2026 年 11 月 18 日

水中破砕によるリスクを低減したリチウムイオン電池の失活と排ガスと廃水の再利用
―常温失活法による資源循環の新展開―

概要

リチウムイオン電池(LIB)の使用拡大に伴い、安全な失活（無害化）と有用な元素・材料の効率的な回収が求められています。私たちは不活性雰囲気下における石灰水中での液中破砕を用いた LIB の安全な失活法を研究してきました。このプロセスでは、水中にて LIB を物理的に破砕しながら蓄積された電池のエネルギーを解放し、資源の回収に適した形にします。今回の研究では、水中破砕時に発生する水素や揮発性有機化合物（VOCs）が、酸化銅による酸化処理によって除去・無害化が可能であり不活性ガスの循環再利用が期待できることが示されました。また、破砕時に発生する廃水中の有機化合物に対する酸化処理、さらには、電池電解質である六フッ化リン酸リチウムの処理ラインからの濃縮・分離を実際の LIB 破砕で用いた廃水を利用して実証しました。本システムは小型化してオンサイトに分散化導入可能なため、使用済み電池の保管や輸送に関連するリスクを低減できます。このアプローチは分散型の電池処理と高度な資源回収を実現するもので、世界に向けた普及が期待されます。本研究成果は、2026 年 11 月 20 日に国際学術誌「*Communications Sustainability*」にオンライン掲載されます。

研究グループ

京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 教授　宇田哲也（責任著者）

京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 助教　岸本章宏（研究当時）

（現　明石工業高等専門学校　機械工学科 講師）

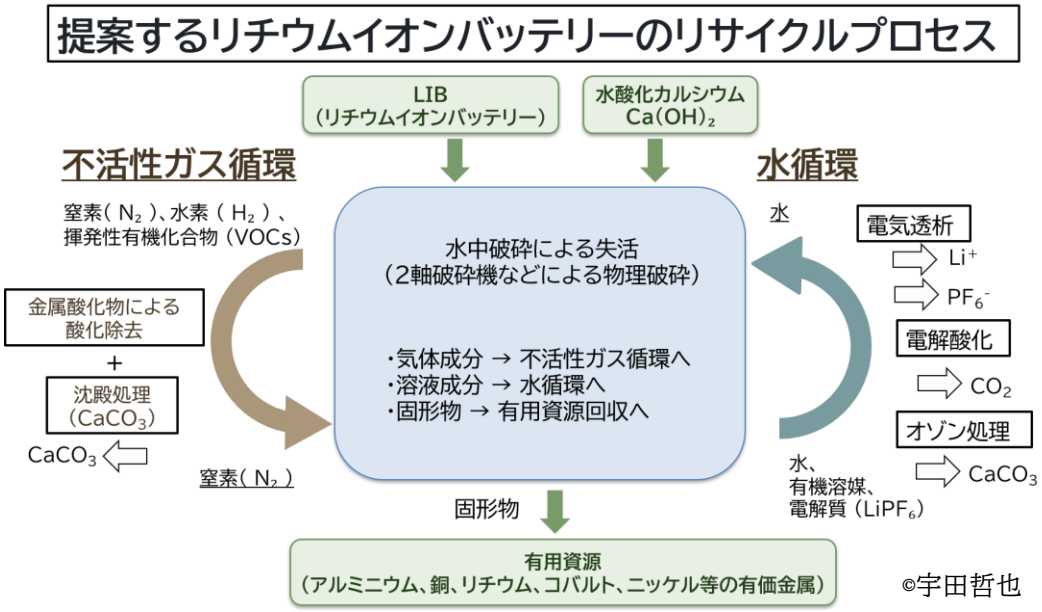
京都大学大学院工学研究科材料工学専攻　特定助教　安田拓海（研究当時）

（現　京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 助教）

京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 博士課程学生　宮下匠人（研究当時）

（現　北海道大学大学院工学研究院材料科学部門 助教）

京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 特定准教授　安田幸司



©宇田哲也

１．背景

リチウムイオン電池(LIB)は高密度にエネルギーを貯蔵でき、各種小型機器、または電気自動車などのエネルギー源としてなくてはならないものとなっていますが、一方で廃棄に当たっては、火災事故が頻発しており注意深い取り扱いが必要となっています。火災に至る原因は、物理的な正極と負極のショートによる熱の発生、続いて有機電解液の電極との反応や大気との燃焼が主な要因です。一方、電池には、ニッケル、コバルト、リチウムなどの元素や、銅やアルミニウムなどの価値の高い金属が使用されており、その回収は資源循環戦略上、重要となっています。よって、LIB を含有する機器の徹底的な回収が、火災事故の軽減と資源循環の推進には重要な社会的課題です。

一方で、廃棄電池は落下や水没などダメージを負っているケースや、膨張などの変形しているようなケースも散見されます。また、必ずしも放電されて廃棄されているとは限らず、発火リスクの高い充電状態となっているケースもあります。1 個の LIB セルからの発火が連鎖的な発火につながることも懸念され、収集した電池を長期間保存したり、リサイクルに向けて製錬所へ移送したりする際には耐火製の容器に保管するなど、厳重な管理が必要とされています。

私たちは、各所分散配置が可能な比較的小型の装置で LIB を失活できる方法の研究を行ってきました。その中で、不活性雰囲気中の石灰水中で LIB の破砕を行う方法[1]に注目し、100%の充電状態の LIB でも比較的マイルドな反応で失活できることをセルサイズ[2]の LIB で示してきました。水中破砕の利点としては、水が冷媒として機能し温度上昇の抑制が可能になることがあります。さらに、不活性ガスである窒素雰囲気下に設置することで、破砕時に負極中の Li と水との反応で発生する水素を窒素で希釈し、水素爆発のリスクを軽減することも可能です。また、私たちの手法のオリジナルな点としては、破砕に石灰水などのアルカリ水溶液を用いることで、破砕装置の腐食の軽減を図っている点にあります。

しかし、従来の水中破砕の研究では、LIB に使用されている有機電解液が一部蒸発し、窒素ガス中で揮発性有機化合物(VOCs)として異臭の原因になっていること、ならびに LIB を破砕して生じる廃水の循環利用のための廃水処理を実サンプルで実証できていなかったことが課題として残っていました。そこで、本研究では、私たちのグループで行ってきた従来の要素研究をベースとして、気相中の窒素の循環使用および、水の循環使用が可能であるプロセスを示すことができましたので報告いたします。

２．研究手法・成果

本研究では、気相の無害化の研究および水の循環利用の原理を実証いたしました。気相の無害化の研究につきましては、加熱した銅酸化物を酸化剤として利用した点が特徴です。

気相中の水素濃度や揮発性有機化合物の濃度は低いと推察されます。しかし、前述のようにそのまま廃棄すると異臭などの問題が生じる上、窒素も無駄になってしまいます。可燃性物質であっても濃度が低い場合には、燃焼させるために追加の燃料が必要となり、経済性の面でも問題が生じます。そこで、Ar（アルゴン）グローブボックスのガス精製装置における「逆転の発想」で、銅酸化物を酸化剤として用いることにいたしました。通常、Ar グローブボックスなどでは Ar 中の微量の酸素を金属銅で還元除去しますが、今回は逆に、酸化銅を用いて微量の水素や揮発性有機化合物を酸化除去することを試み、その効果を示すことに成功いたしました。なお、酸化銅は還元されて金属銅に変化しますが、こちらは空気によって再び酸化銅に戻すことが可能です。

一方で、廃水には電池で使用されている $LiPF_6$ と有機電解液の炭酸エステルが溶解します。したがって、廃水を循環利用するためには、これらの物質を効率的に除去することが求められます。炭酸エステルはアルカリ水溶液中で速やかに加水分解し、アルコール類に変化することが知られております。そのため、破砕を石灰水中で行う場合には、これらアルコール類の除去、さらには電池に用いられている微量有機添加剤の除去が必

要となります。私たちのこれまでの要素研究では、模擬試料として用意した各種アルコール水溶液ならびに代表的な添加剤のオゾン酸化、または電解酸化による除去が効率的であることを示してまいりました。今回は、実際の車載用廃 LIB（リチウムイオン電池）セル 448 個を水中破砕して得た実廃水に対してオゾン酸化および電解酸化を行ったところ、溶液中の全有機炭素濃度（TOC）を約半分に削減することができました。水の繰り返し利用を前提に考えると TOC 値をゼロまで減らす必要はないため、この結果から十分に TOC を削減できたことがわかります。

さらに、このようにして TOC を削減した実溶液に対して、カチオン交換膜ならびにアニオン交換膜を利用した 3 室の電気透析実験を行い、アノード室に PF_6^- イオンを、カソード室に Li^+ イオンを濃縮することに成功いたしました。濃縮した Li^+ イオン含有溶液からはリチウム資源の回収が期待できます。一方で、PF_6^- イオンが濃縮された溶液は、PF_6^- イオンの分解による無害化が期待されます。PF_6^- イオンは水中で速度論的に安定なイオンであり、分解には強酸での強加熱が必要となりますが、このような方法で濃縮が可能になれば、効率的な分解が可能になります。

今回、不活性雰囲気に設置した水中破砕装置による LIB 破砕を想定した模擬気相と実廃水のリサイクル利用可能性を調査し有望な結果を得ました。水のない環境で、常温の空気中で LIB を破砕すると、充電容量が残っている場合には激しい発火が起こります。また、水中破砕を行っても空気中では異臭の問題や水素爆発の懸念が残ります。本研究の「不活性雰囲気に設置したアルカリ水中における破砕（もしくはもっと広く、不活性雰囲気中における水中破砕法)」は、常温における非加熱の方法でありながら、安全性を高めた方法です。また、装置の大きさも比較的小型から大規模なものまで幅広く設計が可能です。小型装置の場合は各地域への分散配置が容易になると推定され、効率的に廃棄 LIB を回収できる社会の形成に期待がかかります。

３．波及効果、今後の予定

今回提案する手法は、このままでも小型化が可能ですが、廃水をタンク等で一時貯蔵し、別の処理施設で集約的に廃水を再生すれば、さらなる小型化とメンテナンスの容易化が可能となります。したがって、各所に小型回収装置を設置し、LIB の状態や形態を問わず、誰もが安全に LIB を含有する小型機器を廃棄・集積し、製錬所へ移送できる社会の形成が期待されます。

今後の課題といたしましては、以下のような課題が期待されます。

(1) 常温プロセスならではの資源回収性のメリットの明確化

非加熱処理であるため、電池の外装材などに用いられているプラスチックのリサイクルも期待されます。さらに、学術研究としては電極活物質の常温プロセスならではリサイクルにおける有利性の見極めを行っていきたいと考えております。

(2) 適応可能な電池サイズの見極め

今回までは、車載用電池のセルサイズ以下の電池を対象として実験を進めてまいりました。より大きな電池を処理する際には未確認の課題が懸念されます。安全性の観点からどのような危険性や現象が発生するのかを見極めていく必要があります。

(3) 最適な溶液の選択

私たちのこれまでの研究では、LIB を破砕する際の溶液として、破砕機の鉄鋼材料部分の腐食を抑制するた

めに石灰水を用いてまいりました。今後は、より汎用性の高いプロセスのため中性の水についての検討も行うべきと考えております。多様な LIB を破砕処理し、その際の浴の pH 変化や有機溶媒の挙動などを調査した上で、生じる課題の解決を進める必要があります。

４．研究プロジェクトについて

本研究は、京都大学大学院工学研究科材料工学専攻表面処理工学研究室および同非鉄製錬学講座の共同で実施されました。非鉄製錬学講座は、三菱マテリアル株式会社による寄附講座です。本研究成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業（JPNP21026）の一環として得られたものです。さらに、本研究の一部は JX 金属株式会社および JX 金属サーキュラーソリューションズ株式会社の支援を受けて実施されました。著者の宮下は、JST SPRING（助成番号 JPMJSP2110）の支援を受けました。また、本研究の遂行ならびに議論において、東北大学の中村崇名誉教授ならびに本論文で引用した私たちの論文の共著者の皆様に感謝申し上げます。

＜用語解説＞

1 不活性雰囲気中のアルカリ水中にて LIB の破砕を行う方法は、私たちが調査した限り他に報告例はございません。しかし、論文でも紹介しましたように、「不活性雰囲気中の水中破砕」という点におきましては、私たちの報告のほかに特許としての報告が別途存在しておりました。今回の報告は、不活性雰囲気中のアルカリ水中の LIB の破砕で発生する気相および水の循環利用に焦点を当てたものであることにご留意いただけますと幸いです。

2 セルサイズにつきまして：LIB には用途に応じてさまざまな大きさの電池が存在いたします。正極と負極がそれぞれ 1 極ずつの最小単位を「セル」と呼び、セルが複数直列で接続されている状態を「モジュール」もしくは「パック」と呼びます（車載用電池などでは、モジュールをさらに直列接続したものをパックと呼称することもあります)。モジュールやパックなどでは、直列接続されたセルの個数によっては数百ボルトの高電圧になる場合があるほか、大型であるために水との物理的な接触が阻害されたり、発生した水素ガスや熱移動に関する問題がより深刻化したりすることも懸念されます。そのため、私たちのこれまでの研究では予期できない現象が起こる可能性も予見されます。今回の研究での水中破砕実験は、あくまでも「セルサイズ」での検討結果である点にご留意いただき、再現実験等を行われる際には、どのような電池であろうとも、ご自身による安全管理のもと、十分にご注意くださいますようお願い申し上げます。

＜研究者のコメント＞

水素爆発は、酸素がない環境では起こらないはずという考えからこの研究を始めました。充電状態の LIB が水と反応して水素を発生しても不活性雰囲気であれば問題ないはずという考えからです。小さい電池からびくびくしながら実験を進めましたが、二軸破砕装置を導入して本格的に水中破砕の実験初めて行う際には、何か予想もしないことが発生しないか？大学で安全に実験するにはどうしたらよいか？宇田、安田(幸)、岸本で議論を繰り返したことを思い出します。そのあと穏やかな失活を示すことができ、発生する臭気のある排ガスと廃水の循環処理が問題として顕在化しました。本論文の共著者の仲間とその対応を要素研究として進めていき、今回の論文で循環可能なプロセスとしていったん結実させることができました。研究を進める過程で、不活性雰囲気下での水中破砕の報告が海外の特許としてすでに存在することが判明し大変残念でしたが、不活性雰囲気下でのアルカリ水溶液中での水中破砕や水中破砕で発生する各種課題、特に今回の気相と水の循環利用については（調べる限り）私たちのオリジナルな研究ができました。今後は、大学でできる部分は学術的に検討を

すすめ、その他の課題については産学連携により解決を図り、本手法を、社会に貢献できる方法として成長させたいと考えています。ご関心のある方がいましたら声がけいただけますと幸いです。（宇田哲也）

なお、本研究で示した応用可能性や将来展望は研究成果に基づくものであり、現時点で特定の個別企業による導入や事業化を前提とするものではありません。

＜論文タイトルと著者＞

タイトル：Submerged crushing enables safe lithium-ion battery deactivation with wastewater and off-gas recycling（水中破砕による安全なリチウムイオン電池の失活と排ガスと廃水の再利用）

著　　者：Tetsuya Uda,Akihiro Kishimoto,Takumi Yasuda, Takuto Miyashita, Kouji Yasuda

掲 載 誌：*Communications Sustainability, 2026*

https://www.nature.com/articles/s44458-026-00155-2

DOI 10.1038/s44458-026-00155-2

＜参考図表＞

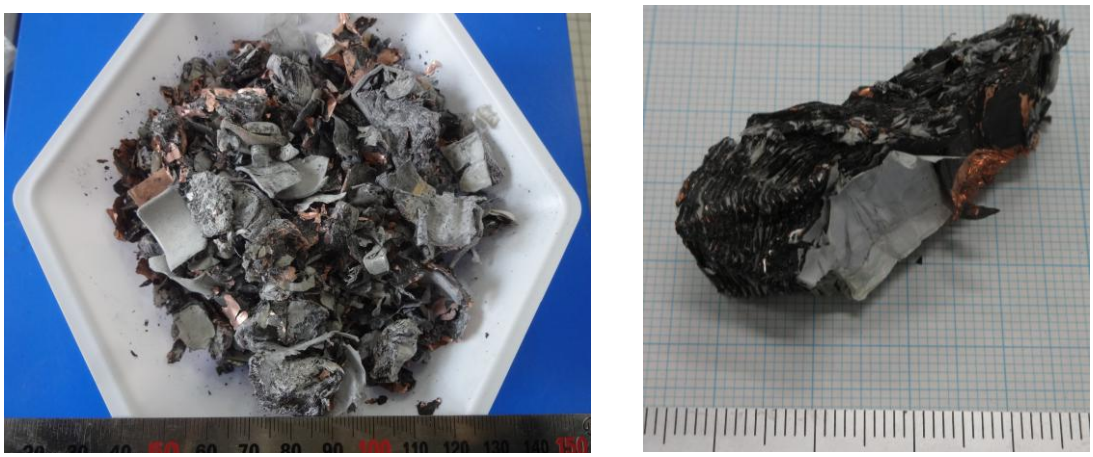


写真　不活性雰囲気中に設置した石灰水中での装置で破砕処理した LIB の固形残渣物