

焼却炉の煙道閉塞抑制及び灰肥料化に向けた 消石灰添加方法の適正化に関する検証

(公財) 愛知水と緑の公社 ○神谷 昌吾・畔柳 裕充
メタウォーター（株） 杉江 由規・雨宮 朝海

1. はじめに

近年、下水汚泥焼却炉では、一酸化二窒素由来の温室効果ガス排出量を削減するため、焼却温度を高温化する取り組みがなされている。また、全国的にも実施が拡大されている栄養塩類の能動的運転管理の導入により、水処理施設において凝集剤添加率削減の取り組みを行うことで焼却炉にて焼却する汚泥性状にも変化が生じている。これらの要因により、焼却灰の溶融・付着による焼却炉の煙道閉塞リスク増加が懸念される。

一方で、下水汚泥焼却灰については、菌体りん酸肥料が新たに肥料の公定規格に追加されたことで、肥料化需要の増加が予想される。そのため、肥料成分の増加に有効な手段を確立することが喫緊の課題である。

また、煙道閉塞対策としては鉄系やアルミ系の薬剤を汚泥に添加する方法も採用されているが、金属成分によるリンの固定化により焼却灰の肥料成分が低下する点や、薬剤中に含まれる硫黄分による排ガス中の硫黄酸化物の増加が懸念される。

筆者らは既報¹⁾において、焼却汚泥への消石灰スラリー添加が、煙道閉塞抑制、肥料成分の増加、および脱硫に対して有効であることを明らかにした。本報ではこれらの知見に基づき、本プロセスの低コスト化を目的として実施した、消石灰スラリーの添加量削減および粉体添加に関する実証試験の結果を報告する。

2. 試験方法

既報で実施した期間と同等である冬季に、愛知県の矢作川浄化センターおよび衣浦西部浄化センターにおいて、焼却炉投入汚泥への消石灰添加試験を実施した。矢作川浄化センターでは消石灰スラリーを脱水ケーキ供給ポンプのフィーダ内へ定量供給し、流動焼却炉にて 830℃～850℃で焼却処理した。衣浦西部浄化センターでは消石灰粉体をケーキ押込機のホップ内に定量供給し、流動焼却炉にて 880℃～900℃で焼却処理した。焼却設備諸元を表-1 に、試験条件を表-2 に、下水汚泥焼却設備の概略フローおよび焼却灰の採取位置を図-1 に示す。

膠着度²⁾は、焼却灰の付着性を定量化する指標であり、膠着度が低いほど焼却灰の付着性が低いことを示す。予備試験では膠着度 0.2 以下で煙道閉塞リスクが低いことを確認している。煙道閉塞リスクを評価するために、採取した焼却灰を対象に膠着度を測定した。

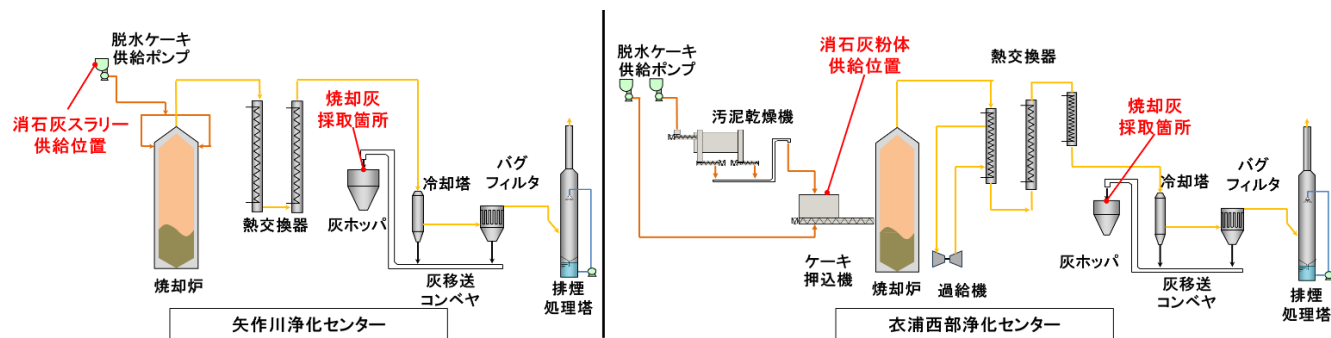
菌体りん酸肥料の公定規格に定められたりん酸全量およびく溶性りん酸は肥料等試験法、無機分組成は下水道試験法に基づき、各試料の分析を行った。また、結晶構造の変化を把握するため、X線回折による定性分析を行った。

表-1 焼却設備諸元

試験場所	矢作川浄化センター	衣浦西部浄化センター
型式	流動床式	流動床式
焼却能力	95 t/日	60 t/日
燃烧温度	830℃～850℃	880℃～900℃
汚泥の 部分乾燥	なし	あり

表-2 試験条件

試験場所			矢作川浄化センター								衣浦西部浄化センター			
試験実施日			2024/12/2	2024/12/3	2024/12/4	2024/12/6	2025/11/17	2025/11/18	2025/11/19	2025/12/4	2025/12/8	2025/12/9	2025/12/11	
焼却 汚泥	脱水汚泥	含水率	%	80.3	79.6	77.7	76.9	79.9	80.7	80.2	79.8	77.6	77.5	78.6
		処理量	kg/h	3980	3980	3980	3980	3980	3980	3980	3980	1890	1870	1890
	乾燥汚泥	含水率	%	—	—	—	—	—	—	—	—	21.8	22.4	24.6
		処理量	kg/h	—	—	—	—	—	—	—	—	170	170	170
消石灰の種類			消石灰スラリー								消石灰粉体			
Ca添加率		kg-CaO/kg-Ash	0	0.32	0.43	0.52	0	0.11	0.34	0.22	0	0.11	0.19	



図ー1 下水汚泥焼却設備の概略フロー

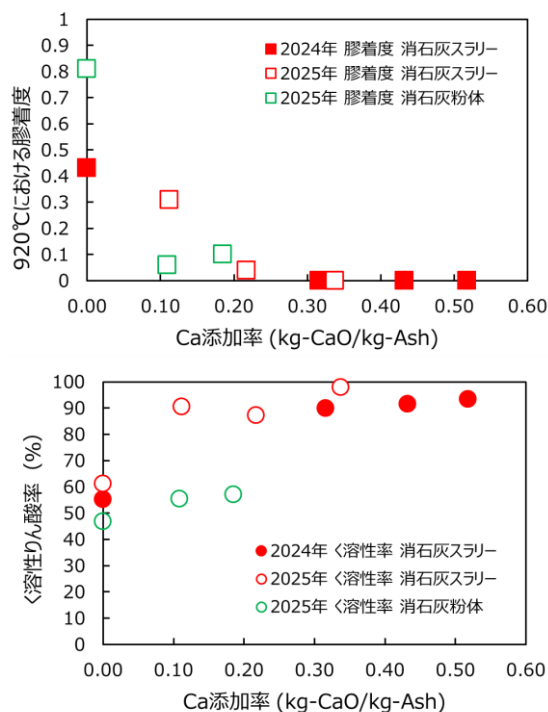
3. 試験結果

ブランク条件における灰発生量 1kg に対する消石灰添加量 (Ca 添加率) を指標とし、薬剤種の違いが各種効果に及ぼす影響を評価した (図ー2)。膠着度については、消石灰スラリー、消石灰粉体のいずれを用いた場合においても、同程度の低下が認められた (図ー2 上図)。

く溶性りん酸率については、消石灰スラリーを用いた実証試験においては、添加の初期段階からく溶性りん酸率の増加が認められた。一方で、消石灰粉体を用いた実証試験においては、消石灰スラリーを用いた実証試験と比べて、く溶性りん酸率の増加が限定的であった (図ー2 下図)。

表ー3 に、各試験条件の焼却灰に対する X 線回折による定性分析の結果を示す。いずれの浄化センターにおいても消石灰を添加しないブランク条件では、リン酸アルミニウム(AlPO_4)の相対強度が高い傾向がみられた。消石灰スラリーを用いた実証試験では、焼却灰においてリン酸カルシウムアルミニウム($\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7$)の相対強度が高い傾向がみられた。添加されたカルシウムが汚泥中リン成分と反応し、カルシウムとリンの化合物を形成することが確認された。

一方で、消石灰粉体を用いた実証試験では、焼却灰において石膏(CaSO_4)の相対強度が高くなる傾向がみられた。消石灰灰中のカルシウムが汚泥又は排ガス中硫黄成分と反応し、カルシウムと硫黄の化合物 (CaSO_4) を形成することが確認された。



図ー2 消石灰添加による各種効果への影響
(上図：膠着度、下図：く溶性りん酸率)

表ー3 X 線回折による定性分析結果

試験場所	矢作川浄化センター								衣浦西部浄化センター		
試験実施日	2025/12/2	2025/12/3	2025/12/4	2025/12/6	2026/11/17	2026/11/18	2026/11/19	2026/12/4	2026/12/8	2026/12/9	2026/12/11
消石灰の種類	消石灰スラリー								消石灰粉体		
Ca添加率(kg-CaO/kg-Ash)	0	0.32	0.43	0.52	0	0.11	0.34	0.22	0	0.11	0.19
SiO_2	++++	++++	++++	++++	++++	++	++	+++	+++	++	++
AlPO_4	+++	—	—	—	+	+	(+)	(+)	++++	+++	++
$\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7$	++	++	+	+	+	++	++	++	++	++	++
$\text{KAl}_2(\text{Si}_2\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	+	+	+	+	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
$\text{Ca}_4(\text{Mg},\text{Fe})_5(\text{PO}_4)_6$	—	—	—	—	(+)	(+)	—	—	(+)	(+)	+
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	—	—	(+)	++	—	—	—	—	—	—	—
CaSO_4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	++

相対強度： ++++非常に強い +++強い ++中程度 +弱い (+)非常に弱い —検出なし

4. 考察

消石灰スラリーの反応機構

消石灰スラリーの添加により、添加初期段階からく溶性りん酸率の上昇が認められた。また、 AlPO_4 の相対強度が弱くなり、 $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7$ の相対強度が強くなる傾向が認められた。消石灰添加により、難溶性結晶であるアルミニウム系のリン酸塩³⁾の形成が抑制され、クエン酸に易溶性の結晶であるカルシウム系のリン酸塩が形成されたため、く溶性りん酸率が上昇したと示唆された。また、消石灰添加量が最も少ない条件においても、膠着度への影響は少なかったが、く溶性りん酸率は90%と十分な肥料成分増加効果を得られている。この結果から、肥料成分増加を目的とする場合には、煙道閉塞抑制や脱硫を目的とした場合よりも、必要な消石灰添加量が少なくなることが示唆された。

消石灰粉体の反応機構

消石灰粉体の添加では、消石灰スラリーを用いた場合と比較した場合に、く溶性りん酸率の上昇が限定的であった。また、カルシウム系のリン酸塩の相対強度の変化は認められず CaSO_4 の相対強度が強くなる傾向が認められ、添加された消石灰は汚泥中のリンよりも排ガス中の硫黄成分に対して優先的に作用したことが示唆された。これは、消石灰粉体の供給先であるケーキ押込機において汚泥と消石灰の混合が十分でなかったため、添加された消石灰は汚泥中リンとの反応性が低下し、排ガス中の硫黄酸化物と気相反応した可能性がある。一方で、消石灰添加によるカルシウム系のリン酸塩の形成が認められないものの、膠着度の低下が認められた。これは、消石灰添加により形成された CaSO_4 を主成分とする石膏が高融点であることから、焼却灰の付着性の低下に寄与したことが要因と思われる。

筆者らが過去に実施した小型試験炉による焼却試験においては、消石灰粉体を脱水汚泥へ添加した後にフィーダで十分に混合し焼却処理することにより、焼却灰中のく溶性りん酸率の十分な上昇を確認している。肥料成分増加を目的として消石灰粉体を汚泥へ添加する際には、汚泥との混合状態を良好に保つことが重要となる。

5. 結論

焼却炉投入汚泥への消石灰添加効果を実証試験により検証した結果、以下の結論を得た。

- ・煙道閉塞抑制および肥料成分の増加といった消石灰添加の目的に応じて、必要となる消石灰添加量が異なることが確認された。
- ・添加する消石灰の形態やその供給方法および汚泥との混合状況により、汚泥焼却時の反応が異なることが確認された。

参考文献

- 1) 畔柳ら. 消石灰添加による汚泥焼却炉の煙道閉塞抑制効果等の検証. 第62回下水道研究発表会講演集, 2025, pp.1013-1015.
- 2) 知恵ら. 膠着度によるバイオマス燃料の灰障害予測評価. 火力原子力発電大会論文集, 2022, 73.5, 44-47
- 3) 杉江ら. 汚泥焼却条件が灰のく溶性リン濃度に及ぼす影響. 第61回下水道研究発表会講演集, 2024, pp.193-195.

問合わせ先：(公財) 愛知水と緑の公社 下水道部管理課 愛知県名古屋市中区丸の内 3-19-30

T E L 052-971-3054 E-mail g-ka@aichi-mizutomidori.or.jp