

〈特集〉

生活排水処理におけるリン資源回収の環境保全性について

鶴巻峰夫¹⁾, 星山英一²⁾¹⁾和歌山工業高等専門学校 (〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77 E-mail: tsurumaki@wakayama-nct.ac.jp)²⁾八千代エンジニアリング(株) (〒810-0062 福岡県福岡市中央区荒戸2-1-5 E-mail: hoshiyama@yachiyo-eng.co.jp)

概要

リン資源循環のための施策を実施していくことは、我が国における安定的な農業の継続や環境保全にとって重要である。一方で社会を取り巻く状況から施策の重要性を判断するに際して、一つの側面から判断することはできないと考えられる。筆者らはライフサイクル分析によって生活排水の処理過程におけるリン資源回収技術の評価を行い、リン鉱石からリン酸肥料を製造する場合と比較を行った。その結果、地球温暖化影響やエネルギー資源の消費の観点からは必ずしも環境負荷削減に直結しないものの富栄養化影響を統合した観点では、環境保全効果の方が大きいと考えることができることがわかった。

キーワード：生活排水処理, リン資源循環, 地球温暖化影響, 富栄養化影響, 資源消費

原稿受付 2009.4.28

EICA: 14(1) 3-7

1. はじめに

我が国においてはリン酸肥料の原料となるリン鉱石の鉱床がないため、消費されているリン酸肥料原料のリンはほぼ100%輸入に頼っている状況である。リン資源は現在の需要で今後60年ほどの可採埋蔵量があるとされるものの人口増やそれともなう需要増等を考慮すれば資源の対策が必要であるとされている¹⁾。

一方、我が国におけるリンの収支では、リン鉱石やリン酸系肥料としての輸入量が2002年ベースで252千t-Pであるのに対して他の要素が486千t-Pであり、2倍近くの量となっている¹⁾。生活排水からのリン排出要因となる人への摂取量では112千t-Pである¹⁾。

このことは、リン資源のリサイクルによって、リン鉱石やリン酸肥料の輸入を大幅に削減できる可能性を有していることを意味している。また、リンは閉鎖性水域での富栄養化の原因物質とされており、リン資源循環は環境保全の面でも重要な意味を持っている。

このように、リン資源循環は重要な社会的問題として取り上げることができるが、現在、我々を取り巻く社会では多くの社会問題や環境問題が存在し、一つの側面から判断で政策的事項を決定することはできないと考えられる。

ここでは、リン資源回収について地球温暖化影響、エネルギー資源消費、富栄養化影響の観点から筆者らが行った検討について報告を行う。

2. 生活排水処理過程でのリン回収について

近年、リン資源枯渇への配慮やリサイクルの重要性の認識等から、下水道等におけるリン資源回収技術の開発が活発に行われている²⁾。

実機としては福岡市や島根県の下水道終末処理施設がある。新規として岐阜市公共下水道のほかし尿や浄化槽汚泥を処理する汚泥再生処理センターでは秋田県仙北市の施設が供用または建設中である。技術的には、福岡市、島根県の施設では脱水ろ液に対してMAP法による回収が行われており^{3,4)}、岐阜市では汚泥焼却灰からの抽出回収⁵⁾、仙北市の事例では生物処理膜分離水に対してHAP法による回収が行われている⁶⁾。

現在の技術動向を見ると、下水道終末処理施設については汚泥処理系において、汚泥再生処理センターにおいては、水処理系においてリン回収設備が組み込まれる方法がとられている^{3,4,7,8)}。

3. 生活排水処理でのリン収支と回収可能量

3.1 下水道終末処理施設におけるリンの収支

下水道終末処理施設においては、汚泥系を含めたリンの水質についての公開データは少ない。Table 1は、公開データにもとづいて、筆者がリンの収支について検討を行ったものである。

リンは基本的に処理過程での減衰はほとんどないと考えてよいので、焼却処分の場合では除去したリンは、焼却灰として系外に排出される。現在の技術では、MAP法は嫌気性消化を備えた処理施設の脱水ろ液

Table 1 下水道終末処理施設におけるリン収支の例

単位 (流入量に対する%)

項目	A 処理場	B 処理場	C 市全体	
MAP 回収	あり	あり	なし	
流入	100	100	100	
汚泥	初沈・終沈汚泥	125	200	84
	濃縮汚泥	121	123	64
	脱水汚泥	82	89	58
汚泥系循環水	濃縮分離水	5	77	39
	脱水分離水	38	34	7
	洗煙排水等	4	—	4
放流	2	7	38	
汚泥系系外排出	焼却灰	47	88	53
	MAP 回収	19	5	—
	その他	32	—	—
水処理	ステップ 流入式二段 A2O 法	嫌気好気法	標準法, A2O 法等 の併用	
汚泥処理	濃縮～消化 ～脱水～焼 却	濃縮～消化 ～脱水～場 外 (焼却)	濃縮～消化 ～焼却	

出典：既存資料^{9, 10)}をもとに筆者が作成した。

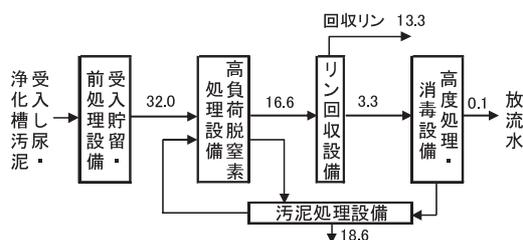
を対象に適用されているが、脱水ろ液への循環量は流入量に対して 1/3 程度となるようである。ただし、MAP 回収の対象となる $PO_4\text{-P}$ 濃度は T-P 濃度に対して 80~90% 程度と考えられる^{11,12)}。技術評価の図書を参考にすると、焼却灰からの回収は含有リン量の約 66%、MAP による回収は、 $PO_4\text{-P}$ に対して 80% 程度と想定できる^{8,13)}。これらの数値と Table 1 での B 処理場での水処理でのリン除去率を使うと、現在の技術での回収可能量としては、焼却灰からの回収が約 61% (水処理除去 93% × 回収率 66%)、脱水ろ液からの MAP 法での回収で約 23% (脱水ろ液の T-P 比 34% × $PO_4\text{-P}$ の比率 85% × 回収率 80%) となり、焼却灰からの回収がリン回収としては有望となる。

ただし、下水汚泥の処理及び有効利用方法については、総合的見地から決定すべき事項である。

3.2 汚泥再生処理センターにおけるリンの収支

汚泥再生処理センターにおいては、生物処理膜分離水から HAP 法で回収する方法⁷⁾と前処理凝集膜分離水から MAP 法で回収する方法⁸⁾が適用されている。

HAP 法によるリン収支は Fig. 1 に示すとおりであるが、汚泥再生処理センターにおいては、流入リン量の約 45% 前後の回収が可能である。

Fig. 1 汚泥再生処理センターにおけるリン収支の試算例⁸⁾

4. リン回収による環境保全性の検討

4.1 CO₂ 排出量に関する検討

ここでは、筆者らが行った検討¹⁴⁾をもとに CO₂ 排出量について述べる。この検討は概略を把握するために行ったもので、現在詳細化の検討を行っている状況であり、既往検討¹⁴⁾に対して多少の数値の見直しがある。

(1) 検討ケース

検討ケースは、次のとおりであり、ケース名称には備えている施設・設備をつけている。その状態をベースラインとして環境負荷の増減を検討する。

- ① リン除去 + 嫌気性消化を有する下水処理施設 (脱水ろ液からリン回収)
- ② リン除去 + 嫌気性消化を有する下水処理施設 (汚泥焼却灰からリン回収)
- ③ 標準法の下水処理施設 (リン除去を行って汚泥焼却灰からリン回収)
- ④ 汚泥再生処理センター (生物処理膜分離水からリン回収)

(2) 検討条件

検討条件については、既報¹⁴⁾に詳術したが、概略以下のとおりである。

① リン回収技術単位操作のインベントリ分析

(a) 対象技術である HAP 法、MAP 法、下水汚泥焼却灰からの回収法の資材・エネルギー等の消費量は各技術評価図書の経済性評価^{7,8,13)}のモデル設計で採用された値を基本的に利用してインベントリ分析を行う。なお、各設備の処理フロー上の位置は Fig. 2~3 に示すとおりである。

焼却灰からの回収では出典にもとづいて廃熱の有効

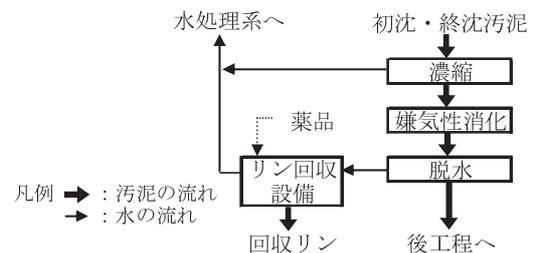
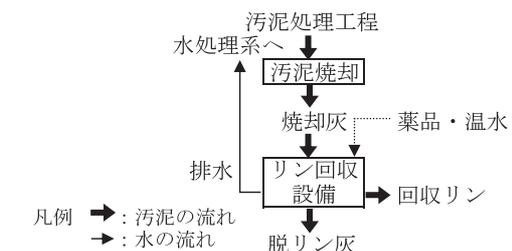
Fig. 2 下水処理施設での MAP 法の処理フロー³⁾Fig. 3 アルカリ性溶液添加による焼却灰からのリン回収処理のフロー¹³⁾

Table 2 検討におけるベースラインからの環境負荷増減要因

ベースラインとなる施設条件	リン回収条件	増減区分	内容
リン除去+嫌気性消化を有する下水処理施設	脱水ろ液からのリン回収	増加 削減	リン回収設備 汚泥処理(リン除去分)
リン除去処理を有する下水処理施設	焼却灰からリン回収	増加 削減	リン回収設備 廃熱有効利用
標準法の下水処理施設	焼却灰からリン回収	増加	リン回収設備, リン除去設備, 汚泥量増加対応
		削減	廃熱有効利用
汚泥再生処理センター	生物処理膜分離水	増加	リン回収設備
		削減	後段凝集分離, 汚泥減量

利用を考慮する¹³⁾が、廃熱利用の確実性は評価図書上からは判断できなかった。

以上の検討における環境負荷の増減要因を Table 2 にまとめる。

(b) 比較の機能単位としては、各回収法とも有効なリン酸含有量(ク溶性リン酸)が、市販のリン酸肥料と同程度あり、リンの形態もほとんどがク溶性リン酸の形態をとっているためリン量当たりの肥効は同等であると仮定して、回収したリン量当たりとする。

(c) 比較は LCA 原単位を用いてライフサイクル負荷量で行う。また、汚泥処理や水処理過程についても検討範囲とする。

(d) LCA 原単位は基本的に「建物の LCA 指針」¹⁵⁾に記載されたものとし、一部には他の検討事例^{16,17)}からの二次原単位を用いた。

(e) 建設時・廃棄時については稼働時の負荷に対する比率で算定を行う。設定する比率は、検討のうち HAP 法で行った検討結果を他の手法に当てはめるものとする。

② 下水道でのリン除去処理(リン高度処理)の検討条件

脱リン処理は、現在、A2O 法により脱窒処理と併用する方式が広がりつつあるが、ここではリンだけの処理とするため PAC を投入する凝集剤添加活性汚泥法を想定する。なお、リン除去処理について既往検討¹⁴⁾の結果の見直しを行っている。

③ 比較対象のリン酸肥料製造について

リン酸肥料製造については、既存の検討事例¹⁸⁾が参考にできる。同文献では4種類のリン単肥についてインベントリ分析がなされており、概ね 2.5~7.3 kg-CO₂/kg-P の範囲にあった。また、同文献に記載されている年間消費量から加重平均した値として約 4.9 kg-CO₂/kg-P という値が得られた。この数値を比較の対象とする。

なお、上記のようにリン酸肥料についてもインベントリ分析に幅があることに留意して検討結果を判断する必要があることを示している。

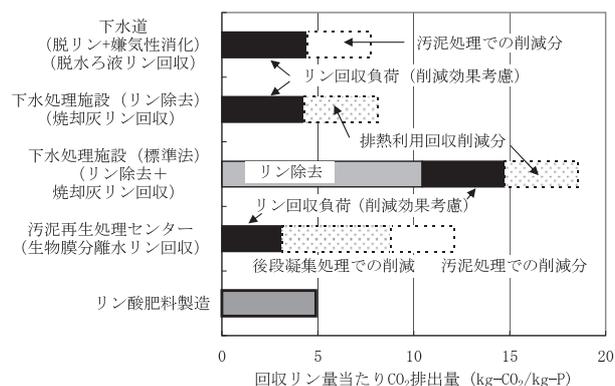


Fig. 4 回収リン 1 kg 当たりでの CO₂ 排出量

(3) ベースラインからの増加量と肥料製造で CO₂ 排出量の比較

ベースラインからリン回収を行う場合の、CO₂ 排出量の計算結果を回収リン 1 kg の数値として、リン酸肥料の値とともに Fig. 4 に示す。

リン回収設備における CO₂ 排出量は 8~12 kg-CO₂/kg-回収 P となるが、下水道終末処理施設水処理過程においてリン除去機能のある施設と汚泥再生処理センターでのリン回収では、汚泥処理量の削減や廃熱利用等の環境負荷削減要因を加味すると概ねリン酸肥料の製造と等しいかやや少ない値となっている。

このため、既にリン除去機能のある下水道終末処理施設等ではリン回収を前向きに考慮しても良い状況と考えられる。

一方で、リン除去機能のない下水道の場合には、リン回収が CO₂ 排出の面でも重荷になる可能性がある結果となった。

4.2 環境保全性について統合化評価の試行

(1) 統合化評価の考え方

前述のように、地球温暖化に関わる CO₂ 排出量の観点では、リン除去機能のない下水道終末処理施設において新たにリン除去を行ってからリン回収を適用することは CO₂ 増加要因となるという結果になった。しかし、東京湾、大阪湾等富栄養化が問題となる閉鎖性水域流域の施設においては少なくとも富栄養化防止の観点も加味して環境保全性を考慮する必要がある。

このため相違する環境問題を統合的に評価することが必要になる。このための手法として、ライフサイクルアセスメント(LCA)の研究分野では種々の検討がなされてきた。ここでは、産総研の研究成果である LIME²⁾を利用して統合的評価を試行する。

LIME (日本版被害算定型ライフサイクル環境影響評価手法: Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling) は、LCA における影響評価手法として、環境負荷によって発生する最終被害額を定量化して統合化を可能としたものであり、環境負荷要素毎の統合化係数の

Table 3 統合化評価の対象要素、係数値、検討対象の環境負荷量採用数値の根拠

環境問題の区分	環境負荷要素	統合化係数 ¹⁹⁾		統合化係数に乗じる環境負荷量の検討数値の算定方法
		単位	係数値	
資源消費	エネルギー資源 (原油換算)	円/kg	2.99	CO ₂ 排出量と同様の手法で算定した一次エネルギー消費量(MJ)の発熱量での原油量換算値
	リン鉱石	LIME2に係数がないため対象外		
温暖化影響	CO ₂ 排出	円/kg-CO ₂	3.20	「3.1」項で説明した値。ただし、環境負荷削減要素は除いた値
富栄養化影響	T-P	円/kg-P	974	新たに排水処理でリン除去を行うときの除去量

データベースとして提供されている。LIME2はその第2版である。

Table 3に検討対象とした統合化係数と環境負荷量の採用値の説明を示す。

(2) 検討条件等

検討対象としたのは、標準法の下水処理施設のケースとした。また、エネルギー資源、CO₂排出量の負荷要因のうち削減効果となる要因については不確定要素があるため考慮しないものとした。

(3) 統合評価

回収リン量1kg当たりでの統合的評価の結果を**Fig. 5**に示すが、リン除去の高度処理による富栄養化影響削減効果が温暖化影響やエネルギー資源の消費による環境負荷増を大きく上回る結果となった。

Fig. 5の結果の絶対値としての精度は、今後の検討で高めていく必要があるが、本試行では、リン資源回収によって増加する温暖化影響やエネルギー資源への影響に比較して削減できる富栄養化影響による効果が非常に大きい結果となった。このことは富栄養化が問題になる流域における下水道等施設でのリン回収は環境保全性の意義が大きいと判断する大きな根拠となると考えられる。

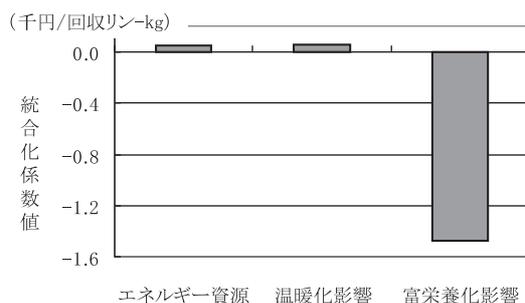


Fig. 5 統合化係数 (LIME2)¹⁹⁾を用いたリン回収に関する評価 (標準法の下水道処理施設 (リン除去処理+リン回収))

5. ま と め

これまでの報告では、概ね以下のことがまとめられる。

- (1) 我が国のリン収支を見ると、リン鉱石、リン酸系肥料でのリン輸入に対して、その他の輸入が2倍近くとなっており、リン資源循環でのリン資源保全への貢献が期待できる。
- (2) 現状のリン回収技術において、可能な回収量は流入に対して下水道終末処理施設では流入リン量の約20~60%、汚泥再生処理センターで約45%である。
- (3) リン回収技術の適用をCO₂排出量で見ると、リン回収部分だけであれば、リン鉱石からのリン酸肥料製造と同程度の負荷量であると考えられる。ただし、この場合、リン除去の高度処理が既に装備されていることが前提となり、リン除去機能を新たに付加すれば、その分は負荷量の増加要因となる。
- (4) LCAにおいて用いられる相違する環境問題に対して統合化して評価する手法を用いると、リン除去を新たに設けてからリン資源回収を行うときでも、富栄養化影響を削減できる場合は、リン除去による環境負荷増加を上回る環境改善効果が期待できると考えられる。

以上の結果から、リン資源回収は資源保全や環境保全の観点からの大きな効果が期待でき、今後の施策展開のための技術開発や仕組み作りを推進することの意義を示すことができたと言える。

なお、本稿での検討内容については、入手できた技術評価図書等^{7-8,13)}のよって行ったものであり、データの汎用性確保、精度等の改善が必要と考えている。そのうえで、資源・環境保全のほか、経済性を含めた検討によるリン資源循環システム構築に向けたシナリオづくりが今後の課題となる。

参考文献

- 1) 獨石油天然ガス・金属鉱物資源機構：金属鉱物資源マテリアルフロー 2006, 平成18年度調査レポート, pp.267-273 (2006)
(http://www.jogmec.go.jp/mric_web/jouhou/material/2006/P.pdf)
- 2) 加藤文隆, 高岡昌輝, 大下和徹, 武田信生：下水処理システムからのリン回収技術の展望と現状, 土木学会論文集G, Vol. 63, No. 4, pp. 413-424 (2007)
- 3) 飯島 宏：島根県における下水汚泥からのリン資源の回収について——造粒脱リン設備の現況および課題——, 再生と利用, Vol. 26, pp. 38-44 (2003)
- 4) 柳橋唯信：福岡市のMAP法によるリン回収の現状について, 再生と利用, Vol. 117, pp. 24-27 (2007)

- 5) 岐阜市：広報資料
(<http://www.city.gifu.lg.jp/c/01021204/01021204.html>) 岐阜市 HP (2005)
- 6) アタカ大機(株)：広報資料
(http://www.atk-dk.co.jp/xml/docs/ATK_15.pdf) (2006)
- 7) 財団法人環境衛生センター：廃棄物処理技術検証 第3号 し尿と浄化槽汚泥からのアパタイト法によるリン回収システム, pp. 109-110 (2003)
- 8) 財団法人環境衛生センター：廃棄物処理技術検証 第5号 MAP法によるリン資源回収資源化システム, p. 110 (2003)
- 9) 国土交通省：第2回下水・下水汚泥からのリン回収・活用に関する検討会配付資料 資料3
(<http://www.mlit.go.jp/common/000034506.pdf>) (2009)
- 10) 川崎市：平成18年度水質管理年報 (2007)
- 11) 島根県宍道湖流域下水道管理事務所：提供資料 (MAP設備流入水質) (2008)
- 12) 横浜市：平成19年度水質管理年報, p. 272 (2008)
- 13) 下水道技術開発プロジェクト委員会：下水汚泥焼却灰からのりん回収技術に係る技術評価書, p. 41 (2006)
- 14) 鶴巻峰夫, 吉田綾子, 星山英一：リン資源循環を実現するシステム構築のための基礎的条件に関する研究, 環境システム研究 論文集, Vol. 36, pp. 217-226 (2008)
- 15) 社団法人建築学会：建物のLCA指針, 添付CDデータ, AIJDATA95_V2.1 (2003)
- 16) 鶴巻峰夫：環境調和性を考慮した排水処理システムの評価手法に関する研究, 東北大学博士論文, pp. 125-139 (1998)
- 17) 財団法人東京都市町村自治調査会：LCAとコストからみる市町村廃棄物処理の現状, pp. 69-70 (2003)
- 18) 稲葉敦：LCAの実務, 社団法人産業環境管理協会, p. 44 (2005)
- 19) 社団法人産業環境管理協会：JLCA-LCAデータベース
(<http://www.jemai.or.jp/lcaforum/index.cfm>) (2008)