

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06892

研究課題名(和文)プロトン化高分子ゲルの特性解析と新しい反応分離プロセスへの応用

研究課題名(英文)Characterization of protonated hydrogel and its application to novel reaction separation process

研究代表者

後藤 健彦 (Gotoh, Takehiko)

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号：10274127

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では近年注目されている希少金属の廃水からの分離回収方法として、側鎖に第三級アミンを持つ高分子ゲルを用い、水中の金属イオンをゲル中で反応させる新規な分離回収法を検討した。内部pHの異なるゲルを用いることで金属イオン混合溶液から、特定の金属を選択的に回収することができた。さらに4級アミン塩酸塩モノマーを用いてゲルを合成し、アミノ基に塩化物イオン、硫化物イオン、リン酸イオンを担持したゲルを用いた金属イオン分離方法を検討した。回収する金属と塩を形成する対イオンを担持したゲルを用い、ゲルのモノマー濃度や反応温度を制御することで、それぞれの金属イオンの系統的な分離回収が可能になることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レアメタルに代表される希少金属資源の不足が問題となっており、廃棄物や廃水からこれらを回収・再利用する技術が求められている。中でも、自動車や電子機器類を破砕した廃棄物(シュレッダーダスト)などからの貴金属の回収は重要な課題である。また、機械、金属関係の工場から排出される廃液には重金属イオンが含まれており、これらの回収は、資源リサイクルのみならず、環境浄化の観点からも欠かせない技術である。本研究は、これまでに無かったイオン性のゲルを用いた反応と分離を同時に行う新しい重金属の分離法として、その開発には学術的意義があり、2次廃棄物を生じない省エネルギー重金属回収方法を開発したことは社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we examined a novel separation and recovery method to separate and recover rare metals from wastewater to make metal hydroxide in a polymer gel with a tertiary amine. It was found that the hydrogel with different inner pH could be prepared by using different concentration of the monomer with the tertiary amine. It was possible to recover a specified metal ion selectively from the mixed metal ion solution by using the gels of different inner pH. We also prepared hydrogel with addition of chloride ions, sulfide ions, or phosphate ions to amino groups by using a quaternary amine monomer to recover mixed metal ions in water selectively. The higher monomer concentration increased the anion concentration in the gel that was effective to enhance the reaction rate of metal salt production. Therefore, it was possible to recover each metal ion systematically by using the gel carrying counterions that forms the metal salt with proper monomer concentration and reaction temperature.

研究分野：化学工学

キーワード：高分子ゲル レアメタル 水酸化物 分離 回収

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景:

近年、レアメタルに代表される希少金属資源の不足が問題となっており、廃棄物や廃水からこれらを回収・再利用する技術が求められている。中でも、自動車や電子機器類には、これらの貴金属が大量に使用され、いわゆる都市鉱山と呼ばれ、これらを破碎した廃棄物(シュレッダーダスト)などからの貴金属の回収は重要な課題である。また、機械、金属関係の工場から排出される廃液にも重金属イオンが含まれておりこれらの回収は、資源リサイクルのみならず、環境浄化の観点からも欠かせない技術である。主な重金属イオンの分離回収方法とその長所短所を次に挙げる。吸着法は、低濃度の金属イオンを除去するいわゆる高度処理の段階で用いられる。ごく低濃度の金属イオンでも除去可能といった長所がある一方で、イオン交換樹脂は高価で、樹脂の再生に大量の酸が必要な上に、その廃酸の処理にも費用がかかるため主に高度処理に用いられる。最も広く用いられている凝集沈殿法には硫化物沈殿法、水酸化物沈殿法があり、プロセスが単純であることや、pH を制御することで、沈殿物の種類を制御できるなどの長所がある。その一方、pH 調整槽や、凝集沈殿槽が必要となり装置が大型化し設置面積を必要とする。また、大量に発生する含水スラッジを脱水するプロセスや、多くのスラッジを埋め立て処分するための輸送費用、処分費用がかかる。高分子金属捕集剤(キレート剤)を使った重金属イオンの分離も行われているが、金属イオンを吸着した含水高分子の分離と脱水は、金属水酸化物スラッジと同様に困難である。このように、現在用いられている、金属イオンの回収方法には、それぞれ長所、短所があり、新しい回収方法の開発が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では側鎖に第三級アミンを持つイオン性ゲルの内部を反応場として用いる新規な金属回収法を検討する。イオン性高分子の DMAPAA が式(1)に示すように水分子と反応してプロトン化する際に水酸化物イオンを放出する性質を持つことを見出し、このゲルを水中での局所塩基性反応場として使用することを考案した。さらにこの局所塩基性反応場の工業的な応用として、次のような、重金属イオンの回収が適していると考えた。



DMPAA を含むゲルが水中で膨潤すると、アミノ基がプロトン化されて陰イオンを吸着できるようになる。その際、水分子の解離により同時に水酸化物イオン(OH⁻)が生成するが、図1に示すように、水酸化物イオンは、カチオン化したアミノ基とのイオン性相互作用によりゲル内部に留まりゲル内部の濃度はゲル外部よりも高くなる。この現象は、Donnan 平衡と呼ばれ、DMAPAA ゲルを用いると水中に局所的に OH⁻濃度が高い場を形成することができる。そのため、ゲル内部が塩基性の反応場(pKa=10.35)となり、金属水酸化物を形成させることが可能となる。一般的な凝集沈殿反応では、生成した金属水酸化物を分離するためには、濾過、遠心分離などさらに別の工程が必要だが、本方法では任意の大きさに成形可能な高分子ゲル中に水酸化物が形成されるため液相からの分離も容易であるといった特徴がある。

そこで本研究では重金属除去・回収法の欠点を解消した新しい重金属回収プロセスを提案し、その分離回収特性を解明することを目的とした。

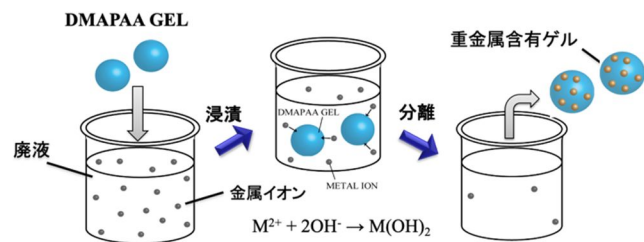


図1 高分子ゲルを用いた重金属イオン回収方法

3. 研究の方法

本研究では、目標達成のために研究計画を大きく以下の4つの段階に分けて検討を進めた。

第1段階: 高分子ゲルの合成条件を変えることで除去できる金属の種類を制御する方法、ゲル内部を高分子側鎖の持つ官能基により内部 pH を制御し混合溶液から、選択除去を可能とする方法を明らかにした。

第2段階: 重金属廃液の濃度、pH、温度などが金属除去速度、金属除去量に与える影響を検討し、最適操作条件を明らかにすると共に、廃液の種類に応じたゲルの組成や添加量を明らかにした。

第3段階: 実際の排水を環境基準に適した状態まで浄化が可能であることを検討し、低濃度重金属イオンの除去方法の検討を行った。

第4段階: 組成の違う複数のゲルを用い、重金属イオン混合溶液から、それぞれのイオンを系統的に分離回収する方法を明らかにした。

4. 研究成果

最初に側鎖に第三級アミンを持つイオン性ゲルを用いた新規な重金属除去回収法を検討した。*N,N*-dimethylaminopropyl acrylamide (DMAPAA), 2-(Dimethylamino)ethylmethacrylate (DMAEMA)を用いてゲルを作製し、重金属としてニッケルイオンを用い、イオン濃度やゲルの添加量、ゲルの溶液への浸漬時間がゲルの金属イオン除去特性に及ぼす影響について検討した。

実験方法

DMAPAA ゲルの合成

所定濃度のモノマーと架橋剤の混合水溶液および開始剤水溶液をそれぞれ窒素パージした後混合し、内径 6 mm のテフロンチューブ内で、10 で8時間ラジカル重合を行い、円柱状のゲルを合成した。ゲルは長さ 6 mm に切断後メタノールで24時間ソックスレー抽出し未反応成分を除去した後50 で乾燥し実験に用いた。

ニッケルイオンの回収

所定量の DMAPAA ゲルを所定濃度に調整した所定量の硝酸ニッケル水溶液に25°C の恒温槽内で所定時間浸漬し、ゲル内に水酸化ニッケルを形成させた。また、溶液のニッケルイオン濃度を液体クロマトグラフィーを用いて測定し、ゲル浸漬前後の濃度差からイオン回収率を算出した。

混合溶液からの金属イオンの回収

ゲルの内部 pH を操作することでニッケルイオン、銅イオン、亜鉛イオン混合溶液からの金属イオンの選択的な回収を検討した。

実験結果および考察

初期外部溶液濃度が回収量に与える影響

図 2 に初期濃度の異なる硝酸ニッケル溶液に所定量の DMAPAA ゲルを 24 時間浸漬させた後のゲル添加量とイオン回収率の関係を示す。初期濃度が100 ppm の場合はゲル添加量の増加に伴いニッケルイオン回収率は約 85 wt.% まで向上した。しかし、初期濃度が 10 ppm の場合は、ゲルの添加量を増加させても回収率に大きな変化はなく、最大でも 65 wt.% 程度であった。外部溶液濃度の濃度が高い場合はゲル内への金属イオンの拡散移動が速いためゲル量が増加するほど水酸化物形成反応が進行し、回収率が上昇したが、外部溶液濃度が低い場合は金属イオンのゲル内部への拡散が律速となりゲル量を増加しても回収率が向上しなかったと考えられる。

低濃度溶液からの金属イオン回収

初期濃度が低い場合にゲル浸漬時間が回収率に与える影響を検討した。図 3 に硝酸ニッケル水溶液 (10 ppm) に DMAPAA ゲル (ゲル添加量 1 g/L) を浸漬させたときの外部溶液濃度の経時変化を示す。24 時間後の濃度は3.5ppm (回収率 65wt%) であるが 72 時間経過すると1.5 ppm (85 wt.%) と初期濃度が100ppm の時と同程度まで増加した。吸着の場合は吸着平衡が存在するので、外部溶液濃度は平衡濃度以下にはならないが、本方法の場合は、ゲル内に移動したイオンが、水酸化物となり再溶解しないためゲル内部のイオン濃度は外部溶液よりも常に低く保たれる。そのため外部溶液から内部へのイオンの拡散移動が継続し、浸漬時間を長くすると最終的に高い回収率を得ることができたと考えられる。

混合溶液からの金属イオンの回収

内部 pH 8.8 の DMAEMA ゲルを用いたニッケルイオン、銅イオン、亜鉛イオンの単体溶液と混合溶液における金属イオンの回収率を表 1 に示す。単体の溶液ではニッケルイオンは回収されたが、混合溶液中からはニッケルイオンは回収されず、銅イオンを選択的に回収できた。これは 3 種類の中で水酸化物の溶解度積が最も小さい銅イオン ($K_{sp}=1.29 \times 10^{-20}(\text{mol/L})^3$) が他の金属イオンより優先的に析出したためと考えられる。

ゲルの内部 pH が金属イオンの回収率に及ぼす影響

銅イオンを除いた後のニッケルイオンと亜鉛イオンを分離するために DMAEMA よりも内部 pH の高い *N,N*-dimethylaminopropyl acrylamide (DMAPAA) および DMAEMA ゲルを用いてニッケルイオン、亜鉛イオン混合溶液からの金属イオンの回収を行った。それぞれの回収率を表 2 に示

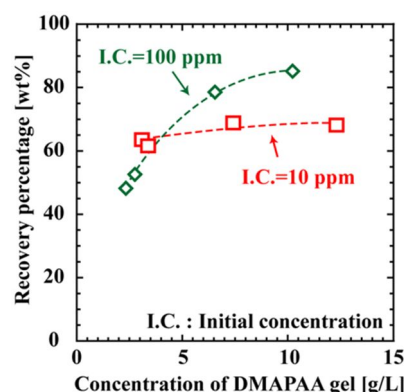


図 2 初期濃度が回収率に与える影響

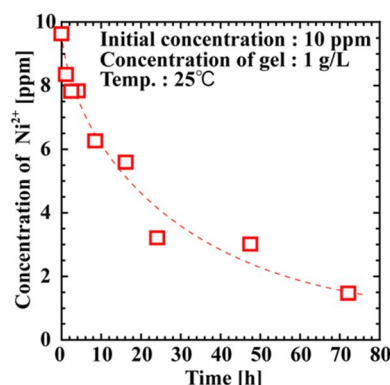


図 3 外部溶液濃度の経時変化

表 1 DMAEMA ゲルによる各イオンの回収率

| Q [wt%] | Ni ²⁺ | Cu ²⁺ | Zn ²⁺ |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Single metal ion solution | 5.2 | 57.5 | 27.0 |
| Mixed metal ion solution | 0 | 95.5 | 6.1 |

す。DMAEMA ゲルと比較して DMAPAA ゲルの方がニッケルイオンと亜鉛イオンそれぞれの回収率は増加したが、その比は小さくなった。これはゲルの内部 pH が高くなることで溶解度積の大きな水酸化ニッケル($K_{sp}=2.00 \times 10^{-15}(\text{mol/L})^3$)の生成量が増加したためと考えられる。そこで DMAEMA と *N,N*-dimethylacrylamide (DMAA) (内部 pH6.2) 1:1 の共重合ゲルを用いた場合の金属イオン回収率を同じく表 2 に示す。内部 pH を下げることでニッケルイオン回収率を抑制し、亜鉛イオンを選択的に回収できた。

表 2 混合溶液からの金属イオンの回収

| Q [wt%] | pH | Ni ²⁺ | Zn ²⁺ |
|-------------------|------|------------------|------------------|
| DMAEMA | 8.8 | 4.7 | 24.4 |
| DMAPAA | 10.3 | 26.1 | 71.7 |
| Copolymerized gel | 8.7 | 1.8 | 29.0 |

初期濃度が金属イオンの回収率に及ぼす影響
 実際のメッキ工場の廃液の組成に近い低濃度の銅イオン 50 ppm、ニッケルイオン 30 ppm、亜鉛イオン 20 ppm の混合溶液からの金属イオンの回収率を図 4 に示す。高濃度の場合と同様に銅イオンが選択的に回収できたが表 1 に示した結果とは逆にニッケルイオンの回収率の方が高くなった。これはニッケルイオンの方が初期濃度が高かったためにニッケルイオンの方が水酸化物を形成しやすくなったためである。そこで、銅イオンを除いた後のニッケルイオンと亜鉛イオンの分離に内部 pH の低い DMAEMA と DMAA 2:8 の共重合ゲル (内部 pH8.53) を用いて回収を行った結果、図 5 に示すようにニッケルイオンのみを回収できた。この場合もニッケルイオンの方が初期濃度が高かったためニッケルイオンの方が水酸化物を形成しやすかったと考えられる。

異なる陰イオンを吸着させたゲルによる金属イオン回収

ここまで、第3級アミンを持つ高分子ゲルを用いて水中でゲルのアミノ基がプロトン化することによって金属イオンを水酸化物として回収可能であることを明らかにした。しかし、金属水酸化物を形成しにくい金属の回収は困難であった。しかし、水酸化物だけでは沈殿特性が類似した金属イオンが多く、金属イオン混合廃水からの金属イオンの選択的回収に限界がある。そこで、次に第4級アミンを持つ高分子ゲルを用い、このゲルに様々なアニオンを吸着させることによって金属を水酸化物以外の様々な金属塩として回収する方法を考案した。ゲルに吸着させるアニオンの種類や溶液の条件が金属回収の選択性に与える影響について検討した。

DMAPAA-Q ゲルの合成

モノマーには、側鎖に第4級アミンの塩酸塩を持つ(3-Acrylamidopropyl)trimethylammonium chloride (DMAPAA-Q) を用いた。ゲルの合成方法は DMAPAA の場合と同様だが合成後、0.1 M の各種アニオン溶液に24時間浸漬し、4級アミノ基に吸着している Cl⁻を所定のアニオンと置換した。Scheme 1 に DMAPAA-Q にアニオン(A⁻)を担持させ、金属イオン(M⁺)を回収する過程を示す。

系統分離

Scheme 2 に系統分離の図を示す。銀イオン、銅イオン、亜鉛イオン、カルシウムイオンを含んだ混合溶液から、塩化物イオン、硫化物イオン、リン酸イオンをそれぞれ置換させた DMAPAA-Q ゲルをそれぞれ1段目、2段目、4段目に用い、3段目の水酸化物形成には DMAPAA ゲルを用いて、1段目で塩化銀、2段目で硫化銅、3段目で水酸化亜鉛、4段目でリン酸カルシウムの選択的回収を行った。

モノマー濃度・水温が回収率に与える影響

DMAPAA の場合ゲル合成時のモノマー濃度が高いほど内部 pH が高くなることが報告されている¹⁾。同様に4級塩の場合もモノマー濃度が高いほど担持できるアニオン濃度が高くなる。そこで、合成時のモノマー濃度の異なるゲルを用いて、モノマー濃度が金属回収率に与える影響を検討した。また、塩形成反応に及ぼす温度の影響を検討した。最初に混合溶液に DMAPAA-Q 塩酸塩ゲルを添加した。図 6 に1段目

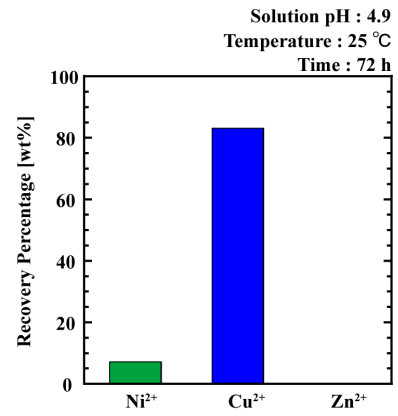


図 4 DMAEMA ゲルによる混合溶液からの金属イオンの回収率

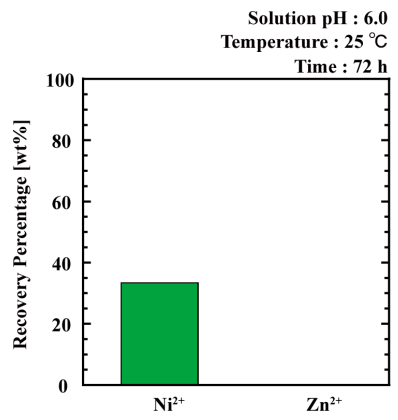
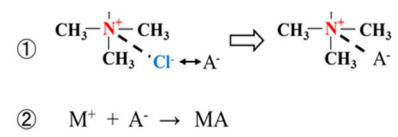
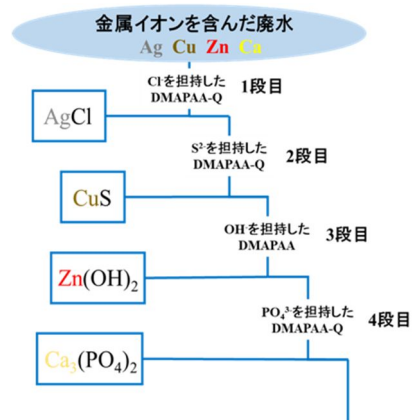


図 5 共重合ゲルによるニッケルの選択的回収



Scheme 1 Recovery mechanism of anion on the gel



Scheme 2 Flow diagram of system separation

での合成時のゲルのモノマー濃度、回収反応時の水温が銀イオンの回収率へ与える影響を示す。モノマー濃度、温度ともに増加させると回収率が増加したことがわかる。これは合成時のモノマー濃度が高い程ゲル中に担持できるアニオンの濃度が増加するため、溶解度積から必要とされるカチオンの濃度が低くなり回収率が増加したと考えられる。また、塩化銀の生成反応が吸熱反応であるため、水温を上昇させると反応率が増加したと考えられる。実験範囲の中でモノマー濃度、反応温度ともに最も高い条件で銀イオンの回収率がほぼ 100 wt.% に達した。次に 2 段階目のゲルのモノマー濃度・水温の銅イオンの回収率への影響を図 7 に示す。合成時のゲルのモノマー濃度を上昇させても銅イオンの回収率は増加しなかった。これは、ゲルのモノマー濃度を増加させた際にゲル中に担持可能なアニオンの量が増加したが、物理架橋の割合が増えて膨潤度が増加しなかったためにゲル内に取り込まれる硫化物イオン量が増加しなかったためと考えられる。水温については 1 段階目と同じく、水温を上昇させると回収率が増加し 90 wt.% に達した。これは硫化銅の生成反応が吸熱反応であるため、水温を上昇させると反応率が増加したためと考えられる。従って、それぞれの条件での銅 / 亜鉛の選択性を回収された銅イオンと亜鉛イオンの比で比較すると表 3 に示す様に温度が高くモノマー濃度の低い の条件で最も銅イオンの選択性が向上していることがわかる。

さらに、3 段階目ではゲルのモノマー濃度・水温の亜鉛イオンの回収率への影響を検討した。合成時のゲルのモノマー濃度が低い方が亜鉛イオンの回収率が増加し約 80 wt.% に達した。これは DMAPAA ゲルの合成時のモノマー濃度が低いほど物理架橋の割合が低下し、生成したゲルの膨潤度が増加し、ゲル内で水の解離が起きやすくなり、OH⁻ が生じやすくなったためと考えられる。また、水温を上昇させると亜鉛イオンの回収率が増加し、ゲルのモノマー濃度 500 mol/L、40 以上で約 81 wt.% に達した。これは前段の硫化物生成反応と同様に水酸化亜鉛の生成反応が吸熱反応であるためである。さらに 4 段階目でもゲルのモノマー濃度および水温がカルシウムイオンの回収率に与える影響を検討した。他の塩に比べて回収率が低く、ゲルのモノマー濃度および水温を上昇させてもカルシウムイオンの回収率は増加しなかった。これは、リン酸とゲルの結びつきが強く実験範囲の濃度ではアニオンの交換が進行しにくかったことと、リン酸カルシウムの溶解度が 0.002g/(100 g 水) と高いため、リン酸塩形成反応が進行しにくかったと考えられる。

最後に図 8 に各段階での回収条件の最適化を行った際の各段階における金属イオン回収率を示す。銀イオン、銅イオン、亜鉛イオンが格段で選択的に回収できたことが分かる。

まとめ

異なるアニオンを担持したカチオン性ゲルを用いてゲル内に金属塩形成反応により金属イオンを選択的に回収可能であることが示された。ゲルのモノマー濃度・水温を調整することで各金属イオンの選択性を向上させられることが示唆された。従って、それぞれの金属イオンに合わせて適切な対イオンを担持したゲルを用いることで金属イオンの系統分離が可能であることが示唆された。

引用文献

- 1) 後藤ら, 化学工学論文集 43, 199~206, (2017)

| | ① | ② | ③ | ④ |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Solution temperature [°C] | 25 | 25 | 40 | 40 |
| Monomer concentration [mol/L] | 1000 | 1500 | 1000 | 1500 |

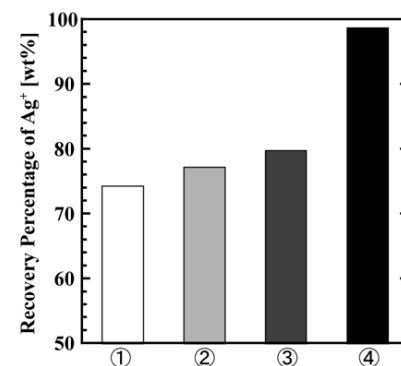


図 6 ゲルのモノマー濃度、水温が銀イオンの回収率へ与える影響

これは硫化銅の生成反応が吸熱反応であるため、水温を上昇させると反応率が増加したためと考えられる。従って、それぞれの条件での銅 / 亜鉛の選択性を回収された銅イオンと亜鉛イオンの比で比較すると表 3 に示す様に温度が高くモノマー濃度の低い の条件で最も銅イオンの選択性が向上していることがわかる。

| | ① | ② | ③ | ④ |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Solution temperature [°C] | 25 | 40 | 25 | 40 |
| Monomer concentration [mol/L] | 1000 | 1000 | 1500 | 1500 |

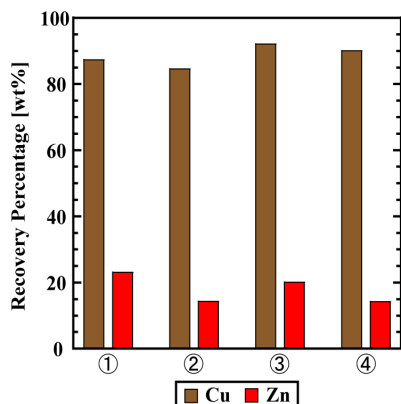


図 7 ゲルのモノマー濃度、水温が銅イオンの回収率へ与える影響

表 3 各条件での銅 / 亜鉛の選択性

| | ① | ② | ③ | ④ |
|-------|------|------|------|------|
| Cu/Zn | 3.78 | 5.91 | 4.59 | 6.34 |

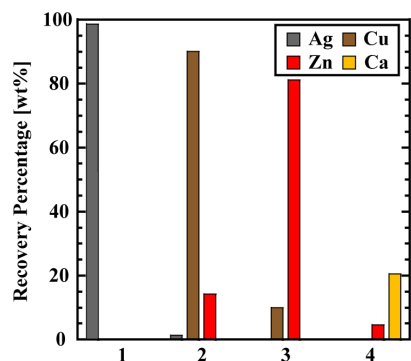


図 8 回収条件の最適化を行った際の各段階における金属イオン回収率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1. 著者名 Ningrum Eva Oktavia, Sakohara Shuji, Gotoh Takehiko, Suprpto, Humaidah Nurlaili | 4. 巻 186 |
| 2. 論文標題 Correlating properties between sulfobetaine hydrogels and polymers with different carbon spacer lengths | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Polymer | 6. 最初と最後の頁 122013 ~ 122013 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.polymer.2019.122013 | 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 該当する |
| 1. 著者名 Gotoh Takehiko, Sano Masahide, Nakai Satoshi | 4. 巻 385 |
| 2. 論文標題 Selective Recovery of Metal Ion by Using Hydrogel With Different Inner pH | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Macromolecular Symposia | 6. 最初と最後の頁 1800163 ~ 1800163 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1002/masy.201800163 | 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 Safi Syed Ragib, Senmoto Kiyotaka, Gotoh Takehiko, Iizawa Takashi, Nakai Satoshi | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 The effect of -FeOOH on enhancing arsenic adsorption from groundwater with DMAPAAQ+FeOOH gel composite | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 119019 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1038/s41598-019-48233-x | 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 - |
| 1. 著者名 Ningrum Eva Oktavia, Sakohara Shuji, Gotoh Takehiko, Suprpto Suprpto, Humaidah Nurlaili | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 The Effect of Cation and Anion Species on the Transition and Adsorption Behaviors of Thermosensitive Sulfobetaine Gel-based Adsorbent | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Technology | 6. 最初と最後の頁 443 ~ 443 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.14716/ijtech.v10i3.2899 | 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 該当する |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1. 著者名 Safi, S. R., Gotoh, T., Iizawa, T., Nakai, S. | 4. 巻 148 |
| 2. 論文標題 Removal of Arsenic Using a Cationic Polymer Gel Impregnated with Iron Hydroxide | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Visualized Experiment | 6. 最初と最後の頁 59728 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.3791/59728 (2019) | 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 後藤健彦 | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 高分子ゲルを使った水中金属イオンの新しい除去・回収プロセス | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 クリーンテクノロジー | 6. 最初と最後の頁 23~26 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| 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 Syed Ragib Safi, T. Gotoh, T. Iizawa and S. Nakai | 4. 巻 217 |
| 2. 論文標題 Development and Regeneration of Composite of Cationic gel and Iron Hydroxide for Adsorbing Arsenic from Ground Water | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Chemosphere | 6. 最初と最後の頁 808-815 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemosphere.2018.11.050 | 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 後藤健彦 | 4. 巻 87 |
| 2. 論文標題 地下水からのヒ素吸着のための高分子ゲル/水酸化鉄複合吸着剤の作製 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 水道協会雑誌 | 6. 最初と最後の頁 32 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| 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 後藤 健彦, 小川 飛鳥, 中田 大貴, 飯澤 孝司, 中井 智司 | 4. 巻 43 |
| 2. 論文標題 塩基性DMPAAゲル内部での金属水酸化物形成と新しい重金属捕集分離法 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 化学工学論文集 | 6. 最初と最後の頁 199-206 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.43.199 | 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 - |

〔学会発表〕 計39件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 16件)

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 後藤健彦、松本理沙、金田一智規、中井智司 |
| 2. 発表標題 高分子ゲル固定化硝化細菌による部分硝化反応 |
| 3. 学会等名 第54回水環境学会年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-----------------------------------------|
| 1. 発表者名 後藤健彦、笹谷 晃洋、中井智司 |
| 2. 発表標題 イオン性高分子ゲルを用いた重金属含有建設汚泥のリサイクル |
| 3. 学会等名 化学工学会第85年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Syed Ragib SAFI, Takehiko GOTOH, Satoshi NAKAI |
| 2. 発表標題 Effective removal of arsenate from groundwater by polymer gel impregnated with iron hydroxide |
| 3. 学会等名 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 Syed Ragib SAFI, Takehiko GOTOH, Satoshi NAKAI |
| 2. 発表標題 Adsorption of Arsenite by Polymer gel impregnated with Iron hydroxide |
| 3. 学会等名 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 Junjie ZHU, Takehiko GOTOH, Masahiro SADAKANE, Satoshi NAKAI |
| 2. 発表標題 Synthesis and characterization of a novel heteropoly acid/hydrogel composite |
| 3. 学会等名 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 Akihiro SASAYA, Takehiko GOTOH, Satoshi NAKAI |
| 2. 発表標題 Dehydration and heavy metal ion removal from contaminated sludge by hydrogel |
| 3. 学会等名 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 Risa MATSUMOTO, Takehiko GOTOH, Satoshi NAKAI |
| 2. 発表標題 New simple lithium recovery method using cationic polymer gel |
| 3. 学会等名 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 Takehiko GOTOH, Masahide SANNO, Satoshi NAKAI |
| 2. 発表標題 Selective recovery of metal ion by cationic hydrogel with various anions |
| 3. 学会等名 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 Toni Suharto, Takehiko GOTO, Masahide SANNO, Satoshi NAKAI |
| 2. 発表標題 Simultaneous Adsorption of Heavy Metal Ions by Thermosensitive Ionic Hydrogel |
| 3. 学会等名 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 Risa Matsumoto, Takehiko Gotoh, Tomonori Kindaichi, Satoshi Nakai |
| 2. 発表標題 Application of cationic polymer gel for cultivation of nitrifying bacteria |
| 3. 学会等名 第 1 回日韓水環境若手研究者シンポジウム (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Syed Ragib SAFI, Takehiko GOTOH, Satoshi NAKAI |
| 2. 発表標題 Removal of Arsenic using Cationic Gel and Impregnated with Iron Hydroxide |
| 3. 学会等名 9th International Colloids Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------------|
| 1. 発表者名 花井 健祥, 後藤 健彦, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 イオン性高分子ゲルを用いたレアメタル・レアアースの回収 |
| 3. 学会等名 第13回中四国若手CE合宿 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------------|
| 1. 発表者名 花井 健祥, 後藤 健彦, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 イオン性高分子ゲルを用いたレアメタル・レアアースの回収 |
| 3. 学会等名 化学工学会姫路大会 2 0 1 9 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------------------|
| 1. 発表者名 祝 俊傑, 後藤 健彦, 中井 智司, 定金 正洋 |
| 2. 発表標題 リンタングステン酸ナノ粒子と高分子ゲルの複合体作製と酸触媒特性の検討 |
| 3. 学会等名 第13回中四国若手CE合宿 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 後藤 健彦, 佐野雅英, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 アニオン吸着高分子ゲルによる重金属イオンの選択的分離 |
| 3. 学会等名 分離技術会年会2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------------|
| 1. 発表者名 花井 健祥, 後藤 健彦, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 イオン性高分子ゲルを用いたレアメタル・レアアースの回収 |
| 3. 学会等名 分離技術会年会2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 後藤 健彦, 木村 嘉樹, 飯澤 孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 イオン性高分子ゲルを用いた硫化銅ナノ粒子の作製 |
| 3. 学会等名 化学工学会第84年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Risa Matsumoto, Takehiko Gotoh, Takashi Iizawa, Satoshi Nakai |
| 2. 発表標題 New lithium recovery method using carbonate loaded polymer gel |
| 3. 学会等名 The 12th SPSJ International Polymer Conference (IPC2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Syed Ragib Safi, Takehiko Gotoh, Takashi Iizawa, Satoshi Nakai |
| 2. 発表標題 Development and characterization of a cationic gel impregnated with iron hydroxide for adsorbing arsenic from groundwater |
| 3. 学会等名 The 12th SPSJ International Polymer Conference (IPC2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Toshiki Kaneko, Katsuhiko Nakahara, Takehiko Gotoh, Takashi Iizawa |
| 2. 発表標題 Thermosensitivity of poly[oligo(ethylene glycol) mono(m)ethyl ether (meth)acrylate)] gels |
| 3. 学会等名 The 12th SPSJ International Polymer Conference (IPC2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Makoto Kanemitsu, Hiroya Okamoto, Syunro Yoshimura, Takehiko Gotoh, Takashi Iizawa |
| 2. 発表標題 Synthesis of porous thermosensitive gel having gradient acylation structure and its bending properties |
| 3. 学会等名 The 12th SPSJ International Polymer Conference (IPC2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|----------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 佐野 雅英, 後藤 健彦, 飯澤 孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 異なる陰イオンを吸着させたプロトン化高分子ゲルによる金属イオン選択的回収の検討 |
| 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 後藤 健彦, 小川 飛鳥・中田 大貴・飯澤 孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 高分子ゲル内水酸化物形成を利用した新しい重金属イオン回収法 |
| 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 Takehiko Gotoh, Masahide Sano and Satoshi Nakai |
| 2. 発表標題 Hydro-gel-metalurgy |
| 3. 学会等名 POLYMER NETWORKS AND GELS 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 後藤 健彦, 佐野 雅英, 飯澤 孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 四級アミノ基吸着陰イオンを利用した重金属イオン処理 |
| 3. 学会等名 分離技術会年会2018 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 松本 理沙, 後藤 健彦・飯澤 孝司・中井 智司 |
| 2. 発表標題 カチオン性高分子ゲルを用いたリチウムの分離回収 |
| 3. 学会等名 分離技術会年会2018 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 笹谷 晃洋, 後藤 健彦・飯澤 孝司・中井 智司 |
| 2. 発表標題 イオン性高分子ゲルによるレアメタルの分離回収 |
| 3. 学会等名 分離技術会年会2018 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------------|
| 1. 発表者名 後藤健彦, 吉岡寛治, 飯澤孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 カチオン性/アニオン性感温性ゲルの併用による硝酸塩の吸脱着特性 |
| 3. 学会等名 分離技術会年会 2017 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Safi Syed Ragib, 後藤健彦, 飯澤孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 Preparation of Composite of Cationic gel and Iron Hydroxide for Adsorbing Arsenic |
| 3. 学会等名 分離技術会年会 2017 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-------------------------------------------|
| 1. 発表者名 小林篤史, 後藤健彦, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 高分子ゲルと ZnO ナノ粒子の複合体作製と光触媒特性の検討 |
| 3. 学会等名 分離技術会年会 2017 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Safi Syed Ragib, Takehiko Gotoh, Satoshi Nakai |
| 2. 発表標題 Preparation of Composite of Cationic Gel and Iron Hydroxide for Adsorbing Arsenic from Ground Water |
| 3. 学会等名 7th IWA-ASPIRE Conference 2017 (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Takehiko Gotoh, Masahide Sano, Asuka Ogawa, Satoshi Nakai |
| 2. 発表標題 Selective Metal Ion Recovery from Waste Water by Using Hydrogel with Tertiary Amino Group |
| 3. 学会等名 7th IWA-ASPIRE Conference 2017 (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-----------------------------------------|
| 1. 発表者名 佐野 雅英, 後藤 健彦, 飯澤 孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 イオン性高分子ゲルを用いた重金属イオンの選択的回収の検討 |
| 3. 学会等名 化学工学会第49会秋季大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-----------------------------------------|
| 1. 発表者名 小林篤史, 後藤健彦, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 ZnOナノ粒子と高分子ゲルの複合体制製と光触媒特性の検討 |
| 3. 学会等名 化学工学会第49会秋季大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-----------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 木村嘉樹, 後藤 健彦, 飯澤 孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 酸化マンガナノ粒子を内包した高分子ゲル複合体の作製およびカドミウム吸着特性の検討 |
| 3. 学会等名 化学工学会第49会秋季大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 後藤健彦, 中田 卓, 飯澤孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 感温性高分子ゲルの油水分離材への応用 |
| 3. 学会等名 化学工学会第49会秋季大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 松本理沙, 後藤 健彦, 飯澤 孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 イオン性高分子ゲルを用いたリチウムイオンの回収 |
| 3. 学会等名 第20回化学工学会学生発表会(東広島大会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 笹谷晃洋, 後藤 健彦, 飯澤 孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 イオン性高分子ゲルを用いたレアメタルの回収 |
| 3. 学会等名 第20回化学工学会学生発表会(東広島大会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 後藤健彦, 中田 卓, 飯澤孝司, 中井 智司 |
| 2. 発表標題 感温性ゲルを用いたO/W乳化分散液からの油分吸着分離 |
| 3. 学会等名 化学工学会第83年会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計2件

| | |
|--------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 後藤健彦 | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 技術情報協会 | 5. 総ページ数 658 |
| 3. 書名 ラジカル重合を中心とした ポリマー・微粒子・コーティング材の 合成, 応用, トラブル対策 | |

| | |
|-------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 後藤健彦、エバ・オクタビア・ニングラム | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス | 5. 総ページ数 864 |
| 3. 書名 刺激応答性高分子ハンドブック | |

〔出願〕 計4件

| | | |
|---------------------------------------------------|----------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 亜硝酸菌固定化高分子ゲル、亜硝酸菌固定化高分子ゲルの製造方法及び水処理方法 | 発明者 後藤健彦、金田一智 規、中井智司 | 権利者 広島大学 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-193931 | 出願年 2019年 | 国内・外国の別 国内 |

| | | |
|---------------------------------|--------------|---------------|
| 産業財産権の名称 吸着剤の使用法 | 発明者 後藤健彦 | 権利者 広島大学 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-171201 | 出願年 2019年 | 国内・外国の別 国内 |

| | | |
|---------------------------------|--------------|---------------|
| 産業財産権の名称 高分子ゲル及び金属回収方法 | 発明者 後藤健彦 | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-239156 | 出願年 2018年 | 国内・外国の別 国内 |

| | | |
|---------------------------------|--------------|---------------|
| 産業財産権の名称 高分子ゲル及び金属回収方法 | 発明者 後藤健彦 | 権利者 広島大学 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-250978 | 出願年 2017年 | 国内・外国の別 国内 |

〔取得〕 計0件

〔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 |
|-------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 飯澤 孝司 (Iizawa Takashi) (60130902) | 広島大学・工学研究科・准教授 (15401) | |
| 研究分担者 | 中井 智司 (Nakai Satoshi) (80313295) | 広島大学・工学研究科・教授 (15401) | |