

2024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

報告書

2025年2月14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

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カーボンフットプリント(CFP)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。	
2024年度 実施内容	① ユースケース分析	➤ 前年度に引き続き、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のユーザビリティ向上に取り組む。
	② 電池管理モデルの構築	➤ 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。
	③ システム設計・開発	➤ ①②の内容に従ってシステム設計・開発を実施する。
	④ CO2分析・システム開発	➤ リサイクル段階のCO2分析・算定手法を構築・実装する。
	⑤ 設備導入	➤ 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。
	⑥ 検証	➤ 拡大したユースケースを実際の業務フローを通じて検証する。
	⑦ 報告書取りまとめ	➤ 各社での検討内容を整理し、報告書としてとりまとめる。

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本事業の位置付け・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	7
1.2.3 事業の実施スケジュール	8
2. 助成事業の報告	9
2.1 助成事業実施結果	9
2.1.1 ユースケース分析	9
2.1.1.1 概略	9
2.1.1.2 ヒアリング	10
2.1.1.3 使用済みバッテリーの有価取引	21
2.1.1.4 プラットフォームの相互運用性	25
2.1.1.5 中国における使用済みバッテリーのリユース・リサイクル事業	29
2.1.1.6 回収業務フロー改善の検討	34
2.1.1.7 考察	37
2.1.2 電池管理モデルの構築	39
2.1.2.1 概略	39
2.1.2.2 背景	39
2.1.2.3 リユース利用バッテリーの寿命予測と確率分布	41
2.1.2.4 確率密度関数の推定	41
2.1.2.5 考察	52
2.1.3 システム設計・開発	58
2.1.3.1 概略	58
2.1.3.2 品質管理情報システムの設計と開発	58
2.1.3.3 診断アプリケーション	65
2.1.3.4 ユーザビリティの向上	68
2.1.4 CO ₂ 分析・システム開発	70
2.1.4.1 概略	70
2.1.4.2 文献調査の結果	71
2.1.4.3 本システム内での測定関連項目	72
2.1.4.4 昨年度の実証試験における測定の結果	72
2.1.4.5 流通モデルの構築	75
2.1.4.6 CFP 算出システムの開発	75

2.1.5 使用済みバッテリー回収・分解確認状況.....	80
2.1.5.1 回収実績.....	80
2.2 設備導入内容および稼働結果.....	80
2.2.1 概略	80
2.2.2 設備導入状況.....	80
2.2.3 実証結果概要.....	85
2.3 実施結果を踏まえた考察.....	91
3. 今後の実証事業実施における課題および解決方法など	95
3.1 現状の課題.....	95
3.2 課題の解決方法	97
3.3 次年度以降の助成事業展開	98
3.3.1 想定する事業の内容.....	98
3.3.2 設備導入内容.....	102
3.3.3 事業の実施体制	102
3.3.4 事業スケジュール.....	102
3.3.5 資金計画	104
4. 事業化の計画.....	104
5. 事業の評価	107
5.1 採算性の評価	107
5.2 有効性の評価	109
用語集.....	111

1. 助成事業の計画

1.1 自動車リサイクル業界における本事業の位置付け・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(HEV)/プラグインハイブリッド車(PHEV)含めた電気自動車(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た。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、提案事業者らは昨年度まで 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となるシステムを構築する。

現在、EV 電池の取り扱いは、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 ソリューションのプラットフォーム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、CO₂ 管理を行

うアプリケーションを開発する。

(2) 電池価値の流通プラットフォームシステム開発：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プラットフォームを構築する。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。

昨年度の一連の取り組み成果を踏まえて、本事業の今年度の実施内容を表 1 のとおりとする。

表 1 今年度の実施内容

今年度実施事項	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 ₂ 分析・システム開発	■内容：リサイクル段階の CO ₂ 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	24 年 4 月～ 11 月

	のCO ₂ 算定手法を実用可能とするシステムの開発	
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

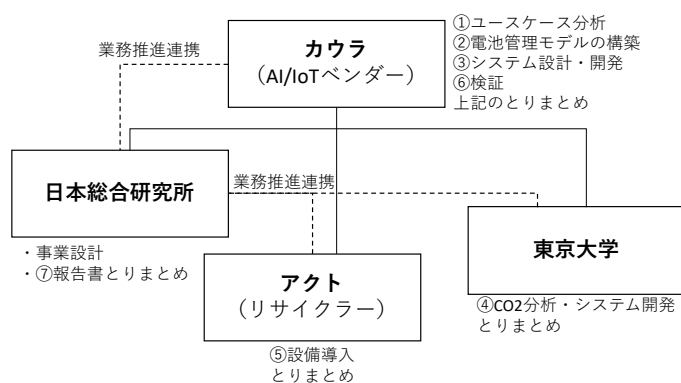
1.2.2 事業の実施体制

代表事業者、連携事業者の役割分担は表2のとおり。

表2 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)㈱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)㈱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

連携イメージ図



1.2.3 事業の実施スケジュール

本年度の実施スケジュールは上記 1.2.1 記載のとおり。3 年目は以下に示す。

表 3 3 年目の実施スケジュール

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： ・ 情報流通プラットフォーム・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： ・ 本プラットフォームに必要となる要件の抽出をおこなう	25 年 5 月～6 月
3. UX 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 改善の検討結果に基づいたシステム設計を実施する ・ 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： ・ 検討結果に基づいたシステム構造の設計がなされる	25 年 4 月～7 月

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・課題の抽出を行う ■目標： ・ モデル事業での情報流通プラットフォーム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 における本プラットフォームの事業化の計画の検討をおこなう ・ BACE における本プラットフォームの事業性の評価を実施する ■目標： ・ BACE における本プラットフォーム事業の展開計画が可視化されている ・ BACE における本プラットフォームの事業性と課題・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

2. 助成事業の報告

2.1 助成事業実施結果

2.1.1 ユースケース分析

2.1.1.1 概略

昨年度の事業と同様に、EV より排出される使用済みバッテリーのサプライチェーンに関わる各事業者へのヒアリングを実施、現状の使用済みバッテリーの取り扱いの現状、課題と要望などのヒアリングを実施した。

2.1.1.2 ヒアリング

ヒアリング実施対象は以下のとおり。

- ・ バッテリー排出業者 … 自動車解体業者 5 社
(各地域で中規模以上の解体業者を選択)
- ・ バッテリー回収業者 … 2 社
(すでにリチウムイオンバッテリーの回収と有効活用を検討している業者を選択)
- ・ リユースバッテリー製造業者 … 1 社
(すでにリユースバッテリー製品の開発を実施している業者を選択)
- ・ リユースバッテリー処分業者 … 3 社
(すでにリチウムイオンバッテリーの処分を実施している業者を選択)

バッテリー排出業者へのヒアリングサマ리를以下に示す。

表 4 ヒアリング：バッテリー排出業者 A

ヒアリング内容	EV の解体業務について
業務範囲について	車両の買い取り、解体、中古パーツの販売
EV の取り扱い規模	・ 昨年に比べて増加。20～40 台/月程度を解体することもある ・ HV も BEV (Battery Electric Vehicle) も解体数は増加している
解体作業について	・ 特定の車種については作業に習熟しつつあり、解体に要する工数は減少している ・ BEV の使用済みバッテリーのような大型のバッテリーパックが出てきた場合、解体台数が増加すると保管設備を準備する必要がある ・ 解体後パックの分解も試験的に実施中
使用済みバッテリーの診断作業の有無	・ 現在はバッテリーの診断は実施していないが、将来は自社で診断と仕分けを実施するために診断技術の試用・共同開発を実施中
使用済みバッテリーの取り扱い	・ 昨年同様自動車再資源化協力機構の回収システムに回収を依頼している ・ 工場内で、パック・モジュール・セルの各レベルで診断ができれば、そのまま利用できるものは売却し、利用できないものは回収を依頼することで、使用済みバッテリーを効率的に処理できるようになる

その他	・ EV の普及の度合いに応じて解体や分解、診断技術を開発していこうと考えている。 ・ 自動車ディーラーとの協業も模索している
-----	--

表 5 ヒアリング：バッテリー排出業者 B

ヒアリング内容	EV の解体業務について
業務範囲について	車両の買い取り、解体、中古パーツの販売
EV の取り扱い規模	・ 昨年に比べて増加している。とくに HEV が増加している
解体作業について	・ 自動車メーカー公開の解体手順に従って解体している ・ このまま解体数が増加する場合、保管設備を拡張する必要がある
使用済みバッテリーの診断作業の有無	・ 常に動向を調査しているが、リチウムイオンバッテリーに対する一般的な診断手法は確立されていない。使用済みバッテリーの診断技術はリユースを実現するためには必須になるが、今のところ目途がたっていない
使用済みバッテリーの取り扱い	・ 昨年同様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 ・ 使用済みバッテリーを中古パーツとして売却したいが、前述のとおり診断技術がなければ、保証を付加できないため実現できていない ・ パックレベルでの売却を希望する
その他	・ 解体後の使用済みバッテリーの保管場所の確保が課題。適宜有価で引き取りをしてもらえれば、利用する ・ 引取依頼など事務作業も負担になっている。手軽に引き取ってもらえるだけでも助かる ・ 駆動用バッテリーだけでなく補器類に付属するリチウムイオンバッテリーも徐々に増加している

表 6 ヒアリング：バッテリー排出業者 C

ヒアリング内容	EV の解体業務について
業務範囲について	車両の買い取り、解体、中古パーツの販売

EV の取り扱い規模	・ 徐々に増加している ・ BEV は中古パーツなどから得られる利益率が低く、買取価格を調整して取り扱いを調整している
解体作業について	・ 解体後の使用済みバッテリーの保管場所に苦慮している ・ 解体業者にもよるが敷地に余裕がない業者なら、使用済みバッテリーの保管場所を確保するだけでも難しいだろう
使用済みバッテリーの診断作業の有無	・ 現時点ではバッテリー診断などは行っていない。今後も調査などの予定はない
使用済みバッテリーの取り扱い	・ オークションなどに出品し、売却できないものは回収を依頼している ・ オークションに出品時は保証がつかない、いわゆるジャンク品扱いのため、価格は低めになる。相場も予測できない ・ 今後の取り扱い量の増加を考えると、手間のかかるオークションを利用し続けることは難しくなるだろう。定額・定期で売却と引き渡しができるのなら積極的に利用したい
その他	・ 海外のブローカーによる使用済みバッテリーの買い付けは増加傾向にある ・ 利益が見込めるなら BEV 解体も積極的におこなう。設備とノウハウを持った業者に EV が集中することも予想される ・ 走行距離などで価格が変動するとすれば、誤った報告をする業者に対する対策が必要になる

表 7 ヒアリング：バッテリー排出業者 D

ヒアリング内容	EV の解体業務について
業務範囲について	車両の買い取り、解体、中古パーツの販売
EV の取り扱い規模	・ EV の調査・研究を兼ねて買取数を意図的に増加させたこともあり増加傾向にある
解体作業について	・ 使用済みバッテリーの解体にかかる時間は 30 分程度 ・ 自動車メーカーの解体手順に沿って実施している
使用済みバッテリーの診断作業の有無	・ 車両の買い取り時に専用のツールを用いて状態を確認している（ツールの詳細については不明）

使用済みバッテリーの 取り扱い	・ すべて自動車再資源化協力機構の回収システムに回収を依頼している ・ 売却する場合は保証などをつけられないためジャンク品扱いになり手間に見合った利益がだせない ・ 使用済みバッテリーが増加すれば保管場所と設備の拡張が必要になる
その他	・ 海外のブローカーによる使用済みバッテリーの買い付けも増加傾向にある ・ EV の使用済みバッテリーを扱うための設備投資（解体治具、診断機材、保管設備など）を勘案すると、自社で売買できる解体業者は限られてくるだろう。自社の方針は今後の動向次第だが、使用済みバッテリーの売却が簡便にできるのであれば、選択肢のひとつになる

表 8 ヒアリング：バッテリー排出業者 E

ヒアリング内容	EV の解体業務について
業務範囲について	車両の買い取り、解体、中古パーツの販売
EV の取り扱い規模	・ EV 全般の取り扱いは増加傾向 ・ 自社では積極的に買い取りしていない
解体作業について	・ 自動車メーカーの公開する解体手順に従って解体している
使用済みバッテリーの 診断作業の有無	・ とくに診断機材などは用いていない
使用済みバッテリーの 取り扱い	・ 自動車再資源化協力機構の回収システムに回収を依頼しているが、一部オークションなどに出品している
その他	・ 海外のブローカーによる使用済みバッテリーの買い付けは多くないが、これから増加するだろう ・ 使用済みバッテリーの海外流出について、解体業者の立場からは経済合理性が成立すれば流出は抑制できるだろうが、そうでなければ海外ブローカーへの売却を防ぐことは難しいだろう

昨年のヒアリング時と比較して、EV に対する対応に差がでてきている。EV に積極的な事業者はみずから使用済みバッテリーを分解し診断・仕分けができる能力を開発しようとして

おり、かたや消極的な事業者はEVの買い取りを抑制しつつある。いずれの取り組みにも共通することは、安定した形で解体後使用済みバッテリーの売却先に期待していること、解体後使用済みバッテリーを保管する敷地・設備に対して課題を持っている点である。診断技術に関しては昨年同様、パック・モジュール・セルの各形状において一般的な方式は確立されていない。解体業者で使用済みバッテリーの分解と診断・仕分けをおこなうことはロジスティクス面で効率的に処理される反面、すべての解体業者が適切な設備を導入するとは想定しづらい。解体した使用済みバッテリーの多くは自動車再資源化協力機構の回収スキームを用いて依頼をしているが、事務手続きなどが煩雑なため有価かつ定期的な引き取りサービスを利用したいとの要望が多く聞かれた。

- 排出業者の想定される役割：
 - EVからのバッテリーの解体（交換）
 - 解体（交換）後バッテリーの売却
 - バッテリーパックの診断
- 排出業者の共通する課題：
 - バッテリーの保管場所・設備の導入
 - 定期的かつ安定した売却先の確保
 - 安全な輸送手段の確立
 - 流通経路全般の効率化
 - 診断技術の確立
 - バッテリー情報の信ぴょう性の確保

バッテリー回収業者へのヒアリングサマ리를以下に示す。

表 9 ヒアリング：バッテリー回収業者 A

ヒアリング内容	現在想定している使用済みバッテリーの回収・診断・仕分け業務について
業務範囲について	使用済みバッテリーの回収、分解、診断、仕分け、リユースバッテリー製造業者への売却
想定業務フローのイメージ	・有価による使用済みバッテリーの回収と分解・診断・仕分け、リユース業者・資源回収業者への売却を想定している
使用済みバッテリーの購入単位	・解体されたパックを想定している。売却のためには車両型式、走行距離などの情報が必須である ・解体時の状態が不明なバッテリーは、リユース用途での売却は

	できない。資源として売却できるなら回収するが、できないなら買取はできない
使用済みバッテリーの購入元	・バッテリー排出業者（解体業者・整備業者） ・バッテリーメーカー
使用済みバッテリーの分解作業	・バッテリーパックの分解手順は独自に調査する ・分解後モジュール・セルの諸元情報は独自で調査する ・使用済みバッテリーの診断技術は開発途上という認識 ・調査、作業ともに大変手間を要する作業でリユースを有価取引で成立させるための最大の課題 ・資源としての売却は金属資源相場により変動する。分解・分別すれば有価取引が成立する可能性は高いがバッテリーの組成・物量で偏りが出ると予想 ・分解・分別を成立させるには効率性が求められるので大量に回収して大量に処理することが求められる。小型のバッテリーは分解・分別の効率性は相対的に低くなり、性能的にはリユース可能でも、結果的に処分される可能性が高い

表 10 ヒアリング：バッテリー回収業者 B

ヒアリング内容	現在想定している使用済みバッテリーの回収・診断・仕分け業務について
業務範囲について	使用済みバッテリーの回収、分解、診断、仕分け、リユースバッテリー製造業者への売却
想定業務フローのイメージ	・有価によるバッテリーの回収と分解・診断・仕分け、リユース業者・資源回収業者への売却を想定している
使用済みバッテリーの購入単位	・車載状態のパックを想定している。車両型式、走行距離などの情報が必須
使用済みバッテリーの購入元	・バッテリー排出業者（解体業者・整備業者） ・バッテリーメーカー
使用済みバッテリーの分解作業	・分解・保管作業用の設備を増強中 ・分解後のバッテリーモジュール・セルの状態を測定するための設備を開発中だが、バッテリー形状ごとに検討する必要がある

	ため効率はよくない
その他	・リユース用途として特定バッテリーの買い取り取を打診されるケースが増加している。 ・リサイクル業者からもバッテリーの種類に応じて有価買い取りの打診がある ・有価取引の可能性が出てきたので、回収・分解作業を効率化していきたい

回収業者は、排出される使用済みバッテリーを一時的に集積・処理し後工程に流通するという重要な役割を果たすと予想される。使用済みバッテリーを保管する設備を複数拠点で備え、バッテリーパックを分解する能力を有する回収業者はすでに存在するが、現時点で有価での取引は限定的かつ主にリサイクルにまわされるため金属資源相場に依存している。排出業者でも触れたが、排出業者の使用済みバッテリーに対する対応には差ができつつあり、将来的に十分な保管場所や設備を持たない業者が出てくると予想される。また、地域ごとに回収したバッテリーの一時保管場所を設けることができれば、流通全体として効率化に大きく寄与する。排出業者から安定的かつ有価で使用済みバッテリーを回収することができれば、排出業者の負担を減らしたうえで使用済みバッテリーの安定調達が可能になると予想する。

- 回収業者の想定される役割：
 - 使用済みバッテリーの買い取り・回収
 - バッテリーの分解・分別
 - バッテリーの診断と仕分け
 - 診断・仕分け済みバッテリーの売却
 - リユースできないバッテリーの処分（売却）
- 回収業者の共通の課題：
 - 安全な分解・診断方法の確立・効率化
 - 安全な輸送手段の確立
 - 流通経路全般の効率化
 - リユースバッテリーの用途開発
 - バッテリー情報の信ぴょう性の確保

リユースバッテリー製造業者へのヒアリングサマリを以下に示す。

表 11 ヒアリング：リユースバッテリー製造業者 A

ヒアリング内容	現在想定している使用済みバッテリーの回収・診断・仕分け業務について
業務範囲について	使用済みバッテリーの調達からリユースバッテリー製品の製造
想定業務フローのイメージ	・使用済みバッテリーを調達し、リパックと BMS を装着したリユースバッテリー製品の製造・販売をする
使用済みバッテリーの購入単位	・現状はバッテリーパックで購入しているが、将来的にはモジュール・セル単位を希望する ・搭載されていた車両の型式・年式、SoH(State of Health)の情報が必要 ・その他必要な情報として、内部インピーダンスなどを検討中
使用済みバッテリーの購入元	・現状は特定の使用済みバッテリー販売業者から購入している ・調達ルートが限られており、価格も硬直的 ・規模拡大にしたがって今後は排出業者・回収業者からの調達も検討する
使用済みバッテリーのリパック作業	・調達した使用済みバッテリーは社内で独自の診断・検査を実施する ・その後、社内ルールに従い仕分け・リパックを行う ・製品の種類は複数あり状態に応じて使い分けている
その他	・バッテリーは精密機器と同様に解体時から適切な取り扱いと保管が必須になる。適切に扱われていないバッテリーを事後に検査しても完全に選別することはできないため、最終製品の品質に関わる ・上記の取り扱いを徹底したうえで、調達元など情報管理が必須である。情報のないバッテリーはリユースできない

リユース業者においては、特定の種類の使用済みバッテリーについて継続的な有価での買い取りを希望する企業が出現し、具体的な要求事項が明らかになりつつある。安全なリユース製品の製造には使用済みバッテリーの取り扱いと関連する情報連携は必須であることが確認できた。

- リユースバッテリー製造業者の想定される役割：
 - 使用済みバッテリーの調達
 - リユース製品の製造

- リユース製品の販売
- 使用済みリユース製品の回収
- リユースバッテリー製造業者の課題：
 - 使用済みバッテリーの安定的な調達
 - 安全な輸送手段の確立
 - 流通経路全般の効率化
 - バッテリー情報の信ぴょう性の確保
 - リユース製品の用途開発

処分業者へのヒアリングサマ리를以下に示す。

表 12 ヒアリング：処分業者 A

ヒアリング内容	使用済みバッテリーの処分業務について
業務範囲について	バッテリーの引取りと処分（焼却、最終処分）、ブラックマスの生成。将来的には引き取ったバッテリーのリユースなども検討する予定
想定業務フローのイメージ	・引取りをした使用済みバッテリーを焼却無害化、ブラックマスを生成し、精錬メーカーへの売却を想定 ・現在はまだ EV から排出される使用済みバッテリー処分方法を試行している段階
使用済みバッテリーの入手単位	・EV 以外のバッテリーも受け入れており、処分費用次第で柔軟に対応している ・有価での買い取りの場合、セルまで分解されているほうが高価で買い取り可能 ・できるだけ同一種類を大量に引き取ることで高価買取が可能 ・処分費用・買取価格は金属相場に依存する
処分に必要な情報	・バッテリーの組成情報があればよいが、詳細は公開されないと想定。また、詳細な情報が提供されても処分時のコスト的に利用しない可能性がある ・ブラックマスを均質にするためには、同一組成のバッテリーセルを処理する必要がある、かつ大量に処理することで効率と品質を向上できる。混合物をいかに分別するかが重要な課題
その他	・前述のとおり混合物はブラックマスの品質低下に直結するた

	め、情報の誤り防止やバッテリー分別の徹底が重要になる ・ 生成するブラックマスの品質水準は精錬メーカーとのあいだで決定されるがコストとの見合いになる
--	---

表 13 ヒアリング：処分業者 B

ヒアリング内容	使用済みバッテリーの処分業務について
業務範囲について	使用済みバッテリーの引取りと処分（焼却、最終処分）、ブラックマスの生成
想定業務フローのイメージ	・ 引取りをした使用済みバッテリーを必要に応じて分解し、焼却処理後にブラックマスを生成し精錬メーカーに引き渡す
使用済みバッテリーの入手単位	・ EV 以外の使用済みバッテリーも受け入れている。有価での買い取りも検討中 ・ セルまで分解して焼却処分を行う
処分に必要な情報	・ バッテリーの組成に関わる情報が提供されても、高品質なブラックマスを生成するためには自社責任で分別をおこなう ・ 効率的に処分をするは同一種類を大量かつ同時に処理する必要がある ・ 詳細なバッテリー種類ごとに処分単位を分割することは可能だが、コストが膨大になる ・ ブラックマスの価格が高まれば処分に必要な情報も詳細になるだろうが、現状では三元系カリウム酸鉄系か程度で十分と考えている
その他	・ 要求されるブラックマスやブラックパウダの品質が価格を決定する重要な要素となる

表 14 ヒアリング：処分業者 C

ヒアリング内容	使用済みバッテリーの処分業務について
業務範囲について	使用済みバッテリーの回収と無害化・最終処分
想定業務フローのイメージ	・ バッテリーの引取りと分解後焼却処分、その後の最終処分まで実施している

使用済みバッテリーの 入手単位	・ 基本的にはパック形状だが他の形状でも受け入れ可能 ・ 必要に応じて焼却前に分解・分別をおこなう
処分に必要な情報	・ 焼却時の事故を防ぐため成分情報が必要。現状は取り扱い数、種類も少なく個別に自社で対応している
その他	・ 現状はブラックマス生成の計画はないため有価での引き取りは検討していない ・ パックから分解されるバッテリーセル以外の金属、樹脂類は分別して価値化する場合もある ・ パックの分解時に感電のリスクがあり安全対策を施したうえで専門の要員が作業をおこなう

処分業者については、一部バッテリーについて有価での引き取りを提示している。効率的に処分を行うためには同一種類のバッテリーを大量に一括で処理するのが理想的で、後工程で精製される再生材も高品質になると考えられる。バッテリーの組成を示す情報があれば分別を効率的に実行できるが、詳細な成分情報は企業秘密にあたるため適切な公開には欧州電池規則のような情報公開のルール制定が必須になる。現時点では使用済みバッテリーに関する情報の必要性は限定的なものの、適正処分のトレーサビリティの観点からは必須と考えられる。

- 処分業者の想定される役割：
 - 使用済みバッテリーの回収
 - バッテリーの無害化・最終処分
 - 再生材用途のブラックマス・ブラックパウダの製造
- 処分業者の共通の課題：
 - 処分対象バッテリー中の混入物の除去
 - バッテリーの保管場所・設備の導入
 - 安全な輸送手段の確立
 - 流通経路全般の効率化
 - 処分バッテリーの安全な取り扱い方法の確立
 - バッテリー情報の信ぴょう性の確保
 - 高品質なブラックマス生成のためのバッテリーの仕分け効率化

以下にヒアリングで明らかになった課題のまとめを図 1 に示す。それぞれの役割から導き出された課題は具体的なものが多く、次項以降のシステム設計検討、業務フローでも対応を検討している。

業者	主な役割	課題	共通の課題
排出業者	- EVからのバッテリーの解体（交換） - 解体（交換）後バッテリーの売却 - バッテリーパックの診断	定期的かつ安定した売却先の確保	- バッテリーの保管場所・設備の導入 - 安全な輸送手段の確立 - 流通経路全般の効率化 - 診断技術の確立 - バッテリー情報の信ぴょう性の確保 - 情報連携・バッテリー取り扱いに関する業界標準の確立
回収業者	- 使用済みバッテリーの買い取り・回収 - バッテリーの分解・分別 - バッテリーの診断と仕分け - 診断・仕分け済みバッテリーの売却 - リユースできないバッテリーの処分（売却）	- 安全な分解方法の確立・効率化 - リユースバッテリーの用途開発	
リユースバッテリー製造業者	- 使用済みバッテリーの調達 - リユース製品の製造 - リユース製品の販売 - 使用済みリユース製品の回収	- 使用済みバッテリーの安定的な調達 - リユース製品の用途開発 - リユース製品に対する保証・保険 - リユース製品の回収・処分	
処分業者	- 使用済みバッテリーの回収 - バッテリーの無害化・最終処分 - 再生材用途のブラックマス・ブラックパウダーの製造	- バッテリー中の混入物の除去 - バッテリーの安全な取扱い方法の確立 - 高品質なブラックマス生成のためのバッテリーの仕分け効率化	

情報流通プラットフォーム(Battery Web)の役割

- 使用済みバッテリーの流通経路の追跡性確保 - 各業者から提供されるバッテリー情報を下流の各業者への連携 - 使用済みバッテリーの流通・各作業にかかるCO2排出量算出のための情報提供
--

図 1 各業者の役割と課題・共通の課題整理

2.1.1.3 使用済みバッテリーの有価取引

本節では、ヒアリング結果報告でも言及した使用済みバッテリーの有価取引について整理する。

使用済みバッテリーを有価で売買するということは、使用済みバッテリーはもはや「廃棄物」ではなく「資源」として位置づけられるということである。使用済みバッテリーの価値は、そのリユースやリサイクルの可能性にもとづいており、以下のような具体的な価値が含まれる。

1. 資源としての価値：使用済みバッテリーは、リチウム、コバルト、ニッケル、マンガンといった貴重な金属を含んでおり、これらはいくつかの業者を通じて回収・リサイクルされ、新しいバッテリーや他の製品の製造に利用される。新規採掘のコストや環境負荷を削減できるため、リサイクル産業において高い価値を持つ。また、需要が増加していることから、使用済みバッテリーの回収の重要性は今後さらに高まることが予測される。
2. リユース用途としての価値：EVとしてのEOL（End-of-Life）バッテリーであっても、新品バッテリーほどの性能が求められない用途での再利用は可能である。こうした「セカンドライフ」の利用によって、使用済みバッテリーはさらに付加価値を持つ資源となる。
3. 法規制と持続可能性の観点からの価値：多くの国や地域では、バッテリー廃棄に関して厳しい規制が導入されている。これにより、リユースやリサイクルが義務化され、企業

はバッテリーのリユースを通じて、持続可能な取り組みを推進し、さらに廃棄物削減という社会的価値も付与されている。

・使用済みバッテリー価値化のコスト構造：

使用済みバッテリーを「廃棄物」ではなく「資源」として位置付けるならば、使用済みバッテリーは有価で取引されるべきである。そして、有価取引が成立するには、バッテリーのライフサイクルに関わるすべてのサプライチェーンが逆有償にならないようにし、一定のコストがかかったとしても、それぞれに利益が出る状態が確立されていなければならない。

今後、希少資源を含まないLFP（リン酸鉄リチウムイオン系バッテリー）などのバッテリーが主流になれば、リサイクルしても利益が出ないという理由で使用済みバッテリーが逆有償になる可能性があり、この場合リユースが価値化の有力候補となる。

・使用済みバッテリーから得られる利益：

使用済みバッテリーから利益が出るということは、より高い値段で売れるかコストが低減されるかのいずれかである。使用済みバッテリーをリユースできれば、バッテリーのライフサイクルにおける炭素排出量を大幅に削減することができる。具体的にはリユースによりバッテリーの寿命が延び、新しいバッテリーが必要なくなればバッテリー製品製造時の排出量を削減できる。一方、リサイクルにより、希少金属を回収して再利用することができ、新しい材料の抽出に伴う排出量を削減できる。単位電力あたりの炭素排出量を最大限抑えるのであれば、リユースを経てリサイクルすることが理想的である。

使用済みバッテリーを用いたリユース製品は、環境負荷軽減の価値が高いことをさらに認識される必要がある。環境保全・持続可能性に関する厳しい規制が導入される中、バッテリーのリユースは推奨されるべきで、使用済みバッテリーが新品バッテリーに比べて安価で当然という考え方も変わっていくことを期待する。そして、環境負荷軽減に貢献したユーザーには何らかのインセンティブを与えるなど仕組みがあるとなおよい。また、リユースバッテリーを安心して使い続けられることも購入意思決定時の重要な要素であるため、保証・交換サービスや、保険の充実も求められる。

・使用済みバッテリーを再利用するコスト：

リユースバッテリーを製造・販売するには、回収から転用にコストがかかるため、新品バッテリーよりも高価になる可能性がある。リユースバッテリーの価値を高める一方で、コスト低減努力も必要である。リユースバッテリーのコスト構造項目の概要は以下になる。

表 15 バッテリーリユースのコスト

項目	詳細内容	考慮点および具体例
仕入コスト	使用済みバッテリーの購入費用	・ 車種やメーカーによる品質差異（高級車用バッテリーと一般車用バッテリーの違い）

		・調達ルート（直接購入 vs 仲介業者） ・数量（大量仕入れ時の割引効果） ・使用履歴情報の有無（正確な情報があればリスク低減）
分解コスト	バッテリーパックをモジュール・セル単位に分解する際の作業費用	・分解対象の設計（分解しやすさ、特殊工具の必要性） ・分解時の安全対策（電気ショートや火災防止策） ・労働力コスト（熟練度や労働時間）
診断コスト	バッテリーの劣化状態を診断するための費用	・診断対象の形状 ・診断精度（劣化状態の正確な評価が可能か） ・診断時間（迅速性とコストのバランス）
設備コスト	分解や劣化診断作業の安全性や作業効率を高める設備の開発・購入	・診断機器、治具 ・パック分解時の固定装置、絶縁性工具 ・診断場所の環境維持設備（空調など） ・保管時のセル間分離板、防爆キャビネット ・二次元コードスキャナ、スケールなど
リパック材料原価	セルを再構成する際の部品コスト	・BMS（Battery Management System）（新規開発か流用か） ・セル間の接続部材の選定（溶接、接着、其他方式） ・その他補助部品（ケース、絶縁材料）の調達コスト
リパック工数	リユースバッテリーの最終製品化にかかる人件費および設備使用料	・自動化のレベル（セミオート、フルオート化の選択） ・作業者のスキル（訓練費用） ・作業手順の標準化（作業効率向上の余地）
輸送費・保管コスト	使用済みバッテリーおよびリユースバッテリーの輸送費用、保管設備費用	・輸送距離（回収先から工場までの距離） ・梱包材、ケージ（規制対応梱包材の要否） ・保管環境（温度・湿度管理が必要か） ・長期保管時の劣化リスクと追加コスト
光熱費	診断および充放電試験時の電力コスト	・試験設備の効率（エネルギー消費量） ・試験回数や条件（充放電サイクル数、試験時間） ・地域の電力単価
処分コスト	再利用できないセルや周辺部品の廃棄処理費	・リサイクル可能な材料（正極、負極材料の再利用可能性）

	用	・ 規制に基づく廃棄費用（法規制の遵守） ・ 処分プロセスの外注可否
品質管理コスト	製造・販売時における品質確認および情報管理のための費用	・ 情報管理システムの導入と運用費用 ・ 品質検査基準（試験の頻度、範囲）
保険コスト	製造中や保管中のリスクに対応する保険費用	・ 適用範囲（火災、盗難、自然災害） ・ 保険料（リスク評価に基づく料率） ・ 製品責任保険（PL 保険）の有無
減価償却費	再利用プロセスに使用する設備や工具の減価償却費用	・ 初期投資額（専用設備導入の規模） ・ 償却期間（法定耐用年数 vs 実用耐用年数） ・ 使用頻度と保守費用

使用済みバッテリーの価値化には、輸送・分解・保管といったコスト要因が大きく影響する。EV から取り外されたバッテリーは、安全な収納容器に収納されて工場へ運ばれ分解されるが、この工程はパックの形状やサイズにも依存する。今後より大型のパックや分解が難しい構造（例：CellToPack、CellToBody）が増えることで、コストと安全対策がさらに重要となる。また、流通との兼ね合いで長期間保管が必要になるケースも多いため、保管費用もコストに含まれる。そして、リユースバッテリーの価値を高めるためには、バッテリーの劣化診断が重要であり、現在は高速な診断技術が進展しているが、さらなる効率化と精度向上が求められている。

コスト構造で占める割合の大きい仕入原価については、定期定額の買取契約を結ぶことで価格を安定化させることが排出業者へのヒアリングからも考えられる。また、輸送費・保管費用については、地域ごとに保管拠点を設けたうえでまとめて輸送したり、保管期間を短縮したりすることも考えられる。

・ サービスとしてのバッテリー利用（Battery As A Service, BAAS）：

有価取引を成立させるために重要な要素として、リユースバッテリー製品の普及・拡大がある。ここでは有力な方策として、バッテリーのユーザーとオーナーを分離してサービス提供をおこなう形態、Battery As A Service (BAAS) を概説する。バッテリー利用者の立場から考えれば、本来バッテリーはエネルギーの容れ物であり利用するのは蓄積されたエネルギーそのものである。そのためバッテリー自身の劣化や廃棄を心配する必要がないことが理想的である。この場合、利用者にとってバッテリーを所有する価値は低くなる。バッテリーを購入するのではなくエネルギーを購入する仕組みを推進し、バッテリーを所有する者がバッテリーをライフサイクル全般に責任をもって管理するのである。バッテリー所有者はバッテリーを資産化し、一次利用・二次利用でバッテリーを貸し出すことで最大限の利益をあげ、最終的にはリサイクル・廃棄の費用も負担する。バッテリーを貸し出す際には、利用者に対してバッ

テリの状態管理のためのデータ取得に協力してもらう。こうして、バッテリーが社会インフラとして安定的に広く機能すると同時に持続可能な社会にもつながる。

2.1.1.4 プラットフォームの相互運用性

本プロジェクトは、EVの車載バッテリーのリユースおよびリサイクルを促進するための使用済みバッテリーの価値顕在化プラットフォーム（情報交換のためのITプラットフォームと流通エコシステム）の構築を目指している。ITプラットフォーム部分は以下の機能を提供する。

1. 非中央集権型のセキュアなデータ交換（DID, DIDComm）
2. 国際標準に準拠した証明書（対象はバッテリー、エコシステム参加者、その他無制限）
 - 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: Verifiable Data Registry）
 - 公開証明書のレジストリ

これらと関連深い、信頼性の高いデータ交換プラットフォームを提供する国内外のプロジェクトを概観し、本プロジェクトとの相互運用性について考察する。

● ウラノス（Ouranos Ecosystem）

Data Free Flow with Trust（DFFT、信頼性のある自由なデータ流通）の実現に向け、複数のシステムを連携させ、企業・業界を横断したデータの利活用を促進することで、データ・システム・ビジネス連携を推進し、官民協調で企業・産業競争力強化を目指す取組である。先行ユースケースである蓄電池サプライチェーンでのカーボンフットプリント算出に向けたデータ連携システムの運用を進めるとともに、欧州 Catena-X（後述）を始めとする海外プラットフォームとの相互運用性確保などにも取り組んでいる。これらの成果を踏まえたうえで、ライフサイクル全体でデータ連携を行う情報流通プラットフォームおよび運用体制構築を推進している。利用者間のデータ交換は Ouranos API を通じて行われ、データの一部は Ouranos 内のトレーサビリティ管理システムに蓄積される。

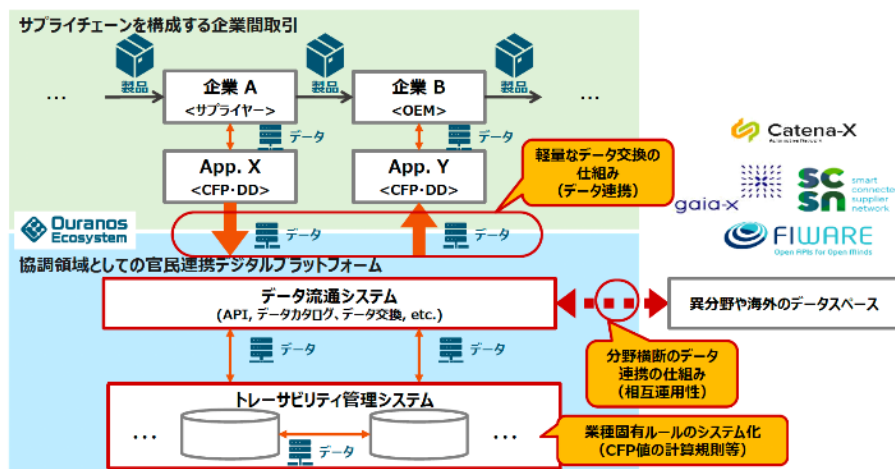


図 2 ウラノス概略図

出所：サプライチェーン上のデータ連携の仕組みに関するガイドラインβ版（蓄電池 CFP・DD 関係）経済産業省・Ouranos Ecosystem・IPA・Digital Architecture Design Center

● Catena-X

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の間で直接送受信され、Catena-X Federated Operating Environment が関与することは無い。

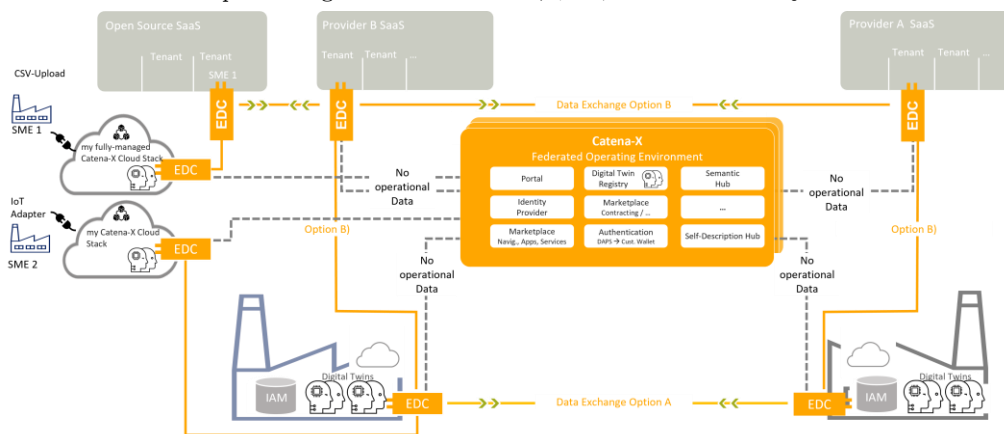


図 3 Catena-X 概略図 1

出所：Introduction of EDC by Catena-X

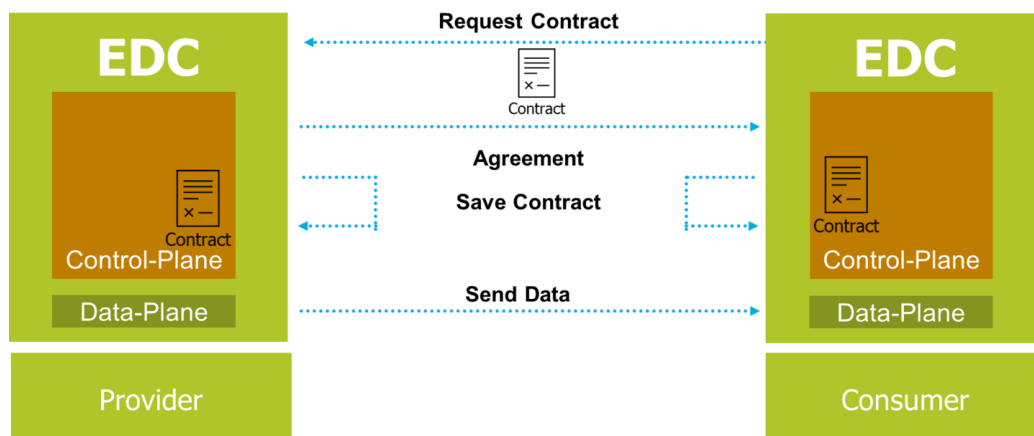


図 4 Catena-X 概略図 2

出所: Eclipse Data Space Connector (EDC) by Catena-X

● MOBI ITN/Citopia

W3C DID 標準に準拠した識別子の管理システム (DID メソッドと Verifiable Data Registry の提供) としての ITN ネットワークと、これを利用してさまざまなモビリティサービスを可能にする Citopia ネットワークを提供している。Citopia は物理世界のデジタルツイン (SSDT: Self Sovereign Digital Twin) 同士が ITN をトラストアンカーとして情報を VC として授受できるサービスマーケットプレイスである。バッテリーに関しては、Citopia Global Battery Passport System (GBPS) によりバッテリー情報 (バッテリーパスポート) を W3C VC 標準に準拠した証明書として発行、提示、確認できる。バッテリーパスポート情報を発行する事業者は自社のデジタルツインを Citopia マーケットプレイスに置き ITN から識別子の発行を受け、識別子に対応する秘密鍵で署名した VC を受け手に送る。これにより受け手は情報の真正性 (確かに発行者により発行されている) とインテグリティ (発行後改竄されていない) の確認が可能である。

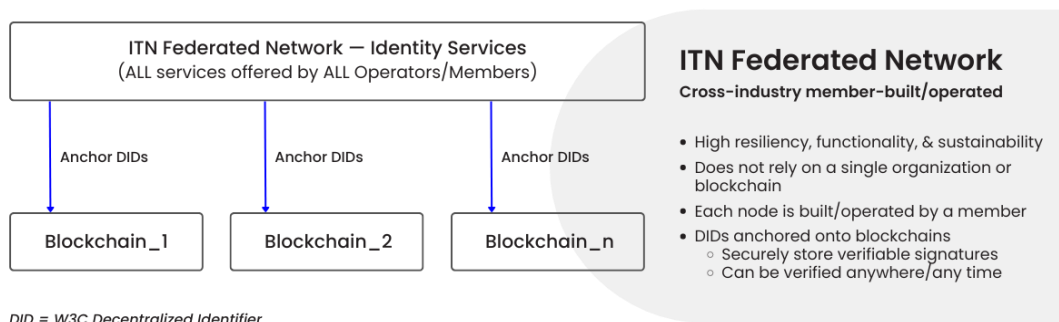


図 5 ITN by MOBI 概略図

出所: ITN by MOBI

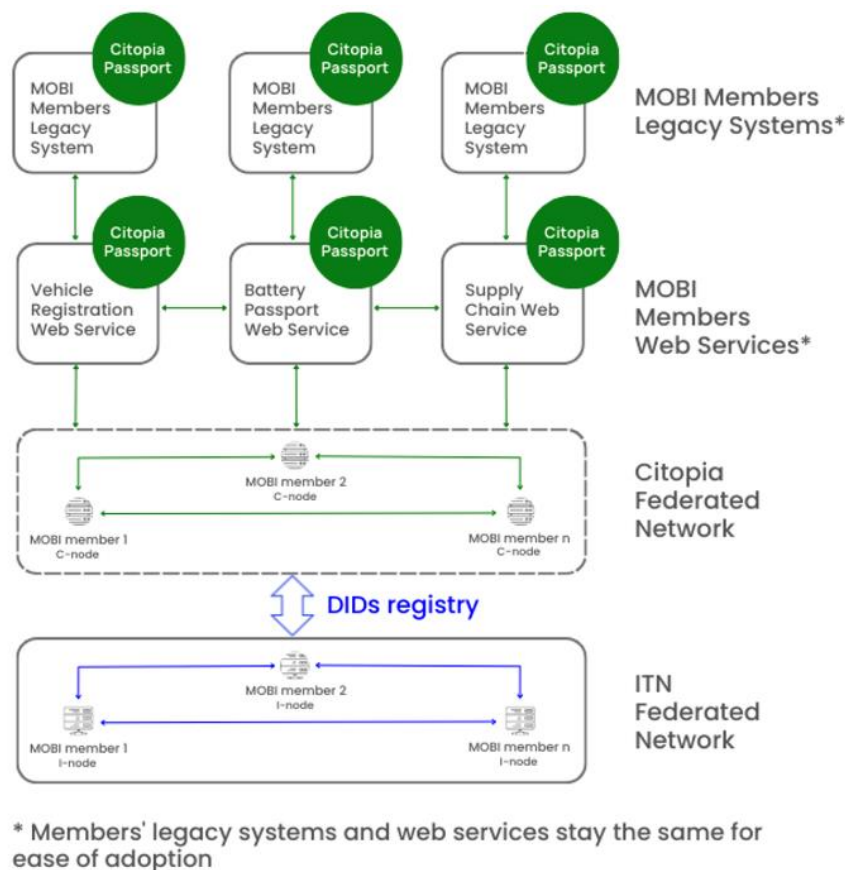


図 6 MOBI Citopia 概略図
出所: Citopia Passport by MOBI

● 相互運用性についての考察

Ouranos Ecosystem と Catena-X については、信頼性の高いデータ交換プラットフォームと考えるなら、我々のプラットフォームもその利用者の一つと位置付けてネットワークに参加することができる。これは Ouranos Ecosystem と Catena-X を接続する場合も、それぞれをお互いの利用者と考えれば容易に接続できるのと同様である。我々のプラットフォームは DID と DIDComm によりセキュアなピアツーピアのデータ交換が可能になっているが、Ouranos Ecosystem および Catena-X のプラットフォーム利用者として別の利用者とセキュアに VC を交換することは可能である。

MOBI ITN/Citopia は W3C DID/VC に準拠しており、特に Citopia GBPS は我々のプラットフォームと技術的にも機能的にも近い。ただし我々は日本のニーズと商習慣への対応を最優先としており、またバッテリーのライフサイクルにおける下流（リユース、リサイクル）に重点を置いていることからバッテリーに関する証明書の内容が Citopia GBPS を異なっている。この違いは VC の語彙やフォーマットに現れるが、幸い W3C VC は Linked Data によるデー

タ構造の定義（スキーマ）と公開を柔軟に行えるようになっている。例えば Citopia GBPS の証明書の公開されたスキーマを読めば我々のシステムのユーザーも MOBI の証明書を理解でき、逆もまた真である。

バッテリーパスポートは完成品としてのバッテリーを管理対象としているのに対して、本プラットフォームはクルマから解体分離されたバッテリーパック、それを更に分解したセルやセルの集合（ロット）を対象としている。バッテリーのライフサイクルは製造から廃棄までと考えられるが、当プロジェクトは世代を超えてバッテリーを管理することを目指している。つまり新品バッテリーの製造から廃棄まではバッテリーパスポートシステム A で管理し、廃棄バッテリーを解体・分解・診断しセルやセル集合としてリユースバッテリー製造業者またはリサイクラーに渡すまでを当プラットフォームで管理し、製造されたリユースバッテリーは別の製品としてバッテリーパスポートシステム B で管理する流れとなる。当プラットフォームがバッテリーパスポートシステムとしても機能することは技術的には可能でありニーズがあれば対応できるが、国内外のさまざまなバッテリーパスポートシステムと連携して複数世代にまたがる情報流通プラットフォームを構築することが循環経済を回すための優先課題と考える。

2.1.1.5 中国における使用済みバッテリーのリユース・リサイクル事業

ここでは EV 普及で先行している中国における使用済みリチウムイオンバッテリーのリユース・リサイクル事業の概要を参考に取り上げる。

中国では、2024 年の EV を含む新エネルギー車の販売台数は 1,286 万台、保有量は 3,140 万台に達している。直近 5 年間の販売台数と保有台数の平均伸び率は 50% を超えており、仮に今後 20% 伸びるとしても、中国政府の 2030 年新エネルギー車保有台数 8,000 万台の目標をクリアする見通しである。

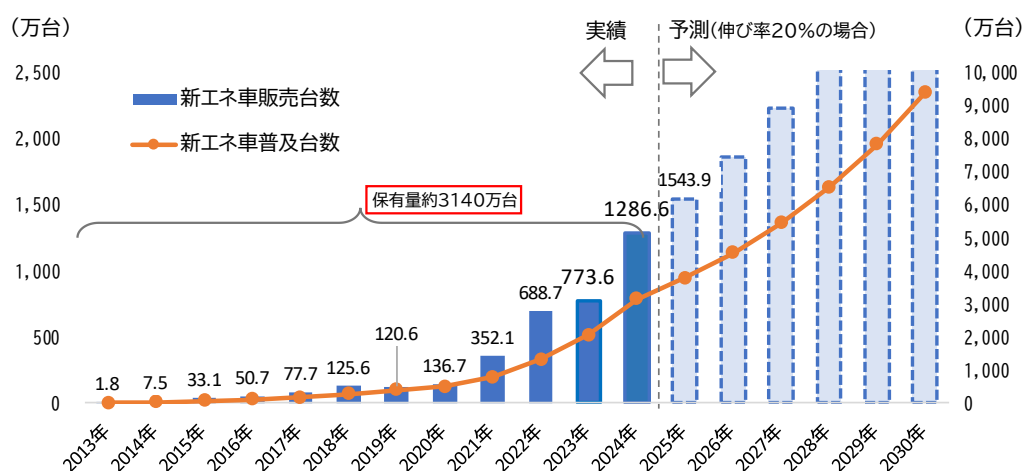


図 7 中国の新エネルギー車販売台数と普及台数

出所：中国の公開情報を元に日本総研作成

新エネルギー車の普及に伴い、排出される使用済みバッテリーも増加傾向にある。2030 年には電力換算で約 450GWh の使用済みバッテリーが排出されると予想されている。ここでは主に使用済みバッテリーを購入しリユース・リサイクルを行う事業の概要を説明する。

中国では、拡大生産者責任に則り、バッテリーのライフサイクルの各段階に応じた要求を規定したうえで、生産から廃棄・再利用までの工程全般のトレーサビリティを確保する制度（「新エネルギー自動車動力蓄電池回收利用管理暫定弁法」）が制定されている。

表 16 トレーサビリティ管理に登録する情報（リユース企業のみ抜粋）

カテゴリ	内容
二次利用情報	・ 二次電池（パック/モジュール/単体）コード、二次利用方式（パック/モジュール/単体）コード、一次電池（パック/モジュール/単体）コード ・ 二次電池（パック/モジュール/単体）の行先（個人情報（姓名・ID 番号）、企業情報（企業名、統一社会信用コードまたは DUNS (Data Universal Numbering System) ナンバー） ・ 応用分野、廃棄電池（パック/モジュール/単体）コード、廃棄電池（パック/モジュール/単体）品質 ・ 廃棄電池（パック/モジュール/単体）の行先（企業名、統一社会信用コードまたは DUNS ナンバー） ・ 出庫日

（株式会社三菱総合研究所 令和 2 年度リサイクルシステム統合強化による循環資源利用高度化促進業務報告書より抜粋）

カウラ株式会社では 2023～24 年にかけて複数回にわたって中国現地へ訪問し視察調査をおこなった。以下に現地の複数社のリユース業務視察結果の業務概要をまとめる。

表 17 中国リユース業者の業務概要

業務	概要
----	----

回収	・ EV からの使用済みバッテリーのみでなく大型車両や定置型から排出されるものも扱う ・ 各バッテリーには型式を識別するためのコードが表記されており、セル単体で型式を識別することができる ・ 基本的に使用済みバッテリーを有価で購入している ・ 多くの業者が使用済みバッテリーと同様に新品バッテリーも購入している ・ 大規模な企業では自動車の解体工場とリユース・リサイクル設備が同じ敷地内に存在することもある
分解	・ 法律に沿って回収・分解時に各バッテリーの識別子を登録している ・ 分解作業は人海戦術で実施している ・ 見学した企業の多くがセルまで分解してリユースしている ・ セル以外の外装品、配線、電子部品すべて分別している ・ 電子部品についてのリユースも研究中
診断・仕分け	・ 基本的には外見と充電容量をもとにバッテリー状態を判定し仕分けを行っている ・ 大量処理のために相当の設備投資をおこなっている
リユース製品の製造	・ リユース製品の種類は多数だが、電動自転車、電動三輪車向けが主力の様子 ・ 大規模な設備向けの定置型蓄電設備へのリユースバッテリーの普及はこれから ・ 前工程までと同じ敷地内で製造している ・ 使用済みバッテリーの代わりに新品バッテリーを用いて製造することもある ・ ほとんどのリユース製品にはテレメトリと遠隔操作のための通信機能を有している
リユース製品の販売	・ 自社でバッテリーのリース・サブスクリプションサービスを展開している企業が多い ・ リース・サブスクリプションサービス企業に売却する場合は保証をつけて販売している

リサイクル

- ・ 見学したいいくつかの事業者はリサイクル設備を装備してブラックマスの生産までを行っている
- ・ ブラックマスからの精錬プラントは、見学時点で計画中の企業が多かった



(A) 調達後バッテリーの保管倉庫



(B) バッテリーの分解風景



(C) バッテリーの識別コード



(D) 使用済みバッテリー向け充放電機器（容量測定を実施中）



(E) リパック後のリユース製品

図 8 中国リユース業者の工場・作業風景

中国ではバッテリーのトレーサビリティ情報は規制当局によって提供される Web システムを介してセル単位で登録されている。パック・モジュール・セル単位に付番される識別コードは規格化されており、製造元や大まかな種類を識別できる。当社が見学した範囲では、登録した情報をリユース製品の仕分けなど品質確認に利用している場面はみられなかった。また作業現場でのヒアリングでもバッテリーの利用履歴情報を積極的に利用していない様子だった。ほとんどの場合、バッテリーに刻印されている識別コードから得られる型式情報や定格情報の参照と、外観や充電容量などバッテリー個体の特性の確認をして診断と仕分けを行っている。

回収からリユース・リサイクルまで単一企業が手掛けることが多く、ロジスティクスの中では効率的に稼働している。分解や診断・仕分け作業については取り扱いバッテリーの種類が多く流動的なこともあり労働集約的な作業が多くみられるが、自動化などの設備投資も積極的に行われている。

使用済みバッテリーはすべて有価取引されており経済合理性をともなった事業として運営されている。この理由としてリユース製品の用途開発が進んでおり、展開形態も自社による前述の BAAS 形態に類似したリース・サブスクリプション形式とすることで利益を自社に集中させ事業の発展を支えていると考えられる。反面、新品バッテリーと使用済みバッテリーとの使い分けはバッテリーの市場価格に従っているため、市場状況によっては使用済みバッテリーのリユースは経済合理性をえられず、処分に回されてしまう可能性もある。

ヒアリングを行った多くの企業が、中国での使用済みバッテリー排出のピークは 2027 年以降と予想しており、その時点での使用済みバッテリーのリユース・リサイクル処理能力はまだまだ不足していると考えている。また、今後定置型蓄電設備への使用済みバッテリーの普及拡大も見込まれており、使用済みバッテリーの確保と設備の拡大を積極的に進めている。

日本国内と比較して大きな違いは、すでに使用済みバッテリーが大量に存在すること、リユース製品が一般消費者に受け入れられている点があり、結果として使用済みバッテリーの有価取引が成立していると考えられる。

2.1.1.6 回収業務フロー改善の検討

昨年度実証事業で設計・検証を行った回収業者の業務フローをもとに本年度ユースケース分析から抽出された課題と対応の検討を行った。

排出された使用済みバッテリーの輸送や分解を安全かつ効率的に実施することは使用済みバッテリーの有価取引を実現するうえで重要な要素であり、特にバッテリーパックを分解しセル本体とその他の金属部品・非鉄部品などに分別することは輸送・保管の効率性を著しく高める。これらの作業を安全に実施できる設備を備えた回収業者が集中的に処理を実施することで業務フロー全体の効率が高まる。他方、本年度にヒアリングにおいては、リユースバッテリー製造業者から使用済みバッテリー取り扱いの品質管理に関する要求が目立った。バッ

テリが適切に輸送・処理されたか否かを事後に判断することは困難なため、各工程が適切に実施される必要がある。実施作業内容の確実な実行の記録として、作業場所や日時、作業者、バッテリーに関する情報と関連する証跡の保管・管理は品質管理上、必須の機能であると思料する。以下に業務フローに沿った課題と改善ポイントを図示し、それぞれの課題と改善検討内容を表にまとめた。

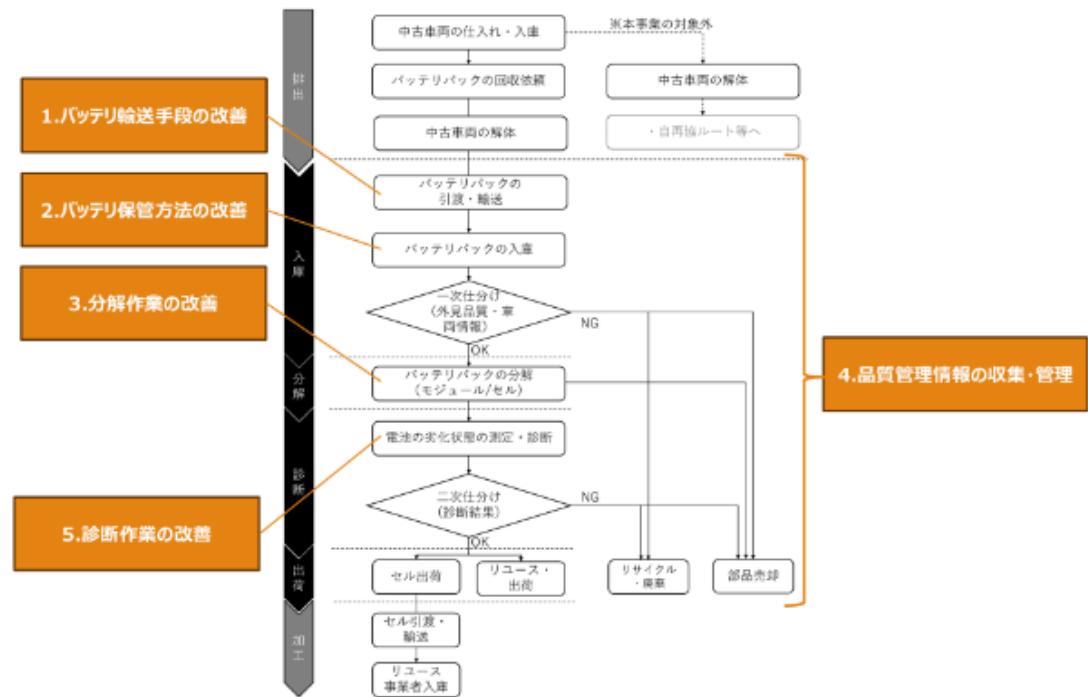


図 9 業務フローと課題・改善点のマッピング

表 18 課題と改善内容

#	課題	概要	改善検討項目
1	バッテリー輸送手段の改善	回収時などの輸送コストはリユース・リサイクル全体で大きな割合を占めるため、輸送の効率化の重要な要件となる。梱包・積載方法など安全に配慮した形での輸送方式を確立・採用する必要がある。	・ 輸送時の容器・梱包資材の整備 ・ 混載輸送の実現 ・ 輸送ルートを集約・最適化

2	バッテリー保管方法の改善	回収したバッテリーパックや分解後のバッテリーモジュール・セルを一定量以上保管するためには消防法に適合する安全設備と保管方式を採用する必要がある。 取扱量が増大する場合は法規に従ったうえで効率的な保管設備を備える必要がある。	・バッテリーパックの搬入出に適した倉庫の設計 ・保管場所を記録・管理できる在庫管理システムの導入 ・消防法に適合した高効率な収納容器の導入 (検討中の収納容器の URL)
3	分解作業の改善	バッテリーパックをモジュールやセルと金属・樹脂・ハーネスなどに分別する作業は、後工程の作業効率化、輸送・保管の効率化の両面で重要であるが、充電状態のバッテリーを分解するためには感電対策を施した設備と手順の確立が必要となる。また、リユースをするためにはセル・モジュール本体にダメージを与えずに分解を行うことが求められる。	・絶縁防護装備の着用（耐圧手袋、防護眼鏡、絶縁安全靴） ・絶縁防護設備の装備（絶縁マット、工具類への絶縁措置） ・消火対策設備（防火・耐熱装備、消火設備の装備） ・バッテリー種別ごとの分解手順の整備 ・作業員の教育・啓蒙活動

4	品質管理情報の収集・管理	バッテリーが適正に解体、回収、保管、分解、診断が行われたことを事後に確認することは困難なため、各工程における適正な作業遵守が品質を確保するためには必須の要素となる。 解体時に取得できる車両情報をはじめ、カーボンフットプリント、いつ・だれが・なにを・どのように作業したかの証跡を可能な限り記録・管理し品質を担保する必要がある。後工程で不具合が発見された場合の原因究明のためにもこれらの情報は必須となる。	・ 品質管理規定の策定 ・ 以下の情報を収集・管理する品質管理情報システムの導入 ・ 車両情報 ・ 作業証跡 ・ 回収業務にかかるカーボンフットプリント算出のための基礎情報
5	診断作業の改善	使用済みバッテリーの診断もしくは電気的な特性の測定を行うことでリユース可能なバッテリーの選別や用途に応じた仕分けが可能になるが、診断・測定のためには適切な接続や周囲環境の整備が必要となる。品質を維持したうえで効率的に診断を行うための設備・手順が必要となる。	・ 作業場の室温管理のための空調設備導入 ・ バッテリー接続用の汎用治具の導入 ・ 診断作業・記録を自動化するアプリケーションの導入

2.1.1.7 考察

昨年度より継続して EV から排出される使用済みバッテリーは増加し、リユース・リサイクルに対する関心が高まり続けていることはヒアリングからあきらかになった。今回のヒアリングで使用済みバッテリーの有価取引実現に向けた各事業者の活動を確認でき、我々が開発を進める情報流通プラットフォームの必要性もあわせて確認できた。Web3 技術を用いることで多数の関係者間において情報の公開・限定公開・非公開を使い分けることができるた

め、今後使用済みバッテリーの流通が本格化するに従い顕在化する情報連携の需要に柔軟に対応することができる。

また、安全かつ経済合理性をとまなうバッテリーの流通を成立させるためには効率的かつ高品質なロジスティクスとバッテリーの診断・仕分けが重要になる。とりわけ、バッテリー回収業者は、供給側（排出業者）と需要側（リユース業者、リサイクル業者）の中間に位置し、円滑な使用済みバッテリーの流通に重要な役割を担う。個別に設営すると非効率になる保管設備や診断設備を地域ごとに配置できれば効率的にバッテリーの仕分けをおこなうことができ、経済的な使用済みバッテリーの流通を実現する。これらの技術や手段は独占的に開発・運営されるべきではなく、情報の共有や安全管理の協調領域と付加価値を伴う競争領域を共存させ、市場原理を導入することで持続的な有価取引を実現する。

また、効果的で持続可能なサーキュラーエコノミーを実現するためには、包括的なサプライチェーンおよびバリューチェーンのフレームワークを設計することが重要である。特に、EV バッテリー排出の時点からの海外流出や不法投棄を抑止するためには、使用済みバッテリーを取り扱う各企業が連携して効率的にバッテリーを回収・再利用できる仕組みや技術開発を進め、リユース製品の利用者には本事業が構想するカーボンクレジットのようなインセンティブや利益を提示し、市場原理にもとづいた適正な価値判断が行われるよう誘導すべきである。さらに、既存の静脈側の法規制に合致した仕組みを整備し、プロセスに対応するための規制改革も行うべきである。これらの取り組みが、有価取引の小さな実績の積み重ねから大きな市場を創出する後押しになると考える。

また、ライフサイクル全体にわたるバッテリー関連データの継続的な収集・公開も不可欠である。収集されたデータは、バッテリーの価値評価や安全性の確保のためのルール策定やリユース製品向けの保険サービスに活用されるべきである。

下図は、本事業が構想する事業範囲と参加者の役割・物流・情報流を整理したものである。昨年度から特に排出業者・リユース製品製造業者からのヒアリング内容を反映し再整理している。

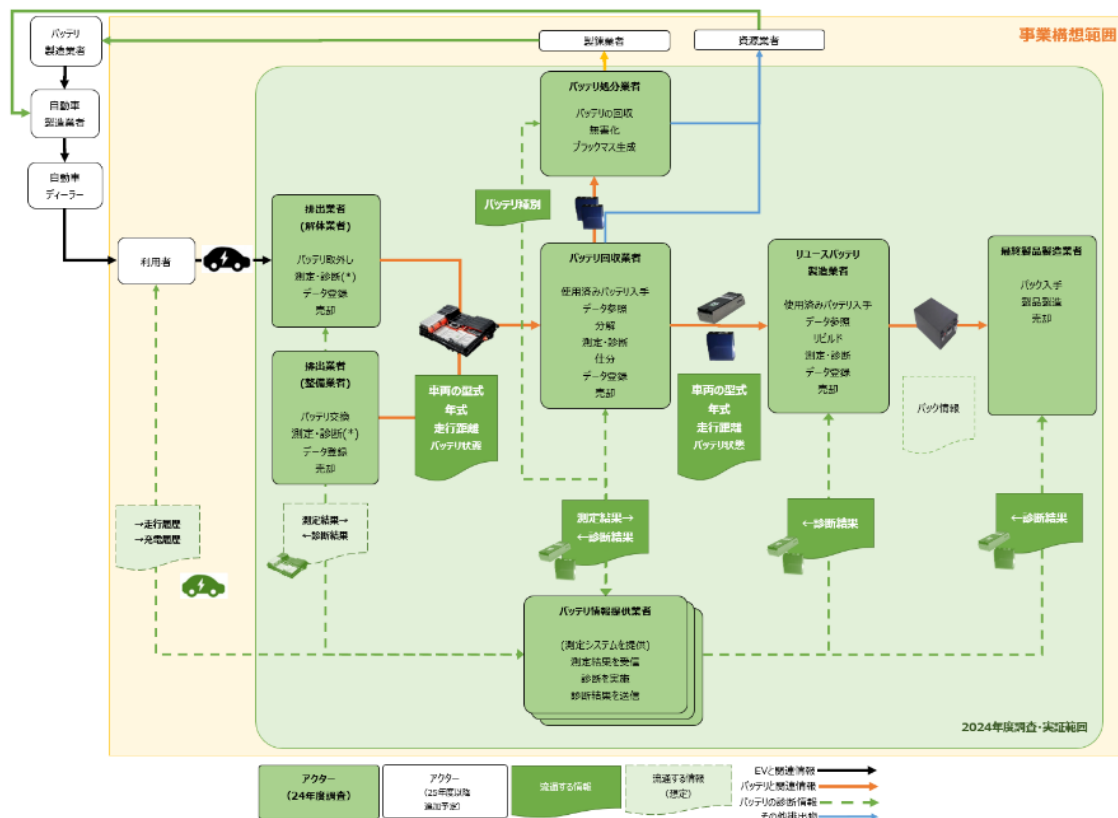


図 10 リユース・リサイクル事業の想定業務フロー（更新版）

2.1.2 電池管理モデルの構築

2.1.2.1 概略

EVの車載バッテリーを分解して他の用途に再利用（例えば定置型蓄電設備など）する場合、そのバッテリーがあと何年使用可能か、どのような状態で使用できるかは、リユースバッテリー製造業者、流通業者、最終利用者にとって重要な情報となる。バッテリー回収業者やリユースバッテリー製造業者は、現時点でのバッテリー容量などを測定できるが、将来のバッテリー寿命を直接予測することはできない。バッテリーには個体差があるため寿命を正確に予測するのは困難でも、製品保証や保険といった手段が代替策として考えられる。例えば、サプライチェーン上流の業者が「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」という保証条件を設定することで、下流業者や最終利用者に対し、実質的な寿命予測にもとづく安心感を提供できる。本項では、電池管理モデルの情報プラットフォームへの適用と寿命予測の方式の検討の結果を報告する。

2.1.2.2 背景

- バッテリー価値顕在化プラットフォームへの予測データの追加

使用済みバッテリーはセルまで分解され、リユースまたはリサイクルのためにサプライ

チェーンの下流業者に引き渡される。分解処理の結果は個別のセルだけでなく、同一品質のセルをまとめたロット、モジュール、パックそのまま、外装品など多岐に渡る。これらさまざまな形体のモノの情報を資格証明書として、世界でただ一つの識別子（バッテリーパックの URI にセルなどに対するローカルな識別子をつけたもの）をつけて発行、授受を可能にするのが本プロジェクトで開発する情報交換プラットフォームであり、この証明書にインターネット上でアクセスできるようにするのが特徴である。ネットワーク上に分散する証明書の URL (DID URL) とアクセス方法の仕様を定め、証明書は真正性（発行者が本物であること）とインテグリティ（内容が改竄されていないこと）が保証され、非公開の証明書は権限がある者同士が限定した内容を授受可能であり、公開の証明書は誰でも検索、閲覧できるようにした。

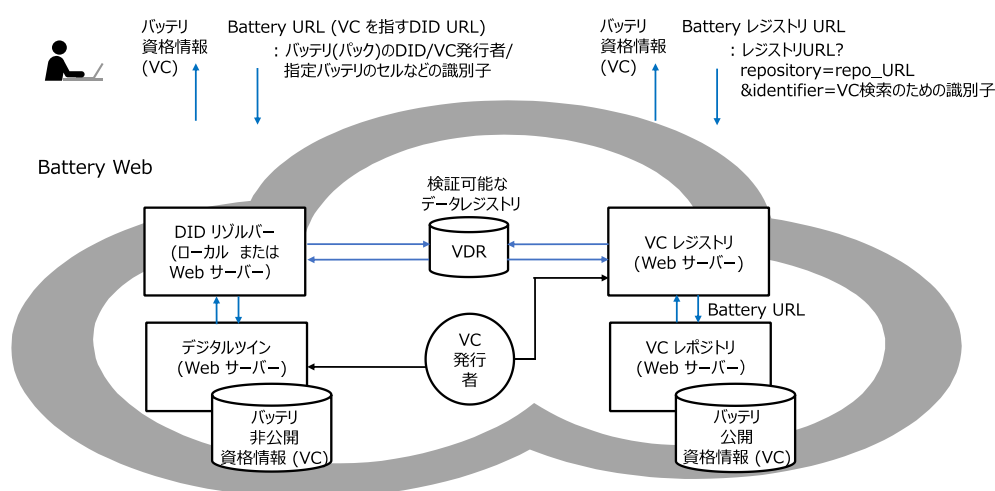


図 11 情報流通プラットフォームの概念

- W3C DID/VC による証明書における真正性

プラットフォーム上のバッテリーの価値に関する証明書（VC: Verifiable Credential）は証明書発行者の秘密鍵により電子署名されており、その公開鍵は当プラットフォームの検証可能データレジストリ（VDR: Verifiable Data Registry）に保存されているため、誰でも発行者の DID からリゾルブ（公開鍵を安全に取得）することができ、この仕組みによって証明書の真正性が証明される。この真正性とは、証明書は確かに DID が示す発行者により発行され、その後誰にも改竄されていないことを意味する。つまり発行者が自ら確認できる事実（例えば排出業者が確認できる車体番号）や測定できる値（例えばバッテリー回収業者が測定できる SoH (State of Health)）については発行者が嘘をついていない限り主張している内容は信用できることになる。それでは発行者が直接確認できない予測値についても証明書を発行することは可能だろうか。この場合は発行者が嘘をついていなくても予測の方法に誤りがあれば証明書の主張は信用できない。

つまり予測値の場合は、「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証明書に不可欠になる。

2.1.2.3 リユース利用バッテリーの寿命予測と確率分布

- 利用者の視点：寿命予測

EV のバッテリーをセルに分解し他用途にリユースする場合、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、リユースバッテリー製造業者、リユース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。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ことを予測し、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。

- 提供者の視点：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は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(PDF、Probability Density Function)を推定することが必要になる。

2.1.2.4 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リユース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、最尤推定によるパラメータ推定とベイズ推定による事後分布を求める方法を比較検討する。以下に各手法について述べる。

- ワイブル分析

信頼性工学で利用されるワイブル分布は、元々は材料の破壊強度の分布を表現するた

めに考案されたが多くの寿命データにも適合することが分かっている。システムの要素間にバックアップのメカニズムが無い場合、最も弱い要素の故障が全体の故障を招くと言う最弱リンクモデルに基づいている。ワイブル分布によれば時間の経過に対する故障率の変化は下図のようなバスタブ曲線になる。図の A は出荷後故障が頻発するがその後激減する初期故障域、B は故障率が安定する偶発故障域、C は寿命が来て再び故障率が急増する摩耗故障域を表す。この分布をバッテリーに適用するにはバッテリー容量が定格容量の 50%以下になったら故障などと設定し、充放電サイクルに対する故障率のデータを収集してワイブル分布の形状パラメータ β 、特性寿命 η を以下の流れに沿って求める。

サイクル t で故障するバッテリーの割合 $f(t)$ は：

$$f(t) = (\beta/\eta)(t/\eta)^{\beta-1} e^{-(t/\eta)^\beta}$$

右辺を積分するとサイクル t までに故障するバッテリーの割合 $F(t)$ になる：

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta}$$

両辺の対数を 2 回取って整理すると

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln t - \beta \ln \eta$$

左辺を Y 、 $\ln t$ を X と置けば $Y = \beta X - \beta \ln \eta$ と一次式になるため回帰分析により β 、 η が求まり故障率の分布が求められる。

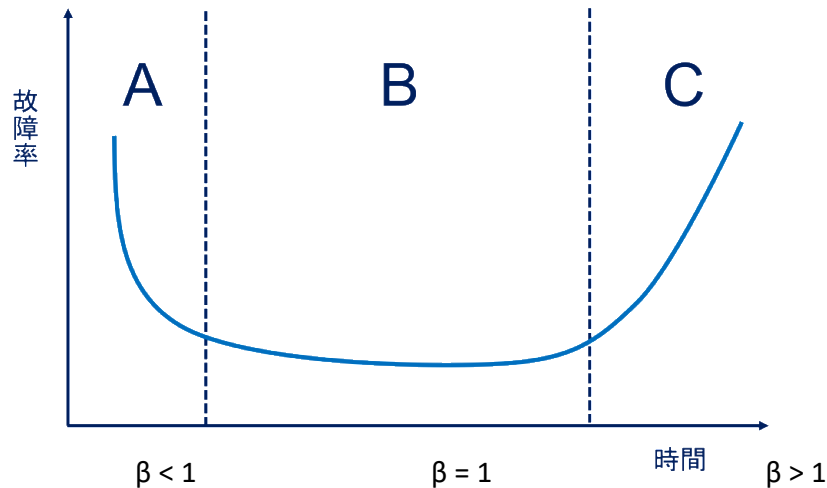


図 12 Weibull 分布

- 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たと考え、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 $\mathbf{x}$ 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 $\mathbf{w} \sim N(0, \lambda^2 \mathbf{I})$ から生成されたと考えるならば $\mathbf{y} \sim N(0, \lambda^2 \Phi \Phi^T)$ と表され、共分散行列 $\lambda^2 \Phi \Phi^T$ は入力 $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)$ 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 $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \theta_1 \exp(-|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2 / \theta_2) + \theta_3 \text{kd}(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ はその代表的なものである。 θ (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 θ 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 (ガウス過程回帰する) ことだが、その予測分布は以下の式で求まる。

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

$$\mathbf{k}_* = (k(x_*, x_1), k(x_*, x_2), \dots, k(x_*, x_N))^T,$$

$$\mathbf{k}_{**} = k(x_*, x_*)$$

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 θ 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下図のようになる。

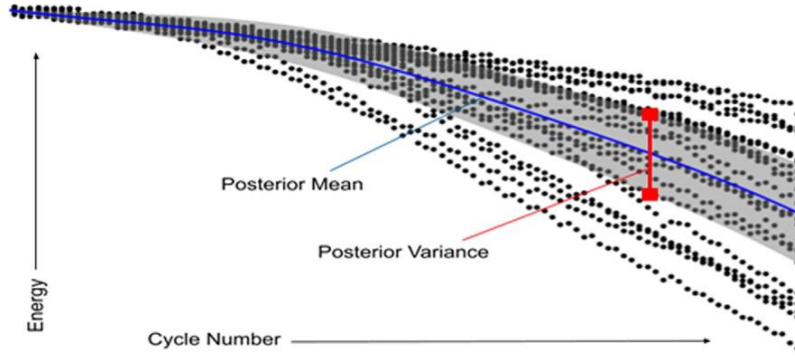


図 13 ガウス過程による最尤推定

- 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 θ に適当な値(ここでは $(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = (1.0, 0.4, 0.1)$) 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_h 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くなるが、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(同義基底関数 RBF: Radial Basis Function) $k(x, x') = \theta_1 \exp(-|x - x'|^2 / \theta_2) + \theta_3 \text{kd}(x, x')$ 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。

- 観測データの生成
- 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)
- ガウスカーネル RBF を関数として定義
- 観測データ同士 $(x_n, x_{n'})$ から配列 $\mathbf{K}$ を RBF で計算
- 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
- 予測データ同士 $(x_m, x_{m'})$ から配列 $\mathbf{k}_{**}$ を RBF で計算
- 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
- 平均 $\mu = \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K})^{-1} \mathbf{y}$ を計算、 μ は M 行ベクトルになる
- 共分散行列 $\sigma = \mathbf{k}_{**} - \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K})^{-1} \mathbf{k}_*$ を計算、 σ は M 行 M 列の行列になる
- 分散 var を σ の対角要素から求める、 var は M 行のベクトルになる

- 標準偏差 **std** を **var** の要素の平方根から求める、**std** は M 行ベクトルになる
- 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
- 平均のグラフを描き、標準偏差の幅に帯をつける

プログラムの実行結果を以下に示す。緑色の破線はモデルとした区間線形関数（真の潜在関数）のグラフ、赤色の点はガウスノイズが乗った観測データ、青色の実線は予測値のグラフ、青色の帯は標準偏差を表している。9 個の観測データからノイズに隠れた未知の区間線形関数が予測できているが、観測データが少ない領域では標準偏差が大きくなっている。またグラフの両端付近では観測データが無いため予測が潜在関数から大きく外れており、標準偏差の帯の広さがその不確かさを表している。

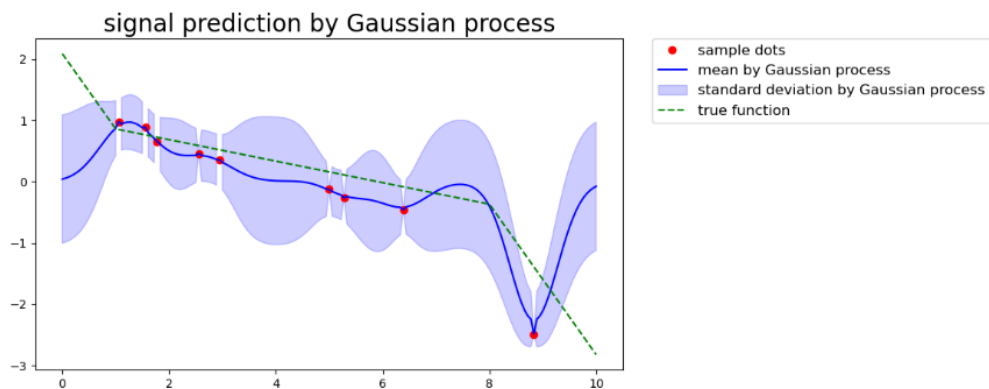


図 14 ガウス過程での予測グラフ

同じプログラムを使って、真の潜在関数を三角多項式 $2\sin(x) + 3\cos(2x) + 5\sin(5\sin(2/3)x)$ とした場合の予測分布は以下ようになった。区間線形関数と全く異なる形の潜在関数についても予測ができていることから、関数形を特定したパラメトリックな方法に対するガウス過程回帰の万能性が読み取れる。ただしこの場合も観測データが少ない領域では予測が潜在関数から大きく外れており、標準偏差の帯の広さがその不確かさを表している。

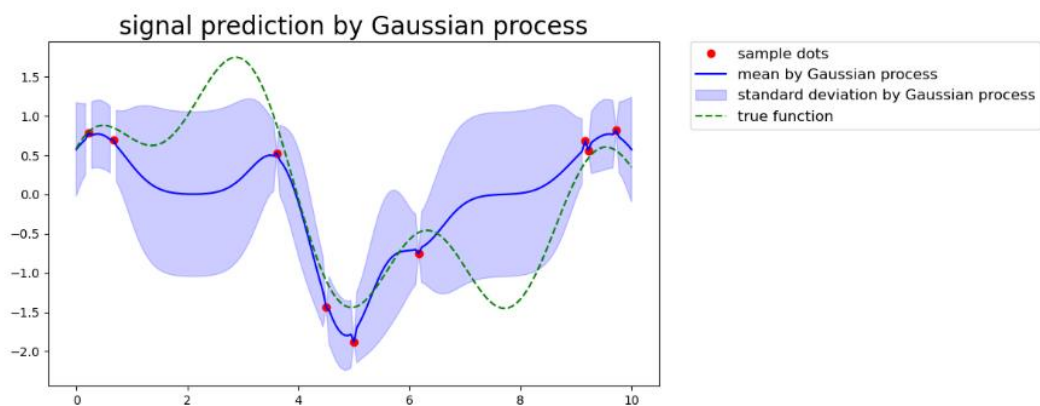


図 15 ガウス過程での予測図

参考のため今回使ったプログラムを以下に示す。ガウス過程回帰の数学的理論は難解であるが、プログラムは単純な行列計算の繰り返しで実現できている。

```
import numpy as np
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

# データを生成する
N = 181
x_full = np.linspace(0, 10, n)

# x_fullからデータを間引いて訓練用データdata_x とする
missing_value_rate = 0.05
sample_index = np.sort(np.random.choice(np.arange(n), int(n*missing_value_rate),
replace=False))
data_x = np.copy(x_full[sample_index])

data_y = true_function(data_x)
obs_y = data_y + np.random.randn(len(data_x)) # ノイズを乗せて観測データobs_yとする

# 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

# 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の下地を準備
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)

# テストデータとトレーニングデータ間のカーネル行列の下地を準備
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、分散の配列に追加
sigma = k_xx - np.dot(kK_, k)
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()

```

図 16 ガウス過程サンプルソース

- ガウス過程によるベイズ推定

最尤推定とベイズ推定はどちらも尤度関数に含まれる未知のパラメータを推定することを目的とするが、前者がパラメータを点推定するのに対して後者は確率分布として推定する。ガウス過程法においてパラメータは平均と共分散を持つガウス分布になる。

バッテリーの充放電サイクルに対する劣化の推定においては、下図に示すように、最尤推定では劣化の事後平均、事後分散が点推定されるが、ベイズ推定ではこれら母集団のパラメータも確率分布すると考え、その平均、分散の分布を推定することになる。

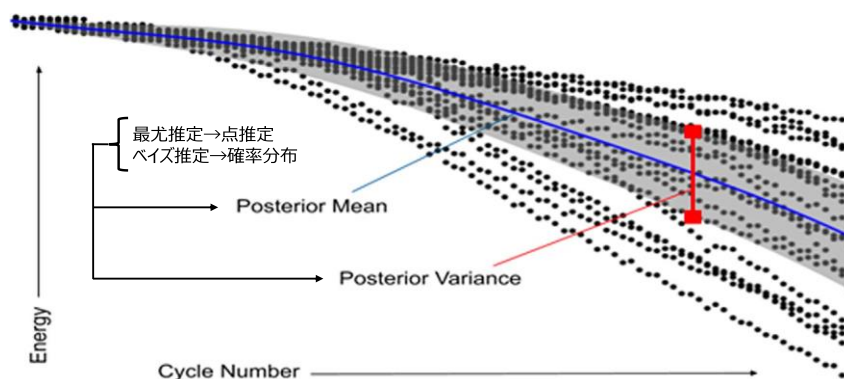


図 17 最尤推定とベイズ推定

- MCMC 法によるベイズ推論の実装

ベイズ推論では尤度関数に含まれるパラメータの確率分布を推定するが、その具体的な方法はマルコフ連鎖モンテカルロシミュレーション（MCMC 法）を使ったコンピュータシミュレーションによる。我々は Python のライブラリ PyMC を使って確率分布を推定する方針を立てた。これについて以下に説明する。

今、下図の散布図に示す観測値 $(X, Y) = \{ (x_1, y_1), \dots, (x_{50}, y_{50}) \}$ があり、 X, Y の間に $y_\mu = \alpha x + \beta$ の関係があるとする。観測値 y には誤差 ε が乗るので $y = y_\mu + \varepsilon = \alpha x + \beta + \varepsilon$ となる。ここで α, β が正規分布（ガウス分布）、 ε が半正規分布に従うとすれば X から Y が生成される確率過程の確率モデルは図 19 で表せる。

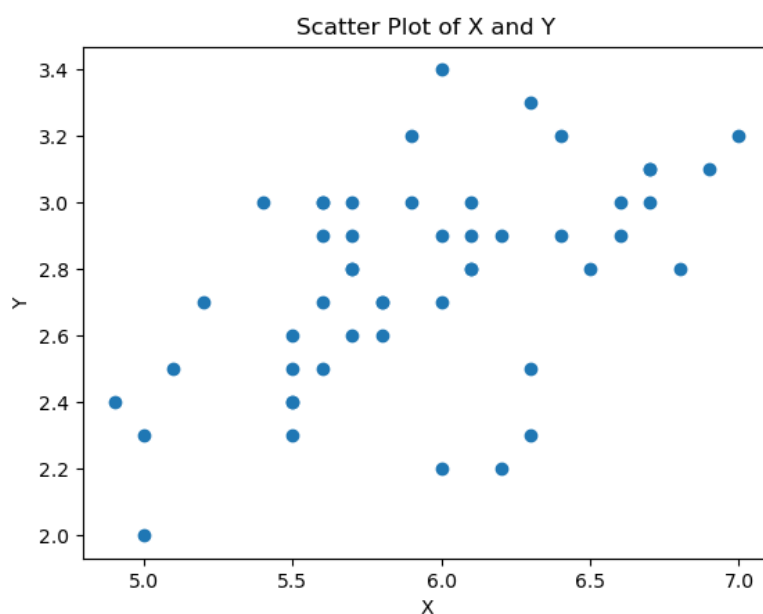


図 18 散布図

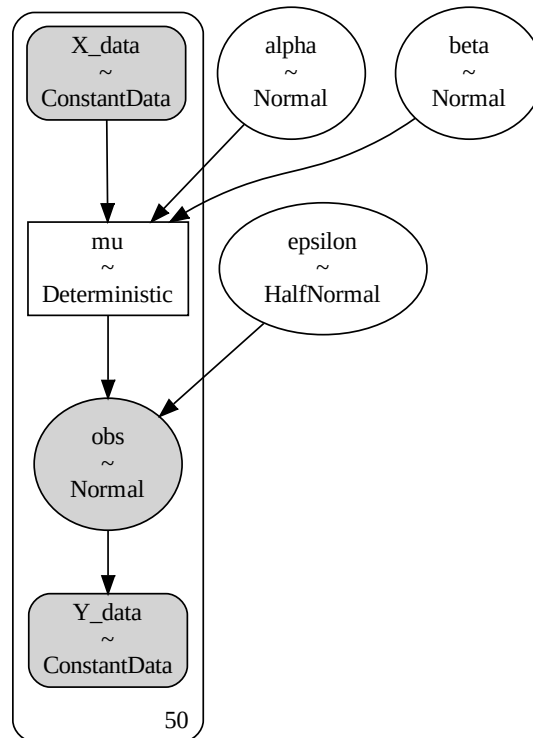


図 19 確率モデルの可視化

確率モデルが定義できれば、PyMC の `sample` 関数を使って未知のパラメータ (α, β, ϵ) のデータサンプリングが出来る。MCMC (マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーション) は初期値から次のデータ、そのデータからまた次のデータと言う具合に連鎖的にデータを生成するので、異なる初期値からは異なるサンプリングデータの系列が生成される。PyMC の `sample` 関数はデフォルトでは 4 系列のデータをそれぞれ 2000 個ずつ生成し、不安定な最初の 1000 個を捨てて、後半の安定した 1000 個のデータを採用する。合計で 4000 個のデータが生成される。下図にサンプリングで得られたデータを示す。この例のように 4 系列のデータが同じ傾向を示せばサンプリングは成功である。データから確率分布を求めた結果が図 21 である。

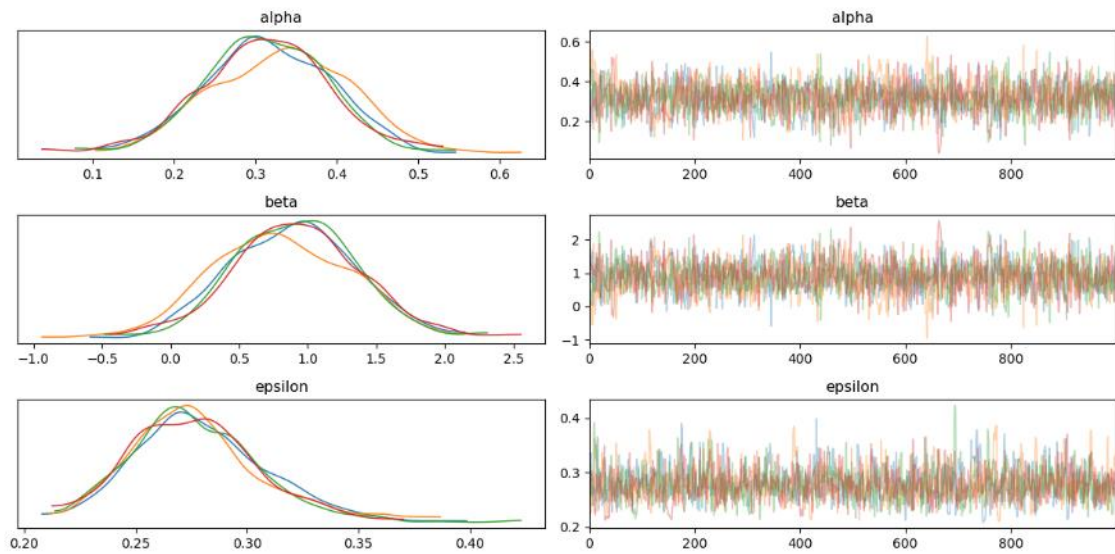


図 20 サンプルング結果

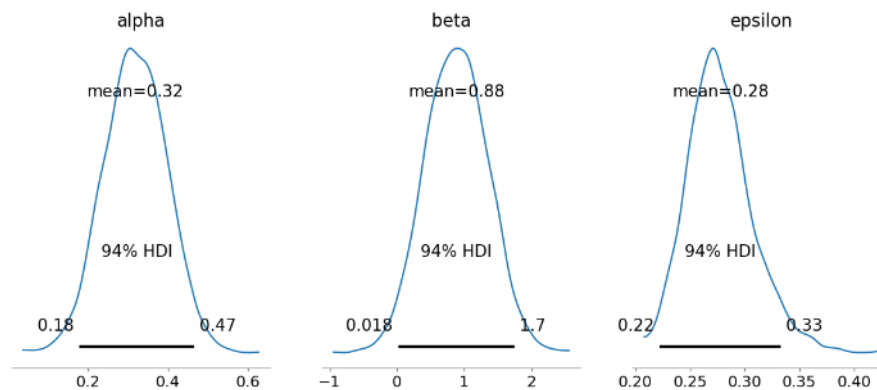


図 21 サンプルング結果の確率分布

参考のため今回使ったプログラムの一部を以下に示す。

```
import pymc as pm # MCMC のライブラリのインポート
import arviz as az # 分析用ライブラリのインポート
model = pm.Model()
with model: # 確率モデルの中身を定義
    X_data = pm.ConstantData('X_data', X)
    Y_data = pm.ConstantData('Y_data', Y)
    alpha = pm.Normal('alpha', mu=0.0, sigma=10.0)
    beta = pm.Normal('beta', mu=0.0, sigma=10.0)
    mu = pm.Deterministic('mu', alpha * X_data + beta)
```

```

epsilon = pm.HalfNormal('epsilon', sigma=1.0)
obs = pm.Normal('obs', mu=mu, sigma=epsilon, observed=Y_data)
idata = pm.sample()
az.plot_trace(idata, compact=False, var_names=['alpha', 'beta', 'epsilon'])
plt.tight_layout()az.plot_posterior(idata, var_names=['alpha', 'beta', 'epsilon'])

```

図 22 ベイズ推論の Python プログラム (抜粋)

パラメータの事前分布の平均、分散 (例えば α の平均 $\mu=0.0$ 、分散 $\sigma=10.0$) は仮置きした値であるが、サンプリングして得たデータから読み取れる事後分布の平均、分散 (α の平均 $\text{mean}=0.32$ 、HDI (High Density Interval)= $0.18 \sim 0.47$) は観測データと合うようになっている。

最後に X, Y の散布図に $y = \alpha x + \beta + \varepsilon$ の回帰直線を重ね書きすると下図になる。最尤推定の際は $\alpha, \beta, \varepsilon$ が点推定されるため 1 本の直線が引かれるが、ベイズ推定ではサンプルデータの数だけグラフが描かれ、データの多い中央部はグラフが集中して重なっているが、データの少ない領域では薄く分散しているのが分かる。

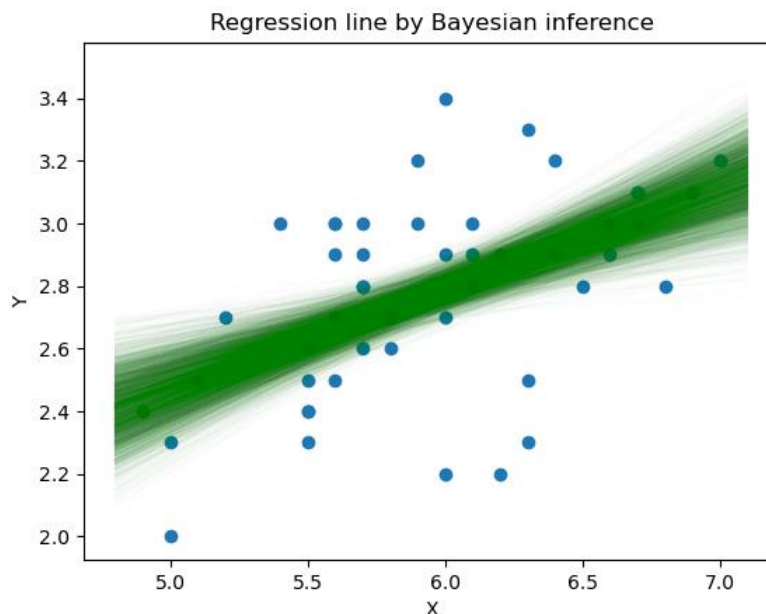


図 23 ベイズ推論による回帰直線

2.1.2.5 考察

- 確率密度分布の推定法の比較検討

パラメトリック、ノンパラメトリック合わせて 4 通りの推定法を検討したが、それぞれについて特徴とメリット、デメリットを以下にまとめる。

①ワイブル分析：

- ・特徴：確率分布の関数形を既知として、そのパラメータを点推定するパラメトリック推定を行う。
- ・長所：信頼性工学の分野で実績のある故障分析手法である。未知のパラメータである形状パラメータ β 、特性寿命 η は重回帰分析だけで簡単に求めることができる。
- ・短所：バッテリーの寿命予測に故障分析がフィットするかは不明である。他の推定法の結果と比較して検証する必要がある。また故障したか否か（例えば容量が設定した基準を下回ったかどうか）のみを分析の対象としているため、観測データに含まれる他の情報（例えば容量の実測値そのもの）が使われないことが実用上問題にならないか検討が必要である。これらが克服できれば簡易分析手法として利用価値があると考えられる。

②ガウス過程（ハイパーパラメータは既定値）

- ・ガウス過程の特徴：「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」とする仮説にもとづき確率的生成モデルを求め、そこに観測値を当てはめることで「観測が得られることの確からしさ」を表す尤度関数（likelihood function）が定まる。観測値は実際に観測されたのだからその確からしさを最大化する（最もよく説明する）確率モデルを推定する。
- ・ガウス過程の長所：あらかじめ関数形が決まっていて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。
- ・ガウス過程の短所：数学的に難解であるため広く利用されるためには専門家による支援が必要である。これについては 1.5.3 で考察する。

③ガウス過程とハイパーパラメータの最尤推定

- ・ガウス過程の特徴、長所、短所は②と同じ。
- ・観測値は実際に観測されたのだからその確からしさを最大化するハイパーパラメータ（尤度関数に含まれるパラメータ）を求めることで確率モデルを推定する。
- ・最尤推定の特徴：尤度関数は観測値を定数として織り込んだハイパーパラメータの関数 $L(\theta)$ となる。尤度関数の値を最大化する θ を点推定するのが最尤法であるが、その具体的な推定法は尤度関数を θ について微分して解析的に求める方法と、より一般的な勾配降下法によりプログラムの的に求める方法がある。
- ・最尤推定の長所：勾配降下法によればベイズ推定より少ない計算量で推定できる。
- ・最尤推定の短所：分布のハイパーパラメータを点推定するため、観測データ量が少ない領域で推定結果の信頼性が低いことが明示されない。

④ガウス過程とハイパーパラメータのベイズ推定

- ・ガウス過程の特徴、長所、短所は②と同じ。
- ・ベイズ推定の長所：尤度関数 $L(\theta)$ の値を最大化する θ を確率分布として推定するため、観測データが多い領域と少ない領域で推論結果の信頼度の変化することが明示される。例えば前述のグラフからは、観測データが集中する中央領域の信頼性がデータの少ない両端の領域より高いことが読み取れる。これは観測データが少ない場合はそれなりの推定を行えることを意味する。
- ・ベイズ推定の短所：マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションの計算量が大きい。また確率モデルによってはシミュレーションによるサンプリングの結果が収束しないことがあり、その場合は PyMC の sample 関数をデフォルト設定からチューニングする必要がある高度な数学的知識が必要になる。

以上の特徴を表にまとめると以下のようになる。

表 19 分析手法毎の特徴

	①ワイブル分析	ガウス過程回帰		
		②既定値	③最尤推定	③ベイズ推定
パラメトリック・ノンパラメトリック	パラメトリック → 潜在関数の形が限定的	ノンパラメトリック → どのような潜在関数にも対応可能		
重回帰・ガウス過程回帰	重回帰 → 理論も実装も容易	ガウス過程回帰 → 理論は難解だがプログラム実装はそれ程でもない		
観測値	故障したかどうかだけなので追加の分析が困難	SoH などの任意の物理量を使えるので追加の分析の可能性が広がる		
ハイパーパラメータ	N/A	既定値を使う → 簡単。予測値の不確かさはガウス過程が示してくれる	尤度関数の微分、または勾配効果法 → ハイパーパラメータを最適化して予測精度を高められる	MCMC 法 → 理論も実装も難解。ハイパーパラメータを確率分布で求めてもカーネル関数に幅が出て利用が困難

それぞれに特徴があり、傾向としては①②③④の順に手法の難易度が上がり、推定の表

現力、精度も上がる。今後の方針としては4手法を並行して評価し、適材適所での利用ができるように進めたいが、②③が有力候補である。

● 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。(下図)

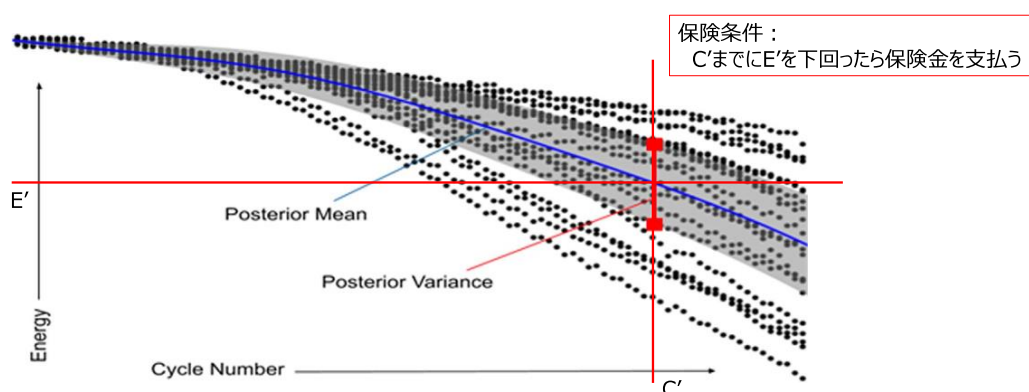


図 24 保険条件の設定

この時、保険金支払いが発生するのは下図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することも可能である。

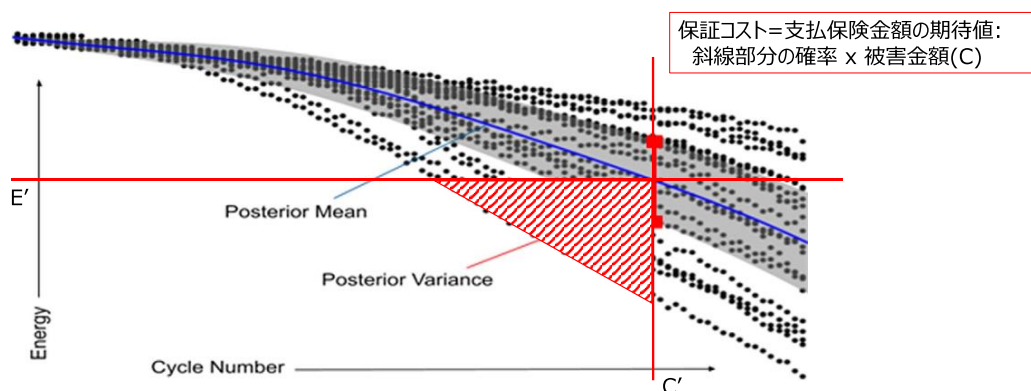


図 25 保険コストの算定

- プラットフォームへの電池管理モデルの反映

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、Verifiable Credential）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。すでに示した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。更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。

下図は自己主権型アイデンティティ (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、リユース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と思われる。

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は不要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。

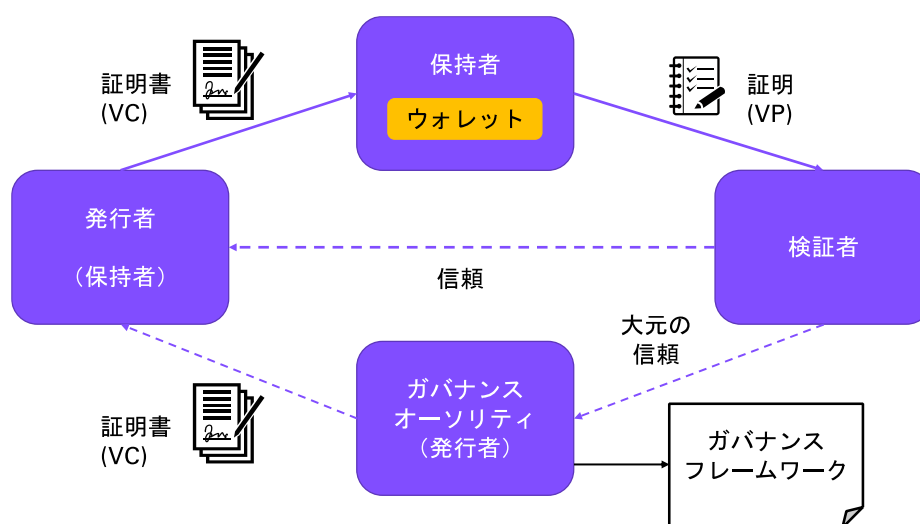


図 26 プラットフォームのガバナンス

＜本項の参考文献＞

- (1) Stephan J. Harris, Marcus M. Noack 2023 Statistical and machine learning-based durability-testing strategies for energy storage
- (2) 持橋大地、大羽成征 2019 ガウス過程と機械学習

- (3) Christopher M. Bishop 2006 Pattern Recognition and Machine Learning
- (4) 赤石雅典 2023 Python でスラスラわかるベイズ推論「超」入門
- (5) 宮川公男 2023 基本統計学 [第 5 版]

2.1.3 システム設計・開発

2.1.3.1 概略

前述の回収業務フローの検討結果に沿って、回収業務に用いるシステムの設計と開発を実施した。特に回収業務における品質管理情報システムと診断アプリの改善について説明を行う。

2.1.3.2 品質管理情報システムの設計と開発

リユースバッテリー製造業者からは、回収事業者に対して、品質管理に関わる情報を、リユースバッテリーが車載されている時点の使用状況から、解体、回収、保管、分解、診断、納品のワークフローに沿って収集する要望がだされた。（下図）

この要望を満たすために、品質管理情報システムが取扱うリユースバッテリーの製造に関わるアクタと工程の範囲は次のとおりとする。（下図、点線で囲われた範囲）

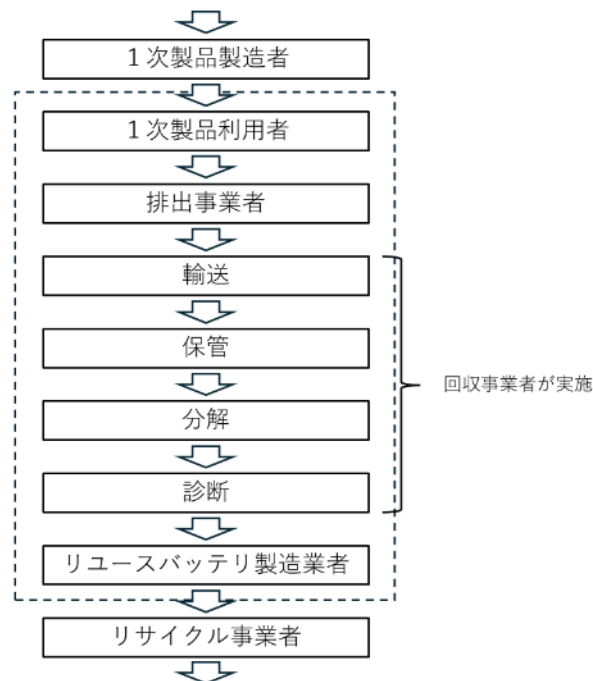


図 27 リユースのための業務品質管理工程

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ため、管理の評価プロセスによって評価されなければならない。（下図）

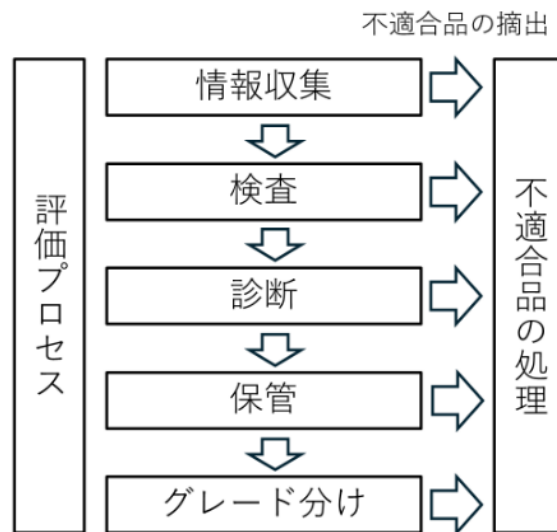


図 28 回収業務品質管理工程

各工程において、手順に従い、不適合品を摘出し、処理し、記録し、報告する。本システム機能はそれをサポートする。(下図)

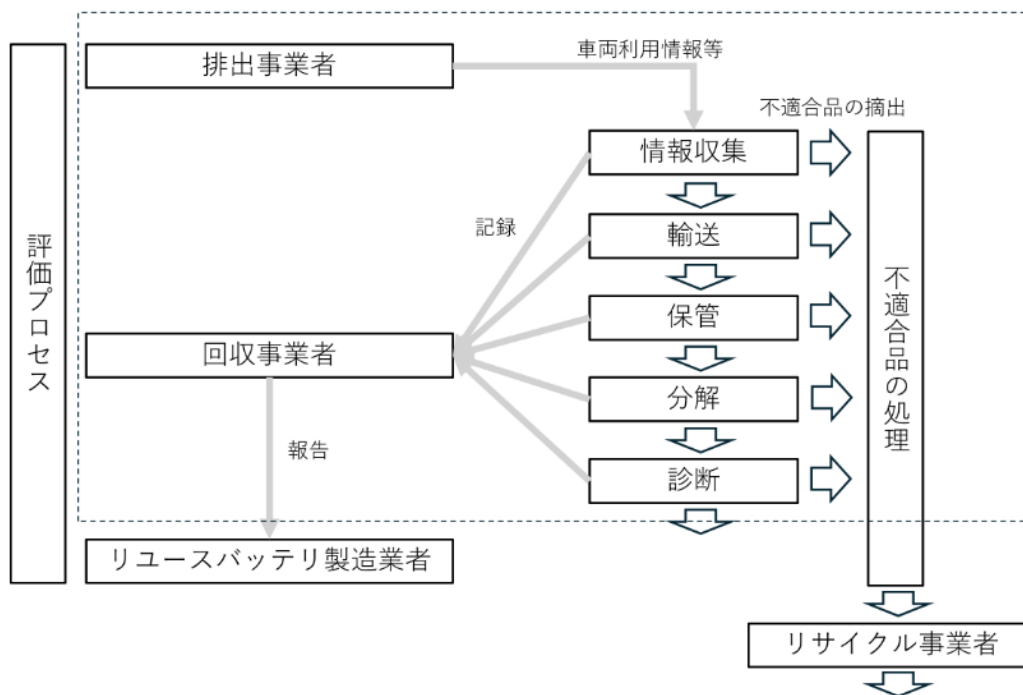


図 29 品質管理工程における情報管理

備考：点線で囲われた範囲が本システムのサポートする範囲。

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)

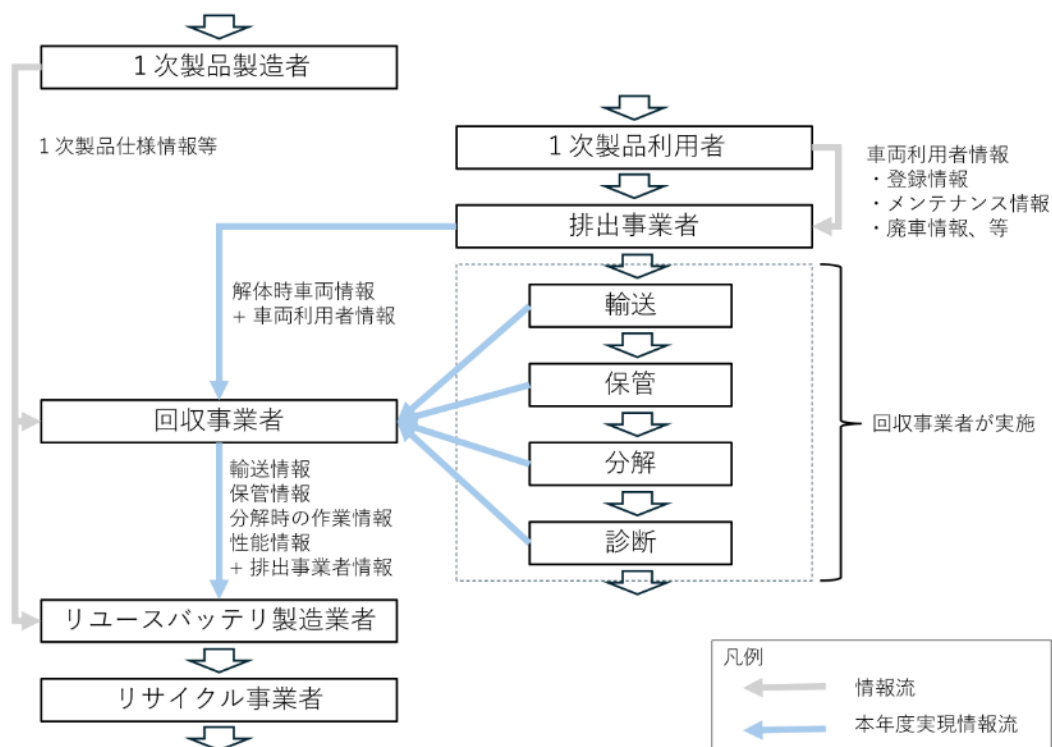


図 30 品質管理における情報流

上記のプロセスについて下記のシステムユースケースを検討・実装した。

表 20 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	● 車検証情報の写真を撮影・記録する ● 車両のオドメータの値の写真を撮影、記録する ● 車両が表示するバッテリー状態の写真を撮影、記録する
	バッテリーパックの使用状況の情報を収集する	
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	● 回収に用いたトラックを記録する ● 回収で走行したオドメータの値を記録する ● 回収に用いるトラックの燃費を管理する
保管	パックは適切な格納場所に保管する	格納場所の監査証跡を残す
	パックの保管期間を管理する	格納・移動の監査証跡を残す
分解	パックの分解作業は、分解技術	作業者の監査証跡を残す

	を習得した作業員が行う	
	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	検査結果を記録する
	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	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
診断	分解したバッテリーがリユースに適している状態であることを検査する	診断結果を記録する
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	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
	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	次の情報収集と計算を行う 1. 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。 2. 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。 3. 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 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(のモデル毎の)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

表 21 作業プロセス一覧

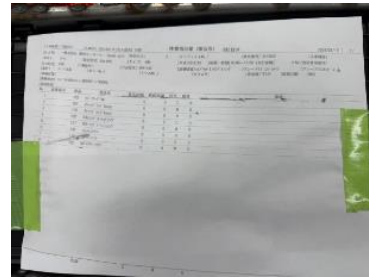
プロセス	アクション
情報収集	排出会社はモバイルアプリケーションを用いて回収依頼を行う (1) スマートフォンのアプリで回収依頼を行う (2) 車検証情報の写真を撮る

車載バッテリーバック回収

申請証の写真を撮る

次に進む

キャンセル



(3) オドメータの写真を撮る (4) セグ数の写真を撮る (リーフの場合)



回収会社は回収依頼を確認し必要な情報を入力する

(1) 回収受付入力画面

車載バッテリーパック回収

ホーム回収入荷トラック顧客顧客登録パスワード

エントリ番号

E2410220101

顧客番号

C0037

登録者

尼崎工場

車台番号

入力必須

故障/破損/異常状態および保守の記録

型式

入力必須

車名

利用終了理由

製造者

利用終了日

年式

YY-MM

解体日

初度登録年月

YY-MM-DD

odometer

保管場所

充電量

0 ~ 100

セグ(日産リーフ)

0 ~ 12

0 ~ 12

◎適合

○取扱不良

○使用状態不良

○使用状態不明

○その他

不適合事由

添付ファイル

inspection-1

odometer-2

charging-3

登録

削除

キャンセル

輸送

回収会社は今回改修する対象の回収依頼を選択し、パックに添付する回収票(二次元コード)を印刷する

(1)回収票印刷

(2)回収するバッテリーパックに回収票を添付

車載バッテリーパック回収

ホーム回収入荷トラック顧客顧客登録パスワード

顧客番号

顧客

依頼件数

未入荷数

1件

C0037

自動車解体社B

1

1

詳細

回収票印刷

キャンセル

使用トラック

出発時オドメータ

帰還時オドメータ

積荷比率(%)

0~100

回収完了

車載バッテリーパック回収票

顧客	自動車解体社B C0037
登録者	A工場 1727523167
登録番号	E2411271347
回収番号	T2411271350
車台番号	144027
型式	DAA-HE12
車名	日産 ノート
初度登録年月	
オドメータ	68652 km
バッテリー充電量	
セグ(日産リーフ)	

(3)回収に使用したトラックの情報を記録

63

	回収記録 <table><tr><td>回収番号</td><td>T2411271350</td></tr><tr><td>トラック番号</td><td></td></tr><tr><td>出発時オドメータ</td><td>km</td></tr><tr><td>帰還時オドメータ</td><td>km</td></tr><tr><td>積荷比率</td><td>%</td></tr></table> 	回収番号	T2411271350	トラック番号		出発時オドメータ	km	帰還時オドメータ	km	積荷比率	%
回収番号	T2411271350										
トラック番号											
出発時オドメータ	km										
帰還時オドメータ	km										
積荷比率	%										
報告	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 (画面例)										

製品シリアル番号

P0123456789-012

検索

公開情報

製品情報

製品シリアル番号

バックシリアル番号

バック識別子DID

P2412170030-001

P2412170030

did:web:did-collector.bace-lab.com:P2412170030

再生品製造日

再生者

再生者識別子DID

2024/12/17

(株) 回収会社

did:web:did-collector.bace-lab.com

容量

3.5 Ah

需要家向け情報

バッテリーモデル情報

型式

車名

年式

DAA-HE12

日産 ノート

セルモジュール個数

構造

正極材

容量

80

[20,20,20,20]

NCM

5 Ah

バック内配置

1-1

カーボンフットプリント

輸送ガス量

在庫

リユース

リサイクル

廃棄

19.7 L

80 / 80

0 / 80

0 / 80

0 / 80

バック取外し

取外し日

解体事業者

解体事業者識別子DID

自動車解体社8

did:bace:43f49fed3b4c825580251c474cdc99d37d1f90622d76c1805

入庫

入庫日

格納場所

2024/12/17

Y001

バック分解

分解日

分解担当者

2024/12/17

山田 太郎

診断情報

SoH

診断日

診断方法

76.0 %

12/17/2024

交流インピーダンス法

診断者

診断者識別子DID

カワラ株式会社

did:bace:6af5f61f2176b5ea4cd75c9c54baf3b85b74971bb84ca25c6a

車両情報

車台番号

初度登録年月

オドメータ

SoC

セグ数(日産リーフ)

144027

68652

利用終了月

利用終了理由

故障/破壊/異常状態および保守の記録

2. 1. 3. 3 診断アプリケーション

昨年度から継続して、バッテリー性能取得作業の効率化のため、診断アプリケーションの改善を実施した。

表 22 今年度実施した改善点

改善点	内容
診断手法の拡大	診断手法の拡大ではより高速な診断手法を導入するために、

	・ ゴイク電池製診断器の導入 ・ ゴイク電池製診断器の制御技能の開発
測定の多チャンネル化	多くのバッテリーセルを一度に測定・診断できるよう測定の多チャンネル化を行う ・ 測定適正化治具の導入 ・ 多チャンネル化の器具（日置電機製スイッチ）の導入 ・ スwitchの制御機能の開発

表 23 利用機器

利用機器	目的
	計測治具 各種バッテリーの形状に対応可能な治具を専用に製造。電極接続部起因による診断結果影響が出ず、測定適正化が可能な設計を実施 ・ バッテリーセルのインピーダンスを測定するために、計測器とバッテリーセルの端子を接続する ・ 複数のバッテリーを同時に計測することを可能にする。 ・ 色々なサイズのバッテリーセルに対応
	スイッチ (SW1001、日置電機製) ・ 計測治具とインピーダンスメータの間に入り、計測対象を切替えることを可能にする
	インピーダンスメータ (BT4560、日置電機製) ・ BT4560 は周波数可変のインピーダンスメータで、 ・ 高精度電圧計、温度測定機能も備えたバッテリーの品質管理に最適な測定器ある ・ ノイズに強い回路構成で生産現場でも安定した測定が可能である

	ゴイク電池製診断器 ・ Battery Analyzing System は、リチウムイオン電池の SoH を診断するシステム ・ 特長として短時間で SoH の診断が行えるため、電池の分別の時間短縮につながる
---	---

計測診断アプリケーションは、上記機器ならびに上記機器を制御するプログラムおよびその測定データを用いて診断を行うクラウド上のサービスから構成される。

システム構成

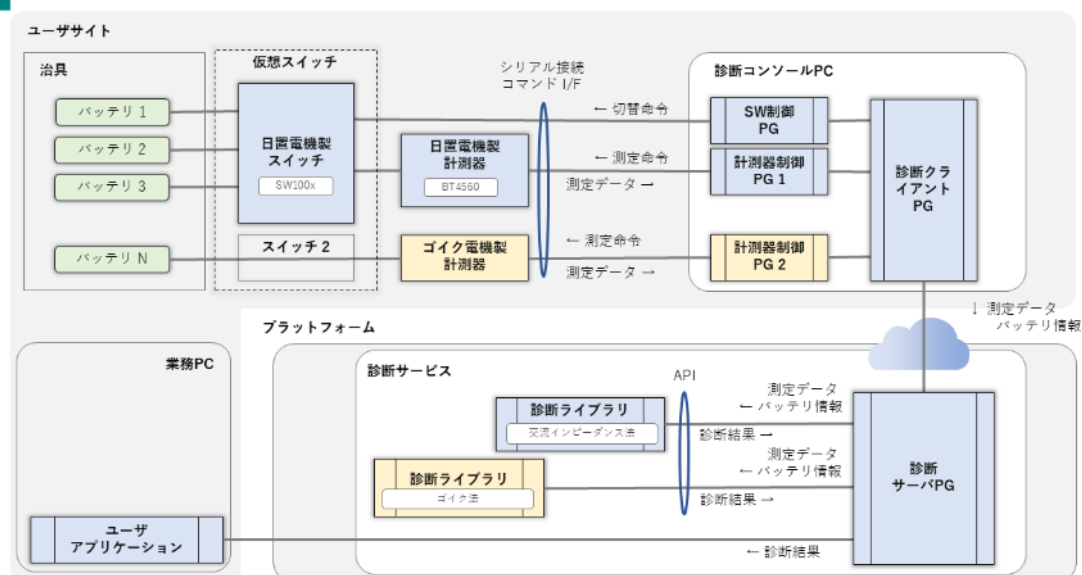


図 31 診断アプリケーション概略図

治具を用いた診断結果について、同一バッテリーセルを異なるチャンネル(赤／青)で計測した例を下記グラフに示すが、大きな乖離は発生していないことを示している。詳細な分析は今後継続的に行う予定。

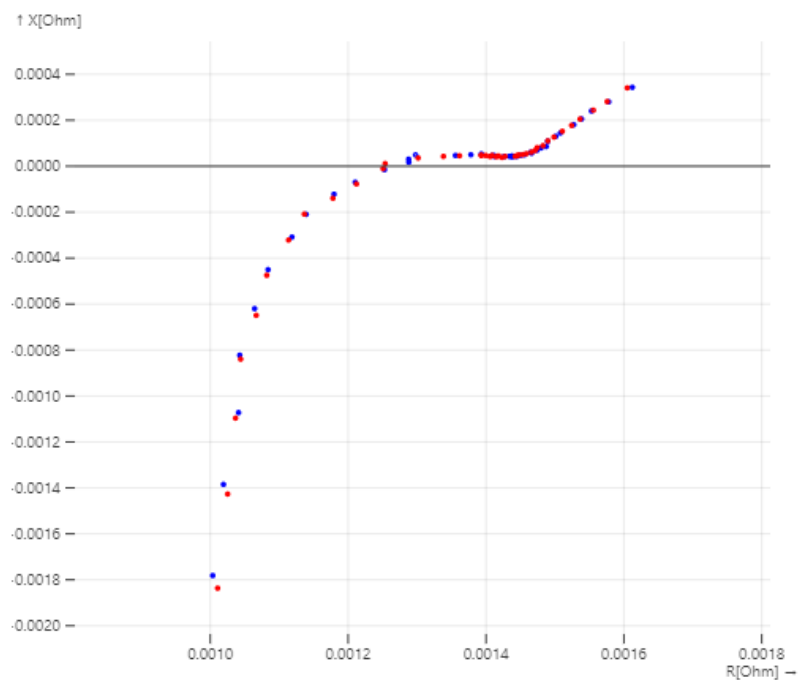


図 32 治具を用いて取得したインピーダンス測定グラフ

2.1.3.4 ユーザビリティの向上

今年度開発したシステムは、図 30 の作業の流れに沿って情報収集するシステムである。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。作業者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。

表 24 二次元コード採用プロセス

プロセス	アクション	
保管	(1) 入荷パック選択	(2) 格納場所選択
		

	* 作業者は入庫場所の二次元コードと格納するバッテリーの二次元コードをスキャンする事で入庫日時と保管場所を記録する。
分解	(1) 作業台選択 (2) 作業員選択   (3) 分解パック選択   (4) 目視検査結果選択・二次元コード印刷   * 分解時の作業日時・作業担当者・対象バッテリーに関する情報も二次元コードをスキャンする事で記録する。
診断	(1) 診断対象選択 (2) チャネル選択



(3) 診断開始



＊診断時は診断治具のチャネルと診断対象の二次元コードをスキャンして診断を実施する。診断操作はアプリケーションが測定機器を自動で操作して連続して診断と記録を行う。

2.1.4 CO₂分析・システム開発

2.1.4.1 概略

昨年度に引き続き、本事業に関連して把握すべき CO₂ 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、本事業の開発するシステムの中で自動計測が可能とすべく準備中である。

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 (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。

2.1.4.2 文献調査の結果

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。昨年度の報告書においてもいくつかの文献を紹介しているが、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。(事例であるが、Fan (2023)、Dunn (2023)、Wrålsen(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ことに変化はなかった。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。

昨年度調査結果に加えいくつかの文献を追加的に調査した結果から、全体としてリマンに関わる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 CO₂ 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-

2.1.4.3 本システム内での測定関連項目

前項で紹介した、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る項目は

- ・ 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）

になる。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、昨年度時点ではその CO₂ 排出原単位などのデータについては調査が行き届いていなかった。そこで、本年度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、CO₂ 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する、不可能である場合には少なくとも感度分析が必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を通して検討する。このモデルを流通モデルと呼び昨年度に引き続き開発を進めている。

2.1.4.4 昨年度の実証試験における測定の結果

確認のため、昨年度報告書にも掲載した、本事業で計測した工場内でのフォアグラウンドデータを再掲しておく。具体的には、1 次仕分けでは電力消費はほぼ発生しない。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。昨年度も示したとおりであるが、以下のようになる。

表 25 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 CO₂ 換算排出量（バッテリー出力 1kWh あたり）

	消費電力量[Wh]	CO ₂ 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-CO₂/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、CO₂ 排出量に換算する準備を整えている。

本年度では、より実操業に近いサイトでの実証試験が行われたことから、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、次のような仮定に基づく簡易的 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、一つひとつ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. Rauegi, 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].

2.1.4.5 流通モデルの構築

このモデルは本事業の全体感を描き、将来像を予測するためのモデルであるとともに、将来的にはリユースによる削減効果を算出するためのシステムとして機能することを意図している。

基本概念は昨年度報告書に譲るが、バッテリー並びにユーザーをエージェントとして描くマルチエージェントシステムとして Python のパッケージ Mesa を用いて実装を進めている。ただし、エージェント間での相互作用などはなく、学習も現時点ではしていない。

現時点で得られている試算結果としては、バッテリー寿命の予測値に関連する SoH の診断精度が上がることで、バッテリーの価値の不確実性が減少、国内での中古車利用やバッテリーリユースが増えることから、結果的に海外への中古車輸出などが減少することが描かれており、パラメータの精査を実施している。こうしたモデルの結果から、本事業によるリユースがあった場合と無かった場合において、どれだけの削減効果をもたらすかをシステム全体として算出することが可能になる。ただし非常に仮定の多い将来予測モデルであるために、そのまま削減効果算出結果として CFP 計算に用いることはできない。むしろ単純化された CFP 計算における削減効果算出の検証のために用いるものと考えている。

2.1.4.6 CFP 算出システムの開発

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 (CFP、Carbon Foot Print) 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 (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。

表 26 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 ₂ 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		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	電力の CO ₂ 原単位	
	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		

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、より具体的に言えば再生原料を利用した製造プロセスと再生原料を産み出した使用済製品処理工程の間に重複なく、かつ抜けもなく、そして合理的だと考えられる割り当てを決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 (Recycled Content Method) も CLAM (Closed Loop Approximation Method) 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、学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、2.2.3 にある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>.
- 市朗醍醐. 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>.

2.1.5 使用済みバッテリー回収・分解確認状況

2.1.5.1 回収実績

アクト社では使用済みバッテリーのリユース事業開発の一環として、継続して使用済みリチウムイオンバッテリーの回収を実施しており、本年度回収実績は以下のとおり。昨年度よりも取り扱い個数は増加していることに加えて、リユースバッテリー製造業者、バッテリー処分業者ともに有価取引を前提とした調整を実施中である。今後バッテリーの買い取りを積極的に進めていくことで、さらに取扱量が増加させてゆく予定。

表 27 今年度までの使用済み回収実績

バッテリー種類	2024 年回収個数	2023 年回収個数
BEV 駆動用	35	6
HEV 駆動用	13	10
HEV アシスト用	221	100

2.2 設備導入内容および稼働結果

2.2.1 概略

今年度は昨年より開発を進めていた可変式・連装式のバッテリーセル接続治具が完成し導入を実施した。本治具は本実証事業で開発した専用の診断アプリケーションを通じて制御され、高精度・高効率のバッテリー診断を実現する。また、本実証事業外ではあるがアクト兵庫工場敷地内にリチウムイオンバッテリー専用の保管倉庫および分解・診断のための工場が竣工した。本工場ではバッテリーの保管・分解作業を安全かつ効率的に行うために特別に設計されており、本事業での検討内容を反映する形で必要な設備の整備を進めている。工場内には WiFi 環境が整備され、リアルタイムでのデータ管理や作業指示の迅速な共有が可能となる。導入設備とそれらを用いた業務フローの実証の結果を解説する。

2.2.2 設備導入状況

- 可変式・連装式のバッテリーセル接続治具

昨年設計を行った専用のバッテリーセル接続治具の導入を実施した。治具は測定・診断気に接続され専用の診断アプリケーションと連動して自動測定・診断を実施する。



図 33 セル診断用治具（全体）



図 34 セル診断用治具（セル装着時）



図 35 診断システム全体

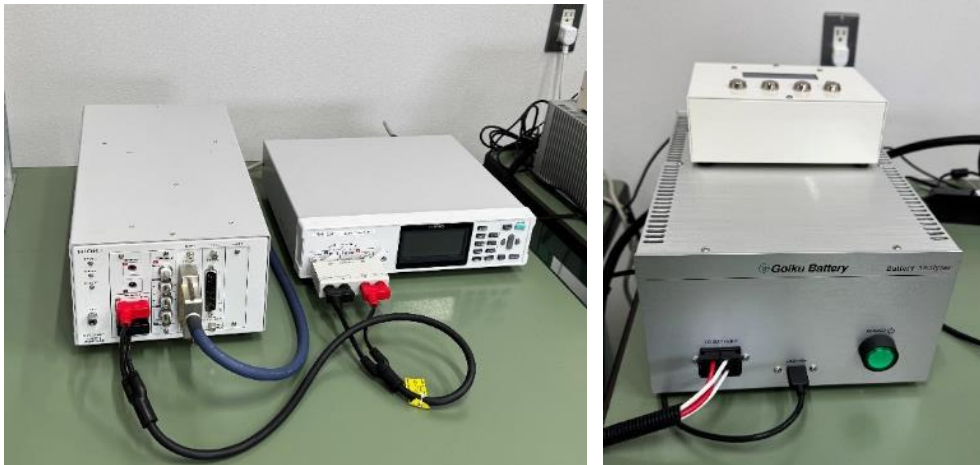


図 36 測定・診断器

- リチウムイオンバッテリー専用工場

工場は株式会社アクト兵庫工場敷地内にリチウムイオンバッテリー処理用に新たに建設された。工場内には WiFi 設備が導入されており作業を行いながら簡易に業務システムにアクセス可能としている。各区画には監視カメラを設置している。



図 37 工場外観

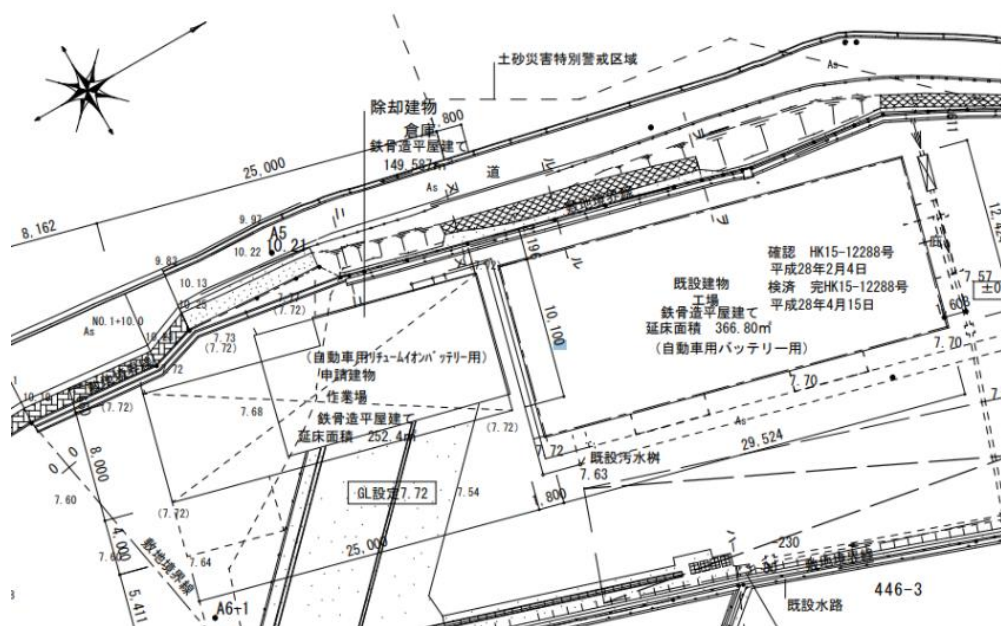


図 38 工場見取り図

● 保管設備

リチウムイオンバッテリー保管倉庫はフォークリフトでの搬出入を想定しており、重量物であるバッテリーパックを収納する棚と専用のケージ、パレットを用いて格納する。





図 39 保管倉庫とバッテリー格納用ケージ

- 分解設備（作業室写真、安全面への配慮）

分解のための作業室は保管倉庫と隣接しており搬送のためのクレーンを完備している。作業状況記録・確認のための監視カメラを装備している。また、分解スペースは複数名での作業ができるようスペースに余裕を持たせて、絶縁・耐感電対策を施した防護装備と工具で作業を行う。





図 40 分解作業場

2.2.3 実証結果概要

実際の使用済みバッテリーを準備したうえで開発した情報流通プラットフォーム、品質管理情報システム、診断アプリケーション、専用治具それぞれの稼働と改善項目の確認を目的に、業務フローに沿っての演練をおこなった。

本年度は解体業者の協力も得て、解体業者での情報入力、輸送トラックへの積載、アクト工場への移送も実演した。アクト工場へ移送した使用済みバッテリーは改善後の業務フローに沿って入庫・分解・診断までの各作業を業務アプリケーションの操作とともに実施し、大きな問題なく当初予定どおり計画した作業は完了した。以下に実証概要と実施状況を説明する。

表 28 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
検証対象バッテリー	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
主な検証項目	輸送～入庫～分解・診断までの業務フロー・利用機材の確認 - 各作業時間の確認 - 分解作業の確認 - 業務アプリとの連携確認 - 治具・診断機の動作確認 - 情報連携 PF との連携確認

	本年度追加された利用機材の消費電力測定
--	---

● 使用済みバッテリーの輸送風景

解体業者からのバッテリー輸送時は専用のケージにバッテリーを格納し輸送時にバッテリー同士が接触しないように固定のうえ、輸送を行う。解体時に報告された車両情報と輸送時のトラックと混載率、走行距離を輸送後にシステムに登録する。

表 29 検証結果概要（輸送時）

検証項目	結果概要
作業時間の確認	受付から搭載までは約 30 分程度で大きな問題なく積み込みを実施した
分解作業の確認	N/A
業務アプリとの連携確認	回収依頼票、回収時の引き当てまで業務アプリから印刷した帳票を利用し、作業を実施した
治具・診断機の動作確認	N/A
情報連携 PF との連携確認	回収依頼票、回収日時の連携を確認した
利用機材の消費電力測定	N/A





図 41 バッテリ積載風景

● 工場への入庫風景

入庫時には入庫日時と入庫位置の情報を、業務アプリを用いて記録を行う。HEV 用など小型のバッテリーパックはケージに格納したまま保管棚に格納する。保管効率を高めるためケージは積み重ねが可能になっている。

表 30 検証結果概要（入庫時）

検証項目	結果概要
作業時間の確認	1 バッテリあたり約 5 分程度で入庫と情報登録を実施
分解作業の確認	N/A
業務アプリとの連携確認	作業日時と対象バッテリー、保管場所の登録を業務アプリで実施した
治具・診断機の動作確認	N/A
情報連携 PF との連携確認	作業日時と対象バッテリー、保管場所情報の連携を確認した
利用機材の消費電力測定	N/A(フォークリフトは昨年度測定済み)



図 42 バッテリー入庫風景

● 分解作業風景

分解作業は作業員が感電対策を施した装備を装着して実施した。作業記録として作業時間・作業者なども二次元コードを用いて記録をする。分解したバッテリーはバッテリーとその他に分別を実施し、バッテリーには昨年同様に個体識別のための二次元バーコードを貼り付けている。

表 31 検証結果概要（分解時）

検証項目	結果概要
作業時間の確認	1 バッテリーあたり約 30～45 分程度要する事を確認した。 作業時間はバッテリーのサイズに依存する
分解作業の確認	セル、金属、樹脂、ハーネス、その他に分別を実施。防護装備、工具を用いて円滑に分解を実施できた。 昨年度と比較しても作業時間・手順共に改善している事を確認した
業務アプリとの連携確認	作業日時・作業者と対象バッテリーの状態の登録を業務アプリで実施した
治具・診断機の動作確認	N/A
情報連携 PF との連携確認	作業日時・作業者と対象バッテリーの状態の連携を確認した

利用機材の消費電力測定	業室全体にかかる照明や空調設備、今年度新たに利用した電動工具などの消費電力測定を実施した
-------------	--



図 43 バッテリー分解風景

● 診断風景

昨年度から設計を行ってきた専用のバッテリー接続治具を用いての診断を実施し、想定どおり作業の効率化が確認できた。診断用アプリも多チャンネル化に対応しており、作業工程は大幅に簡略化されたが、治具とバッテリーの電極の接触状態によっては診断不良が発生する現象が確認された。電極の接触面の状態は、バッテリー形状や分解作業方法に影響されているため、バッテリー種別に応じた手順を整備することで改善できると考える。

表 32 検証結果概要（診断時）

検証項目	結果概要
作業時間の確認	セルの治具への設定は約 1 分/セル程度だった 診断時間は手法により異なる ・ 交流インピーダンス法 ... 約 4 分/セル ・ ゴイク方式 ... 約 10 秒/セル 連装式の治具を用いてまとめて接続を行ったあとは自動で診断が実行されるため、作業者は別の作業を行う事ができ、効率的な作業が実現された

分解作業の確認	N/A
業務アプリとの連携確認	作業日時・作業者と診断結果の登録を業務アプリで実施
治具・診断機の動作確認	治具はセルの形状ごとに調整をする必要があるものの一度調整してしまえば、簡易に接続を実施できることが確認できた 診断機は治具の切替器との連動を含めて自動で稼働し、接続に異常がある場合もスキップをして動作が継続することを確認できた
情報連携 PF との連携確認	作業日時・作業者と診断結果の連携を確認
利用機材の消費電力測定	切替器・診断機・PC それぞれの使用時・待機時の消費電力の測定を実施した





図 44 バッテリー診断風景

2.3 実施結果を踏まえた考察

今年度は昨年度実装をおこなった情報流通プラットフォームと実証アプリをもとに、4章で述べる BACE 事業の使用済みバッテリー診断評価・品質保証サービスを展開するために必要な情報を各事業者から収集・管理、提供する機能を実現するため、調査・実装・検証を進めた。以下に実施結果のサマリと考察を述べる。

表 33 実施結果サマリと計画時目標との対比

実施内容	結果サマリ
①ユースケース分析	・ ヒアリング結果より、有価取引を前提として本事業に関心を持つ事業者は増加傾向であることが確認できた ・ リユース製品製造業者から情報管理と品質管理の具体的な要望事項について詳細を確認した ・ 処分業者にとってのバッテリー情報の必要性は十分認識できたが、他方利用できる情報は限定的と想定される ・ ヒアリング結果、導入設備から業務フローの改善を実施した ■ 計画時目標：実証参加アクタの増加、ユーザビリティ向上 ➢ 排出業者が解体後の使用済みバッテリーの回収依頼・立ち合いに参加 ➢ 業務フローの改善検討の結果、品質管理情報システム・診断アプリケーションのユーザビリティ改善を実施

②電池管理モデル	・ バッテリ寿命予測のための適切な管理モデルの必要性を保険事業者へのヒアリングで確認した ・ 複数の統計的な手法の比較の結果、それぞれ適材適所ではあるものの、ガウス過程を用いた手法が有力と考える ・ さまざまな手法を取り入れるために情報流通プラットフォームが有益であるが、ルールを取り決めるための“ガバナンスフレームワーク”が必要である ■計画時目標：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 ➤ 寿命予測のための統計的手法の比較検討を実施 ➤ 情報流通プラットフォームへの適用の検討を実施 ➤ ガバナンスフレームワークの検討を実施
③システム設計・開発	・ ヒアリングで抽出した品質管理要求に沿った管理システムの開発を実施した ・ 排出業者が簡易かつ適切に解体車両の情報を収集できるスマートフォンアプリを開発した ・ バッテリ診断を効率化する治具と診断アプリを開発した ・ 改善業務フローとリチウムイオンバッテリー処理専用工場に合わせたシステムのユーザビリティを改善した ・ ■計画時目標：①②に関連する実証システムの構築 ➤ 昨年度開発した業務アプリの改善実施 ➤ 品質管理情報システムの構築 ➤ 診断アプリケーションの汎用治具対応と改善の実施
④C02 分析	・ リユース関連文献の調査を行い、LFP 系バッテリーの報告などが進展していること、リユース後のバッテリー寿命が CFP 削減効果に大きく影響することがわかった ・ ヒアリングと現地見学より測定項目の洗い出しを実施 ・ リユース工程における CFP 算出に必要な項目の整理を実施し、システム連携方法を検討した ■計画時目標：電池の種類に応じた複数のリサイクルプロセスの C02 算定手法を実用可能とするシステムの開発 ➤ 最新のリユースに関する文献調査を実施 ➤ CFP 算出システムの開発に向けて必要なデータの精緻化と

	実証中に実際の消費電力の測定を実施
⑤設備導入	・ 汎用治具の開発と導入を行い、診断業務の効率改善を確認した ■計画時目標：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 ➤ 汎用治具を導入 ➤ 治具と連動しバッテリー診断結果を記録する診断アプリケーションを用いる事で診断業務の効率化を確認

実証の結果から、今年度の目標は達成されたと考える。特に分解・診断の工程においては専用治具の開発と改善版業務アプリを用いて高精度・高効率を達成した。情報流通プラットフォーム上には排出時の車両情報・バッテリーモデル・分解など作業履歴・輸送に関する情報が管理され、リユース時には各セルに貼り付けられた二次元コードを通して参照できる。

これらはバッテリーそのものの情報・状態と取り扱い品質を確認するために用いられるとともに、処分業者では適切な処分のために必要な情報として用いられる。BACE 事業における品質保証サービスにおいてはその根拠となる情報を管理する機能を提供する。

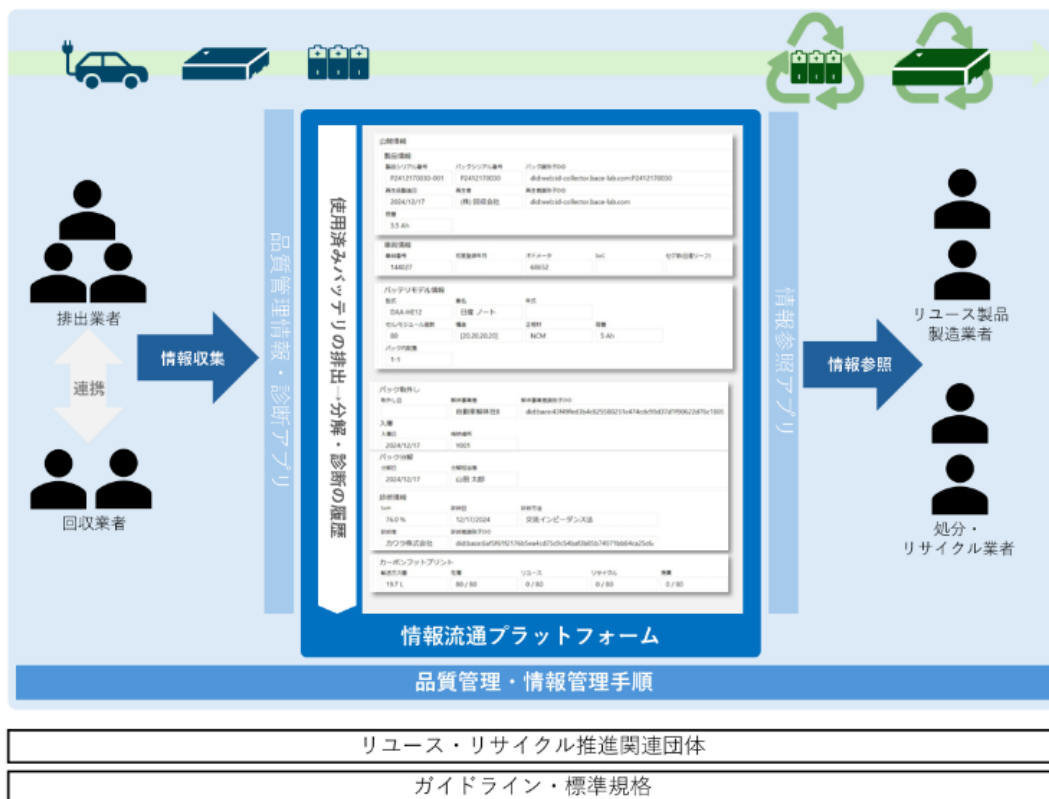


図 45 情報流通プラットフォーム利用の全体イメージ

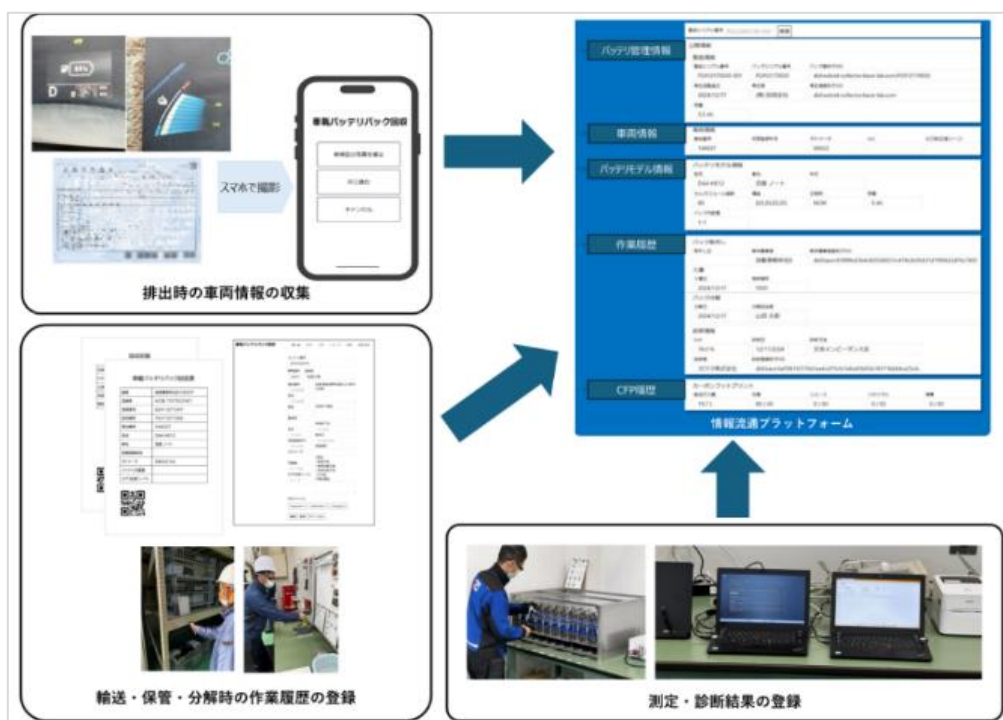


図 38 情報流通プラットフォームへの情報の収集・登録イメージ

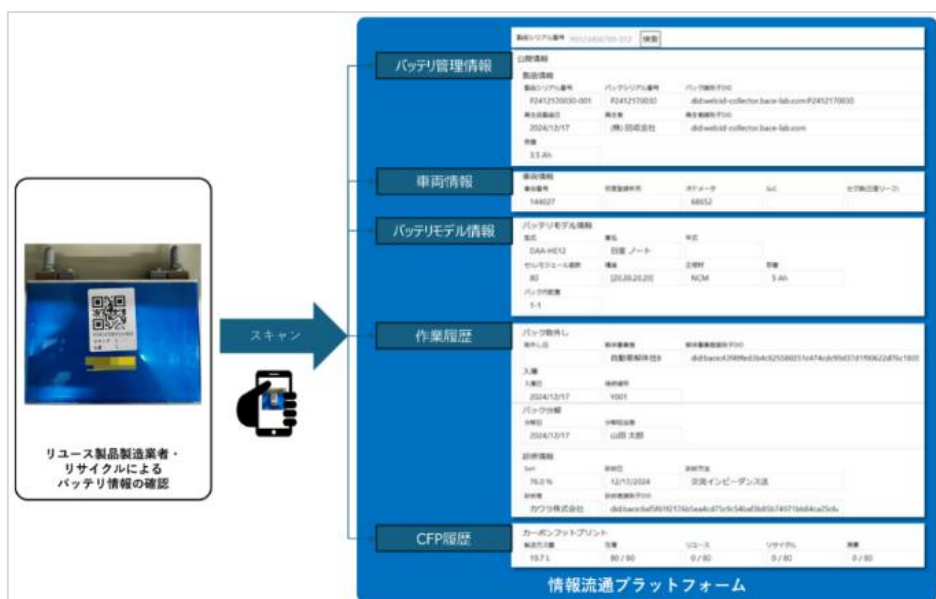


図 38 情報流通プラットフォームからの情報参照イメージ

現状では、ヒアリング結果と想定される情報のみを記録しているが、必要に応じて情報の種類を追加することは容易である。今後バッテリーの取り扱いや情報取得・入力の手順を整備し、使用済みバッテリーの品質水準維持・平準化を目指す。これらは有価取引時の品質の透明性を高め、市場形成を促進し、結果として、リユース・処分業者の参入を容易にすることで市場拡大に貢献する。

3. 今後の実証事業実施における課題および解決方法など

3.1 現状の課題

本年度の事業を通して判明した課題を以下にあげる。

表 34 課題一覧

#	課題	概要
1	情報流通プラットフォームの利用の拡大・存続	情報流通プラットフォームが有効に機能するためには、利用拡大が不可欠である。限られた事業者間で実証した結果を多くの利用者が活用できるべく情報収集と対応が必要と考える。また、各事業者の利便性・効率性は継続して向上しなければならない また、効率的なリユース・リサイクルには車載状態での故障履歴や欧州のバッテリーパスポートにみられるようなバッテリーに関する情報、分解時手順などの情報の活用が考えられる。これらの情報は自動車メーカーの協力のもと入手できると考える ・排出業者との連携強化 ・異なる想定事業領域のリユース製品製造業者との連携強化 ・リサイクル・処分事業者とのバッテリー取扱の精緻化 ・関係する国内外の関連組織・活動との連携の具体化 ・自動車メーカーとの情報連携方法の検討

2	品質管理・情報種類に関する要求の共通化	使用済みバッテリーの取り扱いに対する品質要求、情報の種類は各事業者で統一されていない。参加者が増加するにしたがい要求事項は増加すると考えられ、個別の対応では作業管理の負荷が高まり効率性を損なうことになる。また事業者ごとに品質管理手順が異なる場合、リユースバッテリー製造業者からみた価格の合理性の判断が困難になり、結果として市場が断片化・偏在化してしまう恐れがある ・ 品質管理・情報種別の事業者共通部分の抽出と共通化 ・ 異なる品質管理要求への効率的な対応 ・ 異なる情報種別への効率的な対応
3	分解・診断技術の実務への適用	今年度竣工した工場と新規開発の治具を用いて分解・診断実務への適応は大幅に進捗したが、実務上の課題として以下をあげる ・ 作業量増加に備えて作業の平準化と品質確保 ・ 分解後のバッテリー電極と測定治具の端子の接触状況によって診断結果の品質に影響する
4	標準規格の調査・整理	近年、とくに本年度にバッテリーのリユースに関する国内外の標準規格が発行された。本事業が関連する部分についての対応の検討が必要である 主な使用済みバッテリーリユースに関する規格 ➤ IEC 63338:2024(2024 年 8 月発行) General guidance on reuse and repurposing of secondary cells and batteries ➤ IEC 63330-1:2024(2024 年 6 月発行) Repurposing of secondary batteries - Part 1: General requirements ➤ JIS Q 9092:2022(2022 年発行) 品質マネジメントシステム—電池リユース—要求事項

		・国内外のリユース関連標準規格への対応
5	リユース用途の開発	使用済みバッテリーのリユース製品と新品バッテリー製品の価格差は必ずしも大きいとは限らず、普及のための大きな課題となっている。 他にリユース製品の普及拡大をするためには、保証・保険の考え方を整理・拡充することが求められる。 使用済みバッテリー、特に小型のバッテリーは容量も小さく有効な用途が限られている。反面、HEV などから排出される小容量の使用済みバッテリーは今後増加が予想され、取引価格も相対的に低くなることが予想されるため、安価なリユース製品の製造には適している ・リユース製品に対する保証・保険の普及 ・小型使用済みバッテリーのリユース用途の開発

3.2 課題の解決方法

表 35 課題の解決方法

#	課題	解決方法
1	情報流通プラットフォームの利用の拡大・存続	・有価取引を前提として排出業者への更なるヒアリングを行う ・小型のリユース製品の製造などを検討するリユース製品製造業者との連携強化を図る ・リサイクル・処分業者とは後工程の内容も含め必要な情報やバッテリーの取り扱いを中心にヒアリングを行い、ユースケースの精緻化を図る ・バッテリーの資源循環を目指す関係団体との連携を図り、より広範な事業者からの要求を収集・整理する ・ウラノスエコシステム、MOBI 参画組織、自動車メーカーへのヒアリングと情報交換を実施し、具体的な連携・活用シーンの検討を進める

		・排出業者・回収業者・リユース製品製造業者での情報収集・登録・参照シーンでのユーザエクスペリエンス(UX)を向上させる
2	品質管理・情報種類に関する要求の共通化	・複数のリユース製品製造業者からの要求事項を収集・分析を行い、共通化部分と個別部分の整理を行う ・品質管理・情報収集・参照の手順をマニュアル化・可視化を行う ・使用済みバッテリー種別識別のためのマスタ化の検討を行う ・共通化部分を中心に、ソフトウェアの改修・改善を実施する
	分解・診断技術の実務への適用	・品質管理・情報収集・参照の手順をマニュアル化・可視化を行う ・接続治具を用いた測定精度のさらなる検証を行い精度向上の対応策を検討する
4	標準規格の調査・整理	・関連規格の収集と規格内容の分析を実施し、本プラットフォームに必要な項目と対応方法を検討する ・2の品質管理と並行して、必要な項目を品質管理手順・ソフトウェアに反映する
5	リユース用途の開発	・リユース製品製造業者と共同で小型バッテリーを用いた用途の検討を進める

3.3 次年度以降の助成事業展開

3.3.1 想定する事業の内容

本件の事業で検討・開発を進めた成果は、EV のバッテリーをサーキュラーエコノミーの視点で最大限有効利用するための BACE で掲げる CO2 管理まで可能な情報管理・サービスプラットフォーム事業に活用していくことを目指す。最終年度となる次年度は 2024 年度までの成果を活用し、リユースを前提とした使用済みバッテリーの有価取引を開始し、取引に参加する各事業者が効率的に情報を活用できるよう利便性を高め、情報交換プラットフォームの実用化を推進する。また本サービスプラットフォームの普及拡大のために品質管理のためのプロセスと電池管理モデルの開発を進める。そのために、以下の項目を実施する。

なお、当初はスマートグラスなどを用いた拡張現実の採用を前提としたユーザエクスペリエンスの改善を想定していた。しかし、今年度までのユースケース分析の結果、事業者の

環境は多岐に渡ること、スマートグラスなどの技術的な進歩が限定的であることから、特定技術によらずユーザエクスペリエンスの改善の検討と開発を進めることとした。

表 36 3 年目実施内容詳細

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	次年度実施内容の詳細 ■ 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： ・ 情報流通プラットフォーム・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 当初提示内容 ■ 内容：アプリのユーザエクスペリエンスを拡張現実 (AR, Augmented Reality) で改良する ■ 目標：フリートなどの映像でクルマの電池情報が見られる 変更点・変更理由 UX の改善内容は AR など特定技術分野によらず、各事業者の業務シーンに沿ったニーズの分析を進める	25 年 4 月～8 月
2. 標準規格の調査	次年度実施内容の詳細 ■ 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： ・ 本プラットフォームに必要となる要件の抽出をおこなう	25 年 5 月～6 月

3. UX 改善の検討	次年度実施内容の詳細 ■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 当初提示内容 ■内容：現場の映像とバッテリー価値情報の表示方法を検討する ■目標：バッテリー価値の視認性と使い易さを向上させる 変更点・変更理由 視認性については特定技術によらず、利用環境・ニーズに応じた UX の検討を行うため	25 年 6 月～7 月
4. システム構造設計	次年度実施内容の詳細 ■内容： - UX 改善の検討結果に基づいたシステム設計を実施する - 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： - 検討結果に基づいたシステム構造の設計がなされる 当初提示内容 ■内容：AR 技術を導入する ■目標：現実・仮想の重ね合わせにより UX を改良する 変更点・変更理由 視認性については特定技術によらず、利用環境・ニーズに応じた UX の検討を行うため	25 年 4 月～7 月
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	次年度実施内容の詳細 ■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・課題の抽出を行う ■目標： ・ モデル事業での情報流通プラットフォーム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 当初提示内容 ■内容：エンドユーザ参加の実験とインタビュー ■目標：電池情報の見える化によるビジネスインパクトを確認 変更点・変更理由 小規模な実運用環境化での評価をすることで、事業化に向けてより具体的な課題を抽出するため	25 年 12 月～ 26 年 1 月
7. 事業化計画・評価	次年度実施内容の詳細 ■内容： ・ BACE における本プラットフォームの事業化の計画の検討をおこなう ・ BACE における本プラットフォームの事業性の評価を実施する ・ ■目標： ・ BACE における本プラットフォーム事業の展開計画が可視化されている ・ BACE における本プラットフォームの事業性と課題・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

3.3.2 設備導入内容

今年度設備導入の予定はない

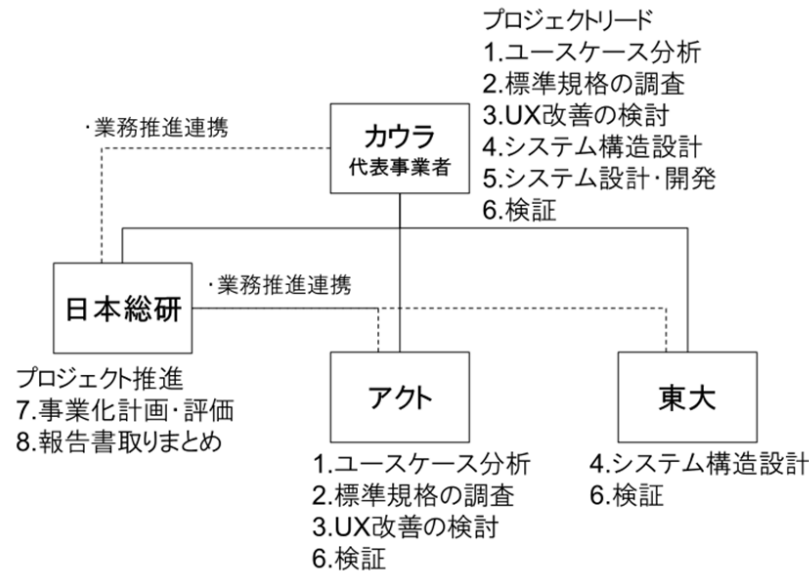
3.3.3 事業の実施体制

事業の実施体制は、2024 年度と同様に下記の体制で実施する。実施内容に対する役割を体制図に付記する。

表 37 事業者と担当

事業者名	区分	担当	その他
カウラ(株)	代表事業者	1, 2, 3, 4, 5, 6	プロジェクトリード
(株)アクト	共同事業者	1, 2	
東京大学	共同事業者	4, 6	
(株)日本総合研究所	共同事業者	7, 8	事業検討、プロジェクト推進

図 実施体制



3.3.4 事業スケジュール

上記の項目を実施するにあたって、次年度は下記のような計画で進めて行くことを想定する。

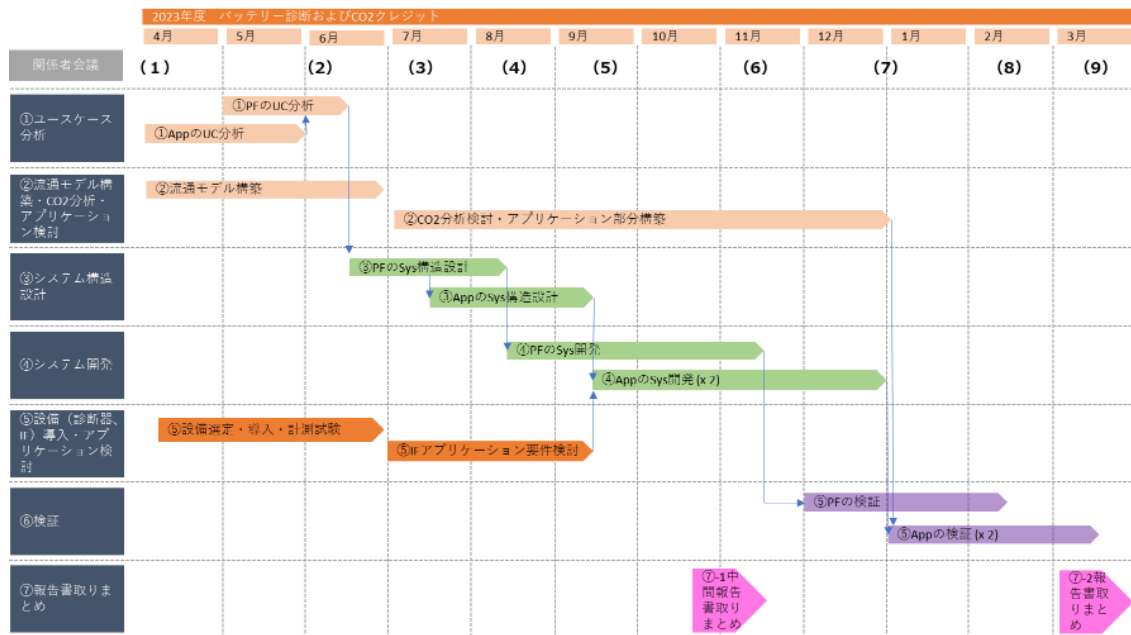


図 2023 年度活動スケジュール実績

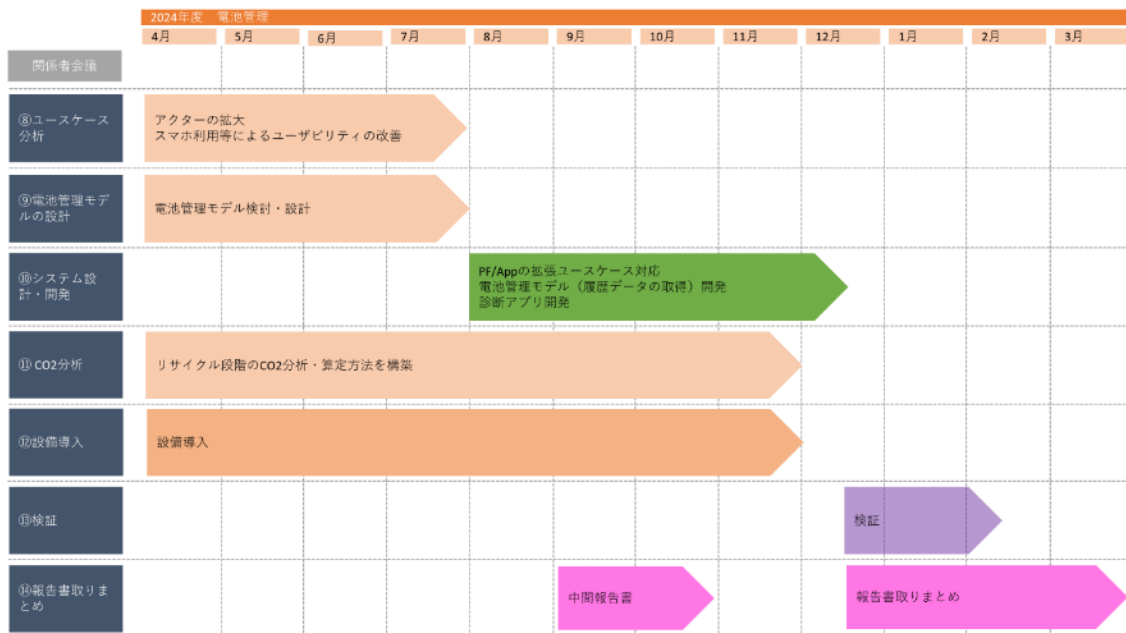


図 2024 年度活動スケジュール実績

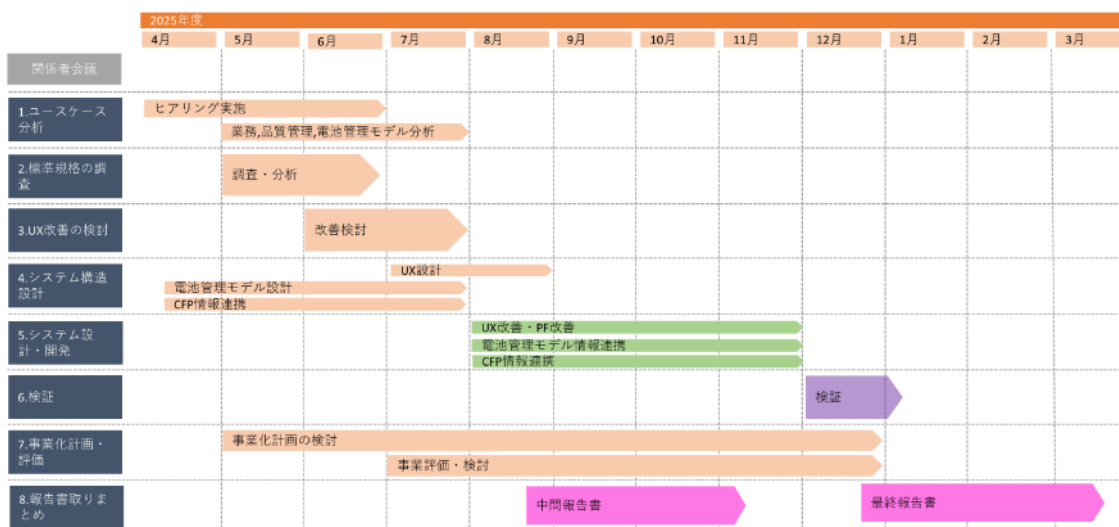


図 2025 年度活動計画スケジュール計画

3.3.5 資金計画

上記の項目を実施するにあたって、次年度は下記の資金計画で進める。

表 38 2025 年度資金計画

内 訳	2025 年度(円)
1) 人件費	23,376,000
2) 事業費	37,338,045
3) 一般管理費	2,451,600
4) 設備費	0
5) 工事費	0
合計	63,165,645

4. 事業化の計画

本件の事業で開発した技術・システムは、当初の予定どおり、BACE を母体とした事業化を行うことを想定する。

BACE は、現在、海外流出が課題になっている中古 EV や、バッテリーが集まらないことや発火などの不安が課題になっている他用途利用のリユースバッテリー、さらには、バッテリー確保の見通しが得られないことが課題になるリサイクルの改善を行い、EV バッテリーの循環市場形成の一助となるようなサービス提供を行う事業の立上げを目指している。本件の事業で開発する信頼性を確保する情報プラットフォームは、本事業の情報流通に活用することを想定する。BACE の事業の全体構造は下図のようになる。

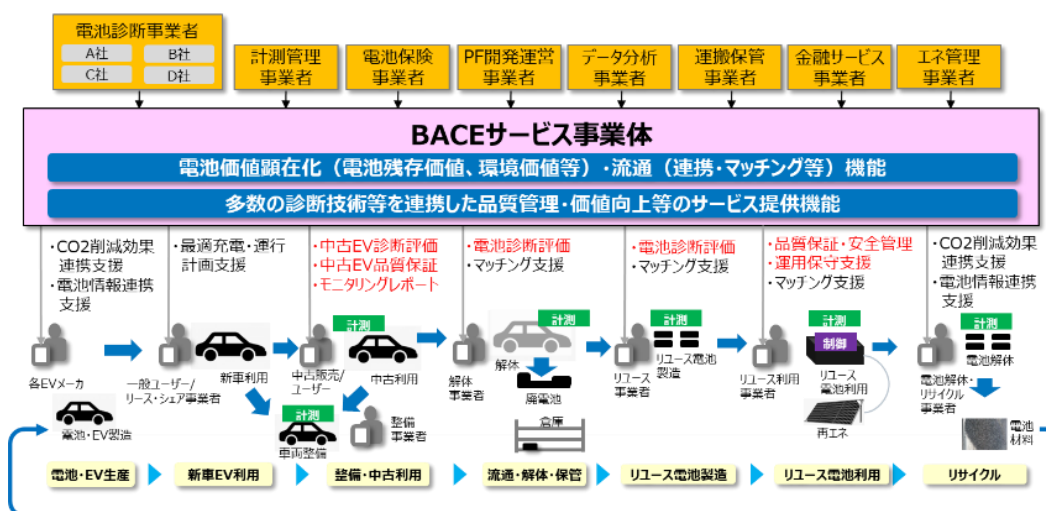


図 46 BACE 事業の全体構造図

具体的には、中古 EV のバッテリーや他用途利用のリユースバッテリーの診断評価、品質保証などのサービスを行うことで、中古 EV の信頼性を向上して中古価格を底上げし、海外バイヤーに負けない競争力を確保し、取り外したバッテリーの信頼できる情報を流通することでリユースバッテリー利用を促進し、他用途利用のリユースバッテリーの利用段階の信頼性向上と各種リスクを低減することでリユース事業者の事業拡大を促進することを想定する。これにより、EV バッテリーの業界関係者を支援して、EV バッテリーの各種流通網の情報へのアクセスを可能とするとともに、国内での再生資源確保と廃棄コスト負担の最小化に貢献する。

今後の事業化の計画として、以下を想定する。

市場の状況から、初期段階では国内に残留する EV バッテリーが少なく一定期間は採算が確保できるロットが確保できないことから、初期サービスとしては、中古 EV 向けサービスを優先して市場投入する。

中古 EV 向けサービスには、以下を想定する。

- ① EV 向け電池診断評価サービス
- ② 中古 EV 品質保証サービス
- ③ モニタリングレポートサービス

①EV 向け電池診断評価サービスは、中古 EV 車両の売買時に診断機を用いて効率的なバッテリー診断評価を行い、診断証明書を発行するサービスである。診断単体では、ニーズは小さいが、一定の市場があることから、25 年度には一部試験的にサービスを開始することを想定する。

②中古 EV 品質保証サービスは、中古 EV 導入の不安を払拭するために、複数診断技術によって診断評価を行い、車両とバッテリーの適切な品質を保証するサービスである。品質保証へのニーズは一定程度あることから、25 年度には一部試験的にサービスを開始す

ることを想定する。

③モニタリングレポートサービスは、EV 車両の運行・充電状況などをモニタリング・分析して、レポートを提供するサービスである。①、②とセットでの提供を想定する。

BACEサービス		想定対象	サービス概要	事業化見通し	開始時期
EV向け	①EV向け電池診断評価	・中古販売、オークション、ディーラ、車両リース、解体等	・中古EV車両の売買時に診断機を用いて効率的な電池診断評価を行い、診断証明書を発行	・診断単体では、ニーズは小さいが、一定市場がある。	一部2025年、本格開始は2026年～
	②中古EV品質保証	・社用車利用企業 ・シェアリング、レンタカー等企業	・中古EV導入の不安を払拭するために、複数診断技術によって診断評価を行い、車両と電池の適切な品質を保証	・品質保証へのニーズは一定程度ある。	
	③モニタリングレポート	・車両リース企業 ・中古販売企業 等	・EV車両の運行・充電状況などをモニタリング・分析して、レポートを提供	・①、②とセットでの提供を想定	
リユース向け	④電池診断評価	・リユース電池物流管理・製造等企業、解体 等	・使用済み電池の診断評価を行い、証明書付き電池として在庫と供給を支援。各種リパック事業者向けの品質評価済み電池の提供・品質レベルを照合支援	・国内で電池流通量が少ないため、少量需要向けに小規模対応を一部に開始	2027年～
	⑤品質保証・安全管理	・災害対策、省エネを期待する自治体、企業、また、電力、通信、データセンター等の電池利用企業	・リユースESS等の運用時のモニタリングを行い、品質管理と安全評価を実施し、品質保証、安全管理を提供	・コスト低減し、国内で一部量産化が想定されるタイミングに事業開始予定	
	⑥運用保守支援		・電池の利用傾向の分析に基づいて、品質を向上する運用計画を支援	・省エネ含めた運用サービスはESS向け。コストが合い始めるタイミングに開始予定	

図 47 BACE の事業化計画

リユースバッテリー向けサービスには、以下を想定する。

- ④ 電池診断評価サービス
- ⑤ 品質保証・安全管理サービス
- ⑥ 運用保守支援サービス

④電池診断評価サービスは、使用済みバッテリーの診断評価を行い、証明書付きバッテリーとして在庫と供給を支援。各種リパック事業者向けの品質評価済みバッテリーの提供・品質レベルを照合支援するサービスである。国内でバッテリー流通量が少ないため、25 年度には少量需要向けに一部試験的にサービスを開始することを想定する。

⑤品質保証・安全管理サービスは、リユース ESS (Energy Storage System、電力貯蔵システム) などの運用時のモニタリングを行い、品質管理と安全評価を実施し、品質保証、安全管理を提供するサービスである。コスト低減し、国内で一部量産化が想定されるタイミングに事業開始することを想定する。

⑥運用保守支援サービスは、バッテリーの利用傾向の分析に基づいて、品質を向上する運用計画を支援するサービスである。省エネ含めた運用サービスは ESS 向けを想定し、コストが合い始めるタイミングに開始予定を想定する。

上記のように本事業では、基本的に診断評価、品質保証、安全管理、モニタリングレポート提供などのサービスを行い、EV やバッテリーの海外への流出を抑制し、管理できる国内流通を高めるような流通支援機能を提供する。これにより、データ流通量が拡大した際には、

下図のように、BACE はサービス提供の際に信頼性が高いブロックチェーンを介したプラットフォームにより、各種データへのアクセスを行うことで、バリューチェーンの各種事業者と連携することが可能になる。その結果、図に示すように、さまざまなポイントでの海外流出の際に国内の関係事業者とマッチングなどの機会を構築することで、国内での活用を促進することに貢献する。

また、本プラットフォームでは、事業での連携先には、守秘義務の範囲で情報連携することも想定するため、有効な情報の流通に貢献する。

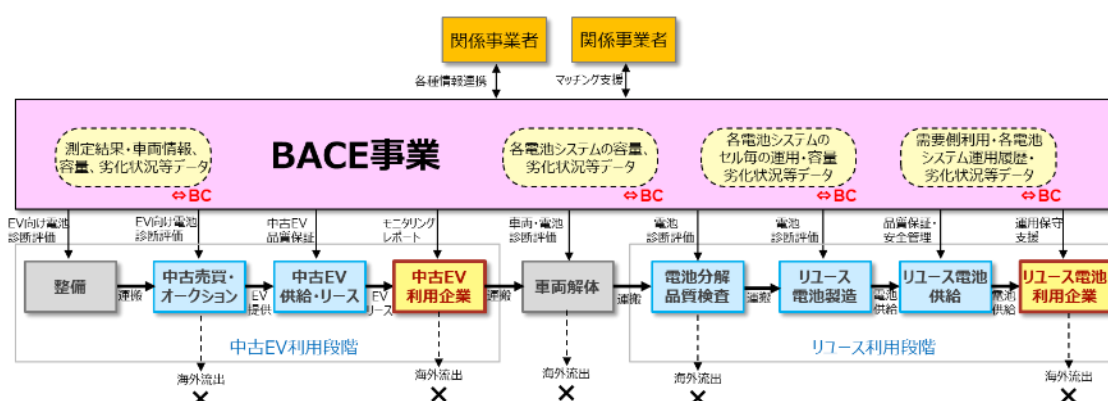


図 48 BACE のサービスに伴う情報流通の位置づけ

5. 事業の評価

5.1 採算性の評価

本事業は、以下のコスト低減策などにより事業性確保を進め、3年後に助成なしでの事業継続を目指す。

診断評価は、一般に計測器側で行うことが多いが、IoT化すれば一つの計測器に対してクラウド側で複数の診断アルゴリズムを動作させることが可能になる。これにより機器コスト低減を行う。また、AIを用いて学習した診断をクラウド側で実施すれば、大規模データを用いた学習が可能になる。これによりバッテリーの進化に合わせて診断技術を順次拡大でき、技術の陳腐化、海外競合との差別性低下を防げる。

また、解体事業者（もしくは整備工場）が車両取得したとき、リユース事業者がバッテリー取得したときに計測した残存容量などのデータはプラットフォーム上で流通する。ここでは、Web3の技術を活用することで、リユース時などに必要となる情報流通の連携を効率化することで運営コストを低下するだけでなく、機能追加を行う際のアプリケーション開発コストを大幅に低減する基盤を構築する。

これらにより、設備・システム運営のコストを最小化し、事業性を高める。また、リユースバッテリーの製造から収益性の高いリユース利用などに展開して多重の収益構造を確保する。一方、利用者の拡大に伴うネットワーク効果によって各種サービスの情報取得コストを

低減させ、プラットフォーム利用者の事業性を向上する。情報セキュリティの観点では、国際的な Trust over IP に準拠した秘密鍵と分散 ID で管理を行う Web3 の仕組みを導入することで、多数の事業者の信頼を確保できるシステムを構築する。

また、本検討の活動の母体となる BACE では、本提案事業者の他に、商社、保険、エネルギー、非鉄金属、各種診断技術などの事業者が参加し、中国ではリユースバッテリー製造時のバッテリーの高効率仕分けの事業化、国内では中古 EV の電池品質保証サービスの事業化に向けた実証を進めてきた。本事業では、こうした個別活動を連携し、国内で IoT ソリューションを統合化する事業立上げを目指す。

事業の実現性・継続性のポイント		実施ポイント
1.コスト低減	接続治具・計測器・診断アルゴリズムを横断的に統合し IoT化する事、各機能を物理層・クラウド層に適切に配置することで、各層でのコスト低減と将来の技術進歩への柔軟な対応を実現します。	- 電池バリューチェーンの標準的な作業プロセスを構築 - ソフトウェア・ハードウェアの分離 - 非中央集権的管理による運営コストの効率化
2.多重の収益構造の確保	事業コストの低減によりリユース電池製造の収益構造を確保します。情報管理基盤を利用するバリューチェーン全体での電池価値の顕在化によりさらなる収益モデルを確立します。	- リユース事業に関連する作業支援システムの構築 - CO2削減効果を管理するための情報管理基盤の構築 - 関連事業者間の連携を効率化する情報管理基盤の構築
3.多数の事業者の参加	効率的な情報管理基盤を構築することで関連事業者が低コストで参入可能とし、情報流通を活性化します。	- Web 3 技術を用いた低コストかつ信頼性の高い情報セキュリティの確保 - 将来の拡張性を考慮した情報管理基盤の構築 - 参加者が容易に利用できる連携方式の構築

BACEコンソーシアムでの検討結果・知見の活用 - 電池バリューチェーン関連事業者との知見の共有 - 電池診断・Web3など基礎技術の研究と実証実験の実施 - 中国など市場化が先行する地域での事業化の推進

図 49 事業採算性のポイント

表 39 各ポイントに対する本年度までの実施状況

ポイント	本年度の実施状況
1. コスト低減	- ヒアリングを通して、バリューチェーン参加業者間の想定される役割分担と作業プロセスを作成し、標準化の入り口として回収業者向けに汎用性持たせたアプリケーションを構築して情報流通プラットフォームと連携する仕組みを構築 - 計測機器とクラウド側で診断を行うシステムを構築 - 多拠点、多種類業務に対応可能な非中央集権的な管理を行うプラットフォームのコアシステムを開発 - これらにより、実施ポイント3項目とも推進し、回収業者向け以外にも接続可能なシステムとし、次年度には他の事業者へ接続可能な標準化された簡易ツールを構築し、運用による効率改善の効果検証を行う段階となった。
2. 多重の収益構造の確保	回収業者の業務フローに即した検証アプリを開発

	・回収業務を中心として、実際の CFP の計測、シミュレーションの実施 ・バッテリー排出業者へのプラットフォームを活用した診断の導入の可能性を確認し、2 点目の収益ポイント候補を確保 ・これらにより、実施ポイント 3 項目とも推進し、次年度は収益ポイントとなる複数事業者連携による運用効率改善の効果検証を行う段階となった。
3. 多数の事業者の参加	・ Web3 を用いた低廉かつ信頼性の高いプラットフォームシステムを開発。 ・ 基盤となる情報連携プラットフォームの活用対象として、回収業者のみならず、バッテリー排出業者、リユースバッテリー製造業者へのヒアリングによってニーズがあることは確認できた。こうした事業者への拡張を想定し、情報連携可能なシステムを構築 ・ これらにより、実施ポイント 3 項目とも推進し、次年度は複数事業者向けの連携しやすさの検証を行う段階となった。

本年度までの活動で得られた成果は、当初設定した前提のもとで検証を行い目標の達成度合いを確認した。次年度以降はユースケースなど対象範囲をさらに拡張しつつ事業化への蓋然性を高めていく。

複数年度事業における 2 年目であるため、進捗を踏まえ 3 年目に採算性の精緻化を行う予定。

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。

● 効果測定の手法：

1. **バッテリー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。
- 目標値：
1. バッテリー性能取得作業の効率化 …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
 2. CFP 算定の効率化 … CFP 算定と証憑整理・集計作業の 90%低減
 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、連携システム開発工数 70%削減

複数年度事業における 2 年目であるため、進捗を踏まえ 3 年目に有効性評価の精緻化を行う予定。

用語集

用語	説明
API	Application Programming Interface。ソフトウェアやプログラム、Web サービスの間をつなぐインタフェースのこと。ソフトウェアやプログラム、Web サービスの機能を公開・利用させるために API を定義公開する。
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 CO2 量に換算して表示すること。
C レート	バッテリーの充電・放電の速度。1C は対象バッテリーを 1 時間で充電もしくは放電する電流の大きさを指す。
DID	Decentralized Identifier。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。非中央集権的識別子。
DIDComm	DID 間のセキュアで非中央集権型のメッセージング方式。DID Document のサービスエンドポイント、公開鍵を利用してメッセージの送り主の真正性、メッセージ内容のインテグリティ（改ざんされていないこと）が保証される。DID 間にピアツーピアの永続的なプライベートチャンネルを張ることができる。特定のトランスポート層に依存せず、HTTP 1.x/2.0、WebSocket、AMQP、SMTP などのうえで利用可能。
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できる。W3C DID 標準の中で定められている。
ecoinvent データベース	Ecoinvent データベースは、スイスに本拠を置く Ecoinvent Association（エコインベント協会）が提供するライフサイクルインベントリ（LCI: Life Cycle Inventory）データベースのこと。環境負荷評価（LCA: Life Cycle Assessment）を行う際に使用される世界的に有名なデータベースの一つであり、製品やプロセスのライフサイクル全体にわたる環境影響データを提供する。
ESS	Energy Storage System。電力貯蔵システムのこと。本文書では特にバッテリーを用いた電力貯蔵システムのことを指す。
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。

IDEA	一般社団法人日本 LCA 推進機構が提供する温室効果ガス排出量の把握のためのインベントリデータベースのこと。
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。
SoH	State of Health。バッテリーの健全度をあらわす指標。一般的には、新品時の満充電容量を 100%としたときの現時点での満充電量の割合を表す。
VC	Verifiable Credential。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。W3C 標準で定められた、DID に関する公開情報をまとめた DID Document を登録する登録簿。DID Document には DID に関する公開鍵やサービスエンドポイントなどが含まれ、リゾルバ（ソフトウェア）に DID をインプットすると VDR から DID Document が得られ、DID のオーナーによる電子署名の検証が可能になる。VDR をブロックチェーンや分散台帳などで実装することで DID Document のインテグリティが保証される。
W3C	World Wide Web Consortium。Web などに関する仕様を定める国際標準化団体のこと。
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。
中央オーソリティ	本報告書では、独占的に識別子を管理する組織を指す。他の組織と識別子を共有せず情報を管理する中央集権的な組織・体制のこと。
トラスト	本報告書では、デジタル上で情報連携する場合に連携者・連携内容が真正であると信用できる関係のことを表す。中央集権的な枠組みでは中央オーソリティを信用することで、各参加者を信用することができるが、非中央集権的な枠組みでは信用を中央オーソリティに頼らずに信用を確立する必要がある。
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。
リマン工程	リユースのなかでも使用済み製品を再生する工程のこと。

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。
------	--