

研究論文

既存社会資本の有効活用による灰溶融飛灰中重金属の再資源化試算

Feasibility Study on Heavy Metals Recovery from Fly Ash of Ash Melting Furnace by Utilizing Existing Production Facilities as Social Resources

藤原健史*・武田信生**・中原啓介***
Takeshi Fujiwara Nobuo Takeda Keisuke Nakahara

明石哲夫****・敦井実*****・長崎英範*****
Tetsuo Akashi Minoru Tsurui Hidenori Nagasaki

(原稿受付日2000年9月21日, 受理日2001年8月3日)

Abstract

Since fly ash generated in ash melting furnace involves valuable nonferrous materials, especially zinc and lead, the materials should be extracted and reused for production from viewpoint of resource recovery. Zinc and lead in the ash can be recovered in a smelting furnace named ICP, which is a large scale furnace to smelt ore. Ash with high chlorine concentration needs pre-treatment to remove chlorine and the salt by thermal operation or rinsing. Hence, it is important to minimize recovery energy and CO₂ emission in the processes and material transportation. In this study, it is considered that the melting furnace fly ash and/or the pre-treated matter are transported over a long distance in Japan by tracks and/or ships and an existing nonferrous metal smelting facility and a pre-treatment facility are utilized as much as possible. From the evaluation of possible paths to recover the zinc and lead from the melting furnace fly ash it was found the path of transporting fly ash to the existing pre-treatment facility by ship and treating it together with a large amount of other ash lowers energy consumption and CO₂ emission.

1. はじめに

昨今, 自治体では, 最終処分場の逼迫による処分量の減量化, 重金属の溶出防止, そして近年問題となっている灰中ダイオキシンを除去する必要性などから, 都市ごみ焼却後の灰を溶融して安定化・減容化し, 生成するスラグを製品として再資源化することを積極的に検討するようになってきた。最近では, ごみを熱分解・ガス化し, 可燃性ガスを二次燃焼して熱エネルギーを回収し, 残ったチャーおよび不燃物を溶融してスラグにするガス化溶融が次世代技術として脚光を浴び, 実用段階に入っている¹⁾。このように, ごみや灰を溶融することは, 今後の廃棄物処理の主流にな

ると考えられる。

ところで, 灰を溶融すると含まれる重金属成分のうち沸点の低い成分である亜鉛, 鉛, カドミウムなどが揮発し, それらは排ガス温度が下がったときに凝縮して飛灰の一部となるため, 溶融飛灰中の重金属濃度は高い。したがって, 溶融飛灰をそのまま埋立処分することはできず, セメントやキレート剤で重金属を固定化することが必要となる。溶融飛灰からの重金属回収は, 重金属を回収して再利用を図るとともに, 灰から重金属を除去して埋立後の溶出リスクを低減することも目的としている。

資源化という観点に立つと, 溶融飛灰から回収した重金属は, 非鉄製錬メーカーに原料として積極的に利用されることが理想である。しかし, 現状では溶融飛灰の重金属濃度(品位)が低かったり, 塩素などの炉を腐食させる成分が飛灰に含まれるため, 適当な前処理が必要となる。都市ごみ焼却後の灰を自治体で前処理してから製錬メーカーが引き取るのか, 製錬メーカーが溶融飛灰を直接引き取って前処理をするのか, 適切な方法について議論されるべきである。本研究では, 動脈系における社会資本(ここでは, 非鉄製

*京都大学大学院工学研究科環境工学専攻助教授

** 教授

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

***NKKエンジニアリング研究所水システム研究部部長

〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1

****NKK環境開発部開発推進グループ統括スタッフ

〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1

*****NKK環境技術部プロセス設計室室長

〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1

*****三井金属鉱業(株)金属事業本部技術部担当部長

〒141-8584 東京都品川区大崎1-11-1

エネルギー・資源学会第18回研究発表会
(1999年6月9・10日)にて発表

錬メーカー所有の生産設備)を積極的に利用することで、重金属の再資源化がエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の削減という点において有効であることを定量的に示すことを試みた。具体的には、ある都市で灰溶融炉からの溶融飛灰を前処理し、ISP炉で亜鉛・鉛の製錬をする場合に、塩や塩素の除去をオンサイトで行うべきか製錬所で行うべきか、また、品位を向上させるために、既存施設を利用すべきか新しい施設を作るべきかなどを、エネルギー消費量や二酸化炭素排出量の観点から考察した。

2. 製錬と重金属回収

2.1 鉛と亜鉛の製錬, ISP炉

鉛、亜鉛の鉱石は主として方鉛鉱(PbS)とせん亜鉛鉱(ZnS)で、わが国ではほとんどオーストラリア、カナダ、ペルーなどの国々から輸入されている。両鉱石とも品位を上げるために海外において選鉱され、精鉱として日本に輸入される。本研究では亜鉛と鉛の製錬方法として、両者を同時に製錬するIPS(Imperial Smelting Process)法²⁾を取り上げた。このIPS法では鉛と亜鉛の硫化鉱を脱硫して焼結塊にし、それを熔鉱炉で熔解し、還元揮発した亜鉛蒸気をコンデンサにおいて溶融鉛中に捕捉し、冷却して亜鉛を得る。また、鉛は熔鉱炉下部より粗鉛として得る。

2.2 溶融飛灰の前処理

溶融飛灰から高濃度の重金属を抽出する方法はいくつか提案されているが³⁾、本研究では簡便な方法である水洗処理⁴⁾を採用する。以下に塩を除去する水洗処理、塩素を除去する加熱処理とRK(Rotary Kiln)炉、金属品位を高める乾式MF(Mitsui Furnace)炉について説明する。

(1) 水洗処理(水抽出法)

溶融飛灰を水で抽出すると、塩化ナトリウムおよび塩化カリウムが溶出し、酸化亜鉛および酸化鉛を主成分とした金属濃縮物が残る。処理プロセスでは、一段目で苛性ソーダ、凝集剤および二段目からの脱離液を溶融飛灰に加えてpHを調整し脱水する。そして、二段目で一段目の脱水ケーキに水を加えて再び脱水する。

(2) 加熱処理(乾式濃縮法)

回収物中の塩素濃度が高いと製錬時に炉が腐食するため、塩素分は極力除去することが望ましい。そこで、水洗処理したケーキを約800℃で加熱して脱塩素化する。これにより塩素濃度は0.5%未満となり、直接ISP炉での製錬が可能となる。

加熱に燃料を用いる場合、飛灰の飛散やダイオキシンの再合成などの問題から容器を外側から暖める外熱式をとる。電気式は容器の内壁面を暖めるため、外熱式よりも装置がコンパクトで、壁面の放熱や排ガスによる熱ロスが小さい。電気式は大きな電力エネルギーを消費するが、焼却

炉の余剰電力を利用することが可能である。以上から、本研究では電気加熱式を選んだ。

(3) RK炉

回収物中の塩素濃度を低減するためにロータリーキルンを用いて加熱し、塩化した金属を揮発させる方法であり、その沸点から塩化鉛、塩化カドミニウム、塩化亜鉛の順で揮発する。揮発後に塩素含有率の少ない鉛、亜鉛が得られる。揮発した重金属の塩化物は別途資源化される。

(4) MF炉

低品位の亜鉛含有物(10~30%)を50~60%に濃縮することを目的とする。原料を石炭、珪石、バインダ(パルプ廃液)と混練して溶融炉内に入れ、還元雰囲気中で熔融する。還元揮発した亜鉛・鉛が二次空気酸化されて粗酸化亜鉛、粗酸化鉛となる。

3. 計算の条件

3.1 溶融飛灰の組成と量の設定

ごみ焼却灰を還元性雰囲気中で溶融した場合の溶融飛灰(飛灰A)の成分を文献5より設定した。次に灰の飛散があるときの溶融飛灰(飛灰B)の成分を(溶融飛灰A50%+供給灰50%)として設定した。飛灰Aと飛灰Bの成分を表1に示す。供給灰には水分や揮発分が含まれるため、飛灰Bの成分の合計は100%より小さくなる。

次に発生量については、神奈川県A市のごみ焼却プラント(処理量200t/日)において、合計28t/日の焼却灰と飛灰が生成するとし、それを隣接する灰の溶融炉(処理量28t/日)で溶融したときの溶融飛灰の量を、飛灰Aと飛灰Bについてそれぞれ0.560トン/日、1.12トン/日とした。(表2)

3.2 飛灰処理ルートの設定

飛灰Aは、亜鉛品位は高いが塩素濃度も高いため、製錬前に塩素濃度を低めておくことが必要である。また飛灰Bは、塩素濃度は低いが亜鉛品位も低いため、製錬前に亜鉛

表1 還元雰囲気溶融飛灰(飛灰A)と飛散灰を含んだ溶融飛灰(飛灰B)の性状(単位 湿重量%)

元素	溶融飛灰組成	
	溶融飛灰A	溶融飛灰B
Zn	21.4	11.1
Pb	6.40	3.38
Cd	0.310	0.160
Cl	38.8	20.7
Fe	0.690	4.06
Si	0.570	8.26
Ca	0.160	5.80
Na	16.1	9.25
K	13.0	7.10

表2 溶融飛灰量の設定

項目	単位	数量
ごみ焼却量	t/day	200
灰発生量	t/day	28.0
飛灰A	t/day	0.560
飛灰B	t/day	1.12

の品位を高めておくことが必要である。以上の条件を考慮して、具体的な処理ルートを図1のように定めた。なお、ISP炉は青森県B市、MF炉は福岡県C市にある実際の施設を想定した。

まず、飛灰Aについては、

ルートA1) ISP炉のあるB市に熔融飛灰を直接輸送し水洗を行ない、新設するRK炉において脱塩素化する。熔融飛灰はフレコンバッグに入れてトラック輸送する。新設するRK炉は生産用であるが、飛灰からの重金属回収にも利用する。

ルートA2) 発生地であるA市で熔融飛灰を水洗してからB市へ輸送し、B市の新設RK炉で脱塩素化する。飛灰を現地A市で洗浄することによって減量化している。

ルートA3) A市で熔融飛灰を水洗し、同時に加熱処理して塩素を除去し、その後B市へ輸送する。現地で脱塩素化するために、B市において新たにRK炉を作る必要はない。

同じく、飛灰Bについては、

ルートB1) 年間11万トン規模の既存のMF炉を利用するため、まずB灰をC市に輸送して水洗を行い、MF炉で重金属品位を高めた後にB市に輸送する。熔融飛灰はA市からC市までトラックで運ぶか、あるいは生産原料とともに船で輸送する。また、回収中間物はC市からB市へと船で輸送する。

ルートB2) A市に年間1.2万トン規模の新しいMF炉と水洗処理施設を設置し、そこで前処理を行った後にB

市に輸送する。MF炉は、広域から重金属を受け入れることを想定したときの規模とする。年間1.2万トンは生産用MF炉の規模に比べてかなり小さい。

以上の5つの処理ルートについて、エネルギー消費量と二酸化炭素排出量を調べた。

4. 計算結果と考察

(1) 輸送 (表3)

陸路の場合、熔融飛灰や中間回収物をフレコンバッグに入れ、10トントラックで輸送するとした。海路の場合、2,500トンの内航タンカーの原単位⁶⁾を使用した。海運の場合は、重金属回収物を原料の運搬に同伴させる形をとるので、海運時のエネルギー消費量および二酸化炭素排出量は、熔融飛灰の輸送量、輸送距離に応じた値を比例計算して求めた。船とトラックは復路で他の物品を輸送することとし、往路のみを評価することにした。2都市間の輸送距離を表3のように設定した。

(2) 素材原単位 (表4)

素材原単位には複数の文献を参照に次の値を用いた。薬剤と炉材(炭化珪素)は、製造時に消費するエネルギーと発生する二酸化炭素をもとに計算した^{7,8)}。建築材料については、輸送まで考慮にいった文献9を参考とした。燃料については、文献10の値を用いた。

(3) 処理プロセスの建設、用役、物質収支に関するデータ (表5)

図1の処理ルートにおける、水洗処理、脱塩処理(RK炉)、濃縮処理(MF炉)の各プロセスについて物質収支を計算した。例として、加熱付き水洗処理プロセスの物質収支フローを図2に示す。

水洗処理については、オンサイト(熔融炉隣接)で行う

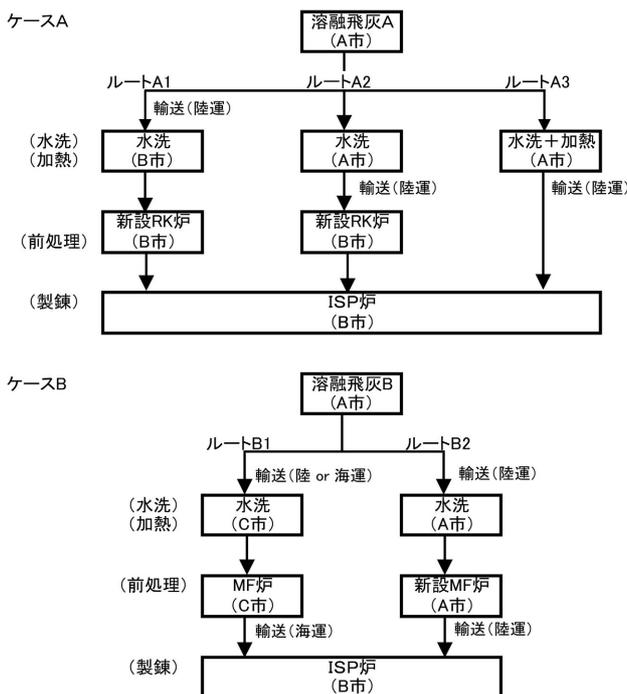


図1 重金属回収の処理ルート

表3 2都市間の距離と輸送原単位

出発地	到着地	経路	距離(km)
神奈川県A市	青森県B市	陸路	730
神奈川県A市	福岡県C市	陸路	1200
神奈川県A市	福岡県C市	海路	1350
福岡県C市	青森県B市	海路	1900

輸送手段	エネルギー原単位	CO ₂ 排出量原単位
10トン車	2,630 kcal/km	0.206 kg-C/km
2500トン船	112 kcal/t/km	0.00634 kg-C/t/km

表4 使用した素材の原単位

素材名	単位	エネルギー消費	CO ₂ 排出量
コンクリート	kcal/m ³ , kg-C/m ³	591,000	126
鋼材	kcal/ton, kg-C/ton	5,830,000	454
耐火物	kcal/m ³ , kg-C/m ³	25,300	1.40
NaOH(24%)	kcal/kg, kg-C/kg	2,980	0.169
HCl(35%)	kcal/kg, kg-C/kg	4,580	0.260
高分子凝集剤	kcal/kg, kg-C/kg	31,800	2.03
電気	kcal/KWh, kg-C/KWh	2,250	0.124
水道	kcal/l, kg-C/l	212	0.0117
A重油	kcal/l, kg-C/l	9,550	0.769
石炭	kcal/kg, kg-C/kg	6,200	0.641

場合と製錬所近隣で行う場合があるので、2通りの水洗処理の仕様を設定した。また、オンサイトの水洗処理では、加熱処理をする場合としない場合について仕様を定めた。RK炉、MF炉についてはプロセスの設計値および実績値から諸元を定めた。

(4) 処理プロセスのエネルギー消費量と二酸化炭素排出量

(表 6)

各処理プロセスのエネルギー消費量、二酸化炭素排出量について、建設と運転（用役）に関する値をそれぞれ求めた。さらに、エネルギー消費量、二酸化炭素排出量の合計を求め、その処理量当たりの値を計算した。処理量当たりのエネルギー消費量および二酸化炭素排出量を見ると、現

表 5 処理プロセスの建設、用役、入出力データ

1) 水洗処理(溶融施設に併設)			2) 加熱付水洗処理(溶融施設に併設)			3) 水洗処理(製錬施設に併設)					
<建設>			<建設>			<建設>					
処理量	単位	数量	処理量	単位	数量	処理量	単位	数量			
建設	延べ床面積	m ²	建設	延べ床面積	m ²	建設	延べ床面積	m ²			
	コンクリート	m ³		コンクリート	m ³		コンクリート	m ³			
	鋼材	ton		鋼材	ton		鋼材	ton			
プラント	鋼材	ton	プラント	鋼材	ton	プラント	鋼材	ton			
* 1日7時間運転			* 1日7時間運転			* 1日24時間連続					
<用役>			<用役>			<用役>					
処理量	単位	数量	処理量	単位	数量	処理量	単位	数量			
電気	KWh/day	210	電気	KWh/day	498	電気	KWh/day	1093			
水道	m ³ /day	5.60	水道	m ³ /day	8.60	水道	m ³ /day	300			
薬剤	NaOH(24%)	kg/day	薬剤	NaOH(24%)	kg/day	薬剤	NaOH(24%)	kg/day			
	HCl(35%)	kg/day		HCl(35%)	kg/day		HCl(35%)	kg/day			
	凝集剤	kg/day		凝集剤	kg/day		凝集剤	kg/day			
<プラント入出力>			<プラント入出力>			<プラント入出力>					
入力	項目	単位	数量	入力	項目	単位	数量	入力	項目	単位	数量
	溶融飛灰	kg/day	560		溶融飛灰	kg/day	560		溶融飛灰	kg/day	30,000
	水	kg/day	5,600		水	kg/day	5,600		水	kg/day	300,000
	薬剤	kg/day	28.4		薬剤	kg/day	28.4		薬剤	kg/day	1,520
出力	水洗回収物	kg/day	218	出力	水洗回収物	kg/day	170	出力	水洗回収物	kg/day	11,670
	排水	kg/day	5,971		排水	kg/day	6,018		排水	kg/day	319,850
4) RK炉			5) MF炉(新設、小型)			6) MF炉(既設、大型)					
<建設>			<建設>			<建設>					
処理量	単位	数量	処理量	単位	数量	処理量	単位	数量			
建設	延べ床面積	m ²	建設	コンクリート	m ²	建設	延べ床面積	m ²			
	コンクリート	m ³		鋼材	ton		コンクリート	m ³			
	鋼材	ton		耐火物	ton		鋼材	ton			
プラント	鋼材	ton	プラント	耐火物	ton	プラント	鋼材	ton			
	耐火物	m ³			m ³		耐火物	m ³			
* 年間8000時間稼動			* 年間8000時間稼動			* 年間8000時間稼動					
<用役>			<用役>			<用役>					
処理量	単位	数量	処理量	単位	数量	処理量	単位	数量			
電力	KWh/day	3.00	電力	KWh/day	3,600	電力	KWh/day	18,000			
A重油	l/hr	31.1	石炭	kg/day	11,112	石炭	kg/day	60,000			
電力	KWh/day	3.600	添加剤	バインダー	kg/day	添加剤	HCl(35%)	kg/day			
				珪石	kg/day		珪石	kg/day			
<プラント入出力>			<プラント入出力>			<プラント入出力>					
入力	項目	単位	数量	入力	項目	単位	数量	入力	項目	単位	数量
	水洗回収物	t/day	13.3		水洗回収物	t/day	37.0		原料	t/day	330
出力	脱塩素鉱	t/day	10.4		石炭	t/day	11.1		石炭	t/day	60.0
	脱塩素煙灰	t/day	2.92		添加剤	t/day	6.24		添加剤	t/day	69.0
				出力	粗酸化亜鉛	t/day	10.7		粗酸化亜鉛	t/day	75.1
					スラグ	t/day	23.8		スラグ	t/day	234
					他	t/day	19.8		他	t/day	150

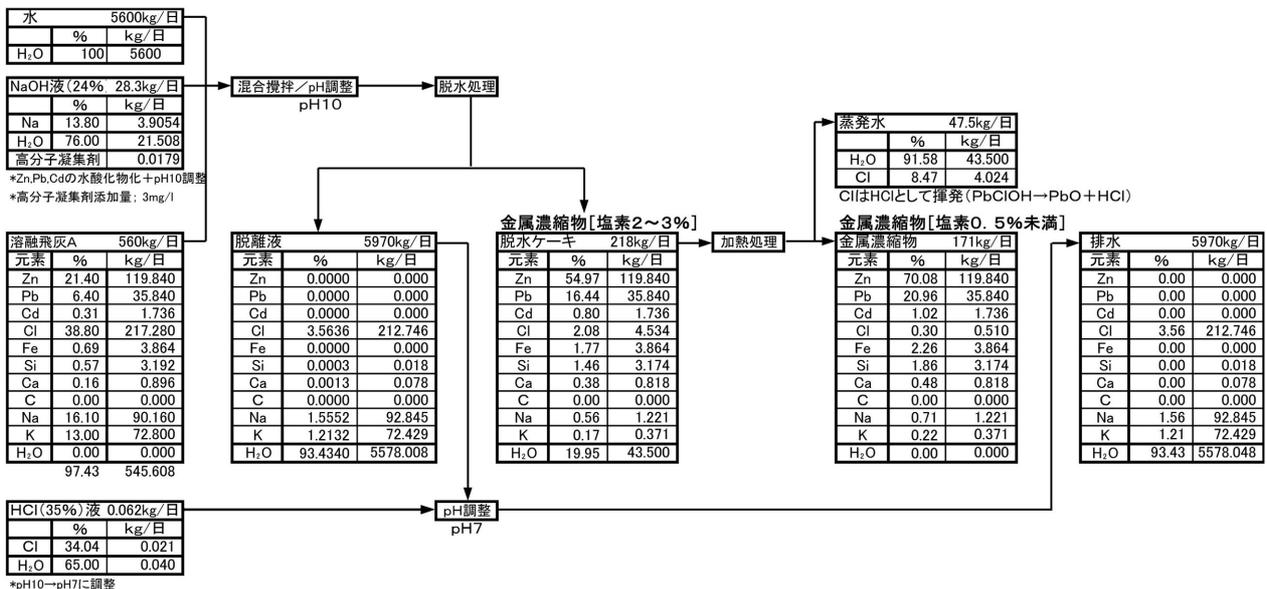


図 2 加熱装置付き水洗処理プロセスの物質収支フロー (飛灰A, 560kg/日)

表6 各処理プロセスにおけるエネルギー消費量と二酸化炭素排出量

処理	処理量 t/年	建設(15年償却)		運転	
		エネルギー消費量 Mcal/年	CO ₂ 排出量 kg-C/年	エネルギー消費量 Mcal/年	CO ₂ 排出量 kg-C/年
		水洗(現地、新設)	204	35,800	3,680
水洗+加熱(現地、新設)	204	56,200	5,570	441,000	24,400
水洗(前処理工場または製錬所、新設)	10,950	95,000	9,270	2,590,000	146,000
RK炉(製錬所、新設)	3,552	1,560	195	4,870,000	324,000
MF炉(前処理工場、既設)	110,000	0	0	138,000,000	13,600,000
MF炉(現地、新設)	12,333	8,800	856	25,700,000	2,520,000

処理	処理量 t/年	建設・運転合計		処理量(ton)当たり	
		エネルギー消費量 Mcal/年	CO ₂ 排出量 kg-C/年	エネルギー消費量 Mcal/t	CO ₂ 排出量 kg-C/t
		水洗(現地、新設)	204	240,000	15,000
水洗+加熱(現地、新設)	204	497,000	30,000	2,430	147
水洗(前処理工場または製錬所、新設)	10,950	2,680,000	155,000	245	14.1
RK炉(製錬所、新設)	3,552	4,870,000	324,000	1,370	91.3
MF炉(前処理工場、既設)	110,000	138,000,000	13,600,000	1,250	123
MF炉(現地、新設)	12,333	25,700,000	2,520,000	2,080	205

表7 ISP炉における原料の節約とエネルギー消費量および二酸化炭素排出量の低減

(a)亜鉛精鉱、鉛精鉱

精鉱	合計 100%	含有率(%)					
		Zn	Pb	Fe	Si	Ca	他
亜鉛精鉱	100	50.5	3	8.5	1	0.4	36.6
鉛精鉱	100	4.5	57.5	11.6	0.4	0.15	25.85

(b)回収物性状

ルート	鉱量 t/年	含有率(%)					
		Zn	Pb	Fe	Si	Ca	他
ルートA1	62.1	70.1	21.0	2.26	1.86	0.48	4.36
ルートB1	82.5	54.5	17.9	0.50	1.70	2.70	22.7

(c)鉱石節約量計算

ルート	含有量(t/年)		換算量(t/年)		
	Zn	Pb	亜鉛精鉱	鉛精鉱	総鉱量
ルートA1	43.7	13.1	85.0	18.3	103.3
ルートB1	44.9	14.8	87.1	21.1	108.2

(d)スラグ減少量

ルート	含有量(t/年)				換算量(t/年)				スラグ減少量 t/年
	Fe	Si	Ca	他	Fe	Si	Ca	他	
ルートA1	9.35	0.923	0.367	35.8	7.94	-0.23	0.07	33.13	42.95
ルートB1	9.86	0.96	0.38	37.3	9.44	-0.45	-1.85	18.6	27.2

(e)エネルギー・CO₂節約量

ルート	鉱石節約量(t/年)		エネルギー節約量 Mcal/年	CO ₂ 節約量 t-C/年	スラグ減少量 t/年	コークス減量 t/年	エネルギー節約量 Mcal/年	CO ₂ 節約量 t-C/年	エネルギー節約量 Mcal/年	CO ₂ 節約量 t-C/年
	亜鉛精鉱	鉛精鉱								
ルートA1	85.0	18.3	41,473	3.47	42.9	3.4	24,739	3.0	66,212	6.52
ルートB1	87.1	21.1	43,485	3.64	27.2	2.2	15,686	1.9	59,170	5.57

(f)原単位

分類	原単位名	エネルギー原単位 Mcal/t	CO ₂ 排出量原単位 t-C/t
輸送	亜鉛の海運	399	0.0339
	鉛の海運	413	0.0325
原料	コークス	7,200	0.886

地において水洗と加熱を組み合わせた処理のエネルギー消費量が多いことがわかる。これは、電気の利用によるものであり、脱塩素化を電気で行うとかなりのエネルギーが消費される。

(5) バージン原料の節約によるエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の低減(表7)

熔融飛灰からの回収物の成分は、A、Bのそれぞれのルートでほぼ同じ値であり、表7ではルートA1、ルートB1を代表として表示している。回収される亜鉛・鉛量に等しい量を含む亜鉛精鉱・鉛精鉱の量を計算した(表7(c))。そして、それらの鉱量が節約されたとして、海外から鉱石を輸送するときのエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の削減量を、表7(f)の海運原単位¹⁰⁾を用いて求めた。また、再利用することによるスラグの低減量を、回収物から生成するスラグ量および精製鉱から生成するスラグ量との差とした(表7(d))。このとき、スラグ量は原料に含有するFe、Si、Caに対するFeO₂、SiO₂、CaO量に残りの原料成分を足し込んだ値とした。そして、求めたスラグの低減量

を精製するときに必要なコークス量を節約量として、そのコークス量に対するエネルギー消費量と二酸化炭素排出量を求め低減量とした(表7(e))。結果は、B灰は原灰を含む分、精鉱量がA灰より多くなっている。逆にスラグ減量はA灰の方が多い。結果として、A灰の方がエネルギー消費量、二酸化炭素排出量が共に大きく低減された。

(6) 処理ルートごとのエネルギー消費量と二酸化炭素排出量(表8)

5つの処理ルートについて、輸送を含めた全体のエネルギー消費量、二酸化炭素排出量を求めた。排出量が節約される項目はマイナスの値で示している。

まず、飛灰Aの処理ルートについてみると、エネルギー消費、二酸化炭素排出量は、ルートA1、A2、A3の順で大きくなった。ルートA1は、熔融飛灰をそのままB市まで輸送し、水洗、脱塩素化とともに大型の施設で処理する。そのため他のルートに比べて、水洗処理および脱塩素化処理のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量は、輸送による値が大きな割合を占めた。水洗処理に関する値はルートA1

表8 処理ルートごとのエネルギー消費量と二酸化炭素排出量

項目		ton/day		
ごみ処理量(1焼却炉)		200		
焼却灰+飛灰		28.0		
溶融飛灰A		0.56		
溶融飛灰B		1.12		

ルート	処理・輸送	輸送量・処理量 t/年	エネルギー消費量 Mcal/年	CO2排出量 kg-C/年
ルートA1	輸送(A市→B市)[陸路]	204.4	39,221	3,074
	水洗(製錬所、新設)	204.4	50,053	2,889
	RK炉(製錬所、新設)	79.5	109,110	7,262
	ISP炉(製錬所、既設)	62.1	-66,212	-6.52
	合計		132,173	13,219
ルートA2	水洗(現地、新設)	204.4	239,768	15,005
	輸送(A市→B市)[陸路]	79.5	15,257	1,196
	RK炉(製錬所、新設)	79.5	109,110	7,262
	ISP炉(製錬所、既設)	62.1	-66,212	-6.52
	合計		297,924	23,457
ルートA3	水洗+加熱(現地、新設)	204.4	496,980	29,986
	輸送(A市→B市)[陸路]	62.1	11,923	934
	ISP炉(製錬所、既設)	62.1	-66,209	-6.52
	合計		442,694	30,914
ルートB1	輸送(A市→C市)[陸路]	408.8	128,947	10,106
	輸送(A市→C市)[海路]	408.8	61,811	3,499
	水洗(前処理工場、新設)	408.8	100,105	5,779
	MF炉(前処理工場、既設)	283.9	354,890	35,015
	輸送(C市→B市)[海路]	82.5	17,549	993
	ISP炉(製錬所、既設)	82.5	-59,170	-5.57
	合計(A→C)[陸路]		542,320	51,887
合計(A→C)[海路]		475,184	45,280	
ルートB2	水洗(現地、新設)	408.8	100,105	5,779
	MF炉(現地、新設)	283.9	591,003	58,111
	輸送(A市→B市)[陸路]	82.5	15,824	1,240
	ISP炉(製錬所、既設)	82.5	-59,170	-5.57
	合計		647,762	65,124

が最も小さい値となったが、これは水洗処理が電気の利用に対してスケールメリットがあるため、一括して大量処理の方が消費量が少ないという理由による。ルートA3の加熱処理は電気を利用しており、その分のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量が多くなった。

次に飛灰Bであるが、亜鉛、鉛濃度を高めるためにMF炉を通す必要があり、福岡県にある既存のMF炉を使う場合と、A市に隣接してMF炉を建てる場合を比較した。結果は、既存のMF炉を使用する場合(ルートB1)が新設する場合(ルートB2)に比べて、エネルギー消費量と二酸化炭素排出量がともに少なくなった。これは、既存のMF炉は生産規模が大きく、処理量当たりのエネルギー消費量と二酸化炭素排出量が小さいためである。また、既存施設の建設に伴うエネルギー消費量と二酸化炭素排出量を考えていないことも影響する。さらに、ルートB1では溶融飛灰を海上輸送することで、エネルギー消費量で0.876倍、二酸化炭素排出量で0.876倍となっており、海上輸送が有利であることがわかった。このように、ルートB1は輸送によるエネルギー消費量と二酸化炭素排出量が大きいものの総合的に見ると新設よりも良い結果となった。ただし、ここでの評価にはコストが入っておらず、MF炉を新設するときの費用については検討していない。

最後に、飛灰A、飛灰Bの違いであるが、飛灰中の重金属の品位が低い場合には、乾式プロセスによって品位を高める必要があり、エネルギー消費量と二酸化炭素排出量が飛灰Aの全てのルートでの値より大きかった。既存の施設を利用する場合(ルートB1のA-C市間を海運)ではルー

トA1のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量がそれぞれ3.60倍、3.43倍程度となった。ただし、ルートA3とルートB1ではエネルギー消費量についてはルートB1で1割程度の違いであった。以上のことから、溶融飛灰中の重金属濃度を高くすれば、濃縮の必要がなくなり、重金属回収におけるエネルギー消費量と二酸化炭素排出量は低くなることがわかった。従って、溶融炉において溶融飛灰量が少なく重金属濃度が高い溶融技術が望まれることになる。

なお本研究では水抽出・乾式濃縮法を用いたが、亜鉛、鉛の品位が低い場合には、他の重金属の抽出方法、たとえば酸による湿式の抽出方法についても同時に比較検討してみる必要があると考えられる。

最後に、飛灰からの重金属を回収するためには、生産系の社会資本を活かして、そのための前処理を集約して大型化することにより、より少ないエネルギー消費量と二酸化炭素排出量で重金属回収が実現できるものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、動脈系における社会資本(ここでは、非鉄製錬メーカ所有の施設)を積極的に利用することで、重金属の再資源化がエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の節減という点において有効であることを、定量的に示すことを試みた。その結果、溶融飛灰を直接製錬所に持ち込んで、規模の大きい前処理で溶融飛灰を一括して処理することが、エネルギー消費量と二酸化炭素排出量の低減に有効であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 企画特集 いよいよ実用化へ、ガス化溶融炉、地球環境、Vo.31, No.9 (2000), pp.83~96
- 2) 社団法人日本金属学会、非鉄金属製錬、丸善、(1986)
- 3) 厚生省生活衛生局水道環境部、廃棄物処理の伴う除去物質の資源化・再生利用システム技術開発、(1996)
- 4) 中原啓介、仲尾 強、須藤雅浩、品川拓也、明石哲夫、溶融飛灰からの有価金属の回収、第18回全国都市清掃研究発表講演論文集、(1997)、pp.104~106
- 5) 明石哲夫、中原啓介、仲尾 強、古角雅行、電気抵抗式溶融による飛灰処理技術の開発、第7回廃棄物学会論文集(1996)、pp.430~432
- 6) 社団法人環境情報科学センター編、ライフサイクルアセスメントの実践 環境負荷低減を目指して、化学工業日報社(1996)、p.47
- 7) 藤原健史、武田信生、櫻田榮一、河端博昭、溶融飛灰を対象とした重金属回収プロセスのLCA、エネルギー・資源学会、第17回研究発表会講演論文集(1998)、pp.275~280
- 8) セラミック工学ハンドブック、日本セラミックス協会(1989)、p.1619
- 9) 一瀬正寛、河田 尚、寺岡泰治、児玉芳実;ごみ焼却工場のエネルギープラントとしての位置づけ、都市清掃、第47巻23号(1994)、pp.623~628
- 10) 基礎素材のエネルギー解析調査報告書、化学経済研究所、(1993)