

下水消化汚泥からのリン除去回収技術

古賀大輔* 萩野隆生**

Technology for Phosphorus Removal and Recovery from Digested Sewage Sludge

by Daisuke KOGA, & Takao HAGINO

Japan's demand for phosphorus is met entirely by imports. It is an extremely valuable resource that is indispensable to fertilizers and industrial applications. On the other hand, sewage treatment plants face issues such as reducing the phosphorus load in discharged water and the level of scaling caused by phosphorus. To address these issues, the mechanical agitation-type magnesium ammonium phosphate (MAP) method was developed. This method makes it possible to recover the phosphorus in digestive sludge in the form of MAP. The joint agri-service research consortium of Swing Corporation, the Kobe City Government, and Mitsubishi Corporation was commissioned by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism to conduct a demonstration of the technology at a real-scale demonstration plant as part of a "Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project (B-DASH Project)." The demonstration confirmed that the method reliably delivers the desired level of performance, and it is estimated to recover around 1.8 times the MAP of conventional methods. Because MAP has already been registered as a fertilizer, Swing is conducting a joint study with Kobe City Government on practical applications in the Kobe area.

Keywords: Phosphorus, MAP (struvite), Crystallization, Anaerobic digested sludge, Fertilizer

1. はじめに

肥料・工業原料の一つであるリンは、世界的な枯渇資源でありながら、我国においては、その必要量全量を輸入しているという貴重な資源である。一方、嫌気性消化槽を有する下水処理場では、高濃度のリン酸、アンモニアが汚泥処理系統から水処理系統へ逆流され水処理への負荷が増加するという問題や、条件によってはスケールによって配管閉塞等が発生するなどの課題を抱えている。これらを解決すべく、消化汚泥中のリンをリン酸マグネシウムアンモニウム（以下MAPと略記）として直接除去回収できる機械攪拌式MAP法を開発した¹⁾。本技術は国土交通省下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト）として2012年～2013年度に国土技術政策総合研究所委託研究として水ing・神戸市・三菱商事アグリサービス共同研究体が、239 m³/dの実規模リン除去回収プラントを神戸市東灘処理場に建設し、技術実証を行った。2014年度以降、神戸市・水ingの共同研究として、

回収したリンを地産地消のリン肥料として有効利用するための研究を行っている。本報では、技術の概要、B-DASHプロジェクトでの実証結果及び回収リンの有効利用に向けた取組の状況について報告する。

2. 本技術の適用箇所と期待される導入効果

消化槽を有する処理場においては、水処理で汚泥中に取り込まれたリンの一部が消化工程で再溶出する。消化汚泥には溶出した溶解性のリン酸態リンを含むリン及びアンモニアが高濃度に含まれており、その返流水が水処理へ循環する。返流水リン負荷削減のためのリン除去・回収技術として、従来型MAP法では消化汚泥脱水ろ液からリンを回収するが、本技術では消化汚泥から直接リンを除去・回収する。脱水ろ液に比べて高濃度となる消化汚泥からリンを除去・回収することで、リン回収量の増加の他、**図1**に示す様々な導入メリットが得られる。回収リン（MAP）は貴重なリン資源として再利用が可能である。

3. リン除去回収装置の特徴

消化汚泥中には高濃度のリン酸とアンモニアが含まれ

* 水ing(株)

** 水ing(株) 博士(工学)

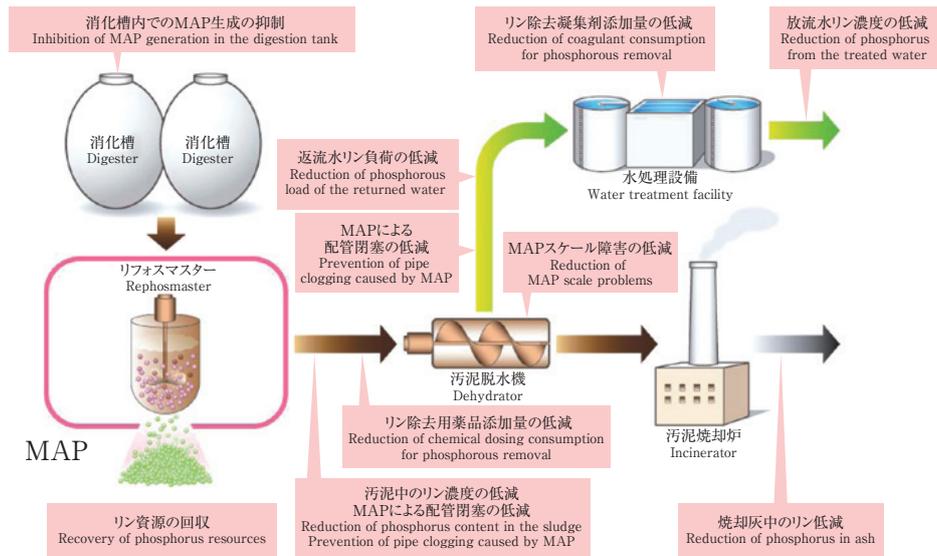


図1 消化汚泥からのリン除去回収技術の導入効果

Fig. 1 Benefit of technology for phosphorus removal and recovery from digested sewage sludge

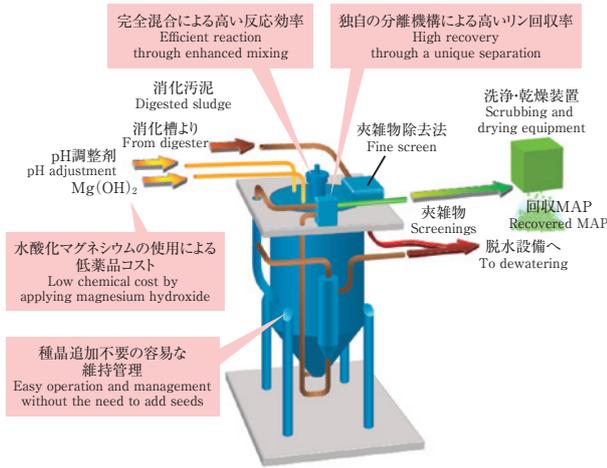
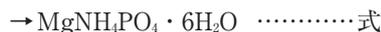


図2 リン除去回収装置概要図

Fig. 2 Phosphorus removal and recovery equipment

ている。消化汚泥に水酸化マグネシウムを添加し、適正にpH条件を保つと、式に示される晶析反応が進行し、MAPの結晶が生成する。本装置はMAP晶析反応を利用して、リンを効率よく除去・回収する。下記に本装置の特徴を示す。図2にリン除去回収装置概要図を示す。



3-1 高いリン回収量

消化汚泥は、高濃度のリン酸や自然発生MAP（消化槽内で生成したMAP）を含有している一方、高SS、高粘度であるという性質も持っているため、従来の一般的な流動床型リアクタには適用が困難であった。本装置は、機械攪拌式の完全混合型リアクタによって、粘性の高い消化汚泥中でも PO_4^- 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} イオン、MAP種晶

を均一に接触させて反応効率を高めている。また、リアクタ内のイオン濃度に偏りがある場合に生じる回収困難な微細MAP²⁾（数 μm 程度）の生成が少ない。MAP回収量は、従来の脱水ろ液からのMAP回収法に比べ、消化汚泥に含まれるより高濃度のリン酸と、消化槽内で自然発生したMAPの一部も回収可能であるため増加する。

3-2 安定した性能と容易な運転管理

①独自のMAP分離システム

完全混合型の晶析リアクタでは、MAP（種晶）と消化汚泥の分離方法が課題となるが、遠心分離を利用した独自のMAP分離システムの開発によって、種晶と消化汚泥とを連続的に分離し、リアクタ内の種晶濃度を高濃度に保つことが可能である。また、攪拌・分離工程による種晶同士の衝突・研磨効果によって、種晶の粒径は常時一定に保たれる。リン酸の回収は種晶表面での晶析反応によるが、種晶の粒径の安定性がリン除去性能に影響を与える。本装置では種晶の粒径が一定に保たれることから、必要な種晶表面積が確保され、安定したリン除去・回収性能を発揮できる。

②種晶の追加投入が不要

リアクタ内の種晶が晶析反応によって増加すること、消化槽で自然発生したMAPを常時回収していることから、種晶の追加投入は不要である。増加した分のMAP（種晶）をタイマーで間欠的に引き抜くことで、リアクタ内の種晶濃度を一定に保つことができる。なお、引抜工程時も装置への流入を停止する必要がなく、常時連続運転が可能である。本装置の立上げ、停止、種晶引抜の各工程は自動化されており、運転管理は容易である。

4. B-DASH実証

4-1 実証概要

実証施設は東灘処理場で発生する消化汚泥の一日当たり発生量の約1/4規模となる239 m³/dの消化汚泥からリンを除去・回収している。実証では処理性能の評価、回収MAPの肥料化検討を行った。

表1に実証施設の諸元、写真1に施設写真、図3に処理フローを示す。実証施設は消化汚泥中のリン酸をMAP

表1 実証施設諸元

Table 1 Demonstration plant specifications

項目 Item	値 Value
処理能力 Capacity	239 m ³ /d (消化汚泥量) (Digested sludge)
処理能力 Performance	T-P除去率 : 37% T-P removal from sludge PO ₄ -P除去率 : 90% PO ₄ -P removal from sludge
MAP回収量 MAP recovery amount	約360 kg/d (消化汚泥 T-P : 542 mg/L) (Digested sludge) (消化汚泥 PO ₄ -P : 172 mg/L) (Digested sludge)



15-16 01/249

写真1 実証施設

Photo 1 Demonstration plant

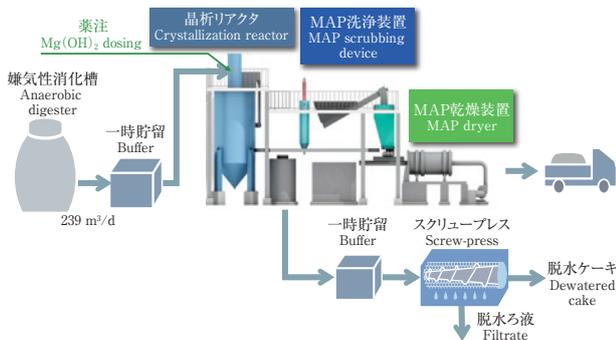


図3 処理フロー

Fig. 3 Process flow

に晶析させ、除去・回収を行う。回収したMAPは洗浄設備で洗浄後、乾燥設備で乾燥させフレコンバックに充填される。処理消化汚泥はスクリーンプレスで脱水する。リン除去前後、及び脱水ろ液でのリンに関わる水質分析を行った。

4-2 リン除去処理性能実証方法

4-2-1 実証内容と目標

リン除去・回収性能の実証として下記①～③を目標とした。加えて、スケール生成抑制効果調査、回収MAPの肥料原料検討を行った。

- ①脱水ろ液として返流するT-Pの除去率として80%
- ②脱水ろ液からのMAP法に比べMAP回収量が約40%増
- ③無機性リン除去によって脱水汚泥固形物量を約3%削減

4-2-2 実験方法

図4にリン除去回収型処理実証フロー及びサンプリング位置を示す。実証はリン除去回収処理を行うフローと、対称系としてリン除去回収装置をバイパスさせた従来型処理フローの2通りで運転を行い、両者を比較することで処理目標の評価を行った。実証期間は2013年8月～2014年3月であり、休日を除く24時間連続処理とした。処理量は239 m³/dである。

①脱水ろ液のT-Pを平均80%削減

図4リン除去回収型処理実証フローにおける脱水ろ液中のT-P負荷量(サンプル位置③)が従来型処理フローにおける脱水ろ液中のT-P負荷量(サンプル位置⑦)の20%以下となることを実証するため、表2式(1)で確認した。

②MAP回収量平均40%増加

図4リン除去回収型処理実証フローにおけるリン回収量である([①:T-P] × [①:流量] - [②:T-P] × [②:流量])が脱水ろ液MAP法の回収量の1.4倍以上であることを表2式(2)で確認した。なお、脱水ろ液MAP法の回収量は脱水ろ液リン負荷量の70%とし³⁾、[⑦:T-P] × [⑦:流量]に0.7を乗じた値を回収量とした。

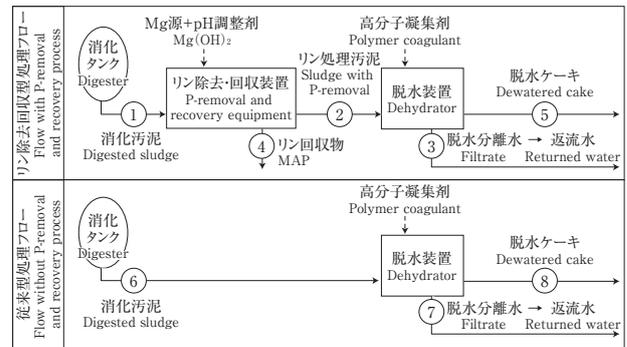


図4 リン除去回収型処理実証フロー及びサンプリング位置

Fig. 4 Demonstration test flow and sampling point

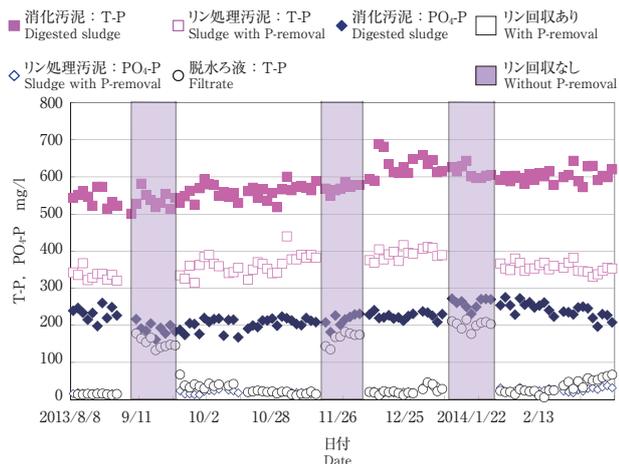


図5 処理状況の推移
Fig. 5 Daily changes in processing

表2 実証施設緒元
Table 2 Demonstration plant specifications

実証条件式 Conditions formula	
$1 - \frac{[\textcircled{3}:\text{T-P}] \times [\textcircled{3}:\text{流量 Flow rate}]}{[\textcircled{7}:\text{T-P}] \times [\textcircled{7}:\text{流量 Flow rate}]} \geq 0.8$	(1)
$\frac{([\textcircled{1}:\text{T-P}] \times [\textcircled{1}:\text{流量 Flow rate}] - [\textcircled{2}:\text{T-P}] \times [\textcircled{2}:\text{流量 Flow rate}])}{[\textcircled{7}:\text{PO}_4\text{-P}] \times [\textcircled{7}:\text{流量 Flow rate}] \times 0.7} \geq 1.4$	(2)
$1 - \frac{([\textcircled{2}:\text{SS}] \times [\textcircled{2}:\text{流量 Flow rate}] \times (1 - \frac{[\textcircled{3}:\text{SS}] \times [\textcircled{3}:\text{流量 Flow rate}]}{[\textcircled{2}:\text{SS}] \times [\textcircled{2}:\text{流量 Flow rate}]})}{([\textcircled{1}:\text{SS}] \times [\textcircled{1}:\text{流量 Flow rate}] \times (1 - \frac{[\textcircled{7}:\text{SS}] \times [\textcircled{7}:\text{流量 Flow rate}]}{[\textcircled{6}:\text{SS}] \times [\textcircled{6}:\text{流量 Flow rate}]})} \geq 0.03$	(3)

③固形物量 (DSベース) 平均3%削減

図4 リン除去回収型処理実証フローにおけるリン除去処理汚泥のSS負荷量 (サンプル位置②) を消化汚泥のSS負荷量 (サンプル位置①) で除した値を1から減じた値が0.03以上となることを採取データの平均値として実証するために表2式 (3) が成立することを確認した。

4-3 実証結果と考察

4-3-1 リン除去処理性能実証結果

図5に処理状況の推移を示す。8月～3月の試験期間において、消化汚泥T-Pは季節変動としては大きくなく比較的低濃度の8月～9月の平均値542 mg/Lと比較的高濃度の1月～2月の平均値605 mg/Lの差は63 mg/Lと10%程度であった。試験期間中の処理汚泥T-P、PO₄-Pも大きな変化はなく安定していた。T-P除去率は平均37.3%、PO₄-P除去率は平均90.0%であり良好にリンが除去・回収された。

①図6に示す脱水ろ液T-P除去率は、安定的に80%以上を維持することができ、返流水リン負荷を軽減できることを実証した。

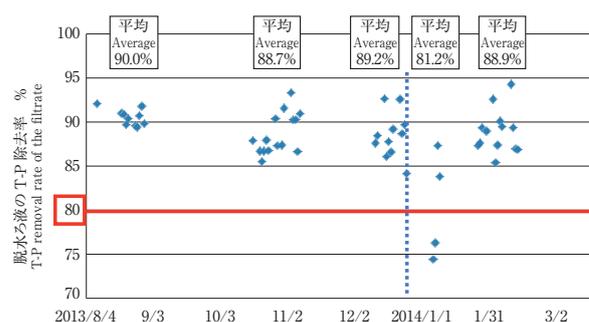


図6 脱水ろ液のT-P除去率
Fig. 6 T-P removal rate of the filtrate

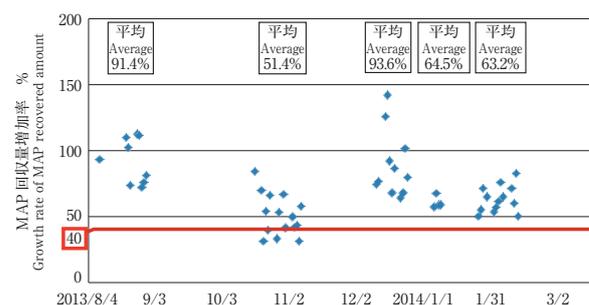


図7 MAP回収量増加率
Fig. 7 Growth rate of MAP recovered amount

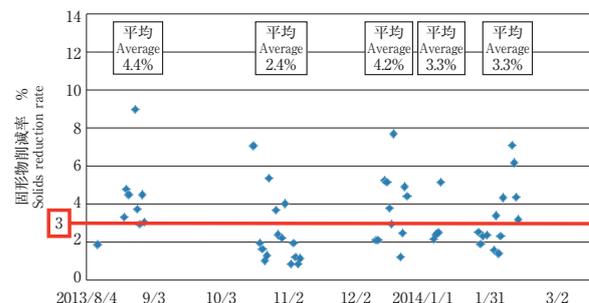


図8 固形物削減率
Fig. 8 Solids reduction rate

②図7に示すMAP回収量増加率は、40%以上の目標性能に対して平均80%となり目標を大幅に上回った。本値には変動が見られるが流入する消化汚泥PO₄-Pと自然発生MAPの変動によると考えられる。従来法である脱水ろ液からのMAP法に比べ、リン回収量が1.8倍に増加する結果となった。

③図8に示す固形物削減率は、9月下旬～11月にかけ、目標値の3%を下回り区間平均：2.4%と目標値をクリアしない時期があったが、試験期間を通じての平均値は3.3%で目標を達成した。本値の変動は自然発生MAPの流入変動によると考えられる。汚泥の処分には多くのコストとエネルギーを必要とするので、数パーセントでも固形物が削減される意義は大きい。

4-3-2 スケール生成抑制効果調査

写真2に実証施設内テスト配管（80A SUS）の写真を示す。テスト配管は実証施設実配管の同一箇所を設置し、リン除去運転とバイパス運転でテスト配管を入れ替えて観察した。結果、リン除去無（バイパス）ではMAPと推定されるスケールの付着が認められた。一方、リン除去・回収運転では、スケール付着は外観上認められず、リン除去によって配管スケール生成が低減されることを実証した。消化槽を有する施設ではスケール障害を抱える事例は多く、本技術適用によってスケール障害の低減が期待される結果となった。

4-3-3 肥料原料検討結果

写真3に回収MAPの外観写真を示す。回収MAPの性状分析の結果は化成肥料の公定規格を満足した。植害試験結果も問題なく、肥料として有効利用可能な品質レベルであることが確認された。さらに肥料工場ではラボ造粒試験を行った結果、回収MAPを使用した試作肥料は通常の原料を使用する場合と同等の造粒性を示し、原料として利用可能であることが確認された。

5. リン資源地産地消の実証

本技術で回収したMAPは、2014年4月に、その成分が問題ないことが農林水産省に認められ、化成肥料として肥料登録された。下水消化汚泥からの回収MAPが肥料登録されたのは実機として初めてである。

神戸市との共同研究で、地元JA、農業関係者、肥料企業と連携し、回収MAPを「こうべ再生リン」として活用する方法についての検討を行った。その結果、MAPの主成分であるク溶性リン酸（水に溶けずクエン酸に溶ける性質）の緩効性肥料としての特性を活かしつつ、窒素、カリウムなどの成分を補い、窒素分の50%を有機質とする窒素：リン酸：カリウム＝10：6：6の配合が、利用しやすいとの結論を得た。これら原料を混ぜ合わせ、加圧・ペレット化することで、施肥しやすい指定配合肥料のサンプルを製造した。写真4にMAPを活用した指定配合肥料のサンプル写真を示す。

2015年4月から、地元JA、農業関係者の協力のもと、本試作肥料を用いた試験栽培が開始された。

都市部に集約される下水から回収したリンが農地で肥料として有効活用され、農地で生産された作物が都市部で消費されることで、資源循環の環を形成することが可能となる。



写真2 実証試験後のテスト配管状況
Photo 2 Test pipe pieces after test



写真3 回収MAP
Photo 3 Recovered MAP



写真4 指定配合肥料サンプル
Photo 4 Designated mixed fertilizer

6. おわりに

消化汚泥から直接リンを除去・回収する本技術によって、消化槽の有する処理場の課題である、返流水リン負荷の低減やスケールトラブルリスクの低減、また、固形物の削減効果など、様々なメリットが得られる。さらに、回収したMAPは肥料として有効活用可能である。

近年、消化槽を活用したエネルギー回収が注目されているが、リン資源回収も本技術との組み合わせによって可能となる。下水処理施設の課題を解決しつつ、リン資

源循環の一助となるべく、本技術の普及に努めたい。

本論文の国土交通省下水道革新的技術実証事業は国土交通省国土技術政策総合研究所からの委託研究として水ing・神戸市・三菱商事アグリサービス共同研究体で実施されたものである。また、回収MAPの利活用においては神戸市との共同研究で肥料企業、地元JA、農業関係者の協力を得て進められている。ここに、関係者の皆様に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 島村ら, メタン発酵液からのリン回収プロセスにおける晶析操作, 化学工学論文集, 第35巻, 第1号, pp127-132 2009.
- 2) 島村ら, 晶析技術を用いた嫌気性消化汚泥中のリン回収システムの検証, 下水道協会誌, Vol43, 第No.529, pp108-117 2006.
- 3) 国土交通省都市・地域整備局下水道部, 下水道におけるリン資源化の手引き, 平成22年3月.

