

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 その 220 蓄電池プログラムにおけるレドックスフロー電池システムへの対応

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEPS Systems, the BEST Part220 Adaptation to the Redox-Flow Battery System in the battery program

正会員 ○滝脇 悟 (大林組) 正会員 滝澤 総 (日建設計)
正会員 二宮 博史 (日建設計) 技術フェロー 柳原 隆司 (RY 環境・エネルギー設計)
名誉会員 村上 周三 (建築環境・省エネルギー機構)

Satoru TAKIWAKI*1 So TAKIZAWA*2 Hiroshi NINOMIYA*2

Ryuji YANAGIHARA*3 Shuzo MURAKAMI*4

*1 Obayashi Corporation *2 Nikken Sekkei Ltd *3 R. Y. Environment & Energy Design

*4 Institute for Building Environment and Energy Conservation

This paper outlines an application of Simulation Tool "BEST" using a newly created Redox-Flow battery program. Also, the simulation result of "BEST" is compared with the measured operation data of Redox-Flow battery system.

1. はじめに

BEST (以下「本ツール」) 蓄熱・蓄電等システム検討 WG (以下「WG」) では、BCP 対応等の目的で普及の期待が高まっている蓄電池システムを対象としたプログラム開発を進めている¹⁾²⁾³⁾。具体的には、対象蓄電池種別の拡大、計算に必要なパラメータの精査・設定、計算方法の整理とプログラムの検証を行ってきた。一方で、蓄電池システムの建物での運用実績は少ないのが現状であり、今後さらに普及させるには、プログラムで活用できる蓄電池種別の選択肢は多種あることが望ましい。また、本ツールで得られる計算値と実測データを比較し、計算精度を検証しておくことは、蓄電池システムの有効活用のために極めて重要である。

本報では、蓄電池種別として新たにレドックスフロー電池 (以下「RF 電池」) の特性を加味した本ツールの蓄電池プログラムを構築したので、その概要を紹介する。また、本ツールの計算値と実測データを比較することで、計算精度を定量的に検証し、その計算手法の有効性を評価した。

2. 蓄電池プログラムの概要

本ツールの蓄電池プログラムで計算可能な蓄電池は、これまでリチウムイオン電池、NAS 電池、鉛蓄電池であったが、今回新たに RF 電池の計算を可能とした。また、放電制御方式としては、ピークカット制御、ピークシフト制御があり、本報告ではピークシフト制御を使用し、充放電の時間帯や充放電電力値のパターンを設定して制御した。

3. 検討対象 RF 電池システムの概要

3.1 設備諸元

本報では、大林組技術研究所 (以下「対象施設」) に実装 (2015 年運用開始) している RF 電池を検討対象設備とした。RF 電池は、正負極の電解液にバナジウム水溶液を用いた電解液流通型の蓄電池であり、バナジウムイオンの価数変化により充放電を行う。そのため、電解液は原理的に半永久的に利用可能、などの特徴がある。単線結線図の概要を図-1 に、主要設計諸元を表-1 に示す。定格蓄電池容量の定義は、図-1 の系統側交流端電力量計 (Wh1) 付近における連続放電電力量、すなわち需要家が RF 電池から負荷のために使用できる連続電力量の保証値である。電解液ポンプはセル電流値及びセル電圧値を基に可変速段階制御を行っている。また、電解液加温ヒーターはタンク表面温度を、熱交換器ファンは電解液温度を検知して ON/OFF 制御を行っている。

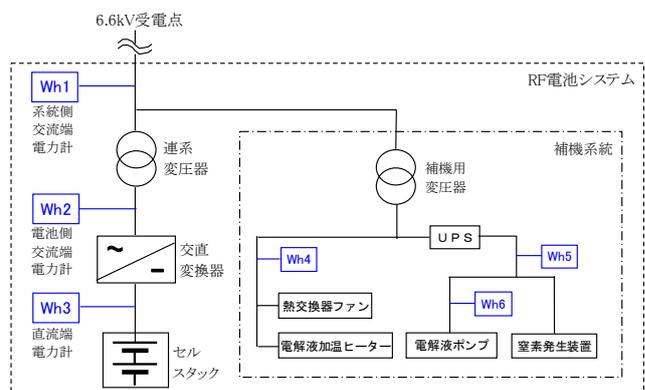


図-1 RF 電池システムの単線結線図概要

表-1 RF 電池システムの主要設計諸元

項目	諸元
定格蓄電池容量	3,000kWh
定格放電容量	500kW
PCS定格容量	600kW
PCS定格容量効率	95%以上 (交流端電力が500kW時)
電解液ポンプ	60kW (7.5kW×8台)
電解液加温ヒーター	13.2kW (1.65kW×8台) (20°Cの時)
熱交換器ファン	12kW (0.75kW×4台×4面)

※温度により消費電力が変化

3.2 RF 電池システムの運用方法

対象施設では、太陽光発電設備やRF 電池などの分散型電源を実装し、スマートエネルギーシステムによる最適制御にて運用を行っているが、本報では本ツール計算値との比較検証が容易なことから、最適制御とは切り離れたRF 電池の満充放電試験時の実測データを用いて検証を行った。

満充放電試験は、あらかじめ放電末の状態にしたRF 電池に、満充電になるまで定格電力で充電させ、満充電になれば次は、放電末になるまで定格電力で放電させて、電池の性能などを確認する試験である。なお、試験における満充電及び放電末の判定は、蓄電池残量 (以下「SOC」) の運用範囲 (0~100%) を超えて、運用可能なセル電圧値の範囲で判定している。

4. 本ツールでの計算条件設定

4.1 制御方式及び、充放電運用方法

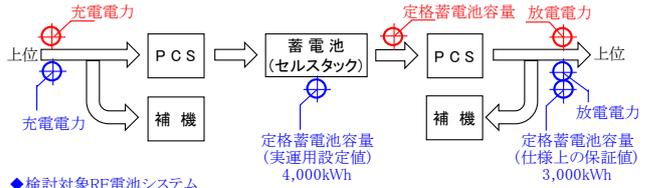
RF 電池の充放電運用方法はピークシフト制御とし、3.2節で述べた満充放電試験の運用方法を、充放電電力時刻変動スケジュール機能を使ってできるだけ忠実に入力して反映させた。

4.2 主要設備の計算条件設定

定格蓄電池容量と充放電電力の定義を図-2に示す。また、本ツールでの計算条件・設定値を表-2に示す。図-2に示すように、本ツール蓄電池プログラムと検討対象RF 電池システムでは、項目によっては定義が異なる。従って、定義の違いを考慮して設定値を算定した。具体的には、定格蓄電池容量は、実運用設定値である4,000kWhに蓄電池効率0.82の平方根を乗じた3,622kWhに設定した。

補機の計算条件設定は、従来のプログラムは、充電時は「その他 (補機等) の効率」、待機時は「待機時の効率」として充放電電力に対して一律の係数を入力するものである (係数法)。しかしながら、RF 電池の主な補機である電解液ポンプは可変速段階制御であり、また電解液加温ヒーターと熱交換器ファンは電解液温度に応じたON/OFF 制御であるため、現状のプログラムで補機電力を忠実に表現することが難しい。そこで、RF 電池専用のモジュールを別に作成し、できるだけ実機に近い特性となるよう補機電力の算出方法を整理した (補機積み上げ法)。詳細は次項4.3に示す。

◆BEST蓄電池プログラム



◆検討対象RF電池システム

図-2 定格蓄電池容量と充放電電力の定義

表-2 本ツール蓄電池プログラムの主要な計算条件・設定値

項目	計算条件・設定値
制御方式	ピークシフト制御
充放電電力	実測データを入力
定格蓄電池容量	3,622kWh
定格放電電力	500kW
PCS効率	充電時：0.95 放電時：0.95
蓄電池効率	充電時：0.82 放電時：-

4.3 RF 電池の補機積み上げ法による計算条件設定

各補機電力算出式に用いる係数名称及びその設定値を表-3に示す。これらの設定値は、実測データと計算値が一致するように調整しながら計算を試行し、最終的に後述の5.に示した計算結果を得るために設定した値である。

(1) 電解液ポンプ

導入している電解液ポンプは、可変速段階制御を行っている。具体的には、充放電時におけるセル電流値、及び (モニタ用) セル電圧値に応じてポンプ速度を変化させている。セル電流値は、充放電電力値でおおよそ置き換えが可能である。また、セル電圧値はSOCに置き換えが可能である。従って、電解液ポンプの補機電力算出には、充放電電力とSOCの二種類の変数を用いた数式とした。また、定格放電電力値を基に、電解液ポンプの補機電力最小値と最大値を算定した。

- 充電時：SOC < SOC 閾値、放電時：SOC > SOC 閾値の場合

電解液ポンプ電力 = 定格放電電力

$$\times \text{ポンプ最小係数} \quad (1)$$

- 充電時：SOC ≥ SOC 閾値、放電時：SOC ≤ SOC 閾値の場合

電解液ポンプ電力 = 定格放電電力 × ポンプ最小係数

$$+ (| \text{SOC} - \text{SOC 閾値} |$$

$$\times (\text{充放電電力} / \text{定格放電電力}) \times \text{傾き係数}$$

(但し、電解液ポンプ電力 ≤ 定格放電電力

$$\times \text{ポンプ最大係数}) \quad (2)$$

(2) 電解液加温ヒーター

電解液加温ヒーター電力は、定格蓄電池容量に比例させ、また外気温度によって係数を変化させた。外気温度には、気象庁の気象データ (所沢) を使用した。また、充電時はポンプ動力の熱量により電解液温度が上昇することからRF 電池の稼働率[%]に応じた稼働率係数を取り入

れた。

$$\text{電解液加温ヒーター電力} = \text{定格蓄電池容量} \times \text{負荷係数} \times \text{稼働率係数} \times \text{気温係数} \quad (3)$$

(3) 熱交換器ファン

熱交換器ファンは、充放電電力に比例させ、外気温度によって係数を変化させた。

$$\text{熱交換器ファン電力} = \text{充放電電力} \times \text{負荷係数} \times \text{気温係数} \quad (4)$$

(4) その他制御機器

その他制御機器は、運転停止に関係なく常時かつほぼ一定の電力を使用するものであり、UPS 電源や窒素発生装置、制御電源などがある。その中でも UPS 電源の割合が最も大きいため、定格放電電力に比例させる算出方法とした。

$$\text{その他制御機器電力} = \text{定格放電電力} \times \text{負荷係数} \quad (5)$$

表-3 各補機電力算出式における係数、参考値

項目	係数	設定値
電解液ポンプ	SOC閾値	放電時：50, 充電時：55
	ポンプ最小係数	放電時：0.028, 充電時：0.01
	ポンプ最大係数	0.066
	傾き係数	放電時：0.42, 充電時：7.6
電解液加温ヒーター	稼働率係数	1 (60%以下：1, 60~80%：0.5, 80%以上：0)
	気温係数	7.5°C未満：1, 7.5°C~15°C：0.5, 15°C以上：0
	負荷係数	0.0034
熱交換器ファン	気温係数	20°C未満：0.5, 20°C~30°C：0.75, 30°C以上：0.9
	負荷係数	0.012
その他制御機器	負荷係数	0.012

5. 実測データと本ツール計算値の比較

5.1 RF 電池の充放電状況

(1) 実測データ

図-3 に 2016/10/18/18:00~10/19/18:00 までの対象施設の実測データグラフを示す。但し、需要電力は対象施設の需要電力から太陽光発電電力分を差し引いて求めたものであり、受電電力もその求めた需要電力に対してのものである。18 日 18:00 時点は放電末の状態、SOC は約-11%である。20:30 頃からは 500kW(定格充電電力)で充電を開始し、19 日 7:20 頃に SOC が 100%となって充電を停止した。8:40 頃からは 500kW で放電を開始し、16:00 頃に SOC が約-11%となって放電を停止した。実運用では、SOC を 0%~100%の範囲で使用しているが、満充放電試験は-11%~100%の範囲であり、実運用では 10%程度の余力を残して運用していることになる。

(2) 本ツール計算値

図-4 に図-3 と同じ期間の本ツール計算値グラフを示す。18 日 18:00 時点での初期 SOC は実測データと同等の-11%に設定している。充電完了時の SOC は 99%で、蓄電池へ実測データと同等の充電ができた。実測データも本ツール計算値も共に、10/19/7:00 付近の高 SOC 時は定格充電電力では充電されず、充電電力が線形的に徐々に減少しているが、今回は満充放電試験で得られた充放電パターンを、そのまま充放電スケジュールとして本ツール

に入力している。従って、充放電指令値のみを本ツールに入力した場合は、SOC が 100%となるまで定格充電電力での充電を継続するため、本ツール計算値は実測データと異なる結果となることが想定される。

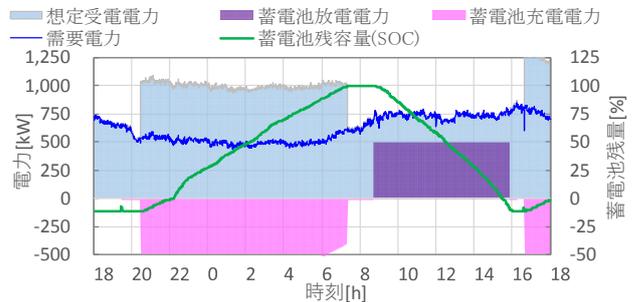


図-3 需要電力と供給電力 (実測データ)

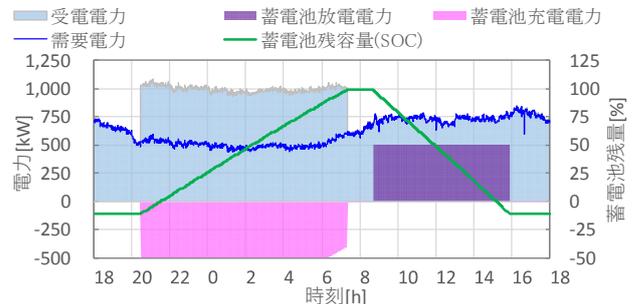


図-4 需要電力と供給電力 (本ツール計算値)

5.2 補機電力

図-5 に実測データと本ツール計算値の補機電力グラフを示す。実測データは、充電時も放電時も大まかな形状として階段状に増加している。これは、前項 4.3 (1) で述べた通り、電解液ポンプの可変速段階制御によるものである。一方本ツールでは、階段状ではなく、ある傾きを持つ線形で表されている。これは、電力を増加させる算出手法を、式 (1), (2) の一次関数式にて定義しているためである。実測データとは異なる形状となるものの、電流値と電圧値の二種類の変数によって変化する補機電力を、マトリックスを用いて算定するよりも、大きな傾向として数式化の方が、汎用性を持ち、仕様変更に対応できる。

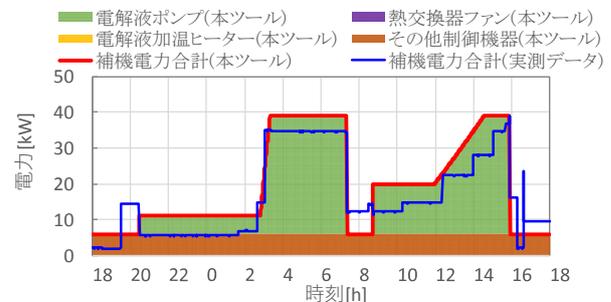


図-5 補機電力 (本ツール計算値・実測データ)

5.3 電力量及び効率

表-4 におおよそ 20:30~翌日 16:00 までの実測データと本ツール計算値の電力量及び効率を示す。表中の実測データの充電電力量と放電電力量は図-1 の Wh1 と Wh2

の計測点における積算値を示し、補機電力量は Wh4 と Wh5 の合算値である。本ツール計算値も、Wh1 と Wh2 の計測箇所を想定して計算した。実測データと本ツール計算値を比較すると、補機なし効率、及びシステム効率はおよそ同等となった。補機電力量は、本ツール計算値の方が大きい。実測データの補機電力には、図-1 に示すように補機用変圧器、及びUPS の損失などが含まれない。本ツール計算値ではそれらを考慮し、Wh1 想定でのシステム効率が同等となるように補機電力を増加させ調整した。

表-4 実測データと本ツール計算値の電力量及び効率

No.	項目	実測データ		本ツール計算値	
		Wh1	Wh2	Wh1想定	Wh2想定
①	充電電力量[kWh]	5,327	5,065	5,333	5,085
②	放電電力量[kWh]	3,567	3,748	3,575	3,767
③	充電時補機電力量[kWh]	上記に含む	209*	上記に含む	248
④	放電時補機電力量[kWh]	上記に含む	147*	上記に含む	192
⑤	補機なし効率[%](②/①)	-	74.00	-	74.07
⑥	システム効率[%](②-④)/(①+③)	66.96	(68.28)	67.04	(67.04)

*実測データ(Wh2)の③,④は、Wh4+Wh5にて算出

5.4 電解液加温ヒーター電力

前項の検証において、電解液加温ヒーターは、実測データも本ツール計算値もほとんど稼働せず、比較としては同等と考えられる。しかしながら、電解液加温ヒーターは、冬期に稼働率の低い運用が行われる場合には、システム効率に大きな影響を及ぼす場合がある。そこで、前述までとは別の電解液加温ヒーターの稼働実績がある期間について、検証を行った。

図-6 に、2017/11/6~12/3 における 4 週間の外気温度と電解液加温ヒーター電力の関係グラフを示す。なお、実測データの電解液加温ヒーター電力は、図-1 の Wh4 の計測値であり、熱交換器ファンとの合算値であるが、冬期であるため、熱交換器ファンの稼働は原則ないと想定される。実測データも本ツール計算値も、外気温度の近似曲線とは、ある程度の相関性が見られるものの、電力値の形状には乖離が見られる。表-5 に電解液加温ヒーターの電力量比較を示す。11 月第 1 週と第 4 週の電力量は本ツール計算値の方が大きいですが、第 2 週と第 3 週は実測データの方が大きくなり、一貫性は見られないが、4 週間の合計電力量での比較では、誤差 0.6% とほぼ同等となった。

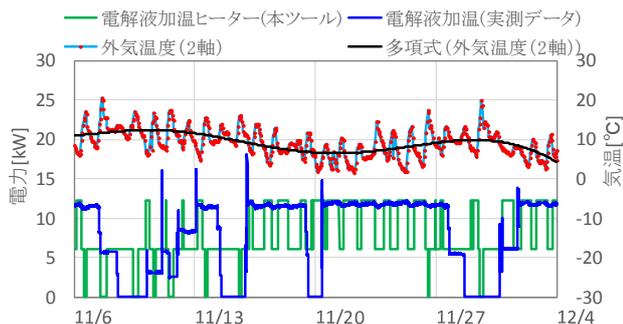


図-6 電解液加温ヒーター電力(本ツール計算値・実測データ)

表-5 実測データと本ツール計算値の電解液加温ヒーター比較

期間	電解液加温ヒーター		誤差率
	①実測データ	②本ツール計算値	
	kWh	kWh	%
11月第1週 (11/ 6~11/12)	895	942	5.3
11月第2週 (11/13~11/19)	1,368	1,287	-5.9
11月第3週 (11/20~11/26)	1,868	1,656	-11.3
11月第4週 (11/27~12/ 3)	1,112	1,392	25.2
計	5,243	5,277	0.6

6. まとめ

本報では、新たに構築した RF 電池の特性を加味した補機積み上げ法による BEST の蓄電池プログラムについて紹介した。また計算値と実測データを比較することで、計算精度を定量的に検証し、その計算手法の有効性を評価した。今後も、プログラムのさらなる普及に向けて、WG で継続して検討を行っていく。

【謝辞】

本報は、(一財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」「BEST 企画委員会(村上周三委員長)」及びプログラム開発委員会(石野久彌委員長、蓄熱・蓄電等システム検討 WG(柳原隆司主査)の活動成果の一部であり、関係各位に謝辞を表すものである。蓄熱・蓄電等システム検討 WG(蓄電池) 名簿(順不同)主査:柳原隆司(RY 環境・エネルギー設計)、委員:西村英樹(ヒートポンプ・蓄熱センター)、滝澤 総、二宮博史(以上、日建設計)、小林 浩(トーエネット)、良知秀樹(東京エナジーパートナー)、斗野綱士(日本ガイシ)、杉澤紀幸(中部電力)、松下 傑(NTT ファシリティアーズ)、阿部 実(関電工)、田村龍一、滝脇 悟(大林組)、岩村 豊(住友電気工業)、事務局:生稲清久(建築環境・省エネルギー機構)、一松涼平、菅谷善昌、三ツ峰吉樹(ヒートポンプ・蓄熱センター)

参考文献

- 1) 滝澤, 村上, 柳原, 二宮, 大西:「外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その140)蓄電池プログラムの改良」, 平成26年空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 OS-11 (2014)
- 2) 小林, 滝澤, 二宮, 柳原, 村上:「外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その185)太陽電池と蓄電池の組合せによるピーク電力の削減の検討」, 平成28年空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 OS-36 (2016)
- 3) 小林, 滝澤, 小沢, 二宮, 柳原, 村上:「外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その205)蓄電池プログラムの活用」, 平成29年空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 OS-29 (2017)
- 4) 気象庁 Web サイト: <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>