

Title	独創的な文理融合研究によるレアメタル回収技術開発と実践的展開への挑戦：先人の知恵の結晶を未来に活かす
Author(s)	三好, 恵真子; 姉崎, 正治
Citation	大阪大学大学院人間科学研究科紀要. 2013, 39, p. 153-174
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/24784">https://doi.org/10.18910/24784</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

独創的な文理融合研究によるレアメタル回収技術開発と実践的展開への挑戦  
—先人の知恵の結晶を未来に活かす—

三 好 恵真子・姉 崎 正 治

目 次

1. はじめに
2. 独創的な文理融合研究から見いだされた貴金属抽出基礎理論と技術開発
3. 実践的展開に向けたシステム構築の技術的特徴と今後の展望
4. おわりに



## 独創的な文理融合研究によるレアメタル回収技術開発と実践的展開への挑戦 —先人の知恵の結晶を未来に活かす—

三 好 恵真子・姉 崎 正 治

### 1. はじめに

我が国では、2000年に循環型社会関連六法が成立し、循環型社会形成を目指して、廃棄物管理政策の法体系が順調に整えられてきた。しかし、これらが想定していたのは「国内」における循環であり、経済のグローバル化の進展にともなって、循環資源(再生資源・中古品)の貿易による越境移動が拡大しており(小島, 2005)、また移動先の現地社会では不適切な処理による環境・人体汚染も浮上している。すなわち、日本では、使用済み家電製品4品目(ブラウン管型テレビ, エアコン, 冷蔵庫・冷凍庫, 洗濯機)を対象とした「家電リサイクル法」が2001年に施行されたが、この法ルートに乗らず、現行では把握できないとされる過半数ほどにものぼる廃家電は、不適切な処理を施されている「見えないフロー」の中に存在すると言われている(寺園, 2008 ; 寺園ら, 2012)。

他方、リーマンショックによる打撃、さらには2010年の尖閣諸島沖での中国漁船衝突も強い追い風となったレアメタルを取り巻く供給障害と不安定な国際情勢等に鑑み、特に我が国の強みである技術力を最大限に活かして「資源大国を目指した資源エネルギー供給革命」を実現することが国家的戦略として目論まれている(経済産業省, 2009)。中でも「都市鉱山」<sup>1)</sup>から安価で効率よくリユース・リサイクルを実施する重要性が急速に高まり、特に潜在的回収可能台数が年間5,000万台に達する使用済・廃棄携帯電話(環境省・経済産業省, 2010)からのレアメタルの回収の実践は、日本の金属元素戦略上の重要な課題として位置づけられるであろう。しかしながら、携帯電話を含む小型廃家電の法制度におけるリサイクルシステムはこれまで未整備であった上に、種々の理由(セキュリティー, 高機能化等)により、退職品の形も含めて未回収のまま停留している場合が多く(環境省・経済産業省, 2010)、全リサイクル過程(回収工程, 破碎工程, 金属抽出工程)を通じて、その回収率が低いことが問題となっている。この潜在的回収可能台数から見積もった場合、日本におけるレアメタル全輸入量に占める割合は約0.2%と小さいものの、携帯電話には複数のレアメタルが純度の高い状態で混合している高価値の資源である点は見逃せず、定常的な回収システムを構築する必要性に迫られている。

こうした社会的要請に連動し、中央環境審議会廃棄物物・リサイクル部会小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用貴金属の再生利用に関する小委員会において、2012年1月に小型電気電子機器リサイクル制度案が取りまとめられ、3月に「使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律」の閣議決定を経て、8月に国会にて可決・成立された。本制度は、2013年より部分的に施行され、以後2年間のうちに法整備さ

れることになるが、「誰かに義務をかけるのではなく、関係者が協力して自主的に回収方法やリサイクル実施方法を工夫しながら、それぞれの事情に合わせた形でリサイクルを実施する促進型の制度を目指すべきであり、できることからリサイクルの取り組みを開始し、回収率を増やしながら徐々に品目、鉱種、地域を拡大させることが望ましい」との答申の基本的な考えを踏まえて制度設計されており(森下, 2012)、従来の義務型とは異なり、消費者も積極的に参画しつつ、その主体性・多様性を重視するところが特出すべき注目点になる。

この制度化に先立ち、小型家電の回収・収集・運搬に関して、詳細な調査・分析を重ねている村上の総説(2012)によれば、上述の海外への「見えないフロー」を除いても、退蔵に向かう量が圧倒的に多く、また自治体等で回収されてもリサイクルされずに埋め立て処分されるケースが大半であるという問題点が指摘されている。そして運用上の課題も具体的に挙げられているが、本研究における技術開発の重要な着眼点と連動してくるため、本稿では、物流の側面から段階的に以下のように整理し直してみた。いずれの次元においてもキーワードとなるのが「効率化」であることが読み取れる。

- 1) **回収・収集・運搬(0次物流)の効率化**：リサイクルの初期段階において、退蔵されている製品をできるだけ排出し、極力リサイクルルートに載せることである。都市鉱山開発における「回収・収集・運搬」は、天然鉱山における地球科学的な作用と採掘(採鉱)という2段階を統括して担うため、その重要性はきわめて高い。特に、小型家電の場合、発生拠点は各消費者の手元と想定され、その量から見積もられる絶対的費用がそれほど大きくないことから、収集・運搬が何らかの形で体系的に行われれば、その後の段階では採算が目論めるため、この0次物流において、「消費者からいかに効率よく回収できるか」が、包括的なシステムの課題解決において、最も重要な鍵を握ると考えられる。
- 2) **破碎・分離選別(1次物流)の効率化**：中間処理における分離・選別技術の高効率化が求められる。例えば、小売店等での回収によって、リバースロジスティックスが用いられる場合には、この1次物流までカバーされることになる。
- 3) **素材回収(2次物流)の効率化**：最終段階の素材回収(製錬)プロセスにおいては、歩留まりを向上させ、回収可能鉱種の拡大を図る等のために、当然ながら高性能化が重要になる。

他方、2)、3)にあたるリサイクルの中・後半部分に焦点を収斂させると、目的とする有用レアメタルを効率的に抽出する技術開発に関しては、多様で高度な研究成果が先行的に多数公表されており、現在、実用化段階に至っているものも少なくない。しかしながら、法制度に連動した実践的展開を目指すならば、物流より前段階における1)の回収・収集・運搬の効率化が最優先されるべき課題として立証されているため(村上, 2012)、物流上に載せた以降の技術開発においても、それ以前の課題も含めて解消することを意識

した包括的な視座からのシステムを生み出す技術開発の工夫が目指されるべきであろう。

そこで本研究では、回収・リサイクル・プロセスから希少金属備蓄へのルートを算出できる点、すなわち「破碎・分離選別」並びに「素材回収」における技術開発においても、その前段階を意識して、回収率の向上に直結できるような設計を目指し、さらに連続的に備蓄量増大へと繋げることを実現する、一貫性のあるシステム構築に挑戦してきた。言い換えれば、この実践的展開を具現化できる包括的システム開発の特徴こそが、従来研究と差別化できる側面であると強調できる。一方、競合するレアメタルの抽出技術に関しては、その理論構築・技術の独創性並びに低コスト処理の実質面で勝負し、特に本開発では、金の回収に関して、破碎の段階で90%以上の濃集が可能になり、最終的には抽出後の製品化にまで結びつけるインバース・マニュファクチャリング<sup>2)</sup>を構想している。

本稿では、これまでの一連の研究成果(姉崎, 2009; 姉崎&三好, 2011&2012; 三好, 2011; 三好&姉崎, 2011)並びに国策に呼応した評価(三好ら, 2011ab)を踏まえて、本技術開発の着想の契機から実践的展開への試行、さらには最新の進捗状況を含めて、リサイクルに伴う上述の課題の克服を目論む開発の特徴を明確にしつつ総説してみたい。具体的には、最初に、歴史学・精錬工学・人間環境学を基軸とした文理融合研究により生み出された独創的な貴金属抽出に関する基礎理論の発見とその技術開発の経緯を説明する。次に、それらを基盤として応用されたレアメタル回収システムの技術的優位性として、回収率向上に寄与する「一次破碎装置」並びに特定金属の濃集分離を可能にする「二次破碎装置」の開発の特徴を言及しつつ、構築された理論とこれらの技術開発を連動して用いる新リサイクルシステムの優位性を具体化する。さらに今後の実践的展開に向けて、これまで実施した定常回収システムの試行実験の成果(大学構内での携帯電話回収キャンペーンの実施)も若干紹介しながら、新制度に対応した、足元から循環の輪を作り出す持続可能な社会に向けた包括的システムの構築の可能性を模索してゆきたい。

## 2. 独創的な文理融合研究から見いだされた貴金属抽出基礎理論と技術開発

ここで述べるのは、リサイクルにおける主として最終段階の素材回収(製錬)プロセスに関する理論構築・技術開発にあたるが、本研究の一連の開発の着想点となるために、最初に説明することにする。また多数が競合するレアメタルの抽出技術に対し、本研究が独創性を有する点としては、歴史学・製錬工学・人間環境論を基軸とした文理融合研究により生み出されたところであり(当時の製錬技術に関して描写された古文書を含むスペイン語で記述された歴史的資料を読み解きながら現代科学の視点から再構築した)、また低コスト処理や対象の汎用性等の実質面も兼ね備えている。さらに特出すべき事柄として、過去を生きる人々の生業の中から培われた技術より抽出された開発である点が、結果

的に現実社会の中で確実に運用してゆく実践面での優位な展開(多様性を持つ社会に受け入れられ、かつ浸透しやすい)に結びついていることである(詳細は後述)。すなわち、技術を実際に活用するのは人間であるため、逆にその営みから開発の鍵を得るという姿勢は、基礎研究の高度化への注視だけでは見落としがちな、社会に柔軟に対応できる技術開発のあり方として評価されるであろう。

そもそも、技術開発の発端は、イスマノアメリカ植民地時代にまでにさかのぼる。ペルー第5代副王として任命されたフランシスコ・デ・トレドは、当時低迷していたペルー銀鉱山を振興させるために、1572年に水銀を用いた金属製錬<sup>3)</sup>(水銀アマルガム法<sup>4)</sup>)を導入した(青木, 2000)。この手法は、低品位の銀鉱石から高純度の銀の製錬が可能となり、16世紀後半からの銀生産の急成長(トレド効果)を導き、19世紀末に銀鉱脈が衰えるまでの数百年にもわたり、広く汎用されたのである。本研究では、当時の古典的な製錬技術に秘められた先人の知恵の結晶を体系的に理論化し、さらにこの理論を都市鉱山から貴金属を回収するシステムとして再構築することに成功した。その画期的な着想の契機となった歴史的事象の評価と分析に関しての詳細は、前報(姉崎, 2009; 姉崎&三好, 2011; 三好&姉崎, 2011)にゆずり、ここでは、新技術開発に活用可能な要点を把握しやすいように、簡潔に整理して説明することとする。

## 2-1. 開発の契機：ペルー副王領のポトシ鉱山における銀の製錬技術

1568年5月、第5代ペルー副王に任命されたフランシスコ・デ・トレド(在任期間：1569-1581)は、合同会議(同年7月)の特命を受けて、1569年にリマに到着した。その特命こそ、当時低迷していたペルーの鉱山業(特に銀鉱山業)を振興して、王室歳入の改善を図ることであった(青木, 2000)。彼は、ワンカベリカ水銀鉱山<sup>5)</sup>とポトシ銀山<sup>6)</sup>を一体化し、鉱山業のシステム化の実現を図ったのであるが、技術的観点から見て、それは非常に単純な仕組みであることが功を奏していたといえる。すなわち、水銀と銀の生産拠点をそれぞれ一カ所に収斂し、製錬手法も統一することにより、基本となる物資の流れに外乱が入りにくいシステムとして調整しており、また物量を基本とする定量的な観測が可能になると考えられる。さらに、この単純化されたシステムから、トレドが王室の財政難に対する最善の諸策を投じている目論見をも伺い知ることできる。

このように、トレドは、製錬技術、労働供給体制、資材運搬体制、水源確保等の必要措置を強力に進め、法制面を含めて、鉱山業を体系化していった。そして、1574年からアマルガム製錬が本格化して、1578年にはトレド鉱山政策の構想の骨格がほぼ完成し、離任時の1581年には銀生産量がそれ以前の低迷期の7~8倍にあたる急増を可能にしたのである(Cole, 1985)。

銀の水銀アマルガム法については、既に1556年にメキシコにおいて、パティオ(patio)法とて発明されており、実用化しつつあった(Probert, 1997)。しかしながら、この手法は、当時のペルーの条件(鉱石の条件、気象条件、物資調達等)には適合せず、採用されなかつ

た。その後、1572年に、トレドの命を受けたフェルナンデス・デ・ベラスコが、低品位の屑鉱石からの銀の抽出に成功し、カホネス(cajones)法と名付けられ、ポトシにおける基本技術を確保してゆくことになる(Bargalló, 1995)。カホネス法とパティオ法との最大の相違は、アマルガム工程(反応槽：カオン)を「加熱」していた点にある。これにより、製錬効率を4倍に上昇させることを可能にし、当初100年分に相当すると見積もられていた屑鉱や坑内の残鉱が、トレド在任中の1577年頃にはほとんどなくなったと言われるほどであった。

カホネス法に関して記述のある史料は、発行年代順に、カポチェ(1585)(Capoche, 1959)、アコスタ(1590)(Acosta, 1894)、バルバ(Barba, 2003)およびアルサンス(1736)(Arzáns, 1965)が存在する。ここでは、ポトシの製錬工場の全体像を捉えることができる、アルサンスの絵図(図1)を元に(必要に応じて、カポチェの記述などから補足することにより)、そのプロセスを具体的に分析してみた(姉崎&三好, 2010)。総括的な作業工程は、「採鉱した鉱石の搬入」、「鉱石の粉碎」、「反応槽での作業と分析」、「水洗選鉱」、「各工程から逸散する水銀の回収」の5つに段階付けられる。アコスタの記述によれば(Acosta, 1894)、約50の製錬所において、鉱泥からの水銀回収が行われたとされ、年間2,000キンタルを回収していたという。

一方、この水銀アマルガム製錬工程において、労働者が水銀に曝露される可能性が高い作業は、①混練作業、②水洗分離作業、③抽出された銀アマルガムを加熱分離して水銀を回収する作業の3段階にあるといえる。まず①について、海拔4,000mのポトシ鉱山における混練中の加熱は、水銀の蒸発を促進させるため、水銀の放散とその作業中における水銀曝露を増大させたと考えられる。続いて②水洗分離作業では、上述のように、結果として大量の鉱泥の形で水銀が流出することになるが、鉱泥中に逸散した水銀のほぼ70~100%回収していたとされる(Acosta, 1894)。



図1 ポトシ鉱山における製錬工場の概観図

最後に、③の粗アマルガムの絞り作業と蒸留分離作業において、蒸留後の水銀蒸気は、凝集装置で回収され、再利用されているものの、10%ほど回収漏れが生じていたと見積もられている(Probert, 1997)。

このように、ポトシ鉱山におけるアマルガム製錬工程において、主に蒸発ロスと水洗ロスがあったと考えられるが、文献に残された値から見積もると、大気中に10%、鉱泥中に30~50%と推定され、合計で少なくとも40~50%の水銀ロスが発生していたと考え



られる(姉崎, 2009)。現代においても水銀アマルガム法が利用されているアマゾンの小規模採取作業中には、添加水銀量の40~50%が河川に流出しており、残りは大気中に逸散していると報告されている(原田ら, 1995)。これはポトシのケースと異なり、非加熱製錬で、かつ回収という観念のない現場での数値である点に留意しておきたい。

一方、人体への影響は、混練作業と蒸留作業において、定常的な曝露であり、深刻であったと予測される。さらに、既定の工程作業以外にも、労働者が柔らかいペースト状態、あるいは液体の水銀を口に含んで持ち帰り、銀を回収して市場で売ることが頻繁に行われていたと報告されており(Percy, 1880)、ポトシの町が水銀中毒の町であったことは確かであろう(原田ら, 1995)。ポトシ鉱山におけるアマルガム製錬技術と水銀汚染との関係性を模式化すると、図2のように示すことができる。

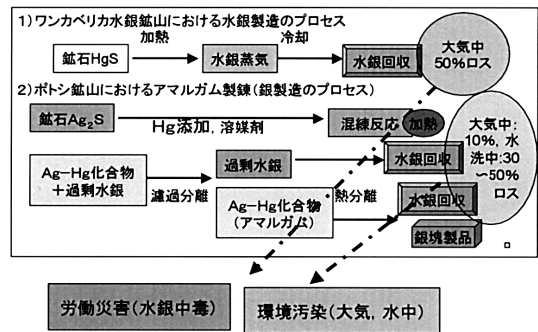


図2 ポトシ鉱山におけるアマルガム製錬技術と水銀被害との関係性

## 2-2. アマルガム製錬技術進歩の変遷から得られる開発の鍵

アマルガム法に着目した水銀や銀に関する製錬技術の歴史的変遷は、19世紀中頃にその反応過程を記述する化学反応式が生まれる前後で二分される。そして、化学式が生まれる前の段階では、ポトシでの製錬技術を含めて、多くの試行錯誤の中から、まさに卓越した経験知の集積により創造されたものと言える。ここでは、この分岐に即して、技術開発の鍵となる重要な知見を中心にまとめてゆく。

### 1) 19世紀中庸以前における経験知に秘められた再注目すべき技術

本研究が着目している水銀を用いる冶金術に関して、最初の歴史書として、プリニウスの『自然誌(Naturalis Historia)』があり、辰砂の焙焼および水銀アマルガムによる砂金製錬や金メッキについて述べられており、水銀の物性や毒性に関しても、ギリシャ、ローマ時代から既に承知されていたと推察される(中野ら, 1986)。

中世の錬金術は、秘密厳守の世界に隠されていた。しかし、その禁を破ったのが、1540年に出版された『Pirotechnia(ピロテクニア)』(Biringuccio, 1540)(Biringuccio, 2005)であり、著者のピリングッチョ自身が習得した技術の詳細を記しており、また冶金を包括的に網羅する最初の出版書籍として位置づけられている。中でも、臼式の粉碎機を利用してアマルガム化する方法を明示しており(図3)、この操作により、金は水銀とのアマルガム反応が極めて活性化されるため、中世以降の実用化への原動力となったと推察される。しかしながら、銀の水銀アマルガム法が応用された事実は、ヨーロッパには存在せ

ず、上述したように、スペインの植民地アメリカの銀鉱山において、初めて実用化された点は特筆に値するであろう。

銀鉱石のアマルガム製錬法の方は、スペイン植民地ヌエバスペインヤ(現在のメキシコ)において、パティオ法として実用化され、その後ペルーにおいて、その気候等の条件に合うカホネス法が開発されて、トレド効果の機動力になってゆく。ペルーで採用されたアマルガム法の製錬過程を現代科学の視点から再構築して模式化したものが図4である(姉崎&三好, 2011; 三好&姉崎, 2011)。

またこの図より、鉱石採取から水銀アマルガム精錬までのプロセスは、以下の4段階に分けることができる。

- i) 選鉱段階の精鉱化技術：①事前焙焼、②微粉化技術(粉碎と反応の同期化)、③貧鉱処理
- ii) 高粘度鉱泥の湿式製錬技術：①高粘度流体の固液接触反応機構(湿式製錬の基礎)、②攪拌混合方法と効果(反応場の集中化と反応効率)、③貧鉱処理
- iii) アマルガム化後の分離精製技術：①浮遊選鉱法、②遠心分離法等
- iv) 仕上げ高純度化技術：①製錬法を選択、②スポンジ塊の活用



図3 中世ヨーロッパにおける石臼粉碎機を利用したアマルガム化

以上の中で、本研究の新技术開発における核心部は、ii)の高粘度鉱泥の湿式製錬技術にある。各種金属と水銀とのアマルガム反応に関する反応動学的な研究は、現状でもほとんどなされていないが、基本的な系は、高粘度混合物(非ニュートン流体)中に分散された液体水銀粒と銀鉱石粉体との固液接触反応であると考えられ、これこそが湿式精錬に値するものである。

そこで、注目すべきii) ①湿式製錬の基礎

を分析すると、重要な事柄が2点存在している。すなわち、1つ目は、媒溶剤(マヒストラルmagistral; 鉄と銅の硫酸塩)と食塩の添加の意義であり、異種の触媒作用と解釈される。また2つ目は、上述したようにカホネス法の特徴である加熱の効果であり、メキシコのパティオ法では、反応完了までに20~27日かかっていたものが、ペルーのカホネス法を用いると、速度効率が4倍に上がり、5~7日に短縮されたという。また、ii) ②攪拌混合に関し

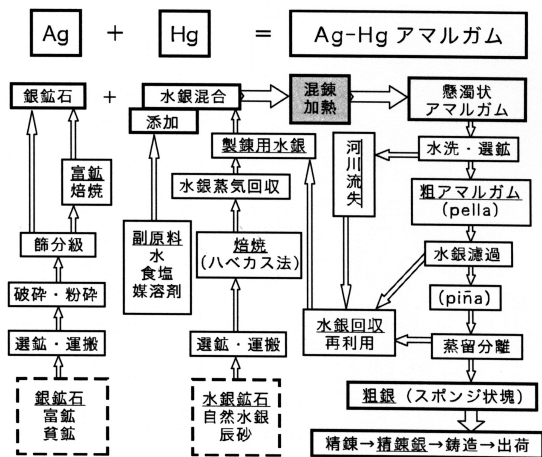


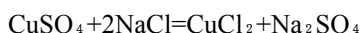
図4 ポトシ鉱山の銀製錬プロセスの工程

では、メキシコではトルタ状(銀鉱石の粘性土壌)の鉱石を馬などの畜力で攪拌しているが、ペルーでは、先住民が足踏み混練(repaso)しており、高粘度の鉱泥に対して、このような攪拌がどのような作用を及ぼすかを説明するのは容易ではない。しかし高粘性流体の動力学的考察は、技術開発の上で非常に重要になるので、今後の基礎的研究の蓄積が待たれる。そしてii) ③に関して、中世以降、アマルガム法が貧鉱処理に有利とされ、急速に導入されてきた理由として、廃鉱及び尾鉱に硫黄や鉛の含量が低かったこと、またそのことが、硫黄による界面反応抑制作用を低下させたと考えられる。さらに、i)からiv)の全ての工程に関することとして、鉱石粉碎と水銀との反応を同期化する手法は、図3や後述する‘Pan Amalgamation(鍋混濁法)’と同様な意義をなし、新開発技術の根幹に関わる側面でもあることを記しておく。

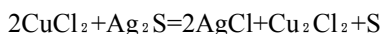
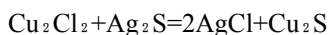
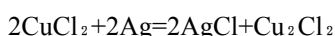
## 2) 19世紀後半以降のアマルガム製錬技術の進歩

19世紀後半以降に、化学記号を用いてアマルガム法が描写されてゆくことになるが、その古典的な記述として『金と銀の冶金学』(Percy, 1880)が存在する。この当時は熱力学の理論が誕生したばかりであるが、本書には、化学反応が元素の置換反応として表記されており、また鉱石の分類、元素の種類、製錬操作など広範囲に渡って網羅された示唆深い研究書である。また、『銀の抽出』(1895)(Rhead, 1895)の中では、銀のアマルガム反応に関して、以下のような化学反応式の記述が見られる。

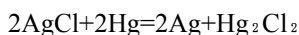
i) 媒溶剤(magistral ; 銅と鉄の硫酸塩)と食塩(NaCl)の反応



ii) 塩化第二銅( $\text{CuCl}_2$ ) や塩化第一銅( $\text{Cu}_2\text{Cl}_2$ )が自然銀(Ag)や硫化銀( $\text{Ag}_2\text{S}$ )を塩化銀(AgCl)にして析出分離する反応



iii) 析出した塩化銀(AgCl)が水銀によって還元され金属銀が生成する反応と、それが過剰の水銀( $\alpha$ )<sup>8)</sup>中に取り込まれてアマルガムとなる反応



上記からも、多種多様な銀鉱石から塩化銀を析出されるためには、媒溶剤の工夫が必要であったと推察できる。一方、プロセス改善の面で、注目すべき手法は、‘Pan Amalgamation(鍋混濁法)’であり、これは、ピリングッチョの手法(図3)の延長線上にある技術であると考えられる。

一方、アマルガム製錬法は、1886年にイギリスにおける青化法の工業化の成功以降に、第一線から退いてゆくことになるが、1930年代まで青化法との併用という形で使われていた(佐渡市教育委員会世界遺産・文化振興会, 2008 ; 山本, 1938)。さらに、この鍋混濁

法そのもの、あるいは青化法との併用の形で、我が国においても、明治以降の佐渡金山に継承されていた点は、注目すべき事象である。

### 2-3. 希少・有用貴金属抽出に関する技術開発の基礎理論の構築

本研究では、上述のこのポトシ銀山で開発・発展してきた古典的な製錬技術に再度着目して分析することにより、都市鉱山から貴金属抽出等の「現代社会」に応用還元可能な再資源化のシステム構築に関する基礎理論を見出すことに成功した。ここで導き出された重要な事柄は、以下の4点にまとめられる(姉崎&三好, 2011; 三好&姉崎, 2011)。

- i) 高温煮沸反応(製錬部のアマルガム反応槽を加熱することにより、処理効率を4倍向上させていた事実を検討)
- ii) 高圧反応(海拔4,000mのアンデス高地での製錬環境では、水銀蒸気が反応場を増加する。逆に加圧することで、浸透による同様な反応場を作ることが可能と想定)
- iii) 粉砕とアマルガム反応の同期化(粉砕機の中で、粉砕と水銀アマルガム反応を同時に処理するのだが、衝撃や摩擦等の機械的エネルギーを与えることで、対象物質が活性化されて化学反応が促進する原理 [メカノケミストリー] を適用)
- iv) アマルガム後の分離精製技術(当時の技術では、水銀の大気中および水中への流出が推算されたが、現代科学の技術を用いて改良することにより、100%回収が可能)

これらの知見をもとに、現代科学の知見による幾つかの改良を加えることにより、貴金属回収のための新たなシステムとして再設計し、その効果を定性・定量分析装置による実験的検証を試みた(姉崎&三好, 2011; 三好&姉崎, 2011)。その結果、携帯電話等の試料中の銀をはじめとする貴金属が、水銀アマルガムとしてはほぼ100%回収出来ることが確認でき、その有効性の高さが十分に証明できている。また、今後の研究対象の広がりとして、資源化対象には、都市電子廃棄物にとどまることなく、廃棄物の焼却灰滓や汚染土壌、不銹鋼鉍滓並びに液体資源の酸洗廃液、メッキ廃液、処分場廃液なども視野に入れることができる汎用性も、差別化できる強みとしてゆきたい。

## 3. 実践的展開に向けたシステム構築の技術的特徴と今後の展望

本研究では、上述の希少・有用貴金属抽出に関する技術開発の基礎理論を用いたシステムを構築し、さらにこれに導入すべく開発した一次・二次破砕機は、小型家電リサイクルの最大の課題として挙げられている回収率向上や素材回収の効率化に寄与することを目的に設計された。ここでは、各破砕機の特徴を具体的に説明するが、これらを用いて考案した新リサイクルシステムの優位性を他の先行事例と比較しながら具体化し、さ

らに実践的展開を試みた成果(大学構内での携帯電話回収キャンペーンの実施)を紹介しつつ、今後の展望に関しても若干述べることとする。

### 3-1. 顧客接近度を高め、回収率向上に寄与する一次破碎装置の開発

「はじめに」で述べたように、都市鉱山、特に小型家電の場合、回収・収集・運搬の効率化が最優先されるべき課題として立証されている。さらに回収率に関しては、経済産業省・環境省の連携事業として、2008年度より『使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理推進事業』が実施され、2010年8月に公表された中間報告の中で、その課題が述べられている(環境省・経済産業省, 2010)。また、(社)電気通信事業者協会は、2001年よりモバイル・リサイクル・ネットワーク(MRN)を立ち上げ、携帯電話関連事業者の共同による回収率の向上を図るとともに、その過程でのアンケート調査を元に、回収率向上に向けた課題が具体的に明らかにされている(電気通信事業者協会, 2010)。これらを整理すると、退蔵に向かっている使用済携帯電話を回収するためには、電子機器の高機能化の要因を除けば、セキュリティも含めて顧客への接近度(足元・目前, 安心・安全, 提供対価等)の如何に関わっている。特に、小型家電は個人への分散性が高いため、接近度を上げるための工夫が益々重要になると考えられる。

そこで本研究では、市販の破碎装置((株)晃立工業製, MS-Z5)に着目し、基礎実験を重ねつつ、選択的な改良を加えた。MS-Z5は、従来の市販の機種にはない“crush and cut”という破碎方式であり、機密情報媒体粉碎機(マルチメディアクラッシャー)として、既に電子機器、小家電メーカー等の電子技術ノウハウの集積体製造現場や、研究開発部門の工程屑処理として活用されている。このMS-Z5に金属濃縮機能を付与した一次破碎装置を、上述した希少・有用貴金属抽出のシステムの最初のステップに導入させた。この一次破碎装置の特徴を具体化すると以下の通りである。

- 1) 顧客接近度(足元, 目前, 安全・安心)を考慮した基本装置: 使用電圧は100V単相で、一般家電として使用可能なものであり、目の前において可視容器内で瞬時に破碎を完了し、セキュリティの強化を図った仕様である点は、その回収率の向上に大きく寄与すると目論むことができる。
- 2) 金属濃縮機能の付与に向けた技術開発: 破碎部分の角度の変化による効果に着目し、連続処理プロセス化に向けた最適角度の選択を見出し、さらに破碎機の構造は、軽量物(主に非金属物質)と重量物(主に金属物質)との分離性を視野に入れたもので、回転速度、破碎品の物理分級等の実験によって、破碎粒径(ロストル径を10mmに決定)と分離手段を組み合わせたシステムを確立した [開発の基礎実験結果の詳細は前報(姉崎&三好, 2012)を参照]。

この一次破碎装置は、収集・運搬の代替となる自治体回収や店頭回収において、その

まま回収ボックス等として利用することが可能になるため、これまで先送りされてきた最大の課題である定常回収の効率化に大きく寄与するだけでなく、個人やコミュニティレベルでの環境意識を後押しし、包括的見地からも社会的意義は極めて高いものと期待される(一連のシステムの評価は後術)。

### 3-2. 特定金属の濃集分離を可能にする二次破碎装置の開発

上述の「一次破碎装置」に連動する二次破碎装置は、市販の高速回転ミル((株)三圧インダストリー製, SC-01)に改良を加えて軸回転数可変型(0~25000rpm)として開発した(改良機: SC-01S)。この装置は、特定金属の濃集分離を可能にすることを、その特徴として掲げている。

まず金属の濃集現象の確認実験を行った。一次破碎装置により10mm以下に破碎された破砕片50~200grを、二次破碎装置に投入し、回転速度25000rpm下で、さらに5~60秒破碎した後、粉砕片をJIS規格による篩を用いて粒度分布を行い、各粒度の金属成分(Cu, Au, Ag)をICP分析により、同定した。

次に、回転速度を25000rpmに固定し、金と銀の濃集現象と破碎時間(0~240s)との関係性を検討した(図5, 図6)。その結果、両金属ともに、5秒以上の破碎で、2mm以下<sup>9)</sup>に、95%以上濃集することが確認され、回転速度を10250rpm, 19500rpmに変化させた場合も、同様な傾向が得られた。これに対し、白金の場合は、金や銀の場合と異なり、2mm以上の粗片側に大部分が集積することが明らかとなった(図7)。したがって、貴金属3元素を高収率で回収するためには、2mm前後を分岐点として細片側と粗片側を分けて検討する必要があると、さらなる適切な条件を確定することが求められる[基礎実験結果の詳細は既報(姉崎ら, 2012)を参照]。

この二次破碎装置の特徴をまとめると以下の通りである。

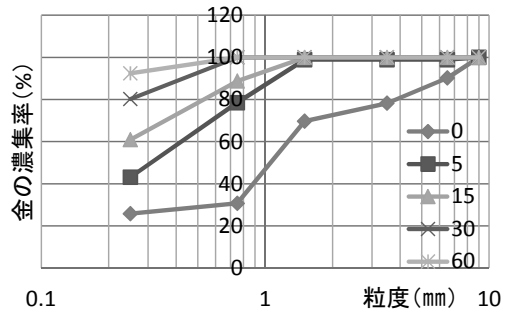


図5 金の濃集と破碎時間との関係

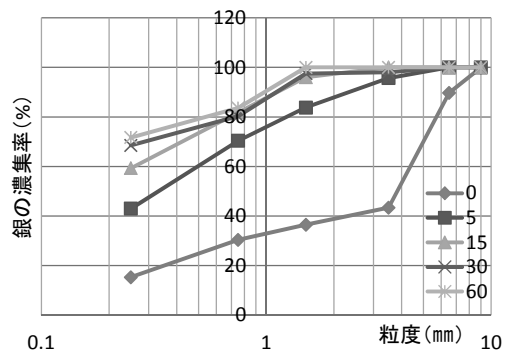


図6 銀の濃集と破碎時間との関係

- 1) 貴金属3元素の90%以上の濃集率：破砕片2mmを分級点として、細片側に金と銀、粗片側に白金を、90%以上濃集できることが明らかとなった。金・銀並びに白金について、上記の条件を同時に達成できる粉砕条件は、2mm分級点で、0.5mm以下の重量比が17%と見積もられた<sup>10)</sup>。
- 2) 貴金属以外の諸元素：それぞれの元素の破砕挙動は、携帯電話の構成要素とその金属の存在形態に依存しており、貴金属濃集・分級後、抽出・製錬する工程に差が生じる可能性が示唆された。

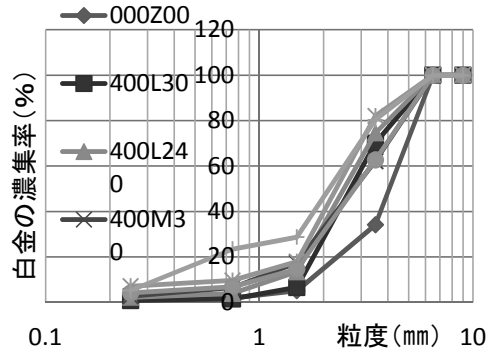


図7 白金と濃度分布と破砕時間の関係 (400g)

以上の基礎実験結果を包括し、本研究の連続二段式破砕により、金・銀・白金の回収に関して90%以上の濃集が可能になるため、最終的には抽出後の製品化にまで結びつけるインバース・マニュファクチャリングを構想し、目下、企業協力の交渉を進めている。

### 3-3. 回収率向上と貴金属濃集を図る二段式破砕機並びに独創的な抽出技術の優位性

環境省と経済産業省は、平成20年度から、適正かつ効果的なレアメタルのリサイクル構築を目指すべく、全国3地域において「レアメタルリサイクルモデル事業」を実施し、さらに21年度には4地域を新たに追加して、使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する検討を行ってきた(環境省・経済産業省, 2010)。その中で、回収に関しては、ボックス回収、さらに一手間加えたイベント回収や対面式ボックス回収等が実施されており、それぞれ適宜順調な成果が報告されている。ただし、ボックス回収の場合、あくまでも受動的な集荷になるため、周知・宣伝の方法に十分な成果が見込まれなければ、定常的取り組みの定着としては、かなり消極的であり、また異物混入の問題等も指摘されている。そこで、回収ボックスを、本システムにおける破砕機に置換することにより、セキュリティ保護、イベント性向上、環境意識の刺激等のあらゆる側面からの相乗効果が発生し、より高い収益を見積もることが期待される。

また、レアメタルリサイクルモデル事業の全体像(図8)から分かるように、消費者から「回収」、「収集・運搬」、「解体・選別」、「製錬」までのプロセスが、それぞれ別々の組織により作業されており、特に中間処理が「手作業」であるリスクと、製錬作業は専門業者(大企業)に委託するというシステムとなっている。当然ながら、消費者からは、使用済小型家電排出後の貴金属回収までの過程が見えないために、回収意識を高める効果は期待できず、モデル事業から、定常回収システムへと定着してゆくまでには、幾つかの課題が残されているといえよう。また、製錬作業は企業委託のため、個別の取り組みとは

別に、提携上の問題が発生する。さらに全体として作業を分散することで、歩留まりの低下や貴金属の品質低下は否めない。

これに対し、本システムを導入した場合、図中に示したように、「回収」、「収集」、「解体・選別」、「製錬」を一体化して担うことができ、また作業規模がコンパクトに収まり、手作業の危険性を回避しつつ短時間で効率的に実施することができる。また組織間の輸送で発生していた運搬費用等もコストダウンでき、製錬企業に頼らずとも小規模経営で一貫したシステムを担うことが可能となる。

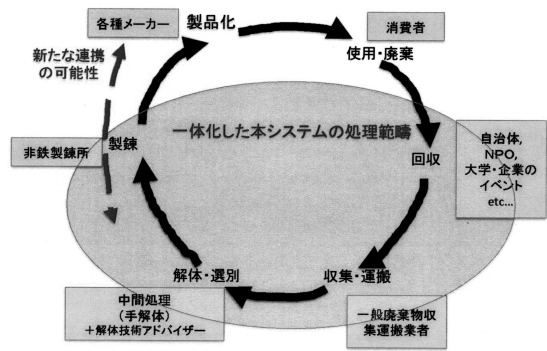


図8 レアメタルリサイクル事業の全体像に対する本システムの処理範囲

また特に設備を新たに整えなくても「収集」、「解体・選別」の部分的対応に関しては、破砕機を小売店等に設置することで可能となり、「携帯電話集荷の場合、集荷箇所を分散させる必要がある」という先行研究(Matsuo et al., 2011)で指摘された課題も解消できると考えられる。さらなる展開として、貴金属製品製造の企業と連携することにより、抽出した貴金属の製品化まで試みることも期待でき、今後、本研究の最終目的として達成してゆきたい。

なお、本技術開発に対する国策に呼応した評価(三好ら, 2011ab)に関して、主なものを挙げておく。まず、2011年1月に東京国際会議場で開かれた経済産業省主催の特別展示「3R(Reduce Reuse Recycle) special event」に招聘され、「レアメタル抽出に関する基礎理論」ならびに破砕機の試作の検討に関する技術展示を行い、注目を集めた。その際、社会の動向を取り込みながら、いかに回収率をアップしてゆくかを具体化することが、今後の課題と指摘されたため、破砕機の改良を重ね、二段式の破砕機の開発に至ったのである。その間の試行調査に関しては、2011年6月に開催された第1回希少金属資源開発推進基盤整備委託事業技術調査委員会にて、公表する機会も得られた。

### 3-4. 大学生協における携帯電話回収キャンペーンの試行による開発の効果の確認

本研究では、現状の問題点を打破すべく使用済携帯電話の積極的な回収に向けて、まず先行研究(電気通信事業者協会, 2010)やモデル理論(Matsuo et al., 2011; 梅澤ら, 2010)を分析し、さらに大学生を対象とした独自のアンケート調査<sup>1)</sup>を実施した結果により種々の課題を整理した。さらにそれらを再検討することにより、具体的な回収実践に向けての工夫点に繋げて評価してみた(図9)。

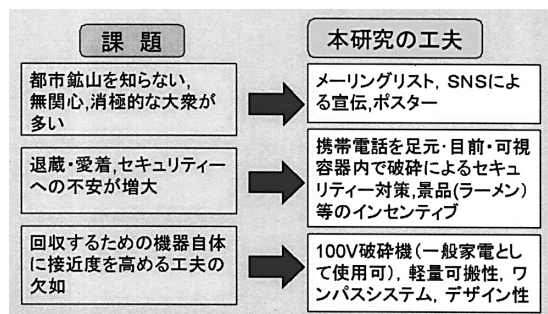


図9 大学キャンペーン実施のための工夫点



これらを踏まえ、リバースロジスティックスとして用いる身近で適切な回収場所(鉱脈)として、大学構内にある大学生協前(生協施設利用者は、約3500/日)を選定し、2011年11月28日から12月2日まで(7時間/日×5日間)、定常的な回収システムの構築に向けた試行実験を実施した。

その結果、特に3日目から回収率が急増し、最終的に回収された使用済携帯電話の総数は331個に達し、当初の予測を大きく上回る成果となった。提供された携帯電話は、機種、発売時期、メーカー等多種多様であった。これは、退蔵に向かうケースが圧倒的に多いことを証明しているが、提供者からは「処分に困っている」、「機会を逸した」等の声が多く聞かれ、さらに周知・宣伝を広げてゆくことで、安定した定常回収の拠点として十分に機能することが確認できた。他方、本実施場所が、工学研究科の隣接した地区であるため、研究上排出頻度が高い「電子基板」などの回収も、並行して可能になるものと期待される。

一方、NPO中部リサイクル運動市民の会の取り組みにおいて、生活スタイルに即して、小型家電の排出の波があると指摘されていることから(山口, 2012)、今回のように大学構内に設置する場合、携帯電話を新機種に変更しやすい卒業式前や年度初めに回収拡大キャンペーンの実施等を試みれば、さらに効率的な成果が期待できるであろう。今後は、大学公認環境サークル(筆者が顧問を担当)と連携しつつ、キャンパスエコロジーの実践の一環として組み込んでゆく予定である。さらには、大学を超えて、地域コミュニティにおけるシステムの運用を確認できるよう、自治体や企業との連携協力も仰ぎながら、使用済携帯電話の広域な鉱脈の確保と回収規模のさらなる拡大を目論む、社会実践に積極的に臨んでいきたい。

#### 4. おわりに

2013年より、我が国において、使用済小型家電機器等リサイクル制度が部分的に施行されることから、これまで基礎研究の分野で議論が活性化した貴金属回収技術開発を、法制度に即した実践的展開に確実に結びつける必要性が加速している。今後、上述した「レアメタルリサイクルモデル事業」により得られた各地域における成果等は、モデル地域への還元・継続性に留まらず、他地域へ相対化してゆく努力が求められるであろう。ただし、こうした実践的運用の評価と先端的技術開発の実現性の評価が、個別分断して実施されるのではなく、展望に向けた緊密な連携のパイプを確立してゆくことも求められるであろう。

本研究では、貴金属抽出の技術開発において、その基礎研究の高度化だけに目を向けるのではなく、「行動科学」に即した包括的システムとして展開してきたことが、実践

的展開に結びつく大きな可能性を生み出していると考えられる。さらに都市鉱山開発を含む環境問題は、一面的に分析・評価することが不可能であるため、共通の課題に対する学際的協力体制の構築とそれを基盤とした将来ビジョンを掲げる総合的システム研究が肝要になるであろう。つまり自然科学的な理解や技術・方法論だけでなく、社会や経済・政治の仕組みをどのように変えてゆくかを含めて、長期的な視野で時間的・空間的な変化の相に沿って体系的に分析する必要があり、さらにその課題解決のためには、国内での自助努力と他国からの国際協力とが連動して、包括的に持続可能なシステムを構築してゆくことが今後益々求められるといえる。

さらなる残された課題としては、小型家電の海外への「見えないフロー」にどのように貢献できるかという点である。すなわち、経済のグローバル化の進展にともなって、循環資源(再生資源・中古品)の貿易による越境移動が拡大してきており、また既報(三好, 2010&2011)においても、中国広東省スウトウ市近郊の貴嶼(Guiyu)村の事例等を挙げながら言及してきたように、越境移動に伴う環境汚染やリスクの移転問題にも目を向けてゆく必要がある。よって、もはや循環は国内だけを注視するものではなく、近未来的に国際的な循環型社会の構築(環境省中央環境審議会, 2006)を目指して、グローバルな視野から検討されるべき時代を迎えているといえよう。そこで、現在刻々進展している重篤な環境問題を改善すること急務であるといえるが、上述した本研究における技術開発は、その対象の汎用性から、直面する重金属汚染土壌の修復への寄与も可能になると考えられる。さらに、比較的安価で利便性が高い側面を活かし、将来的には現地社会のリサイクルシステム現場への導入等の国際貢献も期待できるため、本研究は多様な側面から、グローバルな環境問題の現状改善に役立つ可能性が示唆される。

一方、本研究で開発した貴金属抽出に関わる独創的な基礎理論は、これまで述べてきたように、旧スペイン領アメリカで用いられていた古典的な製錬技術から見出されている。そして、こうした製錬反応過程を示す化学反応式が生まれるのは、19世紀中庸であることに鑑みると、その当時、計り知れぬ程の試行錯誤の繰り返しの中から、卓越した観察力と洞察力が活かされつつ、巧妙な技術として体系化されていったものである点も見逃せない。しかし、この鉱山業のシステム化を実現するためには、極めて多くの先住民が強制労働を強いられ、水銀中毒や過酷な労働による健康被害や命を落とす危機にさえ晒されていた事実(染田, 1986)があったことを忘れてはならない。

環境汚染問題は事の起こりから、その被害を受ける人々の多くが、経済的・社会的に不利な立場に置かれている社会的弱者であったり、また老人や子どもなどの生理的弱者であったりしたが、グイユ村における電子廃棄物問題の事例に見るように、現代社会においてもその状況にはいまだ改善が見られない。よって、「社会的に脆弱な部分」(The Commission Human Security, 2003)に注視してゆく人間の安全保障に立脚したアプローチとその実践的展開が、環境問題改善にも益々求められていることは間違いない。さらには、変化を繰り返す環境の中で、個人や地域がその能力を高めて、生活への脅威を

認識する主体として、さらに自らの判断に基づいて行動する主体として、エンパワーメントを培ってゆくことも、長期的な視野を持って、包括的に支援してゆくことが求められるであろう。

他方で、本研究における技術開発の姿勢として、人々の生業から開発の鍵を見いだすという視点は、自由な発展を目指してきた先端科学技術の社会へのアプローチとして、再評価されるべきものであろう。なぜなら、2011年3月に日本で発生した福島第一原子力発電所の事故において、リスクは人間の行為を伴う危険であるために、回避が極めて困難であることを再確認するとともに、利便性の向上や経済性を目論んで開発されてきた「技術」自体が、システムとして未完成のものであり、その社会への適用のあり方を懸念する教訓が深く刻まれることとなったからである。

以上のように、本研究の一連の成果は、数百年前に生きる先人たちが残してくれた「人間の知恵の結晶」と称すべき技術の所産を、長期的な時間軸を超えて、現在、刻々と進行している環境問題の改善へ還元するために活用することが期待され、今後は包括的・学際的討究を強化しつつ、さらなる進展に期待してゆきたい。

## 謝辞

本研究は、平成21年度大阪大学人間科学研究科ヒューマンサイエンスプロジェクト経費「水銀汚染土壌の改質と貴金属回収に関する応用開発に直結した基礎的研究」並びに平成23年度同経費都市鉱山(中古携帯電話)からの稀少資源(貴金属・レアメタル)回収技術開発により達成できた成果を多く含んでおり、助成頂いた大阪大学人間科学研究科に深謝致します。また、(株)住友金属工業、(株)晃立工業、ブラジル徳島県人会より研究奨励のご支援を頂戴しました。破碎装置改良に関しては、(株)晃立工業並びに(株)三圧インダストリーに多大なるご協力を頂きましたことを厚く御礼申し上げます。さらに携帯電話回収キャンペーンでご支援頂いた大阪大学生生活協同組合吹田支部の関係者の皆様、期間中、携帯電話をご提供頂いた皆様に、この場をお借りして謝意を表します。

## 注

- 1) 天然鉱山が自然の作用で有用物質が濃集している地形上の場所(鉱床、鉱脈)を差すのに対して、その有用物を人為的に採掘して以降、製品となり廃棄物となった有用物質を人為的に集積させた場所を人工鉱山という。しかし鉱山としての価値はその集積度合いによってきまり、集積状況は概して人口密度に比例するので、再生可能資源の濃集した都市こそが資源循環の場と位置付け、有用物質の蓄積された場所を都市鉱山と定義した(南條, 1987)。
- 2) インバース・マニユファクチャリングとは、従来のものづくりの「設計→生産→使用→廃棄」という工程の「廃棄」に替えて、「回収→分解→選別→再利用→生産」という使用後の流れをあらかじめ考慮して、製品を設計・製造する仕組みのことである。

- 3) 製錬(smelting)は主に鉱石から金属を抽出する操作であるが、精錬(refining)は金属から不純物を除去する操作である。
- 4) 水銀は常温で液体であり、多くの金属と化合物(特に金属間化合物)を容易に形成するが、その化合物もしくはその微粒子を懸濁した状態をアマルガムと総称する。金が最もアマルガム状態になり易く、古くからこの性質を利用して製錬やメッキが行われてきた。銀に関してはその原理が生かされ実用化されたのは中世以降である。アマルガム製錬は多くの場合媒溶剤と同時に塩と水を添加するので湿式製錬に属し、本稿でも詳細を述べている。
- 5) 1563年に発見されたペルー領内にあるワンカベリカ鉱山の水銀を、王室の専売として確保した。
- 6) ポトシ銀鉱山は、1545年に発見されていたが、初頭は伝統的な先住民のグアイラ法で精錬されていた。この手法では、高品位の鉱石のみしか精錬できず、1572年頃には品位が落ちて低迷し、しかも屑鉱が堆積してしまった。
- 7) 金属の製錬法には三方式ある。湿式/乾式/電解の各製錬法である。前二者に関しては製錬を水溶液などの溶媒中で行う場合湿式精錬であり、それ自体の熔融状態や気体を反応物質とする場合は乾式製錬である。駆動力に電気を使った湿式精錬が電解製錬といわれる。
- 8) 現在ではアマルガムを構成している金属間化合物は $\gamma$ 合金 $Ag_4Hg_5$ であると判明している。
- 9) 粉碎後、2mm以下と0.5mm以下の重量比の間に、正の相関が認められ、また累積重量分布との関係性から、過粉碎を防ぐために0.5mm以下の重量収率を17%前後に設定することが、最適条件となることが見いだされた。
- 10) 0.5mm以下に重量比17%を植える破碎条件は、破碎重量ごとに回転速度の元決定される所用破碎時間で示され、この関係性は、破碎室内の粉体挙動を翼型破碎機の流体力学的相似形と捉えることで、所用破碎時間を回転速度の三乗則で算出できる可能性が示された。
- 11) 2010年11月、人間科学部・法学部等の学生(約150名)を対象に、2度に渡り、簡易な記述式のアンケート調査を実施した。

## 引用文献

### (日本語文献)

青木康征 (2000), 『南米ポトシ銀山』, 中央公論新社

姉崎正治 (2009), 「イスマノアメリカの植民地時代における銀鉱山での水銀汚染に関する地域動態的研究」, 『グローバル人間学』, Vol.1, pp.55-68.

姉崎正治, 三好恵真子 (2011), 「スペイン植民時代のポトシ鉱山における銀製錬技術の再評価と今日的応用開発への可能性」, 『大阪大学人間科学紀要』, Vol.37, pp.299-319.

姉崎正治, 三好恵真子 (2012), 「都市鉱山に関する実践的研究—使用済携帯電話の破碎特性

- に関する基礎的検討」、『大阪大学人間科学紀要』, Vol.38, pp.131-153.
- 姉崎正治, 三好恵真子, 山本高郁(2012), 「使用済み携帯電話の二段破碎過程における各種金属の分離・凝集現象」, 第164回鉄鋼協会秋期講演大会シンポジウム講演資料.
- 梅澤光希, 増田悦夫 (2010), 「携帯電話端末の回収とその効率化に関する検討」, 『日本物流学会誌』, Vol.18, 81-88.
- 小島道一(編) (2005), 『アジアにおける循環資源貿易』, 日本貿易振興機構(ジェトロ)アジア経済研究所.
- 環境省・経済産業省 (2010), 「使用済み小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会リサイクルシステムワーキンググループ中間とりまとめ」
- 環境省中央環境審議会 廃棄物・リサイクル部会 国際循環型社会形成と環境保全に関する専門委員会 第二回中間報告概要版(2006年1月30日).
- 経済産業省 (2009), 『レアメタル確保戦略』, pp.1-37.
- 佐渡市教育委員会世界遺産・文化振興会、新潟県教育庁文化行政課編著(2008), 『黄金の島を歩くー佐渡銀金山の歴史と文化ー』, 新潟日報事業者.
- 染田秀藤 (1989), 「スペイン領アメリカペルー副王領」, 『ラテンアメリカ史、植民地時代の実像』(染田秀藤編) 世界思想社, pp.97-206.
- 寺園淳 (2008), 「日本からアジア各国へ向かう使用済み電気電子機器：ごみか資源か」, 『科学』, Vol.78, pp.768-772.
- 寺園淳, 吉田綾 (2012), 「使用済家電製品の国内フローに関する考察と中古品輸出量の推定」, 『廃棄物資源循環学会誌』, Vol.23, 280-294.
- 電気通信事業者協会 (2010), 「携帯電話・PHSリサイクルに関するアンケート調査結果」
- 中野定雄, 中野里美, 中野美代 (1986), 『プリュウスの博物誌』(第III巻), 雄山閣出版
- 南條道夫 (1987), 「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づけ」, 『東北大学選鉱製錬研究所集報』, No.43, pp.239-251.
- 原田正純, 中西準子, 小沼晋 (1995), 「ブラジル・アマゾン水域の採金による水銀汚染調査」, 『公衆衛生』, Vol.59, p.p.307-311.
- 三好恵真子 (2010), 「集積する都市電子廃棄物による中国の環境問題とその対策ー人間の安全保障とサステナビリティ学の実践的展開を目指してー」 *New Food Industry*, Vol.52, pp.53-61.
- 三好恵真子 (2011), 「集積する都市電子廃棄物による中国の環境問題並びに希少金属回収に関する技術開発」, 『大阪大学中国文化フォーラムディスカッションペーパー』, No.2011-11, pp.1-16.
- 三好恵真子, 姉崎正治 (2011), 「先人の知恵の結晶を未来へ活かすー独創的な文理融合研究による環境汚染改善への挑戦ー」 *New Food Industry*, Vol.53, pp.69-79.
- 三好恵真子, 姉崎正治, 福廣匡倫 (2011a), 「都市鉱山(廃棄携帯電話)開発に関する共同研究」, 3R(Reduce Reuse Recycle) special event 中小ベンチャー企業パビリオン経産業

省主催特別企画(40回インターネプコン・ジャパン・第28回エレクトロテスト・ジャパン), 東京 国際展示場, 1月19~21日.

三好恵真子, 姉崎正治, 福廣匡倫 (2011b), 「中古携帯電話の金属濃縮型破碎装置の開発並びにそれを活用したレアメタル備蓄システム構築への実践的試行」, 平成23年度第1回希少金属資源開発推進基盤整備委託事業技術調査委員会, 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC), 東京, 6月27日.

村上進亮 (2012), 「小型家電のフローと回収・収集・運搬」, 『廃棄物資源循環学会誌』, Vol.23, 303-310.

森下哲 (2012), 「使用済小型電子機器等リサイクル制度の概要と今後の取り組みに関する考察」, 『廃棄物資源循環学会誌』, Vol.23, 280-294.

山口訓世 (2012), 「経済産業省・環境省モデル事業：名古屋・津島モデル」, 国際協力シンポジウム『眠る都市鉱山：レアメタルーリサイクルが拓く資源大国への道』, 講演発表資料

山本勇三 (1938), 『産金』, ダイヤモンド社.

#### (外国語文献)

Acosta, P. J. (1894) *Historia Natural y Moral de las Indias, (1590)*, Sevilla: Casa de Fuan de Leon.

Arzáns de Orsua y Vela, B. (1965) *Historia de la Villa Imperial de Potosí*, ed. Hanke, L. Y., Mendoza, G., Brown University Press.

Barba, A. A. (2003), *Arte de los metales*, Valladolid: MAXTOR.

Bargalló, M. (1955) *La Minería y la Metalurgia en la América Española durante la época colonial*, Mexico: Fondo de Cultura Economía.

Biringuccio, V. (2005) *De la pirotechnia*, English, DOVER Publications Inc.

Capoche, L. (1959) *Relación general de Villa Imperial de Potoí*, ed. Hanke, L., Madrid.

Cole, A. J. (1985) *The Potosi Mita, In 'California'*, Stanford University Press, 1573-1700.

Percy, J. (1880) *Metallurgy: Silver and Gold-1*, London: John Murray.

Probert, A. (1997) Bartollome de Medina: The Patio Process and the Sixteenth Century Silver Crisis, An Expanding World. The European Impact on World History 1450-1800 (ed. Bakewell, P. ), Vol. 19, VARIORUM., 96-129.

Rhead, L. E. L. (1895) Extraction of silver. *Metallurgy.*, pp. 267-285.

Matsuo, S., Jung-Ah, K., Murata, K., Dodbiba, G. and Fujita, T. (2011) *Evaluating the Practical Application of Underwater Explosion for Recycling*, Vol. 58, 52-58.

The Commission Human Security (2003) *Human Security Now: Protecting and Empowering People*, N. Y..

## **A Technological Development and Practical Approach for Strategy for Ensuring Stable Supplies of Rare Metals**

Emako MIYOSHI and Shoji ANEZAKI

Japan needs effective schemes for recycling apart from the Home Appliance Recycling Law; particularly needed are further collection of used PCs under the existing scheme and a system to collect cell phones and small household electronics. Moreover, despite the growing interest in the environment and recycling, the industry struggles to obtain enough used mobile phones to feed its recycling plants.

Mobile phones contain high concentrations of useful metals, including various rare metals. Promoting their recovery and recycling is important from the viewpoint of effectively using resources. Thus, because a recycling system for small household appliances, such as mobile phones, will be legislated in 2013, further technological development and a more practical approach are needed for the so-called urban mines, places where material is reclaimed from urban waste for reuse.

Therefore, we have been developing a practical approach to be used in urban mining for the recycling of rare metals from used mobile phones. We use an interdisciplinary approach relating to the re-evaluation of the Silver Smelting Technology in Colonial Peru as the basis for our new technical development. We focus on the smelting technology of the Potosi Mine, which was the first successful venture in the industrialization of silver amalgamation during Spanish colonization; it demonstrated key technologies in related historical documents, from the perspective of scientific knowledge. We present a schematic model to explain the smelting technology of the Potosi Mine, believing that we could use these basic theories for our new technical development.

In addition to emphasizing extraction efficiency, we have elaborated on additional experimental devices in order to encourage consumers to recycle mobile phones and increase mobile phone recycling rates. Our newly developed system has excellent features that include a crushing operation, metal concentration, and physical classification. Thus, in order to enhance the extraction of precious metals, such as gold, a device crushes used mobile phones into flakes of less than 10 mm in size in the first step. It is easy to operate because it uses ordinary AC power and a viewable crushing process. Moreover, the size of the pieces can be adjusted in accordance with not only the required security level but also the desirable metal concentration by means of various optional properties. In using the second step of the crushing device with a rotation speed between 0 and 25000 rpm, more than 95% of the gold, silver, and platinum were concentrated into a product that was ground into pieces of less than 2 mm in size.

Using this new system, we held a successful campus campaign for recycling used mobile phones, with 331 used mobile phones returned during the campaign period. In this way, we are continuing research that will contribute to a strategy for ensuring a stable supply of rare metals.