



# コスト削減と災害対策を両立する グリーン基地局向け電力制御技術

ドコモでは環境に優しく災害に強いグリーン基地局の展開を進めており、課題としてコスト削減と災害対策の両立が求められている。そこで、2016年予定の電力小売市場自由化を見据えた複数局間での予測制御および連携制御技術を考案し、グリーン基地局の電力使用効率最大化や蓄電池コスト削減、および、バックアップ時間の確保を実現した。なお、本研究は早稲田大学大学院 先進理工学研究科 若尾研究室（若尾真治教授）との共同研究により実施した。

先進技術研究所  
 ぬかだ かずとし たかはた みのる  
 額田 一利 高畑 実  
 まつおか ほうせい† たむら たかゆき  
 松岡 保静 田村 隆幸

## 1. まえがき

現在、世界中でエネルギー問題が注目を集めている。国内では東日本大震災による停電被害が起こり、延べ停電軒数は東北電力で約466万軒、東京電力で約405万軒と大規模になり、エネルギー安定供給の脆弱性を露見させた[1]。ドコモでも震災発生時は基地局のバッテリー枯渇によって通信途絶が発生しており、災害時のエネルギー対策は重要な課題の1つとなった。

また、直近では2016年の電力小売市場自由化に備えた動きも見られており、例えば各電力会社は消費者のさまざまな生活パターンを想定した多様な電気料金プランを提供し始めている。また、スマートメータ\*1設置などの背景により、料金単価の高い昼の電力使用量が多いとわかっ

た場合、適切な電気料金プランに変更して電気料金を削減するといった、従来以上に利用者側の工夫が求められる世の中に変わりつつある。

このようにエネルギーをめぐる社会情勢が変化中、ドコモグループの消費電力は2013年度におよそ29億kWh/年に達し、コスト削減やCO<sub>2</sub>削減の観点から、環境・エネルギー問題は重要な経営課題となった。そのためドコモでは、自然エネルギーを活用し、災害に強く、環境に優しい無線基地局用エネルギーシステムの研究開発を進めている。大容量リチウムイオン蓄電池（以下、蓄電池）と太陽電池（以下、PV：PhotoVoltaics）パネルを備えたグリーン基地局はその一環であり、蓄電池あるいはPVのみの運用が状況によって可能となる。グリーン基地局の装置構成を図1に示す。

グリーン基地局は、昼間にPVで発電した余剰電力を蓄電池に蓄えたり、電気料金単価が安い夜間に蓄電池を充電して日中の商用電力削減のため蓄電池から放電したりといった、エネルギーの有効活用を実現する[2][3]。PVと夜間電力を活用した制御および蓄電池充電率（SOC：State Of Charge）の例を図2に示す。

グリーン基地局の有効性と信頼性を立証するため、現在までに関東甲信越地域にフィールド試験局として10局を設置済みであり、その実績から、全国に商用局としてのグリーン基地局を11局設置し、全国展開を開始した。

このような特徴を持つグリーン基地局の導入展開を進めるためには2つの主要な課題が存在する。

1つめの課題はコストである。既存基地局をグリーン基地局化するに

©2015 NTT DOCOMO, INC.  
 本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

\*1 スマートメータ：電力の使用状況をリアルタイムに計測し、見える化するための装置。

† 現在、サービスイノベーション部

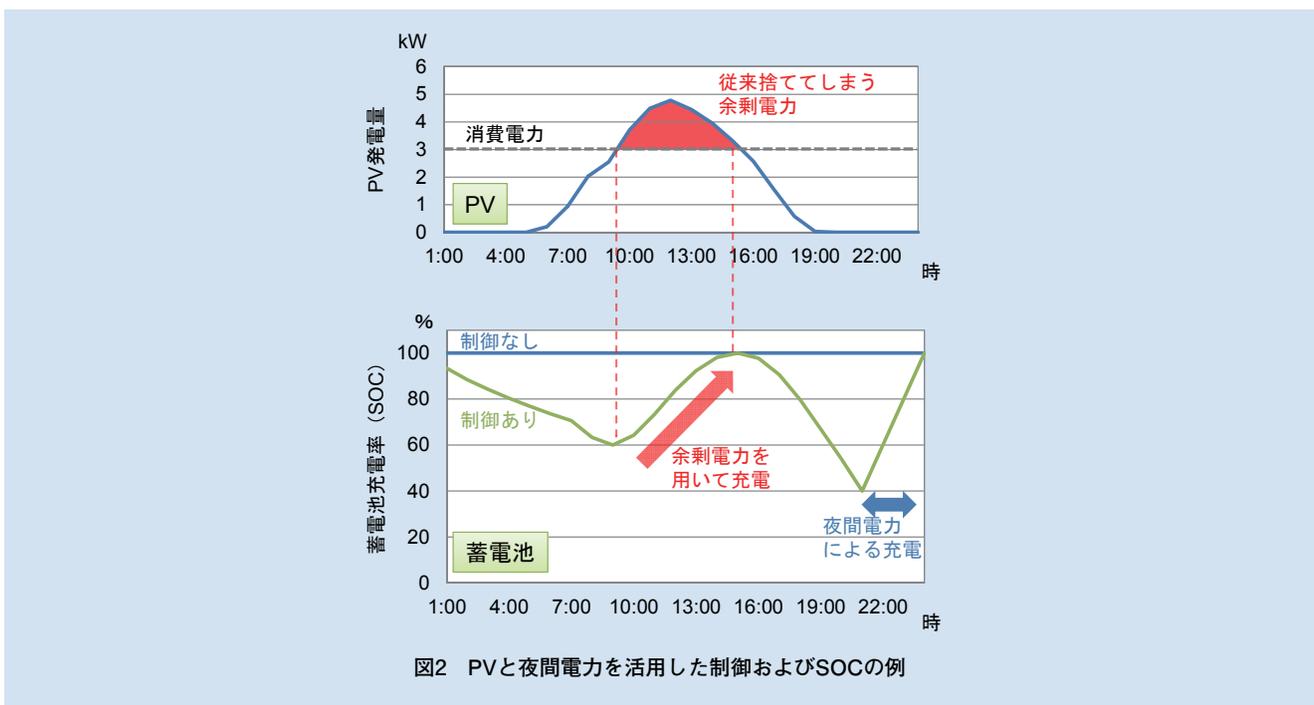
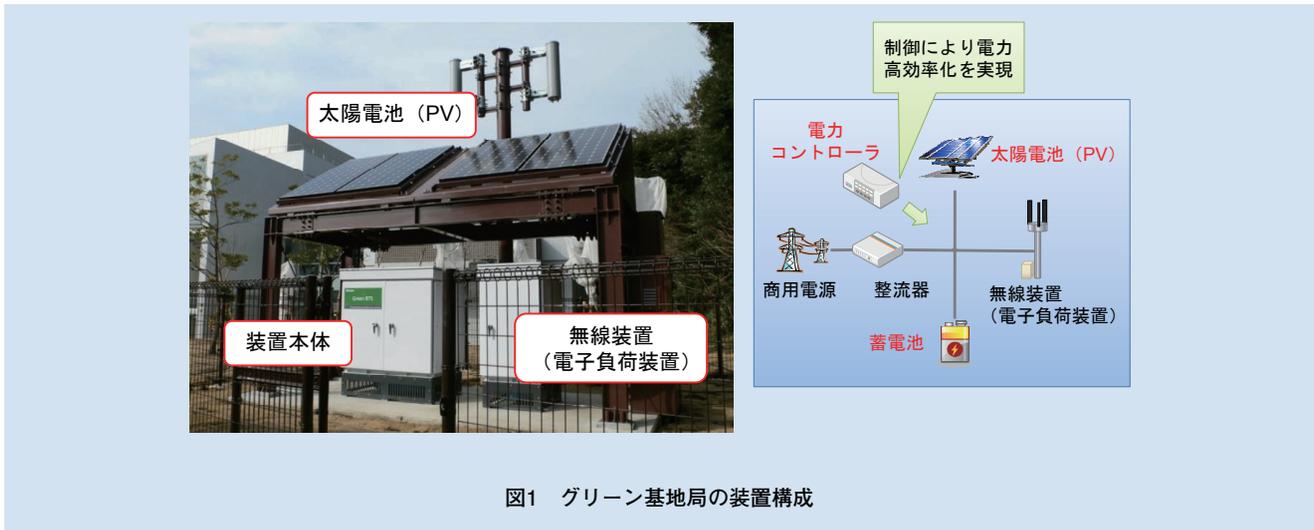
は、災害直後の高トラフィック時間帯を6時間以上カバーするバックアップ能力を持つ蓄電池、十分な発電能力のPV、効率的な電力制御を可能とする電力コントローラを設置するため、追加のインシヤルコストが発生する。よって、グリーン基地局では電力制御をさらに高効率化さ

せ、既存基地局以上のランニングコスト削減が必要である。

2つめの課題は災害対策である。前述したように、グリーン基地局はPVと蓄電池を備えており、環境面での配慮に加え、コスト面での費用対効果を高めるため、これまで破棄していたPV発電の余剰電力や夜間

電力を蓄電池に充放電することで、日中使用する商用電力を削減している。だが、放電は災害時のバックアップ時間を減少させることにもつながるため、蓄電池容量や放電量などを算出し、放電を必要最低限に抑える必要が生じる。

したがって、グリーン基地局の導



入展開を進めるためには、コスト削減と災害対策をさらに向上させる手法の確立が必要である。本稿では、以上の2つの課題を解決するために実施した電力制御技術について解説する。

なお、本研究は早稲田大学大学院先進理工学研究科 若尾研究室（若尾真治教授）との共同研究により実施した。後述するように、本稿の課題解決には予測制御の活用が有効であることから、本研究においては気象庁GPV（Grid Point Value）データ<sup>\*2</sup>、JIT（Just-in-Time）モデリング<sup>\*3</sup>を用いて日射量予測を行う予測制御技術の確立について取り組んできた[4]。

## 2. 電力制御最適化計算

### 2.1 多目的最適化

電力制御最適化においては、前述したようにトレードオフの関係にあるコストと災害対策の2つの課題を

同時に解決する必要がある。本研究では多目的最適化計算による課題解決を検討した。

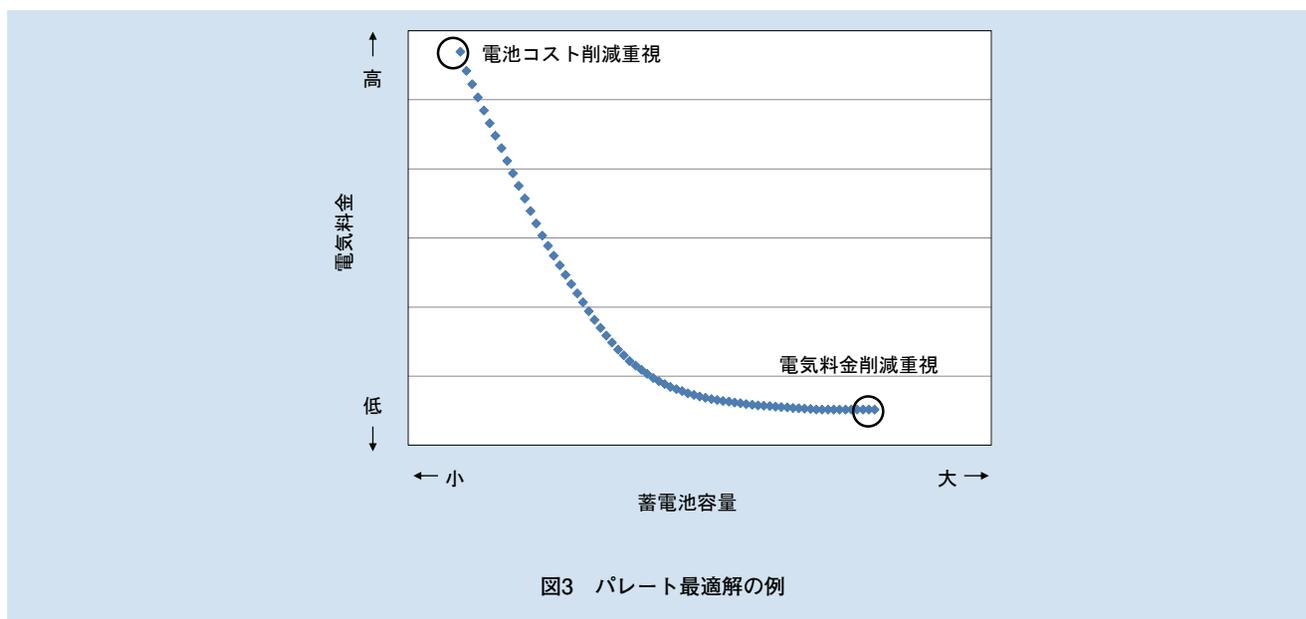
一般に最適化とは、1つの目的に対する最適化を意味することが多い。しかし、実社会に存在するさまざまな問題の多くは、複数の評価基準を同時に考慮する必要がある。このような問題に対処する手法として多目的最適化があり、この計算によって複数算出される解をパレート最適解と呼び、目的に合った制御を選択することが可能になる。

グリーン基地局に用いた場合の一例として、「蓄電池容量」と「電気料金」の2つを評価関数として計算したパレート最適解を図3に示す。図3のとおり、蓄電池容量を増やした場合、ランニングコストの電気料金は下がるがイニシャルコストの設置費用は上がる。蓄電池容量を下げた場合、電気料金は上がるが設置費用は下がる。このようなパレート最

適解が数多く存在し、その中から「電気料金削減」を重視している解や「電池コスト削減」を重視している解など、状況に合わせた解を選択することが可能である。以下で具体的な計算条件について説明する。

### 2.2 評価関数および設計変数

今回は2つの課題を解決するため、「電気料金」と「耐災指標」の2つの評価関数を設定した。電気料金は電気料金単価と購入電力量の積とし、耐災指標は停電発生時の蓄電池での運用能力を指標化したものである。グリーン基地局の蓄電池容量と無線装置消費電力を考慮して評価する必要があるため、放電深度<sup>\*4</sup>を最大バックアップ時間で除した値を用いて評価した。いずれの評価関数も値が小さいほど、優れた制御だと評価できる。また、電気料金と耐災指標の両面で最適な電力制御手法を算出するため、蓄電池の充放電量と他局



\*2 気象庁GPVデータ：気象庁が提供している気象数値シミュレーションの格子点データ。

\*3 JITモデリング：データベース中の近傍データを選択するブラックボックスモデリングの一種。

\*4 放電深度：満充電したときに何%まで放電するかを表す指標。

に電力を送る電力融通量を変動させる設計変数<sup>\*5</sup>をそれぞれ設定した。具体的には、発電予測を考慮した調整係数と、電力融通を考慮したSOCしきい値である。詳細については後述する。

## 2.3 その他の前提条件

計算の前提となるいくつかの条件について説明する。まず、充放電範囲は災害直後の高トラフィック時間帯をカバーするため、基地局バックアップ時間6時間を常に満たすこととした。また、グリーン基地局の装置条件は、実際に設置済みのフィールド試験局3局の装置仕様に基づき、PV発電についてはこの3局の実データを使用した。各局の装置条件を表1に示す。なお、電気料金は3局の設置場所にある該当電力会社の低圧電力を単価とした。

## 3. 予測を用いた広域連携制御

### 3.1 予測制御

#### (1) 概要

実際に最適化計算を用いて電力制御を行う場合、不安定なPV発電を考慮する必要があるため、日射量予測技術を用いた発電予測が必要となる。また、放電量の制御について検討を行ったところ、余剰電力発生直前に蓄電池から同量だけ放電する簡便な制御手法であるPDESP (Prior Discharge Equivalent to Surplus PV power) の有効性を確認できた[5]。しかし、コスト削減と災害対策の両方の課題解決に有効であるPDESP

表1 フィールド試験局3局の仕様

	茨城局	長野局	新潟局
消費電力	1.2kW	2.3kW	1.0kW
蓄電池容量	40kWh	27kWh	9.3kWh
PV容量	2.0kW	3.0kW	4.5kW

も、あくまで発電量の予測値を用いて制御するため、どうしても予測誤差の影響を受けてしまう。そのため、予測誤差を考慮した模擬的な予測値を使用して、誤差影響を最小限に抑える最適化計算を検討した。

#### (2) 予測誤差への対応

予測誤差の影響として、余剰電力を過大予測した場合、充電可能量以上の放電をして低SOCに陥る可能性があるため、災害対策であるバックアップ時間が減少してしまう。また、過小予測した場合、余剰電力をすべて吸収するには蓄電池の空き容量が不足し、電力破棄に伴いコストが上がってしまう。そこで、過大予測、過小予測のそれぞれについて対応を行った。

過大予測への対応として、設計変数に予測の調整係数を設定する手法を導入した。具体的には予測値に減少率をかけて、低SOCに陥るのを防ぐという手法である。これにより、コスト削減にはほとんど影響を及ぼさず、耐災指標を大きく改善することができた。

過小予測への対応としては、SOC基準値を設定する手法を導入した。満充電にならないように商用電源からの充電に上限 (SOC基準値) を設けて、蓄電池に過小予測誤差分を吸収できるようにする手法である。

これにより余剰電力の破棄量を削減することができた。

### 3.2 連携制御

ドコモではこれまでに単局での電力制御に取り組んできたが、さらに電力制御を高効率化させるべく、基地局間で電力融通を行う連携制御について検討を行った。連携制御とは、天候が悪くPV発電量が低い基地局に対して、余剰電力が発生している基地局が電力を融通するといった制御である。これにより、蓄電池設置容量や充放電回数の削減が可能のため、蓄電池コスト削減、蓄電池長寿命化、バックアップ時間向上が期待できる。今回は電力売買や託送<sup>\*6</sup>を想定した電力融通制御について最適化計算を行った。

電力小売市場自由化を前提として電力託送について考えた場合、需要に対して余分な供給はできないため、逆潮流<sup>\*7</sup>電力より購入電力が多くなる条件を設定した。また、電力売買の場合、売電価格が低下傾向にある近年の動向と連携制御効果の明確化のため、売電単価と買電単価を等しいと仮定した。単価は基地局ごとに該当する電力会社の料金に応じて算出したものを合計した。

また、連携制御は2種類のパターンで計算を行った。単局視点と広域

\*5 設計変数：評価関数を最適化するために変動させる、変更可能なパラメータ。

\*6 託送：電力会社の送配電網を利用して、発電した電力を他の場所へ供給すること。

\*7 逆潮流：発電した電力を商用の配電線網に流すこと。

視点である。単局視点は他局の発電状況と関係なく単局でPDESPを行い、予測誤差によって吸収しきれなかった余剰電力のみ融通するという手法である。一方、広域視点は他局の発電状況を把握しながら電力制御する手法である。この広域視点制御を実現するために、最適化計算の設計変数にSOCしきい値を追加した。これまで、単局視点の場合、優先的に自局を満充電にしていたが、SOCしきい値を設定することにより、自局をSOCしきい値まで充電した後はPV発電量の少ない局やバックアップ時間の少ない局に優先的に電力融通する。つまり、充電しすぎて融通を受け取れなかったり、自局で余剰電力を消費しきるために限界まで放電するような状況を回避したりできる。

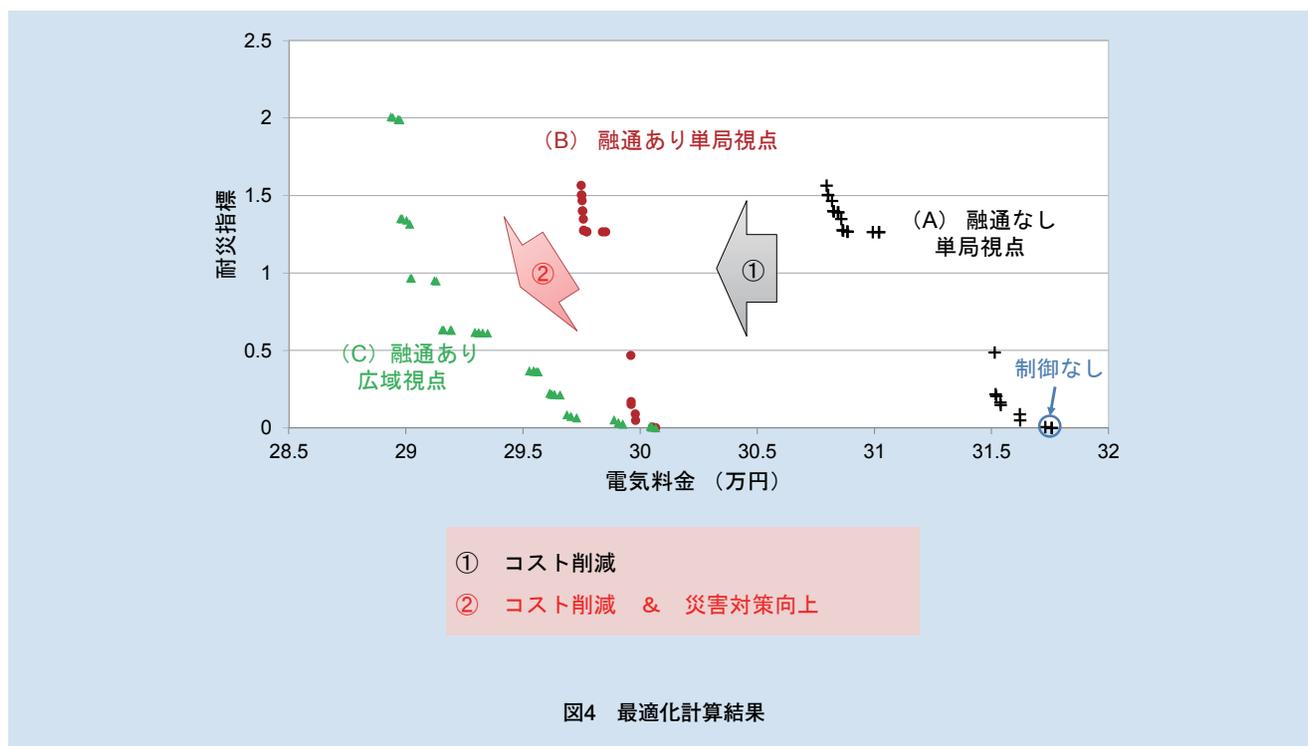
#### 4. 電力制御計算結果

最適化計算結果を図4に示す。軸が評価関数を示しており、縦軸が耐災指標、横軸が電気料金を示している。なお、このグラフは表1で示した3つの基地局8カ月間合計の計算結果である。3種類の制御手法で最適化計算を行っており、1つめは電力融通を行わない単局における電力制御（図4（A））である。なお、（A）の耐災指標0の結果については充放電を全く行わないことを示しているの、制御なしの結果となる。2つめは単局視点の電力融通ありの制御（図4（B））、3つめは広域視点の電力融通ありの制御（図4（C））である。

まず（A）の計算結果から、予測制御により電気料金を削減できてい

ることがわかる。さらに（B）と（C）の計算結果から、電力融通によって電気料金が下がり（図4①）、広域視点にすることによって電気料金削減に加えて耐災指標が改善（図4②）していることがわかる。このように広域視点の連携制御により、従来制御に比べてさらなるコスト削減と災害対策向上の可能性を示した。

制御なしの場合と、この3種類の制御（図4（A, B, C））の効果が大きく表れている耐災指標1.5付近の電気料金、出力抑制量、自活率を示した結果を図5に示す。出力抑制量とは活用できなかった余剰電力量のことを指している。また、自活率は消費電力を発電で賄えた割合である。これは、バックアップと余剰電力活用を両立させるには蓄電池容量が不足している局と、比較的蓄電池



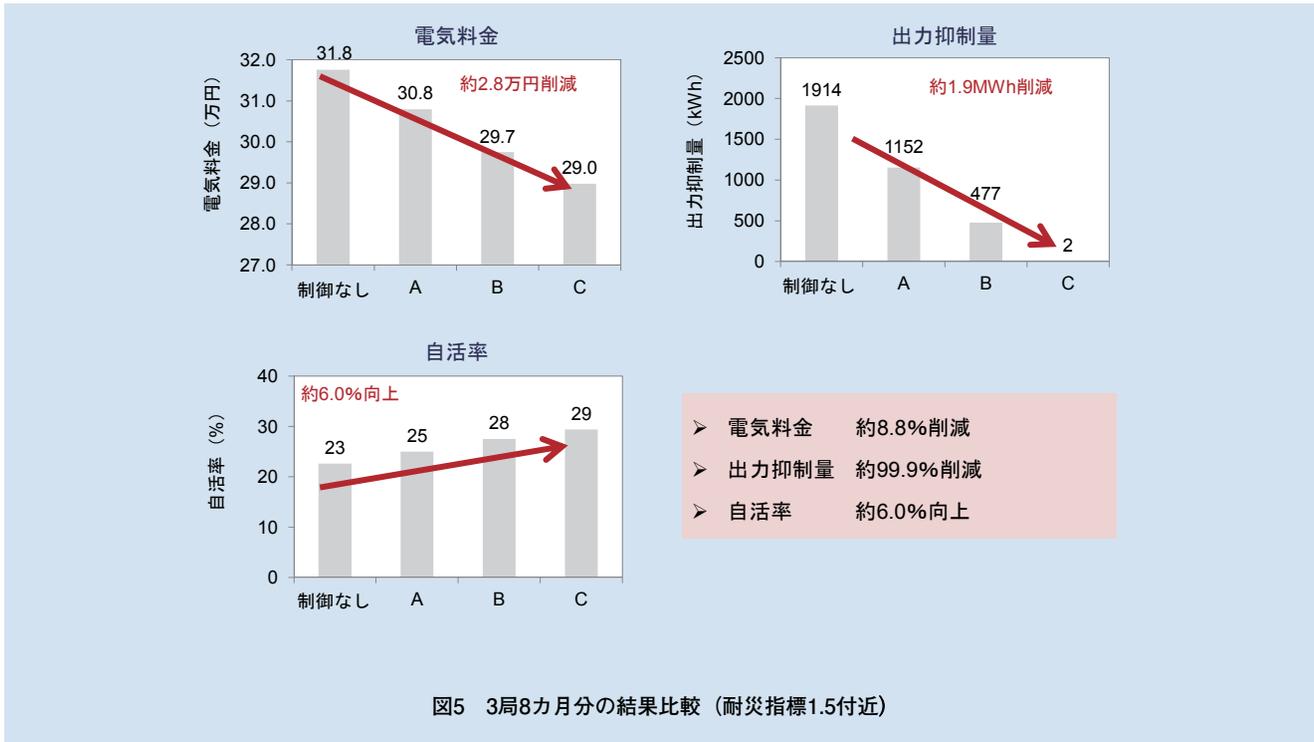


図5 3局8カ月分の結果比較 (耐災指標1.5付近)

容量が大きい局それぞれの充放電電力をうまく配分して得られた結果である。つまり、電力融通と広域視点運用を導入することにより、単局制御で活用しきれなかった余剰電力を他局で活用できることを示している。3局8カ月における制御なしと広域連携制御を比べると、電気料金は約8.8%、出力抑制量は約99.9%の削減、自活率は約6.0%向上できる結果となった。全体として放電深度を浅くすることができるため、適切な制御により蓄電池劣化を抑制し、蓄電池更改の頻度やコスト削減につながることも期待できる。さらに商用電力削減にもつながり、環境負荷の低減も期待できる。

## 5. あとがき

本稿では多目的最適化計算による

電力制御を用いた、グリーン基地局のコスト削減と災害対策の両立について解説した。本制御技術の導入により、電気料金削減や自活率向上だけでなく、蓄電池利用の大幅な効率化が期待できる。今後は多様化する電気料金プランに対応できる新たな制御手法についても研究開発を進めていく。また、本制御技術は、将来の移動通信システムの実現に不可欠な小型基地局にも対応する必要があるが、その場合、従来に比べて蓄電池容量を大幅に削減できる可能性がある。今後はさまざまな種類の基地局導入に向けて研究開発を進めていく予定である。

## 文献

[1] 東京電力株式会社：“東北地方太平洋沖地震に伴う電気設備の停電復旧記

録”，東京電力ホームページ，Mar. 2013.

[2] K. Nukada, T. Tamura and M. Takahata : “Energy Control Optimization of Green Base Stations to Reduce Disaster Risk and Energy Cost Based on PV Power Production Forecasts,” WCPEC-6, 8WePo.8.25, Nov. 2014.

[3] 小宮，ほか：“環境に優しく災害に強いグリーン基地局用試験システムの開発，”本誌，Vol.21, No.1, pp.34-39, Apr. 2013.

[4] 鈴木 孝宣，後藤 悠主，寺園 隆宏，若尾 真治，大関 崇：“Just-In-Time Modelingに基づく日射量予測手法の開発，”電気学会論文誌B，Vol.131, No.11, pp.912-919, Nov. 2011.

[5] Y. Hara, T. Yamazaki, S. Wakao, K. Nukada, T. Tamura and M. Takahata : “Robust Battery Operation of Green Base Stations Considering Forecast of PV Output,” WCPEC-6, 8WePo.8.22, Nov. 2014.