

系統協調／分散型リアルタイムスマートエネルギーシステム、 次世代“エネスワロー”の開発に向けて —エネルギービッグデータをコアとしたプラットフォームの構築—

Toward the Development of Next Generation “Ene-Swallow” as a Grid Cooperative/
Distributed Real Time Smart Energy System
- Information Platform Based on Energy Big Data -

伊原 学

Manabu IHARA

東京工業大学 物質理工学院 応用化学系 教授

博士（工学）

Professor

Department of Chemical Science and Engineering, School of Materials and Chemical Technology

Tokyo Institute of Technology

Ph.D.



パリ協定の合意以降、地球温暖化抑制のため、各国は高いCO₂排出量の削減が求められている。近年、太陽電池の発電コストは急激に低減し、今後、変動型の再生可能エネルギー由来の電源の増加が期待される。したがって、蓄電池や水素エネルギーなどの蓄エネルギー技術と高効率に運用するための高度制御、そして、管理するマイクログリッド内の分散型電源が集中電源と連携して系統の安定化をおこなう系統協調／分散型リアルタイムスマートエネルギーシステム（次世代“エネスワロー”）の開発が求められる。

After the Paris agreement, each country has to highly reduce CO₂ emission to prevent global warming. Because the power generation cost by power sources with renewable energy like solar cells had been drastically reduced in recent years, the ratio of variable renewable energy can certainly increase in the future. The both development of energy storage systems using battery and H₂ energy, and grid cooperative/distributed real time smart energy system (next generation “Ene-Swallow”) will be required.

はじめに：パリ協定後の両輪となる再生可能エネルギーと広義な蓄エネルギー技術

地球温暖化の抑制は、人類が将来にわたって解決すべき本質的な社会的課題である。COP21（第21回気候変動枠組条約締約国会議）におけるパリ合意によって、各国は産業革命以前のレベルに比べて将来の温度上昇を1.5～2℃以下に抑制することを目指している。日本では2030年までに2013年比で26%のCO₂排出量を削減し、2050年までには80%のCO₂排出量の削減を目標とする環境基本計画を閣議決定している。このような極めて高い削減目標の達成には、特に発電におけるCO₂排出量をほぼフリーにすることが必要となる。

発電時のCO₂排出量をほぼフリーにするカーボンフリー電源は、大きく分けて3つある。一つ目は、太陽電池、風力発電、水力発電、地熱発電などの再生可能エネルギーを活用した電源、二つ目は、天然ガスや石炭を燃料とする火力発電で生じたCO₂を回収し、深海や地層に隔離貯蔵するCCS

(Carbon dioxide Capture and Storage)によるCCS火力発電による電源、三つ目は、原子力発電による電源である。CO₂をCCSによって処理する技術は十分に実用レベルに達しているが、分離回収、圧縮、貯蔵場所への搬送にともなう追加的なCO₂排出、コスト負担が必要となる。また、廃棄物となるCO₂は自国にて隔離貯蔵することが原則となっていて、CCSに適した貯蔵場所は、日本では限定的と見られている。原子力発電は、福島発電所での事故以来、安全性対策に対するコスト増などによる経済的優位性の低下に加え、社会受容性の観点からも、日本においては大幅な拡大は難しい状況である。また、これら2つの電源は集中的な初期投資が必要で、その設備投資は長期に渡って回収するビジネス構造を持っているため、社会的要因の変化に対してビジネス計画の変更もしくは中止といった機動的な対応が難しいといった側面も持つ。

一方、太陽電池などの再生可能エネルギーによる電源は、これまでコスト高とみられていたが、太陽電池システム価格（Figure 1に日本、アメリカ、ドイツにおけるシステム価格の変化を示す。）は、特に2008～2013年の5年間で約半分

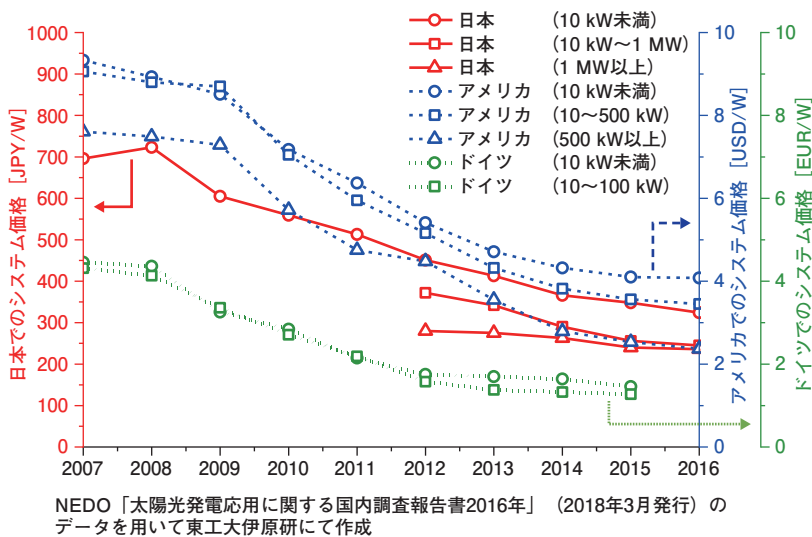


Figure 1 日本、アメリカ、ドイツにおけるシステム価格の変化

へと低下した。また、2016年には、日射時間の長いアブダビにおいて、メガソーラー発電所からの電力を2.42セント(US\$)/kWh(Levelized Cost of Electricity: LCoE)もの低価格にて供給する契約の締結が報道されている。これらの現状と技術開発の可能性を考慮すると、CO₂排出量の削減と経済性の観点から、今後も太陽電池を中心とする再生可能エネルギー由来の電源が増えていくと予想される。太陽電池発電、風力発電などの電源は、天候に左右されやすく、分スケール、時間スケール、1日や季節によっても変動する変動型の電源である。電力を供給する電力グリッドでは、接続されている各種電源からの総発電量と、利用される総消費電力量が等しいことでグリッド内の電圧が維持されている。しかし、気象条件の急激な変化などによって変動型電源の発電量が大きく変動した場合、消費と供給のバランスが崩れ、大規模な停電が生じる危険性がある。現在は、火力発電の出力調整やエリア外への送受電、余剰電力で水をくみ上げる揚水発電などを使って調整しているが、調整力総量や手法はエリアによって様々である。今後はすべての電源の、より弾力的な経済負荷配分制御による調整力確保の議論が必要だが、同時に調整力として水素をエネルギー媒体として利用する発電技術や蓄電池技術が重要になる。つまり、地球温暖化抑制と経済性を両立させるためには、再生可能エネルギーの利用拡大が最も有力な手段の一つであり、さらに電力システムの安定化のためは、すべての電源の弾力的な運用と、カーボンフリー水素(製造時にCO₂排出がほとんどない水素)を含めた広義な蓄エネルギー技術の推進が求められる。

蓄エネルギー技術と位置付けられるグローバル水素とローカル水素^[1]

水素エネルギーはその役割、位置づけによって二つの水素に分類できる。CO₂排出削減という制約条件下で、エネ

ギー資源をグローバルに有効活用するための重要なオプションと位置づける「グローバル水素」と、変動型再生可能エネルギーを大量導入する際の電力平準化という制約下で、ローカルな蓄エネルギーとしての重要なオプションと位置づける「ローカル(蓄エネ)水素」に分類できる。グローバル水素では、水素を地球規模で輸送するため、液化水素、アンモニア、メチルシクロヘキサンなどのエネルギーキャリアを利用する。この場合、安価な太陽電池電力の利用や、CCSと組み合わせた安価な石炭(褐炭)の利用などのメリットがある。一方で、ローカル水素は、グローバル水素に必要な「エネルギーキャリア製造、脱水素」に関わるCO₂排出量およびコストが不要となるメリットを持つ。また、マイクログリッド内で、蓄電池とともにシステムの安定化

に貢献する蓄エネルギーシステムにもなりうる。蓄電池は、比較的短い時間スケールでの速い充放電に適したデバイスであり、水の電気分解によって水素を製造し、電力を水素として蓄える水素PtoG(Power to Gas)システムは長期間のエネルギー貯蔵に適していることがわかっている。

これら二種類のカーボンフリー水素エネルギーは、CO₂排出量低減の価値、蓄エネルギーの価値、エネルギー安全保障上の価値、新たな産業の創出や経済波及の価値など多様な価値を持つ。また、発電部門ではカーボンフリー水素のCO₂削減効果が高く、一方、自動車部門では、燃料電池自動車の輸出など、大きな経済波及効果を持つと試算されている。

再生可能エネルギーと多様なエネルギー由来の電源を機能させる系統協調／分散型エネルギーシステム

世界工学アカデミー エネルギー委員会では、将来のビル技術および自動車や鉄道などの移動体に関する将来技術を、5回のミーティングにて集中議論した。参加国は、日本のほか、インド、中国、韓国、イギリス、ドイツ、スイス、USA、カナダ、オーストラリア、南アフリカの各国であった。報告書では、将来はビル内および自治体などの比較的小規模な単位にて分散型の電源ネットワークを形成し、さらに集中型の大規模発電所と電力網を介して接続される技術が発展していくと予想されている^[2](Figure 2に概要を示す)。一般的に、大量生産によって製造コストが低減できるように、燃料による発電システムでも、その規模が大きくなるに従って変換効率を向上しやすくなる。逆にその規模が小さくなると高効率化が困難になる。では、大型の集中発電システムと比較して、小型の分散型発電システムを導入するメリットは何であろうか。熱力学第一法則であるエ

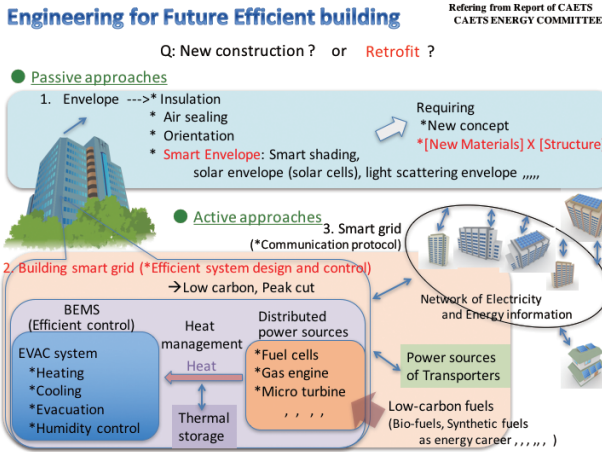


Figure 2 世界工学アカデミーエネルギー委員会で提言された将来のビルエネルギー技術^[2]

エネルギー保存則は、化学エネルギーなどの内部エネルギー変化(ΔU)は、仕事(w)と熱(q)の総和になると教えている。つまり、燃料電池などで仕事(w)である電気エネルギーに変換した後、それ以外は熱となりエネルギーの総量は保存される。小型の分散システムにすることで、仮に化学エネルギーから電気エネルギーに変換する変換効率が低くなくても、排熱の利用を増加させることができれば、総合効率は向上する。一方で、電気エネルギーは送電線によって容易に送ることができるものの、熱はそのエネルギー密度も低く、特に遠方への輸送は難しい。したがって、エネルギー需要地に設置される分散型の場合、小型であっても熱の需要と供給を適切に合致させるシステム設計と高度制御ができれば、集中型の電源よりも総合効率を向上できる可能性がある。また、ハイブリッド自動車を実現したように、エネルギーデバイス機器の特徴を把握し、それぞれの機器の効率の高い条件での運用を複数のデバイスで分担利用するように制御できれば、大幅にシステム効率を向上できる。将来は、大規模な集中型発電システムと太陽電池、燃料電池、蓄電池などの様々な分散型電源が共存するエネルギーシステムになっていくと予想される。そして、水素は集中型、分散型双方で利用できるエネルギー媒体となる。

前述したように、電力系統は、適切な予測と計画的な運用による同時同量の需給バランスの維持によって、系統の電圧や周波数を維持している。したがって、今後、多量の中小様々な再生可能エネルギー由来の変動型電源が電力系統に接続される場合には、同時同量の需給バランスを維持する新たな仕組みが必要となる。そのため、中小様々な電源のPCS(power conditioning system, 直流電力を交流電力に変換する機器)をIoT(Internet of Things)技術を活用して統合し(エネルギーリソースアグリゲーション)、AI(Artificial Intelligence)技術による高度エネルギー予測に基づいたリアルタイム制御をおこなうことで、系統の安定化とマイクログリッド内の高効率制御を両立させるエネルギーシステムの開発が必要となる。このようなシステムを

我々は、“系統協調／分散型リアルタイムスマートエネルギーシステム”と呼んでいる。将来のエネルギーシステムでは、水素は集中型の発電所においてタービンの燃料として、あるいは、上記の系統協調／分散型システムが管理するマイクログリッド内では、蓄エネルギーシステムのエネルギー媒体として利用される。さらに、一部は燃料電池自動車に供給され、駐車時は電気自動車とともに電力グリッドに接続される。近年、AIやIoT技術の進歩に加え、通信速度の向上などによりクラウド／エッジコンピューティングのアーキテクチャの自由度も向上し、社会実装可能な上記エネルギーシステム構築への環境が整ってきた。今後、系統協調／分散型リアルタイムスマートエネルギーシステムの開発と共通プラットフォーム化を、産官学が連携してすすめることが、未来のエネルギー社会実現に向けた大きな課題である。

系統協調／分散型リアルタイムスマートエネルギーシステム開発に向けた各種電池技術／建築技術／情報技術の融合

—環境エネルギーイノベーション棟と1.4 MW太陽電池／100 kW燃料電池／35 kW×3ガスエンジン／100 kWhリチウムイオン蓄電池を実際に制御するエネスワロー—

著者らは、60%以上の低炭素化と電力自給自足が設計上可能で、かつ高い耐震性能を有するビルとして設計され、南壁面、西壁面、屋上が総枚数4570枚の太陽電池パネル(650 kW)で覆われた特長を有する東工大環境エネルギーイノベーション棟(EEI棟, Figure 3に外観写真を示す。)のエネルギー設備のシステム設計をおこなった。また、既存のエネルギー設備の双方向情報通信を可能とする分散型スマートエネルギーシステム“エネスワロー”(東工大にて商標登録)の開発もおこなってきたので以下に紹介する。エネスワローは、上記した「系統協調／分散型リアルタイムスマートエネルギーシステム」への発展を目指している^[3-8]。



Figure 3 東工大環境エネルギーイノベーション棟(EEI棟)の外観写真(大岡山キャンパス)

東京工業大学大岡山団地太陽光発電設備等設置配置図

太陽電池総容量: 1.388MW
赤色の建物の屋上に太陽電池が設置

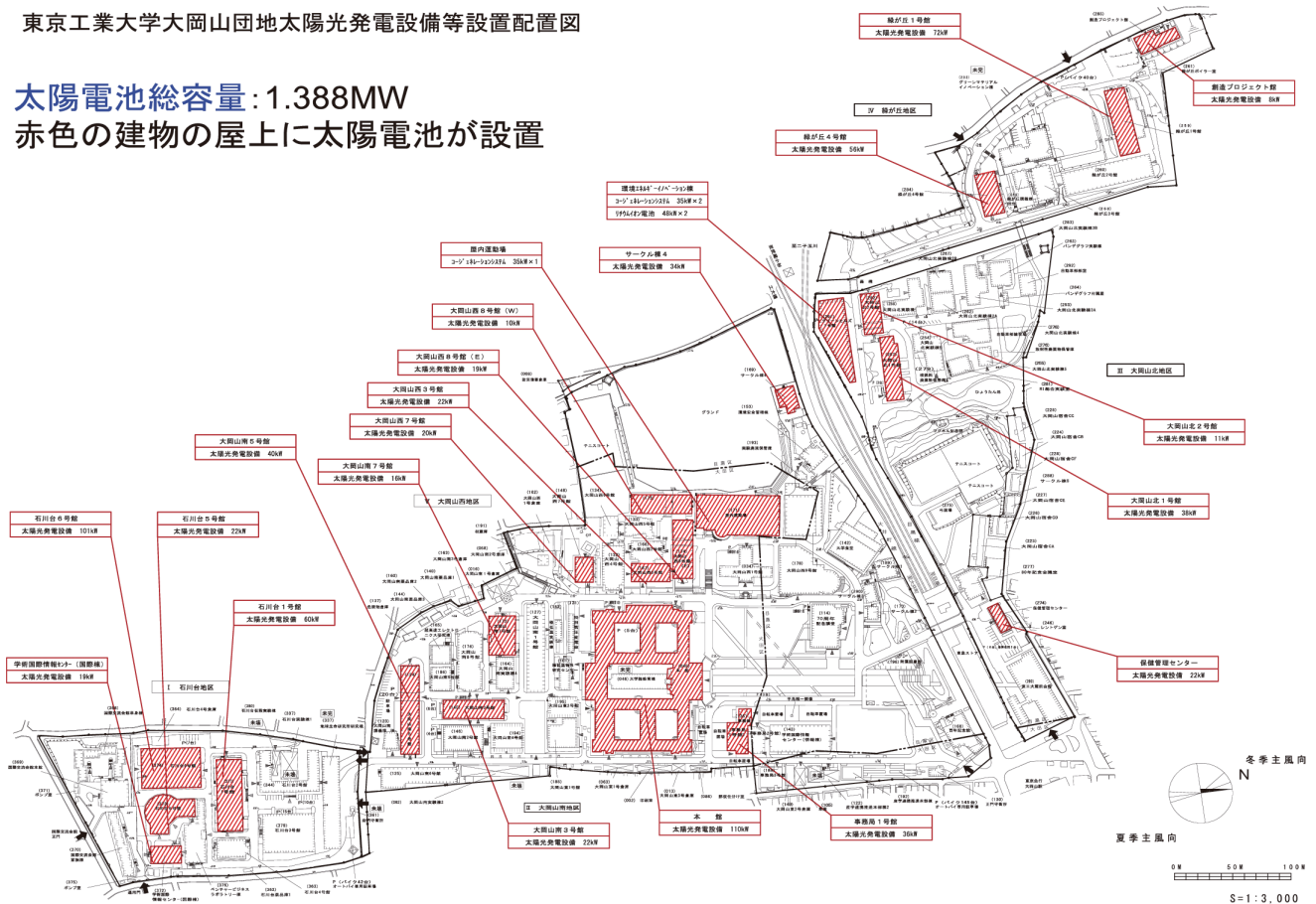


Figure 4 東工大大岡山キャンパスと太陽電池パネル設置位置

2015年には、エネルギーミックスと電力の平準化をおこなう機能を持つ“エネスワローver.3”を開発し、大岡山キャンパスにて運用を開始した。738 kWの太陽電池、105 kW (35 kW×3)のガスエンジン、96 kWh(48 kWh×2台)のリチウムイオン二次電池をキャンパス内に増設し、2012年に竣工したEEI棟の650 kWの太陽電池、100 kWの燃料電池、排熱を利用する空調機器などのEEI棟エネルギーシステムとも連携して制御をおこなう。したがって、大岡山キャンパスの太陽電池の発電容量は合計で約1.4 MWとなり、メガソーラー発電所に匹敵する発電容量を有している。これによって、ピークでは大岡山キャンパスの15~20%もの電力を、太陽電池を主とする分散電源で供給することが可能となり、一層のCO₂排出量の削減を実現している。

“エネスワローver.3” (現在はver 3.2までバージョンアップ)は、熱需要に応じた各分散電源の高効率運転をおこなうとともに、リアルタイムデータに基づく独自の電力予測式によってピークカット制御をおこなう。さらに、停電時には太陽電池、ガスエンジン、燃料電池、リチウムイオン二次電池の各分散電源が連携し、EEI棟に自立的に電力を供給することが可能で、災害時などの長期停電時でも永続的に自立運転を継続することができる。また、Figure 4に東工大大岡山キャンパスの地図を示す。赤色で示した建物屋上には太陽電池が設置されている。

季節、時間の発電量の平準化する太陽電池の設置

EEI棟の太陽電池は、限られた設置面積において発電量を最大化する高密度設置となっている。また、屋上、南面1、南2、西面の各方位に設置することで、時間、季節における発電量を平準化する設置としている (Figure 5に示す)。将来、システムの安定化を考慮すると、分散グリッド内で蓄電池や水電解/燃料電池によるローカル水素の利用によって、システムとやり取りする電力を平準化して供給するシステムが求められると考えられる。エネスワロー、エネルギーサーバーに蓄積されるエネルギーデータを使った解析によると、将来の蓄エネルギー (水素PtoGシステム) を考慮したトータルなシステムコストの最適化が、適切な太陽電池方位による設置によって実現できる可能性を提言している [9, 10]。

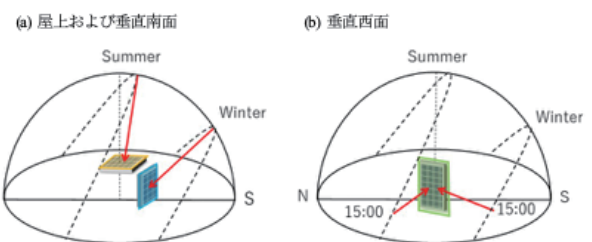


Figure 5 太陽電池の設置方位と太陽の軌道の季節変動性

エネスワローver.3.2の特徴

エネスワローver.3.2のトップ画面のスクリーンショットを示す(Figure 6)。また、下記にシステムの機能、特長を示す。

- ・エネスワローver.1はEEI棟内のエネルギー機器を制御、ver.2では、キャンパス全体の太陽光発電量のリアルタイム取得を実現し、エネスワローver.3では、ver.1, ver.2との相互連携、統合化が可能となった。
- ・msオーダーの高速で処理可能な制御エンジン部と1分ごとに処理するIEEE1888ストレージサーバーから構成されている。
- ・IEEE1888に規格化するマルチゲートウェイを採用し、BacNET/IP通信、TCP/IP通信、ModBus通信、DAIKIN DIII-NET通信、FTP通信、アナログ通信などの異なるプロトコルを有する多様なメーカーの機器を接続した実績を持ち、多種多様な機器からのエネルギーデータを集約取得することが可能である。
- ・既設のBEMS(Building Energy Management System)などを接続し、System of systemsの構成となっている。

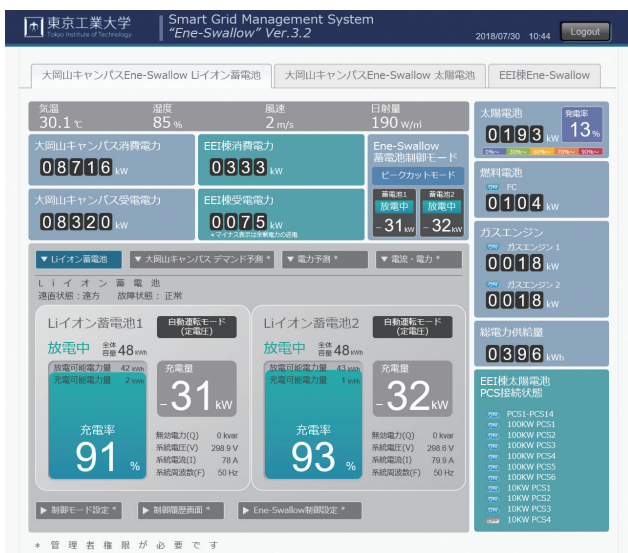


Figure 6 エネスワローver.3.2のトップ画面のスクリーンショット (上：30分後の受電量予測表示、下：ピークカット動作時の表示)

いる。

- ・BEMSが接続され、連携して燃料電池、ガスエンジンからの排熱を高度利用する制御をおこなう。
- ・外調器 風量も考慮したドラフトチャンバー電力按分計算式などを採用するなど、各機器のシステム原理から導き出される独自の按分式を使って、詳細でより正確な電力按分をおこなうことが可能であり、電力計を最小限にでき低コスト化が実現できる。
- ・太陽電池の各ストリングスについて、直流電流、直流電圧を計測し、PCSからのデータと比較表示する機能を有している。
- ・停電時には、エネスワローver.3が積極的に発電機と空調の電力量のバランスを自動的にとることで、二次電池と連携して自立運転をおこなう。
- ・リアルタイムデータに基づく「1. 30分ごとの電力量予測」、「2. 数分後の電力量予測」を独自開発した計算式で予測し、契約電力を超えないようピークカット制御をおこなう。
- ・空調の設定温度、計測温度、外気温度、受電量などから自動的に、かつユーザーに無理なく空調の負荷抑制をおこなう機能を有している
- ・空調の設定温度、計測温度、外気温度、受電量などが一定の条件を満たした場合、自動的にメール配信する機能を有している

おわりに：次世代“エネスワロー”の開発に向けて

—エネルギービックデータをコアとしたプラットフォームの構築—

東工大大岡山キャンパスの契約電力は約10000 kwであり、リソースアグリゲーターが管理すると想定される規模と同程度である。また、以上述べたように、変動型再エネ電源である太陽電池、化石燃料を使い電力と熱を利用するコジェネレーション型の分散電源である燃料電池、ガスエンジン、蓄エネルギーデバイスであるリチウムイオン蓄電池がすでにエネスワローに接続されている。

2018年度から科学技術振興機構 未来社会創造事業「超スマート社会の実現」領域^[11]において、「低コスト社会実装を前提とした再エネ電源の大量導入を可能にする系統協調／分散型リアルタイムスマートエネルギーシステムの開発」プロジェクトがスタートした。本プロジェクトでは、東工大大岡山キャンパスを実験場とした研究拠点の形成を目指す。まず、電気自動車や燃料電池自動車を含めた様々な固定／移動型の電源が、次世代“エネスワロー”に接続するためのインターフェースの規格化などをおこなう。そして、管理するマイクログリッド内の分散型電源の個別の特長に合致した制御および、熱の利用を最大化する制御をおこなうとともに、エネルギービックデータを活用したAI解析に

よる、より高度な予測によって系統と連携して電力グリッドの安定化制御をおこなう「系統協調／分散型リアルタイムスマートエネルギーシステム」(次世代エネスワロー)の開発をおこなう。

このシステムは、多様な分野の研究者が開発に携わることが可能で、低コストで利用できるシステムであると同時に、様々なエネルギーデータやシミュレーションなどが接続されるエネルギー情報共通プラットフォームとして開発する。さらには、エネルギービックデータが活用されるAI解析を中心とするエネルギー予測情報システムが、物理モデルなどを用いて予測されるシステムと有機的にリンクされるシステム構造を想定している。このような、エネルギービックデータをコアとしたエネルギーデータ／シミュレーターを集約する情報プラットフォームへの展開を、産官学連携で推進していきたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構 未来社会創造事業「超スマート社会の実現」領域の支援によっておこなわれました。関係各位に感謝致します。

参考文献

- [1] 東京工業大学, 産業技術総合研究所, エネルギー総合工学研究所, 平成28年度～平成29年度成果報告書 水素利用等先導研究開発事業 トータルシステム導入シナリオ調査研究, http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201810/2018000000349.html
- [2] “TRANSITIONING TO LOWER CARBON ECONOMY—Technology and Engineering Considerations in Building and Transportation Sectors—”世界工学アカデミーエネルギー委員会(International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences, CAETS energy committee)報告書, 2015年10月
<https://www.cae-acg.ca/caets-energy-committee-issues-low-carbon-building-and-transportation-study/>
- [3] 伊原学, ICTインフラの整備により変化するエネルギー管理の将来 その2「スマートグリッド“エネスワロー”と東京工業大学グリーンヒルズ構想」, 一般社団法人建築設備総合協会発行「BE建築設備」2014年9月号, (2014)
- [4] 伊原学, 低炭素化への取組み(1)都市と一体化する将来の分散型エネルギーシステムに向けた, 東工大“グリーンヒルズ構想”—エネスワローによるキャンパスのスマートグリッド化—, 公益社団法人空気調和・衛生工学会発行学会誌2014年5月号, 88(5), (2014), 9-15
- [5] 伊原学, 東工大“環境エネルギーイノベーション棟”の設備概要とスマートグリッド“エネスワロー”によるエネルギーデータの総合化, 建材試験情報, 50, (2014), 2-7
- [6] 伊原学, スマートグリッド管理システム“エネスワロー”によりエネルギーデータが統合化される“環境エネルギーイノベーション棟”, 日本設備設計事務所協会発行「設備設計」10月号, 49, (2013), 3-10
- [7] 伊原学, 環境エネルギーイノベーション棟のエネルギーシステムの概要, 今後のエネルギーシステムについての展望, 株式会社建築技術発行「建築技術」2012年10月号, (2012), 20
- [8] 伊原学, “東工大環境エネルギーイノベーション棟”の環境エネルギー設備とこれからのエネルギー, 「近代建築」2012年7月号, (2012)
- [9] 東京工業大学, NEDO水素社会構築技術開発事業 総合調査研究報告書「水素を利用した系統調整力の低炭素化に関する調査」(2019年3月)
- [10] Tatsuya Okubo, Teruyuki Shimizu, Kei Hasegawa and Manabu Ihara, “Techno-economic analysis of a 100% renewable energy system using photovoltaics and power-to-gas (P2G) technologies”, Extended Abstract of The World Hydrogen Technologies Convention (WHTC 2019), Tokyo, June 2-7, 2019
- [11] <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/super-smart/index.html>