

2025年度 自動車リサイクルの高度化等に資す  
る調査・研究・実証等に係る助成事業

EVの電池循環を支援する価値顕在化・流通システムの構築

最終報告書

2026年3月27日  
カウラ株式会社

担当者連絡先

担当者名： 仲田 太郎

電話番号： 090-3862-4078

メールアドレス： [tnakata@kaula-lab.com](mailto:tnakata@kaula-lab.com)

## はじめに

項目	内容
事業背景	EV電池の循環市場形成には情報流通の仕組みが必要であるが、電池は進化の途上にあり単なる情報共有は困難。電池価値を最大化し解体/リユース/リサイクル業界が参入可能な市場構築が必要である。
事業概要	電池価値顕在化のための電池性能取得作業とCFP（カーボンフットプリント）管理を効率化するAI/IoTアプリケーション、および、電池価値の流通プラットフォームを開発する。
実施概要	<p>本実証事業は、2023年度からの3か年を通じて技術検証から実務適用、そして社会実装の検証へと段階的に進展した。以下に、本事業の核となる3つの要素に沿って概要を述べる。</p> <p><b>電池価値の流通プラットフォームの構築：</b></p> <p>2023年度より非中央集権型の情報流通プラットフォームの設計に着手した。国際標準規格に沿ったDID（分散型識別子）およびVC（検証可能な資格情報）を採用し、各事業者がデータ主権を維持しつつ情報の真正性を保証できる環境とバッテリーパックからセル単位まで一貫してインターネット経由でアクセスできる実装を完了した。</p> <p><b>電池管理モデルの開発：</b></p> <p>バッテリーの「残存価値」を評価するための「電池管理モデル」の開発をおこなった。排出から診断・出荷に至る回収業務フローを実務レベルで手順化し、物理的な取り扱い品質の作業証跡を情報として付加することで、品質の不確実性を解消する仕組みを整えた。あわせて、単なる残存性能の測定に留まらず、ガウス過程回帰を用いた高度な寿命予測モデルの理論的検証と実データの取り込みまでを実施した。</p> <p><b>業務・診断アプリケーションの開発と現場実証：</b></p> <p>現場の実務効率を劇的に改善するため、「業務・診断アプリケーション」と「測定適正化治具」の開発と改良を3か年継続して実施し、1セルあたりの診断時間を従来の方式に比べて大幅に短縮した。</p> <p>2025年度には、実際のバッテリーを用いた小規模モデル事業の遂行ならびにUI/UX改善を実施し、カーボンフットプリント算定に関わる事務作業を削減し、現業員が容易にシステム操作を完遂できる実用性を立証した。</p> <p>以上、3年間の活動を通じて、使用済みバッテリーを有価物として国内循環させるための具体的な道筋を明らかにした。</p>

## 目次

1. 助成事業の計画 .....	5
1.1 自動車リサイクル業界における事業の位置付け・背景.....	5
1.2 事業の実施内容.....	5
1.2.1 事業計画概要.....	5
1.2.2 事業の実施体制.....	8
1.2.3 事業の実施スケジュール.....	10
2. 助成事業の報告 .....	11
2.1 助成事業実施結果.....	11
2.1.1 概略 .....	11
2.1.2 ユースケースと現状分析.....	13
2.1.3 電池管理モデルの開発.....	27
2.1.4 CO <sub>2</sub> 分析.....	37
2.1.5 業務・診断アプリケーションの開発.....	46
2.1.6 情報流通プラットフォームの開発.....	53
2.1.7 実証と効果検証.....	61
2.2 設備導入内容及び稼働結果.....	75
2.2.1 概略 .....	75
2.2.2 測定適正化治具の開発.....	75
2.2.3 設備の機能と処理能力.....	76
2.2.5 稼働結果のまとめ.....	77
2.3 実施結果を踏まえた考察.....	78
3. 今後の実証事業実施における課題及び解決方法等.....	80
3.1 概略.....	80
3.2 現状の課題.....	80
3.3 課題解決に必要な条件.....	81
3.4 本実証事業の成果とまとめ.....	83
4. 事業化の計画.....	84
4.1 想定する事業.....	84
4.1.1 目指す事業の構造.....	84
4.1.2 サービス内容と提供価値の説明.....	85
4.2 対象市場.....	86
4.2.1 対象市場の概要.....	86
4.2.2 対象市場の規模の整理.....	88
5. 事業の評価.....	89

5.1 採算性の評価.....	89
5.2 有効性の評価.....	92
付録.....	95
付録 1. 使用済みバッテリーの各事業者へのヒアリング結果概要 .....	95
付録 2. 診断結果に対する電子証明書サンプル.....	100
付録 3. ガウス過程による最尤推定の実装 .....	100
付録 4. 電池管理モデルにおけるガウス過程の理論的背景.....	107
付録 5. 実証時の各種計測値 .....	115
付録 6. 標準規格の調査 .....	115
用語集 .....	120

## 1. 助成事業の計画

### 1.1 自動車リサイクル業界における事業の位置付け・背景

世界的なカーボンニュートラルに向けた規制の強化によりハイブリッド車(以下HEV)/プラグインハイブリッド車(以下PHEV)含めた電気自動車以下(EV)への移行が確実となり、EV電池の大量廃棄に対応した循環市場の早期形成が求められるようになってきている。また、使用済みEVに搭載された電池の多くが車両ごと海外に輸出されており、EV電池の海外流出を抑制して国内での再生資源確保の促進も必須となってきた。

EV電池の循環市場を形成するためには、電池価値を最大限顕在化して適切に電池価値を流通する仕組みが必要になる。この仕組みができれば、市場が拡大して電池価値の適正評価が進むだけでなく、どのEVの価値・資源がどのように流通したかも可視化できるようになる。

世界では循環市場と情報流通の仕組みを分けて構築する取り組みも進むが、電池のように情報価値の高い市場では、情報流通の仕組みを作るだけでは意義ある情報は集まってこない。このため、循環市場を形成したうえで、その情報をオープン化することで流通する仕組みが求められる。こうした市場の特性を考慮して、提案事業者らは2023年度までBACEコンソーシアム(Battery Circular Ecosystemコンソーシアム。以下BACEとする。)にて循環市場を形成するための電池価値の計測評価、および、サービス提供による市場化の検討を進めてきた。本事業では、これまで検討してきたソリューションを拡張し、情報をバリューチェーン関係者に流通していく仕組みとなる電池IoT(Internet of Things)ソリューションのプラットフォーム(以下PF)となるシステムを構築する。

現在、EV電池の取り扱い、価値の小さい廃棄物処理に手間をかけている状況にあるが、本事業の提供するシステムにより解体事業では電池を安定的に販売できるようになり、定置型などの他用途利用のリユース事業では高品質・低コスト操業が可能になり、リサイクル事業では電池情報を活用した高効率かつ高付加価値な再生材料生産が可能となる。これにより、電池の廃棄コスト負担の最小化を目指す。

### 1.2 事業の実施内容

#### 1.2.1 事業計画概要

電池IoTソリューションのPFとなるシステムを構築するために、本事業では、電池価値を最大限顕在化して適切な電池価値を流通するIoT型の電池価値計測評価のアプリケーション、および、情報連携して電池価値を多くの企業に提供可能とする基盤となるシステムを構築する。

- (1) 電池価値顕在化のAI(Artificial Intelligence)/IoTアプリケーション開発：定置型などの他用途リユース事業に向けて、電池特性をIoTデバイスで計測診断してネット上でデジタルツイン化し、ユースケースに応じて残存容量を最大限利用可能とし、CO<sub>2</sub>管理をおこなうアプリケーションを開発する。

- (2) 電池価値の流通システム開発：取得したデータを電池バリューチェーンで流通し、他のリユース企業やリユース電池利用企業などが活用可能な情報流通システムを開発する。

ただし、このようなシステムでは、どの事業者がどの製品を誰と売買したのかなどの情報が運営管理者に筒抜けになる。管理者と売買事業者が競合であればこうした市場は成り立たない。一方、進化が止まらず、デファクトが見通せない電池業界で初期段階から標準的な市場を形成することは難しい。特に複数のスタンダードが構築された場合には、市場の連携が困難になる可能性が高い。

この課題を解決するために、本事業ではWeb3を活用して複数のスタンダードが独自に流通を行う際にも、信用ある取引が当事者以外の第三者に個人情報などの秘匿情報の開示なしに連携して情報流通可能な基盤を構築する。この際、使用済み電池は一品一様で相対取引にせざるを得ないが、Web3によりさまざまなアプリケーションをまたがって取引可能とすることで、さまざまな電池価値を異なるスタンダードとなる市場間で自由に取引可能になり、市場の最大化が可能になる。

2023年度～2025年度の実施内容は表1のとおりである。

表1 2023年度～2025年度の実施内容

1年目実施事項	実施内容/目標	実施期間
①ユースケース分析	<p>■内容：電池リユースに関わる事業者、およびデバイスが、電池価値に関するデータを、真正性を保証しながら他社を介さずに交換できるPFとアプリのユースケースの分析</p> <p>■目標：証明書の発行費用削減、アプリの開発工数削減</p> <p>アプリ：電池価値情報およびCFP削減データ交換の効率化</p>	2023年4月～6月
②流通モデル構築・CO <sub>2</sub> 分析・アプリ検討	<p>■内容：電池のバリューチェーンモデル構築し、各プレイヤーにおける診断評価・仕分け・各種計測を行って電池の価値把握。各プロセスでのCO<sub>2</sub>削減効果を算定、CO<sub>2</sub>算定アプリケーションの部分実装</p> <p>■目標：診断評価の効果算定、CFP算定ロジックを具体化、アプリ化</p>	23年4月～12月
③システム構造設計	<p>■内容：現実世界のエンティティがPF上にデジタルツインを作成し、PF内の取引、および現実世界の取引との連携の実現</p> <p>■目標：DT間で電池価値とCFP削減データを送受信の実装</p>	23年6月～9月
④システム開発	<p>■内容：システム構造設計に従ってPFとWebアプリの開発</p> <p>■目標：ユースケース分析を通じて設定した目標の達成</p>	23年8月～12月
⑤設備(診断器, IF)導入検討	<p>■内容：設備を選定・導入して検証し、IFのアプリ要件の検討</p> <p>■目標：短時間で評価できる診断設備を導入、現場での適切な利用管理を行う方法の具体化</p>	23年4月～9月
⑥検証	<p>■内容：PFの検証、アプリの検証</p> <p>■目標：ユースケース分析を通じて設定した目標達成の確認</p>	23年12月～24年3月
⑦報告書取りまとめ	<p>■内容：各社で検討～試験内容を整理し、報告書の取りまとめ</p>	23年10月～24年3月

1年目実施事項	実施内容/目標	実施期間
	■目標：成果と課題が明確になるように整理	
2年目実施事項	実施内容/目標	実施期間
①ユースケース分析	■内容：1年目に引き続き本事業に関連する事業者、特に回収業者の前後の事業者へのヒアリングを実施し業務フローの精緻化とスマートフォン対応などユーザビリティの向上を行う。 ■目標：実証参加アクタの増加、ユーザビリティ向上	24年4月～7月
②電池管理モデルの構築	■内容：バッテリー価値に関するデータの利用シーンとユースケースの分析を行い、特にバッテリーの価値判断に重要となるバッテリー診断・履歴データなどの管理モデルを設計する。 ■目標：バッテリーに関するデータ管理モデル（電池管理モデル）の設計	24年4月～7月
③システム設計・開発	■内容：①②の内容に従ってシステム設計・開発を行う。進捗状況を明確化するためタスクとして抽出する。	24年8月～12月
④CO <sub>2</sub> 分析・システム開発	■内容：リサイクル段階のCO <sub>2</sub> 分析・算定手法を構築、実装する。 ■目標：電池の種類に応じた複数のリサイクルプロセスのCO <sub>2</sub> 算定手法を実用可能とするシステムの開発	24年4月～11月
⑤設備導入	■内容：バッテリー診断に用いる汎用治具の導入と診断アプリケーションの対応。バッテリー利用状況の履歴データの取得機能を開発する。 ■目標：診断業務作業効率の向上、バッテリー履歴データの取得機能開発	24年4月～11月
⑥検証	■内容：拡大したユースケースを実際の業務フローを通して検証する。 ■目標：ユースケース分析を通じて設定した目標の達成有無の確認	24年12月～25年2月
⑦報告書取りまとめ	■内容：各社で検討内容を整理し、報告書として取りまとめる。 ■目標：成果と課題の明確化	24年10月～25年3月
3年目実施事項	実施内容/目標	実施期間
①ユースケース分析	■内容：アプリのユーザエクスペリエンスの改善のためのヒアリングを実施する 国内外の関連組織・団体へのヒアリングを実施する 電池管理モデルの利用シーンのヒアリングを実施する ■目標：情報流通PF・アプリの実際の利用環境とニーズ、改善点を明確にする バッテリー回収に関する品質管理・情報に対する要求の整理をおこなう 関連組織・団体との具体的な連携方針を検討する 電池管理モデル利用ユースケースを詳細化する	25年4月～8月
②標準規格の調査	■内容：バッテリー循環に関する標準規格の調査を実施する ■目標：本PFに必要な要件の抽出をおこなう	25年5月～6月
③UX改善の検討	■内容：各事業者の利用環境に最適なUIの検討を実施する ■目標：各事業者が無理なく必要な機能にアクセスするための機能・要件を抽出する	25年6月～7月
④システム構造設計	■内容：UX改善の検討結果にもとづいたシステム設計を実施する	25年4月～7月

1年目実施事項	実施内容/目標	実施期間
	電池管理モデルに用いるリユースバッテリーのデータ取得機能のシステム設計を実施する カーボンフットプリント算出のための情報連携のシステム設計を実施する ■目標： 検討結果にもとづいたシステム構造の設計がなされる	
⑤システム設計・開発	■内容：上記検討内容に従ってシステム設計・開発を実施する	25年8月～11月
⑥検証	■内容：実際のバッテリーを用いた小規模モデル事業を開始し、次年度開発成果の稼働を確認、本格事業化への評価・課題の抽出をおこなう ■目標：モデル事業での情報流通PFの利用と成果の評価がされる 電池管理モデルとバッテリー情報の連携の確認がされている	25年12月～26年1月
⑦事業化計画・評価	■内容：BACEにおける本PFの事業化の計画の検討をおこなう BACEにおける本PFの事業性の評価を実施する ■目標：BACEにおける本PF事業の展開計画が可視化されている BACEにおける本PFの事業性と課題・解決策の抽出がされている	25年5月～12月
⑧報告書とりまとめ	■内容：各社で実施内容を整理し、報告書としてとりまとめる ■目標：成果と課題が明確になるように整理する	25年8月～26年3月

### 1.2.2 事業の実施体制

2023年度～2025年度の代表事業者、連携事業者の役割分担は表2～表4のとおり。

表2 2023年度の実施体制

法人名	事業者の位置付け	当事業における役割 (実施方法フロー図の通番/具体的役割)	
(A)カウラ(株)	代表事業者 AI/IoTベンダー	実施事項①、③～⑦	①、③、④、⑥の実施ととりまとめ、報告作成
(B)株アクト	共同事業者 リサイクラー	実施事項①、⑤～⑦	⑤の実施ととりまとめ、報告作成、①、⑥の担当
(C)東京大学	共同事業者	実施事項②、⑦	②の実施ととりまとめ、報告作成
(D)株日本総合研究所	共同事業者	実施事項①、②、⑤～⑦	バリューチェーン事業検討と⑦のとりまとめ、各業務の連携と推進役

法人名	事業者の位置付け	当事業における役割 (実施方法フロー図の通番/具体的役割)
<p>連携イメージ図</p>		

表 3 2024 年度の実施体制

法人名	事業者の位置付け	当事業における役割 (実施方法フロー図の通番/具体的役割)	
(A) カウラ(株)	代表事業者 AI/IoT ベンダー	実施事項：①②③ ⑥	プロジェクトリード
(B) (株)アクト	共同事業者 リサイクラー	実施事項：⑤	
(C) 東京大学	共同事業者	実施事項：④	
(D) (株)日本総合研究所	共同事業者	実施事項：⑦	事業検討とプロジェクトの推進
<p>連携イメージ図</p>			

表 4 2025 年度の実施体制

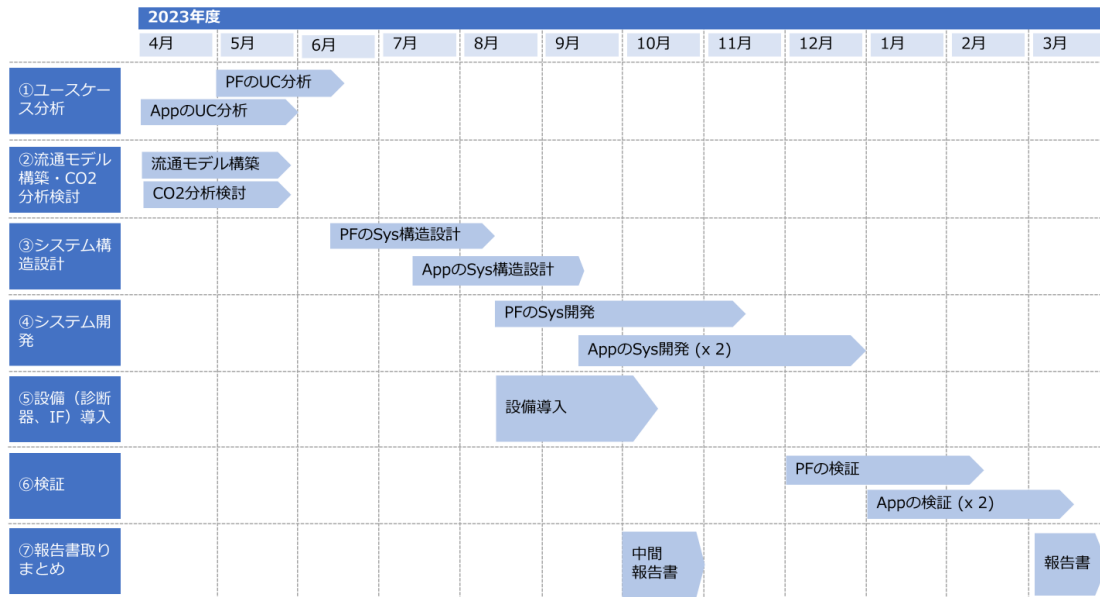
法人名	事業者の位置付け	当事業における役割 (実施方法フロー図の通番/具体的役割)	
(A) カウラ(株)	代表事業者 AI/IoT ベンダー	実施事項：①②③ ④⑤⑥	プロジェクトリード
(B) (株)アクト	共同事業者 リサイクラー	実施事項：①②	
(C) 東京大学	共同事業者	実施事項：④⑥	
(D) (株)日本総合研究所	共同事業者	実施事項：⑦⑧	事業検討、プロジェクト推進

法人名	事業者の位置付け	当事業における役割 (実施方法フロー図の通番/具体的役割)
連携イメージ図		
		<p>プロジェクトリード</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.ユースケース分析</li> <li>2.標準規格の調査</li> <li>3.UX改善の検討</li> <li>4.システム構造設計</li> <li>5.システム設計・開発</li> <li>6.検証</li> </ol> <p>カウラ 代表事業者</p> <p>日本総研 プロジェクト推進 7.事業化計画・評価 8.報告書取りまとめ</p> <p>アクト</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.ユースケース分析</li> <li>2.標準規格の調査</li> <li>3.UX改善の検討</li> <li>6.検証</li> </ol> <p>東大</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4.システム構造設計</li> <li>6.検証</li> </ol>

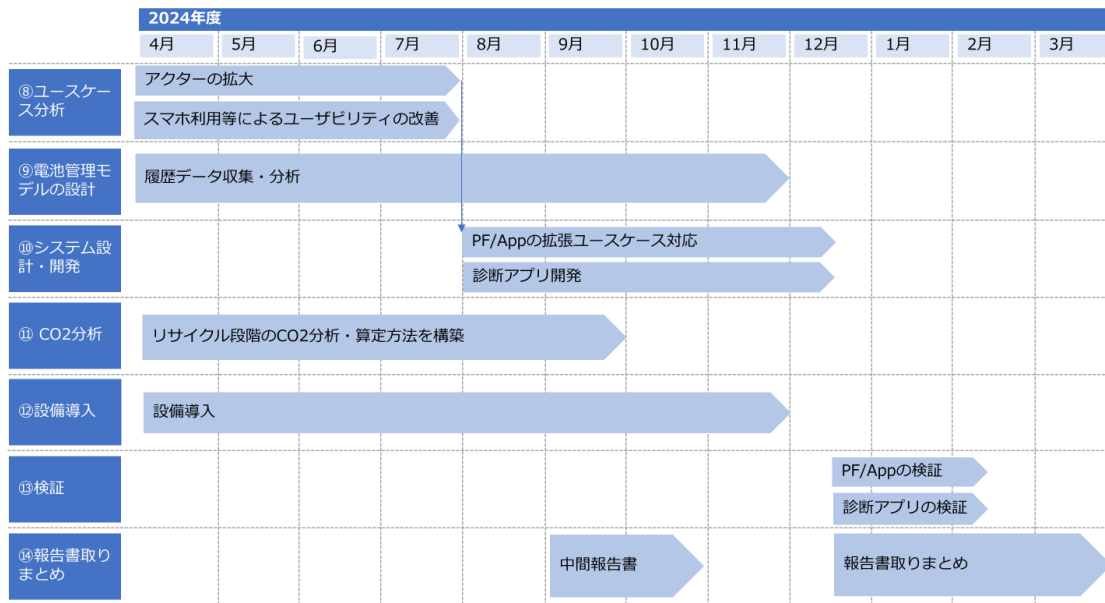
### 1.2.3 事業の実施スケジュール

2023年度～2025年度の実施スケジュールは上記1.2.1記載と以下のとおり。

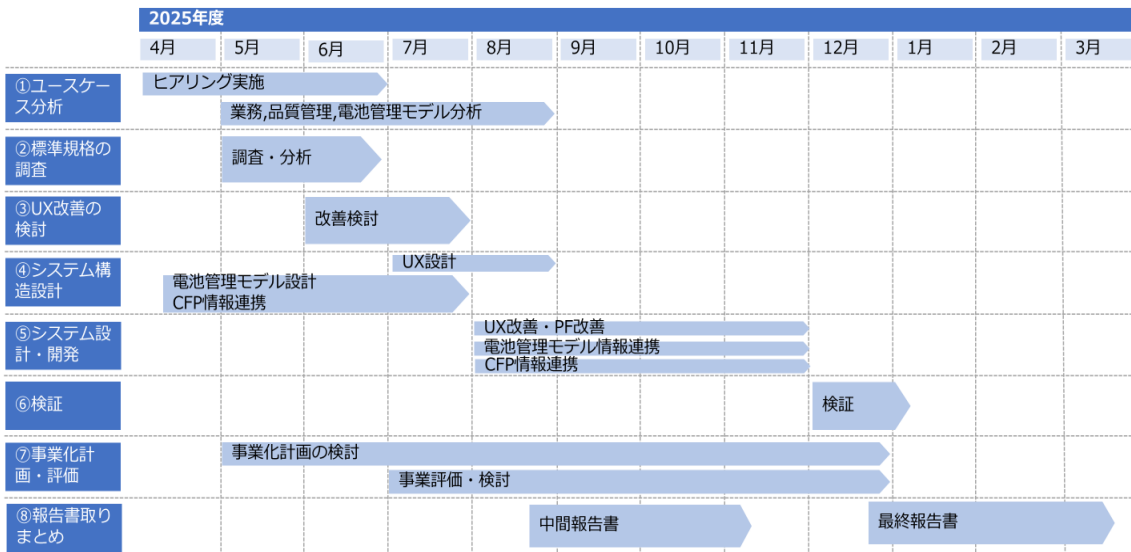
#### 2023年度実施スケジュール



#### 2024年度実施スケジュール



## 2025年度実施スケジュール



## 2. 助成事業の報告

### 2.1 助成事業実施結果

#### 2.1.1 概略

本事業は、2023年度から2025年度までの3か年にわたりEVバッテリーの循環市場形成に不可欠な「価値の顕在化」と「情報の真正性担保」を実現するプラットフォームの構築および実証に取り組んだ。具体的には、現状の課題特定のためのヒアリングを実施したうえで、それぞれの課題にプラットフォームが実用に耐えることを確認しながら実証を行った。

実証の初期段階である2023年度は、Web3技術を用いた非中央集権型の情報流通プラッ

トフォーム「Battery Web」の設計と、高速診断アプリの開発を実施した。続く 2024 年度は、解体・回収業者の現場における保管場所の不足といった物理的制約を反映し、実務フローの精緻化、測定適正化治具の開発とガウス過程回帰を用いた高度なバッテリー寿命予測モデルの検討を推進した。また、回収からリユースを前提とした分解・診断作業に伴う CO<sub>2</sub> 排出量について調査と実証における測定を実施した。最終年度となる 2025 年度には、各事業者の利用環境に適した UI/UX の改善を図るとともに、実際のバッテリーを用いた小規模モデル事業を遂行し、有価取引の成立性と関連国際規格や各種制度連携のあり方を検討した。

3 年間の成果として、技術・実務の両面で当初目標の診断・CO<sub>2</sub> 排出量収集業務の効率化を達成し、情報流通プラットフォームの開発を実施した。本事業を通じて、各ステークホルダーの関心は「情報の不透明さの解消」から「実務的な有価取引の確立」へと進展した。これにより、使用済みバッテリーを「廃棄物」ではなく信頼性の高いデータにもとづく「有価物」へと再定義し、国内での安定的な資源循環と経済合理性を両立させる実務的な最低限の基盤を確立した。

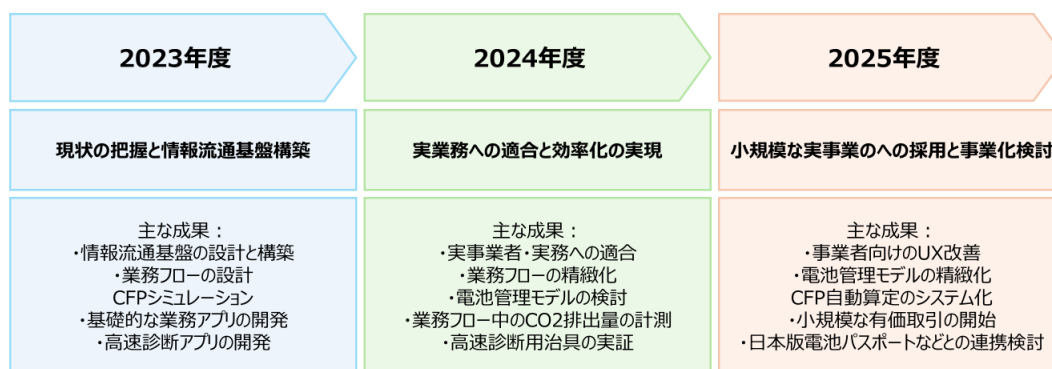


図 1 3 か年の実証活動の概要

各年の実施内容を以下に分類したうえで、各項について実施結果を報告する。

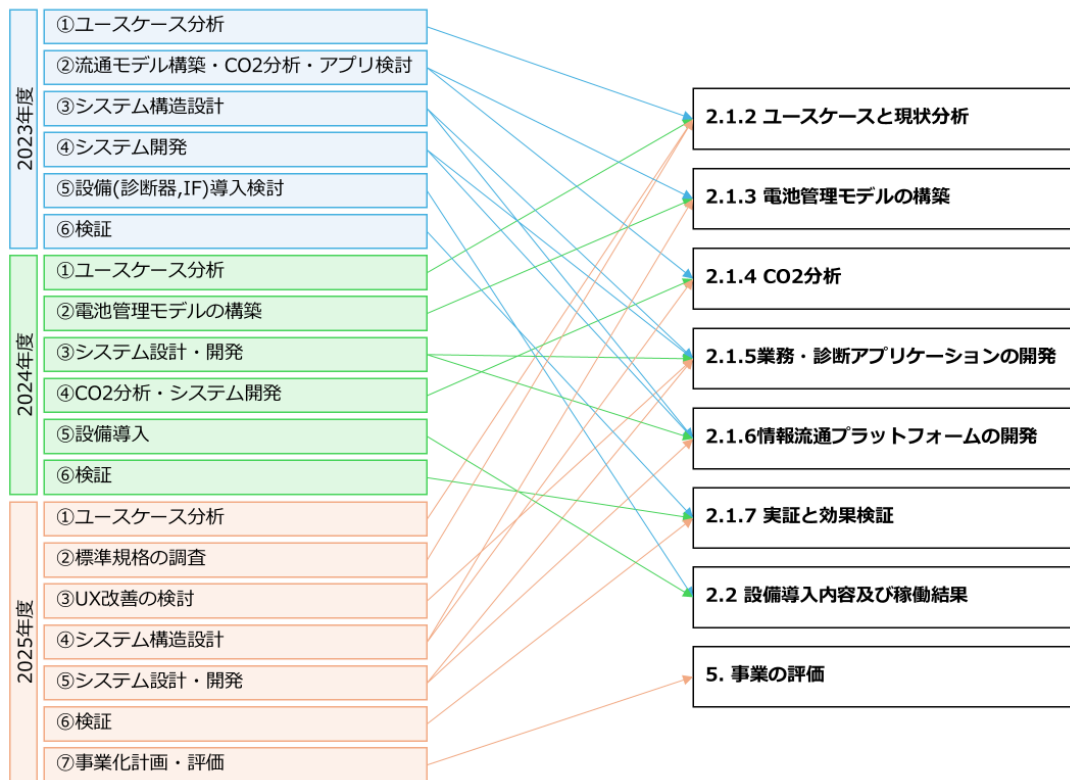


図 2 各年の実施内容と報告各項の対応

## 2.1.2 ユースケースと現状分析

### 2.1.2.1 概略

本項では、3 か年計画における実施項目「ユースケース分析」の成果を統合して報告する。本事業では、年度ごとにステークホルダーの課題に応じ、段階的に現状分析と実際の業務内容の精緻化を行った。

#### 各年の実施内容：

##### 2023 年度：基礎分析と課題の構造化（項目：①ユースケース分析）

主要アクター（自動車解体業者、回収業者、リユース製造業者等）への初期ヒアリングを実施し、電池性能の不透明性や情報連携の欠如といった共通課題を特定し、Web3 技術による情報流通の必要性を定義した。

##### 2024 年度：実務フローの精緻化と物理的制約の特定（項目：①ユースケース分析）

実証範囲を拡大し、現場の物理的制約（保管場所の不足、消防法適合への投資負担等）を具体的に特定した。これらにもとづき、効率的な物流モデルの検討とユーザビリティ向上に着手した。

##### 2025 年度：実用化に向けた UX 改善と制度連携の検討（項目：①ユースケース分析、②標準規格の調査）

有価取引の本格化を見据え、UI の最適化に関するヒアリングを深化させた。また、関連する国際規格との整合性調査を実施したうえで、日本国内における「To-be 像」を確立した。

### 2.1.2.2 事業者へのヒアリング

本実証事業の重要事項である「現場の実務に即したシステム構築」を実現するため、使用済みバッテリーの静脈バリューチェーン上の各事業者に対して継続的なヒアリング調査を実施した。以下に、調査の目的、対象、および年度ごとの課題推移の概略をまとめる。なお、事業者ごとのヒアリング概要については本報告書の付録を参照されたい。

#### ● 調査の概要と対象

本調査は、EVバッテリーの循環市場形成におけるボトルネックを特定し、開発するアプリケーションの実用性向上およびビジネスモデルの検証に反映させることを目的とした。ヒアリング対象は、以下の4つの主要事業者とした。

- ・ 自動車解体業者（排出業者）：バッテリーの発生源であり、回収依頼や初期情報の登録を担う
- ・ バッテリー回収業者：排出業者より使用済みバッテリーを回収し、保管、分解、診断、仕分けの実務を担う
- ・ リユースバッテリー製造業者（需要家）：診断済みセルを用いた製品化を担い、情報の信頼性を最も重視する。
- ・ リサイクル・処分業者：資源循環の最終工程を担い、組成情報や処理効率の向上を求める

#### ● 3年間における関心事と課題の推移

ヒアリングを通じて、各事業者のニーズは年度を追うごとに「抽象的な期待」から「実務的な要求」へと具体化した。

- ・ 2023年度（情報の不透明さの解消）：初期段階では、バッテリーの残存性能（以下 SoH）が不明であることへの懸念が中心であった。情報の有無そのものが課題とされ、実用的な診断技術への期待が寄せられた
- ・ 2024年度（物理的・実務的制約の顕在化）：実証が進むにつれ、大型バッテリーの保管場所不足や消防法適合への投資負担といった、現場の物理的な制約が大きな論点となった。また、回収依頼に伴う事務作業の煩雑さや、物流コストの最適化が強く求められるようになった
- ・ 2025年度（有価取引の本格化と制度連携）：最終年度には、診断結果にもとづく「有価取引」をいかに安定させるかに関心が移った。規制・制度の動向、およびカーボンフットプリント（以下 CFP）の可視化といった、実運用への適応が実務上の必須要件として認識されるに至った

事業者全体をとおして、使用済みバッテリーのリユースを前提とした有価取引には総じて関心が高く本実証にも積極的な協力を仰げた。しかし、各事業者の規模や拠点において、それぞれの事業に対する考え方は異なることも理解できた。とくに解体事業者においては小規模事業者と大規模事業者や工場敷地の大小によっても課題感が異なり、事業化に際しては、各事業者の事情に合わせたサービス提供を行う必要がある。

表 5 年度ごとの現状の変化と課題の推移

区分	2023 年度	2024 年度	2025 年度
主な関心事	バッテリー状態が不明	具体的な取り扱い	有価取引と効率化
情報の性質	情報そのものの有無	作業証跡・品質管理情報	バッテリーパスポート・CFP
物理的課題	取り扱い方法が不明	保管場所の不足・消防法対応	地域回収拠点の最適化
取引形態	廃棄物・自再協ルート	試験的な有価取引	安定的な流通の確立

### 2.1.2.3 課題の整理

ヒアリングの結果を踏まえて、使用済みバッテリーの流通と今後の流通量増加に伴って考えられる課題とリスクを整理し、現状の流通の実態にマッピングをした現状を以下に提示する。

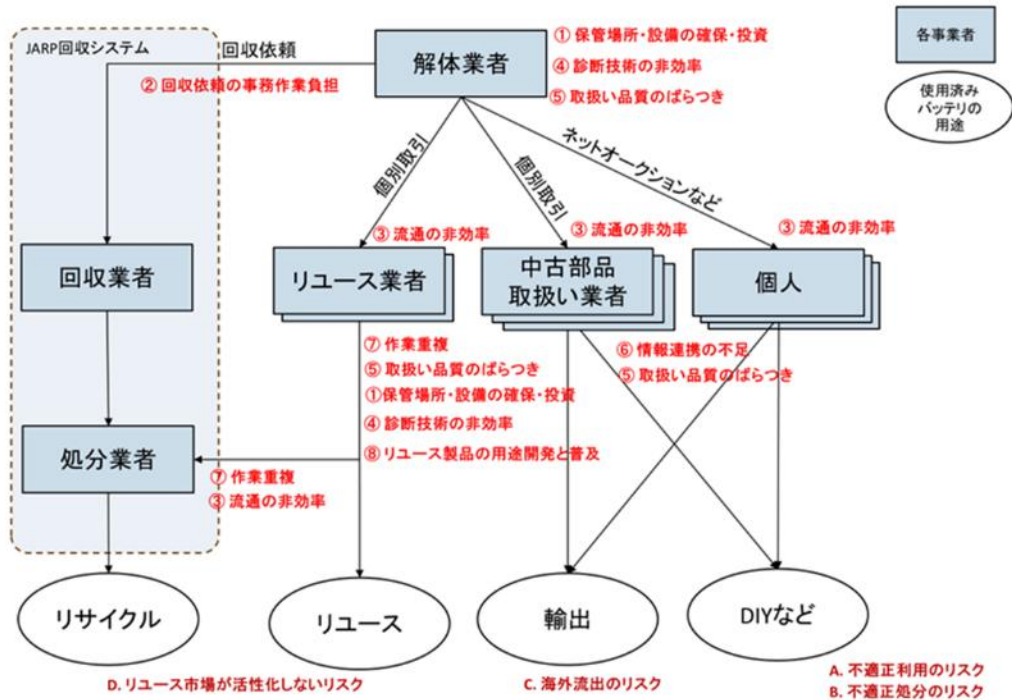


図 3 使用済みバッテリーの流通の現状と課題・リスク

表 6 リスクの概要

	リスク	リスクの概要	本事業による対応・解決策
A	不適正利用のリスク	個人など、リチウムイオンバッテリーに関する専門的な知識や設備を持たないまま、安全基準や設計条件から逸脱した状態で利用し事故が発生する	使用済みバッテリーの取り扱い履歴を管理し、DID/VC を用いたデジタル証明書により、診断者や作業者の身元と技術水準を管理する。基準を満たした適正な事業者間でのみ流通する環境を構築する。

	リスク	リスクの概要	本事業による対応・解決策
		リスク	
B	不適正処分のリスク	廃棄・処分の過程で法令や安全基準に従わず、適正な分別・回収・処理が行われないことによって発生する事故・環境汚染・責任問題などのリスク	排出から出荷まで「いつ、だれが、どう扱ったか」の作業証跡を情報流通プラットフォームで管理する。また、セル単位の追跡性を用いて、管理責任の所在を明確化する。
C	海外流出のリスク	使用済みバッテリーが、適正な管理・手続きを経ずに国外へ流出することで生じる、経済安全保障・環境・経済面でのリスク	高速診断技術や CFP 記録作業の自動化により管理コストを低減し、国内循環の「経済合理性」を確立する。廃棄物ではなく「有価物」として国内市場で取引可能な基盤を整える。
D	リユース市場が活性化しないリスク	経済的・制度的・技術的な要因により、使用済みバッテリーのリユースが進まず、資源循環・環境負荷低減・産業競争力の各面で国内に損失が生じるリスク	寿命予測の可視化を通して製品保証や保険の客観的根拠を提供する。Web3 技術によりデータ主権を保護し、競合他社間でも安心してデータ連携・取引ができる環境を実現する。

表 7 課題の概要と解決案

	課題	課題の概要	解決案
①	保管場所・設備の確保・投資	<ul style="list-style-type: none"> <li>解体したバッテリーを、一時的に保管する場合の保管場所の確保が困難な業者が出始めている</li> <li>保管する使用済みバッテリーが増加すれば、消防法に対応するための保管設備への追加投資が必要となる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>排出業者で保管する使用済みバッテリーを減少させるために、使用済みバッテリーの回収頻度を増加する</li> <li>回収拠点をエリアごとに配置し、輸送コストの低減をはかる</li> <li>保管設備を回収拠点に集中的に配置し、投資効率を高める</li> </ul>
②	回収依頼時の事務作業負担	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用済みバッテリーの回収依頼の情報収集・登録などの事務作業の負担が増加する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>有価での取引量を増加させることで作業量に見合う費用を確保する</li> </ul>

	課題	課題の概要	解決案
③	流通の非効率	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 複数取引先との個別取引の場合、都度輸送が必要となる</li> <li>・ 梱包など取引先ごとに対応が異なり、作業の煩雑化をまねく</li> <li>・ 処分業者においても、少量・不定期の回収は保管の非効率が発生する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 回収業者を配置した流通経路とすることで、輸送の集約を図る</li> <li>・ 梱包方法・手順を共通化し、効率化を実現する</li> <li>・ 回収拠点をエリアごとに配置し、輸送コストの低減と回収頻度を高める</li> </ul>
④	診断技術の非効率	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ バッテリーの状態を診断するのに手間がかかる、もしくは高速かつ簡易に診断する手法が確立されていない</li> <li>・ 診断装置への投資が必要となる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高速・効率的に診断可能なシステムを開発・導入する</li> <li>・ 診断基準の共通化、診断装置の集約を行い、全体の投資コストを抑制する</li> </ul>
⑤	取り扱い品質のばらつき	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 使用済みバッテリーの保管手順、取り扱い手順などが業者ごとに異なり、バッテリーの品質に影響を与えることが考えられる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ バッテリー品質維持のための取り扱いの手順化・共通化を実施して、業者ごとの取り扱い方法を統一し効率化を実現する</li> <li>・ 手順にそった記録を管理し、利活用する</li> </ul>
⑥	情報連携の不足	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 解体時の車両情報や検品、診断情報などが連携されない、もしくはばらばらの形式で提供され、必要な情報を収集作業が煩雑になる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 取り扱い手順に沿った情報管理と収集方法の共通化をはかり、情報連携基盤を用いて業者間の連携を実現する</li> </ul>
⑦	作業の重複	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 外観検査など作業実施内容がまちまちで、作業の重複、非効率が発生している</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 情報管理と収集方法の共通化をはかり、業者間の連携を実現する</li> </ul>
⑧	リユース製品の用途開発と普及	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現時点でのリユースバッテリー製品の实用事例は限定的で、さらなる用途と品質保証面での製品開発をする必要がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 適切な品質管理をされた使用済みバッテリー流通の拡大をすること、リユース過程での品質管理の可視化し、保証制度の拡充・製品の安全性の確保をおこなう</li> </ul>

各ステークホルダーへのヒアリングを通じて、使用済みバッテリーの流通過程での情報管

理、取り扱いの標準化や客観的な評価手法の不在といった課題が浮き彫りとなった。本実証で構築した「情報流通プラットフォーム」は、これらの課題や実務に耐えることを重視し、使用済みバッテリーのリユースに関する標準規格（付録6参照）の分析なども参考して実証を進めた。

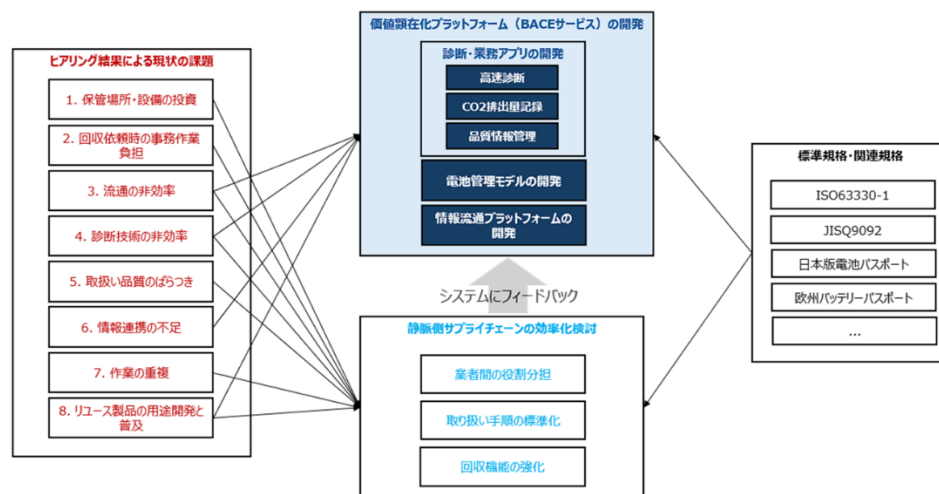


図 4 現状分析と本実証へのフィードバックの関係

#### 2.1.2.4 想定される使用済みバッテリーの流通イメージ(to-be 像)

本実証事業が描く静脈バッテリー物流の to-be 像は、エリアごとに一時保管を行う「回収拠点」を配置し、個別の排出業者（解体業者など）から小口・不定期に発生するバッテリーを集約することにより、幹線輸送の積載率を向上させ、重量物かつ危険物であるバッテリーの輸送コストを抑制する。また、情報流通プラットフォームを通じて回収依頼や在庫状況をリアルタイムに共有し、回収頻度を高めることで、排出業者の保管場所ひっ迫という物理的課題を解消する。回収拠点では、集約的にバッテリーの分解・診断作業を行うことで、取り扱い品質を確保するとともに、高価な診断装置や設備の投資を集中・効率化する。

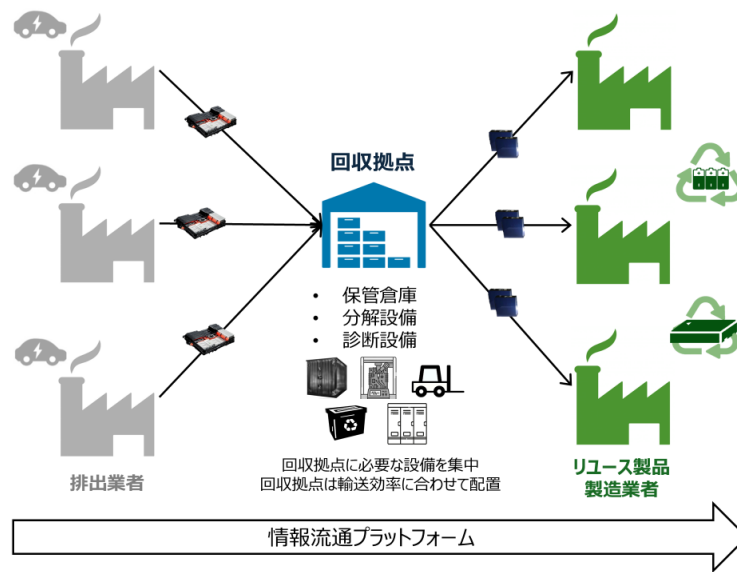


図 5 本実証における物流の to-be 像

情報流通の to-be 像は、Web3 技術と高速診断技術を融合した非中央集権型の情報連携を実現する。特定の管理者への依存を抑え、データの真正性と所有者の主権を保ちながら、解体後のセル単位までの追跡性を確立する。これにより、信頼できる情報にもとづく迅速な有価取引を可能とし、国内における経済合理性と環境価値の両立を実現する。

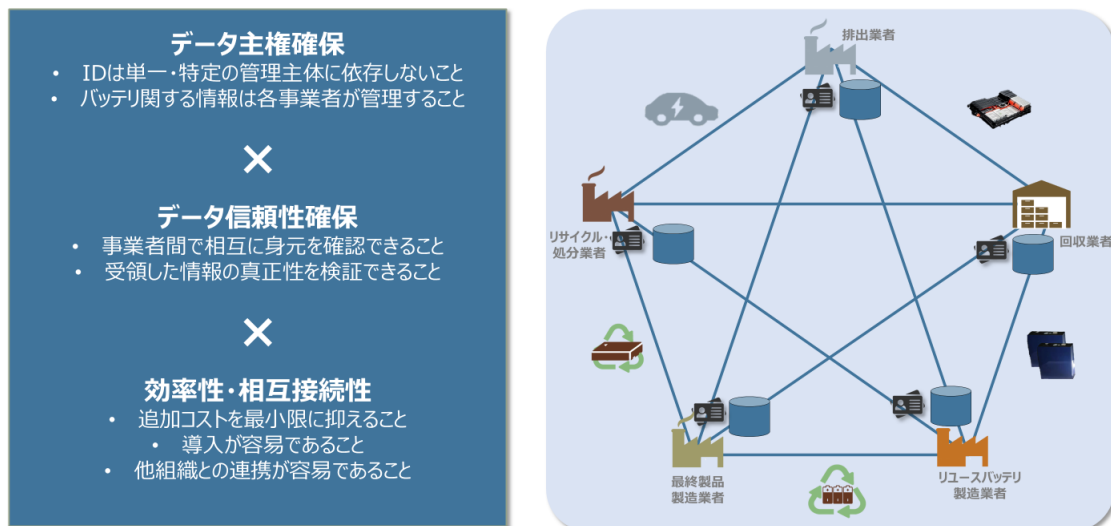


図 6 本実証における情報流通の to-be 像

例えば地方自治体や業界団体が想定される。本実証で開発した Battery Web を活用すれば、自治体がオーソリティとしてデジタル証明書を発行することで、特定の民間プラットフォームに依存せず、地域の信頼をデジタル上で証明できるようになる。これにより、国が

定めた安全・品質基準にもとづき、自治体が地域の事業者を認定・統治するという「重層的ガバナンス」が実現し、信頼できる地域資源循環市場の形成が加速される。

### 2.1.2.5 本実証事業のサービスモデル

本実証事業のサービスモデルは、Web3 技術を基盤とした情報流通プラットフォーム「Battery Web」を基盤とし、当初サービスとして使用済みバッテリーの「信頼性の高い情報管理サービス」と「診断サービス」を一体的に提供するものである。特定の管理主体に依存せず、バリューチェーン上の各事業者が自律的にデータを管理・活用できる非中央集権的なモデルを特徴とする。

下図に示す3層構造を組み合わせることで、さまざまなプレーヤーが独自のサービスを展開できるように設計されている。例えば、使用済みバッテリーの保証・保険、使用済みバッテリーの需給予測・在庫管理などの適応領域の拡大が想定される。

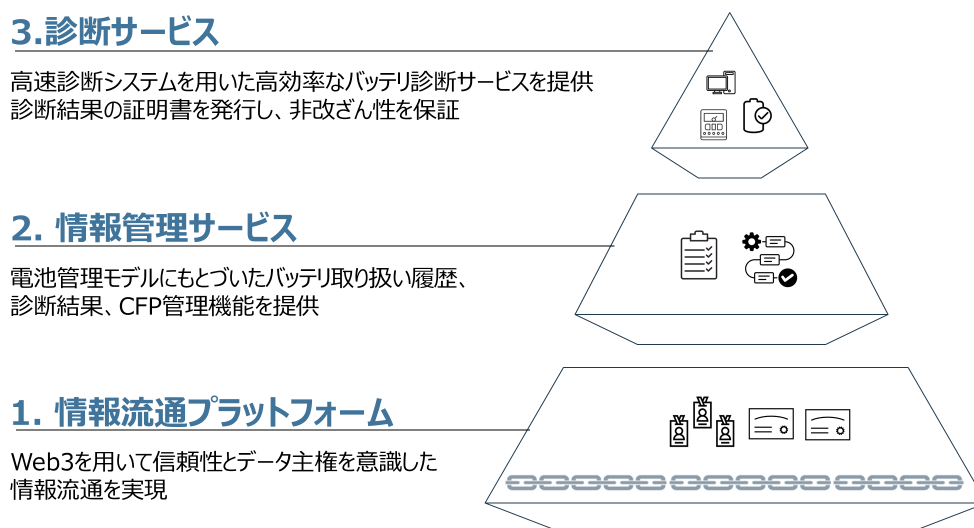


図 7 本実証事業のサービスモデル

#### 1. 情報流通プラットフォーム (Battery Web)

バリューチェーン全体を繋ぐデジタル基盤であり、World Wide Web Consortium (以下、W3C) 国際標準の分散型識別子(Decentralized Identifier、以下 DID) および検証可能な資格情報(Verifiable Credentials、以下 VC)を採用している。

- ・ データ主権の確立: 情報の所有者が開示範囲を制御できる仕組みを構築し、「公開 VC」と、機密性の高い診断データなどの「非公開 VC」を二層で管理する
- ・ バッテリーの識別・追跡: 「Battery URL」の定義により、パックからセル単位へと解体・再構成される過程においても、個体の履歴を一意に特定・継承できる追跡性を実現している

## 2. 情報管理サービス

使用済みバッテリーのサプライチェーンに携わる事業者と情報をデジタルツインとして管理し、製品の信頼性と付加価値を高める。

- ・ 電池管理モデル：排出時の車両情報（走行距離など）から、回収・分解・輸送・保管の各工程における作業証跡を記録し、品質保証の根拠資料として提供する
- ・ CFP 自動算定サービス：物流データや電力消費データを自動収集・集計し、カーボンフットプリント（CFP）を効率的に算出する。これにより、リユースによる CO<sub>2</sub> 削減効果を可視化し、環境価値の取引を支援する

## 3. バッテリー診断サービス

解体から回収・使用済みバッテリーの測定・診断にもとづく診断サービスを提供する。

- ・ 高速診断：交流インピーダンス法などの診断アルゴリズムと専用の連装治具を導入し、高速・高効率な診断サービスを提供する
- ・ 証明書発行：計測データにもとづき、バッテリーの残存性能を客観的に評価し、改ざん不能なデジタル証明書を発行する。これにより、リユース製品の製造業者が安心してバッテリーを調達できる環境を提供する

表 8 主なサービスの利用者

アクター名	役割とサービスの価値
自動車解体業者	<b>役割：</b> 廃車からバッテリーパックを取出し車両情報（車台番号、走行距離など）とともに回収を依頼する役割を担う。 <b>サービスの価値：</b> 情報を付加することで高付加価値での売却が期待できる迅速な回収サービスを楽しむことができる
バッテリー回収業者	<b>役割：</b> 静脈物流の拠点となり、情報の結節点である。排出されたパックの回収、分解、診断、およびリユース適否の仕分けを担当する。 <b>サービスの価値：</b> 情報を付加することで高付加価値での売却が期待できる設備への初期投資を抑えて業務の効率化を可能とする
リユースバッテリー製造業者	<b>役割：</b> バッテリーの需要家として、回収業者から供給されたセルやモジュールを活用し、定置型蓄電池などのリユース製品を製造・販売する。 <b>サービスの価値：</b> 解体・回収・分解・診断の各工程における情報を集約して利用することで、自社製造製品の品質向上を計る信頼できる情報を用いることで、リユース製品の製造にリソースを集中することができる
リサイクル・処分業者	<b>役割：</b>

アクター名	役割とサービスの価値
	リユースに適さないバッテリーや解体後の部材を回収し、再資源化または適正な最終処分をおこなう。 <b>サービスの価値：</b> リサイクル前の分別時に分解されたバッテリーセルの型式の識別の効率化に役立てる
一般消費者	直接のサービス利用者ではないが、品質管理と追跡性を確保し安全なリユース製品を利用することが可能となる

表 9 サービスの提供者・運営者

アクター名	概要・役割
診断サービス提供者	専門的な診断技術の提供者で、クラウド上で高速診断アルゴリズムを運用し、検証可能な診断結果証明（VC）を発行する。
プラットフォーム・アプリ運営者	診断・情報管理アプリ、プラットフォームの提供と運営を実施する主体
サービス提供者	本サービスを包括的に提供する主体。BACE 事業体

### 2.1.2.6 非中央集権の必要性

本項では、本実証で実現する Web3 技術を用いた非中央集権の情報流通プラットフォームの必要性について解説する。

#### ・ 安心安全なデータスペース

下図は自動車リサイクルにおけるバッテリーのリユース、リサイクルの流れである。この図ではサプライチェーンのアクターたちが1対1でつながっているが、実際にはN対Mで接続しており、また静脈系では動脈系と比べて小規模の、お互いをよく知らないアクターが多いことから、複数の取引先の身元（アイデンティティ）の識別を安全確実かつ低コストで行うことが重要となる。またリユースバッテリー製造業者から見たバッテリー診断業者のように直接取引がない者の身元が明らかになることは診断結果の信憑性に関わる重要事項である。またバッテリーパック、セル、再生バッテリー、再生製品（ここでは定置型バッテリー（Energy Storage System、以下 ESS）で代表）の個体を識別する識別子も不可欠である。

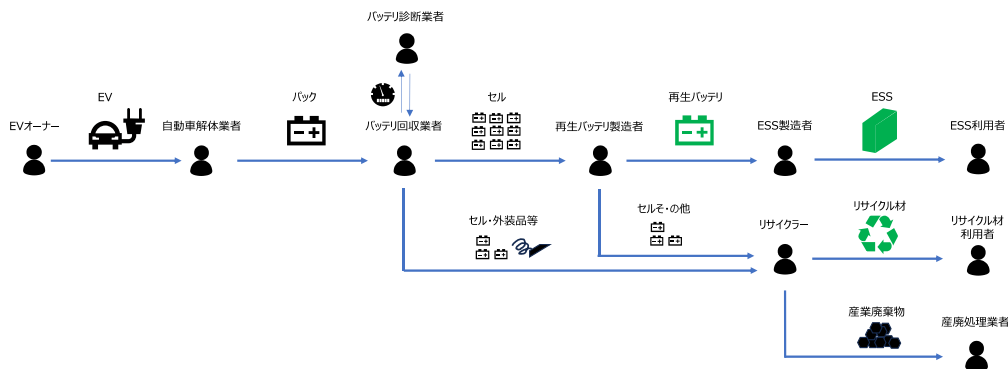


図 8 バッテリーのリユース・リサイクルフロー

このようなN対Mのアクターたちによるネットワーク内で情報共有をする場合、情報提供者と情報利用者の関心事は以下のように要約される。

- ・ 情報提供者：情報提供に関わるリスクを最小化しつつ、必要な相手とは適時情報を共有したい。
  - ・ 情報のオーナーシップを維持したい
  - ・ 開示範囲の自分で選択したい
  - ・ 上記に関わるコストを最小化したい
- ・ 情報利用者：信頼できる情報を見極め、最大限の価値を引き出したい。
  - ・ 情報の真正性を確保したい
  - ・ 情報のインテグリティ（改竄されていないこと）を確保したい
  - ・ 上記に関わるコストを最小化したい

互いに相手を知らない複数のアクターたちが情報交換するためのネットワーク構成として、図 12 に 3 つの類型を示した。

(A) では中央集権的なアクターから付与された識別子（例えば Google から付与された Gmail アドレス）を使ってアクター同士が直接情報交換するが、情報発信者の身元（アイデンティティ）保証が限定的であることから情報利用者が情報の真正性に確信を持ってない問題がある。

(B) では中央集権的なアクターG（例えば単独の企業が運営する SNS サービスなど）から付与された識別子を使い、アクター同士はGを介して情報交換する。この場合は情報発信者の身元は中央集権的に最低限保証されており（プラットフォームによる簡易的な保証なので、例えば相手が本当にA社に勤務しているかは疑わしい。そのような保証はA社によってなされるべきである）、また情報の改竄もないことから、情報利用者には情報の真正性、インテグリティが保証される。しかし情報提供者は発信する情報をすべて中央集権的なプラットフォームに把握されるため情報のオーナーシップを失うことになる。

(C) では個々のアクターが自分で識別子を生成し、直接情報交換する。識別子の真正性は複数の団体によって運用される台帳（例えばブロックチェーンネットワーク上の Verifiable Data Registry（以下、VDR））に登録された公開情報（識別子に紐づく公開鍵など）によって保証される。またアクターの身元はユースケースに応じて適切なオーソリティ（例えば行政機関、金融機関、大学、勤務先、サービスネットワークの幹事組織など）から発行される証明書によって保証される。

(B)、(C) のような情報交換ネットワークはデータスペースと呼ばれることがあり、真正性、インテグリティを確保するための管理情報を交換するコントロールプレーンとアクター同士のユーザーデータを交換するデータプレーンから成る。(B) のようにコントロール

プレーン、データプレーンの両方がプラットフォームの管理下にある場合、情報提供者は情報のオーナーシップを失う恐れが大いにあるが、(C)のようにコントロールプレーンのみがプラットフォームの管理下でありデータプレーンはユーザー同士の直接の通信により行われる場合はその可能性は少ない。

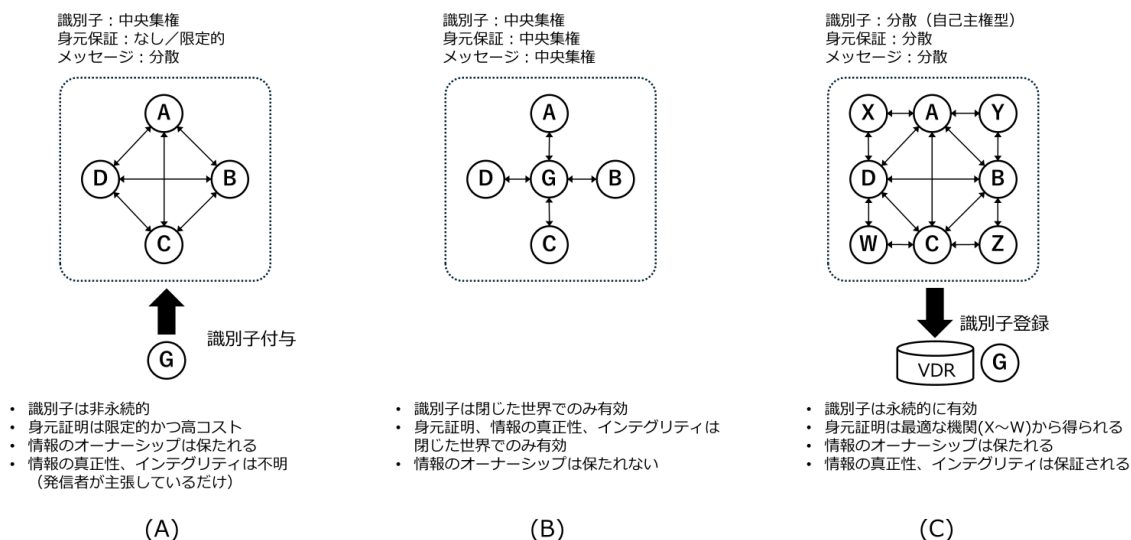


図 9 情報交換ネットワークの類型

(B)のネットワークはWeb2の世界で多く見られるが、プラットフォームにデータをすべて差し出す必要があることから問題視されており、欧米を中心に企業の機密データを交換するような用途において(C)のWeb3型ネットワークの有用性が認められている。

例えば欧州のCatena-Xは、図10、11に示すように、信頼性、相互運用性、データ主権を重視した、組織や企業間の安全で持続可能なピアツーピアのデータ交換を行うためのプラットフォーム提供している。「データ主権 (data sovereignty)」とは、データ提供者が利用者、利用条件を個別に決定、管理できることを意味する。データの提供者と利用者は、EDC (Eclipse Data Connector)を通じてデータ交換に関する契約を結び、データの授受を行う。契約はEDCのコントロールプレーンでやり取りされるが、ビジネスデータはデータプレーンを通じて提供者と利用者間で直接送受信され、Catena-X Federated Operating Environment、つまりプラットフォームが関与することは無い。

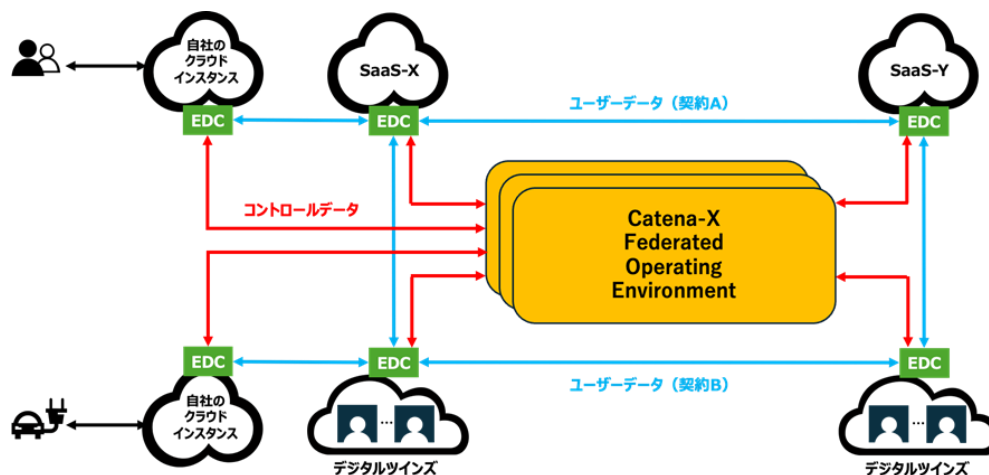


図 10 Catena-X 概略図

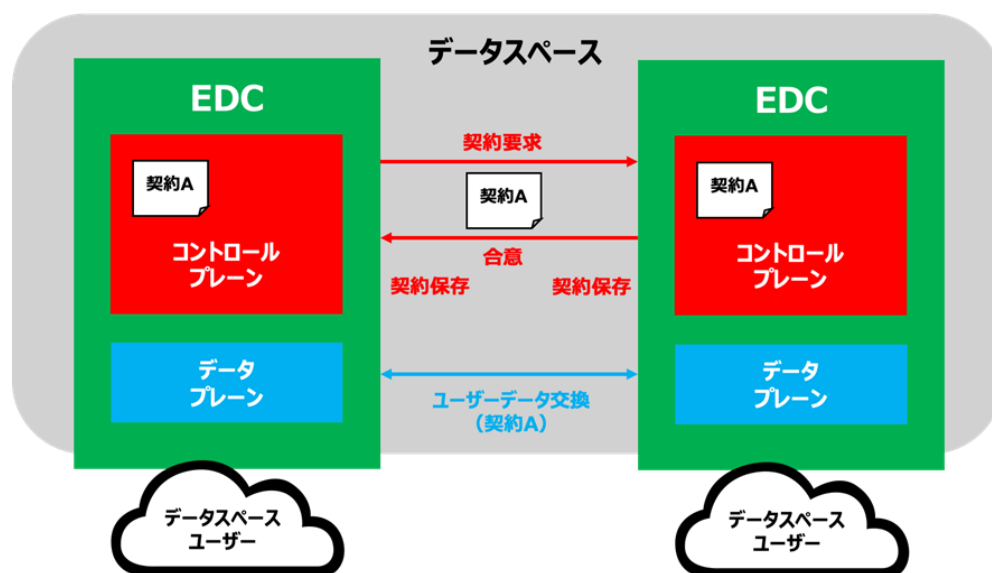


図 11 Catena-X Eclipse Data Space Connector(EDC)

本実証の使用済みバッテリーの情報流通プラットフォーム（ITプラットフォームと流通エコシステム）においてもコントロールプレーンとデータプレーンを分けることで情報提供者と利用者の双方の利益に供する（C）型ネットワークを提供している。具体的には、コントロールプレーンについては国際標準（W3C DID/VC）に準拠した証明書（対象はバッテリー、エコシステム参加者、その他無制限）発行の仕組みを備えつつ、データプレーンでは非中央集権型のセキュアなデータ交換（DIDComm）を実現している。コントロールプレーンを構成する技術要素は以下のとおりである。

- ・ W3C VC データモデル（証明書のフォーマット）
- ・ 証明書のセマンティクス（Linked Data によるデータ構造の定義と公開）
- ・ 証明書の真正性の保証（VDR）

もちろん情報共有プラットフォームで扱う情報には公開されてこそ価値があるものも存在する。図 12 に Battery Web の概念図を提示するが、バッテリー非公開資格情報 (VC) とバッテリー公開資格情報 (VC) が共に存在するのはそのためである。

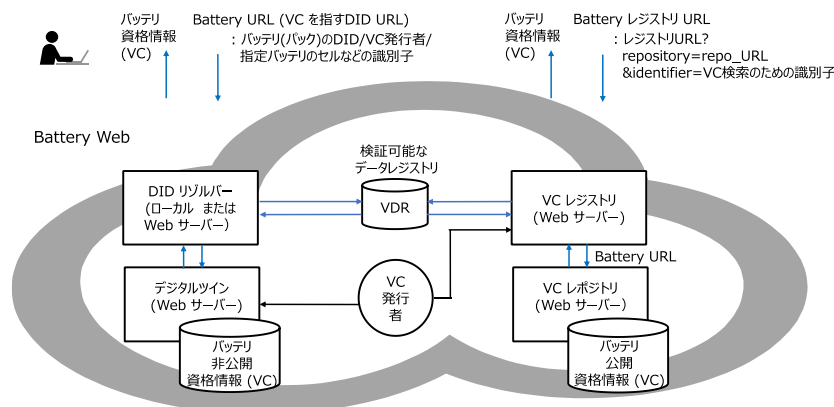


図 12 Battery Web

#### ・ ガバナンスフレームワーク

図 13 は自己主権型アイデンティ (DID/VC) のガバナンスについて示した図である。図の上半分の三角形は使用済みバッテリーの車からの解体、セルの回収、SoH の測定、再生バッテリーの製造などに携わるサプライチェーンの参加者間のやり取りを表している。一方、図の下半分の三角形はプラットフォームを安全に利用するための統治の仕組みである。ガバナンスオーソリティはプラットフォームの運営に関わる機関であり、エコシステムのルールを定めたガバナンスフレームワークを規定し、統治に関わる VC を発行する。例えば上半分の三角形の参加者に一定の基準を満たしていることを証明する認定証を VC として発行する。

ガバナンスフレームワークはエコシステムを統治するための規約である。多数の参加者からなる人間社会の営みを統治するには API や通信プロトコルを決めるだけでは不十分であり、ビジネス、法律、技術に関する規約を定めることが必要で、これらの頭文字をとって BLT と呼ばれる。それぞれの規約には以下のような項目がある。

- ・ ビジネス (B) : 参加資格、参加費、運営費、ビジネスモデル、組織運営など
- ・ 法律 (L) : 司法管轄、税務、法的責任、知的所有権など
- ・ 技術 (T) : 技術標準、プロトコル、ベンダー選定、ユーザビリティなど

このガバナンスフレームワークに標準的な推定方法とツールを規定する。そしてその規定に従って推定が行われていることをガバナンスオーソリティが監査して監査証明書を発行する。この方法であれば現実的な運用が可能である。

なお非中央集権型のエコシステムにガバナンスフレームワークを設けることは矛盾ではないかという疑問が生ずるが、非中央集権型だからこそ参加者が合意できるガバナンスが

必要になる。既存の社会システムにおいても力が拮抗した多数の参加者からなるコミュニティほど統治のための規約やその合意プロセスが重要であり、それと同じである。

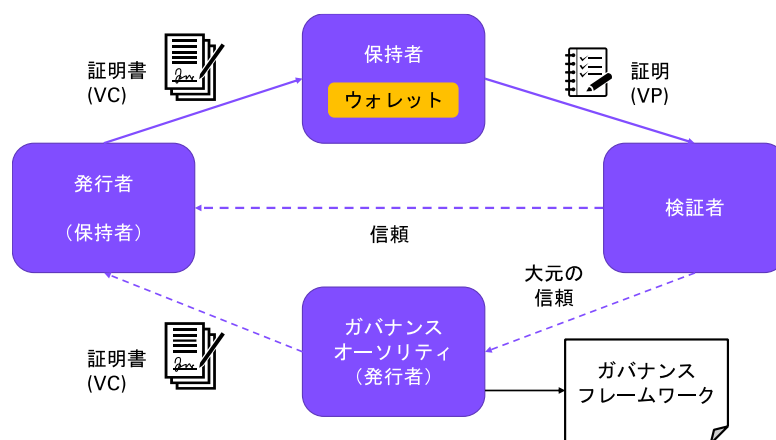


図 13 プラットフォームのガバナンス

### 2.1.2.7 実施結果概要

3年間にわたる静脈バリューチェーン各社へのヒアリングを通じ、保管場所の不足や診断技術の欠如といった現場の物理的・実務的課題を具体的に特定した。これらの課題解決に向け、地域回収拠点の配置による物流効率化と、Web3 技術による非中央集権的な情報連携を核とした、社会実装可能な流通モデル (to-be 像) を設計した。

## 2.1.3 電池管理モデルの開発

### 2.1.3.1 概略

本項では、3か年計画における実施項目「電池管理モデルの構築」の成果を統合して報告する。

各年の実施内容：

#### 2023 年度：流通モデル・業務フローの基礎構築（項目：②流通モデル構築）

バッテリーのライフサイクルを俯瞰した流通モデルを検討し、排出・回収・分解・診断といった現場実務の初期フローを定義した。また、診断精度の向上が国内リユース市場の活性化に与える影響をシミュレーションした。

#### 2024 年度：モデル設計と統計的手法の比較検討（項目：②電池管理モデルの構築）

バッテリー価値に影響する履歴データや品質情報の管理モデルを設計した。寿命予測に向けて各種統計的手法の比較を実施し、不確実性を確率分布としてあつかうガウス過程の有効性を確認した。

#### 2025 年度：業務フローと情報管理の統合と実装の検討（項目：④システム構造設計）

「電池管理モデル」を「実務手順」と「情報管理」の統合プロセスとして整理した。排出から出荷までの工程で「作業証跡」を記録するフローを確立するとともに、ガウス過程回帰を用いて将来の故障リスクを確率密度関数として算出する手法を設計し製品保証や保険設計への有効性を提示した。

本実証事業における「電池管理モデル」は、使用済みバッテリーの価値を適切に顕在化

し、安全かつ効率的な循環市場を支えるための「実務と情報管理プロセス」として定義され、回収業務フロー、実際に管理する情報定義、蓄積される情報をもとにした寿命予測の3つの要素からなっている。以下に各要素についてまとめる。

### 2.1.3.2 回収業務フロー

本実証事業における「電池管理モデル」の回収業務フローは、単なる作業手順の整理に留まらず、使用済みバッテリーを安全かつ透明性の高い流通を実現するための「実務指針と品質管理プロセス」として構築されている。以下に、排出から診断・出荷に至る回収業務フローの各工程と、検討された手順の内容をまとめる。

#### 1. 回収業務フローの全体像と設計思想

回収業務フローは、排出業者（自動車解体業者など）、回収業者、リユース製造業者の三者間を貫く一連のプロセスとして設計された。最大の特徴は、各工程において「いつ、だれが、どのように扱ったか」という作業証跡を記録・管理する点にある。

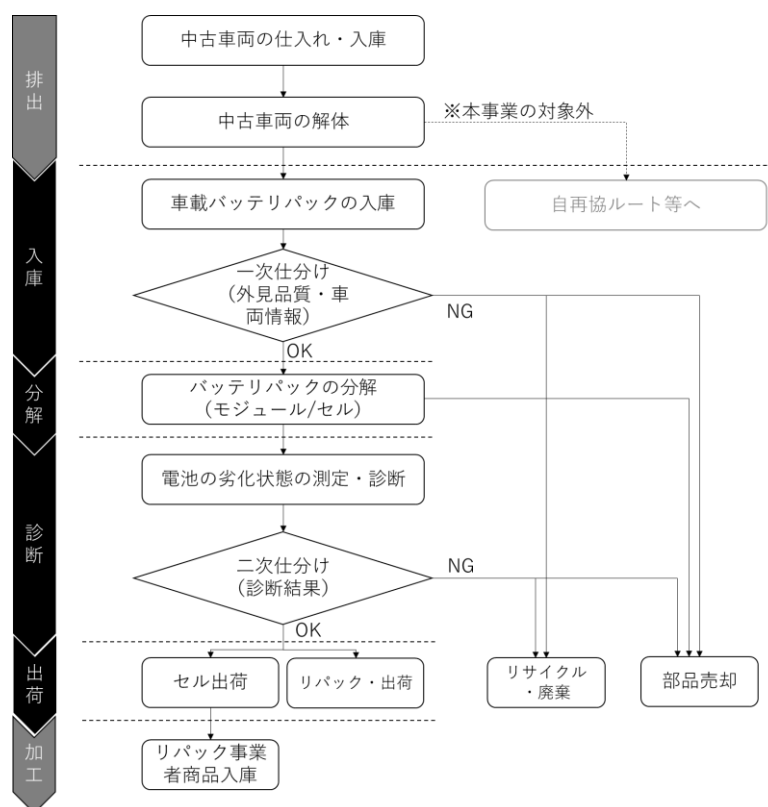


図 14 回収業務フロー

#### 2. 各工程における具体的な検討内容と手順化

##### ① 排出・情報収集（排出業者）

- ・ 車両情報のデジタル化： 排出業者がスマートフォンアプリを用い、解体車両の型式、年式、走行距離、車台番号などの情報を入力・撮影して記録する
- ・ 初期状態の把握： 車両が示すセグ数（劣化状態の目安）やオドメータの写真を証拠として登録し、上流工程での透明性を確保する
- ・ 回収依頼と識別： 二次元コードを発行して物理的なバッテリーパックに貼付し、システム上で回収業者へメッセージを送付する手順を確立した

#### ② 輸送

- ・ 輸送情報の記録： カーボンフットプリント（以下 CFP）算出のため、輸送に用いたトラックの燃費、走行距離、混載率をシステムに登録する手順を導入した
- ・ 安全な輸送手段： 混載輸送の実現や輸送ルートの集約・最適化により、経済合理性と安全性の両立を図った

#### ③ 受入・保管（回収業者）

- ・ 在庫管理： 入庫場所の二次元コードとバッテリーの二次元コードをスキャンすることで、入庫日時と保管場所を自動記録する
- ・ 安全管理： バッテリーパックや分解後のセルの保管期間・場所を厳密に管理し、安全な保管体制を手順化した。

#### ④ 分解（回収業者）

- ・ 安全管理の徹底： 絶縁防護具の着用や絶縁工具の使用、防火設備の整備など、感電・火災リスクを排除するための作業手順をマニュアル化した
- ・ 個体識別の継承： パックからモジュール、セルへと分解される過程で、新たな個体識別子を付番し、パック時代の履歴を引き継ぐトレーサビリティ管理を実装した

#### ⑤ 診断・仕分け（回収業者）

- ・ 診断プロセスの標準化： 交流インピーダンス法などを用いた高速診断技術の実務適用にあたり、測定電極の固定や温湿度管理など、属人性を排除した標準測定手順を規定した

### 3. 業務効率化

- ・ UX の最適化： 現場作業を妨げないよう、スマートフォンのカメラ入力や音声確認、二次元コードスキャナを活用した入力簡略化を徹底した
- ・ 品質管理情報システム： これら一連のフローで収集された「作業証跡」をリユース製造業者が品質を即座に検証できる環境を構築した

本フローの導入により、バッテリーの「性能」だけでなく「取り扱いの正当性」が可視化され、品質の不確実性が解消される。これにより、使用済みバッテリーの適切な価格形成と、国内における有価取引の活性化を支援する。

### 2.1.3.3 データモデル

本実証事業において、業務アプリケーションおよび診断アプリケーションで取り扱うデータモデル（情報の種類）の概要は、以下のとおりである。これらは、使用済みバッテリーの「物理的な状態」と「サプライチェーン上の履歴」をデジタル上で正確に結びつけ、価値顕在化を実現するための基盤となる。

以下に、本実証で開発したアプリ・プラットフォームが取り扱う情報の概要をあげる。将来の取り扱い情報の拡張に備えて、柔軟なデータ構造で開発を行った。

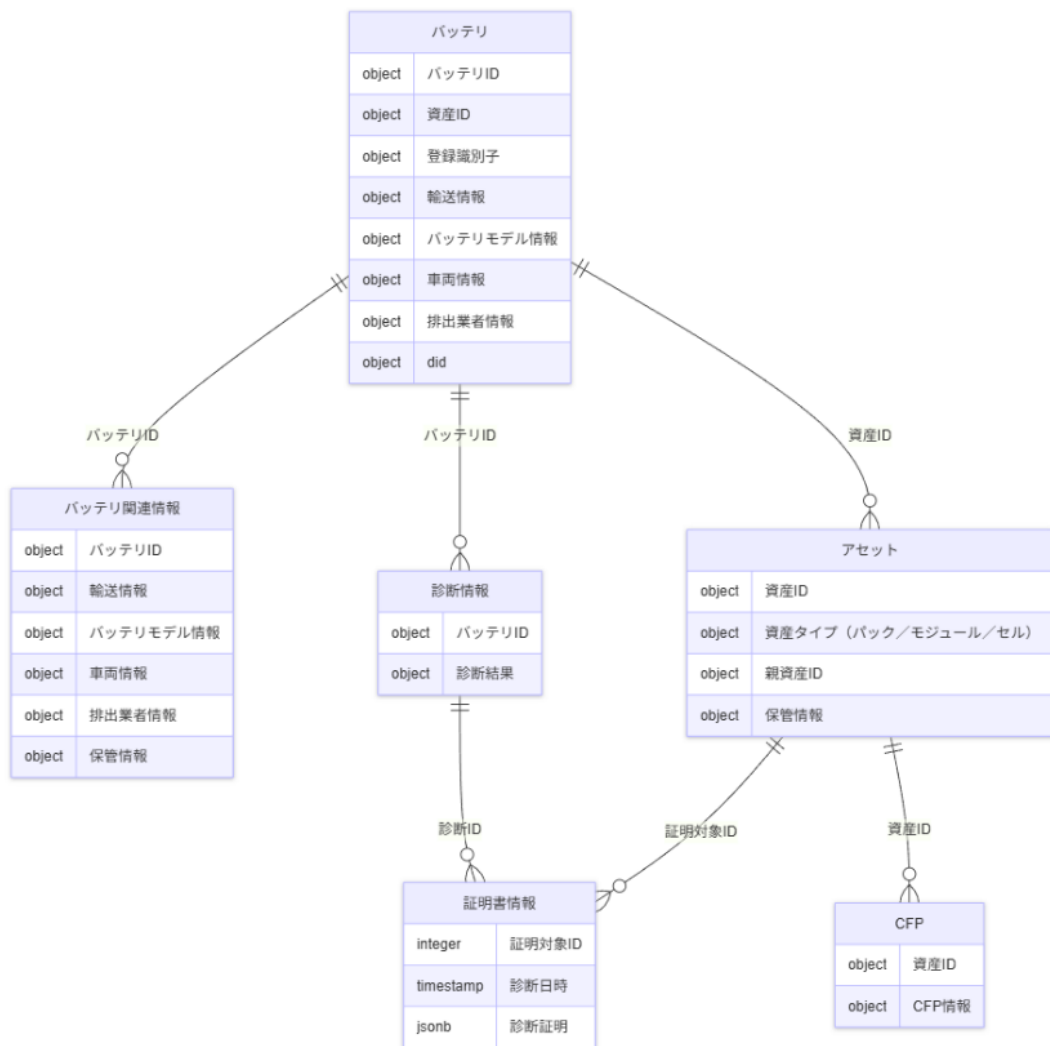


図 15 バッテリー情報のデータモデル概略図

#### ・業務アプリケーションで取り扱う主な情報

表 10 業務アプリ収集データ概要

情報カテゴリ	具体的な情報項目
車両関連情報	車台番号、車両型式、年式、走行距離（オドメータ値）、車両が表示するバッテリー状態
物流・CFP 関連情報	輸送ルート、走行距離、使用トラック（燃費・燃料種別）、積載率（混載比率）、工程別の電力消費量、CO <sub>2</sub> 排出量換算式および単位
品質・工程管理情報	作業員、作業日、入出庫日時、格納場所（保管位置）、分解時の目視検査結果、パック内における配置位置情報、二次元コード識別子

#### ・診断アプリケーションで取り扱う主な情報

表 11 診断アプリ収集データ概要

情報カテゴリ	具体的な情報項目
計測データ	交流インピーダンスなどの測定値、端子電圧、測定時の周囲温度
診断用メタデータ	対象バッテリーのモデル情報（諸元）、適用診断アルゴリズム種別、計測用スイッチのチャンネル情報、診断日
診断結果・証明情報	推定 SoH、推定残存容量、診断結果の証明書（VC）、発行者による電子署名

#### ・プラットフォーム上で流通する情報の形態

これらの情報は入手した事業者のデータベースに保管される。その後、プラットフォームを通じて事業者・バッテリーを識別する DID、証明書とともにデータ交換を行うことで、個別の事業者から提供される情報の真正性を確認することで、信頼性の高い情報流通を実現している。付録で診断結果に対するデジタル証明書の内容のサンプルを示す。

### 2.1.3.4 寿命予測の開発

使用済みバッテリーの寿命予測の開発は、ガウス過程による最尤推定を用いて劣化の確率密度関数を推定することで、製品保証や保険コストの客観的な算定を可能にし、リユースバッテリーの市場価値を高めることを目標に検討を実施した。

#### 1. 寿命予測の目的

- i) データからバッテリー寿命予測を行い、価値顕在化プラットフォームに乗せることで中古バッテリー、再生バッテリーの市場価値を高める。
  - ii) AI（機械学習）により、バッテリーの充放電サイクルに対する出力値（容量など）の確率密度関数を求めることで製品保証と保険（のコスト算出）を可能にし、また定置型バッテリーによる電力供給事業の設備保全に役立つ。
- i) についてはバッテリー標本から寿命データを収集し、区間推定することで実現可能であるが、ii) については、劣化の確率モデルを求める必要があり、それが求めれば i) の目的も叶うので、ii) を目標とした。

## 2. 利用者の視点：寿命予測

EVの車載バッテリーをセルに分解し他用途に再利用する場合（例えば定置型バッテリーに再利用）、再生バッテリー製造業者、流通業者、最終利用者にとってそのバッテリーがあと何年、どのような状態で利用できるかは重大関心事である。バッテリー回収業者、再生バッテリー製造業者、再生バッテリー運用業者はある一時点のバッテリー容量などの測定は可能であるが、将来のバッテリー寿命を直接測定することはできない。そもそもバッテリーは個体差があり、バッテリー寿命を正確に予測することは困難であるが、それに代わる手段として製品保証と保険が考えられる。つまりサプライチェーンの上流業者がバッテリー寿命について「10年以内に故障（容量が一定値以下になるなど）した場合は新品と交換する」などの条件をつけることで下流業者や最終利用者は実質的に信頼できる寿命予測が提示されたのと同じ安心感が得られる。例えば、バッテリー回収業者は、解体したバッテリーセルの出荷時点で、そのセルが含まれていたバッテリー製品種別、定格容量、その時点でのセル容量から充放電サイクルを後何回繰り返すまで利用可能であるかを予測し、その予測以前に故障したら無償保証することが考えられる。

## 3. 供給者の視点：確率分布

寿命予測は保証を受ける側にとっては十分な条件であるが、保証や保険を提供する側にとっては不十分である。なぜなら寿命予測だけでは保証コストを計算できないからである。これはバッテリーが期待寿命より長く使えても保証者のコストメリットはゼロであるが、期待寿命より早く故障したら（劣化が事前に定めた程度を超えて進んだら）ペナルティを払うからである。つまり保証者にとっては、長い寿命で広い故障分布より短い寿命でも狭い故障分布のバッテリーの価値が高いことになる。寿命予測ではなく、劣化の確率密度関数(Probability Density Function、以下PDF)を推定することが必要になる。

## 4. 確率密度関数の推定

バッテリー劣化の要因は多岐にわたりそのメカニズムの詳細を把握することは二次利用者にとって不可能もしくは大変困難である。従って我々はバッテリーの充放電サイクルに対するバッテリー性能の観測値から劣化のモデルを作成し、統計的手法によって劣化の確率密度関数を推定することとする。ここではパラメトリックなアプローチとして信頼性工学で使われるワイブル分布(Weibull Distribution)をバッテリー劣化に当てはめる方法と、ノンパラメトリックなアプローチとしてガウス過程による確率的生成モデルを求める方法を比較検討したが、あらかじめ関数形が決まっていた少数のパラメータを求めることで回帰関数を決定するパラメトリックなモデルに対して、ノンパラメトリックなガウス過程では無限個の基底関数の重み和により複雑な回帰関数を表現することが可能になることから、後者による確率的生成モデルを開発した。

## 5. ガウス過程回帰による劣化予測モデルの実装

使用済みバッテリーの残存価値を最大化するため、本実証ではガウス過程回帰を用いた高度な寿命予測モデルを開発した。本モデルの最大の特徴は、単なる「期待寿命の数値」を出すのではなく、劣化の不確実性を考慮した「確率密度関数 (PDF)」として出力できる点にある。

- ・ 不確実性の可視化： 観測データが少ない領域でも、標準偏差を伴う予測を行うことで、将来の劣化リスクを統計的に把握することが可能となった。
- ・ 柔軟なモデル化： 特定の関数形を想定しないノンパラメトリックな手法により、バッテリー個体ごとの複雑な劣化曲線を精度高く表現できる。

このモデルから得られる「確率的予測」は、リユース製品に対する製品保証の設計や、故障リスクをカバーする保険商品のコスト算定において客観的な根拠資料となる。

※ガウス過程の数学的背景、Python による実装コード、および詳細なテスト結果については、付録 2「電池管理モデルにおけるガウス過程の理論的背景」および付録 3「ガウス過程回帰の Python ソースコード」を参照されたい。

## 6. バッテリー品質の劣化モデルへの影響

バッテリー性能の劣化モデルはバッテリーの状態によって異なるのが自然である。いわゆる A 級品、B 級品で劣化の進行具合が異なるという考え方である。バッテリーメーカーが市場に出荷する製品はすべて A 級品であるとした場合でも、中古バッテリーについてはそれまでの利用状況によって品質にバラツキが出る可能性がある。A 級品の劣化データから作成した劣化モデルと B 級品の劣化データから作成した劣化モデルは異なるため (B 級品は劣化が急速に進む、劣化のばらつきが大きいなど)、まず品質クラスごとに収集したデータにもとづきモデルを作成し、次に劣化予測をしたい対象バッテリーがどのクラスに属するかを識別し、クラスに対応するモデルで劣化予測をするのが全体の指針となる。

## 7. 経験による識別

同種のバッテリーでもその外観 (汚れ、変形など)、利用者 (業種、国籍など)、利用環境 (温度、地域など) などから経験的に判断して品質を識別できる場合がある。それが可能であれば、モデル作成データおよび対象バッテリーの識別を経験則で行い、適当なモデルによる劣化予測が可能になる。

## 8. データによる識別

経験則による識別が困難な場合はデータによる識別が選択肢となる。劣化予測ではガウス過程回帰モデルを利用したが、分類問題の場合はある入力ベクトル  $\mathbf{x}$  を  $K$  個の離散クラス  $C_k$  の 1 つに割り当てるために線形識別モデルを利用する。各クラスは互いに重ならず、各入力は一いつのクラスに割り当てられる。つまり入力空間は決定領域 (decision

region) に分離され、この決定領域の境界を決定面 (decision surface) と呼ぶ。線形識別モデルとは、D 次元入力空間に対して、入力ベクトル  $\mathbf{x}$  を未知数とする方程式で表される決定面が D-1 次元の超平面で定義されるものである。

例えば今 4 つのバッテリーの性能データが下図のように与えられたとする。バッテリー A1, A2 は A 級品、B1, B2 は B 級品である。それぞれの性能の時系列データは

A1=(4.0, 3.5), A2=(3.5, 3.3), B1=(3.7, 2.0), B2=(2.0, 1.0) である。

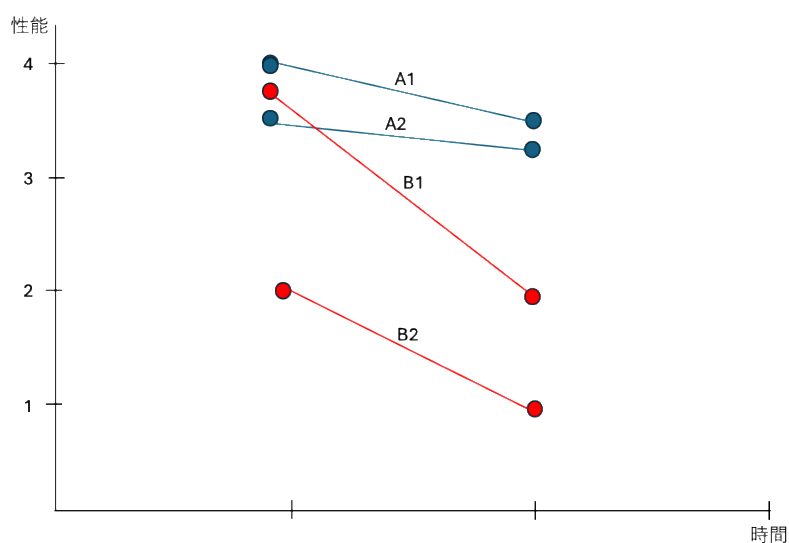


図 16 等級 (クラス) ごとの性能差のイメージ

このままだと分類が難しいので、データを性能ベクトル空間へ移すと下図のようになり、A 級品、B 級品の決定領域が決定面 (この場合は直線) で分断される。これを利用すれば性能劣化予測をしたい新たなバッテリーがどちらのクラスに属するかを識別することができる。ここでは視覚的に分かりやすいように性能ベクトル空間を 2 次元にしているが、実際は多次元にして精度を上げていく。

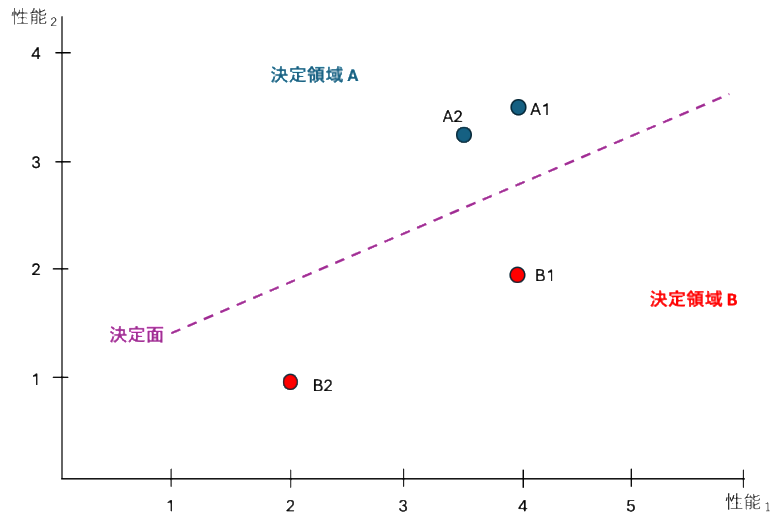


図 17 性能差のイメージのベクトル図

事業化にあたっては、経験による識別が困難な場合は線形識別モデルをプログラム実装することで、性能劣化予測したい個々のバッテリーに最も合ったガウス過程回帰モデルを選択することも検討したい。

### 9. 保証コストの算定

バッテリーの劣化に対して製品保証や保険を提供するには保証コストの算出の観点から寿命予測ではなく劣化の確率密度関数(PDF)が必要であることを述べた。これについてガウス過程による最尤推定により事後平均、事後分散が得られた状況で考えてみる。保険では保険金を支払う保険条件の設定が必要であるが、例えば「一定の充放電回数  $C'$  に対して一定の容量  $E'$  を下回らないこと」と定義できる。(図 18)

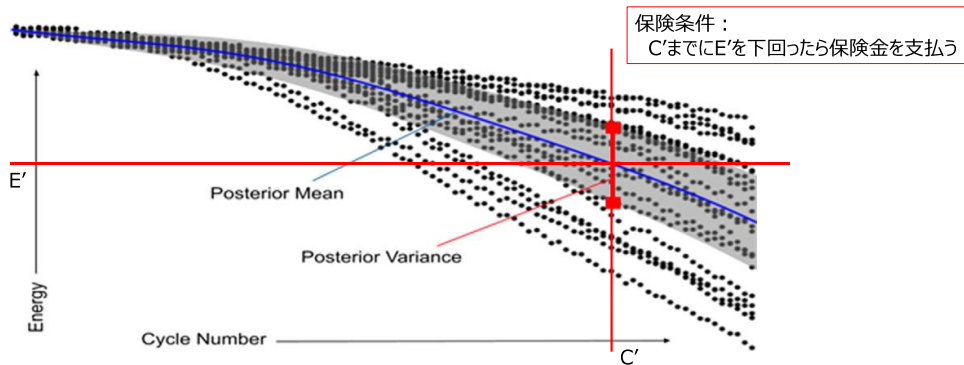


図 18 保険条件の設定

この時、保険金支払いが発生するのは図 19 の斜線を施した部分である。劣化の事象が発生する確率が推定できているので、その場合の被害金額（保険金支払い額）を乗ずるこ

とで保証コストが算出できる。実務においては斜線の三角形をいくつかに分けて、保険条件よりかなり早く故障した場合は高い保険金を支払い、条件直前で故障した場合は少額の保険金を支払うなどとすることも可能である。

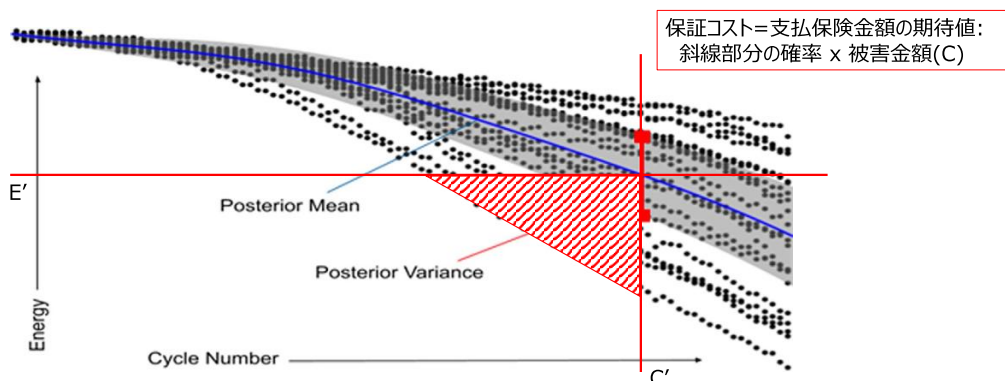


図 19 保険コストの算定

## 10. 電池管理モデルにおけるガバナンスフレームワーク

バッテリーの価値顕在化プラットフォームでは証明書 (VC) によりサプライチェーン参加者同士の主張が共有されるが、VC の発行者が直接確認できない予測値については「誰が何を」に加えて「どのように」予測したかを明確にすることが必要になる。バッテリー性能の劣化状態を確率密度関数として予測することが「どのように」に相当するが、それをプラットフォーム上で表現するには以下の2つの方法が考えられる。

- ① サプライチェーン参加者がバッテリー劣化をどのように予測したかを VC で主張する
- ② 標準的な劣化予測方法とツール、それによって推定がなされたことの監査方法をプラットフォームのガバナンスフレームワークで規定し、プラットフォームには監査済み証明書を VC として残す

①は「どのように」をプラットフォーム上で主張することに対して直ちに想起される方法であるが、実際に運用しようとするときさまざまな問題が発生する。バッテリーの劣化状態を確率密度関数として推定するためには、どの方法をとるにしても数学的な背景の理解が必要になり、特にモデルの表現力の優れたガウス過程によるベイズ推定は難易度が高い。これをサプライチェーンの参加者にあまねく求めることは現実的ではない。仮に推定者が方法論について VC で正確に主張できたとしても、その利用者が VC の内容を理解して安心してバッテリーの残存寿命を受け入れるかは甚だ疑問である。

②はそのような問題を解決するための方法である。推定については専門家が方法論とツールを提供し、サプライチェーンの利用者はそれを利用して推定を行い、結果を VC で主張する。そして確かに規定のツールによって推定を行なっていることを権威者が定期的に

監査して監査済み証明書を VC として残す。こうすれば推定者は与えられたツールを利用するだけであり負担は低くなる。ガウス過程回帰を実装した Python プログラムを見れば分かるように、推定の数学的背景は難解であるが計算のための実装は相対的に容易である。これをツール化して提供すれば、推定者はツールに観測データを入力するだけで信頼のおける推定が可能になる。さらにその監査済み証明書が VC として提供されれば利用者は直ちに推定結果を受け入れることができるようになる。

#### 〈本項の参考文献〉

- (1) 持橋大地、大羽成征 2019 ガウス過程と機械学習
- (2) Christopher M. Bishop 2006 Pattern Recognition and Machine Learning

### 2.1.3.5 実施結果概要

排出から出荷に至る全工程で「作業証跡」をデジタル記録する実務フローを確立し、中古バッテリーの取り扱い品質に対する透明性を確保した。また、ガウス過程回帰を用いて将来の劣化リスクを確率密度関数 (PDF) として算出する手法を開発し、製品保証や保険設計の客観的な根拠を提示できることを示した。これらを電池管理モデルとしてまとめた。

### 2.1.4 CO<sub>2</sub>分析

#### 2.1.4.1 概略

本項では、3 か年計画における実施項目「CO<sub>2</sub>分析・アプリ検討」の成果を統合して報告する。本事業では、使用済みバッテリーのリユースによる CO<sub>2</sub>削減効果を科学的に裏付けるとともに、現場での算定負担を極小化する自動算定システムの構築を段階的に進めた。

#### 各年の実施内容：

##### 2023 年度：算定範囲の定義と初期実測（項目：②CO<sub>2</sub>分析・アプリ検討）

リユース工程におけるライフサイクルアセスメントの評価境界を定義し、実証現場でのフォアグラウンドデータ（分解・診断時の電力消費等）の初期計測を実施した。その結果、リマン工程自体の負荷は製造時と比較して極めて小さく、輸送距離やリユース先での使用年数が削減効果の鍵であることを特定した。

##### 2024 年度：計測項目の精緻化と検証での計測（項目：④CO<sub>2</sub>分析・システム開発）

実際の業務フローと実務環境におけるフォアグラウンドデータの計測の精緻化を実施した。また、自動算定に必要なデータ項目（燃費、積載率、電費等）を整理し、システム実装の要件を検討した。

##### 2025 年度：自動算定システムの実装（項目：④システム構造設計）

業務アプリと連動し、物流・作業データからカーボンフットプリントを自動登録する機能を実装した。実地検証により、現業員に過度な負担をかけない環境価値の可視化手法を実現した。

以上、3 年間の活動を通じて、リユースの環境優位性の証明と、社会実装に不可欠な算定業務の効率化を両立させた。

#### 2.1.4.2 文献調査などの結果から得られた概観

まず、リユースのための工程内でのフォアグラウンドデータについては実証現場にて計測を行い、量的に小さい値であることを確認したうえで、本事業の開発するシステムの中で自動計測が可能とすることとした。

これ以外の、バックグラウンドデータについては、日本国内のデータが主となることから IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis)を中心に、ecoinvent データベースの確認もあわせて進めた。また実際の算定には用いないものの、算出結果の比較、妥当性検証の目的から、既存のリチウムイオンバッテリーのリユース関連の論文、報告書などの調査を実施し、実際に算定を進めた。

本事業に関連して把握すべき CO<sub>2</sub> 排出量の検討を行った。本節では前年度検討の結果もあわせつつ報告を行う。まず、リユースのための工程内でのフォアグラウンドデータについては昨年度実証現場にて計測を行った。量的に小さい値であることは確認済みであるが、本事業の開発した業務アプリの中で自動計測を可能とした。

また、バックグラウンドデータについては、日本国内のデータが主となることから IDEA を中心に、ecoinvent データベースの確認もあわせて進めた。また実際の算定には用いないものの、算出結果の比較、妥当性検証の目的から、既存のリチウムイオンバッテリーのリユース関連の論文、報告書などの調査を実施し、実際に算定を進めた。

自動車用から自動車用への水平リユースではなく、他用途へのカスケードリユース、しかもリパック工程を含む検討結果がそう多く公表されているわけではないものの、リユースに関する LCA の学術論文は増えつつある。今回追加的に調査したものから次のような問題が残されていることと逆に進展があることを確認した。(Fan (2023)、Dunn (2023)、Wrålsén(2023)など)

進展した点としては

- ・ LFP 系のデータが増えつつある
- ・ 温暖化以外のインパクトに言及する論文が出ている
- ・ リパーパスとリサイクルの比較と言った論文が出てきつつある

逆に残された問題点は

- ・ 劣化に古い論文から引用した簡易化された式を用いているものが多い
- ・ リファービッシュ、リパックと言った部分の詳細が明らかにされていない(ただしここでも触れるように相対的に大きなインパクトはない)

我が国のデータについては、学術論文ではなく、実証事業などの報告書という形での成果を見ることができるとはみえていない。リコー(2019)はその代表的な例であり、実証データを用いているという点において先述の学術論文とは異なる。

本事業を通しこれらの文献を調査した結果からも、全体としてリマン固有の工程は大きな負荷を持たないとされている。ただしリマンの実施のために物流が煩雑化した場合などはその負荷の増大が見られる場合もあり、必ずしも無視できるわけでもないこと、また直接

のCO<sub>2</sub>排出量のみならず、削減効果まで考えるのであれば、リユース先での使用年数が大きく影響するといったことは変わらないことが改めて確認された。

注)リマン工程 … 使用済み製品を再生する工程のこと

〈本項の引用文献〉

- ・ Fan, Tao, Weicheng Liang, Wei Guo, Tao Feng, and Wei Li. 2023. “Life Cycle Assessment of Electric Vehicles’ Lithium-Ion Batteries Reused for Energy Storage.” *Journal of Energy Storage* 71 (108126): 108126.
- ・ Dunn, Jessica, Kabian Ritter, Jesús M. Velázquez, and Alissa Kendall. 2023. “Should High - cobalt EV Batteries Be Repurposed? Using LCA to Assess the Impact of Technological Innovation on the Waste Hierarchy.” *Journal of Industrial Ecology*, May.
- ・ Wrålsen, Benedikte, and Reyn O’ Born. 2023. “Use of Life Cycle Assessment to Evaluate Circular Economy Business Models in the Case of Li-Ion Battery Remanufacturing.” *International Journal of Life Cycle Assessment* 28 (5): 554-65.

#### 2.1.4.3 本事業内で直接測定すべき項目と実証内での測定結果

予想される分解工程などやその他現地視察の結果などから、注意し検討すべきだと考えられた項目は

- ・ 工程内における直接エネルギーなど投入量（インプット側のインベントリ）
- ・ セル単位での再利用可否別の集計
- ・ 解体工程から回収されたスクラップなど（詳細は後述）

であった。スクラップ回収についてはその後のフローを追う必要があるが、特殊なスクラップなどが回収されている状況には現在はなく、本事業の工場から出荷後、スクラップ利用事業者へ渡された後は汎用的なリサイクルのインベントリデータが利用可能である。

また、リユースに不適合であったセルについては、リサイクル向けになるが、これについてはユースケース分析の調査とあわせまずは現在すでに動きつつある現場の調査を実施した。調査内容はユースケース分析の節に譲るが、CO<sub>2</sub>排出量と言う視点から見た場合には、いくつかの現場において別の処理対象物向けに設計された炉が転用されているような処理プロセスが存在しており、処理量が不足しているがゆえにエネルギー効率が悪くなるようなケースが散見された。よってプロセスの処理効率のようなパラメータを導入することが可能ならば、不可能である場合には少なくとも感度分析が重要であることが明らかになった。

リユースによる削減効果を考える際には、文献調査にもあったとおり、残存性能が大きな要素となる。リユースバッテリーがどのバッテリーをどれだけの期間代替するかについては、シミュレーションモデルなどを通して検討する他にない。

本事業で 2023 年度のフォアグラウンドデータの計測結果を以下に掲載する。その結果、1 次仕分けでは電力消費はほぼ発生しないことを確認した。よって、バッテリーパック分解における工具など、劣化診断機械とともに、工場内で利用される電動フォークリフトの消費電力が主たるものである。

表 12 自動車用リチウムイオンバッテリーのリマンのうち分解と診断の工程での消費電力量と GHG の CO<sub>2</sub> 換算排出量 (バッテリー出力 1kWh あたり)

	消費電力量[Wh]	CO <sub>2</sub> 換算排出量[g]
電子機器	96	41
電動工具	50	21
フォークリフト	7.4	3.2
合計	153	66

バッテリー出力 1kWh あたりで言えば、新規のバッテリー製造による GHG 排出量がかなりの幅はあるものの概ね 50-500[kg-CO<sub>2</sub>/kWh]程度であることを思えばほぼ無視できる大きさになる。よって、輸送に関する排出量の方が大きくなる可能性もあり、本事業で開発するシステムから自動で輸送経路を抽出し、CO<sub>2</sub> 排出量に換算する準備を整えた。

2024 年度に、実証試験がより今後の実装の姿に近いものとして行われたことから、その現場における再測定を実施した。測定は 2024 年 12 月 17 日並びに 18 日に行われた。車両 9 台分のバッテリー処理に関する測定などを行い、その結果を確認した。昨年度の結果との比較から言えば分解、診断工程の大きさはほぼ変わらない。事業所における電力消費全体のうち、診断機器によるものは 2%程度、エアコンが 40%を占め、残りはその事業所そのものの設備によるものであった。

こうした測定結果および、IDEA3.3 のデータを用い、次のような仮定にもとづく簡易的 LCA を実施、リマンの効果を確認した。

- ・ 製造：250 kg で 192 セルから成る LIB (リチウムイオンバッテリー) を 1 パック製造する。LIB の構成部品については Ellingsen, et al. (2014) および Kikuchi et al. (2021) を参考にした
- ・ BEV として 10 年間利用：BEV として 10 年間利用される。1 kWh のエネルギーで 5 km 走行すると仮定し、年間 8,000 km 走行するとした。電源構成は 2020 年度の日本の平均を用いた
- ・ 分解・診断：解体業者で LIB パックが取り外された後、日本の平均的な積載率の 4 トントラックで 400 km 輸送され、分解・診断を行う工場に搬入される。実際に行った測定データをもとに、LIB パックをセル単位間で分解し、それぞれのセルの残存性能

を測定する。測定後はリマンを行う工場へと、日本の平均的な積載率の4トントラックで400 km 輸送される

- ・ リマン：セル以外の部品は新規に製造され、ESS用のLIBパックとして改めて組み立てられる。BEV用とESS用のLIBは同じ構造と仮定した。その後はESSとして利用される場所へと、日本の平均的な積載率の4トントラックで400 km 輸送される
- ・ ESSとして6年間利用：常時100 Wで6年間充電されると仮定した。電源構成は2020年度の日本の平均を用いた
- ・ 湿式リサイクル：LIBパックはセル単位に分解される。セル以外の部品からは鉄と銅が回収され、残りは埋め立てられる。セルは焙焼された後に粉碎され、湿式精錬によってコバルトとニッケルの70%が硫酸塩として回収され、残りは埋め立てられる。焙焼のプロセスについてはRajaeifar et al. (2021)を、湿式精錬のプロセスについてはSpangenberg (2019)を参考にした

リマンを行うシナリオとしては、BEVで利用した後のLIBセルをESSで再利用することを想定した。具体的にはLIB1セルを製造し、BEVとして10年間利用した後、分解・診断を行う。ここで $x$ をセルの再利用率とよび ( $0 \leq x \leq 1$ )、 $1-x$ セルは劣化が進行しており二次利用の基準を満たさず、湿式リサイクルが行われるとする。残りの $x$ セルは劣化が比較的少なく、二次利用の基準を満たし、リマンされるとする。リマンされた後、ESSとして $n$ 年間利用され、最終的には湿式リサイクルが行われる。

これと比較するベースシナリオとしては、LIB1セルを製造し、BEVとして10年間利用した後、湿式リサイクルを行う。それと同時に、システム境界の拡張としてESS向けリマンLIBと等価となる $x \times \frac{n}{10}$ セルから成るLIBを製造し、ESSとして10年間利用した後、湿式リサイクルを行うこととした。

その結果、非常に簡単な例として、 $x = 1$ ,  $n = 6$ 、すなわち100%リマン可能、かつリマン後の使用年数が6年である場合、気候変動について(GWP)11.9%の減少が確認できた。

#### <本項の引用文献>

- ・ L. A.-W. Ellingsen, G. Majeau-Bettez, B. Singh, A. K. Srivastava, L. O. Valøen and A. H. Strømman, "Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18, pp. 113-124, 2014.
- ・ Y. Kikuchi, I. Suwa, A. Heiho, Y. Dou, S. Lim, T. Namihira, K. Mochidzuki, T. Koita and C. Tokoro, "Separation of cathode particles and aluminum current foil in lithium-ion battery by high-voltage pulsed discharge Part II: Prospective life cycle assessment based on experimental data," *Waste Management*, vol. 132, pp. 86-95, 2021.

- ・ M. Rajaeifar, M. Raugei, B. Steubing, A. Hartwell, P. Anderson and O. Heidrich, "Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling using pyrometallurgical technologies," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 25, 2021.
- ・ Q. Dai, J. Spangenberg, S. Ahmed, L. Gaines, J. C. Kelly and M. Wang, "EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model," April 2019. [Online]. Available: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2019/07/153050.pdf>. [Accessed 20 January 2025].

#### 2.1.4.4 CFP 算出システムの実装に際して必要な事項

本事業において、本パートの役割は在庫したバッテリーパックに対して適切なカーボンフットプリント(Carbon Foot Print、以下CFP)情報を付与することにある。具体的には以下に示す表のような情報を入手、CFP 関連情報として付与する必要がある。

大分類項目のうち、再利用関連情報についてのみ説明を実施する。これはリユースによる削減効果を測るためのものである。ここで重要になるものは下表に説明した、SoHなどによる残存性能の予測を用いることで、リユースによる削減効果の算出を行うためのデータである。

リサイクルについてはバッテリーのライフサイクルの CFP 算出について、我が国でも車載用バッテリーのカーボンフットプリント算定方法がすでに経済産業省から示されている。また世界的に見ても、欧州の Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) が用いる Circular Footprint Formula (以下 CFF、詳しくは JRC(2022)など)、そして The World Business Council for Sustainable Development (持続可能な開発のための経済人会議、以下 WBCSD) が GHG プロトコルの中で示した Recycled Content Method (以下 RCM)、Closed Loop Approximation Method(以下 CLAM)などが並立しており、我が国における試行事業では RCM が採用されている。今後の動向に気をつけつつ、その時点でのルールに従った算出システムを実装するほか無い。

表 13 CFP 計算のために必要なデータ

大分類	小分類	必要なデータ	換算に必要な原単位	備考
新品時製造時		バッテリー種別	外部情報（文献ないしはLCA データベースなど）から CFP を直接取得	基本的に本事業の実施する行為によって変化することはないことから、単なるサプライチェーン上の情報共有として途切れないために保有する
		容量		
		年式		
入庫前使用時		走行履歴	本事業として換算する必要はない	
自動車解体関連		解体工場での情報	換算済み情報が入手可能か？	バッテリーにアロケーションされた値が入手可能ならば付与。ただし解体業との連携が必要。
入庫前の輸送	燃料法の場合	燃料消費量	燃料の CO <sub>2</sub> 原単位	輸送に用いる車両の燃費情報、車両のオドメータや車両管理システムから入手可能な走行距離、積載率などを用いる。本実証で開発した品質管理情報システムでは上記は輸送時に入力・記録されている。
		輸送バッテリー重量 ÷ 輸送総重量		
	改良トンキロ法の場合	輸送距離	実データもしくは経路探索データ (システムから自動算出)	
		輸送バッテリー重量	改良トンキロ法燃料使用原単位 単位発熱量 排出係数	
		積載車情報		
		積載率		
	使用燃料種			
入庫後、本事業内での操作	1次仕分け	不要	電力の CO <sub>2</sub> 原単位	自動計測されるフォアグラウンドデータを用いる。
	分解	フォークリフト電力消費		
	劣化診断	電動工具電力消費		
	出荷前準備	電子機器 (PC, プリンタなど) 電力消費		

大分類	小分類	必要なデータ	換算に必要な原単位	備考
出荷後の輸送：入庫前輸送と同じ				
リユースによる削減効果	再利用先	用途情報		定置型蓄電池や携帯型蓄電池、フォークリフトなどいくつかの類型を定義して登録する。
	診断結果	SoH などの残存性能	相対的残存寿命の算出	リユース製品の製品規格からの充電回数や使用年数を適用することが想定される。
	再利用用途の新品バッテリーの負荷		原単位ではなく直接外部データ（文献ないしは LCA データベースなど）から取得	
	リユース工程中の素材リサイクルの削減効果	回収スクラップ量 出荷先のスクラップ利用に関する情報	出荷先のリサイクルに関する CFP 回収された素材の量から削減効果を算出	回収される素材が、鉄、アルミ、樹脂、銅などであることから、ベースラインにおいても回収されていることが想定されるため、検証後違いがなければ割愛。

CFFについては非常に煩雑なものであるが、これの意図するものはライフサイクルフローを通し、リサイクルなどの再生利用行為が繰り返し行われていく中、この削減効果をどこに割り当てるかを定めるためのルールである。CFFは、その計算手法の分かりにくさ、データ入手、パラメータ設定の困難さから余り利用が進んでいないと考えられるが、論理的には矛盾なく、またCFFのパラメータ設定によりRCMもCLAMも表現できるものであるため、ある意味この3者の間に矛盾はない。詳細については、金属とプラスチックを事例に解説をした醍醐(2022)や中谷(2023)を参考にした。

本事業で実施するリユースについてははっきりとしたルールは存在せず、アカデミアによる研究が行われている程度であることはすでに述べた。特にカスケードリユースについてはより難しい。改めて本事業によるリユースの削減効果において何を計算することが必要になるかを考えれば、

- ・ リユース時点での残存性能：まず性能として例えばSoHなどを用いて評価することが必要である
- ・ 残存性能から導かれる次用途における残存寿命：車載から異なる用途Aに用いられると考えた場合、前項から求められた残存性能を元に、新品バッテリーであった場合と比較して相対的に何%の残存寿命があるかを推定する
- ・ 新品バッテリーに対する代替率：上記の残存寿命を持って削減効果を算出することが必要になる

の3つのステップが必要になる。

本事業では、ここのバッテリーについては単純に残存寿命を持って代替率を算出することとするが、ただし残存性能測定においてそもそもリユースに回らないものについてはリユースとしての削減効果は0となり、比較対象である通常のリサイクルへ回るものと考えられる。

現在上記の表に関するデータの収集、整理および、別項に示す残存性能の推定との関連付けについて作業を進めている。

#### <本項の引用文献>

- ・ JRC: Joint Research Centre. 2022. Understanding Product Environmental Footprint and Organization Environmental Footprint Methods. Publications Office of the European Union. (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c43b9684-4521-11ed-92ed-01aa75ed71a1/language-en>)
- ・ 中谷隼. 2023. “LCAによるプラスチック資源循環の評価方法の基本と課題.” Journal of Life Cycle Assessment Japan 19 (3): 106-16. <https://doi.org/10.3370/lca.19.106>.
- ・ 醍醐市朗. 2022. “材料を評価対象とするLCA.” 鉄と鋼 108 (11): 811-22. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane>. TETSU-2022-058.

#### 2.1.4.5 実施結果概要

実証現場での検証をとおした測定により、解体・診断工程の CO2 排出量がバッテリー製造時に比べ極めて小さいことを確認し、輸送や残存寿命が CFP に与える影響を定量化しました。これにもとづき、CFP 算定に関わる事務作業時間の削減のため現場の入力負担を最小化した自動算定システムの実装設計を行った。

#### 2.1.5 業務・診断アプリケーションの開発

##### 2.1.5.1 概略

本項では、3 か年計画における実施項目「システム設計・開発」「設備導入」および「UX 改善の検討」の成果を統合して報告する。本実証では、使用済み EV バッテリーの「価値顕在化」と「情報流通」を支える、業務および診断アプリケーションの開発を実施した。

各年の実施内容：

**2023 年度：診断アプリの基礎実装（項目：③システム構造設計、④システム開発）**

高速診断アプリケーションのプロトタイプを開発した。診断装置と診断サービスを分離するアーキテクチャを採用し、1 セルあたり約 2 分での計測を実現した。実証を通じて、防護装備での PC 操作の困難さなど現場特有の UX 課題を特定した。

**2024 年度：実務フロー適合と操作性の改善（項目：③システム設計・開発）**

ヒアリングで収集した品質管理要求に対応した業務システムの開発を実施した。また、現場の物理的制約を反映し、二次元コードスキャナと音声確認を導入することで、手作業を中断させない操作性を実現した。「測定適正化治具」を導入し 10 チャネル連装による自動診断機能を実装することで作業スループット向上を実現した。

**2025 年度：実運用への対応と UX 改善（項目：③UX 改善、⑤システム設計・開発）**

排出業者による回収依頼機能や、CFP 自動算定ロジックとの連動機能を拡充した。さらに、DID/VC 管理などの共通機能をプラットフォームとして分離・提供し、将来の多様なサービス展開に耐えうる柔軟な開発基盤を確立した。

業務アプリケーションは、排出時の車両情報から分解、診断、出荷に至る一連の作業証跡と、輸送距離や電力消費量にもとづく CFP（カーボンフットプリント）情報を一元管理するシステムである。現場作業者の利便性を考慮し、二次元コードスキャナや音声確認、スマートフォンに最適化された UI を導入することで、CFP 算定を含む事務作業の 90%削減を実現した。

診断アプリケーションは、様々な診断アルゴリズムに対応したバッテリー残存性能 (SoH) を高速診断するシステムであり、1 セルあたりの診断時間を大幅に短縮する。また、診断証明書 (VC) を発行する機能を備えている。

これらのアプリケーション開発において、DID/VC 管理やメッセージングなどの共通機能をプラットフォームとして分離・提供したことにより、個別にアプリケーションを開発するケースと比較した場合の工数試算では 80%削減できる。(試算内容は 2.1.7 実証と効果検証、5.2 有効性評価を参照のこと。)

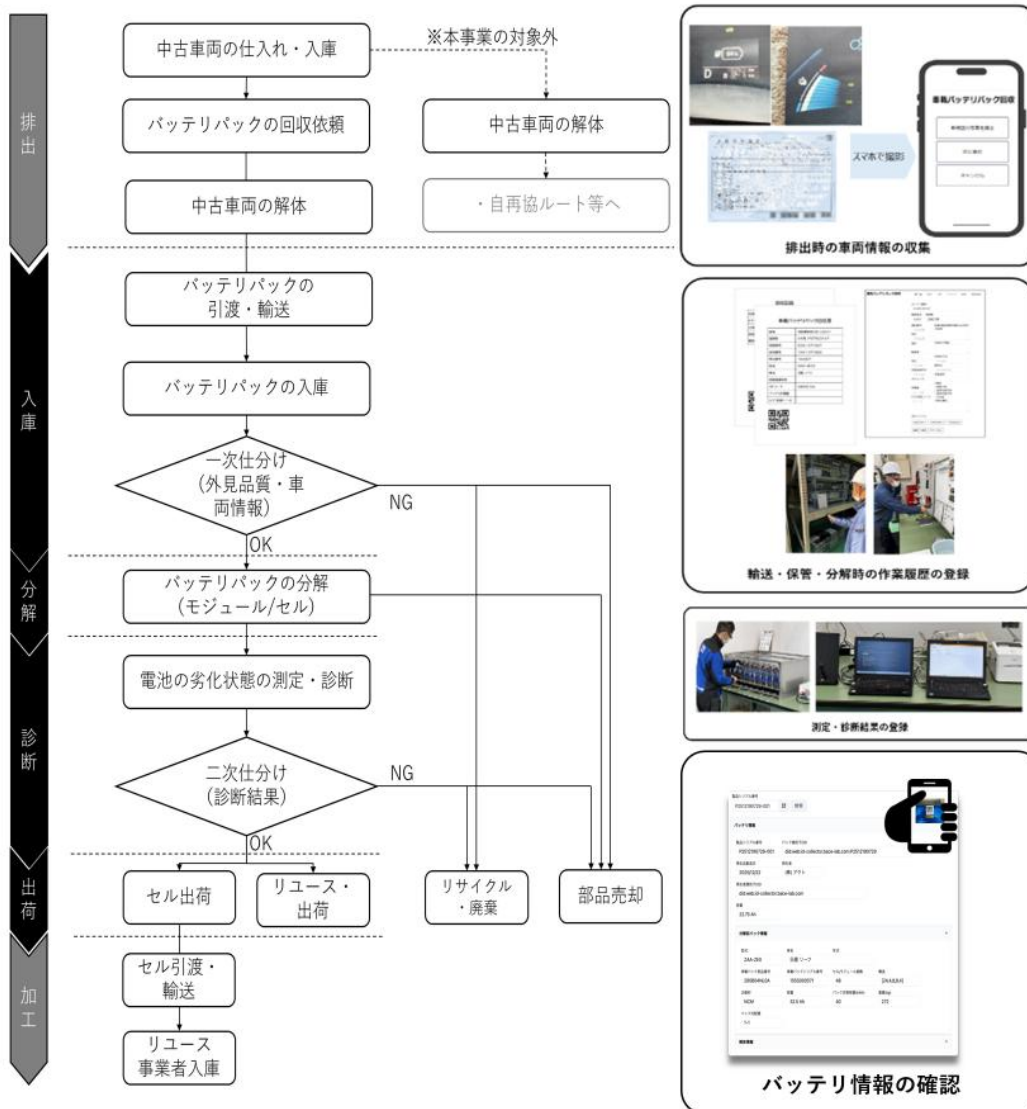


図 20 業務・診断アプリケーション俯瞰図

表 14 品質情報管理システムを構成する主なアプリケーション

アプリケーション	プロセス	主なシステム機能
業務アプリケーション	情報収集	バッテリーパックが搭載されていた車両の情報と、解体時に排出したカーボン量算出して記録する。
	輸送	パックを回収輸送した時に排出したカーボン量を算出して記録する。
	保管・分解	パックを保管、分解、診断した時に排出したカーボン量を収集する。 パック保管場所や分解作業者の証跡を残す。 パックの分解、診断工程の進捗を記録する。

アプリケーション	プロセス	主なシステム機能
診断アプリケーション	診断	高速にバッテリーセルを診断する。 診断アルゴリズム自身は分離されており、多種類に対応可能。
情報参照アプリケーション	報告	リユースバッテリー製造業者が必要とするバッテリーの情報を共有する。

### 2.1.5.1 業務アプリケーション

使用済みバッテリーをリユースするには、解体、回収、保管、分解、診断、納品のワークフローに沿ったバッテリー情報の収集と作業記録にもとづいた品質管理が必須となる。リユースバッテリーの製造プロセスを管理する責任は一義的にはリユースバッテリー製造業者にあるが、回収事業者はそのプロセスの一部を担う。

我々が想定するプロセスにおいては回収事業者が情報の結節点になっており、回収事業者を介してリユースバッテリー製造業者に情報を伝える。(下図)

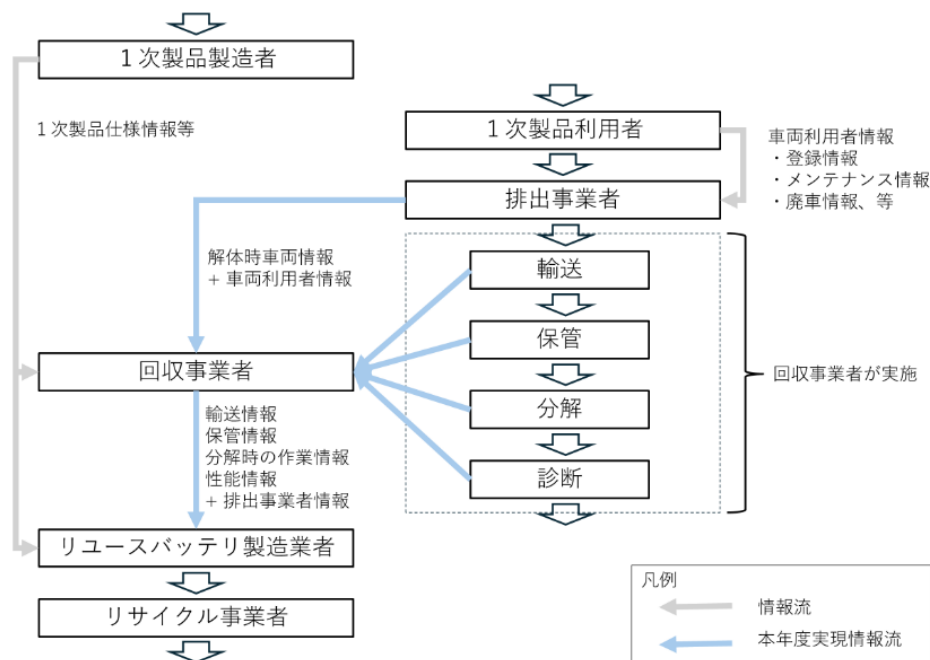


図 21 品質管理における情報流

各プロセスにおけるシステムユースケースは以下のとおり。

表 15 システムユースケース一覧

プロセス	要求	システム機能
情報収集	バッテリーパックが搭載されていた車両を識別する	<ul style="list-style-type: none"> <li>車検証情報の写真を撮影・記録する</li> <li>車両のオドメータの値の写真を撮影、記録する</li> </ul>
	バッテリーパックの使用状況の情報を収集する	

プロセス	要求	システム機能
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・車両が表示するバッテリー状態の写真を撮影、記録する</li> </ul>
輸送	輸送で排出したカーボン量を算出するために必要な情報を収集する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・回収に用いたトラックを記録する</li> <li>・回収で走行したオドメータの値を記録する</li> <li>・回収に用いるトラックの燃費を管理する</li> </ul>
保管	パックは適切な格納場所に保管する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・格納場所の監査証跡を残す</li> </ul>
	パックの保管期間を管理する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・格納・移動の監査証跡を残す</li> </ul>
分解	パックの分解作業は、分解技術を習得した作業員が行う	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業員の監査証跡を残す</li> </ul>
	パックがリユースに適している状態であることを検査する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検査結果を記録する</li> </ul>
	分解したバッテリーのパック内での位置がトレースできる	<ul style="list-style-type: none"> <li>・パック内位置を記録し、分解したバッテリーの二次元コードと紐付ける</li> </ul>
報告	リユースバッテリー製造業者が必要とする情報を共有する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リユースバッテリー製造業者に向けて出荷したバッテリーのシリアル番号から、当該バッテリーに関する基本情報、品質管理に関わる情報を取得する</li> </ul>
	カーボンフットプリントの算出輸送のために排出したカーボン量を回収したバッテリーに割振るための情報収集、計算、情報共有を行う	<ul style="list-style-type: none"> <li>・次の情報収集と計算を行う</li> <li>・トラックのあらかじめ設定されている燃費と実際に輸送した距離を用いて、カーボン排出量を計算する。</li> <li>・積荷のパックの量(混載比率)を用いて、それをパック全体に割当てる。</li> <li>・それを各パックに対して、その重量に依らず、均等に割当てる</li> <li>・他の計算方法として、各パックの重量に比例した量を割当てることが考えられる。各パック(のモデルごとの)重量はシステム内に格納しているため、この計算を行うことも可能である</li> </ul>

情報収集は回収事業者の保管庫や作業室にて、バッテリーの運搬・分解作業を行いながら実施することになる。作業員は防護装備をして作業を行うため、情報入力可能な限り手元で実施できるよう無線の二次元コードスキャナを用いて操作するように開発した。また、作業を中断せずに入力の確認が行えるように情報入力の結果は音声を通じての確認を可能にした。

### 2.1.5.2 バッテリー性能診断アプリケーション

使用済みバッテリーの性能や状態を測る診断サービス提供者を想定し、バッテリー性能取得作業を効率化する計測診断アプリケーションを開発した。

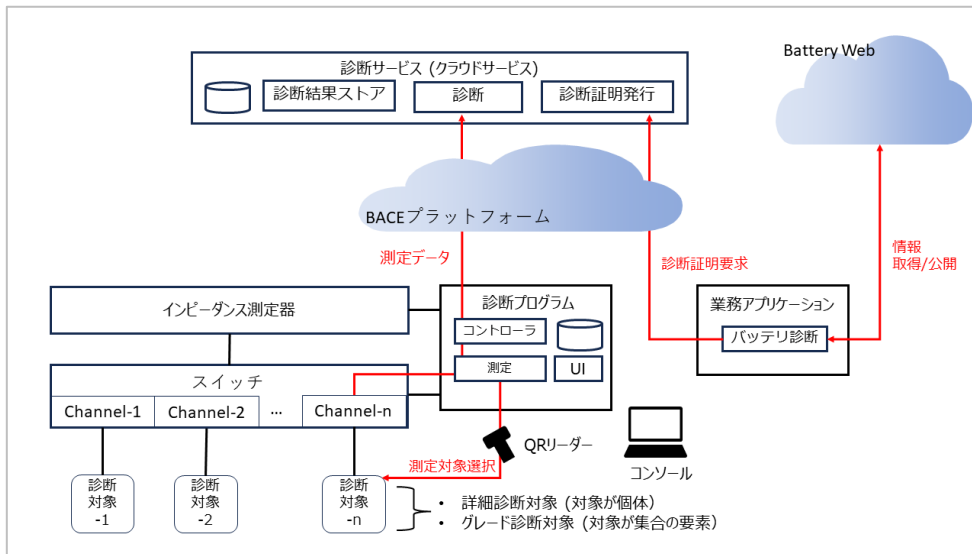


図 22 バッテリー性能診断アプリケーション構造



診断におけるシステムユースケースは以下のとおり。

表 16 システムユースケース一覧

プロセス	要求	システム機能
診断	測定装置を制御して対象バッテリーの測定と診断アルゴリズムとの連携を実現する	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定・診断機を制御し自動的に測定と診断を実施する</li> <li>測定・診断結果を記録する</li> <li>証明書の発行を行う</li> </ul>

表 17 利用機器

利用機器	写真
測定適正化治具	

利用機器	写真
スイッチ (SW1001、日置電機製)	
インピーダンス測定器 (BT4560、BT4560-100V 日置電機製)	

診断サービスをクラウド化することで測定・診断装置を更新せずに診断アルゴリズムの置き換えを可能とし、測定治具のチャンネルによって多数のバッテリーセルを一度に測定・診断できるよう自動制御を実装した。

### 2.1.5.3 バッテリー情報参照アプリケーション

回収事業者が収集するリユースバッテリー製造業者から要望されている品質管理に関わる情報について、バッテリーセルごとに閲覧・共有可能とするバッテリー情報参照アプリケーションを開発した。

表 18 閲覧可能な主な情報

プロセス	バッテリーの情報	主な項目
情報収集	回収事業者の製品情報	<ul style="list-style-type: none"> <li>製品シリアル番号</li> <li>パック識別子 (DID)</li> <li>回収事業者識別子 (DID)</li> </ul>
	分解前パック情報	<ul style="list-style-type: none"> <li>車載パック部品番号</li> <li>車載パックシリアル番号</li> <li>セル/モジュール構造</li> </ul>
	車両情報	<ul style="list-style-type: none"> <li>車台番号</li> <li>オドメータ</li> </ul>
解体	解体作業情報	<ul style="list-style-type: none"> <li>解体日</li> <li>解体事業者識別子 (DID)</li> </ul>
分解	分解作業情報	<ul style="list-style-type: none"> <li>分解日</li> <li>作業担当者</li> </ul>

プロセス	バッテリーの情報	主な項目
診断	診断情報	<ul style="list-style-type: none"> <li>推定 SoH</li> <li>診断日</li> <li>診断者識別子 (DID)</li> <li>診断証明</li> </ul>
報告	CO <sub>2</sub> 排出量	<ul style="list-style-type: none"> <li>CO<sub>2</sub> 換算排出量合計 (kg-CO<sub>2</sub>e/kWh)</li> </ul>

図 23 バッテリー情報の閲覧画面

図 24 証明書の検証画面

回収事業者がバッテリー製品に貼付した二次元コードをカメラで読み取ることでバッテリー情報を表示でき、あわせて診断証明の電子署名を暗号的に検証することが可能である。

#### 2.1.5.4 2024年度、2025年度における改善点

表 19 2024年度、2025年度における改善点

アプリケーション	改善点
回収業務・在庫管理業務アプリケーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 排出業者が操作する工程を改修業務アプリとして新規追加した</li> <li>・ 排出業者が入力のために用いるアプリケーションのUIをスマホに適正化し、より簡便な入力を可能にした</li> <li>・ 回収業者の入庫、分解などの工程において、二次元コードの読み取りでアプリケーションの操作が完結するように改善し、各工程の作業に付随するシステム操作の煩雑さを軽減した</li> <li>・ 各工程で排出されるCO<sub>2</sub>換算排出量を計算し記録するようにした</li> </ul>
バッテリー性能診断アプリケーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ アプリケーション操作を二次元コードの読み取りで実現し、片手での操作を可能とした</li> <li>・ 多チャンネルを持つ測定適正化治具を接続して多くのバッテリーセルを一度に測定可能とした</li> </ul>
バッテリー情報参照アプリケーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ リユースバッテリー製造業者から要望された、品質管理に関わる情報を閲覧可能とした</li> <li>・ バッテリーセルに貼付された二次元コードを読み取ることでバッテリー情報の索引・閲覧操作が可能となるようにした</li> <li>・ 診断サービスを利用した診断結果・診断証明をバッテリー情報として閲覧・検証可能とした</li> <li>・ バッテリーのCO<sub>2</sub>換算排出量をバッテリー情報として閲覧・検証可能とした</li> </ul>

#### 2.1.5.5 実施結果概要

高速診断のためのアプリを開発し、独自開発の専用治具により、1セルあたりの診断時間を従来の手法から90%以上短縮し、現場での効率化を達成した。さらに、現場でのフィードバックにもとづいて業務アプリの開発・改善により、現業員の操作性を高めるとともに、共通機能と個別機能を分離・独立した設計をすることで開発時のソフトウェア再利用性を高めた。

#### 2.1.6 情報流通プラットフォームの開発

##### 2.1.6.1 概略

本項では、3か年計画における実施項目「システム構造設計」およびプラットフォーム開発の成果を統合して報告する。本事業では、特定の管理者に依存せず、各事業者がデータ主権を維持したまま情報の真正性を保証できる、Web3技術を基盤とした非中央集権型プ

プラットフォーム「Battery Web」を構築した。

各年の実施内容：

2023 年度：非中央集権型アーキテクチャの基礎設計（項目：③システム構造設計、④システム開発）

W3C 国際標準の DID（分散型識別子）および VC（検証可能な資格情報）を採用したプラットフォーム「Battery Web」の基礎設計を実施した。バッテリーがパックからセルへと解体・再構成される過程を一貫して追跡・参照するための実装を設計・開発した。

2024 年度：診断・業務アプリとの統合（項目：③システム設計・開発）

「Battery Web」の開発を進め、品質管理情報を含めた診断・業務アプリとの連携を強化し、DID/VC がプラットフォームに登録・利用できるように実装をおこなった。

2025 年度：実運用のための証明書参照・検証の実装（項目：④システム構造設計）

UX 改善の検討結果に基づき、Battery URL を介した証明書へのアクセス手法のリファレンス実装をおこない、診断結果に対する証明書の参照と検証のための基礎的なアプリケーションを開発した。

情報流通プラットフォームはデータ主権を確保したデジタル空間において、情報を信頼して授受できることが目的となる。W3C が定める DID/VC の標準に準拠することで、技術的な実現は可能であるが、異なる事業者や組織が相互に運用可能とするためには、それぞれが異なる実装を実施する手間や無駄が発生する。例えば、インターネット上の情報にすぐにアクセスできるように使用済みバッテリーの情報に容易にアクセス可能とすることを目的として本プラットフォームの開発を実施した。本項では主要な概念について解説する。

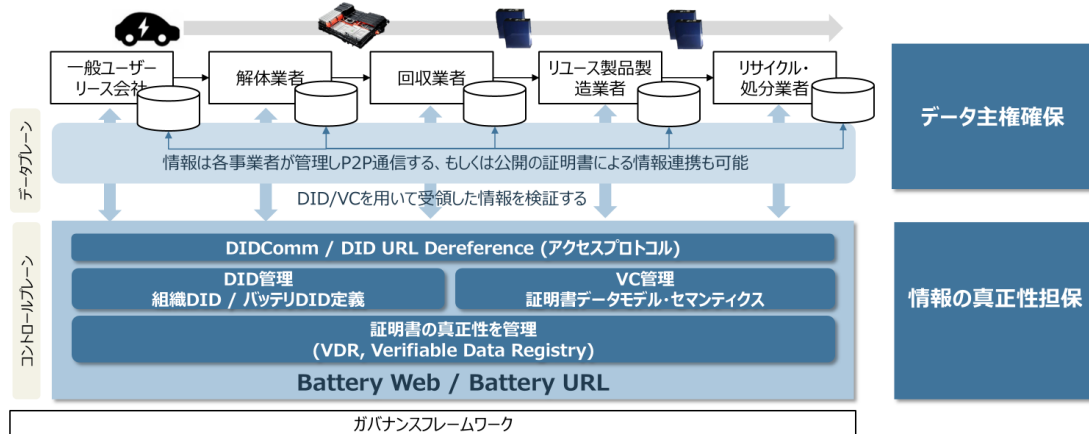


図 25 Battery Web / Battery URL 概略図

#### ・ Battery Web/Battery URL

本プラットフォーム「Battery Web」は、W3C (World Wide Web Consortium) が定める DID および VC の国際標準に準拠した、非中央集権型の情報流通プラットフォームである。本事業では、ネットワーク上に分散して存在するバッテリー個体の資格情報へ、インターネット経由で一意にアクセスするための仕様として「Battery URL」を設計・定義した。

Battery URL は、バッテリーパックの DID に、証明書発行者の識別子やセル単位のローカル識別子をパス (path) として連結した構造を持ち、グローバルに一意な識別子として機能する。この識別体系により、バッテリーがパックからセルへと分解され、世代を超えて流通する過程においても、個体ごとの履歴や特性を正確に特定し、参照することが可能となる。

Battery Web の役割は、この Battery URL を介して分散管理されている証明書へのアクセス (DID URL Dereferencing) を実現することにある。本事業では、これら URL の規則およびアクセス手法の妥当性を検証するため、実際に動作するリファレンス実装を開発した。

プラットフォーム上で流通する証明書は、発行者の電子署名によって真正性 (発行者の正当性) とインテグリティ (内容の未改ざん性) が保証される。また、バッテリーの基本諸元などの「公開 VC」はレジストリを通じて誰でも検索・閲覧可能とする一方、診断データなどの機密情報を含む「非公開 VC」は、所有者が許可した権限を有する当事者間でのみ安全に授受できる二層構造として構築した。

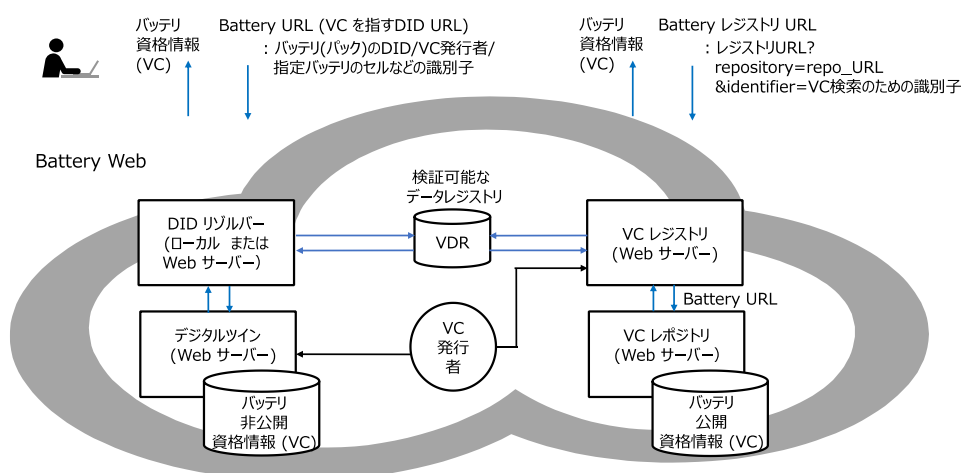


図 26 Battery Web の概念

### 2.1.6.2 システムアーキテクチャ

バッテリーの非公開資格情報 (VC) は、Battery URL をもとに当該資格情報の持ち主であるデジタルツインから直接入手する。Battery URL は、バッテリー (パック) の DID に証明書の発行者の DID と情報の対象となるモノ (セルなど) のローカルな識別子をそれぞれ path として続けたものと定義した。バッテリー (パック) の DID を DID リゾルバに入力すると DID ドキュメントが得られ、そこから資格情報 (VC) にアクセスすることができる。DID URL からそれが指すリソース (今の場合は資格情報 VC) を得ることを DID URL Dereferencing と呼ぶ。

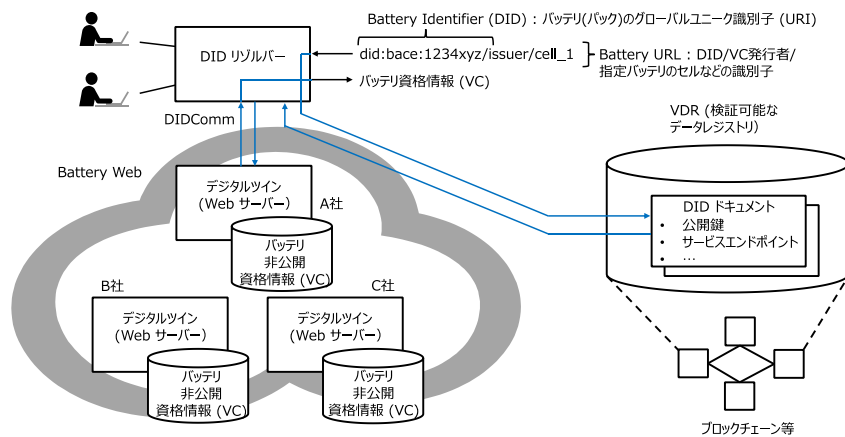


図 27 システムアーキテクチャ 1

バッテリーの公開資格情報 (VC) は、VC レジストリ (Web サーバー) に登録することで、誰でも検索、入手できるようになる。VC レジストリの仕様は特に定めないが、例えば通常の Web ブラウザに VC レジストリの URL を入力し、クエリパラメータで VC を保管する VC レポジトリと VC 検索のための識別子を指定すれば公開 VC が得られる。このシナリオについてはシステムを開発して動作を検証した。

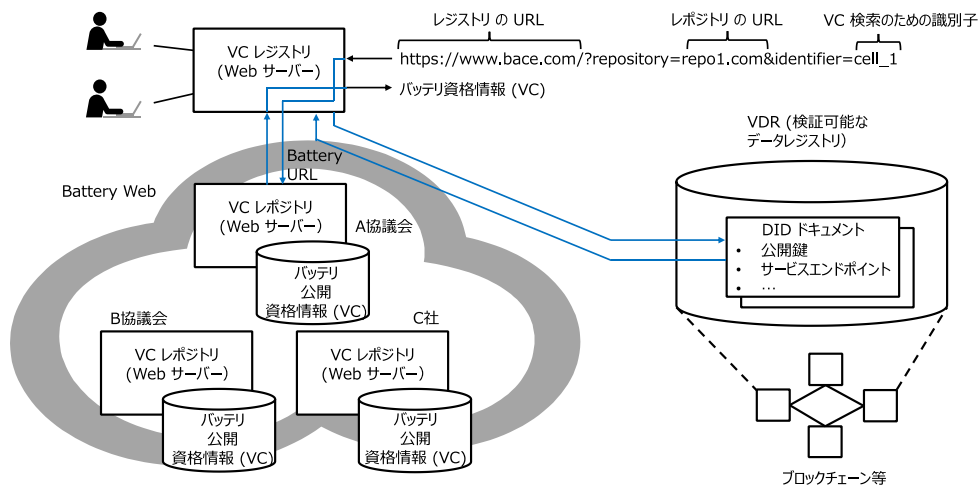


図 28 システムアーキテクチャ 2

### 2.1.6.3 設計の概要

Battery Web の設計は相互運用性の確保を重要な目標として、以下の仕様を設計した。設計した内容はより多くのプラットフォーム参加者に向けてプロジェクト技術情報ページとしてインターネット上での公開を予定している。

- ・ DID メソッドの仕様  
W3C DID Core 仕様 (<https://www.w3.org/TR/did-core/>) で定義されている各項目について、BACE プロファイル仕様としての要求を記述したもの。
- ・ DID ドキュメント拡張のスキーマ定義
- ・ バッテリに関わる対象物の JSON スキーマ定義  
特に車載バッテリーパックが分解/リサイクル/リユースされる間にバッテリーの状態がどのように公開されるかを定義する。
- ・ データ交換の仕様
- ・ DIDComm によるメッセージングを用いてデータの交換をおこなう。
- ・ DIDComm によってエンドツーエンドの暗号化を実現する。

以下にこの仕様に関する重要なコンセプトを解説する。

#### ・使用済みバッテリーの状態遷移の表現

車載バッテリーパックは、車両から取り外され、セルに分解され、分解されたセルがリサイクル/リユースされる一生を辿る。車載バッテリーパックに含まれていたセルがリサイクル/リユースされた総数、セルの残存性能 (SoH) などのバッテリーの状態を証明書 (VC) として公開できる。

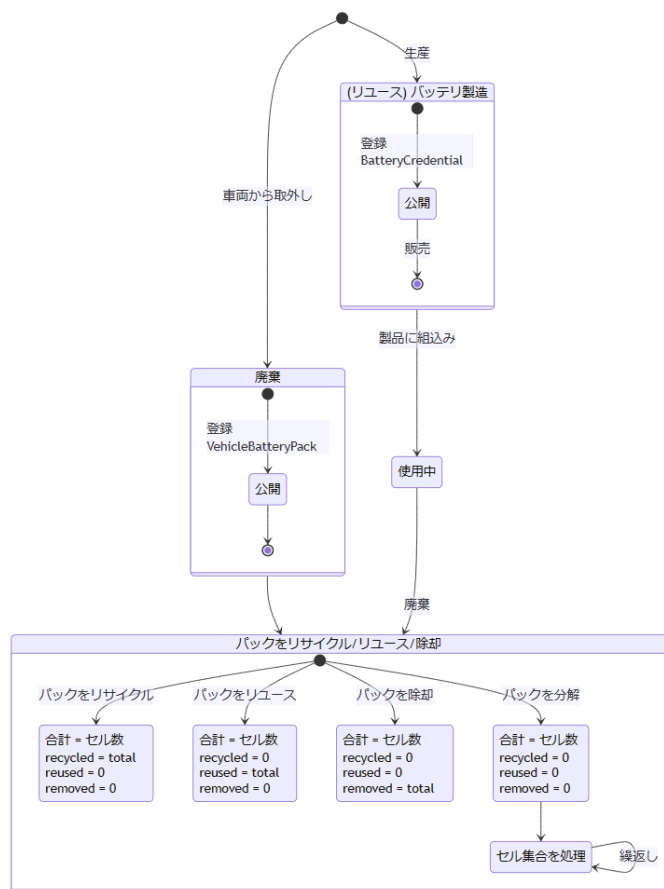


図 29 バッテリーの状態遷移

### ・ バッテリー DID

バッテリー DID とは、バッテリーをユニークに識別する識別子と定義しバッテリーに関する情報へのアクセスする方法を取得する統一的な手段を与える。

- ・ 識別子は分散型識別子 (DID) を用いる
- ・ 対象であるバッテリーの基本情報をプロフィールとして VC (証明書) を紐付ける
- ・ 対象であるバッテリーに関する情報 (証明書) が格納されるレポジトリへのアクセス情報を紐付ける
- ・ 対象であるバッテリーに関する情報 (証明書) の格納場所を DID URL を用いて表す DID を用いることで、
- ・ 識別子を付番する中央オーソリティが不要で、緩やかに結びついた組織団体間での情報交換に向いていること
- ・ DID ドキュメントという識別子が指す対象に関する情報を格納できるデータが標準化されていること
- ・ バッテリーに関する情報を含む証明書を VC としたときに、そこで用いる識別子として使用し易いこと

などの利点がある。

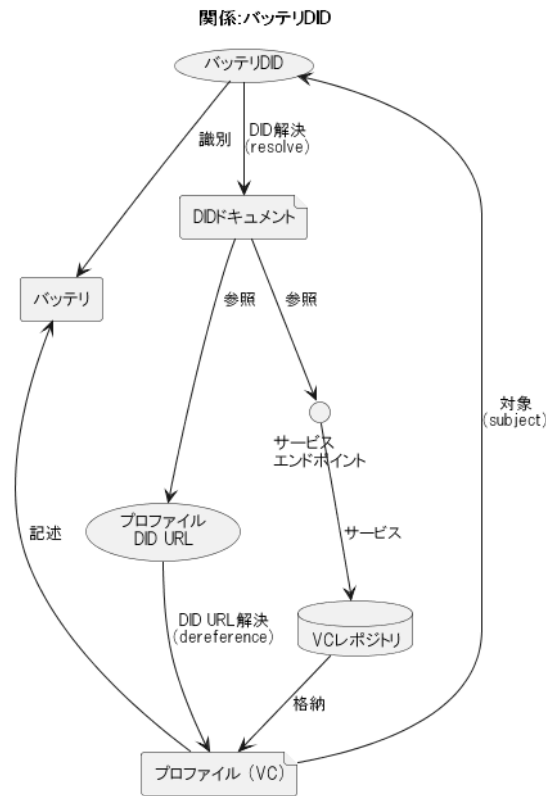


図 30 バッテリ DID の関係図

### ・ トラスト

本プラットフォームが目指す環境は、単一の中央オーソリティを持たず、さまざまな組織との緩やかな連携を実現することである。中央オーソリティ（例：国家機関など）がある場合は、あらかじめその中央オーソリティを信頼（トラスト）するという暗黙の前提があり、情報を提供している組織が何者であるかを都度確認する必要はない。しかし、中央オーソリティが不在で、あらかじめ決っていない、緩やかに結びついた組織団体の間での情報交換をする環境においては、情報の作成者の組織が何者であることを確認する仕組みが必要となる。また、データが信用できる 1 カ所の格納場所に格納されている場合は、そのデータの正当性について確認する必要はないが、データが分散して、それぞれ管理者が異なる格納場所に格納されている環境においては、そのデータの作成者の確認と改竄されていないことを確認する仕組みが必要となる。

今回検討しているユースケースにおいて典型的に現れるものとして下記を説明する。

- ・ バッテリに関わるビジネスをおこなっている組織
- ・ バッテリの診断の情報に対する証明書の発行

### ・ 組織

本プラットフォームで取り扱うデータには、その情報の作成者（発行者）が識別

子とそれに対応する暗号的署名が付与されているものの、それだけでは署名が正しく付いているということだけの確認であって、その作成者が正しく現実社会での組織のものであるかは確認できない。情報を交換する2者間であらかじめ、それぞれを識別する情報（公開鍵）を交換しておけるならば、対象となるデータが正しく相手方が作成したものであることが確認できる。しかし、緩やかに結びついた組織団体の間で情報交換をする環境においてはそのようなあらかじめのやり取りは必ずしも成立しない。そこで、組織が何者であることを証明・担保する別の組織（例：本事業の組織体）を確認できる仕組みが必要である。中央オーソリティを前提としない環境においては、そのような組織が複数ある前提である。

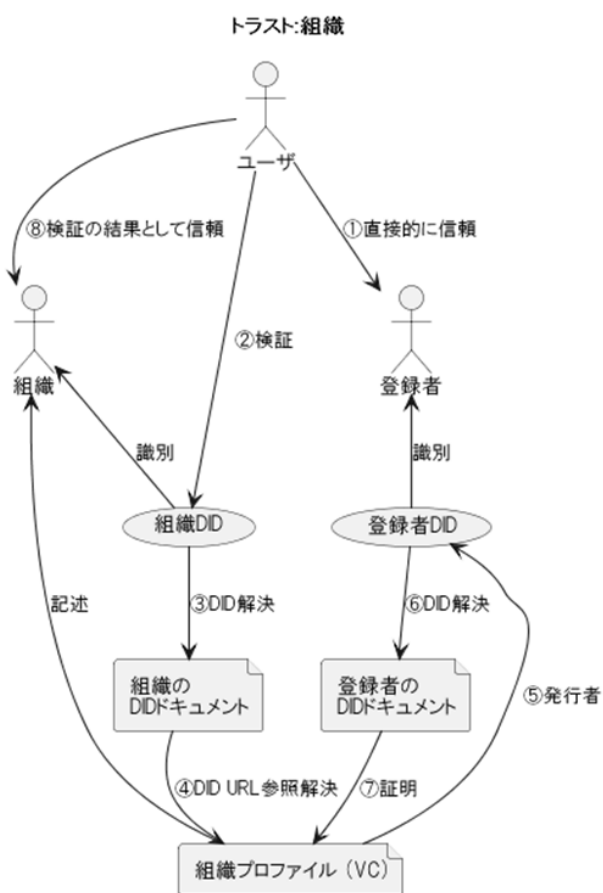


図 31 組織 DID の関係図

### ・ 診断証明書

バッテリーの診断をおこなう状況では、3種類の登場人物がある。

- ・ バッテリーの診断を実行して、その診断結果を保持する者 (Holder)： 下記診断サービス提供者が提供する診断機能の利用者
- ・ バッテリーの診断を機能として提供する者 (Issuer)： 診断結果を証明書として発行する者

- ・ 診断証明書を利用する者 (Verifier) : 診断証明書が正当であることを確認する者

バッテリー DID と組織のトラストの仕組みを組合せた仕組みとし、診断証明書を利用する者は、直接的に診断実行者を知らなくとも、対象のバッテリーに紐付いている診断結果を信用できるよう設計した。

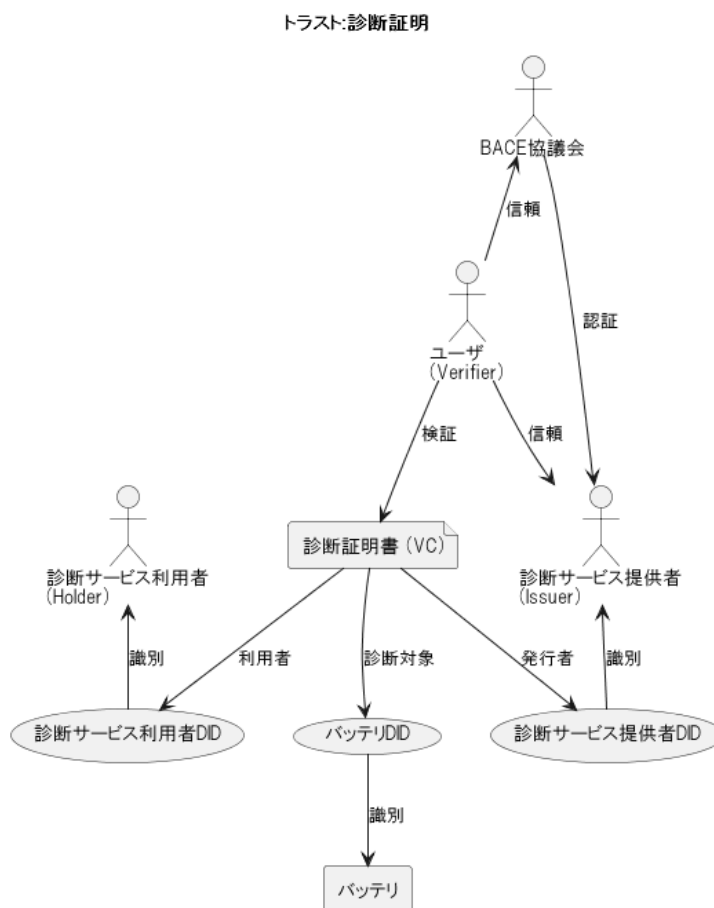


図 32 診断証明書の関係図

#### 2.1.6.4 実施結果概要

W3C 国際標準の DID/VC に準拠した「Battery Web」を構築し、特定の管理者に依存せず、各事業者がデータ主権を維持しながら情報の真正性を保証できるデジタル基盤を完成させた。この非中央集権モデルの採用により、従来の認証局を利用する方式と比較して、証明書の発行・運用コストを削減できることを試算のもとづいて確認した。

#### 2.1.7 実証と効果検証

##### 2.1.7.1 概略

3 年を通じて、使用済みバッテリーの静脈バリューチェーンにおける「情報の管理」と「作業効率性」を現場レベルで立証することを目的に実際の作業予定場所での作業実証を実施

した。実証は主に共同事業者であるアクトの兵庫工場に新設されたリチウムイオンバッテリー専用施設を中心に、解体・回収・診断・出荷に至る一連のフローを対象とした。

また、診断業務や CFP 算定の効率化、情報連携の効率化については、実証で得られた結果と机上での試算を用いて効果検証をおこなった。

## 2.1.7.2 現場での実証結果概要

- 2023 年度実証

システムの基盤構築と初期の業務フローの確認を主目的として、情報流通プラットフォームと業務・診断アプリケーションの初期設計に基づき構築した基礎的な業務フローを実物の使用済みバッテリーと工具を用いて実施状況と作業時間、システムとの連携を確認した。電動工具やフォークリフト等の消費電力および排出物の分類別重量を実測し、リユース工程が環境負荷に与える影響が極めて小さいことを確認した。

表 20 2023 年度実証概要

実施日	2024/1/15～1/18（うち検証は3日間）
実施場所	アクト社仮倉庫内
対象バッテリー	HEV 用バッテリーパック x 2 個 BEV 用バッテリーパック x 1 個（分解作業のみ確認）
主な確認項目と結果	
各作業時間の確認	HEV 用バッテリー 2 個での実作業での平均作業時間は以下のとおり。 ・入庫 … 3 分 ・分解 … 137 分 ・診断 … 約 2 分(138 秒)/セル (交流インピーダンス法を用いた場合)
分解作業の確認	分解は完遂したものの、バッテリー毎に必要な工具・手順が異なり、途中で分解を中断せざるを得ない事があった。品質確保の面でも手順化を徹底する必要がある。
業務・診断アプリとの連携の確認	各工程における情報入力や診断機器との連携は確認できた。手袋などを装着した作業を中断して PC で入力を行うのは煩雑で、ユーザーインターフェース改善の余地が大きいことがわかった。
情報連携 PF との連携の確認	業務アプリをとおして入力した情報はプラットフォームへ連携されたことを確認した
分解後バッテリーの重量測定	付録参照
利用機材の消費電力測定	付録参照

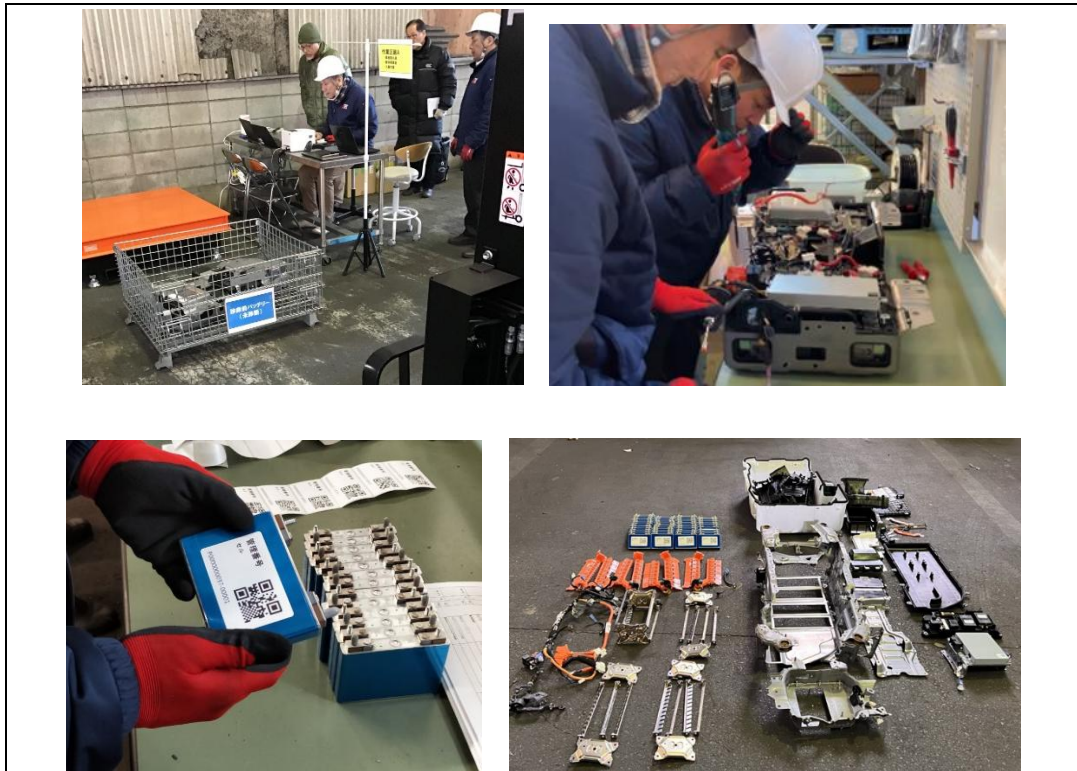


図 33 2023 年度実証風景

● 2024 年度の実証

実務適合と専用設備の導入検証を目的として、現場での物理的制約（防護装備による操作性低下など）を反映した業務アプリの実証と、独自開発の「測定適正化治具」を導入し、交流インピーダンス法による高速診断を実務フローへ適合させるための検証を行った。

表 21 2024 年度実証概要

実施日	2024/12/16～1/19（うち検証は3日間）
実施場所	アクト社兵庫工場，解体業者作業場
対象バッテリー	HEV 用バッテリーパック x 2 個 BEV 用バッテリーパック x 1 個
主な確認項目と結果	
各作業時間の確認	HEV 用バッテリー 2 個での実作業での平均作業時間は以下のとおり。 ・入庫 … 5 分 ・分解 … 103 分 ・診断(交流インピーダンス法と専用治具を用いた場合の 1 パックにかかる時間) … 55 分 (診断にかかる時間は昨年度と同一)

	<p>・診断(他社高速診断方式1セルにかかる時間) … 0.5分/セル  *他社高速診断方式では専用治具を用いずに測定を実施</p>
分解作業の確認	分解手順を準備して実施したため作業は円滑に進み、作業時間も短縮している。
業務アプリとの連携の確認	品質管理などに必要な項目などを追加したうえで、昨年度課題であった操作性などは作業上の実態に合わせたユーザーインターフェースを用いた。
測定診断機・接続治具の動作確認	2024年度より専用に設計・開発した治具と切り替え器を用い、診断アプリでの制御ができること確認した。また、別の診断技術も同様の業務フローで操作可能なように取り込みを行い、実際の診断を実施した。
情報連携PFとの連携の確認	業務アプリをとおして入力した情報はプラットフォームへ連携されたことを確認した。また、簡易的な情報参照機能を準備して内容が相違ないことを確認した。
CFP算定のための電力測定ポイントの精緻化	アクト専用工場における実作業を確認し、電量消費の測定ポイントの精緻化を実施した。(2.1.4項参照)



図 34 2024 年度実証風景

- 2025 年度の実証

実際の有価取引現場での利用を目的として、実際のバッテリーを用いた小規模モデル事業でのアプリケーションの利用、情報流通プラットフォームの連携、排出業者（解体業者）による回収依頼から、回収業者での有価買取、リユース製造業者への転売を想定した分解・診断に至る一連の有価取引プロセスを実施した。現業員がスマートフォンアプリを用いて一連の業務を遅滞なく遂行できる実用性を最終確認した。

表 22 2025 年度実証概要

実施日	2025/12/14～12/28 (全体検証は2日、分解作業は継続実施)
実施場所	アクト社兵庫工場，解体業者作業場
対象バッテリー	BEV用バッテリーパック x 6個
主な確認項目	
解体業者における業務アプリの効率性改善確認	解体業者からは有価での買取であれば、追加の情報登録などは許容できるとの前提で、今回のアプリは利便性が高く十分実用的であるとの評価をうけた。
診断機・接続治具の反復動作確認	診断アプリを通して4パック分すべての診断を実施した。その間での大きな不具合はなく稼働できた。
情報連携PFと情報参照アプリの確認	構築した情報参照アプリを用いて、解体～輸送～分解・診断までの作業履歴、診断結果、CO <sub>2</sub> 排出量の参照ができ、診断結果についてはVCの提示・検証が行えることを確認した。





図 35 2025 年度実証風景

### 2.1.7.3 効果検証

前項の実証で得た結果をもとに、本事業での効率化目標 3 点について検証をおこなった。検証方法と結果についてそれぞれ説明を行う。

#### 本事業における効率化目標：

- (1) 電池性能取得作業の効率化 … バッテリー性能の短時間計測技術を IoT 化して効率的に情報蓄積する。情報取得作業の時間を計測して評価。アプリケーション開発の工数は推定して評価。
- (2) CFP 算定の効率化 … 収集データから CFP を算定し、効率的にカーボンクレジットを実現する。CFP 算定と証憑整理・集計に係る作業時間を計測して評価。
- (3) データ交換の効率化 … データ信頼性を特定組織に依存せずに確保することで、複数事業者にまたがる情報収集を効率化する。データ交換の証明書発行費用、連携システム開発工数を推定して評価。

#### (1) 電池性能取得作業の効率化

電池性能取得作業では、使用済みバッテリーの現在の残存性能 (SoH) を得るためにバッテリーを測定・診断する。その既存手法と今回開発した手法との比較を行う。

表 23 診断手法比較

	既存手法	今回の手法
電池性能取得方法	実際に充放電をおこなう	容量推定をおこなう診断アルゴリズムを適用する
利点	正確な値を取得できる	高速に診断が可能
弱点	測定に時間を要する	推定精度は別途担保が必要
必要な設備 (各手法に専用なもの)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・充放電測定装置</li> <li>・充放電電源装置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・インピーダンス測定器</li> <li>・診断アプリケーション</li> </ul>
必要な設備 (両手法に共通なもの)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・測定適正化治具</li> <li>・多チャンネルスイッチ</li> </ul>	

電池性能取得作業では次のタスクをおこなう。既存手法と今回の手法で要する時間が異なるのは、下表の測定・診断 (D) のタスクのみである。その時間の比較をおこなった。

表 24 診断作業ごとの作業差

時間	タスク	既存手法と今回手法
診断前作業時間 (PR)	診断対象を運び込む	同じ
	診断対象をシステムに入力する	同じ
	測定器に接続する	同じ
測定・診断時間 (D)	測定器を使用し測定を実行する	要する時間が異なる
	診断機能を実行する	今回手法のみに必要
診断後作業時間 (PO)	測定器から取り外す	同じ
	診断対象を保管する	同じ

比較対象の既存手法は、一般的に充放電装置を用いた充放電法とし、作業時間は理論上の値を用いる。充放電法では、正確な SoH を測定するためには低電流での充電をおこなう。C レート 0.2C での充電をおこなった場合、放電に要する時間を除いても、5 時間を要する。

また、実測は 1 チャンネルでおこなった。多チャンネル化をおこなった場合、インピーダンス測定はシリアルな順におこなう必要がある。従って、測定に要する時間は 1 チャンネルの測定に要する時間×チャンネル数となる。

充放電装置は多チャンネル化が可能であり、充放電は平行に実行することができる。従って、測定に要する時間はチャンネル数によらず一定である。

下表では 10 チャンネルを使用した場合を比較する。

表 25 測定・診断所要時間の比較

タスク	既存手法 (理論上)	今回の手法 (実測)	
		1 チャンネル	10 チャンネル
測定器を使用し測定 を実行する	～約 5 時間	138 秒	1,380 秒 (23 分)
診断機能を実行する	N/A	1 秒未満	

以上のように、既存手法が 5 時間程度であるのに対し、1 チャンネルであれば、138 秒で診断ができるため、今回の手法の所要時間にして 1% 以内に削減できることが分かった。その費用比較については、比較対象のコンフィグレーションに依存するものの、一般に多チャンネル化にはコストを要し、充放電の多チャンネル化の場合は、それに応じて充放電電源装置の拡張をおこなう必要がある。インピーダンス測定の多チャンネル化はスイッチのみである。このことから、本手法の費用負担の方が小さいことが期待できる。また、充放電法は実際にバッテリーに対して充電と放電をおこなうことから、不都合のあるバ

バッテリーに対しては発熱・発火などの危険性が伴う。インピーダンスを用いた測定では少量の電流を用いるため安全性は大幅に改善される。

電池性能の診断をおこなうアプリケーションを開発するためのコストの低減効果を、業務アプリケーションの一般業務機能の診断に関わる機能をすべて独自開発した場合と、今回開発したプラットフォーム上の診断サービスを利用する場合で比較した。

表 26 独自開発とプラットフォーム利用時の必要開発機能の比較

	電池性能の診断を実現する前の業務アプリケーションに加えて必要な機能	独自開発時	プラットフォーム利用時	
			開発の必要	診断サービスの利用
1.	診断に必要な情報の収集			
1-1.	車両情報の保存管理	必要	不要	可能
1-2.	分解後セル/モジュールのモデル情報の保存管理	必要	不要	可能
1-3.	CFP 情報の保存管理	必要	不要	可能
2.	診断			
2-1.	診断対象の読取り	必要	不要	可能
2-2.	測定結果の保存管理	必要	不要	可能
2-3.	診断結果の保存管理	必要	不要	可能
2-4.	診断アルゴリズムの更新	必要	不要	可能
2-5.	診断アルゴリズムモデルデータベースの構築	必要	不要	可能
3.	診断結果利用			
3-1.	在庫管理との連携	必要	必要	
3-2.	仕分けでの利用	必要	必要	
3-3.	診断結果の共有	必要	不要	可能
3-4.	診断結果の証明発行	必要	不要	可能
3-5.	CFP 情報の公開	必要	不要	可能

今回開発した機能を使用することで、必要開発項目 13 項目中 11 項目（約 80%超）に削減できることを確認した。

使用済みバッテリーに関わる事業者に対して、本事業のプラットフォームの使用を促す効果が期待できると考える。

## （2）CFP 算定の効率化

電池解体作業を中心とした電池リユースプロセスにおける CFP 算定のためのデータ取得および算定の業務の効率を、一般的な手作業で実施する方法と、関連データを自動で収集して算定に用いる方法で比較する。

表 27 データ取得方法の比較

	一般的な方法	自動取得手法
データ取得方法	走行距離、消費電力などの計測を PC などに手入力する	集計可能な各種センサーなどのデータを自動集約
主な自動取得項目	<p>下記はカタログなどの固定値なので、事前取得可能で定期更新のみで対応する</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>工場外での車両の燃費、CO<sub>2</sub>原単位</li> <li>電力の CO<sub>2</sub>原単位</li> <li>工場内輸送のフォークリフトの移動距離に対する消費電力</li> <li>電動工具の使用時間に対する消費電力</li> </ul>	<p>先の他に下記を自動取得可能</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>工場外の車両の走行距離を目的場所別にリスト化（選択）</li> <li>工場外の車両の種類に応じた燃費のリスト化（選択）</li> <li>フォークリフトの構内走行距離を目的場所別にリスト化（選択）</li> <li>フォークリフトの車種に応じた電費のリスト化（選択）</li> <li>診断器などの設備稼働時の電力消費データ取得</li> </ul>

一般的な方法では、走行距離のデータ確認とメモから PC への入力などの工程で約 5 分を要し、これらが、行き先のリスト選定をおこなうことで走行距離の自動算定をおこなえば、数秒（ここでは 5 秒に設定）でのデータ取得が可能になる。こうした CO<sub>2</sub> 算定のためのデータ取得の自動化を進めることで、CFP 算定に伴う業務の効率化が可能になる。作業プロセス全体を対象とした場合、以下のように効果が算定される。

表 28 作業削減効果

時間	タスク	作業量 (人・秒)	削減効果
入庫輸送	走行距離算定	300	98%
	車両燃費などデータ取得	300	98%
	その他 (重量計測など)	70	なし
一次仕分け	構内輸送距離算定	300	98%
	車両燃費などデータ取得	300	98%
	その他 (電池 ID 計測など)	40	なし
分解	構内輸送距離算定	300	98%
	車両燃費などデータ取得	300	98%
	電力計測データ取得	60	92%
	その他 (電力消費など)	50	なし
診断測定	構内輸送距離算定	300	98%
	車両燃費などデータ取得	300	98%
	その他 (重量計測など)	40	なし
出荷輸送	走行距離算定	300	98%
	車両燃費などデータ取得	300	98%
	その他 (重量計測など)	120	なし
集計業務		600	98%
削減効果		3,980 (1h6m20s)	90%

実証プロセスで試験を行い、電力計測時間、輸送時間の試験より構内作業の概算値を求め、簡易的な計算より効果を算定した。結果として、本プロセスに要する作業は1時間程度であり、そのうち計測にかかる業務時間が長いものは走行距離を算定する部分と、使用した車両の特性を入力する作業であり、自動化やリスト選択などをすることで、時間短縮による効率化が可能である。結果として、**想定する改善効果 90%**は達成することが算定された。1台の電池パックから始まり、1セルまでの出荷準備をるところまでの一連の計測業務にかかる時間が1時間程度と、業務への影響が大きかったが、6分程度に短縮することでCFP算定にかかる業務コストを実施可能なレベルに低減可能であることが確認された。今後、設定した原単位情報のマスタ情報の自動更新や他のシステムからの自動連係などの機能を実装することで、システムの高度化・効率化を進めるなどの改善が考えられる。

### (3) データ交換の効率化

データ信頼性を特定組織に依存せずに確保することで、複数事業者にまたがる情報収集を効率化する。データ信頼性を特定組織に依存せずに確保するために、Web3の非中央集権的技術を使用した。具体的には、下記の技術を使用した。

- ・ 非中央集権的識別子 (DID)
- ・ オーソリティに依存しない検証可能な証明書 (VC)
- ・ ピアツーピアな秘匿メッセージ交換 (DIDComm)

しかし、非中央集権的技術を使用しても必ずしも相互運用性が確保されるとは限らない。相互運用性の実現のために利用者が面する技術的ハードルもある。その理由として、下記があげられる。

- ・ 標準的仕様の欠如
- ・ 標準的仕様の中での相互運用性の欠如
- ・ 標準的実装の欠如
- ・ 利用者による自力開発の技術的ハードルとコスト

これら課題について、下記による解決を図った。

- ・ 相互運用性のための仕様化
- ・ 相互運用性のプラットフォーム化

検証では、これら開発した機能を、「バッテリー排出業者から排出された車載バッテリーパックをバッテリー回収業者が分解・診断」、「その診断情報と共に分解されたバッテリーセルをリユースバッテリー製造業者への出荷」という業務プロセスに適用し、データ交換が実際に効率的行われることを確認した。

情報流通プラットフォームを支える技術として、これら Web3 技術を今後も継続的に使用し、さらに拡張していくべきと考える。

次にデータ交換の効率化に関して掲げた以下の目標について考察する。

- ・ データ交換の証明書発行費用90%低減
- ・ 連携システム開発工数70%削減

#### (a) データ交換の証明書発行費用低減

検証可能な資格証明書（VC）は発行者により電子署名されるが、証明書の真正性とインテグリティの検証には電子署名に使われた秘密鍵に対応する公開鍵が確かに発行者のものであることが保証されていなければならない。本実証では W3C DID 標準に従い、自己生成した秘密鍵・公開鍵ペアの公開鍵を DID ドキュメントの一部として VDR（検証可能データレジストリ）に登録することでこれを保証している。また DIDComm によるピアツーピアのコミュニケーションにおいてもメッセージを送信相手の公開鍵で暗号化するが、ここでもその公開鍵が確かに相手のものであることが保証されることが前提となっている。

公開鍵暗号方式の公開鍵・秘密鍵、その所有者、所有者の識別子の結び付きを保証するには従来は認証局が発行する証明書に頼ることが一般的であったが、本実証ではそれが不要になるため、認証局の利用コストが削減できる。代わりに VDR の運用コストが発生するが、このサービスは鍵を生成するデジタルツインたちで共有できるためデジタルツイン当たりのコストはシステムコストをデジタルツインの数で割った値となる。証明書発行を有料サービスとした場合はエコシステム内でサービス料の授受があるが、エコシステム外へのキャッシュアウトは発生しないためこれは計算から除外する。以上から証明書発行コスト削減は以下のように算出される。

証明書発行のコスト削減（円）＝

$$\text{認証局の証明書料金} - \text{VDR のシステムコスト} / \text{デジタルツインの数}$$

全証明書発行のコスト削減（円）＝

$$\text{認証局の証明書料金} \times \text{デジタルツインの数} - \text{VDR のシステムコスト}$$

エコシステム全体の費用削減率（％）＝

$$\text{全証明書発行のコスト削減} \div (\text{認証局の証明書料金} \times \text{デジタルツインの数})$$

パラメータの値が以下の場合、費用削減率はデジタルツインの数によって下表のように計算される。

- ・ 認証局の組織認証型証明書料金 ＝ 50,000（円/年）

- ・ 認証局のドメイン認証型（保証なし）証明書料金 = 1,000（円/年）
- ・ VDR のシステムコスト = 360 万～600 万（円/年）

表 29 証明書発行費用比較

費用項目	ケース 1	ケース 2	ケース 3
① 認証局の組織認証型証明書料金（円/年）	50,000	50,000	50,000
② 組織のデジタルツインの数	30	50	100
③ 認証局のドメイン認証型（保証なし）証明書料金（円/年）	1,000	1,000	1,000
④ モノのデジタルツインの数	6,000	25,000	100,000
⑤ VDR のシステムコスト（円/年）	2,400,000	3,600,000	6,000,000
全削減（① × ② + ③ × ④ - ⑤）	5,100,000	23,900,000	99,000,000
削減率（全削減 ÷（① × ② + ③ × ④））	68 %	87 %	94 %

上表からプラットフォーム立上げ当初は参加組織数 30 社、バッテリーの年間取り扱い量 6,000 個（参加企業当たり 200 個、重複を考慮すると 400 個）の場合の削減率は 68%だが、EV 増加に伴うエコシステムの発展により参加企業数 100 社、バッテリー取り扱い量 10 万個になった場合は削減率 94%になることが分かる。

#### (b) 連携システム開発工削減

使用済みバッテリーをモジュール、セルなどに分解し、その診断情報などを自己主権型データとして管理する業務アプリケーションは以下の機能を持つ。

表 30 連携システム機能一覧

	機能	内容
①	アプリケーション機能	業務要件に従ってデジタルツインをコントロールし、VC を他のアプリケーションおよびバックエンドシステムと授受する ビジネスロジック システム IF
②	デジタルツイン機能	非公開データを VC として管理し、他のデジタルツインと授受するために以下の機能を提供する ・ プロトコルサービス ・ リゾルバ・インタフェース ・ ウォレット・インタフェース ・ ウォレット（セキュアストレージ）
③	VC レジストリ機能	公開データを VC として受け取り、Web インタフェースで誰でもアクセスできるように公開する ・ デジタルツイン ・ VC レポジトリ ・ データベース

これらの機能をモノリシックアプリケーションとして実装することは可能であるが、アプリケーションに共通な機能②③を個々に開発することは開発効率が悪いだけでなく、イ

インターオペラビリティの検証や保守に要するコスト増を招き好ましくない。

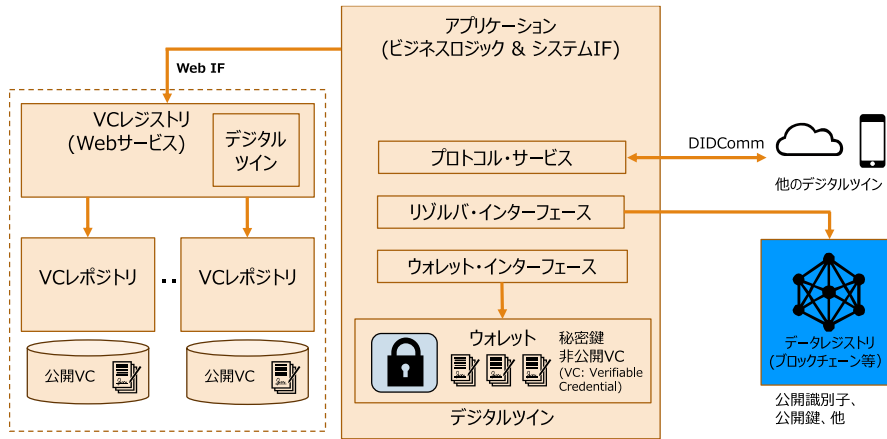


図 36 モノリシックアプリケーション

モノリシックアプリケーションの非効率性を改善するため、本実証では上記共通機能②③を情報流通プラットフォームとしてアプリケーションから分離して提供した。これにより業務アプリケーション開発は業務固有のビジネスロジックとバックエンドシステムとのインタフェースに集中することができる。

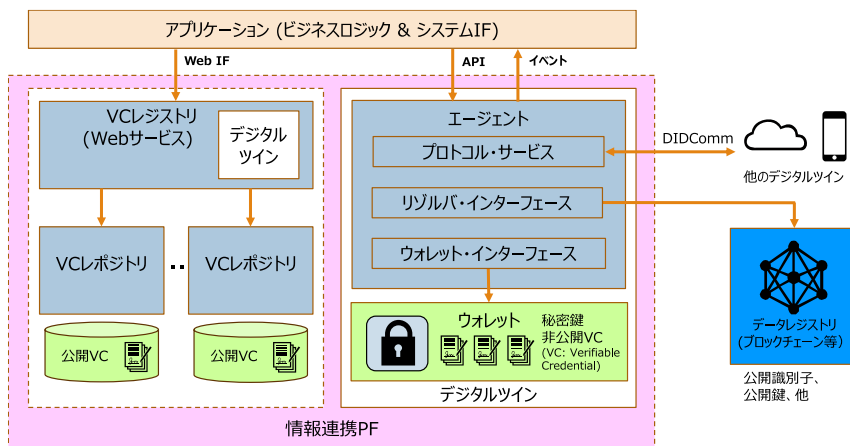


図 37 アプリケーションと情報流通プラットフォームの分離

情報流通プラットフォームの分離による効率化は以下の算式で定量化できる。

$$\text{効率化(\%)} = (\text{情報流通プラットフォームを除いたアプリケーションの開発工数} \div \text{モノリシックアプリケーション開発工数}) \times 100$$

今回モノリシックアプリケーションは開発していないが、その開発工数は

モノリシックアプリケーション開発工数 = 情報流通プラットフォームを除いたアプリケーションの機能①の開発工数 + (機能② + ③の開発工数)

と推定する。その場合、効率化は以下の式で計算できる。

$$\text{効率化(\%)} = 1 - \text{①} \div (\text{①} + \text{②} + \text{③})$$

実証実験を踏まえて①、②、③の開発工数を①を100として指数化し、上式に従って効率化を試算した結果を下表に示す。開発工数的には7割弱の効率化がプラットフォームによって達成できている。さらに開発の難易度は①が最も低く、求められるスキルは通常のWebアプリケーション開発の範囲内である。このため開発単価も①が最も低く、開発費的には7割以上の効率化が達成できると考えられる。

表 31 開発工数の試算

機能	内訳	開発工数	難易度
① アプリ機能		100	4.0
	ビジネスロジック	80	3
	システム I/F	20	5
② デジタルツイン機能		120	6.5
	プロトコルサービス	40	8
	レゾルバ・インタフェース	40	8
	ウォレット・インタフェース	20	5
	ウォレット (セキュアストレージ)	20	5
③ VC レジストリ機能		80	6.5
	デジタルツイン	40	8
	VC レポジトリ	20	5
	データベース	20	5
効率化 = $1 - (\text{①} \div (\text{①} + \text{②} + \text{③}))$		67 %	

以上を考慮して、実事業を実施した場合には目標値に対して下記のような効果が得られる可能性があることから、初期に想定した目標を達成する見通しが確認できた。

表 32 目標値に対する効果達成見通し

目標項目	目標数値	効果達成見通し
(1) 電池性能取得作業の効率化	作業時間の90%以上削減	削減効果99%
	アプリケーション開発工数の70%削減	削減効果80%
(2) CFP 算定の効率化	CFP 算定と証憑整理・集計作業の90%低減	削減効果90%
(3) データ交換の効率化	データ交換の証明書発行費用90%低減	削減効果94%
	連携システム開発工数70%削減	削減効果70%以上

## 2.2 設備導入内容及び稼働結果

### 2.2.1 概略

本実証事業では、使用済みバッテリーの価値顕在化を実務レベルで実現するため、高速・高精度な診断を支える専用治具の開発・導入をおこなった。専用治具本体の解説に加えて関連する測定・診断装置、アプリケーションの連携の結果について報告する。

### 2.2.2 測定適正化治具の開発

バッテリーの正確な電気特性の測定をおこなうためには、測定電極とバッテリー端子の接触状態を一定に保つことが不可欠である。このため、本事業では「測定適正化治具」を独自に開発した。

- ・ 可変・連装式设计：セルの電極形状やサイズに合わせて調整可能な可変機構を採用し、多様な車種のセルに対応可能とした。また、一度に複数のセルをセットできる連装式の構造とし、後述する多チャンネル測定に対応している。
- ・ 接触品質の均一化：測定電極部分を固定し、常に同一の力量で計測可能にすることで、人手による接触抵抗のばらつきを排除し、診断結果の再現性を確保した。



図 38 測定適正化治具全体図

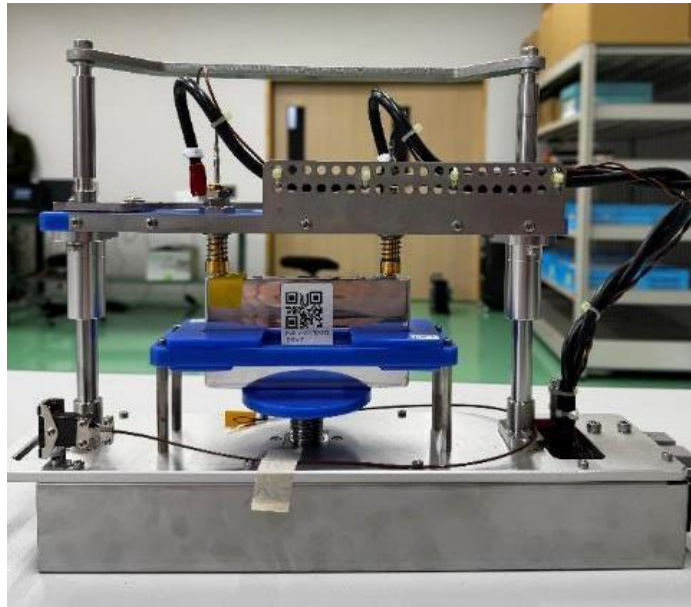


図 39 定適正化治具 単セル



図 40 定適正化治具と診断システム

### 2.2.3 設備の機能と処理能力

導入された診断システム一式（インピーダンス測定器、スイッチ、診断プログラム）および専用工場の機能と処理能力は以下のとおりである。

- ・ 多チャンネル自動測定機能：診断プログラムによりスイッチ（切替器）を制御し、セットされた最大 10 個（検証時）のセルをシリアルに自動計測する。
- ・ 高速診断処理：従来の充放電法では 1 セルあたり約 5 時間を要していた性能測定を、交流インピーダンス法を用いることで 138 秒（約 2 分余）に短縮した。これにより、10 チャンネル連装時の自動診断でも約 23 分で完了し、作業者が他の工程に従事している間に並行して処理をおこなう高いスループットを実現している。

### 2.2.5 稼働結果のまとめ

アクト兵庫工場の実証環境において、実際の HEV 用および BEV 用のバッテリーパックを用いた稼働検証を実施した結果、以下の成果を確認した。

- ・ ワークフローの完遂：分解、診断、そして情報流通プラットフォームへの登録に至る一連の業務フローが、設計どおりに遅滞なく実行できることを実証した。
- ・ 時間短縮目標の達成：診断アプリケーションの開発工数を約 80%削減し、性能取得についても当初目標どおり 90%以上の時間短縮を達成した。
- ・ 測定の安定性実証：同一セルを異なるチャンネルで計測した場合でも、取得されるインピーダンスデータに大きな乖離は発生せず、治具とシステムによる測定の安定性が確認された。

これにより、本設備が実際のビジネス現場において、高品質かつ低コストなバッテリー循環を実現するための有効なツールであることが確認された。



図 41 バッテリー診断風景

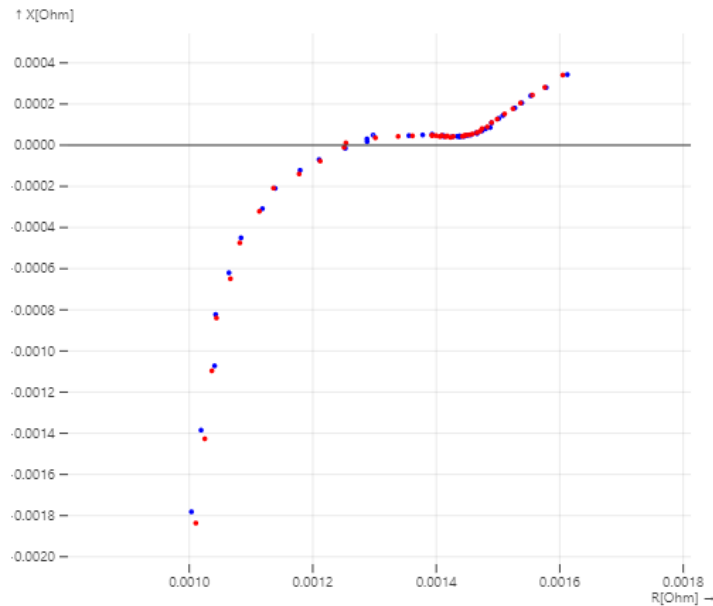


図 42 治具を用いて取得したインピーダンス測定グラフ（異なるスロット間でも測定品質が一様である）

### 2.3 実施結果を踏まえた考察

本実証事業の成果にもとづき、設定された4つの評価軸に沿った考察およびその根拠を以下にまとめる。

#### (A) 事業の有効性

評価：

本事業は、これまで人手に依存していたバッテリー性能取得作業と CFP 算定をデジタル技術により自動化・効率化し、情報流通プラットフォームと連携することで、バッテリー価値の透明性を確保した（詳細は 5.2 有効性の評価を参照）。物理的なバッテリーの価値顕在化と、デジタル上での信頼性の高い情報流通を一体的に提供する仕組みが、資源循環市場の形成における障壁を大幅に下げることが実証を通して利用する事業者からも具体的なニーズに対するソリューションとして受け入れられると期待する。

主なポイント：

- ・ バッテリー性能取得の高速化：交流インピーダンス法および専用治具の導入により、従来の充放電法（1セルあたり約5時間）に対し、計測・診断時間を138秒（約2.3分）まで短縮し、作業時間90%以上の削減目標を達成した
- ・ CFP算定の自動化：ロジスティクス情報や電力消費データを業務システムから自動収集・選択入力する仕組みを構築し、算定に関わる全工程の作業時間を90%以上短

縮可能であることを実証した

- ・ 情報の信頼性担保： Web3 技術の採用により、特定の中央管理組織に依存せず、情報の真正性と未改ざん性を数学的に保証する基盤を構築し、不適正利用や海外流出リスクの低減に寄与した

## (B) 事業の実現性・継続性

評価：

関連する事業者へのヒアリングと現場での実証を重ねることで利便性と効率性を兼ね備えたシステムの構築ができたこと、コスト低減策の導入と収益モデルの多層化により、使用済みバッテリーの排出量が増加した場合の自立的な事業成立の可能性は高く、運営コンソーシアムを母体とするバリューチェーン全体での経済合理性の確保を推進することで、継続性も十分に確保されている。

主なポイント：

- ・ 実用性：UX の改善、取り扱い情報の拡張を通して、排出、回収、リユースの各場面での利便性の向上を現場での実証を通して確認した
- ・ 運用コストの削減：認証局の利用を不要とする DID/VC の運用により、普及段階に応じて証明書発行・運用コストを 68%から最大 94%削減できる見通しを得た
- ・ 診断技術の柔軟性：診断機能をクラウド化することで、高価な診断機器を個別に導入することなく、最新のアルゴリズムを常に提供可能な体制を実現した

## (C) 事業の発展性

評価：

本プラットフォームは国際的な技術標準にもとづいた設計であり、相互運用性を備えつつ参加者の負担を低減するプラットフォーム設計を取っている。また、管理対象をパックからセル単位まで細分化することで、多様なリユース用途への拡張が可能である。将来的には、証明書の発行対象を拡大することで、サービス範囲の拡大に耐えるアーキテクチャを備えている。

主なポイント：

- ・ グローバル標準への準拠：W3C の DID/VC 標準に準拠しており、他のデータ連携基盤に対して、検証可能な証明書を通して相互信頼を確立可能である
- ・ 多層的収益モデル：中古 EV の品質保証、リユースバッテリーの診断評価、運用保守支援など、循環市場の進展に合わせた段階的なサービス展開を計画している
- ・ 用途開発の推進：情報流通プラットフォームは、本実証範囲にとどまらず、バッテリーの追跡性、品質管理全般に応用できるよう構築されている

## (D) 事業の効率性

評価：

プラットフォーム機能の共通化と、現場作業に最適化された UX の導入により、高い開発効率と業務効率を達成した。

主なポイント：

- ・ 開発工数の削減：DID/VC 管理やメッセージングなどの共通機能をプラットフォームとして分離提供したことで、個別の業務アプリケーション開発に必要な工数を約 70%以上削減可能であることを検証した
- ・ 現場作業の最適化：防護装備をした作業員でも操作しやすい二次元コードスキャナやカメラ入力、音声確認機能を導入し、作業ミス防止と時間の短縮を両立した

## 3. 今後の実証事業実施における課題及び解決方法等

### 3.1 概略

本章では、使用済みバッテリーを巡る課題について、すでに指摘されている一般的な論点を踏まえつつ、今後の排出量増加局面において顕在化・深刻化する可能性が高い構造的リスクとして整理を行う。そのうえで、これらの課題を回避・緩和するために必要と考えられる条件を明確化し、本実証事業がそれらの条件に対してどのような役割を果たすのかを示す。

本章においては、本実証事業が課題を直接的に解決したと断定するものではなく、課題解決に向けた道筋や前提条件を、実務レベルで具体化・検証した点にも着目する。あわせて、使用済みバッテリーを巡る課題を、制度面、事業性、社会的受容性、技術・運用面といった複数の観点から整理する。

### 3.2 現状の課題

#### ・ 海外流出が示す構造的リスク

日本国内で発生する EV 用使用済みバッテリーの多くは、使用済みとなった後も国内で循環利用されることなく、車載状態・パック状態に関わらずかなりの数量が海外へ流出しており、今後も増加するのでは、と指摘されている。これは単なる物流や貿易の問題にとどまらず、国内において使用済みバッテリーを受け止め、価値として循環させる市場や制度が十分に成立していないことの結果として生じている構造と考えられる。これらを抑制するためには、国内における経済合理性を持った循環モデルを形成することが重要である。また、この状態が継続したまま今後排出量が増加した場合、国内には資源としての価値や運用・安全に関する知見が十分に蓄積されないおそれがある。

- ・ **管理されない使用済みバッテリーがもたらす安全・社会的リスク**

リユース市場が十分に形成されていないことは、経済的な機会損失にとどまらず、使用済みバッテリーが適切に管理されないことによる安全・社会的リスクを内包していると考えられる。管理主体が不明確なバッテリーは、不適正処分、放置、所在不明といった状態に陥りやすく、結果として火災や事故といった二次的なリスクを引き起こす可能性がある。

このように、「市場が十分に形成されていない」という状態は、結果として使用済みバッテリーの管理責任が不明確になりやすい構造につながっていると捉えられる。EV 使用済みバッテリーの循環利用を巡る課題は、安全性や社会的受容性の観点からも検討が求められる。

- ・ **バッテリー情報が十分に活用されないことによる市場形成上の課題**

EV の一次利用段階において蓄積される使用・故障履歴や状態に関するデータは、使用済みバッテリーの評価や再利用を行ううえで重要な情報資産である。本来、これらのデータはリユース市場形成に必要で、価値向上を後押しすると考えられるが、現状では制度的整理が十分でないことから、活用されているとは言い難い。

バッテリーメーカー/自動車メーカー（一次製造者）は、使用済みバッテリーの処理を自主的なセーフティネットのみに依存するのではなく、民間事業による健全な処理や事業化が進展することを期待していると推察される。一方で、データ提供に関する責任範囲や利用条件が明確でない状況では、一時製造者側としても積極的な協力を踏み出しにくく、その結果として民間によるリユース事業が育ちにくい構造が生じている可能性がある。

### 3.3 課題解決に必要な条件

- ・ **制度設計の重要性**

使用済みバッテリーの循環利用は、市場原理のみに委ねて自然発生的に成立するものではなく、一定の制度設計を前提としなければ安定的な市場形成は難しい分野であると考えられる。安全性を担保するための最低限のルールや責任分担の整理、投資判断の拠り所となる共通前提が存在しなければ、関係主体は中長期的な取り組みに踏み出しにくい。特に、標準化や制度設計の強弱は市場形成に影響を与える要素のひとつである。基準が過度に緩い場合には事故や不信を招くおそれがあり、逆に厳しすぎる場合には過度なコスト負担によって参入が阻害される可能性がある。このバランスを意識した制度設計が重要と考えられる。

本事業では、制度設計の「技術的根拠」となる取り扱いの履歴や診断に関する情報をデジタル上で提供する枠組みを提供できるようにし、安全性と経済合理性を両立できることを実証した。これは将来制定される標準規格や業界ガイドラインに実務レベルの知

見を反映させるための、「リファレンス（参照モデル）」としての役割を果たすと考える。

#### ・ 標準化と技術基盤の考え方

標準化は、事業者の自由度を制限することを目的とするものではなく、安全性を確保したうえで民間の創意工夫を可能にするための基盤として機能することが望ましい。本章における「技術」には、情報システムに加え、輸送・保管・分解・取り扱いといった物理的プロセスに関する技術的要素も含まれる。

診断技術や評価手法、現場プロセスについて最低限守るべき共通ルールを設定しつつ、具体的な効率化や運用の工夫については民間に委ねる余地を残すことが、市場の健全性と経済性の両立につながると考えられる。

さらに、情報連携に関する技術基盤の設計においては、特定の事業者やシステムにデータが過度に集中しない構造とすることも重要な観点であると考えられる。各事業者が自らのデータを管理・活用しつつ、必要な範囲で他の主体と連携できる仕組みとすることで、新規参入の障壁を下げるとともに、将来的な技術更新や事業モデルの多様化にも柔軟に対応しやすくなる。このような考え方は、データの取り扱いに関する信頼性を高め、市場全体としての透明性や持続性を確保するうえでも重要な要素になると考えられる。

本事業では、W3C 国際標準（DID/VC）に準拠した情報流通プラットフォームを構築し、非中央集権的な情報流通基盤を実システムとして完成させた。これにより、競合他社間でも機密情報を保護しながら真正性を担保できる環境を実現した。また、共通機能のプラットフォーム化により、他事業者の参入コスト削減できることを試算で確認し、技術的な参入障壁を大幅にできると考える。

。

#### ・ 国内流通が経済的に成立するための条件

海外流出を抑制するためには、規制の強化や理念的な要請のみでは不十分であり、国内で流通・再利用した方が経済的に合理的であると関係主体が判断できる条件を整えることが重要であると考えられる。そのためには、一定の流通量が見込めること、価格形成の見通しが立つこと、管理や責任の所在が明確であること、ならびに利用に対する不安が過度に大きくならないことなどが、同時に成立する必要がある。

これらの条件が十分に満たされない場合、使用済みバッテリーは結果として海外に流出しやすくなり、国内循環市場の成長・成熟が進まない構造に固定化される可能性がある。特に、相対取引が中心となる初期段階においては、価格形成の見通しが立ちにくく、すでに取り組みを開始しているリユース製品製造業者にとっても、取引条件の妥当性を判断しにくい状況が生じている。

また、市場形成においては、リユース製品の利用に対する価値観の転換もひとつの要素と考えられるが、こうした価値観を初期段階から個人ユーザーや企業ユーザーに一律に求めることは容易ではない。経済合理性や安全性に対する不安が十分に解消されていない段階では、「ESG」や環境配慮といった先進的な動機のみで利用が広がるとは限らず、市場の立ち上がりには一定の時間を要する可能性がある。

このような初期段階においては、利用者の経済的・心理的負担を軽減し、管理や回収を含めた責任の所在を明確にする仕組みが重要であり、BaaS (Battery as a Service) のような事業モデルは、そうした条件を満たし得る枠組みの一例と考えられる。

本事業は、情報流通プラットフォームと実務作業に即したアプリケーションを構築し、経済合理性を支える「信頼」と「コスト」の両面で直接的な解決策を提示した。これは製品品質や製品保証の客観的根拠となり、最終利用者の心理的ハードルを解消し、市場形成を加速させる直接的な手段となる。

### 3.4 本実証事業の成果とまとめ

本実証事業は、EV 使用済みバッテリーを「リスクを伴う廃棄物」から「信頼性の高い有価物」へと再定義するための技術的・実務的基盤を確立した。3 年間の実証を通じて、以下の 3 つの核心的な成果が統合されることで、小規模ながら実際の有価取引を実現するに至った。

#### 1. 現場実務の効率化と経済合理性の提示

交流インピーダンス法などを用いた診断アルゴリズムと独自開発の専用治具の導入により、バッテリー性能の診断時間を 90%以上短縮した。また、業務アプリによる現場 DX により、CFP 算定を含む事務作業を 90%削減した。これにより、これまで国内循環の大きな障壁であった「過大な管理・診断コスト」を克服し、流通量が限定的な段階からでも有価取引が成立し得る最小構成のモデルを提示した。

#### 2. 非中央集権的な情報流通プラットフォームによる「データ主権」の確立

W3C 標準の DID/VC 技術を採用した情報流通プラットフォーム「Battery Web」を構築した。これにより、特定の管理主体に依存することなく、各事業者がデータ主権を維持したまま、情報の真正性と未改ざん性を数学的に保証できる環境を整えた。また、パックからセル単位までを追跡可能な「Battery URL」を定義したことで、直接の面識がない事業者間でもバッテリーの「素性」を信頼して取引できるデジタル基盤を実現した。

#### 3. 高度な予測モデルによる将来価値の可視化と保証・保険の実現

ガウス過程回帰を用いることで、現状の残存性能診断に留まらず、将来の劣化状態を確率密度関数として算出することを可能にし、将来の故障リスクを「一定期間内に容量

が基準を下回る確率」として数学的に算出できるため、リユース製品に対する製品保証の設計や、保険料率の客観的な算定が実務として可能になった。これは、リユースバッテリー市場における信頼性の高め、有価取引を安定させるための鍵となる成果である。

#### 4. 社会実装への展望：自治体主導の地産地消モデルと BaaS

本事業は、これらの成果を一体的に提供する BaaS (Battery as a Service) の有効性を提示している。バッテリーは重量物かつ危険物であるという物理的制約から、国内循環には地域単位の「地産地消」が合理的である。今後は、例えば地方自治体のようなガバナンスオーソリティとして地域の事業者を認定し、国が共通指針を与える「多層的ガバナンス」の実装が重要となる。

結論として、本事業は課題解決に向けた道筋や前提条件を実務レベルで具体化・検証し、有価取引の実現というマイルストーンを達成した。今後、排出量が増大する局面において、本実証で示した技術基盤とガバナンスモデルを社会実装することで、日本国内における健全な資源循環市場の形成が加速されることが期待される。

#### 4. 事業化の計画

##### 4.1 想定する事業

##### 4.1.1 目指す事業の構造

ここでは、下図のように、EV バッテリーのバリューチェーンの各企業に対し、診断評価などの機能によって中古価格や仕分け作業効率などを向上するサービス (BACE サービス) を提供する事業の構築を目指す。

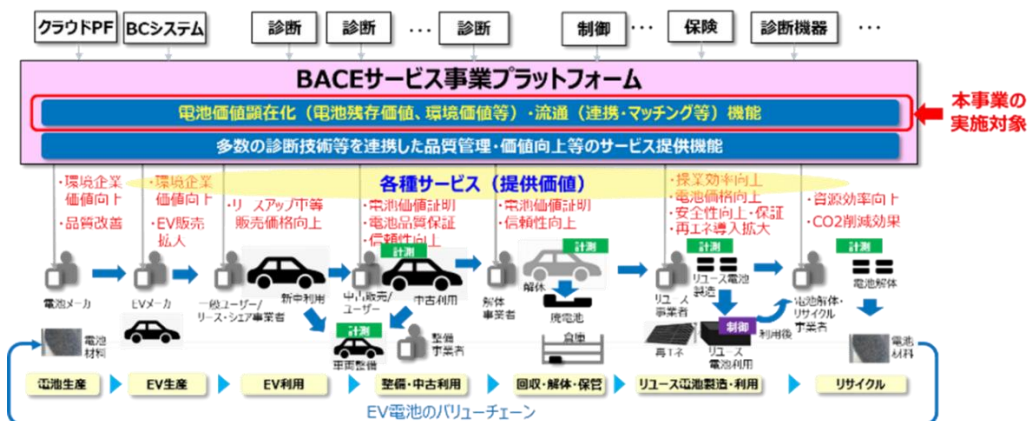


図 43 価値顕在化プラットフォーム

特に、ここでは、初期のサービスとして、使用済みバッテリーをリユースする際のバッテリーの劣化状態把握と劣化状況に応じた仕分け情報を提供するバッテリー診断評価サービスを対象として、事業化検討をおこなう。本サービスの構造を下記に示す。

事業実現に必要な要素のひとつが、いかに効率的にバッテリーを診断評価し、その情報を効率的かつ信頼性高く情報の利用者に提供するシステムとなる。本事業では、これまで示してきたように、下図の回収事業者におけるバッテリーの搬入、分解、診断、出荷のプロセスの中で、効率的な運用をおこなうことができるフローと管理アプリ、診断治具と診断器を利用するプロセスを配置し、運用しやすいシステムを導入する「診断サービス」を提供する。

また、本プロセス設計においては、本事業における検討の結果、治具を用いた診断をおこなうことで、効率的に作業できることが明確になったことから、診断を提供するだけでなく、一体的なサービスとしてあわせて治具を導入することで、回収事業者の作業効率を向上するだけでなく、診断サービスの導入個数を増大させる方法を目指す。

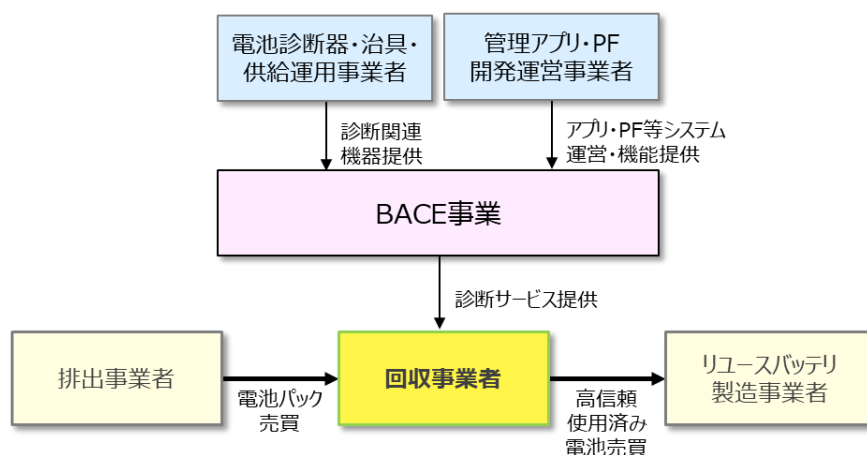


図 44 バッテリー診断サービスの事業スキーム概要

#### 4.1.2 サービス内容と提供価値の説明

ここでは、BACE 事業から回収事業者に対し、上図のように「診断サービス」を提供する。診断サービスは、回収事業者がリユース活用を目的として EV の使用済みバッテリーの容量に応じて仕分けをするための診断を高速に実施する治具や診断システム一式を回収事業者に貸し出すとともに、診断結果を改ざんできないようにデータ管理して利用者が証明書をアプリ上で確認できるようにするものとなる。

回収事業者は、リユース活用を目的に、排出事業者から EV の使用済みバッテリーパックを取得し、モジュール・セルに分解した後に診断をおこなう。診断システム一式を用いた診断計測は、回収事業者がおこなう。回収事業者は、診断によって仕分けしたバッテリーを用途に応じて、リユースバッテリー製造事業者に提供する。リユースバッテリー製造事業者は、劣化に応じたバッテリーを活用して定置型蓄電池システム、街灯、モビリティなどの製品を製造する。

本サービスにより、回収事業者は、リユースバッテリー製造事業者に対して、適切な輸

送・分解などをおこなうとともに、ブロックチェーンによる信頼性の高い情報管理を行った「信頼性あるバッテリー」を供給することができるようになる。これにより、使用済みバッテリーをより使いやすい製品として供給することが可能となる。今後、回収事業者は、リユースバッテリー製造事業者の要求に応じて、他機関によるバッテリーの認証などを取得する手続きなどをおこなうことで、信頼性高いリユースバッテリーを提供できる体制を整備するなど、バッテリーのサーキュラーエコノミー構築に貢献する。

## 4.2 対象市場

### 4.2.1 対象市場の概要

本事業の対象市場では、診断対象となる「信頼性を必要とするバッテリー」の個数の増大と、同時に、信頼性確保を行ったうえで「効率的なバッテリー回収」のニーズを持つ顧客の存在が不可欠となる。使用済みバッテリーの利用先として高信頼なバッテリーをカスケード利用する対象としては、主に下記がある。

表 33 対象とする主なカスケード利用対象

大項目	官民類型	主な対象
小型定置蓄電池	公共系	指定避難所
		ソーラー街路灯
	民間系	通信基地局
		中堅工場
モビリティ	民間系	電動二輪（交換用）
		フォークリフト（交換用）
		ゴルフカート（交換用）

この他にも、大型定置型蓄電池の系統用蓄電池やモビリティのAGVなど、大規模にバッテリーを活用する対象があるが、ここでは、2030年前後でのリユースバッテリーの活用対象として、普及の可能性がある対象を抽出した。系統用蓄電池は1システムが大規模であり、一部にリユースバッテリーを活用する場合は生産効率が低下することが想定され、コスト増の要因となる可能性があるため、規制などがなければ普及し難いと想定される。また、AGVは工場などで高頻度かつ高精度に活用され、バッテリーも製品として最適化されるため、バッテリーの仕様が多様なEVの使用済みバッテリーは普及し難いと想定される。この他、モビリティにおいて、上記に電動二輪、フォークリフト、ゴルフカートをあげているが、これらも、初期の製品として製造される際には、新品バッテリーが利用されることになり、交換用バッテリーに利用されることを想定する。また、もちろん、乗用EVの交換用バッテリーとしても用いることができるが、これは自動車市場内の利用用途であり、既存の事業の流れがあるので、ここでは、主に多用途利用する対象のみを抽出した。

以下に、それぞれの市場の傾向を示す。

### 1. 指定避難所

指定避難所は全国に約 8.2 万か所あり、このうち現時点で 40%に相当する 3.3 万か所には非常用発電設備が導入されていない。また本施設は事業継続計画（BCP）向けの施設であり、2035 年までに導入することを想定すると、年間の新規導入規模は、約 3,600 台となる。

また、現在設置されている非常用発電設備 5.1 万台の更新投資が 20 年で実施されるとすると、更新導入規模は約 2,500 台となる。これらを合わせると、2035 年の更新台数は約 6,100 台となる。これに対して、非常用発電機におけるバッテリー（+再生可能エネルギー）の導入比率は、現在は 7%程度であるが近年増加しており、2035 年には非常用発電機の 50%程度に達すると想定すると、2035 の電システムの導入規模は、年間 3,100 台となることが推定される。1 か所あたりの施設規模を 100kWh と想定すると、必要な年間のバッテリー容量は 310,000kWh と推定される。

### 2. ソーラー街路灯

ソーラー街路灯市場は、現在は 5 千台程度と小さいが、防災向けに今後も普及が拡大し、2035 年には年間 1 万台に達することが予想される。ただし、1 か所あたりの電源容量は 0.5kWh 程度であるため、市場全体では約 5,000kWh と小さい規模となる。

### 3. 通信基地局

通信基地局は、約 27 万か所ありそれぞれに非常用として蓄電池が標準的に設置されている。更新年数は 15 年程度となるため、年間の更新台数は 1.8 万台となる。1 か所あたりの電源容量は、大型と中型無線収容函、小型キャビネットの平均として 40kWh となると推定すると、必要な年間のバッテリー容量は 720,000kWh と推定される。

### 4. 中小工場

工場では、CO<sub>2</sub>削減に向けて太陽光発電などの再生可能エネルギーの大量導入が進み、余剰電力の適正活用、Feed-in Premium（FIP）対応などに向けた再生可能エネルギーの調整利用などを多なうために、蓄電池導入が進んでおり、BCP 用の非常用電源への期待も高まっており、早期導入が求められる。大工場ではすでに普及が進んでいるが、今後は中小工場への普及が期待される。日本国内の工場の数は、現在 22 万か所ある。このうち特に、年間電力消費が 0.1GWh～数 GWh となる中小工場は工場全体の 2 割である 4.4 万か所程度あり、非常用電源未整備は 6 割程度で、今後 2035 年までに導入が進むと想定し、年間約 2,900 台と推定され、非常用電源が整備されている 4 割程度には、耐用年数 20 年間で更新されれば年間 900 台となり、合わせて 3,800 台と推定される。1 か所あたりの施設規模を

平均で 200kWh と想定すると、必要な年間のバッテリー容量は 760,000kWh と推定される。

#### 5. 電動二輪（交換用）

電動二輪は、現在、年間 1 万台程度販売されており、2035 年には 4 倍の 4 万台程度に拡大することが予想されており、成長市場であるが、1 台の規模は約 2kWh と小さいため、2035 年に必要な年間電源容量は、80,000kWh 程度となる。中国では、非常に大きな市場であるが、当面は日本国内ではあまり期待できない。

#### 6. フォークリフト（交換用）

フォークリフトは、年間 10 万台程度が販売されており、今後市場は拡大すると想定される。ここで対象とするのは、新品のフォークリフトのバッテリーではなく、利用開始後 5 年～7 年に必要となる交換用バッテリーである。また、フォークリフトの電動化率は現在 75% 程度となる。これらを考慮し、2035 年の交換用バッテリー市場は、2, 3 年後に販売されたフォークリフトのバッテリーであるため、年間の対象台数は 10 万台の 75% となる 7.5 万台と想定する。この際、1 台あたりのバッテリー容量は 15Wh となるため、必要な年間の電源容量は 1,125,000kWh と推定される。

#### 7. ゴルフカート（交換用）

ゴルフカートは、フォークリフト同様に交換用バッテリーを対象とする。現在、年間約 1 万台が販売されており、2035 年には成長して 2.5 万台まで拡大する見通しである。こちらは、フォークリフトに比べてバッテリー寿命は短く 4 年程度であり、本体の寿命に対して、2 回の交換が必要となると予想される。また、寿命が短いので、2035 年には、現在よりも交換対象となる車両として現在の間をとって 1.75 万台に達すると推定する。この際 1 台当たりのバッテリー容量は 8kWh 程度となる。これらを考慮すると、必要な年間の電源容量は 280,000kWh と推定される。

#### 4.2.2 対象市場の規模の整理

ここでは、上記で想定した各対象の 2035 年の市場規模から想定したリユースバッテリーの導入ポテンシャルと、国内での使用済みバッテリーの排出量の関係を整理して、2035 年のリユースバッテリー流通の市場規模を検討する。

まず、上記の各対象の 2035 年の市場ポテンシャルを整理すると下表のようになる。2035 年の各対象の台数想定と、それぞれの平均的な 1 個当たりのバッテリー容量を設定すると、最大需要として、約 3.3GWh が算出される。ただし、これは各対象市場のバッテリー需要全体であり、すべてにリユースバッテリーが利用されることはないので、このうちの一定割合にリユースバッテリーが導入されることを想定する。

表 34 2035 年に各対象の市場規模（台数）に対するカスケード利用のポテンシャル

大項目	官民 類型	主な対象	台数想定 (台)	想定容量 (kWh/台)	バッテリー容 量(kWh)
小型定 置蓄電 池	公共	1. 指定避難所	3,100	100	310,000
		2. ソーラー街路灯	10,000	0.5	5,000
	民間	3. 通信基地局	18,000	40	720,000
		4. 中堅工場	3,800	200	760,000
モビリ ティ	民間	5. 電動二輪	40,000	2	80,000
		6. フォークリフト	75,000	15	1,125,000
		7. ゴルフカート	25,000	8	280,000
合計			174,900	-	3,280,000

この際、23 年、24 年度に国内販売された EV バッテリーの平均容量は推定で約 40kWh であり、これらが 80%程度まで劣化しているとする、使用済みバッテリーの容量は平均で 1 台当たり 30Wh となる。この平均容量を基に、上記の需要全体を賄う車両台数を算出すると 11 万台が得られる。つまり、2035 年に使用済みバッテリーの需要の計算上の最大値は 11 万台ということになる。

一方、2035 年は 10 年後であり、この 2、3 年の国内生産台数が 2035 年での使用済みバッテリーとなるタイミングであるため、生産台数以上の使用済みバッテリーは得られない。こうした点を踏まえ、この 2 年程度での EV の平均国内販売台数である 7.4 万台が供給側の制約により上限となると推定される。

ただし、これは、国内にすべての使用済みバッテリーが残存する場合であり、現時点で海外流出が多く、国内に残留するための各種の取組みをしなければ実現される数字ではない。一方で、国内で EV バッテリーの生産は欧州の電池規制に対応しておこなう必要があり、2031 年には一定比率を使用しなければならなくなっている。このため、一定比率の EV バッテリーを国内に残留させる政策や民間の取組みがなされていると考えられるので、ここでは、50%程度が国内に残留すると仮定して、国内流通規模を推定すると 3.7 万台となり、これは最大需要  $3,280,000\text{kWh} \div 30\text{kWh} = 11$  万台の 34%程度であり、需要は十分にあると推定される。

## 5. 事業の評価

### 5.1 採算性の評価

事業の採算性評価を行なううえでは、以下の収支項目を検討する。

表 35 事業採算性を評価する収支項目

	収支項目
収益項目	1. 診断評価サービス料金
費用項目	2. 顧客 I/F システム開発の減価償却費
	3. 診断治具の減価償却費

	収支項目
	4. プラットフォームライセンス料
	5. 診断サービス利用料
	6. システム維持管理費

以下に、使用済みバッテリーパック 1 台当たりの収支の構造を分析するため、下記項目の算定方法と必要となるパラメータなどについて概要を示す。

#### 1. 診断評価サービス料金（収益項目）

使用済みバッテリーを診断評価することで、リユース時の付加価値を向上する。回収事業者は、パック状態で取得した使用済みの EV バッテリーをモジュール、もしくは、セルに分解して、診断をおこなう。この際、診断サービスの料金単価は、使用済みバッテリーの価格と診断評価サービスフィー比率で算定する。例えば、使用済みバッテリーの価格が 10 万円/台として、診断評価サービスフィー比率を 10% とすると、1 台当たりの診断評価サービス料金は 1 万円と算定される。

#### 2. 顧客 I/F システム開発の減価償却費（費用項目）

顧客ごとに、診断評価システムの入力画面、確認画面などの I/F を設定して運用をおこなう。この際、新規の顧客に合わせて、仕様確認などを行って I/F を開発する。この際、実績を考慮して、新規顧客ごとの開発費用は 3 百万を想定し、5 年間で償却することを想定する。このため、顧客 1 社あたり年間の減価償却は 60 万円と算定される。

#### 3. 診断治具の減価償却費（費用項目）

バッテリー診断をおこなうには、精度高く計測するために専用の治具を用いる。この開発費を基準にすると、1 台当たりの開発費は 5 百万円となり、減価償却期間は 5 年とする。外部の診断技術事業者による診断機器提供にかかる費用となる。このため、顧客 1 社あたり年間の減価償却は 100 万円と算定される。

#### 4. プラットフォームライセンス料（費用項目）

プラットフォームシステムは、各種のクラウドサービスを活用するため、利用規模に応じたライセンス料が必要になる。ライセンス料については、調査にもとづき、年間 1 万台の管理までは 320 万円/年、3 万台までで 430 万円/年という設定となる。

#### 5. 診断サービス利用料（費用項目）

外部の診断技術事業者による診断機器提供にかかる費用となる。これは、現在、関係事業者のサービスフィーに関わることなので、ここでは、明確な費用を示すことができない。そこで、ここでは、現在前節までに検討している、診断手法をもちいて評価した場合

の費用を用いて代替する。本事業で開発した診断ロジックを活用する場合には、基本的な開発を終わらせることを前提とすると、発生する費用は運用に用いるクラウドサービス利用のライセンス料となる。診断アプリ活用には、年間1万台の管理までは220万円/年、3万台までで300万円/年という設定となる。

## 6. システム維持管理費（費用項目）

上記のプラットフォームシステムや診断アプリの運用やメンテナンスをおこなうために、サポートスタッフを配置する。一定の業務ができるシステムエンジニアを確保することとし、ここでは、一般的なシステムエンジニアの費用として960万円/年（80万円/月）を1万台では1人、3万台までで2人必要と設定する。

上記の内容を表に整理すると、下記のようになる。下表では、日取り扱いパック数を $z$ として、算定方法を記載する。

表 36 収支項目の算定方法とパラメータの概要

項目	項目	算定式/パラメータの概要
収益 : a	$z \times 2.5$ 百万円	$a = b \times c \times 250$ 日/年 $\times d \times e$
回収事業者数 : b	1 社	初期は基準となる1社との契約を想定
処理パック数/日 : c	$z$ 個	変動パラメータとして設定
EV バッテリ価格 : d	10 万円/個	この1年程度の目安価格を設定
診断証明サービス比率 : e	10%	要検討項目なので、例として設定
費用 : f	9 百万円	$f = g + k + o + q + s$
顧客 I/F システム : g	60 万円	$g = h \times i \div m$
顧客数 : h	1 社	初期は基準となる1社との契約を想定
顧客単価 : i	3 百万円/社	本事業の検討実績より
償却年数 : j	5 年	一般的な年数を設定
診断治具 : k	1 百万円	$k = l \times m \div n$
台数 : l	1 社	初期は基準となる1社との契約を想定
単価 : m	5 百万円/社	本事業の検討実績より
償却年数 : n	5 年	一般的な年数を設定
プラットフォームライセンス料 : o	3.2 百万円	$o = p$ ( $c < 1$ 万)
管理台数 : c	$250 \times z$	—
管理価格 : p	3.2 百万円/契約	事業者ヒアリングより設定
診断サービス利用料 : q	2.2 百万円	$q = r$ ( $c < 1$ 万)
管理台数 : c	$250 \times z$	—
管理価格 : r	2.2 百万円/契約	事業者ヒアリングより設定
システム維持管理費 : s	9.8 百万円	$s = t \times u$
人数 : t	1 人	1 万台までは1人で対応する想定
人件費単価 : u	9.8 百万円/年	人材市場から推定

上記の内容にもとづき、対象となる使用済みバッテリーパックの個数を年間500から4,500

個まで増加させた場合の損益分岐点を検討すると下図のようになる。事業性としては、診断評価サービスの使用済みバッテリーパック価格に対する比率を 10% に設定した場合は、年間 2,000 個に達する前に黒字化することが見込まれる。

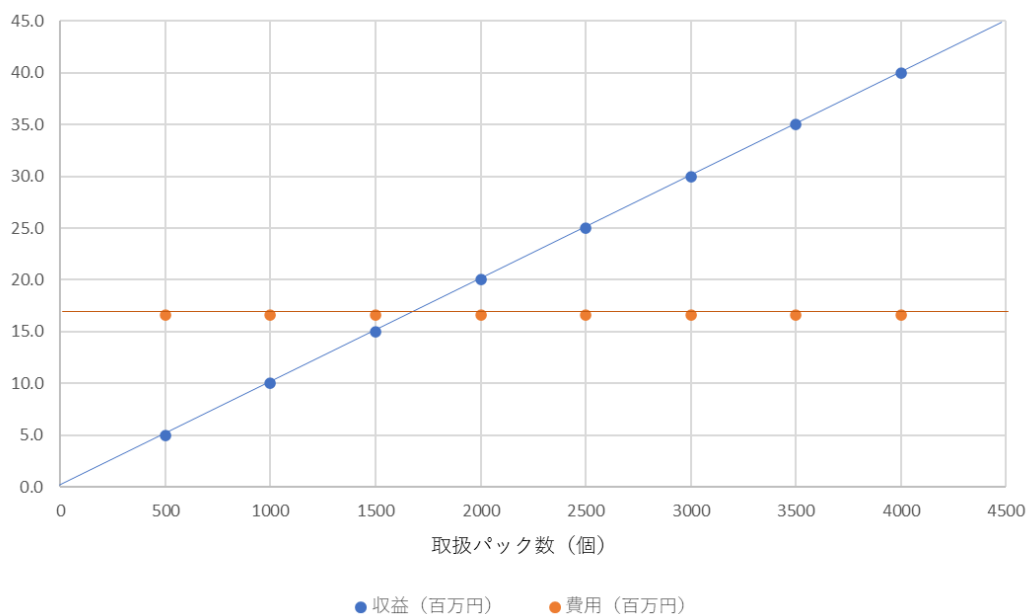


図 45 本サービスの損益分岐点の概略検討

ここで、年間 2,000 個とは、前節の検討から 2035 年のリユース向けの使用済みバッテリーの流通個数が 3.7 万個であり、2030 年にはその半分が仮に流通した場合に 1.9 万個になるので、市場の 10% を獲得している状況となる。簡単ではない状況であるが、不可能な規模ではないと言える。

また、診断治具と診断機器などのシステムによって、どの程度の診断能力が得られるかを試算する。診断治具は 1 回に 10 モジュールまで診断評価をおこなうことができ、セッティングするのに、1 回 30 分程度で実施可能である。このため、1 日 7.5 時間稼働として、最大 150 個/日の診断評価が可能となる。この際、使用済みバッテリーの 1 パックあたりのモジュールを 15 と設定すると、1 日あたり 10 パック分の対応ができることになる。この場合、年間稼働日数を 250 日とすると、年間 2,500 パックの利用が可能となる。

このように考えると、初期の顧客に診断システム一式を導入して、その稼働率を最大化して頂くことができれば、採算ラインを越えていくことができる可能性があることが分かる。

## 5.2 有効性の評価

本事業では、これまで人が個別に実施してきたバッテリー性能取得作業と CFP 算定を高効

率なプラットフォーム API により、バッテリーのデジタルツインを仮想空間上に生成することで擬似 IoT 化し、証憑整理・集計技術の組み込みを実装する。従来困難であった事業主体間のバッテリーのデジタルデータ交換・取引を効率的に実現するプラットフォームを構築する。以下に、本事業の有効性評価を示す。

<p>● <b>有効性評価の目標と効果測定の手法概要：</b></p> <p>(1) <b>電池性能取得作業の効率化</b> … バッテリー性能の短時間計測技術を IoT 化して効率的に情報蓄積する。情報取得作業の時間を計測して評価。アプリケーション開発の工数は推定して評価。</p> <p>(2) <b>CFP 算定の効率化</b> … 収集データから CFP を算定し、効率的にカーボンクレジットを実現する。CFP 算定と証憑整理・集計に係る作業時間を計測して評価。</p> <p>(3) <b>データ交換の効率化</b> … データ信頼性を特定組織に依存せずに確保することで、複数事業者にまたがる情報収集を効率化する。データ交換の証明書発行費用、連携システム開発工数を推定して評価。</p> <p>● <b>目標値：</b></p> <p>(1) <b>電池性能取得作業の効率化</b> … 作業時間の 90%以上削減、アプリケーション開発工数の 70%削減</p> <p>(2) <b>CFP 算定の効率化</b> … CFP 算定と証憑整理・集計作業の 90%低減</p> <p>(3) <b>データ交換の効率化</b> … データ交換の証明書発行費用 90%低減、連携システム開発工数 70%削減</p>
--

上記目標に対しての作業実証と試算をした結果、各目標の評価は以下の通り。

目標と内容	効果の測定手法	測定結果と効果
(1) <b>電池性能取得作業の効率化</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>電池情報取得作業の効率化については既存の充放電法と今回検証で実施した診断プログラムでの作業時間の比較を実施</li> <li>アプリケーション開発工数は本事業で開発したアプリケーションの機能のうち、プラットフォーム機能として再利用できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>充放電法と交流インピーダンスを用いた診断方式での比較では、1セル単位でも測定・診断にかかる時間は当初目標の <b>90%以上の削減効果</b>があることが確認できた。</li> <li>測定適正化治具を用いる事で、測定精度の向上と安定化を実現した。</li> <li>診断アプリケーションの開発工数比較では、必要な機能 13 機能中最</li> </ul>

目標と内容	効果の測定手法	測定結果と効果
	機能と独自開発が必要な機能とに分類して推定工数比較を実施	大 11 機能についてプラットフォーム機能を用いることで独自開発の必要がなくなり、 <b>約 80%の開発工数の削減</b> が可能であると確認できた。
(2) CFP 算定の効率化	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般的な CFP 算定に必要な情報取得方法と選択式、自動的に収集できる環境での取得作業にかかる工数比較を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実際の専用倉庫での分解・診断作業にかかる工程と関連する消費電力を算定・収集した。これらの情報を業務アプリから自動的に入力できるように改修し、全工程を通して <b>90%以上の効率化</b>を実現可能であることが確認できた。</li> </ul>
(3) データ交換の効率化	<ul style="list-style-type: none"> <li>証明書発行コストは既存の PKI（公開鍵暗号基盤）を用いた場合との試算で比較を実施</li> <li>プラットフォーム利用と独自開発による情報連携システム構築の想定開発工数の比較を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>証明書発行と運用にかかるコストは立ち上げ初期～一定程度普及をした場合で、<b>68%~94%程度削減</b>が可能である事が確認できた。（既存方式との価格比較を実施）</li> <li>開発工数については、本実証で開発したプラットフォームをもとに必要機能、削減効果を確認し <b>70%以上の効率化</b>が達成できることが確認できた。</li> </ul>

上記の結果から、情報流通プラットフォームの実装とともに当初目標の効率化は達成されたと思料する。高速診断による仕分けコストの低減と、データ主権と信頼性を両立した情報流通の仕組みによる品質の不確実性の解消が、使用済みバッテリーの有価取引を実現させるための実用上の重要な要素であることが明らかになった。これは、海外流出を抑止し国内での資源循環を自律的に促進させるための、実務的な有効な基盤となる。

## 付録

### 付録1. 使用済みバッテリーの各事業者へのヒアリング結果概要

本項では本実証で実施した各事業者へのヒアリングの結果概要を事業者ごとに整理・報告する。

ヒアリング実施対象事業者と各事業者数は以下のとおり。

表 37 ヒアリング実施対象事業者と各事業者数

ヒアリング実施事業者	実施事業者数		
	2023 年度	2024 年度	2025 年度
排出事業者	4 社	5 社	2 社
回収事業者	1 社	2 社	2 社
リユース製品製造業者	2 社	1 社	2 社
処分・リサイクル事業者	0 社	3 社	1 社

- 事業者ごとのヒアリング結果
- 排出業者（解体業者）

#### ヒアリング概要

- ・ **取り扱い状況と傾向：** EV および HEV の入庫数は年々増加傾向にあり、特定の車種については作業の習熟により解体工数は減少している。一方で、BEV の中古パーツとしての利益率の低さから、積極的に買い取りを行わない業者も存在し、対応が分かればつつある。
- ・ **保管上の懸念：** BEV などの大型バッテリーパックは保管場所を大幅に占有するため、解体台数の増加に伴い、消防法に適合した保管設備の確保や敷地のひっ迫が発生する場面がある。
- ・ **診断・価値評価の実態：** 多くの業者は自社でバッテリー診断を行う技術や設備を有しておらず、車載状態でのダッシュボードの確認や汎用ツールでの簡易確認に留まっている。標準的な診断手法や基準が確立されていないため、有価取引の際も「ジャンク品」扱いとなり、手間に見合った利益が出しにくい状況にある。
- ・ **情報提供への姿勢：** 車台番号、走行距離、年式などの基本情報の提供には肯定的であるが、充電履歴などの詳細データの取得は困難である。また、将来的な取り扱い量増加を見据え、回収依頼時の事務作業の負担軽減を強く求めている。
- ・ **流通ルート：** 基本的には自動車再資源化協力機構の回収システムを利用しているが、保管場所の都合上、より高頻度で引き取りに来る業者や、安定した有価買い取りを提示するブローカーへの売却を選択するケースが増えている。

#### 抽出された主要な課題

- ・ **保管場所・設備の不足と投資負担：**
  - ・ 大型バッテリーパックの保管スペースの確保が困難。
  - ・ 消防法などに適合するための防爆設備や保管容器への追加投資が必要となる。

- ・ **診断技術の欠如と価値評価の不透明性：**
  - ・ 標準規格などにもとづく品質判断ができず適正な有価取引が成立しにくい。
  - ・ 高速かつ簡易にバッテリー状態を判定する標準的手法が現場に普及していない。
- ・ **回収・流通プロセスの非効率：**
  - ・ 自再協スキームを含め、回収依頼や情報登録にかかる事務作業が煩雑。
  - ・ 排出から回収までのリードタイムが長く、在庫の回転率が低い。
- ・ **情報の信頼性とトレーサビリティの欠如：**
  - ・ 解体時の車両情報や走行距離などの正確な情報が後続の事業者にも効率的に伝達されていない。
  - ・ 誤った情報報告や不適正利用を防ぐための仕組みが未整備である。
- ・ **海外流出のリスク：**
  - ・ 国内での有価取引市場が未成熟なため、経済合理性により海外ブローカーへバッテリーが流出し、国内の資源確保が困難になる懸念。
- ・ **作業安全性の確保：**
  - ・ 高電圧バッテリーの解体・取り扱いにおける感電・火災リスクへの対策および作業員の習熟度向上。

## ● 回収業者

### ヒアリング概要

- ・ **事業の立ち位置と現状：** 回収業者は排出業者と需要家の中間に位置し、情報の結節点（ハブ）としての役割を担っている。現状ではバッテリーの排出量はまだまだ大きくないが、今後の増大を見越して設備投資のタイミングを見極めている段階にある
- ・ **取り扱い品目と経済性：** BEV 由来のバッテリーのリユース事例は多いが、HEV 由来のものは1個あたりの容量が小さく、解体・分別の効率が相対的に低い。そのため、性能的にリユース可能であっても処分に回される可能性が高い。また、金属資源相場への依存度が高く、三元系やリン酸鉄（LFP）系といった組成によって事業性が大きく左右される
- ・ **分解・診断作業の実態：** パックからセルへの分解手順やモジュールの諸元情報は、各業者が独自に調査・手順化しているのが現状である。診断技術は開発途上との認識が強く、調査や作業に多大な手間を要することが、有価取引成立に向けた最大の障壁となっている
- ・ **情報連携へのニーズ：** リユース用途での売却には、車両型式や走行距離、SoHなどの正確な情報が必須である。出所不明のバッテリーはリユース不可として扱う必要があり、排出時から分解・診断に至る一連の情報の信憑性を強く求めている

### 抽出された主要な課題

- ・ **設備投資の判断とタイミング：**
  - ・ 排出量増大に備えた保管場所の確保と消防法などに適合する安全設備の導入
  - ・ 事業として成立する物量と、診断・分解設備の投資回収の見極め
- ・ **分解・診断業務の非効率性：**
  - ・ バッテリーパックの構造が車種ごとに異なるため、安全かつ安価に分解するための標準的な手順が確立されていない
  - ・ リユース製造業者の要求に合わせた個別の測定・仕分け基準への対応負担
- ・ **物流コストの最適化：**
  - ・ 重量物かつ危険物であるバッテリーの輸送コストが大きく、少量・不定期的な回収では経済合理性が保てない
  - ・ 地域ごとの一時保管拠点の整備による、輸送ルートの集約と積載率の向上が不可欠である
- ・ **情報の信頼性とトレーサビリティの担保：**
  - ・ 排出業者から引き継ぐ車両情報の正確性の確認および、分解後のセル単位での識別管理の運用負担
  - ・ 情報の真正性保証がなければリユース製品としての品質を保証できない
- ・ **安全管理体制の構築：**
  - ・ 高電圧バッテリーの分解・診断作業における感電・火災リスクへの対策と、作業員の教育
  - ・ 長期保管時におけるバッテリーの劣化抑制と、発火リスク防止のための環境維持
- ・ **リユース・リサイクル用途の偏り：**
  - ・ 特定の人気車種や高付加価値な組成のバッテリーに取引が集中し、小容量なHEVバッテリーなどの用途開発が必要である。

- **リユース製品製造業者**

- ヒアリング概要

- ・ **調達の実態と要望：** 現状は中古車オークションやリースアップ車両を丸ごと、あるいはバッテリーパック単位で調達し、解体を委託後、検品をおこなっているケースが多い。将来的にはモジュールやセル単位での安定的な調達を希望しており、あわせて車載時の型式、年式、走行距離や診断情報が付帯していることを強く求めている
- ・ **品質管理への強い懸念：** バッテリーは精密機器であり、車両解体時からの適切な取り扱いと保管が製品品質を左右する。不適切な取り扱いを受けた個体は事後の検査では完全な選別が困難であるため、排出業者や回収業者による品質管理の証跡の共有を不可欠としている。情報のないバッテリーはリユース不可として

扱うのが業界の通例となりつつある

- ・ **作業の重複と非効率：** 多くの事業者が独自の診断・検査基準を設けているが、種類ごとに異なる分解・診断方法を個別に検討するのは極めて効率が悪い。標準的な手法やグレード基準が一般化し、前工程で仕分けが済んだ状態で納品される仕組みを望んでいる
- ・ **製品寿命の評価：** リユース製品の製品価値を高めるためには、出荷後の寿命予測が極めて重要であると認識されている。現状では統計的な寿命予測は一般的ではないが、ライフサイクル全体のCFP（カーボンフットプリント）可視化も含め、製品の信頼性を裏付けるデータの活用に強い期待を寄せている

#### 抽出された主要な課題

- ・ **情報の信憑性とトレーサビリティの欠如：**
  - ・ 車両情報、走行履歴、SoHなどの正確な情報が担保されていない個体が多いため、底値で調達して自社で再検査せざるを得ない。
  - ・ バッテリーがパックからモジュール、セルへと分解される過程での識別管理が不十分である
  - ・ 解体、輸送、保管の各工程での衝撃・温度管理などの取り扱い品質が不透明なため、製品の安全性保証にリスクが残る
  - ・ 事業者による「適切な作業」を証明する監査証跡の共有が必要である
- ・ **標準的な評価基準・手法の不在：**
  - ・ バッテリーの「使える・使えない」を判断する共通の診断手法や、残存性能に応じたグレーディング基準が確立されていない
  - ・ 特定の車種だけでなく、多様なバッテリーを安価・迅速に評価できる汎用的な診断インフラの不足
- ・ **経済合理性と供給の不安定化：**
  - ・ リユース製品と新品バッテリーとの価格差が必ずしも大きくなく、普及に向けたコスト低減圧力が強い
  - ・ 将来的な供給不足や調達価格の高騰、海外ブローカーへの流出による資源確保の困難性。
- ・ **保証・保険制度の未整備：**
  - ・ リユース製品に対する長期保証や故障リスクをカバーする保険サービスの考え方が整理されておらず、最終利用者の不安を払拭できていない。
  - ・ 故障時の責任分界点の明確化が困難である。

#### ● リサイクル業者

##### ヒアリング概要

- ・ **事業形態と価値定義：** リサイクル業者は、バッテリーを「廃棄物」として処理費

用（逆有償）を取る形態から、金属相場にもとづき「資源」として有価で購入する形態へと移行しつつある。特にニッケルやコバルトを含む三元系バッテリーは資源価値が高いが、今後は資源価値の低いリン酸鉄系バッテリーの増加が見込まれており、リユースへの転用も視野に入れた柔軟な事業構造が検討されている

- ・ **処理工程と効率性：** 高品質なブラックマスを生成するためには、組成ごとにバッテリーを厳密に分別して処理することが理想である。しかし、現状では手作業による分解・分別が主であり、同一種類のバッテリーを大量に一括処理しなければ、エネルギー効率やコストの面で経済合理性を確保することが難しい。
- ・ **入手形態の要望：** 分解の手間を省くため、セル単位での入手を望む声がある一方、資源価値の最大化や物流コストの観点から最適な形態は変動するため、柔軟な受け入れ体制の検討が進められている
- ・ **情報利用の実態と期待：** 現状では詳細なバッテリー組成情報は企業秘密として非公開である場合が多く、各業者が独自に分別・処理方法を判断している。焼却時や破砕時の火災・事故を防止するための成分情報や、適正処分の証跡としてのトレーサビリティ情報の共有に対して強いニーズがある

#### 抽出された主要な課題

- ・ **分別の効率化とブラックマス品質の両立：**
  - ・ 手作業による分解・分別の限界と、それに伴う人件費の負担
  - ・ 複数種類のバッテリーが混在することによる資源回収効率の低下、および最終的な再生材の品質劣化
- ・ **バッテリー組成情報の不透明性：**
  - ・ バッテリー内部の詳細な化学成分や添加物が不明なため、最適な処理プロセスを選択しにくい
  - ・ 事故防止（感電・発火）のために、解体・破砕前に把握すべき安全情報が不足している
- ・ **設備投資と物量の不確実性：**
  - ・ 将来の排出量増大に備えた精錬・資源化設備の投資タイミングの見極め
  - ・ 少量かつ不定期な回収による、焼却炉や処理設備のエネルギー効率の悪化
- ・ **物流コストと拠点整備：**
  - ・ 重量物かつ危険物であるバッテリーを広域から集約するための輸送コスト負担
  - ・ 消防法に適合した安全な保管場所の確保と、地域単位での効率的な回収ネットワークの欠如
- ・ **不適正処分の防止と信頼性の担保：**
  - ・ 不適切な管理や違法な海外流出により、国内の資源確保が阻害されるリスク
  - ・ リサイクル材の含有率証明や、適正に処理されたことを証明する客観的なデータ連携システムの必要性

- ・ 市場価格の変動リスク：
  - ・ 金属相場の乱高下により、有価買い取りと処理費用のバランスが不安定になり、事業計画の策定が困難

## 付録2. 診断結果に対する電子証明書サンプル

```

{
  "vc": {
    "@context": [
      "https://www.w3.org/2018/credentials/v1",
      "https://www.bace-lab.com/schema/v1.jsonld"
    ],
    "type": [
      "VerifiableCredential",
      "DiagnosisCredential"
    ],
    "credentialSubject": {
      "battery": {
        "battery_model_name": "NISSAN-LEAF",
        "quantity": 48,
        "structure": "module",
        "batteryCell": {
          "nominalCapacity": {
            "value": 32.5,
            "unitText": "Ah"
          },
          "cathodeCode": "NCM"
        }
      },
      "stateOfHealth": {
        "value": 12.163952428358666,
        "unitText": "%"
      },
      "diagnoseDate": "2025-11-05T10:05:48.090Z",
      "device": {},
      "consumer": {
        "source": "did:web:id-collector.bace-lab.com",
        "name": "Battery Collector Inc."
      },
      "provider": {
        "source": "did:bace:/*省略*/",
        "name": "Kaula Inc."
      }
    }
  },
  "jti": "/diagnosis/697",
  "nbf": 1764224036,
  "iss": "did:bace: /*省略*/"
}

```

## 付録3. ガウス過程による最尤推定の実装

### 1. ガウス過程による最尤推定

任意の  $N$  個の入力値  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N$  に対して、 $N$  個の出力値  $f_N = (f(\mathbf{x}_1), f(\mathbf{x}_2), \dots, f(\mathbf{x}_N))$  の同時確率  $p(f_N) = p(f(\mathbf{x}_1), f(\mathbf{x}_2), \dots, f(\mathbf{x}_N))$  を与えることができるとき、この関係  $f(\cdot)$  を確率過程と呼ぶ。ここで  $N$  は任意の自然数、 $\mathbf{x}_n$  は  $D$  次元のベクトルである。そして同時確率  $p(f_N)$  がガウス分布として得られる場合、 $f(\cdot)$  をガウス過程と呼ぶ。ま

た「現実世界の観測  $Y$  は、何らかの確率分布  $p(Y)$  からのサンプリング  $Y \sim p(Y)$  によって得られたものだ」とする仮説を確率的生成モデル (probabilistic generative model) もしくは確率モデル (probabilistic model) と呼ぶ。

ここではバッテリー性能 (例えば容量) の観測値  $Y$  は、真のバッテリー性能  $f$  を中心 (平均) に観測ノイズ  $V$  で分散するガウス分布から生成されると考え、確率モデルを  $y | f \sim N(f, V)$  と定義する。また充放電サイクル  $x_n$  (一次元なのでスカラー) に対する真のバッテリー性能  $f$  は観測できない潜在関数であるが、その確率モデルを  $f \sim N(m, K)$  と定義する。ここで  $m$  は事前平均、 $K$  は事前共分散行列である。充放電サイクル  $x_n$  と観測値  $y_n$  のデータ  $D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}$  が  $N$  個ある場合、 $K$  は  $N$  行  $N$  列の対称行列で、その要素はカーネル関数  $k$  と入力データ  $x$  から  $K_{i,j} = k(x_i, x_j; \theta)$  として決まる定数になる。

基底関数の重みつき和で表される線形回帰モデル  $y = w_0 \phi_0(\mathbf{x}) + w_1 \phi_1(\mathbf{x}) + \dots + w_H \phi_H(\mathbf{x})$  を縦に並べた  $\mathbf{y} = \Phi \mathbf{w}$  は、重み  $\mathbf{w}$  がガウス分布  $\mathbf{w} \sim N(0, \lambda^2 \mathbf{I})$  から生成されると考えるならば  $\mathbf{y} \sim N(0, \lambda^2 \Phi \Phi^T)$  と表され、共分散行列  $\lambda^2 \Phi \Phi^T$  は入力  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$  から決まる定数になる。カーネル関数によれば  $\mathbf{x}$  から直接共分散行列を求めることができるので、基底関数がいくつあっても (たとえ無限個でも) それぞれの重みを求めることなく、データ件数  $N$  のオーダーの計算で共分散行列を求めることができる。これはカーネルトリックと呼ばれる。さまざまなカーネル関数が考案されており、ガウスカーネル  $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \theta_1 \exp(-|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2 / \theta_2) + \theta_3 kd(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  はその代表的なものである。 $\theta$  (ガウスカーネルの場合  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ ) はカーネル関数のハイパーパラメータと呼ばれ、カーネル関数によって計算される共分散行列は  $\theta$  に依存する。ワイブル分布のようにあらかじめ関数形が決まっていた少数のパラメータを求めることで回帰関数を決定するパラメトリックなモデルに対して、ノンパラメトリックなガウス過程では無限個の基底関数の重み和により複雑な回帰関数を表現することが可能になる。

以上をまとめると、バッテリー性能劣化モデルは、観測値  $y$  と潜在関数  $f$  からなる連鎖的事象と考えられ、確率的生成モデルは次のように表現できる。

$$\begin{aligned} f &\sim N(m, K) \\ y | f &\sim N(f, V) \\ y | f &\sim N(m, K+V) \end{aligned}$$

我々の目的は、充放電サイクル  $x_n$  と観測値  $y_n$  の  $N$  個の組からなる訓練データ  $D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}$  から、新たな充放電サイクル  $x_*$  に対する観測値  $y_*$  を予測する (ガウス過程回帰) ことだが、その予測分布は以下の式で求まる。

$$\begin{aligned} p(y_* | x_*, D) &= N(\mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \mathbf{V})^{-1} \mathbf{y}, k_{**} - \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \mathbf{V})^{-1} \mathbf{k}_*) \\ \mathbf{k}_* &= (k(x_*, x_1), k(x_*, x_2), \dots, k(x_*, x_N))^T, \\ k_{**} &= k(x_*, x_*) \end{aligned}$$

ここで訓練データは  $(y_1, \dots, y_N)$  の平均値がゼロになるよう標準化されているとす

る。

M 個のベクトル  $\mathbf{x}_*$  ( $x_{*1}, \dots, x_{*M}$ ) に対して観測値  $\mathbf{y}_*$  ( $y_{*1}, \dots, y_{*M}$ ) を予測する場合は以下の式を利用する。

$$p(\mathbf{y}_* | \mathbf{x}_*, D) = N(\mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \mathbf{V})^{-1} \mathbf{y}, \mathbf{k}_{**} - \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \mathbf{V})^{-1} \mathbf{k}_*)$$

$$\mathbf{k}_*(n, m) = k(x_n, x_{*m}) \quad (n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M)$$

$$\mathbf{k}_{**}(m, m') = k(x_{*m}, x_{*m'}) \quad (m = 1, \dots, M, m' = 1, \dots, M)$$

第 1 項が予測分布の事後平均、第二項が事後共分散になる。ここで観測データ  $D$  は定数なのでこれは未知のパラメータ  $\theta$  に対する尤度関数 (likelihood function) となる。最尤推定により尤度を最大にするパラメータを求め、事後平均、事後分散をグラフ表示すると図 46 のようになる。

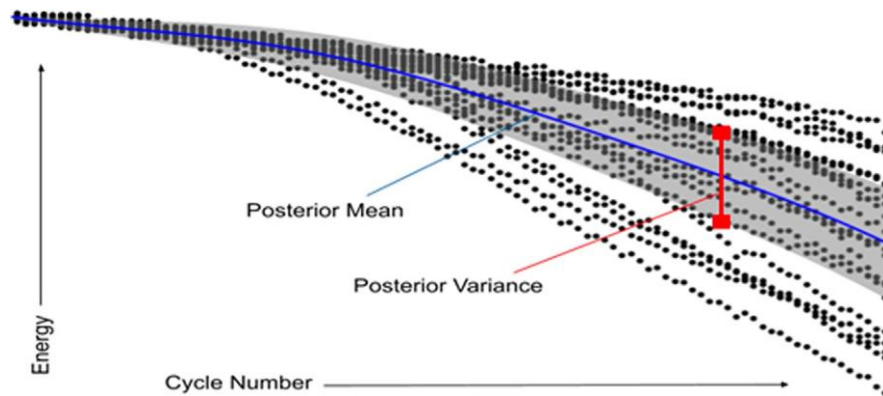


図 46 ガウス過程による最尤推定

## 2. ガウス過程回帰の実装

観測データ  $D$  に含まれる  $N$  個の入力値  $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N$  (入力値が充放電回数だけの場合は 1 次元の  $x_1, \dots, x_N$ ) に対する  $N$  個の出力値  $\mathbf{f}_N = (f(\mathbf{x}_1), \dots, f(\mathbf{x}_N))$  の同時確率  $p(\mathbf{f}_N)$  が与えられるとして、この関係  $f(\cdot)$  を確率過程と呼び、この同時確率  $p(f(x_1), \dots, f(x_N))$  が  $N$  次元のガウス分布として得られる場合に  $f(\cdot)$  をガウス過程と呼ぶのであった。

我々の場合、既知の  $N$  個の観測データ  $D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}$  から、求めたい  $M$  個の入力値  $\mathbf{x}_*$  ( $x_{*1}, \dots, x_{*M}$ ) に対する観測値  $\mathbf{y}_*$  ( $y_{*1}, \dots, y_{*M}$ ) を以下の式を利用して予測したい。

$$p(\mathbf{y}_* | \mathbf{x}_*, D) = N(\mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \mathbf{V})^{-1} \mathbf{y}, \mathbf{k}_{**} - \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \mathbf{V})^{-1} \mathbf{k}_*)$$

$$(\mathbf{K} + \mathbf{V})(n, n') = k(x_n, x_{n'}) \quad (n = 1, \dots, N, n' = 1, \dots, N)$$

$$\mathbf{k}_*(n, m) = k(x_n, x_{*m}) \quad (n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M)$$

$$\mathbf{k}_{**}(m, m') = k(x_{*m}, x_{*m'}) \quad (m = 1, \dots, M, m' = 1, \dots, M)$$

$x_{*m}$  ( $m = 1, \dots, M$ ) は、既知の訓練用観測データとは異なるので  $x_*$  と\*を付けて区別して表記している。例えば  $x_{*1}, \dots, x_{*60}$  を1ヶ月目から60ヶ月目(5年目)の充放電サイクルとして、その時の SoH  $y_{*1}, \dots, y_{*60}$  を求めることが目的である。

$\mathbf{x}_*$ ,  $D$  が与えられた時の  $\mathbf{y}_*$  の予測分布  $p(\mathbf{y}_* | \mathbf{x}_*, D)$  は多変量ガウス分布として表現され、その第1項である平均  $\mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \mathbf{V})^{-1} \mathbf{y}$  が求めたい SoH の予測値(期待値)であり、第2項の共分散行列  $\mathbf{k}_{**} - \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \mathbf{V})^{-1} \mathbf{k}_*$  の対角成分が SoH の予測値の分散を表す。

ここで  $\mathbf{x}_*$ ,  $D$  は定数なので、それらを使って計算された  $\mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \mathbf{V})^{-1} \mathbf{y}$ ,  $\mathbf{k}_{**} - \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \mathbf{V})^{-1} \mathbf{k}_*$  もカーネルのハイパーパラメータ  $\theta$  に適当な値(ここでは  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = (1.0, 0.4, 0.1)$ ) とした) を置くことで定数になる。ここで考え方として、入力  $x_n$  から特徴を抽出する適当な基底関数  $f()$  のベクトル  $\mathbf{f}(x_n) = (f_1(x_n), \dots, f_H(x_n))$  に対して、出力  $y_n$  がその重み付け和  $y_n = w_1 f_1(x_n) + w_2 f_2(x_n) + \dots + w_H f_H(x_n)$  となるように  $\mathbf{x}_*$ ,  $D$  から  $w_{in}$  を定めれば線形回帰によって  $y_n$  を求めることができる。基底関数ベクトル  $\mathbf{f}(x_n)$  の予測精度を上げるために無限次元  $\mathbf{f}(x_n) = (f_1(x_n), \dots, f_\infty(x_n))$  とした場合、重み  $w_h$  も無限個計算しなければならないが、それを回避するのがカーネル関数である。今回採用したのはガウス分布と同じ関数形をしたガウスカーネル(同径基底関数 RBF: Radial Basis Function)  $k(x, x') = \theta_1 \exp(-|x - x'|^2 / \theta_2) + \theta_3 kd(x, x')$  であり、上式から分かるように重み  $w_h$  ( $h$  は無限大!) を計算せずに  $(\mathbf{K} + \mathbf{V})$ ,  $\mathbf{k}_*$ ,  $\mathbf{k}_{**}$  の要素を  $\mathbf{x}_*$ ,  $D$  から直接計算することができる。

今回はガウス過程回帰を Python プログラムで実装し、その動作を確認した。バッテリーの劣化モデルを区間線形関数で模し、製造から1年目までを初期故障域、1年目から8年目までを偶発故障域、8年目以降を摩耗故障域とした。観測データ  $D$  は、この関数の出力値にガウスノイズを加えて生成した。プログラムの流れは以下ようになる。

- 1) 観測データを CSV ファイルから読み込む
- 2) 観測データの標準化(平均0、標準偏差1になるように加工)
- 3) ガウスカーネル RBF を関数として定義
- 4) 観測データ同士 ( $x_n, x_{n'}$ ) から配列  $\mathbf{K}$  を RBF で計算
- 5) 観測データと予測データ ( $x_n, x_m$ ) から配列  $\mathbf{k}_*$  を RBF で計算
- 6) 予測データ同士 ( $x_m, x_{m'}$ ) から配列  $\mathbf{k}_{**}$  を RBF で計算
- 7) 以上の計算では RBF のハイパーパラメータに定数 1.0, 0.4, 0.1 を使用
- 8) 平均  $\mu = \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K})^{-1} \mathbf{y}$  を計算、 $\mu$  は  $M$  行ベクトルになる
- 9) 共分散行列  $\sigma = \mathbf{k}_{**} - \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K})^{-1} \mathbf{k}_*$  を計算、 $\sigma$  は  $M$  行  $M$  列の行列になる
- 10) 分散  $\text{var}$  を  $\sigma$  の対角要素から求める、 $\text{var}$  は  $M$  行のベクトルになる
- 11) 標準偏差  $\text{std}$  を  $\text{var}$  の要素の平方根から求める、 $\text{std}$  は  $M$  行ベクトルになる

- 12) 以上で M 個の予測データ  $x_*$  に対する出力値  $y_*$  の平均と標準偏差が得られた  
13) 平均のグラフを描き、標準偏差の幅に帯をつける。実際のソースコードを以下に  
しめす。

```
import numpy as np
import pandas as pd
from matplotlib import pyplot as plt

# 区間線形関数(piecewise linear function)を真の関数として定義する
def true_function(x):
    y = np.zeros(len(x))
    for i in range(len(x)):
        if x[i] >= 0 and x[i] <= 1:
            y[i] = -20*x[i] + 100
        else:
            if x[i] > 1 and x[i] <= 8:
                y[i] = -(20/7)*x[i] + 580/7
            else:
                y[i] = -20*x[i] + 220
    return y

# CSV ファイルからデータを読み込む。ファイル data.csv に列"x"と"y"が存在することを想定
data = pd.read_csv("data.csv")
data_x = data["x"].values
obs_y = data["y"].values

# 観測データ obs_y の標準化
obs_y = obs_y - obs_y.sum()/len(obs_y) # 平均を 0 にする
obs_y = obs_y/np.sqrt((np.square(obs_y).sum()/len(obs_y))) # 標準偏差を 1 にする

# テスト用 x は適当に細かく生成(真の関数や推定の描画用)
n=181
x_full = np.linspace(0, 10, n)

# ガウスカーネルを関数化
def kernel(x, x_prime, p, q, r):
    if x == x_prime:
        delta = 1
    else:
        delta = 0
    return p*np.exp(-1 * (x - x_prime)**2 / q) + ( r * delta)

# データの定義
xtrain = np.copy(data_x)
ytrain = np.copy(obs_y)
xtest = np.copy(x_full)
train_length = len(xtrain)
test_length = len(xtest)

# 各パラメータ値
Theta_1 = 1.0
Theta_2 = 0.4
Theta_3 = 0.1

# 以下、ガウス過程回帰の計算の基本アルゴリズム
# トレーニングデータ同士のカーネル行列を計算
K = np.zeros((train_length, train_length))
for x in range(train_length):
    for x_prime in range(train_length):
        K[x, x_prime] = kernel(xtrain[x], xtrain[x_prime], Theta_1, Theta_2, Theta_3)

# 内積はドットで計算
```

```

yy = np.dot(np.linalg.inv(K), ytrain)

# トレーニングデータとテストデータ間、およびテストデータ同士のカーネル行列を計算
k = np.zeros((train_length, test_length))
k_xx = np.zeros((test_length, test_length))
for x_c in range(test_length):
    for x_r in range(train_length):
        k[x_r, x_c] = kernel(xtrain[x_r], xtest[x_c], Theta_1, Theta_2, Theta_3)
    for x_r in range(test_length):
        k_xx[x_r, x_c] = kernel(xtest[x_r], xtest[x_c], Theta_1, Theta_2, Theta_3)

# 平均 mu
mu = np.dot(k.T, yy)

# 分散 var
# 先に k * K^-1 の部分を(内積なのでドットで)計算
kK_ = np.dot(k.T, np.linalg.inv(K))
# 後半部分との内積をドットで計算して、共分散配列を得る
sigma = k_xx - np.dot(kK_, k)
# 共分散行列の対角要素を抜き出して分散ベクトルを得る
var = np.zeros(test_length)
for x in range(test_length):
    var[x] = sigma[x,x]

plt.figure(figsize=(12, 5))
plt.title('signal prediction by Gaussian process', fontsize=20)

# 訓練データ
plt.plot(data_x, obs_y, 'o', color='red', label='sample dots')

# 分散を標準偏差に変換
std = np.sqrt(var)

# ガウス過程で求めた平均値を信号化
plt.plot(xtest, mu, color='blue', label='mean by Gaussian process')
# ガウス過程で求めた標準偏差を範囲化
plt.fill_between(xtest, mu + 1*std, mu - 1*std, alpha=.2, color='blue', label=
'standard deviation by Gaussian process')

# 真の関数をプロット
true_y = true_function(xtest)

# データの標準化
true_y = true_y - (true_y.sum()/len(xtest)) # 平均を0にする
true_y = true_y/np.sqrt((np.square(true_y).sum()/len(xtest))) # 標準偏差を1にする
plt.plot(xtest, true_y, 'g', label='true function', linestyle='dashed')

plt.legend(bbox_to_anchor=(1.05, 1), loc='upper left', borderaxespad=0, fontsize=12)
plt.show()

```

### 3. テスト結果

上記プログラムに以下の観測データを CSV ファイルとして与えた。このデータは区間  $[0, 10]$  でランダムに発生させた  $x$  を潜在劣化関数に入力して得た値に観測誤差を乗せて  $y$  を生成している。ただし区間の両端付近の  $x=0.1$ 、 $x=9.9$  については強制的に観測データに含めるようにデータ生成プログラムを工夫してある。これはガウス過程においてデータが存在しない領域の予測値は平均に近づく傾向があり、観測値が上下に偏っている区間の両端においてこの振舞いは予測を不正確にする。本来観測値が高いはずの  $x=0$  付近で低めに、低いはずの  $x=10$  付近で高めに予測値が計算されるためである。

実際の観測データを使用するときも、区間の両端付近のデータがない場合は適当に補うことで予測が正確になる。既知の知識でデータを補うことはモデルの精度を高めることになる。

data

x	y
0.1	1.4965652404629200
2.2222222222222200	0.5899295049233560
2.3333333333333300	0.5044797514804010
2.6666666666666700	0.44878882511831700
2.8333333333333300	0.47281539068479900
4.055555555555560	0.38698718891660600
8.61111111111111	-0.7611086531858930
9.3333333333333300	-1.3707246934747200
9.9	-1.767732554925790

図 47 品質劣化予測結果

プログラムの実行結果は以下のとおりである。観測データから品質劣化予測グラフが得られることが確認できた。

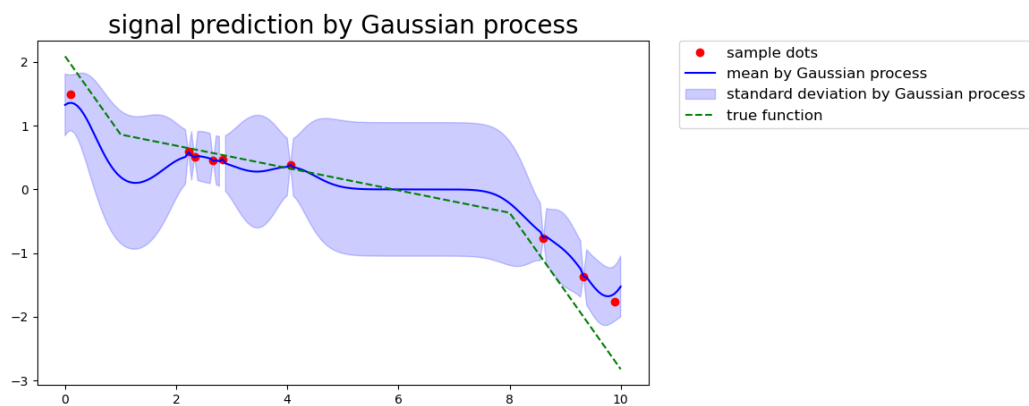


図 48 品質劣化予測グラフ A

類似の観測データで区間両端のデータを補わなかった場合のプログラム実行結果も以下に示しておく。両端で予測が潜在劣化関数から大きく外れているのが分かる。データが存在しない領域の予測値が平均に近づくため、このようなことが起こっている。

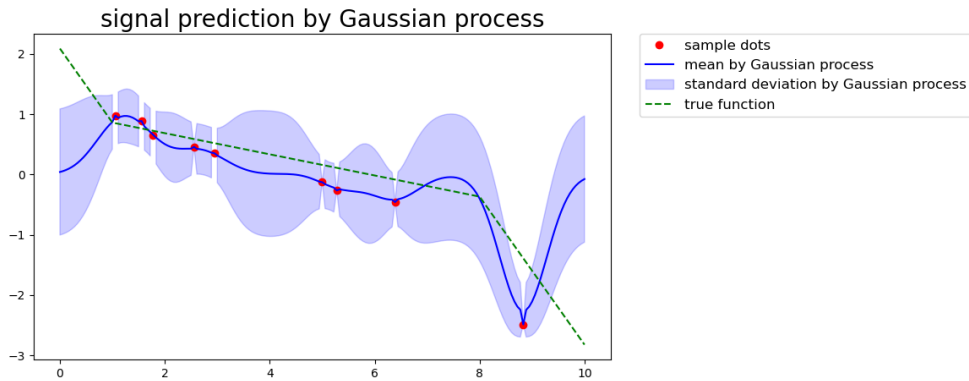


図 49 品質劣化予測グラフ B

#### 付録 4. 電池管理モデルにおけるガウス過程の理論的背景

バッテリー性能劣化予測プログラムの開発は、以下を前提に行なった：

充放電サイクル  $x_n$  と観測値  $y_n$  の  $N$  個の組からなる訓練データ  $D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}$  から、新たな充放電サイクル  $x_*$  に対する観測値  $y_*$  を予測する(ガウス過程回帰する)ための予測分布は以下の式で求まる。ここで訓練データは  $(y_1, \dots, y_N)$  の平均値がゼロになるよう標準化されているとする。

$$p(y_* | x_*, D) = N(k_*^T (K + V)^{-1} y, k_{**} - k_*^T (K + V)^{-1} K_*)$$

$$k_* = (k(x_*, x_1), k(x_*, x_2), \dots, k(x_*, x_N))^T$$

$$k_{**} = k(x_*, x_*)$$

本プラットフォーム利用者にとってリユースバッテリーの経済的価値を知るための重要な式なので、その成立過程をできるだけ平易に説明する。解説は以下の流れでおこなう。

- ・ 単回帰モデル
- ・ 重回帰モデル
- ・ 線形回帰モデル
- ・ 多変量ガウス分布
- ・ 線形回帰モデルから多変量ガウス分布へ
- ・ ガウス過程
- ・ カーネル関数
- ・ 動径基底関数回帰 (RBF 回帰)
- ・ 観測ノイズ
- ・ ガウス過程回帰

ゴールは性能劣化予測プログラム内で使用しているガウス過程回帰の解(上記の式)を導くことなので数式を使って説明するが、平易に全体の理論展開を追うことを優先する。そのため、多変量ガウス分布(正規分布)の公式のそもそもの証明や、数式の変換テクニックに立ち入ることは避け、ひとつの数式が表している概念が次の概念へ発展する論理的

流れを解き明かすことを重視する。

・ **単回帰モデル (simple regression model)**

入力  $x$ 、出力  $y$  の観測データ  $\mathbf{D} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$  が与えられたとき、出力の予測値が  $\hat{y} = a + bx$  になると仮定し、予測値と観測データの誤差が最小になるようにパラメータ  $a, b$  を求めることを単回帰モデル、その解  $(a, b)^T$  を単回帰モデルの解と言う。 $(a, b)^T$  は縦ベクトルを転置して表現していることを示している。この解は、観測値と予測値の差、つまり観測誤差  $E = \sum_n (y_n - \hat{y}_n)^2$  を最小にする  $a, b$  を計算することで求まる。E は  $a, b$  についての 2 次式になるが、その最小値は E を  $a, b$  で偏微分した結果をゼロとして連立方程式を解くことで次のように求まる。

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & \sum_n x_n \\ \sum_n x_n & \sum_n x_n^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_n y_n \\ \sum_n x_n y_n \end{pmatrix} \quad [M]^{-1} \text{は逆行列を表す}$$

単回帰モデルは高校数学で学習する統計学の基礎であるが、ここを出発点にガウス過程回帰まで論理を展開する。

・ **重回帰モデル (multiple regression model)**

単回帰モデルでは入力  $x$  はスカラーであったが、これを  $D$  次元のベクトル  $\mathbf{x}$  にすると重回帰モデルになる。出力の予測値が  $\hat{y}$  は  $\mathbf{x}$  の各要素の重み付け和になる。

$$\mathbf{x}^T = (x_1, x_2, \dots, x_D)$$

$$\hat{y} = w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_D x_D$$

重みをベクトル  $\mathbf{w}^T = (w_0, w_1, w_2, \dots, w_D)$  で表せば出力の予測値  $\hat{y}$  は、

$$\hat{y} = \mathbf{w}^T \mathbf{x}$$

とベクトルの内積で表せる。

$N$  個の観測データ  $\mathbf{D} = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_N, y_N)\}$  についてこの式を縦に並べると、

$$\begin{pmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \hat{y}_3 \\ \vdots \\ \hat{y}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{w}^T \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{w}^T \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{w}^T \mathbf{x}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{w}^T \mathbf{x}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1^T \\ \mathbf{x}_2^T \\ \mathbf{x}_3^T \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N^T \end{pmatrix} \mathbf{w} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1D} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2D} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3D} \\ 1 & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{ND} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_0 \\ w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_D \end{pmatrix} \Rightarrow \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X} \mathbf{w}$$

この  $\mathbf{X}$  は計画行列 (design matrix) と呼ばれ、入力データから一意に決まる定数行列である。単回帰モデルの解を求めた時と同様に、誤差  $E = \sum_n (y_n - \hat{y}_n)^2$  を最小にする  $\mathbf{w}$  を求めると  $\mathbf{w} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}$  となる。この計算過程では行列の計算則、ベクトルの微分などの数学的テクニックを使うが、ここでは重回帰モデルの解 (重み)  $\mathbf{w}$  が観測データから行列計算で求まることを理解すれば十分である。入力をスカラーからベクトルに拡張したことで、バ

バッテリーの性能予測をする（目的変数の値を予測する）ための説明変数を多次元にできる（充放電回数と温度を入力データとするなど）ことになるが、それ以上に重要なのはたとえ1次元の説明変数であっても特徴ベクトルを抽出することで多次元に変換すればモデルを任意の関数セットの重みつき和にすることができることである。これにより複雑な曲線に従う劣化モデルを求めることが可能になる。これについて事項で説明する。

・ **線形回帰モデル (linear regression model)**

重回帰モデルではD次元の入力ベクトル  $\mathbf{x}$  に対する出力の予測値  $\hat{y}$  を  $\mathbf{x}$  の各要素の重み付け和と考えたが、これでは  $x_i$  の1次式としてしか  $\hat{y}$  を表現できない。そこでH個の関数  $\varphi_h$  を用意して  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (\varphi_1(\mathbf{x}), \varphi_2(\mathbf{x}), \dots, \varphi_H(\mathbf{x}))^T$  とし、 $\hat{y}$  を  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$  の各要素の重み付け和とすれば、適当な  $\varphi_h$  を多数用意することで入出力関係の表現力を大幅に上げることができる。例えば入力  $\mathbf{x}$  が1次元で  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (x, x^2, x^3)$  なら、 $\hat{y}$  は  $x$  の3次関数になる。一般に  $\hat{y} = w_0 + w_1 \varphi_1(\mathbf{x}) + \dots + w_H \varphi_H(\mathbf{x})$ 、ベクトル表記すれば  $\hat{y} = \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$  となる。重回帰モデルの時と同様にN個の観測データ  $\mathbf{D} = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_N, y_N)\}$  についてこの式を縦に並べると、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \hat{y}_3 \\ \vdots \\ \hat{y}_N \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_1) \\ \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_2) \\ \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_3) \\ \vdots \\ \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_1)^T \\ \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_2)^T \\ \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_3)^T \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_N)^T \end{pmatrix} \mathbf{w} = \begin{pmatrix} 1 & \varphi_1(\mathbf{x}_1) & \varphi_2(\mathbf{x}_1) & \cdots & \varphi_H(\mathbf{x}_1) \\ 1 & \varphi_1(\mathbf{x}_2) & \varphi_2(\mathbf{x}_2) & \cdots & \varphi_H(\mathbf{x}_2) \\ 1 & \varphi_1(\mathbf{x}_3) & \varphi_2(\mathbf{x}_3) & \cdots & \varphi_H(\mathbf{x}_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & \varphi_1(\mathbf{x}_N) & \varphi_2(\mathbf{x}_N) & \cdots & \varphi_H(\mathbf{x}_N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_0 \\ w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_H \end{pmatrix} \\ &\Rightarrow \hat{\mathbf{y}} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{w} \end{aligned}$$

重回帰モデルの計画行列  $\mathbf{X}$  が  $\boldsymbol{\Phi}$  に変わっただけなので、線形回帰モデルの解は、

$$\mathbf{w} = (\boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\Phi})^{-1} \mathbf{X} \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{y} \text{ となる。}$$

$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (\varphi_1(\mathbf{x}), \varphi_2(\mathbf{x}), \dots, \varphi_H(\mathbf{x}))^T$  は入力  $\mathbf{x}$  の特徴を抽出して並べたベクトルなので  $\mathbf{x}$  の特徴ベクトル (feature vector)、またそれぞれの  $\varphi_h$  は特徴ベクトル空間の座標軸となるため基底関数 (basis function) と呼ばれる。予測値  $\hat{y}$  は入力  $\mathbf{x}$  の1次式ではないが、重み  $\mathbf{w}$  については1次式なので線形回帰モデルと呼ばれる。

・ **多変量ガウス分布**

ここではガウス分布および多変量ガウス分布の性質と関連する公式について次項以降の論理展開で必要となるものを説明する。これらは公知の数学的事項として証明などは統計学の専門書に譲り、ここでは利用者の立場で必要な公式、概念を確認する。

入力  $x$  に対する出力が関数  $f(x)$  に従うとしても実際の観測データ  $y$  はこのグラフ上にすべて乗らず、誤差  $\varepsilon$  だけずれ  $y = f(x) + \varepsilon$  となるのが普通である。この誤差の分布として最もよく用いられるのがガウス分布 (Gaussian distribution) である。正規分布 (normal distribution) とも呼ばれ  $p(\varepsilon) = \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$  と表記される。 $\mu$  は平均、 $\sigma^2$  は分散である。ガウス分布の確率密度関数は  $\mathcal{N}(x|\mu, \sigma^2) = (1/\sqrt{(2\pi)\sigma}) \exp(-(x - \mu)^2/2\sigma^2)$  である。指数

部が本体であり、定数部は指数部を $-\infty$ から $\infty$ まで積分した値の逆数で、これに乗ずることで全体の面積が1の確率密度関数にしている。 $\mu=0, \sigma^2=1$ の場合を標準正規分布と言い、そのグラフは下図のようにベルカーブになる。

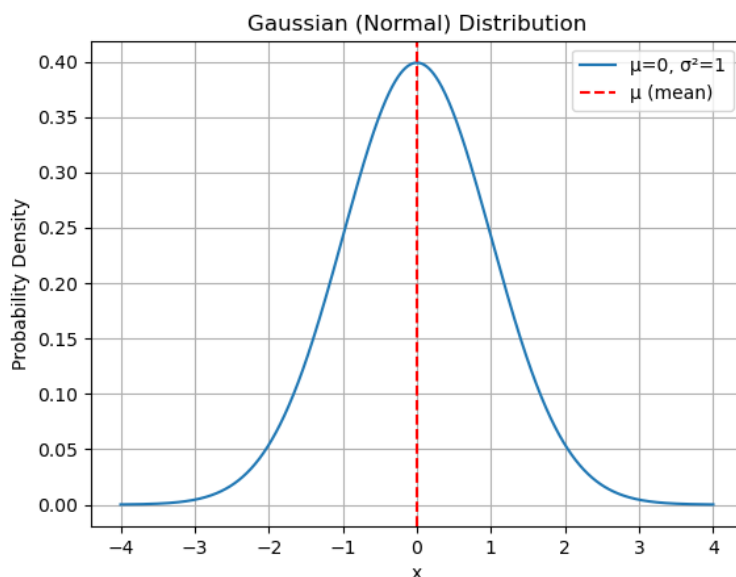


図 50 標準正規分布グラフ

変数が  $D$  次元のベクトル  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_D)$  の場合は多変量ガウス分布と呼ばれ、確率密度関数は  $\mathcal{N}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = (1/((\sqrt{2\pi})^D \sqrt{|\boldsymbol{\Sigma}|})) \exp(-(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^\top \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})/2)$  となる。ここで  $\boldsymbol{\mu}$  は平均ベクトル、 $\boldsymbol{\Sigma}$  は  $D \times D$  の共分散行列で常に正方対称行列になり、その  $(i, j)$  要素が  $x_i$  と  $x_j$  の共分散を表している。多変量ガウス分布において以下の公式が成り立つ。

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbb{E}[\mathbf{x}], \quad \Sigma_{ij} = \mathbb{E}[x_i x_j] - \mathbb{E}[x_i] \mathbb{E}[x_j]$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mathbb{E}[\mathbf{x}\mathbf{x}^\top] - \mathbb{E}[\mathbf{x}] \mathbb{E}[\mathbf{x}]^\top$$

また多変量ガウス分布に従うベクトル  $\mathbf{x}$  を行列  $A$  で線形変換したベクトル  $\mathbf{y}$  もまた多変量ガウス分布に従い、その共分散行列は  $(A^{-1})^\top \boldsymbol{\Sigma}^{-1} A^{-1}$  になる。

ここでベクトル  $\mathbf{x}$  の最初の  $L$  次元を  $\mathbf{x}_1$ 、残りの  $D-L$  次元を  $\mathbf{x}_2$  とおくと、

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ - \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix}$$

$\mathbf{x} \sim \mathcal{N}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$  も同様に  $L$  次元、 $D-L$  次元で分割すると、

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ - \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix} \sim \mathcal{N}\left(\begin{pmatrix} \boldsymbol{\mu}_1 \\ - \\ \boldsymbol{\mu}_2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{11} & | & \boldsymbol{\Sigma}_{12} \\ - & + & - \\ \boldsymbol{\Sigma}_{21} & | & \boldsymbol{\Sigma}_{22} \end{pmatrix}\right)$$

ここで  $\boldsymbol{\Sigma}_{11}$ ,  $\boldsymbol{\Sigma}_{21}$ ,  $\boldsymbol{\Sigma}_{12}$ ,  $\boldsymbol{\Sigma}_{22}$  の次元は、それぞれ  $L \times L$ ,  $D-L \times L$ ,  $L \times D-L$ ,  $D-L \times D-L$  であ

る。

元の分布は、 $p(\mathbf{x})=p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ と  $\mathbf{x}_1$  と  $\mathbf{x}_2$  の同時分布と考えられるが、これを  $\mathbf{x}_2$  について積分すると  $\mathbf{x}_1$  だけについての周辺分布が得られ、これもまた多変量ガウス分布になる。

$$p(\mathbf{x}_1) = \int p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) d\mathbf{x}_2 = \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\Sigma}_{11})$$

また  $\mathbf{x}_1$  が与えられた時の  $\mathbf{x}_2$  の条件付分布も多変量ガウス分布になる。

$$p(\mathbf{x}_2|\mathbf{x}_1) = \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_2 + \boldsymbol{\Sigma}_{21} \boldsymbol{\Sigma}_{11}^{-1}(\mathbf{x}_1 - \boldsymbol{\mu}_1), \boldsymbol{\Sigma}_{22} - \boldsymbol{\Sigma}_{21} \boldsymbol{\Sigma}_{11}^{-1} \boldsymbol{\Sigma}_{12})$$

条件付分布の平均  $\boldsymbol{\mu}_2 + \boldsymbol{\Sigma}_{21} \boldsymbol{\Sigma}_{11}^{-1}(\mathbf{x}_1 - \boldsymbol{\mu}_1)$  は、 $\mathbf{x}_1$  が与えられた時の、 $\mathbf{x}_1$  と相関を持つ  $\mathbf{x}_2$  の新しい平均になるが、 $\mathbf{x}_1$  の分散  $\boldsymbol{\Sigma}_{11}$  が小さい（つまり  $\mathbf{x}_1$  の観測精度が高い）ほど、 $\mathbf{x}_1$  の平均からのずれが  $\mathbf{x}_2$  の元の平均  $\boldsymbol{\mu}_2$  に対して大きく影響する。

また条件付分布の分散  $\boldsymbol{\Sigma}_{22} - \boldsymbol{\Sigma}_{21} \boldsymbol{\Sigma}_{11}^{-1} \boldsymbol{\Sigma}_{12}$  は観測値  $\mathbf{x}_1$  が得られたことで元の分散  $\boldsymbol{\Sigma}_{22}$  より減少している（精度が高くなっている）が、その度合いは  $\mathbf{x}_1$  の分散  $\boldsymbol{\Sigma}_{11}$  が小さいほど大きくなっている。ここでのベクトル分割の議論は、観測データから未知の領域の劣化予測をするために利用される。

#### ・ 線形回帰モデルから多変量ガウス分布へ

入力ベクトル  $\mathbf{x}$  について、特徴ベクトルを  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (\varphi_1(\mathbf{x}), \varphi_2(\mathbf{x}), \dots, \varphi_H(\mathbf{x}))^T$ 、各特徴  $\varphi_h(\mathbf{x})$  の重みを  $\mathbf{w} = (w_0, w_1, w_2, \dots, w_H)^T$  とした時の線形回帰モデルは次のようになり、

$$\hat{y} = \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = w_0 + w_1 \varphi_1(\mathbf{x}) + \dots + w_H \varphi_H(\mathbf{x})$$

これを縦に  $N$  個並べて、計画行列を  $\boldsymbol{\Phi}$  とおけば  $\mathbf{y} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{w}$  となるのであった。

観測値  $\mathbf{y}$  が  $\mathbf{x}$  から誤差なく正確に回帰されるとするなら  $\mathbf{y} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{w}$  となるが、事前知識がない状況でそれぞれの重み  $w_i$  はプラスともマイナスとも言えないので平均ゼロ、ばらつき具合もどの重みが大きいとも小さいとも言えないので分散はすべて  $\lambda^2$  と考えるのが妥当である。さらに平均ゼロ、分散  $\lambda^2$  であることしか知らない場合、最大エントロピー分布 (maximum entropy distribution)、つまり情報が最も少なく最も「正直な」事前分布は平均ゼロ、分散  $\lambda^2$  のガウス分布となる。そこで  $\mathbf{w}$  が平均  $\mathbf{0}$ 、分散  $\lambda^2 \mathbf{I}$  のガウス分布  $\mathbf{w} = \mathcal{N}(\mathbf{0}, \lambda^2 \mathbf{I})$  から生成されたものとするれば、 $\mathbf{w}$  を定数行列  $\boldsymbol{\Phi}$  で線形変換したベクトル  $\mathbf{y}$  もまたガウス分布に従う。その期待値、共分散行列は次のようになる。

$$\mathbb{E}[\mathbf{y}] = \mathbb{E}[\boldsymbol{\Phi} \mathbf{w}] = \boldsymbol{\Phi} \mathbb{E}[\mathbf{w}] = \mathbf{0}$$

$$\mathbb{E}[\mathbf{y} \mathbf{y}^T] - \mathbb{E}[\mathbf{y}] \mathbb{E}[\mathbf{y}]^T = \mathbb{E}[(\boldsymbol{\Phi} \mathbf{w})(\boldsymbol{\Phi} \mathbf{w})^T] - \mathbf{0} = \boldsymbol{\Phi} [\mathbf{w} \mathbf{w}^T] \boldsymbol{\Phi}^T = \boldsymbol{\Phi} \lambda^2 \mathbf{I} \boldsymbol{\Phi}^T = \lambda^2 \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Phi}^T$$

ゆえに  $\mathbf{y}$  の分布は多変量ガウス分布  $\mathcal{N}(\mathbf{0}, \lambda^2 \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Phi}^T)$  となる。

$\mathbf{y} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \lambda^2 \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Phi}^T)$  には、線形回帰モデルにあった重み  $\mathbf{w}$  が無いので  $\mathbf{x}$  や  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$  の次元がどんなに高くても、たとえ無限次元であっても、 $\mathbf{w}$  の値を求めることなく、 $\mathbf{y}$  の分布はデータ数  $N$  に依存する共分散行列  $\lambda^2 \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Phi}^T$  で決まる。つまり線形回帰モデルにあった次元の呪いから多変量ガウス分布は解放されている。

#### ・ ガウス過程

どんな  $N$  個の入力の集合  $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)$  についても対応する出力  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)$  の同時分布  $p(\mathbf{y})$  が多変量ガウス分布に従うとき、 $\mathbf{x}$  と  $\mathbf{y}$  の関係はガウス過程 (Gaussian process) に従うという。「どんな  $N$  個の入力の集合」なので、ガウス過程とは無限次元のガウス分布のことである。それをデータのある次元だけに周辺化して有限次元にしたのが前述した次式である。

$$\mathbf{y} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \lambda^2 \Phi \Phi^T)$$

ここで共分散行列を  $\mathbf{K} = \lambda^2 \Phi \Phi^T$  とおくと、特徴ベクトルを  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (\varphi_1(\mathbf{x}), \varphi_2(\mathbf{x}), \dots, \varphi_H(\mathbf{x}))^T$  とすれば  $K_{nn'} = \lambda^2 \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_n)^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_{n'})$  なので  $\mathbf{x}_n$  と  $\mathbf{x}_{n'}$  の特徴ベクトル  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_n)$  と  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_{n'})$  の内積の定数倍が共分散行列  $\mathbf{K}$  の  $(n, n')$  要素  $K_{nn'}$  になっている。多変量ガウス分布において2つの入力変数の間の共分散が大きいとは、対応する出力  $y_n$  と  $y_{n'}$  も似た値を持つことを意味するので、ガウス過程の直感的な性質は「入力  $\mathbf{x}$  が似ていれば出力  $\mathbf{y}$  も似ている」と言うことになる。ここで入力  $\mathbf{x}$  が似ているとは、特徴ベクトル  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$  を通じた内積が大きいことを意味している。以上の表記を使えばガウス過程は平均  $\mathbf{0}$  の場合  $\mathbf{y} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{K})$  と表せる。

ガウス過程の正確な定義は以下のようになる：

「どんな自然数  $N$  についても、入力  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N$  に対応する出力のベクトル  $\mathbf{f} = (f(\mathbf{x}_1), f(\mathbf{x}_2), \dots, f(\mathbf{x}_N))$  が平均  $\boldsymbol{\mu} = (\mu(\mathbf{x}_1), \mu(\mathbf{x}_2), \dots, \mu(\mathbf{x}_N))$ 、 $K_{nn'} = k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n'})$  を要素とする行列  $\mathbf{K}$  を共分散行列とするガウス分布  $\mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{K})$  に従うとき、 $\mathbf{f}$  はガウス過程に従うといい、これを  $\mathbf{f} \sim \text{GP}(\boldsymbol{\mu}(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n'}))$  と書く」

ここで平均関数  $\boldsymbol{\mu}$  は多くの場合データを適切に変換することで  $\boldsymbol{\mu} = \mathbf{0}$  とみなせる。

また無限次元のベクトル  $\mathbf{f}$  はあらゆる入力  $\mathbf{x}$  に対応する  $f(\mathbf{x})$  を生成するので、これは関数  $f$  を生成していることと同義である。しかし実際には有限個の入力  $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N$  に対応する出力  $f(\mathbf{x}_1), \dots, f(\mathbf{x}_N)$  のガウス分布  $\mathbf{f} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{K})$  をガウス過程の略記とすることが多い。

#### ・ カーネル関数

$\mathbf{y} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{K})$  の分布は共分散行列の要素  $K_{nn'} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_n)^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_{n'})$  だけで定まる。この値は  $\mathbf{x}_n$  と  $\mathbf{x}_{n'}$  の関数  $k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n'})$  の結果さえわかれば特徴ベクトル  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$  を明示的に求めなくても定まる。この関数を  $\mathbf{x}_n$  と  $\mathbf{x}_{n'}$  のカーネル関数という。特徴ベクトルは無限次元になることもあるが（実際にガウス過程でよく使われる RBF カーネルは無限次元の特徴ベクトルによる線形回帰モデルに対応している）カーネル関数を使えばデータ量  $N$  のオーダーの計算で共分散行列を求められる。 $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$  を使わずにカーネル関数  $k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n'})$  だけで  $\mathbf{K}$  を計算することをカーネルトリックと呼ぶ。

#### ・ 動径基底関数回帰 (RBF 回帰)

ガウス過程で入力  $\mathbf{x}$  の間の類似度を測るために最もよく使われるカーネル関数はガウスカーネル (Gaussian kernel) または動径基底関数 (radial basis function: RBF) カーネルと呼ばれ、以下の式で表される：

$$k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_n') = \theta_1 \exp(-|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2 / \theta_2)$$

$\theta_1, \theta_2$  はカーネル関数の性質を決めるハイパーパラメータである。ガウス過程の RBF カーネルは線形回帰モデルの基底関数  $\varphi_h(x)$  に、

$$\varphi_h(x) = r \exp(-(x - h/H)^2 / r_2)$$

を選び、 $h = -H^2, \dots, 0, \dots, H^2$  として基底関数の中心を  $x$  軸上に  $1/H$  おきに  $2H^2+1$  個おいた場合に相当する。特徴ベクトルは次のようになる：

$$\boldsymbol{\varphi}(x) = (\varphi_{-H^2}(x), \dots, \varphi_0(x), \dots, \varphi_{H^2}(x))^T$$

この時カーネル関数は次のようになる：

$$k(x, x') = \boldsymbol{\varphi}(x)^T \boldsymbol{\varphi}(x') = \sum_{-H^2 \leq h \leq H^2} (\varphi_h(x) \varphi_h(x'))$$

ここで  $H \rightarrow \infty$  としてグリッドを無限に細かくすると、

$$\begin{aligned} k(x, x') &= \lim_{H \rightarrow \infty} \sum_{-H^2 \leq h \leq H^2} (\varphi_h(x) \varphi_h(x')) \\ &\rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} r^2 \exp(-(x - h)^2 / r_2) \exp(-(x' - h)^2 / r_2) dh \\ &= \theta_1 \exp(-(x - x')^2 / \theta_2) \quad \text{ただし } \theta_1 = r^2 \sqrt{\pi r_2^2 / 2}, \quad \theta_2 = 2r^2 \end{aligned}$$

つまり RBF カーネルになる。ガウス分布の確率密度関数と同じ形をした基底関数を無限個使った特徴ベクトルによる線形回帰モデルがカーネル関数により有限の計算で定まることが見て取れる。

まとめると、RBF カーネルを用いたガウス過程による曲線（一般には超局面）は、基底関数  $\varphi_h(x) = r \exp(-(x - h/H)^2 / r_2)$  を無限個重み付けた線形回帰モデルとも見ることができ、実際にはデータのある場所での関数の線形和によってその事後分布がガウス分布として表現されている。

## ・ 観測ノイズ

ここまでの説明では観測ノイズについては無視して、

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{w} \quad (\text{線形回帰モデル}) \rightarrow \mathbf{y} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \lambda^2 \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Phi}^T) \quad (\text{多変量ガウス分布})$$

$$f \sim \text{GP}(\boldsymbol{\mu}(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_n')) \quad (\text{ガウス過程}) \rightarrow f \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{K}), \quad y_n = f(\mathbf{x}_n) \quad (\text{ガウス分布による略記})$$

としてきたが、実際には観測値には誤差が乗るので、観測モデルは  $n = 1, 2, \dots, N$  について  $y_n = f(\mathbf{x}_n) + \varepsilon_n$  となる。誤差が平均 0、分散  $\sigma^2$  のガウス分布に従うと考えれば、 $\varepsilon_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$  なので、 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)$  の確率分布は  $p(\mathbf{y} | \mathbf{f}) = \mathcal{N}(\mathbf{f}, \sigma^2 \mathbf{I})$ 、ただし  $\mathbf{f} = (f(\mathbf{x}_1), f(\mathbf{x}_2), \dots, f(\mathbf{x}_N))$  と定義した。ここで  $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)$  が与えられた後の  $\mathbf{y}$  の分布  $p(\mathbf{y} | \mathbf{X})$  を  $\mathbf{y}$  と  $\mathbf{f}$  の同時分布  $p(\mathbf{y}, \mathbf{f} | \mathbf{X})$  を  $\mathbf{f}$  について積分して（期待値をとって）求めると、

$$p(\mathbf{y} | \mathbf{X}) = \int p(\mathbf{y}, \mathbf{f} | \mathbf{X}) d\mathbf{f} = \int p(\mathbf{y} | \mathbf{f}) p(\mathbf{f} | \mathbf{X}) d\mathbf{f} = \int \mathcal{N}(\mathbf{y} | \mathbf{f}, \sigma^2 \mathbf{I}) \mathcal{N}(\mathbf{f} | \boldsymbol{\mu}, \mathbf{K}) d\mathbf{f}$$

これは 2 つの独立したガウス分布の畳み込みなので、結果はやはりガウス分布となり、その共分散行列は 2 つのガウス分布の共分散行列の和となる。よって上記の積分の結果は、 $p(\mathbf{y}$

$\mathbf{X} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{K} + \sigma^2 \mathbf{I})$  と表される。つまり  $\mathbf{y}$  は、カーネル関数を新しく、

$$k'(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n'}) = k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n'}) + \sigma^2 \delta(n, n')$$

$\delta(n, n')$  はクロネッカーのデルタで  $n=n'$  の時 1、それ以外は 0 を返すとおいたガウス過程に従う。

### • ガウス過程回帰

$N$  個の観測データ  $\mathbf{D} = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_N, y_N)\}$  が与えられていて、ただし  $y$  は平均が 0 になるように正規化してある。 $\mathbf{x}$  と  $y$  の間に  $y = f(\mathbf{x})$  の関係があり、この関数  $f$  が平均  $\mathbf{0}$  のガウス過程  $f \sim \text{GP}(\mathbf{0}, k(\mathbf{x}, \mathbf{x}'))$  から生成されているとする。ここでカーネル関数  $k$  は前述の誤差も含んでいるとする。このとき  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$  とおけば  $\mathbf{y}$  はガウス分布に従い、入力のすべてのペア  $(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n'})$  についてカーネル関数  $k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n'})$  を用いて  $\mathbf{K}_{nn'} = k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n'})$  で与えられるカーネル行列  $\mathbf{K}$  を使って  $\mathbf{y} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{K})$  が成り立つ。

ガウス過程回帰で行いたいのは、観測データに含まれていない  $\mathbf{x}^*$  での  $y^*$  の値を求めることである。そのため観測データに  $(\mathbf{x}^*, y^*)$  を追加した新たなデータ  $\mathbf{D}' = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_N, y_N), (\mathbf{x}^*, y^*)\}$  を考え、 $\mathbf{y}' = (y_1, y_2, \dots, y_N, y^*)^T$ 、 $\mathbf{X}' = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{x}^*)$  から計算される  $(N+1) \times (N+1)$  次元のカーネル行列を  $\mathbf{K}'$  とすれば、これら全体がまたガウス過程に従うので  $\mathbf{y}' \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{K}')$  となる。以前に行ったように次元分割すると、

$$\mathbf{y}' = \begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ - \\ y^* \end{pmatrix} \sim \mathcal{N} \left( \mathbf{0}, \begin{pmatrix} \mathbf{K} & | & \mathbf{k}^* \\ \hline - & + & - \\ \mathbf{k}^{*\top} & | & k^{**} \end{pmatrix} \right)$$

$$\mathbf{k}_* = (k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_1), k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_2), \dots, k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_N))^T$$

$$k_{**} = k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}^*)$$

ここで  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{k}_*^T$ ,  $\mathbf{k}_*$ ,  $k_{**}$  の次元は、それぞれ  $N \times N$ ,  $1 \times N$ ,  $N \times 1$ ,  $1 \times 1$  である。

この式は  $\mathbf{y}$  と  $y^*$  の同時分布の式なので、 $\mathbf{y}$  が与えられた時の  $y^*$  の条件付き確率は、ガウス分布の要素間の条件付き確率から求められる。すでに説明したように、

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ - \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix} \sim \mathcal{N} \left( \begin{pmatrix} \boldsymbol{\mu}_1 \\ - \\ \boldsymbol{\mu}_2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{11} & | & \boldsymbol{\Sigma}_{12} \\ \hline - & + & - \\ \boldsymbol{\Sigma}_{21} & | & \boldsymbol{\Sigma}_{22} \end{pmatrix} \right)$$

の時、 $\mathbf{x}_1$  が与えられた時の  $\mathbf{x}_2$  の条件付分布は以下の多変量ガウス分布になる。

$$p(\mathbf{x}_2 | \mathbf{x}_1) = \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_2 + \boldsymbol{\Sigma}_{21} \boldsymbol{\Sigma}_{11}^{-1}(\mathbf{x}_1 - \boldsymbol{\mu}_1), \boldsymbol{\Sigma}_{22} - \boldsymbol{\Sigma}_{21} \boldsymbol{\Sigma}_{11}^{-1} \boldsymbol{\Sigma}_{12})$$

今回は  $\boldsymbol{\mu}_1 = \mathbf{0}$ ,  $\boldsymbol{\mu}_2 = \mathbf{0}$  なので、

$$p(y^* | \mathbf{x}^*, \mathbf{D}) = \mathcal{N}(\mathbf{k}_*^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{y}, k_{**} - \mathbf{k}_*^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{k}_*)$$

がガウス過程による予測分布として求められる。この時、 $y^*$  の期待値はガウス分布の平均なので、 $\mathbb{E}[y^* | \mathbf{x}^*, \mathbf{D}] = \mathbf{k}_*^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{y}$  となる。

予測したい点が  $\mathbf{X}^* = (\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^*, \dots, \mathbf{x}_M^*)$  と複数個ある場合も同様に  $\mathbf{y}^* = (y_1^*, \dots, y_M^*)$  とすると以下のように予測分布が求まる。

$$p(\mathbf{y}^* | \mathbf{X}^*, \mathbf{D}) = \mathcal{N}(\mathbf{k}_*^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{y}, \mathbf{k}_{**} - \mathbf{k}_*^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{k}_*)$$

$$k_*(n, m) = k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_m^*) \quad (n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M)$$

$$k_{**}(m, m') = k(\mathbf{x}_m^*, \mathbf{x}_{m'}^*) \quad (m = 1, \dots, M, m' = 1, \dots, M)$$

観測データからバッテリー性能の期待値と分散を求めグラフに描画するプログラムで利用したのがこの公式である。

## 付録 5. 実証時の各種計測値

- 分解後バッテリーの重量測定

実証作業に用いたバッテリーの分解後のセル/モジュール自身の重量とその他外装・ハーネス等の重量の比較。

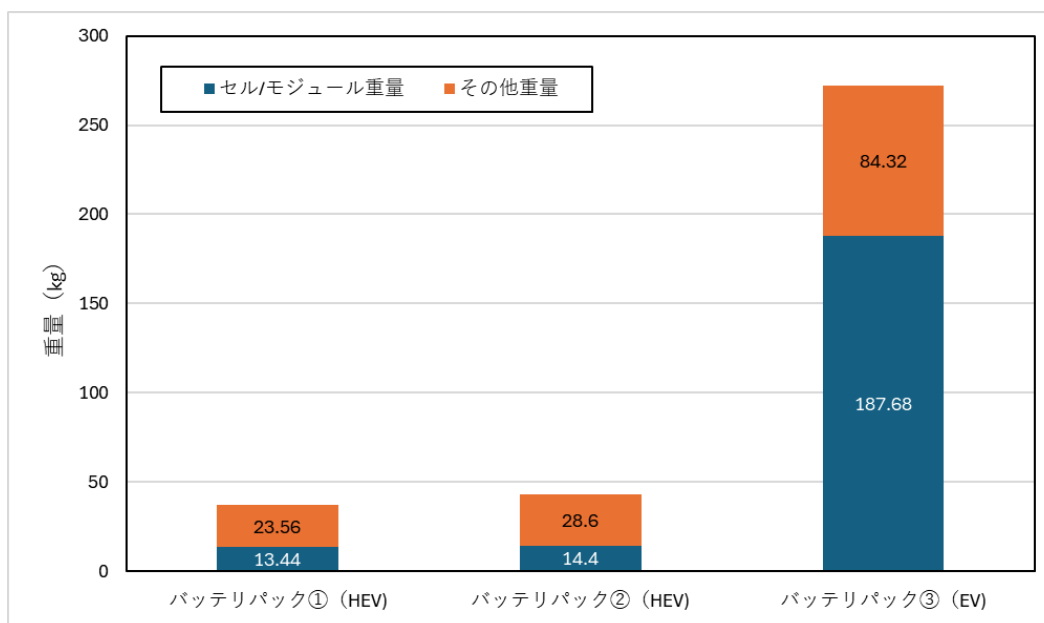


図 51 バッテリーパックの重量

- 利用機材の消費電力測

表 38 自動車用リチウムイオンバッテリーのリマンのうち分解と診断の工程での消費電力量と GHG の CO<sub>2</sub> 換算排出量 (バッテリー出力 1kWh あたり)

	消費電力量 [Wh]	CO <sub>2</sub> 換算排出量 [g]
電子機器	96	41
電動工具	50	21
フォークリフト	7.4	3.2
合計	153	66

## 付録 6. 標準規格の調査

### 概略

EV の普及に伴い、2030 年以降は国内でも大量の廃バッテリーが発生することが確実視され

ている。標準規格の整備は、バッテリーを「廃棄物」から「資源」へと位置付け直し、有価取引を可能にするうえで不可欠な要素である。本章では、国際標準の最新動向、バッテリーパスポート制度の比較、実務における課題、そして本実証で開発する情報流通プラットフォームが果たし得る役割について整理する。

### 国際標準規格の整備状況

2024年にEVの使用済みバッテリーのリユース・リパーパスに関する規格が相次いで発行された。以下に代表的なものの概要を示す。

- IEC 63330-1:2024 二次電池の再利用-第1部：一般要求事項**

EV用途で用いられたセル、モジュール、パックの再利用に関する一般要件を規定。外観検査、使用履歴データ（異常履歴・修理歴・使用期間など）、および使用可能範囲（電圧・電流・温度など）の確認を求める。非破壊的手法で評価することを前提としている。
- IEC 63338:2024 二次電池およびバッテリーの再利用と転用に関する一般的なガイダンス**

バッテリーセルやパックの「再利用」「転用」に関する一般的な指針を示す。ただし、寿命追跡データのない単セルやセルアセンブリの再利用は認めないなど、利用範囲の制限が強い。システムコンポーネントの再利用も対象外とされており、安全リスクを強く意識した内容となっている。
- JIS Q 9092:2022 品質マネジメントシステム—電池リユース—要求事項**

国内規格として制定されたリユースバッテリー事業者向けの品質マネジメントシステム。ISO 9001を基盤に、リユースバッテリーの取り扱いに関する品質要求を加えたもの。現場にとっては「まずは品質マネジメント体制を整備せよ」というメッセージ性を持つ。

IEC 63330-1:2024は「評価手法」を中心に据え、IEC 63338:2024は「再利用可否の基本方針」に重点を置く。一方でJIS Q 9092:2022は「事業者の体制整備」に焦点を当てている。つまり、規格それぞれがカバーする領域は断片的であり、「評価技術」「適用範囲」「事業運営」という三層がバラバラに存在しているのが現状である。

表 39 規格間の比較

	IEC 63330-1:2024	IEC 63338:2024	JIS Q 9092:2022
主な対象	EV用セル・モジュール・パック	セル・パックのリユース・転用	リユース事業者の品質管理
カバー範囲	外観・履歴・電氣的条件	再利用可否の基本方針	品質マネジメント体制
評価方法	非破壊的診断を前提	寿命データが必須	-
法的拘束力	任意	任意	任意

### バッテリーのリユース・リサイクルの情報管理に関する国際動向

・ **EU（欧州連合）：**

EUでは、「電池規則（Battery Regulation 2023/1542）」にもとづき、2027年からバッテリーパスポート制度の導入が義務化される予定である。制度はサプライチェーン全体でのデータ連携を目的とし、CO<sub>2</sub> 出力、リサイクル材の含有率、デューデリジェンス対応など幅広い要素を対象とする。実装ガイドラインはドイツを中心に進められる Battery Pass プロジェクトが策定しており、EUの特徴は、制度が法的拘束力を伴う点にある。ただし、実装プロセスでは当初の計画から遅延が生じていることも報告されている。

・ **中国：**

中国では、新エネルギー車用バッテリーに対してトレーサビリティ制度がすでに導入されており、自動車メーカーが義務的に回収・管理・報告をおこなう仕組みが整備されている。政策主導で市場拡大が進んでいる点の特徴であり、リユースやリサイクルの実装は加速している。一方で、国内制度は進んでいるが、情報公開の透明性や国際的な制度との整合性については課題が指摘されている。

・ **米国：**

米国では、EUのような包括的な電池規則は存在せず、連邦レベルではDOE（エネルギー省）による研究開発支援や補助金プログラムが中心で、技術開発や実証支援は活発に行われている。ただし、制度面は州ごとに分散しており、カリフォルニア州のように厳格な規制を設けている地域もあれば、取り組みが限定的な地域もある。全米共通の制度基盤は整っておらず、研究開発が進んでいる一方で制度設計の一体性には欠ける点の特徴といえる。

・ **日本：**

日本では、BASC（一般社団法人電池サプライチェーン協議会）、ABtC（一般社団法人自動車・蓄電池トレーサビリティ推進センター）が主導して日本版電池パスポートの検討を進めており、2025～26年に社会実証が予定されている。ウラノスエコシステムと接続して資源循環トレーサビリティを確立することを目指している。現時点ではEUのように法的拘束力を伴う制度には至っておらず、自主的な枠組みとして整備が進められているのが特徴である。EV普及台数が欧州や中国に比べて少ないこともあり、市場規模が限られていることから、制度化の進展は慎重に進められている。

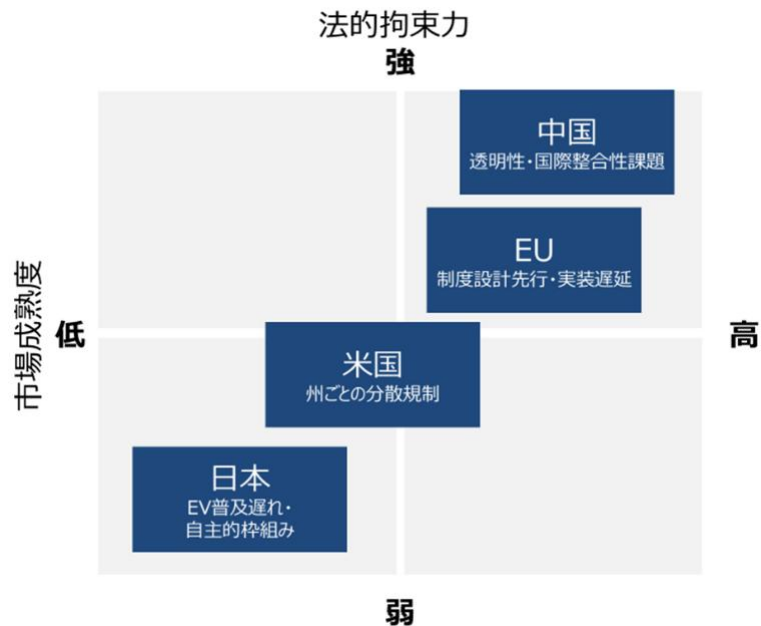


図 52 地域別の制度比較図

### 情報流通プラットフォームの展開可能性

本実証の情報流通プラットフォームの特徴は、「診断・評価の記録」にとどまらず、ライフサイクル全体を貫く情報流通プラットフォームとして設計されている点にあり、解体・輸送・診断・リユースに至るまで、すべての工程でデータを記録する。これにより「誰が・どこで・どのように扱ったか」が追跡可能になる。この情報は、保険会社にとっては事故リスクの算定材料になり、金融機関にとっては融資判断の裏付けとなる。つまり、技術データがそのまま経済合理性に転化する仕組みである。

また、VCを用いた証明書発行により、発行者の真正性と内容の改ざん防止が保証される。公開証明と非公開証明の二層構造を採用することで、企業秘密を保護しながら市場で信頼される情報公開を両立できる。

現場実務においても、情報流通プラットフォーム導入は取引迅速化、価格形成の透明化、保険や保証の制度化、さらには国際取引対応という具体的なメリットをもたらす。ただし、すべての管理項目を一度に実装するのではなく、規格準拠を前提に市場の受容性に応じて段階的にアップデートしていくことが重要である。項目を増やすこと自体が目的ではなく、リユースバッテリーの健全な市場形成につながる「最適な情報粒度」を探ることが重要である。

表 40 IEC63330-1:2024 と情報流通プラットフォームの対応表

項目	IEC 63330-1:2024	情報流通プラットフォーム
診断・評価	外観、履歴、電気特性の確認	特定の診断手法・技術に依存しない
トレーサビリティ	使用前後＋診断時点	排出～輸送～解体～診断～出荷まで全ステップ
ロジスティクス情報	取り扱わない	輸送情報、作業日時を含む
証明書	定義なし	VCによる情報信頼性の確保

## 用語集

用語	説明
BEV	Battery Electric Vehicle。内燃機関を用いず電気のみを動力とする車両のこと。
CFP	Carbon Footprint of Products。商品・サービスのライフサイクルの各過程で排出された「温室効果ガスの量」を追跡し、得られた全体の量をCO <sub>2</sub> 量に換算して表示すること。
DID	Decentralized Identifier、分散型識別子。W3C 標準で定められた、第三者に依存せずに作成できるグローバルに唯一の識別子のこと。 “did:example:123456789abcdefghi”のような形をしている。
DIDComm	Decentralized Identifier Communication。分散型 ID (DID) を用いて、人・組織・ソフトウェア間で安全、プライベート、かつ直接的なメッセージ交換を実現するオープン通信プロトコル。中央集権的な機能を介さず、暗号技術に基づき通信相手の真正性確保と機密性を担保する。
DID URL	DID に続けて URL の規則に従ってパス、クエリパラメータ、フラグメントを追加した文字列。DID に関連付けられたリソースを一意に特定し参照することが出来る。W3C DID 標準の中で定められている。
PDF	Probability Density Function、確率密度関数。確率論において、連続型確率変数がある値をとるという事象の確率密度を記述する関数。
HEV	Hybrid Electric Vehicle。内燃機関と電気の両方を動力とする車両のこと。
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle。HEV の中でも外部からの給電が可能な車両のこと。
VC	Verifiable Credential。検証可能な資格証明書。W3C 標準で定められたデジタル上の証明書を指し、その元々の発行者と情報が改竄されていないことを暗号的に検証することができる証明書のこと。
VDR	Verifiable Data Registry。分散型 ID (DID) や検証可能クレデンシヤル (VC) の仕組みにおいて、情報の真正性を検証するために必要な公開鍵、DID ドキュメント、失効情報などを保存・管理する信頼されたデータ保管機能のこと。主にブロックチェーンや分散型ファイルシステム上で実装され、誰でも参照できるが改ざん不可能な（書き換え不可）特徴を持つ。
Web3	Web1.0 技術の上に非中央集権型のネットワークを構築するオープンテクノロジーの総称。
バッテリー	本報告書では、特に指定のない限りリチウムイオン二次電池を指す。EV/HEV/PHEV に搭載されている単位をバッテリーパック（パック）とし、パックにはさらに細かい単位でバッテリーモジュール（モジュール）に分割される。バッテリーを構成する最小の単位をバッテリーセル（セル）とする。
リサイクル	使用済みバッテリーパックを分解・分類をし、何らかの処理をして資源として再利用すること。
リユース	使用済みバッテリーをバッテリーパック・モジュール・セルそれぞれの単位で別の製品として再利用すること。