

リン回収設備における最適運転方法の検討

神戸市建設局東水環境センター施設課 ○上城 博宣・岡野内 晃代

1. はじめに

神戸市では、国土交通省の平成24年度下水道革新的実証事業（B-DASHプロジェクト）に採択され、消化汚泥に含まれるリンをリン酸マグネシウムアンモニウム（MAP）として回収・再生する実証実験設備を東灘処理場に建設し、平成25年2月より稼働を開始した。生産したMAPを「こうべ再生リン」として販売し、数年前まで出荷量は年間20トン程度であったが、輸入リンの価格高騰や知名度の向上により、肥料原料としての需要が高まった。B-DASHの実験設備として運転を開始したリン回収設備は10年を超えたが、需要の拡大を受け、増産に向けた現場での取り組みについて報告する。

2. リン回収設備

東灘処理場におけるリン回収設備のフローを図1に示す。下水処理工程で発生した汚泥は消化槽で消化されたのち、リアクタへ移送されMAPの結晶を生成し、分離・洗浄・乾燥を経て製品となるMAPを生産している。MAPは式(1)に示す晶析反応で生成される。本設備ではリアクタへ注入した水酸化マグネシウムのマグネシウムイオン（ Mg^{2+} ）と消化汚泥中のアンモニウムイオン（ NH_4^+ ）、リン酸イオン（ PO_4^{3-} ）の晶析反応により核となるMAPの種晶が生成され、この種晶をリアクタで攪拌・循環してさらに反応が進行し、約100～700 μm のMAP結晶となる。

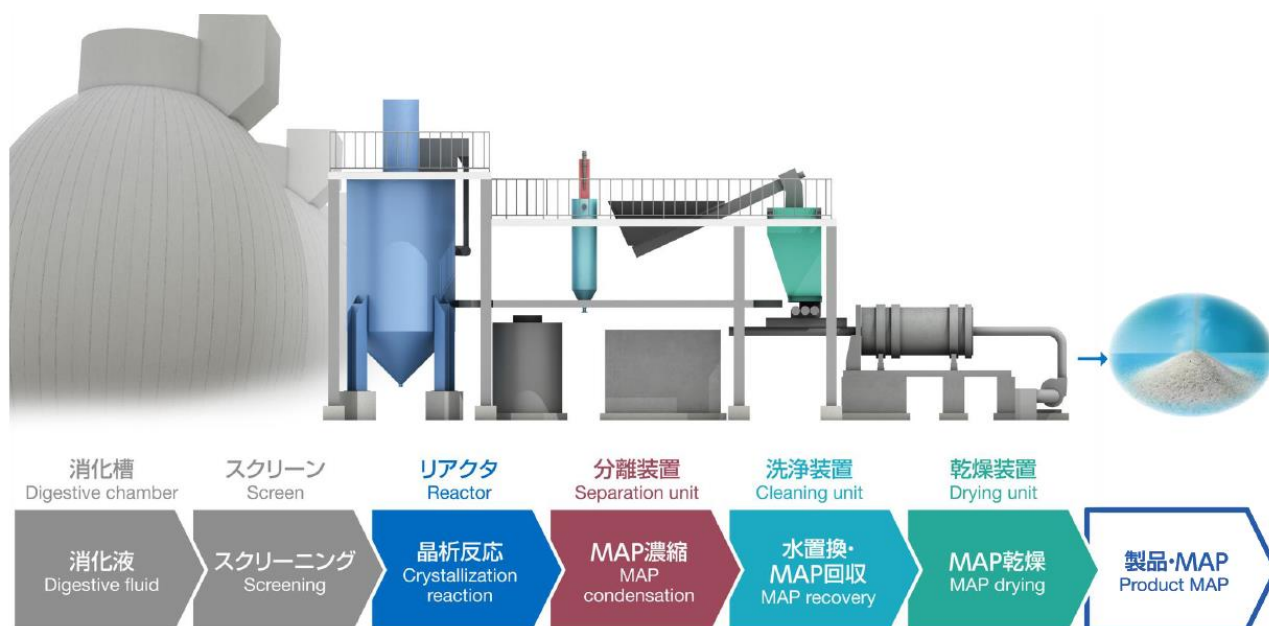
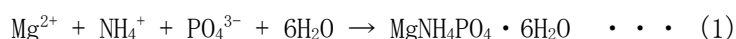


図1 リン回収設備フロー

水酸化マグネシウムの注入量については図2に示す理論式を用いて月2回の消化汚泥中のリン酸態リン濃度の分析結果より算出するが、日常の運転管理ではリアクタ内で生成されたMAPの濃度（50～60g/L）とリアクタpH（晶析反応が起こりやすいpH7.6～8.2）を監視しながら注入量を管理している。令和5年度の消化汚泥中のリン酸態リン除去率は83.2%であり、良好な運転管理ができていた。

$$R_{Mg} = Q \cdot R_{PO4-P} \cdot 100 / C \cdot \kappa \cdot 58.3 / 30.97 \cdot M / 60$$

R_{Mg} ：注入量（mL/min） Q ：処理汚泥量（ m^3/h ）

R_{PO4-P} ： PO_4 -P濃度（mL/min）

C ：水酸化マグネシウムスラリー濃度（%）

κ ：水酸化マグネシウムスラリー比重（設計値1.26）

58.3＝水酸化マグネシウム分子量 30.97＝リンの原子量

M ：Mg/Pモル比（0.9～1.0）

図2 $Mg(OH)_2$ 注入量計算式

3. 「こうべ再生リン」の需要拡大

本市では消化汚泥から回収したMAPを「こうべ再生リン」と名付け、農業用肥料として活用するためJA兵庫六甲の協力のもと、平成27年度より野菜・花用や米、酒米用にそれぞれの生育に適した比率で窒素、カリウムを配合した「こうべハーベスト肥料」を開発し、市内の農家や市民へ販売を開始した。そして、広報活動（スイートコーン収穫体験やカプセルトイによる小口販売、市民へのサンプル配布イベント、リン資源の循環PR動画等）や肥料購入費の補助といった取り組みにより、図3に示すとおり「こうべ再生リン」の年間出荷量は令和4年度以降、大きく増加した。（令和5年度は後述の改造工事により2か月休止）

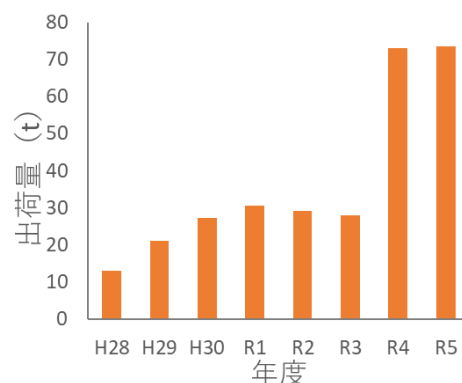


図3 MAP 出荷量（年度別）

4. 現場での取り組み

(1) 設備トラブルの解消による稼働率向上

【トラブルおよび課題】

上述の需要拡大を受け、MAPの増産を迫られるもののリン回収設備は下記のようなトラブルや課題を抱えていた。

- ① 消化槽～スクリーン間の閉塞
- ② リアクタでの水酸化マグネシウムの滴下不良
- ③ MAP分離装置におけるMAP界面の目視による調整
- ④ 乾燥前ホoppaでのブリッジ形成
- ⑤ 雨天日における熱風発生装置の点火不良
- ⑥ 経年劣化による故障と復旧までの長期間の設備停止

①～④はこれまでのノウハウを活かし、運転管理委託業者による日常点検や定期的な整備で対応しているが、⑤は毎朝起動させる必要がある乾燥機が稼働せず、リン回収設備が完全に停止していた。⑥についても契約手続きや部品の手配等で、やむを得ず、長期の設備停止となっていた。

【原因と対策】

上記⑤には恒久対策が必須と考え調査を行ったところ、原因は熱風発生装置の点火用スパーク発生器のケーブルが降雨により、漏電しているためだと分かった。対策として、令和5年5月に図4に示すとおり、熱風発生装置下部に直営でアルミ板のカバーを設置した。

上記⑥への対応としては、故障部品の汎用品への置き換えや運転管理委託業者と協議し、可能な限り迅速な対応ができるよう汎用品での委託業者の小修繕に切り替えを行った。

【結果】

⑤と⑥の対策以降、降雨による起動不具合は発生しておらず、長期の設備停止も減少した。実際に設備トラブルや点検による令和4年度の運転休止日数は15日/月であったが、令和5年度は7日/月に減少した。

①～⑥への対策によって稼働率が向上した結果、図5に示すとおり、令和5年度（改造前の12月末時点）の1か月あたりのMAP生産量は7.2t/月となり、令和4年度の4.9t/月と比較すると約1.5倍に増産することができた。

(2) 消化汚泥移送量アップ試験

【リアクタにおける汚泥循環フロー】

リン回収設備におけるMAPと汚泥の循環を下記および図6に示す。



図4 乾燥機の熱風発生装置

（上：カバー設置前 下：カバー設置後）

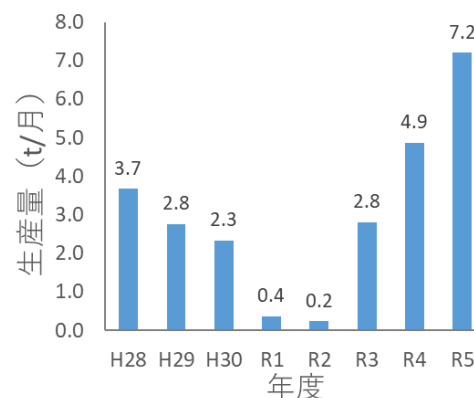


図5 MAP 生産量（月別）

- ① リアクタに消化汚泥を移送し、水酸化マグネシウムと混合し、MAPを生成する。
- ② リアクタ下部よりMAPを含む汚泥を引き抜き、③MAP分離装置または④MAP回収装置へ移送する。
- ③ MAP分離装置で比重差を利用し、MAPと汚泥を分離、MAPをリアクタへ戻してMAP結晶を大きくする。
- ④ リアクタのMAP濃度を監視しながら、1日に2～4回MAPをMAP回収装置へ移送してMAPを回収し、洗浄装置へ移送する。
- ⑤ ③や④で分離したMAPを含まない汚泥はリアクタ横の袖管を経由し、処理汚泥循環貯留槽を経て処理汚泥として脱水機へ移送される。

※ 処理汚泥循環ポンプは③MAP分離装置や④MAP回収装置で閉塞しないよう②リアクタ下部から引き抜かれるMAPを希釈するため、⑤処理汚泥循環貯留槽からMAPを含まない処理汚泥を送泥している。

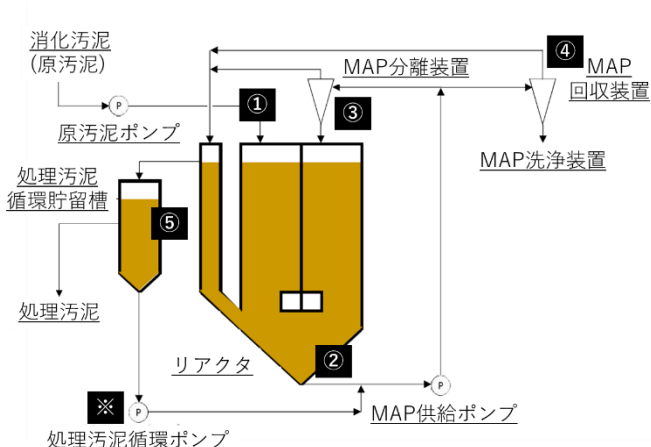


図6 リアクタにおける汚泥循環フロー

【実証実験の運転条件と評価方法】

今回、処理汚泥循環ポンプを停止し、MAP供給ポンプのみの運転とした。こうすることで、処理汚泥として系外に排出される汚泥量が増え、消化汚泥の移送量がアップする。運転期間は、約2日間とした。

評価の方法はリアクタのMAP濃度とMAPの回収回数で行った。MAP濃度の測定は日常の運転管理で行っている方法と同様に1L採泥し、汚泥や夾雑物を洗い流し、残ったMAPの容積から重量換算してMAP濃度（g/L）を求めた。

【結果】

循環汚泥ポンプ停止により、消化汚泥移送量が10m³/hから11m³/hに増加した結果、MAP濃度は60g/L程度から80～100g/Lに上昇した。MAP濃度の最適値は、設備内の閉塞防止やリアクタ内の攪拌効率から50～60g/Lとされている。そのため、MAPの回収回数を通常4回/日から5回/日に増やす運転となった。これにより、処理汚泥循環ポンプを停止し、汚泥の入れ替わりを早くすることで、リアクタのMAP濃度を上昇させ、回収できるMAPの量を25%増やすことが可能であることが明らかとなった。

【MAP増産に向けた設備改造】

令和6年1～2月のメーカーによる設備改造で、図7に示すとおり、原汚泥移送ポンプ増強による消化汚泥供給量の増加、リアクタ下部からの引抜ポンプ（攪拌循環ポンプ）新設によるリアクタ内循環の向上、処理汚泥循環ポンプとリアクタ横の袖管の廃止による処理汚泥の系外への排出量増加を行った。この改造により、前述の実証実験と同等以上のMAP増産が見込まれる。

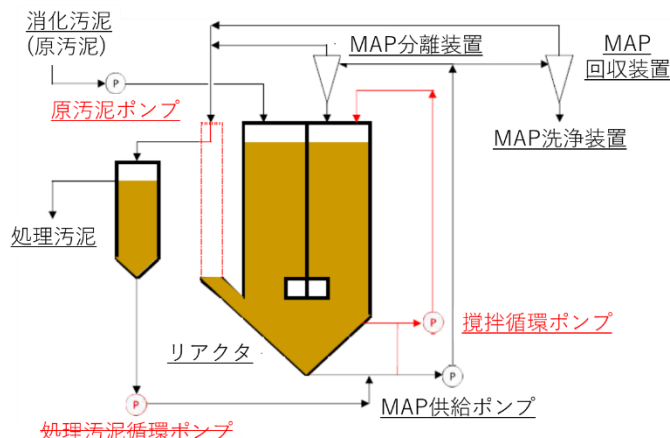


図7 改造後の汚泥循環フロー

6. まとめ

実証実験設備として稼働を開始したリン回収設備は10年を超過し、老朽化による設備トラブルや長期の継続運転に課題を抱えていた。一方で、本市の持続可能な社会の実現に向けたリン資源の循環への取り組みにより「こうべ再生リン」の需要は大きく拡大している。当処理場では、これまで積み上げた運転管理のノウハウや経験を活かし、また、R6年度以降は改造により能力増強した設備によるさらなるMAP増産に努めていく。