

信州大学審査学位論文

リチウムイオン電池を用いた大規模電池システム構築技術

2022年3月

総合工学系研究科 システム開発工学専攻

山内 晋

目次

第1章 序論	5
1.1 概説	5
1.2 リチウムイオン電池	10
1.2.1 リチウムイオン電池の原理	10
1.2.2 リチウムイオン電池の基本構造	11
1.3 リチウムイオン電池システム	13
1.3.1 リチウムイオン電池システムの構成	13
1.3.2 リチウムイオン電池の種類とシステム構成上の課題	15
1.4 本研究の目的および本論文の構成	17
1.4.1 本研究の目的	17
1.4.2 本論文の構成	20
第2章 大規模電池システム向けアーキテクチャの検討	28
2.1 緒言	28
2.2 電池システムの構成方法	28
2.2.1 概説	28
2.2.2 電池システム構成方法	28
2.2.3 接続方式の評価とビルディングブロック方式による電池システム構成方法	31
2.2.4 まとめ	36
2.3 電池システムの絶縁技術および絶縁低下時の検知技術	37
2.3.1 概説	37
2.3.2 電池システムおよびコントローラの絶縁方法	37
2.3.3 漏電検知方法	41
2.3.4 まとめ	43
2.4 大規模電池システムの管理方式	43
2.4.1 概説	43
2.4.2 一括管理方式と階層化管理方式の比較	44
2.4.3 階層化管理方式による大規模電池システムの制御方法	46
2.4.4 まとめ	47
2.5 結言	48
第3章 異種電池システムの設計技術の開発	49
3.1 緒言	49

3.2	異種電池システムの電気回路モデル	49
3.2.1	概説	49
3.2.2	電気回路モデルの概要	51
3.2.3	電気回路モデルによる解析の想定条件	54
3.2.4	まとめ	55
3.3	異種電池システムにおける電流配分の解析	55
3.3.1	概説	55
3.3.2	ステップ状の出力変化への挙動解析	56
3.3.3	放電、充電の切り替わり時の挙動解析	61
3.3.4	充放電を停止する際の挙動解析	64
3.3.5	まとめ	66
3.4	結言	68
第4章 大規模電池システムへの適用効果の検討		70
4.1	緒言	70
4.2	定置向け電池システムへの適用効果	70
4.2.1	概説	70
4.2.2	30kWh 電池システム構成	70
4.2.3	実験方法	77
4.2.3.1	実験項目	77
4.2.3.2	実験条件	78
4.2.4	実験結果と考察	79
4.2.4.1	基本動作および充放電試験結果	79
4.2.4.2	電池パックのスイッチ動作確認	86
4.2.4.3	電池システムの異常模擬試験結果	87
4.2.4.4	漏電検知回路の動作検証	89
4.2.5	まとめ	91
4.3	自動車向け電池システムへの適用効果	91
4.3.1	概説	91
4.3.2	システム構成	92
4.3.3	評価方法	93
4.3.3.1	シミュレーション条件および実験条件	93
4.3.4	評価結果および考察	96
4.3.4.1	シミュレーション評価の結果	96
4.3.4.2	実験結果	99
4.3.5	まとめ	105

4.4 結言	105
第5章 総括.....	107
本論文に関連する論文・発表.....	110
謝 辞.....	111

第1章 序論

1.1 概説

1780年イタリアの医師で生物学者ルイージ・ガルバーニが、カエルの足の神経に2種類の金属を触れさせると、足の筋肉が痙攣するのを発見し、1791年に「筋肉の動きによる電気之力」と題する論文を発表した。これが、電池の原理の発見とされている[1-2]。

図1に電池の発明の歴史を示す。1800年にイタリアの物理学者アレッサンドロ・ボルタは、異なる金属の接触に注目し、銅と亜鉛の板を希硫酸に浸した「ボルタ電池」を作成、電気を自在に発生させることに成功した。これが世界初の一次電池の発明である[3]。

1836年、イギリスの化学者・物理学者ジョン・フレデリック・ダニエルは、負極に亜鉛と硫酸亜鉛水溶液、正極に銅板と硫酸銅水溶液を用い、それぞれを素焼き板で仕切った電池「ダニエル電池」を作成、ボルタ電池の分極による電圧低下の問題点を改善し、歴史上初めて継続的に電気を得ることが可能な実用的な電池を発明した[4]。さらに1868年、フランスの電気技術者、ジョルジュ・ルクランシェが「ルクランシェ電池」を作成。この電池は、正極の周囲を二酸化マンガンを囲んだ炭素材、負極に亜鉛板、溶液はコーンスターチを混ぜた塩化アンモニウム水溶液のゲルで構成された。ルクランシェ電池は、液体を使用せず持ち運びが可能な現在の乾電池の原型となった[5-6]。一方でルクランシェ電池は、ガラス容器の重さや、発電能力維持のために電解液の補充および定期的な電極の清掃が必要であり、冬季は電解液が凍るという欠点があった[7]。それを解消したのが、ドイツのカール・ガスナーが1888年に作成した「ガスナー電池」である。ルクランシェ電池同様に、正極は二酸化マンガんと炭素、負極には亜鉛板を基本構成とし、電解液の塩化アンモニウムには石膏の粉末を混ぜて糊状にした。これにより、横にしても中の液体がこぼれない電池が完成し、「液体の漏れない乾いた電池」として「乾電池」と呼ばれることとなった[1、8]。ガスナーは1888年にドイツで世界初の乾電池に関する特許を取得した。同時期に日本でも、ルクランシェ電池の電解液が冬季に凍結し使用不可能になることから、液体を使わない乾電池の開発が進められ、屋井先蔵により正極の炭素棒にパラフィンを含浸することで解決する乾電池が1885年に開発され、1891年には高橋市三郎により国内で乾電池に関する最初の特許が取得された[9-10]。屋井はガスナーに先駆けて乾電池を開発したことから乾電池の創始者と呼ばれる場合もあるが、特許取得が遅れたために未公認となった。乾電池の発明と実用化により一次電池は技術的

に確立され、1947年にはアルカリ乾電池[11]、1976年にはリチウム電池が商品化され現在に至る[12]。

一方で二次電池の歴史は、一次電池「ボルタ電池」の発明に遅れること約60年、1859年フランス人の科学者ガストン・プランテにより、充電可能な鉛蓄電池が発明されたことから始まる[13]。二次電池の呼び名は、二次電池が発明された当時に継続的に発電可能な発電機が実用化されておらず充電のために一次電池が使用されたことから、電力の供給側を一次電池、そして供給される側を二次電池と呼んだことによる。その後、1899年スウェーデンの技術者ウォルデマール・ユングナーがニッケルカドミウム電池を発明した。この電池は、負極にカドミウム、正極に酸化ニッケルを用いており、電解液にアルカリ性の水酸化カリウムを用いていることからアルカリ二次電池とも呼ばれる。発明当初、充電末期に正極から発生する酸素ガスと負極から発生する水素ガスによる内圧上昇や電池の破裂が課題であったが、1940年代後半にフランスのノイマンによって考案された負極の量を正極よりも多くするなどの技術によって、水素ガス発生抑制、酸素ガスの効率よい吸収方法が確立し、電池の密閉化が実現した[14]。この密閉化されたニッケルカドミウム電池を日本ではニカド電池と呼称している。鉛蓄電池と比較して小型かつ軽量で、500回以上の充放電が可能な高信頼性と長寿命、急速充電が可能と多くの長所を持つニカド電池は、1960年代初頭に米国で商品化、携帯用電子機器など民生用として相次いで量産化され小型二次電池の幕開けの電池となった。しかし、イタイイタイ病などの公害被害によりカドミウムが有害物質の扱いを受け、環境問題の観点から敬遠されることとなる[15-17]。その後、1977年には、ニカド電池よりも高容量で、かつ有害物質のカドミウムを含まないアルカリ二次電池として、ニッケル水素電池がNASAにより人工衛星向けの電池システムとして実用化され、1990年に携帯用電子機器など民生用として量産化された。ニッケル水素電池は、1990年代の携帯電話、ノートパソコンなどの小型電子機器の普及の立役者の一つとなった[15、18]。そして、電子機器の更なる高性能化、多機能化の要求に応える電池として、1991年にソニー・エナジー・テック社によりリチウムイオン電池が世界で初めて量産化された。リチウムイオン電池は、正極にコバルト酸リチウムをはじめとするリチウムイオン含有遷移金属酸化物、負極に黒鉛等の炭素材料を用いて構成されており、反応種のリチウムイオンが正極と負極活物質間を移動する際の電気化学的反応で、電子が正負極間を移動して電気が流れることか

らロッキングチェア型の二次電池と呼ばれる[19]。1983年に旭化成社の吉野彰、米テキサス大のジョン・グッドイナフ、米ニューヨーク州立大のスタンリー・ウィッティンガムらによって、これらの材料構成により化学反応は一切伴わず、イオンと電子のみが関与し電池として機能することが発見され、従来の電池とは異なる作動原理を持つ新たな概念の二次電池として発明された[20]。2019年、3氏はリチウムイオン電池開発の功績により、ノーベル化学賞を受賞した。リチウムイオン電池は、電解液にリチウム塩を溶解した有機溶媒を使用した非水系二次電池であり、その作動電圧が約3.6Vとニカド電池やニッケル水素の約3倍であることから、高エネルギー密度を有する電池である。また、ロッキングチェア型電池は、陽イオンを伝導する機能さえ持てば良く、信頼性の観点などで電解質を必要最小限とし、電池系内を極力電極活物質で充填する設計が可能であり、高容量化に適した形式であることから、携帯機器のみならず、自動車や産業用機器向けへの利用も拡大している[19]。

ロッキングチェア型電池の発明以降、新たな概念の電池は発明されておらず、リチウムイオン電池は約240年に亘る電池技術発展の、現時点における最高到達点である。以降では、ここまでの電池の発明の歴史が、学術的かつ産業的に社会に与えた影響について述べる。

		1780	1800	1836	1859	1868	1888	1899	1947	1960	1971	1977	1991
電池の歴史	発見・発明	原理発見	一次電池発明	実用電池発明	二次電池発明	乾電池の原型発明	乾電池発明	アルカリ二次電池発明		携帯用二次電池発明			ロッキングチェア型二次電池発明
	電池種	ガルバニ電池	ボルタ電池	ダニエル電池	鉛蓄電池	ルクランシェ電池	マンガン乾電池	ニッケルカドミウム電池	アルカリ乾電池	ニカド電池	リチウム電池	ニッケル水素電池	リチウムイオン電池

図1 電池の発明の歴史

ボルタ電池の発明は、電気(電流)を自由に取り出すことを可能にし、発明初期の電池は実験装置の電源として使用された。電池を電源とした各種実験により、図2に示す電磁気学、電気化学上の重大な発見が次々となされた。1800年英国の化学者アンソニー・カーライルとウィリアム・ニコルソンが水の電気分解を行なったのを皮切りに、電気化学では、各種の金属の電解析出が見出された。1807年英国の化学者ハンフリー・デービーは、溶融酸化物の電気分解によりアルカリ金属を分離した[21-22]。そして1833年英国の化学者・物理学者マイケル・ファラデーが電気分解におけるFaradayの法則を見出

し、ここに電気化学の基礎が確立した[23、24]。一方、電磁気学の分野でも、1820年デンマークの化学者・物理学者ハンス・クリスチャン・エルステッドが電流の磁気作用を発見したのを皮切りに、1822年にはフランスの物理学者・数学者アンドレ＝マリ・アンペールがアンペールの法則、続いて1826年ドイツの物理学者ゲオルク・ジーモン・オームがオームの法則、さらに1831年、後に電気分解におけるFaradayの法則(1833)を発見したマイケル・ファラデーが電磁誘導の法則を発見した。その後、1834年ドイツの物理学者ハインリヒ・レンツがレンツの法則を発見、そして1864年英国の物理学者ジェームズ・クラーク・マクスウェルがマクスウェル方程式による電磁理論を完成、ここに電磁気学の基礎が確立し、電池によってこの二つの学問の基礎が築かれた[25]。

	1800	1807	1820	1822	1826	1830	1833	1834	1864
学術的影響	水の電気分解	アルカリ系金属の電気分解	電流の磁気作用	アンペールの法則	オームの法則	電磁誘導の法則	電池化学の基礎確立	レンツの法則	電磁気学の基礎確立

図2 電池の発明による学術的影響

産業的視点では、初めて電池の応用が検討された分野は通信分野である。図3に、電池の発明による産業分野への影響を示す。1831年英国の発明家ウィリアム・クックとチャールズ・ホイートストンが電磁式の電信機である五針式電信機を発明、1837年に実用化された。この際、電源にはダニエル電池が使用された[26]。1838年米国の画家・発明家のサミュエル・モールスがモールス式電信機を発明。ドット(・)とダッシュ(—)の符号の組み合わせにより1分間に10個の単語を送る実証試験に成功した。その後、1844年ワシントン～ボルチモア間のモールス信号による電信サービスが開始、通信サービス事業の幕開けとなった[27]。国内では、1894年の日清戦争において、陸軍の通信機用電源として乾電池が使用された。冬季の中国大陸でも安定的に動作したことから陸軍で重用され、第2次世界大戦終了まで継続的に使用された[10、28]。電池の携帯用機器への適用は、1888年ガスナーの乾電池の発明以降に本格化し、1899年に米国で乾電池を用いた携帯電灯の製造が開始された。一方、鉛蓄電池は、国内では1900年初頭から予備電源として普及、1920年代には国内での家庭用ラジオの普及に伴って製造が拡大した。[29]。

その後、乾電池が携帯電灯用および通信機用の電源として、鉛蓄電池が家庭用ラジオや予備電源としての使用が続き、1970 年以降ニカド電池が実用化されたことでトランシーバや電動工具など携帯型機器の普及が始まる。1983 年にソニー社から世界初のカメラ一体型ビデオレコーダ、1985 年には世界で初めてポータブルなラップトップ PC を東芝社が製品化、電源にはニカド電池が使用された[30、31]。さらに 1990 年、松下電池工業社、三洋電機社がニッケル水素電池を世界で初めて量産化、1991 年にはソニー・エナジー・テック社によりリチウムイオン電池が量産化、携帯電話、ノートパソコン、カムコーダー、デジカメ（デジタルスチルカメラ）などに代表される小型電子機器が本格普及する要因の一つとなった[16]。その後、ニッケル水素電池は、1997 年にトヨタ自動車社が世界で初めて量産化したハイブリッド自動車に適用、リチウムイオン電池は 2000 年に日産自動車社が世界で初めて量産化した小型 EV に適用され、現在に繋がる自動車の電動化の口火を切った。

	1837	1838	1844	1899	1920	1970	1983	1990	1997	2000
工業的 影響	電磁式 通信機 実用化	モールス 通信機 発明	通信 サービス 事業開始	携帯電灯 製造開始	家庭用 ラジオ 普及開始	トランシーバ ・電動工具 普及開始	ポータブル ビデオ・PC 製造開始	携帯電話 PC 普及開始	ハイブリッド 自動車 市販化開始	電気自動車 市販化開始

図 3 電池の発明による産業分野への影響

図 4 を用いて、リチウムイオン電池を中心に、国内の電池市場の動向について述べる。リチウムイオン電池は、1991 年の上市以降、1992 年にソニー社のビデオカメラに搭載されると、小型液晶テレビをはじめ家庭用 AV 機器や、携帯型パソコン、携帯電話端末、PHS（パーソナル・ハンディホン・システム）などの携帯情報機器に次々と採用され、1996 年には国内で小型二次電池の主流だったニッケル水素電池、ニカド電池の売上も上回り、1997 年には鉛蓄電池の売上も越え二次電池の主流となった[32]。さらに、リーマンショック後の 2009 年より、三菱自動車工業社の i-MieV、日産自動車社の LEAF、Tesla 社の Roadster などの EV 販売が開始、2011 年以降は、従来はニッケル水素電池が主流だった HEV 向けへのリチウムイオン電池の採用、さらには太陽光発電システムや風力発電システムに併設する電力貯蔵向け電池へのリチウムイオン電池の採用など、自動車および産業用途への本格適用が始まった[33-35]。

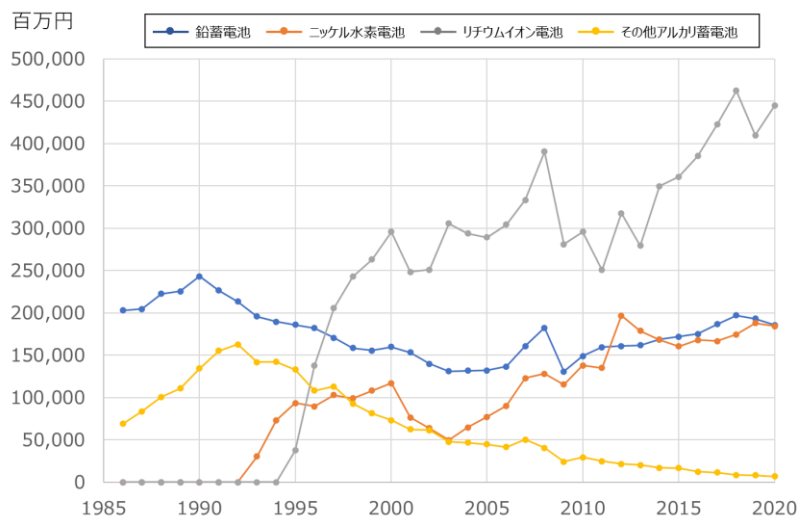


図 4 各種二次電池の国内市場動向

上述のように、電池は発明当初は電磁気学および電気化学の発展を支えるデバイスとして学術部門の発展に貢献し、その後、電池技術の革新に伴って通信サービスや携帯機器の小型化など、エレクトロニクス産業の発展に貢献してきた。その観点から、電池は現代の技術や産業を支える基礎技術およびデバイスであったと言える。さらに、今後の脱炭素化社会の進展に伴うモビリティの電動化や、再生可能エネルギーの主電源化によって、電池は単なるデバイスではなく、複数のリチウムイオン電池を組み合わせることで大規模な電力貯蔵システムを構築するなど、社会を支える重要なインフラと位置付けられており、その重要性は衰えるどころか今なお一段と高まっている。上記背景を鑑み、本研究は、リチウムイオン電池および、複数のリチウムイオン電池を組み合わせたリチウムイオン電池システムについて、システムを安全かつ効率的に運用可能とする電池システム構成のアーキテクチャと制御方法について検討したものである。

1.2 リチウムイオン電池

1.2.1 リチウムイオン電池の原理

リチウムイオン電池の原理を図 5 に示す。リチウムイオン電池は、反応種のリチウムイオンが正極、負極活物質に吸蔵されるインサージョン型の二次電池である。一般的には正極は集電体となるアルミ箔に、コバルト酸リチウムをはじめとするリチウムイオ

ン含有遷移金属酸化物を塗布し、負極には銅箔を集電体として炭素材料が活物質として用いられる。充電中には外部電源によって電子が正極から負極へ移動し、同時にリチウムイオンが正極活物質から放出されて負極活物質に吸蔵される。放電中には外部負荷を介して電子が負極から正極へ移動し、同時にリチウムイオンが負極活物質から放出されて正極活物質に吸蔵される。電解液には、リチウム塩を溶解した有機溶媒を使用しており、リチウムイオンはこの電解液を介して正負極間を移動する。また、正極と負極の短絡を防止するため、両極の間にはポリオレフィン製の多孔膜が使用されている [36-37]。また、近年では、可燃性の電解液を、不燃性の無機固体電解質に置き換えた安全性の高い全固体電池の開発も進められている [38]。

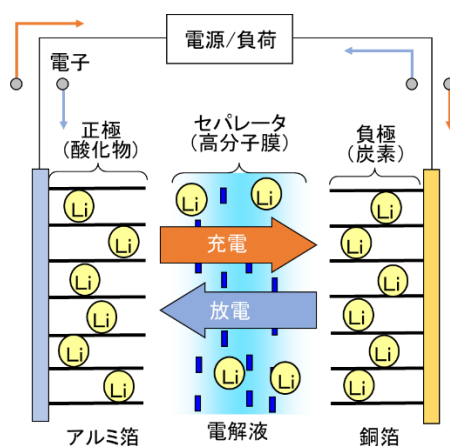


図 5 リチウムイオン電池の動作原理

1.2.2 リチウムイオン電池の基本構造

図 6 に円筒形をしたリチウムイオン電池を想定して、その構造を概説する。正極は薄いアルミ箔に正極材料が、負極には薄い銅箔に負極材料がコーティングされており、間にセパレーターを挟んだ三層構造を基本構成として、これを巻回状に丸めたものが電解液に浸され、筒の中に封入されている。

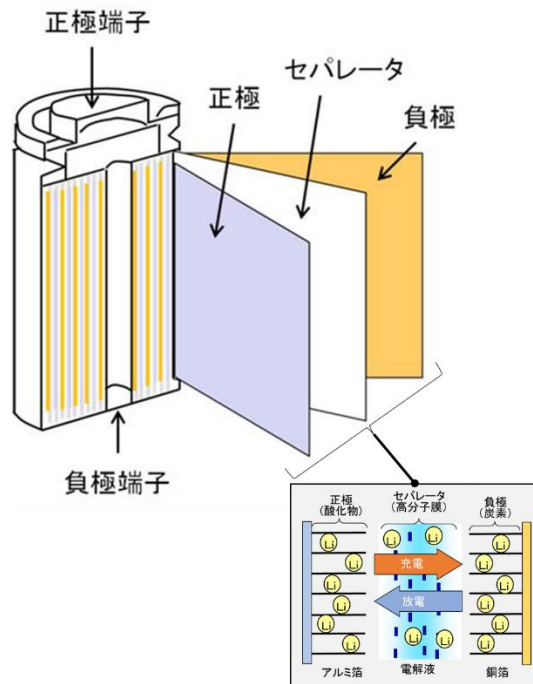


図 6 円筒形リチウムイオン電池の構造

リチウムイオン電池に使用されるリチウムは、非常に活性な金属で、水と激しく反応する。また電解液も有機溶媒であるため容易に発火・燃焼する。このため、リチウムイオン電池は、使い方を誤って過充電や過放電状態にしたり、電池への衝撃で発熱した場合や、或いは電池の定格電流以上の過電流が流れてしまうと電池が劣化するだけでなく、電池の発熱、発火、爆発を引き起こすなどの危険な面を持ち合わせている。その対策として、リチウムイオン電池は過充電や過放電などを防止する保護機構を組み込んだ形でしか使用できない機構を採っている。図 7 にリチウムイオン電池を使用する際の最小限の構成を示す。リチウムイオン電池は電池、保護 IC、充電電流/放電電流を電圧に変換して保護 IC で監視するための高精度な電流検出機能、保護 IC が異常を検出したときに保護 IC からの信号により電池の充放電電流を遮断するためのスイッチで構成されている。[39-40]。

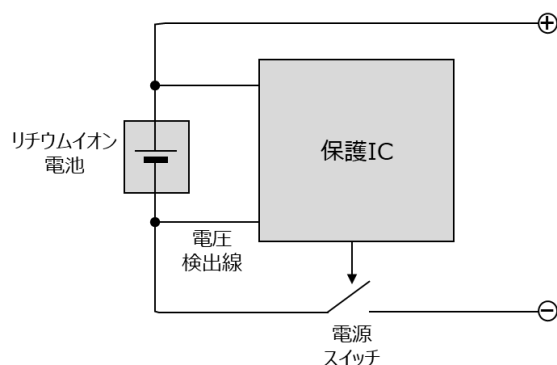


図7 リチウムイオン電池の基本構成

1.3 リチウムイオン電池システム

1.2節では、リチウムイオン電池の原理と基本構成について述べた。本節では、リチウムイオン電池を複数個使用するリチウムイオン電池システムの構成および、システム構成時の課題について説明する。

1.3.1 リチウムイオン電池システムの構成

図8にリチウムイオン電池システム（以後、電池システムと呼称する）の構成の一例を示す。電池システムでは、リチウムイオン電池のセルを用途に応じて50～300個直列接続し、電圧は200～1000Vとなる。例えば、自動車向けには50～100個を使用した電池システム（200～400V）、電動バスや鉄道等の大型車両向けには200個以下（～600V）、近年高電圧化が進む高性能EV向けには300個以下（～1000V）の電池システムが使用される[41-42]。電池システムは、4～14個のセルを1単位として束ね、セルの電圧や電流、温度をモニタリングし、セル間に電圧の一定以上のばらつきが生じた場合にはセル間の電圧をバランスする機能を持つモニタリングICと、モニタリングICから各セルの情報を受信し、全セルのデータから電池システムの稼働状態を把握する電池システム制御IC、そして電池システムの電力を交流に変換する電力変換機であるインバータとで構成される。これらモニタリングICおよび電池システム制御ICを含めた電池システムの保護機能をBMS（Battery Management System）と呼ぶ。モニタリングICと電池システム制御ICの通信では、モニタリングICと電池システム制御ICの基準電圧が異なることから、絶縁対策を施した通信方式によって通信をする。電池システム制御ICでは、得られた稼働状態に応じて電池システムのスイッチをOn-Offすることでインバータ電池システムを動作を制御する。さらに、電池システム制御ICは得られた情報から、電

池システムの充電状態である SOC (State of Charge) や劣化状態である SOH (State of Health) を推定する状態推定機能、およびそれらの情報から電池パックに入出力電力を制御する電力制御機能も備える。 [33、43-44]

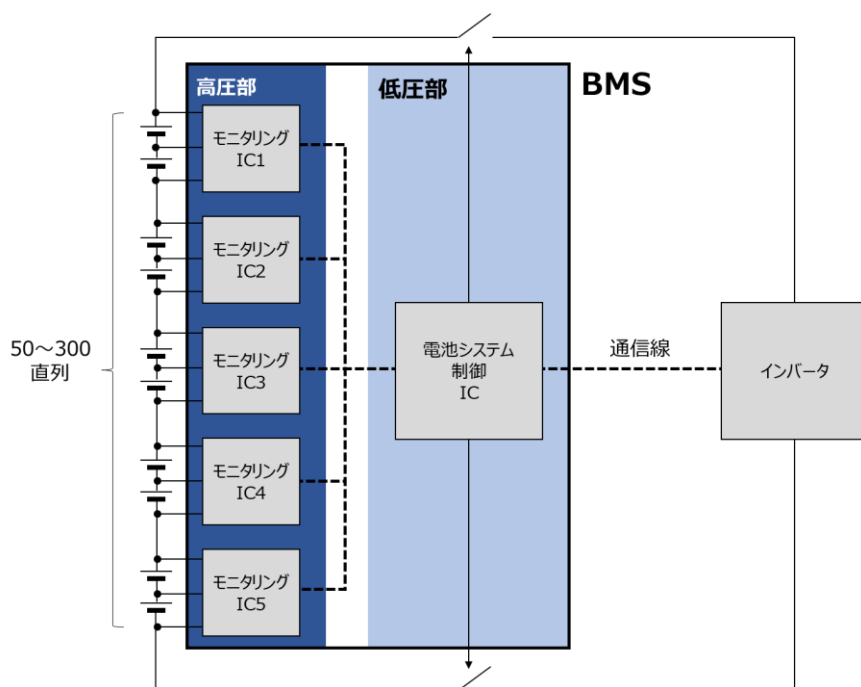


図 8 リチウムイオン電池システムの構成例

一方で、近年増設が進むデータセンタ等の重要施設の予備電源や、再生可能エネルギーの発電所に併設される電力貯蔵設備向けの大規模な電池システムでは、図 8 の構成を更に並列接続して電池システムを構成する。図 9 に、風力発電所に併設する大規模な電池システムの構成例を示す。風力発電の発電機との連系点に電池を設置し、風力発電の出力変動を吸収することで出力を平滑化する。平滑化の方法は、風力発電の出力変動を目標範囲内に収めるよう、実際の出力と目標範囲との差分を求め、目標範囲を逸脱する出力変動が発生した場合は、即時に電池システムが差分に応じて電力吸収または供給することで電力を平滑化する。電力系統へは、この電池の出力と実際の風力発電の出力が合わせられた合成出力が出力される [45-46]。

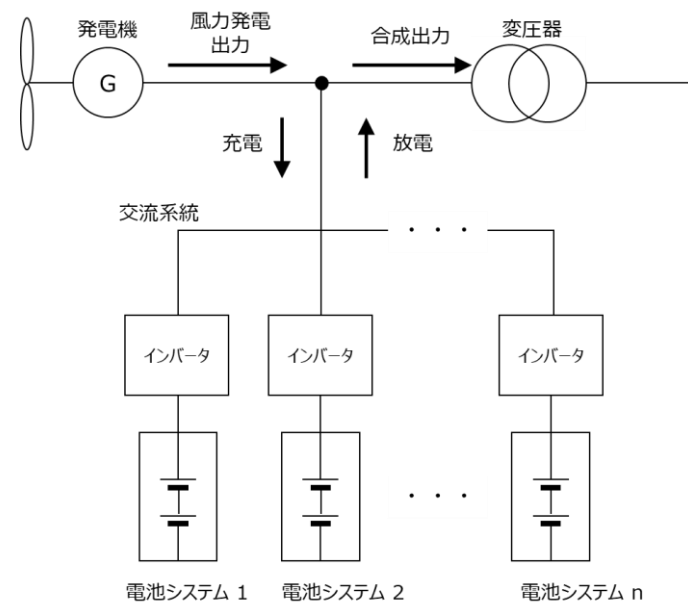


図 9 大規模電池システムの構成例

1.3.2 リチウムイオン電池の種類とシステム構成上の課題

電池システムの適用用途が拡大に連れて、リチウムイオン電池は用途に応じて出力性能を重視する出力型と容量性能を重視する容量型に分岐発展した。図 10 にリチウムイオン電池のエネルギー密度と出力密度の分布を示す。2000 年代の初めから、リチウムイオン電池はハイブリッド自動車への適用をドライバとして高出力化に向けた技術開発が進み、2000 年には当時ハイブリッド自動車の主流を担っていたニッケル水素電池の出力密度を上回る 1350[W/kg]のリチウムイオン電池が日産自動車社のハイブリッド自動車「ティーノ」に採用された。これはリチウムイオン電池を採用した世界初のハイブリッド自動車となった[47]。更に、2006 年から 2016 年にかけて、出力密度は 2600[W/kg]、3000[W/kg]、4500[W/kg]と向上し、いすゞ自動車社や三菱ふそう社のハイブリッドトラック、ハイブリッドバス、そして東日本旅客鉄道(JR 東日本)社のハイブリッド鉄道等、一般乗用車以外の大型車両への適用も進んだ[33、48-49]。2020 年および 2021 年の時点で、ハイブリッド自動車用のリチウムイオン電池は出力密度約 7000[W/kg]に達している[50-51]。

高容量化に向けた技術は、EV や再生可能エネルギーの発電所に併設する電力貯蔵向けとして発展。EV 用を中心に、エネルギー密度は 2015 年～2020 年で 250[Wh/kg]に達し、2021 年以降は 300[Wh/kg]およびそれ以上のエネルギー密度の達成に向けて、日本、

米国、欧州、中国等で大規模なプロジェクトが進められている[52]。

リチウムイオン電池の高出力化、高容量化の技術開発が進む一方で、図 10 より高出力と高容量の両方を満たすリチウムイオン電池は存在しないことが分かる。今後、再生可能エネルギーの主電源化に伴う系統安定化装置である STATCOM(Static Synchronous Compensator)や、電動化が進む航空機、大型の建設機械など、大出力と高容量の双方が必要な電池システムの必要性が高まっている[53-56]。

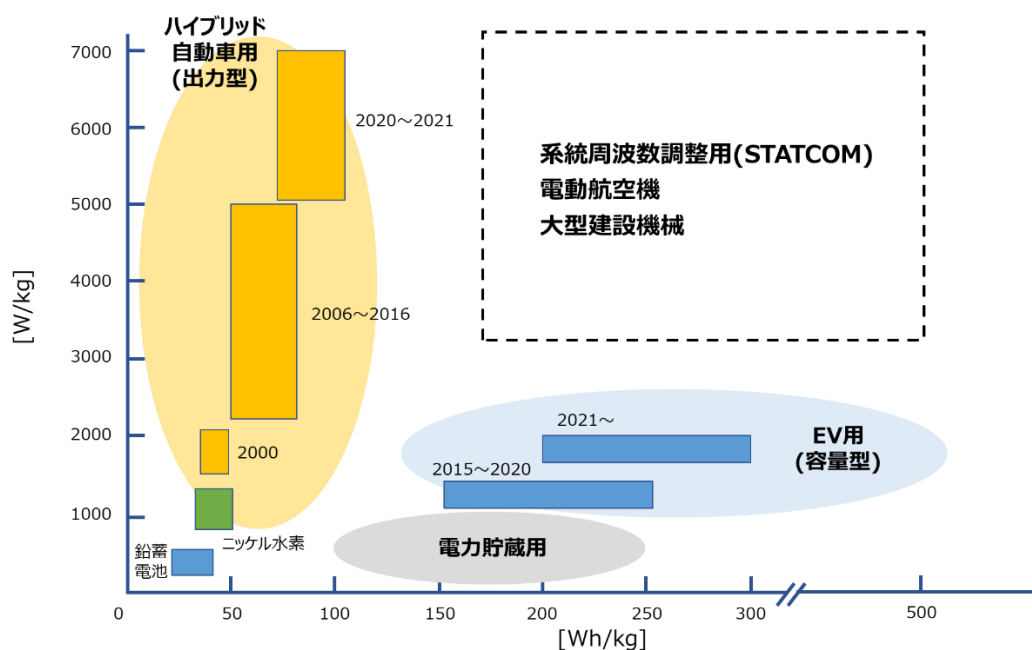


図 10 リチウムイオン電池のエネルギー密度と出力密度の分布

図 11 に、ハイブリッド自動車用の出力型リチウムイオン電池および EV 用の容量型リチウムイオン電池のどちらかの電池だけで、高出力と高容量が求められる電池システムを構築する場合の課題について述べる。出力型で電池システムを構築する場合は、必要な容量を満たそうとすると出力が過剰となり、容量型で構築する場合は、必要な出力を満たそうとすると容量が過剰となる。これは、電池システムに搭載する電池の積載量の増加となり、電池システムの設置スペースやコスト増大に繋がる。このため、今後必要性を増す電池システムに向けては、図 12 に示すように、用途に応じて出力型の電池システムと容量型の電池システムを任意に組み合わせて、必要な出力性能と容量性能を過不足なく提供可能な電池システムを構築する技術が必要である。

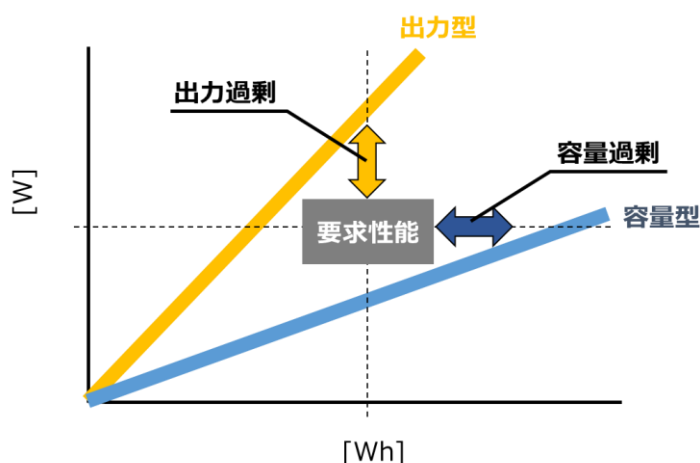


図 11 電池システムの構成時の課題

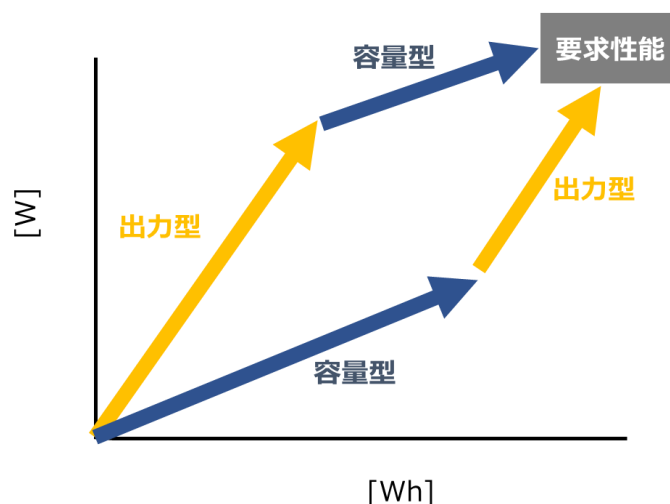


図 12 要求性能を過不足なく満たすための電池システム構成

1.4 本研究の目的および本論文の構成

1.4.1 本研究の目的

本研究では、用途に応じて異なる要求性能に対して、出力性能と容量性能の過不足が無い電池システムを構築する技術の確立をめざす。図 13 に本研究で確立すべき技術の概要を示す。(a)は従来技術による電池システムの構築方法である。1.3.1 節で述べたように、リチウムイオン電池を複数直列接続および並列接続して電池システムを構築することは可能であり、既にそのような電池システムは稼働している。また、異なる種類の電池システムを組み合わせる場合であってもインバータなどの電力変換機を介して

接続することで、要求性能を過不足なく満たす電池システムは従来技術でも構築可能である。しかし、そのような方法は直列接続された電池システムごとに電力変換機が必要となり、特に大出力の電力変換機はサイズが大きく、価格は高価なものとなるため電池システムの大型化やコスト増大要因となる。従って、電池システムの要求性能を満たし、かつシステムの大型化やコスト増大を抑制するためには、(b)に示すように異種の電池システムを直接接続し、それらを一つの電力変換機（インバータ、DC/DC コンバータ、チョップ等）で運用することで、部品点数およびコストの観点で最小の構成となる。

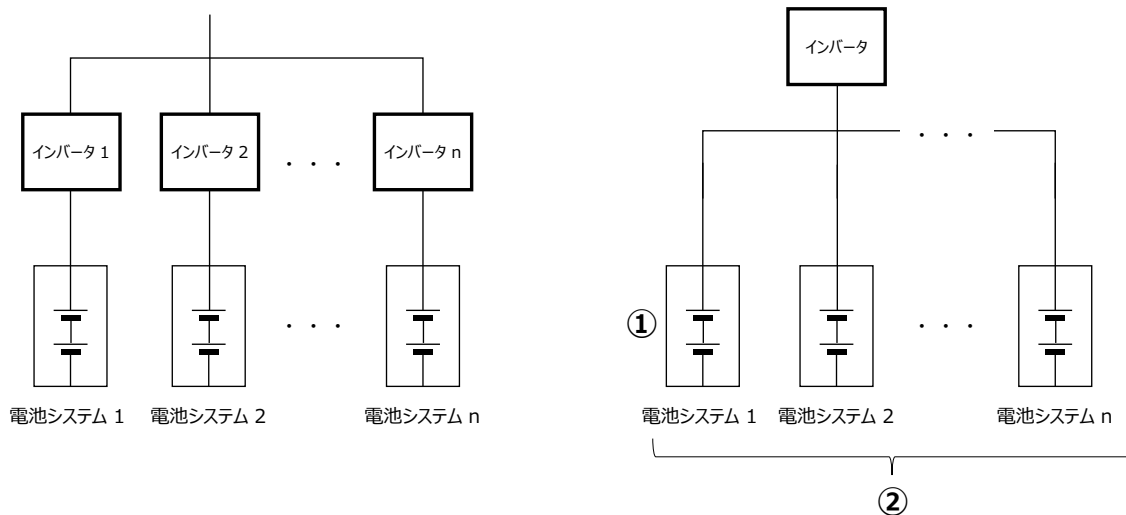
以上を鑑みて、異種の電池を直接接続することにより電池システムを構築し、運用するために解決すべき技術課題を整理する。

1つ目の技術課題として、大規模電池システムの必要性能を満たすためには、小さな電池を複数、直並列接続して小規模な電池システムから大規模な電池システムにスケールアップさせる必要がある。この際は、電圧の上昇に伴う感電や絶縁破壊の防止のための絶縁技術、および万が一、絶縁性が低下した場合の検知技術が必要となる。さらに、一台の電力変換機に従属する電池システムが、過充電や過放電に至ることを避けるために、全ての電池システムの状態を把握し、充放電を制御する方法を確立する必要がある。

2つ目の技術課題として、スケールアップする際の出力と容量の増加のベクトルを変更し、電池システムの出力性能と容量性能を自在に調整可能とするためには、容量型と出力型でタイプの異なる電池システムの直接接続が必要となる。特性の異なる電池を組み合わせた電池システムでは、充放電をする際に電池の特性差によって各電池システムの電流配分が変動する。従って、異種の電池システムを直接接続することで大規模な電池システムを設計する場合は、電流配分の変動を予測して、異常な電流が発生しないように電池システムを設計する必要がある。

上記をまとめると以下の2つの技術が必要となる。

- ① 電池システムの出力と容量をスケラブルに拡大し、且つ1つの上位システムで電池システムの管理を可能とする電池システム構築技術
- ② 容量型と出力型でタイプの異なる電池を直接接続し、運用可能とする条件の特定技術



(a) 従来の電池システム

(b) 異種の電池の直接接続による電池システム

図 13 複数の異種電池を用いた電池システム構築方法

一方、これまでに複数の電池を組み合わせて電池システムを構築する技術は数多く報告されている。古くは、1971年にEV向け鉛蓄電池と加速アシスト用のニカド電池を並列接続した電池システムの報告例がある[57]。自動車向けでは、その他にも鉛蓄電池と電気二重層キャパシタを組み合わせる方式[58]や、リチウムイオン電池の大電流と温度上昇の抑制のためにリチウムイオンキャパシタと組み合わせる方式[59]、さらにはプラグインハイブリッド自動車向けに容量型電池システムと出力型電池を組み合わせ、出力型電池のみをモータに接続し、駆動力の発生や回生電力を吸収をさせる主電池として容量型電池は出力型電池に一定の電流を供給するだけのシリーズハイブリッド形式の構成の電池システムが提案されている[60]。上記と類似した取り組みは自動車以外の分野でも活発に検討されており、鉄道向け[61]やフォークリフト向け[62]の電池システムの検討事例が報告されている。この他、電力貯蔵向けでは、リチウムイオン電池を用いて電圧を600[V]級とし、容量がMWh級の電池システム構築に関する報告[63-66]や、鉛蓄電池を用いて同じく容量がMWh級の電池システムの構築に関する報告[67]、太陽光発電や風力発電など電圧・周波数等変動の大きい分散電源を電力系統に円滑に連系させることを目的として、スケーラブルな電池システム構成する技術を開発し、100kWhの実証システムの開発事例も報告されている[68]。また、特性の異なる種類の電池を並列

接続した際の充放電特性を評価した興味深い報告例もある[69]。これらの報告は、いずれも異なる電池を組み合わせた電池システムや大規模な電池システム構築に関する報告であるものの、異種の電池システムを直接接続して電池システムを構成する技術や条件に着目したものではなく、多様な出力と容量の要求性能に対して、過不足なく電池システムを構築可能とする技術に関する検討はこれまでに見られない。

上記を踏まえて本研究では、電池システムの出力と容量をスケラブルに拡大し、且つ 1 つの上位システムでの電池システムの管理を可能とする電池システムの構築技術(アーキテクチャ)と、容量型と出力型でタイプの異なる電池を直接接続し、運用可能とする条件を特定可能な異種電池システムの設計技術の確立を目的とする。

1.4.2 本論文の構成

本論文は、以下の内容で構成される(図 14)。

第 2 章では、大規模電池システムを構築するための構成方法である電池システムのアーキテクチャについて検討した。初めに、複数の電池セルを組み合わせる小規模な電池システムを構築し、それをスケラブルに組み合わせる大規模な電池システムを構築するビルディングブロック方式による電池システムの構成方法と絶縁技術の検討、多数の電池セルおよびそれにより構成される電池システムを 1 つの上位システムで確実に管理する管理方式について検討した。

次に 3 章では、大規模電池システムの出力特性と容量特性を自在に設計可能とする、異種の電池システムを組み合わせた異種電池システムの構成方法について検討した。特に、異種の電池を直接接続した場合に、電池システムの特性の違いによって充放電中に発生する各電池システムの過渡的な電流配分の変化について、その挙動を数理モデルを用いて分析し、異種の電池システムを組み合わせる際に留意すべき条件を明確にした。

そして第 4 章では、考案したビルディングブロック方式により試作した定置向け電池システムを想定した 60[kW]、30[kWh]の電池システムを用いて、1 つの上位システムによる管理と充放電制御の実証試験により、検討した方式の適用効果について検討した。併せて、試作電池システムを用いて異常発生を模擬し、開発した管理および制御方式により異常個所の特定と、安全な対処の実行可否を検証した。さらに、容量特性に優れたリチウムイオン電池と、出力特性に優れたリチウムイオン電池のそれぞれ特性の異なる

リチウムイオン電池を用いて、異種の電池システムを直接接続した EV を試作し、異種電池を組み合わせた際の過渡的な電流配分の変化を実証した。

最後に、第 5 章で本研究のまとめと今後の展望を述べて、本論文のまとめとした。

	スケーラブルな電池システムの構成方法	異種電池システムの構成方法	システム実証
2章 リチウムイオン電池システム用アーキテクチャ	<ul style="list-style-type: none"> ビルディングブロック方式による電池システムの構成方法 電池システムの絶縁技術 電池システムの管理方式 試作電池システムの実証に向けたスイッチ制御方式 		
3章 異種の電池を組み合わせた電池システム構成		異種電池システムの直接接続による電池システムの挙動解明と、システム構築時の留意条件明確化	
4章 電池システムへの適用効果の検討			<ul style="list-style-type: none"> 定置向け電池システムへの適用効果 自動車向け電池システムへの適用効果

図 14 本論文の構成

第 1 章の参考文献

- [1] Panasonic ホームページ：電池の歴史
 < <https://www.panasonic.com/global/consumer/battery/academy/jp/rekisi.html> >
 Accessed on 2021. 9. 26
- [2] 電磁界情報センタホームページ：ニュースレター 第 4 回動物電気
 < https://www.jeic-emf.jp/about/news_letter/news_letter_1.html >
 Accessed on 2021. 9. 26
- [3] 高村 勉：電気化学の歩み 電池の歴史 その 1 幕開きの時代、電気化学および工業物理化学、54 No. 2 p. 114(1986)
- [4] NTT ファシリティーズホームページ：ビジネスコラム
 < <https://www.ntt-f.co.jp/column/0067.html> >
 Accessed on 2021. 9. 26
- [5] 高橋 樟彦：新しい電池とその応用（3）一次電池、電気化学および工業物理化学、35 No. 9 p. 657(1967)

- [6] Shisaku.com ホームページ：現代人の生活に欠かせない「電池」とは
< <https://www.shisaku.com/blog/anatomy/post-73.html> >
Accessed on 2021.9.26
- [7] 梅尾良之：新しい電池の化学、ブルーバックス、 p.54(2006)
- [8] 吉田 和正：一次電池技術発展の系統化調査、国立科学博物館技術の系統化調査報告、 Vol.9 p.173(2007)
- [9] 梅尾良之：新しい電池の化学、ブルーバックス、 p.5(2006)
- [10] 一般社団法人電池工業会ホームページ：電池の歴史 1 屋井乾電池
< <https://www.baj.or.jp/battery/history/history01.html> >
Accessed on 2021.9.29
- [11] 一般社団法人電池工業会ホームページ：電池の歴史 2 一次電池
< <https://www.baj.or.jp/battery/history/history02.html> >
Accessed on 2021.9.29
- [12] 小槻勉：リチウム電池の歴史と現状、資源と素材、 Vol.117 No.6 p.479(2001)
- [13] 一般社団法人電池工業会ホームページ：電池の歴史 4 二次電池
< <https://www.baj.or.jp/battery/history/history04.html> >
Accessed on 2021.9.29
- [14] Ferdinand von Sturm : Secondary Batteries-Nickel-Cadmium Battery、
Comprehensive Treatise of Electrochemistry、 p.386、 Plenum Press、 New
York(1981)
- [15] 財団法人 エネルギー総合工学研究所：新エネルギーの展望 二次電池-改訂
版-、 p.4(2008)
- [16] 一般社団法人電池工業会ホームページ：電池の歴史 3 小型充電式電池（二次
電池）
< <https://www.baj.or.jp/battery/history/history03.html> >
Accessed on 2021.10.2
- [17] 梅尾良之：新しい電池の化学、ブルーバックス、 p.139(2006)
- [18] 神田基：水素を用いる二次電池、電気化学、 56 No.1 p.13(1988)
- [19] 辰巳国昭：リチウムイオン電池の基本構成とその特長、 モーターリング、

No. 33 (2011)

- [20] 吉野彰：リチウムイオン電池総論、 ぶんせき、 No. 10 p. 580 (2013)
- [21] 井手本康, 板垣昌幸, 湯浅真：化学系学生にも分かりやすい電気化学、
p. 3(2019)
- [22] 木原壯林：電気化学者は見た！-測定法の歴史-(後編)、 Review of
Polarography、 Vol60 No. 2 p. 121(2014)
- [23] 金児紘征：ファラデーの電気分解の法則 -原論文を読み解く- (前編)、
Electrochemistry、 83 巻 11 号 p. 1032(2015)
- [24] 玉虫 伶太：ファラデー定数 (どうやってそれを求めたの 2)、 化学と教育、
46 巻 8 号 p. 493(1998)
- [25] 大阪ガスホームページ：エネルギー偉人館
<https://services.osakagas.co.jp/portalc/contents-2/pc/ijin/1272890_38939.html >
Accessed on 2021. 10. 2
- [26] 梅尾良之：新しい電池の化学、 ブルーボックス、 p. 52(2006)
- [27] 日本ガイシホームページ：がいしの歴史
< <https://www.ngk.co.jp/gaishi-h/chapter1/> >
Accessed on 2021. 10. 2
- [28] 高村 勉：電気化学の歩み 電池の歴史 その2 実用化と定着の時代、 電気
化学および工業物理化学、 54 No. 5 p. 401(1986)
- [29] GS ユアサホームページ：価値創造の歩み-革新の歴史
< https://www.gs-yuasa.com/jp/ir/pdf/GS_Yuasa_Report_2020_02.pdf/ >
Accessed on 2021. 10. 2
- [30] 白髪明敏：東芝 PC25 年の歩みとノート PC 市場、 東芝レビュー Vol. 65 No. 10
p. 4(2010)
- [31] ソニーホームページ：商品のあゆみ
< <https://www.sony.com/ja/SonyInfo/CorporateInfo/History/sonyhistory-f.html> >
Accessed on 2021. 10. 2
- [32] ソニーホームページ：第 2 話 「夢のリチウムイオン二次電池」 合弁事業か

ら独立独歩の道

<<https://www.sony.com/ja/SonyInfo/CorporateInfo/History/SonyHistory/2-13.html#block3>>

Accessed on 2021.10.2

[33] 並木文博, 前島敏和, 井上康介, 河合英正, 西原昭二, 南部利之: 電動車両用リチウムイオン電池、日立評論、11月号 p.48(2013)

[34] 井口隆明, 落合誠二郎, 小園卓, 新田和司, 阿部泰之, 河野健次: ハイブリッド自動車用リチウムイオン電池 EH5、GS Yuasa Technical Report、12月 第11巻 第2号 p.24(2014)

[35] 富士経済調査レポート: 2013 電池関連市場実態総調査 上巻(2013)

[36] 本蔵耕平: リチウムイオン電池の劣化予測に向けた放電曲線の数理モデル構築、九州大学学術情報リポジトリ(2014)

[37] 梅尾良之: 新しい電池の化学、ブルーバックス、 p.158(2006)

[38] 辰巳砂昌弘, 林 晃敏: 全固体電池の最前線 いま世界でどこまで進展しているか?、CHEMISTRY 化学、Vol.67 No.7 p.19(2012)

[39] Embedded Technology Lab. ホームページ: 充電制御 IC とは?

<<https://emb.macnica.co.jp/articles/8969/>>

Accessed on 2021.10.2

[40] ZUKEN ホームページ: 基礎講座「おしえて電源 IC」 第12回 リチウムイオン電池保護 IC ってなに? (その1)

<https://club-z.zuken.co.jp/tech-column/20190627_r012.html>

Accessed on 2021.10.2

[41] 小笠正道: バッテリー搭載型電車の展開、GS Yuasa Technical Report、6月 第8巻 第1号 p.9(2011)

[42] PORSCHE ホームページ:

<<https://www.porsche.com/japan/jp/models/taycan/taycan-models/taycan-turbo-cross-turismo/>>

Accessed on 2021.10.2

[43] 藤田嘉和, 廣瀬育之, 加藤優典, 渡辺雄大: バッテリーマネージメントシステ

ムの開発、 富士通テン技報 Vol. 34 No. 1 p. 62(2016)

[44] 江守昭彦, 坂部啓, 河原洋平, 乗松泰明, 菊池睦, 山内辰美, 工藤彰彦, 堀場達雄: HEV 用リチウムイオン二次電池制御回路の開発、 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J91-B No. 1 p. 104-111(2008)

[45] 橋本勉, 栗田章央, 南正明, 吉岡正博, 小林克明, 橋本雅之: リチウムイオン二次電池を用いた再生可能エネルギーの系統連系円滑化システムの開発、 三菱重工技報 Vol. 48 No. 3 発電技術特集 p. 5(2011)

[46] 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 7 月 p. 12(2011)

[47] 新井寿一, 村中廉, 小関満: 車載用高出力・高容量リチウム二次電池、 日立評論、 5 月号 p. 17 (2004)

[48] 丸山昭彦, 河野竜治 佐藤豊, 石津竹規, 小関満, 村中廉: 自動車用リチウムイオン二次電池、 日立評論、 10 月号 p. 35 (2009)

[49] NEDO ホームページ: 世界初、ハイブリッド自動車用リチウムイオン 2 次電池を量産化

< <https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/200905hitachi/pdf/hitachi.pdf> >

Accessed on 2021. 10. 2

[50] Vehicle Energy Japan ホームページ: HEV 用リチウムイオン二次電池セル

< <https://www.ve-j.co.jp/product-02.html> >

Accessed on 2021. 10. 2

[51] 日立製作所ニュースリリース: 車載用高出力型リチウムイオン電池の開発について

< <https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2009/05/0519a-pre.pdf> >

Accessed on 2021. 10. 2

[52] 経済産業省資料: 「次世代蓄電池・次世代モータの開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装の方向性、 7 月 p. 20-23(2021)

[53] 竹田正俊: 電力技術のイノベーション 2 自励式無効電力補償装置 (STATCOM) の開発と製品化、 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌) 129 巻 7 号 p. 855-858(2009)

- [54] 電力広域的運営推進機関資料：「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討状況について、 2月15日(2021)
- [55] 航空機国際共同開発促進基金ホームページ：電動推進航空機の最新動向
< <http://www.iadf.or.jp/document/pdf/30-7.pdf> >
Accessed on 2021.10.2
- [56] 経済産業省資料：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、 6月18日(2021)
- [57] D.H.Brown：Hybrid Battery System、 SAE Technical Paper Series、 710236 p.2(1971)
- [58] Baek-Haeng Lee, Dong-Hyun Shin, Hyun-Sik Song, Hoon Heo, Hee-Jun Kim：Development of an Advanced Hybrid Energy Storage System for Hybrid Electric Vehicles、 Journal of Power Electronics、 Vol.9 No.1 January p.52(2009)
- [59] Masaki Miki, Yoshiaki Taguchi：Reduction of Current and Rise in Temperature of Lithium Ion Battery by Combining with Lithium Ion Capacitor、 IEEE、 978-1-4799-6783-4(2014)
- [60] Jens Bockstette, Knut Habermann, Juergen Ogrzewalla, Martin Pischinger, David Seibert：Performance Plus Range:Combined Battery Concept for Plug-In Hybrid vehicles、 SAE International Journal of Alternative Powertrains、 Volume: 2 Issue Number: 1(2013)
- [61] 三木真幸, 田口義晃：リチウムイオンキャパシタの併用によるリチウムイオン電池の温度上昇抑制効果の実験的検討、 平成25年電気学会産業応用部門大会論文集、 5-28(2013)
- [62] 宮脇康貴, 藤原耕二, 石原好之, 戸高敏之, 岡田実, 刀谷郁也, 井上敦司：鉛蓄電池とEDLCを併用した電気式産業車両の検討、 平成19年電気学会産業応用部門大会論文集、 2-7-28(2007)
- [63] 二見基生, 加納光益, 田中融, 山本典雅, 田中克佳, 武田賢治, 清宮繁：スマートグリッド対応リチウムイオン蓄電システム、 新神戸テクニカルレポート、 No.23 p.4(2013)

- [64] 橋崎克雄, 田島英彦, 藤岡祐一, 西田健彦, 橋本勉, 森康: リチウムイオン電池電力貯蔵システムの開発、三菱重工技報、 Vol. 41 No. 5 p. 292(2004)
- [65] 向井大輔, 小林克明, 倉橋智佳, 松枝直人, 橋崎克雄, 小暮正紀: 電力貯蔵・産業用機器向け高性能大型リチウムイオン二次電池の開発、三菱重工技報、 Vol. 49 No. 1 p. 12(2012)
- [66] 小杉伸一郎, 岡部令, 黒田和人: 社会インフラ向け大規模蓄電池システムを支える期間コンポーネント、東芝レビュー、 Vol. 69 No. 4 p. 48(2014)
- [67] 世界省エネルギー等ビジネス推進協議会ホームページ: 太陽光発電、風力発電変動緩和用途の制御弁式鉛蓄電池
< <https://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies-j/pdf/electricity/E-05.pdf> >
Accessed on 2021.10.2
- [68] 玄後 義, 小林 由則, 橋本 勉, 南 正明, 重水 哲郎, 小林 克明: リチウム二次電池を用いた系統連系円滑化蓄電システムの開発、三菱重工技報、 Vol. 46 No. 2 発電技術特集(2009)
- [69] 多田安伸: 蓄電池直並列接続時の特性および課題、四国電力、四国総合研究所研究期報 101(2014)

第2章 大規模電池システム向けアーキテクチャの検討

博士論文の2章の要約

大規模電池システムを構築するアーキテクチャについて

電池を組み合わせて大規模化する電池システムの構築方法を提案する。電池システムを構築する方法として、50V以下の電池モジュールを組み合わせたビルディングブロック構造を提案し、ビルディングブロックで構成された電池システムを管理するために階層化管理方式を提案した。各階層では、各階層が管理する電池のセル、モジュール、パックの電圧と温度が計測され、充電状態の計算と異常の検知に必要な情報が上位階層に送信され、下位階層の状態管理を行う。また、メンテナンス時の安全確保のため、電池モジュールの絶縁構造を提案し、絶縁性能の低下を検知する地絡検知方式を開発した。

第3章 異種電池システムの設計技術の開発

3.1 緒言

前章では、電池システムの構築するための構成方法について検討した。本章では、前章での検討結果に加えて、異種の電池を組み合わせて電池システムの出力性能と容量性能を自在に設計する技術について検討する。本章では、まず、異種の電池を組み合わせた場合の課題と、異種電池システムの電流配分挙動を明らかにするための解析解を導出する電池モデルおよび解析解で検討すべき想定条件を検討した(3.2節)。次に、電池システムの特性の違いによって充放電中に発生する過渡的な電流配分について、想定した充放電のケースに基づいて電気回路モデルを用いて検討し、異種の電池システムを組み合わせる際に留意すべき条件を明らかにした(3.3節)。

3.2 異種電池システムの電気回路モデル

3.2.1 概説

1章で述べたように、用途に応じて必要な出力性能と容量性能を過不足なく提供可能な電池システムを構築するためには、出力型の電池システムと容量型の電池システムを任意に組み合わせて電池システムを構築する必要がある。図32に、出力型電池システムと容量型電池システムによる電池システムの概要を示す。

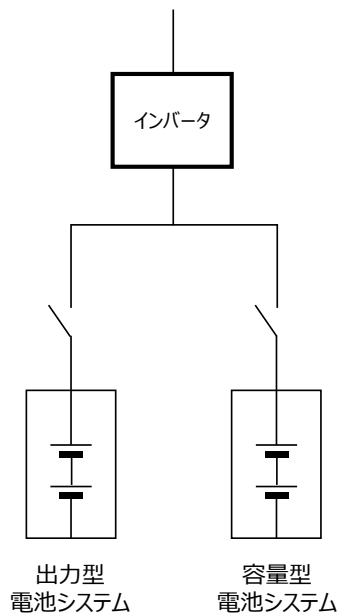


図32 異種の電池を組み合わせた電池システムの概要

1章で述べたように、容量型電池システムと出力型電池システムを直接並列接続するシステム構成について構成の条件を検討した例はこれまでに無く、容量型電池システムと出力型電池システムを組み合わせる際には、図 33 および図 34 に示す基本事象の把握が必要となる。

容量型電池システムと出力型電池システムの起電力(OCV)が等しい時に充放電電流が発生すると、その瞬間の両電池の電流は、内部抵抗の大きさに逆比例して配分される。この状態を初期状態と呼び、充放電電流が発生した時点をも t_0 とする。図 33 に示すように時刻 t_0 から t_1 まで一定の放電電流が流れ、電圧が V_0 から V_1 に変化した場合を考えると、 t_0 で放電電流が発生した瞬間、電池システムの電圧は OCV から放電時電圧に電圧が低下する。容量型電池システムと出力型電池システムは並列接続であるから、両者の放電電圧は等しくなるよう、抵抗比に逆比例して電流が配分される。そこから t_1 までの間に、出力型電池システムと容量型電池システムに流れた電流 I_p と I_c はそれぞれ $I_p = \Delta Q_1 / \Delta t$ 、 $I_c = \Delta Q_2 / \Delta t$ となり、電流は容量に比例して流れる。この状態を定常状態と呼ぶ。従って、異種の電池を組み合わせた電池システムでは、静止状態からステップ的に電流を流した場合、初期状態では内部抵抗の大きさに逆比例して電流が配分され、時間の経過に従って定常状態である容量に比例して配分される状態へと遷移する。これは容量が大きい容量型電池システムに多くの電流が流れる状況であることを意味している。更に、上記の定常状態(時刻 t_1)で放電から充電に切り替わった場合(図 34)、充電電圧は OCV よりも大きくなるが、図 33 と同様に両電池システムは並列接続により電圧は等しくなることから、電流の大きさによっては全ての電流が出力型電池システムに充電され、容量型電池システムには電流が流れないケースが発生し得ることが予想される。このように、異種電池システムでは大きな電流が出力型および容量型電池システムの間で過渡的に発生するため、このような電池システムを設計するためには、単純な出力特性と容量特性の組み合わせだけでなく、電流が切り替わる際の状態遷移条件の把握が必須となる。

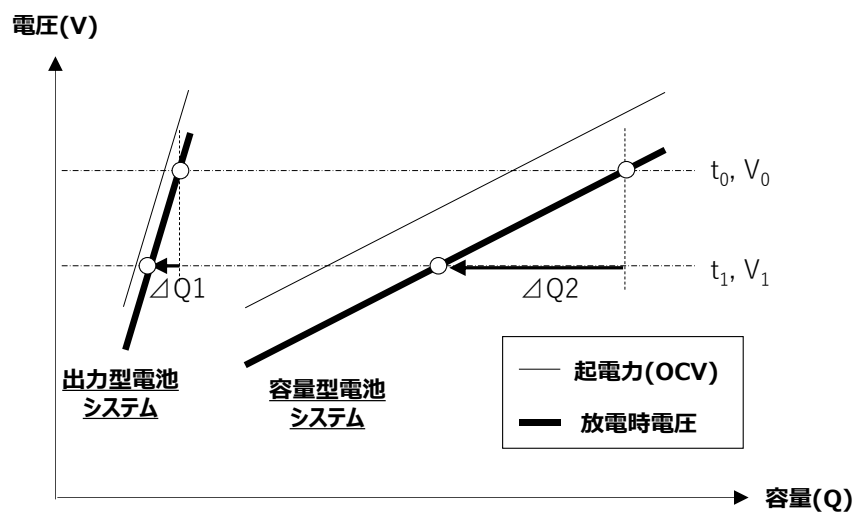


図 33 放電時の電圧変化

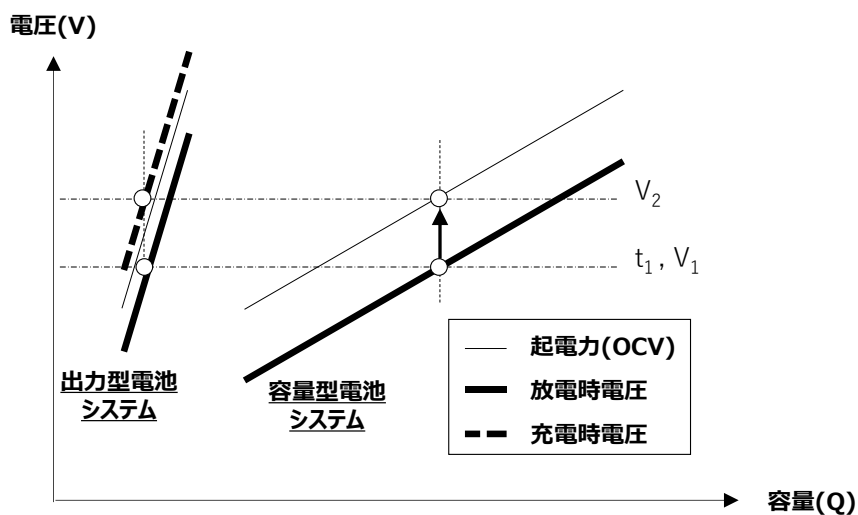


図 34 放電から充電に変化した時の電圧変化

以上より、本節では、異種の電池により電池システムを電気回路モデル化して、状態遷移を過渡応答解析により求め、電池システムの運用時に発生し得る電流配分の基本的な挙動を解析する。

3.2.2 電気回路モデルの概要

図 35 に、電池システムの電気回路モデルの一例を示す。負荷に供給される電流は、容量型電池システムの電流 I_c と、出力型電池システムの電流 I_p の合計値となる。この他に、電池システム内では、容量型電池システムと出力型電池システムとの間の充電状態

の違いに基づく電圧差に応じて循環電流 I_r が発生する。循環電流は負荷の稼働状況によらず電池システム間の電圧差により発生し、制御が困難な電流であるため電池システム内に過大な電流が発生する可能性がある。従って、異種の電池を組み合わせた電池システムの実用化に向けては、 I_c 、 I_p の電流配分が適切となるよう、容量型電池システムと出力型電池システムのパラメータの最適化と、想定される様々な条件にて循環電流の挙動を把握して、過大な電流によりシステムが故障しないよう設計することが課題となる。そこで本検討では、電気回路モデルを作成し、数値解析により電流配分および循環電流の挙動を評価した。

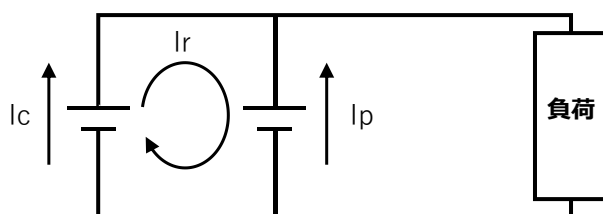


図 35 電池システムの電気回路モデルの概要

本項では、電池の電気回路モデル化方法および、異種の電池による電池システムの電気回路モデルから作成した解析式について述べる。

電池は、電気エネルギーを蓄えるキャパシタ成分と内部抵抗を示す抵抗成分で表せる。ただし、キャパシタは充電状態である残容量に応じて起電力 (OCV) が線形に変化するのに対し、電池は図 36 に示すように電池の起電力 (OCV) は残存容量に対して非線形な特性を持つ。本研究では、電池システムの電流挙動を解析するにあたり、OCV は図 34 の電池特性の近似式を用いて電池の電気回路モデルとした。

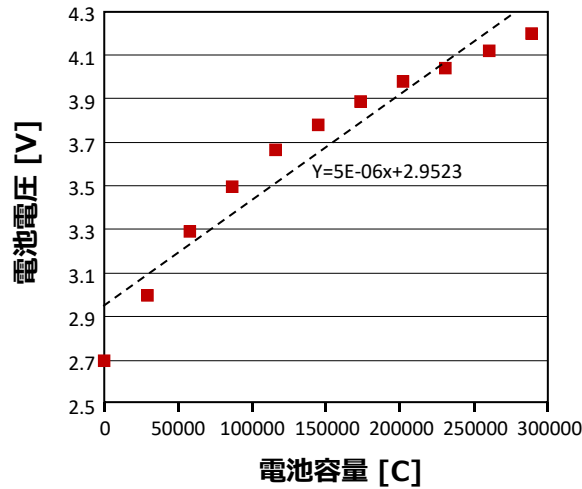


図 36 電池の OCV の近似式

図 37 に異種の電池を組み合わせた電池システムの電気回路モデルを示す。並列接続された電池システム間に流れる電流を計算するためには、充放電による電池の充電状態の変化に伴う電圧の変動、および、内部抵抗(DCR)による電圧降下または上昇を考慮する必要がある。前項で述べたように、充放電による電池の電圧の変動をキャパシタモデルで模擬し、DCR は抵抗にて模擬し、左側の電池を高出力（低抵抗）かつ小容量の出力型電池システムと想定して、DCR を R_1 、キャパシタ容量を C_1 とし、右側の電池を容量型電池システムと想定してキャパシタ容量 $C_2 = mC_1$ 、DCR を $R_2 = nR_1$ とし、 m および n はいずれも 1 より大きな値とした。電池システムに流れる電流 I は、出力型電池システムに流れる電流 $i_1(t)$ と容量型電池システムの電流 $i_2(t)$ の合計値とすると、電気回路モデルの解析式は下記 (1) (2) で表すことができる。

$$V_1(t) = V_{C1}(0) - \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt - R_1 i_1(t) \quad (1)$$

$$V_2(t) = V_{C2}(0) - \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2(t) dt - R_2 i_2(t) \quad (2)$$

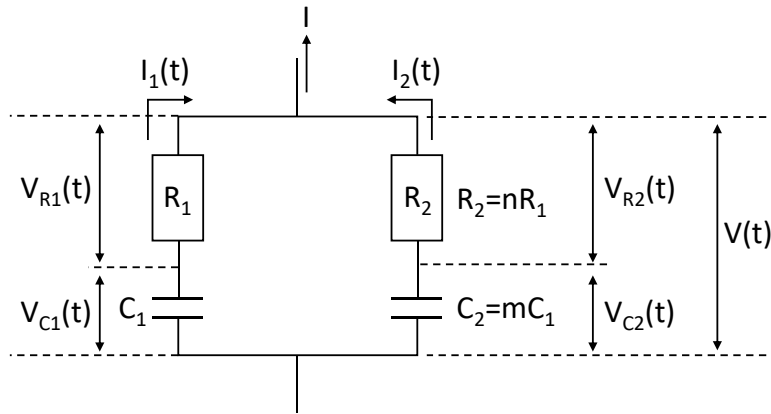
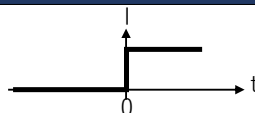
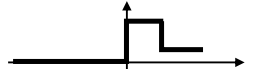
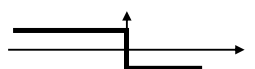



図 37 異種の電池を組み合わせた電池システムの電気回路モデル

3.2.3 電気回路モデルによる解析の想定条件

上記のモデルと解析式を用いて、表 2 に示すような、電池システムにおいて発生頻度が高いと想定される代表的な電流変化の条件で、電池システム内の電流配分および循環電流の解析解を求めた。なお、表の縦軸はプラスが放電、マイナスが充電を示している。#1 のステップ状の電流変化は電池システムの起動を想定した条件である。#2 は放電中の電流の減少を想定している。#3 は放電から急峻に充電に切り替わる条件である。#4 は電池システムの稼働終了時の電流変化を想定している。なお、#1 と#2 では時刻 0 における充電状態を示す電池電圧は同じとした。

表 2 想定条件

#	電流パタン	想定
1		電池システム稼働時 (停止→放電)
2		電池システム放電時 (放電→電流変化)
3		充放電切り替え (放電→充電)
4		電池システム停止時 (放電→停止)

3.2.4 まとめ

出力型と容量型の異種の電池システムを組み合わせる異種電池システムの構築に向けて、異種電池システム構築時の課題と、電池システムの電気回路モデルの構築方法について検討し、以下の結論を得た。

1. 異種電池システムでは、静止状態からステップ的に電流を流した場合、内部抵抗の大きさに逆比例して電流が配分される状態から、時間の経過に従って容量に比例して配分され、容量型電池システムが大半の電流を負担する状態へと遷移し、さらにその状態から放電から充電に切り替わった場合、今度は全ての電流が出力型電池システムに充電されるなど、過渡的に大きな電流が一方の電池に発生し得る。このため、異種電池システムを設計するためには、単純な出力特性と容量特性の組み合わせだけでなく、電流が切り替わる際の状態遷移条件の把握が必須となる。
2. 並列接続された電池システム間に流れる電流を計算するためには、充放電による電池の充電状態の変化に伴う電圧の変動、および、内部抵抗(DCR)による電圧降下または上昇を考慮する必要がある、充放電による電池の電圧の変動をキャパシタモデルで模擬し、DCRは抵抗にて模擬し、電池システムに流れる電流 I は、出力型電池システムに流れる電流 $i_1(t)$ と容量型電池システムの電流 $i_2(t)$ の合計値とする電気回路モデルを考案した。
3. 上記モデルを用いて解析解を求める対象として、電池システムにおいて発生頻度が高いと想定される代表的な電流変化の条件を選定した。具体的には、電池システムの起動時を想定したステップ状の電流変化、充放電中の電流変化、放電から急峻に充電(またはその逆)に切り替わる条件、電池システムの稼働終了時の電流変化の4条件とした。

3.3 異種電池システムにおける電流配分の解析

3.3.1 概説

本節では、前節で得た異種電池システムの電気回路モデルと、想定される条件に基づき、それぞれの条件で出力型電池システムと容量型電池システムに配分される電流の挙動の解析解を求める。また、その結果に基づき、異種電池システムを構築する際に留意すべき条件について明らかにする。

3.3.2 ステップ状の出力変化への挙動解析

前節の式(1)(2)より、電流パターン#1での電流の挙動を求める。 $V_1(t)$ は

$$V_1(t) = V_{C1}(0) - \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt - R_1 i_1(t)$$

で与えられる。

$V_2(t)$ も同様の式で与えられるが、 $t \geq 0$ で $i_1(t) + i_2(t) = I$ であることを考慮すると

$$\begin{aligned} V_2(t) &= V_{C2}(0) - \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2(t) dt - R_2 i_2(t) \\ &= V_{C2}(0) - \frac{1}{mC_1} \int_0^t (I - i_1(t)) dt - nR_1(I - i_1(t)) \\ &= V_{C2}(0) + \frac{1}{mC_1} \int_0^t (i_1(t)) dt - \frac{It}{mC_1} - nR_1 I + nR_1 i_1(t) \end{aligned}$$

となる。

並列接続であるので、 $V_1(t) = V_2(t)$ が成り立つことから $V_{C1}(0) = V_{C2}(0)$ も成立する。

従って

$$-\frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt - R_1 i_1(t) = \frac{1}{mC_1} \int_0^t (i_1(t)) dt - \frac{It}{mC_1} - nR_1 I + nR_1 i_1(t)$$

が得られる。両辺を t で微分すると

$$\begin{aligned} -\frac{i_1(t)}{C_1} - R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) &= \frac{1}{mC_1} i_1(t) - \frac{I}{mC_1} + nR_1 \frac{d}{dt} i_1(t) \\ (n+1)R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) &= -\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{mC_1}\right) i_1(t) + \frac{I}{mC_1} \\ (n+1)R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) &= -\frac{(m+1)}{m} \frac{1}{C_1} i_1(t) + \frac{I}{mC_1} \\ -\frac{i_1(t)}{C_1} - R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) &= \frac{1}{mC_1} i_1(t) - \frac{I}{mC_1} + nR_1 \frac{d}{dt} i_1(t) \end{aligned}$$

ここで

$$-\frac{(m+1)}{m} \frac{1}{C_1} i_1(t) + \frac{I}{mC_1} = \beta$$

と置くと

$$\begin{aligned} -\frac{(m+1)}{m} \frac{1}{C_1} di_1(t) &= d\beta \text{ であるから } di_1(t) = -\frac{mC_1}{m+1} d\beta \text{ となり} \\ -(n+1)R_1 \frac{mC_1}{m+1} \frac{d\beta}{dt} &= \frac{-(n+1)mC_1R_1}{m+1} \frac{d\beta}{dt} = \beta \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\beta} d\beta = \frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} dt$$

$$\ln \beta = \frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} t + A$$

β を $i(t)$ の式に置き換え、変換すると、

$$-\frac{(m+1)}{m} \frac{1}{C_1} i_1(t) + \frac{I}{mC_1} = A^* e^{\frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} t}$$

$$\frac{1}{mC_1} \{I - (m+1)i_1(t)\} = A^* e^{\frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} t}$$

ここで、 $t=0$ の時、電流比は微分抵抗比で決まると考えられるので、 $i_1(0) = \frac{n}{n+1} I$

従って

$$\frac{1}{mC_1} \left\{ I - (m+1) \frac{n}{n+1} I \right\} = A^*$$

$$\frac{1}{mC_1} \{I - (m+1)i_1(t)\} = \frac{1}{mC_1} \left\{ I - (m+1) \frac{n}{n+1} I \right\} e^{\frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} t}$$

$$\{I - (m+1)i_1(t)\} = \left\{ \frac{1-nm}{n+1} I \right\} e^{\frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} t}$$

以上より、(3) (4) が得られる。

$$i_1(t) = \frac{I}{m+1} \left(1 + \frac{mn-1}{n+1} e^{\frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} t} \right) \quad (3)$$

$$i_2(t) = \frac{I}{m+1} \left(m - \frac{mn-1}{n+1} e^{\frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} t} \right) \quad (4)$$

図 38 に $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ を図示する。m、n は出力型電池システムに対する容量型電池システムの容量、抵抗の比であるため、この結果から、電流がステップ的に変化する条件における電流配分は、始めは抵抗比に応じて配分されるものの、時間の経過とともに容量に応じて電流が配分されることが分かる。また、電流変化の際の応答時間 (63.2%

応答) に関わる時定数 τ は $\tau = \frac{m(n+1)C_1R_1}{m+1}$ で与えられる。

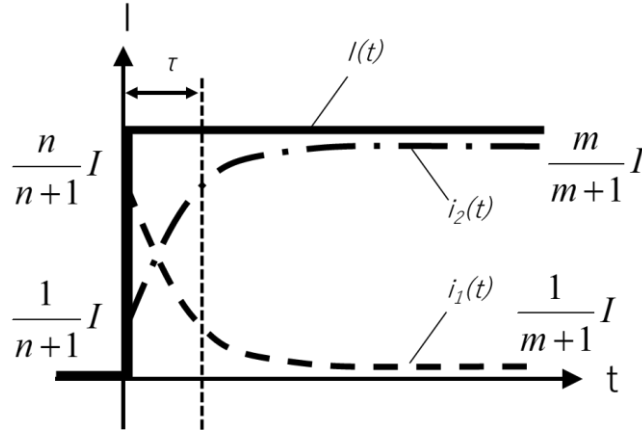


図 38 ステップ状の電流変化における電池システムの電流配分特性

次に、電流パターン#2 における電流の挙動を求める。 $t < t_1$ では電流挙動は電流パターン#1 と同じである。 $t = t_1$ では

$$V_{C1}(t_1) = V_{C1}(0) - \frac{1}{C_1} \int_0^{t_1} i_1(t) dt$$

$$V_{C2}(t_1) = V_{C2}(0) - \frac{1}{C_2} \int_0^{t_1} i_2(t) dt$$

であるから $t > t_1$ では

$$V_1(t) = V_{C1}(0) - \frac{1}{C_1} \int_0^{t_1} i_1(t) dt - \frac{1}{C_1} \int_{t_1}^t i_1(t) dt - R_1 i_1(t)$$

$$V_2(t) = V_{C2}(0) - \frac{1}{C_2} \int_0^{t_1} i_2(t) dt - \frac{1}{C_2} \int_{t_1}^t i_2(t) dt - R_2 i_2(t)$$

$$= V_{C2}(0) - \frac{1}{mC_1} \int_0^{t_1} (I_1 - i_1(t)) dt - \frac{1}{mC_1} \int_{t_1}^t (I_2 - i_1(t)) dt - nR_1 (I_2 - i_1(t))$$

ここで、並列接続であるので、 $V_1(t) = V_2(t)$ が成り立ち、時刻 0 での電池電圧が同じで

あることから $V_{C1}(0) = V_{C2}(0)$ であるので

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{C_1} \int_0^{t_1} i_1(t) dt - \frac{1}{C_1} \int_{t_1}^t i_1(t) dt - R_1 i_1(t) \\ &= -\frac{1}{mC_1} \int_0^{t_1} (I_1 - i_1(t)) dt - \frac{1}{mC_1} \int_{t_1}^t (I_2 - i_1(t)) dt - nR_1 (I_2 - i_1(t)) \end{aligned}$$

両辺を t で微分すると

$$-\frac{i_1(t)}{C_1} - R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) = \frac{1}{mC_1} i_1(t) - \frac{I_2}{mC_1} + nR_1 \frac{d}{dt} i_1(t)$$

$$(n+1)R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) = -\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{mC_1}\right) i_1(t) + \frac{I_2}{mC_1}$$

$$(n+1)R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) = -\frac{(m+1)}{m} \frac{1}{C_1} i_1(t) + \frac{I_2}{mC_1}$$

ここで

$$-\frac{(m+1)}{m} \frac{1}{C_1} i_1(t) + \frac{I_2}{mC_1} = \beta \quad \text{とおくと}$$

$$-\frac{(m+1)}{m} \frac{1}{C_1} di_1(t) = d\beta \quad \text{であるから、} \quad di_1(t) = -\frac{mC_1}{m+1} d\beta \text{ となり}$$

$$-(n+1)R_1 \frac{mC_1}{m+1} \frac{d\beta}{dt} = \frac{-(n+1)mC_1R_1}{m+1} \frac{d\beta}{dt} = \beta$$

を得る。更に

$$\frac{1}{\beta} d\beta = \frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} dt$$

と変換し、両辺を積分すると

$$\ln \beta = \frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} t + A$$

β を $i(t)$ の式に置き換え、変換すると、

$$-\frac{(m+1)}{m} \frac{1}{C_1} i_1(t) + \frac{I_2}{mC_1} = A^* e^{\frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} t}$$

$$\frac{1}{mC_1} \{I_2 - (m+1)i_1(t)\} = A^* e^{\frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1} t}$$

ここで A^* は t_l での値を境界条件として定められる。

$I_1 \rightarrow I_2$ に変化する直前の時間 t_{l-} 、直後の時間を t_{l+} とすると

$$V_{c1}(t_{l-}) + R_1 i_1(t_{l-}) = V_{c2}(t_{l-}) + R_2 i_2(t_{l-})$$

$$V_{c1}(t_{l-}) = V_{c1}(t_{l+})$$

$$V_{c2}(t_{l-}) = V_{c2}(t_{l+})$$

であるから

$$V_{c1}(t_{l-}) + R_1 i_1(t_{l+}) = V_{c2}(t_{l-}) + R_2 i_2(t_{l+})$$

$$i_1(t_{l+}) + i_2(t_{l+}) = I_2$$

となり、時刻 t_1 以降は前述の式(3)以降と同様の展開となる。そこで、時刻 t_1 以降を電流 I_2 の始点と考える。時刻 t_1 で電流が $I_1 \rightarrow I_2$ に変化した直後の電流配分は、直前までの電流 I_1 によって出力型電池システム、容量型電池システムそれぞれの充電状態が変化しているものの、それによる DCR の変化は両電池システムの抵抗比に対して十分小さいと仮定した場合、

$$i_1(t_1) = \frac{n}{n+1} I_2$$

となる。また、時刻 t_1 を始点と考えると

$$\frac{1}{mC_1} \left\{ I_2 - (m+1) \frac{n}{n+1} I_2 \right\} = A^*$$

であるので

$$\frac{1}{mC_1} \left\{ I_2 - (m+1)i_1(t) \right\} = \frac{1}{mC_1} \left\{ I_2 - (m+1) \frac{n}{n+1} I_2 \right\} e^{\frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1}t}$$

$$\left\{ I_2 - (m+1)i_1(t) \right\} = \left\{ \frac{1-nm}{n+1} I_2 \right\} e^{\frac{-(m+1)}{m(n+1)C_1R_1}t}$$

以上の境界条件により $i_1(t_1+)$ 、 $i_2(t_1+)$ が求まり、 $i_1(t_1+)$ 、 $i_2(t_1+)$ 以降の時間変化は電流パターン#1 の変化と同様になることが分かる。

以上をまとめると、図 39 となる。電流パターン#2 のような電流が増減するだけの場合では、電流の値は変化するものの電流の挙動は電流パターン#1 のステップ的な電流変化の場合と同じである。

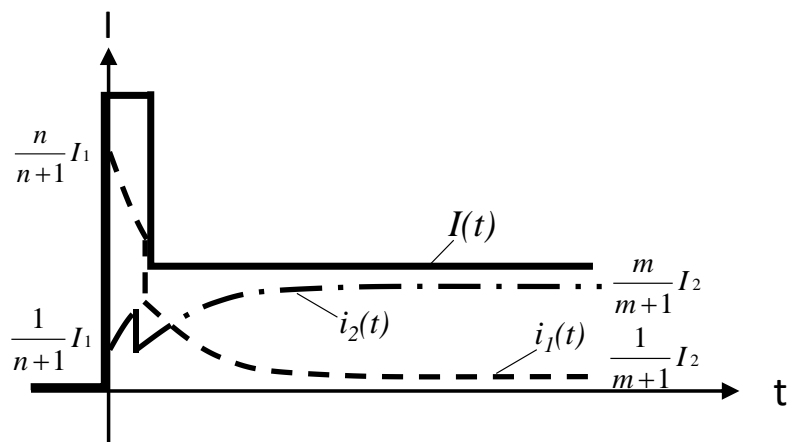


図 39 電流が増減する場合における電池システムの電流配分特性

3.3.3 放電、充電の切り替わり時の挙動解析

次に、電流パターン#3における電流の挙動について、解析解を求める。放電定常状態 ($t < 0$) での電流を

$$i_1(-0) + i_2(-0) = I$$

とすると

$$i_1(-0) = \frac{1}{m+1}I$$

$$i_2(-0) = \frac{m}{m+1}I$$

したがって

$$V_{C1}(-0) = V(-0) + V_{R1}(-0) = V(-0) + R_1 i_1(-0) = V(-0) + \frac{R_1 I}{m+1}$$

$$\begin{aligned} V_{C2}(-0) &= V(-0) + V_{R2}(-0) = V(-0) + R_2 i_2(-0) = V(-0) + nR_1 \frac{m}{m+1}I \\ &= V(-0) + \frac{mnR_1 I}{m+1} \end{aligned}$$

$t = 0$ で電流が $-I$ へと充電に切り替わったとして、 V_{C1} 、 V_{C2} は電流切り替え直後で変化しないので

$$V_{C1}(-0) = V_{C1}(+0)$$

$$V_{C2}(-0) = V_{C2}(+0)$$

$$i_1(+0) + i_2(+0) = -I$$

$$V_1(+0) = V_{C1}(+0) - R_1 i_1(+0) = V(-0) + \frac{R_1 I}{m+1} - R_1 i_1(+0)$$

$$V_2(+0) = V_{C2}(+0) - R_2 i_2(+0) = V(-0) + \frac{mnR_1 I}{m+1} - nR_1(-I - i_1(+0))$$

ここで、 $V_1(+0) = V_2(+0)$ であるから

$$V(-0) + \frac{R_1 I}{m+1} - R_1 i_1(+0) = V(-0) + \frac{mnR_1 I}{m+1} - nR_1(-I - i_1(+0))$$

$$\frac{R_1 I}{m+1} - \frac{mnR_1 I}{m+1} - nR_1 I = (nR_1 + R_1) i_1(+0)$$

$$\frac{-mn + 1 - n(m+1)}{m+1} R_1 I = (n+1)R_1 i_1(+0)$$

$$\frac{-2mn - n + 1}{m + 1}I = (n + 1)i_1(+0)$$

$$i_1(+0) = \frac{-2mn - n + 1}{(m + 1)(n + 1)}I$$

$$i_2(+0) = -I - i_1(+0) = \frac{mn - m - 2}{(m + 1)(n + 1)}I$$

電池 1 側の電位差 $V_1(t)$ は

$$V_1(t) = V_{C1}(+0) - R_1 i_1(t) - \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt$$

電池 2 側の電位差 $V_2(t)$ は

$$\begin{aligned} V_2(t) &= V_{C2}(+0) - R_2 i_2(t) - \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2(t) dt \\ &= V_{C2}(+0) - nR_1(-I - i_1(t)) - \frac{1}{mC_1} \int_0^t (-I - i_1(t)) dt \\ &= V_{C2}(+0) + nR_1(I + i_1(t)) + \frac{1}{mC_1} \int_0^t (I + i_1(t)) dt \end{aligned}$$

V_{C1} 、 V_{C2} は電流切り替え直後で変化しないので、

$$V_{C1}(-0) = V_{C1}(+0)、V_{C2}(-0) = V_{C2}(+0)$$

式(1)、式(2)を電池 1 側、2 側の $V_1(t)$ 、 $V_2(t)$ に代入し、 t で微分すると

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V_{C1}(+0) - R_1 i_1(t) - \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt = V(-0) - \frac{R_1 I}{m + 1} - R_1 i_1(t) - \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt \\ \frac{d}{dt} V_1(t) &= -R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) - \frac{i_1(t)}{C_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_2(t) &= V_{C2}(+0) + nR_1(I + i_1(t)) + \frac{1}{mC_1} \int_0^t (I + i_1(t)) dt \\ &= V(-0) - \frac{mnR_1 I}{m + 1} + nR_1(I + i_1(t)) + \frac{1}{mC_1} \int_0^t (I + i_1(t)) dt \\ \frac{d}{dt} V_2(t) &= nR_1 \frac{d}{dt} i_1(t) + \frac{1}{mC_1} (I + i_1(t)) \end{aligned}$$

を得る。さらに、 $\frac{d}{dt} V_1(t) = \frac{d}{dt} V_2(t)$ より

$$-R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) - \frac{i_1(t)}{C_1} = nR_1 \frac{d}{dt} i_1(t) + \frac{1}{mC_1} (I + i_1(t))$$

$$(n+1)R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) = -\frac{I}{mC_1} - \frac{m+1}{mC_1} i_1(t)$$

$$m(n+1)C_1 R_1 \frac{d}{dt} i_1(t) = -(I + (m+1)i_1(t))$$

$I + (m+1)i_1(t) = x$ とおくと、 $di_1 = \frac{1}{m+1} dx$

$$\frac{m(n+1)}{m+1} C_1 R_1 \frac{dx}{dt} = -x$$

$$\frac{1}{x} dx = -\frac{m+1}{m(n+1)C_1 R_1} dt$$

$$I + (m+1)i_1(t) = A e^{-\frac{(m+1)t}{m(n+1)C_1 R_1}}$$

$t=0$ の時

$$i_1(+0) = \frac{-2mn - n + 1}{(m+1)(n+1)} I$$

であるから

$$I + \frac{-2mn - n + 1}{(n+1)} I = \frac{2(1 - mn)}{(n+1)} I = A$$

したがって

$$I + (m+1)i_1(t) = \frac{2(1 - mn)}{(n+1)} I e^{-\frac{(m+1)t}{m(n+1)C_1 R_1}}$$

となり、以下の式が導かれる。

$$i_1(t) = \frac{-1}{m+1} I + \frac{2(1 - mn)}{(m+1)(n+1)} I e^{-\frac{(m+1)t}{m(n+1)C_1 R_1}} \quad (5)$$

$$i_2(t) = \frac{-m}{m+1} I - \frac{2(1 - mn)}{(m+1)(n+1)} I e^{-\frac{(m+1)t}{m(n+1)C_1 R_1}} \quad (6)$$

図 40 に $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ を図示する。図より、電流が放電から充電に変化した瞬間は、出力型電池システムに大きな充電電流が流れる。さらに、出力型電池システムに流れる電流は、両電池の容量比と抵抗比によって、充電電流 I よりも大きな電流が流れる可能性があることが分かる。これは、充電電流に容量型電池システムからの循環電流が加わるためであり、異種の電池を組み合わせる電池システムを構築する場合には、システムの最大充放電電流よりも大きな電流が出力型電池システムに印加されることを想定し、

それに耐えられるように、出力型電池システムを設計しなくてはならないことを示唆している。

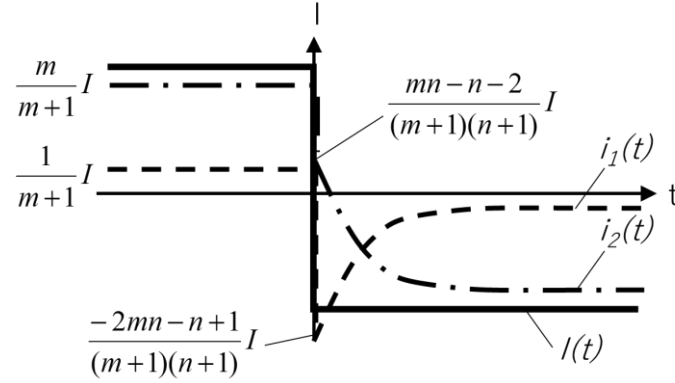


図 40 充放電が切り替わる(放電→充電)場合の電池システムの電流配分特性

3.3.4 充放電を停止する際の挙動解析

最後に、電流パターン#4における電流の挙動について、解析解を求める。定常状態での電流を

$$i_1(0) + i_2(0) = I$$

とすると

$$i_1(-0) = \frac{1}{m+1} I$$

$$i_2(-0) = \frac{m}{m+1} I$$

したがって

$$V_{R1}(-0) = R_1 i_1(-0) = \frac{R_1 I}{m+1}$$

$$V_{R2}(-0) = R_2 i_2(-0) = n R_1 \frac{m}{m+1} I = \frac{mn R_1 I}{m+1}$$

並列接続であるので、各電池システムの電位差は

$$V_{R2}(-0) - V_{R1}(-0) = \frac{mn R_1 I}{m+1} - \frac{R_1 I}{m+1} = \frac{mn-1}{m+1} R_1 I$$

合成電流 I を 0 とした直後も $V_{R2}(-0) - V_{R1}(-0)$ の電位差は保持されるので $V_{R2}(-0) - V_{R1}(-0) = V_{R2}(+0) - V_{R1}(+0)$ となる。電流を切った直後の $C2 \rightarrow C1$ に流れる電流 $i(0)$ は

$$i(+0) = \frac{V_{R2}(+0) - V_{R1}(+0)}{R_1 + R_2} = \frac{mn - 1}{m + 1} R_1 I \times \frac{1}{(n + 1)R_1} = \frac{mn - 1}{(m + 1)(n + 1)} I$$

また、任意の時間 t の循環電流 $i(t)$ は

$$i(t) = \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{R_1 + R_2} = \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{(n + 1)R_1}$$

となる。

次に、 $C2 \rightarrow C1$ に流れる循環電流を $i(t)$ とした時の電池（容量）電圧は

$$V_{C1}(t) = V_{C1}(0) + \frac{1}{C_1} \int_0^{t_1} i(t) dt = V_{C1}(0) + \frac{1}{C_1} \int_0^{t_1} \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{(n + 1)R_1} dt$$

$$V_{C2}(t) = V_{C2}(0) + \frac{1}{C_2} \int_0^{t_1} i(t) dt = V_{C2}(0) - \frac{1}{mC_1} \int_0^{t_1} \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{(n + 1)R_1} dt$$

したがって

$$V_{C2}(t) - V_{C1}(t) = V_{C2}(0) - V_{C1}(0) - \frac{1}{mC_1} \int_0^{t_1} \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{(n + 1)R_1} dt - \frac{1}{C_1} \int_0^{t_1} \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{(n + 1)R_1} dt$$

両辺を微分すると

$$\frac{d}{dt} \{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)\} = -\frac{1}{mC_1} \times \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{(n + 1)R_1} - \frac{1}{C_1} \times \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{(n + 1)R_1}$$

$$= -\left(\frac{m + 1}{mC_1}\right) \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{(n + 1)R_1}$$

$$= -\left\{\frac{m + 1}{m(n + 1)C_1R_1}\right\} (V_{C2}(t) - V_{C1}(t))$$

ゆえに

$$\frac{1}{(V_{C2}(t) - V_{C1}(t))} d\{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)\} = -\left\{\frac{m + 1}{m(n + 1)C_1R_1}\right\} dt$$

積分すると

$$\ln\{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)\} = -\left\{\frac{m + 1}{m(n + 1)C_1R_1}\right\} t + A^*$$

$$\{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)\} = Ae^{-\left\{\frac{m+1}{m(n+1)C_1R_1}\right\}t}$$

初期条件で

$$V_{R2}(-0) - V_{R1}(-0) = V_{R2}(+0) - V_{R1}(+0) = \frac{mn - 1}{m + 1} R_1 I$$

したがって

$$A = \frac{mn - 1}{m + 1} R_1 I$$

$$\{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)\} = \frac{mn - 1}{m + 1} R_1 I e^{-\left\{\frac{m+1}{m(n+1)C_1R_1}\right\}t}$$

となり

$$i(t) = \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{R_1 + R_2} = \frac{V_{C2}(t) - V_{C1}(t)}{(n + 1)R_1} = \frac{mn - 1}{(m + 1)(n + 1)} I e^{-\left\{\frac{m+1}{m(n+1)C_1R_1}\right\}t} \quad (7)$$

が得られる。

図 41 に $i(t)$ を図示する。図に示すように、放電停止後に、容量型電池システムは放電を継続し、出力型電池システムは充電が開始される。すなわち、容量型電池システムから出力型電池システムへ循環電流が発生する。この循環電流は、各電池の電圧差が解消されるまで流れる。この循環電流が解消されるまでの応答時間も #1、#2 同様に抵抗比と、容量比により変動する。ただし、数式から明らかなように、循環電流は直前に流れていた I よりも小さな値となる。

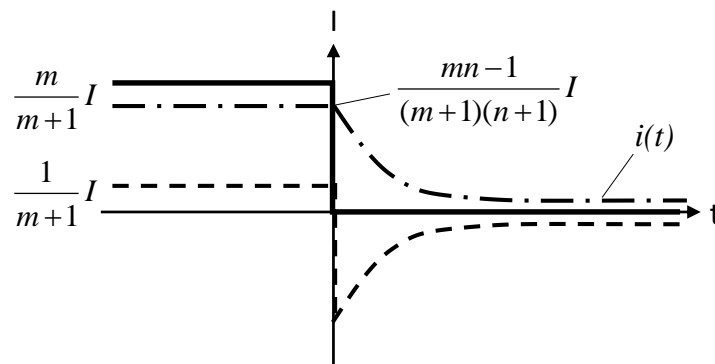


図 41 放電停止後の電池システムの電流配分特性

3.3.5 まとめ

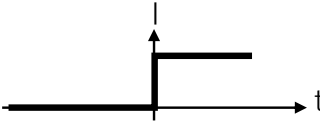
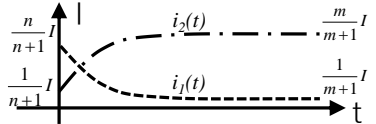
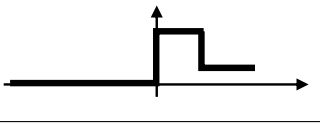
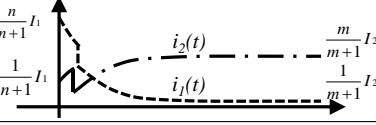
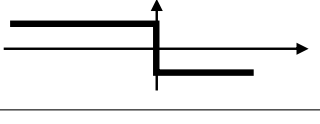
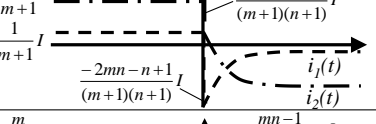

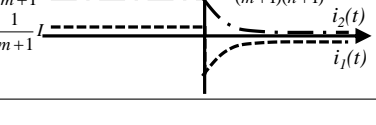
これまでの検討結果を表 3 にまとめて示す。#1、#2 のケースでは、電流変化の際は始めは抵抗比に応じて電流が配分され、時間の経過と共に容量比に基づいて電流が配分される。配分の変化に要する応答時間は抵抗比と容量比に応じて定まる。#3 のケースでは、放電から充電に電流が変化した瞬間に、循環電流も加わって充電電流よりも大きな電流が出力型電池システムに流れる可能性があることが分かった。また#4 のケースでは、充放電を停止しても容量型電池システムと出力型電池システムとの間の電池電圧の差

に基づき循環電流が発生する。

これらの結果より、異種の電池により電池システムを構築する場合には、容量型電池システムの負荷軽減と、システムの安全性確保の観点から、以下に関する検討が必要であることが示唆された。

1. 電流配分の最適化のための容量比と抵抗比の設計
2. 電池システムに流れる最大電流の予測
3. 循環電流が解消されるまでの時間の把握

表 3 電流配分特性のまとめ

電流パタン		解析解
1		
2		
3		
4		

3.4 結言

本章では、異種電池システムを構成し、運用する場合に想定される課題や電流配分の特
 性について検討した。結果として、異種電池システムでは、出力変化に応じて過渡的
 に大きな電流が一方の電流に発生し得るため、異種電池システムを設計するためには、
 単純な出力特性と容量特性の組み合わせだけでなく、電流が切り替わる際の状態遷移条
 件の把握が必須となることを明らかにした。また、この電流挙動を解析するために、電
 池システムの起電力 (OCV) をキャパシタモデルで、内部抵抗 (DCR) は抵抗にて模擬し、電
 池システムに流れる電流は、出力型電池システムと容量型電池システムの電流の合計値
 とする電気回路モデルを考案した。考案したモデルを用いて、電池システムの起動時を
 想定したステップ状の電流変化、充放電中の電流変化、放電から急峻に充電 (またはそ
 の逆) に切り替わる条件、電池システムの稼働終了時の電流変化の 4 条件の解析解を求
 めた結果、電池システムの起動や、充放電の途中で電流が変化する際は、始めは抵抗比
 に応じて電流が配分され、時間の経過と共に容量比に基づいて電流が配分されること、
 電流が放電から充電に変化した瞬間では、循環電流も加わって充電電流よりも大きな電
 流が出力型電池システムに流れる可能性があることが分かった。電池システムを停止さ
 せる条件では、容量型電池システムと出力型電池システム間の電池電圧の差に基づき
 循環電流が発生することを明らかにした。

これらの結果より、異種の電池により電池システムを構築する場合には、容量型電池システムの負荷軽減と、システムの安全性確保の観点から、以下に関する検討が必要であることが示唆された。

1. 電流配分の最適化のための容量比と抵抗比の設計
2. 電池システムに流れる最大電流の予測
3. 循環電流が解消されるまでの時間の把握

第4章 大規模電池システムへの適用効果の検討

4.1 緒言

複数かつ異種の電池を組み合わせ、出力性能および容量性能に過不足の無い大規模な電池システムを構築する手法の確立を志向して、前章までに、電池システムのアーキテクチャと、異種電池システムを構築する際の留意条件について検討した。本章では、検討した手法を定置向け大規模電池システム(4.2節)および自動車用電池システム(4.3節)に適用し、期待した性能や動作が実現できるかを検証した。

4.2 定置向け電池システムへの適用効果

4.2.1 概説

本節では、ビルディングブロック方式および階層化管理方式を適用した30kWhの電池システムを構築し、これらの方式による大規模電池システムの正常な充放電と、異常を模擬した場合における安全動作について検証した。さらに、漏電検知のための昇圧方式の漏電検知回路を30kWh電池システムに適用し、漏電箇所の特定制定を含めた漏電検知の可否について検証した。

4.2.2 30kWh 電池システム構成

図42に試作した30kWhの電池システム(以後、試作電池システムと)の構成概要を示す。試作電池システムは、インバータ1台と電池パック8台で構成した。試作電池システムは電池モジュール、電池パック、電池システムの3階層構造となっている。電池モジュール、電池パック、電池システムの構成を以下に述べる。

1. 電池モジュール

電池モジュールは、電池システムにおいて制御機能を備えた最小構成単位である。電池モジュールには、市販のラミネート型リチウムイオン電池セルを7個直列し、これをBMC(Battery Module Controller)と共にモジュール筐体に収納した。

2. 電池パック

電池パックは電池モジュールを直列接続し高電圧化した電池システムの基本構造であり、最小の制御単位である。試作電池システムでは、電池モジュールを16台直列接続してBPC(Battery Pack Controller)およびBPCで制御可能なスイッチ回路と共

に 19 インチラックに収納した。

3. 電池システム

電池システムは並列接続された 8 台の電池パックと BSC(Battery System Controller)とで構成する。試作電池システムは上記の電池システムと 1 台のインバータとで構成した。試作電池システムの充放電電力は BSC とインバータの PLC(Programmable Logic Controller) が通信して制御する。BSC は BPC との通信により各パックの充電状態や異常状態に関する情報を収集し、さらに BPC は BMC との通信により各モジュールの充電状態や異常状態に関する情報を収集する。

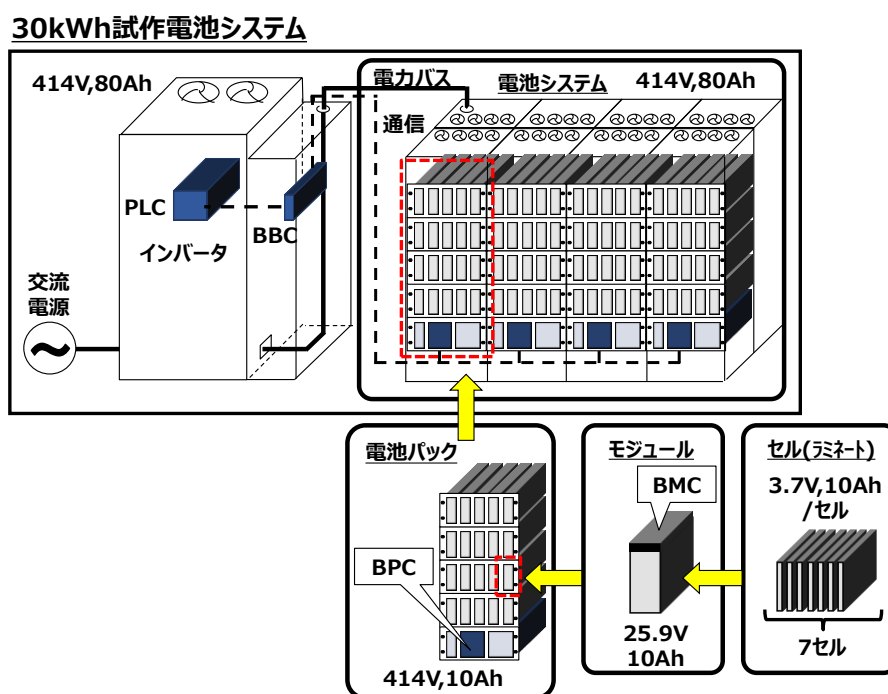


図 42 30kWh 試作電池システムの概要

表 4 に各構成単位のスペックと外観をまとめる。電池セルは電圧 2.5~4.2[V]、10Ah のラミネート型リチウムイオン電池を使用した。電池モジュールは電池セルを 7 個直列しており、電圧は 17.5~29.4[V]、容量は 10.4[Ah]である。電池パックは電池モジュールを 16 個直列接続して構成し、電圧は 280.0~470.4[V]、容量 10.4[Ah]となる。電池システムは電池パックを 8 台並列して構成し、電圧は 280.0~470.4[V]、容量は 83.2[Ah]となる。ビルディングブロック方式では、電池モジュールの構造や電圧の規模の選択が、電池システムの構築方法に影響を与えるが、本開発のように人間による取り扱い時の安

全性を考慮して 50[V]未満とする場合、電池パックが電池システムの電圧を決定する機構となり、構造が最も複雑となる。そこで、以降で電池パックの構造について詳細を説明する。

表 4 試作電池システムの各構成単位のスペックと外観

構成単位	外観	使用数	電圧(公称)	容量
			[V]	[Ah]
電池セル		-	2.5~4.2 (3.7)	10.4
電池モジュール		電池セル 7個	17.5~29.4 (25.9)	10.4
電池パック		電池モジュール 16個	280.0~470.4 (414.4)	10.4
電池システム		電池パック 8台	280.0~470.4 (414.4)	83.2

図 43 に電池パックの構成の詳細を示す。(a)は 19 インチラック (W600×D600×H1800) の正面図、(b)は背面、(c)は 19 インチラック内に電池モジュールを搭載するための架台となるサブラックの外観図である。電池パックには 19 インチラック (W600×D600×H1800) を使用した。ラック内には、モジュール収納および固定用のサブラック (W435×D336×H185) が 4 段設置されており、1 段につきモジュール 5 台が収納可能である。また、コントローラやブレーカ等はラック最下段に BPC(Battery Pack Controller)と共に収納した。ラックの最上部には電池パックを冷却するための天井ファンを設置し、加えて(b)の背面図で確認できるように、各サブラックには電池モジュールを個別に冷却するためのモジュールファンを設置した。また、図 44 に示すように、電池パック内では図に示す経路で電圧が上昇するよう配線を施しており、1 段につき電

圧が 147V 上昇し最大電圧は 588V となる。また、電池モジュールを電池パックに差し込むだけで電源回路が形成されるスロットインコネクタを設置しており、これによりシステム新設時の作業や、モジュールの交換が容易な構造とした。

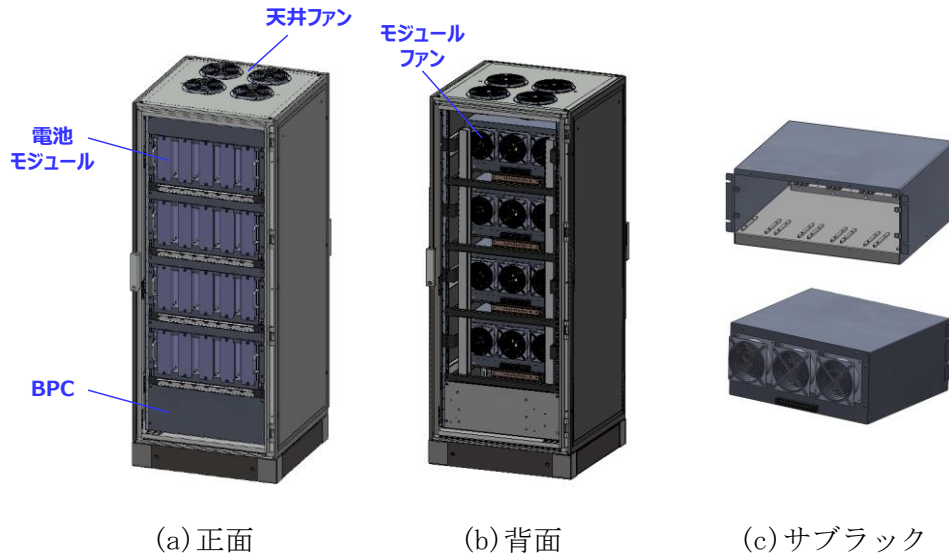


図 43 電池パックの詳細構造

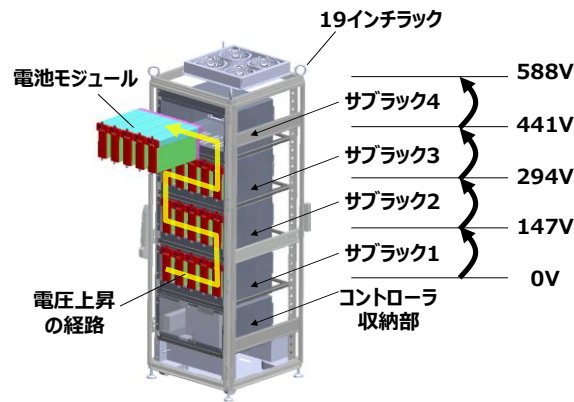


図 44 電池パック内の電圧構造

次に、試作電池システムに実装した階層化管理方式について説明する。図 45 は試作電池システムにおける階層化管理方式の概要を示す。本開発では、電池モジュールが自らを構成する全セル(7 個)の状態を個別管理し、必要な情報を BMC (Battery Module Controller) を通じて、電池パックの BPC (Battery Pack Controller) に送信する。電池パックは自らを構成する直列接続された電池モジュールの状態を、BMC から受信した情報に基づき一括管理し、必要な情報を電池システムの BSC (Battery System Controller)

に送信する。さらに、電池システムは並列接続された電池パックの状態を、BPC から受信した情報に基づき一括管理して、インバータに対して電池システムが入出力可能な電力の上限値を通知する管理方式とした。階層管理方式の特徴は、充電状態や異常診断の処理を自階層で完結させ、階層間で交わされる情報を上位階層で必要な情報に限定する点にある。この構成を取ることで、システムの規模や構成要素が異なる場合でも同じ制御構成での制御が実現でき、大規模なシステムの構築が容易となる。

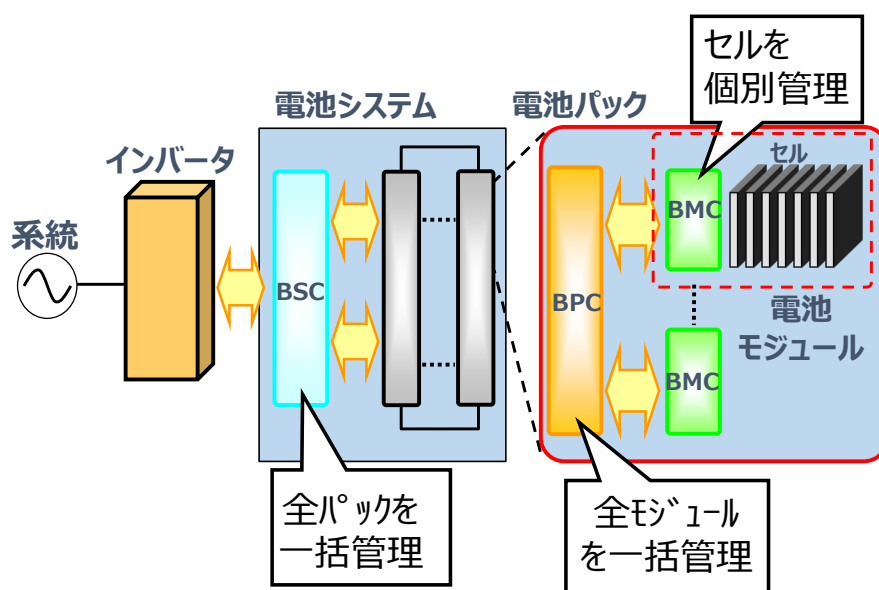


図 45 階層化管理方式の概要

表 5 から表 8 を用いて、階層化管理方式を実現するために実際に BMC、BPC、BSC の各コントローラに割り当てた機能を説明する。

表 5 は BMC に割り当てた機能の一覧である。自律的に電池セルを監視し、性能と安全性を維持することを可能とするため、BMC には各セルの電圧およびモジュールの総電圧、電流、温度の測定機能を搭載し、さらに測定した情報から電池モジュールの充電状態である SOC を演算する機能と、電圧モジュール内のセルに電圧ばらつきが生じた場合に電圧差を均一化するbalancing機能を実装した。また、上記の測定データおよび演算結果を BPC に送信するための通信機能を搭載した。

表 5 BMC の機能一覧

No.	機能	機能詳細	内容
1	SOC演算機能	-	電流積算およびSOC/OCVカーブによる演算
2	バラシング機能	パッシブ	セルコン+外部MOS FETによるバラシング
3	測定機能	セル電圧測定	セルコンによるセル電圧測定
		総電圧測定	総電圧を測定
		電流測定	電流を測定
		温度測定	セルおよびコントロール基板の温度を測定
4	通信機能	上位システム (BPC)通信	4線式全2重マルチドロップRS485、基準電位はFG
5	デバッグ機能	シリアル通信	RS232
		デバッグI/F	HUDI

表 6 は BPC の機能一覧である。主な機能として、BPC は下位階層の BMC および上位階層 BSC との通信機能、電池パック内の温度、電圧、電流の測定機能、19 インチラック内の電池モジュールを冷却するための冷却制御機能、冷却ファンや電力ブレーカの故障や状態の検知機能、電池パックを他の電池パックおよびインバータと接続するためのスイッチ制御機能、そして電池パック内で異常が発生した場合に外部に異常の内容を通知する表示機能を搭載した。

表 6 BPC の機能一覧

No.	機能	機能詳細	内容
1	通信機能	下位システム (BMC)通信	4線式全2重マルチドロップRS485、基準電位はFG
		上位システム (BSC)通信	10/100Base-TX
2	デバッグ機能	シリアル通信	RS232
		デバッグI/F	HUDI
3	測定機能	温度測定	パック内温度管理用
		電圧測定	ストリング毎に電圧を測定
		電流測定	ストリング毎に電流を測定
4	保護機能	過電流保護	ストリング毎にヒューズによる過電流保護
5	冷却制御機能	FAN電源制御	DC24V FANのON/OFFを制御
6	検知機能	FAN故障検知	FANのバルスセンサにより故障を検知
		手動ブレーカ状態認識	手動ブレーカのON/OFF状態を検知
7	スイッチ機能	電流遮断/接続	ストリング毎に電流遮断/接続
8	電源制御機能	モジュールRS485 電源供給/停止	モジュールの絶縁型RS485トランシーバのバス側電源を供給/停止
		電源バックアップ切替	2系統からのDC入力に対して高電圧側の系統を選択
9	表示機能	ステータス表示	交換識別や各種ステータスを表示、LED × 8個
10	設定機能	通信ID設定	簡易的なIDの設定やデバッグに使用、DIP SW × 8bit

表 7 は BSC の機能一覧である。BSC の役割は電池システムの保護と性能維持であり、電池を保護するための BPC から受信したデータに基づき電圧、電流、温度が電池システムの運用にとって問題の無い範囲で運用されているかを監視する機能を備え、さらに電池システムの維持のために、バラシングの必要性を判断する機能を搭載した。これは、一つの電池モジュール内で電圧が均一化されていても、異なる電池モジ

セル間で電圧が均一化されていない場合を想定し、搭載した機能である。

表 7 BPC の機能一覧

No.	機能	詳細機能	内容
1	リチウムイオン電池の保護	電圧監視	リチウムイオン電池の各セルの過充電および過放電からの保護
		電流監視	リチウムイオン電池の各セルの規定以上の充放電電流からの保護
		温度監視	リチウムイオン電池の各セルの動作温度条件の遵守
2	電池システムの性能維持	balancing	直列接続された各リチウムイオン電池セル間の電圧調整
		SOC演算	balancingを実行するための演算

図 46 に 30kW 試作電池システムのコントローラの全体構成を示す。試作電池システムのコンセプトは「ビルディングブロック方式により、多様な規模の電池システムに対して出力性能と容量性能に過不足無く対応できる電池システム」である。試作電池システムのコントローラの最大の特徴は、このコンセプトを実現するため、電池システムを構成する最小単位であるモジュールに2つの基本機能（セル電圧・電流・温度監視機能と SOC 演算・balancing機能）を実装している点にある。これにより電池システムは、システムを構成する膨大な電池セルの電圧・電流・温度の監視機能と SOC 演算など大規模なデータ処理が必要な作業から解放され、優れた拡張性と自律性を備えた階層化構造を得る。即ち、電池システムとして必要な基本機能は各電池モジュールに実装されているので、モジュール間バランスの調整以外、基本的には上位階層の電池パックが電池モジュールを制御する必要はない。同じ考えで、電池パックは複数の電池モジュールを直列接続して構成されるが、これらを束ねて1つの電池として振る舞う機能を実装しているため、電池パック間バランスの調整以外、基本的には上位階層の電池システムは電池パックを制御する必要はない。試作電池システムのコントローラは、このように各階層において制御が閉じている構成とした。

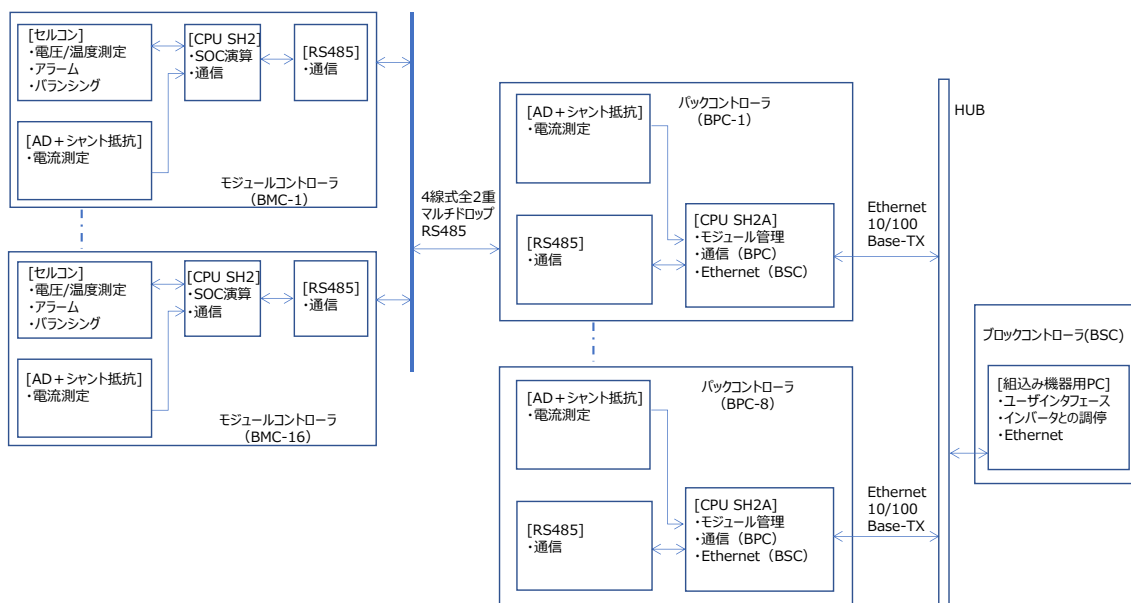


図 46 試作電池システムのコントローラの全体構成

4. 2. 3 実験方法

4. 2. 3. 1 実験項目

表 8 に、試作電池システムを用いた実験項目と内容、および確認事項を示す。試作電池システムを用いて、充放電時の動作確認、電池パックのスイッチ動作確認、異常時の動作確認、漏電検知の可否確認をする。充放電時の動作確認は、充放電時の BSC、BPC、BMC の各コントローラのデータを確認(1-1)し、そのデータの妥当性およびコントローラ間でデータが整合しているかを確認(1-2)する。その上で試作電池システムの動作が正常であるか、動作の妥当性を確認する(1-3)。電池パックのスイッチ動作確認では、BSC と BPC が一致した情報に基づいて電池パックのスイッチ制御指令をやり取りできるかを確認(2-1)し、かつその指令に基づいてスイッチが正常に動作するかを確認(2-2)する。異常時の動作確認では、模擬的に温度異常を発生させた場合の電池システムの動作を確認する。具体的には、異常発生時に状況を正確に把握し、各階層のコントローラ間で予め定めた手順に従い異常時の対応が取れるか、その動作の妥当性を確認する(3-1)。また、異常が解消され場合にも、予め定めた手順に従い復帰動作ができるかを確認する(3-2)。漏電検知可否の確認では、昇圧回路を用いた漏電検知方式の漏電検知性能を確認する。初めに電池パック 1 台で漏電検知の可否を確認する(4-1)。次に電池システム(電池パック 8 台)での漏電検知可否を確認(4-2)する。

表 8 試作電池システムでの実験項目と内容

#	項目	目的・内容	確認事項
1	充放電時の動作確認	充放電時のBSC、BPC、BMCのデータの確認	1-1 各コントローラのデータの確認
			1-2 コントローラ間のデータの整合確認
			1-3 試作電池システムの動作妥当性確認
2	電池パックのスイッチ動作確認	電池パック同士を接続する際のスイッチ制御の正常動作確認	2-1 BSC-BPC間の制御指令の妥当性確認
			2-2 スイッチの動作確認
3	異常時の動作確認	模擬温度異常を発生させた場合の電池システムの動作の確認	3-1 異常発生時の動作の妥当性確認
			3-2 異常解消後の動作の妥当性確認
4	漏電検知可否の確認	昇圧回路を用いた漏電検知方式の漏電検知性能の確認	4-1 電池パック1台の漏電検知可否
			4-2 電池システム(パック8台)での漏電検知可否

4.2.3.2 実験条件

表 9 に各試験項目の実験条件を示す。充放電試験では、最大入出力±6kW において、運転SOC範囲10～80%の充放電を2サイクル(10→80→10→80)を8時間かけて実施し、各コントローラのデータおよびコントローラ間のデータの整合性と、電池システムとしての動作の妥当性を確認した。電池パックのスイッチ動作では、27[A]の一定電流で放電中に、電池パック1のスイッチを解列させ、そのまま放電を継続した後に、同じ電流で充電に切り替え、充放電を継続していた他の電池パックと電池パック1が同じSOCになった時に再び電池パック1が電池システムが自動的に復帰するかを確認、スイッチ制御の動作確認をした。異常時の動作確認では、一定電流の充放電時に模擬的に特定の電池モジュールに温度異常を発生させ、異常が発生した直列電池システムの解列と、異常解消後の複列動作を確認した。そして、漏電検知に関しては、電池パックのモジュール数を12個とし、電池モジュール間13箇所を1つずつ地絡させた場合の漏電検知の可否を検証した。

表 9 試作電池システムでの実験条件

#	項目	内容	試験条件	
1	充放電時の動作確認	充放電時のBSC、BPC、BMCのデータの確認	充放電時間	8時間
			最大入出力	±6kW
			運転SOC範囲	10~80%
2	電池パックのスイッチ動作確認	電池パック同士を接続する際のスイッチ制御の正常動作確認	充放電電流	±27A
			スイッチ接続条件	42.5%
2	異常時の動作確認	模擬温度異常を発生させた場合の電池システムの動作の確認	異常条件	温度異常
			充放電電流	±15A
3	漏電検知可否の確認	昇圧回路を用いた漏電検知方式の漏電検知性能の確認	地絡箇所	13箇所

4.2.4 実験結果と考察

4.2.4.1 基本動作および充放電試験結果

図 47 に試作電池システムの充放電試験結果を示す。実験は、試作電池システムの内パック 4 台を用いて実施した。実験開始後の 1000[秒]付近から約 6[kW] (13[A])で放電、7500[秒]付近で SOC の下限である 10[%]に到達し、6[kW]の充電に切り替わり 16000[秒]付近で SOC の上限である 80[%]に到達して再び 6[kW]の放電となり、25000[秒]付近で再度、SOC の下限値に到達して 32000[秒]まで充電した。電流は BSC (Battery System Controller)での測定値、SOC は BPC から受信した各電池パックの SOC を平均化して演算している。電流はプラスが放電、マイナスが充電を示している。電圧と電流の動きは放電時に電圧が低下し、充電時に電圧が上昇しており、定性的には基本動作として正常に充放電試験が行われている。さらに、7500[秒]から 16000[秒]の間の充電電流は 12.5[A]であり、この間の SOC の変化量を計算すると約 70.7[%]となり、BSC の演算結果の 70[%]とほぼ値が一致し、定量的にも正常な充放電と BSC が動作していることが確認できた。一方で、SOC に関しては図中の点線で囲んだ 16000[秒]付近で SOC がステップ的に上昇し、20000[秒]付近でステップ的に下降、さらに 28000[秒]でもステップ的に下降する動作が見られた。電流が大きく変化していない状況で残存容量を示す SOC がステップ的に変化するのは論理的に発生し得ない現象であり、これは SOC の計算方法の問題である。これについては要因を後述する。

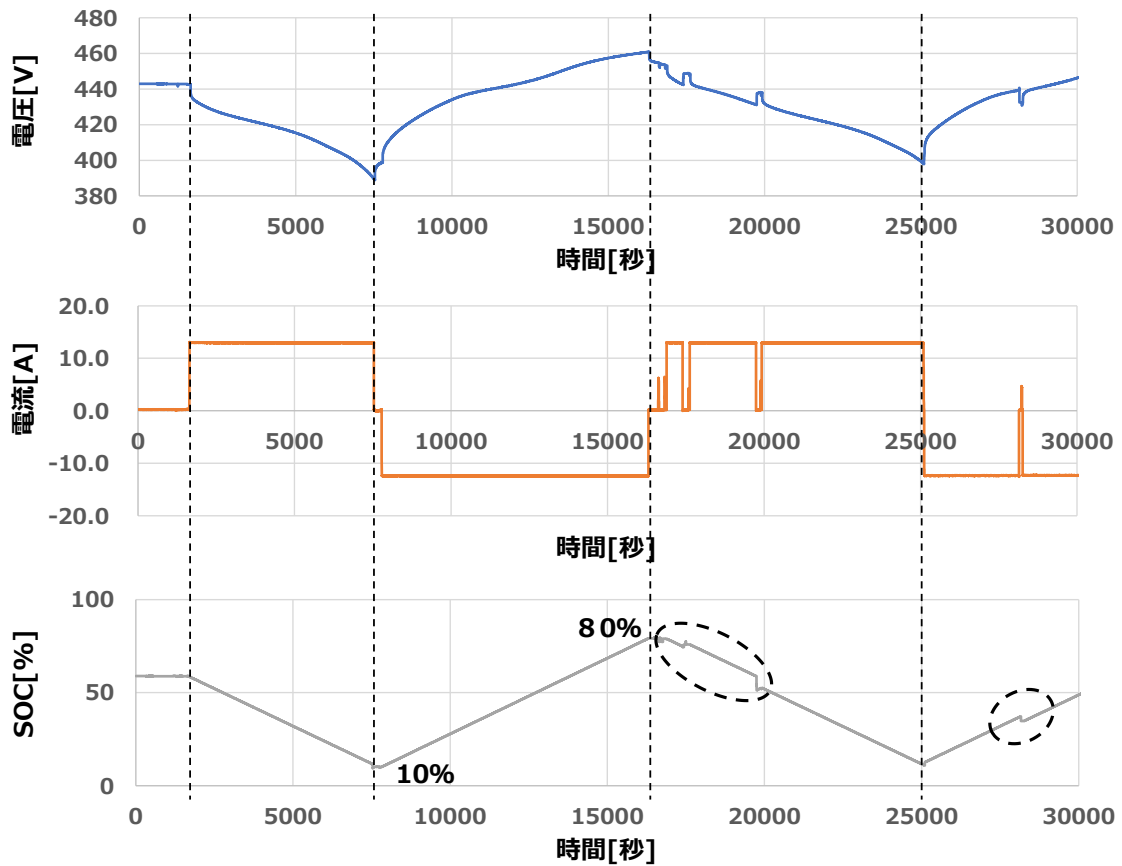


図 47 試作電池システムの電圧、電流の測定および SOC 演算結果

次に、図 48 に同条件での各電池パックの電圧と電流の測定データを示す。電圧および電流はそれぞれ BPC で測定した値である。充放電試験に使用した 4 台の電池パックは、並列接続されているので充放電中の電圧は等しくなる。そのため、電池パックの電圧は 1000[秒]付近で放電が開始される前は、電圧に若干の差異が確認できるが、充放電が開始された後は全ての電池パックの電圧は一致しており、正しく動作していることが確認できた。また、1000[秒]付近で放電を開始した際、電池パック 1 は瞬時的に電流がマイナスになっており充電電流が流れていることが確認できる。放電開始前の電圧データでは、電池パック 1 は他の電池パックの電圧よりも小さく、充電状態が小さいと想定される。このため、放電開始と同時に電池パック 1 には充電状態の違いに基づく循環電流として充電電流が流れたと考えられる。また点線円の充電期間の充電電流を比較すると、その大きさは電池パック 2 が最大で、次に電池パック 1、そして電池パック 3 と 4 が最小となっている。3 章で説明した電池システムの電流配分の解析解では、並列接

続した電池システム間の電流は容量比で配分されるので、これは各電池パックの容量の大きさの違いにより生じたと考えられる。この観点で充放電試験中の電流の大きさの違いを見ると、全て上記の関係となっており、電池システムの充放電時の動作として正常な動作である。

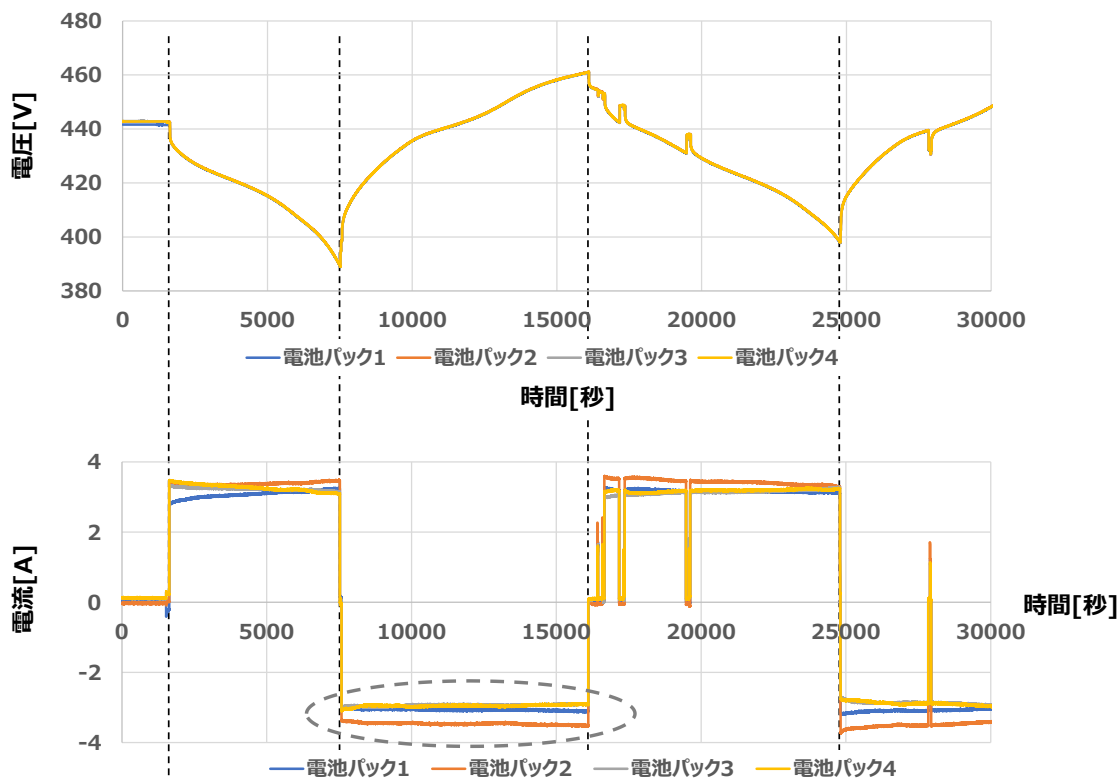


図 48 電池パック 4 台の電圧、電流の測定結果

図 49 は、各電池パックの SOC 演算結果を示している。①から③は、前述した SOC がステップ的に変化している点である。図より、電池パック 4 の SOC が大きく変化していることが判った。一方で、②に関しては電池パック 4 のみならず、全ての電池パックの SOC がステップ的に変化していることが確認できた。③は①と同様に電池パック 4 のみが変化している。①と②が発生した 17000[秒]から 20000[秒]の部分拡大すると、SOC のステップ的な変化は、電流のステップ的な変化と同時に発生している。このことから、SOC の演算用に開発したアルゴリズムに原因があると推察される。本研究では、SOC 演算用のアルゴリズムとして、充放電の電流を積算する電流積算方式

と、電池の起電力(OCV)を利用してSOCを演算する電圧検知方式を条件により組み合わせた演算方式としている。特に、電圧検知方式は大きな電流変化があった時に適用される方式であり、電池パック4のBPCでは①から③の条件で電圧検知方式が選択され、SOCの演算結果が電流積算から電圧検知式の値にステップ的な変化が起きたと推察される。以上より、演算方式が切り替わった際に値が不連続にならない対策を施すことが今後必要である。

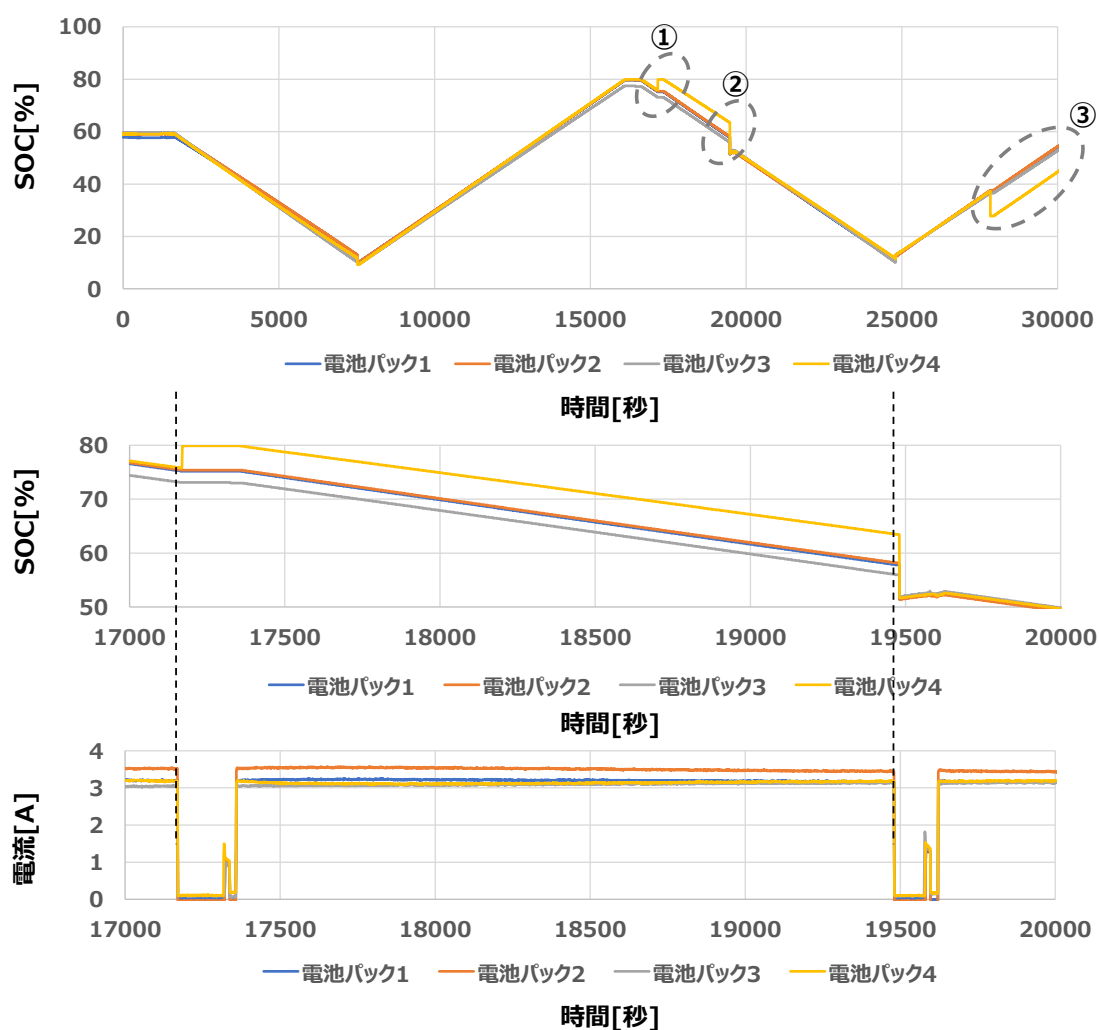


図 49 電池パック 4 台の SOC 演算結果

図 50 に、BSC で演算した試作電池システムの SOC と、電池パック 4 台の BPC で演算した SOC を平均化した値との比較を示す。両者の値は一致しており、BSC での SOC が

正しく演算されていることを確認した。

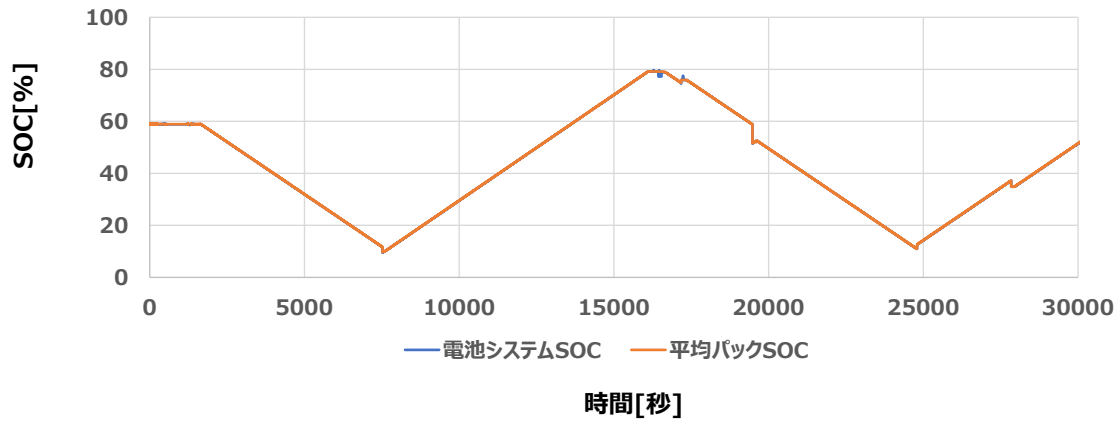


図 50 BSC で演算した SOC と電池パックの SOC 演算結果の比較

図 51 に、電池パック 1 の BPC が、電池パックを構成する 16 台の電池モジュールの BMC から受信した電圧測定結果と、SOC 演算結果を示す。すべての電池モジュールの電圧がほぼ均一であり、SOC も一致していることが確認できた。

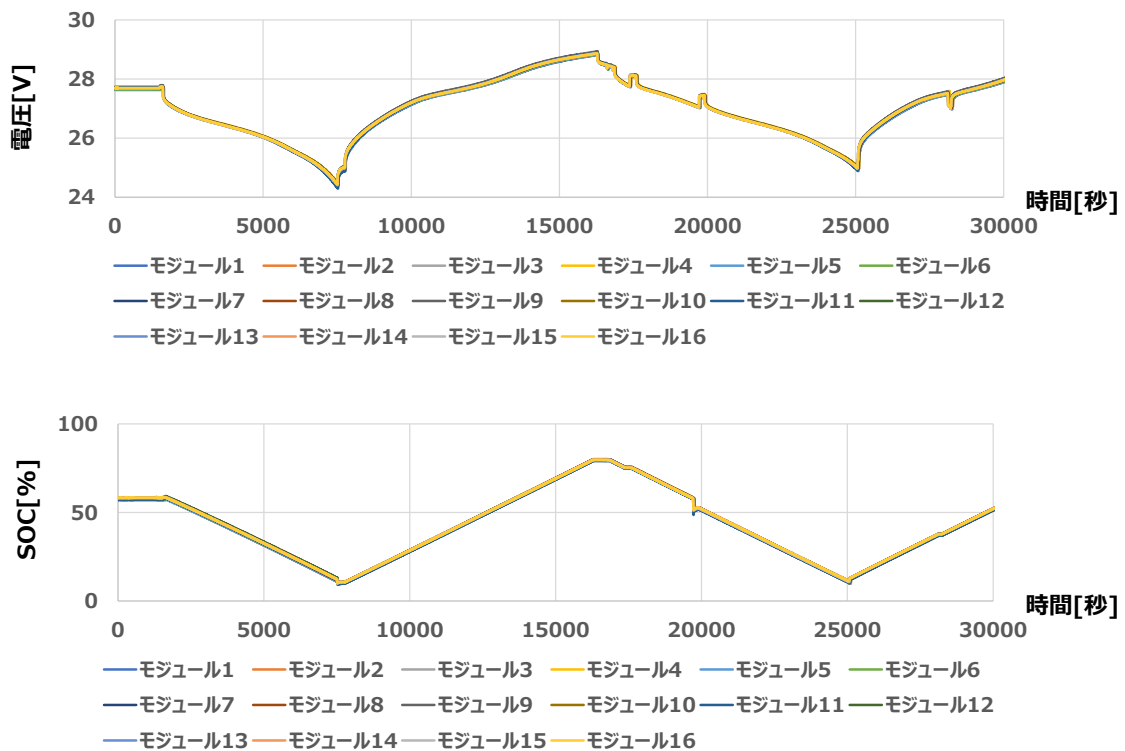


図 51 電池パック 1 を構成する電池モジュール群の電圧測定、SOC 演算結果

図 52 に、BPC が計測した電池パック 1 の総電圧と、電池パック 1 を構成する 16 台の電池モジュールの電圧データの総計値との比較と、BPC が演算した SOC と、各電池モジュールの BMC が計算した SOC の平均値の比較結果を示す。両者の値はほぼ一致しており BPC および BMC の電圧の計測と、SOC 演算が正しく計算されていることが確認できた。

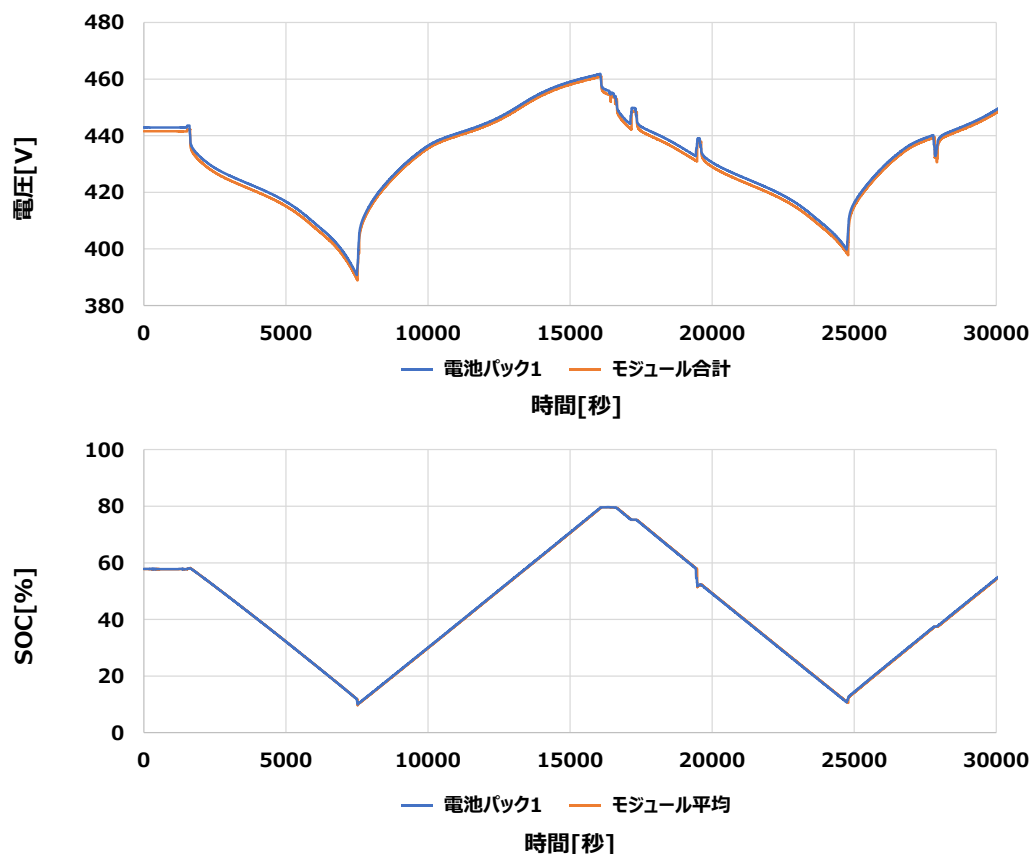


図 52 電池パックおよび電池モジュールの電圧計測と SOC 演算結果の比較

図 53 に、電池モジュールにて BMC が測定したモジュール電圧と、電池モジュールを構成する全セルの電圧の合計値および、電池モジュールが演算したモジュールの SOC と各セルの SOC の平均値の比較を示す。両者の値はほぼ一致しており BMC 内の各種測定および演算機能が正常に動作していることが確認できた。

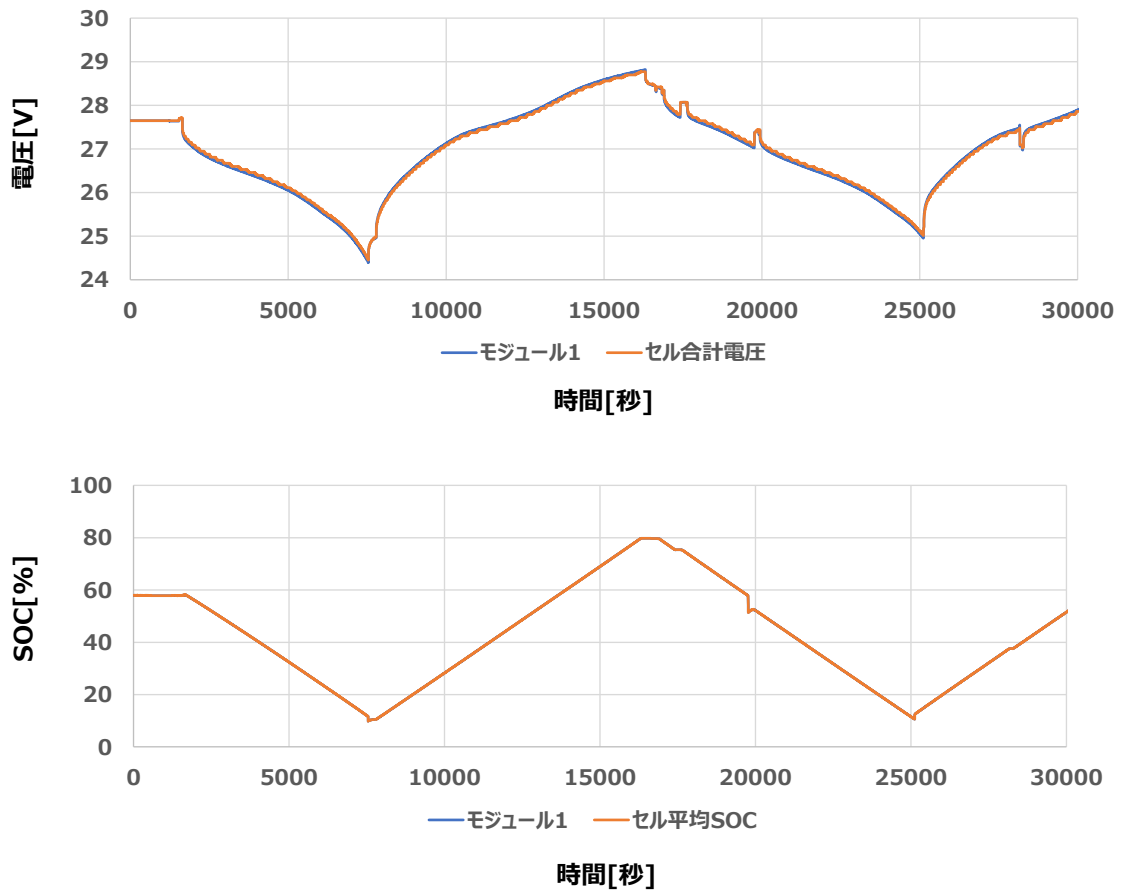


図 53 BMC の電圧測定と SOC 演算結果の確認

以上の結果より、ビルディングブロック方式と階層化管理方式を適用して構築した試作電池システムが正常に充放電を行えることを確認した。また、BSC、BPC、BMC のそれぞれのコントローラが測定および演算した情報や、試作電池システムの異常の有無などの稼働状態を可視化するために、状態監視システムも併せて開発した(図 54)。

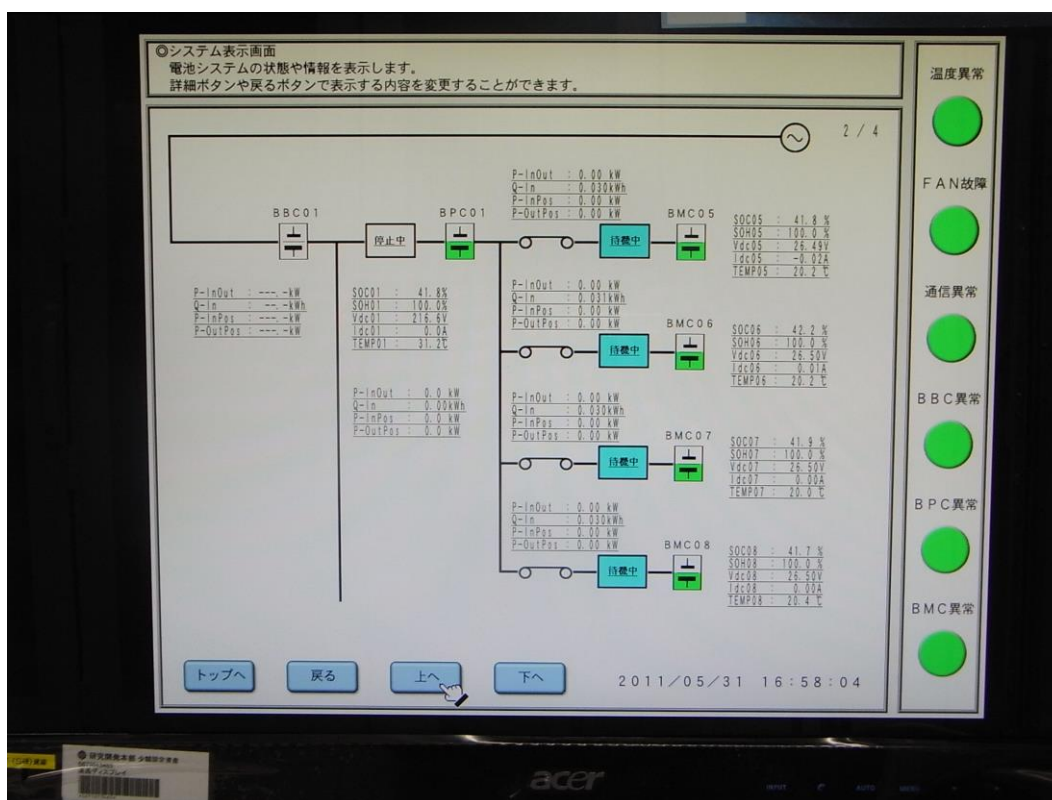


図 54 試作電池システムの状態可視化システムの外観

- 4.2.4.2 電池パックのスイッチ動作確認
- 4.2.4.3 電池システムの異常模擬試験結果
- 4.2.4.4 漏電検知回路の動作検証

博士論文の 4 章の 4.2.4.2~4.2.4.4 の要約

ビルディングブロック方式および階層化管理方式により構築した 30kWh の試作電池システムにて、電池システムの充電状態や故障が検出されていることを確認し、電池システムが安全に充電および放電できることを確認した。

4.2.5 まとめ

本節では、ビルディングブロック方式と階層化管理方式を適用して 30kWh 試作電池システムを構築して、充放電試験、スイッチ制御、異常模擬試験、および漏電検知回路の動作を検証し、以下の知見を得た。

1. 試作電池システムにて約 8 時間の充放電試験を実施し、ビルディングブロック方式と階層化管理方式を適用して構築した電池システムが正常に充放電を行えることを確認した。また、BSC、BPC、BMC が自階層の電池群(セル、モジュール、パック)の電圧、電流、SOC などの情報を測定、演算し、かつ各コントローラ間で正確に共有できることが判った
2. スイッチの動作試験にて、電池パックは所定の SOC で一つの電池パックのスイッチを Off にし、他の電池パックはそのまま充放電を継続した条件にて、充放電を継続した電池パック(電池システム)の SOC とスイッチが Off にされた電池パックが等しくなった時点で、自動的に電池パックのスイッチが On となり電池システムに復帰することを確認した。これにより、事前に設定した条件で BSC と BPC が連携し、スイッチ動作が可能なことを確認した。
3. 異常を模擬した試験により、電池システムは異常が起きた箇所を正確に把握でき、異常な電池を含む電池パックを試作電池システムから解列し、異常が解消されたと判断した場合は自動で復帰する機能を実現した。
4. 昇圧回路と分圧抵抗を用いた漏電検知回路による漏電検知試験を実施した結果、電池パック内の主回路のあらゆる地点で地絡を検知でき、かつ地絡箇所も特定できることを確認した。また、電池パック 1 台だけでなく、電池パックが 8 台の条件でも同様に地絡検知が可能なことを確認し、本方式が大規模電池システムにも適用可能なことが判った。

4.3 自動車向け電池システムへの適用効果

4.3.1 概説

前節では、ビルディングブロック方式と階層化管理方式により、大規模な電池システムを構築でき、かつ安全に運用できることを示した。本節では、異種の電池システムを組み合わせた異種電池システムの、電池の特性差による電流配分への影響を検証するこ

とを目的とする。この検証のために、出力性能に優れた電池と、容量特性に優れた電池で異種電池システムを構築し、それを搭載した試作の電気自動車を開発して電流配分への影響を評価した。

4.3.2 システム構成

図 58 と表 11 に、本研究で開発した異種電池システムを搭載した EV の概要と諸元を示す。開発に使用した車両は、インドのマヒンドラエレクトリック社の e20 を使用した。e20 は重量が約 1000[kg]、最大出力が 19[kW]、最高速度 80[km/h]の小型 LSEV(Low Speed Electric Vehicle) [1]であり、システム電圧が 52[V]と低く、電気系の改造も容易なことから本開発の適用効果の検証に向けた実験機として好適であると判断し使用した。

電池システムは、e20 の電池システムを容量型の電池システムとして利用し、新たに出力型の電池システムを直接接続して構築した。それぞれの容量は、容量型が 200[Ah]、出力型が 10.4[Ah]である。出力型電池システムは後部座席を取り外し、そこに設置台を追設して図のように搭載した。容量型電池システムは、車両のシート下に格納されている。各電池システムの抵抗値は、容量型電池システムが約 10[m Ω]、出力型電池システムは温度や充電状態に応じて 10~18[m Ω]の値となる。

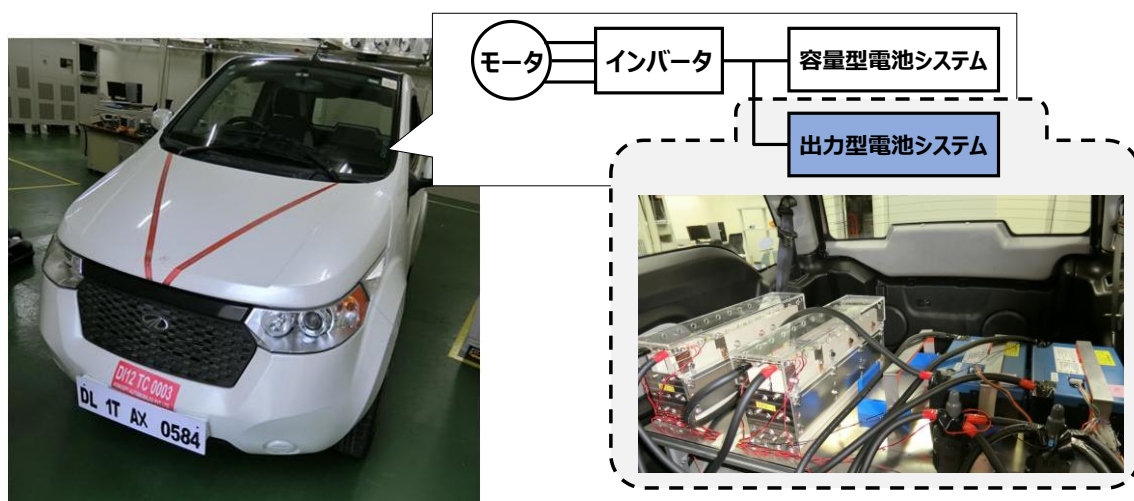


図 58 異種電池を搭載した試作電気自動車の概要

表 11 試作電気自動車および電池システム主要諸元

No.	パラメータ名	値	単位
1	車両重量	960	Kg
2	最大出力	19	kW
3	電池電圧 (公称)	52	V
4	電池容量 (容量型電池システム)	200	Ah
5	電池容量 (出力型電池システム)	10.4	Ah
6	電池抵抗 (容量型電池システム)	10	mΩ
7	電池抵抗 (出力型電池システム)	10-18	mΩ

4.2.3 評価方法

4.2.3.1 シミュレーション条件および実験条件

車両モデルの主要緒元を表 12 に示す。LSEV である e20 を想定し、車両重量は 960[kg]、最大出力は 19[kW]、電池システムの電圧は 52[V] とした。電池システムの容量は、容量型電池システムの容量を 200[Ah]、出力型電池システムの容量を 10[Ah] とした。電池システムの抵抗値は容量型電池システムの抵抗が 10[mΩ]、出力型電池システムが SOC や温度に応じて 10-18[mΩ] で変化するように設定した。

表 12 異種電池システムを統した電気自動車シミュレーションの条件

No.	パラメータ名	値	単位
1	車両重量	960	Kg
2	最大出力	19	kW
3	電池電圧 (公称)	52	V
4	電池容量 (容量型電池システム)	200	Ah
5	電池容量 (出力型電池システム)	10	Ah
6	電池抵抗 (容量型電池システム)	10	mΩ
7	電池抵抗 (出力型電池システム)	10-18	mΩ

図 59 にシミュレーション方法を示す。シミュレーションには dSPACE 社製の車両シミュレーションソフト ASM を使用した[2]。異種電池システムを搭載した車両モデルとしては、ASM に初期実装されている車両モデルをベースとし、その車両モデルのバッテリーモデルの部分を独自に作成した異種電池システムに置き換え、異種電池システムを搭載した車両モデルを作成した。

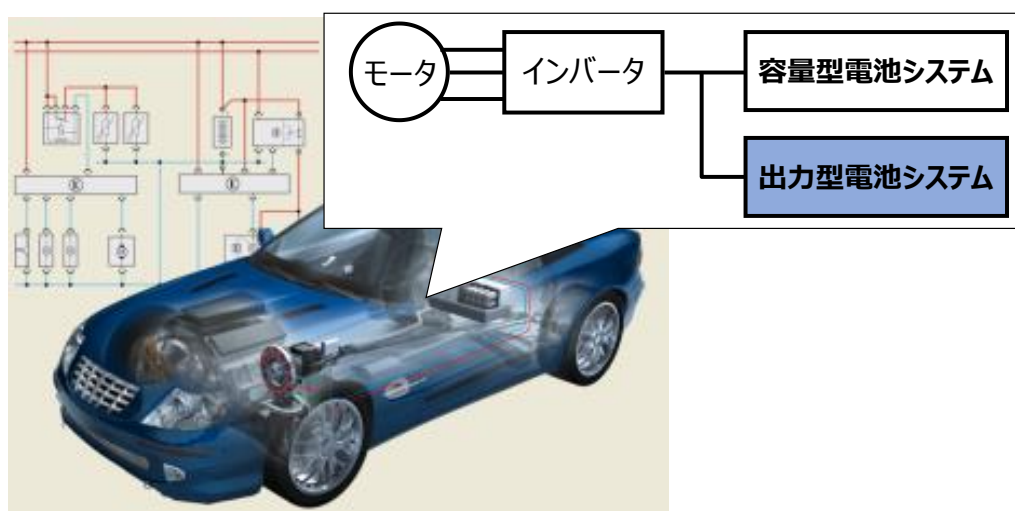


図 59 ASM 活用による異種電池システム搭載 EV のシミュレーションモデル概要

図 60 にシミュレーションに使用した走行パターンを示す。走行パターンは自動車の

走行性能評価に一般的に使用される WLTP サイクルを使用した。ただし、LSEV の最高速度を 80km/h としたため、速度 80km/h 以下の低速から中速までの領域を走行パターンとして使用した。なお、この走行パターンは、実際に自動車を用いた走行試験でも同様に使用する。

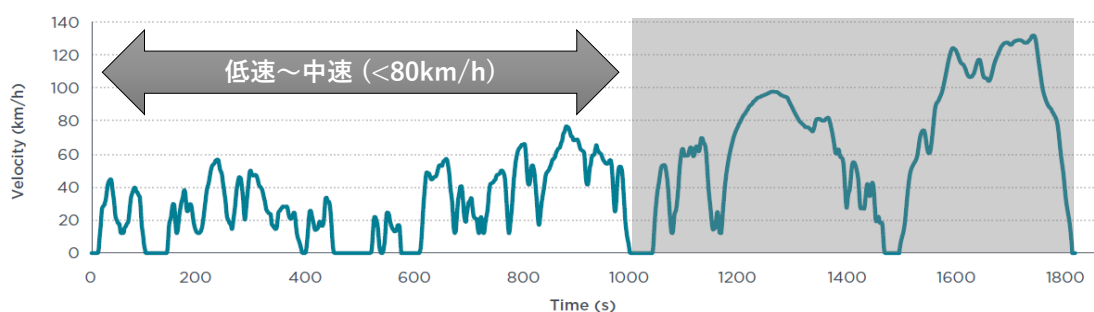


図 60 走行シミュレーションのパターン(WLTP)

図 61 に走行試験の試験風景の画像を示す。走行試験は、室内で走行試験が可能シャードダイナモ試験室を使用して実施した。示した画像は、今回試作した車両の走行テスト中の画像ではないが、走行テストでは図の赤枠に示した走行速度指示器に、目標とする走行速度（今回は WLTP サイクル）と実際の走行速度の両方が表示され、目標速度に一致するように車両のアクセルやブレーキを操作することで走行試験を実施した。このため、実走行テストでは目標速度に対してアクセルやブレーキ操作のばらつきや遅れにより、完全に目標速度を再現することは難しく、上記で説明した走行シミュレーションと実走行テストでは、異種電池システムの充放電波形が一致していない。



図 61 走行試験の風景

4.2.4 評価結果および考察

4.2.4.1 シミュレーション評価の結果

まず、比較対象として容量型電池単独（オリジナル）でのシミュレーションを実施した。図 62 に電流波形を示す。グラフ中に円で囲んだ時間帯において、本開発において使用した LSEV は最大出力で加速する時間が最も長い部分となると予想する。この結果から、本開発で想定する LSEV の最大出力で走行する時間は 10[秒]以下であることが分かった。3 章の解析解(3)(4)に基づけば、最大出力で走行する時間が異種電池システムの応答時間よりも長い場合は、電流の大半または全てを容量型電池システムから供給することとなる。従って、異種電池を組み合わせる場合は、最大出力時の電流が容量型電池システムの上限電流を超えないことの確認と共に、電池システムの応答時間と最大出力で走行する時間の関係を把握する必要がある。

本開発では、異種電池システムの応答時間 τ は、表 12 で設定した値では約 13.5 秒となる。

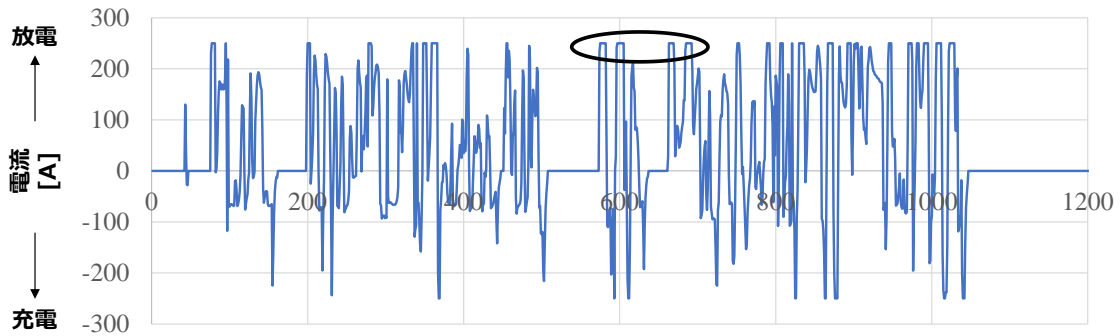


図 62 容量型電池単独での走行シミュレーション結果

図 63 に異種電池システムでの電流波形を示す。容量型電池単独システムでは最大電流が放電、充電共に約 250[A]だったのに対して、異種電池システムでは最大電流が放電で 180[A]、充電は 140[A]まで低減した。異種電池システム間の電流配分に関して、走行期間全般を通して、出力型電池システムよりも容量型電池システムに流れる電流の方が大きい結果となった。これは、表 13 より容量型電池システムの抵抗が小さく、容量が大きいためで、3 章で検討した解析解(3) (4)にて予測した「電流がステップ的に変化する条件における電流配分は、始めは抵抗比に応じて配分されるものの、時間の経過とともに容量に応じて電流が配分される」に合致した結果である。さらに、電流が放電から充電 (EV であるので充電は回生) に切り替わった場合は、出力型電池システムに容量型電池システムと同等か、それ以上の電流が流れている。この結果も解析解(5) (6)にて予測した「電流が放電から充電に変化した瞬間は、出力型電池システムに大きな充電電流が流れる。」に合致した内容である。また、1050[秒]付近で走行が終了した際に、容量型電池から出力型電池に循環電流が発生することを確認した。

以上の結果から、2 章の解析解とシミュレーションの結果は定性的に一致することが判った。そこで、以降ではデータの詳細について定量的な分析を試みた。

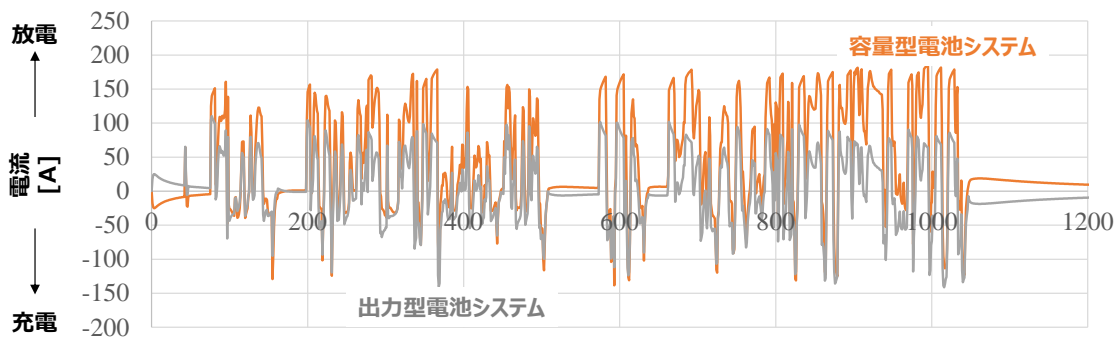


図 63 異種電池システムでの走行シミュレーション結果

図 64 は上記シミュレーション結果の 550[秒]から 650[秒]の電流波形の拡大図であ

る。図中の A は、電流の変化がステップ的に変化しており、停止中から急加速の条件を再現している。同様に、B は電流が直前の放電から充電に変化しており、放電から充電に切り替わった条件を再現している。

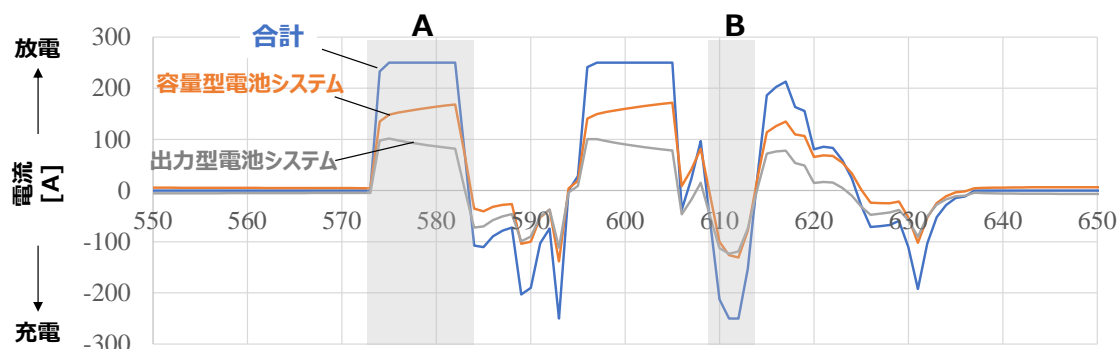


図 64 異種電池システムでの走行シミュレーション結果（拡大図）

また表 13 に各領域での電流の詳細データを示す。A の領域では、解析結果と同様に、放電開始時は容量型電池と出力型電池で電流が配分され、放電の継続に応じて容量型電池の電流が増加することを確認した。放電開始時の電流は容量型電池が出力型電池の 1.46 倍となっており、抵抗比に応じた電流よりも多くの電流が配分されている。この原因は、容量型電池の SOC が出力型電池よりも大きいため、容量型電池からより多くの電流が放電されたためである。A の領域での放電が終了するまでの約 8[秒]で、容量型の電池システムは電流が 20[A]が上昇し、出力型の電池システムでは 20[A]減少した。

表 13 領域 A、B での電流の詳細データ

領域	時間 [秒]	電流 [A]			抵抗 [mΩ]		SOC [%]	
		合計	容量型	出力型	容量型	出力型	容量型	出力型
A	575	250	148.4	101.6	0.010	0.012	95.9	65.2
	582	250	168.3	81.7	0.010	0.012	95.7	63.6
B	611	-250	-126.2	-123.8	0.010	0.012	95.6	63.6

図 65 は、A の条件にて、3 章で求めた解析解 (3) (4) を用いて容量型の電池システムおよび出力型の電池システムの電流を計算した結果である。解析解では容量型の電池シス

テムは放電期間中に 18[A]電流が増加し、出力型の電池システムは 18[A]減少すると算出され、シミュレーションの結果と凡そ一致した結果となった。この結果より、2章で検討した解析解による異種電池システムの電流配分の予測は、実際の異種電池システムにも適用可能な見通しを得た。

一方、Bの領域は放電から充電に切り替わった条件である。容量型電池と出力型電池の双方にほぼ同程度の充電電流が流れており、解析結果と同様に、このような条件では抵抗比によらずに充電電流が発生することを確認した。

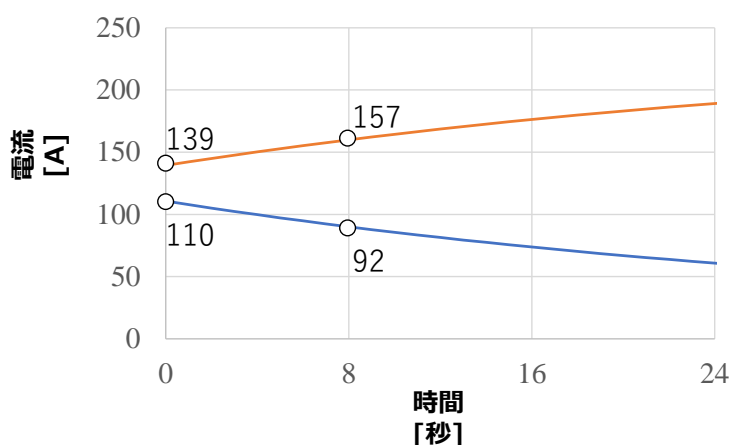


図 65 シミュレーションと同条件における解析解の計算結果

これらの結果から、容量型の電池システムの電流配分は事前の電流配分の解析結果に従うことが確認できた。さらに、本検討結果を実車を用いて検証した。

4.2.4.2 実験結果

次に、開発した異種電池システムを搭載した EV の走行テストの結果について述べる。図 66 は、上記走行テストにおける、容量型電池システムおよび出力型電池システムの電流データである。図 67 は、同じ走行テスト時における両電池システムの総和であり、容量型の電池システム単独で走行した際に発生すると想定される電流特性と見ることができる。図 66 と図 67 を比較することで、容量型の電池システムの電流が減少しており、異種電池システム間で電流が配分されており、容量型電池システムの電流の最大値が約 350[A]から約 200[A]へと減少していることが分かる。シミュレーションと同様に、

実車試験でも放電電流は、出力型電池システムよりも容量型電池システムの方が大きく、回生時には出力型電池に容量型電池とほぼ同等の充電電流が流れることが確認できた。また、実車試験での充放電特性のデータに異常な電流の挙動は見られず、異種電池システムが正常に動作していることが確認できた。

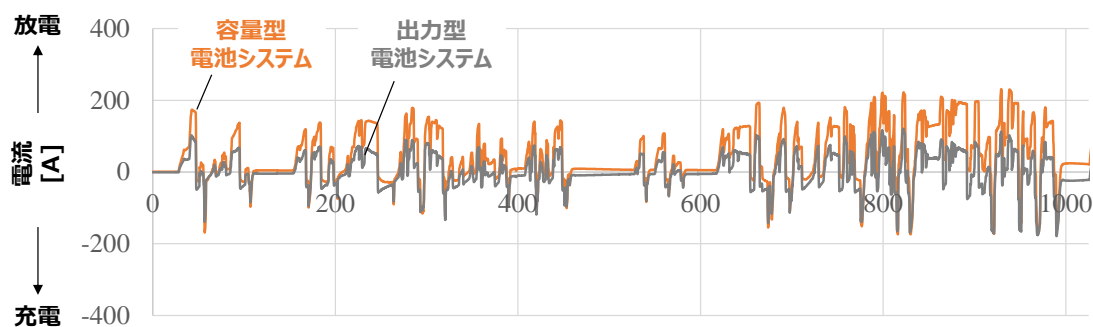


図 66 異種電池システムを搭載した試作 EV による走行試験結果

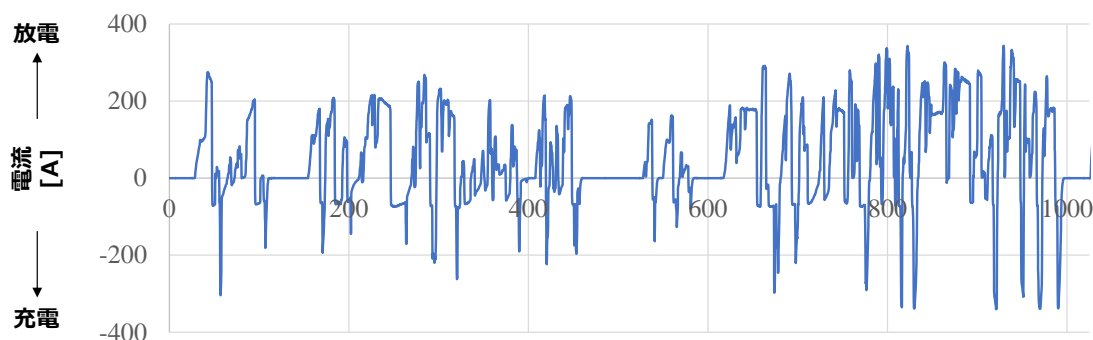


図 67 試作 EV による走行試験時の電流の総和

図 68 に、図 66 の 20~70[秒]区間の電流波形の拡大図を示す。シミュレーションと同様に、図中の A は、電流の変化がステップ的な変化である停止中から急加速の条件を再現しており、B は放電から充電に切り替わった条件を再現している。放電開始時の電流は容量型電池が出力型電池の 1.46 倍となっており、抵抗比に応じた電流よりも多くの電流が配分されている。この原因は、容量型電池の SOC が出力型電池よりも大きいため、容量型電池からより多くの電流が放電されたためである。放電終了が終了までの 8[秒]で、容量型の電池システムは電流が 20[A]が上昇し、出力型の電池システムでは 20[A]減少した。

一方、Bの領域は放電から充電に切り替わった条件である。容量型電池と出力型電池の双方にほぼ同程度の充電電流が流れており、解析結果と同様に、このような条件では抵抗比によらずに充電電流が発生することを確認した。

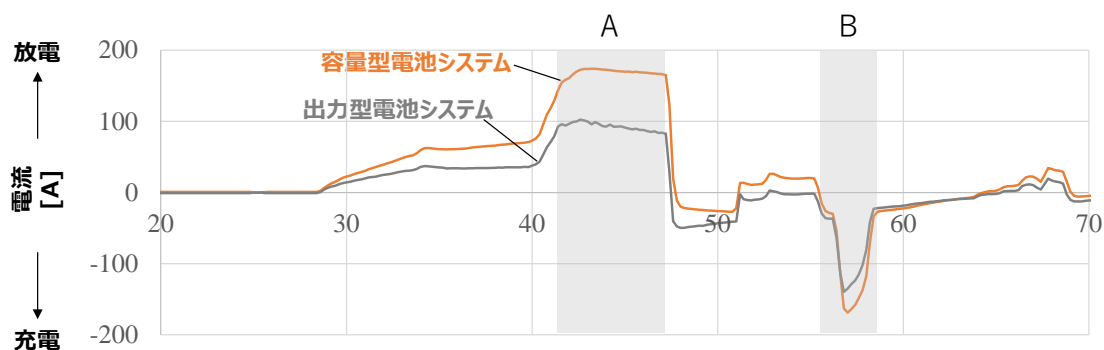


図 68 異種電池システムを搭載し試作 EV の走行試験結果（拡大図）

表 14 に、各領域での電流の詳細データを示す。A の領域では、解析結果と同様に、放電開始時は容量型電池と出力型電池で電流が配分され、放電の継続に応じて容量型電池の電流が増加することを確認した。放電開始時の電流は容量型電池が出力型電池の 1.64 倍となっており、抵抗比に応じた電流よりも多くの電流が配分されている。また、放電終了直前の容量型の電池システムの電流は約 10[A] 増加しており、出力型の電池システムの電流は約 11[A] 減少した。

表 14 領域 A、B での電流の詳細データ

領域	時間 [秒]	電流 [A]			抵抗 [mΩ]		SOC [%]	
		合計	容量型	出力型	容量型	出力型	容量型	出力型
A	41.6	250.6	154.6	94.2	10.6	16.8	95.9	61.6
	47.2	247.7	165.0	82.7	11.0	18.6	95.8	60.2
B	56.8	-302.0	-162.6	-139.4	11.1	10.6	95.8	60.9

図 69 は、A の条件にて、解析解(3)(4)を用いて容量型の電池システムおよび出力型の電池システムの電流を計算した結果である。解析解では放電開始時の容量型の電池シ

システムは 153[A]、そして出力型の電池システムの 96[A]と算出された。さらに、放電が終了するまでの約 6 秒間で、容量型の電池システムの電流は 11[A]増加し、出力型の電池システムは 11[A]現象する結果となった。この結果は、表 14 とほぼ一致した結果となっている。

一方、B の領域は放電から充電に切り替わった条件である。容量型電池と出力型電池の双方にほぼ同程度の充電電流が流れており、解析結果と同様に、このような条件では抵抗比によらずに充電電流が発生することを確認した。

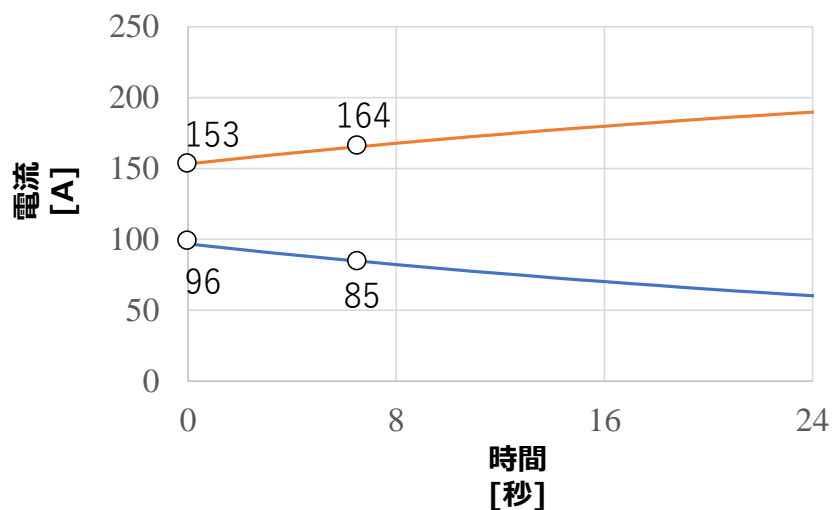


図 69 走行試験と同条件における解析解の計算結果

以上の結果より、3章で検討した解析解による異種電池システムの電流配分の予測は、実際の電池システムにも適用可能であることをシミュレーションと実験の双方により確認できた。ここまでは、異種電池システムによる電流分配が3章の解析式に従うことを確認してきたが、最後に、異種電池システムによる、電池システムの寿命延長効果について述べる。

図 70 に、WLTP サイクルの低速から中速領域(走行速度 ≤ 80 km)を5回連続で繰り返した走行試験を実施した際の、電池システムの温度変化を示す。赤は異種電池システムに改造する前の、容量型電池システムのみで走行した際の電池システムの温度である。青は異種電池システムに改造した後に、同じ走行試験を行い、同じく容量型電池システム

の温度をプロットした結果である。図より、改造前の容量型電池システムの温度は、走行試験終了時に約 6.6[°C]にあるのに対して、改造後は約 2.9[°C]となっており改造後の方が 3.7[°C]温度が低い結果となった。これは、出力型電池システムが、走行または回生時の電流の一部を負担することで、容量型電池システムの負荷が軽減したことを示している。

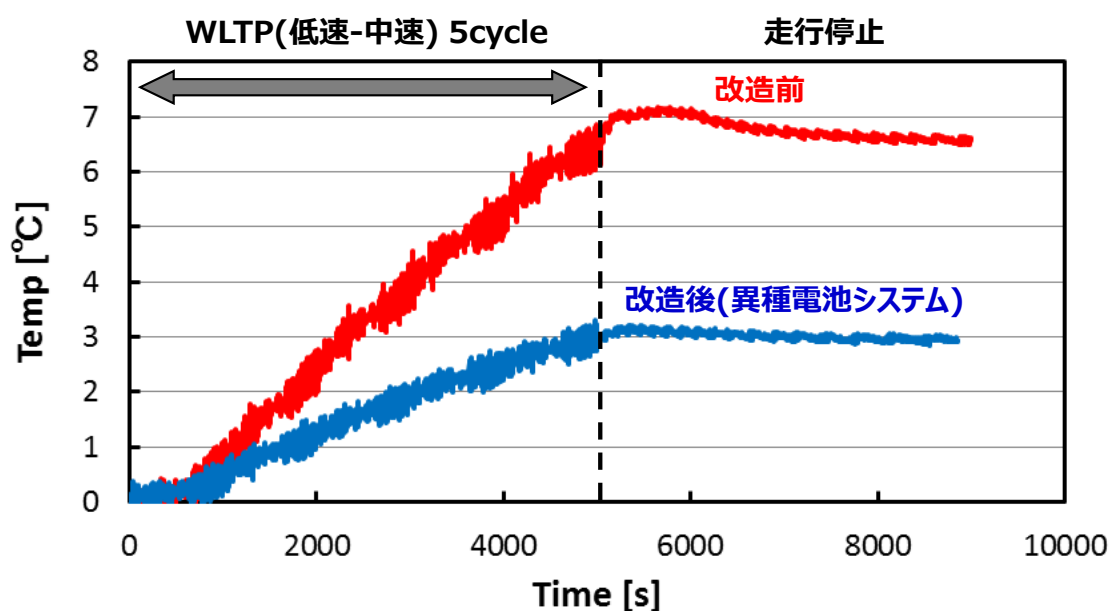


図 70 電池システムの改造前後の容量型電池システムの温度の比較

上記の電池システムの温度低減による寿命への効果をシミュレーションにより見積もった。図 71 は寿命予測シミュレーションの概要を示す。シミュレーションでは、実験車両に搭載されている電池と同じ材料の電池を、様々な条件で劣化試験をした際のデータベースを作成し、劣化を予測するアルゴリズムを実装した。劣化予測に必要な入力データである電池システムの電圧、充放電電流、電池システムの SOC の変動に関するデータは、図 59 に示す ASM を用いた EV シミュレーションモデルを活用し、表 13 および図 60 の条件に基づき LSEV の走行シミュレーションからデータを算出して使用した。

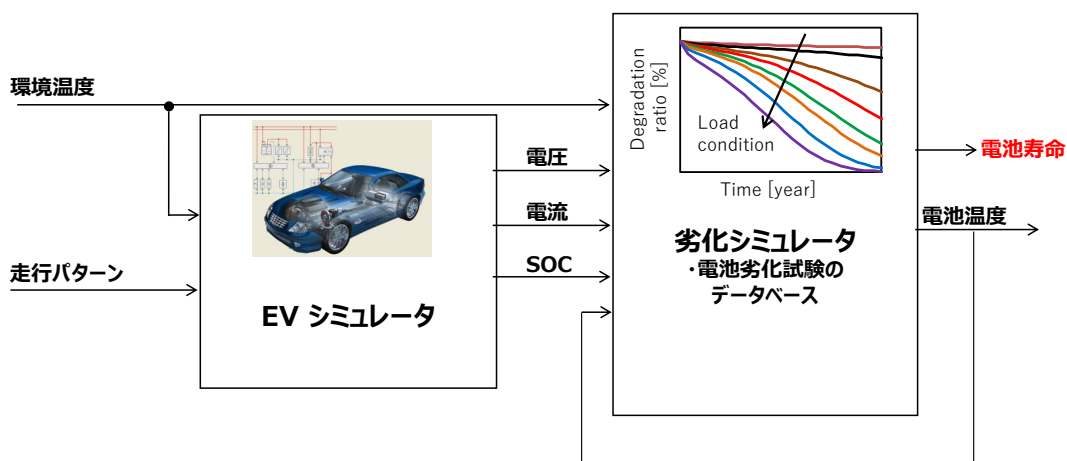


図 71 電池システムの寿命予測シミュレーションの概要

図 72 および 73 に、外気温度が 30℃および 40℃における寿命予測シミュレーションの結果を示す。両図より、容量型電池システムの寿命の同様の傾向を示し、改造前の電池システムでは一日の走行距離が 100km を超えると、容量型電池システムの劣化が顕著に進み、電池システムが寿命を迎えるまでのトータル距離が低下する。一方で、異種電池システムでは一日の走行距離が 100km を超える条件でも寿命の低下傾向は相対的に小さく、異種電池により約 1.5 から 2 倍の寿命の延長効果が期待できる可能性があることが判った。

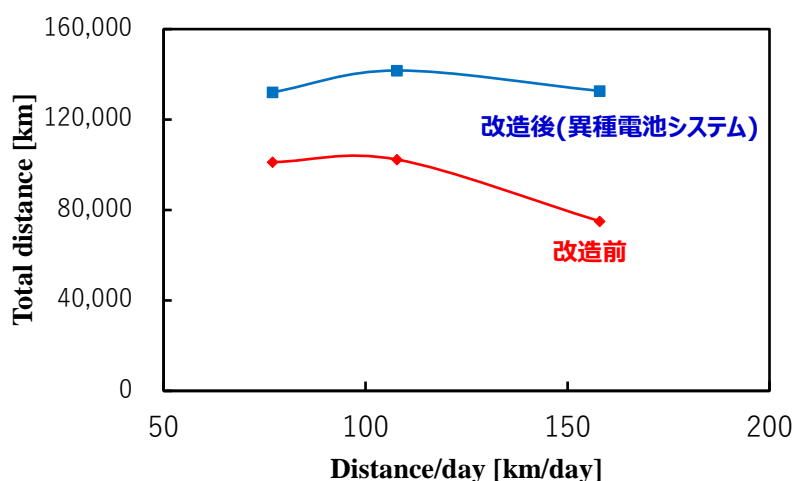


図 72 環境温度 30℃における容量型電池システムの寿命予測結果

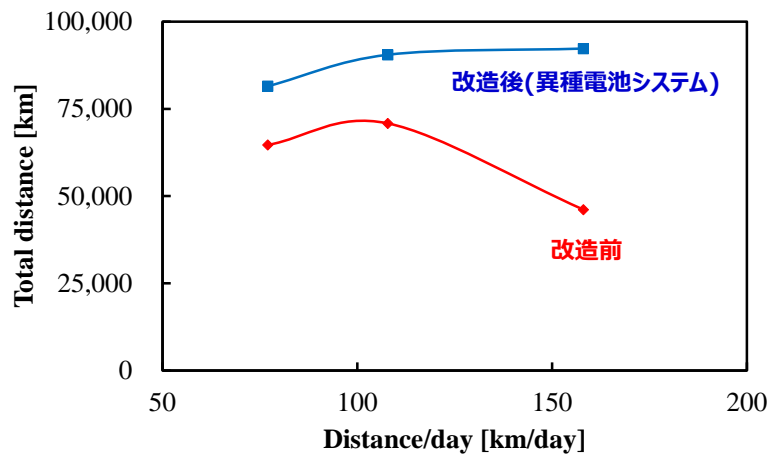


図 73 環境温度 40°Cにおける容量型電池システムの寿命予測結果

4.2.5 まとめ

本節では、出力特性に優れた出力型電池システム、および容量特性に優れた容量型電池システムを直接接続して異種電池システムを構築し、それを EV に搭載して走行試験と異種電池システムの性能評価を行い、これと並行して、試作 EV と同等の条件を再現したシミュレーションを行った。これらを通して以下の知見を得た。

1. 特性の異なる電池を直接接続した異種電池システムを構築し、EV に搭載した実車試験にて、異種電池システムが異常な挙動をすることなく動作することが判った。
2. 異種電池システムの電流配分は、放電時は、最初は抵抗比に応じて電流が配分されるが、放電が進むと容量比に応じて電流が配分される。ただし、SOC の違いが反映されるため、抵抗比や容量比に完全合致した電流配分とはならず、詳細な電流配分を再現させるためには、SOC 挙動の正確な把握が必要である。
3. 上記の結果は、電池システムを電気回路モデル化して検討した解析解と一致し、異種電池システムの電流配分は解析解で予測できることが判った。
4. さらに、異種電池システムによる容量型電池システムの負荷軽減効果により、容量型電池システムの寿命が約 1.5 から 2 倍、伸びる可能性があることが判った。

4.4 結言

本章では、ビルディングブロック方式と階層化管理方式を適用して 30kWh 試作電池シ

システムを構築して、充放電試験、スイッチ制御、異常模擬試験、および等電流条件のシステム適用可否を検証した。その結果、試作電池システムでの約 8 時間の充放電試験にて、試作電池システムが正常に充放電すること、BSC、BPC、BMC の各種コントローラが自階層の電池群の管理と制御が正常に動作し、かつ各コントローラ間で正確に共有できることを確認した。また、電池パックのスイッチの動作試験にて、電池パックは事前に設定した条件で BSC と BPC が連携し、スイッチ動作が可能なことを確認した。異常を模擬した試験では、電池システムは異常が起きた箇所を正確に把握でき、異常な電池を含む電池パックを試作電池システムから解列し、異常が解消されたと判断した場合は自動で復帰する機能を実現した。さらに、昇圧回路と分圧抵抗を用いた漏電検知回路の動作検証により、電池パック内の主回路のあらゆる地点で地絡を検知でき、かつ地絡箇所も特定できることを確認した。また、電池パック 1 台だけでなく、電池パックが 8 台の条件でも同様に地絡検知が可能なことを確認し、本方式が大規模電池システムにも適用可能なことを確認した。

次に、出力特性に優れた出力型電池システム、および容量特性に優れた容量型電池システムを直接接続した異種電池システムを搭載した EV を開発し、異種電池システムの電流配分を検証した。その結果、異種電池システムの電流配分は、放電時には最初は抵抗比に応じて電流が配分されるが、放電が進むと容量比に応じて電流が配分されることが判った。また、この結果は、電池システムを電気回路モデル化した解析解と一致し、異種電池システムの電流配分は解析解で予測できることが判った。ただし、実際の電流配分では SOC の違いが反映されるため、抵抗比や容量比に完全合致した電流配分とはならず、詳細な電流配分を再現するためには SOC の挙動の把握が必要であることが判った。

また、異種電池システムによる容量型電池システムの負荷軽減効果により、容量型電池システムの寿命が約 1.5 から 2 倍、伸びる可能性があることが判った。

第 4 章の参考文献

[1] Mahindra Electric ホームページ : e20 Plus City Smart

< <https://www.mahindraelectric.com/vehicles/e2oplus/> >

Accessed on 2021.10.18

[2] dSPACE ホームページ: ModelDesk GUI によるパラメータ設定およびシミュレーション

<https://www.dspace.com/ja/jpn/home/products/sw/automotive_simulation_models/produkte_asm/modeldesk.cfm>

Accessed on 2021.10.18

第5章 総括

高エネルギー密度と高出力密度を有するリチウムイオン電池の登場により、小型の携帯機器の普及のみならず、自動車や鉄道などモビリティの電動化や、再生可能エネルギーの主電源化など、電池は従来の電源デバイスから、社会のデジタル化や脱炭素化を実現するインフラになりつつある。一方で、現在のリチウムイオン電池は、出力が求められる用途向けの出力型電池と、エネルギーが求められる用途向けの容量型電池に分かれており、出力特性と容量特性の双方に優れるリチウムイオン電池は未だに実在しない。このため、今後、大出量化と大容量化が求められる電池システムの構築に向けては、大規模な電池システムを構築する技術だけでなく、用途に応じて出力型と容量型の電池システムを自在に組み合わせて、必要な出力性能と容量性能を過不足なく提供可能な電池システムの構築技術が必要となる。そこで本研究では、電池システムの出力と容量をスケラブルに拡大し、且つ1つの上位システムで電池システムの管理を可能な電池システムアーキテクチャと、容量型と出力型でタイプの異なる電池を直接接続し、運用可能とする異種電池の設計技術の確立に取り組んだ。電池システムアーキテクチャの検討により、ビルディングブロック方式による大規模な電池システムの構成方法と、それを可能にする絶縁耐圧の設計、電池システムの状態を適切に管理する階層化管理方式を考案し、上記技術により小規模から大規模な電池システムまで、多様な規模の電池システムを構築できることを明らかにした。また、異種電池の設計技術の検討により、電池システムをキャパシタと抵抗を用いた電気回路モデルで表し、その解析解を求めることにより、電池の特性差によって充放電中に過渡的な変化をする電流配分を事前に予測できることを明らかにした。

各章の検討により得られた結論は以下の通りである。

1章では、本研究の背景、課題、目的を記した。電池の発明と、電池の発展による学術

的、産業的な貢献の歴史を振り返り、今後のモビリティの電動化や再生可能エネルギーの主電源化の実現に向けて、リチウムイオン電池の大規模電池システム化が必要であることを背景として述べた。そして、大規模電池システムの構築に向けては、今後、電池システムに求められる出力性能と要求性能が拡大し、単一のリチウムイオン電池で出力性能と容量性能の双方を過不足無く満たす電池システムを構築することが困難な見通しであることを示した。そこから、大規模な電池システムを構築するアーキテクチャと、出力型と容量型で異なる電池を組み合わせて電池システムを構築する技術が必要であることを課題として述べた。その上で、以下2つの技術開発の確立を本研究の目的とした。

- ① 電池システムの出力と容量をスケラブルに拡大し、且つ1つの上位システムでの電池システムの管理を可能とする電池システムアーキテクチャ
- ② 容量型と出力型でタイプの異なる電池を直接接続し、運用可能な条件を特定する異種電池システムの設計技術

2章では、大規模電池システムを構築するアーキテクチャについて記した。大規模な電池システムの構成方法に関しては、電池セルを直列接続した基本構造を並列化する直列接続優先で電池システムを構築することが、構造的に循環電流の影響を小さくできることを明らかにした。また、ビルディングブロック方式により電池システムを構築する場合には、電池システムを構成する最小構成単位、およびコントローラにも電池システムの総電圧に耐える絶縁構造を施す必要があることを明らかにした。一方で、電池システムの絶縁低下を検知するためには、大規模電池システムの一点地絡を検知する必要性を示し、漏電検知方法として昇圧回路と分圧抵抗を用いた漏電検知回路を考案した。更に、電池システム内で検知すべき情報と汎用的な通信デバイスの通信速度を考慮して、電池システムのコントローラの構成は、最上位のコントローラ、中間コントローラ、末端のコントローラで階層ごとに電池群を管理する階層化管理方式が好適であり、RS-485通信で20[bite]バイトのデータを10[ms]毎に通信する場合、統括コントローラ1台につき625台の中間コントローラを接続でき、電池モジュール62500台と大規模な電池システムが構築可能であることを明らかにした。以上から、大規模な電池システムの構築のための設計指針を得ることができた。

3章では、異種電池システムの設計技術について検討した。異種電池システムでは、

電池の特性や内部状態により、抵抗比に逆比例して電流が配分されるケースや、容量に比例して配分されるケース、一方の電池に全ての電流が集中するケースなど、過渡的に大きな電流が一方の電池に発生し得ることを述べ、異種電池システムを設計するためには、単純な出力特性と容量特性の組み合わせだけでなく、電流が切り替わる際の状態遷移条件の把握が必須であることを明らかにした。更に、並列接続された電池システム間に流れる電流を計算するためには、充放電による電池の充電状態の変化に伴う電圧の変動、および、内部抵抗(DCR)による電圧降下または上昇を考慮する必要がある。充放電による電池の電圧の変動をキャパシタモデルで、DCRは抵抗にて模擬し、電池システムに流れる電流 I は、出力型電池システムに流れる電流と容量型電池システムの電流の合計値とする電気回路モデルを考案した。電気回路モデルの解析式より、放電中の電流変化の際は始めは抵抗比に応じて電流が配分され、時間の経過と共に容量比に基づいて電流が配分されることを明らかにした。また、放電から充電に電流が変化した瞬間には、循環電流も加わって充電電流よりも大きな電流が出力型電池システムに流れる可能性があることが分かった。更に、充放電を停止しても容量型電池システムと出力型電池システムとの間の電池電圧の差に基づき循環電流が発生することを明らかにした。以上の結果から、異種電池システムを構築する場合には、容量型電池システムの負荷軽減と、システムの安全性確保の観点から、以下に関する検討が必要であることが示唆された。

1. 電流配分の最適化のための容量比と抵抗比の設計
2. 電池システムに流れる最大電流の予測
3. 循環電流が解消されるまでの時間の把握

4章では、2章と3章で検討した技術を適用し、30kWh 試作電池システムと、異種電池システムを搭載したEVを開発し、開発した技術の適用効果を検証した。試作電池システムでは、充放電試験、スイッチの動作試験、異常模擬試験、および漏電検知回路の検証試験を実施し、約8時間の充放電試験にて、試作電池システムが正常に充放電すること、試作システムを構成するBSC、BPC、BMCの各種コントローラが自階層の電池群の管理と制御が正常に動作し、かつ各コントローラ間で正確に共有できることを確認した。スイッチの動作試験では、一つの電池パックのスイッチを所定のSOCでOffにし、他の電池パックはそのまま充放電を継続した条件にて、他の電池パック(電池システム)のSOCが再びスイッチがOffにされた電池パックと等しいSOCに到達した際に、自動的に

電池パックのスイッチが On となり電池システムに復帰することを確認した。これにより、事前に設定した条件で BSC と BPC が連携し、スイッチ動作が可能なことを確認した。更に、電池パックの温度異常を模擬した試験では、電池システムは異常が起きた箇所を正確に把握でき、異常な電池を含む電池パックを試作電池システムから解列し、異常が解消されたと判断した場合は自動で復帰する機能を実現した。また、漏電検知回路の検証試験では、昇圧回路と分圧抵抗を用いた漏電検知回路を用いて試験を実施した結果、電池パック内の主回路のあらゆる地点で地絡を検知でき、かつ地絡箇所も特定できることを確認した。また、電池パック 1 台だけでなく、電池パックが 8 台の条件でも同様に地絡検知が可能なことを確認し、本方式が大規模電池システムにも適用可能なことが判った。

異種電池システムを搭載した EV での走行試験では、出力特性に優れた出力型電池システム、および容量特性に優れた容量型電池システムを直接接続した異種電池システムを搭載した EV を開発し、異種電池システムの電流配分を検証した。その結果、異種電池システムの電流配分は、放電時は、最初は抵抗量比に応じて電流が配分されるが、放電が進むと容量比に応じて電流が配分されることが判った。また、この結果は、電池システムを電気回路モデル化した解析解と一致し、異種電池システムの電流配分は解析解で予測できることが判った。一方で、実際の電流配分では充放電中の SOC の違いにより、抵抗比や容量比に完全合致した電流配分とはならず、詳細な電流配分を再現するためには SOC の挙動の把握が必要であり、今後の課題である。また、異種電池システムによる容量型電池システムの負荷軽減効果により、容量型電池システムの寿命が約 1.5 から 2 倍、伸びる可能性があることが判った。

本論文に関連する論文・発表

1. 論文

- (1) 山内晋, 江守昭彦, 二見基生, 河合通文, 本田光利, 武田賢治, 岩澤寛; 産業用大規模電池システムのアーキテクチャ検討, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 136 No. 1 pp. 1-8 (2016)
- (2) Shin Yamauchi, Takeshi Inoue, Rishi Chandra, Shigeki Makino, Daiki Komatsu; Development of a Combined Battery System for Electric Vehicles with

Battery Lifespan Enhancements, SAE Technical Paper, 2018-01-0448 (2018)

2. 発表

(1) 山内 晋, 横浦 浩一, 田中 融, 岩澤 寛, 武田 賢治; 産業用大規模電池システムのアーキテクチャ検討, 電気学会全国大会, 広島工業大学五日市キャンパス (2012)

(2) Shin Yamauchi, Takeshi Inoue, Rishi Chandra, Shigeki Makino, Daiki Komatsu; Development of a Combined Battery System for Electric Vehicles with Battery Lifespan Enhancements, SAE World Congress (2018)

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、信州大学大学院 総合理工学研究科 水環境・土木工学分野 教授 林卓哉先生には、終始親切且つ熱心な御指導、御鞭撻を賜りました。この場をお借りして、心より感謝の意を表します。

本論文の作成・審査過程におきましてご指導いただきました信州大学大学院 総合理工学研究科 電子情報システム工学分野 教授 橋本佳男先生、信州大学大学院 総合理工学研究科 水環境・土木工学分野 助教 村松寛之先生、および立命館大学 理工学部 電子情報工学科 教授 福井正博先生、信州大学大学院 総合理工学研究科 水環境・土木工学分野 准教授 竹内健司先生に深く感謝いたします。また、研究を進める上で常に有益な御助言を頂いた信州大学 先鋭領域融合研究群 カーボン科学研究所 特別特任教授 遠藤守信先生にも、厚く御礼申し上げます。遠藤先生には、2000年に学部4年生として遠藤研究室に所属して以来、長年に亘って直接、間接にご指導をいただき、私の研究者としての礎を築くとともに、脱炭素社会を実現する電池システムを開発して世に広め、子供たちや後世の世代に持続可能な社会を残すという、私の人生にとっての目標や生きがいを示していただきました。この場をお借りして、長きに亘るご指導に心より感謝の意を表します。

本論文は、私が㈱日立製作所において行った研究成果を纏めたものであり、このような研究と、社会人博士課程に進む機会とをいただき多大なるご支援とご配慮を賜りました㈱日立製作所 研究開発グループ 脱炭素エネルギーイノベーションセンタ 馬場

淳史センタ長と、同センタ 環境システム研究部 奥村壮文部長に心より感謝申し上げます。(株)日立製作所の元社員 小林裕氏、エナジーウィズ株式会社 江守昭彦氏、(株)日立製作所 研究開発グループ 社会イノベーション協創統括本部 環境プロジェクト 牧野茂樹氏におきましては、研究に関する数々の御指導、御支援を頂き、感謝の念に絶えません。さらに、同僚として共に本研究を遂行し、多くの実験データ取得に御尽力いただきました武田賢治氏、本田光利氏、高橋俊樹氏、岩澤寛氏、小松大輝氏に心より感謝の意を表します。

最後に、業務と学業の両立を理解し、長期間にわたって応援してくれた妻逸香、娘京香、尚香、息子開登、および何事も諦めず、完遂することの重要さと、それを遂行する精神力と忍耐力を授けてくれた父立示、亡き母修子に対し、心より感謝の気持ちを伝えたいと思います。ありがとうございました。

令和3年12月