

〈特集〉

下水汚泥焼却灰からのりん回収技術の開発

岩下 真理<sup>1)</sup>, 内田 賢治<sup>2)</sup>, 後藤 幸造<sup>3)</sup>, 石田 貴<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(財)下水道新技術推進機構 資源循環研究部 (〒162-0811 東京都新宿区水道町3番1号 E-mail: m-iwashita@jiwet.or.jp)

<sup>2)</sup>(財)下水道新技術推進機構 資源循環研究部 (〒162-0811 東京都新宿区水道町3番1号 E-mail: k-uchida@jiwet.or.jp)

<sup>3)</sup>岐阜市上下水道事業部 (〒502-0812 岐阜市八代2丁目2番4号 E-mail: gotou-kuz@city.gifu.gifu.jp)

<sup>4)</sup>(財)下水道新技術推進機構 資源循環研究部 (〒162-0811 東京都新宿区水道町3番1号 E-mail: t-ishida@jiwet.or.jp)

概要

近年枯渇が懸念されていることから、下水中に多く含まれるりんの回収と焼却灰有効利用を目的として、焼却灰中のりんを固体状の「回収りん酸塩」として回収する技術の開発と同時に、土壤環境基準を満たす「脱りん灰」にする技術の開発を推進してきた。

本技術に関し、国土交通省 LOTUS Project の一環として研究開発を実施した結果、開発目標である処理コスト 8,000 円/t-焼却灰以下を達成し、平成 19 年 3 月に技術評価を完了した。本報では、この実証試験で得られた知見のうち、焼却灰中のりんをりん酸塩として回収する技術について報告する。

キーワード：Lotus Project, 下水汚泥焼却灰, りん回収, 灰無害化, 肥料  
原稿受付 2009.4.14

EICA: 14(1) 15-18

1. はじめに

近年世界的なりん資源需給の逼迫や主産出国の輸出制限により、りんの国際的価格が高騰しており、将来必要量を確保しにくくなるといった懸念が生じてきている。一方で、汚泥処分費高騰等は、地方自治体の財政を圧迫しており、汚泥の有効利用が求められている。そこで、枯渇が懸念されているりんの回収と焼却灰有効利用促進を目的として、我々は下水汚泥の焼却灰をアルカリ性溶液で処理することにより焼却灰中のりんを固体状の「りん酸塩」として回収する技術を開発すると同時に、焼却灰を土壤環境基準を満たす「脱りん灰」とする技術の開発を行った。

本技術は、平成 19 年 3 月に国土交通省 LOTUS Project の技術評価を完了した。

2. システムの概要

本システム概念図を Fig. 1 に示す。

本システムでは、焼却灰中のりんをアルカリ溶液でりん酸イオンとして抽出後、消石灰と反応させ、りん酸カルシウムを主成分とするりん酸塩として回収する。同時に、脱りん灰中の有害物質を除去し、無害化するシステムである。

本システムは、下水汚泥又は焼却灰からりんを回収する既往技術と比較し、以下の特徴がある。

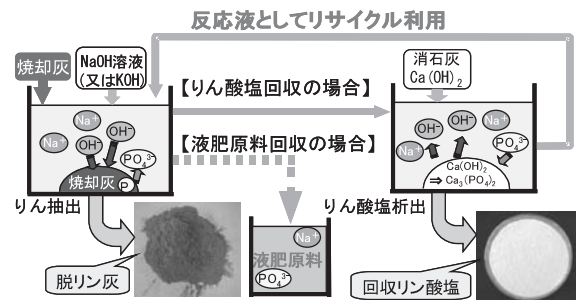


Fig. 1 Basic concept of recovering phosphorus system

- ① りん酸肥料原料が得られると同時に、焼却灰を土壤環境基準・土壤含有量基準を満たす脱りん灰とすることができる。
- ② 反応液循環使用により薬剤費が低減される。
- ③ 反応温度が 50~80℃ であるため、焼却炉の余剰熱で必要熱量を確保できる。
- ④ 焼却灰からりん回収するため、汚泥からりん回収する既往システムよりも設備がコンパクトになる。

3. 開発研究方法

3.1 開発目標

Table 1 に本研究の開発目標 (必要性能) を示す。全体目標である処理コスト 8,000 円/t-焼却灰以下を達成するために、りん回収率、薬品使用量、脱りん灰、回収りん酸塩に関する目標値を Table 1 に示すとおり設定した。

Table 1 Development Target

大項目	小項目	目標値
全体目標	処理コスト	8,000 円/t-焼却灰以下 (LOTUS Project 評価規準)
りん回収率	りん抽出率	55% 以上
	りん酸塩析出率	90% 以上
薬品使用量	NaOH 使用量	0.043 kg/kg-焼却灰以下 (りん抽出率 55% のとき)
	消石灰使用量	0.3 kg/kg-焼却灰以下 (りん酸塩析出率 90% のとき)
脱りん灰及び有効利用先	土壌への利用	土壌環境基準を満たす 土壌含有量基準を満たす
	土質改良材	コーン指数 800 kN/m <sup>2</sup> 以上
	アスファルトフィラー用石粉	標準マーシャル安定度 4.9 kN 以上 残留安定度 75% 以上
	下層路盤材	修正 CBR 20% 以上
回収りん酸塩	回収りん酸塩	副産りん酸肥料規格及び 焼成汚泥肥料規格を満たす

### 3.2 パイロット試験設備

パイロット試験設備のフローを Fig. 2 に示す。本試験設備は、焼却灰処理量最大 100 kg/日、りん酸塩回収量 30~40 kg-DS/日で設計した。

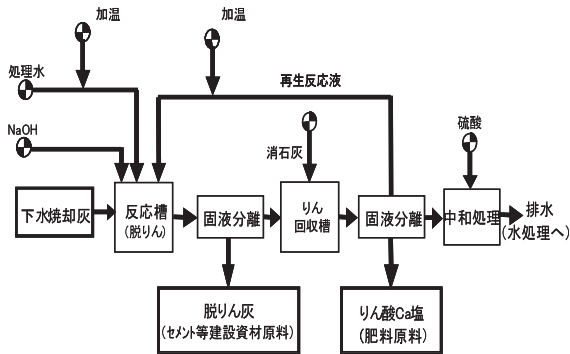


Fig. 2 Pilot plant flow

### 3.3 試験条件

試験条件を Table 2 示す。

りん抽出工程においては、調製してから反応に供していない反応液（以下、反応新液という）を用いた際、りん抽出率を確認の上、反応液循環使用時でもりん抽出率が低下しない運転条件を探索した。また、それと同時に、脱りん灰有効利用促進のため、その性状分析を行った。

一方、りん酸塩析出工程においては、りん酸塩析出率と  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  使用量との相関を求めると同時に、回収りん酸塩の肥料適用性評価のため、その性状分析を

Table 2 Test condition

工程	項目	運転条件
りん抽出	反応温度	50~80℃
	反応時間	0.5 h
	NaOH 濃度	0.75~1.0 N
りん酸塩析出	反応温度	室温
	反応時間	15~24 h

行った。

## 4. 開発研究結果

### 4.1 りん抽出率

りん抽出率の試験結果を Fig. 3 に示す。本図に示すとおり、反応新液を使用した場合、冬期、春期、および夏期を通じて、りん抽出率は 50% 以上を達成した。

そのうち、反応液 NaOH 濃度 0.75N、反応温度 50℃ において、NaOH を追加しない場合は、反応液を循環使用すると、1 回循環であっても、りん抽出率は 21.7% に低下した。（冬期 1 回循環を参照）

これをふまえて、夏期試験では、反応液を循環使用してりん抽出率が低下しない条件の探索を行い、① プロセス内りん抽出回数 2 回、② NaOH 追加使用量 0.121 kg/kg-焼却灰、③ 反応液 NaOH 濃度 1.0N、④ 反応温度 70℃ で運転することにより、反応液循環回数 8~10 回においても、りん抽出率は 65.5~66.7% (平均 66.1%) まで到達し安定することを確認した。

### 4.2 脱りん灰の性状

脱りん灰の土壌環境基準に基づく溶出試験結果の一

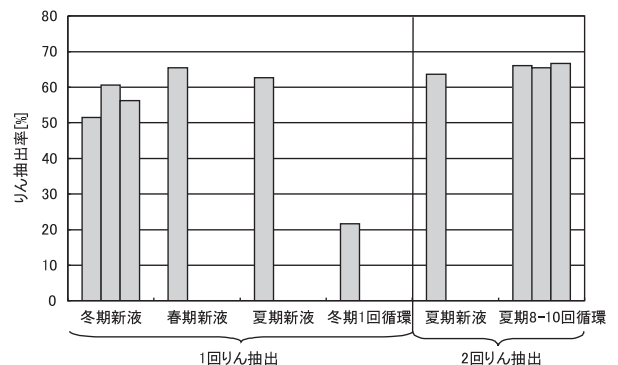


Fig. 3 Phosphorus extraction rate

**Table 3** Amount of toxic substance elution from phosphorus residue (Environmental notification law No. 46)

Run	As			Se			F			B		
	[mg/L]			[mg/L]			[mg/L]			[mg/L]		
	焼却灰	脱りん灰		焼却灰	脱りん灰		焼却灰	脱りん灰		焼却灰	脱りん灰	
	処理前	1回抽出	2回抽出	処理前	1回抽出	2回抽出	処理前	1回抽出	2回抽出	処理前	1回抽出	2回抽出
冬2	0.60	0.008	<0.005	0.38	0.014	<0.002	0.9	0.1	<0.1	0.8	0.12	0.06
冬3	0.60	0.020	<0.005	0.38	0.032	<0.002	0.9	0.4	<0.1	0.8	0.29	0.07
冬4	0.54	0.009	<0.005	0.49	0.017	<0.002	1.2	0.2	<0.1	0.8	0.11	0.08
冬5	0.046	0.008	<0.005	0.222	0.016	<0.002	0.6	0.4	<0.1	0.57	0.13	0.06
夏1	0.034	—	<0.005	0.231	—	<0.002	0.6	—	<0.1	0.78	—	<0.05
夏4	0.046	—	<0.005	0.470	—	<0.002	0.9	—	<0.1	0.69	—	<0.05
夏5	0.042	—	<0.005	0.522	—	<0.002	0.9	—	<0.1	0.70	—	<0.05
夏6	0.037	—	<0.005	0.436	—	<0.002	0.7	—	<0.1	0.72	—	<0.05
土壤環境基準	0.01			0.01			0.8			1		

※ 1回抽出：りん抽出1回+水洗浄 2回抽出：りん抽出2回+水洗浄+酸添加洗浄1回

部を **Table 3** に示す。りん抽出2回→水洗浄→酸添加洗浄1回を実施することにより、As, Se, F, Bの溶出量が土壤環境基準以下となることを確認した。また、夏1の脱りん灰に対して環告46号法およびCO<sub>2</sub>飽和法による土壤環境基準全項目溶出試験を実施し、全項目について土壤環境基準以下となることを確認した。更に、土壤汚染対策法に係る有害物質の含有量を測定し、全項目について土壤含有量基準以下であることを確認した。

### 4.3 りん酸塩析出率

りん酸塩析出率とCa(OH)<sub>2</sub>使用量には次の相関性が確認出来た。

Ca(OH)<sub>2</sub>使用量が反応等量×1.0のとき、りん酸塩析出率は約80%であった。

また、りん酸塩析出率はCa(OH)<sub>2</sub>使用量の増加に伴い向上し、Ca(OH)<sub>2</sub>使用量が反応等量×1.3以上のときには、りん酸塩析出率はほぼ100%となった。

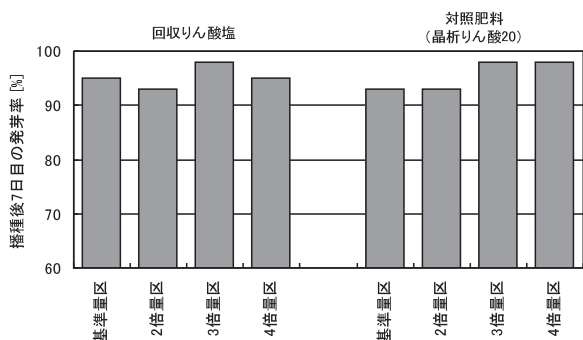
### 4.4 回収りん酸塩の性状

Ca(OH)<sub>2</sub>使用量を反応等量の1.7倍以下とすれば、回収りん酸塩中のく溶性りん酸含有量が15~20%以上となることを確認した。(副産りん酸肥料規格における、く溶性りん酸含有量は15%以上)

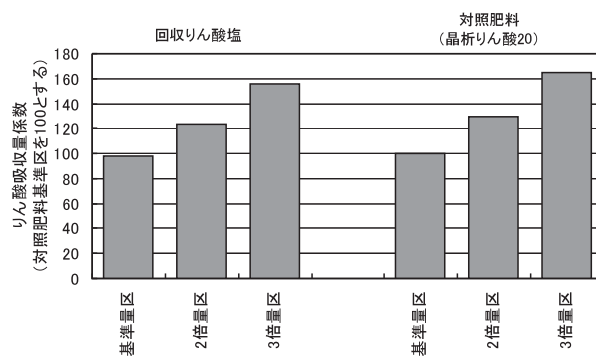
この結果と4.3の結果より、Ca(OH)<sub>2</sub>使用量の適正值は、反応等量の1.3~1.7倍といえる。

また、播種後7日目の発芽率の結果、および播種後33日の収穫時における生体重指数及び吸収量指数を **Fig. 4~6** に示す。**Fig. 4** より回収りん酸塩を用いた場合の発芽率は、対照肥料と同程度であったことから、回収りん酸塩中の有害物によると考えられる生育上の異常症状はないと考えられる。また **Fig. 5, 6** より施用量を基準量より増加させることによって、生体重指数、りん酸吸収指数ともに増加していることが読み取れ、両指数とも対照肥料と同等であった。

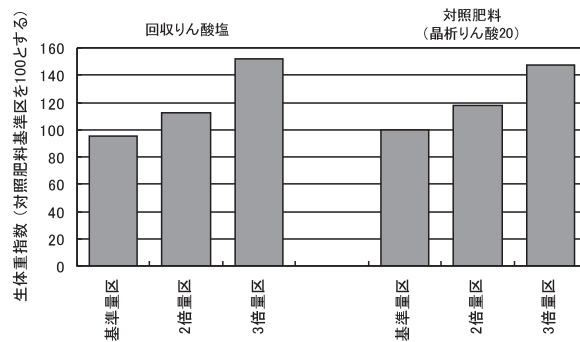
また、反応液を循環使用した場合においても、回収



**Fig. 4** Germination rate



**Fig. 5** Phosphate absorption coefficient



**Fig. 6** Weight of seedlings expressed as a percentage of the control plot

Table 4 Verification result test (Phosphorus recovery case)

大項目	小項目	目標値	実証実験結果
全体目標	処理コスト	8,000 円/t-焼却灰以下	7,840 円/t-焼却灰
りん回収率	りん抽出率	55% 以上	65.5~66.7%
	りん酸塩析出率	90% 以上	100%
薬品使用量	NaOH 使用量	0.043 kg/kg-焼却灰以下 (りん抽出 55% のとき)	0.121 kg/kg-焼却灰
	消石灰使用量	0.3 kg/kg-焼却灰以下 (りん酸塩析出率 90% のとき)	0.431 kg/kg-焼却灰 (反応等量 ×1.5)
脱りん灰 及び 有効利用先	土壌への利用	土壌環境基準を満たす 土壌含有量基準を満たす	2 回りん抽出+水洗浄+1 回弱酸洗浄により達成
	土質改良材	コーン指数 800 kN/m <sup>2</sup> 以上	907~4,728 kN/m <sup>2</sup>
	アスファルトフィラー用石粉	標準マーシャル安定度 4.9 kN 以上 残留安定度 75% 以上	標準マーシャル安定度 9.68 kN 残留安定度 89.0% (石粉代替率 25%)
	下層路盤材	修正 CBR20% 以上	修正 CBR94.7% (脱りん灰添加率 5%)
回収りん酸塩	回収りん酸塩	副産りん酸肥料規格及び 焼成汚泥肥料規格を満たす	達成

りん酸塩中の有害成分は、全ての項目について焼成汚泥肥料規格以下となること、回収りん酸塩中の有害成分は濃縮されず、洗浄排水に移行していることを確認した。

#### 4.5 地球温暖化ガス削減効果・省エネルギー効果

焼却灰処理量 4 t/日、稼働日数 340 日/年とした場合について、焼却炉から回収され反応熱として有効利用される熱量と CO<sub>2</sub> 排出削減量を算出した。その結果、焼却炉からの熱回収量は約 3,212,000 MJ/年、CO<sub>2</sub> 削減量は 55.6 t-CO<sub>2</sub>/年と算出された。

## 5. 評価結果

実証実験結果の一覧を Table 4 に示す。

NaOH 使用量、消石灰使用量は目標値よりも多くなったが、りん抽出率、りん酸塩析出率は目標値以上となった。

このため、①焼却炉を有し、②焼却灰発生量が 4 t/日以上（原水処理量 100,000 m<sup>3</sup>/日規模）で、③焼却灰りん含有率が P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 換算で 25% 以上であれば、開発目標である処理コスト 8,000 円/t-焼却灰以下に対し、コスト試算額は 7,840 円/t-焼却灰となり、目標を達成した。

## 6. おわりに

本技術は、下水汚泥焼却灰有効利用における大きな課題であった「土壌環境基準」を満足するとともに、枯渇資源であるりんを回収し、肥料として利用することを可能としたものであり、下水汚泥焼却灰の有効利用促進に大きく貢献できるものと考えられる。

現在は、地域に応じた様々な有効利用先との連携を図りながら、最適システムを構築できるよう推進している。

## 謝辞

本報告は、国土交通省がリードする下水道技術開発プロジェクト (SPRIT21) の第 2 の課題である LOTUS Project にて岐阜市上下水道部、メタウォーター(株)により実施された実証試験結果をもとにしたものである。同研究を実施して頂いた各者に対して厚く御礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 下水汚泥焼却灰からのりん回収技術に係る技術評価書、平成 19 年 3 月 下水道技術開発プロジェクト (SPRIT21) 委員会