

# 汚泥再生処理センターにおける余剰汚泥削減とリン回収技術の組み合わせ効果について

Combination of Excess Sludge Reduction with Phosphorus Recovery at Sludge Resource Recycling Treatment Centers



船石圭介 Keisuke Funaishi ①  
山口 滋 Shigeru Yamaguchi ②  
奥野芳男 Yoshio Okuno ③

## あらまし

当社は汚泥再生処理センターにおけるリン回収技術（HAP法）を開発し、これまでに6施設が稼働している。リン回収技術は初期費用が安く導入が容易な反面、近年のし尿等の希薄化や浄化槽汚泥混入比率の増大に伴ってリン回収量の減少が懸念されている。

2014年に稼働を開始した池野山環境衛生センターでは、汚泥削減技術「DNアシスト®」を導入しており、余剰汚泥発生量の削減と汚泥からのリン溶出によるリン回収量の増加について実態を調査した。

DNアシスト®による汚泥削減効果は理論発生量に対して最大34.6%で、リン回収量の増加効果はし尿等由来に対して最大45.5%増加し、組み合わせ効果が確認できた。

## Abstract

The HAP system of phosphorus recovery technology developed by Hitachi Zosen is employed at six Sludge Resource Recycling Treatment Centers to date. Phosphorus recovery involves low initial costs, and introduction is easy. In recent years, however, concerns have emerged that the diminishing concentration of human waste and increasing percentage of sludge in the septic tank might lead to decreases in phosphorus recovery quantity.

In the Ikenoyama Environmental Sanitation Center that started operation in 2014, we installed DN Assist technology to reduce sludge, and investigated the influence of the reduction of excess sludge and the elution of sludge from phosphorus on increases in phosphorus recovery quantity.

The DN Assist reduced the quantity of sludge by up to 34.6% of the theoretical value, and increased the quantity of phosphorus recovery by up to 45.5%, confirming the effectiveness of combining the two technologies.

## 1. 緒言

生活排水の処理施設は大きく分けて、各戸から集水管で集めた汚水を処理する下水道処理の他に、汲み取りし尿および浄化槽汚泥を車両輸送して集約処理する我が国特有のし尿処理に分けられる。

し尿処理においては、し尿・浄化槽汚泥以外の有機性廃棄物として生ごみなどを受け入れ、汚泥の堆肥化やメタン発酵によるエネルギー回収、汚泥炭化、リン回収、

汚泥助燃剤化などの資源化を行う施設が汚泥再生処理センターとして位置づけられている<sup>1)</sup>。当社は2009年にリン回収設備を備えた全国初の汚泥再生処理センター<sup>2)</sup>を秋田県仙北市に建設して以来、これまでに6施設を建設している。

回収対象のリンは生物にとって欠かせない元素で、特に窒素、カリウムと並んで肥料の三大要素の一つとして農業生産において重要な資源となっている。

リンの産出源は古代生物が堆積して生成したりん鉱石と言われる埋蔵資源であるが、日本国内には採掘可能な鉱脈が無く、国内で使用する全量を輸入に依存している。世界的な人口増加による食糧増産の他、バイオ燃料需要などの高まりによって資源枯渇が懸念され<sup>3)</sup>、2008

① 環境事業本部 水処理ビジネスユニット 水処理技術部 技術士(上下水道)

② 環境事業本部 開発センター

③ 環境事業本部 開発センター 博士(工学)、技術士(衛生工学、上下水道、総合監理)

年にはリン鉱石の価格が約10倍に急騰したが、モロッコのリン鉱石埋蔵量が大幅に増加する<sup>4)</sup>などして価格は沈静化傾向にある。しかし食糧生産に欠かせないことに変わりはなく、各国が戦略物質として国内需要を優先する動きがあり、日本や欧州を中心として資源回収や農業生産における施肥量削減の取り組みも行われている。

また、埋蔵量は十分にあって、リン鉱石のうち高品質で安く採掘できるものは将来入手しにくくなる可能性も指摘されており<sup>5)</sup>、今後もリン資源の確保は重要な課題である。

し尿には下水処理場流入水より数十倍以上濃度が高いリンが含まれており、従来の水処理設備に回収技術を適用しやすいこと、人間の排出物由来であるため、重金属類の混入する恐れが少ないこともあり、実施への回収技術の導入が進んでいる。

汚泥再生処理センターのリン回収技術は、前凝集分離液からリン酸マグネシウムアンモニウム (MAP) を回収するMAP法と、生物学的脱窒素処理水からヒドロキシアパタイト (HAP) を回収するHAP法がある。

これらのリン回収技術では、し尿等に含まれるリンのうち、溶解性のリン酸態リン ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) のみが回収対象であり、汚泥中のリンは回収できないため、し尿の希薄化や浄化槽汚泥混入比率が高くなるに従って、リン回収量が減少する傾向にあった。

一方、し尿処理を含め、汚水処理施設からは汚濁物質を分解して余剰汚泥が排出されるため、その発生量を抑制・削減し、汚泥処分費を低減する試みが行われている。オゾン処理や超音波照射、物理破碎などの様々な汚泥削減技術は、オゾン発生器や超音波振動子、破碎機などの特徴的な機器を用いるために、初期費用や維持管理費を低く抑えることができず、また、電力使用量が多くランニングコストが高くなる可能性があった。

本施設に導入した汚泥削減技術「DNアシスト<sup>®</sup>」は、アルカリ薬剤の注入と攪拌貯留のみのシンプルな設備構成を特徴とし、初期費用や維持管理費を抑えられる。また、アルカリ処理によって汚泥から溶出した有機物や窒素・リンのうち、有機物は脱窒反応における炭素源として、リンはHAPとして回収し有効利用することができる。

本論文では、汚泥削減技術とHAP法によるリン回収技術を採用した汚泥再生処理センターでの性能調査結果を報告する。

## 2. 施設の概要

**2.1 施設の概要** 今回対象とするのは2014年に稼働を始めた池野山環境衛生センターで、施設概要を表1に、処理フローを図1に示す。

同センターが立地する古座川町は和歌山県南東部の内陸側にあり、清流古座川が流れる緑豊かな町である。串本町および古座川町のし尿・浄化槽汚泥の他、住宅団地等の生活排水処理施設であるコミュニティプラントや小規模下水処理施設から排出される余剰汚泥も受け入れている。

表1 施設概要

名称	池野山環境衛生センター	
処理能力	45kL/日	
	内訳 し尿	18kL/日
	浄化槽汚泥	24kL/日
	コミュニティプラント	1kL/日
	下水道汚泥	2kL/日
処理方式	膜分離高負荷脱窒素処理+高度処理	
資源化設備	リン回収(HAP法)	
汚泥処理	脱水後場外搬出	
竣工年月	2014年3月	

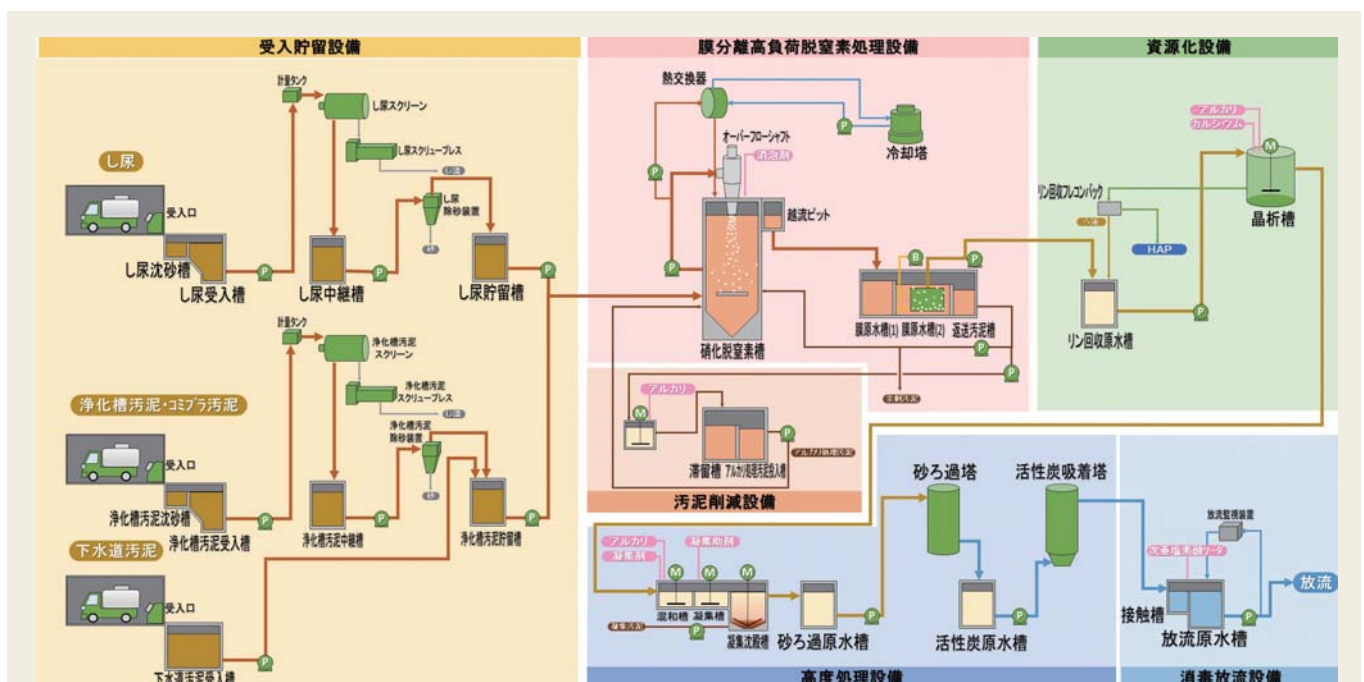


図1 処理フロー概要図

搬入されたし尿および浄化槽汚泥等は、夾雑物を除去のうえ、硝化脱窒素槽にて有機物と窒素を処理した後、膜分離設備により固液分離している。

膜透過液をリン回収原水として晶析槽に導入し、HAP法によるリン回収を行う。リン回収処理水は凝集沈殿、砂ろ過、活性炭による高度処理と消毒の後、放流している。

膜分離した汚泥は硝化脱窒素槽に返送されるが、返送汚泥の一部をアルカリ処理し、処理液を硝化脱窒素槽に投入している。余剰汚泥と凝集汚泥は汚泥脱水機で脱水し、脱水汚泥は場外搬出している。

**2.2 HAP法によるリン回収技術の概要** 本施設では、硝化脱窒素処理後の膜透過液中に含まれる $PO_4^{3-}-P$ をHAPとして回収する。HAPはリン酸カルシウム化合物の中で最も溶解度が小さい。

液中のリンは、以下の反応式でHAP  $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ として固定される。



リン回収設備は、晶析槽、晶析槽攪拌機と薬品注入設備、およびHAPの引抜貯留設備で構成される。晶析槽内では、膜透過液に対して塩化カルシウム溶液を添加するとともに、苛性ソーダでpH調整を行う。晶析槽の反応部内で種結晶を十分に攪拌・流動させ、結晶表面にHAPが析出して大きな結晶が得られる。晶析槽内には沈降分離部があり、HAPが沈降分離した上澄みが処理水として次工程に移送される。

**2.3 アルカリ処理による汚泥削減技術の概要** 余剰汚泥の一部にアルカリ薬剤を添加して高いpH条件で有機性汚泥を加水分解し、汚泥中の各種成分を溶出させる。さらにこの液を一定時間貯留することにより溶出成分の低分子化が進み、有機酸を中心とした有機物やアンモニア性窒素、 $PO_4^{3-}-P$ が増加する。この時の炭素と窒素の比率(C/N比)が高ければ、有機物は脱窒反応の炭素源として有効に利用されるため、窒素除去の安定化に寄与する。

また、アルカリ処理液は $PO_4^{3-}-P$ 濃度が高く、生物処理後の膜透過液の $PO_4^{3-}-P$ 濃度を引き上げてリン回収量を増加させることができる。

### 3. 調査方法

本調査では、汚泥再生処理センターにおけるリン回収に及ぼす汚泥削減技術の影響を確認するために、アルカリ処理を行わない比較対照期間のRUN1、アルカリ処理量を2段階設定したRUN2とRUN3について、それぞれ数ヶ月間に亘って搬入物の性状や各処理工程における水質、水量、汚泥収支を求めた。

**3.1 データ集計と採水頻度** し尿等の搬入量や硝化脱窒素槽への

投入量、リン回収処理水量、アルカリ処理量、余剰汚泥量などは、電磁流量計の積算値から一日あたりの水量を求めた。し尿等は2週間に1回の頻度で採取し、各種水質を分析した。

**3.2 分析方法** BOD、SS、窒素、リンなどの各水質項目は下水試験方法(2012)に、回収HAPの重金属類やリン酸等の成分は肥料分析法(1992)に従って分析を行った。回収HAPの観察にはキーエンス製マイクロスコプVHX-2000を使用した。

## 4. 調査結果

**4.1 施設の稼働状況** 施設へのし尿等の搬入量の平均値と浄化槽汚泥等混入比率を図2に示す。

し尿の搬入量は各期間の平均で11.9～13.0kL/日と、設計値18.0kL/日より少なく、浄化槽汚泥搬入量は平均で28.3～29.9kL/日と設計値24.0kL/日より多かった。下水道汚泥搬入量は平均で2.0～2.3kL/日と設計値3.0kL/日よりも少なかった。そして、浄化槽汚泥等混入比率は平均で70.4～72.4%で、設計値の60.0%よりも高かった。

調査期間中の除さ後し尿および浄化槽汚泥の性状の平均値を表2に示す。

設計要領<sup>6)</sup>に記載された2001年度～2003年度の精密機能検査データの平均値(表2の参考値)と比較すると、全項目とも低濃度化が進んでいることがわかる。また、リン回収技術の回収対象である $PO_4^{3-}-P$ 濃度はT-P濃度に対してし尿で37.5～61.1%、浄化槽汚泥で33.7～47.2%であり、どちらもRUN3が特に低くなっていた。

アルカリ処理量と余剰汚泥量に対する比率を図3に



図2 し尿等搬入量と浄化槽汚泥等の比率

表2 し尿等性状

項目	除さ後し尿				除さ後浄化槽汚泥			
	RUN1	RUN2	RUN3	参考※	RUN1	RUN2	RUN3	参考※
BOD (mg/L)	5,780	4,240	4,090	7,300	2,920	2,470	2,550	3,300
SS (mg/L)	2,640	2,780	4,070	6,000	4,110	3,640	4,460	8,300
T-N (mg/L)	1,930	1,580	1,570	2,300	548	672	691	780
T-P (mg/L)	167	171	167	270	97.1	106	106	150
$PO_4^{3-}-P$ (mg/L)	102	98.1	62.6	-	43.5	50.0	38.9	-
$PO_4^{3-}-P/T-P$ (%)	61.1	57.4	37.5	-	44.8	47.2	33.7	-

※汚泥再生処理センター等施設整備の計画・設計要領(2006改訂版)記載の平均値



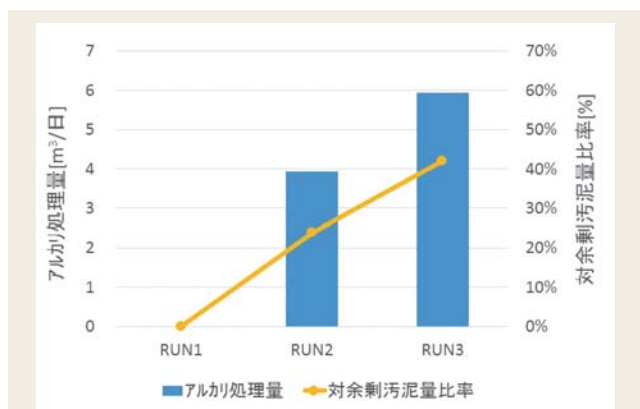


図3 アルカリ処理量と対余剰汚泥量比率

示す。余剰汚泥量に対するアルカリ処理量の比率は、RUN2で23.8%、RUN3で42.0%であった。

**4.2 リン回収** 施設全体のリン収支として、投入液とリン回収原水のP量と、晶析槽前後のT-P回収率を、図4に示す。

硝化脱窒素槽に投入されるし尿等由来のT-Pは各期間の平均で5.6～5.7kg/日であり、そのうち $PO_4^{3-}-P$ は2.1～2.9kg/日であった。リン回収原水のT-Pは1.3～1.9kg/日であり、投入液の $PO_4^{3-}-P$ に対しては46～66%に相当する。

晶析槽前後のリン除去率はRUN1が37.8%、RUN2が52.4%、RUN3は53.8%であった。し尿等投入量に対する施設全体のリン除去率は平均値で8.9～17.5%であった。搬入物に占める浄化槽汚泥等の比率が高く、リン回収原水のT-P濃度が平均値で25～35mg/Lと低いことや、特にRUN3では冬季で晶析槽内液温が低下し、HAP生成には難しい条件であったため、リン除去率は従来の報告<sup>2)</sup>よりも低い結果になったと思われる。

**4.3 汚泥削減効果** 余剰汚泥の実際の発生量、投入液性状から算出した余剰汚泥発生量の理論値、理論値に対する実際の発生量と理論値の差の比率を余剰汚泥削減率として図5に示す。余剰汚泥発生量の理論値は、投入液のSSからの余剰汚泥発生率を95%、投入液のBODからの余剰汚泥発生率を50%、硝化脱窒素槽内浮遊物質 (MLSS) の内性呼吸による汚泥減量を0.012

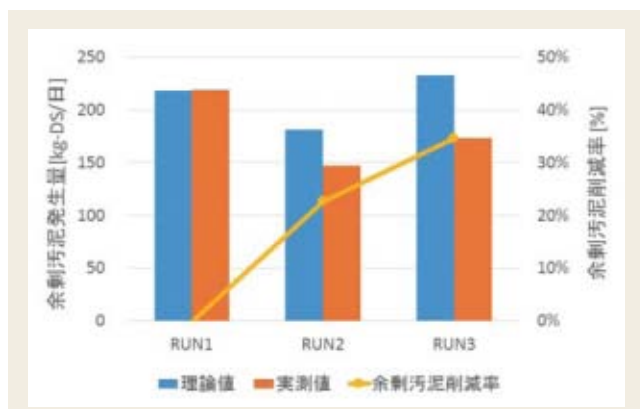


図5 余剰汚泥発生量(理論値と実測値)

日<sup>1)</sup>として求めた。余剰汚泥の実際の発生量は、引抜汚泥量の他に硝化脱窒素槽や膜分離原水槽のMLSS濃度の増減を補正して求めた。

比較対照としてアルカリ処理を行っていないRUN1の余剰汚泥発生量の理論値は218kg/日で、実際の余剰汚泥発生量219kg/日と同等の値であった。

一方、アルカリ処理を行ったRUN2の余剰汚泥発生量は理論値に対して33.3kg/日削減し、アルカリ処理量を増やしたRUN3は同じく59.9kg/日削減できており、余剰汚泥削減率として22.6%と34.6%であった。

アルカリ処理量に対する余剰汚泥削減量の比率はRUN2で63.7%、RUN3で69.7%であり、アルカリ処理量に対して一定割合で余剰汚泥が削減できていることが確認できた。

**4.4 リン溶出効果** 硝化脱窒素槽に投入されるし尿等の $PO_4^{3-}-P$ 負荷と、アルカリ処理液の $PO_4^{3-}-P$ 負荷の比率からリン回収原水のアルカリ処理液由来のリン濃度を算出して図6に示す。

アルカリ処理を行うことによって、RUN2で0.84kg/日、RUN3で0.86kg/日の $PO_4^{3-}-P$ が硝化脱窒素槽に投入された。これはし尿、浄化槽汚泥由来の $PO_4^{3-}-P$ 負荷合計量の29.5%と45.5%であった。この比率をリン回収原水のリン濃度の割合として算出すると、余剰汚泥のアルカリ処理により、リン回収原水のリン濃度はRUN2で10.1mg/L、RUN3で11.7mg/Lの増加効果があり、リン回収量の

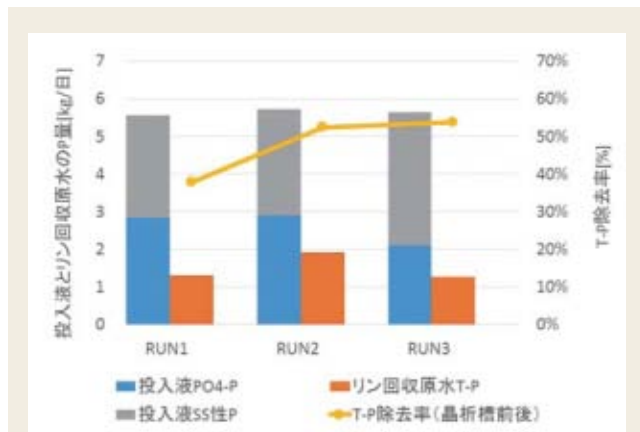


図4 P量と晶析槽前後のT-P除去率



図6 アルカリ処理液のリン溶出効果

向上に寄与していることが確認できた。

**4.5 回収物の成分分析結果** RUN2の期間中に回収したHAPの顕微鏡写真を図7に、成分分析結果を表3に示す。

回収HAPは粒径数百 $\mu\text{m}$ の球形粒子であった。純粋なHAPは白色であるが、し尿中の色度成分を吸着して黒褐色を呈している。色度成分の吸着は、後段の高度処理工程への負荷を削減する効果もある。引き抜いた結晶は非常に水切れが良く、混合液をフレコンバッグに受けるだけで、含水率30%程度の晶析物として容易に回収できるため、取り扱いが容易である。

回収HAPのく溶性りん酸（クエン酸に溶解するりん酸 $\text{P}_2\text{O}_5$ ）の含有量は32.3% (dry)、wet換算で23.1%であり、副産りん酸肥料の含有すべき主成分の最小量15% (wet) を大きく上回った。回収HAP中の重金属は、肥料取締法の副産りん酸肥料として規制されている、砒素とカドミウムの許容値と比較して、含有量は大幅に低かった。また、



図7 回収HAPの顕微鏡写真

表3 回収HAPの成分分析結果

項目	単位	値	基準値 (理論値)
TS	%	71.5	—
T-P	%(dry)	14.4	(18.5)
カルシウム	%(dry)	29.5	(39.9)
く溶性りん酸	%(dry)	32.3	—
炭素	%(dry)	6.57	—
窒素	%(dry)	0.44	—
砒素	mg/kg(dry)	17	50 <sup>※2</sup>
	% <sup>※1</sup>	0.000053	0.004 <sup>※3</sup>
カドミウム	mg/kg(dry)	0.1	5 <sup>※2</sup>
	% <sup>※1</sup>	0.0000003	0.00015 <sup>※3</sup>
総水銀	mg/kg(dry)	<0.5	2 <sup>※2</sup>
ニッケル	mg/kg(dry)	3.5	300 <sup>※2</sup>
クロム	mg/kg(dry)	<5	500 <sup>※2</sup>
鉛	mg/kg(dry)	1.2	100 <sup>※2</sup>

※1 く溶性りん酸1%あたりの割合

※2 参考値：肥料取締法における工業汚泥肥料、下水汚泥肥料などで含有を許される最大値

※3 許容量：肥料取締法における普通肥料の副産りん酸肥料で含有を許される最大値

汚泥肥料において規制されている水銀、ニッケル、クロム、鉛についても十分に低い値であったことや、一般的なりん酸肥料と比較しても含有量は少なく<sup>2)</sup>、肥料としての取り扱いに全く問題がない組成であることが確認できた。

**4.6 その他の影響と効果について** 一般的に汚泥削減技術では、窒素・リンの他にCOD成分が汚泥から溶出し、処理水質を悪化させる可能性があることが指摘されている。本施設では、リン回収工程でCOD成分や色度成分の一部がHAPに吸着される<sup>2)</sup> 他、後段の凝集沈殿と活性炭吸着によって除去されるため、処理水質への影響は確認できない程度であった。

また、リン回収設備でリンが除去されるため、リン回収設備を設置しないフローと比較して、凝集工程における薬品使用量と凝集汚泥量を削減できる。従来のりん酸肥料製造におけるCO<sub>2</sub>排出量などを考慮すると、リン回収設備を設置した場合にCO<sub>2</sub>排出量を削減できる<sup>7),8)</sup> ことなどから、基幹的設備改良事業の対象としても有効である。

## 5. 結 言

リン回収による資源化とアルカリ処理による汚泥削減技術を備えた池野山環境衛生センターでは、アルカリ処理により最大34.6%の汚泥削減効果が確認できた。また、リン回収技術との組合せにより、余剰汚泥からのリン溶出によるリン回収量増加効果がし尿等搬入物由来に対して最大45.5%増加しており、浄化槽汚泥比率が高い条件においてもリン回収技術を適用可能であることが確認できた。

汚泥削減技術を導入することによって、し尿の希薄化や浄化槽汚泥比率の増加に伴い施設へ搬入されるリンの量が少なくなっても、資源循環としてのリン回収量の向上やリン回収処理の安定化などの相乗効果が期待できる。

### 【謝辞】

本調査研究は、串本町古座川町衛生施設事務組合様、並びにアタカメンテナンス株式会社串本事業所の皆様のご協力の下実施したものである。関係の皆様に対して、深く感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 松田圭二, 岩堀恵祐, し尿・汚泥集約処理システムの史的背景と処理技術の変遷, 用水と排水, 2016, Vol.58, No.6, 437-452.
- 2) 船石圭介, 猪股淳一, 小林英正ほか, し尿処理施設におけるアパタイト法を利用したリン回収・資源化, 都市清掃, 2010, 第63巻第295号, 258-262.
- 3) 黒田章夫, 滝口昇, 加藤純一ほか, リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発, 2005, 環境バイオテクノロジー学会誌Vol.4 No.2, 87-

- 94.
- 4) JOGMEC, 鉱物資源マテリアルフロー 2014, **2015**, 335-347.
  - 5) JOGMEC, 鉱物資源マテリアルフロー 2016, **2017**, 339-350.
  - 6) 社団法人全国都市清掃会議, 汚泥再生処理センター等施設整備の計画・設計要領2006改訂版, **2007**, 47-48.
  - 7) 渡邊仁史, 東海林俊吉, し尿等からのリン回収の検討, 第42回環境システム研究論文発表会講演集, **2014**, 49-57.
  - 8) 鶴巻峰夫, 河窪義男, リン資源循環による環境負荷削減効果について, 第3回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, **2008**, 24-25.

**【文責者連絡先】**

Hitz日立造船株式会社 環境事業本部  
水処理ビジネスユニット  
水処理技術部 水環境設計第2グループ  
船石圭介  
Tel : 06-6569-0516 Fax : 06-6569-0048  
e-mail : funaishi@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
Environment Business Headquarters  
Water Treatment Business Unit  
Keisuke Funaishi  
Tel : +81-6-6569-0516 Fax : +81-6-6569-0048  
e-mail : funaishi@hitachizosen.co.jp



船石圭介



山口 滋



奥野芳男