

# エナジーウィズテクニカルレポート

# Energywith Technical Report

第3号／2025.05



# エナジーウィズテクニカルレポート Energywith Technical Report

第3号／2025.05



## 巻頭言

- エナジーウィズテクニカルレポート巻頭挨拶 ..... 3  
専務執行役員 技術開発本部長 鈴木 正勝

## 社外寄稿

- 鉛蓄電池のこれまでとこれから ..... 5  
福井大学 産学官連携本部 井上 利弘
- リチウムイオン電池の劣化予測モデルと鉛蓄電池への適用可能性 ..... 9  
株式会社コベルコ科研 計算科学センター 高岸 洋一・北川 勇人・馬場 亮平

## 技術レポート

- 提案型蓄電ソリューション ..... 14  
江守 昭彦  
執行役員
- 再エネ蓄電システムのワンストップソリューションを実現する要素技術開発 ..... 19  
有田 裕・西山 洋生・金田 晴利・広瀬 義和・宮本 佳樹・佐藤 俊索  
産業電池システム事業本部 蓄電システム事業推進部
- 統計的解釈による電池性能ばらつきの要素分解と評価 ..... 25  
島田 康平・長谷川 鶴  
DX統括部 DX・データ活用推進グループ  
保坂 大祐・田村 宜之  
事業戦略・調達本部

# CONTENTS

## Commentary

- Energywith Technical Report ..... 3  
Masakatsu Suzuki

## Contribution

- Lead Acid Batteries, Past and Future ..... 5  
Toshihiro Inoue
- Frontiers in Lithium-Ion Battery Degradation Modeling  
and Application to Lead-Acid Batteries ..... 9  
Yoichi Takagishi . Hayato Kitagawa . Ryohei Baba

## Report

- Proposal-Based Battery Solutions ..... 14  
Akihiko Emori
- Development of Core Technologies for  
Providing One-Stop Solutions in Renewable Energy Storage Systems ..... 19  
Hiroshi Arita . Hiroo Nishiyama . Harutoshi Kaneda . Yoshikazu Hirose . Yoshiki Miyamoto . Shunsaku Sato
- Decomposition and Evaluation of Battery Performance Variation  
Based on Statistical Interpretation ..... 25  
Kohei Shimada . Kei Hasegawa . Daisuke Hosaka . Noriyuki Tamura



専務執行役員 技術開発本部長

鈴木 正勝

# エナジーウィズ テクニカルレポート 巻頭挨拶

エナジーウィズ株式会社は、蓄電池の製造及び販売ならびに蓄電池のシステム・サービス事業を展開しています。100年以上にわたる鉛蓄電池製造経験を有し、2021年に、エネルギー（Energy）と共に（with）を念頭に置いて再スタートを切りました。エネルギーを「活かす力」を高め、今までの主力事業である鉛蓄電池の製造・販売である「もの」売りから、施工から保守点検までのトータルソリューションをワンストップで提供する「こと」売りへとビジネスモデル転換を進めています。「品質へのこだわり」を追求し、お客様の困りごとに対し最適な解決策を積極的に提案することで蓄電池専業メーカーから「提案型蓄電ソリューション」企業へ進化し、サステイナブルな社会の創造に貢献します。

鉛蓄電池は、ほぼ100%がリサイクル可能です。製品を回収して、新しい電池に再利用可能なCO<sub>2</sub>排出が少ない蓄電池です。また、リチウムイオン電池に比べ安全な蓄電池システムを容易に構成でき、再生エネルギー用途への適用拡大が期待されます。循環も含めたサプライチェーンのクローズドシステムの視点で、当社は鉛蓄電池を「提案型蓄電ソリューション」のキーデバイスと位置づけています。今後さらなる性能向上に取り組むとともに、蓄電池のシステム・サービスプロバイダーとして必要な製品開発とトータルサプライチェーンの構築に取り組んでいきます。また、当社は、同じく電解液に水溶液を用い、リサイクルが容易で、リチウムイオン電池よりも過酷な環境で使用できるニッケル亜鉛電池の製品化にも取り組んでいます。

本巻では、外部より2件寄稿いただきました。この度はEWのテクニカルレポートにご知見を寄稿いただき感謝申し上げます。1件は福井大学 産学官連携本部の井上先生より「鉛蓄電池のこれまでとこれから」と題して鉛蓄電池の歴史と特徴を振り返り、今後の鉛蓄電池への期待について提言をいただきました。160年以上の歴史を持ち、多くの技術の解明や進歩を重ねてきたにもかかわらず、依然として電気化学的に奥深く、これからも材料やプロセス、利用方法などの

進歩が期待できる優れた電池であり、さまざまな規制に注意を払いつつ、進化を続けて社会貢献して欲しいとの提言をいただきました。もう1件は、鉛蓄電池の劣化予測技術について社外委託させていただいている株式会社コベルコ科研 計算科学センター様に「リチウムイオン電池の劣化予測モデルと鉛蓄電池への適用可能性」と題して寄稿いただきました。「蓄電ソリューション事業」を推進するために、劣化予測技術は極めて重要です。鉛蓄電池は電気化学反応に溶解析出を伴う点でリチウムイオン電池より充放電メカニズムが複雑であり、実環境を対象とした予測では劣化やそのばらつきに及ぼす因子そのものが不明であることも多く、その劣化予測は電池系に関する深い知識と、機械学習や統計解析を組み合わせるチャレンジングなテーマとなります。当社も井上先生を始めとした外部の先生方やコベルコ科研様のような連携のご支援をいただきながら、蓄電池の品質、性能向上や、システムソリューションに供する要素技術の開発に取り組んでまいります。

技術レポート3件のうち、2件は「提案型蓄電ソリューション」に関する内容です。題目「提案型蓄電ソリューション」は、蓄電池のシステム・サービスプロバイダー寄りの視点で、当社の提案型蓄電ソリューションの概要をまとめました。蓄電池の機能を最大限に発揮し、安心安全な蓄電システムを提供するために必要不可欠な蓄電池の状態検知技術に関して、これまでの進化を整理し、今後の技術開発の方向性を述べています。2件目の「再エネ蓄電システムのワンストップソリューションを実現する要素技術開発」は、当社が自動車用・産業用鉛蓄電池、電源装置に次ぐ第3の事業の柱として位置付ける再エネ蓄電システムについての内容です。再エネ用サイクル長寿命蓄電池(LL1500シリーズ)、PCS(パワーコンディショナー)、EMS(Energy Management System)などの周辺装置一式を含めた再エネ蓄電システム全体を、設計～設置～メンテナンス～廃棄までワンストップで構築する蓄電池システム、制御システム、監視システムの概要を紹介します。残り1件「統計的解釈による電池性能ばらつきの要素分解と評価」はDX(デジタルトランスフォーメーション)を活用した技術内容です。前号で紹介した通り、DXは、まずは「品質」改善のテーマから統計解析ツールを活用し取り組み、具体的な成果が現れてきました。蓄電池の売り切り事業から蓄電池の知を価値として提供するためにDX活用は必須であり、適用を拡大させます。

このテクニカルレポートを通して、当社が目指す方向性をご理解いただけますように努めて参りますので、引き続きご指導をよろしくお願ひ致します。

# 鉛蓄電池のこれまでとこれから

## Lead Acid Batteries, Past and Future

井上 利弘 *Toshihiro Inoue*

福井大学 産学官連携本部

### 1 概要

鉛蓄電池は二次電池として160年以上の歴史を持つ電池であり、多くの技術の解明や進歩を重ね、今日でも世界中で自動車のエンジン始動用や据置用のバックアップ電源として用いられている。鉛蓄電池は大容量の安全な蓄電池を容易に構成でき、風力発電や太陽光発電などの再生エネルギーと組み合わせることで、地域ごとや公共施設、学校などへの電力供給や災害時の非常用のシステムとなる。また、材料の鉛の産出も地域に偏ることもなく、資源の確保やリサイクルなど、扱いやすく、コスト面でも優位性のある蓄電池である。鉛蓄電池の反応は複雑ではあるが、これからも材料やプロセス、利用方法などの進歩が期待できる優れた蓄電池である。

The lead acid battery has over 160-year improvement for various applications. It is generally used for SLI car battery with combustion engine and for energy storage devices in the back-up system around the world, because of its low cost, valuable reliability and technology improvements.

The storage energy with renewable wind power and/or solar power can supply local grid and grid systems. It can also supply as an emergency power source in the event of a disaster. In addition, the production of lead as a material is not the specific region. It has advantages in resource security, easy handling and recycling. The lead acid battery is excellent storage devices that can be realized to develop materials, processes, and system control methods for further progress.

### 2 はじめに

現在実用化されて、広く用いられている二次電池（充電式電池）は、鉛蓄電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池がある。これらの充電可能な蓄電池の中で、ニッケル水素電池やリチウムイオン電池は1990年前後に実用化された比較的新しい電池である。

一方、鉛蓄電池はG. Planteの発明<sup>1)</sup>から160年以上の歴史を持つ蓄電池であり、今日でも世界中で用いられている。さらに大学入学共通テスト（旧センター試験）の問題としても出題される<sup>2)</sup>電池である。

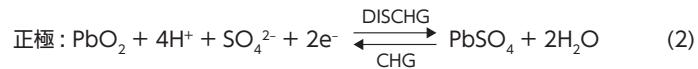
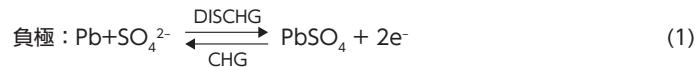
鉛蓄電池は自動車のエンジン始動用として移動体に付属しての使用、バックアップなどの定置用としての使用という幅広い用いられ方をする歴史のある電池であるとともに、電池材料の鉛がリサイクルされるという、環境や資源にも優れた特徴を有している。鉛蓄電池の長い歴史を振り返るとともに、これからの発展について考えていきたい。

### 3 鉛蓄電池の歴史と特徴

鉛蓄電池は乾電池とともに歴史ある電池であるが、本格的なメカニズムや反応の解明などの精力的な研究開発が行われたのは1950年頃からである。例えば、田川ら<sup>3)</sup>の総説、N. A. Hampsonら<sup>4)</sup>の電極に関する文献、J. Perkins<sup>5)</sup>、P. Ruetschi<sup>6)</sup>による総説など多くの文献がみられる。pH-電位図や鉛の酸化などについてはJ. Burbank<sup>7)</sup>、P. Ruetschiら<sup>8),9)</sup>、K. Bullock<sup>10)</sup>などの報告に詳しい。さらには、鉛蓄電池の教科書ともいえるH. Bode<sup>11)</sup>の“LEAD-ACID BATTERIES”があり、近年ではD. A. J. Randら<sup>12)</sup>、D. Pavlov<sup>13)</sup>による成書もみられる。また、D. A. J. Rand<sup>14)</sup>の詳しい総説もある。

鉛蓄電池では正極は鉛の酸化物（二酸化鉛、酸化鉛IV）が、負極はスポンジ状の鉛が用いられ、電解質には希硫酸が用いられている。鉛蓄電池を放電すると、正極には硫酸鉛が生成し、負極にも硫酸鉛が生成する。このため、電解液の希硫酸の濃度

は低くなる。鉛蓄電池の基本反応は以下のように示され<sup>5)</sup>、起電力はセル当たりほぼ2Vが得られる。自動車の始動用バッテリーが12Vなのは6セルが直列に接続されているからである。



$$\text{起電力: } E = 2.041 - 0.1182\text{pH} \quad (4)$$

鉛蓄電池の反応は可逆なために繰り返し充放電を行うことができる。一方で、水は1.23Vで電気分解されることは教科書にも書かれていることであるが、鉛蓄電池は水の分解電圧よりも高い約2Vを示して充放電される。この理由は、電解液の希硫酸中では硫酸鉛の溶解度が極めて小さいことや電解液のpHが低いこと、電解液中の鉛イオンの濃度が低いことなどによって、ネルンストの式から正極と負極の電位を求めるとき、ほぼ2Vの電圧で蓄電池として動作することが得られる<sup>4)-11)</sup>。実際は用途や温度にもよるが、セル当たり1.6Vから2.4V程度の範囲で充放電されることが多い。

現在市場で用いられている鉛蓄電池は、アイドリングストップ用を含めた自動車のエンジン始動用としての液式鉛蓄電池、産業用としての液式鉛蓄電池と制御弁式鉛蓄電池（Valve Regulated Lead Acid）がある。産業用分野では通信などのバックアップ、電力貯蔵などの据置用途やフォークリフト、AGV（Automated Guided Vehicle）などのサイクル用途にも用いられている。制御弁式鉛蓄電池は充電中に正極から発生する酸素を負極にて吸収させて電解液の減少を防ぐ陰極吸収式とも呼ばれ、1960年代にその原型が開発された。初期には電解液に無水ケイ酸のコロイド溶液に希硫酸を加えて固化し、寒天状としたゲル状電解液が用いられていた。1970年代にはそれまでのゲル状電解液に代わり、平均繊維系が0.8~20μmの微細なガラスマットAGM（Absorbent Glass Mat）と呼ばれるセパレータに希硫酸を含侵させた現在のVRLAの形をとるに至っている。この構造については当時のGates社の特許<sup>15)</sup>に詳しい。

また、乾電池やリチウムイオン電池では反応物質は材料メーカーからの粉体を出発原料として電池を製造しているが、鉛蓄電池は原材料の粉体から製造するほぼ唯一の電池である。図1に示すように、鉛蓄電池の製造プロセスにおける最大の特徴は正極も負極も集電体の格子体も、純鉛もしくは鉛合金から作られることである。反応物質としての鉛粉は鉛のインゴットから酸化鉛が製造され、このプロセスは島津源蔵の発明した鉛粉製造方法<sup>16)</sup>が有名である。電池製造については、H. Bode<sup>11)</sup>、T. L. Blair<sup>17)</sup>、L. Prout<sup>18-21)</sup>他、多くの解説がある。

資源としての鉛は、エネルギー・金属鉱物資源機構のレポートに詳しい<sup>22)</sup>。鉛の埋蔵量は90,000Kton程度といわれている。埋蔵量の41%がオーストラリアに、20%が中国、7%がペルーといわれ、国別に見た鉛地金の生産量は12,832Ktonで、中国が41%、米国が8%、インドが7%、韓国が6%といわれている。すなわち、資源としてある地域や国に偏在していないという特徴がある。一方で、ニッケル水素電池やリチウムイオン電池に用いられるニッケルは埋蔵量が95,000Kton程度で、その22%がインドネシア、22%がオーストラリア、17%がブラジルで、国別の生産量は、インドネシアが33%、中国が26%、欧州が13%、中南米が10%で合計は2,632Ktonといわれている。さらに、リチウムは、埋蔵量は22,000Ktonで、42%がチリ、26%がオーストラリア、10%がアルゼンチンで、国別の生産量はオーストラリアが52%、チリが25%、中国が13%で合計104.8Ktonといわれている。電池の材料では埋蔵や産出地域ばかりではなく、生産国やその資本に注意を払うことも元素戦略として重要なポイントである。

二次電池の材料の中で、鉛は材料のサプライチェーンに問題が少なく、資源的には入手が容易な金属である。鉛の用途のほとんどが蓄電池用であることも逆に幸いし、日本では消費量に対するリサイクルの比率は2020年で73%である<sup>22)</sup>。この点は鉛蓄電池の大きな特徴ではあるが、EUで導入されるバッテリー規制<sup>23),24)</sup>への対応も大きな課題である。

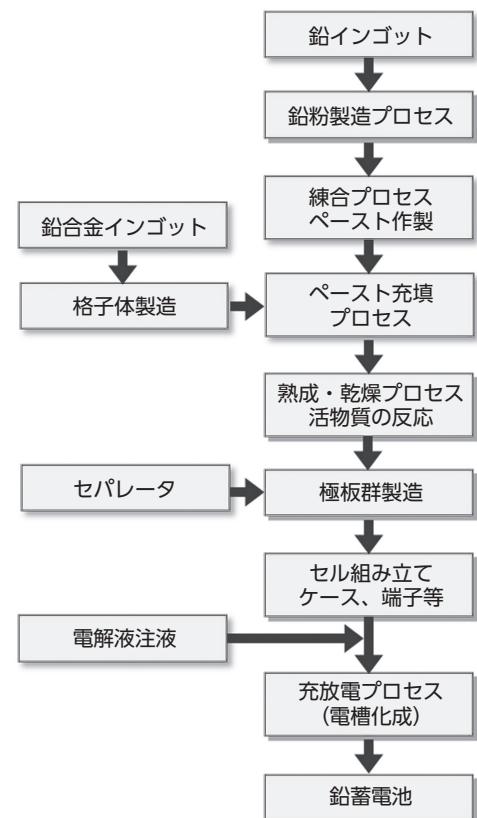


図1 鉛蓄電池（VRLA）の製造プロセスの例

## 4 今後の鉛蓄電池

鉛蓄電池はエネルギー密度は低いものの、使用温度範囲が広く、地球上のあらゆるところで用いることのできる電池系でもある。特に低温での出力特性に優れているために、自動車のエンジン始動やアイドリングストップには欠かせない電池である。

鉛蓄電池についての技術動向を見るために、日本に出願された知財を、特許情報プラットフォーム（J-PlatPat）にて特許の請求項だけではなく本文中に「鉛蓄電池」または「鉛電池」が含まれる特許・実用新案検索を行った結果を抽出して図2に示した。2012年頃から件数の増加がみられ、しかも外国出願も増えてきている。鉛蓄電池に直接的には関係しないものも含まれてはいるが、内容には鉛蓄電池の製造や添加剤、セパレータ、鉛蓄電池モジュールやシステムの制御方法や管理手法、計測技術、リサイクル、車両に関するものなど様々なものがみられる。海外からの出願や日本企業の外国出願も増えてきており、鉛蓄電池はまだまだ進化の余地があることから、知財の点からも注意深く見ていく必要がある。

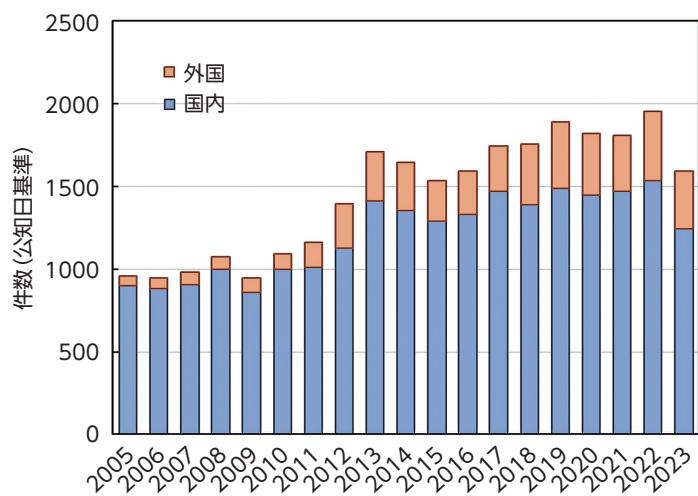


図2 特許の本文に「鉛蓄電池」または「鉛電池」が含まれる特許・実用新案の件数(日本国内出願分)

また、鉛蓄電池の大きな特徴として、セル当たりの容量が幅広いことが挙げられ、1Ah程度の容量から3000Ahを越える大容量の電池が作られている。産業用の液式鉛蓄電池や制御弁式鉛蓄電池は直列並列に組み合わせ、通信やデータセンターのバックアップ、携帯電話の基地局や発電所など社会のインフラを支える10MWhを超える大容量の電源として用いられている。

近年の電力の需給構造に関する変化の流れにより、分散型エネルギーを取り巻く環境は多様化が図られてきた。例えば、太陽光発電や風力発電と組み合わせた蓄電システムなど、再生可能エネルギー・システムの導入により、蓄電システムの重要性は高まってきた。再生可能エネルギーの活用には、発電所に蓄電システムを設置する方法、地域単位やビル単位、さらには役所や学校などの公共施設単位での分散型システムや、系統用ネットワークに蓄電システムを設置することが効果的となる。特に、学校は災害時の避難場所に指定されていることが多いため、太陽光発電と鉛蓄電池を組み合わせたマイクログリッドシステムをハブとして構築することで、台風や地震といった災害時にも活用できるシステムとなる。鉛蓄電池は低コストで大容量高電圧のシステムが構築でき、火災や爆発といった危険性が少なく安全性が高いこと、メンテナンスやリサイクルが容易であるなど、災害時も含めたシステムの構築には優位性があり、20年程度の寿命が期待できるシステムである。システムインテグレーターとの連携により、鉛蓄電池はGX（グリーン・トランク・フォーメーション）に向けたネットワークシステム構成の候補となりうる。

一方、鉛蓄電池のさらなる性能向上には、劣化要因の改善が不可欠である。劣化要因の多くは、正極の格子体と呼ばれる集電体の腐食と正極活性物質の充放電による微細化が挙げられ、鉛合金の耐食性を高めることは長寿命の取扱いに貢献できる。正極の微細化は活性物質の熟成などの製造プロセスや添加剤などの改善による抑制効果が期待できる。正極とのバランスをとるために、負極での充電受け入れ性の向上やセパレータの改良、電解液の減少抑制の検討も必要である。正極の格子と活性物質の界面、電極とセパレータの界面、活性物質と電解液の界面など、鉛蓄電池内の界面の解析レベルを高め、DX（デジタルトランク・フォーメーション）で取り上げられるようなデジタル技術を材料やプロセスの設計、反応シミュレーションに応用することも有効である。こうした新たな制御技術、寿命診断システム、シス

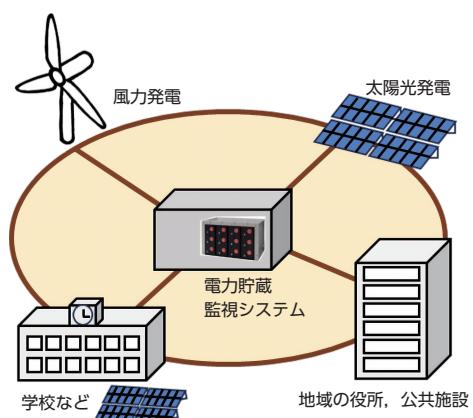


図3 地域におけるエネルギー・マネジメントの例

ムシミュレーションの精度向上、低温特性の向上など、より扱いやすいシステムの構築も期待される。

昨今の蓄電池開発はリチウムイオン電池や次世代の新型電池のハイエンドの研究開発が注目されているが、長い歴史を有する鉛蓄電池の研究開発やビジネスについても、システムトータルとして考えていかなければならない。加えて、据置用のリチウムイオン電池の動きやEUやIEC等の国際規格の動き<sup>23),24)</sup>にも注意を払う必要があり、サプライチェーンのさらなるクローズドシステム化（蓄電池やシステムの循環も含めて）が鍵となる。リチウムイオン電池の研究開発で革新的に進歩した解析技術の応用や、AIの活用なども優れた鉛蓄電池やプロセスの実現につながると思われる。もしかするとこれからも長く使われ続ける電池は乾電池と鉛蓄電池かもしれないし、鉛蓄電池のように氷点下でも作動する水溶液系の電池に適した参照電極の研究開発も、今後の進歩においては興味深いテーマのように思える。

## 5 まとめ

鉛蓄電池は長い歴史の積み重ねで今日の地位を築いてきた蓄電池であり、決して短期間で消え去るような弱さを持った蓄電池ではないものの、様々な規制<sup>23),24)</sup>に注意を払いつつ、社会の進歩に適合していかなければならない。他方、学問的には水溶液系を電解液とした2Vの電池であるため、酸素や水素の反応を常に考えなければならない複雑な電池系である。電気化学におけるネルンストの式やpH-電位図、ターフェルの式にもとづく電位変化や過電圧などを考える電気化学としては奥深い電池系である。今後も電気化学の理論と実践に興味を持つ多くの技術者によって、鉛蓄電池が進化を続けて社会と共に存し、貢献していくことを願っている。

### 【参考文献】

- 1) G. Plante: "Note sur la polarization voltaique", CR. Aca.Sci. Paris, vol.49, p402-404(1859)
- 2) 例えは鉛蓄電池は2007年度、2010年度、2013年度、2018年度、2019年度、2024年度などの「化学I」や「化学基礎」に出題
- 3) 田川博, 石川俊夫: "鉛蓄電池の最近の進歩", 電気化学 (presently Electrochemistry) , 28巻, p492-500(1960)
- 4) J. P. Carr and N. A. Hampson: "THE LEAD DIOXIDE ELECTRODE", Chemical Reviews, vol.72, p679-703(1972)
- 5) J. Perkins: "Materials and Mechanisms Determining the Performance of Lead-Acid Storage Batteries, An Invited Review", Mat. Sci. and Eng., vol.28, p167-199(1977)
- 6) P. Ruetschi: "REVIEW ON THE LEAD-ACID BATTERY SCIENCE AND TECHNOLOGY", J. Power Sources, vol.2(1977/78), p3-24(1977)
- 7) J. Burbank: "The Anodic Oxides of Lead", J. Electrochem. Soc., vol. 106, p369-376(1959)
- 8) P. Ruetschi and R. T. Angstadt: "Anodic Oxidation of Lead at Constant Potential", J. Electrochem. Soc., vol. 111, p1323-1330(1964)
- 9) P. Ruetschi: "Ion Selectivity and Diffusion Potentials in Corrosion Layer", J. Electrochem. Soc., vol. 120, p331-336(1973)
- 10) K. Bullock: "The Effect of Anion Activity on Electrochemical Equilibria: Three-Dimensional Potential-pH Diagram for Pb/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O System", J. Electrochem. Soc., vol.127, p662-664(1980)
- 11) H. Bode, "LEAD-ACID BATTERIES", JOHN WILEY & SONS, 1977
- 12) D. A. J. Rand et.al., Ed., "Valve-regulated Lead-Acid Batteries", ELSEVIER, 2004
- 13) D. Pavlov, "LEAD-ACID BATTERIES: Science and Technology", ELSEVIER, 2017
- 14) D. A. J. Rand: "A Journey on the electrochemical road to sustainability", J. Solid State Electrochem, vol.15, p1579-1622(2011)
- 15) D. G. McClelland and J. L. Devitt: "MAINTENANCE-FREE TYPE LEAD ACID", US Pat.3,862,861
- 16) 島津源蔵: "特許鉛粉製造装置及び特許鉛粉の應用と其効果", 機械學會誌, 28巻(100号), p 489-516(1925)
- 17) T. L. Blair: "Lead oxide technology – Past, present, and future", J. Power Sources, vol.73, p47-55(1998)
- 18) L. Prout: "Aspects of lead/acid battery technology 1. Paste and paste mixing", J. Power Sources, vol.41, p107-161(1993)
- 19) L. Prout: "Aspects of lead/acid battery technology 2. Tubular positive plates", J. Power Sources, vol.41, p163-183(1993)
- 20) L. Prout: "Aspects of lead/acid battery technology 3. Plate curing", J. Power Sources, vol.41, p185-193(1993)
- 21) L. Prout: "Aspects of lead/acid battery technology 4. Plate formation", J. Power Sources, vol.41, p195-219(1993)
- 22) エネルギー・金属鉱物資源機構, 金属資源情報, 鉱物資源マテリアルフロー2022,  
[https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2024/02/material\\_flow2022\\_Pb.pdf](https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2024/02/material_flow2022_Pb.pdf)
- 23) 例えは、JETRO ビジネス短信「EU、バッテリー規制案に政治合意、2024年から順次適用へ」 2022.12.13.,  
<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/12/12e41e15f44c73df.html>  
さらに、JETRO 調査部（ミュンヘン事務所）、「EUバッテリー規制とドイツを中心としたバッテリー生産・リサイクルの動き」、2023.11が詳しい
- 24) European Commission, Batteries, [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries_en)

# リチウムイオン電池の劣化予測モデルと 鉛蓄電池への適用可能性

## Frontiers in Lithium-Ion Battery Degradation Modeling and Application to Lead-Acid Batteries

高岸 洋一 Yoichi Takagishi 北川 勇人 Hayato Kitagawa 馬場 亮平 Ryohei Baba

株式会社コベルコ科研 計算科学センター

鉛蓄電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池をはじめとする二次電池は、情報機器端末、電気自動車や宇宙機に至るまで各分野において搭載が進んでおり、劣化予測は予防保全の観点からも極めて重要な技術として注目される。本稿では、これまで多数提案されているリチウムイオン電池の劣化予測技術を概観し、単セルおよびモジュール／パックの劣化予測事例を解説する。特に、劣化現象を時間に関する方程式で記述する「物理モデル」を用いた技術構築に焦点を当てる。さらに比較的報告が少ない鉛蓄電池への適用可能性と課題を議論する。

Secondary batteries, including lead-acid, nickel-metal hydride, and lithium-ion batteries, are being increasingly adopted in various fields such as information devices, electric vehicles, and spacecraft. As a result, battery degradation prediction has gained significant attention as a crucial technology for preventive maintenance. This paper provides an overview of the numerous lithium-ion battery degradation prediction techniques proposed thus far, and presents case studies of degradation prediction for individual cells and modules/packs. In particular, we focus on the construction of techniques using "physics-based model" that describe degradation phenomena as equations over time. Furthermore, we discuss the applicability and challenges of applying these models to lead-acid batteries, for which relatively few reports exist.

### 1 はじめに

近年、リチウムイオン電池(Lithium-Ion Battery、以降LIBと表記)はスマートフォンなどの携帯機器、電気自動車、住宅などへの搭載・設置が急速に進められており、その発熱や安全性、劣化や余寿命に対する予測技術への関心が高まっている<sup>1,2)</sup>。特に、電池劣化は製品寿命に直結し得ることから、これまで経験的関数、電気化学反応に基づくシミュレーション(物理モデル)、大量のデータを用いる機械学習など、さまざまな手法により予測する技術が開発されてきた<sup>3-11)</sup>。その一方、鉛蓄電池は長い歴史を持つ二次電池であるにもかかわらず、劣化予測技術の報告は比較的少なく<sup>17-20)</sup>、今後の開発の余地が大きいと思われる。

本稿では、はじめに現在のLIBの劣化予測技術について概観し、セルやパックにおける発熱や劣化シミュレーションへの展開例を紹介する。さらに、鉛蓄電池における劣化メカニズムと、LIBモデルの適用可能性について議論する。

### 2 二次電池の劣化予測モデルの分類

LIBの充放電や保存に伴う劣化の原因は、電極材料や条件によって大きく変化するが、Liのインターカレーショングに伴う副反応が主であり、負極活性物質表面のSEI(Solid Electrolyte Interface)成長、正極活性物質の構造転移や溶出、電解液劣化・枯渇、リチウム金属の析出、活性物質同士や集電箔との接触抵抗の増加などが知られている<sup>2)</sup>。図1に代表的な劣化予測モデルの分類マップを示す<sup>10)</sup>。なお、横軸にブラックボックス(ユーザ目線)／ホワイトボックス(開発者目線)をとり、縦軸に仮説駆動／データ駆動をとった。ここで、仮説駆動とは様々な仮定や単純化などを行ってモデル化する方法、データ駆動とは実測データに適合するモデルを機械学習により構築する方法を表す。左上の第2象限では、ルートt則などの経験的式<sup>3)</sup>が代表である。簡便で広く採用されているが、妥当性や外挿可能性には議論が必要となる。物理モデル<sup>4-7)</sup>(第1象限)では、劣化の量を時間に関する微分方程式で記述する手法である。経験式より厳密であるが、複雑現象や不明点が多い場合の適用が難しい。一方、最近では機械学習によるデータ駆動型アプローチ<sup>8-11)</sup>が採用されている。メカニズムを考察しないブラックボックス手法<sup>8,9)</sup>(第3象

限)では、回帰・予測としては優れた性能を示すものの設計へのフィードバックが難しい。それに対し、ホワイトボックス手法<sup>10,11)</sup>(第4象限)では分析画像を積極的に機械学習・深層学習に適用する手法であり、計算規模が大きくなるが、電極ミクロ構造など詳細な予測が可能となる。

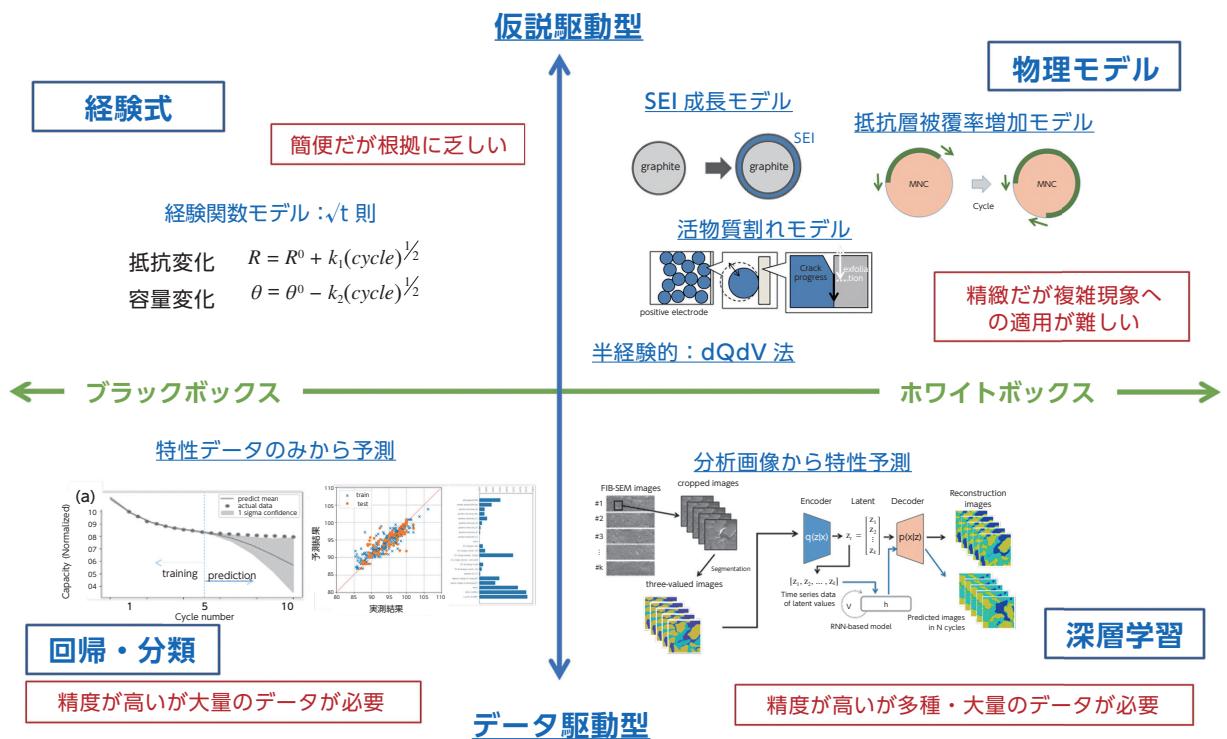


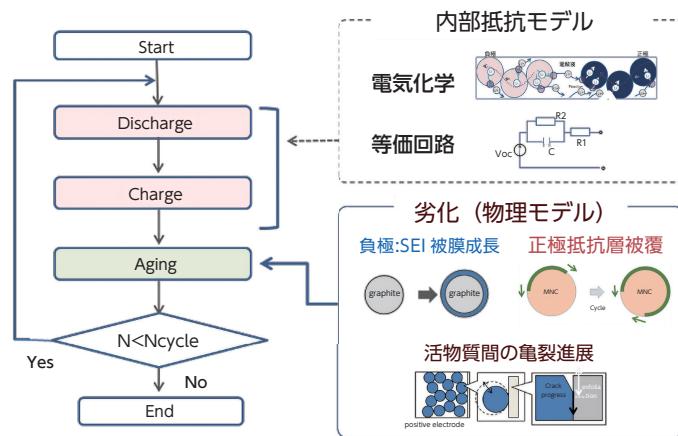
図1 代表的なリチウムイオン電池の劣化予測方法のマップ

### 3 物理モデルによるリチウムイオン電池劣化予測

前節の通り、LIBに対する劣化モデルは多岐にわたるが、紙面の都合上、図1第2象限の物理モデルを用いた単セル劣化モデルリング、およびパックへの展開事例を紹介する。

電池劣化状態を正確に予測するにあたっては、LIB単セルにおける充放電時の電圧、抵抗、発熱量および温度を正確に再現する内部抵抗モデル構築が基本となる。SOC(State Of Charge)や電流、温度の関数で内部抵抗を表す動的等価回路<sup>12)</sup>モデルや、反応・化学種輸送・ポアソン方程式に基づく電気化学モデル(いわゆるNewmanモデル<sup>13)</sup>、Single Particleモデル<sup>14)</sup>など)が採用されることが多い。上記をベースとして、さまざまな劣化機構を模擬した物理モデルが追加される。図2(a)に単セルの代表的な計算フローを示す。充放電中の正負極電位を内部抵抗モデルから算出し、劣化モデル式からSEI成長(電解液の分解)や正極構造転移などの副反応量を求め、内部抵抗増加、容量減少量を見積もる。さらに、これらを内部抵抗モデルへフィードバックする。図2(b)は実測との容量維持率変化と物理モデルによる予測値の比較<sup>15)</sup>である。複数の劣化因子を考慮することで、複雑な劣化挙動に追従していることが分かる。

(a)



(b)

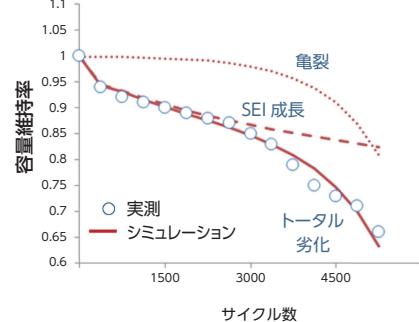
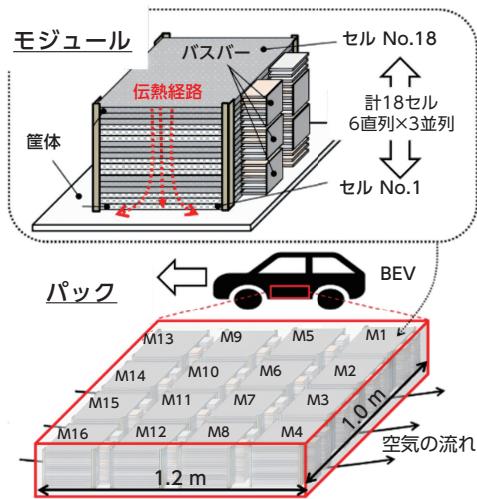


図2 (a) 物理モデルに基づく単セル劣化シミュレーションの計算フローの例。基本の内部抵抗モデルに各劣化現象を想定した劣化モデルが追加される。

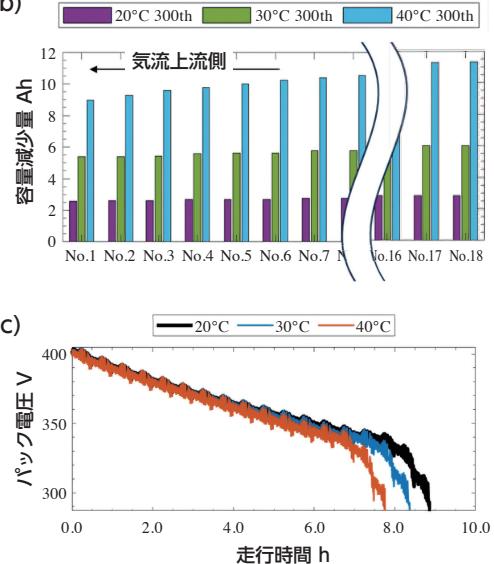
(b) 実測との容量維持率変化と物理モデルによる予測値の比較。

単セルのモデルを用いて、車両走行中の電池モジュールやパック状態の充放電特性および劣化特性予測への展開が可能である。その際、セル温度のばらつきは劣化進行・抵抗のばらつきに影響し得るため、セルの直列・並列回路から各セルに印加される電流条件、セルのホルダーや断熱材、バスバー、冷却機構などを正確にモデル化し、熱の拡散・輸送パスを模擬する必要がある。電気自動車に採用される電池パックを対象とし、電気化学モデルと熱回路モデルを連成することで各セルの温度状態・劣化状態の予測モデルを構築した例<sup>16)</sup>を紹介する。対象とする電池パックの概要を図3(a)に示す。全16個のモジュール(直列接続)と、モジュールは全18個のラミネートセルから構成されるとした。負荷電流はWLTC class 3bモードの走行時の電池パックへの印加電力時間履歴から算出した。図3(b)は、さまざまな環境温度における各セルの容量減少量である。環境温度が高いほど温度上昇や容量減少量が大きいことが分かる。環境温度40°Cで航続距離は初期に比べて300回目で17%減少し、これは環境温度20°Cの1000回目と同程度であった(図3c参照)。即ち、環境温度40°Cでは3.5倍劣化が早くなることが示された。

(a)



(b)



(c)

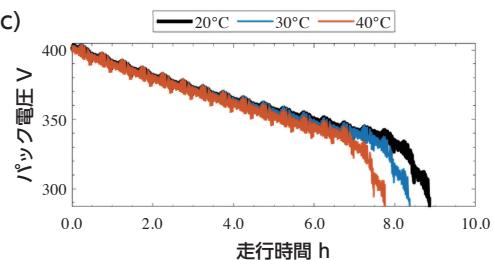


図3 (a) 対象とする車載用電池パックの概要。

(b) さまざまな環境温度における各セルの容量減少量。

(c) 各環境温度における電池パックの電圧変化。

## 4 鉛蓄電池への適用可能性

鉛蓄電池では $\text{PbSO}_4$ などの析出溶解を伴う点で、LIBよりも充放電メカニズムが複雑であると思われるが、等価回路モデル<sup>17)</sup>や電気化学モデル<sup>18)</sup>など同様の内部抵抗モデルが使用されている(ただし、回路構成や電気化学反応式は異なる)。物理モデルに基づく鉛蓄電池シミュレーション<sup>19, 20)</sup>では、内部抵抗モデルにサルフェーション、電解液の層別化、ガス発生、格子腐食などが考慮される。表1に、代表的な劣化メカニズムとモデル化方法の例をまとめた。LIBの場合と同様、実際の劣化現象はこれらが互いに影響し合う複合現象であり、劣化進行に寄与する各パラメータ(反応速度定数、反応の活性化エネルギーなど)は多くの場合未知である。そのため、実測の温度や充放電レート、積算放電量など、さまざまな条件におけるサイクル特性データから、精緻にパラメータを決定するプロセスが重要となる。その際、SEM観察による活物質サイズの変化、XRDによる結晶構造の同定、電解液の定量分析などにより、予め支配的な劣化メカニズムを特定することも有効と思われる。

LIBと同様にモジュール/パックや、ユニット/コンテナ単位での劣化やそのばらつきの予測も可能と思われる。その際、セルごとの容量や内部抵抗因子に加えて、温度のばらつきの寄与が大きくなるものと予想され、周囲の部材や冷却機構による熱輸送の考慮が重要になる。また、リアルワールド(実環境)を対象とした予測では、劣化やそのばらつきに及ぼす因子そのものが不明であることも多く、機械学習や統計解析による分析が有効と思われる。最近、長谷川ら<sup>21)</sup>は風力発電所の蓄電システムを対象とした探索的データ分析を行い、充電時における電流・電圧の特異的な挙動が劣化進行と相関が高いことなどを見出した。さらに、将来的にはリアルタイム運用データから寿命予測を行い、予防保全や蓄電ニーズに合わせた運用の最適化技術の可能性を示している。

このように、鉛蓄電池の劣化予測技術の確立は、実用上大きなインパクトを持つ一方で、現象解明と合わせてモデルを作りこむ必要がある。数値計算の知識だけでなく電池に関する深いドメイン知識が鍵となるため、電池技術者や研究者にとって非常にチャレンジングなテーマである。

表1 代表的な鉛蓄電池の劣化メカニズムとモデル化方法の例

劣化メカニズム	モデル化方法の例
正極グリッドの腐食	被膜成長速度を電極電位の関数として考慮する
サルフェーション	容量低下を放電レートや温度の関数として表する
電解液層別化	実質的な容量低下として考慮する
活物質劣化	容量低下をSOCなどの関数として表する
電解液の漏れ出し	充放電レート、温度、時間などの関数として表現する
ガス発生	電極電位や温度の関数として考慮する

## 5 まとめ

本稿では、LIB単セルの内部抵抗モデルの概要および劣化モデルの考え方を解説し、電池モジュール/パックにおける劣化シミュレーションへの展開例を紹介した。また、代表的な鉛蓄電池の劣化メカニズムとモデル化方法を整理し、実電池への適用課題を述べた。今後は、充放電中のin-situ SEM観察や、operando XAFSなど高度な分析技術を組み合わせることで、さらなるモデルの精度向上を試みる予定である。

---

## 【参考文献】

- 1) 高岸洋一他30名：“AI・MI・計算科学を活用した蓄電池研究開発動向”，シーエムシー出版（2021）
- 2) 坪田隆之他：“リチウムイオン二次電池の試作・評価解析技術”，R&D 神戸製鋼技報 Vol. 65 No. 2, p.92 (2015)
- 3) G. Ning, et al: “Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rate”, J. Power Sources 117, p.160 (2003)
- 4) P. Ramadass, et al: “Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells”, J. Power Sources 123, p.230 (2003)
- 5) Y. Takagishi, et al: “Prediction of Li-ion Battery Module Performance under Running Condition Based on “Multifactorial Degradation Model”, International Journal of Automotive Engineering, Vol.8, No.3, p.143 (2017)
- 6) Y. Takagishi, et al: “Mathematical Modeling of Multiple-Li-Dendrite Growth in Li-ion Battery Electrodes”, J. Electrochem. Soc., 170 (3), 030528 (2023)
- 7) J. S. Edge, et al: “Lithium ion battery degradation: what you need to know”, Phys. Chem. Chem. Phys., 23, p. 8200 (2021)
- 8) A. Thelen, et al: “Probabilistic machine learning for battery health diagnostics and prognostics— review and perspective”, npj Materials Sustainability 2:14 (2024)
- 9) H. Rauf, et al: “Machine learning in state of health and remaining useful life estimation: Theoretical and technological development in battery degradation modelling”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 156, p.111903 (2022)
- 10) Y. Takagishi, et al: “Modelling of SiO<sub>x</sub> electrode degradation based on latent variables from 2D-SEM image”, Journal of Energy Storage 105, p.114621 (2025)
- 11) 高岸洋一他：“機械学習を用いたリチウムイオン電池劣化モデリング”，電気化学（Denki Kagaku） Vol.89, p.140 (2021)
- 12) P. Baudry, et al: “Electro-thermal modelling of polymer lithium batteries for starting period and pulse power”, J. Power Sources 54, p.393 (1995)
- 13) M. Doyle, et al: “Comparison of Modeling Predictions with Experimental Data from Plastic Lithium Ion Cells”, Journal of The Electrochemical Society, 143 (6), p.1890 (1996)
- 14) S. Santhanagopalan, et al: “Review of models for predicting the cycling performance of Lithium ion batteries”, J. Power Sources 156, p.620 (2006)
- 15) 高岸洋一他17名：車載用リチウムイオン電池の開発と市場 2024, シーエムシー出版 (2023)
- 16) T. Yamanaka, et al: “An Electrochemical-Thermal Model for Lithium-Ion Battery Packs during Driving of Battery Electric Vehicles”, J. Electrochem. Soc., 168(5), p.050545, (2021)
- 17) J. Schumacher, “Digitale Simulation regenerativer elektrischer Energiversorgungssysteme”, University of Oldenburg (1991)
- 18) J. Newman, et al: “Simulation of Recombinant Lead - Acid Batteries”, J. Electrochem. Soc., Vol.144, p.3081 (1997)
- 19) H. Bindner, et al: “Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries”, Risø-R-1515 (2005)
- 20) K. S. Gandhi, “Modeling of Sulfation in a Flooded Lead-Acid Battery and Prediction of its Cycle Life”, J. Electrochem. Soc., 167, p.013538 (2020)
- 21) 長谷川馨他：風力発電所で稼働するLL電池の寿命予測に向けた探索的データ分析等の手法による運用データの分析、エナジーウィズテクニカルレポート No.02 p.11 (2024・5月)

# 提案型蓄電ソリューション

## Proposal-Based Battery Solutions

江守 昭彦 Akihiko Emori

執行役員, Chief battery solution officer

### 1 はじめに

蓄電デバイスは非常に重要な役割を担っており、その用途はモバイルから移動体、そして定置用機器まで多岐にわたる。また蓄電デバイスの種類は乾電池からニカド電池、鉛蓄電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池など多種多様である。これら蓄電デバイスの重要性が増すにつれ、BMS (Battery Management System) のニーズが高まっている。また、脱炭素社会および循環型社会の実現に向け、これらの材料調達から廃棄、リサイクルまでのライフサイクルにおけるGHG (Greenhouse Gas) 排出量の削減も重要性を増している。かかる背景のもと、当社は脱炭素社会および循環型社会への貢献を第一に、「エナジーウィズは、蓄電池に新しい知恵を足し、品質にこだわり、『任せていただける提案型蓄電ソリューション企業』として、人々に安心安全を提供します。」という企業理念のもと事業運営を進めている。

ここでは、当社が蓄電デバイスおよびこれらのシステム・サービス事業のプロバイダーとして109年の歴史の中で培ってきた技術と経験、ノウハウをもとにした提案型蓄電ソリューションの概要について述べる。

### 2 蓄電デバイスの役割と効果

蓄電デバイスが搭載された製品として、例えば、モバイル機器に代表されるユビキタス機器、AGV (Automatic Guided Vehicle) やフォークリフト、自動車などの移動体機器、UPS (Uninterruptible Power Supply) や再エネ併設蓄電システムなどの定置用機器などがある。これらの製品の中で表1に示す様に、蓄電デバイスはエネルギー供給、電力アシストや回生・バッファーなどの機能を果たし製品の高機能、高性能、高効率化や電力品質の安定化などに貢献している。蓄電デバイスのさらなる性能向上、新しい蓄電デバイスの登場もあり、また、DX (Digital Transformation) の流れの中で蓄電デバイスを応用した製品、サービスの拡大が期待できる。

表1 蓄電デバイスの役割と効果

役割	効果	アプリケーションと効果の内容(例)
エネルギー供給	携帯性と自由度の向上	ユビキタス機器という単語が普及したようにモバイル機器においては蓄電デバイスを搭載することで電源ケーブルから解放され場所を選ばずに使用できるようになる。
	バックアップ	UPSでは停電時に蓄電デバイスから電力を供給し機器の動作を継続させる。また、太陽光発電システムと併用し夜間など発電不能な時に電力を供給することが可能となる。
	自立運転	電気自動車などでは蓄電デバイスが車両を動かすためのエネルギー源となる。
アシスト・回生・バッファー	性能向上 燃費向上 省エネ化	ハイブリッド車や電気自動車では、加速時や登坂時にモーターがエンジンをアシストしより力強い走行を実現する。 回生ブレーキによって運動エネルギーを電気エネルギーに変換し蓄電デバイスに充電し、力行時に蓄電した電力を使用することで燃費の向上、省エネに貢献する。
	システムの効率化	太陽光発電システムや回生電力活用システム <sup>1) 2)</sup> などでは、発電や回生された電力を蓄電デバイスに蓄え必要な時に使用することで発電やエネルギー効率を高める。また、HEVやPHEVではエンジンとモーターをそれぞれ高効率で稼働する領域で動作させることにより高効率化が図られるとともにギヤの削減によりメンテナンスコストや工数の削減、低騒音化、NOxやSOxの低減が図られる <sup>3)</sup> 。
	電力品質の安定化	電力変動の激しい環境下でも蓄電デバイスが電力を供給、吸収することで電力品質の安定化に貢献する <sup>4)</sup> 。

### 3 蓄電ソリューション提案

図1に蓄電デバイスを搭載した製品のエネルギー容量と出力を示す。また、図2に各種蓄電デバイスの特徴を比較して示す。評価点は現状レベルで良好なデバイスを5とした相対比較である。

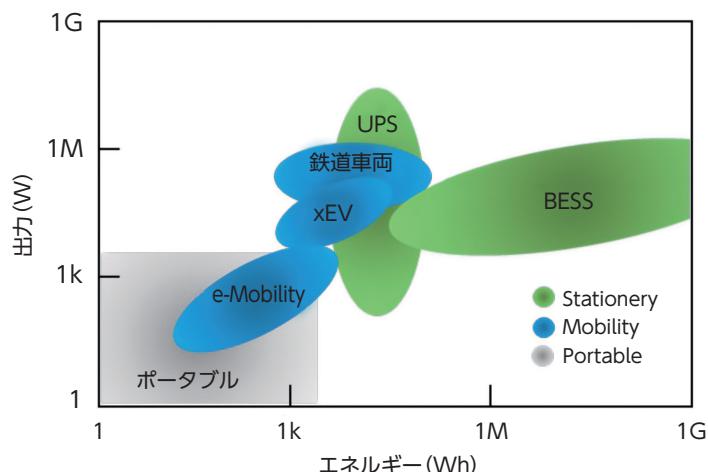


図1 蓄電デバイスを搭載した製品のエネルギー容量と出力

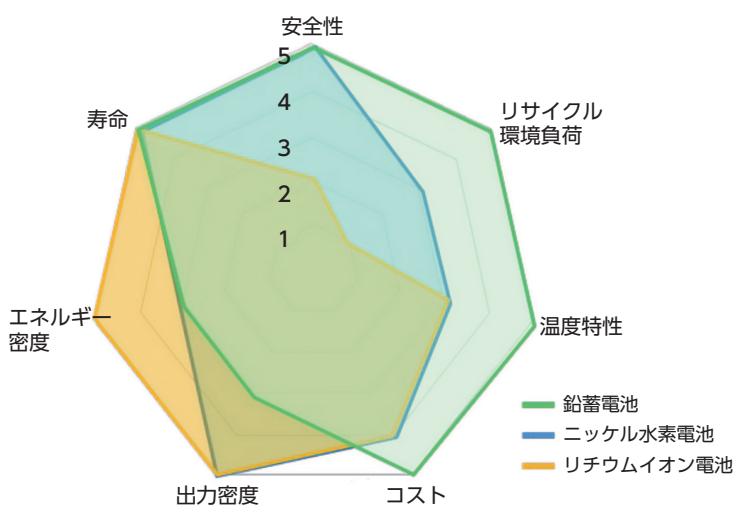


図2 各種蓄電デバイスの特徴比較

蓄電デバイスを応用した製品・サービスは広範に普及しており、そこに採用される蓄電デバイスの仕様も多様である。蓄電デバイスの選定にあたっては、製品の機能を実現する出力やエネルギー以外に使用温度や寿命、価格、安全性等も重要である。また、近年ではライフサイクルを通してのサプライチェーンやCFP (Carbon Footprint of Product) などの考慮も必要である。当社では前述の様な蓄電デバイスの役割と効果を最大限に発揮するために、異なる蓄電デバイスのハイブリッドシステム<sup>5)</sup>も含め適材適所の最適な蓄電ソリューションを提案する。また他社とも協業し、NaS電池やヒートポンプ給湯機、発電機など蓄電デバイス以外のエネルギー機器をミックスした最適なエネルギーシステム<sup>6) 7)</sup>の構築を図る。

### 4 安心安全な蓄電システム

JAFの一般道路と高速道路での四輪・二輪合計の出動理由として「バッテリー上がり」が依然としてTOPとなっている<sup>8)</sup>。また、リチウムイオン電池を主とする蓄電設備の事故について各省庁をはじめ多々報告されている<sup>9)</sup>。蓄電デバイスおよび蓄電デバイスを搭載した機器を安全に安心して使用して頂くために、また、蓄電デバイスの性能を最大限に発揮するために蓄電デバイスの状態検知およびBMSのニーズが高まっている。

かかる背景のもと、当社では蓄電デバイスの高信頼化に加え、BMSの開発にも力を入れてきた。

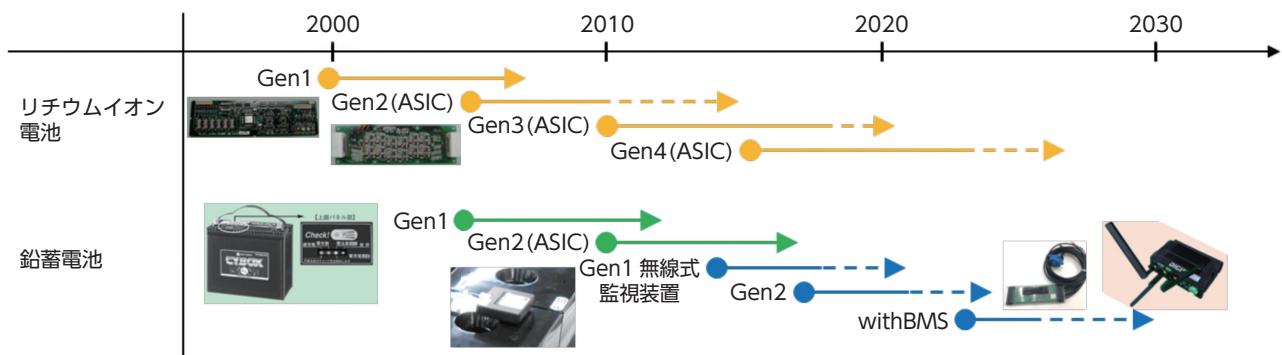


図3 バッテリ監視の進化

図3に当社のバッテリ監視の進化を示す。当社の前身であった新神戸電機（株）は、HEV用リチウムイオン電池およびそのセルコントローラを開発し、2000年に上市されたHEV車に採用された。そして、小型、低コスト、高精度化のために電池監視専用IC<sup>10)</sup>および電池状態の演算にカルマンフィルタや機械学習を適用したBMSの開発、製品化<sup>11)</sup>を進め、各種製品に採用してきた。また、鉛蓄電池についてこれらの技術を展開した状態検知技術の開発を進め<sup>11)</sup>、2004年に自動車用AIバッテリ（CYBOX）を開発、発売した。この商品はバッテリ本体上部に状態判定装置を埋め込み、充電状態、劣化状態を常時監視する機能を備えている<sup>12)</sup>。そして、これらの技術、製品を更にエンハンスし、産業用鉛蓄電池に特化したBMSを2013年に製品化した。本製品は放送やデータセンタ向けの大規模な蓄電池設備に対応させるため、設置工事の軽減、ハーネスの簡素化とハーネス間の接触による短絡の回避など安全に配慮し、無線による通信を採用した。また、鉛蓄電池の特性を捉え高周波領域と低周波領域のインピーダンス測定データを活用した劣化推定技術を適用した<sup>13)</sup>。そして、IoTへの展開を図り、複数の設置拠点のデータをクラウドサーバーにアップロードし、遠隔で常時監視できる第二世代のBMSを開発した。本開発技術は、放送やデータセンタ向け鉛蓄電池の状態検知にとどまらず、再エネ分野や電動フォークリフト、モビリティ分野における蓄電デバイスの状態検知や遠隔監視へ展開されている<sup>7)</sup>。中でも、電動フォークリフト用では鉛蓄電池に取り付けた監視装置の電池計測データをクラウドサーバー上のサービスプラットフォームへ転送する。そして、サービスプラットフォームでは蓄積した電池計測データを基に電池異常アラートおよび定期レポートを生成、提供するサービス、withBMSを開始した<sup>14)</sup>。

今後はAIを適用した状態検知や予兆診断、NiZnをはじめとする各種蓄電デバイス、および蓄電デバイス応用製品、サービスへの適用を拡大する。またIoTやモバイル通信との連携強化を図ったさらなる安心安全なソリューションへの展開を図る。

## 5 脱炭素社会および循環型社会への貢献

鉛蓄電池はCircular Economyの実現が可能な代表的な製品であり、90%以上がリサイクルされている。ニカド電池やニッケル水素電池の再資源化率の実績（それぞれ76、77%）<sup>15)</sup>と比べてもその優位性が分かる。

表2 主な電極材料の融点

電極材料	融点(℃)
リチウム	180.5
カドミウム	321.1
鉛	327.5
アンチモン	630.5
アルミニウム	660.3
カルシウム	839
銅	1085
マンガン	1246
ニッケル	1455
コバルト	1495
鉄	1538

表2に主な電極材料の融点を示す。鉛は他の材料に比べ比較的低い温度で溶融しやすく、他の物質から分離しやすいという特性がある。実際、鉛蓄電池からの鉛のリサイクル率は99.8%<sup>16)</sup>とのレポートもあり、これが鉛蓄電池のリサイクルが進んでいる理由の一つでもある。

ecoinvent databaseによると、一般的な鉛蓄電池のGWP (Global Warming Potential) は新鉛を使用した場合が2.320 (t-CO<sub>2</sub>eq/t-鉛)、リサイクル鉛を使用した場合は0.652と新鉛の約1/3とされている。また、鉛蓄電池は製造時にはドライルーム等の設備は使用せず、アプリケーションの製品設計においては特殊な冷却構造等の配慮が不要であり、使用時の強制冷却も不要である。このように鉛蓄電池は、材料調達から製造、稼働、廃棄、リサイクルに至るまでのライフサイクル全体を通じてCFPに優れた蓄電デバイスである。

加えて、鉛の輸入国をみると、日本の2020年の鉛鉱石輸入国（比率）は、1位が米国（32%）、2位が豪州（31%）、3位がボリビア（13%）である。そして、地金は1位が豪州（45%）、2位が台湾（26%）、3位が韓国（24%）である<sup>17)</sup>。近年クローズアップされている材料調達の地政学的リスクも少ない材料と言える。

当社はタイのグループ会社、Thai Nonferrous Metal Co.,Ltdを擁し、廃鉛蓄電池のリサイクル事業を展開している。また日本国内ではリサイクル企業との連携を強化している。GX (Green Transformation) を強力に推進する一環として、前述の鉛蓄電池の優位性を活かしたリサイクル活用を積極的に推進している。

## 6 まとめ

当社が推進する提案型蓄電ソリューションに関して、蓄電デバイスのシステム・サービスプロバイダー寄りの視点でその一端を述べた。今後も蓄電デバイスの役割と効果を活かした、また、DXやGXの社会潮流に適した新たな製品、システム・サービスのさらなる拡大が期待できる。お客様のニーズや製品、システム・サービスの理解を深め、当社の蓄電デバイスの技術、ノウハウをベースにサプライヤーやお客様と協創し脱炭素社会および循環型社会にも貢献すべく、提案型蓄電ソリューション企業への変革を推進していく。

---

### 【参考文献】

- 1) 高橋弘隆, 青木克成, 真岡明洋, 金永翊: 回生電力貯蔵装置の導入事例と今後の展望, 日立評論 Vol.94, No.06, pp.50-53 (2012)
- 2) 森田克明, 尾崎和基, 豊原尚, 吉岡伸郎, 小林雅人, 古川祐紀: バッテリアリスト電動トランسفァークレーンの開発, 三菱重工技報 Vol.49 No.4, pp.126-129 (2012)
- 3) 大村哲郎, 豊田瑛一, 鈴木優人, 江守昭彦, 宮内努, 嶋田基巳: ハイブリッド駆動システムと蓄電装置, 鉄道車両と技術 No.101, pp.12-18 (2004.11)
- 4) 本澤純, 野村太一, 茅荷谷佑輝, 大野最英良, 江守昭彦, 武田賢治: 電力系統安定化に寄与するコンテナ型蓄電システム, 日立評論 Vol.96 No.05, pp.61-64 (2014)
- 5) 有田裕, 河原洋平, 廣田昇一, 武田賢治: 電力平準化用大容量ハイブリッド蓄電システム, 日立化成テクニカルレポート, No.57, pp.20-21 (2014)
- 6) NEDO ホームページ: ポーランド最大規模のハイブリッド蓄電池システムを設置、本格的な実証運転を開始  
[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101362.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101362.html) (2018)
- 7) 有田裕, 加納光益, 米元雅浩, 柴田康博, 内藤憲樹, 落久保隆: 再生可能エネルギーの自家消費型システムのNEDO実証, 日立化成テクニカルレポート No.60, pp.13-14 (2017)
- 8) JAF ホームページ: よくあるロードサービス出動理由  
<https://jaf.or.jp/common/about-road-service/frequency> (2024)
- 9) 例え、総務省消防庁ホームページ: 蓄電池設備における爆発・火災事故 及びその対応について  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan\\_shohi/denryoku\\_anzen/denki\\_setsubi/pdf/021\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/denki_setsubi/pdf/021_03_00.pdf) (2024)
- 10) 例え、工藤彰彦, 長岡正樹, 堀場達雄, 江守昭彦: リチウムイオン電池用IC化セルコントローラの開発, 新神戸テクニカルレポート No.16, pp.16-21 (2006)
- 11) 大越哲郎, 山田恵三, 平沢今吉, 宮崎英樹, 江守昭彦: 鉛電池状態検知技術の開発: 新神戸テクニカルレポート No.14, pp.7-12 (2004)
- 12) 大越哲郎, 山田恵造, 町山美昭, 小布施俊, 原享, 江守昭彦, 川田隆弘, 城学: 自動車用次期AIバッテリの開発, 新神戸テクニカルレポート No.16, pp.22-26 (2006)
- 13) 向谷一郎, 工藤彰彦, 宮本良雄, 早田幸嗣, 上城貴嗣: 次世代監視装置 (Gen2) 日立化成テクニカルレポート No.60, P.15 (2017)
- 14) 工藤彰彦, 早田幸嗣: 電動フォークリフト用電池状態監視サービス “withBMS”, Energywith Technical Report 第2号 pp.22-25 (2024)
- 15) JBRC ホームページ: 再資源化率実績表  
[https://www.jbrc.com/recycle/graph\\_recycling/](https://www.jbrc.com/recycle/graph_recycling/)
- 16) (独) エネルギー・金属鉱物資源寄稿ホームページ: 2020年の鉛需給動向  
<https://mric.jogmec.go.jp/reports/mr/20211108/159944/>
- 17) BCI ホームページ: National Recycling Rate Study  
<https://battery council.org/resource/national-recycling-rate-study/>

# 再エネ蓄電システムの ワンストップソリューションを実現する 要素技術開発

## Development of Core Technologies for Providing One-Stop Solutions in Renewable Energy Storage Systems

有田 裕 Hiroshi Arita 西山 洋生 Hiroo Nishiyama 金田 晴利 Harutoshi Kaneda  
広瀬 義和 Yoshikazu Hirose 宮本 佳樹 Yoshiki Miyamoto 佐藤 俊索 Shunsaku Sato  
産業電池システム事業本部 蓄電システム事業推進部

### 1 概 要

世界的な地球温暖化防止のため、太陽光発電（以下、PV）や風力発電などの再生可能エネルギー（以下、再エネ）の導入が進んでいる。その一方で、再エネは天候や時間帯により発電量が変動する。電力の安定供給のため、この変動を吸収する蓄電池が注目されている。エナジーウィズ株式会社（以下、当社）では、再エネ向けにサイクル用制御弁式据置鉛蓄電池LLシリーズを中心とし、PCSやEMSなどの周辺装置一式を含めた再エネ蓄電システムをビル、コンビニ、工場などをターゲットに製品開発を進めている。さらに、本システムの信頼性の向上とライフサイクル全体の最適化を目的に、蓄電池の運用データを収集分析する遠隔監視と、その運用データをもとに電気コストの最適化と蓄電池の計画的な劣化を両立するEMSを開発し、システムのワンストップソリューションを実現する。今回、これらの再エネ蓄電池システムの要素技術について報告する。

To prevent global warming, renewable energy sources, such as PV (photovoltaic) and wind power, are becoming throughout the world. However, power generated from renewable energy fluctuates depending on weather conditions and time. To address this issue, renewable energy storage systems have been installed.

At Energywith Co. Ltd, we are developing renewable energy storage systems, which have our LL Series of stationary valve-regulated lead-acid batteries for cycling use and power conditioning systems (PCS) for targeting buildings, convenience stores, factories, and other facilities. Furthermore, to enhance the reliability of these systems and optimize their entire lifecycle, we are developing a remote monitoring system to collect and analyze battery operations and energy management systems (EMS) to achieve both electric cost optimization and battery lifecycle control.

In this report, we present the elemental technologies of these renewable energy battery storage systems.

### 2 再エネを取り巻く環境の変化

世界的な地球温暖化の対策については、COP（気候変動枠組条約締約国会議）<sup>1)</sup>が1992年に発足以来、1995年（COP3）に京都議定、2015年（COP21）にパリ協定がそれぞれ採択され、最新の2024年（COP29）では全世界が取り組むべき地球温暖化対策の目標は下記となっている<sup>1)</sup>。

- ・産業革命前と比べ気温上昇を2°C未満に抑える（努力目標として1.5°C未満）。
- ・世界全体のGHG<sup>2</sup>排出量を2025年までにピークアウトし、21世紀後半に実質ゼロにする。
- ・2030年までに世界の再エネ導入量を現在の3倍の11,000GW以上にする。

また、日本においては、COPの採択を受けて目標をエネルギー基本計画（現在第7次）にまとめており<sup>2)</sup>、これをベースに

1 COPは2025年現在参加国が198か国と地球上のほぼすべての国が参加。1995年以降毎年開催されている。

2 GHG(Greenhouse Gases：温室効果ガス)には、地球温暖化に影響を与える二酸化炭素をはじめ、メタン、一酸化窒素、代替フロン類などが含まれる。

官公庁や自治体が政策を進めている。

- ・GHG排出量を2030年までに46%削減（2013年比）し、2050年までに実質ゼロとする。
- ・再エネ導入比率を2030年までに38%、また、2050年までに50%まで引き上げる。

その一方、再エネの主力である太陽光発電（以下、PV）、風力発電（以下、風力）はVRE（Variable Renewable Energy）と称され、季節や天候の影響を受け発電量が変動する。そのため、VREの導入量が増加すると、それらの変動を系統側で吸収できず、電力の安定供給の維持が困難となる。実際、各電力会社は再エネの導入を許可制とし、事前協議（系統連系協議）を必要としている。この変動の問題を解決する目的で蓄電システムが注目されており、既に数MWh規模の蓄電システムが導入されている。また、近年では再エネ導入に対する補助金においても蓄電システムの設置が条件となっている場合が増えてきている。図1に再エネ蓄電システムの適用先の3つパターンを示す。

- ①発電所併設の変動抑制システム：特に風力の発電量は、常に変化する風況の影響で変動する。系統に接続する際、発電量の変動を抑えるために蓄電システムを使用する。
- ②系統用蓄電池：主に変電所に設置され、電力の需要と供給のバランスをとる。蓄電所やアンシラリーサービスなどと呼ばれる。
- ③自家消費システム<sup>3)</sup>：家庭や工場等にPVとともに設置され、蓄電システムにより逆潮流を抑え、PVの発電電力を有効活用する。その制御を行うものをEMS（Energy Management System）と呼ぶ。

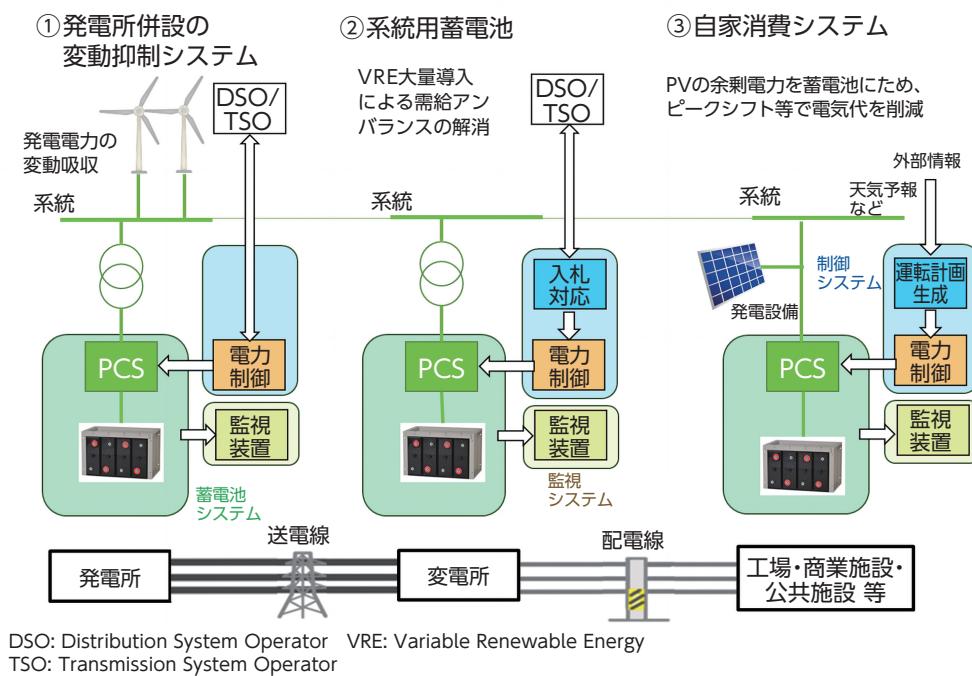
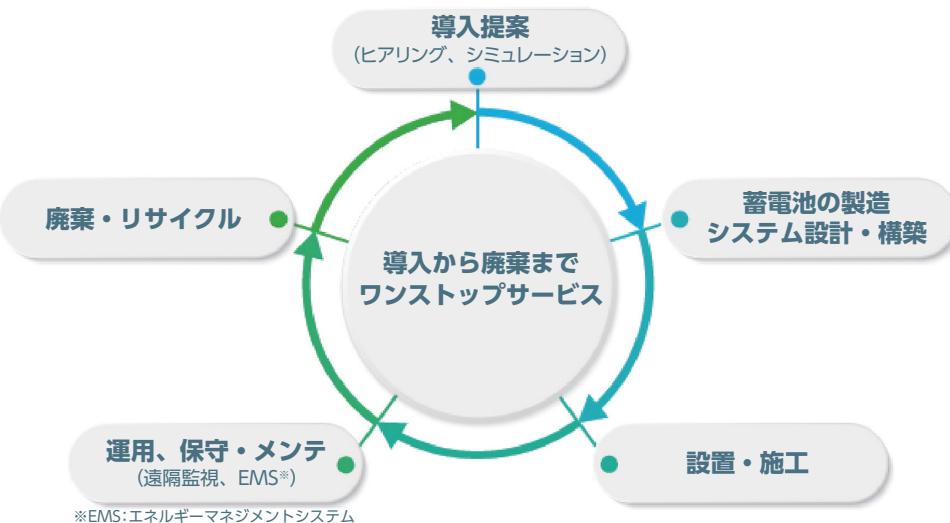


図1 系統に蓄電池を設置するパターン

### 3 再エネ蓄電システムを構成する要素技術

図2に、再エネ蓄電システムのライフサイクル全般を網羅するワンストップソリューションをめざした取り組みを示す。また、これらを構成する技術要素ごとに説明する。

1. 蓄電システム
2. 制御システム・シミュレーション
3. 監視システム



#### ① ヒアリング～シミュレーション～導入提案

お客様のご使用方法や目的のヒアリングおよび電力デマンドデータをもとに太陽光および蓄電システム導入の経済効果をシミュレーションし、最も適切なシステム構成をご提案します。

##### ●シミュレーション結果の一例

項目	太陽光発電設備	タフロングLL蓄電システム	コスト削減	CO <sub>2</sub> 削減	最適提案
シミュレーション1	35kW	—	43万円/年	3.1t/年	△
シミュレーション2	35kW	25kW-112kWh	108万円/年	4.9t/年	○

※ すでに太陽光発電をお持ちのお客様には、後付けで蓄電システムを入れた場合の効果シミュレーションが可能です。

#### ② システム設計～蓄電池の製造・システム構築

タフロングLL蓄電システムに太陽光発電設備を加えた発電・蓄電システム全体および、非常時の重要負荷のバックアップを想定したシステムを構築します。



#### ③ 設置・施工～運転支援～保守メンテ

遠隔監視技術により、タフロングLL蓄電システムの状態を見守り、予知保全を致します。あわせてメンテナンスを効率化し、そのコストを軽減します。また、運用データ解析をもとにした蓄電池性能を最適活用する運用方法を、アドバイスします。

#### ④ 廃棄～リサイクル

エナジーウィズグループにて、使用後の蓄電池を回収したうえで、廃棄物として適正な処理もしくは買取が可能であり、廃棄に関するお困り事（手間や費用等）を解決します。また、タフロングLL電池はほぼ100%再資源化可能で、かつ当社国内工場での生産であることから、国内で資源循環をさせることができ、サステナブルな社会の実現に貢献します。

※エナジーウィズは広域認定（認定番号331号）と古物商認定（東京都公安委員会 許可番号301032420929号）を受けています。

図2 中小容量向け再エネ蓄電システムのワンストップソリューションの流れ

### (1) 蓄電システム（蓄電池+PCS）

蓄電システムは、当社のLLシリーズ（サイクル用制御弁式据置鉛蓄電池）及び、蓄電池を系統に接続するために直流電力→交流電力を双方向に変換するPCSから構成され、当社のLLシリーズを使用した再エネ蓄電システムをTuflong LLシステムと称している。

LLシリーズはベースが鉛蓄電池であるため、エネルギー密度の観点ではリチウムイオン電池に劣るもの、安全性（電解液が水溶性、消防法上の危険物が含まれていない）とリサイクル性（主要部材はリサイクル化）が優れている。期待寿命においては、2001年に3000サイクルのLL1500形を開発以降、改良を重ね、2011年に17年のLL1500-W形<sup>4)</sup>、2014年に出力特性1.5倍としたLL1500-WS形、2016年には放電1.0Cとサイクル寿命5250サイクルを持つLL1500-G形を開発、上市している。また、小容量向けはLL1500と同様の形状・設置方法を継承した小型のLLタイプの開発を進めており、2026年に上市する予定である。

図3にTuflong LLの特徴と設置例を示す。Tuflong LLは過去からの実績に裏付けられた鉛蓄電池を持つ安全性から既設の建物等に設置できる点が特徴である。また、図4に一例として、中容量型及び小容量型のTuflong LL蓄電システムを示す。

また、PCSは外部から調達する。鉛蓄電池に必要な機能としては、均等充電を実施に必要な定電圧充電機能（Constant-Voltage

充電) 及び過電圧・過電流の抑制機能である。

## タフロングLLの特徴

優れた安全性	CO <sub>2</sub> 排出削減																																				
タフロングLL電池の電解液は水溶液系であり、消防法上に規定された危険物に該当しません。	太陽光発電との組み合わせにより二酸化炭素排出量の削減効果が向上します。																																				
BCPに対応	リサイクル性																																				
日常は電気代削減モードで運転。非常時にはBCP運転モードで電力供給リスクに備えることができる、マルチユースの蓄電システムです。																																					
タフロングLLの設置例	格納例																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>出力 (kW)</th><th>実行容量 (kWh)</th><th>設置形態</th><th>主な適用先</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>25~50</td><td>100</td><td>専用キューピクル</td><td>自治体、小規模店舗、病院</td></tr> <tr> <td>50~100</td><td>~350</td><td>20Ftコンテナ×1</td><td>大規模店舗、総合病院、ホテル、マンション、中小工場</td></tr> <tr> <td>100~200</td><td>~700</td><td>40Ftコンテナ×1</td><td></td></tr> <tr> <td>200~300</td><td>~1,400</td><td>分割シェルター or 40Ftコンテナ×2</td><td></td></tr> <tr> <td>300~500</td><td>~2,100</td><td>分割シェルター or 40Ftコンテナ×3</td><td>工場、物流倉庫</td></tr> <tr> <td>500</td><td>2,000</td><td>産業用テント・建屋等</td><td></td></tr> <tr> <td>1,000</td><td>4,000</td><td>産業用テント・建屋等</td><td>電力事業者向け</td></tr> <tr> <td>10,000</td><td>40,000</td><td>産業用テント・建屋等</td><td></td></tr> </tbody> </table>	出力 (kW)	実行容量 (kWh)	設置形態	主な適用先	25~50	100	専用キューピクル	自治体、小規模店舗、病院	50~100	~350	20Ftコンテナ×1	大規模店舗、総合病院、ホテル、マンション、中小工場	100~200	~700	40Ftコンテナ×1		200~300	~1,400	分割シェルター or 40Ftコンテナ×2		300~500	~2,100	分割シェルター or 40Ftコンテナ×3	工場、物流倉庫	500	2,000	産業用テント・建屋等		1,000	4,000	産業用テント・建屋等	電力事業者向け	10,000	40,000	産業用テント・建屋等		
出力 (kW)	実行容量 (kWh)	設置形態	主な適用先																																		
25~50	100	専用キューピクル	自治体、小規模店舗、病院																																		
50~100	~350	20Ftコンテナ×1	大規模店舗、総合病院、ホテル、マンション、中小工場																																		
100~200	~700	40Ftコンテナ×1																																			
200~300	~1,400	分割シェルター or 40Ftコンテナ×2																																			
300~500	~2,100	分割シェルター or 40Ftコンテナ×3	工場、物流倉庫																																		
500	2,000	産業用テント・建屋等																																			
1,000	4,000	産業用テント・建屋等	電力事業者向け																																		
10,000	40,000	産業用テント・建屋等																																			

図3 Tuflong LLの特徴と設置例

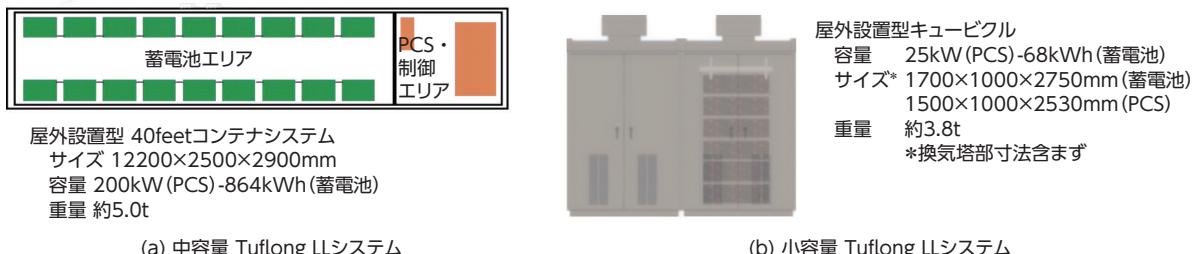


図4 Tuflong LL蓄電システムの構成例

## (2) 制御システム、シミュレーション

再エネ蓄電システムの利点は、再エネの発電及び電力の購入タイミングと電力消費タイミングをずらすことで、ピークカット(ピークシフト)<sup>3)</sup>を実現できる点にある。つまり、PVの余剰電力や単価が安い時間帯に購入した電力を蓄電システムに充電しておき、電力単価が高い時間帯や購入電力のピーク時に放電することで、電力コストの低減を実現する。また、天候の予測を用いて電力の事前購入を有効活用することで、天候の影響を低減することができる。

当社では、先に開発したHEMSのエンジン<sup>5)</sup>をベースに、再エネ蓄電システムの導入効果を定量的に評価できるシミュレーションを開発した。図5に計算結果の例を示す。(a)が1日の運用結果で、左側が晴天時で右側が雨天時を、(b)が年間の導入効果を示している。

晴天時は朝方のPVの余剰電力を充電し、夕方の購入電力のピーク時に放電することで、また、雨天時はピークカットラインを守るため必要な電力を夜間のうちに購入・充電することで、購入電力の最大値(ピークカットライン)を下げ、契約電力の低減を実現する。

3 本稿ではピークカットとピークシフトは同義語と扱う。今回、購入電力のピークを抑えることを強調するため、ピークカットと記載する。

また、この低減費用を年間で集計したものを再エネ蓄電システムの導入効果としてまとめたものが(b)である。

図6に、開発したシミュレーション技術を核としたEMSのコンセプト(EW-EMS)を示す。このシミュレーションにPV発電・電力需要の予測データを入力して、運転計画を生成する部分(Planning EMS)と、その運転計画をもとに、実際のPV発電や実際の電力需要から蓄電システムへの充放電の指令を生成する部分(Operation EMS)からなるEW-EMSを開発し、2025年度中に上市する計画である。

さらに、このPlanning EMSに蓄電池の劣化推定機能を織り込むことで、電気代を削減しつつ蓄電池の長寿命を両立するEMSを2026年度以降に上市する計画である。

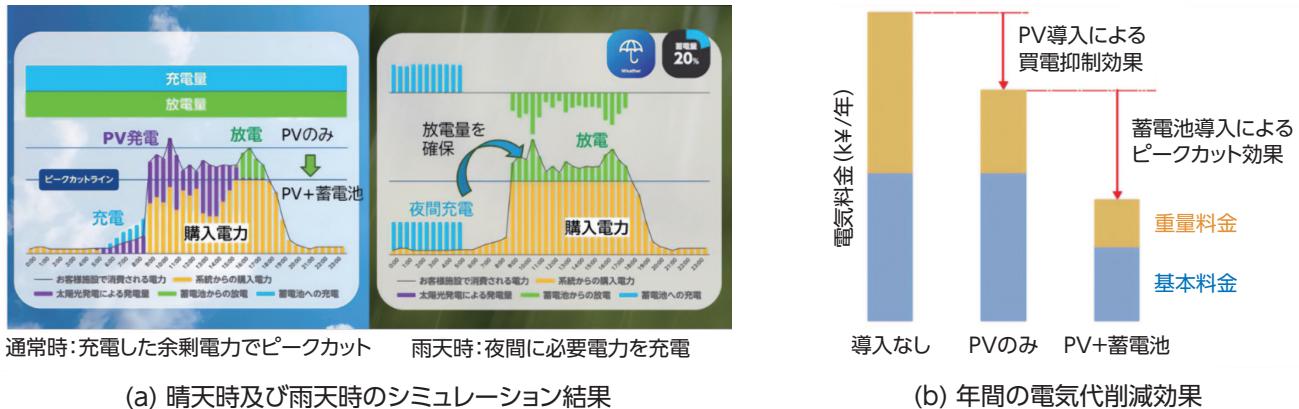
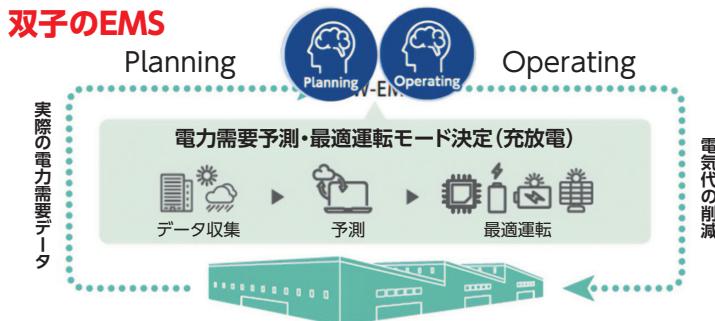


図5 再エネ蓄電システムのシミュレーションの結果



### Planning EMS 予測

天候・電力需要予測から、将来の運転計画を立案

### Operating EMS 実践

運転計画をベースに実際の状況に即した制御を実現

### (3) 監視システム

再エネ蓄電システムには遠隔監視システムが搭載されている。この遠隔監視システムにより、当社のサービス部隊がリアルタイムに本システムの健全性、性能確認、経済性が確保できているか確認することができ、タイムリーな対応を実現する。特に、蓄電池は使用温度環境や充放電量に応じて、性能が劣化するため、当初の設計通りに運用されているか確認・調整することで、システム寿命をコントロールする予防安全を実現する。

図7に遠隔監視システムの機能及びメリットを示す。当社のサービス部隊が、再エネ蓄電システムの常時監視や運用データの解析を実施し、異常時の即時対応とともに、異常や蓄電池の早期劣化を回避する予防安全、運用アドバイスを行う。

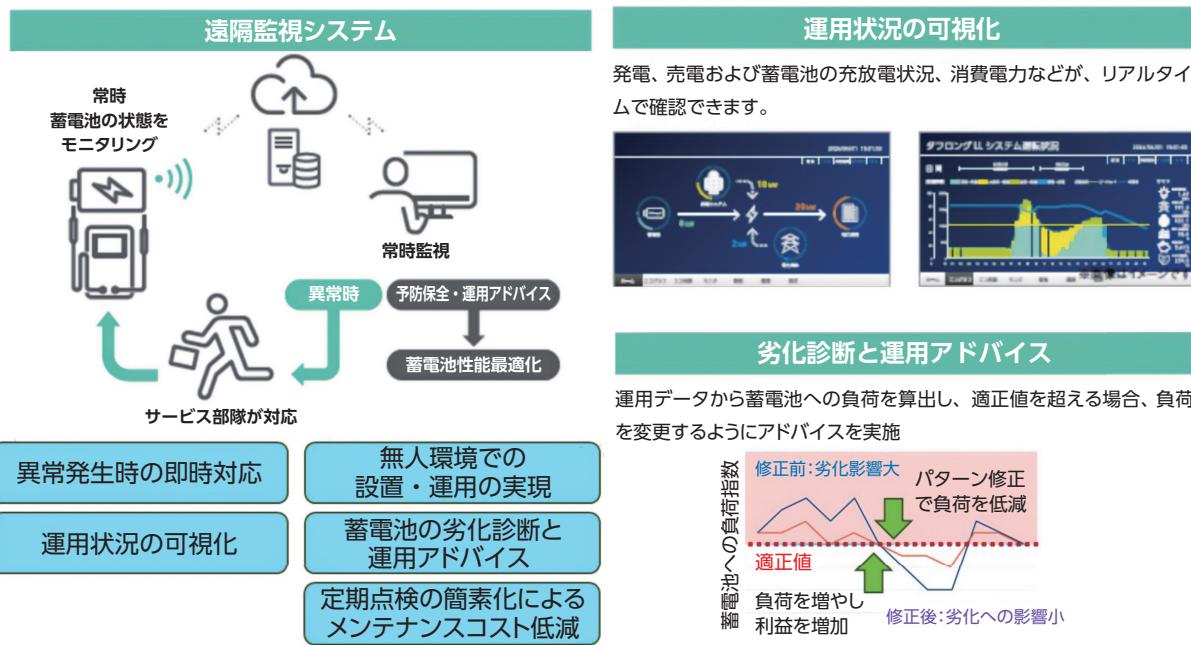


図7 遠隔監視システムの機能とメリット

## 4 まとめ

当社では安全性及びリサイクル性に優れたサイクル用制御弁式据置鉛蓄電池LLシリーズを中心とした再エネ蓄電システムの要素技術について述べた。本システムのライフサイクル全体の最適化を実現する遠隔監視とそれと連携するEMSを開発しており、本システムの信頼性向上に寄与するとともに、DXやGXの社会潮流に適した新たな製品・サービスの更なる拡大が期待できる。お客様のニーズや製品・システム・サービスの理解を深め、当社の再エネ蓄電システムを発展させる。

## 5 今後の展開

- 1) 再エネ蓄電システムを構成する製品群のラインナップの充実
- 2) AI等の最新技術を導入し、遠隔監視とEMSの連携強化の実現

### 【参考文献】

- 1) 「過去のCOP等の開催状況と結果について」, <https://www.env.go.jp/earth/copcmcpma.html>, 環境省
- 2) 「エネルギー基本計画（第7次）」, 2025年2月, 経産省 資源エネルギー庁
- 3) “Variability and Predictability of Large-Scale Wind Power”, 2025年2月、IEA Wind TCP Task 25  
(日本語訳「風力発電大量導入時の変動性と予測可能性」, NEDO, 2020年4月発行の旧版を翻訳)
- 4) 佐野他：「風力発電の出力変動緩和用制御弁式据置鉛蓄電池“LL1500-W形”」, 新神戸テクニカルレポート, No21, P15-20 (2011)
- 5) 有田他：「再生可能エネルギーの自家消費型システムのNEDO ドイツ実証」, 日立化成テクニカルレポート, No60, P13-14 (2017)
- 6) 向谷他：「次世代無線監視装置( Gen.2)」, 日立化成テクニカルレポート, No60, P15-20 (2017)

# 統計的解釈による 電池性能ばらつきの要素分解と評価

Decomposition and Evaluation of Battery Performance Variation  
Based on Statistical Interpretation

島田 康平 *Kohei Shimada* 長谷川 馨 *Kei Hasegawa*

DX統括部 DX・データ活用推進グループ

保坂 大祐 *Daisuke Hosaka* 田村 宜之 *Noriyuki Tamura*

事業戦略・調達本部

## 1 概 要

当社では品質保証のため、各品種の電池について定期的な抜き取り検査を実施している。これまで取得してきた検査データに大数の法則などの統計学の理論を適用した解析から、電池の性能ばらつきを同じ製造ロット内とのばらつきと異なる製造ロット間とのばらつきに分解して評価する手法を確立した。これにより、各製品の性能ばらつきの特徴を明らかにでき、ばらつきの全体像とその要因の把握が容易になった。解析結果を製品開発や工程改善に活かすことで品質の向上が期待される。

Our company conducts periodic sampling inspections for each type of battery to ensure quality assurance. We have established a method to decompose performance variation of the batteries into variations within the same production lot and between different production lots for evaluation, by applying statistical theories such as the Law of Large Numbers. This method has clarified the characteristics of performance variation for each product, making it easier to see the whole picture of the variations and their origin. The analyzed results are expected to enhance the quality of our products by being applied to the improvement of product development and manufacturing processes.

## 2 技術の特長

- 統計学の理論を適用することで、電池の性能ばらつきを同じ製造ロット内と異なる製造ロット間とのばらつきに分解、評価する手法を確立

## 3 開発の経緯

当社では企業理念として「品質にこだわる」ことを掲げ、事業を運営する上で最も重要な要素の一つとして品質を挙げている<sup>1)</sup>。これまで、各品種の電池について定期的な抜き取り検査を実施し、充放電性能が基準値を満たしているかを確認してきた。この検査データは全て社内の品質管理システムに記録され、品質問題が発生した際の原因究明に活用している。これは品質を保つための「守りの品質」として重要な役割を果たしている。

一方、当社は電動フォークリフト用電池状態監視サービスや再エネ蓄電池システムといった蓄電池の知を価値として提供する「蓄電ソリューション事業」への転換を図っている<sup>2)</sup>。これを成し遂げるため、当社におけるデジタルトランスフォーメーション(DX)の活動の一環として品質の技術革新を進めており、その成果として例えば製造工程に画像検査技術を導入し、品質を向上させた事例が挙げられる<sup>3)</sup>。これは「守りの品質」から一歩進み、積極的に品質改善を推進する「攻めの品質」であり、当社の「品質にこだわる」という理念を具現化したものである。

さらにこの理念を具現化させるべく、定期検査についても「攻めの品質」への転換を検討しており、これまで取得してきた定期検査データをビッグデータと捉え、統計やAIの技術を駆使したデータ解析により新たな品質改善手法の創出を試みている。その中で、探索的データ解析(EDA)や、クラスター分析、決定木分析などの機械学習も取り入れた結果、性能ばらつきの要因をより深く評価する手法の確立に至った。

本報告では、統計学の理論を適用し、電池の性能ばらつきを同じ製造ロット内のばらつきと異なる製造ロット間のばらつきに分解して評価することで、各製品の性能ばらつきの全体像とその要因を把握した事例について紹介する。

## 4 技術内容

定期検査では、一定期間ごとに同じ製造ロットから複数の電池を抽出し、その充放電性能を測定している。図1(a)は定期検査結果の模式図である。この図では、特定の電池について各月に2個の性能データを取得したうちの5か月分を示している。

取得したデータのばらつきを評価する場合、一般的には標準偏差を算出する(図1(b))。標準偏差は全データの平均値から各データがどれだけ離れているかを数値化したもので、この例では2.39になる。ここで性能ばらつきの要因は、製品の構成要素に由来するばらつきと製造環境に由来するばらつきの二つに大別できると考えられるが、全体のばらつきを評価している標準偏差から要因を絞り込むことは困難である。

そこで、性能ばらつきをこれら2つの要因に分解する方法を検討した。定期検査では同月の取得データから同じ製造ロットの情報が得られ、別月の取得データから異なる製造ロットの情報が得られる。これに基づき、図1(a)から同じ製造ロット内のばらつき(ロット内ばらつき)と異なる製造ロット間のばらつき(ロット間ばらつき)をそれぞれ評価した。結果を図1(c)に示す。ロット内ばらつきは同月のサンプルの性能差(緑矢印)で示され、その標準偏差は1.85である。一方、ロット間ばらつきは同月サンプルの平均値の変動(青線)で示され、その標準偏差は2.18である。

ここで同じロットの製品は同条件下で製造されるため、製造環境の変化は限りなく小さいことを踏まえると、ロット内ばらつきは極板の厚みや電解液の濃度の違いなど、主に製品の構成要素によって生じるばらつきと言える。一方ロット間ばらつきは、製造時期や作業者の違いなど、製造環境の変動によって生じるばらつきがロット内ばらつきに加わったものである。この製造環境の変動によるばらつきは、製品の構成要素に由来する影響も含むため、厳密にそのばらつきだけを取り出して定量的に解析することは困難である。しかしロット間ばらつきがロット内ばらつきよりも大きい場合、性能ばらつきにおける製造環境の変動の影響は無視できないほど大きいと言える。従って、図1(c)の結果はロット間ばらつきの方がロット内ばらつきよりも大きいことから、性能ばらつきに対する製造環境の変動の影響は大きいと言える。

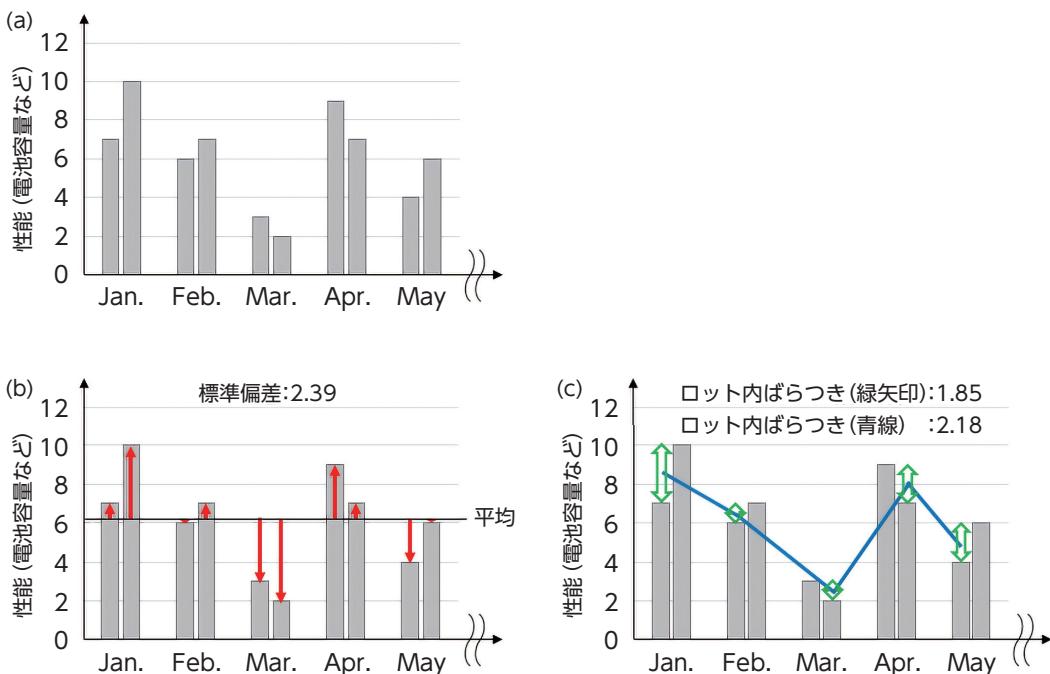


図1 (a)定期検査結果の模式図(同月のデータはサンプリング順に左から表示)  
 (b)性能の5か月間平均値からのずれ(偏差)と標準偏差  
 (c)ロット内ばらつき、ロット間ばらつきのそれぞれの標準偏差

図1は5か月分のサンプリングデータの例だが、データを蓄積することで各ばらつきをより高精度に算出できる。図2は、データの蓄積によりロット内ばらつきの推定精度が向上する原理を示す。ここでサンプリングした電池が含まれる製造ロット全体(母集団)の分布は、蓄電池Aが蓄電池Bに比べて狭いものとする。このときサンプリングした電池の性能差は蓄電池Aの方

が小さくなる確率が高いが、1か月分のサンプリングデータだとサンプリング誤差によって蓄電池Bの方が性能差が小さくなることがある。しかしそれ多くのサンプリングデータを蓄積すると、サンプル平均が製造ロット全体の平均に近づく「大数の法則」に基づいて母集団の推定精度が高まり、蓄電池Aの方がロット内ばらつきが小さい結果を精度良く得られるようになる。

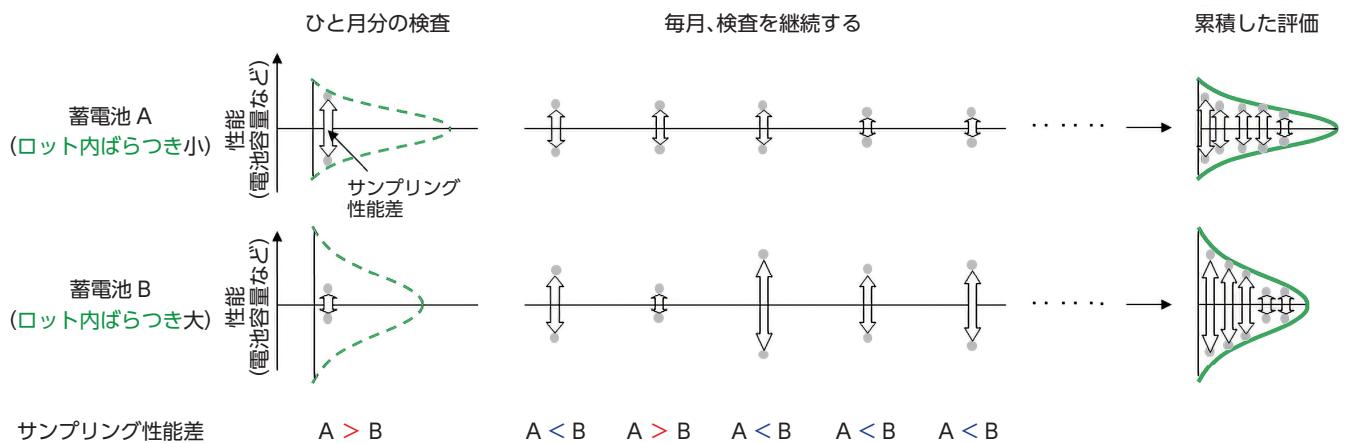


図2 データの蓄積によりロット内ばらつきの推定精度が向上する原理

ロット間ばらつきも同様に、「大数の法則」に基づいて推定精度を高めることができる。図3は、データの蓄積によりロット間ばらつきの推定精度が向上する原理を示す。ロット内ばらつきやサンプリング誤差の影響で、ロット間ばらつきの測定値が真の値と大きく乖離するケースが想定されるが、より多くのサンプリングデータを蓄積して評価すると真の値に近づき、ロット間ばらつきが精度良く得られるようになる。

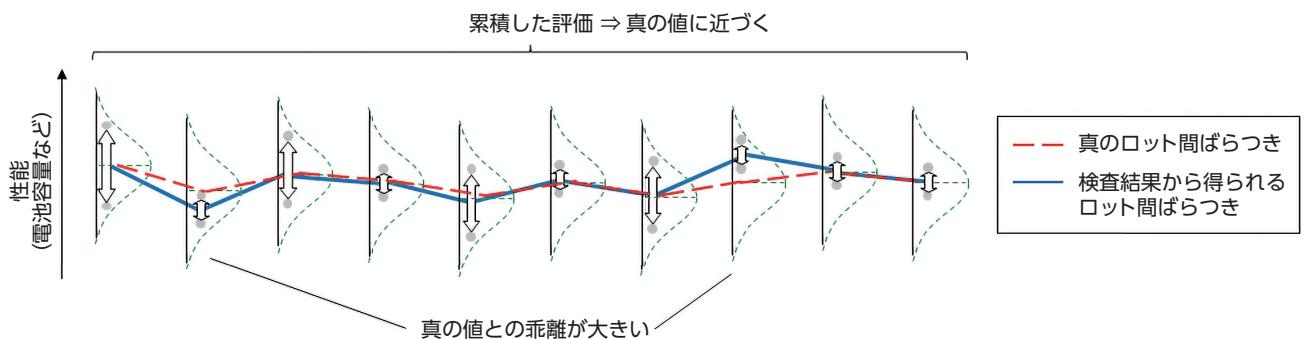


図3 データの蓄積によりロット間ばらつきの推定精度が向上する原理

当社では定期検査を長年にわたり実施しており、蓄積したデータに基づいてロット内ばらつきとロット間ばらつきを高い精度で算出できる。図4に、ある放電試験における各電池ごとのロット内ばらつきとロット間ばらつきの関係を示す。図中の「管理No」は製品を識別するための管理番号である。複数の製品を相対的に比較するため、ここでは標準偏差を平均値で割った変動係数を用い、管理番号ごとに各ばらつきの変動係数をプロットして、4象限のカテゴリに分けて電池の特徴を把握した。まず図4の右側の2領域は、ロット内ばらつきの変動係数が各電池の平均値より大きい電池が含まれる。これらの電池は製品の構成要素に由来するばらつきが平均より大きいことから、性能ばらつきの低減は製品の設計変更から着手するのが効果的と考えられる。次に図4の上側の2領域は、ロット間ばらつきの変動係数が各電池の平均値より大きい電池が含まれる。これらの電池は製造環境の変動に由来するばらつきが大きいことから、性能ばらつきの低減は製造プロセスの改善も有効であり、ロット内ばらつきが小さいものほど効果的と考えられる。

このように性能ばらつきをロット内とロット間のばらつきに分解して評価することで、各製品のばらつきの全体像とその要因の把握が可能となる。解析結果に基づいて、ロット内/ロット間のばらつきを低減する製品設計や製造プロセスの改善に繋げることで、各製品の性能ばらつきが改善し、不良率の削減等の品質向上が期待できる。

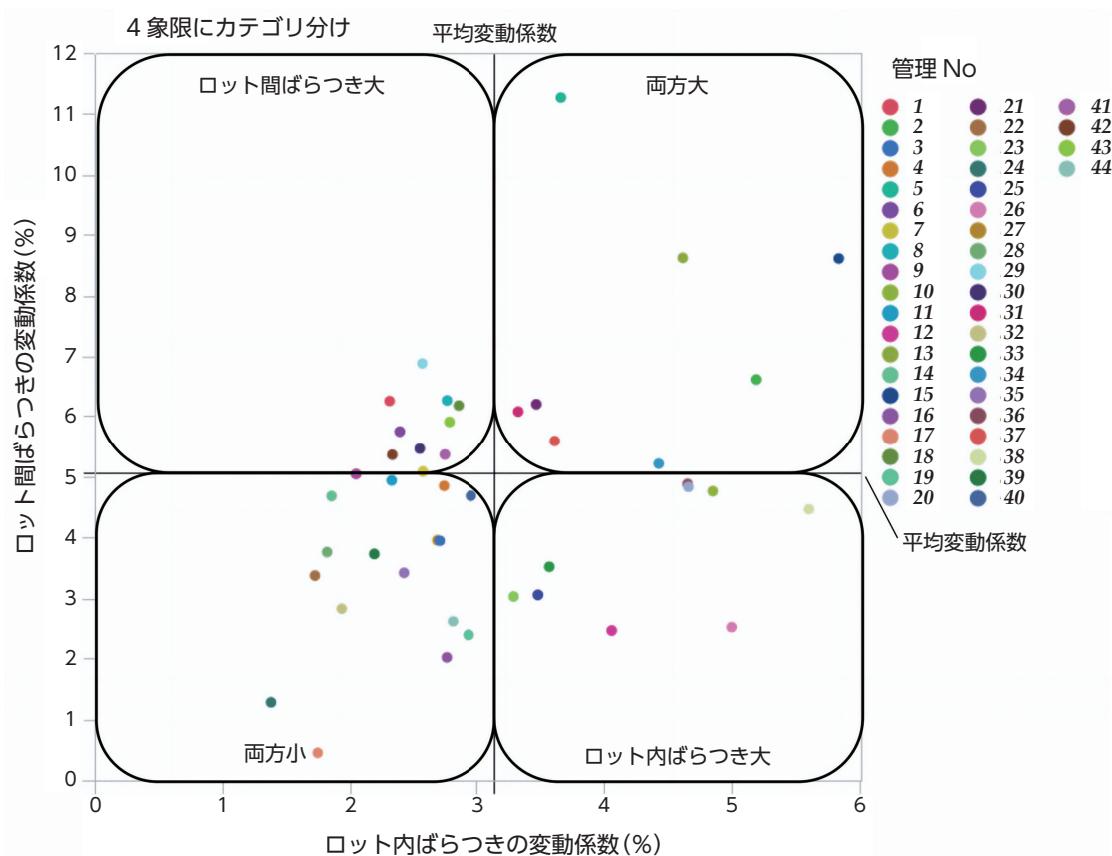


図4 ある放電試験における各電池ごとのロット内ばらつきとロット間ばらつきの関係

## 5 まとめ

当社が推進する提案型蓄電ソリューションに関して、品質保証の側面での取り組み事例を述べた。電池の性能ばらつきをロット内・ロット間のばらつきに分解して評価する手法を確立し、各製品の特徴とその要因の把握が容易になった。今後は、性能ばらつきを改善するための製品設計や製造プロセスの最適化に本技術を活用していく。

### 【参考文献】

- 1) 吉田誠人：EWテクニカルレポート初刊発行に寄せて，Energywith Technical Report 第1号, P.4 (2023)
- 2) 吉田誠人：エナジーウィズテクニカルレポート巻頭挨拶, Energywith Technical Report 第2号, P.4 (2024)
- 3) 大野真秀：COS工程の画像検査技術の確立, Energywith Technical Report 第2号, P.15 (2024)

お問い合わせ先

掲載事項に関するお問い合わせにつきましては、弊社インターネットホームページの下記アドレスのお問い合わせフォームをご利用ください。

お問い合わせホームページアドレス：

<https://www.energy-with.com/inquiry/>

---

Energywith Technical Report 第3号 2025年5月

エナジーウィズ株式会社

〒101-0022 東京都千代田区神田練塀町3 (AKSビル8階) 電話03-6811-6510(代表)

制作 株式会社 日立ドキュメントソリューションズ

---

© 2025 Energywith Co.,Ltd. All rights reserved. Printed in Japan (禁無断掲載)