

シナリオ分析を用いた車載用電池循環ビジネス設計支援

Supporting the Design of Traction Battery Circular Business Using Scenario Analysis

○孫榕 (東京大学) *1 木下裕介 (東京大学) *2 梅田靖 (東京大学) *3

*1 Rong Sun, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 1138656, sunrong235@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

*2 Yusuke Kishita, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 1138656, kishita@pe.t.u-tokyo.ac.jp

*3 Yasushi Umeda, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 1138656, umeda@race.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード: サーキュラーエコノミー, シナリオ分析, ビジネス設計, リチウムイオン電池, 電気自動車

1. 緒言

世界的にガソリン車・ディーゼル車から電気自動車(EV)への転換が進む中で、電気自動車のエネルギー源である車載用電池の生産も急増し、それにとまなう環境負荷も増加することが予想される⁽¹⁾⁽²⁾。欧州を中心にさかんに議論されているサーキュラーエコノミー(CE)の文脈では、車載用電池を回収し再利用することで、電池製造に伴う資源消費の削減と経済性の両立が有望視されている⁽³⁾。CEの実現に向けて電池を循環させることによって価値創出を目指すビジネスを、本研究では車載用電池循環ビジネスと定義する。

車載用電池の回収量は現時点では少なく、車載用電池循環ビジネスはまだ初期段階にある⁽⁴⁾。その一方で、世界では電気自動車の総販売台数が2030年までに4000万台をこえると推計されている⁽⁵⁾。電池自動車の販売数の増加はより多くの中古電池の発生に繋がり、車載用電池循環ビジネスにおける需要と供給のバランスに変化をもたらす可能性がある。さらに、車載用電池循環ビジネスは技術、市場などの要因によって影響を受ける⁽⁶⁾。これらの理由より、将来の変化に備えた車載用電池循環ビジネスプランニング支援が今後ますます重要になると考えられる。しかし、車載用電池循環システムに影響を及ぼす将来変化や不確実性の評価を行う研究が存在するが⁽⁷⁾、それを車載用電池の循環ビジネスのプランニングに統合化する研究はほとんど行われていない。

この課題に対して、本研究はシナリオ分析を用いた車載用電池循環ビジネスプランニング支援手法を提案する。すなわち、ビジネスを取り巻く中長期的な将来状況におけるビジネスに大きな影響を与える不確実性要因(=キードライバー)を抽出した上で、それをもとに将来起こりうる車載用電池循環ビジネスのシナリオを複数本作成する。車載用電池循環ビジネス分析モデルを用いてこれらのシナリオを定量化および比較分析することで、持続可能な車載用電池循環ビジネスのための条件抽出を試みる。

2. 文献調査

2.1. 車載用電池循環に関する既存研究

EVの利用が増加するにつれて、電池の循環に関する研究の必要性が高まっている⁽¹⁾。Bobba et al. (2019) は電気

自動車における使用寿命終了後再利用する電池を二次電池と定義し、電気自動車の普及予測に基づき、二次利用電池の数及びCoやLiのストックを計算した⁽³⁾。Bobba et al.(2019)の研究は二次利用がリチウムイオン電池の容量をより良い利用を可能にすることを示した⁽³⁾。車載用電池の再利用による環境価値について、Wrålsen et al.(2023)らは二つのノルウェー会社についてケーススタディーを行い、life cycle assessment (LCA)を用いて二つの会社におけるビジネスをモデル化し、環境効果を計算し、その結果はいずれの会社においても、電池の再利用は環境にプラスの影響を与えたことを示した⁽⁸⁾。また、Net present value (NPE)分析とLife cycle assessment (LCA)を組み合わせ、環境性及び経済性の面から電池リース事業のビジネスモデルを検証した研究も存在する⁽⁹⁾。

2.2. 車載用電池循環モデル

市場要因を考慮した上で車載用電池循環システムの環境性影響を評価することを目的として、Tao et al. (2022) は車載用電池循環モデルを開発した(図1)⁽⁷⁾。車載用電池循環モデルは、マーケットモデルとライフサイクルモデルから構成される。

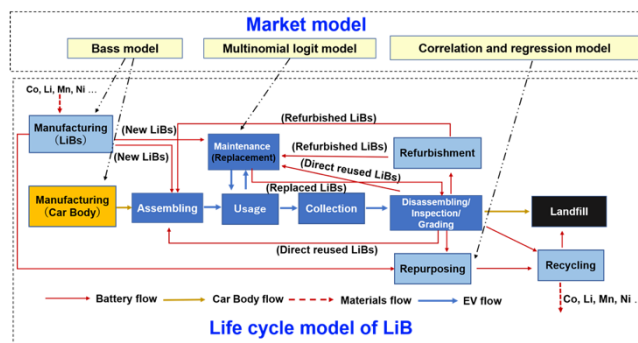


Fig. 1 Traction battery circulation model⁽⁷⁾

マーケットモデルはBassモデル⁽¹⁰⁾とLogitモデル⁽¹¹⁾を用いて、異なる種類(例:新品電池,再製造した二次利用電池)の車載用電池の将来需要を定量的に推計する。Bassモデル⁽¹⁰⁾は過去の普及実績に基づいて製品の将来普及台数を推計するモデルであり、車載用電池循環モデルではEVの将来普及台数を1年単位で推計するために用いる。一方

で、Logit モデルは⁽¹¹⁾消費者が特定の条件において異なる種類の製品の購入確率を推定するためのモデルである。車載用電池循環モデルではLogit モデルを用いて、消費者が電池を購入する際に各種の電池を選択する確率を計算する。

ライフサイクルモデルは車載用電池の製造から廃棄まで全過程において発生した環境影響をシミュレーションできる。マーケットモデルと組み合わせて、一定の時間において社会全体において車載用電池の普及状況及び環境影響を計算できる。マーケットモデルとライフサイクルモデルはいずれもLife cycle simulationを用いて構築した⁽¹²⁾。

3. 車載用電池循環ビジネスのプランニング支援

3. 1. アプローチ

車載用電池循環ビジネスのプランニングを実行する際には、以下の2つが課題となる。

- (課題1) 将来変化および不確実性が車載用電池循環ビジネスに及ぼす影響を評価すること。
- (課題2) 対象地域の特性を反映しながら、電池循環の需給バランスを担保する方法を決定すること。

これらの課題に対して、本研究では図2に示すように、シナリオ分析の手法を用いて複数の車載用電池循環ビジネスシナリオの作成を通してビジネスプランニングを支援するというアプローチを提案する。ここでは、循環プロバイダー（資源・情報を組み合わせて循環ビジネスを構築するアクター）に対して車載用電池循環ビジネスのプランニングを支援する。本研究では、車載用電池循環ビジネスシナリオを、循環ビジネスを取り巻く中長期的な将来状況とビジネスの戦略案及びそれらの相互作用を記述するものと定義する。

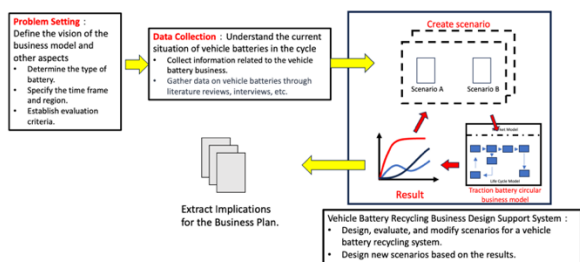


Fig. 2 Overview of the approach

課題1に対して、本研究では以下の3つのステップをとる。(1)現状調査に基づき、現状から将来への外挿によって確からしい変化が起こる未来 (Business as Usual, BaU) を想定する、(2)現状調査の結果に基づき、発生する確率が大きくかつ車載用電池循環ビジネスに大きな影響を与える要素 (=キードライバー) を抽出する、(3) BaUに車載用電池循環ビジネスを取り巻く環境を基準に、キードライバーを変化させることにより、複数の将来環境を想定する。

課題2に対して、本研究ではTao et al. (2022)が開発した車載用電池循環モデル⁽⁷⁾を拡張する。このモデルでは、EV 販売台数と再利用電池の各年の発生量及びそれに対する需要に基づき、需給バランスのマッチングを行う。一方で、EVの使用状況やそれともなう電池の劣化状態などは地域によって異なるが、車載用電池循環モデルは異なる地

域による影響を評価できていなかった。そこで本研究ではビジネスにおける地域の影響を議論するために、Tao et al. (2022) のモデルにFACTEVを統合化する⁽¹³⁾。FACTEVは地域の気候と設定された電気自動車の走行状況から自動的に電池の劣化と実用電費を計算するツールである。

3. 2. 車載用電池循環ビジネスシナリオの記述方法及び定量化

ビジネス外部環境については、対象地域においてビジネスを取り巻く中長期的な外部環境を描く。これは、政治(P) 経済(E) 社会(S) 技術(T) の面から議論して要素を決める。複数のビジネスを取り巻く中長期的な外部環境を想定するため、キードライバーを軸に変化させた外部環境をそれぞれ別に記述する。一方で、ビジネス戦略は、車載用電池循環ビジネスに直接な影響を与えるライフサイクル・循環戦略、ビジネスモデル、ステークホルダーから構成する。

以上の要素をまとめて作成したシナリオを定量化するため、本研究では図3に示す車載用電池循環ビジネス評価モデルパラメーターリストを適用する。このパラメーターリストはProcess, Product, LCA, Market という4つのリストから構成し、合計33個のパラメータを定義した(図3)。個々のパラメーターに対して、シナリオの設計者がシナリオの記述に基づいてパラメーターの値を定める。また、シナリオに言及がなかったパラメーター値及びさらに追加する必要のあるパラメーターは、文献調査及び議論によってシナリオ設計者が決める。

Category	Parameter	Category	Parameter	Category	Parameter	Category	Parameter
threshold	DR	Weight (Battery)	Ni	CO2 emission factor	transformation	Sale	Sales data
	Refurbishment		Li		electric		Market size
Driver distance	Average		Co		Ni	Consumer preference	Weight of attribute (Price)
	Weibull distribution (EV)		Shape		Al		Li
Scale			Cu		Co		Mn
Recycle	Recycling efficiency		FACTEV		Graphite		AL
	SOH after refurbishment	Car type		Cu			
Refurbishment		How to use	Graphite	Others (Battery)			
		Battery	Capacity				
Process		Product		LCA		Market	

Fig. 3 Parameter list

3. 3. 車載用電池循環ビジネス評価モデル

異なる地域において車載用電池循環ビジネスを計算するために、本研究はFACTEV⁽¹³⁾と車載用電池循環モデル⁽⁷⁾を組み合わせる(図4)。すなわち、車載用電池循環ビジネスシナリオに設定された地域データと車種データをFACTEVに入力することによって、EVの平均電費及び電池劣化を計算する。FACTEVから計算された電気自動車の平均電費及び電池劣化は車載用電池循環モデルに引き渡す。

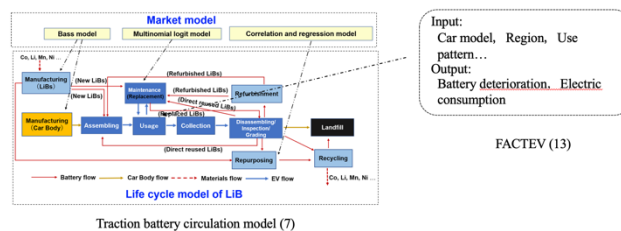


Fig. 4 Traction battery circular business evaluation model

車載用電池循環モデルはマーケットモデルから地域ごとに電気自動車の普及と伴った車載用電池需要の増加を計算し、さらに電気自動車の廃棄と電池劣化 (FACTEV から得られた)などの要素を組み合わせ、全体の需要を計算する。需要に満たせるように新規電池の供給を計算することによって需給マッチングを行う。最終的に地域ごとの車載用電池循環ビジネスの環境性及び経済性評価を行う。

3. 4. プランニング手順

複数のシナリオを制作・比較し、ビジネスインプリケーションを抽出のために、以下の車載用電池循環ビジネスプランニング支援手順を開発した。図5に示すように、提案手順は以下の五つのステップから構成する。

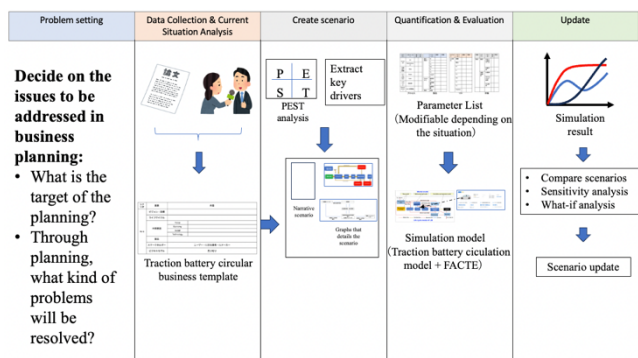


Fig. 5 Planning step

(1) 問題設定: ビジネスプランニングを通じて解決したい問題を定義する (例: プランニングの対象地域, プランニングを通じて解決したい課題など)。

(2) データ収集・現状分析: 文献調査, アンケート調査, インタビューなどの手段を利用して, 解決したい課題についてのデータを収集する。集められたデータから車載用電池循環ビジネスの現状分析を行う。

(3) シナリオ作成: 車載用電池循環ビジネスの外部環境について PEST (Political, Economic, Social and Technological) 分析を行い, ビジネスに大きな影響を与える不確定性要因を抽出する。抽出した不確定性要因を変化に加えて, 複数の異なる未来環境を設定する。さらに, ビジネスを実行する地域及びビジネスプランを設定する。組み合わせることによって, 複数の車載用電池循環ビジネスシナリオを制作する。

(4) シナリオの定量化・評価: 制作されたシナリオを車載用電池循環ビジネス評価モデルのパラメーターリストに適用する。シナリオに言及のないパラメーターについては議論によって定める。車載用電池循環ビジネス評価モデルを用いて, 各シナリオの環境性及び経済性を評価する。

(5) シナリオの改良: シミュレーションの結果に基づき, 各シナリオに対して比較・感度分析・What-if 分析を行う。分析の結果に基づき各シナリオにおいて持続可能な車載用電池循環ビジネスの達成方法及び必要な改良について検討する。検討の結果に基づき持続可能なビジネスに向けた条件を抽出する。

4. ケーススタディ

提案する手法を検証するために, ケーススタディを行う

た。ケーススタディは 3. 4 節に記述した手順で行った。

4. 1. 問題設定

今回のケーススタディは中長期的な将来において, 横浜と札幌に車載用電池循環ビジネスの環境性及び循環性について検討する。問題設定は以下のとおりである。

- 期間: 2021~2050
- 地域: 横浜・札幌
- 対象製品: 40 kWh リチウムイオン電池 (LiB) (電池種類: NMC)
- 評価指標: Life cycle CO2 emission (LCCO2), Circularity index (CI)

車載用電池循環ビジネスの実施地域は気候の変化による影響を検証するために, 気候が大きく異なる横浜・札幌二つの都市を選んだ。本研究において, 車載用電池循環ビジネスにおける二次電池利用の度合いを定量的に評価するために, 評価指標のひとつとして CI を以下のように定義する:

$$CI = \frac{\sum \text{Secondary battery supply}}{\sum \text{All battery supply}} \quad (1)$$

上式において, 分母と分子はそれぞれ 2021 年から 2050 年まで, 新規電池及び二次電池の供給のトータル数と二次電池の供給のトータル数と定義する。

4. 2. データ収集・現状分析

車載用電池循環ビジネスの現状を把握するために, 車載用電池の再生・販売事業に携わる事業者インタビューを行った。事業者へのインタビューに基づいて, 本研究では表1のように現状ビジネスを記述した。インタビューに基づき, 車載用電池循環ビジネスにおいて, 循環戦略として, 電池に対して以下のライフサイクルオプションを設定した。

- Direct Reuse (DR): 回収されてから直接車載用として再利用する電池。
- Refurbishment: 回収されてから再製造の工程を経て, 電池の性能を回復させたうえで車載用として再利用する電池。
- Repurpose: 定置型蓄電池として再利用する電池。
- Recycling: 分解して原材料を取り出して再利用する電池。

車載用電池を購入する際に, 各種類 (例: DR 電池, 新品電池) の電池の選択確率に関する消費者選好を調べるために, 横浜市の EV ユーザーを対象としたアンケート (N=200) を行った。アンケートにおいて, 消費者が電池を購入するとき, 異なるオプションの電池を選択する確率を調べた。アンケートの設定および各種類の車載用電池を選択する確率に関するアンケート結果に基づいて算出した車載用電池購入時価格・電池容量・保証期間に関する重み (2.2 節参照) を表2に示す。

電池を異なるライフサイクルオプションに分類するためには, State of health (SOH) を用いて判断する。SOH は式

Table. 1 Current business situation

Elements	Context
Vision/Goal	By 2050, the goal is to establish a business in Japan centered around the secondary use of traction batteries, contributing to a decarbonized society.
Life cycle	After the end of the lifespan of electric vehicles, car batteries can be utilized through various methods based on their remaining capacity: Direct Reuse (DR), Refurbishment, and repurposing for different applications. Batteries with significantly low capacity are slated for recycling.
Product	Nissan Leaf batteries, including 24kWh Gen1, 24kWh Gen2, and 30kWh variants, will be repurposed for V2V applications, autonomous guided vehicles (AGVs), energy storage systems (ESS), and other uses.
Stakeholders	Stakeholders include dismantling companies, EV manufacturers, and reuse customers.
Business model	The collected batteries will be sorted into different grades and sold for specific applications, capitalizing on the current situation where demand surpasses supply.

Table. 2 Result of consumer preference

Attribute k	Attribute value assumed in the questionnaire survey according to battery type*			Weighting factor A_k
	New	Refurbished	Direct reuse (DR)	
Price	1 (800 thousand JPY)	0.5 (400 thousand JPY)	0.3 (240 thousand JPY)	-0.77
Battery capacity	1 (40 kWh)	0.9 (36 kWh)	0.88 (35 kWh)	0.20
Warranty period	1 (8 years)	0.5 (4 years)	0.25 (2 years)	2.30

*The attribute values were decided based on the discussions with business providers and experts in the field

(2)のように定義する：

$$SOH = \frac{\text{現在電池容量}}{\text{初期電池容量}} \times 100 \quad (2)$$

本ケーススタディでは、事業者へのインタビュー結果に基づいて、回収された電池に対して、90%≦SOHの電池はDR、70%≦SOH<90%の電池は Refurbishment、SOH<70%の電池は Repurpose が可能であると判定する。

4. 3. シナリオ作成

4.2節での現状分析に基づき、現在のビジネス(表1参照)からなりゆきのな変化を想定した BaU (business as usual)の外部環境を想定した。

• BaU:

車載用電池循環ビジネスを取り巻く中長期的な外部環境は大きな変化が発生しない。電気自動車は順調に普及し、また、外部の参考資料を参照して、電池価格は2050年まで2021年の価格の35%まで徐々に低下すると仮定した⁽¹⁴⁾。

キードライバーは Christian et al. (2023)が実施した車載用電池循環についてのワークショップの結果に基づき抽出した⁽¹⁵⁾。ワークショップは異なるバックグラウンドをもつ専門家が複数に参加し、日本が2050年に持続可能な車載用電池の生産への転換を開発した。ワークショップの結果、車載用電池の循環利用についての促進要因、抑制要因、対抗対策は7つのグループにまとめ、特に必要なのは以下の三つである：

- (1) エネルギーセクターの脱炭素化
- (2) 回収オプションのコスト
- (3) データの利用可能性

特に、エネルギーセクターの脱炭素化は持続可能な車載用電池生産への転換全体に影響を与える⁽¹⁵⁾ため、車載用電

池循環ビジネスに大きな影響を与え得ると考慮し、本ケーススタディのキードライバーとして選定した。

キードライバーに基づき、以下の New energy policy (NEP)の将来環境を設定した：

• NEP:

再生可能なエネルギーの普及より、電力のCO2排出係数が著しく低下していく。さらに、エネルギーコストの低下より、電池の生産コストが低下し、販売価格はBaUシナリオよりも低くなり、そのため、2050年の電池価格は2021年の25%に徐々に低下していくと仮定した。

ビジネス戦略案について、本研究は車載用電池の再生・販売事業に携わる事業者に対するインタビューから、現状のビジネスをベースになりゆきのな変化を考慮に入れて、以下のビジネスモデルを想定した。

• 売り切り:

消費者が自動車を購入すると同時に車載用電池を購入する。このとき消費者は自らどの種類の電池(例：新品電池、DR電池)を使用するかを決めることができる。使用終了後の自動車は自動車回収・解体業者によって回収し、電池を取り外して電池再生・販売業者に売却する。電池再生・販売業者は電池をグレード分けてそれぞれの性能によって電池を再利用する。電池のセル劣化が激しい時そのセルはリサイクルする、このことを表現するために電気の最大再利用可能回数を設定し、2だと仮定した。

売り切り以外のビジネスモデルとして、著者(シナリオ設計者)は電池の所有権が消費者から電池管理会社に移行したと仮定し、以下のリースビジネスモデルを想定した。

• リース:

消費者はEV購入時、車載用電池の購入を行わず、代わりに車載用電池の所有権を保有する電池管理会社と電池のリース契約する。そのため、消費者は電池管理会社が提供する電池を使用し、自ら使用する電池の種類を決めることが

できなくなる。一方、電池管理会社は消費者の日常使用を満たすために一定程度の容量（ここでは、SOH 75%以上を基準とする）を持った電池を提供する。電池容量が基準を下回った場合、電池管理会社は電気自動車の電池を交換する。交換で回収した電池はリファービッシュし、SOHを90%まで回復させたうえで再び車載用電池として利用する。また、電池をセルの劣化によるリサイクルの発生は売り切りビジネスモデルの場合と同様に存在し、最大再利用可能回数は2と仮定した。

以上の条件のもとで、外部環境×ビジネスモデルで合計4本のシナリオを作成した（図6）。さらに異なる外部環境で各シナリオの違いを検討するために、横浜及び札幌の地域条件でそれぞれのシナリオを実装した。そのため合計8本のシナリオを作成した。

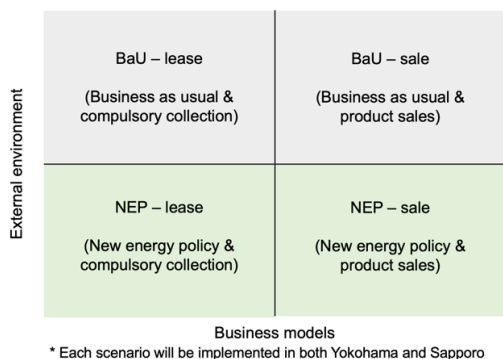


Fig. 6 Created scenarios

4. 4. シナリオの定量化・評価

図6のシナリオに対して、パラメーターリストと車載用電池循環ビジネス評価モデルを用いて、各シナリオを定量化した。8本のシナリオのシミュレーション結果を図7に示す。

横浜市において、シナリオ BaU-sale, BaU-lease, NEP-sale, NEP-lease に対する 2021年から2050年までの累積のLCCO2排出量はそれぞれ、2.40 Mt, 2.40 Mt, 1.12 Mt, 1.12 Mtである。循環性指標CIはそれぞれ34.3%, 38.1%, 33.9%, 38.1%である。

札幌市の場合、シナリオ BaU-sale, BaU-lease, NEP-sale, NEP-lease に対する累積のLCCO2排出量はそれぞれ、1.45 Mt, 1.45 Mt, 0.63 Mt, 0.62 MtのLCCO2を排出した。循環性指標CIはそれぞれ34.3%, 38.1%, 33.9%, 38.1%である。

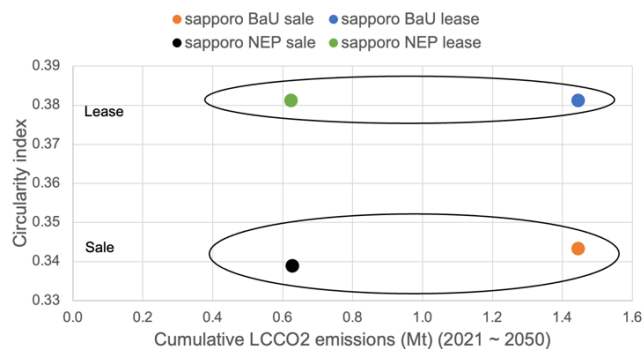
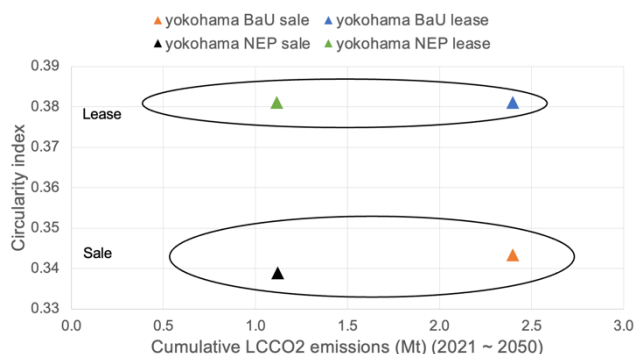


Fig. 7 Overview result (Top: Yokohama, bottom: Sapporo)

図7から、横浜と札幌において、LCCO2の排出について、リースと売り切りのビジネスモデルはいずれの外部環境においても大きな違いが存在しなかった。NEPの外部環境において売り切りビジネスモデルに比べて、横浜のLCCO2は0.38%, 札幌は0.42%だけそれぞれ低かった。

横浜市の4つのシナリオのLCCO2排出の内訳を図8に示す。NEPの2つのシナリオでは再生可能なエネルギーの普及より電力のCO2排出係数が低下したため、電池の使用時CO2排出が低下した。一方、売り切りとリースのビジネスモデルの間には大きな違いが発生しなかった。これは、売り切りビジネスモデルからリースビジネスモデルに移行したとき、車載用電池を再利用すると新規電池の生産時CO2排出量を抑えられるが、その一方で二次電池を再製造するためにCO2の排出量が増加するためである。BaU-saleからBaU-leaseへの移行を考えると、Manufacturing, Usage, Refurbishment, Inspect, Transportation段階のLCCO2排出量がそれぞれ-0.40%, -0.20%, 17.5%, 13.1%, 11.1%変化した（図8）。

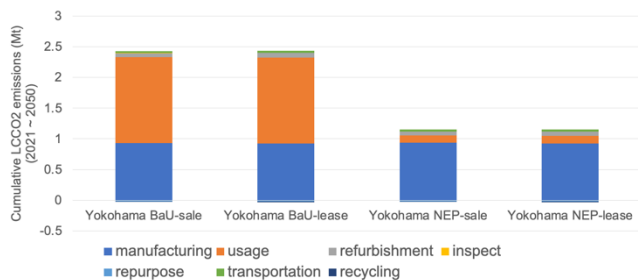


Fig. 8 Cumulative LCCO2 emissions in Yokohama

一方、循環性指標CIについて、売り切りからリースに切り替えることによって、BaUシナリオのCIは3.8%上昇、NEPシナリオの場合は4.2%の上昇が見られた。これはリースビジネスモデルを採用する場合は電池の再利用にプラスの寄与を与えたことを示している。横浜市において、BaU-saleシナリオの月毎電池生産数を図9に示す。

図9から、車載用電池は全期間にわたって新品の使用がメインであることが分かった。全供給された電池の中に新規電池の個数割合は65.7%である。これは車載用電池の需要が2021年から2050年まで大幅に増加しているため、二次電池の供給が需要に満たせなかったと考えられる。しかし、時間の経過と共に二次電池が発生した後、二次電池の使用量も徐々に拡大していくことが観測できた。実際、2030年において、二次電池(Direct reuse + refurbishment)

の供給数は全電池供給の 26.8%だが、2050 年において、二次電池の供給数は全電池供給の 35.7%に達した。

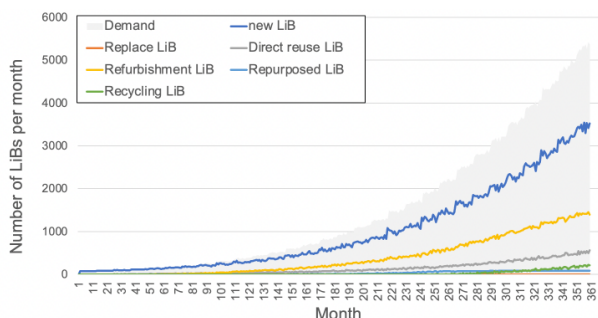


Fig. 9 LiB circulation for BaU & Sales scenario in Yokohama

4. 5. シナリオ改良

リースビジネスモデルと売り切りビジネスモデルを比較した結果、リースビジネスモデルは売り切りビジネスモデルより高い CI を得られた。これはリースビジネスモデルで電池をうまく管理することによって、新品に対する再生電池の利用割合が向上したためである。

車載用電池循環ビジネスにおいて、LCCO2 の削減に一番影響が強いパラメーターを探るために、横浜市に BaU-sale シナリオの各パラメーターを 10%変化させた (EV 寿命は 1 年間増加) 2021 から 2050 までの LCCO2 の排出量についての感度分析結果を表 3 に示す。

Table. 3 Sensitivity analysis result

Parameter	Unit	Original Value	Sensitivity of LCCO2 emissions
LiB deterioration	% / km	-0.0027	0.15%
LiB capacity	kWh	40	4.05%
Annual travel distance	km	8940	5.99%
EV lifetime	years	7	-1.17%
SOH threshold for refurbishment	%	70	-0.00026%

感度分析の結果から、年間平均走行距離及び電池容量が全体の LCCO2 の排出に大きく寄与することがわかった。これは LCCO2 排出の内訳において、電池製造および使用中の CO2 排出が大きい割合を占めたからである。

横浜市 BaU シナリオのリースビジネスモデルを実施する場合に対して、ユーザー使用中車載用電池の交換について、交換するタイミングを変えて、2021 から 2050 までの LCCO2 及び CI についての感度分析を行った。表 4 に結果を示す。

感度分析の結果から、リースビジネスモデルを実行するとき、車載用電池の交換 SOH を高く設定すると、より多くの二次電池が利用され、CI の値が高くなる。その一方で、CO2 排出量が増加した。この三つの状態の LCCO2 排出の内訳を図 11 に示す。

Table. 4 Sensitivity analysis for LiB replace SOH threshold

Parameter	Unit	Value	Sensitivity of LCCO2 emissions	CI
SOH threshold for replacement	%	75 (Original)	-	38.1%
SOH threshold for replacement	%	80	1.82%	40.1%
SOH threshold for replacement	%	85	6.46%	43.4%

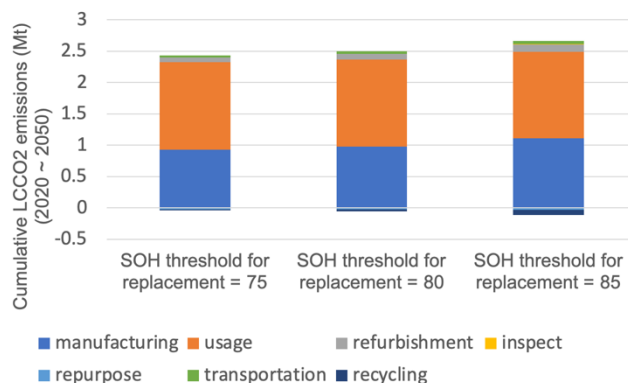


Fig. 11 LCCO2 emissions for Yokohama_BaU_lease (SOH threshold for replacement = 75, 80, 85)

図 11 から、電池交換の SOH が増加するにつれ、電池生産段階の CO2 排出が増加したことが見られる。これは電池の交換数が増加したため、より多くの電池需要が発生したためである。すなわち、リースビジネスモデルにおいては、単純にユーザーから電池を回収するタイミングを早めることは電池需要の増加に繋がり、LCCO2 の削減には繋がらなかった。

5. 考 察

本研究は車載用電池循環ビジネスについて、異なる地域・外部環境・ビジネスモデルを設定することによって、合計 8 つのシナリオを設計・評価した。

5. 1. 地域について

今回は横浜・札幌の両地域を選定し、ケーススタディを行った。結果上、横浜と札幌両地域間の LCCO2 の排出には大きな違いが見られた。これは主に地域の人口の違いによるものである。図 10 は横浜と札幌の売り切りビジネスモデルを実施する場合の LCCO2 排出を人口一人当たり換算した結果である。結果から、札幌は BaU と NEP の外部環境において、一人当たりの LCCO2 の排出は横浜に比べてそれぞれ 13.8%と 5.6%増加した。以上の違いは札幌の冬が長く、その気候の影響によって、EV を使用する時の実用電費が高いことが理由だと思われる。

一方、本研究では簡単のために両地域の年間平均走行距離を同じと仮定した。そのため、両地域における車載用電

池の劣化係数がほぼ同じ値になったため、ビジネスモデルによる違いが見られなかった。地域によるEV使用段階の違いをより詳細に分析することは今後の課題である。

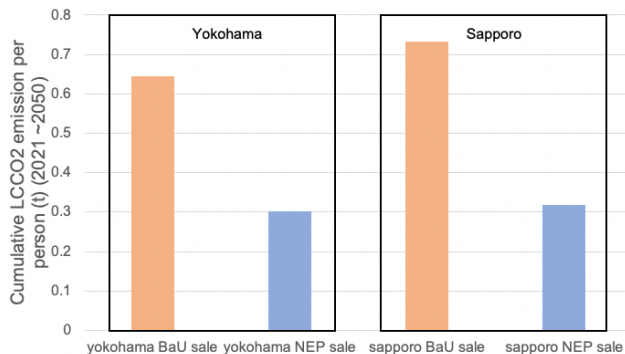


Fig. 10 Cumulative LCCO2 per person (t) (2021 ~ 2050)

5.2. シナリオ比較

ケーススタディの結果において、再生可能なエネルギーが普及する未来 (NEP) は発電時発生するCO2の減少によって、いずれのビジネスモデルにおいても大幅なLCCO2の減少が見られた。売り切りシナリオの場合、BaUからNEPに切り替えることによって札幌のLCCO2の削減量は56.6%、横浜のLCCO2の削減量は53.2%となった。EV使用時に多く電力を消費する地域では、再生可能なエネルギー普及の効果がより大きい。また、売り切りビジネスモデルとリースビジネスモデルの間にLCCO2の排出について大きな違いがなかった。これはGONZALEZ-SALAZAR et al. (2023)の結果と一致する⁽⁹⁾。本研究において売り切りビジネスモデルとリースビジネスモデルがLCCO2排出において大きな違いがなかった理由として、リースビジネスモデルは車載用電池を再利用するために、電池の輸送や再製造などのプロセスが追加が必要となった。それによって発生したCO2排出量は電池の製造個数減少によって削減できたCO2排出量と相殺し、結果として、ライフサイクル全体のCO2排出量削減には繋がらなかった。

5.3. 研究の限界

本研究の課題として、データ収集及び評価手法の複雑性が挙げられる。本ケーススタディでは、横浜市のみを対象として消費者アンケートを実施した(4.2.節参照)。札幌に対する消費者選好及び電気自動車の使用状況(例:年間平均走行距離)は横浜と同じと設定したことが、横浜と札幌両地域の間大きな違いが見られなかった理由としてあげられる。

まだ、本研究に使用するシミュレーションモデルはパラメーターの設定が複雑かつ出力結果が直観的ではないため、シナリオ設計のサポート(例:ビジネス戦略検討のワークショップで参加者に使用させ、結果を見ながらビジネス戦略を議論する)に使用することが困難である。

今後の課題として、シミュレーションの精緻化のためにさらなるデータ収集が必要である。さらに、シナリオアップデートしやすいために簡易化バージョンのモデル開発が課題として挙げられる。

6. 結 言

本研究は、シナリオ分析を用いた車載用電池循環ビジネスプランニング支援の手法を提案した。2050年までの日本を対象としたケーススタディを通して、提案手法の検証を行った。検証の結果、いずれの外部環境においても横浜と札幌の両方において、売り切りビジネスモデルはリースビジネスモデルにLCCO2の排出において大きな違いがなかったが、リースビジネスモデルの方は循環性指標(CI)が高い(札幌においてNEPの場合、リースビジネスモデルは売り切りビジネスモデルに比べてCIが4.23%向上した)。一方、電力の脱炭素化は車載用電池循環ビジネスのCO2排出量に大きく寄与することが分かった。特に、札幌のようなEV走行時消費電力が高い地域の方が、二酸化炭素排出量の削減につながる。

今後の課題として、データのさらなる収集、および、ビジネス事業者にとって使いやすいビジネスプランニングツールの開発が挙げられる。

謝 辞

本研究は、(一財)新技術振興渡辺記念会 令和5年度科学技術調査研究助成(上期)、科研費(21H01234, 23H03676)、環境再生保全機構 令和4年度環境研究総合推進費(JPMEERF20223R04)の支援を受けたものである。

文 献

- (1) Baars, J., Domenech, T., Bleischwitz, R. et al. :Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials. *Nat Sustain* 4, 71–79 (2021).
- (2) Muhammad Shafique, Muhammad Rafiq, Anam Azam, Xiaowei Luo: Material flow analysis for end-of-life lithium-ion batteries from battery electric vehicles in the USA and China, *Resources, Conservation & Recycling*, 178 (2022), 106061
- (3) Silvia Bobba, Fabrice Mathieux, Gian Andrea Blengini. How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 145, 2019, 279-291.
- (4) Robert Reinhardt, Ioannis Christodoulou, Santiago Gassó-Domingo, Beatriz Amante García, Towards sustainable business models for electric vehicle battery second use: A critical review, *Journal of Environmental Management*, Volume 245, 2019, Pages 432-446, ISSN 0301-4797.
- (5) IEA:Prospects for electric vehicle deployment: <https://www.ica.org/reports/global-ev-outlook-2023/prospects-for-electric-vehicle-deployment#outlook-for-evs> (参照日 2023年8月27日)
- (6) Leander Pantelatos, Casper Boks, Elli Verhulst.: A Review of Repurposing Lithium-ion Batteries for Household Applications, *Proceedings of the 5th PLATE 2023 Conference*, pp.1-8.
- (7) Fuwei Tao, Yusuke Kishita, Christian Scheller, Steffen Blömeke, Yasushi Umeda, Designing a Sustainable

- Circulation System of Second-life Traction Batteries: A Scenario-based Simulation Approach, *Procedia CIRP*, Volume 105,2022,Pages 733-738,ISSN 2212-8271.
- (8) Wrålsen, B., O’Born, R. Use of life cycle assessment to evaluate circular economy business models in the case of Li-ion battery remanufacturing. *Int J Life Cycle Assess* 28, 554–565 (2023).
- (9) Miguel Gonzalez-Salazar, Georgios Kormazos, Viroj Jienwatcharamongkhol, Assessing the economic and environmental impacts of battery leasing and selling models for electric vehicle fleets: A study on customer and company implications,*Journal of Cleaner Production*,2023,138356,ISSN 0959-6526.
- (10) Bass FM. A New Product Growth for Model Consumer Durables. *Management Science* 1969;15:215–27.
- (11) Jeffrey M. Wooldridge. *Introductory Econometrics: A Modern Approach*, (5th edition). South-Western College, 2013.
- (12) UMEDA, Y., NONOMURA, A., & TOMIYAMA, T. : Study on life-cycle design for the post mass production paradigm. *AI EDAM*, 14(2), 149-161. (2000). doi:10.1017/S0890060400142040
- (13) DeNA: EV の実用航続距離・導入効果予測の見える化で法人のEV導入を加速 4/1よりEV転換シミュレータ「FACTEV」の試験提供を開始 : <https://dena.com/jp/press/4974/> (参照日 2023年8月27日)
- (14) 経済産業省 : 蓄電池産業戦略 : https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/battery_strategy/battery_saisyu_torimatome.pdf (参照日 2023年9月3日)
- (15) Christian Scheller, Yusuke Kishita, Steffen Blömeke, Christian Thies, Kerstin Schmidt, Mark Mennenga, Christoph Herrmann, Thomas S. Spengler, Designing robust transformation toward a sustainable circular battery production, *Procedia CIRP*, Volume 116,2023,Pages 408-413,ISSN 2212-8271.