

【特集：廃棄物からのレアメタル回収】

レアメタル類の使用状況と需給見通し

原 田 幸 明*

【要 旨】 急速に広がっているレアメタルの用途について紹介し、その一方で強まる供給リスクを国民経済の持続可能性、人類経済の持続可能性および地球環境の持続可能性の面から述べる。また、そのような中で重要になってくる資源端重量の考え方を紹介するとともに、ひとつの解決策として既利用資源に注目する都市鉱山について触れる。

キーワード：レアメタル，資源リスク，資源端重量，都市鉱山

1. はじめに

レアメタルは産業のビタミンにたとえられる。製品中には極めて少量しか使われなくとも、そのレアメタルが存在しないと多くの製品機能が有効に作動せず、生活や経済に大きく影響を与える。本稿では、レアメタルの現状を概観するとともに、その資源消費の動向、およびリサイクルのポテンシャルに触れるとともに、レアメタル類を考える際に必要な“資源端量”という考え方について紹介する。

2. レアメタルの定義

レアメタルを科学的に定義された国際用語と思っている人も多いが、実は主として日本で使われる限られた表現でしかない。国際的にはむしろ minor metal のようにいわれるケースが多い。ここの違いに「マイナー」のような格下ではなく必須物質であるという日本産業界のメッセージが伝わってくる。

一般的にレアメタルのレアは rare (稀) であり、その言葉のままでは「稀な金属」の一般総称となる。Rare でない金属とは、鉄、銅、アルミニウム、亜鉛などのベースメタルや金、銀などの貴金属のようにある程度の

市場規模を有した金属類であり、たとえばロンドン金属取引所 (LME) などで売買されている金属となる (英語では major metal, 日本では common metal もしくは base metal)。このように、基本的に rare metal を理解するならば、技術的価値のあるもので LME などの商品取引所に上場されていないような市場規模の小さな金属として理解しておくのがよい。政策的用語としては、1984 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があるものと、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 31 鉱種 (希土類は一鉱種として数えた) をピックアップしている。これがレアメタル 31 として知られるもので、Li, Be, B, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Ga, Ge, Se, Rb, Sr, 希土類, Zr, Nb, Mo, Pd, In, Sb, Te, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Re, Pt, Tl, Bi がそれぞれである。これは科学的定義ではなくあくまで 1984 年段階でのレアメタル戦略の対象として整理されたものであることを理解しておくべきである。なお近年の審議会でもこの 31 鉱種は経済的影響等を配慮して変更されず継続している。

このレアメタルの中で、希土類 (rare earth) は英語の名称が類似しさらに「希」がつくことから、レアメタルの中でも稀なものを指しているかのような誤解がある。しかしこれらの地殻存在度は Au や Pt はもちろん、In や Bi などより高く、より稀な存在ではない。存在度の希少性よりむしろ難分離性、難製錬性で得難い元素であるといえる。ちなみに、英語でも rare な earth (土類) であり、土類として Mg, Ca などがアルカリ土類と呼ばれることを思い起こすならば、その中で稀であってもそ

原稿受付 2009.2.26

* 独物質・材料研究機構 材料ラボ ラボ長

連絡先：〒 305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

E-mail: halada@mcn.ne.jp

れほどの希少性を意味しえないこともわかるだろう。

このように、レアメタルの科学的定義はあいまいであり、また厳密に定義する必要があるのかも不明である。これからも単にレアメタルとは何かを論ずるよりも、戦略的備蓄対象のレアメタル、供給確保対象のレアメタル、循環・回収促進対象のレアメタルというように、どのような行為の対象物としてかということ議論されていくことになるであろう。本稿でも以降はレアメタルというより“希少金属”という表現で金、銀などの貴金属類も含み、今後の産業に必須となる金属類について述べていく。

なお、図1に周期表にのっとって、各元素の地殻存在度と市場規模をその桁数を丸の大きさに代表させて記してある¹⁾。市場規模の大きさが地殻存在度の大きさと一致しているものはFe、Alぐらいであり、他方で金(Au)などは市場規模は大きいものの地殻存在度は極めて小さく、希少であるが貴重であるという側面と同時に、長く大きな目で見るとこのアンバランスな状態が資源問題の根源であるということもできる。

3. 希少金属の用途のひろがり

では、これらの希少金属はどのようなところで用いられているであろうか。図2には日常的な用途に使われる金属を図1と同様に周期表上にあらわしてみた。希少金属の用途は大まかに分けると、鉄、アルミ、チタンなどととも用いられ、その性能を向上させる構造的用途と、電子部品等の特殊機能を発揮する機能的用途がある。図2で、自動車部品を例に表したものが構造的用途である。構造的用途は合金鋼として古くから用いられており、最も有名なものが耐蝕性を期待して用いられるステンレス鋼で、キッチンの流しから火力発電所まで広範囲に用いられており、そこではNi、CrさらにはMoといった希少金属が使用されている。自動車のボディに用いられる薄く、強く、加工しやすい冷延鋼板は日本のお家芸の一つであるが、この特性を出すためにもNb、Vといった希少金属が使用されている。これらは鉄に微量に添加された合金となって用いられるため、一般には鉄とみなされている場合が多いが、実は量的には合金鋼の使用量が他の金属の使用量より数桁大きいため、この構造

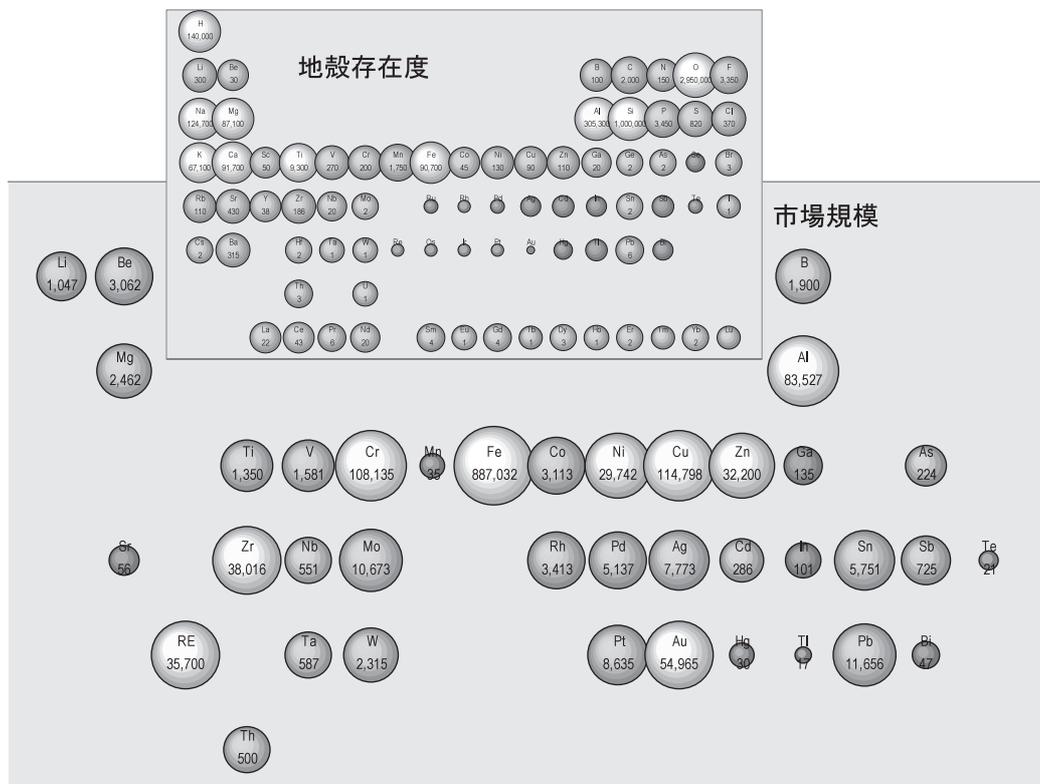


図1 各元素の地殻存在度と市場規模

Figure 2 is a periodic table of elements. The legend indicates the following uses for various elements:

- ICチップ (IC Chip): Grey shaded cells
- LED: Black circle
- ディスプレイ (Display): Grey circle
- 光情報 (Optical Information): White circle
- 記録メディア (Recording Media): White square
- 電池 (Battery): Grey square
- モーター (Motor): Black square
- 自動車部品 (Automotive Parts): White diamond
- 自動車触媒 (Automotive Catalytic Converter): Grey diamond

図2 日常的用途に使われている金属類

用途の希少金属が量的には機能性用途の希少金属よりも圧倒的に多いことはリサイクルなどを考える上で念頭に置いておく必要がある。

近年急速に増してきているのが機能性用途の希少金属の重要性である。図2でも、照明、LED、ディスプレイなどの視覚機能、光情報、記録メディアなどの情報機能、モーターなどの磁気機能、電池のエネルギー貯蔵機能、さらには触媒機能などで多くの種類の希少金属が用いられるようになってきている。また、昔はほとんどSiで構成されていた半導体回路素子（ICチップ）も、現在のように高密度回路がナノメートル台になると、微量な電流の漏れや熱歪からくるごく微細な歪みなどもなくすることが要求され、WやCo、さらにはHfなどを微細に組み込み、その限界に近づけようという構造になってきている。そのため電子機器関係での希少金属は不可欠になってきている。図3は産業連関表をもとに作成した電子関連機器製造業において、製品100万円あたりで非鉄金属およびレアメタルに投入した金額である。また図の白いカラムはその製品の市場規模である。特に半導体、開閉器、電子計算機関係でレアメタルの投入比率が高く

なっているのがわかる。

さらに近年の特徴として、地球温暖化対策でエコ・イノベーションが期待されているが、その鍵としての高機能システムにはレアアースや白金族などをはじめとして希少金属の特殊な機能を期待するものが多い。図4にはエコ・イノベーション関係で期待されている環境エネルギー分野での各種の機能と、そこに用いられる希少金属の代表的なものを示した。太陽光発電は従来Si系が主力であったが、化合物半導体としてGaやCdなども注目されている。また色素増感型の色素には白金族の一種であるRuが用いられる。燃料電池では触媒電極材料としてのPtが必要となるだけでなく電解質材料にも多様な元素が用いられる。二次電池にもCoやNiだけでなく希土類もその性能向上のために添加される。廃熱利用に期待されている熱電素子もBi、Teなどである。ハイブリッドカーなど駆動エネルギーや冷房などのコンプレッサーの効率化に大きく役立っているモーター用の永久磁石には、NdやDyといった希土類が使用される。このように新規の環境エネルギー材料は希少金属のオンパレードといってよい。しかも、さらにこれらの素材を

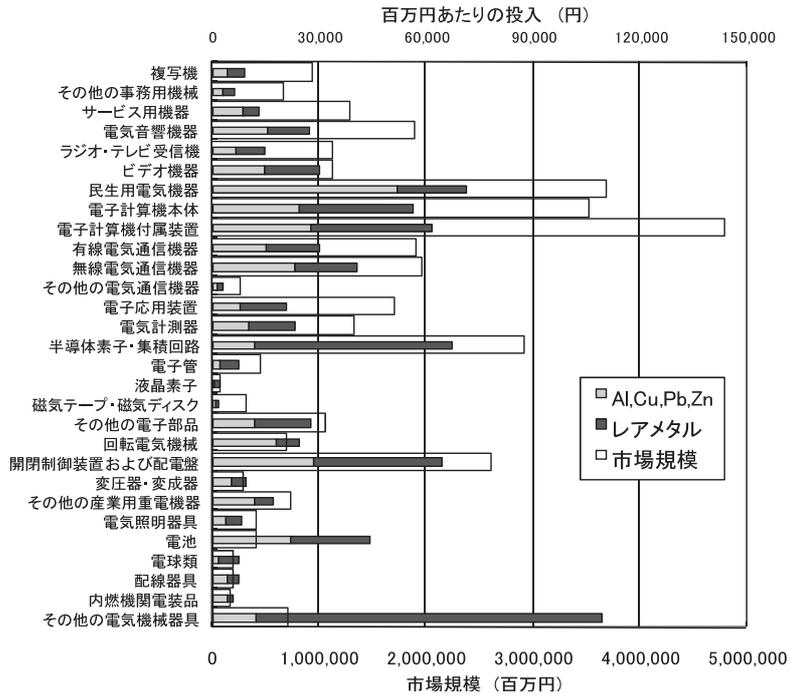


図3 電子機器産業の中での希少金属類の経済規模

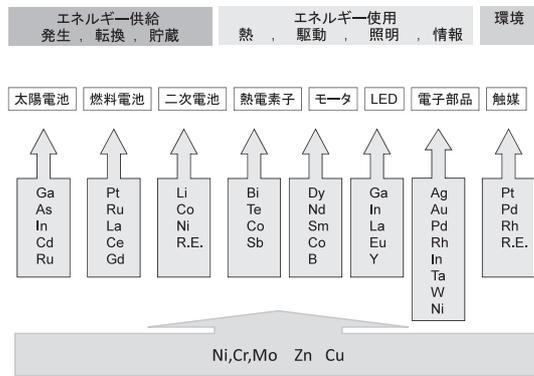


図4 エコ・イノベーションに期待されている希少金属

設置したり機構中で維持するためにはステンレスなどが必要となり、そこでも Ni, Cr 等の希少金属が必要となる。

4. 基調としての資源需要

このように用途がひろがる希少金属の将来動向はどうか。図5に示すのは各金属の近年の価格変動である。これは2002年の価格を基準にしてその変動を示したも

ので、原油の変動幅よりも大きい。これは経済のグローバル化が進む中で、膨らんだ金融商品の行く先をもとめて原油など資源・基礎素材市場に資金が流れ込むことで大幅な価格上昇が起き、さらにそれがカジノ経済倒壊のあおりを受け急下落したものである。これらのグローバル化された金融商品の取り引きは、実体の確保力が前提であった従来の「先物買い」がさらに突き進み、「時間を超えて未来を取り引き」し「人間の持つ未来への『期待』」が取り引きを動かす段階に入っていると指摘²⁾されている。この『期待』は金融商品としての期待であり、それは実体経済や技術の側からみれば、むしろ『供給リスク』とも読むことができ、今後もこのダッチロール現象は繰り返すものとみられている。

このような先物期待が資源に集中する背景には、BRICs 諸国などの大幅な需要の増大が見込まれることがある。これはこれまで20%の人口で80%の世界中の富を動かしていた OECD 諸国に対して、80%の非 OECD 諸国がそれに匹敵する富を求める必然的行為であり、カジノ経済倒壊でもいささかも揺るがない基調的方向である。

かつて1970年代にも「成長の限界」が指摘されたが、現在はその2倍のペースで人類が地球から汲み上げる資源の量は増加している。今後この傾向は単純な外挿では

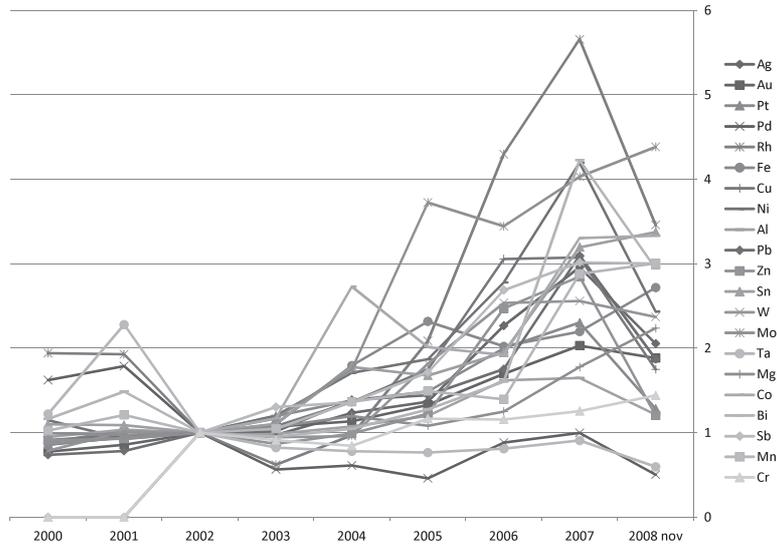


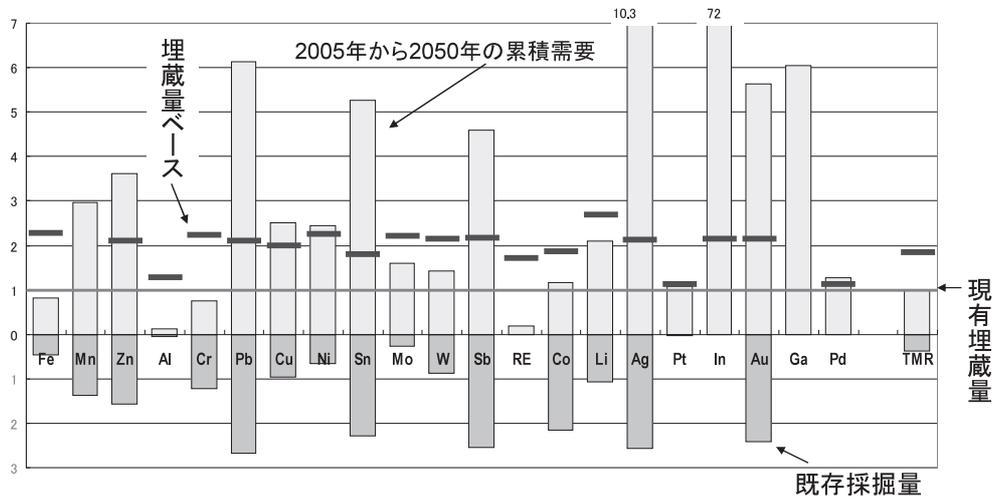
図5 近年の金属価格の変化の推移

2050年には現有埋蔵量の数倍の金属資源が必要になる

2050年に現有埋蔵量をほぼ使い切るもの: Fe, Mo, W, Co, Pt, Pd

2050年までに現有埋蔵量の倍以上の使用量となるもの: Ni, Mn, Li, In, Ga

2050年までに埋蔵量ベースをも超えるもの: Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Sn



現有埋蔵量に対する2050年までの累積需要量

図6 2050年までの金属消費予測

不十分であることはいまでもない。現に「成長の限界」が指摘された後の OECD 諸国では、資源消費量の増加は鈍り一種の安定成長期に移行している。このよう

な状態をデカップリングと呼ぶ³⁾。筆者はこのデカップリングの状態が起きることも考慮して 2051 年までの Fe, Al, Cu, Ni, Cr, Mn, Pb, Zn, Sn, W, Mo, Au, Ag, Pt, In,

Ga, Li など各金属の需要の増大の予測を行った⁴⁾。

詳細はそちらを参考にさせていただきとして、各金属に対してのこれらの傾向を一覧で示したものが図6である。棒グラフの下向きの部分がかこれまでの消費量の累積であるのに対して、上側が2000年から2050年にかけての累積消費量を示しており、これらはそれぞれの金属の現有埋蔵量を1として比較しやすく表してある。また短い横バーは埋蔵量に対する埋蔵量ベースの量を示している。埋蔵量ベースとは、埋蔵量が経済性も考慮した採掘可能と認識されている量であるのに対して、埋蔵量ベースは地質学的な調査などに基づく経済限界下の確認資源量であり、価格等の変動で埋蔵量が埋蔵量ベースまで拡大することは比較的容易であるが、埋蔵量ベースを超えると新たな資源の探索が必須になってくる。この埋蔵量ベースに対して、多くの金属が現有埋蔵量を超過する消費量が見込まれており、探索やリサイクルとともに使用量の大幅な削減が求められていることがわかる。この傾向は、金、銀、銅、鉛、亜鉛などの金属に著しく、その社会的影響は大きい。

さらに注意しなくてはならないのは、希少金属類に関しては鉄や銅などのメジャーメタルに見られるようなデカップリングがおきていないということである。すなわち、Pt や Co, Li, In, Ga および希土類等は、先進工業国でも GDP あたりの需要が伸びる傾向があり、まさに世

界中で消費が加速されていくため、より多くの消費量の増大が予測される。

5. 3つの資源供給リスク

このような資源需要の増大に対して、資源のサステナビリティに関してよく議論されることが多い。その際、3つの異なったサステナビリティの概念が用いられていることに注意しておくべきである。すなわち、資源供給リスクには、価格変動や鉱山の国レベルの偏など経済性・政治性の強い供給様式にかかわる国の経済のサステナビリティの側面と、資源の希少性や枯渇など資源そのものにかかわる側面がある。そしてまた後者にも、地質学的な側面の強い資源の希少性に関する地球環境のサステナビリティの側面と、その希少性と人間の需要のミスマッチによる枯渇性の人間経済のサステナビリティの側面がある。資源リスクはこれらの要素が複合して現れているということをもまず理解しておく必要がある。

国の経済のサステナビリティにかかわる側面として資源の偏在性の問題がある。この国民経済のサステナビリティの視点が加わると資源問題はより一層の深刻性を増す。図7に示したのは、各金属資源の上位3カ国のシェア率であり、その中でも1国のシェア率の高いものから順に並べてある。3カ国だけで80%以上のシェア

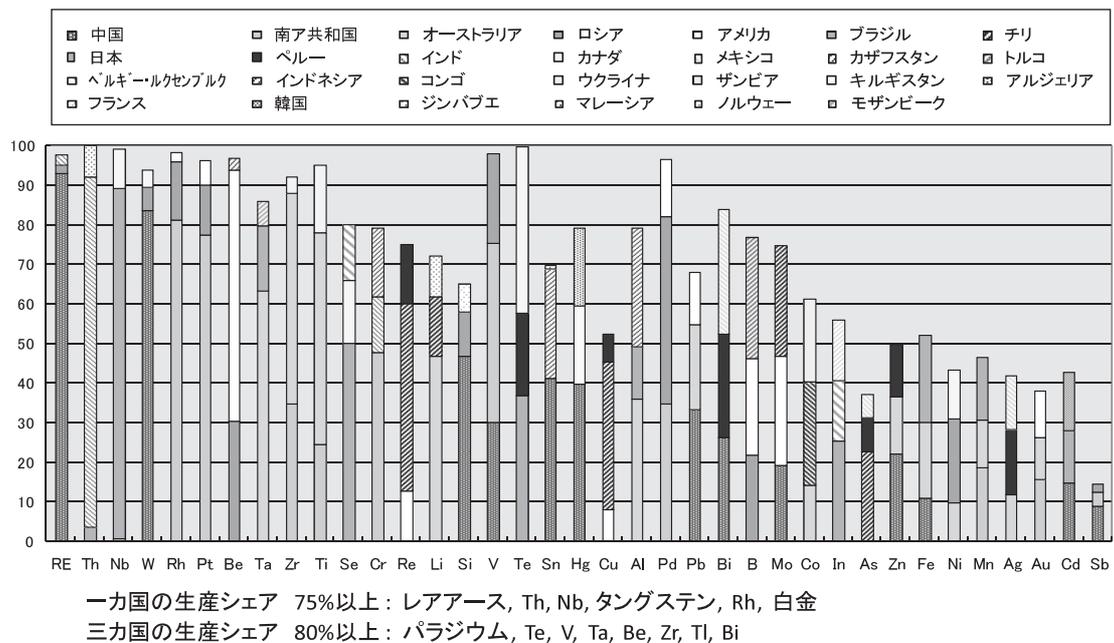


図7 各金属資源の上位3カ国占有度

になる金属は希土類と Ta, Th, Nb, V, W, Rh, Pt, Pd, Be, Te, Zr, Tl, Bi の 13 金属にも上り, その中でも希土類, Th, Nb, W, Rh, Pt は 1 カ国だけで 4 分の 3 以上となっている。特に希土類は, 精錬時の廃水処理など環境問題もあって撤退した国も多いため中国一カ国で 90% を超えるシェアになっている。

人類経済の持続可能性の面にかかわってくる資源の状態は, 資源の枯渇, 疲弊に関する状態である。一般に資源の「枯渇」というと, 砂漠の井戸の干上がった状態がイメージされ, 「掘っても掘っても資源が出てこない」状態と誤解されるケースが多い。図 8 に各資源の埋蔵量と年間消費量の関係を示したものを記したが, 埋蔵量がタンクの水で年間消費量がタンクの底を擬したこのような表記法も, 高さが静的耐用年数に相当することから, タンクの水を耐用年数をかけて汲みつくすイメージに結びつきやすくなっている。実際は埋蔵量は発掘や経済状況で変化するし, 年間消費量の変化はそれ以上に大きい。埋蔵量を年間消費量で割っただけの耐用年数の数値は, 自転車操業の厳しさを表すかもしれないが, その自転車がいつ倒れるかを示すものではない。

なお, 実際の資源枯渇は, 新たな資源の供給のために資源の対象が低品位側に移っていき, 単位あたりの採掘コストが増大していく中で価格の安定性が維持できなくなって, 需要側が他の安定な資源に乗り換えることでそ

の資源が価値を失い, 見捨てられていくという姿を想定するのが良く, 資源は枯渇すると物質としては地中に残ることになる。なお, わが国は既に石炭でそれを経験している。

地球環境のサステナビリティは資源の希少性と密接にかかわっている。鉄やアルミ以外の大部分の金属は多くても含有量が数%であり, 目的鉱物よりも尾鉱, 脈石, 覆土, 鉱内水など大量の関連物質を処理することが必要となり, エネルギー投入や廃棄物処理およびプロセスでの環境負荷の大きさに支配的な影響を与えることになるからである。

図 9 には各金属を製造する際に発生する廃棄物の量を円柱で, CO₂ の量を球で記した。いずれの場合も得られる金属よりはるかに多くの廃棄物や CO₂ を発生して金属を得ているのがわかる。それだけではなく, 先述したように金属鉱石の採掘時により多くの廃棄物が発生している。図 10 は白金, 金, 鉄の金属としてのこれまでの採掘量と地球を掘った量を比較したものである。金属としては鉄がペンタゴン 1,500 分なのに対して金でオリンピックプール一杯分, 白金では 25 m プール分しかないが, 地球を掘った量は, 鉄が富士山 2 個分に対して金は富士山 1 個, 白金も 8 合目以上とほぼ同じオーダーで比較できるほどになっている。

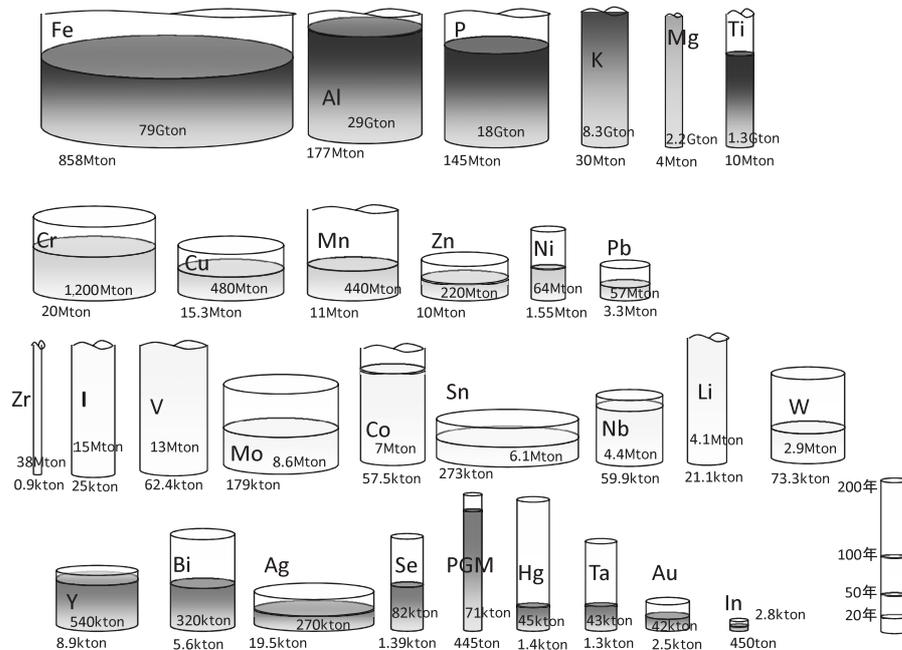


図 8 各金属資源の埋蔵量と年間消費量

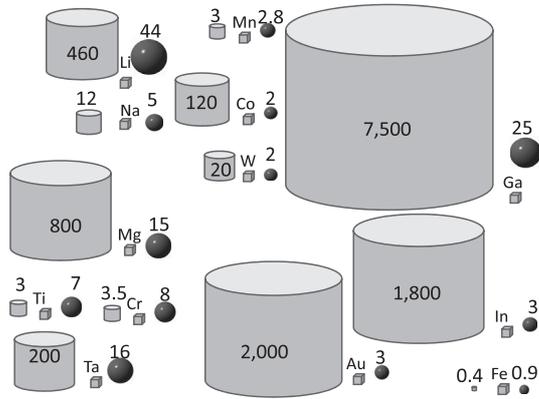


図9 金属1kgを得るプロセスで発生するCO₂と廃棄物量

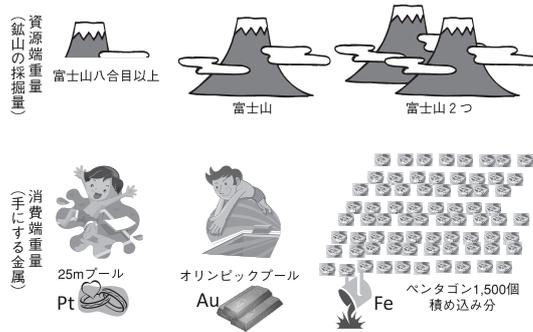


図10 鉄、金、白金の既採掘金属量とそのため掘った量

6. 資源端重量

このような中で重要になるのが、資源を使用している立場からだけでなく、資源採取という側面で捉えることである。特にわが国は多くの資源が枯渇し海外からの輸入に頼っているため、電子製品などの中に含まれてしまった極微量の物質が資源に見えてしまう。たとえば電子機器の中の約10mgの金は約10mgとしか認識されない。しかし、この金を掘っている国にしてみればそのために10kg分の地球を掘っているのである。

金属1tonを得るために地球資源を何ton掘り返さねばならないかは、ドイツのWuppertal研究所のSchmidt-Bleekらによってエコロジカル・リユクサックとして提案⁵⁾されたもので、筆者らは関与物質総量 (TMR: Total Material Requirement) として各金属に対して算定している⁶⁾。図11にその値を桁数に合わせたサイズとして示した。たとえば銅の場合は、TMRはほぼ360であり、1kgの銅製品の背後には約0.3tonの物質が地球から採掘されていることを意味しており、それが金の場合には1gの製品に対して1tonの物質が控えていることになる。

この数値は、最終製品中のある金属の重量を消費時の重量として「消費端重量」とするならば、資源採掘時の重量、すなわち「資源端重量」として見ることができる。これはある製品の成分に対してこのTMRを求めると消費者が直接意識しないで動かしているその製品にかかわる資源量に相当する。図12は、それを携帯電話を例に示したものであり、上部が消費端、すなわち消費者が分解すると得られる重量であり、プラスチック、銅、鉄、

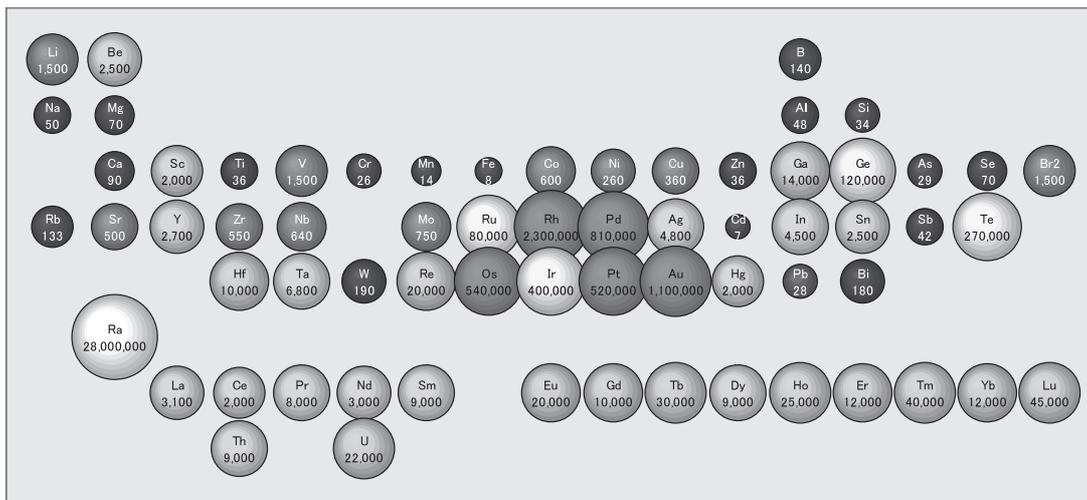


図11 金属の関与物質総量係数

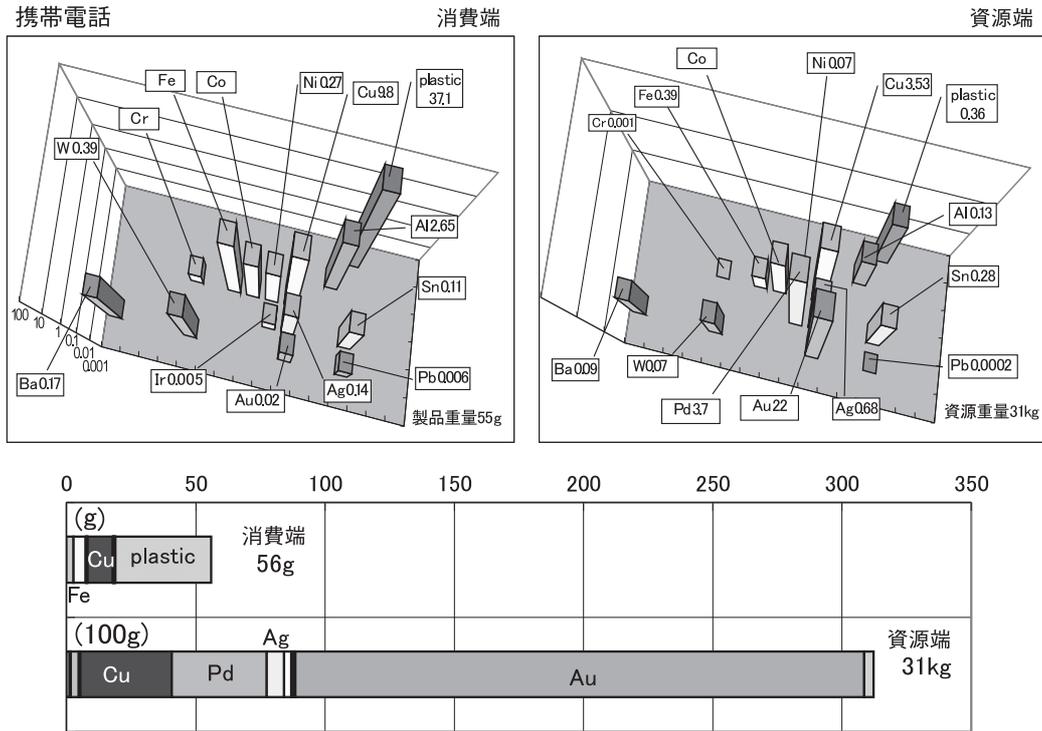


図12 携帯電話の実重量（消費端重量）と資源端重量

アルミなどが主体になる。それを資源端としてTMRで表したものが下であり、消費端重量的にはきわめて微量であった金やパラジウムなどが資源的に見れば大きな比率を占めることになる。このことからしても携帯電話をリサイクルして金を回収することが理にかなっていることもわかる。

7. 都市鉱山とリサイクル

資源リスクを回避するには、1) 新たな資源を探す、2) 資源の消費を抑える、3) 資源の代替物を開発する、4) 資源を再生して使う、の4つの道がある。ここで、図6の下に出た柱上部に注目して欲しい。これは、いまままで地球から掘り出した金属分の総量である。実は、もはや今では多くの金属で、すでに掘り出した金属の量が埋蔵量よりも多くなっている。このように工業製品やその使用済物の中に存在している金属もいまひとつの資源とみなすことができ、天然の鉱山に対比する意味で「都市鉱山」⁷⁾と呼ばれる。

では、そのような都市鉱山としての蓄積ポテンシャルは、日本の中にはどのくらいあるのか。それは、輸入し

た資源の総量から材料や製品として輸出したものを差し引くことで大まかな値を知ることができる⁴⁾。そのようにして計算して得られた結果が表1⁸⁾であり、日本の中に存在しているはずの金属を最大限集めた量であり、世界の天然鉱山の埋蔵量や年間消費量との比較で示してある。また、図中の最右の数字は各金属の資源保有国の埋蔵量と比べると何位に匹敵しているかを示したものである。この数値に驚きの声も聞こえるが、金や銀など多くの金属ではすでに採掘した既採掘金属量のほうが、地中で確認されている埋蔵量より多くなっており、さらにわが国が世界中の資源の2~3割を集めながら経済発展してきたことを考えれば当然の数値といえる。

もちろん都市鉱山蓄積ポテンシャルには、製品として使用中のものや粗大ごみの中で最終処分場に埋められてしまっているものも含まれるため、地下資源の埋蔵量のように容易に採掘・利用できるわけではない。このポテンシャルをいかに実効的なものにするかが問題であり、それができて初めて本当の都市鉱山が開発されたといえる。とはいえ、その可能性が量的に資源国の埋蔵量ほどもあるということは、今後の資源利用の対象として大きな役割を果たすことになりうるという差支えない。

表1 日本の都市鉱山蓄積量

金属	世界の年間消費量 (ton)	世界の埋蔵量 (ton)	わが国の都市鉱山蓄積 (ton)	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
Al	177,000,000	25,000,000,000	60,000,000	0.24	0.3	12
Sb	11,200	1,800,000	340,000,000	19.13	30.7	3
Cr	20,000,000	810,000,000	16,000,000	2.08	0.8	4
Co	57,500	7,000,000	130,000	1.876	2.3	6
Cu	15,300,000	480,000,000	38,000,000	8.06	2.5	2
Au	2,500	42,000	6,800	16.36	2.7	①
In	450	11,000	1,700	15.5	3.8	2
Fe	858,000,000	790,000,000,000	1,200,000,000	1.62	1.5	11
Pb	3,300,000	57,000,000	5,600,000	9.85	1.7	4
Li	21,100	4,100,000	150,000	3.83	7.4	6
Mo	179,000	8,600,000	230,000	2.69	1.3	6
Ni	1,550,000	64,000,000	1,700,000	2.70	1.1	9
PGM	445	71,000	2,500	3.59	5.7	3
RE	123,000	88,000,000	300,000	0.35	2.5	6
Ag	19,500	270,000	60,000	22.42	3.1	①
Ta	1,290	43,000	4,400	10.41	3.5	3
Sn	273,000	6,100,000	660,000	10.85	2.4	5
W	73,300	2,900,000	57,000	1.97	0.8	5
V	62,400	13,000,000	140,000	1.08	2.2	4
Zn	10,000,000	220,000,000	13,000,000	6.36	1.4	6

8. おわりに

カジノ経済崩壊による価格の低落がおこっているが、世界的な資源の需要は基調として高まっており、これからも乱高下のダッチロールが続くものと予想される。資源のサステナブルな管理・利用のために、世界的にも国連でUNEP(国連環境計画)主導のもと資源パネルがもたれるようになり、国際協調の中での資源の持続的な管理が議論されだしている。このような段階でこそ、自らが資源として活用できる対象を的確に管理していくことが世界的貢献としても求められている。

参考文献

- 1) 御物質・材料研究機構：元素戦略アウトトラック (2007)
- 2) 金子 勝：閉塞経済，筑摩書房，p.11 (2008)
- 3) 原田幸明，島田正典，井島 清：金属消費の経済成長とのデカップリング状況の分析，日本金属学会誌，第71巻，第10号，pp.823-830 (2007)
- 4) 原田幸明，島田正典，井島 清：2050年の金属使用量予測，日本金属学会誌，第71巻，第10号，pp.831-839 (2007)
- 5) F. Schmidt-Bleek, 花房恵子(翻訳)：エコリユックサック，省エネルギーセンター (2006)
- 6) 原田幸明，井島 清，片桐 望，大蔵隆彦：金属の関与物質総量の概算，日本金属学会誌，第65巻，第7号，pp.564-570 (2001)
- 7) 南條道夫：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，東北大学選鑛製錬研究所彙報，第43巻，第2号，pp.239-251 (1988)
- 8) 原田幸明，井島 清，島田正典，片桐 望：都市鉱山蓄積ポテンシャルの推定，日本金属学会誌，第73巻，第3号，pp.151-160 (2009)

Demand and Supply of Rare Metals

Kohmei Halada

National Institute for Materials Science
(1-2-1 Sengen Tsukuba, Ibaraki 305-0047 Japan)

Abstract

Expanding applications and impending supply risk of minor metals are introduced. The supply risk of metals is analyzed from three different viewpoints: sustainability of national economics, sustainability of the activity of humans, and sustainability of the global environment. A concept of resource-end view is introduced with regard to the supply risk of metals. Urban mining is also mentioned as a measure for easing the risks.

Key words: minor metals, supply risk, resource-end view, urban mining