と需要家の二面性を持つことであり、換言すれば 2050 年には低圧配電系ネットワークにエネルギー需給構造変化が起きるであろうことを意味する。これを前提として、本戦略プロポーザルでは電力供給者と一般家庭、あるいは一般家庭間をつなぐ低圧配電系ネットワークのあり方、さらには一般家庭における人の行動も含めたエネルギー需要に係わる課題について、推進すべき科学技術、基盤研究を提案するものである。

2016 年 5 月に閣議決定した「地球温暖化対策計画」では 2030 年の温室効果ガス（GHG）排出量削減 26%（2013 年度基準）の必達目標に加え、2050 年長期目標として GHG80% 削減を目指すことが示された。この 2050 年長期目標の対応策としては電力の二酸化炭素（CO₂）フリー化等が重要とされているが、現状、我が国ではその実現方策として再生可能エネルギーの拡大、特に家庭用も含めた PV の導入拡大が有望な選択肢とされており、今後のコスト低下も相まって一般家庭への PV 導入数は膨大になると見られている。また PV 以外の家庭用エネルギー機器である燃料電池、蓄電池（電気自動車やプラグインハイブリッド利用含む）についても、コスト削減や導入施策等により、2050 年時点の一般家庭全体で、大きな発電容量、蓄電容量を持つと考えられている。

一方で大量導入が見込まれる PV は発電量が日照条件に依存した自然変動電源であり、風力発電とともに発電量の制御が難しい Non-dispatchable（指令不能）に分類される電源である。現在の電力システムは電力需給を同時同量でバランスさせる必要があるため、PV 大量導入に対して、需給調整の課題が発生する。2030 年に向けては、デマンドレスポンス、PV 等の発電量予測精度向上、グリッドのスマート化として情報通信技術（ICT: Information and Communication Technology）を用いた系統運用の一層の効率化・高度化などの対策が検討されているが、さらにその先の、一般家庭への PV 導入拡大を想定した対応は必ずしも十分ではない。そこで本戦略プロポーザルは、現行対策後に必要となるであろう 2050 年に向けた課題に対応した研究開発戦略の提案となる。

以上を踏まえて 2050 年時点の一般家庭のエネルギー需給を考えると二つの主たるボトルネック課題が見えてくる。一点目は低圧配電系ネットワーク内の一般家庭で発電した電力をどのように電力システムの中に取り込み活用するか、その際の需給調整はどうするかという電力需給面の課題である。これは 2030 年時点のメガソーラを主体とした PV 導入拡大の場合と比較すると、数が膨大になる点で状況が大きく異なる。二点目は、2050 年における一般家庭のエネルギー需要変化がどのようになるか、さらには需要の能動化がどの程度可能かという点である。エネルギー需要は明るさや暖かさ、情報等の形で消費され

る「派生需要」である。そのためその需要の変化を本質的な部分にまで掘り下げて推定するには、エネルギーを利用する上での人の行動にまで踏み込む必要がある。

これらボトルネック課題を克服するために今後推進すべき研究開発項目を長期的な視点から考えてみる。まず、一点目の低圧配電系ネットワーク内の電力需給の課題を考える。現在の電力システムは集中管理型であり、制御が必要な機器の増加に伴って、制御の困難さは増大していく。このため膨大な家庭用 PV 等の需給調整の制御方法として、通信分野からのアナロジー的な発想から、ネットワーク内に自律分散的な機能を持たせることが考えられている。通信分野では、自律分散型のインターネット技術が ICT の進化に伴い膨大な情報伝送を処理できるようになり、結果として集中管理型の電話・FAX 等を置換え、さらにはさまざまなイノベーションをもたらした。このような自律分散的な技術・システムを電力需給に対してあらかじめ検討しておくことは、将来に向けた対応技術の選択の幅を広げる意味で重要と考えられる。これらの技術・システムを実現するためには、自律分散的な電力潮流制御技術、さらには優先度を定めるための市場メカニズムなどの仕組みを含めたシステム、家庭内の機器制御などの一連の研究開発を推進することが必要になる。二点目の一般家庭におけるエネルギー需要の課題については、エネルギー消費に関する家庭内の人の行動も含めたモデル構築やそのための計測、さらには人が限定合理的な行動をすることを踏まえた行動科学、行動経済学からの研究が必要になる。

上記の二つの課題に対応した具体的な研究開発項目を以下に示す。

- (1) 自律分散型低圧配電系ネットワークの研究開発
 - ・電力の自律分散型システムと ICT による電力潮流制御技術
 - ・家庭内の電力制御システムなど
 - ・ネットワークや家庭内のパワエレ機器や材料開発
 - ・低圧配電系内の市場メカニズム / 電子取引の仕組みや方法
 - ・電力市場における制度設計の評価用モデル
 - ・電力システム全体を評価できるモデル
- (2) エネルギー需要科学に係る研究開発
 - ・エネルギー需要のモデル化、そのための計測、分析
 - ・エネルギー利用に関わる行動科学、行動経済学を用いた研究

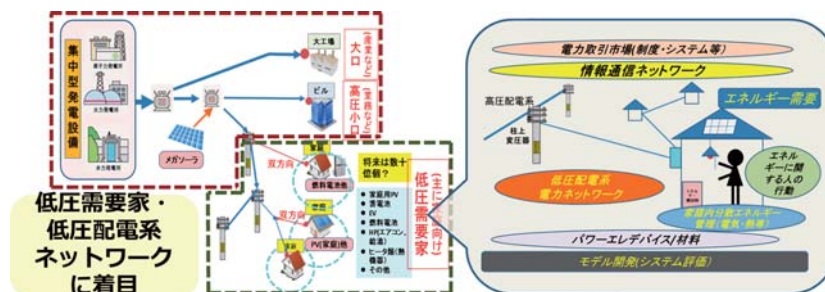


図 本戦略プロポーザルの研究開発領域イメージ

本提案の研究開発課題を推進するためには、産学官で情報共有の場を設定し、コンセプト検証のための小規模な実証研究を行いながら、システムと要素技術の両面から技術進展させ、早い段階で効果を示すことが必要になる。その上で局所的導入の展開、さらにそれらをつなげてネットワーク化を拡大するといった段階を踏まえた展開が必要となる。

Executive Summary

This report presents a proposal for R & D strategy on fundamental technologies of the low voltage distribution network and energy demand of households connected with the network beyond 2050.

As of 2050, large volume of photovoltaic (PV) in homes is assumed to be penetrated, and excess amount of power will be supplied to end-users. This means that consumers in homes will play dual roles in both energy supply and consuming, that is to say, in 2050, the energy supply and demand structure in the low-voltage distribution network will change drastically. Based on these circumstances, this report aims to explore and propose technology to promote for the ideal situations of low voltage distribution network as well as human behaviors on energy demand in homes.

In May 2016, the Plan for Global Warming Countermeasures was decided by the Japanese Cabinet. The plan defines a path to achieve a mid-term target of 26% greenhouse gas emission reduction by 2030 compared to 2013, and sets a long-term goal to pursue 80% reduction by 2050. In order to accomplish 2050 long-term goal, it must be important to decarbonize electric power supply ultimately. Large-scale introduction of renewable energy, especially PV including household use is a promising option.

However, the power supply from PV, as well as wind tends to fluctuate and thus is classified as Non-dispatchable power. Large-scale penetration of PV is concerned to be harmful for power grid load balancing

Toward 2030, countermeasures such as demand response, prediction method for PV power and ICT for smarter grid, etc. have been improved. However, further deployments to meet with large amount of PV residences is not sufficient.

Based on the above, mainly two bottlenecks emerge. The first is the process to capture power generated from PV systems in homes and utilize in the power grid system under the appropriate balancing condition. Considering the speed of expanding PV until 2030, the situation will be different in terms of the volume. The second is the expected change of home energy demand, and its responsiveness in 2050. Energy demand is "derived demand" which is consumed in the form of lighting, heat and cool, ICT, etc. Therefore, to deduce the change of energy demand, further analysis would be necessary to look deep into human behavior to consume power.

In order to overcome these bottlenecks, we will consider R&D items in the long term. For the first issue, current centralized power system has a difficulty as the number of decentralized devices which generate electricity uncontrollably increases. To solve this problem, it is considered that autonomous function should be installed in the low voltage distribution network based on the conceptual idea for ICT, which

results in replacing centralized telephone system and promoting various innovations. It is important to consider such autonomous decentralized technologies / systems proactively in order to respond to a wide variety of electric power system needs in future.

To realize the systems, it is necessary to develop a comprehensive R&D for autonomous decentralized power flow control including power flow control technology, mechanism design for the market. Regarding energy demand in homes, research for a human energy consumption behavior modelling and behavioral science and economics is necessary.

Specific research and development items for the two tasks are shown below.

(1) R & D of Autonomous Decentralized Low-Voltage Distribution Network

- Power flow control technique by autonomous distributed system of power and ICT
- Power control system in homes and other related systems
- Power and equipment and materials development in the network and home
- Market mechanism in low-voltage distribution system / mechanism and method of electronic transaction
- Model for evaluation of institutional design in the electricity market
- Model that can evaluate the holistic power system

(2) R & D related to energy demand science

- Modeling of energy demand, measurement and analysis
- Research on behavioral science, behavioral economics related to energy use

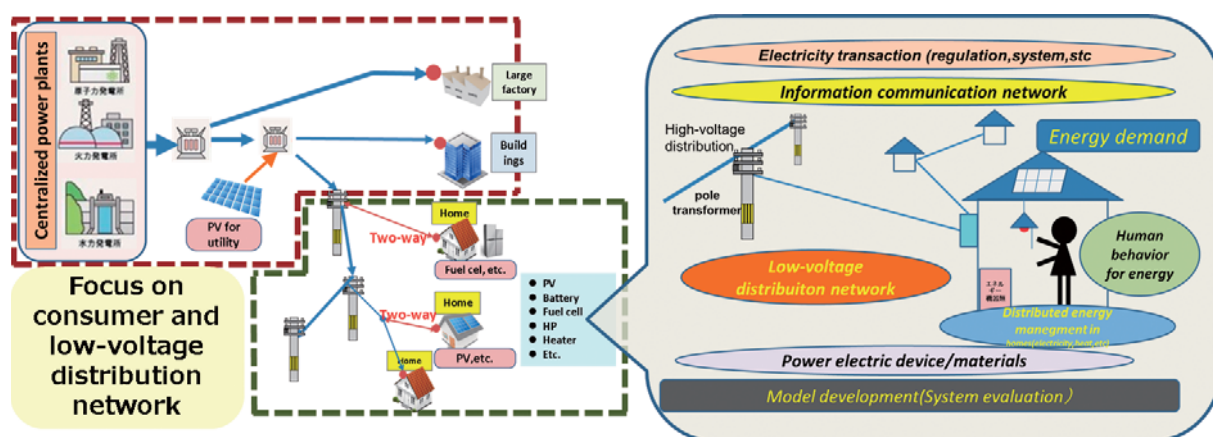


Fig. Image of R & D area in this strategy proposal

To promote the proposed R & D, a consortium to share information among industry, academia and government, where they verify concept and develop technology from the both fundamental and applied aspects mutually, demonstrate the effect and endeavor to extend the local installation to the whole network.

目 次

エグゼグティブサマリー

Executive Summary

1. 研究開発の内容	1
2. 研究開発を実施する意義	4
2-1. 現状認識および問題点	4
2-2. 社会・経済的効果	12
2-3. 科学技術上の効果	14
3. 具体的な研究開発課題	15
4. 研究開発の推進方法および時間軸	22
付録 1. 検討の経緯	24
付録 2. 国内外の状況	27
付録 3. 専門用語説明	34

1. 研究開発の内容

2050 年時点では、多くの一般家庭に太陽光発電（PV）等の家庭用エネルギー機器の導入が想定されており、全体としての発電等のポテンシャルは無視できない量になると考えられている。これは現在エネルギー消費のみの家庭が、2050 年時点には電力供給者と需要家という二面性を持つ状況に変化していることを意味している。

2050 年における上記の構造変化を前提とすると、主な研究開発課題は、低圧配電系ネットワークとそれにつながる一般家庭の低圧需要家を対象とした研究開発領域（図 1）であり、その内容として（1）自律分散型低圧配電系ネットワークの研究開発、（2）エネルギー需要科学に係る研究開発の二つが挙げられる。以降にこれらの課題に対応して必要になる研究開発内容を示す。

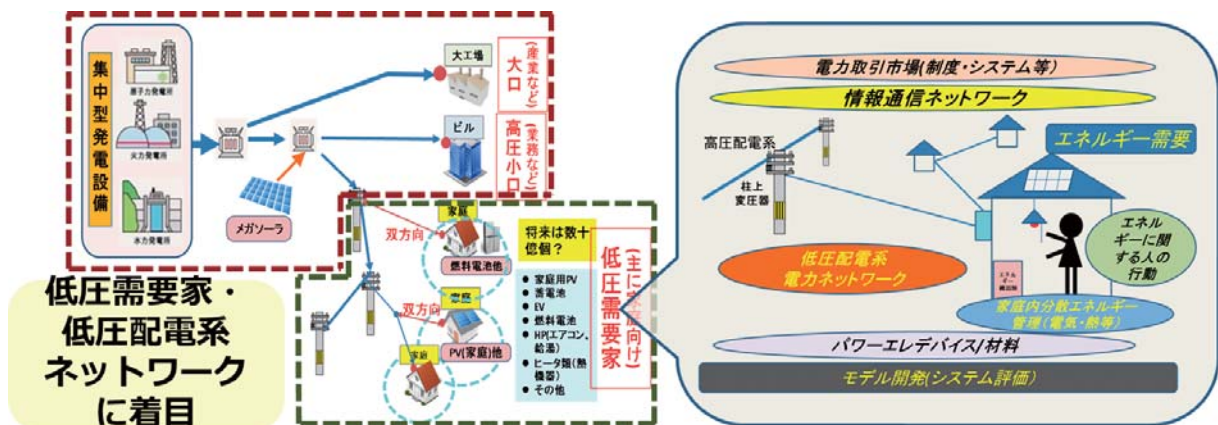


図 1 本戦略プロポーザルの研究開発領域

(1) 自律分散型低圧配電系ネットワークの研究開発

- ・電力の自律分散型システムとその ICT による電力潮流制御技術
- ・家庭内の電力制御システムなど
- ・ネットワークや家庭内のパワエレ機器や材料開発
- ・低圧配電系内の市場メカニズム / 電子取引の仕組みや方法
- ・電力市場における制度設計の評価用モデル
- ・電力システム全体を評価できるモデル

電力の自律分散型システムの実現のためには、ある場所から狙いとする場所に決まった電力を送ることが必要であり、このため物理法則で流れる現在の電力システムとは異なり、人為的な電力の潮流制御が必要となる。これを実現するためには、まず個別に電気をどこからどこにどれだけ流すかを調整し、優先度等を決めた上で、電気が自律分散的な潮流制御により伝送時の混雑度合を考慮しながら流すことができる技術・システム構築を目指すことになる。情報通信におけるインターネット技術は情報をタグ（荷札）付けしたパケット（荷物）として自律分散的に伝送する技術であり、これをアナロジーとして電力ネットワークに適用することが考えられる。当然、実際に伝送するものが情報と電気とで特性が異

なることから情報伝送とは異なる、新たな技術やシステムが必要になるが、インターネットにおける伝送経路調整方法（プロトコルなど）など、参考になるところは多いと考えられる。一方で電気の潮流制御自体にはいくつかの方式が考えられており、長所短所の比較を含めて今後の検討課題の一つである。またいずれの方式においても電流電圧制御・スイッチング操作など潮流制御のための装置、電力ルータが新たに必要になる。加えてこれらは高速・高精度の制御が必要となることから、パワーエレクトロニクス技術を用いた回路設計、さらにはそれらの電力損失を最小にするための材料開発などの研究開発も重要になる。一方、どこからどこにどれだけ電気を流すかを調整する仕組みの一つとして、市場メカニズムを用いた電力の電子取引の利用が考えられる。この電力市場の設計や市場の安定性等の経済的市場の評価のためには、メカニズムデザインやエージェントシミュレーションなどの工学的アプローチが有効となる。これらの研究は株式市場を対象とした既往の研究があり、これらを先行研究として参考にしながら進めることができる。

(2) エネルギー需要科学に係る研究開発

- ・エネルギー需要のモデル化、そのための計測、分析
- ・エネルギー利用（供給・消費）に関わる行動科学、行動経済学を用いた研究

従来から GDP や人口などを指標としたマクロな需要予測や気温などを指標とした短期の時系列予測もあるが、このような方法は統計的手法であり、経験則による予測である。エネルギー需要は人の行動を通じた派生需要であることから、将来に向けてその変化を推定するためには本質的にエネルギー消費に関する人の行動やその行動変容も含める必要がある。例えば、エネルギー需要の能動化が可能な量を見積もるために、エネルギー消費構造を各要素に分割し、機器、サービス毎にその消費量と、それによって需要家が受けているサービスや経済性、快適性などを見ながら、どれぐらいの需要調整が可能かを検討する必要が出てきている。さらに一般家庭における人の行動は合理性に欠ける行動を取ることも多く、いわゆる限定合理性も考慮した研究が必要になる。その上で、将来のエネルギー需要変化の予測や需要の能動化のポテンシャルを推定していくことが必要である。さらに長期的にはこのような研究を通じて、一般家庭を対象としたさまざまなエネルギー施策に対する受容性や効果の推定が可能になることが期待でき、より効果的な対策検討に資することができると考えられる。これらを実現するためには、エネルギー消費に関する家庭内の人の行動も含めたモデル構築やそのための計測、さらには人が限定合理的な行動をすることを踏まえた行動科学、行動経済学の観点からの研究開発が必要になる。

上記の二つの研究開発領域は現時点で必ずしも広く認知、共有化されてはいないことから、初期段階のコンセプトベースの研究開発の推進母体はアカデミア主体になると考えられる。このため、研究開発の方向性を明確にするために、将来のニーズを産学官で明確化、共有化することが重要になる。特に自律分散型低圧配電系ネットワークの研究開発については新しい技術・システムを社会へ実装、導入していくプロセスも必要になることから、それを研究開発の一環として取り込むことも重要になる。このためにはコンセプト検証のための小規模な実証研究（POC : Proof of concept）を行いながら、システムと要素技術の両面から技術進展させることで、新しい技術・システムの効果を示していくことが必要になる。さらに次の段階として、局所的ネットワークの導入、さらに局所的なネットワー

ク間をつなげることで拡大させるといった段階を踏まえた展開により、最終的には新しいネットワークへの転換・拡大を目指すことになると考えられる。

【コラム 1】 日本における電力システムの概要（現状）

電力システムは 1882 年にトーマス・エジソンが火力発電機と配電網を設置したことから始まる。低電圧で送電ロスが大きかった直流方式に対して、1884 年にニコラ・テスラが交流方式を導入し、高電圧による遠距離送電に成功している。それ以降、変圧が容易な交流方式が現在まで主流となっている。

日本の電力システムは下図に示すように、主に遠隔地にある大規模な発電所から高電圧（50 万～6.6 万 V）で送電ネットワークを通じて運ばれ、消費地の近くの変電所で電圧を下げて、配電ネットワーク（2.2 万～100V）により需要家に供給されている。送配電線の長さ（電線路こう長）は送電線で 10.2 万 km、配電線で 130.3 万 km である。

低圧配電系ネットワークは 200/100V の電圧であり、柱上変圧器から先の配電網を指している。この低圧配電系と接続しているのが低圧需要家であり、一般家庭・小規模事業者で構成される。その契約メータ数は約 7700 万個で、高圧系につながる大口需要家 5 万個、高圧小口需要家 70 万個と比較して数の上で圧倒的に多い。電力消費量で比較すると低圧需要家は約 36% である。（一般家庭のみでは約 31%）

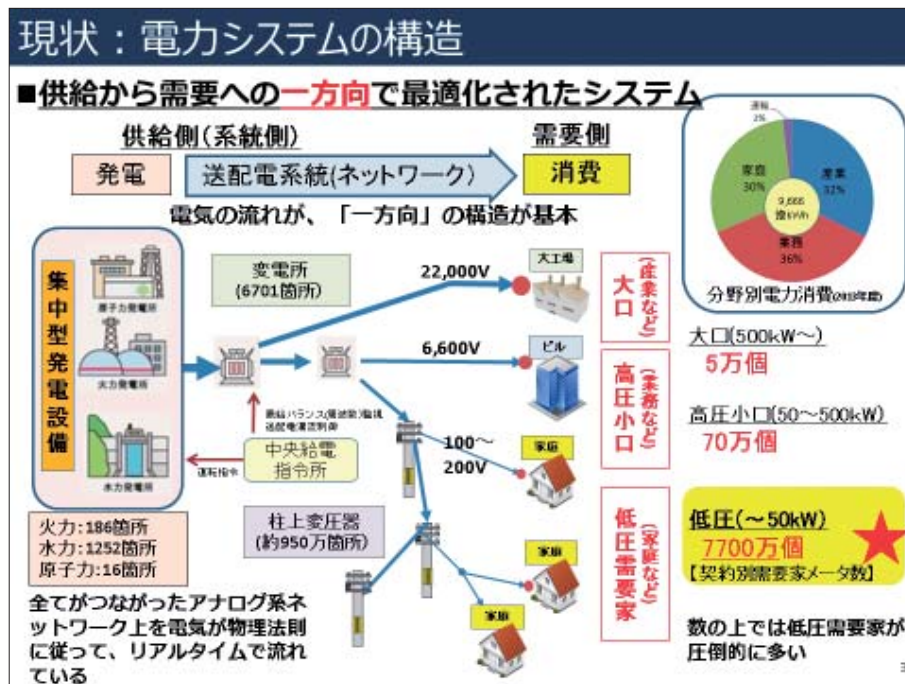


図 C1-1 現在の日本の電力システム構造の概要

電気は物理法則に従ってほぼ光速で伝わるため、送配電網のネットワークにつながるものはすべて瞬時に影響を及ぼしあっている。また交流系ネットワークの特徴として同じ周波数で同期させることが必要になる。このような交流アナログ系では、電力ネットワークの広域化が、電力システム全体としての安定度を高め、さらには需要の平準化や自然変動電源のならし効果などの観点からも有効なものとなる。このため日欧米における電力ネットワークは広域化が共通の方向性となっている。日本においても電力広域的運営推進機関（OCCTO）が 2015 年 4 月に設立され、連系線の活用により送電ネットワークの広域利用の推進を行っている。

2. 研究開発を実施する意義

2-1. 現状認識および問題点

〈2050 年超の社会状況の想定〉

2015 年 12 月の COP21・パリ協定の合意を受けて、我が国では 2016 年 5 月に「地球温暖化対策計画」を閣議決定した。この計画では、2030 年中期目標として、パリ協定に先立ち提出された約束草案の内容に沿って、GHG 排出量 26% 削減（2013 年度基準）の達成が示された。さらには 2050 年長期目標として 80% 削減を目指すことも示された。後者の 2050 年目標を実現するためには、電力の CO₂ フリー化および自動車を含む利用機器側の電化推進が重要とされる。CO₂ フリーの電源としては、CCS 付き火力、原子力、再生可能エネルギーが挙げられるが、我が国の現状を鑑みると再生可能エネルギーの拡大が安全保障上のエネルギー自給率向上の観点からも望ましいと言える。特に太陽光発電（PV）については、コスト競争力、導入期間の短さ、小規模で分散的な投資が可能などの導入の容易さ、さらには保守管理も容易であることから、再生可能エネルギーの中では有望な選択肢となっている。

環境省調査報告書¹⁾（コラム 2 参照）によれば 2050 年の PV 設備容量（中位）は 2 億 4844 万 kW であり、その内、家庭用 PV は 1 億 4779 万 kW と想定しており、H28 年 6 月末の 884 万 kW と比較して飛躍的な設備容量の増加を見込んでいる。

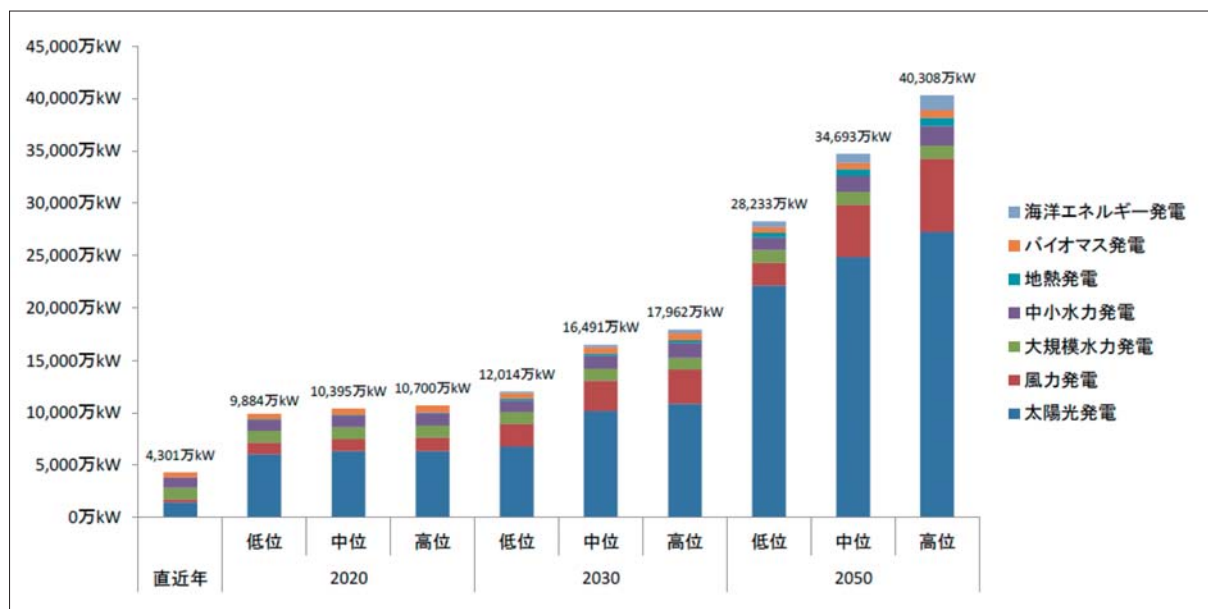


図 2 再生可能エネルギー電気の発電設備容量¹⁾

これは家庭用 PV が 3890 万軒（3.8kW/軒と仮定）の規模であり、低圧需要家 7700 万件の半分に相当する膨大な数である。また発電量で見ると低圧配電系内の電力需要量の 1/3 程度に相当する。この家庭への PV 導入量見込みはいくつか前提を置いた机上計算の数字であるが、今後 PV の発電コストが基幹電源コスト以下にまで低下し、さらに最安値

の電源になると推測されていることも考えると、無視できない数の PV が一般需要家に導入されることが容易に想像できる（コラム 2 参照）。また PV 以外の家庭用エネルギー機器として家庭用燃料電池、さらには電力貯蔵を可能にする蓄電池（電気自動車やプラグインハイブリッド利用含む）についても、コスト削減や支援策により導入が進むと予想されており、一般家庭全体として発電や蓄電の潜在的容量は大きなものになることが推定される。（コラム 3 参照）

一方で PV は発電量が日照条件に依存した自然変動電源であり、風力発電とともに発電量の制御が難しい Non-dispatchable（指令不能）に分類される電源である。常に瞬時の同時同量の需給調整が必要な現在の電力システムにおいては、この自然変動電源の大量導入は需給調整の課題が発生する。特に PV は日中に集中した発電となるため、同じ発電量の風力発電と比較して、影響度はさらに大きくなる。

〈克服すべき 2 つのボトルネック課題〉

以上の前提・背景により、2050 年時点の一般家庭を考えると二つの課題が浮かびあがってくる。一点目は一般家庭で発電した電力をどのように電力システムの中に取り込み活用するか、その際の需給調整はどうかと言う点である。これは 2030 年に向けた PV 導入拡大による課題と類似しているが、数をはるかに膨大となる点で大きく異なる。2030 年に向けた目標は総発電量の 7% を PV でまかなうことであり、メガソーラを中心とした拡大を想定している。九州など PV の導入が進んでいる地域では、既に 7% に達しており、それに伴う需給調整の課題が顕在化してきている。このような 2030 年に向けた対応策として「発電機の調整力向上」「電力系統（ネットワーク）増強」「PV 発電抑止」「需要の能動化」「運用の高度化」「PV 等発電量予測（気象予測）」などを中心に技術的検討、研究開発が進められている。これらはいわゆるスマートグリッドやデマンドレスポンスによる対応であり、ICT を用いることで、系統運用の一層の効率化・高度化を中心とした対策となる。しかしながら、その先 2050 年に向けて PV を所有する一般家庭の数が膨大に増加し、系統運用による集中管理がさらに困難になる状況を想定した対応は必ずしも十分でない。そこで本戦略プロポーザルは現行対策後に必要となるであろう 2050 年に向けた課題に対応した研究開発戦略の提案となる。

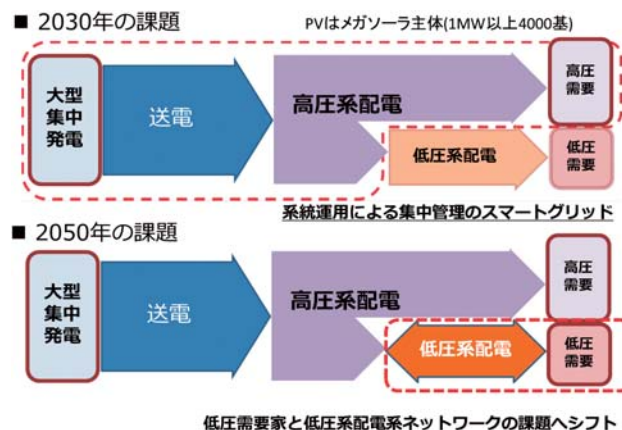


図 3 2030 年の課題と 2050 年の課題の比較

二点目は、2050 年における一般需要家におけるエネルギー需要変化がどのようになるか、需要の能動化がどの程度可能かという点である。エネルギー需要は「派生需要」であり、食料のように直接消費される財ではない。電気の場合、それが明るさや暖かさ、情報等の形で消費されている。そのためその需要の変化を本質的に推定するためには、エネルギーを利用する上での人の行動まで踏み込む必要がでてくる。

〈課題克服に向けたアプローチ〉

先に示した 2050 年に向けた二つの課題について、長期的視点から根本的対策を考えてみる。

まず一点目の低圧配電系ネットワーク内の電力需給の課題および対策を考えてみる。現在の電力ネットワークは大規模な発電所から送配電ネットワークを介して需要家に物理法則に従って流れるシステムであり、つなぐだけで需要家は電気を利用できるシステムになっている。これはシンプルで便利なシステムの一方で、供給側は発電量を事前に確定できないという課題がある。このため、系統運用として需要量を予測しながら発電量の集中管理型の制御により需給調整を行っているが、需要量の不確実性に対応するために一定の予備力を確保しながら調整する必要がある（コラム 4 参照）。その状況下において、一般家庭の自然変動型の不確実性のある発電供給も追加される状況を想定すると、集中管理型で数千万～数億個の機器類の個々の制御が可能かという課題が出てくる。現在考えられている将来の需給調整方法は仲介者であるアグリゲータを中間に設け、一定規模の電力量として束ねて取り扱うことを想定しているが、我が国では電力のアグリゲーションビジネスはまだこれからの段階である。また対象も現時点では比較的需要の大きいビル群などであり、2050 年に向けた一般家庭をどのようにアグリゲートするかは今後の制度設計やビジネスモデルも含めて、大きな課題となっている。一方で現在と根本的に異なるシステムを導入することによる対策も考えられる。これは低圧配電系ネットワーク内の電力需給の調整方法を自律分散型に転換していくことである。このことは通信分野で自律分散型のインターネット技術が ICT の進化により膨大な情報量の伝送を処理できるようになり、結果として集中管理型のアナログ系電話を置換え、さらにはさまざまなイノベーションをもたらしたことのアナロジー的な発想から来ている。現状においてはこのような対策が具体的な候補として俎上に載っているわけではないが、将来に向けた対策の選択肢を増やす観点からも重要になる。低圧配電系ネットワーク内に自律分散的な調整の機能を持たせて電力需給調整を行うためには、個々の技術の研究開発のみならず、制度やビジネスモデルの仕組みも含めたシステム全体としての研究開発も合わせて必要になる。例えば、ICT による電気の潮流制御技術、さらには自律分散的な電力潮流の優先度を定めるための市場メカニズムの利用など、制度やビジネスモデルを考慮した仕組みを含めたシステム、家庭内の需給調整に係る機器制御などの一連の研究開発を推進することが重要になる。なおこの新しい電力システムは現存のシステムにおける高圧配電線より下位の低圧部分（100/200V）だけの転換を想定しており、上位部分は現状システムのままである。低圧配電系内のみが新たな研究開発の対象となることから、電氣的な制約も低くなり、技術的に十分可能と考えられる。またインターネットではシステム上の最大値を超える情報量に対しても、混雑

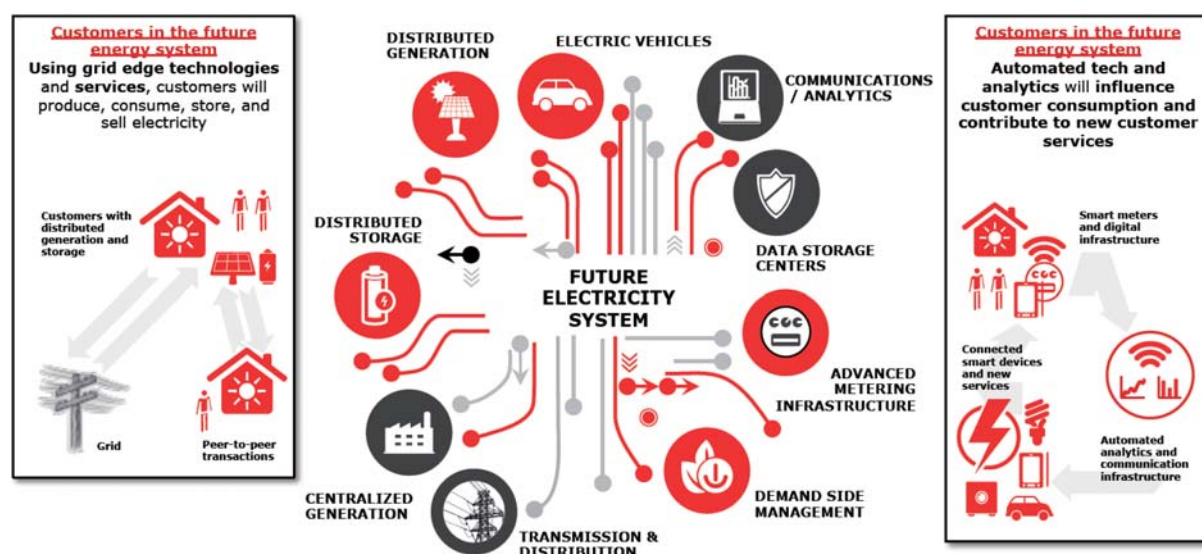
度に応じて情報が流れるシステム（ベストエフォート）になっており、伝送速度は遅くなるもののシステム全体の直接的な破綻にはつながらない。これと類似したシステムが電力システムに導入されることで、仮に上限を超える電力が要求された場合でも、優先度順に電力が供給され、優先度が低いところは供給量が自律的に削減されることになり、地域全体の停電といったシステム全体への波及を避けることができる。すなわち自律分散型の導入は電力システムのレジリエンスを本質的に高めことにも有効と考えられる。また優先度の決め方としては病院等の公的重要性の観点や市場メカニズムを用いた市場価格により優先度付けをするなどの方法があり、これら単独あるいは複数を組み合わせで決める方法が考えられる。市場メカニズムを用いた場合、市場価格が高いところに優先的に電気が流れることになる。また市場価格の上昇はその地域への投資意欲を高め、最終的に市場価格の平準化が期待できるが、投資額自体も分散的で少額になることから比較的短期間で対応できる可能性もある。このような技術・システムは低圧配電系ネットワークに従来の電力システムと互換性を持たせながら部分的に導入することも可能と考えられ、それらをさらに段階的につなげていくことで拡大できると考えられる。

また二点目の一般需要家におけるエネルギー需要の課題について考えてみる。エネルギー需要は人のエネルギー消費行動に基づく派生需要であることから、本質的に中身を理解するためにはエネルギー消費に関する人の行動やその行動変容を対象とした研究開発が必要となる。特に一般家庭は個人、家族の生活の場であり、エネルギー需要は生活行動と強く関連する。これまでも国レベルのマクロでのエネルギー需要予測は行われてきたが、GDP や人口などを説明指標とした統計的な予測でしかない。このため、例えば東日本大震災後の需要の大きな変化などは、その成り立ちすらはっきりと解明されているわけではない。また時系列予測のような短期予測の方法もあるが、これも気温などを説明指標とした統計的な経験則による予測であり、人の行動や使用機器などのさまざまな要因と必ずしも具体的に関連付けられている訳ではない。今後、温暖化対策計画の中で大幅な省エネルギーが求められている中で、この実現のためにエネルギー消費構造を理解し、各要素に分割する必要がある。その上で機器やサービス毎にその消費量とそれにより需要家が受けるサービスや経済性、快適性などを考慮して、どれぐらい調整可能かを定量化する必要が出てきている。さらに一般家庭における人の行動は企業組織と比較すると合理性に欠ける行動を取ることも多く、いわゆる限定合理性も考慮した研究が必要になる。その上で、将来のエネルギー需要変化の予測やデマンドレスポンスの効果がどの程度になるかを推定していく必要がある。また長期的にはこのような研究を通じて、さまざまな一般家庭を対象としたエネルギー施策等の受容性や効果などの推定を可能にすることが期待でき、より効果的な対応策の検討に資することができると考えられる。

〈長期的視点からの電力システム変革に関する国内外の動向〉

将来に向けた電力システムにおいては、長期的視点から国内外で電力ネットワークの変革に向けた動きが始まっている。例えば World Economic Forum（世界経済フォーラム）において、将来の三つのトレンド、①電化の進展、②配電系における分散型エネルギー資源（PV、蓄電デバイスなど）の拡大、③デジタル化として Internet of Things（IoT）の

出現と接続デバイスの急増、を検証し、その上で将来に向けたシステムレベルでの提案²⁾を行っている。これは上記の三つのトレンドにより生産者、ディストリビューター、顧客といった従来の境界がぼやけてきており、システムガバナンスの複雑さが増加している中で、将来に向けては「グリッドエッジ」である一般家庭の顧客がビジネスに参加でき、グリッドエッジを対象とした技術を統合化することで分散型エネルギー資源の価値最大化が可能なプラットフォームの構築が重要とされている。これにより電力システム全体の効率化が可能になり、家庭間の電力取引（ピアツーピア分散型取引）に加え、信頼性、セキュリティ、環境の持続可能性、資産の利用率を高め、サービスとビジネスの新たな機会を開拓することができるとされる。



電力グリッドのために追加的役割を提供し、多くの顧客技術を組み込む

図 4 将来のエネルギーシステム²⁾

また逆に分散型エネルギー資源の恩恵を受けることができない場合、ネットワーク資産が孤立し、最終的に顧客がグリッドから逸脱する可能性があると考えられる。これはデス・スパイラルと呼ばれる負の連鎖である。すなわち家庭用 PV の増大により、電力会社からの購入電力量が低下する。そうするとグリッド（送配電網）を維持する固定費回収のために電気料金の値上げをする。これにより一般家庭でさらにグリッドからの電力利用が低下し、結果として重要な社会インフラであるグリッドを維持できなくなることが懸念されている。

このように将来の電力システムにおいては、一般家庭がネットワークの中に参加できるようなプラットフォームの構築が必要であり、今後それを実現するための仕組み、技術やシステムの研究開発の重要性が増大するという方向性は確かなものと言える。

【参考資料】

- 1) 「2050 年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討（H26 年度）」
<http://www.env.go.jp/earth/report/h27-01/index.html>

2) The Future of Electricity: New Technologies Transforming the Grid Edge

<https://www.weforum.org/reports/the-future-of-electricity-new-technologies-transforming-the-grid-edge>

【コラム 2】 2050 年の一般家庭への PV 導入量の推定

(1) 環境省調査報告書による PV 導入量見込み

・「2050 年再生可能エネルギー分散型エネルギー普及可能性検証検討 (H26 年度)」¹⁾ では、2050 年における再生可能エネルギーの導入見込み量を算出している (計算の前提等は報告書参照)。3 段階の推定値があるが、ここでは中間の「将来の低炭素社会の構築等を見据え、合理的な誘導策や義務づけ等を行うことにより重要な低炭素技術・製品等の導入を促進することを想定したケース」の中位の見通しの値を用いた。中位見通しの値は以下の通り。

★再生可能エネルギーによる発電量：5,988 億 kWh (全発電量の 47% 相当)

★その内 PV 発電量：2,788 億 kWh (全発電量の 22% 相当)

内訳 家庭用 (戸建住宅)：1,554 億 kWh / 非住宅用：1,234 億 kWh

また、この場合の PV の設備容量は、以下の通り。

★家庭用 PV 設備容量：1 億 4779 万 kW (参考 (H28.6 末現在の METI 公表値)：884 万 kW)

★非住宅 PV 設備容量：1 億 65 万 kW (参考 (H28.6 末現在の METI 公表値)：2,525 万 kW)

2050 年の中位推定値は家庭用 PV を 3.8kW/ 軒とすると 3890 万軒の設備容量に相当し、その数は低圧需要家 7700 万軒の半分に相当する数となる。また家庭用 PV からの発電量は電力需要量の約 13% に相当する。また低圧配電系内の電力需要量 (全電力需要量の 36%) に限ると 1/3 程度に相当する。

(2) PV システム価格の見通し例

・米国における発電事業用 PV の設備価格動向として 2010 年に \$3.24/W であったものが、2016 年には \$1.14/W に低下している。2025 年では \$0.7/W の価格になると推定されている²⁾。

・米国 DOESunshot イニシアティブでは PV 発電コストの目標を以下の通り設定している³⁾。

★2020 年：\$ 0.07/kWh (発電事業用) / \$ 0.09/kWh (家庭)

★2030 年：\$ 0.03/kWh (発電事業用) / \$ 0.05/kWh (家庭)

・NEDO の PV 発電コスト目標：2030 年 7 円 /kWh (基幹電源並)⁴⁾

・JST-LCS：定量的技術評価に基づいたコスト分析により 2030 年 5 円 /kWh が可能と示している⁵⁾。

【参考文献】

1) 環境省 HP <http://www.env.go.jp/earth/report/h27-01/index.html>

2) Bloomberg New Energy Finance "the Future of the Power System" セミナー資料

3) DOE SunShot Initiative <https://energy.gov/eere/sunshot/about-sunshot-initiative>

4) :NEDO (PV Challenges) <http://www.nedo.go.jp/content/100575154.pdf>

5) JST-LCS <http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2013-pp-02.pdf>

【コラム 3】 EV・PHV および家庭用燃料電池の導入とそのポテンシャル

(1) EV・PHV

・経産省「EV・PHV ロードマップ」報告書¹⁾ では、EV、PHV の 2020 年目標導入台数は 100 万台が掲げられている。EV100 万台の出力および蓄電容量総和は以下の通り。

★出力容量：7,000 万 kW (参考・揚水発電設備容量：2 億 7710 万 kW)

★蓄電容量：3,000 万 kWh (参考・低圧需要家総電力需要量：約 4 億 5000 万 kWh/ 日)

EV1台あたりの想定能力：定格出力 70kW/蓄電容量 30kWh（日産リーフ諸元）

- 世界的には2040年の新車販売の35%がEV・PHVになるとの予想²⁾もあり、2050年の段階であれば保有台数としても相当数になると想定できる。我が国でも乗用車保有台数の10%がEV・PHVと仮定しても600万台となり、上記数字の6倍となる。仮に600万台の場合、短時間の調整力の潜在能力は現在の揚水よりも高く、また蓄電容量としても低圧配電系内の一日当たりの需要の40%程度のレベルとなる。このことから仮にこれらの機器を蓄電や調整力として活用できるならば、その潜在的な容量は非常に大きい。

(H28年乗用車保有台数(日本)：6083万台)

- 参考1：リチウムイオン電池価格も低下が予想されている。2010年に\$1000/kWhであったものが2016年には\$273/kWhとなり、2030年では\$73/kWhが予想

(比較例：揚水発電建設コスト：約2.3万円/kWh(60年耐用))

- 参考2：テスラ社が家庭用蓄電池としてH29年から販売するパワーウォール：14kWh/70万円(電池単体)

(2) 家庭用燃料電池

- 平成28年3月「水素・燃料電池戦略ロードマップ改訂版」³⁾では家庭用燃料電池の2030年普及台数の目標を530万台としている。これによる発電の出力容量は以下の通り。

★出力容量：371万kW(燃料電池1台あたり0.7kW/台と想定)

【参考文献】

- 1) 経産省 HP <http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160323002/20160323002-3.pdf>
- 2) Bloomberg New Energy Finance "the Future of the Power System" セミナー資料
- 3) 経産省 HP <http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009.html>

【コラム4】 電力における市場メカニズムについて

市場メカニズムは供給と需要とのバランスで価格が決まり、取引を成立させる仕組みである。電力においても需要と供給のバランス、過不足に応じた市場価格で取引されることで、需要量と供給量が自動的に調整されることになる。

経済的市場=交換による効率化・価値の循環

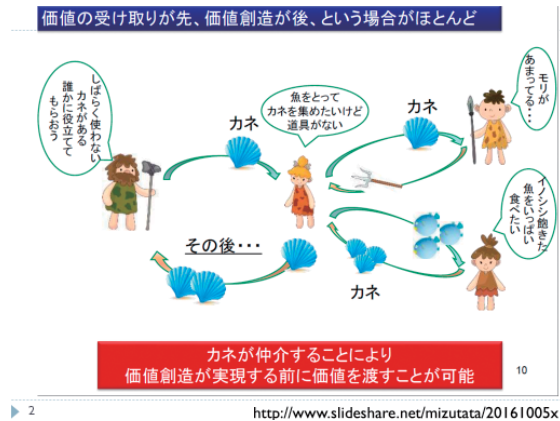


図 C3-1 市場メカニズムの概念¹⁾

理想的な電力市場取引

- 時間解像度を1000倍以上高めた市場取引
 - 物理的取引も含めて、電力系統の時定数よりも短い時間間隔での電力取引を行い、時々刻々の市場価格(ノードルプライス)を生成する。

- 空間解像度を1000倍以上高めた市場取引
 - 低圧配電線の節点ごとに市場を設け、それぞれの市場価格(ノードルプライス)の差を当該節点間の送電料金(送電収入)とする。



数百万個の分散型のミリ秒単位の高速取引市場？

図 C3-2 電力市場取引における理想的姿²⁾

市場メカニズムが機能するためには、価値が価格として適正に反映される必要がある。日本の電力卸

売市場では 30 分単位での電力の取引で需給調整がされている。しかし周波数制御などの物理的な需給調整は秒単位で行われており、市場と実際の電力の物理的な時間解像度とに乖離があり、その時点での価値が市場価格に正しく反映されていない可能性がある。理想的な市場を構築するためには、時間的解像度を物理的なものと同じレベル、すなわちミリ秒オーダーでの電力の売買を行う必要があると考えられる。またネットワークの空間解像度についても各地点（ノード）の伝送量の混雑度が重要になることからノード（接点）毎の空間解像度が重要になる。

また現状の電力システムは需要家がつなげるだけで使えてしまい、各消費者が支払い意志額をあいまいなままに利用している。このことも、社会全体の最適化をしようとする時に優先順位を付けにくい仕組みになっており、市場メカニズムを適正に機能させるためには支払い意志額が事前に明確になる仕組みも必要になる。

【参考文献】

- 1) CRDS-FY2017-WR-02 和泉教授発表資料
- 2) CRDS-FY2017-WR-02 藤井教授発表資料

【コラム 5】 電力システムの特徴

電力システムの主たる構成は「大規模集中型発電」、「送配電システム（ネットワーク）」、「系統運用」の 3 つである。貯蔵が難しい電力は使う瞬間に使う量だけを発電する同時同量（供給量＝需要量）が必要であり、その調整をおこなうのが「系統運用」である。動的な需給バランスが崩れると停電につながるため、非常に重要な役割を持っている

電力システムの特徴

- 発電側からネットワークを介して需要家に物理法則に従って電気が流れるため、つなぐだけで需要家が電気を取り出せる仕組みになっている。このため最大需要量を想定した設備容量（発電・送配電ネットワークの設備）を持つ必要がある。
- 需給バランスの調整のために、「系統運用者」が日々需要量全体を予測し、計画を立て、周波数を監視しながら発電側を制御することで、経済性を考慮しつつ集中的に運用管理している（下図参照）。これにより、電力の物理的なロバスト性の低さを補い、安定性・信頼性を担保している

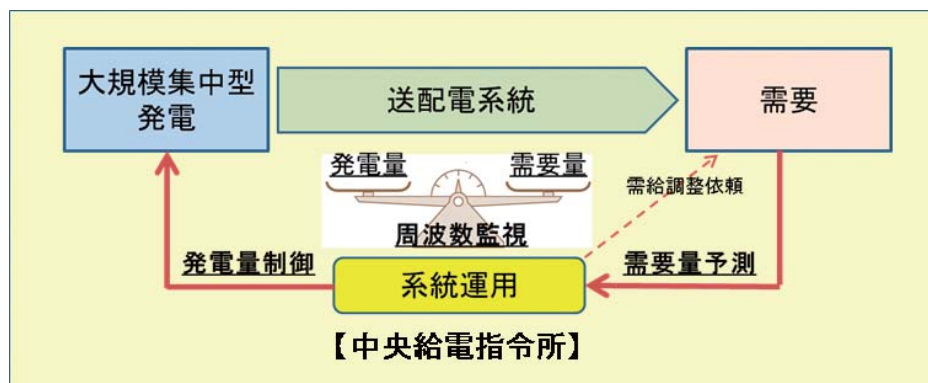


図 C5-1 電力システムにおける系統運用

※系統運用者：日本では電力会社の送配電部門。欧米ではさまざまな形態の組織がある

※周波数監視の意味：需給バランスが崩れ始めると周波数変化としてあらわれる。この変化を監視し、周波数が一定になるように発電量制御

2-2. 社会・経済的効果

本提案の課題に対応した研究開発成果が社会実装されれば、一般家庭という膨大な需要家が電力ネットワーク、および連携する情報ネットワークに主体的・能動的に参加できる技術・システムを提供できるものと考えられる。その結果、PV 大量導入を可能とする高い柔軟性かつ高いレジリエンスを持つことで、低炭素社会に資する低圧配電系ネットワークへの転換、電力需要の能動化（デマンドレスポンスやバーチャルパワープラント）の拡大に貢献できるものと考えられる。さらには「第5期科学技術基本計画」に記載されている ICT の利用による「超スマート社会」におけるエネルギーバリューチェーンのサービスプラットフォームとしても機能することが期待でき、一般家庭間の電力取引や新たなビジネスモデルの導入による新たな価値創造も期待できる。このように新たな制度やビジネスモデルなどの仕組みも導入されるものと想定すると、需要家、社会システム、供給事業者に対して、経済性も含めて、以下に示すようなさまざまな効果が期待できると考えられる。

◆電力価格の低下

- ✓ PV からの電気は燃料費がゼロであり、近隣家庭からの余剰電気を託送料金に近い金額でシェアしても、両者にメリットがでるため、全体として電力購入価格低下の効果が期待できる。

◆需要側（家庭）の電力購入方法の選択肢増加

- ✓ 電力潮流を人為的に制御できることから、さまざまな電源から各需要家の嗜好に応じて購入・設定ができる。例えば、少々高くなっても自由に電気を使いたい、なるべく電気代を抑えたい、電気代に上限を設けたいなどが自由に設定できる。

◆系統側の予備力・調整力削減、コスト削減

- ✓ 低圧配電系における需給を事前調整するため、需要の不確実性が減少し、系統側の予備力を削減できる。これによりコスト削減が可能となる。
- ✓ 低圧配電系内の需要側が持つエネルギー資源の活用が容易になることから、アグリゲーションによるデマンドレスポンスやアンシラリーサービスの供給力提供のみならず、価格シグナルによる自律的需給調整や調整力供給も可能となり、より需給調整の余地が拡大する。これにより、系統運用の調整負担が低下し、コスト削減が可能となる。

◆電力ネットワークのレジリエンスの向上

- ✓ 低圧配電系内のトラブルの場合、その影響が局所的で全体に波及しない
- ✓ 系統側のトラブルでも、低圧配電系内で限られた電力量を公益性も含めた優先度に従って自律分散的に電力供給を行うことが可能。

◆エネルギー事業者以外の事業者（サードパーティ）によるビジネス参入拡大

- ✓ 電力の物理的制約を切り離せるため、分野の異なるサードパーティの電力市場参入が容易になり、新たな付加価値ビジネス創出の可能性が拡大する（図5参照。例えば情報と電気の融合ビジネス、ヘルスケア分野など）
- ✓ 小規模・局所的な範囲でのインフラビジネスが可能になることから、分散的、小額

の投資でも対応できる。このため、投資リスクも分散できる。

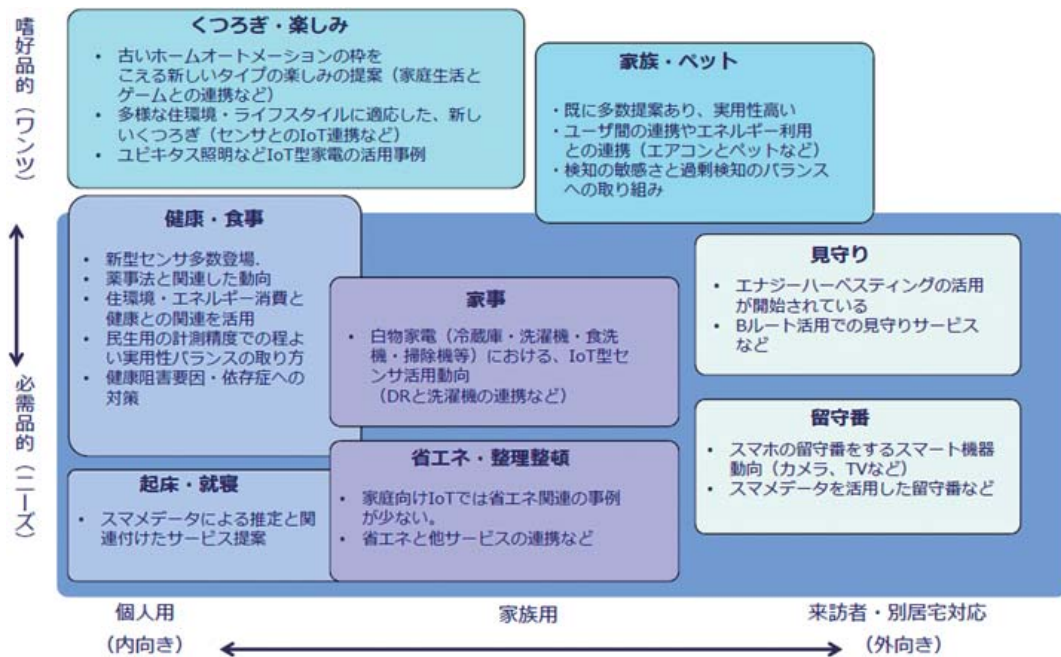


図 5 IoT と家庭向け新サービスの例

(出典：CRDS-FY2015-WR-14 電中研・浅野氏発表資料)

◆海外の電化への貢献・ビジネス拡大

- ✓ PV の分散型に適した電力システム技術として輸出

◆効果的施策の実現

- ✓ 需要家を対象とした施策によるデマンドレスポンスの効果が定量的に推定できるようになり、効果的な施策が可能になる。
- ✓ 人を対象とした各種施策の効果が推定できるようになることで、受容性が高く効果的な施策が可能になる。

なお、国連では 2015 年 9 月に人間、地球及び繁栄のための行動計画として、17 の目標と 169 のターゲットからなる「持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals:SDGs)」¹⁾ を全会一致で採択している。この実現に向けては科学技術イノベーション (STI) への期待が大きいとされ、本提案内容においても自国あるいは海外を対象に SDGs として、目標 7：エネルギー、目標 11：都市、目標 12：消費と生産、目標 13：温暖化、を実現するための技術になりうると考えられる。今後、SDGs の視点からの研究開発の必要性も精査する必要がある。

【参考文献】

- 1) 「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」
(日本語 (外務省仮訳) <http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000101402.pdf>)

研究開発を実施する意義
社会・経済的効果

2-3. 科学技術上の効果

一般家庭の電力需要が対象になることで、多くの分野にまたがる研究開発になる。電力システムとしては電気と情報の融合に関する科学、エネルギー需要科学においては、行動経済学、心理学、医学等の人の行動に係る研究に加え、住環境学や建築学などの融合が進展する。以下に示す。

- ◆ 出口を見据えた異分野融合による研究開発、それに対応した新しい領域創成による学問の進化
 - ✓ 電気工学、情報工学、システム工学等の融合による新しい領域創成
 - ✓ 工学と心理学、医学、経済学等との連携による新しい領域創成
 - ✓ エネルギー需要の構造を理解し、需要調整のポテンシャル（人の行動変容も含む）を導くための学術分野の確立
- ◆ 研究開発による人材育成
- ◆ アカデミア発の長期視点からの社会変革への提案

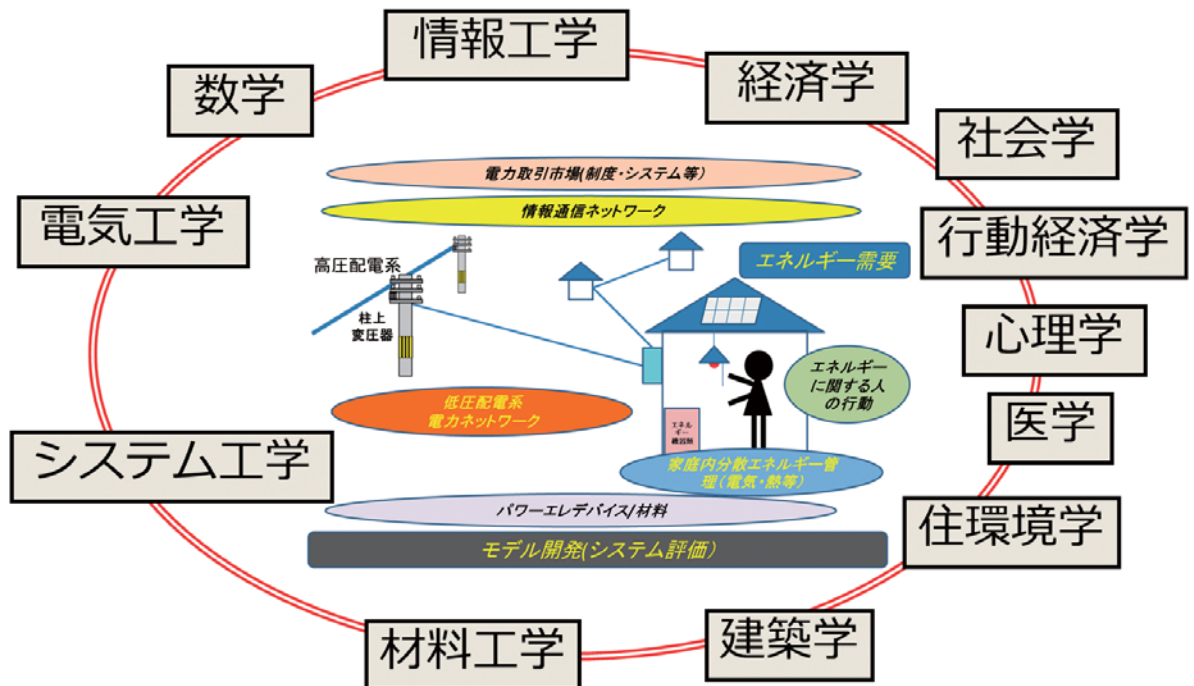


図 6 一般家庭を対象にした異分野融合領域の創成

3. 具体的な研究開発課題

本章では 2050 年における (1) 低圧配電系ネットワーク内の電力需給に関する課題、と (2) 一般家庭のエネルギー需要に関する課題に対応するために、今後必要となる研究開発を示す。

電力システムで自律分散型を実現するためには、人為的な電力潮流制御技術と潮流の優先度を定めるための仕組みが必要になることから、(1) 低圧配電系ネットワーク内での電力融通や需給調整を自律分散的に行うための研究開発、および需要の構造化や限定合理的な人の行動を理解することが必要になることから、(2) 人の行動も含めたエネルギー需要に関する研究開発と、大きく二つの研究開発領域がある。各領域の具体的な研究開発課題は以下の通り。

(1) 自律分散型低圧配電系ネットワークの研究開発

- ・電力の自律分散型システムと ICT による電力潮流制御技術
 - 電力カラーリング、電力ルーティング、パルス・パケット送電、非同期化など
- ・家庭内の電力制御システム
 - 家庭内の電力利用の優先度を定める仕組み作り、HEMS など電力潮流の制御システム、市場メカニズムを用いて電力の電子取引を行う場合には最適化運用のためのアルゴリズム開発 (AI 利用) など
- ・ネットワークや家庭内のパワエレ機器や材料開発
 - 電力ルータ、パワエレデバイス、回路設計など
- ・低圧配電系内の市場メカニズム / 電子取引の仕組みや方法
 - 分散高速取引市場、プロトコルなど
- ・電力市場における制度設計できるモデル
 - 人工市場シミュレーション、オークション理論など
- ・電力システム全体を評価できるモデル

(2) エネルギー需要科学に係る研究開発

- ・エネルギー需要のモデル化、そのための計測、分析
 - 需要分解型需要モデル (ボトムアップ型) など
- ・エネルギー利用 (供給・消費) に関わる行動経済学を用いた研究
 - フィールド実験経済学など

電力の自律分散型システムの実現のためには、ある場所から狙いとする場所に決まった電気量を送ることが必要であり、このため物理法則で電気が流れる現在の電力システムとは異なり、人為的な電気の潮流制御が必要となる。そのためには電気をどこからどこにどれだけ流すかを ICT で調整した上で、自律分散的な潮流経路の制御方法で電気を流すことになる。また自律分散的に流すためには潮流制御の優先度を定める仕組み作りが必要になる。

一方、エネルギー需要に関する研究開発としては、エネルギー消費に関する家庭内の人の行動も含めたモデル構築やそのための計測、さらには人が限定合理的な行動をすること

を踏まえた行動科学、行動経済学からの研究が必要になる。

これらの研究開発課題は多岐に渡るため、システム全体の相互の関係を明確にした上で、これらを物理層・サイバー層・サービス層の3層（レイヤー）に構造化して、レイヤー毎に研究開発を推進することが重要になる。このような構造化でレイヤー毎の分業を可能にすることで、特定分野に専念して技術開発ができ、技術進歩の促進が期待できる。物理層に関連するものとしては、人の動きや電気の流れなどの実社会を対象としたもの、サイバー層に関連するものとしては、コンピュータや情報等の仮想空間を取り扱うもの、サービス層に関連するものとしては、ビジネスや制度などの仕組みを取り扱うものとなり、さらには物理層・サイバー層・サービス層の3層によるシステム構築、さらにはその研究開発を推進するための手法的な研究開発の推進も必要である。下図にこれら研究開発項目の階層毎の概要を示し、研究開発の具体例を示す。

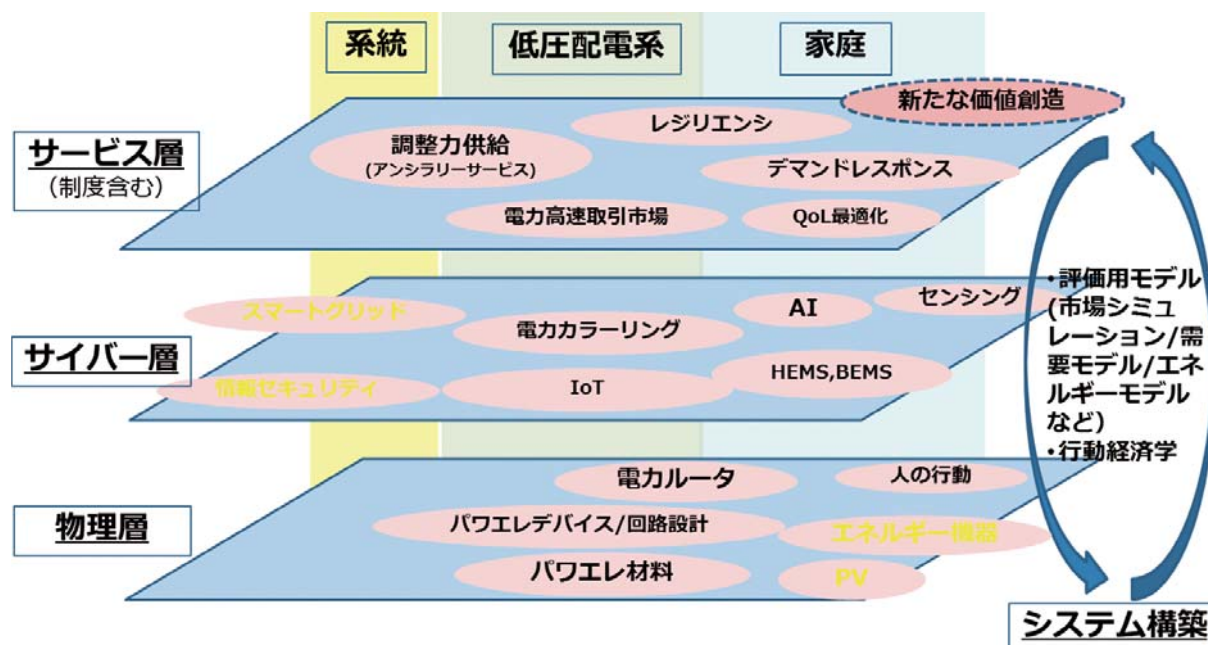


図7 各研究開発課題の関係：3層構造化とシステム構築
(内閣府・エネルギー協議会資料を参考にCRDSで作成)

◆サイバー層に係る研究開発

自律分散的に電気を流すためには、供給側と需要側との間で個別に電気を区別することが必要になる。電気自体は同質で区別がないことから、情報、ICTを用いることで電気を区別する方法・仕組み（以下、電力カラーリング）が必要になる。電力カラーリング方法は、サイバー層と物理層の両面からの対応が必要になる。既に複数の方式が検討されている。今後は各方式のメリット・デメリットも含めた比較検討も必要になる。

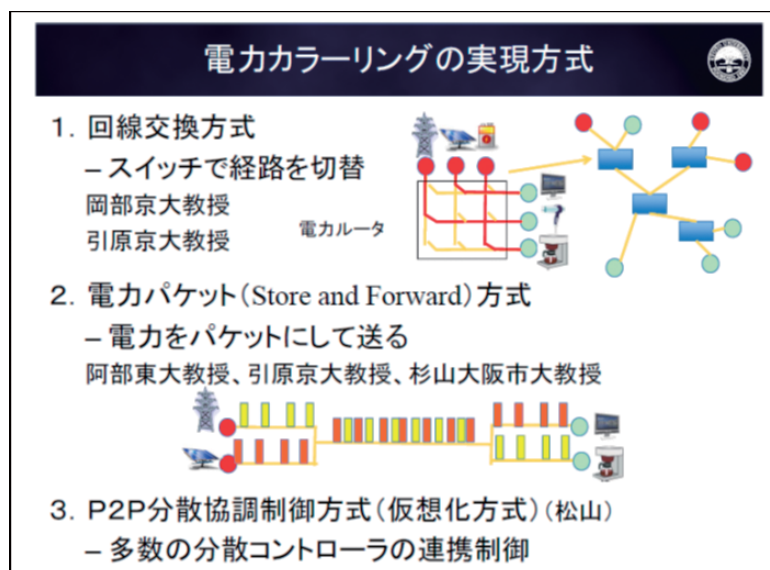


図8 電力カラーリング方法

(出典：CRDS - FY2015-WR-14 京大・松山教授発表資料)

また事前調整については既存のインターネット技術として経路調整のプロトコルなどが参考になる。さらに家庭内の電力潮流の制御については、現在の HEMS や BEMS などの技術も利用できると考えられる。一方で将来、一般家庭で電力の電子取引が発生する場合、人間が個別に対応することはほぼ不可能になることから、人工知能 (AI) の利用が必要になる。AI については研究開発が進展しており、家庭においてもさまざまな場面で利用可能になると考えられる。このため AI 利用の一つとして、電力利用においても需要家の意思決定をアシストできるものと考えられる。

さらにエネルギー需要の研究においては、人の行動の実態を把握するための計測が必要になる。このため、目的に応じたセンシング技術とデータ解析技術も重要になる。

なお、サイバーセキュリティの問題は、電力システムに限らず情報ネットワークにつながる全てのシステムに共通した重要課題である。現在、このサイバーセキュリティについては国としても重要課題として対策が推進中であることから、IoT の社会実装に向けた共通課題として取り扱うこととし、本提案内には含めていない。

◆物理層に係る研究開発

前述の電力カラーリングについては、方式に応じてサイバー層のみならず物理層の電力潮流制御のデバイス設計も異なるため、その方式に応じたデバイス設計、回路設計が重要になる。特に電気のルーティングを高速、高精度で制御するためのパワーエレクトロ技術を用いた電力ルータや回路設計が必要となる。これらのパワエレ機器は、電力損失を低減するためのパワエレ材料の研究開発も必要になる。特にパルス送電などの電力をパケット化して送る場合は、回路設計をはじめとして、利用段階で連続的な電力にするための短時間の電力貯蔵用のキャパシタなどの研究開発も重要になる。

◆ サービス層に係る研究開発

家庭内での電力利用のように金銭的なやり取りが必要の無いケースの場合、電力利用の優先度の決め方は生活の質：QoL (Quality of Life) が最大になるように利用の優先度を決めていくことになり、そのためのアルゴリズムなどの研究開発も必要となる。一方、外部との電力の電子取引が発生する場合は金銭的な授受等が伴うことから、その仕組み作りが必要になる。特に市場メカニズムを用いた電子商取引の経済的な仕組みを構築する場合、その制度設計などに工学的なアプローチも有効と考えられている。株式市場においては既に市場メカニズムによる電子商取引が行われており、それら株式市場を対処とした研究が先行研究事例になる。例えば適切な制度設計を決めるためのオークション理論を用いたメカニズムデザインの研究開発やコンピュータ上に人工的な市場を作成し、シミュレーションにより市場の動的安定性を検証するエージェントシミュレーションなどが研究の対象となる。

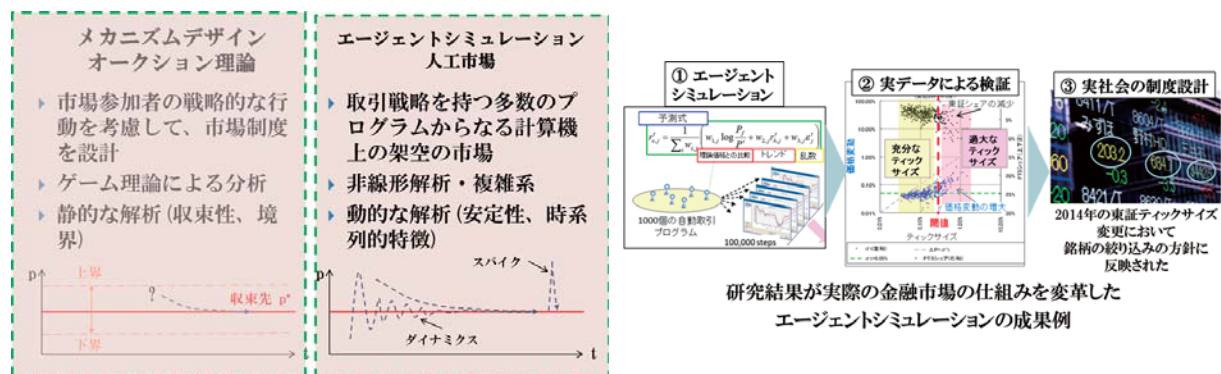


図9 市場メカニズムの工学的アプローチ

(出典：CRDS-FY2017-WR-02 東大・和泉教授発表資料)

◆ 3層構造化によるシステム構築

低圧配電系内における市場メカニズムを用いた自律分散型の電力システムのコンセプト例としては、高速取引市場の検討がある。これは分散低圧配電系ネットワークの空間解像度をノード毎、時間解像度をミリ秒レベルとして、電力は規定化したパルス送電として電子取引を行うことを考えたものである。システムとつながる柱上変圧器を中心に近隣家庭からのPVからの電力、システムからの電力など局所的範囲が市場範囲となり、この市場内で高速な市場取引を行うことになる。市場メカニズムの採用により競争原理を徹底化することで、社会厚生最大化を目指すことが狙いとなる。このようにシステム全体を構築し、要素技術として研究開発を進め、システムとしての妥当性の検証、必要があればシステムの改善を行いながら研究開発を進める必要がある。

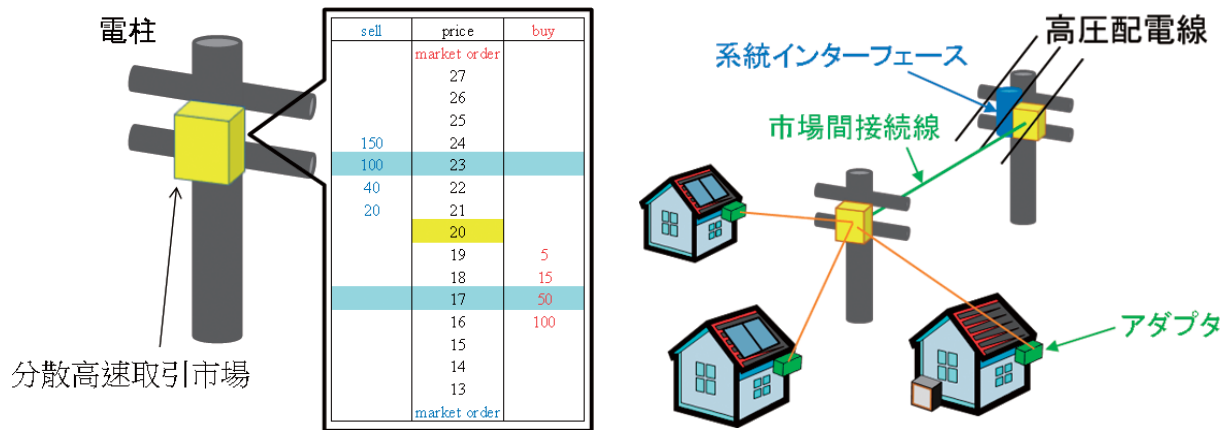


図 10 自律分散型システムのコンセプト例：分散高速取引市場

(出典：CRDS-FY2015-WR-14 東大・藤井教授発表資料)

◆研究開発推進のための手法（モデル評価等）

自律分散型システムの課題の洗い出しや電力システム全体の安定性などはシステム全体を構造化したモデルによる評価検討が重要になる。このため、ツールとしてのモデル構築が重要な研究開発の対象となる。また将来のエネルギー需要予測においても、これまでは国土レベルの予測であり、GDP や人口などをパラメータとしたマクロな予測でしかない。一方で、短期予測では時系列予測のようなやり方があるが、説明指標は気温程度だけで、中身がわからない状況である。今後はその中身を明らかにするためにエネルギー消費構造を理解し、各要素に分割した上で、機器やサービス毎に消費量とそれにより需要家が受けたサービスや経済性、快適性などを考慮して、どれぐらい調整可能かを定量的に調べる必要がある。

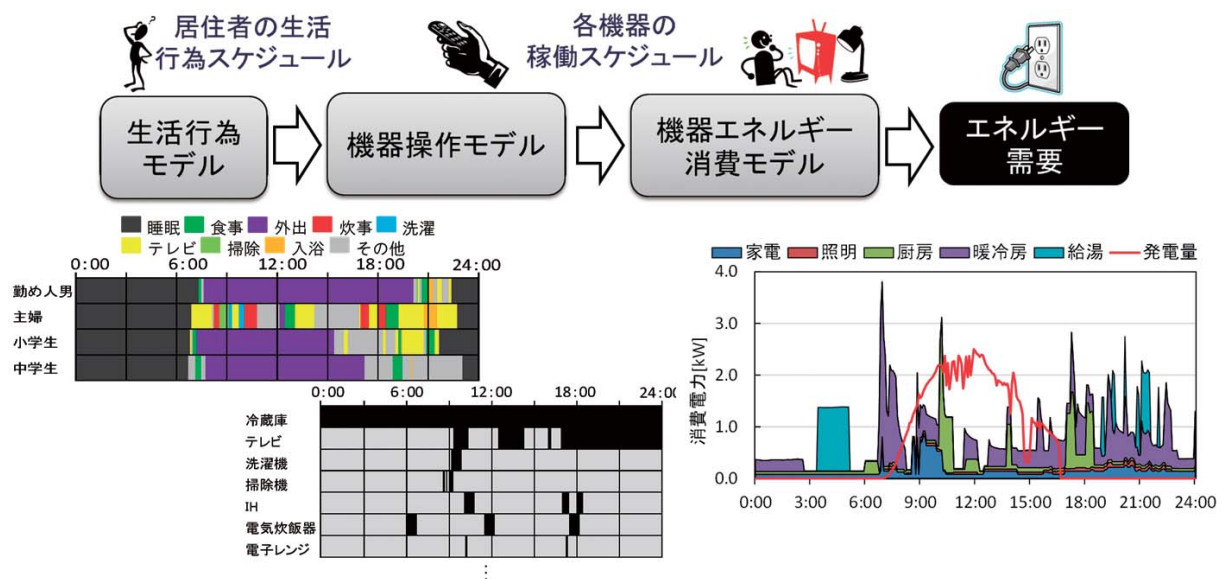


図 11 要素分解型エネルギー需要モデル

(出典：CRDS-FY2017-WR-02 大阪大・下田教授発表資料)

具体的な研究開発課題

この研究開発例として要素分解型モデルを用いたエネルギー需要の研究も行われている。これは家庭の居住者を想定して、サービスを生み出すエネルギー機器とそれを操作する人の行動や制御装置などの要素から構成されるシステムとして表現し、システムが変化するメカニズムを明らかにするボトムアップ型のアプローチである。また別な方法として全体挙動型も検討する必要がある。

また完全合理的ではない実際の人の行動を対象とした研究分野としては、行動経済学などの分野がある。これは、人の行動が必ずしも合理的ではないものの、その行動を引き起こす共通の「心のクセ」に着目したものである。具体的な研究例として、経産省次世代エネルギー・社会システム実証ではスマートコミュニティ実証として4地域（横浜、豊田、京都（けいはんな）、北九州：平成23～26年度）においての人の節電等に関する行動を統計的に解析するためにフィールド実験（ランダム化比較試験（RCT））も行われた事例がある（図12左）。これらは人のマニュアル型の節電行動によるデマンドレスポンスを対象とした研究であるが、今後は自動型のデマンドレスポンス、さらには理的負担を掛けないで対応できる方法などを研究するために、センシング技術やビッグデータ解析、AIやIoTを組み合わせることで新たな研究開発分野に拡大する可能性もある（図12右）。また長期的にはスマート社会としてエネルギーのみならずヘルスケアなどの広がりを持つことも期待できる。

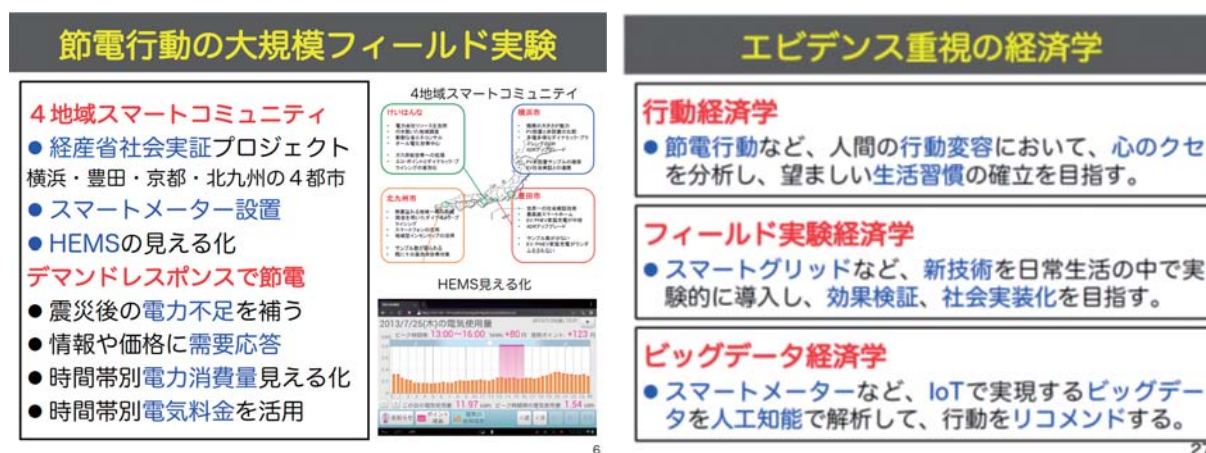


図12 スマートコミュニティ実証（左） 経済学三本柱（左）

（出典：CRDS-FY2017-WR-02 京大・依田教授発表資料）

なお、家庭内のセンシングや情報収集については、プライバシー保護等の問題があり、ELSIの観点から重要な検討課題となる。ただし、ここではビッグデータ利用で検討されているELSIの共通課題と整理し、本提案には挙げていない。

【コラム 6】 情報通信におけるインターネット技術の進化

情報通信の世界でこの 40 年間に起きた革命は、アナログからデジタルへの転換、次に回線交換からパケット交換、さらには帯域保証型（通信速度の保証）からベストエフォート型へと進化しており、これは半導体技術の飛躍的な進歩が原動力となっている。

図 C6-1 に示す通り、ICT におけるインターネット技術が進化した理由を考えると以下の 4 点が挙げられる。

1. パケット交換：ICT では連続量を離散化・量子化・符号化することでパケットとして取り扱えるようにした。これにより通信回線の多重化を可能にしている。
2. ストア・アンド・フォワード（パケツリレー方式）：パケットを一旦貯めて、次に送ることで時間確保を含めて様々な問題に対処できるとともに、物理層の局所化が可能になる
3. システム設計の階層化・要素設計の局所化：階層化により他の階層を意識せずに開発できることから大規模、マルチドメイン、ヘテロジニアスなシステムの構築が容易になる。また障害、リスクも局所化できる。
4. 自律分散制御：分散した個々が一定のルールやアルゴリズムに従って、ネットワーク上を自律的に流れるため、障害が起きても全体に波及しない。このため障害、リスクを局所化でき、レジリエンスの高いシステムになる。

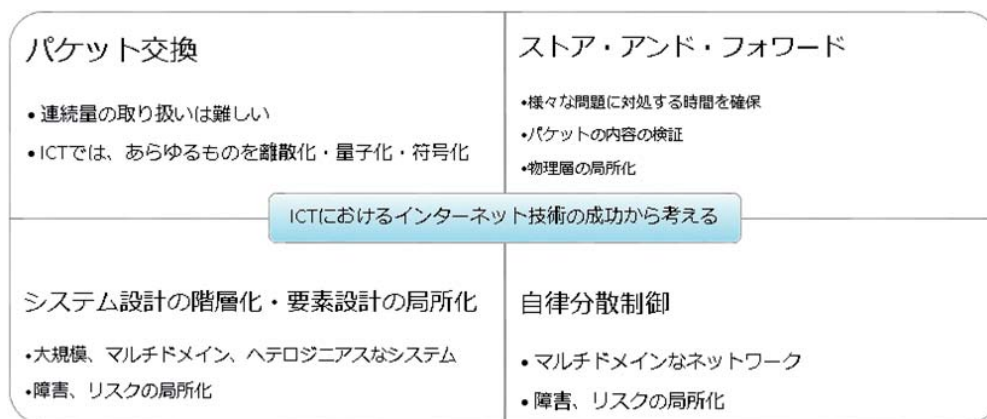


図 C6-1 ICT におけるインターネット技術¹⁾

参考：通信パケットと電力パケットの相違点は以下の通り。これらの物理層の違いは研究開発課題として挙げられる。

- 電力パケットは転送毎に「劣化」（電力損失）する
- 電力パケットは廃棄できない（情報と異なり、エネルギーという実体を持つ）
- 電力パケットは識別する必要がない（電力は同質なため）

【参考文献】

1) CRDS-FY2017-WR-02 京大・岡部教授発表資料

4. 研究開発の推進方法および時間軸

本提案は研究開発内容が異なる以下の二つの研究開発領域を推進することになる。

(1) 自律分散型低圧配電系ネットワークの研究開発

(2) エネルギー需要科学に係る研究開発

特に上記(1)の自律分散型低圧配電系ネットワークの研究開発は、実装段階において集中制御型から分散自律型へのシステム転換を含む。このため新しい仕組み・技術・システムを社会へ実装、導入していくプロセスも必要になることから、それを研究開発の一環として取り込むことも重要になる。

最初に重要な点として、上記の二つの研究開発領域は現時点で必ずしも広く認知、共有化されてはいないことから、産官学で情報を共有化する場を設定することが必要である。また研究開発の初期段階はコンセプトの実証であり、まずはその効果を示す段階となる。このため当初の研究開発の推進母体はアカデミア主体になると考えられ、オープンイノベーションとして、産官からのニーズの明確化と研究開発目標への取り込み、その成果を全体にフィードバックすることが必要になる。特に新しい仕組みを社会に導入する場合、データやモデルのオープン化は非常に重要になる。風洞実験のように技術の変化で全体像の変化がイメージできるようになると、どのようなネットワークが最適なのか、どのようなビジネスチャンスがあるか、さらにはそのビジネスチャンスを生かすために次のステップの開発は何かということを見通せるようになり、産官の参加が加速、拡大できることになる。

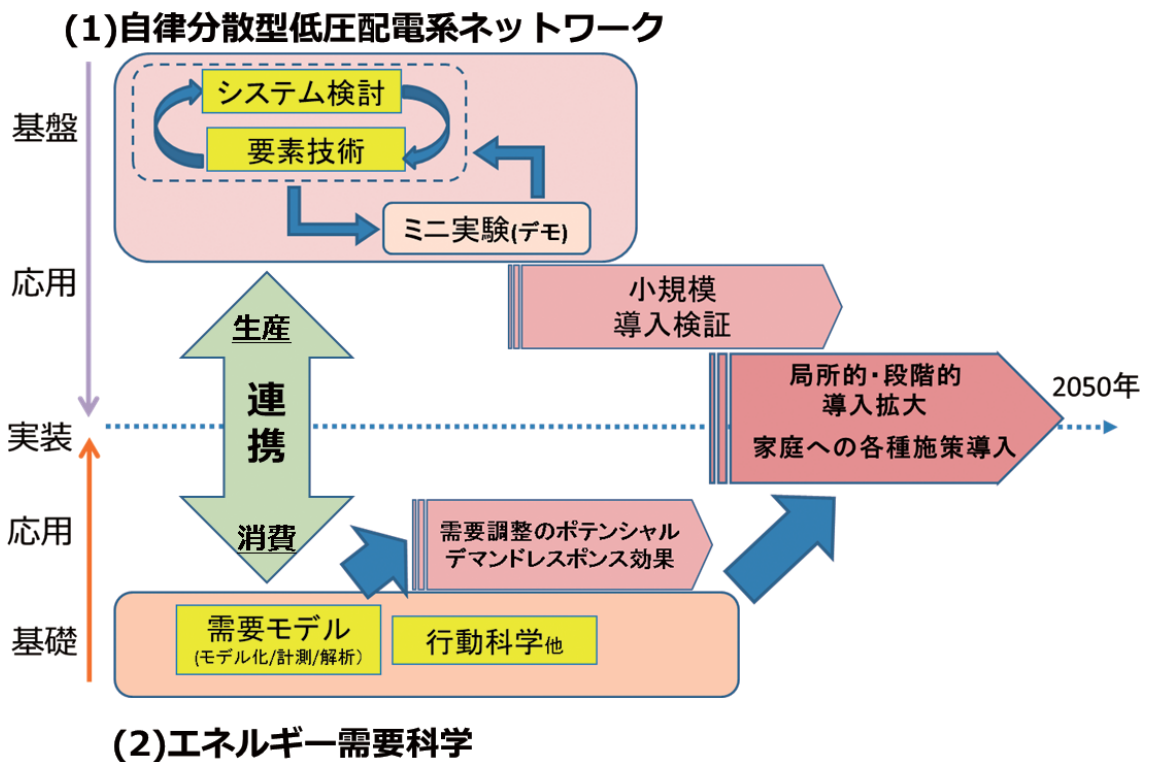


図 13 研究開発の推進方法と時間軸

図 13 に示すように研究開発の進展に応じて、産官学による研究体制を段階的に拡大・強化することになる。また研究開発自体にコンセプト実証（POC：Proof of concept）を研究開発の一部として取り込み、ミニ実験などを行いながら、システムと要素技術の両面から技術進展させることで、新しい仕組み・技術・システムの効果を示していくことが必要になる。

なお、新たなシステムは従来のシステムとの互換性を持たせることが可能と考えられる。このため段階的な導入として局所的で小規模なネットワークに導入・検証を行い、改良しつつ、さらにそれら小規模ネットワークをつなげることで徐々にネットワークを拡大していくことが肝要となる。

(2) についても、同様に人の行動という広い範囲が研究対象となるため、まずはエネルギー需要に係るニーズを明確にした上で研究開発を行い、最初は需要モデルの構築やデマンドレスポンス等の効果の定量化、さらには電力システムの変化を見ながら研究範囲を広げることが重要になる。また(1)(2)はいずれも最終的には一般家庭におけるエネルギー需給として関連することから、推進時における(1)(2)の情報共有化も重要となる。

これらの研究開発は、出口を考えた研究開発ではあるが、前述の通り、初期段階はコンセプト実証段階であり、不確実性が伴うことから公的資金により行うべきである。なお関連する機関としては内閣府、文部科学省、経産省、JST、NEDO等が考えられる。初期段階はコンセプトを実証するために、システムも要素技術も複数の候補となる研究開発を幅広く進める必要があり、5年～10年程度の比較的長期的視点からの研究開発を推進することが望ましい。なおこのコンセプト実証については、現在のシステムを前提として2030年に向けて進められている研究開発と同時並行の形で推進するとともに、両研究開発の進捗や社会的ニーズの状況を確認しながら、本提案の研究開発の必要性や課題をフィードバックすることが重要になる。このため少なくとも2030年より前には、本提案による研究開発の効果が明示されることが必要であり、例えば(1)の場合においてはシステム自体を明確化して、その効果を定量的に示せるレベルにしておくことが肝要となる。

付録 1. 検討の経緯

- 本プロポーザル作成の前段階として、平成 27 年度に CRDS 環境・エネルギーユニットにおいてエネルギーネットワークに関連した俯瞰調査活動を行った。これはエネルギー分野において、「エネルギー供給」と「エネルギー利用」の従来からの二区分に加え、両者を結ぶ「エネルギーネットワーク」の重要性が増してきている状況を鑑み、新たな区分として設定したものである。調査活動としては有識者へのインタビューに加え、平成 28 年 1 月 20 日には俯瞰ワークショップ「エネルギーネットワーク・統合システム (EMS、スマートグリッド)」を開催した。(俯瞰報告書：CRDS-FY2015-WR-14)
- これらの調査活動結果および追加調査等を基に、研究開発戦略として本領域をさらに深く検討するために、平成 28 年 6 月より「低炭素エネルギーネットワークに資する電力システムと基盤技術の検討」として調査チーム (エネルギーネットワークチーム) を立ち上げ、調査活動を開始した。調査活動では文献以外にも大学、企業等の有識者からのインタビューや関連講演会等の参加も含めて、幅広い情報収集を行った。さらにこれまでの検討結果を踏まえて、平成 29 年 1 月 17 日に科学技術未来戦略ワークショップを開催した。このワークショップでは、2050 年超における低圧配電系ネットワークおよびそれらにつながる一般家庭における需給構造変化に対応した研究開発課題、その研究推進方法などの議論をおこなった (報告書：CRDS-FY2017-WR-02)。
- 以上の調査・分析・検討の結果と、ワークショップにおける議論等を踏まえて、本戦略プロポーザルを発行するに至った。なお発行に至る間、先行調査である俯瞰調査活動を含めて、有識者へのインタビュー 31 名、セミナー開催 1 回 (3 名発表)、ワークショップ開催 2 回 (計 22 名発表)、関連講演会への参加による情報収集 9 件を行った。

【科学技術未来戦略ワークショップの開催について】

平成 29 年 1 月 17 日に科学技術未来戦略ワークショップ「未来エネルギーネットワークと需要科学 ～ 2050 年超の一般家庭でのエネルギー需給構造の変革時代到来に向けて～」を開催した。当日のスケジュールおよび参加者は以下の通り。

プログラム

開催日時：2017 年 1 月 17 日 (火) 13:30 ～ 18:00

開催会場：JST 東京本部別館 4 階会議室 F

13:30 ～ 13:35 開会挨拶 JST 研究開発戦略センター 佐藤 順一

13:35 ～ 13:50 事務連絡・趣旨説明 JST 研究開発戦略センター 尾山 宏次

13:50 ～ 16:25 発表 (1 件 15 分発表、3 分質疑) (発表順 / 敬称略)

- ・「将来のスマートエネルギー NW」藤井 康正 (東京大学)
- ・「オンデマンド型電力ネットワークと電力のパケット化」岡部 寿男 (京都大学)
- ・「パルス化送電方式に基づく低電圧配電系電力ネットワーク」杉山 久佳 (大阪市立大学)
- ・「パワーエレクトロニクス技術～将来の電力システムに向けた研究～」伊瀬 敏史 (大阪大学)

- ・「市場メカニズムに関する工学的研究」和泉 潔（東京大学）
- ・「エネルギーマネジメントにおける需要研究」下田 吉之（大阪大学）
- ・「スマートグリッド・エコノミクス～フィールド実験・行動経済学・ビックデータが拓くエビデンス政策～」依田 高典（京都大学）

16:25 ～ 17:05 コメンテータからの発表・コメント（5～8分発表）

- ・大谷 謙仁（産業総合研究所）
- ・斎藤 浩海（東北大学）
- ・林 泰弘（早稲田大学）
- ・矢加部 久孝（東京ガス）

17:05 ～ 17:55 総合討議

17:55 ～ 18:00 閉会挨拶

氏名	所属	役職
講演者・コメンテータ（五十音順）		
和泉 潔	東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻	教授
伊瀬 敏史	大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻	教授
依田 高典	京都大学 大学院経済学研究科	教授
大谷 謙仁	産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所 再生可能エネルギー研究センターエネルギーネットワークチーム	研究チーム長
岡部 寿男	京都大学 学術情報メディアセンター	教授
斎藤 浩海	東北大学 大学院工学研究科 電気エネルギーシステム専攻	教授
下田 吉之	大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻	教授
杉山 久佳	大阪市立大学 工学研究科 電子情報系専攻	准教授
林 泰弘	早稲田大学 大学院 電気・情報生命専攻	教授
藤井 康正	東京大学 大学院工学系研究科 原子力国際専攻	教授
矢加部 久孝	東京ガス株式会社 リビング本部 燃料電池事業推進部 燃料電池開発グループ	グループマネージャー
JST		
佐藤 順一	CRDS 環境・エネルギーユニット	上席フェロー
大平 竜也	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
尾山 宏次	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
島津 博基	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
末村 耕二	CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
高橋 玲子	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
高島 洋典	CRDS システム・情報科学技術ユニット	フェロー
田中 加奈子	低炭素社会戦略センター	主任研究員
原田 裕明	CRDS 科学技術イノベーション政策ユニット	フェロー
福島 俊一	CRDS システム・情報科学技術ユニット	フェロー
鈴木 康史	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
関根 泰	CRDS 環境・エネルギーユニット／早稲田大学 理工学術院	フェロー／教授
松田 一夫	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
松本 麻奈美	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
阿部 宜之	戦略研究推進部 研究評価グループ	主任調査員
磐田 朋子	低炭素社会戦略センター	研究員
三枝 邦夫	低炭素社会戦略センター	主任研究員
南 裕一	低炭素社会戦略センター企画運営室	副調査役

関係府省機関		
西島 元	文部科学省研究開発局環境エネルギー課	行政調査員
原田 千夏子	文部科学省研究開発局環境エネルギー課	行政調査員
鷹觜 利公	内閣府 CSTI 事務局 エネルギー・環境担当	ディレクター
三宅 葵	内閣府 CSTI 事務局 エネルギー・環境担当	政策調査員
小笠原 有香	NEDO 技術戦略研究センター エネルギーシステム・水素ユニット	研究員
西 順也	NEDO 技術戦略研究センター エネルギーシステム・水素ユニット	研究員
出脇 将行	NEDO スマートコミュニティ部	主任

※本ワークショップの詳細は、以下の報告書に掲載。

科学技術未来戦略ワークショップ報告書 CRDS-FY2017-WR-02

付録 2. 国内外の状況

海外動向（1）：低圧配電システムに関する研究開発

1. 米国 Transactive Energy

Transactive Energy は、電力システムの特徴である集中型の制御により行われていた需給バランス、システムの安定性、信頼性の維持を、市場経済ベースの制御メカニズムを通じて行う新しいアプローチ。2004 年に DOE が検討組織として「GRIDWISE Architecture Council」を設立し、実証試験も含めて検討。各ノードにおける電力価格（+託送料）の情報を元に、自動的な電子商取引を行うことで、電力システム全体の安定化・最適化を図る。デモンストレーションのための実験も行われた。（以下参照）

- Olympic Peninsula demo（2006-2007）

分布制約、卸売価格、分散電源など、複数の要因存在下での相互調整を行う意思決定方法を構築。

- AEP gridSMART® demo（2010-2014）

HEMS ベースのリアルタイム市場の構築。動的でリアルタイムなインセンティブを価格設定に反映する仕組みを構築し、PJM の電力取引市場において実用化。AEP 社の送配電コントロールとピークロード制御に導入。

- Pacific NW Smart Grid demo（2010-2015）

PNNL 開発の transactive 概念を用い、風力由来の余剰電力の地域間調整、ピークロードカット、電気料金削減を行う。5 分毎に近接するノードへのアクセスにより、インセンティブ信号や直近の電力取引予測を可能としている。

2. 米国のアグリゲーション産業化の例

米国ではアグリゲーションビジネスが進んでおり、プロジェクト例は、以下の通り。

- EnerNOC 社：DR や蓄電池アグリゲーションビジネス

- Comverge 社：一般家庭を対象としたネガワット取引

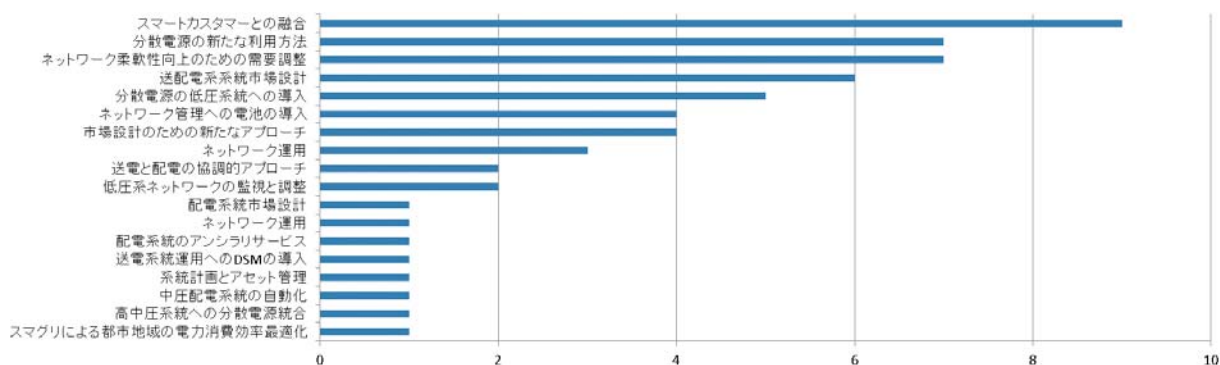
- Nest Labs 社：節電すると電力料金が払い戻しされる Rush Hour Rewards プログラム
また、人工知能による例に、Watson IoT、および米 Whirlpool、フィンランド Fingrid 社、独 Siemens 社とのタイアップ、人工知能を使った産業システムの監視プラットフォーム Crex がある。また Verdigris 社企業を中心に電力消費の分析を行うサービスを提供している。

3. 欧州電力グリッドイニシアチブ(European Electricity Grid Initiative(EEGI))

SET プラン (Strategic Energy Technologies Plan) のもとで、将来の欧州の電力ネットワークのイノベーションを加速する 9 年計画の研究開発プログラムが提案、実施され、成果が GRID Innovation Online に公表されている。その中から、低圧配電系を対象とし、Prosumer をキーワードとする 10 プロジェクトを下表に示す。また、これらのプロジェ

クトで扱うテーマをグラフに示す。

名称	概要
E-DEMA	E-Energy イニシアチブの 1 つ。ICT と測定データ活用により、発電から蓄電までのエネルギーシステムの統合と効率的消費の最適化を行う。
INERTIA	既存配電システムに、IoThings/Services により制御と配電協調のアクティブな要素を導入する "structural inertia" プロジェクト。
Model City Mannheim	エネルギー自給自足をを行う住宅 (cell) を地域単位やグリッド単位で制御する “cellular control concept” を設計。Energy Butler が情報セキュリティとプライバシーを保護しながら家電や EV を自動制御しエネルギー利用を最適化。グリッド供給信頼性も確保。
ADDRESS project	多数の低圧電力消費者 (プロシューマ) にアクティブなデマンドを配備することでアグリゲーション機能をもたせる。
NOBEL GRID Project	Horizon 2020 のもと低価格、高信頼、高安定、低炭素な電力をスマートグリッドの全関係者に供給し販売する先端ツールと ICT サービス。こうしたツールとサービスにより、積極的な消費者の参加、新アクターによるビジネスモデル構築、再エネ由来電力の配電への導入を可能とする。
The Flexiciency project	先端的計測、地域エネルギー制御や柔軟性向上などの電力小売における新サービスを検討。オープンな EU 市場において領域を超えたステークホルダーとの標準化を見込んだ活動を通して加速されている。
BESOS	スマートシティの住民への持続可能性やエネルギー効率に関する啓蒙と意思決定サポートシステムの構築。
The Estfeed Project	複数情報を統合し、電力の柔軟な使用のための管理、エネルギー効率向上、監査やベンチマーキングにおいて価値ある情報に変えるソフトウェアプラットフォーム。
Smart Watts	E-Energy イニシアチブの 1 つ。Aachen にフィールド試験場において、全ての市場参加者の発電と需要のデータをリアルタイムで入手し、unbundling-compliant モデルを構築する。
SGMS	電力の生産者と消費者が、既存のインフラをより効率的に使い、分散電源由来の電力ネットワークのホスティングサービスを増やすためのインテリジェントネットワークを制御する。中低電圧のプロトタイプモデルが試行中。
MeRegio	E-Energy イニシアチブの 1 つ。分散電源においても利用者の効率向上の要求に合致するために、エネルギーバリューチェーンの全要素に ICT 統合を目指す。



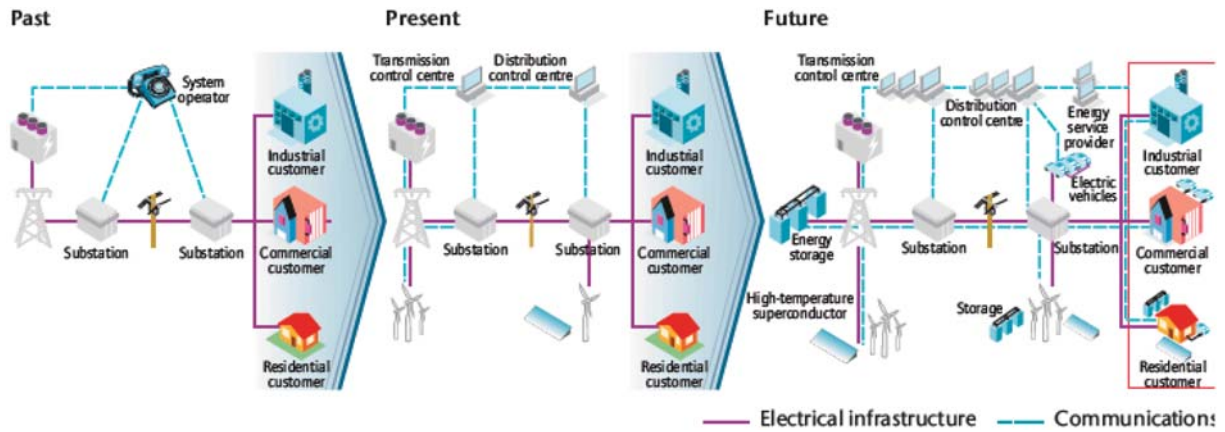
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHow2GuideforSmartGridsinDistributionNetworks.pdf>

4. IEA によるスマートグリッドプロジェクト

IEA では、スマートグリッドを「送配電の監視及び管理に ICT を用い、変化する消費者の電力ニーズにあわせて多様な電源由来の電力を供給する電力ネットワークシステム (Technology Roadmap: Smart Grids (2011))」と定義しており、将来は統合されたグリッ

ド全体の機能が形成されていくとしている。

<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHow2GuideforSmartGridsinDistributionNetworks.pdf>



またスマートグリッドに関連するプロジェクトの領域と検証内容は以下の通り。

プロジェクトの種類	ハード	システムとソフト	機能
AMI	スマートメータ、家庭内ディスプレイ (IHD)、サーバ、リレー、通信機器	測定データ管理システム (MDMS)、通信ソフト、作業管理システム (WMS)	集金、盗電防止、停電通知、サービス・保全計画
消費者側システム	スマート電気機器、ルータ、IHD、ビル自動化システム、蓄熱機器、スマートサーモスタット、EV 蓄電機器、蓄電池、インバータ	エネルギーダッシュボード、EMS、スマホ・タブレット用アプリ、課金システム、G2V・V2G 向け課金および充放電方式構築	家電や EV の自発的制御サポートのための電力消費認識向上
デマンドレスポンス	AMI システム、目的型家電制御機器あるいはシステム	EMS、配電管理システム (DMS)、GIS	ピーク需要シフト、消費者認識と選択の向上、システム柔軟性の向上、不具合時対応、TOU 料金促進
配電自動化	リクローザ、スイッチ、キャパシタ、遠隔操作 DG および蓄電装置、変圧器センサ、電線およびケーブルセンサ	GIS, DMS, 停電管理システム (OMS)、WMS	グリッドの平常時、停電時、保守時の顧客影響を最小化する運用・管理
分野横断的課題：ICT 統合	通信設備、ルータ、リレー、スイッチ、ゲートウェイ、サーバ	企業リソース企画ソフト、顧客情報システム	特定の目的のための電力データ収集、転送、分析

海外動向 (2) : エネルギー需要科学に関する海外動向

1. エネルギー需要科学に関する関係団体

1-1. BECC (Behavior, Energy & Climate Change Conference)

昨今のエネルギーシステムがおかれる状況変化のもとで、エネルギーの Consumer か

ら Prosumer へと変化を遂げつつある個人や組織の、エネルギー利用、温暖化ガス排出、気候変動、持続可能性に関する行動や意思決定を把握・理解するための代表的な学会に BECC (Behavior, Energy & Climate Change Conference) がある。http://beccconference.org/ 2016 年の BECC でトピック的に扱われたテーマには以下がある。

- ・ 需要行動分析のための方法論 (行動変容分析のためのデータ収集、キー要素分析、モデル構築、分析手法構築など)
- ・ 対象別の需要行動比較 (個人、組織、地域別、プログラム別、ライフスタイル別、所得別、社会的属性別など)
- ・ 需要行動の変容 (変容と定着、情報の内容や伝え方別の行動変容、マーケティング手法としての変容分析)
- ・ 新技術導入による行動変容 (スマート家電、EV など新移動手段、情報端末など)

1-2. ACEEE

米国の NPO である ACEEE (American Council for an Energy-Efficient Economy) では、1980 年の創設以来エネルギー効率向上技術、政策提言、産官学連携に関する取組を行っている (BECC とも連携)。http://aceee.org/portal/behavior

1-3. Behave

欧州を中心とする省エネ行動に関する国際会議。毎年開催。2016 年のテーマは下記。

- ・ 持続可能な省エネ行動の促進に関するツール、評価
- ・ 低炭素技術の適用と応用
- ・ スマートグリッド導入に資する行動研究
- ・ 建物や組織における最終エネルギー効率
- ・ エネルギーモデルへの行動要素の統合
- ・ エネルギー行動の学際的アプローチ

http://www.uc.pt/en/org/inescc/org_scientific_events/behave2016

2. 行動変化を推進するための政策：エネルギー需要科学を含む欧州各国のスマートグリッドプロジェクト

名称	概要
E-DEMA	E-Energy イニシアチブの 1 つ。ICT と測定データ活用により、発電から蓄電までのエネルギーシステムの統合と効率的消費の最適化を行う。
eTelligence	風力由来の電力を VPP システムと蓄熱システムを利用し、ICT と料金制度を工夫することで利用者の需給調整を促進し、システム全体の最適化を行う。
MeRegio	E-Energy イニシアチブの 1 つ。分散電源においても利用者の効率向上の要求に合致するために、エネルギーバリューチェーンの全要素に ICT 統合を目指す。
Model City Mannheim	エネルギー自給自足を行う住宅 (cell) を地域単位やグリッド単位で制御する “cellular control concept” を設計。Energy Butler が情報セキュリティとプライバシーを保護しながら家電や EV を自動制御しエネルギー利用を最適化。グリッド供給信頼性も確保。数々の試行錯誤を経て、消費者の電力価格変動への対応行動に関し、消費者の弾力性のある意思決定を達成する料金システムを構築。

Smart Watts	E-Energy イニシアチブの 1 つ。Aachen にフィールド試験場において、全ての市場参加者の発電と需要のデータをリアルタイムで入手し、unbundling-compliant モデルを構築。
RegModHarz	小規模分散電源、需要家、小規模貯蔵設備により、VPP（仮想発電プラント）システムを構築。
SGMS	電力の生産者と消費者が、分散電源由来の電力ネットワークのホスティングサービスを増やすためのインテリジェントネットワークを制御する。電気自動車と電力系統との連携、中低電圧系統の家庭および空調管理やオフィスの消費電力管理システムを構築。
BESOS	スマートシティの住民への持続可能性やエネルギー効率に関する啓蒙と意思決定サポートシステムの構築。
NOBEL GRID Project	Horizon 2020 のもと低価格、高信頼、高安定、低炭素な電力をスマートグリッドの全関係者に供給し販売する先端ツールと ICT サービス。こうしたツールとサービスにより、積極的な消費者の参加、新アクターによるビジネスモデル構築、再エネ由来電力の配電への導入を可能とする。

<http://www.gridinnovation-on-line.eu/>

3. その他のプロジェクト

英国 ETI (Energy Technologies Institute) による Consumer Behavior Study

ETI から 300 万ポンドの出資を受けた産学連携によるプロジェクト。エネルギーカタパルトの一部として実施。一般家庭および商業施設の電力・熱・温水利用に関し、消費者の行動や志向を分析し、スマートエネルギーシステム導入への消費者の反応を理解する。日本からは日立が参加。

<http://www.eti.co.uk/programmes/smart-systems-heat/consumer-behaviour-study>

英国 ETI (Energy Technologies Institute) による Consumers, Vehicles and Energy Integration (CVEI)

ETI から 500 万ポンドの出資を受けた移動手段と電力の両専門家がタグを組んだプロジェクト。社会に受け入れられやすい電力系統とプラグイン自動車を連携したシステムの構築と技術開発を検討。プロジェクトにおいては、ビジネスモデル構築に向け、消費者の利用に対する意見収集と反映を重視する。

<http://www.eti.co.uk/programmes/transport-ldv/consumers-vehicles-and-energy-integration-cvei>

英国 BEIS (Department for Business, Energy & Industrial Strategy) によるスマートエネルギーに関する消費者の意識調査

調査から、料金体系やスマート家電によりピーク需要を下げる、あるいは低 CO₂ 排出時間帯の電力消費を増加させることができる。低年齢の高社会階級ほど関心が高い。電池の家庭への導入は意見が分かれる。電子による情報提供を希望する。実際にはエネルギー消費形態を過去 2 年間変えていない。などの傾向が明らかになった。

<https://www.gov.uk/government/consultations/call-for-evidence-a-smart-flexible-energy-system>

米国 ARPA-E と Stanford 大学による省エネ行動イニシアチブ研究

省エネ行動研究で先駆的なスタンフォード大学の PEEC (Precourt Energy Efficiency

Center) は、ARPA-E と (ファンド額 846 万 \$) 2010 年から 2016 年にかけて ITC を用いたエネルギー消費削減に関する大規模実験を行った。

<https://arpa-e.energy.gov/?q=slick-sheet-project/behavioral-initiatives-energy-efficiency>

<https://peec.stanford.edu/research/knowledge-area/human-behavior>

国内動向 (1) : 低圧配電系に関するプロジェクト

NEDO スマートコミュニティ国際実証の中から、低圧配電に関する内容を抽出。

<http://www.nedo.go.jp/seisaku/smartgrid.html?from=key>

・米ニューメキシコ州スマートグリッド実証事業

需要約 2 ～ 5MW 規模の配電フィーダーに 1.8MW 規模の蓄電池を利用し、1MW の太陽光発電の変動吸収運転可能なマイクログリッド運用の実証、モデルスマートハウスを使った系統側の太陽光発電の余剰を住宅レベルの蓄電池で吸収する電力系統と HEMS の協調運転、このエリアの約 900 軒の住宅が参加したデマンドレスポンス実証。

・英国・マンチェスターにおけるスマートコミュニティ実証

マンチェスター市内の公共住宅 600 軒にヒートポンプを設置し、ICT で各住宅のヒートポンプをコントロールし、小口の電力ユーザーの電力需給調整能力を検証。電力調整量をまとめることで、広範な電力市場とのさまざまな取引を可能にするとともに、英国内の給湯・暖房エネルギーをガスから電力にシフトを促すことで、低炭素化を目指す。小口電力に関する情報を一括してとりまとめ、負荷調整能力を提供するサービスの世界初の事例。

・ドイツ・シュパイヤー市エネルギー地産地消型のスマートコミュニティ

太陽光発電によって発電した電力を極力、自家で消費し、電力会社に売電しないシステムを構築することが喫緊の課題となるドイツで、日本の蓄電技術、ヒートポンプ温水器による蓄熱技術、HEMS の機能を実現する情報通信技術により実証システムを構築し、実際の生活環境のなかでの運転を通じて、太陽光発電で発電した電力を地産地消する太陽光発電の「自己消費モデル」を確立し、太陽光発電からの逆流抑制に貢献するとともに、住宅における熱を含めたトータルのエネルギーコスト低減を実証する。

・仏リヨンのスマートコミュニティ実証

再生可能エネルギーの導入を図る一方、街単位、ビル単位、世帯単位の各段階でエネルギーの消費状況を認識し、効率的な使用を促進する仕組みを構築。既設の公共住宅地域を対象に各家庭での電気、ガス、水の利用状況を見える化すると共に、エネルギー増加アラームや省エネ方策をアドバイスすることにより、住民の省エネルギー行動を促進。エネルギー需給面だけでなく、都市交通など多様な面からの都市のスマート化も。

・ポルトガル共和国の自動デマンドレスポンス実証

リスボン市内の公共ビルや一般家庭の協力のもと、空調機器を需要家の特性に応じて自動で運転管理することで需要家の快適性を保ちつつ、電力の市場価格が安い時間に需要をシフトすることで経済性も両立した電力需給調整を行う自動デマンドレスポンスを実施。

国内動向 (2) : エネルギー需要科学に関するプロジェクト

JST 戦略的創造研究推進事業 (CREST) : 分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開

- ・再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギー源と様々な利用者をつなぐエネルギー管理システムにおいて、エネルギー需給を最適制御するための理論、数理モデル及び基盤技術の創出が目的であり、5 チームによる研究開発が推進されている。その研究開発の一部としてエネルギー需要科学に関するテーマが実施されている。

以下、参考としてスマートグリッドに関する国内の主なファンディングについて記載する。

【国内のスマートグリッドに関する主なファンディング】

主体	プログラム名	年度
経済産業省 (NEDO)	電力系統出力変動対応技術研究開発事業	26-30
	分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業	26-30
	次世代洋上直流送電システム開発事業	27-31
文部科学省 (JST)	分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開 (CREST)	24-31
	共進化社会システム創成拠点 (COI)	25-35

付録 3. 専門用語説明

デマンドレスポンス (Demand response : DR)

時間帯別の電気料金の導入や、電力消費ピーク時に需要抑制をした需要家にインセンティブ（対価）を与えるなどの方法により、需要側の消費量調整で電力の供給安定性を保つ仕組みのこと。

バーチャルパワープラント (Virtual Power Plant : VPP)

高度なエネルギーマネジメント技術により、電力グリッド上に散在する分散型エネルギー資源、例えば再生可能エネルギー発電設備、蓄電池等のエネルギー設備、デマンドレスポンス等需要家側の取組を統合的に制御し、あたかも一つの発電所（仮想発電所）のように機能させること

EMS / HEMS / BEMS

EMS (Energy Management System : エネルギーマネジメントシステム)

電力・ガス等のエネルギー供給や消費状況などをモニターし、リアルタイムの情報処理によって、運用を最適にするシステム。システムの対象に応じて、HEMS (住宅 : Home Energy Management System) BEMS (ビルディング : Building Energy Management System) などに分けることもできる。

■戦略プロポーザル作成メンバー■

佐藤 順一	上席フェロー・総括責任者	(環境・エネルギーユニット)
尾山 宏次	フェロー・リーダー	(環境・エネルギーユニット)
大平 竜也	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
島津 博基	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
末村 耕二	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
高橋 玲子	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
高島 洋典	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
田中 加奈子	主任研究員	(低炭素社会戦略センター)
原田 裕明	フェロー	(科学技術イノベーション政策ユニット)
福島 俊一	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2016-SP-04

戦略プロポーザル

未来エネルギーネットワークの基盤技術とエネルギー需要科学 ～ 2050年超の一般家庭でのエネルギー需給構造変化に向けて～

STRATEGIC PROPOSAL

Fundamental Technology of Energy Network in the Future, and Science of Energy Demand

- Toward a change in energy supply and demand structure in general households beyond 2050-

平成 29 年 3 月 March 2017

ISBN 978-4-88890-563-3

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
環境・エネルギーユニット

Environment and Energy Unit, Center for Research and Development Strategy,
Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7番地

電話 03-5214-7481 (代表)

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds/index.html>

©2017 JST/CRDS

許可無く複製／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

