

## 【調査報告】

## ごみ焼却施設排ガス減温塔内における湿灰発生条件の判定法

A Criterion for Possible Accumulation of Wet Fly Ash in Flue Gas Quenching Chamber of Incineration Plants

大和裕治\*、秋月祐司\*、持田武信\*

Yuji YAMATO\*, Hiroshi AKIZUKI\* and Takenobu MOCHIDA\*

キーワード：蒸発熱負荷、熱容量係数、ガス減温塔、湿灰、有効滞留時間

## 1. はじめに

最近のごみ焼却施設では、ダイオキシン類排出削減対策の一環として集じん器入口温度の低下を迫られている。このため、集じん器入口温度を当初の設計条件より下げて運転を行うために、ガス減温塔の容量の増加もしくは減温塔の追設等の改造を行う施設も多い。しかし、集じん器入口温度を廃棄物処理法の維持管理基準に定める「概ね200℃以下」まで低下させた場合、ガス減温塔内の蒸発条件は一般に認識されている以上に厳しくなる。このため、冷却水の蒸発不全により、湿灰や余剰水が発生し、煙道や空気予熱器の閉塞、減温塔ケーシングの腐食等様々な障害が根絶されない状況<sup>1)</sup>にある。

そこで、この種の障害を最小限にするための有効な対策を行うために、この発生条件を定量化し、その判定法を見出すことを目的として排ガス減温塔の実態を調査し、検討を行った。

## 2. 調査方法

最近実施した精密機能検査結果から、減温塔内の

飛灰による汚れの状況と運転状況を整理した。さらに、構造上また設計条件として特徴のある設備を加え、総数41施設、43設備、46事例を対象とした。調査内容の性格上、情報収集においてデータの信頼性を確保することに制約があったが、可能な限り数値化することを目標とし、計算による検証等を加え、できる限り信頼性の向上を図った。なお施設によっては、ガス温度（塔入口はセンサーの不良、塔出口は計測記録なし）、噴射水量（計測記録なし）、ノズルの汚れ状況等が明らかでないものもあったが、塔内ガスの流れ模様（数値化困難）等については減温塔の形状等から偏流の有無の推測し、ガス流れの一様性の評価とした。これらは解析上極めて重要な因子であるので、調査対象の性格上一部推定により補足した。

減温塔内の飛灰による汚れの発生は図1に示すように発生箇所によって、

- ①塔出口ないし全体
- ②塔入口
- ③水噴射ノズル周辺

の3つの類型に分類される。

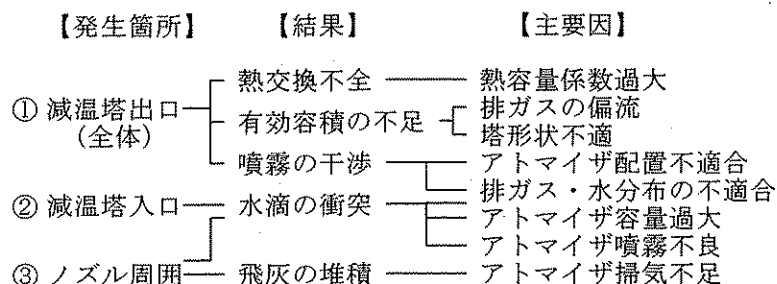


図1 減温塔内湿灰の発生箇所と主要因

\* (財) 日本環境衛生センター東日本支局環境工学部  
Dept. of Environmental Engineering, East Branch, JESC

それぞれ主たる要因は異なるが、これらは相互に影響を及ぼしあつて状況を悪化させている。そこで、パラメータとして熱容量係数（蒸発熱負荷/対数平均温度差：MJ/m<sup>2</sup>・h・℃）、水噴射ノズル容量（ℓ/h・本）およびこれらに関連する表1に記載の諸項目について調査、整理を行った。なお、汚れの状態については数値化が困難なため、同じく表1に示すとおり検査時の目視により塔内全体ないし出口の汚れをA、B、C、DおよびEの5段階評価（「汚れなし（A）」～「余剰水発生（E）」）、またノズル周辺の局所的汚れを「なし」、「あり」の2段階評価とした。

表1 減温塔内冷却水蒸発性能評価パラメータ

パラメータ	調査項目
熱容量係数 (MJ/m <sup>2</sup> ・h・℃)	入口ガス温度 ℃
	出口ガス温度 ℃
	塔有効容積 m <sup>3</sup>
	ガス冷却蒸発熱負荷 MJ/m <sup>2</sup> ・h
水噴射ノズル容量 (ℓ/h・本)	冷却水量 ℓ/h アトマイザ本数
塔内ガス流れ	一様性（偏流、渦流少）有無 上昇流（降下水滴に対抗）
水噴射ノズル形式	圧力式（多孔:m, 単孔） 二流体式（多孔, 単孔:s）
汚れ状態	塔内全体、出口 : 汚れ程度 A~E 入口、ノズル周囲 : ※印 汚れあり

ガス減温塔は排ガスと冷却水の直接熱交換器としてとらえることができるので、ここでの対数平均温度差（Δt）は図2に示すように積分平均値となり、

$$\Delta t = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln\{(T_1 - t_1)/(T_2 - t_2)\}}$$

として表される。ここで図2の冷却水温度上昇分の①および②の影響は小さいものと仮定すると  $t_1 \approx t_2 \approx 100$  と見なして計算することができる。すなわち、排ガスと冷却水との対数平均温度差は、  

$$\frac{\{(入口ガス温度 - 100) - (出口ガス温度 - 100)\}}{\ln\{(入口ガス温度 - 100) / (出口ガス温度 - 100)\}}$$
 として求めた。この対数平均温度差が大きい程熱容量係数が小さくなり熱交換器としての減温塔の設計条件は有利といえる。

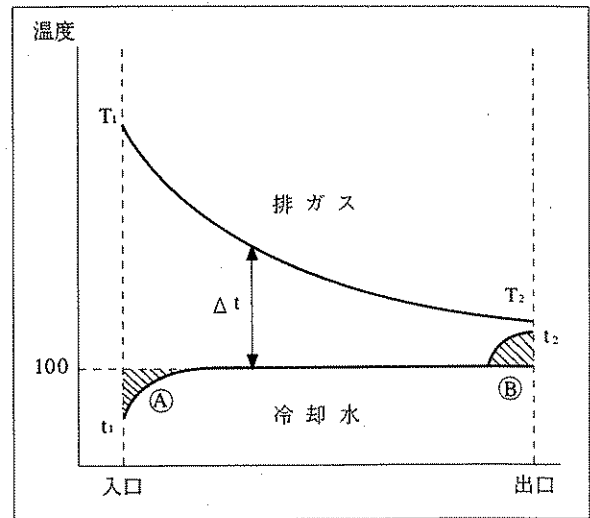


図2 対数平均温度差の原理

### 3. 調査結果

表1のパラメータと塔内の汚れの状況について、今回の調査結果の主要項目を表2に示す。なお、ガス減温塔のノズル形式はほとんどが圧力式であるが、ガス減温塔の後段にある二次減温塔（8例）での形式は二流体式であった。また、ガスの流れが上昇流となっているのはほとんどが炉頂型のガス減温塔であり、別置型で上昇流となっている事例は2例であった。さらに、塔の形状は過半数の施設において著しいガスの偏流を避けた構造をとっているが、配置上制約のあるものも多かった。表2より以下のことが示唆される。

- ① ノズル1本当たりの水噴射量は約300～1,000 ℓ/hの範囲にわたり、600 ℓ/h前後が最も多い。
- ② 熱容量係数は、0.168～3.320MJ/m<sup>2</sup>・h・℃の広範囲におよび、その結果塔内の汚れの状況も様々である。汚れほとんどなし（A）が7例、軽微（B）が14例、やや多い（C）が10例、顕著（D）が10例、余剰水発生（E）が7例である。A～Bを望ましい範囲とするならば、半数は改善を要することとなる。  
 なお、同表記載の「特性値」については後述する。

表2 減温塔調査結果一覧

塔内汚 れ状	事例 番号	塔 形状	ガス 流れ	アトマイ ザ数・型式	平均温 度差 °C	水噴射量 ℓ/h・本	熱容量係数 MJ/m <sup>3</sup> ・h・°C	特性値 <sup>*</sup> MJ・t/m <sup>3</sup> ・°C
A	32	∇		10 M	440	350	0.210	74
A	1	∇		16 M	437	426	0.314	134
A※	23	∇		5 M	315	390	0.348	136
A'	13	∇	∇	1 A	94	540	0.297	160
A'	27	∇	∇	12 M	538	525	0.503	264
A'	19	∇	∇	1 A	126	848	0.398	338
A/C	41	∇	∇	1A(3As)	(88/58)	(420)	0.168 / 0.796	71 / 334
B	45			10 A	230	400	0.536	214
B	2	∇		8 A	131	360	0.599	216
B	33			6 M	457	470	0.478	225
B※	36		∇	8 M	421	400	0.591	236
B※	39			6 M	(464)	700	0.339	237
B※	31	∇		6 M	376	666	0.385	256
B※	14	∇		8 M	(480)	530	0.545	289
B'	17	∇	∇	3 M	447	700	0.679	475
B'	5	∇	∇	7 M	424	630	0.754	475
B'	40	∇	∇	7 M	480	690	0.725	500
B'※	37	∇	∇	7 M	428	564	0.733	413
B'※	22	∇	∇	8 M	512	730	0.570	416
B'※	30	∇	∇	10 M	515	540	0.960	518
C	8			14 M	441	514	0.700	360
C	28	∇		4 M	431	870	0.419	365
C	44			10 A	230	600	0.754	452
C	4			8 M	444	650	0.775	504
C※	10		∇	8 M	(400)	456	0.851	388
C'	34	∇	∇	8 M	(464)	613	0.892	547
C'	35	∇	∇	4 M	(450)	945	0.863	816
C'※	21	∇	∇	9 M	528	960	0.599	575
C'※	20	∇	∇	13 M	422	428	1.592	681
D	18	∇		7 M	418	828	0.746	618
D	43			10 A	230	730	0.880	642
D※	25	∇		9 Mm	393	600	0.436	262
D※	9			12 M	357	530	1.110	588
D※	26			6 M	518	540	1.144	618
D※	46			6 M	(557)	(474)	1.718	814
D※	6		∇	6 A	254	727	1.173	853
D※	11			14 M	458	480	1.869	897
D※	29			5 M	456	860	1.110	955
D/B	7			1A / 1A	221	730/300	1.320 / 0.788	950 / 236
E	3			15 Mm	433	700	1.198	839
E	24			12 M	403	360	3.034	1,092
E	16	∇		14 M	456	500	2.757	1,379
E※	38			6 M	429	600	1.383	830
E※	12			6 M	(432)	550	1.638	901
E※	15			17 M	255	480	2.070	994
E※	42			10 M	230	870	1.173	1,021

【注】アトマイザ M : 圧力式 (m : 多孔ノズル)、A : 二流体式 (s : 単孔ノズル)  
 塔形状 ∇印 : 一樣流 (偏流・渦流が少ない)  
 ガス流れ ∇印 : 上昇流 (降下水滴に対して抗力作用)  
 塔内汚れ A : なし、B : 軽微、C : やや多い、D : 顕著、E : 余剰水発生  
 ' : 塔形状、ガス流れの双方とも「∇印」の場合  
 ※ : 水噴射ノズル周辺内壁に灰付着、汚れ

( ) 推算値

4. 検討結果と考察

一般的に、冷却水を噴霧する直接熱交換器では、パラメータとして蒸発熱負荷 (kJ/m<sup>2</sup>・h) が用いられている。いわゆるガス冷却室のように、排ガスと冷却水の対数平均温度差が大きい場合は蒸発熱負荷は簡易なパラメータとして採り得るが、ガス減温塔を熱交換器としてとらえれば、本来対数平均温度差を考慮に入れた「熱容量係数」を採用すべきである。また、冷却水の蒸発速度は噴霧粒径、周辺温度および発生水蒸気の拡散に大きく支配されることに注目して、ここでは1つのパラメータとしてノズル当たりの噴射水量を採用した。そこで表2の結果からこれら2つのパラメータと塔内の汚れの関係をプロットすると図3に示すとおりとなる。

図3より塔内の汚れが一定の状態 (A、B等) の条件下では、熱容量係数と水噴射量との間に逆比例の関係が認められる。すなわち、ダストの付着状況により図3においては4本の直線を引くことができ、熱容量係数と水噴射量の積を「特性値」とすると、それぞれの直線の特性値は以下ようになる。

- ・ AとBの境界：200
- ・ BとCの境界：350
- ・ CとDの境界：550
- ・ DとEの境界：850

ここで、ガス減温塔の類型を表3【注2】に示すとおり3つの条件

- ①塔内ガス流れが一様性である。
- ②上昇ガス流である。
- ③二流体ノズルを採用している。

に適合するか否かにより、まず、4つの類型 (I、II、IIIおよびIV) に大分類した。なおIは3条件すべて適合、IIは2条件適合、IIIは1条件適合、IVはすべて不適合であり、IIとIIIに関しては組み合わせによりさらに3種類 (a、b及びc) に分類した。ここで特徴的なことは、上昇ガス流であれば同じレベルの「特性値」でも汚れの程度は1ランク優位となっていることである。すなわち、条件②の上昇ガス流の場合 (ただしIII bを除く) はその他 (II a、III、IV) と比較して、蒸発性能が優れている (汚れが発生しにくい)。これは上昇ガス流が、降下する水滴の抗力として作用し、塔内の有効滞留時間を有

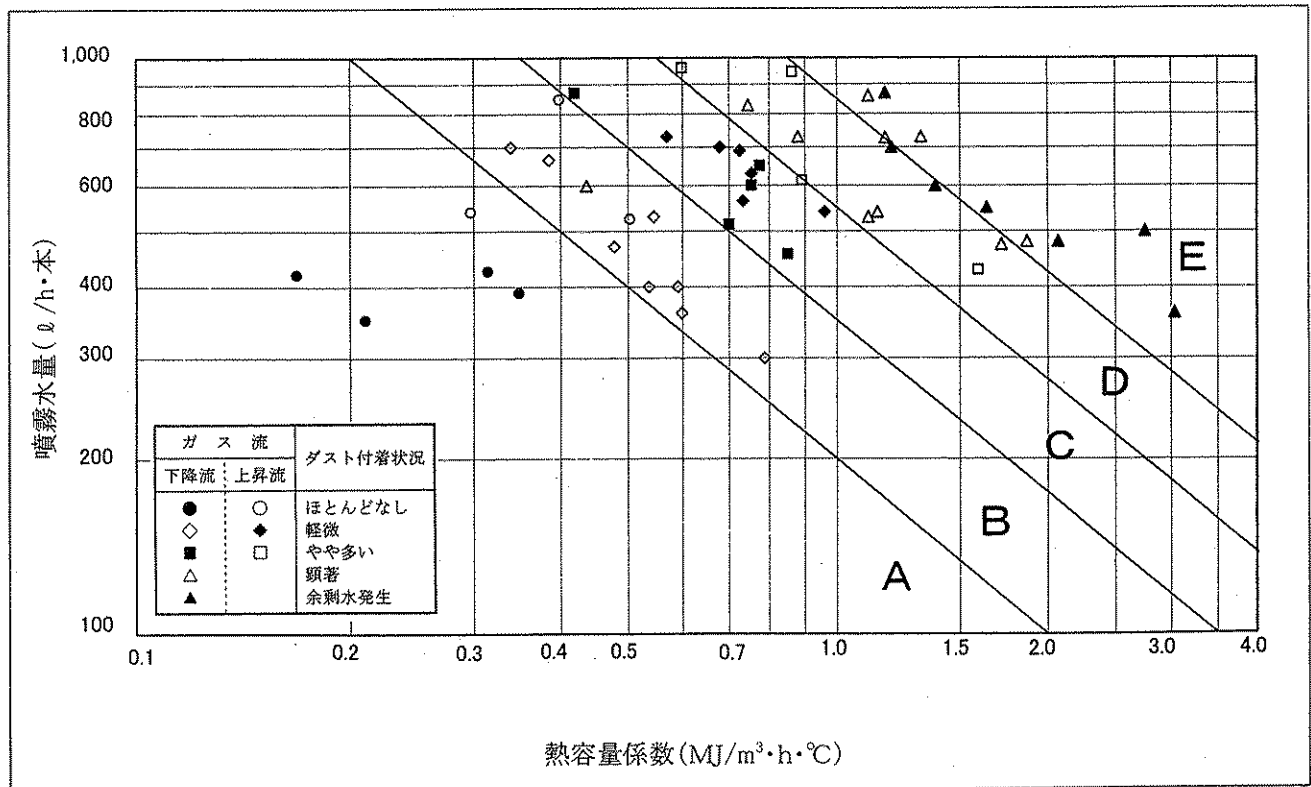


図3 減温塔内冷却水蒸発に及ぼす熱容量係数と噴射水量の影響

表3 減温塔内の飛灰による汚れと特性値\*1の関係

特性値*1		汚れの程度			A なし～ 殆どなし	B 軽微	C やや多い	D 顕著	E 余剰水発生
		II <sup>a</sup> ,	III,	IV					
条件*3	*2 類型	①	②	③	<200	200～350	350～550	550～850	850<
		①	②	③	<350	350～550	550～850	850<	
I	v	v	v	{13} 160 {19} 338 {41} 71			{41'} 334		
	a	v	v		{2} 216				
	b	v	v	{27} 264	{5} 475 {17} 475 {22} 416※ {30} 518※ {37} 413※ {40} 500	{20} 681※ {21} 575※ {34} 547 {35} 816			
c		v	v				{6} 853※		
III	a	v		{1} 134 {23} 136※ {32} 74	{14} 289※ {31} 256※ {39} 237※	{28} 365	{18} 618 {25} 262※	{16} 1,379	
	b		v		{36} 236※	{10} 388※			
	c			v		{7'} 236 {45} 214	{44} 452	{7} 950 {43} 642	
IV					{33} 225	{4} 504 {8} 360	{9} 588※ {11} 897※ {26} 618※ {29} 955※ {46} 814※	{3} 839 {12} 901※ {15} 994※ {24} 1,092 {38} 830※ {42} 1,021※	

【注1】特性値\*1:「熱容量係数 (=蒸発負荷/対数平均温度差)」×「冷却水ノズル噴射容量」(MJ/m<sup>3</sup>h°C)・(ℓ/h本)

「特性値」については、汚れの程度との関係から、類型を2グループ(II a、III、IVとI、II b、II c)に分けて整理してある

【注2】類型\*2:条件\*3①塔内ガス流れの一様性、②上昇ガス流、③2流体噴霧ノズルとして、下記を表す  
 I ①、②、③総ての条件を満足する場合  
 II ①～③のうち、2つの条件を満足する場合で、aは①、③、bは①、②、cは②、③が該当する  
 III ①～③のうち、①つの条件のみ満足する場合で、aは①、bは②、cは③が該当する  
 IV ①～③総ての条件を満足しない場合

【注3】{}内数字は事例番号を表す(但し42～45は同一施設で設備改造を行った場合を、7、7'及び41、41'は、同一設備内で構造上流れを分割して計算した結果を示す)

【注4】記号※は、水噴射ノズル周辺内壁の灰付着、汚れを示す

効に保持するためと考えられる。ただし、上昇ガス流だけでは噴射水の蒸発を有効に行わせるためには不十分であり、ガスに偏流を生じさせないか二流体式ノズルで噴霧を行うことによって、効果的に上昇ガス流の効果が生じてくる（網掛け部：類型Ⅰ、Ⅱb、ⅡcはⅢbと比べて蒸発性能が優れている）。

また、ガスの偏流の有無の影響は、上昇ガス流ほどではないが、ガス流が一様であるほど塔全体に汚れが付きにくくなっている。

水噴射ノズル周辺ないし塔入口の汚れ（表2および表3中の※印）は、事例は少ないものの、二流体式ノズル（類型Ⅰ、Ⅱa、ⅡcおよびⅢc）ではほとんど発生していないことから、二流体式の良好な蒸発、拡散性能の効果が示唆される。一方、塔内全体の汚れに対してはノズルの形式の違いによる有意差は認められない。

このほか特殊な条件としては単孔の二流体式ノズル（3個で1組、表2中s印）と多孔式の圧力式ノズル（表2中m印）があるが、拡散特性から判断して合計の噴射水量で整理した。その結果、「特性値」の定義にあたりガス減温塔の類型別にグループ分けすることで、汚れとその発生条件の相関を整理することができる（図3および表3参照）。すなわち、表3の類型Ⅲaにある事例25のような稀な例外はあるものの（この事例はノズルの汚れによる噴霧の劣化が原因であると判明）、特殊な場合を除けば湿灰発生障害を大略定量的に判定することが可能であると考えられる。多孔小口径の圧力式ノズルによる噴霧粒径改善効果<sup>2)</sup>、気流中の蒸発にともなう液滴の軌跡等、解析を加える余地を残しているが、実際の使用条件下における噴霧粒径は不明であり、今回採用したパラメータと比較すると影響が極めて小さいものであると判断されるのでこの検討は割愛した。

## 5. まとめ

ノズルの汚れ等不確定要因による定量化が難しい条件があるものの、次のことが明らかになった。

- 1) 熱容量係数と噴射水量の積を「特性値」として、塔内の汚れを概ね判断することができる。
- 2) その他のパラメータとしては①上昇ガス流、②塔内ガス流の一様性、③ノズルの汚れ、が重要であり、①および②の両条件を満足しているか否かで分類して、汚れの程度と「特性値」の関係を整理することができる。すなわち、この特性値が上向流の場合で550以下、下降流の場合で350以下であるならば、概ね湿灰による障害は回避できる。
- 3) 塔内全体の汚れに対しては、ノズル形式の違いによる有意差はないが、噴霧ノズル周辺の局所汚れに対しては、発生水蒸気の拡散が良好な（噴霧分散、噴霧・ガス相対速度、噴霧粒径で優れる）二流体式が有利である。また、ガス減温塔内湿灰発生障害を未然に防止するためには、実用的対策として「汚れにくいノズル」の採用が必要であり、そのための条件としては①単純な構造、②確実なエアページが重要であり二流体式はこの点でも優位にある。

## 6. 謝辞

本調査に当たり、御協力いただいた各自治体ならびにプラントメーカー関係者各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 持田 (1999) : ごみ焼却施設におけるダイオキシン類削減対策と管理上の留意点. 都市清掃, vol. 52(229), pp118-122
- 2) 小林 (1953) : 渦巻噴射弁の微粒化特性 (第2報 補遺 噴射圧および渦巻き室の寸法が粒径に及ぼす影響). 日本機械学会論文集, vol. 19(80), pp56-59