

レドックスフロー電池の性能向上と最新設計

Performance Improvements and Latest Design of Redox Flow Batteries

林 清明*

Kyoaki Hayashi

内藤 恭裕

Yasuhiro Naitou

田口 大作

Daisaku Taguchi

寺岡 寛二

Kanji Teraoka

藤川 一洋

Kazuhiro Fujikawa

寒野 毅

Takashi Kanno

地球温暖化対策および再生可能エネルギー導入の拡大に伴い、電力系統の安定化と長期運用可能なエネルギー貯蔵システムへのニーズが高まっている。本論文では、電力品質の安定化に効果的な電力貯蔵技術として注目されるレドックスフロー電池の性能向上と最新の開発状況と設計について報告する。特に、セルスタックの出力向上やエネルギー密度の向上に焦点を当て、多様な運用要求に対応可能な蓄電システムの実現を目指した。さらに、30年にわたる長期運用に耐える高い信頼性を確保し、ライフサイクルコストの低減に寄与する技術開発も行った。本開発の成果により、再生可能エネルギーの効果的な蓄電と長期的な安定運用の実現に貢献していきたい。

Due to measures against global warming and the expansion of renewable energy introduction, the demand for energy storage systems to contribute to power system stability with a long lifespan has increased. This paper reports on the latest developments and designs aiming to improve the performance of redox flow batteries, which are gaining attention as effective energy storage technologies for stabilizing power quality. In particular, this paper focuses on enhancing cell stack output and increasing energy density to achieve energy storage systems that can meet diverse operational requirements. Additionally, this paper discusses the development of technologies to ensure high reliability for long-term operation over a 30-year period as well as contributing to reducing lifecycle costs. The outcomes of this development are intended to contribute to the efficient storage and long-term stable operation of renewable energy.

キーワード：レドックスフロー電池、蓄電池、LDES（長時間エネルギー貯蔵）、サーキュラーエコノミー（循環経済）、長寿命

1. 緒 言

近年、地球温暖化対策が喫緊の課題となる中、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入拡大が世界的に推進されている。しかし、これらの自然変動電源が大量に電力系統へ連系されたことにより、出力変動に起因する電力品質の低下（電圧変動、周波数変動）や余剰電力の発生が問題として顕在化している。こうした課題への対策の一つとして、系統用蓄電池の導入が進んでいる⁽¹⁾。

蓄電池の中でも、レドックスフロー（Redox Flow: RF）電池は、活物質である金属イオン（バナジウム）の水溶液を電解質に用い、イオンの価数変化のみで充放電を行うため活物質の劣化が生じず、高い安全性と長寿命を特長とする。また、出力部（セルスタック）と容量部（電解液タンク）を独立して設計可能であり、用途に応じた柔軟な設計が可能である点も特長である⁽²⁾。当社は1985年よりRF電池の開発に着手し、2025年9月までの納入実績は52MW, 190MWhである。

一方で、電解液が水溶液であるがゆえに、活物質の溶解度の制約から、ほかの蓄電池に比べてエネルギー密度が小さく、システムサイズが大きいことが弱点である。当社では、この弱点に対する改良として、セルスタック性能の向上やシステム運用の最適化を通じた高エネルギー密度化に

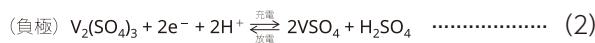
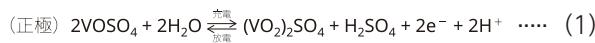
取り組んできた。

また、当社ではRF電池のさらなる長寿命化によるライフサイクルコスト（Life Cycle Cost: LCC）の低減に向けた開発にも取り組んでいる。各部材の長寿命化、メンテナンス技術の向上により、蓄電池の長期的な運用が可能となれば、LCCの削減に大きく寄与する。

本論文では、RF電池の高出力化、高エネルギー密度化と長寿命化への開発状況及び最新設計について報告する。

2. RF電池の動作原理と特長

RF電池は、電池反応を行う電解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）。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)にて充放電が行われる。



充電時、電池に電流を流すと正極で酸化反応、負極で還元反応が生じ、隔膜を介してプロトロン (H^+) が移動する。放電時はこの逆反応が生じる（図2）。

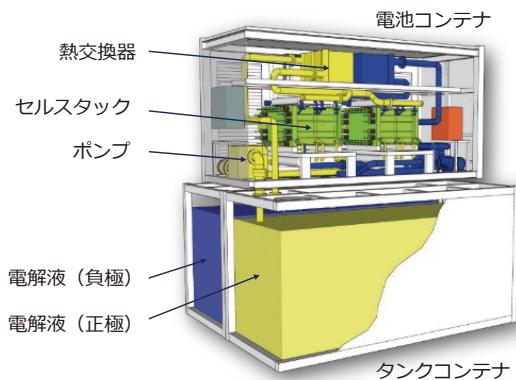


図1 RF電池の構成

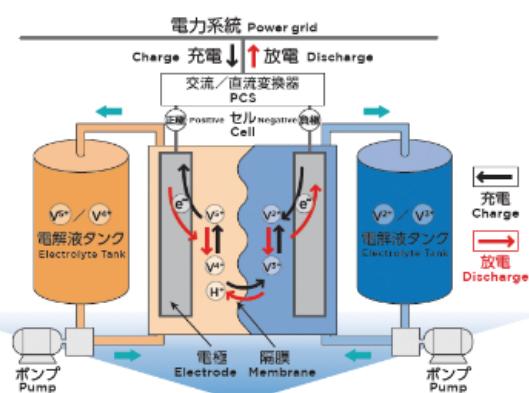


図2 RF電池の原理

RF電池の特徴として、次のようなものが挙げられる。

- (1) 高い安全性：レドックスフロー電池の電解液は水溶液であり、不燃性である。また配管等に利用される塩化ビニルやセルスタックの各部材は自己消火性のため火災のリスクが低い。また、国内の消防法上も危険物に該当せず、設置工事、運用中に危険物取扱における有資格者を配置する必要がない。なお、当社のRF電池セルスタックは蓄電池の安全規格であるUL1973を取得している。
- (2) 長寿命：充放電に伴う反応は電解液中の価数変化だけのため、相変化を伴わず劣化しにくい。このため、電解液は長期間性能を維持し、実現可能な設計寿命は20年以上である。
- (3) エコフレンドリー：電解液は劣化しないため、設備廃棄後も再利用できる。また、撤去時にはほとんどの部材がリユース・リサイクル可能であり、産業廃棄物の

発生は1%未満である。つまり、資源循環性に優れ、持続可能な社会構築に貢献できる⁽³⁾。

- (4) ライフサイクルコスト優位性：RF電池は、出力部（セル）と容量部（タンク）を独立して設計が可能なため、電解液の量を増やすだけで長時間化が実現でき、LDSE（Long Duration Energy Storage: 長時間エネルギー貯蔵）^{*1}用途にも最適な電池といえる。また、長寿命・低劣化という特長から、初期容量の大規模な積増しや運用期間中のセルスタック、電解液の交換や拡張を必要としないので、運用年数が長いほどLCCの優位性が高まる。

その他にも、充放電に寄与しない専用の単独セルに電解液を流することでその開放電圧から充放電中も充電状態（SOC: State of Charge）をリアルタイムに計測できること、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。

一方で上述の通り、エネルギー密度が低いためにシステムサイズが大きくなるという弱点がある。

3. 新型RF電池システムの開発目標

RF電池の更なる導入拡大を図るため、より高性能かつコスト効果の高い新型RF電池システムの開発を進めている。この開発の目標値を表1に示す。

PCS変換効率を含めたシステム効率^{*2}70%以上を維持しながら、①セルスタック出力334kWへの高出力化、②エネルギー密度の15%向上、③運用期間30年への延長をを目指した。

表1 新型RF電池システムの開発目標値

出力	250kW → 334kW
エネルギー密度	+15%
運用期間	20年 → 30年
システム効率	70%以上

現在販売しているモデル⁽⁴⁾では1MWのシステムの場合 250kW × 4モジュールの構成となるが、新型では334kW × 3モジュールの構成とする（図3）。これにより、同一出力を維持しつつ、設備の占有面積を25%削減することが可能となる。

また、モジュール数が減ることにより必要となる機器もあわせて削減することができる。機器寿命の延長とともに、サーキュラーエコノミーへの適合にも直結する。

しかしながら、これらの目標達成のためには、高出力化に伴う電圧ロスの低減、電解液エネルギー密度向上時の過充電リスクの低減、さらにシステムの主要部品であるセルスタックの耐久性向上などの課題がある。

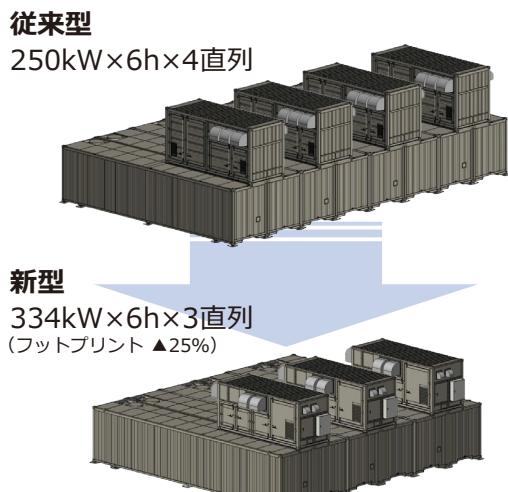


図3 新型RF電池システムにおける専有面積の削減

4. RF電池の新型モデルの開発

4-1 セルスタック高出力化

セルスタックの出力 (kW) は電圧 (V) と電流 (A) との積で表される。したがって、高出力化するためには高電圧化、高電流化が必要である。

しかし、単位面積当たりの電流値である電流密度 (A/cm^2) の二乗とセルの電気抵抗率 (Ωcm^2) に比例してジュール損が増え、充放電効率が低下する。よって、効率低下を抑えて高電流密度化を達成するためには、セル抵抗率を低減する必要がある。

新型セルスタックでは高導電性材料を採用することで、セル抵抗率を25%低減している。加えて、セルの積層数を10%増加させ、高電圧化することで、目標である従来比+34%の高出力化を達成した(図4)。サイズについては、+5%の体積増加に留めた。

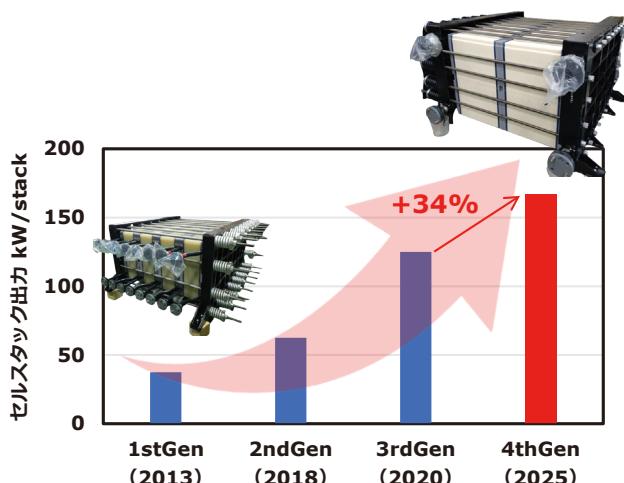


図4 RF電池セルスタックの高出力化

4-2 エネルギー密度の向上

電解液のエネルギー密度 (kWh/m^3)^{※3}は、理論エネルギー密度とバナジウムイオンの利用率によって決まる。

理論エネルギー密度は、電解液中のバナジウムイオン濃度のみで決まる。そのため、バナジウムイオンの高濃度化を行えば理論エネルギー密度は向上できるが、溶解度の制約があり、容易ではない。一方で、バナジウムイオンの利用率は、従来、後述する正負極のバナジウムイオン濃度の不均衡により、60~75%程度であった。バナジウムイオンの利用率には改善の余地が残されていたことから、この向上に着目して開発を行った。

RF電池の電気化学的なSOC^{※4}は式(3),(4)で表される。

$$\text{正極SOC} = \frac{[V(V)O_2^+]}{[V(IV)O^{2+}] + [V(V)O_2^+]} \quad \dots \quad (3)$$

$$\text{負極SOC} = \frac{[V(II)^{2+}]}{[V(II)^{2+}] + [V(III)^{3+}]} \quad \dots \quad (4)$$

したがって、正負極のバナジウムイオン濃度が同じである理想的な状態では反応式(1), (2)を踏まえると、正負極のSOCは一致する。

ここで、セルの構成部材の一つである隔膜はセル内でのバナジウムイオンの混合を防ぐ役割を持つが、実際には充放電中に隔膜を通じて一部のバナジウムイオンが負極から正極に移動する(図5)。このため、正負極間のバナジウムイオン濃度の不均衡が発生する⁽⁵⁾。この不均衡により、理想的な状態と比べてバナジウムイオン濃度が上昇した正極ではSOCが低くなり、バナジウムイオン濃度が低下した負極ではSOCが高くなるSOCの不均衡が生じる(図6)。

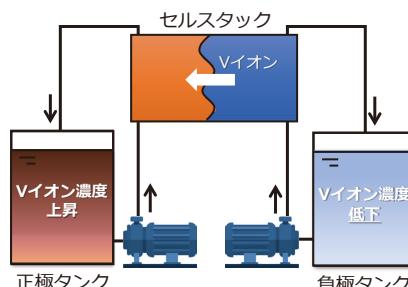


図5 正負極でのバナジウムイオン不均衡発生のイメージ

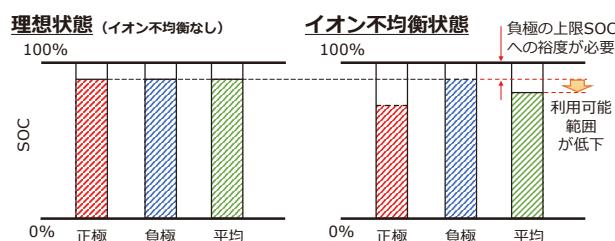


図6 バナジウムイオンの不均衡を考慮したSOC上限の設定

バナジウムイオンの利用率を拡大するため、当社では、バナジウムイオンの移動を低減した隔膜と正負極それぞれのSOCに応じた最適な制御が可能な制御系の開発を行った。

新たに開発した隔膜の評価結果を図7に示す。従来の隔膜では充放電サイクルとともに負極のバナジウムイオン濃度が急激に減少していくことに対し、開発した隔膜ではバナジウムイオン濃度の低下速度が約1/5に改善されていることを確認した。これは、開発した隔膜ではバナジウムイオンの移動を従来の隔膜に対して約1/5に低減できていることを示している。

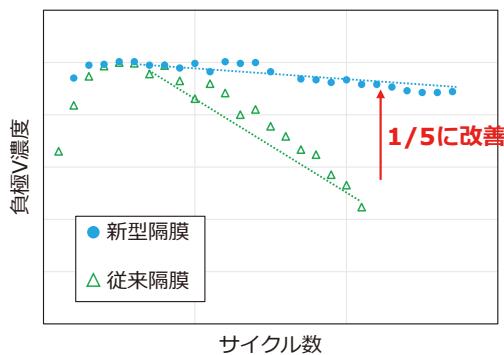


図7 新型隔膜でのバナジウムイオン濃度不均衡抑制の効果

制御系の開発において、これまで正負極SOCの平均値しか測定できなかつたが、正負極のSOCを個別に測定できるセンサーを導入した。これにより、各極に適切な上限値を設定し、正極または負極のいずれか一方が設定した上限値まで充電する制御を可能とした⁽⁶⁾。

新たに開発した隔膜と制御系の採用により、図8に示すようにバナジウムイオン濃度の不均衡状態を改善しつつ、過充電を防ぎながら充電可能なSOC上限を引き上げることが可能となった。

シミュレーションにより求めた従来と改良後のRF電池のエネルギー密度を図9に示す。目標とした15%を超えるエネルギー密度の向上が見込めることが確認した。

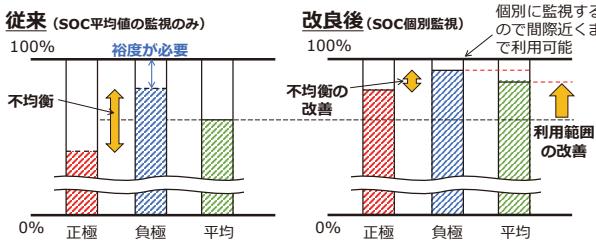


図8 SOCの正負極個別測定による利用範囲の改善

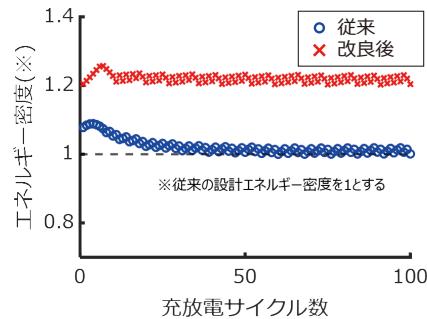


図9 シミュレーションによる従来と改良後のエネルギー密度の比較

4-3 運用期間30年への対応

RF電池を構成する機器の内、特にセルスタックは、運転中の電気化学反応や液圧等の熱機械的ストレスに耐える必要があり、運用期間30年の実現の鍵となる。そこで、セルスタックについて、より高い耐酸化性を有する材料への変更や、構造の見直しを実施した。その上で、これら設計改良の妥当性を確認するために信頼性試験を実施した。

セルスタックの信頼性試験は、主に以下の3種類の試験群で構成される⁽⁷⁾。

- ① 材料寿命試験
- ② セルスタックストレス試験
- ③ システム試験

本項では、この中でもセルスタックの長期運用耐久性を最も直接的に評価できる「②セルスタックストレス試験」について記載する。本試験は、実際の運用条件をより過酷な状況で模擬し、劣化や故障を引き起こす条件下での性能変化を評価する。

また、ストレス試験に加えてIEC62932-2-2 Annex Bに規定されるセルスタックの安全性試験（形式試験）⁽⁸⁾についても併せて実施した。

試験項目は多岐にわたるが、主なストレス試験内容の項目と条件を表2に、安全性試験の項目と条件を表3に示す。

表2 主なセルスタックストレス試験

試験名称	試験条件	設定根拠
ヒートサイクル試験	試験温度 : -30°C ⇄ 50°C サイクル数 : 32 cycles	年間の最高・最低気温 × 30年数相当のサイクル数
圧力変動試験	試験温度 : 50°C 圧力 : 70 ⇄ 350kPa サイクル数 : 219,000cycles	充放電(3hシステム) 10cyc/日 × 30年 × 安全率
高温クリープ	試験温度 : 50°C 試験圧力 : 480kPa 試験期間 : 240日	運転最大圧力 × 1.5 ラーソンミラー法より30年相当 (寿命損傷率50%)
ポンプ連続運転停止試験	電解液温度 : 50°C 電解液圧力 : 320kPa サイクル数 : 72,000 cycles	最大温度・圧力にて、月間起動回数100回 × 30年 × 安全率
低温試験	環境温度 : -20°C 低温印加時間 : 3日	冬季の長期運転停止・輸送・低温保管を想定
落下試験	落下衝撃 : 15G × 10回	製造から設置までの輸送中に印加される衝撃回数

表3 主なセルスタック安全性試験条件

試験名称	試験条件	設定根拠
ヒートショック試験	電解液温度 : -10°C ⇄ 50°C 電解液圧力 : 320 kPa 温度切替時間 : 1 hour サイクル数 : 11 cycles	IEC62932-2-2 Annex B
外部短絡試験	SOC : 100% 周囲温度 : 20~25°C 接続抵抗負荷 : 最大20mΩ	IEC62932-2-2 Annex B

試験実施状況の例として、写真1 (a) には-20°Cの恒温槽中で保管中のセルスタックを、写真1 (b) には、高さ15cmの高さから落下させる試験時の様子を示す。

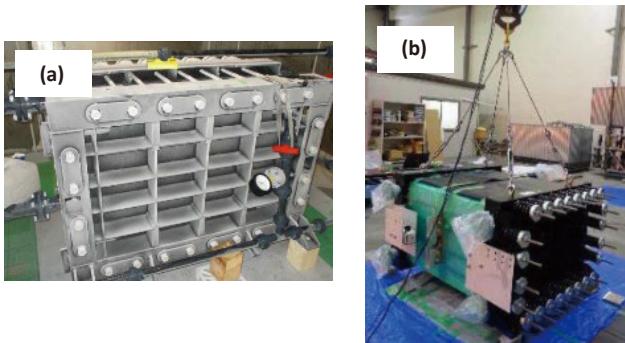


写真1 (a) 低温試験中に凍結したセルスタック
(b) 落下試験時のセルスタック

ストレス試験前後には充放電試験による性能試験や、液漏れが発生しないことを確認する圧力試験を行い、ストレス試験前後で性能に変化がないこと、また、セルスタックを解体し内部損傷がないことからその健全性を確認した。

5. 新型RF電池システムの実証

新型RF電池システムの試作設備を当社内に設置し(写真2)、実証試験を実施した。



写真2 新型RF電池システムの試作設備

本試作設備でサイクル充放電試験を実施した結果を図10に示す。試作設備は定格出力のAC334kWで継続して6時間以上放電できることを確認した。これは目標として定めたエネルギー密度+15%を達成したことを見ている。また、システム効率も70%以上であることを確認した。詳細結果は表4に示す。

なお、確認した放電時間は、30年間の運用後の劣化を考慮しても放電時間を6時間維持できるものであった。

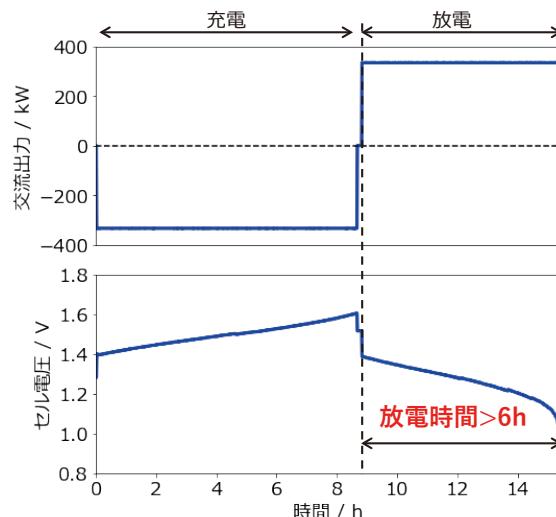


図10 新型RF電池システムの試作設備でのサイクル充放電試験結果

表4 新型RF電池システムの試作設備での放電時間とシステム効率

	目標値	測定結果
放電時間	6h以上	6h 31m 12s
システム効率	70%以上	70.7%

本試作設備では長期連続運転を行っており、想定を超える性能劣化がないこと、セルスタックを含めた各構成部材の信頼性が運用期間30年に対応できるものであることを引き続き検証していく。

6. 結 言

本論文では、高出力化、高エネルギー密度化、長寿命化を図った新型RF電池システムの開発状況とその設計について報告した。

これらの技術的成果を踏まえた今後の展望として、この新型RF電池システムは「V40シリーズ」として製品化し、2026年1月より受注を開始する予定である。初納入案件の竣工は2026年中を見込んでおり、再生可能エネルギーの更なる導入拡大と電力系統の品質維持に貢献していく。

用語集**※1 LDES**

(Long Duration Energy Storage: 長時間エネルギー貯蔵)
エネルギーを長時間（一般的に6または8時間以上）貯蔵し、必要に応じて放出するシステムの総称。

※2 システム効率

充電時に入力した電力量と放電時に取り出せる電力量の比率。PCS変換効率、補機動力によるロスも含む。

※3 電解液の理論エネルギー密度

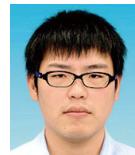
理想的な条件下で電解液1m³あたりに蓄えられる最大の電力量のこと。

※4 電気化学的なSOC

電気化学的なSOCはバナジウムイオンの反応率によって決まる「理論上の充電状態」。一方で制御上は、安全性や寿命を考慮して「実際の運用範囲内の充電状態」で示す。

執筆者

林 清明* : RF電池事業開発部 主席



内藤 恭裕 : RF電池事業開発部 主査



田口 大作 : RF電池事業開発部



寺岡 寛二 : RF電池事業開発部 グループ長



藤川 一洋 : RF電池事業開発部 グループ長
博士（エネルギー科学）



寒野 毅 : RF電池事業開発部 部長



*主執筆者

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁、再エネの安定化に役立つ「電力系統用蓄電池」
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/keitoyochikudenchi.html>
- (2) 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)
- (3) 内藤恭裕、「再生可能エネルギーを支えるレドックスフロー電池」、化学装置2024年10月号、pp 14-10 (September 2024)
- (4) 「地域新電力会社の蓄電所に8時間容量レドックスフロー電池システムを納入」、住友電工テクニカルレビュー第206号、pp 127-128 (January 2025)
- (5) D. Taguchi, K. Fujikawa, T. Kanno, K. Yamanishi, "Development and Modelling of a 300kW/2400kWh Vanadium Flow Battery," The International Flow Battery Forum, pp 130-131, Vienna, Austria (June 2025)
- (6) 田口大作、「レドックスフロー電池システム、およびレドックスフロー電池の運転方法」、WO 2025/192118 A1 (2025)
- (7) T. Kanno, K. Yamanishi, T. Ito, "Reliability Testing of Redox Flow Battery Cell Stacks," The International Flow Battery Forum, pp 66-67, Glasgow, Scotland (June 2024)
- (8) International Electrotechnical Commission, Flow battery energy systems for stationary applications – Part2-2: Safety requirements, IEC62932-2-2:2020