

汚泥焼却炉からの汚染質の排出実態について(第2報)

— 流動床炉について —

谷川 昇 岩崎 好陽 中浦 久雄
矢島 恒広 石黒 辰吉

1 はじめに

下水道の普及とともに、汚泥の発生量は年々増加し、その処理処分が大きな問題となっている。現在の汚泥の処分方法は、機械脱水した汚泥(以下スラッジケーキ)を海面もしくは陸上埋立する方法が一般的であるが、大都市では、埋立地の確保が困難となってきていることなどからスラッジケーキを焼却してさらに減量化をはかる方法や、一部ではスラッジケーキを堆肥化して土壌改良剤などに利用する方法などもとられている。

東京都においても汚泥の全量焼却の方向で事業が進められている¹⁾が、その一方で汚泥焼却に伴う汚染質の排出が問題となってきている。焼却方法としては、立形多段炉を用いる例が最も多いが、多段炉は、^{2), 3)}

- ① 燃焼空気との接触が不十分で未燃物量が多くなる。
- ② 排ガス量が多く、処理装置が大きくなる。
- ③ 汚泥予熱部から揮発するガスのため、悪臭の発生や金属腐食がおこりやすい。

などの操作上、大気汚染上の問題があることから、最近では流動床炉が増えてきている。

筆者らは、昭和52年度から汚泥焼却に伴う汚染質の排出実態を把握する調査を実施しており、前報⁴⁾で多段炉から排出される汚染質について報告したが、本報では、流動床炉から排出される汚染質の調査結果について報告する。

2 調査方法

(1) 調査施設

流域下水道北多摩一号処理場の流動床式汚泥焼却炉について、1979年9月から11月にかけて調査を実施した。

北多摩一号処理場は1日100,000m³の生活排水、

工場排水を活性汚泥法によって処理している。処理に伴い発生する汚泥は、高分子凝集剤を加えてベルトプレスで脱水(一部熱処理後フィルタープレスで脱水)され、定格40t/日の流動床式汚泥焼却炉2基で焼却されている。

流動床炉は、図1に示したような立型中空の円筒型の炉で、焼却炉床部に充てんしたけい砂を、風函から均一に吹きあがる燃焼用空気によって流動させ、補助燃料で流動層内を750~800℃に保ちながらその中に汚泥を投入し、燃焼させる装置である。焼却灰は燃焼排ガスとともに全量炉から排出されるため、サイクロン、ベンチュリースクラバー、水洗塔の排ガス処理装置がつけられている。

流動床炉2基は、同質の汚泥を同じ負荷で焼却していたので、主に2号炉から排出される汚染質について調査を行った。

(2) 測定項目および測定方法

ア ガス状汚染質

SO ₂ , NO _x , CO	非分散形赤外線分析計(NDIR)
THC	水素炎イオン化形分析計(FID)
O ₂	磁気式
CO ₂	熱伝導度法
HCl	チオシアン酸第二水銀法 (JIS K 0107)
HCN	硝酸銀法(JIS K 0109)
NH ₃	インドフェノール法 (JIS K 0099)

イ 悪臭

三点比較式臭袋法(東京都告示第238号に定める方法)

ウ 重金属

① 流動床炉	⑤ 空気予熱器	⑨ ベンチュリー スクラバー	⑬ 白煙防止用ブロー
② スラッジケーキ ホッパー	⑥ 白煙防止用予熱器	⑩ 水洗塔	⑭ 排ガス採取口 (入口)
③ ケーキ押込機	⑦ サイクロン	⑪ 煙突	⑮ 排ガス採取口 (出口)
④ 風函	⑧ 誘引ブロー	⑫ 流動ブロー	

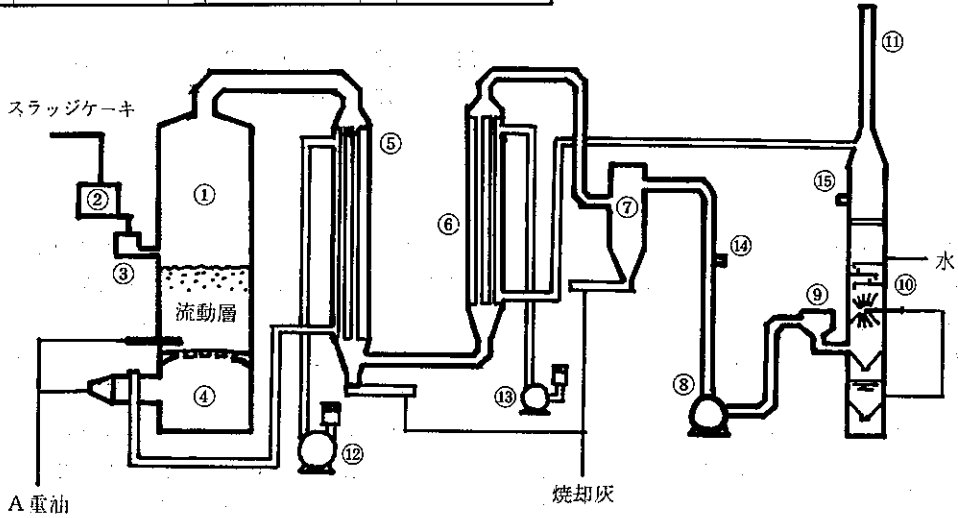


図1 流動床式汚泥焼却炉の構造および排ガス処理施設

スラッジケーキ	} JIS K 0097 に準拠した
焼却灰	
ダスト	原子吸光法
気体状Hg	けい光X線法
気体状Cd, Pb	原子吸光法 (0.3% KMnO ₄ と (1+15) H ₂ SO ₄ 等量の吸収液で捕集し、循環還元気化法で分析)
	原子吸光法 (1 NHNO ₃ + 1 N HCl 吸収液に捕集)

3 結果および考察

(1) ガス状汚染質

連続測定を行った SO₂, NO_x, O₂, CO, THC, CO₂ の 1 時間値の平均値と同時サンプリングにより 3~8 回測定した HCl, HCN, NH₃ 濃度および前報⁴⁾で報告した多段炉のガス状汚染質濃度の平均値を表1に示した。

なお、測定期間中の流動層内温度は 750 ± 20℃ とほぼ一定で、排ガス流量も 60 N m³/分程度でほとんど変動がなかった。スラッジケーキ焼却量は日によって差はあったが、平均すると 26 t/日であり、定格の約 7 割の運転状況であった。

また、ガス状汚染質の採取は図1に示した湿式排ガス洗浄装置の前後で行った。

ア SO₂

表1のように SO₂ 濃度の 1 時間値は、排ガス洗浄装置入口では 73~236 ppm の範囲で平均 190 ppm (乾燥汚泥単位重量あたりの発生量は 2.7 N m³/t・乾燥汚泥。以下同様。)であり、出口では 0~41 ppm の範囲で平均 7 ppm (0.1 N m³/t・乾燥汚泥)であった。前報⁴⁾の多段炉での測定結果と比較すると処理装置入口濃度は高い値となっているが、これは、北多摩一号処理場の汚泥の脱水法が高分子凝集剤添加による方法で、石灰注入を行っていないので炉内で SO₂ があまり除去されないためと考えられる。しかし、SO₂ は洗浄装置によって 80% 以上除去されていた。

測定期間中スラッジケーキは、1, 2号炉各汚泥ホッパーに5分間おきに交互投入され、スクリーフイーダーによって炉内に供給されていたが、洗浄装置入口 SO₂ 濃度等に図2のような10分間隔の明確なピークがみられた。排ガス中の SO₂ は、汚泥もしくは助燃用の重油に含まれる S 分が酸化したものと考えられるが、測定期間中の排ガス量はほぼ一定であり、重

表 1 ガス状汚染質の排ガス中濃度

	採取場所	SO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	O ₂ (%)	CO (ppm)	THC (ppm)	CO ₂ (%)	HCl (ppm)	HCN (ppm)	NH ₃ (ppm)
北多摩一号 (流動床炉)	2号炉 処理装置 入口	*190 (73~236)	41 (32~54)	13.4 (12.0~15.6)	110 (72~140)	63 (37~79)	4.5 (3.0~5.5)	182 (93~290)	124 (65~198)	66 (24~108)
	2号炉 処理装置 出口	8 (0~41)	33 (17~63)	14.1 (10.0~17.2)	72 (10~110)	42 (10~55)	3.2 (1.2~6.0)	45 (5~110)	36 (3~90)	11 (1~19)
	1号炉 処理装置 出口	4 (0~10)	28 (17~40)	16.4 (14.2~18.5)	57 (30~80)	—	2.4 (0.5~3.3)	—	—	—
新河岸・小台段炉 (多段炉)	処理装置 入口	41	76	13.8	1180	450	4.4	147	27	129
	処理装置 出口	8	59	15.5	670	160	3.3	7	3	3

* () 内は最小最大

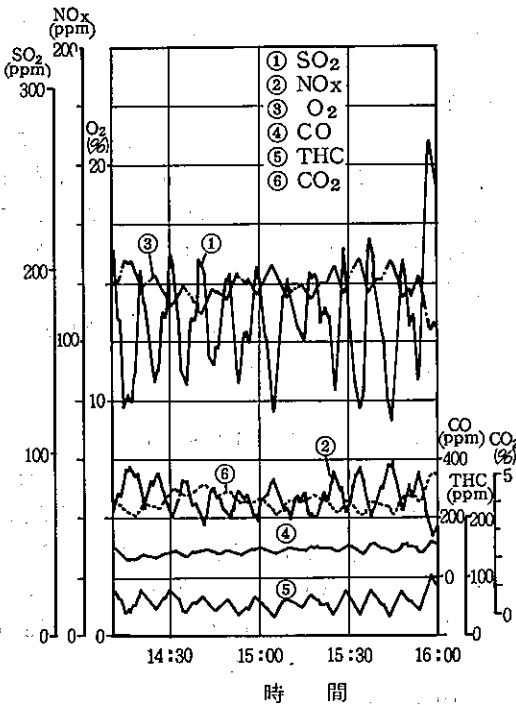


図 2 洗浄装置入口でのガス状汚染質濃度の変動

油中のS分も0.095%と低く、さらに1分間あたりの重油使用量はほとんど変化しないことから、重油中のS分が原因でSO₂濃度にピークが現われるとは考えられない。また、スラッジケーキ投入中のホッパー

内は、スラッジケーキが円錐状に堆積し、投入が中断すると徐々に円錐がくずれて平らになる状況から、スラッジケーキの炉への供給量は、ホッパーへの投入間隔の倍の10分周期で変動すると推測されることから洗浄装置入口SO₂濃度の変動は、スラッジケーキ中のS分に起因するものと考えられる。さらに、スラッジケーキ中のS分は短時間ではほぼ一定と考えられ、排ガス量も変動が少ないので、排ガス中のSO₂濃度とスラッジケーキ投入量は比例関係にあると考えられる。

イ NO_x

NO_x濃度は、洗浄装置入口、出口ではほとんど差がなく1時間値は17~63ppmの範囲であった。表1では、入口と出口で差があるが、これは入口、出口で測定時間が違うため、同時サンプリングを行いO₂換算をするとほぼ同程度となる。NO_x濃度の平均値をO₂濃度12%換算すると49ppm(0.70Nm³/t・乾燥汚泥)となり、多段炉のNO_x濃度の約半分値となる。他の報文^{2),5)}では、流動床炉ではNO_x濃度が多段炉よりもかなり高くなるとされているが、今回の測定ではそのようなことはなかった。

洗浄装置入口でのSO₂濃度とNO_x濃度は、図2のように相関を示し、SO₂濃度が極大となるときNO_x濃度は極小となっている。各極大、極小点におけるSO₂濃度XとO₂12%換算したNO_x濃度Yとの関係を図3に示したが、Xが50~250ppmの範囲

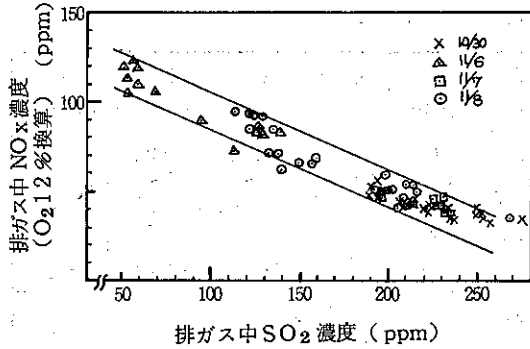


図3 SO₂濃度とNO_x濃度の関係

内で $Y = -0.44X + 140 (\pm 10)$ の関係があった。SO₂ の項で述べたように、SO₂ 濃度と炉へのスラッジケーキ投入量は比例関係にあると考えられ、排ガス量もほぼ一定であることから、この関係は、スラッジ投入量が増加する、すなわち、負荷量が増えるとNO_x 排出量が減るという現象を示している。流動床式焼却炉を重油のみの空運転を行ってNO_x 濃度を測定すると検出不能であるという報告⁶⁾や、重油使用量がほぼ一定であること、流動層内温度が $750 \pm 20^\circ\text{C}$ に保たれていることなどから、排ガス中のNO_x は主にスラッジケーキ中のN分から生成したものと考えられる。しかし、NO_x 発生の主因と考えられるスラッジケーキの供給が増えるとNO_x 発生量が減るという現象は、これまでいわれているようなNO_x 発生量は負荷量を増加させると増大するという一般論と一致していない。

この原因としては、スラッジケーキの投入量が多い時一部がアンモニア等の生成で還元雰囲気となりNO_x の生成が抑制される、75%近い水分の蒸発で一種の水蒸気噴霧と同じ状態となりNO_x の生成が抑制される、供給空気量が一定で燃焼により消費された分だけO₂ 濃度が下がってNO_x の生成が抑制されることなどが推測されるが、今後の検討が必要となろう。

ウ O₂

O₂ 濃度の1時間値は13~16%の範囲であり、多段炉のO₂ 濃度とはほぼ同程度であった。流動床炉の特徴の一つとして排ガス中のO₂ 濃度が低いことがあげられているが、期待された程O₂ 濃度は低くなっていなかった。

洗浄装置入口におけるSO₂ 濃度とO₂ 濃度の間に

も相関があり、O₂ 濃度はSO₂ 濃度が極大の時、極小になるというNO_x 濃度と同一の変動を示していた。流動空気量がほぼ一定であることから、SO₂ 濃度が高い時、すなわち、スラッジケーキ供給量が多い時は、スラッジケーキ中の有機物の燃焼によってO₂ の消費が多くなるのでO₂ 濃度が下がり、SO₂ 濃度とO₂ 濃度は逆の変動を示したと考えられる。

エ CO

排ガス中のCO濃度の1時間値は10~140 ppmの範囲で、平均は72 ppm (1.0 Nm³/t・乾燥汚泥)と多段炉の排出濃度の約1/10の値であった。これは、流動床炉の大きな特徴といえる。

洗浄装置入口のSO₂ 濃度との相関性も他のガス同様であり、CO濃度はSO₂ 濃度と同じ変動を示し、スラッジケーキ焼却量が増加するとCO濃度も上昇していた。

また、多段炉でしばしばみられる高濃度のCOの出現は、流動床炉では全くなく、CO濃度の変動は小さかった。

オ THC

THCの排ガス中の1時間平均濃度は、10~55 ppmの範囲でその平均は42 ppm (0.60 Nm³/t・乾燥汚泥)であった。この値は、多段炉のTHC濃度の1/2~1/20であり、COと同様に流動床炉ではTHCの排出量は少なくなる。

また、THC濃度はCO濃度と同様に、SO₂ 濃度変動と正の相関を示していた。

カ CO₂

CO₂ 濃度は1時間値で1.2~6.0%の範囲で平均3%と多段炉の排ガス中濃度とはほぼ同程度であった。CO₂ 濃度とSO₂ 濃度の相関性はCO、THCと同様であり、CO₂ 濃度はSO₂ 濃度と同じ変動を示していた。ただし、CO₂ 濃度はSO₂ 濃度の変動に対して時間おくれがあった(図2)が、これはCO₂ 計の応答速度が遅いためと考えられる。

キ HCl, HCN, NH₃

HCl濃度は洗浄装置入口で182 ppm、出口で45 ppmであった。入口濃度は多段炉と比較してやや高い値となっているが、出口濃度は多段炉の場合よりかなり高い結果となっている。SO₂ の除去効率から考えるとHClの出口濃度はもう少し低くてもよいはずであるが、出口濃度測定時にダストが少量混入し、ダス

ト中のClが溶出してHCl測定結果に正の誤差を生じさせたことも考えられる。

HCN濃度は入口では124 ppm, 出口では36 ppmと入口, 出口とも多段炉に比べて高い値となっている。これは, 汚泥脱水時に汚泥乾量あたり0.4~0.5%添加する高分子凝集剤がCN化合物であるため, 燃焼時に高分子凝集剤が熱分解し, HCNの発生量が多くなったと考えられる。なお, 平岡ら⁷⁾は乾留炉テストプラントにおいて排ガス中のHCN濃度が93~930 ppmの範囲内であったことを報告している。

NH₃濃度は洗浄装置入口で66 ppm, 出口で11 ppmという値であり, 多段炉から発生するNH₃濃度の約1/2であった。

(2) 悪臭

表2に三点比較式臭袋法による北多摩一号処理場の流動床炉および小合, 新河岸処理場の多段炉⁴⁾の排ガスの臭気濃度測定結果を示した。流動床炉排ガスの臭気濃度は洗浄装置入口でも730と多段炉排ガスの臭気濃度より1けた以上低い値であった。規制基準を遵守するだけであれば, 工業地域に設置する流動床炉は多段炉と異なり, 脱臭施設を特に必要としない。

表2 臭気濃度

処理場	流動床炉		多段炉 ⁴⁾	
	北多摩一号		新河岸	小合
採取場所	2号炉 処理装置 入口	2号炉 処理装置 出口	処理装置 入口	処理装置 入口
臭気濃度	730	410	7300	5500
測定年月日	1979.11.13		1978.12.4	1977.12.1

(3) 重金属

ア スラッジケーキおよび焼却灰

高分子凝集剤を加え, ベルトプレスで脱水したスラッジケーキの含水率は, 74~85%で平均79%であった。

スラッジケーキ中の重金属の含有率を表3に示した。スラッジケーキ中のいくつかの重金属濃度には相関性がみられ, FeとZn, Cu, Mnの間にはほぼ直線関係が成立していた。

当部実験室においてスラッジケーキを空気を送入しながら, 電気炉を用いて500~1000℃で熱分解させた時に残る灰(以下残渣)の量は, 重量比で汚泥乾量の48.5~46.3%であった。温度が高くなるほど残渣の量は少なくなるが, その差はわずかであった。この残渣の比率を利用し, スラッジケーキ中の重金属が全量残渣中に留まっていると仮定して焼却灰中の重金属組成を算出すると, 表3下段のようになる。この算出した値とサイクロンによって捕集された焼却灰中の重金属含有率とを厳密に比較することはできないが, 融点の低いHg, Cd, Zn等は, 実際の焼却灰中の重金属含有率の方がかなり低くなる傾向を示し, 焼却時に揮散している^{5), 8), 9), 10)}ことがわかる。また, 電気炉でスラッジケーキを熱分解させた時の残渣中に残る重金属量を調べた一例を図4に示した。図4の縦軸の残存率は, 残渣中の重金属量/スラッジケーキ中の重金属量のことであるが, この図からもCd, Znなどの融点の低い金属は, 焼却時に揮散しやすく, その揮散量は焼却温度に依存していることがわかる。

イ ダスト

流動床炉では, 燃焼後の灰は全量排ガスとともに炉外に排出されるため, 排ガス中のダスト濃度は高くな

表3 スラッジケーキ・焼却灰中の重金属の含有率

	Cd (ppm)	Pb (ppm)	Fe (%)	Zn (%)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	Hg (ppm)
スラッジ ケーキ	7 (5~11)	180 (100~300)	3.5 (2.2~5.0)	0.16 (0.11~0.24)	390 (290~540)	410 (260~550)	130 (40~320)	60 (40~90)	0.93 (0.81~1.2)
焼却灰	11 (7~19)	390 (220~600)	7.5 (4.7~10.9)	0.27 (0.17~0.55)	880 (550~1370)	900 (520~1560)	160 (80~490)	140 (80~200)	0.013 (0.009~0.018)
算出 焼却灰組成	15	380	7.4	0.34	830	870	280	130	2.0

* ()内は最小最大, すべてドライベース

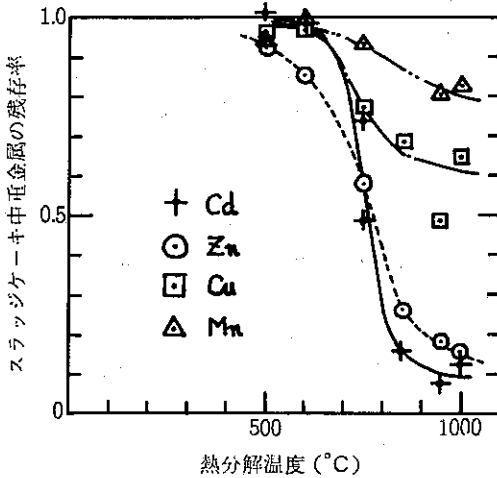


図4 熱分解温度とスラッジケキ中重金属の残存率

る。測定を行った炉では、サイクロン、ベンチュリースクラパー、水洗塔によってダストを除去しているが、ダスト濃度はサイクロン出口で7.0 g/Nm³、洗浄装置出口で0.14 g/Nm³であった。水洗装置によってダストの98%が除去されるが、水洗装置にとりこまれるダストの量も多いため装置の維持管理に十分留意する必要がある。同一処理装置を設置した場合、流動床炉は多段炉に比べて装置入口ダスト濃度が高い分だけ出口濃度も高くなっている。

ダスト中の重金属含有率は表4に示した。

ウ 気体状重金属

排ガス中の気体状Hg, Pb, Cd濃度の測定結果を表5に示す。

排ガス中のHg濃度は、洗浄装置入口では0.059 mg/Nm³、出口では0.054 mg/Nm³とほとんど差はなかった。この値と多段炉の測定結果⁴⁾を比べるとは

表5 排ガス中の気体状重金属濃度

採取場所	Hg (mg/Nm ³)	Pb (mg/Nm ³)	~Cd (mg/Nm ³)
2号炉 処理装置 入口	* 0.059 (0.033 ~ 0.094)	1.7 (0.8 ~ 2.4)	3.6 (1.5 ~ 4.8)
2号炉 処理装置 出口	0.054 (0.053 ~ 0.056)	2.2 (0.8 ~ 3.6)	1.7 (0.7 ~ 2.8)

* ()内は最小最大

は同程度がそれ以下であった。

Pb, Cd濃度もHgと同様に洗浄装置入口、出口ではほぼ同じ値となり、気体状の重金属は、水洗装置ではほとんど除去されていないといえる。Cdの出口濃度が入口濃度の約1/2となっており、洗浄装置により除去されているようにみえるが、気体状Cdの捕集量がわずかであったため、この程度の差は誤差範囲内となる。

4 ま と め

- ① 排ガス中のSO₂は、主にスラッジケキ中のS分に起因し、流動床炉出口の排ガス中のSO₂濃度とスラッジケキ投入量は比例関係にあると考えられた。
- ② SO₂濃度とNO_x, O₂, CO, THC, CO₂濃度の変動に相関があり、CO, THC, CO₂濃度はSO₂濃度と同じ変動を示し、NO_x, O₂濃度はSO₂濃度と逆の変動を示した。
- ③ 流動床炉は多段炉に比べて、NO_x, CO, THC, 悪臭などの汚染質の排出量がかなり少なくなる。ただし、CN化合物系の高分子凝集剤を使用した時には、HCNの排出量が増加する可能性がある。
- ④ 流動床炉では、焼却灰が全量排ガスとともに炉外

表4 ダスト濃度およびダスト中重金属含有率

	ダスト濃度 (g/Nm ³)	Ti (%)	V (ppm)	Cr (ppm)	Mn (ppm)	Fe (%)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)
2号炉 処理装置 入口	* 7.0 (5.6 ~ 8.5)	0.47 (0.13 ~ 0.80)	410 (130 ~ 940)	130 (12 ~ 230)	480 (150 ~ 790)	4.2 (1.9 ~ 7.0)	80 (20 ~ 130)	530 (240 ~ 860)	2300 (1000 ~ 3900)
2号炉 処理装置 出口	0.14 (0.10 ~ 0.16)	1.5 (0.91 ~ 2.0)	1500 (910 ~ 1800)	310 (200 ~ 530)	1100 (680 ~ 1500)	9.9 (6.9 ~ 13)	260 (150 ~ 360)	1400 (1100 ~ 1700)	5300 (1900 ~ 8800)

* ()内は最小最大

に排出されるため、排ガス中のダスト濃度は高く、集じん装置の維持管理に留意する必要がある。

⑤ Hg, Cd, Pb, Znなどの融点の低い金属は、焼却時に揮散しやすく、その揮散量は焼却温度に依存していた。また、気体状の金属は、水洗装置ではほとんど除去されていなかった。

参 考 文 献

- 1) 下水汚泥処理調査委員会：下水汚泥の処理処分等について、東京都下水道局，P 11，(1979)。
- 2) 玉井孝生：流動床焼却による下水汚泥処理について、環境技術，11，1093，(1979)。
- 3) 月島機械：最近の汚泥焼却設備について，P 4，(1978)。
- 4) 中浦久雄ほか：汚泥焼却炉からの汚染質の排出実態について，東京都公害研究所年報，3 (1980)。
- 5) 松井三郎，平岡正勝：下水汚泥焼却処理によって発生する大気汚染の諸問題(I)，下水道協会誌，11，13，(1974)。
- 6) 三機工業：スラッジの熱処理設備，スラッジの流動焼却設備について，P 45 (1975)。
- 7) 平岡正勝，武田信生：汚泥焼却に伴う窒素酸化物対策，公害と対策，5，32，(1978)。
- 8) 平岡正勝ほか：下水汚泥焼却時の有害重金属の挙動について，環境技術，3，163 (1974)。
- 9) 近藤準子ほか：下水処理場の機能解析，科学，5，271，(1972)。
- 10) Takeda, N., Hiraoka, M.: Combined Process of Pyrolysis and Combustion for Sludge Disposal, *Environ. Sci. Technol.*, 12, 1147, (1976)。