

令和 4 年度環境省委託業務

令和 4 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 5 年 3 月

三菱マテリアル株式会社

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リチウムイオンバッテリー(廃LIB)の処理の方法は、国内外で様々な検討が行われている。一般的に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搭載されている。このような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いと考えられ、LIBを構成する素材の資源循環システムの構築が課題となっている。

本事業では、廃車両からのLIBユニット取り出しから、LIBに含有するCo、Niの回収までの処理プロセスに関して、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て、地域循環共生圏に貢献することを目的としている。

【成果】

廃車両からのLIBユニットの取り出し、LIBユニットの劣化診断、LIBユニットの放電・解体、LIBモジュールの熱分解、破碎・選別、活物質からのCo、Ni回収・精製からなる一連の処理プロセスの実証を行い、CO₂排出量削減効果の検討並びに今後の事業化に向けた課題の抽出を行った。

(1) LIBユニット取り出し自動化・省力化

LEAFとFIT3の2車種を対象とし、LIBユニットの取り出し作業の省力化を目的に、LEAFでは車両の傾転、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、FIT3ではLIBユニット取り出しのための助力装置をそれぞれ設計・製作し、LIB取り出し作業の安全性及び省力化に寄与できることを確認した。また、作業効率の向上や他車種への汎用性の検討を行った。

(2) LIBユニット劣化診断

現状で考えられる車載LIBの状態情報を把握するための手段として、車両内バッテリー・メーターからの情報取得、並びに車載式故障診断装置からの情報取得の可能性と今後の課題について考察し整理した。

(3) LIBユニットの放電

LIBユニットの安全かつ効率的な解体、並びに熱分解での熱暴走の回避のため、LIBユニットの状態での安全かつ簡便な放電手法の確立と回生電力式放電装置を用いた放電を実施し、商用電力量の削減効果を確認した。

(4) LIBユニット解体自動化

LIBユニットの解体作業の省力化及び感電リスクの低減を目的として、産業用ロボットを活用したLIBユニット解体自動化設備を含むLIBユニット解体ラインを設置し解体実証を行い、手解体作業の作業負荷低減、感電リスクの低減効果を確認した。

(5) LIBモジュールの熱分解

LIBモジュール中の電解液等を熱分解により無害化し、後段の破碎・選別、Co、Ni回収で高効率な分離を実現できるよう、熱分解処理実証（熱分解産物の脆化挙動、排出ガスの分析等の確認）を実施した結果、異常なく熱分解処理が可能であることを確認した。

(6) 熱分解後の破碎・選別

LIBモジュールの熱分解物を用いた破碎・選別の実証を行い、回収される活物質のCo、Ni品位と回収率、Cu、Al等の混入率、Liの挙動等を確認した。Co、Ni回収率、Cu、Al混入率は、一部を除き概ね目標値をクリアできることを確認した。

(7) Co、Niの回収

LIBを熱分解し、破碎・選別後に回収した活物質からCo、Niを湿式回収するプロセスを改善し、高回収率（95%）、高純度（99.99%）でCo、Niが回収できる技術的見通しを得た。

(8) 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

本実証事業における一連のLIBリユース・リサイクルプロセス導入による環境影響改善効果並びにライフサイクルCO₂排出量の低減効果の評価した結果、両者ともに大きな削減効果を見込めることを確認した。

(9) 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

本実証事業の各LIBリサイクル工程において経済性を評価した結果、現状の技術・規模を前提とした場合、廃LIBの素材価値のみでリサイクルを成立させることは難しく、別途委託処理費の確保が必要である結果となった。また、金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討を行うとともに、出口戦略を整理した。

Summary

【Objective】

The use of lithium-ion batteries (LIBs) is increasing in Japan due to the widespread use of electric vehicles (EVs), hybrid vehicles (HVs), and other vehicles. Various methods are being examined in Japan and abroad for processing spent LIBs generated from end-of-life next-generation vehicles.

Generally, LIBs are installed in vehicles as a unit that combines a number of cells or modules with control circuits. The reuse/recycling of the materials that make up such LIB units is thought to have a significant effect on reducing carbon dioxide (CO₂) emissions, and the establishment of a resource recycling system for the materials that make up the LIB has become an issue.

In this project, we conduct a demonstration using consistent processing to appropriately reuse/recycle each LIB constituent materials, from LIB unit removal from end-of-life vehicles to cobalt and nickel recovery. The demonstration, which is based in Kitakyushu City, Fukuoka Prefecture, aims to evaluate the effect of CO₂ reduction with a view to contributing to the regional circular and ecological economy.

【Results】

A series of treatment processes consisting of LIB unit removal from end-of-life vehicles, LIB unit deterioration diagnosis, LIB unit discharge and dismantling, LIB module pyrolysis, crushing and sorting, and Co and Ni recovery and refinement from active materials were demonstrated to study CO₂ emission reduction effects and to identify issues for future commercialization.

(1) Automation and labor saving of LIB unit removal

We designed and manufactured an automated LIB unit removal device with a vehicle tilt and unscrewing device for the LEAF and a helping device for the FIT3, respectively, to reduce the labor required for LIB unit removal. We have confirmed that these devices can contribute to safety and labor saving in LIB removal work. We also studied the improvement of working efficiency and general applicability to other types of vehicles.

(2) Diagnosis of LIB unit deterioration

The possibility of acquiring information from on-board battery meters and on-board diagnostic equipment to determine the status of on-board LIBs, as well as future issues, were studied and organized.

(3) Discharging LIB unit

We established a safe and simple discharge method for the LIB unit and discharged the LIB unit using a regenerative power discharge device to dismantle the LIB unit safely and efficiently and to avoid thermal runaway during thermal decomposition.

(4) Automated LIB unit dismantling

To save labor and reduce the risk of electric shock during dismantling of LIB units, we installed an automated dismantling line for LIB units using industrial robots, and verified the effectiveness of the line in reducing the workload of manual dismantling work and the risk of electric shock.

(5) Pyrolysis of LIB modules

To detoxify the electrolyte in the LIB module by pyrolysis and achieve highly efficient separation in the subsequent stages of crushing, sorting, and Co and Ni recovery, we conducted a pyrolysis treatment demonstration (checking the embrittlement behavior of pyrolysis products, analysis of exhaust gas, etc.) and confirmed that the pyrolysis treatment was possible without any abnormalities.

(6) Crushing and sorting after pyrolysis

We demonstrated crushing and sorting using pyrolysis products of LIB modules, and confirmed Co and Ni grades and recovery rates of recovered active materials, contamination rates of Cu, Al, etc., and behavior of Li, etc. We confirmed that Co and Ni recovery rates and Cu and Al contamination rates could generally meet the target values except for some cases.

(7) Co and Ni recovery

We improved the hydrometallurgical process to recover Co and Ni from active materials recovered after pyrolysis, pulverization, and sorting of LIBs, and obtained a technical prospect to recover Co and Ni with high recovery rate (95%) and purity (99.99%).

(8) Evaluation of the effect of environmental impact improvement and the effect of CO₂ emission reduction of the project

The results of the evaluation of the environmental impact improvement effect and the life cycle CO₂ emission reduction effect of the introduction of a series of LIB reuse/recycle processes in this demonstration project confirmed that both are expected to have a significant reduction effect.

(9) Examining the project for the revitalization of metal recycling business and for the exit strategy

As a result of economic evaluation of each LIB recycling process in this demonstration project, it is difficult to establish a recycling business based solely on the material value of spent LIB, assuming the current technology and scale, and it is necessary to secure a separate consignment processing cost. In addition, we examined measures to revitalize the metal recycling business and organized exit strategies.

目次

1. 事業の全体概要	1
1. 1 事業の背景	1
1. 2 事業の目的	1
1. 3 事業全体像と実施概要	2
1. 4 事業の実施体制	5
1. 5 本年度事業の実施期間	5
2. 実証事業における前提条件	6
2. 1 検討の対象とする車種	6
2. 2 九州地区における廃車台数と廃 LIB 発生量	6
2. 3 本事業における LIB ユニット解体ラインの処理量	6
3. 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	8
3. 1 車両からの LIB ユニット取り出し自動化に関する検討	8
3. 1. 1 LIB ユニット取り出し自動化装置の検討	8
3. 1. 2 LIB ユニット取り出し助力装置の検討	15
3. 2 LIB ユニットのリユース・リサイクルに関する検討	21
3. 2. 1 LIB ユニット劣化診断	21
3. 2. 2 LIB ユニットの放電	24
3. 2. 3 LIB ユニット解体自動化	32
3. 3 LIB の熱分解処理、破碎・選別処理に関する検討	56
3. 3. 1 LIB モジュールの熱分解	56
3. 3. 2 熱分解後の破碎・選別	66
3. 4 Co、Ni の回収に関する検討	82
3. 4. 1 湿式回収プロセスと設備	82
3. 4. 2 Co、Ni の湿式回収能力の改善	85
4. 事業における環境改善効果、CO ₂ 排出量削減の評価	89
4. 1 昨年度までの成果	89
4. 2 本年度の成果	91
4. 2. 1 ライフサイクル CO ₂	91
4. 2. 2 環境負荷削減効果	110
4. 3 まとめと今後の課題	114
5. 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

5. 1 昨年度までの成果	115
5. 2 本年度の成果	116
5. 2. 1 経済性評価	116
5. 2. 2 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 ...	139
6. まとめと今後の課題	144
参考文献	146
付録1 「現地視察会の開催」について.....	148
付録2 「共同実施者等との打合せ」について.....	148
付録3 「評価審査委員会への出席」について.....	148
学会発表、著書・論文投稿、報道、特許等の実績	149
用語の定義/略語	150

図目次

図 1.3-1	事業全体像図.....	2
図 1.4-1	事業の実施体制図.....	5
図 2.3-1	LIB ユニット解体ラインの処理量の考え方	7
図 3.1.1-1	LIB ユニット取り出し自動化装置全景画像	9
図 3.1.1-2	LEAF とテスラモデル 3 の傾転装置搭載時比較図	11
図 3.1.1-3	LEAF と日産 e-NV200 の傾転装置搭載時比較図	12
図 3.1.1-4	LEAF と日産サクラの傾転装置搭載時比較図	12
図 3.1.1-5	車両傾転装置の変更すべき箇所.....	13
図 3.1.2-1	LIB ユニット取り出し助力装置全景	16
図 3.1.2-2	LIB ユニット取り出し助力装置全体レイアウト	16
図 3.1.2-3	ホンダグレイス.....	18
図 3.1.2-4	LIB ユニットの取り出しが困難な状態	18
図 3.1.2-5	FIT3 とホンダグレイスのラゲッジルーム開口部の違い	18
図 3.1.2-6	ホンダグレイスの後部乗降口から LIB ユニット取り出す様子.....	19
図 3.1.2-7	改良した LIB ユニットアタッチメント.....	19
図 3.2.2-1	LEAF-LIB のユニット単位での放電実証	24
図 3.2.2-2	LEAF-LIB の構成およびユニット配置	25
図 3.2.2-3	放電検討を行った LIB の種類.....	26
図 3.2.2-4	FIT3-LIB の放電課題(樹脂ケースの取り外し)	27
図 3.2.2-5	FIT3-LIB の放電課題(放電ケーブル接続性)	27
図 3.2.2-6	FIT3-LIB 電気回路模式図	28
図 3.2.2-7	FIT3-LIB と放電装置の接続	28
図 3.2.2-8	電力系統図.....	29
図 3.2.3-1	LEAF-LIB 解体の様子	33
図 3.2.3-2	FIT3-LIB 解体の様子	33
図 3.2.3-3	LEAF-LIB のねじ取外し自動化対象範囲	34
図 3.2.3-4	FIT3-LIB のねじ取外し自動化対象範囲	35
図 3.2.3-5	LIB ユニット解体ライン	38
図 3.2.3-6	LIB ユニット解体ライン全景	38
図 3.2.3-7	揚重装置.....	39
図 3.2.3-8	治具パレット.....	40
図 3.2.3-9	LEAF-LIB 作業姿勢	41
図 3.2.3-10	FIT3-LIB 作業姿勢	41

図 3.2.3-11	産業用ロボット	43
図 3.2.3-12	ロボットビジョンシステム	44
図 3.2.3-13	ナットランナーとソケット	45
図 3.2.3-14	ねじ回収装置	45
図 3.2.3-15	FIT3-LIB 手解体様子	47
図 3.2.3-16	LEAF-LIB 手解体様子	47
図 3.2.3-17	FIT3-LIB の解体フロー	48
図 3.2.3-18	LEAF-LIB の解体フロー	49
図 3.2.3-19	FIT3-LIB の解体時間の比較	53
図 3.2.3-20	LEAF-LIB の解体時間の比較	53
図 3.3.1-1	バッチ炉 設置レイアウト	57
図 3.3.1-2	熱分解原料	58
図 3.3.1-3	LIB Ni 系(円筒型) 熱分解物	59
図 3.3.1-4	バッチ炉	60
図 3.3.1-5	熱分解原料	61
図 3.3.1-6	各原料の装入条件	61
図 3.3.1-7	熱分解時の温度挙動	62
図 3.3.1-8	熱分解産物	63
図 3.3.1-9	脆化部	63
図 3.3.1-10	排ガス測定時の温度挙動	64
図 3.3.2-1	破砕・選別ライン構成図	67
図 3.3.2-2	FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュール熱分解物	69
図 3.3.2-3	FIT3 及び LEAF LIB モジュール破砕選別試験における処理フロー	70
図 3.3.2-4	FIT3-LIB モジュール熱分解物 二軸せん断破砕産物	71
図 3.3.2-5	LEAF-LIB モジュール熱分解物 二軸せん断破砕産物	71
図 3.3.2-6	FIT3-LIB モジュール熱分解物 ハンマー破砕選別ライン マテリアルバランス	73
図 3.3.2-7	FIT3-LIB モジュール熱分解物 BM 金属品位と金属回収率	74
図 3.3.2-8	FIT3-LIB モジュール ハンマー破砕選別ライン 回収産物	74
図 3.3.2-9	LEAF-LIB モジュール ハンマー破砕選別ライン マテリアルバランス	76
図 3.3.2-10	LEAF-LIB モジュール一貫処理試験 BM 金属品位と金属回収率	76
図 3.3.2-11	LEAF-LIB モジュール ハンマー破砕選別ライン 各回収産物	77
図 3.3.2-12	FIT3-LIB モジュール一貫処理 マスバランス	78
図 3.3.2-13	LEAF-LIB モジュール一貫処理 マスバランス	80
図 3.4.1-1	湿式回収プロセスの概要	83
図 3.4.1-2	湿式回収実証試験設備の外観	84

図 3.4.2-1	回収した CoSO_4 結晶	86
図 3.4.2-2	回収した NiSO_4 結晶	86
図 3.4.2-3	Li 回収プロセスの一例	88
図 4.2.1-1	リサイクル評価のシステム境界	92
図 4.2.1-2	リユース評価のシステム境界	92
図 4.2.1-3	電炉工程の物質収支	104
図 4.2.1-4	LEAF (30kWh) のライフサイクル比較結果	107
図 4.2.1-5	LEAF (40kWh) のライフサイクル比較結果	108
図 4.2.1-6	FIT3 のライフサイクル比較結果	109
図 4.2.2-1	LEAF (30kWh) の TMR 比較結果	111
図 4.2.2-2	LEAF (40kWh) の TMR 比較結果	112
図 4.2.2-3	FIT3 の TMR 比較結果	113
図 5.2.1-1	損益分岐点分析	117
図 5.2.1-2	劣化診断・放電・解体工程の処理フロー及び実証試験でのデータ採取マップ	119
図 5.2.1-3	実証試験設備の処理能力の検証結果	122
図 5.2.1-4	LEAF 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係	123
図 5.2.1-5	FIT3 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係	123
図 5.2.1-6	熱分解及び破碎・選別工程の処理フローとデータ採取マップ	125
図 5.2.1-7	本設備の処理能力の LEAF 換算処理台数と FIT3 換算処理台数の相関図	128
図 5.2.1-8	LEAF 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係	129
図 5.2.1-9	FIT3 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係	129
図 5.2.1-10	湿式処理工程の処理フロー及び実証試験でのデータ採取マップ	131
図 5.2.1-11	補正設備の処理能力の LEAF 換算処理台数と FIT3 換算処理台数の相関図	133
図 5.2.1-12	LEAF 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係	134
図 5.2.1-13	FIT3 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係	134
図 5.2.1-14	本設備での LEAF 単独処理における損益分岐点分析（今後の方向付け反映）	137
図 5.2.1-15	本設備での FIT3 単独処理における損益分岐点分析（今後の方向付け反映）	137

表目次

表 2. 1-1	実証事業対象 LIB ユニット搭載車両.....	6
表 2. 2-1	2025 年の日本国内における廃車台数と廃 LIB 発生量	6
表 3. 1. 1-1	内リング及び外リングの減速比変更による作動速度比較表.....	10
表 3. 2. 1-1	劣化診断技術の比較.....	22
表 3. 2. 2-1	LEAF-LIB(30kWh) の定格電圧.....	25
表 3. 2. 2-2	LEAF-LIB(40kWh) の定格電圧.....	25
表 3. 2. 2-3	FIT3-LIB の定格電圧	26
表 3. 2. 2-4	LEAF-LIB 放電データ	30
表 3. 2. 2-5	FIT3-LIB 放電データ	30
表 3. 2. 3-1	LIB ユニット解体時間(ガントチャート)	46
表 3. 2. 3-2	Blue Energy 製及び Panasonic 製 FIT3-LIB の自動化率	50
表 3. 2. 3-3	LEAF-LIB(30kWh 及び 40kWh) の自動化率.....	51
表 3. 2. 3-4	Blue Energy 製 FIT3-LIB の自動解体成功率	52
表 3. 2. 3-5	LEAF-LIB(30kWh) の自動解体成功率.....	52
表 3. 3. 1-1	熱分解炉の仕様.....	56
表 3. 3. 1-2	FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュール 熱分解条件、熱分解結果	62
表 3. 3. 1-3	熱分解処理における LPG、水道、電力使用量	64
表 3. 3. 1-4	排ガスの管理値と測定結果一覧.....	65
表 3. 3. 2-1	本試験に用いた小型家電用 LIB 熱分解物.....	68
表 3. 3. 2-2	破碎選別能力確認試験の目的.....	68
表 3. 3. 2-3	LEAF モジュール熱分解物 二軸せん断破碎結果	71
表 3. 3. 2-4	ハンマー破碎選別ライン 選別条件.....	72
表 3. 3. 2-5	FIT3-LIB モジュール熱分解物 ハンマー破碎選別ライン 処理結果	72
表 3. 3. 2-6	FIT3-LIB モジュールの破碎選別処理で使用した電力使用量	74
表 3. 3. 2-7	LEAF-LIB モジュール熱分解物 ハンマー破碎選別ライン 処理結果	75
表 3. 3. 2-8	LEAF-LIB モジュールの破碎選別処理で使用した電力使用量	77
表 3. 3. 2-9	FIT3-LIB モジュール 回収した BM の金属品位と金属回収率	79
表 3. 3. 2-10	LEAF-LIB モジュール 回収した BM の金属品位と金属回収率	81
表 4. 1-1	本プロセスと現行の自再協 LIB 処理プロセスの特徴の比較.....	90
表 4. 2. 1-1	LIB ユニットの仕様	91
表 4. 2. 1-2	FIT3 の廃 LIB 取り出し工程に伴う CO ₂ 排出量.....	93
表 4. 2. 1-3	LEAF の廃 LIB 取り出し工程に伴う CO ₂ 排出量.....	93
表 4. 2. 1-4	放電装置の仕様.....	94

表 4.2.1-5	FIT3-LIB と LEAF-LIB の回生電力量	94
表 4.2.1-6	FIT3-LIB の回生電力による CO ₂ 削減量	95
表 4.2.1-7	LEAF-LIB の回生電力による CO ₂ 削減量	95
表 4.2.1-8	FIT3-LIB の解体工程における CO ₂ 排出量	96
表 4.2.1-9	FIT3-LIB の解体工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果	96
表 4.2.1-10	LEAF (30kWh) -LIB の解体工程における CO ₂ 排出量	96
表 4.2.1-11	LEAF (30kWh) -LIB の解体工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果	97
表 4.2.1-12	LEAF (40kWh) -LIB の解体工程における CO ₂ 排出量	97
表 4.2.1-13	LEAF (40kWh) -LIB の解体工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果	97
表 4.2.1-14	熱分解炉の仕様	98
表 4.2.1-15	FIT3-LIB の熱処理工程における CO ₂ 排出量	98
表 4.2.1-16	FIT3-LIB の熱処理工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果	98
表 4.2.1-17	LEAF-LIB の熱処理工程における CO ₂ 排出量	99
表 4.2.1-18	LEAF-LIB の熱処理工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果	99
表 4.2.1-19	FIT3-LIB の破碎・選別工程における CO ₂ 排出量	100
表 4.2.1-20	LEAF-LIB の破碎・選別工程における CO ₂ 排出量	100
表 4.2.1-21	FIT3-LIB の湿式回収工程における CO ₂ 排出量	101
表 4.2.1-22	FIT3-LIB の湿式工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果	101
表 4.2.1-23	LEAF-LIB の湿式回収工程における CO ₂ 排出量	101
表 4.2.1-24	LEAF-LIB の湿式工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果	102
表 4.2.1-25	FIT3-LIB の輸送工程における CO ₂ 排出量	102
表 4.2.1-26	LEAF-LIB の輸送工程における CO ₂ 排出量	102
表 4.2.1-27	FIT3 の現行プロセスにおける CO ₂ 排出量	104
表 4.2.1-28	FIT3 の現行プロセスにおける天然資源からの製造プロセスの代替効果	104
表 4.2.1-29	LEAF-LIB (30kWh) の現行プロセスにおける CO ₂ 排出量	104
表 4.2.1-30	LEAF-LIB (30kWh) の現行プロセスにおける天然資源からの製造プロセスの代替効果	105
表 4.2.1-31	LEAF-LIB (40kWh) の現行プロセスにおける CO ₂ 排出量	105
表 4.2.1-32	LEAF-LIB (40kWh) の現行プロセスにおける天然資源からの製造プロセスの代替効果	105
表 4.2.1-33	LEAF (30kWh) のライフサイクル比較結果	106
表 4.2.1-34	LEAF (40kWh) のライフサイクル比較結果	106
表 4.2.1-35	FIT3 のライフサイクル比較結果	107
表 4.2.2-1	TMR 係数の設定	110

表 4.2.2-2	LEAF (30kWh) の TMR 比較結果.....	111
表 4.2.2-3	LEAF (40kWh) の TMR 比較結果.....	112
表 4.2.2-4	FIT3 の TMR 比較結果	113
表 5.2.1-1	本実証事業の処理台数及び稼働日数の前提条件.....	118
表 5.2.1-2	LIB ユニット構成	118
表 5.2.1-3	経済性評価のために採取したデータの一覧.....	120
表 5.2.1-4	年間処理目標台数と 1 日あたりの処理台数.....	121
表 5.2.1-5	経済性評価のために採取したデータの一覧.....	126
表 5.2.1-6	本設備の処理能力.....	127
表 5.2.1-7	本実証事業の目標処理量.....	128
表 5.2.1-8	経済性評価のために採取したデータの一覧.....	132
表 5.2.1-9	実証試験結果から見えてくる課題と今後の方向付け.....	136
表 5.2.2-1	本プロセスと加熱しないリサイクル手法との比較.....	142
表 6-1	事業化に向けた今後の課題.....	145

1. 事業の全体概要

1. 1 事業の背景

リチウムイオン電池（以下、「LIB」と略す）は、次世代自動車の普及ととも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あまり顕在化していない。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などが開始されているものの、国内では廃 LIB の発生量がそれほど多くないことから、事業化を進め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、一般社団法人自動車再資源化協力機構を窓口とした無償回収システムを利用し引き取ってもらう、若しく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 ユニットの部品として販売しているのが実態である。

このような中、カーボンニュートラル政策の下、自動車の EV 化が急速に進み、将来、廃 LIB が大量発生する時代には、資源循環の観点からも LIB のリユース・リサイクルのサプライチェーン全体の維持・強化に資するための効率的かつ安全な循環型処理システムの構築が求められ、また、このような LIB のリユース・リサイクルの促進により、サプライチェーン全体での環境負荷が低減し、カーボンニュートラルに貢献が可能になると考えられる。現時点では、LIB のリユース・リサイクルについては、種々の技術検討、検証が進められているが、LIB ユニット取り出し工程から Co、Ni 回収工程までの連続した一貫システムの検証は行われておらず、この連続した一貫システムに内在する課題、特に、各処理プロセスの接続の際の課題等を顕在化させ、解決していくことによる、より安全かつ効率的で、CO₂排出等の環境負荷の低い処理システムの構築が重要となると考えられる。

1. 2 事業の目的

LIB は、ハイブリッド自動車（以下、「HV」という。）、プラグインハイブリッド自動車、電気自動車（以下、「EV」という。）及び燃料電池自動車の普及等により、ますますその使用量が増える傾向にある。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な LIB の使用量は増え続けている。

LIB の材料として、Co、Ni の需要は高まり、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可能性がある。現在、LIB の処理は、焼却処理や再生鉄を製造する電炉での廃棄処理が行われている。電炉での廃棄処理においては、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、資源の有効利用がなされていないのが現状である。こうした背景から、LIB ユニットの構成する素材をリユース・リサイクルする事による CO₂削減効果は大きく、希少資源を国内で循環する面でも 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いる。

本事業では車両からの LIB ユニット取り出し工程から Co、Ni 回収工程まで、構成素材

ごとの適正なリユース・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削減効果を評価するとともに、地域循環共生圏の形成に貢献する。

1. 3 事業全体像と実施概要

本事業の事業全体像を図 1.3-1 に示すとともに、図内に示す各項目の本年度の実施概要を以下に示す。

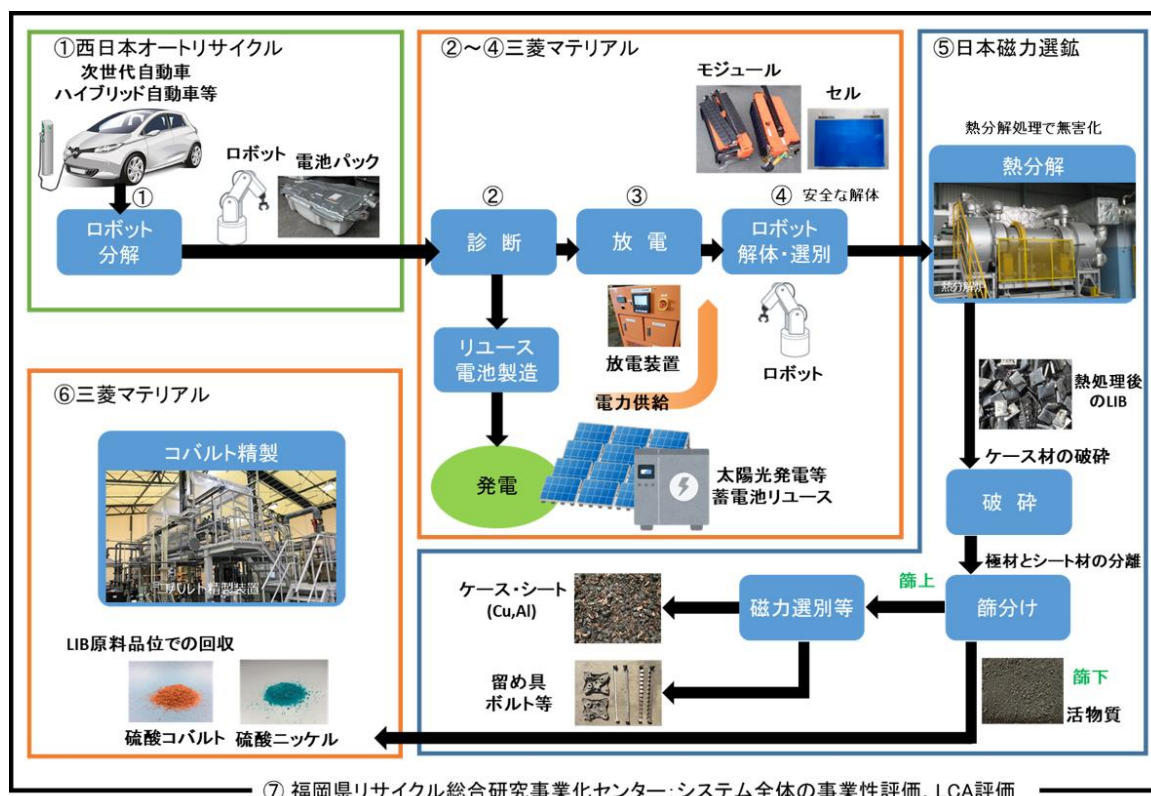


図 1.3-1 事業全体像図

(1) LIBユニット取り出し自動化・省力化

昨年度は、現時点で販売量の多い本田技研工業株式会社 FIT3 (HV) (以下、「FIT3」という。) と日産自動車株式会社 LEAF (EV) (以下、「LEAF」という。) の2車種を対象とし、LIBユニット取り出し工程の省力化に向け、FIT3については助力装置、LEAFについては自動化装置を導入し、それぞれ目標処理時間内で動作可能であることを確認した。本年度は、各装置を用いて更なる作業効率の向上に向けた検討を行うとともに、各装置の他車種への汎用性に関する検討を机上にて実施する。

(2) LIBユニット劣化診断

昨年度は、LIBの劣化診断技術調査より、情報不足等の観点から現時点での具体的な

適用には至らない結果となり、リユース LIB の蓄電池化について電力供給用途として供給者側の視点で課題の整理を行った。

本年度は、車載 LIB に対する適切な劣化診断技術の適用方法を引き続き調査し、出口戦略の検討を行うとともに、リユースによる蓄電池化に係る技術検討として需要者側の視点で課題の整理を行う。

(3) LIB ユニットの放電

昨年度は LEAF-LIB について、管理電圧までの放電による安全かつ効率的な放電を実証した。

本年度は、FIT3-LIB に対して安全かつ効率的な放電方法を検討し実証する。

(4) LIB ユニット解体自動化

昨年度は、解体自動化については解体手順の検討及びねじ取り外し自動化の対象範囲の検討を行った。

本年度は、LIB ユニット解体ラインを立ち上げ、同一ラインでの FIT3-LIB 及び LEAF-LIB の解体を実証する。なお、解体ラインでのロボット活用における目標設定とその根拠も明確にする。

(5) LIB モジュールの熱分解

昨年度は熱分解炉の仕様を検討し、製作・設置するとともに、設置した熱分解炉による小型家電 LIB を用いた熱分解挙動を確認した。その結果、一部正極材 (A1) の脆化が確認された。

本年度は、熱分解処理温度条件の調整により脆化防止の可能性を検討するとともに、FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュールを用いた熱分解処理実証を行い、後段の破碎・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。

(6) 熱分解後の破碎・選別

昨年度は破碎・選別ラインの製作・設置を行い、小型家電 LIB の熱分解処理物を用いた破碎・選別試験を行った。その結果、脆化した A1 が活物質に一部混入していることが分かった。

本年度は、前述の脆化防止の可能性検討に伴う、A1 の混入率低減の可能性を検討するとともに、FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュールを用いた熱分解から破碎、選別、活物質回収までの一貫処理実証を実施し、回収される活物質の Co、Ni 品位と回収率、Cu、Al 等の混入率、Li の挙動等を確認する。

(7) Co、Ni の回収

昨年度は、FIT3-LIB から回収した活物質を対象に、改善した湿式処理プロセスを用いて Co、Ni の湿式回収実証を行った。その結果、酸浸出・粗精製液工程における Co、Ni の回収率の向上、湿式回収工程における更なる不純物の除去が課題として挙げられた。

本年度は、Co、Ni の回収率と純度向上に向けた検討を引き続き実施するとともに、LEAF-LIB モジュールの熱分解処理後の活物質を用いた実証を行う。また、湿式処理プロセスにおける Li 回収のプロセスフロー例をオプションとして検討する。

(8) 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

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から運転データを収集し、工程ごと及び一貫処理での環境影響改善効果及び CO₂ 排出量を試算する。

昨年度は、評価シナリオの設定、評価のための条件設定、データ採取を行い、LIB 取り出し時、輸送時の CO₂ 排出量の評価を行うとともに、環境影響改善効果の評価等についても検討した。

本年度は、昨年度までに収集できていない処理工程のデータを収集し、全プロセスを対象とした CO₂ 排出量削減効果の評価、並びに環境影響改善効果の評価を実施する。また、本実証事業で採用している処理プロセスとは異なった、現状の各 LIB リサイクル処理プロセスのメリット、デメリットについても整理する。

(9) 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

昨年度は、経済性評価の一環として LIB 取り出しに対する処理コストの試算を行った。また、金属リサイクルビジネスへの横展開、出口戦略についての検討を行った。

本年度は、一連の処理プロセスに対するデータ取得・検討を行い、経済性評価を実施する。また、本実証試験全般を通じ得られた知見から、LIB リユース・リサイクルシステムの各工程に用いる技術又はビジネスモデルを、金属リサイクルビジネスに横展開する可能性、並びに出口戦略の観点から検討する。

1. 4 事業の実施体制

本事業の実施体制を図 1.4-1 に示す。申請法人及び共同実施者の役割の詳細は前述の図 1.3-1 の事業全体像図のとおりである。

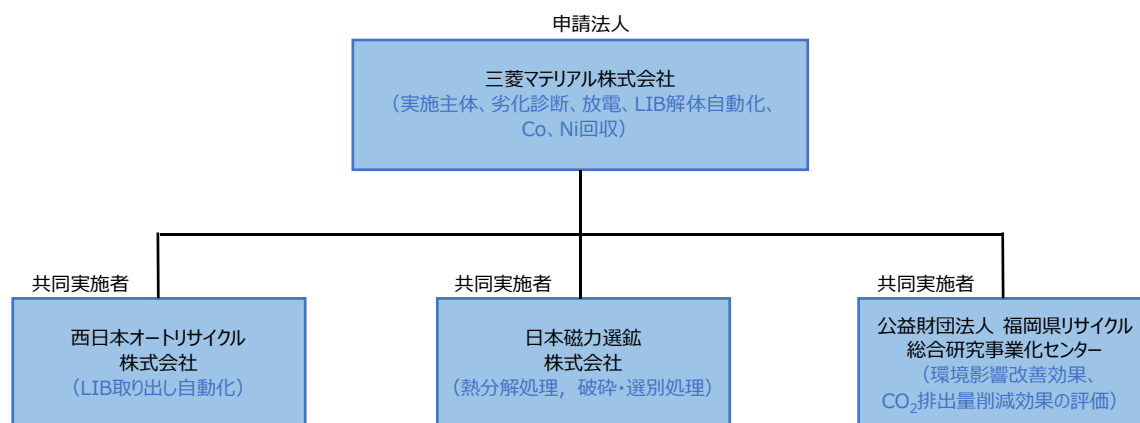


図 1.4-1 事業の実施体制図

1. 5 本年度事業の実施期間

本年度の実証事業の実施期間は、以下の通りである。




「2022年4月1日～2023年3月24日」

2. 実証事業における前提条件

2. 1 検討の対象とする車種

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2.1-1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 2.1-1 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			

2. 2 九州地区における廃車台数と廃LIB発生量

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し、表2.2-1に示した。

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。

表 2.2-1 2025年の日本国内における廃車台数と廃LIB発生量

	2025年 廃車台数
FIT	32,216
LEAF	6,068

2. 3 本事業における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ともに、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、電力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 2.3-1 に LIB ユニット解体ラインの処理量の考え方を示す。

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。

さらに劣化診断により 70% がリユース、30% がリサイクルに配分されると仮定し、LIB ユニット解体ラインで受入れる廃 LIB を、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 と設定した。

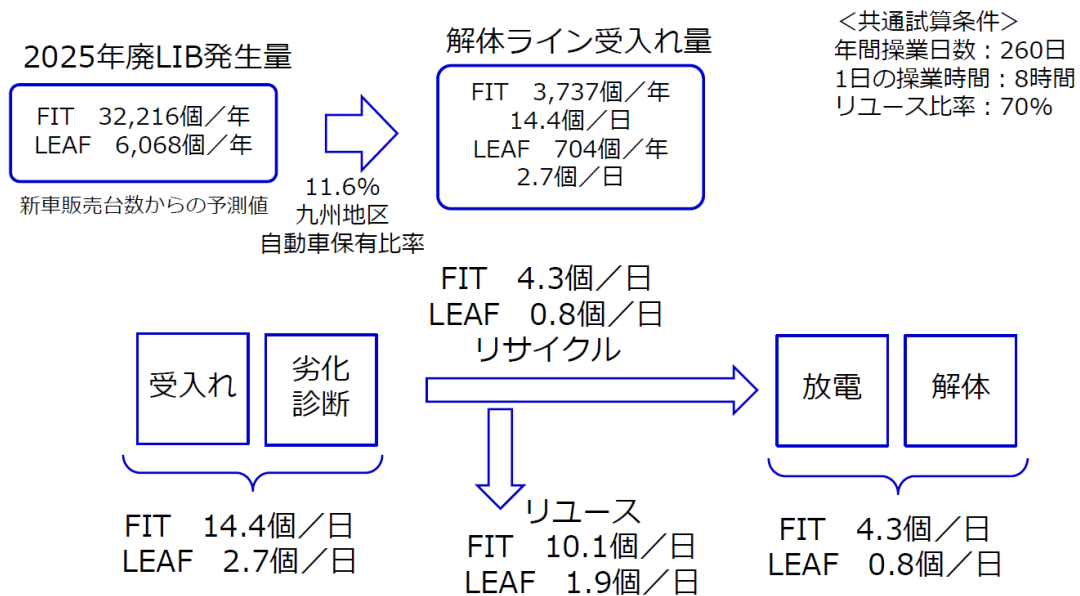


図 2.3-1 LIB ユニット解体ラインの処理量の考え方

3. 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

3. 1 車両からの LIB ユニット取り出し自動化に関する検討

令和 2 年度までの累計で販売台数の多い本田技研工業株式会社 FIT3 と日産自動車株式会社 LEAF の 2 車種を対象とし、LIB ユニット取り出し工程の安全性の確保及び省力化に向け、FIT3 については助力装置、LEAF については自動化装置に関する検討を行った。

3. 1. 1 LIB ユニット取り出し自動化装置の検討

LEAF の LIB ユニット取り出し方法の一連の作業の内、LIB ユニー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目的とした、LIB ユニット取り出し自動化装置の設計製作及び作動確認を行った。

(1) 昨年度までの成果と課題

LEAF の LIB ユニートを車体から取り出す作業は、通常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。作業員は、樹脂製アンダーカバー、電気系コネクタ及び LIB ユニートの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。また、作業員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に、300~400 kg の重量物である LIB ユニートの落下の危険性を伴っている。これらの課題に対し、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と LIB ユニット締結ねじ取り外し作業の部分自動化を可能とするロボットを導入した。車両傾転装置においては、車体を 90° 横転して作業員が正対した状態で、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作業を可能としている。また、ロボット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° 反転することで LIB ユニット締結ねじの取り外し作業を自動化した。以上の車両傾転装置と LIB ユニット締結ねじ取り外し用ロボットの導入により、これら一連の LIB ユニット取り出し作業を要員 1 名で行う省力化と生産性向上を可能とし、車体下部作業を無くす安全性を確認することが出来た。LIB ユニット取り出し自動化装置の装置全景画像を図 3.1.1-1 に示す。画像は装置へ車両の装入作業を行う斜め前方から撮影したものである。機械色に塗装されているのが車両傾転装置、青色に塗装されているのがロボットで、これらの装置を囲んでいるのが黄色に塗装されたポストで支えられた安全柵である。LEAF の LIB ユニット取り出し時間については、LEAF を傾転装置に設置する工程から、LIB ユニートの取り出し作業を完了するまでの一貫工程作業時間が約 29 分 16 秒/台であった。これは、2.3 節に示した 2025 年の九州エリアでの LEAF 廃車発生予測に基づく 2.7 個/日に対応する

目標である1台当り30分以内に収まることを確認した。

本年度の課題としては、LEAF以外の車両への車両傾転装置の活用拡大を目指した汎用性の確保と、LIBユニットの取り出し時間の更なる短縮による作業効率の向上について検討することとした。



図 3. 1. 1-1 LIBユニット取り出し自動化装置全景画像

(2) 本年度の成果

本年度は、LIB ユニット取り出し自動化装置の作業効率の向上に向けた検討を行うとともに、他車種への汎用性に関する検討を机上にて実施した。

1) 作業効率の向上に向けた検討

作業効率の向上に向けた検討内容として、設備の作動速度に関して着眼し、検討を実施した。作動時間が長く作動速度の向上で効果が出る部分として、車両傾転装置の傾転リングを形成する内リングの開閉速度と、車両を傾転させる外リングの速度について現状の作動時間と比較した。作動速度については、現在の車両傾転装置のモーターの回転数を単純に上げた場合だと、回転トルクが低下することと、減速ギヤ等が故障する恐れがあるため、今回の比較ではモーターの出力を 0.4kW から 0.75kW へ向上させ、減速比を変化させることで、作動速度の変化を調査した。内リングの現状の開閉時間は 128 秒である。減速比を現在の 1/120 から 1/60 とすれば、約 2 倍の 64 秒の開閉速度となる。また、外リングによる車両の傾転速度は 180° まで傾転した後、0° に復帰するまでに 260 秒かかるが、減速比を 1/160 から 1/80 とすれば、約 2 倍の 130 秒となる。しかし安全を考慮すれば、外リングによる車両の傾転速度の向上は車両の脱落等を含め避けるべきだと考える。それぞれ減速比を変更した場合の傾転装置の内リング往復作動時間と、傾転の往復作動時間の変化内容を表 3.1.1-1 に示す。

表 3.1.1-1 内リング及び外リングの減速比変更による作動速度比較表

・内リング開閉(傾転リング形成作動 147° × 2)

出力(kW)	減速比	回転速度(r/min)	1台当たり所要時間(s)	短縮時間(s)	
0.40	1/120	0.38	128	—	(現在)
0.75	1/100	0.46	106	22	
0.75	1/80	0.57	86	42	
0.75	1/60	0.76	64	64	

・外リング回転(車両傾転作動 180° × 2)

出力(kW)	減速比	回転速度(r/min)	1台当たり所要時間(s)	短縮時間(s)	
0.75	1/160	0.23	260	—	(現在)
1.50	1/120	0.31	193	67	
1.50	1/100	0.37	162	98	
1.50	1/80	0.46	130	130	

2) LIBユニット取り出し自動化装置の汎用性の検討

今回対象とした主なEV車として、車体形状の違いや販売台数を考慮したなかで、LEAF以外の乗用車としてテスラモデル3、1BOX形状の日産e-NV200、軽自動車の日産サクラで汎用性について検討を実施した。

(a) テスラモデル3を車両傾転装置に搭載する場合

LEAFとの比較として、ホイールベースで175mm、トレッド幅が50mm、高さ+117mmの差異がある。車両傾転装置にテスラモデル3を搭載した状態とLEAFを車両傾転装置に搭載した比較を図3.1.1-2に示す。

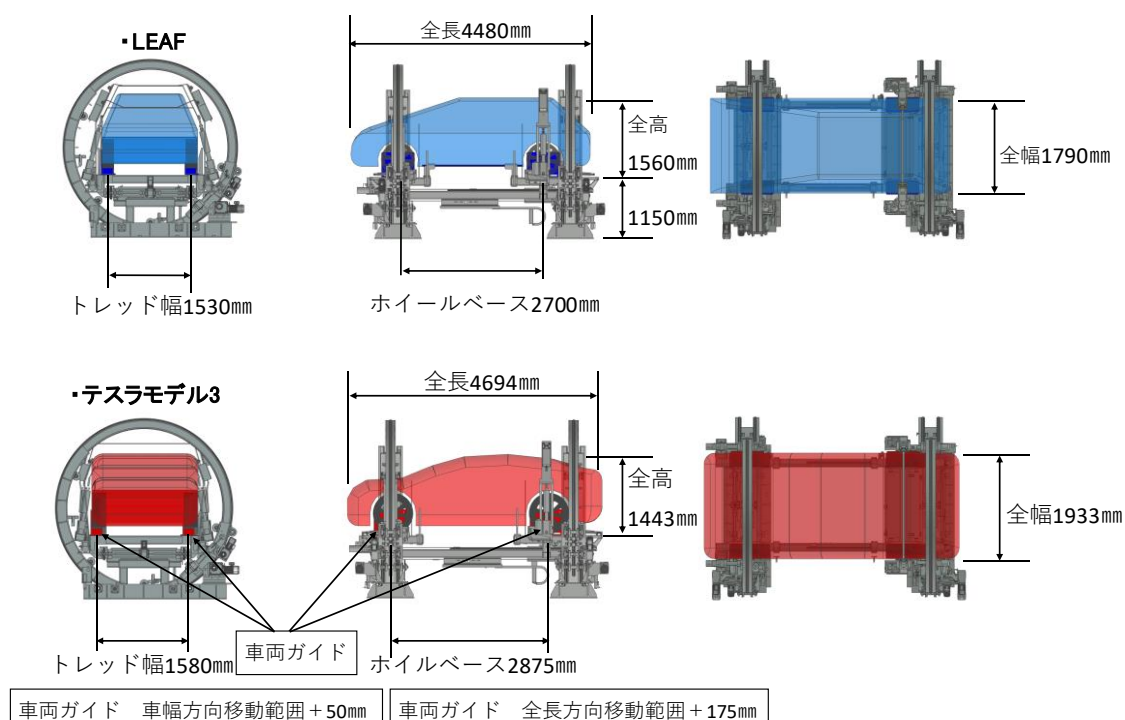


図3.1.1-2 LEAFとテスラモデル3の傾転装置搭載時比較図

(b) 日産e-NV200を車両傾転装置に搭載する場合

LEAFとの比較として、ホイールベースで+25mm、トレッド幅は同一、全高で+290mmの差異がある。特にLEAFと比較して、全高が上がるため傾転装置リングの直径を3200mmから4560mmに拡大することが必要となる。車両傾転装置にLEAFを搭載した状態と日産e-NV200を車両傾転装置に搭載した比較を図3.1.1-3に示す。

(c) 日産サクラを車両傾転装置に搭載する場合

LEAFとの比較として、ホイールベースで-205mm、トレッド幅が-230mm、高さ+95mmの差異がある。車両傾転装置にLEAFと日産サクラを車両傾転装置に搭載した比較を図3.1.1-4に示す。

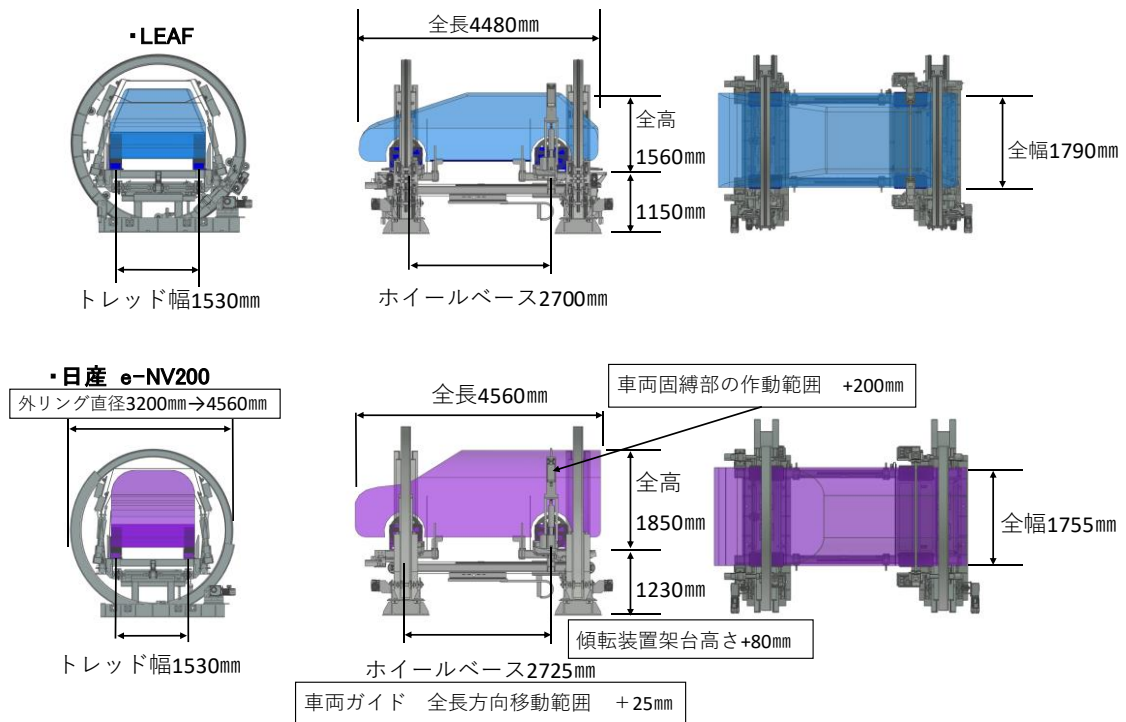


図 3. 1. 1-3 LEAF と日産 e-NV200 の傾転装置搭載時比較図

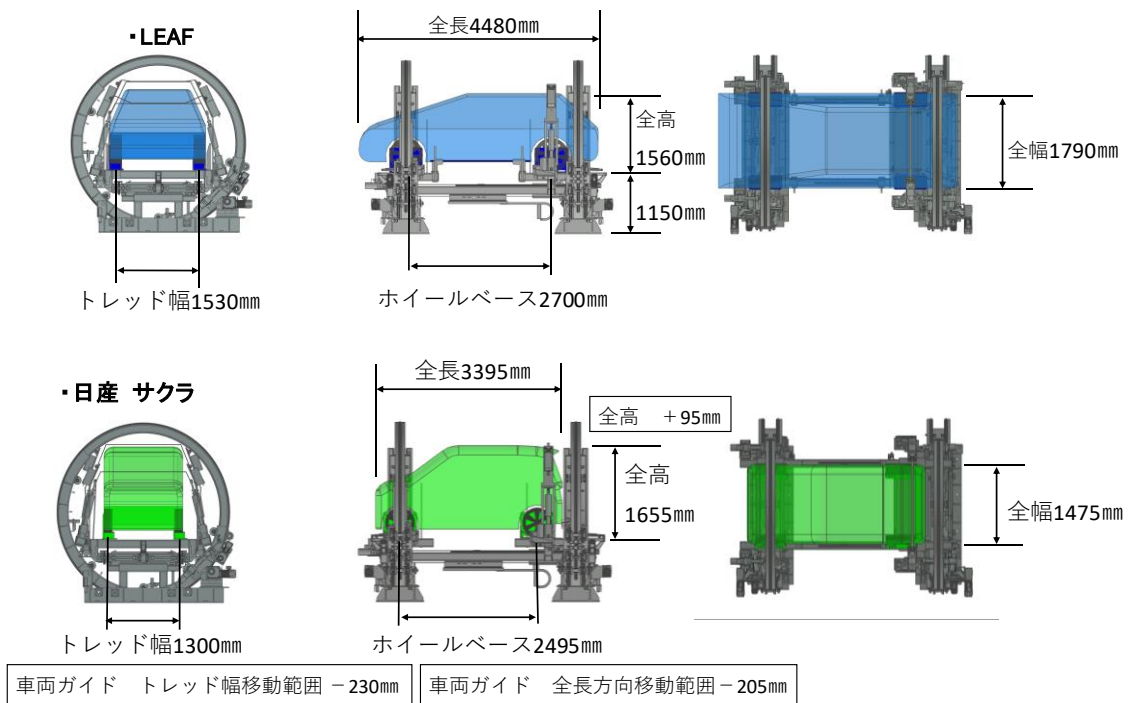


図 3. 1. 1-4 LEAF と日産サクラの傾転装置搭載時比較図

(d) 汎用性についての検討結果と今後の課題

車両傾転装置の汎用性について、LEAF を含めた上記の比較対象車両を同一の車両傾転装置に搭載する場合において、車両傾転装置の変更すべき箇所を図 3.1.1-5 に示す。

変更点として、まず車両ガイドを各車両のトレッド幅及びホイールベースにあわせて可動式とする。可動範囲はトレッド幅を内側に 230 mm 以上、外側に 50 mm 以上を必要とし、ホイールベースは車両の前後に対し、伸び側に 175 mm 以上、縮側に 205 mm 以上のスライドできることが必要である。また、傾転装置のリングの直径を 3200 mm から 4560 mm に拡大し、ロボットを固定している架台の高さを 1750 mm から 1870 mm へ 120 mm の嵩上げが必要となる。車体を固定する固縛装置については、それぞれの車体形状に合わせて固定するために、固縛装置のストローク量を 300 mm から 500 mm に +200 mm の変更が必要である。これらの条件を満たすことが出来れば、それぞれの車両に関して車両傾転装置にて 90° ないし 180° での作業は可能である。但し、ロボットによる LIB ユニット締結ねじの取り外しについては、LIB ユニット締結ねじの取付位置に関してはティーチングにより覚えさせることが出来るが、それぞれ車種のねじのサイズや取り付け方等を実車にて確認が出来ていないため今後の課題となる。

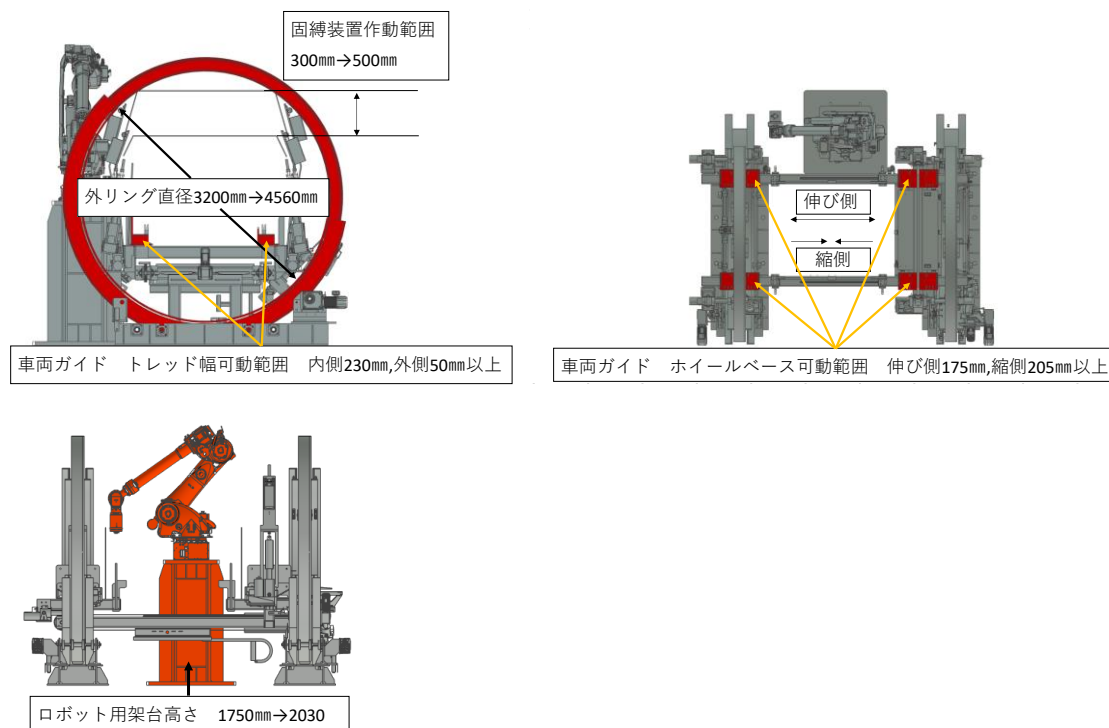


図 3.1.1-5 車両傾転装置の変更すべき箇所

(3) まとめと今後の課題

今回の実証事業は、ロボットを導入することで、作業の安全性や作業効率を重視した LIB ユニット取り出し自動化装置を製作したが、LIB ユニットの取り出し作業のすべてをロボットで作業をさせることは難しく、車両を 90° 横転させて人手に頼る部分がある。この人手での作業効率をいかに向上させることが出来るかが課題であることと、EV 車の解体車両が増加してきたときに自動車解体業者が設備を導入しやすいように、LIB ユニット取り出し自動化装置の廉価版の検討及び開発が今後の課題となる。また、これら設備以外に関しても、LIB の車載構造を設計するメーカーと取り出す解体業者との密接な情報交換による連携や、安全で効率的な LIB 回収スキーム構築の連携といった動静脈連携の促進が不可欠であると考ええる。

3. 1. 2 LIBユニット取り出し助力装置の検討

FIT3のLIBユニット取り出し方法の一連の作業の内、LIBユニットを車両から降ろす際の作業員の安全性や作業効率の改善を目的とした、LIBユニット取り出し助力装置の設計製作及び作動確認を行った。

(1) 昨年度までの成果と課題

昨年度は、FIT3(HV)を対象とし、LIBユニット取り出し工程の省力化に向け、助力装置を導入し、それぞれ目標処理時間内で動作可能であることを確認した。FIT3の室内のラゲッジルーム下に搭載されたLIBユニットを取り出すには、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、通常2名で取り出す必要があるところを、助力装置を使用することで1名での取出しを可能とし、またFIT3のLIB取り出し作業に関しては1名作業で10分5秒/台と、目標時間とした作業員1名の対応で1台当り15分以内で完了できることを確認した。この時間は2.3節に示した2025年の九州エリアでのFIT3廃車発生予測である14.4個/日の対応も可能としている。LIBユニット取り出し助力装置の装置全景画像を図3.1.2-1に示す。

LIBユニット取り出し助力装置の設置レイアウトに関しても、FIT3の装入及び排出をフォークリフトで効率よく容易に行える位置で且つ、LIBユニット取り出し助力装置を車両傾転装置に隣接して設置し、1名の作業員で助力装置と車両傾転装置の操作及び作業を並行して出来る様に配している。LIBユニット取り出し助力装置全体レイアウトを図3.1.2-2に示す。

本年度の課題としては、FIT3以外の車体形状や搭載位置の違うHV車への助力装置の活用を目指した汎用性拡大や、更なる作業効率の向上について検討することとした。



図 3. 1. 2-1 LIB ユニット取り出し助力装置全景



図 3. 1. 2-2 LIB ユニット取り出し助力装置全体レイアウト

(2) 本年度の成果

本年度は、作業効率の向上に向けた検討を行うとともに、他車種への汎用性に関する検討を机上にて実施した。昨年度の実証事業までは FIT3 の LIB ユニットの取り出し作業を対象に、助力装置と、安全且つ効率よく取り出す FIT3 の LIB 専用アタッチメントの組み合わせで検証を行ってきたが、本年度は作業効率の向上と汎用性を考慮したなかで、FIT3 と同形式の LIB ユニットを搭載したホンダグレイスに着眼した。ホンダグレイスを図 3.1.2-3 に示す。

FIT3 とホンダグレイスの相違点は車体形状であり、FIT3 はラゲッジルームに隔壁を持たない 2BOX 車だが、ホンダグレイスは後部座席とラゲッジルームを隔壁で仕切られた形状の 3BOX 車である。ホンダグレイスのラゲッジルームから LIB ユニットを取り出す際、FIT3 のリアゲートを開けたときの開口部と比べ、高さ方向の空間を確保できず、助力装置のアームがラゲッジルームの上部に当り、LIB ユニットを持ち上げて取り出すことができない。LIB ユニットの取り出しが困難な状態を図 3.1.2-4 に示す。

この場合、ホンダグレイスから助力装置を使用して LIB 取り出す方法としては、まず、室内の後部座席を取り外した後、後部座席とラゲッジルームの隔壁を取り外し、後部乗降口から助力装置を挿入し、LIB ユニット取り出しを行う。但しこの方法だと、部品の取り外しに時間がかかり作業効率が低下してしまう。今回、汎用性と作業効率の向上策として、FIT3 の LIB 取り出し方法と同様にホンダグレイスのラゲッジルーム開口部からの LIB ユニット取り出す方法を検討した。FIT3 とホンダグレイスのラゲッジルーム開口部の違いを図 3.1.2-5 に示す。

ホンダグレイスの後部乗降口から LIB ユニット取り出す様子を図 3.1.2-6 に示す。

ホンダグレイスのリアフードを開いた開口部から LIB ユニット取り出すための改良点として、LIB ユニット取り出しアタッチメントの吊り下げ方式をチェーンからワイヤーに変更し、アタッチメント部で巻き取る方式とした。巻き取りができることで、アタッチメントと LIB ユニットの間隔を 100 mm 詰めることができ、助力装置のアームとホンダグレイスのラゲッジルーム上部に 100 mm のクリアランスが生じることで、LIB ユニットを浮かすことが可能となる。その状態でラゲッジルーム後部へ LIB ユニットを移動させることでラゲッジルームの開口部から取り出すことができる。改良したアタッチメントを図 3.1.2-7 に示す。



図 3.1.2-3 ホンダグレイス



図 3.1.2-4 LIBユニットの取り出しが困難な状態



FIT3 ラゲッジルーム開口部

ホンダグレイス ラゲッジルーム開口部

図 3.1.2-5 FIT3 とホンダグレイスのラゲッジルーム開口部の違い



図 3. 1. 2-6 ホンダグレイスの後部乗降口から LIB ユニット取り出す様子

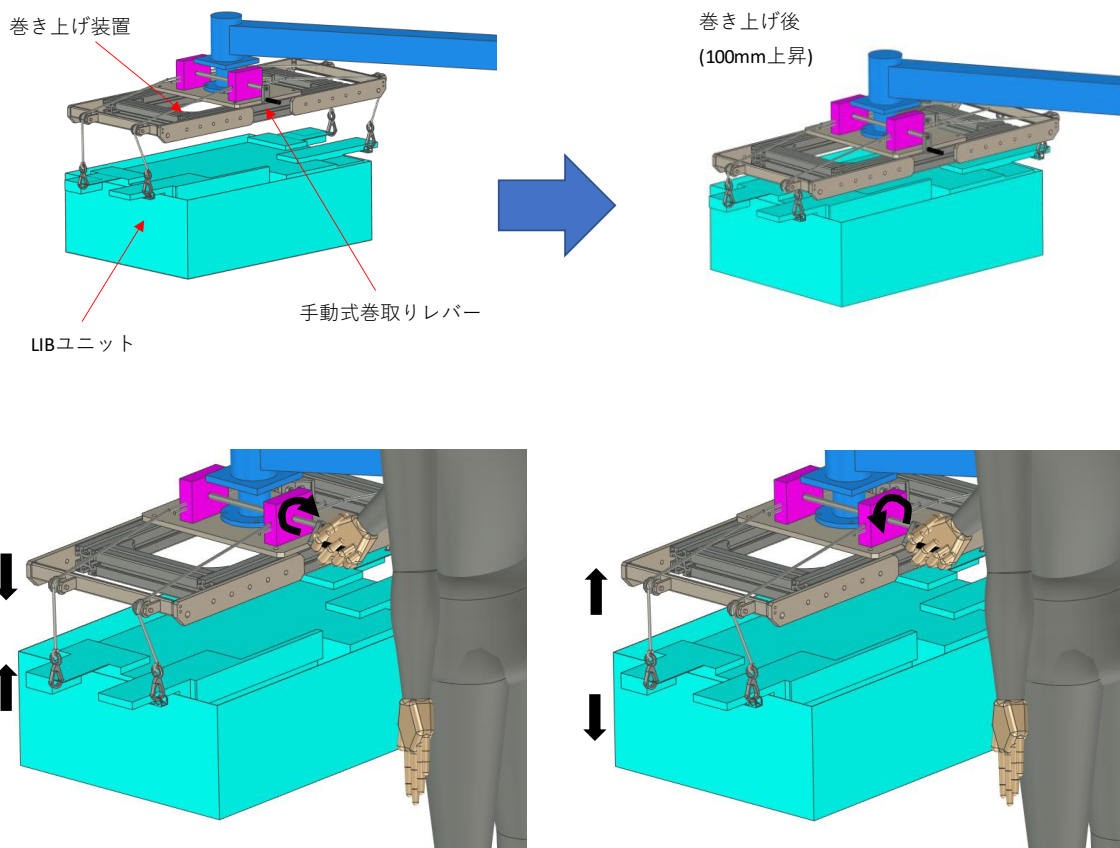


図 3. 1. 2-7 改良した LIB ユニットアタッチメント

(3) まとめと今後の課題

本年度の実証事業で、同じ LIB ユニットであっても、車体形状の違いで助力装置による LIB 取り出しが難しくなることが判明した。今後 LIB ユニット取り出し助力装置の汎用性を広げていくには様々な車種の取付位置の寸法や重量等の情報が必要である。今回は、アタッチメントの改良による机上検討だったが、メーカー及び車種が変われば助力装置のアームの伸縮や関節の増設も必要になると思われる。また作業効率の向上に関しては、メーカーの LIB 取り出しマニュアル上は 2 名での人力による取り出しとなっているが、LIB ユニットに吊具をかけられる位置を明確に設けることで、助力装置による 1 名での取り出し作業も容易に対応が可能となる。

このように HV 車の LIB ユニット取り外し作業効率の向上を図るためには、LIB ユニットの取付け及び取り出し作業一貫の視点での設計製作が必要であり、LIB の車載構造を設計するメーカーと取り出す解体業者とのより密接な情報交換を図る動静脈連携を促進することが必要であると考ええる。

3. 2 LIBユニットのリユース・リサイクルに関する検討

リユースについては、回収したLIBをユニット単位でのリユース可否を評価するための技術調査・検討を行った。また、LIBのリユースによる蓄電池化に係る技術検討を行い、電力供給用途として利用可能性を調査・検討した。

リサイクルについては、安全かつ効率的なLIB解体の前段として必要となる、ユニット単位での放電を技術検討し、安全な放電技術を実証した。また、放電後のユニットの解体に関しては、ユニットからモジュール又はセルの状態までの安全かつ効率的な解体のため、電池解体作業のボルト外し等、一部工程にロボット技術を活用することを検討した。

3. 2. 1 LIBユニット劣化診断

車両に搭載されているLIB（車載LIB）は車両外部からの影響が少なくなるような配置が考慮されていると考えられ、また、近年では車載LIBの劣化を遅らせるための制御がなされていることから、車両が使用されなくなった後も車載LIB単体での使用は可能な場合が多いと考えられる。このような車載LIBを二次電池が必要なシステムでリユースすることは、新たな二次電池の製造コストや必要資源を低減させると考えられる。また、車載LIBを所定の場所でリユースした後にリサイクルすることは、リサイクルすべき車載LIBの確保を容易にさせ、資源循環の効率化を向上させると考えられる。

車載LIBをリユースするにあたっては、まずは劣化状態を診断する必要がある。劣化状態を診断する技術（劣化診断技術）として、表3.2.1-1に示すように、充放電法、充放電曲線解析法、バッテリー・マネジメント・システム（BMS：Battery Management System）データ利用、交流インピーダンス法、並びにゴイク電池法といった劣化診断技術の比較検討を行ってきたが、現在においても車載LIBのユニット単位での劣化診断技術の早期確保は難しい状況である。

本実証事業では、廃棄された車載LIBを対象にリユース可否判断のための劣化診断技術を検討したものの適切な技術を確保できなかったが、現状で考えられる車載LIBの状態情報を得るための手段について考察した。

表 3.2.1-1 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。	測定時間が数分で、短時間で診断できる。	劣化データとの比較で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。	・極めて短時間で診断できる。 ・SOHの絶対値を測定可能。誤差は1%(電池容量SOC20~80%時)	・被測定LIBの定格電圧等のデータを入力する必要がある。 ・実証段階である。

(1) 昨年度までの成果と課題

昨年度は、情報確保の方向性、蓄電池化及び電力供給用途としての可能性を検討した。

車載 LIB の劣化状態の小さいセルをリビルトすることで蓄電池としてリユースが可能になると考えられる。車載 LIB のユニットからリビルト用のセルを抽出するにはユニット単位での効率的な劣化診断技術が求められるが、現実的には実現されておらず、セルの抽出でコストが大きくなるという課題が残る。

(2) 本年度の成果

本年度は、現状で考えられる車載 LIB の状態情報を把握するための手段について考察した。

1) 車両内バッテリー・メーターからの情報取得

LEAF にはバッテリーの状態に関連するメーターとして「リチウムイオンバッテリー残量計」「リチウムイオンバッテリー容量計」等が搭載され、運転席前のインストルメントパネルに表示されている。車載 LIB が車両に搭載されている状態であれば、上記のメーターの内容を LIB ユニットの状態を把握するための情報として参照することができる。ただし、メーターが示す内容は車両を安全に利用するために余裕を持たせた値や保守的な値で示している可能性もあり、バッテリーの真の状態とメーターが示す内容が完全に一致しているとは限らないことに留意が必要である。

また、LIB のセル単位での情報は得られないため、車両内バッテリー・メーターからの情報は LIB ユニットとしてリユースできるかどうかの判断利用に限られるという課題がある。

2) 車載式故障診断装置からの情報取得

車載式故障診断装置（OBD：On-Board Diagnostics）は、エンジンやトランスミッションなどの電子制御装置（ECU：Electronic Control Unit）内部に搭載された故障診断機能である。車載 LIB ユニット内部には ECU が搭載されているため、この ECU には車載 LIB ユニット内部の様々な記録情報が登録されていると考えられる。

OBD によって車載 LIB ユニット内部の ECU から記録情報を取得し、この記録情報と車載 LIB の状態とを紐付けすることができれば、たとえ車載 LIB が車両に搭載されていないとしても車載 LIB の状態を把握することが可能となる。また、ECU の記録情報がセル単位のものであれば、車載 LIB のセル単位の状態までも把握することが可能となる。

ただし、ECU の記録情報は国土交通省告示第 196 号の運用で点検整備やスキャンツール（汎用機）といった機器開発に必要な故障コード（DTC：Diagnostic Trouble Code）以外は自動車メーカーが独自に定義・設定したデータ構造やコードとなっており、これらのデータ構造やコードを利用するには事前の調査や自動車メーカーへの確認等が必要となるが、これらは一般公開されていないため容易に利用できないという課題がある。

(3) まとめと今後の課題

BMS は各自動車メーカーが独自に開発しているため共通して利用することができず、また、OBD を経由して取得できる ECU 内部の記録情報のデータ構造等も自動車メーカー独自のものである。

このことから、劣化診断技術の中で最も簡易で便利だと思われる BMS や OBD の利用を考えた際に、LIB の状態を把握するための情報を取得するためのスキャンツールは自動車メーカーから提供される専用機を用いる必要があり、また、汎用機の開発を考えた際には自動車メーカーや車載 LIB の違いによって数種類のソフトウェア開発やオプション等の搭載が必要になってくることが予想される。また、既存のスキャンツールに対応できていない車種が登場した場合には、スキャンツールがその車種に対応できるまでに時間を要することになる。

車載 LIB のリユースを円滑に行えるようにするためには、車載 LIB を取り扱う者が劣化診断を簡易かつ便利に行える必要がある。BMS や OBD は劣化診断を簡易かつ便利に行える候補ではあるが、それを実現させるためには ECU に記録される LIB 情報のデータ構造や格納アドレスが統一・規格化され、公開される必要がある。また、ECU の記録情報の改ざん防止に対応できるようブロックチェーンの仕組み等が適用され、デジタルを用いたトレーサビリティ確保によるリサイクル時の品質向上・維持も必要であると考えられる。

車載 LIB のリユースはライフサイクルにおける経済性を向上させるとともに、環境改善と資源循環の観点からも必要となるものの、その実現性は劣化診断技術の効率性に大きく依存するものと考えられる。上記のような課題認識のもと、今後も効率的な診断技術を模索する必要がある。

3. 2. 2 LIBユニットの放電

本実証事業におけるLIBのリサイクルでは、LIBの活物質化の工程を経る。この活物質は、LIBの熱分解、破碎・選別の工程を経て、篩目から落ちたものを採取することで取り出す。熱分解の工程では、LIBをモジュール単位で処理するため、LIBユニットからモジュールまでの解体が必要である。この解体を安全かつ効率的に実施し、また、熱分解での熱暴走を回避するにはLIBユニットの状態での適度な放電が必要となる。

(1) 昨年度までの成果と課題

昨年度はLEAF-LIBについて、管理電圧までの放電による安全かつ効率的な放電を実証した。LEAF-LIBでは、上蓋を取り外した後に一部のユニットを取り出す事前準備が必要であったが、放電作業をメインコネクタから一括での放電を行う手法により、より簡便で安全な放電方法を確立した。併せて、回生式放電装置を導入しLEAF-LIBでの放電電力の回生による商用電力量の削減効果の実証及び回生効率データを取得した。

図3.2.2-1にLEAF-LIBのユニット単位での放電実証を示す。

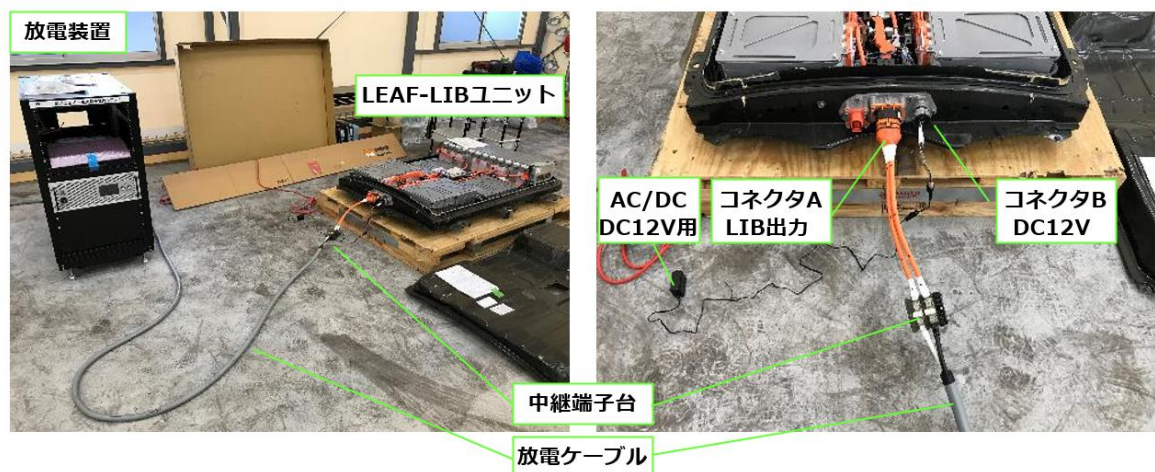


図3.2.2-1 LEAF-LIBのユニット単位での放電実証

1) 放電の定義

LEAF-LIBの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。このため、過放電によりセル形状に変化が生じることが確認されている。また、FIT3-LIBのセルは、角型セルであり外装は金属ケースとなっているが、LEAF-LIBのセルと同様、過放電によりセル形状に変化が生じる可能性がある。

セル形状に変化が生じた場合、セル内部でのガス発生が疑われる。この場合、放電や解体等の作業中の安全性確保に対しマイナスの影響が予測されることから、完全放電せずにセル形状が変化しない電圧までの放電を行う。

このセル形状が変化しない電圧を管理電圧とし、本項ではLIBユニットの初期開放電

圧から管理電圧まで降圧することを放電と定義する。図 3. 2. 2-2 に LEAF-LIB の構成およびユニット配置を示す。表 3. 2. 2-1～3 に LEAF-LIB (30kWh)、LEAF-LIB (40kWh)、及び FIT3-LIB の定格電圧をそれぞれ示す。

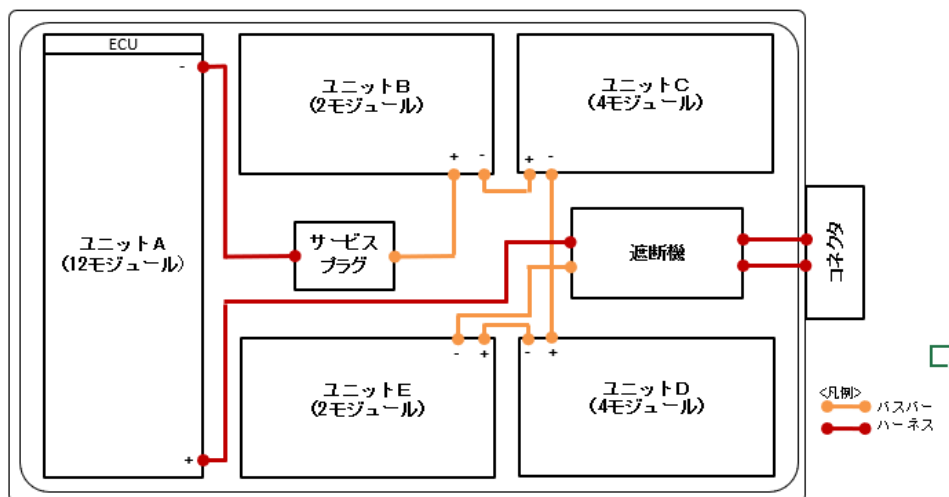


図 3. 2. 2-2 LEAF-LIB の構成およびユニット配置

表 3. 2. 2-1 LEAF-LIB (30kWh) の定格電圧

項目	ユニット電圧 (24モジュール)	ユニットA電圧 (12モジュール)	ユニットB～C ユニットD～E 電圧 (各6モジュール)	モジュール 電圧 (4セル)	セル電圧
	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
定格電圧	360	180	90	15	3.75

表 3. 2. 2-2 LEAF-LIB (40kWh) の定格電圧

項目	ユニット電圧 (24モジュール)	ユニットA電圧 (12モジュール)	ユニットB～C ユニットD～E 電圧 (各6モジュール)	モジュール 電圧 (4セル)	セル電圧
	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
定格電圧	350	175.2	87.6	14.6	3.65

表 3. 2. 2-3 FIT3-LIB の定格電圧

項目	ユニット電圧 (4モジュール)	モジュール電圧 (12セル)	セル電圧
	[V]	[V]	[V]
定格電圧	173	43.2	3.6

(2) 本年度の成果

1) 放電方法の検討

本実証事業では、図 3. 2. 2-3 に示す LEAF-LIB、FIT3-LIB を対象にしており、本年度は FIT3-LIB について放電方法の見直しを行い、より簡便で安全な放電方法を検討し実証した。

LEAF-LIB



車両型式	AZE0	ZE1
セル製造	AESC	
容量(kWh)	30	40
LIB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	350
バック 外寸 (mm)	幅	1188
	長さ	1547
	高さ	264
重量(kg)	293	308

FIT3-LIB



車両型式	GP5	
セル製造	Blue energy	Panasonic
容量(kWh)	0.864	0.941
LIB構成	4モジュール(48セル)	
定格電圧(V)	173	
バック 外寸 (mm)	幅	703
	長さ	545
	高さ	216.5
重量(kg)	38	

図 3. 2. 2-3 放電検討を行った LIB の種類

FIT3-LIB の放電に伴い、図 3. 2. 2-4 に示す上蓋取り外し、樹脂ケースからの LIB 本体取り出しを経て、上面へのサービスプラグの取付けと側面のジャンクションボードへの放電ケーブルの接続を行う必要があった。特に樹脂ケースから LIB 本体取り出しでは約 40kg ある LIB 本体を持ち上げる必要があり重筋作業となる。加えて、図 3. 2. 2-5 に示す側面ジャンクションボードへの放電ケーブルの接続は、プラス端子はプラスねじであり、マイナス端子は六角ボルトとねじの種類が異なるため工具を使い分ける必要がある。また、ケーブルと工具が干渉して作業性が悪いため作業への負担が大きく、ねじを損傷する可能性もあるという課題があった。

この課題への対策として、電気回路を調査し放電方法を見直すことで、樹脂カバーからLIBを取り外さず上面へ放電ケーブルを接続する方法を実証した。これにより、より簡便で安全な放電方法となり、上記の課題を解決した。

図 3. 2. 2-6 に FIT3-LIB の電気回路模式図を示す。図 3. 2. 2-7 に FIT3-LIB と放電装置の接続を示す。

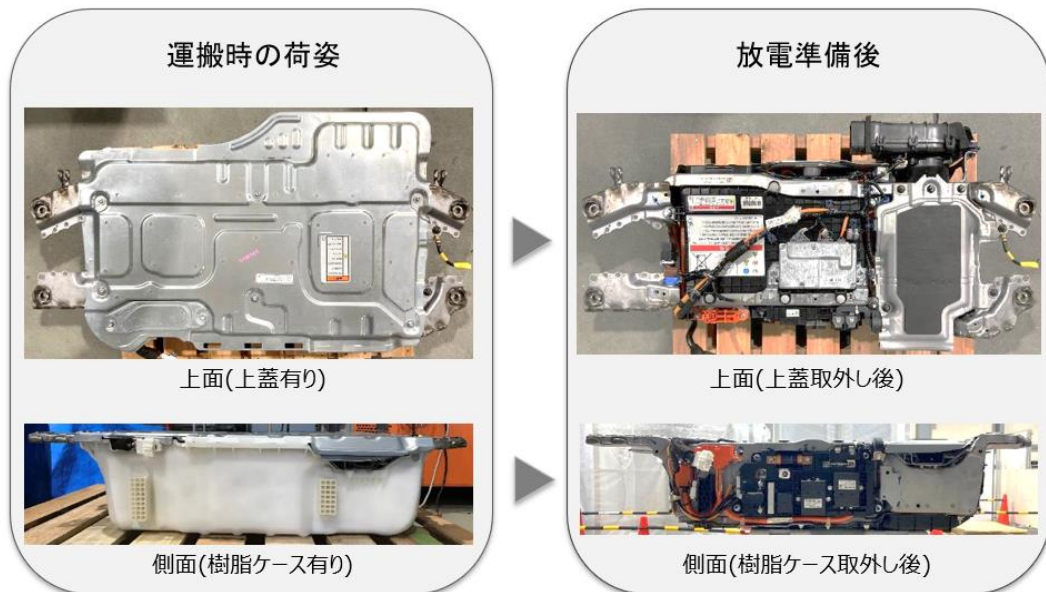


図 3. 2. 2-4 FIT3-LIB の放電課題(樹脂ケースの取り外し)

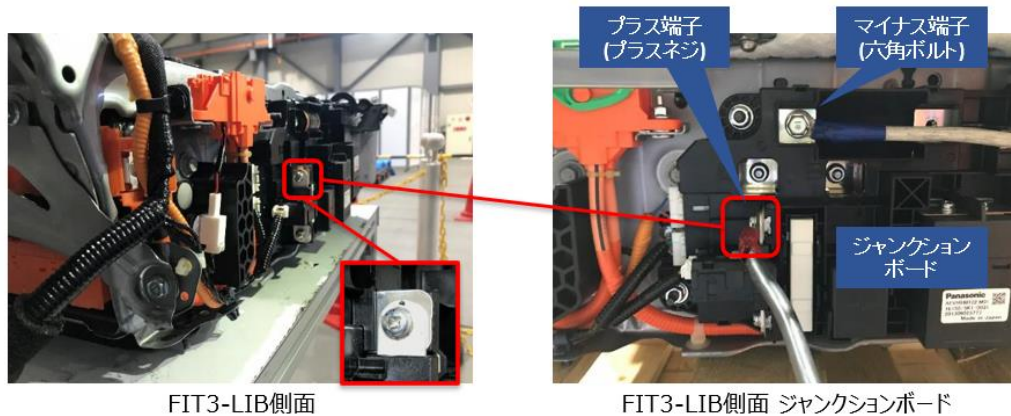


図 3. 2. 2-5 FIT3-LIB の放電課題(放電ケーブル接続性)

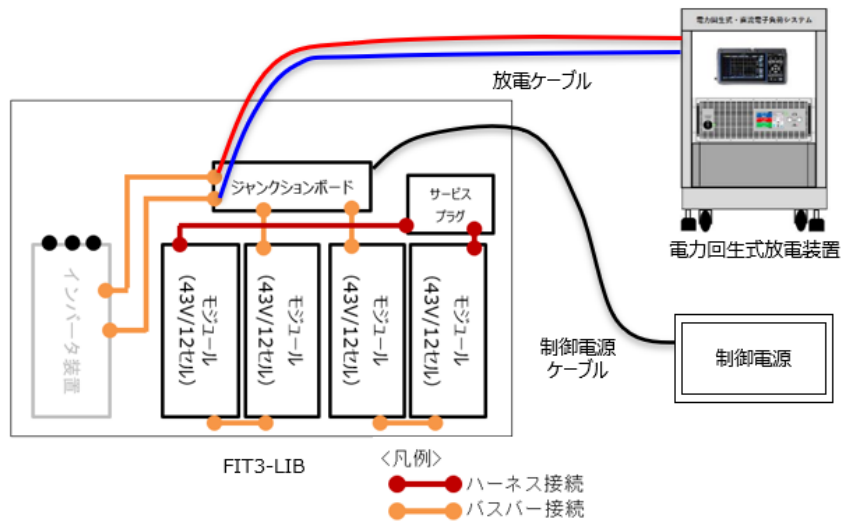


図 3. 2. 2-6 FIT3-LIB 電気回路模式図

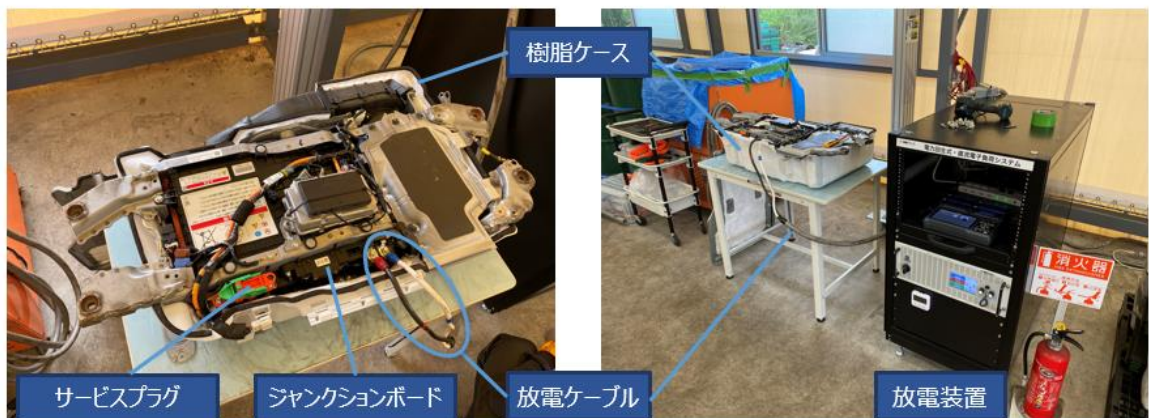


図 3. 2. 2-7 FIT3-LIB と放電装置の接続

2) 電力回生式放電装置による放電実証

FIT3-LIB ユニットの用いて電力回生式放電装置による商用電力量の削減効果の実証を行った。

(a) 回生式放電装置による商用電力量の削減の実証

回生式放電装置を FIT3-LIB に接続し、LIB からの直流電流を回生式放電装置により三相 200V の交流電流へ変換し、商用電源系統へ送電し、電力回生することで商用電力量を削減できることを確認した。

図 3. 2. 2-8 に電力系統図を示す。

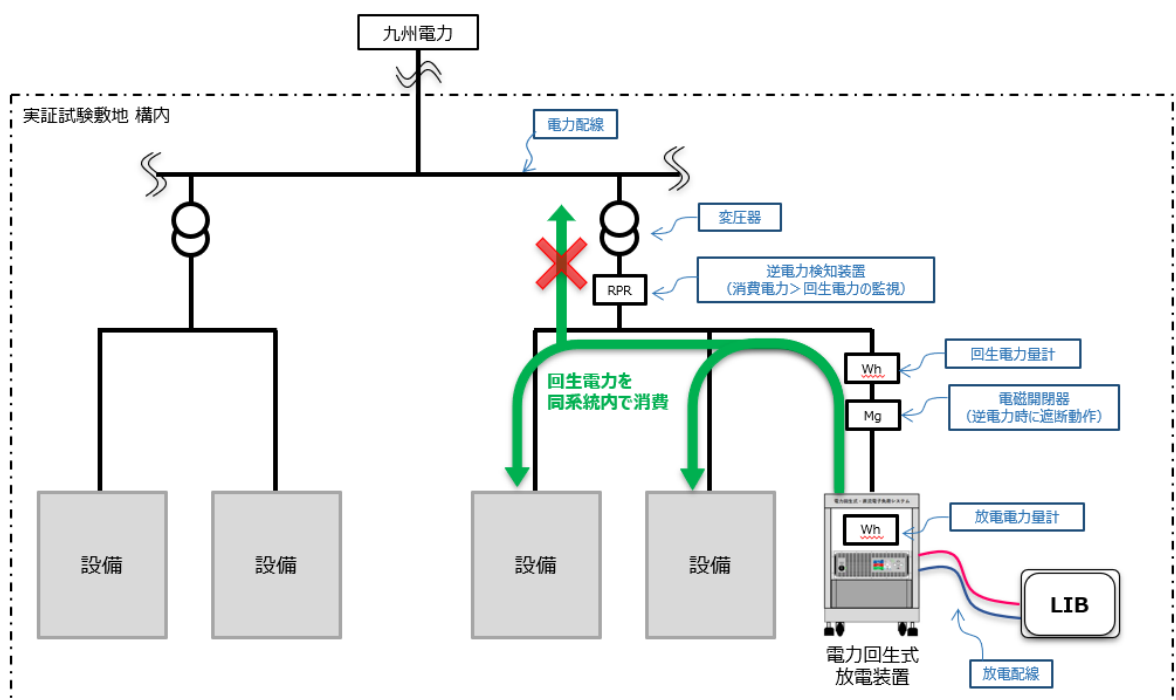


図 3. 2. 2-8 電力系統図

(b) 放電電力量及び回生効率、放電時間

表 3.2.2-4 に昨年度実証した LEAF-LIB の放電時間、放電電力量、回生効率を示す。
表 3.2.2-5 に FIT3-LIB の放電時間、放電電力量、回生効率を示す。

LEAF-LIB、FIT3-LIB 共に車両から取出した状態から管理電圧までの放電を行った値である。放電時間は残容量の影響が大きく、回生効率はいずれも約 90%前後であった。

表 3.2.2-4 LEAF-LIB 放電データ

No.	放電電力設定 (kW)	放電時間 (min)	①放電電力量 (kWh)	②回生電力量 (kWh)	回生効率 ②÷①×100
1	8	123	16.62	14.5	87.2%
2	8	77	10.47	9.5	90.7%
3	8	88	12.03	11.0	91.4%
4	8	47	6.57	6.0	91.3%
平均	-	84	11.42	10.25	90.2%

表 3.2.2-5 FIT3-LIB 放電データ

No.	放電電力設定 (kW)	放電時間 (mm:ss)	①放電電力量 (kWh)	②回生電力量 (kWh)	回生効率 ②÷①×100
1	8	05:15	0.34	0.3	87.8%
2	8	04:38	0.24	0.2	84.2%
3	8	04:09	0.22	0.2	91.8%
4	8	04:59	0.30	0.3	98.4%
5	8	04:33	0.24	0.2	83.1%
6	8	04:14	0.22	0.2	91.0%
平均	-	04:51	0.27	0.2	89.4%

(3) まとめと今後の課題

本実証において、LIBユニットを解体せず安全で簡便な放電手法の確立と回生電力式放電装置を用いた放電を実証した。LIBユニットの放電に関する課題については以下に示す。

1) 放電時間の短縮

表 3.2.2-4 に示した通り、LEAF-LIB では平均で約 84 分程度の放電時間を要している。LIB ユニットの定格仕様(電流、電力)内であれば放電電力を大きく設定することで放電時間を短縮することが出来る。このため、放電装置を大容量化することで時間短縮することが可能である。一方で放電電力を大きくすることで、LIB ユニット内外の導体(バスバー、ハーネス等)の発熱量が増加する。このため異常発熱などを考慮して BMS による温度監視や外部からの温度監視を行い、安全に放電する方法が課題となる。

2) 回生エネルギー高効率回収・有効利用

図 3.2.2-6 の電力回生機放電装置の電力系統図に示したように放電装置からの回生エネルギーは商用電力系統へ逆潮流しないように逆電力検知装置などによって制御される。これは、電力会社との契約内容に従うものである。放電装置からの回生エネルギーを制限されることなく、高効率に有効利用するためリユース電池などを活用した蓄電システムとの連携することが考えられる。

3. 2. 3 LIBユニット解体自動化

本実証事業におけるLIBのリサイクルでは、LIBユニットを後工程の熱分解、破碎・選別の工程に適したLIBモジュール状態までへの解体作業を行う必要がある。現状のLIBユニットは易解体性が考慮された構造にはなっていないため、この解体作業では人手を介することとなり、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。省力化及び感電リスクの低減を目的として、産業用ロボットを活用したLIBユニット解体自動化設備を含むLIBユニット解体ラインの検討を行った。

(1) 昨年度までの成果と課題

昨年度は、LIBユニットの解体調査・解体手順の検討を経てねじ取外し自動化対象範囲の検討を行い、LIBユニット解体ラインの設計と製作を進めた。

LEAF-LIB解体の様子を図3.2.3-1に、FIT3-LIB解体の様子を図3.2.3-2にそれぞれ示す。また、LEAF-LIBのねじ取外し自動化対象範囲を図3.2.3-3に、FIT3-LIBのねじ取外し自動化対象範囲を図3.2.3-4にそれぞれ示す。

赤で囲っている部分が解体自動化対象のねじ、青で囲っている部分が解体自動化対象外のねじを示している。解体自動化対象外となった原因としては、周辺の狭さや部品が干渉してしまいナットランナーがアクセスできないこと、手作業とロボットの交互作業により非効率になってしまうことが挙げられる。

LEAF-LIB 解体の様子

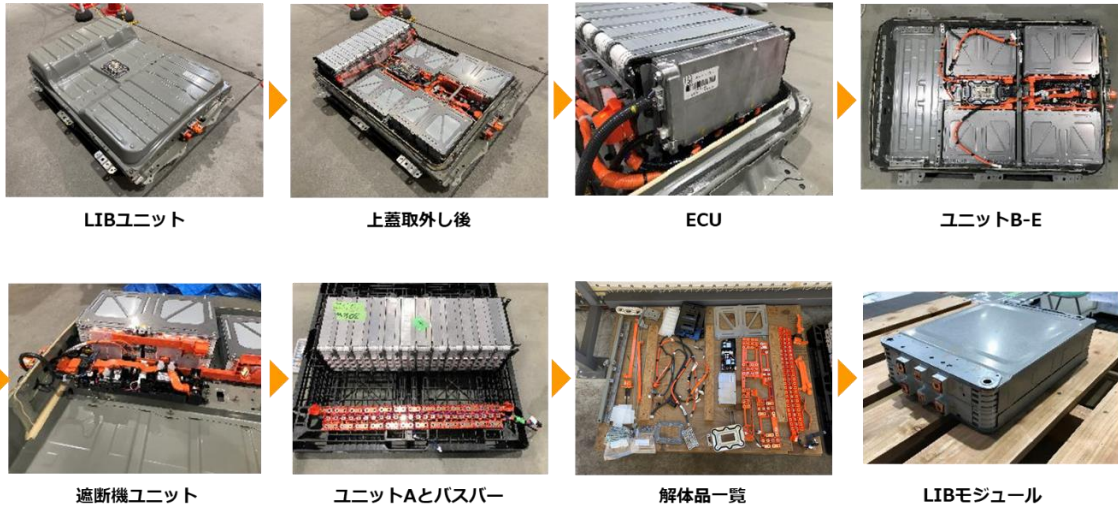


図 3. 2. 3-1 LEAF-LIB 解体の様子

FIT3-LIB 解体の様子

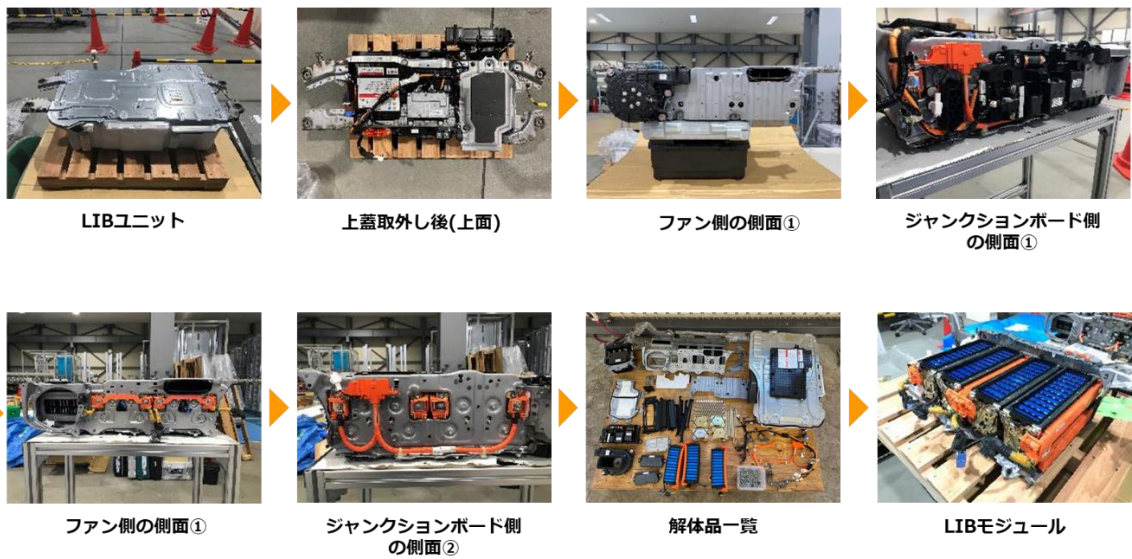
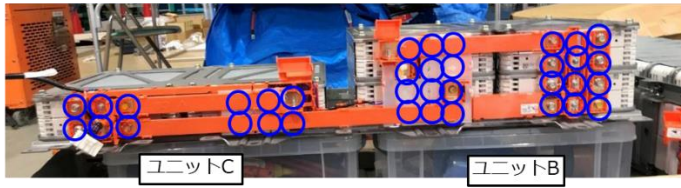
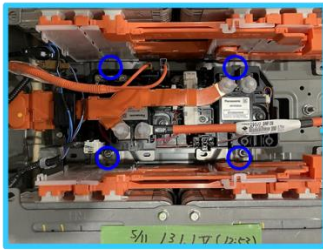


図 3. 2. 3-2 FIT3-LIB 解体の様子

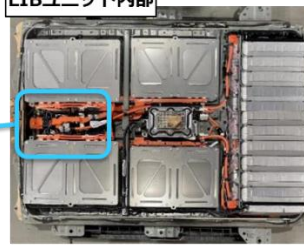
LEAF-LIB 解体自動化対象外のねじ



バスバーが立体交差しており
手作業とロボットの交互作業が
発生し非効率となる



LIBユニット内部



周辺が狭くツールがアクセスできない



組立状態ではアクセスできない

LEAF-LIB 解体自動化対象のねじ

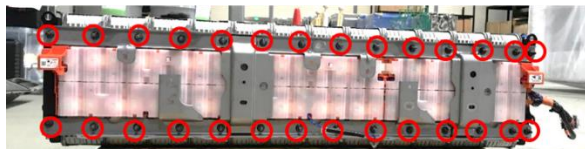
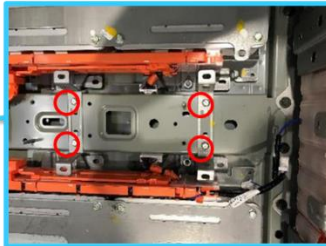
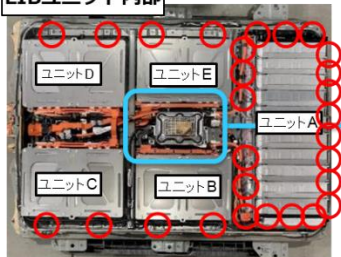
LIBユニット外観



サービスコネクタ接続部



LIBユニット内部



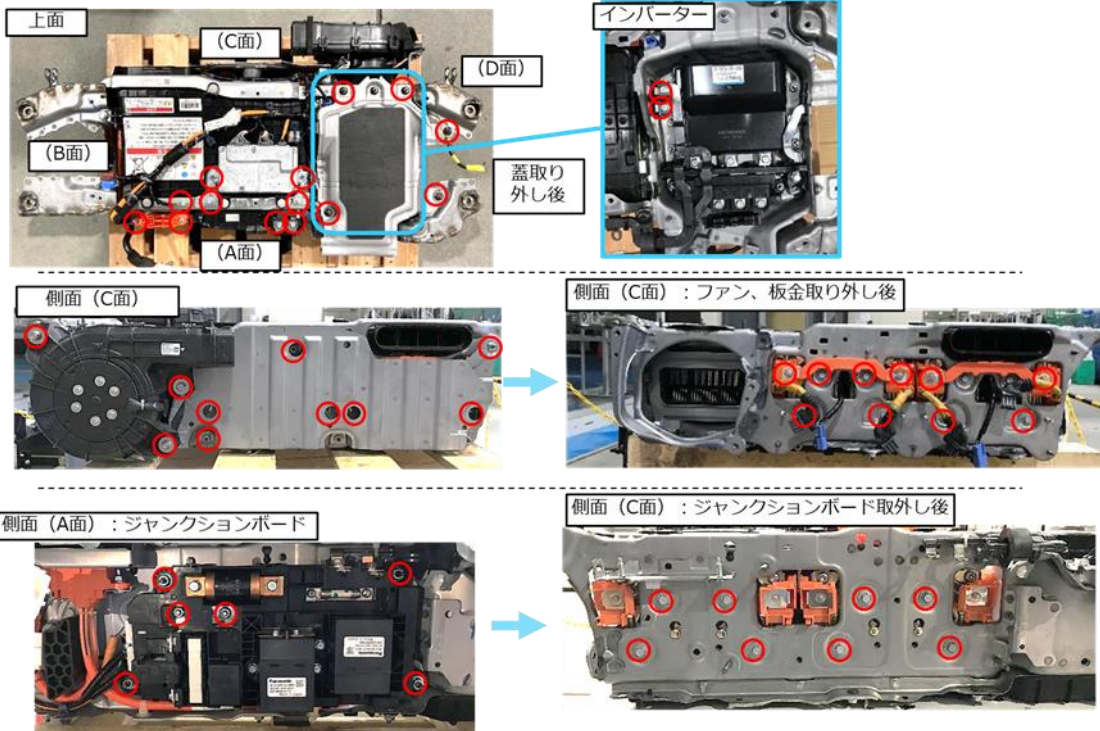
ユニットA ブラケット



ユニットA 端子部

図 3. 2. 3-3 LEAF-LIB のねじ取外し自動化対象範囲

FIT3-LIB 解体自動化対象のボルト・ナット



FIT3-LIB 解体自動化対象外のボルト・ナット

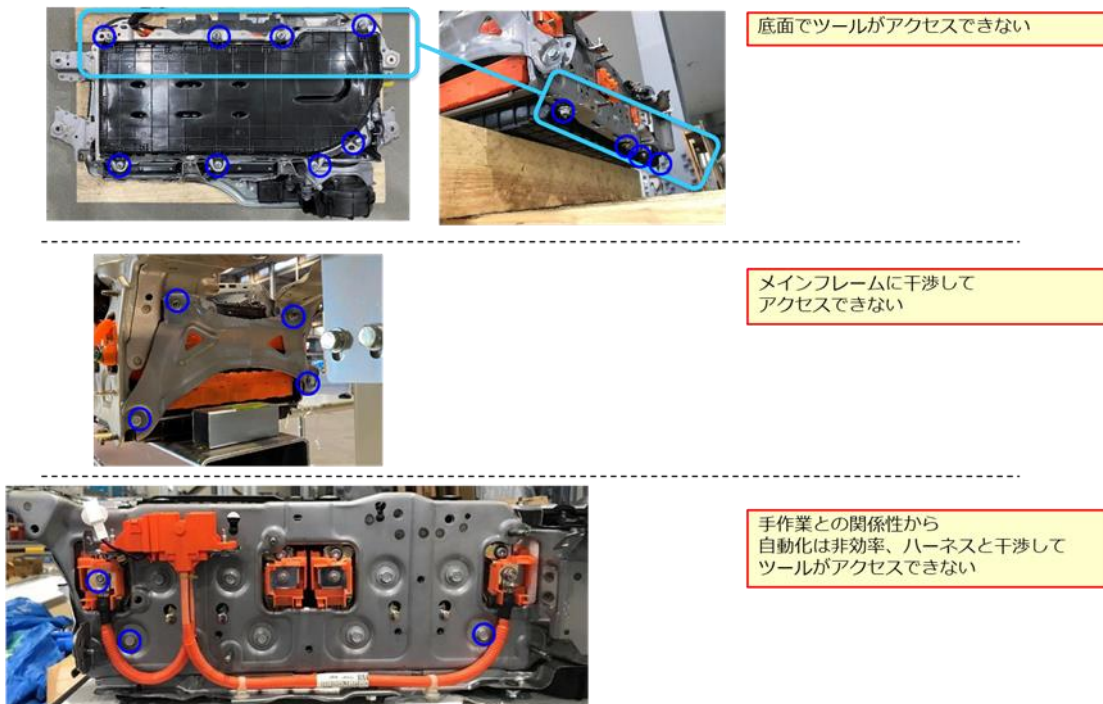


図 3. 2. 3-4 FIT3-LIB のねじ取外し自動化対象範囲

(2) 本年度の成果

本年度は、解体ラインでのロボット活用における目標設定と根拠を明確にし、LIB ユニット解体ラインを立ち上げ、同一ラインでの FIT3-LIB 及び LEAF-LIB の解体自動化を実証 (FIT3-LIB 及び LEAF-LIB、それぞれ 2 ユニット以上を使用) した。

1) 解体ラインでのロボット活用における目標設定と根拠

本実証事業では、LIB ユニットの後工程の熱分解、破碎・選別の工程に適した LIB モジュール状態までへの解体作業を行う必要がある。しかしながら、現状の LIB ユニットは易解体性が考慮された構造にはなっていないため、この解体作業は人手を介する作業となる。人手を介する作業については、現状の少子高齢化による労働人口の減少に起因する人手不足が、廃車発生量が増加した際には大きな課題になる。また、航続距離の拡大を目的として LIB ユニットは大型化される傾向にあるため、手作業時の作業負荷増大が課題となる。さらに、完全放電できない場合の残留電力による感電のリスクが懸念される。今回、これらの課題や懸念に対し、省力化の向上と安全性の確保を可能とする LIB ユニット解体自動化設備を含む LIB ユニット解体ラインの構築を目標とした。

解体自動化については、解体の一部工程にロボットを活用した自動化による安全かつ効率的な解体手法の実証工数(人時/ユニット)の予測を行った。従来の LIB ユニット解体ライン(劣化診断、放電、解体)では、特に LIB ユニットの解体作業が手作業であったということもあり、LEAF は 4 名、FIT3 は 3 名で作業を行っていたが、自動化により 1 名減の LEAF は 3 名、FIT3 は 2 名での作業を目標とした。

処理能力については、図 2.3-1 で示した 2025 年の北九州地区における FIT3 及び LEAF の廃 LIB 発生量に基づき、本事業における一日当たり(操業時間 8 時間)の放電及び LIB ユニット解体の処理量を FIT3 が 4.3 個/日、LEAF が 0.8 個/日とし、これらの値を切り上げた FIT3 が 5 台/日、LEAF が 1 台/日を一日当たりの目標処理能力とした。

2) LIB ユニット解体ラインの立ち上げ及び実証

昨年度の各 LIB ユニットの解体検討を基に、以下の点を考慮して設備開発を行った。
本年度はこの LIB ユニット解体ラインを用いて様々な実証検討を行った。

- ・劣化診断・放電済みの FIT3 及び LEAF の LIB ユニットの解体では、同一の解体ラインで解体作業が可能であること
- ・重量物である LIB ユニットの運搬では、安全性の確保及び作業負荷の軽減を目的とした揚重装置が使用可能であること
- ・手解体における作業性では、コンベアの高さ・幅を適切に設定し、必要に応じて回転機能を設けることで作業姿勢に無理を生じさせず、作業負担を軽減することが可能であること
- ・作業者のロボットからの安全性確保では、作業者とロボット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、作業者が入る必要がなく安全に作業が可能であること
- ・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、人がねじ部品位置を指示する必要なく産業用ロボットによる自動解体作業が可能であること
- ・自動解体ラインでは、廃 LIB 発生量及び劣化診断によるリサイクル判断により FIT3-LIB が 4.3 個/日、LEAF-LIB が 0.8 個/日の解体処理が可能であること

(a) LIB ユニット解体ライン

同一ライン上で FIT3-LIB、LEAF-LIB の解体作業を行い、手解体とロボットによるねじ取り外しの自動解体を交互に作業を行うことを考慮して、LIB ユニット解体ラインを立ち上げた。

LIB ユニット解体ラインを図 3.2.3-5 に示すとともにユニット解体ライン周辺レイアウトを図 3.2.3-6 に示す。

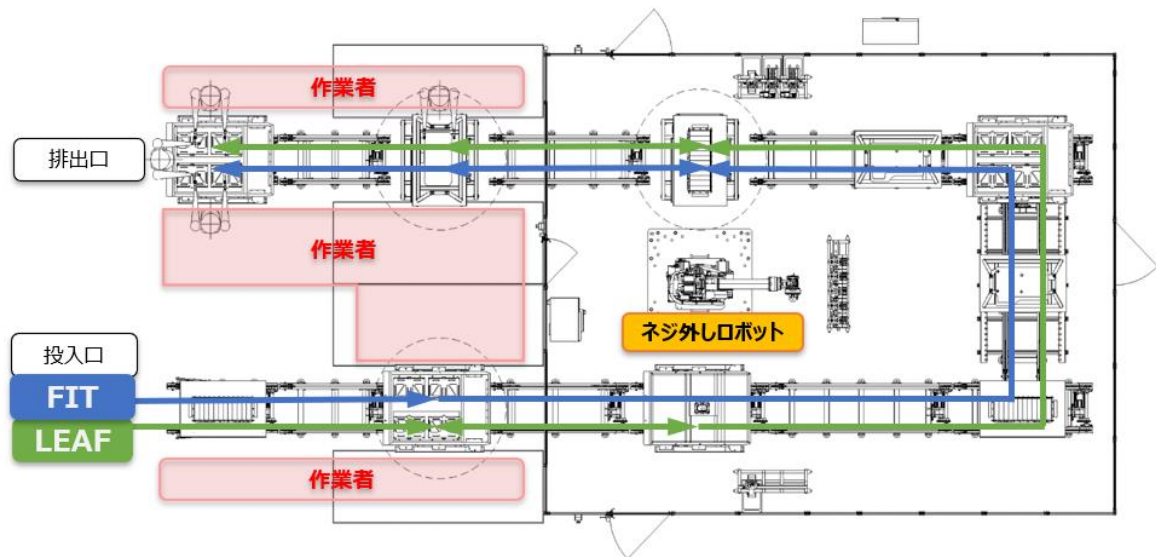


図 3.2.3-5 LIBユニット解体ライン

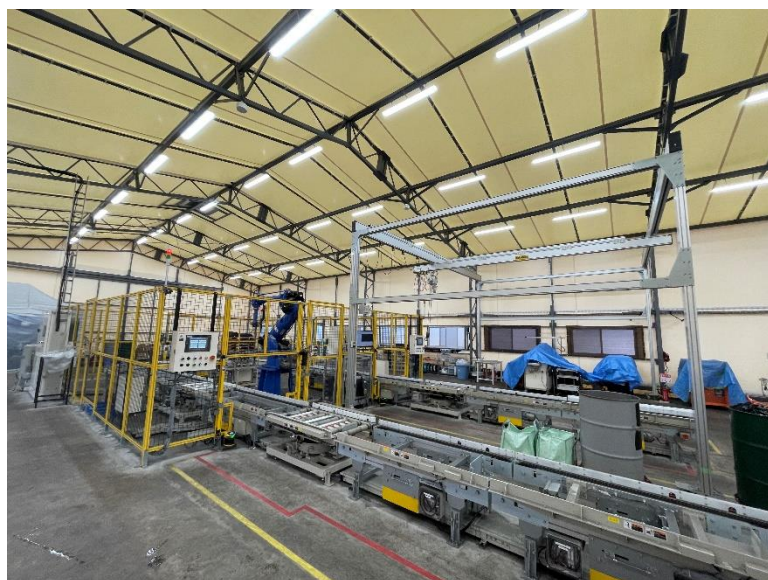


図 3.2.3-6 LIBユニット解体ライン全景

(b) 揚重装置

LIBユニット解体ラインに投入前に劣化診断及び放電作業を行うことを考慮して、LIBユニット解体ライン周辺に劣化診断装置及び放電装置を配置した。放電装置周辺からライン投入時には揚重装置を使用することで安全性の確保及び作業負担を軽減する。揚重装置は、LIBユニット解体ライン上の治具パレットにLIBユニットを設置する際に微調整が必要なことから操作性などを考慮して設置した。

図 3.2.3-7 に揚重装置を示す。



やぐら式クレーン



電動チェーンブロック



図 3.2.3-7 揚重装置

(c) 治具パレット

LIBユニット解体ラインへ各LIBユニットを投入する際は、パレット治具を使用する。各治具パレットは共通パレットの上に各LIBユニット専用の治具を載せることで様々な形状に合わせて対応することが可能である。

治具パレットを図3.2.3-8に示す。

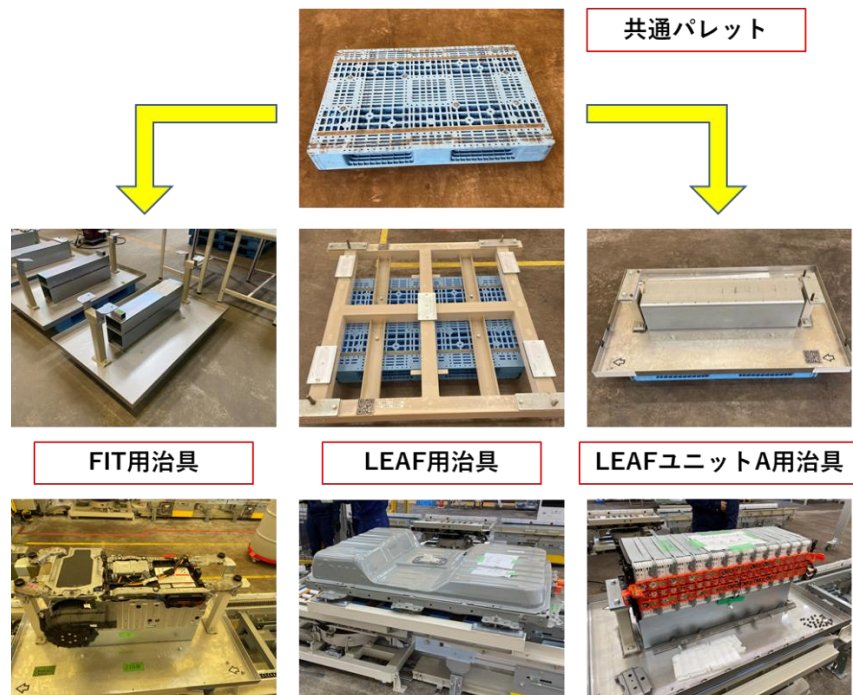


図3.2.3-8 治具パレット

(d) 作業姿勢

手解体エリアにおいて上面や側面からの作業が必要となる、作業者に負担の少ない作業姿勢となるようにパレット治具の高さを検討した。

LEAF-LIB 作業姿勢を図 3.2.3-9 に、FIT3-LIB 作業姿勢を図 3.2.3-10 にそれぞれ示す。



図 3.2.3-9 LEAF-LIB 作業姿勢



図 3.2.3-10 FIT3-LIB 作業姿勢

(e) 自動ねじ取り外し機構

LIB ユニット解体ラインの自動ねじ取り外し機構には以下の構成要素がある。

➤ 産業用ロボット

ねじ取り前、ロボットビジョン、ナットランナー、ソケットをねじ位置に移動させる。また、ねじ取り外し後にロボットビジョン、ナットランナー、ソケットをねじ回収装置まで移動させる。リーチ長や自由度から 6 軸垂直多関節ロボットを採用した。産業用ロボットを図 3.2.3-11 に示す。

➤ ロボットビジョンシステム

LIB ユニットの位置検出を行い、事前にティーチングした位置とのずれ量を補正する。ロボットビジョンシステムを図 3.2.3-12 に示す。

➤ ナットランナー・ソケット

ロボットハンド部に搭載し、ナットランナーの回転動作によりねじ緩め動作を行う。ソケット部を交換することで複数のねじ類に対応する。ソケット先端には永久磁石により外したねじが保持される。ナットランナー・ソケットを図 3.2.3-13 に示す。

➤ ねじ回収装置

外したねじをソケット先端より回収するため把持機構を持つ。ねじ回収装置を図 3.2.3-14 に示す。



名称	MOTOMAN-GP180-120		許容 モーメント	R軸(手首旋回)	883 N・m
形式	YR-1-05VX180-120-A00			B軸(手首振り)	883 N・m
構造	垂直多関節型 (6自由度)			T軸(手首回転)	520 N・m
可搬質量	手首部	120 kg	許容慣性 モーメント (GD ² /4)	R軸(手首旋回)	79 kg・m ²
	Uアーム上	30 kg		B軸(手首振り)	79 kg・m ²
最大リーチ	3058 mm				T軸(手首回転)
位置繰返し精度*1	0.05 mm		本体質量	1090 kg	
動作範囲	S軸(旋回)	-180° ~ +180°	保護等級	本体：IP54 手首部：IP67	
	L軸(下腕)	-60° ~ +76°	設置環境	温度	0℃ ~ +45℃
	U軸(上腕)*2	-86° ~ +90°		湿度	20% ~ 80%RH (結露のないこと)
	R軸(手首旋回)	-360° ~ +360°		振動加速度	4.9 m/s ² (0.5 G) 以下
	B軸(手首振り)	-130° ~ +130°		標高	1000 m以下
	T軸(手首回転)	-360° ~ +360°	電源容量*3	5.0 kVA	
最大速度	S軸(旋回)	2.16 rad/s、125°/s	設置方式	床置き	
	L軸(下腕)	2.01 rad/s、115°/s	オプション仕様*4	防滴仕様 (本体：IP65 手首部：IP67)	
	U軸(上腕)	2.18 rad/s、125°/s			
	R軸(手首旋回)	3.18 rad/s、182°/s			
	B軸(手首振り)	3.05 rad/s、175°/s			
	T軸(手首回転)	4.63 rad/s、265°/s			

図 3.2.3-11 産業用ロボット

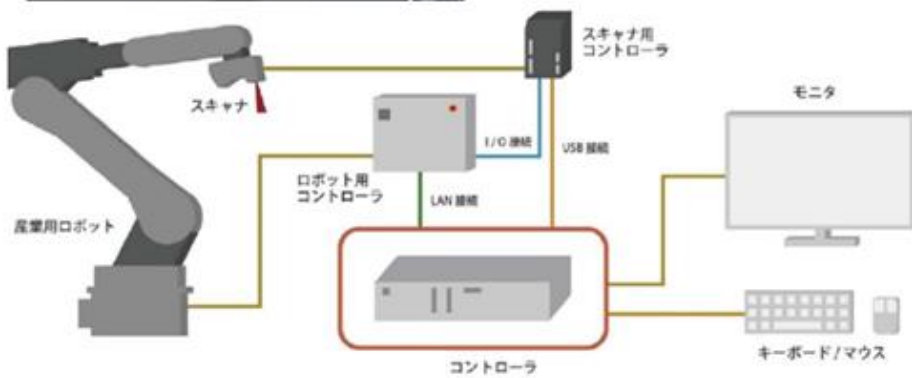
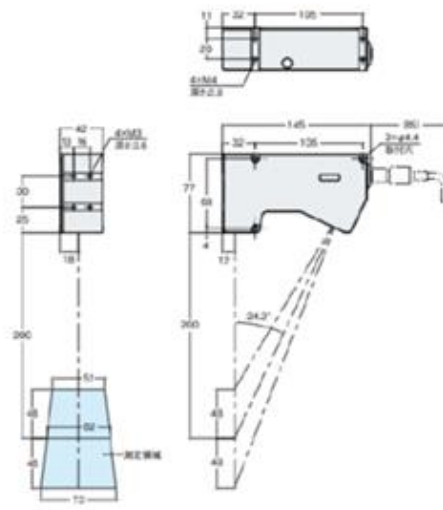
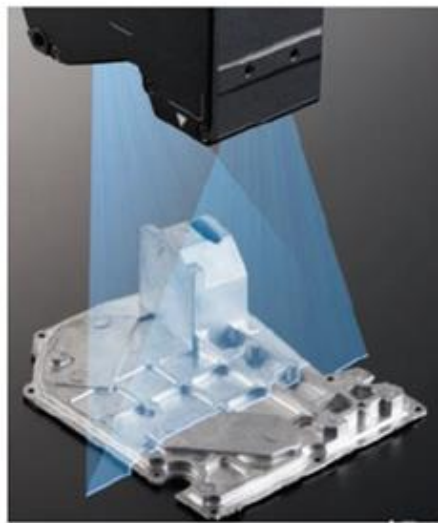


図 3.2.3-12 ロボットビジョンシステム

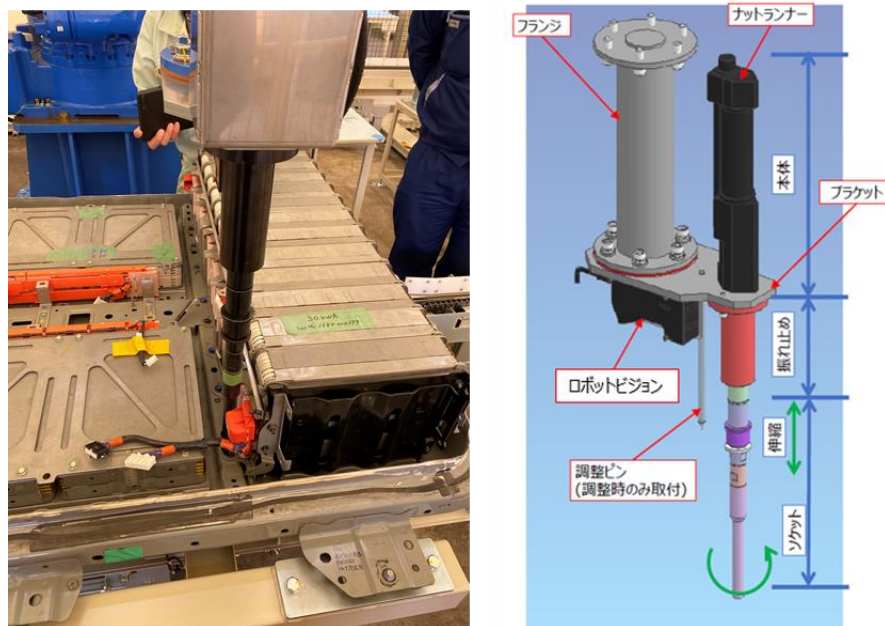


図 3.2.3-13 ナットランナーとソケット

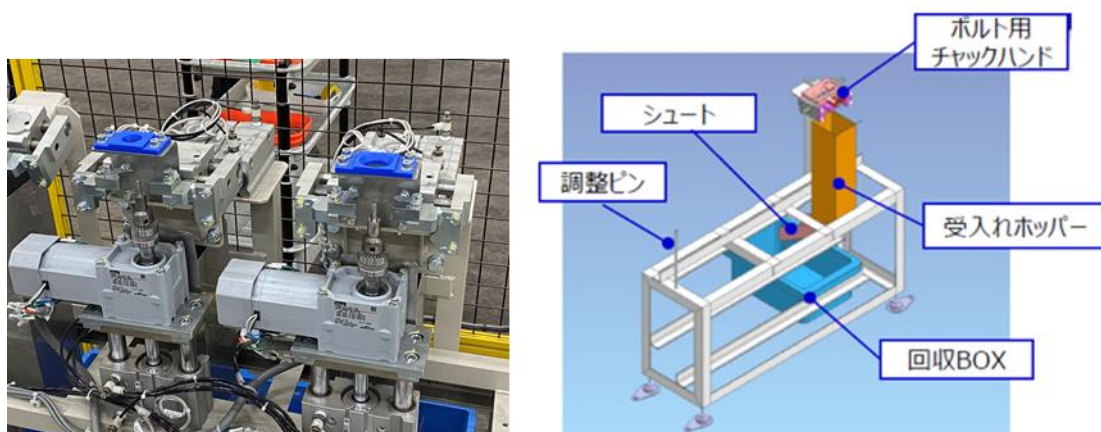


図 3.2.3-14 ねじ回収装置

3) 解体ラインの処理能力

前述の(2) LIB ユニット解体ラインの立ち上げ及び実証)に示した LIB ユニット解体ラインを用いて、FIT3-LIB 5 個及び LEAF-LIB 1 個の解体作業を行い、処理能力の検証を行った。表 3.2.3-1 に解体時間を示す。合計解体時間は約 5 時間 45 分であり、一日の作業時間を 8 時間と仮定した場合の目標処理能力を達成した。

(表 3.2.3-1 の続き) LIB ユニット解体時間

FIT3-LIB 5 個解体時間	3 時間 58 分 45 秒
LEAF-LIB 1 個解体時間	1 時間 45 分 49 秒
合計解体時間	5 時間 45 分 33 秒

FIT3-LIB 1 個当たりの解体時間	47 分 45 秒
----------------------	-----------

4) 解体ラインの作業人員

LIB ユニットの手解体には、LEAF は 4 名、FIT3 は 3 名の作業人員を要していたが、今回、省力化効果の高いねじの取外し作業を自動化することで作業人員の削減が見込めると考え、解体フローの検討を行った。

図 3.2.3-15 に FIT3-LIB の手解体作業の様子を、図 3.2.3-16 に LEAF-LIB の手解体作業の様子を、図 3.2.3-17 に FIT3-LIB の解体フローを、図 3.2.3-18 に LEAF-LIB の解体フローをそれぞれ示す。

ライン図における赤色部分及び緑色部分が作業者の手解体スペースである。FIT3-LIB の解体は、ロボットによる自動解体 1,2、手解体 1,2 のフローで、LEAF-LIB の解体は、ロボットによる自動解体 1-4、手解体 1-5 で構成されており、それぞれライン図の対応した部分で解体を行う。この解体自動化により、作業人員を LEAF は解体作業員 2 名、補助者 1 名の計 3 名、FIT3 は解体作業員 1 名、補助者 1 名の計 2 名への省力化を達成することができた。



図 3.2.3-15 FIT3-LIB 手解体様子



図 3.2.3-16 LEAF-LIB 手解体

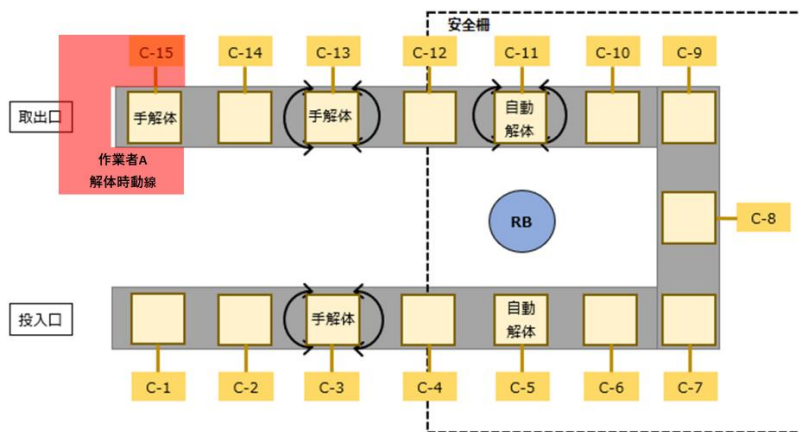
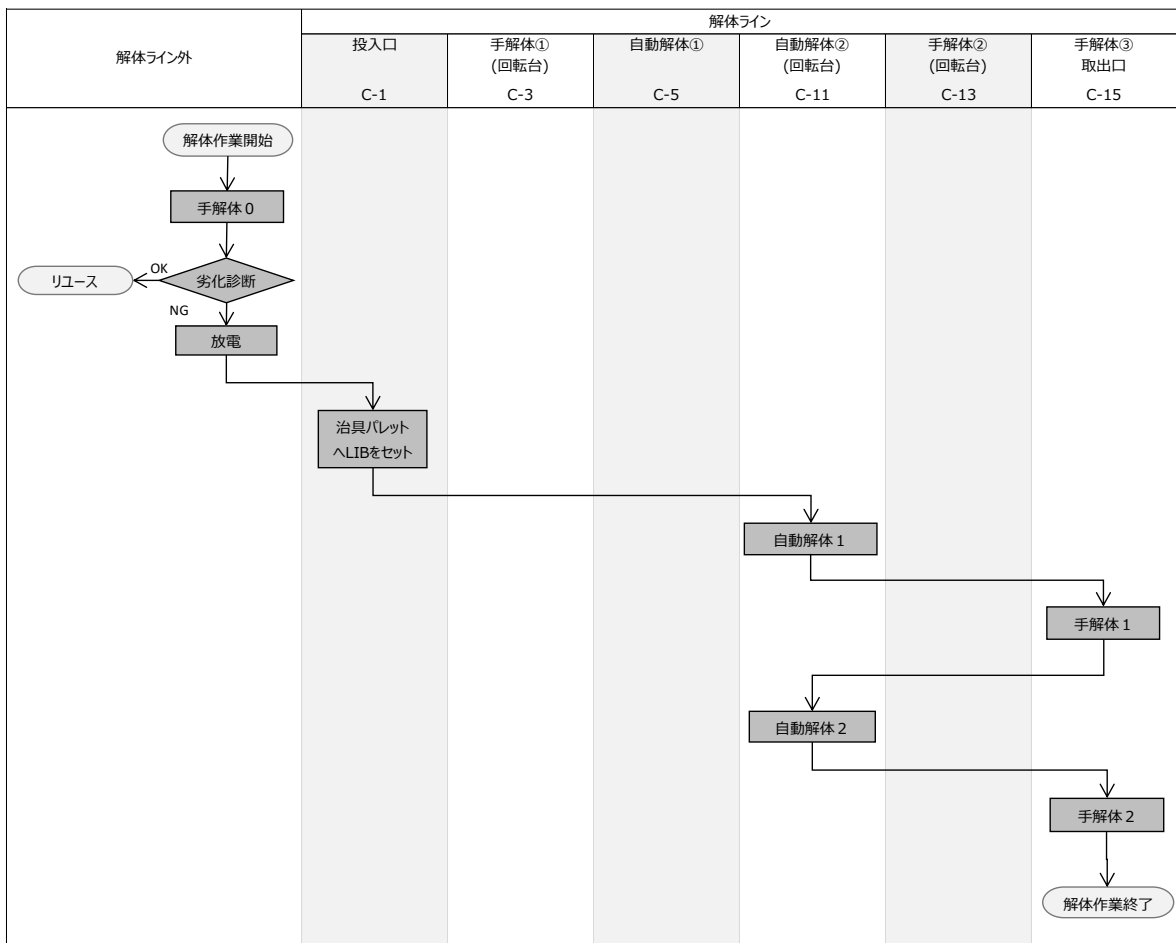


図 3. 2. 3-17 FIT3-LIB の解体フロー

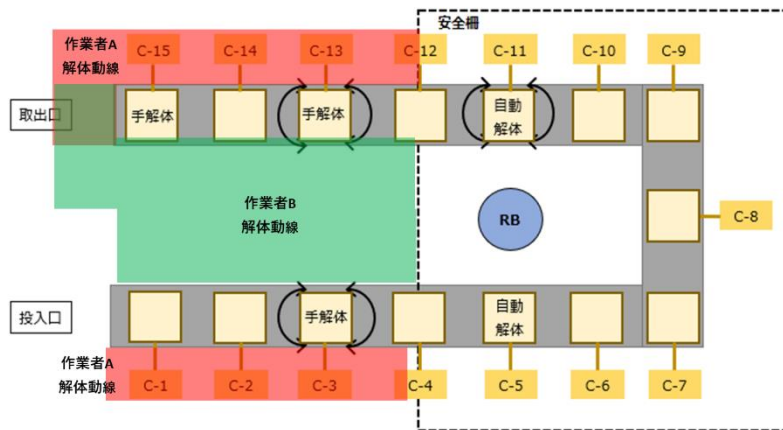
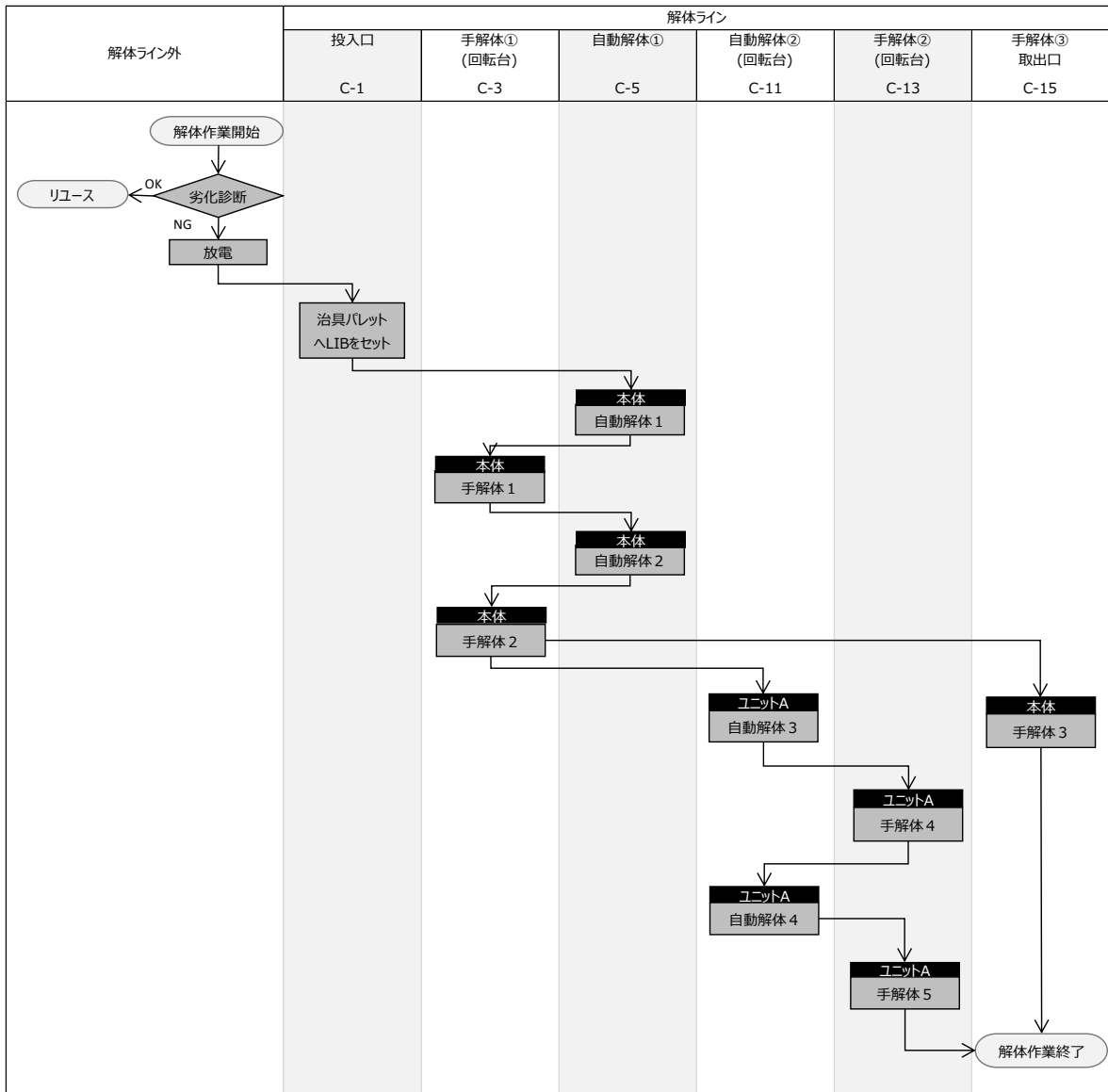


図 3. 2. 3-18 LEAF-LIB の解体フロー

5) ねじ取外し自動化率及び成功率

LIB ユニット解体ラインでは、ロボットによるねじ取り外しを行う自動解体と作業者が手解体を行うエリアは異なるため、各工程間に LIB ユニートをコンベア上で搬送する必要がある。このため、自動解体と手解体の工程間搬送がより少なく、より多くのねじ本数をまとめて自動解体することで作業効率を向上させる。しかし、ナットランナーの位置ずれなどによってねじ取外しが成功しないこともある。その際に、3回のリトライ機能がプログラミングされており、再びねじ取外しを行っている。

表 3.2.3-2 に Blue Energy 製及び Panasonic 製 FIT3-LIB の自動化率を、表 3.2.3-3 に LEAF-LIB(30kWh 及び 40kWh)の自動化率を、表 3.2.3-4 に Blue Energy 製 FIT3-LIB の成功率を表 3.2.3-5 に LEAF-LIB(30kWh)の成功率をそれぞれ示す。

表 3.2.3-2 Blue Energy 製及び Panasonic 製 FIT3-LIB の自動化率

	BE製 FIT3 - LIB				
	T-30 トルクスネジ	M6ボルト (S=10)	M6ナット (S=10)	M8ナット (S=12)	合計
人	6	4	12	0	22
ロボット	0	31	37	0	68
合計	6	35	49	0	90
自動化率	0.0%	88.6%	75.5%	-	75.6%

	Panasonic製 FIT3 - LIB				
	T-30 トルクスネジ	M6ボルト (S=10)	M6ナット (S=10)	M8ナット (S=12)	合計
人	6	4	8	0	18
ロボット	0	17	33	16	66
合計	6	21	41	16	84
自動化率	0.0%	81.0%	80.5%	100.0%	78.6%

表 3. 2. 3-3 LEAF-LIB(30kWh 及び 40kWh) の自動化率

	LEAF - LIB (30kWh)						
	+(#2) ネジ	M6ボルト (S=10)	M6ナット (S=10)	M8ボルト (S=13)	M8ナット (S=13)	M10ナット (S=17)	合計
人	24	106	37	0	0	2	169
ロボット	24	92	32	6	12	0	166
合計	48	198	69	6	12	2	335
自動化率	50.0%	46.5%	46.4%	100.0%	100.0%	0.0%	49.6%

	LEAF - LIB (40kWh)						
	+(#2) ネジ	M6ボルト (S=10)	M6ナット (S=10)	M8ボルト (S=13)	M8ナット (S=13)	M10ナット (S=17)	合計
人	24	108	37	0	0	2	171
ロボット	24	92	32	6	12	0	166
合計	48	200	69	6	12	2	337
自動化率	50.0%	46.0%	46.4%	100.0%	100.0%	0.0%	49.3%

表 3.2.3-4 Blue Energy 製 FIT3-LIB の自動解体成功率

FIT-BE				対象本数	成功率											
					N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	平均	
自動解体1	上面	M6ナット	回収	9	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	88.9%	77.8%	77.8%	94.4%	
		M6ボルト	回収	3	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
	C面	M6ナット	回収	8	100.0%	100.0%	87.5%	100.0%	37.5%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	87.5%	91.3%
		M6ナット	緩め	1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	A面	M6ボルト	緩め	3	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
		M6ナット	回収	6	83.3%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	66.7%	100.0%	83.3%	100.0%	100.0%	93.3%	
自動解体2	上面	M6ナット	回収	1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
		M6ボルト	回収	4	100.0%	100.0%	100.0%	75.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	97.5%	
	A面	M6ボルト	回収	8	100.0%	100.0%	100.0%	75.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	97.5%	
		M6ナット	回収	4	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
	C面	M6ボルト	回収	8	87.5%	100.0%	87.5%	100.0%	100.0%	87.5%	87.5%	87.5%	100.0%	87.5%	92.5%	
		M6ナット	回収	2	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
	D面	M6ボルト	回収	2	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
		M6ナット	回収	2	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
成功率				59	96.6%	100.0%	96.5%	94.9%	91.5%	94.9%	98.3%	94.9%	96.6%	93.2%	95.7%	

表 3.2.3-5 LEAF-LIB(30kWh) の自動解体成功率

LEAF					対象本数	成功率							
						N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	平均
自動解体1	本体	カバー	M6ボルト	回収	10	90.0%	100.0%	90.0%	80.0%	100.0%	100.0%	60.0%	88.6%
		コネクタ	M6ボルト	回収	10	90.0%	100.0%	90.0%	90.0%	100.0%	100.0%	100.0%	95.7%
自動解体2	本体	ユニットBE外側	M8ナット	回収	8	87.5%	100.0%	87.5%	87.5%	100.0%	100.0%	100.0%	94.6%
		ユニットBE内側	M8ナット	回収	2	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
		ユニットBE内側	M6ボルト	回収	4	100.0%	100.0%	100.0%	75.0%	100.0%	100.0%	75.0%	92.9%
		ユニットA	M8ボルト	回収	6	83.3%	100.0%	83.3%	100.0%	100.0%	83.3%	83.3%	90.5%
		ユニットA外側	M6ボルト	回収	8	100.0%	100.0%	100.0%	75.0%	100.0%	100.0%	100.0%	96.4%
		ユニットA内側	M6ボルト	回収	6	50.0%	66.7%	50.0%	66.7%	83.3%	100.0%	83.3%	71.4%
自動解体3	ユニットA	端子側ブラケット	M6ナット	回収	26	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
		端子側ブラケット	M6ナット	緩め	2	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
自動解体4	ユニットA	端子	M6ボルト	回収	48	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	85.4%	97.9%	97.6%
		端子	プラスねじ	回収	24	62.5%	79.2%	62.5%	83.3%	100.0%	91.7%	83.3%	80.4%
		反端子側ブラケット	M6ボルト	回収	12	100.0%	100.0%	100.0%	91.7%	91.7%	100.0%	100.0%	97.6%
		反端子側ブラケット	M6ナット	回収	3	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	66.7%	100.0%	95.2%
		反端子側ブラケット	M6ナット	緩め	1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
成功率					170	90.6%	95.9%	90.6%	91.8%	98.8%	93.5%	92.9%	93.4%

6) 自動化による安全かつ効率的な解体手法の実証

LIBユニットの手解体は、作業負荷や感電リスクがあることを述べたが、ここでは、実際に解体自動化を導入したことで、どの程度作業効率の上昇や手解体作業時間の削減に寄与したかの検討を行った。

図 3. 2. 3-19 に FIT3-LIB の解体時間の比較、図 3. 2. 3-20 に LEAF-LIB の解体時間の比較をそれぞれ示す。

FIT3-LIB の解体では、解体自動化を導入したことで全体の解体時間は手解体のみと比較して増加しているものの、手解体作業時間は約 60%短縮した。LEAF-LIB の解体では、手解体のみと比較して全体の解体時間は約 30%、手解体作業時間は約 80%短縮した。これにより、手解体作業時間の短縮や作業負荷低減、LIB 接触機会の低減による感電リスク低減の効果が得られた。

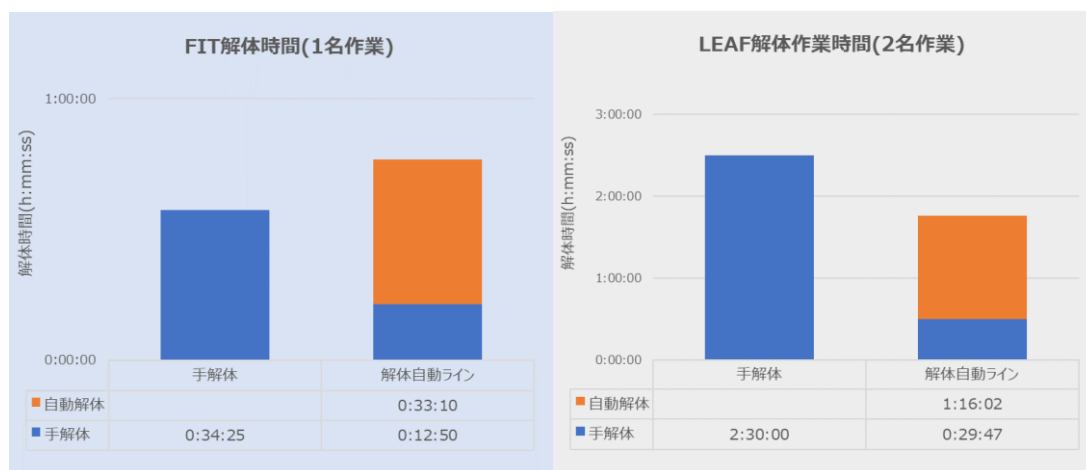


図 3. 2. 3-19 FIT3-LIB の解体時間の比較 図 3. 2. 3-20 LEAF-LIB の解体時間の比較

(3) まとめと今後の課題

1) 汎用性向上(他 LIB への対応)

本事業では、日産 LEAF とホンダ FIT3 にフォーカスを当てて LIB リサイクルの実証試験を行ってきた。ロボットによるねじ取外しの自動化によって、作業負荷軽減や感電リスクの低減に寄与したことに加え、作業効率の向上や省力化などにも成果が得られた。しかし、将来的には HV、EV の製造、普及台数が増加していくことが推測され、現状のパフォーマンスを考慮すると、事業化にあたっては、今後、以下の課題に直面すると考えられ、その解決は必要不可欠であると考えられる。

- ① 様々な車種 LIB の調査及び市場動向の把握
- ② 複数の LIB に対応した解体ラインの機器構成
- ③ ロボットティーチングにおける作業負荷軽減や所要時間の短縮

2) 解体時間短縮

前述(解体ラインの処理能力)の通り、現状では FIT3 約 48 分/台(解体作業員 1 名)、LEAF 約 1 時間 46 分/台(解体作業員 2 名)であり、表 2.2-1 に示す 2025 年の九州地区における FIT3、LEAF の廃車台数と廃 LIB 発生量予測に基づいた処理能力である。今後の HV、EV の製造、普及台数の増加、それに伴う廃 LIB の増加、さらには経済性を考えると、解体自動化による処理の能力拡大は必須となると考えられる。

ロボットによるねじ取外しのスピード向上に加えて、ねじ取外し以外の自動化やラインレイアウトの改善なども検討していく必要がある。

3) 電圧を残したままでの安全な解体手法の確立

本事業では、ロボットによる解体自動化と手解体を組み合わせた LIB ユニット解体ラインの構築を行ってきた。しかし、手解体工程が存在する以上、感電リスクをゼロにすることは難しい。現段階では、感電リスクを少しでも低減するために解体前に LIB ユニットの放電を行っているが、過放電によるセル形状の変化及びセル内部でのガス発生が疑われるため、管理電圧までの放電に止めている。そのため、感電リスクをさらに低減するためには、電圧を残したままでの安全な解体手法の確立が求められる。

ねじ取外しに加えて、部品取外しなどロボットによる解体自動化範囲の拡張による手解体工程の減少により感電リスクを低減する必要がある。

4) 工程の省力化の向上

ロボットによるねじ取外し自動化によって手解体作業時間が削減され、省力化の効果を得られた。しかし、部品取外しなど未だ人手に頼る部分が多いのが現状であり、

省力化だけでなく感電リスクの観点からも、工程の省力化の向上についても追求していく必要がある課題である。

3. 3 LIBの熱分解処理、破碎・選別処理に関する検討

後段のCo、Ni回収で高効率な分離を実現できる、FIT3及びLEAF LIBモジュールの熱分解処理、破碎・選別処理条件を検討した。

3. 3. 1 LIBモジュールの熱分解

解体したモジュール又はセルを熱分解し、後段の破碎・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した。

(1) 昨年度までの成果

熱分解炉の仕様を検討し、製作・設置するとともに、設置した熱分解炉による小型家電由来のLIB(パソコン用、コードレス掃除機用、工具用等)を用いた熱分解挙動を確認した。

1) 熱分解炉の仕様検討

LIB内の有機物である電解液を無害化し、後段の破碎、選別にてCo、Niを高効率で分離、回収するための熱分解炉の仕様を検討した。仕様検討において、以下を前提条件とした。

- ・条件① : 処理流量を最大2.0t/day、常用1.5t/dayとすること
- ・条件② : 熱分解時、LIB内の正極材(Al)、負極材(Cu)を極力脆化(酸化)、溶解させないこと
- ・条件③ : LIB内の正極材を溶解させないため、熱分解炉内の温度をAlの融点以下にて保持できること
- ・条件④ : 長さ250mm以上、重量3kg/個以上の車載LIBが安定した処理流量で処理できること

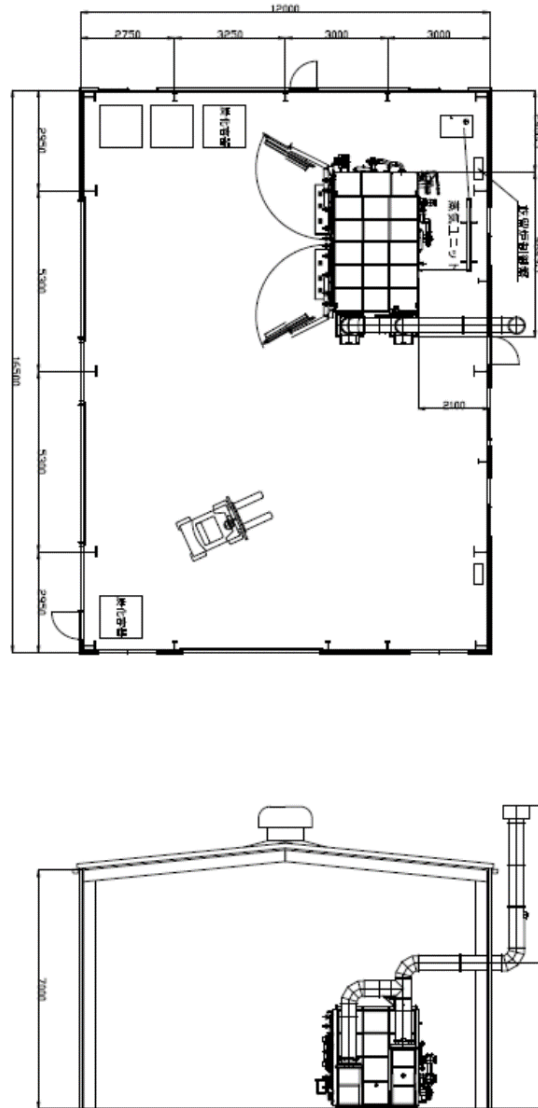
上記前提条件を検討した結果、設置する熱分解炉の仕様を以下に決定し、設計・製作を行った。

表 3. 3. 1-1 熱分解炉の仕様

熱分解方法	過熱蒸気式熱分解炉
原料装入方法	バッチ式
熱分解炉雰囲気温度	450℃～600℃
熱分解炉容積	4 m ³
熱対流の有無	有

2) 熱分解炉の製作、設置

上記で検討した熱分解炉仕様にて、熱分解炉の製作、設置を行った。
製作、設置したバッチ式過熱蒸気式熱分解炉(後述 バッチ炉)のレイアウトを図 3.3.1-1 に示す。



【バッチ炉仕様】

- ・建屋面積 : 198 m^2
- ・炉(熱分解室)の内容積 : 4 m^3 (2 m^3 ×2室)
- ・最大処理能力 : 2.0 t/day(1バッチ)

図 3.3.1-1 バッチ炉 設置レイアウト

バッチ炉を導入する建屋は、消防署との協議にて 198 m^2 とし、準耐火構造とした。
炉の内容積(原料を装入する熱分解室の内容積)は、仕様検討の通り 2 m^3 ×2 室の 4 m^3 と

し、最大処理能力は 2.0t/day となる。一日当たり 1 バッチにて最大 2.0t/day の熱分解が可能である。

3) バッチ炉における熱分解挙動の確認

設置したバッチ炉にて、設計通りの熱分解処理が可能であることを確認するため、熱分解挙動の確認試験を行った。

FIT3 及び LEAF LIB モジュールは昨年度準備ができなかったため、小型家電由来の LIB Ni 系(円筒型)を熱分解原料として挙動を確認した。なお、LIB Ni 系は正極活物質中の Ni、Co、Mn のうち Ni の含有量が最も高い LIB のことである。



図 3.3.1-2 熱分解原料

上記熱分解原料を用いて最大 1,500kg/バッチまでの熱分解処理を行ったが、熱分解歩留も安定しており、また熱分解時に温度異常等は発生しなかった。

昇温開始から熱分解完了までは約 23 時間であり、1,500kg/バッチで 23 時間/バッチとなることから、仕様として設定した常用 1.5t/day の処理能力は十分有している。

しかしながら、LIB 内部の性状を確認したところ、図 3.3.1-3 に示すような正極材(A1)の脆化が確認された。

本試験による LIB Ni 系円筒型熱分解物を原料として破碎・選別試験を行った結果、脆化した A1 が回収される活物質中に多く混入することが分かった。本年度実施する FIT、LEAF モジュールを用いた熱分解処理実証試験では、本結果を参考条件として温度条件を見直し、脆化した A1 の活物質中への混入を極力低減させる。

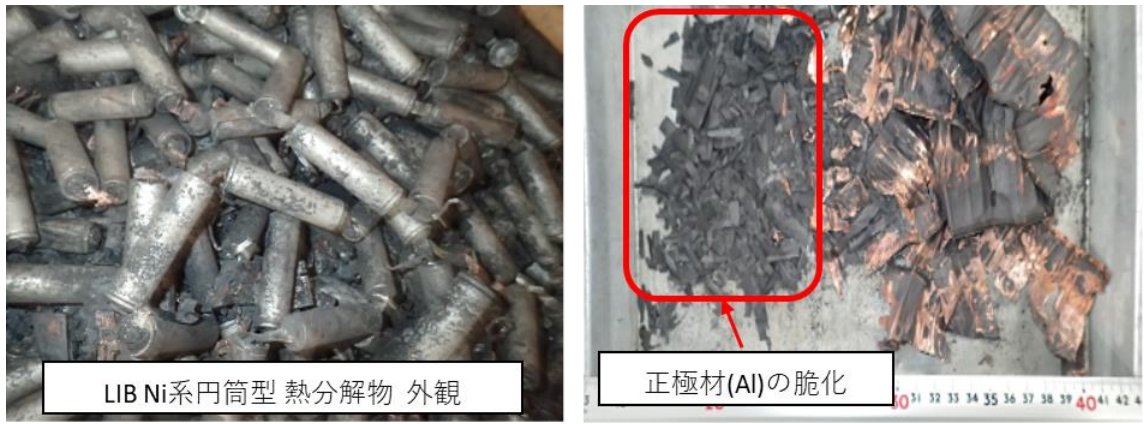


図 3.3.1-3 LIB Ni 系(円筒型) 熱分解物

(2) 本年度の成果

本年度は、熱分解処理温度条件の調整により脆化防止の可能性を検討するとともに、FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュールを用いた熱分解処理実証 (FIT3-LIB 及び LEAF-LIB それぞれ 4 モジュール相当以上) を行い、後段の破碎・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した。

1) LIB モジュールの熱分解処理試験

FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュールの熱分解処理と、熱処理時にバッチ炉から排出されるガス成分の測定を実施した。昨年度、LIB Ni 系円筒型で試験した際、Al が熱で脆化したが、その是正措置として温度条件を見直し、燃焼室設定温度を 1,050 から 900°C に下げることによって熱分解室の雰囲気温度を 620 から 540°C まで低下させた条件で熱分解処理を実施した。熱分解処理は図 3.3.1-4 に示す昨年度設置したバッチ炉を用いて行い、排ガス測定については外部分析機関である日鉄テクノロジー株式会社に依頼し、実施した。



【バッチ炉 仕様】

- ・建屋面積 : 198㎡
- ・炉(熱分解室)の内容積 : 4㎡ (2㎡×2室)
- ・最大処理能力 : 2.0 t/day(1/バッチ)
- ・使用燃料 : LPG (ボイラー、排ガス燃焼室)

図 3.3.1-4 バッチ炉

本試験で使用した熱分解原料を図 3. 3. 1-5 に示す。



図 3. 3. 1-5 熱分解原料

本試験は図 3. 3. 1-6 に示すように、熱分解において両電池の性状の違いで左右両熱分解室の挙動、排ガス発生量に大きな影響が出ないように、両室にそれぞれの電池を均等な重量で装入した。また熱分解反応促進の為、最下段に空の鉄籠、2 段目、3 段目に両電池を配置し、過熱蒸気の熱分解室内の対流効果を上げた。

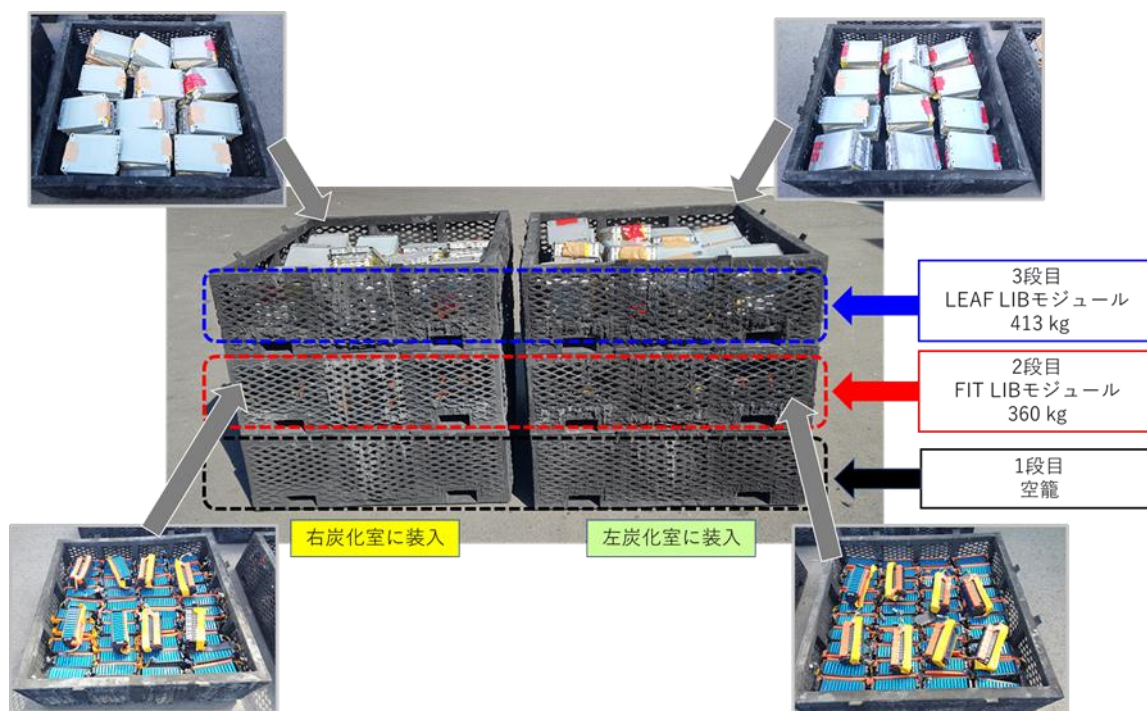


図 3. 3. 1-6 各原料の装入条件

本試験の熱分解条件及び処理結果を表 3.3.1-2 に示す。

表 3.3.1-2 FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュール 熱分解条件、熱分解結果

		左熱分解室 (kg/バッチ)	右熱分解室 (kg/バッチ)	合計 (kg/バッチ)	熱分解歩留 (%)
3 段目	LEAF-LIB	207	206	413	79.2
2 段目	FIT3-LIB	180	180	360	73.9
1 段目	Blank	-	-	-	-
合計		387	386	773	76.7

FIT3-LIB モジュール 360kg 及び LEAF-LIB モジュール 413kg を装入し、合計 773kg/バッチにて熱分解処理を行った。熱分解歩留は、2 段目 FIT3-LIB で 73.9%、3 段目 LEAF-LIB で 79.2%となり、両電池合計で 76.7%であった。熱分解時に温度異常等は発生しなかった。

図 3.3.1-7 に熱分解時の温度挙動を示す。

昇温工程から冷却工程完了(熱分解室内の雰囲気温度 100℃以下)までは約 15 時間/バッチであり、1 バッチ 24 時間で考えると、処理時間的にまだ余裕がある為、モジュール装入量を増やすことは可能である。

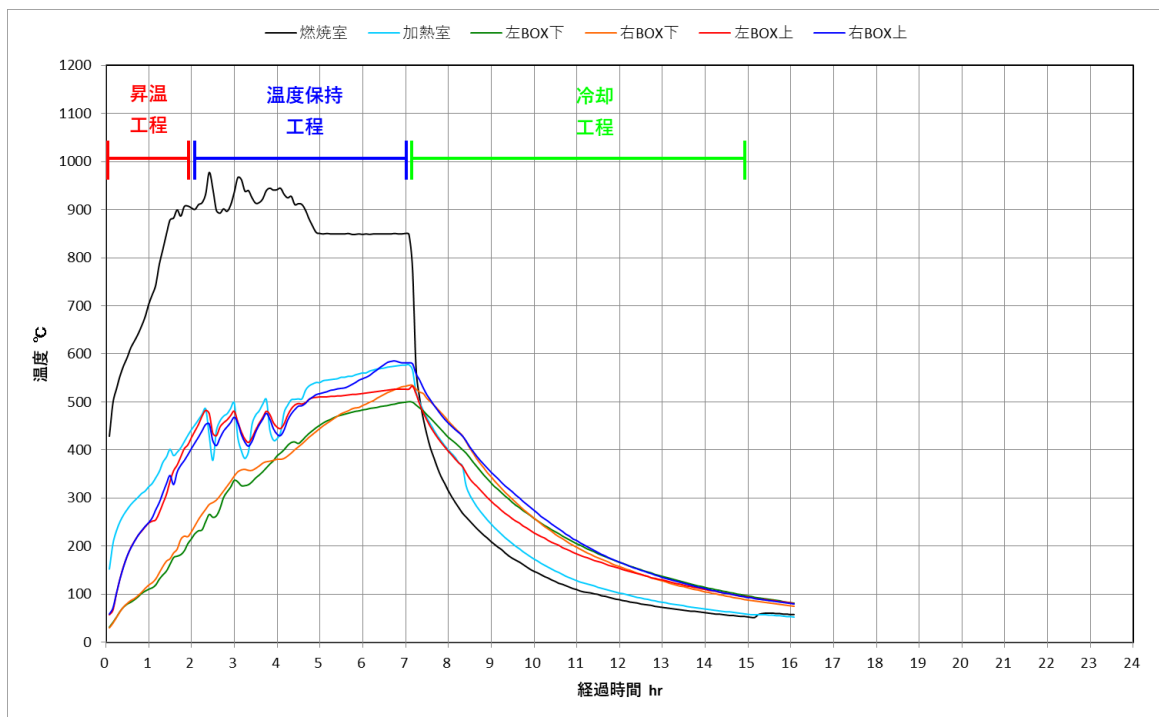


図 3.3.1-7 熱分解時の温度挙動

本試験における装入量773kg/バッチにおいて、燃焼室(排ガスの燃焼室)の温度は900℃～1,000℃で安定していた。

熱分解を行う熱分解室原料 BOX 部の雰囲気温度(原料装入部温度)は、昨年度の小型家電由来の LIB Ni 系の熱分解処理結果と比較すると、最も低い箇所(右 BOX 下)で約 470 から 500℃、最も高い箇所(右 BOX 上)で約 620 から 540℃となった。

FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュールの熱分解産物を図 3.3.1-8 に示す。これらの熱分解産物はプラスチック、セパレータ及び電解液は完全に熱分解されている。しかしながら、LIB 内部の性状を確認したところ、LEAF-LIB モジュールの熱分解産物は図 3.3.1-9 に示すような外側筐体(A1)や正極材(A1)の脆化が確認された。



図 3.3.1-8 熱分解産物

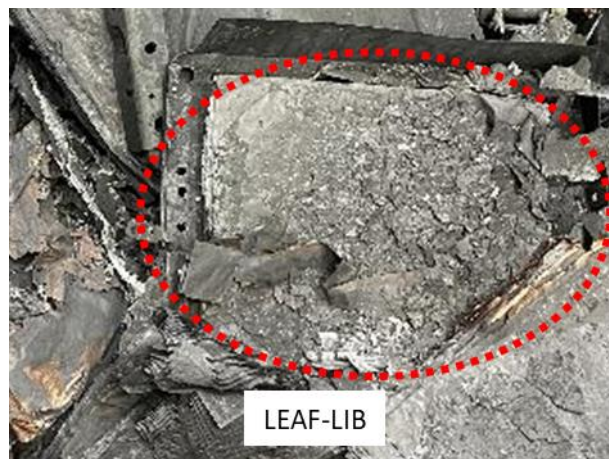


図 3.3.1-9 脆化部

A1 が脆化した原因は、排ガス測定の実施に合せ、熱分解処理における温度保持時間を延長した為と思われる。排ガス測定は、燃焼室温度が安定してから測定しなければならない為、炉稼働開始後 3 時間より実施し、さらに排ガスのサンプリングの為、4 時間以上

の温度保持が必要である。本試験における炉の温度挙動を見ると、LIB モジュールの熱分解反応自体は、温度保持後 3 時間で終了しているが、排ガス測定に合せ、約 2 時間保持時間を延長している(図 3. 3. 1-10 排ガス測定時の温度挙動参照)。保持時間延長により、熱分解室内の温度が上昇し、A1 の脆化が進んだ可能性が高い。熱分解室の室内温度に急激な温度上昇は確認できず、また最大 540℃程度であるが、あくまで雰囲気温度であり、局所的な物温自体の温度上昇が発生している可能性がある。

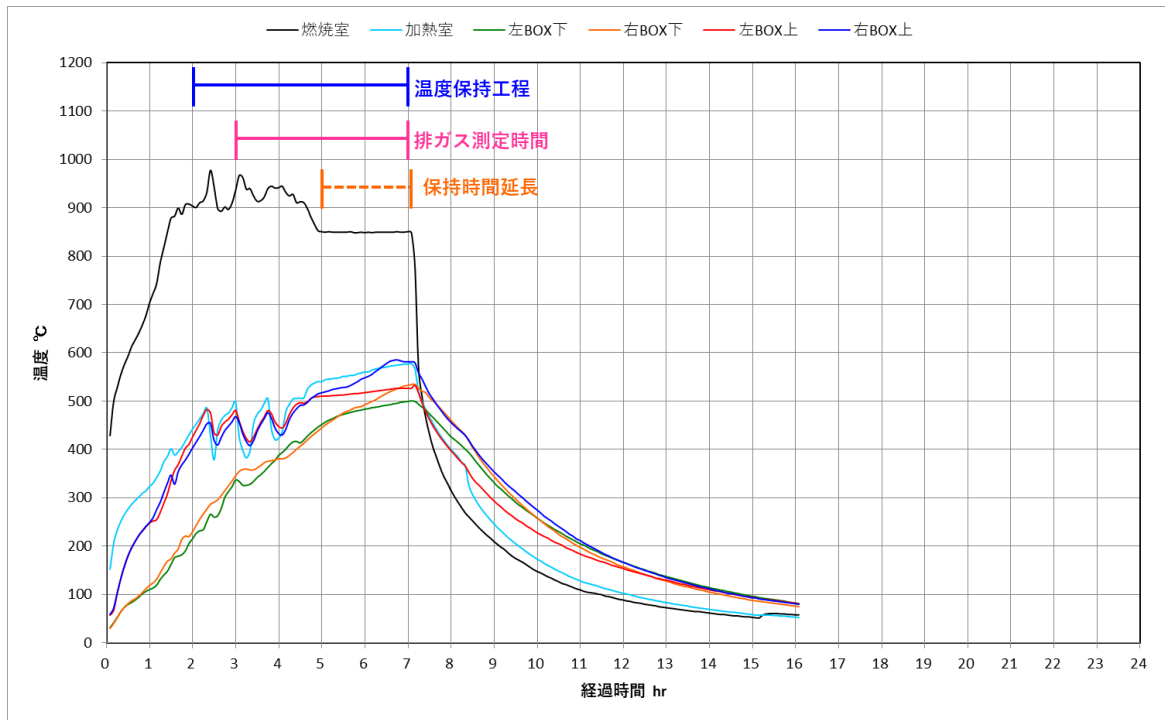


図 3. 3. 1-10 排ガス測定時の温度挙動

表 3. 3. 1-3 に熱分解処理における LPG、水道、電力使用量を示す。

表 3. 3. 1-3 熱分解処理における LPG、水道、電力使用量

LPG 使用量 (m ³ /バッチ)	上水使用量 (m ³ /バッチ)	電力使用量 (kwh/バッチ)
53.5	0.2	51.12

2) 排ガス測定結果

本試験での排ガス測定は、CO、ダイオキシン類、ばいじん、SO_x、HCl、NO_x、HF の7項目について実施した。表 3.3.1-4 に排ガス測定結果を示す。

表 3.3.1-4 排ガスの管理値と測定結果一覧

排ガスの管理項目	NMD管理値	準用する法令基準	LEAF,FIT 排ガス測定値
一酸化炭素	常時 100 volppm 未満	廃棄物の処理及び清掃に関する法律 焼却施設	8 volppm
ダイオキシン類	5ng-TEQ/Nm ³ 未満	ダイオキシン類対策特別措置法 廃棄物焼却施設規模 2 t/h未満	0.000004 ng-TEQ/Nm ³
ばいじん	0.15g/Nm ³ 未満	北九州市公害防止条例 廃棄物焼却炉 規模 50kg以上 200kg/h未満	0.031 g/Nm ³
硫黄酸化物	0.17Nm ³ /h 未満 (K値 3.5)		0.039 Nm ³ /h
塩化水素	700mg/Nm ³ 未満	大気汚染防止法 廃棄物焼却炉 (準用：規模未満の為、自主管理値)	10.5 mg/Nm ³
窒素酸化物	250volppm 未満		67 volppm
ふっ化水素	20mg/Nm ³ 未満		中心点 4.7 mg/Nm ³ 代表点 1.4 mg/Nm ³

※ふっ化水素の測定値である中心点と代表点とは、どちらも排ガス採取地点は同じ箇所である。採取した時間が違う為、2回採取した結果を記載している。

バッチ式熱分解炉は、ばい煙指定施設に該当し、法規制は①ばいじん：0.15 g/Nm³未満、②硫黄酸化物：2.778Nm³/h未満のみである。測定結果はばいじんが0.031 g/Nm³、硫黄酸化物が0.039 Nm³/hであり、いずれも管理値以下である。

日本磁力選鉱(株)(以下、NMD)が別途使用しているロータリーキルン炉の管理値と比較し、全ての項目が管理値以下であることを確認した。

(3) まとめと今後の課題

バッチ炉で各 LIB モジュールを熱分解処理実施したところ、特に異常反応など示さず熱分解処理は良好であった。熱分解産物に一部脆化が見受けられたが、これは排ガス測定実施による熱分解時間延長による影響と思われる。

熱分解時にバッチ炉から排出されるガスについて測定を実施したところ、準用する法令基準の管理値と比較して、全ての項目で管理値以下であることを確認した。

今後の課題として、各 LIB モジュールの装入量を増やし、その装入量に対して適正な熱分解条件を検討し、事業として活用していく。

3. 3. 2 熱分解後の破碎・選別

FIT3 及び LEAF モジュールの熱分解物を用いた破碎・選別試験を行い、回収される活物質の Co、Ni 品位と回収率、Cu、Al の混入率を確認する。

(1) 昨年度までの成果と課題

昨年度は破碎・選別ラインの製作・設置を行い、小型家電 LIB の熱分解処理物を用いた破碎・選別試験を行った。

1) 破碎、選別ラインの製作、設置

破碎機、選別機、設備レイアウトの詳細設計を行い、二軸せん断ライン、ハンマー破碎選別ラインの製作、設置を行った。

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、二軸せん断ライン、ハンマー破碎選別ラインのそれぞれを独立させ設備を配置した。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。両ラインの設置建屋面積は $26\text{m} \times 15\text{m} = 390 \text{ m}^2$ とした。

両ラインは 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為、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した。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。

最終仕様のライン構成を図 3. 3. 2-1 に示す。

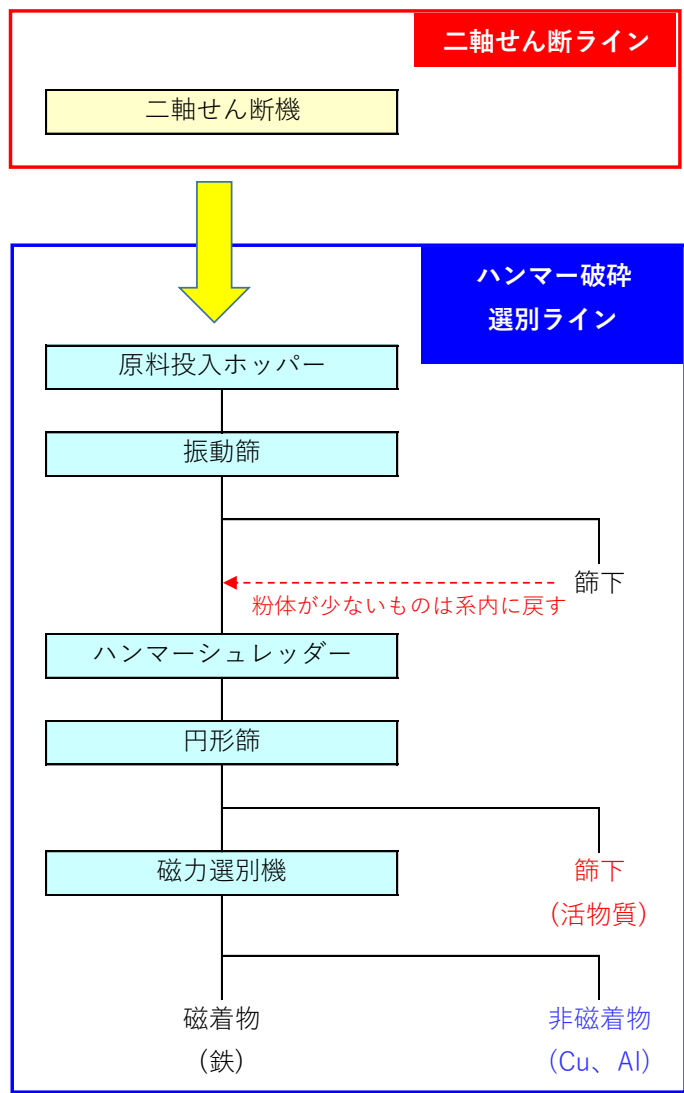





図 3. 3. 2-1 破碎・選別ライン構成図

2) ハンマー破碎選別ラインにおける破碎選別能力確認試験

本事業において設置したハンマー破碎選別ラインは、FIT3 及び LEAF モジュールの熱分解物を対象原料として設計したが、両原料が昨年度において準備できていなかったため、NMD で回収した小型家電用 LIB 熱分解物を用いて本ラインの能力確認を行った。本試験に用いた小型家電用 LIB 熱分解物原料を表 3. 3. 2-1 に示す。

表 3.3.2-1 本試験に用いた小型家電用 LIB 熱分解物

対象原料	LIB Ni 系 円筒型 熱分解物	LIB Co 系 円筒型 熱分解物	LIB Co 系 角型 熱分解物
			

※LIB Co 系は正極活物質中の Ni、Co、Mn のうち Co の含有量が最も高い LIB のことである。

また、本試験の主目的を表 3.3.2-2 に示す。

表 3.3.2-2 破砕選別能力確認試験の目的

目的①	処理流量の確認	設定した処理流量を満足できていることを確認する。 【目標値】 ・最大処理能力 500kg/h ・常用 300kg/h
目的②	Co、Ni 回収品位、回収率の確認	ハンマーシュレッダー破砕後の回収産物を確認する。及び活物質の Co、Ni 品位を確認し、Co、Ni 回収率を確認する。 【目標値】 ・活物質中に含まれる 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

目的①における処理流量の確認において、各熱分解ともに規定の処理流量を得られていることが確認できた。一部において、熱分解物の形状に起因し処理流量過多になる傾向が見受けられたが、回収産物に影響はなかった。

目的②における Co、Ni 回収品位と回収率確認において、目標値である Co、Ni 回収率は、目標値に数%及ばなかったものの概ね 90%に近い回収率で回収できた。

しかしながら、熱分解による Al の脆化の影響により、活物質中への Al の混入率が高く、LIB Ni 系においては、混入率 67.4%となった。

LIB の中でも、特に Ni 系は、過去の経験より熱分解時に激しく発熱反応を示すことが確認されており、その影響で Al が脆化した可能性が高い。

熱分解時、熱分解室の室内温度に急激な温度上昇は確認できず、また最大 620°C程度で

あるが、あくまで雰囲気温度であり、局所的な物温自体の急激な温度上昇が発生している可能性がある。

よって本年度実施する FIT3-LIB、LEAF-LIB モジュールを用いた熱分解処理実証試験では、温度条件を見直して熱分解処理を行い、その熱分解産物にて破碎・選別試験を行い、回収される活物質の Co、Ni 品位と回収率、Cu、Al 等の混入率、Li の挙動を確認する。

(2) 本年度の成果

本年度は、脆化防止の可能性検討に伴う、Al の混入率低減の可能性を検討するとともに、FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュールの熱分解物を用いた破碎・選別試験を行い、回収される活物質の Co、Ni 品位と回収率、Cu、Al 等の混入率、Li の挙動を確認した。

1) 対象原料

LIB モジュールの熱分解で得られた FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュール熱分解物を対象原料とした。図 3.3.2-2 に、本試験で使用した LIB モジュール熱分解物を示す。



図 3.3.2-2 FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュール熱分解物

本試験で使用した FIT3-LIB モジュール熱分解産物は 266kg、LEAF-LIB モジュール熱分解産物は、327kg である。

2) 破碎選別処理フロー

FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュール熱分解物の破碎選別処理フローを図 3.3.2-3 に示す。二軸せん断ラインの集塵物は系内に戻すフローとした。

また、ハンマー破碎選別ラインにて発生する集塵物①、集塵物②について、昨年度までの成果より、Co、Ni が多く含まれ、また Cu、Al 等の逃避も少ないことから、集塵物も活物質として回収して評価することとした。

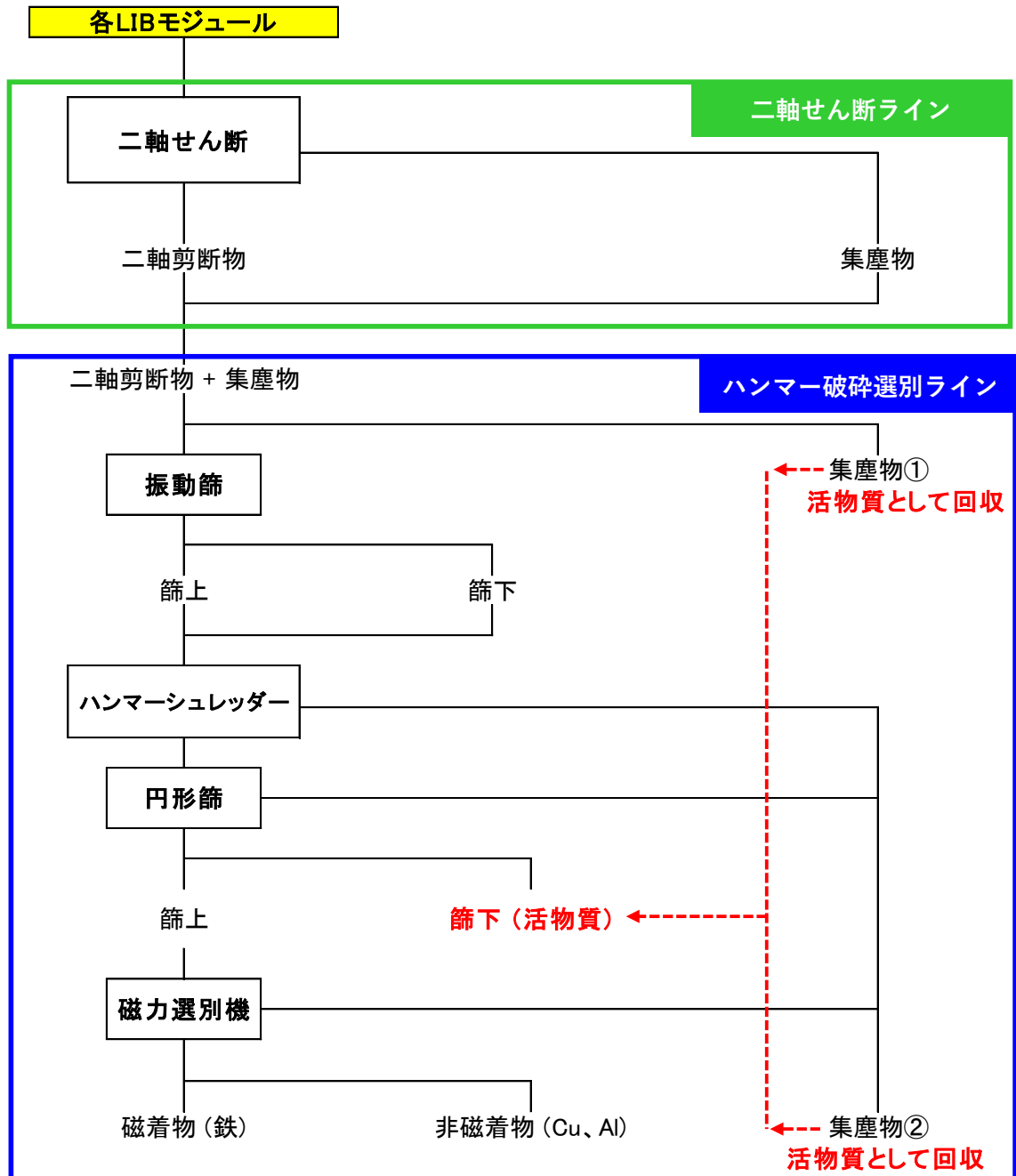


図 3.3.2-3 FIT3 及び LEAF LIB モジュール破碎選別試験における処理フロー

3) 二軸せん断ラインにおける破碎処理

FIT3-LIB 及び LEAF-LIB モジュール熱分解物を用いて、二軸せん断ラインで一次破碎を行い、処理流量、破碎産物の形状を確認した。二軸せん断ラインにおける破碎結果を表 3.3.2-3 に、破碎産物の写真を図 3.3.2-4 及び 3.3.2-5 に示す。

表 3.3.2-3 LEAF モジュール熱分解物 二軸せん断破碎結果

	処理量 (kg)	処理流量 (kg/h)	破碎産物重量(kg)	
			せん断産物	集塵物
FIT3-LIB	263	1,315	260	3
LEAF-LIB	325	3,250	323	2

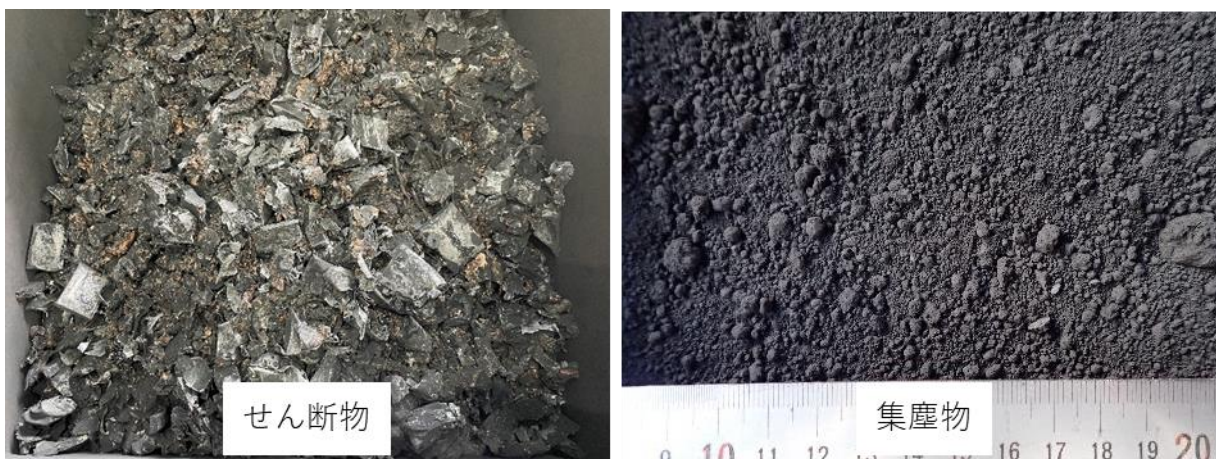


図 3.3.2-4 FIT3-LIB モジュール熱分解物 二軸せん断破碎産物

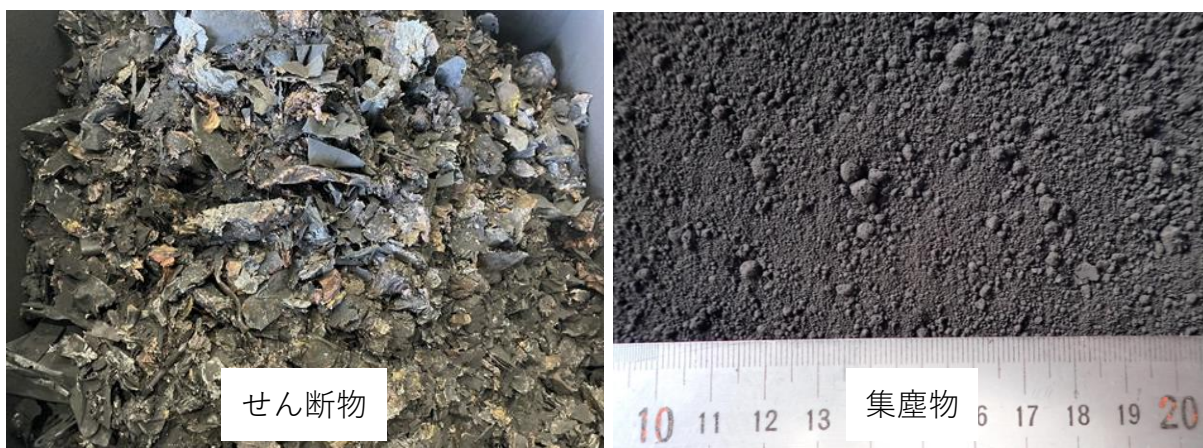


図 3.3.2-5 LEAF-LIB モジュール熱分解物 二軸せん断破碎産物

処理流量は FIT3-LIB モジュール熱分解物が 1,315kg/h、LEAF-LIB モジュール熱分解物が 3,250kg/h で最大処理能力 500kg/h を大きく上回る結果となった。本来二軸せん断破

は、正転、逆転を繰り返しながらせん断していくが、投入量が少ないことから、回転刃が逆転することなく一気にせん断された為と思われる。

FIT3-LIB モジュールにおいては、二軸せん断時にセルが回転刃部に挟まり、除去するのに時間を要したが、ほとんど電氣的負荷なく破碎できた。

LEAF-LIB モジュールにおいても、約 1mm 程度の薄い鉄筐体にアルミラミネートセルが封入されている形となっている為、こちらもほとんど電氣的負荷なく破碎できた。

両原料共に過負荷時に起こるせん断刃の逆転は 1 度もなく、安定した処理であった。また、産物も異常無く良くせん断されており、セル内部の活物質も原型を留めた状態で、粉体の発生は極力抑えられていた。

今後順次投入量を増やし、処理流量への影響を確認していく。

4) FIT3-LIB モジュール熱分解物のハンマー破碎選別ラインにおける破碎選別処理

FIT3-LIB モジュール熱分解物の二軸せん断破碎物を原料として、ハンマー破碎選別ラインにて破碎選別処理を行った。昨年度までの成果を参考として、ハンマー破碎選別ラインの選別条件を以下に設定した。選別条件を表 3.3.2-4 に示す。

表 3.3.2-4 ハンマー破碎選別ライン 選別条件

給鉱条件	給鉱ダンパー開度 : 30% 給鉱コンベア周波数 : 6Hz
ハンマーシュレッダー回転刃周波数	60Hz
処理流量	300kg/h

二軸せん断にて一次破碎されている為、給鉱ダンパー開度は 30%、ハンマーシュレッダー回転刃周波数は最大の 60Hz とした。昨年度の成果より、最も高い Co 回収率、Cu、Al の除去率が得られた条件を設定した。

ハンマー破碎選別ラインにおける処理結果を表 3.3.2-5 に示す。

表 3.3.2-5 FIT3-LIB モジュール熱分解物 ハンマー破碎選別ライン 処理結果

処理量 (kg)	処理流量 (kg/h)	産物重量(kg)							産物 回収率 (%)
		活物質				磁着物 (Fe)	非磁着物 (Cu, Al)	合計	
		篩下	集塵物①	集塵物②	小計				
263	382	24	5	53	82	21	142	245	93.2

FIT3-LIB モジュール熱分解物における破碎選別処理において、処理流量は 382kg/h となり、設定どおりの処理流量を得られた。各産物の回収率合計は、93.2%、245kg となり、

6.8%、18kg が系外に逃避している。これは、コンベア下のこぼれ及びハンマーシュレッダー返り粉を系外にて計量した為である。実操業においては、それら系外逃避物は原料に戻すことを想定している為、処理上問題はない。

次にFIT3-LIBモジュール熱分解物のハンマー破碎選別ラインの MATERIAL BALANCE を図 3.3.2-6 に、集塵物①、集塵物②、篩下 を活物質(後述 BM)として回収した場合の金属品位と金属回収率を図 3.3.2-7 に示す。なお、MATERIAL BALANCE の作成はハンマー破碎選別ライン投入後とし、またコンベア下のこぼれ等の系外に逃避分は考慮していない。

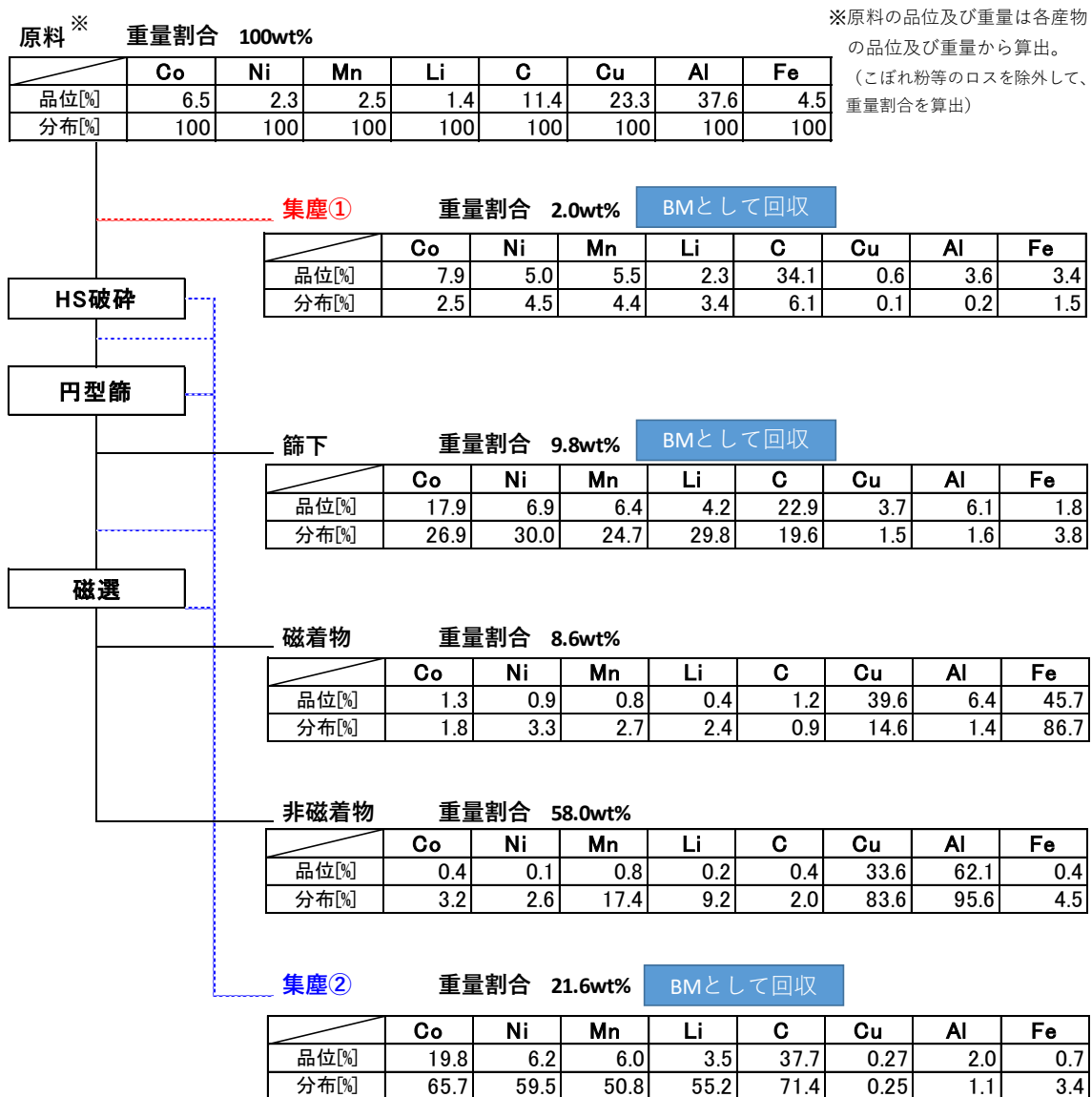


図 3.3.2-6 FIT3-LIB モジュール熱分解物 ハンマー破碎選別ライン MATERIAL BALANCE

	品位 Wt%								重量分布 %
	Co	Ni	Mn	Li	C	Cu	Al	Fe	
焼成物原料	6.5	2.3	2.5	1.4	11.4	23.3	37.6	4.5	100.0
集塵物①	7.9	5	5.5	2.3	34.1	0.6	3.6	3.4	2.0
集塵物②	19.8	6.2	6	3.5	37.7	0.27	2	0.7	21.6
篩下	17.9	6.9	6.4	4.2	22.9	3.7	6.1	1.8	9.8
BM品位	18.5	6.3	6.1	3.6	33.1	1.3	3.3	1.2	33.4



	Co	Ni	Mn	Li	C	Cu	Al	Fe
金属回収率%	95.0	94.1	79.9	88.4	97.1	1.8	2.9	8.8

図 3.3.2-7 FIT3-LIB モジュール熱分解物 BM 金属品位と金属回収率

BM である集塵物①、集塵物②、篩下の重量分布合計は 33.4wt% となった。Co と Ni の金属回収率は、それぞれ 95.0% と 94.1%、Cu と Al の混入率は、それぞれ 1.8% と 2.9% となり、目標値を達成した。

各回収産物の写真を図 3.3.2-8 に示す。



図 3.3.2-8 FIT3-LIB モジュール ハンマー破碎選別ライン 回収産物

FIT3-LIB モジュールの破碎選別処理で使用した電力使用量を表 3.3.2-6 に示す。

表 3.3.2-6 FIT3-LIB モジュールの破碎選別処理で使用した電力使用量*

	電力使用量 (kWh)
FIT3-LIB モジュール	61.9*

*電力使用量は、ハンマー破碎選別ラインの動力の他に、建屋等の雑動電力やフォークリフトの使用電力も含む。

5) LEAF-LIB モジュール熱分解物のハンマー破碎選別ラインにおける破碎選別処理

LEAF-LIB モジュール熱分解物の二軸せん断破碎物を原料として、ハンマー破碎選別ラインにて破碎選別処理を行った。ハンマー破碎選別ラインの選別条件は表 3.3.2-4 に示す条件と同等にした。

ハンマー破碎選別ラインにおける処理結果を表 3.3.2-7 に示す。

表 3.3.2-7 LEAF-LIB モジュール熱分解物 ハンマー破碎選別ライン 処理結果

処理量 (kg)	処理流量 (kg/h)	産物重量(kg)							産物 回収率 (%)
		活物質				磁着物 (Fe)	非磁着物 (Cu, Al)	合計	
		篩下	集塵物①	集塵物②	小計				
325	476	102	26	71	199	48	55	302	92.9

LEAF-LIB モジュール熱分解物におけるハンマー破碎選別処理において、処理流量は 476kg/h となり、設定どおりの処理流量を得られた。産物の回収率合計は、92.9%、302kg となり、7.1%、23kg が系外に逃避した。この点について、FIT3-LIB モジュールのハンマー破碎選別処理結果と同様に、系外逃避物は原料に戻すことを想定している為、処理上問題はない。

次に LEAF-LIB モジュール熱分解物のハンマー破碎選別ラインの MATERIAL BALANCE を図 3.3.2-9 に、集塵物①、集塵物②、篩下 を BM として回収した場合の金属品位と金属回収率を図 3.3.2-10 に示す。なお、MATERIAL BALANCE の作成はハンマー破碎選別ライン投入後とし、またコンベア下のこぼれ等の系外に逃避分は考慮していない。

原料※

重量割合 100wt%

※原料の品位及び重量は各産物の品位及び重量から算出。
(こぼれ粉等のロスを除外して、重量割合を算出)

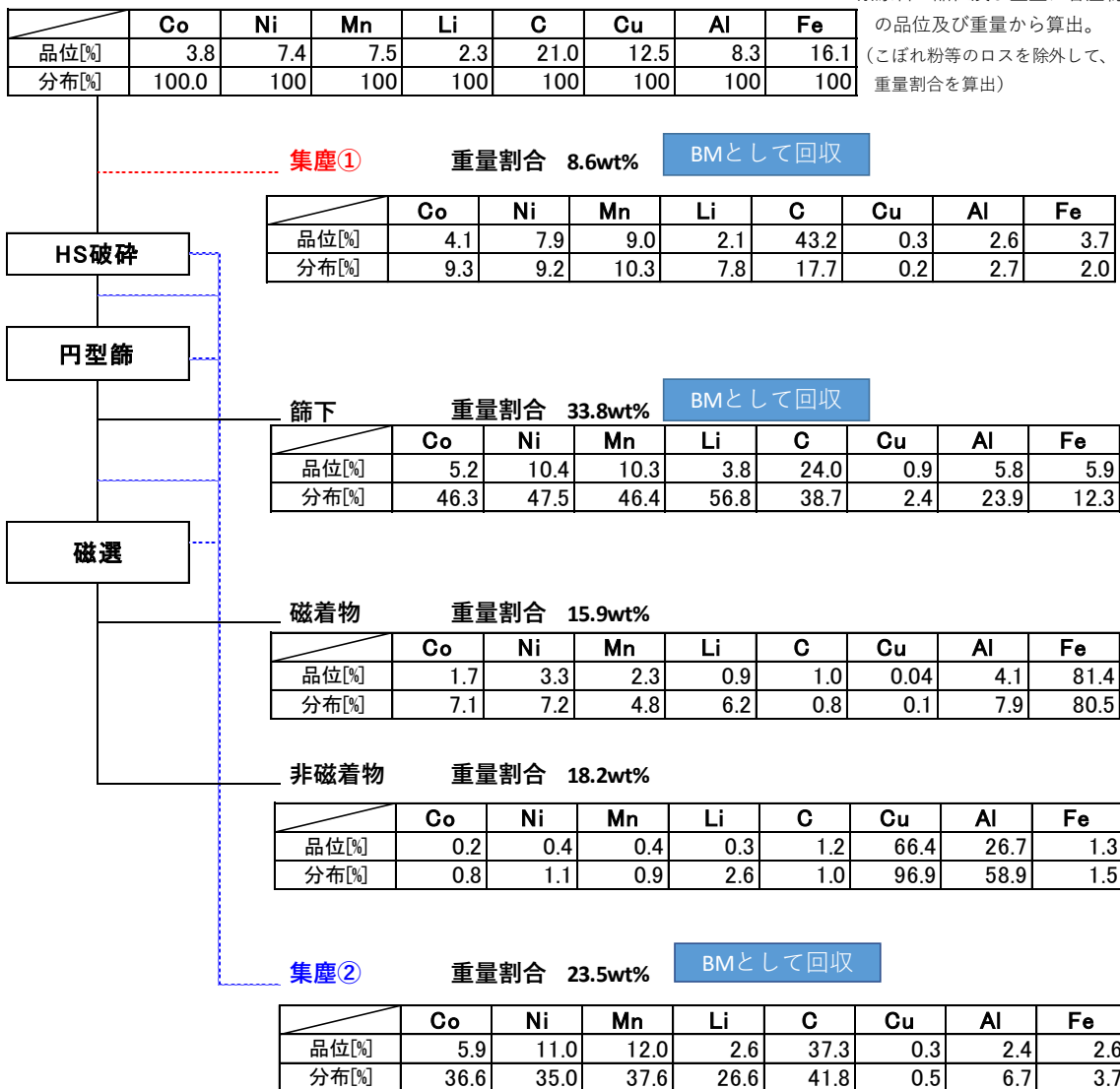


図 3.3.2-9 LEAF-LIB モジュール ハンマー破碎選別ライン マテリアルバランス

	品位 Wt%								重量分布 %
	Co	Ni	Mn	Li	C	Cu	Al	Fe	
焼成物原料	3.8	7.4	7.5	2.3	21	12.5	8.3	16.1	100
集塵物①	4.1	7.9	9	2.1	43.2	0.3	2.6	3.7	8.6
集塵物②	5.9	11	12	2.6	37.3	0.3	2.4	2.6	23.5
篩下	5.2	10.4	10.3	3.8	24	0.9	5.8	5.9	33.8
BM品位	5.3	10.3	10.7	3.2	31.2	0.6	4.2	4.4	65.9

	Co	Ni	Mn	Li	C	Cu	Al	Fe
金属回収率%	92.1	91.8	94.4	91.2	98.2	3.0	33.2	18.0

図 3.3.2-10 LEAF-LIB モジュール一貫処理試験 BM 金属品位と金属回収率

BMである集塵物①、集塵物②、篩下の重量分布合計は65.9wt%となった。CoとNiの金属回収率は、それぞれ92.1%と91.8%となり、目標値を達成した。しかし、CuとAlの混入率は、それぞれ3.0%と33.2%であり、AlがBMにかなり多く混入している。この原因は、排ガス測定を行うにあたり、熱分解処理時間を2時間延長したことでAlが脆化し、破碎選別の際Alが篩下に混入した為と思われる。

しかしながら、昨年度の小型家電由来のLIB Ni系の破碎選別処理結果と比較すると、Alの混入率は67.4%から33.2%に減少しており、熱分解温度の改善で大幅にAlのBMへの混入を低減できている。

各回収産物の写真を図3.3.2-11に示す。



図 3.3.2-11 LEAF-LIB モジュール ハンマー破碎選別ライン 各回収産物

LEAF-LIB モジュールの破碎選別処理で使用した電力使用量を表3.3.2-8に示す。

表 3.3.2-8 LEAF-LIB モジュールの破碎選別処理で使用した電力使用量[※]

	電力使用量 (kWh)
LEAF-LIB モジュール	47.91 [※]

[※]電力使用量は、ハンマー破碎選別ラインの動力の他に、建屋等の雑動電力やフォークリフトの使用電力も含む。

表 3.3.2-9 FIT3-LIB モジュール 回収した BM の金属品位と金属回収率

集塵物①+集塵物②+篩下	品位 Wt%							
	Co	Ni	Mn	Li	C	Cu	Al	Fe
BM品位	18.5	6.3	6.1	3.6	33.1	1.3	3.3	1.2
金属回収率%	95.0	94.1	79.9	88.4	97.1	1.8	2.9	8.8

FIT3-LIB モジュールを 360kg 熱分解処理することで、熱分解産物を 266kg(重量分布 73.9%)得た。この熱分解産物を二軸せん断ラインとハンマー破碎選別ラインにて破碎選別処理を行うことで、活物質(集塵物①+集塵物②+篩下)を 82kg(重量分布 22.8%)、磁着物(Fe)を 21kg(重量分布 5.8%)、非磁着物(Cu、Al)を 142kg(重量分布 39.4%)回収することができた。

回収した BM の Co と Ni の金属回収率は、それぞれ 95.0%と 94.1%、Cu と Al の混入率は 1.8%と 2.9%となり、目標値を達成した。

2) LEAF-LIB モジュールの熱分解からの一貫処理まとめ

LEAF-LIB モジュールの熱分解処理から破碎選別処理における一貫処理時のマスバランスを図 3.3.2-13 に、回収した BM の金属品位と金属回収率を表 3.3.2-10 に示す。

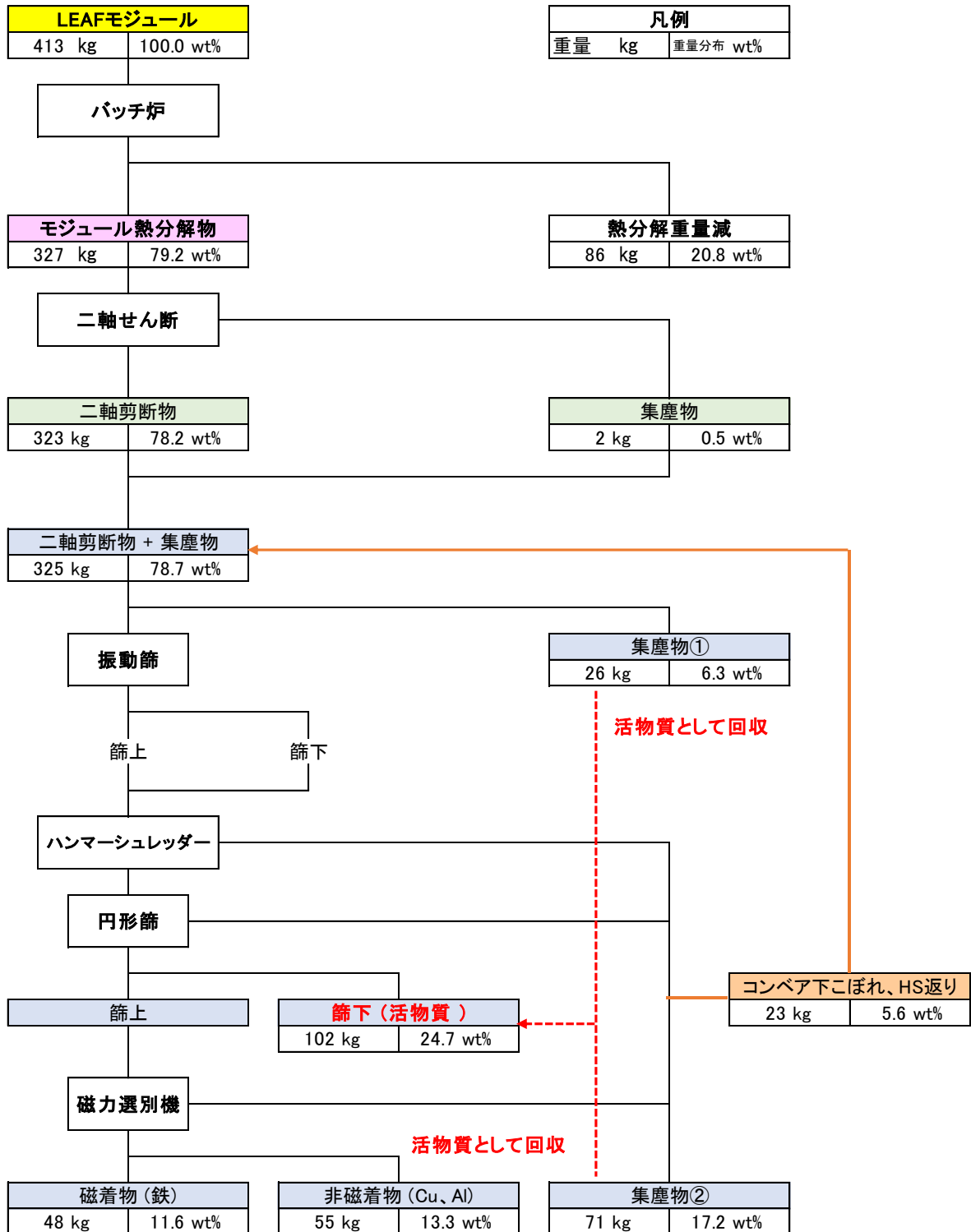


図 3.3.2-13 LEAF-LIB モジュール一貫処理 マスバランス

表 3.3.2-10 LEAF-LIB モジュール 回収した BM の金属品位と金属回収率

集塵物①+集塵物②+篩下	品位 Wt%							
	Co	Ni	Mn	Li	C	Cu	Al	Fe
BM品位	5.3	10.3	10.7	3.2	31.2	0.6	4.2	4.4
金属回収率%	92.1	91.8	94.4	91.2	98.2	3.0	33.2	18.0

LEAF-LIB モジュールを 413kg 熱分解処理することで、熱分解産物を 327kg(重量分布 79.2%)得た。この熱分解産物を二軸せん断ラインとハンマー破碎選別ラインにて破碎選別処理を行うことで、活物質(集塵物①+集塵物②+篩下)を 199kg(重量分布 48.2%)、磁着物(Fe)を 48kg(重量分布 11.6%)、非磁着物(Cu、Al)を 55kg(重量分布 13.3%)回収することができた。

回収した BM の Co と Ni の金属回収率は、それぞれ 92.1%と 91.8%となり、目標値を達成した。Cu と Al の混入率は、それぞれ 3.0%と 33.2%であり、目標値には達していなかった。しかしながら、昨年度実施した結果と比較すると熱分解条件を見直すことで、BM への Al の混入率は大幅に低減できている。

今後、各 LIB モジュールの熱分解処理時間の最適化を検討し、更なる改善を目指す。

3. 4 Co、Ni の回収に関する検討

活物質からの Co、Ni の回収は、湿式法にて実施した。昨年度までの試験結果に基づくと Co、Ni の更なる回収率の向上、不純物除去が必要と判明した。本事業では、一部工程を見直し、変更・改善したプロセスを用いて、LEAF 搭載 LIB から回収した活物質由来の Co、Ni をより高効率、高純度で回収するための実証試験を行った。

3. 4. 1 湿式回収プロセスと設備

(1) 湿式回収プロセス

本実証において改善検討した Co、Ni 湿式回収プロセスを以下に示す。また、図 3.4.1-1 にプロセスフローの概要を示す。

(a) 活物質の酸浸出

活物質を酸浸出した後、Cu の沈澱除去（脱 Cu）を行い、Cu、負極材を中心とした沈殿物（未溶解残渣①）の固液分離を行う。

(b) Co/Ni 中間体の回収

液相の酸浸出液①を pH 及び ORP 調整し、固液分離、洗浄を行い、沈殿として Co/Ni 中間体を回収する。

(c) 再浸出・粗精製液回収

Co/Ni 中間体を酸浸出（再浸出）して、沈殿物（未溶解残渣②）の固液分離を行い、液相側として、粗精製液を回収する。

(d) 溶媒抽出・Co、Ni 精製

回収した粗精製液をミキサセトラ装置にて、溶媒抽出により分離精製することで、Co 精製液、Ni 精製液を回収する。

(e) 晶析・高純度塩回収

回収した Co 精製液、並びに Ni 精製液を晶析することで、高純度 Co 塩、並びに高純度 Ni 塩を回収する。

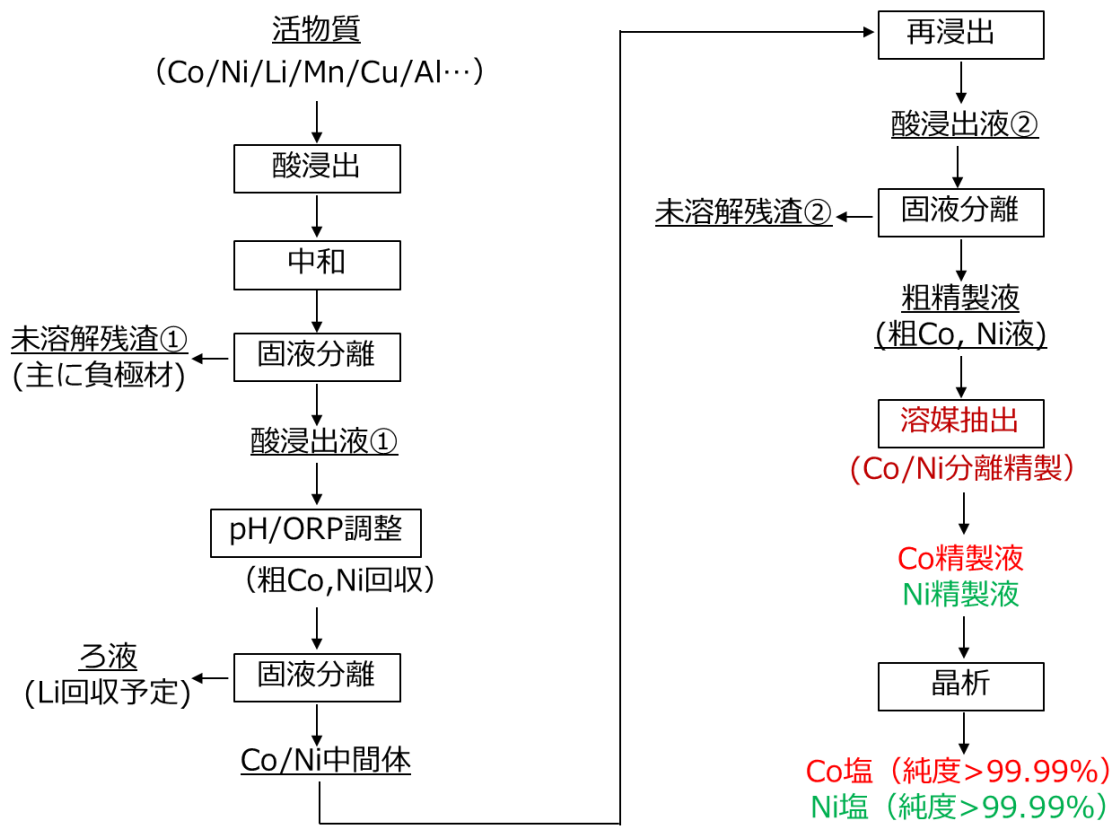


図 3. 4. 1-1 湿式回収プロセスの概要

(2) 湿式回収実証試験設備

Co 及び Ni の湿式回収は、日本磁力選鉱ひびき工場（福岡県北九州市若松区響町）敷地内に設置した湿式回収実証試験設備(図 3. 4. 1-2)で実施した。

湿式回収実証試験設備は、活物質からの浸出等を行う反応槽、固液分離装置、並びに溶媒抽出装置（ミキサセトラ）、晶析装置から構成される。

なお、本実証試験設備における Co 及び Ni の回収能力は、Co、Ni 合わせて金属重量換算で 2t/年程度（LIB モジュール約 25t の処理に相当する重量）である。



図 3. 4. 1-2 湿式回収実証試験設備の外観

3. 4. 2 Co、Ni の湿式回収能力の改善

Co、Ni の回収率及び純度を向上させるとともに、令和 2 年度及び令和 3 年度の試験データをもとに事業化を検討した場合に、どのような要素が Co、Ni の回収に大きな影響を及ぼすかについて検討し、回収率及び回収物純度の向上を図った。

(1) 昨年度までの成果

令和 2 年度及び令和 3 年度では、湿式回収プロセスを改善し、Co、Ni の回収試験を実施した。その結果、試験を実施する前のプロセス^{a)}では Co、Ni 回収率約 60%及び Co 液、Ni 液の純度 99.9%未満であったのに対して、Co、Ni 回収率は約 80%、Co 精製液、Ni 精製液の純度は 99.9%以上へと向上させた。この回収率及び純度向上は FIT3 搭載 LIB から回収した活物質を用いた湿式試験で達成した。

(2) 本年度の成果

本年度は、LEAF 搭載 LIB から回収した活物質を対象に、回収率並びに回収物の純度向上を目的に、プロセス改善を行い、Co、Ni の湿式回収を実施した。活物質中の構成元素としては Co、Ni、Li の他、不純物として C、Zn、Fe、Cu、Al、Mn などが含まれているが、これらの不純物元素を除去し Co、Ni をそれぞれ硫酸塩として回収した。

本年度は、Co/Ni 中間体の洗浄液組成や洗浄方法の改善を行うことで、粗製精液の状態での回収率は Co、Ni のどちらも約 90%(活物質中の Co、Ni 全量を 100%とした場合)を達成した。また、本プロセスフロー上で活物質の酸浸出残渣(滓)や Co/Ni 中間体の洗浄液に Co、Ni の一部が含まれているため、系外へ排出され回収率減となっていたが、図 3.4.1-1 右上の粗製精液(粗 Co、Ni 液)と未溶解残渣②を分離する固液分離の工程で用いるフィルタープレス設備のろ過・洗浄能力向上や、Co/Ni 中間体の洗浄液を回収・再利用できる設備を導入することで回収率は 95%を超えることができる見通しを得た。

一方、回収物の純度に関しては、溶媒抽出工程で新たに不純物元素を除去する抽出工程を過去の実証プロセスに対して新たに追加した結果、回収した CoSO_4 、 NiSO_4 水和物結晶の純度は 99.99%以上を達成した。

回収した CoSO_4 、 NiSO_4 水和物の写真を図 3.4.2-1 並びに図 3.4.2-2 にそれぞれ示す。

^{a)} 特開 2021 134402 コバルトおよびニッケルの回収方法

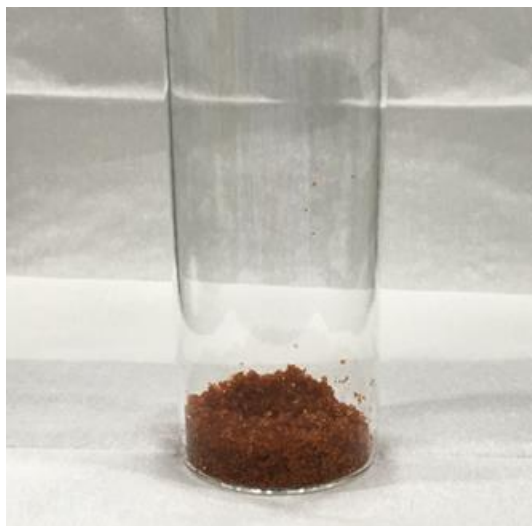


図 3.4.2-1 回収した CoSO_4 結晶

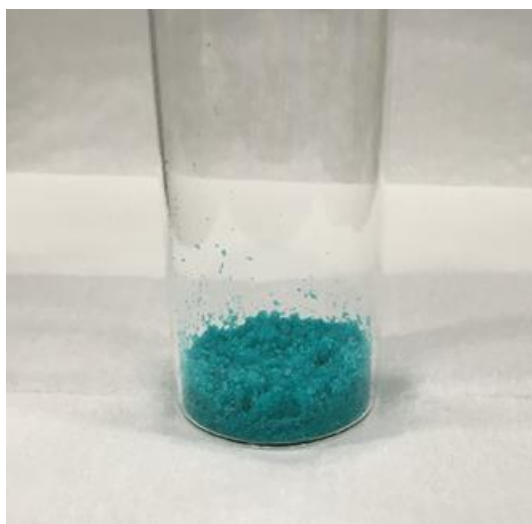


図 3.4.2-2 回収した NiSO_4 結晶

(3) まとめと今度の課題

令和2年度から湿式回収プロセスの最適化検討を行い、令和3年度から令和4年度にかけてFIT3搭載LIB由来の活物質及びLEAF搭載LIB由来の活物質を用いて湿式回収実証試験を実施した。

その結果、Co、Ni回収率が90%以上(回収、再反応ができる条件下では95%以上)、また抽出工程を追加することで CoSO_4 、 NiSO_4 水和物結晶の純度が99.99%以上となり、回収率、純度の向上を達成することができた。

将来の事業化を見据えた今後の課題としては、以下の項目が考えられる。

1) ろ液等を高効率で再回収できる湿式設備の検討

本年度の試験を実施した湿式回収実証試験設備では、ろ過残渣洗浄液やCo/Ni中間体のリパルプ洗浄液を回収し、再利用する機能がなかった。今後の事業化における課題としてこの機能を設備として設置する必要があると考えられる。

2) Liの回収、精製

本年度の湿式回収プロセスではCo、Niの回収を対象としている。一方で、LIB中のLiも、近年、リサイクルする価値が非常に高い元素として注目されており、分離精製が可能になることにより、事業の採算性向上も見込まれる。Liの回収、精製については、現状、実験室スケールでの検討を行っているため、その結果を踏まえて、ベンチスケールでの実証を行う必要がある。一例として、図3.4.2-3に示すように、Co/Ni中間体を固液分離で回収したのちに発生したろ液に適切な試薬を投入してLiを含む塩を形成させ回収するなど、効率的にLiを回収するプロセスの開発が今後必要になるものと考えられる。

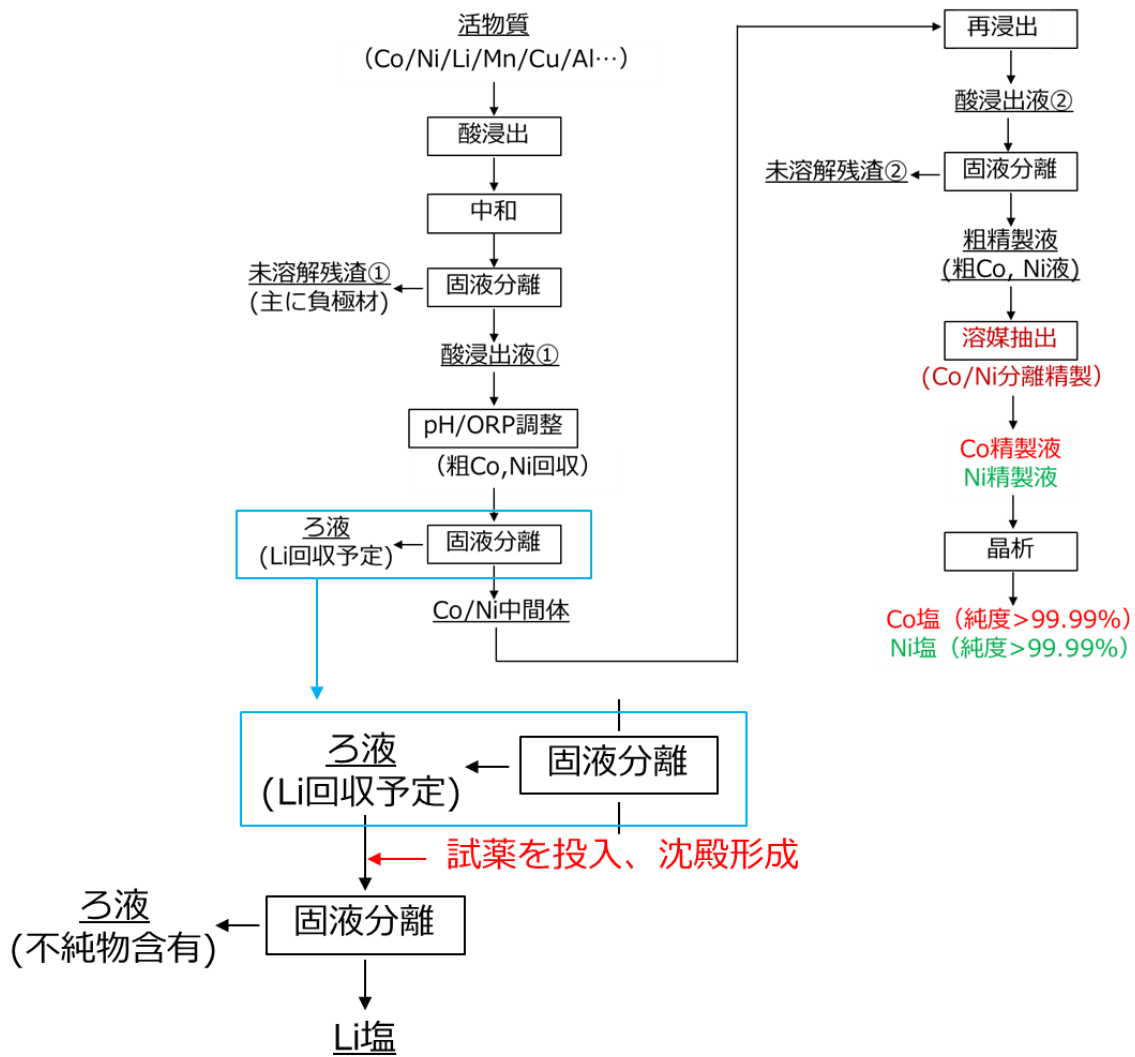


図 3.4.2-3 Li 回収プロセスの一例

4. 事業における環境改善効果、CO₂排出量削減の評価

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から運転データを収集し、工程ごと及び一貫処理での環境影響改善効果及びCO₂排出量を試算した。

4. 1 昨年度までの成果

昨年度は、評価のためのシナリオ及び条件の設定、データ採取を行い、LIB 取り出し時、輸送時のCO₂排出量の評価を行った。また、環境影響改善効果の評価等についても検討した。

輸送時CO₂に関しては、車体のまま輸送するより、各県の拠点においてLIBを取り出して北九州まで輸送するケースの方が効率的であることを示した。

環境影響改善効果、CO₂排出量削減の評価に当たっては、総合的・俯瞰的な評価を行うため、本実証プロセス単独の評価だけではなく、他のプロセスとの比較検討により評価することを想定していたので、現行のLIB処理プロセス（一般社団法人自動車再資源化協力機構（以下「自再協」と記す）が運営するLIB回収・処理スキーム）の認定処理事業者の会社訪問調査を実施した。自再協LIB処理スキームの認定処理事業者は、12社あり、大別して、電気炉方式と焼却方式に区分される。会社訪問調査は、焼却方式の3社を訪問調査した。本プロセスと現行の自再協LIB処理プロセスの特徴の比較を表4.1-1に示す。電気炉方式の特徴として、LIBの構成材料のCo、Ni、Cuはメタル側へ、Li、Al、Mn、Pは、スラグ側へ移行する。ただ、Co、Ni、Cuは一般鋼において品質制約元素（トランプエレメント規制）であり、元素として有効利用されていないので、資源回収性の観点から本プロセスよりも不利である。一方、焼却方式については、熱処理生成物の破碎・選別によって、資源回収処理を実施している。また、活物質の有効活用のための技術開発を推進している過渡期なので、プロセスの普遍性を考慮して、本プロセスの比較対照プロセスは、電気炉方式として検討を実施した。

表 4.1-1 本プロセスと現行の自再協 LIB 処理プロセスの特徴の比較

	本プロセス	現行の自再協LIB処理スキーム	
		電気炉方式	焼却炉方式
	【排出事業者】 ELV→輸送→	同左	同左
LIB処理プロセス	【LIB取外し工程】 取外しLIB→輸送→	同左	同左
	【診断工程】 OK →リユースLIB ⇒外販 NG →廃LIB →(輸送) → 【放電工程】 (電力回生)→廃LIB→(輸送) → 【解体工程】 回収物 →鉄、プラ、銅など外販 モジュール →(輸送) →	【電気炉】 →排ガス ・メタル (Fe,Cu,Ni,Co) ⇒鉄鋼製品 ・スラグ (Al,Li,Mn,P) ⇒外販、路盤材	【焼却炉】 →排ガス 残渣 ⇒外販 <事業展開> 【破碎・選別工程】 ・回収物 (鉄、非鉄) ⇒外販 ・活物質 ⇒外販
	【熱処理工程】 →排ガス (プラ、電解液、セパレータ、 負極材) →残渣 →(輸送) → 【破碎・選別工程】 →回収物：鉄、非鉄⇒外販 →活物質→(輸送) →		
	【湿式処理工程】 【硫酸浸出・不純物除去工程】 →未溶解残渣①⇒外部委託処理 Co/Ni中間体→(輸送) → 【溶媒抽出工程】 →未溶解残渣②⇒外部委託処理 Co塩、Ni塩 ⇒外販 ↓ 廃水⇒外部委託処理		
資源回収性	△～○		
CO ₂ 排出量	△	×	×～△
処理能力	○	○～△ (鉄鋼製品成分制約あり)	○
技術成熟度	実証試験ベース	商業ベース	商業ベース
概念図			
電気炉方式			
焼却炉方式			

4. 2 本年度の成果

昨年度までに収集できていない処理工程のデータを収集し、全プロセスを対象としたCO₂排出量削減効果の評価、並びに環境影響改善効果の評価を実施した。また、本実証事業で採用している処理プロセスとは異なった、現状の各 LIB リサイクル処理プロセスを比較対照ケースとして比較した。

4. 2. 1 ライフサイクル CO₂

(1) 評価手法（評価対象の設定とシステム境界）

過年度報告書¹⁾をもとに、EV として日産 LEAF (40kWh、30kWh) を、HV としてホンダ FIT3 を想定し、これらに搭載されている LIB を評価対象とした。LIB ユニットの仕様を表 4.2.1-1 に示す。年間廃車台数については、LEAF を 704 台/年、FIT3 を 3,737 台/年とした。

本事業のプロセスと比較対照プロセス、評価のシステム境界を図 4.2.1-1 に示す。本事業では、Fe、Cu、Al、Co、Ni を回収するものとし、対照システムは Fe 及びスラグのみを回収・リサイクルするものとした。なお、機能単位は LIB 1 個の処理とした。

また、本事業については、リユースについても評価対象とした。リユース評価のためのシステム境界を図 4.2.1-2 に示す。

これらの条件から、実証試験より得られた活動量と CO₂排出原単位を用いて、CO₂削減効果を算出した。

表 4.2.1-1 LIB ユニットの仕様

車種	AZE0	ZE1	FIT3
種類	リチウムイオン電池 (30kWh)	リチウムイオン電池 (40kWh)	リチウムイオン電池
構成	48モジュール	24モジュール	4ジュール (48セル)
格定電圧 (V)	360	350	172.8
重量 (kg)	294	303	37.5
寸法 (mm)	長さ	1547	520
	幅	1188	760
	高さ	264	200

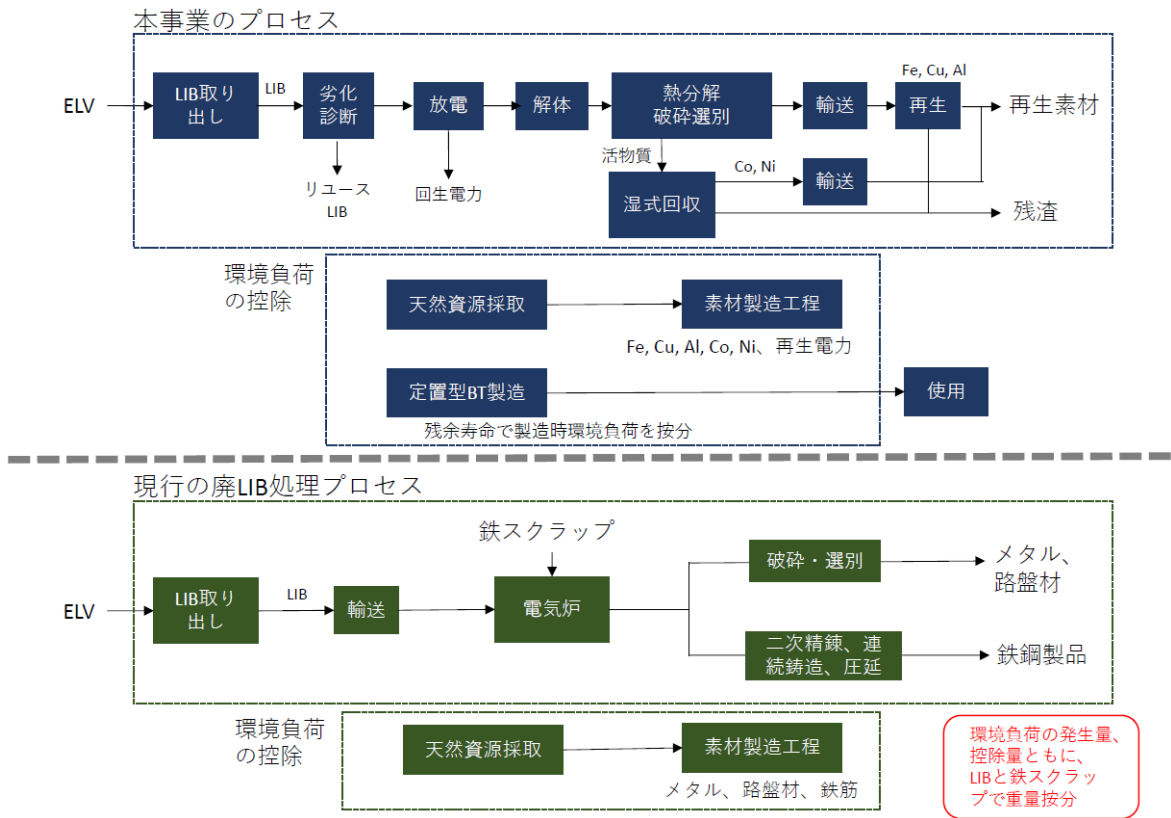


図 4. 2. 1-1 リサイクル評価のシステム境界

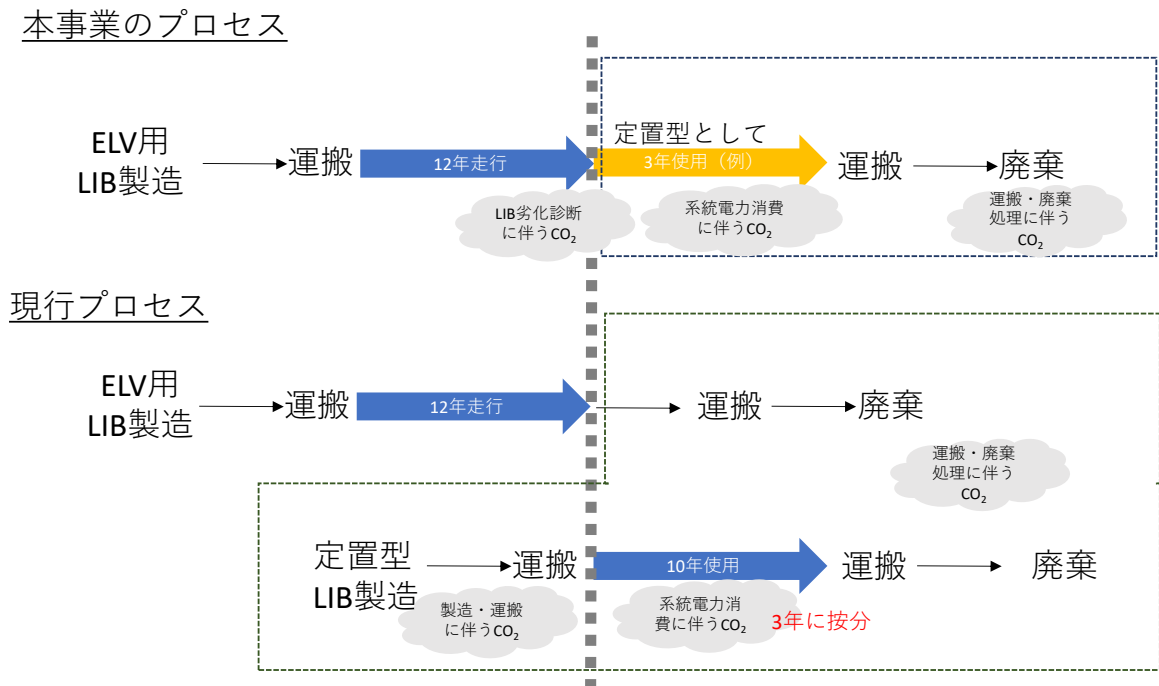


図 4. 2. 1-2 リユース評価のシステム境界

(2) 工程別の評価

1) LIB 取り出し工程

過年度報告書²⁾のデータをもとにCO₂排出量を求めた。LEAFは2021年10月、FIT3は2021年7月に西日本オートリサイクルにてLIB取り出し実験を行った。

電力消費に伴うCO₂排出量は2021年度九州電力の小売電気事業者の供給に係る電気CO₂排出係数³⁾(0.305kg-CO₂/kWh)を用いた。また、軽油使用に伴うCO₂排出量は軽油製造のCO₂排出係数と環境省データ⁷⁾による軽油使用のCO₂排出係数を加えた数値

(2.855kg-CO₂/L)を用いた。なお、過年度報告書²⁾と電力のCO₂原単位が異なるため、CO₂排出量も異なる結果となった。

表4.2.1-2~3にCO₂排出量の算定結果を示す。LIB取り出し工程に伴うCO₂排出量は、LIB1台あたりFIT3では0.63kg-CO₂、LEAFでは0.99kg-CO₂となった。

表4.2.1-2 FIT3の廃LIB取り出し工程に伴うCO₂排出量

FIT3取り出し工程	CO ₂ 排出量	
	数値	単位
助力装置コンプレッサー	0.005	kg-CO ₂
フォークリフト	0.628	kg-CO ₂
合計	0.633	kg-CO ₂

表4.2.1-3 LEAFの廃LIB取り出し工程に伴うCO₂排出量

LEAF 取り出し工程	CO ₂ 排出量	
	数値	単位
車両傾転装置	0.036	kg-CO ₂
ロボット	0.020	kg-CO ₂
ねじ取り外し装置コンプレッサー	0.005	kg-CO ₂
フォークリフト	0.934	kg-CO ₂
合計	0.994	kg-CO ₂

2) 劣化診断工程

LIBは、使用状況や期間及び充放電回数により蓄電容量が徐々に減少する。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廃LIBを取り出しと同時に劣化診断し、リユースまた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。本事業では、劣化診断工程について、机上検討のみを行った為、本工程のCO₂排出量は0kg-CO₂とした。

なお、処理台数のうち70%のLIBをリユース、30%のLIBをリサイクルすると仮定して後段工程を評価した。

3) 放電工程

過年度報告書⁴⁾を参考に放電装置を選定した。放電装置の仕様を表4.2.1-4に示す。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もつ。放電装置内の電子負荷には、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種類がある。本事業では、電力回生式の放電装置を導入した。

本実証試験で得られた回生電力量を表4.2.1-5に示す。FIT3ではLIB1台あたり0.24kWh/台-LIB、LEAFではLIB1台あたり10.03kWh/台-LIBの回生電力が得られた。これらのデータに電力消費に伴うCO₂排出量³⁾(0.305kg-CO₂/kWh)を乗じて天然資源からの製造プロセスの代替効果(系統電力のCO₂削減量)を求めた。

天然資源からの製造プロセスの代替効果(CO₂削減量)を表4.2.1-6~7に示す。放電工程の天然資源からの製造プロセスの代替効果(CO₂削減量)はFIT3とLEAF、LIB1台あたりそれぞれ0.07kg-CO₂、3.06kg-CO₂となった。

表4.2.1-4 放電装置の仕様

項目	仕様
【電子負荷】	
電圧	0-500V
電流	0-180A
電力	15kW
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	50μs以下(CCモード時)
AC入力	三相AC188~228V、45~66Hz

表4.2.1-5 FIT3-LIBとLEAF-LIBの回生電力量

回生電力量	LEAF		FIT3	
	AESC : 30kWh		Blue Energy : 0.864kWh	
	10.03	kWh/台-LIB	0.24	kWh/台-LIB

表 4.2.1-6 FIT3-LIB の回生電力による CO₂削減量

FIT3-LIB	CO ₂ 削減量	
	数値	単位
回生電力量	0.0732	kg-CO ₂

表 4.2.1-7 LEAF-LIB の回生電力による CO₂削減量

LEAF-LIB	CO ₂ 削減量	
	数値	単位
回生電力量	3.059	kg-CO ₂

4) 解体工程

解体工程における電力使用量と回収物量のデータをもとに、CO₂排出量と天然資源からの製造プロセスの代替効果を求めた。なお、解体工程の回収物のうち、Fe は電炉メーカーで Fe 再生、Cu と基板は Cu 製錬所で再生、Al は Al 製錬所で再生されるとした。その他、樹脂とゴムは産業廃棄物として焼却処理するとした。

電力消費に伴う CO₂排出量は、2021 年度九州電力の小売電気事業者の供給に係る電気 CO₂排出係数⁶⁾ (0.305kg-CO₂/kWh) を用いた。回収物の天然資源からの製造プロセス代替効果においては、Cu と基板は過年度報告書⁵⁾ より、採掘を含む原単位 (2.31kg-CO₂) からリサイクル材から製錬する場合の原単位 (0.741kg-CO₂) を引いた値を用いた。また、Al は Cu と同様に同報告書⁵⁾ より採掘を含む原単位 (9.22kg-CO₂) からリサイクル材から製錬する場合の原単位 (0.157kg-CO₂) を引いた値を用いた。

CO₂排出量及び天然資源からの製造プロセスの代替効果の結果を、それぞれ表 4.2.1-8～13 に示す。FIT3 においては、CO₂排出量の合計が 4.7kg-CO₂、天然資源からの製造プロセスの代替効果の合計が 22.7kg-CO₂となった。LEAF (30kWh) 及び LEAF (40kWh) においては、どちらも CO₂排出量の合計が 6.1kg-CO₂、天然資源からの製造プロセスの代替効果の合計が 119.2kg-CO₂となった。

表 4. 2. 1-8 FIT3-LIB の解体工程における CO₂排出量

FIT3-LIB	解体工程		CO ₂ 排出量	
			数値	単位
電力使用量	電気設備	解体ライン、ロボット等	0.5	kg-CO ₂
		電動フォークリフト	LIB搬送	0.0
	作業台輸送		0.0	kg-CO ₂
	回収物輸送		0.0	kg-CO ₂
	建屋共通	照明機器等	1.3	kg-CO ₂
回収物	樹脂		2.8	kg-CO ₂
	発泡スチロール		0.0	kg-CO ₂
	ゴム		0.1	kg-CO ₂
合計			4.7	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-9 FIT3-LIB の解体工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果

FIT3-LIB	解体工程		CO ₂ 排出量	
			数値	単位
回収物	Fe		16.3	kg-CO ₂
	Cu		3.9	kg-CO ₂
	基板		2.5	kg-CO ₂
合計			22.7	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-10 LEAF (30kWh) -LIB の解体工程における CO₂排出量

LEAF-LIB	解体工程		CO ₂ 排出量	
			数値	単位
電力使用量	電気設備	解体ライン、ロボット等	0.6	kg-CO ₂
		電動フォークリフト	LIB搬送	0.0
	作業台輸送		0.0	kg-CO ₂
	回収物輸送		0.0	kg-CO ₂
	建屋共通	照明機器等	2.7	kg-CO ₂
回収物	樹脂		2.8	kg-CO ₂
	ゴム		0.0	kg-CO ₂
合計			6.1	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-11 LEAF (30kWh) -LIB の解体工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果

LEAF-LIB	解体工程		CO ₂ 排出量	
			数値	単位
	回収物	Fe	98.7	kg-CO ₂
		Cu	4.6	kg-CO ₂
		Al	15.9	kg-CO ₂
	合計		119.2	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-12 LEAF (40kWh) -LIB の解体工程における CO₂排出量

LEAF-LIB	解体工程		CO ₂ 排出量			
			数値	単位		
	電力使用量	電気設備	解体ライン、ロボット等	0.6	kg-CO ₂	
		電動フォークリフト	LIB搬送		0.0	kg-CO ₂
			作業台輸送		0.0	kg-CO ₂
			回収物輸送		0.0	kg-CO ₂
		建屋共通	照明機器等	2.7	kg-CO ₂	
	回収物	樹脂		2.8	kg-CO ₂	
		ゴム		0.0	kg-CO ₂	
合計		6.1	kg-CO ₂			

表 4. 2. 1-13 LEAF (40kWh) -LIB の解体工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果

LEAF-LIB	解体工程		CO ₂ 排出量	
			数値	単位
	回収物	Fe	103.8	kg-CO ₂
		Cu	6.8	kg-CO ₂
		Al	8.6	kg-CO ₂
	合計		119.2	kg-CO ₂

5) 熱処理工程

熱処理工程では、FIT3 モジュール (413kg)、LEAF モジュール (360kg) を各 LIB の混焼処理とした。過年度報告書⁶⁾を参考にした熱分解炉の仕様を表 4. 2. 1-14 に示す。得られた実証試験の活動量データに、CO₂排出原単位を乗じて CO₂排出量を算出した。

電力消費に伴う CO₂排出量は、2021 年度九州電力の小売電気事業者の供給に係る電気 CO₂排出係数³⁾ (0.305kg-CO₂/kWh) を用いた。また、LPG 消費に伴う CO₂排出原単位は、LPG 製造の CO₂排出原単位と環境省データ⁷⁾による LPG 使用の CO₂排出原単位を足した値 (3.702kg-CO₂/kg) を用いた。加えて、LPG は日本 LP ガス協会が公表している換算係数⁸⁾を用いて得られたデータの単位換算を行った。

FIT3 と LEAF それぞれの算出結果を表 4.2.1-15~18 に示す。FIT3 及び LEAF の熱処理工程における CO₂排出量は、それぞれ 5.6kg-CO₂、73.9kg-CO₂となった。また、天然資源からの製造プロセスの代替効果は、FIT3 が 4.2kg-CO₂、LEAF (40kWh) が 51.4kg-CO₂となった。

表 4.2.1-14 熱分解炉の仕様

熱分解方法	加熱蒸気式熱分解炉
原料装入方法	バッチ式
熱分解炉雰囲気温度	450~600°C
熱分解炉 容積	4m ³

表 4.2.1-15 FIT3-LIB の熱処理工程における CO₂排出量

	熱処理工程			CO ₂ 排出量	
				数値	単位
FIT3-LIB	原料装入	電気	電動フォークリフト	0.0	kg-CO ₂
	熱分解	LPG		5.3	kg-CO ₂
		電気	ボイラー電力	0.0	kg-CO ₂
			バッチ炉電灯、雑動	0.1	kg-CO ₂
			バッチ炉動力	0.2	kg-CO ₂
		水道水 (上水)	ボイラー	0.0	kg-CO ₂
	残さ搬出、移動	電気	電動フォークリフト	0.0	kg-CO ₂
	合計			5.6	kg-CO ₂

表 4.2.1-16 FIT3-LIB の熱処理工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果

	熱処理工程			CO ₂ 排出量	
				数値	単位
FIT3-LIB	回収物	磁着物	Fe	0.5	kg-CO ₂
		非磁着物	Cu	3.7	kg-CO ₂
	合計			4.2	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-17 LEAF-LIB の熱処理工程における CO₂排出量

	熱処理工程			CO ₂ 排出量	
				数値	単位
LEAF-LIB	原料装入	電気	電動フォークリフト	0.0	kg-CO ₂
	熱分解	LPG		69.8	kg-CO ₂
		電気	ボイラー電力	0.1	kg-CO ₂
			バッチ炉電灯、雑動	1.2	kg-CO ₂
			バッチ炉動力	2.7	kg-CO ₂
		水道水（上水）	ボイラー	0.0	kg-CO ₂
	残さ搬出、移動	電気	電動フォークリフト	0.0	kg-CO ₂
	合計			73.9	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-18 LEAF -LIB の熱処理工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果

	熱処理工程			CO ₂ 排出量	
				数値	単位
LEAF-LIB	回収物	磁着物	Fe	23.3	kg-CO ₂
		非磁着物	Cu	28.0	kg-CO ₂
		合計			51.4

6) 破碎・選別工程

破碎・選別工程における電力使用量データをもとに、CO₂排出量と天然資源からの製造プロセスの代替効果を求めた。

電力消費に伴う CO₂排出量は、2021 年度九州電力の小売電気事業者の供給に係る電気 CO₂排出係数³⁾ (0.305kg-CO₂/kWh) を用いた。

FIT3 と LEAF それぞれの算出結果を表 4. 2. 1-19～20 に示す。破碎・選別工程における LIB 1 台あたりの CO₂排出量は、FIT3 は 0.9kg-CO₂、LEAF においては 6.6kg-CO₂ という結果となった。

表 4. 2. 1-19 FIT3-LIB の破碎・選別工程における CO₂排出量

	破碎・選別工程		CO ₂ 排出量		
			数値	単位	
FIT3-LIB	電気使用量	原料二軸破碎機装入	電動フォークリフト	0.0	kg-CO ₂
		二軸せん段破碎処理	二軸せん段破碎機、集塵機	0.2	kg-CO ₂
		ハンマー破碎機装入	電動フォークリフト	0.0	kg-CO ₂
		ハンマ破碎機・選別	ハンマー破碎機、選別機	0.6	kg-CO ₂
		建屋共通	電灯、雑動電力	0.1	kg-CO ₂
		産物計量、保管場へ移動	電動フォークリフト	0.0	kg-CO ₂
	合計			0.9	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-20 LEAF-LIB の破碎・選別工程における CO₂排出量

	破碎・選別工程		CO ₂ 排出量		
			数値	単位	
LEAF-LIB	電気使用量	原料二軸破碎機装入	電動フォークリフト	0.0	kg-CO ₂
		二軸せん段破碎処理	二軸せん段破碎機、集塵機	0.3	kg-CO ₂
		ハンマー破碎機装入	電動フォークリフト	0.0	kg-CO ₂
		ハンマ破碎機・選別	ハンマー破碎機、選別機	5.1	kg-CO ₂
		建屋共通	電灯、雑動電力	1.1	kg-CO ₂
		産物計量、保管場へ移動	電動フォークリフト	0.1	kg-CO ₂
	合計			6.6	kg-CO ₂

7) 湿式回収工程

湿式回収工程における電力使用量、薬品使用量、廃棄物要処理量データをもとに、CO₂排出量と天然資源からの製造プロセスの代替効果を求めた。

電力消費に伴う CO₂排出量は、2021 年度九州電力の小売電気事業者の供給に係る電気 CO₂排出係数³⁾ (0.305kg-CO₂/kWh) を用いた。Co と Ni の CO₂排出原単位は、過年度報告書⁹⁾を参考にした。

FIT3 と LEAF それぞれの算出結果を表 4. 2. 1-21～24 に示す。FIT3 及び LEAF の湿式回収工程における CO₂排出量は、それぞれ 68.5kg-CO₂、893kg-CO₂となった。また、天然資源からの製造プロセスの代替効果は、FIT3 が 16.7kg-CO₂、LEAF が 192.1kg-CO₂となった。

表 4. 2. 1-21 FIT3-LIB の湿式回収工程における CO₂排出量

FIT3-LIB	湿式工程		CO ₂ 排出量	
			数値	単位
	電気使用量	共通電気設備	36.9	kg-CO ₂
	上水使用量		0.5	kg-CO ₂
薬品	98%硫酸		0.3	kg-CO ₂
	48%苛性ソーダ		8.6	kg-CO ₂
	12%次亜塩素酸ソーダ		0.1	kg-CO ₂
	35%過酸化水素水		20.0	kg-CO ₂
廃棄物	硫酸ナトリウム溶液		2.2	kg-CO ₂
	浸出残渣		0.0	kg-CO ₂
合計			68.5	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-22 FIT3-LIB の湿式工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果

FIT3-LIB	湿式工程		CO ₂ 排出量	
			数値	単位
回収物	硫酸コバルト		14.4	kg-CO ₂
	硫酸ニッケル		2.3	kg-CO ₂
合計			16.7	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-23 LEAF-LIB の湿式回収工程における CO₂排出量

LEAF-LIB	湿式工程		CO ₂ 排出量	
			数値	単位
	電気使用量	共通電気設備	426	kg-CO ₂
	上水使用量		7	kg-CO ₂
薬品	98%硫酸		3	kg-CO ₂
	48%苛性ソーダ		51	kg-CO ₂
	12%次亜塩素酸ソーダ		2	kg-CO ₂
	35%過酸化水素水		376	kg-CO ₂
廃棄物	硫酸ナトリウム溶液		28	kg-CO ₂
	浸出残渣		0	kg-CO ₂
合計			893	kg-CO ₂

表 4.2.1-24 LEAF-LIB の湿式工程における天然資源からの製造プロセスの代替効果

LEAF-LIB	湿式工程		CO ₂ 排出量	
			数値	単位
	回収物	硫酸コバルト	94.6	kg-CO ₂
硫酸ニッケル		97.4	kg-CO ₂	
合計		192.1	kg-CO ₂	

8) 輸送工程

輸送工程においては、過年度報告書¹⁰⁾を参考にした。同報告書¹⁰⁾では、LIBを九州地域の各県で取り出し北九州エコタウンまで輸送する方法と、ELVを直接北九州エコタウンまで輸送しLIB取り出しを行う方法の2パターンの輸送に伴うCO₂排出量が推計されたが、本報告では、LIBを取り出し北九州エコタウンまで輸送する方法を選択した。

LIBを取り出して輸送する際に伴うCO₂排出量は、LIB 1台あたりFIT3は5.5kg-CO₂、LEAFは21.1kg-CO₂であった(表4.2.1-25~26)。

表 4.2.1-25 FIT3-LIB の輸送工程におけるCO₂排出量

FIT3-LIB	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)	廃車台数	1台あたりCO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /台-LIB)
LIBを取り出して輸送	20.5	3737	5.5
ELVのまま輸送	284.8	3737	76.2

表 4.2.1-26 LEAF-LIB の輸送工程におけるCO₂排出量

LEAF-LIB	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)	廃車台数	1台あたりCO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /台-LIB)
LIBを取り出して輸送	14.8	704	21.1
ELVのまま輸送	50.5	704	71.8

(3) リユースの推計結果

リユースについては、車載用 LIB として使用後、新品 LIB の 7 割の能力で定置用 LIB に転用後、3 年間使用可能とした。比較対照プロセスとしては、新品 LIB の寿命を 10 年間使用すると想定した。本実証試験のプロセスを基準に使用期間を 3 年間に按分、容量劣化を考慮し推計した。

車載用 LIB の製造時 CO₂排出量について、工藤ら¹¹⁾、石崎¹²⁾で報告されており、その推計値のうち LIB 製造に伴う CO₂排出量を使用した (LIB 製造に伴う CO₂排出量 : LEAF (40kWh) 4.5t-CO₂、Prius HEV 0.4t-CO₂)。また、FIT3 の LIB 製造に伴う CO₂排出量のデータは得られなかったため、HEV である Prius HEV のデータを電池容量で換算して用いた (LIB 製造に伴う CO₂排出量の FIT3 換算値 : 460.8kg-CO₂)。

以上の条件より、リユースによる天然資源からの製造プロセスの代替効果を求めた。リユースによる CO₂削減量は、LEAF (40kWh) が 945kg-CO₂、FIT3 が 96.768kg-CO₂ という結果となった。

(4) 比較対照プロセス

比較対照プロセスとして、現行の処理プロセスは図 4.2.1-1 に示したように、廃 LIB を再生鉄製造する電炉で処理し、Fe とスラグのみをリサイクルするとした。

回収される Fe の重量については、本事業で回収された Fe の重量と同じになるものとした。電炉工程の物質収支は、基礎素材のエネルギー解析調査報告書¹³⁾の電炉による粗鋼製造エネルギーを参考にした。電炉工程の物質収支を図 4.2.1-3 に示す。電炉工程の活動量は、FIT3、LEAF (30kWh、40kWh) それぞれの LIB の重量から、図 4.2.1-3 の物質収支をもとに推計した。電炉工程で発生するスラグ量についても図 4.2.1-3 の物質収支を参考に求め、スラグは路盤材として再利用されるとした (スラグ量 : FIT3 1.324kg、LEAF 30kWh 8.008kg、LEAF 40kWh 8.424kg)。なお、取り出し工程と輸送工程については、本事業と同じ値を用いた。

算出した結果を表 4.2.1-27~32 に示す。CO₂排出量において、FIT3 は 28.9kg-CO₂、LEAF (30kWh) は 207.9kg-CO₂、LEAF (40kWh) は 217.5kg-CO₂であった。天然資源からの代替効果については、FIT3 は 25.6kg-CO₂、LEAF (30kWh) は 185.6kg-CO₂、LEAF (40kWh) は 193.4kg-CO₂であった。

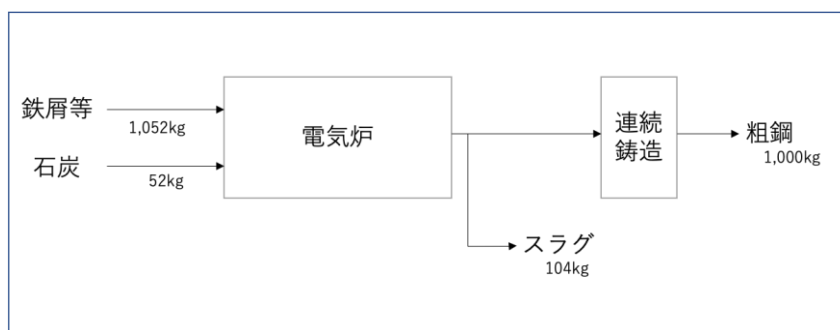


図 4. 2. 1-3 電炉工程の物質収支

表 4. 2. 1-27 FIT3 の現行プロセスにおける CO₂排出量

FIT3-LIB	現行プロセス	CO ₂ 排出量	
		数値	単位
	取り出し工程	0.6	kg-CO ₂
	輸送工程	5.5	kg-CO ₂
	電気炉工程	22.7	kg-CO ₂
	合計	28.9	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-28 FIT3 の現行プロセスにおける天然資源からの製造プロセスの代替効果

FIT3-LIB	現行プロセス	CO ₂ 排出量	
		数値	単位
	路盤材	0.01	kg-CO ₂
	粗鋼	25.6	kg-CO ₂
	合計	25.6	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-29 LEAF-LIB (30kWh) の現行プロセスにおける CO₂排出量

LEAF-LIB	現行プロセス	CO ₂ 排出量	
		数値	単位
	取り出し工程	1.0	kg-CO ₂
	輸送工程	21.1	kg-CO ₂
	電気炉工程	185.9	kg-CO ₂
	合計	207.9	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-30 LEAF-LIB (30kWh) の現行プロセスにおける天然資源からの製造プロセスの代替効果

LEAF-LIB	現行プロセス	CO ₂ 排出量	
		数値	単位
	路盤材	0.03	kg-CO ₂
	粗鋼	185.6	kg-CO ₂
	合計	185.6	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-31 LEAF-LIB (40kWh) の現行プロセスにおける CO₂排出量

LEAF-LIB	現行プロセス	CO ₂ 排出量	
		数値	単位
	取り出し工程	1.0	kg-CO ₂
	輸送工程	21.1	kg-CO ₂
	電気炉工程	195.4	kg-CO ₂
	合計	217.5	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-32 LEAF-LIB (40kWh) の現行プロセスにおける天然資源からの製造プロセスの代替効果

LEAF-LIB	現行プロセス	CO ₂ 排出量	
		数値	単位
	路盤材	0.03	kg-CO ₂
	粗鋼	193.4	kg-CO ₂
	合計	193.4	kg-CO ₂

(5) CO₂排出量比較

本事業のプロセスと現行の対照プロセスのライフサイクル CO₂排出量の比較結果を、表 4. 2. 1-33～35 に示す。

また、年間処理目標台数 (LEAF 704 台、FIT3 3,737 台) を想定した年間 CO₂削減効果を、図 4. 2. 1-4～6 に示す。年間の CO₂削減効果は、LEAF (30kWh) は 220t-CO₂、LEAF (40kWh) は 338t-CO₂、FIT3 は 202t-CO₂と算出された。

表 4.2.1-33 LEAF (30kWh) のライフサイクル比較結果

LEAF30kWh/台-LIB	現行プロセス	本実証試験	単位
取り出し工程	1	1	kg-CO ₂
輸送工程	21	21	kg-CO ₂
劣化診断・放電工程	—	0	kg-CO ₂
解体工程	—	6	kg-CO ₂
熱処理工程	—	74	kg-CO ₂
破碎・選別工程	—	7	kg-CO ₂
湿式回収工程	—	467	kg-CO ₂
湿式回収工程（電気）	—	426	kg-CO ₂
電炉処理工程	186	—	kg-CO ₂
天然資源からの製造プロセスの代替効果	-186	-366	kg-CO ₂
リサイクル合計	22	636	kg-CO ₂
リユース	—	-709	kg-CO ₂

表 4.2.1-34 LEAF (40kWh) のライフサイクル比較結果

LEAF40kWh/台-LIB	現行プロセス	本実証試験	単位
取り出し工程	1	1	kg-CO ₂
輸送工程	21	21	kg-CO ₂
劣化診断・放電工程	—	0	kg-CO ₂
解体工程	—	6	kg-CO ₂
熱処理工程	—	74	kg-CO ₂
破碎・選別工程	—	7	kg-CO ₂
湿式回収工程	—	467	kg-CO ₂
湿式回収工程（電気）	—	426	kg-CO ₂
電炉処理工程	195	—	kg-CO ₂
天然資源からの製造プロセスの代替効果	-193	-366	kg-CO ₂
リサイクル合計	24	636	kg-CO ₂
リユース	—	-945	kg-CO ₂

表 4. 2. 1-35 FIT3 のライフサイクル比較結果

FIT3/台-LIB	現行プロセス	本実証試験	単位
取り出し工程	1	1	kg-CO ₂
輸送工程	5	5	kg-CO ₂
劣化診断・放電工程	—	0	kg-CO ₂
解体工程	—	5	kg-CO ₂
熱処理工程	—	6	kg-CO ₂
破碎・選別工程	—	1	kg-CO ₂
湿式回収工程	—	32	kg-CO ₂
湿式回収工程（電気）	—	37	kg-CO ₂
電炉処理工程	23	—	kg-CO ₂
天然資源からの製造プロセスの代替効果	-26	-44	kg-CO ₂
リサイクル合計	3	42	kg-CO ₂
リユース	—	-97	kg-CO ₂

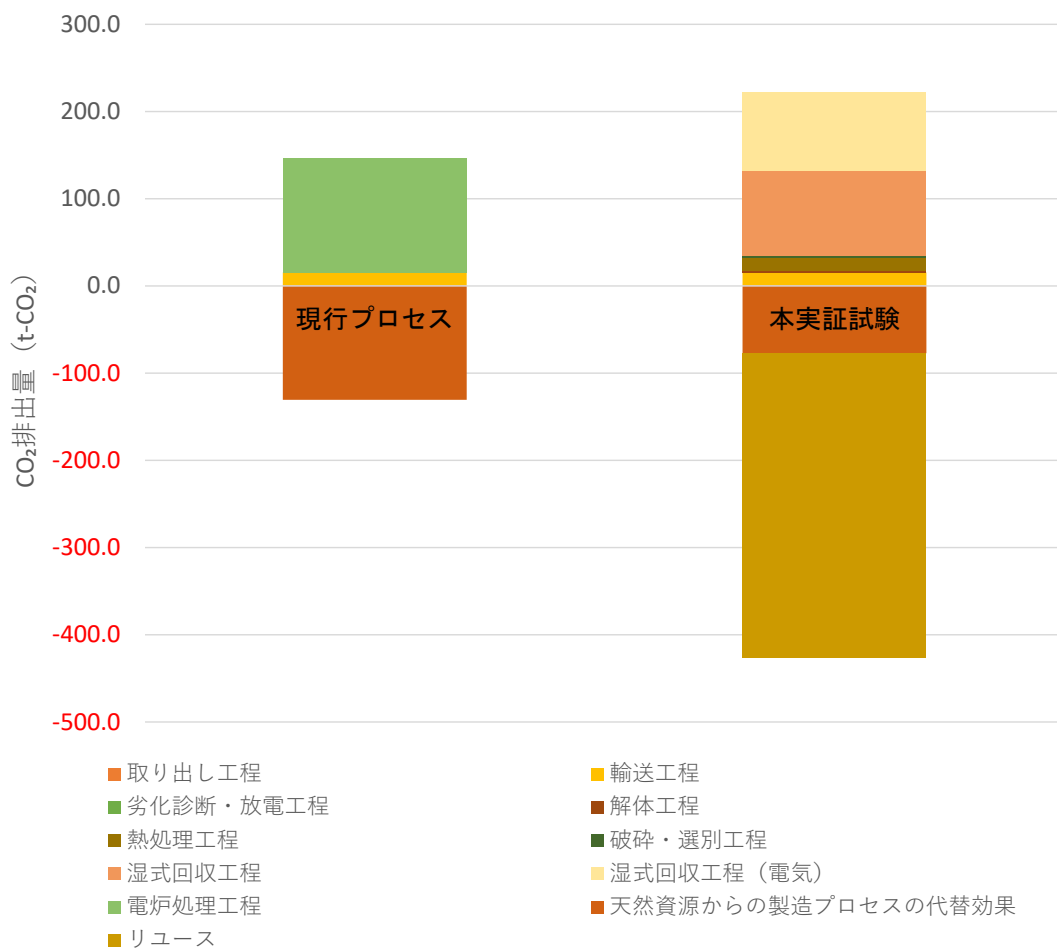


図 4. 2. 1-4 LEAF (30kWh) のライフサイクル比較結果

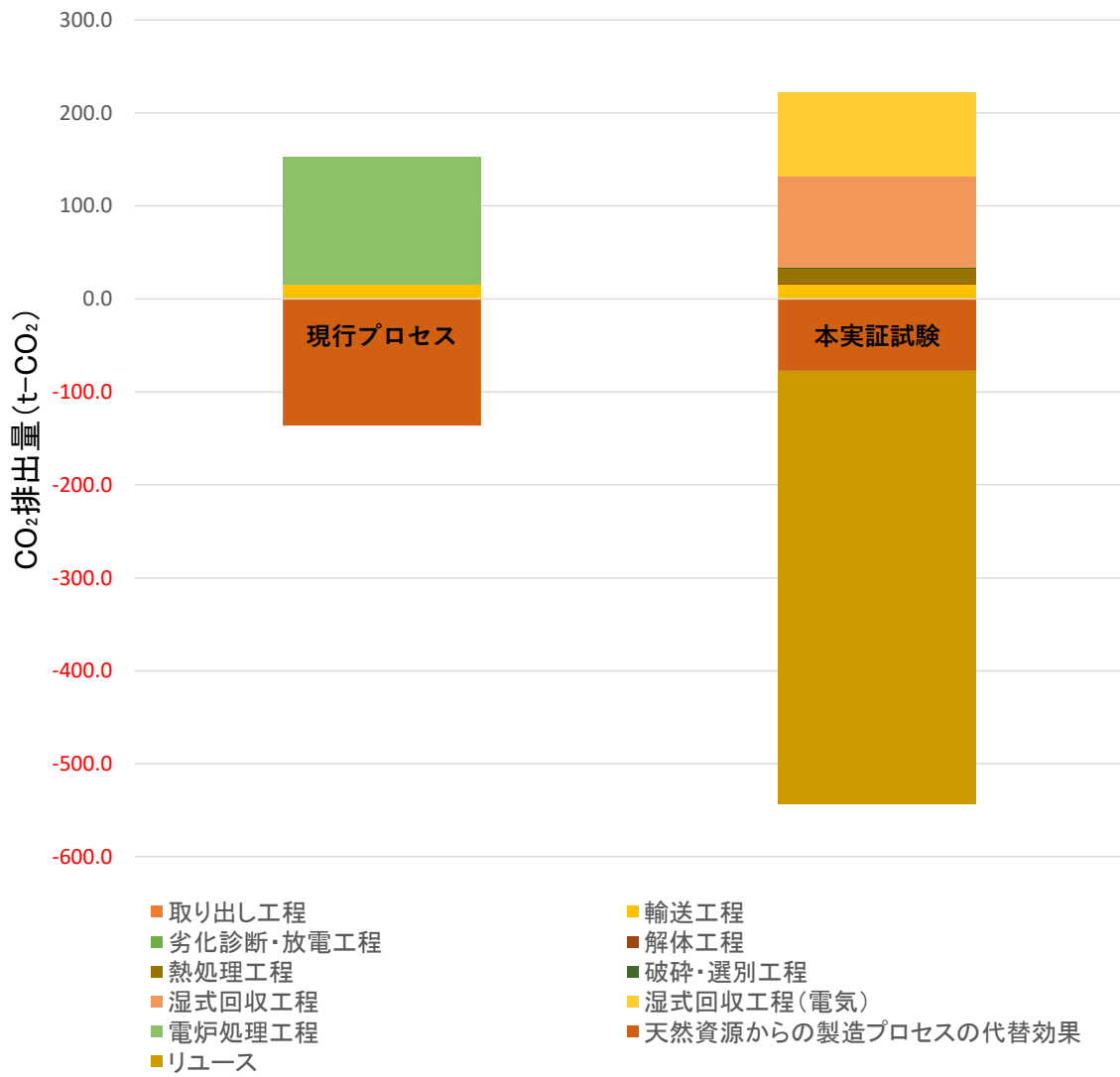


図 4. 2. 1-5 LEAF (40kWh) のライフサイクル比較結果

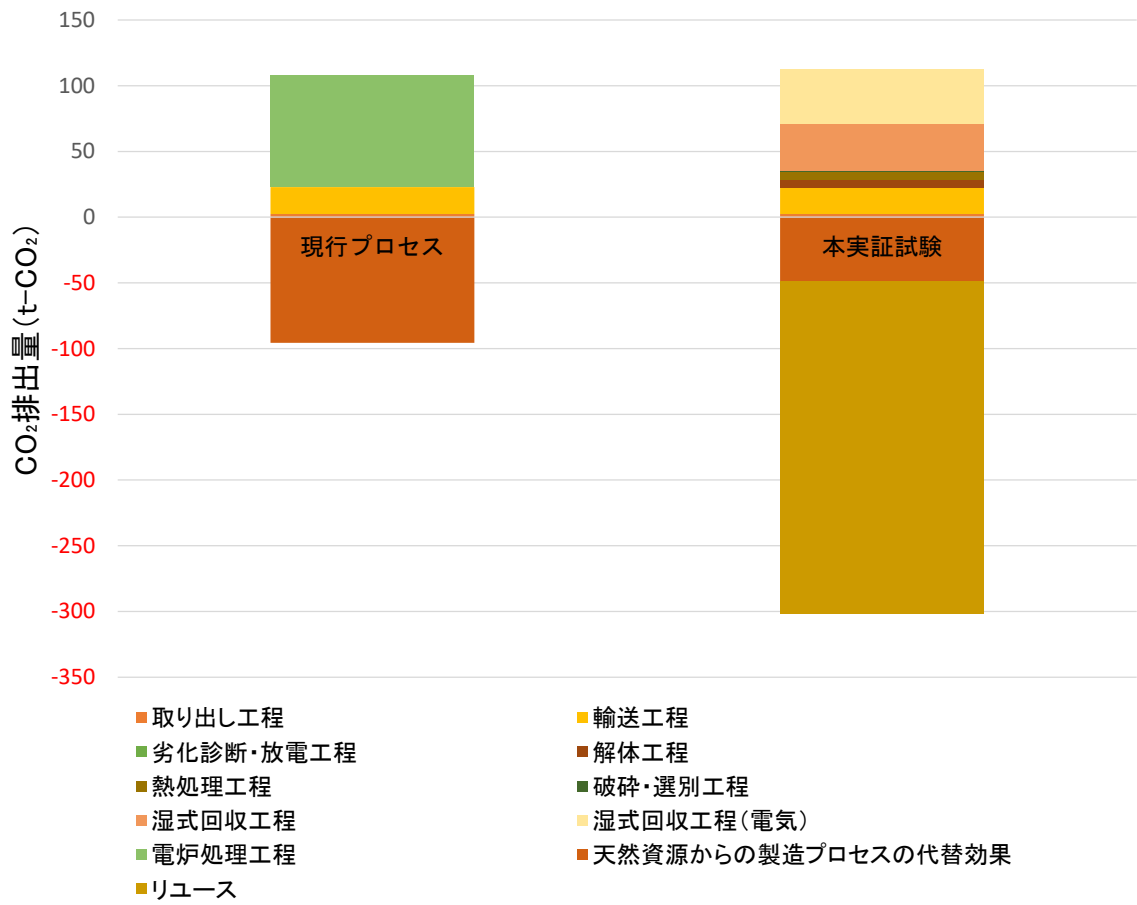


図 4.2.1-6 FIT3 のライフサイクル比較結果

4. 2. 2 環境負荷削減効果

(1) TMR (関与物質総量)

TMR (関与物質総量) を用いて環境負荷削減効果を評価する。人間の経済活動に伴う直接的・間接的な物質の量、および経済外の隠れたフロー量を含めた物質の量を表す指標である。隠れたフローは、直接のおよび間接的な経済活動に伴う物質以外にその行為に伴って起こる物質の移動や攪乱の量であり、採掘に伴う岩石や土砂の移動、森林の伐採、石油採掘などに必要とされる水を含めた変更された水系、さらには土地の再生や景観の保護のために必要な物質の総量も含める。

算出に用いた TMR 係数は、表 4. 2. 2-1 のとおりである。Fe、Cu の TMR 係数としては、NIMS-EMC 材料環境情報データ¹⁴⁾を用いた。環境負荷量及び負荷削減量いずれの算定にも、天然鉱床から採掘等を経て最終目的産物を得るまでを積算した自然鉱石 TMR を用いた。

表 4. 2. 2-1 TMR 係数の設定

	TMR係数	単位	出典
電力	1.89	kg-TMR/kWh	14
石油	7.4	kg-TMR/L	14
Fe	5.1	t-TMR/t	14
Fe (粗鋼)	5	t-TMR/t	15
Cu	300	t-TMR/t	14
Cu	125~455	t-TMR/t	15
Al	10	t-TMR/t	14
Co	870	t-TMR/t	14
Ni	200	t-TMR/t	14

(2) TMR の推計結果

本研究プロセスと現行プロセスの電気使用量、石油使用量、及び回収される金属の TMR を試算し、TMR を算出した。Fe は図 4. 2. 1-3 で示したように電炉工程の物質収支¹³⁾を参考に、本実証試験で回収された重量から製錬される粗鋼の量を求めた値を使用した。その他の金属 Cu、Al、Co、Ni に関しては本実証試験で回収された重量を用いた。

推計結果を表 4. 2. 2-2~4 及び図 4. 2. 2-1~3 に示す。現行プロセスと比較した TMR 削減効果は、LEAF (30kWh) では 8,060kg-TMR、LEAF (40kWh) では 8,474654kg-TMR、FIT3 では 1,708kg-TMR と試算された。

表 4.2.2-2 LEAF (30kWh) の TMR 比較結果

LEAF(30kWh)/LIB台	現行プロセス	本実証試験	単位
電気	247	87	kg-TMR
電気(湿式工程)	—	2,639	kg-TMR
石油	62	62	kg-TMR
Fe	-481	-481	kg-TMR
Cu	0	-6,250	kg-TMR
Al	0	-18	kg-TMR
Co	0	-2,973	kg-TMR
Ni	0	-1,299	kg-TMR
合計	-172	-8,232	kg-TMR

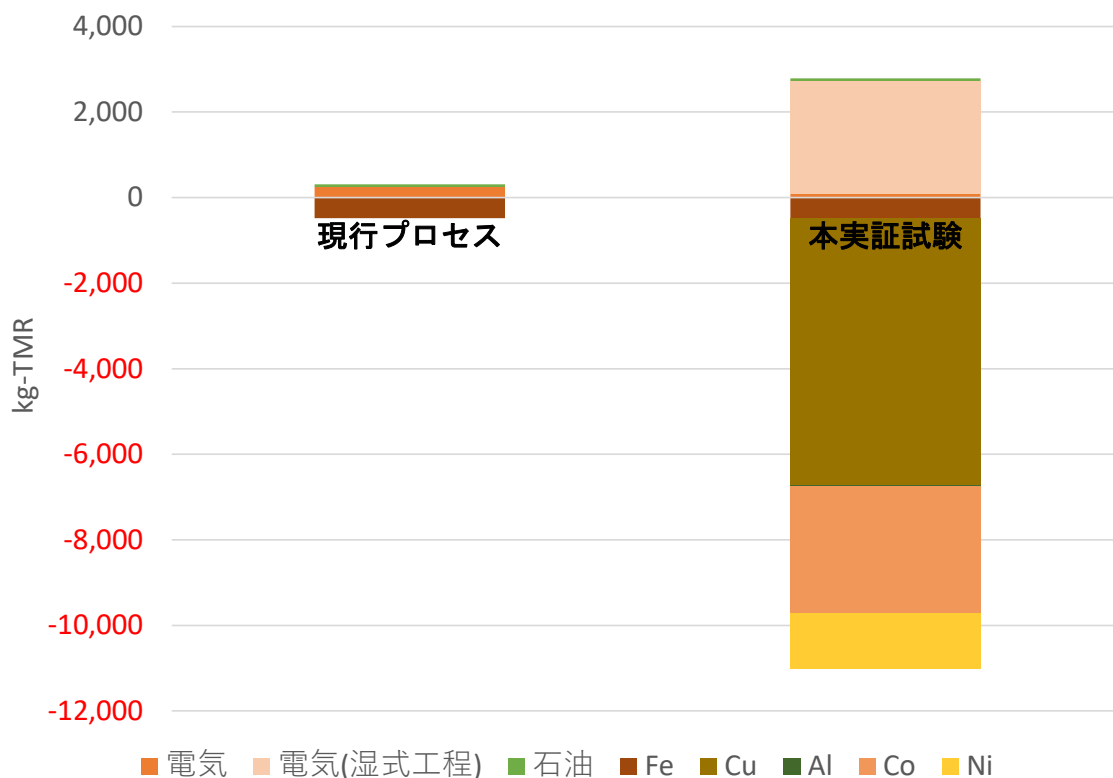


図 4.2.2-1 LEAF (30kWh) の TMR 比較結果

表 4. 2. 2-3 LEAF (40kWh) の TMR 比較結果

LEAF(40kWh)/LIB台	現行プロセス	本実証試験	単位
電気	259	87	kg-TMR
電気(湿式工程)	—	2,639	kg-TMR
石油	62	62	kg-TMR
Fe	-501	-501	kg-TMR
Cu	-	-6,659	kg-TMR
Al	-	-10	kg-TMR
Co	-	-2,973	kg-TMR
Ni	-	-1,299	kg-TMR
合計	-180	-8,654	kg-TMR

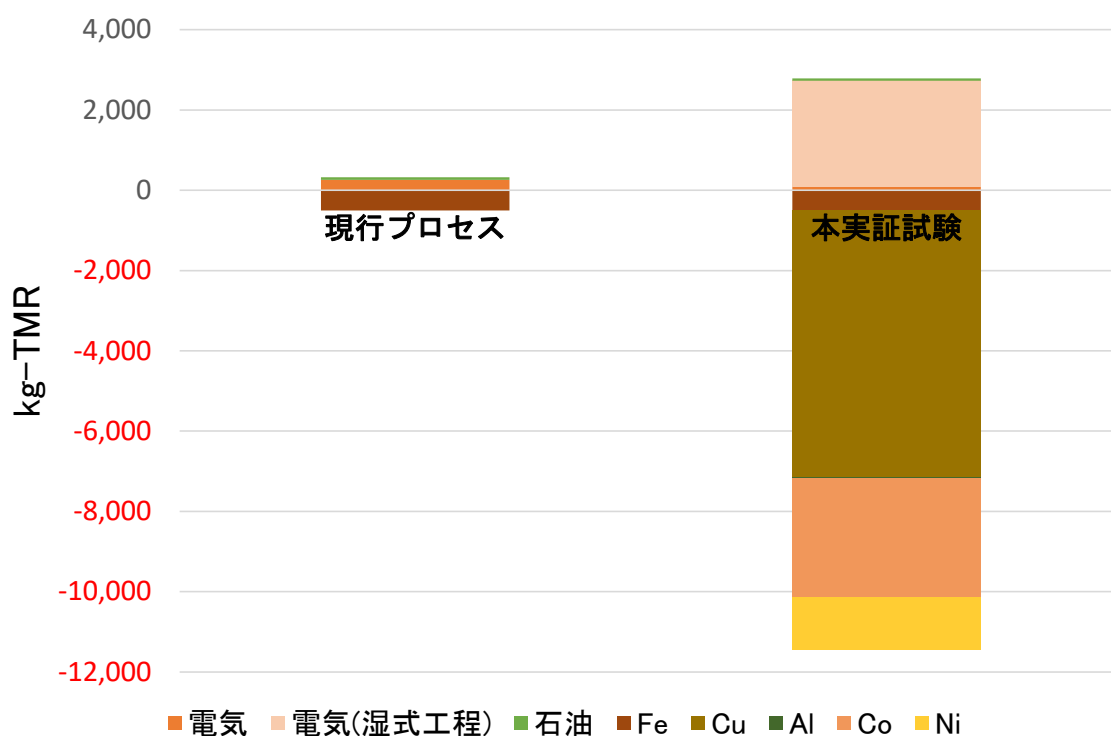


図 4. 2. 2-2 LEAF (40kWh) の TMR 比較結果

表 4. 2. 2-4 FIT3 の TMR 比較結果

FIT3/LIB台	現行プロセス	本実証試験	単位
電気	29	19	kg-TMR
電気(湿式工程)	—	229	kg-TMR
石油	17	17	kg-TMR
Fe	-66	-66	kg-TMR
Cu	-	-1,445	kg-TMR
Al	-	-	kg-TMR
Co	-	-452	kg-TMR
Ni	-	-31	kg-TMR
合計	-20	-1,728	kg-TMR

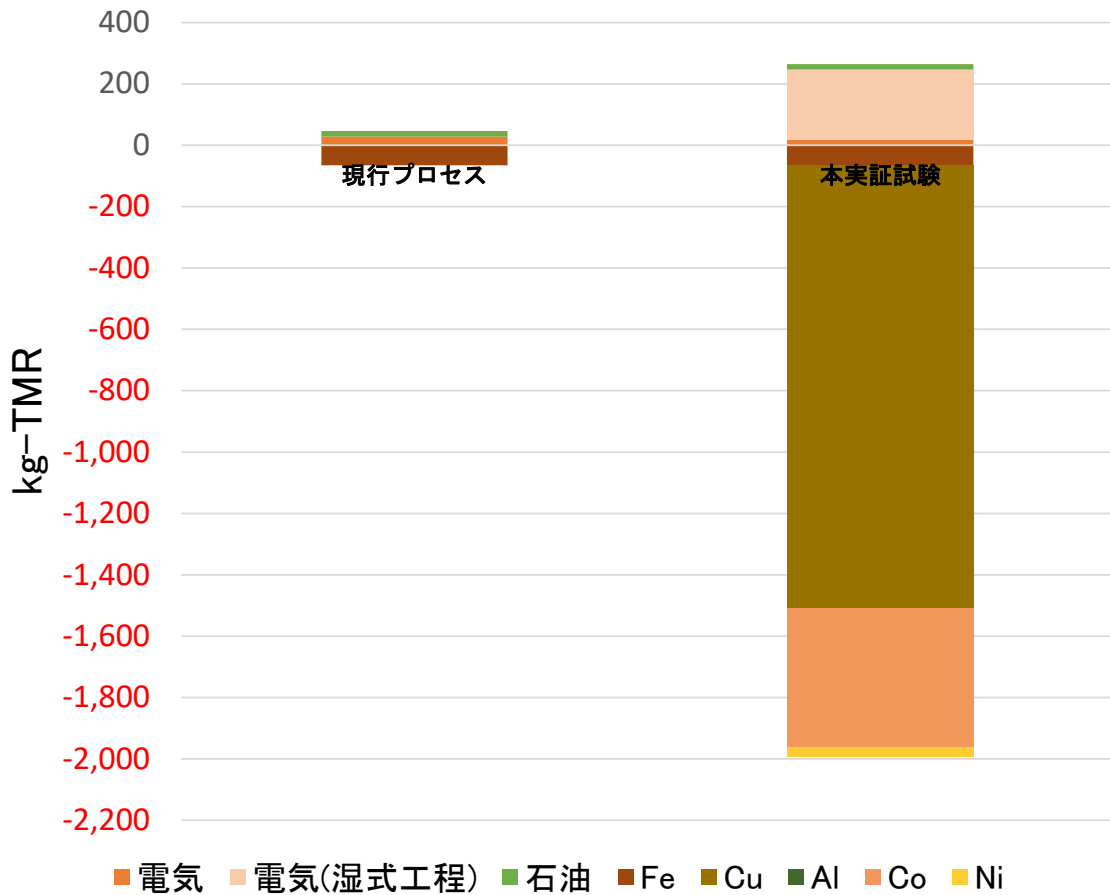


図 4. 2. 2-3 FIT3 の TMR 比較結果

4. 3 まとめと今後の課題

リサイクルシステムの環境負荷削減効果（TMR）及びLCA（ライフサイクルCO₂）削減効果について算出した。

その結果、処理1台あたりのライフサイクルCO₂では、現行プロセスにおけるFeのみの回収ではなくCuやAl、Co、Niなども含めてリサイクルすることで、天然資源からの製造プロセス代替効果が大きくなる結果となった。さらにリユースを行うことで大きなCO₂削減効果を見込める結果となった。

次に、年間のCO₂削減量を推計した。本事業では、年間処理目標台数をLEAFは704台、FIT3は3,737台としている。そのうち70%をリユース、30%をリサイクルとして推計した結果、年間のCO₂削減効果は、LEAF（30kWh）は220t-CO₂、LEAF（40kWh）は338t-CO₂、FIT3は202t-CO₂のCO₂削減効果が見込めると推計された。

TMRの推計では、本事業プロセスの方が現行プロセスよりも大きく削減効果があることがわかった。現行プロセスと比較した削減量は、LEAF（30kWh）で8,060kg-TMR/台-LIB、LEAF（40kWh）で8,474kg-TMR/台-LIB、FIT3で1,708kg-TMR/台-LIBと推計された。Co、Ni、Cuの単位重量あたりTMR量が大きいことから、本事業プロセスのTMR削減量が大きく算出された。

ライフサイクルCO₂の評価において、特にリユースの効果が大きいことがわかったが、今回のリユース評価は想定値による概算にとどまっている。そのため、リユースに関する実証データを入手し、より精緻な解析を行うことが今後の課題である。

また、CoやNiなどのレアメタルは、採掘地の偏在性が大きく、紛争等による調達リスクや児童労働の問題を有する。製品やサービスが作られる過程における社会的影響評価をする手法にソーシャル・ライフサイクルアセスメント（S-LCA：Social Life Cycle Assessment）があるが、このような手法を適用することで、社会的影響も含めたサステナビリティ評価についても今後展開の必要性がある。

5. 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

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から運転データを収集し、工程ごとの経済性を評価した。また、本事業における LIB リユース・リサイクルシステムの各工程に用いる技術又はビジネスモデルについて、金属リサイクルビジネスに横展開する可能性を検討した。さらに、実証事業で得られた技術及び経験を、将来の LIB リユース・リサイクル事業等へ活かす方策を検討した。

5. 1 昨年度までの成果

経済性評価の一環として、LIB 取り出しに対する処理コストの試算を行い、取り出し自動化設備の投資対効果を評価した。FIT3 からの LIB 取り出し作業用の助力装置については、2 名作業から 1 名作業が可能になるため、省力化効果が得られ、設備費も比較的安く、投資効率は、投資利益率=95.9%、投資回収年数=1.0 年となった。今後、解体事業者への即戦力としての横展開が期待できるものと考えられた。

LEAF からの LIB 取り出し作業用の傾転装置&ロボットネジ取り外し設備については、作業者の安心安全対策及び作業者の負荷軽減が図られることを検証した。今後、設備開発技術のブラッシュアップによって、設備費の廉価化、動作速度アップによる生産性向上効果等の更なる効果が期待できるものと考えられた。

また、金属リサイクルビジネスへの横展開として、LEAF・FIT3 以外の xEV への展開、xEV 以外の自動車への展開、蓄電ビジネスへの展開等を整理した。また、出口戦略としては、使用済 LIB のトレーサビリティ確保を含めた回収・リサイクルスキームの構築、法・制度の整備の必要性について言及した。

5. 2 本年度の成果

5. 2. 1 経済性評価

残りの3つの工程（①劣化診断・放電・解体工程、②熱分解及び破碎・選別工程、③湿式処理工程）の実証試験でデータ採取し、経済性評価を行った。

（1）経済性評価スキーム

1）基本的な考え方

本実証事業は、市場形成の過渡期であり、処理台数予測の2025年度時点では処理量も少なく、売上として計上できるものも少ないことから、いずれの工程も収益（=売上-処理コスト）はマイナスとなることが想定される。経済性評価においては、本実証事業の目標処理量のスポット的な収益計算結果ではなく、損益分岐点分析を用いて、総合的、俯瞰的な検討を行うこととした。

損益分岐点は、図5.2.1-1に示す様に、売上=処理コスト（変動費+固定費）となる処理量、若しくは、任意の処理量において売上=処理コスト（変動費+固定費）となる売上目標値を示す。この損益分岐点を超えると、限界利益（売上-変動費）で利益が得られるため、事業継続のためには、この損益分岐点を超える処理量若しくは売上が前提となる。また、限界利益が得られない場合は、事業としては成立しないため、売上アップ若しくは処理コストの削減等の収益改善対策が課題となる。

本実証事業の経済性評価では、各工程とも、横軸に処理量、縦軸に損益分岐点（収益改善目標値）の関係をグラフにした。処理量の横軸のスペンは、実証試験設備の処理能力の範囲内とした。

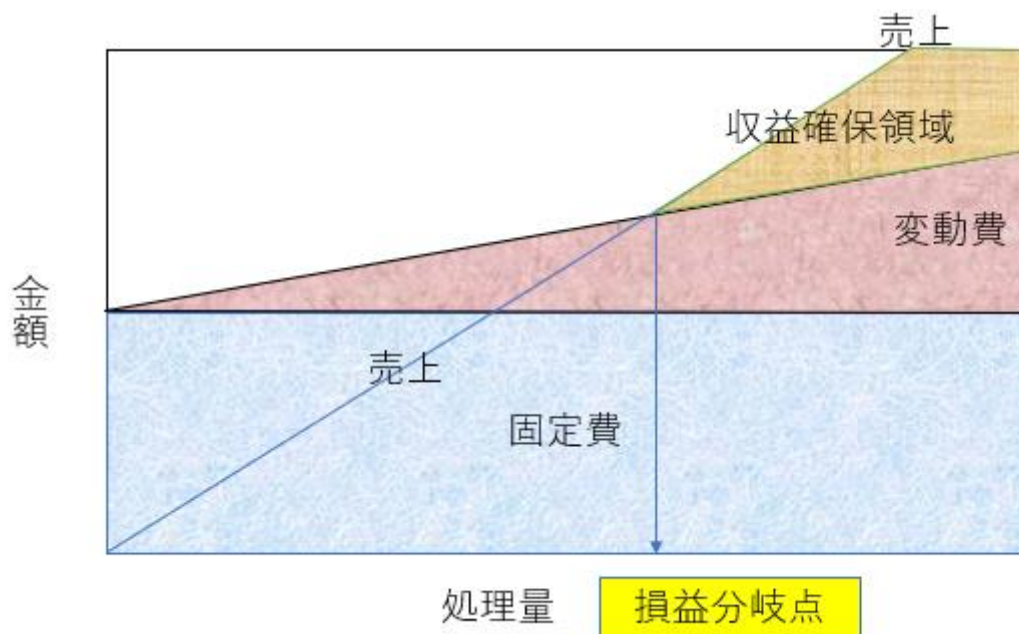


図 5.2.1-1 損益分岐点分析

- ・ 収益=売上 - 処理コスト
- ・ 売上は、処理費に応じて増える。本実証事業は、市場形成の過渡期であり、売上については、市場取引実績のないものは外し、現時点で確実に見込まれるものを計上した。
- ・ 処理コストは、変動費+固定費から構成される。変動費は、処理量に応じて発生する費用で、実証試験でデータ採取した。また、固定費は、処理量とは無関係に発生する費用であり、ここでは、労務費、管理費、減価償却費、保全費とした。労務費と管理費は、実証試験の作業分析を行い、作業要員数と労務単価から設定した。減価償却費と保全費は、実証試験で実証試験設備の処理能力分析を行い、実証試験設備費（土地等は含まれない）をベースとして、必要に応じて、設備費の補正を行った。具体的には、目標処理量を達成できる場合はそのままの設備費を採用し、処理能力が不足する場合は、（目標処理量/実証試験設備処理能力量）比の 0.6 乗則を用いて補正した。

2) 本実証事業の処理量の前提条件

2025 年度において九州全域から発生が予想される LIB 搭載電動車の廃車台数とし、販売実績の多い車種の代表として、EV は日産 LEAF、HEV はホンダ FIT3 を取り上げた。本実証事業の処理台数及び稼働日数の前提条件を表 5.2.1-1 に示す。なお、劣化診断については、本実証事業の対象外となったため、劣化診断でのリユース率 70%と仮定した。

表 5.2.1-1 本実証事業の処理台数及び稼働日数の前提条件

			LEAF	FIT3	備考
			台/年間	台/年間	
目標処理台数			704	3,737	
① 劣化診断・放電・解体工程	劣化診断	リユース	493	2,616	リユース率 = 70%
		リサイクル	211	1,121	
	放電		211	1,121	
	解体		211	1,121	
② 熱分解及び破碎・選別工程	熱分解		211	1,121	
	破碎・選別		211	1,121	
③ 湿式処理工程	酸浸出・不純物除去		211	1,121	
	溶媒抽出		211	1,121	
稼働日数			260 日/年間		

3) LIB ユニット構成の前提条件

各工程の実証試験の取扱単位は、劣化診断・放電・解体工程が LIB ユニット個数、熱分解及び破碎・選別工程は LIB ユニットから取り出された LIB モジュール重量、湿式処理工程はモジュールから取り出された活物質重量となる。

経済性評価においては、各工程の取扱単位を統一させるため、表 5.2.1-2 に示す LIB ユニット構成比率を用いて、処理台数へ補正計算を行った。

表 5.2.1-2 LIB ユニット構成

	LEAF	FIT3
LIB ユニット	AESC 製 : 30kWh	Blue Energy 製 : 0.864kWh
LIB ユニット重量	293kg/台	38kg/台
LIB モジュール重量	200.2kg/台	15.2kg/台
活物質重量	87.6kg/台	6.3kg/台

(2) 劣化診断・放電・解体工程の経済性評価

1) 処理の概要

北九州エコタウン近郊で排出された廃車は、西日本オートリサイクルに搬入し、実証試験設備で LIB ユニットを取り外し、隣接する日本磁力選鉱ひびき工場内の三菱マテリアルの本工程へ搬入することとする。また、遠隔地から排出される廃車は、輸送効率を考慮し、その地域の解体事業者で LIB ユニットを取り外した後、本工程へ搬入することを想定している。

本工程では、搬入された LIB ユニットの劣化診断を行い、リユース品とリサイクル品に仕分けする。リユース品は、再製品化若しくは再利用化のためにリユース市場へ販売することを想定している。リユース率=70%と仮定して、検討を行った。リサイクル品は、LIB ユニット内の残存電力を放電し、回生電力は工場内で使用される。次に、放電された LIB ユニットは電動フォークリフトで同じ建屋内の解体搬送ラインへ搬入され、作業員と解体ロボットで解体され、資源回収のため有用物を分別回収した後、取り出されたモジュールを隣接する日本磁力選鉱ひびき工場の熱分解及び破碎・選別工程へ搬出する。

図 5.2.1-2 に劣化診断・放電・解体工程の処理フロー及び実証試験でのデータ採取マップを示す。

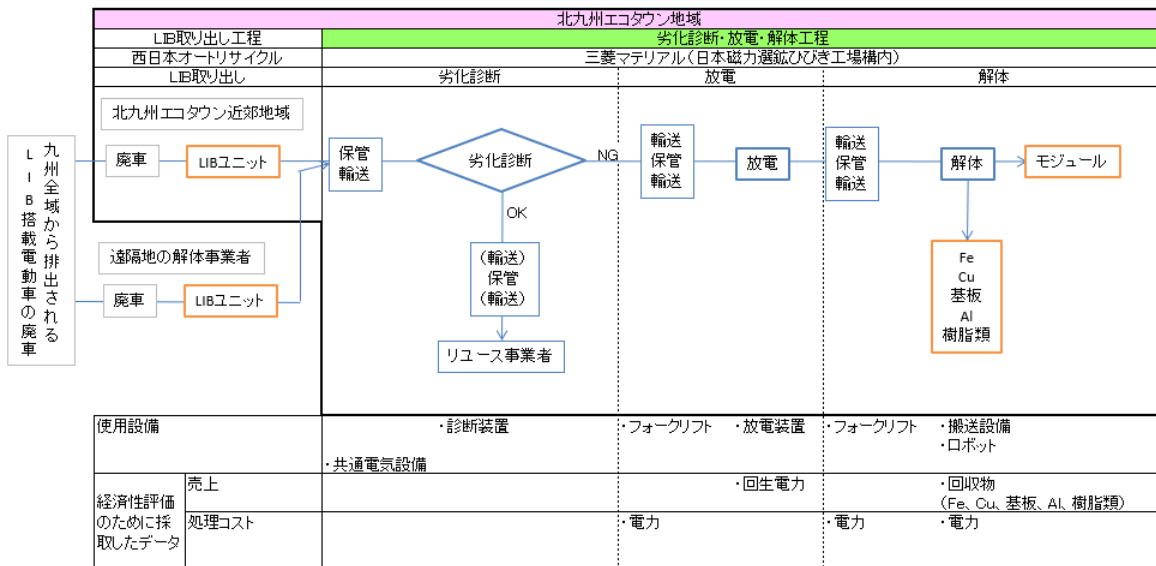


図 5.2.1-2 劣化診断・放電・解体工程の処理フロー及び実証試験でのデータ採取マップ

2) 経済性評価のために採取したデータ

経済性評価のために採取したデータの一覧を表 5.2.1-3 に示す。

表 5.2.1-3 経済性評価のために採取したデータの一覧

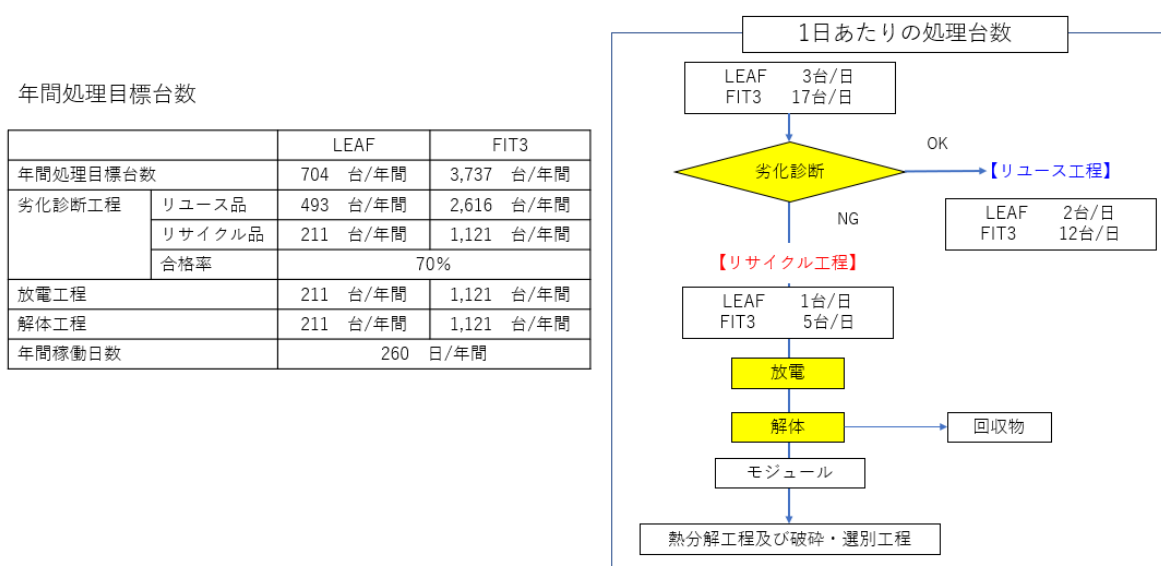
		データ採取結果		備考	
		収益計算への織り込み			
売上	委託処理費		売買単価はデータなし	-	現行の自再協LIB処理スキームの将来構想には記載があるが、現行は未実施
	リユース品		売買単価はデータなし	-	リユース市場形成の過渡期のため取引価格情報なし
	回収物	鉄、非鉄金属、電子基板、廃プラ類	・実証試験でデータ採取 ・評価単価、利用用途のヒアリング調査	○	取引業者へのヒアリング調査
		モジュール	実証試験で数量データ採取、売買単価はデータなし	-	リサイクル市場形成の過渡期なため、取引価格情報なし
	回生電力量		実証試験でデータ採取	○	2020年度産業向け電力料金(消費税含む)
処理コスト	変動費	電力使用量	実証試験でデータ採取	○	出典：資源エネルギー庁
		固定費	労務費	実証試験での作業分析から作業要員数設定	○
	管理費		労務費の20%	○	ヒアリング調査
	減価償却費		実証試験設備費ベースに必要な応じて補正	○	・財務省令に基づいて、減価償却年数を設定 ・定額法を使用
	保全費	設備費=1%	○	ヒアリング調査	

3) 実証試験方法

年間処理目標台数と1日あたりの処理台数を表5.2.1-4に示す。

劣化診断は、本実証事業の対象外となったため、技術調査に留め、実証試験は実施していない。実証試験は、放電作業と解体作業とに分けて実施し、データ採取した。事前に放電を実施し、データ採取後、別途、放電したLIBユニットを用いて、午前中にFIT3=2台の連続解体処理、午後からLEAF=1台の解体作業の実証試験を行い、データ採取した。

表5.2.1-4 年間処理目標台数と1日あたりの処理台数



4) 実証試験設備の処理能力の検証

実証試験設備の処理能力検証結果を図 5.2.1-3 に示す。

実証試験設備で目標処理台数を処理できることを確認したため、減価償却費、保全費の試算には実証試験設備の設備費をベースとする。

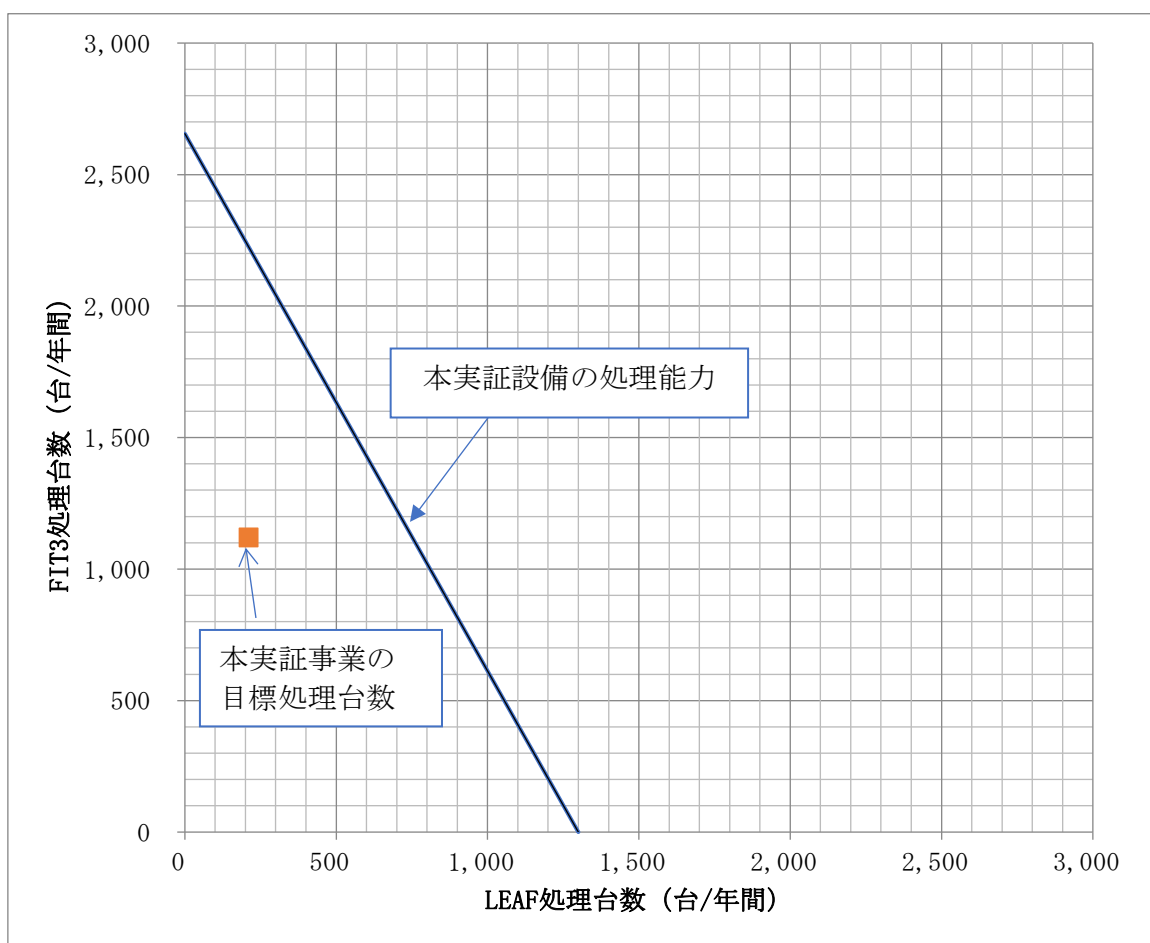


図 5.2.1-3 実証試験設備の処理能力の検証結果

5) 収益計算結果

図 5.2.1-4 は、本設備で LEAF 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係を示しており、この図は、処理台数が増えるほど、損益分岐点（収益改善目標値）のハードルが下がることを意味する。図中の収益改善目標値の計算値（実線）は、本設備の処理能力の範囲内での計算値を示す。FIT3 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係を図 5.2.1-5 に示す。

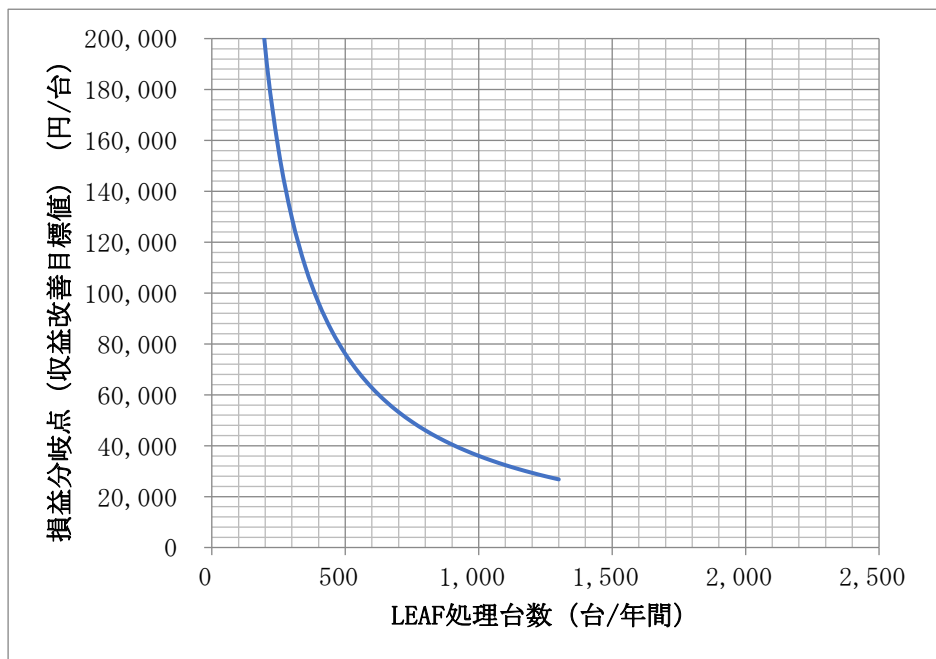


図 5.2.1-4 LEAF 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係

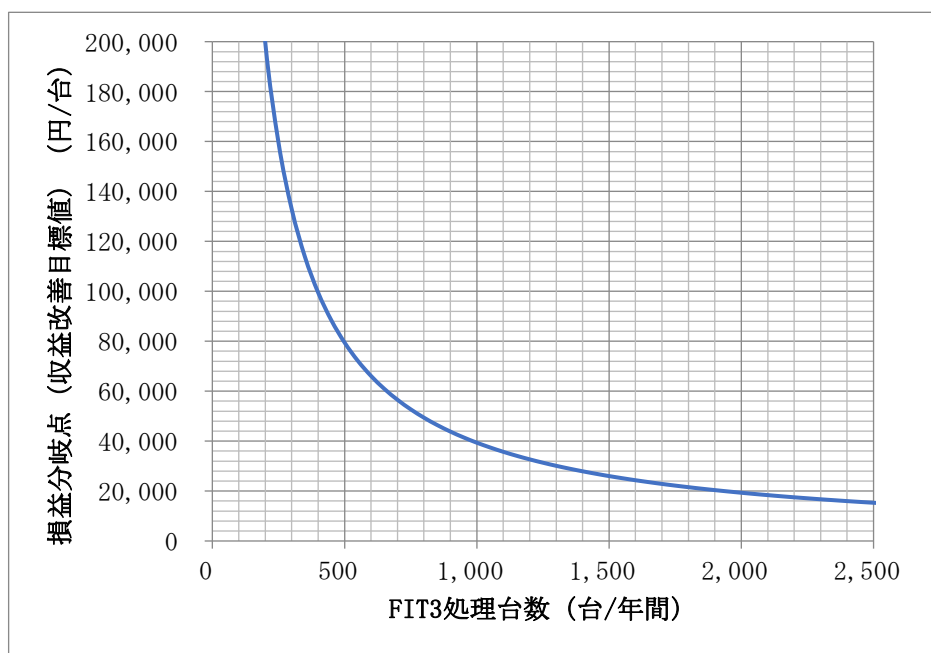


図 5.2.1-5 FIT3 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係

6) 経済性評価結果

経済性評価としては、目標処理台数において、損益分岐点（収益改善目標値）の達成可否から判断することになる。

売上としては、①取り外し LIB ユニットの委託処理費、②リユース品の売却益、③リサイクル品の回生電力、④回収物売上、⑤モジュール売上、が考えられる。収益計算の売上には、③、④は既知の売上として織り込んでいるものの、①、②、⑤については、LIB リユース・リサイクル事業は、市場形成の過渡期であり、市場取引実績が得られていないため、織り込んでいない。これら未知の売上の市場動向を注視する必要がある。

一方、処理コストの大部分を固定費が占めており、変動費は300円/台程度と安いため、処理台数が増えれば、処理コストの削減が確実に図られるため、経済性評価としては優良案件になりうる潜在力があると判断する。

7) 省力化設備導入の投資対効果の評価

本実証事業では、解体工程に省力化のためのロボットを1基導入し、作業者とロボットの作業役割分担の最適化が図れたことを検証した。ロボット導入により、作業要員1名/年間の削減が図れた。本実証設備は初号機であり、ロボットの動作スピードを抑えた試験を行っており、今後の展開として、ロボット動作スピードのアップによる処理量増加の生産性アップ効果及び設備の低廉化による固定費削減効果が得られるため、更なる投資対効果アップが図られることが期待できる。

省力化効果のみの投資利益率=12.2%、投資回収年数=8.2年は、市場金利を考えると、かなり優良な投資案件となると思われる。

ただ、LIBタイプ毎にチューニング作業が必要であり、更なる設備技術開発のブラッシュアップを促進する必要があると思われる

(3) 熱分解及び破碎・選別工程の経済性評価

1) 処理の概要

本工程は、まず、前工程で解体されたモジュールをメッシュ型バスケットに入れ、電動フォークリフトで建屋内に設置されたバッチ式熱分解炉へ装入し、加熱蒸気を噴射しながら、熱分解処理を行う。次に、分解炉の温度が所定の温度以下になっていることを確認して、分解残渣を搬出し重量測定後、2軸破碎機へ装入して粗破碎を行う。次に、ハンマー破碎機で微細に破碎して、篩選別、磁力選別機にかけ、活物質、磁着物、非磁着物を分別回収する。磁着物、非磁着物は、重量測定後、保管場へ搬出され、有価物として外販される。また、活物質は、次工程の日本磁力選鉱ひびき工場構内に配置された三菱マテリアルの湿式処理施設へ搬出される。

図 5.2.1-6 に熱分解及び破碎・選別工程の処理フローと実証試験でのデータ採取マップを示す。

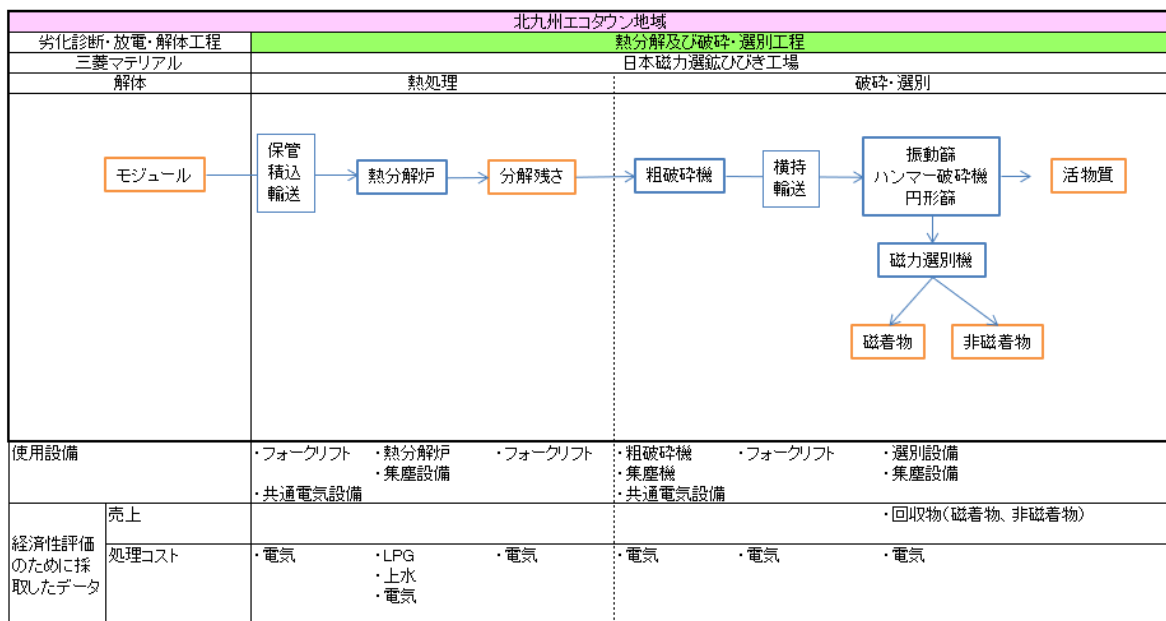


図 5.2.1-6 熱分解及び破碎・選別工程の処理フローとデータ採取マップ

2) 経済性評価のために採取したデータ

経済性評価のために採取したデータを表 5.2.1-5 に示す。

表 5.2.1-5 経済性評価のために採取したデータの一覧

		データ採取結果		備考	
		収益計算への織り込み			
売上	委託処理費	売買単価はデータなし	-	現行の自再協 LIB 処理スキームにおいて、認定処理事業者には委託処理費が支払われているが、本実証では織り込みなし	
	回収物	磁着物	実証試験でデータ採取	○	取引業者にて評価
		非磁着物			
	活物質	実証試験でデータ採取	-	本実証では無償での引き渡しで評価	
処理コスト	変動費	電力	実証試験でデータ採取	○	2020 年度産業向電気料金（消費税含む） 出典：資源エネルギー庁
		LPG	実証試験でデータ採取	○	2021 年度小売価格（消費税含む）出典：日本 LP 協会
		上水	実証試験でデータ採取	○	北九州市水道料金（従量料金制のため使用量連動）2022 年度の実績単価
	固定費	労務費	実証試験での作業分析から作業要員数設定	○	R3 年度賃金基本統計調査 I-54 機械機器卸業 543 電気機械機器卸業の賃金
		管理費	労務費の 20%	○	ヒアリング調査
		減価償却費	実証試験設備費ベースに必要な応じて補正	○	・財務省令に基づいて、減価償却年数を設定 ・定額法を使用
		保全費	設備費=1%	○	ヒアリング調査

3) 実証試験方法

熱分解炉の実証試験は、供試材の数量制約上、混焼処理（LEAF/FIT3 モジュールの同時熱分解）を実施した。LEAF モジュールと FIT3 モジュールを別々のメッシュ型パレットに装入して、熱分解残渣が混ざらない様にした。ユーティリティー（電気、LPG、上水）使用量を装入重量で割り、装入物=1kg あたりの使用量を計算し、LEAF 及び FIT3=1 台あたりモジュール重量を掛けて、LEAF 及び FIT3=1 台あたりの使用量に変換した。

なお、供試材の数量制約上、装入量は、熱分解炉の処理能力に対して 30%程度となり、熱分解は 2.5 時間程度で完了していたが、熱分解炉の運転時間は排ガス測定の測定時間（4 時間）を確保するため、この間、燃焼バーナーは運転状態をキープした。

破碎・選別設備の実証試験は、LEAF モジュールの熱分解残渣と FIT3 モジュールの熱分解残渣を別々の日に実施し、実証試験実施前に設備の清掃を行い、コンタミの影響を排除した。同様にユーティリティー使用量を LEAF 及び FIT3=1 台あたりの使用量への変換を行った。

4) 実証試験設備の処理能力の検証

本設備は、商業運転をベースに設計されているため、本実証事業の目標処理量は十分に達成できる。表 5.2.1-6 に本設備の処理能力を示す。表 5.2.1-7 に本実証事業の目標処理量を示す。図 5.2.1-7 に本設備の処理能力の FIT3 換算処理台数と LEAF 換算処理台数の相関図を示す。

表 5.2.1-6 本設備の処理能力

熱分解工程	熱分解炉の処理能力	4t/日（2t/日×2基）
	年間稼働日数	260日/年間
	処理能力	1,040t/年間
破碎・選別工程	破碎・選別ラインの処理能力	500kg/h（最大）
	年間稼働日数	260日/年間
	処理能力	1,040t/年間

表 5.2.1-7 本実証事業の目標処理量

			LEAF	FIT3	合計
目標処理台数		台/年間	211	1,121	
熱分解工 程	1台あたりのモジ ュール重量	kg/台	200.2	15.2	
	モジュール処理量	kg/年間	42,242	17,039	59,281
破碎・選 別工程	残渣歩留	%	73.89	79.18	
	残渣処理量	kg/年間	31,213	13,492	44,704

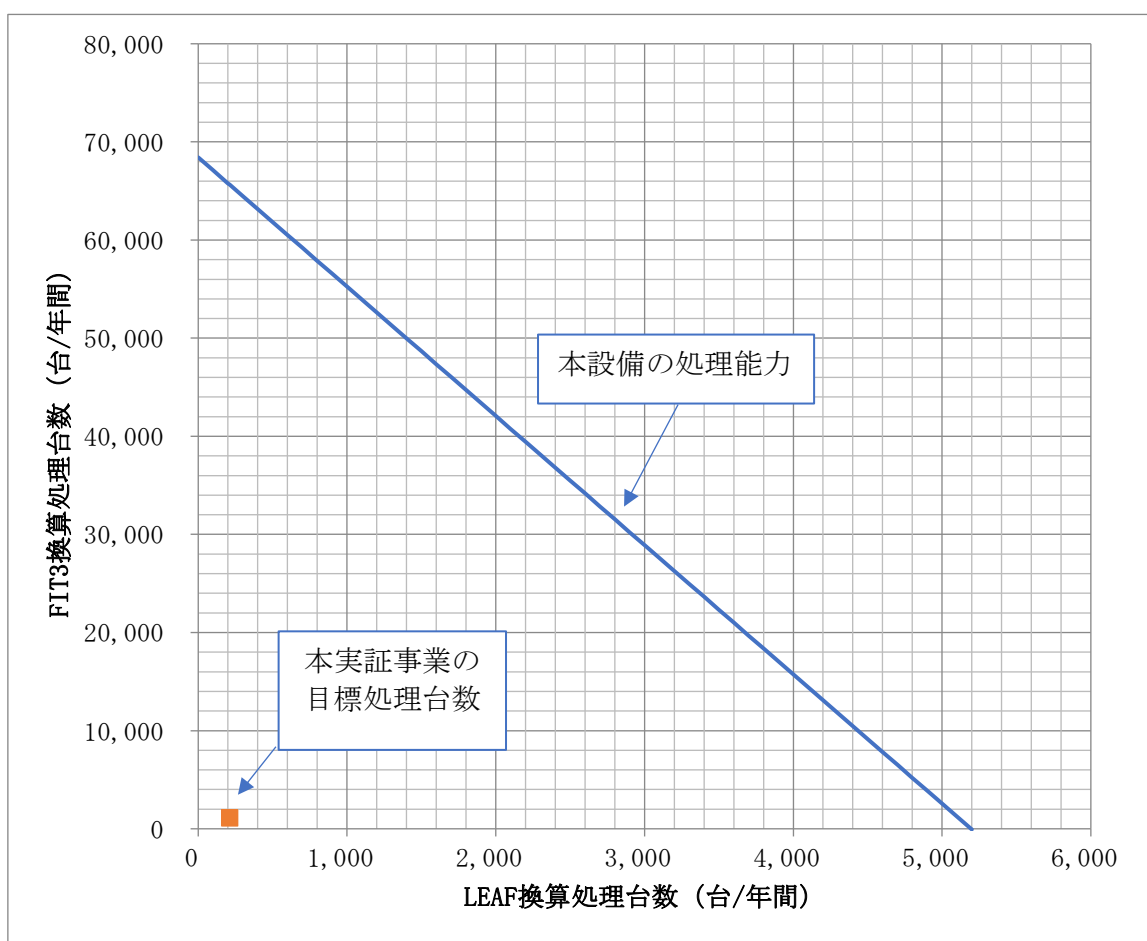


図 5.2.1-7 本設備の処理能力の LEAF 換算処理台数と FIT3 換算処理台数の相関図

5) 収益計算結果

本設備で LEAF 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係を図 5.2.1-8 に示す。また、FIT3 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係を図 5.2.1-9 に示す。

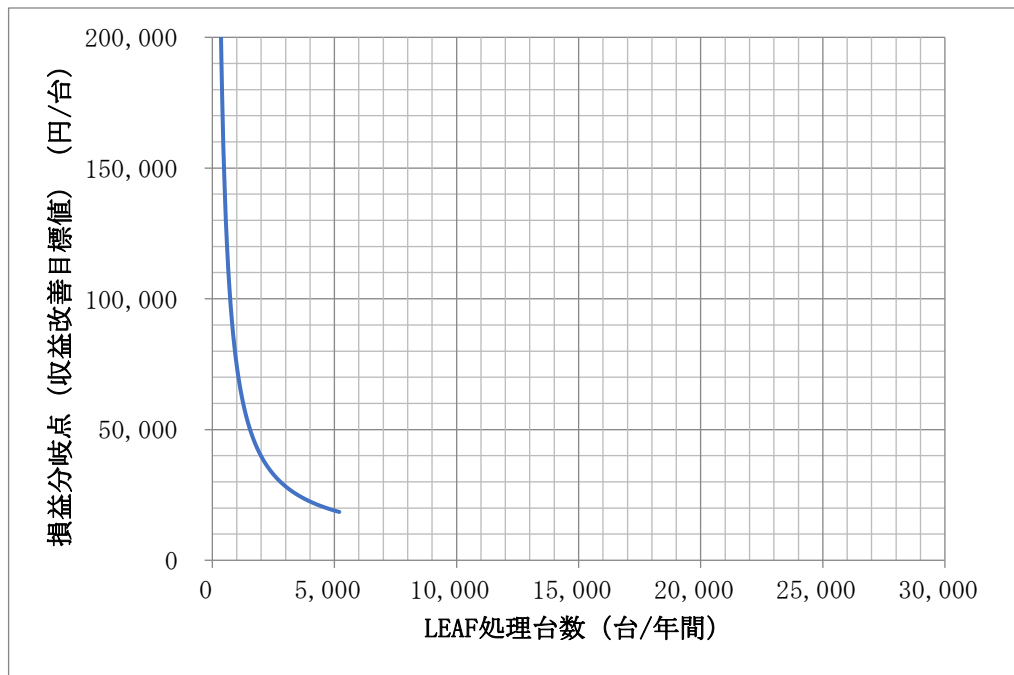


図 5.2.1-8 LEAF 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係

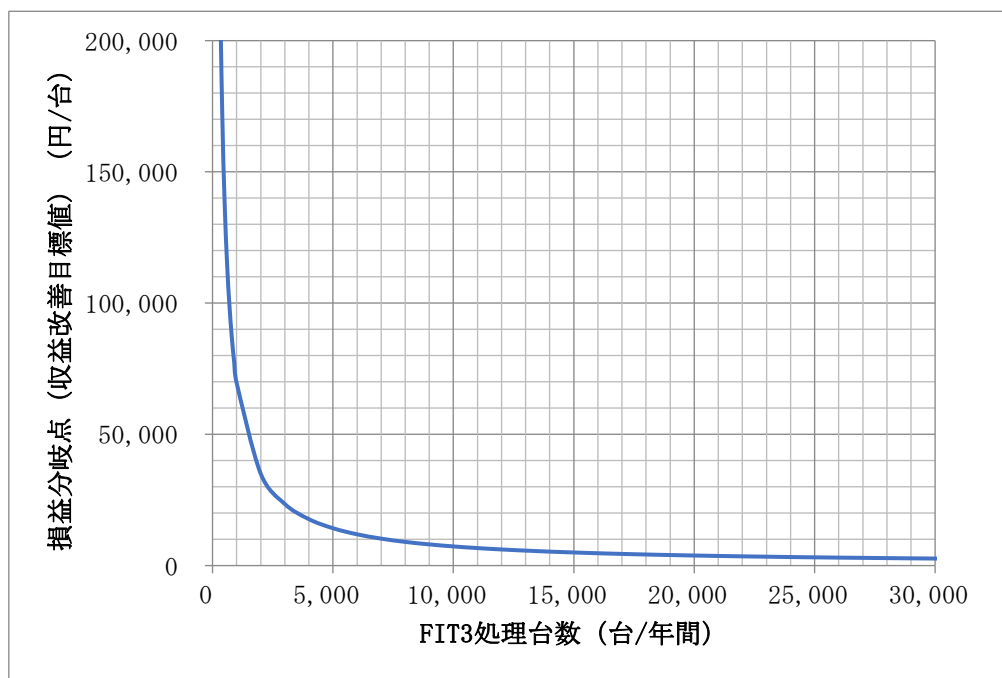


図 5.2.1-9 FIT3 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係

6) 経済性評価結果

本工程では、処理量を確保することを前提として、破碎・選別工程から回収される回収物（磁着物、非磁着物）の売上の他、既に自再協 LIB 処理スキームで認定処理事業者へ支払われている委託処理費を加えることで、本工程単独での事業性の可能性は高いと考えられる。

産廃処理事業者へのヒアリング調査によると、委託処理費は、100～300 円/kg-LIB 重量（LEAF-LIB 相当重量の LIB=30,000～88,000 円/台、FIT3-LIB 相当重量の LIB=4,000～12,000 円/台程度）と推察される。また、（一社）日本自動車工業会環境委員会架装物リサイクル分科会が 2021 年 4 月 1 日に公開している「架装車両搭載 LIB 回収について」の情報によると、自再協スキームでは、自再協取扱手数料：3,800 円/台、運搬/処理費用：120～3,500 円/kg-LIB 重量となっている。

(4) 湿式処理工程の経済性評価

1) 処理の概要

湿式処理工程は、酸浸出・不純物除去工程と溶媒抽出工程から構成される。

酸浸出・不純物除去工程では、前段の熱分解及び破碎・選別工程で産出された活物質を硫酸浸出後、薬剤を添加して、固液分離処理で不純物を除去し、粗 Co、Ni 精製液を生成する。

回収した粗精製液をミキサセトラ装置にて、溶媒抽出により分離精製することで、Co 精製液、Ni 精製液を回収する。

回収した Co 精製液、並びに Ni 精製液を晶析することで、高純度 Co 塩、並びに高純度 Ni 塩を回収する。

図 5.2.1-10 に湿式処理工程の処理フロー及び実証試験でのデータ採取マップを示す。

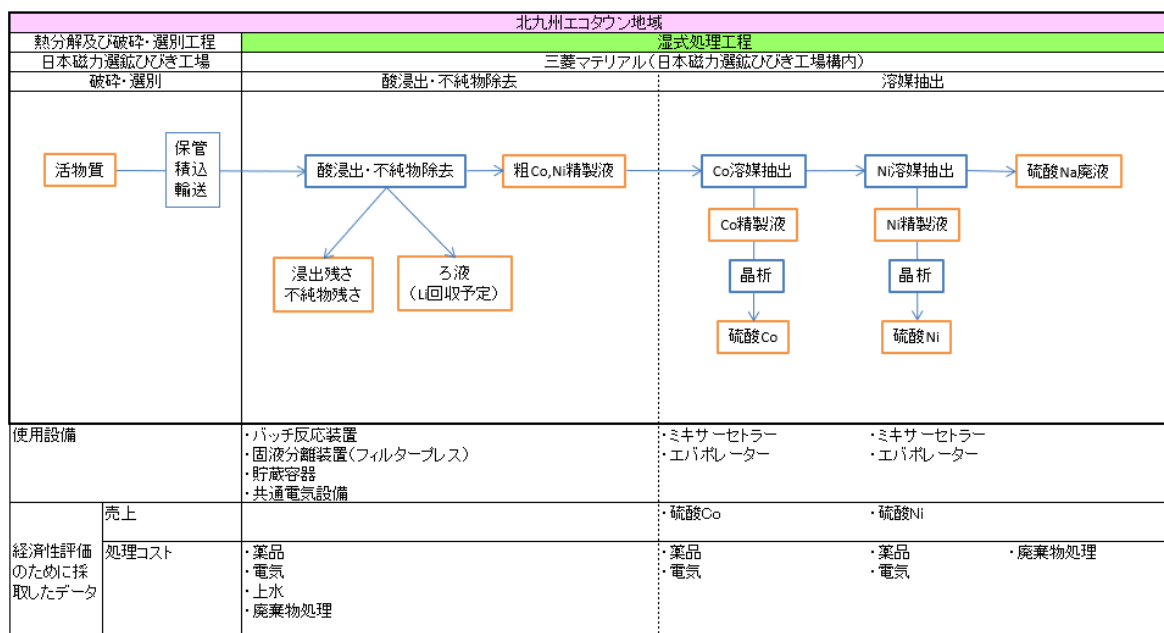


図 5.2.1-10 湿式処理工程の処理フロー及び実証試験でのデータ採取マップ

2) 経済性評価のために採取したデータ

経済性評価のために採取したデータの一覧を表 5.2.1-8 に示す。

表 5.2.1-8 経済性評価のために採取したデータの一覧

			データ採取結果		備考	
			収益計算への織り込み			
売 上	回 収 物	硫酸 Co	実証試験でデータ採取	○	化学商品（化学工業日報社） 最新価格（2021.10月時点）	
		硫酸 Ni				
処 理 コ ス ト	変 動 費	薬品	実証試験でデータ採取	○	化学商品（化学工業日報社） 最新価格（2021.10月時点）	
		ユ ー テ ィ リ テ ィ ー	電力	実証試験でデータ採取	○	2020年度産業向け電力料金 （消費税込み） 出典：資源エネルギー庁
			上水	実証試験でデータ採取	○	北九州市水道料金（従量料金 制のため使用量連動）2022年 度の実績単価
		廃棄物処理 費	実証試験でデータ採取す るも、実証試験の段階の ため評価から除外 （LCA 評価については実 機設備を想定した廃棄物 取り扱いを行う）	-	-	
	固 定 費	労務費	・実証試験での作業分析 から作業要員数設定 ・四直三交代、3名/シフ ト×4シフト=12名	○	R3年度賃金基本統計調査 I- 53 建築材料、鉱物、金属材 料等卸業の賃金	
		管理費	労務費の20%	○	ヒアリング調査	
		減価償却費	実証試験設備費ベースに 必要に応じて補正	○	・財務省令に基づいて、減価 償却年数を設定 ・定額法を使用	
保全費		設備費=1%	○	ヒアリング調査		

3) 実証試験方法

湿式処理工程の処理フローは図 3. 4. 1-1 に示した通りである。湿式回収実証試験設備は、活物質からの浸出等を行う反応槽、固液分離装置、並びに溶媒抽出装置（ミキサセトラ）、晶析装置から構成される。

今回の実証試験にて、酸浸出・不純物除去工程では、反応容器によるバッチ処理と固液分離（フィルタープレス）の組み合わせ処理を行った。溶媒抽出工程では、粗 Co、Ni 精製液を貯留タンクに貯めて、連続処理を実施した。

4) 実証試験設備の処理能力の検証

本実証設備の処理能力は、目標処理量の達成に満たないため、設備費を補正することとした。能力不足の設備費の補正は、実証試験設備の設備費をベースとして、0.6 乗則を用いて設備費の補正を行った。

設備費の補正式=（実証試験設備の設備費）×（目標処理量/本実証設備の処理能力の比=3.6（処理能力ネック工程））の 0.6 乗
補正設備の処理能力の LEAF 換算処理台数と FIT3 換算処理台数の相関図を図 5. 2. 1-11 に示す。

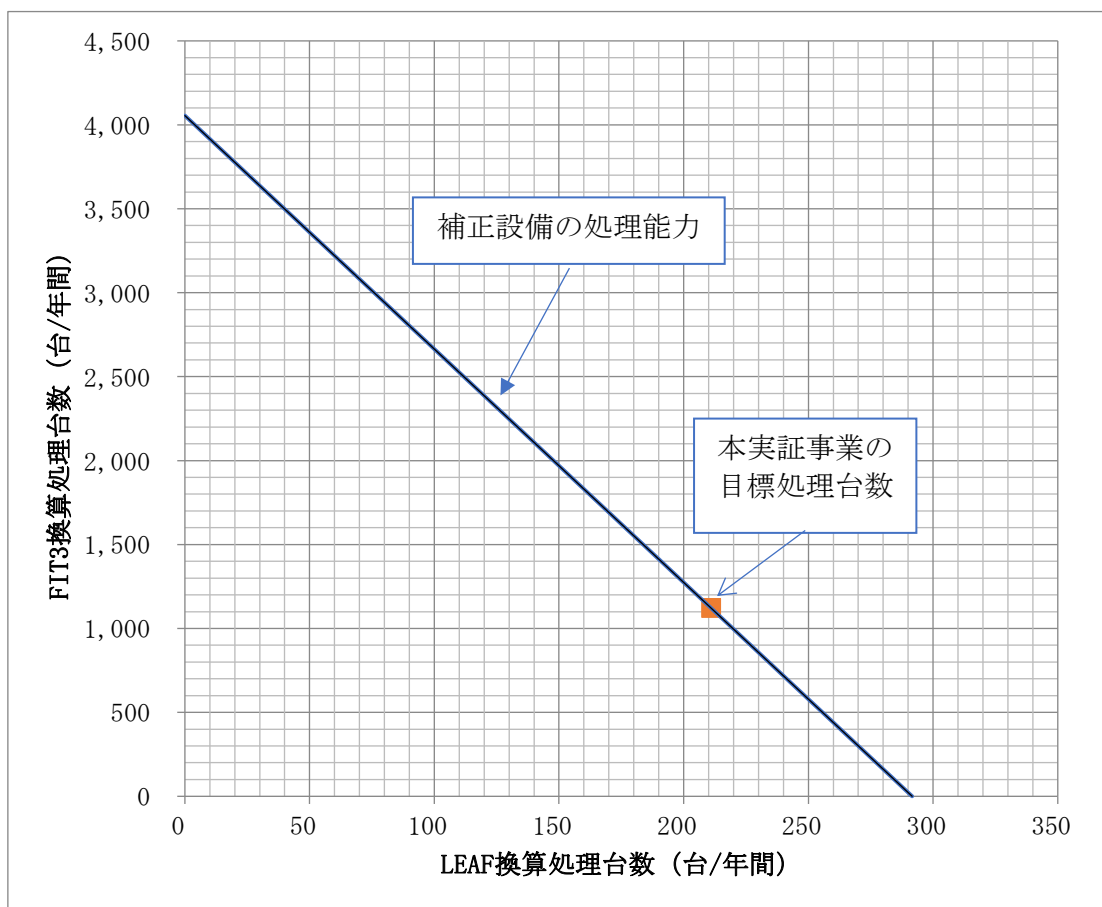


図 5. 2. 1-11 補正設備の処理能力の LEAF 換算処理台数と FIT3 換算処理台数の相関図

5) 収益計算結果

本設備で LEAF 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係を図 5.2.1-12 に示す。また、FIT3 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係を図 5.2.1-13 に示す。

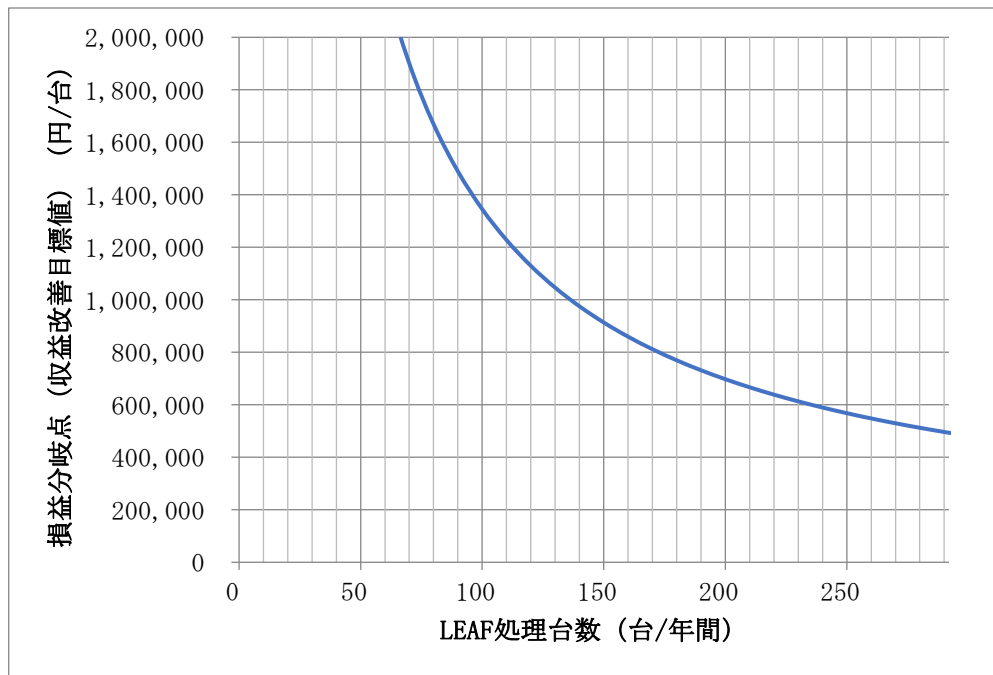


図 5.2.1-12 LEAF 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係

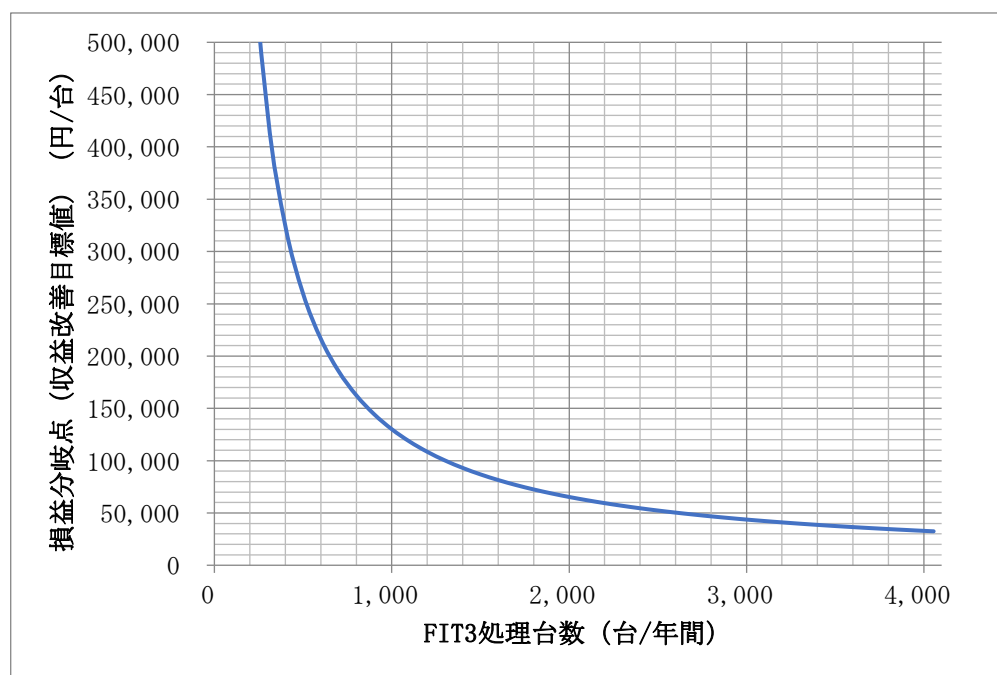


図 5.2.1-13 FIT3 単独処理した場合の処理台数と損益分岐点（収益改善目標値）の関係

6) 経済性評価結果

本工程は、Co、Ni のリサイクルプロセスの検証が主目的であり、設備も試験装置としての構成・規模である。そのため、処理量が少ないこと、また専用の処理設備ではなく固定費・変動費が商用プロセスのように合理化されていないことから、試験結果から推算された処理コストが大きくなり、経済性が成立しないモデル計算となっているため、ここでは、収益計算での課題抽出と今後の方向付けに関して検討を行った。

【現状分析】

実証試験での収益計算結果を分析すると、

- ・ 売上については、硫酸 Co、硫酸 Ni 回収量を評価している。今後、Li 回収についても処理プロセスに付加し、売上向上が必要である。
- ・ 処理コスト（変動費）については、
 - ① 今回の実証試験では、処理設備の制約からプロセス内での液再利用等による薬剤原単位の最適化が出来ておらず、結果として薬剤コストが高くなっている。
 - ② 溶媒抽出工程について、有機溶媒の廃液側への流出はほとんどないものとして試算した。
 - ③ Co、Ni 精製液から硫酸 Co 及び硫酸 Ni を晶析するため、実証試験においては電気加熱式のエバポレーターを使用した。エバポレーターの電力使用量が多く、変動費の30～35%と大きな割合を占めている。商用プロセスでは、既設工場に隣接した立地が想定されるため、工場排熱を有効利用することにより、電力使用量の削減が期待できる。
 - ④ 廃棄物処理について、今回の実証試験では、硫酸 Na 廃液、薬品容器、不純物除去残渣が発生したが、実証試験の特有の費用と判断し収益計算から除外した。商用プロセスでは、特に硫酸 Na 廃液処理、不純物処理残渣処理について、十分な検討が必要である。
- ・ 処理コスト（固定費）については、
 - ⑤ 労務費は、省力化・自動化設備の導入等により要員削減が考えられる。

【今後期待する収益構造の姿】

これら課題を解決したと仮定して、表 5.2.1-9 に実証試験結果から見えてくる課題と今後の方向付けを示す。今後の方向付けに記載した内容を実現出来たとして、コストを見直した LEAF 及び FIT3 単独処理における損益分岐点分析(今後の方向付け反映)を図 5.2.1-14 及び図 5.2.1-15 に示す。

表 5.2.1-9 実証試験結果から見えてくる課題と今後の方向付け

			実証試験の収益計算結果から見えてくる課題	今後の方向付け
売 上	回収物	硫酸 Co	限界利益（売上-変動費）が得られず、事業化不成立	
		硫酸 Ni		
処 理 コ ス ト	変動費	薬剤	活物質からの Co、Ni 以外の不純物除去コストが高い	活物質の品質改善及び高効率操業実現により、薬剤使用量 20%削減とした。
		電力	エバポレーターで使用する電力コスト高	工場排熱の活用により、電力使用量の削減。
		上水	-	-
		廃棄物処理	硫酸 Na 廃液の委託処理費が非常に高い	既設工場の廃水処理設備を有効活用する。
	固定費	労務費	連続操業のため、運転要員（四直三交代：3 名/シフト×4 シフト）12 名、労務費負担大	自動化設備導入により、運転要員（四直三交代、2 名/シフト×4 シフト）8 名とした。
		管理費	-	-
		減価償却費	目標処理量が少ないため、固定費負担大	・早期連続操業設備を導入し、操業技術を確立。 ・減価償却費の 1/3 程度の外部資金補助とした。
		保全費	-	-

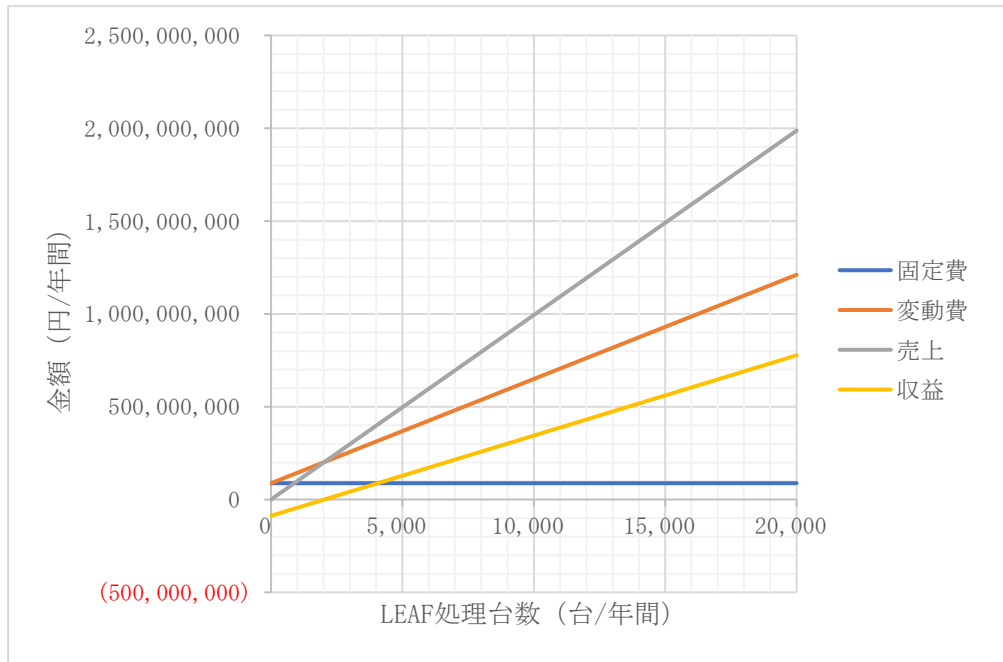


図 5. 2. 1-14 本設備での LEAF 単独処理における損益分岐点分析 (今後の方角付け反映)

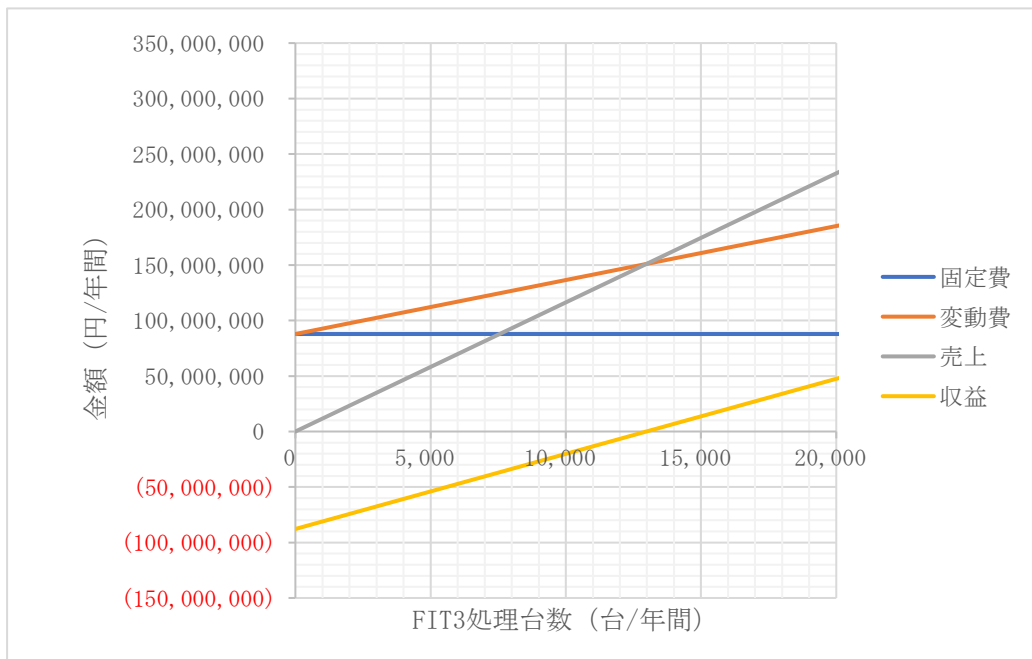


図 5. 2. 1-15 本設備での FIT3 単独処理における損益分岐点分析 (今後の方角付け反映)

この図にて、LEAF 単独処理時の損益分岐点 (処理台数) =2,032 台/年、FIT3 単独処理時の損益分岐点 (処理台数) =12,980 台/年となっている。ただし、この損益分岐点分析には、設備処理能力を反映していない。本設備の処理能力を超える処理台数領域に入る

と、固定費ラインが上にシフトするため、損益分岐点（処理台数）が右側にシフトする。

参考までに、本実証で想定した 2025 年度の九州地区で発生する LEAF(211 台)及び FIT3(1,121 台)の LIB を処理することにより発生する活物質の量は、30t 強である。

今後、xEV の普及によりこの量は急速に増加するものとは推測されるが、湿式処理において経済性が成立する程度の活物質を、車載用 LIB のみから確保するのは当面困難であることが予想される。そのため、今後の湿式処理の事業化にあたっては、国内の各地域からの車載用 LIB（もしくは活物質）の確保や、小型家電 LIB、電池会社等の LIB 製造の工程スクラップ、さらには海外からの輸入などによる活物質の確保が重要になるものと考えられる。

（5）まとめと今後の課題

LIB 取り出し工程については、現行の自再協の LIB 回収スキームでは、取り外した LIB は、「無償引渡し」が前提になっている。そのため、収入源となり得ず、解体事業者への自動化設備導入にドライビングフォースが働かない LIB 回収スキームとなっている点が課題であると考えられる。

劣化診断・放電・解体工程については、今回の実証試験では評価した解体回収物の売却益の他に、リユース品の売却益及び自再協からの委託処理費等が収入源として考えられるが、現時点では、LIB リユース市場形成の過渡期であり、リユース品の売却評価をしていない。解体ロボット導入により、作業要員 1 名/年間の削減が図れた。今後、ロボットスピードアップ等、更なる技術開発による費用対効果の増加が望まれる。

熱分解及び破碎・選別工程については、破碎・選別工程で回収される磁着物、非磁着物だけでは採算は取れないが、既に自再協 LIB 処理スキームでは認定処理事業者に委託処理費が支払われているので、収入源としてこの委託処理費が得られれば十分に単独での事業化は見込めるものと考えられる。

湿式処理工程については、本実証試験規模のように、処理量が少なく、商用プロセスのように合理化されていない設備での試算の結果では、経済性の成立が困難である結果となった。そのため、収益計算から見えて来る課題抽出と今後の方向付けを検討した。

5. 2. 2 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

(1) 金属リサイクルビジネスへの横展開の可能性

金属リサイクルに関連したビジネスへの、本実証試験の横展開の可能性を以下に示す。

1) LEAF・FIT3 以外の xEV への展開

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、放電、解体自動化、破碎・選別等の技術は、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の LIB を搭載する自動車についても適用でき、横展開が可能である。取り出し手法に関して、電池容量の大きい EV では、電池はシャシ底部に搭載されるため傾転装置の手法が適用できると考える。電池容量の比較的小さい HV では、電池は庫内やシート下などに搭載されるため助力装置による移載の手法が適用できると考える。また、解体自動化に関して、電池種類に応じた解体手法を構築することができるため、適切なツールや解体手順を各電池専用に展開することが可能であり、横展開が可能と考える。

2) モータユニット等の取り外しへの展開

本事業では、LIB を対象に取り出しの際の省力化を実証した、次世代自動車を構成するモータユニット等の取り出しについても、LIB の取り出しと同時に行うことにより、省力化が可能となる場合があると考えられる。本実証で検討した技術をベースに、次世代自動車におけるリサイクル・リユース部品の取り出し手法の効率化への横展開も今後必要と考える。

3) xEV 以外の自動車への展開

現状、自動車解体事業者においては、多種多様な車種の ELV について部品の取り出しや解体作業が行われているが、重量物の取り扱いを伴うことから作業負荷が大きく、また感電のおそれもあり安全に作業を行うためには細心の注意が必要となる。

LIB の取り出し・解体自動化技術は、LIB 搭載の自動車に限らず、ニッケル水素電池、LFP 電池、燃料電池車やガソリン車を含む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作業環境を改善して人手不足を解消し、安全かつスムーズな解体作業の実現による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られる。

4) 蓄電ビジネスへの展開

車載用 LIB の蓄電池への利用は既にビジネスとして展開され始めている。例として、LIB の劣化診断技術を活用したリユース LIB の事業展開に関しては、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事業展開は今後拡大するものとする。

5) レアメタル回収ビジネスへの展開

現在、車載 LIB については自再協の主導により処理が行われているが、電炉・廃棄物焼却炉による処理が主体であり、この処理では処理物に含まれている Co、Ni 等のレアメタルの有効利用がなされているとは言い難い状況である。

本事業の LIB の熱分解、破砕・選別、Co、Ni の湿式回収技術に関しては、車載用 LIB のみならず様々な用途の LIB に対する処理への応用、また、処理高度化が可能な技術であり、レアメタル等の回収の高効率化により、二次電池の正極材原料供給の安定化等、金属リサイクルビジネスに大いに貢献できるものと考えられる。

Ni、Co、Li 等のクリティカルメタルの回収は EU 電池規則にもあるように、将来的には必然となるものと推察される。したがって、単なる現状の経済合理性のみをもって評価するのは危険であり、世界的な経済安全保障の強化の動向も含め、クリティカルメタルであるこれらの元素の回収、確保は注視が必要である。

6) 本事業プロセスの他地域への展開

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の実証を完了した後は、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。自動車保有台数の地域別割合の多い地域においては、その規模(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))に応じた廃 xEV の発生台数が想定される。

日本各地域に、xEV の地域循環共生圏を設けることで、廃 EV を発生場所から遠方に運搬することなく処理し、省 CO₂ での国内資源循環が可能となるものと考えられる。また、本事業において実証されたプロセスは既存スキームよりも CO₂ 発生量を低く抑えることが可能になるため、今後、日本よりも大量の廃棄車載 LIB 発生が見込まれるアジア、欧州等の海外への横展開も見込まれる。

以上のように、本実証試験の関連技術の横展開により、国内産業の育成を促進し、金属リサイクル関連ビジネスを活性化するものと考えられる。また、将来的には EU 電池規則の影響により、電池関連産業は生産時のリサイクル材使用や回収後のリサイクルスキームの構築を求められる状況にあり、日本国内において LIB リサイクルの高度化・高効率化を推進することは本分野における国際競争力を高めるうえで必須である。

(2) 出口戦略の検討

金属リサイクルの出口戦略としては、LIB からの Co、Ni、Li 回収物を二次電池の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な Co、Ni 等のレアメタルの有効利用が難しい手法から、湿式回収技術のように Co、Ni を効率的に回収するプロセスへ転換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 資源調達リスクの低減など、SDGs への貢献や EU 電池規則への追随のためにも、使用済 LIB のトレーサビリティ確保を含めた回収・リサイクルスキームを構築し、二次電池の正極材原料として再資源化することが望まれる。

現状、LIB のリサイクルプロセスとしては、特に失活処理において、本実証プロセスとは異なるプロセス（表 5.2.2-1）があり、今後はこのようなプロセスの動向にも注視する必要がある。

本プロセスは、加熱蒸気を利用して、400～500℃の比較的低温で失活させている。加熱する方式は乾式処理と呼ばれ、電気炉方式プロセスでは、1600～1700℃の高温で熔融処理している。焼却炉方式プロセスは、アルミが溶解する 700～800℃で焼成する方式や、チャンバー内を窒素雰囲気にして、350～450℃で焼成し、失活処理するプロセスがある。

加熱しないリサイクル手法としては、湿式処理のみの方法が報告されている。LIB ユニットの失活処理として、真空、不活性ガス（CO₂、N₂ 等）、水中での破砕することが考えられるが、セル中の電解液処理において、蒸留反応を利用して、LiPF₆、有機溶媒を回収する処理プロセスが報告^{b)}されている。

最近注目されている LIB 処理として、ダイレクトリサイク法がある。これは、電極から活物資をはぎ取り、活物質から金属等に戻さずに活物質のまま電池材料として利用するプロセスであり、金属等回収工程を省略できるので、CO₂ 排出量削減効果が大きいと暫定的に評価した。今後、開発状況を注視する必要がある。

LIB 技術開発は日進月歩である。本実証事業では液系 LIB を対象としているが、既に全固体系 LIB の EV への実装化の取組も始まっている。今後の LIB 技術開発の高度化にもフレキシブルに対応できる処理プロセス技術を構築しておく必要がある。この視点からも本プロセスは、十分に対応可能と考える。本プロセスの早期実装化を図り、国内資源循環及び循環経済形成の基盤となる操業技術の開発及び成熟化に向けて世界に先駆けて積極的に取り組むことが重要であると思われる。

^{b)} 例えば、Reiner Sojika, Qiaoyan Pan, Laura Billmann, “Comparative study of Li-ion recycling processes”, Accurec Recycling GmbH, September (2020)

表 5.2.2-1 本プロセスと加熱しないリサイクル手法との比較

		本プロセス該当		加熱しないリサイクル手法	
		乾式	乾式+湿式	湿式	ダイレクト・リサイクル
特徴		熔解若しくは焼却処理による処分	熔解メタル若しくは焼却物（活物質）からNi,Co,Li等を回収	不活性雰囲気若しくは水溶液中で破碎、乾燥後、選別し、活物質からCo,Ni,Li等を回収	金属等に戻さずに活物質のまま電池材料として利用
資源回収性		×	△～○	○	◎
CO2排出量		×	△	○	◎
処理能力		◎	○～◎	△～○	× (解体自動化技術開発次第)
技術成熟度		商業ベース	パイロットプラント、一部は商業ベース	パイロットプラント、一部は商業ベース	ラボベース
適用事例	海外	・ Redux ・ Valdi	・ UMICORE ・ Accurec ・ Brunp ・ Recycling Tech	・ Primobius ・ Li-Cycle ・ Retriev	・ アルゴン国立研究所に拠点を置く、ReCellCenter ・ 英国ファラデー研究所 (ReLIB)
	国内	・ 自再協スキーム認定処理事業者	・ 住友金属鉱山 ・ JX金属		・ JERA

また、本実証における一連の成果から考察される各 LIB リサイクルプロセスの出口戦略は、以下となる。

LIB ユニット取り出し自動化・省力化では、自動車解体業者が設備を導入しやすい自動化装置等の廉価版の検討、LIB ユニットが取り出しやすいような車載構造の要望などの自動車メーカーへの提案がリサイクラー側の負荷低減に繋がるものと考えられる。

LIB の劣化診断では、本実証では技術調査に留まったが、自動車解体業者が LIB 取り出し後に劣化度合いを確認できる技術を整備しリユース及びリサイクルの判断を効率的にすることがリユース市場の活性化に寄与するものと考えられる。

LIB の放電・解体自動化では、熱分解の前段処理として LIB ユニートを LIB モジュールとその他の構成金属等の素材とに分離・解体する重要なプロセスであるため、今後は、多種多様な LIB に対応でき、かつ分離・解体時間を短縮できるよう継続した技術開発が望まれる。また、車載用 LIB ユニットのみならず、リユース市場で使用される蓄電 LIB の分離・解体への適用も今後必要になるものと考えられる。

LIB モジュールの熱分解・破碎選別では、熱分解技術と活物質/Fe/Cu・Al 等の選別技術とともに、本実証の結果から事業化が可能なレベルに達していると考えられる。今後は、発生する多種多様な LIB に対応できるよう処理条件の最適化を都度行っていくことが必要になると考えられる。

Co、Ni の湿式回収では、本実証ではベンチスケールの規模において、回収率、回収物純度について目標を技術的に達成可能であることを確認した。今後は、事業化に向けたパイロット施設の検討、多種多様な活物質への対応と Li の回収プロセス技術開発を加え、経済的合理性を考慮した検討を実施していく予定である。

また、LIBを搭載した次世代自動車の廃棄台数は2025年では約20万台、2030年では約27万台が見込まれるものの、LIB搭載xEVの多くは未だ製品寿命を迎えていないことから、現状では市中から回収される使用済LIBは少数である。このため、LIBリサイクルの受け入れ体制の整備は十分ではないが、来るべき使用済LIBの多量排出に先立ってLIBの国内資源循環の基盤を整備する必要がある。

この基板の整備にあたっては、リサイクラー等の事業者ではLIBリサイクルに必要な技術開発と設備の導入を推し進め、また、国や業界団体では二次電池の確実な回収の確立化、設備導入のための補助制度化やリサイクル料金体系の再整備化など、法・制度面と経済面とで事業支援を行っていただきながら、官民一丸でLIBの確実な回収とリサイクル体制の構築に取り組んでいく必要があると考える。

LIBを含めた次世代自動車のリサイクルは、地球温暖化や天然資源枯渇への対策として必須事項である。このため、リサイクル部分のプロセスにおいても、サプライチェーン全体における環境負荷低減の一環として、可能な限りの資源循環の促進と環境負荷の低減が社会課題としてステークホルダーから要求されるものと考え。この考えに対し、本実証事業で培った技術をさらに向上させ、北九州地域以外の地域にも技術展開することで、これら社会課題の解決に貢献していく所存である。

6. まとめと今後の課題

本事業は、廃車両からの LIB ユニットの取り出し、LIB ユニットの劣化診断、LIB ユニットの放電・解体、LIB モジュールの熱分解、破碎・選別、活物質からの Co、Ni 回収・精製からなる一連の処理プロセスに関して、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て、地域循環共生圏に貢献することを目的として実施した。

各処理プロセスに関して、LIB ユニット取り出し工程では、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 では車両の傾転、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、FIT3 では LIB ユニット取り出しのための助力装置をそれぞれ設計・製作し、LIB 取り出し作業の安全性及び省力化に寄与できることを確認した。また、作業効率の向上や他車種への汎用性の検討を行った。

LIB ユニット劣化診断工程では、現状で考えられる車載 LIB の状態情報を把握するための手段として、車両内バッテリー・メーターからの情報取得、並びに車載式故障診断装置からの情報取得の可能性と今後の課題について考察し整理した。

LIB ユニットの放電の工程では、LIB ユニットの安全かつ効率的な解体並びに熱分解での熱暴走の回避のため、LIB ユニットの状態で放電の実証を行い、安全かつ効率的な放電手法を検討した。LIB ユニット解体自動化工程では、産業用ロボットを活用した LIB ユニット解体自動化設備を含む LIB ユニット解体ラインを設置し解体実証を行い、手解体作業の作業負荷低減、感電リスクの低減効果を確認した。

LIB モジュールの熱分解工程では、LIB モジュール中の電解液等を熱分解により無害化し、後段の破碎・選別、Co、Ni 回収で高効率な分離を実現できるよう、熱分解処理実証（熱分解産物の脆化挙動、排出ガスの分析等の確認）を実施し、異常なく熱分解処理が可能であることを確認した。熱分解後の破碎・選別工程では、破碎・選別により回収される活物質の Co、Ni 品位と回収率、Cu、Al 等の混入率、Li の挙動等を確認し、Co、Ni 回収率、Cu、Al 混入率は、一部を除き概ね目標値をクリアできることを確認した。

Co、Ni の回収工程では、LIB を熱分解し、破碎・選別後に回収した活物質から Co、Ni を湿式回収するプロセスを改善し、高回収率（95%）、高純度（99.99%）で Co、Ni が回収できる技術的見通しを得た。

以上の実証試験から、環境影響改善効果、CO₂ 排出量削減効果の評価を行い、本実証の LIB リサイクルプロセスを導入することにより、環境影響改善効果並びにライフサイクル CO₂ 排出量ともに大きな削減効果を見込めることを確認した。

また、本実証事業の各 LIB リサイクル工程において経済性を評価した結果、現状の技術・規模を前提とした場合、廃 LIB の素材価値のみでリサイクルを成立させることは難しく、別途委託処理費の確保が必要である結果となった。また、金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討を行うとともに、出口戦略を整理した。

上記の成果を踏まえ、今後の事業化に向けた各 LIB リサイクル処理プロセスの課題を表 6-1 にまとめて示す。将来の廃 LIB の増加を念頭に、リサイクル処理の経済性を向上させるための更なる技術開発・改善を検討していく必要があるものと考えられる。

表 6-1 事業化に向けた今後の課題

	LIBユニット 取り出し	劣化診断	放電	LIBユニット 解体	熱分解	破碎選別	溶媒抽出
事業化に向けた課題	(a) 自動取り出し時間の短縮化	(a) BMS活用の検討	(a) LIBを膨張させない状態での放電自動化	(a) 電力を残したままでの安全な解体手法の確立	(a) 定置炉での均質性の向上	(a) Co、Niの回収率向上	(a) Liの回収
	(b) アンダーカバー取り出しの自動化	(b) 車種毎の診断方法の標準化	(b) 放電時間の短縮	(b) 解体時間の短縮	(b) BMの浸出性の向上	(b) Cu、Alの事前除去	(b) 異なるLIB、BMへの対応
	(c) 異なる車種、LIB形状への対応	(c) リユース電池活用方法の検討	(c) 再生エネルギー高効率回収・有効利用	(c) 工程の省力化の向上	(c) 異なるLIBへの対応	(c) Cu、Alの分離回収	(c) 必要純度の把握と提案
	(d) 液類回収と合わせた効率化検討			(d) 異なるLIBへの対応		(d) 異なるLIBへの対応	(d) パイロットスケールへの展開
	(e) LIB取り出しのコスト低減、効率向上化					(e) 同伴不純物の低減	

参考文献

- 1) 三菱マテリアル株式会社：平成2年度脱炭素金属リサイクルシステムの早期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 完了報告書，令和3年3月，pp.1～7
- 2) 三菱マテリアル株式会社：令和3年度脱炭素金属リサイクルシステムの早期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 成果報告書，令和4年3月，pp.122～133
- 3) 九州電力：2021年度のCO₂排出係数について，
https://www.kyuden.co.jp/environment_not
- 4) 三菱マテリアル株式会社：令和3年度脱炭素金属リサイクルシステムの早期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 成果報告書，令和4年3月，pp.60～66
- 5) 三菱マテリアル：平成29年度 低炭素型3R技術・システム実証事業 次世代自動車LIBのリユース・リサイクルにおける低CO₂削減実証事業 完了報告書，平成30年2月28日，pp.85
- 6) 三菱マテリアル株式会社：令和3年度脱炭素金属リサイクルシステムの早期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 成果報告書，令和4年3月，pp.82～86
- 7) 環境省：算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧，https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf
- 8) 日本LPガス協会：プロパン、ブタン、LPガスの立方メートルからキログラムへの換算係数，https://www.j-lpgas.gr.jp/news/files/20091019_kanzan.pdf
- 9) 三菱マテリアル株式会社：令和2年度脱炭素金属リサイクルシステムの早期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 完了報告書，令和3年3月，pp.112
- 10) 三菱マテリアル株式会社：令和3年度脱炭素金属リサイクルシステムの早期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 成果報告書，令和4年3月，pp.124～133
- 11) 工藤祐揮・南斉介・田原聖隆：走行条件によるエネルギー消費の違いを考慮した代替燃料車LCCO₂排出量の算出，LCA学会研究発表会講演要旨集，2008年2月，pp.182-183
- 12) 石崎啓太：博士学位論文，国内における自動車ライフサイクルCO₂排出量予測と省燃費潤滑油の必要性，慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント学科，2019年3月，pp.158
- 13) 社団法人 化学経済研究所：基礎素材のエネルギー解析調査報告書 科学経済研究所調

査委員会研究調査報告, 1993年9月, pp. 39~46

- 14) 片桐望・中島謙一・原田幸明：NIMS-EMC 材料環境情報データ No. 18, 概説 資源端重量 (Total Material Requirement ; TMR) (2009)
- 15) 立命館大学山末研究室：エネルギー・資源循環工学研究室 TMR 係数データ,
<https://www.ritsumei.ac.jp/~yamasue/tmr/database.html> - ac02

【付録】

付録1 「現地視察会の開催」について

日時：2022年8月25日(木) 10:00～16:00

場所：リモート及び現地でのハイブリッド形式で実施

付録2 「共同実施者等との打合せ」について

第一回：2022年4月20日(水) 13:30～15:00

第二回：2022年6月15日(水) 13:30～15:00

第三回：2022年8月17日(水) 13:30～15:00

第四回：2022年10月19日(水) 13:30～15:00

第五回：2022年12月21日(水) 13:30～15:00

付録3 「評価審査委員会への出席」について

令和4年度 評価審査委員会(開催なし)

学会発表、著書・論文投稿、報道、特許等の実績

■学会発表等

学会・誌名	タイトル	著者・所属	発表(掲載)日
資源・素材学会	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	市吉 健太 三菱マテリアル株式会社	2022年9月6日
富士経済	xEV 用リチウムイオン二次電池 リサイクル・リユースに関する調査	富士経済株式会社	2022年10月7日
LCA 学会研究会	使用済み車載用リチウムイオン電池のリサイクルを対象としたライフサイクル評価	前門梨香、松本 亨、 藤山淳史 北九州市立大学	2023年3月9日
技術情報センター セミナー	北九州地域での全体最適 LIB リユース・リサイクル技術・システム実証について	北口 誠 三菱マテリアル株式会社	2023年4月27日
日本機械学会 企画講演(Web)	サステイナブルコミュニティの形成に向けた暮らしとものづくりの最新技術動向	小隅 誠司 三菱マテリアル株式会社	2023年5月12日

■展示会出展等

種類	内容	展示日
展示会出展	三菱マテリアル EV TECH 2022 (Web 展示会)	2022年2月2日～ 2月4日
公開展示	タイ王国工業省による LIB リサイクル実証設備ご見学	2022年11月8日

■特許出願等

出願日	出願番号	発明の名称	出願人
2022年1月6日	特願 2022-1294	車両傾転装置	吉川工業株式会社 西日本オートリサイクル株式会社

用語の定義/略語

番号	用語	定義
01	BMS	Battery Management System: バッテリー管理システム。
02	CAN	Controller Area Network
03	ESS	Energy Storage System: 電力貯蔵システム。
04	EV	Electric Vehicle: 電気自動車。
05	HV	Hybrid Vehicle: ハイブリッド車。
06	LIB	Lithium-Ion Battery: リチウムイオン電池。LiB とも。
07	LIB セル	LIB の最小構成単位。
08	LIB モジュール	複数の LIB セルで構成され、LIB ユニット内でバッテリーの一単位として存在する LIB。
09	LIB ユニット	複数の LIB セルあるいはモジュールで構成され、次世代自動車のモーターを駆動するために供される車両部品としての LIB。
10	PHEV	Plugin Hybrid Electric Vehicle: プラグインハイブリッド車。
11	RFID	Radio Frequency Identifier
12	SOC	State of Charge
13	SOH	State of Health
14	V2H	Vehicle to Home
15	xEV	次世代車 (EV, HV, PHEV, FCV (燃料電池車))。
16	活物質	LIB を熱分解、破砕した後に篩選別処理の篩下で得られるレアメタルを含む粉体状物質。ブラックマス、ブラックサンドとも称される。

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。