

[研究報告]

し尿処理汚泥の焼却に伴う 有害ガスの発生について

Generation of toxic gas incinerating sludge by night soil treatment

中田 清志* 森田 昭* 岡崎 貴之*

Kiyoshi NAKATA, Akira MORITA and Takayuki OKAZAKI

1. はじめに

昭和29年に嫌気性消化処理方式のし尿処理施設が稼働して以降、近年におけるし尿処理技術の進歩はめざましく、最近の施設では生物学的脱窒素処理方式（標準脱窒素処理方式、高負荷脱窒素処理方式、膜分離高負荷脱窒素処理方式）のものが主流となり、放流水の水質も従来と比較すると格段に向上した。

ところが、処理過程にて発生するし渣や汚泥の焼却処理については、焼却炉の形式が従来の固定床炉から円形炉や流動床炉に移り、燃焼効率や作業性等が向上したものの、焼却排ガスの処理を含め、依然として多くの課題が残されているのが現状である。また、焼却排ガスの処理については、その発生ガス量が少ないことなどから、集じん機によるばいじんの捕集のみの方式が一般的であり、有害物質（SO_x、HCl、NO_x）の除去装置を設置する例は少ない。しかしながら今後は、周辺環境への配慮などから、焼却排ガスの有害物質処理について計画する施設が増えることが予想される。

そこで、汚泥（し渣を含む）焼却に伴って発生する有害ガスの処理に関する設計資料を得ること

とを目的として、汚泥及びし渣の元素分析を実施したので、その結果を報告する。

2. 調査施設

(1) 調査施設の概要

汚泥元素分析の対象施設は、処理方式が生物学的脱窒素処理方式（標準脱窒素処理方式、高負荷脱窒素処理方式、高負荷膜脱窒素処理方式）である施設の中から、施設の処理条件や運転条件の異なる6施設「表-1」をピックアップした。脱水し渣は、前述した施設の中から、し尿と浄化槽汚泥を個別に採取できる施設のものとした。元素分析は脱水ケーキ6検体、し尿脱水し渣を2検体、浄化槽汚泥脱水し渣を2検体、合計10検体について実施した。

(2) 施設の運転状況

(2)-1 し尿・浄化槽汚泥の処理状況

施設のし尿および浄化槽汚泥の処理状況は「表-2」に示すとおりである。計画処理量に対する処理率は86~140%、浄化槽汚泥混入率は0~100%である。なお、し尿および浄化槽

表-1 調査対象施設

施設名	処理方式（主処理）	処理方式（高度処理）	汚泥脱水機の形式
A施設	標準脱窒素処理方式	凝集分離+オゾン+砂ろ過+活性炭	遠心脱水機
B施設	標準脱窒素処理方式	凝集分離+オゾン+砂ろ過	フィルタープレス
C施設	高負荷脱窒素処理方式	凝集分離+砂ろ過+活性炭	遠心脱水機
D施設	高負荷脱窒素処理方式	凝集分離+砂ろ過+活性炭	フィルタープレス
E施設	高負荷膜脱窒素処理方式	凝集膜分離+活性炭	フィルタープレス
F施設	高負荷膜脱窒素処理方式	凝集膜分離+活性炭	遠心脱水機

*財) 日本環境衛生センター東日本支局環境工学部
Department of Environmental Engineering, East
Branch, Japan Environmental Sanitation Center

汚泥の投入量は試料採取日（平成7年11月30日～12月1日）前1ヶ月間として、平成7年11月における365日平均値を使用している。

(2)-2 施設の運転状況

試料採取日における各施設の運転状況は「表-3」に示すとおりである。

水処理用無機凝集剤については全施設が硫酸バンドを使用している。また、汚泥調質剤として硫酸バンドとポリマを使用しているのは6施設中3施設、ポリマを2剤使用しているのは1施設、ポリマを1剤使用しているのは2施設である。

3. 元素分析結果

(1) 脱水ケーキ

前述より「表-1」に示した6施設の脱水ケーキ元素分析の結果を「表-4」に示す。

(1)-1 3成分(水分、灰分、可燃分)

汚泥の3成分のうち、水分について認められる差は、汚泥脱水機の形式によるもの(B、D、E施設：フィルタープレス、その他：遠心脱水機)である。灰分と可燃分については一見差が認められるが、その構成比は各サンプルとも同様の傾向を示し、その比率は概ね3(灰分)：

表-2 調査対象施設の処理状況

施設名	し尿投入量 (kl/日)	浄化槽汚泥投入量 (kl/日)	合計量 (kl/日)	処理率 (%)	浄化槽汚泥混入率 (%)	備 考
A施設	86	0	86	86	0	平成7年11月の365日平均値
B施設	402	31	433	140	7	平成7年11月の365日平均値
C施設	89	14	103	103	14	平成7年11月の365日平均値
D施設	106	126	232	86	54	平成7年11月の365日平均値
E施設	117	42	159	106	26	平成7年11月の365日平均値
F施設	0	83	83	86	100	平成7年11月の365日平均値

表-3 調査対象施設の運転状況

施設名	水処理用凝集剤注入率*1		汚泥調質剤注入率*2		希釈倍率 (倍)	汚泥のCl ⁻ 濃度*3 (mg/l)
	硫酸バンド (g/kl)	ポリマ (g/kl)	硫酸バンド (%)	ポリマ (%)		
A施設	791	3.9	-	2.3/0.59	12	-
B施設	317	0.46	-	0.88	4.8	392
C施設	459	8.8	1.6	1.7	1.3	2,450
D施設	695	3.3	-	0.16	1.4	970
E施設	651	-	1.4	2.1	1.5	1,650
F施設	138	-	0.13	0.001	1.3	275

※1：投入し尿(kl)あたりの注入量を示す。なお、硫酸バンドは酸化アルミ(Al₂O₃)としての注入率を示す。

※2：汚泥SSあたりの注入量を示す。なお、硫酸バンドは酸化アルミ(Al₂O₃)としての注入率を示す。

※3：脱水分離液または脱窒素処理水(沈殿槽澄水)の塩素イオン濃度を示す。

表-4 元素分析結果一覧(脱水ケーキ)

施設名	処理方式	浄化槽汚泥混入率 (%)	3成分			元素組成					
			水分 (%)	灰分 (%)	可燃分 (%)	炭素 (%)	水素 (%)	窒素 (%)	酸素 (%)	塩素 (%)	硫黄 (%)
A施設	標 脱	0	81.3	5.8	12.9	49.5	7.6	6.8	35.1	0.1	0.9
B施設	標 脱	7	74.4	7.8	17.8	46.3	7.7	8.1	36.8	0.1未満	1.1
C施設	高負荷	13	86.4	4.1	9.5	46.6	7.5	7.8	36.8	0.2	1.1
D施設	高負荷	54	74.7	6.5	18.8	44.4	7.4	7.9	38.9	0.1	1.3
E施設	高負荷膜	27	76.8	6.7	16.5	47.2	7.2	8.2	36.4	0.1未満	1.0
F施設	高負荷膜	100	82.5	3.8	13.7	45.5	7.2	8.4	38.0	0.1	0.8

※：元素組成の数値は可燃分中の割合である。

7 (可燃分)である。なお、脱水ケーキの水分を一般的な数値である85% (構造指針値)と仮定した場合の調査施設 (6施設) 脱水ケーキ平均の3成分構成割合を「図-1」に示す。

(1)-2 可燃分の元素組成 (C、H、N、O、Cl、S)

可燃分中の元素組成については、各項目とも大きなバラツキは認められない。処理方式等に左右されず、各検体ともにはほぼ同様の組成を示した。焼却排ガス中有害物質の原因となる窒素、塩素、硫黄の各成分はいずれも低い割合であり、

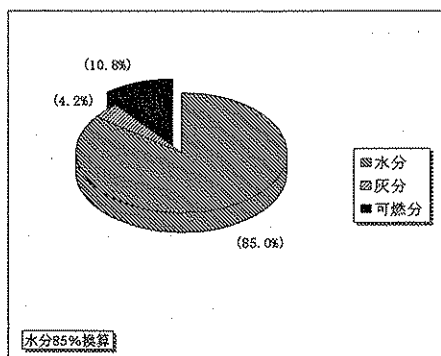


図-1 脱水ケーキの成分

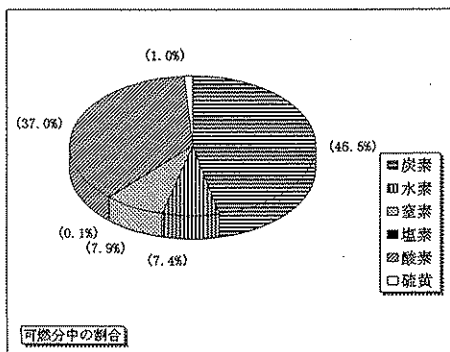


図-2 脱水ケーキの元素組成

特に硫黄分は1%程度、塩素分は0.1%程度である。また、し尿処理施設以外の汚泥として下水汚泥と比較してみたところ、その組成にほとんど差はみられない。調査施設 (6施設) 平均の汚泥組成を「図-2」に、下水汚泥との比較を「表-5」にそれぞれ示す。

(1)-3 浄化槽汚泥混入率と元素組成

前述したように調査対象施設の浄化槽汚泥混入率は0~100%の間で相違していることから、浄化槽汚泥混入率と脱水ケーキの組成との関係について検討してみた。結果は「図-3~図-8」に示すとおりであり、各成分について大きなバラツキは認められない。処理の対象がし尿、浄化槽汚泥に関わらず、汚泥の組成に差はないと言える。

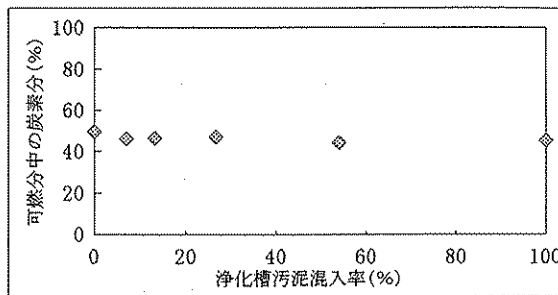


図-3 浄化槽汚泥混入率と脱水ケーキ中の炭素分

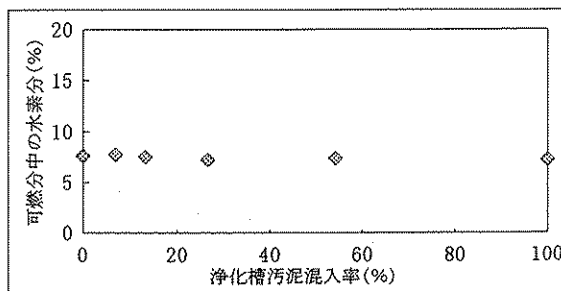


図-4 浄化槽汚泥混入率と脱水ケーキ中の水素分

表-5 脱水ケーキの比較 (し尿汚泥と下水汚泥)

施設名	元 素 組 成					
	炭 素 (%)	水 素 (%)	窒 素 (%)	酸 素 (%)	塩 素 (%)	硫 黄 (%)
A 施設	49.5	7.6	6.8	35.1	0.1	0.9
B 施設	46.3	7.7	8.1	36.8	0.1未満	1.1
C 施設	46.6	7.5	7.8	36.8	0.2	1.1
D 施設	44.4	7.4	7.9	38.9	0.1	1.3
E 施設	47.2	7.2	8.2	36.4	0.1未満	1.0
F 施設	45.5	7.2	8.4	38.0	0.1	0.8
下水汚泥*	45~50	6~8	6~7	35~40	-	1~3

※: 汚泥研究年報1980 (環境技術研究会) ~下水汚泥の一般的な性状~

(1) 4 硫酸バンド注入率と脱水ケーキ中の硫黄分

各施設とも凝集剤、または汚泥調質剤として硫酸バンドを使用しているため、その注入量と汚泥中の硫黄分との関係を検討してみた。硫酸バンド中の硫黄分が元素分析の結果に認められることを予想したが、結果は「表-6」および「図-9」に示すとおりであり、注入率と汚泥

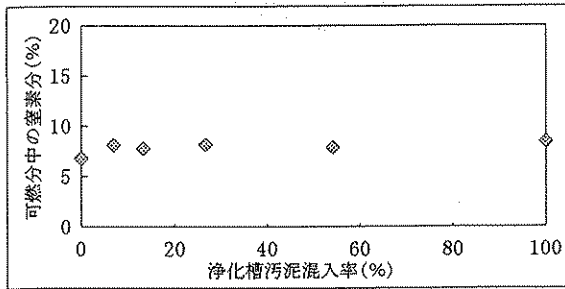


図-5 浄化槽汚泥混入率と脱水ケーキ中の窒素分

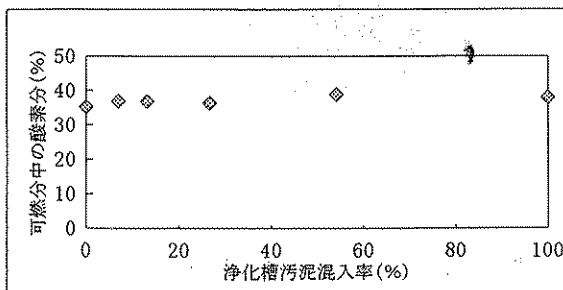


図-6 浄化槽汚泥混入率と脱水ケーキ中の酸素分

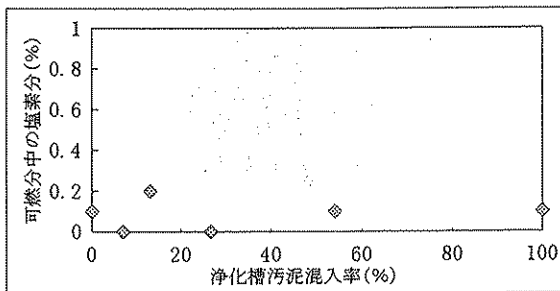


図-7 浄化槽汚泥混入率と脱水ケーキ中の塩素分

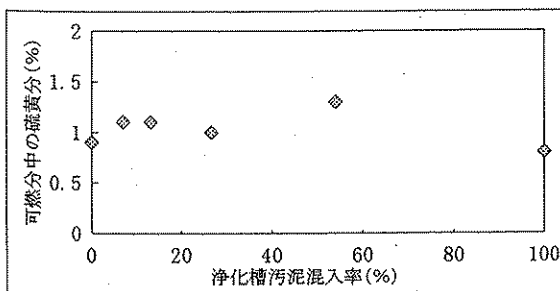


図-8 浄化槽汚泥混入率と脱水ケーキ中の硫黄分

中の硫黄分との間に有意な相関は認められなかった。元素分析結果の硫黄分はあくまで可燃分中の割合であり、汚泥水分中に溶解している硫酸イオンは元素分析の際、カルシウム塩やマグネシウム塩等の灰分として含まれていることが考えられる。

(1) 5 処理水中の塩素イオン濃度と脱水ケーキ中の塩素分

各施設は、処理方式（希釈倍率）や処理条件（浄化槽汚泥混入率）の違いにより、処理水の塩素イオン濃度は大きく異なっていることから、この塩素イオン濃度と汚泥中の塩素分との関係を検討した。塩素イオン濃度の差が、元素分析結果の塩素分の差に反映されていることを予想したが、結果は「表-7」および「図-10」に示すとおり、有意な相関は認められなかった。汚泥水分中に溶解している塩素イオンは、前述した硫酸イオンと同様に灰分として含まれていることが考えられる。

(2) 脱水し渣

前述した施設のし尿脱水し渣、および浄化槽汚泥脱水し渣における元素分析の結果を「表-8」に示す。

表-6 硫酸バンド注入率と汚泥中の硫黄分

施設名	バンド注入率 (g/kL)	元素分析結果 可燃分中のS分 (%)
A施設	791	0.93
B施設	317	1.11
C施設	459	1.14
D施設	695	1.28
E施設	651	1.04
F施設	138	0.80

※：酸化アルミニウムとして、投入し尿1kLあたりの注入率を示す。

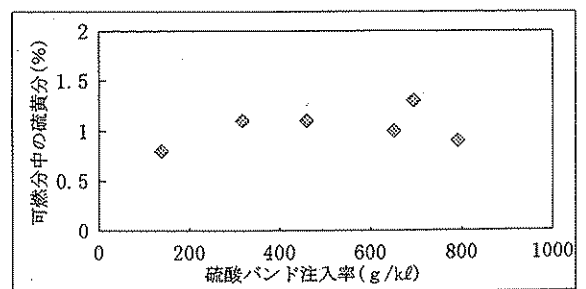


図-9 硫酸バンド注入率と脱水ケーキ中の硫黄分

(1)-1 3成分(水分、灰分、可燃分)

3成分の構成をみると灰分の割合は、わずかに1~4%程度であり、脱水し渣の95%以上は水分と可燃分で構成されている。各成分の構成比は各サンプルともに大きな差は認められず、概ね59(水分):3(灰分):38(可燃分)である。なお、脱水し渣の水分を60%と仮定した場合における平均脱水し渣の3成分構成割合を、し尿脱水し渣について「図-11」、浄化槽汚泥脱水し渣については「図-12」にそれぞれ示す。

(1)-2 可燃分の元素組成(C、H、N、O、Cl、S)

可燃分中の元素組成については、各項目とも大きなバラツキは認められない。し尿、浄化槽汚泥に関わらず、各検体ともにほぼ同様の組成を示した。焼却排ガス中有害物質の原因となる窒素、塩素、硫黄の各成分についてはいずれも

低い割合であり、特に塩素および硫黄については0.3%程度である。なお、調査した4検体のうち、し尿脱水し渣の平均元素組成を「図-

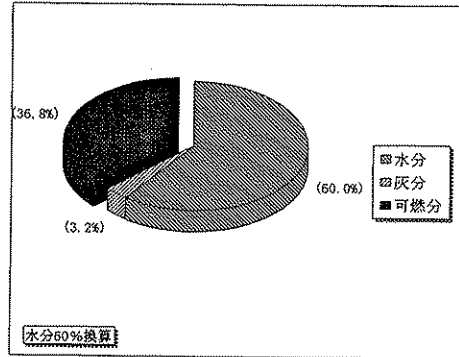


図-11 脱水し渣(し尿)の成分

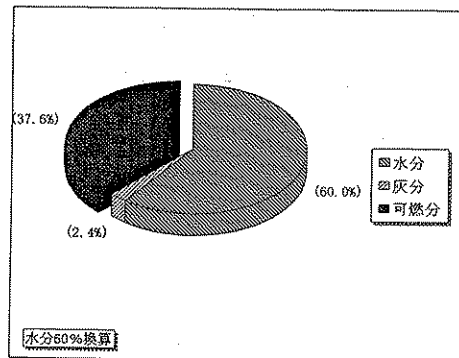


図-12 脱水し渣(浄化槽汚泥)の成分

表-7 処理水の塩素イオン濃度と汚泥中の塩素分

施設名	希釈倍率(倍)	塩素イオン濃度(mg/l)	元素分析結果 可燃分中の塩素分(%)
A施設	12	-	0.11
B施設	4.8	392	0.09
C施設	1.3	2,450	0.16
D施設	1.4	970	0.10
E施設	1.5	1,650	0.09
F施設	1.3	275	0.10

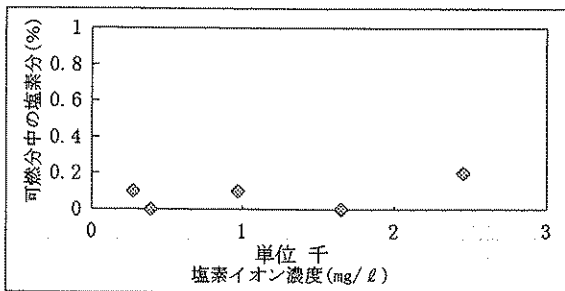


図-10 塩素イオン濃度と脱水ケーキ中の塩素分

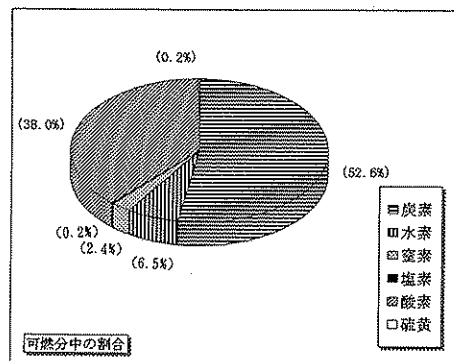


図-13 脱水し渣(し尿)の元素組成

表-8 元素分析結果一覧(脱水し渣)

施設名	し渣の対象	3成分			元素組成					
		水分(%)	灰分(%)	可燃分(%)	炭素(%)	水素(%)	窒素(%)	酸素(%)	塩素(%)	硫黄(%)
A施設	し尿	64.6	3.7	31.7	52.0	6.9	2.8	37.8	0.2	0.3
B施設	し尿	59.9	2.3	37.8	53.3	6.0	2.0	38.2	0.3	0.2
B施設	浄化槽汚泥	57.9	3.6	38.5	55.0	7.0	2.4	35.1	0.2	0.3
F施設	浄化槽汚泥	53.8	1.7	44.5	56.0	7.4	2.7	33.3	0.4	0.2

※元素組成の数値は可燃分中の割合である。

13)、浄化槽汚泥脱水し渣平均元素組成を「図-14」にそれぞれ示す。

4. 有害ガス発生量の算出

元素分析の結果をもとに、し尿処理1klあたりにおける燃焼排ガス量、有害物質発生量等の理論値算出を試みた。算出条件は「表-9」に示すとおりである。

(1) 理論空気量、燃焼排ガス(湿り)量

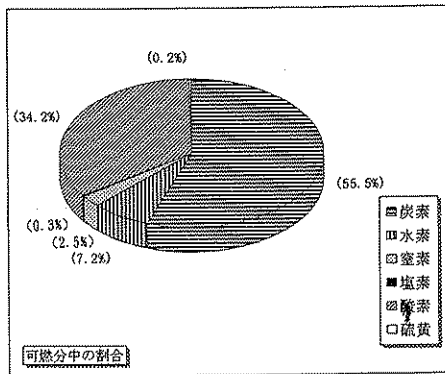


図-14 脱水し渣(浄化槽汚泥)の元素組成

理論空気量、および理論燃焼排ガス(湿り)量の算出結果を「図-15、図-16」に示す。なおこの結果は焼却対象(脱水ケーキ、脱水し渣、燃料)の可燃分全てが完全燃焼した場合の理論値である。

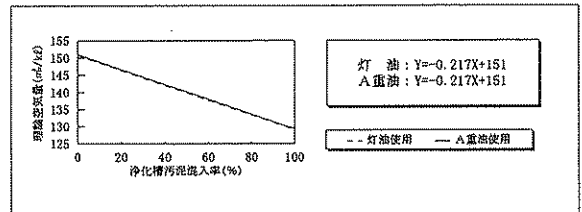


図-15 し尿1klあたりの理論空気量

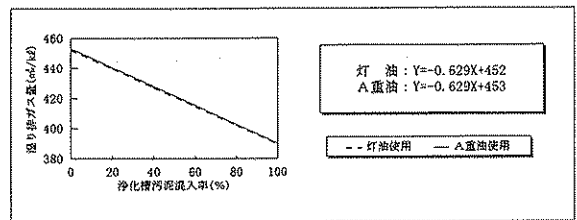


図-16 し尿1klあたりの湿り排ガス量

表-9 理論排ガス量等の算出条件

項目	使用数値	根拠
汚泥発生量	余剰汚泥: 8 kg-DS/kl	構造指針値
	凝集汚泥: 8 kg-DS/kl	構造指針値
	合計: 10 kg-DS/kl (67 kg-水分 85%/kl)	構造指針値
し渣発生量	し尿: 8 kg-DS/kl (20 kg-水分 60%/kl)	構造指針値
	浄化槽汚泥: 3 kg-DS/kl (7.5 kg-水分 60%/kl)	構造指針値
燃料の性状	A重油 比重: 0.85 1 kg中: 炭素分 (0.8455 kg) 水素分 (0.1287 kg) 酸素分 (0.0035 kg) 窒素分 (0.0002 kg) 硫黄分 (0.0085 kg) 灰分 (0.0136 kg)	し尿処理施設設計例
	灯油 比重: 0.92 1 kg中: 炭素分 (0.8700 kg) 水素分 (0.1200 kg) 酸素分 (0.0000 kg) 窒素分 (0.0094 kg) 硫黄分 (0.0001 kg) 灰分 (0.0005 kg)	当センター資料
燃料使用量	7.7 l/kl	日本環境衛生センター所報 [第23号: し尿処理施設の精密機能検査にみる運転実績の現状について (第2報)] より
燃焼時空気比	2.33	酸素 12%補正を考慮

(2) 理論有害物質発生量および濃度

有害物質（硫黄酸化物、塩化水素、窒素酸化物）発生量の算出結果を「図-17～図-19」、理論有害物質濃度の算出結果を「図-20～図-22」にそれぞれ示す。なお、この結果は可燃分中の硫黄分、塩素分、窒素分が完全燃焼した場合の理論値である。また、窒素酸化物については焼却物中の窒素分がすべて燃焼した場合の数値である。参考値として示した。

(3) 実測値との比較

本調査の対象施設6施設の焼却排ガス測定の結果を「表-10」に示す。各施設の焼却炉の形式や排ガス処理方式、その時の燃焼状態などいくつかの原因は考えられるが、各施設とも排ガス測定結果にバラツキがあり、理論値と比較しても大きな相違が認められる。硫黄酸化物については、一部例外があるが概ね理論値に対して10～50%程度の濃度であり、理論値に対して実測値は低濃度であ

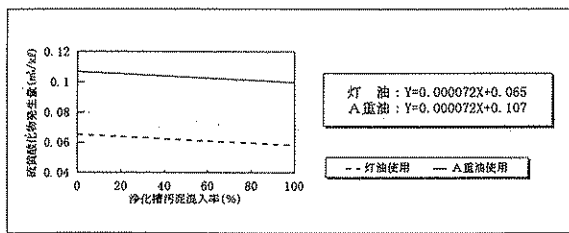


図-17 し尿1klあたりの硫黄酸化物発生量

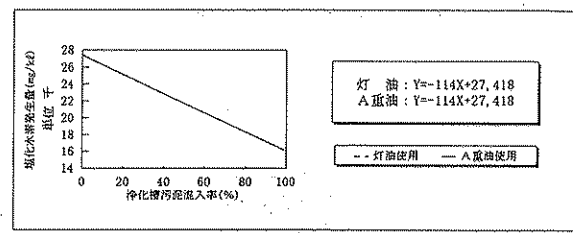


図-18 し尿1klあたりの塩化水素発生量

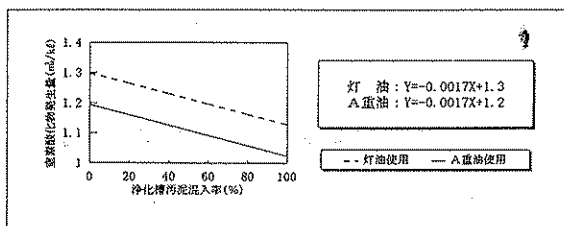


図-19 し尿1klあたりの窒素酸化物発生量

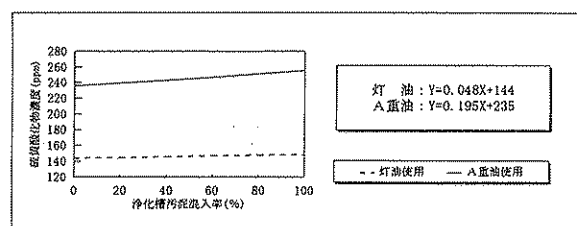


図-20 理論硫黄酸化物濃度

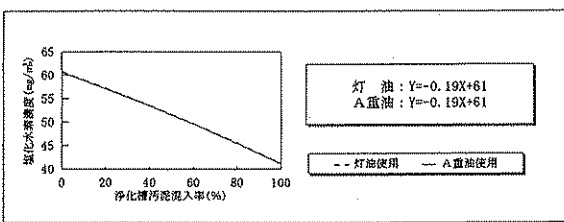


図-21 理論塩化水素濃度

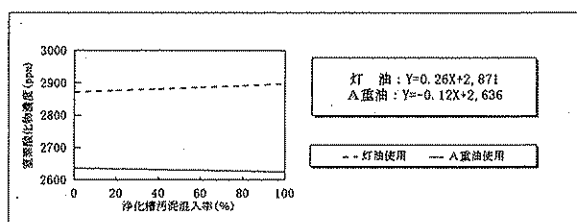


図-22 理論窒素酸化物濃度

表-10 有害物質理論濃度と実測値

施設名	処理方式	排ガス測定年月日	測定時空気比	硫黄酸化物		塩化水素*		窒素酸化物*	
				実測値 (ppm)	理論値 (ppm)	実測値 (mg/m³)	理論値 (mg/m³)	実測値 (ppm)	理論値 (ppm)
A施設	標脱	7. 10. 5	4.12	50	235	N.D	61	60	2,636
B施設	標脱	7. 9. 18	2.73	190	236	N.D	60	56	2,635
C施設	高負荷	6. 4. 7	5.67	270	238	440	58	120	2,634
D施設	高負荷	7. 7. 14	5.38	32	246	330	51	140	2,630
E施設	高負荷膜	7. 6. 7	4.77	51	240	N.D	56	90	2,633
F施設	高負荷膜	7. 8. 25	5.25	24	255	281	42	27	2,624

*実測値は酸素12%補正值。

る。一方、塩化水素については理論値に対して6～7倍程度濃度が高い。これは前述したように可燃分のみならず、灰分中の物質（硫黄、塩素等）が燃焼に関与している可能性を示していると考えられる。

5. まとめ、今後の課題等

脱水ケーキの元素分析を生物学的脱窒素処理方式のうち、処理方式（標準脱窒素方式、高負荷脱窒素方式、膜分離高負荷脱窒素方式）や運転状況等の異なる施設をピックアップして実施したが、結果として各施設とも分析結果に大きな差異は認められなかった。また、し尿処理施設以外の汚泥として下水汚泥の元素組成とも比較してみたが、その組成についてはほとんど差が認められない。処理方式や処理対象（し尿、浄化槽汚泥、下水）に関わらず、汚泥の組成は一定していることが確認された。相関の予想された運転状況（薬品注入率や希釈倍率）と汚泥の組成（硫黄分、塩素分）との関係については、予想に反して各施設ともに有意な差は認められなかった。しかし前述したように、元素分析結果の硫黄分および塩素分はあくまで可燃分中の割合であり、可燃分中のほか灰分中にもカルシウム塩やマグネシウム塩として存在していることが考えられる。これらの塩類は温度700～800℃程度でも分解する可能性があり、焼却炉内において分解し、有害ガス化することも考

えられる。今回の調査ではあくまで可燃分について検討したが、し尿処理施設の汚泥焼却を考えるうえで灰分の存在についても無視できないと思われる。

脱水し渣の元素分析は、し尿脱水し渣と浄化槽汚泥脱水し渣について各2検体実施したが、し尿と浄化槽汚泥の元素組成に大きな差異は認められなかった。

今回の調査において、し尿処理施設における焼却対象物である脱水ケーキおよび脱水し渣の組成をある程度把握し、焼却時に発生する焼却排ガス量や焼却排ガスの有害物質濃度の理論値も得られた。ただし、この理論値は各施設で実施している排ガス測定値（実測値）と比較して、大きな相違が認められることから、今後はその原因として、前述した灰分の影響等を含めた燃焼のメカニズムについて検討し、理論値と実測値についての関係を導きだしたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) (社)全国都市清掃会議：「し尿処理施設構造指針解説 - 1988年版 -」
- 2) 環境技術研究会：「汚泥研究年報(1980)」、理工新社
- 3) (財)日本環境衛生センター：「所報第23号 - し尿処理施設の精密機能検査にみる運転実績の現状について(第2報) -」