

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分： 環境問題対応型研究（一般課題）

研究予定期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【3-2101】

体系的番号： （JPMEEERF20213001）

研究課題： 「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」

Research Title: Appropriate Management Measures of Lithium-Ion Batteries at Recycling and Disposal Processes based on Investigation of Fire Accidents

研究代表者： 寺園 淳

研究代表機関： 国立研究開発法人国立環境研究所

研究分担機関： みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社、横浜国立大学、イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社

研究協力機関： 株式会社環境管理センター、株式会社エコリサイクル、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、産業技術総合研究所

研究領域： 資源循環領域

キーワード： リチウムイオン電池、火災、不燃ごみ、小型家電、モニタリング

令和6（2024）年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	7
2. 研究開発目的	7
3. 研究目標	8
4. 研究開発内容	8
5. 研究成果	9
5-1. 成果の概要	9
5-2. 研究目標の達成状況	12
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	14
6. 研究成果の発表状況の概要	16
6-1. 成果の件数	16
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	16
7. 国際共同研究等の状況	16
8. 研究者略歴	17
II. 成果の詳細	18
II-1 サブテーマ1「循環・廃棄過程における火災事故調査の全体設計と適正管理対策提案」	18
[サブテーマ1要旨]	18
1. サブテーマ1研究開発目的	18
2. サブテーマ1研究目標	18
3. サブテーマ1研究開発内容	19
4. サブテーマ1結果及び考察	21
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	27
II-2 サブテーマ2「火災事故メカニズムの解明」	28
[サブテーマ2要旨]	28
1. サブテーマ2研究開発目的	28
2. サブテーマ2研究目標	28
3. サブテーマ2研究開発内容	28
4. サブテーマ2結果及び考察	32
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	38
II-3 サブテーマ3「リサイクル施設等における対策技術の検討」	39
[サブテーマ3要旨]	39
1. サブテーマ3研究開発目的	39
2. サブテーマ3研究目標	39
3. サブテーマ3研究開発内容	40
4. サブテーマ3結果及び考察	42
5. サブテーマ3研究目標の達成状況	51
III. 研究成果の発表状況の詳細	52
(1) 成果の件数	52
(2) 誌上发表	52
(3) 口頭発表	53
(4) 知的財産権	55
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	56

(6)	マスメディア等への公表・報道等.....	57
(7)	研究成果による受賞.....	57
(8)	その他の成果発表.....	58

I. 成果の概要
 <課題情報>

公募区分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	令和3（2021）年度～令和5（2023）年度
課題番号：	【3-2101】
研究課題：	「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」
研究代表者：	寺園 淳（国立研究開発法人国立環境研究所、上級主席研究員）
重点課題（主）：	【重点課題⑫】社会構造の変化に対応した持続可能な廃棄物の適正処理の確保に関する研究・技術開発
重点課題（副）：	【重点課題⑪】ライフサイクル全体での徹底的な資源循環に関する研究・技術開発
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	（3-6）リチウムイオン電池等の循環・廃棄過程における事故発生実態とその制御策立案に向けた研究
研究領域：	資源循環領域

<キーワード>

リチウムイオン電池
火災
不燃ごみ
小型家電
モニタリング

<研究体制>

サブテーマ1「循環・廃棄過程における火災事故調査の全体設計と適正管理対策提案」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
国立研究開発法人 国立環境研究所	資源循環領域	上級主席研究員	寺園 淳	
国立研究開発法人 国立環境研究所	資源循環領域	主幹研究員	小口正弘	
みずほリサーチ& テクノロジーズ株 式会社	サステナビリティ コンサルティング第2部	上席主任コンサル タント	秋山浩之	2021年度～2022 年度
みずほリサーチ& テクノロジーズ株 式会社	サステナビリティ コンサルティング第2部	上級主任コンサル タント	小林 元	

みずほリサーチ&テクノロジー株式会社	サステナビリティコンサルティング第2部	主任コンサルタント	蓮沼和夫	2023年度
みずほリサーチ&テクノロジー株式会社	情報通信研究部	課長	友澤弘充	
みずほリサーチ&テクノロジー株式会社	情報通信研究部	上席主任コンサルタント	萩原 透	

サブテーマ2「火災事故メカニズムの解明」

＜サブテーマ2リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
横浜国立大学	総合学術高等研究院	教授	三宅淳巳	
横浜国立大学	総合学術高等研究院	准教授	伊里友一郎	
横浜国立大学	総合学術高等研究院	特任教員（准教授）	中山 穰	
横浜国立大学	総合学術高等研究院	非常勤講師（研究担当）	塩田謙人	

＜サブテーマ2研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
横浜国立大学	総合学術高等研究院	特任教員（助教）	鈴木智也（2023年度）

サブテーマ3「リサイクル施設等における対策技術の検討」

＜サブテーマ3リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
イー・アンド・イーソリューションズ株式会社	企画開発グループ	部長	狩野真吾	
イー・アンド・イーソリューションズ株式会社	環境事業部 グローバル環境グループ	上席研究員	阪口幸三	
国立研究開発法人 国立環境研究所	資源循環領域	上級主席研究員	寺園 淳	

＜サブテーマ3研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名

イー・アンド・イー ソリューションズ 株式会社	環境事業部 グ ローバル環境グ ループ	主任研究員	新富美雪
イー・アンド・イー ソリューションズ 株式会社	環境事業部 グ ローバル環境グ ループ	主任研究員	栗本 航

< 研究経費（間接経費を含む） >

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	27,839千円	8,011千円	35,850千円
2022	27,520千円	7,878千円	35,398千円
2023	25,563千円	7,621千円	33,184千円
合計	80,922千円	23,510千円	104,432千円

1. はじめに（研究背景等）

廃棄物処理・リサイクル施設で火災事故が頻発しており、安全・安心で持続可能な資源循環システムに向けた懸念材料となっている。このような循環・廃棄過程の火災事故については、一般廃棄物処理施設においてはスプレー缶・ガスボンベによるもの、産業廃棄物処理施設においては化学物質や有機物によるものが原因としてそれぞれ疑われる事例が多い。

一方、近年ではリチウムイオン電池（LIB）の破碎による発火や処理後残渣の蓄熱による発火が疑われる事例も増えており、LIB が小型家電や不燃物などに混入したまま資源循環プロセスに投入されていることが影響していると考えられる。これらの火災も以前は中国向け輸出の雑品スクラップからの発生が主であったが、2017 年末以降の中国による輸入禁止政策と廃棄物処理法等改正によって輸出が困難になって、粗大ごみ・不燃ごみを処理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火災が増加しており、施設の停止や被害にとどまらず、周辺住民や環境への影響が懸念される場合もある。

LIB は資源有効利用促進法に基づく自主回収の取組みはあるが、廃棄方法がわかりにくいモバイルバッテリーや取出し困難なものへの対応を含めて、自主回収が十分機能しているとは言い難い。こうした LIB が関係していることが疑われながらも原因不明となっている場合が多い火災事故に対して、資源循環プロセスの現場では対処方法がわからずに警戒を強めている。情報通信環境の発展と電気電子製品の普及に伴い、今後も LIB の消費量及び廃棄量が増加していくことが確実である。

このような LIB による火災の問題は、研究開始前から下記のようなメディアを通じて報道されていたが、「マスメディア等への公表・報道等」でも示すように、研究期間中にも国内でも関心が高まっていった。

「ごみ処理場で発火相次ぐ／リチウムイオン電池／廃棄せずリサイクルを」東京新聞（2019 年 11 月 29 日）

「リチウムイオン電池、ごみとして捨てられ火災相次ぐ」朝日新聞（2020 年 12 月 8 日）

また、LIB の除去や対応について、小型家電リサイクル（産構審・中環審、2020）や容器包装リサイクル（日本容器包装リサイクル協会、2020）における課題としても指摘されたほか、自治体における課題として環境省も 2020 年度（令和 2 年度）にリチウムイオン電池に関連する火災等に関する調査（環境省、2021）を開始した。このように各関係機関で対応が模索され始めたが、多くは問題点の指摘に留まり、研究開発的なアプローチは十分できていなかった。

産業構造審議会・中央環境審議会：小型家電リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書（2020）

日本容器包装リサイクル協会：リチウムイオン電池混入防止取組事例集 2020 年版（2020）

環境省：令和 2 年度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結果（業務報告書等抜粋）（2021）

2. 研究開発目的

今後も LIB の消費量及び廃棄量が増加していくことが確実ななか、循環・廃棄過程での LIB に関連する火災事故の防止対策が急務となっている。火災事故リスク低減により安全・安心で持続可能な循環型社会づくりに貢献することを目的として、火災事故メカニズムの解明と対策技術の評価を伴った適正管理対策を提案する。

3. 研究目標

全体目標	一般廃棄物処理施設及びリサイクル施設におけるリチウムイオン電池（LIB）等に起因する火災事故実態を解明し、火災事故防止対策をガイドラインにまとめるとともに、今後のLIB消費拡大に備えた適正管理対策についても費用対効果を伴って提案する。
サブテーマ1	「循環・廃棄過程における火災事故調査の全体設計と適正管理対策提案」
サブテーマ1 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所、みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社
サブテーマ1 目標	リチウムイオン電池の現在と将来の排出量とフローを分析し、一般廃棄物処理施設やリサイクル施設に混入する量を推計して火災事故発生ポテンシャルを示す。 既存の火災事故事例と監視データの分析によって自動検知の可能性を明らかにするとともに、サブテーマ2及び3の結果もあわせて複数の適正管理対策の効果（リスク低減）とコストを定量的に示す。
サブテーマ2	「火災事故メカニズムの解明」
サブテーマ2 実施機関	横浜国立大学
サブテーマ2 目標	既存の火災事故事例を模擬したモデル実験によって、原因特定困難となっている処理残渣の自然発火・蓄熱発火を含む火災事故メカニズムを解明し、火災リスク低減の条件と早期発見のためのモニタリング方法を提案する。
サブテーマ3	「リサイクル施設等における対策技術の検討」
サブテーマ3 実施機関	イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社、国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ3 目標	5ヵ所程度の一般廃棄物処理施設及びリサイクル施設を対象に、火災リスクの低減につながる対策技術（プロセス改善、モニタリング強化、RFIDによるLIB事前除去など）の効果を実施設で実証し、その結果に基づいた定量的な指標を提示する。基本的な火災事故防止のガイドラインをまとめる。

4. 研究開発内容

循環・廃棄過程でのリチウムイオン電池（LIB）に起因する火災事故の防止対策が急務となっており、火災リスク低減を通して、安全・安心で持続可能な循環型社会づくりに貢献することを目的として、火災事故メカニズムの解明と対策技術の評価を伴った適正管理対策を提案する。

まず統計情報と施設での取扱い状況調査から、現在と将来のLIBの排出量及び処理・リサイクル施設へのフローを推計する。既存の事故事例に基づき、前処理・破碎選別・残渣保管といったプロセスに応じた火災事故調査と対策の全体設計を行う。

次に、各プロセスで発火原因に関する仮説を立てる。例えば、衝撃発火、外部・内部短絡などに応じたLIBの発火に関するモデル実験・モデル計算を実施し、火災事故メカニズムを解明する。この中から温度・湿度・CO濃度などを含めて、実施設でリアルタイムモニタリングを行う項目や方法を検討する。

そしてLIB混入が懸念される廃棄物処理・リサイクルの実施設を5ヵ所程度抽出して、破碎選別や残

渣保管などのプロセスにおいて各種センサーを設置して数週間以上のリアルタイムモニタリングを実施し、火災事故メカニズムと発火の早期検出可能性を検証する。同時に、破碎選別プロセスなどの改善、センサー強化によるモニタリング強化、RFID（Radio Frequency IDentification）タグを装着したLIBの事前除去といった対策技術の導入可能性を検討するとともに、これらのリスク低減効果の定量的な指標化を行う。

最後に、検討した現場の対策技術に対して、効果とコストを伴った評価を行う。短期的に可能な対策はガイドラインとしてとりまとめる。RFIDを用いたLIB除去については生産段階の協力も必要なLIBのライフサイクル管理であり、長期的な対策の一つとして費用負担のあり方を含めた検討材料の提供を行う。以上により、将来のLIB排出量推計結果と対策技術の効果及びコストを合わせて、将来の循環・廃棄過程における火災事故リスク低減に向けた適正管理対策を複数提案する。

内容が多岐に渡り、サブテーマごとの重複や関係もあるため、参考のために図1を示す。

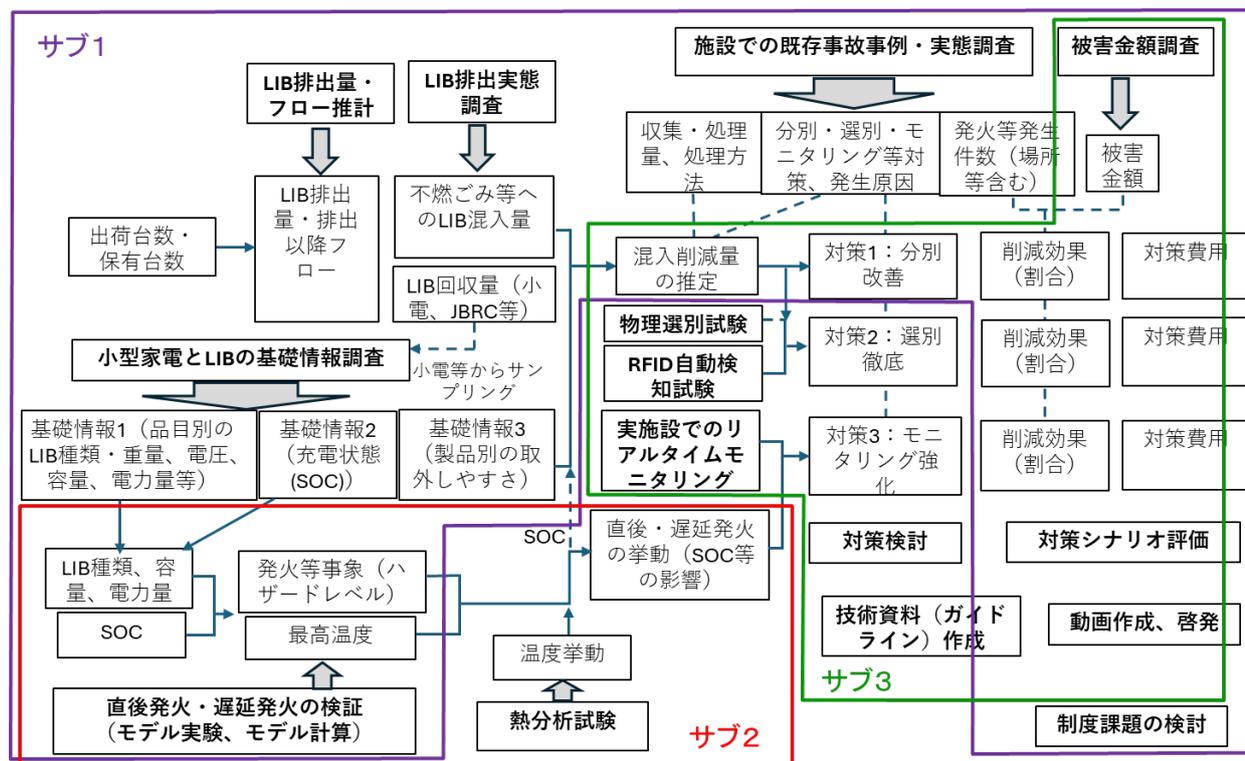


図1 本研究による主な実施内容

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

全体として、次の知見を得た。

一般廃棄物処理施設及びリサイクル施設におけるリチウムイオン電池（LIB）等に起因する火災事故実態について、既存事故実態調査、火災事故メカニズム解明のモデル実験・モデル計算、実施設におけるリアルタイムモニタリングによって解明した。

LIBの圧壊試験などのモデル実験からは充電状態（SOC）や電力量の高いLIBほど発火リスクが高いことが確認され、直後発火のみでなく数時間以上経過する遅延発火のメカニズムも解明した（図2.5、2.8、2.11、2.14、2.18）。また、リアルタイムモニタリングからは、実施設におけるLIB発火現象を複数回把握し、温度挙動、火災検知、ガス発生を確認した（成果1、図4.2～4.5）。

品目別のLIB重量、容量、電力量などの基礎情報を整備し、発火リスクが高いと考えられる品目を特定した（図1.4、1.6）。将来シナリオ推計として、LIB排出量は2020年度の8,162トンから2037年に1万トンを超えると推計され、一方でJBRC等による現在の回収量は排出量の14%と推定した（図1.7）。

不燃ごみにおけるLIBの混入状況調査からは、LIB含有小型家電の重量は不燃ごみ全体の0.3%にもかかわらず、発火等発生事故のほとんどの原因となっている実態を明らかにした（成果1）。

自治体の廃棄物処理施設における火災被害額について、LIB起因による火災被害額は100億円程度と推計した。

さらに分別収集や選別による対策効果を定量的に示し、複数の対策シナリオによる費用と効果を示して提案した（表1.2）。これらの火災事故防止対策を技術資料（ガイドライン）にまとめるとともに、動画も含めて啓発を精力的に実施した。

サブテーマ1では、次の成果を得た。

廃棄物処理におけるLIBに起因する発火等事故の現状把握、及び対策に必要な情報提供を行うことを目的として、自治体の処理施設における既存事故事例調査を行った。その結果、2020年度は不燃・粗大ごみ収集量1tあたり0.1件以上の発火等事故を発生している処理施設が複数あった。事故原因については、調査ができていない施設によれば80%から90%程度はLIBに起因するものであり、破碎段階でLIBに物理的衝撃を与えているためであることは確実である。

LIB排出量の推計、既存回収システムを通じた回収率の推計、高リスク製品の考察などのために、LIB使用製品（小型家電）に使用されているLIBに関する基礎的な情報を整備した。製品1台あたりのLIB重量、容量と定格電力量を取得でき、電力量から熱暴走が警戒される電動アシスト自転車、ノートPC、ロボット掃除機、コードレス掃除機などを特定した。品目別のLIB取外しやすさも整理するとともに、LIB排出量を製品台数、LIB重量、容量、電力量別にまとめ、重量ではスマートフォン、ノートPC、タブレット端末、コードレス掃除機、モバイルバッテリー、加熱式たばこ、電動アシスト自転車の寄与が大きいと推計された。将来シナリオ推計として、LIB排出量は2020年度の8,162トンから2037年に1万トンを超えてピークに達すると推計した。

不燃ごみにおけるLIBの混入状況調査からは、LIB含有小型家電の重量は不燃ごみ全体の0.3%にもかかわらず、発火等発生事故のほとんどの原因となっている実態を明らかにした。「LIBが外れない小型家電」の分別収集によって、不燃ごみへのLIB使用製品の混入を21%～28%削減する事例を示した。

LIBの排出以降のフローを整理、推計した結果から、一般社団法人JBRC（以下、JBRC）、一般社団法人パソコン3R推進協会（以下、PC3R）、モバイル・リサイクル・ネットワーク（以下、MRN）、小型家電リサイクル認定事業者による回収量は排出量8,162トンの14%と推定した。

自治体が管轄する廃棄物処理施設における火災被害額は、120億円程度と推計された。うち、LIB起因による火災の割合を80%と見積もった場合の火災被害額は96億円程度と推計した。

品目別の排出量推計結果を用いて、分別収集・排出や選別等の適正管理対策による効果について、(1)対策前に対して、(2)JBRC、PC3R、MRN、小型家電認定事業者による現状の回収、(3)自治体によるLIBが外れない小型家電の回収、(4)個別品目の回収ルートへの排出徹底、(5)LIBが「取外し可能」な製品について市民によるLIB取外しとJBRCへの排出徹底、(6)(7)土間選別等による効果を試算した。また、対策シナリオとして、モニタリング強化、分別収集の改善、選別の徹底、RFIDを用いたLIB自動検知を取り上げ、費用と効果を概算して費用対効果を評価した。

以上の他、制度課題の検討などを行った。

サブテーマ2では、次の成果を得た。

廃棄物処理施設に混入したリチウムイオン電池（LIB）に起因するおける火災（発火等を含む）について、直後発火と遅延発火を対象としてモデル実験などの安全性評価試験で検証を行い、その結果をもとに火災事故メカニズムの整理と提案、ならびにモニタリング方法の提案を行った。

まず、事故の大多数である直後発火の検証のために、安全性評価のモデル実験としてLIBに対する圧

壊試験（一部釘刺し試験）を実施し、充電状態（SOC）が高くなるほどハザードレベルや最大温度が高い傾向を得た。特に円筒型のLIBに対しては高いSOCで猛烈な発火等が確認されたが、容量や電力量も影響する。本章で得た知見からは、SOC 100%を想定したLIBとしては、電力量では3.6～5.4Wh（単電池の場合、容量で1,000～1,500mAh）程度以上で危険性が高いとみられる（サブテーマ1の知見からは、例えば電動アシスト自転車、ノートパソコン、掃除機、タブレット端末、モバイルバッテリーが代表的なLIB使用製品である）。SOCが低い場合は相対的に危険性は小さいが、容量や電力量も加味する必要がある。ポリマーの電池に対しては、限られたモデル実験の結果と機械学習モデルによる予測計算によれば、円筒型よりも危険性が小さい結果が得られたが、さらに知見の蓄積が必要である。

また、頻度が少ないものの大きな被害に至る場合もある遅延発火の検証のために、安全性評価のモデル実験として加熱試験と圧壊試験、および熱分析試験を行った。その結果、SOCが低い場合に分解生成ガスまたは電解液の漏えいが確認された。遅延発火の模擬として実施した断熱材を用いた圧壊試験や、LIB部材の熱分析試験結果を用いた速度論的解析によれば、10分程度ないし長い場合は11時間以上経過してから、ジュール熱および化学反応によって温度上昇に至ることが確認された。

以上のような検証結果や文献などを総合して、廃棄物処理施設で考えられるLIB破損後の火災事故メカニズムの現象を9つに整理した。直後発火と遅延発火のみでなく、発火に至らないガス噴出、分解生成ガスや電解液の漏えいの現象とともに、電解液の発火特性や着火源と合わせた注意点を指摘した。

これらの結果からモニタリング方法の検討と提案を行った。反応が直ちに進む直後発火に対してはモニタリングが困難であり、危険性の高いLIBを分別収集や破砕前の選別によって除去することや、可能な場合には、混入するLIBのSOCを極力減らすため啓発活動が有効である。遅延発火に対しては、サーモカメラを用いた温度管理やLIB由来の分解生成ガスの測定が有効である可能性を指摘した。SOCの変化によって温度や発生ガスが異なる知見を得て、実施設でのリアルタイムモニタリングにも共有した。

サブテーマ3では、次の成果を得た。

一般廃棄物処理施設および小型家電リサイクル施設の計5カ所の実施設を対象にリアルタイムモニタリングを実施し、赤外線サーモカメラなどによるLIB発火現象を捕捉した。

自治体の不燃ごみ・粗大ごみの破砕処理施設では、LIBによる小規模の爆発を含めて、モニタリング当日に各1回以上のLIB発火を確認できた。施設で把握が困難なLIB起因の発火等事象が潜在的に多数あることに加えて、破砕機内部で高温頻発する一方で遅れて高温・発火を生じるような遅延発火に類する事象も確認された。現状で発火等事象（主に直後発火）の検知に有効なのは、赤外線サーモカメラによる温度と火炎の検知とみられた。LIBの熱暴走で発生するといわれるCO₂、CO、H₂などのガス発生は確認できたが、ガスの発生と把握は事象の直後になるため予防的な対策は困難であった。一方で、CH₄やプロパンなどの可燃性ガス濃度が高い時はLIB発火の注意を高めることは有効と考えられた。

調査を行った小型家電リサイクル施設においては、前処理時のLIB選別を人手によって対応しているため発火・火災は生じていなかった。ただし、赤外線サーモカメラによれば90℃程度を記録する場合もあり、検知手法としての有効性と発火対策として自動消火システムとの連携の有効性が示唆された。

破砕機内へのLIB混入による発火（主に直後発火）を防ぐ対策技術として、RFIDを用いたLIBの自動検知の可能性を検証した結果、現在の技術では理想的な条件が整わない限りRFIDを貼付したLIBの検出精度には限界があること、また社会実装に向けた課題として、将来の量産化コストは1枚あたり10円未満であることやサプライチェーンでの費用負担、役割分担の明確化が必要なこと、RFIDの検知精度を落とさずサイズダウン（小型家電に内蔵されたLIBに添付できる）が必要なこと等を整理した。

遅延発火に関する対策技術として、選別プロセスにおける高磁力選別ならびに渦電流選別によるLIBの選別可能性を実験的手法により検討した結果、円筒型LIBは高磁力選別機によって、角型およびポリマー型のLIBは高磁力選別機または渦電流選別機によってそれぞれ選別が可能であることがわかった。

LIBの破砕を防ぐために多くの小型家電リサイクル施設で行っているLIBの取外し時間を測定した。LIBの危険性はさほど高くないにもかかわらず長い取外し時間を要する品目もあった。作業にかかるコ

ストを研鑽することでLIB取外しの作業効率を判断する材料にもなる一方で、事故防止の負担が廃棄物処理・リサイクルの現場のみに課せられている現状があり、メーカーや国も含めてLIBを使用する社会全体での役割分担の議論が期待される。

自治体における不燃ごみ等破碎処理施設および小型家電リサイクル施設におけるLIBに起因する発火防止対策に関して、本研究で検討した対策技術のうち比較的導入が容易と考えられる技術について技術資料（ガイドライン）としてとりまとめた。

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況>・・・・・・・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」

全体目標	全体の達成状況
一般廃棄物処理施設及びリサイクル施設におけるリチウムイオン電池（LIB）等に起因する火災事故実態を解明し、火災事故防止対策をガイドラインにまとめるとともに、今後のLIB消費拡大に備えた適正管理対策についても費用対効果を伴って提案する。	一般廃棄物処理施設及びリサイクル施設におけるリチウムイオン電池（LIB）等に起因する火災事故実態について、既存事故実態調査、火災事故メカニズム解明のモデル実験・モデル計算（図2.5、2.8、2.11）、実施設におけるリアルタイムモニタリング（図4.2、4.4）によって解明した。品目別のLIB重量、容量、電力量などの基礎情報を整備し、発火リスクが高いと考えられる品目を特定した（図1.4、1.6）。さらに分別収集や選別による適正管理対策の効果を定量的に示し、複数の対策シナリオによる費用対効果を評価して今後の方向性を提案した（表1.2）。これらの火災事故防止対策を技術資料（ガイドライン）にまとめるとともに、動画も含めて啓発を精力的に実施した。

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・・・・・・・・・ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「循環・廃棄過程における火災事故調査の全体設計と適正管理対策提案」

サブテーマ1目標	サブテーマ1の達成状況
リチウムイオン電池の現在と将来の排出量とフローを分析し、一般廃棄物処理施設やリサイクル施設に混入する量を推計して火災事故発生ポテンシャルを示す。 既存の火災事故事例と監視データの分析によって自動検知の可能性を明らかにするとともに、サブテーマ2及び3の結果もあわせて複数の適正管理対策の効果（リスク低減）とコストを定量的に示す。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 自治体の処理施設における既存事故事例調査の結果、ごみ収集量1tあたり0.1件以上の発火等事故を発生している処理施設が複数あった。不燃ごみへのLIB混入が0.3%にもかかわらず、事故原因の80%から90%程度がLIB起因であることを示した。 2. LIB使用製品（小型家電）に使用されているLIBに関するLIB重量、容量、電力量などの大量の基礎情報を整備した。サブテーマ2との連携で安全性の観点から電力量に注目し、電力量から熱暴走が警戒される電動アシスト自転車、ノートPC、ロボット掃除機、コードレス掃除機などを特定した。 3. 現在の将来の排出量推計から、LIB排出量は2020年度の8,162トンから2037年に1万トンを超えるピークに至ると推計した。 4. 自治体の廃棄物処理施設において、LIB起因

	<p>の火災被害額は100億円程度と推計した。</p> <p>5. 品目別の排出量推計結果を用いて、事故発生ポテンシャルとして処理対象LIB量（電力量、重量ベース）と分別収集・排出や選別等の対策効果を定量的に示した。また、対策シナリオとして、モニタリング強化、分別収集の改善、選別の徹底、RFIDを用いたLIB自動検知を取り上げ、対策効果と対策費用の概算を示して、自治体の負担を減らす方向性を提案した。</p>
--	---

< 【サブテーマ2】 達成状況 > 3. 目標どおりの成果をあげた

「火災事故メカニズムの解明」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
<p>既存の火災事故事例を模擬したモデル実験によって、原因特定困難となっている処理残渣の自然発火・蓄熱発火を含む火災事故メカニズムを解明し、火災リスク低減の条件と早期発見のためのモニタリング方法を提案する。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 直後発火の検証のために、安全性評価のモデル実験としてLIBに対する圧壊試験（一部釘刺し試験）を実施し、充電状態（SOC）が高くなるほどハザードレベルや最大温度が高い傾向を得た。特に円筒型のLIBに対しては高いSOCで猛烈な発火等が確認されたが、容量や電力量も影響することを指摘した。（図2.3、2.6、2.9） 2. 遅延発火の検証のために、安全性評価のモデル実験として加熱試験と圧壊試験、および熱分析試験を行った。その結果、SOCが低い場合に分解生成ガスまたは電解液の漏えいが確認され、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ことが確認された。（図2.15、2.18） 3. 廃棄物処理施設で考えられるLIB破損後の火災事故メカニズムの現象を9つに整理した。直後発火と遅延発火のみでなく、発火に至らないガス噴出、分解生成ガスや電解液の漏えいの現象とともに、電解液の発火特性や着火源と合わせた注意点を指摘した。（図2.19） 4. モニタリング方法について、反応が直ちに進む直後発火に対してはモニタリングが困難であり、危険性の高いLIBの除去や、可能な場合には混入するLIBのSOCを極力減らす活動が有効である。遅延発火に対しては、サーモカメラを用いた温度管理やLIB由来の分解生成ガスの測定が有効である可能性を指摘した。

< 【サブテーマ3】 達成状況 > 3. 目標どおりの成果をあげた

「リサイクル施設等における対策技術の検討」

サブテーマ3 目標	サブテーマ3 の達成状況
<p>5ヵ所程度の一般廃棄物処理施設及びリサイクル施設を対象に、火災リスクの低減につながる対策</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 計5ヵ所の一般廃棄物処理及び小型家電リサイクル施設においてリアルタイムモニタリン

<p>技術（プロセス改善、モニタリング強化、RFIDによるLIB事前除去など）の効果を実施設で実証し、その結果に基づいた定量的な指標を提示する。基本的な火災事故防止のガイドラインをまとめる。</p>	<p>グを実施し、赤外線サーモカメラ画像などによりLIB発火現象を捕捉した。爆発を含めて複数回のLIB発火とともに、潜在的な多数の事象や遅延発火に類する現象も確認した。現状で発火等事象の検知に有効なのは、赤外線サーモカメラによる温度と火炎の検知とみられた。LIBの熱暴走で発生するガス発生も確認できたが、予防的な対策は困難な一方で、可燃性ガス濃度が高い時はLIB発火の注意を高めることは有効と考えられた。</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. 遅延発火に関する対策技術として、LIBの選別可能性を検討し、円筒型LIBは高磁力選別機によって、角型およびポリマー型のLIBは高磁力選別機または渦電流選別機によってそれぞれ選別が可能であることがわかった。 3. 破砕機内へのLIB混入による発火を防ぐ対策技術として、RFIDを用いたLIB検出可能性を検証した結果、現在の技術ではLIB検出精度に限界があること、および社会実装に向けた課題として費用負担や役割分担を挙げた。 4. 廃棄物処理施設及び小型家電リサイクル施設におけるLIB発火防止対策に関して、技術資料（ガイドライン）をとりまとめた。
---	--

5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

サブテーマ1では、品目ごとにどのようなLIBがどの程度使われているかという従来は不明だった基礎情報を整備し、サブテーマ2で得た知見と連動して電力量が大きいなど対策が必要な品目を特定したことに先導性がある。また、従来はLIB排出量と回収量の関係が不明であったのに対して、排出量と排出以降のフロー推計で全体状況を明らかにしたとともに、分別・選別などを含む適正管理対策の効果を定量的に明らかにしたことに革新性がある。

サブテーマ2では、直後発火におけるLIBの危険性に関して充電状態（SOC）が高い方が危険という従来の定性的な情報に対して、圧壊試験などの安全性評価のモデル実験とモデル計算によって容量や電力量まで加味して、具体的に3.6～5.4Wh程度以上で危険性が高いとする目安を提供した点から先導性がある。また、遅延発火に対しても、従来はメカニズムが不明だったのに対して、圧壊試験と熱分析試験などを通じて、10分程度ないし長い場合は11時間以上経過してからも温度上昇に至ることを示した点に大きな意義がある。

サブテーマ3では、廃棄物処理施設におけるリアルタイムモニタリングで、LIB起因の発火（直後発火、遅延発火）による温度挙動、火炎発生、ガス発生などに関するデータを蓄積したことで、実施設における事故の現象と検知方法の有効性を確認したこと革新性がある。また、RFIDによる検知手法の検討については、主にサプライチェーンの動脈側で使用実績の多いRFIDを静脈側で使用できるかに着眼した点から独創性がある。また、遅延発火の対策技術として高磁力選別および渦電流選別に着目したことは、既存選別手法のLIB選別への適応性を検証したという点から先導性がある。

<行政等に既に貢献した成果>

多くの研究成果（LIB起因の火災等事故の概要、不燃ごみへの混入状況、充電状態（SOC）による発火等への影響、実施設でのリアルタイムモニタリング結果など）が環境省主催「LiBコン！表彰式」（2024年2月26日、オンライン）における寺園による基調講演「リチウム蓄電池による発火事故を防ぐ」で市民向けに活用されるとともに、同イベント終了後も講演動画が環境省のホームページ「リチウ

ム蓄電池関係」において掲載されている。

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

サブテーマ1において推計した排出量、およびLIB使用製品（小型家電）に使用されているLIBに関するLIB重量、容量、電力量などの大量の基礎情報は今後の環境省や自治体におけるLIB火災防止対策における基礎情報として非常に有用である。また、サブテーマ2におけるモデル実験の結果で判明した充電状態（SOC）や電力量に関する知見から、安全性の観点で熱暴走が警戒される電動アシスト自転車、ノートPC、ロボット掃除機、コードレス掃除機などの品目を特定した結果についても、同様に有意義に利用可能である。

また、対策シナリオとして、モニタリング強化、分別収集の改善、選別の徹底、RFIDを用いたLIB自動検知を取り上げ、対策効果と対策費用の概算や、自治体の負担を減らす方向性については、環境省や経産省におけるアクションプランの検討において、長期的な対策の方向性として貢献することが期待される。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	1
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	1
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	28
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	13
マスコミ等への公表・報道等：	5
研究成果による受賞：	0
その他の成果発表：	2

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
1	Terazono A., Oguchi M., Akiyama H., Tomozawa H., Hagiwara T., Nakayama J. (2024) Ignition and fire-related incidents caused by lithium-ion batteries in waste treatment facilities in Japan and countermeasures. Resources, Conservation & Recycling, 202 (107398), 1-13 https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107398

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

< 研究代表者略歴 >

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
寺園 淳	京都大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学 博士（工学） 京都大学助手を経て、現在、国立研究開発法人国立環境研究所上級主席研究員 中央環境審議会専門委員（特定有害廃棄物等の輸出入等の規制の在り方に関する 専門委員会）（2016年度）、環境省・リチウムイオン電池等処理困難物の対策に 係る検討会委員、経産省・資源有効利用促進法のあり方に関する検討会検討委員 （以上、2021年度）、環境省・リチウム蓄電池等処理困難物の対策に係る検討会 委員及び座長（2023年度） 専門は環境工学、研究テーマは電気電子機器などの資源循環

< 研究分担者（サブテーマリーダー）略歴 >

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
1) 三宅淳巳	横浜国立大学大学院工学研究科修了 博士（工学） 横浜国立大学助手，講師，助教授を経て、 現在、横浜国立大学大学院環境情報研究院教授 主にエネルギーシステムのリスク分析を研究	2021年度 ～ 2023年度
2) 狩野真吾	東北大学大学院工学研究科地球工学専攻博士後期課 程修了 博士（工学） 国土交通省国土技術政策総合研究所・任期付研究官、 東北大学大学院環境科学研究科・リサーチフェロー、 DOWAエコシステム株式会社・企画室等を経て、 現在、イー・アンド・イー ソリューションズ株式会 社・環境事業部担当部長 専門は廃棄物・資源リサイクル	2021年度 ～ 2023年度

II. 成果の詳細

II-1 サブテーマ1「循環・廃棄過程における火災事故調査の全体設計と適正管理対策提案」

[サブテーマ1 要旨]

廃棄物処理におけるLIBに起因する発火等事故の現状把握、及び対策に必要な情報提供を行うことを目的として、自治体の処理施設における既存事件事例調査を行った。その結果、2020年度は不燃・粗大ごみ収集量1tあたり0.1件以上の発火等事故を発生している処理施設が複数あった。事故原因については、調査ができていない施設によれば80%から90%程度はLIBに起因するものであり、破碎段階でLIBに物理的衝撃を与えているためであることは確実である。

LIB排出量の推計、既存回収システムを通じた回収率の推計、高リスク製品の考察などのために、LIB使用製品（小型家電）に使用されているLIBに関する基礎的な情報を整備した。製品1台あたりのLIB重量、容量と定格電力量を取得でき、電力量から熱暴走が警戒される電動アシスト自転車、ノートPC、ロボット掃除機、コードレス掃除機などを特定した。品目別のLIB取外しやすさも整理するとともに、LIB排出量を製品台数、LIB重量、容量、電力量別にまとめ、重量ではスマートフォン、ノートPC、タブレット端末、コードレス掃除機、モバイルバッテリー、加熱式たばこ、電動アシスト自転車の寄与が大きいと推計した。将来シナリオ推計として、LIB排出量は2020年度の8,162トンから2037年に1万トンを超えて最大値に達すると推計した。

不燃ごみにおけるLIBの混入状況調査からは、LIB含有小型家電の重量は不燃ごみ全体の0.3%にもかかわらず、発火等発生事故のほとんどの原因となっている実態を明らかにした。「LIBが外れない小型家電」の分別収集によって、不燃ごみへのLIB使用製品の混入を21%～28%削減する事例を示した。

LIBの排出以降のフローを整理、推計した結果から、JBRC、PC3R、MRN、小型家電リサイクル認定事業者による回収量は排出量8,162トンの14%と推定した。

自治体が管轄する廃棄物処理施設における火災被害額は、120億円程度と推計された。うち、LIB起因による火災の割合を80%と見積もった場合の火災被害額は96億円程度と推計した。

品目別の排出量推計結果を用いて、分別収集・排出や選別等の適正管理対策による効果について、(1)対策前に対して、(2)JBRC、PC3R、MRN、小型家電認定事業者による現状の回収、(3)自治体によるLIBが外れない小型家電の回収、(4)個別品目の回収ルートへの排出徹底、(5)LIBが「取外し可能」な製品について市民によるLIB取外しとJBRCへの排出徹底、(6)(7)土間選別等による効果を試算した。また、対策シナリオとして、モニタリング強化、分別収集の改善、選別の徹底、RFIDを用いたLIB自動検知を取り上げ、対策効果と対策費用を概算して費用対効果を示し、自治体の負担を減らす今後の方向性を提案した。

以上の他、制度課題の検討などを行った。

1. サブテーマ1 研究開発目的

今後もLIBの消費量及び廃棄量が増加していくことが確実ななか、循環・廃棄過程でのLIBに関連する火災事故の防止対策が急務となっている。リチウムイオン電池の現在と将来の排出量とフローを分析し、一般廃棄物処理施設やリサイクル施設に混入する量を推計して火災事故発生ポテンシャルを示す。既存の火災事件事例と監視データの分析によって自動検知の可能性を明らかにするとともに、サブテーマ2及び3の結果もあわせて複数の適正管理対策の効果を示す。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「循環・廃棄過程における火災事故調査の全体設計と適正管理対策提案」
--------	-----------------------------------

サブテーマ1 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所、みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社
サブテーマ1 目標	リチウムイオン電池の現在と将来の排出量とフローを分析し、一般廃棄物処理施設やリサイクル施設に混入する量を推計して火災事故発生ポテンシャルを示す。 既存の火災事故事例と監視データの分析によって自動検知の可能性を明らかにするとともに、サブテーマ2及び3の結果もあわせて複数の適正管理対策の効果（リスク低減）とコストを定量的に示す。

3. サブテーマ1 研究開発内容

3.1 既存事故事例の調査 (Terazono A., et al., 2024、成果1)

国内の主に不燃・粗大ごみを対象とする自治体の廃棄物処理施設における発火等事故の情報収集として、自治体を訪問してヒアリング調査を行った。自治体の処理施設へのヒアリング調査は、発火等の情報を有する14の施設に対して、2021年10月から2022年1月にかけて実施した。多くの自治体は1つの処理施設を有するが複数の場合もあり、一方で複数の自治体からなる一部事務組合が有する処理施設の場合もある。LIB由来の発火等は主に破碎処理に関連して発生しているため、対象は破碎処理される不燃・粗大ごみとしたが、日本では分別収集の方法が自治体によって決められており、自治体によって不燃ごみの収集区分がない場合もある。

訪問の際は、発火等事故発生件数、事故原因、収集量・処理量、処理（破碎）方法、事故検知方法、検知時対応などに加えて、事故防止対策としての分別収集区分と施設でのLIB選別・除去などの項目も尋ねた。ヒアリング調査の結果は、発火等事故発生件数がほぼ明確であった11の施設についてとりまとめた。

ここで、発火・火災等事故の発生件数は把握が容易ではないことに注意を要する(Terazono, 2022)。理由の一つは、処理施設と周辺住民との関係から、大きな火災の場合を除いて積極的な公表を控えることがあるためである。もう一つの理由は、消防庁による「火災」の定義に含まれないような、小規模のうちに消し止められる消火（ボヤ）については消防への通報や記録がなかったり、自治体によって数え方がまちまちだったりするためである。本研究では、火災という重大な事故の背後に多数のヒヤリ・ハット（発火等）が存在するというハインリッヒの法則を参考にして、事故の現状を広く把握するために発火・発煙に火災を含めた「発火等事象（事故）」としばしば表現する。

3.2 使用済みリチウムイオン電池（LIB）の排出量およびフローの分析

3.2.1 LIB使用製品に関する基礎情報整備

後段のLIB排出量の推計、既存回収システムを通じた回収率の推計、高リスク製品の考察などのために、LIB使用製品（小型家電）に使用されているLIBに関する基礎的な情報を整備した。具体的には、小型家電認定事業者のリサイクル施設に搬入された充電式小型家電をサンプルとして、使用されている充電式電池の種類、使用されている充電式電池がLIBの場合にはその種類（円筒形（主に18650）、角形、ポリマー、他）、重量、定格電圧、定格容量、定格電力量、LIBの取り外しやすさなどを調査し、それらのデータを品目ごとに整理した。調査は2022年3月、2023年3月、2024年2月の3回にわたり実施した。約2700の製品サンプルについて調査を行ったが、後述の結果はそのうち各情報が判明し、記録が取れた製品の集計結果を示している。また、電動アシスト自転車については、主要メーカーのカタログデータを収集、整理した。

3.2.2 LIB排出量の推計

環境省（2021、2022）の推計方法を参考に、次式によって全国におけるLIB排出量を推計した。

(品目iの排出台数) × (品目iのうちLIB使用製品の割合) × (品目iの製品1台あたりLIB重量)

LIB使用製品の割合、製品1台あたりLIB重量は3.2.1の調査結果を用いた。品目iの排出台数は、以下の3つの方法のうち、データの有無や適切さを考慮して、品目ごとに適用可能な方法を採用した。方法1)は結果として出荷台数を意味するが、出荷台数の変動を考慮したより望ましい方法2)が採用できない場合などに採用した。保有台数は、「消費動向調査」などのデータをもとに世帯あたりまたは人口あたり保有台数を求め、2020年度(2020年10月現在、国立社会保障・人口問題研究所による2015年国勢調査の結果に基づく推計値)の世帯数または人口を乗じて計算した。

- 1) 保有台数÷(保有台数+出荷台数)
- 2) 1) の出荷台数を、出荷年と前後1年の3年間で移動平均をとったものを採用。
- 3) 保有台数÷製品寿命

また、2040年度までの将来のLIB排出量をシナリオ推計した。統計データ(内閣府消費動向調査等)の2022年度までの値の曲線回帰をもとに設定したLIB使用製品の将来の世帯/人口あたり保有台数、もしくは市場調査情報等をもとにシナリオ設定した将来の世帯/人口あたり保有台数に前述の世帯数/人口の将来推計値を乗じて計算した将来の保有台数を用い、上記方法のいずれかによって推計した。その際、製品寿命や保有台数÷出荷台数(製品寿命相当値)は2022年度の値で固定した。将来の保有台数の外挿やシナリオ設定が困難であった一部の品目については、市場調査等による将来の販売台数予測値と製品寿命を用いて寿命分布モデルにより排出量のシナリオ推計を行った。

3.2.3 一般廃棄物処理施設へのLIB使用製品排出実態の調査 (Terazono A., et al., 2024、成果1)

不燃ごみへのLIB混入量推計のための基礎情報を得るため、埼玉県坂戸市の協力を得て、同市東清掃センターに搬入された一般廃棄物におけるLIB使用製品の排出実態を調査した。調査は2022年2月に実施した。坂戸市は環境省のリチウム蓄電池等処理困難物適正処理対策モデル事業として「LIBが外れない小型家電」の分別収集を2021年12月から実施していたため、調査は不燃ごみ(2022年2月9日収集分)と「LIBが外れない小型家電」(2021年12月から2022年2月第2週までの12週の収集分)を対象とした。

3.2.4 LIBの排出以降のフロー推計

一般廃棄物等への混入量や各種回収システムによる回収量の情報収集整理、推計を行い、3.2.2で推計した排出量と比較することで、LIBの排出以降のフローを推計するとともに、各種回収システムにおける回収率の推定、評価を行った。フロー量は、一般社団法人JBRC(以下、JBRC)による回収、一般社団法人パソコン3R推進協会(以下、PC3R)およびモバイル・リサイクル・ネットワーク(以下、MRN)による回収、小型家電認定事業者による回収、不燃ごみへの混入、容器包装プラスチックへの混入について情報収集整理および推計を行った。JBRCおよびMRNによる回収量はそれぞれの公表値を引用した。PC3Rによる回収量はノートPC回収台数の公表値に3.2.1で得られたノートPC1台あたりのLIB重量を乗じて推計した。小型家電認定事業者による回収量は、小型家電リサイクル法に基づく密閉型蓄電池の回収量(環境省(2021))を、全量LIBと仮定して引用した。不燃ごみへの混入量は3.2.3で調査、推定した結果を元に全国の不燃ごみ・粗大ごみ収集量から推計した。容器包装プラスチックへの混入量は環境省による推計値(参考値)(環境省(2022))を引用した。

3.2.5 被害金額調査

日本国内におけるLIBによる被害と報道は、主に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。この中で最も施設件数、処理量が多いと考えられる①を対象として、LIBに起因すると思われる火災被害額の推計を試みた。

最初に、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た。次に、火災被害額を算出するために、収集した情報のうち、復旧費（保険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」と定義した。

本調査はサブテーマ3と連携して実施した。

3.2.6 適正管理対策の効果と対策シナリオの費用対効果

一般廃棄物処理施設やリサイクル施設に混入するLIBによる火災事故発生ポテンシャルとして、破碎方式などの影響も検討したが、明確な傾向がみられなかった。そのため、LIBそのものの混入を削減することが火災事故ポテンシャルへの影響を反映させるものとして、品目別の排出量推計結果を用いて得たLIBの重量や電力量の適正管理効果を検討することとした。すなわち、分別収集や処理施設での選別を進めることで、不燃ごみなどへのLIB混入防止にどの程度の効果があるかを検討した。

また、対策シナリオとしては、対策費用に関する情報を得ることは容易ではなかったことから、仮想的な条件を含めて取り上げ、費用対効果を評価した。具体的な対策として、前述の分別収集改善と選別徹底を取り上げるとともに、サブテーマ3で検討したモニタリングとRFIDを含めた。

3.2.7 制度課題の検討、啓発用動画の作成

エネルギー密度が高く電気製品などに広く普及しているリチウムイオン電池は、発火の危険性がよく知られており、安全確保のために厳しい法規制がなされている。また、廃棄段階においては、資源有効利用促進法で定めた指定再資源化製品として自主回収の義務が定められており、JBRCによる自主回収とリサイクルが行われている。

こうした安全管理と回収の規定にもかかわらず、リチウムイオン電池を使用する製品の多くが適切に回収されず、不燃ごみや粗大ごみの中に混入している。不燃ごみや粗大ごみは一般に、廃棄物処理施設で減容化や鉄などの回収の目的で破碎されるため、この際の物理的衝撃によって発火等の事故を引き起こしている。では、このような安全管理の対策と事故発生の現実とのギャップは、なぜ生じているかについて、ライフサイクルの中で安全管理の規定は製造・使用段階にほぼ限定されていること、ならびに廃棄段階における自主回収の対象製品も限定されていること、の2点を挙げて制度の検討を行った。

この他、一般への普及・啓発が重要との認識から、研究計画にはなかった動画の作成も行い、「その他の成果発表」に示した。

4. サブテーマ1 結果及び考察

4.1 既存事故事例の調査（Terazono A., et al., 2024、成果1）

4.1.1 発火等事故発生件数の傾向

自治体の廃棄物処理施設11箇所に対するヒアリング調査の結果、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件以上であった。3.1で述べたように発火等事故発生件数の把握は容易ではなく、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、発生件数が変動する要因になっていることには注意を要する。その上で、2020年度に最大807件であった施設Aにおける発火等事故発生件数の経年変化を図1.1に示す。2021年度の発生件数も追加ヒアリング調査を行って1,093件と判明し、2015年度の67件から増加傾向が続いていることがわかった。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あった。

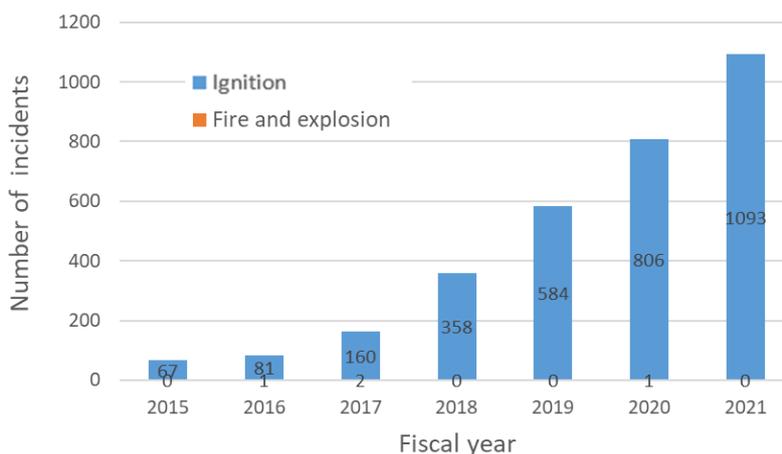


図1.1 施設Aにおける発火等事故発生件数の経年変化

4.1.2 発火等事故の発生場所

発火等事故の発生場所について、同じ施設Aで得た2021年度の結果を図1.2に示す。施設A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であり、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件であった。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炎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ことは明らかである。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する。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る。

破碎と選別を経た後の残渣や金属類の保管段階では1件の発生件数であったが、これは残渣が可燃ごみピットへ送られた後の発生件数36件を含んでいない。可燃ごみピットでは不燃・粗大ごみ由来の残渣以外にも元の可燃ごみが原因である可能性もあるためであるが、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であると考えれば、全体（1,093件+36件=1,129件）の3.3%は残渣保管段階でも発生している計算になる。LIBは破碎・選別の直後で発火せず、残渣として遅延発火する場合がある。可燃ごみピットでの火災は大事故につながるため非常に注意を要する。他の施設では発生場所の詳細なデータは少なかったが、搬送段階が最も多くて破碎段階を含めるとほぼ9割以上であるとともに、残渣保管の段階でも発生事例を指摘する施設が多かった。

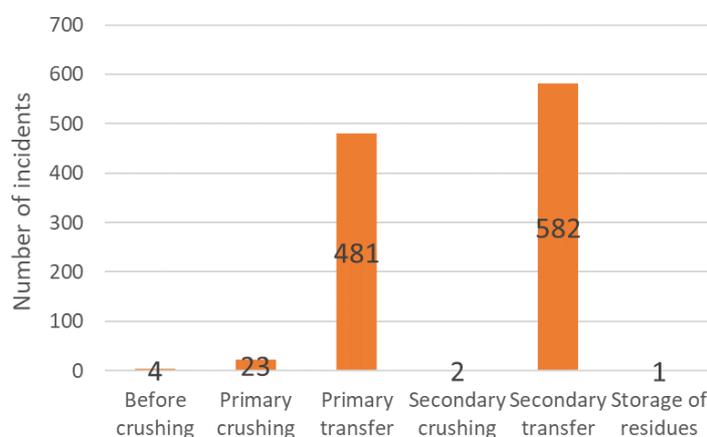


図1.2 施設における発火等事故の発生場所（2021年度）

4.1.3 事故原因としてのLIBと小型家電

事故原因について、調査ができる施設は限られていた。しかしながら、一定の調査を行っている施設によれば、施設Aの場合は原因の80～85%はLIB、施設Bでは約8割の400件程度の事故原因はほぼ電池（電池以外は3件）かつ電池の大半はLIB、施設Eでは事故の9割以上はLIBが原因、施設Iでは事故の約6割で火元を確認しその95%がLIBなどの充電式電池、などのような見解が得られた。これらを総合すると、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LIBに起因するものと推測できる。

発火等事故発生時に検出されることが多いLIB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（環境省（2022））ともほぼ一致する結果であった。

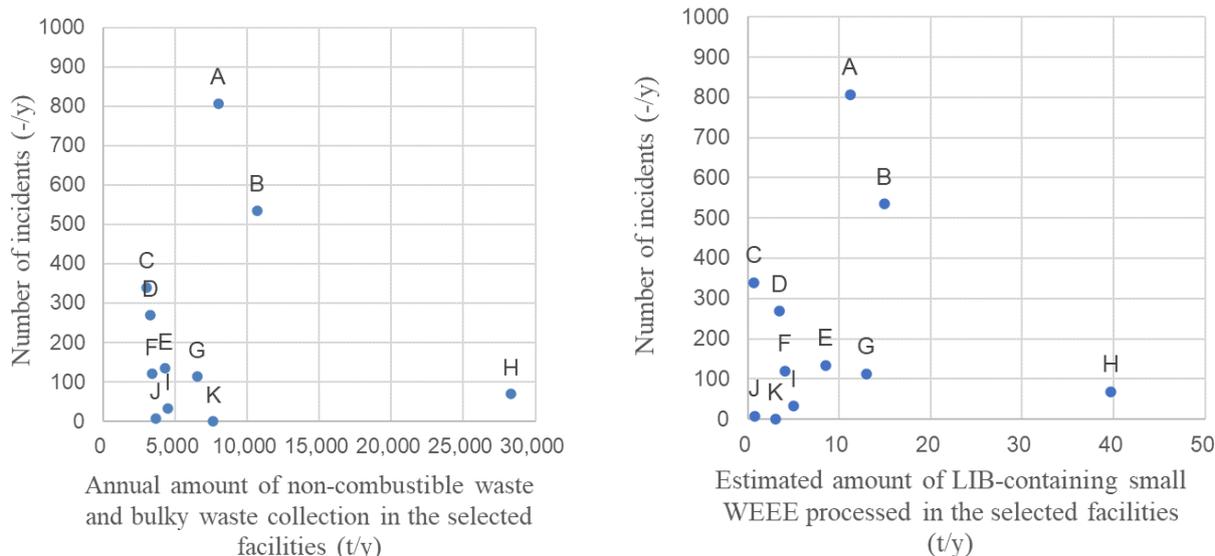
4.1.4 収集量・処理量と発火等事故発生件数との関係、分別収集及びLIB除去の効果

日本ではLIBの自主回収が行われているが、排出量全体に対する回収率は小さいと考えられ、取外しが難しいLIB使用製品も増えている。日本ではLIB使用製品の多くは小型家電製品に分類され、2013年の小型家電リサイクル法施行以降、分別収集を行う自治体が増加している。

ヒアリング調査では当該施設の自治体における小型家電分別収集の実施状況を調査した結果、7つの自治体で実施、4つで未実施であった。実施している場合はいずれも回収ボックスを拠点に設置して、9品目から16品目程度を指定して回収している場合が多く、加えて拠点での持込みを行っている自治体もあった。また、LIBによる処理施設での事故防止を目的とした「LIB取外しが困難な小型家電」の分別収集については、11の施設のうち5つの施設（うち1施設は2つの自治体からなり、1つの自治体のみ実施）で実施していた。さらに、収集後に処理施設で破碎される前に作業員が可能な範囲でLIB含有小型家電を手選別で除去している施設が5つあり、このうち2つの施設では持込みごみなど一部に限って行われていた。

このようにして施設ごとに得られた、不燃・粗大ごみの収集量・処理量と分別収集及びLIB除去の状況を表に整理した（表1.1）。不燃・粗大ごみの収集量はaであり、これに不燃・粗大ごみにおけるLIB含有小型家電の割合として0.2%を乗じて、LIB含有小型家電の収集ポテンシャルbを得る。ここで、小型家電の分別収集があることで不燃・粗大ごみにLIB含有小型家電が混入することを削減できる割合cについて、環境省調査（環境省（2022））における小型家電分別収集と不燃・粗大ごみへの排出先の比（排出先二者のうち、小型家電へはゲーム機で37.9%、電気かみそりで24.7%、掃除機で27.1%）を参考にして、30%と設定した。また、「LIB取外しが困難な小型家電」の分別収集がさらに追加されることによってLIB含有小型家電が不燃・粗大ごみへの混入の削減割合dについては、4.2.3を参考にしながら低めの20%に設定した。このような削減割合cとdを用いて、収集された不燃・粗大ごみにおけるLIB含有小型家電の推定量eが算出される。さらに、処理施設でのLIB含有小型家電の手選別による除去割合fについては、参考になる数値がなく、施設Kでの目視によって任意に80%と設定した。LIB小型家電収集量eと処理施設での除去割合fを用いて、LIB含有小型家電の処理量gを計算する。各施設における発火等事故発生件数hとa及びgから、不燃・粗大ごみ収集量あたりの発火等事故発生原単位h/aと推定LIB含有小型家電処理量あたりの発火等発生原単位h/gが表1.1のように算出された。h/aは2つの施設で0.1を超えており、不燃・粗大ごみ収集量1tあたり0.1件以上の発火等事故が発生していることを意味する。

ここで、発火等事故発生件数hと、不燃・粗大ごみ収集量a及び推定LIB含有小型家電処理量gとの関係を図1.3(1)および(2)にそれぞれ示す。不燃・粗大ごみ収集量aと発火等事故発生件数hとの間の相関係数は-0.025であり相関関係は認められない。推定LIB含有小型家電処理量gと発火等事故発生件数hとの間の相関係数も0.041のために相関関係はない（大都市の施設であるHの点を外れ値として除くと相関係数は0.513）が、正の方向に改善したことになる。これより、小型家電の分別収集や処理施設でのLIB含有小型家電除去によって、破碎処理へのLIB混入量を削減することは発火等事故の減少につながる可能性が示唆される。



(1) 不燃・粗大ごみ収集量(a)と発火等事故発生件数(h) (2) 推定LIB含有小型家電処理量(g)と発火等事故発生件数(h)

図1.3 11箇所の処理施設における不燃・粗大ごみ収集量(a)、推定LIB含有小型家電処理量(g)及び発火等事故発生件数(h)の関係

表1.1 2020年度の11箇所の処理施設における不燃・粗大ごみ収集量(a)、推定LIB含有小型家電処理量(g)、発火等事故発生件数(h)など

	施設	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
不燃・粗大ごみ収集量 (t/y)	a	7,992	10,687	3,022	3,297	4,320	3,394	6,515	28,328	4,491	3,635	7,630
不燃・粗大ごみにおけるLIB含有小型家電ポテンシャル (t/年)	$b=a*0.002$	15.985	21.374	6.044	6.594	8.640	6.788	13.030	56.656	8.982	7.270	15.26
小型家電の分別収集による削減割合 (-)	c	0.3	0.3	0.3	0.3	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0
「LIBが外れない小型家電」の分別収集による削減割合 (-)	d	0	0	0.2	0	0.013	0.2	0	0	0.2	0.2	0
LIB含有小型家電の推計収集量 (t/年)	$e=b*(1-c)*(1-d)$	11.19	14.96	3.38	4.62	8.53	5.43	13.03	39.66	5.03	4.07	15.26
処理施設における手選別・除去による削減割合 (-)	f	0	0	0.8	0.24	0	0.24	0	0	0	0.8	0.8
LIB含有小型家電の推計処理量 (t/y)	$g=e*(1-f)$	11.19	14.96	0.68	3.51	8.53	4.13	13.03	39.66	5.03	0.81	3.052
発火等発生件数 (件/年)	h	807	535	340	269	134	120	113	69	33	8	0
収集量当たり発火等発生件数(件/t-不燃・粗大ごみ推計収集量)	h/a	0.101	0.050	0.113	0.082	0.031	0.035	0.017	0.002	0.007	0.002	0.000
LIB含有小型家電処理量当たり発火等発生件数 (件/t-LIB含有小型家電推計処理量)	h/g	72.12	35.76	502.27	76.68	15.71	29.08	8.67	1.74	6.56	9.83	0.00

4.1.5 検知方法と検知時の対応

処理施設においては、運転管理のためにITVカメラが一般的に設置されており、それ以外の破碎や搬送段階を主とした検知方法と検知時の対応を尋ねた。その結果、全11施設の中で、検知方法は火災（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施設であった。赤外線サーモカメラは高価なため、1施設の残渣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た。この他、11施設の中で検知方法を有していない施設が1つあった。発火等事故検知の場合、11施設のうち自動消火が8（散水が7、消火器が1）、手動消火が2、不明が1であった。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

ある。

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施設であった。発火等事故の程度にもよるが、年に数十件以上の発火等事故の場合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）に相当することになり、日常茶飯事になって迅速な復旧を求められている現状がある。このように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ともに、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施設からあった。

4.2 使用済みリチウムイオン電池の排出量およびフローの分析

4.2.1 LIB使用製品に関する基礎情報整備

4.2.2 LIB排出量の推計

4.2.3 一般廃棄物処理施設へのLIB使用製品排出実態の調査（Terazono A., et al., 2024、成果1）

展開調査を行った1.93トンの不燃ごみ（2022年2月9日収集分）には、LIB使用製品が5.7kg含まれており、不燃ごみへの混入率は0.3%と計算された。坂戸市がモデル事業の効果把握の目的で行った別の展開調査（2022年2月2日収集分不燃ごみ）ではLIB使用製品の混入率として0.2%という調査結果が得られており、本研究で得られた値と同等であった。一方、「LIBが外れない小型家電」については12週間で340kgの収集量であった。年間を50週としてこの量を年間あたりに換算すると1.42トン/年となる。この量は同市の不燃ごみ推計収集量1,844トン/年に対して約0.08%に相当する。これらの製品はモデル事業として分別排出・収集されたものであり、同市では通常であれば不燃ごみとして排出されるものであると考えれば、不燃ごみへの混入率調査結果0.2%～0.3%と合わせて、不燃ごみには0.28%～0.38%のLIB使用製品が排出されると推定された。この結果より、モデル事業による「LIBが外れない小型家電」の収集によって、不燃ごみへのLIB使用製品の混入を21%～28%（0.08%/0.28%～0.38%）削減する効果があったと考えられる。同市ではモデル事業開始後において発火事故が一定程度減少していたと当時認識されており、この結果はその認識とも整合するものである。

また、「LIBが外れない小型家電」340kgのうち55.19kgのサンプルを対象に分解・解体によるより詳細な調査を行ったところ、LIBが合計で9.38kg含まれており、詳細調査対象製品の重量の17%であった。

4.2.4 LIBの排出以降のフロー推計

4.2.5 被害金額調査

4.2.6 適正管理対策の効果

4.2.7 制度課題の検討

サブテーマ1 参考文献

環境省（2021）令和2年度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結果（業務報告書等抜粋）

環境省（2022）リチウム蓄電池等処理困難物対策集、<https://www.env.go.jp/recycle/libtaisaku.pdf>

経済産業省（三菱総合研究所）（2020）経済産業省委託調査令和元年度地球温暖化問題等対策調査（使用済小型電子機器等の再資源化事業調査）報告書

環境省（2024）リチウムイオン蓄電池等処理困難物対策集（令和5年度版）

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，Vol.33，No.3，pp.214-228

eurostat、Waste statistics – recycling of batteries and accumulators、https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_recycling_of_batteries_and_accumulators

Stahl H., et al.: Study in support of evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators. Final Report. Under the Framework contract on economic analysis of environmental and resource efficiency policies ENV.F.1./FRA/2014/0063 (2018)

Terazono A., Oguchi M., Akiyama H., Tomozawa H., Hagiwara T., Nakayama J. (2024) Ignition and fire-related incidents caused by lithium-ion batteries in waste treatment facilities in Japan and countermeasures. Resources, Conservation & Recycling, 202 (107398), 1-13

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

目標：

リチウムイオン電池の現在と将来の排出量とフローを分析し、一般廃棄物処理施設やリサイクル施設に混入する量を推計して火災事故発生ポテンシャルを示す。
既存の火災事故事例と監視データの分析によって自動検知の可能性を明らかにするとともに、サブテーマ2及び3の結果もあわせて複数の適正管理対策の効果（リスク低減）とコストを定量的に示す。

目標を大きく上回る成果を上げた。

不燃ごみなどに混入するLIBの量は0.3%程度とわずかであるとの実態調査結果を得るとともに、不燃ごみではなく小型家電を大量に調査することで、LIB使用製品（小型家電）に使用されているLIBに関するLIB重量、容量、電力量などの大量の基礎情報を整備した。当初予想していた以上の基礎情報を得たことと、サブテーマ2との連携で安全性の観点から電力量に注目できたことから、電力量から熱暴走が警戒される電動アシスト自転車、ノートPC、ロボット掃除機、コードレス掃除機などを特定することができた。さらに、品目別の排出量推計結果を用いて、事故発生ポテンシャルとして処理対象LIB量（電力量、重量ベース）と分別収集・排出や選別等の対策効果を定量的に示した。また、対策シナリオとして、モニタリング強化、分別収集の改善、選別の徹底、RFIDを用いたLIB自動検知を取り上げ、対策効果と対策費用の概算を示して、自治体の負担を減らす方向性を提案した。

当初、発火・火災の定義が施設によってばらつきが大きかったり、発火等発生件数の情報の未整備、あるいは事故報道による自治体や施設の風評被害を警戒されるために、調査の実施が難航した。そのようななか、熱心に協力頂けた施設との信頼関係を築くことで、リアルタイムモニタリング（実施はサブテーマ3として）も含めて処理状況や対策などの貴重な情報を入手し、全国レベルの推計と実施設の状況との比較もしながら対策の評価や提案を行うことができた。

II-2 サブテーマ2「火災事故メカニズムの解明」

[サブテーマ2 要旨]

廃棄物処理施設に混入したリチウムイオン電池（LIB）に起因するおける火災（発火等を含む）について、直後発火と遅延発火を対象として安全性評価のモデル実験などで検証を行い、その結果をもとに火災事故メカニズムの整理と提案、ならびにモニタリング方法の提案を行った。

まず、事故の大多数である直後発火の検証のために、安全性評価のモデル実験としてLIBに対する圧壊試験（一部釘刺し試験）を実施し、充電状態（SOC）が高くなるほどハザードレベルや最大温度が高い傾向を得た。特に円筒型のLIBに対しては高いSOCで猛烈な発火等が確認されたが、容量や電力量も影響する。本章で得た知見からは、SOC 100%を想定したLIBとしては、電力量では3.6～5.4Wh（単電池の場合、容量で1,000～1,500mAh）程度以上で危険性が高いとみられる（サブテーマ1の知見からは、例えば電動アシスト自転車、ノートパソコン、掃除機、タブレット端末、モバイルバッテリーが代表的なLIB使用製品である）。SOCが低い場合は相対的に危険性は小さいが、容量や電力量も加味する必要がある。ポリマーの電池に対しては、限られたモデル実験の結果と機械学習モデルによる予測計算によれば、円筒型よりも危険性が小さい結果が得られたが、さらに知見の蓄積が必要である。

また、頻度が少ないものの大きな被害に至る場合もある遅延発火の検証のために、安全性評価のモデル実験として加熱試験と圧壊試験、および熱分析試験を行った。その結果、SOCが低い場合に分解生成ガスまたは電解液の漏えいが確認された。遅延発火の模擬として実施した断熱材を用いた圧壊試験や、LIB部材の熱分析試験結果を用いた速度論的解析によれば、10分程度ないし長い場合は11時間以上経過してから、ジュール熱および化学反応によって温度上昇に至ることが確認された。

以上のような検証結果や文献などを総合して、廃棄物処理施設で考えられるLIB破損後の火災事故メカニズムの現象を9つに整理した。直後発火と遅延発火のみでなく、発火に至らないガス噴出、分解生成ガスや電解液の漏えいの現象とともに、電解液の発火特性や着火源と合わせた注意点を指摘した。

これらの結果からモニタリング方法の検討と提案を行った。反応が直ちに進む直後発火に対してはモニタリングが困難であり、危険性の高いLIBを分別収集や破砕前の選別によって除去することや、可能な場合には、混入するLIBのSOCを極力減らすため啓発活動が有効である。遅延発火に対しては、サーモカメラを用いた温度管理やLIB由来の分解生成ガスの測定が有効である可能性を指摘した。

1. サブテーマ2 研究開発目的

廃棄物処理施設に混入したLIBに起因するとされる火災について、LIBの自然発火・蓄熱発火などを含む火災事故メカニズムを解明するとともに、これら火災事故防止に向けて必要な火災リスク低減の条件および早期発見のためのモニタリング方法を提案することを目的とする。

2. サブテーマ2 研究目標

サブテーマ2	「火災事故メカニズムの解明」
サブテーマ2 実施機関	横浜国立大学
サブテーマ2 目標	既存の火災事故事例を模擬したモデル実験によって、原因特定困難となっている処理残渣の自然発火・蓄熱発火を含む火災事故メカニズムを解明し、火災リスク低減の条件と早期発見のためのモニタリング方法を提案する。

3. サブテーマ2 研究開発内容

まず、廃棄物処理施設における火災等事故の調査を通じて、大多数はLIBを破砕処理した直後の発火（直後発火）である一方、一定の時間差を置いた発火（遅延発火）も少なからずあって大きな被害に至る場合もあるため、直後発火と遅延発火を分けた検証が必要であると考えた。

そこで、直後発火の検証のために、安全性評価のモデル実験としてLIBに対する圧壊試験（一部釘刺し試験）を実施した。このとき、試験回数が限られることからモデル計算で補うために、安全性試験データベースおよびそれに基づく機械学習モデルを用いて、結果の考察を行った。なお、圧壊試験は、1回目で（特にポリマーに対して）十分な知見が得られなかったと判断して、2回目を追加で実施した。

次に、遅延発火の検証のために、安全性評価のモデル実験として直後発火と同様の圧壊試験に加えて、加熱試験と熱分析試験を実施した。遅延発火は直後発火と比べて発生確率が低いことに加えて、長時間の模擬が安全管理上困難であるため、断熱材を用いて短時間で遅延発火を模擬する圧壊試験を試みた。また、熱分析試験の結果を加えて、遅延発火メカニズムの解明に努めた。

以上のような、直後発火と遅延発火に対するモデル実験、モデル計算（直後発火のみ）の結果を総合して、火災事故メカニズムの整理と提案を行った。

また、これらの結果より、モニタリング方法の提案を行った。

なお火災の用語について、狭義では現象の一部しか捉えない場合もあるが、本研究全体を通じて広く捉えており、本サブテーマでも発火・破裂・ガス噴出も含めて広く論じているので理解されたい。

3.1 直後発火の検証（モデル実験、モデル計算）（国立環境研究所との連携により実施）

3.1.1 試験サンプル

3.1.2 モデル実験の試験方法と試験水準

3.1.3 モデル計算の方法

3.2 遅延発火の検証（モデル実験としてガス測定を含む加熱試験と圧壊試験、および熱分析試験）

遅延発火現象は、図2.3に示す多段階の事象により発生することが考えられる。具体的には、LIB破砕に伴う内部短絡による温度上昇、その温度上昇により誘発される電解液等の熱分解反応に伴う温度上昇、さらに熱暴走に伴う急激な温度上昇により、最終的に電解液の発火温度に達し、ある程度の時間をかけて発火に至る現象である。

遅延発火現象を理解するために、下記3段階の実験的検討を行った。なお、圧壊試験では直後発火に寄与する内容も含む。

1. 加熱試験：主にLIBが破砕機で破砕されることに起因するLIB火災は、LIB部材単体あるいは混合物の熱暴走が発生することにより最終的に火災に至る。したがって、LIBを強制的に加熱することにより熱暴走を誘発し、発生する現象（温度上昇やガス噴出の状況など）を実験的に把握することが重要であり、特にSOCの違いによる熱暴走及び発火の有無を検証する。
2. 圧壊試験：廃棄物処理施設でLIB部材が熱分解に至るためには、LIB破砕時に発生する内部短絡に伴う温度上昇を理解する必要がある。したがって、LIB破砕に伴う温度上昇によりLIB部材の熱分解が開始し、発煙・発火に至るどうかを検証する。
3. 熱分析試験：加熱試験および破砕試験では、複数の部材から構成されるLIBに着目し実験を行い、発煙・発火の有無を検証するが、さらに詳細な検討のためには部材そのものに着目した検証が必要である。したがって、熱分析により、各LIB部材あるいは混合物の熱的特性（発熱開始温度や発熱量）を分析し、加熱実験及び破砕実験で得られた結果と併せて、遅延発火現象を検証する。

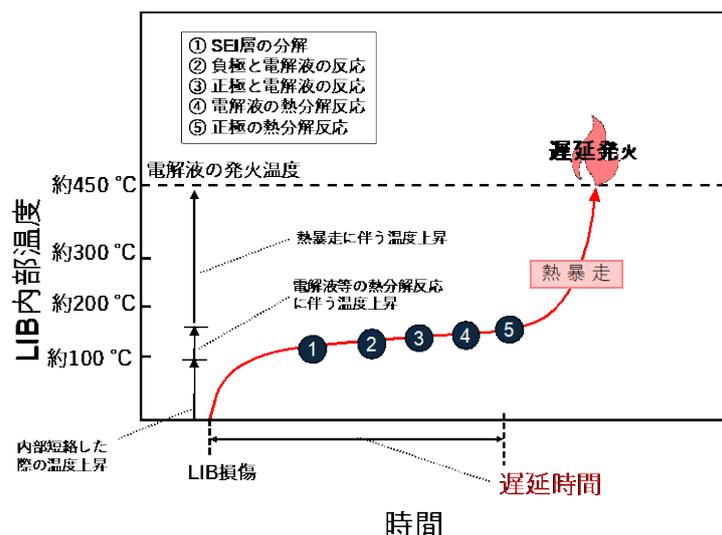


図2.3 遅延発火現象の概念図

なお、本節の試験サンプルとしては代表的なLIBの1つである円筒型LIB（株式会社プラタ製）を用いた。LIB試験サンプルに関する情報を表2.6に示す。電解液のうち、ジエチルカーボネート（DEC）の沸点は126°C、引火点は25°C、自然発火点は445°Cであり、エチルカーボネート（EC）の沸点は244°C、引火点は143°C、自然発火点は465°Cである。

表2.6 LIB試験サンプルに関する情報（販売業者への問合せ結果より情報入手）

LIBの形状	円筒型（18650型）
容量	2500 mAh
セル電圧	3.6 V
電解液組成	LiPF ₆ + DEC + EC
正極材	リチウムニッケルマンガンコバルト酸化物 (Ni : Co : Mn = 6 : 2 : 2)
負極材	グラファイト

3.2.1 加熱試験

LIBを構成する部材の熱分解反応を理解することを目的とし、加熱試験を実施した。加熱試験条件は、図2.4に示す実験概念図に基づき試験装置を作製し、ホットプレートの設定温度を300°Cとし、加熱中のLIBの温度挙動や生成ガスなどを分析した。SOCは松定プレジジョン製のECD81を用いて調整した。

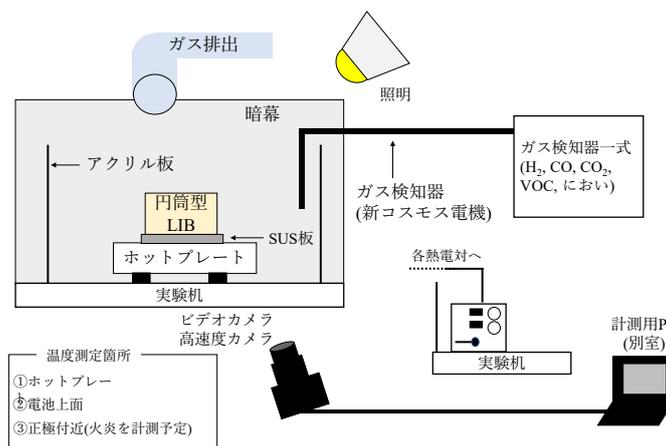


図2.4 加熱試験の実験概念図

3.2.2 圧壊試験

LIBの圧壊試験を実施して、各現象発生時の可視測定、LIB表面温度測定、および生成ガス測定を実施した。なお、LIB破碎時の遅延発火とともに直後発火現象の取得も目的としている。本試験では油圧式破碎機（コベルコ科研製、国立環境研究所所有の簡易圧壊治具）を用いてLIBを破碎するとともに、熱電対（正極側と負極側それぞれの表面にテープにて固定）および一部は赤外線サーモカメラ（日本アビオニクス製H9000およびInfReC R550）を用いてLIBの表面温度の経時変化も測定した。油圧式破碎機は、LIBを挟み込む両端の金具にそれぞれ1枚刃、2枚刃の楔形治具を取り付けたもので、一方を固定し、もう一方を手動油圧ポンプにて押し込んでいく方式のものである。また、分解生成ガス測定のためにガス吸引用ゴムホースを取り付けた新コスモス電機製の可燃性ガス（メタン）、水素、二酸化炭素、一酸化炭素、VOC（ニオイ）検知器を備えた。SOCの調整は加熱試験と同様である。

3.2.3 熱分析試験

部材そのものに着目してLIB破碎時の遅延発火現象の要因を明らかにするため、LIBを構成する各部材の発熱量や発熱開始温度を取得することを目的とした熱分析試験を実施した。LIBを構成する電極（正極材・負極材）、電解液などについて、それぞれ単体および組み合わせの混合物を試料として昇温試験を実施し、発熱の有無及び発熱開始温度を取得し、LIBの破碎後に遅れてLIBが発火する現象が説明可能かどうかについて検証するとともに、反応速度論解析を用いてLIB部材の断熱温度上昇を推算した。

既往研究では、LIB内部で起こる可能性のある発熱反応として、1)負極による電解液の酸化反応、2)電解液の熱分解反応、3)正極上での電解液の酸化反応、4)負極の熱分解反応、5)正極の熱分解の5つが挙げられている。そのため、試料は①電解液(LiPF₆ 1M/EC:DEC (1:1))と正極 LiCoO₂と負極Graphite)の混合物、②電解液と負極の混合物、③電解液、④電解液と正極の混合物、⑤負極、⑥正極を用いた。電解液と正極と負極の混合物を用いた実験では、試料容器内で固体である正極と負極を電解液で満たすことのできるカルベ式反応熱量系(C80)を用いた。その他の試料に関しては示差走査熱量計(DSC)を用いた。測定雰囲気はLIBが破碎された後に空気と触れることを考慮して空気とした。また、反応速度論的解析に関して、熱分析結果及びFriedman法を用いて、電解液および電解液・正極・負極混合物の断熱温度上昇を推算した。なお、昇温速度に関しては、DSCを用いた電解液の測定では0.5, 1, 2, 3, 4 K/min、C80を用いた混合物の測定では0.5, 1, 1.5, 2 K/minとした。

3.3 火災事故メカニズムの提案

LIBは、正極材料、負極材料、電解液溶媒、電解質塩、セパレータ等から構成され、その構成材料はメーカーにより異なるため、各メーカーのLIBの火災危険性はそれぞれ異なる。また、廃棄物処理施設における具体的な工程もそれぞれ異なる。しかしながら、LIBの破碎処理を通じて直後発火や遅延発火など

の現象が生じていることを検証した前述の実験結果に加えて、文献レビューやヒアリング結果に基づき、火災事故メカニズムの整理と提案を行う。

3.4 モニタリング方法の提案

前項の火災事故メカニズムに基づき、各現象の予兆を検知するためのモニタリング項目を抽出し、提案する。

4. サブテーマ2 結果及び考察

4.1 直後発火の検証（モデル実験、モデル計算）（国立環境研究所との連携により実施）

4.1.1 モデル実験の結果及び考察

4.1.2 モデル計算の結果及び考察

4.2 遅延発火の検証（モデル実験としてガス測定を含む加熱試験と圧壊試験、および熱分析試験）

4.2.1 加熱試験

廃棄物処理施設には様々な種類や形状、充電率のLIBが混入すると考えられるが、下記にはLIBのSOC（充電率）が60%、40%、0%の条件下で測定した代表的な試験結果を示す（図2.12及び表2.11）。

(1) SOC 60%の場合

LIBの正極側に備えられている安全弁からガスが噴き出した後に内部から火炎が噴出した。また、温度データと高速度カメラでの撮影結果から、ガスの大量噴出から火炎の噴出にかけてLIB表面温度が急激に上昇し、LIBの熱暴走が発生したことが確認された。また、安全弁が作動するまでにガス検知器は作動しなかった一方で、安全弁が作動してから、熱暴走が起こるまでに検知されたセンサーとしてはおいセンサーが確認され、他の水素センサー、メタンセンサー、二酸化炭素センサー、一酸化炭素センサーは熱暴走発生後にガス検知が確認された。

(2) SOC 40%の場合

LIBの正極側に備えられている安全弁からガスが噴き出し内部から火花が発生した。また、温度データと高速度カメラでの撮影結果から、ガスの大量噴出から火花の発生にかけて温度が急激に上昇し、LIBの熱暴走が発生したことが確認された。ガス検知器の作動はSOC 60%の際と同様である。

表2.11 加熱試験における各SOCに応じたLIBとセンサー類の挙動

	SOC 60%	SOC 40%	SOC 0%
熱暴走発生	○	○	-
電解液の漏出	○	○	○
ガス噴出	○	○	-
火花の噴出	○	○	-
火炎の噴出	○	-	-
安全弁が作動する前に 検知したセンサーの有無	-	-	-
安全弁が作動した後に検 知したセンサー	においセンサー	においセンサー	においセンサー
熱暴走発生後に 検知したセンサー	H ₂ センサー CH ₄ センサー、 CO ₂ センサー、 COセンサー	H ₂ センサー、 CH ₄ センサー、 CO ₂ センサー、 COセンサー	熱暴走発生せず

(3) SOC 0%の場合

LIBの正極側から少量のガスが漏れ出したことから安全弁の作動が判断された。また、温度データと高速度カメラでの撮影結果から、LIB内部からのガスが発生している際も急激な温度上昇は確認されていないことから、LIBの熱暴走は発生していないことがわかった。安全弁が開いた後においてセンサーが検知した一方で、他のセンサーは作動しなかった。

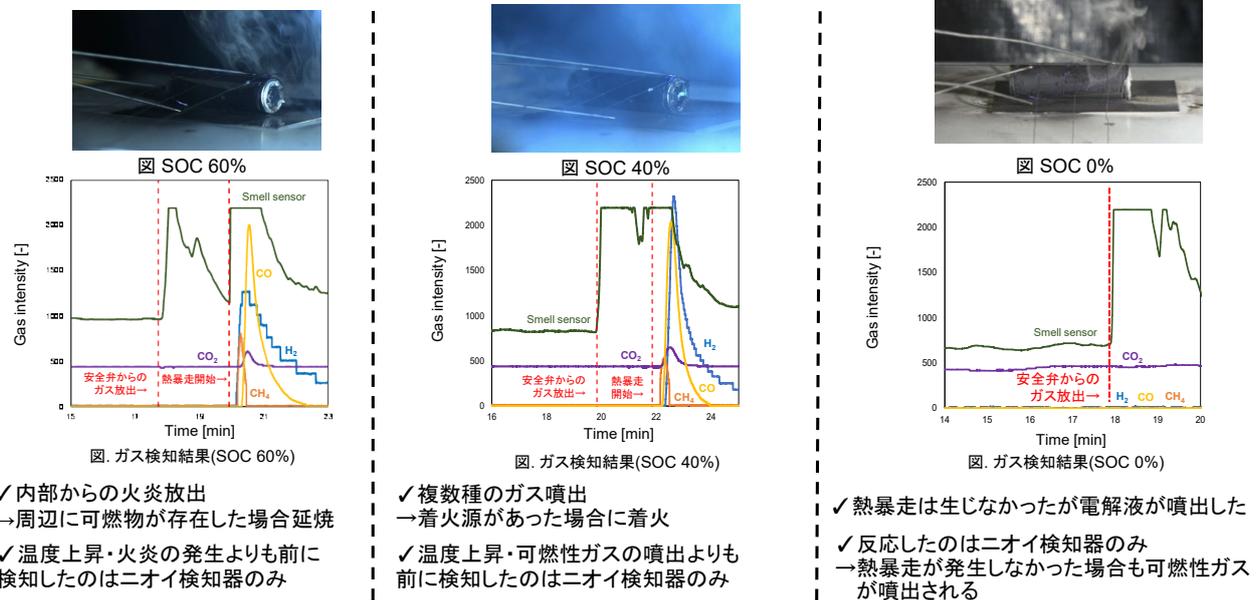


図2.12 加熱試験結果の概要

4.2.2 圧壊試験

代表的な試験結果を図2.13及び図2.14に示す。LIB破碎後の現象は大きく下記3つに分類された。

(1) 破碎後、多数の火花発生とともに、噴出したガスに着火する（直後発火）

LIBに対して2,3回目の楔形治具押し込み時にLIBが発火し、火花発生とともに激しく噴出したガスに着火する現象がみられた。熱電対での測定温度は発火とともに著しく上昇した。これらは、LIBのSOCが比較的高い（60～100%程度）条件で多く観察された。

(2) 破碎後、白煙や黒煙を伴うガスが噴出する（ガス噴出。数秒後に着火した場合、直後発火）

LIBに対して複数回目の楔形治具押し込み時にLIBから激しく白煙や黒煙を伴うガスが噴出し、場合によっては噴出ガスに着火する。これらは、LIBのSOCが中間的な値（約30～60%程度）の条件で多く観察された。

(3) 破碎後、温度上昇するが着火しない（分解生成ガスまたは電解液の漏えい）

LIBに対して複数回目の楔形治具押し込み時に熱電対測定温度が緩やかに上昇するが、着火には至らない現象がみられた。場合によっては微量のガス噴出で白煙や黒煙を伴うことがあった。これらは、LIBの初期SOCが比較的低い（約0～30%程度）条件で多く観察された。

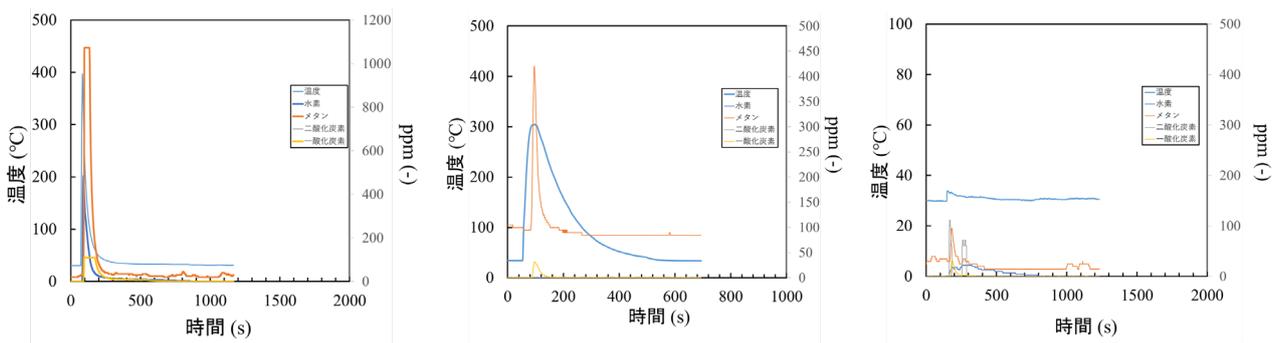


図2.13 圧壊試験によるLIB表面温度変化の例（左から、SOC=100%, 40%, 0%）

一方で分解生成ガスについては、(1)の直後発火に関しては測定したガス種（メタン、CO, CO₂, H₂）が検出された。また、(2)(3)で着火せずにガス噴出（微量含む）がみられた場合は、LIB破碎後にメタン、CO, CO₂が検出され、(3)でガス噴出がなかった場合はメタンのみ検出された。いずれのガス測定結果に関して、今回活用したガス検知器では定性的な検討のみが可能であり、またLIB自体の個体差もあることから、ガス測定結果の傾向としてCO, CO₂が検知された場合には、LIB部材の分解を示すことが可能と考えられた。(1)の直後発火は瞬間的な反応のために表面温度やガス測定をモニタリングする意義を認めにくい一方で、(3)のような緩やかな反応に対しては、破碎されたLIBの表面温度上昇を検知することが可能であった。

以上の結果より、LIB破碎後の現象はSOCによって分類でき、直後発火に関してはSOCが比較的高い場合に検証された。一方で、遅延発火に関しては上記の実験では検証されず、安全管理の観点から長時間の実験が困難であったことから、次のような追加検証を行った。すなわち、破碎後のLIBからの放熱及び電解液の漏洩を極力抑えることで廃棄物処理プロセス内での遅延発火現象を簡易的に模擬することを試み、低いSOC（0～40%）のLIBに断熱材（グラスウール）を巻いた破碎実験を実施した。

図2.14に断熱材をLIBに巻いた際のLIB破碎時の温度変化を示す。その結果、LIBの個体差や破碎操作の再現性などの理由により、同じSOCでも結果が異なる場合があるものの、SOC40%の場合、LIBに対して複数回目の押し込み後に激しく火花が発生したケースを得た。これは、LIBに断熱材を巻かない条件での現象とは大きく異なる現象であり、LIB破碎後の遅延発火現象はLIBからの放熱の程度の条件が重要となる可能性が示された。さらに、同様の実験において、図2.15に示すとおり、SOC30%の場合に約600秒間、微小な温度上昇を継続した後、急激な温度上昇に至った結果も得られた。したがって、廃棄物処理プロセス内においてわずかに損傷したLIBが、放熱が起こりにくい状態におかれた場合、ジュール熱および化学反応により蓄熱・熱暴走に至り、一定時間後に遅延発火が発生する可能性があることが示された。

赤外線サーモカメラの結果に関しては、図2.15の上図は3秒に1回の時間間隔で破碎されるLIBの表面温度を撮影した結果であり、左図にて急激な温度上昇を検知した後、時間経過とともに中央図にて138.2℃（33秒後）、30.4℃（192秒後）を示した。また、下図は1秒に1000回の時間間隔で破碎されるLIBの表面温度を撮影した結果であり、左図はLIB正極付近及び負極付近の温度変化、右図はある時間のLIB表面温度を示す。下左図より、正極及び負極ともにLIBが破碎された直後から温度上昇し、その後温度低下する履歴を計測することができた。以上より、赤外サーモカメラは低い時間分解能であっても破碎によるLIB表面温度上昇を検知することができたことから、モニタリング用機器としての観点から、直後発火やガス噴出が示す瞬間的な反応とともに、遅延発火や分解生成ガス漏えいのような緩やかな反応に対しても、LIBの温度上昇を検知することが可能であると考えられた。一方で、電解液発火が発生すれば赤外サーモグラフィにて検知可能と考えられる一方で、破碎の程度次第では電解液が漏えいの際にLIBの表面温度が上昇しないことが考えられるため、その場合には赤外サーモカメラは有効に作動しないと考えられた。

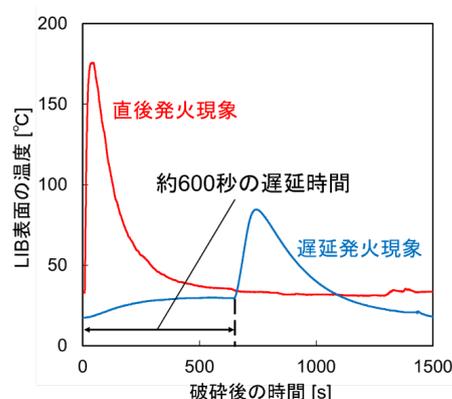


図2.14 直後発火現象および遅延発火現象におけるLIB表面温度の挙動（赤：SOC40%、青：SOC30%）

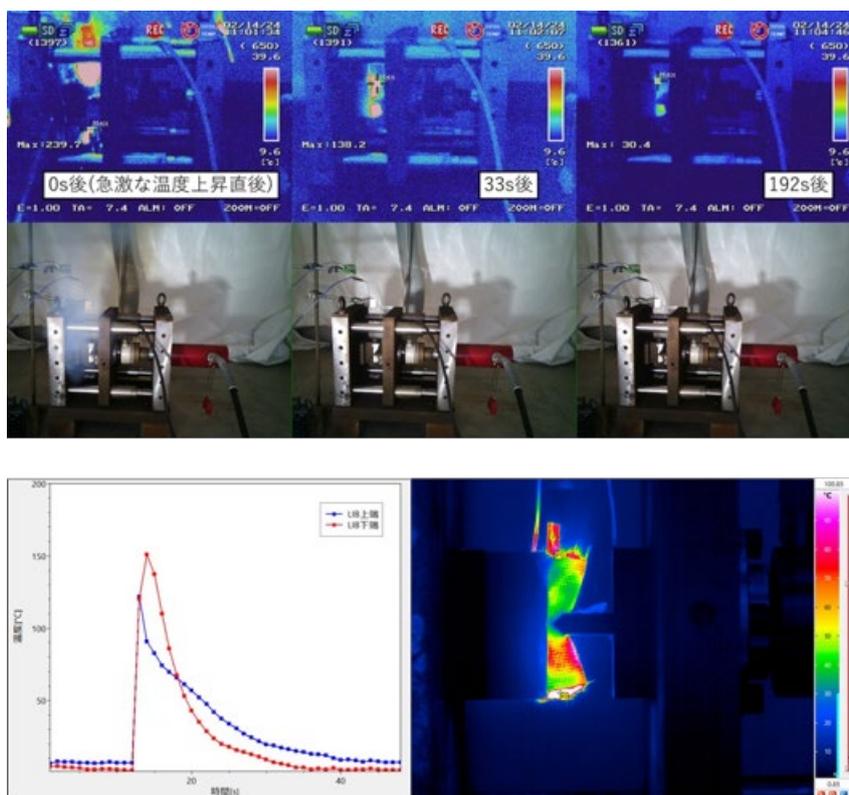


図2.15 LIBを破碎した際の赤外データ（上図：InfReC R550、下図：H9000）

3.2.3 熱分析試験

以下、熱分析試験結果の概要を示す。図2.16は電解液の昇温試験結果を示す。150°Cから200°C付近に1stピーク、250°Cから320°C付近に2ndピークが観測された。既往研究により負極による電解液の酸化反応は130 °C付近および256 °C付近で起こることが報告されているため、本昇温試験で観測されたピークは電解液の酸化反応であると考えられる。図2.17は電解液と正極と負極の三成分混合物の昇温試験結果である。200°Cから270°Cの間で発熱ピークが観測でき、発熱量は 147 ± 9.5 J/gであった。この発熱ピークに着目した速度論的解析を実施し、断熱温度上昇を算出した結果を図2.18に示す。その結果、110°Cでは11時間程度、130°Cにおいては5時間程度で断熱温度上昇を開始することがわかった。遅延発火現象の発現に関して、LIB破碎に伴うジュール熱による温度上昇が初期温度に位置付けられるため、LIB廃棄時の残存充電率と断熱状態に応じて、さらに短時間、あるいは長時間で断熱温度上昇が発生する可能性があり、遅延発火現象に至ることが考えられた。

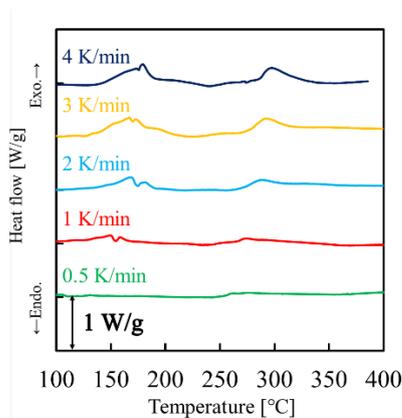


図2.16 DSCを用いたLIB電解液の昇温測定結果

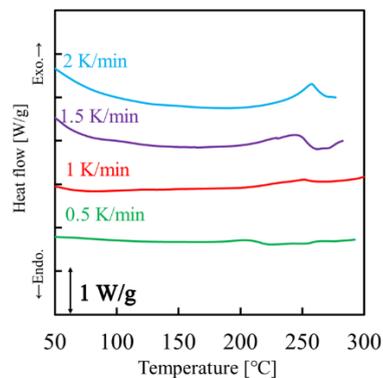


図2.17 C80を用いた電解液、正極、負極混合物の昇温測定結果

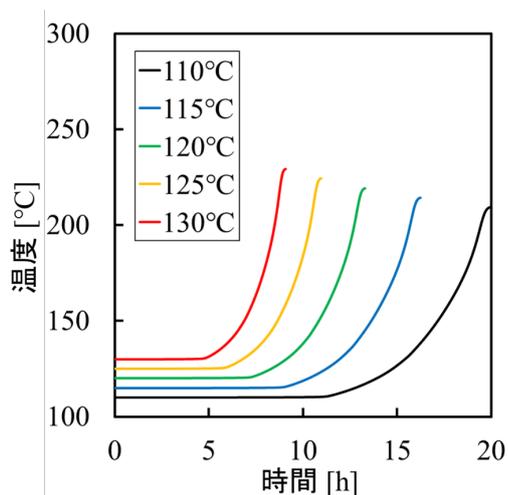


図2.18 電解液・正極・負極混合物の断熱温度上昇と時間の関係

4.3 火災事故メカニズムの提案

前述の実験結果に加えて、文献レビューやヒアリング結果に基づき、下記および図2.19に示すような火災事故メカニズムの整理と提案を行った。

1. 破砕機等によりLIBが損傷した直後に、内部短絡が起き、急激な温度上昇により構成部材である電解液等が熱暴走する。その後、可燃性ガスを含む分解生成ガス（ CO_2 、 CO 、メタン、エチレン、水素、酸素など）が破砕箇所から火災と共に噴出する。本研究では、本現象を“直後発火”と呼称する。なお、一般的にLIBの熱暴走が発生する第一要因としては、何らかのトリガーにより負極と電解液が反応し、その後、電解液の熱分解や正極と電解液の反応などにより、LIBの温度上昇、分解促進、急激なガス発生に至るとされている（蔦島、2016）。直後発火に関しては、内部短絡に伴う急激な温度上昇により、それらの段階的な反応が極めて短時間に一斉に発生することで多量の分解生成ガスが噴出・発火するものと考えられる。また、直後発火現象は、廃棄物処理施設においては破砕直後、あるいは搬送コンベア入口で主に発生する。
2. LIBが損傷直後、電解液等の分解に伴い生成された可燃性ガスが噴出する。その後、数秒の時間経過後、燃焼範囲になる可燃性ガスがLIB由来の着火源（火花など）により着火する。現象2は、現象1とは厳密には異なる現象であるが、発火が発生する場所や破砕から発火が起こるまでの時間の観点から、本研究では現象2も“直後発火”として扱う。
3. LIBが損傷後、電解液等の急激な分解に伴い生成された可燃性ガスが周辺の廃棄物またはプロセスに由来する着火源（例えば、金属の破砕により生成される火花など）により着火する。現象3は、現象2と比較すると着火源が異なるが、現象自体は同様の現象が発生している点から、本研究では現象3も“直後発火”として扱う。
4. LIBが損傷後、電解液等の分解に伴い生成された可燃性ガスを含む分解生成ガスが噴出する。現象4は、発火には至らず、ガスが噴出するのみであるため、本研究では現象4を“ガス噴出”と呼称する。
5. LIBが損傷後、直後発火やガス噴出は発生せず、一般的に提案されている電解液と負極等の反応により徐々に温度が上昇し、最終的に熱暴走により電解液の自然発火点（火元がなくても燃焼を開始する温度）（例えば、ジメチルカーボネート（DMC）は 468°C 、エチレンカーボネート（EC）は 465°C ）に至り発火する。本研究では、本現象を“遅延発火”と呼称する。直後発火と比較すると緩やかな反応であり、搬送コンベア後の選別や残渣の貯留にて発生することが考えられる。
6. LIBが損傷後、直後発火やガス噴出は発生せず、一般的に提案されている電解液と負極等の反応により徐々に温度が上昇し、熱暴走に至り、分解生成ガスに含まれる可燃性ガスが周辺の廃棄物

またはプロセスに由来する何らかの着火源により発火する。本現象は、厳密には現象5の遅延発火とは異なるが、時間の観点からは本研究では現象6を“遅延発火”と呼称する。なお、代表的な電解液であるDMCの引火点（火元を液面に近づけた時に燃焼が始まる最低温度）は14℃、ECの引火点は143℃と言われており、各LIBで使われる電解液の組成は異なるものの、電解液の近傍に火元があれば十分に発火する可能性がある。

7. LIBが損傷後、一般的に提案されている電解液と負極等の反応により徐々に温度が上昇し、熱暴走に至り、分解生成ガスに含まれる可燃性ガスが漏出するものの発火には至らない。本研究では現象7を“分解生成ガス漏えい”と呼称する。
8. LIBが損傷後、直後発火や遅延発火には至らず、電解液が漏えいする。電解液の可燃性蒸気（例えば、DMCの引火点は14℃）が周辺の廃棄物またはプロセスに由来する何らかの着火源により発火する。現象6と同様に、各LIBで使われる電解液の組成は異なるものの、電解液の近傍に火元があれば十分に発火する可能性がある。本研究では現象8を“電解液発火”と呼ぶ。
9. LIBが損傷後、直後発火や遅延発火には至らず、電解液が漏えいする。現象8とは異なり、LIB近傍に着火源がなく、電解液が漏えいするのみとなる。本研究では現象9を“電解液漏えい”と呼ぶ。

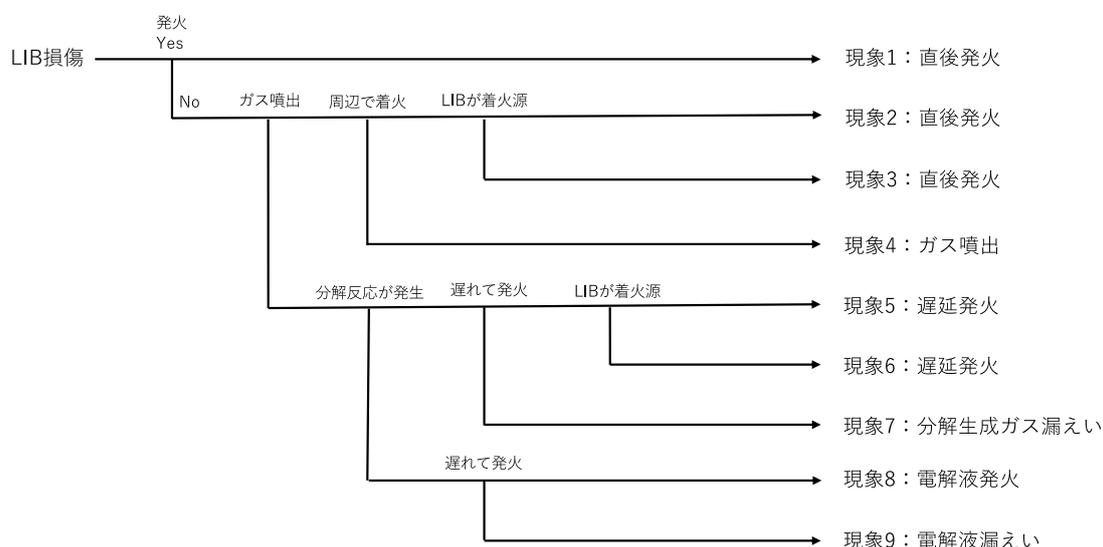


図2.19 廃棄物処理施設で考えられるLIB破損後の火災事故メカニズム現象の整理結果

4.4 モニタリング方法の提案

LIBの破損によって直ちに直後発火（現象1, 2, 3）が起きる場合、瞬時に発火することからその事前検知・モニタリングは困難であると考えられる。したがって、廃棄物の分別収集、または搬入後の破碎処理に至る前の手選別などによって、危険性の高いLIBを除去することが必要である。本章で得た知見からは、SOC 100%を想定したLIBとしては容量で1,000～1,500mAh程度以上、電力量では3.6～5.4Wh（単電池の場合、セル電圧3.6Vとして計算）以上で、例えば電動アシスト自転車、ノートパソコン、掃除機、タブレット端末、モバイルバッテリーが代表的なLIB使用製品である（サブテーマ1参照）。また、可能な場合には、混入するLIBのSOCを極力減らすため啓発活動等を行うことが有効である。直後発火が発生した後のモニタリングに関しては、火炎・発火の検知や目視、赤外線サーモカメラによる温度上昇の検知が有効と考えられる。紫外線を用いた火炎検知は処理施設での導入も増加しているとみられる。赤外線サーモカメラに関しては、目安とする温度（100℃程度など）の妥当性、高価であること、粉じんからの画像保護など課題はあるが、今後も知見を蓄積する必要がある。

遅延発火現象については、破碎から発火するまでに一定時間が存在することから、何らかの方法でモニタリングし、異常を検知、LIBを除去することが重要である。低SOCのLIBの破碎試験から、LIB表面温

度が40～80℃付近で保持されることが確認された。実際の環境下ではLIBは他の廃棄物に埋もれるなどにより除熱されにくい状況に置かれ、環境温度よりも高い温度になる可能性があるため、サーモカメラを用いてLIBの表面温度を測定し、電解液等の反応が進みにくい温度以下（LIB部材により異なるが、概ね100℃よりも低い温度）にてプロセスを停止、または緊急対応を実施する体制を整備することが有効と考えられる。一方で、破碎されたLIBの周辺には、LIB由来の分解生成ガス（CO、CO₂、メタン）や電解液蒸気が存在する可能性があることから、周辺に着火源がある場合、火災に至る可能性がある。そのため、該当場所にガス検知器を設置し、ガス濃度モニタリングが可能となれば、遅延発火の可能性を早期に検知して対応することが可能となると考えられる。

サブテーマ2 参考文献

鳶島真一、リチウムイオン電池の安全性と要素技術、科学情報出版（2016）

Herreras-Martínez, L., Anta, M., Bountis, R. (2021) et al. Recommendations for tackling fires caused by lithium batteries in WEEE- A report of the Batteries Roundtable. （元はLithium metal battery management guidelines in the reverse value chain. StEP initiative webinar, 27 March 2020）

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>

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

目標：

既存の火災事故事例を模擬したモデル実験によって、原因特定困難となっている処理残渣の自然発火・蓄熱発火を含む火災事故メカニズムを解明し、火災リスク低減の条件と早期発見のためのモニタリング方法を提案する。

目標どおりの成果を上げた。

直後発火については、既存文献などでも知られたSOCのみならず、容量や電力量にも注目したモデル実験を実施し、サブテーマ1との連携で電力量の参考情報を用いて危険性の高いLIB使用製品の品目特定に貢献した。遅延発火については、圧壊試験などのモデル実験と熱分析試験を組み合わせることで、再現の困難な遅延発火メカニズムの解明に寄与した。

なお、モデル実験を行うにあたり、大きく以下の2点の困難さがあった。

まず、安全管理の整った実験施設の協力を得るために時間を要し、結果的に直後発火は主に民間試験機関、遅延発火は公的研究機関（産業技術総合研究所）で実施した。特に民間試験機関で実施するには外注費用を要し、試験のサンプル数が限られた。

また、試験サンプルの入手の問題もあった。LIBはその種類（円筒型、ポリマー、角形）、容量、電解液、メーカー・生産国や一部粗悪品など様々である。条件を整えてモデル実験を行うために内容の明確なサンプルの入手を試みたが、LIBメーカーは原則として機器メーカーにしか販売せずに（研究目的を含む）一般向けには販売していないこと、小型LIBの国内メーカーは事実上2社に限られていて多様な種類のLIB入手ができないこと、などの困難に遭遇した。結果として、交渉の末に協力を得られた国内メーカーや代理店などを通じて入手可能となったサンプルを用いた。

II-3 サブテーマ3 「リサイクル施設等における対策技術の検討」

[サブテーマ3 要旨]

一般廃棄物処理施設および小型家電リサイクル施設の計5ヵ所の実施設を対象にリアルタイムモニタリングを実施し、赤外線サーモカメラなどによるLIB発火現象を捕捉した。

自治体の不燃ごみ・粗大ごみの破砕処理施設では、LIBによる小規模の爆発を含めて、モニタリング当日に各1回以上のLIB発火を確認できた。施設で把握が困難なLIB起因の発火等事象が潜在的に多数あることに加えて、破砕機内部で高温頻発する一方で遅れて高温・発火を生じるような遅延発火に類する事象も確認された。現状で発火等事象（主に直後発火）の検知に有効なのは、赤外線サーモカメラによる温度と火炎の検知とみられた。LIBの熱暴走で発生するといわれるCO₂、CO、H₂などのガス発生は確認できたが、ガスの発生と把握は事象の直後になるため予防的な対策は困難であった。一方で、CH₄やプロパンなどの可燃性ガス濃度が高い時はLIB発火の注意を高めることは有効と考えられた。

調査を行った小型家電リサイクル施設においては、前処理時のLIB選別を人手によって対応しているため発火・火災は生じていなかった。ただし、赤外線サーモカメラによれば90℃程度を記録する場合もあり、検知手法としての有効性と発火対策として自動消火システムとの連携の有効性が示唆された。

破砕機内へのLIB混入による発火（主に直後発火）を防ぐ対策技術として、RFIDを用いたLIBの自動検知の可能性を検証した結果、現在の技術では理想的な条件が整わない限りRFIDを貼付したLIBの検出精度には限界があること、また社会実装に向けた課題として、将来の量産化コストは1枚あたり10円未満であることやサプライチェーンでの費用負担、役割分担の明確化が必要なこと、RFIDの検知精度を落とさずサイズダウン（小型家電に内蔵されたLIBに添付できる）が必要なこと等を整理した。

遅延発火に関する対策技術として、選別プロセスにおける高磁力選別ならびに渦電流選別によるLIBの選別可能性を実験的手法により検討した結果、円筒型LIBは高磁力選別機によって、角型およびポリマー型のLIBは高磁力選別機または渦電流選別機によってそれぞれ選別が可能であることがわかった。

LIBの破砕を防ぐために多くの小型家電リサイクル施設で行っているLIBの取外し時間を測定した。LIBの危険性はさほど高くないにもかかわらず長い取外し時間を要する品目もあった。作業にかかるコストを研鑽することでLIB取外しの作業効率を判断する材料にもなる一方で、事故防止の負担が廃棄物処理・リサイクルの現場のみに課せられている現状があり、メーカーや国も含めてLIBを使用する社会全体での役割分担の議論が期待される。

自治体における不燃ごみ等破砕処理施設および小型家電リサイクル施設におけるLIBに起因する発火防止対策に関して、本研究で検討した対策技術のうち比較的導入が容易と考えられる技術について技術資料（ガイドライン）としてとりまとめた。

1. サブテーマ3 研究開発目的

一般廃棄物処理施設及びリサイクル施設におけるLIBに起因する火災リスクの低減につながる対策技術を明らかにすることを目的に、施設におけるリアルタイムモニタリングや各種対策技術を検討、試行し、その成果の一部をガイドラインとして取りまとめる。

2. サブテーマ3 研究目標

サブテーマ3	「リサイクル施設等における対策技術の検討」
サブテーマ3 実施機関	イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社、国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ3 目標	5ヵ所程度の一般廃棄物処理施設及びリサイクル施設を対象に、火災リスクの低減につながる対策技術（プロセス改善、モニタリング強化、RFIDに

	よるLIB事前除去など)の効果を実施設で実証し、その結果に基づいた定量的な指標を提示する。基本的な火災事故防止のガイドラインをまとめる。
--	--

3. サブテーマ3 研究開発内容

3.1 リアルタイムモニタリングの実施

実際の処理施設における現象解明と対策技術の検討のため、リアルタイムでのモニタリングが可能な実施設を選定した(表3.1)。

一般廃棄物処理施設については、一定の頻度で発火等事象が発生している3箇所の施設で自治体の協力を得て実施した。まず、埼玉県坂戸市東清掃センターの不燃ごみ(同市では「燃やさないごみ」と称している)・粗大ごみの処理施設で、作業時間における発火等に関連するデータの取得を行った。取得データは、破砕機内部に設置したITVカメラ映像、赤外線サーモカメラ(日本アビオニクス社製Thermo FLEX F50)を用いた表面温度、簡易なUSB型環境センサー(OMRON社2JCIE-BU)を用いたeCO₂、eTVOC(それぞれCO₂、VOCの近似値)などである。破砕機は複合圧縮剪断方式(ギロチン式の一次破砕とアリゲータ式の二次破砕)で、リアルタイムモニタリングは2022年3月16日に実施した。当日の実際の稼働時間は3時間程度であった。

また、より一般的な回転破砕機を用いた処理施設で、破砕機出口を含めて、温度以外にサブテーマ2でも指摘されたLIBの熱暴走に伴って発生するガスを詳細に測定するために、施設Aと施設Bにおいて、各2日間施設の運転中に各種測定を実施した。測定日は施設Aが2023年2月16日と17日、施設Bが同ねん2月28日と3月1日の各2日間である。施設Aでは、粗大ごみを処理能力60t/5hrの高速回転式の破砕機で処理(一段のみ)を行っている。測定項目は表面温度、ガス濃度(CO₂、CO、CH₄、H₂、ニオイ)、PM(主にPM1.0、PM2.5、PM10で分類)及び火災であり、それぞれ赤外線サーモカメラ(日本アビオニクス社製Thermo FLEX F50B-ONL)、各種ガス検知器(新コスモス電機製で各々PS-2I、KD-12D、KD-12A、KD-12A、COD-203)、PMセンサー(レーザー式)及び火災検知器(同FL500、紫外線・赤外線検知方式)を用いた。ニオイはVOC等の化学物質として測定している。測定場所は破砕機内部、同出口、搬送コンベア後方(以下、コンベア)の3箇所であり、表面温度は3箇所を各2日測定したが、その他は機材の都合で破砕機内部と同出口を1日ずつとした。施設Bでは、不燃ごみ・粗大ごみを処理能力134t/日(ペットボトルなどを含む能力)の低速回転式と高速回転式の二段の破砕機で処理を行っている。測定項目は火災を除く以外は施設Aと同じで、測定場所は低速破砕機出口、搬送コンベア途中、高速破砕機内部(表面温度以外は低速破砕機出口と高速破砕機内部を1日ずつ)である。

また、民間の小型家電リサイクル施設2社(施設a、b)からはLIBを内蔵する小型家電の仕分け・破砕・選別処理(実操業)におけるモニタリングデータならびに操業時の留意点や課題点等をヒアリングした。このうち施設aにおいては、2022年6月に赤外線サーモカメラを設置して破砕選別プロセスのリアルタイムモニタリングを実施し、モニタリングデータを取得した。

表3.1 リアルタイムモニタリングを行った施設と計測項目

分類	施設	計測場所	計測項目	計測デバイス・方法
一般廃棄物処理施設	坂戸市東清掃センター(不燃ごみ、粗大ごみ)	破砕機内部	温度、湿度、照度、気圧、騒音、3軸加速度、eTVOC、eCO ₂ (注)、※最大1Hzにて計測	環境センサー(オムロン社製)
			温度	赤外線サーモカメラ
	施設A	破砕機内部	表面温度	赤外線サーモカメラ

	(粗大ごみ)	破砕機出口 破砕物搬送コンベア	以下は破砕機内部、破砕機出口のみ(各1日) ・ガス濃度：CO ₂ , CO, CH ₄ , H ₂ , ニオイ (VOC) ・PM：主にPM1, PM2.5, PM10 ・火炎	各種ガス検知器(新コスモス電機製)、PMセンサー、火炎検知器
	施設B (不燃ごみ、粗大ごみ)	一次破砕機出口 一次破砕後コンベア 二次破砕機内部	表面温度 以下は一次破砕機出口、二次破砕機内部のみ(各1日) ・ガス濃度：CO ₂ , CO, CH ₄ , H ₂ , ニオイ (VOC) ・PM：主にPM1, PM2.5, PM10	赤外線サーモカメラ 各種ガス検知器(新コスモス電機製)、PMセンサー、火炎検知器
小型家電リサイクル施設	施設 a	破砕機内部、拔出(破砕後)コンベア、ローター：各1カ所	温度(破砕機内部)	赤外線サーモカメラ
		破砕機上部・下部：各1カ所	散水量	
	施設 b	破砕機2カ所, 出口フード2カ所, 破砕物搬送コンベア2カ所	温度(コンベア)	赤外線サーモカメラ

注) eTVOC (equivalent Total Volatile Organic Compound) と eCO₂ (equivalent CO₂) はそれぞれVOCとCO₂に関する簡易な相当値を意味する。

3.2 対策技術の検討

(1) RFIDを用いたLIBの自動検知に関する検討

廃棄物処理や小型家電リサイクルの前処理工程におけるLIB自動検知・除去の対策技術として、RFIDタグの活用可能性を検討した。まず、RFIDタグの技術や種類を整理し、活用可能であると考えられたRFIDタグを用いて自動検知のための試験を実施した。適切にチューニング(読み取り可能距離の調整等)を行ったRFIDタグをLIBに貼り付け、さらにパソコン、デジカメ等の機器に取り付けてリーダーによる読取試験を行い、RFIDタグの読み取りによる検知の技術的可能性と課題について整理した。

RFIDに関する流通分野での普及動向、課題克服のための金属対応タグの性能や、コストダウンの可能性などに関してもサブテーマ1と協力してヒアリング調査によって情報収集を行った。

(2) LIBの物理選別に関する検討

破砕機を通った小型家電等の破砕物に残留したLIBが破砕直後に発火せず、一定時間を経過した後に発火する「遅延発火」が発生する場合がある。これを抑制するために最も確実な方法は、作業者が破砕後の選別ライン上でLIBを視認し取り除くことであるが、人手の作業負担を軽減できる可能性のある方法として、高磁力選別機および渦電流選別機によるLIBの物理選別の可能性、ならびに物理選別精度を高めるための条件を明らかにすることを目的とした試験を行った。

(3) 小型家電からのLIB取外し時間の測定

LIBの破砕を防ぐために、小型家電リサイクルでは多くの場合に破砕の前処理工程で人手によるLIBの選別・除去を行っている。しかしながら、消費者によってLIBの取外しがされなかった一体型製品が多いため、熟練した作業者でも一定の取外し時間の作業負担がかかるだけでなく、取外しの効果が見えにくい。そこで、サブテーマ1との連携で小型家電リサイクル会社の協力を得て、品目別のLIB取外し時間を測定し、品目別のLIB電力量と比較することでLIB取外しの作業効果を検討する。

(4) 対策効果の指標化および技術資料（ガイドライン）の作成

対策技術によるLIBの発火対策として、直後発火および遅延発火に対する対策技術の検討結果をもとにそれぞれの対策効果について考察した。その結果、直後発火への対策として破砕機投入前の事前選別の有効性を確認した。また、遅延発火については破砕後の選別プロセスにおける適切な発火検知・消火システムの導入および破砕物に混入するLIBの物理選別工程の導入が有効であることをそれぞれ確認し、それらの定性的、定量的な指標化を試みた。

また、対策技術のうち導入が比較的容易と考えられる技術等についてとりまとめ、技術資料（ガイドライン）を作成した。

4. サブテーマ3 結果及び考察

4.1 リアルタイムモニタリングの実施

4.1.1 自治体の一般廃棄物処理施設におけるリアルタイムモニタリング

(1) 坂戸市東清掃センターにおけるモニタリング（Terazono A., et al., 2024、成果1）

今回のモニタリング試行日における不燃・粗大ごみの処理作業は3時間程度であったが、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、作業者が処理を停止して消火にあたった。発火原因はモバイルバッテリーと思われるLIBであり、手動消火後に除去された。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濃度の推移を図4.1に示す。

まず、13:25:32にギロチン式の一次破砕機がLIBをせん断破砕した直後に図4.2（a.1、a.2）のような発煙がITVカメラで確認され、LIB内部から噴出したガスの温度がすぐに測定限度（図4.2では380度程度だが機器の仕様上は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た。12秒後の13:25:44には図4.2（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た。

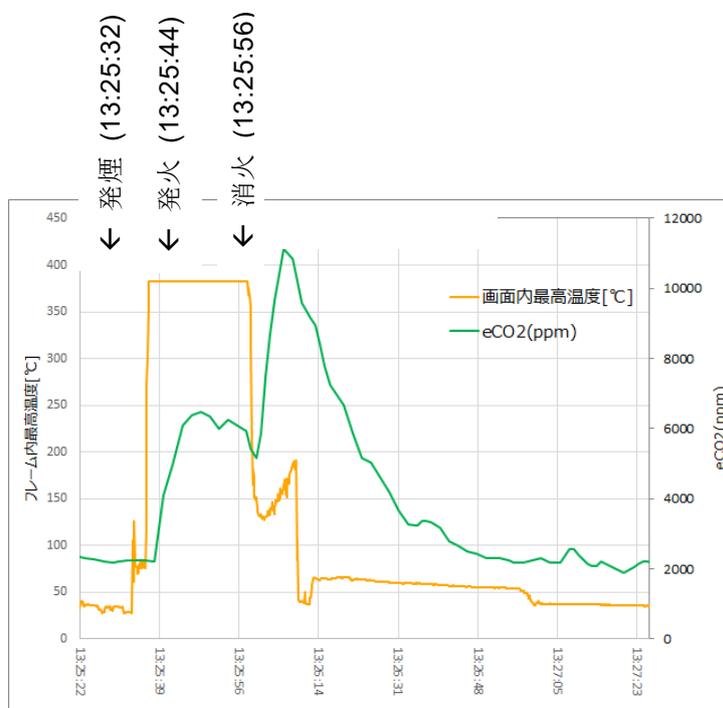


図4.1 赤外線サーモカメラによる画面内の最高温度と環境センサーによるeCO₂濃度の推移

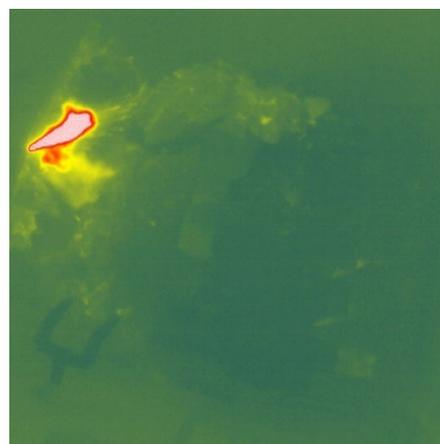
この処理施設には他の検知方法がないため、ITVカメラと目視によって発火等検知を行っている。図

4.2 (a.1、a.2) のような発煙を迅速に検知するにはITVカメラよりも赤外線サーモカメラの方が優位に思われる。

また、当日の明確な発火確認と処理停止は1回のみであったが、赤外線サーモカメラのデータからはこれ以外に80℃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る。



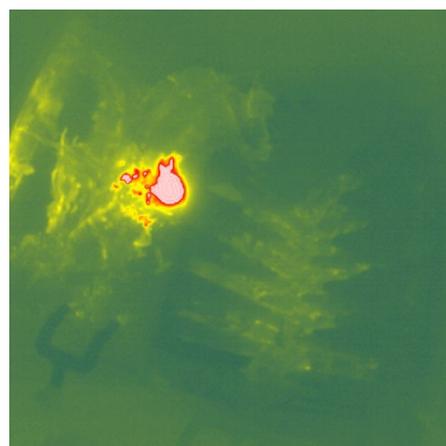
(a.1) ITVカメラの画像(13:25:32)



(a.2) 赤外線サーモカメラの熱画像(13:25:32)



(b.1) ITVカメラの画像(13:25:44)



(b.2) 赤外線サーモカメラの熱画像(13:25:44)

図4.2 発煙時（13:25:32）および発火時（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

4.1.2 小型家電リサイクル施設におけるモニタリング

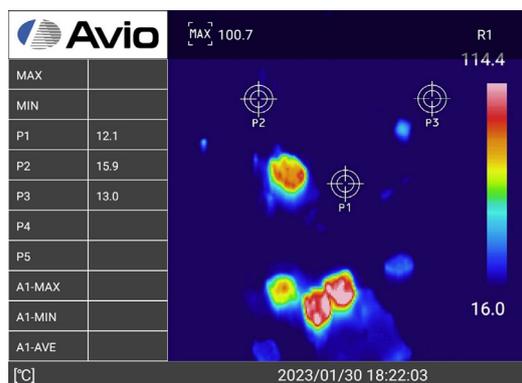
小型家電リサイクル施設である施設a、bはともにこれまでLIBに起因する発火、火災自体は生じていないが、前処理時のLIB選別を人手により対応している効果であり、作業に伴うコスト負担は小型家電リサイクルプロセスにおける課題となっている。調査対象施設の概要、モニタリングの実施内容、その他火災防止対策等を表3.3示す。

表3.3 調査対象の小型家電リサイクル施設の概要（モニタリング内容等）

	施設 a	施設 b
対象処理品目	<ul style="list-style-type: none"> ボックス回収、ピックアップ回収がメイン（一部ステーション回収） 資源性（品目）により4区分 	<ul style="list-style-type: none"> ボックス回収分（品目限定）（LIB含有機器：パソコン、ゲーム機等）

	<ul style="list-style-type: none"> （LIB 含有機器：コードレス掃除機、ゲーム機等） 	
小型家電処理時における火災等の事例	<ul style="list-style-type: none"> なし（小型家電関係） 保管中の火災もない（倉庫内保管） 破砕機の衝撃により（LIB に起因しない）火花が出ることがある。 	<ul style="list-style-type: none"> なし（小型家電関係） 保管中の火災もない（倉庫内保管） 手解体時に電池での破損により白煙が出ることがある。
電池への対応	<ul style="list-style-type: none"> 前処理段階で電池を人手により事前除去（仕分）、絶縁処理。 	<ul style="list-style-type: none"> 前処理段階で電池を人手により事前除去（仕分）、絶縁処理。（取りこぼし（仕分できない分）もあり。）
破砕機の種類	<ul style="list-style-type: none"> 衝撃式堅型破砕機 	<ul style="list-style-type: none"> 衝撃式堅型破砕機
小型家電処理作業時のモニタリング項目	<ul style="list-style-type: none"> 温度（破砕機内、拔出（破砕後）CV、ローター：各 1 ヲ所） 散水量（破砕機上部・下部：各 1 ヲ所） 	<ul style="list-style-type: none"> 温度（破砕機 2 ヲ所，出口フード 2 ヲ所，破砕物搬送 CV2 ヲ所）
モニタリング方法、データ	<ul style="list-style-type: none"> 破砕機、拔出コンベアに放射温度計設置。 60°Cでアラート、100°Cで自動停止。 40~50°C程度であれば、破砕物が熱をもってかなりの頻度で達しうるレベル。 	<ul style="list-style-type: none"> 破砕機内と破砕後のコンベアに放射温度計を設置。 いずれも 20°C~40°Cの間で推移 磁選機以後は温度管理はしていない。
火災防止対策（ハード・ソフト）、課題	<ul style="list-style-type: none"> 火災報知器付きの建屋内で仕分け作業実施（小型家電専用の火報等はない）。 今後対策が必要と考えられるものとして、製品保管庫の管理対策強化、拔出コンベアのカメラ（AI）設置等 	<ul style="list-style-type: none"> 発火の際、水につける対策あるが、少量の水では効果なく、砂をかけるように指導。 事前の LIB 選別等については人手による作業のため処理コストへの影響がある。

施設bにおいて、小型家電の破砕後のコンベアにおいて赤外線サーモカメラによるリアルタイムモニタリングを実施した。画像データの記録は3秒間のインターバルで設定し、SDカードでデータ保存した。カメラ（赤外線カメラ及び可視カメラ）は破砕後の排出コンベア上部約50cmの箇所に設置した。図4.6に示す画像では小さな炎のようなものが記録されている。また、別途測定している温度データ（図4.7）から90°C程度が記録されている。一方、可視カメラではコンベア速度が速いためクリアな画像は記録できなかった。



赤外線カメラ



可視カメラ

図4.6 施設bにおける赤外線サーモカメラ（左）と可視カメラ（右）の画像例

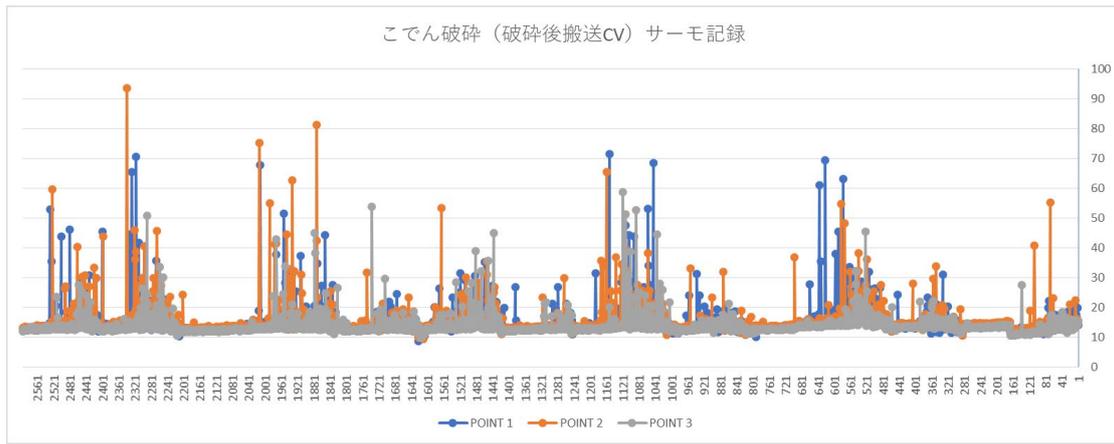


図4.7 施設bにおける赤外線サーモカメラによる温度データ

両施設ともに破砕前に小型家電の仕分け、手分解を十分に行い、破砕機に極力LIBが混入しないオペレーションを実施している。その結果、破砕機内で火花は発生するも発火はまれで、LIBに起因する火災は未発生である（通常、両施設では家電リサイクル処理をメインに実施しており、小型家電リサイクル対応は月1～2日程度）。赤外線カメラの有効性は確認できたが、モニタリングの精度向上には、粉じん、照度不足への対策が必要であるが、一方施設音安全対策上、設置場所・モニタリングに制限が多いのという制約条件も考慮が必要である。

4.2 対策技術の検討

4.2.1 RFIDを用いたLIBの自動検知

4.2.2 LIBの物理選別

遅延発火を抑制するための対策技術として、高磁力選別機および渦電流選別機によるLIBの物理選別の可能性、ならびに物理選別精度を高めるための条件を明らかにすることを目的とした試験を行った。プーリー型高磁力選別機および渦電流選別機の試験機の外観および緒元を図4.11、表3.8に示す。

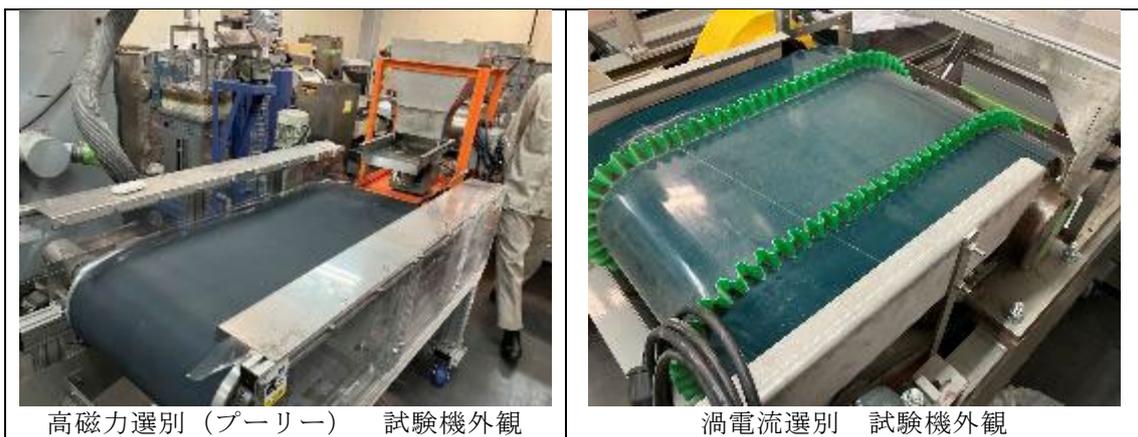


図 4.11 試験に用いた高磁力選別機および渦電流選別機

表 3.8 試験機の緒元

機種	緒元
高磁力選別機	プーリー表面磁力：3,000G、6,000G（試験は3,000Gを使用） プーリー径：φ305mm ベルト幅：600mm ベルト材質：樹脂

渦電流選別機	形式：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：φ216×519.5W 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）
--------	---

(1) LIBの基本的な選別特性把握

まず、表3.9に示す円筒型、角形、パウチ型（ポリマー）のLIBに対して、基本的な選別特性を把握するために高磁力選別と渦電流選別を実施した。高磁力選別試験と渦電流選別試験については、表3.10に示す条件で行った。

表3.9 選別特性を把握したLIB

	円筒型	角形	パウチ型（ポリマー）
件数	49.7	25.3	22.7
平均重量	1.5	13.2	21.1
標準偏差	20	10	22

表3.10 試験条件

	高磁力選別	渦電流選別
コンベアスピード	20m/分 および 45m/分	コンベアスピード： 60m/分 および 45m/分
磁力	3,000G および 6,000G	2,500G
試験回数	上記を組み合わせて4条件で、各3回	各3回

試験の結果、高磁力選別によって円筒型は全て選別された。一方、角形とパウチ型は磁力が高くコンベアスピードが遅いほど選別される傾向にあったが、個体によっても差があり、重量（重い方が選別されにくい）と磁性（磁着物が多い方が選別されやすい）が影響していることが考えられた。

そこで、LIBの解体を行って磁着物の割合を求めた10の固体（角形、パウチ型）に対して、高磁力選別と渦電流選別のそれぞれによる選別／非選別の結果を図4.12、図4.13に示す。対象サンプル数が少ないものの、LIBに含まれる磁着物の割合が高いと高磁力選別では選別されやすく、反対に渦電流選別では選別されにくい傾向にあることがわかった。

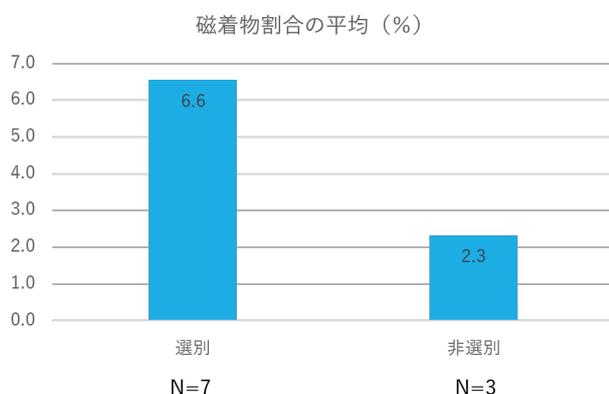


図4.12 高磁力選別の結果と磁着物割合の関係

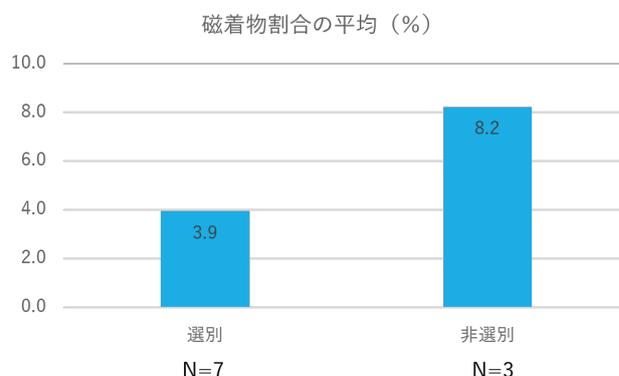


図4.13 渦電流選別の結果と磁着物割合の関係

解体試験によって得られたLIB内部の磁着物と選別特性との関係を総合すると、以下のようになる。

- 角型 LIB、パウチ型 LIB は構造や重量において個体差が大きく、磁着物割合にもばらつき(1~10%)が大きい。磁着するのは主に端子 (Ni 合金)、次に基板 (素材による) であった。正極材(Co 含有)は磁着しない。
- 磁着物割合が高い (目安 : 4%~) LIB は、高磁力選別で選別される。一方で磁着物割合が高すぎると (目安 : 7%~) 渦電流選別では選別されない。
- 磁着物割合が低い (目安 : ~6%) LIB は渦電流選別で選別される。一方で磁着物割合が低すぎると (目安 : ~3%) 高磁力選別では選別されない。

高磁力選別は磁着物の割合が高いものを、渦電流選別は磁着物の割合が低いものを選別するのに適している。2つの選別を組み合わせることにより、単独のLIBに対しては、高精度にLIBを選別除去することが可能になると考えられる。

(2) 供試体 (破砕物、LIB) の準備

次に、小型家電等の破砕物からLIBを選別することを想定し、小型家電リサイクル施設から小型家電の破砕サンプルを入手した。すなわち、自治体が回収した小型家電のうち掃除機や電子レンジなどの中型品目 (不燃ごみ処理施設等でのピックアップ回収物) を中心に小型家電リサイクル施設にて破砕処理を行い、図4.14に示す工程で供試体をサンプリングした。供試体の重量を表3.11および表3.12に示す。サンプルAは磁力選別機 (吊下げ式1,000G、ドラム式8,000G) で回収される磁着物、サンプルBは渦電流選別機で回収される非鉄金属、サンプルCはプラスチックや少量の銅線類、基板片等からなる混合物である。また、サンプルDは磁力選別機を通過する前の状態を想定し、サンプルA・B・Cを所定の割合で配合して作成した。同様にサンプルEは磁力選別機通過後の状態を想定し、サンプルB・Cを配合して作成した。配合割合は以下の通りである。

サンプルA (磁着物) : サンプルB (非鉄金属) : サンプルC (プラ等) = 55% : 5% : 40%

また、物理選別の目的であるLIBについては、表3.12に示す円筒型、パウチ型 (ポリマー)、角形の3種類から各4つを準備した。

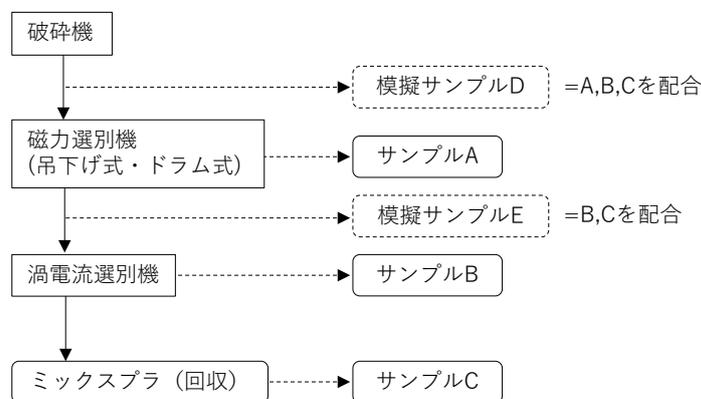


図 4.14 小型家電リサイクル施設における供試体のサンプリング箇所

表3.11 供試体 (破砕物)

供試体	サンプルA	サンプルB	サンプルC	配合サンプルD*	配合サンプルE*
重量	11 kg	3 kg	16 kg	サンプルA 11 kg サンプルB 1 kg サンプルC 8 kg	サンプルB 2 kg サンプルC 16 kg
写真				写真なし	

*操作データに基づき小型家電の材料バランスを下記と想定し、サンプルDはサンプルA、B、Cを、サンプルEはサンプルB、Cを配合して作成。

鉄（サンプルA）：非鉄（サンプルB）：プラ等（サンプルC）＝55%：5%：40%

表 3.12 供試体（LIB）

円筒型	No.	1	2	3	4
	重量(g)	49.9	49.2	51.7	44.8
	写真				
パウチ型	No.	5	6	7	8
	重量(g)	12.1	24.1	15.9	9.4
	写真				
角型	No.	9	10	11	12
	重量(g)	21.9	21.8	19.7	46.0
	写真				

(3) 試験ケース

5種類の破砕物および破砕物なしの6ケースに対して、3種類のLIBを各2個、コンベア層厚8cm程度などの中でLIB配置の高さを変えて、高磁力選別機によってLIBが選別される個数を調べた（ただし、サンプルAはほぼ磁着物のために実施しなかった）。今回、選別機メーカーへのヒアリング結果により概ね3,000ガウスあればLIB含有物を選別することが可能と判断し、本試験では原則として3,000ガウスを採用した。また、コンベア速度はケース1のみ20m/min、45m/minの2通りで行い、その他のケースはすべて45m/minで行った。

同様に、破砕物のサンプルEと破砕物なしのケースのみ、渦電流選別機による選別個数を調べた。

(4) 試験結果および考察

高磁力選別機による試験の結果を表3.13に示す。

破砕物なしのケース1では、LIB単体を様々な条件で試験機に通した際の挙動をみた。3,000ガウスの場合、コンベア速度が20m/min、45m/minどちらの場合も円筒型および角型はすべて選別でき、パウチ型はすべて選別できなかった。コンベア速度を45m/min、磁力を6,000ガウスに上げた場合、LIBの表裏および向きによってパウチ型の結果がばらつき、選別できる場合とできない場合に分かれた。なお、円筒型はその後の全ケース（ケース2～6）で選別され、パウチ型は逆に全ケース（ケース2～6）で選別されなかった。

角型LIBは、ケース3・4・6においてサンプル下（層厚の下、コンベア直上）に配置した場合はすべて選別されたが、サンプル上やサンプル中程に配置したケースではいずれも選別されなかった。また、ケース5（サンプルD）では使用した2個中、1個のみ選別された。

表3.13 高磁力選別機による物理選別の試験結果

ケース	供試体	使用LIB数	LIBの配置位置			LIB選別個数			サンプル層厚cm	磁力(ガウス)	備考	
			サンプル上	半数サンプル上半数サンプル中	サンプル下	円筒型	パウチ型	角型				
1-1	なし	各4個				4	0	4		3000	マーカ一面が上、向き揃える	
1-2						4	1 (⑧)	4		6000	マーカ一面が上、向き揃える	
1-3						4	3 (⑤⑦⑧)	4		6000	マーカ一面が下、向きはランダム	
1-4						4	1 (⑤)	4		6000	上下、向きともにランダム	
2-1	サンプルA	磁着物	○								サンプルAはすべてくっついてしまうので実施せず	
2-2				○								
2-3					○							
3-1	サンプルB	非鉄金属	各2個	○			2	0	0	8	3000	
3-2					○		2	0	0		3000	
3-3						○	2	0	2		3000	
4-1	サンプルC	プラ等	各2個	○			2	0	0	6	3000	
4-2					○		2	0	0		3000	
4-3						○	2	0	2		3000	
5-1	サンプルD	全混合	各2個				2	0	1(⑩)	層ほぼなし	3000	サンプル中にLIBを混ぜて開始
5-2							2	0	1(⑩)		3000	サンプル中にLIBを混ぜて開始
6-1	サンプルE	磁着後	各2個	○			2	0	0	数センチ程度	3000	
6-2					○							
6-3						○	2	0	2		3000	

また、渦電流選別機による試験は破砕物なしとサンプルEの場合のみ実施したが、いずれもパウチ型がすべて選別され、円筒型はすべて選別されなかった。角型については4個中3個が選別され、1個が選別されなかった。

以上の結果より、高磁力選別、渦電流選別それぞれについて、以下の各要素がLIBの選別精度に及ぼす影響について考察した。

1) 破砕物の性状

高磁力選別のケース3～6ではすべてLIBの種類によらず選別可否が同じ傾向であったことから、破砕物の違いがLIB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（サンプルA）は今回試験を実施できなかったが、稀にモーター・コイル類が含まれ、LIBがその銅線に絡まってしまうと選別精度に影響が出る可能性がある。

2) コンベア層厚

高磁力選別のケース3およびケース4では層厚がそれぞれ8cm、6cmある状態で、サンプルの上にLIBを乗せた状態では角型LIBは選別できなかった。層厚の上部は高磁力の影響が小さくなることと層厚による妨害がないという反対の影響が考えられるが、前述の結果は前者が勝った形である。LIBの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ア速度や磁力の程度に依存するが、これまで小型家電リサイクル施設等での運転状況や関係者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。

3) LIBの種類など

今回、円筒型LIB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、対してパウチ型LIB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LIB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LIBの構成素材の違いによるところが大きいと思われる。

渦電流選別による回収物には円筒型LIBの混入の可能性は低いものの、パウチ型や一部の角型LIBは非鉄金属とともに選別され回収物に混入する可能性が示唆された。これらを非鉄金属から分ける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分岐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ア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。

渦電流選別機を通過する残物（プラスチック類等）には主に円筒型および一部の角型LIB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ア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。

以上から考えられるLIBの除去・選別を行うラインの一案として、図4.15に示す。本試験の供試体は衝撃式堅型破砕機を用いた破砕物であることからそのような条件フローとなっているが、別の破砕方式については別途検証が必要である。

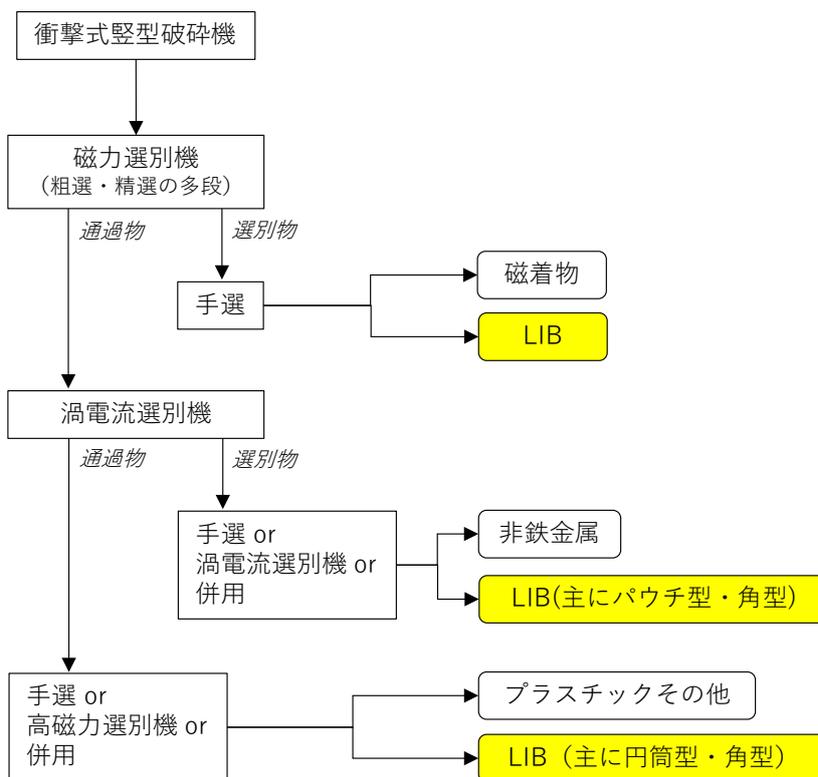


図4.15 各回収物からLIBを除去する選別ラインの一案

4.2.3 小型家電からのLIB取外し時間の測定

4.2.4 対策効果の指標化

(2) 遅延発火に対するLIBの物理選別の効果

破砕物にLIBが混入、回収物等に残留することによる遅延発火を抑制するため、LIBの物理選別の検証を行い、遅延発火の防止に資する望ましい選別ラインを先述の通り示した。高磁力選別や渦電流選別を行うことである程度のLIBを除去することが可能なこと（その分の発火等火災リスクを下げられる可能性があること）、追加的にピッキングを行うことでさらにリスクを下げられる余地があることが示唆された。これらの対策によっても回収物へのLIB残留のリスクをゼロにすることは難しい。現時点ではリスクをゼロにする確実な方法および設備はなく、リスクに対応するほど設備機器は増えていくが、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、トータルの設備導入コストや運用コストを低減できると考えられる。参考まで、今回使用した試験機と同サイズ・同仕様の選別機の導入費用および運用費用を表3.14に示す。なお、別途選別機メーカーにヒアリングしたところ、諸条件が適性（層厚が一定で、処理量に大きな変動が無く、処理物とLIBがそれぞれ分離出来ている状態で、なおかつベルトコンベア厚が6mmと薄い、渦電流選別の分岐板が適切な位置にある）な場合、機種ごとの選別精度は9割程度を見込めるとのことである。また、マグネットプーリー表面の滞留時間を少しでも長くするためにも、プーリー径は大きい方が望ましい。

¹ 日本の廃棄物処理 令和元年度版 (https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r1/data/disposal.pdf) における資源化の施設数（選別）が 995 施設

表 3.14 高磁力選別機と渦電流選別機の導入費用、運用費用

機 種	導入費用	運用費用*
高磁力選別機 (3,000G)	約2.3百万円	0円
高磁力選別機 (6,000G)	約4.6百万円	0円
渦電流選別機	約4.0百万円	0円

*運用費用は電気代を除く。また月 1 回程度、駆動型・従動側の軸受の給油が必要。

4.3 技術資料（ガイドライン）の作成

自治体における不燃ごみ等破砕処理施設および小型家電リサイクル施設におけるLIBに起因する発火防止対策に関して、本研究で検討した対策技術のうち比較的導入が容易と考えられる技術について技術資料（ガイドライン）としてとりまとめた。全国のLIBに起因する火災等被害規模の推計結果や自治体におけるリアルタイムモニタリング調査結果、LIBの排出時に注意すべき点なども併せて記載した。

サブテーマ 3 参考文献

Terazono A., Oguchi M., Akiyama H., Tomozawa H., Hagiwara T., Nakayama J. (2024) Ignition and fire-related incidents caused by lithium-ion batteries in waste treatment facilities in Japan and countermeasures. *Resources, Conservation & Recycling*, 202 (107398), 1-13

5. サブテーマ 3 研究目標の達成状況

目標：

5ヵ所程度の一般廃棄物処理施設及びリサイクル施設を対象に、火災リスクの低減につながる対策技術（プロセス改善、モニタリング強化、RFIDによるLIB事前除去など）の効果を実施で実証し、その結果に基づいた定量的な指標を提示する。基本的な火災事故防止のガイドラインをまとめる。

目標どおりの成果を上げた。

3ヵ所の一般廃棄物処理施設および2ヵ所のリサイクル施設、計5ヵ所の実施設においてリアルタイムモニタリングを実施し、そのうち複数施設において実際の発火現象を赤外線サーモカメラ画像により捕捉することに成功した。なお、調査ヵ所以外の一般廃棄物処理施設、リサイクル施設、ならびに破砕機メーカーに対しても実験的検討への協力を求めたが、安全管理や情報管理の関係から実施には至らなかった。サブテーマ 2 とも共通するが、事故が多発している施設が多い一方で、同様の事故を実機のスケールで実施することは困難であった。

対策技術についてはRFIDを用いたLIB検出可能性を実験的手法により検証した他、破砕選別プロセスにおけるLIBの遅延発火の抑制を目的としたLIBの物理選別の可能性を実験的手法により明らかにすることができた。また、LIBを含有する小型家電からのLIBの取り外し時間を測定し、その結果を用いて破砕機内へのLIB混入量を減らすための作業負荷とその効果を定量的に示した。当初目標には掲げていなかったLIBの充電深度（SOC）にも着目し、充電残量と発火リスクについての考察も試みたが、SOC測定のための十分な準備時間とサンプルの確保ができず、その検討と考察は今後の課題として残った。最後に、モニタリング結果ならびに対策技術の検証結果を取りまとめて火災対策防止のための技術資料（ガイドライン）を作成した。

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

※この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	1
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	1
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	28
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	13
マスコミ等への公表・報道等：	5
研究成果による受賞：	0
その他の成果発表：	2

(2) 誌上発表

< 査読付き論文 >

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Terazono A., Oguchi M., Akiyama H., Tomozawa H., Hagiwara T., Nakayama J. (2024) Ignition and fire-related incidents caused by lithium-ion batteries in waste treatment facilities in Japan and countermeasures. Resources, Conservation & Recycling, 202 (107398), 1-13 https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107398
成果番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
	サブテーマ1に含まれる

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
	特に記載すべき事項はない。

< 査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野） >

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

< その他誌上発表（査読なし） >

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
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

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

(3) 口頭発表

< 口頭発表（国際学会等・査読付き） >

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
3	Terazono A. (2021) Circular economic utilization of WEEE and emerging battery issues. 11th International Conference on Sustainable Waste Management & Circular Economy (IconSWM-CE) and IPLA Global Forum 2021, -
4	寺園淳, 秋山浩之, 小林元, 中山穰, 小口正弘 (2021) 自治体の不燃ごみ処理施設におけるリチウムイオン電池起因の火災防止対策の考え方. 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会, 講演原稿2021, 79-80
5	寺園淳, 秋山浩之, 小林元, 中山穰, 小口正弘 (2021) 循環・廃棄過程におけるリチウムイオン電池のリスク評価に向けた火災事故事例解析. 日本リスク学会第34回年次大会, 講演論文集, 153
6	寺園淳, 秋山浩之, 小林元, 中山穰, 小口正弘 (2022) 不燃ごみ処理施設におけるリチウムイオン電池起因の火災事例と防止対策. 第43回全国都市清掃研究・事例発表会, 講演論文集, 82-84
7	寺園淳 (2022) 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等事故の現状と対策. 2022年度環境施設総括管理士資格認定研修会, 同予稿集
8	寺園淳 (2022) 廃棄物処理・リサイクルから見たLIB問題. 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会 企画セッション「リチウムイオン電池を含む製品プラスチックの回収における課題」
9	Terazono A. (2022) Prevention of Fires caused by Lithium-ion Batteries in Waste Management in Japan and Future Challenges. 27th International Congress for Battery Recycling (ICBR 2022), -
10	寺園淳, 小口正弘, 秋山浩之, 友澤弘充, 萩原透, 中山穰 (2022) 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等事故の実態と対策. 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会, 講演原稿2022, 187-188
11	寺園淳, 秋山浩之, 新富美雪, 狩野真吾 (2022) 火災防止を考慮した使用済みリチウムイオン電池管理の費用効率性に関する考察. 環境経済・政策学会2022年大会, 同予稿集
12	Terazono A., Akiyama H., Hagiwara T., Tomozawa H., Oguchi M., Nakayama J. (2022) Investigation of fire accident caused by lithium-ion batteries in the disposal process and evaluation of countermeasures. EcoBalance 2022 (The 15th Biennial International Conference on EcoBalance), Abstract, 48
13	Terazono A. (2022) Collection and Recycling of Portable Rechargeable Batteries and Safety Issues in Japan. ISEE2022 (The 2nd International Symposium on Electronic Waste and End-of-Life Vehicles), -
14	寺園淳, 小口正弘, 秋山浩之, 新富美雪, 狩野真吾 (2022) 火災防止を考慮した使用済みリチウムイオン電池管理のあり方. 日本リスク学会第35回年次大会, 講演論文集, 35(12-13), 34
15	寺園淳, 小口正弘, 秋山浩之, 友澤弘充, 萩原透, 中山穰 (2023) 廃棄物処理施設におけるリチウムイオン電池の混入と事故防止対策. 第44回全国都市清掃研究・事例発表会, 講演論文集, 47-48
16	寺園淳, 小口正弘, 秋山浩之, 新富美雪, 狩野真吾 (2023) リチウムイオン電池起因の事故発生と拡大生産者責任に基づく管理システム. 第18回日本LCA学会研究発表会, 同予稿集, 2-C2-04
17	Oguchi M., Terazono A., Akiyama, H., Kobayashi, G. (2023) Estimating the material flow of used lithium-ion batteries in Japan. The 11th International Conference on Industrial Ecology (ISIE2023), Abstracts

18	Terazono A., Oguchi M., Akiyama H., Hagiwara T., Tomozawa H., Nakayama J. (2023) End-of-Life Lithium-Ion Battery Management Including Safety Perspectives. The 11th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE2023), Abstracts
19	寺園淳, 小口正弘, 萩原透, 友澤弘充 (2023) 廃棄物処理施設におけるリチウムイオン電池起因の発火等事象の発生状況. 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会, 講演原稿, 221-222
20	寺園淳, 小口正弘, 新富美雪, 狩野真吾, 栗本航, 小林元, 蓮沼和夫 (2023) 廃棄物処理におけるリチウムイオン電池起因の発火・火災等事故の被害と対策. 環境経済・政策学会2023年大会, 同予稿集
21	寺園淳, 小口正弘, 小林元, 蓮沼和夫, 友澤弘充, 萩原透, 狩野真吾, 新富美雪 (2024) 廃棄物処理施設におけるリチウムイオン電池起因の発火等事故の発生状況と適正管理対策. 第45回全国都市清掃研究・事例発表会, 同講演論文集, 67-69
22	寺園淳 (2024) 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. 日本鉄リサイクル工業会 中四国合同 岡山部会
23	寺園淳 (2024) 不燃ごみ・粗大ごみの処理現場で発生するリチウムイオン電池による発火・火災を防ぎましょう!. リチウム蓄電池等に起因する発火事故防止のためのデザイン・イラストコンクール(LiBコン!)表彰式 (環境省依頼講演)
24	寺園淳, 小口正弘, 新富美雪, 狩野真吾, 小林元, 蓮沼和夫 (2024) 廃棄物処理施設におけるリチウムイオン電池起因の事故による被害と防止対策の評価. 第19回日本LCA学会研究発表会, 同抄録, 2-P2-59
25	【予定】 Terazono A., Oguchi M., Tomozawa H., Hagiwara T., Hasunuma K., Kobayashi G., Shintomi M., Kano S. (2024) Ignition and Other Incidents Caused by End-of-Life Lithium-ion-Batteries and Safety Management Measures, Electronics Goes Green 2024 (2024年6月、ベルリン、発表確定)

成果番号	【サブテーマ2】の口頭発表 (学会等・査読なし)
26	山本峻太郎, 鈴木智也, 中山穰, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳 (2022) リチウムイオン電池混入廃棄物処理プロセスにおける火災シナリオ特定, 2022年度日本火災学会研究発表会 (Web), 2022年5月28日~29日
27	中山穰, 山本峻太郎, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳 (2022) リチウムイオン電池混入廃棄物処理プロセスの定量的リスク分析手法の提案, 2022年度日本火災学会研究発表会 (Web), 2022年5月28日~29日
28	中山穰, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳 (2022) 廃棄物処理施設に混入したリチウムイオン電池由来の発煙・発火メカニズムの提案, 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会 (宮崎/Web), 2022年9月20日~22日
29	山本峻太郎, 鈴木智也, 中山穰, 伊里友一朗, 三宅淳巳 (2022) リチウムイオン電池混入廃棄物処理プロセスにおける火災シナリオの定量的頻度解析, 第55回安全工学研究発表会 (鳥取/Web), 2022年12月1日~2日
30	Yamamoto R., Nakayama J., Nishiwaki Y., Sato Y., Shiota K., Suzuki T., Izato Y., Miyake A., Thermal risk and thermal runaway mechanisms of LIBs under overheating in waste management facilities, International Conference on Chemical Thermodynamics 2023, O-03ES1650, August 2023
	その他、サブテーマ1にも含まれる

成果番号	【サブテーマ3】の口頭発表 (学会等・査読なし)
	サブテーマ1に含まれる

(4) 知的財産権

成果番号	発明者	出願者	名称	出願以降の番号	出願年月日
	特に記載すべき事項はない。				

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	実施年度	【サブテーマ1】の実施状況
31	2021	寺園淳 (2021) リチウムイオン電池含有電気製品の循環・廃棄と火災防止対策. 第21回レアメタル資源再生技術研究会 (2021年8月23日、オンライン、参加者数約150名) にて講演
32	2021	寺園淳 (2021) 身近なごみから環境と社会づくりを考える ～家庭ごみ、プラスチック、電池の例～. 茨城県立並木中等教育学校 令和3年度SDGsセミナー (2021年11月25日、同校、参加者約160名) にて講演
33	2022	国立研究開発法人国立環境研究所 公開シンポジウム2022 (2022年6月23日、オンライン、参加者約20名) にて「リチウムイオン電池の廃棄に伴う火災等の発生と対策」の成果紹介
34	2022	寺園淳 (2022) リチウムイオン電池起因の火災等事故発生の現状と課題. 第2回リチウムイオン電池トラブル防止に関するマルチステークホルダー会合 (2022年7月6日、東京&オンライン、参加者約60名) にて話題提供
35	2022	国立研究開発法人国立環境研究所 夏の大大公開における動画公開と解説「不燃ごみが燃えて大変」 (2022年7月16日、オンライン、参加者約70名)
36	2022	寺園淳 (2022) LALAガーデン・キッズデー「自転車発電を体験して電気と電池を考えよう」 (2022年8月28日、LALAガーデンつくば、参加者約30名) にて動画公開と実演
37	2022	寺園淳 (2023) リチウムイオン電池起因の火災等事故発生の現状と課題 (その2). 第3回リチウムイオン電池トラブル防止に関するマルチステークホルダー会合 (2023年1月27日、東京&オンライン、参加者約60名) にて話題提供
38	2023	寺園淳 (2023) ごみからくらしを考えよう!. くすのき未来塾令和5年度第2回講座 (2023年12月9日、埼玉県立川越高校、参加者22名) にて講演
39	2023	国立研究開発法人国立環境研究所 夏の大大公開 (2023年7月22日、国立環境研究所、当該箇所の参加者約70名) における「誰だ? LIBくんって」 出展
40	2023	寺園淳 (2023) 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. CE-MVC研究会 メンバーミーティングNo.56 (2023年7月21日、オンライン、参加者数33名) にて講演
41	2023	寺園淳 (2024) 最近のごみ問題と方向性 ～リチウムイオン電池とプラスチックの事例より～. なか環境市民会議創立10周年記念環境シンポジウム (2024年2月12日、那珂市総合センターらぼーる、参加者約200名) にて講演
42	2023	寺園淳 (2024) 廃棄リチウムイオン電池による発火等事故発生の状況と対策検討. 第4回リチウムイオン電池トラブル防止に関するマルチステークホルダー会合 (2024年2月15日、東京&オンライン、参加者38名) にて話題提供
43	2023	寺園淳 (2024) 最近の研究について語る ～川越で考えたごみ問題、リチウムイオン電池、アスベストなどを例に～. 令和5年度 (所沢市) 山口地区環境講演会 (2024年3月1日、山口まちづくりセンター、参加者約20名) にて講演

成果番号	実施年度	【サブテーマ2】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ3】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
44	教育応援 (Vol.52、8～9頁、令和3年12月1日発行、「不適切に廃棄された家電製品は牙をむく」で課題と対策についてコメント)
45	日本経済新聞 (2022年8月28日、電子版、「リチウムイオン電池、分別回収拡大 廃棄での事故防止」で現状と対策についてコメント)
46	読売新聞 (2022年9月14日、朝刊・社会面31頁、「充電機 清掃工場 火事の元」で対策についてコメント)
47	NHKおはよう日本 (2022年9月30日、ごみ処理施設で発生しているリチウムイオン電池起因の火災について、オンラインインタビューの録画と坂戸市での調査映像を5～6分放映)
48	東京新聞 (2023年7月27日、朝刊、20・21ページ、こちら特報部「(リチウムイオン電池)屋外で手軽にひんやり、一つ間違えればヒヤリ」で発火原因と対策についてコメント)

成果 番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
----------	--------------------

	特に記載すべき事項はない。
--	---------------

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
49	宮崎県立宮崎北高校放送部による取材対応及び「分別のすゝめ」動画作成への協力（2023年11月、第7回全九州高等学校総合文化祭大分大会 放送部門 宮崎県予選大会 第3位受賞）
50	一般向け啓発用動画「【リチウムイオン電池の捨て方】不燃ごみが燃えて大変！」（2024年5月公開）

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

Abstract

[Research Title]

Appropriate Management Measures of Lithium-Ion Batteries at Recycling and Disposal Processes based on Investigation of Fire Accidents

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Terazono Atsushi
(PI ORCID) :	ORCID0000-0003-1704-7043
Principal Institution :	National Institute for Environmental Studies 16-2 Onogawa, Tsukuba, 305-8506, JAPAN Tel: +81-29-850-2506 Fax: +81-29-850-2931 E-mail: terazono@nies.go.jp
Cooperated by :	Mizuho Research & Technologies, Ltd., Yokohama National University, E&E Solutions Inc.
Keywords :	Lithium-ion batteries (LIBs) Fire, ignition and other incidents Non-combustible waste Small waste electrical and electronic equipment (WEEE) Monitoring

[Abstract]

The actual situation of fire accidents caused by lithium-ion batteries (LIBs) at municipal waste treatment and recycling facilities was clarified through a survey of existing accidents, model experiments and model calculations for safety evaluation to clarify the fire accident mechanism, and real-time monitoring at the actual facilities.

The model experiments revealed that LIBs with a high state of charge (SOC) and high electric power (Wh) are at high risk of ignition, and the mechanism of delayed ignition, in which several hours or more elapse, was also elucidated. Real-time monitoring of LIB ignition phenomena at an actual facility was conducted several times, and temperature behavior, flame detection, and gas generation were confirmed.

Basic information such as LIB weight, capacity, and power consumption by item was developed, and items considered to be at high risk of ignition were identified.

As a future scenario estimation, end-of-life LIB generation were estimated to reach a maximum of more than 10,000 tons in FY2037 from 8,162 tons in FY2020, while the current recovery by Japan Portable Rechargeable Battery Recycling Center (JBRC) and others was estimated to be 14% of emissions.

A survey of LIB mixed in non-combustible waste revealed that although LIB-containing small home appliances account for only 0.3% of total noncombustible waste, they are the cause of most fire, ignition and other incidents.

The amount of fire damage at municipal waste treatment facilities caused by LIBs was estimated to be about 10 billion yen.

Furthermore, the effectiveness of countermeasures through separate collection and sorting was quantitatively demonstrated, and the cost and effectiveness of multiple countermeasure scenarios were

presented and proposed. These fire incident prevention measures were compiled into a guideline, and awareness-raising activities, including videos, were vigorously implemented.

[References]

Terazono A., Oguchi M., Akiyama H., Tomozawa H., Hagiwara T., Nakayama J. (2024) Ignition and fire-related incidents caused by lithium-ion batteries in waste treatment facilities in Japan and countermeasures. *Resources, Conservation & Recycling*, 202 (107398), 1-13
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107398>

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).