

3-1-2 北多摩二号水再生センター焼却2号炉の流動不良対策について

流域下水道本部 技術部 北多摩二号水再生センター
水質管理担当 河野 里名

1. はじめに

北多摩二号水再生センター（以下、北二）では、冬季になると流動不良によって焼却炉の運用が不安定になる傾向があり、焼却炉内の珪砂の粒径の増加が要因の一つとして考えられている。これらの現象は、閉塞抑制指標値（以下、余裕率）が1を下回っている期間に起こることから、炉内でのりん酸化合物の溶融（以下、りん溶融）と関係していると考えられていた。

そこで、2022年度冬季にりん溶融を防止する目的で焼却炉内の温度設定値を見直したところ、粒径の大きな珪砂の発生がなくなり、燃焼状態が安定した。また、温室効果ガスの1つである一酸化二窒素（以下、 N_2O ）の発生量や都市ガス使用量の削減も同時に確認されたため、この取り組みについて報告する。

2. 北二の焼却炉の状況

2-1 北二の焼却炉

北二は、国立市の大部分と立川市・国分寺市の一部の下水を日量5.5万 m^3 で処理する合流式の水再生センターで、下水処理で発生した汚泥は、センター内の汚泥処理施設で脱水・焼却を行っている。（脱水ケーキ換算30トン/日 含水率77% 年平均値）

焼却炉は、2基所有しており、1号炉が流動床炉、2号炉が多層燃焼炉で、いずれも焼却能力は40トン/日（脱水ケーキ換算）である。エネルギー効率の良い2号炉を優先稼働させ、老朽化の進む1号炉は予備炉としている。

多層燃焼炉は、空気の供給口が3か所あり（図-1）、一次空気ですべて汚泥を燃焼させ、フリーボード部（以下、FB部）で吹き込む二次空気と三次空気ですべて炉内を高温にし、汚泥燃焼で発生した N_2O を効率的に分解する。※参考文献1

炉内の温度制御点は、流動床部に1か所、FB部に2か所あり、設定温度に合わせて、空気量が自動制御される。

なお、2号炉は、排ガス測定用の N_2O 計が設置されている。

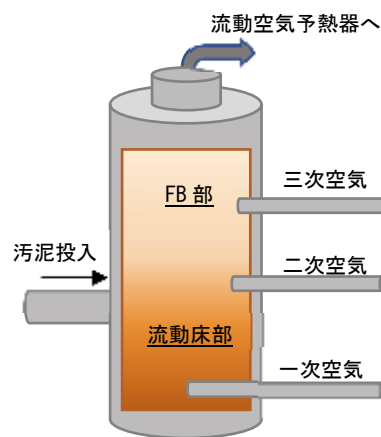


図-1 多層燃焼炉の構造

2-2 冬季の流動不良

東京都下水道局では、冬季を中心にりん溶融が原因と思われる焼却炉の煙道閉塞や流動不良が確認されている。りん溶融は、余裕率が1を下回ると起こり易くなるとされている。

北二において余裕率が1を下回るのは降雨の少ない冬季に限られ、過去の経験では余裕率や灰発生率の低下といったりん溶融の初期症状が見られても、降雨で回復することが多かった。しかし、この数年冬季の降水量が少なく、余裕率が1を下回り、灰発生率の低下と粒径の大きな珪砂が確認されるようになると、炉内で流動不良が発生し、燃焼状況が不安定になっていた。その際は、焼却炉内から抜き出した珪砂から、粒径の大きなものをふるいにかけて、正常な径の珪砂を再投入する作業を行い、流動不良の改善を図っていた。

2021年1月は、前述の作業を6回行ったが状況が改善されず、焼却量を28トン/日に減らした運用を強いられた。その結果、毎日3トンの焼却不足が発生してセンター内に汚泥が滞留するだけでなく、都市ガス消費率は、定格投入だった11月に比べて25%増加し、効率の悪い運転となった。

3. 焼却原因の推定

3-1 リン溶融と余裕率

リン溶融は、図-2に示すように、脱水ケーキ中に含まれる鉄やカルシウムなどのリンと結合しやすい金属イオンが少ない時に、リンがカリウムやナトリウム等と結合し、炉内温度（850℃以上）よりも融点が高い化合物を形成することで起こるとされている。溶融物は、その粘着性により煙道などの細い配管部分に吸着、堆積して、焼却炉の空気の流れを阻害する。さらに堆積量が増えると煙道が閉塞して、焼却炉は緊急停止する。

余裕率は、焼却灰中に存在するリンと高融点化合物を形成する金属のモル比を現したもので、式-1で表される。

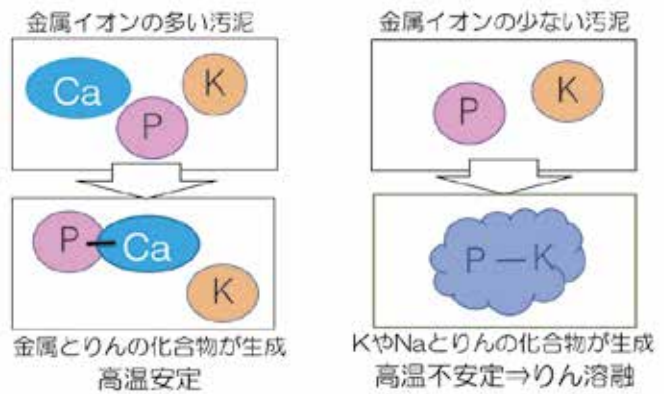


図-2 リン溶融のしくみ

$$\text{余裕率} = \left\{ \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{M(\text{Fe}_2\text{O}_3)} \times 3 + \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{M(\text{Al}_2\text{O}_3)} \times 4 - \frac{\text{CaO}}{M(\text{CaO})} \times \frac{2}{3} + \frac{\text{MgO}}{M(\text{MgO})} \times \frac{2}{3} \right\} / \left\{ \frac{\text{P}_2\text{O}_5}{M(\text{P}_2\text{O}_5)} \times 2 \right\} \quad (\text{式-1})$$

※M(i) [g/mol] : 化合物 i の分子量

3-2 リン溶融と流動不良

北二では、図-3に示す4項目を確認して、リン溶融とそれに伴う焼却炉不調の事前把握に努めている。

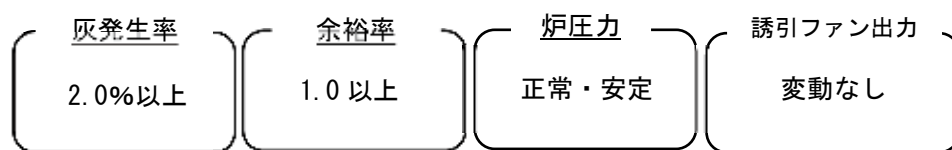


図-3 リン溶融の確認項目

灰発生率は、式-2に示すように焼却炉から排出された焼却灰の量を、投入した脱水ケーキ量で割ったものである。北二では、降雨の影響がない期間の灰発生率は2.2%が正常値であり、1.6%を下回ると異常値と判断している。

$$\text{灰発生率} = \text{灰発生量} / \text{焼却炉投入量} \times 100 \quad (\text{式-2})$$

なお、灰発生率と余裕率の低下は、リン溶融に伴う煙道閉塞リスク上昇の兆候を示す指標であり、正常値を外れても即座に焼却炉が停止することはない。ただし、この状況を放置することで、炉内の圧力上昇や誘引ファンの出力上昇につながり、焼却炉の停止に至ることが多い。

3-3 りん溶融と珪砂の増径

2022年度も余裕率（図-4）が1を下回った12月中旬以降から灰発生率（図-5）の低下が顕著になり、12月19日に1.6%を下回ったのち、12月23日の降雨により一旦上昇したが、12月28日から再度減少し、1月3日以降は連日北二の異常値の判断基準である1.6%（グラフ中の橙色横線）を下回るようになった。特に1月7日は1.3%と低く、明らかに異常な状態であった。

この期間の降雨量は図-6に示すとおり、12月22日に18mmの降雨があった以降はほとんど雨が降っておらず、1月の降雨量は4mmであった。

また、灰発生率の低下した期間は、炉内圧力が上昇しやすい傾向があったため、12月28日と1月10日に余剰珪砂の排出をおこなったところ、表-1に示すとおり、0.5mm程度の灰色の珪砂のほかに、振動ふるいを通過できない粒径数ミリから数センチの珪砂が確認された。

また、FB上部を目視観察すると、通常は多量の灰が炉内の空気の流れとともに舞い上がり、煙ったような状態になるが、灰発生率低下していた期間は、視界がはっきりとしていた。このことから、焼却灰は炉内下部にとどまり、焼却炉内を出ていないと推測され、その原因は粒径の大きな珪砂の生成にあると考えた。また、余裕率が低下すると珪砂の粒径が大きくなることから、りん溶融が関与していると考えた。そこで、珪砂とりん化合物の関係を調べることにした。

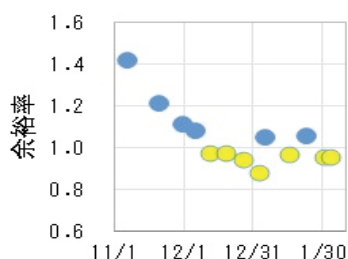


図-4 余裕率の変化

（余裕率1を下回る結果は黄色で表示）

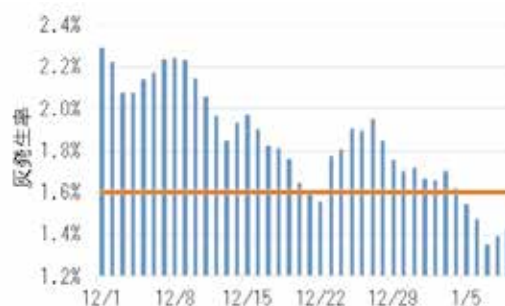


図-5 灰発生率の変化（5日間平均）

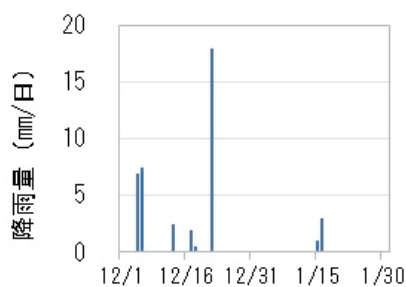
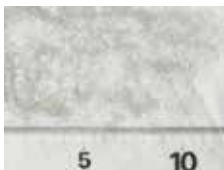



図-6 降雨量

表-1 余剰珪砂の性状

| | 振動ふるい | |
|----|--|---|
| | 通過 | 通過できない |
| 粒径 | 0.5mm前後 | 2~50mm |
| 色 | 灰色~白 | 茶色が多い。白や灰もある。 |
| 写真 |  |  |

4、珪砂の分析

珪砂の粒径の増大にりん溶融が関与することを検証するため、粒径の大きな珪砂の組成を調べた。

分析試料には1月10日に余剰珪砂として排出され、振動ふるいを通過できなかった珪砂を用いることとした。粒径0.2~3cmの珪砂は色の違いの存在比に応じて7~8個ほど選び取り1組にして粉砕した試料を3検体、粒径3cmを超えるものは、茶色を2つ、白を1つ選び取ってそれぞれ粉砕した。

蛍光X線分析の結果を図-7に、りん含有率を表-2に示す。分析試料のうち3cmを超える白色の検体はアルミニウムの割合が高く、他のものと性状が異なったため、調査結果から除外した。それ以外の5

検体は、珪砂の主成分である SiO₂ の割合（グラフ灰色）が 43%以上と高く、次いでリンの割合（グラフ黄色）が多い傾向があった。また、リン含有率は粒径の大きな珪砂ほど高く、3 cm以上の珪砂は通常の 0.05 cmの 6 倍のリンを含有していた。

以上のことから、分析前に推定していたとおり、粒径の大きな余剰珪砂は、焼却灰中のリン化合物が溶けて、珪砂同士を吸着させることで生成していると考えることができた。（図-8）これは、焼却灰の一部であるリン溶融物が吸着材として珪砂に取り込まれ炉内に滞留することを意味し、粒径の大きな珪砂の発生と灰発生率の低下が同時期に発生するという実際の現象と一致する。 ※参考文献 2

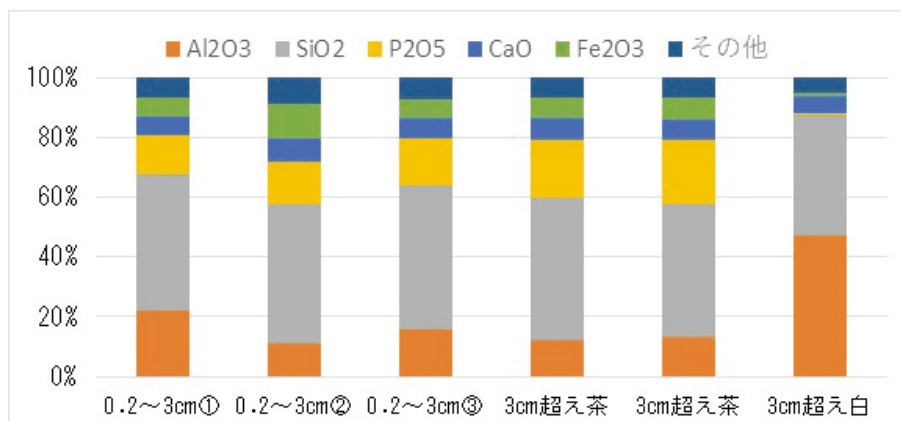


図-7 粒径の大きな珪砂の組成

表-2 珪砂のリン含有率

| 粒径 | リン含有率 |
|-----------|-------|
| 0.05cm程度 | 1% |
| 0.2~3.0cm | 4% |
| 3.0cm以上 | 6% |

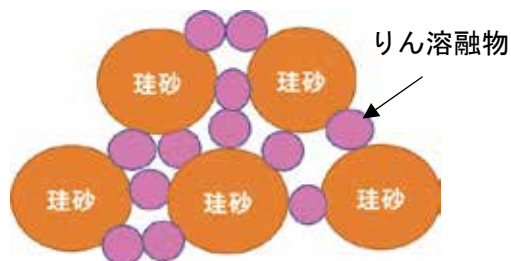


図-8 粒径の大きな珪砂の構造

5、焼却温度設定の変更とその効果

5-1 設定温度の検討

ここまでの検討から、粒径の大きな珪砂の生成には、リン溶融が関与していることが示唆された。リン溶融は炉内温度を下げることで防止できる。しかし、炉内温度の低下は N₂O 濃度の上昇を招くことから、温度設定に当たっては、リン溶融防止と N₂O 排出抑制の両立に配慮しなくてはならない。

そこで、2号炉が、流動床部、FB 中部、FB 上部の 3 か所で温度設定できる特徴を利用して、リン溶融防止と N₂O 濃度抑制を両立できる温度設定を検討した。

検討結果を整理すると、以下ようになる

- FB 上部の灰の通過量が減っていることから、今回の異常は流動床部から FB 下部で起きている
- 流動床部の設定温度を下げることで、粒径の大きな珪砂の生成が減り流動不良が改善する
- 流動床部の温度低下は N₂O の発生量を増加させる可能性はあるが、FB 部の温度が維持され、N₂O の分解が円滑に進めば排ガス中の N₂O 濃度は上昇しない
- 流動床部の温度を下げると汚泥の燃焼位置が炉内上部に拡大し、生成したりん溶融物が煙道に堆積する可能性がある

これらを踏まえ、下記の条件を設定した。

- ・流動床部の温度設定を下げる
- ・FB部の温度を維持する
- ・りん溶融物の煙道への堆積を抑制するために、炉出口温度を下げる

5-2 設定温度変更

調査は、以下のスケジュールで実施した。

変更前調査 : 2022年12月5日～2023年1月9日
 設定温度変更 : 2023年1月10日
 変更後調査 : 2023年1月11日～31日

測定結果の評価に当たっては、点検や汚泥量の減少による焼却炉の一時停止と再稼働時の数値の変動を補正するため、灰発生率は5日間平均を使用し、その他は定格で焼却を行った日（投入量39～42トン/日）のデータを用いた。

炉内の温度設定箇所と設定温度を図-9に、運用時の温度を表-3に示す。

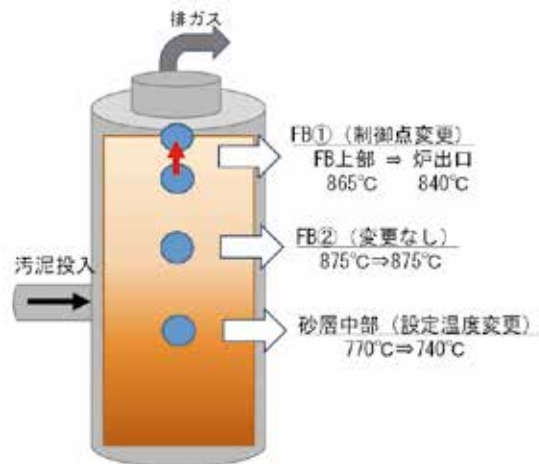


図-9 温度設定箇所と設定温度

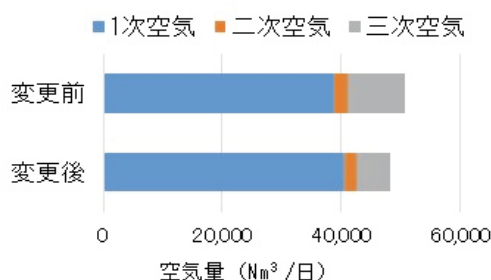
表-3 運用温度の変化

| | 変更前 | 変更後 |
|------|-----|-----|
| 炉出口 | 853 | 848 |
| FB部 | 863 | 863 |
| 砂層中部 | 754 | 743 |

※FBはFB上部と中部の平均値

温度設定値を下げた砂層中部は754°Cから743°Cで11°C低下した。FB温度は863°Cで変化はなく、見込み通りの結果を示した。炉上部の制御点は煙道閉塞を防止するためFB上部から炉出口に変更したところ、炉出口の運用温度は853°Cから848°Cに下がり、りん溶融が起こりやすいとされている850°Cを下回るようになった。

また、1日の総空気量は図-10に示すとおり50,700Nm³から48,200Nm³に4%減少した。その内訳をみると、流動床部では供給される一次空気が4%増加し、流動床部の温度低下に寄与し、FB部は、二次空気が9%、三次空気が42%減少して、炉内温度を維持した。



| | 1次空気 | 二次空気 | 三次空気 | 総空気量 |
|----|------|------|------|------|
| 増減 | 4% | -9% | -42% | -5% |

図-10 空気量の変化

5-3 灰発生率の変化

温度設定変更による灰発生率の変化を図-11に示す。

灰発生率は、前述したように12月28日から低下傾向にあったが、温度設定変更後は上昇傾向になり、1月16日に1.6%を超えてからは、1.6%を下回することはなかった。粒径の大きな珪砂はほとんど排出されなくなり、昨年度まで行っていた珪砂の再投入を行うことはなかった。

この結果は、珪砂の粒径増大にりん溶融が関与しているのではないかとの前述の考えが正しいことが示唆された。

5-4 N₂Oの変化

N₂O濃度の変化（設定値変更前後20日）を図-12に示す。温度設定後は12ppmを超える日が減少し、濃度の低下が確認された。全調査期間の平均値は変更前13.3ppm、変更後11.6ppmだった。

1日のN₂O排出量は、2.4トン-CO₂から2.1トン-CO₂になり13%削減された。



図-11 温度変更前後の灰発生率の変化

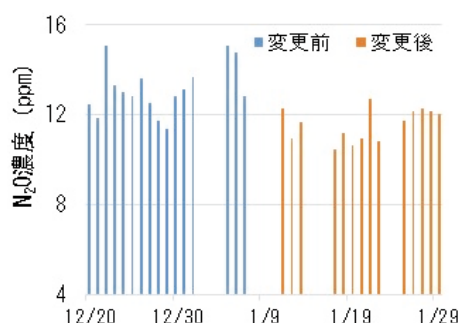


図-12 N₂O濃度の変化

5-5 運用コストの変化（電力使用量・都市ガス使用量）

焼却にかかる1日の電力使用量は、変更前・変更後ともに5300kwhで違いが見られなかった。これは、電力使用量の多い誘引ファンや流動ブローアの稼働に変化がなかったためと考えている。

都市ガス使用量は、温度設定変更前日量1150Nm³に対して変更後は9.8%減の1040Nm³となった。これは、流動床部の設定温度を下げた効果と考えられる。

以上のように、流動床部の温度設定を下げることで、電力使用量は変化しないものの、都市ガス使用量を削減でき、焼却炉の運用コストの低減が図れることが確認できた。

6、調査期間以降の運用

調査結果が良好であったことから、調査終了後も同様の温度設定で運用を継続した。調査終了後の降雨量を図-13、余裕率を図-14、灰発生率の変化を図-15、焼却炉投入量を図-16に示す。

2月以降も降雨が少ない傾向は続き、2月14日～3月16日まで1か月間降雨がなかった。この期間の余裕率の多くが1を下回っていたが、灰発生率は1.6%を超えており、流動不良の兆候も見られなかった。

3月の下旬以降、定期的に降雨があったことで、余裕率が1を上回るようになり、物理的にはりん溶融の危険性が少なくなった。そこで、3月11日以降は煙道閉塞のリスクが高まる過負荷運転を浅川水再生センターの汚泥を受け入れて実施したが2号炉の運用に問題はなかった。

また、N₂O排出量（図-17）と都市ガス使用量（図-18）について、温度設定変更前の平均値（グラフ中橙色の横線）と比較をしたところ、概ね温度変更前よりも低い数値だった。

このことから、流動床部の設定温度を下げる運用は、長期間安定した焼却炉運用が可能であり、N₂O

排出量や運用コストも抑えられることが確認された。

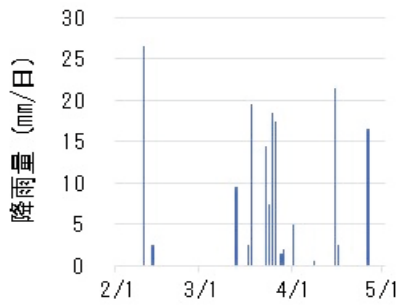


図-13 降雨量

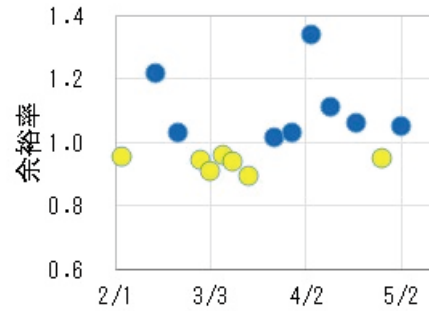


図-14 余裕率の変化

(余裕率1を下回る結果は黄色で表示)

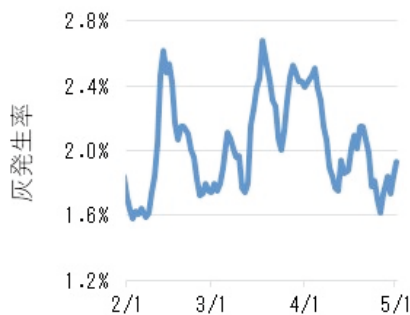


図-15 灰発生率の変化

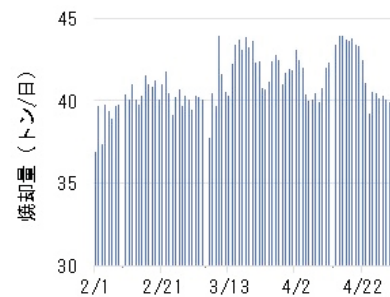


図-16 焼却炉投入量

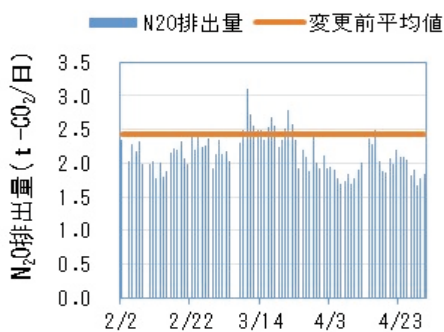


図-17 N₂O 排出量

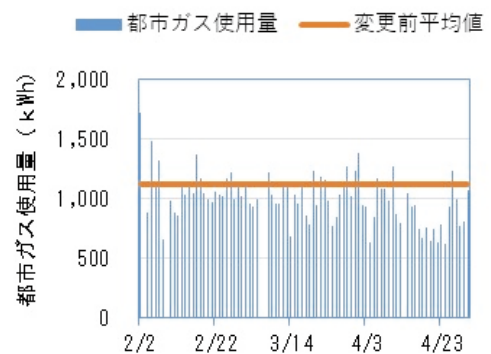


図-18 都市ガス使用量

7、まとめ

多層燃焼炉の設定温度を下げることで、以下のような効果と知見が得られた。

- ① 粒径の大きな珪砂の生成は、りん溶融物が吸着材のような働きをして珪砂同士を結合させることによって起こると強く示唆された。
- ② 多層燃焼炉の砂層中部の温度を下げることで、粒径の大きな珪砂の生成を抑制できた。
- ③ 粒径の大きな珪砂の生成抑制により、流動不良が改善し焼却炉が安定した。
- ④ N₂O 排出量は13%減少しており、焼却炉の安定運用とN₂O濃度の抑制が両立できた。
- ⑤ 都市ガス使用量は9.8%削減し、運用コストの削減が図れた。
- ⑥ 余裕率が1以上で閉塞リスクが低い場合は、過負荷運転が可能だった。

参考文献

- 1) 多層燃焼技術による下水汚泥流動焼却炉からの N₂O 排出抑制効果について
(第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会 メタウォーター株式会社 服部修策 他)
- 2) 下水汚泥の焼却時に生成される焼結物の構造と 人工知能を用いた煙道閉塞の抑制方法
(2021 年度東京都下水道局技術調査年報 計画調整部 技術開発課 岸本 長 他)