

2025年度カーボンニュートラル研究助成制度・  
文理融合研究スタートアップ制度実施報告書

カーボンニュートラル推進センター 御中

以下のとおり研究実施報告書を提出します。

基 本 情 報	研究課題名：パルス放電噴流床による使用済み「使い捨てカイロ」への電気エネルギーの貯蔵
	研究代表者 氏名： 明石 孝也
	【在籍者】 研究科・専攻・学年： 【修了者等】 所属・職種：生命科学部 環境応用化学科・教授
	指導教員（所属・職・氏名）： （※在籍者のみ記入）
	共同研究者（所属・職・氏名）： （※指導教員と同人の場合は記入不要）
	その他 研究分担者：生命科学部 環境応用化学科・教務助手・クライソクラム パヌワット
	研究期間： 2025 年度
年 間 の 研 究 実 施 概 要	<p>※研究計画の進捗状況を中心に今年度の研究実施状況を記載してください。</p> <p>【研究目的（概要）】（申請書の記載）</p> <p>当研究室の特許技術であるパルス放電噴流床(Pulsed-Discharged Spouted Bed, PDSB)を用いて、使用済みの「使い捨てカイロ」に電気エネルギーを貯蔵できることを実証する。使用して塊状になった「使い捨てカイロ」を、酸化雰囲気にて PDSB 処理を行い、破砕する。その後、還元雰囲気にて PDSB 処理を行い、酸化鉄を還元して電気エネルギーを貯蔵する。使い捨てカイロの評価は、篩による粒度分布測定、顕微鏡による微細組織観察、X線回折による相同定によって行う。使い捨てカイロから取り出せるエネルギーの評価には、市販の水熱量計を改良した装置を用いる。上記の実証がなされた際には、電気エネルギーの貯蔵効率を高めるために、雰囲気と各雰囲気での PDSB 処理時間と印加電圧などを変えた実験を行い、同様の評価を行う。</p> <p>【研究実施概要】</p> <p>使い捨てカイロには、鉄粉、水、活性炭、バーミキュライト、吸水性樹脂、鉱物系吸着剤が含まれている。これを大気中に1日放置して、発熱を完了させた。発熱後の使い捨てカイロの袋から粉末を取り出し、粉末の X 線回折を行った。これにより、鉄粉は酸化してオキシ水酸化鉄(FeOOH)になっていることが分かった。</p> <p>パルス放電噴流床(Pulsed-Discharged Spouted Bed, 以下 PDSB と略す)は、パルス放電を熱源とする噴流床である。噴流床では、底部を細くした円筒容器に粉体を充填し、底部中心に開けた穴から気体を上部に噴き上げる。すると、粉体が噴水のように中心で吹き上がり、吹き上がった粉体</p>

は周囲で円環状に落下する。本研究で用いた独自技術の PDSB では、この噴流床で粉体が吹き上がる部分にパルス放電を発生させて、粉体の熱処理を行う。

### 1. 使用済み「使い捨てカイロ」の PDSB 処理による破砕効果の検証

使用済み「使い捨てカイロ」に含まれるオキシ水酸化鉄の PDSB 処理による破砕効果を確認するために、外径 14 mm φ の噴流床セル（底部を細くした石製製円筒容器の底に小さな穴を開けたもの）を用いた酸化雰囲気での PDSB 処理を行った。噴流床セル内を酸化雰囲気に保つために、噴流床セル内を上部から減圧して、石英管下部から空気を吸引させながら、500 Hz の繰り返し周波数 22 kV のパルス電圧で、10 min、20 min、40 min のパルス放電を行った。その後、乾式篩（目開き：4.75 mm, 2.80 mm, 2.00 mm, 850 μm, 300 μm, 150 μm, 75 μm）による粒度分布測定を行った。今回の検討条件では、PDSB 後に粒径は大きくなり、破砕効果は確認されなかった。PDSB 処理前後の試料をマイクロSCOPEにより観察すると、PDSB 処理前は茶褐色の粒子が見られたのに対して、PDSB 処理後では放電時間が長くなるにつれて黒色の粒子が増加した。この粒子の色の変化は、オキシ水酸化鉄が還元したことを示唆しており、噴流床内を酸化雰囲気に保てなかったことで、破砕が進行しなかったと考えられる。

### 2. PDSB 処理による使用済み「使い捨てカイロ」への電気エネルギーの貯蔵

使用済み「使い捨てカイロ」に電気エネルギーが貯蔵できる、すなわちオキシ水酸化鉄 (FeOOH) が PDSB 処理にて還元できることを実証するために、外径 14 mm φ の噴流床セルを用いた還元雰囲気での 22 kV, 500 Hz, 10 min の条件で PDSB 処理を行った。この還元雰囲気は、都市ガスの燃焼ガスを噴流床セル内に導入することにより行った。粉末中のオキシ水酸化鉄は、酸化鉄(II) (ウスタイト、FeO) にまで還元され、電気エネルギーを貯蔵できることを確認した。

### 3. 「使い捨てカイロ」から取り出せるエネルギーの評価

理科実験キットの水熱量計を2つを一定温度に保てるインキュベーター内に設置して、双子型カロリーメーターを作製した。使い捨てカイロからの発熱の時間変化を測定して、定性的な評価は可能となった。定量的評価のための精度向上の取り組みは継続して行う。

### 4. 「使い捨てカイロ」への貯蔵効率向上

電気エネルギーの貯蔵効率を高めるための方策として、当初予定していた PDSB 処理時間の延長に加えて、電極（陰極）本数を変える試みを行った。陰極のタングステン(W)線本数を1本から2本に変えることにより、鉄 (Fe) と四三酸化鉄（マグネタイト、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>）の混合物にまで還元できることを確認した。また、陰極の W 線本数を1本から2本に変えることにより、粗粒生成が抑制できることを確認した。現在は、電気エネルギーの貯蔵効率を高める（鉄粉の生成効率を高める）ために、空気混入を最小化するための風防機構を新設しており、都市ガスの燃焼ガスの代わりに水素還元を行える配管改造を行った。今後の成果に期待が持たれる。

### 5. 「使い捨てカイロ」による発電のデモンストレーション検討（成果発信に向けて）

氷水と発熱したカイロの間の温度差によって、ペルチェ素子で 0.5 V の起電力が得られることを確認した。ただし、市販の使い捨てカイロでは、安全上の観点から発熱を抑える工夫がなされているため、モーターを回転させるまでに至らなかった。しかし、熱源にお湯を用いればモーターは回るため、実演を工夫すれば、市民プログラムやオープンキャンパスなどでカーボンニュートラルへの取り組みを強く印象付けるデモンストレーションを行える。

研 究 業 績	成果発表（学会・論文・研究会等）			
	学会・論文・研究会等の別	タイトル	発行または発表年月	
	論文 (Mater. Trans.)	“Reduction of SnO <sub>2</sub> Powder by Innovative Process of Pulsed-Discharged Spouted Bed”, P. Khlaisongkham, Y. Kondo, <u>T. Akashi</u>	2026年4月	
	解説記事 (J. Soc. Inorg. Mater., Japan)	「パルス放電噴流床と各種プロセスへの応用展開」, <u>明石孝也</u>	2026年7月号掲載予定	
	学会 (日本セラミックス協会第38回シンポジウム, 2025年9月17-19日、群馬大学荒巻キャンパス)	“A possible reduction mechanism of hematite powder by pulsed discharged spout bed”, P. Khlaisongkham, D. Jo, S. Deki, <u>T. Akashi</u>	2025年9月	
	学会 (35 <sup>th</sup> Annual Meeting of MRS-Japan 2025, 10-12 Nov. 2025 Kitakyushu Japan)	“Reduction of iron ore using a pulsed-discharged spouted bed and its kinetic analysis” S. Deki, P. Khlaisongkham, <u>T. Akashi</u>	2025年11月	
	学会 (日本鉄鋼協会第191回春季講演大会, 2026年3月11-13日、千葉工業大学新習志野キャンパス)	“Reduction kinetics of hematite powder by pulsed- discharged spouted bed” <u>P. Khlaisongkham</u> , S.Deki, <u>T. Akashi</u>	2026年3月	
研 究 業 績	その他（アピールすることがあればご記入ください。）			
	<b>本研究に関するその他の発表</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・2026年1月21日 カーボンニュートラル特許取材（取材記事は法政大学 SDGs のホームページに掲載予定）「金属資源の乾式製錬方法及び乾式精錬装置」</li> <li>・2026年3月10日 カーボンニュートラル文理融合研究フォーラム ― 行動変容を促すからくり ―において、2025年度カーボンニュートラル研究助成制度研究成果報告済み。「パルス放電噴流床による使用済み『使い捨てカイロ』への電気エネルギーの貯蔵」</li> </ul> <b>Iron Power（鉄粉を媒体とするエネルギー循環スキーム）に関する技術交流</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・2025年11月17日 Webによる技術交流、面談者: Prof. Dierk Raabe 教授、Isnaldi R. Souza Filho 博士（ドイツマックスプランク持続可能研究所）</li> <li>・2025年12月22日 Webによる技術交流、面談者：高下拓也（JFE スチールステンレス鋼・鉄粉研究部グループリーダー、小林弘和（同 圧延加工プロセス研究部グループリーダー）</li> <li>・2026年2月5日 鉄粉製造工場見学と技術交流、対応者：高下拓也（JFE スチールステンレス鋼・鉄粉研究部グループリーダー）</li> </ul>			
支 出 報 告	費目	計画時金額	実績額	備考
	設備備品費	117,000	0	クールインキュベーターは消耗品として入手
	消耗品費	383,000	500,000	
	旅費	0	0	
	謝金等	0	0	
	その他	0	0	
	合計	500,000	500,000	