

循環式流動焼却炉におけるクリンカ対策について（Ⅱ）

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、2年目の令和5年度は令和4年度からの継続で、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、新たに焼却灰の色による成分推定、焼却炉外部からの赤外線放射の観測によるクリンカ付着の推定に関する調査を行った。

2. 調査概要

2.1 調査期間

調査期間は、令和5年4月から令和6年2月までとした。

※1年目は令和4年4月から令和5年2月まで実施した。

2.2 調査項目・方法

1) 焼却灰成分に関する調査（継続調査）

令和4年度の継続として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、焼却灰週1回、クリンカは生成した際（令和5年7月と11月の2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43検体、2号炉50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) 焼却灰の色による無機分（リン）の推定（新規調査）

①色彩計によるリン濃度の推定

アルカリ金属（ナトリウム、カリウム）は他の成分との共晶現象により融点が低下し付着性が増加することでクリンカの成長を促進することがある。今回の調査では蛍光X線分析においてナトリウムは非検出、カリウムは3%程度と少量であったため影響は考えにくい。そのためクリンカの主成分であるリン濃度（23%）に着目し色彩計を使い調査を行った。

ア) 色彩計の原理

色彩計（カラーリーダーCR-20）は、パルスキセノン光源にて一定の強度の光を試料に照射し試料表面で反射された光を受光部で受ける。反射光は内部の分光器を通しスペクトルに分光され光が6個のセンサーに到達することで、光の強度を電気信号として検出することができる。電気信号はデジタル処理され色相・彩度・明度を「L*a*b*、Y x y、XYZ、マンセル（D65）」の表色系で数値化することができるものである。

イ) 定量方法

蛍光X線分析の実測値と重回帰分析可能な計測値（L*a*b*、Y x y、XYZ）に着目し、色彩計の色彩値（表示値）と蛍光X線分析の実測値から重回帰分析によりリン濃度の推定を行えないか検討を行った。

3) 焼却炉赤外線放射観測によるクリンカ付着推定調査（新規調査）

①サーモグラフィカメラによる赤外線放射の撮影

クリンカの成長とともに断熱性が増すことで焼却炉筐体表面への熱伝導が悪くなり表面温度の低下が期待できる。そのため、運転中の焼却炉サイクロン部をサーモグラフィカメラで週に1度撮影し画像比較を行う。温度の低下から可視的にクリンカの付着推定が行えないか検

討した。

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2か年分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3試料の分析であったが、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32%程度（令和4年度平均33%）含まれていることが確認された。年間の変化としては、昨年度と同様に降雨による影響を受け降雨後に含有量が高まり、秋季中盤から冬季は含有量が低下する傾向であった。

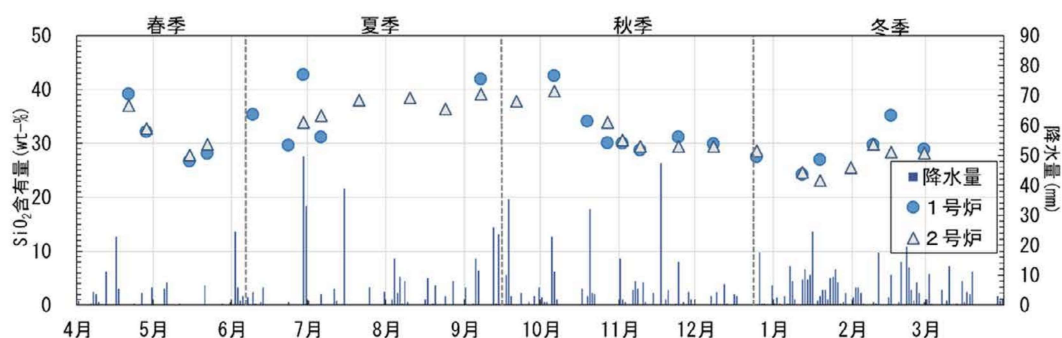


図-1 焼却灰に含まれるSiO₂含有量

イ) リン

年間を通して平均23%程度（令和4年度と同等に）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、昨年度と同様に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。

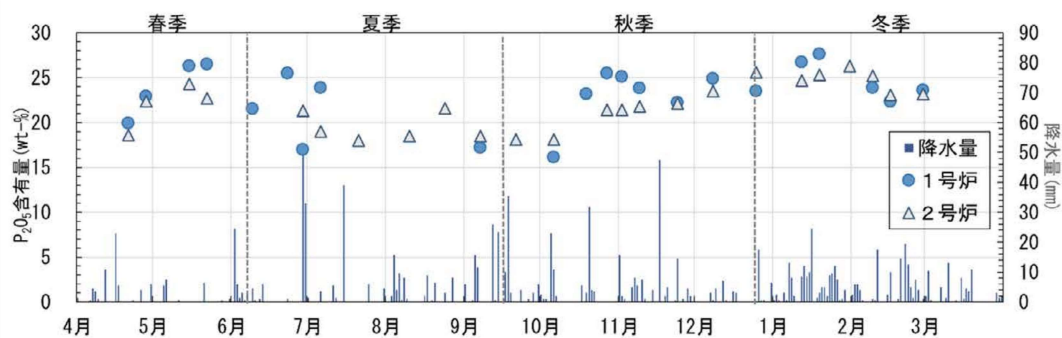


図-2 焼却灰に含まれるP₂O₅含有量

ウ) 鉄

年間を通して平均 17%程度（令和4年度平均 15%）含まれていることが確認された。年間の変化としては、昨年度と同様に秋季と冬季に高くなる兆候が見られた。

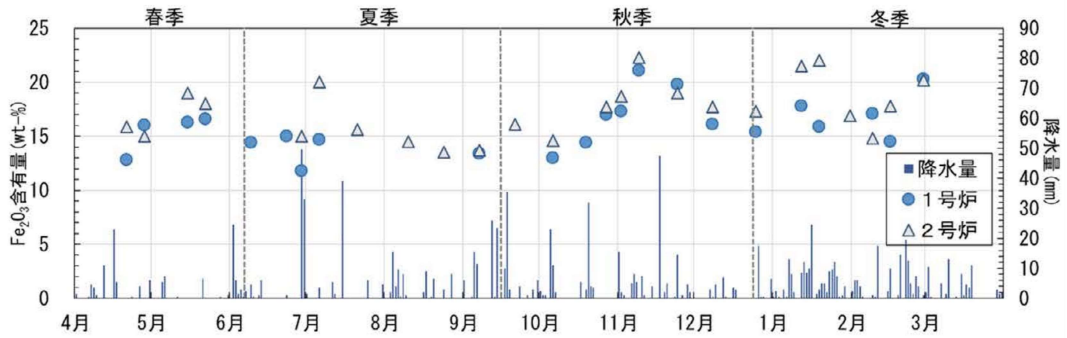


図-3 焼却灰に含まれる Fe_2O_3 含有量

エ) カルシウム

年間を通して平均 9%程度（令和4年度平均 10%）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り昨年度と同様の変化であった。

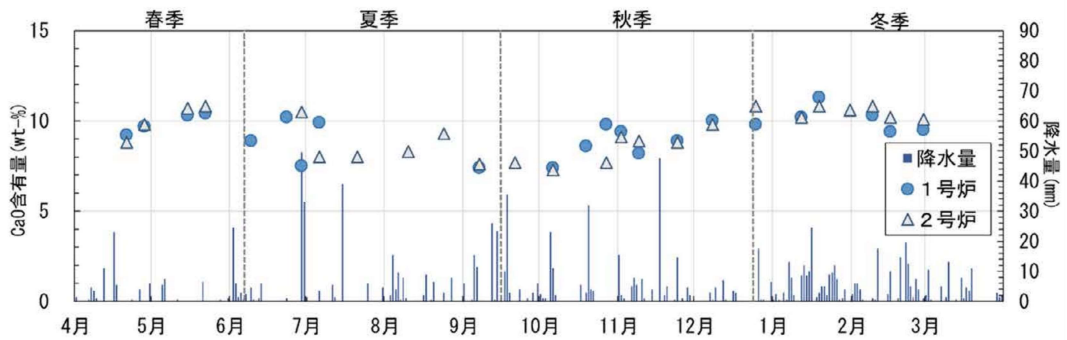


図-4 焼却灰に含まれる CaO 含有量

オ) アルミニウム

年間を通して平均 9%程度（令和4年度と同等に）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。

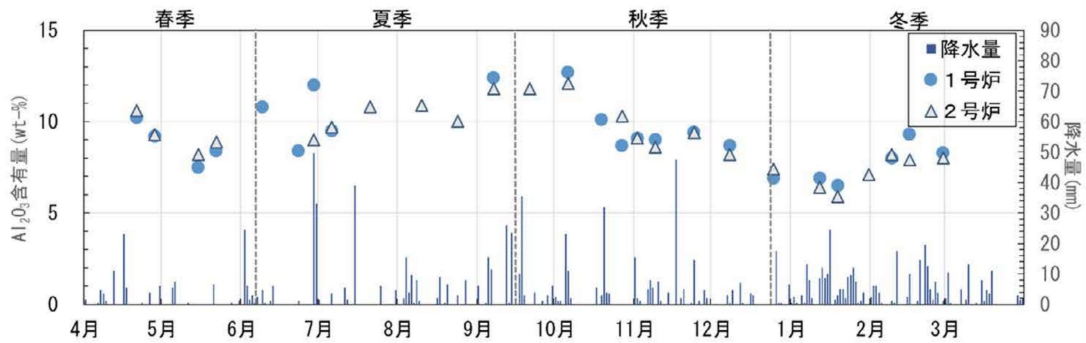


図-5 焼却灰に含まれる Al_2O_3 含有量

カ) カリウム

年間を通して平均3%程度（令和4年度と同等に）含まれていることが確認された。年間の変化としては、昨年度と同様に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。

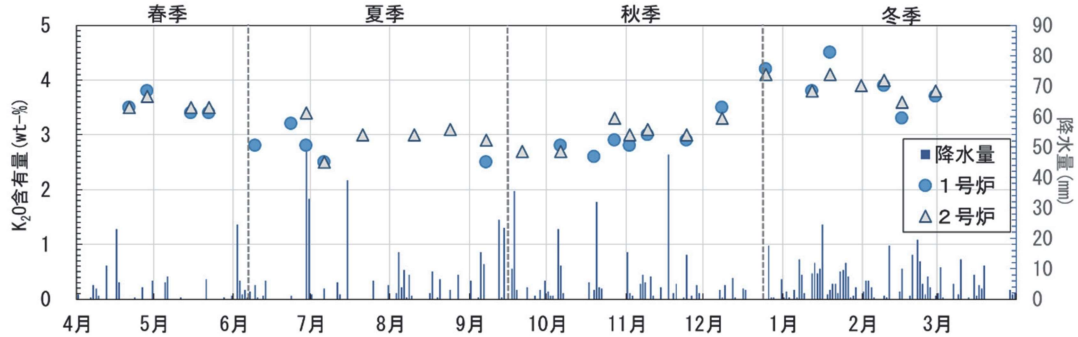


図-6 焼却灰に含まれるK₂O含有量

キ) マグネシウム

年間を通して平均2%程度（令和4年度と同等に）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。

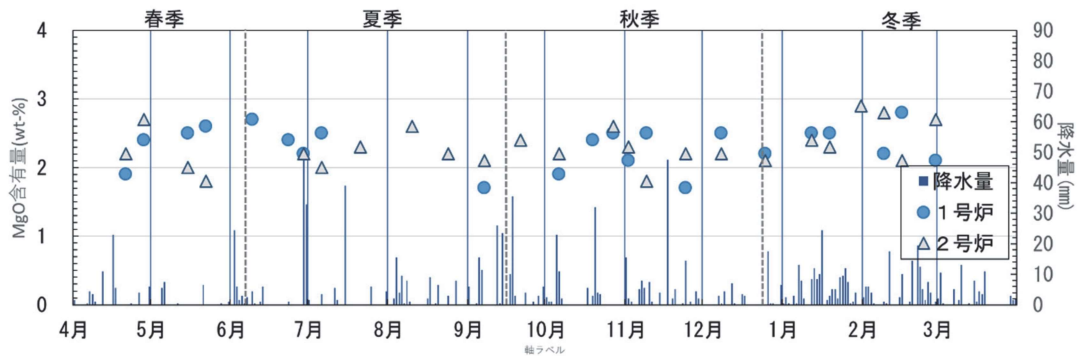


図-7 焼却灰に含まれるMgO含有量

表-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

【1号炉焼却灰】

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-%)
令和4年05月26日	29.4	25.2	17.2	10.8	7.8	3.3	2.4
令和4年05月30日	47.9	11.7	11.6	7.0	13.4	2.5	2.9
令和4年05月31日	41.8	15.7	13.5	8.4	12.3	2.7	2.3
令和4年06月10日	31.8	24.0	15.7	10.7	9.4	3.0	2.0
令和4年06月16日	32.1	24.5	14.7	9.3	8.6	2.8	2.6
令和4年06月23日	33.9	23.6	14.5	9.4	9.3	2.7	2.7
令和4年06月29日	40.6	18.6	11.9	8.8	11.8	2.8	2.2
令和4年10月20日	29.5	26.9	14.9	11.0	8.9	2.9	2.0
令和4年10月28日	30.2	25.8	14.2	11.7	9.1	2.9	2.5

令和4年11月04日	29.9	26.5	14.9	10.0	9.3	2.6	2.9
令和4年11月11日	28.3	28.0	13.9	11.3	7.5	2.8	2.9
令和4年11月18日	36.7	19.8	15.0	9.2	10.4	3.0	2.8
令和4年11月25日	30.2	26.1	14.8	9.9	9.5	3.6	2.7
令和4年12月02日	30.9	26.6	14.6	9.7	9.0	3.2	2.3
令和5年12月09日	29.8	27.4	13.5	10.6	8.3	3.8	2.8
令和5年12月16日	33.1	24.6	13.3	9.9	9.7	3.4	2.9
令和5年12月23日	29.2	28.4	13.3	10.4	8.1	3.6	2.5
令和5年01月19日	28.0	28.0	14.4	11.0	7.5	3.8	2.7
令和5年01月26日	26.7	26.5	16.2	12.2	7.5	3.6	2.3
令和5年02月03日	28.0	27.0	13.6	11.8	7.5	3.8	2.6
令和5年02月21日	28.8	27.2	14.0	11.2	8.0	4.1	2.5
令和5年04月21日	39.1	19.9	12.8	9.2	10.2	3.5	1.9
令和6年04月28日	32.1	22.9	16.0	9.7	9.2	3.8	2.4
令和6年05月15日	26.7	26.3	16.3	10.3	7.5	3.4	2.5
令和6年05月22日	28.1	26.5	16.6	10.4	8.4	3.4	2.6
令和6年06月09日	35.3	21.5	14.4	8.9	10.8	2.8	2.7
令和6年06月23日	29.6	25.5	15.0	10.2	8.4	3.2	2.4
令和6年06月29日	42.7	17.0	11.8	7.5	12.0	2.8	2.2
令和6年07月06日	31.1	23.9	14.7	9.9	9.5	2.5	2.5
令和6年09月07日	41.9	17.2	13.4	7.4	12.4	2.5	1.7
令和6年10月06日	42.5	16.1	13.0	7.4	12.7	2.8	1.9
令和6年10月19日	34.1	23.2	14.4	8.6	10.1	2.6	2.4
令和6年10月27日	30.1	25.5	17.0	9.8	8.7	2.9	2.5
令和6年11月02日	30.0	25.1	17.3	9.4	9.1	2.8	2.1
令和6年11月09日	28.7	23.8	21.1	8.2	9.0	3.0	2.5
令和6年11月24日	31.1	22.2	19.8	8.9	9.4	2.9	2.2
令和6年12月08日	29.9	24.9	16.1	10.0	8.7	3.5	2.5
令和6年12月25日	27.5	23.5	15.4	9.8	6.9	4.2	2.2
令和6年01月12日	24.2	26.7	17.8	10.2	6.9	3.8	2.5
令和6年01月19日	26.9	27.6	15.9	11.3	6.5	4.5	2.5
令和6年02月09日	29.7	23.9	17.1	10.3	8.0	3.9	2.2
令和6年02月16日	35.1	22.3	14.5	9.4	9.3	3.3	2.8
令和6年02月29日	28.9	23.6	20.3	9.5	8.3	3.7	2.1

【1号炉クリンカ】

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-%)
令和5年07月27日	27.1	28.3	17.0	10.9	8.1	2.6	2.6

【2号炉烧却灰】

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-%)
令和4年04月08日	31.8	21.6	17.4	9.5	9.7	3.8	2.6
令和4年04月15日	28.7	21.2	19.9	10.3	8.8	4.1	2.6
令和4年04月21日	26.9	24.7	18.9	10.9	8.1	4.1	2.5
令和4年04月28日	31.0	22.1	17.4	10.0	9.2	3.5	2.7
令和4年05月06日	28.7	24.1	17.2	9.9	8.3	3.4	2.0
令和4年05月11日	31.8	22.9	16.3	10.0	8.8	3.4	2.3
令和4年05月20日	27.3	26.0	17.3	11.1	7.6	3.7	2.5
令和4年07月06日	32.8	20.5	17.4	9.7	9.6	3.2	2.6
令和4年07月15日	35.5	22.4	12.9	8.8	10.1	2.8	2.3
令和4年07月22日	35.4	19.5	16.0	9.8	9.8	2.9	2.2
令和4年07月28日	33.6	20.9	16.0	9.6	9.1	3.1	2.2
令和4年08月05日	37.9	20.1	13.9	8.9	10.8	2.8	1.9
令和4年08月12日	38.4	20.1	14.0	8.2	10.8	2.7	2.3
令和4年08月19日	38.3	17.8	16.5	7.9	11.3	2.8	2.0
令和4年08月26日	34.9	21.5	15.3	8.8	10.5	2.5	2.7
令和4年09月02日	41.9	16.9	12.2	8.1	11.6	2.8	1.8
令和4年09月09日	37.9	20.0	13.5	8.4	10.7	2.7	2.4
令和4年09月16日	31.3	23.1	16.1	9.5	8.6	2.7	2.3
令和4年09月22日	40.3	17.5	13.3	8.9	11.4	2.9	2.0
令和4年09月29日	31.0	23.6	17.5	9.4	9.0	2.8	2.8
令和4年10月06日	35.8	19.8	13.8	9.2	10.0	3.1	1.8
令和4年12月28日	33.5	23.4	13.7	9.5	9.8	3.7	3.0
令和5年01月06日	26.3	27.4	15.4	11.4	7.1	3.7	2.8
令和5年01月11日	25.8	28.2	16.0	11.4	7.2	3.6	3.0
令和5年02月09日	29.2	26.1	14.5	11.4	7.8	3.8	2.4
令和5年02月17日	30.2	24.5	14.6	11.3	8.5	3.6	2.9
令和5年04月21日	37.0	18.6	15.9	8.8	10.6	3.5	2.2
令和5年04月28日	32.7	22.4	15.0	9.8	9.3	3.7	2.7
令和5年05月15日	27.8	24.3	19.0	10.7	8.2	3.5	2.0
令和5年05月22日	29.8	22.7	18.0	10.8	8.9	3.5	1.8
令和5年06月29日	33.9	21.3	15.0	10.5	9.0	3.4	2.2
令和5年07月06日	35.1	19.0	20.0	8.0	9.7	2.5	2.0
令和5年07月21日	38.0	18.0	15.6	8.0	10.8	3.0	2.3
令和5年08月10日	38.4	18.5	14.5	8.3	10.9	3.0	2.6
令和5年08月24日	36.4	21.6	13.5	9.3	10.0	3.1	2.2

令和5年09月07日	39.1	18.5	13.7	7.6	11.8	2.9	2.1
令和5年09月21日	37.8	18.1	16.4	7.7	11.8	2.7	2.4
令和5年10月06日	39.7	18.1	14.6	7.3	12.1	2.7	2.2
令和5年10月27日	33.9	21.4	17.7	7.7	10.3	3.3	2.6
令和5年11月02日	30.6	21.4	18.7	9.1	9.1	3.0	2.3
令和5年11月09日	29.4	21.8	22.3	8.9	8.6	3.1	1.8
令和5年11月24日	29.4	22.1	19.0	8.8	9.4	3.0	2.2
令和5年12月08日	29.4	23.5	17.7	9.8	8.2	3.3	2.2
令和5年12月25日	28.6	25.6	17.3	10.8	7.4	4.1	2.1
令和6年01月12日	24.6	24.7	21.5	10.2	6.4	3.8	2.4
令和6年01月19日	23.1	25.3	22.0	10.8	5.9	4.1	2.3
令和6年01月31日	25.5	26.3	16.9	10.6	7.1	3.9	2.9
令和6年02月09日	29.8	25.2	14.8	10.8	8.2	4.0	2.8
令和6年02月16日	28.4	23.1	17.8	10.2	7.9	3.6	2.1
令和6年02月29日	28.2	23.2	20.2	10.1	8.0	3.8	2.7

【2号炉クリンカ】

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-%)
令和5年01月24日	27.5	26.4	15.7	11.0	8.8	4.0	3.2
令和5年11月29日	29.0	24.9	18.1	10.3	8.5	2.7	2.8

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、測定した全ての無機成分において2号炉の方がR二乗の値が高く、マグネシウムは1号炉・2号炉共に低い結果となった。リンは、1号炉は中程度の相関、2号炉は強い相関が認められ近赤外成分計の精度が比較的高い結果となった。

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	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO
1号炉	焼却灰	0.56	0.47	0.63	0.43	0.59	0.58	0.08
2号炉	焼却灰	0.72	0.69	0.64	0.53	0.68	0.51	0.25

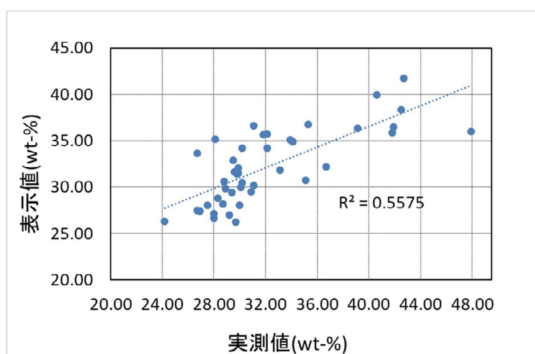


图-8 SiO₂ (1号炉烧却灰)

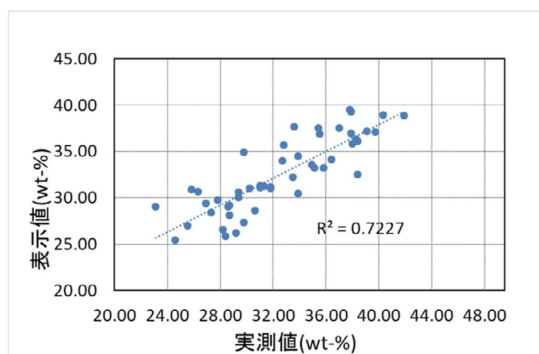


图-9 SiO₂ (2号炉烧却灰)

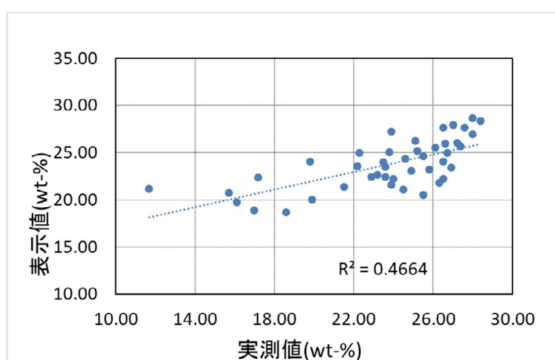


图-10 P₂O₅ (1号炉烧却灰)

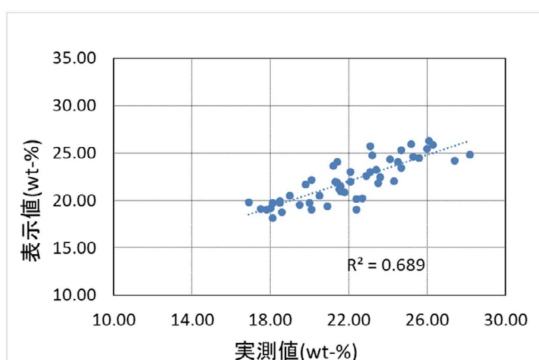


图-11 P₂O₅ (2号炉烧却灰)

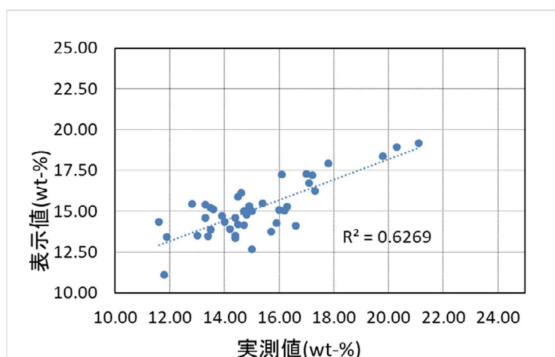


图-12 Fe₂O₃ (1号炉烧却灰)

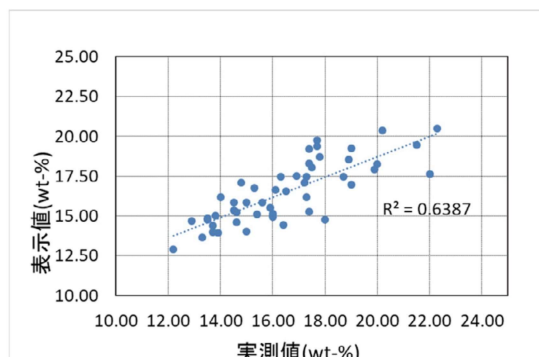


图-13 Fe₂O₃ (2号炉烧却灰)

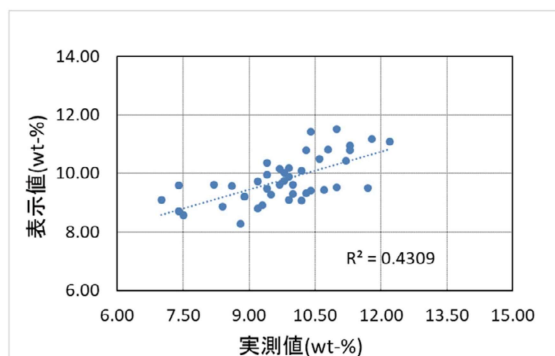


图-14 CaO (1号炉烧却灰)

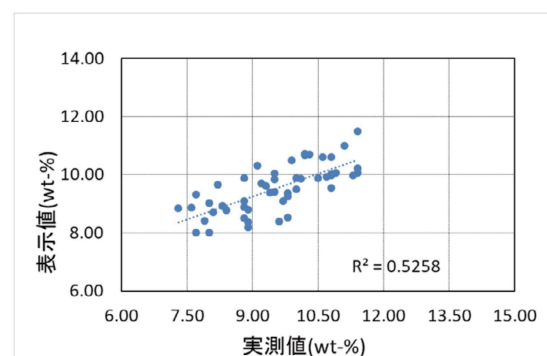


图-15 CaO (2号炉烧却灰)

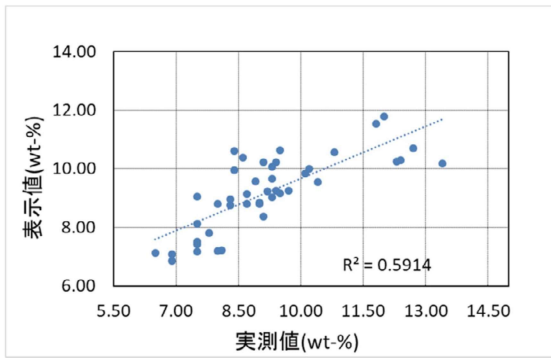


图-16 Al_2O_3 (1号炉烧却灰)

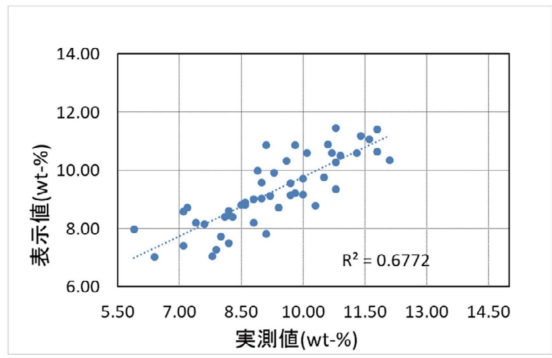


图-17 Al_2O_3 (2号炉烧却灰)

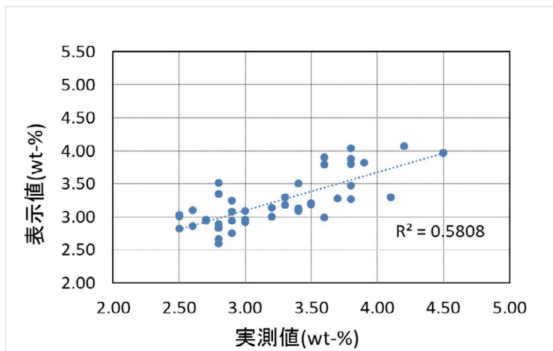


图-18 K_2O (1号炉烧却灰)

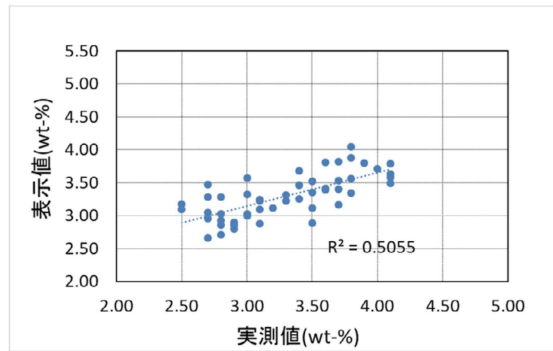


图-19 K_2O (2号炉烧却灰)

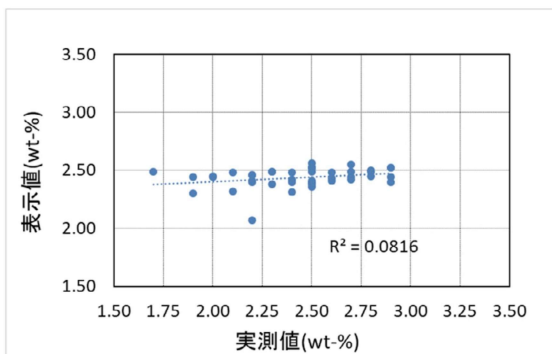


图-20 MgO (1号炉烧却灰)

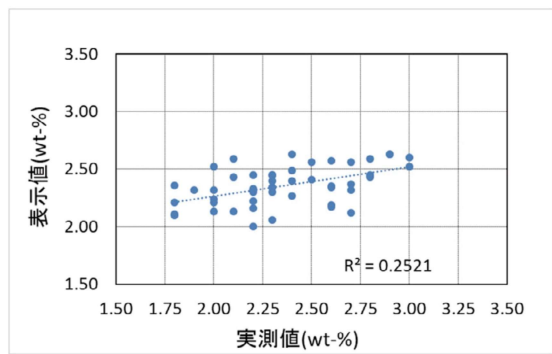


图-21 MgO (2号炉烧却灰)

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-%)
令和4年05月26日	29.4	25.2	17.2	10.8	7.8	3.3	2.4
令和4年05月30日	36.0	21.2	14.4	9.1	10.2	3.0	2.4
令和4年05月31日	35.9	20.7	15.2	8.9	10.3	2.9	2.4
令和4年06月10日	35.6	22.2	13.8	9.4	10.2	2.9	2.4
令和4年06月16日	35.7	21.1	15.0	8.9	10.4	2.8	2.4
令和4年06月23日	35.1	22.4	14.2	9.5	10.1	3.0	2.4
令和4年06月29日	40.0	18.7	13.4	8.3	11.5	2.6	2.4
令和4年10月20日	32.9	23.4	15.3	9.5	9.6	3.1	2.5
令和4年10月28日	34.2	23.2	13.9	9.5	10.2	2.8	2.5
令和4年11月04日	32.0	24.0	15.2	9.6	9.7	2.9	2.5
令和4年11月11日	28.8	26.9	14.7	10.8	8.1	3.5	2.5
令和4年11月18日	32.2	24.1	15.0	9.7	9.6	3.0	2.5
令和4年11月25日	30.5	25.5	14.8	10.2	9.2	3.0	2.6
令和4年12月02日	29.5	26.0	16.1	10.2	8.9	3.1	2.5
令和4年12月09日	31.4	25.7	13.9	10.5	9.0	3.3	2.5
令和4年12月16日	31.8	24.3	15.4	9.9	9.3	3.1	2.4
令和4年12月23日	27.0	28.3	14.6	11.4	7.2	3.9	2.5
令和5年01月19日	26.7	28.6	14.6	11.5	7.2	3.9	2.5
令和5年01月26日	27.5	27.6	15.0	11.1	7.5	3.8	2.5
令和5年02月03日	27.2	27.9	15.1	11.2	7.4	3.8	2.5
令和5年02月21日	30.6	26.0	14.3	10.4	8.8	3.3	2.5
令和5年04月21日	36.3	20.0	15.4	8.8	10.0	3.2	2.3
令和6年04月28日	34.2	22.4	15.1	9.6	9.2	3.5	2.3
令和6年05月15日	33.6	21.8	15.3	9.3	9.0	3.5	2.4
令和6年05月22日	35.2	22.2	14.1	9.4	10.0	3.1	2.4
令和6年06月09日	36.8	21.4	13.4	9.2	10.6	2.8	2.4
令和6年06月23日	31.6	20.5	12.7	9.1	10.6	3.0	2.4
令和6年06月29日	41.7	18.9	11.1	8.6	11.8	2.7	2.5
令和6年07月06日	36.6	21.6	14.1	9.1	10.6	2.8	2.4
令和6年09月07日	36.4	22.3	13.5	9.6	10.3	3.0	2.5
令和6年10月06日	38.3	19.7	13.5	8.7	10.7	2.9	2.4
令和6年10月19日	34.9	22.6	13.5	9.6	9.9	3.1	2.5
令和6年10月27日	30.0	24.6	17.3	9.8	8.8	3.3	2.4
令和6年11月02日	28.0	26.3	16.2	10.4	8.4	3.4	2.5
令和6年11月09日	28.2	25.0	19.2	9.6	8.8	3.1	2.4

令和6年11月24日	30.2	23.6	18.4	9.2	9.3	2.9	2.4
令和6年12月08日	31.5	23.1	17.3	9.3	9.1	3.2	2.4
令和6年12月25日	28.1	24.0	15.5	10.0	7.1	4.1	2.1
令和6年01月12日	26.3	24.9	17.9	10.1	6.9	4.0	2.6
令和6年01月19日	27.4	27.6	14.3	11.0	7.1	4.0	2.5
令和6年02月09日	26.2	27.2	16.7	10.8	7.2	3.8	2.5
令和6年02月16日	30.8	24.9	15.9	10.0	9.0	3.2	2.5
令和6年02月29日	29.9	23.5	18.9	9.3	8.8	3.3	2.3

表一5 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 (wt-%)	P ₂ O ₅ (wt-%)	Fe ₂ O ₃ (wt-%)	CaO (wt-%)	Al ₂ O ₃ (wt-%)	K ₂ O (wt-%)	MgO (wt-%)
令和4年04月08日	31.0	21.5	19.2	9.4	9.2	3.3	2.3
令和4年04月15日	28.1	23.7	17.9	10.7	8.2	3.8	2.6
令和4年04月21日	29.4	23.4	18.6	10.1	8.4	3.6	2.4
令和4年04月28日	31.3	22.0	18.3	9.5	9.1	3.4	2.4
令和4年05月06日	29.2	24.3	17.1	10.5	8.4	3.7	2.5
令和4年05月11日	31.2	22.6	17.5	9.9	9.0	3.5	2.3
令和4年05月20日	28.4	25.4	16.2	11.0	8.2	3.8	2.6
令和4年07月06日	35.7	20.5	15.3	9.1	10.3	3.1	2.4
令和4年07月15日	36.9	20.2	14.7	8.9	10.6	3.0	2.3
令和4年07月22日	37.5	19.5	14.9	8.5	10.9	2.9	2.3
令和4年07月28日	37.7	19.4	15.2	8.4	10.9	2.9	2.3
令和4年08月05日	39.3	19.0	13.9	8.2	11.5	2.7	2.3
令和4年08月12日	32.5	22.2	16.2	9.7	9.4	3.3	2.3
令和4年08月19日	36.3	19.0	16.6	8.4	10.6	2.9	2.2
令和4年08月26日	33.5	21.2	16.8	9.1	9.8	3.1	2.3
令和4年09月02日	38.8	19.8	12.9	8.7	11.1	2.9	2.4
令和4年09月09日	36.9	19.7	14.8	8.8	10.6	3.0	2.3
令和4年09月16日	31.3	23.0	16.7	9.9	8.8	3.5	2.5
令和4年09月22日	38.9	19.1	13.7	8.4	11.2	2.8	2.3
令和4年09月29日	31.1	22.5	18.0	9.4	9.0	3.3	2.4
令和4年10月06日	33.2	21.7	15.0	9.7	9.2	3.2	2.1
令和4年12月28日	32.2	23.2	14.4	10.0	9.2	3.4	2.6
令和5年01月06日	30.7	24.2	15.1	10.2	8.6	3.5	2.6
令和5年01月11日	30.9	24.8	15.0	10.1	8.7	3.4	2.5
令和5年02月09日	26.3	26.3	15.9	11.5	7.0	4.1	2.6
令和5年02月17日	31.1	24.1	15.2	10.0	8.8	3.4	2.6

令和5年04月21日	37.5	18.7	15.5	8.5	10.9	2.9	2.2
令和5年04月28日	34.0	19.0	15.9	9.4	9.9	3.2	2.1
令和5年05月15日	29.8	22.0	19.3	9.9	8.5	3.5	2.1
令和5年05月22日	34.9	20.2	14.8	9.6	10.0	3.1	2.1
令和5年06月29日	34.5	22.0	14.0	9.9	9.6	3.3	2.0
令和5年07月06日	33.2	20.5	18.3	8.0	9.6	3.2	2.2
令和5年07月21日	35.9	19.1	15.9	9.0	10.3	3.0	2.1
令和5年08月10日	36.1	19.9	15.4	8.9	10.5	3.0	2.2
令和5年08月24日	34.1	21.0	14.8	9.6	9.7	3.2	2.3
令和5年09月07日	37.2	19.7	14.0	8.9	10.6	2.9	2.1
令和5年09月21日	39.5	18.2	14.4	8.0	11.4	2.7	2.4
令和5年10月06日	37.1	19.7	14.6	8.8	10.3	3.1	2.2
令和5年10月27日	30.4	21.9	19.4	9.3	8.8	3.2	2.2
令和5年11月02日	28.6	24.0	17.5	10.3	7.8	3.6	2.4
令和5年11月09日	30.6	20.8	20.5	8.8	8.9	3.1	2.2
令和5年11月24日	30.0	23.0	17.0	9.9	8.7	3.3	2.5
令和5年12月08日	30.0	21.8	19.8	9.3	8.6	3.3	2.3
令和5年12月25日	29.0	24.4	17.5	10.0	8.2	3.5	2.4
令和6年01月12日	25.4	25.3	19.5	10.7	7.0	3.9	2.5
令和6年01月19日	29.1	24.6	17.7	10.0	8.0	3.6	2.5
令和6年01月31日	27.0	25.9	17.5	10.6	7.4	3.8	2.6
令和6年02月09日	27.4	25.9	17.1	10.6	7.5	3.7	2.5
令和6年02月16日	25.8	25.8	18.7	10.7	7.3	3.8	2.6
令和6年02月29日	26.6	24.8	20.4	9.9	7.7	3.6	2.6

③焼却灰の色による無機分（リン）の推定

ア) 色彩計によるリン濃度の推定

色彩計の測定値（表示値）と蛍光X線分析の実測値から重回帰分析によりリン濃度の推定を行えないか検討を行った結果、「L*a*b*、Y x y、XYZ」ともに説明変数（表示値）が目的変数（蛍光X線分析実測値）への影響がほとんどなく各成分が色との関係性について説明することはできない結果となった。Y x y表色系を例にとって説明する。

・ Y x y 表色系検討結果

図-22 左図の x y 色度図を用いて表現し「x」と「y」は色度座標、図-22 右図「Y」は視感反射率を表している。グラフの中央部に無彩色のエリアがあり、中央部から外側に向かって彩度を円周方向に色相が順次変化して配置されている。色相と色彩は色度座標 x 軸と y 軸の直交座標の交点で表す。図-22 右図は視感反射率「Y」の値が小さくなるにつれて、色度図全体が暗くなっていく、色度図は実際には視感反射率Y値（明るさ）との多層構造になっており、あらゆる色を表現することができる。

重回帰分析の結果では、説明変数の視感反射率「Y」、色度座標「y」はリン成分を説明するうえで有意性が認められたが、色度座標「x」がリン成分を説明するうえで有意性が低い結果となった。「Y x y 表色系」は3つの要素で1つの色を表すため全ての要素（Y、x、y）が有意でなければがこの調査モデルそのものが妥当ではないという結果となるため、札幌市の焼却灰は成分を色で判別することは難しいと考えられる。

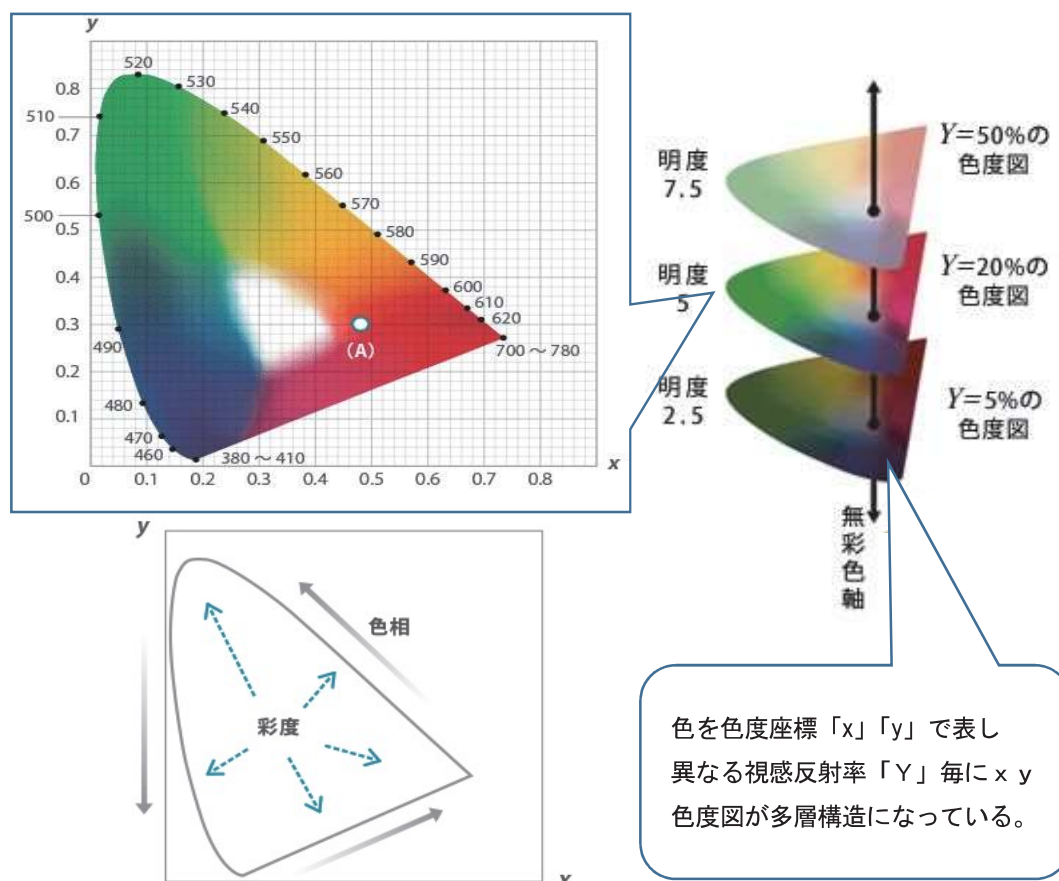








図-22 x y 色度図と色相・彩度の関係

・焼却灰の見た目とリン・鉄含有割合

表-6は、2か年の検体におけるリン含有量が最小値・中間値・最大値の焼却灰の写真とリン及び鉄分の含有割合を示したものである。札幌市の焼却灰は他都市と比較してリン含有率が10ポイントほど低く、リンに対する鉄分の含有割合が高いことがわかった。一般に鉄分が多いほど赤茶色、リンが多いほど白色を示すことから、リンに対する鉄分の含有割合が多いことで、色彩値として表れにくかったと考えられる。

すなわち、見た目からも色彩計の値と蛍光X線分析実測値の間に関係性が少ないことを示す結果となった。

表-6 焼却灰の色及びリン・鉄含有率

	リン濃度	最小値	中間値	最大値
札幌市	写真			
	採取日	令和4年5月30日	令和5年11月24日	令和4年12月23日
	リン P ₂ O ₅	11.7%	22.2%	28.4%
	鉄 Fe ₂ O ₃	11.6%	19.8%	13.3%
他都市	写真			
	リン P ₂ O ₅	31.0%	32.0%	38.0%
	鉄 Fe ₂ O ₃	13.3%	10.7%	10.1%

④焼却炉赤外線放射観測によるクリンカの付着推定調査

図-23は焼却炉サイクロン部をサーモグラフィカメラで赤外線放射を週に1度のサイクルで撮影したもので、観測点M2の温度変化と対象期間内に成長したクリンカの厚さをまとめたものである。1号炉114日間で5～6cm、2号炉64日間で1cm程度のクリンカの成長があったが表面温度の変化は上昇や低下などの変化を示さず、誤差範囲の変化となった。そのため、サーモグラフィ画像では温度差を可視的に表示しクリンカの成長を判別することは難しいと考えられる。

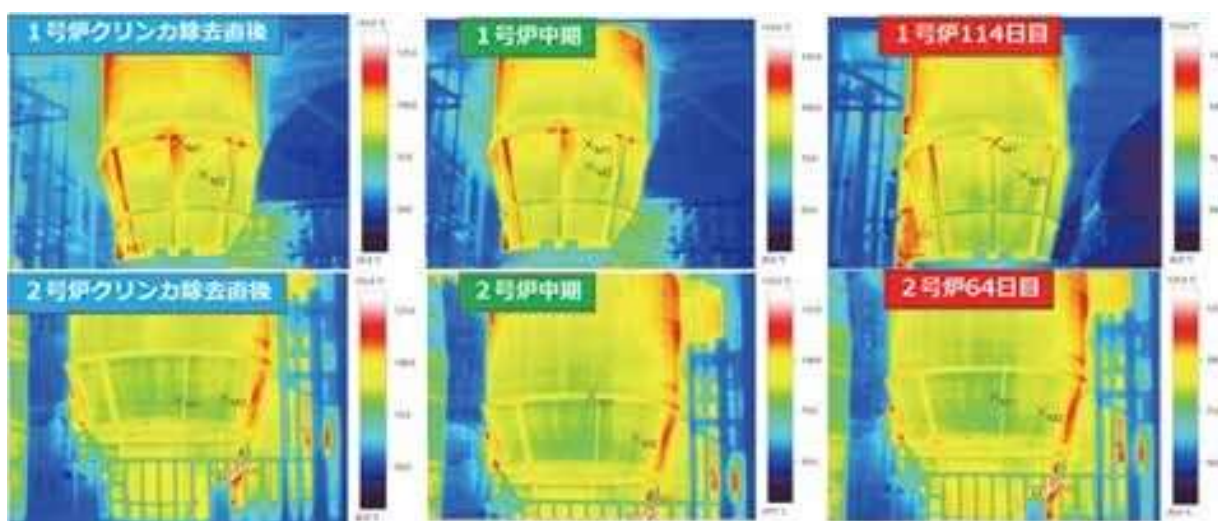


図-23 焼却炉サーモグラフィ画像

表-7 焼却炉サーモグラフィ温度・クリンカ厚

	クリンカ 除去直後	運 転 中 期	運 転 終 期	クリンカ 厚
1号炉サイクロン表面温度M2 [°C]	80.5°C	81.2°C	80.2°C	5～6 cm
2号炉サイクロン表面温度M2 [°C]	75.4°C	78.0°C	76.8°C	1 cm 程度

4. 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2か年を通して高い結果が得られた。
- 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) 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、2号炉は近赤外成分計の表示値は蛍光X線分析実測値と強い相関となり統計的にある程度有意な結果が得られた。
- 4) 色による無機成分の推定では、リンに対する鉄分の含有量が多く、色彩値として表れにくかったと考えられ、色彩値で推定するのは難しいと考えられる。
- 5) 焼却炉赤外線放射観測によるクリンカの付着推定調査では期待した温度差が得られなかったことから赤外線放射観測による推定は難しいと考えられる。
- 6) クリンカ清掃
 焼却炉の運転・停止の都度、マンホールから届く範囲でクリンカの清掃を行い可能な限り成長を進ませないことが重要であると考えられる。また、クリンカの成長が著しい場合は外注清掃にて完全に除去し管理していくことが必要であると考えられる。
- 7) 引き続き当事業所に合ったクリンカの成長把握手法を検討していくことが必要であると考えられる。

【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. 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 pp.295
3. 循環式流動焼却炉におけるクリンカ対策に関する基礎調査のご提案
 株式会社日水コン