

# 電動車両駆動用電池リサイクルの ための水素プラズマ還元技術

茨城大学 学術研究院  
応用理工学野 物質科学工学領域  
教授 篠嶋 妥

2025年10月21日

## 本技術の概要

- EV車の電源用電池から、**高効率・低環境負荷でレアメタルを回収**する技術である。
- リチウムイオンバッテリー(LIB)**正極に対して直接水素プラズマを照射**することで、正極に含まれる炭素がレアメタルの回収、アルミニウムがリチウムのゲッターとして活用できる新しい還元方法(**ハイブリッド還元**)である。
- 正極物質とアルミニウム電極を分離する必要がなく、回収コストを飛躍的に低減できる。また、環境負荷も少なく、処理時間も短時間でできる。
- LIB正極中の炭素およびアルミニウムの含有量を最適化することによって、**高効率・低コストでレアメタル回収を可能にする新しいLIBの開発**につなげることができる。

## 従来技術とその問題点

既に実用化されているものには、乾式の加熱溶融法と湿式の溶媒抽出法があるが、

多様な電池ごとに溶媒の調整が必要

溶媒の後処理のための環境負荷が大きい

等の問題があり、新技術の開発が望まれる。

## 新技術の特徴・従来技術との比較

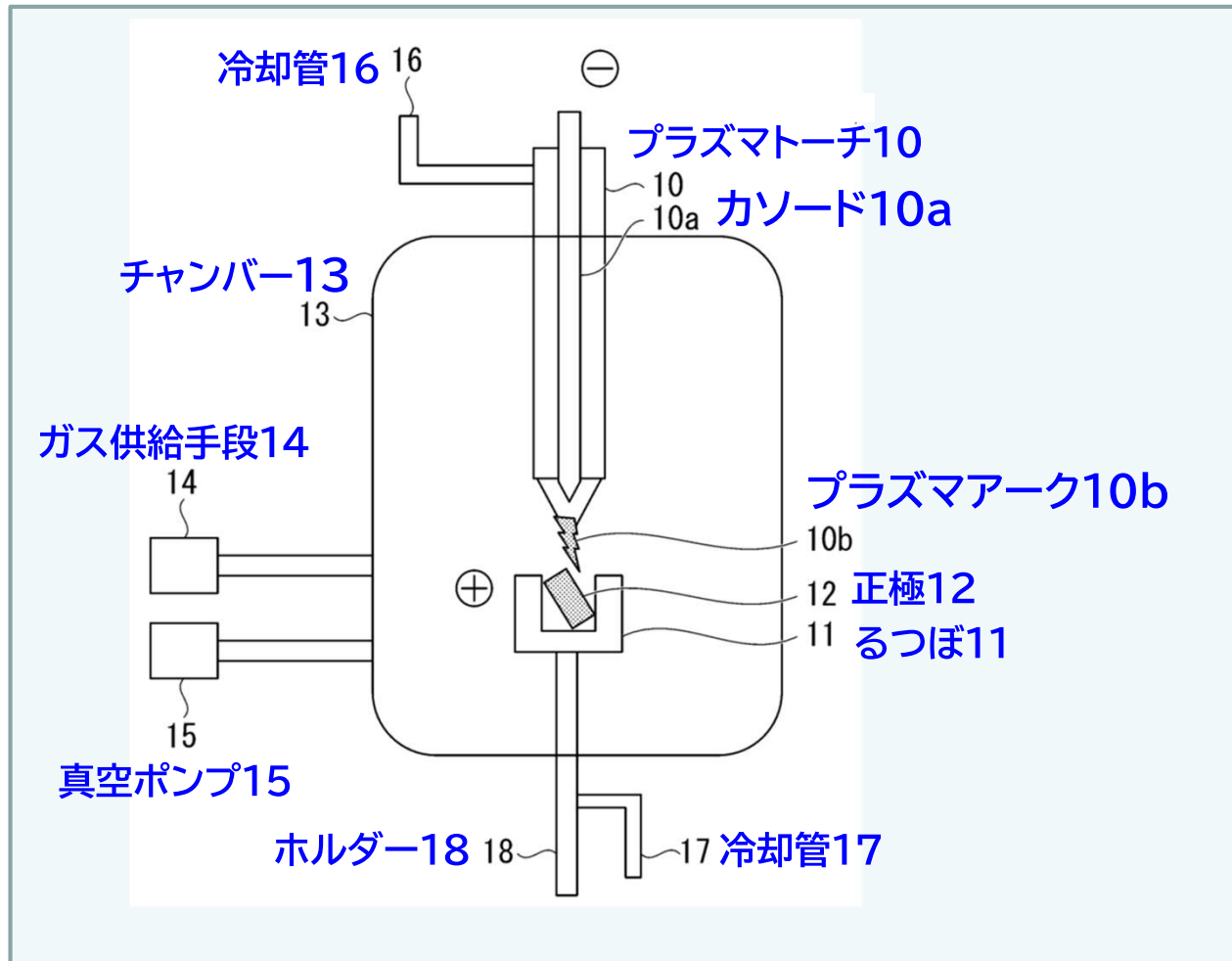
- 従来技術の問題点であった、**環境負荷を著しく低減**することに成功した。**(水素還元による生成物は水)**
- 正極物質を電極からはく離せずに直接還元するので高効率
- **還元処理時間を30秒程度に短縮**できるため、**コスト削減**が期待される。

表1. 従来技術に対する本技術の比較優位表

	本技術		従来技術 1	従来技術 2
構成	乾式：水素雰囲気 気中プラズマ加熱還元	乾式：水素雰囲気 気中炭素加熱還元	乾式：加熱溶融 比重利用	湿式：溶媒抽出法
処理容易性	○	◎	×	×
処理時間	◎	○	△	△
環境負荷	小	小（ただし別途 CO <sub>2</sub> の回収が必要）	大	大
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・簡易にレアメタルを回収できる。</li> <li>・Liについては還元時にLi-Al酸化物として分別処理する。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・多様な電池ごとに溶剤の調整が必要</li> <li>・エネルギー消費量大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多様な電池ごとに溶剤の調整が必要</li> <li>・回収率が高い</li> </ul>

ハイブリッド還元により、さらに  
効率的な回収が可能

# 技術内容(1) 水素プラズマ処理



- ・チャンバー13の内部には、ガス供給手段14によりプラズマ生成ガス(水素を含む雰囲気ガス)が供給される。
- ・水素プラズマ処理は、リチウムイオン電池を分解して取り出した正極12をチャンバー13の内部に配置し、アルゴンガスに水素ガスを混合した雰囲気ガスをガス供給手段14により導入して、水素プラズマ10bを照射する。
- ・水素プラズマを正極に照射すると、 $H^+$ イオンが正極活物質に含まれる希少金属の金属酸化物を還元し、還元物と水を生じる反応が生じる。
- ・生じる還元物は、金属酸化物から酸素を取り除いた純粋な金属である。
- ・水素プラズマは高温であるため、還元物である金属は溶融し、冷却されて固化する。固化した金属固体を回収することで、リチウムイオン二次電池の正極から、希少金属を回収することができる。

## 技術内容(2) 水素プラズマ還元装置

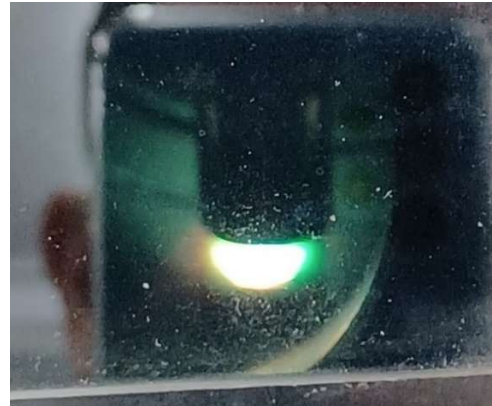
(a)外観



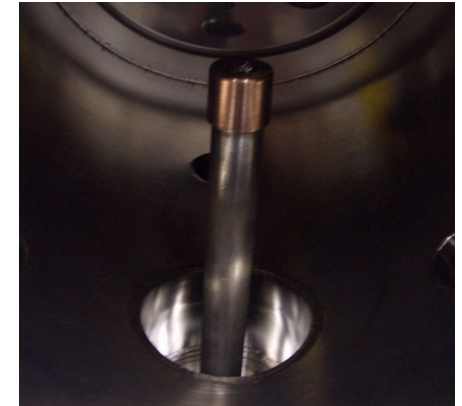
(b)プラズマトーチ



(c)高温プラズマ



(d)試料ステージ



(a)の金属製チャンバーを真空排気したのち、アルゴンと水素のガスを充てんして、(b)に示したプラズマ発生電極にて(c)のような高温プラズマを発生させ、下に対向して設置した(d)の試料ステージ中の試料を還元するものである。

## 実施例(概要)

水素-アルゴン混合ガスの濃度を0~15vol% $H_2$ の範囲で変化させ、LIB正極の水素プラズマ還元実験を行った。ここで、還元用試料はEEMB社製のリチウムイオンバッテリーLP222036であり、これを分解して取り出した**正極をそのまま用いている。そのため、還元工程を大幅に短縮できている。**

作成した試料についてSEM観察およびEDXによる元素分析を行った結果、**水素プラズマ処理によって雰囲気ガスが水素濃度5%、10%、15%でリチウムイオンポリマー電池の正極を還元できる**ことを明らかにした。全体として水素濃度5%と比較してみると、10%、15%での還元は同程度であり、Ni、Coを還元するためには水素濃度5%での水素プラズマが有効であると考えられる。特に、**15秒から60秒という短時間で還元工程が終わる**のも、水素プラズマ還元の利点として注目される。



# 実施例(還元前の正極材料の外観)



5.アルミラミネート除去後



6.引き出し



7.紙をはがす



8.電極と保護紙の分離



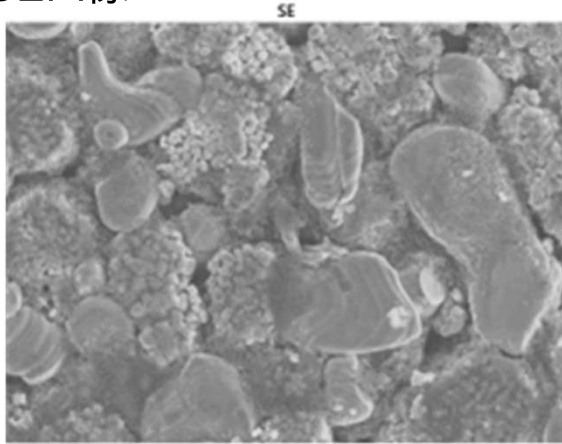
9.分解後のポリマー電池



SEM、  
EDX分析

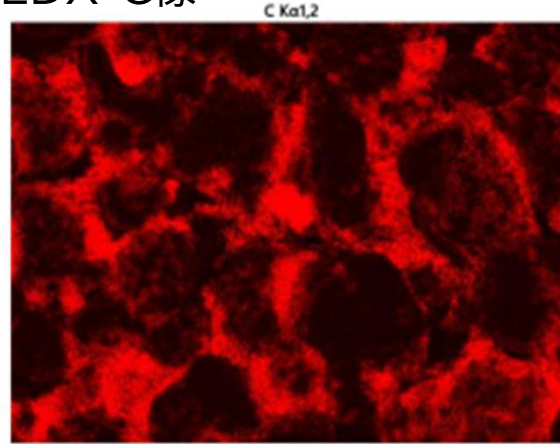
# 実施例(還元前の正極材料のEDX分析)

SEM像

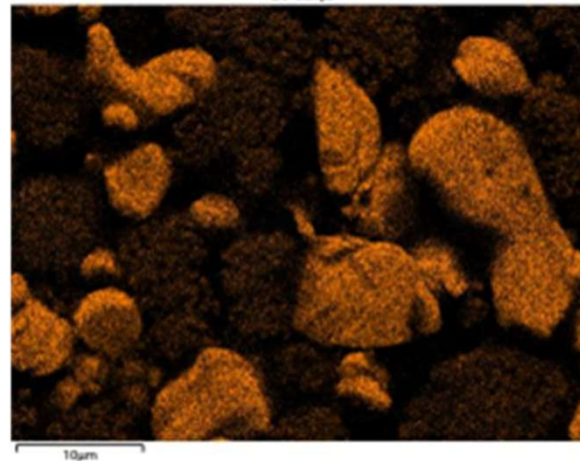


10µm

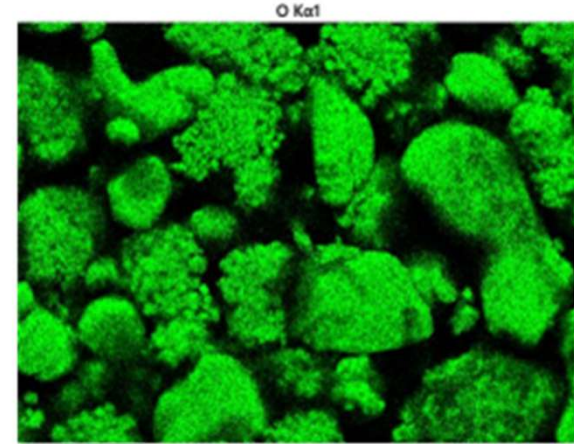
EDX-C像



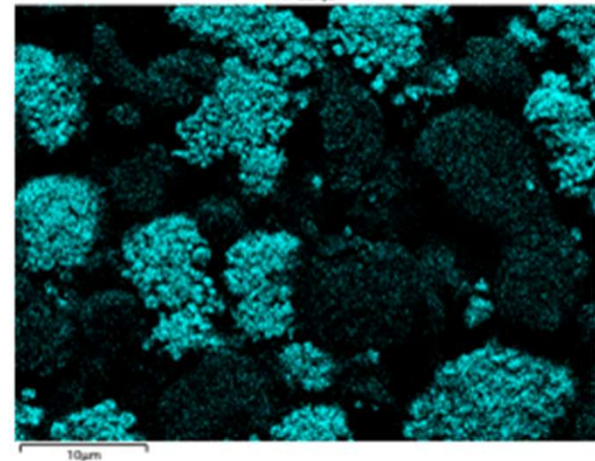
EDX-Co像



EDX-O像

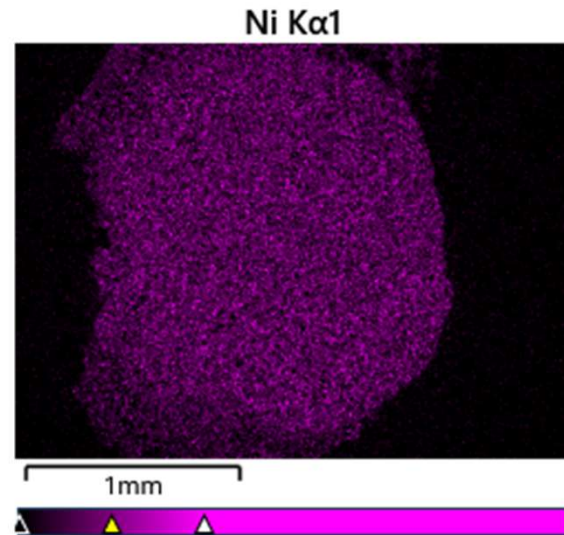
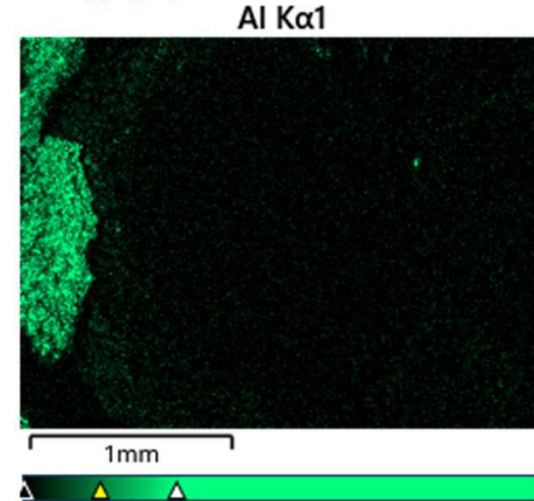
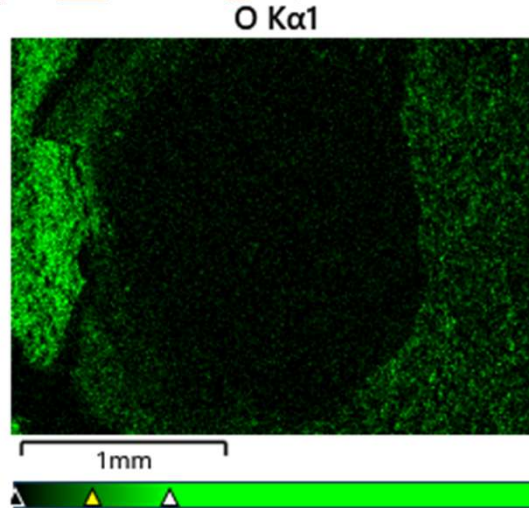
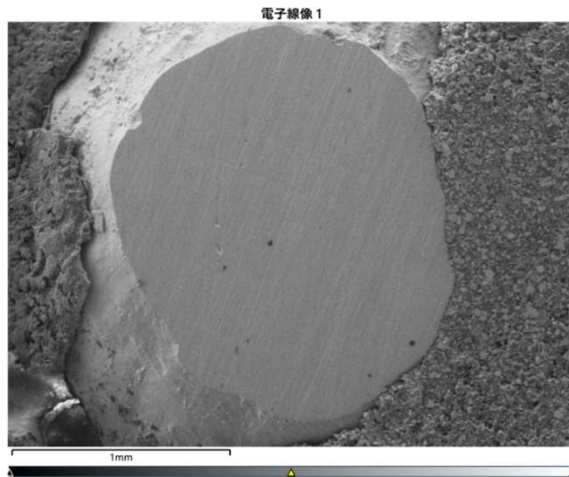


EDX-Ni像



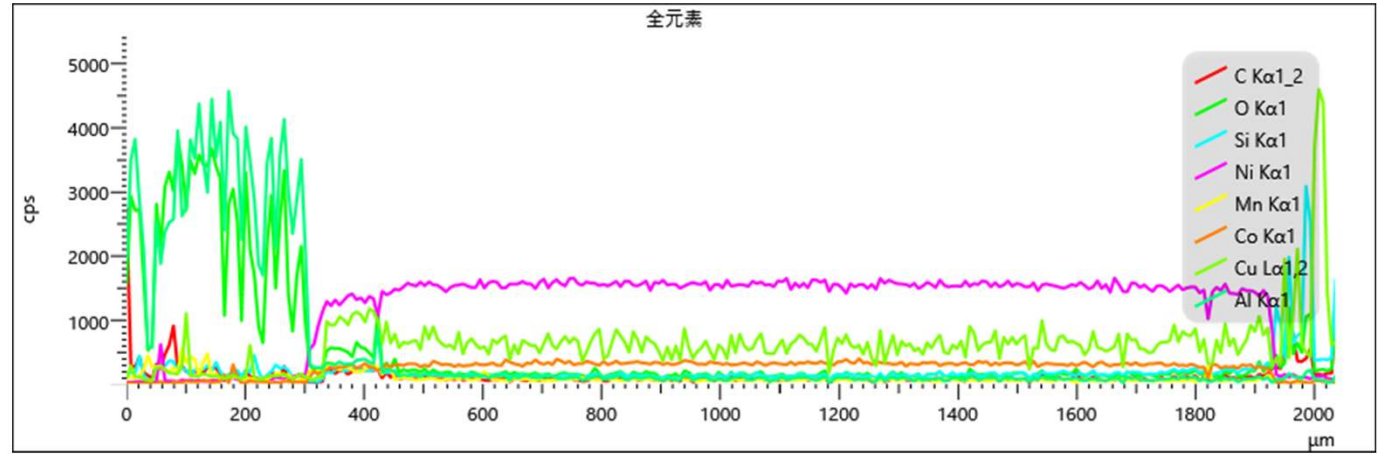
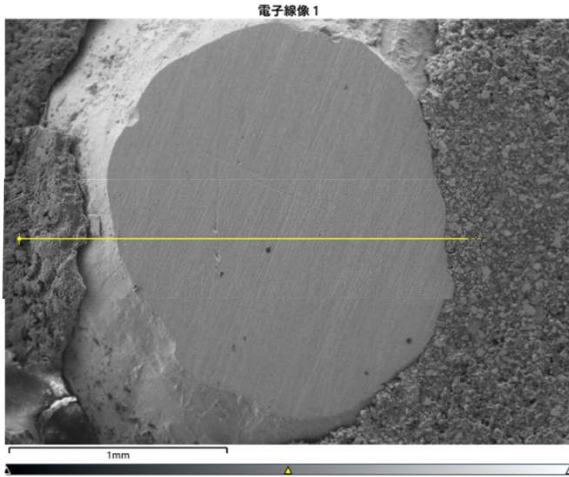
粒径1µm程度のニッケル酸化物と粒径10µm程度のコバルト酸化物が均等に分散しており、その個々の酸化物粒子の間に微細な炭素粉末が存在しているがわかる。

# 実施例(還元後のEDX分析)

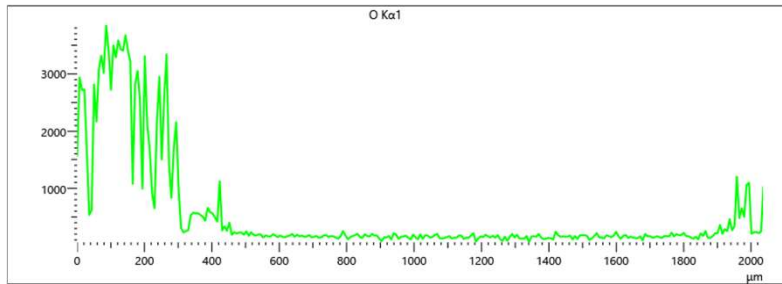


(5% $H_2$ +Ar)ガスで還元処理した試料について、析出した粒子を含む部分を樹脂埋めして研磨したうえで行ったSEM観察およびEDXによる元素分析マップ図である。**粒子直径が2 mmと極めて大きい、還元されたNi-Co合金**であることがわかった。そのEDX線分析からも非常に良く還元されていることが確認できた。また、**AlとC**が還元されたNi-Co合金の周囲に存在しており、**酸素のゲッターとして作用している**ことがわかる。

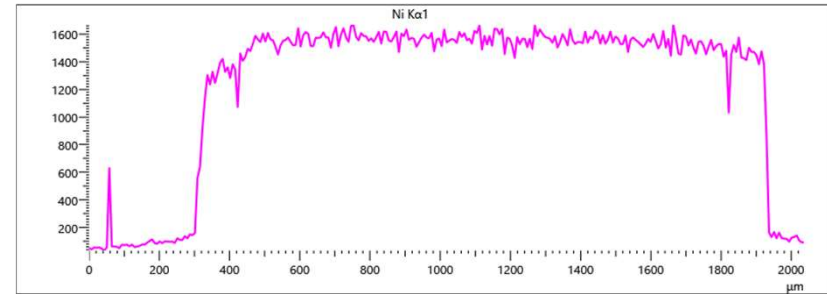
# 実施例(還元後のEDX線分析)



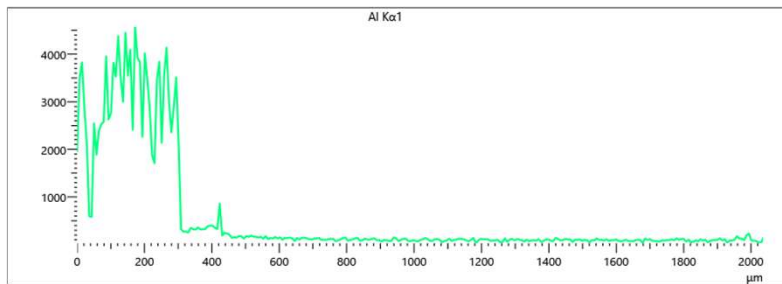
O



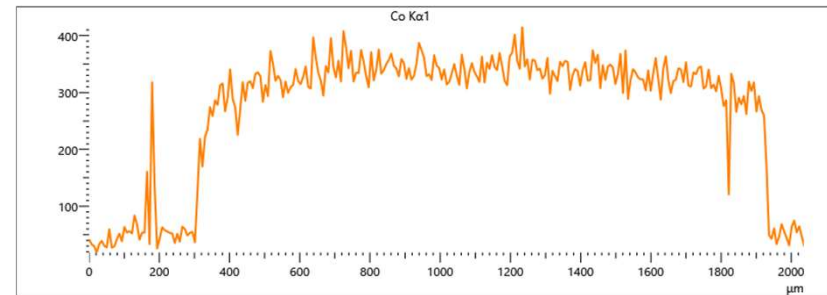
Ni



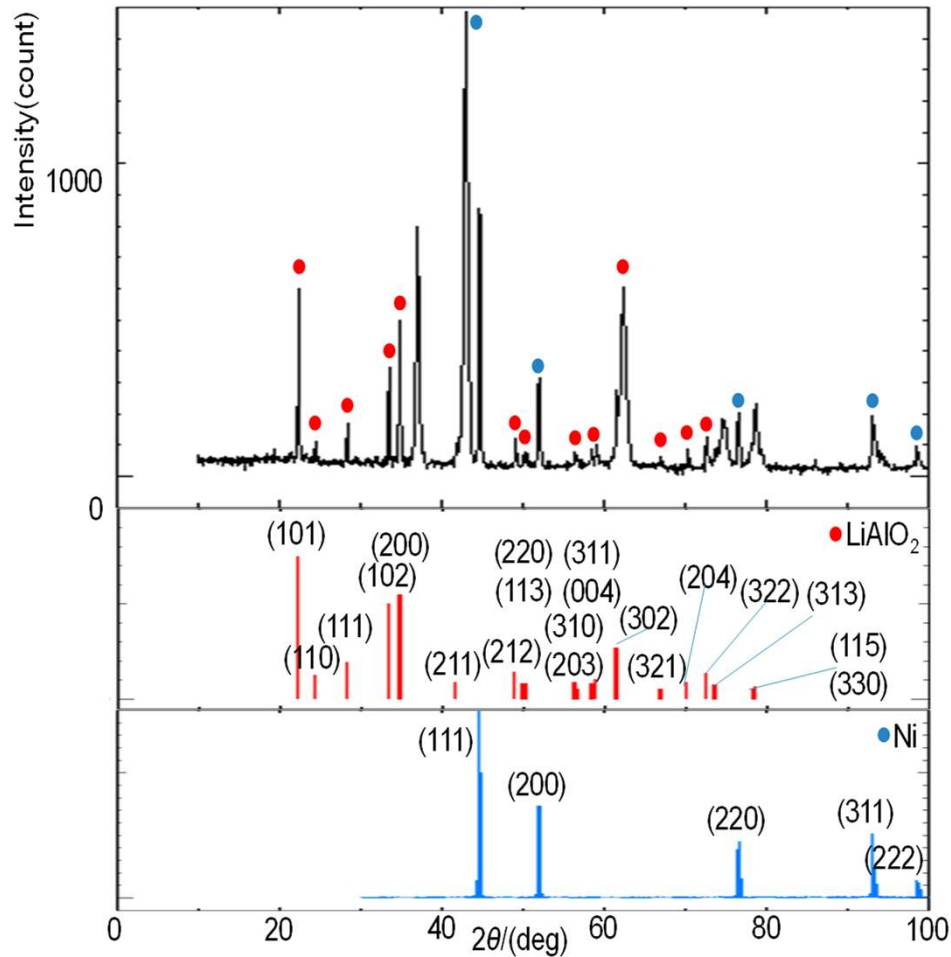
Al



Co



# 実施例(還元後のX線回折実験)

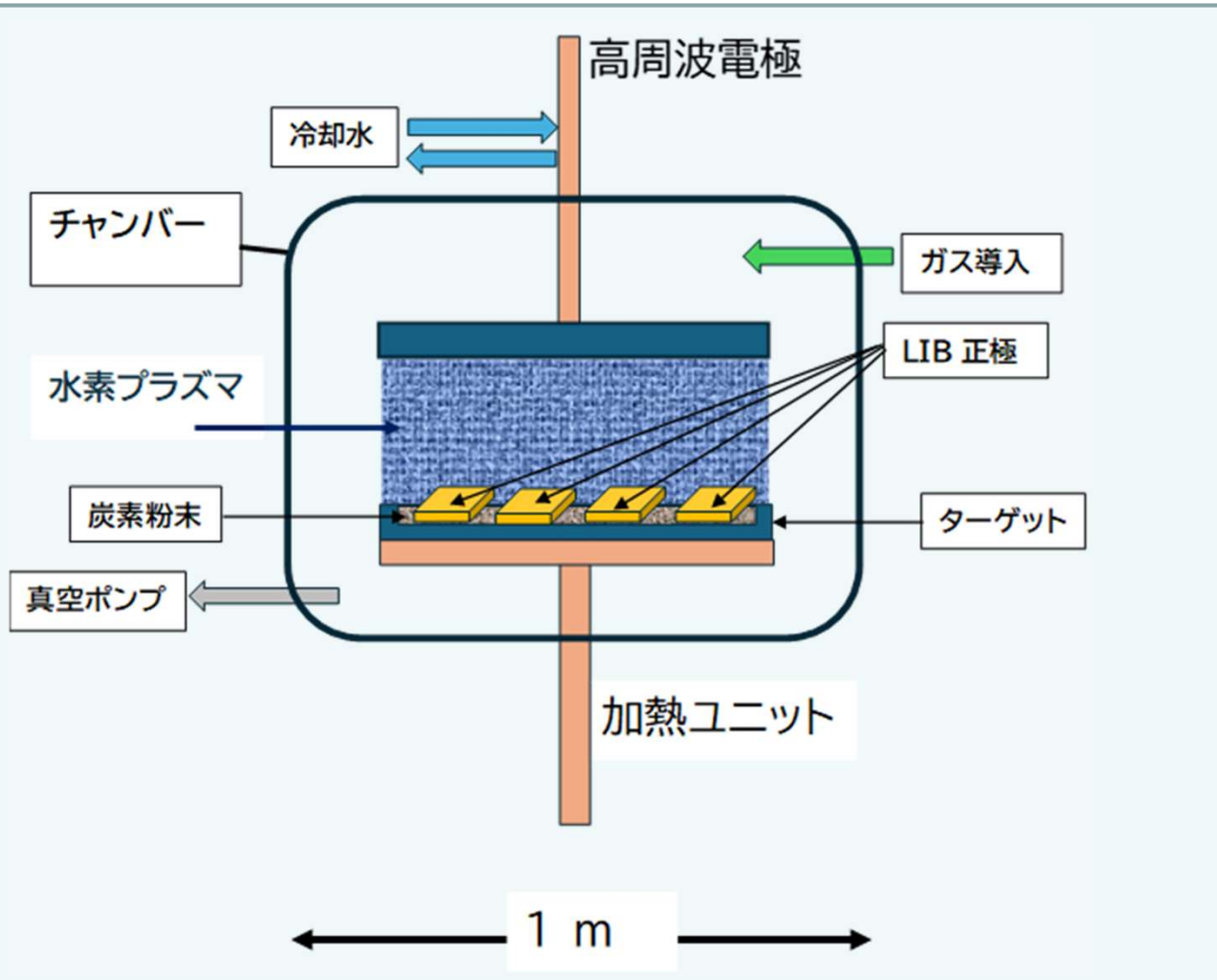


還元された金属球以外の粉末状物質についてX線回折実験を行い、物質同定したところ、 $\text{LiAlO}_2$ が生成していた。すなわち、**アルミニウムがリチウムのゲッターとして働き、リチウムを化合物の形で固定化できるので、高効率でリチウムを回収できると考えられる。**

## ハイブリッド還元装置の特徴

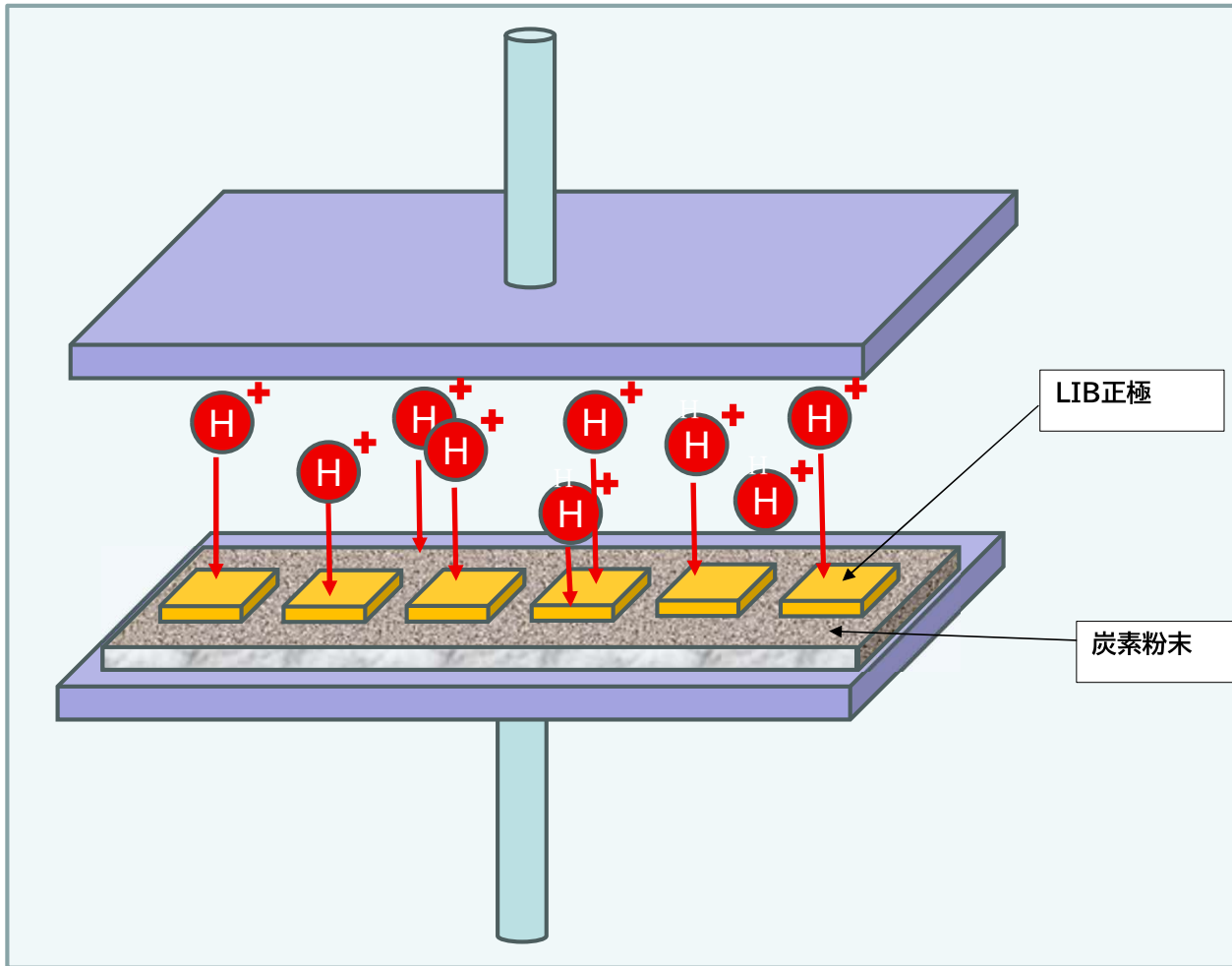
ハイブリッド還元装置として、水素プラズマ溶融法のデメリットを克服する水素イオン照射法として、**正極をターゲットとした、水素雰囲気での高周波スパッタを採用**する。これにより、**水素照射領域を大面積で均一にとれるようになるため、良質のレアメタル還元物を大量に得られる**と考えられる。これに加えて、**水素照射と同時に炭素還元**を可能にするために、ターゲット加熱ユニットを備えた装置とする。

# ハイブリッド還元装置の概念図



ターゲット電極直下に加熱ユニットを組み込んで、炭素還元が可能となるような高温を実現する。ターゲットは凹部を有し、そこに炭素粉末とLIB正極を複数配置する。チャンバー内を排気後、アルゴン・水素混合ガスを導入し高周波を印加して水素プラズマを生成する。スパッタ条件にすると活性化した水素イオンがLIB正極に照射されることになり、水素還元が正極上部より進行する。同時に炭素還元も炭素粉末に接触し高温となっている正極下部より進行する。

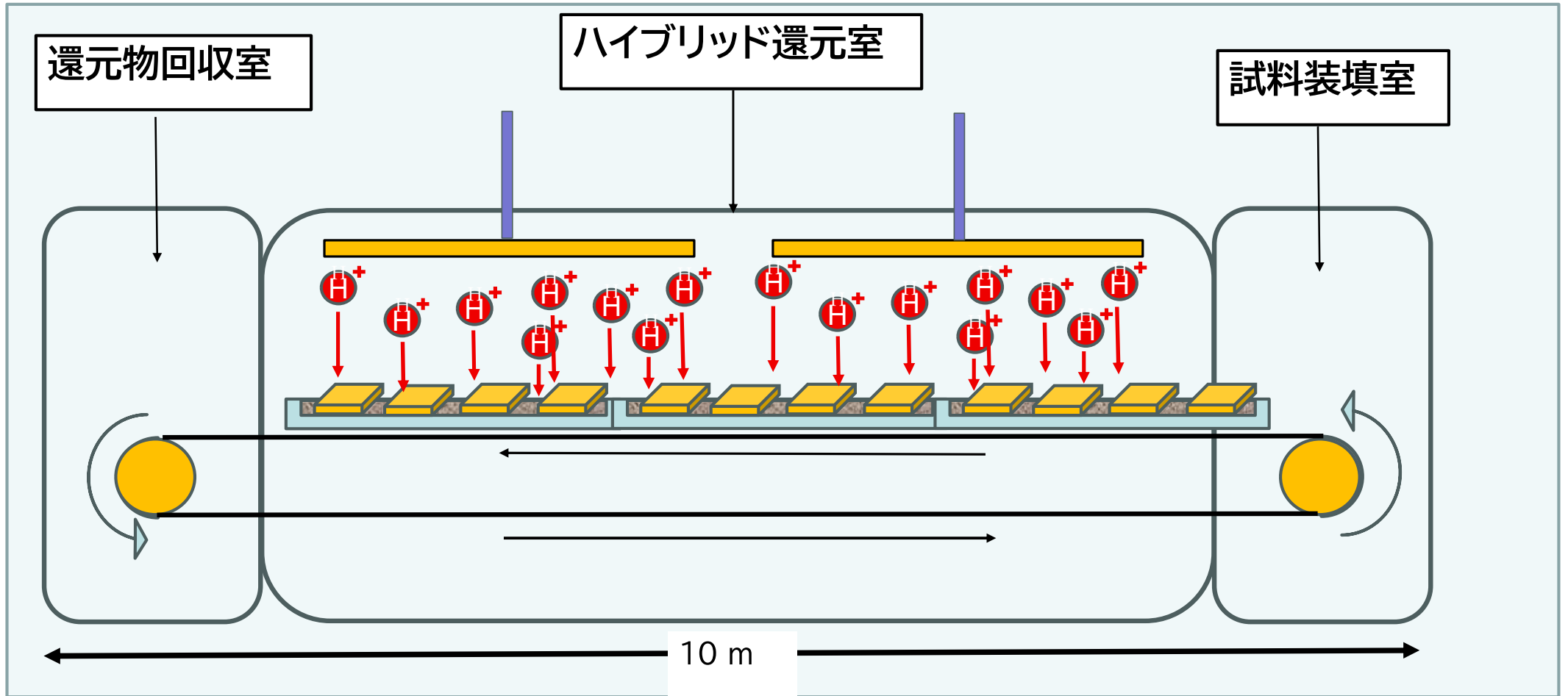
## 電極部分の拡大図



ターゲットは凹部を有し、そこに炭素粉末とLIB正極を複数配置する。チャンバー内を排気後、アルゴン・水素混合ガスを導入し高周波を印加して水素プラズマを生成する。スパッタ条件にすると活性化した水素イオンがLIB正極に照射されることになり、水素還元が正極上部より進行する。同時に炭素還元も炭素粉末に接触し高温となっている正極下部より進行する。



# 連続ハイブリッド還元装置の概念図



実用化に向けては、連続スパッタ装置を改良したパイロットプラントにより、高効率で操業可能な連続ハイブリッド還元装置を開発する。

## 想定される用途

- 本技術の特徴を生かすためには、**EV車の電源用電池のリサイクル**に適用することで**高効率・低環境負荷**のメリットが大きいと考えられる。
- また、達成された**還元・ゲッター効果**に着目すると、**金属精錬**や**不純物除去**といった分野や用途に展開することも可能と思われる。

## 実用化に向けた課題

- 現在、水素プラズマ還元についてレアメタル回収が可能なところまで開発済み。
- 今後、高周波スパッタリングを用いるハイブリッド還元装置を開発して実験データを取得し、LIBのリサイクルに適用していく場合の条件設定を行っていく。
- 実用化に向けて、回収率を欧州電池規則まで向上できるよう技術を確立する必要もあり。

## 企業への貢献、PRポイント

- 本技術は低環境負荷・高効率のレアメタル回収が可能のため、連続操業可能な還元装置を開発することでより企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験、第一原理による理論計算を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能。
- 本格導入にあたっての技術指導等

# 社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	・ハイブリッド還元装置の設計が完了	
現在	・水素プラズマによる、電極を含むLIB正極からのレアメタル還元が実現	
2年後	・ハイブリッド還元装置によるレアメタル回収技術の進展 ・回収率に関する欧州電池規則をクリア	デモンストレーション実施 JSTのA-step事業へ応募し研究資金獲得
4年後	・連続ハイブリッド還元装置による主要特性の評価(例:性能、安定性試験の実施) ・還元条件の最適化を実現	評価基礎データの提供 サンプル提供が実現
6年後	・連続ハイブリッド還元装置の性能向上 (連続運転の安定性の実現)	試験サービスの実現

## 企業への期待

- 未解決のハイブリッド還元の高効率な連続操業については、高周波スパッタリングの技術により克服できると考えている。
- 連続スパッタ装置の技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、高周波スパッタリング装置を開発中の企業、レアメタル回収分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

## 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 回収方法及び組成物
- 出願番号 : 特願2024-141863、  
PCT/JP2025/029497
- 出願人 : 茨城大学
- 発明者 : 篠嶋 妥、永野隆敏、大貫 仁、  
大橋健也、吉田武彦

# お問い合わせ先

茨城大学  
研究・産学官連携機構

T E L : 0294-38-7451  
e-mail : [iric@ml.ibaraki.ac.jp](mailto:iric@ml.ibaraki.ac.jp)