

令和2年度環境省委託業務

令和2年度脱炭素型金属リサイクルシステムの
早期社会実装化に向けた実証事業
北九州地域での全体最適 LIB リユース・リサイクル
技術・システム実証
委託業務

成果報告書

令和3年3月

三菱マテリアル株式会社

目次

1. 実証事業の実施	1
1. 1 実証事業の概要	1
1. 1. 1 事業の目的	1
1. 1. 2 事業の背景	2
1. 1. 3 解決すべき課題	4
1. 1. 4 実施体制	6
1. 2 LIBユニット取り出し自動化.....	7
1. 2. 1 LIBユニット取り出し自動化装置検討.....	8
1. 2. 2 LIBユニット取り出し助力装置の検討.....	30
1. 2. 3 LIBユニット取り出し自動化装置設置場所.....	38
1. 3 LIBユニット劣化診断.....	40
1. 3. 1 検討方針	40
1. 3. 2 劣化診断技術の比較検討	41
1. 3. 3 劣化診断技術検討のまとめ	45
1. 4 LIBユニット解体ラインの処理量.....	46
1. 5 LIB放電.....	47
1. 5. 1 放電方法の検討	48
1. 5. 2 放電装置の検討	56
1. 5. 3 放電装置の検証	58
1. 6 LIBユニット解体自動化.....	60
1. 6. 1 LIBユニット解体手順の検証.....	61
1. 6. 2 LIBユニット解体ラインの検討.....	66
1. 7 熱分解後の破砕・選別	77
1. 7. 1 破砕・選別システムの検討方針	77
1. 7. 2 破砕機の選定	82
1. 7. 3 選別機の選定	93
1. 7. 4 設備レイアウト検討	96
2. 環境影響改善効果、CO2 排出量削減効果.....	98

2. 1	環境影響改善効果の検討	98
2. 2	CO2 排出量削減効果の検討.....	100
2. 2. 1	評価シナリオの検討	101
2. 2. 2	評価条件の検討	105
2. 2. 3	評価のために取得するデータの検討	106
3.	事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討、出口戦略の検討 ...	115
3. 1	経済性評価	115
3. 1. 1	評価シナリオの検討	115
3. 1. 2	評価条件の検討	119
3. 1. 3	評価のために取得するデータの検討	122
3. 2	金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討	124
4.	令和3年度の事業計画	126

(要約)

【目的】

リチウムイオン電池(以下、LIB)は、電気自動車(EV)、ハイブリッド車(HV)等の普及により、国内においても使用量は増加傾向にある。これらの次世代自動車の廃車両に伴い発生する廃LIBの処理方法は、国内で様々な検討が行われている。その多くは熱処理によりLIB中の有機溶媒を揮発分解した後、機械的処理により正負極材(活物質)とシート等の金属材料を選別回収するという方法を取る。また、活物質からのCo、Ni回収は、乾式・湿式の様々な方法が実証されている。

一般にLIBは多数のセル又はモジュールに制御用回路を組み合わせたユニットとして車載される。LIBユニットを構成する素材をリユース/リサイクルすることによるCO₂排出量削減効果は大きく、LIBを循環するシステムの構築が求められており、全体的なリユース/リサイクルシステム実証が重要となる。

本事業では、廃車両からのLIBユニット取り出しからCo、Ni回収まで、構成素材毎の適正なリユース/リサイクルの一貫処理の実証を福岡県北九州市で行い、CO₂排出量削減効果を評価し地域循環共生圏に貢献することを目的とする。

【令和2年度実証事業の内容】

本事業は、廃車両からのLIBユニットの取り出し、LIBユニットのリユース/リサイクルの仕分けのための劣化診断、リサイクル向けLIBユニットの放電・解体、LIBセル又はモジュールの熱分解、破碎・選別、活物質からのCo、Ni回収からなり、3年間の事業期間で各工程を実証していく。令和2年度の実証事業では、熱分解及びCo、Ni回収工程を除く各工程において次の検討を実施した。

(1) LIBユニット取り出し自動化

車載用のLIBは、電気自動車(EV)かハイブリッド車(HV)による搭載量や電力仕様の違い、各メーカーによる大きさや重量、形状、取り付け場所、及び取り付け方法が相違し、取り出し手法も異なる。このため自動車メーカーのマニュアルに基づいて手解体で取り外しが行われている。この手法では作業負荷、効率の観点から、今後の廃車発生量増加への対応が難しい。

今回、現時点で販売台数の多いLEAFとFIT3の2車種を対象とし、取り出し作業の省力化を目的に、LEAFでは、LIBユニット締結ねじ取り外しの自動化を、FIT3では、LIBユニット取り出しに助力装置を検討した。

LEAFのLIBユニット締結ねじ取り外しでは、車両を傾転させねじ外し装置を実装したLIBユニット取り出し自動化装置を開発した。FIT3のLIBユニット取り出しでは車両のLIBユニット設置位置、取り外し作業を考慮した助力装置を検討した。

(2) LIBユニット劣化診断

LIBは他の蓄電池と同様、電池容量が使用状況、期間及び充放電回数により徐々に減少する。将来、様々な拠点に点在する自動車リサイクル事業者が取り外したLIBを、取り外しと同時に健全性を診断し、リユース又はリサイクルへ仕分けることでLIBの輸送コスト及び輸送に係る環境負荷削減につなげることが可能である。

LIBの劣化診断技術としては、自動車リサイクル事業者若しくはLIBの回収運搬事業者がLIBの健全性を評価できる汎用性が高い技術を用いた劣化診断方法が適切であることから、現在開発されている劣化診断技術の比較検討を行った。

(3) LIB放電

LIBユニットのリサイクルでは、LIBの熱分解処理に向け、LIBユニットをLIBモジュール又はLIBセルの単位まで解体する。LIBユニットは数百ボルトの電圧を持つため、LIBユニット解体の作業安全、加えて安定した熱分解処理のためにLIBを放電しておく必要がある。

本事業ではLIBの構造及び電気的特徴を考慮した放電方法を検討し、LIBユニットの放電に適した装置を選定した。

(4) LIBユニット解体自動化

LIBユニットは、セル又はモジュール単位のLIB及びLIBの制御システム、これらの接続ケーブル類、固定器具等で構成され、複雑な構造となっている。LIBユニットの解体作業は、構造の複雑さから人手による作業が優位であるが、将来の労働力の減少と廃LIBユニット発生量増加に備え、解体作業の助力化、省力化が望まれる。

今回、省力化を目的として、産業用ロボットを活用した解体作業の自動化について、実際のLIBユニット解体作業により得られた作業手順を作成し、解体作業の一部に自動化を組み入れたLIBユニット解体ラインの構成を立案した。

(5) LIB破碎・選別

LIBモジュール又はセルを熱分解した後、破碎し、後段のCo、Ni回収工程の原料となる活物質と、Cu、Al等のシート材やLIBの筐体を選別して回収する。

今回、破碎・選別工程の主要機器に性能条件を設定し、熱分解後のLIBの破碎試験、選別試験結果から、Co、Niの高効率回収に適した装置を選定、装置仕様を決定した。また、効率の良い破碎・選別工程ラインを立案した。

(6) 環境影響改善・CO₂排出量削減効果、金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討

LIBリユース/リサイクルシステムの事業化により、廃LIBのリユース活用、Co、Niの電池リサイクルに伴う環境影響改善効果やCO₂排出量削減効果が見込まれる。また、本事業ではLEAF、FIT3に限定したLIBリユース/リサイクルを検証するが、今後はメーカーや車種を限定しない次世代自動車全般への横展開や自動車リサイクル事業への自動化設備導入といったビジネスの活性化が期待できる。

今回、環境影響改善・CO2 排出量削減効果については、効果を評価するためのシナリオを設定した。また、経済性評価についても同様に評価シナリオを設定した。

【令和3年度実証事業の計画】

令和3年度は、LIBのリユース／リサイクルの一貫処理実証に向け、令和2年度に進めた検討を推進、深化させる計画である。

LIB リユース・リサイクル技術・システム実証の各工程で用いる装置及び設備の検討、試運転、装置最適化を完了させる。

本事業で用いる装置及び設備の試運転や装置最適化試験等の試験運転にて操作データを収集し、工程ごとの環境影響改善効果、CO2 排出量及び経済性評価を試算する。

Summary

[Objective]

The quantity of lithium-ion batteries ("LIBs") in use is on the increase in Japan, as in many other countries, due to the proliferation of next-generation vehicles such as electric vehicles (EVs) and hybrid vehicles (HVs). Various solutions are being examined in Japan for processing the end-of-life LIBs that will be generated by end-of-life next-generation vehicles. Most of these use a thermal process for volatile separation of the organic solvent in the LIB, following which a mechanical process is used for sorting and recovery of positive/negative-electrode material (black mass) and metal materials such as sheets. The recovery of Co and Ni from black mass has also been demonstrated using a variety of wet and dry methods.

An LIB is generally installed into the vehicle as a unit combining a large number of cells or modules with a control circuit. The reuse and recycling of materials comprising the LIB unit has a significant effect in terms of reducing CO₂ emissions. There is therefore a need to design a recycling system for LIBs and as such it is important to demonstrate a system for reuse and recycling.

In this project, we conduct a demonstration using consistent processing to appropriately reuse/recycle each system component, from removal of the LIB units from end-of-life vehicles through to recovery of Co and Ni. The demonstration, which is based in Kitakyushu City, Fukuoka Prefecture, is used to evaluate the effect of CO₂ reduction with a view to contributing to the Regional Circular and Ecological Sphere.

[Details of the FY2020 Demonstration Project]

The project tests each of the following processes over a project duration of three years: removal of the LIB units from end-of-life vehicles; detection of deterioration in order to sort the LIB units for reuse/recycling; discharging and dismantling of LIB units for recycling; thermal decomposition of LIB cells and modules; crushing and sorting of LIB cells and modules; recovery of Co and Ni from black mass. In the FY2020 demonstration project, the following studies were conducted to examine each process except for thermal decomposition and Co and Ni recovery.

(1) Automation of LIB unit removal

Automotive LIBs have varying loads and power specifications, depending on whether they are used in EVs or HVs. There are also variations between manufacturers in terms of size, weight, shape, installation position, installation method, and removal method. For this reason, dismantling is done by hand, in accordance with the manual provided by the car manufacturer. From the standpoints of workload and efficiency, this method would make it difficult to keep pace with the volume of end-of-life vehicles, which going forward is expected to increase.

In FY2020, two labor-saving approaches were examined for the removal of LIB units from the LEAF and FIT3, the two models which currently have the highest vehicle sales. For the LEAF, automation of the removal of the LIB unit fastener bolts was examined. For the FIT3 the use of an assist installation for the removal of the LIB unit was examined.

For the LEAF LIB unit fastener bolt removal, an LIB unit retrieval automation installation that tilts the vehicle and uses a bolt removal device was developed. For the FIT3 LIB unit removal, an assist installation that takes into account the LIB unit installation position in the vehicle and removal procedure was examined.

(2) Detection of LIB unit deterioration

As with any rechargeable battery, the battery capacity of an LIB gradually decreases with usage, period of time, and number of charge / discharge cycles. In the future, it will be possible to diagnose the state of health of LIBs at the time of their removal by automobile recyclers at separate locations. By sorting them accordingly for reuse or recycling, it will be possible to reduce transportation costs of LIBs as well as the environmental load of transportation.

A comparative study of technologies for detecting deterioration in LIBs was conducted. Such technologies are still in development, since a suitable deterioration detection method will be required to use highly versatile technology so that automobile recyclers or LIB collectors and transporters will be able to evaluate the state of health of LIBs.

(3) LIB discharge

In LIB unit recycling, the LIB unit is dismantled down to the level of LIB modules or LIB cells in preparation for the LIB thermal decomposition process. Since the LIB unit has a voltage of several hundred volts, the LIB must be discharged in order to ensure safety in dismantling it and to ensure a stable thermal decomposition process.

In this project, the discharge method was examined based on a consideration of the structure and electrical features of LIBs and a suitable device for discharging LIB units was selected.

(4) Automation of LIB unit dismantling

The LIB unit has a complex structure, consisting of LIBs in cells or modules, an LIB management system, and the connecting cables and fixtures for these. Due to the complexity of the structure, manual dismantling of LIB units is the predominant method of dismantling. However, the dismantling process needs to be made easier and more labor-saving, in preparation for the labor shortage and increased volume of end-of-life LIB units that are expected in the future.

This study examined the automation of dismantling work using industrial robots for the purpose of labor saving. A work procedure was created, obtained through actual dismantling of LIB units.

The configuration was then planned for an LIB unit dismantling line that incorporates automation into part of the dismantling work.

(5) LIB crushing and sorting

Following thermal decomposition of the LIB modules or cells, these parts are crushed. Sorting and recovery is then conducted for black mass (raw material for the Co and Ni recovery process in the later stage), sheet materials such as Cu and Al, and the LIB housing.

In this study, performance conditions were set for the main equipment in the crushing and sorting processes. Based on the results of the crushing and sorting tests of the LIBs after thermal decomposition, equipment suitable for high-efficiency recovery of Co and Ni was selected, and the equipment specifications were determined. In addition, an efficient crushing and sorting process line was planned.

(6) Improvement of environmental load, effect of CO₂ reduction, revitalization of metal recycling business

The commercialization of the LIB reuse/recycle system can be expected to result in the reuse of end-of-life LIBs and the recycling of Co and Ni batteries, contributing to environmental impact improvement and the effect of CO₂ reduction. In addition, although this project is limited to demonstration of LIB reuse/recycling for the LEAF and FIT3, businesses revitalization effects can be expected through the broader application of LIB reuse/recycling to next-generation vehicles in general, without limitation to certain manufacturers or vehicle types, as well as the introduction of automation equipment to the automobile recycling business.

A scenario was set for evaluating the efficacy in terms of environmental impact improvement and the effect of CO₂ reduction. The same evaluation scenario was also set for economic evaluation.

[Plan of the FY2021 Demonstration Project]

In FY2021, we plan to advance and deepen the studies that were conducted in FY2020.

The study, commissioning, and equipment optimization of the equipment and facilities required for the LIB reuse/recycling technology and system demonstration will be completed.

Operational data will be collected through test runs, equipment optimization tests, and other testing of the equipment and facilities used in this project to estimate the environmental impact improvement effect, CO₂ emissions, and economic evaluation for each process.

1. 実証事業の実施

1. 1 実証事業の概要

1. 1. 1 事業の目的

リチウムイオン電池(以下、LIB)は、ハイブリッド車(HV)、プラグインハイブリッド車(PHEV)、電気自動車(EV)、燃料電池車(FCV)等の次世代自動車の普及と共に自動車への使用が増えている。社会の環境負荷低減の要望が高まる中、その使用量はますます増加する傾向にある。また太陽光発電と組み合わせた家庭用の蓄電池やバックアップ電源等にも小型で大容量のLIBの使用量は増え続けている。廃LIBの処理については、当社を含め国内で様々な検討が行われている。その多くは熱をかけて、LIB中の有機溶媒を揮発させた後、機械的な処理により、正負極材(活物質)とシート等の金属材料を選別回収する方法を取る。また、活物質からのCo、Ni回収について、乾式・湿式の様々な方法で実証が行われている。LIBを構成する素材のリユース/リサイクルによるCO2排出量削減効果は大きく、LIBを循環するリユース/リサイクルシステムの構築が求められており、全体的なシステム実証が重要となる。本事業では、廃車両からのLIBユニット取り出しからCo、Ni回収まで、構成素材毎の適正なリユース/リサイクルの一貫処理の実証を福岡県北九州市で行い、CO2排出量削減効果を評価し地域循環共生圏に貢献する。本事業の事業概要を図1.1-1に示す。

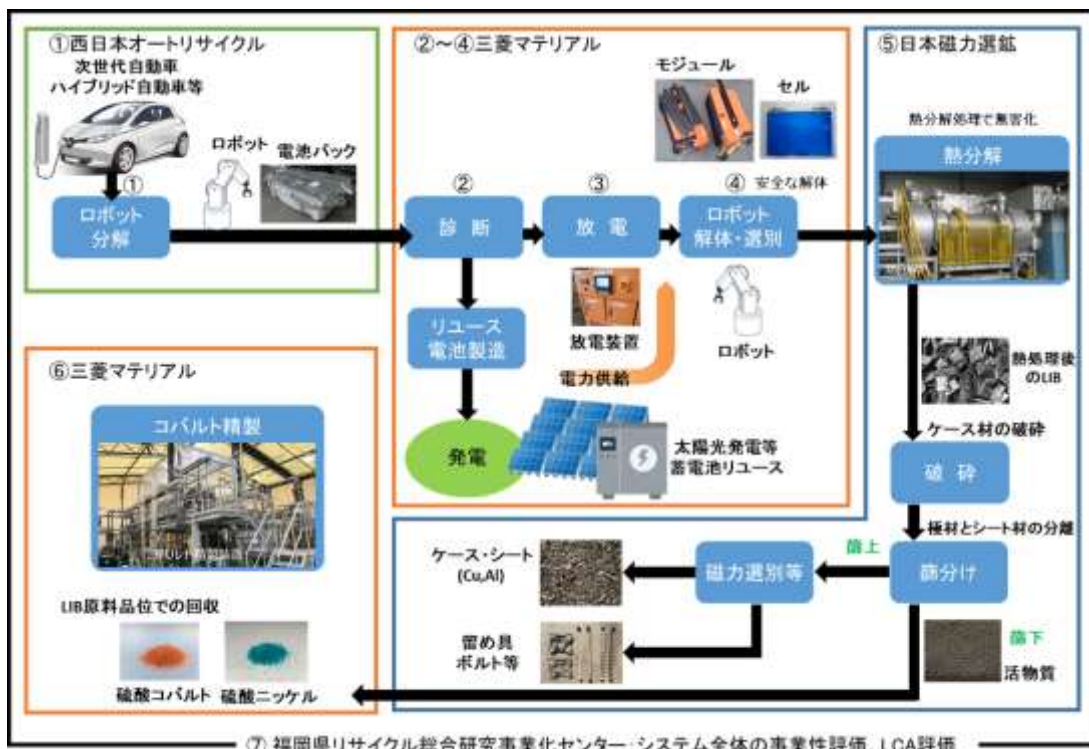


図 1.1-1 事業概要図

1. 1. 2 事業の背景

LIB は次世代自動車の普及と共に自動車への使用が増えているものの、現状では廃車両に搭載されていた LIB の扱いを巡る社会的な課題は顕在化していない。LIB のリユースでは、自動車メーカーが主体となった定置型 LIB としてのリユース事業が開始されているものの、国内では廃 LIB の発生量がそれ程多くないことから、事業化している企業は多くない。自動車リサイクル事業者では、廃車両から回収された LIB は、走行距離等の情報から LIB のリユース可否を判断し、売却できる LIB ユニットを部品として販売しているのが実態である。

将来、廃 LIB が大量発生する時代には、LIB の効果的な処理が求められる。自動車リサイクル事業者が廃車両から LIB を取り外した時点で、LIB の劣化度を評価し、リユース/リサイクル向けに仕分けることが出来れば、LIB をリユース事業者、リサイクル事業者へ効率よく輸送が可能であり、リユース事業者からリサイクル事業者への輸送を減らすことも可能である。すなわち、車載 LIB の簡易的な劣化診断を LIB 取り外しの際に行い、リユース可能な LIB の判断をその場で行うことで、LIB を遠方まで輸送する際に発生する CO₂ を抑制できる。また、リユース不可能な LIB についてのみリサイクル処理することで、LIB を有効利用可能であり、リサイクル処理による CO₂ 発生を削減できる。

LIB ユニットは、LIB セル又はモジュール、銅を使った電路、金属を含む制御基板等で構成されており、LIB のリサイクルでは、構成部材の需要者に応じた分別回収が欠かせない。部材の分別回収には、LIB を解体しなくてはならないが、LIB ユニット内は複雑な構成となっており、解体作業は人手に頼るところが大きい。国内では少子高齢化が進んでおり、将来、リサイクル向け LIB の大量発生に向け、省力化や作業負荷軽減が望まれる。加えて、回収された LIB は高い電圧を保持しており、安全な解体作業のためにも自動化装置を含んだ解体ラインの整備が求められる。

Co、Ni は将来的には需給バランスが大きく変化し調達が困難となることが予想されており、LIB リサイクルによる Co、Ni 回収が求められている。現在、廃 LIB は焼却処理や再生鉄を製造する電炉でリサイクルされている。電炉処理では、Fe は回収、リサイクルされるが、その他 Cu、Al、Co、Ni 等は、Fe 中の不純物として取り込まれるか、スラグに移行してしまい、材料本来の有効的な活用がなされていないのが現状である。

当社は Co、Ni のリサイクルを目指し、日本磁力選鉱株式会社と共同で、LIB リサイクル技術の開発に取り組んでいる。2019 年 4 月から、当社が独自開発した Co、Ni 精製装置を北九州市に設置し、Co、Ni を電池材料用にリサイクルするための回収実証試験を開始し、リサイクル技術の共同開発を進めている。

以上のように、廃車両から取り外された LIB については、将来の大量発生に備え、より効率的な処理システムを構築することで、LIB そのもののリユース、適正な LIB のリサイクルを促進し、環境影響負荷を下げ CO₂ 発生量の抑制に繋げることが可能である。LIB のリユース/リサイクルについて、これまでに様々な検討、検証が進められているが、リユース

ス/リサイクルを一貫したシステムは検証されておらず、システム全体に潜在することが予想される課題を顕在化させ、解決していくことが重要である。

1. 1. 3 解決すべき課題

2025年以降の全国的なLIB排出量増加に対応し、LIBのリサイクルを推進するために、LIB取り出しからCo、Ni回収までの総合的なシステムが求められており、本事業では、LIB取り外しからCo、Ni回収までの一貫処理を行いLIBのリユース/リサイクルシステムを実証する。

本事業においては、LIBのリユース/リサイクルの各個別プロセスにおける、以下の課題を解決する必要がある。また、LIBのリユース/リサイクル一貫処理により、新たな課題が顕在化した場合は、その解決方法について議論していく必要がある。

(1) LIBの取り出し自動化

車載用のLIBは、電気自動車(EV)かハイブリッド車(HV)による搭載量や電力仕様の違い、各メーカーによる大きさや重量、形状、取り付け場所、及び取り付け方法が相違し、取り出し手法も異なる。このため自動車メーカーのマニュアルに基づいて手解体で取り外しが行われている。この手法では作業負荷、効率の観点から、今後の廃車発生量増加への対応が難しい。今回、現時点で販売台数の多いLEAFとFIT3の2車種を対象とする。LEAFについて、LIBユニット締結ねじ取り外しの自動化を実証する。FIT3では、LIBユニット取り出しに助力装置を導入し、取り出し作業の省力化を図る。また、取り出し手法が類似する別車種への適用も検討する。

(2) LIBリユース/リサイクル仕分けに向けた劣化診断

回収したLIBユニットは、LIBの劣化度に応じて輸送前にリユース/リサイクルを仕分けることが望ましい。今回、LIBをユニット単位で評価する劣化診断技術を検討する。また、車両から取り外したLIBを定置型の蓄電池として活用する方法を検討する。

(3) LIBユニットの放電の実証

LIBユニットから、モジュール又はセルの状態まで安全に解体するため、解体作業前の完全放電が求められる。LIBの放電方法として、塩水放電法が確実であるが、LIBに残存するエネルギーを廃棄することになり、また、放電操作中に爆発性の水素ガス等が発生する。今回、LIBの解体の前段として、LIBに残るエネルギーを回収し、ユニット単位での効率的で安全な放電を検討する。

(4) LIBユニットの解体自動化の実証

LIBユニットからの部材の分別回収、後段のLIB熱分解処理に向けたLIBユニットの解体では、LIBユニットの構造が複雑であるため、人手による解体となる。作業負荷を低減し、効率的かつ安全な解体作業のためのLIB解体ラインを整備する必要がある。今回、産業用ロボットを活用し一部の作業を自動化した、安全な解体作業を実現するためのLIB解

体ラインを検討する。

(5) LIBの熱分解処理、破碎・選別処理による高効率な有価物分離回収

LIBユニットの解体により得られるLIBモジュール又はセルのリサイクルでは、熱分解処理によりLIB中の有機溶媒を揮発分解する。その後、破碎・選別処理において、後段のCo、Ni回収工程の原料である活物質と、Cu、Al等のシート材を選別して回収する。熱分解処理後のCo、Ni、Cu、Al等の化学形態、破碎・選別による活物質の状態により、Co、Niの回収操作に影響を及ぼすことから、操作条件の設定が課題となる。今回、熱分解からCo、Niの湿式処理による回収までを一連して操作することで、Co、Niを高効率で回収するための、熱分解、破碎・選別処理の操作条件を最適化する。

(6) Co、Niの高効率回収実証

これまで行ってきた活物質からのCo、Ni回収試験では、Co、Ni回収効率が低かったため、処理プロセスの改良を重ねてきた。本事業では、令和3年度から、この改良されたプロセスを適用し、Co、Niの高効率な回収を検証していく。

(7) 今回のリユース/リサイクルシステム全体の事業性評価、LCA評価

リユース/リサイクルシステム事業化に向けて、事業を前提とした各工程でのコスト試算、全体の経済合理性評価が必要である。そこで、技術と社会システムの条件を変えて経済効果のシナリオ分析を行う。また、各工程における環境負荷を算出することによる一貫したシステムでのLCA評価を実施する。

1. 1. 4 実施体制

本事業の実施体制を図 1.1-2 に示す。申請法人及び共同実施者の役割の詳細は図 1.1-1 の事業概要図のとおりである。



図 1.1-2 事業の実施体制図

1. 2 LIBユニット取り出し自動化

LIBユニット取り出し自動化を検討するにあたり、各メーカーの電動車に使用されたLIBユニット取り出しへの汎用性を考慮し、EVの代表車としてLEAFを、HVの代表車としてFIT3を選定した。各車の型式と写真を表1.2-1に示す。検討に際しては、各メーカーが提示している手解体による取り出し方法を参考にした。

表 1.2-1 実証事業対象LIBユニット搭載車両

車種	LEAF		FIT3
型式	AZE0 (30kWh)	ZE1 (40kWh)	GP5
写真			

1. 2. 1 LIBユニット取り出し自動化装置検討

1. 2. 1. 1 LEAFの手解体によるLIBユニットの取り出し方法と課題

1) LIBユニットの搭載状態と仕様

LEAFは電気自動車(EV)であるため、LIBユニットは重量が300kg以上と非常に重く且つ大型である。LIBユニットは図1.2-1に示す様に車体の外側でフロアの下側から貼り付けるように搭載されている。今回対象としたLEAF AZE0(30kWh)とZE1(40kWh)のLIBユニットは両車種とも同形状である。これらLIBユニットの形状を図1.2-2に、また仕様を表1.2-2に示す。LIBユニットは複数のボルトで車体フレームに締結されて車体に取り付けられており、樹脂製アンダーカバーによって覆われて保護されている。LIBユニットを保護するための樹脂製アンダーカバーの取り付け状態を図1.2-3に、またLIBユニットの車体への取り付け状態を図1.2-4に示す。

2) 手解体によるLIBユニットの取り出し方法と課題

メーカーのLIBユニット取り出しマニュアルを基に、LIBユニット取り出し方法の概略を図1.2-5に示す。LIBユニット取り出し方法の一連の作業のうち、安全性や作業効率の改善が求められる作業は、LIBユニットを車体から降ろす作業である。当該作業は、カーリフトで持ち上げられた車体の下部に作業員が入り込んで行われる。この作業状況を図1.2-6に示す。作業員は、樹脂製アンダーカバー、電気系コネクタ及びLIBユニット固定ねじの取り外し等を行う必要があり、車体の底面に対して上向きでの作業を長時間強いられる。樹脂製アンダーカバーの取り外し作業の詳細を図1.2-7に示す。樹脂製アンダーカバーは、外周部を19個のねじで、内周部を16個の樹脂製ファスナーでLIBユニット底部に取り付けられている。作業員は、これらをソケットレンチとファスナー取り外し工具で取り外すことになる。電気系コネクタ及びLIBユニットを取り付けるための締結ねじ(以下、LIBユニット締結ねじ)の取り外し作業の詳細を図1.2-8に示す。作業員は、車体前方からLIBユニットに3箇所接続された電気系コネクタを最初に取り外す。次に、LIBユニット前方2箇所のボンディングプレートを取り外した後、図1.2-9に示すリフトテーブルを使用してユニットを受けた状態にしてLIBユニットを降ろす際の落下防止を図りながら、ユニット後部より4本のねじと下部より8本のLIBユニット締結ねじを取り外す。この様に、LIBユニットを車体から降ろす作業は、車体の下部に入り込んで上向き姿勢で数多くの部品を取り外すことになるため、部品やアンダーカバー等に付着した泥等の落下もあり作業環境が悪いととも、300~400kgの重量物であるLIBユニットの落下の危険性を伴っている。従って、LIBユニットを車体から降ろす際の作業員の安全性や作業効率の改善を課題とした。

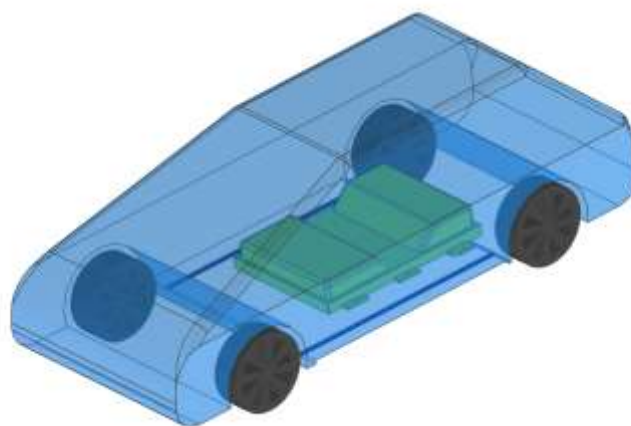


図 1.2-1 LEAF LIBユニット搭載位置

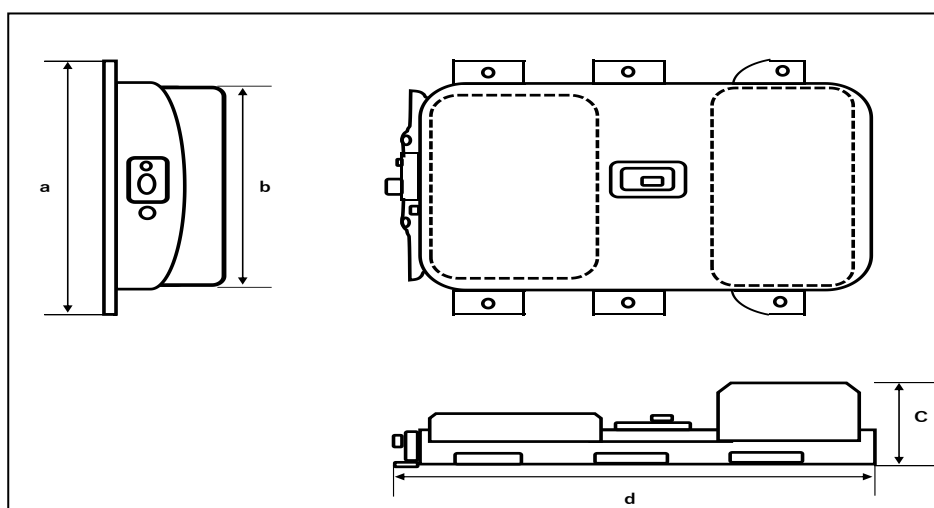


図 1.2-2 LEAF AZE0 と ZE1 の LIBユニット形状

表 1.2-2 LEAF の LIBユニット仕様

車種	AZE0	ZE1
種類	リチウムイオン電池(30kWh)	リチウムイオン電池(40kWh)
構成	48 モジュール(192 セル)	24 モジュール(192 セル)
定格電圧 (V)	360.0	350.0
重量 (kg)	294.0	303.0
寸法 (mm)	a	1188.0
	b	1007.0
	c	264.0
	d	1547.0

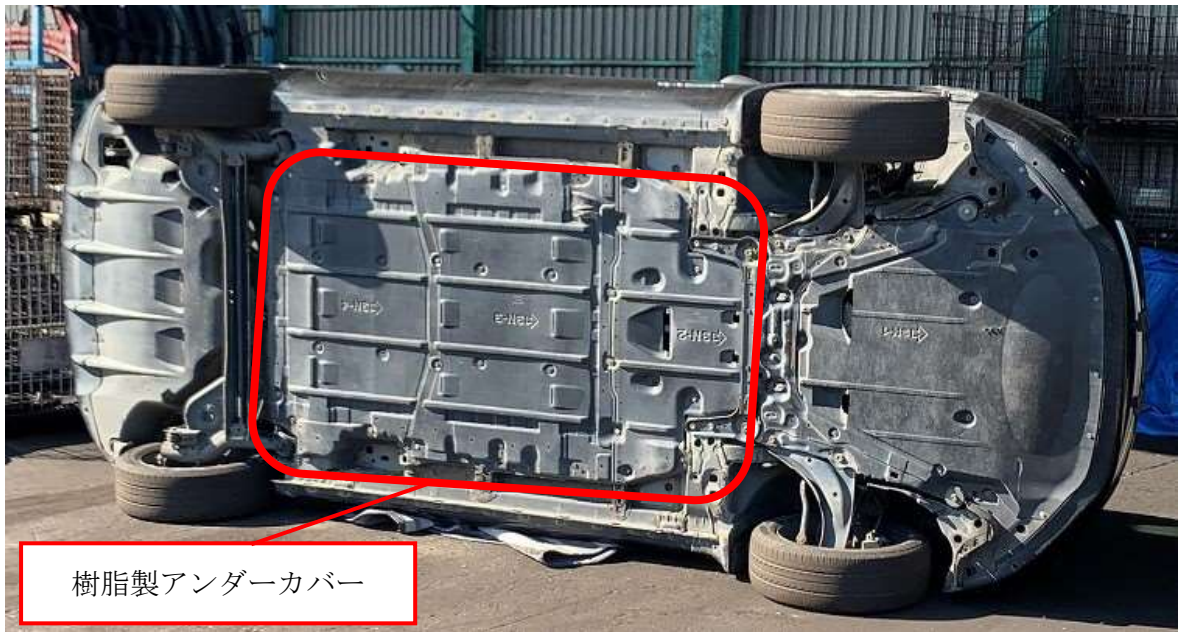


図 1.2-3 樹脂製アンダーカバー取り付け状態



図 1.2-4 LEAF LIBユニットの車体への取り付け状態



1. モータールームの12ボルトバッテリーの端子を取り外す



2. 室内からLIBユニットのサービスプラグを取り外す



3. カーリフトで車体を上方に上げアンダーカバーを取り外す



4. LIBユニットの電気系コネクタを取り外す



5. LIBユニット締結ねじを外しLIBユニットを車体から取り外す

図 1.2-5 LEAF の LIB ユニット取り出し方法概略手順



アンダーカバー取り外し作業



電気系コネクタ取り外し作業

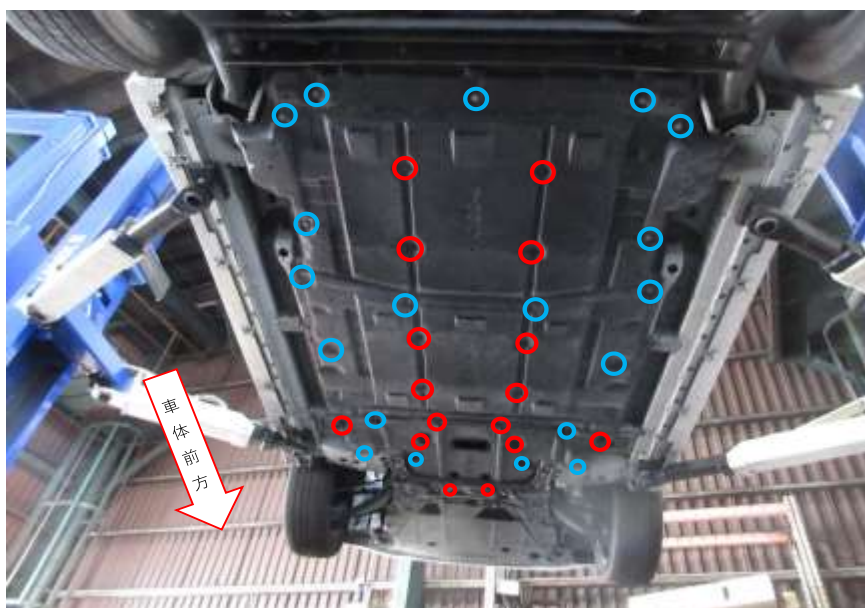


LIBユニット締結ねじ取り外し作業



LIBユニットの取り外し作業

図 1.2-6 LEAF の LIB ユニット取り出し作業状況



アンダーカバー取り付け樹脂ファスナー及びねじの分布状況



樹脂製ファスナー 16個



ファスナー外し工具で取り外し



ねじ 19個



ソケットレンチで取り外し



取り外したアンダーカバー

図 1.2-7 アンダーカバー取り外し内容詳細



電気系コネクタ（3箇所）



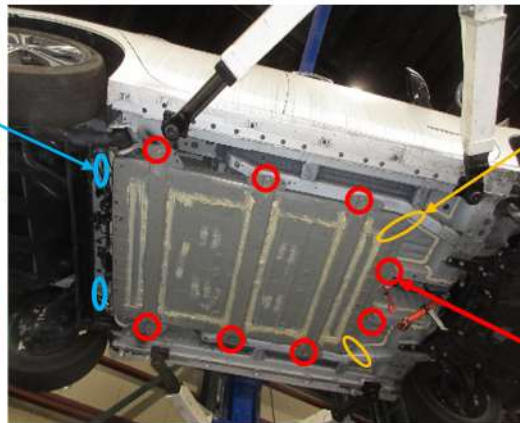
取り外した状態



後部LIBユニット締結ねじの取り外し状況



後部LIBユニット締結ねじ（M10）4本取り外し



LIBユニット締結ねじ分布状況



ボンディングプレート取り外し（2箇所）



後部LIBユニット締結ねじ（M12）8本取り外し

図 1.2-8 電気系コネクタ及びLIBユニット締結ねじの取り外し内容詳細



図 1.2-9 リフトテーブル

1. 2. 1. 2 LIBユニット取り出し自動化装置の検討

LIB ユニット取り出し自動化装置を検討するにあたり、車体下部作業及び長時間の上向き作業を排除する手段として長手方向を軸に車両を傾転させて作業性を向上させる装置である車両傾転装置を導入することとした。また、車両傾転装置に加えてLIBユニット締結ねじ取り外しの部分自動化を可能とするロボットを導入することで、LIB ユニット取り出し自動化装置全体として省力化、安全性及び生産性の向上を目指すこととした。ロボットが対応できない作業の一部である樹脂製アンダーカバー及びアンダーカバー周辺の電気系コネクタ等の取り外しでは、車体を90°に横転して作業員が正対した状態で作業を可能とすることで作業負荷の低減を図ることを課題とした。自動化については、ロボットの特性上、上からの作業を得意とするため、車体を180°に反転することでLIBユニット締結ねじの取り外しに対応させることを課題とした。また、一連のLIBユニット取り出し作業を要員1名で行うことを前提とし、作業における車体の横転や反転及び復元作業の自動化とロボット導入を含めた安全性確保を開発課題とした。LEAFのLIBユニットの取り出し時間については、1台当り30分を目標とした。なお、この時間は1.4に示す2025年の九州エリアでのLEAF廃車発生予測である2.7個/日も包含できる。

1) 車両傾転装置の開発

車両傾転装置を図1.2-10に、主仕様を表1.2-3に示す。

(1) 装置設計の考え方

装置の設計にあたり、以下の点を考慮して装置の開発を行った。

- ① 車体の底部に積載された300kg～400kgの重量を有するLIBユニットの取り出し作業において、最も危険なLIBユニットを車体フレームから取り外す作業を上方向からロボットにて行うこと、及び取り出したユニットの回収作業を安全かつ効率的に行うことを可能とすること
- ② 樹脂製のアンダーカバーや電気系コネクタの取り外し及びLIBユニット締結ねじでロボットが対応できない箇所の取り外し作業を作業員が正対した状態で行うことを可能とすること
- ③ 一連のLIBユニット取り出し作業を要員1名で実施し、高い生産性を有することを可能とすること
- ④ LEAF以外の他社製EVのLIBユニット取り出しへの汎用性を持たせること

以上の4点を具備する装置として、車のホイールベースの間隔を有する二つのリングの中に車両を固定し、回転させることで90°横転の状態や180°反転の状態がスピーディーにつくり込める車両傾転装置を開発することとした。

(2) 車両傾転装置の主仕様

① 車両位置決め機能と固縛装置

車両を反転した状態で LIB ユニット取り出し作業をロボットで行うためには、車両傾転装置に対する車両位置決めと固定が必要である。まず装置フレームへの車両位置決めについては、車両前後方向は前輪及び後輪の輪留め（図中「縦方向車両ガイド」）と横方向車両ガイド各 4ヶ所で行う。また、車両のフレームへの固定では、車両傾転装置フレームの前後に固縛装置を設けている。固縛装置は、LEAF を傾転装置フレームに設置後、前後の固縛装置が立ち上がり、車両の前後を電動シリンダーと連結したベルトスリングを用いて締め付け、車両を固定する装置である。当該装置は、傾転装置フレームに車両をセット後、自動運転で車体を固縛し、LIB ユニット取り出し後の車両傾転装置 0° 復元時に固縛を解除する動作も全て自動で行う。なお、ベルトスリングを用いることにより、LEAF と車両の形状が近似していれば固縛が出来るように汎用性を持たせている。

② 回転装置

車両の固縛を完了後、車両傾転装置の内リングが電動モーター駆動により伸びて外リングと結合し、円状のリングとなる。この状態で、リング本体を電動モーターにより回転させることで、リング内側のフレームに固縛された車両を 90° 横転の状態及び 180° 反転の状態に傾転することを可能としている。

③ リフト・シフト装置

車両が 180° 反転の状態、ロボットによる LIB ユニット締結ねじの取り外しを完了した後、車両傾転装置のフレームに沿って、リフト・シフト装置が LIB ユニットの重心位置に向かって前進する。ユニットの重心位置まで来ると、ジャッキ方式のリフト機構により LIB ユニットの重量を 300kg 程度の力で車体に押し付け、ねじの締結がない状態の LIB ユニットの重量を車体に固定する。次にリフト・シフト装置と車体で LIB ユニットの重量を保持したまま、180° 反転の状態から 0° の状態まで復元する。復元後、リフト・シフト装置のリフト機構が下がり、LIB ユニットが車体から取り外されるといった一連の作業を自動で行う。

2) LIBユニット締結ねじ取り外しロボット化開発

ねじ取り外しロボットを図 1.2-11 に、主仕様を表 1.2-4 に示す。

(1) 装置設計の考え方

装置の設計にあたり、以下の点を考慮して装置の開発を行った。次の5点を具備するロボットの設備化を行った。

- ① LIB ユニット締結ねじをロボットで取り外すことで、安全性の確保及び自動化による作業効率の向上を可能にすること
- ② 車両傾転装置への車両のセット状態や LEAF 以外の車種に起因する LIB ユニットの締結ねじの位置ズレに対応可能であること
- ③ 車両傾転装置と連動して LIB ユニット締結ねじの取り外しを行う自動運転を可能とすること
- ④ LIB ユニット締結ねじの取り外しに失敗した場合、作業者が取り残しねじを確認した上で再試行する機能を有し、作業者の稼働範囲内への立ち入りを検知できること
- ⑤ 作業者のロボット稼働範囲内への立ち入り検知の際の安全対策機能を有すること

(2) ロボットの主仕様

① ロボット

LIB ユニット締結ねじの取り外し位置まで、ナットランナー及びカメラを誘導するためのロボットは株式会社安川電機製の MOTOMAN GP180-120 を、ロボットコントローラーは YRC1000 を使用する。ロボット本体を図 1.2-12 に示す。構造は垂直多関節型 (6 自由度) で可搬質量は手首部 120kg で、最大リーチは 3058 mm である。ねじの取り外しに関わる主な仕様としては、手首回転許容モーメント $520\text{N}\cdot\text{m}$ で位置繰返し精度は 0.05mm と十分な性能を有している。また、LEAF 以外の他メーカーの車種への汎用性も考慮し、ねじの位置を学習するティーチング機能を有している。

② ナットランナー

LIB ユニット締結ねじ (M12) を取り外すナットランナーは、瓜生製作所株式会社製の UNR-F100-2500NT を使用する。LEAF の LIB ユニット締結ねじは $90\text{N}\cdot\text{m}$ ~ $130\text{N}\cdot\text{m}$ で締結されている。当該ナットランナーはねじを緩めるトルクを $250\text{N}\cdot\text{m}$ と余裕を持った仕様とした。ナットランナーを図 1.2-13 に示す

③ カメラ

LIB ユニット締結ねじ (M12) とナットランナーを結合させるための詳細な位置 (直径 15 cm の範囲) を判別するカメラは、株式会社キーエンス製の CA-H200MX を使用する。カメラを図 1.2-14 に示す。撮影素子は白黒 CMOS、正方格子 16 倍速読出しで有効画素数は 1600

(H) ×1200 (V) である。画像の転送は、デジタルシリアル伝送で転送周波数は 195MHz である。

3) 車両傾転装置とロボットを組み合わせた LIB ユニット取り出し運転法の開発

(1) 基本構成

車両傾転装置とロボットを組み合わせた LIB ユニット取り出し自動化装置に係る各設備の基本構成を図 1.2-15 に、レイアウトを図 1.2-16 に基本構成図を示す。車両を車両傾転装置に搬入する側が開口した安全柵に囲まれたエリアに傾転装置とロボットが配置されている。ロボットは傾転装置の奥に 1750 mm の架台上に設置されており、車両を反転した状態で LIB ユニット締結ねじの取り外しが行えるように配置されている。取り外したねじの回収は、ロボットの左側の可動範囲に設置されたボルト回収ボックスで行う。

(2) 装置全体の運転方案

安全性の確保及び自動化による作業効率の向上を図るため、傾転装置への車両の搬入作業やアンダーカバーや電気系コネクタの取り外し及び LIB ユニット締結ねじでロボットが対応できない箇所の取り外し作業、及び LIB ユニット取り出し後の車両と LIB ユニット搬出作業を除いて他の作業は全て自動運転とする。一連の LIB ユニット取り出し作業での基本的な動作フローを図 1.2-17 に、運転方案の概要を図 1.2-18 に示す。また、ロボットによる LIB ユニット締結ねじ取り外し予定サイクルタイムを図 1.2-19 に示すが、8 本のねじの取り外し所要時間は 380 秒で、ねじ回収失敗時は、ロボットは原点復帰後アラームを発報し、作業者が状況を確認後リトライ可能な運転方案としている。

(3) 安全対策

安全柵で囲まれた車両傾転装置とロボットは、次に列記する作業を除いて他の作業は全て自動運転を行うことから、作業者が安全柵内に立ち入る際に以下の安全対策を設けている。

- ・傾転装置への車両の搬入作業
- ・アンダーカバーや電気系コネクタの取り外し作業
- ・ロボットでは困難な LIB ユニット締結ねじ取り外し作業
- ・LIB ユニット取り出し後の車両と LIB ユニット搬出

① 定常運転時の安全対策

傾転装置操作盤に「侵入許可 PBL」を設け、作業者が押釦した時に運転モードを表示するパトライトが緑点灯から黄色点滅に代わり自動運転を中断する。更に、操作盤の側面に設置された「セーフティープラグ」を抜くことにより安全柵内に入ることを可能としており、「セーフティープラグ」が抜かれた状態で操作押釦を操作しても設備は稼働しない安全対策をとっている。作業終了後は、作業者が「セーフティープラグ」を操作盤の所定位置に差し込み、操作盤上の「作業完了 PBL」を押釦することでパトライトが黄色点滅から緑点灯に代わり自動運転が復帰することとしている。図 1.2-20 に車両傾転装置の操作盤と操作釦を示す。

② 非定常時の安全対策

上記①の定常操作を行わずに作業者が安全柵内に立ち入ろうとした場合に備え、以下の安全対策を実施している。

- ・車両傾転装置前の安全柵開口部からの侵入対策

安全柵開口部に「ライトカーテン」を設けており、侵入検知でパトライトを赤点灯とし、自動運転の運転準備を切りとする。

- ・安全柵のドアからの侵入対策

安全柵のドアに「ドアセーフティープラグ」が設置されており、ドアセーフティープラグを抜いてドアを開けようとした時点で侵入を検知し、パトライトを赤点灯し自動運転の運転準備を切りとする。

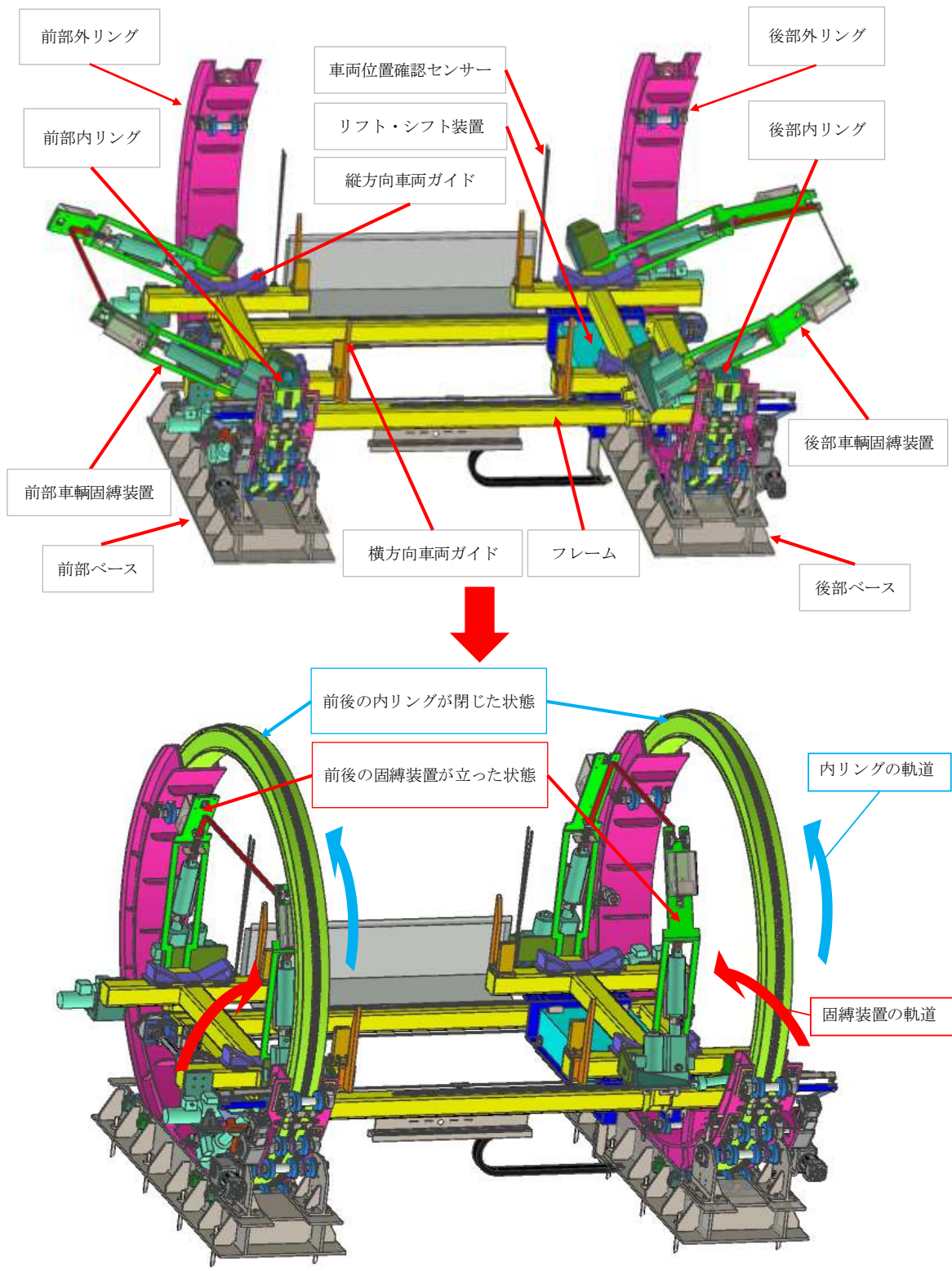


図 1.2-10 車両傾転装置

表 1.2-3 車両傾転装置主仕様

大項目	小項目	仕様	
概形寸法	横幅	4489 mm	
	縦幅	3293.5mm	
	高さ	3255.7mm	
傾転装置	傾転リング	個数	2
		外径	φ 3200 mm
		内径	φ 2804 mm
		外リング	幅 440 mm 215°
		内リング	幅 180 mm 145°
	駆動方式	チェーン・スプロケット モータードライブ	
固縛装置	個数	2	
	固縛機構	ベルトスリング+圧縮バネ モータードライブ	
	起立傾斜角度	65°	
シフトリフト装置	個数	1	
	寸法	1200 mm×700 mm	
	横行ストローク	1350 mm	
	押付力	ジャッキ方式 300kg	

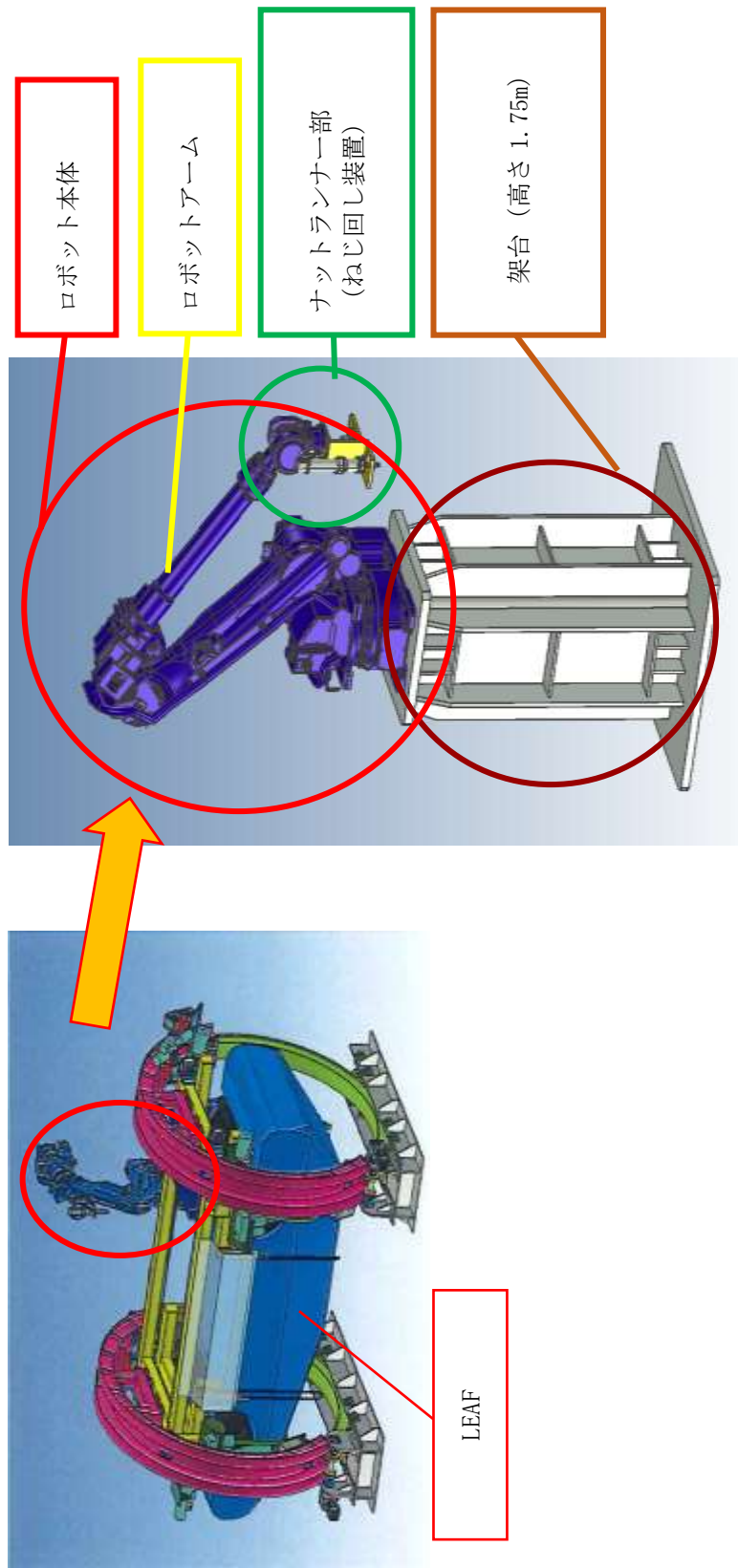


図 1.2-11 LIBユニット締結ねじ取り外しロボット

表 1.2-4 LIB ユニット締結ねじ取り外しロボット主仕様

大項目	小項目	仕様
ロボット	(株)安川電機製 MOTOMAN GP180-120	<ul style="list-style-type: none"> ・構造 垂直多関節型 (6自由度) ・最大リーチ 3058 mm ・可搬質量 手首部 120kg ・位置繰返し精度 0.05 mm ・許容モーメント 520N・m
カメラ	(株)キーエンス製 CA-H200MX	<ul style="list-style-type: none"> ・撮像素子 白黒 CMOS 16倍速読出し ・有効画素数 1600(H)×1200(V) ・画像転送周波数 195MHz
ナットランナー	瓜生製作所(株)製 UNR-F100-2500N	<ul style="list-style-type: none"> ・最大締付トルク 250N・m ・最高回転数 370rpm



図 1.2-12 株式会社安川電機製ロボット MOTOMAN GP180-120



図 1.2-13 瓜生製作所株式会社製 ナットランナー UNR-F100-2500N



図 1.2-14 株式会社キーエンス製 カメラ CA-H200MX

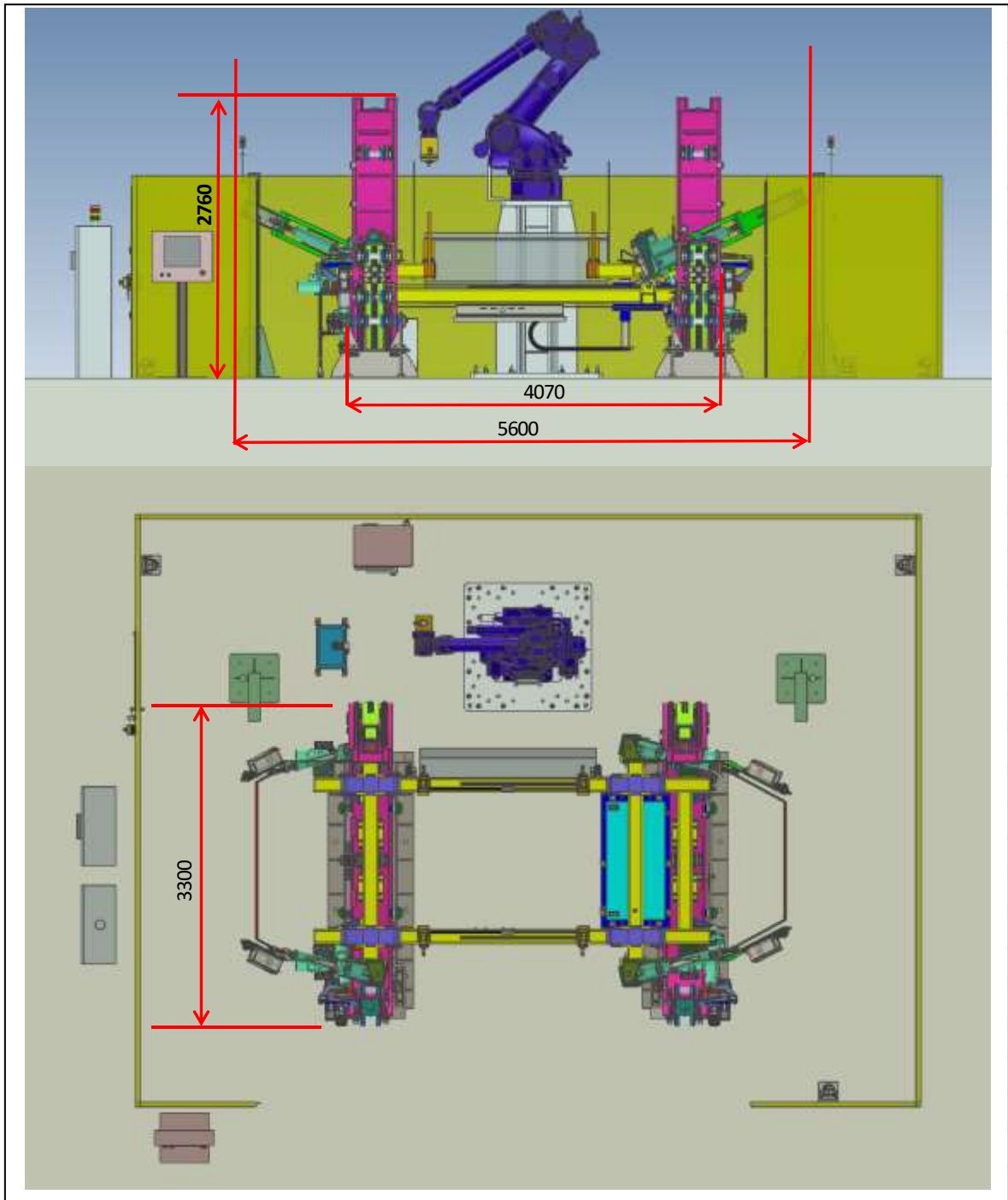


図 1.2-15 車両傾転装置とロボットのレイアウト

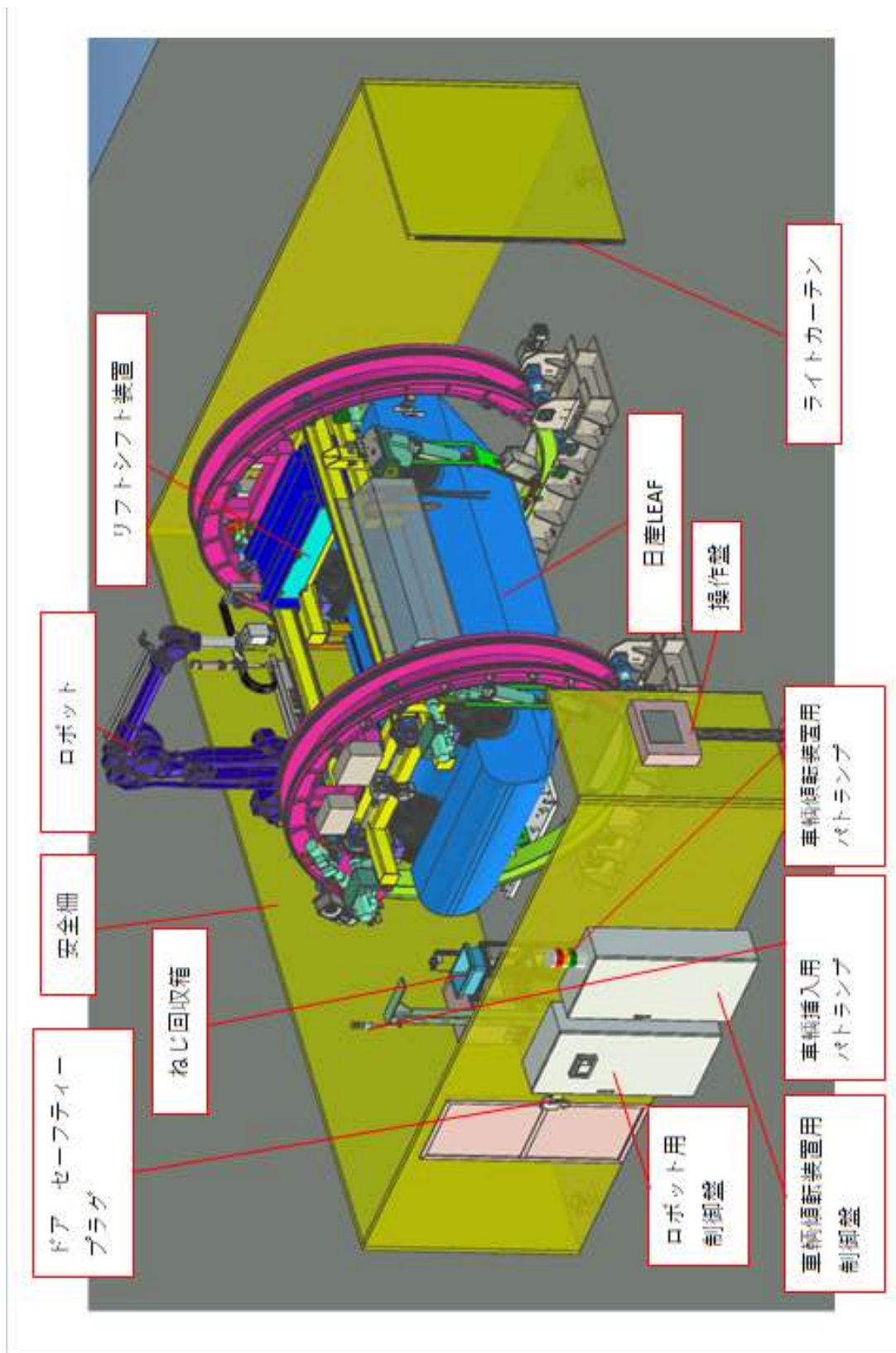


図 1.2-16 車両傾転装置とロボットの基本構成図

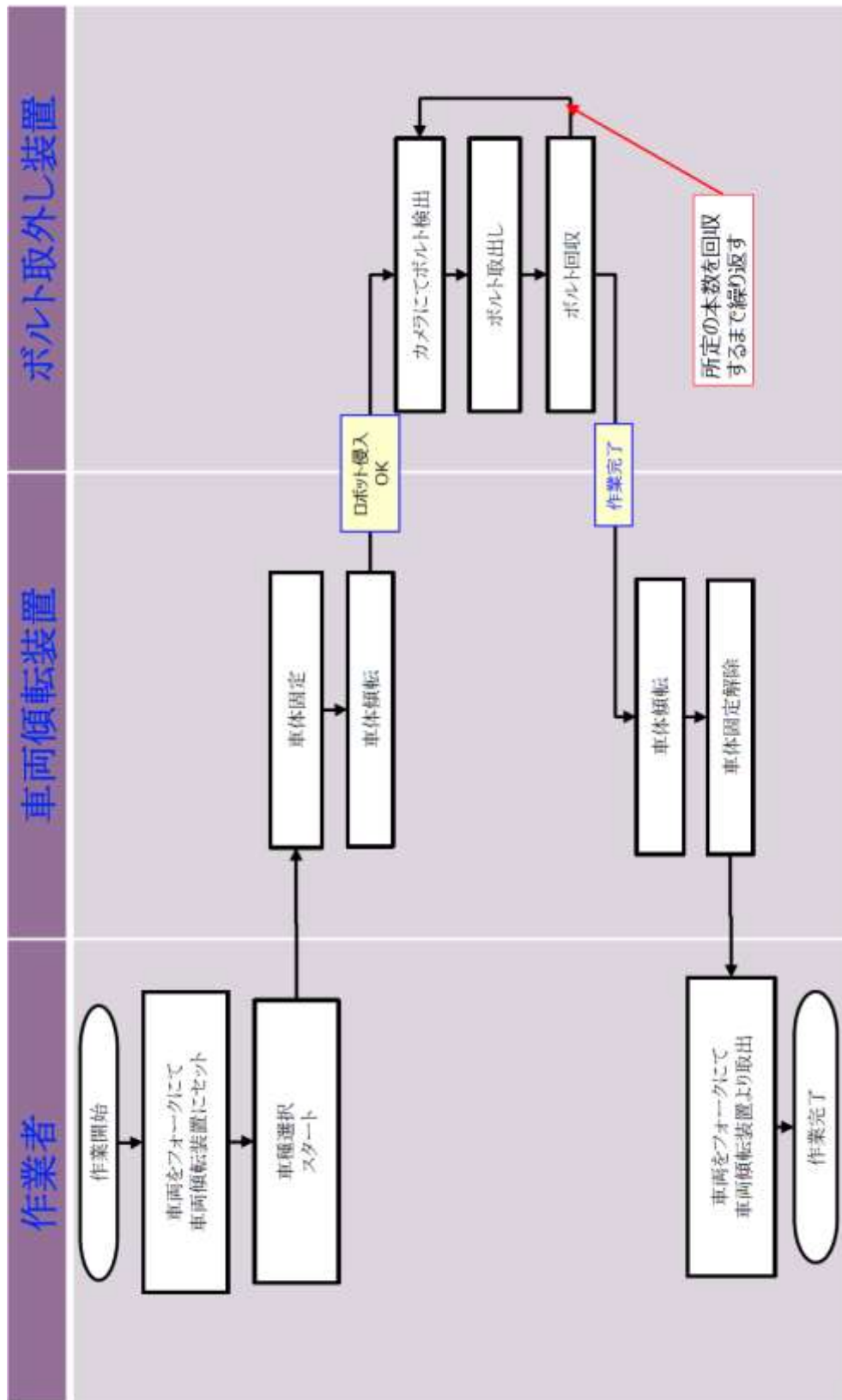
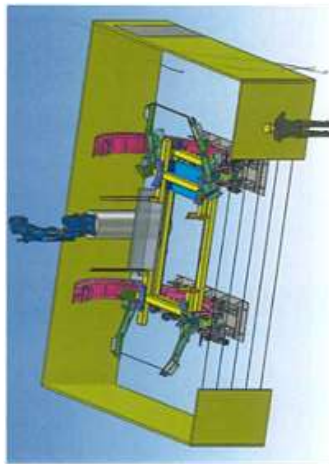
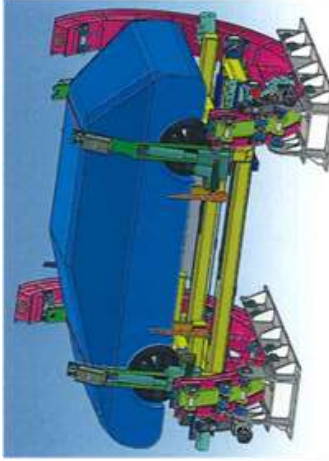


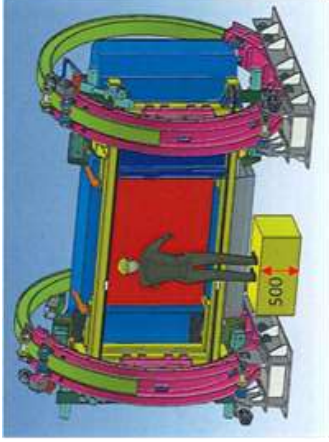
図 1.2-17 基本動作フロー



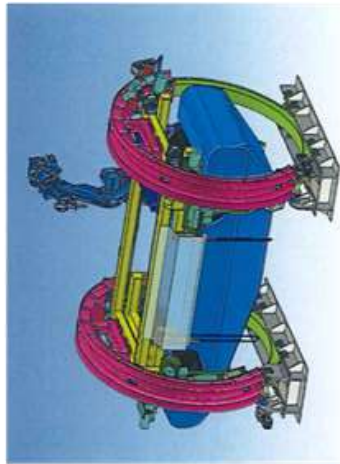
1. 車両傾転装置全容



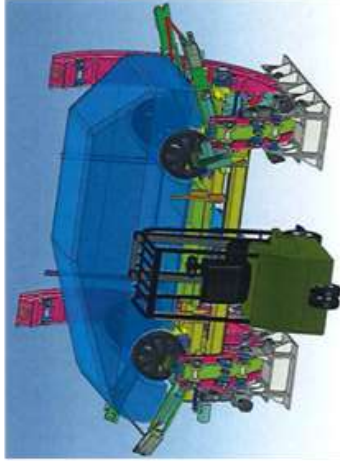
2. ニッサンリリーフを傾転装置に設置



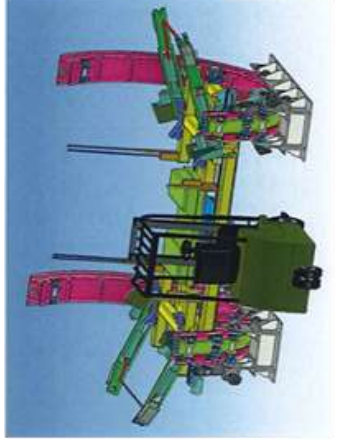
3. 90度横倒しの後、作業員がアンダーカーバーを取外す



4. 180度裏返しの後、ロボットがLIBユニット締結ねじを取り外す



5. LIBを押さえた状態で車体を元に戻し、フォークリフトで車体を抱えて移動させる



6. 残ったLIBをフォークリフトで抱えて移動する

図 1.2-18 車両傾転装置とロボットの運転方案概要

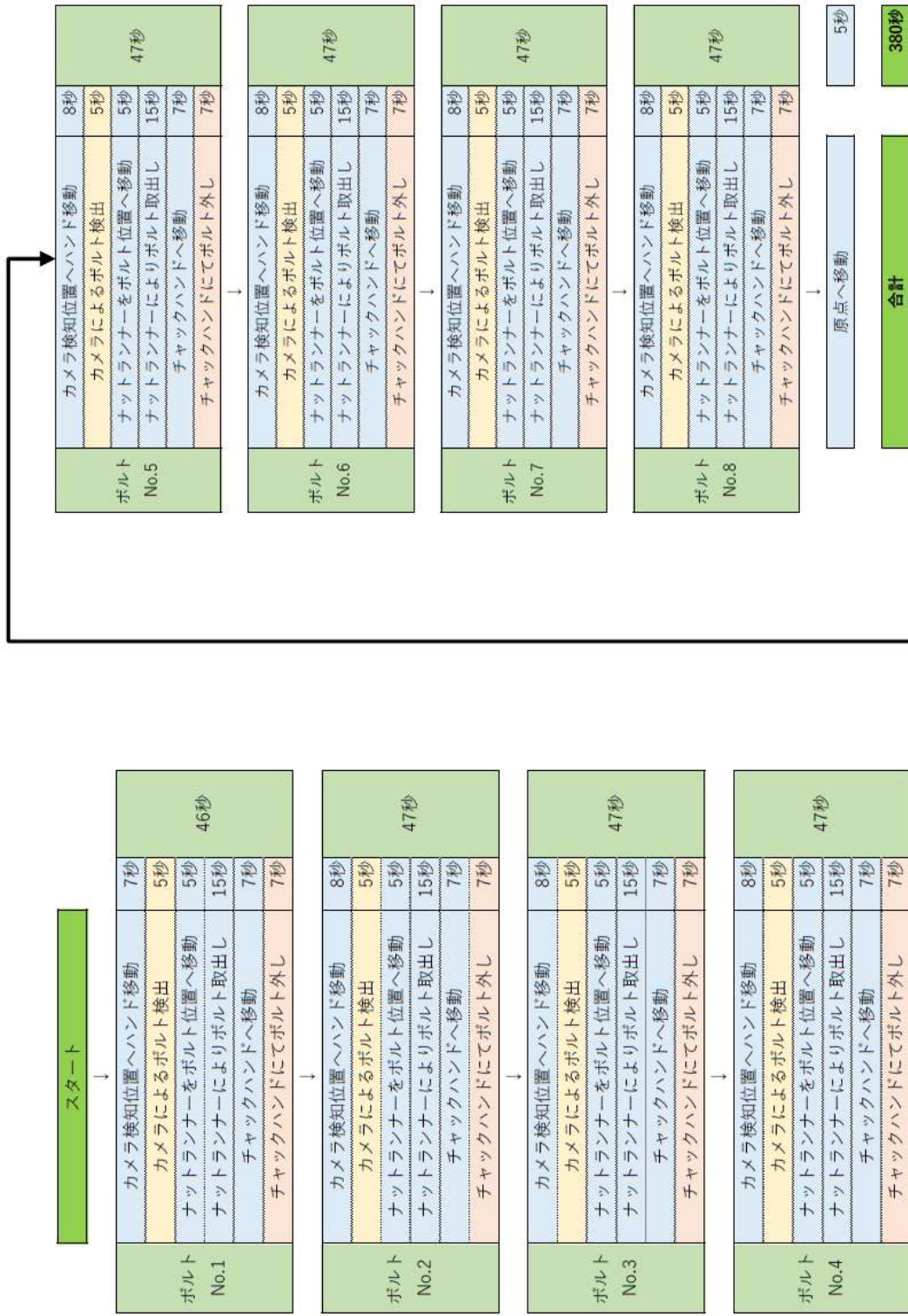


図 1.2-19 ロボットによる LIB ユニット締結ねじ取り外し予定サイクルタイム

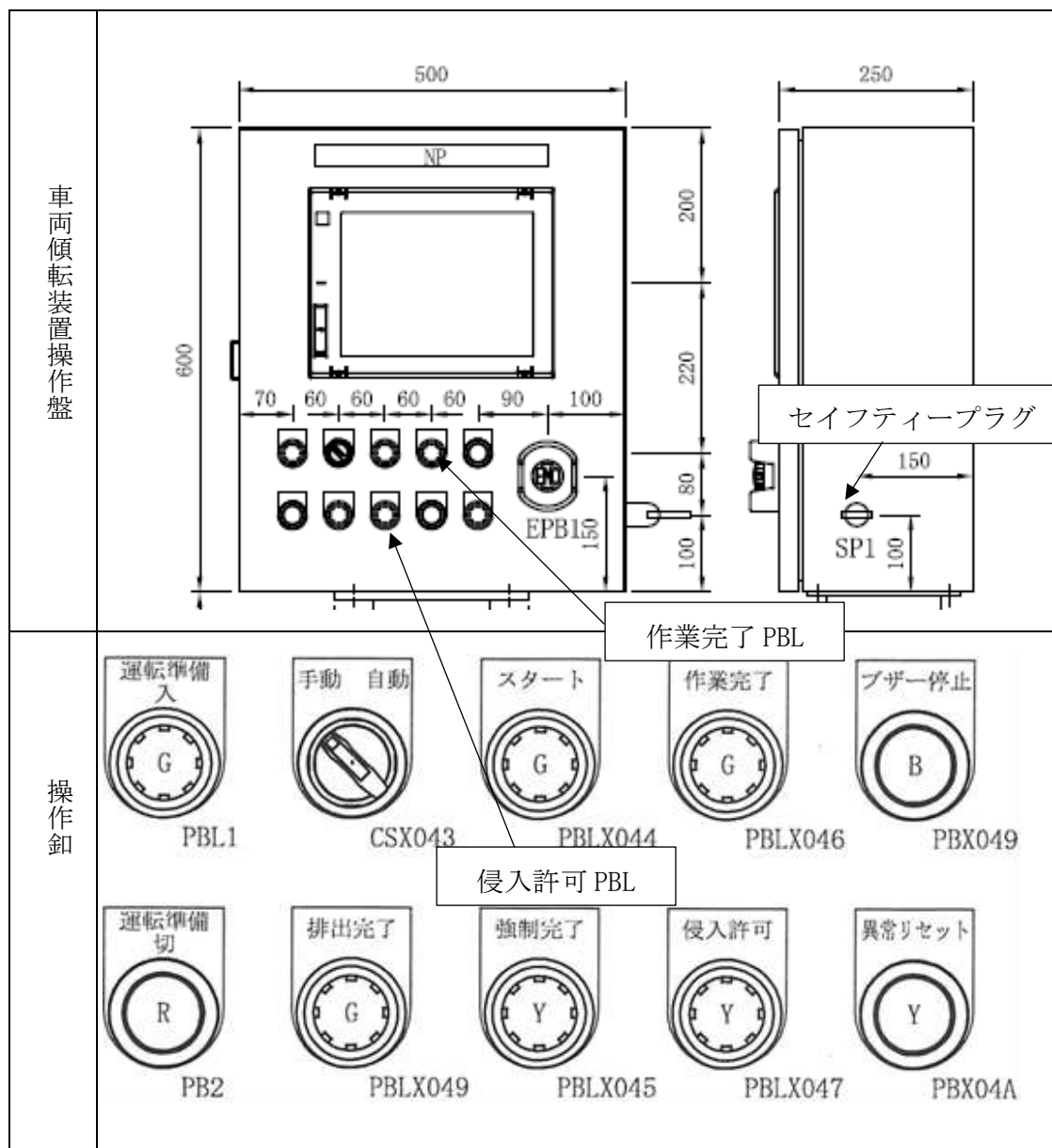


図 1.2-20 車両傾転装置操作盤と操作鈕

1. 2. 2 LIBユニット取り出し助力装置の検討

1. 2. 2. 1 FIT3の手解体によるLIBユニット取り出し方法と課題

1) LIBユニットの搭載状態と仕様

FIT3はハイブリッド車(HV)であるため、LIBユニットは小型で室内のラゲッジルームの下に搭載されている。LIBユニットの搭載状態を図 1.2-21に、また仕様を表 1.2-5に示す。

2) 手解体によるLIBユニットの取り出し方法と課題

FIT3のメーカーのLIBユニット取り出しマニュアルを基に、取り出し法の概要を図 1.2-22に示す。小型のLIBユニットとはいえ、LIBユニットの重量は37kg程度あるため、取り出し時は2名で取り出す必要があり、しかも狭いラゲッジルーム内での作業となるため、安全な作業姿勢がとり難いととも誤ってLIBユニットを落下させる危険性を持つ。従って、LIBユニットを1名で安全かつ効率的に取り出すことを課題とした。一方、他メーカーのハイブリッド車(HV)ではLIBユニットを運転室内に搭載している場合もあることから、ラゲッジルーム以外からの取り出しにも対応できる汎用性の確保も課題とした。

1. 2. 2. 2 LIBユニット取り出し助力装置の検討

FIT3 を代表とするハイブリッド車(HV)の LIB ユニットのラゲッジルームや運転室内の狭いスペースに搭載されており、ロボットによる LIB ユニット取り出し省力化の適用が難しいことから、搭載位置に対する汎用性を備えた助力装置の適用を検討した。特に、LIB ユニットを取り出す作業の安全性と作業効率を左右するユニットとの接続治具については、FIT3 に留まらず、他の車種への汎用性を考慮した。なお LIB ユニットの取り出し時間については、FIT3 の LIB 取り出し作業の目標時間として、作業員 1 名の対応で 1 台当り 15 分を目標とした。なお、この時間は 1. 4 に示す 2025 年の九州エリアでの FIT3 廃車発生予測である 14.4 個/日も包含できる。

1) LIBユニット取り出し助力装置の検討

助力装置の本体アーム部分は、自動車メーカーの製造ラインでも実績があり、アームの寸法や操作方法等を含め用途に応じた柔軟な設計対応が可能なトーヨーコーケン(株)を採用した。

(1) 装置検討の考え方

装置の検討に当たり、以下の点を考慮して装置の設計を行った。

- ① 重量が 37kg 程度ある LIB ユニットの取り出し作業を 1 名で安全かつ効率的に取り出すことを可能とすること
- ② LIB ユニットが運転室内等のラゲッジルーム以外に積載されている場合への汎用性を有した装置であること

以上の 2 点を具備する装置の検討を行った。

(2) 助力装置の主仕様

LIB ユニット取り出し助力装置の本体アームの主仕様を表 1.2-6 に、装置概略図を図 1.2-23 に示す。また、LIB ユニット取り出し接続治具については独自に設計製作を実施した。LIB ユニット取り出し接続治具を図 1.2-24 に示す。

(3) 助力装置の使用方法

LIB ユニット締結ねじを取り外し後、通常であれば FIT3 のラゲッジルームから 2 名で LIB ユニットの抱えて取り出す作業を、エア一式の助力装置を用いて 1 名で取り出すことを可能としている。また、FIT3 の LIB ユニットに関しては、スライドピン式接続治具を専用に設計し、落下防止を考慮したロック機能付きのピン方式の採用によりワンタッチで装着及び取り外しが出来る様になっており、作業性の向上を図ることを可能としている。更に、接続治具を汎用フック式接続治具に付け替える機能も準備し、FIT3 以外のバッテリー

ユニットも取り外すことが出来る様に汎用性を持たせている。LIB ユニット取り出し接続治具の種類を図 1.2-25 に示す。

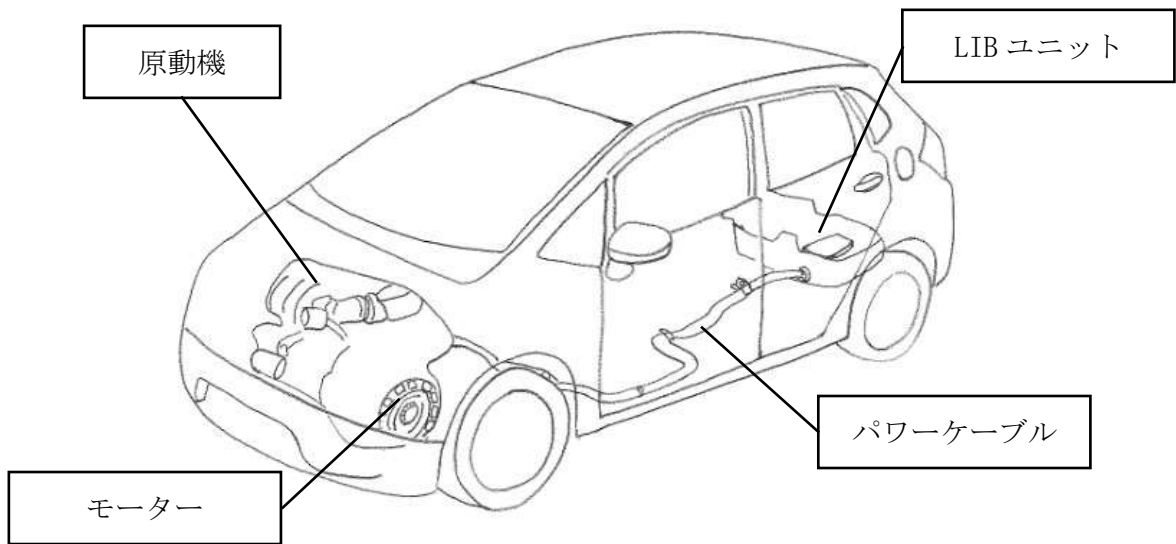


図 1.2-21 FIT3 の LIB ユニット搭載状態

表 1.2-5 FIT3 の LIB ユニット仕様

種類	リチウムイオン電池	
構成	4 モジュール(48 セル)	
定格電圧 (V)	172.8V	
重量 (kg)	37.5	
寸法 (mm)	長さ	520
	幅	760
	高さ	200



図 1.2-22 FIT3 の LIB ユニット取り出し方法

表 1.2-6 LIB ユニット取り出し助力装置の主仕様

大項目	小項目	仕様
LIB ユニット 取り出し助力装置	トーヨーコーケン(株) バラマン仕様 BMS-125	<ul style="list-style-type: none"> ・最大吊上げ加重 100kg ・ワーク質量 MAX. 60kg ・有効作業半径 1535 mm ・有効作業高さ 1500 mm ・使用空気圧 0.54MPaG ・本体+台座質量 180kg+600kg

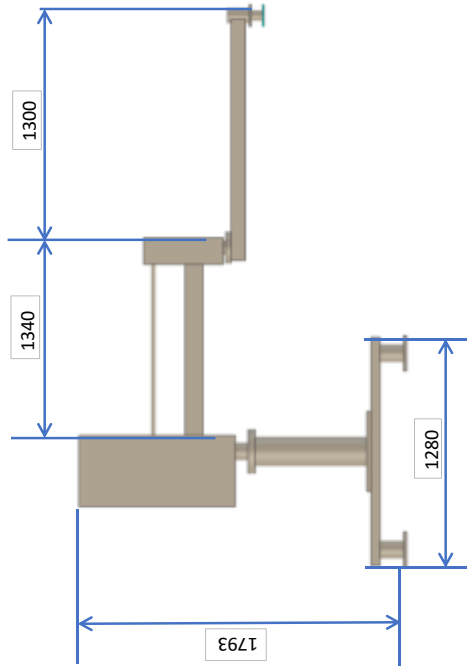
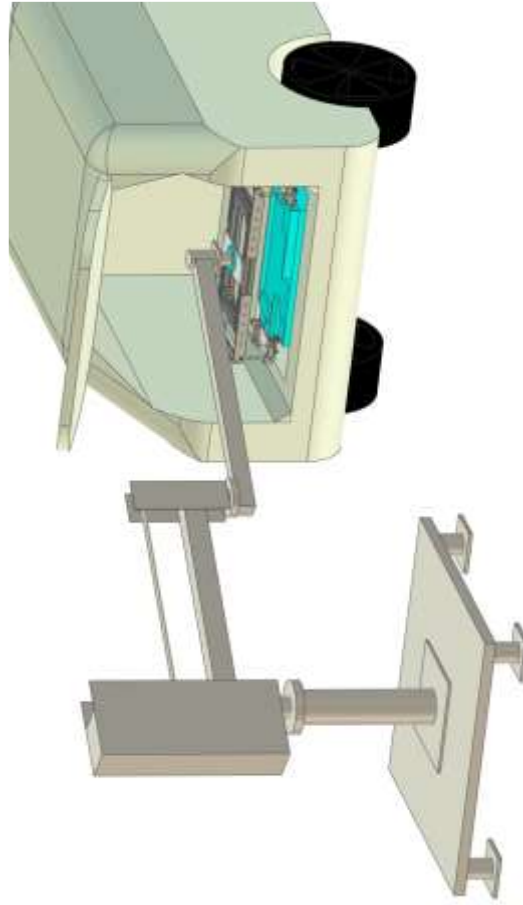


図 1.2-23 LIB コンピュータ取り出し助力装置

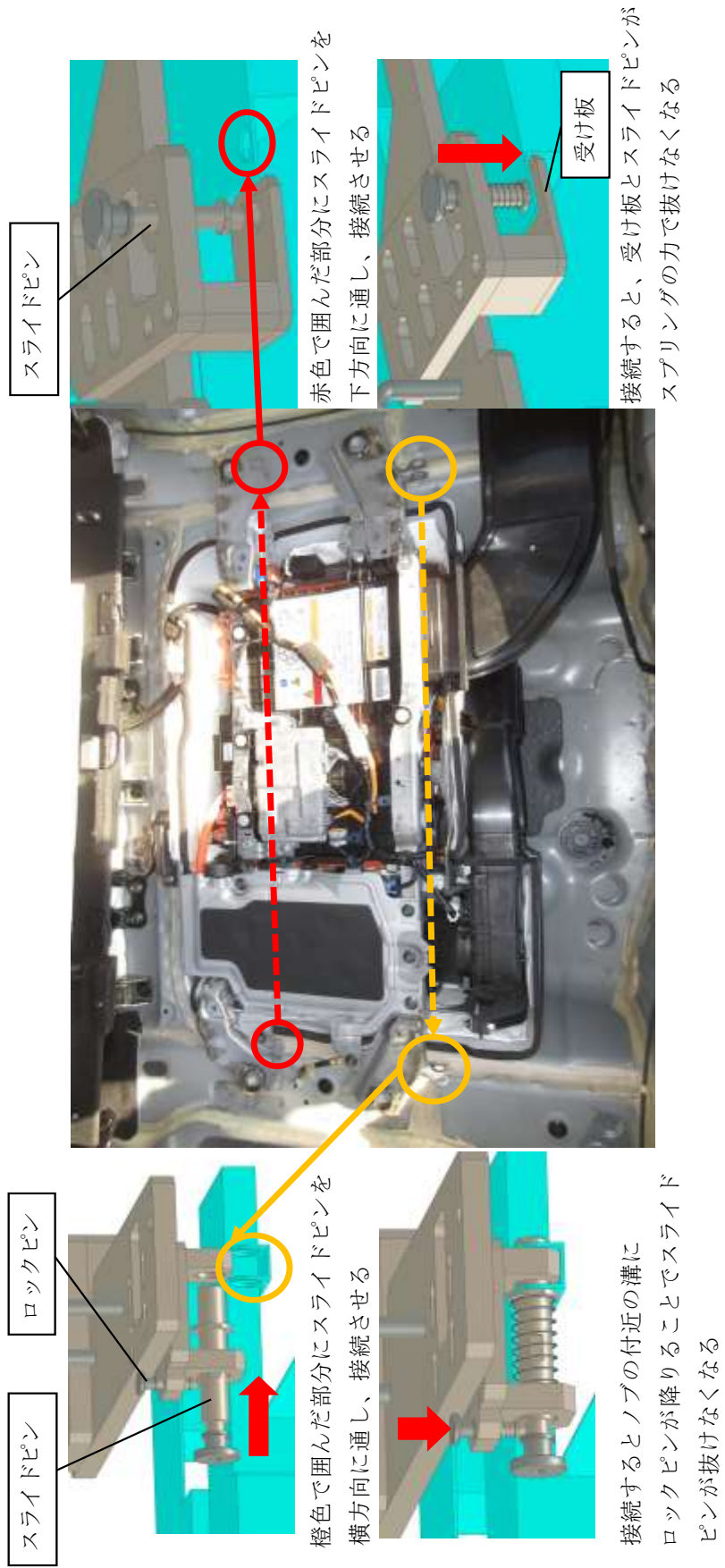


図 1.2-24 LIB ユニット取り出し接続治具



スライドピン式接続治具



汎用フック式接続治具

図 1.2-25 LIB ユニット取り出し接続治具の種類

1. 2. 3 LIBユニット取り出し自動化装置設置場所

LEAFを対象とした車両傾転装置とLIBユニット締結ねじ取り外しロボット及びFIT3を対象とした助力装置のレイアウトを図1.2-26に示す。両装置を近接した配置にすることにより、LEAFのLIBユニット取り出し作業を自動運転中にFIT3のLIBユニット取り出し作業を並行して行えるようにし、1名で安全で生産効率の良い作業を可能とすることを狙っている。

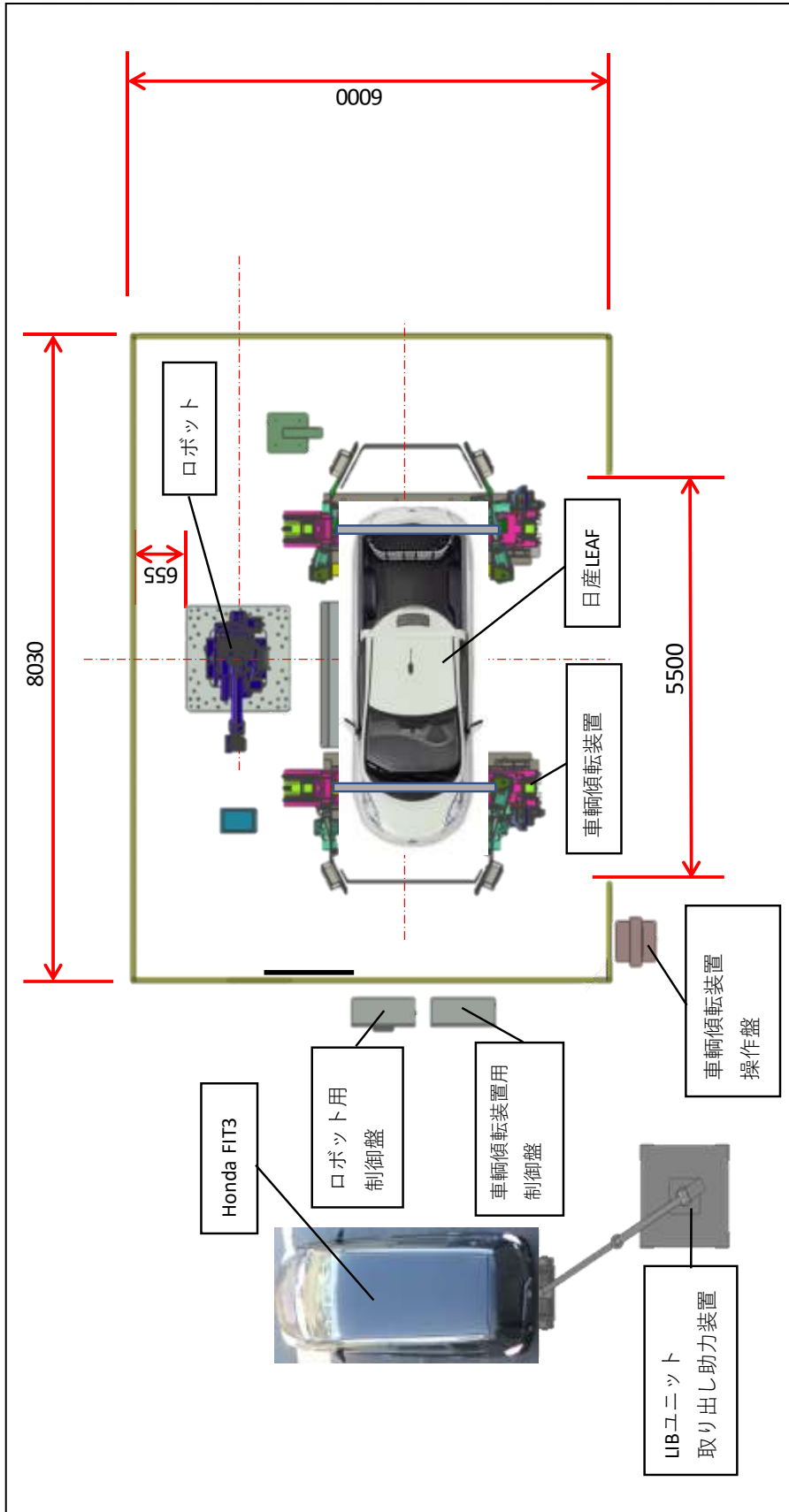


図 1.2-26 車両傾転装置と助力装置のレイアウト

1. 3 LIBユニット劣化診断

1. 3. 1 検討方針

LIB は他の蓄電池と同様、電池容量が使用状況、期間及び充放電回数により徐々に減少する。本事業では、使用済みの車両に搭載されている、ある程度の劣化が予想される LIB を対象とし、リユース・リサイクルシステムを実証する。本事業は北九州地区で車両から LIB を取り外し、近傍で LIB の健全性を診断、リユース又はリサイクルに仕分けるため、LIB の輸送による影響はない。しかしながら、将来、様々な拠点に点在する自動車リサイクル事業者が取り外した LIB を対象とする場合には、取り外しと同時に健全性を診断し、リユース又はリサイクルへ仕分けることで LIB の輸送コスト及び輸送に係る環境負荷削減につなげることが可能である。

LIB の劣化診断技術としては、各種の個別技術が開発されているが、本事業では上述の観点から、自動車リサイクル事業者若しくは LIB の回収運搬事業者が LIB の健全性を評価できる汎用性が高い技術を用いた劣化診断方法を検討する。

1. 3. 2 劣化診断技術の比較検討

リチウムイオン電池は、充放電サイクルや長期保存（放置）により、電極や電解質が劣化して電池容量が仕様値より低下する劣化現象が起きることが知られており、この劣化度合いを診断する技術の開発が進められている。

電池の劣化度を評価する指標の1つであるSOHは「State of Health」の略で、次式で Q_0 ：定格容量（Ah）を100%とした際の、 Q ：実際の満充電容量（Ah）の割合を指す。つまり、SOH 50%の電池は、満充電の状態にしても定格値の半分の容量しか持たない電池になっていることを表している。

$$\text{電池の劣化度 (SOH)} = Q / Q_0 \times 100 \quad (\%) \quad Q_0 \cdots \text{定格容量}$$

本検討では、現在開発されている車載LIBの劣化度SOHの測定による劣化診断手法として、充放電法、充放電曲線解析法、BMSデータ利用、交流インピーダンス法、ゴイク電池法について比較検討を行った。表1.3-1に比較結果をまとめる。

(1) 充放電法

充放電法は、満充電から放電停止電圧まで放電し、放電電力量と電池の定格容量とを比較する方法である。被測定電池のSOH値を直接測定することができる一方で、測定に際して充放電を行うため、電池容量に応じた充電電力を必要とし、また充放電に要する測定時間が長くなるデメリットがある。また、LIBの充放電法による被測定電池の定格容量の測定条件（充電方法、充電・放電電流、充放電停止電圧、温度・環境など）は一般的には公開されていないため、実際のSOH測定では、測定者側でこれら測定条件を任意に決める必要があり、これら測定条件がSOH値の誤差としてどの程度影響を及ぼすかは、現時点では不明である。

(2) 充電曲線解析法

充電曲線解析法は、充電時の電池の電圧挙動（充電曲線）を解析して、電池の劣化状態を推定する充電曲線解析(CCA)技術を用いた手法である。

図1.3-1に示すように、電池の充電曲線が充電中の正極電位と負極電位の差分であることを利用して、開回路電位(OCV)カーブを基準として充電曲線にフィッティングを行うことで、正極・負極材料のそれぞれの劣化、及び正極と負極の組合せ状態を含む内部状態を推定する。

通常EVで用いる充電器による定電流充電（普通充電と急速充電ともに適用可能）では、その場で計測できるメリットがある。しかしながら、廃LIBの測定環境は色々なメーカーや種類の電池が入荷する条件下であり、それら被測定電池毎に電池の劣化状態を推定するための比較データが必要であること、充電に電力を要するなどの課題があると想定される。

(3) BMS データ利用

BMS (Battery Management System) は、電池パックに内蔵される各 LIB セルの電圧、充電電流、温度などの情報を測定し、これら情報を例えば車両側にある上位コントローラに CAN (Controller Area Network) で送信し、又は CAN からのその指示を受信し、電池パック及び電池セルを制御する。車両は、BMS により測定された電池セルの計測 (電圧・電流・温度) 値や使用回数といったデータ、及び事前に取得したこれら測定項目と劣化度との関連データと対比させて SOH を算出していると想定される。

BMS データから得られた SOH 値を活用する場合、自動車メーカーからの情報開示が必須である。現在、日本国内の自動車メーカーは、この情報を開示していないため、車両から取り外された LIB ユニットに紐づけられた情報として取り扱うことができない。また、事故や故障起因の廃車両においてデータ収集が困難なことも想定される。

(4) 交流インピーダンス法

交流インピーダンス法は、被測定電池へ微小な交流電流を流した際の、電圧と電流の振幅値及び位相差を測定することで、被測定電池の複素インピーダンス (抵抗とリアクタンス) として求める方法である。

交流インピーダンス法にかかる測定時間は数分/回程度である。但し、被測定電池毎に複素インピーダンス値と SOH との関連づけデータが必要であり、これらデータを収集するだけでも相当な日数を要する。被測定電池種類別に多量の対応データを収集する必要もある。今後、多車種の使用済み EV が出てきた際、電池種類別に都度、関連づけデータを作成することは現実的でない。

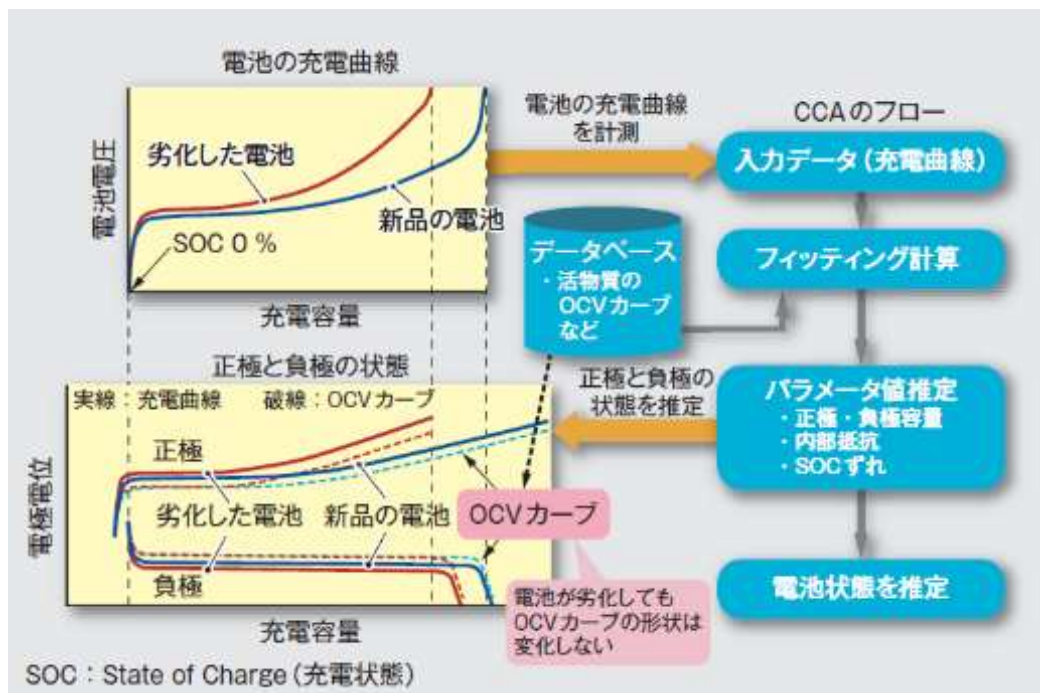
(5) ゴイク電池法

図 1.3-2 にゴイク電池法と交流インピーダンス法の測定手法の関係を示す。ゴイク電池法は電池に電流を流した際の電池電圧の変動値などを、電池の電極反応と関連づける理論式 (特許申請中) に当てはめ、SOH 値を直接算出するものである。

僅か数秒で電池の容量 Q 値が測定可能であり、SOH 値は測定容量 Q と定格容量 Q_0 の比で求めることができる。電池の正極材の種類などに依らず、上記測定値と方程式から Q 値が算出できる。また、交流インピーダンス法の様な関連づけデータを作成する必要もなく、汎用性が高い。

表 1.3-1 劣化診断技術の比較

方式	原理	利点	欠点
①充放電法	満充電⇒放電停止電圧まで放電し、放電時電力量と電池の定格容量とを比較する。	従前からの一般的な方法である。	・充電電力コスト ・測定時間が長い(数時間～)
②充電曲線解析法	充電時の電圧変動データからSOHを推定する。	充放電法と比較して、放電操作が不要となる。	・充電電力コスト ・測定時間が長い(数時間～)
③バッテリーマネジメントシステム(BMS)データ利用	EV車両のBMSで収集された電池の使用履歴(充放電時の電圧変動、使用時間等)から、SOHを診断する。	データ収集により診断できる。	・車両分解前にデータを取得する必要がある。 ・BMSデータ非公開の車両には適用できない。
④交流インピーダンス法	電池の交流インピーダンスからSOHを推定する。	測定時間は数分で、短時間で測定できる。	劣化電池データとの比較でSOHを判定するため、不特定多数のLIBの診断には不向き。
⑤ゴイク電池法	電池に電流を流した際の電池電圧の変動を、電池の電極反応と関連づける理論式(電池方程式と称している)に当てはめ、SOH値を算出する。	極めて短時間(数秒レベル)で電池容量Qが測定可能。電池の定格容量が分かればSOHも算出できる。	実証段階である。



(出典：東芝レビュー Vol.71 No.2(2016))

図 1.3-1 充電曲線解析法について

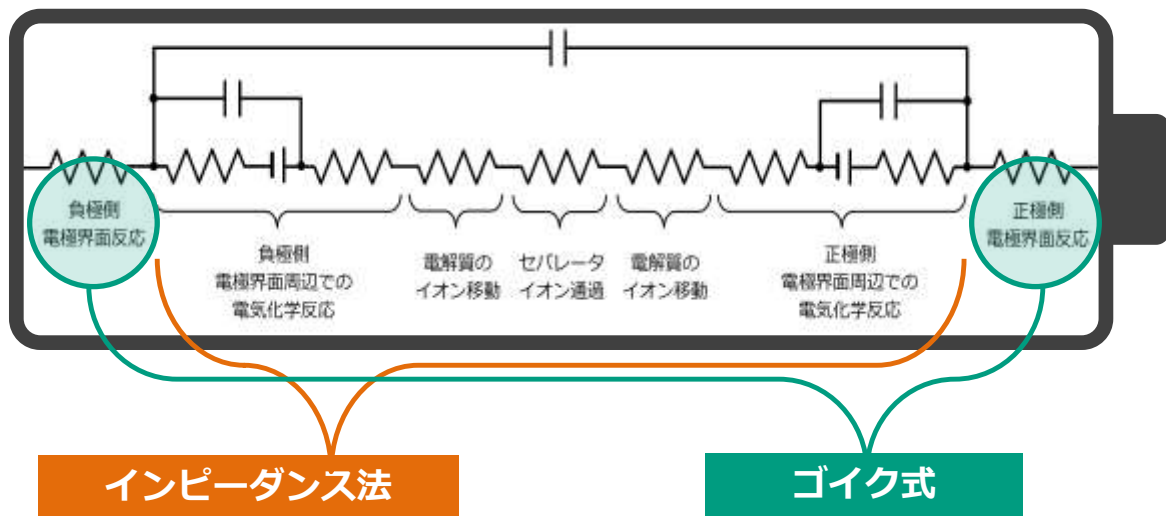


図 1.3-2 ゴイク電池法と交流インピーダンス法での測定手法の関係

1. 3. 3 劣化診断技術検討のまとめ

自動車リサイクル事業者が LIB の健全性を判断する方法として、BMS データの利用が最も合理的である。しかしながら、現在、日本国内では BMS データは開示されていない。

中国では、BMS データの情報開示が法律で定められており、BMS データを活用した劣化診断が進んでいる。日本においても、今後の LIB 搭載車発生増に対応するためには、自動車メーカーからの情報開示が必要と考える。

車載の状態での劣化度を消費者に情報提示する国際規格の制定に向けた議論も進んでいるため、将来的には BMS データを活用、車載状態で実車査定、中古車として転売されることが望ましい。車載 LIB をそのままの状態を活用し、どうしても車載 LIB として活用出来ない LIB についてのみ、ESS 用途等、他用途でのリユースを検討することで、環境負荷を最小限に抑えたリユースシステムが構築できると考える。

但し、自動車メーカーによる BMS データの開示が確実ではないこと、加えて事故や故障起因の廃車両では、廃車時点のデータ収集が困難なことも予想されることから、本事業では、その他の劣化診断方法を評価し、具体化していくこととする。

1. 4 LIBユニット解体ラインの処理量

LIBユニット解体ラインでは、LIBユニットを後工程の熱分解処理に適したLIBセル又はモジュール単位まで解体すると共に、LIBユニットを構成するケース、LIBの制御システム、これらの接続ケーブル類、固定器具等の部材を分別回収する。車両から取り外されたLIBユニットは、電圧が残留していることから、安全なLIB解体作業には放電も必要となる。LIBユニット解体ラインは、これらの一連の作業を行う設備の総称である。なお、本事業では、北九州地区で車両からLIBユニットを取り外し、近傍でLIBユニットを解体するため、LIBの劣化診断もLIBユニット解体ラインで行う。

本事業では、LIBを搭載する現時点で販売台数の多いFIT及びLEAFを対象とし、2025年の九州地区におけるLIBの発生量に基づき、LIBユニット解体ラインの検討を行う。

図1.4-1にLIBユニット解体ラインの処理量の考え方を示す。過去のFIT及びLEAFの国内新車販売台数に、経年による廃車率及び中古車輸出比率を勘案し廃車台数を予測する。2025年のFIT及びLEAFの廃車台数は、それぞれ32,216台、6,068台となり、廃LIBの発生はこれらと同数となる。

九州地区では、それぞれの廃車台数に自動車保有比率の11.6%を乗じた数が発生するため、北九州市におけるLIBユニット解体ラインの廃LIB受入れ量を、FITが3,737個/年(=14.4個/日)、LEAFが704個/年(=2.7個/日)とした。

LIBユニット解体ラインで受入れる廃LIBを劣化診断した結果、70%がリユース、30%がリサイクルに配分されるとし、一日当たりの放電及びLIBユニット解体の処理量をFITが4.3個/日、LEAFが0.8個/日とした。

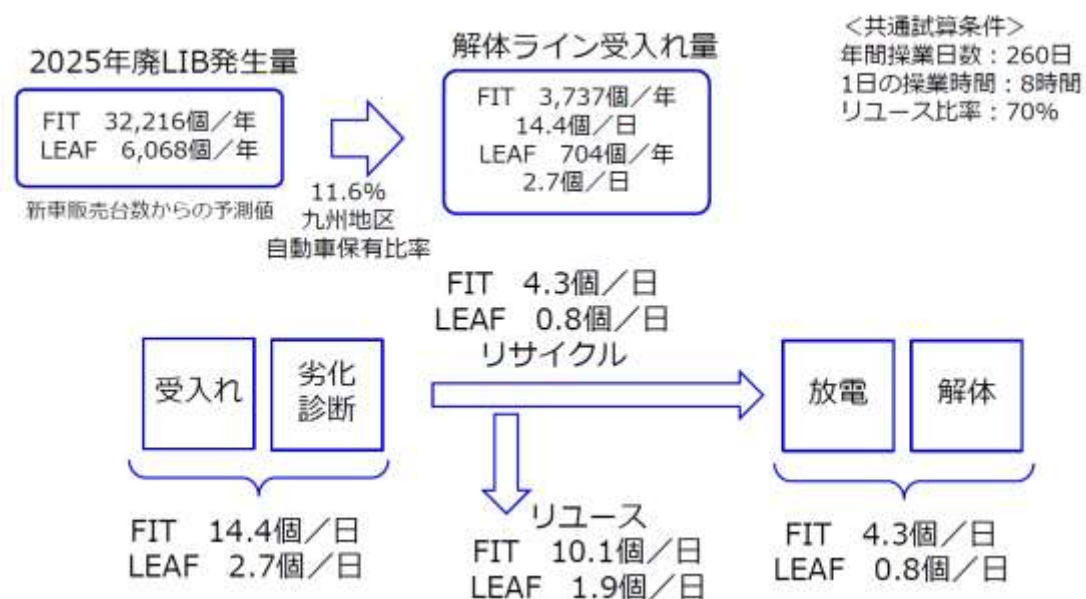


図 1.4-1 LIBユニット解体ラインの処理量の考え方

1. 5 LIB 放電

LIB ユニットから、モジュール又はセルの状態まで安全に解体するには事前の放電が必要である。LIB ユニットのリサイクルでは、LIB を熱分解が可能なモジュール単位まで解体する。しかしながら、LEAF 用 LIB ユニットは約 400V、FIT3 用 LIB ユニットでも約 200V の電圧を保持しており、LIB ユニットの解体する作業者の安全を確保するために LIB の放電が求められる。

また、当社の過去の実証事業での経験から、満充電に近い LIB を熱分解にかけると LIB が熱暴走を起こし、爆発的な燃焼が生じることがわかっている。Al、Cu 等のシート材を効率よく回収するために低温で熱処理を行うが、熱暴走により燃焼と同等の反応が起きてしまうと材料回収が十分にできない問題が発生する。

以上から、①解体する人の安全性の確保、②Al、Cu 等の材料の回収効率を下げず、一定のプロセス条件で処理を行う、この 2 つの目的で放電を行う必要性があり、本事業では LIB の構造的・電気的特徴に合わせて放電方法の検討を行い、適切な放電装置を選定した。

1. 5. 1 放電方法の検討

劣化診断の結果、リサイクルの対象と判断され、放電工程に移る場合、LEAF 及び FIT3 の LIB ユニットの構造的・電氣的に異なるため、それぞれの特徴に合わせた放電方法が必要である。本項では、LIB ユニットの電気系統、放電による LIB セルへの影響及び放電範囲と事前準備に焦点を当てて放電方法を検討した。

1) LIB ユニットの電気系統

(1) LEAF-LIB ユニットの電気系統

LEAF-LIB には表 1.5-1 のように 4 種類があり、本事業では 30kWh 及び 40kWh の 2 種類を対象とした。

① AZE0（後期型）の LEAF-LIB（30kWh）

LEAF-LIB（30kWh）の LIB ユニットの構成は 48 モジュール/192 セル構成であり、1 モジュールは 4 セル（2 並列・2 直列）で構成されている。1 モジュールの電圧は約 7.5V であり、1 セルの電圧は約 3.75V となる。

図 1.5-1 に LEAF-LIB（30kWh）の外形及びブロック図を示す。LIB ユニット内は A～E の 5 つのユニットで構成されており、ユニット A では 24 モジュール（約 180V）、ユニット B 及び E では 4 モジュール（約 30V）、ユニット C 及び D では 8 モジュール（約 60V）で構成されている。LEAF-LIB（30kWh）の電気系統は、サービスプラグが接続され、かつ遮断機が OFF（通電）の状態ですべてのユニット A～E が直接に接続されることでコネクタから 30kWh の電力量で 360V を出力する仕様となっている。

② ZE1 の LEAF-LIB（40kWh）

LEAF-LIB（40kWh）の LIB ユニットの構成は 24 モジュール/192 セル構成であり、1 モジュールは 8 セル（2 並列・4 直列）で構成されている。1 モジュールの電圧は約 14.6V であり、1 セルの電圧は約 3.65V となる。

図 1.5-2 に LEAF-LIB（40kWh）の外形及びブロック図を示す。LIB ユニット内は A～E の 5 つのユニットで構成されており、ユニット A では 12 モジュール（約 175.2V）、ユニット B 及び E では 2 モジュール（約 28.4V）、ユニット C 及び D では 4 モジュール（約 56.8V）で構成されている。LEAF-LIB（40kWh）の電気系統は、サービスプラグが接続され、かつ遮断機が OFF（通電）の状態ですべてのユニット A～E が直接に接続されることでコネクタから 40kWh の電力量で 350V を出力する仕様となっている。

(2) FIT3-LIB ユニットの電気系統

FIT3-LIB には Blue Energy 製及び Panasonic 製の 2 種類があるが、電気系統は同一であ

り、構造も同一筐体に収まる形となっている。本項では Blue Energy 製を対象に電気系統を説明する。

FIT3-LIB の LIB ユニットの構成は 4 モジュール/48 セル構成であり、1 モジュールは 12 セル (12 直列) で構成されている。1 モジュールの電圧は約 45V であり、1 セルの電圧は約 3.75V となる。

図 1.5-3 に FIT3-LIB の外形及び概略ブロック図を示す。

2) 放電による LIB セルへの影響

LEAF の LIB セルはラミネートタイプであり、外装は柔らかい素材で構成されている。LIB セルは劣化によりガスが発生することが知られている。過放電により LIB セル内で劣化が進行し、LIB セル内部でガスが発生すると、LEAF の LIB セルは外装が柔らかいため、放電中に「セル形状が変化する」という影響が想定される。

3) 放電範囲と事前準備

(1) LEAF-LIB の放電範囲と事前準備

上記 2) に記載したように、LEAF-LIB は放電により形状の変化が想定されることから、放電を実施する前に放電範囲を決め、放電のための事前準備が必要である。LIB ユニット内でユニット B~E は横に配置されているが、ユニット A は縦に配置されていることから、放電後の形状を考慮する必要がある。

このことから、LEAF-LIB の放電ではユニット A とユニット B~E の 2 つの範囲で分け、ユニット A を LIB ユニットから取り出す事前準備が必要となる。

なお、LEAF-LIB (30kWh) と LEAF-LIB (40kWh) は電気系統の構成が同一であるため、同一の放電範囲で事前準備を行うこととする。

図 1.5-4 に LEAF-LIB (40kWh) 放電前のユニット A、ユニット B~E の形状を示す。

図 1.5-5 に LEAF-LIB (40kWh) の放電範囲、事前準備のイメージを示す。

(2) FIT3-LIB の放電範囲と事前準備

図 1.5-3 の「FIT3-LIB の外形、概略ブロック図」で示したように、FIT3-LIB の外部に露出した 3 つの端子は LIB の直流電力をインバータで変換した交流電力を出力する端子である。このため、直接 LIB の直流電力を出力する内部電池に直接アクセスする端子が露出しておらず、このため解体が必要である。

FIT3-LIB の遮断機に搭載された電子部品締結用のボルトを内部電池に直接アクセスする端子として露出するまで解体を行い、放電用のケーブルを接続した後にサービスプラグを差し込むまでを事前準備とする。

図 1.5-6 に FIT3-LIB の放電範囲、事前準備のイメージを示す。

表 1.5-1 LEAF-LIBの種類

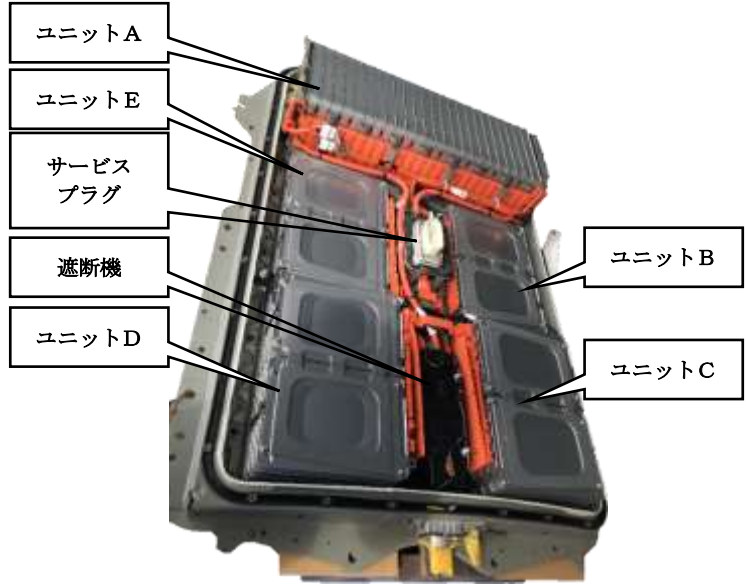
型式	ZEO(前期型)	AZEO(後期型)	ZE1
販売期間	2010年12月-2012年10月	2012年11月-2017年9月	2017年10月-2019年1月-
LIB容量[kW]	24	30	40
国内登録台数	81,572		60,321(～2020年7月)
保証期間(年)	N.A.		8
保証距離[km]	N.A.		160,000
セル製造		AESC	
バック外寸[mm]	幅	1188.0	1248.0
	全長	1570.5	1547.0
	全高	264.9	264.0
モジュール数	48		24
セル数		192	288
電圧[V]	360.0		350.0
重量[kg]	294.0	273.0	303.0

①

②



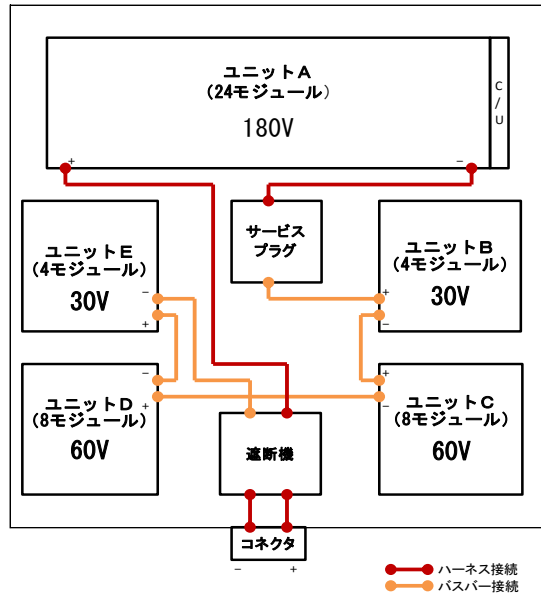
LEAF-LIB (30kWh) の外形



上蓋を取り外した状態



ユニットA内モジュール近影

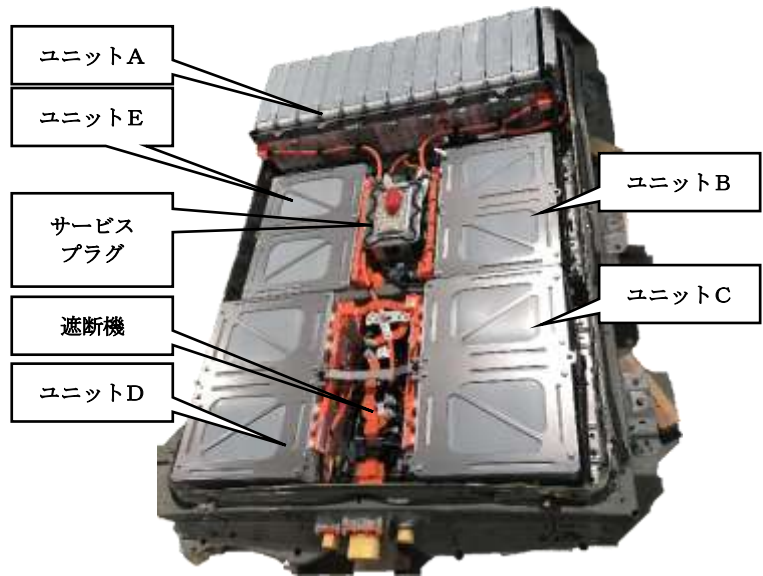


概略ブロック図

図 1.5-1 LEAF-LIB (30kWh) の外形、概略ブロック図



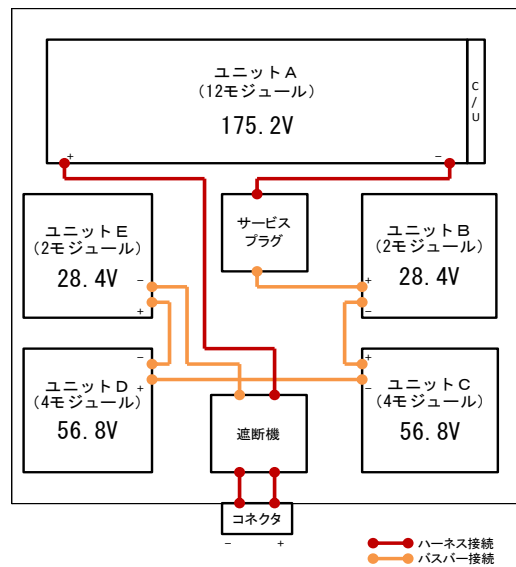
LEAF-LIB (40kWh) の外形



上蓋を取り外した状態

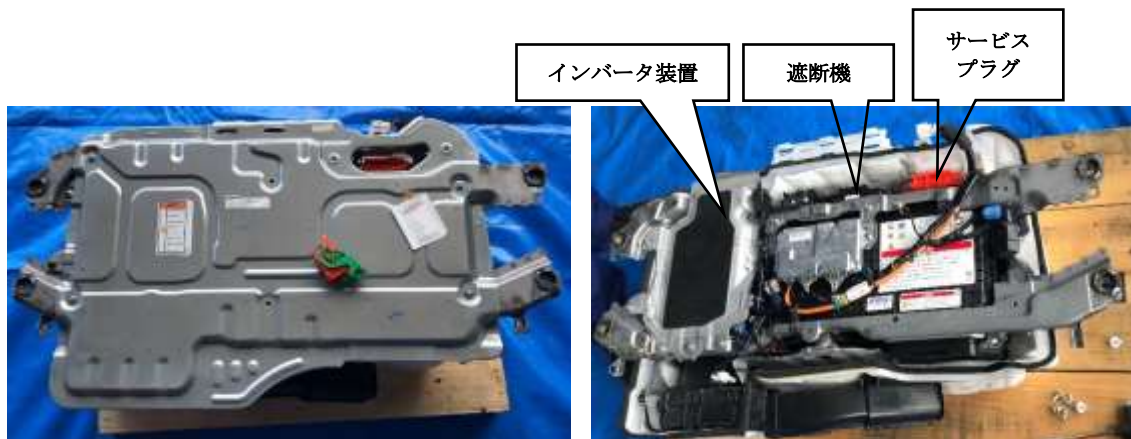


ユニットA内モジュール近影



概略ブロック図

図 1.5-2 LEAF-LIB (40kWh) の外形、概略ブロック図

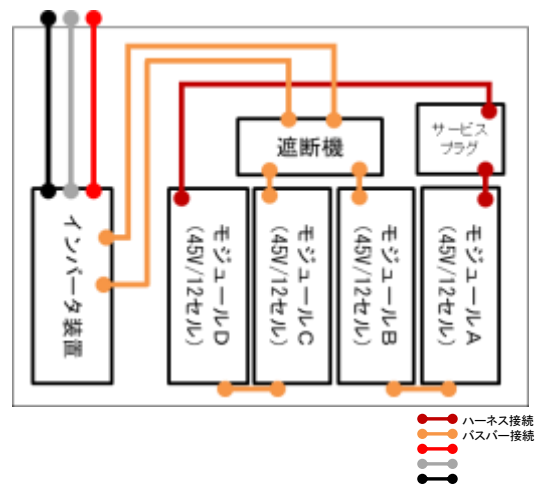


FIT3-LIB の外形

上蓋を取り外した状態



FIT3-LIB 内部のモジュールA～D



概略ブロック図

図 1.5-3 FIT3-LIB の外形、概略ブロック図

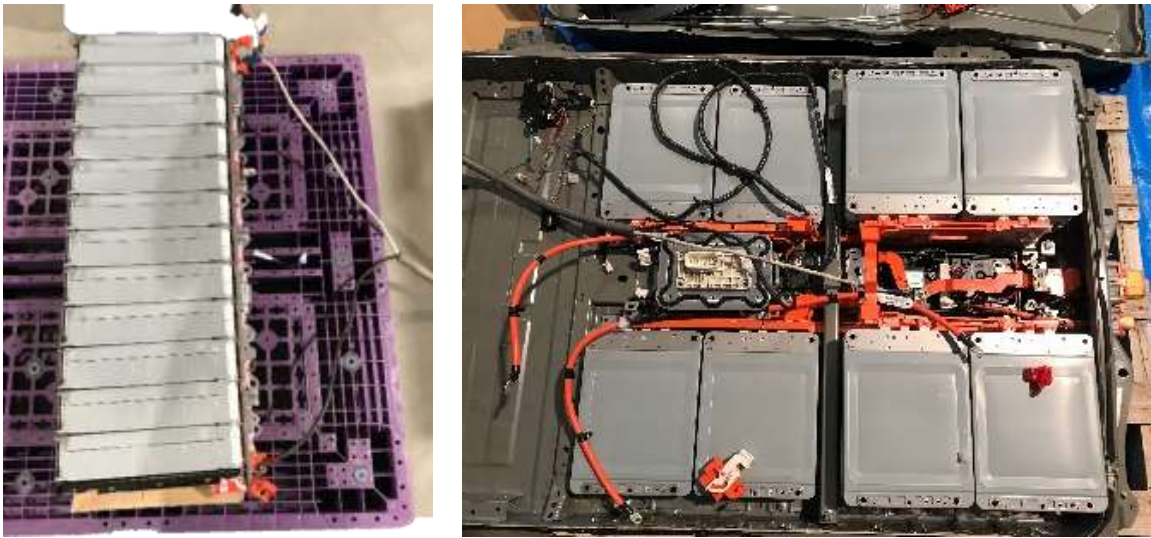


図 1.5-4 LEAF-LIB (40kWh) 放電前のユニットA、ユニットB～E

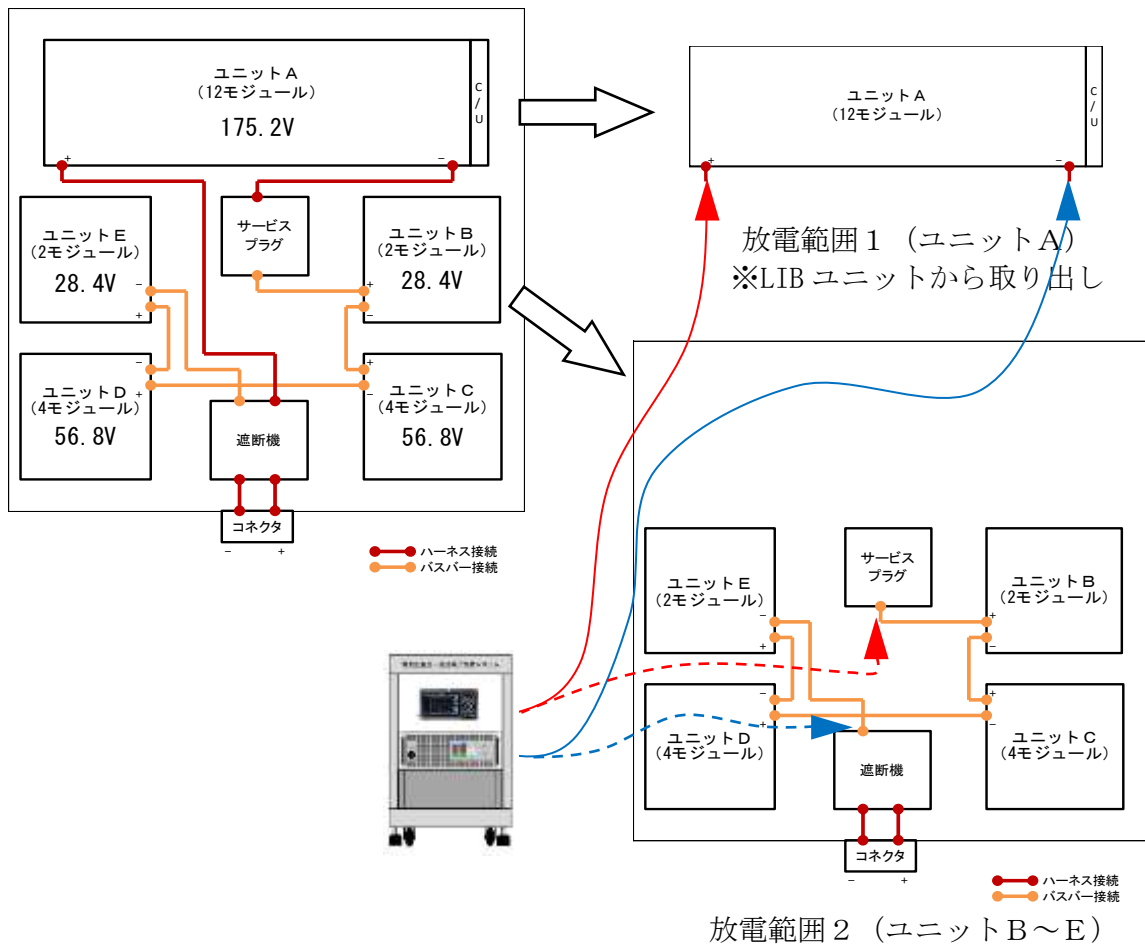


図 1.5-5 LEAF-LIB (40kWh) の放電範囲、事前準備のイメージ

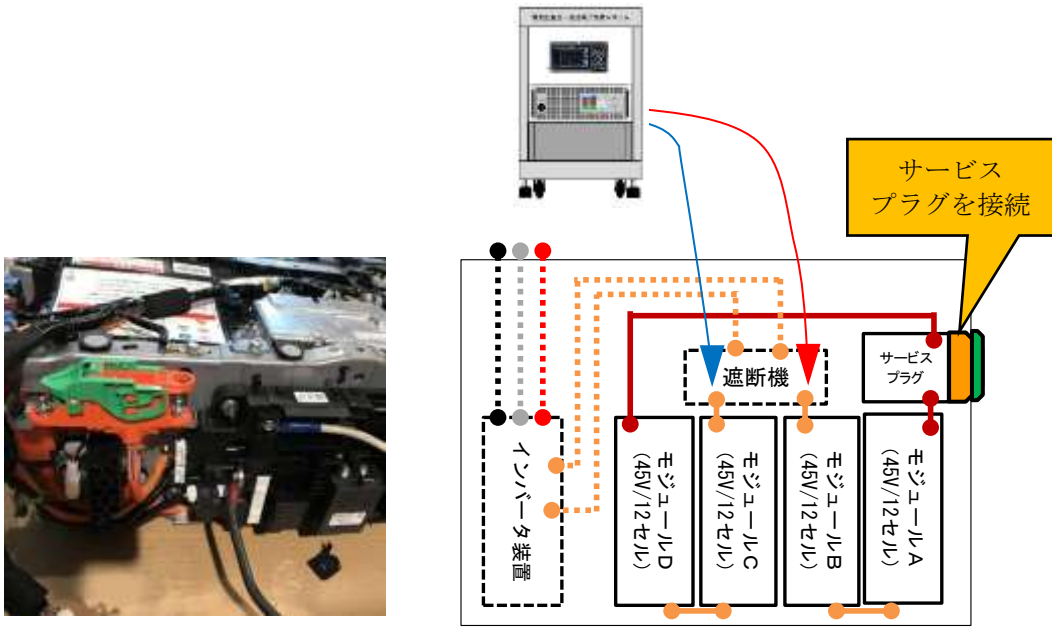


図 1.5-6 FIT3-LIB (0.8kWh) の放電範囲、事前準備のイメージ

1. 5. 2 放電装置の検討

1. 5. 1の放電方法の検討を踏まえ、各 LIB ユニットの放電に必要な能力を検証し、放電装置を選定した。

1) 必要な放電能力

図 1.4-1 LIB ユニット解体ライン処理量の前提条件から、放電装置の処理量としては FIT3-LIB で 4.3 個/日、LEAF-LIB で 0.8 個/日となる。端数を切り上げし、一日あたりに放電する FIT3-LIB 及び LEAF-LIB の個数は 5 個及び 1 個となる。

FIT3-LIB の電力量を 0.8kWh (電圧：180V)、LEAF-LIB の電力量を 40kWh (電圧：400V) とし、急速放電における安全性を考慮し 30A 以下で放電することとすると、必要な放電能力は $400V \times 30A$ で 12,000W (12kW) 程度となる。

2) 放電装置の選定

必要な放電能力から、選定する放電装置は東陽テクニカ製の 15kW 電力回生式・直流電子負荷システムである ELR10500-180-SYS (0-500V/0-180A/15kW) とした。

本放電装置は直流電子負荷を基本機能として、最大 15kW までの掃引電力を交流 3 相 200V の回生電力として出力する機能を持つ。表 1.5-2 に放電装置の仕様を示す。また、図 1.5-7 に放電装置の掃引可能な電圧と電流の範囲を示す。

表 1.5-2 放電装置の仕様

電圧	0 ~ 500 V
電流	0 ~ 360 A
電力	14.4kW
動作温度	0°C ~ 50°C
動作湿度	< 80%(結露なきこと)
電圧制御精度	最大電圧の 0.1%未満(CV モード時)
電流制御精度	最大電流の 0.2%未満(CC モード時)
立ち上がり時間	50 μ s 以下(CC モード時)
AC入力	単相 AC90 ~ 264V、45 ~ 66Hz 最大消費電力 520W

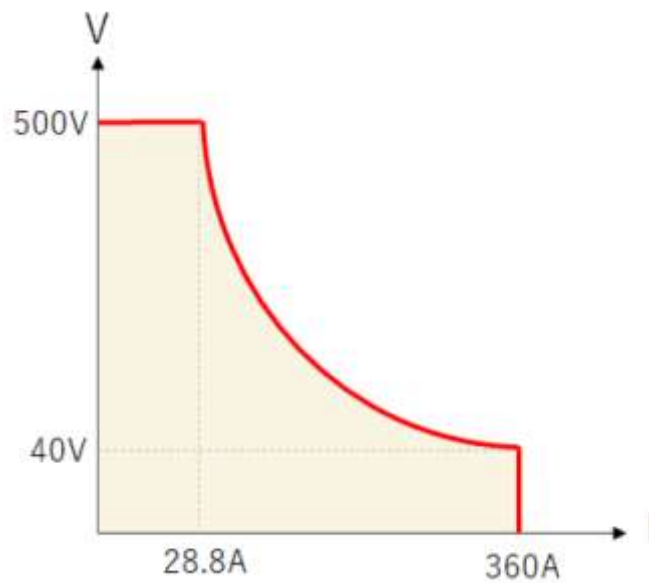


図 1.5-7 放電装置の掃引可能な電圧と電流の範囲

1. 5. 3 放電装置の検証

1) 放電時間

本事業で対象とした4種類のLIBのうち、LEAF-LIB(30kWh)とLEAF-LIB(40kWh)の放電時間について検討する。表 1.5-1 から、LEAF-LIB(30kWh)の電圧は 360.0V であり、LEAF-LIB(40kWh)の電圧は 350.0V である。LIB の電圧は放電装置の掃引可能な電圧である 500V 以下であり、放電装置による掃引可能な電流の範囲は 0~42.8A となる。

満充電の 30kWh と 40kWh の LEAF-LIB を 10A、20A、30A、40A の各掃引電流で放電した場合に LEAF-LIB の電力量が 0 となる理論時間を表 1.5-3 に示す。掃引電流が 30A の場合、電力量が 0 までの 30kWh 及び 40kWh の理論放電時間はそれぞれ約 167 分(約 3 時間弱)及び約 229 分(4 時間弱)となる。

但し、図 1.5-4 及び図 1.5-5 LEAF-LIB の放電範囲、事前準備のイメージでも触れたように LEAF-LIB は放電範囲 1 と放電範囲 2 とで分けて放電するので、実際に必要な放電時間(電力量が 0 となる理論時間)は表 1.5-3 よりも大きい値となる。

2) 回生電力の活用

電子負荷には掃引電力を処理する機能によって2種類がある。掃引電力を熱として放出する熱消費式と、回生電力として出力する電力回生式の2種類である。今回選定した放電装置は掃引電力が 15kW の電力回生式の電子負荷であり、この回生電力を本事業の設備で活用することを検討する。

放電装置を定電流モードで動作させ、掃引電流を 30A で LEAF-LIB を放電させた場合、放電範囲による放電の分割を考慮し、回生電力が連続出力される最小時間は 30kWh の場合で約 83 分、最大時間は 40kWh の場合で 114 分となる。

この回生電力が連続出力される時間においては、回生電力を消費する装置等(負荷装置)が接続されている必要があり、回生電力は商用電力に代わって負荷装置を動作させる電力として活用できる。今後、活用される回生電力量を電力量計から計測し、エネルギー代替の効果を評価していく。

3) 安全性の検証

満充電の LIB ユニットの電圧は FIT3-LIB で約 180V、LEAF-LIB で約 360V (30kWh) である。また、LEAF-LIB は放電範囲による放電の分割を行うことから、30kWh の LEAF-LIB の放電範囲 1 及び放電範囲 2 の放電端子間の電圧はそれぞれ約 180V となる。これらは直流高電圧の組電池であることから、これら組電池を取り扱う作業を行う際は、特に感電災害に気を付ける必要がある。感電災害を発生させないためには、作業を担当する者が低圧電気取扱業務特別教育を修了し、電気知識や絶縁用保護具や絶縁用防具等といった安全作業用具の知識を身に付けておく必要がある。

LIB ユニットに放電装置のケーブルを接続する行為が手作業となる場合は、ヒューマンエラー等が発生しないよう事前対策を十分検討する。例えば、誤って他の端子とショートすることの無いよう、むき出しとなった電極や金属端子等がある場合は樹脂テープ等の絶縁物で絶縁処理を施しておく。

放電により放電装置における計測電圧が 0V になったとしても、組電池の復電に注意する。放電装置の掃引を一時的に停止させ、復電による計測電圧の上昇を確認する。必要に応じて掃引を繰り返し、復電による計測電圧が 40V 程度となるまで放電を実施しておく。

LIB セルの形状の変化に気を付ける。変化の要因としてガスの発生が想定されることから、LIB セルの破損によるガス等の漏洩がないよう取り扱いには特に気を付ける。また、形状の変化により LIB ユニットから取り出せない、LIB モジュール、LIB セル単位への分解作業ができない等の作業性にも影響を及ぼすことから、LIB セルの形状の変化が想定される場合は事前に変化を予測し対処方法を検討しておく。

表 1.5-3 LEAF-LIB の電力量が 0 となる理論放電時間

掃引電流 (A)	30kWh の理論放電時間 (分)	40kWh の理論放電時間 (分)
10	500	686
20	250	343
30	167	229
40	125	172

1. 6 LIBユニット解体自動化

LIBのリサイクルでは、LIBユニットを後工程の熱分解処理に適したモジュール又はセルの状態まで解体する必要がある。しかしながら、LIBユニットの解体作業は、人手を介する作業となるため、将来の少子高齢化による労働人口の減少という課題に加え、廃車発生量が増加した場合に人手の確保が困難になることが予想される。

今回、省力化を目的として、産業用ロボットを活用した解体作業の自動化について検討した。

1. 6. 1 LIBユニット解体手順の検証

回収された LIB ユニットの解体を行う場合、LEAF 及び FIT3 の LIB ユニットの構造的・電氣的に異なるため、それぞれの特徴に合わせた解体手順を検討する必要がある。両 LIB ユニットについて解体作業を行い、解体手順の確認を実施した。

LEAF-LIB の解体手順及び写真を表 1.6-1 及び図 1.6-1 に示す。表 1.6-1 で示した通り、LIB ユニット重量が 300kg を超え、ユニット A 単体でも 120kg 程度の重量であるため、解体作業には揚重作業が必要である。

LEAF-LIB はラミネート型であるため放電時に形状が変化することが想定される。このことから放電工程後は構造が定形となることを担保できず、ロボットでの解体が難しいことから、自動化の対象は放電以前の工程が対象となる。また、LEAF-LIB は、モジュール単位までの解体を行う。

FIT3-LIB の解体手順及び写真を表 1.6-2 及び図 1.6-2 に示す。図 1.5-3 に FIT3-LIB の外形、概略ブロック図で示した通り、LIB からの直流電源をインバータで交流電源に変換して給電を行っている。このため、LIB ユニットの劣化診断及び放電を行うためには、解体作業が必要となり、解体手順の途中で放電を実施する必要がある。FIT3-LIB は、モジュール単位までの解体を行う。

表 1.6-1 LEAF-LIB(40kWh) 解体手順

作業手順	部品名称	作業内容	数量
1		(劣化診断)	1 回
2	カバー	固定ボルト取り外し	10 本
3	カバーコネクタ	金具固定ボルト取り外し	6 本
4	カバー	取り外し	1 個
5	LIB ユニット A	ハーネス切り離し	1 個
6	コントロールユニット	固定ボルト取り外し	4 本
7		ハーネス切り離し	1 個
8	LIB ユニット A	固定ボルト取り外し	8 本
9		固定ボルト取り外し	14 本
10	LIB ユニット B~E	固定ボルト取り外し	32 本
11	LIB ユニット A	取り外し	1 ユニット
12		ガイド(棒)取り外し	2 本
13		ブラケット固定ボルト取り外し	12 本
14		(放電)	1 回
15		バスバーボルト取り外し	72 本
16		ガイド(棒)取り外し	2 本
17		モジュール単位へ分解	12 モジュール
18		LIB ユニット B~E	(放電)
19	バスバー固定ボルト取り外し		2 本
20	給電コネクタ	固定ボルト取り外し	4 本
21	プラグコネクタベース	固定ボルト取り外し	4 本
22	LIB ユニット B~E	取り外し	4 ユニット
23		バスバーボルト取り外し	72 本
24	ジャンクションボード	固定ボルト取り外し	6 本
25	ハーネス	取り外し	2 本

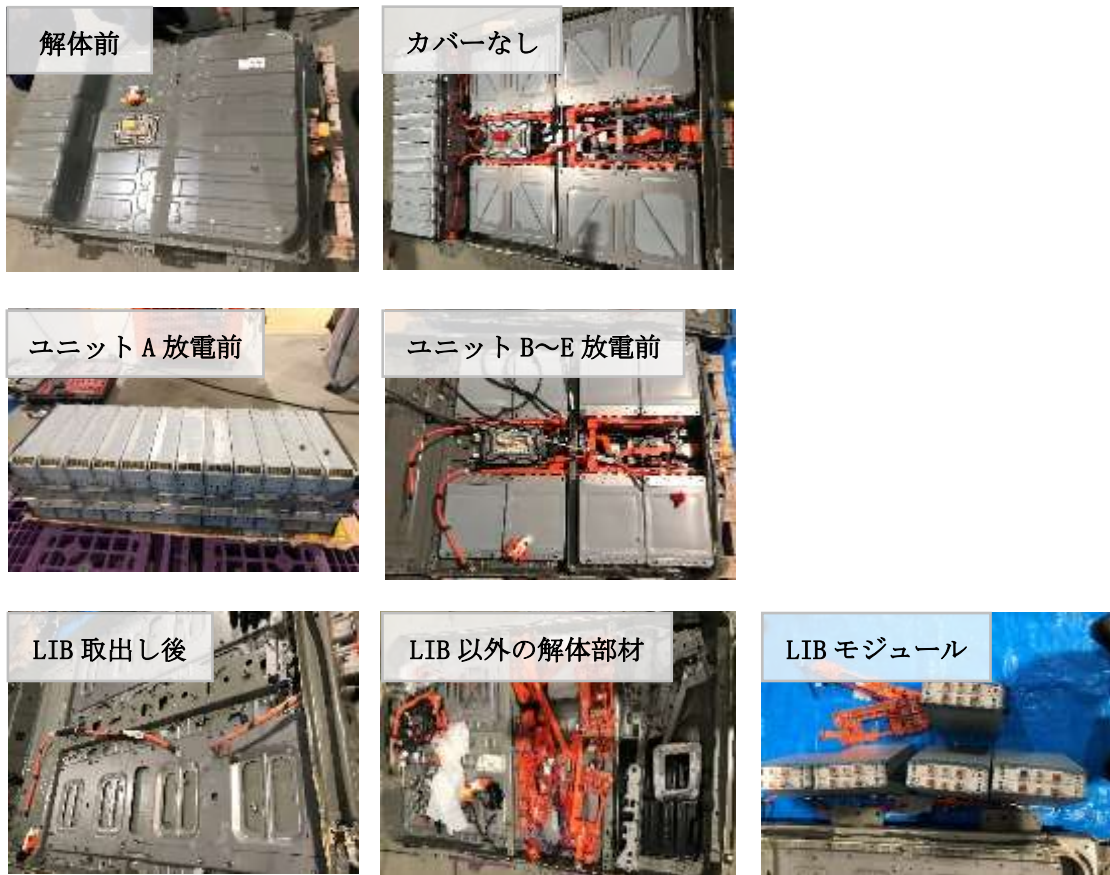


図 1.6-1 LEAF-LIB(40kWh)解体状況

表 1.6-2 FIT3-LIB 解体手順

作業手順	部品名称	作業内容	数量
1	天板	嵌合部取り外し	1 個
2		トルクスねじ取り外し	6 本
3		天板取り外し	1 枚
4	樹脂ケース	コネクタ切り離し	1 個
5		側面固定ピン取り外し	4 個
6		取り外し	1 台
7	(劣化診断)		1 回
8	(放電)		1 回
9	ジャンクションボード	コネクタ切り離し	1 個
10	電装部品等	固定ボルト/ナット取り外し	14 本
11	フレーム	固定ボルト/ナット取り外し	8 本
12	ジャンクションボード	固定ナット取り外し	6 本
13	フレームカバー	固定ナット取り外し	9 本
14	冷却ファン	固定ボルト取り外し	3 本
15	インバータ	上蓋取り外し	1 枚
16	フレーム	取り外し	2 個
17	フレームカバー	取り外し	1 枚
18	コネクタ	切り離し	4 個
19	ハーネス	取り外し	4 本
20	インバータ	内部固定ボルト取り外し	13 本
21	フレーム	固定ボルト/ナット取り外し	22 本
22	インバータ	ユニット取り外し	1 台
23	バスバー	取り外し	2 個
24	ハーネス	取り外し	1 本
25	樹脂カバー	固定ピン取り外し	4 個
26		取り外し	1 枚
27	LIB モジュール	取り外し	4 モジュール
28	メインフレーム	ボルト取り外し	8 本



図 1.6-2 FIT3-LIB 解体状況

1. 6. 2 LIBユニット解体ラインの検討

今回の実証事業において、対象とする LEAF と FIT3 の LIB ユニットでは、大きさ、重量、形状及び解体手順の違いがある。これらの違いに対応した LIB ユニット解体ラインを構築する上で、主に産業用ロボットと搬送コンベアを組み合わせた解体ラインを検討した。

- ① FIT3 及び LEAF の LIB ユニットの同一ライン上で解体するため、ロボット解体エリア、手解体エリア、バッファエリア等を設け、安全かつ効率的に解体作業を可能とすること。
- ② FIT3 及び LEAF の LIB ユニットの同一パレット上に設置して搬送可能であり、コンベア及びパレットの高さ、幅を適切に設定し、必要に応じて昇降機能や回転機能を設けることで解体作業時の作業姿勢に無理がなく、作業負担を軽減することが可能であること。
- ③ ロボットと人の作業エリアを分離し、ロボットハンドに取り付けるツールの交換作業などでロボット安全柵へ都度、人が入る必要がなく安全に作業が可能であること。
- ④ 事前にロボットティーチングした内容とライン投入時に設定する LIB 種別情報及びロボットビジョンを組み合わせて、ねじなどの対象部品の位置検出し、精密な位置決めが必要なく、人が毎回解体ねじ部品位置を指示する必要なくロボットによる自動解体作業が可能であること。
- ⑤ 劣化診断装置、放電装置を解体ライン周辺に設置できる配置であること。
- ⑥ 重量物運搬には、安全確保及び作業負担を軽減するために揚重装置を用いること。
- ⑦ 解体ライン設置面積をコンパクトに収めること。

以上の7点を具備する解体ラインを検討した。構想図を図 1.6-3 に示す。

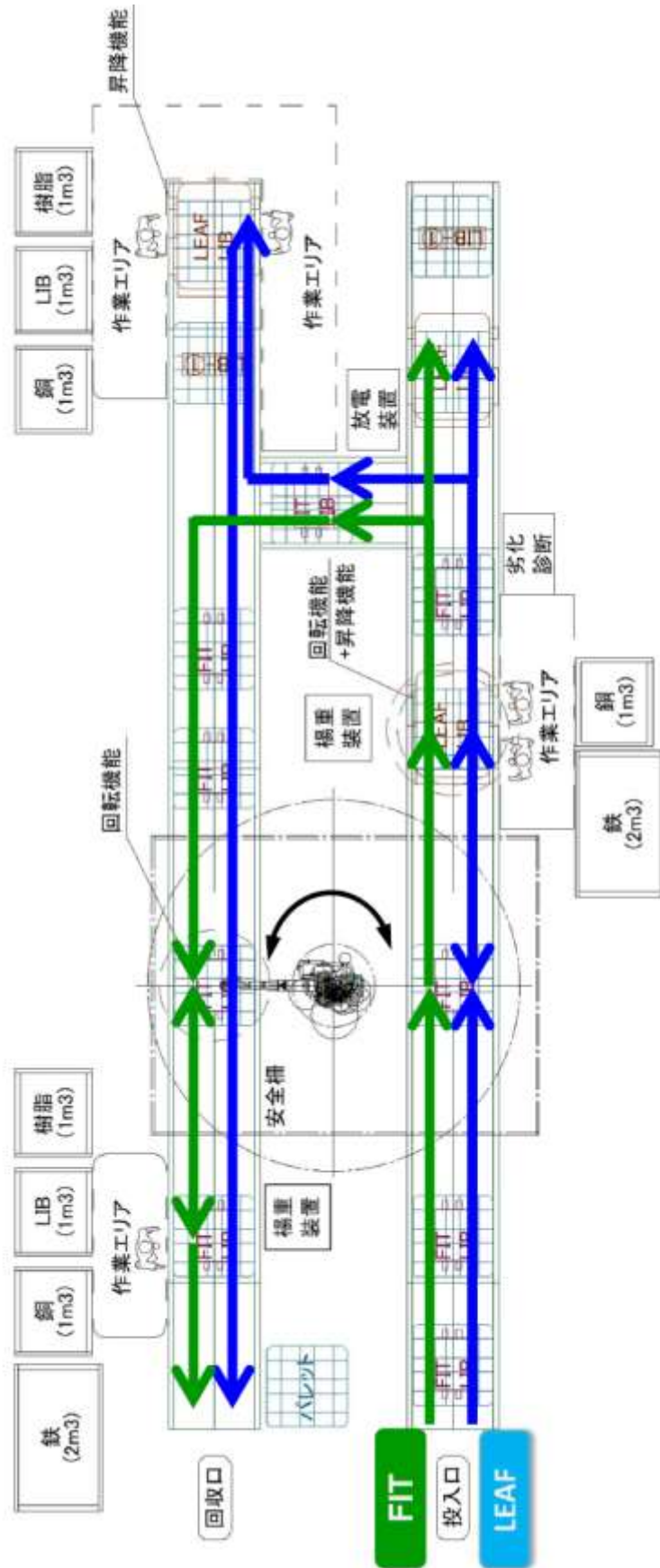


図 1.6-3 解体ラインの構想図

1. 6. 2. 1 自動化範囲の検討

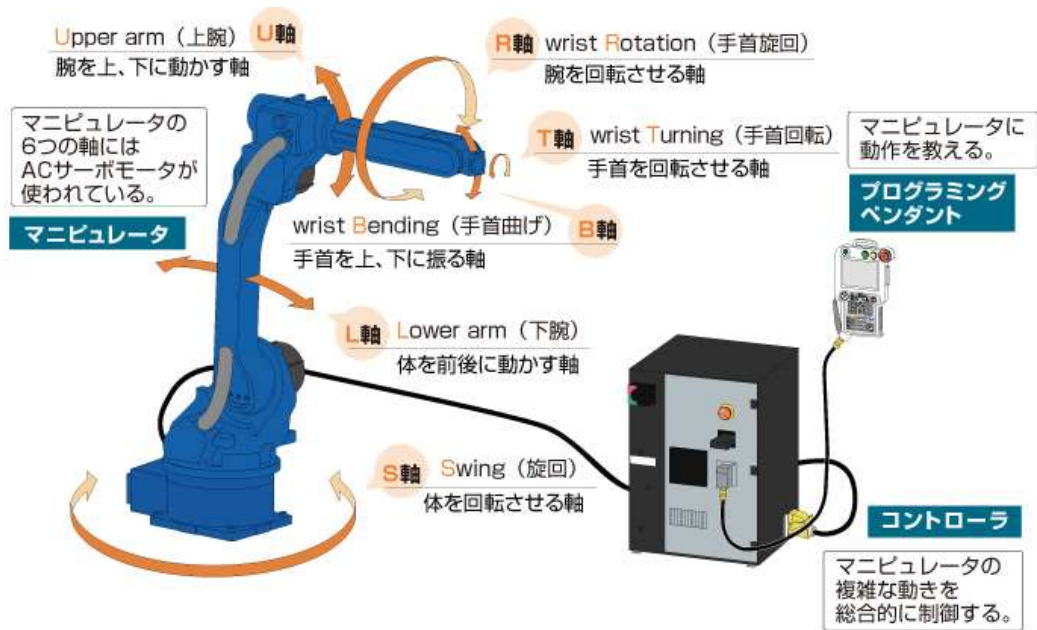
産業用ロボットの中で人と同様な作業が可能となる6軸垂直多関節ロボットによる自動化を検討する。図 1.6-4 に垂直多関節ロボットシステムを示す。6軸垂直多関節ロボットは、腕と手首に相当する動きが可能であり、人の代替作業を行うロボットとして最も合理的な形をしている。

LIB ユニットの解体作業のうち、ロボットにより自動化する範囲（自動化範囲）の選定に当たっては、実現性、合理性を考慮しなくてはならない。

作業半径が大きいロボットを選定することでLIBの上面、4方側面の計5面に対して作業を行うことが可能である。また、ロボット先端に取り付けるロボットハンドツール（ナットランナー、ハンド等）を選択することで様々な機能を持たせることができる。

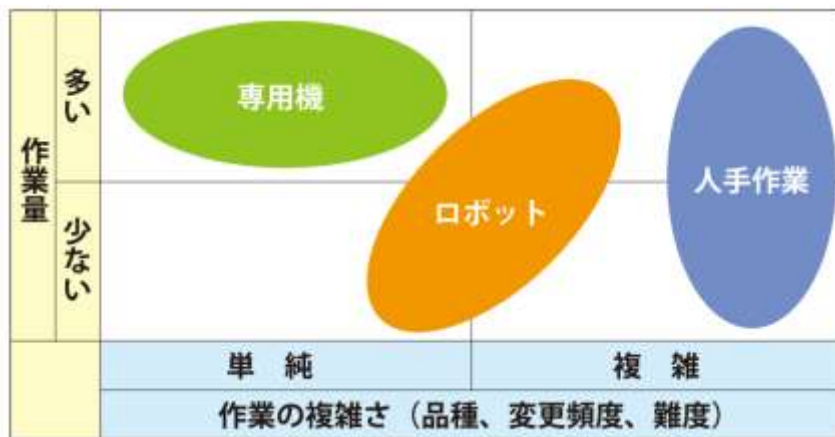
ロボットの選定は主に作業半径と可搬重量が要素となる。ロボットハンドツールは、ツールチェンジャーを使用して交換可能である。但し、ツールチェンジャーを用いると重量が増加し、大型のロボット機種を選定する必要があるため、解体ラインが大型化する懸念がある。

また、自動化する作業の選定においては、人とロボットの特徴を考慮する必要がある。人とロボットの特徴について図 1.6-5 に示す。



(出典：安川電機 <https://www.yaskawa.co.jp/product/robotics/about>)

図 1.6-4 6軸垂直多関節ロボットシステム



(出典：経済産業省 近畿経済産業局『ロボット導入促進ガイドブック』)

図 1.6-5 人とロボットの関係

1. 6. 2. 2 自動化の可否判断

1. 6. 1 に示した LIB ユニット解体手順の検証より、作業の複雑さと作業量及びロボットツールの適用などを加味した自動化適正の判断について表 1. 6-3 を示す。繰り返し作業の量が多く、ロボットハンドツールが共有でき、省力化の効果が高いと考えられるボルト、ナット、トルクスねじのねじ類取り外しを自動化の対象作業とした。図 1. 6-5 に LEAF-LIB のボルト位置、図 1. 6-6 に FIT3-LIB のボルト、ナット位置を示す。

ねじ類の自動取り外しには、以下の機器が必要となる。

① ロボット

ナットランナー及びロボットビジョンをロボットハンドツールとして搭載させ、ねじ類位置の検出及び取り外し動作を行う。事前のティーチングによる位置登録が必要となり作業半径、可搬重量、繰り返し精度などによる選定が必要となる。

② ロボットビジョン

事前にロボットティーチングで登録した位置の範囲内のねじ類を検出し、位置の補正を行いナットランナーが正確にねじ類にアプローチする補助を行う。多数カメラによる 3D スキャン方式や 2D レーザースキャンなどの方式があるため、得たい情報の精度やスキャンタイムなどを考慮して選定する必要がある。

③ ナットランナー

ロボットビジョンの位置情報により検出したねじ類に対して、ソケットを回転させることで取り外しを行う。また、対象のねじ類取り外しに必要な回転トルクによる選定が必要となる。LEAF-LIB では M8、M6 のボルト、FIT3-LIB では M6 のボルト、ナットと T-30 トルクスねじが使用されているため、対応させたソケットを自動交換し使い分ける。

解体作業項目の中で、作業量及び作業の複雑さを考慮し、自動化した場合に必要な機器などを考慮して自動化範囲を検討した。

表 1.6-3 自動化適正

作業項目	複雑さ	作業量	再現性	自動化適正
ボルト取外し	単純	多	○	○ ロボット
ナット取外し	単純	多	○	○ ロボット
トルクスネジ取外し	単純	少	○	○ ロボット
カバー取外し (FIT)	単純	少	○	△ 手作業
カバー取外し (LEAF)	複雑	少	○	× 手作業
ハーネスコネクタ切り離し	複雑	多	○	× 手作業
ハーネスクリップ外し	複雑	多	○	× 手作業
ハーネス回収	複雑	少	×	× 手作業
放電	複雑	少	○	× 手作業
劣化診断	複雑	少	○	× 手作業
バスバー回収	複雑	多	×	× 手作業
基板類取外し	複雑	少	×	× 手作業
LIBモジュール回収	複雑	多	×	× 手作業

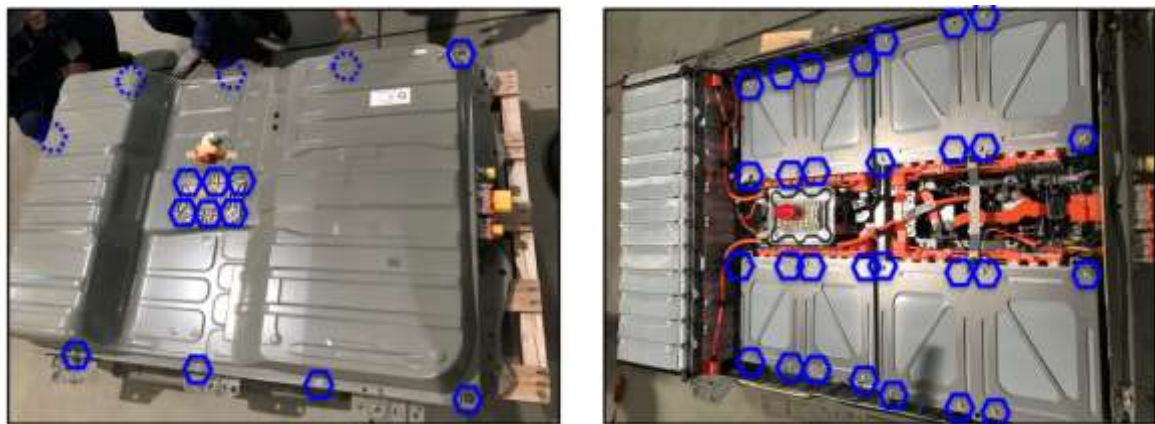


図 1.6-5 LEAF-LIB ボルト位置

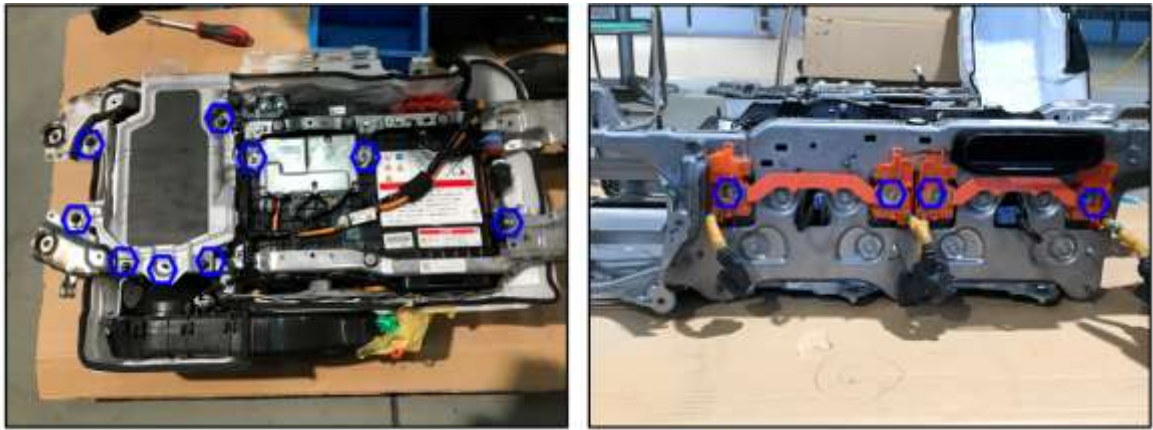


図 1.6-6 FIT3-LIB ボルト、ナット位置

1. 6. 2. 3 必要な処理量

LIB ユニット解体ラインに必要な処理量は、1. 4 LIB ユニット解体ラインの処理量で述べた通り、廃 LIB 受入量として、FIT が 3,737 個/年(= 14.4 個/日)、LEAF が 704 個/年(= 2.7 個/日)と見積もっている。劣化診断を行い、70%がリユース、30%がリサイクルの各工程に配分されるとすると、一日における放電及び自動解体での廃 LIB 処理量は FIT が 4.3 個/日、LEAF が 0.8 個/日となり、以上の処理量に対応できる解体ラインを構築する必要がある。

また、LIB には、消防法上の危険物である第四類第二石油類（指定数量：1000L）に該当する電解液が使用されており、電解液は FIT3 では約 2L/個、LEAF では約 20L/個が含まれていることが分かっている。廃 LIB 処理量の小数点以下を切り上げし、FIT3×15 個、LEAF × 1 個を解体ライン建屋内に保管した場合の指定数量の倍数を表 1.6-4 に示す。指定数量の倍数は 0.05 倍であり、消防法及び北九州市火災予防条例で定める 0.2 倍未満となり、条例で定める規制に該当せず、0.2 倍に対して十分に余裕があることを確認した。

一日における廃 LIB 処理量に加えて、多少の在庫分を建屋内に保管することが出来る、FIT3 は電解液が 2L/個と少なく、単体では 100 個未満であれば 0.2 倍を超過することがない、LEAF は 20L/個であり単体では 10 個未満で保管することに留意して、解体建屋ライン建屋の設計を行う際には保管スペースの配置を検討する必要がある。

表 1.6-4 指定数量の倍数

種類	保管個数 (個)	電解液 (L/個)	電解液 小計 (L)	指定数量 (L)	指定数量の倍数	
					小計	合計
FIT3	15	2	30	1000	0.03	0.05
LEAF	1	20	20	1000	0.02	

1. 6. 2. 4 自動化以外の工程との関係、物流動線

LIB 解体ラインでセル又はモジュール単位に解体した LIB を後工程となる熱分解、破碎・選別、湿式設備での処理により Co、Ni を回収する際の効率的な物流動線を検討する。

解体ライン建屋のレイアウトを図 1.6-7 に示す。建屋内には、LIB 解体ライン及び入荷した LIB ユニートを一時的に保管するパレットラック、解体した LIB ユニットやその他回収品を保管するエリアなどを備える。また、LIB 入荷及び LIB モジュール等の回収物の出荷を行う搬出入口を同一方向に設け、コンパクトな建屋サイズとすることで効率的な物流動線とする。

日本磁力選鉱(株)社の敷地を使用して近傍に各設備を設置することで輸送距離を短くし、輸送時の CO₂ 削減及び効率的な運用が出来る配置を目的として、図 1.6-8 に建屋配置図を示す。解体ライン建屋から熱分解設備建屋の距離約 95m、熱分解設備建屋から破碎選別建屋の距離約 55m、破碎選別建屋から湿式設備建屋までの距離約 60m であり、各建屋間の合計距離は約 210m で建屋間の輸送が可能となり、効率的な物流動線となる。

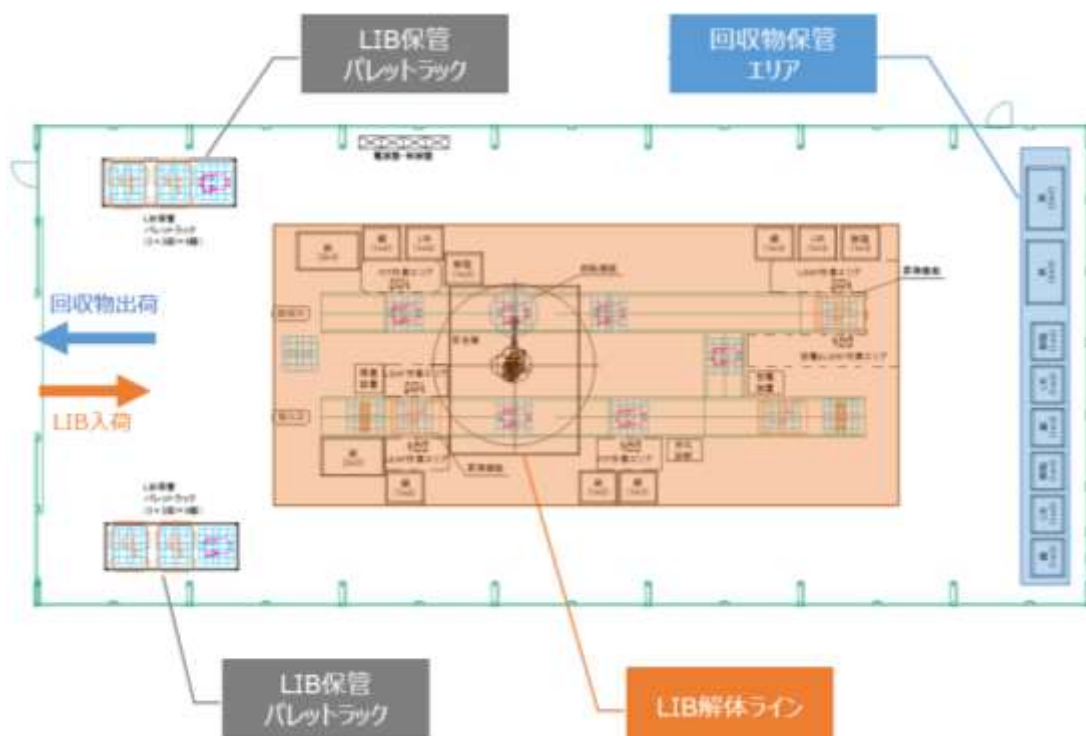


図 1.6-7 解体ライン建屋レイアウト



图 1.6-8 建屋配置图

1. 6. 2. 5 LIBユニット解体ラインに必要なユーティリティ

構想案において、解体ラインに必要なユーティリティは、電源（三相 200V、単相 200/100V）及びエアとなる。各機器での使用ユーティリティについて表 1.6-5 に示す。

表 1.6-5 ユーティリティ一覧

使用機器	ユーティリティ種別		
	電源		エア
	三相200V	単相200/100V	
搬送コンベア	○	○	○
6軸垂直多関節ロボット	○	×	×
ロボットビジョン	×	○	×
ナットランナー	○	○	×
解体ライン制御装置、安全機器	×	○	×
放電装置	○	○	×
劣化診断装置	○	○	×

<凡例> ○：ユーティリティ使用、×：ユーティリティ不要

1. 7 熱分解後の破碎・選別

1. 7. 1 破碎・選別システムの検討方針

本事業における車載LIBのリサイクルフローでは、ユニットからセル又はモジュール単位に解体したLIBを原料とし、熱分解、破碎・選別、湿式製錬の処理によりCo、Niを回収する。

このフローにおける破碎・選別は、後段のCo、Ni回収工程の原料である活物質とCu、Al等のシート材を選別することを目的としている。本検討では、Co、Niを高効率にて回収するための破碎・選別機等主要機器の仕様を検討するとともに、ライン化を想定した最適な設備レイアウトを検討する。

破碎・選別等主要機器の仕様検討に当たり、次の目標を設定する。

- ・活物質に含まれるCo、Niそれぞれの回収率を90%以上とする。
- ・回収される活物質中へのシート材であるCu、Alの混入率を10%以下とする。
- ・活物質は、採算性を考慮して回収率を高める一方で、活物質へのCu、Alの混入は、後段のCo、Ni回収工程におけるコストアップにつながるため、極力活物質への混入を避ける。

1) 破碎機の選定

図1.7-1に破碎機選定における検討イメージを記載する。

車載LIBの筐体、正極材（アルミニウムシート材）、負極材（銅シート材）から活物質であるCo、Niを高効率で単体分離可能な破碎機を選定する。

単体分離性は、後の選別工程でのCo、Ni回収率に大きく影響するため、如何に選択的に活物質をシート材等から剥離（単体分離）するかが重要である。過去のトライアル試験にて、回転型の衝撃式破碎機であるハンマーシュレッダーがシート材からの活物質剥離に有効であることが判明しているため、破碎機メーカーにて同型破碎機を用い、実機レベルの破碎テストを実施し、活物質の単体分離性を確認する。

併せ、ハンマーシュレッダー単体での破碎が能力的に難しい場合は、二軸せん断機による前処理破碎（粗破碎）も検討する。

また、破碎機の処理能力としては、最大処理能力500kg/h、常用300kg/hと設定する。

2) 選別機の選定

図1.7-2に選別機選定における検討イメージを記載する。

破碎機にて単体分離されたシート材であるCu・Al、Fe及び活物質を高効率で分離回収するため、選別機の選定、及び選定された選別機の仕様を検討する。尚、選別フローは、過去のトライアル試験にて図1.7-3に示すフローが最適であると判明している。

活物質は、最もシンプルな方法である篩分けにて回収可能であり、Cu・Al、Feは、磁力

選別により分離可能である。Cu・Al の分離については、両者が混在したままで再資源化原料として出荷可能であることから、今回両者の分離は行わないことにした。

篩分けにおける篩い粒度は、過去実施したトライアル試験の結果より、今回設定した目標値である Co、Ni 回収率 90%以上、及び Cu、Al 混入率 10%以下と同等の値となっている篩い粒度を選定した。

上記事項を確認し、篩分け機、磁力選別機の最終仕様を決定する。

3) 設備レイアウト検討

破碎機、選別機の選定結果より、車載 LIB 破碎・選別のライン化を想定した最適な設備レイアウトを検討する。

実操業を想定し、原料投入、破碎・選別、産物回収まで一連の処理をライン化し、設備の配置を決定する。ライン設計に当たり、Co、Ni、Mn を含む車載 LIB の破碎・選別設備となるため、労働安全衛生法上の特定化学物質障害予防規則（特化則）に準じ、局所排気装置等の設置、配置も検討する。

図 1.7-4 に設備レイアウト検討イメージを記載する。



図 1.7-1 破碎機選定における検討イメージ



図 1.7-2 選別機選定における検討イメージ

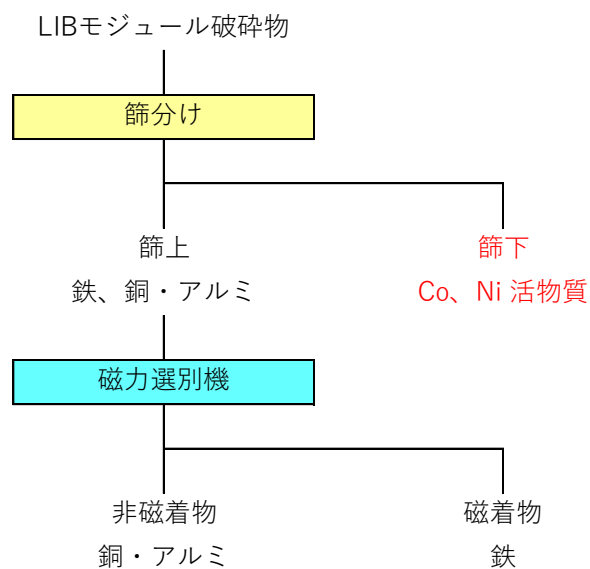


図 1.7-3 選別フロー



図 1.7-4 設備レイアウト検討イメージ

1. 7. 2 破砕機の選定

破砕機メーカー2社にて、車載 LIB 熱分解物の破砕テストを行い、活物質の単体分離性を確認し、破砕機の最終仕様を検討した。

1) 破砕テスト原料

本テストで使用した原料を表 1.7-1、図 1.7-5、図 1.7-6 に示す。

FIT3 の LIB モジュールは、強固な鉄枠でセルが固定されており、モジュール単位で熱分解を行っても、その形状を留めたままとなる。(図 1.7-5 原料 A (鉄枠付き) 参照)

ハンマーシュレッダーで破砕し、単体分離を促進させるに当たっては、ハンマーシュレッダーのロストル径の選定が重要である。過去行ったトライアル試験結果より、Co、Ni 回収率が約 90%となっているものと同サイズのロストル径を用いることにした。しかしながら、過去行ったトライアル試験はセル単体にて行っているため、原料 A のような強固な鉄枠付きモジュールの破砕テストは初めてとなる。

ハンマーシュレッダーの特性上、ロストル径以下のサイズまで破砕されないと破砕機からは排出はされないため、大きく厚い鉄や非鉄金属等を小粒径のロストルで破砕することは、破砕機に大きな負荷を与えることになる。よって、本破砕テストでは、原料 B のような鉄枠を除去したのものも準備し、同様のテストを行うことにした。

尚、本事業では、FIT3 の他に LEAF の LIB モジュールも対象となるが、LEAF モジュールは、FIT3 のように強固な鉄枠は無く、またセルもラミネートタイプであるため、破砕負荷が大きい FIT3 のモジュールのみで試験を行った。単体分離性も FIT3 のモジュールで確認をとれば、LEAF は問題ないと判断した。

2) 破砕テスト機、破砕テストフロー

表 1.7-2 に破砕テストで使用した各破砕機の仕様を示す。

当初、原料 A (鉄枠付き)、原料 B (鉄枠なし) をそのままハンマーシュレッダーにて破砕することを想定していたが、両破砕機メーカーより、ハンマーシュレッダーで破砕する前に二軸せん断機にて前処理 (粗破砕) しないとハンマーシュレッダーでの破砕は難しいとの見解があったため、二軸せん断機による前処理を実施することにした。図 1.7-7 に破砕テストフロー、確認項目を示す。

それぞれの原料を二軸せん断機、ハンマーシュレッダーにて破砕し、破砕物を篩分けして篩下、篩上の重量分布を確認するとともに、それぞれを分析して金属品位を確認する。その結果より、篩下での Co、Ni 活物質回収率、篩上での Cu、Al、Fe の回収率を確認し、目標を達成する破砕機仕様を特定する。

3) 原料 A (鉄枠付き) での破砕テスト結果

原料 A (鉄枠付き) を二軸せん断機にて破砕した結果、両メーカー共に二軸せん断機に

かかる負荷が想像以上に大きく、実機レベルで考えた場合、二軸せん断機のサイズを大きくし、電動機容量を 150kw 以上に設定しなければならないとの見解であった。

併せ、後のハンマーシュレッダー破碎についても同様に、電動機の容量を大きくする必要のあることから、両破碎機の導入においてイニシャルコストの増大が見込まれ、事業としての採算性確保も難しいと想定されることから、原料 A での破碎は断念し、LIB ユニット解体工程にて鉄枠を除去し、熱分解、破碎・選別を行う処理フローとした。

4) 原料 B(鉄枠なし)での破碎テスト結果

(1) 二軸せん断機

表 1.7-3 に二軸せん断機破碎テスト結果、図 1.7-8 に二軸せん断機破碎物を示す。

原料 B(鉄枠なし)での破碎結果は、両メーカーともに良好であり、目標の処理量 500kg/h をクリアした。破碎物の形状として、目視評価としては若干メーカー A の粒度が小さくなっているが、後にハンマーシュレッダーで破碎することを考慮すると、メーカー B での破碎物形状でも問題はない。

原料は両メーカー共に、図 1.7-9 に示す方法で投入した。別途原料切り出しホッパー、コンベア等を設置し、500kg/h で定量給鉱することも考えたが、実機レベルでの操業を考えた場合、給鉱ホッパー、コンベア等の付帯設備の設置が不可欠となるため、設置スペースが増大し、併せそれら付帯設備からの集塵も必須となることからコスト増となる。ハンドリングの面でも問題ないことから、図 1.7-9 の原料投入方法を採用した。

実機として導入する二軸せん断機の仕様としては、両メーカー共に電動機 110kw の油圧駆動方式が推奨された。今回の試験においては、少量で、しかも短時間での破碎であるため、電動機にさほど大きな負荷を与えないが、それでもせん断刃が原料を噛み込む際には瞬間的に定格電流を超える負荷を電動機に与えてしまう。二軸せん断機は、何度も正転、反転を繰り返しながら原料を徐々に破碎していく構造のため、連続操業時においては定格電流を超える負荷を、瞬間的にはあるが、繰り返し電動機に与えてしまう。その結果、電動機の焼き付きが発生する可能性があり、電動機自体の寿命も低減する。油圧駆動にすれば電動機への負荷が低減することから、長時間での操業も考慮し、110kw の油圧駆動と設定した。

両メーカーとも破碎機の性能としては問題ないが、試験結果での処理能力とコストを考慮し、メーカー B の二軸せん断機を選定した。図 1.7-10 に、今回の試験結果より選定した二軸せん断機の最終仕様を示す。

(2) ハンマーシュレッダー機種選定

今回の試験で使用したハンマーシュレッダーの仕様を表 1.7-2 に示す。単体分離性を左右するロストル径の設定は、過去のトライアル試験結果より、両メーカーともに同サイズ

とした。これをロストル径①とする。対象原料は、先に記述した通り、原料A（鉄枠付き）での破碎は、原料の性状的に不可であるため、原料B（鉄枠なし）を使用した。

上述の条件にて、図 1.7-7 の破碎フローに沿って破碎テスト、評価、最終仕様の決定を行った。

破碎メーカーAの結果を図 1.7-11、破碎機メーカーBの結果を図 1.7-12 に示す。メーカーAでの篩下産物のCo、Niの回収率は、それぞれ78.2%、76.2%となり、目標値である回収率90%以上は達成できなかった。篩下産物へのCu、Alの混入率については、目標値10%以下を達成できた。

次にメーカーBでの結果として、篩下産物のCo、Ni回収率は、それぞれ93.0%、91.3%となり、目標値である回収率90%以上を達成した。併せ、篩下産物へのCu、Alの混入率についても、目標値10%以下を達成した。

上記結果は、両者が持つハンマーシュレッダーの回転刃の形状に寄与したものと考えられるが、メーカーBのハンマーシュレッダーで良好な結果が得られたため、以降の検討はメーカーBを主体として行っていく。

(3) ハンマーシュレッダーのロストル径の選定

破碎機メーカーBのハンマーシュレッダーを用いて、ロストル径の選定試験を行った。前述したロストル径①以外に、更に2種のロストル径にて破碎試験を行った。ロストル径②用いた試験結果を図 1.7-13、ロストル径③を用いた試験結果を図 1.7-14、ロストル径選定試験結果のまとめを表 1.7-4 に示す。

全結果共に目標値である篩下Co、Ni回収率90%以上、Cu、Al混入率10%以下は達成しているが、試験No.3 ロストル径③でCo、Ni回収率が最も低くなり、かつ最も高いCu、Al混入率となった。試験No.1 ロストル径①、及び試験No.2 ロストル径②の結果としては、Co、Ni回収率、及びCu、Al混入率は同等の値となっている。

操業コストへの影響として、試験No.1、試験No.2、試験No.3での電流値の比較を表 1.7-5 に示す。試験で使用したハンマーシュレッダーの定格電流40Aに対し、試験No.2 ロストル径②で実測電流値が最も低い値を示した。実測電流値が低ければ、破碎機に与える負荷が小さいと判断できる。よって、試験No.1と試験No.2のCo、Ni回収率、Cu、Al混入率は同等ではあるが、試験No.2の方が選別機として適していると判断できる。また、篩下への鉄の混入率も試験No.2が最も低い結果となっていることから、ロストル径②を採用することとした。

図 1.7-15 にハンマーシュレッダーの最終仕様を示す。

表 1.7-1 破砕テスト原料

原料	原料詳細 (1 モジュール当り)
原料 A (鉄枠付き)	<ul style="list-style-type: none"> ・種類 : FIT3 LIB モジュール ・大きさ : 250mm (W) × 120mm (L) × 90mm (H) ・重量 : 3.46kg ・セル数 : 12 個/1 モジュール
原料 B (鉄枠なし)	<ul style="list-style-type: none"> ・原料 A (鉄枠付き) を解体し、鉄枠を除去したもの ・重量 : 2.76kg ・セル数 : 12 個/1 モジュール ・セル大きさ : 113mm (W) × 80mm (L) × 16mm (H)



図 1.7-5 原料 A (鉄枠付き)



図 1.7-6 原料 B (鉄枠なし)

表 1.7-2 破碎テスト機の仕様

破碎機	仕様	破碎機メーカーA	破碎機メーカーB
二軸せん断機	電動機	110kw	37kw
	対象原料	原料A (鉄枠付き)	原料A (鉄枠付き)
		原料B (鉄枠なし)	原料B (鉄枠なし)
ハンマーシュレッダー	電動機	30kw	11kw
	周速	40m/s	40m/s
	ロストル径	ロストル径① (両社同サイズ)	
	対象原料	原料A (鉄枠付き) 二軸せん断物	原料A (鉄枠付き) 二軸せん断物
		原料B (鉄枠なし) 二軸せん断物	原料B (鉄枠なし) 二軸せん断物

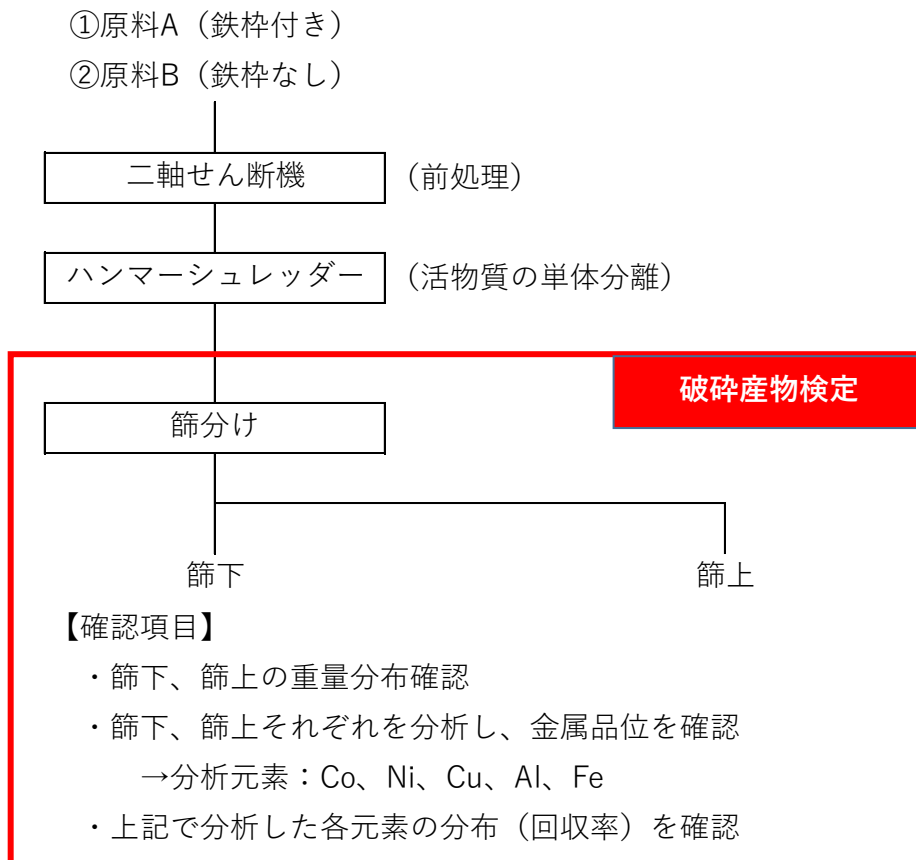


図 1.7-7 破碎テストフロー、確認項目

表 1.7-3 二軸せん断機破碎テスト結果

破碎機	仕様	破碎機メーカーA	破碎機メーカーB
二軸せん断機 破碎テスト結果	電動機	110kw	37kw
	原料投入量	205 kg	46.87 kg
	破碎所用時間	620 秒	64 秒
	処理能力	1,190 kg/h	2,636 kg
試験結果より 推奨される仕様	電動機	110 kw	110 kw
	駆動方式	油圧駆動	油圧駆動



図 1.7-8 二軸せん断機破碎物

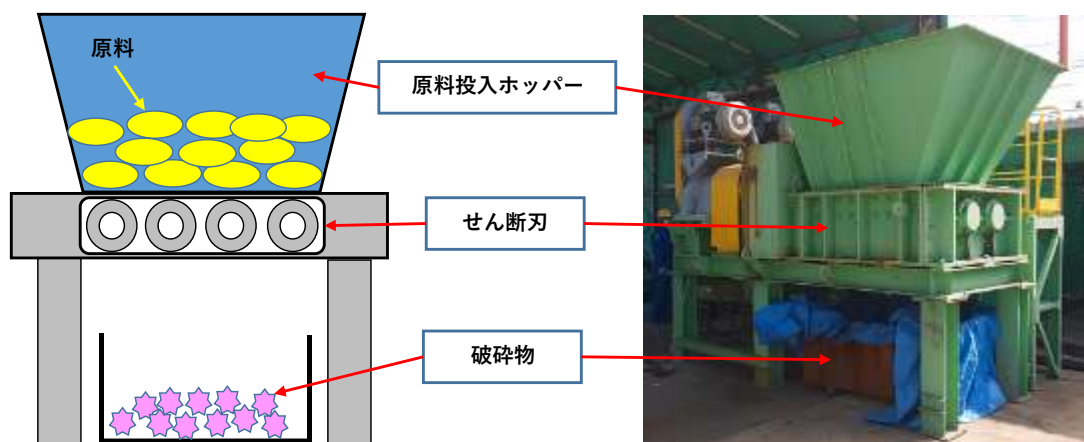
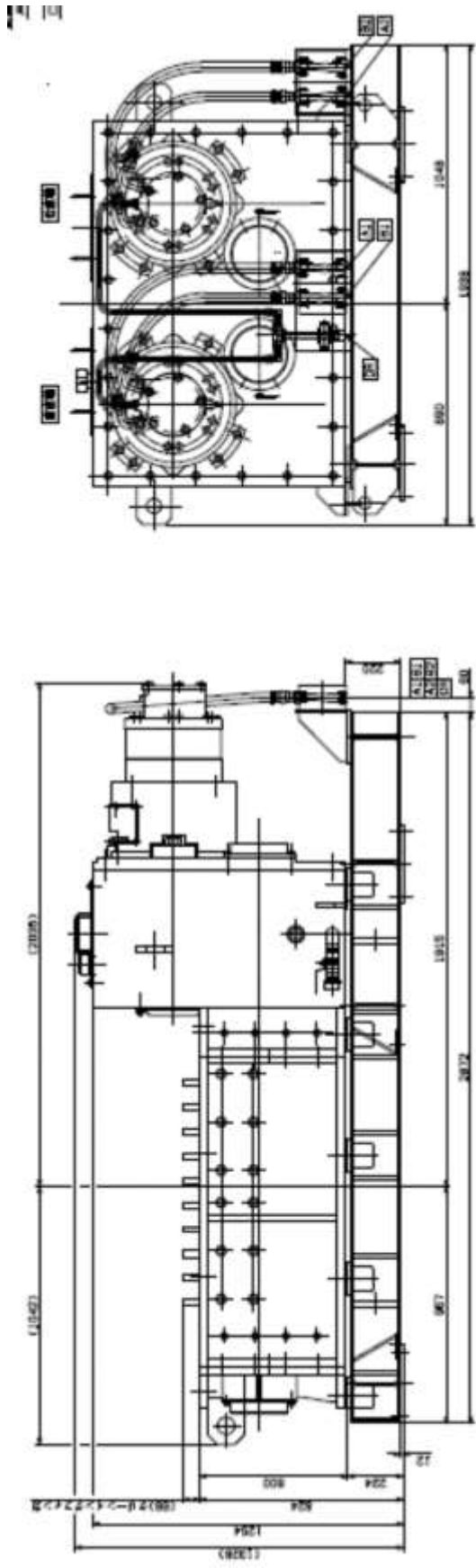


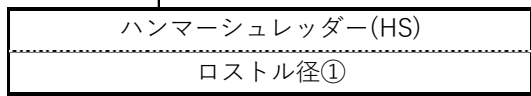
図 1.7-9 二軸せん断機の原料投入方法



破碎機メーカー	メーカーB
駆動方式	油圧駆動
電動機	55kw × 2台
処理能力	最大 500 kg/h

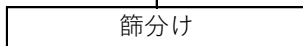
図 1.7-10 二軸せん断機の最終仕様

原料B（鉄粹なし）二軸せん断物



HS破碎産物 112.7 kg 100.0 wt%

	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	5.3	1.4	36.8	32.2	2.7
重量 (kg)	6.0	1.5	41.4	36.3	3.0
分布 (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0



篩下産物 23.4 kg 20.8 wt%

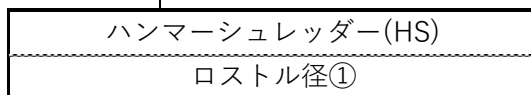
	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	20.1	5.0	5.2	6.9	<0.1
重量 (kg)	4.7	1.2	1.2	1.6	-
分布 (%)	78.2	76.2	2.9	4.5	0.0

篩上産物 89.3 kg 79.2 wt%

	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	1.5	0.4	45.0	38.9	3.4
重量 (kg)	1.3	0.4	40.2	34.7	3.0
分布 (%)	21.8	23.8	97.1	95.5	100.0

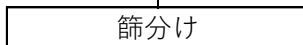
図 1.7-11 破碎機メーカーA（ロストル径①）によるハンマーシュレッダー破碎結果

原料B（鉄粹なし）二軸せん断物



HS破碎産物 10.0 kg 100.0 wt%

	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	5.8	1.5	23.7	48.3	3.7
重量 (kg)	0.6	0.2	2.4	4.8	0.4
分布 (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0



篩下産物 2.3 kg 22.6 wt%

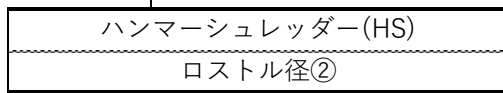
	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	23.6	6.1	5.8	6.8	2.3
重量 (kg)	0.5	0.1	0.1	0.2	0.1
分布 (%)	93.0	91.3	5.5	3.2	13.8

篩上産物 7.8 kg 77.4 wt%

	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	0.5	0.2	28.9	60.5	4.1
重量 (kg)	0.0	0.0	2.2	4.7	0.3
分布 (%)	7.0	8.7	94.5	96.8	86.2

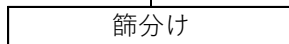
図 1.7-12 破碎機メーカーB（ロストル径①）によるハンマーシュレッダー破碎結果

原料B（鉄粹なし）二軸せん断物



HS破碎産物 16.4 kg 100.0 wt%

	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	6.7	1.7	26.3	45.2	1.4
重量 (kg)	1.1	0.3	4.3	7.4	0.2
分布 (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0



篩下産物 4.2 kg 25.8 wt%

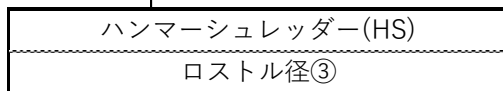
	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	24.1	6.0	4.7	6.3	0.6
重量 (kg)	1.0	0.3	0.2	0.3	0.0
分布 (%)	92.8	94.2	4.6	3.6	10.9

篩上産物 12.1 kg 74.2 wt%

	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	0.7	0.1	33.8	58.8	1.7
重量 (kg)	0.1	0.0	4.1	7.1	0.2
分布 (%)	7.2	5.8	95.4	96.4	89.1

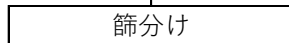
図 1.7-13 ロストル径②でのハンマーシュレッダー破碎結果

原料B（鉄粹なし）二軸せん断物



HS破碎産物 15.7 kg 100.0 wt%

	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	7.9	1.9	23.8	45.6	0.6
重量 (kg)	1.3	0.3	3.7	7.2	0.1
分布 (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0



篩下産物 4.6 kg 29.0 wt%

	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	24.9	6.2	5.5	6.7	0.6
重量 (kg)	1.1	0.3	0.2	0.3	0.0
分布 (%)	90.9	93.3	6.7	4.2	27.1

篩上産物 11.2 kg 70.9 wt%

	Co	Ni	Cu	Al	Fe
品位 (%)	1.0	0.2	31.3	61.6	0.7
重量 (kg)	0.1	0.0	3.5	6.9	0.1
分布 (%)	9.1	6.7	93.3	95.8	72.9

図 1.7-14 ロストル径③でのハンマーシュレッダー破碎結果

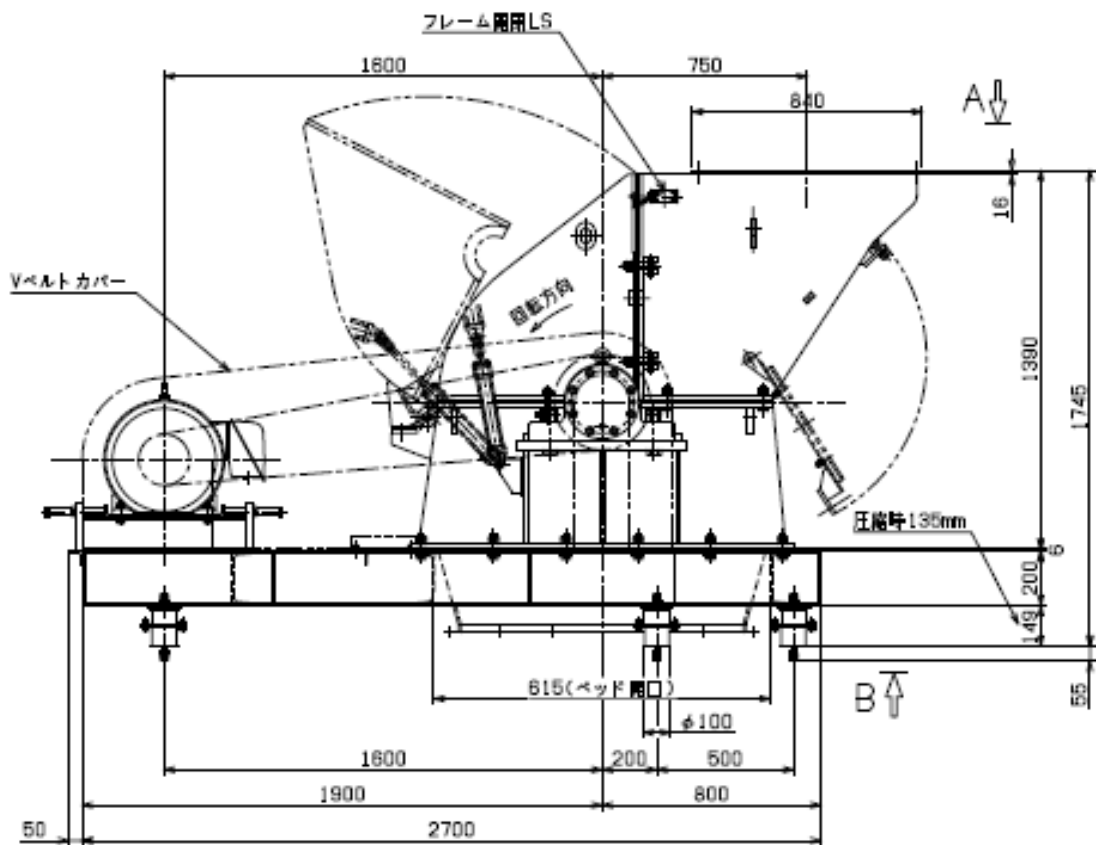
表 1.7-4 ロストル径選定試験 試験結果まとめ

(%)

試験No	ロストル条件	対象産物		Co	Ni	Cu	Al	Fe
No.1	ロストル径 ①	篩上	品位(%)	0.5	0.2	28.9	60.5	4.1
			回収率(%)	7.0	8.7	94.5	96.8	86.2
		篩下	品位(%)	23.6	6.1	5.8	6.8	2.3
			回収率(%)	93.0	91.3	5.5	3.2	13.8
No.2	ロストル径 ②	篩上	品位(%)	0.7	0.1	33.8	58.8	1.7
			回収率(%)	7.2	5.8	95.4	96.4	89.1
		篩下	品位(%)	24.1	6.0	4.7	6.3	0.6
			回収率(%)	92.8	94.2	4.6	3.6	10.9
No.3	ロストル径 ③	篩上	品位(%)	1.0	0.2	31.3	61.6	0.7
			回収率(%)	9.1	6.7	93.3	95.8	72.9
		篩下	品位(%)	24.9	6.2	5.5	6.7	0.6
			回収率(%)	90.9	93.3	6.7	4.2	27.1

表 1.7-5 ロストル径選定試験 電流値比較

試験No	ロストル条件	定格電流	実測電流値 平均
No.1	ロストル径①	40A	26~27A
No.2	ロストル径②	40A	19~20A
No.3	ロストル径③	40A	22~23A



破砕機メーカー	メーカーB
ハンマー周速	最大40m/s (インバーター制御)
ロストル	ロストル径②
処理能力	最大500kg/h (常用300kg/h)

図 1.7-15 ハンマーシュレッダーの最終仕様

1. 7. 3 選別機の選定

二軸せん断機、ハンマーシュレッダーによって破碎され、単体分離された活物質、Cu・Al、Fe を分離回収する選別方法は、過去のトライアル試験によって図 1.7-3 に示す選別フローが最適であることが判明している。そこで、フローに示す選別機の選定、及び選別機の最終仕様を検討した。

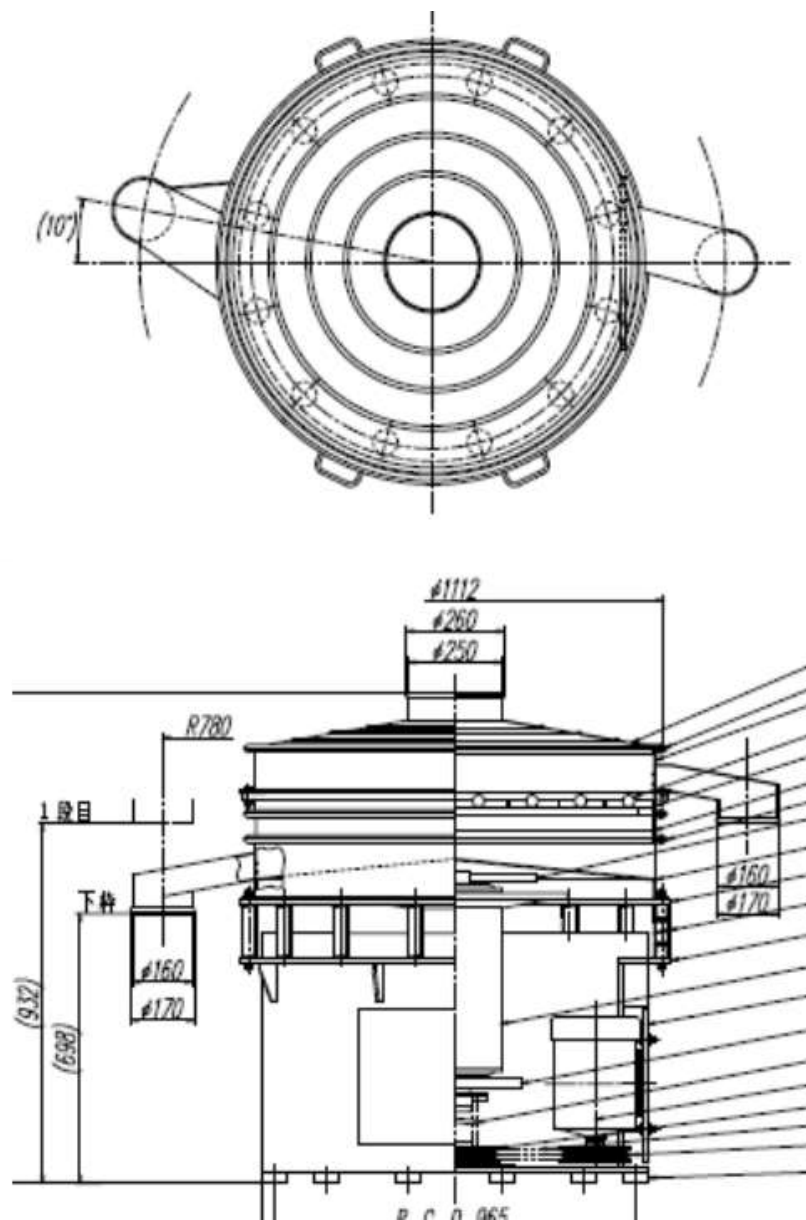
1) 篩分け機の選定

活物資の選別は、篩分けにより行う。篩い粒度はハンマーシュレッダー最終仕様決定の際と同等の粒度とし、破碎機の処理能力に合わせ、500kg/h にて設計した。ハンマーシュレッダー破碎物（前述試験 ロストル径②での破碎物）を用いて、篩分け機メーカーにて実際に篩分け試験を実施し、図 1.7-16 に示す篩分け機を最終仕様とした。

2) 磁力選別機の選定

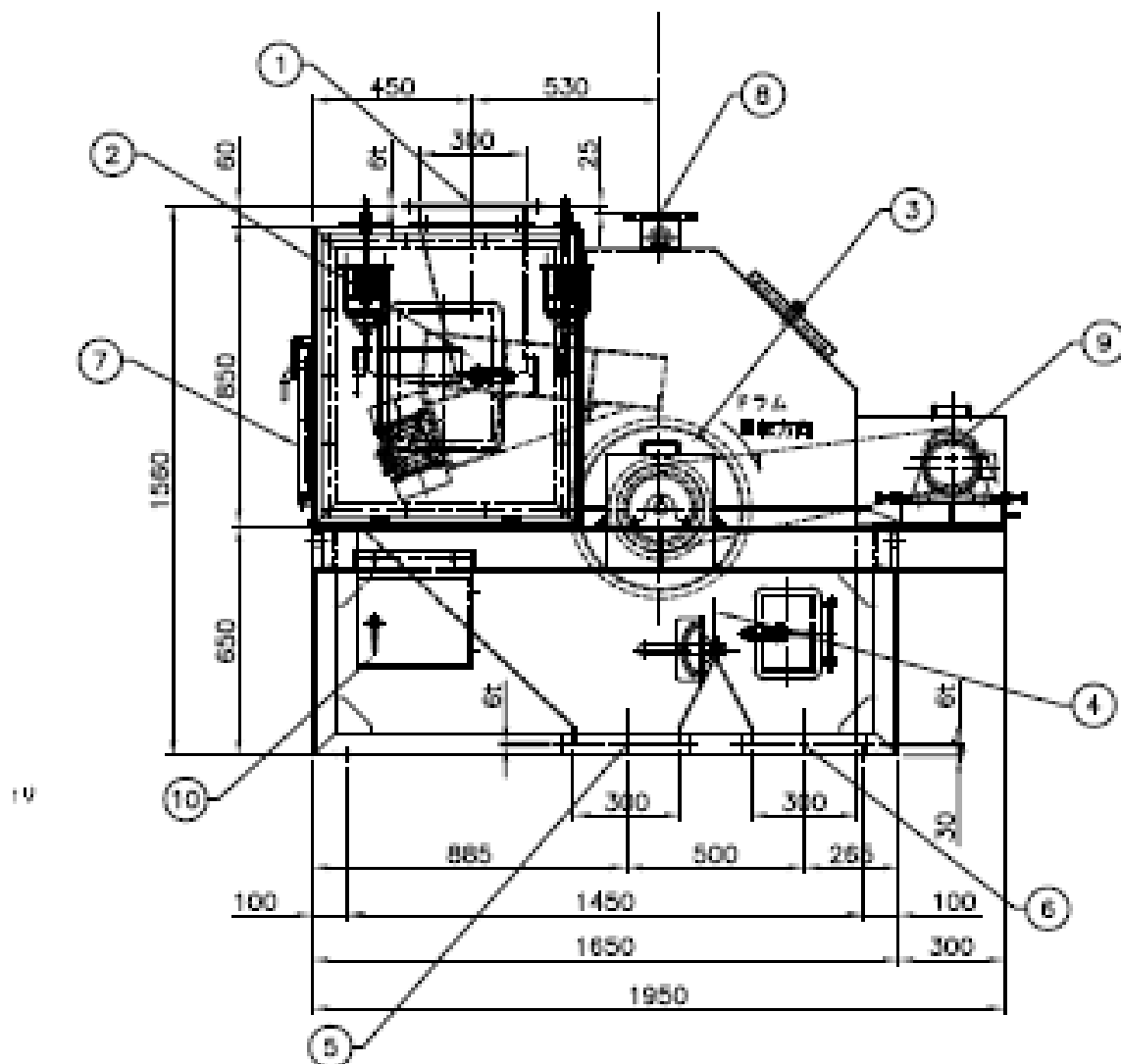
篩分け後の Fe、Cu・Al の選別は、磁力選別機により行う。磁力選別機には吊り下げ型、プリー型等様々な型式があるが、最も選別効率、回収率が良いドラム型を採用した。また、LIB モジュールの筐体、LIB モジュールに同伴するビス等の Fe を高収率で回収するため、高 Gauss タイプ（電動機 0.75kw、磁束密度は 1,500Gauss）を選定した。

選別対象物が回転するドラムに投入され、磁性がある Fe は磁着物で、磁性が無い Cu・Al は非磁着物で回収される。分離精度は、ドラム周速、分離板角度で調整し、原料によって最適な条件を設定する。図 1.7-17 に磁力選別機最終仕様を示す。



篩分け機タイプ	円形型振動篩い
処理能力	最大500kg/h（常用300kg/h）

図 1.7-16 篩分け機の最終仕様



型式	日本磁力選鉱(株) DPT-4660
選別タイプ	ドラム型磁力選別機
磁束密度	1,500 Gauss
ドラム周速	60m/min , 60Hz(インバーター制御)
処理能力	最大500kg/h (常用300kg/h)

図 1.7-17 磁力選別機の最終仕様

1. 7. 4 設備レイアウト検討

1. 7. 2 及び 1. 7. 3 にて最終仕様を決定した破碎機、選別機のレイアウトを検討した。

1) ライン構成の検討

図 1.7-18 にライン構成の検討結果を示す。

破碎・選別システムとして、処理対象に応じて柔軟に処理フローを変更できるようにするため、二軸せん断機を独立させ、ハンマーシュレッダーと選別機をラインとして構成した。二軸せん断機は前処理として粗破碎するための設備であり、粗破碎が不要な処理対象物に対しては、合理的にハンマーシュレッダーだけの破碎と選別を行うことを可能としている。本事業における対象の FIT3 及び LEAF の LIB モジュールは、二軸せん断機による破碎が必要であるが、強固な筐体を持たない LIB セル単位で構成される LIB の処理を考慮し、柔軟に処理フローを変更できる。

ハンマーシュレッダーと選別機のラインには、原料受入れ後に、簡易的な振動篩いを設置した。これは二軸せん断機による粗破碎で発生する微粉や粉体が多い原料に対応するための処置である。粉体を事前に回収することで、ハンマーシュレッダーでの破碎効率を向上させ、またハンマーシュレッダーからの集塵物量を減らし、可能な限り集塵機の容量を押しさえことが可能となるため設置することにした。

2) 設備レイアウト検討

上述したライン構成を基に、設備レイアウトを検討した。二軸せん断機は、ハンマーシュレッダーと選別機と独立させ設備を配置する。設備を導入する建屋面積を極力小さくし、かつ処理の作業性を考慮して配置を決定した。破碎・選別システムの設置建屋面積は 26m × 15m = 390 m² となる。破碎・選別システムでは Co、Ni、Mn を含む LIB を原料とした粉塵を取り扱う設備となるため、労働安全衛生法上の特定化学物質障害予防規則（特化則）に準じ、局所排気装置を設置する。建屋外 3 か所にバグフィルターを設け、各設備、付帯設備からの環境集塵、局所集塵に対応できる形とした。

今後は、破碎機、選別機、設備レイアウトの検討結果を基に詳細設計を行い、製作、設置を行っていく。

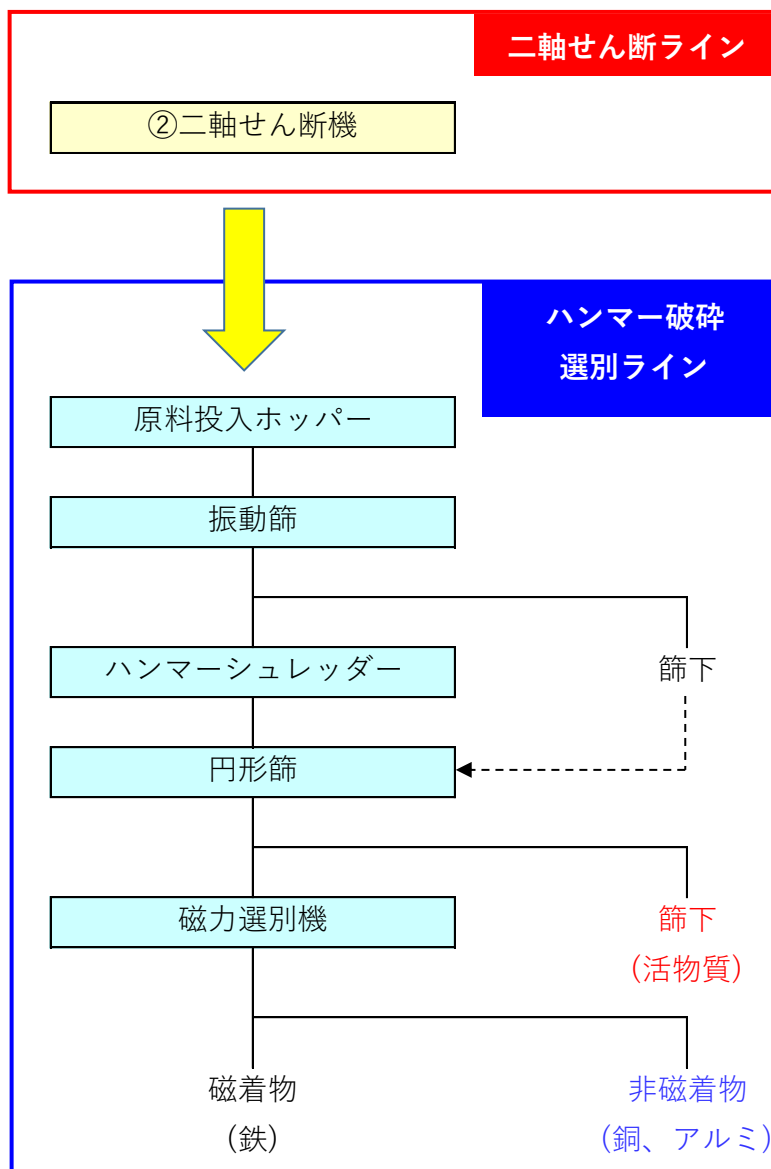


図 1.7-18 ライン構成

2. 環境影響改善効果、CO2 排出量削減効果

2. 1 環境影響改善効果の検討

1) LIB 取り出し自動化による環境影響改善効果の検討

車載用の LIB は、電気自動車(EV)かハイブリッド車(HV)による搭載量や電力仕様の違い、各メーカーによる大きさや重量、形状や取り出し手法、取り付け方法や取り付け場所の違いがある。このため自動車メーカーのマニュアルに基づいて手解体で取り外しが行われている。この手法では作業負荷、効率の観点から、今後の廃車発生量増加への対応が難しい。LIB 取り出し自動化による処理時間・能力の改善率評価に向けて、本年度、処理時間・能力を設定した。2025 年の九州エリアでの発生予測数量を処理可能な能力を前提として、LEAF について 30 分/台、FIT3 に関しては、15 分/台の処理能力とした。

次年度、装置を用いた取り出し試験により、手作業と能力比較し、またユーティリティ一、資材の使用量を調査することで環境影響改善効果の評価を行う。

2) LIB 劣化診断による環境影響改善効果の検討

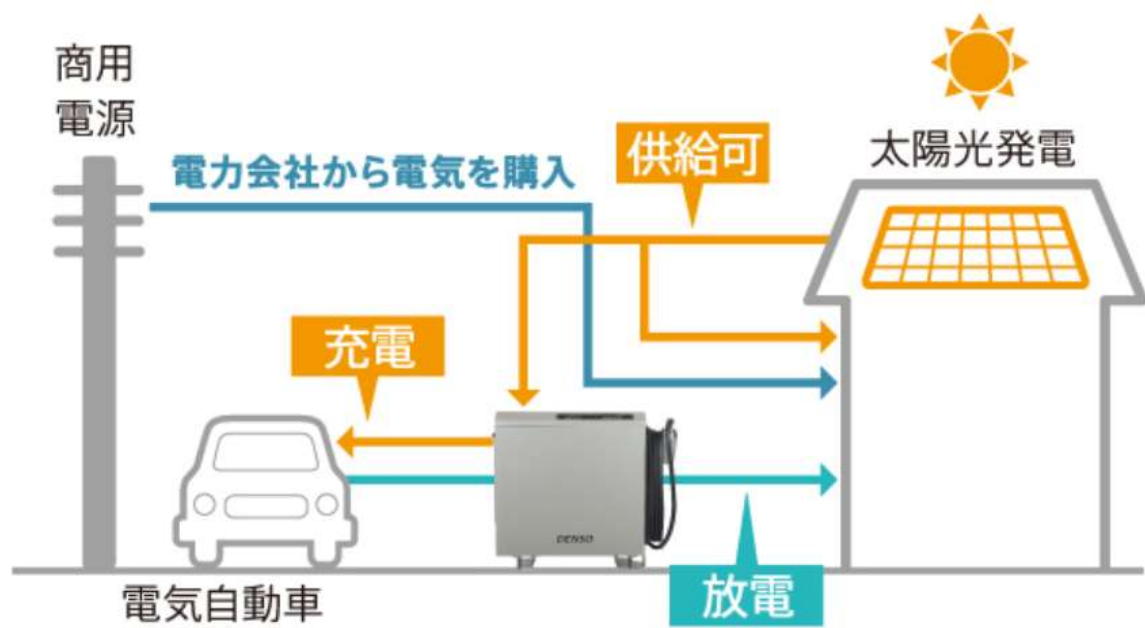
LIB の劣化診断技術としては、各種の個別技術が開発されているが、本事業では、自動車リサイクル事業者若しくは LIB の回収運搬事業者が LIB の健全性を評価できる汎用性が高い技術を用いた劣化診断方法を検討する。今年度、各劣化診断技術の比較検討を行った。短時間でユニット単位の診断が可能と見込まれる技術を選定することで、将来的な大量の廃棄車載 LIB 発生にも対応可能と考える。次年度、診断機の設計から試運転までを行い、環境影響改善効果の検証を計画している。

3) LIB リユース活用による環境影響改善効果の検討

EV の大容量蓄電能力を家庭やオフィスでの蓄電池として利用することで、電力需要の平準化や再生可能エネルギーの利用拡大に活用する V2H (Vehicle to Home) システムの普及が始まっている。CHAdeMO※仕様に準拠した V2H と PV を組み合わせたシステムの技術が確立し、既に複数社で実用化されている。本事業においても、上記 V2H システムを採用した EV リユース活用について検討を進める。

FIT3 搭載 LIB に関しては、V2H システムが対応していないため、そのまま車載用 LIB の中古部品としての活用以外には、リユースし難い状況である。

※CHAdeMO: CHAdeMO 協議会が標準規格として提案する急速充電器の充電規格



(出典：株式会社デンソーHP)

図 2.1-1 V2H システム

2. 2 CO2 排出量削減効果の検討

本事業において、2025年に九州地域で発生が予測される LEAF 704 台/年、FIT 3,737 台/年をリサイクルすることで見込まれる CO2 削減見込量を、次式の考え方で評価した結果、表 2.2-1 のとおり 409t/年となった。

$$\text{本事業による CO2 削減見込量} = \text{現状の電炉での処理による CO2 発生量} + \text{鉍石由来の各金属生産時 CO2 発生量} - \text{本事業の各金属リサイクルで発生する CO2 発生量}$$

現段階において、電炉での処理による CO2 発生量、本事業による各金属リサイクルで発生する CO2 発生量は未確定であるため、表 2.2-1 では、鉍石由来の各金属生産時の CO2 発生量を製造原単位から計算した。金属回収量については、マテリアルバランスから算出した。

本事業による CO2 排出量削減効果については、事業における各工程の実証結果に基づき、評価をしていく。本年度は、各工程が検討段階にあることから、CO2 排出量削減効果の評価シナリオ、評価条件、取得するデータの検討を行った。

2. 2. 1 評価シナリオの検討

CO2 排出量の削減効果を検討するために、本事業ではライフサイクルアセスメント (LCA) を用いる。そのために、まず LIB リサイクルに関してケースを設定し、それを比較することで削減効果の評価する。図 2. 2-1 に、①現行の廃 LIB 処理プロセス、②本事業のプロセスのケース設定を示す。

①現行の廃 LIB 処理プロセスでは、再生工程（電炉）にて Fe を、焼却炉にて Cu, Al をリサイクルする。それに対して、②本事業のプロセスでは、破碎・選別後の活物質から湿式回収によって Co, Ni を回収する。

LCA では、システム境界と機能単位を設定して比較評価するが、その際、比較システムが生み出すベネフィットを統一することが必要となる。本事業のプロセスから生み出すベネフィットは、まず、リユースされる LIB と、リユース不可能な LIB からリサイクルする Fe, Cu, Al, Co, Ni、更に放電工程において回収される再生電力がある。

(1) LIB 回収ケースの設定

九州全域から LIB を広域回収するにあたり、LIB をどのような形態で回収し、北九州市のリサイクル拠点まで運搬するか検討する必要がある。図 5. 1-1 で示した 2 つのケース設定の②本事業のシナリオについて、更に ELV（使用済自動車）の発生から LIB 取り出しまでの工程を図 2. 2-2 のように 3 つに分ける。

九州全域で排出された ELV をそのまま北九州市まで運搬し、北九州市にて LIB 取り出しを行うケースと、九州全域で LIB の取り出しを行い、LIB の形態で北九州市まで運搬するケース、また、LIB 取り出し後、劣化診断まで発生場所で行い、リサイクル対象 LIB のみ北九州市まで運搬するケースである。

今後、運搬については、輸送形態（車両、積載方法・量）、距離を精査することで評価する。また、消防法との関係についても検討する必要がある。

(2) LIB リユースの評価の考え方

図 2. 2-1 に示したように、②本事業のプロセスでは、LIB 取り出し後、劣化診断を行い、利用可能な場合は LIB をリユースする。リユースのシナリオについては、別の自動車に搭載する、定置型電池として利用する、あるいは別用途に使用する等考えられるが、ここでは定置型を想定して考える。

図 2. 2-3 に、LIB リユースをする場合の環境負荷削減効果の評価するためのシステム境界を図示する。リユース後の使用期間については現時点では知見がないが、とりあえず 3 年として図中に示している。なお、図 2. 2-4 は自動車の使用年数に関する統計値 (2015 年) であるが、平均使用年数が 15 年で、15 年未満で廃車となる場合の平均使用年数が 12 年であることを考慮して、LIB の寿命があと 3 年程度残余していると仮定した。むろん、自動車の寿命と LIB の寿命は異なるので、今後精査が必要である。

上記仮定のもと、ベースライン（現行プロセス）として自動車を12年間使用した後、新品蓄電池を購入し定置型利用する状況を設定した。新品蓄電池の寿命を仮に10年間とし、プロジェクト（本事業）に合わせるために3年間に按分する。プロジェクトは、自動車を12年間使用した後、リユースとして定置型蓄電池として3年間利用する状況を設定した。

表 2.2-1 CO2 削減見込量

評価金属	回収量(t/年)	CO2排出量削減量(t/年)
Cu	20	41
Al	23	208
Co	4	98
Ni	4	62
合計	50	409

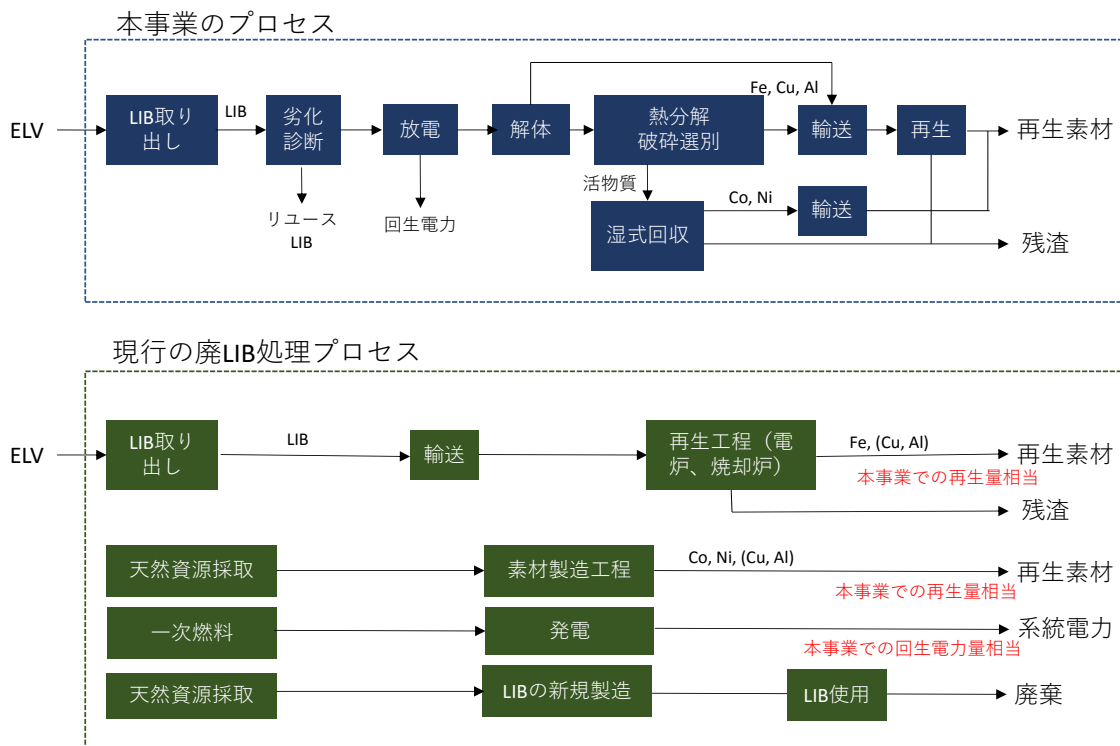


図 2.2-1 システム境界

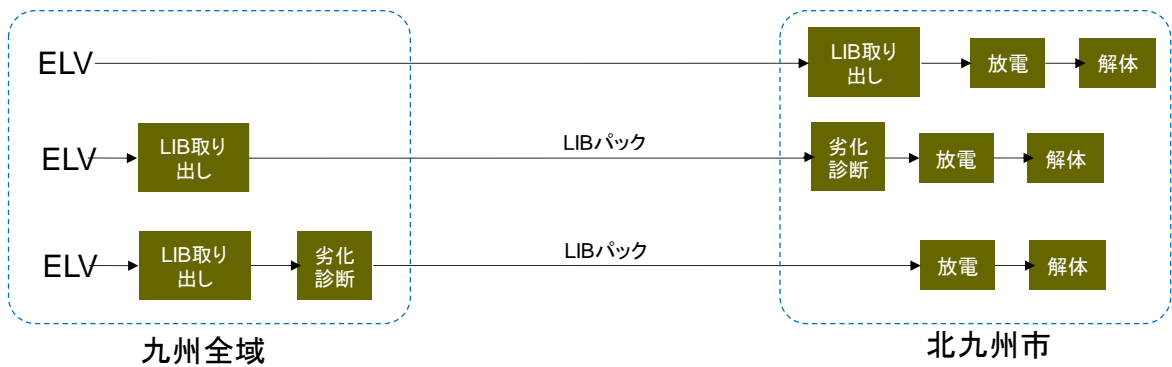


図 2.2-2 LIB回収ケースの設定

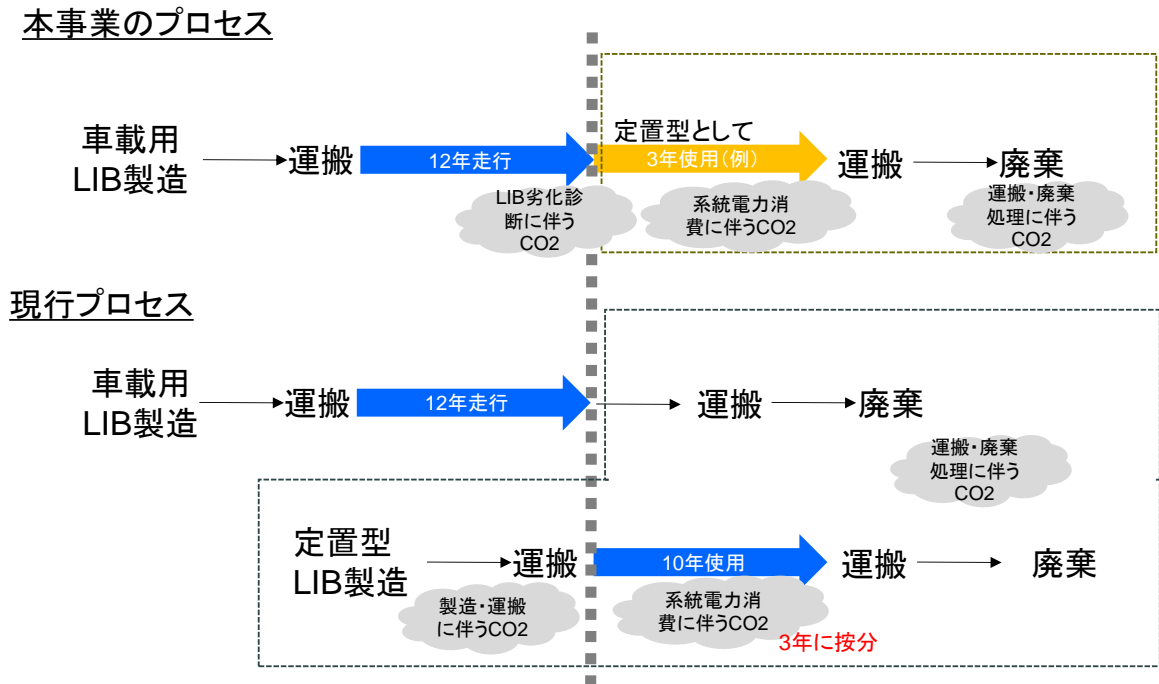
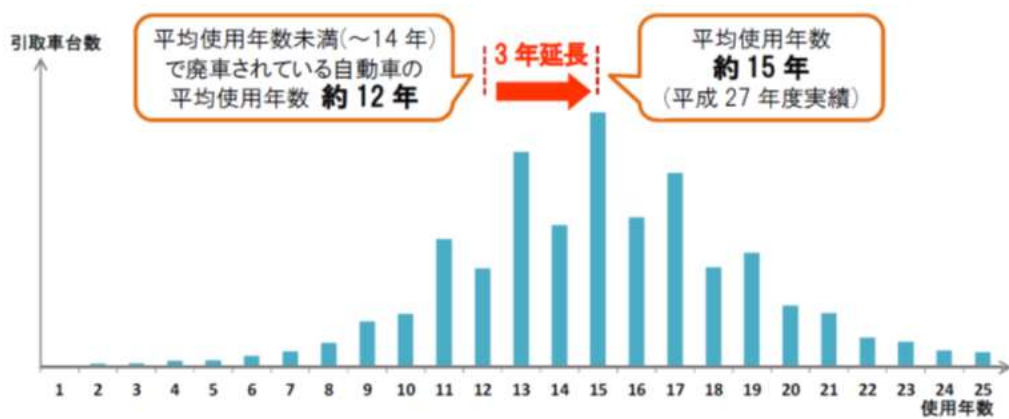


図 2.2-3 LIB リユースの評価の考え方



出典：自動車リサイクル促進センター

図 2.2-4 自動車の使用年数

2. 2. 2 評価条件の検討

本事業プロセスの評価に必要なデータ、諸条件は表 2.2-2 のとおりである。

表 2.2-2 本事業プロセスの評価に必要なデータ・条件

1. 取り出し工程	・ エネルギー消費量
2. 劣化診断	・ エネルギー消費量 ・ LIBリユース率、LIB 2次利用の余命年数または1次使用年数
3. 放電	・ エネルギー消費量 ・ 回生電力量
4. 解体	・ エネルギー消費量
5. 熱分解破碎選別	・ エネルギー消費量 ・ 活物質・非活物質回収量、廃棄物発生量
6. 湿式回収	・ エネルギー消費量、薬品等使用量 ・ 回収率（歩留まり） ・ 廃水排出量
7. 輸送	・ エネルギー消費量 ・ 輸送形態（車両、積載率）、距離
8. 再生	・ エネルギー消費量 ・ 歩留まり ・ 再生素材の機能（新規素材との対比において）

2. 2. 3 評価のために取得するデータの検討

本章では、Ni, Co のリサイクルによって削減される天然鉱石由来の Ni, Co の製造による CO₂ 排出量を計算する際に必要となる CO₂ 排出原単位（以下、原単位）と、LIB のリユースの際に必要な、LIB の新規製造の LCA のインベントリデータについて検討する。

(1) IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis)

産業技術総合研究所によって開発された、統計情報によるデータと積み上げデータをハイブリッドで活用したインベントリデータベースである。

ニッケル及びコバルトについては、MCLE 法 (Matte Chlorine Leach Electrowinning) が採用されている。ニッケルマット及びニッケル・コバルト混合硫化物を原料とした塩素浸出～電解採取法 (MCLE 法) による製造法であり、住友金属鉱山で開発されたプロセスで、新居浜製錬所においてのみ実施されている。原料 (マット及び混合硫化物) をセメンテーション浸出～塩素浸出し、浄液工程を経たのち電解採取する。浄液段階で Co 滓を分離し、溶媒抽出により Co 及び Ni を分離する。Ni を含む液はニッケル電解に戻される。

図 2.2-5～7 に、MCLE 法のプロセス系統図を、図 2.2-8 に IDEA から算出した Ni, Co の原単位を示す。

(2) SimaPro

SimaPro は、欧州において LCA の研究・実践をしているオランダの Pre コンサルタント社が開発したソフトウェアであり、世界中で広く使われている。ソフトウェアにおけるある原材料の排出原単位を特定する際、バウンダリーやインベントリデータベースなどの条件を考慮しなければならない。以下の原単位はこのような条件を考慮し、電気ニッケルと電気コバルトの排出原単位を抽出したものである。

マテリアルプロセスにおいて、電気ニッケル (Ni:99.5%) の原単位は 11.4kg-CO₂/kg となっている。原単位のインベントリデータベースは「Ecoinvent 3」である。なお、原単位のバウンダリーは以下の通りである。

採掘→選鉱→溶錬→Ni, Co 混合硫化物→乾式と湿式精錬・電解→電気ニッケル

マテリアルプロセスにおいて、電気コバルト (Co:>98%) の原単位は 25.4kg-CO₂/kg となっている。原単位のインベントリデータベースは「Ecoinvent 3」である。なお、原単位のバウンダリーは以下の通りである。

採掘→選鉱→溶錬→Ni, Co 混合硫化物→乾式と湿式精錬・電解→電気コバルト

(3) GaBi

GaBi は、ドイツの民間企業 PE インターナショナル社が開発したソフトウェアである。GaBi データベースは、LCA だけでなく、EPD (タイプⅢ環境ラベル) やカーボンフットプリントにも利用可能である。SimaPro と同じく、GaBi においても原材料の排出原単位の計算はバウンダリーやインベントリデータベースのセッティングが必要である。

マテリアル製造プロセスにおいて、電気ニッケル (Ni: class1, 99.95%) の原単位は 7.49kg-CO₂/kg となっている。原単位のインベントリデータベースは「ILCD-2017」である。なお、原単位のバウンダリーは以下の通りである。

採掘→選鉱→溶錬→Ni, Co 混合硫化物→乾式と湿式精錬・電解→電気ニッケル

マテリアル製造プロセスにおいて、電気コバルト (Co: Refined, >99%) の原単位は 34.7kg-CO₂/kg となっている。原単位のインベントリデータベースは「ILCD-2017」である。なお、原単位のバウンダリーは以下の通りである。

採掘→選鉱→溶錬→Ni, Co 混合硫化物→乾式と湿式精錬・電解→電気コバルト

(4) 産業技術審議会エネルギー・環境技術開発部会電力等輸送・貯蔵技術分科会

LIB の LCA について、通商産業省 (現、経済産業省) 産業技術審議会エネルギー・環境技術開発部会電力等輸送・貯蔵技術分科会が、1997 年に「リチウムイオン電池を対象にしたライフサイクルアセスメントの実施」という報告書を作成している。この報告書では、リチウム電池の製造に伴うエネルギー消費及び CO₂ 排出量の算定が行われている。

① 前提条件

表 2.2-3 に対象としたリチウム電池の諸元を示す。数値はプロジェクトの開発目標としている。リチウム電池の製造に伴うエネルギー消費量及び CO₂ 排出量算定の対象範囲は、原料採掘、素材製造、原料輸送、電池製造、電池システム製造とし、各工程で消費される電力等のエネルギーについては、原料採掘・輸送等の工程は考慮しないものとされている。リチウム電池製造時の電力消費に伴う CO₂ 排出量は、1995 年度における我が国の平均電源構成による排出原単位が用いられている (444g-CO₂/kWh)。なお、電力消費に伴う CO₂ 排出量は発電時のみを対象とし、原料の採掘や運搬、精製等に伴う CO₂ 排出量は対象とされていない。

② その他の計算条件

対象としたリチウム電池及び電池システムの製造工程については、正極活物質である LiNiO₂ はニッケル、硝酸、水酸化リチウム、酸素から製造され、負極活物質である難黒鉛化性炭素はピッチから製造されるため、これらの物質をそれぞれ LiNiO₂、難黒鉛化性炭素

に対する素材とされている。

製造工程で用いられるエネルギーは電気エネルギーのみであり、LiNiO₂ 製造も含めた正極製造工程が約 8 割を占める結果となっている。

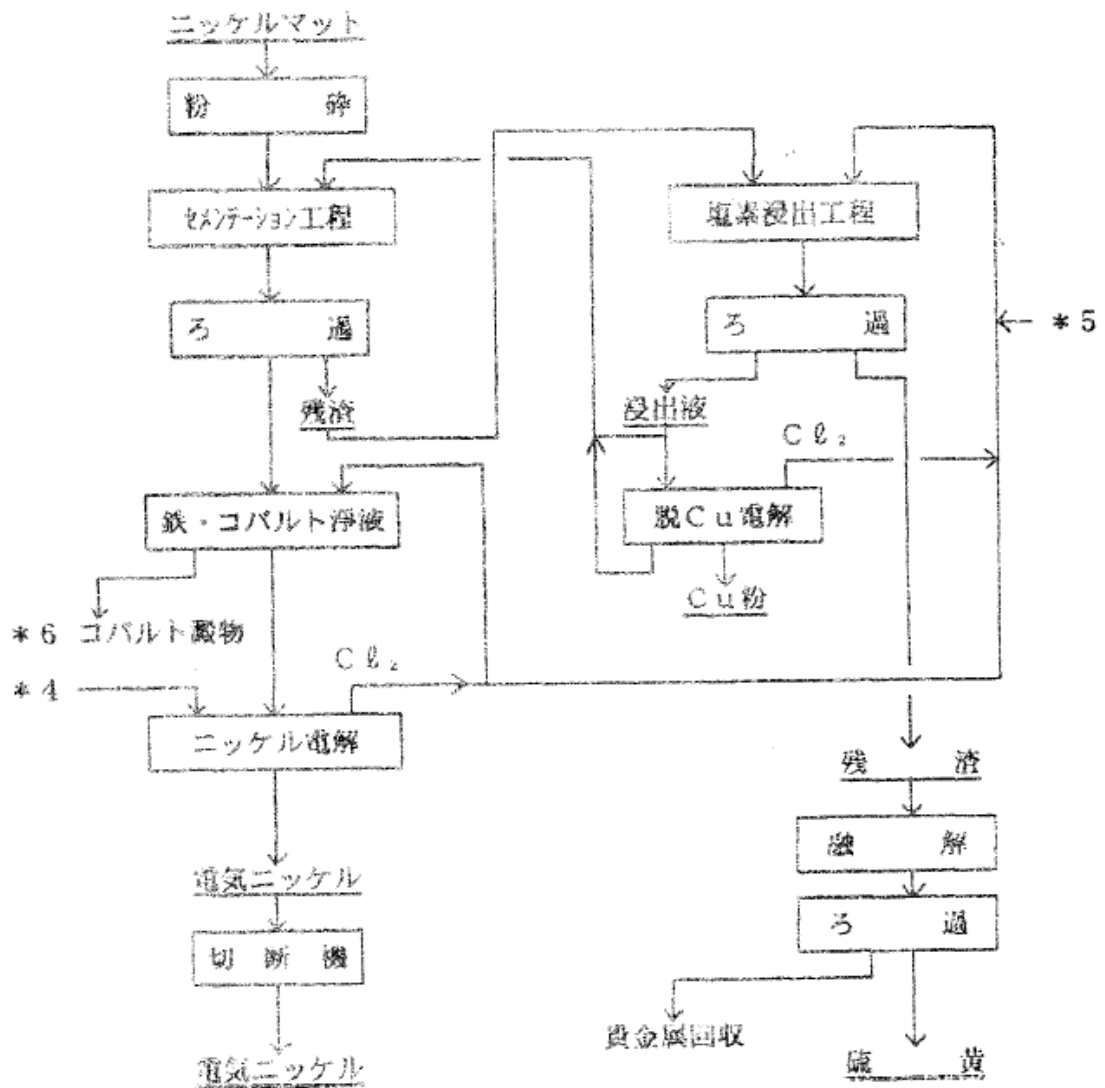
電解液副溶剤である EMC は DMC のデータで代用、シリコンフェノール樹脂についてはポリウレタン、PBT は PET のデータで代用されている。

採掘されたボーキサイトはアルミニウム地金として輸入されるものとし、日本で産出される原料・鉱石等の輸入は想定されていない。また、日本・海外いずれにおいても国内輸送は考慮されていない。

③ 算定結果

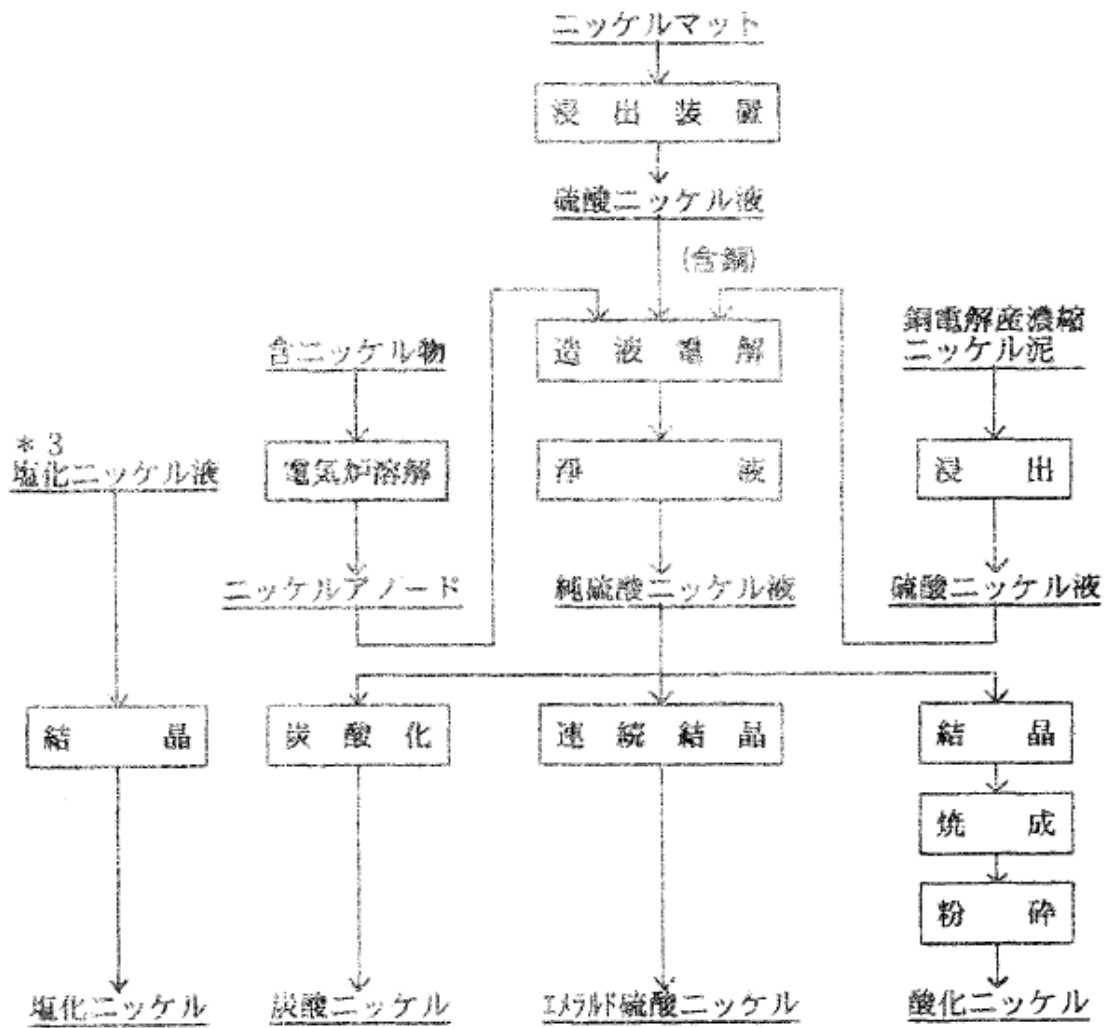
以上の条件から、45kWh リチウム電池の製造に伴うエネルギー消費量及び CO₂ 排出量が計算された。表 2.2-4、図 2.2-9 に算定結果、図 2.2-10 に工程別構成比を示す。

CO₂ 排出量の合計は 2,756kg-CO₂ となり、内訳を見るとシステム製造、LiOH 製造、これら以外に三分される。最も排出が大きいのは正極の製造工程で 25%、次いで LiOH の製造工程が 22%となっている。



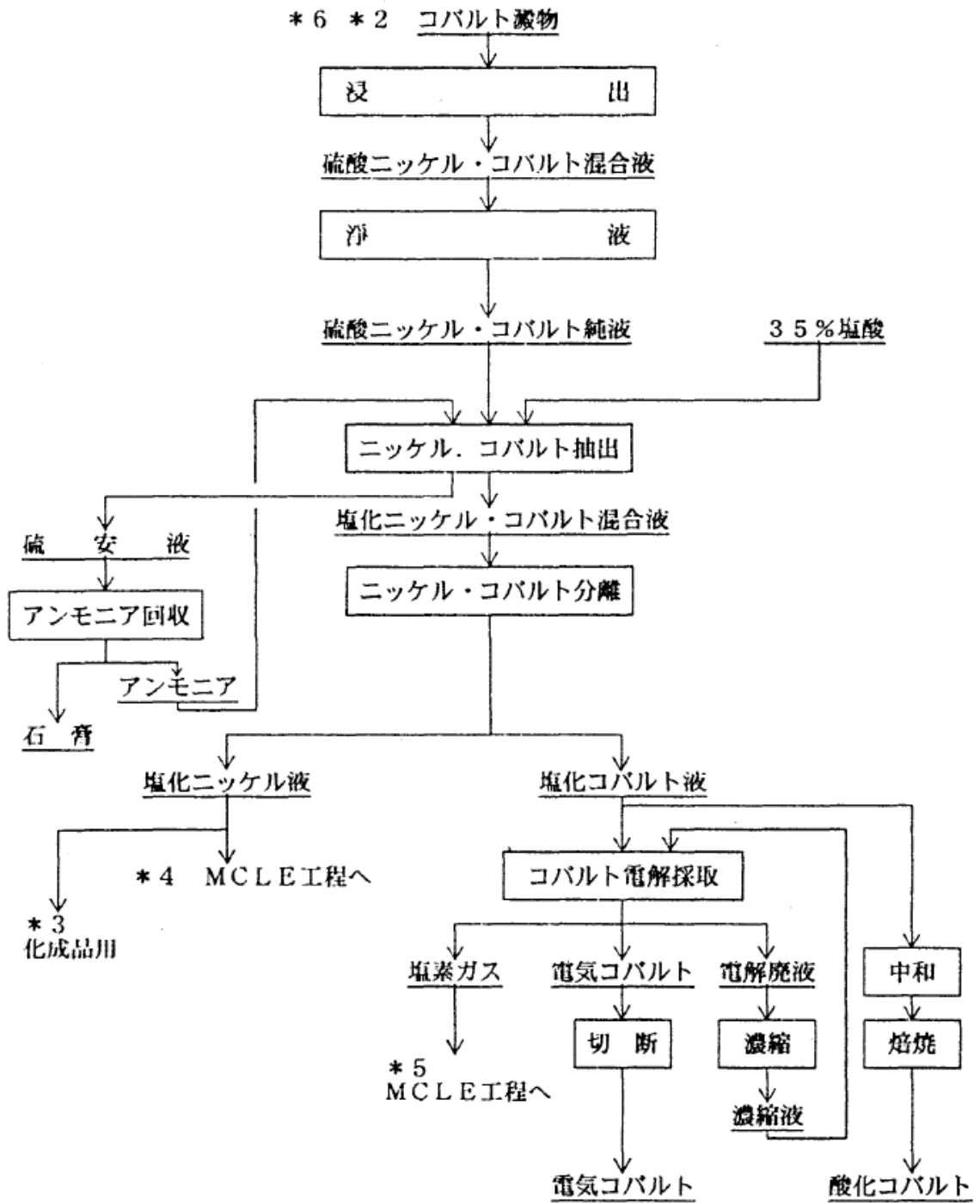
出典：石川，牧野：別子事業所におけるニッケル・コバルト精錬，1993

図 2.2-5 MCLE プロセス系統図



出典：石川，牧野：別子事業所におけるニッケル・コバルト精錬，1993

図 2.2-6 ニッケル化成品製造系統図



出典：石川，牧野：別子事業所におけるニッケル・コバルト精錬，1993
 図 2.2-7 電気コバルト製造系統図

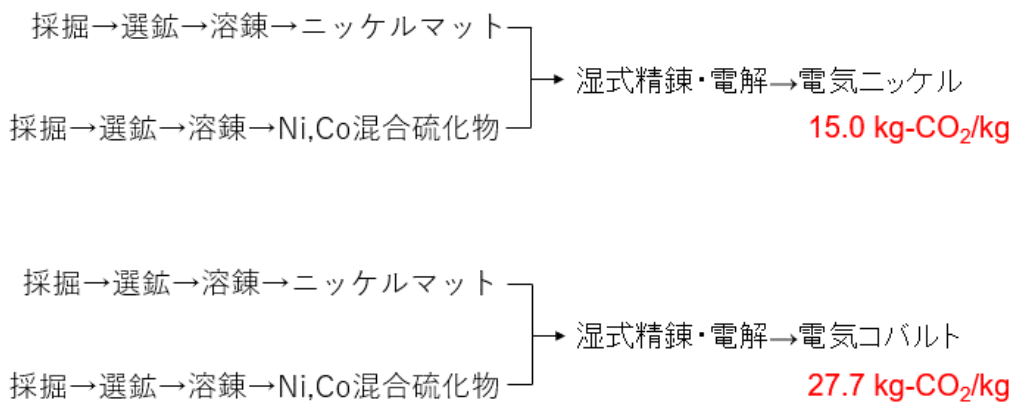


図 2.2-8 Ni、Co の原単位

表 2.2-3 リチウム電池の諸元

構成	正極	LiNiO ₂ (ニッケル酸リチウム)
	負極	難黒鉛化性炭素
	電解質	LiPF ₆ (六フッ化リン酸リチウム)
	電解液溶媒	主溶媒：PC(プロピレンカーボネート) 副溶媒：EMC(エチルメチルカーボネート)
出力規模	単電池	375 Wh
	モジュール	3 kWh(単電池×8)
	システム	45 kWh(モジュール×15)
寿命		500 サイクル

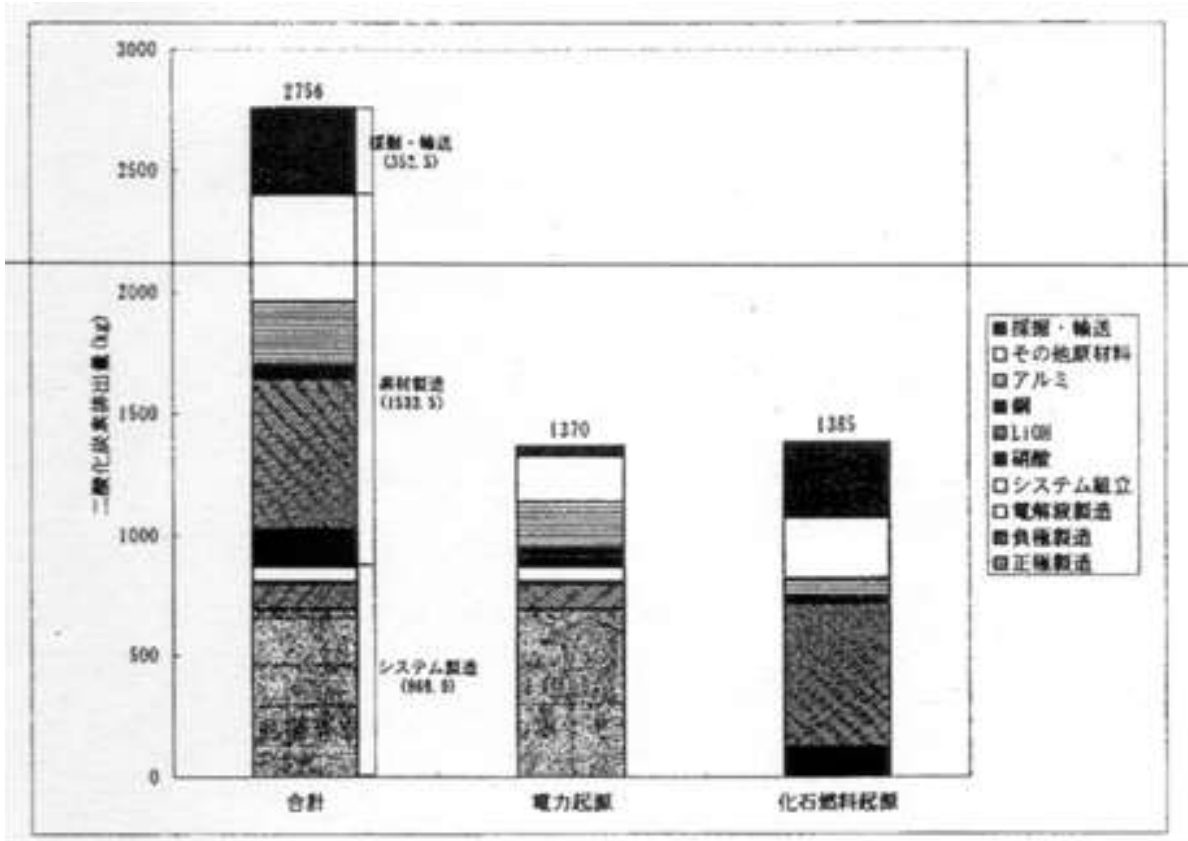
出典：産業技術審議会報告書，1997

表 2.2-4 製造に伴うエネルギー消費量、CO2 排出量

		エネルギー消費量(10 ⁶ kcal)		CO2排出量(kg-CO2)	
リチウムイオン電池システム製造工程		4,406	36%	870	32%
正極製造工程			3508.88		692.75
負極製造工程			596.85		106.02
電解液製造工程			60.75		11.98
単電池組立工程			97.20		19.20
モジュール組立工程			101.25		19.99
システム組立工程			101.25		19.99
投入原材料		6,498	53%	1,534	56%
ニッケル	53.3 kg		702		154.80
硫酸(正極用)	694.1 kg		585		157.14
LiOH	21.3 kg		2,084		615.02
酸素(正極用)	2.2 kg		0.62		0.52
鉄(コークス、酸素含む)	39.0 kg		87		23.37
銅(コークス含む)	43.6 kg		226		52.59
アルミ(コークス含む)	36.9 kg		1,234		269.65
NMP	11.2 kg		3		0.84
ポリフッカピニリデン	2.8 kg		-		-
ケッチェンブラック	2.0 kg		-		-
ビッチ*	60.0 kg		-		-
LiPF6	2.5 kg		144		29.43
PC(アロ ¹ ワト ² 4 ³ 4 ⁴)	10.0 kg		113		28.18
DMC	10.0 kg		80		23.76
4 ¹ 134 ² 4 ³ 9 ⁴ 10 ⁵ 12 ⁶ 17 ⁷ 19 ⁸ 27 ⁹ 37 ¹⁰ 47 ¹¹ 樹脂, PBT	53.8 kg		1,239		178.22
採掘		387	3%	81	3%
鉄鉱石	43.1 kg		8.87		1.93
石灰石	19.3 kg		0.34		0.09
炭酸カルシウム	4.8		0.00		0.70
ドロマイト	1.6 kg		0.39		0.09
マンガン鉱石	0.4 kg		0.02		0.01
ニッケル鉱・ニッケルマット	91.4 kg		18.96		4.08
銅精鉱	54.2 kg		51.28		10.12
ボーキサイト	100.1 kg		14.27		4.24
原油	2803.1 kg		257.46		52.31
石炭	35.0 kg		25.88		5.34
天然ガス	4.2 m ³		0.58		0.13
岩塩	34.7 kg		9.27		2.01
輸入		905	7%	271	10%
鉄鉱石	43.1 kg		5.98		1.79
マンガン鉱石	0.4 kg		0.06		0.02
ニッケル鉱・ニッケルマット	91.4 kg		12.68		3.80
銅精鉱	54.2 kg		7.52		2.26
アルミニウム地金	23.9 kg		10.68		3.20
原油	2803.1 kg		856.41		256.86
石炭	35.0 kg		3.94		1.18
岩塩	34.7 kg		7.83		2.35
合計		12,196	100%	2756.0	100%

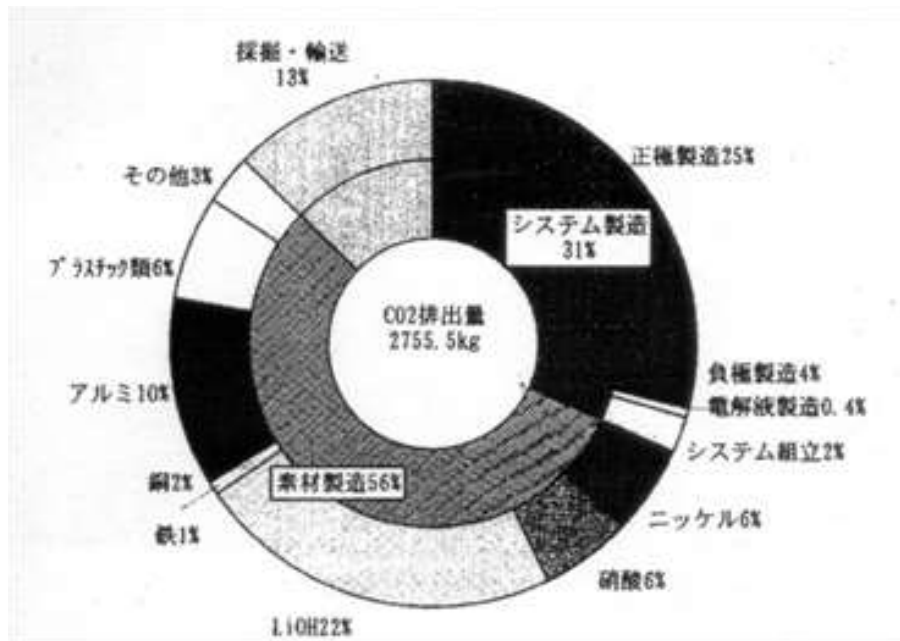
*都市ガス精製、化学製品精製時の副産物であるため、投入エネルギーはかからないものとする。

出典：産業技術審議会報告書，1997



出典：産業技術審議会報告書，1997

図 2.2-9 製造に伴うCO2排出量



出典：産業技術審議会報告書，1997

図 2.2-10 製造に伴うCO2排出量：工程別構成比

3. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討、出口戦略の検討

3. 1 経済性評価

3. 1. 1 評価シナリオの検討

LIBの広域回収を想定して、表3.1-1に示す3パターンの比較評価を行い、総合的、俯瞰的に本事業のプロセスの経済性を評価することとした。なお、開発中プロセスについては事業化に至っていないことから技術情報や収益情報に関するデータが十分に得られないため、参考程度とする。

表 3.1-1 比較検討対象とするプロセス

1. 本事業のプロセス	本事業において開発するプロセス
2. 既存プロセス	LIBの処理事業として、現在事業化されているプロセス
3. 開発中プロセス	他の開発中LIBリユース・リサイクルプロセス

3. 1. 1. 1 シナリオ設定の基本方針

評価対象とする各プロセスの概要について記述する。なお、本事業のプロセスの内容については「3. 1. 1. 2 本事業のプロセスにおける事業スキームの設定」において後述するため、本項では既存プロセスと開発中プロセスの概要について述べる。

(1) 既存プロセス

一般的な LIB リサイクルプロセスとして、電炉による溶融処理と、固定床炉による焼却処理の 2 方式について評価を行うこととした。

① 電炉方式

一般的な電炉方式の概念を図 3.1-1 に示す。電炉処理方式では、LIB を他の廃棄物・資源物と一括して電気炉で処理する。LIB を構成する成分のうち、Fe は回収・リサイクルされるが、その他 Cu、Al、Co、Ni 等は Fe 中の不純物として取り込まれるか、スラグに移行してしまい、材料本来の有効的な活用がなされていない。

② 焼却炉方式

一般的な焼却炉方式の概念を図 3.1-2 に示す。焼却炉方式では、LIB を固定床炉において焼却処理し、LIB の無害化及び金属以外の構成材料の焼却処理を行う。焼却処理終了後、焼却後物を回収し、破碎・選別を行って Fe、Cu、Al を金属資源として回収している。

(2) 開発中プロセス

リチウムイオン電池からのレアメタル回収を目指したリサイクルプロセスの技術開発は複数社が取り組んでいる。代表的な例としては、住友金属鉱山株式会社による乾式と湿式を組み合わせたりサイクルプロセスや、JX 金属株式会社による Li、Co、Ni が回収可能な湿式リサイクルプロセスの開発が挙げられる。

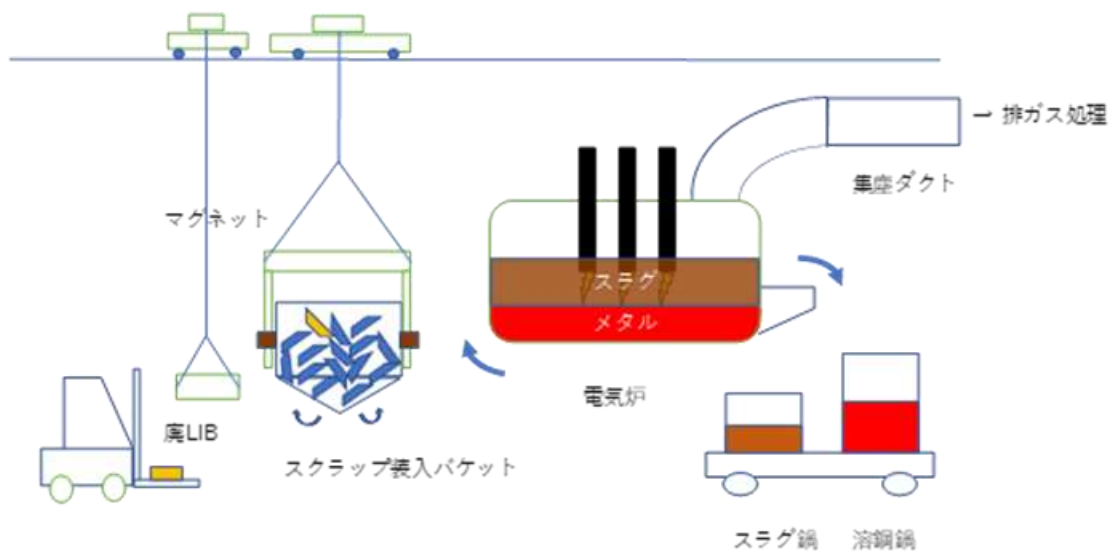


図 3.1-1 一般的な電炉方式の概念図

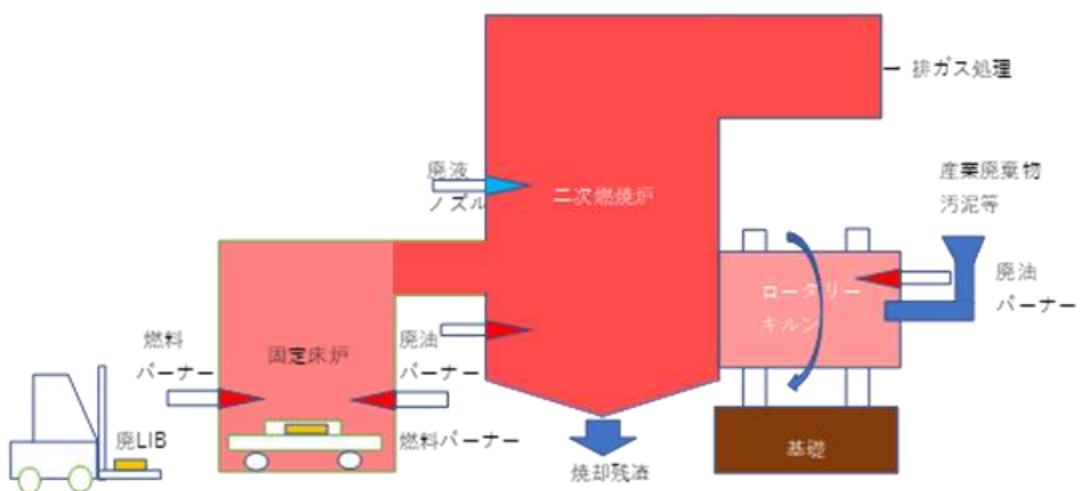


図 3.1-2 一般的な焼却炉方式の概念図

3. 1. 1. 2 本事業のプロセスにおける事業スキームの設定

本事業のプロセスにおいては、取り出された LIB について劣化診断を行い、リユース可否を判定する。リユース不可品については、熱分解処理により無害化した後、破碎・篩分け・磁力選別工程を経て Fe、Cu、Al を回収する。また、篩い分けられた活物質からの溶媒抽出により、Co、Ni まで回収しリサイクルするプロセスについて実証中である。本事業におけるプロセスの事業スキーム図を図 3.1-3 に示す。

なお、リユース可能品として再商品化された LIB についても、再使用期間終了後には本事業のプロセスにおいて処理することで、Ni、Co 等のレアメタル資源を可能な限り有効活用することを目指している。

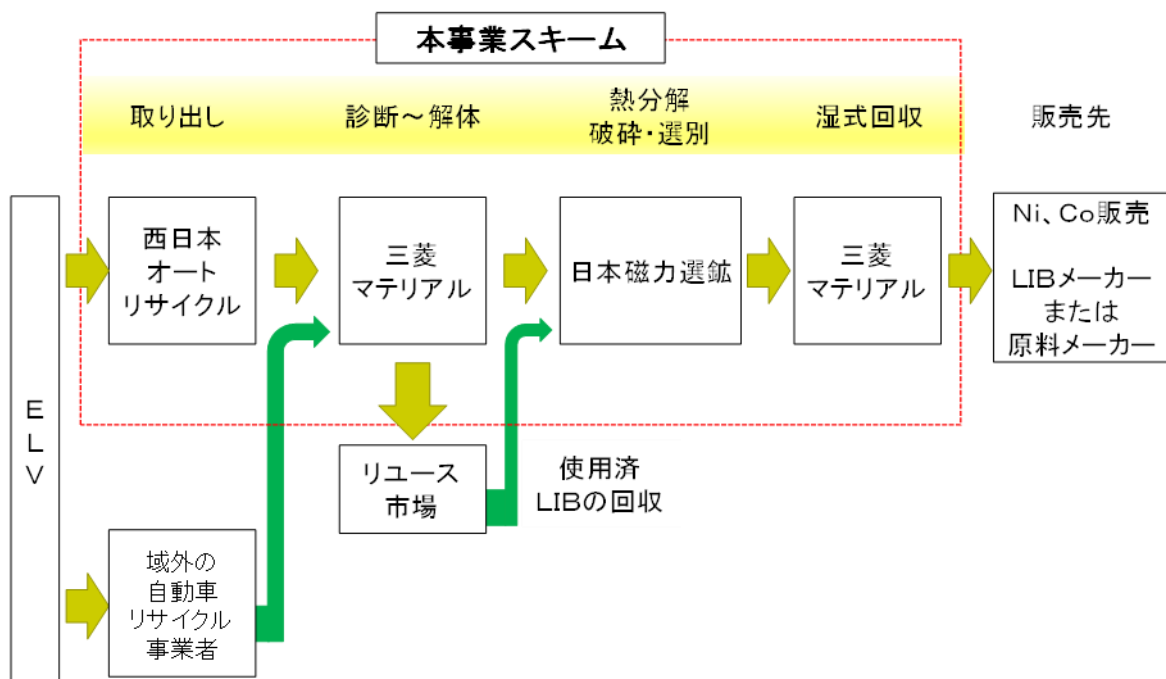


図 3.1-3 本事業におけるプロセスの事業スキーム図

3. 1. 2 評価条件の検討

3. 1. 2. 1 処理能力の設定の考え方

2025 年度における全国での FIT 及び LEAF の発生台数予測を基に、九州地区における自動車保有比率を勘案し、本事業における処理量想定個数を算出した(図 3. 1-4)。

2025 年度における処理個数は、図 1. 4-1 に示すように FIT : 3, 737 個/年、LEAF : 704 個/年の計 4, 441 個/年 (370 個/月) を想定し、経済性評価における各工程の処理能力についてもこれに沿う形で能力を想定することとした。

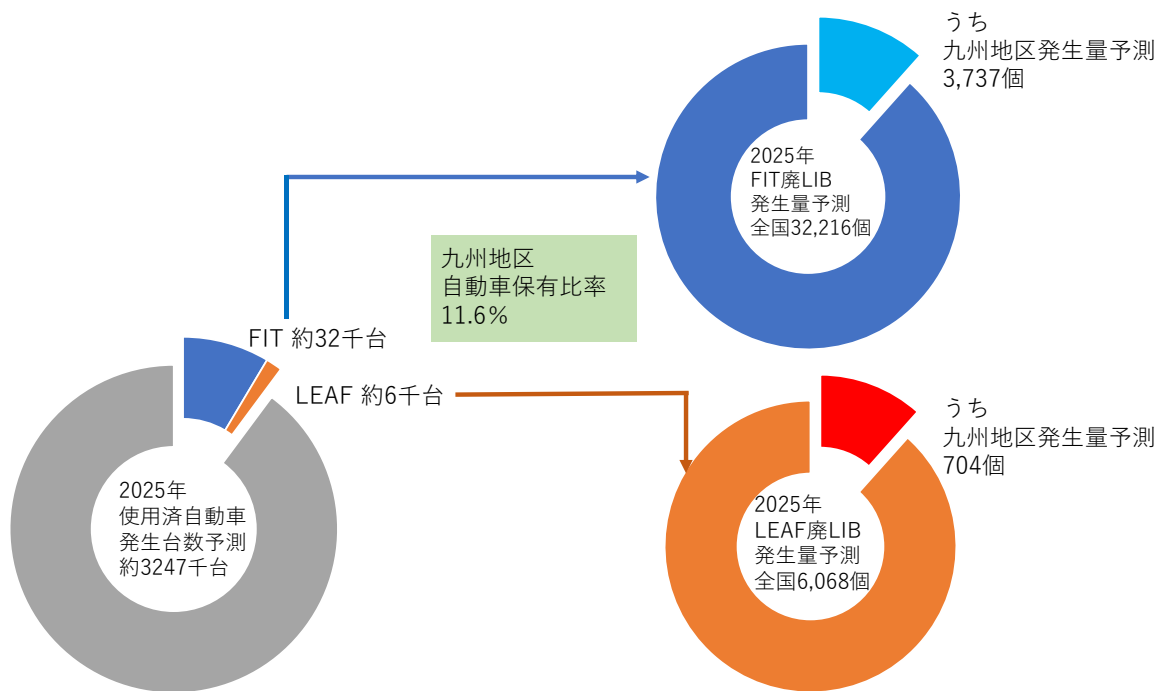


図 3. 1-4 2025 年における処理対象台数の想定

3. 1. 2. 2 本事業における経済性評価の進め方

本事業における経済性評価の進め方について、表 3.1-2 に示す。今年度の本事業のプロセスはシステムの設計構築段階であるため、まずは比較対象となる既存の処理プロセスの現状についての調査から着手した。

表 3.1-2 経済性評価の進め方

項目	実施事項	実施時期
①現状の使用済 LIB 処理の収益構造の調査	・既存の LIB リユース・リサイクル事業者における収益構造についての調査	令和 2 年度
②本事業のプロセスのコストの算出	・検証試験におけるデータ採取	令和 3 年度
③本事業のプロセスにおける収益ポイントの見極め	・実証試験終了後、全工程のコストを算出 ・収益計算シミュレーションで収入条件を変えて収益性評価の検討	令和 4 年度

3. 1. 2. 3 現状の使用済 LIB 処理における収益構造

使用済 LIB 処理の現状調査として、業界団体（自動車再資源化協力機構）・LIB リユース事業者・LIB リサイクル事業者からの聴取調査を実施し、各プロセスの収益構造についての調査を行った。調査結果は表 3.1-3 のとおり。

表 3.1-3 現状の処理事業者からの聴取調査結果

区分	得られた知見（要約）
業界団体 （自再協）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自再協スキームでは、自動車リサイクル事業者に対するセーフティネットとして、処理困難となった LIB の無償回収を実施 ・ LIB 回収面での相談には乗れるが、事業プロセスを自再協スキームとの組み合わせることは難しい
LIB リユース事業者	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自動車メーカー直系工場、ディーラー、自動車リサイクル事業者からの使用済 LIB を有価で買取 ・ 当該事業者は自社の独自技術として高速診断技術を保有、また自動車メーカーのトレーサビリティシステムと連携することにより、受け入れた LIB のほとんどをリユースできている。 ・ リユース品を利用して、モバイル蓄電池、家庭用及び産業用定置型蓄電池を製造して販売
LIB リサイクル事業者① （自再協認定処理業者）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電池メーカー、自動車メーカー等の廃棄 LIB の処理を実施、自再協からも廃棄 LIB 処理を受託 ・ 焼却処理施設を活用し、低濃度 PCB 汚染機器等と混合処理 ・ 処理費を徴し、廃棄物処分として受託 ・ 焼却後物は他事業者へ有価売却（資源回収の原料に）
LIB リサイクル事業者② （自再協認定処理業者ではない）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 処理費を徴し、廃棄物処分として廃棄 LIB 処理を実施 ・ 顧客の機密確保のため、原体のまま固定床炉で焼却処理 ・ 火災の危険があり、混載処理を禁止、廃棄 LIB だけの平積処理、作業性が悪く、委託処理費が割高 ・ 焼却後物は磁力選別、磁着物は他事業者へ有価売却、非磁着物は自社リサイクル（製鉄原料、セメント原料に利用）

3. 1. 3 評価のために取得するデータの検討

本事業のプロセスの評価に向けて、図 3.1-5 の工程図を基に、収益計算のためコスト評価が必要な項目についての洗い出し作業を行った。検討結果の概要は表 3.1-4 に示すとおり。

また、図 3.1-6 に経済性評価の作業シートのイメージを示す。なお、シート記載項目は現段階での素案であり、今後事業実施各社と協議しながら評価・想定の対象とする項目を決定していく。

今後、本事業プロセスの評価において必要となるデータの取得を進めるとともに、比較対象となる既存 LIB 処理プロセスに関する調査を進め、本事業のプロセス全体での総合的、俯瞰的な評価に取り組んでいく。

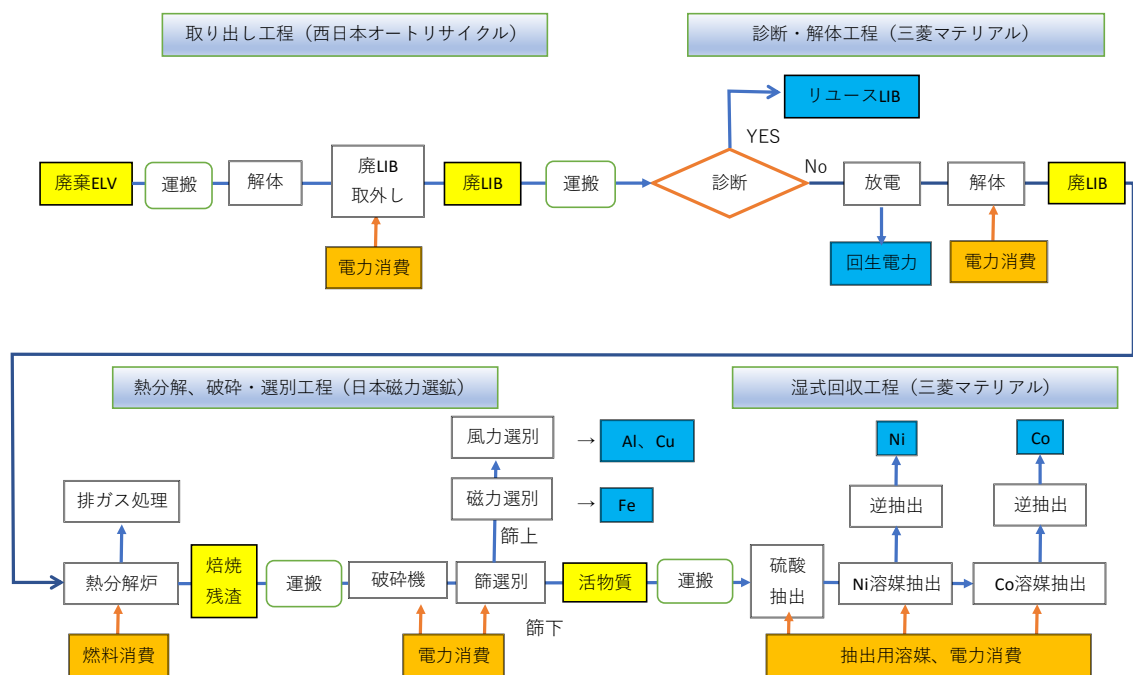


図 3.1-5 本事業のプロセスの工程図

表 3.1-4 経済性評価のための取得データ検討結果

工程	取得するデータ項目
取り出し工程 (西日本オートリサイクル)	<ul style="list-style-type: none"> 手作業時と半自動作業時のデータ採取 ユーティリティー、資材の使用量と単価
診断～解体工程 (三菱マテリアル)	<ul style="list-style-type: none"> 作業データの採取 ユーティリティー、資材の使用量と単価 回生電力量のデータ採取 LIB 分解調査
熱分解、破砕・選別工程 (日本磁力選鉱)	<ul style="list-style-type: none"> 作業データ採取 物量バランス ユーティリティー、資材の使用量と単価
湿式回収工程 (三菱マテリアル)	<ul style="list-style-type: none"> 作業データ採取 物量バランス、Ni、Co 収率 回収物(硫酸ニッケル、硫酸コバルト)の分析値 ユーティリティー、資材の使用量と単価

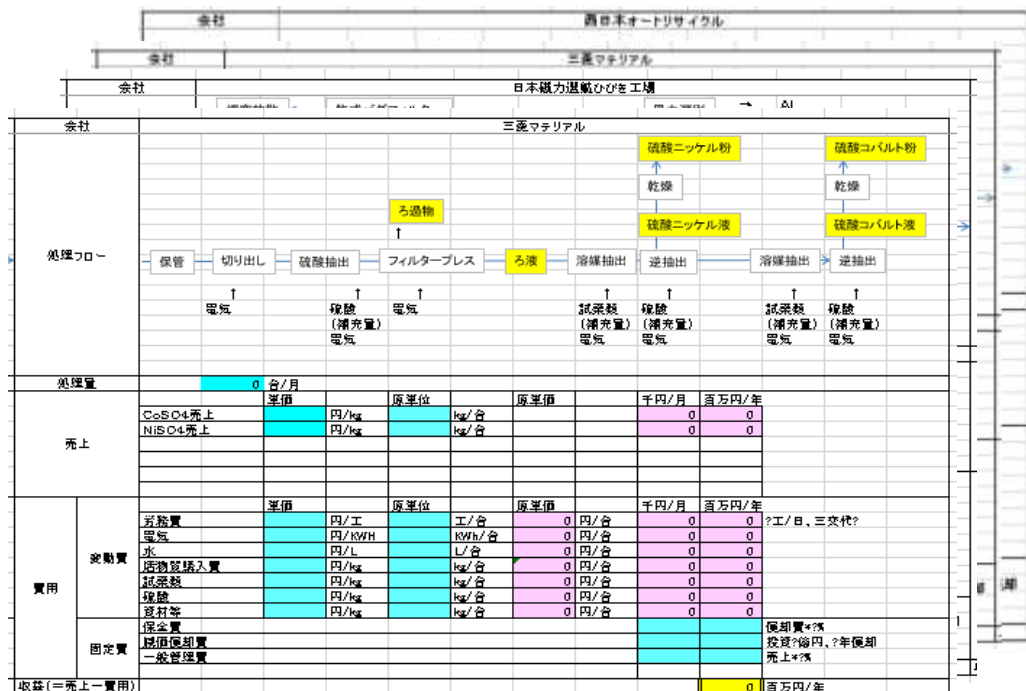


図 3.1-6 経済性評価作業シートのイメージ

3. 2 金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討

事業の横展開可能性としては、本事業における LIB リユース/リサイクルの過程において、取り出し手法、解体自動化、破碎・選別等は、LEAF、FIT3 の 2 車種に限定した手法ではなく、日産自動車株式会社・本田技研工業株式会社以外のメーカーや PHEV など LIB を搭載する次世代自動車についても適用でき横展開が可能であると考ええる。

また、本事業における各工程に用いられる関連技術は、それぞれに横展開が可能であると考ええる。LIB の取り出し・解体自動化では、LIB 搭載の次世代自動車に限らず、燃料電池車や自動車リサイクル全般に適用が可能である。自動車から取り出される部品は個々に再販されており、特定の部品の取り出しを最短工程で自動化することで人手不足を解消し自動車リサイクル事業の活性化に繋がる横展開が可能であると考ええる。LIB の劣化診断では、リユースできる LIB を太陽電池とパワーコンディショナを組み合わせることでグリーン電力の系統安定化を目指した蓄電池としての利用が可能である。商用利用、一般家庭利用にかかわらず、低炭素化を目指す街づくりを支える蓄電池の普及を促進することが考えられ、社会インフラ設備としての横展開が可能であると考ええる。

金属リサイクルビジネスの活性化の見込みとしては、Co、Ni の高効率回収では、二次電池の正極材原料を安定供給させる。このような関連技術の横展開が国内装置産業の育成を促進し、リサイクルビジネスを活性化させると考えられる。LIB を搭載した次世代自動車の廃棄台数は 2025 年では約 16 万台、2030 年では約 51 万台が見込まれているため、これら LIB をリユース/リサイクルできる関連技術を整備することで、廃棄 LIB の増加に応じた規模の効果が見込まれると考えられる。北九州で自動車から一貫した地域循環の金属リサイクルシステムを実証、事業性評価した後は、他の地域においても、自動車リサイクル事業者が連携する事で、地域で一貫したリユース/リサイクルシステムの横展開が可能となる。規模としては、自動車保有台数の地域別割合は関東エリア：28.3%(対九州 2.4 倍)中部エリア：15.2%(対九州 1.3 倍)であり、発生台数に応じた規模が考えられる。

日本各地域に、そのような地域循環共生圏を設ける事で、廃 EV を発生場所から遠方に運搬する事無く処理し、省 CO2 での資源循環が可能となる。

また、日本よりも大量の廃棄車載 LIB 発生が見込まれる中国等の海外への横展開も可能となる。

金属リサイクルビジネス活性化に向け、LIB からの Co、Ni 回収物を二次電池正極材原料として安定供給する新規市場を創出することが肝要であり、それにはリサイクルビジネス活性化の道筋立てが必要である。

LIB リサイクルプロセスとして既存の電炉方式や焼却炉方式のように Co、Ni を材料本来の有効的な活用をしない方法を改め、Co、Ni を回収できるリサイクルプロセスを実施することが重要であり、また、効率的に回収するプロセスを採用することが重要である。コンゴの児童労働や紛争鉱物への対応及び Co 資源調達リスクを低減するためにも、また、SDGs

への貢献や EU 電池指令への追従のためにも、使用済 LIB の回収・リサイクルスキームを構築し、二次電池正極材原料を再資源化することが望まれる。回収した Co、Ni を他の用途向けではなく、確実に二次電池正極材原料として供給することが重要である。回収・リサイクルすることを前提に LIB のトレーサビリティ確保に努め、回収・リサイクルスキームにのせた運用を進めていくべきであり、そのためにも LIB を確実に回収・リサイクルするための仕組みが求められる。

4. 令和3年度の事業計画

令和2年度は、車両からのLIB取り出し自動化検討から破碎・選別システムについて、技術検討を進めた。また、環境影響改善効果及びCO2排出量削減効果、経済性評価においては評価の検討方針を定めた。

令和3年度は、令和4年度に計画しているLIBのリユース／リサイクルの一貫処理実証に向け、令和2年度に進めた検討を推進、深化させる。具体的には以下の内容を計画している。

(1) 事業全体

- ・LIB リユース・リサイクル技術・システム実証に必要な装置及び設備の検討、試運転、装置最適化を完了する。
- ・本事業で用いる装置及び設備の試運転や装置最適化試験等の試験運転にて操業データを収集し、工程ごとの環境影響改善効果、CO2排出量及び経済性評価を試算する。

(2) 車両からのLIBユニット取り出し自動化に関する検討

- ・FIT3とLEAFの2車種を対象とし、FIT3向けのLIBユニット取り出し助力装置及びLEAF向けのLIBユニット取り出し自動化装置を検証し、装置の最適化（チューニング）を図る。

(3) LIBユニットのリユース／リサイクルに関する検討

- ・劣化診断：令和2年度に引き続き、LIBユニット及びLIBモジュールでの劣化診断技術の技術検討を継続する。
- ・放電：LIBユニット及びLIBモジュールでの放電を検証する。
- ・解体自動化：令和2年度に引き続き、LIBユニット解体自動化（一部工程にロボット活用）の技術検討を継続する。

(4) LIBの熱分解処理、破碎・選別処理に関する検討

- ・熱分解処理：後工程の破碎・選別、Co、Ni回収で高効率な分離を実現できる熱分解処理条件を検討する。
- ・破碎・選別：熱分解後のLIBの破碎・選別において、Co、Ni回収工程の操作に最適な操作条件を検討する。

(5) Co、Ni回収に関する検討

- ・改良した処理プロセスによるCo、Ni回収能力（回収率、純度）を検証する。

(6) 事業における環境影響改善効果、CO2排出量削減効果の評価

- ・令和2年度に検討した評価シナリオ(環境影響改善効果及びCO2排出量削減効果の評価)に、本事業の進捗により得られた新たな知見を反映する。
- ・放電装置、熱分解、破碎・選別設備、及びCo、Ni回収の試運転や装置最適化試験等の試験運転から、評価に必要な操業データを収集し、環境影響改善効果及びCO2排出量を試算する。

(7) 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討、出口戦略の検討

- ・令和2年度に検討した評価シナリオ(経済性評価)に、本事業の進捗により得られた新たな知見を反映する。
- ・LIBユニットのリユース／リサイクルに係る関連技術の横展開の可能性を検討する。

以上

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料〔Aランク〕のみを用いて作製しています。