

令和元年6月18日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06233

研究課題名(和文) リチウムイオン電池の詳細発熱計算と電池モジュールの発熱を考慮したシミュレータ構築

研究課題名(英文) Detailed Heat Generation Estimation of Lithium-ion Battery and Development of Simulator for Its Module Considering Heat Generation

研究代表者

乾 義尚 (INUI, Yoshitaka)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：70168425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：電力用の蓄電池としてリチウムイオン電池モジュールの能力を最大限に引き出すためには、その高精度な動作特性シミュレータが必要不可欠である。リチウムイオン電池モジュールは、充放電時の発熱により顕著な温度上昇が発生し、しかもその温度上昇により特性が変化してしまう。従って、電池モジュールのシミュレータ構築には、電池の発熱量の正確な推定手法の確立が必要不可欠である。本研究では、リチウムイオン電池充放電時の発熱量の高精度な推定が可能な新しい詳細発熱計算手法を開発し、それを電池の温度上昇と電圧過渡応答の解析プログラムと組み合わせて、電池モジュールの発熱と温度上昇を考慮した動作特性シミュレータを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、リチウムイオン電池の等価回路に基づく詳細発熱推定手法を確立し、それを考慮した電池モジュールの動作特性シミュレータを構築するという、オリジナルなアイデアに基づくものであり、このような研究は国内外を問わずこれまでに行われたことがない。さらに、本研究の成果は、リチウムイオン電池のユーザサイドの技術者が待ち望んでいるものであり、電池モジュールを組み込んだ次世代自動車や電力調整設備の本格的な普及に非常に大きなインパクトを与えるものと考えられる。従って、本研究は、非常に重要であるにもかかわらず、世界的に見ても類を見ない研究であり、それが本研究の学術的かつ社会的な意義である。

研究成果の概要(英文)：To maximally extract the capability of lithium-ion battery modules for large power storage, a precise simulator of their performance characteristics is indispensable. The temperature of the modules significantly rises by the heat generation during their charge/discharge. In addition, this temperature rise varies their performance. To realize a simulator of lithium-ion battery modules, therefore, some accurate estimation method of their heat generation is necessary. In the present study, at first a detailed estimation method of the heat generation in lithium-ion batteries during their charge/discharge was newly proposed and established, and then a high-precision simulator of the performance characteristics of the battery modules was successfully provided by combining the simulation programs of both the temperature rise and transient voltage response of the battery modules with this new estimation method.

研究分野：電力工学

キーワード：リチウムイオン電池 発熱推定 交流インピーダンス特性 等価回路 電池モジュール 温度上昇

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

リチウムイオン電池は、既に実用化され、パソコンや携帯電話等の携帯用電子機器の電源として広く普及している。さらに、この電池は、高起電力かつ高エネルギー密度という利点をいかして、モジュール化（集積化）して、次世代自動車（プラグインハイブリッド自動車、電気自動車、等）の電動機駆動用や自然エネルギー発電（太陽光発電、風力発電、等）の電力調整（出力変動補償と電力貯蔵）用の蓄電池としても広く用いられるようになってきている。このリチウムイオン電池モジュールを電動機駆動用や電力調整用の蓄電池としてその能力を最大限に引き出すためには、その高精度な動作特性シミュレータが必要不可欠である。

リチウムイオン電池は、高エネルギー密度であるため、その電池モジュールには充放電時の発熱により顕著な温度上昇が発生し、しかもその温度上昇により電池モジュールの特性が変化してしまう。従って、電池モジュールの高精度な動作特性シミュレータを構築するためには、電池の発熱量の正確な推定と温度上昇の計算手法の確立が必要不可欠である。

研究代表者は、リチウムイオン電池の電圧や電流の過渡応答のシミュレーションを目指した研究を進めてきた。その結果として、単電池の交流インピーダンス特性を測定し、その測定結果に基づいて、起電力、抵抗、キャパシタおよびインダクタよりなる電池の等価回路を決定し、得られた等価回路を用いて単電池の電圧過渡応答を正確に計算する過渡応答シミュレータの開発に成功している。

上述のリチウムイオン電池の等価回路パラメータは温度により大幅に変化するため、その温度上昇の原因となる発熱量の正確な推定は、電池モジュールの高精度な動作特性シミュレータの構築のために必要不可欠である。このことを考慮して、研究代表者は、リチウムイオン電池充放電時の発熱量の推定に関する研究も行ってきており、これまでにその等価内部抵抗のみを考慮した簡易発熱計算手法を提案し、それを用いた温度上昇解析を行い、電池の全容量の充放電に1~2時間かかるような低レートでかつ定電流での充放電の場合には、推定結果は実測結果とほぼ一致することを確認している。

しかし、その後の研究で、パルス的な短周期充放電を繰り返すような場合には、簡易発熱計算手法は推定精度が不十分であることが分かった。また、単電池のみで電池モジュールは取り扱っておらず、電池の劣化が発熱量に及ぼす影響も考慮していなかった。研究代表者は、最近の過渡応答に関する研究の過程で、等価内部抵抗のみを考慮する簡易発熱計算手法でパルス充放電時の推定精度が不十分なのは電池内に存在する等価キャパシタによる過渡応答を考慮していないからではないかということに思い至った。

### 2. 研究の目的

まず、リチウムイオン電池の発熱量の高精度な推定が可能な新しい詳細発熱計算手法を開発する。次に、以前の研究で開発済みの単電池の過渡応答シミュレータをその詳細発熱計算手法と複合し発展させて、電池モジュールの発熱とそれによる温度上昇を考慮した動作特性シミュレータを構築し、その妥当性を確認する。具体的には下記の研究を行う。

- ① 単電池を対象として、パルス充放電時においても発熱量の高精度な推定が可能な等価回路を利用した電池の新しい詳細発熱計算手法を開発し、さらに種々の充放電条件の場合について熱量計を用いた測定結果との比較・検討を行うことにより、提案手法の妥当性を確認する。
- ② 上記の詳細発熱計算手法を用いて単電池の温度解析コードを作成し、既に開発済みの過渡応答シミュレータと組み合わせて単電池の発熱と温度上昇を考慮した動作特性シミュレータを構築し、実験結果との比較・検討を行うことにより本シミュレータの妥当性を確認する。
- ③ 上記で構築した単電池の発熱を考慮した動作特性シミュレータを拡張・発展させて、電池モジュールを取り扱えるようにする。さらに、電池モジュールに対して過渡応答と温度上昇を測定し、実験結果との比較・検討を行うことにより本シミュレータの妥当性を確認する。

### 3. 研究の方法

本研究は、2016~2018年度の3年間で実施し、上述の研究目的に記した①~③の研究を、それぞれに1年ずつをかけて、概ねその順の年次進行で遂行した。各年度の具体的な研究方法は下記の通りである。

- ① 等価回路を利用したリチウムイオン単電池の詳細発熱計算手法の開発とその妥当性の確認（2016年度）
  1. 単電池の発熱量の高精度な推定が可能な等価回路を利用した詳細発熱計算手法の開発
  2. 熱量計を用いた測定結果との比較・検討による提案詳細発熱計算手法の妥当性の確認
- ② リチウムイオン単電池の発熱を考慮した動作特性シミュレータの構築とその妥当性の確認（2017年度）
  1. 詳細発熱計算手法を組み込んだ単電池の発熱を考慮した動作特性シミュレータの構築
  2. 実験結果との比較・検討による発熱を考慮した単電池用シミュレータの妥当性の確認
- ③ リチウムイオン電池モジュールに対する動作特性シミュレータの構築とその妥当性の確認（2018年度）
  1. 単電池用シミュレータの拡張・発展によるモジュール用動作特性シミュレータの構築
  2. 実験結果との比較・検討によるモジュール用の動作特性シミュレータの妥当性の確認

#### 4. 研究成果

本研究で得られた各年度の研究成果は、下記の通りである。

(1) 2016年度は、等価回路を利用したリチウムイオン単電池の詳細発熱計算手法の開発とその妥当性の確認を行った。

本研究では、新たに開発した詳細発熱推定手法と従来の簡易発熱推定手法により発熱量を推定し、さらに実測結果との比較・検討を行う供試電池として、ビデオカメラ用バッテリーパック（ソニーNP-F970）に使用されている18650タイプの円筒型リチウムイオン電池（直径18 mm、高さ65 mm、公称電圧3.6 V、公称容量2.2 Ah）をサイクル劣化させた電池を使用した。

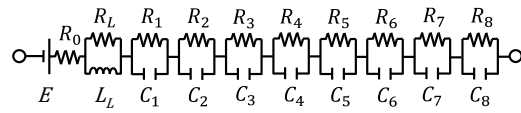


図1 本研究で採用した電池の内部等価回路

本研究で開発したリチウムイオン電池の発熱量の詳細推定手法では、内部等価回路として電池の交流インピーダンス特性を考慮した詳細なものを採用している。この等価回路は、電池の交流インピーダンス特性を測定し、過電圧の過渡応答を線形と仮定して、交流インピーダンス特性がその測定値とできるだけ一致するように構築する。そして、その内部等価回路に含まれる全ての抵抗成分によるジュール熱の総和を計算することにより、過電圧による発熱量を推定する。具体的な推定手順は、① 交流インピーダンス特性の測定、② 内部等価回路の回路定数の同定、③ 過電圧の過渡応答の計算、④ 発熱量の計算である。本研究で採用したリチウムイオン電池の詳細な内部等価回路を図1に、電池の交流インピーダンス特性の測定結果例とそれの等価回路へのフィッティング結果を図2に示す。

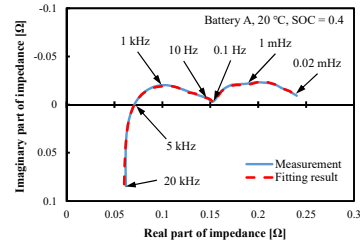


図2 交流インピーダンス特性の測定結果例とそのフィッティング結果

詳細発熱推定手法による推定結果と、簡易発熱推定手法による推定結果および熱量計による実測結果の比較例として、電池温度が20°C一定の条件で、0.5 C一定電流の充電後放電、同電流の放電後充電、+1.0/-0.5 Cパルス電流の双極充電後放電、同電流の双極放電後充電および±1.0 Cパルス電流の反復充放電を行った場合を

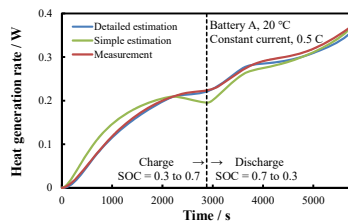


図3 定電流充電後放電時の結果

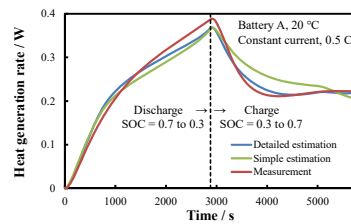


図4 定電流放電後充電時の結果

図3～図7に示す。これらの図より、リチウムイオン電池の発熱量の推定に関して、簡易発熱推定手法は、定電流充放電にのみ実用上問題のない精度で適用可能で、パルス電流充放電には適用できないことが分かる。一方、詳細発熱推定手法は、どちらの電流パターンに対しても十分な精度で適用可能で、電流パターンを選ばない汎用性を有していることが分かる。これらの結果より、詳細発熱推定手法の妥当性と必要性を確認することができた。

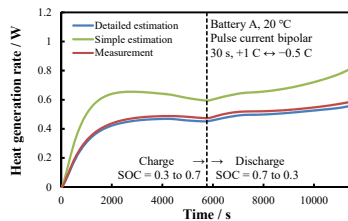


図5 パルス電流双極充電後放電時の結果

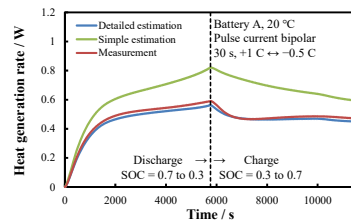


図6 パルス電流双極放電後充電時の結果

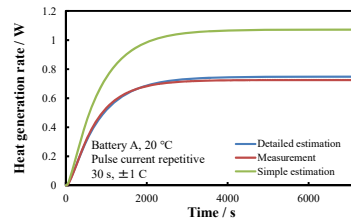


図7 パルス電流反復充放電時の結果

(2) 2017年度は、リチウムイオン単電池の発熱を考慮した動作特性シミュレータの構築とその妥当性の確認を行った。

図8に供試リチウムイオン電池の交流インピーダンス特性の温度依存性を示すが、この図より、電池特性は温度により大幅に変化することが分かる。このことを考慮して、供試リチウムイオン電池の単電池を対象として、発熱による温度上昇とそれによる特性変化を考慮した電圧過渡応答をシミュレートすることができる。リチウムイオン単電池の動作特性シミュレータを構築した。なお、電池からの放熱は、自然対流熱伝達を仮定し、その条件での熱伝達係数を用いて計算した。

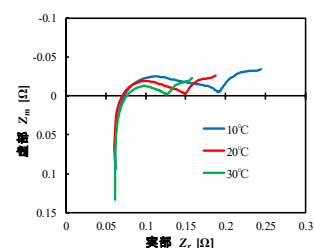


図8 交流インピーダンス特性の温度依存性

本シミュレータの構築にあたって、最初は、モデルを簡略化するために、単電池を温度が一樣な円柱と仮定した。電池の温度上昇と発熱量のシミュレーション結果と実測結果の比較例として、約 20°C の室温環境で単電池を水平に吊し、定電流 0.5 C 充電後 1.0 C 放電およびパルス ±0.7 C 反復充放電を行った場合を図 9 および図 10 に示す。また、電圧過渡応答のシミュレーション結果と実測結果の比較例として、パルス ±0.9 C 反復充放電による温度上昇後の場合を図 11 に示す。なお、これらの図中には、電池温度が初期値で一定と仮定して

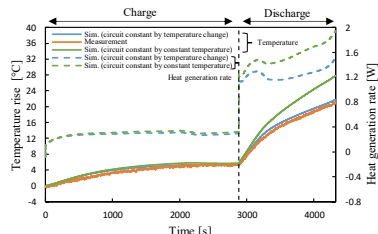


図 9 温度上昇と発熱量 (定電流充放電時)

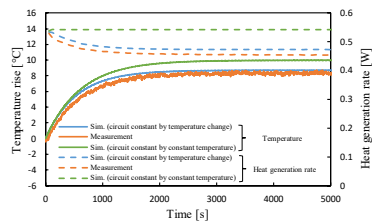


図 10 温度上昇と発熱量 (パルス充放電時)

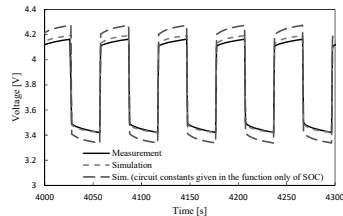


図 11 電圧過渡応答 (パルス充放電時)

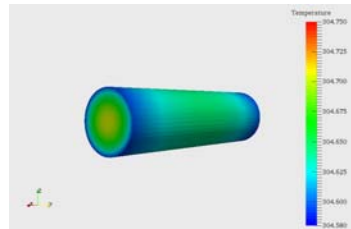


図 12 電池表面の温度分布例

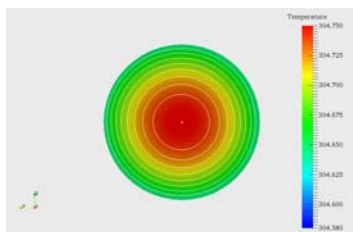


図 13 電池中央部横断面の温度分布例

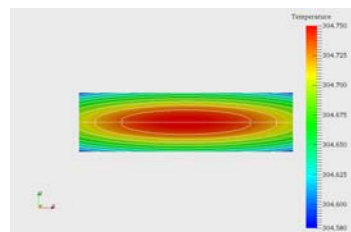


図 14 電池中央部縦断面の温度分布例

発熱量の計算を行った場合のシミュレーション結果も示している。これらの結果より、構築したシミュレータの妥当性および温度変化の考慮の必要性が確認できた。

次に、単電池内の温度分布の計算も行えるようにシミュレータを改良した。電池内部の温度分布の計算結果の一例として、±0.75 C 反復充放電による温度上昇後の場合を図 12～図 14 に示す。これらの図より電池内部の温度はほぼ一樣であり、上述の単電池を温度が一樣な円柱と仮定した簡略化モデルの妥当性が確認できた。

(3) 2018 年度は、リチウムイオン電池モジュールに対する動作特性シミュレータの構築とその妥当性の確認を行った。

電池モジュール用の動作特性シミュレータの構築にあたっては、前年度の結果を考慮して、モデルを簡略化するために、モジュール内の各単電池は温度が

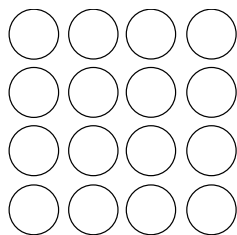


図 15 モジュール内の単電池の配置

一樣な円柱と仮定した。構築したシミュレータの適用例として、18650 タイプ円筒スパイラル型リチウムイオン電池である供試電池を 16 本縦置きにして 4 本×4 本の正方形に組んだ、図 15 に示すような電池モジュールの場合の、電池まわりの空間の温度分布のシミュレーション結果の一例を図 16 に、パルス ±0.75 C 反復充放電時の温度上昇後のモジュール電圧過渡応答のシミュレーション結果と実測結果の比較を図 17 に示す。なお、本電池モジュールでは、電池同士を接触させずに、電池間に 5 mm の間隔をあけた。また、本シミュレーションでは、モジュール内の電池配置の対称性を考慮して、計算領域は全体の 1/4 の部分とし、図 16 の温度分布はその対称面における分布 (対称面は 2 面あるが温度分布はどちらも同じ) である。電圧過渡応答のシミュレーション結果は実測結果とよく一致しており、構築したシミュレータの妥当性が確認できた。

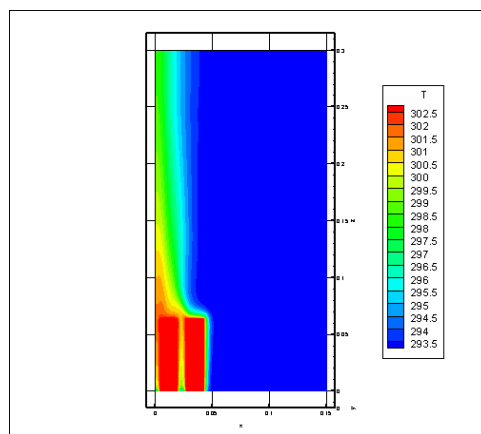


図 16 電池まわりの空間の温度分布の計算例 (モジュール対称面)

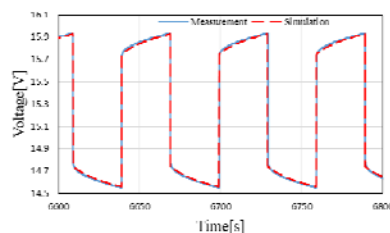


図 17 モジュール電圧の過渡応答

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 乾 義尚, 平山智士, 田中正志: 「リチウムイオン電池の充放電時発熱量の等価回路を用いた詳細推定手法」, 電気学会論文誌 B 分冊, 査読有, 139 巻, 10 号, 掲載決定 (2019)
- ② Y. Inui, S. Sakamoto, T. Tanaka: “Investigation of Degradation and Voltage Response of Lithium-ion Battery Based on Impedance and Electromotive Force Measurement”, Electrical Engineering in Japan, 査読有, Vol. 201, No. 3, pp. 14-24 (2017) DOI: 10.1002/ej.23011

〔学会発表〕(計23件)

- ① 藤本直嗣, 平山智士, 乾 義尚: 「詳細発熱法を組み込んだ伝熱解析による円筒形リチウムイオン電池の温度上昇量推定」, 第 35 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 6-4 (2019)
- ② 辻 聡秀, 平山智士, 乾 義尚, 田中正志: 「リチウムイオン電池の電荷移動インピーダンスの温度依存性推定法の提案」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-18-95・PSE-18-71 (2018)
- ③ 藤本直嗣, 平山智士, 乾 義尚: 「詳細発熱推定法を用いたリチウムイオン電池の温度上昇量の簡易解析」, 平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 183 (2018)
- ④ 辻 聡秀, 平山智士, 乾 義尚, 田中正志, 加藤彰訓: 「インバータを用いたリチウムイオン電池モジュールの簡易交流インピーダンス測定装置の製作」, 平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 188 (2018)
- ⑤ 辻 聡秀, 平山智士, 乾 義尚, 田中正志, 加藤彰訓: 「インバータを用いたリチウムイオン電池の簡易交流インピーダンス測定装置の設計と製作」, 電気学会新エネルギー・環境研究会資料, FTE-18-49 (2018)
- ⑥ 藤本直嗣, 平山智士, 乾 義尚: 「内部等価回路を用いたリチウムイオン電池の温度および電圧応答解析」, 電気学会新エネルギー・環境研究会資料, FTE-18-50 (2018)
- ⑦ 安藤僚人, 平山智士, 乾 義尚: 「定電流充放電におけるリチウムイオン電池モジュールの温度上昇特性」, 平成 30 年電気学会全国大会, 7-042 (2018)
- ⑧ 岩田直己, 田中正志, 乾 義尚: 「リチウムイオン電池と EDLC の HESS と単電池の高レート定電流充放電による劣化の比較」, 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 16-2 (2018)
- ⑨ 乾 義尚, 中村大樹, 平山智士, 伊藤大輔, 田中正志: 「等価回路に基づくリチウムイオン電池の電荷移動インピーダンスの温度依存性の検討」, 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 16-3 (2018)
- ⑩ 中村大樹, 平山智士, 伊藤大輔, 乾 義尚, 田中正志: 「劣化したリチウムイオン電池の電荷移動インピーダンスの温度依存性の検討」, 電気学会新エネルギー・環境研究会資料, FTE-17-23 (2017)
- ⑪ 安藤僚人, 平山智士, 伊藤大輔, 乾 義尚: 「パルス充放電時におけるリチウムイオン電池モジュールの温度上昇特性」, 電気学会新エネルギー・環境研究会資料, FTE-17-26 (2017)
- ⑫ 中村大樹, 伊藤大輔, 平山智士, 乾 義尚, 田中正志: 「リチウムイオン電池の電荷移動インピーダンスの温度依存性の検討」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 107 (2017)
- ⑬ 安藤僚人, 平山智士, 伊藤大輔, 乾 義尚: 「円筒型リチウムイオン電池のパルス充放電時における簡易温度上昇解析」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 110 (2017)
- ⑭ 中村大樹, 平山智士, 伊藤大輔, 乾 義尚, 田中正志: 「リチウムイオン電池の CPE を用いた等価回路とそれに基づく内部抵抗の温度依存性解析」, 平成 29 年電気学会全国大会, 7-040 (2017)
- ⑮ 安藤僚人, 平山智士, 伊藤大輔, 乾 義尚: 「リチウムイオン電池の充放電時の温度上昇量に関する基礎的検討」, 平成 29 年電気学会全国大会, 7-041 (2017)
- ⑯ 乾 義尚, 前田 諒, 中村大樹, 平山智士, 伊藤大輔, 田中正志: 「リチウムイオン電池の内部インピーダンスの温度および充電状態依存性の検討」, 第 33 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 1-2 (2017)
- ⑰ 岩田直己, 田中正志, 乾 義尚: 「リチウムイオン二次電池のパルス充放電サイクルと定電流充放電サイクルによる劣化比較」, 平成 28 年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会, IBK-16-015 (2016)
- ⑱ 中村大樹, 伊藤大輔, 平山智士, 乾 義尚, 坂本眞一, 田中正志, 加藤彰訓: 「インバータを用いたリチウムイオン電池の簡便な劣化評価回路の設計と製作」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-16-113・PSE-16-133 (2016)
- ⑲ 安藤僚人, 平山智士, 伊藤大輔, 乾 義尚, 坂本眞一, 田中正志: 「リチウムイオン電池の詳細発熱推定法の劣化電池への適用性の検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-16-114・PSE-16-134 (2016)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：田中 正志

ローマ字氏名：(TANAKA Tadashi)

所属研究機関名：茨城大学

部局名：理工学研究科（工学野）

職名：講師

研究者番号（8 桁）：40583985

研究分担者氏名：平山 智士

ローマ字氏名：(HIRAYAMA Satoshi)

所属研究機関名：滋賀県立大学

部局名：工学部

職名：助教

研究者番号（8 桁）：70759274

### (2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。