

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：32690

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11716

研究課題名(和文) 感温性ポリマー/シリカ被覆磁性ナノ粒子の調製と重金属回収への応用

研究課題名(英文) Preparation of thermoresponsive polymer/silica coated magnetite nanoparticle composite and its application for heavy metal ions recovery

研究代表者

井田 旬一 (Ida, Junichi)

創価大学・理工学部・教授

研究者番号：20409783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低環境負荷、かつ吸脱着速度、及び、吸脱着量が大きく、再利用可能な感温性重金属吸着剤を開発した。本吸着剤では、吸着した重金属の脱着の際に通常用いられる酸などは必要なく、10-50℃の温度スウィング操作のみで重金属の回収が可能であった。また、その際の加熱について、溶液全体を加熱する必要はなく、吸着剤粒子の溶液からの迅速な分離を目的に使用したマグネタイトの誘導加熱特性を用いた局所加熱を応用することも可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、低環境負荷、かつ、重金属回収性能の高い吸着剤が開発され、誘導加熱を用いるこれまでにない重金属回収法実現の可能性も示された。今後、この吸着剤と誘導加熱を組み合わせた新たな重金属イオン回収プロセスを実現できれば、メッキ工場排水、電子機器処理廃水、汚染土壌処理等へ幅広く応用可能と考えられる。また、これにより近年深刻になりつつある、廃棄物処分場の問題や資源枯渇の問題の解決に貢献できると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new thermoresponsive heavy metal adsorbent, which exhibit high adsorption rate, high adsorption capacity as well as low environmental impact, was successfully developed. The adsorbent does not require the use of acid or base during desorption process of adsorbed heavy metal ions, which is normally required in the process, since the control of adsorption/desorption of heavy metal ion on the adsorbent can be achieved by swinging (changing) solution temperature between 10 and 50 °C. In addition, as to heating of the solution, an inductive heating property of magnetite, which is a component of the adsorbent, can be used instead of using an isothermal bath so that it is not required to heat the whole solution but is only required to realize localized heating around the adsorbent. The results indicate that it is possible to design a new heavy metal ion recovery process based on the developed adsorbent and the inductive heating in the future.

研究分野：環境材料科学

キーワード：感温性ポリマー 磁性粒子 重金属回収 電解酸化法 誘導加熱

1. 研究開始当初の背景

磁性ナノ粒子は近年バイオ分野をはじめ、様々な分野への応用が盛んに研究されており、それに適した、「高い飽和磁化を有し、粒径が小さく（比表面積が大きく）、かつ分散性の高い」磁性ナノ粒子合成法が求められている。Setyawan らは、最近、電解酸化法を用い、表面がシリカ(SiO₂)被覆された磁性粒子を1ステップで合成する事で、上記の性質を持つ磁性ナノ粒子を合成可能なことを報告した[1]。一方、N-イソプロピルアクリルアミドポリマー (PNIPAM) は、水溶液中において 32℃付近で親水性から疎水性へと性質が変化する“感温性”高分子である。このPNIPAMの特性を利用して、申請者はこれまで、重金属イオン回収を目的とした“直鎖状の感温性吸着剤(ポリマー)”の開発を行ってきた。この感温性ポリマーは、1) 温度スウィングのみで重金属を吸脱着可能なため、従来法の問題点であった重金属リサイクル時の大量の酸性廃液の生成がないこと、また、“ゲル”タイプの感温性吸着剤と比べて、2) 吸着速度が速い、3) 重金属吸着部位である官能基を多く導入できる、等の利点がある。一方、欠点としては、重金属脱着後にポリマーを重金属廃液から分離・回収(再利用)することが困難(どちらも水に可溶性状態にあるため)という点があった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、この“直鎖状の感温性吸着剤(ポリマー)”を上述の“シリカ被覆磁性ナノ粒子”に修飾(固定化)することで、温度スウィングのみで重金属イオンを吸脱着でき、かつ重金属リサイクル後に磁性を使って迅速に分離回収可能な新規な感温性重金属吸着剤の開発を目的とした。また、磁性粒子は交流磁場をかけることにより発熱する(誘導加熱)ため、これを利用すれば溶液全体を加熱せずに、局所的に吸着材のみ加熱できる。そのため、全体的に省エネルギーなプロセスとすることが可能である。Fig. 1 にこの感温性重金属吸着剤の概念図を示す。シリカ被覆磁性ナノ粒子(silica coated magnetite nanoparticles (silica-coated MNP))をコアとし、その表面に申請者の開発した直鎖状の感温性ポリマーが修飾された構造となっている。この感温性吸着剤を用いた重金属回収プロセスはFig. 2 のようになる。

まず1) 重金属含有廃水に相転移温度(32℃)以下にて吸着剤を投入する。次に2) 交流磁場をかける(印可する)ことにより、磁性粒子自体を発熱させ(誘導加熱)粒子温度を32℃以上とする。これにより感温性ポリマーを構造変化させ、重金属を吸着させる。その後、3) 重金属を吸着した吸着剤を32℃以下の水に移す事で、再びポリマーの構造変化を起こし、重金属を脱着させる。最後に、4) 吸着剤を磁石で分離・回収し、再利用する。

本研究は直鎖状の感温性ポリマーと磁性ナノ粒子を用いて低環境負荷、かつ吸脱着速度、及び、吸脱着量が大きく、再利用可能な重金属吸着剤を創成する試みであり、これまでにないものである。本研究によって、廃水からの重金属回収の新たな手法が確立できれば、メッキ工場排水、電子機器処理廃水、汚染土壌処理等へ幅広く応用可能と考えられる。また、これにより近年深刻になりつつある、廃棄物処分場の問題や資源枯渇の問題の解決に貢献できると期待される。以上の観点から、本研究を実施した。

3. 研究の方法

・Poly(NIPAM-co-AA)の調製

感温性コポリマーのpoly(NIPAM-co-AA)は、溝口の手法を参考に、NIPAMモノマーとアクリル酸(AA)モノマーのフリーラジカル共重合によって調製した[2]。NIPAMモノマーとAAモノマーの投入量比を変えて、3種類のpoly(NIPAM-co-AA)を調製した。

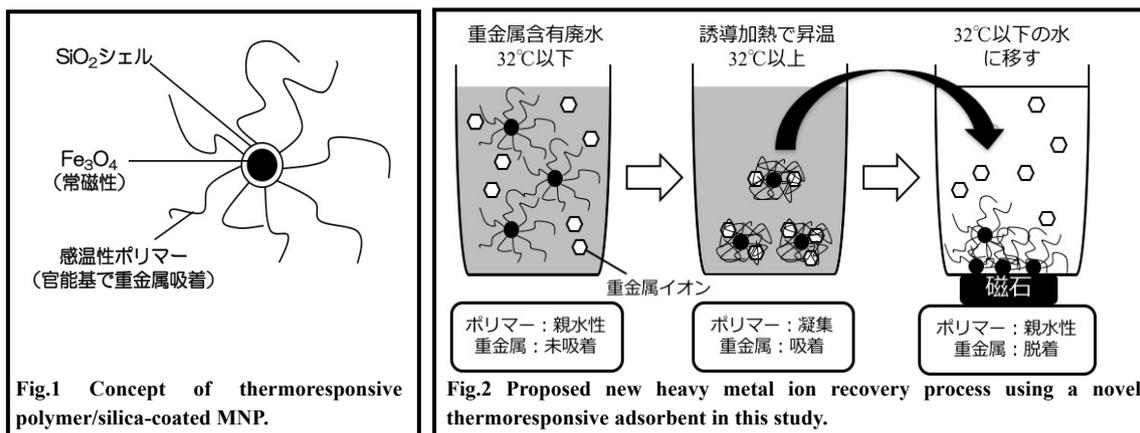


Fig.1 Concept of thermoresponsive polymer/silica-coated MNP.

Fig.2 Proposed new heavy metal ion recovery process using a novel thermoresponsive adsorbent in this study.

・シリカ被覆 MNP の調製

Setyawan らの手法を参考に、電解酸化法によってシリカ被覆 MNP を調製した[1]。鉄電極 (30 mm x 15 mm x 0.4 mm) は、純度 99 %以上のものを 2 枚用意し、それぞれアノードおよびカソードとして使用した。電極間距離は 2 cm とした。本実験では、鉄電極は使用する前に、超純水およびエタノール中で各 10 分間ずつ超音波洗浄を行った。0.25 M 硫酸ナトリウム水溶液に鉄電極を浸し、室温で電流を印加することで反応させた。この際、シリカ源としてケイ酸ナトリウムを濃度が 50~500 ppm となるように加えておいた。印加電流は 0.1~1.0 A、反応時間は流れる電流量を一定にするために、反応時間 [s] = 2160 [C] / 電流値 [A] となるように電流値毎に調整した。反応終了後、ネオジム磁石で得られた粒子を沈殿・回収した。その後、未反応物や不純物を取り除くために、超純水を窒素パージして準備した脱酸素水を加えて洗浄し、ネオジム磁石で粒子を沈殿・回収する操作を 3 回繰り返した。最後に、24 時間以上凍結乾燥することで試料を得た。試料名は、「Si(シリカ源濃度)-MNP(電流値)」とした。例えば、シリカ源濃度 200 ppm で調製した試料は、「Si(200)-MNP」となる。また、比較としてシリカ源を加えずに MNP を調製し、試料名は「Si(0)-MNP」とした。

・シリカ被覆 MNP への poly(NIPAM-co-AA) の固定化

シリカ被覆 MNP 表面への poly(NIPAM-co-AA) の固定化では、まず以下のような手順で、アミノ基を持つシランカップリング剤である APTES をシリカ被覆 MNP 表面に修飾することで、以降の架橋反応に用いるアミノ基を導入した。エタノール水溶液 100 mL (脱酸素水 10 mL、エタノール 90 mL) にシリカ被覆 MNP を 0.55 g 加え、超音波処理によって分散させた。その後、この溶液に APTES を 1.65 mL 加え、ボルテックスミキサーで 10 分間激しく攪拌させることで反応させた。反応終了後、ネオジム磁石で粒子を沈殿・回収し、脱酸素水で 3 回洗浄した。その後、24 時間以上凍結乾燥することで試料を得た。次に poly(NIPAM-co-AA) 中のカルボキシ基と APTES 修飾シリカ被覆 MNP 表面のアミノ基をアミド結合させることで poly(NIPAM-co-AA) の固定化を行った。このアミド結合形成反応には、架橋剤の EDC を用いた。脱酸素水 100 mL に poly(NIPAM-co-AA) を 1.26 g 加え、溶解させることでポリマー溶液を準備した。このポリマー溶液を三口フラスコに移し、ここに架橋剤として EDC を 0.5 g 加え、溶解させた。また、脱酸素水 100 mL に APTES 修飾シリカ被覆 MNP を 0.55 g 加え、超音波処理を行うことで APTES 修飾シリカ被覆 MNP 分散液を準備した。その後、ポリマー溶液に APTES 修飾シリカ被覆 MNP 分散液を加えることで反応させた。反応温度は 10°C、攪拌速度は 200 rpm で 24 時間反応させた。反応終了後、ネオジム磁石で反応物を沈殿・回収し、脱酸素水で 3 回洗浄した。その後、24 時間以上凍結乾燥させることで試料を得た。試料名は、「poly-Si(シリカ源濃度[ppm])-MNP」とした。

・特性評価

粉末 X 線回折 (XRD) 法によって試料の結晶構造解析を行った (D8 ADVANCE、Bruker)。調製した試料がシリカで被覆されているかの確認は、酸性溶液中での試料からの鉄イオンの溶出実験により行なった。試験管に試料 10 mg と pH 1 の塩酸溶液 10 mL を加え、振盪させた。その後、任意の時間で上澄み液 1 mL を採取し、0.1 M のチオシアン酸カリウム (KSCN) 溶液 3 mL を加えた後、紫外可視分光光度計 (V-630、Jasco) を用いて波長 463 nm における吸光度を測定した。窒素吸脱着法 (ASAP2020、Shimadzu) によって試料の BET 比表面積を測定した。レーザー回折散乱法によって試料の凝集径分布を測定した (LS230、Beckman coulter)。懸濁液は、試料を超純水中で分散させ、約 40 mg/mL となるように準備した。測定モデルは Mie 散乱理論を用いて測定した。熱重量分析装置 (TGA、SDT Q600、TA Instruments) を用いて試料の重量減少を測定し、poly(NIPAM-co-AA) 固定化量を算出した。

・重金属イオン吸着実験

複数の重金属イオンが競合する条件下で吸着実験を行い、各重金属イオンの吸着等温線を作成した。まず、Cu(II)、Co(II)、Mn(II) および Ni(II) の硫酸塩を用い、それぞれの重金属イオン濃度が 0.5~5.0 mmol/L となるように、pH 5.0 酢酸-酢酸ナトリウム緩衝液を用いて調製した。この溶液に poly(NIPAM-co-AA) 固定化シリカ被覆 MNP を加え、10°C と 50°C で吸着実験を行なった。

次に、恒温槽の代わりに高周波誘導加熱電源 (Ambrell, EASY HEAT) を用い、MNP の誘導加熱 (AMF) 特性によって吸着剤の表面を局所的に加熱して Cu(II) イオン吸着実験を行い、加熱方法が吸着特性に与える影響を調べた。誘導加熱実験では、電流値 200A、電圧 2.4 V、磁場強度 194 0e、周波数 283 kHz の AMF を 2 時間印加した。

4. 研究成果

Fig. 3 に代表的なシリカ被覆 MNP の XRD パターンを示した。合成条件に関わらず、全ての試料でマグネタイト (Fe_3O_4) に起因するピーク $2\theta = 30^\circ$ (220)、 36° (311)、 43° (400)、 57° (511)、 63° (440) が確認された。また酸性溶液中での試料からの鉄イオン溶出実験により、全ての調製試料でシリカ被覆が確認された。**Fig. 4、5** にレーザー回折散乱法を用いて測定した試料の凝集径分布を示す。電解酸化法を用いた調製において、電流値を変化させた場合 (**Fig. 4**)、またシリカ源濃度を変化させた場合 (**Fig. 5**) のいずれにおいても、シリカ被覆 MNP の粒子径分布は、被覆なし MNP よりも小粒子径側にシフトしていることから、シリカ被覆により MNP の凝集抑制に成功したと考えられる。**Fig. 6** は凝集粒子の Median 径をもとに求めた比表面積 ($S_L, median$) に対す

るコポリマー固定化量を示している。図から、凝集粒子径基準の比表面積の増加に伴い、コポリマー固定化量も増加していることが分かる。また、被覆なし MNP はこの見かけの比表面積が最小の値を示し、コポリマー固定化量も最小の値であった。シリカ被覆 MNP の見かけの比表面積は、被覆なし MNP と比較して最大で約 6.4 倍であり、この時のコポリマー固定化量が約 5 倍であることと良く一致している。以上のことから、本研究で提案する“電解酸化法を用いた MNP のシリカ被覆”によって MNP 凝集をある程度抑制可能であり、コポリマー固定化に利用できる見かけの比表面積の増加と、その結果としてのコポリマー固定化量の増加が可能であることが示された。

Fig. 7 に poly(21)-Si(450)-MNP 0.60A を用いたときの Cu(II)、Co(II)、Mn(II) および Ni(II) の 50°C および 10°C での吸着等温線を示した。まず Cu(II) イオンの結果を見ると、50°C での吸着量は 10°C での吸着量よりも大きいことが分かる。この結果から、本吸着剤は 50°C で吸着、10°C で脱着といった温度スイングによる Cu(II) イオンの吸脱着制御が可能であることが分かった。一方、Co(II)、Mn(II) および Ni(II) イオンの吸着量は非常に小さく、本吸着剤はこれらのイオンに対して Cu(II) イオンの吸着選択性が高いことが分かった。また得られた実験データを基に、吸着等温式である Langmuir 式と Freundlich 式を用いて解析を行い、吸着剤の吸着モデルを調べたところ、本吸着剤を用いた重金属イオンの吸着は Langmuir モデルでよく説明できることが分かった。次に、NIPAM と AA 比を変えて合成したコポリマー poly(11)、poly(21)、及び poly(41) を用いて合成したポリマー固定化シリカ被覆 MNP を用いて、Cu(II) イオン吸着を行った実験について、各試料のコポリマー固定化量に対する飽和吸着量 Q_s を Fig. 8 に示した。結果から、コポリマー固定化量の増加とともに 50°C での飽和吸着量が大幅に増加していることが分かる。一番飽和吸着量が大きかった poly(41) の 50°C での値 0.511 mmol/(g-adsorbent) は、一番小さかった poly(11) の 50°C の値 0.114 mmol/(g-adsorbent) の約 4.5 倍に達した。一方、10°C での飽和吸着量は、コポリマー固定化量が増加してもある程度一定の値を示し、低温での吸着量には差が生じなかった。

Cu(II) 回収量、及び一度吸着した Cu(II) の脱着率について、現在報告されている感温性高分子を基にしたゲルタイプの感温性重金属イオン吸着剤と本研究で調製した感温性吸着剤の結果を比較した (Fig. 9)。ここで、本研究では、Fig. 7 に示すように、50°C と 10°C の間に Cu(II) 吸着量の差が見られ、この吸着量の差は温度スイングに基づいた Cu(II) 回収量 とみなすことができる。一方、これまでに報告されている感温性重金属イオン吸着剤の中には、本研究と同様に高温で高い吸着量を示すものもあれば、逆に低温で高い吸着量を示すものもある。そのため、高温、低温での吸着量ではなく、高い吸着量を Q_H 、低い吸着量を Q_L として評価する必要がある。そして、 $Q_H - Q_L$ は「温度スイングによって回収 (リサイクル) できる Cu(II) の量」と見なすことができ、感温性重金属イオン吸着剤の性能を評価する重要な指標の一つとして用いることができ

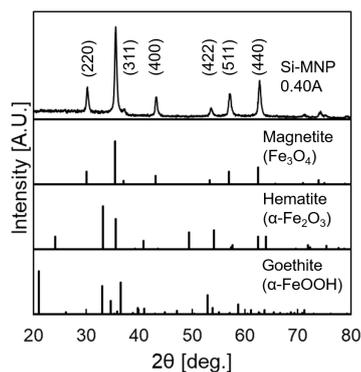


Fig.3 XRD patterns of Si-MNP 0.70 and poly-Si-MNP-0.70.

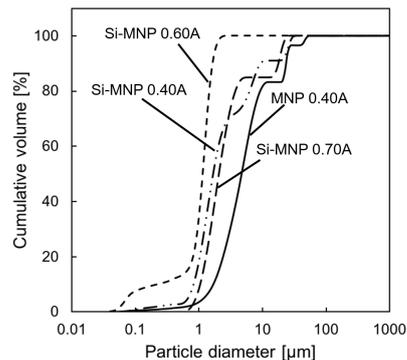


Fig.4 Effect electrical current on cumulative particle size distribution of MNP and Si-MNPs.

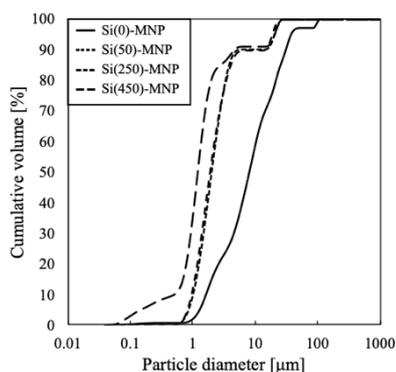


Fig.5 Effect of Si concentration on cumulative particle size distribution of MNP and Si-MNPs.

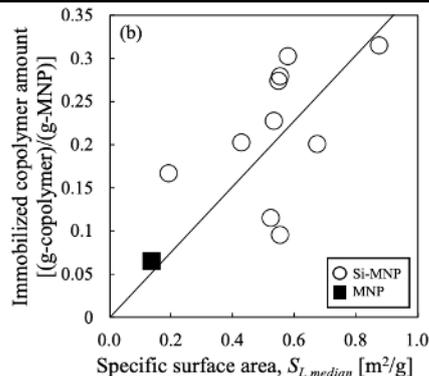


Fig.6 Immobilized copolymer amount vs specific surface area calculated based on aggregate size.

る。さらに、脱着率も、「吸着剤が吸着した重金属イオンをどれだけ脱着し、リサイクルできるか」を示すため、吸着剤の性能を示す指標の一つとなる。そのため、吸着剤の評価にこの2つの指標を用いた。結果より、本研究で開発した吸着剤は、Ochiら[3]が報告した poly NIPAM とアルギン酸からなる相互侵入高分子網目構造の感温性ヒドロゲルと同程度以上の回収量を示した。一方で、Ochiらの脱着率は38%であったのに対し、本研究では71%と約2倍に達した。また、Chenらが報告した NIPAM と AA を共重合させたヒドロゲル[4]、Chengが報告した NIPAM、アクリルアミド、マレイン酸からなるヒドロゲル[5]と比較して最大約5倍の回収量、約10倍の脱着率に達した。また、ゲル型吸着剤は吸着速度が遅く、Ochiらの吸着剤、Chenらの吸着剤では24時間、Chengの吸着剤では48時間を吸着に要する。一方で、本吸着剤は4時間という比較的短い時間で吸着を行うことができる。以上の比較は、本吸着剤の優位性を示している。

最後に、恒温槽を用いた場合と誘導加熱 (AMF) を用いた場合の2つの加熱方法で行なった、Cu(II)吸着実験で得られた、各実験操作の Cu(II)吸着量を **Table 1** に示した。結果より、誘導加熱においては、恒温槽加熱の4時間と比べて2時間という短時間の加熱で、かつ溶液温度も39.5°CとコポリマーのLSCTに到達していないにも関わらず、Cu(II)吸着量は同程度を示していることが分かる。これは誘導加熱によりMNPの局所加熱が起きているためと考えられ、誘導加熱を用いた新たな重金属回収プロセスの可能性を示している。

【参考文献】

- [1] Setyawan, H. et al. One-step synthesis of silica-coated magnetite nanoparticles by electrooxidation of iron in sodium silicate solution, *J. Nanopart. Res.*, 14 (2012) 807.
 [2] Mizoguchi, K. et al. Straight-Chained Thermo-Responsive Polymer with High Chelating Group Content for Heavy Metal Ion Recovery, *Sep. Purif. Technol.* 75 (2010) 69-75.
 [3] Ochi, M., et al. Thermoresponsive-interpenetrating polymer network hydrogels for heavy metal ion recovery, *J. Appl. Polym. Sci.*, 135(2018)6-11.
 [4] Chen, J. et al. Poly(N-isopropylacrylamide-co-acrylic acid) hydrogels for copper ion adsorption: Equilibrium isotherms, kinetic and thermodynamic studies, *J. Environ. Chem. Eng.*, 1 (2013)339-348.
 [5] Cheng, J. et al. Temperature and pH-dependent swelling and copper(ii) adsorption of poly(N-isopropylacrylamide) copolymer hydrogel, *RSC Adv.*, 5 (2015)62091-62100.

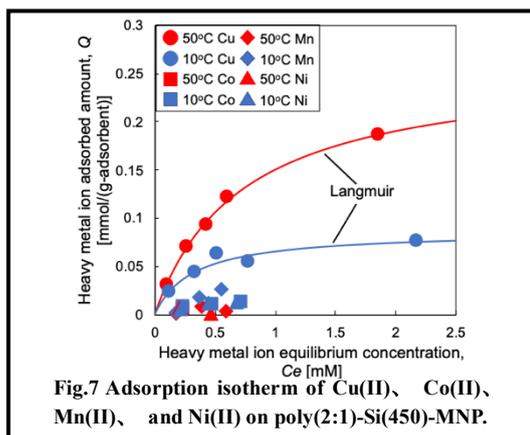


Fig.7 Adsorption isotherm of Cu(II), Co(II), Mn(II), and Ni(II) on poly(2:1)-Si(450)-MNP.

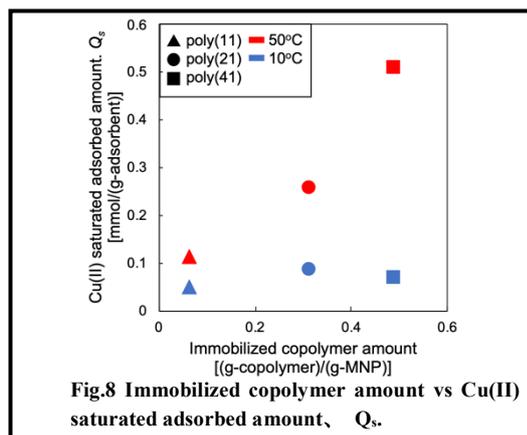


Fig.8 Immobilized copolymer amount vs Cu(II) saturated adsorbed amount, Q_s .

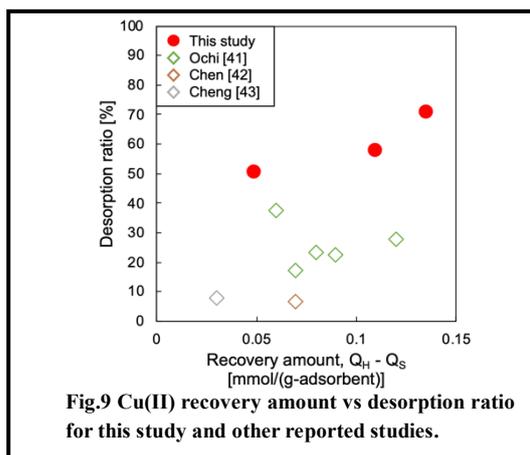


Fig.9 Cu(II) recovery amount vs desorption ratio for this study and other reported studies.

Table 1 Time for adsorption, final solution temperature, and Cu(II) adsorbed amount of each heating operation (heating the entire solution using isothermal bath versus heating of only poly(NIPAM-co-AA)/silica-coated MNP using AMF).

Heating method	Time [h]	Final slution temperature [°C]	Cu(II) adsorbed amount [mmol/(g-adsorbent)]
Isothermal bath	4	50.0	0.390
AMF	2	39.5	0.369

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hayashi Kodai, Matsuyama Tatsushi, Ida Junichi	4. 巻 355
2. 論文標題 A simple magnetite nanoparticle immobilized thermoresponsive polymer synthesis for heavy metal ion recovery	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 183 ~ 190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.powtec.2019.07.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Risako Sakai, Tatsushi Matsuyama, Junichi Ida	4. 巻 590
2. 論文標題 Effect of immobilization method and particle size on heavy metal ion recovery of thermoresponsive polymer/magnetic particle composites	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.colsurfa.2020.124499	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tomonaga Hitoshi, Hayashi Kodai, Matsuyama Tatsushi, Ida Junichi	4. 巻 138
2. 論文標題 Synthesis of thermoresponsive copolymer/silica coated magnetite nanoparticle composite and its application for heavy metal ion recovery	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Polymer Science	6. 最初と最後の頁 50303 ~ 50303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/app.50303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tomonaga Hitoshi, Hayashi Kodai, Matsuyama Tatsushi, Ida Junichi	4. 巻 58
2. 論文標題 Characterization of Silica-coated Fe ₃ O ₄ Prepared Using Electrooxidation Method under Various Silica Source Concentration and Its Application for Thermoresponsive Polymer Immobilization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Powder Technology, Japan	6. 最初と最後の頁 111 ~ 118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4164/sptj.58.111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomonaga Hitoshi, Tanigaki Yuichi, Hayashi Kodai, Matsuyama Tatsushi, Ida Junichi	4. 巻 171
2. 論文標題 Adsorption properties of poly(NIPAM-co-AA) immobilized on silica-coated magnetite nanoparticles prepared with different acrylic acid content for various heavy metal ions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Research and Design	6. 最初と最後の頁 213 ~ 224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cherd.2021.05.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 0件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Kodai Hayashi, Tatsushi Matsuyama and Junichi Ida
2. 発表標題 Facile synthesis of polymer/magnetite nanoparticle composite
3. 学会等名 The 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress. (APCChE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Tomonaga, Kodai Hayashi, Tatsushi Matsuyama, Junichi Ida
2. 発表標題 Synthesis of Thermoresponsive Copolymer Immobilized on Silica Coated Magnetite and Its Application for Heavy Metal Ions Recovery
3. 学会等名 The 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress. (APCChE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kodai Hayashi, Junichi Ida and Tatsushi Matsuyama
2. 発表標題 Facile synthesis of polymer/magnetite nanoparticle composite
3. 学会等名 American Institute Chemical Engineering (AIChE) Annual Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Tomonaga, Kodai Hayashi, Tatsushi Matsuyama, Junichi Ida
2. 発表標題 Synthesis of Thermoresponsive Copolymer Immobilized on Silica Coated Magnetite and Its Application for Heavy Metal Ions Recovery
3. 学会等名 American Institute Chemical Engineering (AIChE) Annual Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 友永人志, 松山達, 井田旬一
2. 発表標題 電解酸化法によるシリカ被覆Fe ₃ O ₄ ナノ粒子の調製と感温性ポリマー固定化担体への応用
3. 学会等名 粉体工学会 2019年度秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林広大, 松山達, 井田旬一
2. 発表標題 感温性ポリマー固定化マグネタイトナノ粒子の合成と誘導加熱を用いた重金属イオン回収への応用
3. 学会等名 粉体工学会 2019年度秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junichi Ida
2. 発表標題 New materials development based on powder technology and their application for various environmental problems
3. 学会等名 2nd International Conference on Exhibition on Powder Technology Indonesia. (ICePTi 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kodai Hayashi, Junichi Ida and Tatsushi Matsuyama
2. 発表標題 A Simple Synthesis Method of Thermoresponsive Polymer Immobilized Magnetite Nanoparticles for Heavy Metal Ions Recovery
3. 学会等名 International Symposium on Chemistry and Materials Sciences (ISCM) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 12.Kodai Hayashi, Junichi Ida and Tatsushi Matsuyama
2. 発表標題 A Simple Synthesis Method of Thermoresponsive Polymer Immobilized Magnetite Nanoparticles for of Heavy Metal Ions Recovery
3. 学会等名 2018 American Institute of Chemical Engineering (AIChE) Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林広大, 井田旬一, 松山達
2. 発表標題 重金属イオン回収能を有する感温性ポリマー修飾マグネタイトナノ粒子合成法の簡略化
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Tomonaga, Kodai Hayashi, Tatsushi Matsuyama, Junichi Ida
2. 発表標題 Characterization of Silica-Coated Fe ₃ O ₄ Prepared Under Various Conditions Using Electrooxidation Method and Immobilization of Thermoresponsive Polymer
3. 学会等名 American Institute Chemical Engineering (AIChE) Annual Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 友永人志, 林広大, 松山達, 井田旬一
2. 発表標題 各種条件で調製したシリカ被覆Fe30の特性評価と感温性ポリマーの固定化
3. 学会等名 粉体工学会 2020年度春期研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 友永人志, 林広大, 井田旬一, 松山達
2. 発表標題 電解酸化法によるシリカ被覆Fe304ナノ粒子の調製と感温性ポリマー固定化への応用
3. 学会等名 化学工学会第51回秋期大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関