

自治体の不燃系廃棄物処理施設および小型家電リサイクル施設における
リチウムイオン電池に起因した発火・火災対策に関する技術資料
ーリチウムイオン電池起因の発火・火災対策ガイドラインー

環境研究総合推進費

「リチウムイオン電池等の循環・廃棄過程における
火災事故実態の解明と適正管理対策提案」

(3-2101、JPMEERF20213001)

目次

1. はじめに	3
2. 本技術資料（ガイドライン）が対象とする範囲	4
3. 発火・火災事故の概要と原因	5
(1) 発火・火災事故の実態把握	5
(2) 発火・火災事故発生の概要	5
(3) 発火・火災事故発生場所	7
(4) 発火・火災事故の原因	8
(5) リチウムイオン電池使用製品（小型家電）と発火・火災事故との関係	9
(6) 破碎処理による発火の事例	10
4. リチウムイオン電池に起因すると思われる火災被害規模	13
5. 代表的な処理プロセス	15
6. 破碎方式の分類	18
7. 発火・火災対策	20
(1) 排出に関する周知啓発	20
(2) 分別収集	21
(3) 事前選別	22
(4) 破碎機内の対策	23
(5) モニタリングと消火	25
(6) 遅延発火の抑制（リチウムイオン電池の物理選別など）	27
(7) その他のソフト対策	30
(8) 選別除去したリチウムイオン電池の取扱い	31
8. おわりに	33
参考資料	34
(1) リチウムイオン電池	34
(2) リチウムイオン電池に関連する規制	34
(3) 一般廃棄物処理施設の維持管理の技術上の基準（抜粋）	36
(4) 廃棄物処理施設整備国庫補助事業に係るごみ処理施設性能指針（抜粋）	37
(5) 遅延発火予防を目的としたリチウムイオン電池の物理選別	38
参考文献	44

1. はじめに

近年、家庭や事業所から不燃系廃棄物などに混入して排出されるリチウムイオン電池に起因する発火・火災事故が頻発・増加しています。その被害規模は年々増加の一途をたどっており、自治体の廃棄物処理施設におけるリチウムイオン電池起因の火災事故の被害額は年間100億円程度と推計しております。一度火災が発生すると施設の被害金額だけでなく、復旧までに数カ月以上の時間を要する場合がありますなど、安全・安心な循環型社会づくりに対する信頼性を毀損するような甚大な社会的な影響や、人命にかかる影響も懸念されます。

そこで、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費「リチウムイオン電池等の循環・廃棄過程における火災事故実態の解明と適正管理対策提案」(3-2101、JPMEERF20213001；2021～2023年度)では、自治体および民間事業者の関係者各位がリチウムイオン電池に起因する発火・火災対策の参考となるような技術資料(ガイドライン)をとりまとめました。本技術資料が廃棄物処理施設および小型家電リサイクル施設におけるリチウムイオン電池に起因する発火・火災対策の一助となれば幸いです。

2024年9月

環境研究総合推進費(3-2101、JPMEERF20213001)研究代表者
国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域
寺園 淳

2. 本技術資料（ガイドライン）が対象とする範囲

本技術資料（ガイドライン）が取り扱う製品の範囲は、リチウムイオン電池およびリチウムイオン電池を使用する製品（小型家電）に係るものとし、また、本技術資料が対象とする範囲は主に自治体の不燃系廃棄物処理施設（破碎選別）における発火・火災事故ですが、一部は民間の小型家電リサイクル施設におけるものも含めています。

リチウムイオン電池の排出時および収集運搬時、さらにプラスチック製容器包装のリサイクルなどにおける発火・火災についても、参考となる情報はありますが、原則として対象外とします。

3. 発火・火災事故の概要と原因

これまでの調査でいくつかの自治体に協力をいただき、不燃・粗大系廃棄物の破砕処理施設における発火等事故発生に関するヒアリング、および破砕処理中のモニタリング調査を実施しました¹⁾。その結果に基づく概要を紹介します。

(1) 発火・火災事故の実態把握²⁾

廃棄物処理における発火・火災（等）事故の実態把握は容易ではありません。その要因はいくつかあります。

まず、民間のみでなく、市町村の廃棄物処理施設においても周辺の住民との関係から、大きな火災の場合を除いて、積極的な被害の公表を控えることがあるためです。

次に、火災の用語の問題があります。消防庁の「火災報告取扱要領」では、「人の意思に反して発生（放火も含む）」「消火の必要がある燃焼現象」「消火施設の利用を必要とする」という三要素を満たすものが火災の定義になっていますが、実際には、小火（ボヤ）については消防への通報や記録がなかったり、市町村における消火能力や頻度によって数え方がまちまちだったりしています。この技術資料では、重大事故の背後に多数の異常（ヒヤリ・ハット）が存在する可能性も踏まえて、「発火・火災（等）事故」（または単に事故）の用語を主に用います。

関連して、施設によって検知方法や運用方法（記録や稼働停止を含む）が異なります。同じ施設においても、検知方法の変更（増強）によって発生件数が変動する要因になっている場合もあります。

(2) 発火・火災事故発生の概要

市町村でのリチウムイオン電池に関連する発火・火災事故について、環境省³⁾による2022年度の調査（原文では火災等、以下同様の表現修正あり）によれば、図3-1に示すように、リチウムイオン電池（原文はリチウム蓄電池）等に起因した収集車両、破砕施設の事故は、1,741の市町村数（区を含む）の中で「発生していない」が1,460（84%）を占め、「発生している」は281（16%）でした。ただし、同じく2021年度調査でも二次電池に起因した同様の事故が発生している市町村は255（15%）でしたが、「二次電池に起因すると疑われる火災が発生しているが、原因は特定していない」と回答した市町村が273（16%）あったため、疑いを含めると3割以上の市町村が発生の経験があると考えられます。

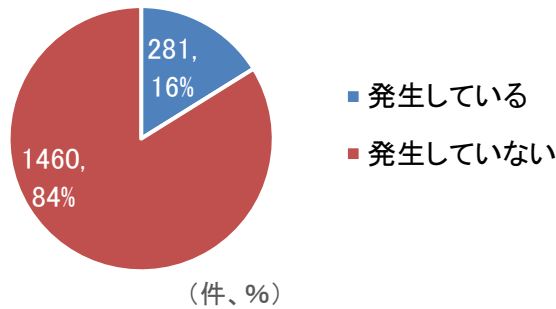


図 3-1 リチウム蓄電池に起因した収集車両や破砕施設の火災等の発生状況（単回答）
（2022 年度調査、市区町村ベース：n=1,741）³⁾

発火・火災事故の年間規模別発生件数について、環境省³⁾が 2022 年度に実施した一般廃棄物処理実態調査においては図 3-2 に示すように、「出火し、散水装置等の設備で自動的に消火」が最も多く、3,917 件でした。他に、「火花・煙等が発生（出火なし）」がほぼ同数の 3,825 件と続き、「出火し、職員が手動で消火」などを加えた合計が 11,140 件でした。同じく 2021・2020 年度に実施した調査結果でも規模の区分はやや異なるものの、合計でそれぞれ 12,765 件、9,732 件となっており⁴⁾、年間 1 万件程度以上の発火・火災等事故が報告されています。

一方、環境省の 2022 年度調査では「出火し、消防隊により消火」が 49 件となっています。これは、施設外の消防隊が消火するような火災は、発火・火災事故全体の 11,140 件の 0.44%にあたり、全体の中で規模の大きめの火災の割合はごく一部であることを示しています。

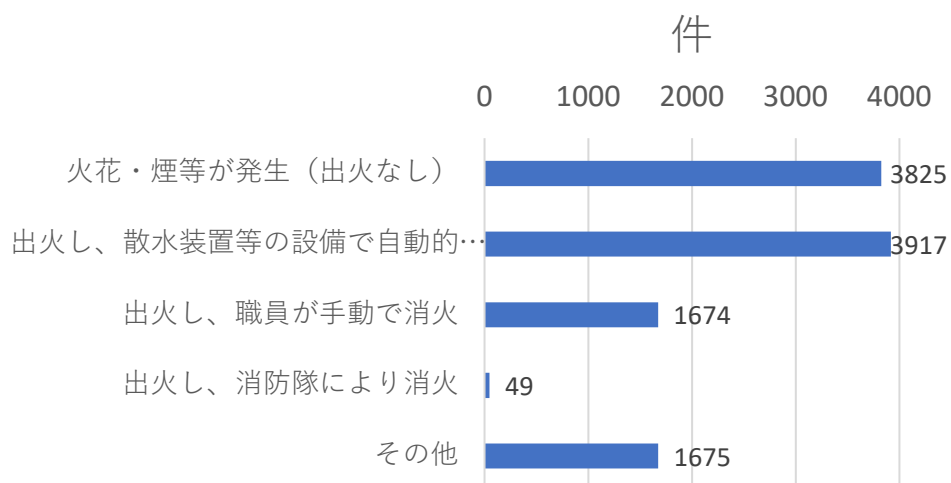


図 3-2 発火・火災事故の年間規模別発生件数（2022 年度調査、対象：リチウムイオン蓄電池に起因した火災が発生している市町村：n=281）³⁾

また、推進費によるヒアリング調査でも年間 1,000 件以上の発火・火災等事故があるとする市町村（処理施設）は複数あった一方で、前述のように事故が「発生していない」とする回答も非常に多く、市町村によるバラつきが極めて大きいことがわかっています。これは、実際に事故の件数の違いがあるだけでなく、前述のように市町村の対応や把握の方法による違いから実態把握が困難なことを示しています。

さらに、2020 年度に最大 807 件あった施設 A における発火等事故発生件数は、図 3-3 に示すように 2021 年度には 1,093 件であり、2015 年度の 67 件から増加傾向が続いていることがわかりました。内訳は、2020 年度に 1 件であった火災・爆発を除いてほとんどが発火でした。

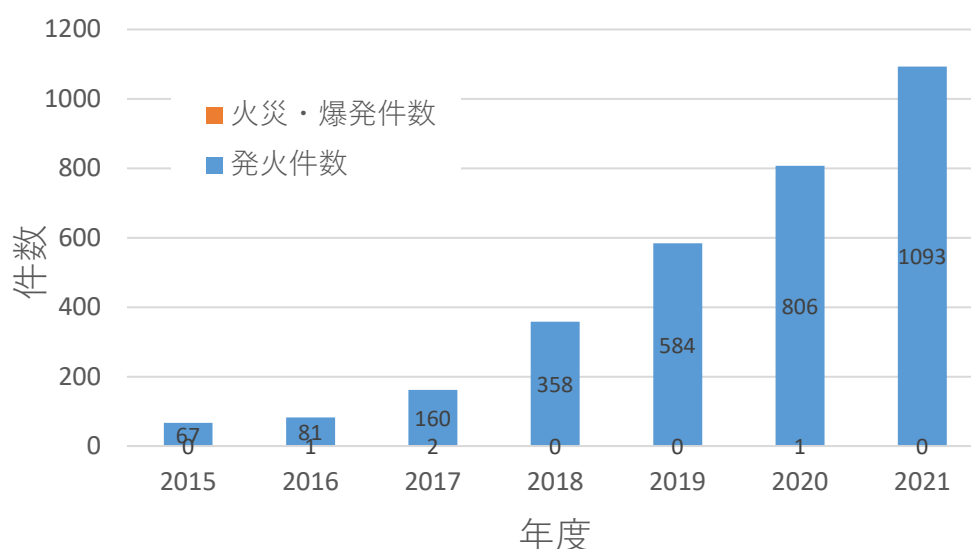


図 3-3 施設 A における発火等事故発生件数の経年変化¹⁾

市町村において火災等が発生している収集区分については、環境省による 2021 年度の調査では「不燃ごみ」が 67.1%と、他の収集区分より突出して多く、次いで「粗大ごみ」が 20.8%、「可燃ごみ」が 18.4%でありました⁴⁾。

(3) 発火・火災事故発生場所¹⁾

推進費でヒアリングを行った施設 A の例を示します。施設 A では、一次破碎（低速回転破碎機）と二次破碎（高速回転破碎機）からなる二段破碎方式を採用し、その発火等事故の発生場所は図 3-4 に示すように、一次破碎の直後のコンベヤ上である一次搬送での事故が全体の約 43%の 481 件、同様に二次搬送が全体の約 52%の 582 件でした。破碎機で発火した電池はすぐにコンベヤ上に落ちることや火災検知器の設置位置などを考慮すると、搬送

段階での発火は破碎による結果であると推察されます。他の施設では発生場所の詳細なデータは少ないものの、搬送段階が最も多く、破碎段階を含めるとほぼ9割以上であると考えられます。

また、一次破碎のような粗破碎でも発火が十分発生することと、一次破碎で発火を免れた電池でも二次破碎で発火していることは注目に値します。破碎前の保管段階での発火は、収集段階の圧縮が影響した可能性があります。

破碎と選別を経た後の残さや金属類の保管段階では、1件の発生件数でしたが、これは残さが可燃ごみピットへ送られた後の発生件数（ヒアリングの結果、36件）を含んでいません。仮に36件を含む37件が不燃・粗大ごみに由来する発火等事故の場合、全体（1,093件+36件=1,129件）の3.3%は残さ保管段階で発生している計算になります。リチウムイオン電池は破碎・選別の直後で発火せず、残さとして遅延発火する場合があります、可燃ごみピットでの火災は重大事故につながることから非常に注意を要する現象といえます。

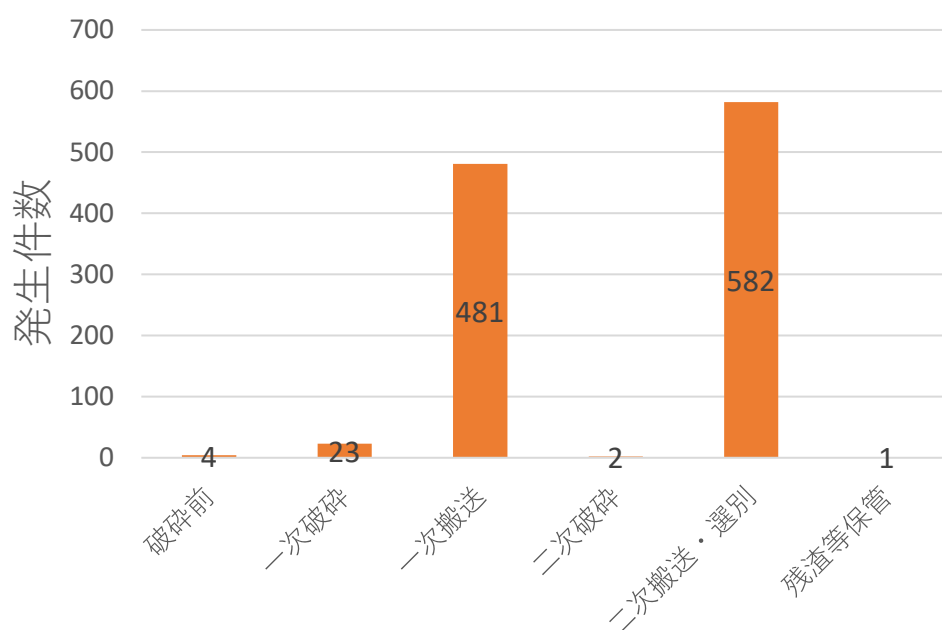


図 3-4 施設 A における発火等事故の発生場所（2021 年度）¹⁾

（4）発火・火災事故の原因

発火・火災事故の原因について、調査結果が得られる施設は限られました。これは、大規模な火災事故であれば激しい焼損によって発火源が確認できないことや、小規模の発火であっても原因が見つからなかったり頻発のために毎回の調査ができなかったりすることがあるためです。

このように調査ができる施設は限られましたが、一定の調査を行っている施設によれば、

現在処理施設で発生している発火等事故の 80%から 90%程度はリチウムイオン電池に起因するものと推測されました¹⁾。

発火等事故発生時に検出されることが多いリチウムイオン電池使用製品について、回答があった 5 つの施設のうち、充電式掃除機、電子たばこ・加熱式たばこ、モバイルバッテリーがいずれも 4 つの施設から、電動アシスト自転車、携帯・スマートフォン、ワイヤレスイヤホンがいずれも 2 つの施設から挙げられました。これらは、モバイルバッテリー、加熱式たばこ、コードレス掃除機、スマートフォン、ワイヤレスイヤホン、電気かみそりの順で挙げられた環境省調査⁴⁾ともほぼ一致する結果となりました。

(5) リチウムイオン電池使用製品（小型家電）と発火・火災事故との関係

リチウムイオン電池使用製品（小型家電）と発火・火災事故との間に、明確な関係を示すことは容易ではありません。しかし、リチウムイオン電池の安全性評価試験（破砕による熱暴走の検証）と施設における事故件数の検証の 2 つによって、関係があることは十分考えられます。ここでは、施設における事故件数の検証結果を示します。

不燃・粗大ごみの処理施設における破砕処理に伴う発火・火災等事故が多いと考え、ヒアリング調査で発火等事故の発生件数が得られた 11 の処理施設において収集（処理）量と事故発生件数の関係を調べました¹⁾。その結果、図 3-5 に示すように 2020 年度における発火等事故発生件数は 0 から最大 807 件であり、7 施設が年間 100 件以上でした。事故が多い施設では、不燃・粗大ごみ収集量 1t あたり 0.1 件以上の発火・火災等事故が発生していました。発生件数の把握が困難なことから図では両者の相関がありませんでしたが、図 3-6 のように小型家電の分別収集や選別などによって破砕処理の対象からリチウムイオン電池使用製品が少なくなった場合は一定の相関関係が見えることが示されました。

これより、データの制約などのために明確な関係までは見えませんが、破砕処理されるリチウムイオン電池使用製品（小型家電）の量を減らすことは発火等発生件数を減らす効果があると考えられます。

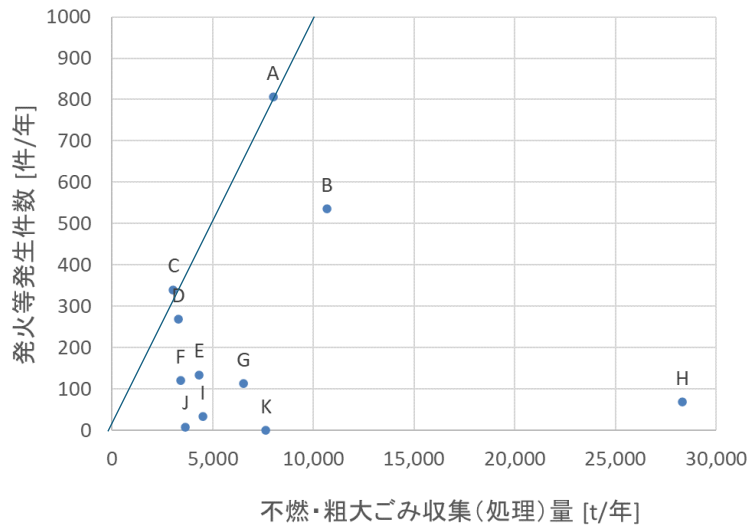


図 3-5 不燃・粗大ごみの収集（処理）量と発火・火災等事故発生件数との関係¹⁾
 （直線は不燃・粗大ごみ収集量 1t あたり 0.1 件の傾きを表しており、一部の施設でこれより上にある。）

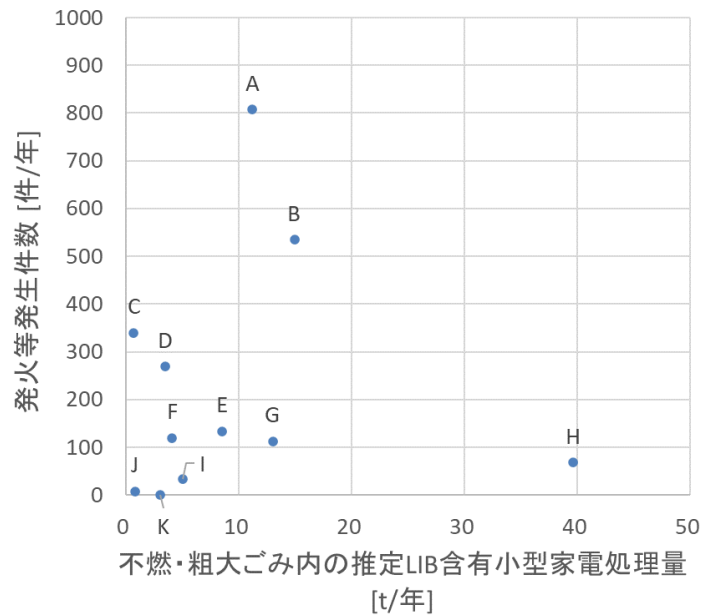


図 3-6 11 箇所の処理施設における不燃・粗大ごみ内の推定リチウムイオン電池含有小型家電処理量及び発火等事故発生件数の関係¹⁾

(6) 破碎処理による発火の事例

破碎処理の衝撃によってリチウムイオン電池または金属どうしの発火が発生する様子は、

多くの施設で破砕機内に設置されている ITV カメラなどで確認できます。ここでは、私たちが実施した破砕処理のリアルタイムモニタリングによる、リチウムイオン電池発火の事例を示します¹⁾。

私たちは 2022 年 3 月、埼玉県坂戸市のご協力で、不燃・粗大ごみの破砕処理作業における処理機内部の状況について、ITV カメラ（坂戸市所有）に加えて、赤外線サーモカメラと環境センサーを用いて確認しました。当日の不燃・粗大ごみの処理作業は 3 時間程度でしたが、その間に明確な発煙・発火事象が ITV カメラで 1 回確認され、作業員が処理を停止して消火にあたりました。発火原因はモバイルバッテリーと思われるリチウムイオン電池であり、手動消火後に除去されました。この時の発火を含む 13:25:22 から 2 分間における、赤外線サーモカメラによる画面内の最高温度と環境センサーによる eCO₂ 濃度（簡易的な CO₂ の測定濃度）の推移を図 3-7 に示します。

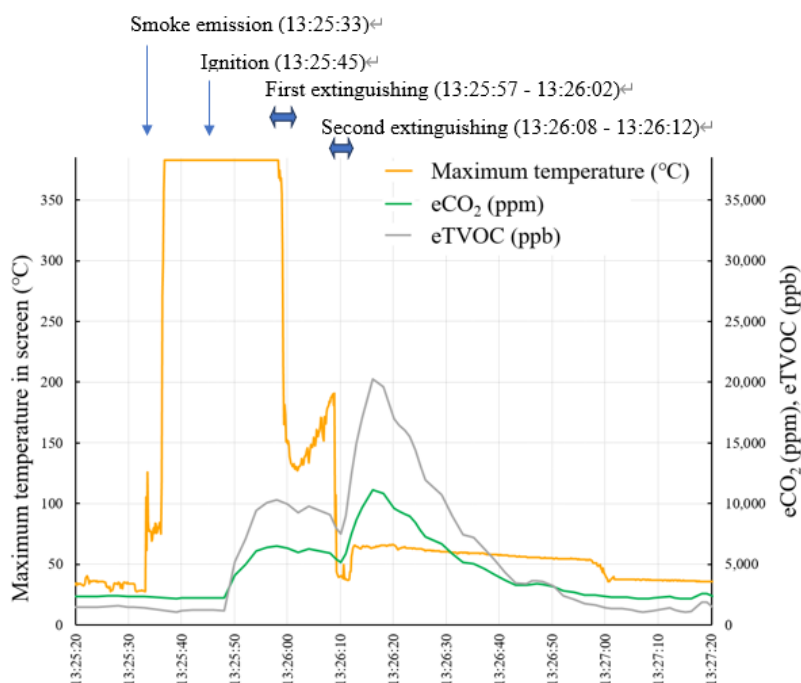


図 3-7 赤外線サーモカメラによる最大温度と環境センサーによる eCO₂ と eTVOC 濃度の推移¹⁾

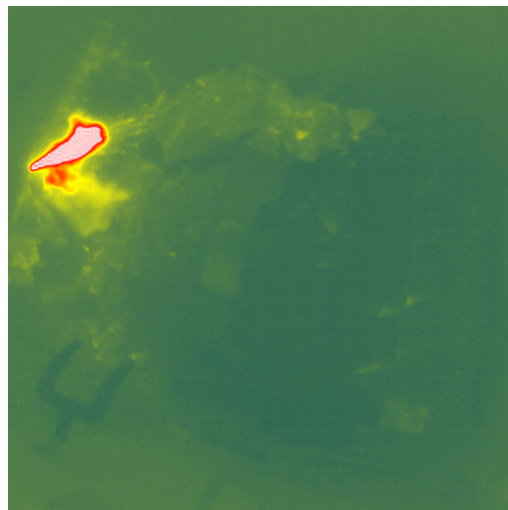
この間、13:25:32 にギロチン式の一次破砕機がリチウムイオン電池をせん断破砕した直後に図 3-8 (a.1、a.2) のような発煙が ITV カメラで確認され、リチウムイオン電池内部から噴出したガスの温度がすぐに測定限度（図 3-7 では 380 度程度ですが機器の仕様上は 350 度）を超過したことが赤外線サーモカメラでも確認されました。12 秒後の 13:25:44 には図 3-8 (b.1、b.2) に示すように発火が ITV カメラでも見られて高温を維持し、さらに 12 秒後の 13:25:56 には作業員による手動放水が始まって 15 秒間でほぼ消火を終えました。

また、当日の明確な発火確認と処理停止は 1 回のみでしたが、赤外線サーモカメラのデ

ータからはこれ以外に 80 度超過事象は 3 回あることがわかり、いずれも処理作業中に発火に至らず温度が低下していました。なお、2020 年度の坂戸市での発火等発生件数は 269 件であって、年間処理日数を 50 日とすると平均 5.36 回/日であり、今回確認した発火以外にも潜在的な発火事象がある可能性があります。



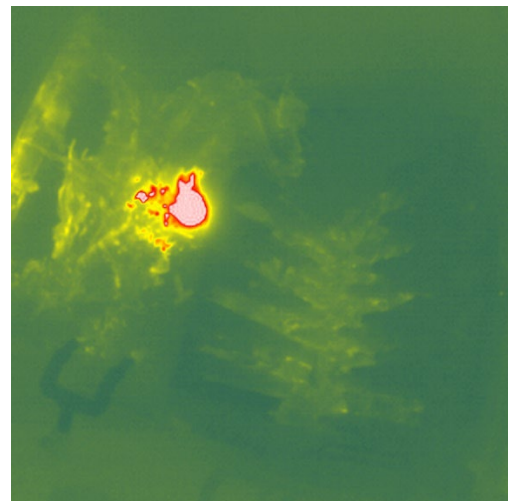
(a.1) 発煙時の ITV カメラ画像 (13:25:32)



(a.2) 発煙時の赤外線サーモカメラ画像
(13:25:32)



(b.1) 発火時の TVV カメラ画像
(13:25:44)



(b.2) 発火時の赤外線サーモカメラ画像
(13:25:44)

図 3-8 発煙時(13:25:32)及び発火時 (13:25:44) における ITV カメラの画像と赤外線サーモカメラの熱画像¹⁾

4. リチウムイオン電池に起因すると思われる火災被害規模

リチウムイオン電池に起因すると考えられる廃棄物処理施設の火災事故は近年増加の一途をたどっていますが、国内に詳しい統計データは存在しません。これに関し、いくつかの機関が関連する統計情報を公開しています。例えば、独立行政法人製品評価技術基盤機構は、インターネット等から収集した情報から、ごみに混入したリチウムイオン電池の発火などによる被害額は2018年度から2021年度の4年間でおよそ111億円に達すると報じています⁵⁾。

日本国内において、リチウムイオン電池が廃棄、処理される場所はおもに①自治体が管轄する廃棄物処理施設、②小型家電リサイクル施設、③産業廃棄物処理施設、④容器包装再生処理施設があると考えられます。この中で最も施設件数、処理量が多いと考えられる①自治体が管轄する廃棄物処理施設について、リチウムイオン電池に起因すると思われる火災被害額の推計を試みました。

試算にあたっては、ニュースサイトや新聞、雑誌、自治体の予算・決算資料、議会議事録等の公開されている情報をもとに廃棄物処理施設の火災の情報（被害箇所や程度）、復旧費用や処理費用、休止期間等の情報を収集し、火災被害額を算出するため、収集した情報のうち復旧費（災害共済金で給付される額と自治体が補填する額の合計）と復旧中の処理費用の合計と「火災被害額」と定義しました。

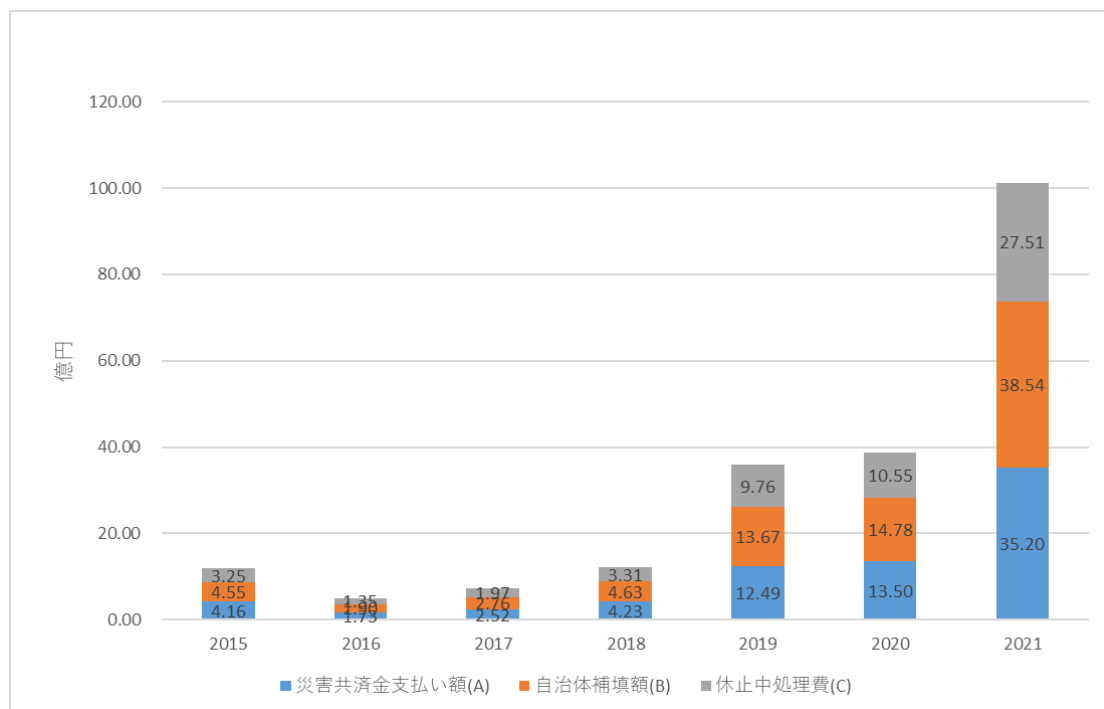


図 4-1 市有ゴミ処理施設火災の推計被害額

出典：各種媒体や公開情報等をもとに作成

推計の結果、市有ごみ処理施設火災の被害額は図 4-1 のように 2019 年度以降大きな伸びを示し、2021 年度には 101 億円程度に達しました。これより市有施設以外を含む日本全国の自治体が管轄する廃棄物処理施設における火災被害額を推計した結果、120 億円程度とみなされました。そのうち、リチウムイオン電池に起因する火災の割合を 80～90%と見積もった場合の火災被害額は 96～108 億円程度と推計されたため、2021 年度の被害額は 100 億円程度かそれ以上と考えられます。

一方、イギリスやアメリカでは対人口比で日本の 5 倍程度の被害額が確認されました。そこで、今回推計した火災被害額に含まれていない被害を振り返ったところ、以下のものがあると考えられました。

- 小規模火災被害（消防車の出動がない、保険請求をしない程度のもの）による復旧費用、補償費用
- 火災の原因調査費用
- 火災を予防するための追加の対策費用
- 操業への影響が少ないと判断され復旧に至っていない箇所の復旧費用
- 休止・休業中の補償費用（本来は得られるはずだった収益等を含む）

最後の休止・休業中の補償費用に関連して、金銭的な被害の定量化には至っていませんが、頻繁な稼働停止による処理の停滞も甚大な被害の一側面であると考えられます。発火等事故の検知を行った場合、停止・消火から再稼働までにかかるまでの通常の時間がわかった 6 施設のうち、10～15 分程度が 4 施設、30 分～40 分程度が 2 施設でした¹⁾。加えて、ある程度の発火の場合であっても停止せずに処理を継続するという回答も 1 施設からありました。発火等事故の程度にもよりますが、年に数十件以上の発火等事故の施設では、一稼働日あたり数件の事故発生（週に 1 日～4 日稼働の施設が多いため）に相当することになり、日常茶飯事のように稼働停止や迅速な復旧を求められている現状があります。

また、日本全国のリチウムイオン電池に起因する火災被害額を考えた場合、上記に加えて、自治体の廃棄物処理施設以外（小型家電リサイクル施設、産業廃棄物処理施設、容器包装再生処理施設等）の火災被害についても含めて考える必要があります。

以上から、日本国内の自治体管轄の廃棄物処理施設におけるリチウムイオン電池に起因する火災被害額は少なく見積もっても 100 億円程度と考えるのが妥当であり、火災被害の定義をもっと広げた場合や、民間の処理施設を含めた場合には、火災被害はさらに増大すると考えられます。

5. 代表的な処理プロセス

ここでは、リチウムイオン電池やリチウムイオン電池使用製品の混入するケースが比較的多い高速回転式破砕機による破砕処理を例に、よくみられる処理プロセスとリチウムイオン電池に起因する発火例について記載します。

代表的な処理プロセスの例として文献やヒアリングによって調べた結果を、自治体における不燃系廃棄物処理プロセスと小型家電リサイクルプロセスについてそれぞれ図 5-1 と図 5-2 に示します。

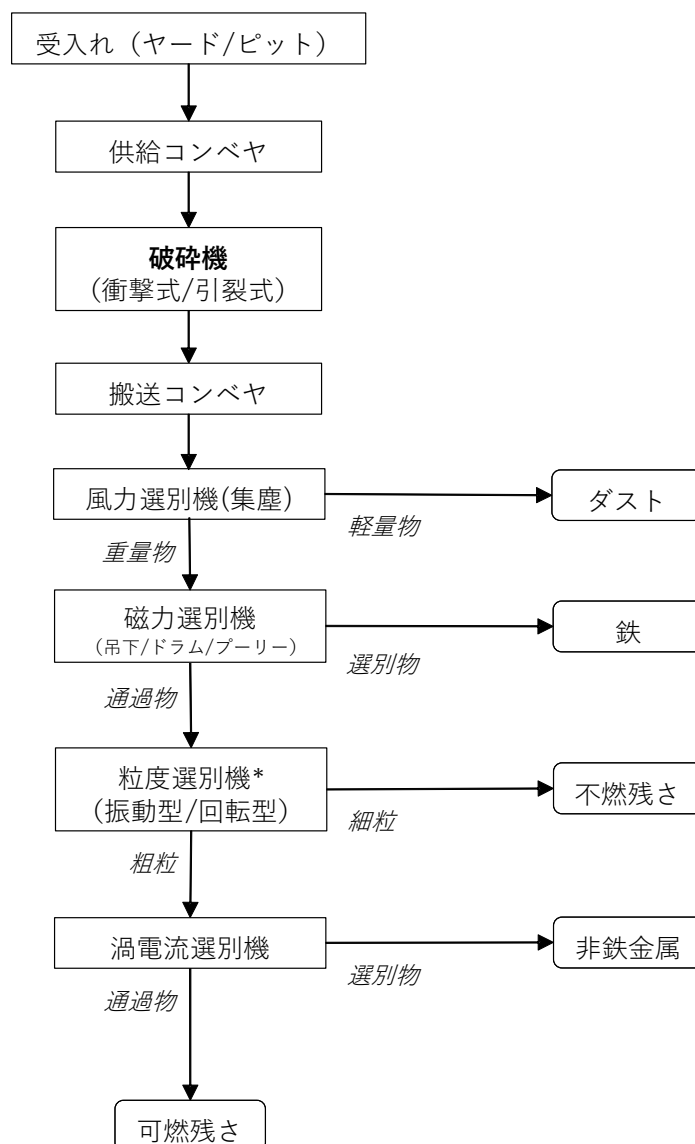


図 5-1 自治体における代表的な不燃系廃棄物処理プロセス
出典：文献^{6,7)}や破砕機メーカーへのヒアリング結果等をもとに作成

* 粒度選別について、細粒・中粒・粗粒 3 種類の場合は、中粒は渦電流選別へ、粗粒は可燃残さへ

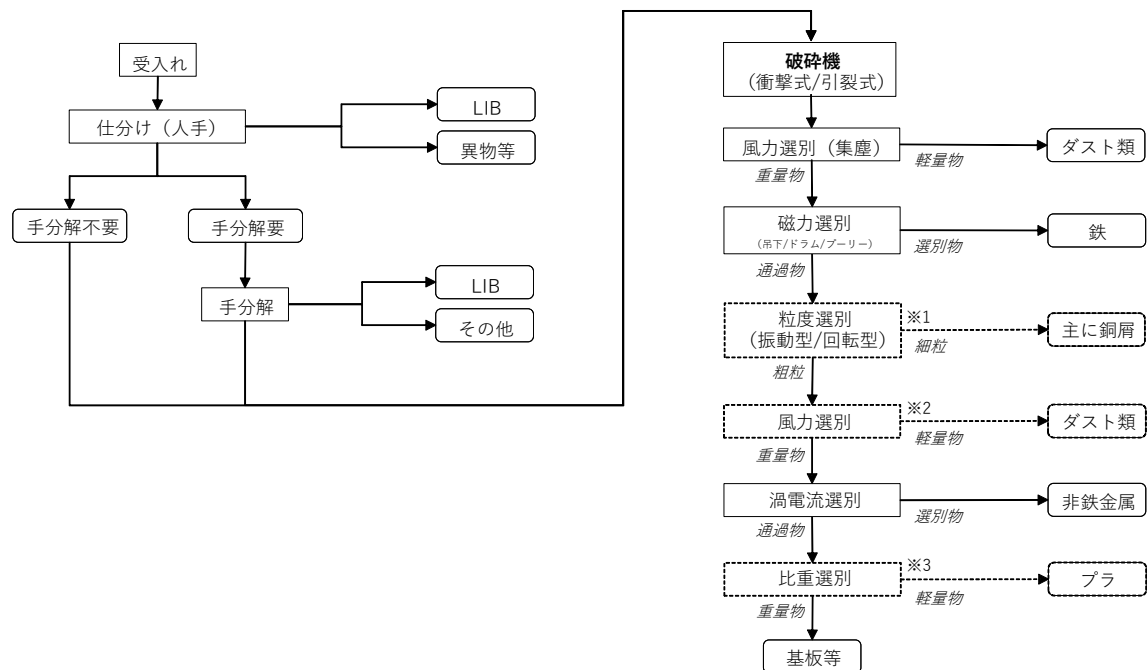


図 5-2 小型家電リサイクル施設における代表的な小型家電処理プロセスの例
出典：小型家電認定事業者へのヒアリング結果等をもとに作成

リチウムイオン電池による発火・火災事故については、収集段階で圧縮などの物理的衝撃を受ける以上、受入れ以降のどこでも発生する可能性があります。収集において圧縮を伴うパッカー車を避けて平ボディ車などを使った場合でも、積込みなどでの圧縮は避けられない上に、廃棄前に何らかの破損を受けている可能性も否定できません。しかしながら、頻度と影響の大きさを考えると、やはり破碎を中心に対策を考えるのが妥当です。

リチウムイオン電池の破碎による変形・破損で生じる発火には、大きく分けて直後発火と遅延発火があります。両者には明確な時間区分はないが、私たちの研究では 10 分程度ないし長い場合は 11 時間以上経過してから温度上昇に至る現象も確認しています。感覚的には、破碎機内部、破碎機出口、搬送コンベヤで破碎後 1 分程度以内に発生している発火を直後発火、破碎後数分程度経過してから搬送コンベヤの途中以降や選別物・残さの保管場所で発生している発火を遅延発火と考えてよいかと思われま。

処理プロセスの場所において想定される発火内容と影響をまとめると表 5-1 のようになります。

表 5-1 処理プロセスの場所において想定される発火内容と影響

発火場所	想定される発火内容	影響
受入れヤード・ピット	不燃ごみに混入したりチウムイオン電池やリチウムイオン電池使用製品が収集や保管による圧縮などの理由で発火し、受入れヤードやピット内で延焼	発火の頻度は低いですが、沈下までに時間を要し、大規模に延焼するリスクがある
破碎機内	衝撃式、引裂式などの外力によりリチウムイオン電池が変形・破損し直後発火	発火の頻度は非常に高い。通常、発火はすぐにおさまるか出口に移行するとともに、防火・防爆対策が取られているが、注意が必要である
破碎機出口	破碎機内で変形・破損したりチウムイオン電池が破碎機を出てから直後発火	発火の頻度が非常に高い。初期消火が遅れると延焼リスクあり
搬送コンベヤ、各種選別機	変形・破損したりチウムイオン電池がくすぶった状態で、搬送コンベヤで発火	発火の頻度が高い。初期消火が遅れると延焼リスクあり
選別物や残さの保管場所（可燃残さのピットを含む）	選別回収した磁着物や不燃残さ、可燃残さなどの保管容器内で混入したりチウムイオン電池が火種となり、数時間～数日経過以降（施設稼働時間外含む）でも遅延発火	発火の頻度は低いですが、保管場所がピットなどの場合、鎮火までに時間を要し、延焼して大規模火災になるリスクがある。鉄など選別物でも発火する場合がある。

6. 破碎方式の分類

主に文献⁸⁾によって整理された破碎方式ごとに、これまでの自治体ならびに小型家電リサイクル施設へのヒアリング等調査によって得られたリチウムイオン電池単体またはリチウムイオン電池使用製品が混入して破碎される傾向の程度を表6-1のように整理しました。

切断式の代表機種はギロチン式せん断破碎機で、廃棄物焼却施設の可燃性粗大ごみ前処理破碎として、また粗大ごみ処理施設の回転式破碎機の前処理破碎として多く用いられています。家庭等から排出されるリチウムイオン電池またはリチウムイオン電池使用製品が粗大ごみや不燃ごみに混入し、切断式破碎機に供される事例が多くみられます。

高速回転式の代表機種はハンマクラッシャ（衝撃・せん断併用回転式破碎機）で、不燃ごみや粗大ごみの破碎機として多くの自治体が導入し広く普及しています。そのため、不燃ごみや粗大ごみに混入するリチウムイオン電池やリチウムイオン電池使用製品が高速回転式破碎機に供される事例は非常に多くなっています。

低速回転式の代表機種はせん断破碎機で回転する1本または2本の水平軸にせん断刃を取り付けた一軸せん断破碎機や二軸せん断破碎機が主流です。軟質系長尺物の粗大ごみ処理を目的とした導入が比較的多く、家庭から排出される家具類など可燃性粗大ごみにリチウムイオン電池またはリチウムイオン電池使用製品が混入するケースが考えられます。

圧縮型は鉱山や砕石現場での使用の他、鉄筋入り廃コンクリートの一次破碎などにも使用されていますが、ここで対象とする一般廃棄物処理施設や小型家電リサイクル施設での使用としては不向きなタイプの破碎機です。摩擦機構である粉碎機は通常、破碎機構に含まれない⁸⁾のため、ここでは検討の対象外とします。

以上のように、切断式、高速回転式、低速回転式がリチウムイオン電池の発火事例でよくみられる破碎方式です。高速回転式が細破碎（二次破碎）として用いられる前に、切断式や低速回転式が粗破碎（一時破碎）として用いられることもあり、粗破碎の方が発火頻度が低そうにも予想されますが、私たちの研究では明確な頻度の違いは見つかっていません。なお、不燃ごみなどの収集袋に対して破袋機が用いられることもあり、基本的には低速回転式と同様のメカニズムになっていますが、破袋機での発火事例はあまり知られていません。

表 6-1 破碎機の分類

1.方式	2.メカニズム	3.対象物	4.代表機種	5. リチウムイオン電池単体または使用製品の破碎事例・可能性
切断式	せん断	強じん、繊維質	ギロチン	多い
高速回転式	衝撃が主	ぜい弱、摩耗性、繊維質	ハンマクラッシャ	多い
低速回転式	引き裂き	強じん、繊維質	二軸せん断式	多い

圧縮型	圧縮	ぜい弱	ジョークラッシャ	不明
粉砕機	摩擦		ミル	— (対象外)

出典：項目 1～4 は文献^{8,9)}、項目 5 は独自に作成

7. 発火・火災対策

ここでは、破碎処理によるリチウムイオン電池に起因する発火・火災の対策例について記載します。

まず対策を施す際の基本的な考え方として、

- 破碎機にリチウムイオン電池を極力混入させない
- 破碎機に混入した場合でも、直後発火や遅延発火を可能な限り防止する

の2点が肝要です。

前者のために排出に関する周知啓発、分別収集、事前選別、後者のために破碎機内の対策、モニタリングと消火、遅延発火の抑制などの対策を記します。

(1) 排出に関する周知啓発

リチウムイオン電池に起因する発火・火災事故を減らすため、排出者である市民および事業者に向け適切な排出を促すための周知啓発が重要です。周知啓発にあたっては以下の項目を考慮することが効果的と考えられます。

- ・どのような製品にリチウムイオン電池が使用または内蔵されているか
- ・リチウムイオン電池や使用製品の分別収集（収集場所、捨て方など）
- ・できるかぎり放電をして充電状態（State of Charge; SOC）を下げること
- ・絶縁すること

ただし、リチウムイオン電池の使用に関する表示や取外し可能な設計については、市民が対応できるような情報が十分与えられているとは言えない状況であり、国としての対応が求められます。

分別収集については（2）で記載します。

充電状態（SOC）に関しては、私たちの研究でも低SOCほど発火リスクが小さいことを示す試験結果を得てきました。回収場所では技術的に可能であればSOCを30%以下まで放電させるとする優良事例の紹介¹⁰⁾や、SOCを25%以下に減らすことで発火の可能性を大幅に減らすことができる¹¹⁾とする情報もあるように、SOCが小さい方が相対的に発火リスクが小さいことは明らかと言ってよいと考えられます。一方で、一部のモバイルバッテリーなどを除いてSOCの目安を知ることは困難であることなどから、現実的には消費者の協力は容易ではないとも言えます。

絶縁についても、取外しがされたリチウムイオン電池については有効です。ただし、取外しが困難な電池が多いことと、乾電池のように電極が明確とは限らないことから、容易ではありません。

関連して、一般社団法人JBRC（以下、JBRC）の自主回収の対象でなかった非純正のリチウムイオン電池については、これまでに経済産業省が以下のような注意喚起をしていまし

た。リチウムイオン電池の発火リスクや放電の重要性とともに、非純正の電池使用も控えるのが望ましいと考えられます。

経済産業省のプレスリリース

- 2021年10月29日「有限会社すみとも商店、ロワ・ジャパン有限会社が輸入したコードレス掃除機用非純正のバッテリーパックについて～充放電をしていない保管状態であっても発火のリスクがある大変危険な製品です～」¹²⁾
- 2021年12月17日「本年10月29日にご案内した有限会社すみとも商店、ロワ・ジャパン有限会社のコードレス掃除機用非純正のバッテリーパックについて掃除機運転による放電を御願います」¹³⁾

(2) 分別収集

リチウムイオン電池は資源有効利用促進法による指定再資源化製品として自主回収の対象であるため、この自主回収の促進とそれ以外の市町村による分別収集の2つがあります。

自主回収は、電池と使用製品のメーカー・輸入事業者などにリチウムイオン電池を含む小型充電式電池の自主回収が義務付けられていて、多くのメーカーなどがJBRCを通じて小型充電式電池のリサイクル活動を共同で行っています。環境省の対策集でも、公共施設におけるJBRCの回収ボックスの設置などが紹介されています³⁾。しかしながら、回収場所（電器店などの排出協力店）のわかりにくさ、対象外の品目や電池（非会員メーカーを含む）、電池一体型製品のために取り外せない電池、表示のない製品、回収率の目標がないことなど、多くの課題があります^{1,14)}。

また、JBRC以外にもパソコンと携帯電話は一般社団法人パソコン3R推進協会（以下、PC3R）とモバイル・リサイクル・ネットワーク（以下、MRN）による自主回収がそれぞれ行われています。ただし、リチウムイオン電池の回収量は、JBRCが589t¹⁵⁾（2023年）、PC3Rが35t（ノートパソコン回収量13.3万台¹⁶⁾からリチウムイオン電池0.26kg/台として推計、2022年度）、MRNは電池として109t¹⁷⁾（2022年度）、小型家電からは密閉形蓄電池として298t¹⁸⁾を合計すると年間約千tであり、私たちの推計によるリチウムイオン電池の年間排出量8,200t程度を分母とした回収率は10%台に留まっています。この他、加熱式たばこ、電気かみそり、電子機器などの自主回収を個社や団体が実施している場合もありますが、2024年3月時点で回収実績を公表している事例はなく、回収量は極めて少ないと考えられます。

このようにメーカーによる十分な自主回収が期待できない状況で、事故防止のためにやむを得ず対策を始める市町村が増えつつあり、その事例が環境省の対策集に紹介されています³⁾。具体的には、「リチウムイオン電池（を含む充電式電池、以下同じ）」と「リチウム

イオン電池を取り外せない小型家電（いわゆる一体型製品）」の分別収集を始めた市町村が多く、東京都府中市が「危険ごみ」、東京都武蔵野市が「危険・有害ごみ」、新潟市が「特定5品目」（有害危険物から改称）として、それぞれ分別収集を始めています。

また、埼玉県坂戸市は2021年12月から環境省のモデル事業として「リチウムイオン電池」（乾電池、ライター等と一緒に）と「リチウムイオン電池が外れない小型家電」を燃やさないごみと分けて分別収集する取組みを始めていた³⁾が、よりわかりやすくするために「リチウムイオン電池」と「充電式小型家電等」について乾電池・ライター、スプレー缶等と合わせて「発火性危険物」としての分別収集を2024年4月から開始しました¹⁹⁾。同様の分別区分は愛知県瀬戸市でも実施しています。

この他、「リチウムイオン電池」について、東京都町田市と千葉県市川市では「有害ごみ」、名古屋市では「電池類」として、神奈川県藤沢市では（モバイルバッテリーと加熱式たばこを合わせて）「特定処理品目」として、それぞれ分別収集を行っています。特徴的なものでは、北九州市が2023年7月から「リチウムイオン電池」の回収ボックスを市内88カ所の小型家電回収ボックスに併設を始めたというものもあります。また、「一体型製品」については、鳥取中部ふるさと広域連合では「有害ごみ」として分別収集を始めています。

なお、私たちの調査¹⁾では、リチウムイオン電池使用製品（小型家電）の重量は不燃ごみ全体の0.3%程度であり、リチウムイオン電池自体の重量は0.06%（製品重量の約20%）に過ぎなかったにもかかわらず、発火等発生事故の80~90%程度の原因となっている実態が明らかになりました。（不燃ごみと粗大ごみの収集区分や処理量は自治体によっても異なりますが、リチウムイオン電池が不燃ごみの0.3%という比率は不燃・粗大ごみのおよそ0.2%程度にほぼ相当すると考えられます。）2021年度時点の坂戸市での分別収集に関する限られた調査結果からは、「リチウムイオン電池が外れない小型家電」の分別収集で不燃ごみへの混入を2割程度削減する効果があると考えられました。2割程度は十分高い割合とは言えないため、住民への周知・啓発によってさらに混入防止が進むことが期待されます。

（3）事前選別

事前選別は、分別収集の有無にかかわらず不燃ごみなどに混入したリチウムイオン電池使用製品を、主に破碎処理の事前に職員の手選別で除去するものです。一般にこのような手選別は土間と呼ばれる広い屋内スペースと人員や費用が必要なため、実施可能な処理施設は限られます。

環境省の対策集によれば、このようなリチウムイオン電池使用製品の選別は、府中市、新潟市（搬入ごみが対象）、町田市および市川市で強化または追加したとされています³⁾。私たちによる現地調査によると、町田市では破碎前だけでなく破碎後においても、ともにコンベヤ上で手選別が実施されていました。

この他、北九州市では2023年10月から始まったプラスチックごみの一括回収に際して、

破袋・選別後の重量物に対する高磁力選別を適用してリチウムイオン電池が含まれたプラスチック製品の選別を行っています。

私たちの研究では、発火リスクはSOCや充電電力量（リチウムイオン電池に残っている電力量）に影響することが考えられました。事前選別ではすべてのリチウムイオン電池使用製品を見つけて選別することは難しいですが、充電電力量も大きくて比較的に見つけやすい大きさの「電動アシスト自転車」「ノートパソコン」「掃除機（コードレス、ロボット）」を除くだけでも一定の大きな効果を上げるといえます。

また、廃棄物等に混入したリチウムイオン電池の選別除去技術として、近年、X線を利用した検知システムがあります。これは物体がX線を通じた際の波形や画像からリチウムイオン電池を検知するもので、容器包装リサイクル施設での導入が見られ始めています。

（４） 破砕機内の対策

廃棄物処理法施行規則に定める一般廃棄物処理施設の維持管理基準によれば、破砕施設にあつては不適物混入防止の連続的な監視が示されていますが、現実的には困難です。また、廃棄物処理施設の性能指針については、「廃棄物処理施設整備国庫補助事業に係るごみ処理施設性能指針」（平成20年3月31日環廃対発第080331003号、2008年）があります。この中には「VI ごみ破砕選別施設」がありますが、ごみ処理能力、破砕物の性状、回収物の純度、安定稼働に関する事項と性能確認方法が記述されているだけで、具体的な事故防止対策は記述されていません。

文献⁸⁾によれば、不燃ごみ等の破砕処理施設における防爆対策は、廃棄物に混入するスプレー缶やカートリッジボンベなどの可燃性物質を対象に次のような方式が採用されてきました。すなわち、高速回転式破砕機における希釈空気吹込方式と水蒸気吹込方式や、低速回転式せん断破砕機による前処理（前処理方式）が主な方式です。

希釈空気吹込方式と水蒸気吹込方式は可燃性ガスによる燃焼反応に対する破砕機内の防爆対策として、また前処理方式は後段の破砕機に入る前に可燃性ガスを拡散させることを目的に、以下の燃焼の3条件の1つの要素を外すことを目的としています。

- 可燃性ガスの爆発範囲を外す
- 酸素濃度を爆発限界濃度以下に保持する
- 着火源をなくす

リチウムイオン電池による爆発事故はあまり聞かれませんが、基本的に上記のような防爆対策は有効と考えられます。上記の燃焼の3条件を考慮した設計とすることが重要と考え、あくまで参考情報として、それぞれの防爆方式を表7-2にまとめました。なお、破砕機の種類や処理量によっても関係することが考えられるため、破砕機メーカーなどとの相談が望まれます。

表 7-2 防爆方式の比較

項目	希釈空気吹込方式	水蒸気吹込方式	前処理方式
1.防爆機構	可燃性ガス濃度希釈	酸素濃度低減	前処理破碎ガス追出
2.防爆原理	爆発下限濃度以下	爆発限界濃度以下	混入可燃ガス低減
3.事前除去	必要度大	あった方が良	あった方が良
4.爆発規模	事前除去の程度によっては大規模爆発になることもある	小規模(1日で復旧できる場合が多い)	小規模(前処理破碎機での可燃性ガスの処理が必要)
5.操作性	非常に簡単	容易	非常に簡単
6.制御方法	ガス検知によりごみ供給量調整	酸素濃度検知により蒸気量調整 排風機により破碎機内静圧調整	ガス検知によりごみ供給量調整
7.その他	日処理量 50t 以下で一般的。	日処理量 50t 以上で、横型の高速回転式の場合に導入しやすい。ただし、縦形の場合は空気が動くので蒸気を送るのは経済的ではない。	

出典：項目 1～6 は文献⁸⁾より抜粋、項目 7 はヒアリング等により記載

① 希釈空気吹込方式

破碎機内に空気を吹き込んで機内の可燃性ガス濃度を爆発下限濃度以下に薄めることを目的に行われます。大量の空気を送風するため大型の集塵機が必要ですが、小規模な破碎施設では数多く採用されています。リチウムイオン電池の変形・破壊によって発生・噴出する可燃性ガスが多い場合、その濃度低減により、発火の抑制に一定の効果がある可能性があります。

② 水蒸気吹込方式

一定量の水蒸気を破碎機内に吹き込み機内の酸素濃度を爆発限界濃度以下(約 11%)に保持し、混入する可燃性ガス量の変動しても雰囲気的に爆発しない状況にします。破碎機内でのリチウムイオン電池の発火の抑制に一定の効果がある可能性があります。ただし、蒸気源としてボイラーを設置する必要があること、破碎機開口部からの水蒸気の拡散防止対策や水蒸気の凝縮・結露の対策が必要です。

③ 前処理方式

廃棄物に混入するスプレー缶やカートリッジボンベ等を衝撃式高速回転破砕機に投入する前に容器を壊して引火性ガスを拡散する目的で低速回転式せん断破砕機が実用的に用いられています。リチウムイオン電池に対しても筐体を変形・破壊することで内部の可燃性ガスを拡散させる効果は期待できますが、同時に発火するリスクもあります。また、実用的に用いられる低速回転式せん断破砕機の刃幅はスプレー缶の直径（65mm）を考慮して50mm程度に設計されているため、小型のリチウムイオン電池などの種類によっては破砕機を通過し変形・破壊を免れることも考えられます。

（5）モニタリングと消火

廃棄物処理施設における防火・消火設備と機器として、文献²⁰⁾には、熱感知器、煙感知器、炎感知器等のうち適切なものの併用設置と散水設備の設置が望まれることが記載されているほか、大規模施設の貯留ピットでは赤外線カメラを使用した高性能な火災検知システムやこれらのシステムと連動した自動消火システムの設置に言及しています。なお、消防法における防火対象物に廃棄物処理施設は該当します（消防法施行令別表第一の12項（イ）：工場又は作業場、15項：全各項に該当しない事業場）が、機械設備は対象とされていません。そのため建物以外で、リチウムイオン電池による発火・火災が多く発生する破砕機や搬送コンベヤのような機械設備に対しては、別途対応の検討が必要になります。

分別収集や選別の徹底によってもリチウムイオン電池の完全な混入防止は難しく、破砕処理で発火・火災事故を発生した場合、モニタリングの強化によって事故を早期に発見する必要があります。具体的には、ITVカメラなどを通じた目視による他、火炎（炎）、熱・温度、ガスなどを検知する方法が取られており、散水・消火設備の増設などとあわせて対策を取られることが多いです。なお、処理施設において破砕や搬送段階を主とした検知方法（ITVカメラ以外）と検知時の対応を尋ねた結果、全11施設の中で、検知方法は火炎（紫外線または赤外線）とガス（可燃性ガス、COなど）がともに9施設、温度・熱が5施設、煙が1施設でした¹⁾。この他、11施設の中で検知方法を有していない施設が1つありました。

火炎検知器の設置や増設が最も一般的であり、発火・火災等事故の発生したコンベヤやピットにおいて、武蔵野市、新潟市、名古屋市、および市川市で実施されています。文献⁷⁾によれば、赤外線式は受光部の汚れに対して非常に強く、紫外線式は赤外線式に比べ応答性が速いとされています。リチウムイオン電池は遅延発火の場合があるため、搬送コンベヤ上に10mなど一定間隔置きに設置するのが有効です。

赤外線サーモカメラや放射温度計を含む温度検知器（温度センサー）の設置も武蔵野市、静岡市、および名古屋市で活用されており、北九州市におけるプラスチックごみの破袋後の搬送コンベヤ上の温度センサー設置も同様のものとみられます。赤外線サーモカメラは高価なため、1施設の残さ保管場所で用いていたほか、別の1施設で稼働停止中の調査用にポ

ータブルの機器を利用していました¹⁾。

可燃ガス検知器は従来からスプレー缶などによる防爆目的で設置されることも多かったですが、リチウムイオン電池起因が疑われる事故を契機としても、静岡市や名古屋市で実施されています。また、消火用噴霧を行う CO 濃度基準の引き下げを行った町田市¹⁾の事例もあります。なお、ガス検知は設置方法によって 20~30 秒程度のタイムラグがあるため、リチウムイオン電池起因の発火・火災に対しては直接有効と考えられません。

以上の他、不燃・粗大ごみのピットで AI による煙検知システムを導入した静岡市や、検知器（温度と光）が作動してコンベヤが自動停止したために消火ができずに火災が拡大した経験から、検知器のプログラムを変更した府中市の事例もあります。最近では、AI による火花検知システムなども開発されています。

一方、消火については、スプリンクラー設備、屋内消火栓設備、消火器などが消防法で定める設置基準に従って廃棄物処理施設には設置されています。ただし、リチウムイオン電池起因の発火の多い破碎機内部や搬送コンベヤのような機械設備に対しては、モニタリングと同様に施設の判断で設置や運用がされています。

前述のように私たちの調査で調べた 11 施設の中では、自動消火が 8（散水が 7、消火器が 1）、手動消火が 2、不明が 1 という結果でした。手動消火は ITV カメラや CO 検知器などを人が確認して散水を行うとのことでした¹⁾。

なお、製品安全に詳しいあるメーカーの担当者によれば、破碎機などで発火したリチウムイオン電池（または使用製品）に対しては、手動消火は危険なため極力避けるべきということでした。リチウムイオン電池が単電池（セル）でなく組電池（パック）の場合、それまで無傷であった別の電池に熱が伝わり、手動消火の最中に新たな電池が発火や破裂などを起こして作業者が負傷してしまう可能性があるためです。予算などの制約があることが考えられますが、できるだけ早期に自動消火を導入頂くことが望まれます。

また、屋内消火栓設備は一般に 1 階に設置されていてホースの長さも限られます。特に搬送コンベヤのように施設内で高さのある場所に対して効果的な消火・散水ができるよう、消火・散水設備は適切な位置に設置することが望ましいです。

ごみ貯留ピット（不燃系廃棄物、可燃残さなど）においては、大規模火災のような甚大な影響を防ぐ必要があります。このような場所では、発火監視装置と自動放水銃装置を組み合わせた自動放水銃システムが最も適しています²⁰⁾。

最後にやや古いですが、下表ではリチウムイオン電池による事故後の措置の事例を示します。

表 7-3 リチウム電池等による事故後の措置等（平成 27～29 年度）²¹⁾

施設	推定起因物質	物的要因	事故後の措置	恒久措置
焼却施設	リチウムイオン電池等の発火性物質	発火原因の特定は不可能であったが、リチウムイオン電池等の自然発火の可能性のある物質が可燃ごみに混入していたことが発火の原因となったと推測される。	県への事故報告、報道機関への発表	市広報で分別の徹底に関する市民への周知を行った。受託者との協議により、施設内が無人になる時間帯が生じないようにするため、運転停止期間の夜間の時間帯も2人以上の人員を配置するように、委託業務の実施条件の変更を行った。
破碎施設	リチウムイオン電池	破碎処理の工程で、スプレー等の爆発事故防止のため衝撃せん断式高速破碎機に投入する前に低速回転式二軸破碎機で粗破碎をしています。その工程でリチウムイオン電池を変形させたことによる火災とされます。	二次電池を使用している製品については、別途収集に変更した。	監視カメラ、モニター、散水栓の増設
	リチウムイオン電池による発火	防爆のために導入した低速回転式破碎機でリチウムイオン電池を変形させてしまったことが原因とされます。	—	—
	小型二次電池（小型充電式電池）	充電式電池が製品に組み込まれ、消費者で取外しが困難な製品。ヒットした商品の電池パック交換による火災が急増中（コードレス掃除機の電池パック及び過熱式タバコが原因の火災が急増中）。充電式電池の処理方法の徹底不足および回収場所の不足。	翌9月29日に朝から無負荷運転にて設備の確認。問題がなかったことから通常運転を再開。	現状の消火設備では死角になる部分があることから、散水ノズルと検知器を増設しそれに伴う給水設備の整備を平成30年度に施行予定。
	乾電池等の破碎による発火	リサイクルプラザに搬入された「燃やさないごみ」の処理工程において適正な分別がなされずに混入していた可燃性ガス又は可燃性液体が残留していた容器を粗破碎機で破碎した際に、混入していた乾電池等の破碎時の火花により発火したと考えられる。	本設備出口側に散水ノズルを新たに設置。	火災の発生原因の一つにごみの不適正な排出による混入が推定されているため、特に乾電池・ライター・ガスボンベ・スプレー缶の正しい分別と適正な排出を住民へ向け協力依頼。
	リチウムイオン電池	粗大ごみ処理施設にリチウムイオン電池の混入。当町ではリチウムイオン電池は処理できないものとして引き受けをしていない。	火災原因物質の捜索・異物混入の発生の無いよう指導	広報誌にて火災の再発防止の啓発
選別・梱包	リチウムイオン電池による発火	防爆のために導入した低速回転式破碎機でリチウムイオン電池を変形させてしまったことが原因とされます。	市報等による市民への注意喚起及びごみの収集方法変更	—

（6）遅延発火の抑制（リチウムイオン電池の物理選別など）

破碎後の遅延発火を可能な限り防止する方法としては、先述したモニタリングの強化、物理選別、およびソフト対策が重要となります。すなわち、搬送コンベヤ上のモニタリングで遅延発火を早期に検知し、消火設備（散水・消火剤等）による自動消火を行います。また、選別回収物へのリチウムイオン電池の混入への対策としては先述した物理選別や手選別の組合せが有効です。

自治体と小型家電リサイクル施設の代表的な処理プロセスに対する、リチウムイオン電池に起因する発火・火災対策を施した処理フロー図の例を、以下の図 7-1（事例 1）、図 7-2（事例 2）にそれぞれ示します。

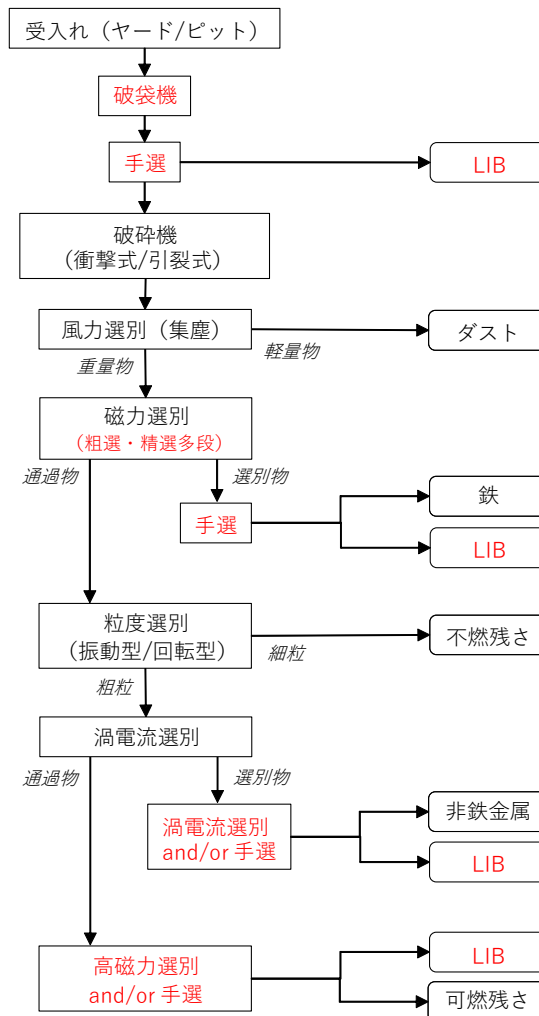


図 7-1 自治体の代表的な処理プロセス (図 5-1) に対する、破碎後の遅延発火予防対策を加味したフロー案 (破碎前の混入防止対策を一部含む) (事例 1)

事例 1 における対策のポイント：

- 遅延発火を極力防ぐため、破碎機の後段の搬送コンベヤ上で炎・煙・温度検知器のいずれかまたは組合せで発火を早期検知し、消火設備 (散水・消火剤等) による自動消火を行う。また、破碎機を通過したリチウムイオン電池については可能な限りピッキングや各種選別機 (磁力選別機、渦電流選別機) あるいはそれらの組合せを配置。
- 破碎機の後段の磁力選別では非磁性体の巻き込みを極力減らすため、粗選 (1,500 ~ 3,000G 程度) と精選 (8,000G) の多段設置とすることが望ましい。

- リチウムイオン電池の物理選別精度を維持するためには搬送コンベヤを流れる破碎物の層厚は無い、あるいは極力薄い層厚（数センチ程度）を保つことが重要。

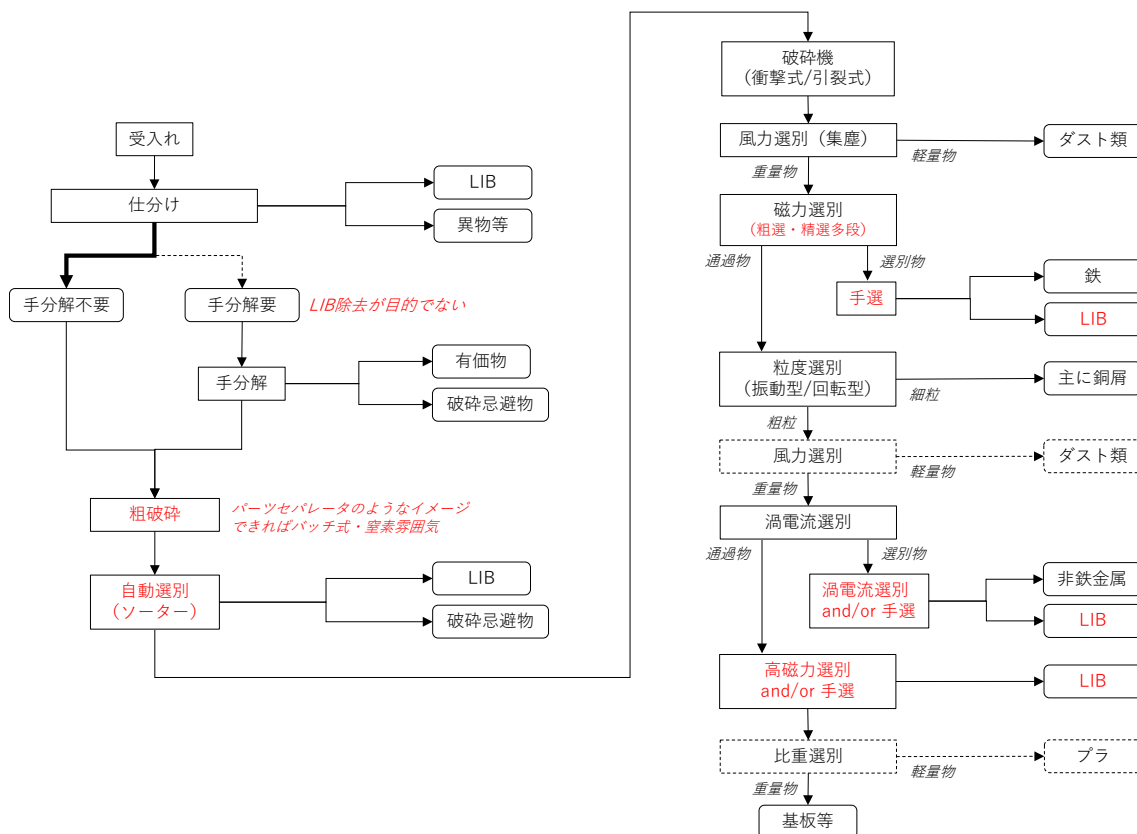


図 7-2 小型家電リサイクル施設の代表的な処理プロセス（図 5-2）に対する、原料の持つ資源性を確保（有価物の最大限回収）しつつ破碎前の混入対策として粗破碎・自動選別機を考慮した場合のフロー案（事例 2）

事例 2 における対策のポイント：

- 破碎機投入までの追加対策では、仕分けソーターや粗破碎機、自動選別機などの設備導入にかかるコスト増と、伴う仕分けや手分解に要するコスト減（主に人件費）が判断材料のひとつとなる（なお、設備導入してもリチウムイオン電池の破碎機混入がゼロになるわけではない）
- 自動選別は日進月歩の技術領域であり、今後の技術開発が望まれている。

破碎機から排出され一定時間を経た後に発火する遅延発火は、搬送コンベヤ上や各種選別機内、または鉄やアルミといった各種回収物、残さ物の保管容器内でも発生する可能性が

あります。遅延発火は直後発火より頻度は低いものの、甚大な影響を引き起こす可能性があります。抑制するための対策が必要です。最も確実な対策は作業者が選別ライン上を流れてくるリチウムイオン電池を視認し取り除くことですが、人手の作業負荷を軽減できる可能性のある方法として、物理選別の有効性について検証しました。詳細は巻末の参考情報に記載し、ここでは要点のみ示します。

- 金属物の選別方法として、一般的には磁性物を磁力選別機で、非鉄金属を渦電流選別機で分離可能なことが知られています。多くの不燃系廃棄物の処理施設でもこれらの選別機を用いて鉄やアルミなどが回収されています。今回、3種類のリチウムイオン電池（円筒型、角型、ラミネート型）を対象に、磁力選別機および渦電流選別機の各試験機で選別可能か、またその要因について検証した結果、以下のことが明らかになりました。
- 磁力選別試験の結果、同一条件下において選別されるリチウムイオン電池個体と選別されない個体が存在することがわかりました。その要因としては、電池の重量、および電池に含まれる磁性物の重量割合が選別可否に影響を与えている可能性が示唆されました。
- リチウムイオン電池を除去した使用済み小型家電の破砕物にリチウムイオン電池を混ぜたサンプルを用意し、同様の選別試験を行ったところ、円筒型リチウムイオン電池は高磁力選別で選別され渦電流選別で選別されないこと、対してラミネート型電池は高磁力選別で選別されず渦電流選別で選別されることがそれぞれ確認されました。
- 渦電流選別において、ラミネート型や一部の角型電池はアルミ等金属と共に選別され回収物に混入する可能性があり、その対策として渦電流選別機の後段にもう1台の渦電流選別機を設置し仕切板の位置を適切に設定するか、あるいは選別物搬送コンベヤ上で人手によるピッキングを行うか、その併用が考えられました。
- 物理選別の精度を維持するためには搬送コンベヤを流れる破砕物の層厚は無いか、あるいは極力薄い層厚（数センチ程度）を保つことが重要です。そのためには、振動コンベヤを各種選別機の前段に設置して搬送物を均すことが有効と考えられます。
- 今回試験をした高磁力選別機や渦電流選別機のように、従来技術で比較的安価に処理能力が高い設備を入れることで、後段のピッキングや電池の混入対策といったコスト高な手法の適用範囲を小さくでき、トータルの設備導入コストや運用コストを低減できる可能性があります。

（7）その他のソフト対策

先述した設備上の対策も含め、ハード的な対策によってリチウムイオン電池の発火を100%防止することは不可能です。そのため、発火の予防とともに、発火検知を如何にして早期に行い、かつ、検知後の初期消火を如何にして迅速に行うかが重要になります。

廃棄物処理施設におけるソフト対策について、「ごみ処理施設の火災と爆発事故防止対策マニュアル」²⁰⁾では「過去の事件事例の分析による危険箇所や危険度の特定、危険箇所の最適な監視方法の決定、事故予防や事故発生の適切な対応手順、適切な施設運転や維持管理を行うための教育や訓練の方法等施設を適切に運転し、維持管理するための研究やそれらの優れたソフトウェア技術」がこれまで十分に取組みられてこなかったことと、このようなソフトウェアに重点を置いた研究が急務であるとされています。「ごみ処理施設の火災事故防止のための防火安全マネジメントマニュアル」²²⁾においても、防火安全マネジメントシステム文書、危険度の把握・評価（リスクアセスメント）、危険予防の改善目標と実施計画の策定、緊急事態対応、防火管理体制などが紹介されています。

(8) 選別除去したリチウムイオン電池の取扱い

選別除去したリチウムイオン電池は、安全に放電をした上で専門の処理業者に引き渡すことが推奨されます。

● JBRC

- JBRC 会員企業（電池メーカー・機器メーカー・輸入メーカー）の電池が回収対象
- 資源有効利用促進法の対象範囲または JBRC が認める機器に使われるニカド電池、ニッケル水素電池、およびリチウムイオン電池
- 打痕や圧壊など外部ダメージの無い電池について、短絡防止を的確に実施し、専用のペール缶またはドラム缶に入れて排出（ドラム缶使用の場合は事前連絡が必要）

● 野村興産株式会社

- 乾電池やボタン電池だけでなく、リチウム電池及びリチウムイオン電池を含む充電式電池や充電式電池を内蔵した製品の処理も可能
- リサイクルマークが無い充電式電池の受け入れが可能
- 多種多様な電池が混在した状態でも受け入れが可能
- 充電式電池を内蔵した製品の受け入れが可能（ただし、一部は充電式電池の取り出しが必要）
- 発火し、消火した充電式電池の受け入れが可能

なお、膨張変形したリチウムイオン電池は強い衝撃を与えないよう注意しながら放電し、放電後は適切なルートで処分することが望ましいです。リチウムイオン電池を安全に放電する方法として、経済産業省は塩水処理を紹介しています¹²⁾。すなわち、塩分濃度を3%程度に調整した塩水の中にリチウムイオン電池を投入し、4日間程度放置することで

放電が完了します。その際、作業は屋外など換気のよい場所で行い、また、金属のサビ等を含む汚水となるため、バッテリーを取り出す際や廃液や沈殿物を廃棄する際には、念のためゴム手袋等を装着し、素手で触れないよう注意する旨が紹介されています。

リチウムイオン電池が膨張するとどうなる？²³⁾

リチウムイオン電池は、化学反応を利用して電力を生み出しています。電池が古くなると、この化学反応が完全に行われなくなり、ガスが発生（アウトガスといいます）してバッテリーが膨張することがあります。またバッテリーの内部レイヤーが損傷や欠陥によって適切に分離されていない場合、アウトガスの発生や膨張、さらには発火が起こる可能性もあります。アウトガスの原因としては、製造時の欠陥、過充電、過温などが挙げられ、これらは電池内部で不要な化学反応を引き起こす可能性があります。

8. おわりに

本技術資料は、近年頻発・増加しているリチウムイオン電池起因の発火・火災事故に対して、自治体の廃棄物処理施設などで対策を実施する上で参考にして頂くために、推進費研究の成果などをまとめたものです。研究を通じて、リチウムイオン電池起因の事故はまだ知見が非常に少ないとともに、対策も容易ではないことがわかってきました。そのため、手順通りに実施すれば十分な対策が実現するようなマニュアルではなく、あくまで技術資料（ガイドライン）としてとりまとめた次第です。参考資料に示すような環境省の対策集や各種団体などによる資料ともあわせて、参考にして頂ければ幸いです。

また、内容の修正や更新は適宜行う場合がありますことをご了承下さい。

本技術資料は環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費「リチウムイオン電池等の循環・廃棄過程における火災事故実態の解明と適正管理対策提案」(3-2101、JPMEERF20213001；2021～2023年度)により実施しました。本研究にご協力頂きました環境省、埼玉県坂戸市をはじめとする市町村、井上求氏、日本アビオニクス株式会社、新コスモス電機株式会社、株式会社コベルコ科研、日本エリーズマグネチックス株式会社、小型家電リサイクル認定事業者、各種破碎機メーカー、各種選別機メーカーをはじめ関係各位に心より謝意を表します。

参考資料

(1) リチウムイオン電池²⁾

リチウムイオン電池とは、正極にリチウム複合酸化物、負極に炭素を用い、リチウムイオンが移動することで充電や放電を行う二次電池（充電式電池）です。1990年代に登場した新しい電池であり、軽量でありながら、高電圧・大電力、しかも自己放電率の少ない、すぐれた電池とされています²⁵⁾。携帯電話、デジタルカメラ、ノートパソコン、また最近ではタブレット端末や電気自動車にも使用されています。

正極はコバルト酸リチウム、マンガン酸リチウム、ニッケル系、三元系、リン酸鉄リチウムなどの材料が用いられています。形状は、金属製の外装材料を使用する円筒型または角型の単電池（セル）に限らず、組電池（パック）も多く見られる。電解液としては有機溶媒が最も多く用いられていますが、ゲルポリマー電解質を用いた薄型・軽量の特徴を有するリチウムイオンポリマー電池も1999年に製品化されています²⁶⁾。

なお、資源有効利用促進法では同法施行令別表第6で定める「密閉形蓄電池」において、密閉形鉛蓄電池、密閉形アルカリ蓄電池（ニカド電池、ニッケル水素電池）と並んで「リチウム蓄電池」と称していることから、経産省や環境省は「リチウム蓄電池」の用語を用いることが多くなっています。一方で、同じ経産省でも製品安全の分野では電気用品安全法の対象である「電気用品」として、同法施行令別表第二に「リチウムイオン蓄電池」を挙げており、消防法でも同法別表第一の第四類（引火性液体）に電解液が該当するとして「リチウムイオン蓄電池」の用語が用いられることが多いです。また、JISではJIS C8711「ポータブル機器用リチウム二次電池」やJIS C62133-2「ポータブル機器用二次電池の安全性—第2部：リチウム二次電池」などで「リチウム二次電池」が用いられています。本技術資料では原則として一般にもわかりやすい「リチウムイオン電池」と称しています。

(2) リチウムイオン電池に関連する規制²⁾

リチウムイオン電池の回収について定めているのは、前身の再生資源利用促進法から2001年に改正施行された資源有効利用促進法に基づく自主回収です。資源有効利用促進法では、同法施行令別表第6で密閉形蓄電池（密閉形蓄電池を部品として使用する製品29品目を含む）とパソコンを指定再資源化製品に指定して、製造事業者及び輸入販売事業者が自主回収及び再資源化を実施することを義務付けています。

廃棄物処理法においては、広域認定制度によって、認定された製造事業者等がリチウムイオン電池を含む二次電池（密閉形蓄電池）の収集運搬及び処理を行う場合があります。広域認定制度は2003年の同法改正によって定められた特例であり、拡大生産者責任に則

り、製造事業者等が自社製品の廃棄物の処理を広域的に行うことにより、適正処理を確保することを目的として、廃棄物処理に関する許可を不要とするものです。同法第9条の9（一般廃棄物）及び第15条の4の3（産業廃棄物）で定められており、現在までにJBRCや一部製造事業者等が一般廃棄物や産業廃棄物に対して広域認定を受けています。

安全性に関して、リチウムイオン電池は内部または外部の短絡、過充電、過放電、加熱によって熱暴走を引き起こして火災につながる可能性があり、そのメカニズム解明や対策のために国内外で多くの研究やレビューが行われてきました。また、リチウムイオン電池は高温状態で不安定化しやすい電極材料や可燃性の有機溶媒を使用しており、ノートパソコンや携帯電話などに搭載されたものが充電を含む使用段階で発火・発煙事故が発生していることが、2007年以前に問題になっていました²⁶⁾。このため、2007年11月に電気用品安全法が改正され、法第二条で「蓄電池であって、政令で定めるもの」が電気用品の定義に追加され、政令の別表第二で「リチウムイオン蓄電池であって、単電池の体積エネルギー密度が400ワット時毎リットル以上のもの（自動車用、原動機付自転車用、医療用機械器具用及び産業用機械器具用のものを除く）」が規制対象とされました。

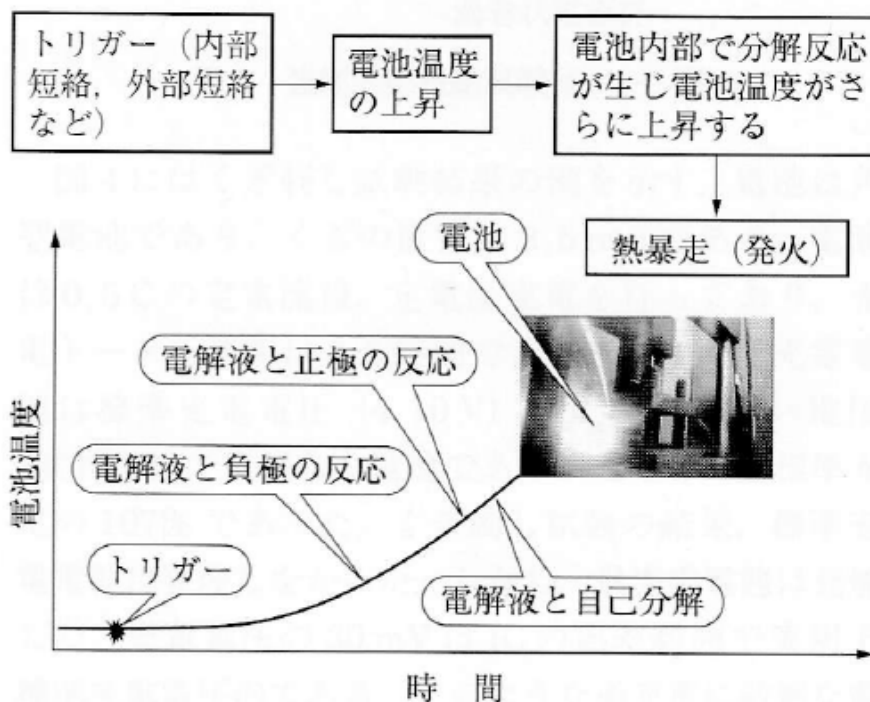


図9-1 リチウムイオン電池が発火に至るメカニズム²⁵⁾

電気用品安全法では、「電気用品の技術上の基準を定める省令の解釈について」（技術基準解釈）という通達が示されており、リチウムイオン電池の場合は同技術基準解釈の別表

十二で、2022年12月から国際規格（IEC規格）に準拠したJIS規格として、技術基準と整合する「ポータブル機器用二次電池の安全性—第2部：リチウム二次電池（JIS C 62133-2: 2020）」が適用されています。その中で「単電池及び組電池を、意図する使用及び合理的に予見可能な誤使用の双方の場合に安全であるように設計し、製造しなければならない」とされており、予見可能な誤使用として過酷な条件も想定しているものの、あくまで使用段階における安全性に留まるものとなっています。

また同法では製造・輸入事業者に対して、技術基準適合義務と表示について定めており、リチウムイオン電池の場合は自主検査などで技術基準に適合したことを示すPSEマーク（丸型）の表示のないものは販売禁止となっています。

最近の一例として、JBRC会員でもある有名メーカーのコードレス掃除機に関して、輸入事業者2社が販売した非純正リチウムイオン電池から2021年9月までに計9件の重大製品事故が発生した事案があり、充放電をしていない状態でも発火のリスクがありました。うち1社は同年10月に倒産して回収不可能となったため、保有していた消費者に対しては放電してから市町村への排出を、市町村に対しては処分委託などを同年12月に依頼することとなりました^{12,13)}。安全管理が不十分なメーカーによるリチウムイオン電池とともに、不十分な回収体制に対して、市町村が後処理を担わされた事例といえます。

（3）一般廃棄物処理施設の維持管理の技術上の基準（抜粋）

廃棄物処理法施行規則

（一般廃棄物処理施設の維持管理の技術上の基準）（抜粋）

第四条の五 法第八条の三第一項の規定によるごみ処理施設の維持管理の技術上の基準は、次のとおりとする。

六 破碎施設にあつては、次のとおりとする。

イ 投入する廃棄物に破碎に適さないものが含まれていないことを連続的に監視すること。

ロ 破碎によつて生ずる粉じんの周囲への飛散を防止するために必要な措置を講ずること。

八 選別施設にあつては、選別によつて生ずる粉じんの周囲への飛散を防止するために必要な措置を講ずること。

十四 前各号のほか、施設の機能を維持するために必要な措置を講じ、定期的に機能検査並びにばい煙及び水質に関する検査を行うこと。

十五 市町村は、その設置に係る施設の維持管理を自ら行うこと。

十六 施設の維持管理に関する点検、検査その他の措置（法第二十一条の二第一項に規定する応急の措置を含む。）の記録を作成し、三年間保存すること。

(4) 廃棄物処理施設整備国庫補助事業に係るごみ処理施設性能指針（抜粋）

「廃棄物処理施設整備国庫補助事業に係るごみ処理施設性能指針」（平成20年3月31日環
廃対発第080331003号、2008年）（抜粋）

VI ごみ破碎選別施設

1 性能に関する事項

(1) ごみ処理能力

計画する質及び量のごみを、計画する性状の破碎物に破碎し、計画に応じた選別を
する能力を有すること。

(2) 破碎物の性状

破碎処理する場合、施設に投入するごみ量の八五パーセント以上を、計画する破碎
物の大きさ以下に破碎できること。

(3) 回収物の純度

① 鉄分を回収する場合、回収物中の鉄分の純度は、九五パーセント以上であるこ
と。

② 銅分又はアルミニウム分を回収する場合、回収物中の銅分又はアルミニウム分
の純度は、八五パーセント以上であること。

(4) 安定稼働

一系列当たり九〇日間以上にわたり、この間の計画作業日における安定運転が可能
であること。

2 性能に関する事項の確認方法

(1) 性能確認条件

以下の条件を満たす実証施設又は実用施設における運転結果にもとづき、各性能に
関する事項に適合しているか確認すること。

① 計画するごみと同程度のごみ質のごみを使用して運転を行ったものであるこ
と。

② 計画する実用施設の一系列当たりの処理能力に対し、実証施設又は既存実用施
設の一系列当たりの処理能力は、概ね一〇分の一以上であること。

③ 実証試験については、延べ二〇〇時間以上の運転実績を有すること。

(2) 性能確認方法

① ごみ処理能力、破碎物の性状及び回収物の純度

以下のいずれかにより確認すること。

i 実証試験により得られた運転データ等を評価した結果

ii 実用施設における運転データ等を評価した結果

② 安定稼働

以下のいずれかにより確認すること。

- i 実証試験により得られた運転データ並びに構成部品及び部材の耐用性と、安定運転を阻害する原因への対策等を評価した結果
- ii 実用施設において、一系列当たり九〇日間以上にわたり、この間の計画作業日に安定運転した実績


(5) 遅延発火予防を目的としたリチウムイオン電池の物理選別

本調査では形状やタイプの異なるリチウムイオン電池が磁力選別機や渦電流選別機で選別可能かどうか、またその要因について検証を行いました。検証に用いたリチウムイオン電池は円筒型、角型、ラミネート型の3種類で、用いたサンプル数は約20個です。


表 9-1 物理選別の検証に用いたリチウムイオン電池のサンプル

	円筒型	角型	パウチ型
平均重量	49.7	25.3	22.7
標準偏差	1.5	13.2	21.1
N数	20	19	22

磁力選別試験の概要

項目	概要
試験機	<p>日本エリーズマグネチックス社製高磁力選別機、プーリー表面磁力 3,000G・6,000G、プーリー径φ305mm、ベルト幅600mm、樹脂ベルト</p> 
試験パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> ・磁力 (3,000G、6,000G) ・コンベヤ速度 (20m/分、45m/分)
試験方法	磁力、コンベヤ速度の組み合わせ (計4ケース) ごとに同一サンプルを3回供し、再現性を確認

渦電流選別試験の概要

項目	概要
試験機	<p>日本エリーズマグネチックス社製渦電流選別機（永久磁石式エディカレントセパレータ、エリーズモデル RevX-E1214）、ECS ドラム $\phi 216 \times 519.5W$、ベルト 490W 樹脂ベルト t4.2、ECS ドラム回転数 0～2,500rpm/min（インバータ制御）、ベルト速度：10～63.3m/min/60Hz（インバータ制御）</p> 
試験パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> ・磁力（2,500G） ・コンベヤ速度（45m/分、60m/分）
試験方法	<p>磁力、コンベヤ速度の組み合わせ（計 2 ケース）ごとに同一サンプルを 3 回供し、再現性を確認</p>

検証の結果、以下のことがわかりました。

- 磁力選別試験の結果、同一条件下において選別される個体と選別されない個体が存在することがわかった。主に選別された個体の重量は母集団平均重量より軽く、反対に選別されなかった個体の重量は母集団平均重量より重い傾向にあることがわかった。ただし、「軽くても選別されない個体」と「重くても選別される個体」もまた存在することがわかった。
- 重量以外の選別要因を探るため、リチウムイオン電池を安全な状況下で分解したところ、電池の中に含まれる磁性物（基板や端子部分）の電池に占める重量割合が高い（目安：4%以上）個体は高磁力選別で選別されやすい一方で、磁性物の重量割合が高すぎる（目安：7%以上）個体は渦電流選別で選別され難いことがわかった。反対に、磁性物の重量割合が低い（目安：6%未満）個体は渦電流選別で選別されやすい一方で、磁性物の重量割合が低すぎる（目安：3%未満）個体は高磁力選別では選別され難いことがわかった。
- 以上から、高磁力選別は磁性物の重量割合が高いものを、渦電流選別は磁性物の重量割

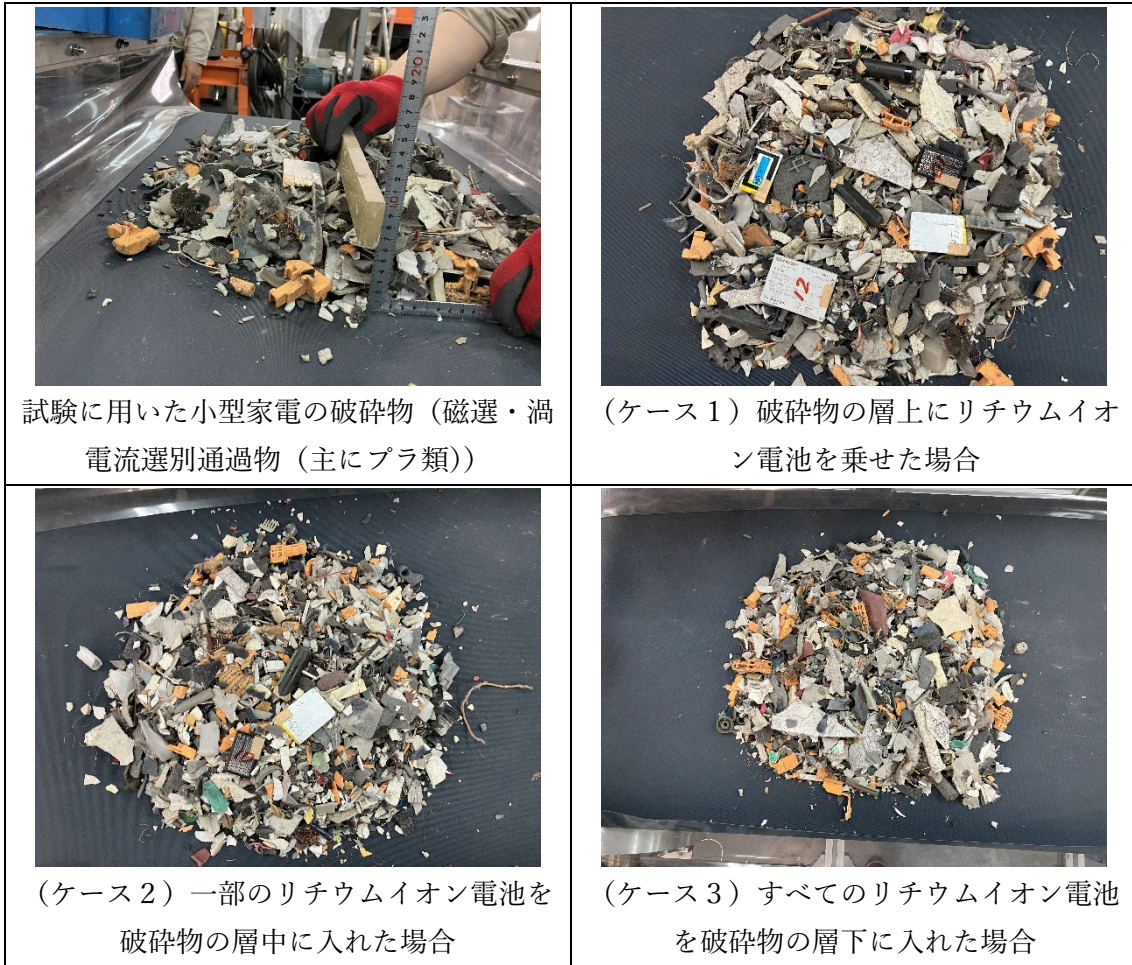
合が低いものをそれぞれ選別するのに適しており、2つの選別を組み合わせることによってより多様なリチウムイオン電池を選別除去することが可能になると考えられる。

- なお、本試験で得られた結果はリチウムイオン電池が単体で選別機に供された場合のものであり、リチウムイオン電池が小型家電に内蔵された状態での選別挙動は別途検討する必要がある。

次に、実際の廃棄物処理施設での処理に近い状況でのリチウムイオン電池の選別挙動について検証するため、小型家電リサイクル事業者の協力を得て、あらかじめリチウムイオン電池を除去した使用済み小型家電を衝撃式縦型破砕機で破砕処理したものにリチウムイオン電池を混ぜたサンプルを用意し、上記と同様の装置を用いた選別試験を実施しました。試験では、破砕物の性状（磁選物、渦電流選別物、磁選通過物（主に非鉄・プラ類の混合物）磁選・渦電流選別通過物（主にプラ類）、破砕物（未選別）の計5種類に円筒型、角型、およびラミネート型のリチウムイオン電池をそれぞれ混ぜて試験機に供しました。その際、リチウムイオン電池の選別可否に対して破砕物の層厚、リチウムイオン電池の種類、リチウムイオン電池の形状および大きさ、選別機に対するリチウムイオン電池の配置方法（向き）が及ぼす影響を調べました。

表 9-2 小型家電破砕物とリチウムイオン電池の混合物に対する物理選別試験

項目	内容
小型家電破砕物	<ul style="list-style-type: none"> ● 磁着物 ● 渦電流選別物 ● 磁選通過物（主に非鉄・プラ類の混合物） ● 磁選・渦電流選別通過物（主にプラ類） ● 破砕物（未選別）
リチウムイオン電池	<ul style="list-style-type: none"> ● 円筒型 4個 ● 角型 4個 ● ラミネート型 4個
試験方法	小型家電破砕物（5種類）とリチウムイオン電池を種類ごとに混ぜ、高磁力選別機ならびに渦電流選別機に供し、リチウムイオン電池の選別可否を調べた



試験を通して以下のことが考察されました。

○破砕物の性状がリチウムイオン電池の選別精度に及ぼす影響

高磁力選別では磁着物を除く破砕物に対してリチウムイオン電池の種類によらず選別可否が同じ傾向であったことから、破砕物の性状の違いがリチウムイオン電池の選別精度に及ぼす影響は確認されなかった。なお、磁着物は高磁力選別機のベルトを破損する可能性があるため試験を実施しなかった。磁着物には稀にモーターやコイル類が含まれ、リチウムイオン電池がその銅線に絡まってしまうと選別精度に影響がでる可能性がある。

○コンベヤ上の破砕物の層厚

破砕物の層厚がそれぞれ8 cm、6 cm ある状態で破砕物の層上および層下(コンベヤ直上)にリチウムイオン電池を配置して高磁力選別機に供した結果、破砕物の層上にリチウムイオン電池を乗せた状態ではリチウムイオン電池は選別できなかった。このことから層厚はリチウムイオン電池の選別精度に影響を及ぼすと考えられ、選別精度を高めるためには層厚はない(破砕物が積層していない状態)または極力小さいほうが望ましいといえる。どの

程度の層厚まで許容できるかについてはコンベヤ速度や磁力の程度に依存すると考えられることから一概には言えないが、小型家電リサイクル事業者や選別機メーカーへのヒアリング等から概ね数センチ程度ではないかと推察する。

○リチウムイオン電池の種類、形状および大きさ、ならびに選別機に対する向き（配置）

円筒型リチウムイオン電池は高磁力選別で選別され渦電流選別で選別されないこと、対してラミネート型電池は高磁力選別で選別されず渦電流選別で選別されることがそれぞれ確認された。また、角型電池は高磁力選別、渦電流選別ともに種類や表裏・向きによって選別可否が異なることがわかった。これは各種電池の構成素材の違いによるところが大きいと思われる。試験に用いた円筒型電池は電子タバコに内蔵される 18650 型で、筐体が磁性物であることが確認されている。なお、本試験のサンプル数は4個であり、種類ごとの傾向を精査するためにはサンプル数を増やすことが必要である。

○各種選別回収物へのリチウムイオン電池の混入と選別の可能性

先述のとおり、磁力選別にて混入しやすいモーター・コイル類にリチウムイオン電池が絡みついて一緒に回収されてしまう場合、電池のみを選別機で選別することは容易でなく、対策としては磁力選別機の後段の搬送コンベヤ上で人手によるピッキングが有効と考えられる。なお、磁力選別は非磁性体の巻き込みを極力減らすため、粗選（1,500～3,000G 程度）と精選（8,000G）の多段設置とすることが望ましい。

渦電流選別による回収物には円筒型電池の混入の可能性は低いものの、ラミネート型や一部の角型電池は非鉄金属と共に選別され回収物に混入する可能性が示唆された。対策としては渦電流選別機の後段にもう1台の渦電流選別機を設置し仕切板の位置を適切に設定するか、あるいは選別物搬送コンベヤ上で人手によるピッキングを行うか、その併用が考えられる。

渦電流選別機の通過物（主にプラスチック類等）には円筒型および一部の角型電池が混入する可能性があるが、これらは高磁力選別機を後段に追加設置するか、あるいは搬送コンベヤ上で人手によるピッキングを行うか、その併用によって選別できる可能性が高い。

なお先述のとおり、物理選別精度を維持するためには搬送コンベヤを流れる破碎物の層厚は無いか、あるいは極力薄い層厚（数センチ程度）を保つことが重要である。そのためには振動コンベヤを各種選別機の前段に設置して搬送物を均すことが有効と考えられる。

なお、これらの対策によっても破碎物へのリチウムイオン電池の残留をなくすことは難しく、現時点では残留のリスクに対応するほど設備機器は増えていくことが想定されます。ただし、今回の高磁力選別機や渦電流選別機のように従来技術で比較的安価に処理能力が高い設備を入れることで、後段のピッキングや残留リスク対応といったコスト高な手

法の適用範囲を小さくでき、トータル設備導入コストや運用コストを低減できると可能性が示唆されました。

参考文献

1. A. Terazono et al. (2024) Ignition and fire-related incidents caused by lithium-ion batteries in waste treatment facilities in Japan and countermeasures, Resources, Conservation & Recycling 202
2. 寺園淳 (2022) リチウムイオン電池の循環・廃棄過程における火災等の発生と課題. 廃棄物資源循環学会誌, 33 (3), 214-228
3. 環境省 (2024) リチウム蓄電池等処理困難物対策集 (令和 5 年度版)
<https://www.env.go.jp/content/000214935.pdf>
4. 環境省 (2023) リチウム蓄電池等処理困難物対策集 (令和 4 年度版)
<https://www.env.go.jp/content/000124904.pdf>
5. 独立行政法人製品評価技術基盤機構 (NITE) (2023) 「ごみ捨て火災」、被害は 100 億円超え！～充電式電池は正しく捨てましょう～
<https://www.nite.go.jp/jiko/chuikanki/press/2023fy/prs230629.html>
6. 公益社団法人全国都市清掃会議 (2017) ごみ処理施設整備の計画・設計要領 (2017 改訂版)
7. 環境省 (2013) 廃棄物処理施設の発注仕様書作成の手引き (標準発注仕様書及びその解説) マテリアルリサイクル推進施設編 不燃・粗大・容器包装リサイクル施設(第2版)
8. 建設産業調査会 (1993) 廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック, 890p
9. 松藤敏彦 (2017) 処理技術の原理と効果を「形式知」に, 都市清掃, Vol.70, No.338, pp.313-319
10. Herreras-Martínez, L., Anta, M., Bountis, R. et al. (2021) Recommendations for tackling fires caused by lithium batteries in WEEE- A report of the Batteries Roundtable.
<https://weee-forum.org/wp-content/uploads/2021/07/Tackling-fires-caused-by-batteries-in-e-waste.pdf>
11. Shi A. (2022) One Major Way Smartphone Batteries Can Catch Fire—and How to Prevent It, IFIXIT
<https://www.ifixit.com/News/69041/how-batteries-can-catch-fire-and-how-to-prevent-it>
12. 経済産業省 (2021) 「有限会社すみとも商店、ロワ・ジャパン有限会社が輸入したコードレス掃除機用非純正のバッテリーパックについて～充放電をしていない保管状態であっても発火のリスクがある大変危険な製品です～」(2021 年 10 月 29 日)
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211029005/20211029005.html>
13. 経済産業省 (2021) 「本年 10 月 29 日にご案内した有限会社すみとも商店、ロワ・ジャパン有限会社のコードレス掃除機用非純正のバッテリーパックについて掃除機運転による放電を御願います」(2021 年 12 月 17 日)

- <https://www.meti.go.jp/press/2021/12/20211217005/20211217005.html>
14. 寺園淳 (2024) リチウムイオン電池の発火・火災に見る関係者間のギャップ – ライフサイクル全体での対応と伝え方の大切さ –, 環境, 2024年2月号
<https://www-cycle.nies.go.jp/magazine/genba/202402.html>
 15. 一般社団法人 JBRC (2024) リサイクル実績
https://www.jbrc.com/recycle/graph_year/
 16. 一般社団法人パソコン 3R 推進協会 (2024) 使用済パソコンの回収および再資源化実績
https://www.pc3r.jp/association/recycle_result.html
 17. モバイル・リサイクル・ネットワーク (2024) これまでの回収実績
<https://www.tca.or.jp/mobile-recycle/result/>
 18. 環境省(2022b) 令和3年度小型家電リサイクル法施行支援及びリチウムイオン電池等処理困難物適正処理対策検討業務報告書
<https://www.env.go.jp/content/000085738.pdf>
 19. 坂戸市(2024) 「令和6年4月から発火性危険物の収集を開始しています」
<https://www.city.sakado.lg.jp/soshiki/65/43863.html>
 20. 社団法人全国市有物件災害共済会 (2009) ごみ処理施設の火災と爆発事故防止対策マニュアル, 234p
 21. 一般社団法人 廃棄物処理施設技術管理協会 (2019) 平成30年度 一般廃棄物処理施設等事故事例調査報告書
 22. 社団法人全国市有物件災害共済会 (2015) ごみ処理施設の火災事故防止のための防火安全マネジメントマニュアル
 23. Miesch C. 膨張したバッテリーの処理方法
https://jp.ifixit.com/Wiki/What_to_do_with_a_swollen_battery
 24. 電池工業会
<https://www.baj.or.jp/index.html>
 25. 電気化学会電池技術委員会編 (2010) 電池ハンドブック, オーム社, p551
 26. 経済産業省 (2007) 消費経済審議会製品安全部会 (2007年12月12日)
https://www.meti.go.jp/shingikai/shokeishin/seihin_anzen/009.html