

リン資源回収技術の効率的な導入に 関する調査研究

1. 研究目的

リンは肥料の必須成分であり、農業生産性の向上に多大な効果をもたらす物質である。しかし、その資源は有限であり、将来的なリン資源の枯渇が懸念されている。

近年、中国やインドといった新興国の経済成長や、バイオ燃料の需要増大による世界的な穀物増産に伴い、肥料の市場価格が高騰している。さらにリン資源は、原産国に限られるうえ主産国の輸出制限の影響もあり、国際取引価格は6年前（H16年）と比較してH20～21年には4倍近くに上昇した。なお、H21年半ばにはこの高騰が収まっているが、このようにリンの輸入価格については乱高下が生じている。

そのため、限りあるリン資源を確保するためにも、現在リンの回収及び再利用に関する技術開発が進められている。生活排水中には56千tものリンが含まれていると推計されており、下水・下水汚泥からの効率的なリン回収技術の導入が急務となっている。

このリン回収技術導入のキーポイントは経済性の見通しである。リン回収技術を導入する際のコストに焦点を絞り、コストに大きく影響を及ぼす処理規模の要因との関係を整理することで、リン回収技術導入の経済性の見通しを評価し、今後、下水処理場で導入検討を行う際の参考となることを目的とする。

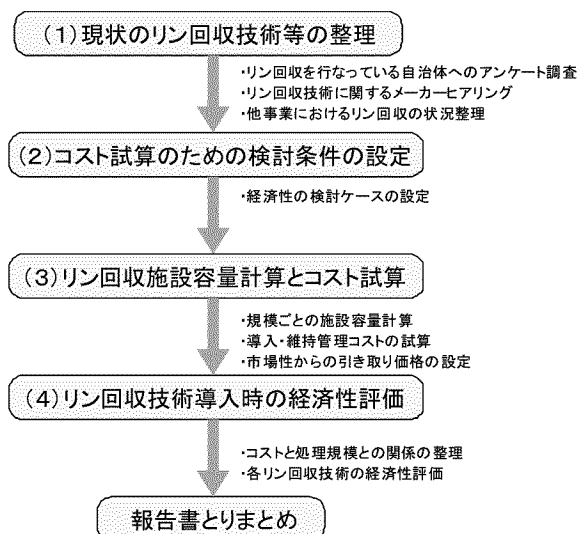


図-1 業務フロー

2. 研究体制

本研究は、下水道技術開発連絡会議における「下水道に関する新技術開発の共同研究」として、札幌市、仙台市、さいたま市、千葉市、東京都、川崎市、横浜市、新潟市、静岡市、浜松市、名古屋市、京都市、大阪市、堺市、神戸市、岡山市、広島市、北九州市、福岡市、(財)下水道新技術推進機構で共同実施した。

3. 研究内容

本調査研究業務のフローを図-1に示す。

(1) 現状のリン回収技術等の整理

下水道分野及び他分野において、現在、開発・実用化されているリン回収技術について、自治体等へのアンケートをも含めた資料収集を行い、技術の概要・特長、技術導入事例、運転管理面での課題・問題点について整理する。

(2) コスト試算のための検討条件の設定

リン回収技術を導入するにあたって、試算のための検討条件を設定する。

(3) リン回収施設容量計算とコスト試算

(2)で設定した検討条件に基づき、リン回収施設の容量計算を行うとともに、建設コストや維持管理費用のコスト試算を行う。

(4) リン回収技術導入時の経済性評価

(3)で試算したコストと処理規模との関係を整理し、リン回収技術導入の際の経済性評価を行う。

4. 研究結果

4.1 現状のリン回収技術等の整理

(1) 下水道及びし尿処理分野の技術

下水道及びし尿処理分野の技術を表-1に示す。

(2) 下水道分野以外の技術の整理

1) 液晶製造工場からのリン回収

工業的にはリンは、半導体や液晶の製造に欠かせない物質である。現在は、携帯電話や大型テレビに利用されている液晶製造に高濃度のリンが大量に使用され、廃液、洗浄排水として排出、水処理にて汚泥として産業廃棄物処分されている。

この洗浄排水からリンを回収する技術には、水酸化カルシウムを添加してリン酸カルシウムとして沈殿させる「リン酸カルシウム法」、イオン選択性を利用した「イオン交換法」、下水と同様のMAP法やHAP法がある。

2) 鉄鋼スラグからのリン回収

鉄鋼材料にとってはリンは、低温脆性を助長する最も有害な不純物の一つであり、製鋼工程では徹底的な脱リン処理がなされており、溶鉄中のリンは大部分が鉄鋼スラグ中に分配除去されている。

表-1 下水道及びし尿処理分野におけるリン回収技術一覧

処理方法		処理対象	技術の概要	取り組み状況
①	晶析法	MAP法	消化反応で発生する返流水や消化汚泥にマグネシウムを添加し、リン酸マグネシウムアンモニウム(MAP)結晶を生成する方法。	大阪市大野下水処理場(建設中) 島根県宍道湖流域下水道(運転中) 福岡市和白、東部、西部水処理センター(運転中)
②		HAP法	りん酸態りんを含む返流水や処理水にカルシウムを添加し、ヒドロキシアパタイト結晶を析出させる方法。	岐阜県下呂市(運転中)
③		フォストリップ法	返送汚泥の一部を膜分離槽に導き、嫌気的条件下で、汚泥からりんを放出させ、放出したりんを結晶化させて回収する方法。	福島県北塩原村裏磐梯浄化センター(運転中)
④		Heat Phos法	余剰汚泥に熱を加えて可溶化し、可溶化した液からりんを析出させる方法。	広島県福山市芦田川浄化センター(実機規模試験中)
⑤	酸・アルカリ溶出		焼却灰からりんを酸・アルカリで溶出させ、溶出液からりんを析出させる方法。	岐阜市北部プラント(建設中)
⑥	還元法	完全還元溶融法	焼却灰を還元溶融し、りんを黄りんとして揮発させ回収する方法。	
⑦		部分還元溶融法	焼却灰を部分的に還元して、りん化合物を回収する方法。	
⑧	吸着法		りん吸着力をもつ吸着剤を用いて、りんを回収(吸着脱離反応の利用)する方法	
⑨	炭化法		脱水汚泥を炭化してそのまま利用する方法。	群馬県県央浄化センター(計画中)

出典：国土交通省：下水道資源利用とリン回収の動向について、第46回下水道新技術セミナー
下水道新技術推進機構、H21年2月

脱リンスラグの組成はプロセスの詳細や製造鋼種によってかなり異なるが、基本成分は $CaO-FeO-SiO_2-P_2O_5$ である。この脱リンスラグを磁気分離することにより、実験レベルでリン回収を行う試みがなされている。実験結果として、リン回収物のリン含有率は P_2O_5 換算で 10～11% という結果が報告されている。

なお、実機の導入等を行われていない。

(3) 下水道施設における現況把握

リン回収を実施している自治体を対象に、施設概要、運転状況、コスト等に関するアンケートを実施し、実績による検討を行った。

⇒対処として、年2回程度クエン酸洗浄を行っている。

2) 引取先との問題とその対処

・1トンプレコンバックに詰め込んだMAPに塊化物が多量に混じた。

⇒対処として、設備の一部改良とフレコン投入の際に金網で除去した。

・し渣等の混入により引取先から苦情が出たことがあった。

⇒対処として、乾燥後袋詰め前にスクリーンをかけて、し渣等を除去している。

・原水中のゴミ等がMAPに混入した。

表-2 アンケート検討対象の自治体及び対象設備 (H21. 8 現在)

No.	自治体名	処理場名	リン回収方法	設置年月	施設規模	摘要
1	福岡市	西部水処理センター	汚泥処理返流水からのMAP法	H8.3	122m ³ /日 × 6基	
2		東部水処理センター	脱水機分離液に対するMAP法	H8.3	117m ³ /日 × 6基	
3		和白水処理センター	汚泥処理返流水からのMAP法	H8.4	106m ³ /日 × 2基	
4	島根県	宍道湖東部浄化センター	返流水からのMAP法	H10.9	500m ³ /日, 150m ³ /日	
				H13.3	500m ³ /日	
5	大阪市	大野下水処理場	消化汚泥からのMAP法	H21.3	300m ³ /日 × 1基	実績データ未
6	仙北市	仙北市汚泥再生処理センター	し尿処理からのHAP法	H21.3	60KL/日	
7	群馬県	県央水質浄化センター	下水汚泥炭化物のリンを回収	—	—	未建設
8	岐阜市	北部プラント	汚泥焼却灰からの溶出	H22.2予定	灰5t/日 × 1基	未稼働
9	十津川村	十津川村衛生センター	生物処理水からのMAP法	H22.3予定		未稼働

アンケート検討対象の自治体及び対象設備を表-2に示す。

実機が稼働している施設において、現在までに発生した運転時の問題と対処方法を記載する。

1) 設備運転上の問題とその対処

・MAP 設備における原水ポンプ、循環ポンプ、返流水等配管のMAPによる閉塞が年間多くて10回発生した。
⇒対処として、分解清掃及び酢酸溶液にて循環洗浄を実施した。

・消化汚泥引き抜き管から脱水機設備までの配管がMAPにより閉塞した。
⇒対処として、薬品洗浄業務を実施した。

・配管、反応塔、貯留槽内にMAPが析出する。
⇒対処として、清掃、析出物除去を頻繁に行っている。

・配管にMAPが詰まる。

⇒対処として、乾燥機出口に金網を設置し除去している。

・引取先の肥料会社が狂牛病予防のため肥料製造を中止したため、出荷出来ず埋め立て処分としたことがある。

(4) リン回収物の肥料利用について

下水からのリン回収物は、肥料取締法を遵守し肥料登録がなされれば肥料として販売することができる。ただし取引先が求める性状、価格、需要量に関しては、各地域特性によって条件が大きく異なる。そのため、地元の農協や農家が肥料として求める成分、価格（利用先までのデリバリー性）及び需要量について詳細なヒアリングを行い、把握することが重要である。

現在登録されている肥料のうち、下水汚泥を用いた肥料の事例を表-3に示す。

4.2 コスト試算のための検討条件の設定

算定対象とする下水処理施設は、他の処理場からの汚泥を受け入れておらず、汚泥処理を自前で行っている処理施設とする。水処理において高度処理を行って

表-3 下水汚泥を用いた登録肥料の事例

分類	肥料の種類	製造方法	登録例
汚泥肥料	下水汚泥肥料	脱水、乾燥等	北海道等
	工業汚泥肥料	下水汚泥と生ごみ等を混合し、脱水・乾燥等	珠洲市
	混合汚泥肥料	2つ以上の汚泥肥料を混合	真狩村
	焼成汚泥肥料	汚泥肥料を炭化、焼却	群馬県
	汚泥発酵肥料	汚泥肥料を発酵	網走市等
複合肥料	熔成汚泥灰複合肥料	P-ACE法(還元溶融)	※実証プラント
	化成肥料	MAP法	福岡市、島根県
りん酸質肥料	副産りん酸肥料	アルカリ溶出法	岐阜市(予定)

参考文献：下水汚泥リサイクル資料一覧，(社)日本下水道協会 [H20年度 下水・下水汚泥からのリン回収・活用に関する検討会，第2回委員会 (H21.3月) 資料より]

いない場合は標準活性汚泥法による処理を行っているものとし、高度処理ではA0法やA₂O法等で生物学的リン除去を行っているものとする。コスト試算のための検討条件を表-4に示す。

表-4 コスト試算のための検討条件

ケース	嫌気性消化	高度処理
ケース①	なし	なし
ケース②	あり	なし
ケース③	なし	あり
ケース④	あり	あり

※ 水処理において凝集剤を使用しない。また、汚泥は焼却処理まで行う。

※ 嫌気性消化は単段とし、全量脱水を行う。

4.3 リン回収施設容量計算とコスト試算

(1) リン収支試算結果

リン収支試算結果の一例を図-2に示す。

図-2の例は、ケース①(標準法・消化なし)における処理水量が100,000m³/日の場合である。

ケース別のリン負荷量の流れに対する特徴は以下のとおりである。

1) ケース①：標準法-消化なし

流入下水を100%とした場合、処理水に30%、脱水ケーキに70%が配分され、焼却後には60%近くが灰として残存する。返流水へは、全リンとして17%程度移行している。

2) ケース②：標準法-消化あり

ケース①と比較して、嫌気性消化工程が入るため、脱水ろ液へ移行するリン負荷量の割合が高くなる。(ケース①：8%→ケース②：11%)

標準法であるため、返流水のリン負荷が高くても水処理におけるリン除去能力はケース①と同じであると考えられ、ケース①と比較して処理水中のリン負荷の割合(ケース①：30%→ケース②：34%)が若干高くなる。その分、脱水ケーキへ移行するリン負荷の割合が若干低くなる(ケース①：70%、ケース②：66%)。

3) ケース③：高度処理-消化なし

高度処理となるため、処理水中のリン負荷の割合がケース①、②と比較して低くなる(ケース①：30%→ケース③：15~16%)。4つのケースの中で、処理水として放流されるリン負荷が最も低くなり、脱水ケーキ及び焼却灰中へ移行するリン負荷が最も高くなる(脱水ケーキ中85%、焼却灰68%)。

4) ケース④：高度処理-消化あり

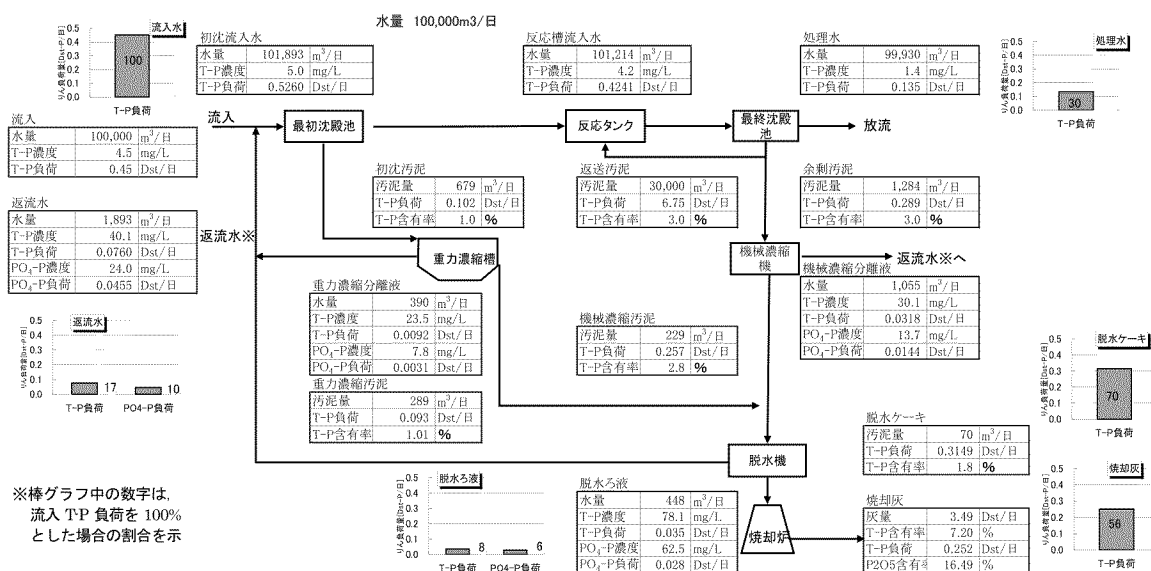


図-2 リン収支試算結果の一例〔ケース①(標準法・消化なし) 100,000m³/日〕

水処理で除去されるリン負荷が高く、消化工程で溶出するリン負荷が高くなるため、4つのケース中で最も脱水ろ液及び返流水中のリン負荷の割合が高い(リン負荷:脱水ろ液 13%, 返流水 24%)。

(2) 対象とするリン回収技術

対象とするリン回収技術はHAP, MAP, 炭化処理の3技術とする。今回調査において検討を行う各技術の適用ケースを表-5に示す。

表-5 各技術の適用ケース

ケース	リン回収技術の適用箇所			
	HAP法 (返流水)	HAP法 (脱水ろ液)	MAP法 (脱水ろ液)	炭化処理
ケース①				○
ケース②			○	○
ケース③	○	○		○
ケース④	○	○	○	○

(3) リン回収設備の設置面積

該当水量ごとに各技術の適用箇所に対して、必要設置面積をメーカーに対するヒアリングにより設定した。

リン回収設備の必要設置面積を図-3に示す。

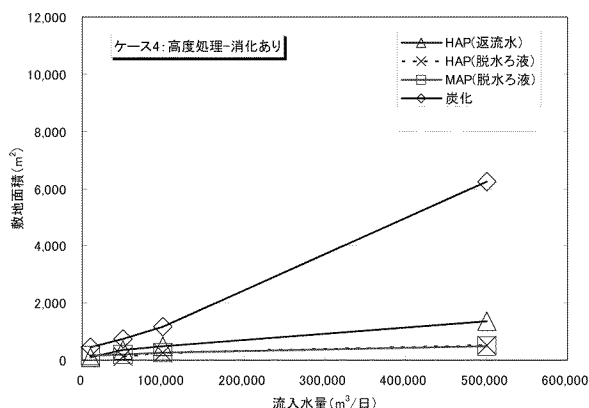


図-3 リン回収設備の必要設置面積

脱水ろ液に対するHAPとMAPはほぼ同程度の必要設置面積である。次いで返流水処理のHAPの必要設置面積が少ない。炭化で必要面積が大きい理由は、試算条件である施設の最大規模が小さく、処理規模を増やす場合には施設を複数設置することとなり、スケールメリットが現れないことである。将来の施設設計条件の改善により、必要設置面積を抑制できる可能性がある。

(4) コスト試算

建設費の年価を試算し、維持管理費との合計に

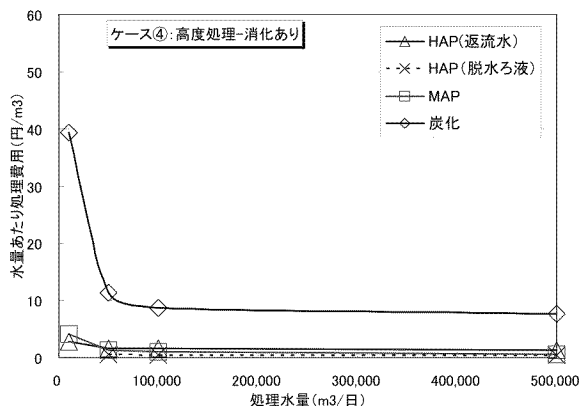
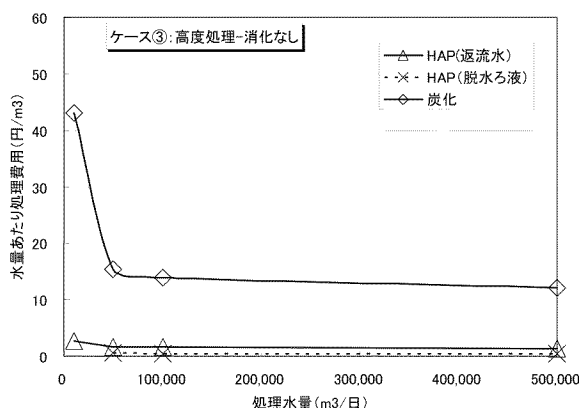
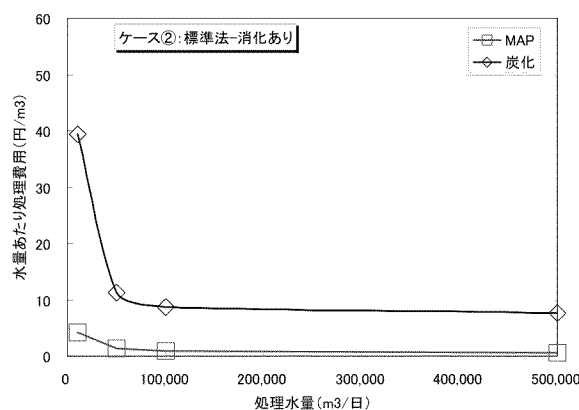
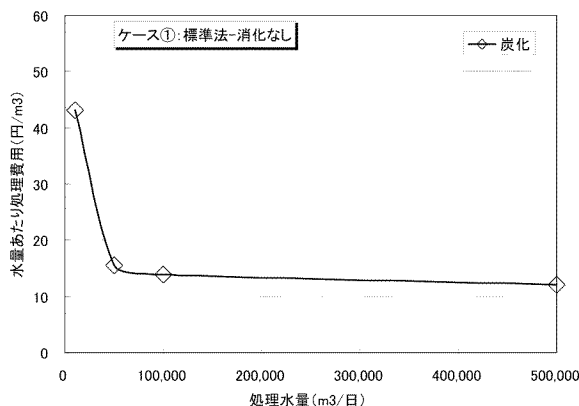


図-4 下水処理場流入水量あたりのリン回収にかかる費用

表－6 リン回収されたリンの売却単価の実績

自治体	リン回収物	年間引取量 (t/年)	引き取り先	価格 (円/t)	取引形態、摘要
A	MAP	49～134	肥料会社	21,000	1tフレコンバッグ(処理場引渡し)
B	MAP	122～148	肥料会社	10,000～12,000	処理場引渡し(梱包無し), H21は50,000円/t

※引取量、価格はH17～20の範囲

よる年間費用の比較を行った。

下水処理場流入水量あたりのリン回収にかかる費用を図－4に示す。

4.4 リン回収技術導入時の経済性評価

処理規模(図－4中では「流入水量」と表現)が同じであれば、ケース①～④の違いに係わらず同じ年間費用となる結果となった。HAP法であればケース③とケース④の返流水及び脱水ろ液に適用されているが、ケース③と④での年間費用は同じであり、MAP法でもケース②とケース④での年間費用は同じであった。これは、建設費を規模により設定することに加え、原水リン濃度に対する維持管理費の差が生じない概算的な試算条件を採用しているためである。

流入水量当たりの費用として試算した場合、炭化処理で7.7～43.1円/m³、HAP法で0.4～2.7円/m³、MAP法で0.6～4.2円/m³と試算された。なお、スケールメリットが明確に現れるのは50,000m³/日付近であり、それ以上の処理規模において全ての処理方式で流入水量あたりの処理費用がほぼ一定となる結果を得た。試算結果は現時点の設備コスト等に基づくものであり、技術開発および事業の進展に伴い、さらなるコスト低下が期待される。

なお、図－4の費用試算の結果にはリン回収物の売却益を反映させていない。参考までに、自治体アンケートにおける売却実績を有するリン回収物の売却単価を表－6に示す。リン回収物の売却実績は、現時点でMAP法のみとなっている。

5. 今後の課題

今回の調査研究においては、標準的な水処理施設におけるケーススタディとして建設費及び維持管理費の調査を行った。水に対して処理を行うHAPやMAPの方が経済的には安価となるが、返流水等からリンを回収するだけなので、汚泥の最終処理形式とはならない。このため別途汚泥処理処分費用が必要となる。逆に、炭化処理はコストが大幅にかかるものの、汚泥の最終処分費を考慮せずに済むという点では経済性に優れることとなる。今後は下水汚泥焼却灰からのリン回収にかかる費用についても合わせて整理を行う予定である。

また、今回のコスト試算においてはリン回収物の売却益を反映させていないが、地域特性やリン鉱石単価の上昇等、社会的背景の変化に応じて回収リンの価値がドラスティックに変化するものと考えられ、今後、経済性評価へリン回収物の売却益を反映させる場合は注意が必要である。さらに、リンの回収だけではなく、例えば返流水からリンを回収した場合には高度処理が不要となることや、灰から回収した場合には残存する灰の価値が上がる(リン含有量が少なくなるため、セメント工場等で使いやすい品質となる)こと等の付加価値に対しても検討を行っていく必要がある。

最後に、今回調査で試算したコストについては、標準的処理施設のみであったが、汚泥の集約処理を行っている施設や高度処理において凝集剤を添加している施設等、下水処理施設のリンの挙動に大きく影響を及ぼす処理方式が考えられるため、実際の処理施設に対してもケーススタディを行い、検討を進める必要があると考えられる。

●この研究を行ったのは

研究第一部長
資源循環研究部副部長
研究第一部主任研究員

森田 弘昭
落 修一
加藤 薫

●この研究に関するお問い合わせは

研究第一部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部主任研究員

森田 弘昭
山下 洋正
加藤 薫