

循環式流動焼却炉におけるクリンカ対策について

1. 目的

東部スラッジセンターの循環式流動焼却炉では、燃焼によって溶けた灰の塊であるクリンカが炉の壁面で成長・脱落し、砂循環の不良やサイクロンの閉塞を引き起こすなど、運転に支障をきたす事例が度々発生している。現状において、他施設の調査研究事例を見ても、クリンカの発生阻止は困難な状況であることから、本調査研究では、クリンカの成長度合いを予測・推定する手法を検討し、計画的なクリンカの除去など、適切な対処につなげることを目的とした。

調査期間は2年間とし、初年度の令和4年度は、クリンカ発生に起因すると言われている無機成分の焼却灰中の含有量の実態調査、及び含有量を簡易に分析する手法の検討を行うとともに、過去のクリンカ生成報告書の整理や、他施設のクリンカ対策に関する文献調査を行い、クリンカ生成の理論的要因を整理することを目的として調査を行った。

2. 調査概要

2-1 調査期間

調査期間は、令和4年4月から令和5年2月までとした。

2-2 調査項目・方法

1) 焼却灰成分に関する調査

クリンカの生成には汚泥中のリン等の無機成分が関与し、焼却の際に融点の低いリン化合物が生成されると焼却灰融解温度が低減し、他の焼却灰や流動砂の接着剤となりクリンカが生成するとの見解があることから、焼却灰中の無機成分含有量に関する以下の調査を行った。

① 蛍光X線分析調査

- ア) 試料は、焼却灰は週1回、クリンカは生成した際（令和5年1月に1回）に採取した。
イ) 試料の無機成分の含有量について、表-1に示す各項目の蛍光X線分析を行った。各無機成分は、酸化物で存在するものとして分析を行った。

表-1 調査項目

調査項目 (化学式)	ケイ素 SiO ₂	リン P ₂ O ₅	鉄 Fe ₂ O ₃	カルシウム CaO	アルミニウム Al ₂ O ₃	カリウム K ₂ O	マグネシウム MgO
---------------	-------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	--------------	--	--------------------------	---------------

② 近赤外成分計の実用可能性検討調査

近赤外成分計は、一般的には有機物を対象に利用されていることから、焼却灰のような無機成分の測定について検討を行った。

調査項目は表-1の項目とし、1号炉と2号炉の焼却灰を対象に、公社所有の近赤外成分計(KJT270)により吸光度の測定を行った。この吸光度と①の蛍光X線分析の結果から無機成分の含有量を定量する手法を用い、近赤外成分計の実用可能性について検証を行った。なお、試料は蛍光X線分析と同一のものを用いた。

ア) 近赤外成分計の原理

近赤外線領域において、成分にはその成分特有の吸収帯があり、特有の波長光を物質に

当てた場合、その成分の含有量に応じて光が吸収され吸光度が変化する。その減衰量を調べることで、成分量を定量することが可能となる。

イ) 変換式（検量線）を用いた定量方法

近赤外線線の吸収度合いから成分量を換算するためには変換式が必要となる。この変換式のことを検量線とも呼ぶ。

近赤外成分計（KJT270）では、変換式を簡単な操作で作成する機能が備わっている。変換式は、近赤外成分計で測定した焼却灰の6つの吸光度の値と、吸光度ごとの係数から得られる。この変換式により計算された結果が、測定物質の成分の含有量であり、近赤外成分計に「表示値」として表示される。

ウ) 近赤外成分計の実用可能性についての検討

近赤外成分計において、変換式に用いる係数は、変換式で計算された表示値と蛍光X線分析による実測値との差が小さくなるよう演算により設定され、一定の検体数で重回帰分析を行うことで係数が決定する。本調査では、1号炉21検体、2号炉26検体を用いて計算された表示値と、蛍光X線分析の実測値の決定係数R二乗の値から近赤外成分計の実用可能性を検証した。

2) 文献調査

東部スラッジセンターにおけるクリンカを原因とする過去の焼却炉運転停止に関する報告内容を整理するとともに、他施設のクリンカ対策に関する調査研究事例の文献等からクリンカ生成や生成抑制方法等について整理した。

3. 調査結果（データ一覧）

1) 焼却灰成分に関する調査

① 蛍光X線分析結果

焼却灰に含まれる無機成分ごとの含有量の年間推移を図-1から図-7に示した。表-2は毎回の分析結果の一覧である。

各成分は、年間を通じて概ね一定の含有量で推移していた。クリンカについては本調査では1試料のみの分析となったが、各成分は焼却灰と同様の組成であった。主要な無機成分の含有量については、年間を通じた大きな変動はなかったが、それぞれ次のような挙動を示していた。

ア) ケイ素

年間を通して平均33%程度含まれていることが確認された。年間の変化としては、降雨後に含有量が高まり、春季及び秋季中盤から冬季にかけては含有量が低下する傾向であった。

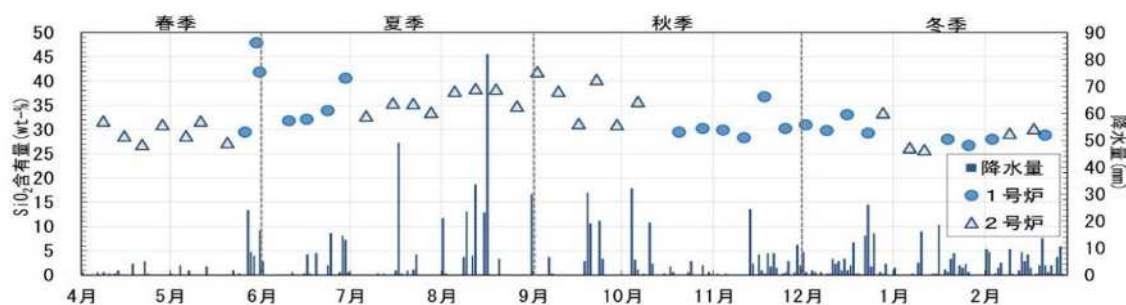


図-1 焼却灰に含まれるSiO₂含有量

イ) リン

年間を通して平均 23%程度含まれていることが確認された。年間の変化としては、リンについては降雨後に含有量は低下し、ケイ素とは逆の挙動を示していた。秋季中盤から冬季にかけては含有量が高まる傾向であった。

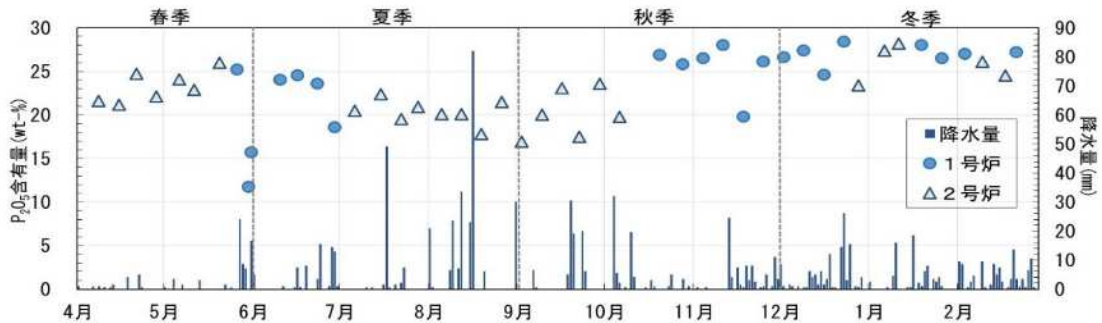


図-2 焼却灰に含まれる P_2O_5 含有量

ウ) 鉄

年間を通して平均 15%程度含まれていることが確認された。年間の変化としては、春季はやや高めで推移し、夏季は降雨後に含有量が低下した。秋季から冬季についてはほとんど変動がなく、平均値付近において一定の含有量で推移した。

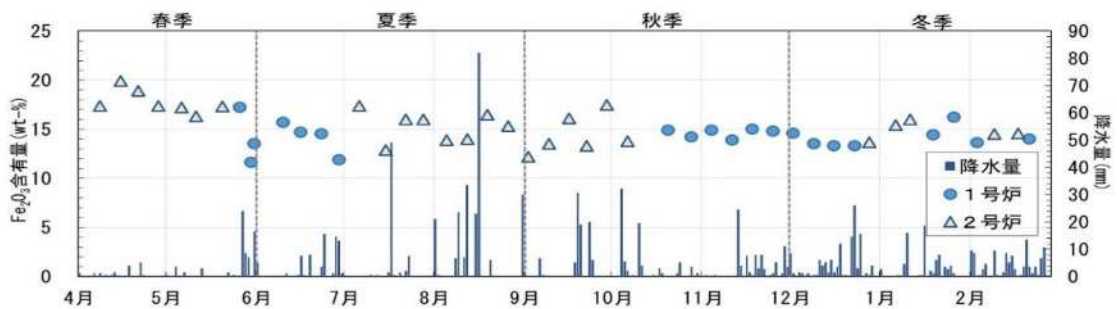


図-3 焼却灰に含まれる Fe_2O_3 含有量

エ) カルシウム

年間を通して平均 10%程度含まれていることが確認された。年間の変化としては、リンと同様の傾向を示し、降雨後に含有量は低下した。また、秋季中盤から冬季にかけては含有量が高まる傾向であった。

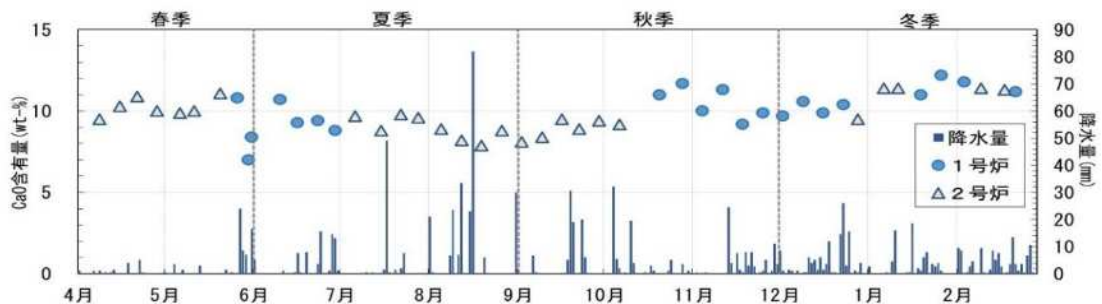
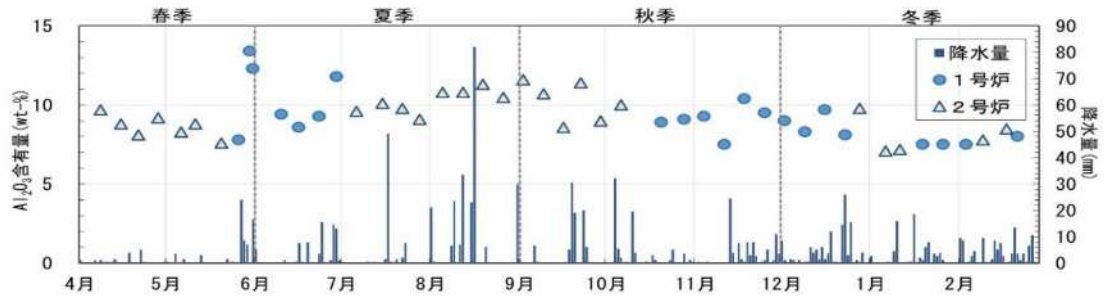


図-4 焼却灰に含まれる CaO 含有量

オ) アルミニウム

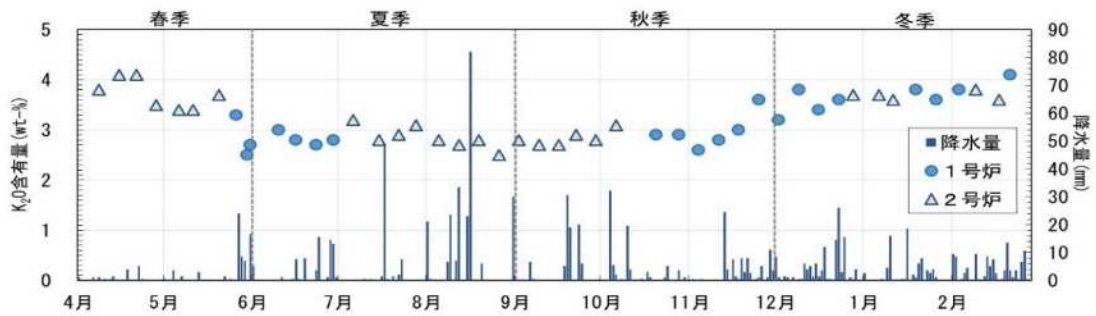
年間を通して平均9%程度含まれていることが確認された。年間の変化としては、ケイ素と同様の傾向を示し、降雨による土砂等の流入により含有量が高まる傾向が確認された。また、夏季から秋季中盤まではやや高めで推移し、春季及び秋季中盤から冬季は低下する傾向であった。



図一五 焼却灰に含まれる Al_2O_3 含有量

カ) カリウム

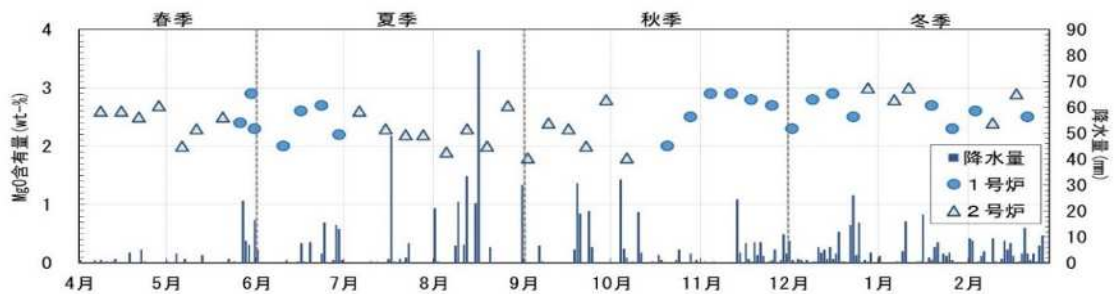
年間を通して平均3%程度含まれていることが確認された。年間の変化としては、リンと同様の傾向を示し、降雨後は含有量が低下し、秋季中盤から冬季には含有量が高まる傾向であった。



図一六 焼却灰に含まれる K_2O 含有量

キ) マグネシウム

年間を通して平均2%程度含まれていることが確認された。マグネシウムについては年間の変化が少なく、一定の傾向で推移した。



図一七 焼却灰に含まれる MgO 含有量

表一 2 焼却灰及びクリンカに含まれる主要な無機成分の蛍光X線分析結果

採取日	採取箇所	種類	SiO ₂ (wt-%)	P ₂ O ₅ (wt-%)	Fe ₂ O ₃ (wt-%)	CaO (wt-%)	Al ₂ O ₃ (wt-%)	K ₂ O (wt-%)	MgO (wt-%)
4月8日	2号炉	焼却灰	31.8	21.6	17.4	9.5	9.7	3.8	2.6
4月15日	2号炉	焼却灰	28.7	21.2	19.9	10.3	8.8	4.1	2.6
4月21日	2号炉	焼却灰	26.9	24.7	18.9	10.9	8.1	4.1	2.5
4月28日	2号炉	焼却灰	31.0	22.1	17.4	10.0	9.2	3.5	2.7
5月6日	2号炉	焼却灰	28.7	24.1	17.2	9.9	8.3	3.4	2.0
5月11日	2号炉	焼却灰	31.8	22.9	16.3	10.0	8.8	3.4	2.3
5月20日	2号炉	焼却灰	27.3	26.0	17.3	11.1	7.6	3.7	2.5
5月26日	1号炉	焼却灰	29.4	25.2	17.2	10.8	7.8	3.3	2.4
5月30日	1号炉	焼却灰	47.9	11.7	11.6	7.0	13.4	2.5	2.9
5月31日	1号炉	焼却灰	41.8	15.7	13.5	8.4	12.3	2.7	2.3
6月10日	1号炉	焼却灰	31.8	24.0	15.7	10.7	9.4	3.0	2.0
6月16日	1号炉	焼却灰	32.1	24.5	14.7	9.3	8.6	2.8	2.6
6月23日	1号炉	焼却灰	33.9	23.6	14.5	9.4	9.3	2.7	2.7
6月29日	1号炉	焼却灰	40.6	18.6	11.9	8.8	11.8	2.8	2.2
7月6日	2号炉	焼却灰	32.8	20.5	17.4	9.7	9.6	3.2	2.6
7月15日	2号炉	焼却灰	35.5	22.4	12.9	8.8	10.1	2.8	2.3
7月22日	2号炉	焼却灰	35.4	19.5	16.0	9.8	9.8	2.9	2.2
7月28日	2号炉	焼却灰	33.6	20.9	16.0	9.6	9.1	3.1	2.2
8月5日	2号炉	焼却灰	37.9	20.1	13.9	8.9	10.8	2.8	1.9
8月12日	2号炉	焼却灰	38.4	20.1	14.0	8.2	10.8	2.7	2.3
8月19日	2号炉	焼却灰	38.3	17.8	16.5	7.9	11.3	2.8	2.0
8月26日	2号炉	焼却灰	34.9	21.5	15.3	8.8	10.5	2.5	2.7
9月2日	2号炉	焼却灰	41.9	16.9	12.2	8.1	11.6	2.8	1.8
9月9日	2号炉	焼却灰	37.9	20.0	13.5	8.4	10.7	2.7	2.4
9月16日	2号炉	焼却灰	31.3	23.1	16.1	9.5	8.6	2.7	2.3
9月22日	2号炉	焼却灰	40.3	17.5	13.3	8.9	11.4	2.9	2.0
9月29日	2号炉	焼却灰	31.0	23.6	17.5	9.4	9.0	2.8	2.8
10月6日	2号炉	焼却灰	35.8	19.8	13.8	9.2	10.0	3.1	1.8
10月20日	1号炉	焼却灰	29.5	26.9	14.9	11.0	8.9	2.9	2.0
10月28日	1号炉	焼却灰	30.2	25.8	14.2	11.7	9.1	2.9	2.5
11月4日	1号炉	焼却灰	29.9	26.5	14.9	10.0	9.3	2.6	2.9
11月11日	1号炉	焼却灰	28.3	28.0	13.9	11.3	7.5	2.8	2.9
11月18日	1号炉	焼却灰	36.7	19.8	15.0	9.2	10.4	3.0	2.8

採取日	採取箇所	種類	SiO ₂ (wt-%)	P ₂ O ₅ (wt-%)	Fe ₂ O ₃ (wt-%)	CaO (wt-%)	Al ₂ O ₃ (wt-%)	K ₂ O (wt-%)	MgO (wt-%)
11月25日	1号炉	焼却灰	30.2	26.1	14.8	9.9	9.5	3.6	2.7
12月2日	1号炉	焼却灰	30.9	26.6	14.6	9.7	9.0	3.2	2.3
12月9日	1号炉	焼却灰	29.8	27.4	13.5	10.6	8.3	3.8	2.8
12月16日	1号炉	焼却灰	33.1	24.6	13.3	9.9	9.7	3.4	2.9
12月23日	1号炉	焼却灰	29.2	28.4	13.3	10.4	8.1	3.6	2.5
12月28日	2号炉	焼却灰	33.5	23.4	13.7	9.5	9.8	3.7	3.0
1月6日	2号炉	焼却灰	26.3	27.4	15.4	11.4	7.1	3.7	2.8
1月11日	2号炉	焼却灰	25.8	28.2	16.0	11.4	7.2	3.6	3.0
1月19日	1号炉	焼却灰	28.0	28.0	14.4	11.0	7.5	3.8	2.7
1月24日	2号炉	クリンカ	27.6	26.4	15.7	11.0	8.8	4.0	3.2
1月26日	1号炉	焼却灰	26.7	26.5	16.2	12.2	7.5	3.6	2.3
2月3日	1号炉	焼却灰	28.0	27.0	13.6	11.8	7.5	3.8	2.6
2月9日	2号炉	焼却灰	29.2	26.1	14.5	11.4	7.8	3.8	2.4
2月17日	2号炉	焼却灰	30.2	24.5	14.6	11.3	8.5	3.6	2.9
2月21日	1号炉	焼却灰	28.8	27.2	14.0	11.2	8.0	4.1	2.5

②近赤外成分計の実用可能性検討結果

1号炉及び2号炉の焼却灰中の主要な無機成分について、蛍光X線分析での実測値と近赤外成分計の表示値の相関を図-8から図-21に示した。表-3は決定係数をまとめたものである。また、表-4と表-5は、近赤外成分計の表示値データの一覧である。

決定係数R二乗の値は、一般的に0.5以上で一定の精度があるものとみなすことができ、1に近づくほど精度が高いと言える。表-3に示すとおり、1号炉と2号炉の焼却灰を比較すると、カリウムを除き2号炉の焼却灰においてR二乗の値が高くなった。また、両焼却炉ともにリンのR二乗値が最も高く、近赤外成分計の精度が高い結果となった。

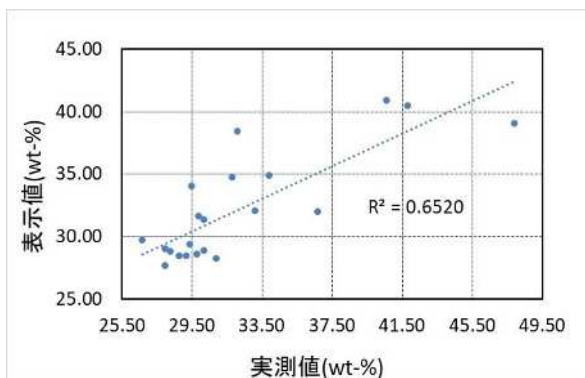


図-8 SiO₂ (1号炉焼却灰)

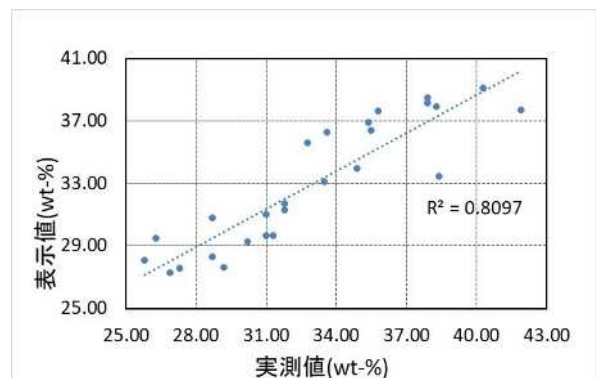
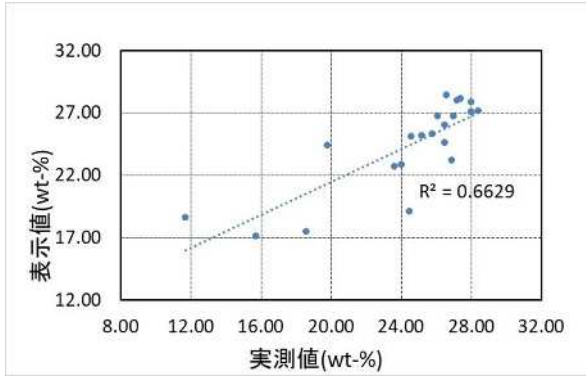
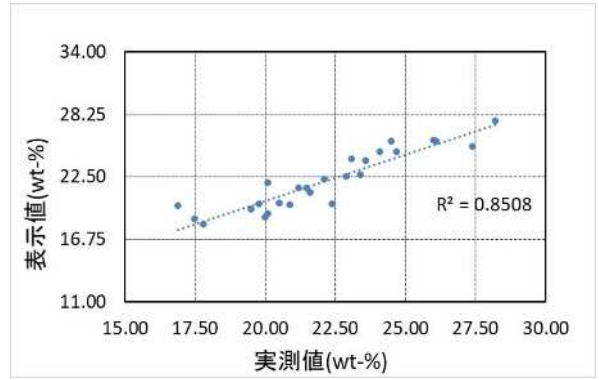


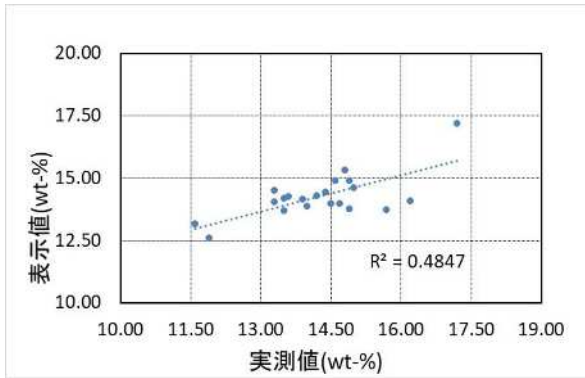
図-9 SiO₂ (2号炉焼却灰)



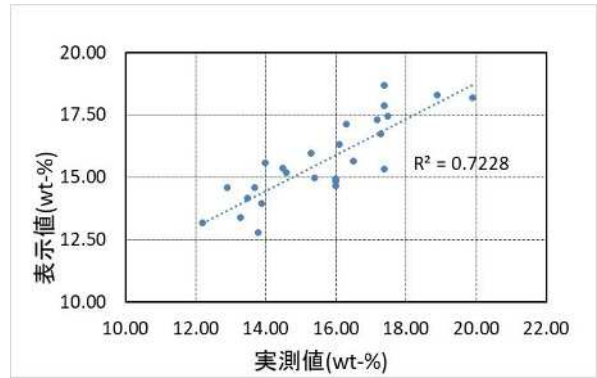
图一10 P₂O₅ (1号炉烧却灰)



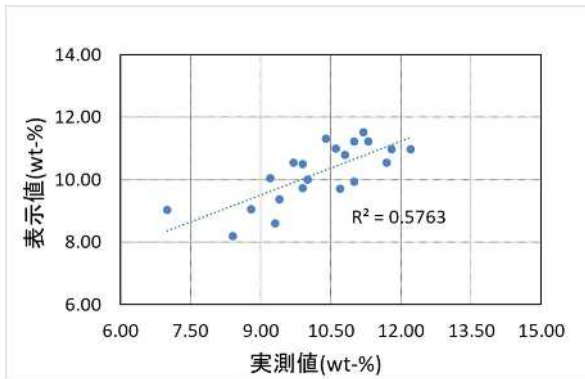
图一11 P₂O₅ (2号炉烧却灰)



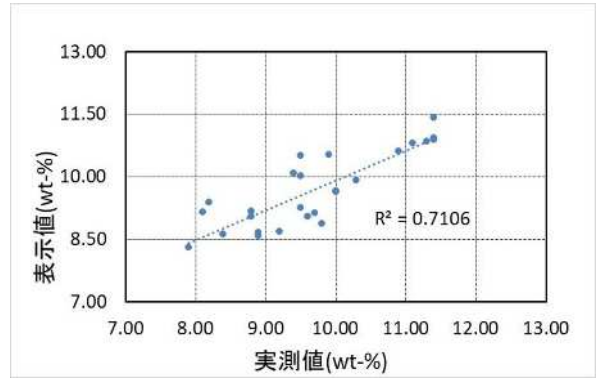
图一12 Fe₂O₃ (1号炉烧却灰)



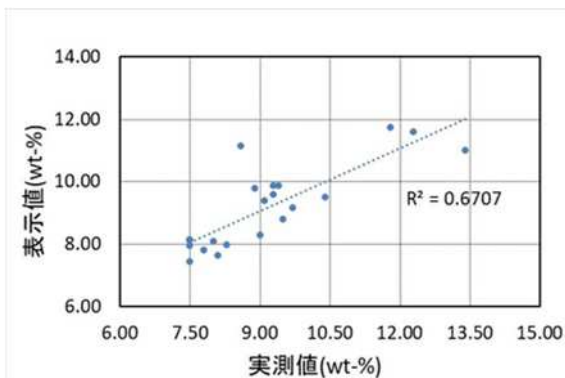
图一13 Fe₂O₃ (2号炉烧却灰)



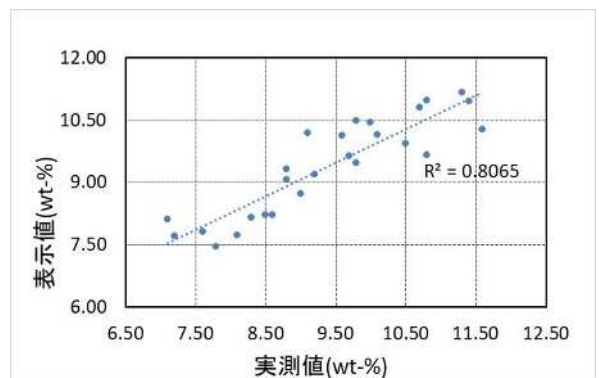
图一14 CaO (1号炉烧却灰)



图一15 CaO (2号炉烧却灰)



图一16 Al₂O₃ (1号炉烧却灰)



图一17 Al₂O₃ (2号炉烧却灰)

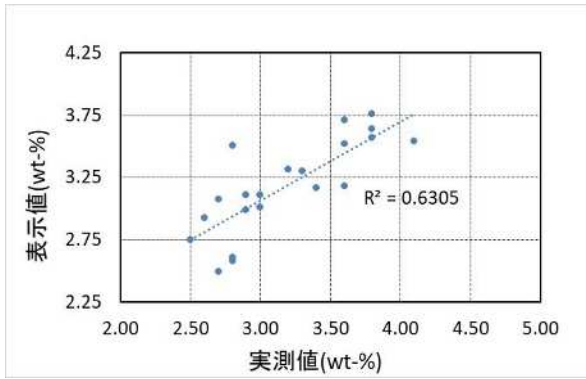


図-18 K₂O (1号炉烧却灰)

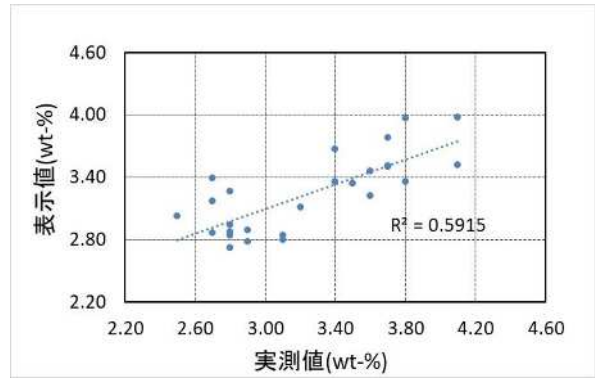


図-19 K₂O (2号炉烧却灰)

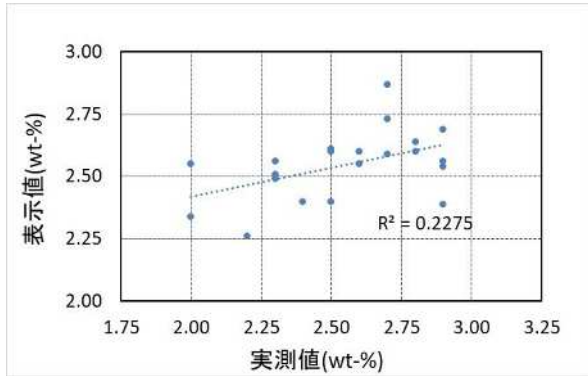


図-20 MgO (1号炉烧却灰)

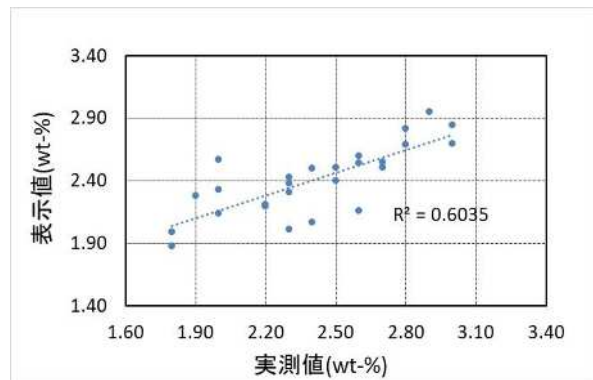


図-21 MgO (2号炉烧却灰)

表-3 蛍光X線分析実測値と近赤外成分計表示値の相関(決定係数R二乗値)

種類		SiO ₂ (wt-%)	P ₂ O ₅ (wt-%)	Fe ₂ O ₃ (wt-%)	CaO (wt-%)	Al ₂ O ₃ (wt-%)	K ₂ O (wt-%)	MgO (wt-%)
1号炉	烧却灰	0.65	0.66	0.48	0.58	0.67	0.63	0.23
2号炉	烧却灰	0.81	0.85	0.72	0.71	0.81	0.59	0.60

表-4 1号炉における各無機成分の近赤外成分計測定における表示値

採取日	SiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO
	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)
5月26日	29.4	25.2	17.2	10.8	7.8	3.3	2.4
5月30日	39.1	18.6	13.2	9.0	11.0	2.8	2.4
5月31日	40.5	17.2	13.7	8.2	11.6	2.5	2.5
6月10日	34.7	22.9	13.7	9.7	9.9	3.1	2.6
6月16日	38.4	19.1	14.0	8.6	11.1	2.6	2.6
6月23日	34.9	22.7	14.0	9.4	9.9	3.1	2.6
6月29日	40.9	17.5	12.6	9.1	11.8	2.6	2.3
10月20日	34.0	23.2	13.8	9.9	9.8	3.0	2.3
10月28日	31.3	25.3	14.3	10.5	9.4	3.1	2.6
11月4日	31.6	24.6	14.9	10.0	9.6	2.9	2.7
11月11日	28.8	27.1	14.2	11.2	8.1	3.5	2.5
11月18日	32.0	24.4	14.6	10.1	9.5	3.0	2.6
11月25日	28.9	26.8	15.3	10.5	8.8	3.2	2.9
12月2日	28.2	28.4	14.9	10.6	8.3	3.3	2.5
12月9日	28.6	28.2	14.2	11.0	8.0	3.6	2.6
12月16日	32.0	25.1	14.5	9.7	9.2	3.2	2.6
12月23日	28.5	27.2	14.1	11.3	7.6	3.7	2.6
1月19日	27.7	27.9	14.4	11.2	7.5	3.8	2.7
1月26日	29.7	26.1	14.1	11.0	8.1	3.5	2.6
2月3日	29.0	26.7	14.3	11.0	7.9	3.6	2.6
2月21日	28.4	28.0	13.9	11.5	8.1	3.5	2.4

表-5 2号炉における各無機成分の近赤外成分計測定における表示値

採取日	SiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO
	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)
4月8日	31.7	21.1	18.7	9.3	9.6	3.4	2.5
4月15日	30.8	21.5	18.2	9.9	9.3	4.0	2.6
4月21日	27.3	24.8	18.3	10.6	7.7	3.5	2.4
4月28日	31.0	22.3	17.9	9.7	9.2	3.3	2.6
5月6日	28.3	24.8	17.3	10.5	8.2	3.7	2.6
5月11日	31.3	22.5	17.1	9.7	9.1	3.4	2.3
5月20日	27.6	25.9	16.7	10.8	7.8	3.8	2.5
7月6日	35.6	20.1	15.3	9.1	10.1	3.1	2.2
7月15日	36.4	20.0	14.6	9.0	10.2	2.9	2.0
7月22日	36.9	19.5	14.8	8.9	10.5	2.9	2.2

採取日	SiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO
	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)	(wt-%)
7月28日	36.3	20.0	14.9	9.1	10.2	2.8	2.2
8月5日	38.5	19.2	14.0	8.6	11.0	2.7	2.3
8月12日	33.5	22.0	15.6	9.4	9.7	3.2	2.4
8月19日	37.9	18.1	15.6	8.3	11.2	2.8	2.3
8月26日	34.0	21.4	16.0	9.2	9.9	3.0	2.5
9月2日	37.7	19.9	13.2	9.2	10.3	2.9	2.0
9月9日	38.1	18.8	14.2	8.6	10.8	2.9	2.1
9月16日	29.6	24.2	16.3	10.5	8.2	3.4	2.4
9月22日	39.1	18.7	13.4	8.7	11.0	2.8	2.1
9月29日	29.6	24.0	17.4	10.1	8.7	3.3	2.8
10月6日	37.6	20.0	12.8	8.7	10.5	2.8	1.9
12月28日	33.1	22.7	14.6	10.0	9.5	3.5	2.7
1月6日	29.5	25.3	15.0	10.9	8.1	3.5	2.7
1月11日	28.1	27.6	14.6	10.9	7.7	3.2	2.9
2月9日	27.6	25.8	15.4	11.4	7.5	4.0	2.5
2月17日	29.2	25.8	15.2	10.9	8.2	3.5	3.0

2) 文献調査結果

様々な調査研究事例や報告書を確認し、以下の項目に分けて整理を行った。整理した内容は、別添資料ー1「焼却炉の灰付着による障害に関する参考文献等調査結果」としてとりまとめた。

- ①東部スラッジセンターにおけるクリンカを原因とする焼却炉運転停止に関する報告
- ②下水道分野の調査・対策事例
- ③他分野における焼却炉等の灰付着に関する調査
- ④クリンカの対応を検討する際の参考文献
- ⑤東部スラッジセンターの焼却炉について現状で考えられる灰付着に係る事項及び今後検討を要すると考えられる事項

4. 調査結果の考察

1) 焼却灰成分に関する調査結果の考察

①蛍光X線分析調査

主要な無機成分の含有量は、ケイ素が平均で33%程度と最も高く、次にリンが23%程度、鉄が15%程度、カルシウムが10%程度、アルミニウムが9%と続いている。クリンカの生成に関与しているとされているリンの含有量が年間を通じて高いことがわかった。

また、後述する文献調査でも考察しているが、クリンカの生成を促進する成分としてカリウムもあげられるが、含有量は3%程度とリンと比較すると少量であり、影響は小さいと考えられる。カリウムと同様、ナトリウムも促進成分としてあげられるが、今回の調査では蛍光X線分析にお

いて非検出であった。

焼却灰に含まれる主要な無機成分には自然環境由来と汚泥由来のものがあり、雨等の影響を受けて含有量が変動すると考えられる。

リン・カルシウム・カリウム等は、汚泥由来の成分と考えられ、秋季中盤から冬季にかけて含有量が多い結果となった。昨年は秋季の降水量が例年より少なく、雨水や地下水、土砂等の影響を受けにくい期間が秋季から冬季となり、この間に含有量が増加したものと考えられる。

一方、ケイ素・アルミニウムは、自然環境の影響を強く受けており、降雨により含有量が増加し、降雨影響のない期間には含有量が低下傾向となった。

鉄に関しては、降雨後に含有量が低下しているため、汚泥由来の傾向がうかがえるが、冬季など降雨の影響のない期間の含有量は増加しておらず、変動の説明が難しい結果となった。

リンについては、これまで経験的に冬季は含有量が多くなり、クリンカが生成しやすくなると考えられてきたが、本調査結果は、このことを裏付けするものとなった。

②近赤外成分計の実用性検討調査

公社所有の近赤外成分計を用いて焼却灰の吸光度から含有量を定量し、蛍光X線分析結果と比較したところ、1号炉の焼却灰における鉄及びマグネシウムを除き、決定係数R二乗の値が0.5を超え、近赤外成分計の精度が一定程度あることがわかった。また、各無機成分のうちリンの含有量については、決定係数R二乗の値が1号炉で0.66、2号炉で0.85と大きく、説明力の高い変換式が得られた結果となった。

以上のことから、近赤外成分計での簡易測定を活用することで、現場でリン含有量を確認し、クリンカの生成しやすい状況のある程度推測することが可能と考えられる。

表-3の決定係数の一覧表で、1号炉と2号炉に差異が生じた理由についてであるが、1号炉と2号炉の焼却灰の物理的性状に着目すると、手で触れた際の粒の質感が1号炉と2号炉では異なっていた。2号炉の焼却灰が微粉末状であるのに対し、1号炉の焼却灰は2号炉に比較して粒径が粗い性状であった。近赤外成分計の専用測定容器は図-22に示すとおり、充填した後に蓋を回してロックする構造になっており、このロックの際の抵抗感は1号炉で大きかった。

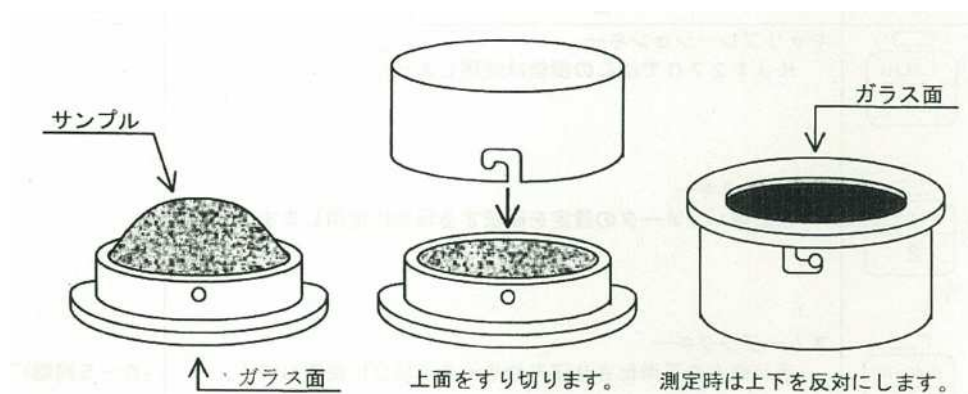


図-22 近赤外成分計 KJT270 専用測定容器

近赤外成分計の取扱説明書によると、粒径の大きい物質の測定を行う場合には、測定精度を上げるために粉碎して粉状とすることを勧めている。また、1) ①で行った蛍光X線分析結果では両者の焼却灰の組成がほぼ同様の傾向を示していることから、組成の違いではなく、この粒径の粗

さが近赤外成分計で吸光度を測定する際の精度に影響していると推測される。

ただし、1号炉のリンのR二乗の値は0.66と、0.5を十分上回っており、1号炉、2号炉ともにリン含有量のある程度推測することが可能であると考えられる。

今回は単年度の結果であることから、今後は再現性を含めた継続調査として、本調査で作成した変換式を使用した場合の表示値と実測値のR二乗値の検証や、2か年のデータを用いた変換式の作成とR二乗値の検証を行うこと等が考えられる。これらの検討により、クリンカの付着を推定する一つの手法として確立を目指したい。

2) 文献調査の考察

クリンカに関する文献を整理し、内容を調査した結果、灰の付着に関しては以下の3つが主要な因子として考えられる。

- ①高温場における焼却灰の粘性等物性の変化及びサイクロン表面温度による付着性の増加
- ②灰中のアルカリ金属 (Na, K) と Si のような他成分との共晶現象により、融点が低下することによる付着性の増加
- ③灰中のリンにより低融点のポリリン酸塩が生成されることによる付着性の増加

これら因子への対応として、①については、サイクロン壁面の冷却という方法が考えられるが、実際の運転状態での温度調整は困難である。

②及び③については、ポリ硫酸第二鉄や炭酸カルシウム等を焼却汚泥に加えて、成分を積極的に調整するという方法が取られている例がある。しかし、成分の調整に薬品を使うことから、注入施設の設置が必要となり、経常的な薬品費も発生することから、財政的な課題をクリアする必要がある。

東部スラッジセンターの焼却炉において、現状で考えられる現実的な対応としては、クリンカ付着状態を焼却炉運転中に把握し、運転に支障をきたす前に停止・冷却後ただちにクリンカを除去、復旧することである。そのために、今後も引き続き、以下のとおり焼却炉運転中におけるクリンカ生成状況の更なる予測や推測手法の確立に関する検討が必要であると考えられる。

ア) 焼却灰組成の年間推移把握と組成の色等による簡易な推定方法に関する検討

イ) クリンカ付着を炉外部から把握する方法の検討

- ・サイクロン差圧等の運転データからクリンカ付着の有無を推定する方法の検討
- ・外部から炉表面の赤外線放射等を観測して、サイクロン内壁面へのクリンカ付着の有無を推定する方法の検討

5. まとめ

- 1) 焼却灰に含まれる主要な無機成分の含有量について、蛍光X線分析を行った結果、焼却灰における各成分は、年間を通じて概ね一定の値で推移していた。この中で、クリンカの生成に関与しているとされるリンの含有量が平均23%程度と年間を通じて高いことがわかった。また、クリンカの成分は焼却灰と同様の組成であった。
- 2) 年間変動として、秋季中盤から冬季は、汚泥由来のリンの含有量が高い傾向となった。これは、秋季は例年より降水量が少なかったこと、また、冬季は積雪期となることから、降雨による土砂等の流入がなく、相対的にリン含有率が高くなったためと考えられる。

- 3) リンについては、これまで経験的に冬季は含有量が高くなり、クリンカが生成しやすくなると考えられてきたが、本調査結果は、このことを裏付けするものとなった。
- 4) 公社保有の近赤外成分計を用い、焼却灰の吸光度からリンの含有量を求めたところ、近赤外成分計の表示値は蛍光X線分析実測値と高い相関となった。このことから、近赤外成分計での簡易測定を活用することで、現場でリン含有量を確認し、クリンカの生成しやすい状況にある程度推測することが可能と考えられる。
- 5) クリンカに関する文献を整理、調査した結果、焼却灰等の付着に関して、以下の3つが主要な因子として考えられる。
 - ①高温場における焼却灰の粘性等物性の変化及びサイクロン表面温度による付着性の増加
 - ②灰中のアルカリ金属 (Na, K) と Si のような他成分との共晶現象により、融点が低下することによる付着性の増加
 - ③灰中のリンにより低融点のポリリン酸塩が生成されることによる付着性の増加
- 6) 東部スラッジセンターの焼却炉について現実的に考えられる対応としては、クリンカ付着状態を焼却炉運転中に把握し、運転に支障をきたす前に停止・冷却後ただちにクリンカを除去、復旧することであると考えられる。
- 7) 6) の対応を行うため、以下のとおり焼却炉運転中におけるクリンカ生成状況の更なる予測や推測手法の確立に関する検討が必要であると考えられる。
 - ①焼却灰組成の年間推移把握と組成の色等による簡易な推定方法に関する検討
 - ②クリンカ付着を炉外部から把握する方法の検討
 - ア) サイクロン差圧等の運転データからクリンカ付着の有無を推定する方法の検討
 - イ) 外部から炉表面の赤外線放射等を観測して、サイクロン内壁面へのクリンカ付着の有無を推定する方法の検討

【参考文献】

1. 下水道維持管理指針 実務編 ー2014年版ー
公益社団法人 日本下水道協会 pp.921-923
2. KJT270 付属書類 取扱説明書
株式会社ケット科学研究所 pp1-2, 2-1, 7-5, 8-2~8-12
3. Rによるやさしい統計学
山田剛史、杉澤武俊、村井潤一郎
株式会社オーム社 pp295

焼却炉の灰付着による障害に関する参考文献等調査結果

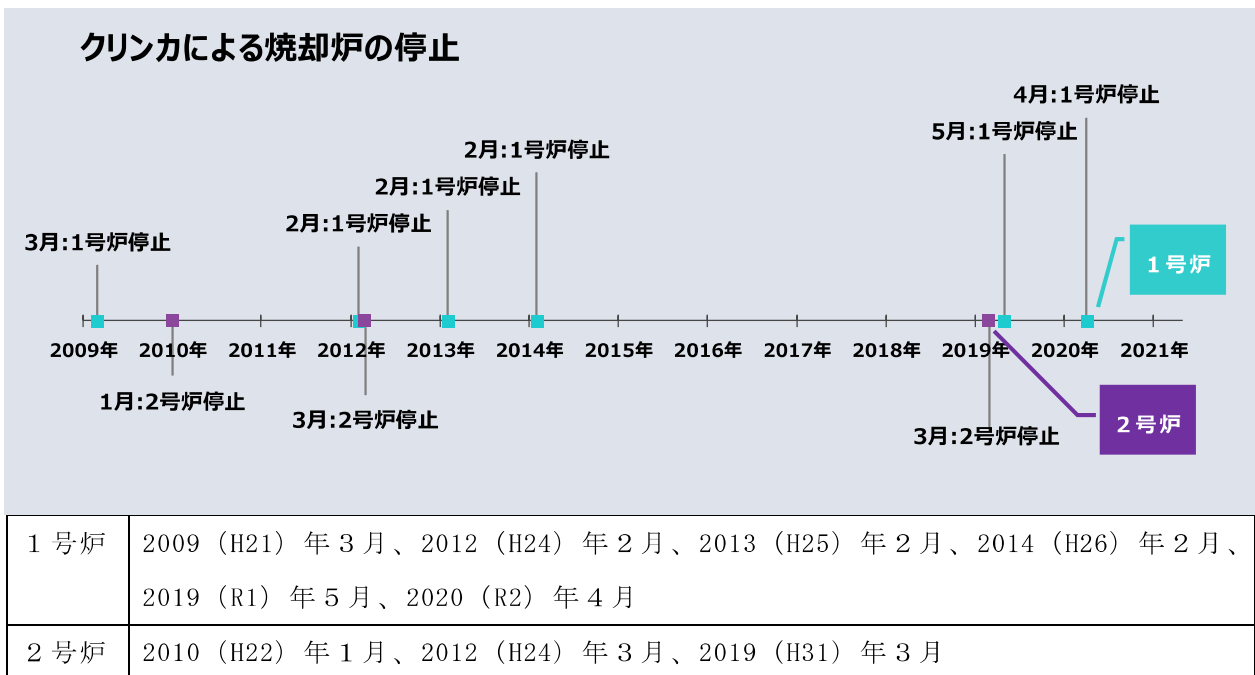
東部スラッジセンターでは、運転開始以来度々焼却炉内に形成されたクリンカが原因による運転停止が発生している。そこで、ここでは過去の事例におけるメーカの発生原因に関する報告内容を整理するとともに、文献等からクリンカ生成や、生成抑制方法等について整理した。

主な整理事項は、次のとおりである。

- ① 東部スラッジセンターにおいてクリンカが原因となった焼却炉の運転停止に関する報告
- ② 下水道分野の調査・対策事例
- ③ 他分野における焼却炉等への灰付着に関する調査
- ④ クリンカの対応を検討する際の参考文献

なお、東部スラッジセンターの焼却炉におけるクリンカによる運転停止事例で、運転開始初期の焼却炉立上げ時に使用するメインバーナ周辺のバーナタイルに形成されたクリンカが原因となっているものについては、既に対応が確立しているため、今回の対象からは除外している。

- 1 東部スラッジセンターにおいてクリンカが原因となった焼却炉の運転停止について
現在までに東部スラッジセンターにおいて、クリンカが原因となった焼却炉の運転停止事例は、以下のような時期に発生していた。



図－1 クリンカによる焼却炉の停止年表

また、これらの他にも運転停止には至らないが、砂循環が不良のため、汚泥焼却量を定格より落とした状態で、運転せざるを得ない状況の発生も見られている。この場合には、運転停止後に確認したところ、サイクロン内面及び内筒内へのクリンカ付着や、ループシール内のクリンカ堆積が確認されていた。

ここで、図-2に循環式流動焼却炉の概念図を示す。図を基に運転時の概要を説明すると、循環式流動焼却炉は、流動媒体（珪砂）が気流によって上方に搬送されるライザー

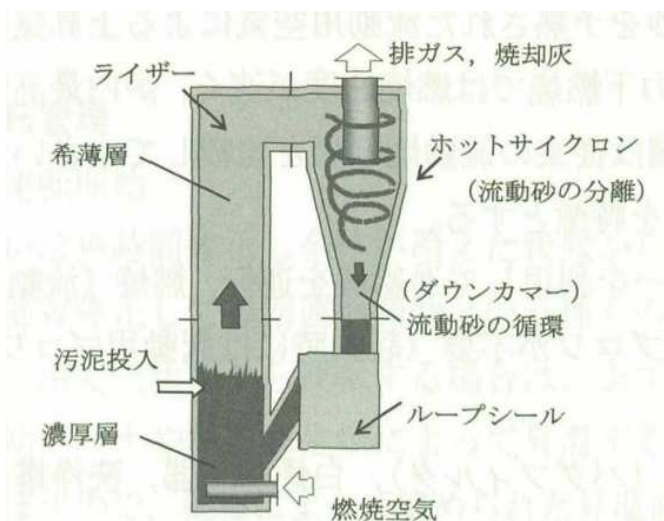


図-2 循環式流動焼却炉

〔出典〕石川 清 下水道維持管理指針 実務編-2014年版-,
公益社団法人日本下水道協会(2014)

と排ガス・焼却灰と流動媒体を分離する捕集器（ホットサイクロン）、気体と分離した流動媒体をライザー下部に戻す下降管（ダウンカマー）から構成されている。ライザー内では流動媒体の濃度は均一ではなく、下部には濃厚層、上部には希薄層が形成される。濃厚層に投入した汚泥は、水分蒸発、有機物の熱分解による燃焼が短時間のうちに同時進行する。燃焼した汚泥は、排ガスと焼却灰になってホットサイクロンで分離され、炉外へ排出される。ホットサイクロンで捕集された流動媒体である珪砂は、ダウンカマーを経て、再び濃厚層へ供給される。東部スラッジセンターの1号炉及び2号炉も同構造となっている。

1号炉・2号炉どちらの焼却炉の事例でも共通して見られた事象としては、次のようにまとめられる。

- ・ サイクロン内面（場合によっては内筒表面、内筒内）にクリンカが生成・付着していた。特に付着頻度が多かったのは、サイクロン直胴部から下部コーン（テーパー）部にかけての部位であった。
- ・ 焼却炉の立上げ、立下げ等の温度変化があった際に、付着したクリンカが壁面から剥離、脱落して、サイクロン・ループシール間をつなぐディップレグ（1号炉での名称、2号炉ではダウンカマー）を閉塞し、砂循環が阻害されて運転停止に至る
- ・ 殆どの事例が1～3月に発生しており、クリンカの生成・付着が汚泥の性状に影響されていることが推測される。
- ・ 生成したクリンカの性状は、緻密で硬い場合が多く、付着していた部分の形状に従った外観である。

- ・ クリンカの成分を分析したところ、焼却汚泥の無機成分の組成に近いものであった。従って、クリンカは汚泥から生成されると考えられる。

メーカーの見解では、クリンカの生成は汚泥中の無機分、特にリン濃度の上昇が主要な原因としている。また、リンの他にナトリウムやカリウムといった低融点物質も関与しているとの見解である。リン等の含有濃度が高くなると、焼却灰融解温度の低減が見られるようになる。そのような状態の焼却灰が、他の焼却灰や砂との接着剤となり、クリンカを生成するとの説明である。

これまでのクリンカ対策としては、以上のような見解から、炉内に蓄積されるリンの低減のため、運転中に流動砂の入替え頻度を増やす、炉停止時の内部点検による付着クリンカの除去を行っている。

参考に、資料の中で言及されている元素について、周期表における位置を図-3に示した。



※表中で、赤色枠（実線）で囲ったものが「アルカリ金属」と呼ばれる元素である。また、紫色枠（破線）で囲ったものが、今回整理した資料類の中で言及されている元素である。

図-3 周期表

また、東部スラッジセンターの焼却灰に含まれる主な成分とその融点及び含有量について、表-1に示した。

表中の焼却灰に含まれる主な成分値は、令和4年度に実施した東部スラッジセンターの焼却灰の無機成分における蛍光X線分析結果の一例である。令和4年度の分析結果

から、東部スラッジセンターの焼却灰中には年間を通して低融点物質のリンが平均して 23wt-%程度含まれていることが分かっている。

表－１ 東部スラッジセンターの焼却灰主成分及び融点一覧表

		融点* (°C)	東部 SC 焼却灰主成分 (wt-%) (2号炉 R5.1.19)
SiO ₂	ケイ素	1,470	27.5
P ₂ O ₅	リン	580	26.4
Fe ₂ O ₃	鉄	1,570	15.7
CaO	カルシウム	2,570	11.0
Al ₂ O ₃	アルミニウム	2,050	8.8
K ₂ O	カリウム	350°Cで分解	4.0
MgO	マグネシウム	2,830	3.2

※表中の赤色枠（実線）で囲ったものは融点が高い元素である。

[出典] K₂O は CAS 登録番号情報 (12136-45-7)、その他は次の文献による。
長倉 三郎ら(編) 物理化学辞典 改訂 4 版, 岩波書店 (1998)

2 下水道分野における調査・対策事例

下水道施設について、東部スラッジセンターと同じくクリンカによる運転障害に関する調査、対策報告事例をまとめた。殆どのものは下水道研究発表会にて報告されたものであり、その他に下水道協会誌に掲載されたものがあった。

事例等の報告としては、次のような資料があった。

(1) 東京都

東京都の報告では、流動焼却炉の空気予熱器や煙道で発生した閉塞の事例を示し、各種の調査を行った結果、次のような結論が示されていた。

- ① 汚泥中のリン濃度が上昇したことにより、焼却の過程で金属とリンとの比率が一定の割合を下回ると、リンの低融点物質が生成され、煙道閉塞等が引き起こされる。
- ② リンの低融点物質生成を防ぐために、汚泥にポリ硫酸第二鉄（ポリ鉄）を加える方法が取られている。しかし、ポリ鉄は過剰に添加すると、リンの場合とは別の原因で煙道等の閉塞を引き起こすことが考えられる。
- ③ 汚泥の金属成分を調査し、リンと金属の結合比を考慮した閉塞抑制指標値を定義した。実際の状況を閉塞抑制指標値は示すことができると考えられる。しかし、この指標値を求めるには成分分析が必要となり、結果が出るには時間を要する。そこで、焼却灰の色と指標値の関係から迅速に対応を判断できるシステムを検討した。

④ 焼却灰の色を画像解析し、閉塞危険性の判断、リン含有率等を算出するシステムを開発し、実用可能と考えられた。このシステムに、更にディープラーニングを導入し、高精度化を図り、実施設での検証によって管理に有効であることが確認された。

- 1) 珪砂の流動焼却炉内での形状・性状変化と交換時期の指標について
東京都下水道サービス㈱石塚 健一、今井 悠斗、吉田 正 第 53 回下水道研究発表会講演集 pp.1085-1087 2016
- 2) 焼却に伴う煙道閉塞の危険性を簡易スクリーニングする手法の検討
東京都下水道サービス㈱塩谷 聡 第 55 回下水道研究発表会講演集 pp.1154-1156 2018
- 3) クリンカと流動砂の成分について
東京都下水道サービス㈱後藤 麻希 第 55 回下水道研究発表会講演集 pp.1151-1153 2018
- 4) 空気予熱器における閉塞物に関する調査事例
東京都下水道サービス㈱ 巖 克弘 第 55 回下水道研究発表会講演集 pp.1148-1150 2018
- 5) 画像解析を用いた下水汚泥焼却灰の閉塞抑制システムの開発
東京都下水道局 岸本 長ほか 第 56 回下水道研究発表会講演集 pp.1184-1186 2019
- 6) 煙道閉塞対策としてのポリ鉄添加の効果と課題について
東京都下水道サービス㈱ 八島 卓寛 第 56 回下水道研究発表会講演集 pp.1181-1183 2019
- 7) クリンカと流動砂の含有化合物について
東京都下水道サービス㈱ 後藤 麻希 第 56 回下水道研究発表会講演集 pp.1178-1180 2019
- 8) 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
東京都下水道局 岸本 長ほか 第 57 回下水道研究発表会講演集 pp.1042-1044 2020
- 9) 示差熱分析及び成分分析から見た焼却炉施設の閉塞についての一考察
東京都下水道サービス㈱小泉 僚平、曾根 啓一、後藤 麻希、八島 卓寛 第 57 回下水道研究発表会講演集 pp.1036-1038 2020
- 10) 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
東京都下水道局 岸本 長ほか 第 58 回下水道研究発表会講演集 pp.866-868 2021

- 11) アルミニウム含有鉄剤の注入による焼却炉の煙道閉塞防止効果の検証
東京都下水道局 河内 奨ほか 第 59 回下水道研究発表会講演集 pp. 889-891
2022
- 12) 混合汚泥比率の管理による煙道閉塞対策・下水処理の安定化について
東京都下水道局 阿部 翔真 第 59 回下水道研究発表会講演集 pp. 898-900
2022
- 13) 下水汚泥焼却炉における煙道閉塞および炉内焼結物の発生メカニズムに関する検討方法
東京都下水道局 一色 充也ほか 第 59 回下水道研究発表会講演集 pp. 907-909
2022
- 14) 画像解析を用いた汚泥焼却灰の閉塞抑制システムの開発
東京都下水道局 岸本 長 下水道協会誌 2020.07 Vol.57 No.693 pp.13-16
- 15) 下水汚泥焼却炉の閉塞危険性評価及び閉塞防止方法
黒住 光浩、冠城 敏之、中田 友三、塚原 純哉 下水道協会誌 2016.09 Vol.53
No.647

(2) 処理施設不詳

施設は明示されていないが、流動焼却炉における焼却灰の空気予熱器管板部での焼結の発生について調査結果が報告されている。その結果、次のような結論が示されていた。

- ① 流動焼却炉にて 850°C以上の条件で運転中に、煙道等で焼却灰の焼結が発生する事例が見られている。この原因として汚泥中のリン（リン酸）濃度の上昇が考えられ、相対的な塩基物質割合の低下が低融点ポリリン酸アルカリ金属塩を生成しやすくし、灰の焼結温度を下げるという過程が想定された。
- ② 室内試験により、焼結の防止には汚泥へのポリ鉄（ポリ硫酸第二鉄）添加が、有効であると考えられる。更に、ポリ鉄の他に有効な添加物として、炭酸カルシウム（炭カル）も焼結抑制の効果があることが確認された。また、焼結の予測は汚泥中のリンと塩基類の総量比（焼結評価値）から可能であるという結果が得られた。
- ③ 循環流動焼却設備において炭カル注入設備を設置し、長期間の運転を行った。その結果、焼結の抑制をコントロールすることが可能であることが確認できた。但し、炉内砂や汚泥の分析をしながら、運用することが必要と考えられる。
- ④ 流動焼却炉の焼結対策として、生汚泥と余剰汚泥の固形物比を、濃度計及び流量計を用いて連続的に計測し、各汚泥の成分組成から脱水ケーキの組成を推定し、焼結管理をするシステムを開発し、試験運用を続けた。その結果、降

雨が汚泥の組成に影響を与えており、余剰汚泥の組成・焼結評価値が脱水汚泥の組成に影響を与えていることが確認された。そこで、余剰汚泥の焼結評価値を降雨量で補正することで、脱水汚泥の予測評価値の精度を高められるのではないかと考えられた。

- 16) 流動焼却設備における灰の焼結事例と焼結防止対策に関する報告
月島テクノメンテサービス(株) 上野 勇ほか 第 51 回下水道研究発表会講演集 pp. 994-996 2014
- 17) 流動焼却設備における灰の焼結事例と焼結防止対策に関する報告 (続報)
月島テクノメンテサービス(株) 上野 勇ほか 第 52 回下水道研究発表会講演集 pp. 962-964 2015
- 18) 流動焼却設備における灰の焼結抑制に関する報告
月島テクノメンテサービス(株) 大西 雅章、上野 勇、月島機械(株) 小林 俊樹 第 53 回下水道研究発表会講演集 pp. 1091-1093 2016
- 19) 流動焼却設備における焼結事例と焼結防止対策に関する報告 (第 4 報)
月島テクノメンテサービス(株) 岩崎 晃之、月島機械(株) 小林 俊樹 第 54 回下水道研究発表会講演集 pp. 1036-1038 2017
- 20) 高濃度りんによる焼結抑制に固形物演算を活用した事例報告
月島テクノメンテサービス(株) 篠野 充、川崎 俊幸、林 丈憲 第 56 回下水道研究発表会講演集 pp. 1190-1192 2019
- 21) 高濃度りんによる焼結抑制に固形物演算を活用した事例報告 (第 2 報)
月島テクノメンテサービス(株) 篠野 充、川崎 俊幸、林 丈憲 第 57 回下水道研究発表会講演集 pp. 1048-1050 2020
- 22) 循環流動焼却設備における焼結防止対策に関する事例報告
月島テクノメンテサービス(株) 田中 康隆、月島機械(株) 川端 友寛 第 57 回下水道研究発表会講演集 pp. 1039-1041 2020
- 23) 高濃度りんによる焼結抑制に固形物演算を活用した事例報告 (第 3 報)
月島テクノメンテサービス(株) 篠野 充、川崎 俊幸、林 丈憲 第 58 回下水道研究発表会講演集 pp. 875-877 2021

(3) 埼玉県

埼玉県内の流域下水道施設の汚泥焼却炉 (流動焼却炉、循環流動焼却炉) では焼結障害の発生事例が見られている。そこで、焼却灰の色相及び成分組成について調査をおこなった。その結果、次のような結論が得られている。また、実施設における焼結障害について調査を行い、その結果も報告している。

- ① 焼却灰の色相と成分組成の中では、成分により色相と正相関又は負相関を示

すものがあった。また、成分間でもリンに対して正相関又は負相関を示すものがあった。そこで、これらの結果を総合して、早見図を作成した。

- ② 流動焼却炉にてリン濃度の上昇により、焼却炉内及びダクト（煙道）の閉塞が発生した。その原因は、高温焼却を行っていること、冬場の降雨量が少なく、焼却灰中のリン含有割合の上昇と金属物割合の低下が生じていることがあげられる。冬場は汚泥の腐敗が少なく、その他の条件も揃いにくいことから、汚泥中にリンが残留する傾向にあったと考えられる。

24) リンおよび関連元素の挙動と焼結リスク簡易診断法について

公財)埼玉県下水道公社 大熊 健治 第 55 回下水道研究発表会講演集 pp.1145-1147 2018

25) リン焼結による汚泥焼却炉排気ダクト閉塞対策について

公財)埼玉県下水道公社 大峠 聖他 第 59 回下水道研究発表会講演集 pp.895-897 2022

(4) 岐阜市

岐阜市の汚泥処理施設では、汚泥脱水の際に高分子凝集剤とポリ硫酸第二鉄（ポリ鉄）を使用し、気泡流動焼却設備で焼却処理をしている。この処理過程で、ポリ鉄の注入不良による流動不良の発生や、煙道閉塞が発生している。どの場合でも、ポリ鉄の注入量の調整により、不具合を解消することができた。これらの事例を分析したところ、リンの増加を主な要因とする灰の低融点化と、ポリ鉄の注入量増による運転の安定化が見られた。

26) 焼却設備異常（流動不良・煙道閉塞）事例と流動砂性状解析による検証

岐阜市上下水道事業部 太田 淳一ほか 第 55 回下水道研究発表会講演集 pp.1142-1144 2018

(5) 室内試験結果

主に室内試験による報告として次のような報告があった。

- ① 汚泥焼却における煙道閉塞や流動不良等の不具合が発生しているが、それには焼却灰の付着性が影響していると考えられる。高温条件下での焼却灰の付着性は、灰粒子中の低融点共晶物が部分熔融して生じる液架橋力が原因と考えられる。下水汚泥焼却の場合には、リンがその原因成分であり、鉄は付着性を低減する効果があると考えられる。そこで、付着性に関してリンや鉄の影響を調査し、次のような結果を得た。

ア 下水汚泥焼却灰の高温場における付着性は組成、性状により異なるが、温

度依存性は認められた。また、リン濃度は付着性を高める方向に作用し、鉄濃度は焼結を抑制する方向に作用すると考えられる。

イ 高温場での焼却灰の付着性は、リンや鉄だけではなく、粒子径や空隙率等の物理的特性も関与すると考えられる。

27) 下水汚泥焼却灰の高温付着性におよぼすリンと鉄の影響

三機工業(株) 伊東 賢洋ほか 第 58 回下水道研究発表会講演集 pp. 869-871 2021

28) 下水汚泥焼却灰の高温付着性におよぼす物理的特性の影響

三機工業(株) 尾関 多賀美ほか 第 59 回下水道研究発表会講演集 pp. 892-894 2022

② 下水汚泥焼却灰を分析し、成分調整をしたモデル灰を作成した。それを用いて付着性低減成分の選定、実灰での確認をした。その結果、アルミナ (Al_2O_3) が有効であると分かった。

29) 汚泥燃焼灰の高温付着現象の解析と付着防止法の提案

東京農工大学大学院 松下 未来, 川田 大達, 塚田 まゆみ, 神谷 秀博 日本エネルギー学会大会講演要旨集 25 巻 2016 pp. 150-151

3 他分野における灰付着に関する調査

下水道以外の分野でも、焼却炉等への焼却灰の付着について、発生原因や対策等に関する報告が出されている。それらの文献の結果について簡単に整理すると、以下のようになる。

○石炭の燃焼時に生じる灰の焼結について検討した。その結果、アルカリ金属を含む灰は溶融しやすく、融点、沸点が低いため壁に付着する。また、Na・K 酸化物は 0.4% 以下では焼結しにくくなり、5~10%では壁への付着が指数的に増加すると考えられた。

○石炭燃焼場におけるアルカリ金属化合物、特に Na の放出特性について室内試験を行った。その結果、原炭中の水溶性 Na の一部は燃焼場で容易に放出されること。Si と Al の存在で Na の放出率が低くなることが分かった。

○石炭燃焼時の灰粒子付着性増加にはアルカリ金属、アモルファスシリカ (SiO_2) が関与していることを確認した。そこで、付着抑制のため灰に CaO を添加し、室内試験で効果を確認した。その結果、CaO 添加による高温付着性抑制が確認された。但し、最適添加量は、添加方法、灰組成などに影響されることを示唆するものであった。

- 高温サイクロン壁面へのダスト粒子付着について数値シミュレーション、室内試験を行った。その結果、次のようなことが分かった。数値シミュレーションからダストの壁面摩擦角を求め、常温では約 45° のものが、1230K (957°C) では約 80° となり、サイクロン下部への摩擦力によるダスト付着が予想された。実際に 1230K としたサイクロンで、壁面を冷却したものと冷却しないものに Fe と FeO を主成分とするダストを流したところ、壁面を冷却していないサイクロン下部にダストの付着が見られた。一方、壁面を冷却した場合は、壁面への付着は見られなかった。これは、サイクロンの材料をアルミナ耐火煉瓦、ステンレス鋼とした場合のどちらでも同じ結果であった。
- 石炭灰の灰分が低温溶融する原因を探るにあたり、多量に含まれるシリカ (SiO₂) とアルカリ金属に着目した。酸化ナトリウム添加等の試験により、原因としてシリカと酸化ナトリウムによるガラス化、低温共晶現象が生じていることが考えられた。
- バイオマス燃料の流動層炉での焼却時には、燃料中のアルカリ金属による灰付着等のトラブルが予想される。そこで、カリウム・ナトリウムを用いた焼結試験を行い、バイオマス燃料に多く含まれるカリウムが共晶化合物を形成し、灰を固まりやすくしていると推測された。アルカリ金属による影響は、温度が高いほど、また、アルカリ金属濃度が高いほど強くなることが分かった。

30) 燃焼・ガス化における灰の挙動

成蹊大学 小島 紀徳, 畢継 誠 日本エネルギー学会誌 第 75 巻 第 1 号(1996)
pp. 28-34

31) 石炭燃焼場におけるアルカリ金属化合物の基礎放出特性

豊橋技術科学大学工学部 村上 高広・野田 玲治・成瀬 一郎 化学工学論文集 第
25 巻第 3 号(1999) pp. 389-394

32) 微粉炭への CaO 添加による生成飛灰の高温付着性低減効果

東京農工大学 青笹 隆史ほか 日本エネルギー学会大会講演要旨集 2002 80 巻
pp. 150-151

33) 高温サイクロンにおけるダスト粒子の挙動

水上 俊一、廣瀬 潤、村田 博之 粉体工学会誌 Vol.29 No.1 (1992) pp. 4-10

34) 焼却炉における元素の挙動とその類似性

貴田 晶子、野馬 幸生、高延 堅三 廃棄物学会論文誌 Vol.2 No.1 pp. 11-20
1991

35) アルカリ金属による灰分中のシリカの溶融挙動

八戸工業大学 平戸 瑞穂、和田 信幸 第 36 回石炭化学学会議 1999 pp. 99-100

36) バイオマス専焼時の灰障害予測評価

4 クリンカの対応を検討する際の参考文献

東部スラッジセンターの焼却炉におけるクリンカへの対応について考えるにあたり、クリンカが形成される場となっているサイクロン内での気流や焼却灰、流動砂の分離等に関する資料を収集した。それらは、次のようなものである。

37) サイクロンの分級・集じん理論と性能向上

福井 国博 タクマ技報 Vol. 24 No. 2 2016 pp. 69-79

38) サイクロンにより分離される微粒子の限界粒径について (第 3 報)

北浦 嘉之 化学機械 第 16 巻第 8 号(1952) pp. 254-260

39) サイクロンによる粉末分離に関する研究

西原 利夫、郡 利矩、吉住 辰男 化学工学 第 17 巻 第 9 号 (1953) pp. 347-350

40) サイクロン形集じん器の性能と価値評価

池森 亀鶴 粉体工学研究会誌 Vol. 2 No. 3 (1965) pp. 377-385

41) サイクロン集じん器の圧力損失に関する理論 (第 5 報)

井伊谷 鋼一 日本機械学会誌 56 巻 408 号 1953 pp. 90-95

42) サイクロン集じん器内の気流について (第 2 報)

井伊谷 鋼一 機械学会誌 54 巻 392 号 1951 pp. 42-48

43) サイクロン集塵器の性能とその進歩

湯 晋一 環境技術 Vol. 2 No. 11(1973) pp. 814-819

44) サイクロン分離器の分離効率

上滝 具貞、富田 侑嗣、吉田 幸一 粉体工学研究会誌 Vol. 9 No. 6 (1972) pp. 61-63

45) サイクロン分離機の圧力損失について

上滝 具貞、富田 侑嗣、吉田 幸一 粉体工学研究会誌 Vol. 9 No. 6 (1972) pp. 363-370

46) サイクロン分離性能の実験結果

井伊谷 鋼一、朴 昌鶴、岡本 樹允、竹内 和 粉体工学会誌 Vol. 18 No. 4 (1981) pp. 229-233

47) 粗大粒子分級型サイクロンにおいて粒子濃度が分級性能へ及ぼす影響

忍足 輝男、山本 一己、木村 将貴、深澤 智典、福井 国博、吉田 英人 粉体工学会誌 Vol. 54 No. 6 (2017) pp. 390-397

48) サイクロン形集塵器における離散要素モデルと連続体モデルによる数値解析及び粒子挙動の観察

坂庭 大輔、王 俊柱、高山 佳典、酒井 幹夫 粉体工学会誌 Vol. 53 No. 1 (2016) pp. 4-13

5 報告書、参考資料等から考えられる灰付着に関係する事項及び今後検討を要すると考えられる事項

1～3の項目について資料を整理し、灰の付着に関しては次のようなものが主要な因子となっているのではないかと考えられた。

- ア 高温場における焼却灰の粘性等物性の変化及びサイクロン表面温度による付着性の増加
- イ 灰中のアルカリ金属（Na、K）とSiのような他成分との共晶現象により、融点が低下することによる付着性の増加
- ウ 灰中のリンにより低融点のポリリン酸塩が生成されることによる付着性の増加

アについては、サイクロン壁面の冷却というような方法が考えられるが、実際の運転状況を考えると、実現困難である。

イ及びウについては、ポリ鉄（ポリ硫酸第二鉄）や炭カル（炭酸カルシウム）等を焼却汚泥に加えて、成分を積極的に調整するという方法が取られている例がある。しかし、成分の調整に薬品を使うことから、それに要する費用が通常脱水・焼却処理に上乗せされ、運転管理面・処理費用面の両面で、この方法を取ることは困難である。

現状での対応可能な方法としては、サイクロン内でのクリンカ付着状態を炉の運転中に把握し、停止・冷却後直ちにクリンカを除去・復旧することを考える。

そのためには、次のような事項の調査を行うことが必要と考えられる。

- ア．焼却灰組成の年間推移把握と組成の色等による簡易な推定方法に関する検討
- イ．クリンカ付着を炉外部から把握する方法の検討
 - ・サイクロン差圧等の運転データからクリンカ付着の有無を推定する方法の検討
 - ・外部から炉表面の赤外線放射等を観測して、サイクロン内壁面へのクリンカ付着の有無を推定する方法の検討

以上