

下水汚泥焼却灰の高効率リン肥料化技術の開発と実用化への課題

山崎 将義* 地井 直行*
Masayoshi Yamazaki Naoyuki Jii

1. はじめに

リンは植物の成長および食料の安定供給に不可欠な三大栄養素の一つであるが、我が国では原料鉱石が産出しないため、ほぼ100%輸入に依存している。リンをはじめとする肥料原料の国内資源化・自給化は喫緊の課題となっており、近年、国土交通省と農林水産省の連携により、下水汚泥の肥料化利用促進が図られている¹⁾。

未利用資源の下水汚泥焼却灰（以下、汚泥灰）にはリンが原料鉱石と同程度含まれている。リン回収の技術はいくつか実用化例が報告²⁾されているものの、その回収率は一般に30%程度と低く、採算性向上が課題である。またリン化合物として回収した回収物中の重金属濃度が高く、肥料化利用に支障をきたす場合があることも課題である。

本研究開発では、汚泥灰に対する酸およびアルカリによる二段階の溶出方法（以下、二段階溶出法）による高効率リン回収技術に着目し、リンの回収率および回収物中の重金属濃度について、既往の処理対象の灰量が数10g以下での実験結果³⁾をふまえ、同灰量を1kgにスケールアップさせて検証を行った。また、本技術の実用化に向けた技術的課題を抽出し整理したので報告する。

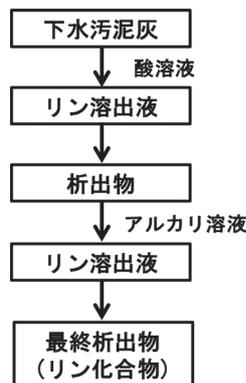
2. 実験方法

(1) 汚泥灰試料

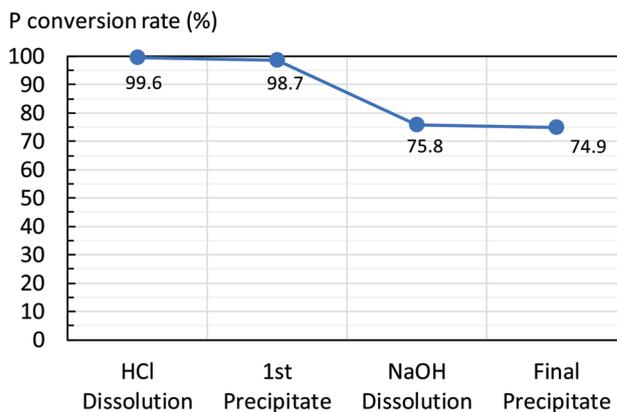
汚泥灰には下水処理場から採取したリン含有率（P₂O₅換算）が約30%の流動層炉灰の実試料を用いた。

(2) リン回収実験

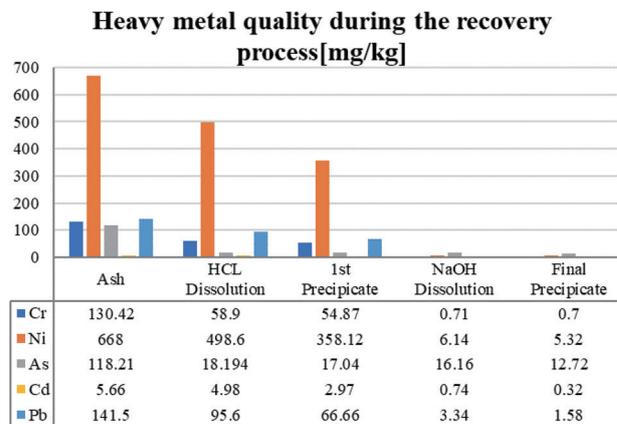
一般にリン回収の工程は溶出、析出および分離プロセスから構成される。本研究では図一1のフローに示す二段階溶出法を用いた。汚泥灰中のリンを塩酸（HCl）溶液によって酸溶出した後、析出し、その析出物を同様に水酸化ナトリウム（NaOH）溶液によって再度溶出、再び析出（最終析出）してリンを回収した。リンの溶出量および析出量は、モリブデン青吸光度法によりリン酸濃度を定量し、その結果から算出した。



図一1 二段階溶出法によるリン回収フロー



図一2 二段階溶出法による汚泥灰からのリン回収率



図一3 リン回収の各反応工程における重金属含有量

3. 実験結果および考察

(1) 二段階溶出法によるリンの回収率

汚泥灰（乾重量1kg）から二段階溶出法でリンを回収した際の回収率を反応工程毎に調べた結果を図一2に示す。最終析出（Final Precipitate）において回収率は74.9%を示し、従来技術の灰アルカリ法（回収率30%程度）に比べて2.5倍程度高いことが示された。

酸溶出後の析出（1st Precipitate）までは、リンはほぼ全量（98.7%）が回収されたものの、次段階のアルカリ溶出において回収率は75.8%に留まった。

* 技術研究所環境技術グループ

表一 実用化に向けた技術的課題と対応策

	技術的課題	対応策
1	酸処理設備の強酸・高温への耐久性	酸処理工程で得たリン抽出液を固液分離する設備には、フィルタプレス等に耐酸性の仕様が求められる。特に接液部は強酸に加え高温（80℃）に耐えうる仕様が求められ、SUS製でも耐久性が十分ではない。そのため設備の耐久性向上のため、接液部に高耐久性のライニング等の保護を行う。
2	維持管理に係る消耗部材の耐久性	酸処理工程で使用する設備（特に接液部）の消耗部材（反応槽・配管のライニング、ろ布等）をリストアップし、要求される耐用年数を満足する部材を確保する。
3	ストーカ炉灰への適用性	下水汚泥の焼却炉に関し、従来主流であった流動層炉に比べ温室効果ガスである N ₂ O の排出量が少ないストーカ炉が近年注目され、ニーズが増している。ストーカ炉灰からのリン回収に関する基礎データが少ないため実験を重ねることで、本技術の適用性の検証および高効率な回収方法の確立を目指す。

これらのことから、アルカリ溶出の工程において、リンをアルカリに溶解しやすい化学形態で維持できる反応条件を把握することが更なる回収率の向上にとって不可欠であり、今後の課題である。

(2) 肥料に活用するリン回収物の重金属適合性検証

①各反応工程における重金属含有量

前記の各反応工程における主な重金属の含有量の結果を図一3に示す。図中のAsh, 1st Precipitate, Final Precipitateでは固体中の重金属の含有量を示し、HCl Dissolution, NaOH Dissolutionでは溶液中の重金属濃度を含有量に換算した値を示す。アルカリ溶出工程においてヒ素を除く重金属の濃度は大きく減少し、そのほとんどがアルカリ溶出後の残渣へ移行したことが分かる。ヒ素についてはアルカリ条件下でヒ酸イオンとして溶出するため、他の重金属と異なる挙動を示したと考えられる。

②リン回収物中の重金属含有量

汚泥灰からのリン回収物（Final precipitate）について、肥料（副産りん酸肥料）として活用を図るため、肥料の品質の確保等に関する法律の規制対象重金属であるヒ素とカドミウムの含有量を分析した。副産りん酸肥料に対する上記2つの物質の基準値は、ク溶性リン酸が1.0%に対しヒ素は40 mg/kg、カドミウムは1.5 mg/kgと定められており、今回のリン回収物のク溶性リン酸は91%であったことから、基準値はヒ素は3,640 mg/kg、カドミウムは136.5 mg/kgと設定される。分析の結果、ヒ素は9.78 mg/kg、カドミウムは0.43 mg/kgであった。前記した2つの物質の含有量の分析結果から、当該リン回収物は肥料の重金属基準に適合することが確認された。

4. 実用化に向けた技術的課題

前記の灰量1kgスケールでのリン回収実験を通じて、実用化に向けた技術的な課題が明らかとなった。

- ①酸処理設備の強酸・高温への耐久性
- ②維持管理に係る消耗部材の耐久性

さらに、流動層炉に比べて温室効果ガスである亜酸化窒素（N₂O）の排出量が少なく、地球温暖化対策の観点からニーズが増しているストーカ炉は、汚泥灰の生成過程（燃焼および集塵の方法）が流動層炉と異なっているため、本回収技術の適用性を検証する必要がある。これらの課題の対応策を表一に示す。

5. まとめ

下水汚泥焼却灰の高効率リン肥料化技術に着目し、流動層炉灰を試料とし、二段階溶出法によるリンの回収率および回収物中重金属濃度について、処理対象の灰量を1kgにスケールアップして検証を行った。その結果、従来技術の2.5倍程度の回収率が示され、回収物中の重金属濃度は肥料（副産りん酸肥料）の重金属基準に適合することが確認された。また本技術の実用化に向けた技術的課題を抽出し、整理した。

本技術の早期の社会実装・実用化を目指し、今後はストーカ炉からの汚泥灰への適用可能性・有効性の検証を研究開発の公募事業を利用し進めていきたい。

謝辞。 本研究開発は国立大学法人新潟大学自然科学系（工学部）狩野直樹准教授および金熙濬元教授との共同研究開発により得られた成果の一部を報告したものである。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書，pp. 242，2023。
URL：https://www.mlit.go.jp/statistics/file000004/pdfindex.html
- 2) 林 直希 他：汚泥燃焼灰からの燐回収に関する基礎研究，第23回廃棄物資源循環学会，2012。
- 3) 地井直行，山崎将義，石渡寛之，金 熙濬：下水汚泥焼却灰からの高効率リン回収と回収リンの肥料化に関する基礎検討，第74回土木学会年次学術講演会 VII-61，2019。