

石炭火力発電所フライアッシュ中の 微量有害成分に関する知見

Study on trace elements in coal fly ash
discharged from electric power plants

秋 月 祐 司* 南 ひ かり*

Hiroshi Akizuki and Hikari Minami

1. はじめに

近年エネルギー転換政策に伴い、石炭を燃料とするプラントが増加しつつある。そこから排出される多量のクリンカーやフライアッシュの大部分は、海面等への埋立てによって処理されているのが現状であるが、近い将来埋立て可能な海面が不足するのは必至であるため、各プラントでは廃棄物の有効利用法を研究中である。しかし、フライアッシュやクリンカー中に含まれる微量有害成分についてはほとんど文献がなく^{1,2)}、我国ではその分析法も確立していない。このような背景から環境庁では独自の分析法を作成し、昭和56年度と57年度の2度にわたり、コールフライアッシュを共通試料として全国規模の分析精度管理調査を行い、その結果を礎として「コールフライアッシュ中微量有害成分の分析方法試案³⁾」(以下「試案」と略す。)を発表するに至った。

試案では、コールフライアッシュの分解方法として、フッ化水素酸を用いた全分解法と硫酸・硝酸・過塩素酸を用いた酸分解法の2方法について記述されている。環境分析としては、フッ化水素酸を用いなければ溶出してくる成分までを対象とすることについては議論の多いところであり、試案においても、全分解法を用いるか酸分解法を用いるかは、調査の目的に応じて決めるべきこととしている。しかし、酸分解法によって全含有量の大部分が溶出するか、または試料が異なっても、溶出してくる割合が一定であれば、酸分解法のみを行ってもおよそその全含有量を知ることにも可能である。

そこで、コールフライアッシュ中微量有害成分の一般

的濃度を把握するため、昭和57年末現在、我が国で稼働している11の石灰火力発電所のコールフライアッシュ(電気集じん機灰及び2火力発電所についてはマルチサイクロン灰も採取したので、試料数は合計13)について、試案を用いて微量有害成分の全含有濃度及び酸可溶性濃度を測定した。また、全含有濃度に対する酸可溶性濃度の比(溶出率)は、試料及び元素によって異なることがわかったので、各試料について粒度分布及び主成分元素含有量の測定を行い、溶出率の変動因について検討した。

2. 試験方法

1) 微量有害成分の測定方法

詳細は試案に掲載されているが、概略は次の通りである。測定は2回繰り返して、その平均値を各濃度とした。

a) 全含有量

○鉛、ニッケル、銅、マンガン、亜鉛

硫酸・硝酸・過塩素酸・フッ化水素酸分解—原子吸光法

○バナジウム

硫酸・硝酸・過塩素酸・フッ化水素酸分解—BPHA 吸光光度法

○ヒ素

硫酸・硝酸・過マンガン酸カリウム・フッ化水素酸分解—DDTC 銀吸光光度法

○クロム

硫酸・硝酸・過塩素酸・フッ化水素酸分解—Ce(IV) 酸化—TOA 抽出—過塩素酸逆抽出—ジフェニルカルバジド吸光光度法^{4,5)}。(試案では過酸化ナトリウム融解法が記されているが、過酸化ナトリウムの入手が困難なため、本法によった)

b) 酸可溶性濃度

* 日本環境衛生センター公害部水質産業廃棄物課
Water pollution and Industrial Waste Laboratory,
Department of Environmental Pollution,
Japan Environmental Sanitation Center

○鉛、ニッケル、銅、マンガン、亜鉛

硫酸・硝酸・過塩素酸分解—原子吸光法

○バナジウム

硫酸・硝酸・過塩素酸分解—BPHA 吸光光度法

○ヒ素

硫酸・硝酸・過塩素酸分解—DDTC 銀吸光光度法

○クロム

硫酸・硝酸・過塩素酸分解—Ce(IV) 酸化—TOA 抽出—過塩素酸逆抽出—ジフェニルカルバジド吸光光度法 (試案には酸可溶性クロムの測定法は記されていないが、比較のため測定を行った。)

2) 粒度分布

JIS A 1204-1970に従って粒度分布を測定し、粒径加積曲線から50, 80, 90%粒径を読み取り、これらを各試料の粒径の代表値とした。

3) 主成分元素

○ケイ酸

試料を白金ルツボに分取して炭酸ナトリウム融解し、融成物を塩酸で浸出した後蒸発乾固し、ケイ酸を不溶化する。これに塩酸を加えて可溶分を溶解した後濾過して濾紙上の残渣を濾紙とともに灰化し、その重量を測定して含有量を求めた⁶⁾。

○アルミニウム、鉄、カルシウム、マグネシウム

硝酸・過塩素酸・フッ化水素酸分解—原子吸光法

○ナトリウム、カリウム

硝酸・過塩素酸・フッ化水素酸分解—炎光光度法⁷⁾

3. 微量有害成分の測定結果

全含有濃度のヒストグラムを図1～8に示す。試料数が少ないため、分布型は明らかではないが、対数正規型を示唆する分布型が多いように思われる。

また全含有濃度及び酸可溶性濃度の基本統計量を表1及び表2に示す。全含有濃度の幾何平均値と各元素の地

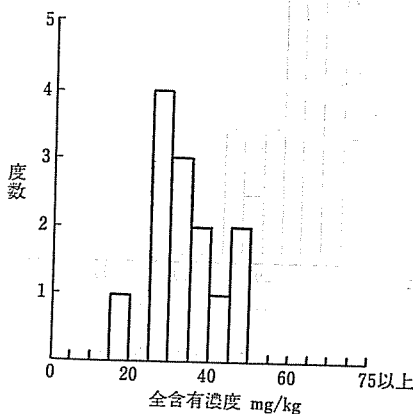


図1 鉛のヒストグラム

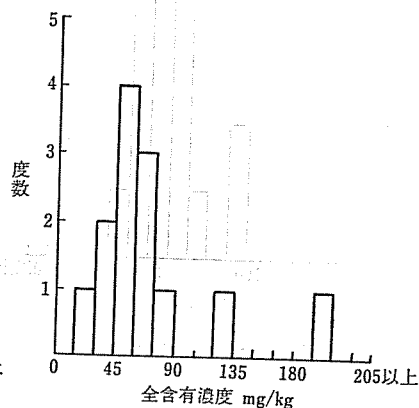


図2 ニッケルのヒストグラム

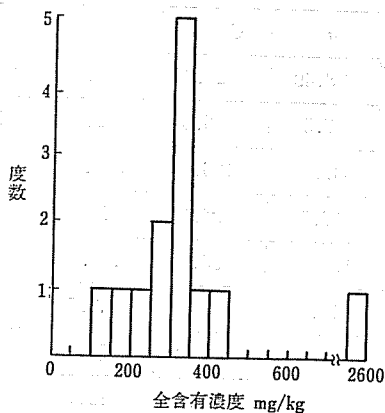


図3 マンガンのヒストグラム

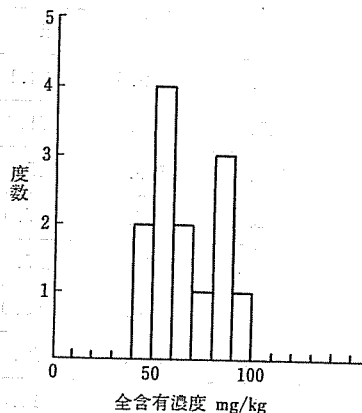


図4 銅のヒストグラム

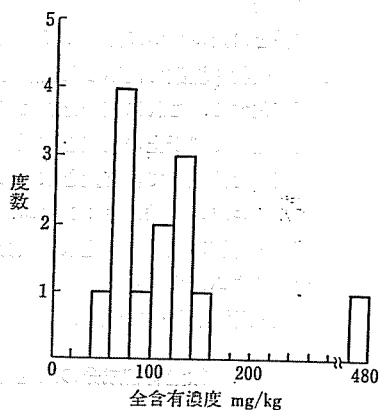


図 5 亜鉛のヒストグラム

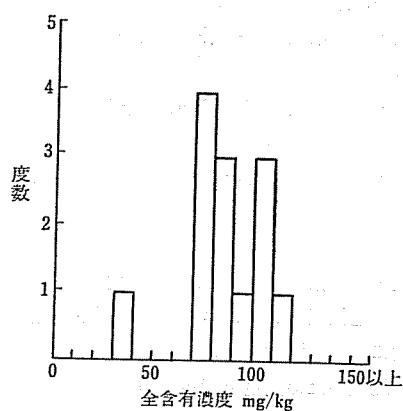


図 6 クロムのヒストグラム

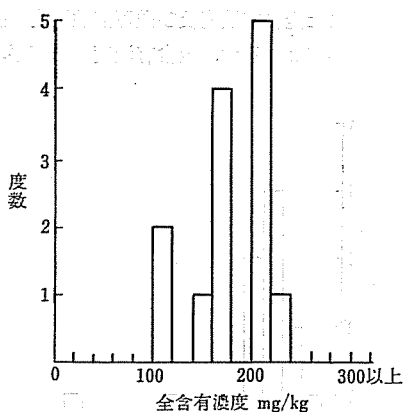


図 7 バナジウムのヒストグラム

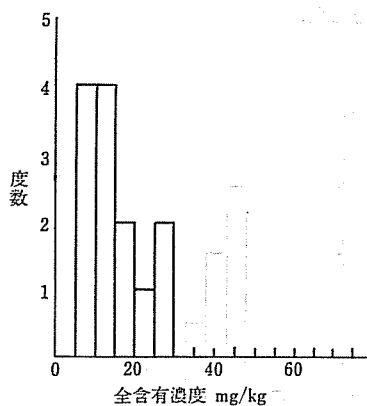


図 8 ヒ素のヒストグラム

表 1 コールフライアッシュ中微量有害成分の全含有濃度

Element	n	min.*	max.*	arithmetic			geological		
				$\bar{x}^*$	σ^*	CV%	$\bar{x}^*$	$\bar{x}-\sigma^*$	$\bar{x}+\sigma^*$
Lead	13	19.0	49.6	34.1	8.49	24.9	33.1	25.6	42.7
Nickel	13	27.8	208.	71.3	47.5	66.6	62.1	37.5	103.
Manganese	13	117.	2550.	465.	631.	136.	330.	164.	662.
Copper	13	142.6	97.6	67.0	17.5	26.1	64.9	50.0	84.2
Zinc	13	50.7	470.	127.	108.	85.0	105.	60.0	185.
Chromium	13	38.3	110.	86.0	18.5	21.5	83.7	64.0	109.
Vanadium	13	100.	224.	179.	39.8	22.2	174.	135.	225.
Arsenic	13	5.35	27.8	14.4	7.55	52.3	12.7	7.40	21.7

* unit : mg/kg

表 2 コールフライアッシュ中微量有害成分の酸可溶性濃度

Element	n	min.*	max.*	arithmetic			geological		
				$\bar{x}^*$	σ^*	CV%	$\bar{x}^*$	$\bar{x}-\sigma^*$	$\bar{x}+\sigma^*$
Lead	13	3.10	13.8	8.02	3.39	42.2	7.30	4.54	11.7
Nickel	13	8.27	135.	33.6	33.2	99.0	25.4	12.5	51.8
Manganese	13	68.7	2070.	321.	528.	165.	199.	88.3	448.
Copper	13	9.77	44.8	21.7	11.0	50.6	19.5	12.2	31.2
Zinc	13	16.7	155.	38.6	37.4	96.7	30.4	16.2	57.1
Chromium	13	16.2	61.1	45.0	13.0	29.0	42.8	30.0	61.2
Vanadium	13	44.9	123.	74.1	30.9	41.8	68.6	45.9	103.
Arsenic	13	4.56	27.9	14.5	7.82	54.0	12.5	7.04	22.3

* unit: mg/kg

酸存在度⁹⁾を比較すると、鉛で約3倍、ヒ素で約7倍コールフライアッシュの方が高濃度である他は、概ね同程度ないし3分の1程度であり、幾何平均値+標準偏差(分布型が対数正規型であれば、母集団の約84%はこの値より小さな値を示す)を考慮しても、各元素の地殻存在度を大きく(10倍以上)上まわるのはヒ素のみであった。また、岩石及び土壌の元素の平均天然賦存量¹⁰⁾との比較においても、とくに含有濃度が高いと考えられるのはヒ素のみであった。

ヒ素については、酸可溶性濃度も全含有濃度とほとんど同じ平均値を示しており、コールフライアッシュ中のヒ素は、かなり溶出しやすい状態で存在しているものと思われる。したがって、コールフライアッシュの処理処分や有効利用にあたっては、とくにヒ素に対する配慮が必要である。また他の元素についても、図2、3及び5のように、最頻値からかなり離れた値を示すものもあるため、この点についても注意が必要と考えられる。

4. 溶 出 率

コールフライアッシュ中の微量有害元素は主成分であるケイ酸結晶中に存在していて、酸分解法では溶出せず、フッ化水素酸分解(またはアルカリ融解)によるケイ酸処理によって初めて溶出する部分と、ケイ酸結晶の表面に付着していて酸分解により容易に溶出する部分に分けられる。各試料中の各元素のうち、どの程度が前者として存在し、どの程度が後者として存在するかは、石炭の種類、石炭燃焼炉内における各元素の存在形態やケイ酸結晶の生成過程等と密接な関係があると思われるが、これらの結果を総合的かつ端的に表わすのが次式に

示す溶出率である。

$$\text{溶出率}(\%) = (\text{酸可溶性濃度} / \text{全含有濃度}) \times 100$$

各試料ごとに算出した、各微量有害成分の溶出率の基本統計量を表3に示す。(ヒ素については計算上溶出率が100%を超えるものがあつたが、これらは100%として計算した。以後の解析においても同様に扱った。)

表 3 コールフライアッシュ中微量有害成分の溶出率

Element	n	min.*	max.*	arithmetic		
				$\bar{x}^*$	σ^*	CV%
Lead	13	11.0	35.6	23.8	8.60	36.2
Nickel	13	27.9	64.9	42.6	12.3	28.8
Manganese	13	36.5	81.1	61.6	12.8	20.9
Copper	13	19.0	45.9	31.2	8.95	28.7
Zinc	13	17.1	48.5	30.0	8.80	29.3
Chromium	13	42.3	66.8	51.7	7.66	14.8
Vanadium	13	28.1	56.9	40.8	11.3	27.7
Arsenic	13	85.2	100	97.2	4.25	4.4

* unit: %

溶出率が最も低いのは鉛で平均23.8%、逆に最も高いのはヒ素で平均97.2%であった。また、溶出率の変動係数はヒ素では4.4%と小さいが、他の元素では14.8~36.2%と大きかった。そこで元素及び試料を要因として、2因子分散分析を行ったところ、両要因とも高度に有意となり、溶出率は元素によってもまた同一元素でも

試料によって異なることがわかった。(表4参照) また、元素間の溶出率の差を検討したところ、表5に示すようにニッケルとバナジウム及び銅と亜鉛の溶出率に有意な差が認められなかった他は、全ての元素の組合せにおいて、溶出率に有意な差が認められた。

表4 溶出率に関する分散分析表

要因	平方和	自由度	分散	分散比
元素間	50598.8	7	7228.39	188.955**
試料間	5799.6	12	483.3	12.6338**
誤差	3213.39	84	38.2547	
計	59611.8	103		

** Significant level : 0.01

表5 元素間の溶出率の差の検討

	Pb	Ni	Mn	Cu	Zn	Cr	V	As
Lead	—	**	**	**	*	**	**	**
Nickel	**	—	**	**	**	**	—	**
Manganese	**	**	—	**	**	**	**	**
Copper	**	**	**	—	—	**	**	**
Zinc	*	**	**	—	—	**	**	**
Chromium	**	**	**	**	**	—	**	**
Vanadium	**	—	**	**	**	**	—	**
Arsenic	**	**	**	**	**	**	**	—

Significant level * : 0.05, ** : 0.01

Reject H_0 : $|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > \text{l.s.d.}$,

$$\text{l.s.d.} = t(\phi_e, \alpha) \sqrt{\hat{\sigma}_2(\bar{y}_i - \bar{y}_j)}$$

$$= t(\phi_e, \alpha) \frac{2Ve}{n}$$

Ve : 誤差分散

さらに、各元素の溶出率の相関行列を求めたところ、表6に示すように、鉛、ニッケル、マンガン、銅、亜鉛及びバナジウムの6元素間では互いに溶出率に有意の相

関があり、これら6元素はコールフライアッシュの生成過程において、よく似た挙動を示すものと考えられる。一方、クロム及びヒ素については、他元素との間にあまり相関がなかった。

溶出率に影響を及ぼす要因としては、①各元素の融点、沸点あるいは昇華点、②コールフライアッシュの粒径及び③コールフライアッシュの主成分元素組成等が考えられる。①は、元素間の溶出率の差に関係があると思われる。②及び③は試料間の溶出率の差に関係があると思われる。

表7に各微量有害成分の単体及び主要酸化物の融点、沸点及び昇華点を示す^{8,10)}。石炭の灰分の融点は通常1,200~1,600°Cであるが¹¹⁾、この温度でヒ素だけは確実に気体として存在しており、コールフライアッシュの生成過程においてヒ素は、溶融状態の灰分に取り込まれることは少なく、周囲温度の低下に伴って粒子表面に昇華して来るものと考えられる。これにより、ヒ素の溶出率が100%近いことは合理的に説明できる。しかし他の元素については、融点や沸点のみでは、元素間の溶出率の差を説明できなかった。

次に表8にコールフライアッシュの粒径及び主成分元素含有量の基本統計量を示す。粒径に関しては、試料間の差が大きく、変動係数はどの%粒径についても40%以上であった。また、主成分としてはSiO₂が最も多く49.8~63.2%であり、Al₂O₃がこれに次いで多く17.4~24.5%であった。両者とも試料間の差は小さく、変動係数は7%台であった。また、測定を行った主成分7元素の酸化物としての含有量及び650°C 強熱減量の総和は92.5~99.9%であった。

粒径及び主成分元素含有量と溶出率との相関行列を表9に示す。これによると、粒径及び主成分元素含有量と溶出率との相関性のパターンから、微量有害成分は3つの群に分けられる。すなわち①溶出率において元素間相

表6 溶出率の元素間相関行列

Element	Pb	Ni	Mn	Cu	Zn	Cr	V	As
Lead	1.000	0.782**	0.619*	0.657*	0.688**	0.257	0.719**	-0.040
Nichal	0.782**	1.000	0.810**	0.839**	0.807**	0.342	0.794**	-0.093
Manganese	0.619*	0.810**	1.000	0.925**	0.880**	0.428	0.808**	0.077
Copper	0.657*	0.839**	0.925**	1.000	0.913**	0.560*	0.866**	0.104
Zinc	0.688**	0.807**	0.880**	0.913**	1.000	0.484	0.773**	-0.001
Chromium	0.257	0.342	0.428	0.560*	0.484	1.000	0.674*	0.532
Vanadium	0.719**	0.794**	0.808**	0.866**	0.773**	0.674*	1.000	0.387
Arsenic	-0.040	-0.093	0.077	0.104	-0.001	0.532	0.387	1.000

Significant level * : 0.05 ** : 0.01

表 7 融点, 沸点, 昇華点

化 合 物	融点 (°C)	沸点 (°C)	昇華点 (°C)
Pb	327	1540	—
PbO	880	1470	—
Ni	1450	2730	—
NiO	1998	不明	—
Mn	1245	2150	—
Mn ₂ O ₄	1705	不明	—
Cu	1083	2595	—
Cu ₂ O	1235	1800	—
Zn	419.5	907	—
ZnO	1800	不明	—
Cr	1905	2200	—
Cr ₂ O ₃	1990	3000	—
V	1915	3450	—
VO ₂	1967	不明	—
V ₂ O ₃	—	—	—
As	—	—	615
As ₂ O ₃	—	—	193~218

互の相関があり (表 6 参照), かつ主成分元素のうち SiO₂ や K₂O 含有量との間に負の相関があるが, 粒径とは相関が認められない鉛, ニッケル, マンガン, 銅, 亜鉛及びバナジウムの 6 元素からなる群 (以下「鉛群」とする), ②粒径の%が大きくなる程負の相関性が増大し, 主成分元素のうち SiO₂ 含有量と負の相関が認められるクロム, 及び③粒径とは強い正の相関があるが, 主成分元素含有量とは相関が認められない元素の 3 群である。

当初溶出率と粒径との関係については, 粒径が小さい

表 8 コールフライアッシュの粒径及び主成分元素含有量

項 目	n	min.*	max.*	arithmetic		
				$\bar{x}^*$	σ^*	CV%
50 % 粒 径	13	13.5	78.0	33.3	16.0	48.1
80 % 粒 径	13	32.0	140	75.9	30.9	40.7
90 % 粒 径	13	48.0	180	110	44.0	40.0
SiO ₂	13	49.8	63.2	58.7	4.3	7.3
Al ₂ O ₃	13	17.4	24.5	22.7	1.8	7.9
Fe ₂ O ₃	13	0.8	9.4	3.3	2.0	58.4
CaO	13	0.3	5.6	2.6	1.6	63.2
MgO	13	0.1	1.7	1.3	0.4	31.2
Na ₂ O	13	1.3	3.1	2.0	0.5	25.8
K ₂ O	13	2.4	4.5	3.5	0.7	19.3
650°C 強熱 減量	13	0.5	9.7	3.0	2.8	91.2

* 単位 粒径: μ その他: %

ほどコールフライアッシュの単位量当りの表面積が大きくなるため, 溶出率も大きくなるものと予想されたが, 鉛群においてはほとんど無関係であることがわかった。この理由として

- ① 酸分解法では, ケイ酸結晶が凝固してから表面に付着した元素のみが溶出し, ケイ酸とともに溶融してケイ酸結晶中に取り込まれた元素は, たとえそれが粒子のごとく表面近くにあっても溶出されない。
- ② 酸分解法でもケイ酸結晶のごとく表面近くにある元素は溶出されるが, コールフライアッシュ粒子が多孔質であって, 粒径と表面積は全く関係がない。

また, 鉛群の溶出率と SiO₂ 含有量との間に負の相関があることも考慮すれば,

表 9 溶出率と粒径及び主成分元素含有量との相関行列

要素	粒 径			主 成 分 元 素 含 有 量							
	50%	80%	90%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	650°C 強熱減量
Lead	0.333	0.295	0.248	-.673*	-.137	0.043	0.342	-.467	0.048	-.785**	0.723**
Nickel	0.157	0.020	-.024	-.640*	-.138	-.076	0.330	-.498	-.056	-.770**	0.711**
Manganese	0.114	-.218	-.304	-.802**	-.485	0.358	0.479	-.265	-.143	-.725**	0.554*
Copper	0.105	-.221	-.304	-.890**	-.475	0.289	0.657*	-.113	0.114	-.638*	0.416
Zinc	0.282	-.139	-.255	-.855**	-.488	0.295	0.602*	-.119	0.230	-.667*	0.409
Chromium	-.129	-.521	-.575*	-.668*	-.167	0.174	0.576*	0.226	0.312	-.210	0.098
Vanadium	-.081	-.368	-.406	-.815**	-.227	0.115	0.681*	-.179	-.006	-.736**	0.523
Arsenic	-.701**	-.706**	-.604*	-.259	-.058	0.152	0.373	0.019	0.057	-.222	0.067

Significant level * : 0.05 ** : 0.01

③ SiO_2 含有量の少ないものほど、酸分解法による溶出作用が内部まで及ぶため、粒径が大きくても溶出率が高かったり。その逆も起こり得る。

などが考えられる。

そこでまず、酸分解終了後の濾過残渣を光学顕微鏡で検鏡したところ、粒径の小さな粒子は球形をしており、大きな粒子は不定形をしていることがわかった。しかし粒子が多孔質であるとは認められず、また球体の一部が破損して、中にさらに小さな粒子が認められるものもあったが、これはむしろ例外的なものであって、粒径と表面積は完全な比例関係にあるとはいえないまでも、全く無関係とは認め難い。したがって、上記②の理由ではないと考えられる。

また、③が理由であるとする、試料を SiO_2 含有量によっていくつかの層別した場合、各層内では溶出率と粒径との間に相関関係が存在するはずである。図9は、 SiO_2 含有量と溶出率との相関が最も強い銅について、溶出率と80%粒径との関係を SiO_2 含有量によって3つに層別して表わしたものである。これによると、層別を行っても溶出率と粒径との間に相関があるとは認め難く、③も理由とは考えにくい。

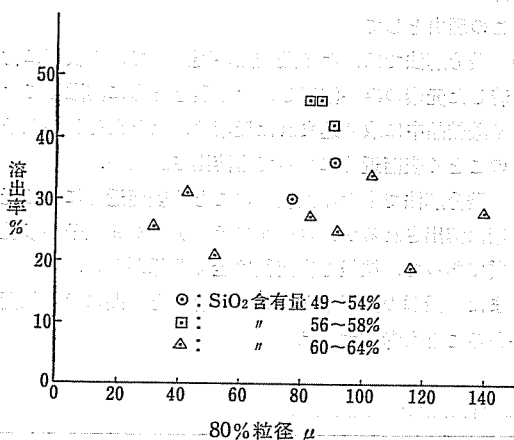


図9 SiO_2 含有量別の銅の溶出率と80%粒径との関係

したがって、①が真の理由である可能性が高いが、この場合でも鉛群がケイ酸とともに溶融するか凝固後に粒子表面に付着するかが、原料炭の性質（たとえば、鉛群各元素とケイ酸との偏在等）によって決定されるのか、石炭の燃焼条件（原料炭粉碎時の粒径や燃焼温度等）によって決定されるのかは明らかでない。しかし石炭は植物が炭化して生成したものであるから、原植物体中において葉であった部分や根であった部分等によって微量有害成分が偏在していた可能性は強く、これらがケイ素原

子の比較的多い部分に偏在度が高ければ、ケイ酸とともに溶融し易く、そうでなければケイ酸が凝固した後にその表面に付着し易いものと考えられ、コールフライアッシュ中に含有される微量有害成分のうち、前者の占める割合が大きければ溶出率は低くなり、後者の占める割合が大きければ溶出率は高くなることになる。

次にヒ素の溶出率が、主成分元素含有量とは相関がなく、粒径との間に高い相関を示したことについては次のように考えられる。すなわち、燃焼炉内に噴霧された石炭の微粉は、可燃分の燃焼と同時に灰分が溶融してコールフライアッシュ粒子を形成する。この時ヒ素はガス化して粒子外へ揮散するが、粒径の大きな石炭粒の内部に存在していたヒ素は、揮散しきれず内部に残留する。石炭粒の粒径が大きければ、コールフライアッシュの粒径も大きいことは当然予想されるから、ヒ素の溶出率と粒径との間に負の相関関係が生ずるものと考えられる。

最後にクロムについては、今回検討を行った要因だけでは、その溶出率の変動がどのような原因によるものか、はっきりしなかった。

5. まとめ

我が国の石炭火力発電所から発生するコールフライアッシュ中の微量有害成分を測定した結果、元素の地殻存在度や土壌中の平均賦存量と比較してとくに高濃度であるのはヒ素のみであった。

また、全含有濃度に対する酸可溶性濃度の比（溶出率）は、試料及び元素によって差があり、ヒ素では平均97.2%と高いが、他の元素では平均23.6~61.6%であった。そしてその変動係数は、ヒ素では4.4%と小さいが、他の元素では14.8~36.2%と大きかった。

溶出率の変動因として、ヒ素ではコールフライアッシュの粒径が大きく作用し、鉛、ニッケル、銅、マンガン、亜鉛及びバナジウムでは石炭の原植物体中におけるこれら元素や主成分元素の偏在が作用するものと考えられたが、クロムについてははっきりした変動因はわからなかった。

これらのことから、酸分解法で含有量のほとんど全てが抽出されるヒ素を除いて、酸可溶性濃度から全含有濃度を推測することは困難であると考えられた。

参考文献

- 1) Gluskoter, H. J. et al.: Illinois State Geological Survey Circular, 449: 154, 1977.
- 2) Klein, D. H. et al.: Environ. Sci. Technol., 9(10): 973, 1975.
- 3) 環境庁: 昭和57年度環境測定分析統一精度管理

- 調査報告書, 215~244, 1983.
- 4) 秋月祐司, 早川亮太: 日本環境衛生センター所報, No. 9: 59, 1982.
 - 5) 田中 克, 石丸 章: 分化, 31: 191, 1982.
 - 6) 日本分析化学会編: 分析化学実験指針, 東京化学同人: 100~101, 1969.
 - 7) 土壤養分測定法委員会編: 土壤養分分析法, 養賢堂, 1975.
 - 8) 岩波理化学辞典第3版, 岩波書店: 1974.
 - 9) 渋谷政夫: 環境情報科学, 7~2: 48~59, 1978.
 - 10) 7680の化学商品: 化学工業日報社: 1980.
 - 11) 化学大辞典5, 共立出版: 306, 1963.

Summary

The result of analyses on trace elements (Pb, Ni, Cu, Mn, Zn, V, As, Cr) in coal fly ash dis-

charged from electric power plants in Japan showed that only arsenic was higher in concentration than average value found in soil or in the earth's crust.

With respect to the ratio of the acid-extractable concentration to total concentration of each element (acid-solubility ratio), varied by sample as well as by element. The mean value of the acid-solubility ratio of arsenic was 97.2% (C.V. 4.4%). The values of the other elements ranged from 23.8~61.6% (C.V. 14.8~36.2%).

There was a close correlation between the acid-solubility ratio of arsenic and the grain size of coal fly ash, those of Pb, Ni, Cu, Mn, Zn and V appeared to depend on the quantity of each element in a plant's raw coal.