

1. 一般廃棄物焼却灰中のPb低減対策

山村貞雄・十川絃一*

The measure against Pb reduction in municipal solid waste incineration ashes

Sadao Yamamura・Kouichi Sogawa

【要旨】 一般廃棄物焼却施設から発生する焼却灰は埋立処分場逼迫の原因であるが、一方ではゼオライトの原料として有望な資材でもある。当センターでは焼却灰（主灰）のゼオライト化のネックとなっている焼却灰中のPb濃度を低減するため、県下5施設における焼却灰中Pbの季節変動、Pb混入の経路、灰への混入防止対策の調査検討をおこなった。

Key words：一般廃棄物，焼却灰，Pb，ゼオライト

1. 背景

一般廃棄物の多くは市町村等の運営する焼却施設において処理されており、その焼却量は県全体で年間約22万tとなっており、発生する焼却残渣は約5800t¹⁾となっている。(高知市の処理方法が変更になったため、2010年には1万t程度の増加が見込まれる。)

一方、県下の一般廃棄物最終処分場は残余容量が少なく、新たな建設も難しい状況にある。

高知県工業技術センターでは、2005年度から焼却灰（主灰）のゼオライト化に取り組んでおり、製造技術は既に実用化の段階にあったが、焼却灰中のPb濃度が高く、製品段階での目標である150mg/kgを達成できない状況であった²⁾。

このため、環境研究センターでは工業技術センターと協同でPb低減に取り組むこととし、工業技術センターはゼオライト製造段階でのPb低減対策をさらに進め、当センターではおもに、焼却灰中Pbの季節変動、Pb混入の経路、灰への混入防止対策の検討を行うこととした。

2. 調査方法

2.1 調査対象施設及び試料採取

焼却灰（主灰）の発生のある、県下5施設（表1）を調査の対象とした。高知市清掃工場は調査開始当時灰の熔融処理を行っていたため対象外とした。

採取は2009年11月から2010年11月までの奇数月に行い、炉床から排出され、水冷された直後の主灰をサンプルとした。

また、2010年12月に年末の大掃除ごみの状況を調査するため、年末最後の焼却灰をサンプリングした。

2.2 聞き取り調査

施設の状況や収集の状況を調べるため、聞き取り調査を実施した。

2.3 分析検査

2.3.1 熱灼減量

熱灼減量は平成2年環第22号環境整備課長通知に準拠し、試料を600±25℃で3時間加熱した時の減量分とした。

2.3.2 主要成分含有量

灰の主な成分の分析は蛍光X線（JEOL製JSX-3220）により行った。

* 現環境対策課

2. 3. 3 微量成分含有量

微量成分の含有量は、サンプルに硝酸及びフッ酸を加え、マルチウェーブサンプル分解装置により前処理をしたものを、ICP-MS装置（Agilent製 ICP-MS 7500ce）により分析した。

3. 結果及び考察

3. 1 施設及び収集状況

3. 1. 1 施設

施設の状況及び収集・処理の状況を表1及び表2に示す。

対象とした5施設のうち3施設は中規模の連続炉，他の2施設は小規模のバッチ炉であり，焼却方法はすべてストーカー方式である。

焼却炉は施設イは一基でその他は二基である。

完全休止を行うことが難しい施設イでは，全面改修工事が行われておらず，主灰の量が多い一因と考えられる。

3. 1. 2 収集・分別等

施設ウと施設オでは持込ごみの割合が大きくなっている。

収集ごみに比べ，持込ごみは混入物の確認が難しく，灰の性状悪化の要因と考えられる。

粗大ごみは，施設アを除く4施設で，破碎後に破碎された物の大きさ等で分別し一部を焼却している。破碎後に一定の大きさ以上の物は可燃物という考え方であり，家電製品の基板等が混入する可能性が指摘されている³⁾⁴⁾。

施設イは当初から，施設オは2007年度末から家電製品は手選別により分別し，すべてリサイクルに回す対策を取っている。

鈴木ら⁵⁾によって，焼却灰中の鉛の変動には自動車用鉛蓄電池が大きく寄与していることが報告されている。そのため，各市町村等のごみ収集制度における蓄電池の扱いについて聞き取りをした。

施設エでは，焼却場に持込のあった廃蓄電池を受け付け，一定量が溜まったところでリサイクル業者に出している。その他の施設では受入はしておらず，販売店又はリサイクル業者に持ち込むよう指導しているが，HPやパンフレット，広報誌などでの積極的な業者の紹介は行っていない。

持込ごみのチェックについては，投入時に立会

表1 焼却施設の概要

施設	竣工	焼却方法	種別	焼却能力 (t/日)	粗大ごみ処理能力 (t/日)	収集量(t/月)		持込量(t/月)		排ガス処理	助剤
						可燃	不燃	可燃	不燃		
ア	H4.2.28	ストーカー	連続	160		2035		104		電気集塵機	消石灰
イ	H8.3.20	ストーカー	バッチ	17.5	6	206	31	48	6.4	バグフィルター	消石灰
ウ	H5.9.30	ストーカー	連続	120	10	431	35	206	3.6	バグフィルター	消石灰
エ	H10.3.31	ストーカー	連続	120	10	1173		264		バグフィルター	消+活
オ	H15.2.28	ストーカー	バッチ	25	(6)	297	4.4	125.2	0.9	バグフィルター	消+活

表2 収集及び処理の状況

施設	家電製品処理	バッテリー収集	バッテリー処理の指導	持込ごみの検査	主灰発生量 (t/月)	主灰発生率 (%)
ア	なし	なし	リサイクルを推奨	初回時に立会	210	9.82
イ	手選別	なし	販売店に引取	投入時立会	30	11.81
ウ	破碎分別一部焼却	なし	販売店に引取	投入時立会	58.3	9.15
エ	破碎分別一部焼却	持込受付	廃棄物処理業者	口頭で確認	112	7.79
オ	手選別	なし	販売店に引取	投入時立会	26.6	6.30

をする施設が多いが、抜き打ちでの展開調査などは実施していない。

鉛蓄電池などの混入の可能性については、全施設で、「ごみに混ぜて投入されればわからない」との回答であった。

3. 2 焼却灰の分析結果

3. 2. 1 主要成分含有量

2009年11月に採取した焼却灰の主要成分含有量を表3に示す。

成分の構成は概ね同様の傾向を示しており、CaO, SiO₂, Al₂O₃が特に多くこの3成分で全体の約75%を占めている。施設間での大きな差は見られないが、施設アのCuOが低い値を示し、施設イのPbOおよび施設ウのZnOが高い値を示している。

3. 2. 2 微量成分含有量

微量成分含有量を表4及び表7-1-1以下に示す。

なお、これらの表では定量下限値以下の値を統計処理の都合上0として示している。

3. 2. 2. 1 Pb

Pbは初回（2009年11月）の値が各施設とも高く、そのあと減少し、安定した値を示している。

特に、施設イと施設ウでは初回の濃度が大変高い値を示している。

一般廃棄物焼却施設の焼却灰中のPb濃度については、値が大きく変化することが知られている。鈴木ら⁵⁾は22回の測定の内、大部分は1000mg/kg前後であるが、5000mg/kgを超える値を2回測定していると報告している。この報告でのPbの平均値は1694mg/kgである。

また、本県でも、2430mg/kgの値が報告されている²⁾。

これらから、初回時の施設イの値は先行文献に比べて高い値となっているが、施設ウの値は通常

範囲内にあると言える。

一方、第2回以降は、年末の大掃除ごみの影響を受ける12月を除き、高くても700mg/kg程度の値にとどまっており、平均は349mg/kgとなっている。

各施設ごとのPb含有量の変化は表5のとおりであり、変動の大きな3施設では中央値と最大値の差は1000mg/kgを超えている。測定値がサンプリングした日の平均的な濃度であると仮定すると、各施設において、大きく変動した日に必要なPbの量（中央値に追加して）は、それぞれ表5のとおりとなる。

Pbの利用状況は³⁾、

- 1) 鉛蓄電池（自動車用、産業用、民生用）：90.0%
 - 2) 無機薬品（ガラス製品、塩化ビニル安定剤、塗料）：4.0%
 - 3) 鉛管板・はんだ（板金用、配線用）：3.7%
 - 4) その他（おもり、放射線防護）：2.3%
- となっている。

これらの中で、ごみに一度に5～8kgも混入してPb濃度を押し上げるものは、鉛蓄電池と一部のガラス製品が考えられる。ガラスは対象となったすべての施設で分別収集しており、可燃ごみに混入する可能性は低いものと考えられる。一方、鉛蓄電池は分別収集しておらず、一施設で持込を受付しているのみである。

また、塩化ビニルの中には数%程度のPbを含有するものがある。一般の家庭ごみでは数十kg単位の廃棄は考えにくいですが、パイプや建材が一度に排出された場合は、Pb濃度に影響を及ぼす可能性がある。

なお、農業ハウス用塩化ビニルにはPb含有安定剤は使用されていない。

（塩ビ工業・環境協会電話聞き取り調査）

表3 焼却灰中の主要成分

施設	wt(%)																
	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO3	Cl	K2O	CaO	TiO2	V2O5	Cr2O3	MnO	Fe2O3	CuO	ZnO	PbO
ア	4.97	2.08	15.39	21.40	4.92	1.07	2.14	1.80	39.89	1.88	0.02	0.12	0.16	3.73	0.09	0.34	
イ	5.56	2.53	11.95	26.54	4.29	1.26	3.25	2.17	33.66	2.41	0.05		0.17	4.32	0.39	0.73	0.72
ウ	5.22	2.40	11.75	28.44	3.92	1.70	2.48	1.97	33.49	1.85	0.03	0.10	0.17	4.72	0.17	1.59	
エ	4.96	2.58	13.49	24.16	4.77	2.09	2.25	2.00	36.56	1.89	0.02	0.10	0.15	4.01	0.45	0.50	

表4 一般廃棄物焼却灰中の微量成分

		mg/kg													
採取月	施設	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb		
H 2 1 年度	11月11日	ア	3046	237	568	12036	40	431	1383	0	0	0	66	769	
	11月11日	イ	3908	128	624	12858	50	3600	2293	2	0	0	141	5478	
	11月17日	ウ	2698	146	644	15085	98	1481	16641	1	0	0	104	1709	
	11月17日	エ	3142	139	599	13703	87	4152	1979	2	0	70	120	573	
		オ													
	1月12日	ア	2149	229	649	40057	80	2432	2338	2	0	14	47	248	
	1月12日	イ	2009	183	1166	26902	46	1693	3787	2	0	24	99	482	
	1月13日	ウ	2251	200	500	31260	80	1257	2123	4	0	0	76	438	
	1月13日	エ	2015	145	618	23420	60	981	1611	4	0	18	95	291	
		オ													
	3月29日	ア	1668	167	867	27580	51	2333	2492	1	8	2	56	199	
	3月29日	イ	1346	141	815	22746	109	542	3785	1	6	3	85	278	
	3月29日	ウ	2308	173	611	35976	76	2206	2511	2	8	1	73	212	
	3月30日	エ	3224	79	566	19843	53	300	1705	2	6	2	59	271	
	3月30日	オ	1948	141	480	20358	91	1581	3317	5	5	12	79	439	
H 2 2 年度	5月20日	ア	2946	177	389	11088	61	770	9580	5	0	0	43	319	
	5月20日	イ	2526	263	304	12940	42	992	0	5	0	0	158	359	
	5月20日	ウ	3727	197	470	24268	281	1742	4052	4	0	0	99	391	
	5月18日	エ	3160	101	471	17608	0	879	1960	6	0	0	73	583	
	5月18日	オ	3177	183	381	20128	36	1048	397	12	0	0	65	572	
	7月14日	ア	2533	155	427	30300	167	579	2558	4	0	0	38	108	
	7月14日	イ	1988	183	304	10928	2543	729	818	3	16	0	88	236	
	7月14日	ウ	2550	155	249	9800	175	912	3250	4	32	0	92	246	
	7月15日	エ	3928	178	317	11356	0	368	1634	10	4	0	57	242	
	7月15日	オ	2917	221	357	17372	12	1695	8928	6	13	0	52	557	
	9月8日	ア	604	133	592	10715	52	1270	17617	1	3	3	50	470	
	9月8日	イ	544	119	307	7331	50	1028	86	0	0	0	52	251	
	9月8日	ウ	990	101	832	9683	50	1039	3079	0	0	4	162	596	
	9月7日	エ	392	113	463	9735	33	325	1257	2	0	2	83	378	
	9月7日	オ	870	260	402	13999	190	721	430	4	11	1	40	261	
	11月18日	ア	1373	172	298	24340	34	92	0	0	0	0	38	321	
	11月18日	イ	1374	136	743	22904	946	1183	2626	0	0	29	50	135	
	11月18日	ウ	1258	387	537	32248	227	1725	1634	0	0	0	132	673	
	11月17日	エ	1323	87	332	35128	0	0	0	0	0	0	33	71	
	11月17日	オ	1434	1451	447	28932	102	1670	3029	0	0	0	58	489	
	12月30日	ア	1698	320	817	37368	75	1469	0	0	0	0	71	1471	
12月29日	イ	1968	288	547	58560	0	15	0	0	0	0	82	178		
12月30日	ウ	1867	203	424	46760	0	4940	6064	0	0	4	153	1207		
12月30日	エ	1578	91	335	23040	2370	237	0	0	0	31	55	49		
12月30日	オ	1809	256	675	31744	0	606	0	0	0	0	64	219		

相関係数

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B	1.000											
Cr	-0.119	1.000										
Mn	-0.126	-0.050	1.000									
Fe	-0.104	0.214	0.221	1.000								
Ni	-0.113	-0.075	-0.206	-0.124	1.000							
Cu	0.208	0.081	0.238	0.167	-0.167	1.000						
Zn	0.035	-0.047	0.124	-0.215	-0.149	0.208	1.000					
As	0.582	-0.159	-0.359	-0.329	-0.125	-0.075	0.023	1.000				
Se	0.065	-0.075	-0.291	-0.294	0.188	-0.087	0.018	0.229	1.000			
Cd	0.023	-0.140	0.259	-0.051	0.233	0.363	-0.072	-0.132	-0.176	1.000		
Sb	0.143	-0.049	0.201	-0.053	-0.069	0.504	0.023	-0.078	-0.005	0.121	1.000	
Pb	0.339	-0.018	0.162	-0.113	-0.138	0.479	0.142	-0.042	-0.159	-0.099	0.431	1.000

有意差検定(独立変数である可能性:両側)

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B												
Cr	47.533%											
Mn	45.208%	76.470%										
Fe	53.458%	19.714%	18.272%									
Ni	49.927%	65.286%	21.450%	45.860%								
Cu	20.960%	62.832%	15.007%	31.492%	31.606%							
Zn	83.696%	77.973%	45.833%	19.455%	37.342%	21.006%						
As	0.013%	34.161%	2.692%	4.355%	45.623%	65.592%	89.187%					
Se	69.860%	65.401%	7.590%	7.322%	25.784%	60.402%	91.251%	16.684%				
Cd	88.973%	40.251%	11.683%	75.972%	15.974%	2.529%	66.942%	43.121%	28.925%			
Sb	39.209%	76.868%	22.634%	75.210%	68.056%	0.126%	89.020%	64.223%	97.533%	47.060%		
Pb	3.736%	91.375%	33.128%	50.091%	40.810%	0.237%	39.578%	80.163%	34.145%	55.292%	0.693%	

表5 灰中のPb含有量及び変動に必要なPbの量

施設	H21年度			H22年度					中央値	最大値との差 (mg/kg)	灰発生量 (t/日)	Pb必要量 (kg)
	11月	1月	3月	5月	7月	9月	11月	12月				
ア	769	248	199	319	108	470	321	1471	320	1151	7.5	8.63
イ	5478	482	278	359	238	251	135	178	264	5214	1.4	7.11
ウ	1709	438	212	391	246	596	673	1207	517	1192	4.1	4.86
エ	573	291	271	583	242	378	71	49	281	302	5.1	1.54
オ			439	572	557	261	489	219	464	108	1.2	0.13

3. 2. 2. 2 Pbと他の微量成分との相関

Pbは相関係数は低いもののSb及びCuと1%有意な相関関係にある(表4)。

Sbは鉛蓄電池の電極に使用されているが、近年Sbを含まない製品が増えてきている。また、使用量全体から見た場合、電極での使用は約7%⁶⁾で、難燃助剤や塗料・顔料などが多くを占めている。

後者は一度に大量に投入されるといった極端な変動はないと考えられるが、小規模な施設では影響が大きい可能性もある。

PbとSbは施設別に見ると、施設ア、施設エなど規模の大きな施設で強い相関が見られる。

Cuは多様な電気機械製品に含まれている。Pbとの関連では基板回路などが疑われるが、データからは明確な関係は見いだせなかった。

3. 2. 3 各施設の検討

3. 2. 3. 1 施設ア(表7-1-1, -2, -3)

Pb濃度は200~300mg/kg程度が多い。焼却量が比較的多く、これは2kg程度のPbが入っていることを意味する。

Pbの大きな値としては、1471mg/kgと769mg/kgがある。1471mg/kgは中央値に比べて1151mg/kg多くこの差は約8.6kgのPbに相当し、ほぼ自動車用蓄電池1個のPbにあたる。

また、769mg/kgは中央値に比べて449mg/kg多く、これは約3.3kgのPbに相当する。

既に述べたように、蓄電池以外で大量の鉛を含む物としては一部のガラス製品がある。ガラスは用途によって、数%~30%程度の鉛を含む物があ

表6 バッテリーのPb含有量

製品	自動車用 バッテリー	二輪車用 バッテリー	家庭用 シール電池
重量	8.5kg	1.3kg	0.5kg

文献5) から作成

り、クリスタルガラスなど高級な物ほど多く鉛を含む傾向がある。このような物が10~30kg程度投入されれば769mg/kg程度の濃度となるが、この施設ではガラスは分別収集されており、これほどの重量物を可燃物に混入させることは考えにくい。電子基板に含まれるPbはノートパソコン1台あたり5g程度⁴⁾、また、塗料や塩じなどの場合も大量に投入することが必要となり現実的でない。

なお、古い電気製品では内蔵のシール型鉛蓄電池の可能性があるが、施設アでは不燃物の破碎施設が併設されており、可燃ごみへ混入された場合のみ影響を受ける。

他の微量成分との関係については、Pb-Sb、Pb-Crについて、有意な相関を示している。Sbについては既に述べたように、鉛蓄電池の電極に使用されており、その影響が考えられるが、Sbの使用量は難燃助剤などへ利用が大半を占めており、断定するにはさらなる調査が必要である。

Crは用途の大半がステンレスであるが、その他に顔料、メッキ原料、耐火物などがある。Pbとの関係では、ペンキなどに使われるPb系黄色顔料の一部にCrが使用されている。ペンキの動向についても今後検討の必要がある。

表7-1-1 施設アにおける焼却灰中の微量成分

採取月	施設	mg/kg											
		B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
11月11日	ア	3046	237	568	12036	40	431	1383	0	0	0	66	769
1月12日	ア	2149	229	649	40057	80	2432	2338	2	0	14	47	248
3月29日	ア	1668	167	867	27580	51	2333	2492	1	8	2	56	199
5月20日	ア	2946	177	389	11088	61	770	9580	5	0	0	43	319
7月14日	ア	2533	155	427	30300	167	579	2558	4	0	0	38	108
9月8日	ア	604	133	592	10715	52	1270	17617	1	3	3	50	470
11月18日	ア	1373	172	298	24340	34	92	0	0	0	0	38	321
12月30日	ア	1698	320	817	37368	75	1469	0	0	0	0	71	1471

表7-1-2 施設アにおける相関係数

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B	1.000											
Cr	0.239	1.000										
Mn	-0.231	0.458	1.000									
Fe	-0.085	0.483	0.403	1.000								
Ni	0.270	-0.083	-0.109	0.417	1.000							
Cu	-0.241	0.181	0.797	0.517	-0.012	1.000						
Zn	-0.374	-0.557	-0.117	-0.632	-0.118	0.031	1.000					
As	0.438	-0.432	-0.359	-0.120	0.570	0.004	0.338	1.000				
Se	-0.383	-0.356	0.591	-0.035	-0.241	0.552	0.152	-0.114	1.000			
Cd	-0.114	0.071	0.254	0.466	0.027	0.700	0.036	0.067	0.007	1.000		
Sb	0.043	0.740	0.744	0.062	-0.329	0.282	-0.194	-0.578	0.149	-0.113	1.000	
Pb	-0.067	0.838	0.427	0.132	-0.221	-0.031	-0.200	-0.558	-0.266	-0.270	0.823	1.000

表7-1-3 施設アにおける有意差検定 (独立変数である可能性：両側)

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B												
Cr	56.93%											
Mn	58.23%	25.42%										
Fe	84.06%	22.53%	32.18%									
Ni	51.83%	84.58%	79.63%	30.37%								
Cu	56.47%	66.84%	1.78%	18.97%	97.73%							
Zn	36.15%	15.15%	78.22%	9.30%	78.10%	94.10%						
As	27.73%	28.51%	38.21%	77.71%	14.03%	99.26%	41.27%					
Se	34.85%	38.63%	12.26%	93.37%	56.61%	15.60%	71.88%	78.86%				
Cd	78.89%	86.77%	54.31%	24.42%	94.98%	5.30%	93.18%	87.52%	98.76%			
Sb	91.97%	3.57%	3.43%	88.37%	42.67%	49.84%	64.55%	13.34%	72.49%	79.01%		
Pb	87.44%	0.95%	29.19%	75.55%	59.91%	94.25%	63.43%	15.03%	52.37%	51.79%	1.20%	

3. 2. 3. 2 施設イ (表7-2-1, -2, -3)

Pb濃度は200mg/kg前後の概ね低い値で推移しているが、初回に5478mg/kgという大変高い値を示した。この値は、中央値(表5)より5214mg/kg高い値となっており、これは約7kgのPbに相当し、ほぼ自動車用蓄電池1個のPbにあたる。

他の原因として考えられるガラス製品で、7kgものPbを供給するためには、50kg程度のガラスが必要であるが、十分な分別が行われているこの施設では、これほどの重量物を可燃物に混入させることは考えにくい。

また、電子基板や古い電気製品などの内蔵シール型鉛蓄電池の可能性については、施設イでは不燃物や粗大ごみを場内で手分別し、電気製品等の

解体も実施しており、粗大ごみなどからの混入は考えにくい。

さらに、塗料や塩じなどの場合も100kgを超える量を投入することが必要となり現実的でない。

Pbと他の微量成分との関係では、Pb-Cuの相関が高くなっているが、分布図を確認した結果、関連性は見いだされなかった。

その他ではZn-Mnで強い相関が見られた。ZnとMnはともに乾電池で使用されているが、ここではZnの濃度変化がMnに比べて大変大きいので、他の要因が関係していると思われる。Znはメッキをはじめとした電気機器、電子部品や塗料、タイヤ、乾電池などが主な用途で、多量に焼却される可能性としては塗料やタイヤなどが考えられる。

表7-2-1 施設イにおける焼却灰中の微量成分

採取月	施設	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
11月11日	イ	3908	128	624	12858	50	3600	2293	2	0	0	141	5478
1月12日	イ	2009	183	1166	26902	46	1693	3787	2	0	24	99	482
3月29日	イ	1346	141	815	22746	109	542	3785	1	6	3	85	278
5月20日	イ	2526	263	304	12940	42	992	0	5	8	0	158	359
7月14日	イ	1988	183	304	10928	2543	729	818	3	16	0	88	238
9月8日	イ	544	119	307	7331	50	1028	86	0	0	0	52	251
11月18日	イ	1374	136	743	22904	946	1183	2626	0	0	29	50	135
12月29日	イ	1968	288	547	58560	0	15	0	0	0	0	82	178

表7-2-2 施設イにおける相関係数

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B	1.000											
Cr	0.188	1.000										
Mn	0.046	-0.201	1.000									
Fe	-0.026	0.616	0.320	1.000								
Ni	-0.079	-0.102	-0.314	-0.276	1.000							
Cu	0.699	-0.485	0.220	-0.436	-0.185	1.000						
Zn	0.063	-0.508	0.880	-0.033	-0.104	0.332	1.000					
As	0.592	0.328	-0.310	-0.444	0.162	0.257	-0.191	1.000				
Se	0.028	0.176	-0.457	-0.358	0.736	-0.316	-0.200	0.591	1.000			
Cd	-0.211	-0.245	0.704	0.108	0.030	0.088	0.601	-0.324	-0.387	1.000		
Sb	0.824	0.375	-0.105	-0.182	-0.230	0.460	-0.083	0.869	0.222	-0.367	1.000	
Pb	0.809	-0.325	0.054	-0.236	-0.210	0.906	0.170	0.225	-0.257	-0.227	0.520	1.000

表7-2-3 施設イにおける有意差検定 (独立変数である可能性: 両側)

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B												
Cr	65.57%											
Mn	91.42%	63.39%										
Fe	95.12%	10.39%	43.98%									
Ni	85.17%	81.05%	44.88%	50.85%								
Cu	5.36%	22.28%	60.04%	27.99%	66.08%							
Zn	88.21%	19.92%	0.39%	93.91%	80.72%	42.21%						
As	12.22%	42.80%	45.45%	27.02%	70.08%	53.93%	65.09%					
Se	94.71%	67.67%	25.44%	38.43%	3.72%	44.65%	63.42%	12.27%				
Cd	61.67%	55.91%	5.13%	79.92%	94.29%	83.49%	11.53%	43.30%	34.42%			
Sb	1.19%	36.06%	80.49%	66.57%	58.30%	25.12%	84.52%	0.51%	59.69%	37.16%		
Pb	1.51%	43.25%	89.83%	57.37%	61.83%	0.20%	68.72%	59.17%	53.81%	58.93%	18.68%	

3. 2. 3. 3 施設ウ (表7-3-1, -2, -3)

Pb濃度の中央値は(表5) 5施設で最も高く517 mg/kgとなっている。また、初回と最後に1000mg/kgを超える値を示すなど変動も大きい。中央値と最高値の差は1192mg/kgであり、これは約5kgのPbに相当し、小型の蓄電池1個程度のPbにあたる。

この報告では、Pb濃度の通常値として中央値を用いているが、表5のとおり、施設ウでは低い値でもばらつきが大きく、複数の原因が複合的に作用してPb濃度を押し上げている可能性がある。

他の原因として考えられるガラス製品で、5kgものPbを供給するためには、30kg程度のガラスが必要であるが、この施設ではガラスは分別収集されており、可燃物に混入させることは考えにくい。

同様に、電子基板や塗料、塩ビなどの場合も大量を投入することが必要となり、1000mg/kgを超える値を説明するのは困難である。

この施設では、粗大・不燃ごみを破碎し、細かく粉碎されなかった物を可燃ごみとして焼却している。基板に含まれる鉛の他、古い電気製品には、一部にシール型鉛バッテリーを内蔵している物があり、これらは可燃物のラインに入ってしまう可能性がある。塗料や塩ビ、電気基板は大きな変動を説明するのは難しいが、小さな変動の原因となっている可能性は大きい。

他の微量成分との関係については、Pb-Znが有意な相関を示しているが分布図ではあまり明確な関連ではない。Znはメッキをはじめとした電気機器、電子部品や塗料、タイヤ、乾電池などが主な用途で、Pbとは電機部品や塗料の関係が考えられる。なお、乾電池にも一部Pbが含まれているが、Mnの変動を考えれば、Pb-Znの相関が電池由来とは考えられない。

表7-3-1 施設ウにおける焼却灰中の微量成分

採取月	施設	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
11月17日	ウ	2698	146	644	15085	98	1481	16641	1	0	0	104	1709
1月13日	ウ	2251	200	500	31260	80	1257	2123	4	0	0	76	438
3月29日	ウ	2308	173	611	35976	76	2206	2511	2	8	1	73	212
5月20日	ウ	3727	197	470	24268	281	1742	4052	4	0	0	99	391
7月14日	ウ	2550	155	249	9800	175	912	3250	4	32	0	92	246
9月8日	ウ	990	101	832	9683	50	1039	3079	0	0	4	162	596
11月18日	ウ	1258	387	537	32248	227	1725	1634	0	0	0	132	673
12月30日	ウ	1867	203	424	46760	0	4940	6064	0	0	4	153	1207

表7-3-2 施設ウにおける相関係数

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B	1.000											
Cr	-0.212	1.000										
Mn	-0.448	-0.237	1.000									
Fe	-0.068	0.490	-0.189	1.000								
Ni	0.472	0.463	-0.329	-0.252	1.000							
Cu	-0.077	0.157	-0.195	0.800	-0.442	1.000						
Zn	0.285	-0.315	0.178	-0.228	-0.191	0.080	1.000					
As	0.754	-0.247	-0.506	-0.236	0.418	-0.446	-0.168	1.000				
Se	0.174	-0.220	-0.629	-0.406	0.171	-0.292	-0.186	0.436	1.000			
Cd	-0.584	-0.364	0.430	0.107	-0.669	0.469	-0.089	-0.628	-0.262	1.000		
Sb	-0.632	0.067	0.348	0.007	-0.271	0.378	0.032	-0.804	-0.343	0.790	1.000	
Pb	-0.067	-0.045	0.233	0.054	-0.347	0.368	0.871	-0.525	-0.432	0.179	0.396	1.000

表7-3-3 施設ウにおける有意差検定 (独立変数である可能性：両側)

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B												
Cr	61.41%											
Mn	26.53%	57.12%										
Fe	87.33%	21.80%	65.34%									
Ni	23.71%	24.84%	42.57%	54.79%								
Cu	85.58%	71.10%	64.44%	1.71%	27.28%							
Zn	49.33%	44.73%	67.35%	58.75%	65.08%	85.03%						
As	3.08%	55.59%	20.10%	57.38%	30.33%	26.79%	69.03%					
Se	68.02%	60.09%	9.45%	31.87%	68.64%	48.29%	65.98%	28.01%				
Cd	12.84%	37.54%	28.81%	80.05%	6.96%	24.09%	83.44%	9.55%	53.06%			
Sb	9.24%	87.49%	39.83%	98.74%	51.68%	35.61%	93.96%	1.61%	40.49%	1.96%		
Pb	87.42%	91.59%	57.95%	89.82%	39.92%	37.00%	0.49%	18.18%	28.56%	67.10%	33.18%	

3. 2. 3. 4 施設工 (表7-4-1, -2, -3)

Pb濃度は比較的低い濃度で安定して推移しているが、2010年11月、12月と突然低い値を示している。これらは、期間内の全施設で最も低い値であり、原因について施設管理者に問い合わせたが特に変更した事柄はないとのことであった。

この施設は、持込の蓄電池について別途受付けており、自動車用蓄電池等が可燃物に混入されることはほとんどないと考えられ、これが低濃度で安定したPb濃度の要因であると思われる。

Pb濃度の変動は少ない施設であるが、中央値(表5)より300mg/kg程度高濃度の値が見られる。これは約1.5kgのPbに相当する。

既に述べたように、ガラス製品や塗料、塩びなどでは大量に投入することが必要となり、十分な

分別収集を行っているこの施設では現実的ではない。

一方、粗大・不燃ごみについては施設ウと同様に、破碎・選別の後、細かく粉碎されなかった物を可燃ごみとして焼却している。基板に含まれる鉛の他、シール型鉛蓄電池を内蔵している物ではこれらが可燃物のラインに入ってしまう可能性がある。

他の微量成分との関係については、Pb-Znが有意な相関を示している。Znはメッキをはじめとした電気機器、電子部品や塗料、タイヤ、乾電池などが主な用途で、Pbとは電機部品や塗料の関係が考えられる。なお、乾電池にも一部Pbが含まれているが、Mnの変動を考えれば、Pb-Znの相関が電池由来とは考えられない。

表7-4-1 施設工における焼却灰中の微量成分

採取月	施設	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
11月17日	工	3142	139	599	13703	87	4152	1979	2	0	70	120	573
1月13日	工	2015	145	618	23420	60	981	1611	4	0	18	95	291
3月30日	工	3224	79	566	19843	53	300	1705	2	6	2	59	271
5月18日	工	3160	101	471	17608	0	879	1960	6	0	0	73	583
7月15日	工	3928	178	317	11356	0	368	1634	10	4	0	57	242
9月7日	工	392	113	463	9735	33	325	1257	2	0	2	83	378
11月17日	工	1323	87	332	35128	0	0	0	0	0	0	33	71
12月30日	工	1578	91	335	23040	2370	237	0	0	0	31	55	49

表7-4-2 施設工における相関係数

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B	1.000											
Cr	0.404	1.000										
Mn	0.149	0.055	1.000									
Fe	-0.285	-0.520	-0.206	1.000								
Ni	-0.256	-0.301	-0.383	0.180	1.000							
Cu	0.327	0.339	0.573	-0.324	-0.172	1.000						
Zn	0.623	0.467	0.671	-0.666	-0.615	0.500	1.000					
As	0.657	0.728	-0.117	-0.553	-0.409	-0.017	0.604	1.000				
Se	0.592	0.070	-0.005	-0.218	-0.216	-0.259	0.303	0.360	1.000			
Cd	0.110	0.193	0.398	-0.150	0.289	0.873	0.120	-0.304	-0.347	1.000		
Sb	0.126	0.436	0.771	-0.546	-0.225	0.834	0.665	0.084	-0.306	0.690	1.000	
Pb	0.361	0.250	0.607	-0.603	-0.509	0.664	0.843	0.361	-0.146	0.297	0.753	1.000

表7-4-3 施設工における有意差検定 (独立変数である可能性: 両側)

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B												
Cr	32.06%											
Mn	72.51%	89.67%										
Fe	49.43%	18.64%	62.44%									
Ni	53.98%	46.89%	34.85%	67.05%								
Cu	42.90%	41.14%	13.79%	43.35%	68.36%							
Zn	9.91%	24.32%	6.85%	7.15%	10.43%	20.71%						
As	7.70%	4.06%	78.32%	15.55%	31.48%	96.90%	11.27%					
Se	12.23%	86.83%	99.12%	60.47%	60.74%	53.60%	46.49%	38.06%				
Cd	79.45%	64.77%	32.90%	72.29%	48.69%	0.46%	77.64%	46.46%	40.01%			
Sb	76.57%	28.08%	2.50%	16.14%	59.20%	1.01%	7.20%	84.38%	46.12%	5.85%		
Pb	37.96%	55.08%	11.05%	11.38%	19.80%	7.27%	0.86%	38.02%	72.98%	47.55%	3.09%	

3. 2. 3. 5 施設オ (表7-5-1, -2, -3)

Pb濃度は200~600mg/kgで、他の施設に比べサンプル数は少ないものの、濃度は低く最も安定している。しかし、2005年の工業技術センターの測定では2000mg/kgを超える値が報告されており²⁾、何らかの原因で濃度が低下したものと考えられる。

聞き取り調査によれば、2007年度末から家電製品について場内で別途に分別しており、これによる効果が考えられる。

中央値は464mg/kgであるが、200mg/kg台と400mg/kg以上に分かれている。最大値は572mg/kgで

あり、中央値からは100mg/kg程度を押し上げる何らかの要因が働いている可能性がある。この値は0.1kg程度のPbに相当する。この程度の変動についてはサンプリング誤差をはじめ、塗料や金属部品など様々な要因が考えられるが、鉛蓄電池の混入はなかったと思われる。

他の微量成分との関係については、サンプル数が少ないため統計的に有意な相関は得られなかった。グラフを検討した結果、Cu及びZnとの関係が疑われたが、原因を突き止めるためにはさらなるデータ収集が必要である。

表7-5-1 施設オにおける焼却灰中の微量成分

採取月	施設	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
3月30日	オ	1948	141	480	20358	91	1581	3317	5	5	12	79	439
5月18日	オ	3177	183	381	20128	36	1048	397	12	0	0	65	572
7月15日	オ	2917	221	357	17372	12	1695	8928	6	13	0	52	557
9月7日	オ	870	260	402	13999	190	721	430	4	11	1	40	261
11月17日	オ	1434	1451	447	28932	102	1670	3029	0	0	0	58	489
12月30日	オ	1809	256	675	31744	0	606	0	0	0	0	64	219

表7-5-2 施設オにおける相関係数

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B	1.000											
Cr	-0.366	1.000										
Mn	-0.306	-0.019	1.000									
Fe	-0.104	0.498	0.774	1.000								
Ni	-0.751	0.217	-0.326	-0.462	1.000							
Cu	0.296	0.392	-0.480	-0.079	-0.096	1.000						
Zn	0.396	0.033	-0.462	-0.271	-0.287	0.783	1.000					
As	0.741	-0.535	-0.638	-0.614	-0.158	0.074	0.095	1.000				
Se	-0.084	-0.384	-0.521	-0.794	0.322	0.155	0.573	0.146	1.000			
Cd	-0.115	-0.289	0.074	-0.189	0.221	0.310	0.058	0.036	0.088	1.000		
Sb	0.360	-0.136	0.376	0.403	-0.444	0.270	-0.068	0.112	-0.562	0.647	1.000	
Pb	0.731	0.161	-0.697	-0.226	-0.290	0.756	0.568	0.622	-0.010	-0.005	0.229	1.000

表7-5-3 施設オにおける有意差検定 (独立変数である可能性: 両側)

	B	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb
B												
Cr	47.52%											
Mn	55.49%	97.14%										
Fe	84.49%	31.53%	7.10%									
Ni	8.50%	68.03%	52.88%	35.65%								
Cu	56.94%	44.16%	33.57%	88.19%	85.69%							
Zn	43.76%	95.08%	35.64%	60.30%	58.19%	6.55%						
As	9.22%	27.41%	17.27%	19.43%	76.46%	88.94%	85.72%					
Se	87.46%	45.22%	28.88%	5.92%	53.33%	76.91%	23.48%	78.21%				
Cd	82.86%	57.86%	88.97%	71.98%	67.36%	54.94%	91.36%	94.57%	86.89%			
Sb	48.34%	79.74%	46.24%	42.88%	37.82%	60.44%	89.76%	83.31%	24.57%	16.46%		
Pb	9.90%	75.99%	12.41%	66.74%	57.78%	8.22%	23.93%	18.75%	98.47%	99.29%	66.22%	

4. まとめ

焼却灰 (主灰) のゼオライト化にむけて、焼却灰中のPb濃度を低減するため、県下5施設における焼却灰中Pbの季節変動、Pb混入の経路、灰への混入防止対策の調査検討をおこなった。

4.1 Pb混入の可能性

Pbの混入原因についてマテリアルフローから見ると、鉛蓄電池 (数kg/個)、ガラス製品 (~30%)、塩ビ安定剤 (数%)、塗料 (数%)、金属部品、はんだ (電子基板 (数g/個)) 等が考えられる。

このうち、ガラス製品、金属部品はすべての施設で別途収集しており、焼却施設への混入は少ないと考えられる。

塗料、蓄電池はどの施設も収集していないが、一施設だけ持込の蓄電池を受け付けている。

電子基板は粗大ごみである電気製品として収集されるが、破碎し、一部焼却される施設が二カ所、分別しリサイクル等に回す施設が二カ所、受け入れてない施設が一カ所であった。

塩ビ製品は粗大ごみあるいは可燃ごみとして収集しており、すべての施設で焼却される可能性が

ある。

持込廃棄物のチェックは、一定実施しているが、混入している物を十分確認できるほどではなかった。

4.2 焼却灰分析結果

焼却灰の主要な成分としては、CaO, SiO₂, Al₂O₃ が特に多くこの3成分で全体の約75%を占めている。

Pbは初回 (2009年11月) の値が各施設とも高く、そのあと減少し、安定した値を示した。

先行文献²⁾⁵⁾では2000mg/kg前後の値が報告されているが、今回は大半が1000mg/kgを下回る低い値であった。

いくつかの施設では、比較的大きなPb濃度の変動があり、これらの変動は数kgのPbが投入されたことに相当するものであった。

数kgのPb投入は、施設の状況等を考え合わせれば鉛蓄電池の可能性が高いと思われる。

Pb濃度の中央値が最も低かった施設イは、不燃物や粗大ごみ等を場内ですべて手分別しており、家電製品も基板や金属部品等に解体しリサイクルをおこなっている。このため、不燃物等からの混

入はほとんどないと考えられるが、規模が小さいため、可燃物に混入した少量のPb含有物で測定値が大きく変動していると考えられる。

鉛蓄電池の持込を受け付けている施設エは、Pb濃度の中央値が5施設中二番目に低い値を示し、標準偏差も二番目に低い値であった。

Pb濃度が最も安定していた施設オは、2005年の調査ではPb濃度が2000mg/kgを超えており、今回の測定値は約20%まで低下していた。

この施設では、2007年度末から場内において電気製品を分別し、破碎系統から除外する方法をとっている。基板からのPbだけではこれほどの減少は説明できないので、その他の要因があるものと考えられるが、特定に至らなかった。

Pbと他の微量成分の関係では明確な知見は得られなかった。これは、ごみ性状の変動が大きいこと、施設ごとの条件が大きく異なっていること等が影響していると考えられる。

各施設ごとのデータで相関を検討した結果、Pb-Sb及びPb-Znについて、それぞれ2施設で有意な相関が得られた。

PbとSbは鉛蓄電池に合金として使用されており、その影響が考えられるが、Sbの使用量は難燃助剤などへ利用が大半を占めており、断定するにはさらなる調査が必要である。

Znはメッキをはじめとした電気機器、電子部品や塗料、乾電池などが主な用途で、Pbとは電機部品や塗料の関係が考えられる。

4. 3 Pb濃度低減対策

Pbの利用状況から混入原因は鉛蓄電池、ガラス製品、塩化ビニル（安定剤）、塗料、鉛管板、はんだ（電機部品）、おもりなどが考えられる。

このうち、塩ビ以外は分別収集によって、本来燃焼工程には入らないはずのものであるが、分析結果から、相当量の混入がうかがわれる。

ガラス製品、鉛管板、おもりは分別収集の周知徹底で除去することは容易である。

一方、鉛蓄電池、塗料は市町村では収集しておらず、処分は住民任せの状態にある。

持込による鉛蓄電池を受け入れている施設エでは、Pb濃度も安定しており、現状では処分費も特別な対策も必要ないとのことであり、鉛蓄電池の収集は容易に出来て効果の高い対策として速やか

に実施することが望ましい。

電機製品は本来焼却しないごみであるが、近年の埋立処分場の逼迫から、多くの施設では粗大ごみや不燃物中の可燃部分を破碎分別し焼却している。

この破碎物の分別は、磁力、風力、渦電流によるアルミ（金属）の分別を経て、粒径の大きな物を可燃物としており、電子基板等に付着した部品や回路は可燃物として処理される場合が多い。そこで、電気製品の処理方法に着目してPb濃度を見てみると、電気製品を破碎せず、分別・リサイクルを実施している2施設ではPb濃度が比較的low、特に施設エでは3年でPb濃度が80%低下した要因のひとつになっていると思われる。

電気製品の分別・解体・リサイクルは多くの人手が必要であり、実施にはある程度の負担が考えられるが、電気基板等にはPb以外にも多くの有害・有用金属が含まれており⁴⁾、これらの除去は今後取り組むべき対策である。

塩化ビニルは、安定剤としてPb, Ba, Zn, Ca, Snなど様々な金属が使われており、Pb系安定剤は近年減少しているが、依然30%以上を占めている¹⁰⁾。

Pb系安定剤の用途は大口径パイプ、建材などおもに硬質のものであり、これらが大量に焼却されれば焼却灰中のPb濃度に影響を及ぼす可能性がある。

焼却灰の有効利用を考えるうえで、塩化ビニル廃棄物の処理は今後検討すべき課題である。

4. 4 焼却灰ゼオライト化

ゼオライト化工程におけるPb低減策として、工業技術センターでは、従来、NaOH水溶液によるアルカリ処理を行ってきたが、材料である焼却灰中のPb濃度が高く(2000mg/kg程度)、溶解平衡のため、目標とするPb濃度(150mg/kg)を下回ることが出来なかった。

今回、

- ①焼却灰中のPb濃度が500mg/kg前後と低下した。
- ②アルカリ処理時に電析処理を行うことにより、目標とするPb濃度を達成し、現在工業技術センターではゼオライトの農業用資材としての性能試験を実施している⁷⁾⁸⁾。

今回調査したPbでは、平均的な濃度を押し上げ

る要因と考えられる。塩ビ安定剤、塗料、ハンダについては、近年、Pbを含まない製品への変更が進んでいる。また、Pbをはじめとする金属資源の価格が上昇しており、資源として回収されるPbも増加しているものと考えられる。

このような事情から、全体的な傾向として、焼却灰中のPb濃度は低下の方向に進むものと予想される。しかし、鉛蓄電池などの混入による突発的な高濃度の防止や有用金属の回収のためにも、ここで述べた対策は今後ますます重要になってくると考えられる。

最後に、調査研究に御協力いただいた各施設及び工業技術センターに感謝申し上げます。

引用文献, 出典

- 1) 高知県一般廃棄物処理事業の概況（平成20年度）・高知県
- 2) 河野敏夫ら：焼却灰の無害化・有用物製造・一体化システムの開発，高知県工業技術センター研究報告No38（2007）57-61
- 3) 小口正弘ら：使用済み電気・電子製品の破碎選別における資源性・有害性金属の分配挙動とフロー解析。第21回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集。169-170（2010）

- 4) 川口光夫，貴田晶子：廃電気電子製品（ノートPC，プリンター，TV）の基板中の金属量調査。第21回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集。175-176（2009）
- 5) 鈴木靖文ら：焼却灰の鉛濃度分布を用いた鉛の由来推定。第5回廃棄物学会研究発表会講演論文集。525-527（1994）
- 6) 鉱物資源マテリアルレフロー21年度調査レポート，独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構
- 7) 河野敏夫ら：重金属除去による廃棄物のリサイクルプラン設立 電析処理による重金属回収技術の開発，高知県工業技術センター2010年研究開発&企業支援成果報告書No6 56-57
- 8) 河野敏夫ら：焼却灰の無害化・有用物製造・一体化システムの開発（第3報）焼却灰ゼオライトの用途開発 高知県工業技術センター研究報告No40（2009）59-63
- 9) 平井 康宏，酒井 伸一：自動車用鉛蓄電池のリサイクル・廃棄フロー推定，環境経済・政策学会 2005年大会 報告論文
- 10) 塩ビ工業・環境協会HP
(http://www.vec.gr.jp/lib/lib2_6.html#bb)