

レドックスフロー電池の開発及び実証状況

Development and Demonstration of Redox Flow Battery System

矢野 敬二*

Keiji Yano

林 修司

Shuji Hayashi

隈元 貴浩

Takahiro Kumamoto

柴田 俊和

Toshikazu Shibata

山西 克也

Katsuya Yamanishi

藤川 一洋

Kazuhiro Fujikawa

太陽光や風力発電などの再生可能エネルギーの連系量拡大に伴う電力品質確保や電力の効率的な運用及び停電時における事業継続計画への対策技術として、蓄電池の期待が高まっている。当社はこれまで安全且つ長寿命という特長を持つレドックスフロー電池の開発を進めてきており、近年の多様な電力ニーズへの適用可能性を検証すべく、電力会社及び需要家に蓄電池システムを設置した。本稿では当社が開発したレドックスフロー電池システムの特長や運用例について報告する。また最後にコストダウンへの取り組みを紹介する。

High expectations have been placed on rechargeable batteries as a key technology to power quality assurance associated with the introduction of an increasing volume of renewable energy, as well as efficient power supply and successful business continuity planning. We have developed a redox flow battery system that is safe with a long service life. A demonstration proved its applicability to multiple demands from electric power companies and other businesses. This paper describes the system, demonstration results, and our effort to reduce the price.

キーワード：レドックスフロー電池、電力貯蔵、再生可能エネルギー、デマンドレスポンス、BCP

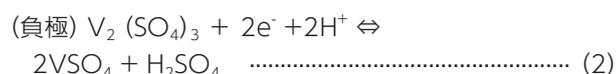
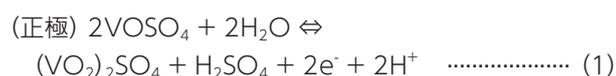
1. 緒 言

近年、再生可能エネルギーの固定買取制度の開始などにより、太陽光や風力発電などの再生可能エネルギーの電力系統への連系量が拡大している。特に北海道は、再生可能エネルギーの適地であることから、連系量が多く、これら再生可能エネルギーの出力変動による電力系統への影響が懸念されている。こうした背景のもと、当社は北海道電力(株)の南早来変電所に世界最大規模となる60MWh (= 15MW×4h) のレドックスフロー電池 (以下、RF電池と略す) システムを設置し、電力系統安定化を目的とした制御技術の開発、蓄電池の性能評価を行うため、経済産業省の補助金を受け、実証試験を2015年12月から開始した。

一方需要家側では、受電電力最大値を抑えるピークカットや自然災害などに起因する電力系統停電時においても必要最小限の事業を継続可能とする事業継続計画 (BCP : Business Continuity Plan) への関心が高まっている。また、従来の電力会社からの片方向の電力供給と異なり、需要家の分散電源や節電を統合して有効に電力を利用するデマンドレスポンス^{*1} (以下、DRと略す) という新しい仕組みが生まれつつある。これらの複合的な需要家用途を目的に(株)大林組の技術研究所内に3MWh (= 500kW×6h) のRF電池システムを設置し、2015年2月に運用を開始した。本稿ではRF電池の特徴や導入したRF電池設備の運用例について報告する。

2. レドックスフローの原理と特長

図1に示す通り、RF電池は電池反応を行う電解液流通型セル、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、配管などから構成される。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水溶液を用いており、以下の反応式(1)、(2)にて充放電を行なっている。



上式に示すように、充放電に伴う反応は電解液中のバナジウムイオンの価数変化のみであり、相変化を伴わないため、電解液は原理的に劣化することなく、半永久的に利用可能である。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、用途に応じて出力/容量の設計ができるため自由度が高い、(2) 各セルに同一タンクから同じ充電状態 (SOC : State of Charge) の電解液が供給されるため各セルの充電状態が自動的に均等になる、(3) 充放電中においても専用の単独セルに電解液を流通し起電圧 (開放電圧) を測定することで、電池のSOCを正確に測定できる、(4) ミリ秒オーダーの高速応答性を持ち、短時間であれば定格出力の2倍の出力で充放電が可能である、などの特長を有する^{(1)、(2)}。

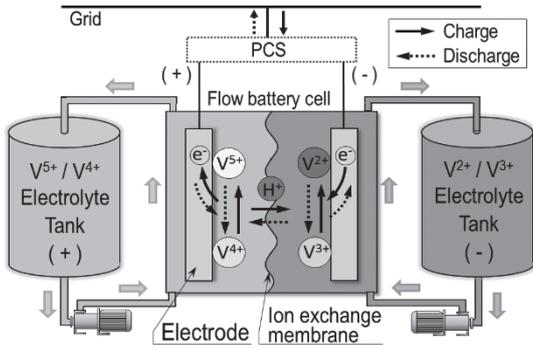


図1 RF電池原理図

また、図2に社内実証設備における長期信頼性評価の試験結果の一例を示す。これはRF電池のセル性能の推移であり、電流効率は機能部材である隔膜の劣化具合を、セル抵抗は電極等の劣化具合を示すものである。何れも顕著な劣化は認められず、設計通りの高い性能を有していることが確認できた。なお、同評価は現在も継続中である。

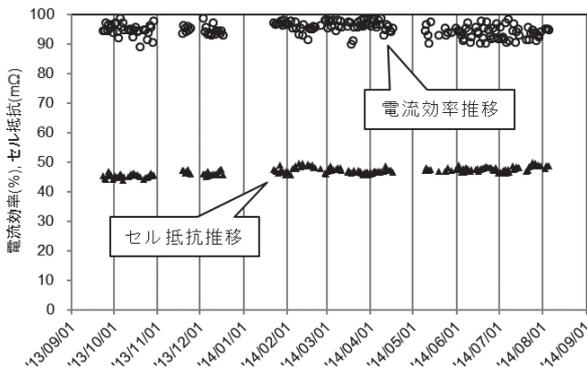


図2 セル性能推移

3. 系統用大型蓄電池システム

北海道電力(株)南早来変電所に、定格出力15MW (最大出力30MW)、定格放電容量60MWhの蓄電池システムを納入した^{(3)~(6)}。本設備は寒冷地への設置であるため、2階建ての専用建屋に収納されている。本設備の写真を写真1に示す。

3-1 実証の目的

本実証では、大型蓄電池が、再生可能エネルギー連系に伴う短周期及び長周期の周波数変動抑制や余剰電力対策として機能するかを検証すべく、大型蓄電池の制御方法の開発、性能の評価を行うことを目的としている。また図3に蓄電池システムの制御イメージを示す通り、北海道内の太陽光及び風力発電所の出力情報や気象予測システムからの

情報、ならびに負荷の状況を基に、中央給電指令所に設置される実証用中央制御装置が、蓄電池システムに充放電電力指令値を送信し、それに応じて蓄電池システムが充放電運転を行う。



2F 電池盤、電池制御盤設置状況



1F 交直変換装置盤、タンク、ポンプ設置状況

写真1 大型蓄電池システム外観

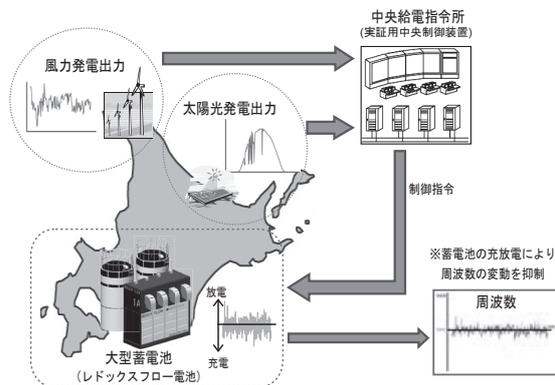


図3 蓄電池制御イメージ図

3-2 システム構成

本システムの構成を図4に示す。タンク、ポンプ、セルスタックで構成される1組の電解液循環系をモジュール、複数のモジュールを組み合わせて交直変換装置と接続し、独立に充放電制御ができる単位をバンクと呼ぶ。本システムは5モジュールで1バンク (定格出力1,250kW、最大出力2,500kW) を構成し、全システムは13バンクにて構成される。本システムは合計520台のセルスタック、5,200m³の電解液にて60MWhの定格放電容量を有し、RF電池システムとして世界最大、蓄電池システムとしても世界最大級の規模である。

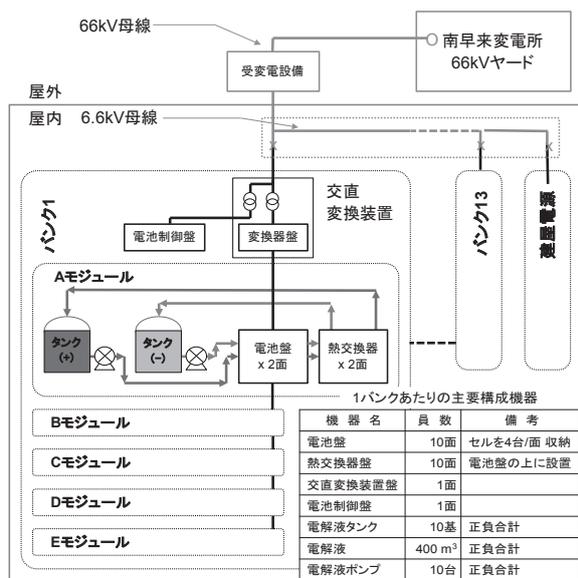


図4 システム構成図

3-3 初期性能評価

システム設置後に竣工試験にて初期性能評価を実施した。代表的な試験結果を以下に示す^{(5),(6)}。

(1) 容量試験

容量試験は、満充電の状態から定格出力で放電を行い、所定の放電時間を確認する試験であり、バンク単位及び全バンク一括で試験を実施した。何れの試験においても仕様である4時間以上の放電時間を確認した。全バンク一括での定格放電運転時の試験波形を図5に示す。上図は全バンクでの交流有効電力波形、下図は代表1バンクの波形(直流電圧、直流電流及びSOC)である。全バンクの合計で約75MWhの放電容量を確認した。

また、短周期変動抑制を模擬した運転で効率試験も行い、13バンクの平均で70.8%のシステム効率が得られた。

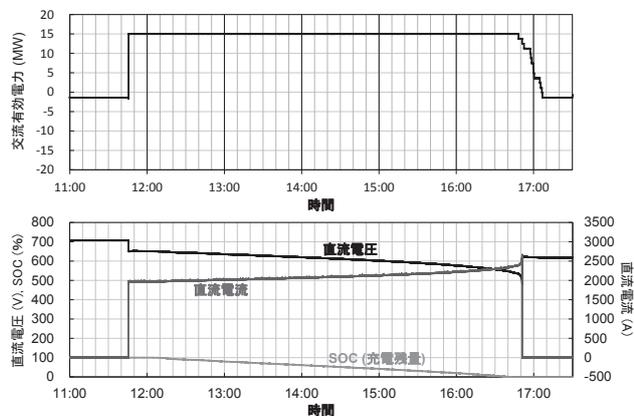


図5 容量試験

(2) 高出力充放電試験

セルは短時間であれば定格出力以上の充放電が可能である。短周期変動抑制(ミリ秒~秒オーダーの比較的短い時間の出力変動抑制)の用途では、この特性を適用することで、設置するセルスタック数を少なくすることができ、本システムでは蓄電池の定格出力の2倍の定格出力を有する交直変換装置を設置した。図6に試験結果の一例を示す。蓄電池定格出力の1.2倍(1,500kW)、1.6倍(2,000kW)、2.0倍(2,500kW)の充電と放電を実施(連続充放電60秒)したが、何れの条件でも高出力充放電が可能であることが確認できた。

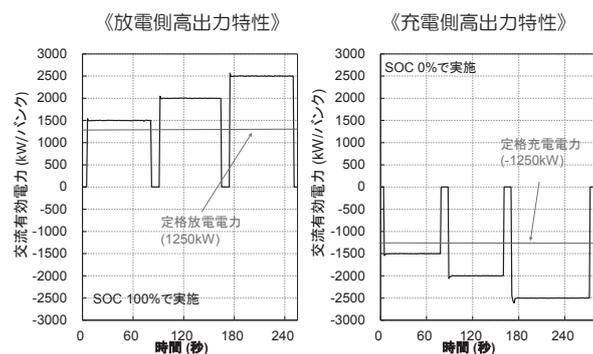


図6 高出力充放電試験

(3) 応答速度確認試験

実証用中央制御装置から蓄電池システムが充放電電力指令値を受信後、所定の出力に到達するまでの応答速度を測定した。結果を図7に示す。放電方向を正として、2倍出力である+2,500kWから-2,500kW、その逆方向である

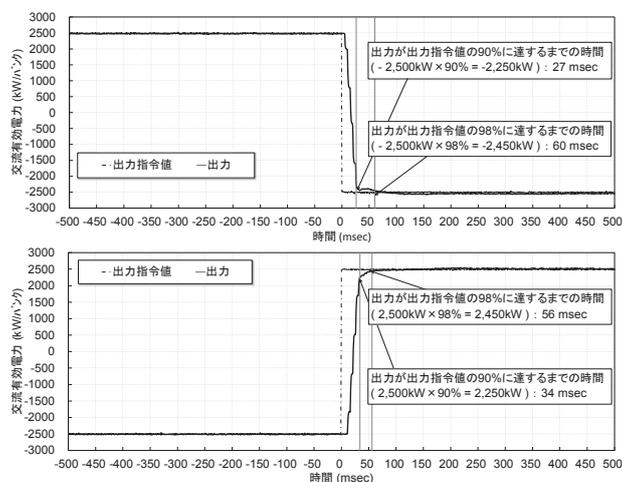


図7 応答速度確認試験

-2,500kWから+2,500kWまで到達するのに要した時間(指令値の98%到達時間)は約60ミリ秒であり、短周期変動抑制運転に十分対応可能な高い応答性を有していることを確認した。

3-4 ガバナフリー相当制御試験結果例

実証試験結果の一例としてガバナフリー相当制御^{*2}の試験結果を紹介する。本制御は蓄電池システムにて周波数を検出して、必要な充放電電力を算出して実行する自律的な制御であり、実証用中央制御装置からの指令値伝送時間を伴わないため、高速に応答できる。一般に系統周波数が上昇、減少するのは需要(負荷)と供給(発電)のバランスをとれない状態にある時であり、系統周波数がある範囲を逸脱すると、需要家の生産設備停止などが発生するため、蓄電池システムは周波数変動を抑制できるよう、高速に応答する必要がある。図8に示す試験波形の通り、周波数変動に遅れなく追従できることを確認した。

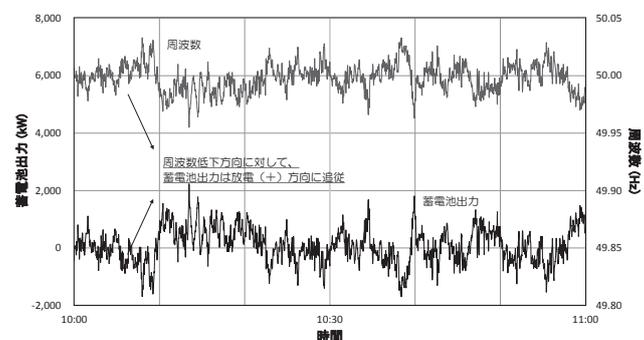


図8 ガバナフリー相当制御試験結果例

4. 需要家向け蓄電池システム

4-1 システムの目的

本システムは(株)大林組の技術研究所内における技術研究所スマートエネルギーシステムとして構築されたものであり、このシステムは、再生可能エネルギーの最大限利用によるCO₂排出量の削減、ピーク受電電力の低減による電気基本料金の削減、需要を減らす省エネルギー及びBCP対応能力の向上を目的としている。

この内、本稿では受電電力の低減を目的としたDRの試験結果及びBCP対応能力向上を目的とした自立運転^{*3}の試験結果について報告する⁽⁷⁾。

4-2 システム構成

当社が納入した定格出力500kW、定格放電容量3MWhのRF電池の他、太陽光発電設備(計820kW、以下PVと略す)、発電機(計445kW)で構成されており、これらをEMS(Energy Management System)が制御、管理するシステムとなっている。図9にシステム構成を示す。

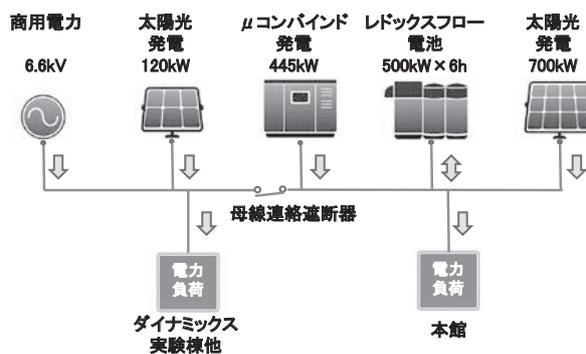


図9 システム構成

4-3 デマンドレスポンス機能確認試験

(1) 試験概要

DRは電力会社から要請を受けた際に、協力可能なネガワット量(指令値)^{*4}を算出して、節電回答を行う。本試験では国内で唯一DR実証施設を有する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^{*5}、本蓄電池システムを含む技術研究所を需要家と想定した。

(2) 試験内容

試験は前日にDR要請を受ける場合と1時間前にDR要請を受ける場合の2種類の試験を行った。以下、前日DRについて述べる。DRを受ける時間帯は朝(9:00~11:00)と夕方(17:00~19:00)の各2時間とし、各時間帯におけるネガワット量を表1に示す。

表1 DR要請時間とネガワット量

DR要請時間	ネガワット量
朝	9:00 ~ 10:00 200 kW
	10:00 ~ 11:00 400 kW
夕	17:00 ~ 18:00 200 kW
	18:00 ~ 19:00 200 kW → 400 kW

計画では朝はネガワット量をRF電池の放電により供給することを想定し、18:00~19:00はDR対象時間の1時間前にネガワット量を200kW増加させ、RF電池に加え、発電機が稼働する動作の確認を行うこととした。

(3) 試験結果

結果を図10に示す。当初の計画通り、朝はRF電池の放電にて受電電力を下げ、夕方はRF電池に加え、発電機にて受電電力を下げたことが確認できた。1時間前DRを含めた全試験での指令値と実績値の比率は71.5%~349.0%で推移しており、DRの成功は同比率が70%以上と定義されていることから、RF電池を活用した本試験は成功したと考える。

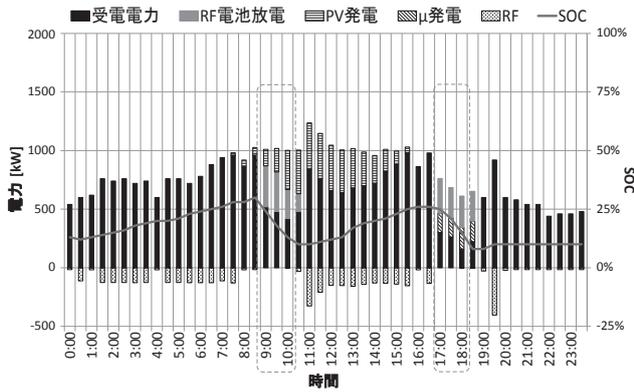


図10 DR実施日の電力実績

4-4 自立運転試験

(1) 試験概要

自立運転システムにおけるシステム構成を図11に示す。一般に自立運転時における電圧源には発電機を用いることが多いが、本自立運転システムのようにPV比率が高く、日射量が多いと需要を上回る電力を出力する場合には発電機では対応できない。そこで、本自立運転システムでは、RF電池を電圧源として、PVによる余剰電力発生の際にはRF電池による充電動作、需要がPVと発電機の供給電力を上回る際にはRF電池による放電動作を行うことにより、自立運転時においてもPVの出力抑制を行うことなく、需給バランスを保つことができる構成とした。

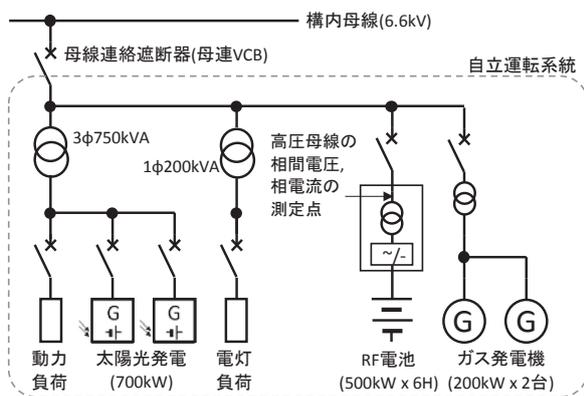


図11 システム構成(自立運転システム)

(2) 試験内容

自立運転試験は母線連絡遮断器を開放して、図11中の点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、その後、PV及び発電機を順次連系させた。

(3) 試験結果

試験では構内負荷調整や制御設定値の変更によって分散型電源の運転状態を自動で変化させ、PV解列及び再連系や発電機の起動停止などの場合において、安定的に運転可能な条件や出力について検証を行った。本稿ではPV解列時の挙動について説明する。図12に結果を示す通り、PVを順次解列することで出力が急変するが、そのタイミングに応じて瞬時にRF電池への充電電力が変化して、需給バランスを維持する動作が確認できた。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することが確認できた。

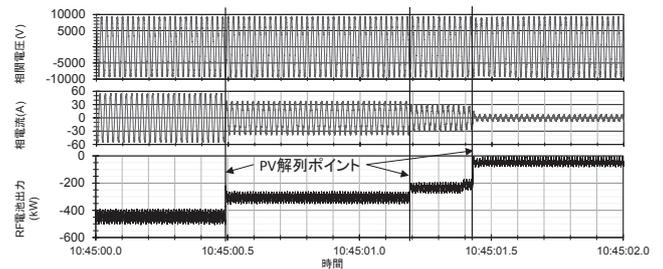


図12 PV解列時の挙動

5. コストダウンに向けた取り組み

以上の通りRF電池が優れた機能を有することは確認できたが、普及に向けた最大の課題はコストである。これに対して当社はセルスタックの高出力化とパッケージ化による輸送及び工事費のコストダウンに取り組んでいる。高出力化は定格出力が現行比で2倍以上、パッケージ化は海上輸送コンテナ内にセルスタック、ポンプ、タンク及び配管類などの主要機器を全て収納する設計とした。プロト機を社内に設置し、実証中である。写真2にコンテナシステムの外観を示す。



写真2 コンテナシステム外観

6. 結 言

再生可能エネルギー導入拡大に伴う電力系統安定化対策や需要家向けの新たな電力ニーズに対応すべく、安全且つ長寿命であるRF電池システムを開発し、何れも所定の性能が得られることを確認した。今後、運転効率向上等を始めとした更なる技術開発やコストダウンを実現し、再生可能エネルギーの更なる導入拡大や省エネルギー社会への取り組みに貢献していく所存である。

用語集

※1 デマンドレスポンス

電力市場価格の高騰時又は電力系統の信頼性の低下時において、電気料金価格の設定又はインセンティブの支払に応じて、需要家側が電力の使用を抑制するよう電力消費パターンを変化させること。

※2 ガバナフリー相当制御

ガバナフリーとはガバナ（水車や蒸気タービンなどの调速機）動作に負荷制御器による制限を設けず、周波数の変動に対して自由にガバナを応動させることを言う。蓄電池にガバナはついていないが、ガバナと同様の機能（自律的に周波数を検出して制御する機能）を有することから「相当制御」と呼んでいる。

※3 自立運転

商用系統停電時において、蓄電池を始めとする分散型電源が電圧源となり、連系する重要負荷等に電力を供給して運転を行うこと。

※4 ネガワット量

電力需給逼迫時などにおける需要の削減量のこと。需要の削減分を、通常の正の電力と対比する意味で負の電力とし、ネガワット (Negative Watt) と呼ぶ。

※5 アグリゲータ

電力会社と需要家の間に位置し、効果的なエネルギー管理を行う事業者のこと。需要家からネガワット量などを集め、電力売買を行う。

参 考 文 献

- (1) 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)
- (2) 柴田俊和 他、「再生可能エネルギー安定化用レドックスフロー電池」、SEIテクニカルレビュー第182号、pp.10-17 (July 2013)
- (3) 多田邦彦 他、「南早来変電所 大型蓄電システム実証事業(1) -実証事業の概要について-」、平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会、225、pp. 4-5-17-18 (September 2016)
- (4) 井上彬 他、「南早来変電所 大型蓄電システム実証事業(3) -風力太陽光発電出力予測システムの開発-」、平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会、227、pp. 4-5-21-22 (September 2016)
- (5) T. Shibata et al., "60MWh vanadium flow battery system for grid control," IFBF2016 (June 2016)
- (6) 矢野敬二 他、「南早来変電所 大型蓄電システム実証事業(2) -60MWhレドックスフロー電池システムの性能評価-」、平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会、226、pp. 4-5-19-20 (September 2016)
- (7) 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」、平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会、28、pp. 7-2-13-7-2-18 (September 2016)

執 筆 者

矢野 敬二* : エネルギーシステム事業開発部



林 修司 : エネルギーシステム事業開発部 主席



隈元 貴浩 : エネルギーシステム事業開発部 主席



柴田 俊和 : エネルギーシステム事業開発部
グループ長



山西 克也 : 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 主席
工学博士



*主執筆者