

小型家電等から回収した金・銀・銅で2020年東京オリンピックの入賞メダルが製作される計画であるなど、都市鉱山開発は注目すべきトピックスである。本特集で紹介する産学官の取り組みを通じて、都市鉱山リサイクルに向けた課題と展望が見いだせれば幸いである。

(編集担当：大島達也・村山憲弘)†

都市鉱山の概要

原田 幸明

1. 都市鉱山とその意義

都市鉱山(Urban mine)は、天然鉱山に対置される言葉である。天然鉱山は地殻や水中の金属成分が造山活動や生物活動の結果として濃集したものであり、基本的に地球環境圏に属し、資源の天然鉱山からの採掘という人為的行為はまさに人間経済圏が地球環境圏に接する部分であり、製品などのライフサイクルの起点となっている。それに対して、一旦人間経済圏に取り込んだものから再利用資源を採り出すことが都市鉱山活用(Urban mining)でありその対象が都市鉱山である。

リサイクルと呼ぶ場合は、容器包装プラスチックのリサイクルのように対象物の資源としての価値よりも廃棄物の減量化を目的とするものも含まれる。その意味で都市鉱山活用は元素成分の資源的価値に注目したリサイクルであるということもできる。

なお、メディア等では日常的に使用している小型電子機器の使用済みものからの資源の回収を「都市鉱山」と呼んでいるものも多いが、図1に示すように、都市鉱山には工場発生屑、産業屑などの多様な発生ルートがあり、一般家庭の使用済み電子機器は身近な都市鉱山ではあるが、都市鉱山の中における量的割合を考えると工場発生屑、産業屑の利用が都市鉱山開発の鍵を握っている。

この都市鉱山を最初に学術的に定義したのは東北大学の南

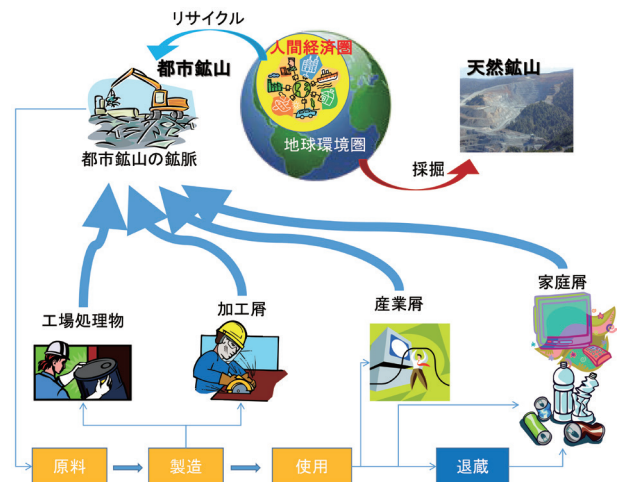


図1 都市鉱山とは人間経済圏から得られる資源

條道夫教授である¹⁾。当時の指摘では、1) 品位の高さ、2) 存在確認の容易さ、3) 省エネルギー、4) 景観等環境の改善ということが指摘されていた。最近はこのに加えて次の3つの意義が重要になってきている。それは5) 資源全体の比重が天然鉱山から都市鉱山に移行せざるを得なくなっていること。6) 天然鉱山に依存していた際の資源の偏在が、都市鉱山では消費＝都市鉱山資源として解消できること。さらに7) レアメタルなどの供給リスク管理としてサプライチェーン・マネジメントの中に組み込みやすいことである。

また、都市鉱山開発は特に国際的なSDGs(サステイナブルな開発目標)の中でも高く位置づけられる。2020東京オリンピックのメダルが都市鉱山原料により作製されることが決まった際もバツハIOC会長がサステイナブルな取り組みとしていち早く高く評価したことにも表れている。これは一つに資源採取時における環境問題とともに水銀などを使ったり若年労働者問題をおこすような不法採掘を防止するこ



Urban Mine
Kohmei HALADA
1979年 東京大学大学院工学系金属工学博士課程修了
現在 (国研)物質・材料研究機構 名誉研究員、(一社)サステイナビリティ技術設計機構 代表理事
連絡先：〒305-0033 つくば市東新井10-1 ハートランドつくば108号室
E-mail halada@susdi.org

2018年5月28日受理

† Ohshima, T. 平成29, 30年度化工誌編集委員(8号特集主査)
宮崎大学工学教育研究部
Murayama, N. 同上 関西大学環境都市工学部

とができ、また、アフリカや東南アジアで問題となっている廃電子機器の不法投棄を防止することになる。筆者はよく小中学校に出前授業をおこなっているが、地球を破壊されて怒り出したテラ (=地球) のサウルスとあちこちに有害物を捨て散らかすステテコウサウルスの二大恐竜を退治するのがトシ子さん (=都市鉱山) と教えている。ちなみに、図2はオリンピックの金メダルを例に、それ一個をリサイクルで作った場合に地球資源を使わずに済む量と、不法投棄による土地回復に使わずに済む地球資源量 (関与物質総量、俗に環境背後量とも呼ぶ) の筆者試算とともに図示したテラノサウルスとステテコウサウルスである。

2. 循環型社会は必然

このような現在の意義に加えて、近未来は都市鉱山の役割はますます大きくなるものと予想される。金属資源の一人当たりの年間国内消費というものは、基本的にその国の一人当たりのGDPとともにほぼ比例して大きくなるが、一人当たりGDPが一万ドルを超えた辺りではほぼ横ばいとなる。逆に言うと、ある国の一人当たりのGDPが一万ドルを超えてくると、その段階で一人当たりの消費量は欧米並みになり、それに人口が掛け合わせられた膨大な消費量に達することになる。

今世紀の末にはほとんどの国の一人当たりのGDPが一万ドルを超えることが予想されるので、その段階の資源需要は現在の欧米並みの一人当たり消費量に世界人口をかけたものになる²⁾。図3にはその過程が直線的成長と仮定

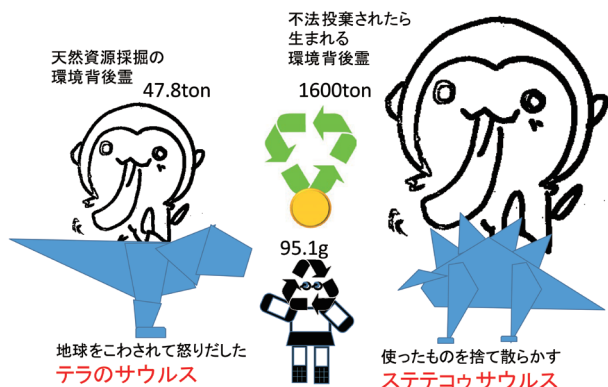


図2 都市鉱山メダルが削減する環境負荷

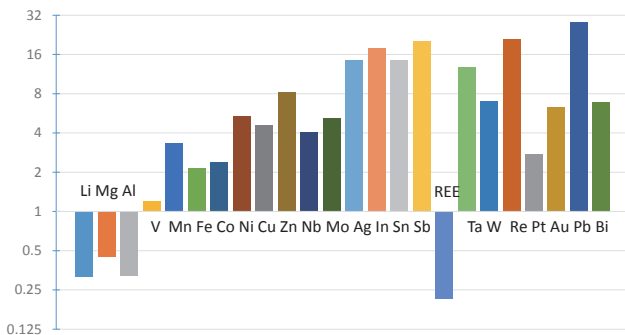


図3 現有埋蔵量に対する2100年までの累積資源需要予測

しての2100年までの各金属の累積消費量をその金属の現有埋蔵量を1として表したものである³⁾。

鉄は現有埋蔵量のほぼ二倍の需要が予想され、鉛に至っては30倍近くなる。現有埋蔵量で賄える可能性のあるものはLi, Mg, Alそして希土類(主として軽希土類)であるが、これらはいずれも酸素との親和力の高い元素で還元には膨大なエネルギーを必要とする。

しかしエネルギー資源と異なり金属資源は循環使用ができる。ではどのくらい循環使用することによってこの莫大な需要を賄うことができるか。それを単純化して概算したものが図4である³⁾。これも2100年に向けて単純線形で需要が伸びるとして台形の積算需要を想定し、そこに埋蔵量で賄える分を埋め込んだもので、左端の埋蔵量依存分に現在のリサイクル率を反映させている。もちろん価格の上昇などで埋蔵量は増大するが、その分は2100年以降使用するものとして予想から外してある。

横になった台形の色の濃い部分が天然鉱山の埋蔵量で賄える部分、そして多くの金属で大部分を占める下部の明るい部分が都市鉱山すなわちリサイクルで賄わなければならない部分であり、今世紀の末は資源の循環利用は必然となる。

3. 都市鉱山の大きなポテンシャル

問題は都市鉱山にそれほどのポテンシャルがあるのだろうか。筆者らは2008年に我が国の都市鉱山のポテンシャルとしてその蓄積量の推定をおこなった⁴⁾。それは個々の蓄積をカウントするボトムアップ法という手法とは異なり、トップダウン法と呼ばれる手法の一つで貿易などによる国内への資源流入と流出の差の累積からその蓄積量を推定したものである。それまでは製品の一部として輸出される資源をカウントすることが難しく、加工貿易国として資源の大部分は製品として海外に持ち出されていると予想されていたが、筆者らによる分析では産業連関表を用いることで製品中の金属量を推定し、多くの金属で半分以上が何らかの形で国内に残っていることを明らかにした。そうし

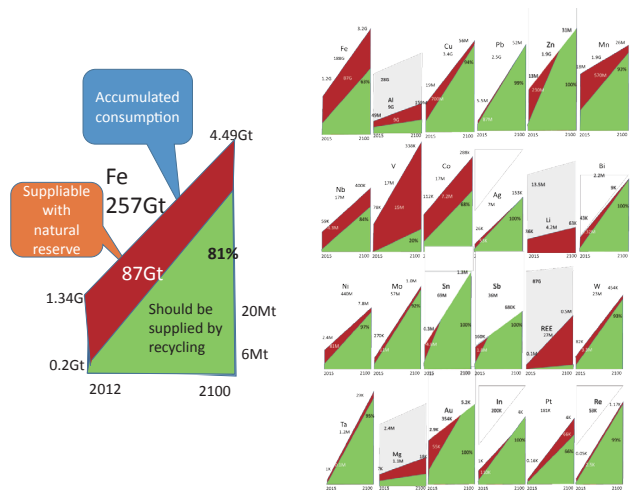


図4 需要の大部分はリサイクルで賄わねばならない

て得られた結果を2017年時点の各金属の世界の可採埋蔵量と比較して見たものが図5であり、アンチモンで2割以上金で約1割に相当するなど資源の可能性として無視できない量が日本の金属蓄積量として眠っていることがわかる。

ただし、埋蔵量は現在の技術と価格でも資源採取が経済的に成立する対象の量であるが、蓄積量はただであるというだけで経済的成立性を意味するものではない。何もしなければこの蓄積量は資源として生かされず眠ったままであり、技術、経済、社会システムを駆使して蓄積量を経済的にも意味のある埋蔵量に変えていく努力があって初めて都市鉱山は意味を持つのである。

4. 都市鉱山開発の現状

では、現在の都市鉱山利用はどのくらい進んでいるのだろうか。都市鉱山の中でも生活に身近な小型電子機器のリサイクルが2013年から開始された。図6は2016年の小型家電リサイクルの処理状況である⁶⁾。市民の使用済み小型家電は基本的に自治体によって回収され、さらに認定事業者として国から認められたリサイクラーのもとに持ち込まれる。こうして回収される小型家電は約5万8千トンである。回収された小型家電の多くはリサイクラーで解体されプラスチックの一部が再資源化に付されるとともに、電子

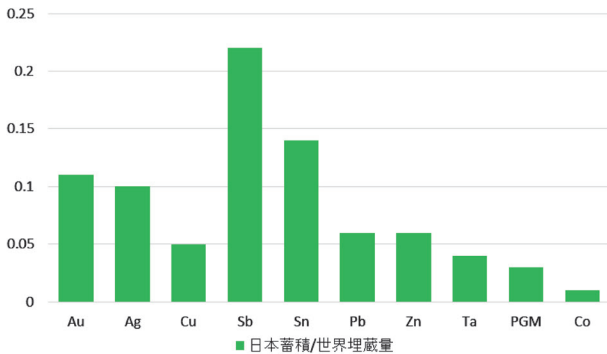


図5 各金属の日本の都市鉱山蓄積

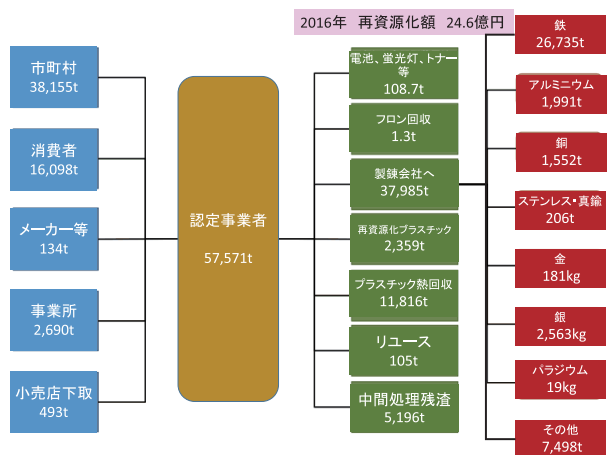


図6 2016年の小型家電リサイクル処理状況

基板や金属部分が製錬会社などに持ち込まれ金属資源が回収される。その多くは鉄で約2万7千トン、さらにアルミニウム、銅が2千トン弱と続く。金は181 kg、銀は2,563 kg、さらにパラジウムが19 kg回収されており、全体の再資源化額は24.6億円と報告されている。

これだけ見ると小型家電リサイクルは順調に動いているように見える。しかし、小型家電リサイクル法が施行される以前に経産省と環境省の合同研究会で算定されていた小型電子機器の年間排出量に含有される金属⁷⁾では、銅は約4000トン、銀は約50トン、金は約6トンが使用済み小型家電で排出されることが予想されている。この予想と比較すると金は3%、銀で5%しか回収されていない。前出の資料に金属全体を見ても予想排出量が65万トンに対して回収量は約5.7万トン、再資源化額では当初見込み844億円に対して3%程度の達成額でしかない。小型家電リサイクルはまだ緒に就いたばかりであるということが出来る。

小型家電リサイクルが十分に広がらない背景には、政府や自治体などの宣伝不足は否めないが、それ以前に構造的問題を持っている。その一つは、小型家電リサイクルにより回収されるはずのレアメタルなどを必要としているハイテク産業すなわち小型家電製造業がこのリサイクルのシステムの中に入っていないことである。またもう一つの弱点は、レアメタルなどのリサイクルはサプライリスクに対するリスク管理の側面を有しており、そのため価格変動に対して頑強な持続性のあるシステムが求められるのに対し、市場動向にまったくゆだねられむしろ翻弄さえされているという脆弱さがある。このことを踏まえ、以下にこれからの方向をみていこう。

5. 都市鉱山開発活性化への道

5.1 ファインケミカルリサイクルへの転換

本来、資源のリサイクルはごみを増やさないためのリサイクルではなく使うためのリサイクルである。しかしながら現状ではリサイクルは汎用性のある金属インゴットとして資材化された段階であたかも完結したかのように取り扱われる。使うという立場でのリサイクルではなく、売れるものにする事で留まっているのである。例えば、コバルトはLiBのコバルト酸リチウムの原料としてのコバルトが求められているのであるが、超硬工具バインダーグレードのコバルトでも資材化は達成できたとして満足される。他のレアメタルの場合も同じであり、そのほとんどが用途としては高純度のファインケミカルであるのに対して、汎用性のある金属インゴットにすることでリサイクルしたかのように錯覚されている。これではお金に換えるための換金リサイクルであり、循環を目指すリサイクルにはなっていない。図7に示すように今までのリサイクルは廃棄物を利用し減量するリサイクルと資源リサイクルといわれてきたが、実は使うための資源ではなく売るための資源だったのだ。

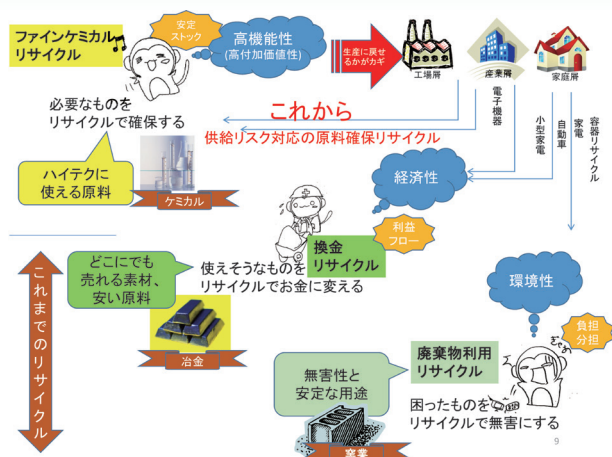


図7 換金リサイクルからファインケミカルリサイクルへの転換を

既存のリサイクルファシリティがこのような換金リサイクル指向で組み立てられているために、需要と付加価値の高いファインケミカルとしての利用が十分にできず、価格もインゴット市場に翻弄される一因となっている。従来のメタラジーによる汎用品化リサイクルではなく、ファインケミカルとしての使用用途に合ったリサイクル技術の転換が求められている。

5.2 製造業を巻き込んだ資源活用

ファインケミカルリサイクルへの転換を図るには、製造業の調達部門が何を求めているかが重要になる。しかしこれまでリサイクルで登場する製造業は、製造業の中でも廃棄物の処理に係るいわゆる静脈系であり、この対応が都市鉱山活用を遅れさせる大きな一因となっている。資源調達としてリサイクルを位置づけさせること、これが大きな課題である。

資源調達の意味で実は製造業は大きなリソースを持っている。それは工場発生物である。工場発生物の多くはゼロエミッションの取り組みなどを通じて利材化されている。しかしその多くが鉄、銅、アルミなどバルクでリサイクルされる素材であり、ファインケミカルリサイクルのようにレアメタルの成分を生かすリサイクルという視点でどれだけ有効活用されているかについてはその調査さえおこなわれていない。都市鉱山の最大の鉱脈は工場発生屑であり、製造業を巻き込んだ資源効率の高いリサイクルの取り組みが望まれる。

5.3 ストック型の資源利用

上記のような取り組みで静脈と動脈をより密接につなげていくことで国際市場価格に翻弄されるのではなくむしろサプライチェーンの中に組み込まれる循環システムへと発展させていくことができるであろうが、さらに持続性の高いリサイクルシステムを構築していくことが重要である。都市鉱山の天然鉱山に対する弱点として、分散性とそれに伴う質と量の不安定性があげられる。このようなものを廃棄物処理と同様にフロー、すなわち入手したものは即時に

処理をする、で扱うのは技術的にも経済的にも好ましくない。最終的な製錬、精製に至る前段階で、中間製品としてストック化して管理し、量と質の不安定性を解消させる工程の挿入を考える必要がある。徹底した分離技術の導入により廃棄物性をなくした中間製品として国内にレアメタル類を備蓄しておくという考え方の導入を検討しておく必要がある。

5.4 モノの循環からコトの共有へ

以上はあくまでモノ（資源）を効率的に廻す立場からの改善の方向である。自治体などの取り組みとなるとモノだけでなくそこにヒトが係っていることにも注目しておく必要がある。使用済みの背後には使用者がおり、モノを整えたり解体したりするのが好きな人たちもいる。地域コミュニケーションの中から使用済みのものが出てくる。例えば一人暮らしの家への家電相談員の派遣とか、地域リサイクルショップとの連携、さらにはハンディキャップの方々の働く場としての取り組み、などリサイクルされるモノでそこに係る人たちを繋いでいく、そのような取り組みもできるだろう。それは、再生された資源だけでなくもっと多くの価値を生み出すことに繋がっていくかもしれない。

6. リサイクルが変わるとき

長期的には資源利用の主体が天然鉱山から都市鉱山に移行していくのは必須である。ただそれには今の「静脈産業」と呼ばれる廃棄物処理や利材活用型のリサイクルでは対応できなくなってくる。まさにファインケミカルリサイクルへの転換が求められているのである。

現在、欧州をはじめアメリカ、中国でもサーキュラーエコノミーというものが注目され、そこではリマニュファクチャリングやリファービッシュ、リペアを通じて製品中に残された残存価値を徹底して生かす取り組みが進められ、いわゆる成分リサイクルはその一番下にある資源価値を生かす位置になろうとしている。これは逆に言うと廃棄物、老廃物などとして今まで使用済み物の処理として「静脈側」と見られていた成分リサイクルが、残存価値の底辺を支えかつ再生へと転化させる「動脈側」への移行を示唆するものかもしれない。都市鉱山の有効活用に向けて、今リサイクルは変わらねばならない。

引用文献

- 1) 南條：都市廃棄物の処理と資源化に関する基礎的研究，東北大学選鉱製錬研究所彙報，43，239(1987)
- 2) HALADA：World Resource Forum 2015, Davos
- 3) HALADA：Rare Metal Symposium 2015, Sendai
- 4) 原田，井島，島田，片桐：都市鉱山蓄積ポテンシャルの推定，日本金属学会誌，73(3)，151-160(2009)
- 5) USGS：Minerals Information, <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>
- 6) 中央環境審議会 循環型社会部会 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金属の再生利用に関する小委員会資料「小型家電リサイクルの施行状況」(2017)
- 7) 中央環境審議会 廃棄物・リサイクル部会 小電小委員会第三回資料「小型電気電子機器に含まれる有用金属含有量」(2012)