



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	EV駆動用蓄電池の定置リユースと地域マイクログリッドにおける活用
Author(s)	林田, 淳
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第16517号
Issue Date	2025-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16517
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95205
Type	doctoral thesis
File Information	Atsushi_Hayashida.pdf



博士論文

EV 駆動用蓄電池の定置リユースと地域マイクログリッド
における活用

林田 淳

2025 年 2 月

北海道大学 大学院情報科学学院
情報科学専攻システム情報科学コース

本論文は北海道大学 大学院情報科学院に
博士（情報科学）授与の要件として提出した博士論文である。

林田 淳

審査委員：	主査	原 准教授
	副査	北 教授
		五十嵐 教授

EV 駆動用蓄電池の定置リユースと地域マイクログリッド における活用*

林田 淳

概要

近年、地球温暖化防止とエネルギー自給率向上、災害対応のため、地域分散型の再生可能エネルギー(RE)の導入拡大が求められている。固定価格買い取り制度(FIT)により、地域へ RE の太陽光発電、風力発電及びバイオガス発電等の普及が進んでいる。上記の社会的背景に対して、地域側からは、頻度が少ない災害のための設備投資をなるべく少なくして非常時のレジリエンスを確保したい、また現状は FIT で活用できている RE を、制度終了後も維持したいというニーズが顕在化している。

上記に対応する有効なシステムとして、域内で電力需給調整を行う地域マイクログリッド(MG)があり、平常時に分散型 RE を活用し、非常時にはレジリエンスを確保するポテンシャルを有する。先行研究により、地域 MG のモデル検討や実証が進められており、課題も明確化されつつある。主要な課題は、設備投資及びランニングコストに関する以下の2項目である。1つ目は、RE 施設と需要エリアの街区が隣接しておらず、エネルギー輸送が高コストであること、2つ目は、需給調整を行う蓄電システムが高コストなことである。前者に対しては、エネルギー輸送を低コストにできる MG モデルの提案、評価及び実証が期待されている。後者に対しては、2025 年に世界中の EV 等の電動自動車で使用済みの駆動用蓄電池は 90 GWh を超え、その約 1/3 が再利用される予測となっており、EV 等で使用済みの蓄電池をリユースすることによる低コスト化が期待されている。ところで、EV 等で使用済みの蓄電池を定置リユースするためには、性能ばらつきに対応する特有の活用技術が必要となる。具体的には、1 次利用後の性能ばらつきを安価かつ高精度に選別する技術、及び定置リユース運用中に蓄電池の健全度を診断する技術などがある。

本研究では、EV 等で使用済みの蓄電池を定置リユースするための特有の活用技術を提案することを目的として、1 次利用後の性能ばらつきを安価かつ高精度に選別する技術、及び定置リユース運用中に蓄電池の健全度を診断する技術を提案する。また、地域 MG でエネルギー輸送を低コスト化することを目的に、EV 及び定置リユース蓄電池を活用した MG モデルの提案及び蓄電池と EV の協調制御方式を開発し評価する。

キーワード：マイクログリッド、リユース蓄電池、性能選別、健全度診断、協調制御

*北海道大学 大学院情報科学院情報科学専攻システム情報科学コース，博士論文，SSI-DT46235021，2025 年 2 月 8 日

Stationary Reuse of Electric Vehicle Batteries and Their Utilization in Regional Microgrid[†]

Atsushi Hayashida

Abstract

In recent years, distributed renewable energy (RE) has been required in Japan to prevent global warming, improve the degree of self-sufficiency in energy and resiliency against disasters. The concept of a regional microgrid (MG) is to evolve a part of the existing distribution system into a microgrid, together with regional RE resources available close to the demand area. One of the difficulties of regional MG is its expensive capital cost, especially paid for larger facility capacities required for rare emergency situations such as disasters. The regional MG has the potential to promote the RE, because the MG regulates power balance between supply and demand using batteries. Although expensive new battery systems have prevented practical use, inexpensive reused batteries, which have completed their primary use, might resolve the issue. The reused batteries from electric vehicles (EVs) exceed 90 GWh around the world and about 1/3 of EV batteries are projected to be re-purposed by 2025. In addition, the percentage of the EVs to all vehicles is expected to advance to 35.7% by 2030. Therefore, it is possible that with certain level penetration of the EVs, there will be enough capacity to storage energy for efficient operation of the MG.

By the way, in order to stationary reuse of EV batteries, which have completed their primary use, specific technology is required to regulate performance variations. Specifically, there are technologies to screen performance variations after primary use and to diagnostic for state of health of reused batteries during system operation.

This paper proposes that screening and diagnostic for state of health is key technology for RE development using reused batteries which has a performance variation. Proposal screening method, which includes multi-layer AI analysis and MT system based on Taguchi method, determine whether the capacity, as the measure of battery performance, exceeds the threshold. Proposal diagnostic method, based on current sharing ratio in parallel, determines whether the capacity, as the measure of battery performance, is higher than other stacks. This paper also a coordinated control scheme for EVs and reused batteries for supply and demand balancing during an emergency and demonstrates how the proposed control scheme realizes the virtual distribution line function by EVs.

Key words: Microgrid, Reused Battery, Screening Method, Diagnostic Method

[†]Doctoral Thesis, Division of Systems Science and Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, SSI-DT46235021, February 8, 2025

目 次

第1章	序論	1
1.1	本論文の背景	1
1.2	EV 駆動用蓄電池の定置リユース	5
1.2.1	定置リユースへの期待	5
1.2.2	定置リユースでの活用	6
1.2.3	関連研究の動向	7
1.3	地域マイクログリッドでのリユース蓄電池活用への期待と課題	9
1.4	本研究の目的と論文構成	10
第2章	EV 駆動用蓄電池を定置リユースするための性能選別技術	11
2.1	先行研究に対する提案技術の位置づけ	11
2.2	性能選別技術の提案手法	11
2.3	提案手法の検証	12
2.3.1	クラスタリング	13
2.3.2	特徴量抽出	15
2.3.3	判別	17
2.3.4	考察	18
2.4	選別時間の最適化	20
2.4.1	内部インピーダンス測定	20
2.4.2	解析精度	21
第3章	定置リユース運用中に蓄電池の健全度を診断する技術	23
3.1	先行研究に対する提案技術の位置づけ	23
3.2	運用中の健全度診断技術の提案分析法	23
3.3	リユース蓄電池の実測特性モデル化	25
3.4	シミュレーション	28
3.4.1	シミュレーションモデル	29
3.4.2	シミュレーション	31
3.5	実回路での実験による健全度診断	31
3.5.1	実験装置	31
3.5.2	放電容量比と電流分担による容量比の比較	31
3.5.3	考察	33
第4章	地域マイクログリッドでのリユース蓄電池の活用	37
4.1	地域マイクログリッドの位置づけ	37
4.2	モデル提案	37
4.3	モデルの一般化	38

4.3.1	マイクログリッドの電力需給	38
4.3.2	リユース蓄電池と EV の協調制御	39
4.3.3	EV 運用	41
4.4	ケーススタディ	42
4.4.1	シミュレーションモデル	42
4.4.2	シミュレーション条件	43
4.5	シミュレーション評価と考察	46
4.5.1	ケーススタディの結果	46
4.5.2	協調制御で電力需給がバランスする必要条件	49
第 5 章	結論	51
5.1	本論文のまとめ	51
5.2	本研究の事業展開への可能性と今後の展望	52
参考文献		55
著者が発表した論文		61
謝辞		63

図目次

図 1.1 世界のエネルギー源構成と消費量の推移	1
図 1.2 世界のエネルギー需給の展望	2
図 1.3 日本の1次エネルギー供給構成の推移	2
図 1.4 都道府県・地域別発電電力量ポテンシャルと年間消費電力量	3
図 1.5 北海道地域の電力基幹系統と混雑状況	3
図 1.6 DER フレキシビリティシステム(NEDO 事業)の概要	4
図 1.7 北海道胆振東部地震前後の北海道管内の電力供給量の推移	5
図 1.8 米国における HEV、PHEV、EV の販売台数	6
図 1.9 2025 年までの EV 駆動用蓄電池から定置リユースされる数量の推計	6
図 1.10 バイオガスプラントと需要エリアの関係	9
図 2.1 提案手法の分析手順	12
図 2.2 試験体の容量一覧	13
図 2.3 試験体の 1.5C 放電曲線	13
図 2.4 K-MEANS 法によるターゲットのクラスタリング	14
図 2.5 クラスタ 1 の標本線候補とターゲットの内部インピーダンス	16
図 2.6 標本線 GA 法で設定した最適な標本線位置と被検体の特徴量	16
図 2.7 提案方式（多層 AI 方式）の OK 及び NG サンプルの判別結果	17
図 2.8 従来方式（充放電法）の OK 及び NG サンプルの判別結果	17
図 2.9 提案方式（多層 AI 方式）でのサンプル数のパラメータスタディ	19
図 2.10 従来方式（充放電法）でのサンプル数のパラメータスタディ	19
図 2.11 提案方式（多層 AI 方式）での過学習の確認結果	20
図 2.12 従来方式（充放電法）での過学習の確認結果	20
図 2.13 蓄電池のインピーダンス測定における各周波数の測定時間	21
図 2.14 0.13、0.2 Hz を除いた内部インピーダンス測定での提案方式の判別結果	22
図 2.15 0.13、0.2、0.32 Hz を除いた内部インピーダンス測定での提案方式の判別結果	22
図 2.16 従来方式（放電容量測定法）での判別結果	22
図 3.1 提案手法の分析手順	24
図 3.2 蓄電池のモデルチェンジと SOC-OCV 曲線の関係	25
図 3.3 試験体の容量	26
図 3.4 試験体の内部インピーダンス	26
図 3.5 試験体の 0.1Hz で測定した SOC-抵抗曲線	27
図 3.6 試験体の SOC-OCV 曲線	27
図 3.7 測定で得た SOC に対する OCV の標準偏差	28

図 3.8 スタック 1 と 2 の並列回路の等価回路	29
図 3.9 スタック 1 と 2 の回路方程式のブロック線図	30
図 3.10 健全度診断シミュレーションの結果	30
図 3.11 実験装置の外観	32
図 3.12 実験装置の回路図	32
図 3.13 シミュレーションと実験結果の比較	33
図 3.14 実験とシミュレーションにおけるスタック間の電流比 B/A の比較	33
図 3.15 シミュレーションにおける内部抵抗をパラメータとした電流比 B/A の比較	34
図 4.1 既存の配電線を利用して日常的に電力を供給する地域 MG モデル	38
図 4.2 非常時の EV を用いた仮想電力線の地域 MG モデル	38
図 4.3 提案 MG モデルの構成	39
図 4.4 提案 MG モデルの非常時の構成	40
図 4.5 リュース蓄電池と EV の協調制御に関するブロック線図	40
図 4.6 EV の状態遷移モデル	40
図 4.7 ケーススタディの需給システムの構成	42
図 4.8 提案 MG のシミュレーションモデル	42
図 4.9 晴天日の PV 出力	43
図 4.10 雲が多く出力変動が大きい日の PV 出力	43
図 4.11 病院を含まない総需要（ケース 1）と病院を含む総需要（ケース 2）の比較	44
図 4.12 ケース 1 の V2X システムの電力需給とリュース蓄電池の SOC に関するシミュレーション結果	47
図 4.13 ケース 1 の EV の状態遷移と稼働台数	47
図 4.14 ケース 1 の各 EV の SOC 状態	47
図 4.15 ケース 2 の V2X システムの電力需給とリュース蓄電池の SOC に関するシミュレーション結果	48
図 4.16 ケース 2 の EV の状態遷移と稼働台数	48
図 4.17 ケース 2 の各 EV の SOC 状態	48
図 4.18 EV の初期 SOC に偏りがあるケースの V2X システムの電力需給とリュース蓄電池の SOC に関するシミュレーション結果	50
図 4.19 EV の初期 SOC に偏りがあるケースの EV の状態遷移と稼働台数	50
図 4.20 EV の初期 SOC に偏りがあるケースの各 EV の SOC 状態	50

表目次

表 1.1	1 次利用後の蓄電池の性能選別技術の一覧	8
表 3.1	式(1)の係数と式(2)の内部抵抗の平均値	27
表 3.2	シミュレーションと実験の電流分配比による容量比、従来法による放電容量比 ...	34
表 4.1	設備特性値	45
表 4.2	パラメーター一覧	45
表 4.3	公共施設の概要	45

第1章 序論

1.1 本論文の背景

近年、異常気象や災害の激甚化・頻発など地球温暖化に伴う影響が顕在化している。IPCC 第5次評価報告書^[1]によれば、人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な要因である可能性が高いと結論付けている。温暖化への対応として、パリ協定^[2]を発行し各国で具体的な政策を定めて化石燃料の削減を進めている。2023年4月には、「G7 気候・エネルギー・環境大臣会合」^[3]の共同声明において、CO₂ 排出削減対策が講じられていない化石燃料の段階的廃止が明記された。日本では、2020年10月に菅内閣総理大臣によって2050年カーボンニュートラルを目指すことが宣言され^[4]、エネルギー供給側では化石燃料を削減していくこと、消費側では電力及び運輸の両分野で使用量を削減していくことが求められている。

ここで、図 1.1^[5]に世界のエネルギー源構成と消費量の推移を示す。エネルギー源が化石燃料に依存していること、エネルギー消費量が右肩上がりで増加してきたことがわかる。図 1.2 に、IEA (International Energy Agency) の World energy outlook 2023 を基に作成された世界のエネルギー需給の展望を示す^[6]。図 1.2 では、IEA が想定している3つの将来シナリオにおける2050年の見通しを、2022年の実績比で比較している。1つ目の公表政策シナリオ (Stated Policies Scenario, 以下 STEPS) は、各国が表明済の具体的政策を反映したシナリオ、2つ目の表明公約シナリオ (Announced Pledges Scenario, 以下 APS) は、有志国が宣言した野心を反映したシナリオ、3つ目のネット・ゼロ・エミッション2050年実現シナリオ (Net Zero Emission by 2050 Scenario, 以下 NZE)

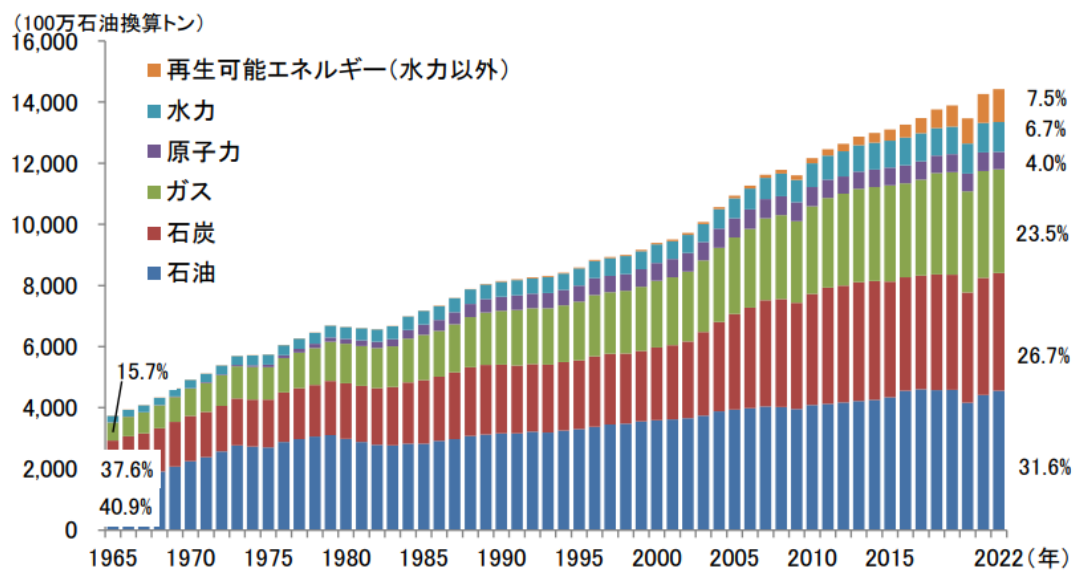


図 1.1 世界のエネルギー源構成と消費量の推移

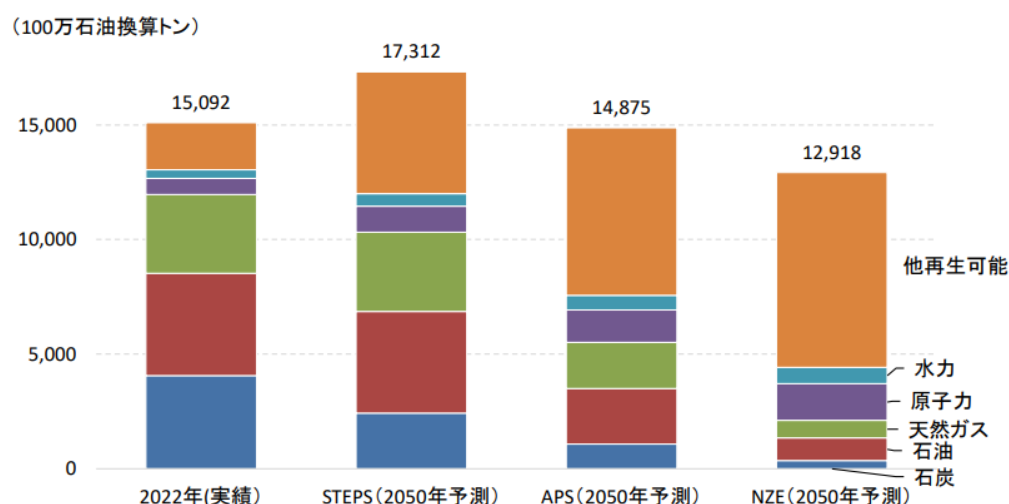


図 1.2 世界のエネルギー需給の展望

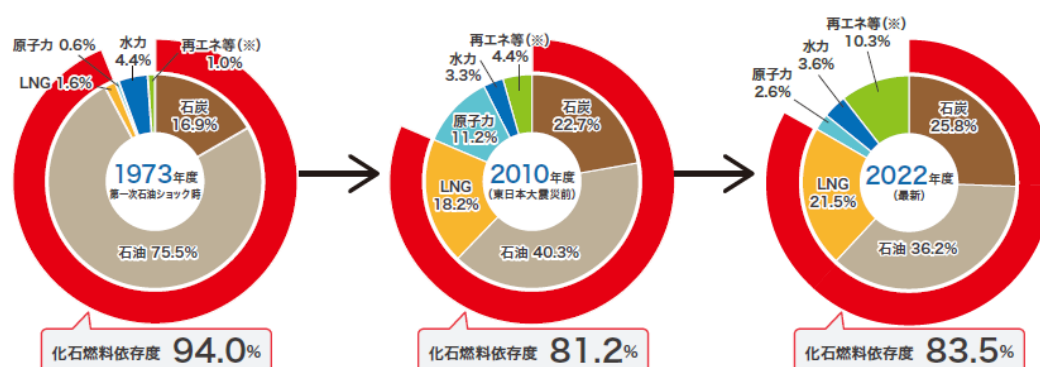


図 1.3 日本の1次エネルギー供給構成の推移

は、2050年に世界でネットゼロを達成するためのシナリオである。IEAのシナリオでは、STEPS、APS、NZEの順に気候変動対策が強くなり、低炭素なエネルギーや技術がより多く利用されるようになる。2050年のエネルギー消費量は、STEPSでは2022年比で1.15倍の増加となるものの、APS及びNZEでは減少すると見込まれている。2050年のエネルギー源構成も、APSやNZEでは、再生可能エネルギー(RE)が主電源となり、従来の化石燃料依存から脱却する予測となっている。図1.3^[6]に、日本の1次エネルギー供給構成の推移を示す。世界と同様に、石油・石炭・天然ガス(LNG)など化石燃料が支配的で、化石燃料への依存度が高い。日本においても、前述のカーボンニュートラル宣言をふまえれば、IEAのシナリオのAPSないしはNZEのように、REを主電源とする政策を進める必要がある。

図1.4^[7]に、都道府県・地域別の発電電力量ポテンシャルと年間消費電力量を示す。北海道や東北地域で陸上風力を主としてREの発電ポテンシャルが非常に大きい。また、REの発電ポテンシャルが大きい地域と消費量大きい需要エリアは一致しない。つまり、IEAのシナリオのAPSまたはNZEでは、REはポテンシャルの大きい地域に分散して大量に導入されることが想定され、需要エリアと離れているために広域で需給調整が必要となる可能性がある。図1.5^[8]に北海道地域における電力の基幹系統とその混雑状況を示す。泊原子力発電所及び苫東厚真火力発電所を基軸とした、主要発電所から地域の需要エリアに分配する従来型の系統構成となっている。従来型

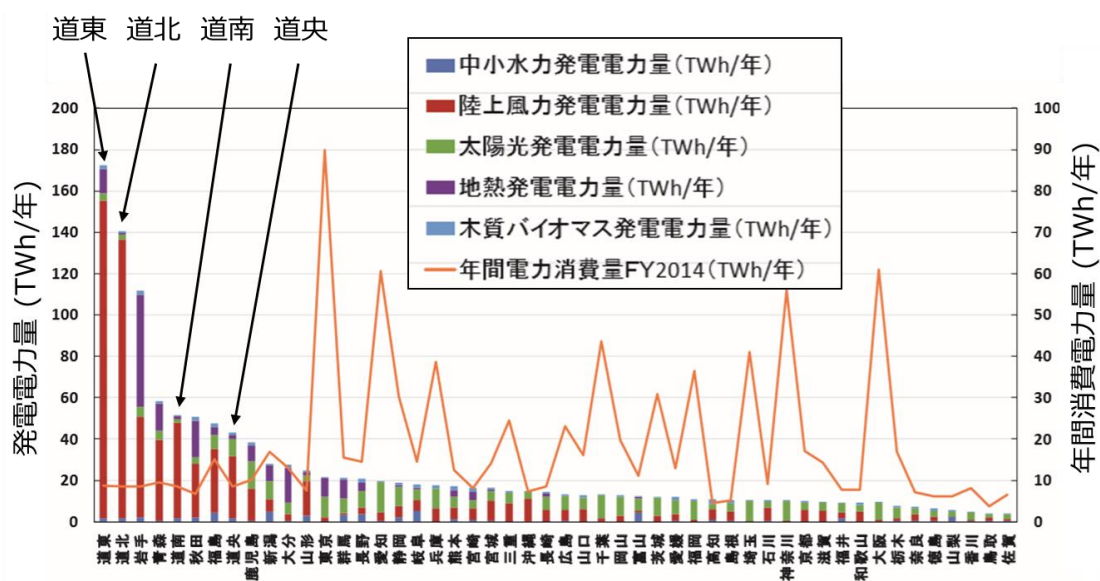


図 1.4 都道府県・地域別発電電力量ポテンシャルと年間消費電力量

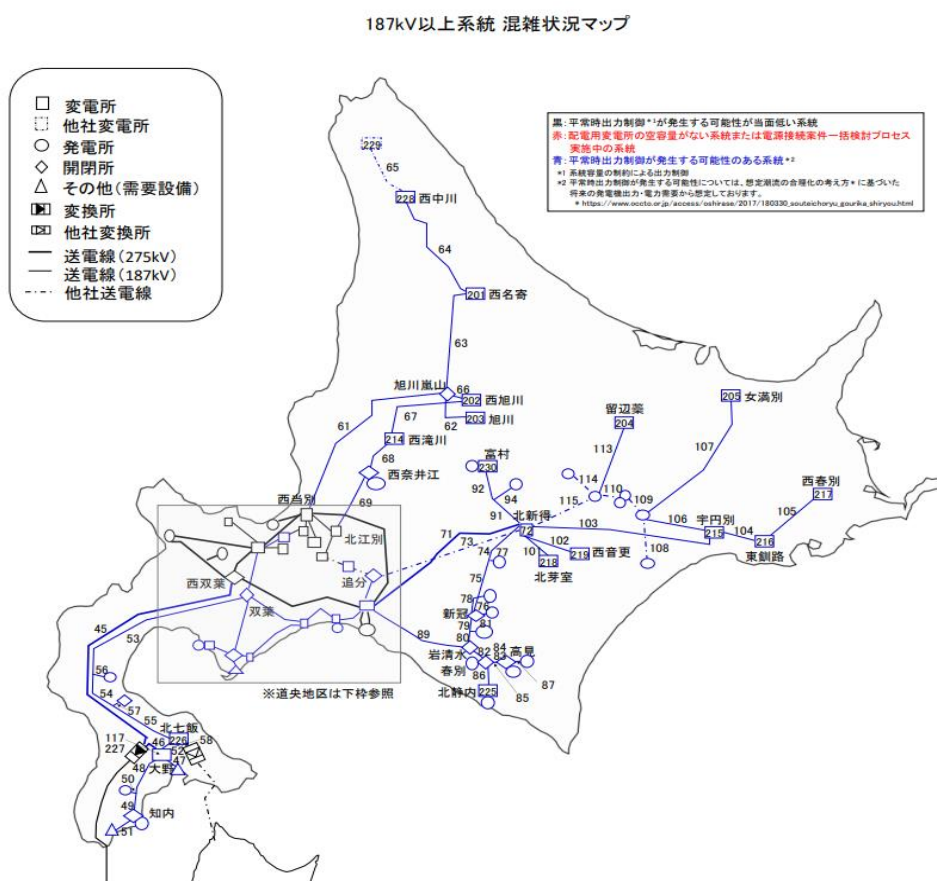


図 1.5 北海道地域の電力基幹系統と混雑状況

の系統に、RE が分散して普及したため潮流が変化し、札幌周辺の幹線を除いて系統混雑が発生し、2024 年現在は新たな発電設備を系統に接続することが難しくなっており、RE 導入の妨げになっている。ここで、系統混雑とは、変電所や送配電線などの系統設備に流れる潮流がその設備

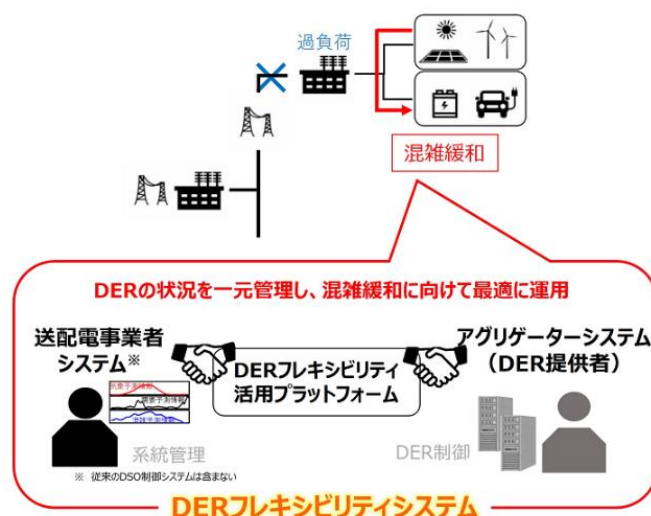


図 1.6 DER フレキシビリティシステム(NEDO 事業)の概要

容量を超過してしまうことを意味する。IEA のシナリオの APS 及び NZE では、ポテンシャルが大きい北海道地域でさらに RE 導入量を増やす必要がある。このため、系統混雑緩和として、実態をより反映した電源稼働を前提とする方法による想定潮流の合理化^[9]、単一設備故障時にリレーシステムで瞬時に電源制限を行うことで運用容量を拡大する取り組みである N-1 電制^[10]、送電線などの送変電設備の空いている容量を活用し、新しい電源をつなぐ方法であるノンファーム型接続^[11]、送変電設備の状態を常時監視し、電流容量を現地の状況に合わせて変化させて運用する技術であるダイナミックレーティング^[12]などの既存送変電設備を最大限活用する取り組みや、送電線や変圧器を新設したり、容量の大きな設備に変えたりするなどの設備増強も進められている^[13]。これらの中には長期間を要する対策もあり、系統混雑はしばらく続くことが想定される。

そこで、上記のように広域で需給調整するのではなく、地域で需給調整を行う方法の検討が進められている。域内で電力需給調整を行う方法として、地域マイクログリッド(MG)があり、平常時に分散型 RE を活用し、非常時にはレジリエンスを確保するポテンシャルを有している。MG は、CERTS (The Consortium for Electric Reliability Technology Solutions : 電力供給信頼性対策連合) によって以下のように定義される^[14]。

- ①複数の小さな分散型電源と電力貯蔵装置、電力負荷がネットワークを形成する一つの集合体
- ②集合体は系統からの自立運用も可能であるが、系統や他の MG と適切に連系することも可能
- ③需要家のニーズに基づき、設計・設置・制御される

先行研究である NEDO 事業「電力系統の混雑緩和のための分散型エネルギーリソース制御技術開発 (FLEX DER プロジェクト)」^[15]の概要を図 1.6 に示す。DER (Distributed Energy Resources) の稼働状況を把握し、DER を制御して需要をシフトすることにより、再エネの出力制御を回避しつつ系統混雑を緩和することを可能とする DER フレキシビリティシステムを開発している。DER は、発電設備や蓄電設備、電気自動車、ヒートポンプなどの需要設備の総称である。このシステムでは、MG の需給調整に蓄電池等の調整力だけではなく DER の制御も活用することが新しい。管理者が DER を群制御するには、所有者との合意形成が必要となる。

ここで、分散型 RE の大量導入が想定される地域の 1 つである北海道の地域特性を整理する。2018 年 9 月に発生した北海道胆振東部地震^[16]では、図 1.5 に示す道央と道東地域を結ぶ 3 つの基

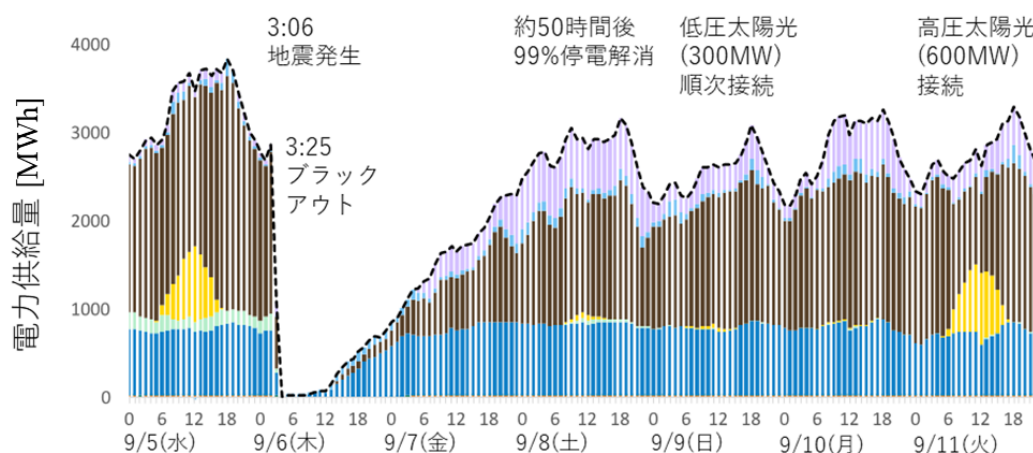


図 1.7 北海道胆振東部地震前後の北海道管内の電力供給量の推移

幹系統全てで故障が発生し送電できなくなったことを発端として、北海道全域でブラックアウトが発生した^[17]。図 1.7 に示すように、ブラックアウトからの復旧に時間を要したこともあり、地域独自で非常時のレジリエンスを確保したいというニーズが高まっている^[18]。レジリエンスを確保するためには、大規模な災害を想定する場合、大容量の設備を導入することになるが、頻度が少ない災害のための設備投資はなるべく少なくしたいという切実な声も多く聞かれる。また、FIT 制度^[19]で地域に普及した分散型 RE について、現状は FIT 制度により活用できているが、FIT 終了後も維持したいというニーズも顕在化している。

地域 MG の先行研究^{[20][21][22]}では、MG モデルの検討や実証が進められ技術的な課題が整理されてきた。先行研究の多くは、地域のニーズを反映して非常時にレジリエンスを確保するモデルであり、設備投資及びランニングコスト等の経済性に課題を有している。具体的には、需給調整を行う蓄電システムが高コストなことであること、及び RE 施設と需要エリアの街区が隣接していない場合が多く、エネルギー輸送が高コストなことである。平常時と非常時に両用できて、経済性を有する持続的なモデルの提案が求められている。

1.2 EV 駆動用蓄電池の定置リユース

1.2.1 定置リユースへの期待

1.1 節で述べたカーボンニュートラルの実現には、運輸分野では、化石燃料であるガソリンの消費量削減が必要であり、ガソリン車からハイブリッド車(HEV)、プラグインハイブリッド車及び電気自動車(EV)などの電動車へのシフトが進められている。図 1.8^[23]に米国における HEV、PHEV、EV の販売台数の年次推移を示す。今後も右肩上がりに増加することが想定される。図 1.9^[23]に EV 駆動用蓄電池から定置リユースされる数量の推計を示す。2025 年に世界中の EV 等で使用済みの駆動用蓄電池は 90 GWh を超え、その約 1/3 が再利用される予測となっている^[23]。地域 MG の主要な課題の 1 つに、需給調整を行う蓄電システムが高コストなことがあるが^[24]、EV 等で使

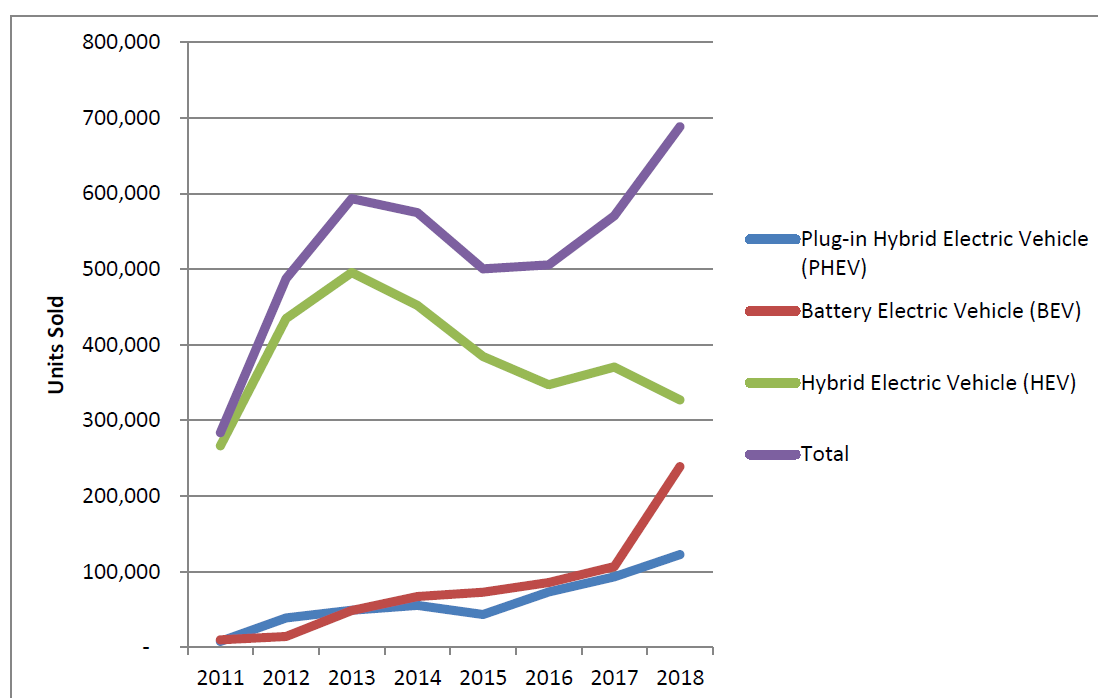


図 1.8 米国における HEV、PHEV、EV の販売台数

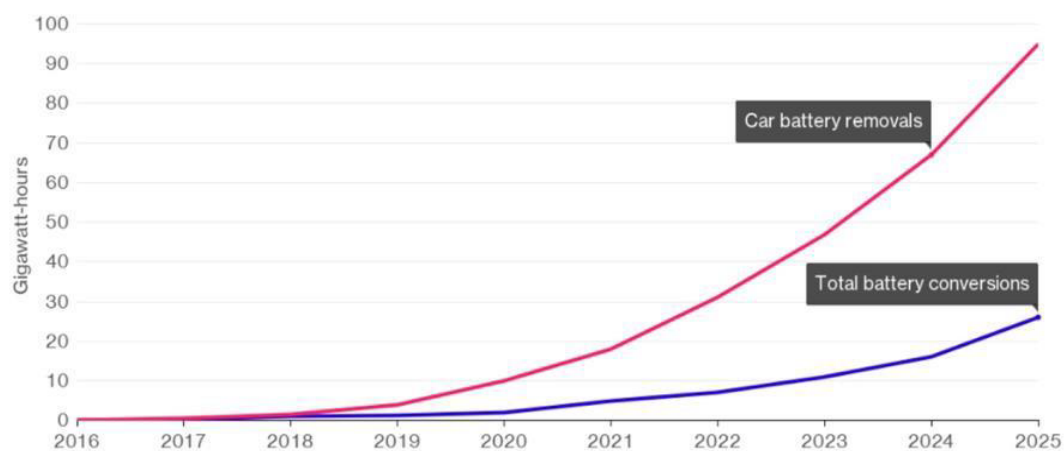


図 1.9 2025 年までの EV 駆動用蓄電池から定置リユースされる数量の推計

用済みの蓄電池をリユースすることによる低コスト化が期待されている^[25]。

1.2.2 定置リユースでの活用

EV 等で使用済みの蓄電池は、1 次利用中の環境温度や負荷等の使用履歴により性能ばらつきを有する^[26]。そのため、定置リユースするには、性能ばらつきを考慮した特有の活用技術が必要となる。具体的には、1 次利用後の性能ばらつきを安価かつ高精度に選別する技術、及び定置リユース運用中に蓄電池の健全度を診断する技術などがある。低コストであるリユース蓄電池の優位

性を生かすためには、充放電能力に関する性能選別も低コストであることが求められることから、高価な装置や設備を用いず、短時間に高精度に選別を行うことが望ましい。また、一般に、蓄電池システムは、単電池を直列に多積層スタックすることでシステム電圧まで電圧を上昇させ、スタックを並列に多積層することで容量を確保する。リユース蓄電池システムでは、性能差による様々なばらつきを考慮した運用が必要となる。ばらつきの種類には、蓄電池の容量及び電池の充電状態（State of charge：以下、SOC）があり、ばらつきが生じる箇所は、並列接続されたスタック間、直列に多積層されたスタック内、及び単電池内部である。ここで、スタック間及びスタック内の SOC ばらつきについては、それぞれ、並列回路の循環電流で均等化され、バッテリーマネジメントシステムに内蔵された SOC バランサ回路で均等化される^[27]。単電池内部の SOC ばらつきは、蓄電池内部の充電状態が不均一になることで生じ、リユース蓄電池で大きな電流を印加した際に顕著になる。このため、大電流印加後に CC-CV 充電を行い、蓄電池内部の SOC を均等化するなど、制御技術で蓄電池の充電状態を均一化することが必要である。本研究では、スタック間の容量ばらつきについて検討する。リユース蓄電池システムでは、スタック間で容量がばらつくことを前提に、低コストなリユース蓄電池の優位性を活かすため、高価な装置や設備を用いずシステム運用中にスタックの健全度を把握し、必要に応じてスタックを交換できることが望ましい。

1.2.3 関連研究の動向

1 次利用後の性能ばらつきを安価かつ高精度に選別する技術、及び定置リユース運用中に蓄電池の健全度を診断する技術について、関連研究の動向をまとめた。

Garg ら^[28]及び Farhad らによる報告書^[29]を参考に、性能選別技術の先行研究を表 1.1 にまとめた。まず、Schneider ら^[30]は、目視検査、電圧測定、およびサイクル性能テストを用いた性能選別手法を提案している。また、より短時間かつ高精度な方法として、Muhammand ら^[31]や Jiang ら^[32]は、CC-CV 充電テストを用いる方法が提案している。Muhammand らは、HPPC マイクロサイクルによるモデルリングを、Jiang らは、K-means 法^[33]を選別に用いている。さらに、より簡便な方法として、森田ら^[34]は、CC 充電テストを用いる方法を提案し、蓄電池容量の低下や内部抵抗の上昇が充電電圧曲線の変化に現れることに着目して選別を行っている。また、Lai ら^[35]は、放電テストを用いている方法を提案している。この方法は、放電電圧曲線で学習を行い、遺伝的アルゴリズム-バックプロパゲーション(GA-BP)ニューラルネットワークに基づく容量スクリーニングを行う。

上記の先行研究では、いずれも充放電試験を行うために高価な装置が必要なこと、また高精度だが時間がかかることが課題となっている。そこで、安価なミリオームメータを用いて単電池の内部抵抗を測定し、使用履歴と抵抗の関係を利用することで、短時間で性能選別法も提案されている^[36]。しかし、充電する方法と比べて性能選別の精度が低く、使用済み蓄電池を組電池とした際の性能ばらつきが大きくなるため、蓄電池性能を充分活用できないことが想定される。また、1 次利用中のトレサビリティデータを活用する方法もあるが、トレサビリティデータは個人情報を含むことから入手が難しく、その利用は一般的ではない。また、上記の先行研究では、いずれも単電池で分析する必要があるため、スタックを分解して再度組み立てる工数がかかること、また運用を停止する必要があることが課題となる。

表 1.1 1 次利用後の蓄電池の性能選別技術の一覧

Reuse battery type	Parameters	Screening/Checking procedure	Regrouping methods	Validation methods	author	Ref.
NiMH cells/ Li-ion cells	Voltage; Current; Resistance;	1. Disassemble 2. Visual aspect 3. Voltage verification 4. Cycles performance		Experiment	Schneider	[30]
Li-ion batteries	Capacity; Resistance; Open circuit voltage (OCV); Power capability;	1. Constant current constant voltage (CC-CV) test 2. HPPC micro cycle 3. Modelling the HPPC Micro Cycle 4. End of life Sorting	HPPC Micro cycle	Experiment	Muhammand	[31]
Li-ion batteries	Resistance; Capacity;	1. CC-CV method 2. DC pulse approach 3. Self-discharge test	K-means algorithm	Simulation	Jiang	[32]
Li-ion batteries	Capacity; Resistance; Open circuit voltage (OCV);	1. Constant current (CC) test 2. Regression calculation from Resistance and OCV 3. Parameter estimation	Charging curve analysis	Experiment	Morita	[34]
Li-ion batteries	Capacity; Voltage; Resistance;	1. Fast Screening of Capacity 2. Fast Screening of Internal Resistance 3. Capacity Screening Model Based on GA-BP Neural Network	GA-BP Neural Network	Experiment & Simulation	Lai	[35]
NiMH batteries	DC Impedance; Traceability (Usage period);	1. Observational check 2. Measurement of DC Impedance 3. Sort by usage period		-	Ito	[36]
Li-ion batteries	AC Impedance; Electromotive force;	1.Measurement of AC Impedance and Electromotive force 2. Fitting to equivalent circuit		Experiment & Simulation	Inui	[42]

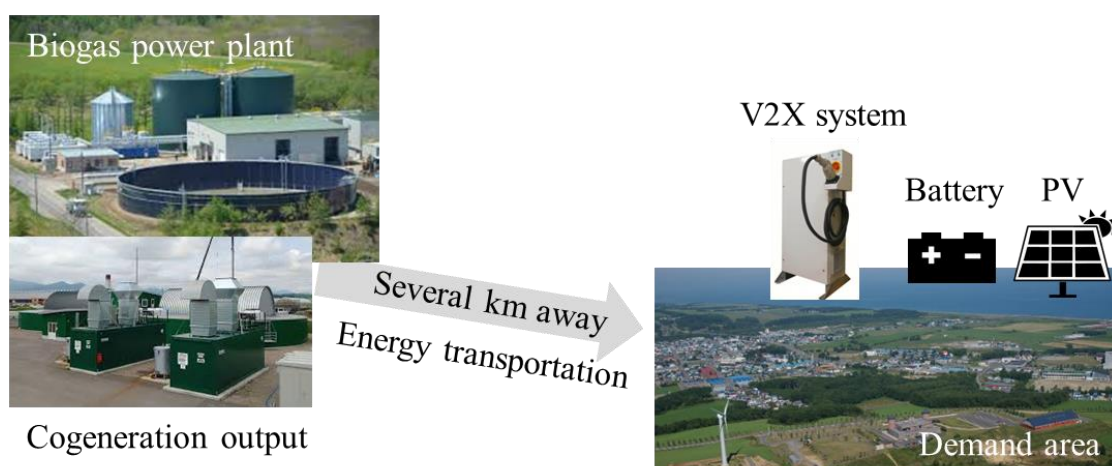


図 1.10 バイオガスプラントと需要エリアの関係

1.3 地域マイクログリッドでのリユース蓄電池活用への期待と課題

地域 MG を、需要エリアに近い分散型 RE を利用するシステムと定義する。地域 MG は、蓄電池等の調整力を活用することで電力需給バランスを調整できるため、RE の導入を拡大できるポテンシャルを有する。高価な蓄電池システムは実用化を阻んできたが、一次利用を終えた安価なリユース電池がこの問題を解決するかもしれない。1.2 節で述べた通り、世界中で EV のリユース蓄電池は 90GWh を超え、2025 年には EV 電池の約 1/3 が再利用されると予測されている。さらに、2030 年には全自動車に占める EV の割合が 35.7% まで進むと予想されている^[37]。したがって、EV がある程度普及する状況では、MG の効率的な運用に必要な蓄電容量を確保できる可能性がある。V2X(Vehicle to Everything)システムで系統に接続することで、EV から MG に電力を供給することができる。

分散型 RE の一つであるバイオガス(BG)プラントは、牛糞から発電することができる^[38]。プラントは多くの場合、定格出力で運転され、地域 MG におけるベースロード発電と定義できる^[39]。しかし、図 1.10 に示すように糞尿の臭気対策のため、BG プラントは需要エリアから数 km 離れた場所に設置されることが多い。1.1 節で述べたように、地域 MG の主要な課題は、設備投資及びランニングコストが高く、持続的なモデルでないことである。具体的には、RE 施設と需要エリアの街区が隣接していないため、エネルギー輸送が高コストなことにある。先行研究によれば、複数の再生可能エネルギーと需要を併せ持つ MG は、自営線を利用した構成が可能である^[21]。また、著者らは、地域 MG を設計するために、RE 施設から需要エリアまでのエネルギー輸送方法の検討を進めてきた^[22]。BG プラントから需要エリアにガスをエネルギー・キャリアとして輸送するケースでは、ガスタンクローリー車による輸送またはガスパ管を敷設することを想定した。前者では、高圧に圧縮して輸送密度を上げて輸送することが一般的であるが、輸送前後に行う圧力変換にコストがかかる。後者では、ガスパ管を維持するためには厳しい保安基準を満たす必要があり高いランニングコストがかかる。商用の配電線を利用するケースでは、緊急時に避難所等の一部の対象施設のみに電力を選択的に供給することが難しく、エリアに含まれる一般家庭も含めて供給することになるため、電力の需給調整及び、電力が供給されない周辺住民との公平性を保つ

ことが難しい。MG と EV 技術の統合などのブレイクスルーにより、上記で示したエネルギー輸送の課題を克服することが期待されている。

1.4 本研究の目的と論文構成

本研究では、EV 等で使用済みの蓄電池を定置リユースするための特有の活用技術を提案することを目的として、1 次利用後の性能ばらつきを安価かつ高精度に選別する技術、及び定置リユース運用中に、蓄電池の健全度を診断する技術を提案する。また、地域 MG でエネルギー輸送のコストを低コスト化することを目的に、EV 及び定置リユース蓄電池を活用した MG モデルの提案及び蓄電池と EV の協調制御方式を開発し評価する。

以下、本論文の構成および概要について記載する。

第 2 章では、1 次利用後の性能ばらつきを安価かつ高精度に選別する技術について述べる。インピーダンス波形を詳細に AI で複数回分析することと、品質工学の MT (Mahalanobis Taguchi) システムである MT 法 (MT 法) [40][41]とを組み合わせることで、性能が基準を満たすかどうかを高精度に短時間で判定する方法を提案する。この方法では、インピーダンス波形の差異が小さい場合も性能選別ができ、高価な充放電装置を用いた時間がかかる充放電や 1 次利用中のトレサビリティデータは必要としない。まず、手法の提案を行い、次に、実機の EV 等で使用済みの蓄電池で提案分析法を用いた選別を行い、充放電による従来法と比較し有用性を検証する。

第 3 章では、定置リユース運用中に蓄電池の健全度を診断する技術について述べる。並列接続された蓄電池の電流分担比が容量比となることに着目する。この方法を用いてスタック間の容量ばらつきを把握し、スタック間の相対的な容量比を把握する健全度診断方法を提案する。提案法では、高価な装置を用いた内部インピーダンス測定、解析は必要とせず、システム運用中にリユース蓄電池の健全度を把握できる。従来法で精度が高い放電容量比と、提案手法の電流分担比が近いことを示すため、まず実電池の電流分担が理論通りであるかを、蓄電池の実機特性を組み込んだシミュレーションと同定することで確認を行う。次に、実電池の電流分担比と従来法の放電容量比を比較し、提案分析手法の有用性を検証する。

第 4 章では、1 次利用後の蓄電池の定置リユースを活用した地域 MG モデル及び蓄電池と EV の協調制御方式について述べる。日常的な電力供給には既存の配電線を利用し、非常時には EV を仮想的な配電線として利用する革新的な地域 MG モデルを提案する。非常時のためだけに設備投資するのではなく、日常的な電力供給に活用するこのモデルは、持続可能で災害にも強い。また、非常時の需給バランスをとるためのリユース蓄電池と EV の協調制御方式を提案し、制御方式が EV による仮想配電線機能をどのように実現するかを検証する。

第 5 章では、全体を通して得られた所見を含めた結論および今後の展望を述べる。

第2章 EV 駆動用蓄電池を定置リユースするための性能選別技術

2.1 先行研究に対する提案技術の位置づけ

1.2.3 節で、蓄電池を定置リユースするために性能選別する技術の先行研究とその課題について述べた。本研究では選別時間を充電による方法より大幅に短縮できる、蓄電池性能の劣化指標となる内部インピーダンスに着目した。既往研究において、インピーダンス波形を用いた性能選別方法も提案されている^[42]が、この方法を用いて性能選別できる蓄電池がある一方で、性能差があるのにインピーダンス波形の差異が小さく、性能選別が難しい蓄電池もある。本研究では、インピーダンス波形を詳細に AI で複数回分析することと、品質工学の MT 法とを組み合わせることで、性能が基準を満たすかどうかを高精度に短時間で判定する方法を提案する。この方法では、インピーダンス波形の差異が小さい場合も性能選別ができ、高価な充放電装置を用いた時間がかかる充放電や 1 次利用中のトレサビリティデータは必要としない。まず、提案の手法について述べる。次に、車両で使用済みの実蓄電池で提案分析法を用いた選別を行い、充放電による従来法と比較し有用性を検証する。

2.2 性能選別技術の提案手法

図 2.1 を用いて提案手法の分析手順を説明する。分析対象はバッテリーインピーダンスメータを用いて測定した 1 次利用済みの単電池の内部インピーダンス波形とする。はじめに MT 法での判別に横軸の単調増加が必要なため、一般的なインピーダンス波形に対して軸を反転させ、実部を縦軸、虚部を横軸とする。次に、選別したい蓄電池（以後、被検体）の波形と、性能の指標とする容量が既知の波形群を合わせてクラスタリングを実施し、被検体がどの波形パターンに属するか自動的に分類する。クラスタリングには、AI の教師なし機械学習の手法を用いており、正しい分類方法が不明なデータ群に対して適切な分類方法を推定し、データ群をグループ化できる。クラスタリングの結果で得られる 1 つ 1 つのグループはクラスタと呼ばれる。クラスタリングは、k-means 法を用いた。その次に、インピーダンス波形の特徴量を抽出する。ここでは、石澤ら^[43]によって提案された、波形から標本線を用いて特徴抽出する標本線 GA 法を用いる。標本線 GA 法では、AI の教師あり学習が用いられており、最適化計算の遺伝的アルゴリズムを応用した方法となる。クラスタ単位で特徴量抽出に最適な標本線の位置を設定し、標本線と波形の交点からの線長を特徴量とする。標本線の設定は、1 つのクラスタに対して初回のみ必要となる。最後に、MT 法を用いてインピーダンス波形が基準を満たすか判別を行う。MT 法による判別は、

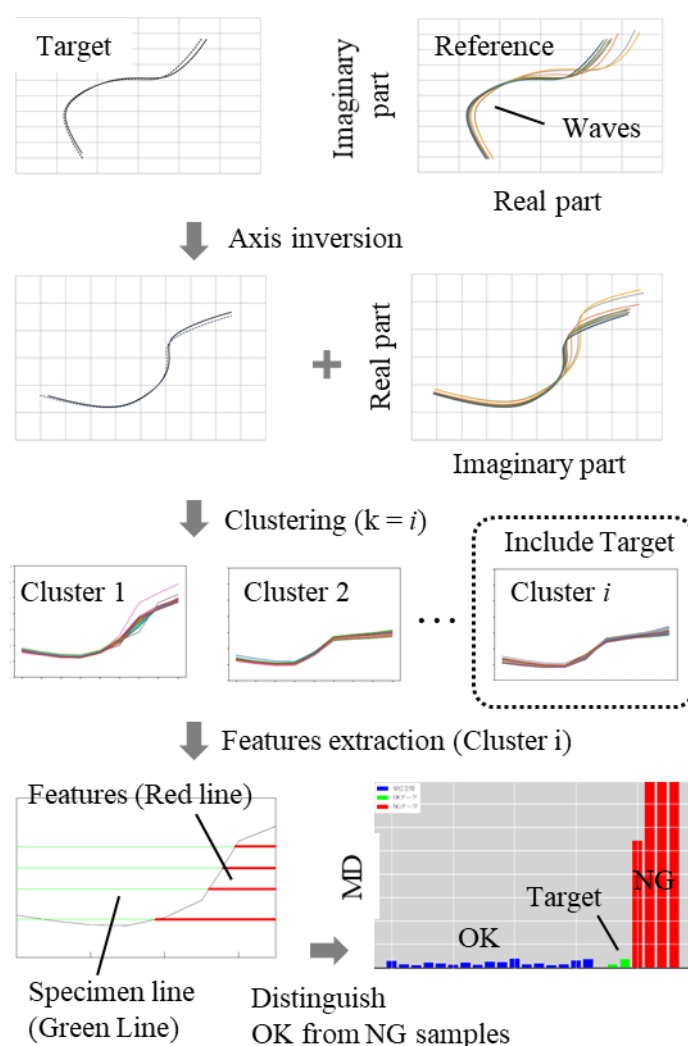


図 2.1 提案手法の分析手順

クラスター単位とする。MT 法には AI の教師なし学習が用いられており、被検体が、基準を満足する集合からどの程度離れているかを示すマハラノビス距離(MD)を指標として、同属か否かを判別する手法である。

今回、クラスタリングを行うプログラムは python で作成し、インピーダンス波形の特徴量抽出から、MT 法による判別までは、解析ソフト（田中精密工業製 Signal Catcher）を用いた。

2.3 提案手法の検証

提案手法について、順を追って検証結果を示す。検証に用いた蓄電池は、EV 等の駆動用電池として 1 次利用された後に保管していた単電池を 65 個準備し、内訳は容量が既知のものを 63 個、また被検体を 2 個とした。1 次利用済み蓄電池の種類はニッケル水素電池、定格容量は 6.5Ah、定格電圧は 7.2 V、定格内部抵抗は 12 mΩ である。2 次利用蓄電池の内部インピーダンス測定は、バッテリーインピーダンスメータ（HIOKI 製 BT4560）を用いて 1,000～0.1 Hz までログスイープで

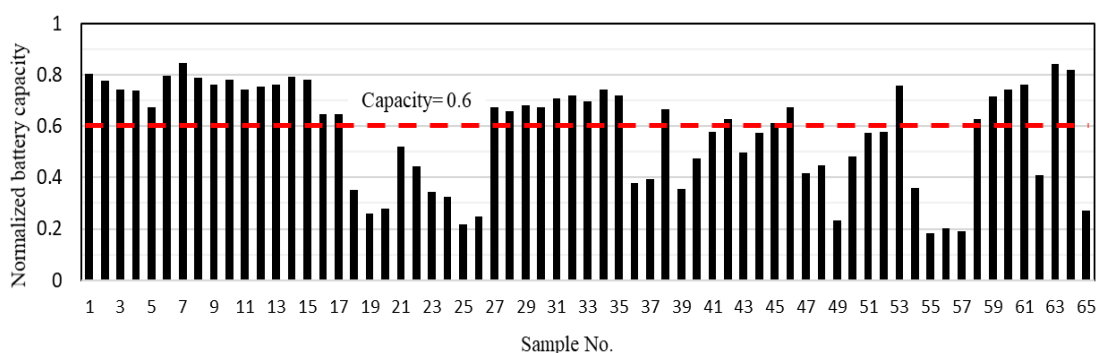


図 2.2 試験体の容量一覧

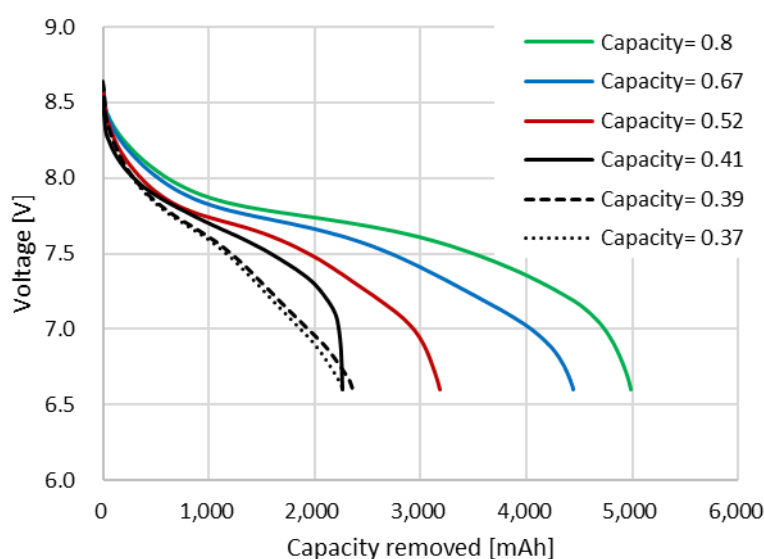
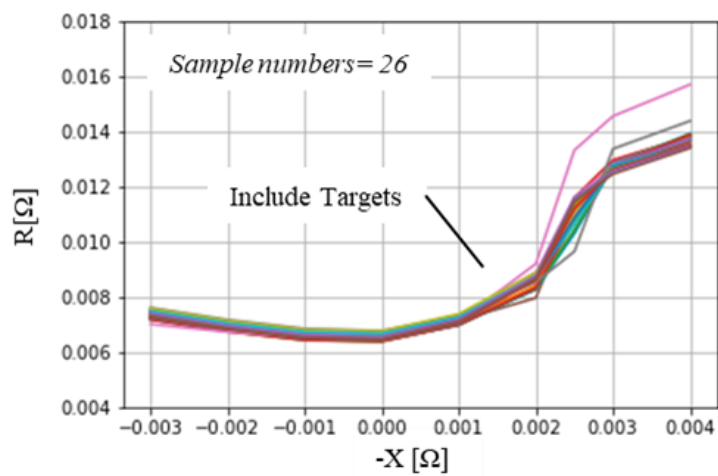


図 2.3 試験体の 1.5C 放電曲線

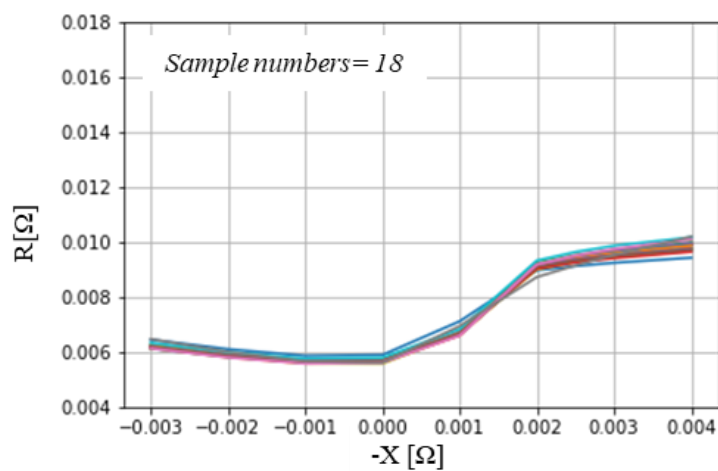
41 点, 23.0 ± 2.0 °Cにて行った。インピーダンス測定時の蓄電池電圧は、平均値 7.44 V 標準偏差 0.08 V であった。また判別結果は、提案手法と、放電容量を充放電試験で測定する従来法で比較を行った。図 2.2 に本検証に用いた 1 次利用済み蓄電池全数の容量分布を示す。容量は定格容量で正規化した値であり、以下では、容量は全て正規化した値で示す。次に、1 次利用済み蓄電池の IV 特性を図 2.3 に示す。容量 0.4 以下のサンプルは、容量が 0.4 以上あるサンプルと異なる IV 曲線となるため、今回の検討では、リユースの下限容量を 0.4 と設定した。リユースは、容量 0.4 から 0.6 の範囲を想定し、判別するための容量基準値を 0.6 とした。

2.3.1 クラスタリング

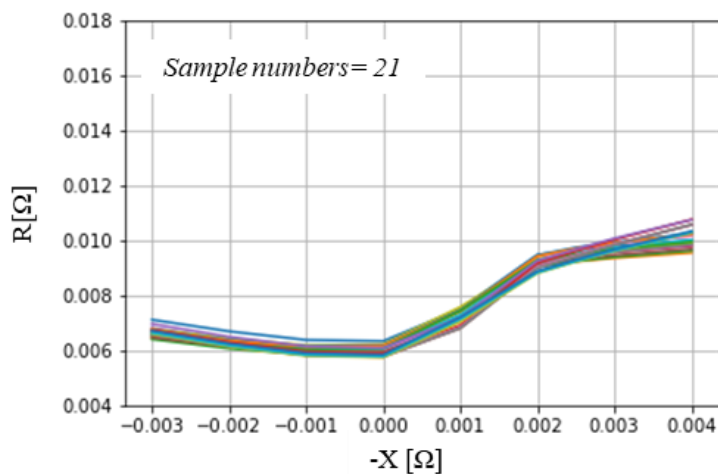
被検体をクラスタリングで分類した結果を図 2.4 に示す。一般にクラスタリングでは、事前にユーザがクラスタ数を指定するが、今回はクラスタ数を文献[44]を参照に 3 とし、類似した波形パターンに分類した。クラスタ 1 には、26 個の波形が分類され、内訳は、被検体が 2 個、容量が基準を満足する波形が 22 個、満足しない波形が 2 個であった。



(a) Cluster 1



(b) Cluster 2



(c) Cluster 3

図 2.4 K-means 法によるターゲットのクラスタリング

2.3.2 特徴量抽出

今回は、被検体が属するクラス 1 に絞って、最適な標本線の位置を設定し特徴量を抽出することとした。表本線の設定に用いた表本線 GA の目的関数は、 MD_{NG_MIN} と MD_{OK_MAX} の差分を最大化である。ここで、 MD_{NG_MIN} は、判別に用いている MT 法の NG 群の MD 最小値、 MD_{OK_MAX} は、OK 群の MD 最大値である。表本線設定時のデータ処理は、順に、標本線候補を設定、特徴量を算出、そして MT 法により目的関数の算出となる。このデータ処理を繰り返して、目的関数が高い標本線候補を次世代へ引き継ぐことで、目的関数が最大となる表本線を設定する。

最適な標本線の位置を設定するには、分割数、特徴量数及び初期集団数をパラメータとして任意に決める必要がある。図 2.5 にクラス 1 での分割数の設定を示す。分割数は、標本線範囲の最大から最小までの等間隔の分割値であり、今回は最小 $0.007\ \Omega$ から最大 $0.013\ \Omega$ の範囲で 40 とした。分割数を大きくすると候補となる標本線位置が増えるが、一方で分割数を大きくしすぎると一部分に標本線が偏り過学習^[45]の要因となる。一般的に過学習になると汎化能力が低下し、新たな被検体に対する判別精度が悪くなる。次に特徴量数の設定について述べる。鈴木^[44]によれば、判別に用いる MT 法の解析では、サンプルは特徴量数の 3 倍以上あることが望ましいとされる。ここでは、クラス内のサンプルが 26 であることから、今回は特徴量数を 8 とした。初期集団数は、最初に生成する標本線の組み合わせ数である。大きくするとより良い標本線位置が見つかりやすくなるが、過学習に陥りやすい。今回は 100 とした。

図 2.6 に標本線 GA 法で設定した最適な標本線位置と被検体の特徴量を示す。今回のパラメータ設定値を用いることで、内部インピーダンス波形の低抵抗域、中間域、高抵抗域に分散して標本線が設定できていることから過学習となることなく、波形の特徴を抽出できたことがわかった。

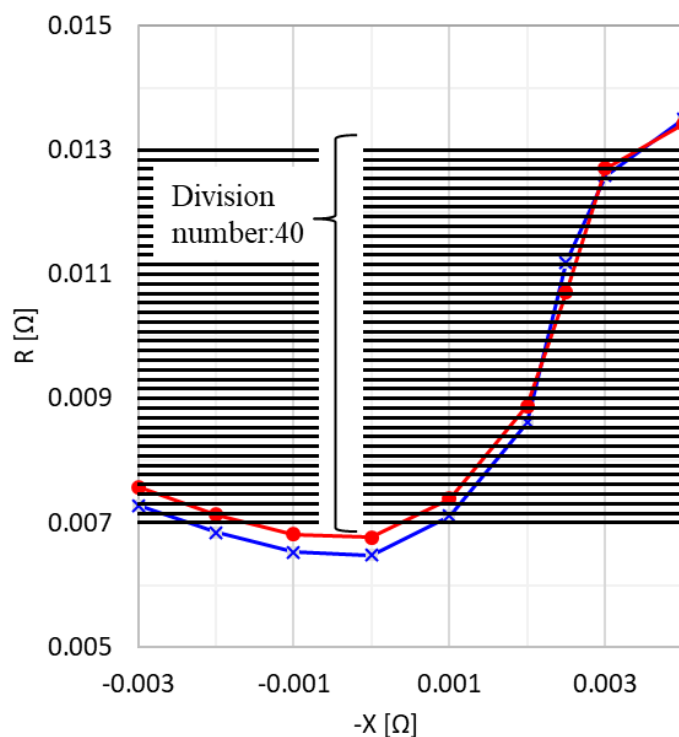


図 2.5 クラスタ 1 の標本線候補とターゲットの内部インピーダンス

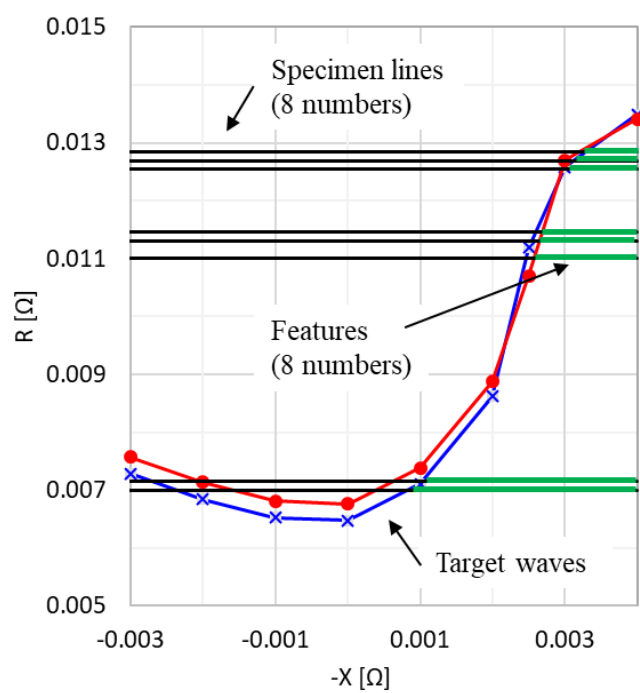


図 2.6 標本線 GA 法で設定した最適な標本線位置と被検体の特徴量

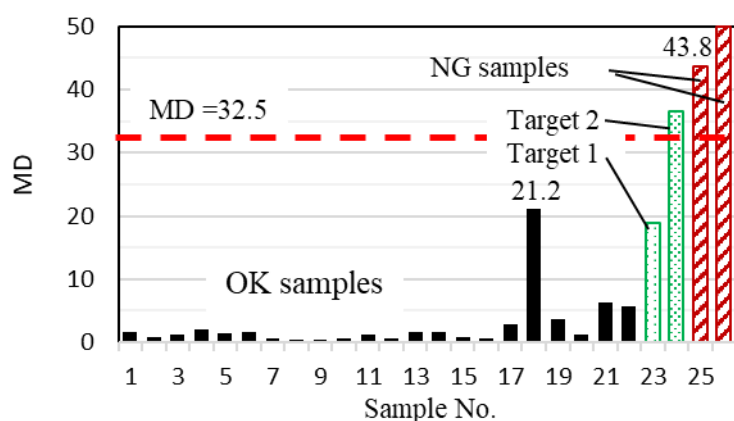


図 2.7 提案方式（多層 AI 方式）の OK 及び NG サンプルの判別結果

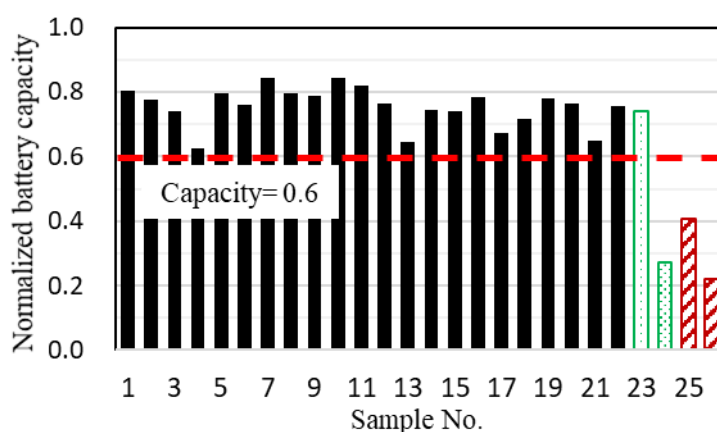


図 2.8 従来方式（充放電法）の OK 及び NG サンプルの判別結果

2.3.3 判別

クラスタ 1 の波形から抽出した特徴量を用いて MT 法で解析した結果を図 2.7、従来法である放電容量を充放電試験で測定した結果を図 2.8 に示す。従来法では、サンプル 1～22 は基準の満たす群（OK 群）、サンプル 25、26 は基準を満たさない群（NG 群）であった。MT 法で解析した結果は、サンプル 1～22 の OK 群の MD が小さく、サンプル 25、26 の NG 群の MD が大きかった。下記の(2-1)式のように MD 判定値を設定し、MD 判定値以下を OK 群と同属と判別することで、提案手法と容量測定結果は一致する。

$$MD_{\text{判定値}} = (MD_{NG_MIN} + MD_{OK_MAX}) \quad (2-1)$$

$$MD_{NG_MIN} > MD_{OK_MAX} \quad (2-2)$$

ここで、 MD_{NG_MIN} は、NG 群の MD 最小値、 MD_{OK_MAX} は、OK 群の MD 最大値とし、(2-2)式が成り立つこととする。

次に、(2-1)式から MD 判定値を 32.5 とし、被検体の判別を行った。被検体 1（容量 0.74）は、MD が 19.4 で OK 群と同属、被検体 2（容量 0.27）は MD が 36.6 で NG 群と同属だと判定した。

提案手法の結果と容量測定結果は一致しており、提案手法で正しく判別できることを確認した。

2.3.4 考察

提案分析法により、1 次利用済み蓄電池の性能を判別できることを確認した。本手法では MT 法の特徴をいかして、比較的少ないサンプル数でも判別が可能である。ここで、必要なサンプル数及び特徴量数について検証を行った。まず、必要なサンプル数の評価のため、特徴量数を 8 に固定し、サンプル数を減らして検証を行った。具体的には、OK 群のサンプルを減らす方法でサンプル数を 21 とし、過学習となっていないか確認するため、先に除いた 5 個のサンプルを用いて、正しく判別できるか確認を行った。次に、サンプル数を 26 に固定し、特徴量数を 7 に減らした場合について検証を行った。

図 2.9 及び図 2.10 に波形数 21 とした場合の判別結果を示す。(2-1)式より MD 判定値を 771 とし、被検体の判別を行った。被検体 1 (容量 0.74) は、MD が 263 で OK 群と同属、被検体 2 (容量 0.27) は MD が 1,753 で NG 群と同属だと判定した。先の検証と同じように提案手法の結果と容量測定結果は一致することを確認した。次に過学習の確認結果を図 2.11 及び図 2.12 に示す。図 2.12 に示す従来法の結果より、確認用のサンプル 22~26 は、全て容量基準値を満足した。一方で、図 2.11 に示す MT 法の解析結果では、サンプル 25 (容量 0.65) は MD が 2,316 で NG 群と同属だと判別した。

これは MT 法で、本来 OK 群と同属と判定すべきサンプルを、NG 群と同属と誤判定したことになる。特徴量抽出を行う際の波形数が少ないため過学習をしてしまい、未知データの判別ができなかったと考えられる。次に、サンプル数を 26 に固定し、特徴量数を 7 に減らして検証を行った。MT 法で MD 値を算出すると、 MD_{NG_MIN} は 48、 MD_{OK_MAX} は 58 で、(2-2)式を満たさず、判別に必要な MD 判定値を算出できなかった。これは、図 2.6 で示す 8 本の標本線のうち、特徴量数を 7 とすることで、縦軸の R が 0.013 Ω 付近の標本線の数 が 3 から 2 に減ったことで、波形の特徴を把握できなくなったためと推定される。まとめると、今回の検討では、蓄電池の内部インピーダンス波形の特徴抽出には、特徴量数が 8、MT 法の過学習を抑制するためには同じクラスタ内のサンプル数が 26 必要となり、判別精度の確保には、一定数以上の特徴量数及びサンプル数が必要であることがわかった。また、判別精度を向上させるためには、容量が基準を満足しない波形の数を増やすことも有効であることを付け加える。

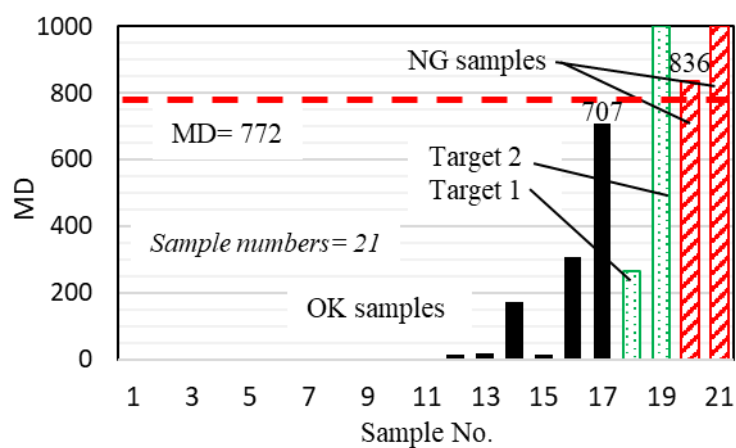


図 2.9 提案方式（多層 AI 方式）でのサンプル数のパラメータスタディ

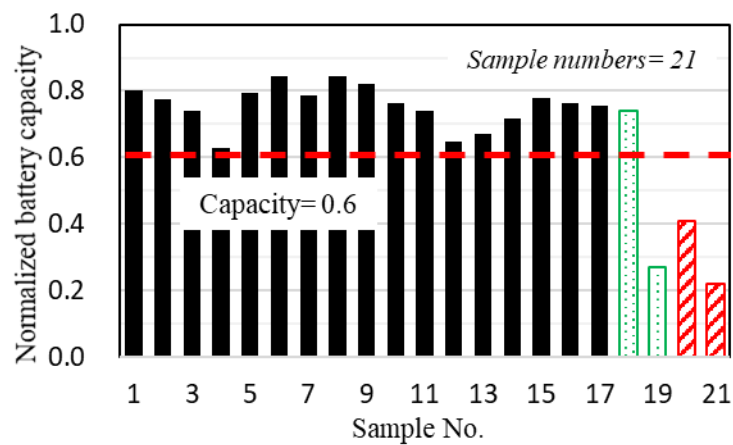


図 2.10 従来方式（充放電法）でのサンプル数のパラメータスタディ

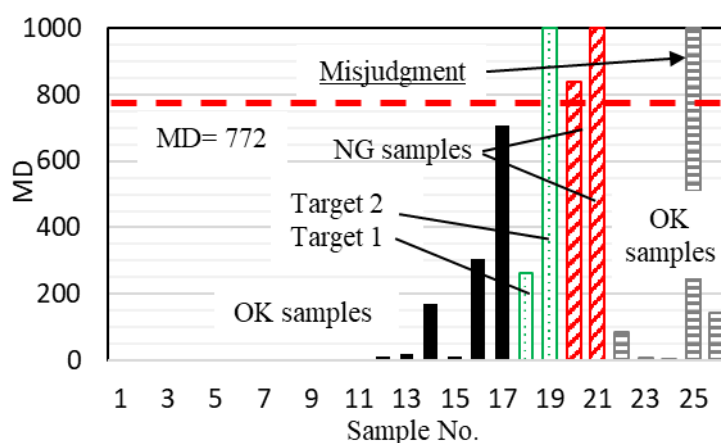


図 2.11 提案方式（多層 AI 方式）での過学習の確認結果

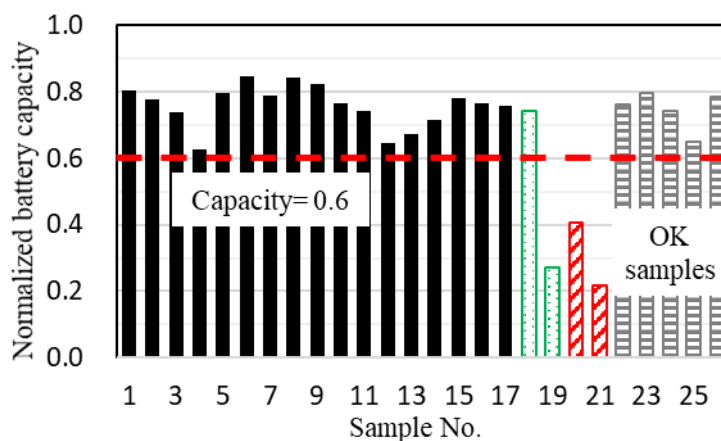


図 2.12 従来方式（充放電法）での過学習の確認結果

2.4 選別時間の最適化

提案手法の解析時間は 235 sec 程度となり、充放電を用いた従来法の約 2.5 時間から大幅に短縮できた。ところで、提案手法における解析時間の支配要因は、蓄電池の内部インピーダンス測定にある。多層 AI 法の解析時間が数 sec であることから、解析精度を下げない範囲で蓄電池の内部インピーダンスの測定時間を短縮することで、選別時間の最適化を検討する。

2.4.1 内部インピーダンス測定

本研究で用いたバッテリーインピーダンスメータによる内部インピーダンス測定時間は 230 sec である。ここで、蓄電池のインピーダンス測定における各周波数の測定時間を図 2.13 に示す。1Hz 以下の累積時間が全体の 80% 以上となり測定時間が長い要因であることから 0.1~1 Hz について検討する。先の提案手法の検証での測定点数を標準パターンとし、そこから、0.13 及び 0.2Hz を除外したパターン、そして 0.13, 0.2 及び 0.32 Hz を除外したパターンを作成した。それぞれ、

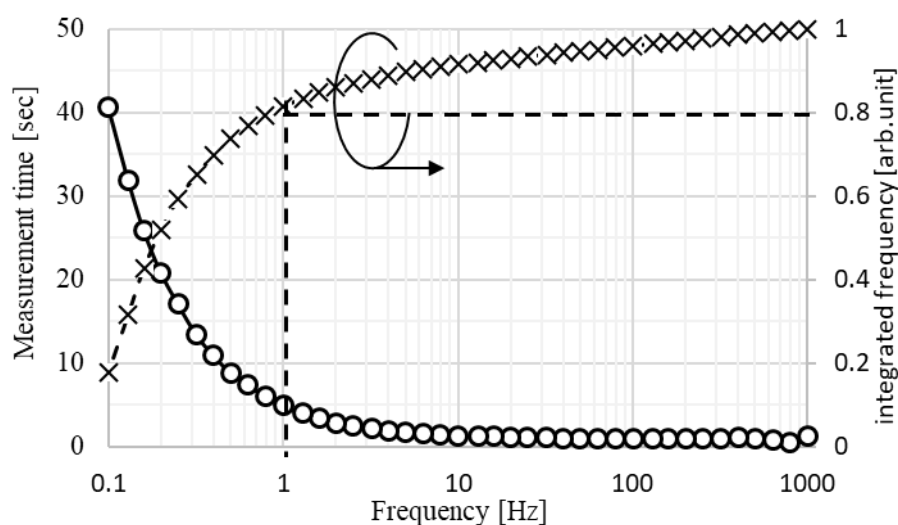


図 2.13 蓄電池のインピーダンス測定における各周波数の測定時間

標準パターンより 43 及び 54 sec 測定時間を短縮できる。

2.4.2 解析精度

内部インピーダンス測定の各パターンを用いて、提案手法で判別を行った結果を図 2.14、図 2.15 及び図 2.16 に示す。図 2.14 に示す 0.13 及び 0.2 Hz を除外した測定パターンでは、判別が標準パターンと一致することが確認された。一方で、図 2.15 に示す 0.13, 0.2 及び 0.32 Hz を除外した測定パターンは、MT 法で MD 値を算出すると、 MD_{NG_MIN} は 34.0, MD_{OK_MAX} は 33.6 で、(2-1)式より MD 判定値は 33.8 となった。(2-2)式を満たすため、判別に必要な MD 判定値を算出できたが、 MD_{NG_MIN} と MD_{OK_MAX} の差異がとても小さく、新たな被検体に対して誤判定する可能性が高い。0.32 Hz は、図 2.6 の縦軸 $R = 0.01 \Omega$ 付近で波形のプロット精度が低下し、波形の特徴量抽出に影響があったためと推定される。内部インピーダンス測定は、標準パターンを基本とし、1 Hz 以下で波形の特徴量抽出に影響しない測定点を除外することにより、選別時間を最適化することができる。

1 次利用済み蓄電池の性能選別手法として、蓄電池の内部インピーダンス波形を多層に AI で解析するとともに、MT 法を用いた手法を提案、検証した。その結果、本手法は、従来法である充放電試験で測定した放電容量と相関が見られ、その有用性を確認した。提案手法を用いることで、インピーダンス波形の差異が小さい蓄電池も短時間かつ高精度で性能選別できる。また、判別精度の確保には、波形の特徴を把握すること及び MT 法の過学習を抑制するために、一定数以上の特徴量数及びサンプル数が必要であることがわかった。さらに選別時間の最適化として、特徴量抽出に影響しないインピーダンス測定点を除外するなど、本手法適切な使用方法を示した。

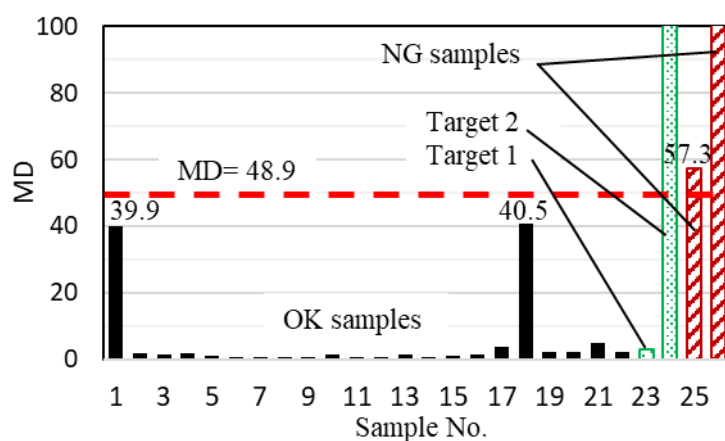


図 2.14 0.13、0.2 Hz を除いた内部インピーダンス測定での提案方式の判別結果

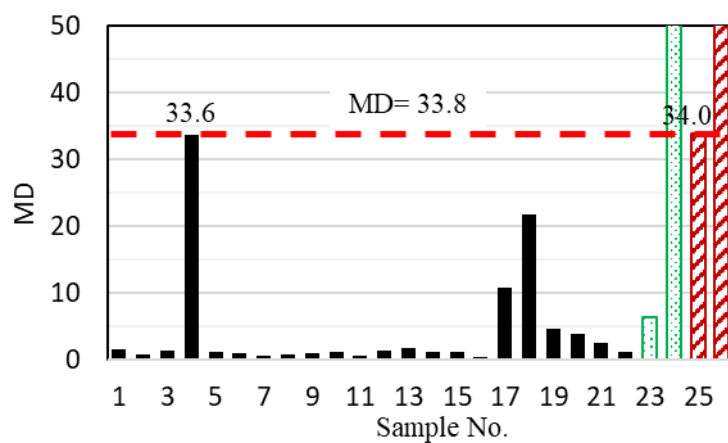


図 2.15 0.13、0.2、0.32 Hz を除いた内部インピーダンス測定での提案方式の判別結果

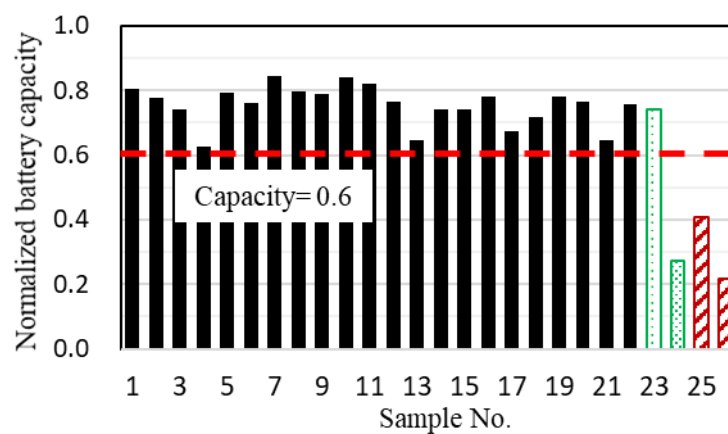


図 2.16 従来方式（放電容量測定法）での判別結果

第3章 定置リユース運用中に蓄電池の健全度を診断する技術

3.1 先行研究に対する提案技術の位置づけ

第1章で、定置リユース運用中に蓄電池の健全度を診断する技術の先行研究について述べた。本研究では、スタックの状態で健全度を把握する診断技術を検討対象とする。スタック間の容量ばらつきの把握は、既往研究において、外付けの監視装置により蓄電池容量を把握する方法^[46]や、スタックごとに周波数解析する方法^[47]が提案されており、後者では、スタックの合成内部インピーダンスを測定し解析することで、スタック間の容量ばらつきを把握する。一方で、数百Vになるスタック電圧で内部インピーダンスを測定する装置や、msec単位で計測できるデータロガーが必要など、高価な装置や設備が必要となることが想定される。

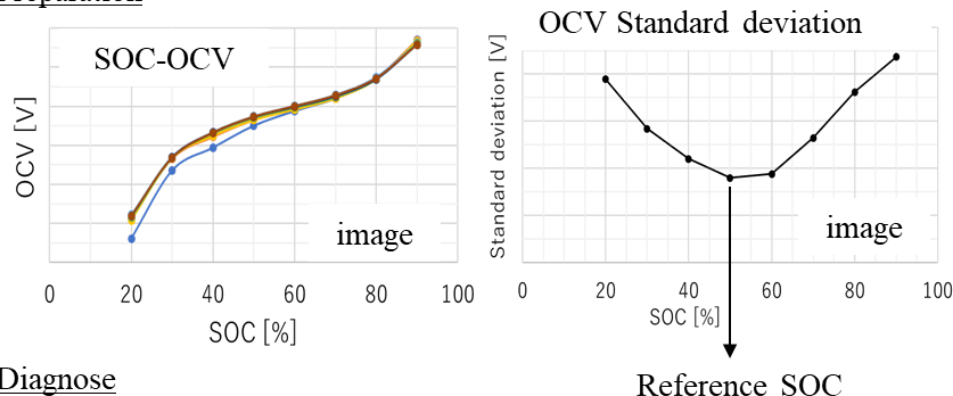
本研究では、並列接続された蓄電池の電流分担比が容量比となることに着目する^[48]。この方法を用いてスタック間の容量ばらつきを把握し、スタック間の相対的な容量比を把握する健全度診断方法を提案する。提案法では、高価な装置を用いた内部インピーダンス測定、解析は必要とせず、システム運用中にリユース蓄電池の健全度を把握できる。

本章の構成は以下のとおりである。まず、3.2節で提案分析法について述べる。次の3.3節で、リユース蓄電池の実測特性からSOCとOCVの関係をモデル化する。3.4節では、3.5節で従来法の放電容量比と、提案手法の電流分担による容量比が近いことを示すため、その準備として、電流積算値を従来法の放電容量で除して算出したSOCを並列接続の等価回路モデルに組み込んでシミュレーションを行う。3.5節では、実回路を用いて実験を行い、シミュレーションの結果と比較を行う。最後に、シミュレーション及び実験の電流分担による容量比と従来法の放電容量比を比較することで、提案分析手法の有用性を検証する。

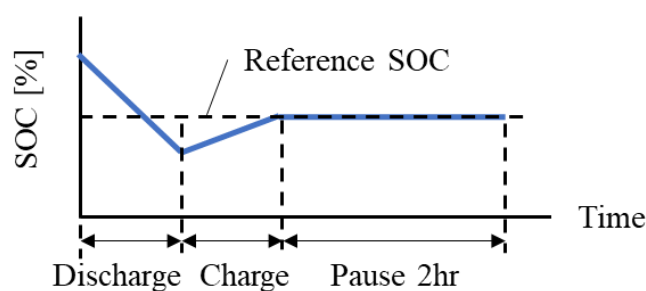
3.2 運用中の健全度診断技術の提案分析法

分析対象は、スタックを流れる電流とする。リユース蓄電池システムとして、既製品（トヨタエナジーソリューションズ社製、再生Ni-MH蓄電池システム、定格電圧202V、定格容量4kWh）を参考に、3並列・28直列で構成されているスタック群を想定した。

スタック間の容量比の分析方法について図3.1を用いて説明する。分析手順は、システム運用前に行う事前準備と、運用中に行う診断に分かれる。なお、事前準備はシステムを構築する際に行えば良く、運用中に行う必要はない。蓄電池のSOC-OCV特性は温度依存性を有するため、事前準備及び運用中の診断は、同じ温度で行う必要がある。

PreparationDiagnose

Step1



Step2

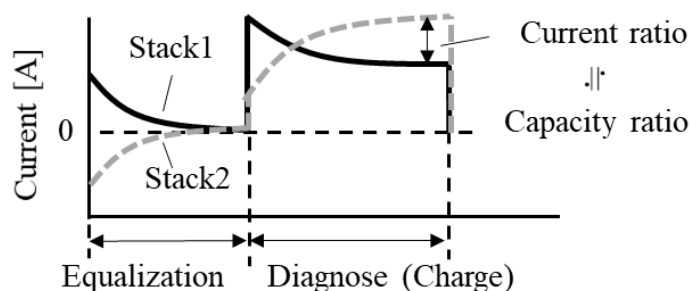


図 3.1 提案手法の分析手順

まず事前準備について説明する。事前準備として、診断時の基準 SOC の設定を行うために、単電池の開回路電圧 (open circuit voltage, 以下 OCV) 特性を測定する。OCV は温度依存性があるため、診断を行う環境と同じ温度で測定することが望ましい。システムで用いる蓄電池から無作為に 10 個程度選んで、SOC 10% ずつ C レート 0.5 で充電し、2 時間休止後に蓄電池電圧を測定する。これを SOC 20~90% まで繰り返し行う。測定した OCV を SOC ごとに区切って標準偏差を求め、最も標準偏差が小さくなる SOC を診断時の基準 SOC とする。なお、本分析方法の対象となる蓄電池システムは、種類及び世代が同じ蓄電池で構成され、その劣化程度が異なるものを想定している。図 3.2 に同種類で世代が異なる蓄電池の SOC-OCV 特性を示す。種類が同じでも世代が異なる蓄電池は、SOC-OCV 特性が大きく異なることがある。スタック間に意図しない循環電流が流れ過充電もしくは過放電が生じることから、SOC-OCV 特性が大きく異なる蓄電池を並列にスタックすることは好ましくない。なお、インバータのブースタ (DC/DC コンバータ) を用いれば、電流を任意に制御できることから、SOC-OCV 特性が大きく異なる蓄電池を並列に接続

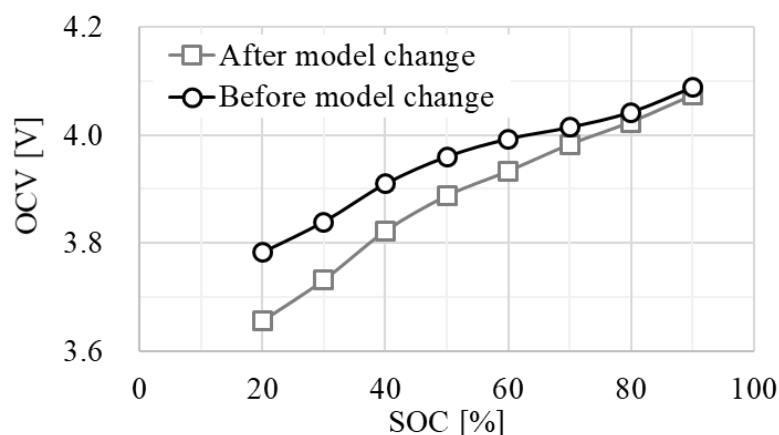


図 3.2 蓄電池のモデルチェンジと SOC-OCV 曲線の関係

できる。

次に、運用中の診断について説明する。まず、ステップ 1 として、蓄電池を充放電し基準 SOC に合わせる。この時、現在の SOC が基準 SOC より高い場合は、基準 SOC より 5 %低い SOC まで放電を行い、5 %充電する。例えば、現在の SOC が 60 %で基準 SOC が 40 %の場合、SOC 35 %まで放電し、その後 40 %まで充電を行う。充電時の電流は、事前準備と同じ C レート 0.5 で行い、充電後 2 時間休止する。基準 SOC より放電してから充電を行う理由は、蓄電池には SOC-OCV 特性のヒステリシスがあり、充電後と放電後で電池の内部状態が異なり休止後の OCV に差異が生じるためである^[49]。次にステップ 2 として、並列回路の電流分担比から運用中の診断を行う。休止後、3 並列されたスタックのうち、2 並列（スタック 1, 2）を閉回路とし、残りの 1 並列（スタック 3）は開回路とし、外部からの電流の入出力は 0 とする。この時、閉回路とした 2 並列のスタック間で SOC にずれがある場合、並列回路では、SOC を均等化する循環電流により SOC が均等化される。均等化に必要な時間は、蓄電池の内部抵抗及び回路の線路抵抗が小さいほど短い。次に、外部から蓄電池システムを 5 A（平均の C レート 0.38）で充電し診断を行う。休止から充電を切り替えた直後は、過渡現象に伴う電流変化があるため、電流が安定する充電時間を確保する。安定する時間は、均等化に必要な時間と同じく、蓄電池の内部抵抗及び回路の線路抵抗が小さいほど短い。安定電流を測定し、分担比を算出することで、容量比を求める。この作業をスタック 2, 3 及びスタック 1, 3 についても行うことで、電流分担比から各スタック間の相対的な容量比の傾向（どちらのスタックの容量が大きい）を判別できる。

3.3 リユース蓄電池の実測特性モデル化

ここでは、リユース蓄電池の実測特性から SOC と OCV の関係をモデル化する。

リユース蓄電池の種類は Ni-MH 蓄電池、定格容量は 6.5 Ah、定格電圧は 7.2 V、定格内部抵抗は 12 mΩである。今回の試験では、劣化状態の異なる 12 個のリユース蓄電池を準備した。リユース蓄電池の構成は、12 個あるうち No.11～14 の 4 個がスタック 1、No.21～24 の 4 個がスタック 2、及び No.31～34 の 4 個がスタック 3 である。図 3.3、図 3.4、図 3.5 及び図 3.6 に蓄電池特性を示す。図 3.3 は放電容量を充放電試験で測定した従来法の結果、図 3.4 は蓄電池の内部インピーダンスを測定した結果、図 3.5 は 0.1 Hz で測定した SOC-内部抵抗の結果、また、図 3.6 は、

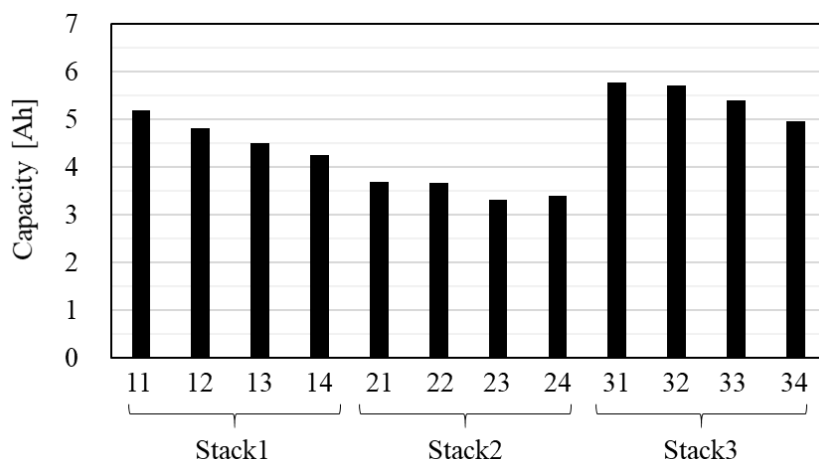


図 3.3 試験体の容量

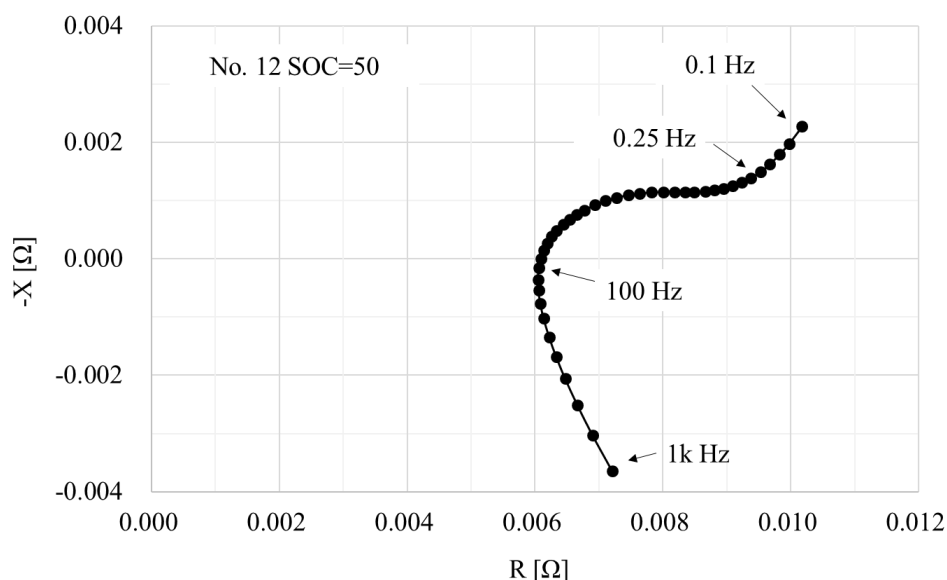


図 3.4 試験体の内部インピーダンス

提案分析法の事前準備である充電時の SOC-OCV 測定結果を示す。全ての測定は、環境温度 23 ± 1 °Cで行い、蓄電池の内部インピーダンス及び抵抗は、インピーダンス測定装置 (BT4560, HIOKI 製) を用いて、1 k~0.1 Hz をログスイープで印加した。Ni-MH 蓄電池の内部インピーダンスは、反応周波数が高い方から低い方の順に、溶液抵抗、活物質間の接触抵抗、電荷移動抵抗、及び水素拡散に関係したワールブルグインピーダンスとして表される^[50]。水素拡散に関係したワールブルグインピーダンスは、ナイキスト線図の直線となる領域となることが知られており、図 3.6 の測定結果より、0.25~0.1 Hz の範囲が該当した。本章では、並列接続された蓄電池の電流分担に着目することから、時定数の大きい水素拡散に関係したワールブルグインピーダンスが支配的となるため、0.1 Hz で測定した内部抵抗値を用いた。図 3.5 より、内部抵抗は SOC 50~80 %において同程度であるため、その平均値で表現する。また、図より、OCV は SOC の関数として表現できる。(3-1)式は、グラフより導出した 3 次多項式の近似曲線である。表 3.1 に、各蓄電池の(3-1)式の係数、及び内部抵抗の平均値を示す。

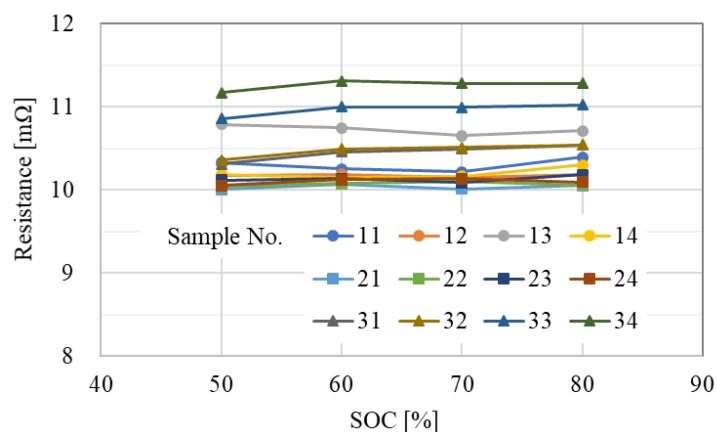


図 3.5 試験体の 0.1Hz で測定した SOC-抵抗曲線

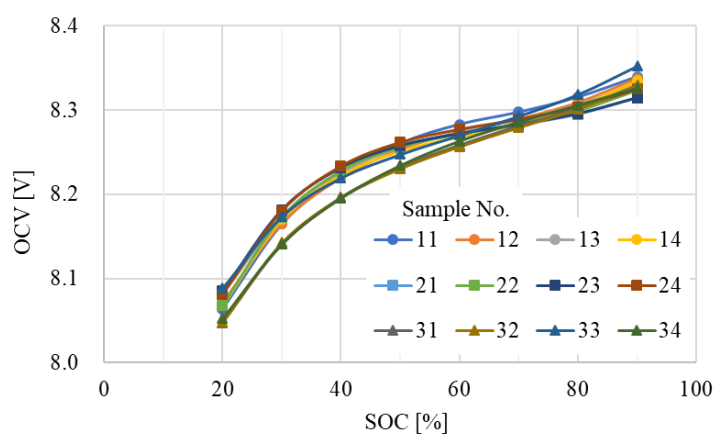


図 3.6 試験体の SOC-OCV 曲線

表 3.1 式(1)の係数と式(2)の内部抵抗の平均値

Sample No.	α	β	γ	δ	ε
11	1.465×10^{-6}	-2.995×10^{-4}	2.179×10^{-2}	7.738	10.30
12	1.505×10^{-6}	-2.973×10^{-4}	2.101×10^{-2}	7.759	10.17
13	1.506×10^{-6}	-2.970×10^{-4}	2.073×10^{-2}	7.775	10.72
14	1.817×10^{-6}	-3.491×10^{-4}	2.348×10^{-2}	7.726	10.20
21	1.660×10^{-6}	-3.297×10^{-4}	2.248×10^{-2}	7.754	10.04
22	1.807×10^{-6}	-3.551×10^{-4}	2.408×10^{-2}	7.717	10.07
23	1.604×10^{-6}	-3.195×10^{-4}	2.189×10^{-2}	7.764	10.13
24	1.648×10^{-6}	-3.278×10^{-4}	2.256×10^{-2}	7.750	10.10
31	0.935×10^{-7}	-2.042×10^{-4}	1.674×10^{-2}	7.794	10.45
32	1.292×10^{-6}	-2.594×10^{-4}	1.924×10^{-2}	7.759	10.48
33	1.233×10^{-6}	-2.514×10^{-4}	1.898×10^{-2}	7.760	10.97
34	1.364×10^{-6}	-2.577×10^{-4}	1.805×10^{-2}	7.822	11.26

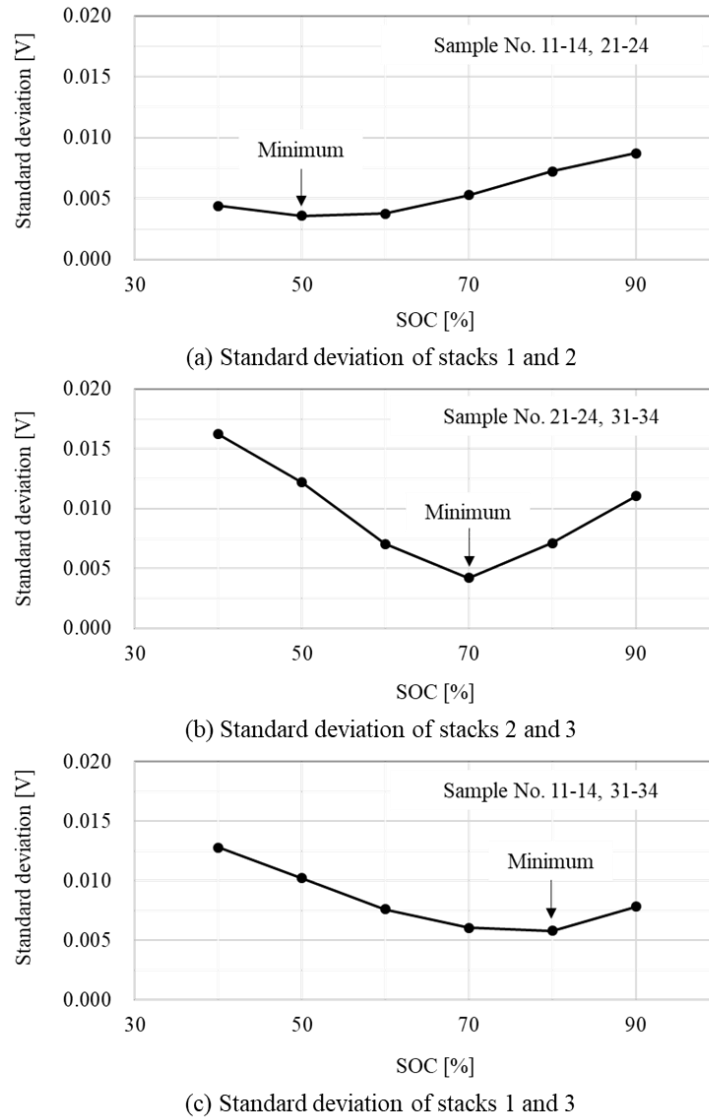


図 3.7 測定で得た SOC に対する OCV の標準偏差

$$F_{OCV}(SOC) = \alpha \times SOC^3 + \beta \times SOC^2 + \gamma \times SOC + \delta \quad (3-1)$$

$$R = \epsilon \quad (3-2)$$

次に、測定で得た SOC に対する OCV の標準偏差を図 3.7 に示す。標準偏差が最も小さくなる SOC を基準 SOC に設定し、スタック 1, 2 の構成は SOC50 %, スタック 2, 3 の構成は SOC70 %, 及びスタック 2, 3 の構成は SOC80 %とした。

3.4 シミュレーション

ここでは、3.5 節で従来法の放電容量比と、提案手法の電流分担による容量比が近いことを示すため、その準備として、電流積算値を従来法の放電容量で除して算出した SOC を並列接続の等価回路モデルに組み込んでシミュレーションを行った。

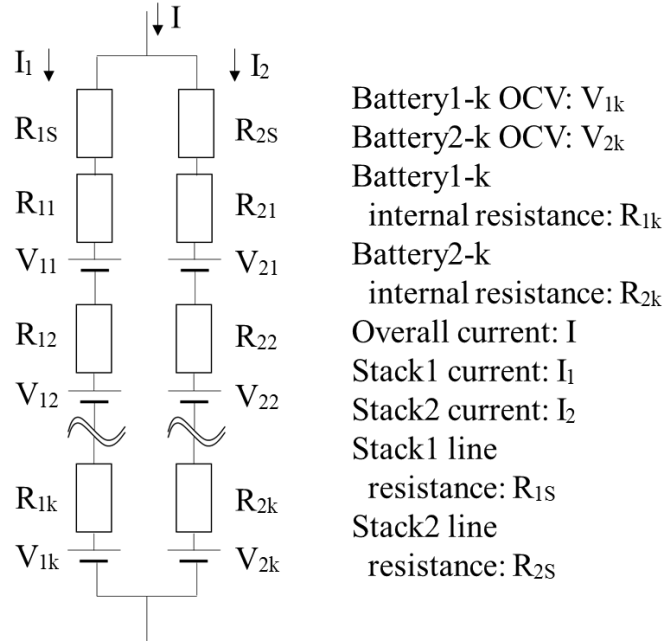


図 3.8 スタック 1 と 2 の並列回路の等価回路

3.4.1 シミュレーションモデル

並列接続された蓄電池の等価回路よりシミュレーションモデルを作成し、シミュレーションで評価した。多田ら^[48]の先行研究を参考に、電池の等価回路を直流電圧源及び内部抵抗で表現した。 k 個の蓄電池を直列に多積層し、2 並列に接続した等価回路を図 3.8 に示す。

回路方程式は、

$$I = I_1 + I_2$$

$$\sum_{n=1}^k (R_{1n} \cdot I_1 + V_{1n}) + R_{1s} \cdot I_1 = \sum_{n=1}^k (R_{2n} \cdot I_2 + V_{2n}) + R_{2s} \cdot I_2$$

この方程式を解くと、

$$I_1 = \frac{\sum_{n=1}^k \{(V_{2n} - V_{1n}) + R_{2n} \cdot I\} + R_{2s} \cdot I}{\sum_{n=1}^k (R_{1n} + R_{2n}) + R_{1s} + R_{2s}} \quad (3-3)$$

$$I_2 = \frac{\sum_{n=1}^k \{(V_{1n} - V_{2n}) + R_{1n} \cdot I\} + R_{1s} \cdot I}{\sum_{n=1}^k (R_{1n} + R_{2n}) + R_{1s} + R_{2s}} \quad (3-4)$$

ここで、SOC は、充放電電流積算値を放電容量[Ah]で除したものあることから、以下の式で表すことができる。

$$SOC = \int \frac{I(t)dt}{(\text{放電容量} \cdot 36)} \quad (3-5)$$

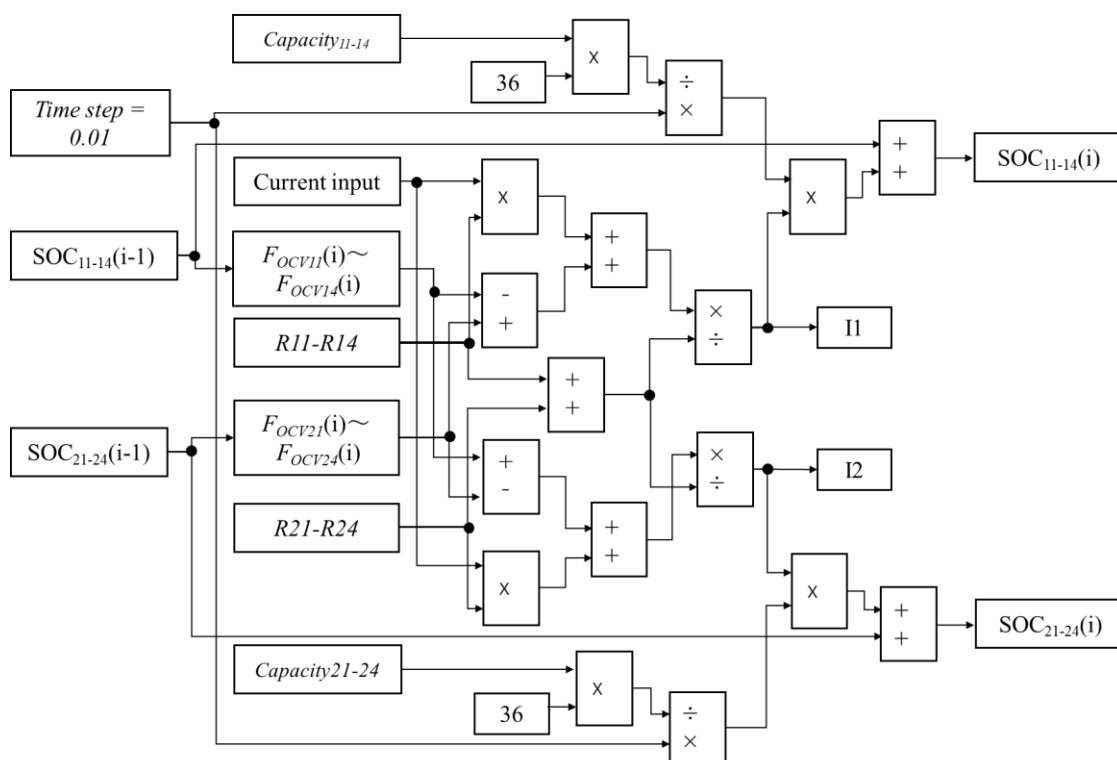


図 3.9 スタック 1 と 2 の回路方程式のブロック線図

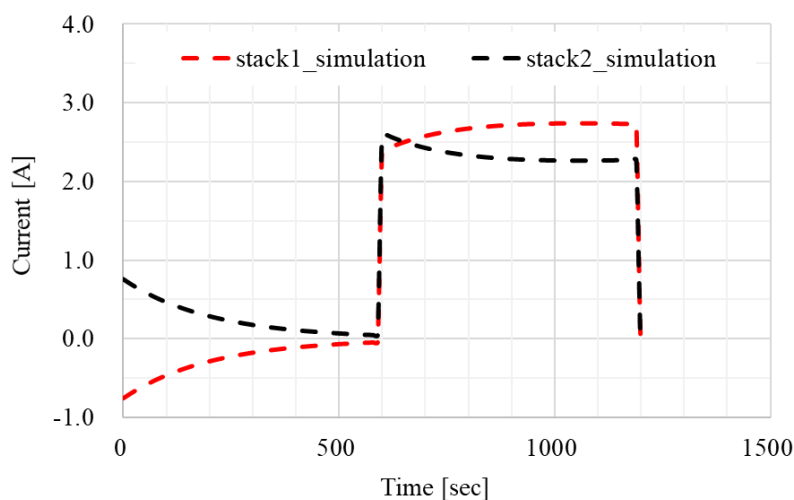


図 3.10 健全度診断シミュレーションの結果

スタックの直列数は 4 ($k = 4$) とし、並列回路の電流に関する(3-1)式、(3-2)式及び(3-3)式よりブロック線図でシミュレーションモデルを図 3.9 に示す通り作成した。初期 SOC は任意に設定する必要がある。電流の積分値である SOC は、時間刻み Δt の間電流値を一定と近似して長方形の面積の和を求めるオイラー法で算出した。時間刻み Δt は 0.01 sec とした。3.3 節で求めた、OCV の近似式及び内部抵抗値をブロック線図に代入した。シミュレーションツールは、MATLAB/Simulink の Ver.2022a を用いた。

3.4.2 シミュレーション

3.4.1 節で作成したシミュレーションモデルを用いて、3.2 節ステップ 2 で提案した健全度診断のシミュレーションを、スタック 1, 2 の構成で行った結果を図 3.10 に示す。電流は蓄電池の充電方向を+とした。まず、2つのスタックを閉回路とすると、スタック 1 からスタック 2 の方向に循環電流が確認された。これは、全蓄電池の初期 SOC を 50 %に設定したが、SOC-OCV 特性が個々の蓄電池でわずかに異なるため電圧差が生じ電圧を均等化する電流が流れたと推定される。均等化に必要な時間は、10 min であった。次に、外部より充電を行い安定した後のスタック 1, 2 の電流は、それぞれ、2.67 A, 2.33 A であり、電流分担比は、1:0.87 であった。電流が安定するための時間は、10 min であった。

3.5 実回路での実験による健全度診断

本節では、まず実回路での実験を行った。次に、従来法による放電容量比と、提案手法の電流分担による容量比が近いことを示すため、3.4 節のシミュレーション及び実験結果の比較を行った。考察では、シミュレーション及び実験の電流分担による容量比と従来法の放電容量比の誤差要因を明確にすることで、提案手法により相対的なスタック間の容量比の傾向を把握できることを示した。

3.5.1 実験装置

実験装置の外観を図 3.11、回路図を図 3.12 に示す。実際のリユース蓄電池システムへの実装を想定して、各スタックの電流測定はシャント抵抗 (SDVSH30, オムロン製) を用い、データ測定は汎用のロガー (ADL-12N, アズワン製) を用いた。線路抵抗はスタックごとに 15 mΩ あった。データ測定は、総電流、スタック電流、及び蓄電池電圧を 10 sec 刻みで測定した。

3.5.2 放電容量比と電流分担による容量比の比較

事前に SOC 50 %に調整した蓄電池を接続して、環境温度 23 ± 1 °C で実験を行った。図 3.13 にスタック 1, 2 の構成で行った実験及び 4 章のシミュレーションで求めた電流を示す。まず、2つのスタックを閉回路にすると、実験では、シミュレーションと異なり、循環電流が短時間で収束した。均等化に必要な時間は、5 min 程度であった。次に、外部より充電を行い安定した後のスタック 1, 2 の電流は、それぞれ、2.68 A, 2.32 A であり、電流分担比は、実験で 1:0.86 であり、先のシミュレーションの 1:0.87 と近いことが確認された。

同様に、スタック 2, 3 の構成、及びスタック 1, 3 の構成で実験及びシミュレーションを行った。図 3.14 に 3 つのスタック構成での実験とシミュレーションにおける電流分担比の関係を示した。異なるスタック構成においても、充放電電流積算値を従来法の放電容量で除して算出した SOC に基づく並列接続の等価回路モデルを作成して行ったシミュレーションと実験結果が近いことを確認できた。

また、実験で安定に必要な時間は 2 min 程度であり、シミュレーションの 1/5 であった。蓄電

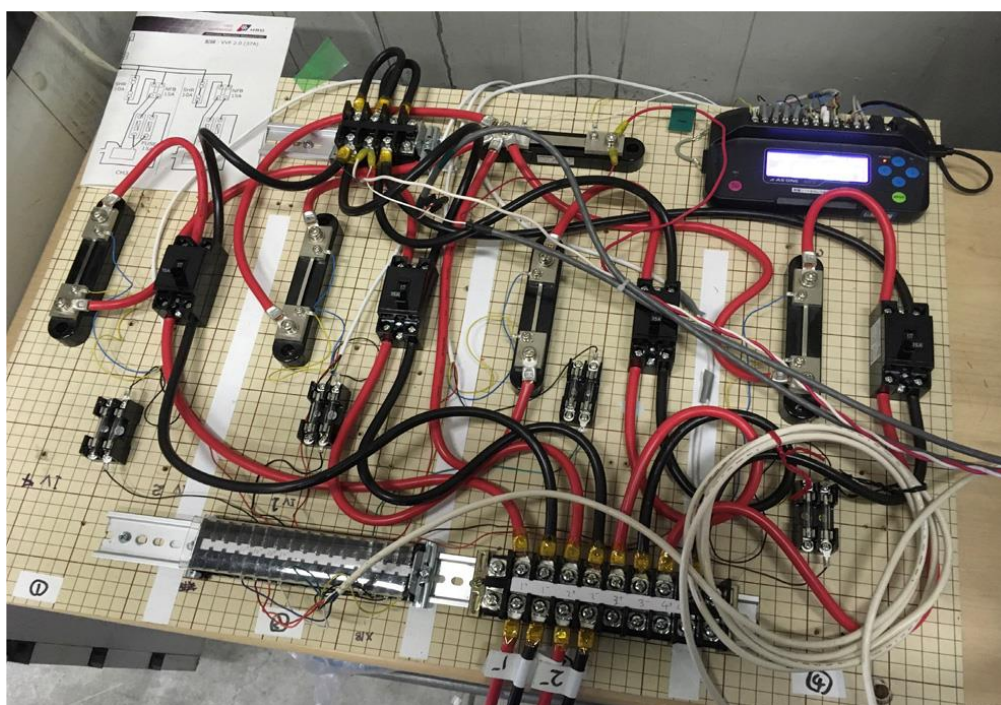


図 3.11 実験装置の外観

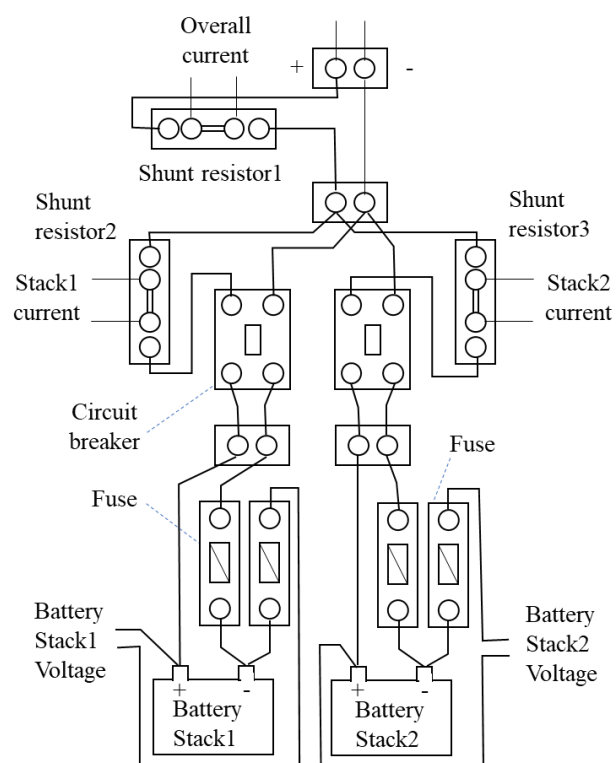


図 3.12 実験装置の回路図

池は、応答周波数領域が $1\text{k} \sim 0.1\text{ Hz}$ と広いため、全領域を包含した同定は難しく、一般的に特定の応答周波数領域に限定してモデルを構築する^[51]。本報告では、時定数が多い水素拡散に関係したワールブルグインピーダンスが支配的となる領域の等価回路でモデル化し、シミュレーショ

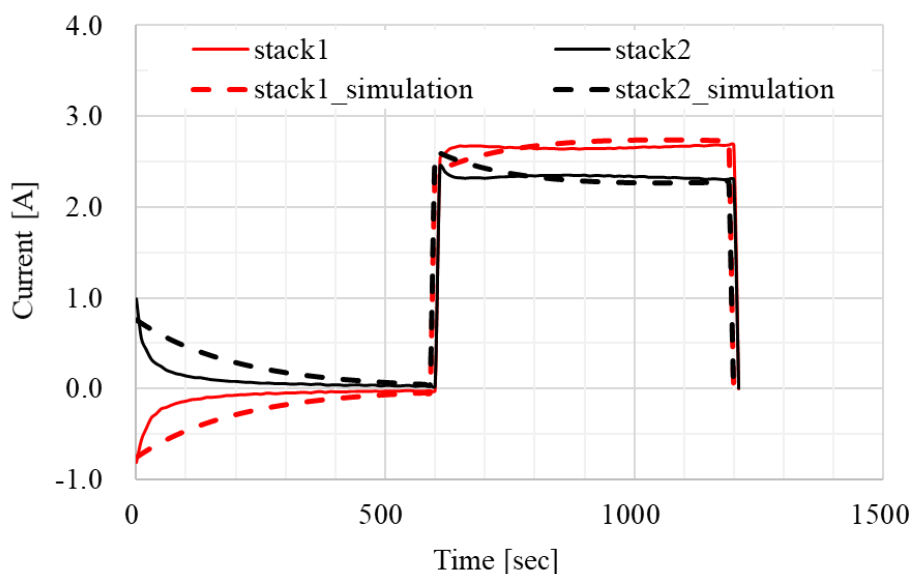


図 3.13 シミュレーションと実験結果の比較

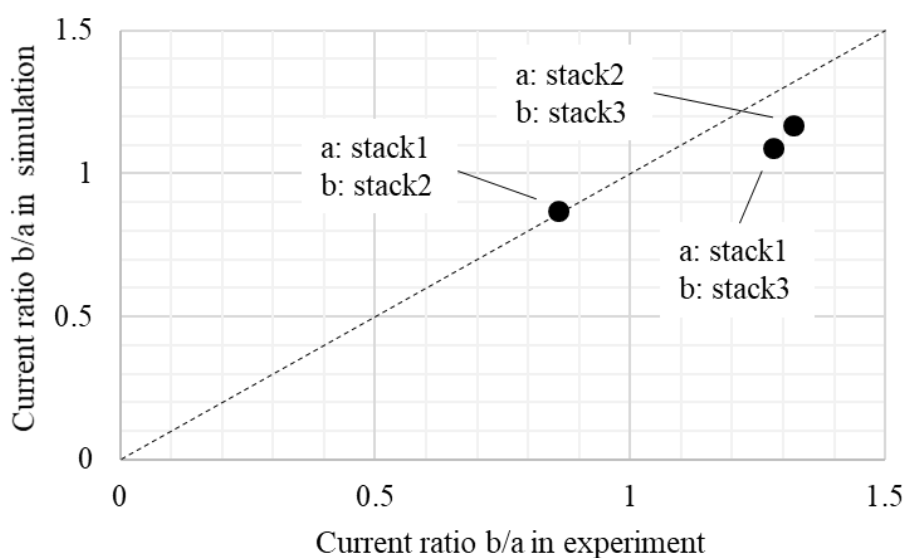


図 3.14 実験とシミュレーションにおけるスタック間の電流比 b/a の比較

ンを行ったため、電流安定に要する時間が実験より長くなった。実験での電流安定の過渡的な現象は、10 sec 以内であったことから、短い時定数である、溶液抵抗、活物質間の接触抵抗、及び電荷移動抵抗が支配的であったと推定される。

3.5.3 考察

3.4 節で求めた各スタックの電流に関する(3-3)式及び(3-4)式では、第 1 項がスタック間の電圧差を両スタックの蓄電池内部抵抗と線路抵抗の和で除する項であり、電池間の電圧差をなくすように電流が流れる。第 2 及び第 3 項は、充放電電流を内部抵抗値及び線路抵抗に応じて分担して

表 3.2 シミュレーションと実験の電流分配比による容量比、従来法による放電容量比

	Simulation	Experiment	Conventional method
Stack1: Stack2	1: 0.87	1: 0.86	1: 0.75

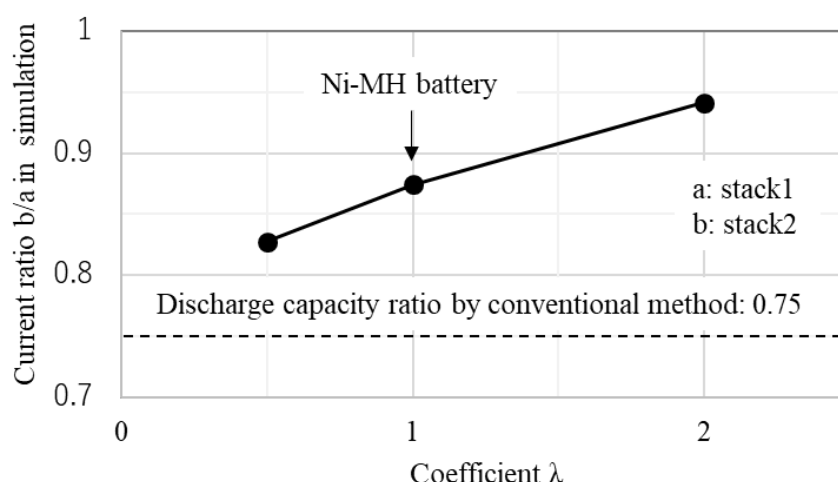


図 3.15 シミュレーションにおける内部抵抗をパラメータとした電流比 b/a の比較

$$\text{内部抵抗} = \varepsilon \times \lambda$$

いる電流となる。多田ら^[48]によれば、並列回路では、各スタックの蓄電池群の端子電圧（OCV ではない）は同じになる。提案手法では、図 3.6 に示す SOC-OCV 特性の標準偏差が一番小さい SOC で診断しているため、各スタックの蓄電池群の端子電圧を同じにするためには、ほぼ同じ SOC でなくてはならない。ほぼ同じ SOC（充放電電流積算値を放電容量[Ah]で除したもの）を維持するには、充放電電流の大きさが容量比と同じ必要がある。これゆえ、並列接続された蓄電池群の電流分担比から放電容量比を推定することができる。

表 3.2 にシミュレーション及び実験の電流分担比から求めた容量比、従来法で求めた放電容量比を示す。従来法で測定した放電容量は、スタック 1, 2 それぞれ、18,767 mAh, 14,069 mAh で、容量比は 1:0.75 となり、電流分担比から求めた容量比との誤差が生じた。ここで、誤差が生じる要因が、(3-3)式及び(3-4) 式の第 1 項の端子電圧を同じにするために流れる電流が、内部抵抗及び線路抵抗が大きいために阻害されたためか、(3-3)式及び(3-4) 式の第 2 項で示される充放電電流を内部抵抗値に応じて分担している電流、つまり、内部抵抗に伴う電圧降下の差を補う循環電流が流れたためか検証を行った。

前者の検証のため、(3-2)式の内部抵抗 ε に係数 λ を乗じて内部抵抗値をパラメータとし、その他の条件は変えずにシミュレーションを行った結果を図 3.15 に示す。内部抵抗と電流分担比には正の相関があり、係数を小さくする、つまり内部抵抗値を小さくすると、電流分担比と従来法で求めた放電容量比との誤差が小さくなることを確認した。

次に後者の検証を行う。図 3.5 に示す通り、本報告で用いたリユースの Ni-MH 蓄電池は、一般的ナリユース蓄電池と異なり、劣化に伴う容量低下と内部抵抗増加に相関がなかった。そこで、

蓄電池の内部抵抗をスタック間で入れ替えて、容量低下と内部抵抗増加に相関がある設定とし、その他の条件は変えずにシミュレーションを行った。外部より充電を行い安定した後のスタック間の電流分担比は、1: 0.85 となり、従来法で求めた放電容量比との誤差はほぼ変わらなかった。上記より、シミュレーションの電流分担比と従来法で求めた放電容量比に誤差が生じた支配的な要因は、端子電圧を同じにするために流れる電流が、蓄電池の内部抵抗が大きいことにより阻害されるためであり、この際、両スタック間には電圧差が生じていたと推定される。実験とシミュレーションの結果は近しかったため、実験の電流分担比と従来法の放電容量の誤差も同様の要因である。また、蓄電池の劣化に伴う容量低下と内部抵抗増加の相関の有無は、誤差が生じた支配的な要因ではない。まとめると、内部抵抗が大きい Ni-MH 蓄電池においては、電流分担比と従来法の放電容量比の誤差が大きいため、従来手法に比べて精度が劣るが、スタックの相対的な容量比の傾向を判別できる。以上は、提案分析法により、リユース蓄電池の健全度診断が可能であることを示唆している。なお、リユース蓄電池システムでは、1 次利用の使用履歴が異なることから、並列接続された各スタックは三者三様の劣化をすることが想定され、相対的な診断により最も劣化しているスタックを確認することは、システムを運用するために有益である。

リユース蓄電池の運用中の健全度診断法として、並列に接続された蓄電池の電流分担比に基づき容量比を算出する方法を提案、検証した。その結果、本手法はスタックの相対的な容量を判別可能であり、その有用性を確認した。提案手法を用いることで、リユース蓄電池システムの運用中に健全度診断が可能となる。本検討では、内部抵抗が大きい Ni-MH 蓄電池で提案手法が適用可能なことを示したが、内部抵抗が小さい Li-ion 蓄電池において、精度良く適用できる可能性がある。

第4章 地域マイクログリッドでのリユース蓄電池の活用

4.1 地域マイクログリッドの位置づけ

地域 MG のコンセプトは、既存の配電系統の一部を、需要地域の近くで利用可能な地域の RE とともにマイクログリッドに発展させることである。地域 MG を構築することの主要な目的はレジリエンスを確保することだが、頻度が低い災害に備えた大容量の設備により、導入費用が高コストになることが課題となっている。本研究では、日常的な電力供給には既存の配電線を利用し、非常時には EV を仮想的な配電線として利用する革新的な地域 MG モデルを提案する。非常時のためだけに設備投資するのではなく、日常的な電力供給に活用するこのモデルは、持続可能で災害にも強い。また、非常時の需給バランスをとるためのリユース蓄電池と EV の協調制御方式を開発し、EV による仮想配電線機能を有するモデルで電力の需給バランスを評価する。

4.2 モデル提案

図 4.1 及び図 4.2 に、提案する kW 級地域 MG モデルを示す。図 4.1 は、日常的な電力供給に既存の配電線を利用したモデルであり、図 4.2 は、非常時の EV を利用した仮想配電線モデルである。MG は、V2X システム、太陽光発電(PV)、リユース蓄電池、EV、ディーゼル発電機、複数の需要を持つ需要エリアと、熱電併給(CHP)と急速充電器(QC)を持つバイオガス(BG)プラントで構成される。需要エリアと BG プラントは商用配電線で結ばれており、系統にも接続されている。需要エリアの公共施設は、数百メートルの自営線で結ばれて、1 つの需要家を構成していて、ピークカットが可能である。公共施設のひとつである病院には、非常用ディーゼル発電機(DG)がある。V2X システムには、PV、EV 充電器、リユース蓄電池が含まれ、自営線に接続される。EV で一次利用した蓄電池を再利用することで、維持コストを削減することができる^[52]。

平常時は、EV を役場の公用車として、非常時には仮想送電線として稼働する。需要エリアから数 km 離れた BG プラントでは、CHP を定格出力で運転し、QC を平常時に EV の急速充電スポットとして、非常時に仮想送電線の供給スポットとして機能させる。停電に伴うブラックスタートに対応するため、CHP と V2X システムの非常時の運転モードが設定される。

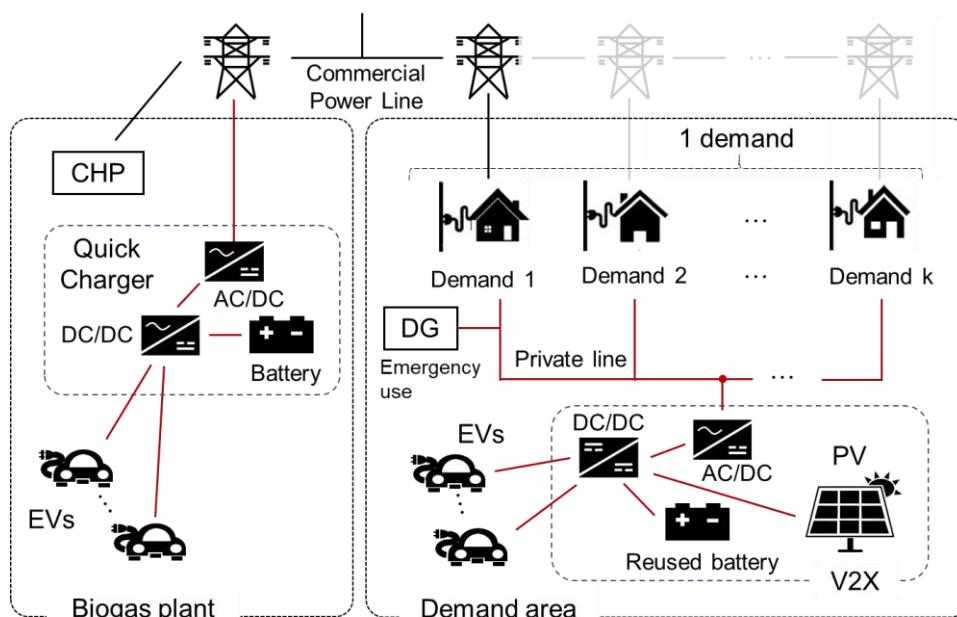


図 4.1 既存の配電線を利用して日常的に電力を供給する地域 MG モデル

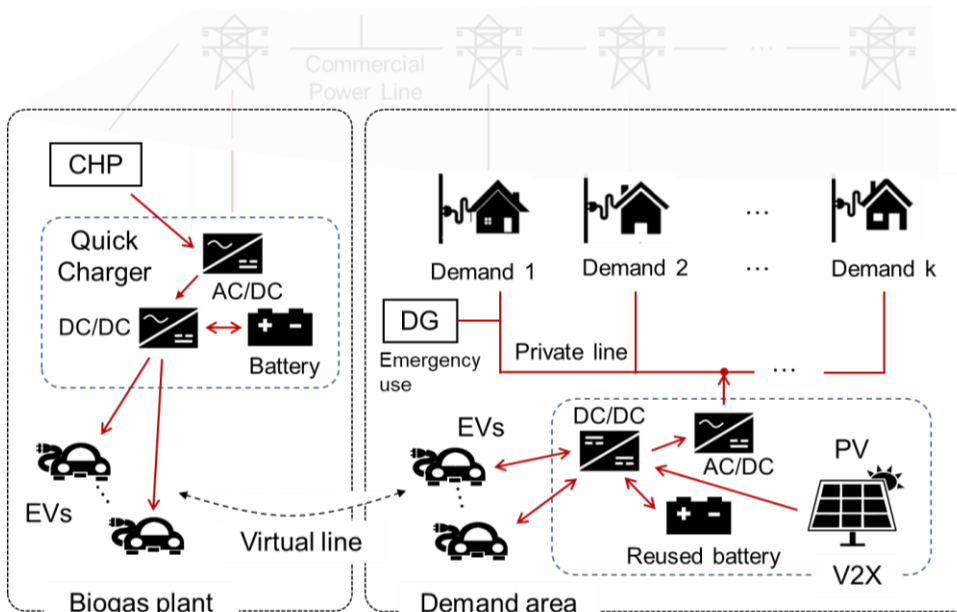


図 4.2 非常時の EV を用いた仮想電力線の地域 MG モデル

4.3 モデルの一般化

4.3.1 マイクログリッドの電力需給

図 4.3 に提案する MG モデルの構成を示す。 R_{V2X} は V2X システムの定格電力(kW)である。平常時の電力供給は、CHP をベースロード発電し、V2X システムでピークカットを行い、不足分

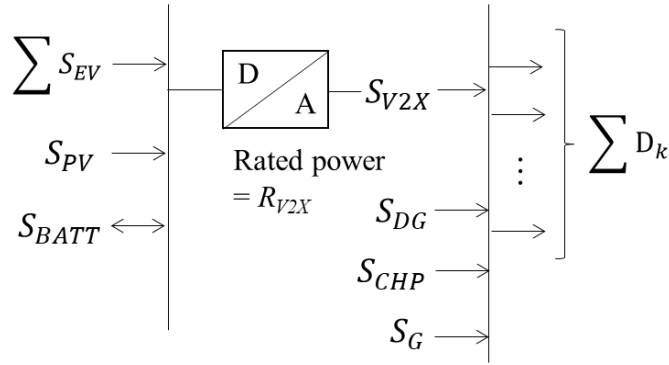


図 4.3 提案 MG モデルの構成

を系統から補うことで需給バランスを制御する。したがって、平常時の電力需給は(4-1)式で表される。

$$S_{CHP} + S_G + S_{V2X} = \sum D_k \quad (4-1)$$

S_{CHP} は BG プラントの CHP 出力(kW)、 S_G は商用系統電力(kW)、 S_{V2X} は V2X システムの出力(kW)、 D_k は公共施設の需要(kW)である。

これ以降は、非常時について述べる。非常時は商用送電線が停止するため、BG プラントと需要エリアは別々に運用される。需要エリアの運用は、DG と V2X システムを用いて需給バランスを制御する。したがって、需要地における電力供給と需要量は(4-2)式で表される。

$$S_{DG} + S_{V2X} = \sum D_k \quad (4-2)$$

ここで、 S_{DG} は病院内の非常用 DG の出力(kW)である。

非常時の発電計画は、V2X システムを DG よりも優先して運用する。これにより、DG は、燃料を節約し、平常に戻るまで病院の電力バランスを調整する。

V2X システムでは、EV を仮想電力線として運用することで需給バランスを制御する。リユース蓄電池は、EV が充電のために V2X システムから離脱する（以下、EV 離脱）時に生じる EV 出力の電力減少を補償し、PV により充電を行う。V2X システムの電力需給は(4-3)式で表される。

$$\left(\sum S_{EV} + S_{BATT} + S_{PV} \right) \times E_{ACDC} = S_{V2X} \quad (4-3)$$

ここで、 S_{EV} は EV1 台あたりの出力(kW)、 S_{BATT} はリユース蓄電池の出力(kW)、 S_{PV} は PV の出力(kW)、 E_{ACDC} は交流と直流の変換効率である。

V2X システムに接続された EV の入出力は同一とし、EV の切り替え時間は 4 分とする。

4.3.2 リユース蓄電池と EV の協調制御

図 4.4 に提案 MG モデルの非常時の構成を示す。リユース蓄電池と EV の協調制御が、V2X システム端出力を PV、EV 及びリユース蓄電池の合成出力で制御することで、電力需給をバランスする。協調制御の運用指針は以下の通りである。PV 出力は制御することができないので、V2X システム端出力と PV 出力の差分に対して、優先して V2X システムで給電中の EV に出力させる。EV 出力が不足時には、リユース蓄電池で補償を行う。なお、リユース蓄電池は、フィードバック

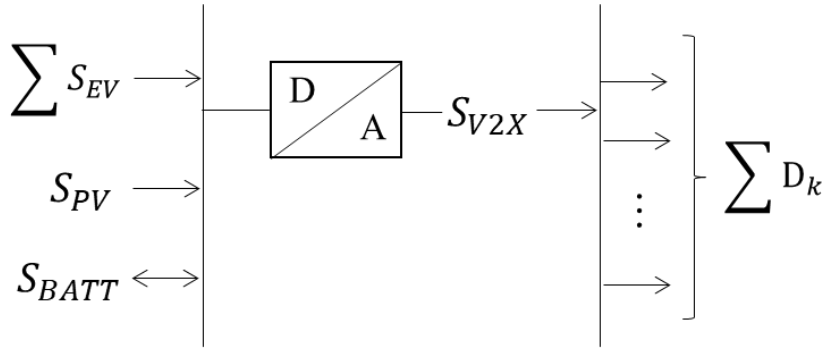


図 4.4 提案 MG モデルの非常時の構成

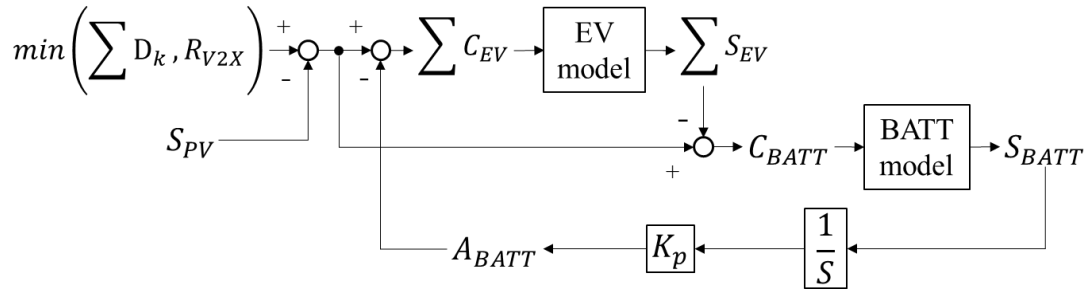


図 4.5 リユース蓄電池と EV の協調制御に関するブロック線図

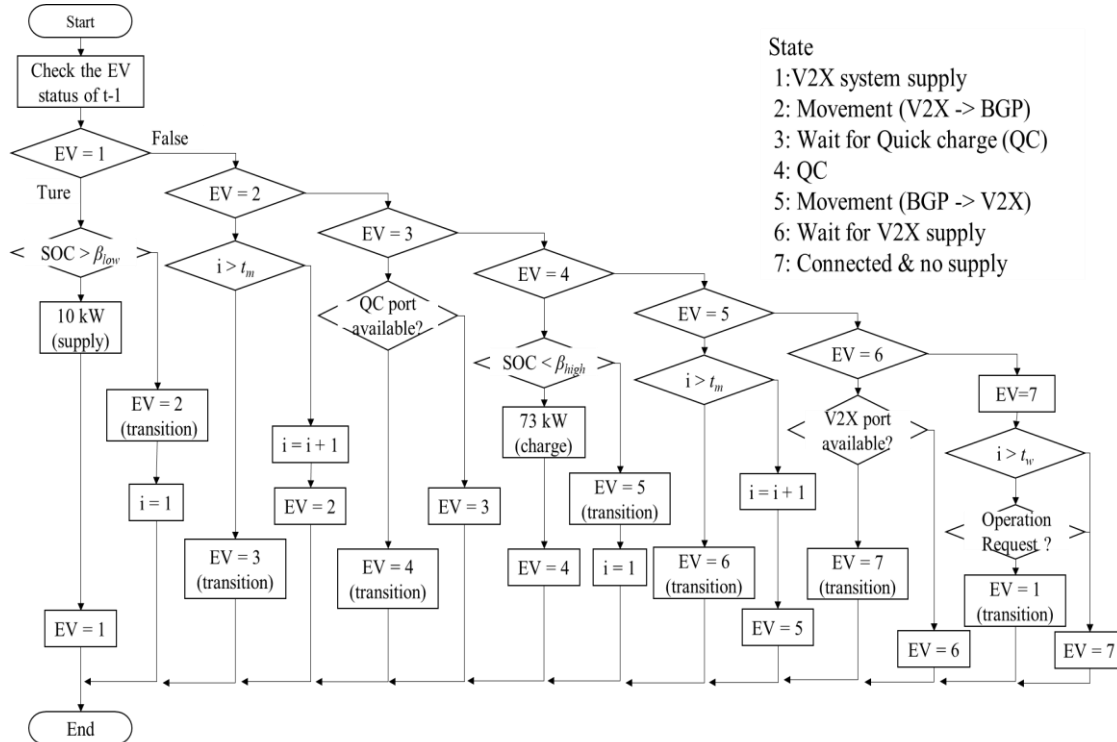


図 4.6 EV の状態遷移モデル

制御により, EV 出力で SOC を安定させる。図 4.5 にリユース蓄電池と EV の協調制御に関するブロック線図を示す。 C_{EV} は EV の出力指令(kW), C_{BATT} はリユース蓄電池の出力指令(kW), K_p は

比例ゲイン, A_{BATT} は蓄電池の充電状態(SOC)を安定させるための出力(kW)である。ブロック線図では, EV とリユース蓄電池がモデル^[53]化されており, 各々の出力や, SOC 使用範囲を決定するリユース蓄電池の最小及び最大 SOC は, それぞれ α_{low} と α_{high} である。EV の最小及び最大 SOC は, それぞれ β_{low} と β_{high} である。

4.3.3 EV 運用

図 4.6 は, EV の状態遷移モデルである。状態 1 では, 出力指令に従って EV が V2X システムに電力を供給する。状態 2 では, EV は V2X システムから BG プラントに t_m 秒で移動し, 状態 3 でスタンバイに移行する。QC が利用可能な場合, 状態 4 で EV は 73kW で最大 SOC まで充電する。状態 5 で, EV は t_m 秒で BG プラントから V2X システムに移動し, 状態 6 でスタンバイに移行する。V2X システムのポートが利用可能な場合, 状態 7 で EV は V2X システムに t_w 秒で接続し, 状態 1 に戻る。

EV の出力は, CHAdeMO 規格^[54]により, 充電器 1 台あたり 10 kW に制約される。冗長性を確保するために, 少なくとも 2 台の EV を V2X システムに接続する。

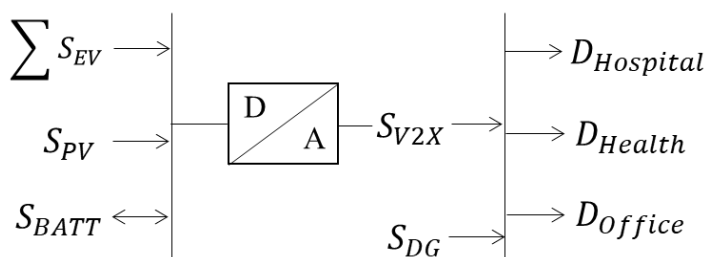


図 4.7 ケーススタディの需給システムの構成

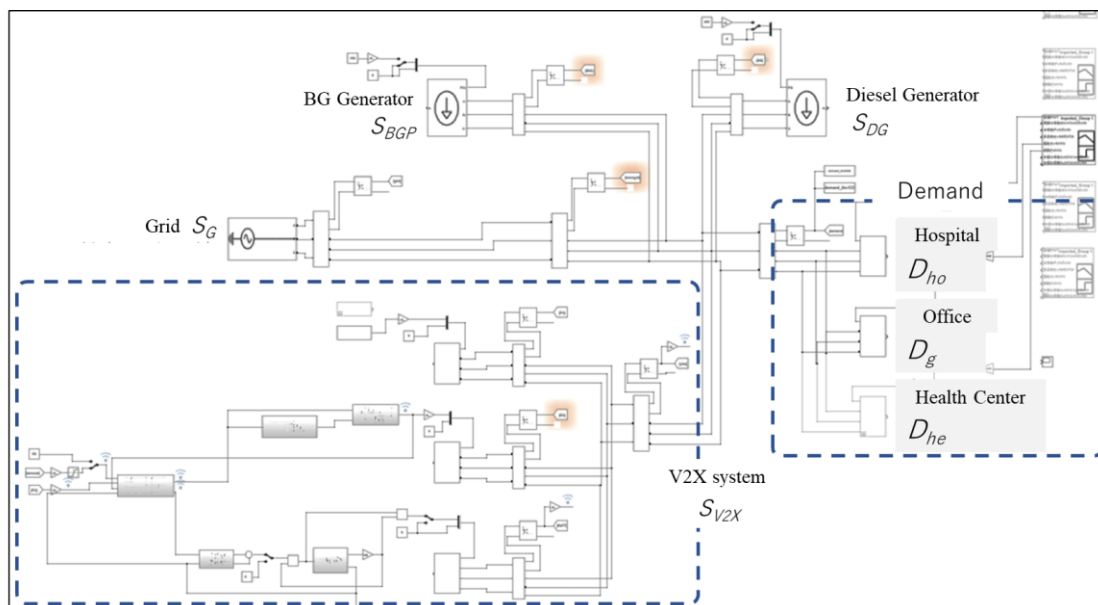


図 4.8 提案 MG のシミュレーションモデル

4.4 ケーススタディ

シミュレーションによるケーススタディでは、EV が仮想送電線として使用できるかどうか、リユース蓄電池と EV の協調制御が提案モデルにおいて、需要と供給の間の電力バランスを調整できるかどうかを評価する。

4.4.1 シミュレーションモデル

図 4.7 は、ケーススタディにおける需給の構成を示す。(4-2)式及び(4-3)式に基づいて作成されたシミュレーションモデルを図 4.8 に示す。シミュレーションは、1 日分の 86,400 秒行い、タイムステップを 0.01 秒とした。シミュレーションモデルは、MATLAB/Simulink の R2022a を用いてモデルを作成し、シミュレーションを行った。

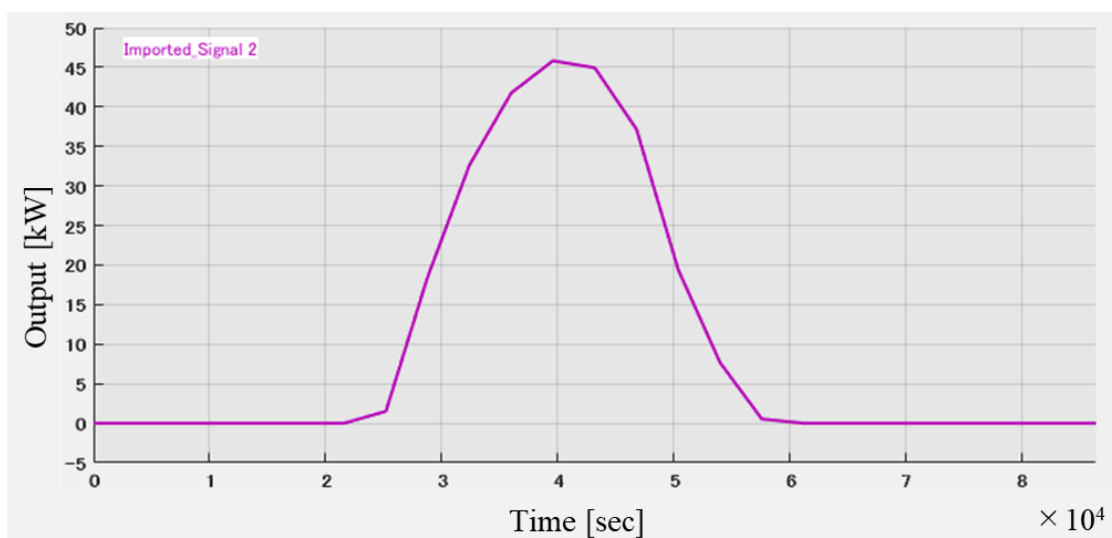


図 4.9 晴天日の PV 出力

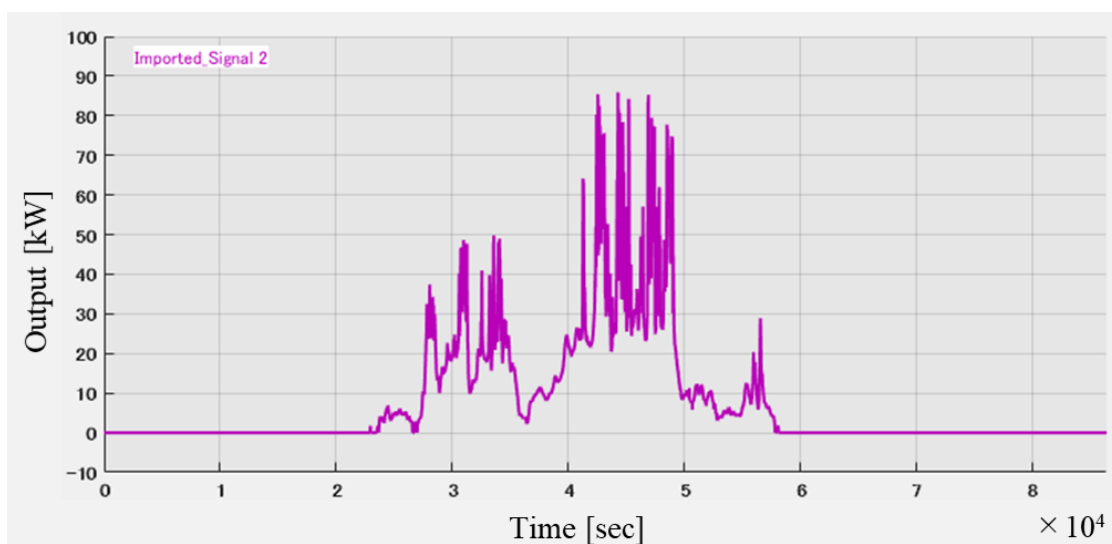


図 4.10 雲が多く出力変動が大きい日の PV 出力

4.4.2 シミュレーション条件

ケーススタディを行うにあたっては、実環境を想定して、表 4.1 に示す各機器の仕様と表 4.2 に示す各パラメータを設定した。シミュレーションでは、EV を 6 台とし、各 EV の初期 SOC を $I_1 \sim I_6$ とした。

PV 出力のデータセットは、物質・材料研究機構(NIMS)が公表している 2015～17 年度の 1 秒刻みの MG データ^[5]を用いた。PV 出力は、晴天の場合は、図 4.9 のような波形となり、雲が多く出力変動が大きい場合は、図 4.10 のような波形となる。ケーススタディでは、変動幅が大きい図 4.10 の PV 出力データを選択した。

表 4.3 に需要群を示す。ケーススタディでは、需要として、病院、福祉センター、役場庁舎を想定した。需要のデータセットは、上記施設について、北海道の自治体で、夏・秋・冬の 1 週間、

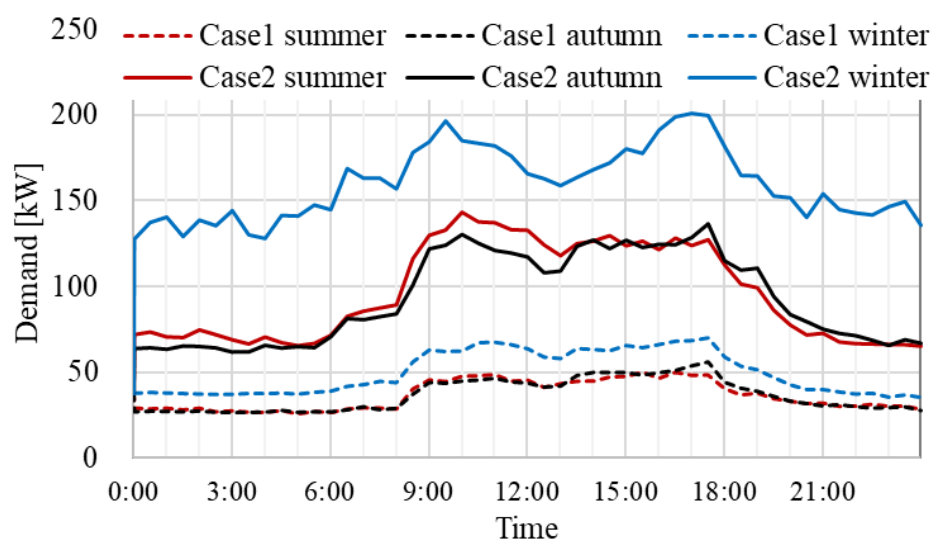


図 4.11 病院を含まない総需要（ケース 1）と病院を含む総需要（ケース 2）の比較

1 秒間隔で実測したデータを用いた。図 4.11 は、病院を含まない総需要であるケース 1 と病院を含む総需要であるケース 2 の比較である。本研究では、秋の需要に注目した。ケース 1 では、一部の時間帯を除き、需要は V2X システムの定格出力を下回っている。V2X システムの出力は、(4-2)式と V2X システムを優先して稼働する非常時発電計画を満たすように、基本的に需要と同期する。ケース 2 では、終日、需要が V2X システムの定格出力(50 kW)を上回った。V2X システムの出力は、(4-2)式と非常時の発電計画から 50 kW で一定となる。以上より、ケース 1 では、V2X システムの出力が、需要に同期して運用できるか、ケース 2 では V2X システムの定格電力を維持できるかを評価すればよい。

表 4.1 設備特性値

Main items	Sub items	Unit	Value
Biogas plant	CHP	kW	150
	QC	kW	150
Hospital	DG	kW	200
V2X system	AC/DC	kW	50
	PV	kW	45
	Reused battery	kWh	46.5
		kW	46.5
	EV	kW	10
EV	Capacity	kWh	62
	Charge/ discharge	kW	73

表 4.2 パラメーター一覧

Equipment	Items		Symbol	Unit	Value
V2X system	Rated power		R_{V2X}	kW	50
	Proportional gain		K_p	-	0.3
	Conversion efficiency		E_{ACDC}	%	97
Reused battery	Initial SOC		I_{BATT}	%	75
	Minimum SOC		α_{low}	%	20
	Maximum SOC		α_{high}	%	90
EV	Minimum SOC		β_{low}	%	25
	Maximum SOC		β_{high}	%	75
	Movement time		T_m	sec	420
	Waiting time		T_w	sec	120
	Initial SOC	EV1	I_1	%	25
		EV2	I_2	%	35
		EV3	I_3	%	45
		EV4	I_4	%	55
		EV5	I_5	%	65
		EV6	I_6	%	75

表 4.3 公共施設の概要

Facilities	Symbol	Unit	Total floor area
Hospital	$D_{Hospital}$	m ²	3,800
Health center	D_{Health}		3,051
Office	D_{Office}		2,382

4.5 シミュレーション評価と考察

提案モデルのシミュレーションによりケーススタディを行った。シミュレーション結果に基づき、リユース蓄電池と EV の協調制御を用いて電力需給をバランスできるかの確認を行った。また、提案モデルにおいて、協調制御を用いて電力需給がバランスする必要条件について考察した。

4.5.1 ケーススタディの結果

図 4.12、図 4.13 及び図 4.14 にケース 1 のシミュレーション結果を示す。図 4.12 は、V2X システムの電力バランスとリユース蓄電池の SOC である。図 4.13 は、EV の状態遷移と稼働台数である。図 4.14 は、EV の SOC である。図 4.12 より、協調制御のロジックに従い、需要の総量から PV 出力を差し引いた電力を EV が出力し、EV だけでは出力が不足する場合に蓄電池で補足することを確認した。これにより、V2X システムの出力は需要の総量に同期した。また、蓄電池の SOC を安定化させるためのフィードバック制御により、シミュレーション終了時の蓄電池 SOC は、初期 SOC を上回った。蓄電池は、PV の変動を一時的に補ったが、主な役割は EV 離脱時に生じる EV 出力の減少に対する電力補償であった。図 4.13 に示すように EV の稼働台数がほぼ一定であることから、開発した制御方式は EV により仮想電力線の機能を実現できている。各 EV の SOC は図 4.14 に示すようにバランスしていた。

次に、図 4.15、図 4.16 及び図 4.17 にケース 2 のシミュレーション結果を示す。図 4.15 より、協調制御のロジックに従い、V2X システムの定格から PV 出力を差し引いた電力を EV が出力し、EV だけでは出力が不足する場合に蓄電池で補足することを確認した。これにより、V2X システムの出力は終日 V2X システムの定格電力を維持することができた。また、蓄電池の SOC を安定化させるためのフィードバック制御により、シミュレーション終了時の蓄電池 SOC は、初期 SOC とほぼ同じであった。図 4.16 に示すように、ケース 2 もケース 1 と同様に EV の稼働台数がほぼ一定であることから、開発した協調制御は EV で仮想電力線の機能を実現できている。

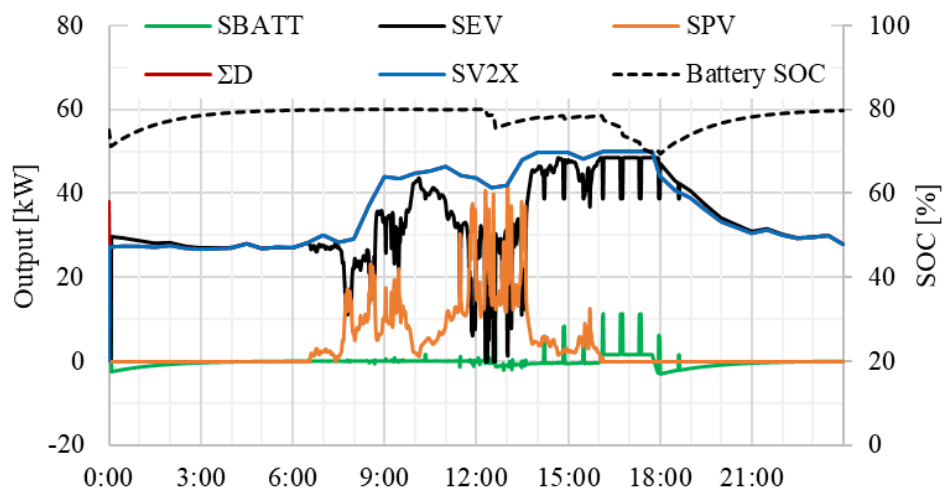


図 4.12 ケース 1 の V2X システムの電力需給とリユース蓄電池の SOC に関するシミュレーション結果

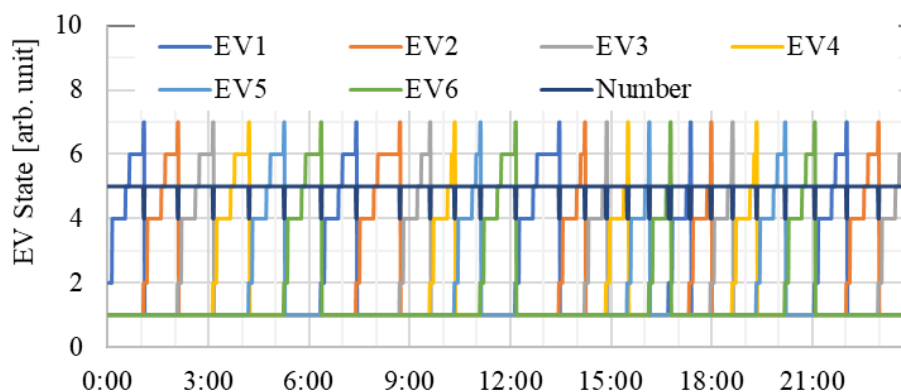


図 4.13 ケース 1 の EV の状態遷移と稼働台数

状態 1 は V2X システムからの供給, 状態 2 は V2X システムから BG プラントへの移動, 状態 3 は QC 待ち, 状態 4 は Quick charge, 状態 5 は BG プラントから V2X システムへの移動, 状態 6 は V2X システムからの供給待ち, 状態 7 は接続中で供給なし

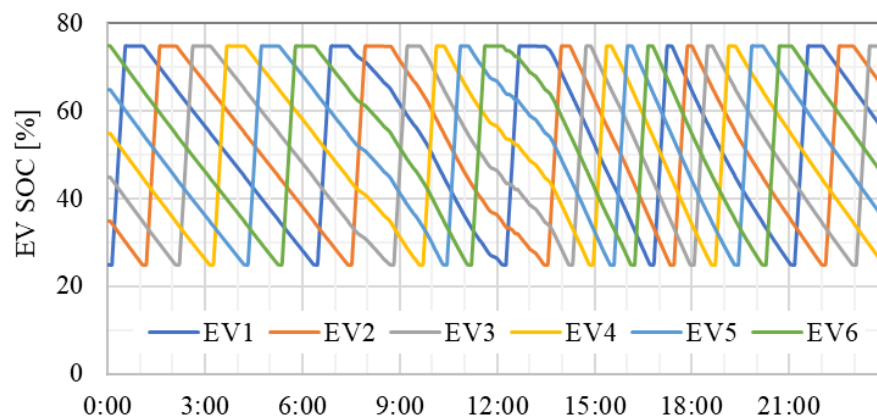


図 4.14 ケース 1 の各 EV の SOC 状態

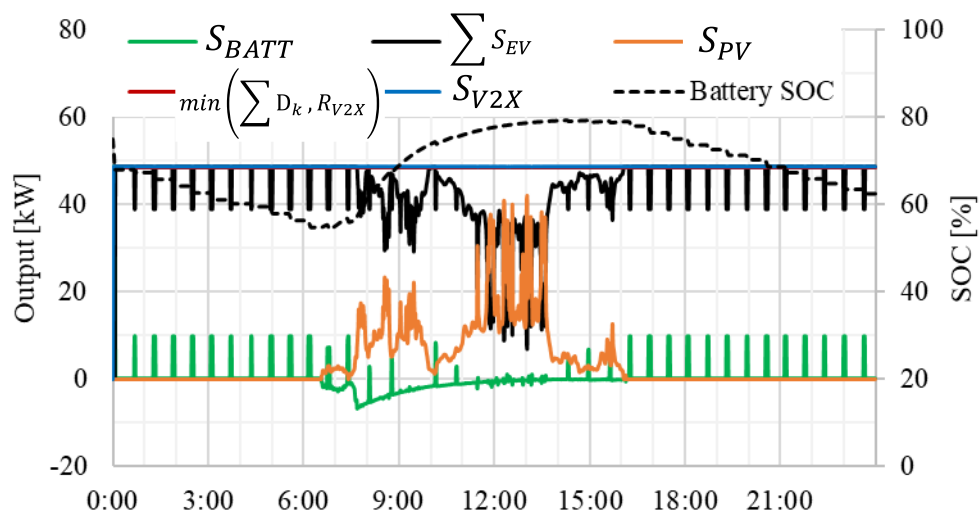


図 4.15 ケース 2 の V2X システムの電力需給とリユース蓄電池の SOC に関するシミュレーション結果

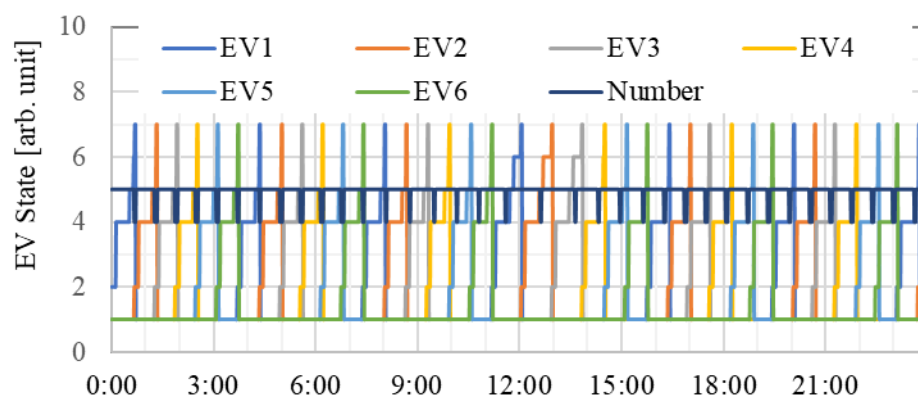


図 4.16 ケース 2 の EV の状態遷移と稼働台数

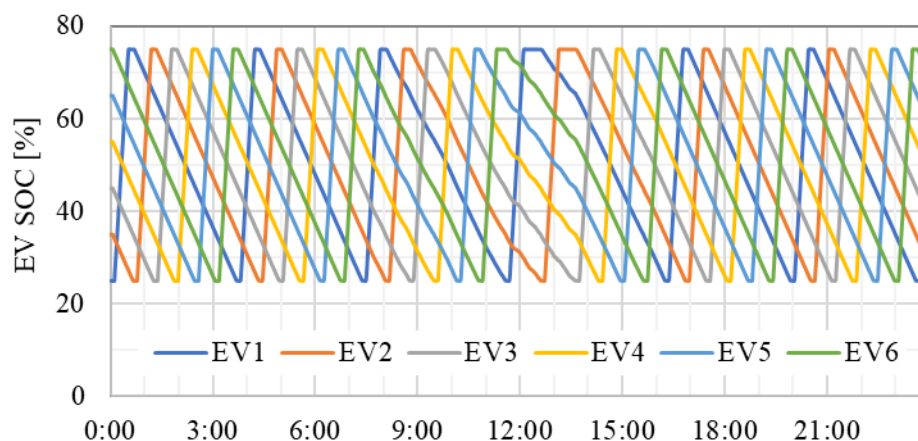


図 4.17 ケース 2 の各 EV の SOC 状態

4.5.2 協調制御で電力需給がバランスする必要条件

提案モデルにおいて、リユース蓄電池と EV の協調制御を用いて電力需給がバランスする必要条件について考察する。

非常時に蓄電池を安定して運用するために、EV 離脱の補償分の蓄電池容量を確保する必要がある。長時間に渡って V2X システムを安定して運用するためには、EV 離脱の補償分の蓄電池容量を PV 出力で充電することも必要となる。また、複数の EV が同時に V2X システムから離脱することを防ぐために、稼働中の各 EV の SOC がバランスすることも必要となる。

まず、EV 離脱の補償用の蓄電池容量は、(4-4)式を満たす必要がある。

$$CA_{BATT} \geq FR_{day} \times SW_{EV} \quad (4-4)$$

ここで、 CA_{BATT} はリユース蓄電池の容量(kWh)、 FR_{day} は 1 日あたりの EV 離脱回数、 SW_{EV} は EV 離脱 1 回あたりの電力量(kWh) である。

次に、PV 出力で EV 離脱の補償分を蓄電池に充電するためには、PV 出力と蓄電池容量が(4-5)式を満たす必要がある：

$$\int S_{PV} \geq CA_{BATT} \quad (4-5)$$

(4-5)式を満たすことで、非常時に想定される 72 時間という長時間運転も条件により可能となる。

最後に、各 EV の SOC は、運用中にバランスしている必要があるかを検証した。EV の初期 SOC に偏りを持たせて評価を行った結果を図 4.18、図 4.19 及び図 4.20 に示す。図 4.20 に示すように各 EV の初期 SOC に偏りがあるため、図 4.19 に示すように複数台の EV がほぼ同じタイミングで離脱することで、V2X システムで給電する EV の台数が減少した。これにより、図 4.18 に示すように、EV 出力が不足したため、協調制御ロジックに従い、蓄電池で補償を行ったが、補償量が大きかったことから、蓄電池の SOC が大きく減少した。5:00 頃に蓄電池の SOC が下限に達した後、7:00 頃に PV 出力が増加して蓄電池の SOC が安定するまでの時間帯で、V2X システム出力は定格電力を維持できなかった。シミュレーションの結果より、EV の SOC がバランスすることで、協調制御を用いて非常時の電力需給をバランスできることを明らかにした。

本研究では、分散型電源の一つであり、需要地から数 km 離れていることが多い BG プラントに着目し、非常時に EV を仮想電力線として運用する MG モデルを提案した。リユース蓄電池と EV の協調制御を開発しシミュレーションで評価を行った。

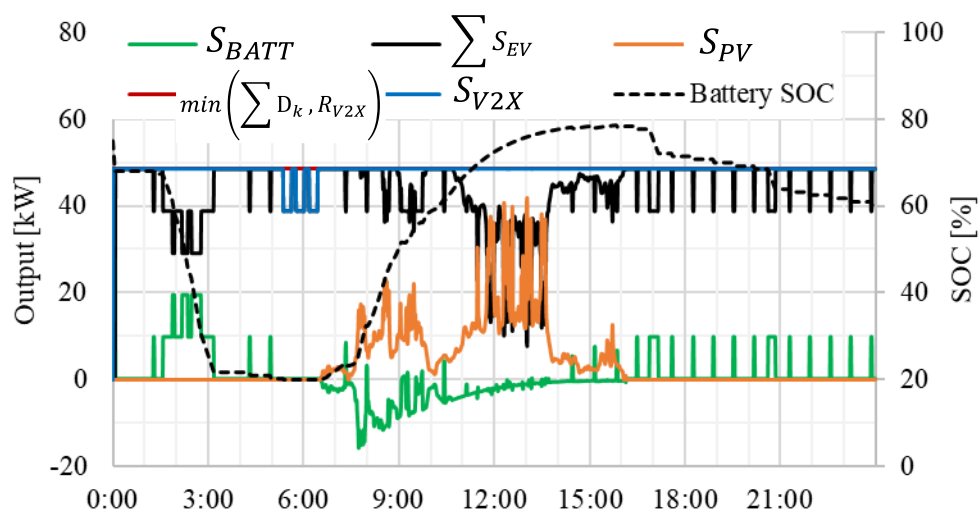


図 4.18 EV の初期 SOC に偏りがあるケースの V2X システムの電力需給とリユース蓄電池の SOC に関するシミュレーション結果

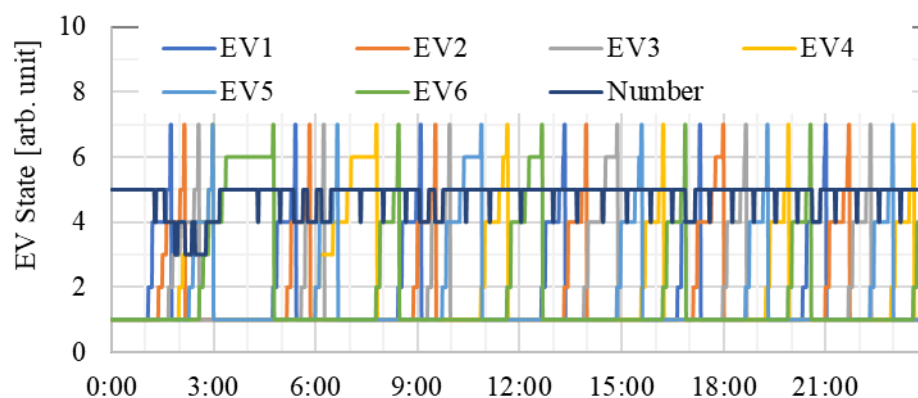


図 4.19 EV の初期 SOC に偏りがあるケースの EV の状態遷移と稼働台数

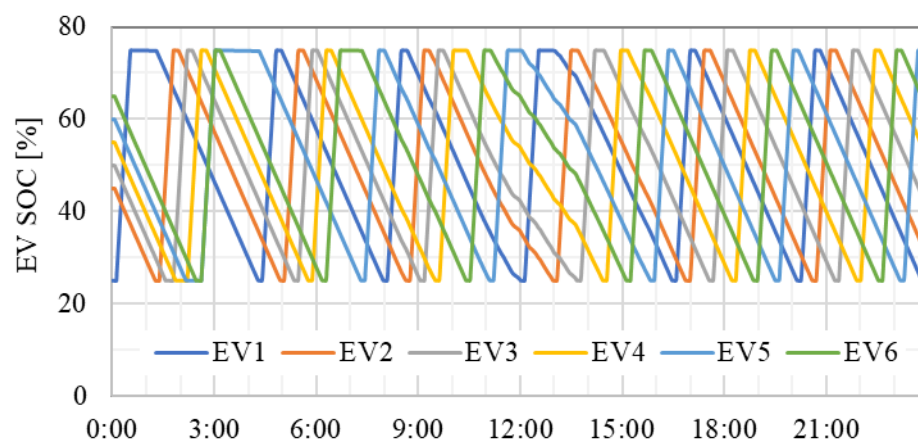


図 4.20 EV の初期 SOC に偏りがあるケースの各 EV の SOC 状態

第5章 結論

5.1 本論文のまとめ

本論文では、EV 等で使用済みの蓄電池を定置リユースするための特有の活用技術を提案することを目的として、第 2 章で、1 次利用後の性能ばらつきを安価かつ高精度に選別する技術、及び第 3 章で、定置リユース運用中に、蓄電池の健全度を診断する技術を提案した。また、地域 MG でエネルギー輸送をコスト化することを目的に、第 4 章で、EV 及び定置リユース蓄電池を活用した MG モデルの提案及び蓄電池の協調制御方式を開発し評価した。

第 2 章では、1 次利用後の蓄電池の性能選別手法として、蓄電池の内部インピーダンス波形を多層に AI で解析するとともに、MT 法を用いた手法を提案、検証した。その結果、本手法は、従来法である充放電試験で測定した放電容量と相関が見られ、その有用性を確認した。提案手法を用いることで、インピーダンス波形の差異が小さい蓄電池も短時間かつ高精度で性能選別できる。また、判別精度の確保には、波形の特徴を把握すること及び MT 法の過学習を抑制するために、一定数以上の特徴量数及びサンプル数が必要であることがわかった。さらに選別時間の最適化として、特徴量抽出に影響しないインピーダンス測定点を除外するなど、本手法適切な使用方法を示した。

第 3 章では、定置リユース蓄電池の運用中の健全度診断法として、並列に接続された蓄電池の電流分担比に基づき容量比を算出する方法を提案、検証した。その結果、本分析法はスタックの相対的な容量を判別可能であり、その有用性を確認した。提案手法を用いることで、リユース蓄電池システムの運用中に健全度診断が可能となる。本検討では、内部抵抗が大きい Ni-MH 蓄電池で提案手法が適用可能なことを示したが、内部抵抗が小さい Li-ion 蓄電池において、精度良く適用できる可能性がある。

第 4 章では、リユース蓄電池の活用した地域 MG モデルを提案した。分散型 RE の一つであり、臭気対策で需要エリアから数 km 離れていることが多いバイオガスプラントに着目し、非常時に EV を仮想送電線として運用する MG モデルを提案した。複数の EV を仮想的な送電線として運用し、MG が需要と供給の電力バランスを調整できることを複数のケーススタディにより明らかにした。

本論文では、地域 MG の設備導入及びエネルギー輸送が高コストであるという主要課題に対して、EV 等で使用済み蓄電池を定置リユースで活用するための特有の活用技術を提案した。また、EV を平常時に公用車、非常時に仮想電力線として運用する革新的な MG モデルを提案し、EV とリユース蓄電池の協調制御方式を開発し評価した。これらの技術やモデルを用いて地域 MG を構築することで、レジリエンスの確保と地域での RE 普及に貢献することが可能となる。

5.2 本研究の事業展開への可能性と今後の展望

まず、本研究の事業展開への可能性について述べる。第 2 章で提案した 1 次利用後の性能ばらつきを安価かつ高精度に選別する技術では、前述の通り、インピーダンス波形の差異が小さい場合も性能選別ができ、高価な充放電装置を用いた時間がかかる充放電や 1 次利用中のトレサビリティデータは必要としないことに産業利用で高い優位性がある。

第 3 章で提案した定置リユース運用中に蓄電池の健全度を診断する技術では、高価な装置を用いた内部インピーダンス測定、解析は必要とせず、従来手法では難しかったシステム運用中にリユース蓄電池の健全度を把握できることが産業利用で有用である。

第 4 章で提案したリユース蓄電池を活用した地域 MG のモデルでは、日常的な電力供給には既存の配電線を利用し、非常時には EV を仮想的な配電線として利用する革新的モデルである。非常時のためだけに設備投資するのではなく、日常的な電力供給に活用するこのモデルは、持続可能で災害にも強い特徴を有していて、独創的であり実用化が期待できる。

次に今後の展望について述べる。提案した地域 MG モデルの高度化が挙げられる。本研究では、RE 施設と需要エリアの街区を 1 対 1 で想定したが、RE 施設や需要エリアの街区が複数あることも想定される。この場合は、RE 施設と複数の需要エリアを EV が運用されることになり、RE 施設と各需要エリア間の往復だけでなく、周回するような運用を行うケースも考慮する必要がある。

参考文献

- [1] 全国地球温暖化防止活動推進センター(JCCCA)IPCC 第 5 次評価報告書
<https://www.jccca.org/ipcc/ar5/wg1.html>
- [2] パリ協定外務省：「気候変動 2020 年以降の枠組み：パリ協定」，令和 4 年 2 月 24 日
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000119.html
- [3] 環境省：「G7 札幌 気候・エネルギー・環境大臣会合」，2023 年 4 月
https://www.env.go.jp/earth/g7/2023_sapporo_emm/index.html
- [4] Prime Minister of Japan and His Cabinet: “Policy speech by the prime minister to the 203rd session of the diet”，Oct. 28, 2020.
Available: https://japan.kantei.go.jp/99_suga/statement/202010/_00006.htmlSa
- [5] 資源エネルギー庁：「エネルギー白書 2024」
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/pdf/>
- [6] 資源エネルギー庁：「日本のエネルギー 2023 年度版」
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2023/01.html#section1>
- [7] 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター「主要再生可能エネルギーの都道府県別 ポテンシャル分布と発電所建設コスト低減」，2018 年 1 月
- [8] 北海道電力：「系統情報の公表について」
https://www.hepco.co.jp/network/con_service/public_document/bid_info.html
- [9] 電力広域的運営推進機関(OCCTO)「電源接続や設備形成の検討における前提条件（送配電等業務指針第 6 2 条）としての 想定潮流の合理化の考え方について」2023 年 4 月
- [10] 電力広域的運営推進機関(OCCTO)「流通設備の整備計画の策定（送配電等業務指針 第 5 5 条関連）における N-1 電制の考え方について」2024 年 5 月
- [11] 電力広域的運営推進機関(OCCTO)「系統の接続および利用ルールについて ～ノンファーム型接続～」2024 年 7 月
- [12] 清水雅仁：「用語解説 ダイナミックレーティング」，電学論 B，Vol.139，No.11 (2019)
- [13] 電力広域的運営推進機関(OCCTO)「電力ネットワーク利用の改革」
<https://www.occto.or.jp/grid/public/riyoukaikaku.html>
- [14] 新エネルギー・産業技術総合開発機構「新エネルギー等地域集中導入技術ガイドブック」
<https://www.nedo.go.jp/content/100083461.pdf>
- [15] NEDO:「電力系統の混雑緩和のための分散型エネルギーリソース制御技術開発(FLEX DER プロジェクト)」
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100237.html
- [16] 気象庁札幌管区气象台：「平成 30 年北海道胆振東部地震」
https://www.jma-net.go.jp/sapporo/jishin/iburi_tobu.html

- [17] 平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う大規模停電に関する検証委員会：「平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う大規模停電に関する検証委員会最終報告」，2018 年 12 月
https://www.occto.or.jp/iinkai/hokkaido_kensho/files/hokkaido_kensho_04_03_2.pdf
- [18] 環境エネルギー政策研究所：「北海道全域のブラックアウト」，2018 年 11 月
- [19] 資源エネルギー庁：「再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック 2018 年度版」
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/data/kaitori/2018_fit.pdf
- [20] 環境共創イニシアチブ：「令和 3 年度補正地域共生型再生可能エネルギー等普及促進事業費補助金(地域マイクログリッド構築支援事業のうち, 地域マイクログリッド構築事業)」，2023 年 3 月
- [21] Y. Kojima, M. Koshio, S. Nakamura, H. Maejima, Y. Fujioka and T. Goda: "A demonstration project in hachinohe: microgrid with private distribution line" 2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering (2007)
- [22] H. Shirato: "Study of biogas energy supply and demand model for post-FIT" Hokkaido Biomass Network Forum (2023) (in Japanese)
- [23] Research Study on Reuse and Recycling of Batteries Employed in Electric Vehicles: The Technical, Environmental, Economic, Energy and Cost Implications of Reusing and Recycling EV Batteries, Project Report, pp.33–43 (2019)
- [24] 資源エネルギー庁：「再エネ型経済社会」の創造に向けて～再エネ主力電源化の早期実現(2020)
- [25] 中部電力（株）：「電動車の駆動用電池のリユース・リサイクル技術開発実証事業」，平成 30 年度省 CO2 型リサイクル等設備技術実証事業報告書，pp.1-25 (2019)
- [26] 楊殿宇，高原慎二，末富隆雅：「EV 駆動用バッテリーのリユースに向けた取り組みの紹介」，マツダ技報，No.39，pp.241-247 (2022)
- [27] 乾貴志，青木宏光，瀬川明大，福井正博：「電力再利用可能な蓄電池バランスの試作と性能評価」，情報処理学会研究報告，Vol.2015-SLDM-170，No.32，pp.1–6 (2015)
- [28] A. Garg, L. Gao, and D. Putungan: "Development of recycling strategy for large stacked systems: Experimental and machine learning approach to form reuse battery packs for secondary applications" J. Clean. Prod., Vol.275, No.1 (2020)
- [29] S. Farhad, R. Gupta, G. Yasin and T. Nguyen: "Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing and Reusing" Micro and Nano Technologies, pp.33–51 (2022)
- [30] E.L. Schneider, C.T. Oliveira, R. M. Brito and C. F. Malfatti: "Classification of discarded NiMH and Li-Ion batteries and reuse of the cells still in operational conditions in prototypes" J. Power Sources, Vol.262, No.15, pp.1–9 (2014)
- [31] M. Muhammad, P. S. Attidekou, M. Ahmeid, Z. Milojevic and S. Lambert: "Sorting of spent electric vehicle batteries for second life application" 2019 the 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering, pp.325–329 (2019)
- [32] Y. Jiang, Y. Wang, C. Zhang, G. Su and J. Liu: "Research on group methods of second-use Li-ion batteries based on k-means clustering model" IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific, pp.1–6 (2014)
- [33] 石川歩惟，比護貴之：「太陽光発電出力予測の誤差パターン分析手法」，令和 3 年電気学

- 会電力・エネルギー部門大会, No.18, pp.2WEB4-17 (2021)
- [34] 森田朋和, 門田行生, 本多啓三: 「内部状態の推定により電池の健全性を可視化する充電曲線解析法」, 東芝レビュー, Vol.68, No.10, pp.54-57 (2013)
- [35] X. Lai, D. Qiao, Y. Zheng and W. Yi: "A novel screening method based on a partially discharging curve using a genetic algorithm and back-propagation model for the cascade utilization of retired lithium-ion batteries" *Electronics*, Vol.7, No.12 (2018)
- [36] トヨタ自動車, 伊藤真典: 「中古二次電池の選別方法, リビルト電池パック, これを用いた車両及び電池使用機器, 並びにリビルト電池パックの製造方法」, 国際特許 WO2011121755A1 (2011)
- [37] Global data: "Projected share of each powertrain in global passenger car sales"
<https://www.marklines.com/ja/forecast/index> (2023)
- [38] M. Heiker, M. Kraume, A. Mertins, T. Wawer and S. Rosenberger: "Biogas plants in renewable energy systems-A systematic review of modeling approaches of biogas production" *Applied Sciences*, vol.11, no.8, 3361 (2021)
- [39] S. Ishikawa, N. Connell, R. Lechner, R. Hara, H. Kita and M. Brautsch: "Load response of biogas CHP systems in a power grid" *Renewable Energy*, vol.170, pp.12-26 (2021)
- [40] 田口玄一: タグチメソッドわが発想法, 経済界(1999)
- [41] 増田雪也: 「非線形成分を考慮した MT 法 (多次元非線形 MT 法) の研究」, 第 29 回品質工学研究発表大会, pp.82-87 (2021)
- [42] 乾義尚, 坂本眞一, 田中正志: 「インピーダンスと起電力測定に基づくリチウムイオン電池の劣化と電圧応答の検討」, 電学論 B, Vol.136, No.7, pp.636-644 (2016)
- [43] 石澤剛士, 寺井太郎: 「MT 法における単位空間の自動作成手法の開発」, 第 29 回品質工学研究発表大会, pp.198-201 (2021)
- [44] 鈴木真人: 試して究める! 品質工学 MT システム解析法入門, pp.22-32, 日刊工業新聞社 (2018)
- [45] 高谷学, 滝口哲也, 有木康雄: 「過学習を考慮した AAM パラメータの選択と回帰分析による顔・視線同時推定」, 第 12 回画像の認識・理解シンポジウム, IS1-60 (2009)
- [46] 多田安伸: 「蓄電池の新たな状態表示・監視方法の提案」, 四国電力, 四国総合研究所研究期報 101, pp.7-28 (2014)
- [47] T. Yokoshima, D. Mukoyama, K. Nakazawa, Y. Gima, H. Isawa, H. Nara, T. Momma and T. Osaka: "Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy to Ferri/Ferrocyanide Redox Couple and Lithium Ion Battery Systems Using a SquareWave as Signal Input" *Electrochim. Acta*, 180, pp.922-928 (2015)
- [48] 多田安伸: 「蓄電池直並列接続時の特性及び課題」, 四国電力, 四国総合研究所研究期報 101, pp.1-15 (2014)
- [49] 太田豊, 橋本芳宏: 「ハイブリッド自動車用ニッケル水素電池の電圧ヒステリシス, 緩和のモデリング」, 電学論 B, Vol.129, No.1, pp.118-123 (2009)
- [50] 森下真也: 「Ni-MH 電池用負極の複素インピーダンス解析」, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.34, No.3, pp.63-70 (1999)
- [51] LIN Lei: 「リチウムイオン蓄電池の高精度等価回路モデルおよびそれを用いた最適電池制

- 御システムに関する研究」，立命館大学大学院理工学研究科博士論文，pp.6-27 (2017)
- [52] J. Lacap, J. Park and L. Beslow: "Develop and demonstration of microgrid system utilizing second-life electric vehicle batteries" *Journal of Energy storage*, vol.41, 102837 (2021)
- [53] K. Nakamura, T. Nakajima and A. Hayashida: "Proposal of a control method for stationary mix reuse of EV used storage batteries" *Proc. of 2023 Annual Conference of Power and Energy Society*, IEE Japan, No.16 (2023)
- [54] CHAdeMO Association: "Technical specifications of quick charger for the electric vehicle" in CHAdeMO protocol Rev. 3.0, vol. 3.0 (2021)
- [55] K. Vink, E. Ankyu and M. Koyama: " Multiyear microgrid data from a research building in Tsukuba, Japan" *Scientific Data*, vol.6, 190020 (2019)

著者が発表した論文

本論文に関して著者が公表した論文

1 査読付学会誌等

- [1] 林田淳, 白土博康, 原亮一, “多層 AI 分析と品質工学 MT 法を用いた 2 次利用蓄電池の高精度迅速性能選別手法の提案”, 電学論 B, Vol.143, No.2, pp.125-131, 2023 年 3 月
- [2] 林田淳, 白土博康, 原亮一, “並列時電流分担比に基づくリユース蓄電池の運用中健全度診断技術の提案”, 電学論 B, Vol.144, No.5, pp.337-344, 2024 年 5 月

2 査読付国際会議プロシーディング

- [3] Atsushi Hayashida, Hiroyasu Shirato, Tatsuhito Nakajima, Ryoichi Hara, “Proposal for a Regional Microgrid Model using Reused Batteries and Virtual Power Lines with EVs”, The ICEE conference 2024 proceeding, O-023 (2024)

本論文に関して著者が行った講演発表等

- [1] 林田淳, 藤澤玲央, 白土博康, 原亮一: 「FIT 後を見据えた地域分散型エネルギーネットワーク創成に関する研究」, 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.51 (2019)
- [2] 林田淳, 白土博康: 「再エネ発電所における 2 次利用蓄電池の性能ばらつきを考慮した最適積層手法の提案」, 令和 3 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.217 (2021)
- [3] 林田淳, 白土博康, 石澤剛士: 「2 次利用蓄電池の高精度迅速な性能選別を目的とした多層 AI 分析法の提案」, 令和 4 年電気学会全国大会, No.6-181 (2022)
- [4] 林田淳, 白土博康, 原亮一: 「多層 AI 分析と品質工学 MT 法を用いた 2 次利用蓄電池の高精度迅速性能選別手法の提案」, 令和 4 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.22 (2022)
- [5] 林田淳, 白土博康, 原亮一, 中村健太郎, 中島達人: 「EV による仮想電力線及びリユース蓄電池を用いた地域マイクログリッドモデルの基礎検討」, 令和 6 年電気学会全国大会, No.6-164 (2024)

謝辞

本論文は、筆者が北海道大学大学院情報科学研究院 情報科学専攻 システム情報科学コース 電力システム研究室に在籍中の研究成果をまとめたものである。本論文の執筆にあたり、多くの方々から多大なるご指導・ご支援を頂きました。

北海道大学大学院情報科学研究院 電力システム研究室の北裕幸教授，原亮一准教授，川島信明特任助教には，研究を進めるにあたり日頃より打合せ等において終始絶大なるご指導，ご助言をいただきました。これまでの研究の成果は，先生方のおかげであると強く実感しております。ここに深く感謝の意を示します。

北海道大学大学院情報科学研究院 五十嵐一教授にはご多忙な中，本論文の副査を務めていただきました。深く御礼申し上げます。

研究室の秘書の尾崎ちえみさん，技術職員の李家康さんには，日頃より我々学生が研究活動へ集中できる環境を整えていただき，大変お世話になりました。研究室の諸先輩方，諸兄には多くの貴重なご意見を頂くとともに，研究遂行にご協力頂きました。心より感謝します。

田中精密工業の石澤殿にクラスタリング及び標本線 GA 法について，増田技術事務所の増田殿に MT 法について助言を頂きました。また，evooster の太田代表取締役役に蓄電池のヒステリシスなどの電気特性について，東京海上ホールディングスの川村殿に蓄電池のシミュレーションモデルについて，助言を頂きました。心から感謝します。

当方の勤務先である地方独立行政法人北海道立総合研究機構のエネルギー・環境・地質研究所には，大学院進学について快く許可を頂きました。また，所属する資源エネルギー部の皆様には，業務の調整などで支えて頂きました。心より感謝します。

最後に，社会人ドクターとして大学院進学することに理解し支えてくれた家族と両親に深く感謝いたします。ありがとうございました。

2025 年 2 月

北海道大学 大学院情報科学院
システム情報科学コース 電力システム研究室
林田 淳

