

## バクテリアリーチングによるし尿汚泥等の焼却灰からのリン溶出について

中村洋祐 大塚将成 治多伸介\*1 大森大輔\*2 寺坂晃子\*2 門屋尚紀\*2

### A Study on Phosphorous Elution from Incineration Ash of Night Soil Sludge by Bacterial Leaching

Yousuke NAKAMURA, Masanari OTSUKA, Shinsuke HARUTA, Daisuke OMORI,  
Akiko TERASAKA, Naoki KADOYA

It is concerned that the world's supply of phosphorus rock will be exhausted in the near future. Nevertheless, incineration ash of sludge such as sewage sludge and night soil sludge containing high levels of phosphate has been discarded. In the present study, we have developed and tested a novel method by which phosphate was eluted by bacterial leaching from incineration ash of night soil sludge and septic tank sludge in Ehime Prefecture. It was found that these incineration ash contained phosphate as much as phosphorous ore did (average : 10.3wt% ,max:13.7wt% ). However, phosphate contained in incineration ash has been discarded without being effectively utilized. By the bacterial leaching with sulfur-oxidizing bacteria(NBRC13701 strain), we found that eluted phosphate reached a maximum amount of 5700 mg-P/L. Furthermore, we have brought about a reduction in costs by employing the culture media dissolved in wastewater from night soil treatment plants, desulfurization sulfur from oil refineries, and sulfur-oxidizing bacteria derived from sewage plants, which seems to enhance practicability of this method.

Keywords : night soil sludge, sulfur-oxidizing bacteria, phosphorus elution, desulfurization sulfur

### はじめに

我が国は、リン資源を全て輸入に依存しており、世界的なリン資源の不足により将来、価格が高騰することが予想され、農業等への影響が懸念されている。こうした中、下水汚泥やし尿汚泥、浄化槽汚泥等の焼却灰は、リンを多量に含んだまま廃棄されている<sup>1)</sup>。

本研究所では、県内で排出されるし尿や浄化槽汚泥の焼却灰(以下「し尿汚泥等焼却灰」)から、バクテリアの活性を利用して金属等を溶出させる方法であるバクテリアリーチング(以下「BL」)によりリンを溶出させる技術と吸着材によりリンを分離回収する技術を用いて、肥料等として利用価値の高いリン酸カルシウムとして回収することを目的として研究を行っている。

本研究では、硫黄酸化細菌を用いた BL によるし尿汚

泥等焼却灰からのリン溶出について検討を行った。リン回収技術は、し尿や下水等の処理工程において種々の回収技術が研究されているが<sup>2~4)</sup>、焼却により処理物に含まれるリン化合物が全て濃縮され、溶出されやすいオルトリン酸に変換されることから焼却灰を対象とした。また、焼却灰からのリンの溶出法にはアルカリ剤による灰アルカリ抽出法がすでに実用化されているが、同溶出法に比較して溶出率が高いとされている<sup>2,4,5)</sup>ことから、酸を用いた溶出法である灰酸抽出法<sup>6)</sup>の一種である BL 法を用いた溶出法について検討した。BL 法は、無機酸に比較して穏やかに反応が進み使用薬剤の保管取り扱いが容易である等の特徴があることから、新たなリン溶出法として検討を行った。その結果、実用性、経済性の点について有効利用の可能性が確認されたので報告する。

### 実験方法

1 し尿汚泥等焼却灰中の主要成分の分析法

愛媛県立衛生環境研究所 松山市三番町8丁目234番地

\*1 独立行政法人愛媛大学農学部

\*2 株式会社ダイキアクシス

## 1) 調査対象試料

県内の全19し尿処理施設中焼却灰を排出する14施設を対象とした。試料採取は、夏季(平成24年8月)、秋季(10~11月)及び冬季(25年1~2月)の3回実施した。

## 2) 分析方法

蛍光X線分析(FP法)

蛍光X線分析装置:フリップス社製 PW2400

## 2 BLによる最適溶出条件の検索方法

各処理施設の試料のうち夏季に採取した試料を用いて試料添加量を変えながら数回のBLを実施し、可能な限り高濃度となる溶出条件を求め、それを最適条件とした。つまり、経済性の観点から、一定量の培地から可能な限り多量のリンが溶出できれば一定量のリンを溶出させるための経費は最も安くなることから、リン溶出濃度が最も高くなる条件を最適溶出条件とした。

1) 使用試料 14施設の夏季採取試料

## 2) 使用菌株

*Acidithiobacillus thiooxidans* NBRC13701

## 3) 使用培地

既報<sup>7)</sup>において報告した培地(St\*10培地)を用いた。

1 リットルの超純水に、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  0.2 g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.5 g,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.3 g,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.3 g,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.01 g, ブロムフェノールブルー10 mgを溶解滅菌後、滅菌イオウ 10gと合わせて使用。

## 4) BLの方法

①500 mL 三角フラスコに2 gイオウを添加しオートクレーブ滅菌

②1~2 ml 植菌, 培地を加えて200 mlとし前培養開始(振とう培養:30°C, 120 rpm)

③約10日間経過後, 増殖を確認(pH, 菌体数で確認)した後, 所定量の試料を添加しBL開始

④試料添加1, 5, 10, 15日経過後それぞれ分析用試料を15 ml分取し, 分析試料とした。

## 5) 分析方法

分取した試料を遠心分離(10000 rpm, 5分)後, 0.8 µm シリンジフィルターでろ過し, pH, リン酸イオン等を分析した。

pH: (株)東興化学研究所 TPX-999i

リン酸イオン: 日本ダイオネクス社製イオンクロマト

## 3 実用的BL法の検討

BL実施に当たり, 実用性や経済性の観点から培地調製法, 培地に使用する硫黄, 使用菌株の違いによる効果について, 硫黄酸化細菌の増殖状況から検討を行った。

なお, 検討対象試料は, 溶出濃度の最も高かった試料Lと併せて今後の有効利用を考慮して焼却灰発生量の最も多い試料Eとを対象とした。また, 今回使用した

脱硫硫黄は石油を精製する過程で副生するもので, 原油中にはパーセントオーダーで含まれているのである。

## 1) 使用硫黄

市販の硫黄(和光純薬製),

脱硫硫黄(県内製油所から入手)

## 2) 使用菌株

*Acidithiobacillus thiooxidans* NBRC13701, 集積株

## 3) 培地調製に使用する水

超純水(MQ水), 水道水, し尿処理施設(E処理施設)からの処理水

## 4) 増殖状況の確認

①500 ml 三角フラスコに2 g イオウを添加し滅菌

②植菌後, 培地を加えて200 mlとし前培養開始(振とう培養:30°C, 120 rpm)

③振とう培養開始以降1日1回増殖を確認

測定項目:pH, 硫酸イオン, リン酸イオン

測定方法:2の4)と同様の方法で行った。

## 5) 集積株

下水処理場から採取した試料をSt\*10培地及びNBRC13701の培地として提示されている224培地<sup>8)</sup>で,pHが0.5程度まで下がったのを確認しながら継代培養を繰り返して集積を行った。

## 4 化学溶出試験

BL法との比較検討を行うために, 無機酸(硫酸)を用いたpH調整のみによるリン溶出濃度を測定した。実験操作:

①3.6 N硫酸をBL最終到達pHまでビュレットで計量しながら添加

②所定のpHに到達するまで30°C, 120 rpmで振とう

③最終的に消費した硫酸量を確認

なお, pH調整に当たっては, 振とう培養により得られた最適溶出条件において到達したpH値まで徐々に下げるようにした。

## 結果及び考察

### 1 し尿汚泥等焼却灰に係るアンケート調査について

聞き取り等により調査した結果を表1に示す。

平成23年度の県内のし尿汚泥等焼却灰発生量は, 年度中に焼却処理を中止した処理施設を除くと合計662 tであった。そのうち有効利用されることなく埋め立て処分された焼却灰が539 t(約80%)であった。有効利用も熔融処理の後スラグとして建設資材等に利用するもので, 含有成分を考慮した利用ではなかった。

し尿処理方法は, 14施設のうち標準脱窒素処理が8施設で, 膜分離高負荷脱窒素処理6施設であった。

表1 平成23年度県下のし尿処理施設における焼却灰発生量等

し尿処理施設	し尿処理方法※	し尿処理凝集剤	汚泥処理凝集剤	焼却灰発生量 (t/年)	焼却方式	焼却灰の処理
A	高負膜分	無	塩化第二鉄	34	回転アーム式	熔融
B	標脱	硫酸バンド 高分子凝集剤	無	17	多段式焼却炉	熔融
C	高負膜分	硫酸バンド	硫酸バンド	22	回転アーム式	熔融
D	標脱	硫酸バンド 高分子凝集剤	高分子凝集剤	119	流動床式	海面埋立
E	標脱	硫酸バンド 高分子凝集剤	高分子凝集剤	136	ロータリーキルン	埋立
F	標脱	硫酸バンド 高分子凝集剤	高分子凝集剤	50	回転アーム式	熔融
G	標脱	硫酸バンド 高分子凝集剤	高分子凝集剤	10	回転アーム式	埋立
H	高負膜分	塩化第二鉄 高分子凝集剤	高分子凝集剤	19	ストーカー式	埋立
I	高負膜分	硫酸第二鉄	高分子凝集剤	51	流動床式	埋立
J	高負膜分	硫酸バンド	高分子凝集剤	13	回転アーム式	埋立
K	標脱	硫酸第二鉄 高分子凝集剤	高分子凝集剤	69	流動床式	埋立
L	標脱	硫酸バンド	高分子凝集剤	24	回転アーム式	埋立
M	標脱	硫酸バンド 高分子凝集剤	高分子凝集剤	50	ストーカー式 バッチ焼却炉	埋立
N	高負膜分	硫酸第二鉄	高分子凝集剤	48	回転アーム式	埋立

※高負膜分: 膜分離型高負荷脱窒素処理方式、標脱: 標準脱窒素処理方式

表2 し尿汚泥焼却灰主要成分(平成24年度3回採取試料)

し尿処理施設	試料採取時期	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
A	A1 24年 8月	1.8	1.3	4.5	5.8	7.4	0.2	0.03	1.0	4.1	33.3	0.3	0.8
	A2 24年 11月	1.4	0.9	4.0	5.0	7.4	0.3	0.02	1.0	2.2	38.1	0.2	0.7
	A3 25年 1月	3.2	0.7	3.3	3.8	5.4	0.2	0.03	1.1	2.2	42.5	0.2	0.5
B	B1 24年 8月	0.7	1.2	28.5	6.8	8.1	0.4	0.02	0.5	3.6	1.3	0.3	0.4
	B2 24年 11月	0.6	1.2	29.5	6.2	7.7	0.5	0.02	0.5	3.4	1.4	0.3	0.7
	B3 25年 1月	0.9	1.5	28.6	6.1	7.7	0.6	0.05	0.6	4.1	1.3	0.3	0.4
C	C1 24年 8月	1.8	1.6	23.2	6.6	10.6	0.4	0.02	1.4	5.0	0.9	0.4	0.5
	C2 24年 11月	1.8	1.4	24.5	6.1	10.2	0.7	0.04	1.3	4.6	0.9	0.3	0.4
	C3 25年 1月	1.9	1.4	23.8	6.2	10.6	0.5	0.07	1.6	4.5	0.8	0.3	0.3
D	D1 24年 8月	1.4	1.4	26.2	6.1	9.7	0.2	0.01	0.6	4.8	1.0	0.3	0.5
	D2 24年 11月	1.2	1.2	28.0	6.2	8.9	0.3	0.01	0.6	3.9	1.0	0.3	0.4
	D3 25年 1月	1.4	1.2	28.5	5.6	9.2	0.2	0.01	0.8	3.7	0.8	0.3	0.5
E	E1 24年 8月	1.6	2.6	12.1	8.8	12.1	1.2	1.72	1.5	6.8	1.6	2.7	1.1
	E2 24年 11月	1.6	2.6	12.6	8.6	12.1	1.4	0.47	1.6	6.8	1.9	2.3	1.1
	E3 25年 1月	1.7	2.5	12.5	8.4	12.4	1.2	0.31	1.7	6.3	2.1	2.8	1.5
F	F1 24年 8月	0.6	2.3	16.2	9.0	11.2	1.0	0.09	1.1	7.0	2.3	0.5	0.9
	F2 24年 11月	0.5	1.9	17.2	8.8	11.0	0.5	0.11	0.8	7.4	2.3	0.5	1.7
	F3 25年 1月	0.8	2.0	16.2	8.7	11.4	1.0	0.09	1.3	7.0	2.2	0.6	1.5
G	G1 24年 8月	7.2	3.7	8.0	4.5	9.2	0.5	0.79	1.4	5.6	3.5	1.1	0.5
	G2 24年 11月	10.2	4.6	11.7	5.2	10.8	0.5	1.08	1.9	6.0	3.5	0.5	1.0
	G3 25年 1月	10.0	3.9	9.5	4.7	11.0	0.4	2.35	2.4	5.7	7.1	0.3	1.0
H	H1 24年 8月	2.2	2.2	4.2	6.2	12.9	1.0	1.22	2.2	7.4	16.5	0.4	0.7
	H2 24年 11月	2.0	2.2	4.6	6.1	12.3	1.2	0.32	1.9	6.0	19.3	0.4	1.2
	H3 25年 1月	2.5	1.9	2.9	5.3	9.9	1.5	1.72	2.3	6.0	9.9	0.4	0.9
I	I1 24年 8月	2.3	2.4	5.2	7.4	9.4	1.1	0.11	1.4	7.1	19.6	0.4	1.3
	I2 24年 11月	2.3	3.3	5.4	10.7	8.8	1.8	0.23	1.4	8.5	10.8	0.4	2.4
	I3 25年 1月	2.8	2.8	4.5	8.5	8.7	1.8	0.32	1.4	8.1	16.0	0.4	2.2
J	J1 24年 8月	3.1	2.1	20.0	6.4	10.5	0.9	1.39	1.5	5.2	1.9	0.3	0.5
	J2 24年 11月	2.4	2.3	18.2	6.4	11.7	0.6	0.04	1.7	6.4	2.0	0.3	1.3
	J3 25年 1月	2.7	2.5	14.7	7.8	12.7	0.5	0.04	2.2	6.8	1.8	0.3	1.2
K	K1 24年 8月	1.2	2.5	5.3	8.9	10.5	0.4	0.02	1.1	7.2	17.8	0.4	1.2
	K2 24年 11月	1.1	2.3	5.4	8.2	9.9	0.3	0.01	1.1	6.9	20.2	0.4	1.6
	K3 25年 1月	1.0	2.4	4.8	7.5	10.3	0.6	0.02	1.3	6.1	22.0	0.4	1.1
L	L1 24年 8月	0.9	2.4	16.7	6.7	13.7	0.2	0.02	0.9	8.0	1.8	0.3	1.0
	L2 24年 11月	0.7	2.3	16.0	8.0	12.5	0.2	0.03	0.9	8.1	2.3	0.4	1.4
	L3 25年 1月	0.8	2.2	17.2	7.1	13.0	0.1	0.01	1.0	7.5	2.0	0.3	1.3
M	M1 24年 8月	0.8	1.8	19.8	7.3	12.0	0.8	0.08	1.0	5.7	1.8	0.2	0.6
	M2 24年 11月	0.8	1.7	19.8	7.5	11.3	1.0	0.13	1.0	5.8	1.9	0.3	0.8
	M3 25年 1月	2.1	1.7	18.9	5.7	12.4	1.3	0.35	1.6	5.6	2.0	0.2	0.7
N	N1 24年 8月	2.4	2.9	3.0	4.8	10.9	0.6	0.06	1.8	6.2	25.3	0.3	1.0
	N2 24年 11月	3.1	2.5	2.7	5.4	9.7	1.0	0.06	1.9	6.1	25.9	0.2	1.1
	N3 25年 1月	2.4	2.0	2.3	4.7	7.4	1.1	0.09	1.5	4.0	21.8	0.2	0.6
n		4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
	平均値	2.2	2.1	13.8	6.8	10.3	0.7	0.32	1.3	5.8	9.3	0.5	1.0
	標準偏差	2.1	0.8	8.9	1.5	1.9	0.5	0.56	0.5	1.6	11.4	0.6	0.5
	最小値	0.5	0.7	2.3	3.8	5.4	0.1	0.01	0.5	2.2	0.8	0.2	0.3
	最大値	10.2	4.6	29.5	10.7	13.7	1.8	2.35	2.4	8.5	42.5	2.8	2.4

表3 下水汚泥焼却灰等との比較

成分元素	P	Si	Al	Ca	Fe	Mg	K	合計
し尿汚泥等焼却灰 ※1	10.3	6.8	13.8	5.8	9.3	2.1	1.3	49.4
下水汚泥焼却灰 ※2	8.2	14.9	8.5	11.9	4.3	2.3	1.5	51.6
県内下水処理場焼却灰 ※3	12.0	10.0	8.9	11.0	5.6	3.5	1.1	52.1
リン鉱石 ※2	14.3	1.5	0.1	39.8	0.1	0.2	0.1	56.1

※1: 県内14施設の平均値(3季分)、※2: 岩井ら(廃棄物資源循環学会誌<sup>3)</sup>、※3: 平成22年度当研究所調査結果

使用する凝集材(高分子凝集材を除く)はアルミ系の凝集材が 14 施設中 9 施設で鉄系の凝集材が 5 施設であった。

焼却方式は、回転アーム式が 14 施設中 7 施設で次いで流動床式が 3 施設となっていた。

2 し尿汚泥等焼却灰中のリン等の含有量について

14 処理施設の分析結果を表 2 に示す。最大値が 1.0wt%以上であった成分 12 項目の結果を示した。

最もリン含有量の高いのは、Lの 13.7wt-P%で、3季 14 施設で平均 10.3 wt-P%であった。

特徴として、アルミ系の凝集材を使用している処理施設(B, C, D, E, F, G, J, L, M)は、Alの含有率が高く、鉄系の場合(A, H, I, K, N)は Fe の含有率が高くなっていった。全体的に P 等の含有成分に大きな季節変動は認められなかった。L についても P が 12~13%と安定していた。

これらの結果を全国の下水処理場について調査した結果<sup>9)</sup>、県内の下水汚泥焼却灰<sup>7)</sup>及びリン鉱石<sup>9,10)</sup>と比較すると表 3 のとおりとなった。

本県のし尿汚泥等焼却灰中の P は、全国の下水汚泥焼却灰に比較して幾分高めで、凝集材由来と考えられる Al や Fe の含有率も高かった。Ca は、下水処理汚泥焼却灰が高くなっているが、これは排ガス処理に多量に使用される消石灰等に由来するものと考えられる。

県内のし尿汚泥等焼却灰は、リン鉱石と比較するとリン含有量が幾分低く Al や Fe の含有量が高いが、今後品位の高いリン鉱石確保が難しくなること等将来のリン資源確保を考えた時、十分な資源になり得るものと考えられる。

表4 BLによるリン溶出濃度・溶出率

試料名	試料添加量 (wt/vol%)	pH		リン溶出濃度 (mg/L)	リン溶出率 (%)
		BL1日後	BL15日後		
A	12.0	1.97	1.70	3700	42
B	2.0	2.07	1.21	1100	68
C	4.0	2.20	1.19	3300	79
D	2.0	2.37	1.23	1500	77
E	4.0	2.61	1.33	3300	67
F	2.0	1.52	0.84	1400	60
G	4.0	2.27	1.39	3000	80
H	4.0	1.68	0.94	1800	35
I	6.0	2.04	0.81	1500	27
J	4.0	2.64	2.33	2100	50
K	8.0	2.31	1.74	5400	64
L	6.0	2.41	1.91	5700	69
M	6.0	2.56	1.93	4700	64
N	10.0	1.98	1.92	3000	27
MT ※	4.0	1.80	1.22	3900	83

3 BLによる最適溶出条件の検索結果

1) 最大溶出濃度

県内 14 施設から採取した焼却灰について溶出濃度が最大となった条件を表4に示す。

試料添加量を変えて合計 6 回の BL を行った。

その結果、溶出濃度の最も高かったのは、試料 L (5700 mg-P/L)、次いで試料K (5400 mg-P/L)、試料 M (4700 mg-P/L)の順であった。試料 E は 3300 mg-P/Lであった。

2) リン溶出状況

試料 L と E について、試料添加量を変えて BL を行った結果を図 1 に示す。

試料Lでは、BL 開始後約 10 日で溶出が完了し、試料Eでは 1 日後にはほぼ溶出が完了している状況であった。

4 実用的 BL について

以後、実用的 BL を検討するに当たり、14 施設中最もリン溶出濃度の高かった試料 L と焼却灰排出量が最も多く安定的な確保が可能な試料 E を中心に検討を行った。

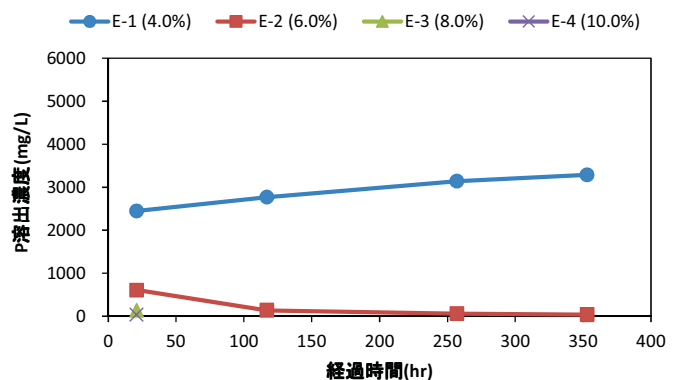
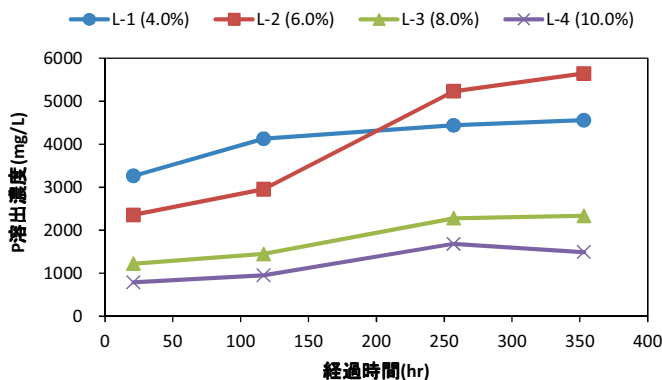


図1 試料添加量によるBLのリン溶出濃度変化(試料L, E)

1) 培地成分(硫黄)と使用菌株の増殖状況の比較検討  
市販されている硫黄と脱硫硫黄の違い、分譲株と集積株の違いによる増殖状況を図2に示す。

pH, 硫酸イオン濃度とも市販硫黄で NBRC13701株が幾分良い増殖を示しているが、いずれの条件においてもほぼ同じ増殖状況と考えられた。つまり、pHも硫酸イオン濃度もいずれの条件においても対数増殖期における増殖速度及び最終到達値に多少の差は見られるが、いずれもほぼ同じ増殖状況と考えられる。

硫黄については、市販硫黄より安価な脱硫硫黄の使用、菌株については集積株でも使用の可能性が認められた。

なお、集積株についてはクローンライブラリー解析の結果純粋株に近い *Acidithiobacillus thiooxidans* であることが分かった。

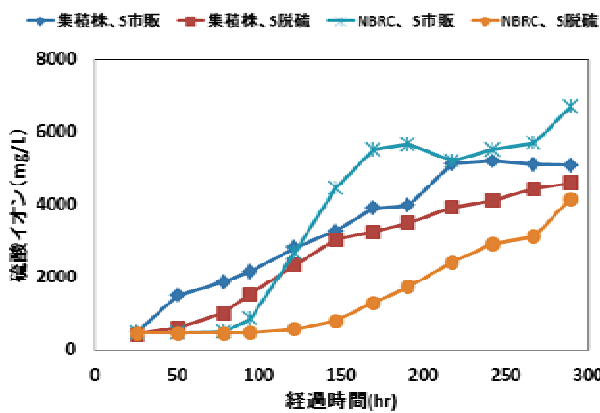


図2 培地成分(硫黄)と使用菌株の検討結果

2) 培地に使用する水と使用菌株の BL の比較検討

試料 L と E について、2 種類の菌株、培地調製に使用する 3 種類の水(超純水、水道水、E し尿処理施設処理水)で BL を行った結果を図3に示す。ただし、培地成分の硫黄は市販のものに統一した。

経時変化に多少の差異はあるものの、培地調製用の水の違い、使用菌株の違いによる溶出リン濃度の違いはないと考えられる。

以上のとおり、脱硫硫黄や集積株の使用、し尿処理施設排水の利用の可能性が確認されたことは、今後実用性、経済性を考える上で有益な知見と考えている。

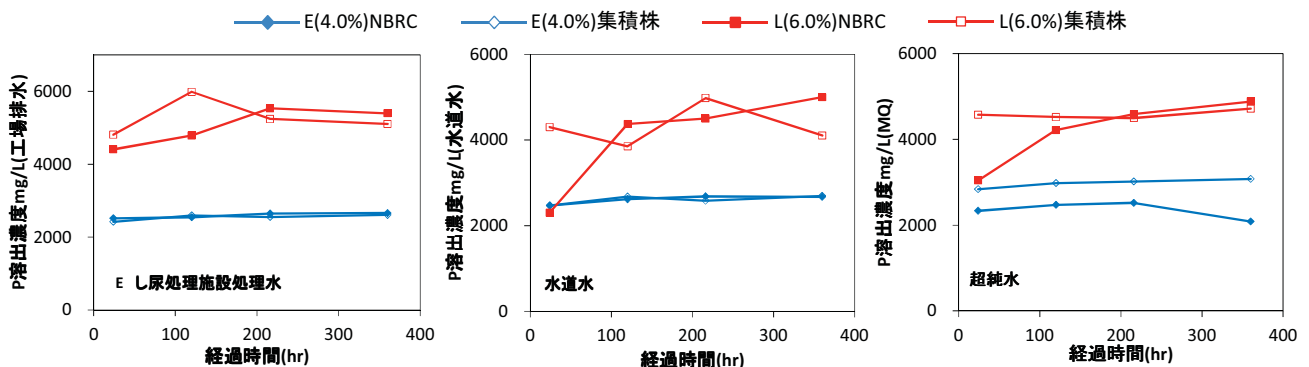


図3 培地に使用する水と使用菌株の検討結果

5 化学溶出試験結果

試料 L, E について行った化学溶出の結果を表5に示す。

試料 L は、BL による溶出濃度が 5700 mg-P/L であったのに対し、6000 mg-P/L と幾分 BL の方が低い状況であった。試料 E では、BL による溶出濃度が 3300 mg-P/L であるのに対し 2800 mg-P/L と BL の方が幾分高い状況であった。

6 BL によるリン溶出に係る使用薬剤経費について

経済性を検討する上で使用薬剤経費が大きい<sup>11,12)</sup>ことから試料 L と E について、最適条件によるリン溶出に係る薬剤経費を化学溶出に係る薬材経費と対比して表6に示す。

表5 化学溶出実験結果

試料 試料添加%	化学溶出実験			最適BL結果		
	P濃度 (mg-P/L)	P溶出率 (%)	最終pH	P濃度 (mg-P/L)	P溶出率 (%)	最終pH
試料L 6.0%	5990	73	1.98	5700	69	1.99
試料E 4.0%	2800	58	1.37	3300	67	1.27

注: 試料K, Lの添加量6.0%における100%P溶出濃度: 8190mg-P/L  
試料Eの添加量4.0%における100%P溶出濃度: 4850mg-P/L

表6 し尿汚泥等焼却灰からBLにより  
純リン1kgを溶出させるために必要な薬剤経費

(単位: 円/kg-P)

試料	市販硫黄		脱硫硫黄		化学溶出 (硫酸)
	最小	最大	最小	最大	
L	126	215	55	73	73
E	219	374	96	128	153
平均	173	295	76	101	—

注: 一般的な工業用硫酸の単価 15円/kg

表7 培地 1 m<sup>3</sup>の製造単価 (S t\*10 培地)

薬剤	使用量 (kg)	市販硫黄使用		脱硫硫黄使用	
		最大	最小	最大	最小
イオウ	10	1,000	500	200	100
硫酸アンモニウム	0.2	12	12	12	12
硫酸マグネシウム	0.5	33	30	33	30
リン酸2水素カリ	0.3	150	150	150	150
塩化カルシウム	0.3	18	18	18	18
硫酸第一鉄	0.01	2	2	2	2
単価(円/m <sup>3</sup> )		1,215	712	415	312

溶出濃度の最も高かった試料 L では、リン 1 kg 当たり 55～73 円となり化学溶出より安価となった。これは、2010 年版肥料要覧<sup>13)</sup>記載の価格等から試算した輸入リン鉱石に含まれるリン 1 kg の単価 550 円に比較しても安価となった。今後、リン鉱石の高騰等により確保が難しくなることを考えると、し尿汚泥等焼却灰は貴重なリン資源であり回収有効利用の研究はさらに重要になると考えられる。

## まとめ

し尿汚泥等焼却灰中のリン等の含有量を調査し、それら焼却灰から硫黄酸化細菌を用いたバクテリアリーチングにより、リン溶出濃度が最大となる条件の検索及び実用性、経済性の観点から検討を行った結果次のことが明らかとなった。

- 1) 県内で発生するし尿汚泥等焼却灰のほとんどは有効利用されことなく埋立処分されている。有効利用も含有成分に配慮したものではなかった。
  - 2) 県内のし尿汚泥等焼却灰のリン含有量は、最大 13.7wt-P%で平均 10.6 wt-P%であった。
  - 3) 硫黄酸化細菌によるバクテリアリーチングにより、し尿汚泥等焼却灰から最大 5700 mg-P/L のリンの溶出が確認された。
  - 4) 硫黄酸化細菌によるバクテリアリーチングについて実用性、経済性の観点から検討した結果、
    - 1) し尿処理施設からの排水で培地調製可能である。
    - 2) 培地の主要成分である硫黄は、製油所の脱硫工程から副生する脱硫硫黄の使用が可能である。
    - 3) 使用菌株は、下水処理場から採取した集積株も NBRC からの純粋株と同様に使用可能である。
  - 5) バクテリアリーチングによるリン溶出に係る薬剤経費は、市販硫黄に替えて脱硫硫黄を使用することにより格段に安価となる。
- 今後は、溶出残渣や溶出液について関係法令基準

に基づく有害物質の確認等により安全性を確認することとしている。さらに、吸着回収工程を含めたリン回収施設としての検討、評価を行うこととしている。

なお、今回の報告内容は、平成 24 年度環境研究総合推進費補助金研究事業として行ったものの一部であることを記して謝意を示す。

## 文献

- 1) 環境省、し尿・浄化槽汚泥からのリン回収・利活用の手引き（平成 24 年 3 月）
- 2) 日本水環境学会：日本水環境学会誌，Vol.34，No1(2011)
- 3) 高岡昌輝：再生と利用，23-31，Vol34，No127(2010/3)
- 4) 加藤文隆ほか：土木学会論文集，413-424，Vol63，No.4(2007)
- 5) 高橋泰弘ほか：下水道協会誌，181-192，Vol38，No468(2001/1)
- 6) 株式会社エヌ・ティー・エス：汚泥の処理とリサイクル p223-237
- 7) 中村洋祐ほか：愛媛県立衛生環境研究所年報 12 (2009)
- 8) NBRC:菌株リスト
- 9) 岩井良博ほか：廃棄物資源循環学会論文集 53-66，Vol20，No.3 (2009)
- 10) 吉田國夫：鉱産物の知識と取引，財団法人通商産業調査会，451-487
- 11) 岐阜市、焼却灰からのリン回収と販売について 第 1 回リンリサイクルシンポジウム事例発表資料 (2009)
- 12) 環境省、し尿・浄化槽汚泥からのリン回収・利活用の手引き（平成 23 年 3 月）
- 13) 社団法人農林統計協会：ポケット肥料要覧 (2010)