OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	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
Author(s)	三好, 恵真子
Citation	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. 2011, 2011-11, p. 1-16
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/13314
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Osaka University
Forum on China

Discussion
Papers
in
Contemporary
China
Studies

No.2011-11

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

三好 恵真子

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

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 *

2011 年 9 月 10 日

三 好 恵 真 子†

* 本稿は 2011 年 8 月に中国・内モンゴル大学で開催された第五届現代中国與東亜新格局国際学術研討会「百年中国與周辺地域」における提出論文を改編したものである。

† Associate Professor, Graduate School of Human Science, Osaka University, 大阪大学大学院人間科学研究科准教授 (emako@hus.osaka-u.ac.jp)

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を整えられてきた。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、もはや国際的な循環型社会の構築を目指すべき時を迎えている。

中でも中国広東省汕頭（スワトウ）市近郊の貴嶼（Guiyu）は、都市電子廃棄物（E-waste）の大量輸入や不適切なリサイクル，残渣の投棄による重金属中毒の村として知られている。米国の環境保護団体による最初の警告以来、国連や種々の NGO 団体の関心が高まるとともに、環境・土壌汚染調査並びに住民の健康被害・リスクに関する疫学的・医学的調査が進められており、今後は曝露経路を含めたより詳細な分析と具体的な対策が急務といえる。加えて中国では、自国内で発生する都市電子廃棄物の問題も急速に深刻化しており、地域レベルでの取り組み等も徐々に進められている。国策としては、2009 年に循環経済促進法が基本法として施行され、続いて個別法としての廃棄電気電子製品回収処理管理条例が公布されたが、いずれも制度と実態が伴っていない側面は否めず、より包括的な対策と実践が望まれる。

そこで本研究では、イスパノアメリカの植民地時代における古典的な製錬技術に再注目した結果、現代社会にも応用還元可能な重金属汚染の復元・再資源化の基礎理論の構築と回収システムの設計に成功し、特にリサイクル・プロセスから希少金属備蓄へのルートを算出できる点が、従来研究と差別化できる特徴でもある。さらに具体的な実践を目論むために、日本でも法制度的に回収システムが未整備であるものの、含貴金属品位の面で高価値資源である廃棄（中古）携帯電話に着目した。携帯電話は、日本における潜在的回収可能台数が年間 5,000 万台（2010 年）と推算されているが［リサイクルシステム WG，2010］、種々の理由により未回収の形で停留している場合が多いため［経済産業省，2010］、本研究ではその回収率の向上に連動可能な独創的な技術開発（金属濃縮型破砕装置）も試みている。

本稿では、グローバル経済システムがもたらす負の影響が強く反映されている都市電子廃棄物に着目し、現状における問題の所在を明らかにするとともに、環境汚染を改善する技術開発の経緯や実践的展開の進捗状況を提示し、さらに持続可能な社会に向けた包括的システムの構築を目指した今後の展望についても若干述べることとしたい。

Ⅰ．研究の着眼点と課題：越境移動する循環資源の弊害

１）使用済み家電製品の海外への輸出と法的解釈の差異の問題

我が国では、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 年より施行された。しかし、この法定ルートに乗らず、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、不法投棄されたり、中

古品として海外に輸出されたり、国内でフロン回収などがなされずに分解・破砕されるなど、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。そのうちテレビの場合、2006 年度までは、香港に対して 150 万台前後の日本からの輸出が存在していたが、香港の CRT テレビ・モニタの輸入規制の強化について、2007 年に経済産業省・環境省から国内関係者宛に通知されて以降、輸入量は大幅に減少している。中国では、2002 年より、部品を含めた廃電子電気製品の輸入が完全に禁止され、輸入量は少ないものの、この香港の輸入規制の影響を受けたためか、中古と推測される低価格のテレビの中国への輸出が 2007 年には 30 万台強まで増加したと報告されている［寺園，2008］。

一方、パソコンに関しては、資源有効利用促進法によって（事業所系は 2001 年より、家庭系は 2003 年より）リサイクルが義務づけられているが、使用済みパソコンの多くは、国内市場で中古品として流通するか、一部は中古品として海外輸出されている。国立環境研究所によれば［寺園，2011］、貿易統計の単価により新品と中古のパソコンの輸出先を調査した結果、9 割以上の中古パソコンは、アジア地域へ輸出されており、特に香港が主要な輸出先になっているという。

「**はじめに**」で述べた循環型社会形成促進基本法（2000 年）において、廃棄物や中古品は、有価・無価を問わず、「循環資源」として一体的に捉えようとなされている。しかし日本では「廃棄物」として扱われるものでも（**図１**）、中国などアジア諸国では、安価な労働力と莫大な資源需要を背景として、価値ある「資源」と見なされる場合が多く、その処理問題の解決を益々困難にしている。

こうした循環資源の国際的な移動に関する主要な枠組みとしては、「多角貿易体制」と「バーゼル条約」（「有害廃棄物の国境を越える移動及びその処分の規制に関するバーゼル条約」）により規制を受けており、バーゼル条約では、廃棄物に排出経路や有害特性等を踏まえて、規制対象を示しており、その対象物品について、輸出入の承認が必要などの枠組みが定められている。

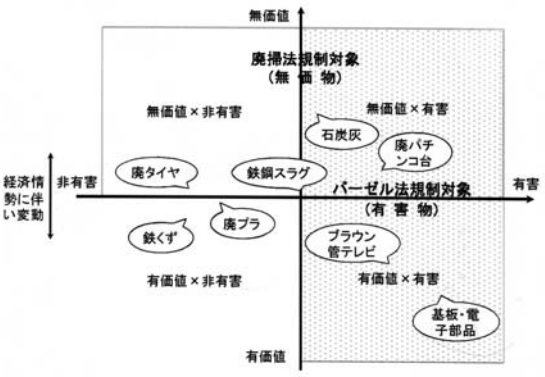

図１　日本の廃棄物処理法とバーゼル法の適用範囲と対象品目例

しかしながら、その締約国の 3 分の 2 が途上国であるということもあり、多くの締約国の中で製造者責任の導入、使用済み機器のテイク・バック・スキームの構築への取り組みがあまり進んでいない。さらに、経済格差，技術格差，その他の問題から、大半の国が、政策、経済、技術的に、有害廃棄物をはじめとする廃棄物の環境上適正な管理に達成することが困難な状況にあるといえる。

２）広東省貴嶼村（Guiyu）**の事例**

国連環境計画（UNEP）の統計によると、世界で毎年約五千万トンの電子廃棄物が生じており、その内の 7.2 割が中国で処理されているという。すなわち、世界の工場として各国から電子部品

が集まる中国は、電子ゴミの集積地でもあり、その処理に伴って引き起こされる重金属汚染への対策の遅れが問題視されている［三好, 2010］。

中国広東省汕頭（スワトウ）市近郊の貴嶼（Guiyu）は、大量の都市ゴミ・電子ゴミが持ち込まれる電子ゴミ重金属中毒の村として知られている。貴嶼村は、もともと純粋な農業生産地であったが、1995 年頃から電子廃棄物を搬入して処理業務を手掛ける業者が現れ始めてからは、農業を大幅に上回る収入の刺激により広範囲の創業ブームが興るに従い、最大規模の電子廃棄物処理地域に変貌していった。この問題に対して、最初に警告したのが米国の環境保護団体「バーゼル・アクション・ネットワーク（Basel Action Network：BAN）」による報告書（2002）であり、世界を震撼させ、国連や NGO 団体の関心を吸引する契機となった。この BAN の予備調査によれば、電子廃棄物焼却地の近くの川の水から 1.9mg/l の鉛が検出されており、この値は、WHO の基準の 190 倍に相当する。さらにグリンピース・チャイナは、2003 年より中国の電子廃棄物削減運動を始めており、当時、海外のマスコミや環境団体との連携を通じて、貴嶼の実情を世界中に伝え、中国の劣悪な電子廃棄物処理の現状を広く知らしめた。

こうした環境汚染への懸念の高まりに連動して、住民の健康被害やリスクに関する疫学的・医学的調査も進んできている。スワトウ大学病院は、貴嶼一帯の住民に関して、皮膚の炎症，頭痛，目眩，吐き気，慢性胃炎の高度の発症を報告している［Qiu et al., 2004］。また、貴嶼村の 4 つの幼稚園の 1 歳から 6 歳までの 165 人の子どもたちを対象とした調査では、82%の子どもの血液から 100μg/l を超える鉛が検出され、これは子どもの IQ・中枢神経の発達や将来の生殖機能などに悪影響を及ぼすレベルに達していた［Peng et al., 2005］。さらに、貴嶼周辺と隣接する澄江（Chengjiang）に住む 8 歳以下の 278 人の子どもの鉛とカドミウムの血中濃度を調査した結果によれば、貴嶼の子どもは澄江と比較して著しく値が高く、平均身長も有意に低いことが示され、また年齢が増加するにつれて、重金属の濃度が高くなることが明らかになった［Zheng et al., 2008］。しかしながら、医療体制が不十分で、出稼ぎ労働者も多く、住民の健康被害の全容は明らかにされていない。その他、芳香族炭化水素（PAHs）［Yu et al., 2006］や PCB やプラスチック類の燃焼により非意図的に発生するダイオキシン類（PCDD, PCDF）［Yu et al., 2008］の土壌汚染に関する学術的調査も行われており、二次的被害の深刻さも明らかにされている。これらの環境汚染の実態は、Wong ら［2007］が総括的にまとめているが、より詳細なデーターとその分析が急務であるといえる。

このような状況に鑑み、国家環境保護総局は、2005 年 4 月に改正された「固体廃棄物環境汚染防治法」を受けて、2007 年 10 月に「電子廃棄物環境汚染防止管理弁法」を公布し、2008 年 2 月に施行した。この法律では、中国国内で不法分解・処理等が原因で地下水汚染等をもたらすとして深刻な問題になっている電子廃棄物の分解処理の対処が目的となっている。すなわち、電子廃棄物分解処理業務に従事する業者を地域ごとに名簿登録をして管理し、この名簿を公表するとともに、分解処理を個人または未許可業者が行うことを禁止している。よって中国では法律上、未許可で電子廃棄物の分解を行うことが禁止されているものの、現実の実態は矛盾が生じており、

人々は生活のために仕事を失うことを恐れ、法規制が無視され、未許可での解体処理労働が続けられている。

加えて中国では、自国内で発生する都市電子廃棄物の問題も急速に深刻化しており、地域レベルでの取り組み等も徐々に進められている。国策としては、2009 年に循環経済促進法が基本法として施行され、続いて個別法としての廃棄電気電子製品回収処理管理条理が公布されたが、いずれも制度と実態が伴っていない側面は否めず、より包括的な対策と実践が望まれる。

以上のように、この都市電子廃棄物の問題の根底にも、政策決定とその成果との剥離が明白であり、これらの距離を克服するための「人間の安全保障」を目指す取り組みが求められることは間違いない。

Ⅱ．過去と現在の対話から未来への貢献：独創的な文理融合研究よる成果

1）開発の契機：ペルー副王領のポトシ鉱山における銀のアマルガム製錬技術への着目

現在、中国の重金属汚染に関しては、上述したように、貴嶼（Guiyu）村を含めて環境への影響や住民の健康被害やリスクに関する学術的調査も進んできているものの、いずれも汚染の実態や問題提起に終始しており、環境改善・保全対策をも言及したものは見あたらない。また、中国の土壌汚染は、現時点でようやく全土調査が終えられる段階に過ぎず［渡邊, 2010］、経済急成長の裏側で、重金属汚染事故が多発している状況にある。そこで本研究では、グローバルな責務からも、こうした重金属汚染土壌の修復・改善に対する包括的・持続的システム構築の緊急性を重視し、貴金属回収並びに環境改善・リスク削減に関する基礎理論を見出し、そのシステムの構築と将来的な実践的展開を目指して、包括的な討究を進めている。すなわち、Ⅲにおいて具体的に述べてゆくように、現在刻々と進行している「重金属汚染土壌の復元」に寄与するとともに、そこに連動して有用貴金属の回収を実現し、さらに将来的には、都市電子廃棄物のリサイクルシステム現場への導入等の可能性も模索できるものである。そして本研究の独創的な特徴は、歴史学と製錬工学を基軸とした文理融合研究並びに「過去・現在・未来の時間軸を超えた対話」を軸にした「環境改善・貴金属回収」に関する技術開発に成功した点にある。

そもそも、技術開発の発端は、イスパノアメリカ植民地時代にまでにさかのぼる。1568 年 5 月にペルー第 5 代副王として就任したフランシスコ・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[1]（水銀アマルガム法[2]）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、

[1] 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。

[2] 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。

広く汎用されたのである。

トレドの鉱山業は、ワンカベリカ水銀鉱山[3]とポトシ銀山[4]を一体化して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もできる。

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ー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、採用されなかった。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２**）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」，「鉱石の粉砕」，「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。

図２　ポトシ鉱山における製錬工場の概観図

[3] 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。
[4] 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。

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、海抜 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の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ー100%回収していたとされる［Acosta, 1894］。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ー50%と推定され、合計で少なくとも 40ー50%の水銀ロスが発生していたと考えられる［姉崎ら，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ー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買す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３**のように示すことができる。

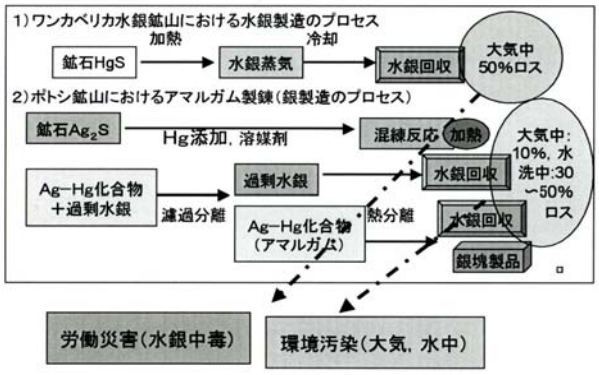

図３　ポトシ鉱山におけるアマルガム製錬技術と水銀被害との関係性

２）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。

a）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、著者のビ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、臼式の粉砕機を利用してアマルガム化する方法を明示しており（**図４**）、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エスパーニャ（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５**である［姉崎&三好, 2011］。

図４　中世ヨーロッパにおける石臼粉砕機を利用したアマルガム化

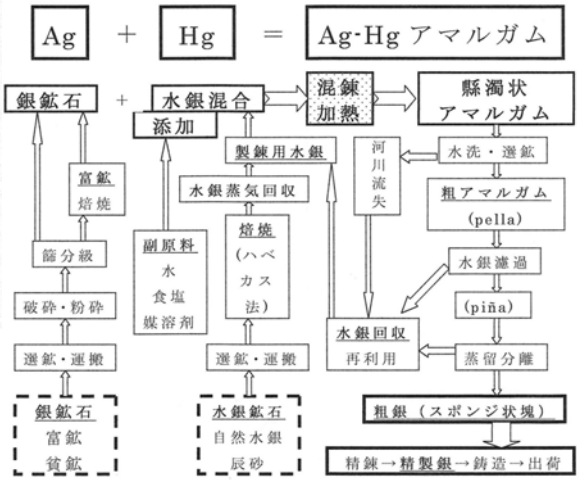

図５　ポトシ鉱山の銀製錬プロセスの工程図

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（粉砕と反応の同期化)、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撹拌混合方法と効果（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製錬法の選択，②スポンジ塊の活用

以上の中で、本研究の新技術開発のおける核心部は、ii) の高粘度鉱泥の湿式製錬[5]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力学的な研究は、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湿式製錬の基礎をみると、重要な事柄が 2 点存在している。すなわち、一つ目は、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ー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ー7 日に短縮されたという。また、ii) ②撹拌混合に関しては、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撹拌しているが、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、このような撹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、鉱石粉砕と水銀との反応を同期化する手法は、**図４**や後術する‘Pan Amalgamation（鍋混溲法）’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。

ｂ）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

$$CuSO_4+2NaCl=CuCl_2+Na_2SO_4$$

ii) 塩化第二銅（$CuCl_2$）や塩化第一銅（Cu_2Cl_2）が自然銀（Ag）や硫化銀（Ag_2S ）を塩化銀（AgCl）にして析出分離する反応

$$2CuCl_2+2Ag=2AgCl+Cu_2Cl_2$$

$$Cu_2Cl_2+Ag_2S=2AgCl+Cu_2S$$

[5] 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、それ自体の溶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。

$2CuCl_2+Ag_2S=2AgCl+Cu_2Cl_2+S$

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(α)[6]中に取り込まれてアマルガムとなる反応

$2AgCl+2Hg=2Ag+Hg_2Cl_2$

$mAg+(n+\alpha)Hg=(Ag_mHg_n)$ in Amalgam

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（鍋混渾法）'であり、これは、ビリングッチョの手法（**図** 4）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、この鍋混渾法そのもの、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。

Ⅲ. 重金属汚染改善の技術開発と実践的システムの構築に向けて

１）重金属汚染改善・貴金属回収に関する技術開発の基礎理論の構築

以上述べてきたように、本研究では、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、都市電子廃棄物から貴金属回収等の「現代社会」に応用還元可能な重金属汚染の復元･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。ここで抽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］。

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（海抜 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］。その結果、携帯電話等の電子廃棄物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

[6] 現在ではアマルガムを構成している金属間化合物はγ合金 Ag_4Hg_5 であると判明している。

明できている。また、研究の広がりとして、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，不錆鋼鉱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。

将来的には、都市電子廃棄物の環境改善・再資源化の実践的還元の実現を目指してゆくが、目下、日本における実践的システムの構築を目論み、対象として都市鉱山の一つである中古携帯電話に着目して、そこから希少貴金属回収に向けた更なる技術開発を進めている。その進捗成果を以下に簡単に述べてみることにする。

２）システムの構築に向けての実践的展開と今後の展望

近年の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］。特に、都市鉱山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、潜在的回収可能台数が年間 5,000 万台に達する中古・廃棄携帯電話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未だ未整備である上に、種々の理由（セキュリティー，ガラパゴス化等）により、退蔵品の形も含めて未回収のまま停留している場合が多く、全リサイクル過程（回収工程，破砕工程，金属抽出工程）を通じても、その回収率が極めて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。

上述した『レアメタル確保戦略』（2009）における 4 つの柱として、「海外資源の確保」，「リサイクル」，「代替素材の開発」，「備蓄」が掲げているが、本研究では、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が、従来研究と差別化できるところでもある。すなわち、携帯電話の回収後の処理において、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、数多くの研究成果が報告され、実用化段階に至っているものも少なくない。さらに本研究では、それに先立つ回収システムにおいて、機器自体に接近度を高める工夫を凝らして回収率の向上を図りつつ、備蓄量増大に繋げることを目論んだ、一貫性のあるシステムの構築を目指している。

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 月に中間報告が公表された［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、回収率向上に関する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］。それらを整理すると、退蔵品となっている中古携帯電話を回収するためには、電子機器のガラパゴス化の要因を除けば、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、小型家電は個々人への分散性が高いので、接近度を上げるための工夫が益々重要になると思われる。

そこで、本研究では、市販の破砕装置に選択的な改良を加えて、金属濃縮機能を付与した試作機を作成した。その特徴を具体化すると以下の通りである。

i) 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砕を完了し、セキュリティの強化を図った仕様。

ii) 金属濃縮機能の付与に向けた開発：破砕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、さらに破砕機の構造は、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、回転刃の形状，回転速度，破砕品の物理分級等の実験によって、破砕粒径と分離手段を組み合わせたシステムを確立した。

今後は、さらに積極的な携帯電話の回収に向けて、先行研究やモデル理論を分析した結果も加味しつつ、実践的調査（2011 年秋に実施予定）により、定常的な回収システムの構築の具体化を試みたい。

一方、中国における中古携帯のニーズ[7]は膨大にあるものの、携帯電話のリサイクルに関しては、日本に比べてさらに法律の整備が遅れており、政府が回収・リサイクルに関与する動きもほとんど見られない。政府は、2009 年に廃棄電気電子製品回収処理管理条例を公布し、その条例の細則の制定に積極的に取り組んでいるものの、携帯電話の回収・リサイクルへのサポートはほんど存在しない。しかし、2005 年に通信事業メーカーが連携して「グリーンボックス計画」を立案し［廬，2010］、使用済み携帯電話の回収・リサイクルに取り組みはじめており、今後より多くのアクターがこの計画に参画することによって、回収率のアップが見込まれている。ただし、ここで回収された携帯電話は、インフォーマルの処理業者において低レベルの処理が施され、健康被害や環境汚染に繋がっているため、法律や制度においてインフォーマルのルートや処理の規制を行う必要性に迫られている。よって、日本のリサイクルの経験を参考にして、中国に即した制度や政策を模索することが重要な鍵を握ると考えられる。

おわりに

以上のように、本研究で取り組んでいる学際的研究は、もともと歴史学に端を発し、それに製錬工学を融合させて実践的展開を構想するという、極めて独自性の高い試みとして捉えることができる。また、水俣病の社会問題化により 1970 年代以降途絶えてしまった製錬研究分野に、応用開発の側面から新たな試金石を投じるものとなり、それ以前の重厚な学術的関連研究の意義を、

[7] 中国における携帯電話の中古市場は盛んであり、その理由は、低収入者が多いために、膨大な需要があることと、携帯電話本体と SIM カードが別になっているために、これの入れ替えにより複数の携帯電話を使用することができるためである。日本においても、SIM により中古市場が拡大しつつあるため、逆に中国の中古市場において発生した問題を参考にして対策や制度を立てることが重要になると思われる。

今日的緊急課題の解決策へと浮上させ、また未来への実践的展開に発展させる可能性をも有している。

貴嶼村（Guiyu）を事例として、これまでも言及してきたように［三好, 2010］、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、同時に環境汚染やリスクの移転問題も浮上してきている。したがって、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を目指して、グローバルな視野から検討すべき時代を迎えているといえよう。国際循環型社会を構築するための基本的な視点として、以下三点が日本の環境省により提唱されている［環境省中央環境審議会, 2006；松波, 2007］。

i) 各国の国内での循環型社会の確立：国際的循環型社会を形成するためには、まず各国の国内における廃棄物の適正処分や３Ｒ（Reduce, Reuse, Recycle）の推進能力の向上が最優先の課題であり、適正処理体制を確立して、国内の循環型社会を形成することが最も基盤となる。

ii) 廃棄物の不法輸出入を防止：i) を前提として、ある国で実施不可能な廃棄物・循環資源の有効な利用・処分を他の国で行うことにより、有害物質の管理も含め、地域全体の環境負荷低減に資することになり、こうした適正な廃棄物・循環資源の越境移動を実現させなくてはならない。

iii) 循環資源の輸出入の円滑化：i) および ii) が確実に行われ、環境汚染の防止が十分に確保されるとともに地域全体の環境保全に資する場合にはじめて、補完的に循環資源の越境移動による「資源」としての有効利用が可能となる。具体的には、優れた技術を有する国が他国で困難なリサイクルを引き受ける場合や、低コストでリサイクル，生産拠点の立地に対応したリサイクルが実施できる場合の 2 つが挙げられる。

今後は、東アジアを中心とした取り組みを包括し、循環型社会実現に向けてのアジア独自の考え方（アジアン・スタンダード）などを整備しながら、「東アジア循環型社会ビジョンの構築」を実現してゆく上で、アジア太平洋地域，さらには全世界へと取り組みを広げつつ、真の循環型社会の理念を世界で共有してゆくことが望まれる。

ただし先行される事柄として、人びとの生活を脅かすような重篤な環境問題から脱却を図ることが急務である。したがって本研究における開発技術は、直面する重金属汚染土壌の修復に寄与するとともに、将来的には、比較的安価で利便性が高い側面を活かし、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、もしくは日本への資源還流等の展望も期待できるものである。

本研究で開発している独創的な技術は、上述のように、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。また、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言及してきた。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, 1989］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・社会的に不利益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、貴嶼村（Guiyu）における都市電気廃棄物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に改善が見られない。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、環境問題の改善という基本ニーズからみても益々求められていることは間違いない。さらに、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かねばならない。

以上のように、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代科学の視点を融合させることにより、今日、刻々と進行している人体・環境汚染改善の実践的還元へと導いてゆくために、包括的討究の今後のさらなる進展に期待してゆきたい。

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，三好恵真子，染田秀藤（2009）「イスパ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, No.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, 37, pp.299-319.

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（2006）『循環型社会白書（平成 18 年版）』：ぎょうせい.

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－佐渡銀金山の歴史と文化－』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.

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」.

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, pp.307-311.

松波淳也（2007),「国際的循環型社会システム形成の可能性」大原社会問題研究所雑誌, No.580, pp. 1-10.

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－人間の安全保障とサステイナビリティ学の実践的展開を目指して−」New Food Industry, Vol.52, pp.53-61.

山本勇三 (1938)『産金』ダイヤモンド社.

廬現軍，松本亨，高頴楠（2010）第 21 回廃棄物資源循環学会研究会発表講演論文集.

渡邊美和 (2010)「中国の鉛製錬—環境問題と生産への影響」金属資源レポート（JOGMEC）, Vol.40, No.2, 211-224.

（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,*Valladlid:MAXTOR.

Bargalló,M. (1955) *La Mineria y la Metalúrgia en la América Español 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*.

Peng. L., Huo, X., Xu, X. J., Zheng, Y. and Qui, B. (2005), e ects of electronic waste recycling disposing contamination on children's blood lead level., J. Shantou Univ. Med. Coll. (In Chinese), Vol.18, pp. 48-50.

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.

Qui, B., Peng, L., Xu, X., Lin, X., Hong, J. and Huo, X. (2004), Medical investigation of E-waste demanufacturing industry in Guiyu town., In International Conference on Electronic Waste and Extended Producer Responsibility in China. Beijing, April 21-22.

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

The Basel Action Network (BAN), Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC), (2002), Exporting Harm: The

High-Tech Trashing of Asia . Available at http://www.ban.org/E-waste/technotrashfinalcomp.pdf, Accessed June 25, 2010.

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

UNEP(United Nations Environment Programme) : Available at http:// http://www.unep.org/, Accessed June 25, 2010.

Wong, M. H., et al.(2007) Proceedings of the Fourth NIES Workshop on E-Waste, Thukuba, 21-30.

Wong, M. H., et al.(2007) Environmental Pollutions, Vol.149, 131.

Yu, X.Z., Gao, Y., Wu, S.C., Zhang, H.B., Cheung, K.C. and Wong, M.H., (2006), Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils at Guiyu area of China, affected by recycling of electronic waste using primitive technologies., Chemosphere, Vol.65, p.p. 1500-1509.

Yu, X., Zennegg, M., Engwall, M., Rotander, A., Larsson, M., Wong, M. H. and Weber, R., (2008), E-waste Recycling Heavily Contaminates a Chinese City with Chlorinated, Brominated and Mixed Halogenated Dioxins., Organohalogen Compounds, Vol.70, pp. 813-815.

Zheng, L., Wu, K., Li, Y., Qi, Z., Han, D., Zhang, B., Gu, C., Chen, G., Liu, J., Chen, S., Xu, X., Huo, X., (2008), Blood lead and cadmium levels and relevant factors among children from an e-waste recycling town in China., Environmental Research, Vol.108, pp.15-20.

大阪大学中国文化论坛 讨论文件 No.2011-11
Discussion Papers in Contemporary China Studies, Osaka University Forum on China No.2011-11

关于由都市电子产品废弃物的大量收集处理引发的中国环境问题以及相关的环保技术开发的可行性

三好　惠真子

The Underbelly of Globalization: Transboundary Movements of Electronic Waste to China and Our New Technical Development for the Selective Extraction of Precious Metals

MIYOSHI Emako

摘 要

我国于 2000 年出台了循环型社会关联六法，以打造循环型社会为目标，重点排查和完善了废弃物管理政策。虽然这些是以国内的物质循环为基础的设想，但是伴随着经济向国际化层面的进展，在循环资源（可再生资源･半旧品）贸易的跨国境移动正在扩大的同时，由于输入国的处理不慎而导致的环境･人身污染问题也随之出现。显而易见，共建国际循环型社会的任务已迫在眉睫。

中国广东省汕头市近郊的贵屿是都市电子产品废弃物的大量进口与再生利用的代表性产地，也是由于管理不善出现大量的残渣投放而导致重金属中毒事件的频发地区。自从美国环保组织对此问题进行调查并曝光后，来自联合国与各种 NGO（非盈利非政府组织的简称）的关心的日渐提高，环境･土壤污染的调查、居民的健康被害调查以及流行病学･医学上的风险调查等正在进行，今后关于包含扩散和泄漏途径的更加详细的分析调查与相关对策的制定成为了当务之急。在中国国内，都市电子产品废弃物的问题正出现全面扩大化的趋势，因此以地域处理能力为基础的调整方案和配套措施正在日渐推行。作为国家政策，虽然中国于 2009 年颁布实施了循环经济促进法，并且相继以个别法的形式公布了废弃电气电子产品回收处理管理条例，但是不能否认的是不论哪项制度都存在着与实际事态不相符的问题，因此，需要检讨制定更加全面的政策来保障实施与实践的效果。

本研究通过对美洲的西班牙殖民时期的古典炼制技术进行重新的排查研究，在现代社会里的可应用还原重金属污染的复原・再资源化基础理论的建立以及回收体系的设计领域取得了成功，特别在可以从再生利用过程中计算出稀少金属储备路径这一点来看，是能够突破以往研究的局限性的。为提高实践效果，在日本也没有完善的再回收体制下，对含有贵金属的高价值资源半旧手机作为对象进行了研究。在日本，虽然推算出的一年间（2010 年）的潜在可回收手机高达 5000 万台，但是由于各种原因并没有实现回收的情况有很多，为此，本研究针对关于提高回收率的连锁式独创技术实施开发设计并做了试验。

（蓑天译）

（担当委員：許衛東）
http://www.law.osaka-u.ac.jp/~c-forum/box2/discussionpaper.htm