

マテリアルフローデータに基づいた

焼却灰の金属濃度低減と金属類回収可能性の検討

A STUDY OF POSSIBILITY OF METAL REDUCTION IN INCINERATION ASH AND HEAVY METALS RECOVERY BASED ON MATERIAL FLOW DATA IN JAPAN

都市リサイクル工学分野 阪井 幸太

近年、金属の枯渇が危惧されているが、廃家電製品等に含まれる資源に着目すれば我が国は世界有数で、適切な回収が求められる。そこで、金属類の用途と使用量、製品のライフサイクルを整理し、製品の分別回収により金属回収できる金属と分別回収が困難で焼却灰に移行する金属に分類した。次に、整理したデータへのモデル式化を行い、焼却灰への移行量を推定し、リサイクルを優先すべき製品を提示した。最後に、提示された製品のリサイクルが金属資源に与える影響を考察した。

Recently, depletion of heavy metals is concerned, but there are lots of heavy metals in disposed electronic product in our country, so appropriate recovery is required. In this study, we arranged use, consumption and product's lifecycle data of each metal, and classified into 2 groups, which are 'metal which should be recovered from product after separated collection' and 'metal which should be recovered from incineration ash'. Then, we estimated the amount of metal which get mixed to incineration ash and clarified the product which should be recovered on a priority basis by making model equation. Finally, we considered the effect of metal resources by recovery of products which should be recovered.

1. 研究背景・目的

近年、多くの重金属元素の枯渇がレアメタル問題として危惧されている。中国、インドなどをはじめとした世界経済の発展を背景に資源需要が拡大し、特にレアメタルやレアアースは多様な機能を有していることから消費は世界的な規模で増大した。しかし、地球上の資源は有限であるために、資源国において資源ナショナリズムの台頭や一部の資源国では輸出抑制を行う等、将来需給不足などの問題が懸念されている。一方で、都市で大量に廃棄される家電製品などの中に存在するレアメタルなどの有用な資源（都市鉱山）に関して、わが国は世界有数である。レアメタルなどは使用量が少ない上に、特定の製品に集中的に利用されていることから効率的な回収のためには、製品を分別回収した上で個別に抽出することが望ましく、経済産業省、環境省が携帯電話などの小型電子機器を回収しレアメタルの資源確保に取り組んでいる¹⁾。

しかし、現実には、回収コストや分離技術の問題から、回収されることなく、廃棄物として、中間処理を経て最終処分されているものも多いと考えられる。それらの金属類は、直接、焼却・溶融されたり、破碎された後に焼却・溶融されて、焼却・溶融残渣中に濃縮

されることが報告されており、飛灰からの回収が提案されている²⁾³⁾。また、多くの製品に広く薄く用いられている金属類であれば、焼却残渣から回収する意義もあると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、金属類の用途と使用量のデータを整理し、製品からの金属類の回収ができる金属と製品からの回収が困難で焼却灰に移行する可能性の高い金属に分類した。次に、より詳しく検討するために整理したデータに対して、モデル式化を行い、金属の焼却灰への移行量を推定するとともに実際に焼却灰に移行する製品を明らかにし、どの製品のリサイクルを優先すべきかを検討した。最後に、リサイクルすべき製品を提示した上で、それらのリサイクルが金属資源と焼却灰の金属量にどの程度影響を与えるのかを考察した。

2. 本研究プロセス

2.1. 研究概要

図-1に本研究プロセスを示す。本研究では、まず対象金属を「製品から回収できる金属」、「焼却灰から回収しなければならない金属」に分類した。その後、「製品から回収できる金属」に対して、どの製品からリサイ

クルすれば効果的であるのかをモデル式を用いて検討した。最後に、金属ごとに検討したリサイクルすべき製品を実際にリサイクルした時の金属資源に与える効果を予想し、考察した。

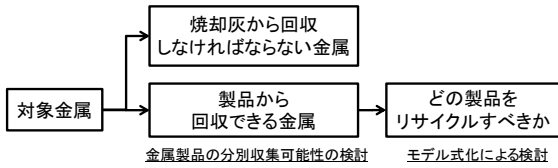


図-1 本研究プロセス

2. 2. 焼却残渣からの金属回収可能性の検討

2. 2. 1. 対象金属

JOGMEC でデータが公開されている Cu、Zn、Cd、Pb、B、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Ga、Se、Y、Zr、Nb、Mo、Pd、In、Sb、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yd、Lu、Ta、Re、W、Pt、Tl、Bi の 41 金属を対象金属とした。

2. 2. 2. 研究方法

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) で公表されている金属類・レアメタル類のマテリアルフローの情報 (2010 年度の情報) ⁴⁾ を元に、各金属類・レアメタル類の埋蔵量、可採年数、需要量、主な用途、利用される形態、用途ごとのリサイクルの現状を整理した。その例 (鉛) を表-1 に示す。

表-1 マテリアルフローデータの整理の例 (鉛)

埋蔵量 (可採年数)	主な用途	形態	需要量		リサイクル の現状		回収の 可能性		灰への 混入率 (%)
			t	%	方法	%	製品	灰	
170,000 千トン (24年) Pb	蓄電池	自動車・ 産業用蓄電池	226,000	100					3
		ガラス製品・ 塗料・他	214,000	95	リサイクル	95	◎	○	
	無機薬品	5,000	2			×	○		
	管・板	0	0	リサイクル	100	◎	○		
	はんだ	5,000	2			×	○		
	その他	放射線保護	2,000	1			○	○	

表中の「回収の可能性」欄の中の「製品」欄は、各製品中の当該金属のリサイクルが、既に行われているものを「◎」(表中のピンク色)、可能であると思われるものを「○」(表中の薄ピンク色)、不可能であると思われるものを「×」(表中の水色)、判断できないものを「？」で示している。また「回収の可能性」欄の中の「灰」欄は、使用済み製品の分別回収がなされたと仮定した上で、焼却・溶融灰に混入してくる可能性があるもの、あるいは、回収するならば、焼却・溶融灰から回収するのが現実的であると思われるものに○を付けている。表-1 の鉛の例では、蓄電池、管・板はすでにリサイクルされているもの (表中の◎の用途)、その他の用途である放射線保護用の鉛は現在リサイクルが行われていないが、製品として分別収集し、リサイクルできると判断されたもの (表中の○の用途)、無機薬品やはんだは分別収集することが不可能であると判断し、焼却灰に混入してしまうと予想されるもの (表中の×) であった。また、「灰への混入率」欄 (表中の

緑色) は全需要量中の「回収の可能性」欄の中の「灰」欄の○が付いたものの割合である。

上記の鉛の例のように対象金属に対して解析を行い、焼却灰への混入率を基準として「製品から回収できる金属」と「焼却灰から回収しなければならない金属」に分類した。

2. 3. モデル式化によるマテリアルフローデータ解析

2. 3. 1. 対象金属

ベースメタルの Cu、Zn、Pb、Al、Fe とレアメタルの Ag、Au、Cd、Co、Hg、In、Se、Sb、Ti の 14 金属を対象金属とした。

2. 3. 2. 研究方法

JOGMEC によるマテリアルフローデータを金属ごとに生産量、需要量、輸入量、輸出量、国内消費量、リサイクル率、廃棄物処理量、焼却率、焼却灰に混入する金属量に整理し、それらに変数を振り、モデル式化を行った。図-2 に例 (鉛) を示す。また表-2 に語句の意味を示す。

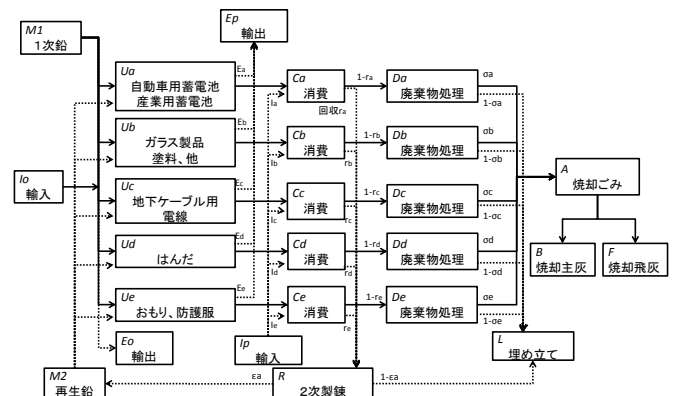


図-2 マテリアルフローデータのモデル式化の例 (鉛)

表-2 語句の意味

M1	1次鉛生産量	σ	焼却率
M2	再生鉛生産量	A	焼却灰に混入する金属量
U	製品の需要量	U _j :j=a	自動車用蓄電池
C	製品の国内消費量	U _j :j=b	ガラス製品・塗料
D	廃棄物処理量	U _j :j=c	地下ケーブル電線
E	輸出量	U _j :j=d	はんだ
I	輸入量	U _j :j=e	おもり・防護服
r	リサイクル率		

上記マテリアルフロー図より、A (焼却灰に混入する金属量) は以下のように表すことができる。

$$A = D_a \cdot \sigma_a + D_b \cdot \sigma_b + D_c \cdot \sigma_c + D_d \cdot \sigma_d + D_e \cdot \sigma_e = \sum (D_i \cdot \sigma_i) \dots (1)$$

$$\text{また、 } D_i = (1 - r_i) \cdot C_i, \quad C_i = U_i + I_i - E_i$$

ゆえに式 (1) は

$$A = (U_a + I_a - E_a) \cdot \sigma_a \cdot (1 - r_a) + (U_b + I_b - E_b) \cdot \sigma_b \cdot (1 - r_b) + (U_c + I_c - E_c) \cdot \sigma_c \cdot (1 - r_c) + (U_d + I_d - E_d) \cdot \sigma_d \cdot (1 - r_d) + (U_e + I_e - E_e) \cdot \sigma_e \cdot (1 - r_e) = \sum (U_i + I_i - E_i) \cdot \sigma_i \cdot (1 - r_i)$$

となる。以上より、(焼却灰に混入する金属量)は $\{(需要量) + (輸入量) - (輸出量)\} \cdot (焼却率) \cdot (1 - リサイクル率)$ と表すことができる。

以上のモデル式を用い、金属ごとにリサイクル率を変えた時の焼却灰に混入する金属量の影響を算出することで、どの製品をリサイクルすれば効果的であるのかを検討した。

2. 4. 各種製品リサイクルが金属資源に与える影響

金属ごとにリサイクルすべき製品を検討した後、その中で代表的な製品である下記の3点を挙げ、それらのリサイクルを行うと、金属資源と焼却灰濃度にどのような影響を与えるのかを評価した。

1) 家電

家電の再資源化に関する法律である家電リサイクル法は2001年に施行された。施行後、環境省では家電リサイクル法により再商品化された鉄・銅の重量のデータを公表¹⁾しており、本研究ではそのデータを用いて家電リサイクル法が与えた焼却灰に混入する鉄・銅量への影響を示した。

2) 小型家電

小型家電の再資源化に関する法律である小型家電リサイクル法は2013年に施行された。しかし、小型家電リサイクル法の取り組みに関する決定権は市町村に委ねられており、現状では大半の市町村が取り組んでいない⁵⁾。本研究では小型家電の内、生産量、金属含有量が多いと考えられる製品である携帯電話、ゲーム機器、携帯音楽プレーヤー、デジタルカメラ、ビデオカメラ、DVDプレーヤー、カーナビの7品目選出し、それらがリサイクルされたと仮定したときの金属類の再利用量と焼却灰に混入する金属量への影響を推測した。

3) 電池

電池は2014年現在、リサイクル法は施行されていない。本研究では、電池に使用されている金属とその種類を提示し、特にリサイクルすべき電池を提示した。

3. 結果と考察

3. 1. 焼却残渣からの金属回収可能性の検討

JOGMECで公表されている金属類・レアメタル類のマテリアルフローの情報から各金属の灰への混入率を

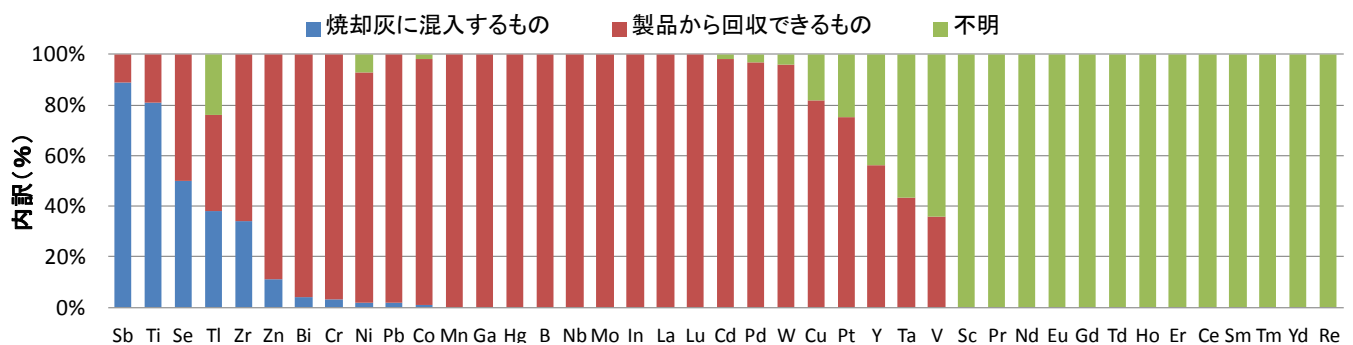


図-3 金属ごとの灰への混入率と製品から回収できるものの割合

まとめた結果を図-3に示す。また、「製品から回収できる金属」、「焼却灰から回収しなければならない金属」に分類した結果を表-3に示す。

表-3 金属の分類結果

焼却残渣から回収しなければならない金属	Ti, Se, Sb,
製品を分別回収して回収すべき金属	B, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Hg, Se, Y, Nb, Mo, Pd, Cd, In, La, W, Pt, Pb, Tl, Zr, Bi
わからない・その他	Sc, V, Ce, Pr, Nd, Eu, Gd, Td, Dy, Ho, Er, Tm, Sm, Yd, Lu, Ta, Re

焼却灰に混入し、焼却残渣から回収しなければならない金属は主に塗料・インキに使用されているTi、主に着色料や化学薬品に使用されているSe、主に難燃助剤使用されているSbであった。特にSbは年間需要量が7,000トン、可採年数が16年であることから、焼却残渣からのSbの回収は非常に重要であると考えられた。

3. 2. モデル式化によるマテリアルフローデータ解析

作成したモデル式の精度を検証するために、実際の焼却灰に金属量のデータとモデル式により算出された焼却灰に混入する金属量の比較を行った。その結果を図-4に示す。

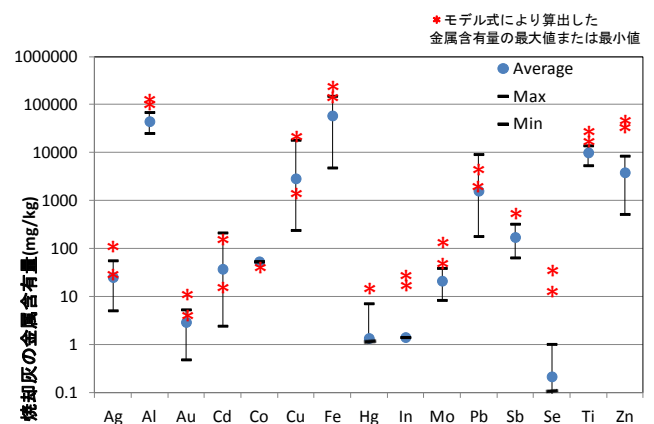


図-4 モデル式の精度検証

Ag、Au、Cd、Co、Cu、Pbは精度が高く、実際の焼却灰の金属含有量データとモデル式により算出された金属含有量はほぼ同じであった。一方で、Al、Fe、Hg、In、Mo、Sb、Se、Ti、Znは実際の焼却灰の金属含有量

より、モデル式で算出された金属含有量の方が高いという結果となった。その理由は、実際の焼却灰のデータは都市ごみの一般廃棄物焼却場のデータであり、モデル式での解析では産業廃棄物と一般廃棄物の区別をつけず、全て一緒に処理されていると仮定していることであると推測された。

モデル式を用いて、金含有製品のリサイクル率を変化させたときの焼却灰の金属量への影響を示したものを図-5に示す。また、リサイクル率をどのように変化させたかを表-4に示す。

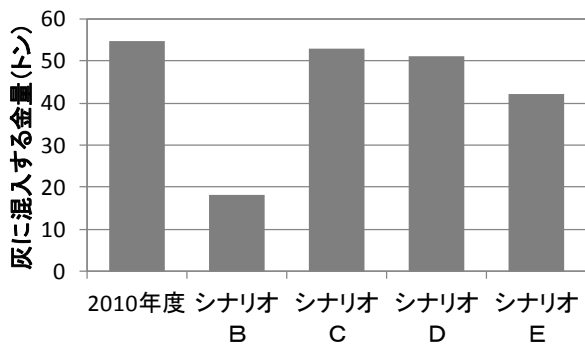


図-5 マテリアルフローデータのモデル式化の例（金）

表-4 リサイクル率の増減（金）

	リサイクル率	灰に混入するAu量
2010年度（現状）	電気通信器・機械部品用: 40%、メッキ用: 40%、 歯科・医療用: 80%、その他(消費): 40%	
シナリオB	電気通信器・機械部品用: 40%→100%	67%減
シナリオC	歯科・医療用: 80%→100%	4%減
シナリオD	メッキ用: 40%→100%	7%減
シナリオE	その他(消費): 40%→100%	23%減

電気通信器・機械部品用のリサイクル率を100%と仮定したとき（シナリオ B）、焼却灰に混入する金は2010年度と比較して67%減少した。歯科・医療用のリサイクル率を100%と仮定したとき（シナリオ C）、焼却灰に混入する金は2010年度と比較して4%減少した。メッキ用のリサイクル率を100%と仮定したとき（シナリオ D）、焼却灰に混入する金は2010年度と比較して7%減少した。その他(消費)のリサイクル率を100%と仮定したとき（シナリオ E）、焼却灰に混入する金は2010年度と比較して23%減少した。以上より、電気通信器・機械部品用を分別収集し、リサイクルすることが最も効果的であると予想された。また、電気通信器・機械部品用の用途は大部分が携帯電話や小型家電に使用されており、2013年度で携帯電話の回収率は15%程度⁶⁾であることから、携帯電話の分別収集が最も効果的な取り組みであると考えられた。

モデル式を用いて、鉛含有製品のリサイクル率を変化させたときの焼却灰の金属量への影響を示したものを図-6に示す。また、リサイクル率をどのように変化させたかを表-5に示す。

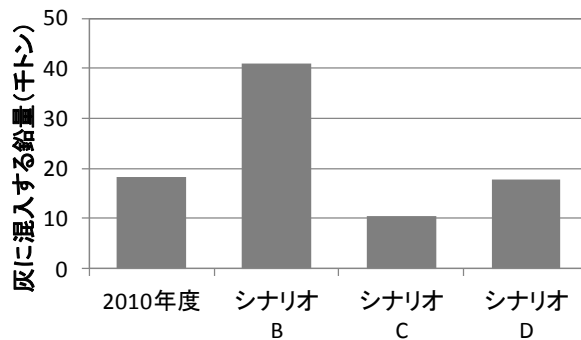


図-6 マテリアルフローデータのモデル式化の例（鉛）

表-5 リサイクル率の増減（鉛）

	リサイクル率	灰に混入するPb量
2010年度（現状）	鉛蓄電池: 95% 錘・防護服: 0%	
シナリオB	鉛蓄電池: 95%→80%	225%増
シナリオC	鉛蓄電池: 95%→100%	42%減
シナリオD	錘・防護服: 0%→50%	2%減
シナリオE	その他(消費): 40%→100%	23%減

鉛蓄電池のリサイクル率を95%から80%に下げると（シナリオ B）、焼却灰に混入する鉛の量は2010年度と比較して225%上昇した。鉛蓄電池のリサイクル率を100%にすると（シナリオ C）、焼却灰に混入する鉛の量は2010年度と比較して42%減少した。錘、防護服のリサイクル率を50%にすると（シナリオ D）、焼却灰に混入する鉛の量は2010年度と比較して2%減少した。以上より、鉛蓄電池のリサイクル率が焼却灰に混入する鉛量に大きな影響を与えており、鉛蓄電池のリサイクルが最も効果的な取り組みであると考えられた。

以上の解析を他の金属に行った結果を表-6に示す。

表-6 金属ごとのリサイクルすべき製品

家電	In	液晶透明電極
	Fe	家電用鋼板、自動車鋼板
	Zn	亜鉛めっき(家電、自動車、建築)
	Al	機械・輸送機器
小型家電	Ag	携帯電話、コネクタ
	Au	携帯電話
	Cu	伸銅品(半導体、端子・コネクタ、基板など)
電池	Pb	鉛蓄電池
	Cd	ニッカド電池
	Co	リチウムイオン電池、ニッケル水素電池
その他	Hg	研究用試薬
焼却灰	Ti	焼却灰
	Se	焼却灰
	Sb	焼却灰

インジウム、鉄、亜鉛、アルミニウムは家電のリサイクルが効果的であると考えられた。銀、金、銅は小型家電のリサイクルが効果的であると考えられた。鉛、カドミウム、コバルトは電池のリサイクルが効果的であると考えられた。水銀は研究用試薬のリサイクルを強化する必要があった。以上より、リサイクルすべき製品は大きく家電、小型家電、電池、焼却灰に分けら

れた。

3. 3. 各種製品リサイクル法が金属資源に与える影響

3. 3. 1 家電リサイクル法

家電リサイクル法によって再商品化された鉄と銅の量を図-7、図-8に示す。

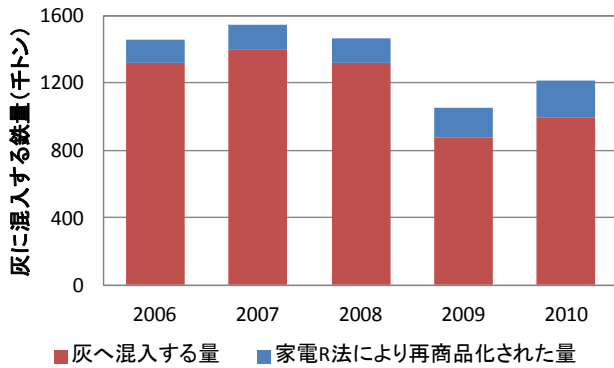


図-7 家電リサイクル法が焼却灰の鉄量に与えた影響

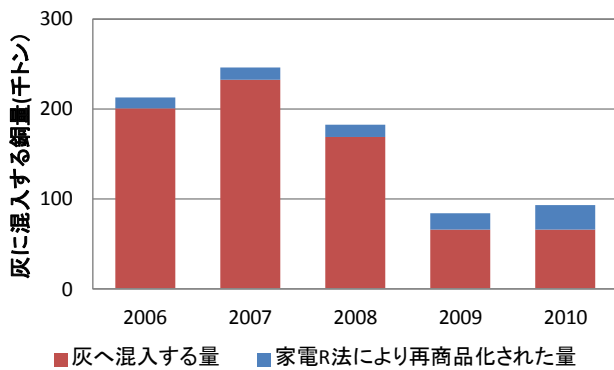


図-8 家電リサイクル法が焼却灰の銅量に与えた影響

家電リサイクル法により再商品化された鉄・銅の量は年々増加している。2008年度に乾燥機が対象品目に追加されたことや、地上波アナログ放送やエコポイント制度により、テレビの買い替えが進んだこと、生産者がリサイクルしやすい製品の開発に取り組んでいることなどが影響を与えていると考えられた。

鉄について、2006年度は家電リサイクル法により灰に混入する鉄量の10%である143千トンが再商品化され、2010年度には18%である219千トンが再商品化されたと予想された。

銅について、2006年度は家電リサイクル法により灰に混入する銅量の6%である12千トンが再商品化され、2010年度には30%である28千トンが再商品化されたと予想された。以上より、家電リサイクル法は、対象品目が4品目であるにも関わらず、鉄、銅の再資源化に非常に効果的であった。

3. 3. 2 小型家電リサイクル法

対象品目7品目に含まれると推測した金属量を表-7に示す。

表-7 対象品目に含まれる金属量

	対象品目の金属含有量合計(t)	国内消費量'2010(t)	対象品目の金属含有量合計/国内消費量'2010
Ti	47	130,000	0%
Se	0	205	0%
In	0	1,040	0%
Sb	21	5,420	0%
Al	1,170	3,240,000	0%
Fe	1,700	50,000,000	0%
Cu	3,000	811,000	0%
Zn	257	372,000	0%
Ag	33	1,600	2%
Cd	0	537	0%
Au	6	121	4%
Hg	0	3,580	0%
Pb	172	162,000	0%
Cr	197	346,000	0%
Mn	20	419,000	0%
Ni	236	33,900	1%
Ga	0	130	0%
Ge	0	47	0%
Mo	4	5,080	0%
Pd	1	91	1%
ND	24	4,650	1%
Ta	4	460	1%
W	8	3,100	0%
Bi	2	313	1%
Sn	421	33,700	1%
計	6,530	54,700,000	0%

黄色で示されたレアメタルの含有量が高く、金で国内消費量の4%、銀で国内消費量の2%が対象品目の中に含まれていると予想された。レアメタルは特定の製品に高濃度に使用されることが多く、小型家電にも多く使用されていることから、対象品目7品目の回収だけでもレアメタルの回収に非常に効果的であると考えられた。

次に、対象品目7品目がリサイクルされたと仮定した時の、焼却灰中の銀、金量に与える影響を図-9、図-10に示す。

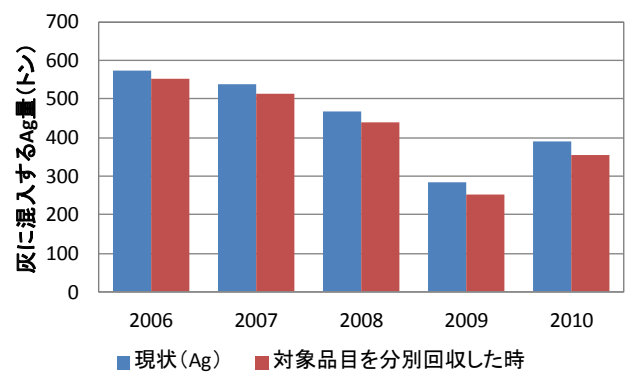


図-9 対象品目のリサイクルが焼却灰の銀量に与える影響

対象品目を全て分別回収できたと仮定した時、現状と比較して焼却灰に混入する銀量は年々減少しており、2010年度で8%である33t減少した。つまり、33tの銀を再利用できるということを意味し、これは2010年度の国内消費量の2%程度であった。以上より、金の再資源化について、対象品目の分別回収は非常に効果的

なものであると予想された。

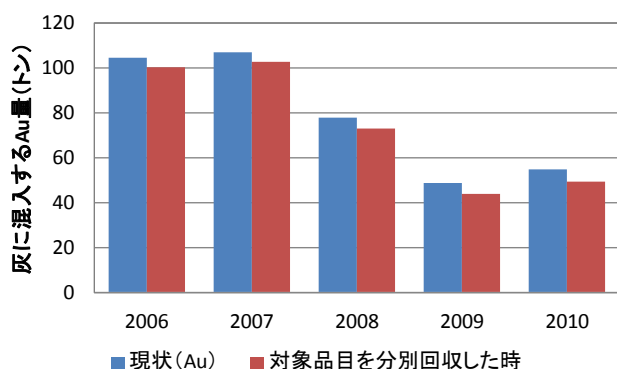


図-10 対象品目のリサイクルが焼却灰の金量に与える影響

対象品目を全て分別回収できたと仮定した時、現状と比較して焼却灰に混入する金量は年々減少しており、2010年度で10%である5.3t減少した。つまり、5.3tの金を再利用できるということを意味し、これは2010年度の国内消費量の4%程度であった。以上より、対象品目の分別回収は非常に効果的なものであると予想された。

3.3.3 電池のリサイクル

電池に使用される金属とその種類を表-8に示す。

表-8 電池に使用されている金属とその種類

	用途	国内電池消費量(t)	灰に混入する金属量(t)	R率
Pb	鉛蓄電池	150,000	7,600	95%
Cd	ニッカド	210	170	18%
Co	リチウムイオン	600	180	70%
Sb	アンチモンバッテリー	620	130	80%

鉛蓄電池、アンチモンバッテリーは主に自動車に使用され、自動車リサイクル法で回収した自動車から電池の分別回収を行っているため、リサイクル率も95%と高い値になっていた。リチウムイオン電池は携帯電話、ノートパソコンなど特定の用途に使用されており、リサイクル率は70%であった。携帯電話やノートパソコンが対象品目である小型家電リサイクル法に取り組む市町村が多くなれば、リチウムイオン電池の回収率も増加すると予想された。一方、ニッケル・カドミウム電池は唯一乾電池型（リチウムイオン電池も乾電池型が存在するが、数は少ない）であり、特に決められた用途に使われるものではない。そのため、廃棄の際、不燃ごみとして廃棄されることから、回収率は18%であった。また、不特定の用途に使用されるため、特定の製品と一緒に回収することが難しいことから、ニッケル・カドミウム電池はそれ単体の分別回収が必要であると考えられた。

4. まとめ

- 1) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）で公表されているマテリアルフローのデータを整理し、製品ごとに分別回収ができるかどうかを検討した。その後、金属ごとに焼却灰に混入する割合を算出し、「焼却残渣から回収すべき金属」、「製品を分別回収して回収すべき金属」の二つに分類した。
- 2) 「焼却灰から回収すべき金属」はTi、Se、Sbの3つの金属であった。
- 3) 可採年数と年間需要量を考慮し、焼却灰から回収の有用性が高いと考えられたのはSbであった。
- 4) JOGMECのデータを基にモデル式化を行い、金属ごとに焼却灰への移行量を推定するとともに、どの製品をリサイクルすべきかを検討した。
- 5) インジウム、鉄、亜鉛、アルミニウムは家電のリサイクルが効果的であると考えられた。
- 6) 銀、金、銅は小型家電のリサイクルが効果的であると考えられた。
- 7) 鉛、カドミウム、コバルトは電池のリサイクルが効果的であると考えられた。
- 8) 特にリサイクルを優先すべき製品であると考えられた家電、小型家電、電池をリサイクルした時の焼却灰への金属濃度と金属資源に与える影響を考察した。
- 9) 家電リサイクル法により、2010年度で灰に混入する鉄の量は18%、灰に混入する銅の量は30%減少していると予想された。
- 10) 小型家電7品目に含まれている金属量は特にレアメタルが高く、金で国内消費量の4%、銀で国内消費量の2%が含まれていた。
- 11) 対象品目7品目を分別回収すると、2010年度で銀が33t、金が5.3t回収できると予想された。
- 12) 乾電池型が主なニッケル・カドミウム電池のリサイクル方法の検討が必要であると考えられた。

（参考文献）

- 1) 環境省 HP (<http://www.env.go.jp/>)
- 2) 肴倉宏史：溶融飛灰・溶融メタルの処理・処分と資源化の現状に関する調査、都市清掃。
- 3) 大迫政浩、肴倉宏史：将来の循環型社会像からみた溶融飛灰・溶融メタルの山元還元の意義、日本機械学会、2009
- 4) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）HP (<http://mric.jogmec.go.jp/>)
- 5) 藤田実花：農林環境課：小型家電リサイクル法の経緯と課題（2013）
- 6) モバイル・リサイクル・ネットワーク HP (<http://www.mobile-recycle.net/>)

討 議 等

◆討議 [内田敬 教授]

アンチモンは代替物質があるため、リサイクルが行われていないのではないかと。また、代替物質がなければ、リサイクルより代替物質の開発を進めるべきではないのか。

◆回答：アンチモンの全需要量の80%を占める難燃助剤の代替物質は2014年現在開発されていません。難燃剤は多くの家電をはじめ、パソコン、携帯電話、デジタルカメラ等の電子基板や外枠、カーテンなどの繊維製品にも幅広く使用されています。その難燃剤によって人命被害を防止しており、イギリス政府の推定によれば¹⁾、10年間で3000人以上の人命が救われていることから難燃剤は今後も需要が減少しないと考えられます。また、アンチモンを難燃剤の混和剤として臭素系又は塩素系難燃剤及びポリマーと組合せて使用することにより、難燃剤の使用量は少量に留まります。その利点として、省資源、母材の長寿命化、消費財の火災安全性の保証が挙げられ、現段階では、アンチモンの難燃助剤は必要不可欠な薬剤であります。また、アンチモンは有害性もあるので、代替物質が開発されたとしても適正な回収が求められると考えています。

1) 国際アンチモン協会 (IAOIA)

<http://www.nihonseiko.co.jp/environment/pdf/060418faq.pdf>

◆討議 [内田敬 教授]

焼却灰からの回収のコストはどのくらいなのか。

◆回答：焼却灰は多くの金属が低濃度で含まれているため、回収コストは低くなります。実際に、私が卒業論文で焼却飛灰・溶融飛灰からの金属回収を試み、コスト評価を行った結果を以下に示します。

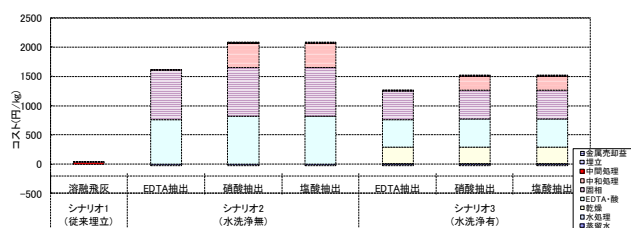


図 1-1 焼却飛灰・溶融飛灰の回収プロセスのコスト評価
焼却灰からの回収を検討する際、回収実験でかかる費用から金属売却益を引いた金額が回収コストとなります。抽出実験では、水洗浄→乾燥処理→溶媒による抽出→固相抽出による金属の分離→中和処理の流れを検

討しコスト評価を行いました。最も低コストで行うことができる水洗浄+EDTA抽出の場合、コストは1,424円/kgとなり、年間100万トン発生している焼却飛灰を考慮に入れると、年間140億円の出費が予想されます。ただし、社会情勢により回収した金属の価格が上昇すれば、トータルのコストは変わってくるので、一概には言えません。

◆討議 [内田敬 教授]

モデル式の精度はあっているのか。

◆回答：モデル式で算出した焼却灰中の金属量と廃棄物資源循環学会の過去8年分(2003年度から2010年度)で公表された焼却灰の金属量を比較し、本モデル式の精度検証を行いました。以下に結果を示します。

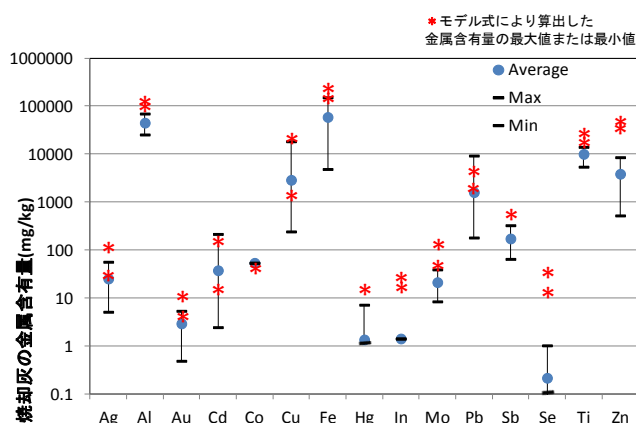


図 1-2 モデル式の精度検証

Ag、Au、Cd、Co、Cu、Pbは精度が高く、実際の焼却灰の金属含有量データとモデル式により算出された金属含有量はほぼ同じでありました。一方で、Al、Fe、Hg、In、Mo、Sb、Se、Ti、Znは実際の焼却灰の金属含有量より、モデル式で算出された金属含有量の方が高いという結果となりました。Al、Feは処理施設で分離されている影響を考慮していないことが原因として挙げられました。Hgは試薬、塗料、顔料の需要量が全需要量の60%以上を占めており、そのリサイクル率は0%で金属含有量データを算出しました。しかし、実際の試薬のリサイクル率は90%である一方で、試薬のみの需要量データを得ることができませんでした。試薬のみの需要量データを調べ、それを反映させると、マテリアルフローデータ解析の値が減少すると考えられました。Mo、Seは輸出入量データが得られなかったため、それぞれの値を0とし、解析を進めましたが、それらを考慮するとマテリアルフローデータ解析の値が減少すると考えられました。Tiは、発電所、建築物に使用されているものは、まだ使用済み製品として廃

棄されていないため、それらを考慮する必要があると考えられました。

また、モデル式では、廃棄された製品は全て焼却処理されていると仮定しているため、廃棄物の直接埋立を考えていないこと、また実際の焼却灰のデータは都市ごみの一般廃棄物焼却場のデータであり、モデル式での解析では産業廃棄物と一般廃棄物の区別をつけず、全て一緒に処理されていると仮定している点などが大きな課題点であり、それらの知見をより詳しく調べる必要があります。特に産業廃棄物の焼却灰のデータを充実させることが重要であると考えています。

◆討議 [滝澤重志 准教授]

焼却灰からの回収は、製品からの回収と比較して効率的ではないのはなぜか。

◆回答：焼却灰とは、様々な製品が混ざり合った状態で焼却処理された後に発生するものであり、焼却灰には非常に多様な金属が低濃度で含まれています。鉄は焼却処理をしても単体に近い状態で存在しており、磁石を用いて回収もしやすく、焼却後の回収にも一定のメリットがありますが、鉛やアンチモンなどの金属は化学反応によって塩化物などになり、回収するためには化学的なプロセスが必要になります。一方で、個々の製品に含まれている製品は、焼却灰と比較して限られた金属が高濃度で含まれています。以上より、ターゲットとなる金属が高濃度、高純度で含まれる製品を分別収集し、リサイクルを行うことが最も効果的であり、分別収集ができない用途が多く存在する金属に対しては焼却灰からの回収を検討するべきであると考えています。