

# ホタテガイ中腸腺由来吸着剤による廃電子基板からの貴金属回収技術

富田 恵一, 若杉 郷臣

## Noble Metals Recycle from Waste Printed Circuit Board Using Mid-Gut Grand of Scallop

Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI

### 抄 録

小型家電廃棄物等の電子基板に含有する金、銀等の貴金属を対象にして、仮焼、浸出、ホタテガイ中腸腺廃棄物由来吸着剤を用いた吸着、ばい焼の工程からなる貴金属回収処理フローを考案し、各工程の最適な処理条件を検討した。廃電子基板約2kgの処理では、全工程で金回収率は80%、回収物は重量比で約1/1,000に減量化し、回収物中の貴金属含有量は金と銀の合計で37%であった。

キーワード：貴金属、回収、ホタテガイ、電子基板、都市鉱山

### Abstract

Focusing noble metals such as gold and silver, which were involved on the printed circuit board in small home-electronic device wastes, new noble metal-recovery processing flows consisted of calcination, leaching, adsorption using the adsorbent originated from the mid-gut grand of scallop, and roasting were constructed and the most appropriate treatment conditions were determined in each of the processing. When a bench-scale recovery test from the printed circuit of about 2kg was carried out under the optimum conditions, recovery efficiency of gold was 80% in the entire process and recovered materials were decreased up to 1/1000 in mass for the printed circuit board. Then noble metal content implying total contents of gold and silver was 37% in the recovered materials.

KEY-WORDS : Noble metal, Recovery, Scallop, Printed circuit board, Mid-gut grand, Urban mine

### 1. はじめに

北海道において水産加工場から排出されるホタテガイ中腸腺は、廃棄物として年間3万トン程度発生している。その一部は含有するカドミウムを除去・希釈し、飼料や堆肥等に利用されているが、高度な利用は進んでいない。筆者等は、このホタテガイ中腸腺が酸性下で貴金属類に対する高い吸着能を有し、銅、鉛等のコモンメタルに比較して高い選択性を有することを報告してきた<sup>1)</sup>。生物系の金属吸着剤はいくつか検討されているが、金属に対する吸着性や選択性を向上させるためにアミノ化等の化学修飾が必要な場合が多い<sup>2)</sup>。これに対して、ホタテガイ中腸腺は、簡易な脱脂処理を施すのみで貴金属の吸着能が得られている。

一方、小型家電リサイクル法の施行とともに廃小型家電の回収が始まっており、今後、その回収量はさらに増大すると試算されている<sup>3-14)</sup>。廃小型家電の電子基板には金等の貴金属が比較的高濃度に含まれている<sup>15)</sup>。しかし、道内には非鉄金属の精錬所がなく、焙焼後に道外の精錬所に輸送しているか、回収後単に保管されている例も多い。道内で貴金属を濃縮減容化できれば、輸送及び精錬コストの削減により貴金属のリサイクルが促進し、今後の回収量増加に対応可能となると期待される。

本研究では、廃棄物であるホタテガイ中腸腺の新たな高度利用法として、鉄、銅等のコモンメタルが多量に含まれている廃電子基板から貴金属濃縮回収フローを考案し、各工程の処理条件を検討した結果について報告する。

事業名：外部資金研究（環境省 環境研究総合推進費（補助金））

課題名：ホタテガイ中腸腺を用いた廃電子基板からの貴金属回収技術の開発（平成26～27年度）

## 2. 実験方法

### 2.1 試料等の準備

#### 2.1.1 廃電子基板

一般家庭及び事務所から廃棄されたパソコンを中心に他の小型電子機器等も解体し、放熱フィン等を除いた廃電子基板を取り出した。それを刃巾20mmの2軸型剪断破砕機（氏家製作所製グッドカッターUG168-20-360型）に2回通して破砕した。図1に破砕前後の電子基板を示す。



図1 破砕前後の電子基板

#### (1) 分析用試料

廃電子基板の破砕物を振動ミルで繰り返し粉碎し、篩目1.18mmを全通させ分析用試料とし、蛍光X線（XRF）分析装置（リガク製ZSX Primus II型）を用いて、ファンダメンタルパラメーター法により定性・半定量分析を行った。

また、湿式分析により粉碎試料中の金を定量した。電子基板には難分解性の素材も使用されているため<sup>15)</sup>、硝酸、過塩素酸、ふっ化水素酸による酸分解後、残渣をアルミナ坩堝中で過酸化ナトリウムによるアルカリ融解処理を行い完全溶解させた。その試料溶液について、誘導プラズマ発光分光分析法（島津製作所製ICP発光分光分析装置ICPS-8100特型、以下、ICP-AES）により、鉄の干渉を受けない測定波長267.595nmで金を定量した。この値を固体濃度に換算して、浸出率等を算出する際の基準に採用した。

#### (2) 浸出試験用試料

破砕物をアルミナ角型坩堝に入れ、常温から仮焼温度450℃まで3hで昇温、5h保持した。その仮焼物を振動ミルで繰り返し粉碎後、篩目1.18mmの篩を全通させたものを浸出試験用試料に採用した。

#### 2.1.2 ホタテガイ中腸線由来吸着剤

図2に、北海道内浦湾沿いの水産加工場からボイル後に排出されたホタテガイ中腸線を冷凍保存、解凍した試料について、既報<sup>1)</sup>に準じた吸着剤の調製方法を示す。中腸線の混合粉碎にはプロペラ式ミキサーを使用し、脱脂処理や酸洗浄等の固液分離には500mL遠心管による遠心分離を行った。図3に得られた吸着剤の外観写真を示す。

#### 2.1.3 試薬

各種化学処理には、電子工業用ELグレード硝酸と特級塩

プロペラ式ミキサー  
 ↳ボイルホタテガイ中腸線500g  
 ↳エタノール500mL  
 粉碎（5回に分けて）  
 ポリびん  
 ↳塩酸25mL  
 混合後、遠心分離  
 3000rpm, 10min（3つに分けて）  
 固相  
 ↳塩酸(1+9)150mL×3  
 混合後、遠心分離  
 3000rpm, 10min（3つに分けて）  
 固相  
 ↳3回繰り返す  
 ポリびんに移し、冷蔵保管 343.52g回収

図2 ホタテガイ中腸線由来吸着剤の調製方法



図3 ホタテガイ中腸線由来吸着剤の外観写真

酸を用いた。浸出に使用した王水は、塩酸と硝酸を容積比で3:1に混合して1h以上放置してから使用した。これを王水原液とし、王水原液20、50mLを純水で希釈し100mLにした希釈王水を、それぞれ王水濃度0.2、0.5と表記して使用した。

湿式分析用には、電子工業用ELグレード硝酸と、原子吸光分析用塩酸、過酸化水素水、過塩素酸、硫酸、ふっ化水素酸、特級過酸化ナトリウムを使用した。また、各元素分析用金属標準溶液として、SPEX製assurance標準溶液（各1000mg/L）を希釈して用いた。

各種化学処理及び湿式分析用の純水は蒸留イオン交換水を用い、分析等にはELGA-オルガノ製超純水製造装置PURELAB ultra Analyticで精製した超純水を使用した。

### 2.2 検討した濃縮回収フローの構成

図4に、ホタテガイ中腸線由来吸着剤を用いた貴金属回収フローを示す。廃電子基板を破砕後、仮焼して樹脂を分解し、酸を用いて金を含む金属を浸出する酸浸出工程、その浸出液にホタテガイ中腸線由来吸着剤を加え、洗浄により貴金属を濃縮した吸着剤をばい焼して粗貴金属を得る吸着・回収工程の処理条件を検討した。

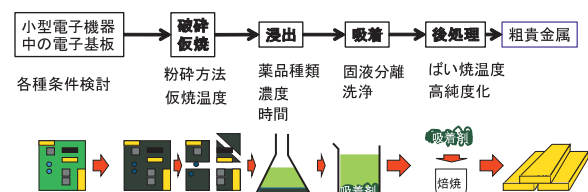


図4 検討した回収フロー

## 2.3 酸浸出処理条件の検討

### 2.3.1 最適仮焼温度

分析用試料5.0gをアルミナ製坩堝（サイズB 1型, 150mm角型のいずれか）に入れ、電気マッフル炉中250, 350, 450, 550℃で仮焼した。試料の自燃による温度上昇を防ぐため、常温から所定温度まで3hで昇温、5h保持、その後自然放冷により常温に戻した。この仮焼物に王水原液50mLを添加、2h浸漬、不溶解物を5種C濾紙によりろ過後、浸出した金をICP-AESにより定量することにより適切な仮焼温度を検討した。

### 2.3.2 酸の浸出条件

浸出試験用試料を3.86g（仮焼前の5.00gに相当）PP製300mLビーカーに入れ、塩酸、硝酸、王水についてそれぞれ50mL添加、2h浸漬、ろ過後、ICP-AESにより金の定量を行った。王水量5, 10, 25, 50mLの浸出により適切な酸量を、王水濃度1（原液）、0.5, 0.2の浸出により適切な酸濃度を、0.5h, 2.0hの浸出により適切な時間を検討した。

### 2.3.3 浸出試験用試料における粉碎

浸出試験用試料は仮焼後、<1.18mmまで振動ミルで粉碎されている。粉碎効果を調べるため、電子基板破砕物を仮焼後、粉碎せずに浸出試験を行った。破砕物試料は、採取部位による試料偏析の影響を低減するため、試料量を75g（仮焼前で97g相当）、王水原液量は750mLで浸出試験を行った。なお、試料中樹脂を十分に酸化分解させるため仮焼時間は45hとした。

## 2.4 吸着・回収処理条件の検討

### 2.4.1 吸着処理における王水濃度

吸着処理における適切な王水濃度の検討では、王水濃度1（原液）、0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02の希釈液に金標準液を加え、金濃度10mg/L溶液を調製し、ホタテガイ中腸腺由来吸着剤0.40g、王水液40mL、処理時間30minで行った。PP製100mLビーカーを用い、マグネチックスターラーにより300rpmで攪拌して吸着処理を行った。吸着後、50mL遠沈管で遠心分離し、酸分解後、塩酸と硝酸混酸酸性としてICP-AESにより金を定量した。

### 2.4.2 吸着処理における吸着剤量

吸着処理における適切な吸着剤量の検討では、浸出試験後の金浸出液を王水濃度0.1（金濃度7.03mg/L）に希釈して用いた。その希釈浸出液40mLに対し、ホタテガイ中腸腺由来吸着剤を0.2, 0.4, 0.8, 1.6g（液固比200, 100, 50, 25mL/g）加え、2.4.1項と同様の操作にて試験を行った。

### 2.4.3 吸着剤の洗浄による再使用の検討

吸着処理後の吸着剤に含まれる卑金属などの目的外不純物

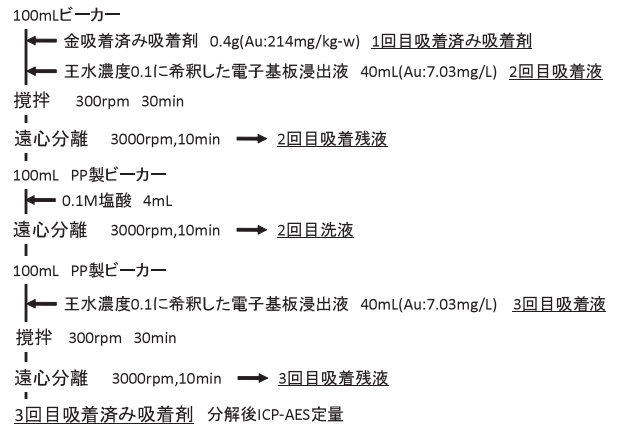


図5 吸着剤再使用検討フロー

を除去するため、吸着処理後、遠心分離した吸着剤2.0gに0.1M塩酸20mLを加え、マグネチックスターラー300rpm, 30minで攪拌し、洗浄した。遠心分離により、吸着剤を主とする固分と洗浄液を主とする液分に分け、ICP発光分光分析法により元素を半定量した。

さらに、再度希釈浸出液の吸着試験を繰り返し、洗浄による吸着剤の再使用について検討した。試験フローを図5に示す。吸着後の残渣及び洗液の金濃度を測定して再使用時の吸着率を算出した。

### 2.4.4 吸着剤の分離方法の検討

吸着処理後の吸着剤の分離を遠心分離器で行う場合、強酸溶液で使用可能な高価な装置が必要になる。装置コストを考慮し、自然沈降による吸着剤の固液分離について検討した。

吸着剤中に含まれる沈降しにくい微粒子をあらかじめ除去するため、吸着剤270gを0.1M塩酸3Lに分散させ、1h沈降後、微粒子を含む上澄みを廃棄する処理を2回行った。この微粒子除去吸着剤50gを用いて、王水濃度0.1まで希釈した浸出液5Lを使用した2.3.4節と同様の吸着試験及び0.1M塩酸500mLによる洗浄処理を行い、吸着処理後の残渣、洗浄液、固相の金濃度を定量した。この際の吸着試験及び洗浄処理後の固液分離は、1hの自然沈降分離により大部分の上澄みを除去する方法とした。なお、洗浄処理後の固相の脱水時のみ遠心分離処理を併用した。

### 2.4.5 吸着剤の金回収におけるばい焼温度

吸着・洗浄後の吸着剤から、貴金属を回収するためのばい焼温度を検討した。吸着剤約30gを用い、500, 600, 700, 800℃で、3hばい焼試験を行い、吸着剤の風乾重量に対する重量変化から最適ばい焼条件を検討した。焙焼試験は、マッフル炉、容器にアルミナ製坩堝（サイズB 1型又はB 3型）を用いた。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 廃電子基板の組成

表1に、XRFによる分析用試料の半定量分析結果を示す。電子基板は樹脂を含むことから炭素が多く、基板強化のためガラス繊維が使用されており、けい素、アルミニウムも含まれていた。また、難燃剤由来と思われる臭素が検出された。

表1 電子基板のXRF分析結果

元素	濃度(%)	元素	濃度(%)	元素	濃度(%)
O	37	Br	1.0	P	0.15
Si	17	Mg	0.48	Si	0.12
Cu	15	Ba	0.35	Ag	0.07
Al	11	Sb	0.34	K	0.06
Ca	8.4	Ni	0.27	Sr	0.06
Sn	2.8	Ti	0.22	Mn	0.03
Fe	1.7	Cl	0.19	Zr	0.02
C	1.4	F	0.16	Au	0.01
Pb	1.4	Cr	0.16		
Zn	1.3	Na	0.15		

重金属類は銅、すず、鉄、鉛が1%以上含まれており、金は0.01%程度検出された。本試料を湿式分解後、金を定量して基板中の濃度に換算すると130mg/kgとなり、これを基準に浸出率等を計算した。

#### 3.2 酸浸出処理条件の検討

##### 3.2.1 最適仮焼温度

図6に、仮焼温度、金浸出率、質量残存率の関係を示す。1.18mm以下まで粉碎された電子基板に含まれる金は、王水により未仮焼（処理温度25℃）で約60%が、450℃以上仮焼で90%以上が浸出されることがわかった。表2に、550℃仮焼後の電子基板のXRF分析値を示す。炭素含有量が大きく減少しており、樹脂等の有機物が少なくなっている。この結果から、高温仮焼により樹脂が除かれ、樹脂にモールドされていた金が酸と接触し、完全に溶解したと考えられる。

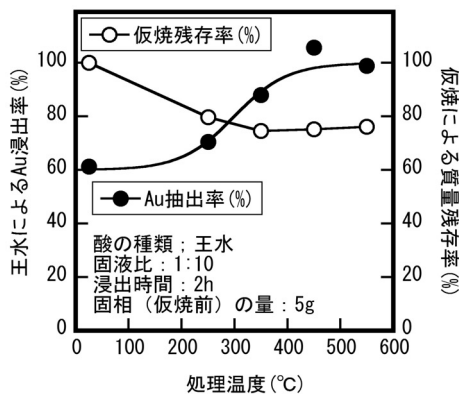


図6 金の浸出率に対する仮焼温度の影響

表2 550℃で仮焼した電子基板の組成

元素	濃度(%)	元素	濃度(%)	元素	濃度(%)
O	31	Pb	1.1	P	0.11
C	26	Zn	0.60	F	0.11
Si	11	Cl	0.36	S	0.09
Al	9.4	Mg	0.30	Ag	0.05
Cu	6.5	Sb	0.24	K	0.05
Ca	5.7	Ba	0.24	Sr	0.04
Br	3.8	Ni	0.23	Mn	0.03
Sn	1.7	Ti	0.17	Zr	0.01
Fe	1.4	Cr	0.12	Au	0.01

##### 3.2.2 酸浸出条件

図7に、異なる酸を用いた金浸出率を示す。王水を使用することにより90%が浸出されており、王水以外の酸では溶解力が不十分であることが確認された。硝酸単独で金が浸出されたが、これは、仮焼後もわずかに残っている塩素化合物や臭素化合物が硝酸により酸化され、塩素や臭素となり金を酸化溶解している可能性があるが、詳細は不明である。

図8に、王水原液の量に対する金浸出率を示す。浸出試験用試料3.83gに対し、王水原液10mL以上で約90%浸出率であった。しかし、液量10mLは固相が浸漬に最低限必要な液量と観察され、安定した金浸出率を得るために安全を見て25mL以上の液量が望ましいと考えられる。

図9に、各王水濃度に対する金浸出率を示す。王水濃度0.5以上で約100%の浸出率が得られた。王水原液50mLでの浸出時間を0.5hと2hで検討した。いずれも90%以上の金浸出率が得られた。

以上の結果をふまえ、各浸出条件検討において浸出率90%以上が得られる必要条件の組合せにおける浸出試験を行った。すなわち、浸出試験用試料3.83gに対し、王水濃度0.5、王水液量25mL、浸出時間0.5hで浸出試験を行った。その結果、94%の金浸出率が得られた。

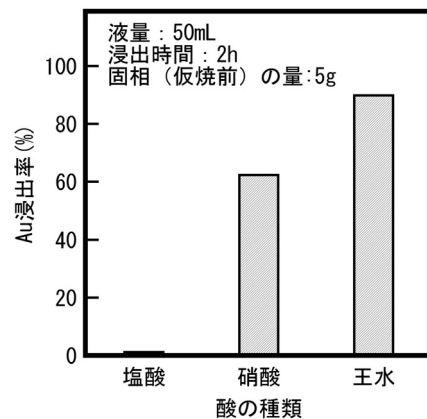


図7 金の浸出率に対する酸の種類の影響

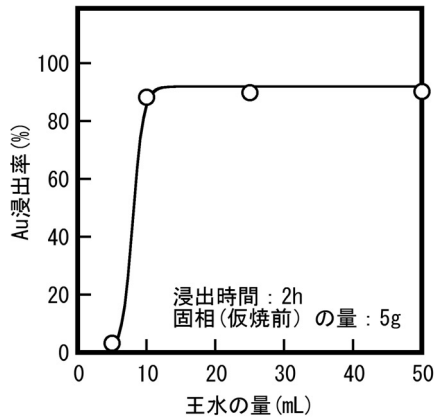


図8 王水の量に対する金浸出率の影響

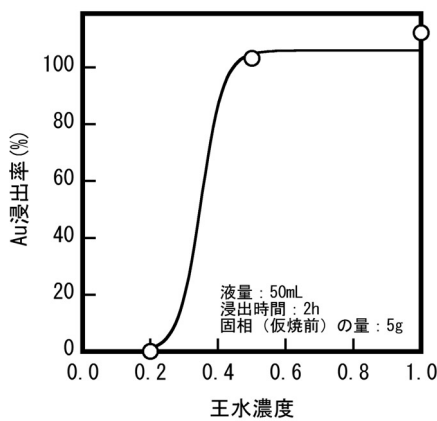


図9 王水濃度に対する金の浸出率

### 3.2.3 浸出試験用試料における粉碎の効果

図10に、破碎及び仮焼後、未粉碎試料と振動ミルで粉碎試料における金浸出率を示す。粉碎試料で浸出率が高いことが確認されたが、未粉碎（最大粒径は約20mm）でも80%の金浸出率が得られたことから、処理コストを考慮し粉碎工程を省略するフローで検討することにした。

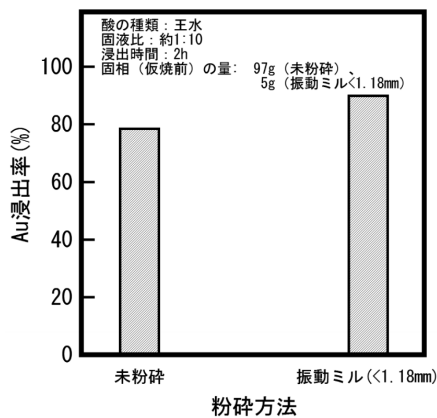


図10 金の浸出率に対する粉碎の効果

### 3.3 吸着剤による金吸着に関する各種条件の検討

#### 3.3.1 吸着処理における王水濃度

図11に、各王水濃度に対する金吸着率を示す。王水濃度0.2以上で著しく吸着率が低下した。王水濃度0.5以上では吸着剤の発泡、褐色への変色が観察された。王水濃度0.2以上では吸着剤の変質により吸着能が低下したか、吸着した金が王水へ再溶解した可能性が考えられる。

#### 3.3.2 吸着処理における吸着剤量

図12に、吸着剤量の比（液固比mL/g）に対する金吸着率を示す。液固比の増加に伴い金吸着率が低下し、液固比100で吸着率は80%となった。液固比が大きい場合、少量の吸着剤で浸出液の処理が可能となり、貴金属濃縮率も向上し後工程の規模を縮小化できると推測される。

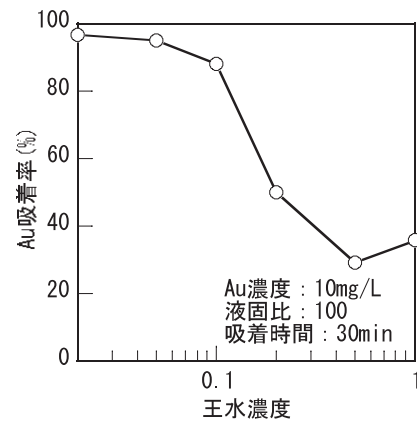


図11 王水濃度に対する吸着率

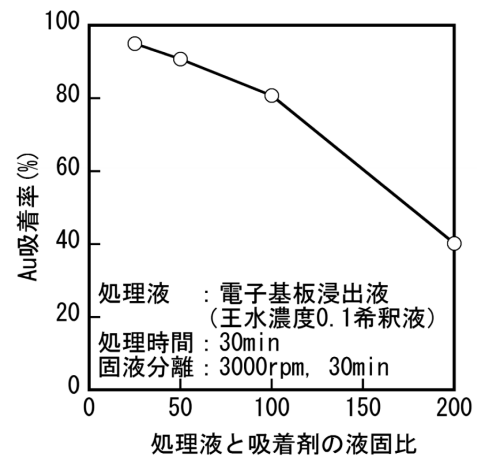


図12 吸着剤の液固比に対する金吸着率

#### 3.3.3 吸着剤の洗浄による再使用の検討

表3に、洗浄後、各元素で固分（吸着剤が主）中の濃度と液分（洗浄液が主）中の濃度の比を示す。濃度の比が大きい元素は、吸着剤に残留し塩酸洗浄により溶出しにくいことを示している。金、りん、硫黄等は洗浄で除去されにくくなるのに対して、卑金属の鉄、鉛、銅等は容易に除去されることが確認された。

表4に、洗浄後の吸着剤を用いて吸着試験した結果を示す。吸着率は、2回目吸着試験で78.1%、再洗浄後の3回目吸着試験で27.8%まで低下し、洗浄による吸着剤の再使用は困難であることがわかった。

3.3.4 吸着剤の分離方法の検討

自然沈降分離において、最終的に回収した吸着剤に金が約95%回収されており、残液には約5%、洗浄に使用した0.1M塩酸（洗液も含む）に洗い出された金は0.43%とわずかで、十分な回収が可能であることがわかった。

表3 各元素の固分中濃度と液分中濃度の比

元素	濃度比	元素	濃度比	元素	濃度比
Au	404	Br	15	Pb	4
P	155	Cd	15	Cr	4
S	144	Fe	10	Al	4
Ag	83	Na	9	Mn	3
Sn	74	B	9	Zn	3
Mg	22	Ba	6	Ni	3
Sr	21	Ca	6	Cu	3

表4 吸着剤の再使用試験結果

吸着回数	試料	濃度 (mg/L)	Au量 (μg)	吸着率 (%)
2	吸着液(希釈浸出液)	7.03	281	78.1
	吸着残液(遠心分離後液分)	1.54	61.5	
	洗液(洗浄・遠心分離後液分)	0.344	1.378	
3	吸着液(希釈浸出液)	7.03	281	27.8
	吸着残液(遠心分離後液分)	5.07	203	

3.3.5 吸着剤の金回収におけるばい焼温度

図13に、各焙焼温度の重量残存率を示す。700℃以上では残存重量が一定になり、ホタテガイ由来有機物の完全除去には700℃以上の温度が必要であることがわかった。

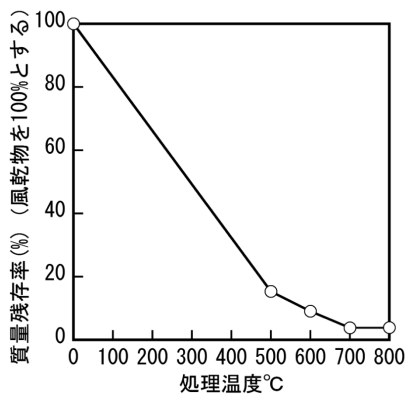


図13 吸着剤の焙焼試験結果

3.5 回収プロセスの検討

図14に、廃電子基板から貴金属を含む焙焼物を得るまでの回収プロセスフローを示す。廃電子基板2,119gを用いて、ベンチスケールでのホタテガイ中腸腺由来吸着剤を用いた、貴

金属の回収試験を実施した。吸着剤に含浸している卑金属をより除くため、洗浄回数を3回とした。本回収試験におけるマスバランスを図15に示す。得られた粗貴金属の組成を表5に示す。廃電子基板に含まれている金の約80%が回収可能で、重量比として約1/1,000まで減容化した粗貴金属として回収可能であることがわかった。

回収プロセスにおいて、浸出処理時の液温は90℃以上に到達したことから、規模の大きな実プラントレベルでは、温度上昇とともに急激な溶解に伴うガスの発生に注意する必要があると考えられる。

焙焼物にはホタテガイ中腸腺由来の二酸化けい素が含まれているため、実際に焙焼物1gにふっ化水素酸を20mL加え、乾固、焙焼し、質量が0.37g減少した。しかし、焙焼物の状態で電子基板に対して質量比で大きく濃縮されるため、ふっ化水素酸を扱う設備を導入しなくても、この形態のままで精錬所に送付する方法が望ましいと考えられる。

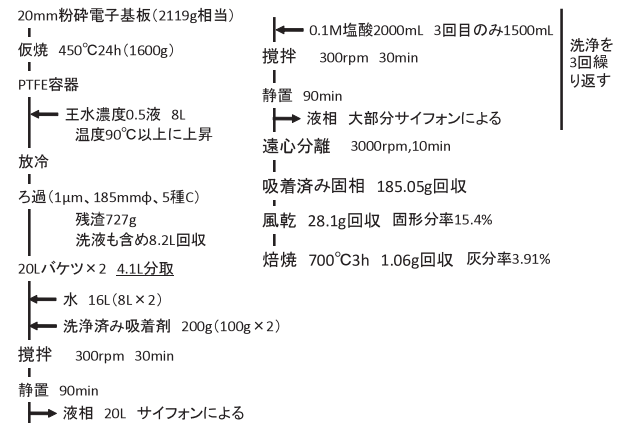


図14 ベンチスケールでの処理フローと結果

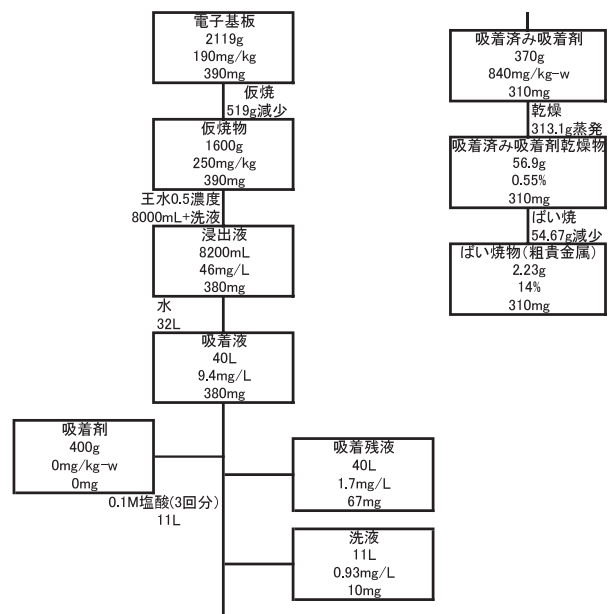


図15 電子基板2.12kg処理時のマスバランス

表5 得られた粗貴金属の組成

元素	濃度(%)	元素	濃度(%)	元素	濃度(%)
SiO <sub>2</sub>	36	Br	1.4	CaO	0.10
Ag	24	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.3	SrO	0.09
Au	13	PdO	0.81	ZrO <sub>2</sub>	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	8.8	Cl	0.45	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.8	ZnO	0.24	MgO	0.06
CO <sub>2</sub>	3.4	PbO	0.20	MoO <sub>3</sub>	0.03
CuO	2.4	TiO <sub>2</sub>	0.12	SO <sub>3</sub>	0.02
SnO <sub>2</sub>	1.7	K <sub>2</sub> O	0.11	Na <sub>2</sub> O	<0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.5	NiO	0.10		

#### 4. まとめ

- (1)粉砕した電子基板により仮焼温度と王水への金浸出について検討した結果、450℃以上で金を王水に90%以上浸出させることができた。450℃仮焼電子基板を対象に、酸の種類、量、濃度、処理時間等を変えて浸出試験を行った結果、浸出試験用試料3.83gに対し、王水濃度0.5、王水液量25mL、0.5h処理で90%以上の金浸出率が得られた。
- (2)ホタテガイ中腸腺由来吸着剤による吸着試験から、浸出液の希釈により王水濃度0.1、液固比100で吸着処理し、吸着剤を0.1M塩酸で洗浄することで約80%の金吸着率が得られた。
- (3)洗浄後の吸着剤の有機物の分解除去条件を検討した結果、処理温度は700℃以上必要であることがわかった。
- (4)以上の工程の最適化により構築した新規プロセスにより、廃電子基板約2kgを処理し、浸出工程で金浸出率約95%、吸着・洗浄工程で金吸着率80%以上、全工程で約80%の金回収率が得られた。吸着剤の焙焼により金と銀の合計で37%、不純物として二酸化けい素約40%、酸化りんを9%含有する回収物が得られた。電子基板に多量に含まれる鉄や銅の含有率は酸化物として5%以下に低減可能であり、高い除去特性を示した。また、本プロセスを適用する事により、廃電子基板から粗貴金属回収物は、重量比にて約1/1,000に減量した。

本手法は、特別な装置等が不要であり、廃棄小型家電等を収集している処理業者において、導入は容易で十分利用できることと推察される。使用している吸着剤の原料も道内で発生する廃棄物であり、他の生物由来吸着剤に比較<sup>2)</sup>しても化学修飾等が不要で簡易な処理で使用できるため、処理剤のコストは低減できる。今後、全体プロセスのコストを検討する必要があるが、減量による運搬コストの削減と貴金属濃縮による売却等の利益増により、設備的、経済的に実現の可能性があると考えられる。

#### 謝辞

本研究は、環境省 環境研究総合推進費により実施された。また、使用した純水・超純水製造システム、ICP発光分光分析装置、ICP質量分析装置は、公益財団法人JKAの機械工業振興補助事業により整備された機器である。ここに、衷心より感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 富田恵一・若杉郷臣・高橋徹・長野伸泰：ホタテガイ中腸腺を用いた金属吸着材の試作，北海道立工業試験場報告，307，p.69-75，(2008)
- 2) 井上勝利：バイオマス廃棄物の有効利用による有害金属の除去及び有価金属の回収，Journal of MMIJ，Vol.123，p.59-67，(2007)
- 3) ㈱エコニクス：北海道のレアメタル資源調査及びリサイクルリングに関する研究報告書（2009）
- 4) 中村崇：小型家電のリサイクルー人工鉱床の展開ー，廃棄物資源循環学会誌，Vol.20，p.70-76，(2009)
- 5) 原田幸明：レアメタル類の使用状況と需給見通し，廃棄物資源循環学会誌Vol.20，p.59-69，(2009)
- 6) 吉田文和：都市鉱山の経済学ーエレクトロニクス製品を中心にー，Journal of MMIJ，Vol.126，p.166-171，(2010)
- 7) 南條道夫：都市鉱山開発ー包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け，東北大学選鉱精錬研究所彙報，Vol.43，No.2，pp239-251，(1987)
- 8) 加藤秀和：7. 都市鉱山の現実とレアメタル回収の可能性，日本エネルギー学会誌，Vol.89，No.4，pp.296-301，(2010)
- 9) 山末英嗣・中島謙一・醍醐市朗・松八重一代・橋本征二・奥村英之・石原慶一：家電製品の廃棄に伴うレアメタルの潜在的拡散量評価，日本金属学会誌，Vol.72，No.8，pp.587-592，(2008)
- 10) 原田幸明：わが国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵，独立行政法人物質・材料研究機構プレス資料（平成20年1月11日），(2008)
- 11) 原田幸明：レアメタル類の使用状況と需給見通し，廃棄物資源循環学会誌，Vol.20，No.2，pp.49-58，(2009)
- 12) 東北経済産業局循環型産業振興課・株式会社三菱総合研究所：我が国における鉱種別 需要／リサイクル／用途等 資料，196PP.，pp.174-179，(2006)
- 13) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構金属資源開発調査企画グループ：非鉄金属のしおりー40鉱種の紹介ー，独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構，80PP.，pp.69-70，(2007)

- 14) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構金属企画調査部：鉱物資源マテリアルフロー2009，独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構，391PP., pp.281-293, (2010)
- 15) 貴田晶子・白波瀬朋子：川口光夫:使用済みパソコン中のレアメタル等の存在量と金属分析，廃棄物資源循環学会誌，Vol.20, p.59-69, (2009)