

技術研究所におけるスマートエネルギーシステム

小島 義包
(本社設計本部)

小野 島 一
(本社技術本部)

藤田 尚志
(本社建築本部)

島 潔
(本社技術本部)

小 関 由 明

小 山 岳 登
(本社設計本部)

Smart Energy System in OBAYASHI Technical Research Institute

Yoshikane Kojima

Hajime Onojima

Hisashi Fujita

Kiyoshi Shima

Yoshiaki Ozeki

Taketo Koyama

Abstract

Obayashi applied a smart energy system in a technical research institute to demonstrate the performance of the various advanced technology required in smart cities. The system consists of a variety of energy sources and information and communication technology, such as large-scale photovoltaic power generations and micro-combined generation; the large battery and these facilities are controlled by EMS (Energy Management System) to optimize the operation based on the precise forecasts of the energy demand. In this study, the outline of the system and some operational performances, which are reduction of the peak demand, functional enhancement for BCP (Business Continuity Planning), and maximum use of the electricity generated by photovoltaic power, are reported.

概 要

スマートシティに必要とされる様々な先進技術を実証するために、スマートエネルギーシステムを技術研究所内に構築した。大規模な太陽光発電やマイクロコンバインド発電、大型蓄電池等の多様なエネルギー源から構成され、電力デマンドと太陽光発電の予測を基にこれらをEMS (Energy Management System)により最適に制御している。本報では、システムの概要とピーク電力の低減、BCP機能強化、太陽光発電電力の最大活用の実績を報告する。

1. はじめに

東日本大震災以降、節電対策や再生可能エネルギー導入の推進に加えて、エネルギーの安定供給の重要性が高まっている。特に、電力供給の強靭性や安定性が強く求められ、ひとつの建物だけでなく、街区における需給を調整し、電力の自立性を向上させるスマートシティの研究・検証が開始されている。中でも、電力システムと情報通信技術を融合させたスマートエネルギーシステムは、これらの社会的ニーズに応えるキーとなる技術として期待されている。

大林組の技術研究所(以下「本研究所」)は、関連会社の研究棟を含めて全10棟、合計延べ面積約35,000㎡から成るひとつのコミュニティに位置づけられる。構内には、消費電力が1000kWを越える大型実験装置が複数台設置されており、これらの装置の運転・停止によって構内需要電力は大きく変動する。大林組は、このような負荷変動の大きい本研究所において、スマートシティに要求される、電力供給の安定性や自立性、環境適合性の実証を行うことを目的として、スマートエネルギーシステムを構築し、2015年2月より本格的に運用を開始した。¹⁾

本稿では、システムの概要と運用実績及び需給逼迫時の制御、停電時の自立運転制御実証について報告する。

2. スマートエネルギーシステムの構成

Fig. 1にスマートエネルギーシステムの構成図を示す。太陽光発電設備(以下「PV」)は、6棟の屋上に合わせて約820kWの大規模システムを構築した。

大型蓄電池は、出力500kW、容量3000kWhのレドックスフロー電池(以下「RF電池」)を採用した。RF電池は、Fig. 2に示す通り、電解液を貯蔵する正負極のタンク、電解液をタンクからセルへと循環するためのポンプ、配管などから構成される。セル部分でのバナジウム(V)イオンの酸化・還元反応により電力の充放電を行うことができる蓄電池であり、大容量化に適していること、自己放電を起しにくいなどの特徴がある。

常用発電機は、マイクロコンバインド発電システム(以下「μ発電」)と称して、ガスエンジン(以下、「GE発電機」)200kW ×2 台を主体とし、エンジン排熱を低沸点媒体の加熱に利用し、タービン発電装置によって発電する仕組みである。

需給予測を基にこれらの電源設備をEMSによって統合的に制御・監視を行う。特に、ビッグデータを活用した電力需要と発電電力の予測、実験装置の稼働予定等の電力ユーザーから得られる情報をリアルタイムの需給の把握に基づいて運転制御を行うことを特徴とする。

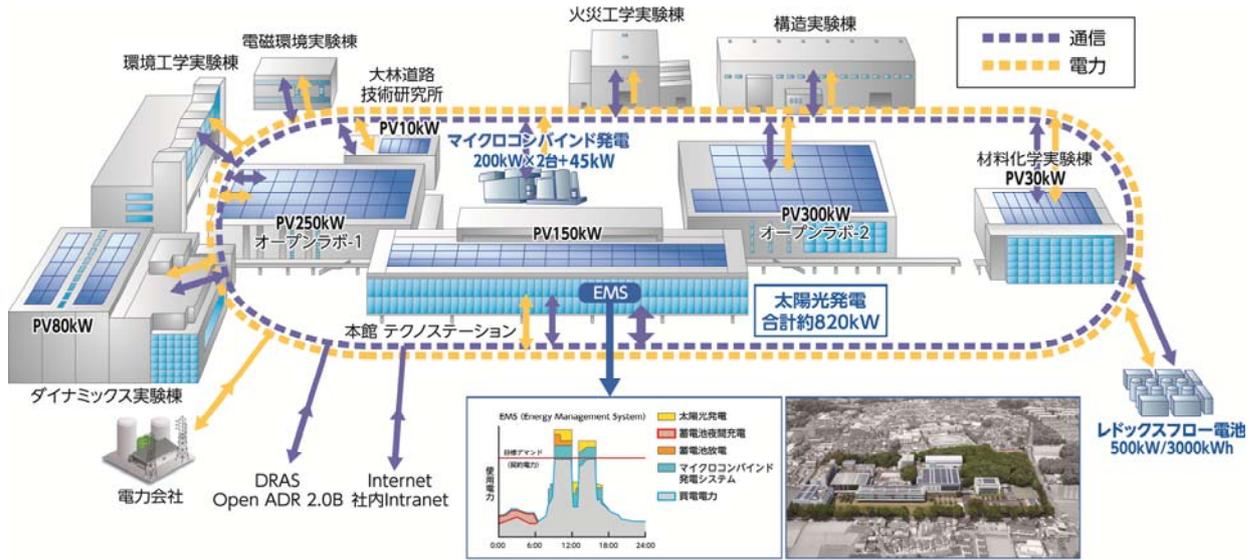


Fig. 1 スマートエネルギーシステム構成図
Smart Energy System Diagram

3. エネルギーマネジメントシステム(EMS)

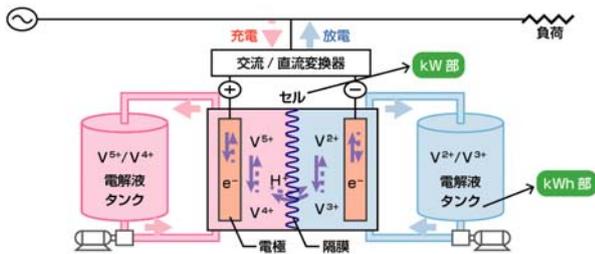


Fig. 2 レドックスフロー電池の構成
Configuration of REDOX Flow Battery

今回導入したμ発電の構成をFig. 3に示す。本研究所のように、給湯や空調に利用できる負荷が少なく、エンジン排熱の利用先がない場合、低温排熱を利用して発電を行うバイナリー発電が有効であると考えられる。今回、低沸点媒体(HPC-R245fa)を作動流体として、ガスエンジンの排熱によって気化させ、気液二相の状態でのバイナリータービンを駆動、発電を行うシステムを開発した。また、低沸点媒体を直接循環する方式を採用することによって高効率化が可能となり、発電効率はガスエンジンで37%、排熱回収発電で5%、総合発電効率で42%を得ることができる。^{2) 3)}

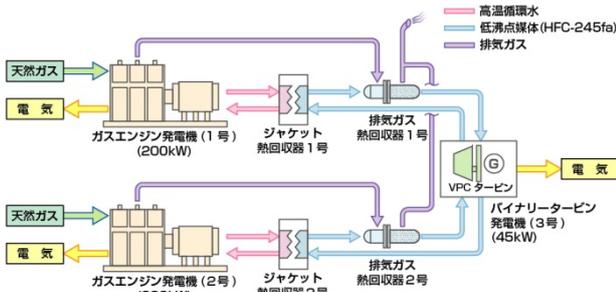


Fig. 3 マイクロコンバインド発電システム
Micro Combined Power Generation System

本研究所で構築したEMSの電力需給管理フローをFig. 4に示す。EMSの機能は、需要計画・予測、需給計画・制御、見える化及び電力需要逼迫時のデマンドレスポンス(以下「DR」)から構成される。

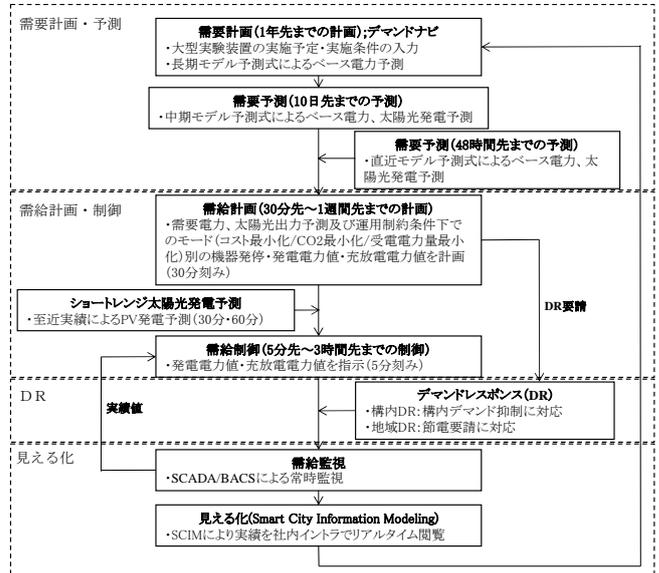


Fig. 4 EMSの機能フロー図
Function Flow of EMS

3.1 需要計画・需要予測

本研究所には複数の大型実験装置があり、これらの稼働は、電力デマンドを大きく押し上げてしまう。このため、これまで実験機器のユーザー間での話し合いで、稼働時間の調整が行われていた。今回開発した需要計画システム(「デマンドナビ[®]」)は、大型実験装置の稼働予

定及び実験条件を1年先まで随時、登録・変更することができる。実験装置以外の空調やコンセント負荷等のベース電力の予測値に、予定の大型実験装置の需要予測を加えることによって、構内全体の需要電力を予測できる。この予測データによって、実験の可否や機器間調整の要否の判断に役立てられる。

大型実験装置を除いた空調や照明、一般コンセント負荷で構成されるベース電力の予測モデルをFig. 5に示す。ベース電力は、過去のビッグデータと取得可能な将来予測情報の種類により、1年先までの長期モデル、10日先までの中期モデル、48時間先までの直近モデルからなる。直近モデルでは、48時間先までの3時間毎の気温、湿度、天気などの情報を基に、ベース電力及び太陽光発電の発電電力を予測している。^{4) (10)}

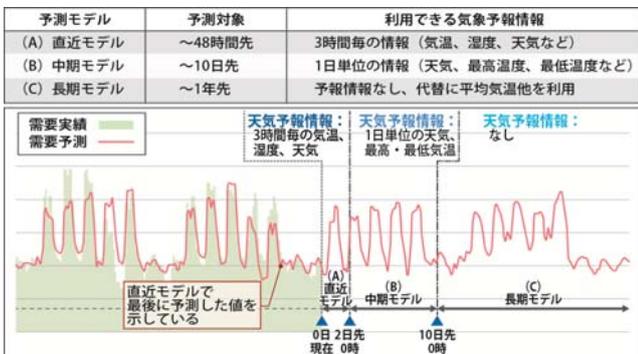


Fig. 5 需要電力の予測モデル
Predictive Model of the Electricity Demand

3.2 需給計画・需給制御

3.2.1 電力需給管理の計画 需給計画は、上記の需要計画・需要予測のデータに基づき、選択した運転モード(コスト最小化, CO₂排出量最小化, 受電電力量最小化)と設備機器の運転制約条件に合わせて行われる。具体的には、μ発電の運転/停止と発電電力値、蓄電池の動作(充電/放電/待機)と充放電電力値及び受電電力値を30分先～1週間先まで30分刻みで立案する。1週間先までを常に計画することで、蓄電設備の電池残量であるSOC (State of Charge)の最適制御や電力需給の逼迫度合い、デマンドレスポンス発動の早期把握・対策を行うことができる。

需給制御は、運転モードと最新の運転実績値に基づいて、μ発電の発電電力、蓄電池の充放電電力、受電電力の最適負荷配分を5分先から3時間先まで5分刻みに決定し、制御指令(発電電力, 充放電電力, 受電電力)を発する。^{4) (14) (15)}

3.2.2 電力需給管理の実績 コスト最小化モードによる電力需給管理の実績として、平日代表日(2015年9月7日(月))をFig. 6に、休日代表日(2015年5月10日(日))をFig. 7に示す。

各日の上段のグラフが電力需給実績であり、需要側を折れ線グラフで、供給側を棒グラフで示す。中段がベ-

ース需要電力の最終予測値(折れ線)と実績(色掛け)、下段がPV発電電力の最終予測値(折れ線)と実績(色掛け)を表す。

平日代表日は大型実験装置が稼働(黄色折れ線)し、構内全体の需要電力(黒色折れ線)が商用電力上限設定値(緑色一点鎖線)を大きく超えている。商用電力がこの上限設定値を超えないようにμ発電が発電し、RF電池が放電で補ったことが分かる。中段のベース需要電力のグラフと下段のPV発電電力のグラフでは、予測値と実績との乖離が大きくないことが見て取れる。

休日代表日では、昼間にPVの発電電力が全体需要電力より大きくなっており、構内消費される分以外の余剰電力がRF電池に充電されていることが確認できた。⁸⁾

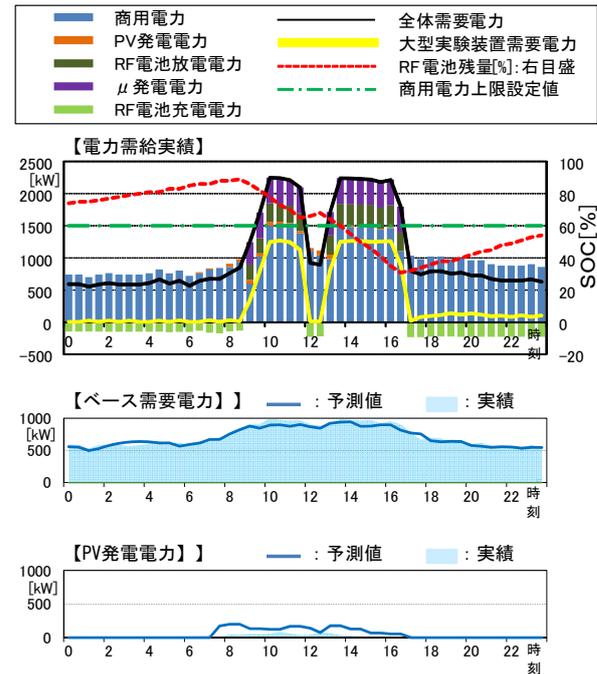


Fig. 6 電力需給管理の平日代表事例 (9月7日)
Representative Data on Weekday of the Electricity Supply and Demand Management (Sept. 7th)

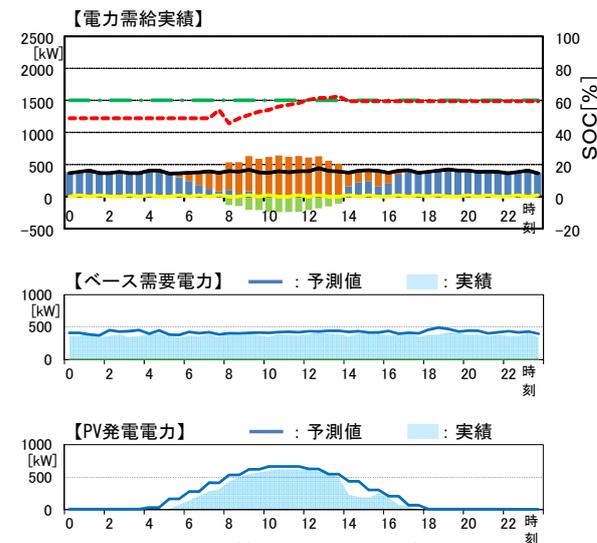


Fig. 7 電力需給管理の休日代表事例 (5月10日)
Representative Data on Weekend of the Electricity Supply and Demand Management (May. 10th)

3.3 需給監視・見える化

本システムの需給監視は、需給制御により稼働した設備システムの実績データと受電電力データを常時収集・監視することができる。需給予測との差異をフィードバックすることにより予測精度の向上を図っている。また、専用サーバを設置し、電力需給状況や稼働実績データ、DR実施状況、デマンドナビによる需要予測、構内各所のライブカメラ映像などを取り込み、社内イントラや見学ルーム内の大画面モニターにリアルタイム表示を行い、スマートエネルギーシステムの見える化を行っている。また、3次元モデルであるBIMデータを活用した見える化システムとして、SCIM(Smart City Information Modeling)を構築した。これによって、本研究所での取り組みとその効果を見える化することができ、社員の電力デマンドに対する意識を高め、精緻な需要計画を行うことによって一層の予測・制御精度の向上を図っている。

4. デマンドレスポンス機能

4.1 デマンドレスポンス機能の概要

デマンドレスポンスとは、電力会社の供給力が逼迫した際に発電出力を上げる代わりに需要家に節電協力を求め、需要家がこのに応答することで需要を減らす行動のことである。本研究所でも、将来的に電力会社等からのDR要請を受けて応答する機能及び体制を整備している。また、これとは別に構内デマンドが契約電力を超過しないように応答するための機能も備え、前者を地域DR、後者を構内DRと称して区別している。

本システムでは、管理者及び本研究所勤務者(所員)が地域・構内DRへ容易に参加することができるツールとして「デマンドナビ」を活用している。⁵⁾

4.2 「デマンドナビ」の概要

「デマンドナビ」とは、ユーザーが需要計画に参加するためのコミュニケーションツールで、大型実験装置の稼働予定登録、構内電力需給状況(過去実績)の確認、地域・構内DR発動時の節電協力の回答登録を行うことができる。Fig. 8にデマンドナビ画面構成を示す。

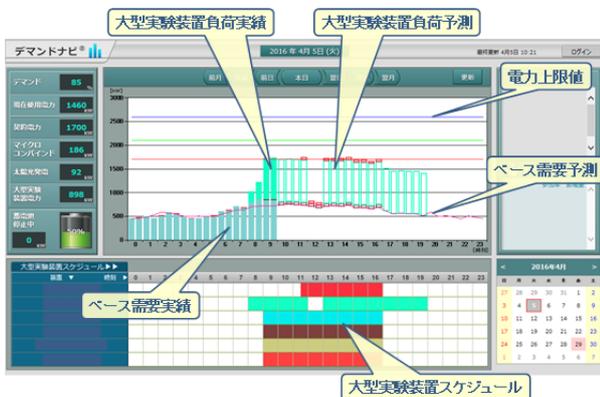


Fig. 8 デマンドナビ画面構成
Screen Image of Demand Navi

「デマンドナビ」の導入により、ベース需要(大型実験装置以外の電力負荷)予測や電力上限値の情報を確認しながら、実験装置ユーザーにて複数の大型実験装置の稼働予約を一年先まで計画的に行うことができるようになった。随時デマンドの状況を確認しながら実験予定をマネジメントすることで、確実なピークカット・ピークシフトの効果が期待できる。

4.3 地域DR

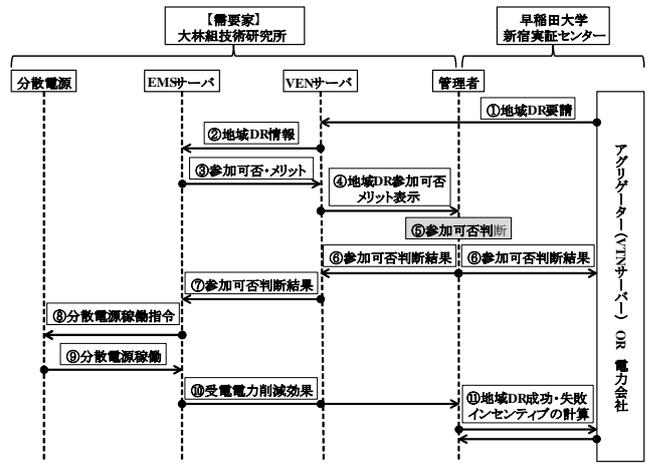
4.3.1 地域DRの概要 地域DRは電力会社から要請を受けた際に、需給計画により協力可能なネガワット量(電力会社等からの節電要請により、需要家が抑制した受電電力量)を算出、一需要家としてアグリゲータ(電力会社と需要家間を仲介する事業者)等を介して電力会社に節電回答を行う。

本システムの地域DRは、電力会社もしくはアグリゲータから節電要請を受けた際、建物管理者が速やかに参加メリットを判断し、応答できるようなフローとなっている(Fig. 9)。

節電要請を受けるとEMSでは自動的に地域DR実施の可否及びコストメリットの算出結果を管理者に通知する。これにより管理者は、地域DR応答の是非を迅速かつ容易に判断できる。また、地域DR要請へ応答の際に必要な通信規格には、自動デマンドレスポンス(ADR: Automated Demand Response)の標準プロトコル(Open ADR 2.0 b)に準拠した規格を採用し、DR実証機能を有する早稲田大学新宿実証センター(新宿標準試験サイト)と相互接続検証を実施した。⁹⁾¹³⁾¹⁷⁾

4.3.2 地域DR実証試験の概要 2016年1,2月における3日間を対象として地域DRの実証試験を実施した。今回は、早稲田大学新宿実証センターを電力会社及びアグリゲータ、本研究所を需要家として、地域DRの要請に応えるケースを想定した(Fig. 9)。

DR種類はSimple(レベル指定)とし、Level:0~3の4段階にて実施した。DRを受ける時間帯には、午前(9:00-11:00(2h))と夕方(17:00-19:00(2h))を設定した。



※VTN:Virtual Top Node VEN:Virtual End Node
Fig. 9 地域DRのイベントフロー
Event Flow of Area DR

DR申告値(ネガワット量の事前申告値)の設定は、0kWh~900kWh(RF電池とμ発電の定格能力の和)の範囲内で可能であるが、今回は、DR時間帯においてRF電池とμ発電のみで対応可能で、かつ、PVが最大で発電した場合でも商用電力系統に逆潮流しない条件の下、ネガワット量を200kW・400kWに設定した。

本システムの地域DRは、DRレベルごとに受電電力の上限目標となる指令値を設定し、需給計画に反映することで設備システムが応答する。指令値を決定するために、DR要請前の基準(ベースライン)となる受電電力を予め把握する必要があり、事前に実施したベースライン確認の結果から設定ネガワット量を差し引いた値を受電電力の指令値として設定した。

今回の実証試験では、午前と午後の電力負荷の異なる時間帯においても確実に地域DRが成功するようにネガワット量及び受電電力の指令値をTable 1の通りに設定した。

Table 1 ネガワット量と受電電力の設定値
Set Values of Nega-Watt and Received Electricity Power

レベル	ネガワット量	受電電力の指令値
Level: 0	200kW (午前)	500kW
Level: 1	400kW (午前)	400kW
Level: 2	200kW (午後)	300kW
Level: 3	400kW (午後)	200kW

4.3.3 地域DR実証試験の条件 地域DR実証試験は、試験前日にDR要請信号を受ける前日DR(1日)と試験の1時間前にDR要請信号を受ける1時間前DR(2日)の2種類を合計3日間実施した。試験日は、大型実験装置の稼働予定がない日を選び、PV発電電力がないものとして予め需給を計画した。

実施した地域DRのDRレベルをTable 2に示す。

Table 2 地域DRの試験条件
Experimental Condition of Area DR

		第1日目	第2日目	第3日目
DR種別		前日DR	1時間前DR	1時間前DR
午前	9:00-10:00	Level: 0	Level: 2(0)	Level: 0
	10:00-11:00	Level: 1	Level: 3(1)	Level: 1
午後	17:00-18:00	Level: 2	Level: 2	Level: 3
	18:00-19:00	Level: 2→3*	Level: 3	

*で示す条件変更は、1時間前DRによって実施

試験条件は、以下の動作が実際に行われることを確認することを目的に設定した。

試験第1日目の前日DRでは、RF電池の放電による対応を想定した。ただし、18:00-19:00に1時間前DR要請によってレベルをLevel:2からLevel:3に上げ、直前にネガワット量を200kW増加させることで、RF電池の放電に加えてμ発電が稼働する動作の確認を行った。

試験第2日目の1時間前DRでは、午前中にDRレベル誤送信、夕方に正常送信を想定した動作確認を行った。午前中、予定のLevel:0に対してLevel:2を送信、Level:1に対

してLevel:3を送信し、その際の挙動について確認を行った。

試験第3日目の午前の1時間前DRでは、地域DR対応によってRF電池のSOCが不足し、μ発電が稼働する場合を想定した。夕方のDR試験では、夜間(19:00-23:00)に大型実験装置の稼働予約を設定し、RF電池が夜間の放電に備えて充電している途中で1時間前DRが発令されることで、SOCの不足分をμ発電が賄うように稼働することを想定した。

4.3.4 地域DR実証試験の結果と考察 Fig.10~ Fig.12に第1日目、第2日目、第3日目の試験結果を示す。

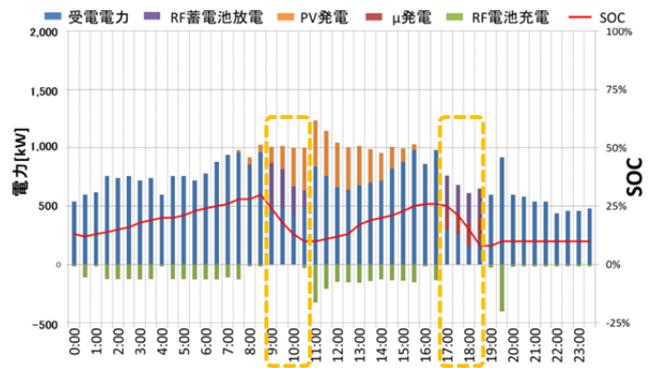


Fig. 10 電力実績 (第1日目)
Operation Results in Electricity of Day1

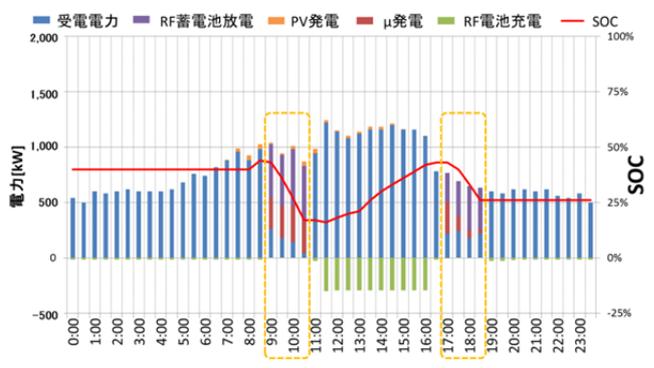


Fig. 11 電力実績 (第2日目)
Operation Results in Electricity of Day2

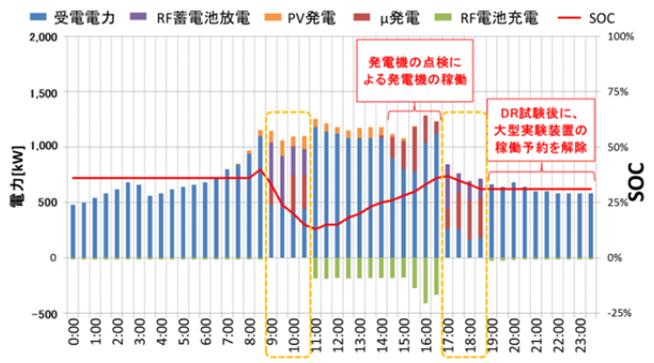


Fig. 12 電力実績 (第3日目)
Operation Results in Electricity of Day3

前日DRでは当初の想定通り、午前はRF電池の放電によって受電電力が指令値以下に下がり、午後はRF電池の放電とμ発電の発電電力によって受電電力が指令値以下に下がった。午前は日射があったため、PV発電を優先的に利用し、RF電池の放電量が減少していることも確認できた(Fig. 10)。

2日目の午前(1時間前DR試験)は、DRレベルの誤送信により、当初の想定より低い受電電力指令値(300kW)が出された。その結果、削減すべきネガワット量がRF電池とμ発電の定格出力の和(900kW)を超えたため、構内DR(後述)が発動した。午後のDRレベルは正常送信のため、想定通りRF電池放電とμ発電にて受電電力を下げた(Fig. 11)。

1時間前DR(3日目)は、午前の試験では、RF電池のSOCが低下してきたために、途中よりμ発電が稼働し、補完するように働いた。午後の試験では、夜間の大型実験装置稼働に備えて、日中にRF電池が充電を行っていたが、大型実験装置稼働の直前に1時間前DRが発令したために、RF電池はDR時間帯直前の充電電力量を増加して放電で対応し、μ発電も稼働して不足分を補う動作となった(Fig. 12)。

3日間を通じて、システムの動作は想定通りに行われた。また、ネガワット量の指令値と実績値の比率は71.5%~39.0%で推移していた。DRの成功は「ベースラインからのネガワット量が70%以上」と定義されており、DRは成功と判断できる。

4.4 構内DR

4.4.1 構内DRの概要 構内DRは緊急時、例えば急激なピーク負荷の増加や気象条件の変化などによりRF電池やμ発電などを利用しても構内デマンドが契約電力を超過する可能性が高くなった際に、所員に対して協力要請を發して、電力使用量を抑制するものである。今回のDRは所員の自主的行動によるものから、最後の手段となる一部の照明・空調の強制制御まで、生産性に支障ない範囲で数段階のレベルを設定した。ここで自主的行動によるDRとは、所員にレスポンス(電力削減への協力のメール返信)を依頼し、返信メールを集計することで期待削減電力量を算出、需要計画に反映するものである。

構内DRでは予測される構内デマンドに応じてFig. 13のようにレベル0~3の4段階に分けて自主的、強制的に節電制御を実行する(このレベルは地域DRとは異なる)。

DR-レベル0 (自主的DR) 発信時期 7:00 発信方法 イントラへの掲示、所員へのメール発信 期待レス 特になし(アナウンスのみ)	DR-レベル2 (機能維持型・快適性緩和型DR) 発信時期 ピーク電力が最大値を超過する可能性が高まった場合(設定値未満) 発信方法 所員へのメール発信 強制制御 照明間引き点灯、空調温度変更等
DR-レベル1 (自主的DR) 発信時期 10:30 発信方法 所員へのメール発信 強制制御 行動内容をメールにて返信 返信内容は定型文を選択	DR-レベル3 (強制DR) 発信時期 ピーク電力が最大値を超過する可能性が高まった場合(設定値以上) 発信方法 所員へのメール発信 強制制御 空調停止

Fig. 13 構内DRの区分
Level of the Site DR

レベル0, 1は、当日朝の需給計画で、ベース需要と大型実験装置の電力負荷からPV発電予測値を差し引いた値が、DR設定値(受電電力の上限値)とRF電池・μ発電の定格能力の和以上となる時間帯(DR対象時間帯)が見込まれる場合に発動する。レベル1では、所員に対して実験スケジュールの調整やPC電源を切る等、自主的な節電協力を要請する旨のメールが発信され返信状況によりDR効果予測が「デマンドナビ」の予測に反映される。

また、レベル1のDR効果を反映しても、受電電力がDR設定値を超過する予測が継続する場合には、DR対象時間帯の30分前にレベル2, 3が通知される。レベル2, 3のどちらを通知するかは、DR設定値からの超過分が一定値(30kWh/30min)未満か以上かによる。レベル2, 3が発動すると、照明の間引き点灯や空調の温度設定変更など(機能維持型・快適性緩和型DR)もしくは業務に直接関係しない空調の停止など(強制DR)による節電制御が行なわれる。

これらDRの効果により受電電力予測値もしくは実績値がDR設定値を下回った段階でDR解除となり、所員にはメールで配信される。

4.4.2 構内DRの実績 Fig. 14に試験的にDR設定値を引下げ、構内DRのレベル3を発動させた2015年3月10日の電力実績を示す。大型実験装置が8時から稼働予定のため、8時以降の受電電力予測値がDR設定値を超過した。これを受け、7時に所員へレベル1の節電喚起メールが配信された。しかし、7時半の段階で電力逼迫状態は改善されず、レベル3を発動する旨のメールが所員へ配信された。8時から15時にかけて、所員による自主的DR及び強制DRの効果によりデマンドは抑えられ、受電電力が契約電力を超過することはなかった。15時には受電電力予測値がDR設定値を下回ったため、所員へのメール配信をもってDRは終了した。

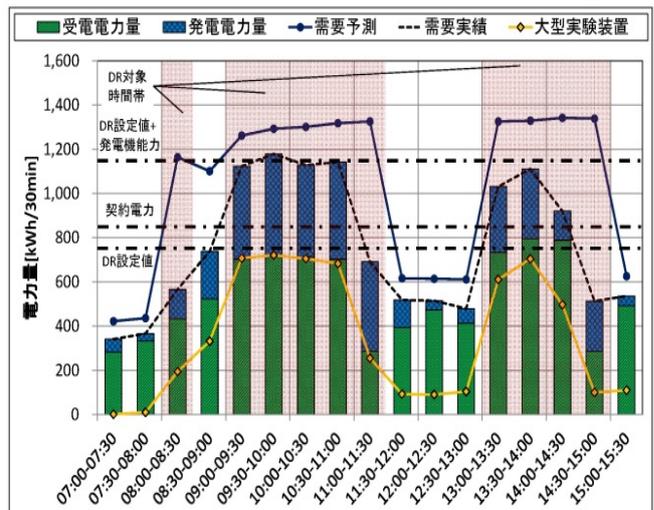


Fig. 14 構内DR実績 (2015年3月10日)
Operation Results in the Site DR (March 10th, 2015)

5. 自立運転機能

5.1 自立電源の構成

自立運転システムの概略回路をFig. 15に示す。接続される分散型電源は、PV(全820kW中700kW)、GE発電機(200kW×2台)、RF電池(500kW×6h)である。

一般的にはGE発電機等を電圧源に用いるケースが多いが、本自立運転システムのようにPV比率が高い電源構成においては、日射量が多いとGE発電機出力を0にしてもPVが需要を上回る電力を出力する場合があります、PVの出力抑制が必要となる。本自立運転システムではRF電池を電圧源とすることで、外部からの制御なしに、余剰電力発生時にはRF電池は充電動作、需要電力がPVとGE発電機からの供給電力を上回る際にはRF電池は放電動作になり、PV出力抑制を回避しつつ需給バランスを実現できる。また、PV出力の急激な変動への応答性でも、RF電池がGE発電機より優る。⁷⁾¹⁶⁾

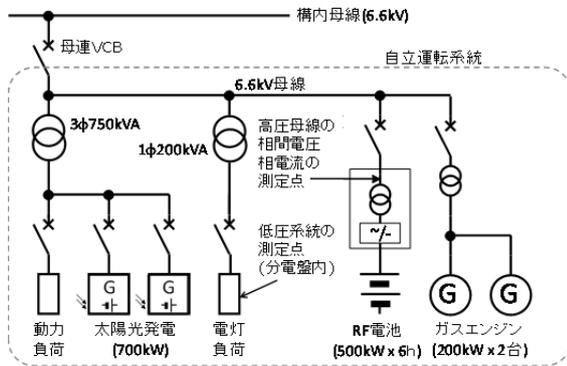


Fig. 15 単線結線図(自立運転システム)
Single Line Diagram (Independent Operating System)

5.2 自立運転試験の概要

2015年9月19日(土)にBCP(Business Continuity Plan)性能検証の一環として、大規模災害における停電を想定した、本研究所内に設置した分散型電源による自立運転試験を実施した。

自立運転試験では、本研究所内の実負荷機器の使用状態や、分散型電源の制御の設定を変化させて、分散型電源が想定通りに自動制御されるかの確認と、安定的に運転可能な条件や出力についての検証を実施した。

自立運転試験は、母線連絡遮断器(以下「母連VCB」)を開放して、Fig. 15中の破線で囲まれた自立運転システムに模擬停電を発生させて行った。停電後、RF電池を起動し、RF電池を電圧源とした自立運転を確立した。その後、PVおよびGE発電機を順次、連系させた。なお、分散型電源の自立運転制御は全てEMSからの指令によって、自動で行っている。

Table 3に試験の各イベントとその際の分散型電源・負荷の状態を、Fig. 16に需給電力の時間推移を示す。Fig. 16の上図に供給電力を、下図に需要電力を示す。自立運転の間は、負荷とPV発電電力の変動をRF電池の充放電で吸収することで、需要と供給のグラフはほぼ同じ形を

示している。

10:02に母連VCBを解列、10:06にRF電池が起動することで自立運転を開始した。その後は、構内負荷制限による低負荷状態での運用(③)、SOCが高い状態でのPV解列(④、⑤)、低SOC状態でのμ発電の起動から出力抑制・停止(⑦~⑨)などのイベントを順次実施し、14:29に母連VCBを商用電力系統へ同期投入することで系統復電した(⑩)。負荷や分散型電源の制御設定を変えることで、EMSからの制御によって想定通りにイベントが順次実行された。

Table 3 自立運転試験のイベントとシステムの状態
Event and Status of the System
at Independent Operation Test

No.	時刻	予定イベント	分散電源(動作結果) (○:運転, ×:停止・解列)			負荷状態	連系状態	
			RF電池	PV	μ発電			
①		系統連系	×	○	×	通常	連系	
②	10:02	自立運転開始	放電	×→○	×	最小	自立運転	
③	10:43	構内負荷制限	充電	○	×			
④	11:00	PV余剰による	放電	×	×			
⑤	11:30	停止	放電	×	×			
⑥	12:19	PV起動 負荷制限解除	充放電	×	×	最大		
⑦	13:07	μ発電起動	充電	○	○			
⑧	13:30	μ発電出力抑制	充電	○	○			
⑨	14:01	μ発電停止	充放電	○	○			
⑩	14:29	系統復電	充放電	○	×			連系

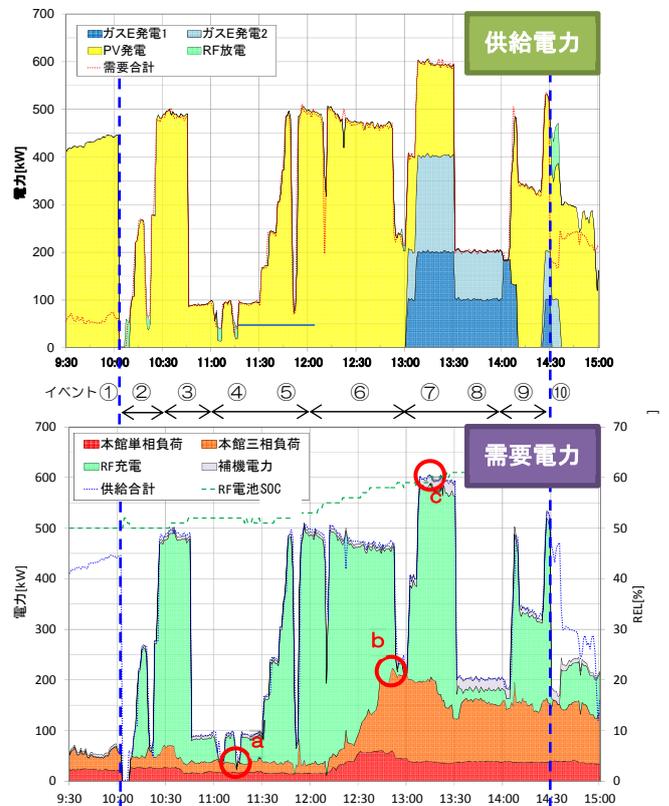


Fig. 16 自立運転試験時の供給電力(上)と需要電力(下)
Electricity Supply and Demand
at Independent Operation Test

5.3 自立運転試験結果

5.3.1 最小負荷・最大負荷時の自立運転の継続

技術的に可能な最小・最大負荷ではなく、大規模災害における停電を想定した場合に予想される運用での最小・最大負荷を設定した。分電盤回路の切り分けにて最小・最大負荷の状態をつくり、自立運転の可否について検証を実施した。検証の結果、最小負荷(23.2kW : Fig. 16・a)～最大負荷(223kW : Fig. 16・b-RF電池の充電を含むと606kW : Fig. 16・c)の条件下で自立運転が可能であることを確認した。

5.3.2 分散型電源の電力供給状況の確認

PVは天候による出力変動が大きく(0～507kW)、μ発電はEMSの指示値通り出力(0～400kW)し、RF電池は需給バランスを保つよう差分を吸収した(-463kW～85kW)。負荷やPV出力の変動に対するRF電池の追従性については実用上問題なく、自立運転システムの電圧・周波数共に大きな問題は生じなかった。PV発電電力が余剰となる場合でも、RF電池が放電から充電にスムーズに移行して自立運転を継続した。RF電池が満充電(SOC:100%)になるとPVの余剰分を充電できなくなり、SOCが不足すると夜間や曇天・雨天時にはPVやRF電池から負荷へ電力供給ができなくなることから、天候の予測に基づきPV発電開始時刻前の時点において蓄電池のSOCを適切に管理することが、自立運転の継続のためには重要となる。

5.3.3 自立運転時の電力品質(低圧分電盤で計測)

低圧分電盤において、データロガーを用いて低圧システムの電圧、電流、周波数及び高調波歪(電圧、電流)の計測を行った。負荷や分散型電源の状態が変わる一連の試験において、電圧は102.8～105.0V、周波数は49.96～50.00Hzと顕著な変化は見られず、問題となる電圧・周波数変動は生じなかった。

高調波総合歪(電流、電圧)の計測結果は、電流において19.5～66.2%まで変化しているが、電圧では1.4～3.6%(5%以下で良好)と推移し、問題となる状況は生じなかった。

5.3.4 高圧母線高速サンプリング測定結果

自立運転時の電氣的挙動を調査すべく、自立運転システム内の6.6kV母線の各相間電圧と相電流の高速サンプリング測定を行った。測定は、RF電池を連系する交直変換装置内の計測用電圧トランス(VT:比率6600/110V)と計測用電流トランス(CT:比率100/5A)にて実施した。また、計測サンプリング周期は、50Hzの1サイクル中の挙動を調査できるように0.1msecとした。以下に測定結果の例を示す。

<停電操作時の挙動(イベント①)> 母連VCB開放操作前の状態は、RF電池及びGE発電機は停止、PVは約400kW発電、負荷は約50kWであった。停電操作時の電圧波形をFig. 17に示す。負荷遮断時は上位への潮流が瞬時に

に切られるため、行き場のなくなった電力により電圧上昇が生じるが、同図が示すように、停電操作時の電圧上昇は約20%程度に抑制されており、各機器の耐圧仕様内となったことを確認した。また、運転中のPVも、単独運転検出(停電検知)後、正常に停止することを確認した。

<自立運転起動時の挙動(イベント②)> 停電状態からRF電池を起動した際の電圧・電流波形をFig. 18に示す。起動時には50kW程度の負荷(単相負荷と三相負荷がほぼ半分ずつ)が接続されていた。起動後、変圧器等への突入電流を抑制すべく、数秒かけて電圧が確立する(ソフトスタート)。負荷不平衡のため各相電流には倍程度の違いがあるが、各相間電圧は安定的に立ち上がり、RF電池が電圧源として機能していることが分かる。

<充放電切り替わり時の挙動(イベント②→③)> PVの発電電力が徐々に上昇して需要を上回ると、余剰電力はRF電池に充電される。放電から充電に切り替わる際の波形をFig. 19に示す。電流は三相不平衡の状態である。同図最下段に電力値として、瞬時電力値と1周期における平均電力値をプロットしている。瞬時電力値は1周期内で変動しており、徐々に1周期内の充電電力量が放電電力量を上回る形で、放電(正側)から充電(負側)に切り替わることが分かる。

<発電電力変動時の挙動(イベント④, ⑤, ⑦)> PVを順次解列し、発電電力が急変する際の波形をFig. 20に示す。PVを解列することで発電電力が急変するが、そのタイミングに応じて、瞬時にRF電池への充電量が変化して需給バランスを維持する動作となっている。発電電力が急変しても相間電圧は安定しており、RF電池が電圧源として機能していることを確認できる。また、自立運転時に、GE発電機を同期投入した際の挙動をFig. 21に示す。投入直後に電流の乱れが一瞬生じ、これは位相差に起因するものである可能性はあるが、さほど大きいものではなく、問題なくGE発電機が連系された。RF電池による電圧源は、商用システムの規模と比較して小さくGE発電機と容量規模が同程度であるが、RF電池の電圧源動作は問題なく継続できることを確認した。

<商用システムへの再連系時の挙動(イベント⑩)> 母線VCBを再投入し、商用システム連系運転に復帰した時の波形をFig. 22に示す。同図が示すように、自立運転から連系運転に切り替わる際に、電圧位相は同期し連続的であるが、電流位相が瞬時に変化して、商用システムに連系した運転に移行できていることが分かる。¹¹⁾¹²⁾¹⁷⁾

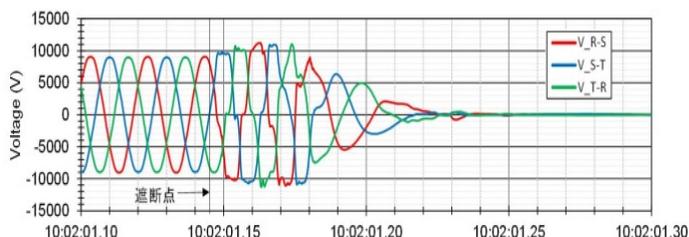


Fig. 17 停電操作時の電圧挙動

Voltage Behavior at the Time of the Blackout Operation

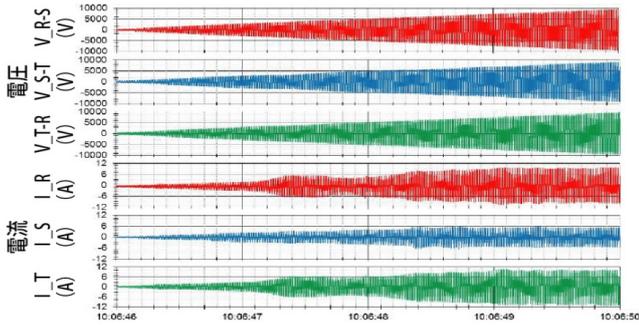


Fig. 18 自立運転 (RF電池) 起動時の挙動
Electrical Behavior of RF Battery at starting of the Independent Operation

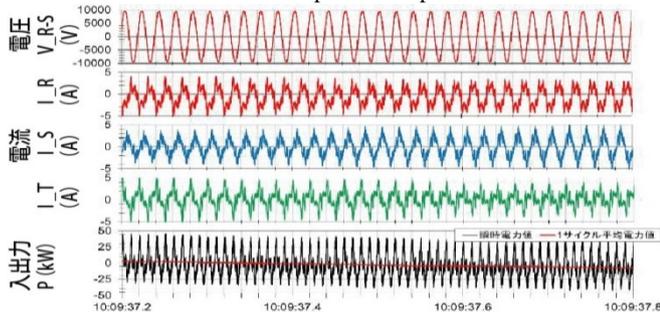


Fig. 19 放電から充電への切り替わり時の挙動

Electric Behavior in transferring from Discharge to Charge mode

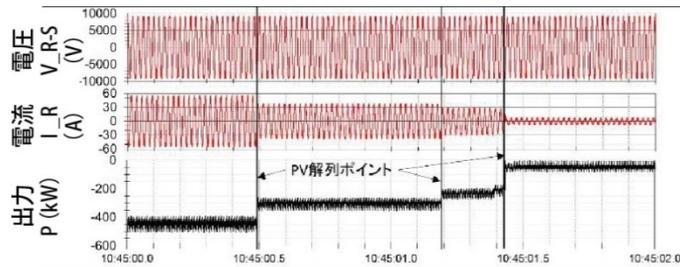


Fig. 20 PV発電出力急変時の挙動

Electric Behavior at Steep Change of PV Output

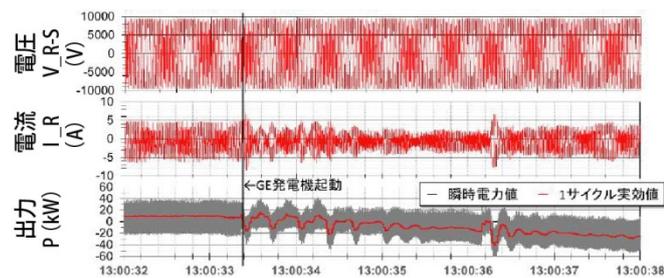


Fig. 21 GE発電機起動時の挙動 (代表相のみ)

Electric Behavior of a Single line at the starting of GE generator

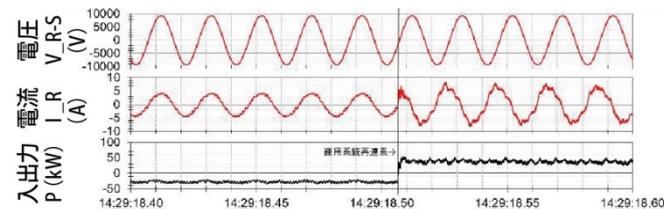


Fig. 22 商用系統への再連系時の挙動 (代表相のみ)

Electrical Behavior of a single line at re-connecting to the Commercial System

6. まとめ

本報では、技術研究所構内に構築したスマートエネルギーシステムの概要と運用実績について報告した。技術研究所の敷地全体をスマートシティと見なして電力設備で備えるべき、受電電力の平準化、環境負荷低減、電力供給自立時の品質や安定性を実証した。下記に成果項目を記述する。

- 1) 需要計画・予測や多様な分散型電源の最適制御による受電電力の平準化
- 2) ベース需要電力と同規模の太陽光発電を最大限に利用した環境負荷低減
- 3) 地域用と構内用の2種類のデマンドレスポンス機能の実証
- 4) 大型蓄電池を電圧源として他の分散型電源を連系させる自立運転における電気品質と電力供給安定性の検証

今後は、さらなる効率化のための改善点の検討・計画を行いたい。また、本研究が今後のスマートシティにおけるエネルギーシステム構築の一助になれば幸いである。

謝辞

本システムの構築や自立運転試験において、早稲田大学先進グリッド技術研究所の林泰弘先生に御指導いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 小野島一, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その1 計画概要, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.665-666, 2014.9
- 2) 小島義包, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その2 電力制御システム, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.667-668, 2014.9
- 3) 小山岳登, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その3 電力需給シミュレーションによる蓄電池の制御方法の比較, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.669-670, 2014.9
- 4) 小山岳登, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その4 電力需給管理の詳細計画と実績, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.833-834, 2015.9
- 5) 畑中裕紀, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その5 デマンドレスポンス機能の概要と実績, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.835-836, 2015.9
- 6) 小関由明, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その6 太陽光発電の予測と実績, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.837-838, 2015.9
- 7) 藤田尚志, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その7 自立運転の動作検証, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.839-840, 2015.9

- 8) 小山岳登, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その8 電力需給管理の実績, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.743-744, 2016.8
- 9) 西村晃, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その9 地域デマンドレスポンス機能の概要と実績, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.745-746, 2016.8
- 10) 小関由明, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その10 太陽光発電の予測と運用状況, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.747-748, 2016.8
- 11) 畑中裕紀, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その11 分散型電源の自動制御による自立運転試験, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.749-750, 2016.8
- 12) 藤田尚志, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その12 自立運転時の高圧母線高速サンプリング測定結果, 日本建築学会学術講演梗概集, D-1, pp.751-752, 2016.8
- 13) 小島義包, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その1 計画概要, 電気学会全国大会, pp.6-215-355-356, 2015.3
- 14) 千貫智幸, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その2 計需給シミュレーション, 電気学会全国大会, pp.6-215-357-358, 2015.3
- 15) 小山岳登, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その3 電力需給管理の詳細と実績, 電気学会全国大会, pp.6-164-265-266, 2016.3
- 16) 小島義包, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その4 自立運転の実験検証, 電気学会全国大会, pp.6-164-267-268, 2016.3
- 17) 小島義包, 他: 大規模研究施設におけるスマートエネルギーシステムの研究 その5 デマンドレスポンス機能と自立運転試験の実績, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, pp.7-2-13-18, 2016.9