

Field test of a DC-based microgrid system in Okinawa

沖縄における直流マイクログリッドシステム
実証試験Taichiro Sakagami
坂上 太一郎^{*1 ‡}Yoshiyuki Asai
浅井 義之^{*2}Miwako Nishimura
西村 美和子^{*2}Keizo Nishime
西銘 恵三^{*3}Yoshiichi Tokuda
徳田 佳一^{*4}Daisuke Kawamoto
川本 大輔^{*4}Mario Tokoro
所 眞理雄^{*4}Hiroaki Kitano
北野 宏明^{*2,4}

Abstract

Utilization of surplus electricity is essential for sustainable energy networks based on renewable energy, especially photovoltaic energy. A DC-based Open Energy System (DCOES) involving 19 faculty houses at the Okinawa Institute of Science and Technology was established in December 2014, and an energy exchange experiment among houses was conducted. Units installed on each house are composed of photovoltaic panels, a rechargeable battery, a DC-DC converter, and a controller. Units are linked by DC power cables and network cables. Each unit independently determines when and how much electricity it should exchange with other units in the neighborhood. As of January 2015, 39% of energy consumption by residents had been supplied by DCOES. 50 kWh were exchanged among houses during that first month. A simulation study suggests that DCOES could supply $\leq 49\%$ of the energy consumed in one month during the Okinawa summer, during which time 297 kWh would be exchanged.

Keywords: Microgrid, DC, renewable energy, lithium-ion battery, smart grid

キーワード: マイクログリッド, 直流, 再生可能エネルギー, リチウムイオン蓄電池, スマートグリッド

1. はじめに

化石燃料資源の枯渇, 二酸化炭素を始めとした温室効果ガスの増加による気候変動の影響などが危惧される中, 世界各国で太陽光, 風力, 地熱, 沿岸の潮流・波力などの再生可能エネルギーを利用した発電システムの開発・導入が盛んに進められている。2013年にはその発電量は全世界の発電量の22%に達しており, 2020年にはおよそ25%に達するといわれている⁽¹⁾。再生可能エネルギーによる発電量は天候などに依存して大きく変動する。そのような変動的な電力を既存グリッドに多く流した場合, 安定した電力供給にも影響しかねないという問題がある⁽²⁾。例えば国内ではスマートグリッドプロジェクトや固定買取制度など再

生可能エネルギーを促進する政策により, その発電量は増加した。しかし, 既存電力網の許容限界や既存発電設備のスタンバイ条件などにより固定買取制度を前提にした導入に関してはすでに制限が発生している⁽³⁾。このため, 既存電力網に依存しない再生可能エネルギーによる電力利用の新たな枠組みを開発する必要がある。一方, 発展途上国には電力システムを保有しない無電化地域もまだ多い。そういった地域には既存の電力システム(集中発電をして送電する)を導入するのではなく, 最初から再生可能エネルギーを導入し, 化石燃料に頼らない持続可能な社会の構築を支援することが望ましいという意見が国連や世界経済フォーラム(WEF)などにおいて主流となっている^(4,5)。

太陽電池モジュールによる発電や蓄電池の充放電は通常直流で行われる。また最近のパソコン・テレビ・LEDライトなどの電子機器は直流で動作する。一方, 既存グリッドは交流をベースとした電力システムである。このため, 既存送電網を利用して再生可能エネルギーから発電された電力を送電する場合は, 一旦交流に変換する必要がある。電子機器がこの電力を利用する時には再度交流から直流へ変

*1 沖縄科学技術大学院大学 統合オープンシステムユニット
(〒904-0495 沖縄県国頭郡恩納村谷茶 1919-1)

‡e-mail: taichis@oist.jp

*2 沖縄科学技術大学院大学

*3 株式会社沖創工

*4 株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所

(原稿受付: 2015年6月7日, 受理日: 2015年9月7日)



Fig. 1 A DC-based Open Energy System (DCOES) was installed on the OIST campus, Okinawa.

換する必要がある^(7,8)。この複数回の変換による電力ロスを減らすためデータセンターやマイクログリッドなどでも直流のまま電力を使用する方式が注目されている⁽⁸⁻¹¹⁾。そのような中で 2007 年ごろより株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所（ソニーCSL）においても、再生可能エネルギーによる発電をより効率的に利用するために蓄電システムをベースとして、相互に直流で繋ぎ、発電の不安定性を吸収するというオープンエネルギーシステムのコンセプトの研究・討議が始まった⁽¹²⁾。発電から送電まで直流のまま電力を取り扱うことにより、交流への変換時に必要となる周波数や位相の制御を行う必要がなくなり、管理・電力送電が格段に容易となる。

オープンエネルギーシステムのコンセプトの具体的な実装として、ソニーCSL、沖縄科学技術大学院大学（OIST）、株式会社沖創工、株式会社ソニービジネスオペレーションズ（SBO）が連携して直流マイクログリッドシステム（DC-based Open Energy Systems: DCOES）を OIST 内の教員宿舎に導入し、2013 年 3 月から同大学施設において実証試験が開始された（Fig. 1）^(12,13)。2 年目までは、住宅 3 軒をイーサネットと電力ケーブルで繋ぐ基礎的な機能の確認とデータ収集を行った。3 年目は合計 19 軒にマイクログリッドを拡張し、グリッド内電力融通の効果を実証した。本稿では、特に 2015 年 1 月の実証試験結果を取り上げ、その成果を報告する。

2. 実証試験の構成

プロジェクト 3 年目の OIST における実証試験では 19 軒の住宅が直流マイクログリッドで繋がれた。各住宅に太陽電池モジュールとエネルギーストレージシステム（ESS）が設置されている^(12,13)。2LDK の住宅を主として 10 軒に定格容量 2.8kW、3LDK の住宅を主として 9 軒に定格容量 4.2kW の太陽電池モジュールを設置した。太陽電池モジュールは各住宅の屋根に設置した。角度は屋根と同じ 26.5 度で、北向きの屋根を避け設置した。太陽電池モジュールの設置方位としては、南西・南がそれぞれ 15 面、南東が 7

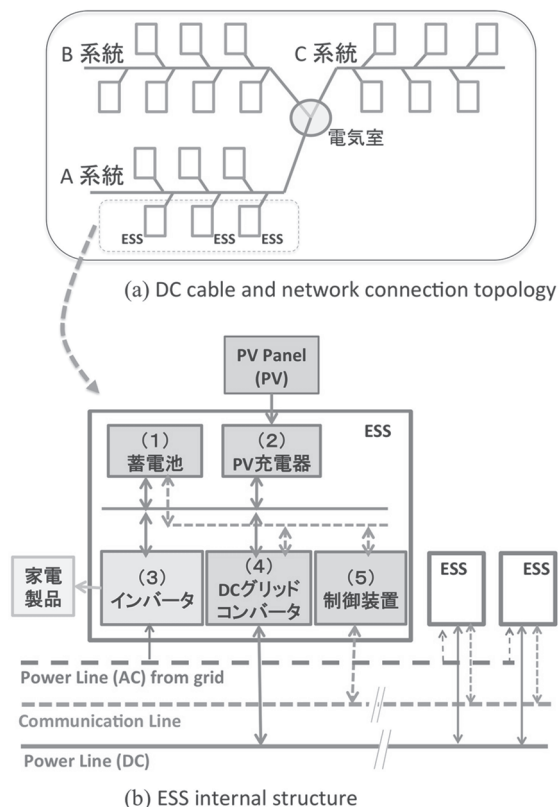


Fig. 2 Scheme of DCOES structure.

面、西・東がそれぞれ 4 面、北東に 2 面、北西に 1 面で、1 面当たり 1.4kW の定格発電量である。ESS は各家庭の分電盤近くの屋外に設置した。ESS は以下の機器により構成されている（Fig. 2 (b)）。(1) オリビン型リン酸鉄リチウムイオン蓄電池（4.8kWh）、(2) PV 充電器（DC 2kW または 4kW）、(3) DC-AC インバータ（5kVA 交流出力、UPS 機能含む）、(4) DC グリッドコンバータ、(5) 制御装置。OIST の DCOES 全体で合計 65.8 kW の太陽光発電と 91.2 kWh の蓄電容量を有する。ESS 内部で各機器は直流で接続されており、インバータで交流に変換し居住者の一般家電製品に電力が供給される。住宅間は各 ESS の DC グリッドコンバータを介して直流で接続されている。ESS 間での情報交換と管理者に必要なデータを収集するために制御装置を介して ESS はネットワークに繋がっている。

“電気室”の一部空きスペースを利用して DCOES の電力ケーブル、ネットワークケーブルなどを統合した。この電気室は DCOES 導入前から利用されていた建物で、電力会社から教員宿舎全体に交流の電力を供給するために変圧・分電を行っている場所である。この電気室内に DC グリッドボックスを今回新規に導入し、そのボックス中の直流ブレーカを経由して 3 つの系統が直流バス型構成になって繋がっている。3 つの系統の構成は、A 系統に 6 軒、B 系統に 7 軒、C 系統に 6 軒である。（Fig. 2 (a)）。直流ブレーカを ON/OFF することにより系統毎の接続・分離を制御することができる。

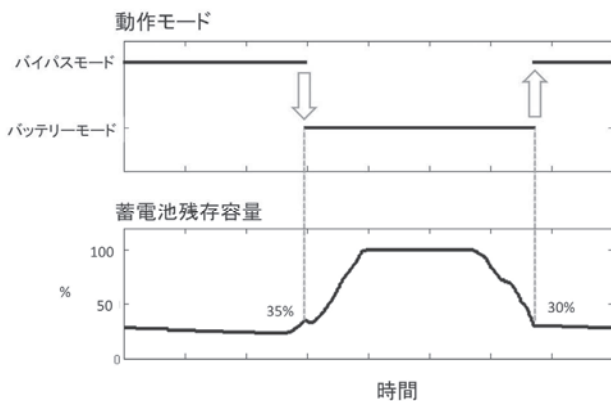


Fig. 3 Battery Mode transition

蓄電池の残存容量が少ない場合は、既設の電力会社から ESS 内のインバータを経由して各住居への供給する設計になっている。これに伴って、ESS には2つの動作モードが設計されている。蓄電池から電力供給する“バッテリーモード”と、電力会社から ESS 内のインバータ経由で電力を供給する“バイパスモード”である。“バッテリーモード”では負荷に対してすべての電力が蓄電池と太陽電池モジュールから供給される。残存容量が30%を切ったときにはバッテリーモードからバイパスモードに自動的に切り替わる (Fig. 3)。インバータが UPS 機能も備えているためこの切り替えは無瞬断で行われ、すべての電力が電力会社から負荷に供給される。太陽光発電により充電され、残存容量が35%以上になるとバイパスモードからバッテリーモードへと再び自動的に無瞬断で切り替わる (Fig. 3)。30%、35%という閾値は今回の実証試験で当初用いた設定である。通常、夜間において残存容量が減りバッテリーモードからバイパスモードに切り替わる。翌朝、太陽電池モジュールからの発電が開始し、残存容量の上昇に伴いバッテリーモードへと切り替わる。したがって、晴天の日中はオフグリッド状態で稼働していることになる。この電力源の切り替え機能があることにより住民は残存容量を気にすることなく電力を利用することができる。ESS を含む我々のシステムで発生したトラブルによる停電を回避するため、ESS を介さずに電力会社から直接給電するよう手動で切り替えることができる仕組みも備えている。蓄電池の残存容量の検出方法は ESS の既存機能を利用している。そのため当論文ではその検出方法や精度に関しては触れない。また、住宅間の電力融通が主目的であることから逆流による電力会社への売電は一切行っていない。

2.1 電力融通

ESS 間で電力を転送することを電力融通 (Energy Exchange) と呼ぶ。電力融通には以下の2種類がある。蓄電池が満充電のとき太陽電池モジュールは負荷での使用分以上の発電を行えない。そのため本来発電できるはずの

電力を無駄にしたことになる (余剰電力, Surplus Energy)。この余剰電力を発生させないために、満充電になりそうな ESS からまだ蓄電池に充電の余裕がある ESS に電力を転送する。これを余剰電力融通と呼ぶ。これにより太陽電池モジュールがもっている本来の発電性能を最大限に活用することができる。もう一つの電力融通では、蓄電池の残存容量が少ない ESS に対して残存容量が比較的多く残っている ESS から電力を供給する。これにより残存容量の少ない ESS がバイパスモードに移行することを遅らせることができ、バッテリーモードでの稼働時間を増やす。これを不足電力融通と呼ぶ。余剰電力融通と不足電力融通は、動作は似ているが発想が逆であることを留意されたい。

電力融通が行われていない状態では、各 ESS を接続する電力ケーブルにかかる電圧は 0V である。電力融通を行う際には一方の ESS 内の DCDC グリッドコンバータを定電圧源とし 350V まで上昇させ、融通電力を 700W で行うよう相手側の ESS 内の DCDC グリッドコンバータが定電流源に設定する。これらの電圧値、電力値も変更可能なパラメータであり、ESS 内の DC グリッドコンバータなどの性能に依存して決定した。

中央集中管理により電力融通を制御するのではなく、各 ESS がお互いの情報を取得し電力融通を決定する分散制御を実現することを目標にしている。詳細のアルゴリズムは Werth, et al. (2015)⁽¹⁴⁾で説明がされており、ここでは簡単な概略を説明する。マスター ESS というものが DCOES 内に1つだけ存在し、すべての電力融通はこのマスター ESS を経由して行われる。マスター ESS は、電力融通が行われている間は同一のものであるが、電力融通が途絶えた後は変わることができる。このマスター ESS が定電圧源になるようにしており、同時に複数の電力融通が発生した場合でも、定電圧源が1台だけになるようになっている。2015年1月時点での DCOES の設定においては、残存容量が90%を超えた ESS は余剰電力融通として送電する先の ESS を探す。この際、残存容量72%以下の ESS がその対象となる。存在すれば、マスター ESS を経由して、送電元 ESS から送電先 ESS に対して電力融通を開始する。残存容量が50%以下の ESS は不足電力融通による受電を必要として、送電元になる ESS を探索する。この際、残存容量73%以上の ESS がその対象となる。送電元 ESS となり得る ESS が存在した場合は、余剰電力融通と同様、マスター ESS 経由で電力融通を開始する。どちらの電力融通も、送電元 ESS の残存容量が70%を下回ったとき、あるいは、受電している ESS の残存容量が75%を上回ったときに停止する設定になっている。

2.2 DCOES データ管理システム

各住宅内の太陽電池モジュールによる発電電力、蓄電池の残存容量、居住者が使用している消費電力、DC グリッドコンバータで融通している電力、ESS のモード (バッテリーモード、バイパスモード) などは30秒おきに計測さ

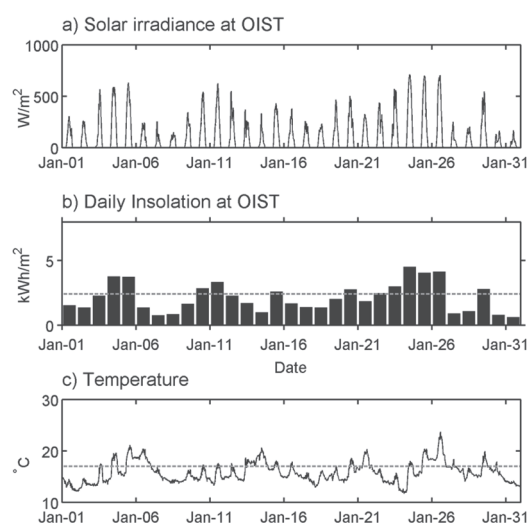


Fig 4. Weather data from the OIST campus during January 2015. (a) Solar irradiance. (b) Daily insolation. Dotted line shows mean daily insolation during January in Naha City (from MONSOLA-11). (c) Temperature. Dotted line shows mean temperature in January in Naha City (from JMA).

れ、電気室のルータ経由でインターネット上のデータ収集サーバへ送信される。また電気室の屋根にとりつけられた気象観測機器により、日射量、気温、風向風速、湿度、気圧、雨量なども収集され 30 秒おきにデータ収集サーバへ送信される。居住者は、収集されたデータの可視化機能を提供するウェブサーバにアクセスすることで、自宅の ESS の情報をブラウザ上で確認することができる。また、管理者は全住宅の状況、履歴を確認することができる

4. DCOES 2015 年 1 月の実績

4.1 日射量

日射量は太陽光発電量と密接に関連するため、太陽光発電を基軸とする我々のシステムにとっては注目すべき重要な指標の 1 つである。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の日射量データベース MONSOLA-11⁽¹⁵⁾によると沖縄県那覇市における 1 月の日射量 (水平面) 平年値 (1981 年～2009 年の 29 年間の累年平均値) は、 $2.42 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$ と東京の平年値 $2.45 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$ をわずかに下回るのに対し、7 月は東京の平年値 $4.04 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$ を大きく上回る $5.82 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$ である。つまり、沖縄の冬期の天候は夏期に比べると太陽光発電にあまり適していない。OIST の電気室に設置した気象観測機器による観測では 2015 年 1 月の平均日射量は $2.14 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$ であり、那覇市の 1 月平年値である $2.42 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$ を下回った (Fig. 4)。気象庁 (JMA) の発表のデータ⁽¹⁶⁾においても 2015 年 1 月の那覇市の日射量は同市平年値を下回る $2.32 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$ であり、我々の気象観測結果と傾向が一致

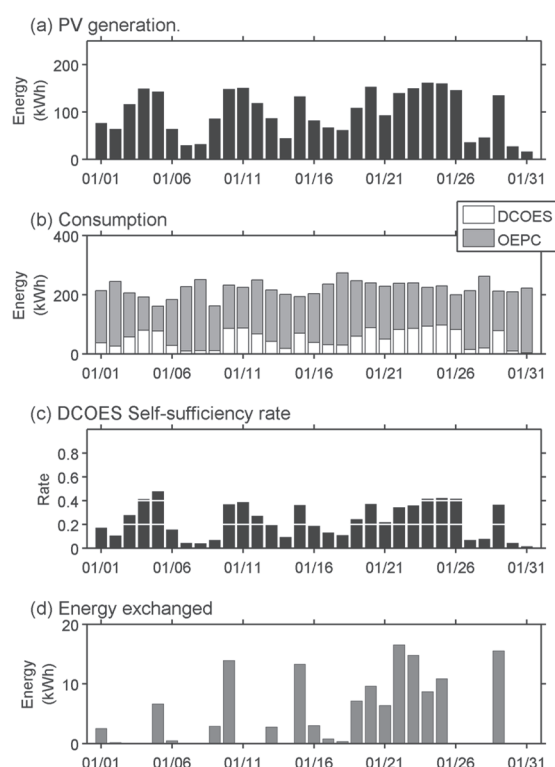


Fig 5. DCOES Output in January 2015. (a) PV power generation. (b) User consumption. Grey bars show consumption energy supplied by Okinawa Electric Power Company (OEPC) and white bars shows energy supplied by DCOES. (c) DCOES Self-sufficiency rate. (d) Energy Exchange.

していた。OIST における気象観測結果によると 2015 年 1 月中の内訳では、月平均値を上回った日が 12 日間、残り (19 日間) は平均値を下回った。

日射量の減少は気温にも影響を及ぼしており、OIST における気象観測結果では 2015 年 1 月の平均気温は 15.8 度 (最低気温 11.7 度, 最高気温 23.7 度) であり、那覇市の 1 月の平年値 (1981 年～2010 年の 30 年間の平均値) を 1.2 度下回った。

4.2 発電量

DCOES 全体における 2015 年 1 月の 1 日当りの発電量の最大値は 161 kWh (1 月 24 日)、最小値は 16.3 kWh (1 月 31 日)、平均値は 97.3 kWh であった (Fig. 5)。また消費電力の日内合計値の最大値は 273 kWh (1 月 18 日)、最小値は 161 kWh (1 月 5 日)、平均値は 221 kWh であった。沖縄における冬場の最大の電力消費は、暖房器具の使用によるものであり、天気が悪く寒い日ほど夜間の電力消費が増加する傾向にあった。DCOES では現在利用できる再生可能エネルギーが太陽光のみであるため、夜間の電力消費に関してはまず蓄電池から行い、残存容量が減少し ESS がバイパスモード切り替わると電力会社から電力供給を受

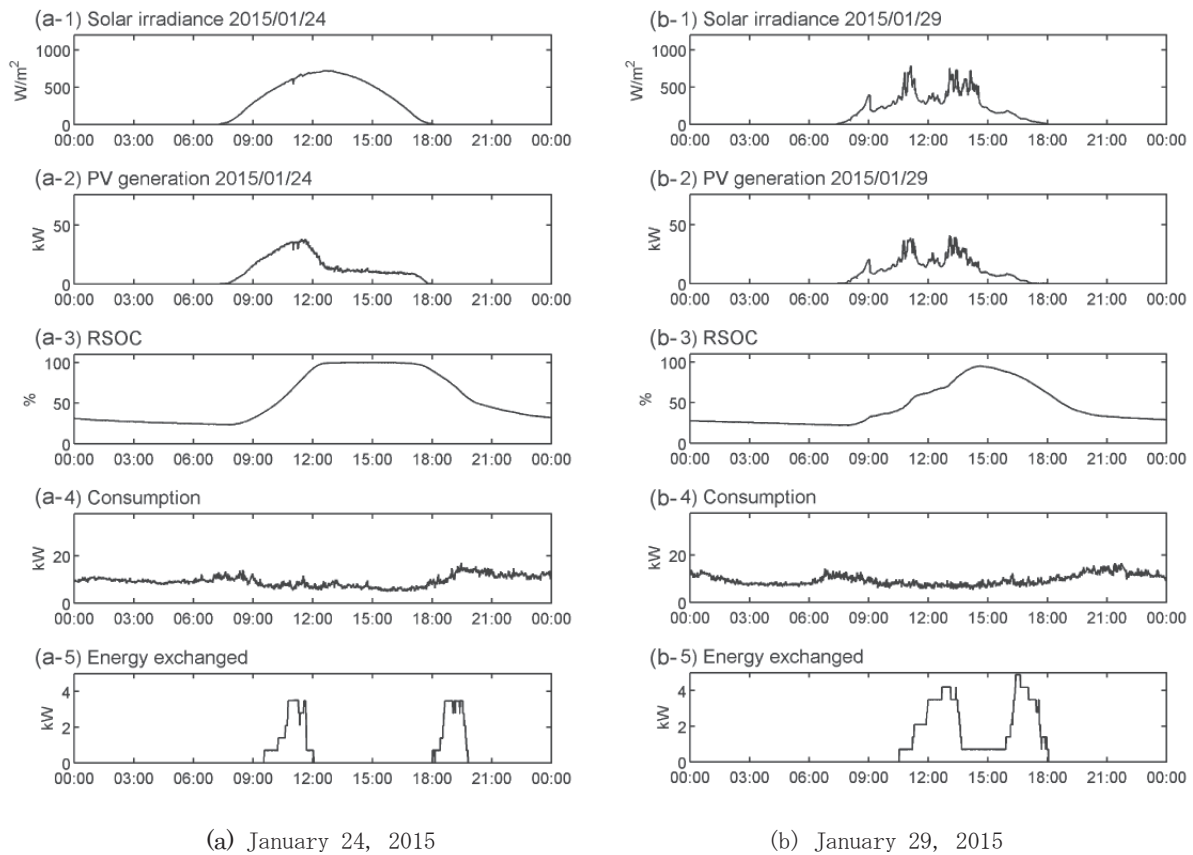


Fig 6. Time series data showing 1) solar irradiance, 2) PV generation, 3) battery RSOC, 4) consumption, and 5) energy exchanged.

けることになる。

ESS がバッテリーモードで稼働する割合が多いほど DCOES が有意義に動作していると言える。DCOES の性能を定量的に評価するにあたり、家屋における総消費電力量のうち再生可能エネルギーを用いて発電し供給した電力量が占める割合を DCOES の“自給率” (DSSR: DCOES Self-sufficiency rate) を示す指標として次式で定義した。

$$DSSR = \frac{E_{battery}}{E_{total}} \quad (1)$$

ここで $E_{battery}$, E_{total} はそれぞれバッテリーモード時に供給した電力量[kWh]と総消費電力量[kWh]を意味する。

家屋で消費される電力のすべてを DCOES が供給した場合、自給率は 100%となる。逆に、電力会社が供給する電力のみを用いた場合（つまり、ESS が常にバイパスモードで稼働した場合）、自給率は 0%となる。DCOES では ESS 間での電力融通を行うことができるため、バッテリーモード時に供給した電力量は、その家屋の太陽電池モジュールで発電された電力のみではなく、他の家屋の ESS から融通された電力も含んでいる。言い換えれば、電力融通がない場合に比べて、電力融通により自給率を上昇させることが DCOES を導入する意義である。

全住宅合計の DCOES 自給率を日毎に算出した。1 月にお

ける 31 日間の全住宅の DCOES 自給率の平均値は 23%（最大値 48%，最小値 1%）であった。晴天時（日射量が MONSOLA-11 沖縄県那覇市の平均値 2.42 kWh/ m² day を上回った日の 12 日間）に限ると自給率 39%を達成しており、電力会社からの電力供給の時間帯は主に深夜 0 時から朝 7 時、日中は DCOES から電力が供給されていた。ピークカットを目的とした電力融通は現在のスキームには含まれていないが、夜間の電力消費のピーク時間帯（19 時から 21 時）にも晴天時は蓄電池に電力が残存しているため、その消費電力を DCOES から供給することができ、ピークカットにつながっていることが確認できた。逆に、現在用いている蓄電池容量では天候に関わらず 1 月における朝のピーク時間帯（7 時から 8 時）には残存容量が下限値 30% 以下になりバイパスモードに切り替わっているため、DCOES から電力を供給することはできない。このため朝の消費電力のピークカットには貢献しない。曇天・雨天時に自給率が低いのは発電量が落ちることも、もちろんあるが、バッテリー残存量が増加しないためバイパスモードからバッテリーモードに切り替わらず、電力会社から継続して電力供給されるためである。

4.3 電力融通量

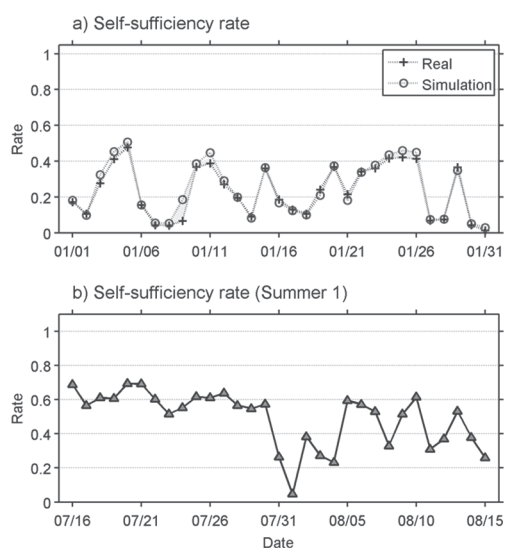


Fig 7. DCOES self-sufficiency rate. (a) Self-sufficiency rate differences between real data and simulation data during January 2015. The self-sufficiency difference was larger on 09 January because of a power-cut test. This caused DCOES to operate in an unusual manner that the DCOES simulator did not capture. (b) Self-sufficiency rate run by DCOES simulator (Summer 1). Self-sufficiency was low on 01 August 2014 because typhoon Nakri passed over Okinawa, reducing solar irradiance.

電力融通は多い日で1日合計10～15 kWh 実施された。電力融通が生じる時間帯として1日の中に2度のピークがあることが確認された。1度目のピークが正午前後で、最大4 kWhの電力融通がピークの1時間で実施された。2度目のピークは夕方17時ごろで、最大3.5 kWhの電力融通がピークの1時間で行われた。晴天時と曇天時では電力融通の時間帯に若干のずれがあった。

例えば、快晴であった1月24日 (Fig. 6 (a)) は午前11時の3.5 kWをピークに9時30分から12時まで4.5 kWhの余剰電力融通が行われた。その後、Fig. 6 (a) から明らかなようにすべてのESSの残存容量が100%となり、太陽電池の発電は減り、負荷への電力供給のみとなる。このことから太陽電池は発電能力を活かしきれず、余剰電力が発生していたことがわかる。日没後、各ESSの蓄電池から電力が供給され、蓄電残存容量が減少し18時以降に合計4.2 kWhの不足電力融通が実施された。逆に曇天であった1月29日 (Fig. 6 (b)) は太陽光発電の発電量が少ないため残存容量の増加速度が遅く、午後1時の4.2 kWをピークに午前10時半頃から午後2時前まで余剰電力融通が行われ、合計8.0 kWhの電力が融通された。また、午後4時から午後6時に不足電力融通が実施され、ピークは午後4時半頃の4.9 kW、合計6.0 kWhの電力が融通された。

5. シミュレーション

DCOES における電力融通の状況を予測・評価するために DCOES シミュレータを Matlab (MathWorks) 上で開発した。太陽電池モジュールによる発電量は OIST に設置した気象観測機器で計測した日射量と気温データならびに各住宅の太陽電池モジュールの向き・角度をもとに、Sandia National Laboratories から提供されている PV_LIB toolbox⁽¹⁷⁾を利用して計算した。各家における消費電力の変化は DCOES の実測値を利用した。電力融通アルゴリズムに関しては様々なアルゴリズムをテストできる必要があるためプラグイン方式で交換可能な枠組みとして実装した。そのアルゴリズムにしたがって電力融通が実行される。シミュレーションでは各 ESS の入出力である、発電電力、消費電力、そしてこれらから計算される融通電力、各 ESS の残存容量を計算した。シミュレーションの時間刻みは1分とした。電力融通時にケーブル抵抗などのために発生する電力ロス、UPS における直流から交流への変換ロス、ESS 自体の消費電力もシミュレーションでは考慮しており、それらの値は実際の計測値から算出し使用した。充電効率は含まず100%とし、残存容量に対する蓄電池からの電圧の違い、自己放電などは考慮していない。

実証試験における2015年1月の日射量・消費量・電力融通量をもとにこのシミュレーションと同等の計算方法を使用し、その結果と観測データとを比較することによりシミュレーションの計算方法の正確さを確認した。30日間のこの計算結果 (1月9日は電力会社系統との停電テストのため解析から省いた) の自給率と観測データからの自給率を Fig. 7 (a) に示す。誤差の絶対値の和を観測データの和で除した値 (Bray-Curtis 非類似度) は0.060 (=6.0%) であり、シミュレーションと同等の計算方法を使用した結果は観測データをきわめて良く再現できたといえる。わずかに生じた誤差の大部分は発電電力の計算に起因しており、各住宅にかかる木陰や朝夕時の山陰や隣接する住宅の陰の影響が主な誤差要因となっていたと考えられる。

DCOES シミュレータでは、電力融通を行わないケース (Standalone ケース)、電力融通を指定のアルゴリズムにより行うケース (DCOES ケース) を並列して計算することができる。両方のケースを比較することにより電力融通による効果を明確にすることができる。例えば、電力融通により有効活用できた余剰電力量や、使用せずに済むことができた電力会社からの給電量などを確認することができる。このシミュレーションにより、2015年1月の1ヶ月間で少なくとも50 kWhの余剰電力を電力融通により有効活用できたことが示された。

現在の機器の設定やロスの改善、新アルゴリズムによる電力融通の効率化効果の予測をシミュレーションベースで進めており (Table 1)、これまでに以下を得た。シミュレータ上の ESS 機器設定でバイパスモードへの切り替えタイミングを実証試験で用いた30% (Winter 1) から0% (Winter 2) に変更し、実質使用できる蓄電容量を増量し

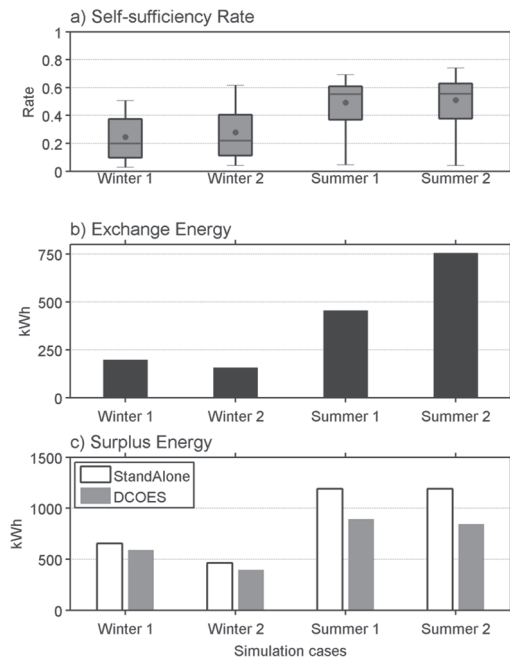


Fig 8. DCOES simulation results from four cases (Table 1). (a) Self-sufficiency rate. Dots inside boxes show mean self-sufficiency rates and lines inside boxes show median self-sufficiency rates. Boxes shows quartiles and lines outside boxes are upper and lower extremes. (b) Total exchange energy for 1 month. (c) Total surplus energy for 1 month between StandAlone and DCOES case.

たことによる効果を試算したところ、晴天時は自給率が約10%増加することが示唆された (Fig. 8 (a)). ESS のロスもなくした最善のシステムの場合、1月の1ヶ月の平均自給率は52%に達することも示されている⁽¹³⁾.

また、沖縄の夏期の自給率の試算を行った。日射量は2014年7月16日からの1ヶ月間の1日平均日射量は5.04 kWh/m²であり、1月と比べると倍近くある。この昨年度の夏の日射量をもとに発電量を計算し、各家庭の消費量と消費パターンは変えずにシミュレーションを行ったところ (Summer 1)、夏期1ヶ月の平均自給率は約49%となり2015年1月と比較して26%増加した。自給率60%を超える日も10日あった (Fig. 7 (b)). また1ヶ月間に合計約455 kWhの電力量が融通され、その結果297 kWhの余剰電力 (StandAloneにおける余剰電力の25%) が有効利用された (Fig. 8 (b) (c)).

電力融通アルゴリズムに関しても改良を加えた場合の試算を行った。電力融通を一旦開始すると終了条件を満たすまで電力融通のペアは変更されないという現在の設定 ("Original" in Table 1) を、5分毎にペアを探しなおすという設定 ("Modified" in Table 1) に変更したところ (Summer 2)、平均自給率は夏季で51%と1.7%の増加であったが晴天時は3~5%の増加が見込まれ、余剰電力の有効利用では今のアルゴリズムより51 kWh 多い、

Table 1. Simulation data for cases illustrated in Fig. 7.

Simulation Case	Solar irradiance period	RSOC for by-pass mode	Exchange Algorithm
Winter 1	2015-01-01 ~2015-01-31	30%	Original
Winter 2	2015-01-01 ~2015-01-31	0%	Original
Summer 1	2014-07-16 ~2014-08-15	0%	Original
Summer 2	2014-07-16 ~2014-08-15	0%	Modified

348 kWh の余剰電力 (StandAlone における余剰電力の30%) を夏季の1ヶ月で有効に活用できることが示唆された (Fig. 8) .

6. 今後の課題

電力融通することにより、1ヶ月間で少なくとも冬期50 kWh、夏期348 kWhの電力を有効利用できる可能性があることが示された (Fig. 8 (c)). 1世帯当たりの1ヶ月の電力消費量は300kWhとされていることから⁽¹⁸⁾、冬季は約5日分、夏季は約35日分の1世帯の電力消費量が有効利用できることとなる。しかし、このOIST実証サイト19軒では1月の1ヶ月間で300 kWh以上の余剰電力が存在し、夏期には800 kWh以上の余剰電力が存在している。この余剰電力を有効利用できるようにすることは重要である。シミュレーションにおいて蓄電容量の増加は晴天時の自給率の向上を伴うことが示唆されたが、設備コストの観点から各家屋に設置する蓄電池の容量を増加させることは難しい。またシミュレーションで行ったように、バイパスモードへの切り替えタイミングを0%にするのはESSの機能を発電のない非常時にも維持するためには限界がある。このため、今後は特に晴天時の余剰電力を蓄電するためのコミュニティ共有バッファ蓄電池 (または水電解装置と燃料電池を組み合わせた水素による蓄電) を導入することが効果的であると考えられる。DCOESの構成はフレキシビリティが高いため、必ずしも家屋・太陽電池モジュール・蓄電池のセットで設置する必要はない。コミュニティ内で共有する形でESS部分 (蓄電池を含む) のみを設置し直流マイクログリッドに参加させることも可能である。晴天時の余剰電力で蓄電し、夜間または雨天時にコミュニティに対して放電するようにすることで、さらなる自給率の向上が期待される。コミュニティ用バッファ蓄電池を置くことにより電力融通のアルゴリズムも現在のような均等分散型電力融通ではなく、より高度な設計が必要となる。例え

ば、晴天時は余剰電力の発生を見越してバッファ蓄電池に対して優先的に電力を送電し蓄電する。曇天時は蓄電池の枯渇を見越してバッファ蓄電池から各 ESS へ分散的に送電し、バッファ蓄電池や各 ESS の送受電能力の限界を超えないようにするなど、気象予報情報に基づいた予測的な制御が必要となるであろう。

発電源に関しても今回の実証試験では太陽光発電のみを用いたシステム構成となっていたが、今後は小規模の風力発電、水力発電、バイオマス発電、バイナリー発電などそのコミュニティにあった発電源を混在させることも考えられる。このような様々な発電源を組み込むことは元来想定されており可能である。また、システム内の電力ロスを低減させると共にシミュレーションによる電力融通アルゴリズムを最適化し実システムへ適用することで DCOES の自給率上昇を目指し、また DCOES の経済性の評価も行っていきたい。

今回の実証試験ではマイクログリッドを構成したのは OIST 内の教員宿舎 19 軒であり、生活パターンや電力消費傾向のバリエーションは大きいとはいえない。例えば、1 日 1 軒当りの消費電力量はどの家も 10~20 kWh 程度であり、夜間消費するような生活パターンは含まれない。生活パターンの多様化は電力消費時間帯を分散させることにつながり電力融通のメリットが強調される。シミュレーションでは消費電力プロファイルを自由に調整できるため、生活パターンに大きな変化をつけて電力融通の状況を検討することができる。地域コミュニティには様々な生活パターンが存在する他、食料品店、飲食店、診療所、学校など電力消費パターンにも様々な要素が含まれる。そのような状況のシミュレーションによる DCOES の動作予測は重要である。これらのシミュレーションを行い、結果の解析から DCOES の可能性を探っていきたい。

また DCOES は再生可能エネルギーを効率よく使い、コミュニティ内のエネルギーの地産地消を推進するだけではなく、非常用電源としての役割を担うことも期待される。例えば、沖縄では毎年台風による停電が発生し、一部地域では 2~3 日間ほど停電が続くこともある。そのような状況において電力をコミュニティ内で生産し供給することができれば、ライフラインとして欠かせない冷蔵・冷凍庫を動作させることができ、食料品や薬品の保存ができ、病院においては診療を行うことができる。

OIST 施設における実証試験により DCOES の有用性は示された。今後は上述のように DCOES の電力融通性能の向上を目指すと共に、温度対策、直流に関する安全性の確認、法令などに関する確認・対応も行っていき、最終的には地元沖縄県において地域コミュニティへの導入を進めたい。

7. まとめ

本実証試験では 19 軒の住宅に太陽電池モジュールと蓄電池を含むエネルギーサーバーシステムを導入した。各住

宅間を直流ケーブルとネットワークケーブルで繋ぎ、電力の融通を行うことにより余剰電力を有効に活用できる直流マイクログリッドの稼働を確認した。本論文では 2015 年 1 月の実データとそれに伴うシミュレーションの結果を示した。本論文の内容を以下にまとめる。

(1) 2015 年 1 月 DCOES は 19 軒の合計で 1 日当たり平均 97.3 kWh の発電を行い、1 日当たり平均消費電力 221 kWh の住宅 19 軒の家庭に対して、自給率平均 23% で稼働した。電力融通は多い日で 1 日 10~15kWh 実施され、正午前後と夕方の 1 日 2 回が主の電力融通の時間帯となった。

(2) DCOES シミュレータによると 2015 年 1 月の 1 ヶ月間で少なくとも 50 kWh の余剰電力が有効活用された。また沖縄の夏季には平均自給率 49% ほど達成可能で、1 ヶ月で 297kWh の余剰電力を有効利用されることが示された。

謝辞

本研究は平成 25, 26, 27 年度沖縄県亜熱帯・島しょ型エネルギー基盤技術研究事業補助金によって行われた。

参考文献

- 1) International Energy Agency, Medium-term renewable energy market report 2014 Market Analysis and Forecasts to 2020, 13-24 (2014), OECD Publishing, Paris.
- 2) Stetz, T., et al., Twilight of the Grids The Impact of Distributed Solar on Germany's Energy Transition. IEEE Power & Energy Magazine, 13(2), 50-61, 2015.
- 3) The Japan Times, Seven utilities only capable of accepting 58% of solar power energy (12 Dec. 2014), <http://www.japantimes.co.jp/news/2014/12/16/business/economy-business/seven-utilities-capable-accepting-58-solar-power-energy>
- 4) Modi, V., et al., Energy Services for the Millennium Development Goals, The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank and the United Nations Development Programme, 2005
- 5) Yergin, D., et al., Energy Vision 2013 --- Energy Transitions: Past and Future, World Economic Forum, 2013
- 6) Yuan, G., Rural Electrification Goes Local: Recent innovations in renewable generation, energy efficiency, and grid modernization. IEEE Electrification Magazine, IEEE, 3 (1), 16-24 (2015).
- 7) Patterson, B. T., Dc, Come Home, IEEE Power & Energy Magazine 10 (6), 60-69 (2012).
- 8) Justo, J. J., et al., AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A

- review, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 24, 387-405, (2013).
- 9) Kakigano, H., Y. Miura, and T. Ise, Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution. IEEE Transactions on Power Electronics, 25(12), 3066-3075, (2010).
- 10) She, X., et al., On Integration of Solid-State Transformer With Zonal DC Microgrid, IEEE Transactions on Smart Grid, 3(2), 975-985, (2012).
- 11) Allee, G. and W. Tschudi, Edison Redux, IEEE Power & Energy Magazine, 10(6), 50-59, (2012).
- 12) Kitano, H., K. Tokuda, T. Sakagami, S. Tajima, Y. Asai, A. Werth, M. Nishimura, T. Morita, T. Yoshimura and M. Tokoro, Open Energy Systems (OES), Japan Solar Energy Society, 40 (5), 29-31, (2014).
- 13) Tokoro, M., DCOES: DC-Based Bottom-Up Energy Exchange System for Community Grid, The Second International Symposium on Open Energy Systems, 2015
- 14) Werth, A., N. Kitamura, and K. Tanaka, Conceptual Study for Open Energy Systems: Distributed Energy Network Using Interconnected DC Nanogrids. Smart Grid, IEEE Transactions on, 6(4), 1621-1630, (2015).
- 15) New Energy and Industrial Technology Development Organization, 日射量データベース閲覧システム (May 2015), <http://app7.infoc.nedo.go.jp/>
- 16) 沖縄気象台, 沖縄地方の天候 平成27年(2015年)1月 (May 2015), <http://www.jma-net.go.jp/okinawa/menu/syokai/toukei/tenkou/tenkou201501.pdf>
- 17) Sandia National Laboratories, PV Performance Modeling Collaborative | An Industry and National Laboratory collaborative to improve Photovoltaic Performance Modeling (May 2015), <https://pvpmc.sandia.gov/resources-for-members/pv-lib-toolbox/>
- 18) 電気事業連合会, 一世帯あたり電力消費量の推移 (May 2015), http://www.fepec.or.jp/enterprise/jigyoku/japan/sw_index_04/index.html