

研究課題番号	3RF-1901
研究課題名	「使用済みワイヤーハーネスから高品位の銅および被覆樹脂を回収する高効率湿式ボールミル剥離法の開発」
研究実施期間	令和元年度～令和3年度
研究機関名	東北大学
研究代表者名	熊谷 将吾

1. 研究開発目的

高品位の銅線および塩ビ被覆樹脂を回収することを目的に、申請者は、2017～2018年度の環境研究総合推進費【3RF1701】にて、直径3 mm以下の細線から被覆材および伸銅相当品位の銅を回収する二つのラボスケール剥離手法（ボールミル剥離法（図1(a)）および膨潤剥離法（図1(b)））を開発した。両手法共に、従来のナゲット処理よりも格段に高品位の塩ビ被覆材および伸銅相当の銅線回収を実現したが、ケーブルを3 cm以下に裁断する前処理および1時間程度の剥離処理時間を要していた。

本研究は、上記両手法の長所を融合した「湿式ボールミル剥離法（図1(c)）」を開発し、使用済みWHの高効率処理を実現する。具体的には、①有機溶媒による塩ビ被覆材膨潤、②可塑剤抽出、および③塩ビ被覆材のボールミル剥離、をワンポットで実施し、そのシナジー効果により剥離効果を高め、剥離時間短縮および長ケーブル処理を実現する。具体的には、数十cm以上の長さのWH細線に対し、塩ビ被覆材の剥離率100%、塩ビ被覆材および銅線の回収率100%、フタル酸エステル可塑剤の回収率100%、を1時間以内に実現可能な湿式剥離法の開発を目指す。2019年度はラボスケールの小型ボールミル反応器にて本目標の達成を目指す。並行して、キログラム単位の使用済みWHを処理可能なベンチスケールリアクターを設計開発する。研究期間終了時、ベンチスケールリアクターにおいても上記の剥離回収目標を達成し、かつ社会実装に向けたスケールアップ化の指針を構築することを目指す。スケールアップ試験により塩ビ被覆材および銅線の回収能力を増強し、併せて、銅線および塩ビ被覆材の品質評価を実施することで、銅線および被覆樹脂双方のリサイクルポテンシャルを明らかにしていく。

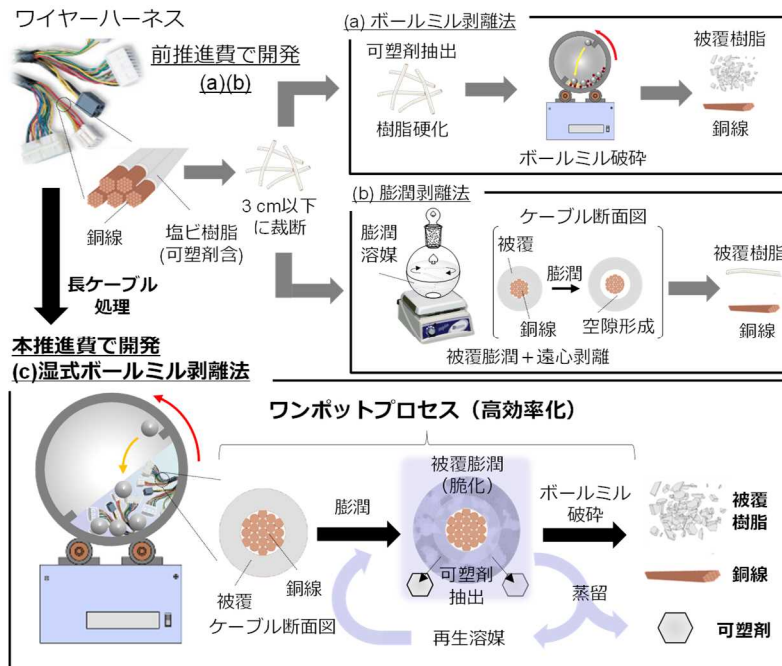


図1 前推進費【3RF1701】で開発した(a)ボールミル剥離法および(b)膨潤剥離法、および(c)本推進費【3RF1901】で開発する湿式ボールミル剥離法

2. 研究目標

【全体、サブテーマ1 共通】

数十 cm 以上の長さの使用済みワイヤーハーネス細線に対し、塩ビ被覆材の剥離率 100%、塩ビ被覆材および銅線の回収率 100%、回収する銅線は伸銅相当品位、フタル酸エステル可塑剤の回収率 100%、を可能とするベンチスケール湿式剥離法の開発を実現する。小型ミルからベンチスケールへのスケールアップ試験により、社会実装に向けたスケールアップ化の指針を見出す。併せて、銅線および被覆樹脂の品質評価を実施することで、銅線および被覆樹脂双方のリサイクルポテンシャルを明らかにする。

3. 研究の進捗状況

【全体、サブテーマ1 共通】

進捗状況自己評価：計画以上の大きな進展がある

評価結果の具体的理由

本報告書提出時点における本研究開発の当初研究実施計画は、①小型湿式ボールミル作製、②被覆樹脂・可塑剤・溶媒の溶解度パラメータ推算、③WH ケーブル膨潤挙動の解明、④剥離条件の最適化および剥離機構解明、⑤ベンチスケールリアクター設計開発、の5項目であった。これら当初研究計画は、2019年の研究到達目標（小型湿式ボールミルを用いて、数十 cm 以上の長さのWH 細線に対し、塩ビ被覆材の剥離率 100%、塩ビ被覆材および銅線の回収率 100%、フタル酸エステル可塑剤の回収率 100%、を1時間以内に実現）を前倒しで達成した。2019年に実施したアドバイザー会合において、当初研究計画以上の進展があったことが認められ、さらにリサイクルの現場において実施しやすい、よりシンプル、安全、かつ高効率な湿式剥離法として、2ステッププロセス法（事前膨潤処理→乾式ボールミル）、さらには、ボールではなくロッドを使う2ステップロッドミルプロセスまで研究が発展し、当初計画以上の性能の湿式剥離プロセスの開発に成功した。銅線が混入することなく塩ビ被覆材を回収できたこともあり、被覆材の塩ビ材料としての材料リサイクルの可能性を探るため、塩ビ製品メーカーに対するヒアリングを実施した。2020年度以降のベンチスケール試験においてまとまった量の塩ビ被覆材を回収した際には、物性評価に協力いただけることとなり、今後の研究開発を加速するネットワーク形成も順調に進んでいる。

上記（1）研究目標において設定した本研究開発目標を達成度 100%とした場合、現在の達成度はおよそ 60%（従来研究計画通りに進んだ場合を 40%と仮定）と考えている。これまでの研究によって、塩ビ被覆、可塑剤、および各種溶媒の HSP パラメータに紐づけた膨潤および可塑剤抽出挙動、膨潤・可塑剤抽出溶媒選定指針、剥離挙動および機構などの学術的基盤の整理ができた。さらに、小型ボールミルにより目標の剥離率・回収率を達成している。プラス α でより高性能な2ステップロッドミルプロセスまで提案できた。残りの 40%に相当する要検討事項として、今後はベンチスケール試験を通じて、反応中の容器内部の状態モニタリングや消費電力測定も新たに実施し、プロセスの安全性および経済性を評価していく。スケールアップ試験全体を通して社会実装に向けたスケールアップ化の指針を見出す（詳細な計画線表は図2）。併せて回収銅線および被覆塩ビの品質評価を実施し、銅線および被覆樹脂双方のリサイクルポテンシャルを明確にしていく。関連協会・企業および研究者へのヒアリングも今後継続していくことで、本研究開発の波及効果の明確化や将来のコンソーシアム型研究（2022年度以降）に向けてのネットワーク形成も進めていく（図3）。

黒：計画書記載・実施済 赤：追加変更・実施済 紺：今後の計画 ●——▶：当初計画 ●-----▶：実施実績

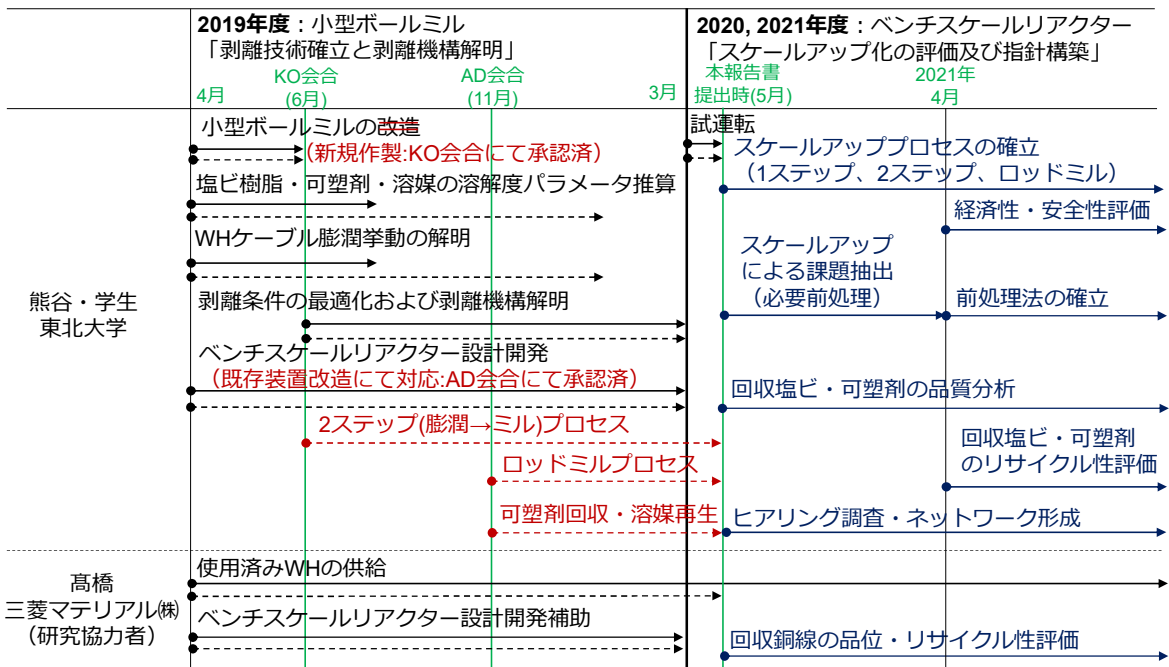


図2 研究計画および実施線表



図3 本研究開発の長期ビジョン

4. 環境政策への貢献(研究代表者による記述)

WHを構成する、銅、炭化水素、および塩素のほぼ全量が輸入資源であり、製品化までに要するエネルギー（銅精錬、ナフサ蒸留、塩水電気分解、塩ビ合成）は莫大である。しかし、使用済みWHの約9割は長期に渡り中国に輸出され、投資したエネルギーや資源は海外に流出していた。本研究は【申請時：重点課題⑨】として、使用済みWHの国内リサイクルを推進する技術開発および国産資源化に貢献する。更に、政府間パネル（IPCC）でも議論されているように二酸化炭素削減は急務の課題である。本研究開発により、国内に滞留する使用済みWHから、伸銅相当品位の銅回収および二次資源に資する塩ビ被覆材を回収することで、銅精錬および塩ビ製造に要するエネルギー消費および温室効果が

ス削減に貢献する。

プラスチック資源循環戦略において、2035年までに使用済みプラスチックを100%リユース・リサイクル等により有効利用することをマイルストーンに掲げている。しかし、従来のWHのナゲット処理等では、被覆樹脂への細かな銅片混入を避けることが難しく、銅片が混入した被覆樹脂は材料リサイクルに適していない。よって、多くが直接埋立処分もしくは耐腐食性の焼却炉にて処理され、効果的な国内資源循環は実現していない。本研究開発は、銅線と被覆樹脂を細かく粉碎しないため分離が容易であり、被覆樹脂の材料価値を高めることでリサイクル原料となる可能性が高い。塩ビの埋立および焼却量を削減することは被覆樹脂の処理に係る設備負荷を軽減する役割もある【申請時：重点課題⑩】。更に、本開発手法はフタル酸エステル系可塑剤を被覆樹脂から分離回収することができる。EUの改正RoHS指令の将来的な影響を考慮すると、フタル酸エステル可塑剤をコントロールできる本手法は、被覆樹脂の資源循環性を高めることにも貢献する。

本技術は、主に非鉄金属、金属・プラリサイクル、自動車、および家電産業における環境・資源戦略技術として活用されることが期待される。本研究で回収可能な銅は伸銅に相当する品位だが、雑銅線（390 円/kg-Cu [2]）として安く見積もっても、年間 25,000 トン-Cu の廃 WH を本技術でリサイクルした場合、約 98 億円に相当する銅を使用済み WH から調達できる。さらに、産業廃棄物として処理費用が発生していた被覆材や可塑剤に、本研究による高度分離により材料価値が付与されることで、プラス α の経済的効果も見込まれる。

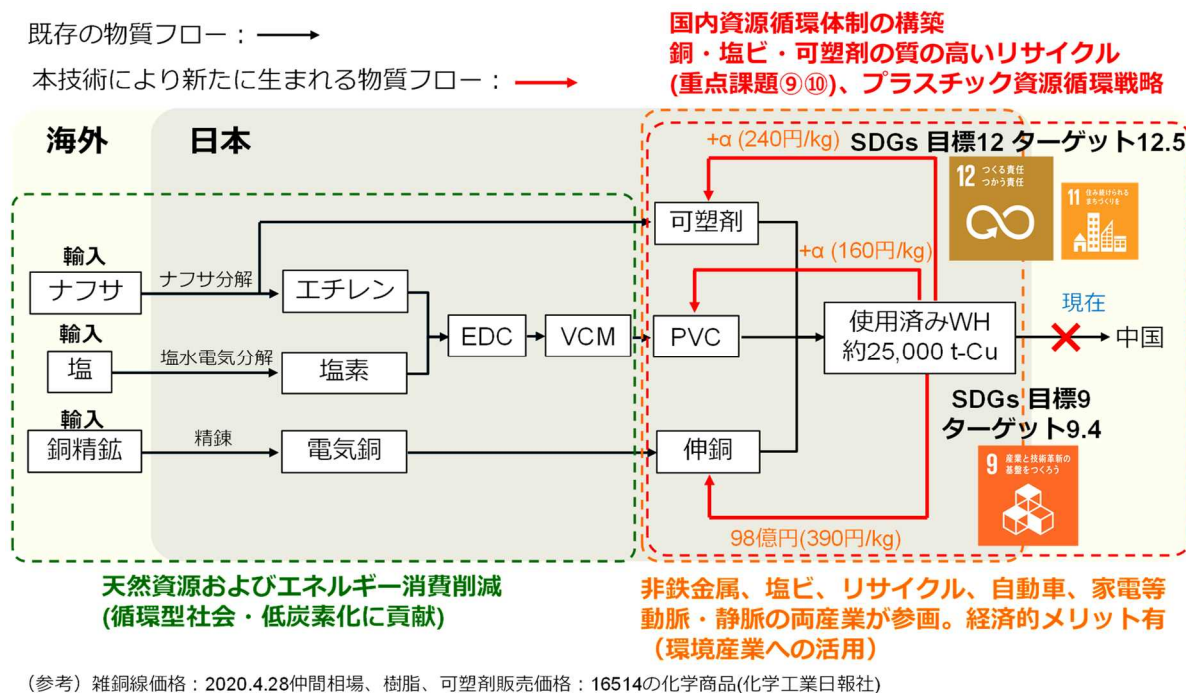


図4 本研究開発の行政ニーズ、環境政策、および環境産業への貢献

5. 評価者の指摘及び提言概要

ワイヤーハーネスの被覆樹脂の短時間での剥離法開発に成功している。良い着目点を持った研究であり、良好な進捗で十分な成果を得ている。加えて、PO、AD等との検討により柔軟に研究を展開していると高く評価できる。実用化に近づいた印象であるが、社会実装に向けた社会システムの検討は今後の課題である。汚れたワイヤーハーネスの前処理、膨潤用の溶媒についての回収効率とマテリアルバランス、回収被覆材のリサイクル容易性、騒音対策等、精力的に技術開発を進めて欲しい。また、関係事業者から要望や課題を聴取していただき、経済性、安全性など、作業効率以外の技術評価の物差しを明らかにして進めていただきたい。

6. 評点

評価ランク : S