



レドックスフロー電池のマルチユース実証

Demonstration of Multiple-Use Application with Redox Flow Battery

北野 利一*
Riichi Kitano

大岡 俊夫
Toshio Ooka

長岡 良行
Yoshiyuki Nagaoka

藤川 一洋
Kazuhiro Fujikawa

柴田 俊和
Toshikazu Shibata

矢野 孝
Takashi Yano

米国カリフォルニア州において、2MW/8MWhのレドックスフロー電池（RF電池）設備を用いてマルチユース実証を行った。配電網ではピークシェービングと電圧制御を組み合わせた運用を行い、カリフォルニア州電力卸売市場においてエネルギー市場とアンシラリーサービス市場に同時に参画した。さらに、平常時と非常時のマルチユースを想定したマイクログリッド運用を行い、ブラックスタート、シームレス移行の両方について、系統接続からマイクログリッドへ安定的に移行し、実際の需要家に電力供給することに成功した。

Sumitomo Electric Industries, Ltd. conducted a demonstration of its 2MW/8MWh redox flow battery (RFB) system for multiple-use application (MUA) in California, U.S.A. The system was operated within the distribution network to achieve peak shaving and voltage regulation. In the California Independent System Operator market, the Company simultaneously participated in the energy and ancillary service markets. In addition, the system successfully demonstrated microgrid operations for both black start and seamless transitions, providing MUA for normal and emergency operation to real residential customers.

キーワード：電力貯蔵、レドックスフロー電池、マルチユース、卸売市場、マイクログリッド

1. 緒言

温室効果ガス削減への取り組みとして再生可能エネルギー導入が世界中で拡大しているなか、米国カリフォルニア州では、2045年までに州内の電力の100%を温室効果ガスを排出しないエネルギーで賄うとする州法SB100⁽¹⁾を2018年9月に成立させるなど、再生可能エネルギー（以下、再エネ）導入を推進している。

再エネの大量導入の達成には需給調整力が不可欠であるが、その確保の担い手として電力貯蔵が注目されている。同州では、州法AB2514⁽²⁾等により、州内大手電力会社に対して電力貯蔵装置の導入を義務付ける動きがあり、またカリフォルニア州公益事業委員会（CPUC: California Public Utilities Commission）は、2032年までに電力貯蔵とデマンドレスポンスの合計で15GWを追加する計画を承認した⁽³⁾。さらにCalifornia Energy Storage Alliance (CESA) は、SB100達成のためには2045年までに45-55GWの電力貯蔵が必要とする研究結果を公表した⁽⁴⁾。

同州においては、電力貯蔵の価値を最大化するため、その用途に関わる制度設計が行われており、その一つとして複数の用途を組み合わせるマルチユース（Multiple-Use Application: MUA）が含まれる。CPUCは、2018年1月に行った決定において、電力貯蔵が複数の利益やサービスを提供できる場合に十分な経済価値を実現するための指針を電力会社に示した⁽⁵⁾。この決定において、電力貯蔵が提供するサービスを、電力貯蔵が接続される5つのドメインごとに「Reliability Service」と「Non-Reliability Service」に分類している（表1）。

またCPUCは、これらのサービスを複合するマルチユース

を管理するためのルールを策定している。このルールでは、電力貯蔵は接続されているドメイン、またはその上位のドメインのいずれかにサービスを提供できる。例えば配電網（Distribution）に接続された電力貯蔵は、配電網だけでなく上位の卸売市場^{*1}（Wholesale Market）へもサービスを提供できる。「Reliability Service」については、「Non-Reliability Service」より優先させること、「Reliability Service」の競合禁止（1つの義務を履行することにより他の義務を履行できなくなる複数サービス契約の禁止）が規定されている。

こうした背景のもと当社は、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）及び米国カリフォルニア州の経済促進知事室（GO-Biz）による支援、カリフォルニア州電力会社の協力により、同州の制度の下で8MWh（=2 MW x 4 h）のレドックスフロー電池（以下、RF電池）設備を設置し、配電網や卸売市場に参画しマルチユース実証を行った。本稿では、その運用例について報告する。

2. RF電池の原理および特長

RF電池は、電池反応を行う電解液流通型セルを積層したセルスタック、電解液を貯蔵する正負極のタンク、さらに電解液をタンクからセルへと循環するポンプ、配管および熱交換器などから構成される（図1、2）。当社のRF電池では、電解液として正負極共に硫酸バナジウム（V）水溶液を用いており、以下の反応式にて充放電が行われる。

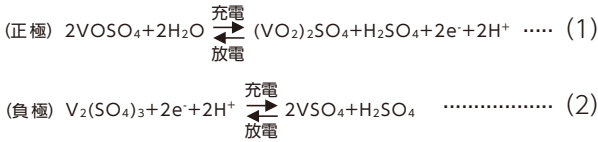


図1に示すように、充放電に伴う反応は電解液中のVイオンの価数変化のみで相変化を伴わないため、電解液は原理的に劣化せず半永久的に利用可能であり、20年以上の設計寿命を実現している。設備廃却後も電解液の再利用が可能であり、長期的なコスト削減、環境負荷削減につながる。

また、電池反応はVイオンへの電子の受け渡しだけで、相変化を伴わないため、RF電池の応答速度は極めて速い。

電解液は不燃性であり、セル内の正負極間短絡や、充電された正負極の電解液の混合が起こっても火災の恐れがない。構成する設備も難燃性の材料を使用しているため、発火リスクは極めて低く、安全性に優れている。

その他にも、(1) 出力部 (セル) と容量部 (タンク) が独立しており設計の自由度が高い、(2) 充放電に寄与しない専用の単独セルに電解液を流通させることで、その開放電圧から充放電中においてもリアルタイムに充電状態 (SOC)

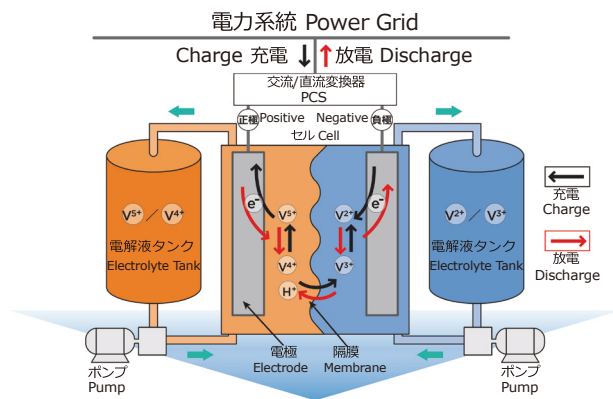


図1 RF電池の原理

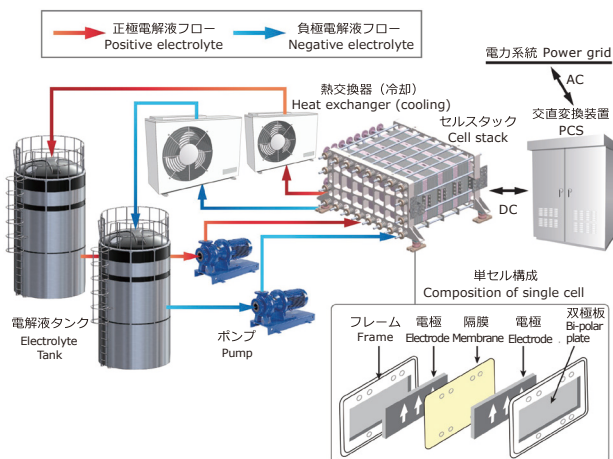


図2 RF電池のシステム構成

を測定できる、(3) ポンプを停止させるとタンク内の電解液はセルから物理的に切り離されるため、タンク内の電解液のSOCが自己放電によって減少しない、等の特長を有する⁽⁶⁾。

3. RF電池のマルチユース実証事例

本稿で紹介する実証を実施したRF電池設備は、2017年、米国カリフォルニア州の大手電力会社の協力のもと、その基幹変電所に設置されたものである。設備のシステム構成と諸元を図3に示す。上記CPUC指針に従い電力会社と協議を行った結果、配電網 (Distribution) に接続された本設備を用いて、1) 配電網でのマルチユース、2) 卸売市場 (Wholesale Market) でのマルチユース、3) 卸売市場と配電網でのマルチユース、の実証を実施した。

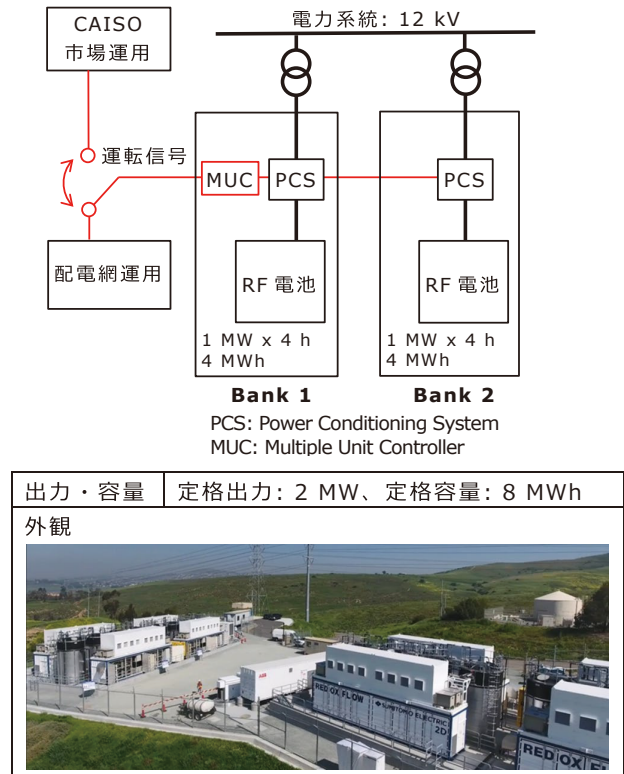


図3 RF電池設備のシステム構成と諸元

3-1 配電網 (Distribution) でのマルチユース⁽⁷⁾

実証用に導入したRF電池設備は、配電網サポートのために、有効電力を利用した周波数制御、ピークシェーピング／ベースローディング運用^{※2}、エネルギーシフト運用^{※3}、および無効電力を利用した電圧制御等、様々な機能を有する。また、機能を単独で使用する制御モードに加え、各機能を組み合わせたマルチユースも可能である。

表1 電力貯蔵がマルチユースにて提供するサービス⁽⁵⁾
(CPUC Decision 18-01-003 in Rulemaking 15-03-011)

Domain	Reliability Services	Non-Reliability Services
Customer	None	TOU bill management; Demand charge management; Increased self-consumption of on-site generation; Back-up power; Supporting customer participation in DR programs
Distribution	Distribution capacity deferral; Reliability (back-tie) services; Voltage support; Resiliency/microgrid/islanding	None
Transmission	Transmission deferral; Inertia*; Primary frequency response*; Voltage support*; Black start	None
Wholesale Market	Frequency regulation; Spinning reserves; Non-spinning reserves; Flexible ramping product	Energy
Resource Adequacy	Local capacity; Flexible capacity; System capacity	None

*Voltage support, inertia, and primary frequency response have traditionally been obtained as inherent characteristics of conventional generators, and are not today procured as distinct services. We include them here as placeholders for services that could be defined and procured in the future by the CAISO.

本設備が接続されている配電網には、太陽光発電の出力変動に伴う負荷や電圧の変動などの問題があり、上記各機能のマルチユースを行い配電網の安定化に寄与した。

例として、ピークシェービング/ベースローディング運用(有効電力)と電圧制御(無効電力)のマルチユース例を紹介する。この2つの機能は表1の配電網(Distribution)において、それぞれDistribution capacity deferralとVoltage supportに対応し、ともにReliability Serviceであるが、有効電力と無効電力の制御は独立して動作できるため競合しない。図4に示すのは、本設備からの有効電力出力を、配電網負荷(消費電力と太陽光発電出力の和)との合成出力での変動を一定範囲内にするように制御するとともに、系統電圧が一定範囲になるように無効電力出力制御を行った例である。配電網負荷の変動および電圧変動を抑制できていることを確認した。

次に、エネルギーシフト運用と電圧制御のマルチユース例を紹介する。需要家の負荷が大きい朝夕の時間帯は放電、深夜から早朝までと日中の時間帯は充電、と計画的に運用することにより、ダックカーブ現象(朝夕の急激な需要変動をもつ需要曲線)の緩和を目的とした運用を行った。ただし、予め設定した充放電電力は前述のピークシェービング/ベースローディング運用で実施する充放電電力より概して大きいため、接続先配電網の容量等から、エネルギーシフト運用を行うと電圧変動が大きくなる可能性があった。そこで、PCSの皮相電力の余力を無効電力で配電網に供給し電圧調整を行うマルチユース(Distribution capacity deferralとVoltage support)を行った。図5のとおり、予定の時間帯で充電もしくは放電を行うことによりエネルギーシフト運用を実現し、かつ無効電力供給により配電線電圧を許容範囲内に収めた。

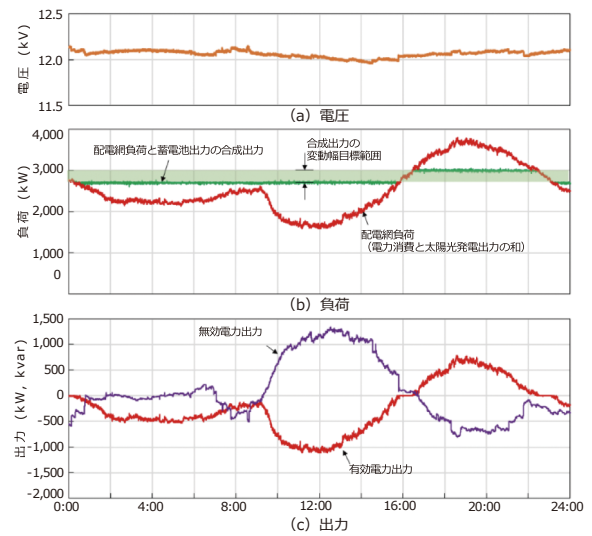


図4 ピークシェービング/ベースローディング運用での運転例

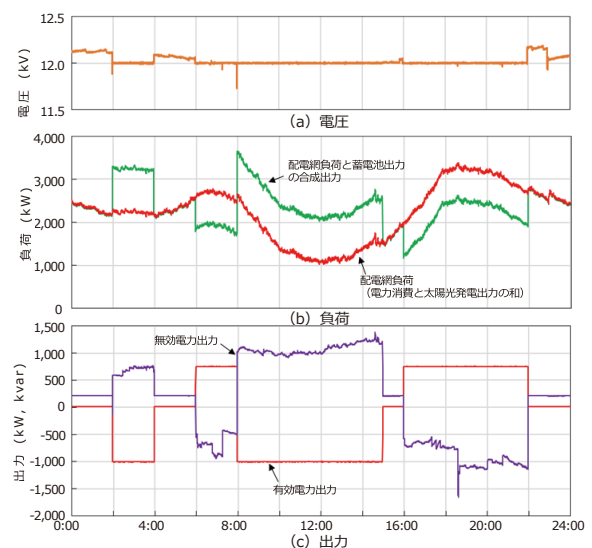


図5 ピークシフト運用での運転例

3-2 卸売市場 (Wholesale Market) でのマルチユース⁽⁸⁾

本設備は2018年12月より、カリフォルニア州電力卸売市場 (CAISO^{*4}市場) に参加した。これは表1において卸売市場 (Wholesale Market) に相当する。同市場は、供給力としてのエネルギー市場と周波数調整等のためのアンシラリーサービス (AS)^{*5}市場から構成される。

エネルギー市場に参加した1日の運転例を図6に示す。1日2回のサイクル (深夜と朝の短いサイクルと、日中と夜間の長いサイクル) のなかで、SOCは0-100%の間で大きく変動しており、DOD (Depth of Discharge: 放電深度) やサイクル数に制約がないRF電池に適した運用である。

エネルギー市場 (Non-Reliability Service) とAS市場 (Frequency regulation) に同時に参加したマルチユース運転例を図7に示す。エネルギー市場の取引結果に基づく長周期信号にAS市場の取引結果による短周期信号 (4秒周期) が重畳した出力指令を受信したが、精度良く本設備の出力が追従した。RF電池では、このような短周期信号に追従しつつ、深い充放電を続ける運用にも制約はないため、長周期 (供給力) と短周期 (周波数調整等) の両用途に同時に対応する運用にも適している。

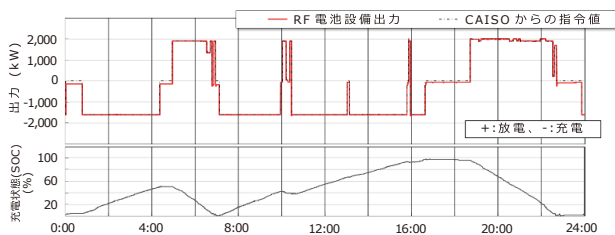


図6 CAISO市場 (エネルギー市場) での運転例

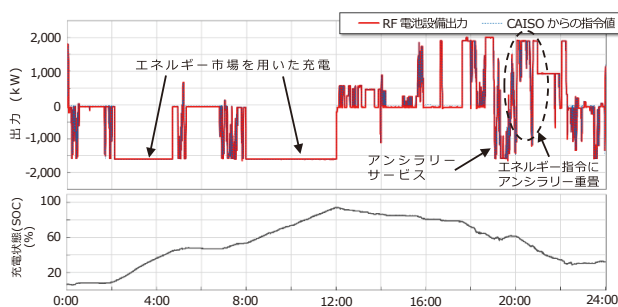


図7 CAISO市場 (エネルギー、AS市場) での運転例

CAISO市場運用では、継続的に入札戦略を改善し収益向上を図ったが、このなかで、(1) エネルギー市場よりもAS市場の方が収益性は高く、AS市場からの収益を確保することに重点を置くべきこと、(2) 夕方ピーク時間帯等の高価格を避けて充電することは収益向上に有効な手段であるこ

と、が知見として得られた。

3-3 卸売市場と配電網でのマルチユース⁽⁹⁾

カリフォルニア州では、自然災害が増加するなかで山火事等の防止のための計画停電 (PSPS: Public Safety Power Shutoff) が2018年に制度化されたが (SB901)、停電時にも電力需要家へのサービスを維持するレジリエンス (回復力) 確保の手段として、マイクログリッド^{*6}に対する期待が高まっている。

このような背景のもと、卸売市場と配電網でのマルチユースとして、平常時にはCAISO市場運用により収益を獲得し、非常時にはマイクログリッド用の電源として配電網に電力供給する運用を、実際の需要家の協力を得て実証した。これは、表1において、配電網 (Distribution) に接続された設備を上位の卸売市場 (Wholesale Market) のサービスに供した例である。

本設備が接続される配電網の一部 (需要家66軒、契約容量400 kW) を対象エリア (図8) として、分界点に再閉路器 (Re-closer) を設置してマイクログリッド実証を行った。連系状態からマイクログリッド状態への移行については、2通り (ブラックスタート及びシームレス移行) の方法を実証した。



図8 マイクログリッド対象エリア

ブラックスタート (図9、10) においては、対象エリアの需要家を停電とした後、本設備を接続しマイクログリッドを起動した。接続時には突入電流が確認されたが、PCSは適切に応答し、接続後の電圧、周波数を規定の範囲内 (周波数: 60 ± 0.3 Hz、電圧: 12 ± 0.6 kV) に維持した。

シームレス移行 (図11、12) においては、無瞬断でのマイクログリッド移行を確認し、マイクログリッド運用中の電圧、周波数ともに規定の範囲内に維持できていることを確認した。また、図12においてはRF電池出力がマイナス (充電) となる時間を確認した。ここでは、太陽光発電

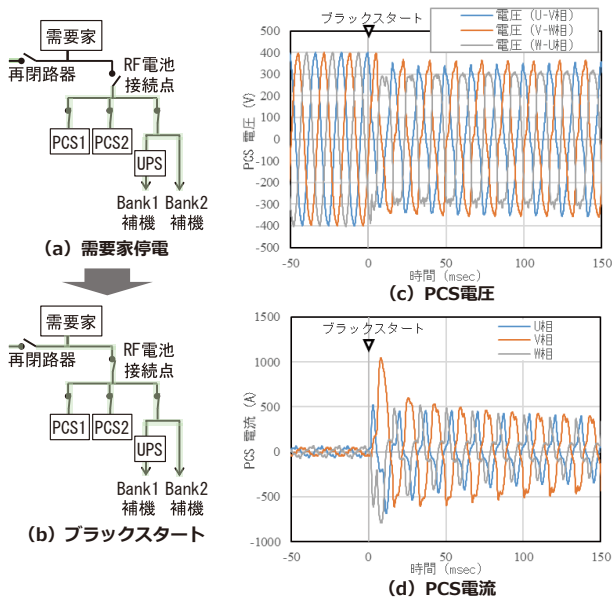


図9 ブラックスタート手順、起動時の波形

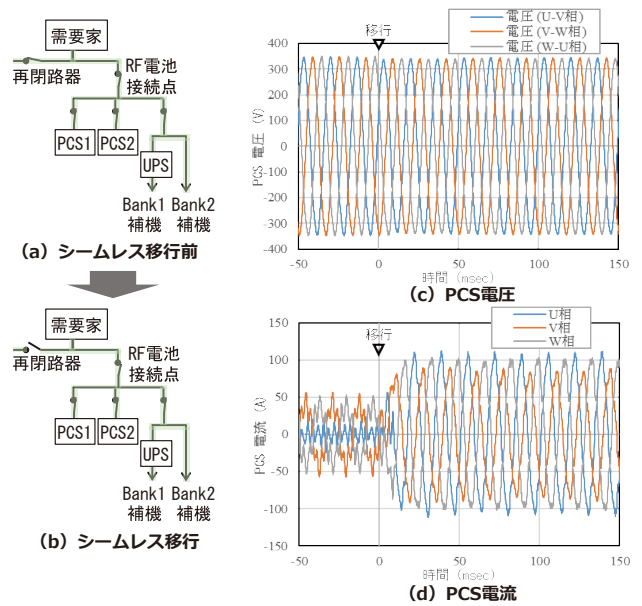


図11 シームレス移行手順、移行時の波形

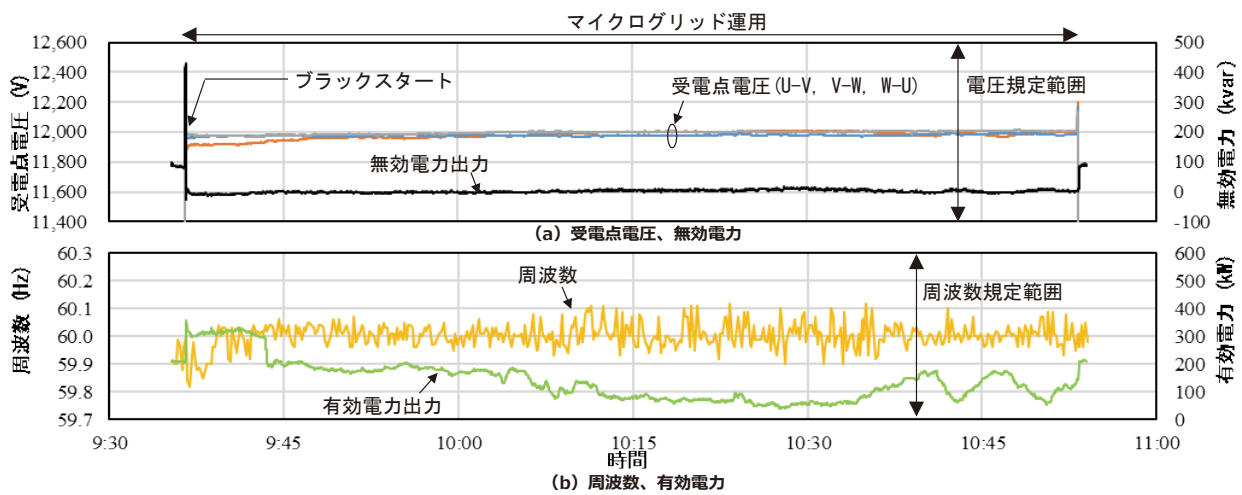


図10 マイクログリッド (ブラックスタート) 運転結果

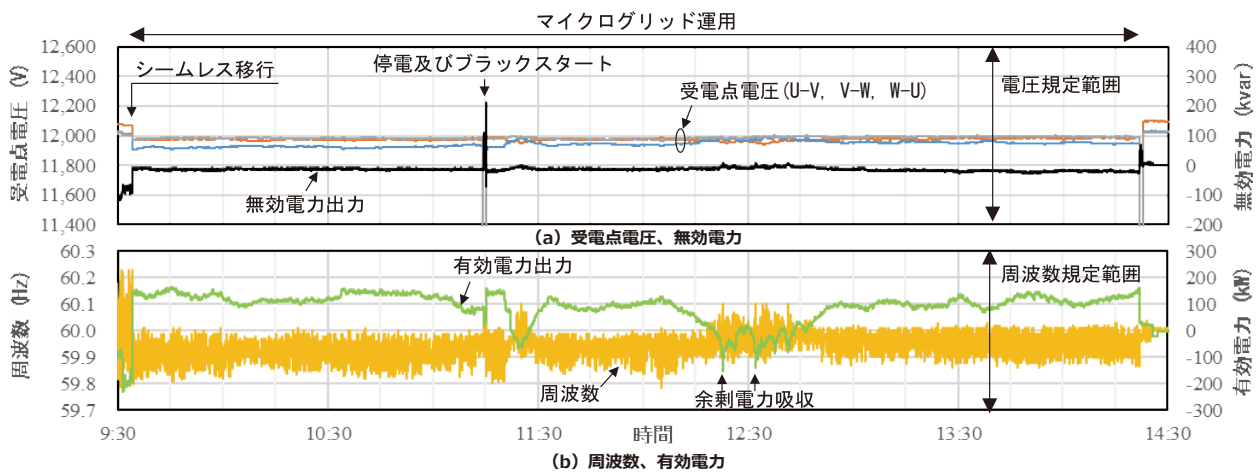


図12 マイクログリッド (シームレス移行) 運転結果

量が対象エリアの電力需要を上回り、発生した余剰電力を RF 電池の充電により吸収した例である。発電機を電圧源にしたマイクログリッドの場合は、余剰電力に対しては太陽光発電の出力を抑制する必要があるが、蓄電池を電圧源に使用することで、太陽光発電出力を無駄にすることなく有効に活用できることを示した。なお、マイクログリッド運用中には一旦停電させてのブラックスタートも実施した。

3-4 RF 電池実証設備の長期性能評価

マルチユース実施後の RF 電池設備の劣化度を評価するため、2017年～2021年にわたる実証期間中、放電容量測定を実施した。結果を図13に示す。経年による若干の容量低下が認められたものの、いずれの測定においても定格容量 (4,000 kWh、1,000 kW × 4 h) を上回っていることを確認し、設計寿命である20年後においても定格容量を確保できることを示した。

また、以下の式の稼働率により設備信頼性を評価した (図14)。CAISO市場 (エネルギー市場及びAS市場) に参加していた2年間 (2019年9月～2021年8月) の稼働率は99%と評価され、安定してマルチユース運用に供することができることを示した。

$$\text{稼働率} = \frac{\text{解析対象時間} - \text{計画停止時間} - \text{計画外停止時間}}{\text{解析対象時間} - \text{計画停止時間}} \dots (3)$$

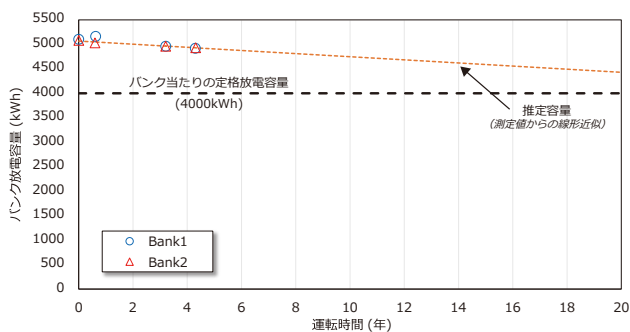


図13 RF 電池設備の放電容量と20年後の容量推定

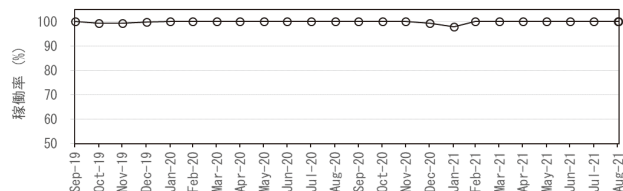


図14 RF 電池設備の稼働率

4. 結 言

本稿では、米国カリフォルニア州における RF 電池のマルチユース実証を紹介し、運転制約が少なく劣化も小さい RF 電池の特長を活かし、この用途に適した電池であることを実証した。また定格容量の維持、稼働率99%を達成し長期間の高い性能を示した。当社は、本事例で得られた知見やノウハウを活かし、世界各国の温室効果ガス削減目標の達成に貢献していく所存である。

本稿で述べた実証の成果は、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託事業「米国加州における蓄電池の送電・配電併用運転実証事業」(JPNP93050) により得られたものであり、関係者各位に謝意を表す。

用語集

※1 卸売市場

リソース (電力貯蔵など) を持つ事業者や小売事業者が参加し電力取引を行う場所。市場メカニズムにより自由競争を促し、安価で信頼性が高く、クリーンな電力網の実現を目的とする。

※2 ピークシェーピング／ベースローディング運用

対象の配電網負荷に上限と下限を設定し、上限超過分を蓄電池からの放電で補い、下限未達分を蓄電池の充電により負荷消費することにより、配電網負荷変動を一定範囲内にするように制御する運用。

※3 エネルギーシフト運用

需要家の負荷が大きい時間帯に放電、負荷が小さい時間帯に充電、と計画的に充放電する運用。

※4 CAISO

California Independent System Operator (カリフォルニア独立系統運用機関)。送電網を管理し、系統安定化、インフラ計画および市場運用を担う非営利法人。

※5 アンシラリーサービス (AS)

周波数制御など、電力品質を安定させるために瞬時の需給バランスを調整する機能。

※6 マイクログリッド

災害や計画停電などの非常時に、電力貯蔵などの分散型電源を自立電源として、停電/停電予定地区に電力供給を行う運用。

参 考 文 献

- (1) California Senate Bill No. 100, https://leginfo.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201720180SB100
- (2) California Assembly Bill No. 2514, https://leginfo.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=200920100AB2514
- (3) CPUC, Long Term Plans To Meet Electricity Reliability and Climate Goals, <https://www.cpuc.ca.gov/news-and-updates/all-news/cpuc-approves-long-term-plans-to-meet-electricity-reliability-and-climate-goals>
- (4) STRATEGEN, "Long Duration Energy Storage for California's Clean, Reliable Grid," https://static1.squarespace.com/static/5b96538250a54f9cd7751faa/t/5fc9815caa95a391e73d053/1607440419530/LDES_CA_12.08.2020.pdf
- (5) CPUC, Decision 18-01-003 in Rulemaking 15-03-011, pp.9-12 (2018)
- (6) 重松敏夫、「電力貯蔵用レドックスフロー電池」、SEIテクニカルレビュー第179号、pp. 7-16 (July 2011)
- (7) 大岡俊夫ほか、2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会、BS-3-4 (2019)
- (8) Riichi Kitano et al., CIGRE 2022 Kyoto Symposium, C000102
- (9) Riichi Kitano et al., 2022 IEEE Electrical Energy Storage Application and Technologies Conference (EESAT), EESAT-2022 - 63 (2022)

執 筆 者

北野 利一* : エネルギーシステム事業開発部 主席



大岡 俊夫 : エネルギーシステム事業開発部 主幹



長岡 良行 : エネルギーシステム事業開発部
グループ長



藤川 一洋 : エネルギーシステム事業開発部
グループ長
博士 (エネルギー科学)



柴田 俊和 : エネルギーシステム事業開発部 次長



矢野 孝 : Sumitomo Electric U.S.A., Inc.



* 主執筆者