



マイクロ波加熱による廃ワイヤハーネスからの銅回収

Recovery of Copper from Wire Harness using Microwave Heating

和嶋隆昌*

by Takaaki WAJIMA

原稿受理 2025 年 1 月 28 日 Received January 28, 2025

1. はじめに

ワイヤハーネスは、主にポリ塩化ビニル(PVC)で直径数mm～数百 μ mの細線を被覆した雑線であり、自動車・オートバイや廃家電に由来し、国内において銅量ベースで年間約2万5千トン廃棄されている。ワイヤハーネスは銅線軸が細く銅の回収率が低いため国内では採算性が悪く、これまでは大半を中国に輸出していたが、近年、中国で雑廃線を輸入禁止対象としたため、ワイヤハーネスの国内滞留が深刻化しはじめている。

しかしながら、ワイヤハーネスに対応する既存のリサイクル技術は、混線したワイヤハーネスの手選別作業の人件費、処理による銅線の品位の低下、塩ビが産業廃棄物となり処理費が必要、など多くの問題があり、国内でのリサイクルを現状の技術で成り立たせるのは困難な状況にある。さらに、現在、ハイブリッド車や電気自動車などワイヤハーネスの搭載量が多い自動車の普及が進んでおり、今後、ワイヤハーネスの廃棄量の増加とともに銅リサイクルの必要性も増加すると推測され、対応できる新たなリサイクル技術が求められている。

そのような中でPVC被覆ワイヤハーネスを水酸化ナトリウム共存下で熱分解することで、水酸化ナトリウム溶融塩による熱分解の促進による発生ガス中の水素量増加による燃料ガス回収、樹脂の効率的炭化による強度低下と簡易な粉化、ハロゲンのアルカリ塩としての捕獲、が同時に起こり、銅細線を簡易に回収することに成功している^{1, 2)}。また、水酸化アルカリ溶融塩を用いたマイクロ波加熱により廃ガラス繊維強化樹脂を高効率に炭化・粉化し再資源化することに成功している³⁾。これらの結果から、マイクロ波加熱による溶融塩処理を用いてワイヤハーネスを迅速・簡易かつ大量に処理ができハロゲンガスはもとより二酸化炭素も排出されない環境調和型の金属回収プロセスを実現できる可能性がある。しかしながら、マイクロ波加熱による溶融塩処理の知見はほとんど見当たらない。

そこで、本研究ではワイヤハーネスの被覆をマイクロ波加熱により分解し銅線回収を試みた。

2. 試料および実験方法

廃ワイヤハーネスは国内の業者から提供いただいたものをカットして用いた。

実験には、マイクロ波加熱装置(μ Reactor EX、四国計測工業株式会社)を用いた。本装置は上部に赤外線カメラと光ファイバー温度計があり、設置した試料の温度を測定できる。

マイクロ波加熱に利用可能な反応器の材質をステンレス、炭化ケイ素、石英、ガラス製の容器(坩堝・ビーカー)を用いて調べた。各容器に水酸化ナトリウム(Wako、特級)、または、水酸化カリウム(Wako、特級)を16 g入れ、マイクロ波加熱装置内に設置し、200～500 Wで加熱を試みた。マイクロ波加熱前後の様子を観察し、マイクロ波加熱中の試料の温度変化を赤外線カメラと光ファイバー温度計で計測した。

次に、ワイヤハーネス試料のみにマイクロ波照射を行い、様子の観察と温度変化を調べた。試料は赤細線と緑太線の2種類のワイヤハーネスを用いた。

これらの結果を踏まえて、マイクロ波を用いた溶融塩加熱による被覆分解・銅回収を試みた。図1に実験内容を示す。試料は緑のワイヤハーネスケーブルを用いて(図1(a))、1 gを石英三角フラスコに水酸化カリウム(10 g)と共に入れ(図1(b))、500 Wのマイクロ波加熱を10 min行った。加熱中発生したガスはガスパックで回収し(図1(c))、ガスクロマトグラフで測定した。

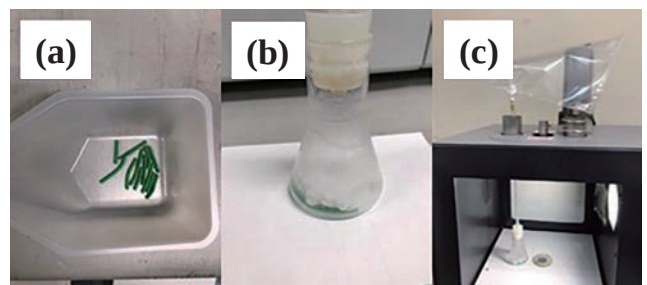


図1 マイクロ波加熱実験内容：(a) ケーブル、(b) 加熱前の反応器、(c) マイクロ波装置への設置状況

* 千葉大学大学院工学研究院 准教授 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

3. 結果および考察

各容器における20 minのマイクロ波照射(200 W)による水酸化ナトリウムと水酸化カリウムの様子を図2と図3に示す。水酸化ナトリウムと水酸化カリウムの双方において、ステンレス坩堝と炭化ケイ素坩堝を用いた場合はマイクロ波を照射しても溶解が見られなかったが、石英ビーカーとガラスビーカーでは溶解が見られた。なお、容器の形状を変えたものでも同様の結果がえられている。

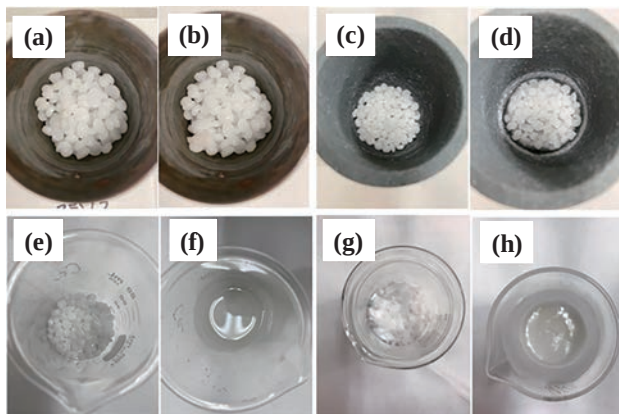


図2 マイクロ波照射前後における各容器中の水酸化ナトリウムの様子：(a) ステンレス坩堝—加熱前、(b) ステンレス坩堝—加熱後、(c) 炭化ケイ素坩堝—加熱前、(d) 炭化ケイ素坩堝—加熱後、(e) 石英ビーカー—加熱前、(f) 石英ビーカー—加熱後、(g) ガラスビーカー—加熱前、(h) ガラスビーカー—加熱後

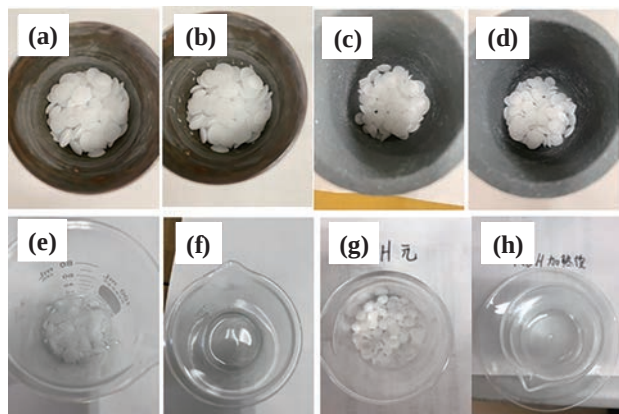


図3 マイクロ波照射前後における各容器中の水酸化カリウムの様子：(a) ステンレス坩堝—加熱前、(b) ステンレス坩堝—加熱後、(c) 炭化ケイ素坩堝—加熱前、(d) 炭化ケイ素坩堝—加熱後、(e) 石英ビーカー—加熱前、(f) 石英ビーカー—加熱後、(g) ガラスビーカー—加熱前、(h) ガラスビーカー—加熱後

各容器におけるマイクロ波照射(200 W)による水酸化ナトリウムと水酸化カリウムの温度変化を図4に示す。水酸化ナトリウムと水酸化カリウムの双方において、ステンレス坩堝と炭化ケイ素坩堝を用いた場合はマイクロ波を照射しても大きな温度上昇が見られな

かったが、石英ビーカーとガラスビーカーでは温度上昇が見られた。

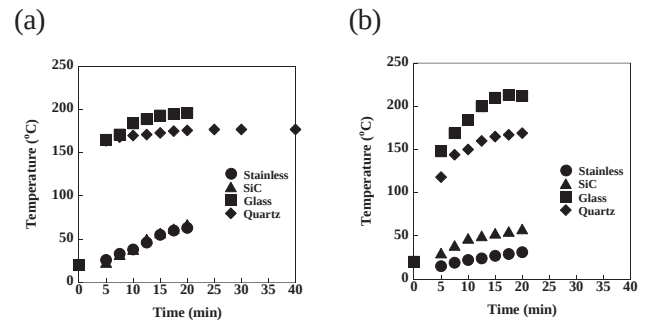


図4 マイクロ波照射による(a) 水酸化ナトリウムと(b) 水酸化カリウムの温度変化

赤外線カメラによるマイクロ波照射中のガラスビーカー中の水酸化ナトリウムの温度変化を図5に示す。容器であるガラスビーカーの温度に比べて水酸化物の温度が集中的に上昇している様子が見られた。

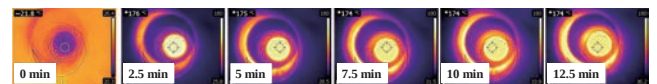


図5 マイクロ波照射によるガラスビーカー中の温度変化

赤外線カメラによるマイクロ波照射中のステンレス坩堝中の水酸化ナトリウムの温度分布を図6に示す。容器であるステンレス坩堝と水酸化物の温度がほぼ変わらない様子が見られた。マイクロ波を効果的に活用する反応器の材質には、ステンレスや炭化ケイ素は不向きであり、石英やガラスで反応器を作成する必要があることが明らかになった。

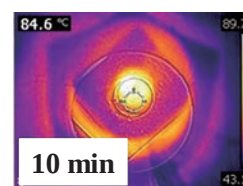


図6 マイクロ波照射によるステンレス坩堝中の温度分布

石英ビーカーにおける各W数のマイクロ波の20 minの照射による水酸化ナトリウムの様子を図7に示す。200 Wでは一部溶解していない部分が見られたが、300 W以上では完全に溶解した様子が観察された。

石英ビーカーにおける各W数のマイクロ波照射による水酸化ナトリウムの温度変化を図8に示す。200 Wと300 Wはほぼ同様の温度上昇の傾向をしめすが、W数が上がるにつれて温度上昇が増加した。200 Wと300 Wでは5分で約160°C、400 Wでは10分で約200°C、500 Wでは15分で約250°Cまで短時間で温

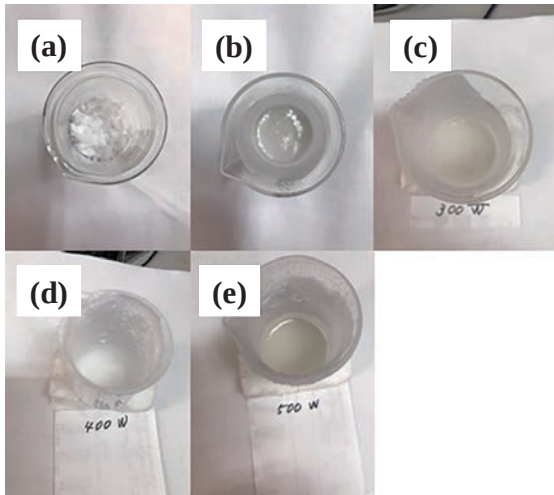


図7 マイクロ波照射前後における石英ビーカー中の水酸化ナトリウムの様子：(a) 加熱前、(b) 200 W、(c) 300 W、(d) 400 W、(e) 500 W

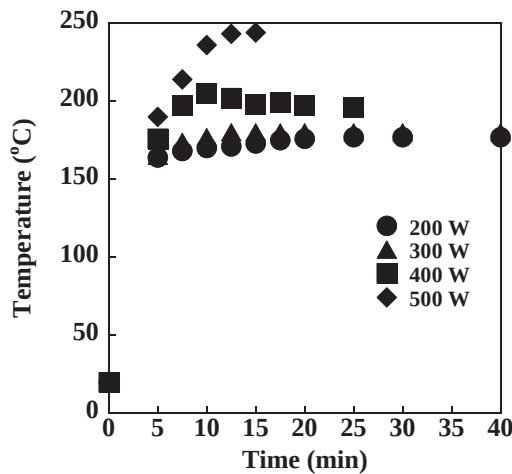


図8 各 W 数におけるマイクロ波照射による水酸化ナトリウムの温度変化

度上昇し一定になった。

500 Wにおける20 minのマイクロ波照射前後のワイヤハーネス試料の様子を図9に示す。赤細線と緑太線の両方ともマイクロ波照射前後において、被覆の溶解などの変化は観察されなかった。

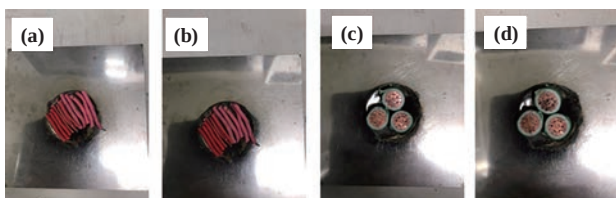


図9 マイクロ波照射前後のワイヤハーネス試料の様子：(a) 赤細線—照射前、(b) 赤細線—照射後、(c) 緑太線—照射前、(d) 緑太線—照射後

緑太線における赤外線カメラによる500 Wのマイクロ波照射中の温度変化を図10に示す。なお、白丸

で記している部分がワイヤハーネスを示している。周りに比べて試料自体の温度が集中的に上昇の様子が見られた。

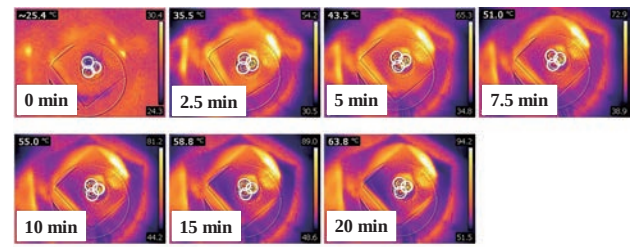


図10 マイクロ波照射による緑太線の温度変化

赤細線における赤外線カメラによる200-500 Wのマイクロ波照射中の温度変化を図11に示す。W数に関わらず周りに比べて試料自体の温度が集中的に上昇の様子が見られた。W数が増えるにつれて、温度が上昇する傾向が見られた。

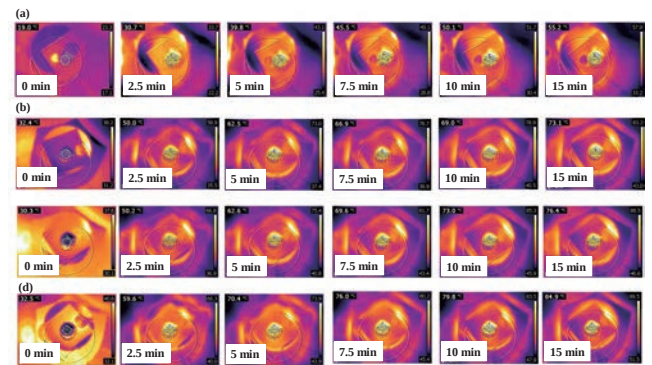


図11 マイクロ波照射による赤細線の温度変化：(a) 200 W、(b) 300 W、(c) 400 W、(d) 500 W

マイクロ波照射による各試料の温度変化を図12に示す。W数が増えるにつれて温度上昇が増加した。また、試料によって同じW数でも温度上昇の大きさが異なることがわかった。マイクロ波でのワイヤハーネスの温度上昇は銅線部分がマイクロ波により加熱されて起こるため、被覆に対して銅線の比率が高い赤細線が同じW数でも温度上昇すると考えられる。しかしながら、ワイヤハーネスのみの温度上昇では、被覆の分解温度である最低200℃以上には達しないため、被覆のみのマイクロ波加熱では被覆の分解は困難であることがわかった。

緑のワイヤハーネスケーブルを水酸化カリウムと共に石英フラスコに入れ、500 Wのマイクロ波加熱を10 min行い、加熱後に蒸留水でフラスコを洗浄し回収した銅線の写真を図13に示す。マイクロ波で熔融塩が溶けて被覆と反応することで被覆はすべて分解し、光沢のある銅線のみが回収できた。なお、加熱中

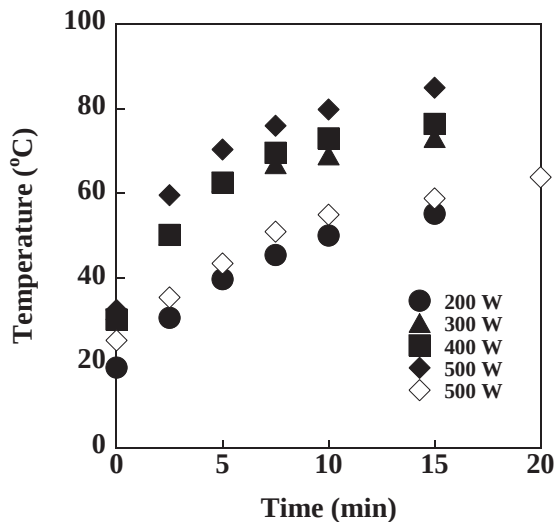


図 12 マイクロ波照射による各試料の温度変化



図 13 マイクロ波加熱でワイヤハーネスから回収した銅線

の発生ガス量は約100 mLであり、 H_2 : 3.7 %、 CH_4 : 25 %、であった。

以上の結果から、マイクロ波加熱を用いた溶融塩処理により簡易かつ迅速にワイヤハーネスから銅線を回収できるプロセスの可能性が示唆された。

4. おわりに

本研究では、マイクロ波加熱により溶融塩を用いてワイヤハーネスの被覆を分解し銅線回収を試みた。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・マイクロ波加熱により短時間での溶融塩の加熱が可能であり、マイクロ波のW数をあげることで加熱温度を上げることができることがわかった。
- ・ステンレスや炭化ケイ素の容器では80℃程度までしか温度が上がらなかったが、一方で石英やガラスの容器では200℃付近まで溶融塩を加熱することができた。
- ・マイクロ波加熱で溶融塩の効率的な反応が可能となり、短時間でワイヤハーネスの被覆を分解し銅線を

回収することができた。

近年、情報化により建設廃棄物をリサイクルする際にコンクリート廃材などとともに廃被覆銅線などが発生する現場が増加している。本研究の成果を用いて建設廃棄物の発生現場で銅線回収が可能となれば、建設用原材料のサーキュラーエコノミーに貢献することが期待できる。

参考文献

- 1) T. Wajima: Pyrolysis behavior of polyvinyl chloride with sodium hydroxide and application to copper recovery from multiwire tinned copper cables, International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources, Vol. 25, No. 1, pp. 70-77 (2022)
- 2) K. Kagawa, T. Wajima: Copper recovery from waste wire harness using potassium hydroxide, Proceedings of The 12th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE2022), pp. 555-558 (2022)
- 3) T. Wajima, M. Miyagawa: Recycling of Waste Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) via Pyrolysis with Sodium Hydroxide using Microwave Heating, Key Engineering Materials, Vol. 920, pp. 68-73 (2022)