

都市鉱山とレアメタル（10・07・17）

西村 山 治（昭24・理）

はじめに

紹介頂きました西村です。私は海軍兵学校第二学年教程終了後、昭和二一年に三高理科に入学、卒業後、京都大学工学部冶金学科に進学、 Ni の製錬に関する三年次生の卒業研究以来、平成十年関西大学化学工学科を退職するまで、その間、五年間の信越化学（株）研究部における Mo 、 Zr 製錬に関する研究業務、十三年間の京都大学冶金教室における各種レアメタル製錬に関する研究を含めて、四六年間に亘って奇しくもレアメタル製錬に関する研究を続けてきました。このレアメタルと緊密な関係を有する都市鉱山とレアメタルについて、お話しする機会を与えていただき大変光栄に存じております。

レアメタルは「産業のビタミン」、「ハイテク産業の糧」といわれ、わが国の先端産業分

野を支える高付加価値な部材の原料で、近年、その需要は年々拡大しています。しかし、産出量や流通量が少ない上、産地も中国、ロシア、アフリカに偏っています。また、新興国の経済発展や資源ナショナリズムにより、需要拡大と価格高騰が起っており、さらに、最近、レアメタル資源国が資源囲い込みの動きを強めています。これらレアメタルが持つ、偏在性は特定の地域、国への依存度の高いことから、わが国の中長期的な安定供給確保に對する重大な懸念が生じています。

貴重なレアメタル資源の殆ど全量を輸入に頼るわが国で、最近、とくに、わが国の「都市鉱山」に熱い視線が注がれ始めています。都市に大量に廃棄される使用済み家電製品や電子機器等には、貴金属やレアメタルなどの貴重な金属資源が多種類含まれており、これらは都市生活の中に埋もれた鉱山に例えて「都市鉱山」と呼ばれ、わが国の高度な製錬、製造技術を用いて、使用済み製品から金属を回収リサイクルすれば、都市はレアメタルを始め各種金属を産み出す鉱山となります。

都市鉱山とレアメタルの関連について、今なぜ都市鉱山か、日本における都市鉱山埋蔵量、都市鉱山鉱石処理の現状と問題点、レアメタルの特性、レアメタル資源の問題点、市場の現状と今後の方向性等を紹介するのが本講演の目的です。

都市鉱山

都市鉱山 (urban mine) とは一九八八年東北大学選鉱製錬研究所の南條道夫教授らが、次記論文で提唱したのが最初で、「都市鉱山開発―包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け、東北大学選鉱製錬研究所彙報、第四三巻、第二号、一九八八年、二三九―二五一頁」、都市で大量に廃棄される家電製品などから資源を回収し、再利用する事を提唱した時に使った造語で、都市でゴミとして大量に廃棄される家電製品などの中に存在する有用な資源（貴金属、レアメタルなど）を鉱山に見立てたものであります。そこから資源を再生し、有効活用しようとするリサイクルの一環となる地上資源の一つでもあります。都市鉱山とは、一旦、地下から掘り出され、人間の活動圏の中に入ってしまった金属などを資源として活用していくことであり、一般に鉱物資源は地下から採取されますが既に二十世紀の末にはいくつかの金属資源が地下にある確認埋蔵量よりも、これまでに採掘した既採掘量のほうが多い状態に至っています。都市鉱山はこの人間活動圏の中にある既採掘金属を資源として、有効に活用しようとする考え方であり、ここである「都市」とは「農村」や「地方」に對置する考え方ではなく、「地下」もしくは「天然」に對する「人間経済圏」を代表する言葉です。金属資源Ⅱ（地下鉱山資源）＋（都市鉱山資

源)

最近、とくに、わが国で「都市鉱山」に熱い視線が注がれています。鉱山といっても原鉱石が採れる新たな鉱山が見つかったわけではありません。都市に大量に廃棄される使用済み家電製品や電子機器等には、貴金属やレアメタル（希少金属、希有金属）などの金属資源が多く含まれており、これらは都市生活の中に埋もれた鉱山に例えて「都市鉱山」と呼ばれています。日本には金属の高度な製錬、製造技術があり、これを用いて使用済み製品から金属を回収リサイクルすれば、都市は金属を産み出す鉱山となります。

鉱物資源に乏しい日本にあつてこの都市鉱山が注目され、物質材料研究機構の試算によると、わが国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵します。

しかし、これらの都市鉱山では、一製品当たりの含有量が微量であつたり、素材と混合されていたりするため、技術的、コスト的に鉱物資源の抽出が容易ではなく、また、数多くの製品が市中に散在しているため、製品回収コストが高くつくことも、資源回収が進まない理由の一つとなっています。その結果、有用金属を含んだ製品が廃棄されたり、本来得られる価値よりも安価で、海外に流出していたりするのが現状です。

これらの問題解決には、有用金属を効率的に抽出する技術の開発や、使用済み製品または有用金属を含む部品の効率的な回収網の整備が不可欠であります。

都市鉱山活用のメリット

スクラップ類から非鉄金属を回収する場合は、採鉱、選鉱、製錬という一連の作業により生産する場合と比べ、エネルギー消費量やCO₂排出量が少なく、また採鉱に伴う環境負荷も発生しなく、重要なメリットとして以下の点が考えられます。

一 CO₂排出量の削減（地球温暖化進行の抑制）

都市鉱山から回収されるリサイクル原料から銅地金を製造する場合のCO₂発生は、既存の文献資料によると、鉱山から採掘された鉱石から製造する場合の四分の一程度。埋蔵天然資源の節約

地球に存在する資源の量は限られています。都市鉱山を活用することは、天然資源からの採掘量を抑制することに繋がります。

三 最終処分量の寿命の延長

都市鉱山開発とは、これまで廃棄されてきた「ゴミ」を「資源」に変えます。

3R {Reduce (発生抑制)、Reuse (再使用)、Recycle (再生利用)} の取り組みを高度化することは、最終処分物の寿命延長に資することになります。

四 資源開発に伴う環境への影響度の低減

金属を天然の鉱石から製造する場合、鉱山から鉱石を掘り出す必要があります。銅鉱石の銅の含有率は一パーセント程度、十円玉の重さは約四五グラム、十円玉二枚作るためには、約一キログラムの銅鉱石を掘り出す必要があります。都市鉱山を開発することは、鉱石の採掘量を減らし、資源開発コストの削減に繋がります。

なぜ都市鉱山か

最近、都市鉱山への関心が急速に高まってきた背景には、世界的な資源価格の高騰があります。鉱物資源価格高騰の背景には、国際的な資源ナショナリズムの台頭があり、世界のレアメタルの埋蔵国はごく限られています。主要産出国である中国は、最近、自国の自動車産業や電気機械産業への供給を優先するために、戦略的に輸出を抑制するなど、自国に存在する資源を自国で管理・開発しようとする動きが強まっており、これが資源価格高騰の一因となっています。

レアメタルは「産業のビタミン」「ハイテク産業の糧」と言われるように、電子機器や自動車などの現代の工業製品には不可欠資源であり、その安定的な確保は日本産業にとつて至上命題であります。こうした資源価格高騰と需給の逼迫を背景に、企業はリサイクル

技術や代替素材技術の開発を活性化させています。

このような状況下だからこそ、都市鉱山からの金属リサイクルのビジネスチャンスが拡大し、廃棄される電気機器等の工業製品から、貴金属やレアメタルを取り出す生産技術への注目度が高まりつつあります。

使用済みのIT機器などの都市鉱山はしばしば「宝の山」といわれますが、廃棄製品を集めて、そこから金属を回収する技術がなければ、宝の持ち腐れであり、さらに、その回収コストが取り出せる金属の価値より安くならなければ、ビジネスとして成り立ちません。この意味で都市鉱山からの金属リサイクルの経済的価値は、その時の鉱物資源価格によって決まる部分が大きいのです。鉱物資源価格が上昇すればするほど、都市鉱山「発掘」の経済的価値が高まります。

都市鉱山に眠る宝「都市鉱山埋蔵量」

作られては捨てられる家電や自動車、そうした工業製品に使われている電子回路基板にはAuやPt, Inといった貴金属、レアメタルが使われています。一枚の基板に使われるレアメタルはごく微量ですが、数が集まると無視できません。国立環境研究所の循環型社会、

廃棄物研究センターによると、パソコンの基板一トンから約一四〇グラムのAuが取り出せます。Auはグラム当り三五〇〇円前後（二〇一〇年九月二二日 三五二四円）ですから、約五十万円の金額になります。

日本にある都市鉱山の規模は表1（物質・材料研究機構）に示されます。夫々の金属ごとに日本にある都市鉱山の規模が、世界の現有埋蔵量の何パーセントを占めるかを見ると、Au一六パーセント、六、八〇〇トン、Ag一一パーセント、六〇、〇〇〇トン、Sn一パーセント、六六〇、〇〇〇トン、Ta一〇、四パーセント、四、四〇〇トンなど、電子部品等に多用されている金属において、いずれも世界の埋蔵量の一割を超える規模となっています。また、透明電極としてディスプレイや太陽光発電に使われているInは六一パーセント一、七〇〇トンにのぼるほか、プラスチックの難燃助剤として使われるSbも一九パーセント、三四〇、〇〇〇トンの規模となっており、わが国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵します。

日本の都市鉱山だけで、世界の消費量の何年分を賄えるかを試算すると、多くの金属は二年分が賄え、とりわけ電池材料になるLiは七、四年分、触媒や燃料電池、電極に不可欠なPtは五、七年分の蓄積量を誇っています。

また、日本の都市鉱山規模を各国の天然資源埋蔵量と並べた場合の順位をみると、Au、

Ag, Pb, Inが世界一位、Cuは世界二位となっています。

勿論、上記の数字は、あくまで物質・材料研究機構の試算に過ぎず、また、都市鉱山から実際に資源を効率的かつ経済性を伴う形で回収するには、数多くの難題があることを考えれば、「日本が世界一、二の資源国」と表現するのは、現時点では適切でないと考えられます。しかし、日本の都市鉱山が可なり大きな規模であることは間違えなく、地下にあった金属資源が地上に在りかを変えたことで、日本は「地上の資源国」という顔を持つよ

世界の埋蔵量 に対するわが 国の都市鉱山 の比率 (%)	世界の年 間消費量 との比	埋蔵量国 別順位
0.24	0.3	12
19.13	3.1	3
2.08	0.8	4
1.87	2.3	6
8.06	2.5	2
16.36	2.7	1
61.05	3.8	1
1.62	1.5	11
9.85	1.7	1
3.83	7.4	6
2.69	1.3	6
2.70	1.1	9
3.59	5.7	3
0.35	2.5	6
22.42	3.1	1
10.41	3.5	3
10.85	2.4	5
1.97	0.8	5
1.08	2.2	4
6.36	1.4	6

表－１－ わが国に蓄積された都市鉱山の規模

金属	世界の年間消費 (t)	世界の埋蔵量(t)	わが国の都市 鉱山蓄積 (t)
Al	177,000,000	25,000,000,000	60,000,000
Sb	112,000	1,800,000	340,000
Cr	20,000,000	810,000,000	16,000,000
Co	57,500	7,000,000	130,000
Cu	15,300,000	480,000,000	38,000,000
Au	2,500	42,000	6,800
In	450	2,800	1,700
Fe	858,000,000	79,000,000,000	1,200,000,000
Pb	3,300,000	57,000,000	5,600,000
Li	21,100	4,100,000	150,000
Mo	179,000	8,600,000	230,000
Ni	1,550,000	64,000,000	1,700,000
Pt	445	71,000	2,500
RE	123,000	88,000,000	300,000
Ag	19,500	270,000	60,000
Ta	1,290	43,000	4,400
Sn	273,000	6,100,000	660,000
W	73,300	2,900,000	57,000
V	62,400	13,000,000	140,000
Zn	10,000,000	220,000,000	13,000,000

うになっているといえます。

都市鉱山に含まれるレアメタルは天然原料に較べて含有量が高い。Auの場合、自然鉱石一トン中に数十グラムあれば、極めて含有量の多い方で、一般に約五グラム程度、他方、携帯電話の場合、一トン中のAuは三〇〇〜四〇〇グラムもあり、自然鉱石の一〇〜八〇倍に近い。国内には、現在使用中のものも含めて二億台の携帯電話が存在し、全体で六〜八トンのAuが含まれています。パソコンの基板などを加えれば、さらに多くのAuが眠っています。Cu鉱石に含まれるCuの濃度は一パーセント程度ですが、電子製品の基板にはCuが一〇パーセント程度含まれています。携帯電話にはLiやNiなどのレアメタルが使われていますが、携帯電話に含まれる金属の価値は一〇〇〜三〇〇円程度とされています。

レアメタルへの世界の需要は高まる一方ですが、産出国の輸出規則もあり、国際価格は高騰を続けてきました。一例は、大容量ハードディスクの成膜用材料となるRuの国際価格は二〇〇七年二月までの僅か一年間で、九倍に高騰。その時、底力を見せたのが、日本の優れた技術であり、Ruの加工最大手のフルヤ金属は二〇〇八年一月新工場を稼働させ、Ru精製能力を一挙に年間二〇トンに引き上げました。これは世界需要の約半分であり、結果として、Ruの国際価格は半値以下に落ちつきました。

リサイクルの現状

携帯電話とパソコンは、通信事業者などが回収、再資源化に取り組んでいます。回収台数は伸び悩んでいます。再資源化の面では、Au, Ag, Cuは国内精錬施設で取り出せるため、事業として成り立ちます。レアメタルは既存施設では抽出できないものが多く、新施設を建設する必要がありますが、大量の機器を効率的に集荷する仕組みがなければ、採算をとるのが困難であります。

—どうすれば沢山集められるか—

秋田、福岡県などの七ヶ所で、スーパーや公共施設に小型電子機器の回収箱を置き、どの程度集まるかを調べる国のモデル事業が始まっています。この調査で、例えば、Auは、国内で販売された基板に含まれる約四、七トンのうち、約〇、三トンが回収可能となることなど、現状と課題が見えてきました。

国の規制で、家庭の使用済み電子機器を集められるのは、免許を持つ一般廃棄物の処理業者だけであり、リサイクルは分解などの手間がかかり、処理業者が焼却や埋立に回す事

二パーセント程度、「携帯電話に含まれるレアメタルなどの金属は濃度は高いが、重量は小さく、資源性からみれば、必ずしも莫大とはいえない」としてCDプレーヤーやデジカメなど小型家電製品全体を見据えたりサイクルの必要性を訴えています。経産省と環境省は二〇一〇年度、新たなリサイクル技術の開発に関して約六億円を計上しています。

現状のリサイクルで資源を取り出すにどれくらいのコストに抑えるべきか

端末の基板を取り出すのに一台当たり五〇円強、レアメタルが多く含まれているＩＣチップまで取り出すと一二〇円程度、これに加えて廃棄物の処理コストがかかる。一台の携帯電話に含まれているAuは約九〇円分、その他の金属を含めて一二〇円（東北大学多元物質科学研究所中村崇教授によると一〇〇～三〇〇円）で可なり厳しい状態です。

天然鉱山の場合、掘り出した鉱石を、そのまま製錬所に持つていくことは殆んどありません。例えば、日本は外国から大量のCrを輸入していますが、Cr鉱石をそのまま輸入しているのではなく、選鉱（不純物などを除く処理）を経てから輸入しています。そうしないと、Cr-トン作るためにはCr鉱石が三〇〇トン必要。とても船で運びきれません。因みに、ステンレスに使われるNiの価格はFeより非常に高いのです。Niは選鉱が難しく、

掘り出した鉱石をそのまま熔かして製錬する必要があるのです、どうしても高くなります。携帯電話などから資源を取り出して利用する場合、製錬し易いように付加価値を高め、それを製錬所が買い取るという流れを作り出しませんと、資源リサイクルはうまく回りません。このためには、基板やチップの取り出し部分に、技術を投入してコスト削減することが必要となります。

実際、各機器を市場ベース（二〇〇九年一月三〇日）で見た場合、都市鉱山から得る利ざやはどれ位あるでしょう。

電子機器基板に含有されるレアメタルの地金相応価格概算値（単位：一台当り円）

ビデオカメラ……………	一五〇	DVDプレイヤー……………	三二
オーディオ……………	三七二	電話機……………	一〇
デジタルカメラ……………	一一〇	カーナビ……………	二一
ポータブルCDプレーヤー……………	六七	ゲーム機……………	六六
ポータブルMDプレーヤー……………	一〇八	フラッシュメモリー……………	四三
液晶テレビ……………	七〇	携帯電話……………	一一九

右記の概算値を見ますと、例えば、携帯電話の場合、解体↓レアメタル選別↓摘出↓精製に至るフローを約一二〇円以下に抑える必要があります。

都市鉱山開発の課題

都市鉱山への関心と期待が高まっていますが、都市鉱山から金属資源を回収することは簡単ではありません。天然の鉱山には金属の品位が高い地層「鉱脈」があります。天然の資源開発は、この「鉱脈」を探し当て、これを掘ることで「鉱石」を得るのです。都市鉱山では、この「鉱脈」をいかに効率的に発見するかが、今後の課題となります。都市鉱山の場合、「鉱石」は使用済み製品または産業廃棄物等。リサイクルに実際に回されるシステムが既に出来上がっているものについては、「鉱脈」が発見されているといえます。しかし、「鉱石」の中にはリサイクルされずに、廃棄されているものが大量にあります。現在の都市鉱山では鉱脈がごく部分的に採掘されている状態に留まっています。

資源は「一定量、一定濃度の物質が一定箇所に集中して存在する」ことで、始めて資源になります。微量で、しかも何種類含まれているか判らない携帯電話等の都市鉱山は非常に扱い難いのです。都市鉱山からレアメタルを回収するに当たって、最も費用がかかるの

は、リサイクルそのものでなく、収集コストです。携帯電話には「モバイル・サイクル・ネットワーク」という通信事業者やメーカーがサポートしているネットワークがあります。携帯電話を回収して得た資源の利益は、収集コストでほぼゼロになってしまっています。携帯電話を回収しないと、中国が安く買い取ってしまいます。中国に買い取られた携帯電話は、まず、分解して組み立て直し、少しグレードの落ちた携帯電話として再使用されます。それが壊れたら、今度はも一度分解して中の部品のみを再利用します。そこまで使つて、最後に、Au, Ag, Cu といった金属資源を取り出します。

レアメタルを回収する事も重要ですが、機器を解体した時に出る大量のプラスチックを処理することまで考える必要があります。小型電子機器そのものは非常に小さく、種類や色も様々で、プラスチックをそのままテリアルリサイクルするのは非常に困難です。

その他、難燃剤の問題がありますが、電子部品やモーターなどを内蔵している製品のプラスチック製筐体や部材には、万一、機器内で発火があっても簡単に燃えないように臭素を含む難燃材を添加しています。これが資源化する時に非常に厄介で、どうやってうまく取り除くか、逆に臭素を用いてレアメタルを分離できないか、などといった研究が進められています。

都市鉱山の鉱石処理の現状と問題点

課題は「法整備」と「技術」

- 一 法整備：二〇〇一年四月一日に「家電リサイクル法」（特定家庭用機器、再商品化法）が施行されていますが、対象となる家電四品目は冷蔵庫、エアコン、テレビ、電子レンジ。この法律はゴミの減量化を目的としたもので、都市鉱山の概念はなく、金属資源の塊であるパソコン、携帯電話、CDプレーヤー、液晶テレビ等の電子機器が対象になっておらず、回収システムが存在しなく、資源の回収率が低かったのですが、二〇〇九年度に薄型テレビ、衣類乾燥機が追加されました。しかし、小型電子機器類は所有権を放棄して捨てると、一般廃棄物になります。一般廃棄物は地方自治体、もしくは委託を受けた一般廃棄物処理業者が処理する様に法律で決められています。それ以外の人や業者が勝手に回収できません。地方自治体で回収された一般廃棄物は、今まで不純物として処分場で埋め立てるか、焼却処分されてきました。
- 家電リサイクル法で定められた品目以外のＩＴ機器についても、回収を促進する仕組み作りが必要であり、法制化を含めたＩＴ機器のリサイクル体制の整備など、なお一層の徹底した法整備が望まれます。

例えば、携帯電話・PHS端末の回収台数は二〇〇〇年度の一、三六一万台をピークに減少傾向にあり、二〇〇七年度は六四四万台に落ち込んでいます。回収が低調な背景には、携帯端末に保存した写真やメールなどの記録を思い出として手元に保持したい利用者が増えていることが影響しています。個人情報流失への懸念が強いことや、ダウンロードしたゲームや音楽などが著作権保護のため、新端末に移行できないことも背景にあります。

二 技術：リサイクル技術が成熟していないため、都市鉱山は散逸してしまいます。現代の技術水準では、電子部品からPCやTVなどは回収できますが、レアメタルの回収技術は不十分で、大部分が廃棄処分されています。都市鉱山の鉱石の多くは経済的に利用されずに、「焼却、埋立などのゴミ処理に回される」、「投棄される」など散逸しています。

散逸する背景には、経済的、技術的な理由があります。

一 分別、解体作業がコスト高で、経済的に成立し難い。

二 都市鉱山に含まれる多様な金属を、効率良く回収することが、技術的に難しい。

三 特に、レアメタル類は含有量が微量であり、回収が困難の要因となります。また、海外に流出した鉱石の一部には、現地で有価金属を抽出する際に、有害物質が使用

された後、廃棄され、環境破壊に連がっているという報道もあります。

三 盲目的な資源循環志向ではなく、効率よい回収：レアメタル回収においては、何が何でも回収するのではなく、その金属をどれほど効率よく回収できるかという視点が重要であります。例えば、PPは鉱石から製造するのに、膨大なエネルギーと時間を要するため、資源、環境保全の観点からリサイクルの徹底を図ることが望ましい。しかし、Cu（亜鉛製錬の副産物）のように、ベースメタルの副産物としても産出されるレアメタルについては必ずしも、徹底的にリサイクルする必要はないとの指摘があります。都市鉱山からの金属資源回収は、効率よく回収するための「現代の錬金術」の開発とセットで推進すべきものといえます。

人工鉱床構想

東北大学の中村崇教授、白鳥寿一教授が提言する「Reserve to Stock＝人工鉱床」構想で、主に廃電子機器からレアメタルを取り出し再利用する発想。「現在すぐにリサイクルできないものであっても、一定品位以上の有用金属を含むものを一定箇所に集約し、将来に向けて取り出せるよう鉱床状態にして貯留しておく。経済合理性の範囲で掘れるもの

けを掘る。都市鉱山とは一線を描く。」

天然の鉱山では単純に金属が散らばっているのではなく、「鉱脈」や「鉱床」と呼ばれる金属の集った部分があります。これが都市鉱山との大きな違いであります。都市鉱山も「鉱床」や「鉱脈」に相当する部分を作らなければなりません。きちんと回収して集めておける場所が必要です。

前述のように、この考え方は中村教授らが提唱し、企業としてDOWA、行政として大館市が協力し、JOGMEC（石油天然ガス・金属鉱物資源機構）がバックアップしている「希少金属等高効率回収システム」の計画として進められています。この様な取り組みが、様々な形、様々の地域へ広がっていくことが、散逸ストックを有効に集めていく鍵となります。

都市鉱山ビジネスから学ぶこと

一 資源高で拡大するビジネスチャンス

都市鉱山から金属を回収してリサイクルすることは、以前から技術的にある程度可能でしたが、殆んど、行われてきませんでした。それがここにきて、急に開花し始めてい

る理由は、資源価格高騰によって、都市鉱山からの金属リサイクルが採算にのる可能性が見え始めたことによります。

資源価格が大幅に上昇すれば、今まで手を付けられなかった資源の開発が可能になります。原油高騰を受けて、オイルシェール（油分を含む岩石）やメタンハイドレード（海底に眠る資源で、天然ガスの主成分であるメタンガスが氷状になったもの）の開発が加速しているのはその一例ですが、最近の都市鉱山ビジネスの盛り上がりも、これらと同様の現象と言えます。

製造業企業にとって、資源価格高騰は原料高で収益を圧迫するマイナス要因であることは言うまでもありません。しかし、一方で、資源高で資源リサイクル事業や代替素材開発の採算性が高まることにより、ビジネスチャンスが拡大する面がある点を見逃してはなりません。

現に、最近のレアメタル価格の上昇を背景に、多くの金属メーカーがレアメタルのリサイクル事業に参入し、レアメタルを回収する大型設備の建設に踏み出しています。また、化学メーカーは、電気機器製造に不可欠なレアメタルを含む素材の代替素材の開発を活発化させています。

こうした動きは、決して一過性のものではなく、資源価格は時に一時的に反落し、調

整局面になったりしますが、中長期的には新興経済国の需要拡大と資源ナショナリズムの高まりを背景に高騰が不可避とみられています。このため、昨今の資源高を一過性のものでない不可逆的なパラダイム転換と見なして、抜本的な対策を打ち始める企業経営者が増えつつあります。

二 日本は資源を「使う」だけではなく「つくる」面でも強い。

都市鉱山ビジネスは日本が資源を一方的に「使う」だけの国ではなく、資源を「つくる」面でも強みを発揮できる国であることを我々に教えてくれます。

天然資源は資源国で「採れる」ものであり、「つくる」より「使う」というイメージが強いのです。しかし、科学技術の発展に伴い、地下にあった金属資源が地上に在りかを変えて、日本は巨大な都市鉱山を抱える「地上の資源国」となっています。

さらに、レアメタルの消費大国であると同時に、実は世界に冠たるレアメタルの生産大国でもあります。鉱石を製錬して純度の高いレアメタルを取り出す技術で日本は世界最高水準であり、この技術力があるからこそ、都市鉱山から資源を創り出す事ができるのであります。

最近の「都市鉱山」開発の盛り上がりを見るべきではありません。資源価格高騰で生じたコスト構造などの環境変化を利用して、高い技術力を武器にして資

源の「生産」面で新たな価値を創造すれば、資源高という逆境を商機に変えることができます。都市鉱山ビジネスの勃興は、日本企業のこのような可能性を教えてくれる事例として注目に値するものであります。

レアメタルとエネルギー問題

使用済みの製品からリサイクルでレアメタルを回収し、再資源化することは、資源の確保の面だけではなく、エネルギー問題の上でも重要であります。鉱石の中に含まれるレアメタル元素は微量であり、ある種のレアメタルを生成するには、膨大な量の鉱石が必要となり、膨大な量の鉱山を発掘し、そこから特定のレアメタルを製錬するまでには、甚大なエネルギーを消費しなければなりません。リサイクルに比べて、自然の鉱山から産出する方法は、地球環境に大きな負荷を与えてしまっています。

地殻から資源を掘り出し、大きなエネルギーを使って製錬することなく、省エネルギー・省資源を図ってリサイクルを進めていくことは、環境保護の観点からも重要であります。

そもそも金属は何度でもリサイクルして使うことができる資源であります。使い終わっ

たものを回収し、再利用する仕組み作りさえできれば、資源の安定供給の問題解決策になる可能性が十分にあります。

これまで日本は省エネルギー、省資源の分野の研究開発を得意としてきましたが、同様に、レアメタルに関しても、より有効に資源を活用する方法を探ることが必要になってきています。

レアメタル (Rare Metal 希少金属、希有金属)

レアメタルについて、学術的な定義は存在しなく、地球の地殻表面には、存在量の少ない非鉄金属のうち Cu, Pb, Zn, Al の様な所謂ベースメタル (一般金属) や Au, Ag, Pt などの貴金属を除いた、産業に利用される金属を云います。

レアメタルは、そもそも埋蔵量が少ないか、埋蔵量自体は多くとも、純粋な金属として抽出することが、技術的、経済的理由から難しく、素材として利用できる資源量が限られている金属を総称したものです。

現在、日本では、一九八四年に通産省の鉱業審議会レアメタル総合対策小委員会が、「現在工業用需要があり、今後も需要のあるものと、今後の技術革新に伴い新たな工業用

需要が予測されるもの」として、三十一鉱種、四十七元素をレアメタルとして定義しています。

国家備蓄対象（七鉱種） Ni, Cr, Co, Mn, W, V, Mo

国家備蓄対象外（要注視十鉱種） Nb, Ta, Sr, Sb, Pt, Pd, Zr, Ga, In, ハンブース（十七元素）

国家備蓄対象外（十四鉱種） Cs, Ba, Re, Tl, Bi, Ge, Ti, Li, B, Se, Te, Rb, Hf, Be

先端的な工業原料や工業製品を作るために欠かせない金属です。例えば、形状記憶合金、DVDプレーヤーなどの小型モーター、液晶パネル、電池（Ni電池、燃料電池、Liイオン電池）、超伝導材料、自動車用の鋼板など、電子電気産業や自動車産業を基幹とする日本にとって重要性は極めて高い金属です。

レアメタルはわが国の先端産業分野を支える高付加価値な部材の原料であり、近年、その需要は年々拡大しています。しかし、確保が難しいのです。第一に産出量や流通量が少ない上、産地も中国、ロシア、アフリカに偏っています。第二に新興国の経済発展や資源ナショナリズムにより需要拡大と価格高騰が起こっています。しかし、これらレアメタルを持つ、偏在性は特定の地域、国への依存度の高いことから、中長期的な安定供給確保に対する懸念が生じています。

レアメタルの特性

一 強度増強

鉄やガラスと混合することにより、単体材料の強度が飛躍的に上がります。製品は超強度合金など。主に、機器の駆動部、点火プラグ、工作機械の切削部分などの材料になります。製品の軽量化、高

の小型軽量化・省エネ化・環境対策		
小型二次電池 Liイオン電池 Ni水素電池	超硬工具	排気ガス 浄化
Li, Co, Ni, レアア ース	W, Co, Ti, Mo, V	Pt, Rh, Pd

一使用		環境
照明	情報	
LED	電子部品	触媒
Ca Y In La Eu	Ag In Au Ta Pd W Rh Ni	Pt Pd Rh RE

二 発光性

電圧等を加えると発光する性質を利用し、薄型テレビや発光ダイオードに使われます。テレビの需要が増えてから、発光性を持つレアメタルの輸入は急増しています。

電圧等を加えると発光する性質を利用し、薄型テレビや発光ダイオードに使われます。テレビの需要が増えてから、発光性を持つレアメタルの輸入は急増しています。

表-2- レア金属の主な用途

高機能材			製品
特殊鋼	液晶 透明電極 (ITO)	電子部品 IC, 半導体, コネクターリードフレーム, 接点	希土類 磁石 Nd, Fe, B 磁石 小型モータ
Ni, Cr, W, Mo, Mn, V	In	Ca, Ta, Ni, Ti, Zr, Nb, Pt	RE (レアアース) Nd, Dy, Tb, Co

エネルギー供給			エネルギー	
発生	転換	貯蔵	熱	駆動
太陽電池	燃料電池	二次電池	熱電素子	モーター
Ga Ru As In Cd	Pt Gd Ru La Ce	Li Co Ni RE	Bi Te Co Sb	Dy B Nd Sm Co

三 強磁性

鉄より遥かに強い磁石になります。用途は超小型モーターなど、携帯電話のバイブや電気機械などの製品の中には多含まれています。

四 半導性

半導体に必須の材料。電子機器内の回路に多数利用されます。太陽光パネルは半導体。夫々のレア金属は前記の特性を個々に有しています。工業化が進む中で、夫々の特徴を生かして活用されており、

「産業のビタミン」、「ハイテク産業の糧」といわれ、日本経済を支えるハイテク産業において、製品の小型化、軽量化、高機能化や省エネルギーの諸点で、日本の国際競争力の維持、発展に欠かせない素材となっています。レアメタルの主な用途は表2-2に示されています。

何が問題になっているのか

一 埋蔵状況

日本は世界のレアメタルの二十五パーセントを消費するレアメタルの消費大国です。レアメタルの問題を議論する時には、BRICS諸国に多く存在することから、その偏在性を取り上げられます。例えば、南アフリカ共和国は世界全体の八十パーセント近くのPt、七十パーセント以上のRhを産出しています。Auは「世界一の産出国」の座を中国に譲りましたが、依然として同国の主要な輸出品の一つ。斯様な同国が二〇〇八年一月に電力危機が発生した際、AuやPt、Rhといったレアメタル相場は史上最高の価格水準にまで押し上げられました。産出量の少ないレアメタルは産出国の供給政策、あるいは採鉱や製錬設備のトラブルで忽ち世界市場に大打撃を与える可能性があります。

レアメタルについては、中国 (W, レアアース、In など)、南アフリカ (Pt, Cr, Mn など)、ロシア (Pt, V, Ni など)、チリ (Cu, Mo, Li) とったように、生産が大きく偏在しています。主に、中国に頼ってきた W, レアアース、In などは、供給を受ける側の最大のリスクとなっています。これは、中国の資源政策の転換によるもので、中国にとって戦略物質と認識されれば、全面的な輸出禁止となる可能性があることによります。同じように、偏在しているレアメタルでも資源国の供給政策によって、大きな影響を受ける可能性があることが予想されます。

二 価格高騰

資源国は鉱石を売るより、利益の多い付加価値の高い工業製品を輸出する方向に舵をとり始めています。このため、資源国国内レアメタル消費が急増しています。また、国家政略としてレアメタルの関税のアップなど自国保護政策を打ち出し、価格が急騰しています。レアメタル価格の急激な高騰は、必ずしも需給バランスからだけで起こっている訳ではなく、昨今の金融不安で生まれた流動的資金の流れ先の一つである事にも影響しています。とはいえ、投機対象から外れても、昔のような低価格でいつも手に入るという認識は改める必要があります。

日本でのレアメタルの国家備蓄制度は一九八三年度から進められており、製鋼の添加剤として使用される γ や硬度の高い合金に用いられる β など四種類について、国内消費量の約二十日分の備蓄をしています。これを二〇〇九年度中に二倍に積み上げると共に、薄型テレビや太陽光発電パネル等の原材料となる α と、省エネ照明器具に使われる発光ダイオード（LED）などに不可欠な δ についても新たに備蓄を開始しています。また、備蓄の対象にはなっていないませんが、電気自動車用の大型充電池などに使われる η について、三井物産がカナダの資源会社と独占契約を結ぶなど、民間でもレアメタル確保が着々と進められています。

レアメタルリサイクル市場の現状と今後の方向性

レアメタルはステンレス鋼等の鉄鋼原料からハイテク産業に至るまで、巾広く使用されており、国内産業にとって不可欠の材料であります。

現在、Pt & Pd, In等の高価なレアメタルのリサイクルは進んでいるものの、多くのレアメタルは「添加物」として使用されており、抽出が困難であり、経済的でない等の理由から、殆んどリサイクルが行われていないのが現状であります。

レアメタルの希少性、需要量、輸入価格、環境要因の側面から、リサイクルの必要性度合いの検討が行われました。その結果、In, Cr, Ni, Mn, Ge, B, Ba, Pt, Nb, Mo, Re, Hfがリサイクル必要性の度合いが上位を占めました。

現状でリサイクル量の多いのは、Cr (年間一八六、二八〇トン)、Mn (年間一五三、五〇〇トン)、Zn (年間四一、六五八トン) ですが、これらは鉄鋼からレアメタルを抽出しているのではなく、鉄鋼屑として再溶解し、鉄鋼原料としてリサイクルされています。

また、リサイクル率が高いレアメタルは、Be (一〇〇パーセント)、Nb (八五パーセント)、Sb (七七パーセント) であり、金属Beは、ほぼ全量が再溶解され、原料としてリサイクルされています。Nbは鉄鋼スクラップからの回収は行われていない。難燃助剤等の添加物として使用されている SnO_2 のリサイクルも行われていません。

鉄鋼関連のリサイクルの場合、レアメタルは添加剤として、使用されていることから、レアメタルを抽出し、原材料として回収しているのではなく、鉄鋼自体を再溶解し、鉄鋼原料として、リサイクルしています。

レアメタル単体を抽出し、リサイクルしているものは、液晶パネル (ITO) からIn、Liイオン電池からCo、触媒からPt, Mo, V等であり、今後、携帯電話、液晶パネル、パ

ソコン、自動車（HV、EV等）の需要拡大と共に、レアメタルのリサイクル市場は拡大すると見込まれています。

環境的要因からは、メッキ業界では、Ni、Cr、B等が排水中から回収され、一部、原料としてリサイクルされており、現在、要監視項目にNi、Mo、Mn、Sbが挙げられており、環境基準として規制される可能性が高く、特に廃水、廃液からのレアメタル回収リサイクルの必要性に迫られています。

Pbの代替製品として、ハンダメッキ用途として、Bi、一般放射線防護用（X線技師のエプロン等）の遮蔽材としてWがあります。しかし、Pbに較べ価格が高いため、急速に需要拡大することは考えられません。

燃料電池の分野では、Ptの代替物質が模索されていますが、適用するPt以外の物質がないため、今後、Ptのリサイクル化に注力しています。

経済産業省と環境省は、使用済み小型家電製品からのレアメタル回収に向けた検討を始めた。両者が共同で研究会を設置、二〇〇八年一月一日に第一回の会合を開きました。研究会では適正かつ効果的なレアメタルのリサイクルシステムの構築を目指し議論。使用済み小型家電製品の回収活動を先行している自治体などと連携し、実際に幾つかの地域で様々な製品を多様な方法で回収することで、効率的、効果的回収方法を見極めます。

小型化家電品に含まれるレアメタルの量の実態把握などを進めます。家電四品目（CRT、テレビ、冷蔵庫、洗濯機、エアコン）や携帯電話、パソコンについては、リサイクルの仕組みの確立に向け鋭意努力が重ねられています。家電四品目のリサイクルを対象とする所謂「家電リサイクル法」では、二〇〇九年に薄型テレビと衣類乾燥機が追加されました。

一方、携帯型音楽プレーヤーやデジタルカメラ等といった小型家電製品は、現時点でリサイクルの仕組みがない。しかし、一部には高価なレアメタルが使用されているため、廃棄された小型家電製品は「都市鉱山」として、その扱いを議論すべきとの声が高まっています。

二〇〇八年八月にはソニーと北九州市が共同で、使用済みの小型電子機器を回収し、レアメタルなどの金属のリサイクルに向けた実証実験を開始すると発表しました。

物質材料研究機構は、レアメタルを含む金属資源について、将来的な消費予測を行い、 Mn 、 Li などの累積需要量（全世界）は二〇五〇年までに、埋蔵量（現在利用可能なもの）を大きく超え、 Zn や E などの累積需要量は、二〇五〇年までに「潜在的な埋蔵量」も超えてしまい、金属の世界的な供給不足は、避け難い事態と見えています。

かような中で、国内でリサイクルをより一層推進して行くための課題として、二つあります。

第一の課題

現在は資源の回収率の低いことであります。いくら潜在的に資源が存在していても、回収されなければ、意味がありません。例えば、携帯電話の二〇〇七年の普及台数は一〇〇五三万台であったが、回収台数は六四四、三万台。一方、廃棄物の海外流出も大きな課題であります。近年では、リサイクルコストの差から、廃棄物が海外に流出することが多く、このことが金属資源の損失に繋がってしまいます。製品の分解が簡単になるような製品設計が必要とされています。

第二の課題

リサイクル技術が成熟していません。現在の技術では、電子部品からAu, Cuなどが回収できますが、大部分のレアメタルが廃棄処分されてしまいます。このことは資源損失するだけでなく、環境汚染にも繋がってしまいます。低コストでレアメタルを抽出する技術の開発が緊急の課題であります。

苦戦する海外権益獲得戦

近年、資源メジャーの寡占化などで調達不安が高まっています。特に、今後の製造業に不可欠なレアメタルでこの傾向が顕著であります。日本企業は資源権益の確保に動いていますが、苦戦を強いられています。

その主要因の一つは、資源の大量消費国の座を中国に奪われたことであります。従来、日本は大量消費国として長期買取りを確約することで、資源開発に参加して、権益取得に結び付けてきましたが、今や、こうした優位性は見出し難い状況にあります。

もう一つは、資金面での日本の魅力が薄れたこと。資源開発には膨大な資金が必要です。日本だけでなく中国などが資金の出し手として浮上し、資源国との交渉の主導権が握り難くなっています。

調達不安の解決として、レアメタルに代わる資源の開発、省資源技術の開発、都市鉱山の活用が必要になりつつあります。都市鉱山については、金属を効率的に抽出する技術の開発や使用済み製品の回収網の整備などが緊急の課題であります。

レアメタルは産出国がロシア、中国、アフリカなどに偏り、日本はほぼ全量を輸入に頼っています。その調達には産出国の政情、資源政策に左右される不安は拭い切れないため、

日本企業は海外鉱山の開発や権益確保などを加速すべきであります。政府もJOGMEC（石油・天然ガス・金属鉱物資源機構）と企業が、鉱山に共同出資できるように法改正し、企業を後押しする構えであります。ただ、資源の「爆食国」中国などライバルも多く、権益取得は容易ではありません。

レアメタル確保戦略

日本政府はレアメタル確保の戦略作りに取り組んできました。二〇〇八年九月に閣議決定した「新経済成長戦略フォローアップと改定」では「資源確保のみならずリサイクル等をも含めた総合的なレアメタル確保戦略を策定」すると決定。資源エネルギー庁は、同年十月より総合資源エネルギー調査会・鉱業分科会における審議を進め、二〇〇九年七月二十八日に「レアメタル確保戦略」を公表しました。

具体的戦略は「海外資源確保、リサイクル、代替材料開発、備蓄」という四つの柱で構成する。「確保」では資源外交や資源開発を重視、例えば、鉱山のインフラ整備などについて、政府開発援助（ODA）を通じた支援を行って、供給国との関係強化を図る。「リサイクル」では、家電製品の回収などをふくめた資源循環システムの構築を目指す。「代

替」では、重要な鉱種について、より確保しやすい材料で転換できるよう、あるいは使用量を削減できるよう、研究を進める。「備蓄」では、現状の対象鉱種についての備蓄積み増しや、非対象鉱種の備蓄開始も検討するとしています。

同戦略では、以上の四分野を横断する共通基盤として「人材育成、技術力強化、一体的取組」という三つの方針を定めています。「人材育成」では国内外における人材育成や、それらのネットワーク化を目指します。「技術力強化」では日本が有する先進技術の高度化を目指します。「一体的取組」では資源開発から製品の製造までのサプライチェーン全体での取り組みなどを求めています。

おわりに

「二十一世紀はレアメタルの世紀」というキャッチフレーズもありますが、夫々のレアメタルは個々に特性を有しており、日本経済を支える電子、自動車、エネルギーなどのハイテク産業において、製品の高機能化、小型化、軽量化、省エネルギー化の諸点で、日本の国際競争力の維持、発展に欠かせない素材となっています。

最近、レアメタル資源国は自国の経済発展による国内レアメタル消費の急増、資源ナシ

ヨナリズム高揚、国家政略として、資源の囲い込みの強化を打ち出し、価格の高騰を招き、国際市場での安定な確保が困難になりつつあります。日本は世界のレアメタルの二十五パーセントを消費するレアメタルの消費大国であります。現状は殆んど全量を輸入に頼っていますので、レアメタル資源権益の確保に苦戦を強いられています。

レアメタル調達不安の解決として、都市鉱山の活用を中心に、省資源技術の開発、レアメタルに代わる資源の開発が必要になります。

二十世紀は大量生産、大量消費の「動脈産業」が主流でしたが、二十一世紀は資源を再生、循環させる「静脈産業」がそれに比肩する重みを持ち、これに相応しい都市鉱山の開発については、日本の都市鉱山の規模は、各国の天然資源埋蔵量と比べた場合、Au, Ag, Pb, Inが世界一位、Cuは世界二位となっており、世界有数の資源国に匹敵するといわれています。都市鉱山から実際に資源を効率的かつ経済性を伴う形で回収するには、数多くの難題がありますが、日本の都市鉱山がかなりの大きな規模であることは確実性高く、わが国が誇ってきた金属を効率的に抽出する技術の更なる開発や、使用済み製品の回収網の整備などが緊急の課題となりつつあります。

ヨナリズム高揚、国家政略として、資源の囲い込みの強化を打ち出し、価格の高騰を招き、国際市場での安定な確保が困難になりつつあります。日本は世界のレアメタルの二十五パーセントを消費するレアメタルの消費大国であります。現状は殆んど全量を輸入に頼っていますので、レアメタル資源権益の確保に苦戦を強いられています。

レアメタル調達不安の解決として、都市鉱山の活用を中心に、省資源技術の開発、レアメタルに代わる資源の開発が必要になります。

二十世紀は大量生産、大量消費の「動脈産業」が主流でしたが、二十一世紀は資源を再生、循環させる「静脈産業」がそれに比肩する重みを持ち、これに相応しい都市鉱山の開発については、日本の都市鉱山の規模は、各国の天然資源埋蔵量と比べた場合、Au, Ag, Pb, Inが世界一位、Cuは世界二位となっており、世界有数の資源国に匹敵するといわれています。都市鉱山から実際に資源を効率的かつ経済性を伴う形で回収するには、数多くの難題がありますが、日本の都市鉱山が可なりの大きな規模であることは確実性高く、わが国が誇ってきた金属を効率的に抽出する技術の更なる開発や、使用済み製品の回収網の整備などが緊急の課題となりつつあります。