

電力貯蔵用レドックスフロー電池

重松敏夫

Redox Flow Battery for Energy Storage — by Toshio Shigematsu — Renewable energies, such as solar and wind power, are increasingly being introduced as alternative energy sources on a global scale toward a low-carbon society. For the next-generation power network, which uses a large number of these distributed power generation sources, energy storage technologies will be indispensable. Among the energy storage technologies, battery energy storage technology is considered to be most viable. In particular, a redox flow battery, which is suitable for large scale energy storage, has currently been developed at various organizations around the world. This paper reviews the technical development of the redox flow battery.

Keywords: redox flow battery, energy storage, renewable energy, battery, vanadium

1. 緒言

近年、低炭素社会の実現を目指して、太陽光、風力などの再生可能エネルギーの導入が世界的に推進されている。一方で、太陽光発電や風力発電の出力は変動するという課題があり、大量に電力系統へ導入された場合には、電圧上昇、周波数変動、余剰電力の発生といった問題が生じることが予測されている。これらの課題に対する対策の一つとして電力貯蔵技術がクローズアップされており、中でも蓄電池の活用が不可欠であると考えられている。現在、様々な蓄電池の開発と共に蓄電池を適用した検証プロジェクトが数多く推進されており、今後の実系統への適用に向けて大きな期待が寄せられている。電力貯蔵用電池の一つであるレドックスフロー電池は、1970年代に原理が発表⁽¹⁾されて以来、国内外を問わず活発な開発が進められており、すでに一部では実用化が進められている。本稿では、これまでの開発の歴史および現状を解説する。

2. 電力貯蔵の必要性和実用化されている技術⁽²⁾

電力系統において古くから使われてきた電力貯蔵技術として揚水発電が知られている。全発電設備のおよそ1割程度の規模を占めており、オフピーク時に電力を貯蔵し、ピーク時に電力を放出することで、電力負荷を平準化するいわゆる負荷平準化の役割を担っている。最近では、ポンプ入力を変化させることのできる可変速揚水発電も実用化されており、周波数調整^{*1}などのより高度な系統安定化機能を有したものもある。電力貯蔵技術には、揚水発電だけではなく、蓄電池、超電導コイル (SMES)、フライホイール、圧縮空気貯蔵 (CAES)、電気二重層キャパシタなどが知られており、その特徴を活かして様々な用途に開発が進

められ、一部では実用に使われている。

SMESは、電気エネルギーをそのままの形で蓄えるため貯蔵効率がが高く、瞬時に大電力を放出できるのが特長である。電力会社や国家プロジェクトにより実証試験が行われるなど、実用化に向けた開発が進展している。中部電力では、瞬低補償用^{*2}としては世界最大規模の5MVAのSMESが液晶工場においてフィールド試験されている。米国などでも、すでに系統対策用、瞬低補償用として販売されている。フライホイールについては、日本では日本原子力研究所核融合実験施設に磁界コイル電源用の世界最大の蓄積エネルギー (8GJ/2,200kWh) のフライホイール付き発電機がある。また、沖縄電力においては、周波数調整の目的で、23MWのフライホイールが設置されている。CAESは、空気を圧縮して地下の空洞に貯蔵し、必要時にガスタービン発電機と組み合わせて発電する技術であり、ドイツや米国の発電所で運転されている例がある。電気二重層キャパシタは、化学反応を伴わずコンデンサと同様に電荷の吸着・脱離により充放電を行うため瞬時高出力特性を有しており、また省メンテナンスである特長を有している。最近では、電力機器に適用可能な大容量の製品が開発され、瞬低補償装置、電気鉄道の回生エネルギー吸収や電圧変動抑制、自然エネルギー発電の出力変動吸収装置^{*3}などにも適用されている。

電池を用いた電力貯蔵技術は上記の電力貯蔵技術の中でも、技術的完成度が高く、都市近郊部への分散設置が容易である点などの実用性の観点から、最も期待されている技術の一つであると言える。

3. 電池電力貯蔵

電力貯蔵用電池の種類と特徴を表1に示す⁽³⁾。これらの中で、古くから自動車用などで広く普及しているのは、鉛電池である。アメリカ、ドイツ、ペルトリコなど、海外では、古くから電力貯蔵設備としてもいくつかの事例がある。ペルトリコでは、20MW（40分）の鉛電池が周波数調整および瞬動予備力として導入された。近年の蓄電池ニーズの高まりに応じて、鉛電池以外にも種々の電池が各々の特長を生かして、世界的に活発に実用化開発が進められている。これらの中でも、NAS電池は、高エネルギー密度であり、充放電効率が高いなどの優れた特長を有しており、すでに国内外を問わず数多くの実績がある。変電所や工場での負荷平準化用途だけでなく、太陽光や風力発電との併設用途などにも適用されており、青森県の二叉風力発電所には、風力発電設備51MWに対して34MWのNAS電池が併設されている。

表1 代表的な電力貯蔵用電池

電池種類	レドックスフロー	NAS電池	鉛	リチウムイオン	ニッケル水素	亜鉛臭素
活物質(正極/負極)	Vイオン/Vイオン	硫黄/ナトリウム	二酸化鉛/鉛	Liイオン含有金属複合酸化物/炭素	オキシ水酸化Ni/水素吸蔵合金	臭素/亜鉛
理論エネルギー密度(Wh/kg)	100	786	167	392~585	225	428
開路電圧/セル(V)	1.4	2.1	2.1	3.6~3.8	1.2	1.8
動作温度(°C)	室温	約300	室温	室温	室温	室温
主な補機	循環ポンプ	ヒーター	特になし	特になし	特になし	循環ポンプ
特徴	出力/容量の独立設計可 充電状態の計測容易 電解液の再使用可	電力貯蔵用電池として最も実績多 高温作動型	自動車、UPSなどで実績多	小型電池としては、実績多	小型電池としては、実績多	

4. 電力貯蔵用レドックスフロー電池

レドックス (redox) という用語は、還元 (reduction) と酸化 (oxidation) を合成したものであり、酸化還元という意味である。レドックス電池は、不活性電極 (電極自身は変化しない) の表面で活物質である2種類のレドックス系の酸化と還元が生じる電気化学システムを指す。この活物質の溶液を外部のタンク等に蓄え、ポンプ等により流通型電解セルに供給して充放電させる電池をレドックスフロー電池 (redox flow battery) という。

4-1 レドックスフロー電池の原理・構成・特徴

(1) レドックスフロー電池の原理・構成

レドックスフロー電池は、図1に示すように電池反応を

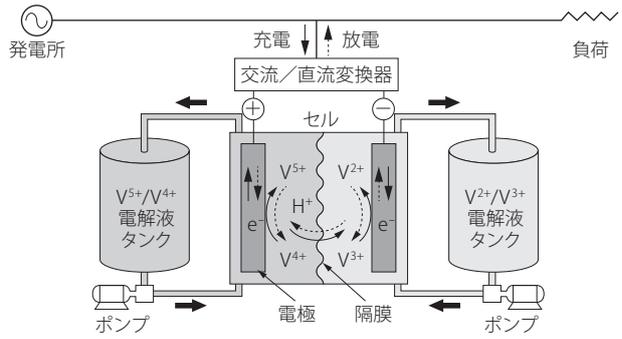
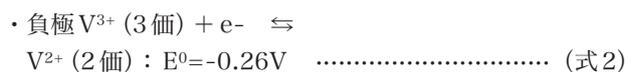
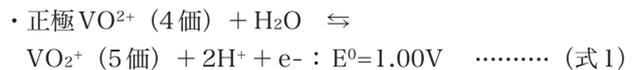


図1 レドックスフロー電池の原理・構成

行う流通型電解セル (以下、セルと称する)、活物質の溶液 (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ためのポンプ、配管などから構成される。交流電力系統とは交流/直流変換器を介して連系される。

レドックス系としては、価数の変化する金属イオンがその候補対象となり得るが、貯蔵可能容量、経済性等の観点から、これまでに実用段階に至った系としては、鉄 (Fe²⁺/Fe³⁺) - クロム (Cr³⁺/Cr²⁺) 系、バナジウム (V²⁺/V³⁺、VO²⁺/VO₂⁺) 系などが知られている。特にV/V系は、正負の金属イオンが同一であるため、鉄/クロム系などの2液型構成とした場合にみられる隔膜を通しての正負電解液の混合による電池容量低下が生じないことが大きな特徴であり、現在、世界中で広く開発が進められている。

バナジウム系の電極反応を次式に示す。



ここで、左から右への反応が充電時の電池反応を表し、セル内の正極で4価のVイオン (VO₂⁺) が5価のVイオン (VO₂⁺) に酸化され、負極で3価のVイオン (V³⁺) が2価のVイオン (V²⁺) に還元される。この際、充電時に正極で生成される水素イオン (H⁺) は、隔膜を通して負極側に移動し、電解液の電気的中性を保つ。このようにして、供給された電力は価数の異なるVイオンの形態変化として電解液タンクに貯蔵される。放電時には、逆の反応によって貯蔵した電力を取り出すことができる。レドックスフロー電池の起電力は、使用するレドックス系の起電力によるが、V系の場合には、上式に示した標準酸化還元電位^{※4} (E⁰) から計算される標準起電力は1.26Vとなるが、実用的な電解液組成、セルを構成した場合に測定される起電力は約1.4Vである。

レドックスフロー電池に用いられる流通型電解セルを複数積層したものをセルスタックと称している。セルスタックの構成例を図2に、セルスタックの断面構造例を図3に示す。単セルの電圧は、高々1.4V程度であるので、実用的な高電圧を得るためには、電池セルを多数直列接続する必要がある。その方法として、燃料電池等でも用いられている双極板を用いた直列積層方式が採用されている。セルの役割は、電解液中のバナジウムイオンを効率良く酸化還元反応させることにあり、電気回路素子と見た場合の内部抵抗が小さいことが好ましく、またその際に副反応を起こさないことが望ましい。セルを構成する部材には、図に示されるように、電極、隔膜、双極板、さらにそれらを収納し、セルを形成するフレームがある。材料面からは、電解液として酸性水溶液が用いられるため、すべての接液部には耐酸性が要求される。

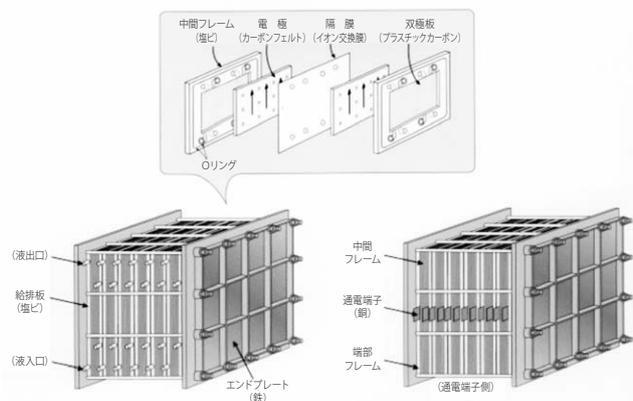


図2 セルスタックの構成例 (住友電工)

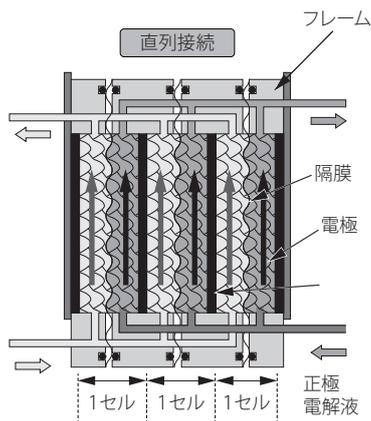


図3 セルスタックの断面構造 (住友電工)

(2) レドックスフロー電池の特徴

レドックスフロー電池の特徴は下記の通り多様であり、様々な用途への適用を可能としている。

- ①電池反応原理が電解液中の金属イオンの価数変化のみと単純であり、充放電サイクル寿命が長い。
 - ②出力部（セル）と容量部（タンク）が独立しているため、用途に応じた最適な出力／容量設計が可能である。
 - ③各セルに供給される電解液が共通であるため各セルの充電状態の管理が不要である点、液体を流通させることから熱管理が容易である点など保守管理が容易である。特に、電解液の電位を測定することで充電状態（SOC: State of Charge）を容易にモニターできるため、運転中も常時SOCを把握できる。
 - ④電解液が正負極のタンクに分離貯蔵されているため、セル部を除き、待機、停止時の自己放電がない。
 - ⑤ミリ秒オーダーの瞬時応答性を有し、短時間であれば設計定格の数倍の高出力での充放電が可能であるため自然エネルギーなどの不規則かつ短時間周期での出力変動吸収などの用途にも適している⁽⁴⁾。
 - ⑥電解液は、通常の使用状態においてはイオンの価数変化以外にはほとんど変化することがないため、半永久的に再利用可能であり環境にやさしい。
- 一方で、レドックスフロー電池の難点は、下記の通りである。
- ⑦水溶液中に溶解させた金属イオンを活物質とするため溶解度に制限があり、タンク部の占める体積が大きくなり、他の二次電池に比べて、エネルギー密度が比較的小さい。
 - ⑧電解液をセルへ循環させるためのポンプ動力が必要である。
 - ⑨電解液を通じての電流損失（シャントカレントロス）を生じる。

4-2 レドックスフロー電池開発の歴史 レドックスフロー電池開発の歴史を概略示したものが表2である。本格的な開発が進められるようになったのは70年代である。レドックスフロー電池システムの原理的な提案がされたのは、1974年の米国NASAのL.H.Thallerの発表による⁽¹⁾。NASAでは、主にFe/Cr系を中心に研究が進められたが、1984年にFinal Report⁽⁵⁾が発行されて終了している。同時期に、国内でも電子技術総合研究所（現在の産業技術研究所、以下電総研と称する）を中心に基礎検討が開始され、新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDOと称する）のプロジェクトとしてFe/Cr系の開発が進展した。一方、オーストラリアのNew South Wales大学（以下、NSW大学と称する）では、1985年頃からV系の開発が進められた。

実用化の観点からは、国内において電力会社とメーカーの共同研究において精力的にシステム開発が行われ、2001年頃にはV系で一部実用化が行われた。以下、Fe/Cr系とV系の開発経緯について述べる。

表2 レドックスフロー電池開発の歴史

1949	Kangro (独特許) Cr/Cr等
1974	Battelle Cr/Cr、Fe/Cr、V、Mo、Mn等
1974	NASA レドックスフロー電池の原理発表、 米国基本特許 ('75) ・ Fe/Cr系 1kW ('78)、Final Report ('84) 電総研にて研究開発スタート
1980	NEDO (ムーンライト計画)「新型電池電力貯蔵システム」 発足 ・レドックスフロー (電総研/三井造船)、NAS (ユア サ電池)、Zn/Br (明電舎)、Zn/Cl ₂ (古河電工) ・電総研 Fe/Cr系 1kW ('82)、三井造船 60kW ('84~'87) NEDO (サンシャイン計画) 太陽光発電用レドックスフロー電池 (三井造船、荏原製 作所)
1985	豪NSW大学V系レドックスフロー電池発表 基本特許 ('86)
1989	電総研-鹿島北共同発電 煤からのV利用研究としてV系レドックスフロー電池を開発 ・ V系 1kW (荏原: '90)、10kW (三井: '91)、 200kW (鹿島北: '97) 関西電力-住友電工 Fe/Cr系 60kW ('89)、 V系 450kW ('96)
1998	電総研-鹿島北 10kWレドックススーパーキャパシター車載試験
2001	住友電工 V系レドックスフロー電池を実用化 (負荷平準化、瞬低補償、非常用等) NEDO 風力出力変動平滑化用として検証 住友電工 170kW ('00)、6MW ('05)
2011	米、欧、中国を初めとし、世界中で開発が進展拡大中

(1) 鉄-クロム系 (Fe/Cr系)

国内では、1980年当時、電力負荷率の低下を背景に負荷平準化による負荷率向上を目的として、揚水発電を補完する大容量の電力貯蔵用電池の開発に期待がかかり、NEDOのムーンライト計画において、レドックスフロー電池を含む4種類の新型電池(ナトリウム/硫黄、亜鉛/臭素、亜鉛/塩素)の開発が始まった。その中で、レドックスフロー電池については、電総研を中心に研究が進展した⁽¹²⁾。電総研では、まず数多くのレドックス対の候補に対して基礎的な検討が実施され、その中から塩酸水溶液を用いたFe/Cr系について具体的な開発が進められた^{(6)~(10)}。

こうした要素技術開発と共に、1984年から1987年にかけてNEDOプロジェクトにおいて三井造船によって10kW、60kWシステムが試作・試験された⁽¹¹⁾。一方で、関西電力と住友電気工業(以下、住友電工と称する)も、1985年から独自にレドックスフロー電池の開発を進め、1989年には60kW級のFe/Cr系RF電池を試作・試験した^{(12)、(13)}。

Fe/Cr系の課題として、Crイオンの電極反応が遅いこと、正極と負極の金属イオンが異なるため隔膜を通じて正負のイオンが混合することで電池容量が次第に減少してゆくこと、Crイオンの酸化還元電位が水素ガス発生電位に近いため充電末期に負極からわずかに水素ガス発生が生じ、正負の充電状態が異なり電池容量が減少する課題がある。正負極のレドックスイオンが混合する課題に対して、関西電力、

住友電工では、正負極共にFeイオンとCrイオンを混合させた1液型のFe/Cr系⁽¹⁴⁾を採用することで原理的な回避を図った。水素ガス発生に対しては、電極特性の改良と共に、長期的に正負の充電深度を調整するリバランスシステムと呼ばれる付属装置についても様々な方式が提案された。

また、Fe/Cr系のエネルギー密度を改善する目的で、三井造船では、正極にFeイオンの代わりに、Brイオンを使うCr/Br系の検討⁽¹⁵⁾、同様に、電総研/荏原製作所では、Cr/Cl系の可能性も検討された⁽¹⁶⁾。さらに、正極を空気極とするV/O₂系も検討された⁽¹⁷⁾。

(2) バナジウム系 (V/V系)

1985年頃に、バナジウム資源の豊富なオーストラリアにおいて、New South Wales大学のMaria Kazacos教授によって、正極、負極共にVイオンを用いるV系RF電池が提案され^{(18)~(20)}、1986年に基本特許が出願された⁽²¹⁾。バナジウム資源の無い日本では経済性が問題となるため、それまで本格的な研究は進められていなかったが、石油や重質油に含まれるバナジウムを火力発電所の燃焼煤から回収し、電解液を製造する技術が鹿島北共同発電と電総研において開発され、経済性評価が見直されたため、開発が始められることとなった⁽²²⁾。V系の起電力は、約1.4VとFe/Cr系の1.4倍であるため、同じセルを適用し、同等のエネルギー効率を得る前提で出力は2倍となるが、実際にはVイオンの電極反応が速いことから出力はさらに数倍となることがわかった。また、正負極共に同じVイオンを使うことで、正負極のイオンが隔膜を通して混合してもFe/Cr系のような電池容量の減少が生じないこと、加えて負極Vイオンの酸化還元電位がCrイオンに比べて、より貴であるため水素ガス発生が起りにくく、実用上、リバランスシステムが不要となる点も大きな利点である。このような利点と共に、Fe/Cr系の電池技術が利用できたことから、国内でも、1989年頃からV系RF電池の開発が本格的に進められるようになった。

1997年には、鹿島北共同発電は、200kW/800kWhのシステムを試作した⁽²³⁾。関西電力と住友電工においても、1996年に、450kW/900kWhのシステムを試作した⁽²⁴⁾。その後は、需要家に設置できる小容量機の開発が進められ^{(25)、(26)}、2000年にはビル設置用100kW/800kWhのシステムが実際のオフィスビルに設置されて検証運転が行われた^{(27)、(28)}。住友電工は、2001年に実用機を開発し、負荷平準化用、瞬低補償用、非常用等の様々な用途において、製品納入を実施した⁽²⁹⁾。

4-3 レドックスフロー電池による電力貯蔵システムの事例 レドックスフロー電池を用いた電力貯蔵システムの適用用途としては、当初の狙いであった負荷平準化用途に加え、需要家における瞬時電圧低下抑制、非常用電源等の用途、近年大量導入が進められている風力・太陽光などの自然エネルギーの出力変動平滑化用途、さらには、電力系統における周波数制御といった電力品質を維持するた

表3 レドックスフロー電池の実績例

納入先or事業主	用途	出力容量	納入年
電力会社	研究開発	450kW × 2H	1996
オフィスビル	研究開発 (負荷平準化)	100kW × 8H	2000
電力会社	研究開発	200kW × 8H	2000
NEDO	風力出力変動平滑化検証 (単機)	170kW × 6H	2000
建設会社	研究開発 (太陽光との組合せ)	30kW × 8H	2001
工場	瞬低補償、ピークカット	3MW × 1.5sec (1.5MW × 1H)	2001
電力会社	研究開発	250kW × 2H	2001
大学	負荷平準化	500kW × 10H	2001
研究所	研究開発	42kW × 2H	2001
電力会社	研究開発	100kW × 1H	2003
オフィスビル	負荷平準化	120kW × 8H	2003
大学	瞬低補償、負荷平準化	55kW × 5H	2003
鉄道会社	研究開発 (負荷平準化、瞬低補償)	30kW × 3H	2003
オフィスビル	研究開発	100kW × 2H	2003
データセンター	瞬低補償、非常用電源	300kW × 4H	2003
研究所	負荷平準化	170kW × 8H	2004
オフィスビル	負荷平準化、消防非常用	100kW × 8H	2004
大学	負荷平準化、消防非常用	125kW × 8H	2004
電力会社	研究開発	152kW × 2.6H	2005
博物館	負荷平準化、消防非常用	120kW × 8H	2005
電力会社	研究開発 (太陽光との組合せ)	100kW × 4H	2005
NEDO	風力出力変動平滑化検証 (ウインドファーム)	4MW × 1.5H	2005



写真1 負荷平準化用 500kW システム (電池盤)

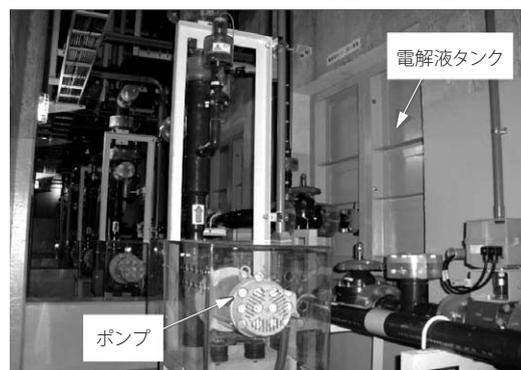


写真2 負荷平準化用 500kW システム (電解液タンク)

めの様々な用途が考えられる。表3に、住友電工が納入した主な試験用および実用システムとその用途を示す。特徴的な事例について、以下に述べる。

(1) 負荷平準化システムの事例

開発の始まった当初は、負荷平準化による負荷率向上を目的として、変電所などに設置される電気事業用の大容量電力貯蔵用電池を目指していたが、実用として最初に使われたのは需要家側に設置されたシステムである。夜間の負荷の少ない時間帯に電力を貯蔵し、昼間のピーク時に電池から放電し、ピーク負荷をまかなうことで、需要家は契約電力削減や夜間の安価な電気の利用による電気代の削減、場合によっては受電設備の縮小化を図ることができる。供給側から見た場合にも、電力負荷が平準化されることによって電力供給設備の効率運用を図ることができるため、双方にメリットが生じる。写真1、2は大学に設置された事例である⁽³⁰⁾。写真1は収納建屋1Fに設置された12台の電池セルスタックを収納した電池盤であり、写真2は地下室に設置された電解液タンクとポンプを示している。電解液タンク1基の大きさは高さ約4m、実容積31m³のゴム製タンクであり、各々が鉄製の枠内に収納されている。システムは、セルスタック4台で構成されるAC168kW × 10h

容量のシステムを1バンクとし、3バンクで構成されており、AC500kW/5,000kWhの出力/容量を有している。

(2) 瞬時電圧低下抑制システムの事例

半導体工場等では、瞬時電圧低下(瞬低)発生によって半製品が不良になったり、また設備復帰に伴う機会損失も含めると大きな被害となる場合が多い。こうした用途では、電池システムは、瞬低発生時に高速に応答し、瞬低が生じている瞬時の間、重要負荷へ電力を供給することが要求される。レドックスフロー電池は、瞬時高出力特性を有していること、また必要な時間容量に合わせてタンク容量を自由に設計することができるため、要求に見合う経済的な設計が可能である。必要に応じて、負荷平準化やピークカット機能を兼ね備えることもできる。

写真3～4は、液晶工場に設置された事例である⁽³¹⁾。レドックスフロー電池システムの主な仕様を表4に示す。セルスタックは建屋2F部分に電池盤に収納して設置され、電解液タンクはポリエチレン製タンク(30m³ × 8基)を用いて建屋1Fに設置されている。通常は、1,500kWのピークカット運転を実施し、瞬低発生時には、瞬時に3,000kWを1.5秒間放出することができる。

表4 瞬低抑制システムの仕様

出力・容量	ピークシフト運転時	1,500kW × 1h
	瞬低補償動作時	3,000kW × 1.5s
セル構成	(100セル×4スタック直列×3分路並列) × 3系統	
電解液	バナジウム 1.7mol/L 硫酸水溶液	
電解液タンク	ポリエチレンタンク 30m ³ × 8基	



写真3 瞬低抑制用3MWシステム（電池盤）



写真4 瞬低抑制用3MWシステム（電解液タンク）

(3) 風力発電と組合せたシステムの事例

太陽光、風力などの自然エネルギーが大量に電力系統へ導入された場合の対策の一つとして蓄電池の活用が有効であると考えられており、現在、蓄電池を活用した様々な検証プロジェクトが推進されており、今後の適用に向けて大きな期待が寄せられている。

レドックスフロー電池に関しても、これまでにNEDOの

実証試験として、風力発電に蓄電池を併設し、発電出力の変動を平滑化する検証試験が実施された。一般に、風力発電の出力変動には、ミリ秒から時間オーダーに至るまで、様々な周期のものが含まれるが、レドックスフロー電池は、電池容量の大小を電解液量の増減によって設計対応可能であり、いずれの要求にも適切に対応できる。特に、短周期変動に対しては、高出力特性を活用した設計によって経済性を向上させることも期待される。以下に、これまでの実証試験の概要を述べる。

(a) 風力発電（単機）の出力変動平滑化の事例

「蓄電池併設風力発電導入可能性調査」と題したNEDOのプロジェクト⁽³²⁾において、2000年度に3種類の蓄電池（RF電池、NAS電池、鉛電池）が各サイトの風力発電機に併設されて試験が行われた。この中でレドックスフロー電池については、エネルギー総合工学研究所がNEDOから受託し、定格出力／容量が170kW（最大275kW）／1,020kWhとなるシステムを、北海道電力ほりかつぶ発電所に設置されている風力発電機の1基（AC275kW出力）に併設した。このシステムでは、交直変換器出力を風力発電機定格275kWに合わせ、レドックスフロー電池の瞬時高出力特性を活用した試験を可能としている。

図4にシステムの概念構成図を示す。風力発電の連系点に電池を設置し、風力発電出力の変動を吸収することで出力変動を平滑化している。平滑化の方法としては、実際の風力出力に対してある時定数を有するローパスフィルターを通して短周期成分を除去した出力値を平滑化の目標値と設定し、この目標値と実際の風力出力の差となる出力を電池から出力させている。系統へは、この電池の出力と実際の風力出力が合わせられた合成出力が出力される。

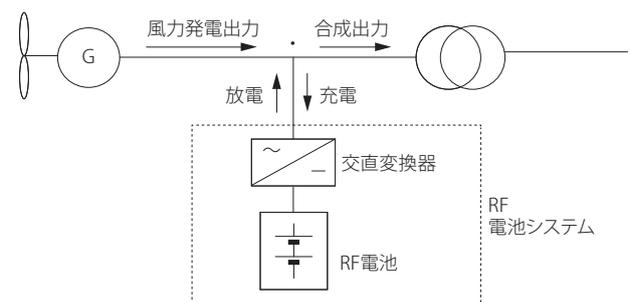


図4 風力発電併設システムの基本構成

平滑化の時定数を1hとした場合の出力データの一例を図5に示す。秒オーダーで小刻みに変動する風力出力に対し、レドックスフロー電池を併設した場合には、系統に出力される合成出力は良好に平滑化されている。次に、図6は平滑化制御の時定数を1hとした場合の1日分の出力データを

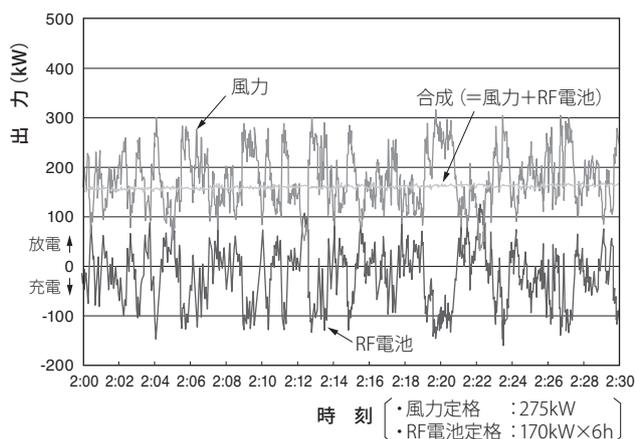


図5 風力発電出力の平滑化特性例 (時定数1h、2001.5.22)

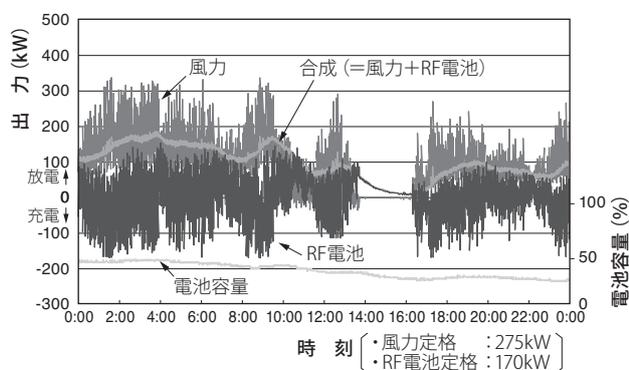


図6 風力発電出力の平滑化特性例 (時定数1h、2001.5.22)

示している⁽³³⁾。図の下部に、この間の電池残容量の推移を併せて示している。時定数が大きいほど出力変動は平滑化されるが、一方で蓄電池への要求出力も大きくなり、より多くの電池容量が必要となる。図に示した電池残容量は、電解液の電位を測定するモニターセル電圧から算出したものであり、電池の残容量を常に正確に把握することが出来るというレドックスフロー電池の特徴を活用したものである。

(b) 風力発電(ウインドファーム)の出力変動平滑化の事例

「風力発電電力系統安定化等技術開発」と題したNEDOのプロジェクト⁽³⁴⁾において、2003年度に電源開発が受託し、北海道苫前ウインピラ発電所(出力30,600kW、風車発電機19台、2000年12月運開)に、レドックスフロー電池システム(定格出力AC4,000kW/6,000kWh:最大出力6,000kW)を併設して風力発電の出力変動平滑化の実証試験が行われた^{(35)~(40)}。

写真5~6は、電池盤および収納されているセルスタック、電解液タンクおよび配管を示している。本システムは

4バンクで構成され、各バンクは4モジュールで構成される。1モジュールは、正極、負極の各々が各1組の電解液タンク(各15m³)とセルスタック6台、および熱交換器1台で構成されている。1セルスタックは18セルからなるサブスタック6台で構成される計108セルからなり、1セルスタックあたりの定格直流出力は45kWである。1バンク内では、セルスタックは電氣的に6並列4直列に接続され、1バンクの定格直流出力は1,000kW(最大1,500kW)である。

本システムは、短周期(数秒から数10分以下)の出力平滑化を目的としている。平滑化制御の方法は、先の単機の風力発電機の場合と基本的に同様である。合成出力は、ウインドファーム出力と電池出力の和であり、合成出力の目標値は、ウインドファーム出力を所定の時定数の一次遅れ要素で平滑化した値と設定している。実際には、レドックスフロー電池に要求される出力は、合成出力目標値とウインドファーム出力の差分に、補充電または補放電による修正量を加えた値としている。これは、電池容量は有限で

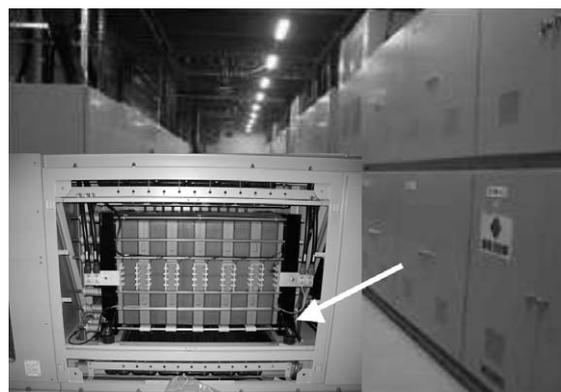


写真5 風力発電併設6MWシステム電池盤およびセルスタック



写真6 風力発電併設6MWシステム電解液タンク

あり、電池ロスにより充電レベルが下限に達することや風況により充電量が放電量を上回り充電レベルが上限に達する場合に、これを回避するために平滑化制御を行いながら補充電または補放電を行い、常に充電レベルを適切なレベルに維持するためである。この制御を容量フィードバック制御と称している。

本システムでの検証試験結果例を次に示す。

図7は、時定数可変制御を適用した検証試験データの一例である。時定数は30分を基本としているが、この試験では状況に応じて可変としている。風力出力の急変時には、電池容量に制約のあることから追従できない場合があり、一時的に時定数を小さくし、電池への負担を減らし、かつ可能な範囲で平滑化運転を実施することが有効であると考えられている。試験データからは、風力出力状況に応じて、最適な時定数可変制御が行われ、電池容量も破綻することなく平滑化運転が行われていることがわかる。

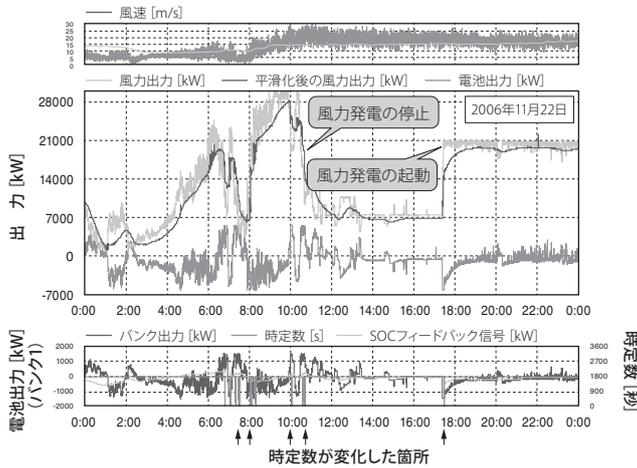


図7 時定数可変制御を適用した試験データ例（基本時定数30分）

図8は、バンク制御を適用した試験データ例である。電池への要求出力の大きさに応じて、最適なバンク数で対応制御することで、システム効率を向上させることを狙いとしている。試験データを見ると、電池への要求出力に応じて、運転対応バンク数が、4バンク、3バンク、2バンクと変化していることがわかる。

以上のように、ウインドファームに併設されたレドックスフロー電池システムは、所望の平滑化制御が行われることが実証されると共に、電池容量が破綻しないように工夫された容量フィードバック制御、平滑化時定数可変制御が有効に機能すること、さらに電池に要求される出力の大きさに応じた最適な電池規模で効率良く対応するためのバンク制御等の制御技術も有効に機能することが検証された。これらの制御を含めたシステムは、試験期間中、安定にか

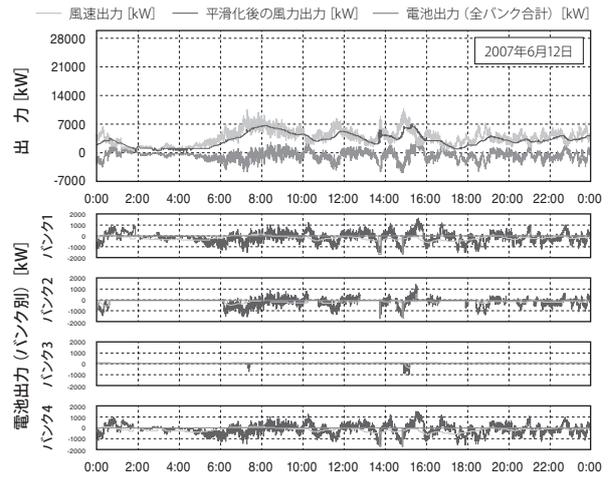


図8 バンク制御を適用した試験データ例

つ効率良く動作することが検証された。

(4) 需給制御用途への期待^{(41)~(43)}

電力システムへの大規模な電池システムの適用という観点から、将来は、電気事業用としての需給制御用途への適用が期待される。現状では、周波数調整は、中央給電司令所からのLFC (Load Frequency Control) 信号に基づき、火力発電、揚水発電、水力発電等の出力を、バランスを取りながら出力調整することによって行われている。こうした現状発電機でのLFC運転を、レドックスフロー電池システムに置き換えた場合には、瞬時に充放電出力を可変にできること（応答速度が速いこと）、また極短時間であれば高出力での出力が可能な特性を有していることから、同じLFC容量を確保するための電池容量は小さくて済むことが予想され、そうした場合には経済的なメリットが期待できるものと考えられる。例えば、レドックスフロー電池が、極短時間であれば定格比3倍の高出力が可能とすると、一般に言われる火力発電のLFC容量5%に対して、レドックスフロー電池のLFC容量は300%と考えられるので、十分に小さな定格の電池で対応できる可能性がある。

4-4 レドックスフロー電池の海外動向 レドックスフロー電池は、米国NASAおよび国内では電総研を初めとして開発が始まったが、その後の実用化開発については、日本国内での電総研、NEDOを中心とする研究開発プロジェクトや電力会社とメーカーとの共同開発プロジェクトが大きな推進力となって発展した経緯がある。現在、再生可能エネルギーの大量導入をきっかけとするスマートグリッドが世界的な盛り上がりを見せる中で、蓄電池はいっそう大きな役割を果たすことが期待されており、今や世界中で蓄電池開発が推進されている。レドックスフロー電池についても、例外ではなく、むしろ、大容量の蓄電池として新たに脚光を浴び、世界各地で開発が進められる状況となっ

ている。現在の開発の主流は、V系のレドックスフロー電池である。以下に海外での開発動向について概説する⁽⁴⁴⁾。

オーストラリアでは、Kazacos教授がV-Fuelと共に、V系の開発に加え、さらにその技術を発展させて高エネルギー密度化を図ったV/Br系を開発している⁽⁴⁵⁾。

米国では、Deeya Energyが、NASAの技術の流れを受け、Fe/Cr系を適用した無線基地局向けの数kW級の製品を開発している。また、Ashlawn Energyは、米エネルギー省（DOE）のプロジェクトを獲得し、V系で1MW/8MWh級システムを検証する計画が発表されている。また、Primus Powerについても、DOEの予算を受け、25MW/75MWhのフロー電池による実証プラントを建設すると発表されているが、電解液系は公表されていない。

カナダでは、VRB Powerが、主に独立電源や再生可能エネルギーとの組合せ用途で数kW級のV系レドックスフロー電池システムを製品化していたが、現在は、中国を中心拠点とするPrudent Energyがその技術を購入し、事業拡大を進めている。最近では米国や中国において太陽光発電や風力発電に併設されるMW級の設備を納入する予定であることが公表されており、電解液にはZn/Cl系（亜鉛塩素）が使われる。

ヨーロッパでは、新しいレドックス系として、Na/Br系（多硫化ソーダ／臭化ソーダ）を用いるRegenesysと呼ばれるレドックスフロー電池の開発が大規模に進められたが、現在は開発が中止されている。オーストリアでは、Cellstromが10kW/100kWh級のV系レドックスフロー電池を開発し、独立電源や太陽光発電との組合せ用途で製品化を進めている。そのほか、英国では、RE-FuelがV系レドックスフロー電池を適用した電気自動車および充電スタンドをコンセプトに開発を進めている。ドイツのFraunhoferは、高エネルギー密度化の期待できる非水系電解液の研究を進めている。南アフリカのCSIRでは、Cr/Br系の検討が進められている。

アジアにおいては、タイでCellenniumがV系で精力的に開発を推進しているほか、韓国のサムスンでは、非水系電解液を用いて開発を行っている。特に最近、活発な動きが見られているのは中国である。中国では、2009年に再生可能エネルギー導入目標の大幅上方修正（2020年に太陽光20GW、風力150GW）を機に蓄電池の開発が加速している。大きな動きとしては、大手送電会社である国家电网が検証プロジェクトを計画しており、各電池メーカーが開発を競っている状況にある。レドックスフロー電池については、先に述べたPrudent Energyの他、中国科学院大連化学物理研究所⁽⁴⁶⁾等の研究機関、承德萬利通實業集團有限公司等が開発を進めている。

その他、亜鉛臭素電池については、オーストラリアのZBB、RedFlow、米国ではPremium Powerが開発を行っている。英国Plurionは、高エネルギー密度化を図るべく、Zn/Ce系のフロー電池を開発している。

5. 結 言

これまでに実用化されたレドックスフロー電池の規模としては、国内では需要家側に設置された数百kW級の設備が多く、海外でも独立電源用途などに用いられる数～数十kW級の電力用としては比較的小容量の設備が大半であった。これらの中で最大規模の設備は、NEDO実証プロジェクトとしてウインドファームに設置された6MW級の設備であるが、今後、こうした風力発電併設用途、さらに電力系統での需給制御用途を想定すると、さらに大容量の設備が必要である。こうした設備には既存の電力システム同等の高い安全性、信頼性、耐久性、低コストが要求されることから、今後、素材からシステムを含めたさらなる開発の促進とユーザーを含めた多くの検証試験が実施され、近い将来、電力系統における重要な役割を果たすことを期待する。

用語集

※1 周波数調整

電力需要と供給との均衡を欠くと電力系統の周波数を標準値に保持できず、電力系統の安定な運用ができなくなる。このため、需要変動に応じて発電機の出力を調整し、各瞬時の需給均衡を図り、周波数を標準値に保持するように制御すること。

※2 瞬低補償（抑制）

落雷などの影響を受けて、系統電圧が瞬時電圧低下（瞬低）する場合があります。この瞬間に電池などから電力を供給し、電圧低下を抑制すること。

※3 自然エネルギーの出力変動吸収（平滑化）

風力発電や太陽光発電では、その出力は天候などに左右されて不規則な変動を伴う。この出力変動は系統安定化上、好ましくないため電池などを用いて変動分を吸収し、平滑化した出力とすること。

※4 （標準）酸化還元電位

酸化還元反応における電子のやり取りの際に発生する電極電位のことであり、基準には標準水素電極が用いられる。特に、酸化還元反応に関与する物質の活量（あるいは分圧）がすべて1の場合の電極電位を、標準酸化還元電位と言う。

参 考 文 献

- (1) L.H.Thaller, "Electrically Rechargeable Redox Flow Cells", Proc. of the 9th IECEC, P.924 (1974)
- (2) 伊瀬敏史、田中祀捷、「電力システムにおける電力貯蔵の最新技術」、シーエムシー出版（2006）
- (3) 日本電気技術企画委員会、電力貯蔵用電池規程、JEAC 5006-2010（2010）

- (4) 佐々木鉄於、重松敏夫、「新エネルギーシステムによる電力品質維持—レドックスフロー電池の適用評価—」、電気関係学会関西支部連合大会 (2001)
- (5) N.H.Hagedorn, "NASA Redox Storage System Development Project Final Report", DOE/NASA/12726-24, NASA TM-83677 (1984)
- (6) 金子浩子、野崎健、小沢丈夫、「電力貯蔵用レドックス・フロー型二次電池のレドックス系の特性 (第1報) 評価基準」、測定法およびクロム、チタン、鉄系の測定結果、電子技術総合研究所彙報、41、P.877 (1977)
- (7) 野崎健、金子浩子、小沢丈夫、「二次電池による電力貯蔵技術の可能性」電子技術総合研究所調査報告、第201号、P.51 (1979)
- (8) K.Nozaki, H.Kaneko, A.Negishi, K.Kanari, T.Ozawa, "Performance of ETL New 1kW Redox Flow Cell System", 19th IECEC P.844 (1984)
- (9) 野崎健、永島郁男、金子浩子、小沢丈夫、「レドックスフロー型電池の内部抵抗と電解液組成の関係」、電気化学、57、10 (1989)
- (10) 根岸明、野崎健、金子浩子、関田吉泰、「太陽光発電システム用レドックスフロー電池の電極材料」、電総研彙報54、11、P.1295 (1990)
- (11) Osamu Hamamoto, Masaharu Takabatake, Masami Yoshitake, Hirowo Misaki, "Research and Development of 10kW class Redox Flow Battery", 20th IECEC,2,P.98 (1985)
- (12) 田中敏夫、坂本龍日子、森範宏、水浪和人、重松敏夫、「レドックスフロー型電池システムの開発」、住友電気、第137号、P.191 (1990)
- (13) 重松敏夫、伊藤哲二、坂本龍日子、「レドックスフロー型電池による新しい電力貯蔵システム」、電気評論9月号 (1993)
- (14) Randall F. Gahn, Norman H. Hagedorn, Jerri S. Ling, "Single Cell Performance Studies on the Fe/Cr Redox Energy Storage System Using Mixed Reactant Solutions at Elevated Temperature", NASA TM-83385 (1983)
- (15) 浜本修、高島正温、吉竹正実、「用途に応じたレドックス・フロー型電池の最適化」、第28回電池討論会、3A19、P.183 (1987)
- (16) 野崎健、和田雄高、「塩素—クロム系レドックス・フロー型電池の可能性」、第28回電池討論会、3A20、P.185 (1987)
- (17) 野崎健、金子浩子、根岸明、黒川浩助、佐藤完二、中島正人、「全バナジウムレドックスフローおよびバナジウム空気電池の特性」、電気化学協会第59回大会要旨集、1J30 (1992)
- (18) B.Sun, M.Skylas-Kazacos, "A Study of the V(II)/V(III) Redox Couple for Redox Cell Application", J. of Power Sources,15, P.179 (1985)
- (19) B.Sun,M.Rychik,M.Skylas-Kazacos, "Investigation of the V(V)/V(IV) System for Use in the Positive Half-Cell of a Redox Battery", J.of Power Sources,16,P.85 (1985)
- (20) M.Rychik,M.Skylas-Kazacos, "Characteristics of a new all-vanadium redox flow battery", J.of Power Sources, 22, P.59 (1988)
- (21) M.Skylas-Kazacos ,M.Rychik,R.Robins, "All-Vanadium redox battery", JP2, 724, 817 (1997)
- (22) M.Nakajima, M.Sawahata, S.Yoshida, K.Sato, H.Kaneko, A.Negishi, K.Nozaki, "Vanadium redox flow battery with resources saving recycle ability I.Production of electrolytic solution for vanadium redox flow battery from boiler soot", 電気化学および工業物理化学, 66, 6, P.600 (1998)
- (23) OHM 解説記事、「回収資源を利用した電力貯蔵用電池 200kW バナジウム電池を開発」、OHM、98/2、73 (1998)
- (24) 徳田信幸、隈元貴浩、重松敏夫、出口洋成、伊藤岳文、吉川憲康、原拓司、「レドックスフロー型二次電池の開発」、住友電気、第151号、P.95 (1997)
- (25) 原拓司、重松敏夫、「レドックスフロー電池の開発」、建築設備士10月号、P.42 (1998)
- (26) 徳田信幸、寒野毅、原拓司、重松敏夫、筒井康充、池内淳夫、伊藤岳文、隈元貴浩、「レドックスフロー型二次電池の開発」、住友電気、第156号、P.73 (2000)
- (27) 徳田信幸、本井見二、原拓司、佐藤寛、筒井康充、江村勝治、新里剛、寒野毅、「ビル設置用レドックスフロー電池の開発」、住友電気、第158号、P.19 (2001)
- (28) 徳田信幸、菊岡泰平、古家昌之、近藤修平、寒野毅、「レドックスフロー電池の開発」、電気学会B部門大会 (2001)
- (29) 重松敏夫、「実用化段階を迎えた電力貯蔵用レドックスフロー電池」、MATERIAL STAGE 1、10、P.40 (2002)
- (30) 森井浩、三浦晋司、南浦基温、本井見二、「負荷準化用レドックスフロー電池の適用」、電設技術10月号 (2001)
- (31) 新里剛、江村勝治、原拓司、「瞬時電圧低下対策用レドックスフロー電池システムの開発」、電気学会B部門大会、254 (2001)
- (32) NEDO、平成12年度調査報告書 (NEDO-NP-0004)、「蓄電池併設風力発電導入可能性調査」(2002)
- (33) T.Shigematsu, T.Kumamoto, H.Deguchi, T.Hara, "Application of a Vanadium Redox-flow Battery to Maintain Power Quality", IEEE T&D Conference, OR-25 (2002)
- (34) NEDO、平成19年度成果報告書、「風力発電電力系統安定化等技術開発」(2008)
- (35) 小林康一、「電力会社における電力貯蔵への取り組み 3) 風力発電電力系統安定化技術開発について」、エネルギー・資源、25、6、394 (2004)
- (36) 徳田憲昭、「ウインドファームの出力準化技術」、電学誌、125、11 (2005)
- (37) 柴田俊和、「レドックスフロー電池の風力発電出力平滑化用途への適用」、電気設備学会誌、10月号、P800 (2005)
- (38) K.Yoshimoto, T.Nanahara, G.Koshimizu, "Analysis of Data Obtained in Demonstration Test about Battery Energy Storage System to Mitigate Output Fluctuation of Wind Farm", IEEE PES CALGARY (2009)
- (39) G.Koshimizu, T.Numata, K.Yoshimoto, H.Hasuiki, T.Shibata, "Subaru Project: Analysis of Field test results for stabilization of 30.6MW Wind Farm with Energy storage", EESAT (2007)
- (40) NEDO、平成20年度成果報告書、「風力発電電力系統安定化等技術開発—経年特性分析研究—」(2009)
- (41) Taiichi Kaizuka, Tetsuo Sasaki, "Evaluation of Control Maintaining Electrical Power Quality by use of Rechargeable Battery System", IEEE PES Winter Meeting Columbus (2001)
- (42) 榎本和宏、佐々木鉄於、重松敏夫、出口洋成、「レドックスフロー電池の応答特性とモデリングに関する考察」、電学論B、122、4(2002)
- (43) Tetsuo Sasaki, Kazuhiro Enomoto, Toshio Shigematsu, Hiroshige Deguchi, "Evaluation study about Redox flow battery response and its modeling", CEPSI Fukuoka (2002)
- (44) <http://www.flowbatteryforum.com/>
- (45) M.Skylas-Kazacos, "Novel vanadium chloride/polyhalide redox flow battery", J.of Power Sources,124,P299 (2003)
- (46) Ping Zhao, Huamin Zhang, Hantao Zhou, Jian Chen, Sujun Gao, Baolian Yi, "Characteristics and performance of 10kW class all-vanadium redox-flow battery stack", J. of power sources,162, P.1416 (2006)

執筆者

重松 敏夫 : シニアスペシャリスト
 パワーシステム研究所 グループ長
 レドックスフロー電池の開発に従事

