

平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業

(車載用等の使用済みリチウムイオン電池の
低炭素型リサイクルシステム実証事業)

報告書

平成30年2月28日

太平洋セメント株式会社

目次

1. 実証事業の実施	1
1.1 実証事業の概要	1
1.1.1 目的、背景、課題等	1
1.1.2 実施体制	2
1.1.3 実証事業のシステム	3
1.1.4 本事業における技術コンセプト	4
1.1.5 実証事業の実施フロー	5
1.2 実証事業の結果	9
1.2.1 使用済 LIB の分別・手解体実験	9
1.2.2 使用済 LIB の焙焼実験	11
1.2.3 焙焼した LIB の破碎・選別実験	16
1.3 処理スキームの全体設計	20
1.3.1 処理・リサイクルスキームの全体設計	20
1.3.2 セメントキルン排熱利用時の消費燃料削減効果の検討	22
2. 環境負荷低減効果の検証	23
2.1 資源循環効果の検討	23
2.2 CO ₂ 排出量削減効果の検討	24
2.3 排ガスによる環境負荷の削減効果の検討	36
3. 経済性評価による事業実現可能性の検証	37
3.1 本事業スキームによる使用済 LIB の経済性評価	37
3.2 本事業スキームの見直し改善による使用済 LIB の経済性向上の可能性検証	39
4. 本処理技術の事業展開性	41
4.1 受入対象廃棄物の市場規模予測	41
4.2 自社既存施設への横展開	43
5. 今後の課題と事業計画	44
5.1 今後の課題	44
5.2 今後の事業計画	44
6. 総括	45
7. 添付資料	49

目次

図 1.1-1	本実証事業の目的、背景、課題等	1
図 1.1-2	実施体制図	2
図 1.1-3	本事業のシステム	3
図 1.1-4	本事業の技術コンセプト	4
図 1.1-5	本実証事業の実施概要	5
図 1.1-6	本実証事業における使用済 LIB の分解・手解体	6
図 1.1-7	本実証事業における焙焼炉	7
図 1.2-1	焙焼炉内の構造	13
図 1.2-2	焙焼炉内の経過時間による温度変化	13
図 1.2-3	焙焼炉から発生する排熱利用の検討	15
図 1.2-4	定置用 LIB における金属資源のマテリアルバランス（手法別）	19
図 1.2-5	車載用 LIB における金属資源のマテリアルバランス（松田産業手法）	19
図 1.3-1	処理スキームの全体設計	20
図 1.3-2	全体設計におけるマテリアルバランス	21
図 1.3-3	隣接するセメントキルンを活用した低炭素型システムの設計・運用手法	22
図 2.2-1	ベースラインプロセス（定置炉処理）	24
図 2.2-2	本実証事業のリサイクルプロセス	24
図 2.2-3	LIB 別の 1t あたりの CO ₂ 排出量の比較	25
図 2.3-1	本事業におけるフッ素のマテリアルバランス	36
図 3.2-1	本事業の経済性評価検討における運搬パターン	39
図 4.1-1	車載用 LIB の廃棄予測	41
図 4.1-2	定置用 LIB の市場規模予測	42
図 4.2-1	太平洋セメントのセメント事業国内拠点	43
図 5.2-1	今後のスケジュール	44

表目次

表 1.1-1	本実証事業における破碎・選別手法の概要	8
表 1.2-1	本実証事業における使用済 LIB の用途計画	9
表 1.2-2	使用済 LIB の集荷量	9
表 1.2-3	使用済 LIB (車載用) パックの解体結果	9
表 1.2-4	使用済 LIB (車載用) パックの解体結果と構成比 (一例)	10
表 1.2-5	本実証事業における焙焼実験計画	11
表 1.2-6	加熱温度帯別による焙焼物の比較	12
表 1.2-7	炉内温度の測定条件	12
表 1.2-8	経過時間別の焙焼状況	14
表 1.2-9	焙焼炉にて発生する排ガスのカロリー測定結果	15
表 1.2-10	破碎・選別手法の概要 (再掲)	16
表 1.2-11	破碎・選別実験結果による手法評価	17
表 1.2-12	破碎手法別の回収結果一覧	18
表 1.2-13	手法別の回収物写真	18
表 1.3-1	セメントキルンの排熱利用の有無による焙焼炉での灯油消費量比較	22
表 1.3-2	焙焼炉の排ガス (可燃性) 利用によるセメントキルンでの省エネルギー効果	22
表 2.1-1	本事業における資源循環効果の評価結果	23
表 2.2-1	本事業と定置炉処理を比較した CO ₂ 排出量削減効果 (LIB1t あたり)	26
表 2.2-2	本事業と定置炉処理を比較した CO ₂ 排出量削減効果 (年間処理量あたり)	26
表 2.2-3	定置炉処理の活動量と CO ₂ 排出量原単位 (車載用 (国内) LIB1t あたり)	27
表 2.2-4	定置炉処理の活動量と CO ₂ 排出量原単位 (車載用 (国外) LIB1t あたり)	28
表 2.2-5	定置炉処理の活動量と CO ₂ 排出量原単位 (車載用 (平均) LIB1t あたり)	29
表 2.2-6	定置炉処理の活動量と CO ₂ 排出量原単位 (定置用 LIB1t あたり)	30
表 2.2-7	本事業の活動量と CO ₂ 排出量原単位 (車載用 (国内) LIB1t あたり)	31
表 2.2-8	本事業の活動量と CO ₂ 排出量原単位 (車載用 (国外) LIB1t あたり)	32
表 2.2-9	本事業の活動量と CO ₂ 排出量原単位 (車載用 (平均) LIB1t あたり)	33
表 2.2-10	本事業の活動量と CO ₂ 排出量原単位 (定置用 LIB1t あたり)	34
表 2.2-11	CO ₂ 排出量削減効果試算にて使用した排出係数の出典一覧	35
表 3.1-1	使用済 LIB の種類別における資源価値とコストによる経済性総合評価	37
表 3.1-2	使用済 LIB の処理スキームにおけるコスト計の内訳	38
表 3.2-1	処理規模と運搬回数組み合わせによる使用済 LIB 処理の経済性総合評価比較	40

略 称 の 一 覧

本報告書では、以下の通り略称の統一を図る。

略 称

本報告書での表記	正式名称	意味等
LIB	Lithium-ion Rechargeable Battery	リチウムイオン二次電池
hr	hour	時間

(要約)

1. 背景と課題

本事業は使用済リチウムイオン二次電池（以下、「LIB」）の低炭素型リサイクルシステムを実証することを目的としている。

これまでに進められてきたリサイクル処理の技術開発は小型 LIB を主な対象としており、大型 LIB への対応は遅れていた。しかしながら、次世代自動車の普及により、現在は大型 LIB のリサイクル技術の開発が求められている。

LIB は直接破砕すると発火し、プラント事故に繋がるリスクがあるため、加熱処理が必須である。しかし、加熱処理には大量のエネルギーを要するほか、LIB に含有されるリチウムやコバルト、ニッケル等のレアメタルの回収に課題を抱えている。現時点で LIB に対応可能な処理方法として電炉や定置炉での加熱処理があるが、電炉では鉄のみリサイクルされ、他のベースメタルやレアメタルが回収されず、定置炉ではベースメタルやレアメタルは回収されるものの、酸化状態で回収されるために品質に課題があった。

使用済大型 LIB の解決すべきリサイクル課題は、大きく分けて次の 3 点である。

- ① 低炭素 … 加熱処理工程にかかる消費エネルギー量の削減を可能にするシステムの開発
- ② 資源循環 … 金属資源（リチウム等レアメタル、ベースメタル）を素材別に高効率回収する処理技術の開発
- ③ その他環境影響改善 … LIB の加熱処理にて発生するフッ化水素ガスを低コストで無害化処理するシステムの開発

2. 事業の目的と実施内容

使用済の大型 LIB を低炭素型処理スキームでリサイクル処理することを目指すため、本実証事業では、焙焼炉を用いて、大型 LIB から高品質の金属資源を回収するための実証実験を行う。処理対象は、自動車搭載用や定置用等の大型 LIB である。最終目標は、これまで未回収であったリチウムの回収とリサイクルである。前述の LIB リサイクルが抱えている 3 つの課題を解決するため、本実証事業では次の 3 つの目標掲げる。

- ① 低炭素 … 焙焼炉をセメントキルンに隣接し、セメントキルンの排熱を活用して焙焼工程の消費エネルギー量を削減するシステムの設計
- ② 資源循環 … 金属資源（リチウム等のレアメタル、ベースメタル）を酸化させず、かつ各金属資源を高濃度で回収することが可能な処理工程の選定
- ③ その他環境影響改善 … LIB の加熱処理で発生するフッ化水素ガスを、隣接するセメントキルンを用いて、低コストで無害化処理するシステムの設計

焙焼温度を調整することで、金属を融解させずに未酸化の状態のまま、可燃物と接着剤のみを焼き、金属資源を回収しやすくする。焙焼した LIB を破砕・選別することで、ベースメタルを回収するだけでなく、リチウム等のレアメタルも素材回収が可能な濃度に濃縮し、金属リサイクルを図る。

さらに、省エネルギーとして焙焼炉をセメントキルンに隣接し、セメントキルンの排熱を

焙焼炉に利用することで、焙焼にかかる消費エネルギー量を削減する。この他、焙焼によって発生した可燃性ガスを含む排ガスをセメントキルンに戻し代替燃料として利用するほか、排ガスに含まれる難処理のフッ化水素をセメントキルンによって低コスト処理する等、セメントキルンを活用し、これまでの廃棄物処理ノウハウを活かすことで、他の技術よりも低コストにて LIB の全量リサイクルを実現する処理システムを目指す。

3. 実証事業の結果

本実証事業の実施内容と主な結果を以下に示す。実証実験に用いた使用済 LIB は、国内自動車メーカーおよび国外自動車メーカーの車載用 LIB、国内メーカーの定置用 LIB である。

① 使用済 LIB の分別・手解体

焙焼処理量の削減とベースメタルとプラスチック資源の回収を目的として、使用済 LIB の集荷、分別・手解体を行い、回収した資源量の計測を行った。回収した LIB は、車載用（国内、国外）と定置用である。なお、手解体はパック状態で排出された車載用（国内・国外）LIB のみ行った。定置用 LIB はモジュール状態で排出されたため、手解体は行わなかった。手解体の結果、車載用 LIB パック 1 台あたり、国内・国外平均で約 4 割（重量ベース）の金属やプラスチックの素材が回収された。手解体により、平均で約 4% のプラスチック（可燃分）を焙焼前に回収することにより、CO₂ 排出量低減に寄与できた。

② 使用済 LIB の焙焼

ベースメタルとレアメタルの高濃度回収のために、電極材のアルミニウムと銅を融解せず、接着剤のみを焼き切る焙焼温度帯と加熱時間の比較検証を行った。解体後の LIB モジュールの焙焼における加熱温度帯を 450℃と 600℃で焙焼物の状態を比較検証した結果、450℃では融着が見られず、破碎による分離が可能な状態であった。一方、600℃では融着が見られ、破碎による分離は困難に見受けられた。加熱時間の 3 時間から 6 時間の間で経過観察を行ったところ、3 時間後と 4 時間後ではまだ炎が出ており、5 時間後では炎は見られなかったものの発煙しており、焙焼は完了しておらず、6 時間後で炎と煙ともに確認されず、焙焼が完了していた。この結果、焙焼温度は 450℃、焙焼時間は 6 時間が好適と判断された。

焙焼によって発生する排ガス（可燃性ガス含有）のセメントキルンでの有効活用について、排ガスの熱量を測定、検証した結果、焙焼にて発生する排ガスの熱量は 156Mcal/t で、セメント生産における石炭使用量の 0.1% を代替すると算出された。

③ 焙焼した LIB の破碎・選別

焙焼物からベースメタルとリチウム等を含有する極材粉 (<1mm) を高効率回収するための好適な破碎・選別手法の選定のため、衝撃式、剪断式、剪断式（排出粒度調整機能付き）の 3 種類の破碎技術の比較検討を行った。選別技術は篩い分けで統一した。技術評価の結果、定置用、車載用いずれの焙焼 LIB にも破碎処理が可能で設備負荷の低い剪断式（排出粒度調整機能付き）が有望であった。

回収物に含まれる成分分析を行い、金属のマテリアルバランスを検証したところ、定置用 LIB において <1mm 極材粉にレアメタルを高濃度回収できていたのは衝撃式で、1-10mm

に銅濃縮、10mm<に鉄とアルミニウムを濃縮できていたのは剪断式（排出粒度調整機能付き）であった。このため、定置用 LIB の破碎処理として、今後、衝撃式と剪断式（排出粒度調整機能付き）を組み合わせる等、改善を検討する。

剪断式（排出粒度調整機能付き）を活用した車載用 LIB では、国内・国外ともに<1mm 極材粉にて 50%以上のレアメタル回収が確認された。一方、ベースメタルでは、10mm<に銅が最も多く濃縮されるものの、同様に鉄やアルミニウムも高濃度回収されており、破碎・選別に課題が残った。

④ 処理スキームの全体設計

実証実験結果に基づき、使用済 LIB のリサイクルフロー全体設計を行い、リサイクルフローのマテリアルバランスを算出した。また、セメントキルンと焙焼炉を隣接することで、セメントキルン排熱を焙焼炉へ、焙焼にて発生する可燃性排ガスをセメントキルンへ送ることによる省エネルギー効果の試算を行った。

使用済 LIB の処理フローとして、パック状態の LIB は手解体を行い、ベースメタルとプラスチックを回収し、モジュール状態にした後、焙焼を行う。焙焼物は剪断式（排出粒度調整機能付き）にて破碎後、篩い分けし、選別回収した<1mm の極材粉はリチウム等のレアメタルリサイクル、1-10mm と 10mm<は銅リサイクルとした。

処理スキームの規模は、焙焼処理量 3,000t/年（10t/日）を軸とすると、処理する使用済 LIB パック（車載用）約 6,000t/年、回収される資源は、極材粉 360t/年、ベースメタルが合計約 3,390t/年の見込みと算出された。

省エネルギー効果については、セメントキルンの排熱エネルギーを利用することで、焙焼炉の年間灯油消費量を 228kL から 160kL に約 70kL（約 30%）削減される見込みであり、焙焼炉から発生する可燃性排ガスをセメントキルンに利用することで、セメント製造に要する石炭の約 0.1%の代替が可能と算出された。

4. 環境改善効果

本事業スキームによる二酸化炭素削減効果の算定にあたり、比較対象技術は定置炉での焼却処理と設定した。定置炉焼却の前後の処理工程に関するエネルギー消費に関連するデータの入手が困難であったため、より保守的な算定として本事業と同一と仮定し、フッ化水素処理工程は、算定範囲から除外した。リサイクル効果は、実際に評価される資源量のみ算定対象とした。試算の結果、車載用（国内）LIB は 265kg-CO₂/LIB パック、車載用（国外）LIB は 362kg-CO₂/LIB パック、定置用 LIB は 617kg-CO₂/LIB モジュールであった。年間焙焼量 3,000t/年の処理規模の場合、いずれの LIB においても約 1,850t-CO₂/年の二酸化炭素削減効果と算出された。

実際に評価される資源量のみ資源循環効果は、車載用（国内）LIB は資源回収率が約 70%、車載用（国外）LIB は約 50%、定置用 LIB は約 1%と算出された。定置用 LIB は、約 60%に相当する 1mm \leq の回収量に対し、銅のみ資源評価となり、銅の含有率が少ないことから資源回収率が低くなった。しかしながら、金属評価されない回収物はセメント化リサイクルを行うことから、いずれの LIB も埋立処理量は 0 であり、従ってリサイクル率は 100%である。

排ガス（フッ化水素含有）の低コスト無害化処理について、LIB に含まれるハロゲン元素（フッ素）の挙動について検証した結果、定置用 LIB と車載用（国外）LIB では 98~100%

と殆どが 1mm 未満の極材粉に移動していた。車載用（国内）LIB では 8 割弱が 1mm 未満の極材粉に移動しており、残りは焙焼の排ガスに移動していたが、この排ガスはセメントキルンに送られ、無害化処理される。セメントキルンの排ガスを計測した結果、フッ素の無害化処理が確認された。

5. 経済性評価

車載用（国内・国外）LIB、および定置用 LIB の経済性について、回収資源の有価物評価と運搬や処理設備に要する費用、人件費、消耗品費の費用を算出し、総合評価を行った。回収資源のうち、レアメタルの有価物評価は、回収物の濃度に基づき行った。1mm \leq はいずれも銅評価とし、評価量は 1mm \leq に含有する銅量とした。

試算の結果、車載用 LIB（国内）の極材粉（<1mm）にて Co に有価評価が得られた。一方、車載用 LIB（国外）の極材粉（<1mm）はいずれも評価されずセメント化となり、定置用 LIB は廉価だがレアメタル回収は可能と判定された。車載用 LIB は国内と国外の平均ではレアメタル回収可能との判定となったことから、処理の運用方法によってレアメタルリサイクルの可能性がある。車載用（国内・国外）LIB は、銅評価により 4 万円/t の資源価値ありと算出されたが、人件費等のコストが 13 万～16 万円/t かかる見込みであり、収支では▲10 万円/t 前後となった。定置用 LIB は資源評価 100 円/t で処理コストが約 19 万円/t であったことから、総合評価も▲約 19 万円/t であった。今後、処理施設の集約による運搬コストの削減や処理施設の大規模化による人件費低減等、使用済 LIB の処理コストを抑える方針である。

6. 今後の課題と事業化スケジュール

LIB は多種多様な構造、素材構成である。今回調達できた LIB の種類が少なかったため、リサイクルフローを確定するためには、LIB サンプルの種類を増やし、多種多様な LIB に対応可能な焙焼条件や破碎・選別手法を詳細検討する必要がある。フッ素等ガスの挙動も LIB によって異なるので、種類を増やし、検証の必要がある。

また、実用化するには、調達、手解体、焙焼、破碎、選別の各工程において、作業効率を向上させるための荷姿やバスケットの構造を再度検証する必要がある。

極材粉の製錬における有価評価は車載用（国内）LIB のみだったため、更なる回収率の向上のための処理工程の改善と、LIB をレアメタル含有量別に仕分ける等のノウハウの蓄積が求められる。実証実験では少量処理だったことから、CO₂ 削減効果、熱分解ガスの燃料削減効果、フッ素ガスの除去効果の精度向上のために、単位時間当たり最大処理量にてより正確な効果を検証する必要がある。

今後のスケジュールとして、2019 年度より付帯設備の設置を行い、大量処理体制の検討、事業化規模の許可取得を並行して進める。2020 年には焙焼量 500～1,000t/年にて操業を開始し、2030 年は拠点も増加させ、18,000t/年の焙焼処理量を目指すことを想定している。

Summary

1. Background and issues

This project demonstrates a low-carbon recycling system for spent lithium-ion rechargeable batteries (hereinafter abbreviated as “LIBs”).

Existing LIB recycling technology is designed primarily for small LIBs, while that for large LIBs is still being developed. The need for large LIB recycling, meanwhile, is increasing with the growing use of next-generation vehicles.

LIBs must be pre-heat-treated because they could catch fire when directly crushed, causing accidents at recycling plants. Such pre-heat-treatment, however, requires a large amount of energy while recovery of rare metals contained in LIBs (lithium, cobalt, nickel, etc.) remains a challenge. The existing techniques to recycle LIBs include heat treatment in an electric furnace or a stationary furnace; the former recovers only iron with other base metals and rare metals left untapped while the latter recovers base metals and rare metals, whose quality remains poor as they are oxidized.

As listed below, there are three major challenges in recycling spent large LIBs.

- 1) Low carbon: Development of a system to reduce energy consumption required for heat treatment
- 2) Resource recycling: Development of a process to recover metal resources (base metals and rare metals such as lithium) in an efficient and selective way.
- 3) Reduction of other environmental impacts: Development of a system to cost-effectively detoxify hydrogen fluoride gas produced by heat treatment of LIBs.

2. Project objectives and descriptions

This project demonstrates recovery of high-quality metal resources from large LIBs using a roasting furnace to recycle spent large LIBs through a low-carbon treatment system. Materials to be recycled are large LIBs for automotive and stationary applications and the final goal is to recover and recycle lithium, which has remained untapped. The project has the following three objectives to address the challenges mentioned above.

- 1) Low carbon: Design a system to reduce the amount of energy required for roasting by using waste heat, with a roasting furnace installed near a cement kiln.
- 2) Resource recycling: Select a treatment process that recovers high concentrations of metals (base metals and rare metals such as lithium) without oxidizing them.
- 3) Reduction of other environmental impacts: Design a system to cost-effectively detoxify hydrogen fluoride gas produced by heat treatment of LIBs, using an adjacent cement kiln.

By adjusting the roasting temperature, combustibles and adhesives are selectively burned without melting and oxidizing metals to facilitate recovery of metal resources. At the same time, roasted LIBs are crushed and segregated to recover both base metals and rare metals, with the latter properly concentrated, to recycle metals.

A roasting furnace is then installed near a cement kiln to save energy required for roasting, where the waste heat from the kiln is used for roasting, while exhaust gas containing combustibles produced by roasting is fed back to the kiln for use as an alternative fuel. In addition, hydrogen fluoride, a persistent compound in the exhaust gas, is treated in the kiln in a cost-effective way. The objective is to develop a process where LIBs are fully recycled more cost-effectively by using a cement kiln and leveraging existing expertise in waste treatment.

3. Demonstration results

The following are the descriptions and results of the project. Spent LIBs used for the demonstration were those onboard domestic and imported cars and stationary LIBs manufactured domestically.

1) Segregation and manual dismantling of spent LIBs

Spent LIBs were collected, segregated and manually dismantled to reduce the amount of materials to be roasted and recover base metals and plastic resources, with the recovered amount measured. Specifically, LIBs onboard domestic and imported cars and stationary LIBs were collected, while for the former, only those that were packed were manually dismantled. Stationary LIBs were not manually dismantled as they were modules. As a result of the manual dismantling, the amount of metals and plastics recovered from a pack of domestic or imported automotive LIB accounted for an average of about 40% of the total mass. At the same time, an average of about 4% of plastics (combustibles) were recovered by manual dismantling before being roasted, which contributed to reducing carbon dioxide (CO₂) emissions.

2) Roasting of spent LIBs

The temperature range and time of roasting to exclusively burn adhesives without melting electrode materials (aluminum and copper) were examined to recover high concentrations of base metals and rare metals. Specifically, LIB modules dismantled and roasted at 450 degrees C and 600 degrees C were examined; no fusion was observed at 450 degrees C and separation by crushing was possible, while at 600 degrees C, fusion was observed and separation by crushing was apparently impossible. The following observations were made during heating (3-6 hours): flames were observed after three to four hours, while after five hours, no flames were observed but smoke was emitting with roasting continuing; roasting was completed in six hours with no flames and smoke observed. These results indicate the best roasting temperature and time: 450 degrees C for six hours.

In addition, the calorific value of the exhaust gas produced by roasting (containing combustible gas) was measured and examined to use it to fuel a cement kiln; the value was 156 Mcal/t, which can replace 0.1% of coal used to produce cement.

3) Crushing and segregation of roasted LIBs

Three crushing techniques – impact crushing, shear crushing and shear crushing with particle size adjustment – were tested to adopt the best method to efficiently recover base metals and electrode particles (containing lithium, etc.) with a size of less than 1 mm while roasted LIBs were all segregated by sieving. The results indicate that shear crushing with particle size adjustment, which puts less load on facilities and can accommodate both

automotive and stationary LIBs, is the most promising technique.

The recovered materials were analyzed for components and their metal material balance was examined; high concentrations of rare metals were recovered from electrode particles (<1 mm) through impact crushing of stationary LIBs while copper (1-10 mm), iron (10 mm<) and aluminum (10 mm<) were concentrated through shear crushing with particle size adjustment. Options for further improvement, such as combinations of impact crushing and shear crushing with particle size adjustment, will thus be examined for stationary LIBs.

As for LIBs onboard domestic and imported cars, more than 50% of rare metals were confirmed to be recovered from electrode particles (<1 mm) through shear crushing with particle size adjustment while high concentrations of base metals – not only copper but also iron and aluminum – were recovered from electrode particles (10 mm<), with copper most concentrated, which suggests the need to improve crushing and segregation processes.

4) General design of the treatment system

The whole flow of spent LIB treatment was designed according to the demonstration results, with its material balance calculated. The energy-saving effect of installing a roasting furnace near a cement kiln was also calculated, where the waste heat from the kiln is fed to the furnace, and combustible exhaust gas produced by roasting, to the kiln.

Packed LIBs were manually dismantled to recover base metals and plastics and then made into modules for roasting. Subsequently, roasted LIBs were sheared and crushed with the particle size adjusted, followed by sieving to segregate and recover rare metals such as lithium (electrode particles smaller than 1 mm) and copper (electrode particles 1-10 mm in size or larger).

Given that 3,000 tons are roasted annually (10 t/day), it is estimated that about 6,000 t/y of spent packed automotive LIBs are treated, which translates into recovery of 360 t/y of electrode particles and about 3,390 t/y of base metals in total.

As for the energy-saving effects, it is estimated that the amount of kerosene used for roasting can be reduced by about 70 kl/y (30%), from 228 to 160 kl/y, by using cement kiln waste heat while about 0.1% of coal used to produce cement can be saved by feeding combustible exhaust gas from a roasting furnace to a cement kiln.

4. Environmental improvement effects

With the incineration in a stationary furnace as a standard for comparison, the project's CO₂ emission reduction effects were calculated. As data on energy consumption before and after the incineration in a stationary furnace was not available, it was conservatively presumed to be the same as that of the project while the hydrogen fluoride treatment process was excluded from calculation. The recycling effects, meanwhile, were estimated based exclusively on the amount of resources to be evaluated. The calculation results: 265kg-CO₂ /LIB (packed) for automotive LIBs (domestic); 362kg-CO₂ /LIB (packed) for automotive LIBs (imported); and 617kg-CO₂ /LIB (modularized) for stationary LIBs. About 1,850 tons of CO₂ emissions, therefore, can be reduced annually regardless of the type of LIB for 3,000 t/y of treatment.

The resource recovery rate was about 70% for automotive LIBs (domestic), about 50% for automotive LIBs (imported) and about 1% for stationary LIBs, all based on the amount of resources that were evaluated. As for stationary LIBs, only copper was evaluated for particles larger than 1 mm, which account for about 60% of the total while low concentrations of copper resulted in a low recovery rate. Recovered materials that were not considered metals, however, were recycled as cement materials. The recycling rate was therefore 100%, with none reclaimed for all LIBs.

The behavior of halogen elements (fluorine) in LIBs was examined to cost-effectively detoxify the exhaust gas containing hydrogen fluoride; as for stationary LIBs and automotive LIBs (imported), 98-100% of them transferred to electrode particles smaller than 1 mm, while as for automotive LIBs (domestic), nearly 80% transferred to electrode materials smaller than 1 mm, with the rest transferring to the exhaust gas, which was fed to the cement kiln for detoxification. The analysis results of the cement kiln exhaust gas proved fluoride detoxification.

5. Cost-effectiveness evaluation

The cost effectiveness of automotive LIBs (domestic and imported) and stationary LIBs were systematically evaluated by determining the value of recovered resources and calculating the costs of transportation, treatment facilities, manpower and consumables. Specifically, the value of recovered rare metals was determined based on their concentrations while particles larger than 1 mm were evaluated as copper with the amount of evaluation considered the amount contained in particles larger than 1 mm.

Consequently, cobalt was evaluated as valuable for electrode particles (<1 mm) of automotive LIBs (domestic) while those (<1 mm) of automotive LIBs (imported) were considered to have no value and therefore downgraded to cement materials. Stationary LIBs were also evaluated as moderately valuable with trace amounts of rare metals recovered. Rare metals, meanwhile, can be generally recovered from automotive LIBs (domestic and imported), which suggests the possibility of rare metal recycling, depending on how they are treated. The value of automotive LIBs (domestic and imported) was calculated at more than ¥40,000/t, based on their copper contents while the manpower cost, etc. were estimated at ¥130,000-160,000/t, which resulted in a deficit of around ¥10,000/t. Likewise, the resource value of stationary LIBs was calculated at ¥100/t, with the treatment cost estimated at ¥190,000/t, which resulted in a deficit of about ¥190,000/t. The plan, therefore, is to consolidate treatment facilities to cut down on transportation costs and expand operations to lower the treatment costs of spent LIBs (manpower costs, etc.).

6. Challenges to be addressed and the commercialization timeline

LIBs with complicated structures consist of various materials. As LIBs procured for the project were limited in variety, more samples are needed to establish LIB recycling procedures, where roasting conditions, crushing techniques and segregation methods are examined for various types of LIBs. This is all the more important, given that the behavior of fluorine gas, etc. differs depending on the type of LIB.

In addition, the packing style and the structure of baskets should be re-examined for each

process (procurement, manual dismantling, roasting, crushing and segregation) to improve the work efficiency for commercialization purposes.

As the value of electrode particles through refining was evaluated only for automotive LIBs (domestic), the treatment process should be improved to further increase the recovery rate while expertise in processes such as segregation of LIBs according to their rare metal contents should be developed. At the same time, more in-depth demonstrations are needed, with the maximized treatment volume per unit time, to accurately evaluate the effects of reducing CO₂ emissions, saving fuel (by using pyrolysis gas) and detoxifying fluorine gas, given that the project dealt with a limited amount of treatment.

Considering the above, ancillary facilities will be set up in FY2019 for large-scale treatment while an application will be filed for commercial operations, where 500-1,000 tons will be treated in 2020 and up to 18,000 tons in 2030, with an increased number of treatment facilities.

事業実施体制

■実施主体			
太平洋セメント株式会社	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム チームリーダー	石田 泰之	
	環境事業部 営業企画グループ グループリーダー	生田 考	
	環境事業部 営業企画グループ 参事	花田 隆	
	環境事業部 営業企画グループ 参事	福田 誠司	
	環境事業部 営業企画グループ 参事	岡村 聰一郎	
	環境事業部 営業企画グループ 主務	鈴木 涼	
	環境事業部 営業企画グループ 主務	上杉 諒平	
	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム 研究員	田村 典敏	
	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム 研究員	竹本 智典	
	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム 研究員	中村 充志	
	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム 研究員	瀧澤 洸	
	■再委託先		
	松田産業株式会社	環境ソリューション事業部 企画 推進課 課長	境 健一郎
環境ソリューション事業部 企画 推進課 課長代理		矢野 雄高	
株式会社クレコ・ラボ	代表取締役	興津 世祿	
	マネージャー	若林 史子	

1. 実証事業の実施

1.1 実証事業の概要

1.1.1 目的、背景、課題等

本事業は使用済みリチウムイオン二次電池（以下、「LIB」）の低炭素型リサイクルシステムを実証することを目的としている。これまでに進められてきたリサイクル処理の技術開発は小型 LIB を主な対象としており、大型への対応は遅れていた。しかしながら、次世代自動車の普及により、現在は大型 LIB のリサイクル技術の開発が求められている。

LIB は直接破碎すると発火し、プラント事故に繋がるリスクがあるため、加熱処理が必須である。しかし、加熱処理には大量のエネルギーを要するほか、LIB に含有されるリチウムやコバルト、ニッケル等のレアメタルの回収に課題を抱えている。現時点で LIB に対応可能な処理方法として電炉や定置炉での加熱処理があるが、電炉では鉄のみリサイクルされ、他のベースメタルやレアメタルが回収されず、定置炉ではベースメタルやレアメタルは回収されるものの、酸化状態で回収されるために品質に課題があった。

使用済みの大型 LIB を低炭素型処理スキームでリサイクル処理することを目指すため、本実証事業では、焙焼炉を用いて、大型 LIB から高品質の金属資源を回収するための実証実験を行う。処理対象は、自動車搭載用や定置用等の大型 LIB である。最終目標は、これまで未回収であったリチウムの回収とリサイクルである。目的や背景、課題を下図に示す。

目的	<ul style="list-style-type: none">リチウムイオン電池（LIB）を低炭素型の処理スキームでリサイクル最終目標は、これまで未回収であったリチウムの回収・リサイクル <低炭素> 隣接のセメントキルン排熱を活用し、焙焼工程の消費エネルギーを削減するシステムの設計 <資源循環> 金属資源（リチウム等レアメタル、ベースメタル）を酸化させずにそれぞれ回収する処理工程の選定 <その他環境影響改善> LIBの加熱処理で発生するフッ化水素ガスをセメントキルンで低コスト・無害化処理するシステムの設計
対象廃棄物	自動車搭載用、並びに定置用等の大型リチウムイオン電池（LIB）
背景	<ul style="list-style-type: none">これまででは小型LIBへの対応が主。大型への対応は遅れていた次世代自動車の普及により、大型LIBのリサイクル技術の開発が求められているLIBは加熱せずに直接破碎すると発火しプラント事故に繋がる。加熱処理が必須加熱処理には多くのエネルギー消費を必要とする電炉での無害化処理では鉄回収しか出来ず、定置炉では金属が酸化するなど、金属リサイクル（ベースメタル、レアメタル）に課題がある加熱により難処理のフッ素化合物が発生するなど、排ガスの環境負荷が大きい <低炭素> 加熱処理工程にかかる消費エネルギーの削減を可能にするシステムの開発 <資源循環> 金属資源（リチウム等レアメタル、ベースメタル）を素材別に高効率回収する処理技術の開発 <その他環境影響改善> LIBの加熱処理にて発生するフッ化水素ガスを低コストで無害化処理するシステムの開発
解決すべき課題	

図 1.1-1 本実証事業の目的、背景、課題等

1.1.2 実施体制

本事業の実施体制図を図 1.1-2 に示す。

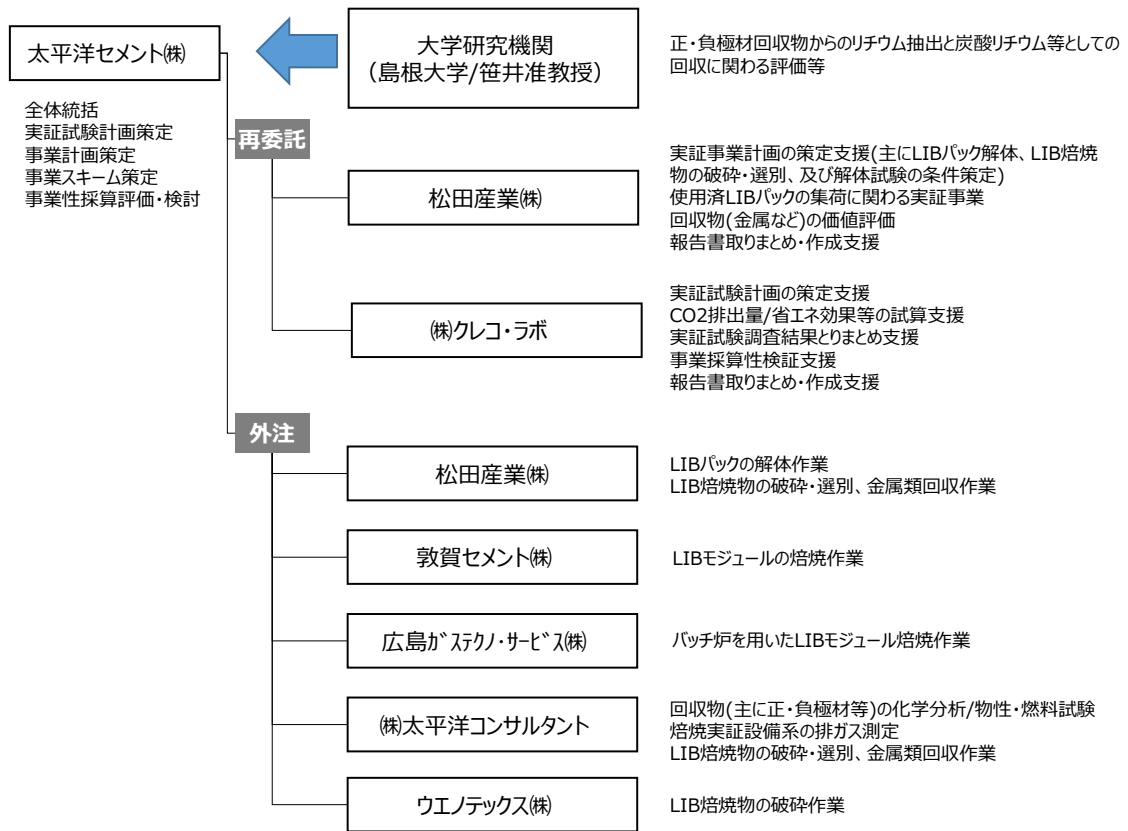


図 1.1-2 実施体制図

1.1.3 実証事業のシステム

本実証事業では、焙焼温度を調整することで、金属を融解させずに未酸化の状態のまま、可燃物と接着剤のみを焼き、金属資源を回収しやすくする。焙焼した LIB を破碎・選別することで、ベースメタルを回収するだけでなく、リチウム等のレアメタルも素材回収が可能な濃度に濃縮し、金属リサイクルを図る。

さらに、省エネルギーとして焙焼炉をセメントキルンに隣接し、セメントキルンの排熱を焙焼炉に利用することで、焙焼にかかる消費エネルギー量を削減する。この他、焙焼によって発生した可燃性ガスを含む排ガスをセメントキルンに戻し代替燃料として利用するほか、排ガスに含まれる難処理のフッ化水素をセメントキルンによって低コスト処理する等、セメントキルンを活用し、これまでの廃棄物処理ノウハウを活かすことで、他の技術よりも低コストにて LIB の全量リサイクルを実現する処理システムを目指す。

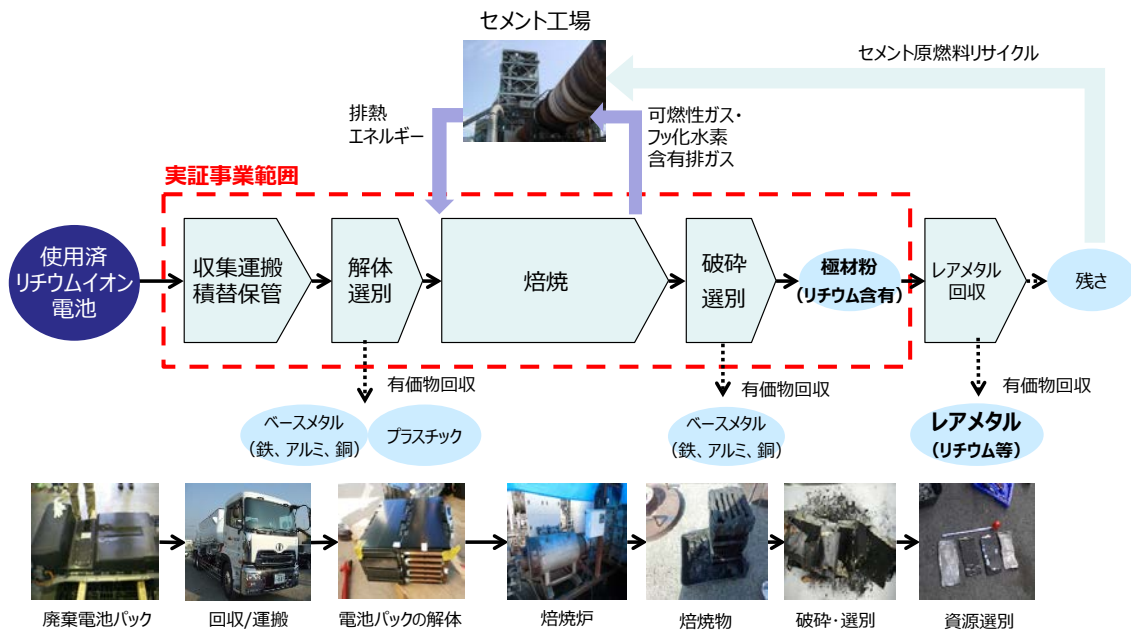


図 1.1-3 本事業のシステム

1.1.4 本事業における技術コンセプト

本事業における焙焼工程と破砕・選別工程の特徴およびコンセプトを下図に示す。

焙焼工程のコンセプトとして、セメント製造工程に隣接することで、セメントキルンの排熱を焙焼炉で有効利用することを想定しており、これにより焙焼炉のエネルギー消費量を削減することが可能になる。また、使用済 LIB を焙焼炉に投入するバスケットの構造が二重構造となっている点が特徴であり、これによって投入物に応じた焙焼条件の設定が可能である。さらに、セメント製造工程に隣接させることで、使用済 LIB の焙焼によって発生するフッ化水素ガスをセメントキルンに戻すことにより、低コストでフッ素の無害化処理ができるほか、排ガスの熱量を有効することによりセメントキルンの省エネルギーに繋がる。

破砕・選別工程のコンセプトは、リチウム等のレアメタル回収が可能となるレアメタル濃度の高い極材粉の回収であり、金属回収率を高めることによる経済性の追求、残さのセメント化処理による 100%リサイクルの実現が特徴である。

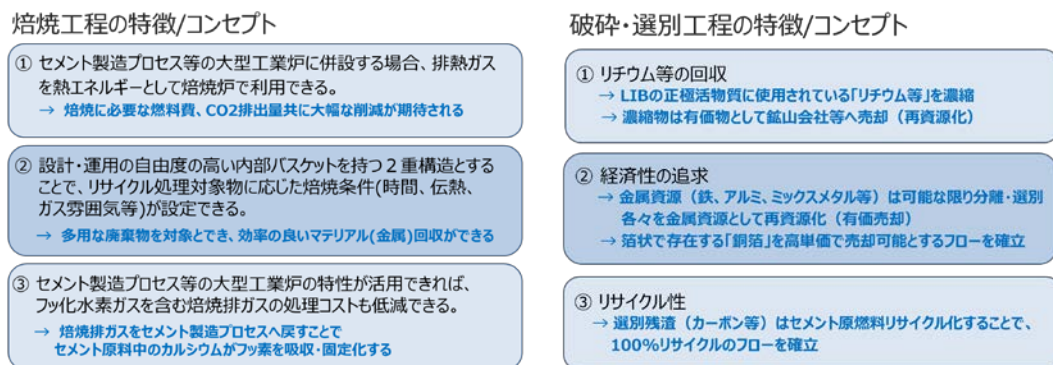
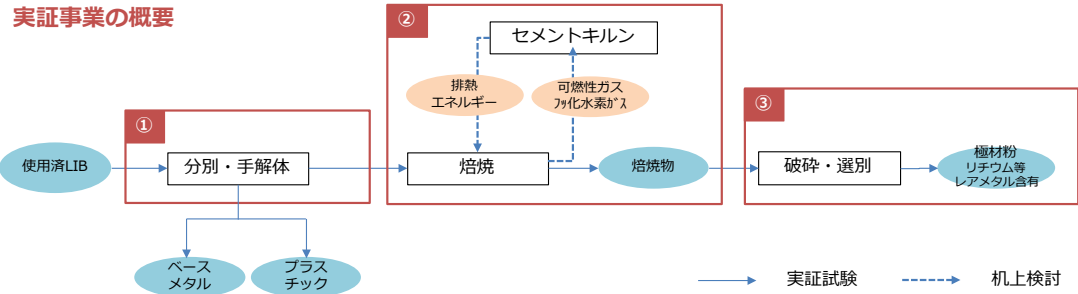


図 1.1-4 本事業の技術コンセプト

1.1.5 実証事業の実施フロー

本実証実験の各工程の実施事項と検討内容、目的と成果を下図に示す。



実施事項	実施者	実施場所	実施内容	目的・成果
① 使用済LIBの分別・手解体	松田産業	松田産業集荷場所	<ul style="list-style-type: none"> 使用済LIBの集荷 使用済LIBの分別・手解体 回収資源の計測 	<ul style="list-style-type: none"> 焙焼処理量の削減
② 使用済LIBの焙焼	太平洋セメント	<ul style="list-style-type: none"> 敦賀セメント 広島ガステクノ・サービス 	<ul style="list-style-type: none"> 解体後のLIBの焙焼における加熱温度帯と加熱時間の検証 セメントキルン排熱利用時の消費燃料削減効果の検討 排ガスの熱利用効果の検証 排ガスのセメント利用時の問題点の抽出 	<ul style="list-style-type: none"> リチウム等を高濃度回収するための、電極材のアルミと銅を融解せず、接着剤のみを焼き切る焙焼温度帯と加熱時間 セメントキルン排熱を利用することによる焙焼工程での消費エネルギー削減効果 可燃性ガスを含む排ガスのセメントキルンでの有効活用法 フッ化水素を含む排ガスの低コスト無害化処理手法
③ 焙焼したLIBの破碎・選別	松田産業	<ul style="list-style-type: none"> 松田産業 破碎・選別プラントメーカー 	<ul style="list-style-type: none"> 破碎・選別手法の比較検討 	<ul style="list-style-type: none"> 焙焼物から、極材粉(リチウム等を含有)を高効率回収するための好適な破碎・選別手法 技術的・経済的に好適な破碎・選別手法組み合わせ
④ 処理スキームの全体設計と経済性の検証	太平洋セメント	太平洋セメント	<ul style="list-style-type: none"> 実証試験結果に基づく処理・リサイクルスキームの全体設計 製品処理単位におけるマテリアルバランス作成 隣接するセメントキルンを活用した排熱・可燃性ガスを含む排ガスを有効活用する低炭素型システムの設計・運用手法の検討 設計フローにおける経済性の検証 	<ul style="list-style-type: none"> LIBの処理・リサイクルフローの全体設計 処理・リサイクルフローにおける製品全体のマテリアルバランス セメントキルンと焙焼炉を隣接することによるキルン排熱の有効利用、排ガス中のフッ素ガスの無害化及び可燃性ガスを含む排ガス代替燃料利用する低炭素型システムの設計・運用手法 経済的に実現可能な処理スキームの計画 今後の課題整理と事業計画の策定

図 1.1-5 本実証事業の実施概要

(1) 使用済 LIB の分別・手解体実験

焙焼工程の前処理として、必要に応じて LIB の手解体を行った。使用する LIB は車載用のほか、必要に応じて定置用 LIB を用いた。ベースメタルやプラスチックを取り外す事により、焙焼炉に投入する可燃分（プラスチック）を減らし、CO2 排出量の削減を図ることを目的としている。



図 1.1-6 本実証事業における使用済 LIB の分解・手解体

(2) 使用済 LIB の焙焼実験

解体した LIB を焙焼炉（試験炉）に投入し、金属回収に適した加熱温度帯および時間の選定を行う。生成した焙焼物（極材粉等）は、次工程の破碎・選別に用いる。この他、焙焼炉から発生した可燃性ガス含有排ガスをセメントキルンで利用するにあたっての燃料代替効果の試算を行う。

なお、本実験にて使用する焙焼炉は、経済産業省からの補助事業(※1)によりリチウムイオン電池リサイクルを目的として導入した回転床式連続焙焼炉（試験炉）を用いた。炉内サイズは、Φ3,400mm、高さ 1,500mm である。

※1 平成 26 年度 産業技術実用化開発事業費補助金(資源循環実証事業)

平成 26 年度 産業技術実用化開発事業費補助金(リサイクル優先レアメタル回収実証事業)

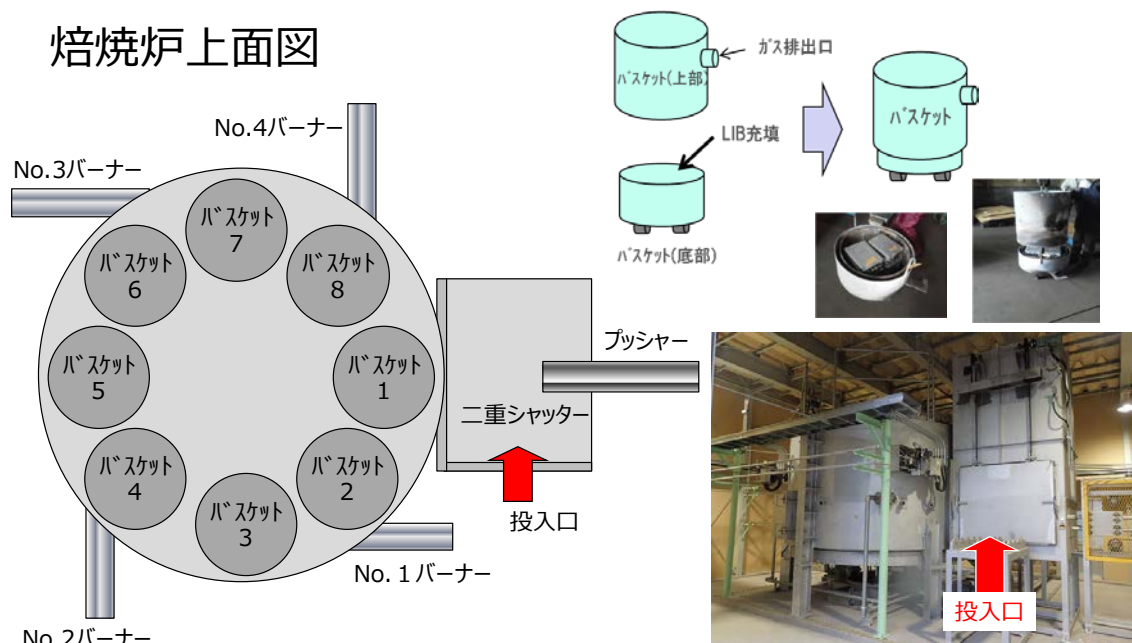



図 1.1-7 本実証事業における焙焼炉

(3) 焙焼したLIBの破碎・選別実験

焙焼炉にて生成した焙焼物（極材粉等）を複数の破碎・選別手法によって比較検証することで、リチウム等を高効率回収するための極材粉を選別回収し、金属素材としてリサイクル可能にする手法を選定する。なお、本実証範囲はリチウム等を含有する極材粉の回収、成分分析までを行う。

3つの実験に基づき、処理システムの全体設計や経済性の検証、環境負荷改善効果の試算を行い、今後の課題整理や事業計画を策定する。

表 1.1-1 本実証事業における破碎・選別手法の概要

破碎					選別		
実施社	破碎方法	排出粒度調整機能	写真	アプローチ方法	実施社	選別方法	写真
ウエノテックス (UT)	衝撃式	○		<ul style="list-style-type: none"> 衝撃破碎による箔からの極材粉の剥離促進 	THC	篩い分け	
大平洋コンサルタント (THC)	剪断式	—		<ul style="list-style-type: none"> 金属ケースの剪断破碎による極材粉の剥離・回収促進 破碎負荷の小さい方式での検証 			
松田産業 (MS)	剪断式	○		<ul style="list-style-type: none"> 金属ケースの剪断破碎による極材粉の剥離・回収促進 ロストル径まで破碎することでのケース、箔、極材粉の単体分離の促進 	MS	篩い分け	

備考) 篩い分け粒度 (共通) : <1mm, 1-10mm, 10mm<

1.2 実証事業の結果

1.2.1 使用済 LIB の分別・手解体実験

本実証事業の実施内容と主な結果を以下に示す。実証実験に用いた使用済 LIB は、国内自動車メーカーおよび国外自動車メーカーの車載用 LIB、国内メーカーの定置用 LIB である。

焙焼処理量の削減とベースメタルとプラスチック資源の回収を目的として、使用済 LIB の集荷、分別・手解体を行い、回収した資源量の計測を行った。回収した LIB は、車載用（国内、国外）と定置用である。なお、手解体はパック状態で排出された車載用（国内・国外）LIB のみ行った。定置用 LIB はモジュール状態で排出されたため、手解体は行わなかった。手解体の結果、車載用 LIB パック 1 台あたり、国内・国外平均で約 4 割（重量ベース）の金属やプラスチックの素材が回収された。手解体により、平均で約 4%のプラスチック（可燃分）を焙焼前に回収することにより、CO2 排出量低減に寄与できた。

表 1.2-1 本実証事業における使用済 LIB の用途計画

		状態	手解体	焙焼	破碎・選別
定置用 LIB	国内メーカー	モジュール	モジュールの状態でするため、手解体は不要	焙焼条件の検証 温度：450℃、600℃ 時間：3時間、6時間	手法別の比較検証 ・松田産業社 ・ウエノテックス社 ・太平洋コンサルタント社
車載用 LIB	国外自動車メーカー由来	パック	パック解体実施	焙焼条件の検証 温度：450℃、600℃ 時間：3時間、6時間	選定した好適手法1パターンで実施
	国内自動車メーカー由来	パック	パック解体実施	焙焼条件の検証 温度：450℃、600℃ 時間：3時間、6時間	選定した好適手法1パターンで実施

表 1.2-2 使用済 LIB の集荷量

搭載車種	入庫物	解体	入庫数量 (台)	入庫重量 (kg)	モジュール数 (台)	モジュール重量 (kg)
定置用 (縦18.6×横36.8×高さ13.4)	モジュール	無	91	1,274	91	1,274
定置用 (縦18.7×横35.8×高さ12.0)	モジュール	無	73	949	73	949
車載用 (国内自動車メーカー)	パック	有	21	882	84	378
車載用 (国外自動車メーカー)	パック	有	34	1,564	272	898









表 1.2-3 使用済 LIB (車載用) パックの解体結果

	車載用LIBパック (国外自動車メーカー)		LIBモジュール	金属スクラップ		プラスチック
	重量(kg)			鉄	非鉄*	
重量(kg)	460	(10台)	270	10	160	20
構成比	100.0%		58.7%	2.2%	34.8%	4.3%

	車載用LIBパック (国内自動車メーカー)		LIBモジュール	金属スクラップ		プラスチック
	重量(kg)			鉄	非鉄*	
重量(kg)	882	(21台)	378	280	182	42
構成比	100.0%		42.9%	31.7%	20.6%	4.8%

備考) 非鉄：ステンレス、アルミ、合金古屑、ハーネス、雑品等

表 1.2-4 使用済 LIB（車載用）パックの解体結果と構成比（一例）

	車載用 LIB（国内自動車メーカー）		車載用 LIB（国外自動車メーカー）	
鉄		29.5%		3.3%
非鉄		21.6%		33.7%
プラスチック （PP、ABS 等）		3.0%		5.0%
モジュール		45.9%		58.1%
合計	100.0%		100.0%	

1.2.2 使用済 LIB の焙焼実験

実施した試験の実施日、試験条件等は、表 1.2-5 の通りである。

表 1.2-5 本実証事業における焙焼実験計画

実施月	試験位置づけ		焙焼日	焙焼 LIB 量
8 月	バッチ炉運転 (広島)	・ 450℃、6hr 加熱 ・ 試焙焼	8/31	27kg (定置用)
9 月	第 2 回負荷 試運転	・ 450℃、6hr 加熱	9/12-13	123kg (定置用)
	第 3 回負荷 試運転	・ 450℃、3hr、6hr 加熱	9/20-21	246kg (定置用)
10 月	バッチ炉運転 (広島)	・ 450℃、6hr 加熱 ・ 排ガス熱量測定	10/2-3	54kg (定置用)
	第 1 回 本運転	・ 450℃、6hr 加熱 ・ 排ガス測定 (第 1 回)	10/17	113kg (定置用)
		・ 450℃、6hr ・ 加熱好適温度・時間で焙焼 した際の焙焼物破碎・選別 性状の変動確認	10/18	120kg (車載用・国外 自動車メーカー)
	無負荷試運転	・ 600℃加熱の設備負荷確認	10/19	—
	バッチ炉運転 (広島)	・ 600℃、6hr 加熱	10/23	27kg (定置用)
	第 2 回 本運転	・ 600℃、6hr 加熱 ・ 焙焼物の破碎・選別による 性状の変動確認	10/25-26	242kg (定置用)
11 月	第 3 回 本運転	・ 450℃、6hr 加熱 ・ 排ガス測定	11/7-9	(定置用) 112kg (車載国内用) 109kg (車載国外用) 120kg
	第 4 回 本運転	・ 450℃、6hr 加熱 ・ 焙焼のパラツキ確認	11/20-21	(定置用) 220kg
12 月	第 5 回 本運転	・ 450℃、6hr 加熱 ・ ガス測定 ・ 灯油消費量測定	12/6-7	(定置用) 440kg (車載国内用) 270kg
	第 6 回 本運転	・ 450℃、6hr 加熱 ・ バスケット内温度の測定	12/18-19	(定置用) 330kg (車載・定置混合) 360kg

(1) 解体後の LIB の焙焼における加熱温度帯と加熱時間の検証

1) 加熱温度帯の検証

ベースメタルとレアメタルの高濃度回収のために、電極材のアルミと銅を融解せず、接着剤のみを焼き切る焙焼温度帯と加熱時間の比較検証を行った。解体後の LIB モジュールの焙焼における加熱温度帯を 450℃と 600℃で焙焼物の状態を比較検証した結果、450℃では融着が見られず、破碎による分離が可能な状態であった。一方、600℃では融着が見られ、破碎による分離は困難に見受けられた。

焙焼時のバスケット内部の温度状況については、450℃で制御した場合は炉内温度の上昇にやや遅れてバスケット内部の温度が上昇し、一度 450℃を超えた後、再び 450℃に収束し、以降安定して推移していることが確認された。

表 1.2-6 加熱温度帯別による焙焼物の比較





	450℃	600℃
時間	6 時間	
場所	敦賀セメント(株)	広島ガステクノ・サービス(株)
外部		
内部		

表 1.2-7 炉内温度の測定条件

		条件
処理対象	定置用 LIB	223kg
	車載・定置用 LIB 混合	62kg
炉内温度制御		450℃

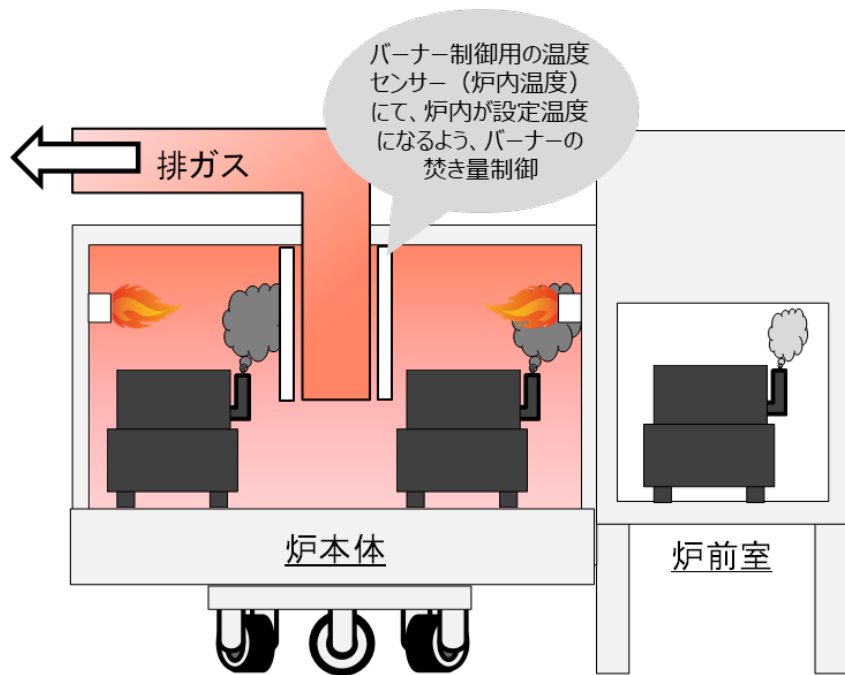


図 1.2-1 焙焼炉内の構造

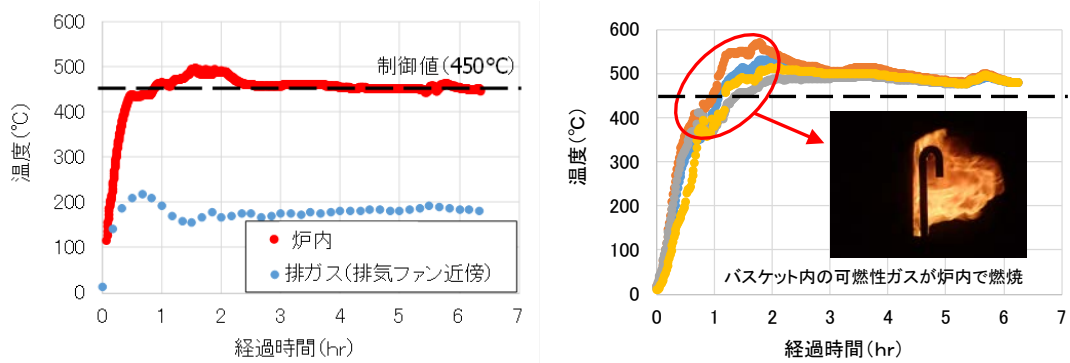



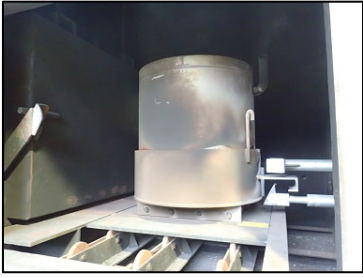


図 1.2-2 焙焼炉内の経過時間による温度変化

2) 加熱時間の検証

加熱時間の3時間から6時間の間で経過観察を行ったところ、3時間後と4時間後ではまだ炎が出ており、5時間後では炎は見られなかったものの発煙しており、焙焼は完了しておらず、6時間後で炎と煙ともに確認されず、焙焼が完了していた。

表 1.2-8 経過時間別の焙焼状況

	
3 時間経過時	4 時間経過時
	
5 時間経過時	6 時間経過時

(2) 排ガスの熱利用効果の検証

焙焼によって発生する排ガス(可燃性ガス含有)のセメントキルンでの有効活用について、排ガスの熱量を測定、検証した結果、焙焼にて発生する排ガスの熱量は 156Mcal/t で、セメント生産における石炭使用量の 0.1%を代替すると算出された。排ガスの熱利用を実用化するには排ガスに含まれる成分が課題になるため、今後は観測データ数を増やし、ばらつきを確認したい。

表 1.2-9 焙焼炉にて発生する排ガスのカロリー測定結果

測定箇所	単位	炉上縦配管 (付着物)	炉上横配管 (付着物)	測定口A (ばいじん)	測定口B (排ガス)	低発熱量 合計
低位発熱量	kcal/h	21.1	64.6	579.5	78.4	743.7
LIB1kgあたりの低位発熱量	kcal/kg・h	0.8	2.4	21.5	2.9	27.6
1バッチの低位発熱量	kcal	126.7	387.8	3,477.20	470.6	4,462.30
LIB1kgあたりの低位発熱量	kcal/kg	4.7	14.4	129.2	17.5	165.8

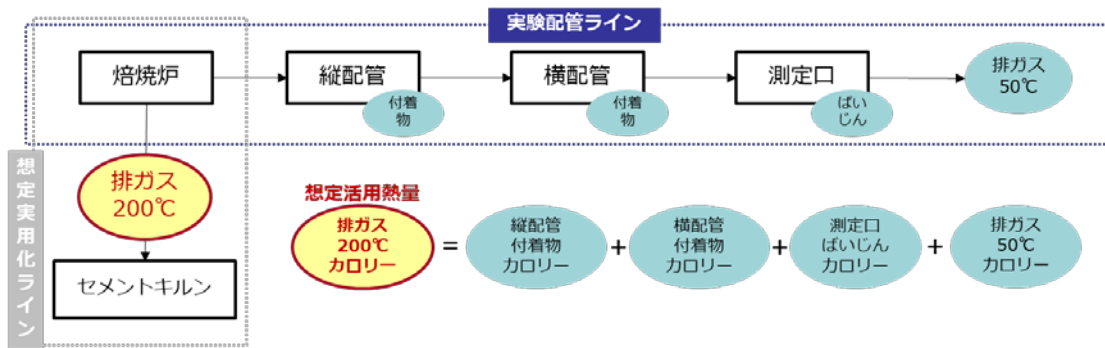


図 1.2-3 焙焼炉から発生する排熱利用の検討






備考) 実験配管ラインでは、測定口での排ガスが冷え、熱量が低下していたことから、想定実業ラインでの熱量を推計するため、配管中に残った熱量を計測し、合算した。

1.2.3 焙焼した LIB の破碎・選別実験

(1) 破碎・選別方法

焙焼物からベースメタルとリチウム等を含有する極材粉 (<1mm) を高効率回収するための好適な破碎・選別手法の選定のため、衝撃式、剪断式、剪断式（排出粒度調整機能付き）の3種類の破碎技術の比較検討を行った。選別技術は篩い分けで統一した。

表 1.2-10 破碎・選別手法の概要（再掲）

破碎					選別		
実施社	破碎方法	排出粒度調整機能	写真	アプローチ方法	実施社	選別方法	写真
ウエノ テックス (UT)	衝撃式	○		・ 衝撃破碎による箔からの極材粉の剥離促進	THC	篩い分け	
大平洋 コンサル タント (THC)	剪断式	—		・ 金属ケースの剪断破碎による極材粉の剥離・回収促進 ・ 破碎負荷の小さい方式での検証			
松田産業 (MS)	剪断式	○		・ 金属ケースの剪断破碎による極材粉の剥離・回収促進 ・ ロストル径まで破碎することでのケース、箔、極材粉の単体分離の促進	MS	篩い分け	

備考) 篩い分け粒度 (共通) : <1mm, 1-10mm, 10mm<

(2) 破碎・選別実験結果

技術評価の結果、定置用、車載用いずれの焙焼 LIB にも破碎処理が可能で設備負荷の低い剪断式（排出粒度調整機能付き）が有望であった。

衝撃式は、定置用 LIB は問題なく破碎され、<1mm の極材粉の回収率も約 60% と高かったが、車載用 LIB は構造が堅固なため破碎処理困難とのメーカー判断があり、実施しなかった。剪断式は、定置用 LIB の破碎処理にかかる刃への負担が大きく、破碎機が何度も停止するなど、連続処理が困難であり、<1mm の回収率も 20% 弱と低かった。定置用 LIB での破碎に物理的な課題があったことから、より構造が堅固な車載用 LIB は処理困難と判断し、実験は行わなかった。剪断式（排出粒度調整機能付き）は、定置用 LIB は問題なく破碎処理され、<1mm の回収率も 25% であった。車載用 LIB も国内、国外ともに問題なく破碎処理され、<1mm の回収率も平均で約 15% であった。剪断式（粒度調整機能付き）のみ定置用、車載用のいずれの焙焼 LIB にも対応可能であった。

回収物に含まれる成分分析を行い、金属のマテリアルバランスを検証したところ、定置用 LIB において<1mm 極材粉にレアメタルを高濃度回収できていたのは剪断式で、1-10mm に銅濃縮、10mm<に鉄とアルミニウムを濃縮できていたのは剪断式（排出粒度調整機能付き）であった。このため、定置用 LIB の破碎処理として、今後、衝撃式と剪断式（排出粒度調整機能付き）を組み合わせる等、改善を検討する。

剪断式（排出粒度調整機能付き）で破碎した車載用 LIB では、国内・国外ともに<1mm 極材粉にて 50% 以上のレアメタル回収が確認された。一方、ベースメタルでは、10mm<に銅が最も多く濃縮されるものの、同様に鉄やアルミニウムも高濃度回収されており、破碎・選別に課題が残った。

表 1.2-11 破碎・選別実験結果による手法評価

実施社		定置用LIB		車載用LIB		総合評価	
破碎	選別						
UT	THC	○	<ul style="list-style-type: none"> ・<1mmの回収率58%。 ・過負荷・停止等無く、安定的な破碎処理が可能。ただし、破碎工程にて発塵多い。 アルミフレームへの箔の巻き込まれ無し。 	×	<ul style="list-style-type: none"> ・実施せず。 ・構造が堅固であり、メーカーより破碎処理困難との判断。 	△	<ul style="list-style-type: none"> ・定置用であれば、破碎処理の可能性あり。
THC	THC	△	<ul style="list-style-type: none"> ・<1mmの回収率18%。 ・過負荷で断続的に破碎機が停止。連続処理が困難。破碎・選別工程にて発塵多い。 回収物にアルミフレームへの箔の巻き込まれを確認。 	×	<ul style="list-style-type: none"> ・実施せず。 ・定置用450°Cで安定的な破碎処理が困難であったことから、より構造が堅固な車載用は処理困難と判断。 	×	<ul style="list-style-type: none"> ・定置用、車載用の破碎処理は困難と判断。
MS	MS	△	<ul style="list-style-type: none"> ・<1mmの回収率25%。 ・過負荷・停止等無く、安定的な破碎・選別処理が可能。 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・<1mmの回収率、国内15%、国外16%。 ・過負荷・停止等無く、安定的な破碎・選別処理が可能。 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・定置用破碎にやや改善点は残るが、構造が堅固な車載用LIBの破碎処理も可能。 ・いずれのタイプでも処理の可能性あり。

備考) UTとはウエノテックス、THCとは太平洋コンサルタント、MSとは松田産業の略称。

UTでは衝撃式、THCでは剪断式、MSでは剪断式（排出粒度調整機能付き）技術にて実施。



















表 1.2-12 破砕手法別の回収結果一覧

	対象LIB	焙焼温度 °C	処理前		処理後重量							
			kg	%	<1mm		1-10mm		10mm<		未回収物	
					kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
UT	定置	450	6.53	100.0%	3.68	56.4%	1.77	27.1%	0.90	13.8%	0.18	2.8%
	車載（国内外）	450	実施せず									
THC	定置	450	7.38	100.0%	1.35	18.3%	1.68	22.8%	4.27	57.9%	0.08	1.1%
	定置	600	10.22	100.0%	3.37	33.0%	4.43	43.3%	2.51	24.6%	-0.09	-0.9%
	車載（国内外）	450	実施せず									
MS	定置	450	108.97	100.0%	26.52	24.3%	18.20	16.7%	61.30	56.3%	2.95	2.7%
	車載（国内）	450	77.11	100.0%	10.67	13.8%	10.00	13.0%	52.70	68.3%	3.74	4.9%
	車載（国外）	450	92.94	100.0%	14.49	15.6%	6.20	6.7%	68.60	73.8%	3.65	3.9%

備考) UTとはウエノテックス、THCとは太平洋コンサルタント、MSとは松田産業の略称。

UTでは衝撃式、THCでは剪断式、MSでは剪断式（排出粒度調整機能付き）技術にて実施。

表 1.2-13 手法別の回収物写真

実施社		LIB	選別回収物		
破砕	選別		<1mm	1-10mm	10mm<
UT	THC	定置用 450°C			
THC	THC	定置用 450°C			
		定置用 600°C			
MS	MS	定置用 450°C			
		車載用 （国内） 450°C			
		車載用 （国外） 450°C			

備考) UTとはウエノテックス、THCとは太平洋コンサルタント、MSとは松田産業の略称。

UTでは衝撃式、THCでは剪断式、MSでは剪断式（排出粒度調整機能付き）技術にて実施。

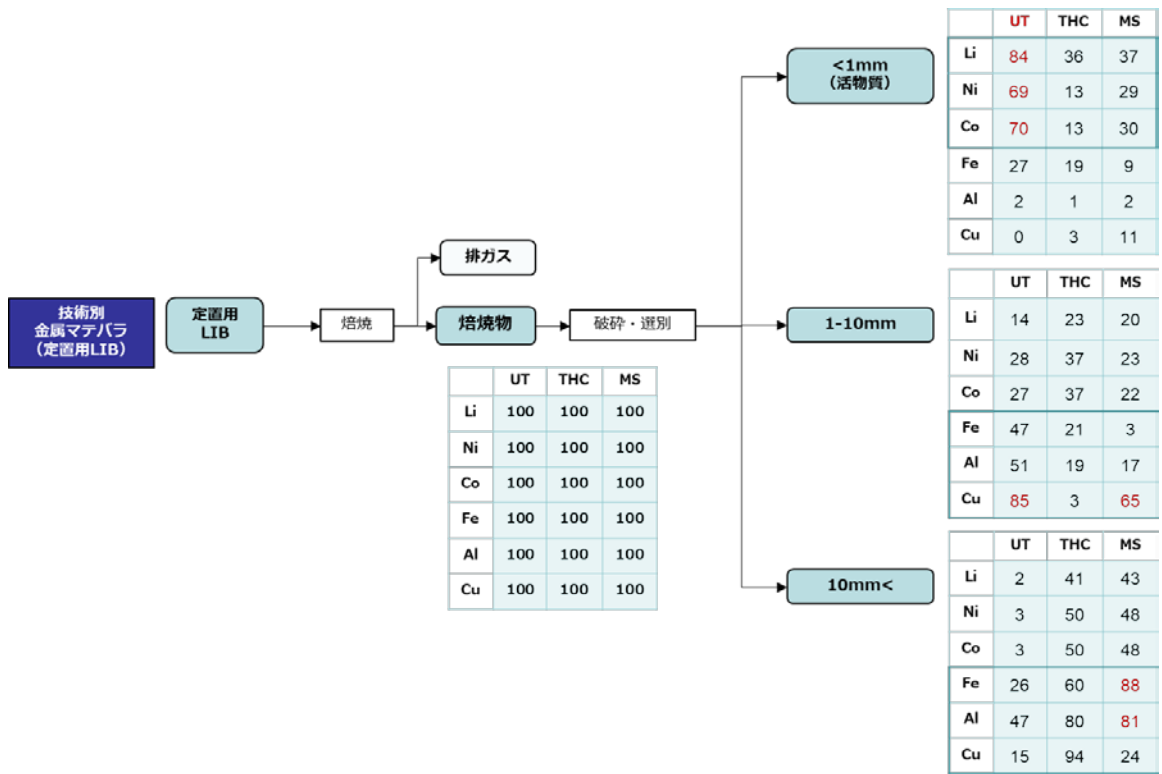


図 1.2-4 定置用LIBにおける金属資源のマテリアルバランス（手法別）

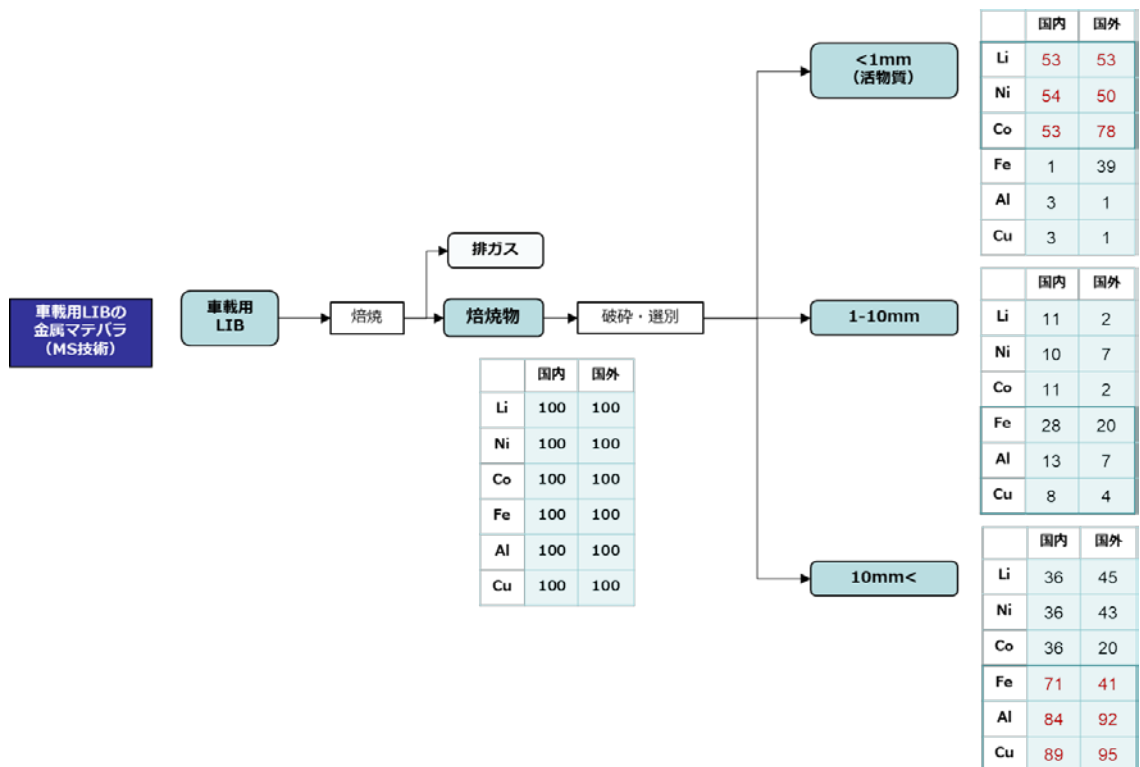


図 1.2-5 車載用LIBにおける金属資源のマテリアルバランス（松田産業手法）

1.3 処理スキームの全体設計

1.3.1 処理・リサイクルスキームの全体設計

実証実験結果に基づき、使用済 LIB のリサイクルフロー全体設計を行い、リサイクルフローの材料バランスを算出した。使用済 LIB の処理フローとして、パック状態の LIB は手解体を行い、ベースメタルとプラスチックを回収し、モジュール状態にした後、焙焼を行う。焙焼物は剪断式（排出粒度調整機能付き）にて破碎後、篩い分けし、選別回収した <1mm の極材粉はリチウム等のレアメタルリサイクル、1-10mm と 10mm<は銅リサイクルとした。

処理スキームの規模は、焙焼処理量 3,000t/年（10t/日）を軸とすると、処理する使用済 LIB パック（車載用）約 6,000t/年、回収される資源は、極材粉 360t/年、ベースメタルが合計約 3,390t/年の見込みと算出された。

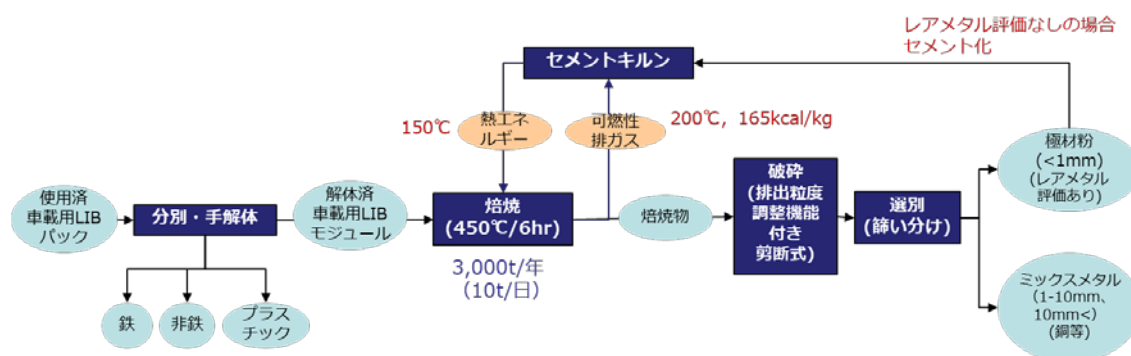


図 1.3-1 処理スキームの全体設計

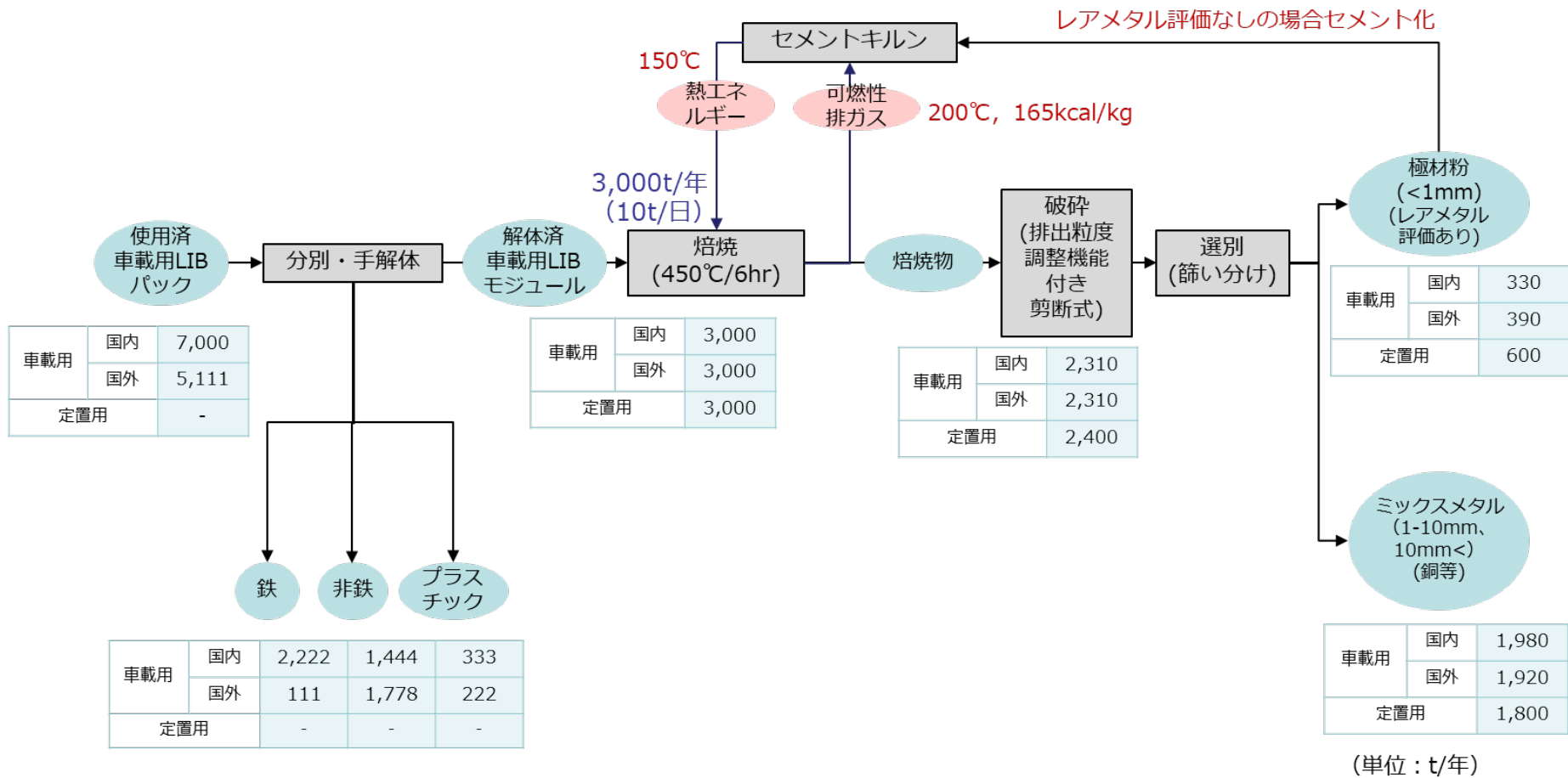


図 1.3-2 全体設計におけるマテリアルバランス

備考) 定置用 LIB はモジュール状態で排出されたのでパック解体検討は行っていない。

1.3.2 セメントキルン排熱利用時の消費燃料削減効果の検討

セメントキルンと焙焼炉を隣接することで、セメントキルン排熱を焙焼炉へ、焙焼にて発生する可燃性排ガスをセメントキルンへ送ることによる省エネルギー効果の試算を行った。

省エネルギー効果については、セメントキルンの排熱エネルギーを利用することで、焙焼炉の年間灯油消費量を 228kL から 160kL に約 70kL (約 30%) 削減される見込みであり、焙焼炉から発生する可燃性排ガスをセメントキルンに利用することで、セメント製造に要する石炭の約 0.1%の代替が可能と算出された。

表 1.3-1 セメントキルンの排熱利用の有無による焙焼炉での灯油消費量比較

	排熱利用あり	排熱利用なし
入り口ガス温度	150℃	20℃
年間灯油量	160kL	228kL

表 1.3-2 焙焼炉の排ガス（可燃性）利用によるセメントキルンでの省エネルギー効果

	排ガス利用あり	排ガス利用なし
排ガスの保有熱量	165kcal/kg	-
一般炭代替率	0.10%	-

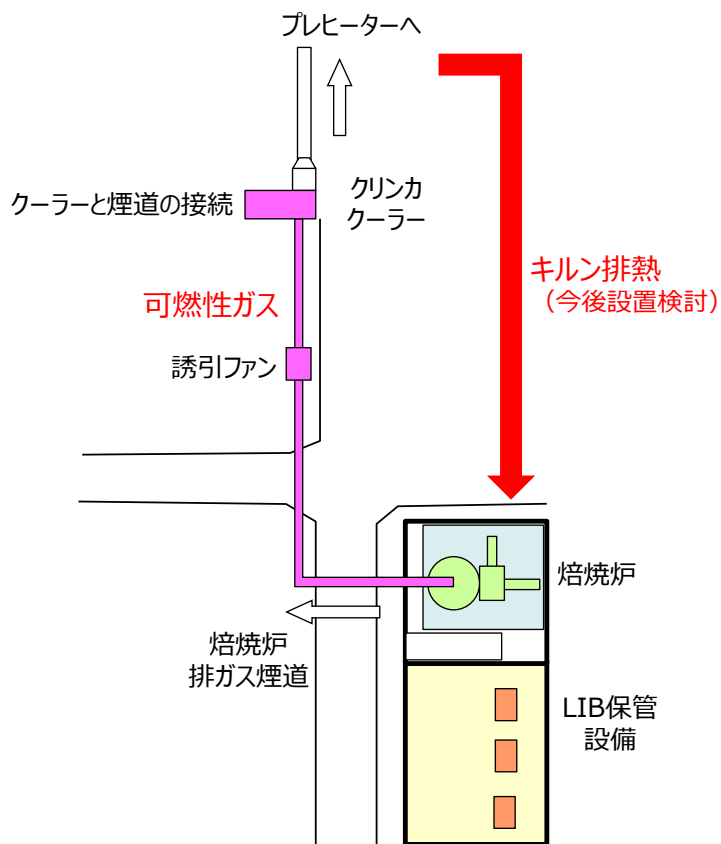


図 1.3-3 隣接するセメントキルンを活用した低炭素型システムの設計・運用手法

2. 環境負荷低減効果の検証

2.1 資源循環効果の検討

実際に評価される資源量のみ資源循環効果は、車載用（国内）LIBは資源回収率が約70%、車載用（国外）LIBは約50%、定置用LIBは約1%と算出された。定置用LIBは、約60%に相当する1mm≦の回収量に対し、銅のみ資源評価となり、銅の含有率が少ないことから資源回収率が低くなった。しかしながら、金属評価されない回収物はセメント化リサイクルを行うことから、いずれのLIBも埋立処理量は0であり、従ってリサイクル率は100%である。

表 2.1-1 本事業における資源循環効果の評価結果

単位：t/t		処理量	鉄	非鉄	プラスチック	Li	Co	Ni	Cu	資源回収率	リサイクル率
車載用LIB	国内	1.00	0.32	0.21	0.05	7.68E-04	1.94E-03	0.00E+00	0.11	68.8%	100%
	国外	1.00	0.02	0.35	0.04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.11	52.5%	100%
	平均	1.00	0.17	0.28	0.05	7.19E-04	3.37E-03	0.00E+00	0.11	61.0%	100%
定置用LIB		1.00	-	-	-	2.39E-03	4.90E-03	5.28E-03	6.80E-04	1.3%	100%

単位：t/年		処理量	鉄	非鉄	プラスチック	Li	Co	Ni	Cu	資源回収量
車載用LIB	国内	7.000	2,222	1,444	333	5	14	0	799	4,818
	国外	5,111	111	1,778	222	0	0	0	574	2,685
	平均	5,908	1,002	1,637	269	4	20	0	669	3,602
定置用LIB		3,000	-	-	-	7	15	16	2	40

備考) 非鉄はアルミニウム評価とした。

2.2 CO2 排出量削減効果の検討

本事業スキームによる二酸化炭素削減効果の算定にあたり、比較対象技術は定置炉での焼却処理と設定した。定置炉焼却の前後の処理工程に関するエネルギー消費に関連するデータの入手が困難であったため、より保守的な算定として本事業と同一と仮定し、フッ化水素処理工程は、算定範囲から除外した。リサイクル効果は、実際に評価される資源量のみ算定対象とした。試算の結果、車載用（国内）LIB は 265kg-CO₂/LIB パック、車載用（国外）LIB は 362kg-CO₂/LIB パック、定置用 LIB は 617kg-CO₂/LIB モジュールであった。年間焙焼量 3,000t/年の処理規模の場合、いずれの LIB においても約 1,850t-CO₂/年の二酸化炭素削減効果と算出された。

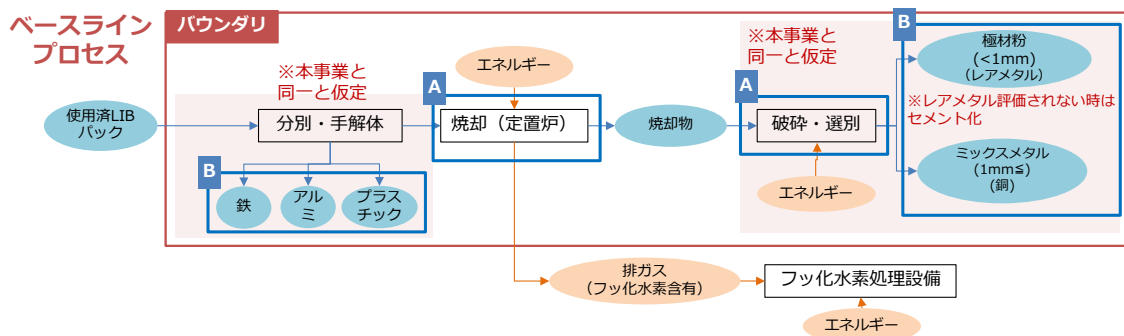


図 2.2-1 ベースラインプロセス（定置炉処理）

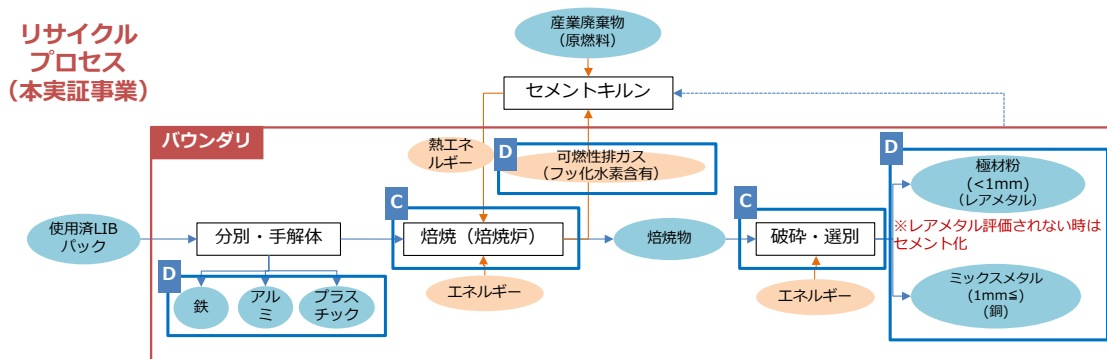


図 2.2-2 本実証事業のリサイクルプロセス

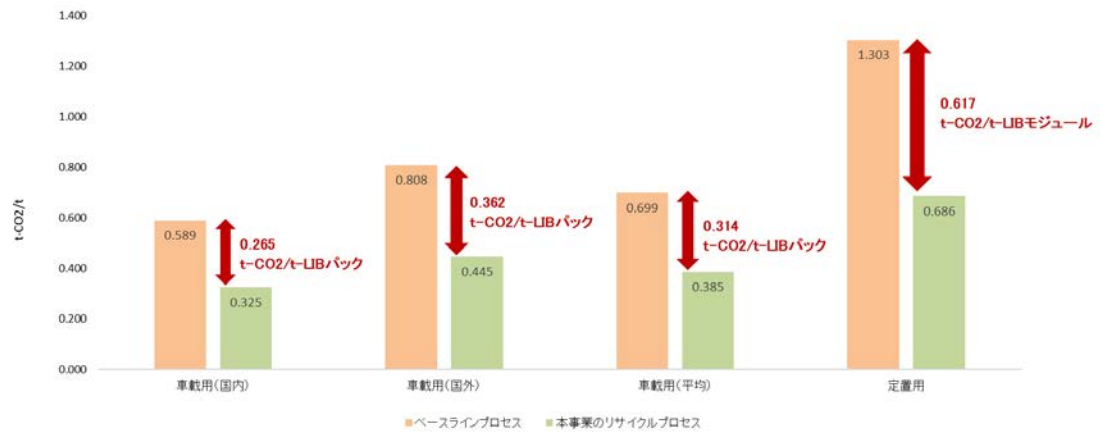


図 2.2-3 LIB 別の 1t あたりの CO₂ 排出量の比較

表 2.2-1 本事業と定置炉処理を比較した CO2 排出量削減効果 (LIB1t あたり)

プロセス	カテゴリ	項目	内容	車載用 (国内)		車載用 (国外)		車載用 (平均)		定置用	
				排出量		排出量		排出量		排出量	
				t-CO2/t-LIBパック		t-CO2/t-LIBパック		t-CO2/t-LIBパック		t-CO2/t-LIBモジュール	
ベースライン プロセス	A	処理プロセス	焼却 (定置炉)	0.573	0.591	0.784	0.809	0.679	0.700	1.260	1.304
			破碎・選別	0.018		0.025		0.021		0.044	
	B	リサイクル効果	鉄・アルミ・プラスチック	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001
			レアメタル・銅	0.001		0.000		0.000		0.001	
本事業のリサイクル プロセス	C	処理プロセス	焙焼 (焙焼炉)	0.332	0.350	0.454	0.479	0.393	0.414	0.697	0.741
			破碎・選別	0.018		0.025		0.021		0.044	
	D	リサイクル効果	鉄・アルミ・プラスチック	0.001	0.025	0.001	0.034	0.001	0.029	0.000	0.055
			可燃性排ガス	0.023		0.032		0.028		0.055	
			レアメタル・銅	0.001		0.000		0.001		0.001	
CO2削減効果 (A-B) - (C-D)				0.265		0.362		0.314		0.617	

表 2.2-2 本事業と定置炉処理を比較した CO2 排出量削減効果 (年間処理量あたり)

プロセス	カテゴリ	項目	内容	車載用 (国内)		車載用 (国外)		車載用 (平均)		定置用	
				排出量		排出量		排出量		排出量	
				7,000 t/年		5,111 t/年		5,908 t/年		3,000 t/年	
				t-CO2/年		t-CO2/年		t-CO2/年		t-CO2/年	
ベースライン プロセス	A	処理プロセス	焼却 (定置炉)	4,010	4,136	4,010	4,136	4,010	4,136	3,780	3,912
			破碎・選別	127		127		127		132	
	B	リサイクル効果	鉄・アルミ・プラスチック	7	11	6	8	6	7	0	2
			レアメタル・銅	4		2		1		2	
本事業のリサイクル プロセス	C	処理プロセス	焙焼 (焙焼炉)	2,321	2,448	2,321	2,448	2,321	2,448	2,092	2,223
			破碎・選別	127		127		127		132	
	D	リサイクル効果	鉄・アルミ・プラスチック	7	175	6	172	6	174	0	166
			可燃性排ガス	164		164		164		164	
			レアメタル・銅	4		2		3		2	
CO2削減効果 (A-B) - (C-D)				1,852		1,852		1,854		1,852	

表 2.2-3 定置炉処理の活動量と CO2 排出量原単位（車載用(国内)LIB1t あたり）

ベースラインプロセス									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (tCO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
A	1	焼却（定置炉）	LIBパック1tあたりの再生重油B消費量	0.107	kL/t-LIBパック	再生重油Bの使用におけるCO2排出係数	3.000000	tCO2/t	0.321429
	2		初期に投入するLIBパック1tあたりの当該工程での廃プラスチック処理量	0.099	t/t-LIBパック	廃プラスチック類の燃焼におけるCO2排出係数	2.550000	tCO2/t	0.251357
	3	破砕機（剪断式）	LIBパック1tあたりの電気消費量	25.410	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.013010
	4	集塵機	LIBパック1tあたりの電気消費量	9.240	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.004731
	5	選別（篩い分け）	LIBパック1tあたりの電気消費量	0.693	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.000355
	合計								0.591

ベースラインプロセスのリサイクル効果									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (tCO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
B	1	鉄回収 （粗鋼代替）	LIBパック1tあたりの鉄回収量	0.317	t/t-LIBパック	粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	0.001190	tCO2/t	0.000378
	2	アルミ回収 （アルミニウム再生地金代替）	LIBパック1tから回収されるアルミ量	0.206	t/t-LIBパック	アルミニウム再生地金製造1tあたりのCO2排出量	0.003130	tCO2/t	0.000646
	3	プラスチック回収 （PPのバンド加工代替）	LIBパック1tから回収されるプラスチック量	0.048	t/t-LIBパック	PPのバンド加工製造1tあたりのCO2排出量	0.000446	tCO2/t	0.000021
	4	リチウム回収 （電気リチウム代替）	LIBパック1tから回収されるリチウム量	0.001	t/t-LIBパック	電気リチウム製造1tあたりのCO2排出量	0.082300	tCO2/t	0.000063
	5	コバルト回収 （電気コバルト代替）	LIBパック1tから回収されるコバルト量	0.002	t/t-LIBパック	電気コバルト製造1tあたりのCO2排出量	0.018800	tCO2/t	0.000037
	6	ニッケル回収 （電気ニッケル代替）	LIBパック1tから回収されるニッケル量	0.000	t/t-LIBパック	電気ニッケル製造1tあたりのCO2排出量	0.007980	tCO2/t	0.000000
	7	銅回収 （電気銅代替）	LIBパック1tから回収される銅量	0.114	t/t-LIBパック	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.003670	tCO2/t	0.000419
	合計								0.002

表 2.2-4 定置炉処理の活動量と CO2 排出量原単位（車載用(国外)LIB1t あたり）

ベースラインプロセス									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
A	1	焼却（定置炉）	LIBパック1tあたりの再生重油B消費量	0.147	kL/t-LIBパック	再生重油Bの使用におけるCO2排出係数	3.000000	tCO2/t	0.440217
	2		初期に投入するLIBパック1tあたりの当該工程での廃プラスチック処理量	0.135	t/t-LIBパック	廃プラスチック類の燃焼におけるCO2排出係数	2.550000	tCO2/t	0.344250
	3	破砕機（剪断式）	LIBパック1tあたりの電気消費量	34.801	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.017818
	4	集塵機	LIBパック1tあたりの電気消費量	12.655	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.006479
	5	選別（篩い分け）	LIBパック1tあたりの電気消費量	0.949	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.000486
	合計								0.809

ベースラインプロセスのリサイクル効果									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
B	1	鉄回収 （粗鋼代替）	LIBパック1tあたりの鉄回収量	0.022	t/t-LIBパック	粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	0.001190	tCO2/t	0.000026
	2	アルミ回収 （アルミニウム再生地金代替）	LIBパック1tから回収されるアルミ量	0.348	t/t-LIBパック	アルミニウム再生地金製造1tあたりのCO2排出量	0.003130	tCO2/t	0.001089
	3	プラスチック回収 （PPのバンド加工代替）	LIBパック1tから回収されるプラスチック量	0.043	t/t-LIBパック	PPのバンド加工製造1tあたりのCO2排出量	0.000446	tCO2/t	0.000019
	4	リチウム回収 （電気リチウム代替）	LIBパック1tから回収されるリチウム量	0.000	t/t-LIBパック	電気リチウム製造1tあたりのCO2排出量	0.082300	tCO2/t	0.000000
	5	コバルト回収 （電気コバルト代替）	LIBパック1tから回収されるコバルト量	0.000	t/t-LIBパック	電気コバルト製造1tあたりのCO2排出量	0.018800	tCO2/t	0.000000
	6	ニッケル回収 （電気ニッケル代替）	LIBパック1tから回収されるニッケル量	0.000	t/t-LIBパック	電気ニッケル製造1tあたりのCO2排出量	0.007980	tCO2/t	0.000000
	7	銅回収 （電気銅代替）	LIBパック1tから回収される銅量	0.112	t/t-LIBパック	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.003670	tCO2/t	0.000412
	合計								0.002

表 2.2-5 定置炉処理の活動量と CO2 排出量原単位（車載用(平均)LIB1t あたり）

ベースラインプロセス									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
A	1	焼却（定置炉）	LIBパック1tあたりの再生重油B消費量	0.127	kL/t-LIBパック	再生重油Bの使用におけるCO2排出係数	3.000000	tCO2/t	0.380823
	2		初期に投入するLIBパック1tあたりの当該工程での廃プラスチック処理量	0.117	t/t-LIBパック	廃プラスチック類の燃焼におけるCO2排出係数	2.550000	tCO2/t	0.297804
	3	破砕機（剪断式）	LIBパック1tあたりの電気消費量	30.105	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.015414
	4	集塵機	LIBパック1tあたりの電気消費量	10.947	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.005605
	5	選別（篩い分け）	LIBパック1tあたりの電気消費量	0.821	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.000420
	合計								0.700

ベースラインプロセスのリサイクル効果									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
B	1	鉄回収 （粗鋼代替）	LIBパック1tあたりの鉄回収量	0.170	t/t-LIBパック	粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	0.001190	tCO2/t	0.000202
	2	アルミ回収 （アルミニウム再生地金代替）	LIBパック1tから回収されるアルミ量	0.277	t/t-LIBパック	アルミニウム再生地金製造1tあたりのCO2排出量	0.003130	tCO2/t	0.000867
	3	プラスチック回収 （PPのバンド加工代替）	LIBパック1tから回収されるプラスチック量	0.046	t/t-LIBパック	PPのバンド加工製造1tあたりのCO2排出量	0.000446	tCO2/t	0.000020
	4	リチウム回収 （電気リチウム代替）	LIBパック1tから回収されるリチウム量	0.001	t/t-LIBパック	電気リチウム製造1tあたりのCO2排出量	0.082300	tCO2/t	0.000070
	5	コバルト回収 （電気コバルト代替）	LIBパック1tから回収されるコバルト量	0.004	t/t-LIBパック	電気コバルト製造1tあたりのCO2排出量	0.018800	tCO2/t	0.000075
	6	ニッケル回収 （電気ニッケル代替）	LIBパック1tから回収されるニッケル量	0.000	t/t-LIBパック	電気ニッケル製造1tあたりのCO2排出量	0.007980	tCO2/t	0.000000
	7	銅回収 （電気銅代替）	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.004	tCO2/t	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.003670	tCO2/t	0.000013
	合計								0.001

表 2.2-6 定置炉処理の活動量と CO2 排出量原単位 (定置用 LIB1t あたり)

ベースラインプロセス									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
A	1	焼却 (定置炉)	LIBパック1tあたりの再生重油B消費量	0.250	kL/t-LIBパック	再生重油Bの使用におけるCO2排出係数	3.000000	tCO2/t	0.750000
	2		初期に投入するLIBパック1tあたりの当該工程での廃プラスチック処理量	0.200	t/t-LIBパック	廃プラスチック類の燃焼におけるCO2排出係数	2.550000	tCO2/t	0.510000
	3	破砕機 (剪断式)	LIBパック1tあたりの電気消費量	61.600	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.031539
	4	集塵機	LIBパック1tあたりの電気消費量	22.400	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.011469
	5	選別 (篩い分け)	LIBパック1tあたりの電気消費量	1.680	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.000860
	合計								1.304

ベースラインプロセスのリサイクル効果									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
B	1	鉄回収 (粗鋼代替)	LIBパック1tあたりの鉄回収量	0.000	t/t-LIBパック	粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	0.001190	tCO2/t	0.000000
	2	アルミ回収 (アルミニウム再生地金代替)	LIBパック1tから回収されるアルミ量	0.000	t/t-LIBパック	アルミニウム再生地金製造1tあたりのCO2排出量	0.003130	tCO2/t	0.000000
	3	プラスチック回収 (PPのバンド加工代替)	LIBパック1tから回収されるプラスチック量	0.000	t/t-LIBパック	PPのバンド加工製造1tあたりのCO2排出量	0.000446	tCO2/t	0.000000
	4	リチウム回収 (電気リチウム代替)	LIBパック1tから回収されるリチウム量	0.006	t/t-LIBパック	電気リチウム製造1tあたりのCO2排出量	0.082300	tCO2/t	0.000478
	5	コバルト回収 (電気コバルト代替)	LIBパック1tから回収されるコバルト量	0.012	t/t-LIBパック	電気コバルト製造1tあたりのCO2排出量	0.018800	tCO2/t	0.000224
	6	ニッケル回収 (電気ニッケル代替)	LIBパック1tから回収されるニッケル量	0.013	t/t-LIBパック	電気ニッケル製造1tあたりのCO2排出量	0.007980	tCO2/t	0.000102
	7	銅回収 (電気銅代替)	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.004	tCO2/t	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.003670	tCO2/t	0.000013
	合計								0.001

表 2.2-7 本事業の活動量と CO2 排出量原単位（車載用(国内)LIB1t あたり）

実証事業のリサイクルプロセス									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (tCO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
C	1	焙焼炉	LIBパック1tあたりの灯油消費量	0.023	kL/t-LIBパック	灯油の使用におけるCO2排出係数	2.490000	tCO2/t	0.057090
	2		初期に投入するLIBパック1tあたりの当該工程での廃プラスチック処理量	0.099	t/t-LIBパック	廃プラスチック類の燃焼におけるCO2排出係数	2.550000	tCO2/t	0.251357
	3	送風ファン	LIBパック1tあたりの電気消費量	45.257	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.023172
	4	破碎機（剪断式）	LIBパック1tあたりの電気消費量	25.410	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.013010
	5	集塵機	LIBパック1tあたりの電気消費量	9.240	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.004731
	6	選別（篩い分け）	LIBパック1tあたりの電気消費量	0.693	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.000355
	合計								0.350

実証事業のリサイクルプロセスのリサイクル効果									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (tCO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
D	1	鉄回収 （粗鋼代替）	LIBパック1tあたりの鉄回収量	0.317	t/t-LIBパック	粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	0.001190	tCO2/t	0.000378
	2	アルミ回収 （アルミニウム再生地金代替）	LIBパック1tから回収されるアルミ量	0.206	t/t-LIBパック	アルミニウム再生地金製造1tあたりのCO2排出量	0.003130	tCO2/t	0.000646
	3	プラスチック回収 （PPのバンド加工代替）	LIBパック1tから回収されるプラスチック量	0.048	t/t-LIBパック	PPのバンド加工製造1tあたりのCO2排出量	0.000446	tCO2/t	0.000021
	4	リチウム回収 （電気リチウム代替）	LIBパック1tから回収されるリチウム量	0.001	t/t-LIBパック	電気リチウム製造1tあたりのCO2排出量	0.082300	tCO2/t	0.000063
	5	コバルト回収 （電気コバルト代替）	LIBパック1tから回収されるコバルト量	0.002	t/t-LIBパック	電気コバルト製造1tあたりのCO2排出量	0.018800	tCO2/t	0.000037
	6	ニッケル回収 （電気ニッケル代替）	LIBパック1tから回収されるニッケル量	0.000	t/t-LIBパック	電気ニッケル製造1tあたりのCO2排出量	0.007980	tCO2/t	0.000000
	7	銅回収 （電気銅代替）	LIBパック1tから回収される銅量	0.114	t/t-LIBパック	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.003670	tCO2/t	0.000419
	8	排ガス	LIBパック1tあたりの代替率	0.010	t/t	石炭（一般炭）におけるCO2排出係数	2.330000	tCO2/t	0.023386
	合計								0.025

表 2.2-8 本事業の活動量と CO2 排出量原単位（車載用(国外)LIB1t あたり）

実証事業のリサイクルプロセス

カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
C	1	焙焼炉	LIBパック1tあたりの灯油消費量	0.031	kL/t-LIBパック	灯油の使用におけるCO2排出係数	2.490000	tCO2/t	0.078188
	2		初期に投入するLIBパック1tあたりの当該工程での廃プラスチック処理量	0.135	t/t-LIBパック	廃プラスチック類の燃焼におけるCO2排出係数	2.550000	tCO2/t	0.344250
	3	送風ファン	LIBパック1tあたりの電気消費量	61.983	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.031735
	4	破砕機（剪断式）	LIBパック1tあたりの電気消費量	34.801	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.017818
	5	集塵機	LIBパック1tあたりの電気消費量	12.655	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.006479
	6	選別（篩い分け）	LIBパック1tあたりの電気消費量	0.949	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.000486
	合計								0.479

実証事業のリサイクルプロセスのリサイクル効果

カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
D	1	鉄回収 （粗鋼代替）	LIBパック1tあたりの鉄回収量	0.022	t/t-LIBパック	粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	0.001190	tCO2/t	0.000026
	2	アルミ回収 （アルミニウム再生地金代替）	LIBパック1tから回収されるアルミ量	0.348	t/t-LIBパック	アルミニウム再生地金製造1tあたりのCO2排出量	0.003130	tCO2/t	0.001089
	3	プラスチック回収 （PPのバンド加工代替）	LIBパック1tから回収されるプラスチック量	0.043	t/t-LIBパック	PPのバンド加工製造1tあたりのCO2排出量	0.000446	tCO2/t	0.000019
	4	リチウム回収 （電気リチウム代替）	LIBパック1tから回収されるリチウム量	0.000	t/t-LIBパック	電気リチウム製造1tあたりのCO2排出量	0.082300	tCO2/t	0.000000
	5	コバルト回収 （電気コバルト代替）	LIBパック1tから回収されるコバルト量	0.000	t/t-LIBパック	電気コバルト製造1tあたりのCO2排出量	0.018800	tCO2/t	0.000000
	6	ニッケル回収 （電気ニッケル代替）	LIBパック1tから回収されるニッケル量	0.000	t/t-LIBパック	電気ニッケル製造1tあたりのCO2排出量	0.007980	tCO2/t	0.000000
	7	銅回収 （電気銅代替）	LIBパック1tから回収される銅量	0.112	t/t-LIBパック	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.003670	tCO2/t	0.000412
	8	排ガス	LIBパック1tあたりの代替率	0.014	t/t	石炭（一般炭）におけるCO2排出係数	2.330000	tCO2/t	0.032029
	合計								0.034

表 2.2-9 本事業の活動量と CO2 排出量原単位（車載用(平均)LIB1t あたり）

実証事業のリサイクルプロセス									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
C	1	焙焼炉	LIBパック1tあたりの灯油消費量	0.027	kL/t-LIBパック	灯油の使用におけるCO2排出係数	2.490000	tCO2/t	0.067639
	2		初期に投入するLIBパック1tあたりの当該工程での廃プラスチック処理量	0.117	t/t-LIBパック	廃プラスチック類の燃焼におけるCO2排出係数	2.550000	tCO2/t	0.297804
	3	送風ファン	LIBパック1tあたりの電気消費量	53.620	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.027453
	4	破碎機（剪断式）	LIBパック1tあたりの電気消費量	30.105	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.015414
	5	集塵機	LIBパック1tあたりの電気消費量	10.947	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.005605
	6	選別（篩い分け）	LIBパック1tあたりの電気消費量	0.821	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.000420
	合計								0.414

実証事業のリサイクルプロセスのリサイクル効果									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
D	1	鉄回収 (粗鋼代替)	LIBパック1tあたりの鉄回収量	0.170	t/t-LIBパック	粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	0.001190	tCO2/t	0.000202
	2	アルミ回収 (アルミニウム再生地金代替)	LIBパック1tから回収されるアルミ量	0.277	t/t-LIBパック	アルミニウム再生地金製造1tあたりのCO2排出量	0.003130	tCO2/t	0.000867
	3	プラスチック回収 (PPのバンド加工代替)	LIBパック1tから回収されるプラスチック量	0.046	t/t-LIBパック	PPのバンド加工製造1tあたりのCO2排出量	0.000446	tCO2/t	0.000020
	4	リチウム回収 (電気リチウム代替)	LIBパック1tから回収されるリチウム量	0.001	t/t-LIBパック	電気リチウム製造1tあたりのCO2排出量	0.082300	tCO2/t	0.000070
	5	コバルト回収 (電気コバルト代替)	LIBパック1tから回収されるコバルト量	0.004	t/t-LIBパック	電気コバルト製造1tあたりのCO2排出量	0.018800	tCO2/t	0.000075
	6	ニッケル回収 (電気ニッケル代替)	LIBパック1tから回収されるニッケル量	0.000	t/t-LIBパック	電気ニッケル製造1tあたりのCO2排出量	0.007980	tCO2/t	0.000000
	7	銅回収 (電気銅代替)	LIBパック1tから回収される銅量	0.116	t/t-LIBパック	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.003670	tCO2/t	0.000427
	8	排ガス	LIBパック1tあたりの代替率	0.012	t/t	石炭（一般炭）におけるCO2排出係数	2.330000	tCO2/t	0.027708
	合計								0.029

表 2.2-10 本事業の活動量と CO2 排出量原単位（定置用 LIB1t あたり）

実証事業のリサイクルプロセス									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
C	1	焙焼炉	LIBパック1tあたりの灯油消費量	0.053	kL/t-LIBパック	灯油の使用におけるCO2排出係数	2.490000	tCO2/t	0.133209
	2		初期に投入するLIBパック1tあたりの当該工程での廃プラスチック処理量	0.200	t/t-LIBパック	廃プラスチック類の燃焼におけるCO2排出係数	2.550000	tCO2/t	0.510000
	3	送風ファン	LIBパック1tあたりの電気消費量	105.600	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.054067
	4	破碎機（剪断式）	LIBパック1tあたりの電気消費量	61.600	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.031539
	5	集塵機	LIBパック1tあたりの電気消費量	22.400	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.011469
	6	選別（篩い分け）	LIBパック1tあたりの電気消費量	1.680	kWh/t-LIBパック	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000512	tCO2/t	0.000860
	合計								0.741

実証事業のリサイクルプロセスのリサイクル効果									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t CO2/t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
D	1	鉄回収 (粗鋼代替)	LIBパック1tあたりの鉄回収量	0.000	t/t-LIBパック	粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	0.001190	tCO2/t	0.000000
	2	アルミ回収 (アルミニウム再生地金代替)	LIBパック1tから回収されるアルミ量	0.000	t/t-LIBパック	アルミニウム再生地金製造1tあたりのCO2排出量	0.003130	tCO2/t	0.000000
	3	プラスチック回収 (PPのバンド加工代替)	LIBパック1tから回収されるプラスチック量	0.000	t/t-LIBパック	PPのバンド加工製造1tあたりのCO2排出量	0.000446	tCO2/t	0.000000
	4	リチウム回収 (電気リチウム代替)	LIBパック1tから回収されるリチウム量	0.006	t/t-LIBパック	電気リチウム製造1tあたりのCO2排出量	0.082300	tCO2/t	0.000478
	5	コバルト回収 (電気コバルト代替)	LIBパック1tから回収されるコバルト量	0.012	t/t-LIBパック	電気コバルト製造1tあたりのCO2排出量	0.018800	tCO2/t	0.000224
	6	ニッケル回収 (電気ニッケル代替)	LIBパック1tから回収されるニッケル量	0.013	t/t-LIBパック	電気ニッケル製造1tあたりのCO2排出量	0.007980	tCO2/t	0.000102
	7	銅回収 (電気銅代替)	LIBパック1tから回収される銅量	0.001	t/t-LIBパック	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.003670	tCO2/t	0.000002
	8	排ガス	LIBパック1tあたりの代替率	0.023	t/t	石炭（一般炭）におけるCO2排出係数	2.330000	tCO2/t	0.054568
	合計								0.055

表 2.2-11 CO2 排出量削減効果試算にて使用した排出係数の出典一覧

データ項目	プロセス	
粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	鉄回収（粗鋼代替）	CFPプログラム「CO2換算量共通原単位データベース」
アルミニウム再生地金製造1tあたりのCO2排出量	アルミ回収（アルミニウム再生地金代替）	
電気銅製造1tあたりのCO2排出量	銅回収（電気銅代替）	
電気リチウム製造1tあたりのCO2排出量	リチウム回収（電気リチウム代替）	
電気コバルト製造1tあたりのCO2排出量	コバルト回収（電気コバルト代替）	
電気ニッケル製造1tあたりのCO2排出量	ニッケル回収（電気ニッケル代替）	
PPのバンド加工製造1tあたりのCO2排出量	プラスチック回収（PPのバンド加工代替）	
再生重油Bの使用におけるCO2排出係数	焼却（定置炉）	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」
灯油の使用におけるCO2排出係数	焙焼炉	
電気の使用におけるCO2排出係数	送風ファン	「電気事業者別排出係数一覧（平成30年提出用 代替値）」
	破碎機（剪断式）	
	集塵機	
	選別（篩い分け）	
廃プラスチック類の燃焼におけるCO2排出係数	焼却（定置炉）	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」
	焙焼炉	
石炭（一般炭）カロリー	排ガス	石炭灰ハンドブックH28年度

2.3 排ガスによる環境負荷の削減効果の検討

排ガス（フッ化水素含有）の低コスト無害化処理について、LIBに含まれるハロゲン元素（フッ素）の挙動について検証した結果、定置用LIBと車載用（国外）LIBでは98～100%と殆どが<1mmの極材粉に移動していた。車載用（国内）LIBでは8割弱が<1mmの極材粉に移動しており、残りは焙焼の排ガスに移動していたが、この排ガスはセメントキルンに送られ、無害化処理される。セメントキルンの排ガスを計測した結果、フッ素の無害化処理が確認された。LIB由来で環境負荷が考えられる臭素と塩素についても計測したところ、問題のある数値は確認されなかった。

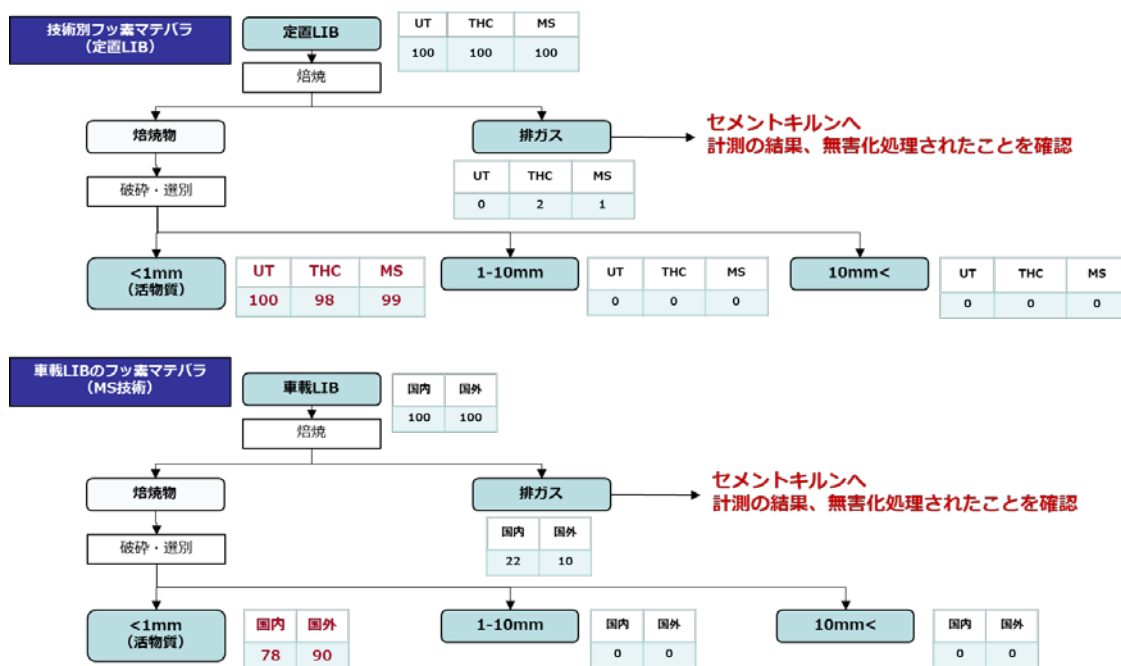


図 2.3-1 本事業におけるフッ素のマテリアルバランス

3. 経済性評価による事業実現可能性の検証

3.1 本事業スキームによる使用済 LIB の経済性評価

車載用（国内・国外）LIB、および定置用 LIB の経済性について、回収資源の有価物評価と運搬や処理設備に要する費用、人件費、消耗品費の費用を算出し、総合評価を行った。回収資源のうち、レアメタルの有価物評価は、回収物の濃度に基づき行った。1mm≦はいずれも銅評価とし、評価量は1mm≦に含有する銅量とした。

試算の結果、車載用 LIB（国内）の極材粉（<1mm）にて Co に有価評価が得られた。一方、車載用 LIB（国外）の極材粉（<1mm）はいずれも評価されずセメント化となり、定置用 LIB は廉価だがレアメタル回収は可能と判定された。車載用 LIB は国内と国外の平均ではレアメタル回収可能との判定となったことから、処理の運用方法によってレアメタルリサイクルの可能性がある。車載用（国内・国外）LIB は、銅評価により 4 万円台/t の資源価値ありと算出されたが、人件費等のコストが 13 万～16 万円/t かかる見込みであり、収支では▲10 万円/t 前後となった。定置用 LIB は資源評価 100 円/t で処理コストが約 19 万円/t であったことから、総合評価も▲約 19 万円/t であった。今後、処理施設の集約による運搬コストの削減や処理施設の大規模化による人件費低減等、使用済 LIB の処理コストを抑える方針である。

表 3.1-1 使用済 LIB の種類別における資源価値とコストによる経済性総合評価

(単位：円/t)		金属スクラップ		プラスチック	<1mm					1mm≦計 (Cu)	資源評価計	コスト計	総合評価
		鉄 (H2)	非鉄 (アルミガラ)		Li	Co	Ni	レアメタル回収判定	実金額				
車載用 LIB	国内	4,030	16,500	90	○	○	×	○	7,100	17,120	44,930	-128,100	-83,000
	国外	270	27,820	80	×	×	×	×	-1,100	16,850	43,860	-158,700	-114,000
	平均	2,150	22,160	90	○	○	×	○	0	16,990	41,400	-143,400	-102,000
定置用 LIB		-	-	-	○	○	○	○	0	100	100	-186,500	-186,000

備考)

- ・ 定置用 LIB は、モジュール状態で排出される場合、手解体が不要であり、鉄、非鉄、プラスチック回収がない。
- ・ 手解体により回収された資源は、鉄は H2、非鉄はアルミガラ、プラスチックはマテリアルリサイクル原料として相場評価した。
- ・ <1mm は、Co と Ni の含有濃度にて製錬評価を行い、どちらか片方が有価評価された場合に Li も回収されるとした。（製錬ヒアリングより）
- ・ Li, Co, Ni の金属価値は、Co と Ni は LME の相場評価を用いた（製錬コスト考慮済み）。Li は上記の設定理由から金額評価対象外とした。（製錬ヒアリングより）
- ・ 含有濃度上有価評価されなかったが金属回収が可能な濃度だった場合は廉価有価とし、金属回収も不可な濃度の場合はセメント化処理（要処理費）とした。
- ・ 1mm≦(1-10mm、10mm<)は銅評価（鉄、アルミ混ざり）とし、評価量は 1mm≦回収量ではなく、1mm≦回収量に含有する銅量とした。
- ・ コストでは、人件費、運搬コスト（モジュール、パック、焙焼物）、設備コスト、消耗品コストを考慮した。
- ・ 上記表では、ベースメタルとプラスチックは下 1 桁、レアメタルとコスト計は下 2 桁、総合評価は下 3 桁の切り捨て処理を行っている。

表 3.1-2 使用済 LIB の処理スキームにおけるコスト計の内訳

(単位：円/t)		人件費	運搬コスト	設備コスト	消耗品コスト
車載用 LIB	国内	-36,500	-63,400	-20,600	-7,400
	国外	-50,000	-73,000	-26,400	-9,000
	平均	-43,300	-68,200	-23,500	-8,200
定置用LIB		-40,000	-99,000	-37,000	-10,500

3.2 本事業スキームの見直し改善による使用済 LIB の経済性向上の可能性検証

使用済 LIB の資源価値と処理コストの経済性総合評価について、スキームの見直し改善によるコスト削減を行い、経済性向上の可能性について検証を行った。

スキームの見直し改善の手法として、処理規模拡大による処理コストの削減と、処理機能を集約し、運搬回数を減らすことによる運搬コストの削減の 2 つ手法について、それぞれ試算を行った。

試算の結果、10t/日の処理規模で、運搬箇所を 3 つとする初期パターンでは、総合評価▲10 万円/t 前後であったが、処理規模を 60t/日とし、処理施設を 1 箇所を集約し、運搬箇所を 1 つとするモデルでは、車載用 LIB で▲3~4 万円/t 前後と半分以下にコストが抑えられると算出された。従って、より現実的にリサイクルを進められるコスト設定にするためには、技術開発の向上だけでなく、拠点集約の構想設計や、実用化後に順調な規模拡大が行えるよう集荷力も高めていく必要がある。

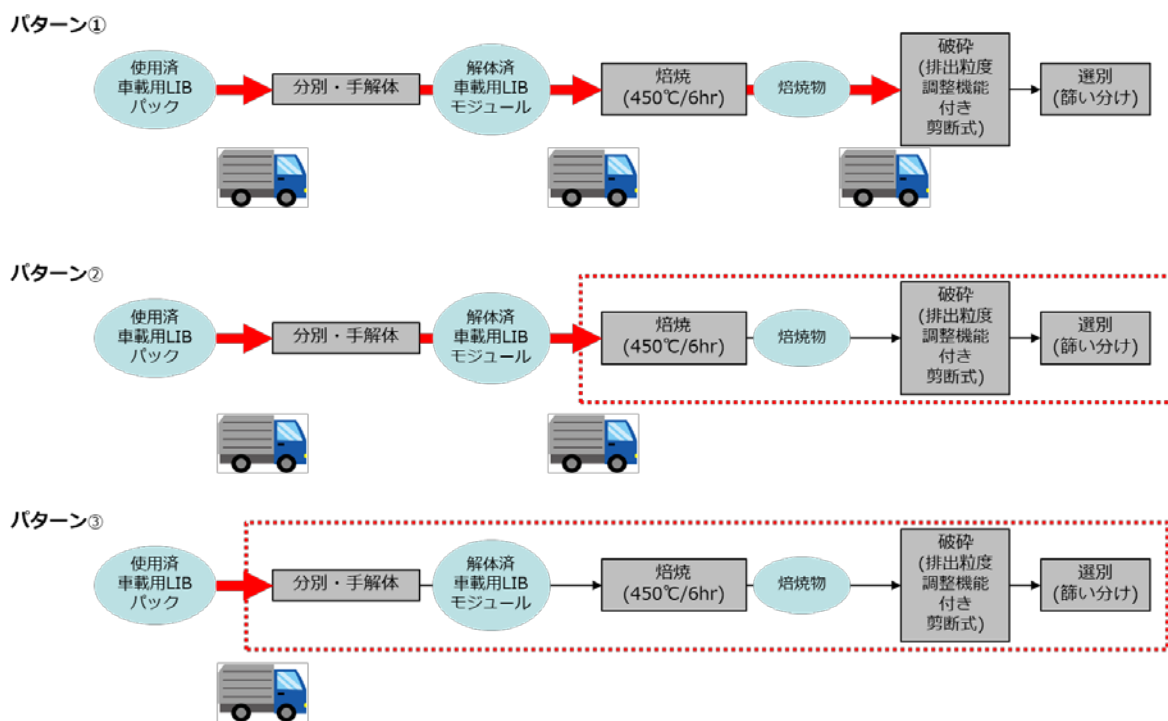


図 3.2-1 本事業の経済性評価検討における運搬パターン

表 3.2-1 処理規模と運搬回数の組み合わせによる使用済 LIB 処理の経済性総合評価比較

処理規模		10t/日			20t/日			30t/日		
運搬パターン		1	2	3	1	2	3	1	2	3
車載用LIB	国内	-83,000	-73,000	-57,000	-67,000	-57,000	-41,000	-61,000	-51,000	-35,000
	国外	-114,000	-101,000	-79,000	-94,000	-80,000	-58,000	-86,000	-72,000	-50,000
	平均	-102,000	-90,000	-71,000	-84,000	-72,000	-53,000	-77,000	-65,000	-46,000
定置用LIB		-186,000	-162,000	-124,000	-154,000	-130,000	-93,000	-142,000	-118,000	-81,000

処理規模		40t/日			50t/日			60t/日		
運搬パターン		1	2	3	1	2	3	1	2	3
車載用LIB	国内	-60,000	-50,000	-34,000	-57,000	-47,000	-31,000	-57,000	-47,000	-31,000
	国外	-85,000	-71,000	-49,000	-81,000	-67,000	-45,000	-81,000	-67,000	-45,000
	平均	-75,000	-64,000	-45,000	-72,000	-60,000	-41,000	-72,000	-60,000	-41,000
定置用LIB		-141,000	-117,000	-79,000	-135,000	-111,000	-74,000	-135,000	-111,000	-73,000

4. 本処理技術の事業展開性

4.1 受入対象廃棄物の市場規模予測

下表の通り平成 32 年以降、国内各地で車載用と定置用リチウムイオン電池の処理ニーズが増大すると想定されており、そのリサイクル処理ニーズを適切に満たすためには、日本各地にある既存インフラを有効活用し、かつ処理ニーズに応じて迅速かつ経済的に対応できるリサイクルシステムが求められる。当システムは、日本各地に所在するセメント工場を段階的に活用することにより、使用済 LIB 集荷コスト低減や処理委託数量に対し柔軟に対応できることから、将来の循環型社会への貢献が高いものと考えられる。

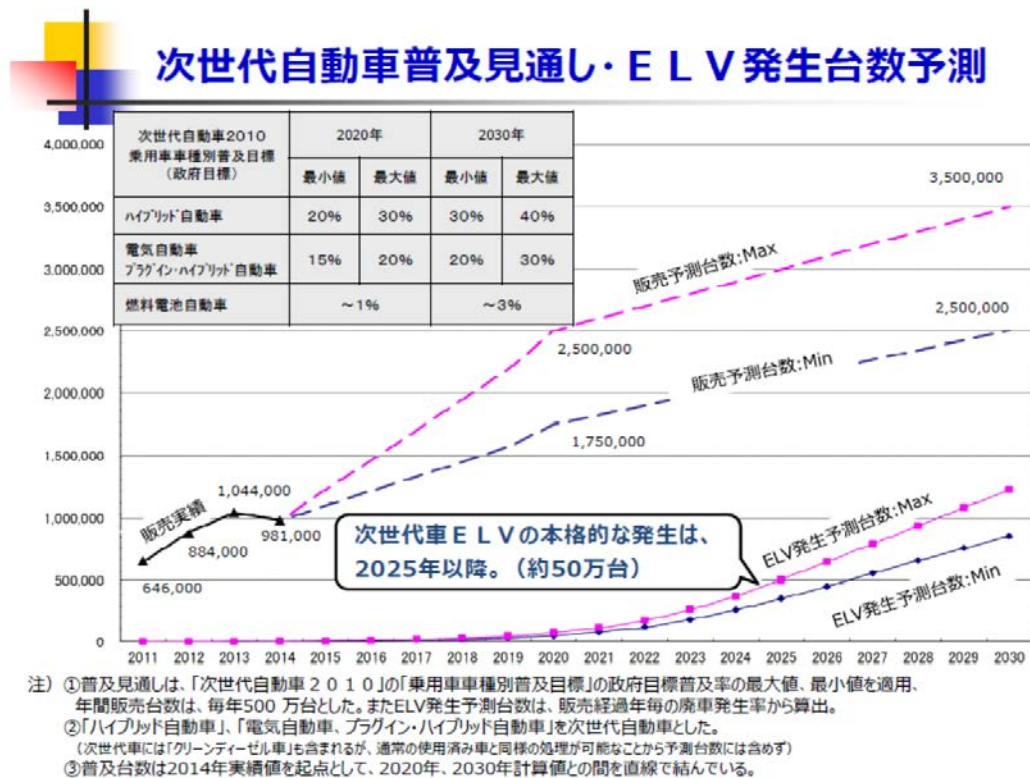


図 4.1-1 車載用 LIB の廃棄予測

出典) 平成 29 年度 産講審・中環審 合同会議資料 資料 6-2

住宅用／業務用蓄電システム 販売台数予測

(単位:万台)



図 4.1-2 定置用 LIB の市場規模予測

出典) (株)シード・プランニング HP、プレスリリース 2017年4月17日発表、
<https://www.seedplanning.co.jp/press/2017/2017041701.html>

4.2 自社既存施設への横展開

本スキームでは、LIBのうち、特に多量排出が見込まれかつサイズが不特定で堅牢で解体が難しい車載用LIBを対象に実証試験を行うが、技術的には定置用LIBも処理可能である。更に、大型に限らず小型も処理可能であり、受入対象LIBについては車載用に限らず、国内に流通している多様な用途のLIBについて幅広く受け入れる予定である。

本スキームは、セメント工場内に使用済LIB専用処理プラントを設置することにより、排熱エネルギーを効率的に利用した低炭素型リサイクルを実現するものである。実証試験を行う敦賀セメント敦賀工場に限らず、LIB集荷体制も考慮しつつ、当社グループの各セメント工場（下図参照）に段階的に導入し、展開する計画である。さらに、海外のセメント製造拠点においても当システムは展開可能であり、海外展開の可能性も検討している。



図 4.2-1 太平洋セメントのセメント事業国内拠点

(出所：太平洋セメント(株)HP <http://www.taiheiyo-cement.co.jp/company/busi/world/japan-2.html>)

(備考：図中の工場名表記の内、青字は太平洋セメント工場、黒字はグループ会社工場である。)

5. 今後の課題と事業計画

5.1 今後の課題

LIBは多種多様な構造、素材構成である。今回調達できたLIBの種類が少なかったため、リサイクルフローを確定するためには、LIBサンプルの種類を増やし、多種多様なLIBに対応可能な焙焼条件や破碎・選別手法を詳細検討する必要がある。フッ素等ガスの挙動もLIBによって異なるので、種類を増やし、検証の必要がある。また、リチウムの挙動について、ばいじんに移っている可能性があることが判明したため、今後は回収物だけでなく、ばいじんについても含有物の分析を行い、挙動を確認する必要がある。

本事業スキームを実用化するにあたり、調達、手解体、焙焼、破碎、選別の各工程において、作業効率を向上させるための荷姿やバスケットの構造を再度検証する必要がある。焙焼炉の処理能力が向上し、エネルギー効率の向上や処理コストの低減が期待できるような構造の改善案を検討し、費用対効果の良いと思われる改善案については、試作品を作り、生産性の検証を行いたいと考えている。

極材粉の製錬における有価評価は車載用(国内)LIBのみだったため、更なる回収率の向上のための処理工程の改善と、LIBをレアメタル含有量別に仕分ける等のノウハウの蓄積が求められる。実証実験では少量処理だったことから、CO2削減効果、熱分解ガスの燃料削減効果、フッ素ガスの除去効果の精度向上のために、単位時間当たり最大処理量にてより正確な効果を検証する必要がある。

5.2 今後の事業計画

今後のスケジュールとして、2019年度より付帯設備の設置を行い、大量処理体制の検討、事業化規模の許可取得を並行して進める。2020年には焙焼量500～1,000t/年にて操業を開始し、2030年は拠点も増加させ、18,000t/年の焙焼処理量を目指すことを想定している。

	2016	2017	2018	2019	2020～	2025～	2030～
セメント工場移設・工事							
能力増強工事	移設	安全対策		付帯設備設置	操業工事	大型化検討	
LIB							
課題対策		多品種処理対応の検討	操業手法の検討	大量処理体制の検討			
許認可取得 (消防、廃掃法、大防法等)	実証規模の許可・確認		事業化規模の許可取得				
事業化					500～1,000 t/年	3,000～9,000 t/年 (拠点増加)	18,000 t/年 (拠点増加)

図 5.2-1 今後のスケジュール

6. 総括

使用済の大型 LIB を低炭素型処理スキームでリサイクル処理することを目指すため、本実証事業では、焙焼炉を用いて、大型 LIB から高品質の金属資源を回収するための実証実験を行った。焙焼温度を調整することで、金属を融解させずに未酸化の状態のまま、可燃物と接着剤のみを焼き、金属資源を回収しやすくする。焙焼した LIB を破碎・選別することで、ベースメタルを回収するだけでなく、リチウム等のレアメタルも素材回収が可能な濃度に濃縮し、金属リサイクルを図る意図である。さらに、省エネルギーとして焙焼炉をセメントキルンに隣接し、セメントキルンの排熱を焙焼炉に利用することで、焙焼にかかる消費エネルギー量を削減する。この他、焙焼によって発生した可燃性ガスを含む排ガスをセメントキルンに戻し代替燃料として利用するほか、排ガスに含まれる難処理のフッ化水素をセメントキルンによって低コスト処理する等、セメントキルンを活用し、これまでの廃棄物処理ノウハウを活かすことで、他の技術よりも低コストにて LIB の全量リサイクルを実現する処理システムを目指している。

実証実験に用いた使用済 LIB は、国内自動車メーカーおよび国外自動車メーカーの車載用 LIB、国内メーカーの定置用 LIB である。本実証事業の実施内容と主な結果を以下のとおりである。

①使用済 LIB の分別・手解体

焙焼処理量の削減とベースメタルとプラスチック資源の回収を目的として、使用済 LIB の集荷、分別・手解体を行い、回収した資源量の計測を行った。回収した LIB は、車載用（国内、国外）と定置用である。なお、手解体はパック状態で排出された車載用（国内・国外）LIB のみを行った。定置用 LIB はモジュール状態で排出されたため、手解体は行わなかった。手解体の結果、車載用 LIB パック 1 台あたり、国内・国外平均で約 4 割（重量ベース）の金属やプラスチックの素材が回収された。手解体により、平均で約 4%のプラスチック（可燃分）を焙焼前に回収することにより、CO₂ 排出量低減に寄与できた。

②使用済 LIB の焙焼

ベースメタルとレアメタルの高濃度回収のために、電極材のアルミと銅を融解せず、接着剤のみを焼き切る焙焼温度帯と加熱時間の比較検証を行った。解体後の LIB モジュールの焙焼における加熱温度帯を 450℃と 600℃で焙焼物の状態を比較検証した結果、450℃では融着が見られず、破碎による分離が可能な状態であった。一方、600℃では融着が見られ、破碎による分離は困難に見受けられた。加熱時間の 3 時間から 6 時間の間で経過観察を行ったところ、3 時間後と 4 時間後ではまだ炎が出ており、5 時間後では炎は見られなかったものの発煙しており、焙焼は完了しておらず、6 時間後で炎と煙ともに確認されず、焙焼が完了していた。この結果、焙焼温度は 450℃、焙焼時間は 6 時間が好適と判断された。

焙焼によって発生する排ガス（可燃性ガス含有）のセメントキルンでの有効活用について、排ガスの熱量を測定、検証した結果、焙焼にて発生する排ガスの熱量は 156Mcal/t で、セメント生産における石炭使用量の 0.1%を代替すると算出された。

③焙焼した LIB の破碎・選別

焙焼物からベースメタルとリチウム等を含有する極材粉 (<1mm) を高効率回収するための好適な破碎・選別手法の選定のため、衝撃式、剪断式、剪断式（排出粒度調整機能付き）の 3 種類の破碎技術の比較検討を行った。選別技術は篩い分けで統一した。技術評価の結果、定置用、車載用いずれの焙焼 LIB にも破碎処理が可能で設備負荷の低い剪断式（排出粒度調整機能付き）が有望であった。

衝撃式は、定置用 LIB は問題なく破碎され、<1mm の極材粉の回収率も約 60% と高かったが、車載用 LIB は構造が堅固なため破碎処理困難とのメーカー判断があり、実施しなかった。剪断式は、定置用 LIB の破碎処理にかかる刃への負担が大きく、破碎機が何度も停止するなど、連続処理が困難であり、<1mm の回収率も 20% 弱と低かった。定置用 LIB での破碎に物理課題があったことから、より構造が堅固な車載用 LIB は処理困難と判断し、実験は行わなかった。剪断式（排出粒度調整機能付き）は、定置用 LIB は問題なく破碎処理され、<1mm の回収率も 25% であった。車載用 LIB も国内、国外ともに問題なく破碎処理され、<1mm の回収率も平均で約 15% であった。剪断式（粒度調整機能付き）のみ定置用、車載用のいずれの焙焼 LIB にも対応可能であった。

回収物に含まれる成分分析を行い、金属のマテリアルバランスを検証したところ、定置用 LIB において<1mm 極材粉にレアメタルを高濃度回収できていたのは剪断式で、1-10mm に銅濃縮、10mm<に鉄とアルミニウムを濃縮できていたのは剪断式（排出粒度調整機能付き）であった。このため、定置用 LIB の破碎処理として、今後、衝撃式と剪断式（排出粒度調整機能付き）を組み合わせる等、改善を検討する。

剪断式（排出粒度調整機能付き）を活用した車載用 LIB では、国内・国外ともに<1mm 極材粉にて 50% 以上のレアメタル回収が確認された。一方、ベースメタルでは、10mm<に銅が最も多く濃縮されるものの、同様に鉄やアルミニウムも高濃度回収されており、破碎・選別に課題が残った。

④処理スキームの全体設計

実証実験結果に基づき、使用済 LIB のリサイクルフロー全体設計を行い、リサイクルフローのマテリアルバランスを算出した。また、セメントキルンと焙焼炉を隣接することで、セメントキルン排熱を焙焼炉へ、焙焼にて発生する可燃性排ガスをセメントキルンへ送ることによる省エネルギー効果の試算を行った。

使用済 LIB の処理フローとして、パック状態の LIB は手解体を行い、ベースメタルとプラスチックを回収し、モジュール状態にした後、焙焼を行う。焙焼物は剪断式（排出粒度調整機能付き）にて破碎後、篩い分けし、選別回収した<1mm の極材粉はリチウム等のレアメタルリサイクル、1-10mm と 10mm<は銅リサイクルとした。

処理スキームの規模は、焙焼処理量 3,000t/年（10t/日）を軸とすると、処理する使用済 LIB パック（車載用）約 6,000t/年、回収される資源は、極材粉 360t/年、ベースメタルが合計約 3,390t/年の見込みと算出された。

省エネルギー効果については、セメントキルンの排熱エネルギーを利用することで、焙焼炉の年間灯油消費量を 228kL から 160kL に約 70kL（約 30%）削減される見込みであり、焙焼炉から発生する可燃性排ガスをセメントキルンに利用することで、セメント製造に要する石炭の約 0.1% の代替が可能と算出された。

本事業スキームによる二酸化炭素削減効果の算定にあたり、比較対象技術は定置炉での焼却処理と設定した。定置炉焼却の前後の処理工程に関するエネルギー消費に関連するデータの入手が困難であったため、より保守的な算定として本事業と同一と仮定し、フッ化水素処理工程は、算定範囲から除外した。リサイクル効果は、実際に評価される資源量のみ算定対象とした。試算の結果、車載用（国内）LIBは265kg-CO₂/LIBパック、車載用（国外）LIBは362kg-CO₂/LIBパック、定置用LIBは617kg-CO₂/LIBモジュールであった。年間焙焼量3,000t/年の処理規模の場合、いずれのLIBにおいても約1,850t-CO₂/年の二酸化炭素削減効果と算出された。

実際に評価される資源量のみ資源循環効果は、車載用（国内）LIBは資源回収率が約70%、車載用（国外）LIBは約50%、定置用LIBは約1%と算出された。定置用LIBは、約60%に相当する1mm \leq の回収量に対し、銅のみ資源評価となり、銅の含有率が少ないことから資源回収率が低くなった。しかしながら、金属評価されない回収物はセメント化リサイクルを行うことから、いずれのLIBも埋立処理量は0であり、従ってリサイクル率は100%である。

排ガス（フッ化水素含有）の低コスト無害化処理について、LIBに含まれるハロゲン元素（フッ素）の挙動について検証した結果、定置用LIBと車載用（国外）LIBでは98~100%と殆どが1mm未満の極材粉に移動していた。車載用（国内）LIBでは8割弱が1mm未満の極材粉に移動しており、残りは焙焼の排ガスに移動していたが、この排ガスはセメントキルンに送られ、無害化処理される。セメントキルンの排ガスを計測した結果、フッ素の無害化処理が確認された。LIB由来で環境負荷が考えられる臭素と塩素についても計測したところ、問題のある数値は確認されなかった。

車載用（国内・国外）LIB、および定置用LIBの経済性について、回収資源の有価物評価と運搬や処理設備に要する費用、人件費、消耗品費の費用を算出し、総合評価を行った。回収資源のうち、レアメタルの有価物評価は、回収物の濃度に基づき行った。1mm \leq はいずれも銅評価とし、評価量は1mm \leq に含有する銅量とした。

試算の結果、車載用LIB（国内）の極材粉（<1mm）にてCoに有価評価が得られた。一方、車載用LIB（国外）の極材粉（<1mm）はいずれも評価されずセメント化となり、定置用LIBは廉価だがレアメタル回収は可能と判定された。車載用LIBは国内と国外の平均ではレアメタル回収可能との判定となったことから、処理の運用方法によってレアメタルリサイクルの可能性がある。車載用（国内・国外）LIBは、銅評価により4万円台/tの資源価値ありと算出されたが、人件費等のコストが13万~16万円/tかかる見込みであり、収支では▲10万円/t前後となった。定置用LIBは資源評価100円/tで処理コストが約19万円/tであったことから、総合評価も▲約19万円/tであった。今後、処理施設の集約による運搬コストの削減や処理施設の大規模化による人件費低減等、使用済LIBの処理コストを抑える方針である。

LIBは多種多様な構造、素材構成である。今回調達できたLIBの種類が少なかったため、リサイクルフローを確定するためには、LIBサンプルの種類を増やし、多種多様なLIBに対応可能な焙焼条件や破碎・選別手法を詳細検討する必要がある。フッ素等ガスの挙動もLIBによって異なるので、種類を増やし、検証の必要がある。また、リチウムの挙動について、ばいじんに移っている可能性があることが判明したため、今後は回収物だけでなく、ば

いじんについても含有物の分析を行い、挙動を確認する必要がある。

本事業スキームを実用化するにあたり、調達、手解体、焙焼、破碎、選別の各工程において、作業効率を向上させるための荷姿やバスケットの構造を再度検証する必要がある。焙焼炉の処理能力が向上し、エネルギー効率の向上や処理コストの低減が期待できるような構造の改善案を検討し、費用対効果の良いと思われる改善案については、試作品を作り、生産性の検証を行いたいと考えている。

極材粉の製錬における有価評価は車載用（国内）LIBのみだったため、更なる回収率の向上のための処理工程の改善と、LIBをレアメタル含有量別に仕分ける等のノウハウの蓄積が求められる。実証実験では少量処理だったことから、CO₂削減効果、熱分解ガスの燃料削減効果、フッ素ガスの除去効果の精度向上のために、単位時間当たり最大処理量にてより正確な効果を検証する必要がある。

今後のスケジュールとして、2019年度より付帯設備の設置を行い、大量処理体制の検討、事業化規模の許可取得を並行して進める。2020年には焙焼量500～1,000t/年にて操業を開始し、2030年は拠点も増加させ、18,000t/年の焙焼処理量を目指すことを想定している。

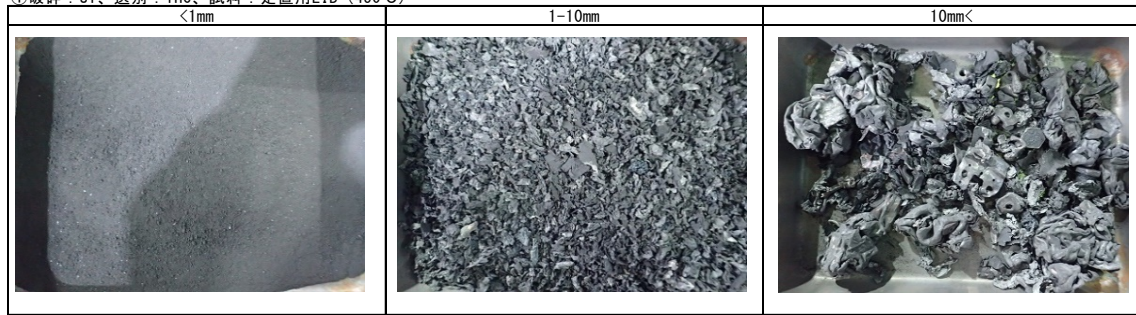
7. 添付資料

表 破碎技術別の回収した各粒径サイズの金属分配率

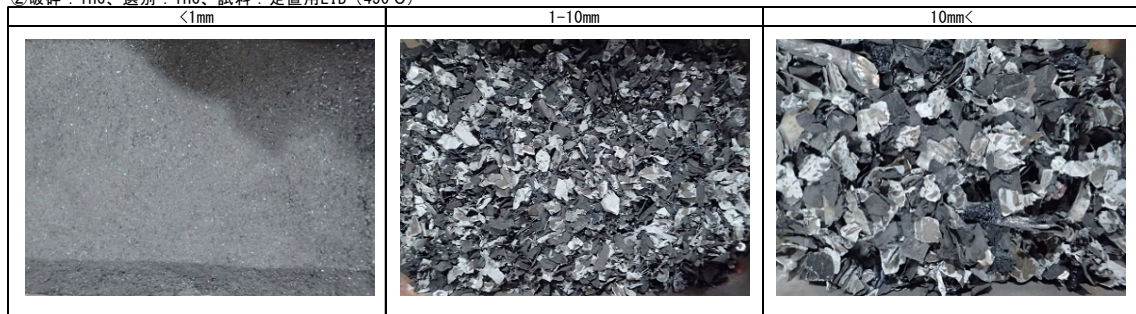
実施社	対象LIB	粒径 (mm)	分配率 (%)					
			Li	Ni	Co	Fe	Cu	Al
UT	定置	<1	84	69	70	27	0	2
		1-10	14	28	27	47	85	51
		10<	2	3	3	26	15	47
THC	定置	<1	36	13	13	19	3	1
		1-10	23	37	37	21	3	19
		10<	41	50	50	60	94	80
MS	定置	<1	37	29	30	9	11	2
		1-10	20	23	22	3	65	17
		10<	43	48	48	88	24	81
MS	車載(国内)	<1	53	54	53	1	3	3
		1-10	11	10	11	28	8	13
		10<	36	36	36	71	89	84
MS	車載(国外)	<1	53	50	78	39	1	1
		1-10	2	7	2	20	4	7
		10<	45	43	20	41	95	92

表 手法別の回収物写真

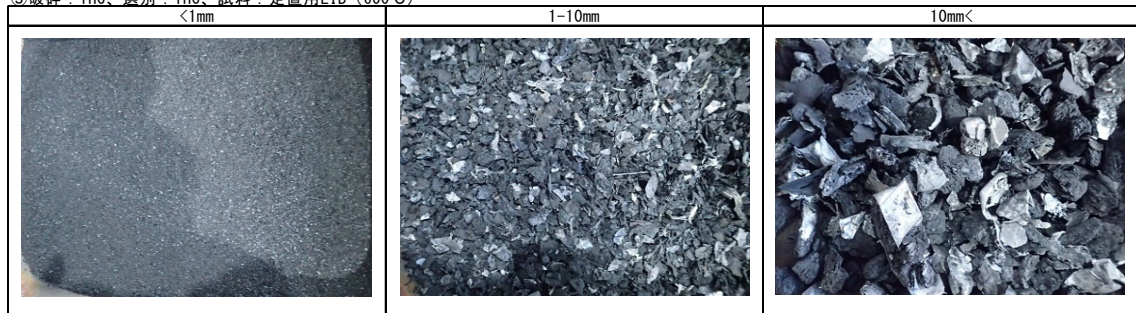
①破砕：UT、選別：THC、試料：定置用LIB (450°C)



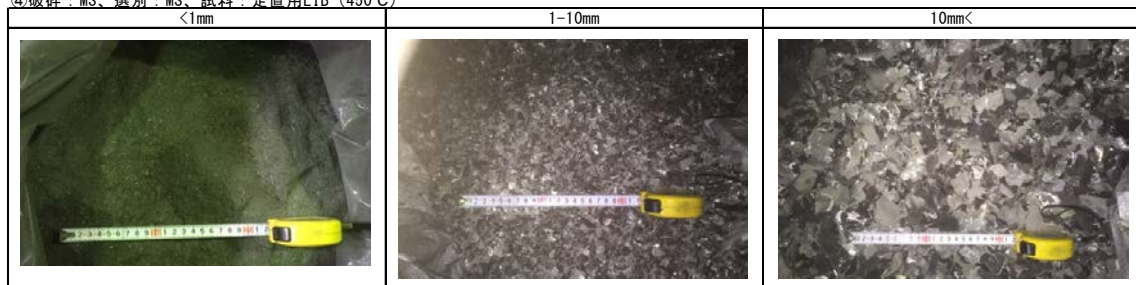
②破砕：THC、選別：THC、試料：定置用LIB (450°C)



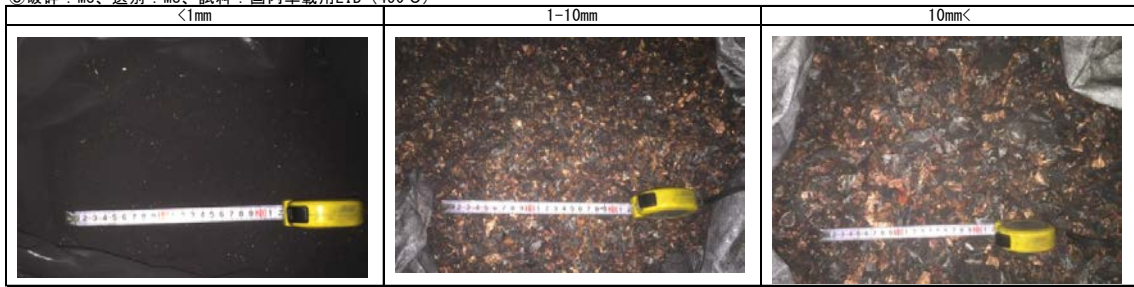
③破砕：THC、選別：THC、試料：定置用LIB (600°C)



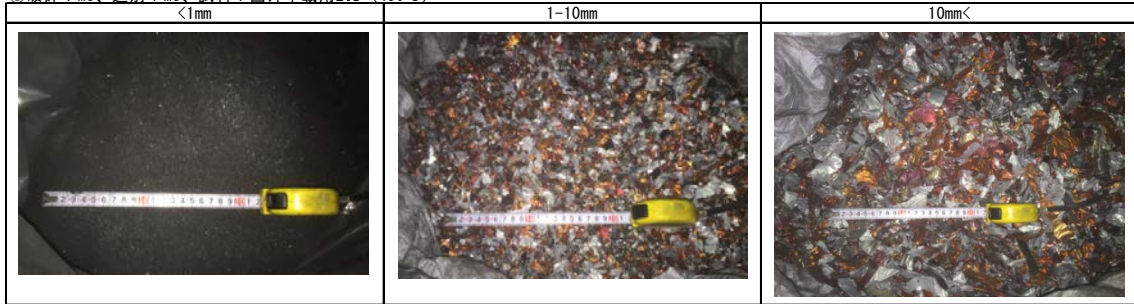
④破砕：MS、選別：MS、試料：定置用LIB (450°C)



⑤破砕：MS、選別：MS、試料：国内車載用LIB (450°C)



⑥破砕：MS、選別：MS、試料：国外車載用LIB (450°C)



平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業

車載用等の使用済みリチウムイオン電池の低炭素型リサイクル
システム実証事業 報告書

平成30年2月28日

太平洋セメント株式会社

環境事業部

TEL 03-5531-7417