



Title	スペイン植民地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
Author(s)	姉崎, 正治; 三好, 恵真子
Citation	大阪大学大学院人間科学研究科紀要. 2011, 37, p. 299-319
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/9668
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

スペイン植民地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

姉崎 正治・三好恵真子

目 次

1. はじめに
2. 中世ヨーロッパにおける水銀を用いる冶金術の発展経緯
 - 2-1 歴史史料に基づく製錬プロセスと再注目すべき技術
 - 2-2 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
 - 2-3 19世紀後半以降のアマルガム製錬技術の進歩
3. 応用開発に向けての蓄積技術の整理と今後の課題
 - 3-1 アマルガム製錬工程の整理と反応動力的考察
 - 3-2 新しい製錬プロセスの具備要素とその基礎研究課題
4. 結びにかえて

スペイン植民地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

姉崎正治・三好恵真子

1. はじめに

16世紀後半のペルー副王領において、第五代副王トレド(Francisco de Toledo:1569-1581)によって振興された銀鉱業は17世紀までに急成長したのだが、そこに導入された中心的技术が水銀アマルガム法であった(姉崎 2008)。水銀アマルガム法とは金属の湿式製錬法¹の一つであり、この手法に関する記述は、古くはギリシャ、ローマ時代のPlinius(23-79)の記録にさかのぼる。その後中世ヨーロッパにおいて、Biringuccio(1480-1539)や Agricola(1494-1555)らによって、それまで秘密裏にされていたその内容が開示されることになる。しかし、銀のアマルガム法²に関しては、ヨーロッパでは従前からの灰吹法³に取って代わることなく、上述のように、スペインの植民地アメリカで銀鉱山の開発において初めて工業化に成功することになり、植民地時代の約250年間、銀の製錬技術として諸々の改善が加えられながら発達し、その間およそ20万トンの水銀が消費され、約10万トン of 銀が生産されたといわれている(Hylander2003;ハイランダー2008)。その後19世紀末期に青化法⁴が発明され、それが主流になるまで北米のゴールドラッシュ時代の中心的な技術でもあった(Smith 2009)。

水銀を用いるこのような冶金術は、近世に入ってから、非鉄金属の製・精錬の分野で混合物から金、銀を分離抽出する工程の一つとして利用されながら改良が加えられてきた。しかし、1956年「水俣病」が公となって、社会問題化することになり、水銀を扱う懸念から、製錬技術に関する学術的な研究も急速に沈滞し、現在に至っている。しかしながら、水銀は現代社会においても電子機器など多面的な用途に使用されているが、その持っている反応活性とそれに基づく循環性のために、過去からの利用による水銀の蓄積が重層されることによる環境や人体に及ぼす影響が明らかにされてきている。また同時に、そのような水銀汚染土壌や電子廃棄物(都市鉱山とも言われる)を修復する技術開発が求められていることは言うまでもない。

本研究では、スペイン副王領時代のペルーにおいて、特にポトシ鉱山で開発・発展してきた原点となる製錬技術に再度着目し、分析した結果、現代社会に応用還元可能な汚染土壌の復元、再資源化のシステム構築の基礎理論を見出すことに成功している。この成果は、当時の製錬技術工程に関して記述されている歴史的諸資料を読み解き、現代科

学（主として製錬工学理論とその応用技術）の視点から再構築を試みたことに端を発している（姉崎 2010）。歴史学と製錬工学を融合させた独自性の高い本研究の試みは、1970年代以降途絶えてしまっている製錬研究分野に、新しい応用開発の面から一考を投じるものであり、さらに、それ以前の重厚な学術的関連研究の意義を現代、未来への実践へと昇華させるものと期待できる。

一連の本研究の展開を示す最初の立脚点と位置づけられる本論文は、歴史的諸資料の分析を中心に、特に、銀のアマルガム製錬技術に焦点を絞って考察し、その結果として、都市鉱山から貴金属を回収するプロセス開発に対して、有力な知見の浮上に結び付けていくことを目論んでいる。今後の応用実践的展開はこの基幹部分にあたる反応工学的検討なくしては存在せず、これを十分に生かしたプロセス設計を目指していきたい。

2. 中世ヨーロッパにおける水銀を用いる冶金術の発展経緯

2-1 歴史史料に基づく製錬プロセスと再注目すべき技術

水銀アマルガム法に注視し、水銀や銀に関する製錬技術の歴史的変遷を整理する場合、その反応過程を記述する化学反応式が生まれる以前とそれ以降に二分され、その分水嶺はおおよそ 19 世紀の中頃に当たる（山本 1987 : 19-42）。まずここでは 19 世紀以前に多くの試行錯誤の体験の中から、自身の卓越した観察力と洞察力によって体系化された反応過程の解釈が記述された歴史史料を再評価してみる。

本研究が関与する水銀を用いる冶金術に関してみれば、最初にあげられる歴史史料は Plinius の『自然誌(Naturalis historia)』であり、その中には、辰砂の焙焼や水銀アマルガムによる砂金製錬、および金メッキについてのべられており、水銀の物性、毒性もギリシャ、ローマ時代から承知されていたことが推察される（中野ら 1986）。水銀は錬金術の中で最も重要な物質の一つと位置付けられ、16 世紀の化学時代よりかなり以前にすでに、蒸留、凝縮、分離といった基本的な実験操作が行われていたことが分かり、また、物性や反応について精通していたことが示唆される。スペインのアルマデン水銀鉱山は紀元 4 世紀ごろに開発が着手されており、16 世紀にスロベニアで開発されたイドリア水銀鉱山とともに、スペインの植民地アメリカでの銀の生産に必要な不可欠な供給源となった（瀬原 2004）。

中世の冶金術は秘密厳守の世界に隠されていたが、その禁を破って Biringuccio は 1540 年に『Pirotechnia (ピロテクニア)』を出版し、自身の体得した技術内容を公開したのである。これは冶金術全般をカバーする最初の印刷書籍であり、中でも、臼式の粉碎機を使ってアマルガム化する方法（図 1）を示し、水銀を用いて銅滓や鉱石屑から金や銀を抽出することが出来るとほめかしている点（Biringuccio 2005:384-385 ; 山本 2007 : 275）は興味深い。このことは低品位の鉱石から金、銀を製錬出来ることを示唆しており、理論的な裏付けは不明瞭であるものの、中世以降の実用化への駆動力になったものと考えられる。



図1 鉱石粒と水銀の混合中にアマルガム化する臼引き装置(Biringuccio 2005 : 385)

この臼式粉碎機に類似した方法は、Agricola (1494-1555) が 1556 年に出版した『De re Metallica (デ・レ・メタリカ)』(Agricola 1556;Agricola 1950)の中にも出現しており、ここでは金のアマルガム製錬法として示されている。金は水銀とのアマルガム反応が極めて急速に起こるため、この方法の有効性が活用されたと推察できる。これを裏付けるものとして、Rosenfeld (1999) によれば、14 世紀中ごろ神聖ローマ帝国のボヘミア地方には、このような金の水銀製錬所が 350 もあったと記されている。しかし、それが臼型容器を使ったものであるかは不明である。かたや、銀の製錬の方に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、上述した通り、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興味深い(瀬原 2004)。

さらに、『デ・レ・メタリカ』には鉱山業、冶金工場の機械化の状況が絵図面で詳細に描かれており、当時の技術、特に水力利用技術の高さを窺い知ることが出来る。また、試金を含めて、定量化の重要性を実数値で示しているところも特徴的である。以上の二つの史料には水銀鉱石(辰砂)から水銀を抽出する方法についても記述されており、特に『デ・レ・メタリカ』では、辰砂の蒸留方法として幾通りもの方法が図示されている。

銀鉱石のアマルガム製錬の方は、スペインの植民地ヌエバエスパーニャ(現在のメキシコ)において、Medina(1500-1560)が初めて事業化に成功し、1556年“Patio (パティオ)法”と命名し特許も取得し、その後メキシコ国内で実用化が拡大してゆくことになる。Medina自身は書籍に残していないが、Probert(1997)によれば、パティオ法では銀鉱石粉と定量された水銀と塩、媒溶剤を混合し、マッド状(mud; 粘性鉱泥状態)にして平面の庭(patio)に約 30 cm の厚さに敷いて馬や人力で攪拌するもので、反応完了まで約 3 週間から 1 か月を要すると記録されている。メキシコにおけるそれまでの銀製錬法はヨーロッパから導入された溶錬法(smelting)、つまり 1451 年に Johannes Funcke によって開発された、鉛を用いた銅と銀の分離製錬法(Seiger 製錬法、一般には“灰吹法”)であった。ヨーロッパでは“Cupel (灰吹) 炉”も開発されて設備が大型化し(Rhead 1895)、この発明で銅と銀が増産されるようになっていった。灰吹法の主目的は銅鉱石の製錬であり、その共存物質である

銀は銅から分離抽出されて銀製品になる。したがって灰吹法は、含銀銅鉱石の製錬の必要に応えた発明であったといえる(瀬原 2004)。逆に、このことからヨーロッパにおいて、銀鉱石製錬を主目的とするアマルガム法が適用されなかった理由の一つであることが示唆される。また、灰吹法による銅鉱業の発達と、銀の分離抽出技術や設備が整っていたこと、この他水銀鉱山はフッガー家が支配していたので、植民地アメリカに向けて優先的に供給されていたことなども関係していたものと考えられる(諸田 1998: 125-128)。

一方、ペルー副王領では 1545 年にポトシ鉱山が発見されて以来、富鉱を対象に、先住民伝来の堅型溶炉“Guayra (グアイラ) 法⁵⁾”によって、製錬が行われていた。しかしながら、第五代副王トレド (1569-1581) の着任当時の 1570 年前後は、その富鉱が枯渇しており、生産が落ち込んでいた時期でもあった。そこで Toledo は『ピロテクニア』の記述にある貧鉱処理法として、アマルガム法をポトシ鉱山の廃鉱石を使った実験の試みが成功し、事業化を決定したのである。この成功が Toledo の銀鉱山業の始点になるのであるが、その方法の概要は Acosta の『新大陸自然文化誌(上)』(Acosta 1894;1590)や Capoche の報告 (Capoche 1959)によって知ることが出来る。この当時のペルーの新しい方式は“Cajones(カホネス)法と称されており、それ以前のメキシコのパティオ法とは異なるものであった。これは銀鉱石粉と水銀、塩、媒溶剤をカホン (cajon) といわれる反応槽に入れ、人間がその中を行き来して足で攪拌する (レパツ; repaso) というものであり、その最大の特徴は反応槽を加熱して製錬速度を向上させたことである。この加熱処理の結果メキシコの方法に比べ、処理日数を約 1/4 まで短縮することが出来た。ペルーで改良されたアマルガム製錬技術に関しては 1640 年 Barba によって『Arte de los metales (冶金の技術)』として出版されている(Barba 2003)。その後 Arzáns(1965)が 1700 年代のポトシの製錬工場の平面図をもとにプロセスの流れを詳細に記述しているが、Acosta、Barba および Arzáns の記述内容に大きな違いはない。このことから、ポトシの製錬技術を主に Arzáns の絵図にしたがって次章で具体的に述べ、プロセス全体の概要を把握することにする。

この節で得られた重要な知見は、以下のようにまとめられる。

- (1) Biringuccio が図 1 に示した臼型粉碎機を使って粉碎アマルガム反応を同時処理し、この方法による貧鉱処理の可能性を示唆していること
- (2) アマルガム反応層を加熱して処理効率を 4 倍に高めた技術
- (3) メキシコとペルーの鉱山の高度差に関係する、気圧 (圧力) と酸素ポテンシャル (その影響は不明であるが、考慮しておく必要がある)

なお、Bargalló (1955) はその間の鉱山技術、冶金術の歴史的経緯を『スペインの植民地アメリカにおける鉱山業および冶金学』にまとめている。これは歴史学的にも工学的にも重要な資料であるが、化学反応式による表現は Rhead(1895)の反応式を引用しているのみである。このことに関してみれば、Arzáns(1676-1736)の記述にも化学反応式は見られないことや、Fisher(1977)による植民地時代末期 (19 世紀前半) のペルーの銀鉱業にお

いても、技術上の大きな変化は述べられていないことなどから、植民地時代のペルーの技術環境としてそこまで至っていなかったことが推察される。

2-2 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

副王トレド(1569-1581)の鉱山業はワンカベリカ水銀鉱山とポトシ銀鉱山を連動したものである(近藤 1959; Bakewell 1997; 青木 2000; 姉崎 2008; 2009)。このことに関して全体像を取りまとめ(姉崎 2010)、その結果を踏まえて一つの方向として、水銀アマルガム製錬技術を現代社会のニーズ、特に、環境問題(汚染土壌の浄化や金属回収等)の解決方法としての可能性を検討するに至った。そこで、本論文では副王トレドの銀鉱業の中核であった製錬技術、“銀の水銀アマルガム法”に注視して、当時の史料から本研究目的に有益な部分を抽出し、考察することとした。

ペルーで行われていたアマルガム法はカホネス(cajones)法と言われ、そのことに關する歴史史料は、発行年(カッコ内)順にCapoche(1585年)、Acosta(1590年)、Barba(1640年)およびArzáns(1736年)である。この中で、Capoche(1548-1628)の記述内容が16世紀後半のプロセスを説明している基本的なものであろう。Acosta(1540-1600)の記述はこの内容を補足する上で重要な情報になる。Barba(1569-1662)の著書『Arte de los metales(冶金学)』は、トレド時代以降の鉱山学、冶金学の書であり、その中でアマルガム法の製錬上の改良点についても言及している。特に1609年頃Barba自身が開発した“Cazo(カソ)法”は、銅製の反応容器を用い、その下部から加熱して水分を沸騰させながら反応させるという方法(Percy 1880:656-666)であり、興味を引くプロセスの一つである。



図2 ポトシ鉱山における製錬工場の概観図 (Arzáns 1965, I:168)

ここでは Arzáns (1965 I : 166-171) によるポトシの製錬工場の絵図 (図 2) にある注釈文と本文中の記述をもとに製錬工程の全体像を捉え、それをもとに以下具体的にプロセスを分析してみる。この図は代表的な製錬工場 (インヘニオ; ingenio) を平面図に描いたものである。工場全体は塀と建屋で囲まれており、周囲半分を水路 (リベラ ; Ribera) が流れている。全体の工程は次のように俯瞰することが出来る。また、必要個所に Capoche (1959:122-124) の記述等から補足する。

- (1) 採鉱した鉱石の搬入
- (2) 鉱石の粉碎
- (3) 反応槽での作業と分析作業
- (4) 水洗選鉱
- (4) 粗アマルガムの回収作業と製錬
- (5) 各工程から逸散する水銀の回収

Arzáns の図から必要設備の配置や形状も見て取れるようになっている。物の流れは図の上から鉱石搬入、鉱石粉碎、混合と反応槽作業、分析作業となり、左に移って河川での水洗選鉱、加熱分解と回収工程と繋り、最下段に倉庫、管理棟がある。

設備配置もこれに沿っているが、一部破砕機が塀の外にあり、2 機の水車を動かすための落差を確保するための措置と考えられる。出入りは上部の第二通用門が鉱石搬入に使われ、下部の第一通用門は正門と思われる。そして、第二通用門側には鉱石搬入監視所と見張り小屋、及び、製錬に必要な物資の受付所が並び、それらの受け入れ用の取引窓口がある。また正門側には鉱山主 (アソゲロ ; azogüero) の住居、礼拝堂があり、また銀と水銀の保管倉庫がある。全体の敷地面積については述べられていない。

主要な設備としては、2 基の水車駆動式の粉碎機 (1 基は敷地外の片軸型、1 基は敷地内の両軸型)、中央付近に金網でできた篩装置が 2 枚ある。加熱炉 (ブイトロント ; buitrón) は 4 基あり、各炉に 6~9 面の反応槽 (カホン) (総称がカホネス ; cajones) がある。

基本となる作業の流れをみると、粉碎した鉱石は秤量し、カホンに挿入され、数人で足踏み混錬する。Capoche によれば、鉱石 40~50 キンタル (約 1.8 から 2.3 トン) 当たり塩 5 キンタル (約 230 kg) と、鉱石品位に基づいて水銀を粗布目を通して散布する。その量は銀純分に対して概ね 4~5 倍である。それに水を加えて反応槽に挿入している。ただし水量に関する知見は記述されていない。この図では 4 基の加熱炉の内 1 基 (下部の中央) で準備作業をしている。そこには木製の秤量容器トポ (topo ; 鉱石重量で 2.5 アローバ、約 29kg を秤量) が一つある。残りの 3 基は混錬中と思われる。中央左には分析所があり各カホン中の鉱石の分析をする。これで水銀量を決めていた。特異な点は、当時富鉱とされていたネグリージョ (negrillo ; 黒色系鉱石) の処理プロセスだけは左側下部に集約されており、焙焼炉で焼成 (硫化鉱石を脱硫) し、その鉱石を第一通用門の左側で乾燥、冷却している。それをその上の専用加熱炉で混錬し製錬している。敷地の外にある粉碎機はおそらくネグリージョ専用のもので推察される。製錬後の処理として、

中央を横切る用水路の上流から、2個の大樽（ティナ；tina）を使って第1段目の水洗選鉱をする。更に、2個の子樽で2段目の水洗をして粗アマルガム（ページャ；pella）を取り出す。流失する廃鉱には1段目で分離される“ラマス”（lamas；鉱泥）と2段目に出る“レラベス”（relaves；尾鉱）とがある。この図には描かれていないが、この鉱泥（ラマス）は溜池（ポソ；pozo）に集められ、分析して回収製錬されていた。Acosta(1894:338)によれば、約50の製錬所がこの鉱泥から年間約2000キントルもの水銀を回収していた。粗アマルガムは中央左にある絞り場（ラマダ；ramada 小屋の意）で銀アマルガム（ピーニャ；piña 粗アマルガム）と水銀に分離され、更に加熱炉でピーニャは蒸留分解される。得られた製品は粗銀塊でスポンジ状をしていた(Capoche 1959:122-124)。一方蒸発分離された水銀はアランビカで回収されていたが、この工程での水銀回収量に関する記述はない。最下段左には銀と水銀の保管倉庫（アルマセネス；almacenes）がある。また、この工場（インヘニオ）の操業要員としては、描かれている人間の数だけで合計60人である。

以上のカホネス法に関する記述からは次の点が参考になる。一つは硫化鉱石（negrillo）の焙焼⁶である。また、加熱炉では用途によって多種多様な構造が工夫されている(Barba 2003:130-144)ことである。3点目は、河川下流で鉱泥からの水銀回収をしていたことで、回収量が多かったことから流失水銀による土壌汚染が未だに堆積している可能性が示されたことである。

なお、不明な点で重要なものはカホン装入時の水分添加量とアマルガム蒸留後の水銀の回収量である。これらは今後の課題でもあるが、特に水分添加量は高粘度鉱泥の湿式製錬という観点からは重要な操作要因になる。

最後に、水銀と同様銀鉱石の品位、特に不純物もアマルガム反応上重要な因子であると考えられる。ポトシ鉱山の鉱石の共存物質に関係すると思われる記述は、まず、Arzáns(1965:142-145)は多くの鉱石の種類を、微細な色調等の差異から識別していたと述べているが、結果的には品位の見定めは長年の経験を要することとしている。この点について Percy(1880)はArzánsの記述内容をさらに整理し、2種類に区分している。第1種はパコス（pacos）といわれるもので、塩素（Cl）、硼素（B）、沃土（I）と結び付いた金属銀で、この内鉄（Fe）や銅（Cu）を含むパイライト（pyrite；硫化鉄 FeS₂）と結合するとムラトス（mulatos）と言われているものになる。パコス別名“metal calido”（熱い鉱石；焙焼が不要の意）といい、アマルガム法に適していた。また、第2種はネグリージョス（negrillos）である。輝銀鉱石（Ag₂S）やこの硫化銀にアンチモン（Sb）や砒素（As）が入ったもの（前者は濃紅銀鉱石であり、後者は淡紅銀鉱石）がこれに入る。上述のパイライトが多くなるとアマルガム製錬の前に焙焼が必要である。第2種のを“metal frío”（冷たい鉱石；焙焼が必要の意）と呼ばれていた。このネグリージョス（negrillos）が、Arzánsの図2の左側のラインで処理されていたことに対応している。鉱石品位は Percy(1880)によれば、1574年は4.5%で19世紀初頭には0.04%になって

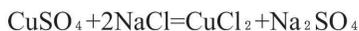
いた。この分不純物の変化も大きかったと推定できる。なお、現代の環境問題の解決策として開発する上で、これら不純物の存在に関しては水銀同様重要であり、基礎研究の集積が求められる。

2-3 19世紀後半以降のアマルガム製錬技術の進歩

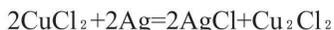
実際のプロセス開発においては実践面からの改善進歩が先行し、基礎的研究は必ずしも同一歩調で発展するものではない場合も少なくない。水銀アマルガム法の進歩もその類であると捉えることができる。ここではまず、19世紀後半以降の化学反応式による銀と水銀のアマルガム反応について述べる。

化学記号を用いたアマルガム法の古典的研究としては、Percy(1880)の『金と銀の冶金学』がある。この当時は熱力学の理論が誕生したばかりであり、各種の化学反応の定量化の問題が盛んに研究されていた時代でもあったことから、化学反応が元素の置換反応の形で表記されている。さらに、鉱石の分類、元素の種類、製錬操作など広範囲にわたって、非常に示唆に富んだ研究書であるといえる。次に同時代には Rhead(1895)が「銀の抽出」の中で、銀のアマルガム反応について次のような化学反応式で記述している。

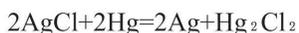
- 1) 媒溶剤 (magistral ; 銅と鉄の硫酸塩) と食塩(NaCl)の反応



- 2) 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



- 3) 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) 中に取り込まれてアマルガムとなる反応である。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 (長崎ら 2008:8)。



このように多種多様の銀鉱石から塩化銀を析出させる化学反応のプロセスにとって媒溶剤の工夫が必要であったと推察される。これについては、Patio法の発明者 Medinaが最も苦心を要した点である (Probert1997)。また、Percy(1880: 593-597)やEissler(1891:135-144)の記述でもそれは明らかである。

一方、プロセス改善の面で、注目すべき技術は Rhead (1895) の記述にある“Pan Amalgamation (鍋混濁法)”である。これは Biringuccio の図 1 や Agricola の記述の延長線上にある技術として捉えることができる。この事実は銀鉱石の水銀アマルガム製錬法を改善工夫してきた歴史の中でも、特に注目に値する技術として位置づけられるといえ

る。この技術についての記述が再び出現するのは 19 世紀後半の北米における銀製錬技術の中に於いてである (Eissler 1891:97-114;Dorr 1940:159-164)。特に Dorr はボールミルを使ったアマルガム法も開示している。さらに、両者とも貧鉱 (lime;泥鉱、tailing;尾鉱) の製錬が実際行われていたことも述べている。Rhead(1895)の記述には、この方法を含む全体のプロセスフローについて図説しているが、両者が描写している大型の設備から、産業革命以降に蒸気や電力エネルギーといった大きな動力の使用が可能になってはじめて実用化したものと推察される。

アマルガム製錬法は、1886 年にイギリスの Mac Arthur と Forrest による青化法の工業化の成功以降、第一線から消滅していくことになるが、1930 年代までは青化法との併用で使われていた (Dorr1936)。特筆すべきは、この pan amalgamation そのもの、および青化法との併用の実態が日本における明治以降の佐渡金山に継承されていたことである (佐渡市教育委員会 2008 ; 山本 1938)。

日本では明治時代の殖産興業・富国強兵政策によって、全国で数千もの鉱山が開発され世界の資源国でもあった。しかし、第 2 次大戦後には資源が枯渇し衰退低迷し、高度経済成長期には多くの金属鉱山が閉山して資源輸入国になった。この間培った日本の鉱山技術、製錬技術の工夫、改良の跡には参考にすべき点が多い。

この中で、水銀アマルガム法に関しては、江戸時代の 1605 年頃には佐渡鉱山で銀の製錬法として導入されて 1620 年代中ごろまで実施されていた記録がある (磯部 1992 ; 新井 2000)。しかしながら、本研究にとって参考となる技術的情報は残されていない(山口 1983)。

本格的に水銀アマルガム法が導入されたのは、明治 2 年 (1869 年) 佐渡鉱山が官営となり、同時期に外国人技術者を招聘して、その当時の新技術として水銀法が導入された時に始まる。それには 2 種類あり、混漙法 (pan amalgamation) が 1872 年、搗鉱法 (stamp crushing) は 1891 年から金の製錬法として生産を開始し、幾多の改良がなされた。しかし、1886 年に発明された青化法が次第に世界の主流になり、1904 年には混漙法を廃止し青化法を取り入れた。1930 年代後半には搗鉱法も中止になり、戦争の影響で 1943 年佐渡鉱山は休止になった。この他明治以降日本の金鉱山では小規模鉱山でアマルガム法の適用が多くみられたが、大企業では佐渡鉱山が唯一であった (山本 1938)。

佐渡金山の製錬において、本研究にとって有益な情報として下記の 3 点あげられる。

- (1) 製錬法の棲み分けの考え、つまり粗粒金の採取にはアマルガム法で、残留鉱石中の細粒金は青化法で抽出すること
- (2) 混漙法や搗鉱法のように臼状容器や破砕機の中で粉砕と水銀反応を同時処理する技術であり、いずれも粉砕中の熱発生部ないしはエネルギー集中点でアマルガム反応を行わせること、その改良技術としてボールミル同時処理が更に有効であったこと
- (3) 反応部の加熱であるが、佐渡鉱山の混漙法では容器を 53°C~56°C に蒸気加熱しており、カホネス法のような効果があったと思われる点 (佐渡市教育委員会 2008 ; 山本

1938)。Eissler(1891)によれば、19世紀後半に北米銀鉱山で実用化した Washoe Process (pan amalgamation の一種と考えられる) では、反応場を 80°C に加熱していた。

これらの諸点を今後のプロセス開発に参考にすることになっているが、総じて、密閉性や加圧に関する知見はほとんど見当たらない。この点も今後の設備上の検討課題である。

一方、水銀を使う製錬法では水銀もその反応物質であるので、基本的に重要なのは各工程での水銀の回収率と回収水銀中の不純物である。日本の水銀鉱山の操業データを参考にして概説すると、金丸(1981)によれば、イトムカ鉱業所は鉱山の発見が1936年であり、1938年に生産開始して1973年の鉱山閉鎖までの35年間に約3千数百トンの水銀を生産した。その後水銀リサイクル工場として現在に至っている。イトムカ鉱山の水銀鉱石には辰砂(HgS)、自然水銀(Hg)、および Cordelolite ($\text{Hg}_3\text{S}_2\text{Cl}_2$) 等があり、主には辰砂と自然水銀が3:7の割合であって、比較的品位は高かった。鉱石焙焼は主にヘレスホフ炉で処理され、その温度は600~700°Cであった。特徴的なのは自然水銀が多く、粘土質鉱物も多かったので湿式粉砕を採用し、先ず自然水銀を回収した後ボールミル粉砕を経て浮選している。この工程での水銀の実収率は約90%前後であった(魚住1970)。一方現在のリサイクル事業での水銀回収率は93~96%である(金丸1981)。このことは、水銀製造や回収においてはその回収率がまだ不十分であって、これからのプロセス開発においては完全密閉装置を目標にしなければならないのであるが、最新の設備技術を応用すれば可能であると考えられる。その他に注目する点は、事前処理における「湿式ボールミル粉砕」と「浮選処理」の効果である。アマルガム製錬に使用する水銀の純度、不純物(例えば、鉛、砒素、元鉱石の硫黄等)がアマルガム反応に影響を及ぼすと考えられるので、採鉱、製造あるいは回収過程での品質管理が重要になり、今度の研究課題でもある。

3. 応用開発に向けての蓄積技術の整理と今後の課題

3-1. アマルガム製錬工程の整理と反応動学的考察

近年、向ら(1966)がそれまでのアマルガム製錬の研究を整理し、更なる研究の必要性を提案し、再注目を集めたものの、「水俣病」が公の問題になるにつれ、「水銀汚染」問題の研究が主流になり、製錬に関する基礎研究が低迷していった。しかしこの間にも、Johnsonら(1999)によってスペイン植民地時代の銀のアマルガム製錬に関して、反応の基礎的な実験が行われ、基本的な反応物質の存在がエックス線解析によって証明される等数少ないが興味深い研究もある。このような状況にあって、本研究では製錬法である水銀アマルガム法の基礎研究が低迷して、30年以上になる現在、この手法が今日的な新しい需要に呼応して、環境保全修復の実践的展開に役立つ知見を提供しようと考えている。なぜなら、金丸(1981)が述べているような、水銀の“Clean Poison”性すなわち、水俣病という公害問題(Poison)のゆえに、利用研究(Clean)が閉ざされていこうとして

いた時代背景を乗り越えて、向ら（1966）が主張していた水銀アマルガム法の応用研究の必要性を再度現代社会の課題（特に人工鉱山の開発）と結びつけながら活かせる可能性を見出したからである。人工鉱山構想は中村らによって提唱されている（中村ら 2009）が、リサイクル資源が主体で、汚染土壌や廃棄物堆積場等の浄化と金属回収は含まれていない。しかし本研究ではすでに述べたように、対象を広げていることで製錬上の課題は多くなる。

前章では主に歴史的な諸資料を参考に過去の水銀アマルガム法における製錬技術としての要所と問題点及び注目すべき技術に関して検討してきたので、ここではまず、その基幹部分を整理し、製錬工程全体を要約して図示した（図3）。そして各工程別に今後の応用開発という視点で反応動力的な考察を加えてみた。

ただし、水銀鉱石の製錬については現時点では対象でないので、ここでは詳細検討は行わず、主に銀鉱石の水銀アマルガム製錬技術に絞って議論することにする。

図3から、鉱石採取から銀の精製までのプロセスを、次のように4段階に分け、それぞれの主要項目に従って考察する。本研究の当面の主課題は、(2)の製錬の中心部に遊星ボールミルを据えた斬新なプロセスを描いているので、それに沿っての論考となっている。

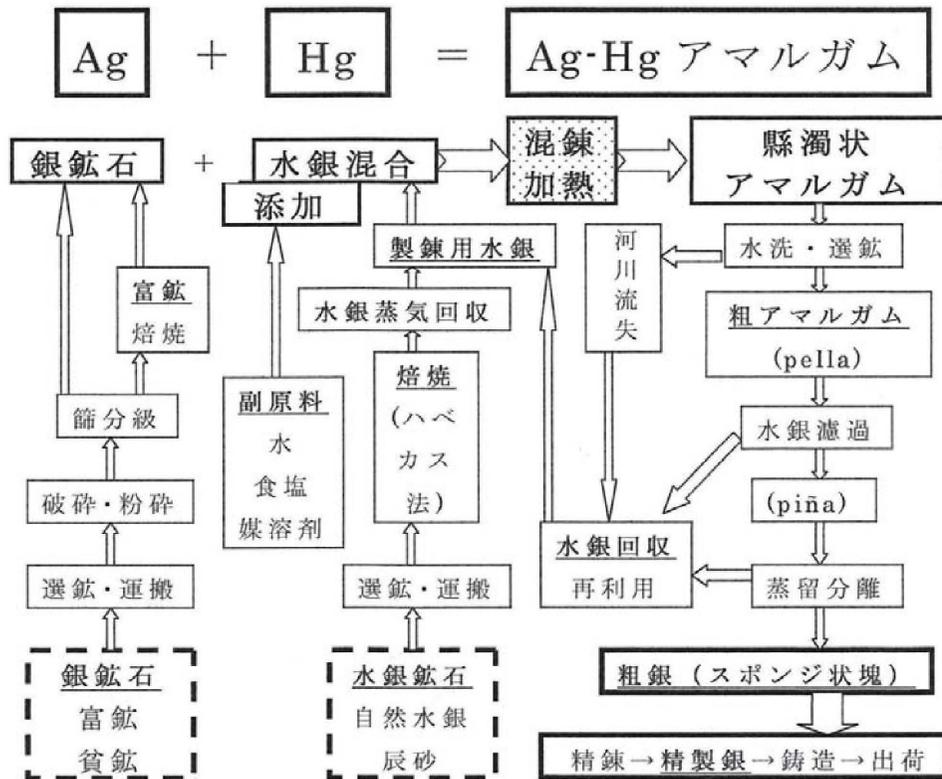


図3 ポトシ鉱山の銀製錬プロセスの工程図（筆者作成）

- (1) 選鉱段階の精鉱化技術；①事前焙焼、②微粉化技術（粉碎と反応の同時化）、③貧鉱処理
- (2) 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
- (3) 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
- (4) 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

まず、(1)の①事前焙焼に関しては、金属鉱石は多くの場合硫化物が多く、乾式製錬はもとより湿式製錬でも事前焙焼が行われる。図2でも富鉱(negrillo)が焙焼されており、水銀や媒溶剤の消費量削減が図られていたと考えられる。これらのことから、硫化鉱対策や粉鉱処理が反応上重要であると認識されていたことが窺われる。

(1)の②に関しては、先述したように粉碎場と反応場をボールミルで同時化する場合の問題でもあるので、(1)から(4)のすべてに関係する事柄として別に述べる。

次に、(1)の③貧鉱石処理に対する考えである。これは、Biringuccio (2005 : 384-385)の記述にあるように、中世以来アマルガム法が貧鉱処理に有利であるといわれてきた点である。事実として副王トレドの実験で実証され、デスモンテ(尾鉱、廃鉱等)からの銀の抽出に成功していることや、前述の通り、Washoe Processでもスライム(泥鉱)やテーリング(尾鉱)の製錬が行われていた(Eissler 1891:97-114)ことやDorr(1936:159-164)がその製錬をボールミルで行っていることを図示していること等から、この言説は正しいものと認めざるを得ないが、今後は理論的な詰めが必要である。いずれにしても、アマルガム反応は固液反応であるので微粉化することは必須条件であるが、その目的に対しボールミルは最良な方法であると考えられる。

次に本研究の核心部分である(2)の各項目について説明する。先に述べたように、水銀のアマルガム反応に関する反応動力学的な研究は現在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)の中の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り、また湿式製錬に属するものである。

まず(2)の①に関して、アマルガムの湿式製錬に関わる重要と思われるのは次の2点である。

第1点は、Medinaの工夫の中心であった媒溶剤(マヒストラルmagistral;鉄と銅の硫酸塩)と食塩の添加の意味である。この組み合わせがMedinaの発明の根幹部分でもある。Medinaはこれを“chain-reaction”(連鎖反応)と捉えた(Probert 1997)が、今日では、一種の自触媒作用と解釈されている。また、食塩の添加効果については湿式製錬における“塩類効果”に該当する(真嶋ら 1977)と考えられる。しかし、銀鉱石の場合の鍵は硫酸塩の存在であり、Johnsons (1999)は基礎的な研究の例で、それら2つの添加物の相互作用を論じている。基本的には反応の過程で塩化銀が形成され、水銀によって還元されるのであるが、多様な鉱石種を扱う複雑系の研究はない。一方、硫化鉱石が主体であることから、優先反応や界面現象(poisoning; 界面吸着)も重要な要因になると考えられる。実際のプ

ロセス設計にあたっては、最適な水分量の決定も重要であるが、詳細が不明な課題である。また応用の面で、鉱石の種類に相当する人工鉱山（都市鉱山や廃棄物堆積場等）の成分とその含有量、構成等に対して、これらの諸因子の影響が、そのプロセスに対しどれだけのフレキシビリティを持たせうるかということに関係してくる。

第2点目は、ペルーのカホネス法の特徴である加熱の効果である。メキシコのパーティオ法では反応完了まで20～27日かかっていたが、ペルーのカホネス法では5～7日に短縮され、速度が4倍になったのである。温度差は不明であるが、海拔の高度差（メキシコは約2000m、ペルーは約4000m）、つまり気圧低下と加熱による水銀の蒸発や酸素ポテンシャルとの関係、さらに、高粘度の鉱泥の湿式製錬であるので塩の電離溶解性に影響すること等種々の要素が関係してくる。この点 Barba のカソ法に注目している。したがって研究が目指すプロセスの研究と設計においては、圧力や温度、さらには水銀の蒸発に対する密閉性の問題などは設備設計上重要な要因となる。

(2) の②の混合攪拌は特に高粘性流体（非ニュートン流体）の動力的研究はアマルガム製錬反応においては重要な要素であるがその説明は簡単ではない。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たことや、ペルーでは先住民が足踏み混錬（repaso）をしていたので定量的な比較評価は困難である。高粘度の鉱泥に対して、このような攪拌方法が及ぼす効果、作用について、基礎的研究により検討する必要がある。このことは、汚染土壌の改質プロセスの設計をする上でも欠かせないものと考えている。

(2) の③の問題は①にも関係するが、単純な金や銀のアマルガム反応の速度論的研究に加えて、水銀や金属鉱石中の不純物の影響に関する研究も散見されるに過ぎない。つまりプロセス開発の方が先行して、経験的に効率や収率の改善がなされてきたことで、基礎研究が後追いになっているのではないかと考えられる。この点が今後の基礎研究の必要な領域であり、プロセス開発をする場合にも基本的に重要な点である。

(1) から (4) のすべてに関係し、かつ本研究の目標とするプロセスの根幹にかかわる技術として、図1や“Pan Amalgamation”にみられる鉱石粉砕と水銀との反応を同時に行う方法に注目している。粉砕エネルギーと反応場を集中させることで、金より反応が遅いと考えられる銀のアマルガム反応を促進できる可能性が高く、その方法として現在のボールミル技術を応用したプロセスに期待をしている。

(3) の課題は単に銀のアマルガムに限らず、研究の狙いである製錬後にできる粗製品が多様な元素と水銀との合金（アマルガムはその一部）であることで、その仕上げ精錬に関わる問題である。第一に製錬後の混合物から水銀化合物を分離する工程、第二には水銀化合物中の水銀の分離回収工程、第三にはその後の最終金属塊からのそれぞれの金属の精製工程である。これらの内、第一の点に関しては、図2では水洗選鉱が2段階プラス2段の4段の樽（tina）による分離が行われているが、この方法の分離精度は悪く、細粒の水銀とアマルガムが大量流失していたものと思われる。現在では浮遊選鉱で効率

よく分離できるようになっているが、現代の水銀に対する環境規制に基づく設備設計においては、完全密閉と完全リサイクルを前提としなければならないので、新しい技術の導入が必要である。この点も最大の課題の一つと考えている。一方、過去の水銀汚染土壌の復元を図る上では、この流失水銀量の大小が経済性に関係してくる。

また、ピーニャ(piña)の加熱処理後の塊がスポンジ状になる点は注目に値する。つまり、(4)の仕上げ精錬法については現時点では湿式製錬を考えているが、粗銀塊がスポンジ状であることは反応界面積で有利に作用すると期待される。

3-2 新しい製錬プロセスの具備要素とその基礎研究課題

歴史的諸資料と反応動力学考察、検討および現代の環境問題、特に都市鉱山からの有用金属の回収における基本となる抽出技術とを結びつけることにより、水銀アマルガム法が応用できる可能性が見出されるといえる。すなわち、ボールミルでの粉碎と反応を同時に行う湿式製錬である。その基本となるプロセスは、Biringuccio(2005:384-395)やRhead(1895)、Eissler(1891)、Dorr(1940)および、佐渡金山の混濁法(pan amalgamation)のようにいくつか事例があげられるが、概して水銀の漏洩や回収率の点では問題が多く、その構造は現代の環境規制を乗り越えることはできないものと考えられる。

本研究では先ず都市鉱山、特に廃棄電子機器(携帯電話等)の処理、製錬を想定しており、この場合の基本プロセスとして、遊星ボールミルを中心に据えて、水銀に関しては完全密閉、完全リサイクルを目指している。また、アマルガム反応に関する基礎的知見が乏しい中で、重要ないくつかの課題については基礎研究を考えている。それらを整理して以下にまとめた。

- (1) 基礎研究；
 - ①水銀と他の有用金属との反応速度論(含、反応妨害元素)
 - ②ボールミル反応場の動力学(含、温度、圧力効果)
 - ③反応生成物等の分離技術(含、湿式製錬)
- (2) 設備技術；
 - ①水銀に対する密閉、循環可能設備
 - ②原料の破碎からボールミル粉碎までの機器の構造
 - ③ニーズに適応した構造体としてのシステム
 - ④安全対策(含、各部の寿命)

これらの進め方は、当然関連部門、専門業者を含めた共同作業になる。当面は、その駆動力に匹敵する、有力な水銀の反応活性機能を基礎研究を通じて引き出していき、適切な評価に結び付けていくことに注力していくことになる。

6. 結びにかえて

本論文では、今後取り組むべき、人工鉱山、特に水銀汚染土壌(低品位鉱山に匹敵)の浄化と金属回収、および都市鉱山(高品位鉱山に匹敵)から貴金属を回収するプロセ

スの開発への足掛かりとなる、ペルー副王領で実用化され改良されてきた水銀アマルガム法の再評価を行い、さらに、明治以降のイトムカ鉱業所や佐渡鉱山で採用された技術の要点を加えることにより応用開発の可能性を模索した。

人工鉱山の開発の面では、低品位資源の製錬に関して、既にボールミルを利用した粉碎、反応の同時処理の事例が多くみられ参考とするところが多いが、水銀の漏えいや回収など、現代の環境基準や上記の目的に照らしてみた場合、新しい観点からの設備設計とシステムの構築が重要となるであろう。その中で都市鉱山のような高品位鉱山（例、廃電スクラップ）の場合は、製錬以外に集荷、物流の問題や製錬仕上げまでの工程が長いことと、管理体制も統一されていないことなど課題は多い。しかも、製錬に限ってみても、反応動力学上の課題、主には高粘度混合物の湿式製錬での固液接触反応の基本的動態、例えば、固体の比表面積（粒度）、反応系の接触確率（濃度、混合攪拌）、反応速度要因（圧力、温度）、物理的状態（系の粘度、分散状況）など重要な因子が多数あるにもかかわらず、未解明の要素が多い。

本研究では、特に都市鉱山の開発に最もふさわしいと思われる基本構成として、粉碎エネルギーとアマルガム反応を集中させることのできるボールミルによる同時処理法に着目している。その場合、カホネス法に始まる加熱の効果を重視し、同時に、圧力の問題を考慮すれば更なる好結果が引き出せる可能性もあると考えている。幸いにも、水銀はFe、Ni、Co等の溶解度が小さいので、反応装置の構造体として採用できるし、水銀に関しては完全密閉と完全循環システムを構成する構造物の加工を可能にすることも期待できる。このことがボールミルと加熱、加圧を組み合わせた新しいプロセスの実現への鍵になると考えている。また人工鉱山は自然鉱石と異なり、不純物に相当するものが非金属である場合が多く、分離操作は比較的容易であると考えられるので、この組み合わせから新しいプロセスフローが描き出せる可能性がある。

本研究では以上の諸点を考慮して、3-2節でまとめた各研究項目に従いテーブルテストに着手している。また、プロセス設計にあたっては関連の専門家と共同しながら実現化を目指していきたい。

[注]

- 1 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。

また、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。この中で溶融状態にして製錬することを熔錬という。

- 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）を作りやすい。

その化合物ないし、その微粒子を水銀中に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。また、19世紀後半には搗鋳法 (pan amalgamation) や混漚法 (stamp crushing)、Washoe process などのアマルガム製錬法が金や銀の製錬法として開発された。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する。これらの詳細は本報告を参照のこと。

- 3 原理は銅と銀の混合物から銅を鉛浴中に吸収させて銀を分離し、次に銅を含む鉛を灰の中で酸化溶解し、鉛が酸化されて灰中に入って銅が分離される一連の連続操作である。代表的な乾式製錬法の一つである。
- 4 金銀の湿式製錬法の代表的なもので、アルカリ性のシアン化溶液で鋳石から金銀をシアン化物として抽出する方法。
- 5 アンデス地方の先住民が開発した銀鋳石の乾式製錬法である。風穴のある粘土製の堅型炉に、まず炭材を入れその上に銀鋳石を置く。この炉をポトシ鋳山の山肌の強風下に置き、高熱で鋳石を還元溶解する方法。
- 6 焙焼は硫化物鋳石を酸化雰囲気で行い、硫黄を亜硫酸ガスとして除去する鋳石の事前処理法で、金属鋳石は硫化物の場合が多く、通常はこの事前処理が行われる。なお、炭酸塩を含む鋳石（代表的なものは石灰石 CaCO_3 ）を高温で焼いて脱炭酸し、酸化物にする処理を仮焼という。

引用・参考文献

- 青木康征(2000),『南米ポトシ銀山』,中央公論新社
- Eissler,M.(1891),*The Metallurgy of Silver*;Crosby Lockwood and Son : London
- Agricola,G(1950),*De Re Metallica*,translated by Herbert,C.H., and Lou,H.H., Dover Publications : New York
- Agricola,G (1556),*De re metallica*(=1968,三枝博音訳著,山崎俊雄編『デ・レ・メタリカー—全訳とその研究』,岩崎学術出版社)
- Acosta,P.J.(1590),*Historia Natural y Moral de las Indias*, Casa de Fuan de Leon : Sevilla
- Acosta,P.J.(1590),*Historia Natural y Moral de las Indias* (=1966,増田義郎訳『新大陸自然文化史〔上〕』岩波書店)
- 姉崎正治(2008),「イスパノアメリカの植民地時代における銀鋳山での水銀汚染に関する地域動態的研究」,『グローバル人間学紀要』大阪大学大学院人間科学研究科, vol.1,55-69 頁
- 姉崎正治(2009),「ポトシ鋳山のカリカリ貯水池決壊事故に関する技術的論考—植民地時代のペルーにおける鋳山業の技術的側面」,『グローバル人間学紀要』大阪大学大学院人間科学研究科,vol.2,19-35 頁

- 姉崎正治,(2010),「ペルー副王領における銀鉱業と水銀汚染—第五代副王トレドが推進した鉱山業を中心に」,大阪大学大学院人間科学研究科修士論文
- 新井宏(2000),「金属を通して歴史を観る—銀がもたらした戦国バブル」『BOUNDARY』6月号
- Arzáns de Orsua y Vela,B.(1965),*Historia de la Villa Imperial de Potosí*, edición por Hanke,L.y Mendoza,G.,Brown University Press
- 磯部欣三(1992),『佐渡金山』,中央公論社
- 魚住力太郎(1970),「イトムカ選鉱工場」,『日本鉱業会誌』 vol.86.668-672 頁
- 金丸徹(1981),「イトムカ鉱業所における水銀製錬」,『日本鉱業会誌』, vol.97,758-761 頁
- Capoche,L.(1959),*Relación general de Villa Imperial de Potosí*, edición por Hanke,L., Ediciones Atlas : Madrid .
- 近藤仁之(1959),「水銀アマルガム法、水銀供給源、及び価格革命：ポトシ銀山とウアンカベリカ水銀鉱山」,社会経済史学会編『社会経済史学』 vol.25, 216-246 頁
- 佐渡市教育委員会 (世界遺産・文化振興課) (2008),『旧佐渡鉱山近代化遺産建造物群調査報告書』 グリーンシグマ
- Johnson,D.A., and Whittle,K.(1999),The Chemistry of the Hispanic-America Amalgamation,*Journal of the Chemical Society,Dalton Transaction*,vol.23,pp.4239-4243
- Smith,D.A.(2009),*The Trail of Gold and Silver-Mining in Colorado,1859-2009*,Univercity Press of Colorado
- 瀬原義生(2004),「中世末期・近世初頭のドイツ鉱山業と領邦国家」,『立命館文学』立命館大学人文学、 vol.585,pp.96-137 頁
- Dorr,J.V.N. (1936), *Dorr-Cyanidation and Concentration of Gold and Silver Ores* (=1940, 三野英彦訳『ドル・金銀製錬法』工元社)
- 長崎誠三・平林眞(2008),『二元合金状態図集』アグネ技術センター
- 中野定雄・中野里美・中野美代(1986),『プリニウスの博物誌 (第Ⅲ巻)』雄山閣出版
- 中村崇 (2009),『サステナブル金属素材プロセス入門—循環型社会の構築のために—』アグネ技術センター
- ハイランダー,L.D.(2008),「水銀の利用を続けるのか、それとも中止するのか、水銀の功罪についての歴史的考察」,『地球環境』 vol.13,151-166 頁
- Bargalló,M.(1955),*La Minería y la Metalúrgia en la América Español durante la época colonial*,Mexico:Fondo de Cultura Economía : Mexico
- Barba,A.A.(2003),*Arte de los metales*, MAXTOR : Valladolid
- Fisher,J.(1977),*Minas y Mineros en el Peru colonial,1776-1824*,IEP ediciones : Lima
- Biringuccio,V.(2005),*De la pirotechnia*,English,DOVER Publications Inc : New York
- Bakewell,P.J.(1997),Technical change in Potosi:The silver boom of the 1560's,*An Expanding World.The European Impact on World History 1450-1800*, vol.19, edition by

- Bakewell,P.VARIORUM.,pp.75-95
- Percy,J.(1880),*Metallurgy:Silver and Gold-1*,John Murray : London
- Hylander,L.D.(2003),500 years of mercury pollution:global annual inventory by region until 2000 and associated emissions,*The Science of the Total Environmet*, vol.304,pp.13-27
- 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*,vol.19,edition by .Bakewell,P.VARIORUM.,pp.96-129
- 真嶋宏・田村秀樹・大野丈博 (1977),「方鉛鉱の酸浸出反応における塩化ナトリウム添加の効果」,『日本鉱業会誌』 vol.93, :895-900 頁
- 向正夫・小浦延幸(1966),「アマルガムの物性とアマルガム製錬」,『日本鉱業会誌』 vol.82.35-51 頁
- 諸田實 (1998),『フッガー家の時代』 有斐閣
- 山口啓二 (1983),「金銀山の技術と社会」,甘粕健他編『講座・日本技術の社会史、第五卷―採鉱と冶金』 日本法論社, 141-176 頁
- 山本大二郎(1987),『歴史をたどる化学』 東京教学社
- 山本義隆(2007),『一六世紀文化革命―1』 みすず書房
- 山本勇三(1938),『産金』 ダイヤモンド社
- Rhead,L.E.L.(1895),Extraction of silver.*Metallurgy.*,pp.267-285
- Rosenfeld,H.F(1972),*Deutsche kultur im Spätmittelalter 1250-1500* (=1999, 鎌野多美子訳『中世後期のドイツ文化―1250年から 1500年まで』 三修社)

Revaluation of the Silver Smelting Technology with Mercury Amalgamation in Colonial Peru and Exploring New Environmental Applications

Shoji ANEZAKI and Emako MIYOSHI

To increase silver production, Toledo, the fifth Spanish viceroy of Peru, introduced a new method of smelting silver ore, an amalgamation process, which involved the use of mercury. Toledo's careful attention to the improvements of laws and practices governing the mercury mine so that all the mines of Peru could lead to a substantial increase on mineral output.

In this study, we focused on the smelting technology of Potosi Mine which was the first successful venture in the industrialization of silver amalgamation during Spanish colonization; it demonstrated the key technologies in the related historical documents, from the perspective of scientific knowledge.

Moreover, we noticed that the smelting technology after the Meiji Restoration in Japan, which suggested the use of the amalgamation process, was independently improved with the introduction of Western technology.

Consequently, we have been challenging the environmental reform indicating the selective extraction of precious metals from electronic waste using new ideas whose theory was found in the present study, and our collaborative work has been advancing.