

## 2-3-2 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

計画調整部	技術開発課	○岸本	長
計画調整部	技術開発課	藤江	正樹
東京都下水道サービス(株)		曾根	啓一
東京都下水道サービス(株)		小泉	僚平
(株)日水コン		村田	道拓
		水上	紗智
		濱谷	義晃

#### 1. はじめに

下水汚泥焼却炉では、焼却時に炉内で珪砂と投入汚泥などが焼結し、クリンカを生じることがある。このようなクリンカが多く発生すると珪砂の流動を妨げる原因となる。また、近年では、排ガスダクトや空気予熱器上部に焼却灰が固着し煙道を閉塞させる閉塞物が生じる事象が発生している。これらクリンカや閉塞物といった焼結物は、汚泥焼却炉の運転に支障を来すため運用上の課題となっている。東京都下水道局（以下、当局という）では、これら焼結物の発生原因を調査するため、表面分析と膠着度分析<sup>1)</sup>によりクリンカ及び閉塞物の構造と焼結温度を明らかにした。また、熱力学的平衡状態シミュレーションを用いて炉内中の物質が燃焼中に生じる変化を確認した。得られた知見について報告するとともに、これまでに当局で開発した人工知能を用いて焼却灰の画像から閉塞危険性を判断する閉塞抑制方法について紹介する。

#### 2. 焼結物の構造

当局で発生しているクリンカや閉塞物の物的な特徴や発生場所はそれぞれ図1、図2のとおりである。これら焼結物の構造を分析するため、表面分析ではEPMA面分析データを元にRGB図を作成し、各元素の存在状態について調査した。RGB図は三元素を赤緑青の

	クリンカ	閉塞物
		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>目視で珪砂の粒が確認できる</li> <li>岩石のように硬い場合や柔らかく崩れやすい場合がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>固まっているが柔らかく、触ると表面が崩れやすい</li> <li>層状になっている</li> <li>焼却灰のように粉末状の塊</li> </ul>

図2 焼結物の特徴（左：クリンカ、右：閉塞物）



図1 焼却炉内部の焼結物

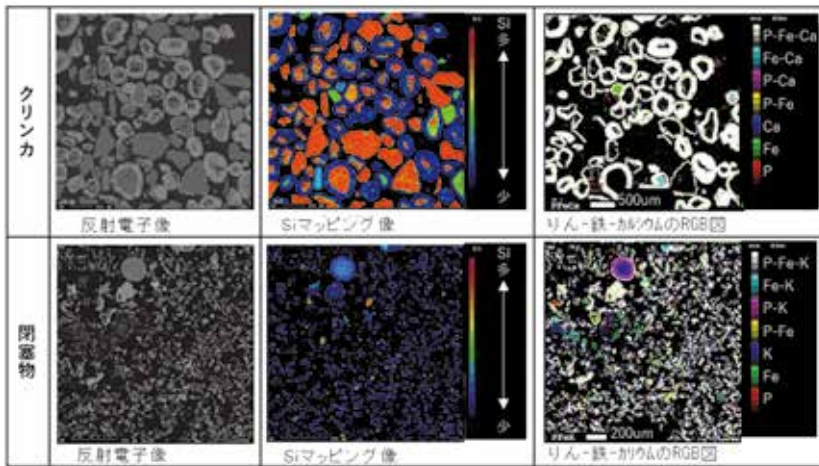


図4 焼結物の表面分析の結果

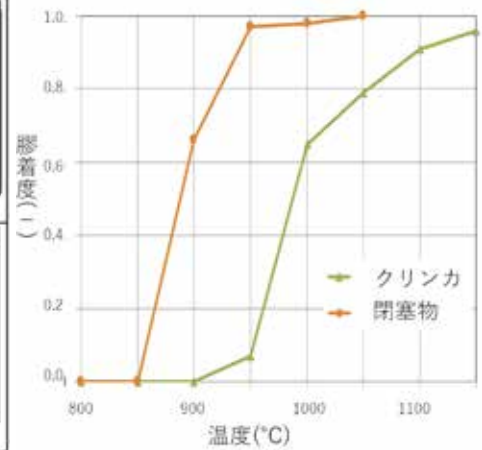


図3 焼結物の膠着度

色の三原色で表現し、色の重ね合わせで元素の存在状態を表現する分析方法である。図3に表面分析の結果としてクリンカを上段、閉塞物を下段とし、表面の反射電子像(左)、シリカ(Si)マッピング像(中央)、代表的なRGB図(右)を示す。クリンカはSiマッピング像から粒状の硅砂の主成分であるSiが全体的に存在し、RGB図からSiを中心にリン酸化合物が包み込みこむように存在し、これがバインダーとして働き、周囲のSiと結合した構造となっていた。一方、閉塞物はSiマッピング図からクリンカに比べSiは少なく、RGB図からパウダー状のリン酸化合物がバインダー成分を形成し、結合した構造であることが分かった。また、RGB図の紫色部分はSi中心にリン酸カリウム化合物(P-K)が包み込むように存在している箇所であった。P-KだけではなくP-Caの存在も確認され、リン酸化合物がバインダーの要因であることが示唆された。次にこれら焼結物の膠着度分析の結果を図4に示す。膠着度とはゴミ焼却炉でクリンカの焼結温度の推定に用いられる指標であり、膠着度が1.0に近いほど硬く焼結(熔融固化)していること示している<sup>1)</sup>。膠着度の上昇点から、閉塞物は850~900°Cで、クリンカは閉塞物よりも高温の950~1000°Cで、それぞれ焼結が始まることが分かった。このことから、閉塞物は炉内でP-K等のリン酸化合物が熔融し、バインダー成分となり焼却灰と結合したものと推察された。

一方、クリンカは焼結温度が焼却炉の管理温度値よりも高温であることから、炉内においてガスガン周辺など局所的に950°C以上となる部分で、硅砂と汚泥中のリン酸化合物が焼結し発生したものと推察された。

### 3. 熱力学的平衡状態シミュレーションによる閉塞物等の成分比と相変化の関係

焼却炉内で発生する焼結物成分系の相変化と炉内温度の関係を把握するため、成分比を変化させ熱力学的平衡状態のシミュレーションを実施した。計算には多成分系の熱力学平衡状態シミュレーションソフトウェアであるFactSageを用いた。シミュレーションでは外的要因が考慮されないため、実現象とは異なるものの、成分比が相変化に与える影響を確認できると仮定した。本解析では、計算された各温度における固相および液相の質量を用いて、以下の式で定義される液相率をもとに、炉内で焼却灰等が熔融しやすい(液相率が大きい)状態にあるかどうかを確認した。

$$\text{液相率}(-) = \frac{\text{液相質量}(g)}{\text{液相質量}(g) + \text{固相質量}(g)}$$

ここで、本解析に使用した基準試料の成分比は下表とした。

表 1 シミュレーションに用いた基準試料の成分比(%)

基準試料	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
閉塞物	40.33	15.28	18.19	7.90	4.16	7.59	0.94	4.78	0.83
焼却灰	33.92	8.84	26.79	10.32	9.07	5.63	1.70	2.94	0.77

### (1) リン酸化合物の減少

基準試料とした閉塞物の成分からリン酸化合物 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) を減少させた条件での液相率の変化を確認した。炉内温度近傍である 800~900℃における各条件と解析結果を図 5 左図に示す。基準試料では 800~900℃(赤破線間)で液相率が急激に高まり、この温度帯で閉塞物の焼結が進むことが示唆された。一方、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> を減少させた場合は、液相率の急激な増加が見られなくなった。さらに P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の減少量が多いほど液相率は低い値を示した。この結果及び図 3 の結果より、リン酸化合物が閉塞物の生成に寄与しており、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> が高い場合は閉塞の危険性が高まることが確認された。

### (2) 鉄成分の増加

次に、焼結していない通常時の焼却灰を基準試料として、焼却灰の成分から鉄成分 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) を増加させた条件での液相率の変化を確認した。その結果を図 5 右図に示す。閉塞物で見られた 800~900℃(赤破線間)での液相率の上昇はなく、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を増加させた場合、液相率は基準試料よりも低下を示した。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が増加することで焼結し難くなる傾向となった。当局では閉塞対策としてポリ硫酸第二鉄を利用し、汚泥に鉄成分を添加しており、本解析からも、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の添加が閉塞抑制に効果があることが示唆された。

### (3) 950~1000℃における液相率の上昇点

今回、熱力学平衡状態シミュレーションを用いて、上記のように成分比の条件から液相率の変化を確認したが、950~1000℃付近でも液相率の傾きが上向きに変化する上昇点(赤丸破線)が確認された。前述したクリンカの膠着度の上昇する温度帯とも重なることから、炉内が局所的に 950~1000℃の高温域となる地点で急激に熔融し、クリンカ等の焼結物が生成されている可能性が示唆された。

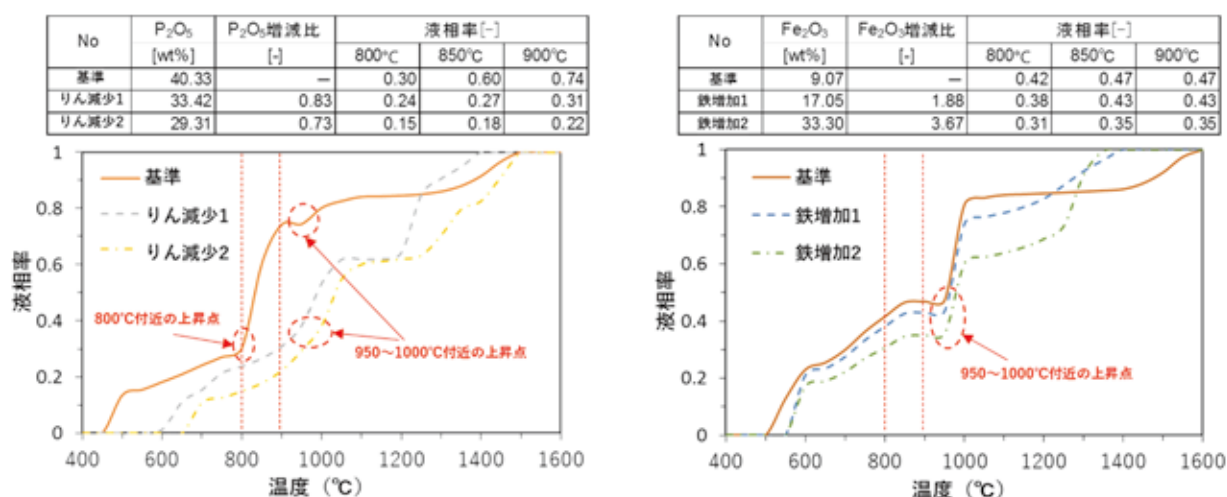


図5 熱力学平衡状態シミュレーション結果

(左：りんを減少させた場合、右：鉄を増加させた場合)

#### 4. 人工知能を用いた閉塞抑制方法

今回、焼結物の生成に  $P_2O_5$  が関わっていることを示した。過去に報告したとおり、当局が開発した画像センサー測定装置では、焼却灰の画像から人工知能（AI）により瞬時に焼却灰中の  $P_2O_5$  含有率と閉塞の危険性を示す閉塞抑制指標値（以下、指標値）を推定することができる<sup>2)</sup>。本装置（図 6）を用いて、 $P_2O_5$  含有率と指標値を監視し、 $P_2O_5$  含有率が増加傾向、または指標値が減少傾向を示した場合は、薬剤添加により鉄を汚泥に添加することで、一定の閉塞抑制効果が得られる。 $P_2O_5$  含有率と指標値は焼却する汚泥の組成により変化するため、日々のトレンドを監視することが肝要である。また閉塞物の焼結温度帯は  $850\sim 900^{\circ}\text{C}$  付近と推察されるため、煙道閉塞が危惧される状況では、炉内温度を低く管理することでも、閉塞抑制効果が期待できる。しかし、焼却灰分析には、人手で焼却灰の採取、運搬、分析を実施する必要があるため、プロセスの自動化が課題となっている。



図6 人工知能を用いた画像センサー測定装置

#### 5. まとめ

本稿では、汚泥焼却炉で発生するクリンカと閉塞物について、表面分析と熱力学平衡状態シミュレーションからその構造、焼結温度及び組成と相変化の関係を示した。また、当局が開発した人工知能を用いた閉塞抑制方法について紹介した。当局では引き続き、閉塞抑制方法のプロセスを自動化する課題に取り組み、汚泥処理の安定化に寄与していきたい。

#### 参考文献

- 1) 茂田潤一 他：都市ゴミ焼却発電ボイラでの灰障害、IIC REVIEW/2018/04. No.59
- 2) 岸本長 他：ディープラーニングの活用による下水汚泥焼却炉閉塞抑制システムの高精度化、第57回下水道研究発表会講演集、pp1042-1044